

持続可能な超長期エネルギー需給

- 如何に「江戸時代」や「ジュラ紀」行きを回避するか -

2006年9月

戒能 一成 (C)*

要 旨

本稿においては、エネルギー需給における「持続可能性」の定義を明らかにし、当該定義の下での日本及び世界のエネルギー需給の問題点を検討し、今後採るべき超長期のエネルギー需給に関する課題を議論する。

エネルギー需給における「持続可能状態」とは、エネルギー供給が再生可能エネルギーだけで供給され世代間での中立性が確保されている状態と定義され、「過渡的状态」とは枯渇性の化石燃料・核燃料を消費しつつ「持続可能状態」の実現に取り組んでいる状態と定義される。

現在の化石燃料・核燃料の確認可採埋蔵量だけでは化石燃料・核燃料などのエネルギー資源はいずれ経済的枯渇に至ると考えられ、仮に非在来型の石油・天然ガス資源などを考慮したとしても、超長期的に見た場合には「持続可能状態」への移行は不可避である。

ところが、現在の世界のエネルギー需給の推移が継続した場合、発展途上国での人口の増加と先進国の人口1人当一次エネルギー供給の膨張により、西暦2060年頃迄に化石燃料が経済的枯渇に至り、わずかな原子力発電と再生可能エネルギーが利用できるだけの状態に急降下し経済社会に破滅的影響を与える「破滅必須状態」に陥ると見込まれる。

このような破滅を回避し、世界全体での西暦2100年頃迄の安定的なエネルギー需給を確保するためには、人口抑制対策、省エネルギー対策、原子力発電・再生可能エネルギー対策など先進国・発展途上国がそれぞれ採りうる限りの対策を総合的に行っていくことが必要である。

このような世界情勢を与件として、今後の日本の対応について考えた場合、西暦2100年に向けて再生可能エネルギーの開発を進め「持続可能状態」でのエネルギー供給を増加させる努力も重要であるが、「過渡的状态」での破綻を回避するための対応として、西暦2040年に向けて石炭の高度利用と高速増殖炉サイクルの推進を強化する必要があることが示された。

キーワード: 超長期エネルギー需給、再生可能エネルギー、化石燃料枯渇

JEL Classification: Q40, Q42, Q34

* 本資料中の分析・試算結果等は筆者個人の見解を示すものであって、筆者が現在所属する独立行政法人経済産業研究所などの各組織の見解を示すものではないことに注意ありたい。

- 目 次 -

要 旨

目 次

本 論

1. 持続可能性とエネルギー需給の視点 - 議論の前提 -
 - 1-1. 持続可能なエネルギー需給の定義
 - 1-2. 持続可能なエネルギー需給の不可避性

2. 持続可能性から見た日本のエネルギー需給
 - 2-1. 日本のエネルギー需給の超長期推移
 - 2-2. 日本のエネルギー需給の「持続可能状態」と「過渡的状态」

3. 持続可能性から見た世界のエネルギー需給
 - 3-1. 世界のエネルギー需給の現状 - 「破滅必須状態」 -
 - 3-2. 「過渡的状态」へ回帰するために必要な対応

4. 日本のエネルギー需給の持続可能状態への遷移シナリオ
 - 4-1. 日本のエネルギー需給の「過渡的状态」
 - 4-2. 「過渡的状态」での遷移シナリオとその姿

5. 持続可能性と世界情勢から見た日本のエネルギー政策の超長期的課題
 - 5-1. 「新・国家エネルギー戦略」
 - 5-2. 超長期的なエネルギー政策の課題

図 表

参考文献

2006年9月
戒能一成 (C)

1. 持続可能性とエネルギー需給の視点 - 議論の前提 -

1-1. 持続可能なエネルギー需給の定義

1-1-1. 環境政治学の世界における持続可能性の定義

1) Brundtland Commission の定義(1987)

環境政治学における「持続可能性」については、1987年の Brundtland Commission / W CED の「持続可能な発展」についての定義が著名である。

「持続可能な発展とは、将来の世代が自らの需要を充足させる能力を損うことなく、今日の世代の需要を満たすような発展である。」("Our Common Future")

当該定義は、理念として引き継がれ、リオ・サミット(UNCED)における「Agenda 21」(1992)で具体的な箇条書形式に展開され、さらにその後の「持続可能な開発に関する世界首脳会議(WSSD#1 ~ #12)へと引き継がれている。

2) UNCED/"Agenda 21"(1992)

環境政治学における「持続可能性」については、1992年の「Agenda 21」で規定されているものとして論じられることが多いが、「Agenda 21」自体は「持続可能性」について直接は何も明らかにしておらず、その内容に「持続可能な開発・発展」の用語を無定義で引用している。

従って、「Agenda 21」の内容全体が「持続可能性」への必要条件を与えている可能性はあるが、それが十分条件となっている保証はないと考えられる。

Principle 1

Human beings are at the centre of concerns for sustainable development. They are entitled to a healthy and productive life in harmony with nature.

Principle 4

In order to achieve sustainable development, environmental protection shall constitute an integral part of the development process and cannot be considered in isolation from it.

Principle 8

To achieve sustainable development and a higher quality of life for all people, States should reduce and eliminate unsustainable patterns of production and consumption and promote appropriate demographic policies.

3) エネルギー需給問題への展開可能性

環境政治学における「持続可能性」をエネルギー需給問題に展開した場合、Brundtland Commission の「開発」を「エネルギー需給」と置換えて、「持続可能なエネルギー需給とは、将来の世代が自らのエネルギー需要を充足させる能力を損うことなく、今日の世代のエネルギー需要を満たすような発展である。」ということになる。

しかし、この定義では一体どこまでの将来世代を想定しているのかが明確ではなく、現状のエネルギー需給の状況から移行すべき姿が定義から直ちには明らかにならず、曖昧性が残ってしまう。

1-1-2. 経済学の世界での持続可能性の概念

1) 会社組織の「非ネズミ講条件」の概念

一般に、持続不可能な経済運営の典型例はネズミ講(Ponzi Scheme^{*1})であり、ある経済主

*1 Ponzi scheme: ネズミ講のこと。1919年にアメリカ・ボストンで90日間で投資を倍にするとの触込みで4万人、150万ドル(当時)規模の投資家を集め、1920年に破綻し逮捕されたイタリア移民 Mr. Charls Ponzi に由来する。

体の運営がネズミ講と見なされないための条件(No Ponzi scheme条件)は、「いかなる時点においても当該時点の純負債の総和が現在価値換算した将来の収益の総和を上回っていないこと」である。

さらに、先進国に共通する制度として、株式会社に關する企業会計ではそもそも資産総額を負債総額が上回り純負債が発生した(負債超過となった)時点でこの条件が満たされないと厳格に判断し、商法典上直ちに清算手続の開始を義務づけている。

$$t; D(t) < \sum_{j=t}^{\infty} (R(t+j)/(1+r)^j) \dots\dots\dots \text{条件 1: 非ネズミ講条件}$$

$$t; D(t) < 0 \dots\dots\dots (\text{条件 1: 株式会社の存続条件})$$

D(t) t 時点の純負債(総資産-総負債)
 R(t+j) t+j 時点の(期待)収益
 r 長期割引率(長期利率)
 t 任意の時点

2) 政府財政の「世代会計中立条件」の概念

一般に、上記「非ネズミ講条件」や「株式会社存続条件」は、直接の金銭的利益を目的とせず、長期的な視野に立った経済運営を行う主体である政府に適用することは難しい。

このため、公共経済学における政府の財政運営に關する持続可能性の概念として Prof. L.. Kotrikoff が 1993 年に提唱した「世代会計」の概念が広く知られている。

「世代会計」とは、「ある世代が存命中に支払った租税・社会負担の総額が、存命中に受取った社会資本・公共サービス・社会給付の総額と等価であること」が世代間の持続可能性の基本条件であるとし、政府財政と民間経済主体のコーホート別の収支計を世代別に評価する手法である。

特定世代に多額の年金給付を約定したり、多額の国債を次世代に残し給付を受けるなどといった形態で当該「世代会計中立条件」を満たさない財政運用を行う世代があった場合、当該世代は先世代からの財政的遺産を食いつぶした(Fiscal Heritage Abuser)か、あるいは次世代を虐待・搾取している(Fiscal Child Abuser)として厳しく評価される。

表現を変えれば、負担-給付の差の総和は国内経済規模に対する国の負債の純増減の総和と等価であることから、この条件は「各種の実質的政府負債を世代会計期間で増加させないこと」という条件であるとも言える。

残念ながら、現在の日本国政府の一般政府会計、社会保障(年金)会計とも当該条件を全く満たしていないことが知られている。

$$c; \sum_{t=c}^{\infty} Wc(t) - \sum_{t=c}^{\infty} Tc(t) = 0 \dots\dots\dots \text{条件 2: 世代会計中立条件}$$

$$c; \sum_{t=c}^{\infty} Dc(t) = 0$$

Wc(t) c 世代が t 時点で受取る社会資本・社会サービス・社会給付
 Tc(t) c 世代が t 時点で支払う租税・社会負担
 Dc(t) c 世代が t 時点で増加させた実質的政府純負債
 t 存命期間 (18 ~ 65 year, 47 年間)
 c 存命中の任意の世代

3) エネルギー需給問題への展開可能性

経済学における「持続可能性」の定義は「非ネズミ講条件」と「世代会計中立条件」の 2 通りがあるが、それぞれをエネルギー需給問題に対して展開した場合、以下のようになる。

ここで、エネルギー需給の世界において人類が生成することができるエネルギー源は「再生可能エネルギー」だけであり、化石燃料・核燃料などの枯渇性エネルギー源は消費することはできても生成することはできない。従って、化石燃料・核燃料などの枯渇性エネルギー源の消費は負債の増加と見なし、以下のように展開することとなる。

(非ネズミ講要件)

「いかなる時点においてもエネルギーの累積消費量の総和が将来の再生可能エネルギーによる生成量の総和を上回っていないことである」

非ネズミ講要件では、化石燃料などの枯渇性のエネルギー消費を行った場合でも、将来の再生可能エネルギーの生成により当該消費分の埋合わせができるのであれば許容されることとなる。つまり、化石燃料や核燃料を消費しながら、遠い将来の再生可能エネルギーの技術開発を行いつつ円滑に移行するための政治的・経済的取組みを行うことは許容される。

(世代会計中立要件)

「いかなる世代においても当該世代のエネルギー消費量の総和が再生可能エネルギーによる累積生成量²の総和を上回っていないことである」

世代会計中立要件を用いた場合は、各世代毎にエネルギーの生成量の範囲内であればエネルギー消費ができない。従って、エネルギー需給はある世代の存命期間内の再生可能エネルギーの生成量の範囲内に制限される。

1-1-3. エネルギー需給問題における持続可能性の定義

環境政治学の世界の定義を用いた場合、「持続可能性」の定義が必ずしも明確でないことに見られるように、現在のWSSDにおける理解は「持続可能性の具体的な展開は各国の政策当局の判断である」とされている。この結果、各国のエネルギー政策上「持続可能性」の判断は必ずしも一貫して示されておらず、政策当局の局所的・限時的な利害調整の結果を含んだ個別の判断がエネルギー政策として採択されている状況にある。

一方、経済学の世界の定義を用いた場合、以下のような過渡的な状態についての解釈を加えることで、エネルギー需給についての問題を明確に、かつ的確に捉えることができる。

「エネルギー需給における「持続可能性」の定義」

1. 究極的「持続可能性」の定義 「持続可能状態」

「エネルギー需給の持続可能性における究極的状态は、経済学における「世代会計中立の条件」が充足された状態であり、「いかなる世代においても当該世代のエネルギー消費量の総和が、当該世代の再生可能エネルギーによる累積生成量の総和を上回っていないこと」を満たしている状態である。」

2. 過渡的「持続可能性」の定義 「過渡的状态」

「究極的な持続可能状態に至る過渡的状态として、各時点でのエネルギー需給が持続可能状態に向かっていると見なされる状態は、経済学における「非ネズミ講条件」が充足された状態であり、「いかなる時点においても当該時点でのエネルギーの累積消費量の総和が、将来の再生可能エネルギーによるエネルギー生成量の総和を上回っていないこと」を満たしている状態である。」

1-2. 持続可能なエネルギー需給の不可避性

1-2-1. 化石燃料・核燃料の可採年数

内外の政策資料においては、現在エネルギー需給の大部分を占めている化石燃料・核燃料

*2 一般にエネルギー需給の世界で「生産量」は化石燃料・核燃料などの枯渇性エネルギー資源の採取・採掘を含んだ概念であるため、ここでは再生可能エネルギーに限定する意味で「生成量」の用語を用いる。

は枯渇性であり、それぞれが現状の消費量を継続した場合にどの程度の可採年数を持つかという情報が提供されている。

可採年数は資源探査・採掘技術の進歩やエネルギー価格などの経済的影響をうけて変動するものであること、またオイルサンド・オイルシェールやメタンハイドレートなど非在来型の資源が存在することなど、当該手法による資源寿命の評価については各種の批判がある。

しかし、こうした問題点を考慮したとしても、石油・天然ガスは遅くとも西暦 2100 年頃迄には経済的に利用可能なエネルギー資源ではなくなり、仮に物理的な地下資源として存在し続けている場合であっても経済的に見て「枯渇」し採掘されなくなる可能性が高いと考えられる。

また、ウラン 235 を軽水炉で利用する形態の核燃料利用も廃止され、高速増殖炉利用へ移行される可能性が高いものと考えられる。

一方、石炭や核燃料については西暦 2100 年以降も利用可能であると考えられるが、中期的に見た場合いずれは「枯渇」するものと考えられる。

[表 1-2-1-1. 化石燃料・核燃料の可採年数(2004)]

	確認可採埋蔵量(R)	年生産量(P)	可採年数(R/P)
[第一段階枯渇]			
石油	1.1886 兆bbl	0.0293 兆bbl/年	40.6 年
天然ガス	180 兆m ³	2.7 兆m ³ /年	66.7 年
ウラン(軽水炉)	459 万t	3.6 万t/年	85.0 年*
[第二段階枯渇]			
石炭	9,091 億t	55.4 億t/年	164.0 年
ウラン(増殖炉)	--	--	~ 1,000 年 (軽水炉の約 120 倍)

出典: 総合エネルギー統計(2004), BP統計・OECD-NEA/IAEA

* ウランの軽水炉利用による可採年数は、単純なR/Pでは 128 年となるが、現在の消費水準と在庫変動を補正すれば約 85 年となる(OECD-NEA/IAEA)。

1-2-2. 化石燃料・核燃料の経済的利用可能性

現在広く行われている化石燃料・核燃料の可採年数の評価においては、エネルギー資源の偏在性や供給側の国際カルテルなどの戦略的行動の可能性については考慮されておらず、単に確認可採埋蔵量を年生産量で除して評価が行われている。

しかし、経済学的に考えた場合、大規模な石油・天然ガス資源を保有している資源供給国は、ある程度枯渇が進んで資源供給国が数ヶ国になった場合、国際カルテルを形成し独占～寡占価格で供給を行うことが限定合理的な行動となる。

また、人類の歴史を見た場合、希少化した資源や利権を巡っては大規模な紛争が発生することが常であり、各資源が可採埋蔵量の限界迄平穩無事に供給される可能性は高くないと考えられる。

従って、各資源とも枯渇が進んで資源供給国が数ヶ国になれば、可採年数前であっても経済的に利用困難な価格が形成されたり、大規模な紛争が発生し供給できなくなったりすることにより、他のエネルギー源に転換が困難な用途以外では、経済的に見て利用可能性がなくなってしまう可能性が高いものと考えられる。

1-2-3. 西暦 2100 年頃迄の化石燃料・核燃料の経済的枯渇の見通し

現時点での化石燃料・核燃料の可採年数と、エネルギー資源の偏在性などを考慮すれば、多少の前後はあるにせよ、超長期的に見た場合化石燃料・核燃料は以下のような過程を経て

枯渇し経済的に見て利用可能性がなくなっていくものと考えられる。

これらの2段階の化石燃料・核燃料の経済的枯渇を経て、遅くとも西暦2200年頃には高速増殖炉による核燃料資源利用と再生可能エネルギーの一部^{*3}の利用のみが人類が利用可能なエネルギー源として残存するものと考えられる。

「西暦2100年頃迄の化石燃料・核燃料の経済的枯渇の見通し」

第一段階：石油・天然ガス資源の経済的枯渇(西暦2050年頃迄)

遅くとも西暦2050年頃迄には、石油資源、次いで天然ガス資源が、資源供給国の戦略的行動や地域紛争などにより価格高騰や供給量制約などの障害を生じ、経済合理的に入手利用できなくなる状態に入ると考えられる。

また、軽水炉の原子力発電による核燃料資源の利用も順次廃止され高速増殖炉利用に移行していくものと考えられる。

第二段階：石炭資源の経済的枯渇(西暦2100年頃迄)

西暦2100年頃、石炭資源が資源供給国の戦略的行動や地域紛争などにより価格高騰や供給量制約などの障害を生じ、経済合理的に入手利用できなくなると考えられる。

さらに、高速増殖炉による核燃料資源の利用も徐々に枯渇に向かうものと考えられる。

1-2-4. 核融合と「第三段階の枯渇」

化石燃料・核燃料の経済的枯渇見通しのうち、大規模な変化をもたらす可能性がある不確定要素は「核融合の経済的利用技術の開発」である。

仮に核融合が経済的に利用可能となった場合、「第二段階」で枯渇するのは石炭資源とウラン・トリウムなどの核分裂燃料資源のみであり、重水などの核融合燃料資源が「第二段階」以降も半永続的に利用可能となるものと考えられる。

従って、核融合の経済的利用技術の開発に成功すれば、人類のエネルギー利用はかなり長期に亘って「第二段階」の状態に留まれるものと考えられる。

一方、核融合の経済的利用技術の開発が失敗すれば、高速増殖炉による核燃料資源の利用が枯渇した段階で、人類のエネルギー利用は「第三段階の枯渇」を迎え、再生可能エネルギー以外のエネルギー源は利用できなくなるものと考えられる。

1-2-5. 気候変動問題と「第二段階」の枯渇の関係

IPCC第三次統合報告書(TAR, 2001)では、化石燃料の燃焼に伴うCO₂排出について以下のように記載している(WG1政策決定者向要約部中「温室効果ガス」の項、気象庁仮訳)。

「人為起源の温室効果ガスで最も重要なCO₂については、例えば、炭素循環モデルによる計算によると、大気中のCO₂濃度を450、650及び1000ppmで安定化させるためには、人為起源のCO₂の排出量をそれぞれ数十年、約100年及び約200年以内に1990年のレベル以下にした上で、その後着実に減少させ続けることが必要となる。最終的には、CO₂の排出量を現在に比べてごくわずかなレベルにまで減少させる必要がある。」

現状において、化石燃料の大部分を占める石炭資源は、その約60%が北米とアジア・大洋州など、現状において京都議定書を批准していない国々に分布していることが知られている。

仮に、これらの国々が気候変動問題に対処するため石炭資源の使用を控えるなどということが現実には起き得たとしても、本稿にいう「第二段階」の枯渇が数十年程度遅れるだけであり、超長期的に見たエネルギー需給問題の推移には殆ど影響がないものと考えられる。

*3 本稿においては、材料資源の枯渇などによるエネルギー源の利用制約は考慮していない。例えば、太陽光発電における高純度シリコンサンドの枯渇や、バイオマス資源における淡水の枯渇などは考慮していない。

2. 持続可能性から見た日本のエネルギー需給

2-1. 日本のエネルギー需給の超長期推移

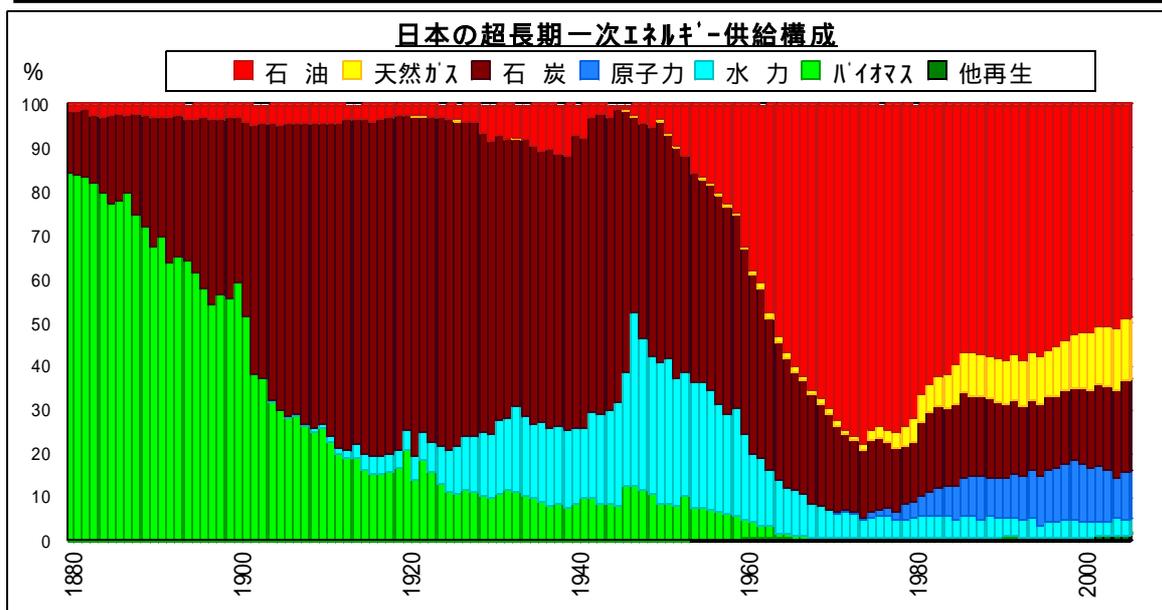
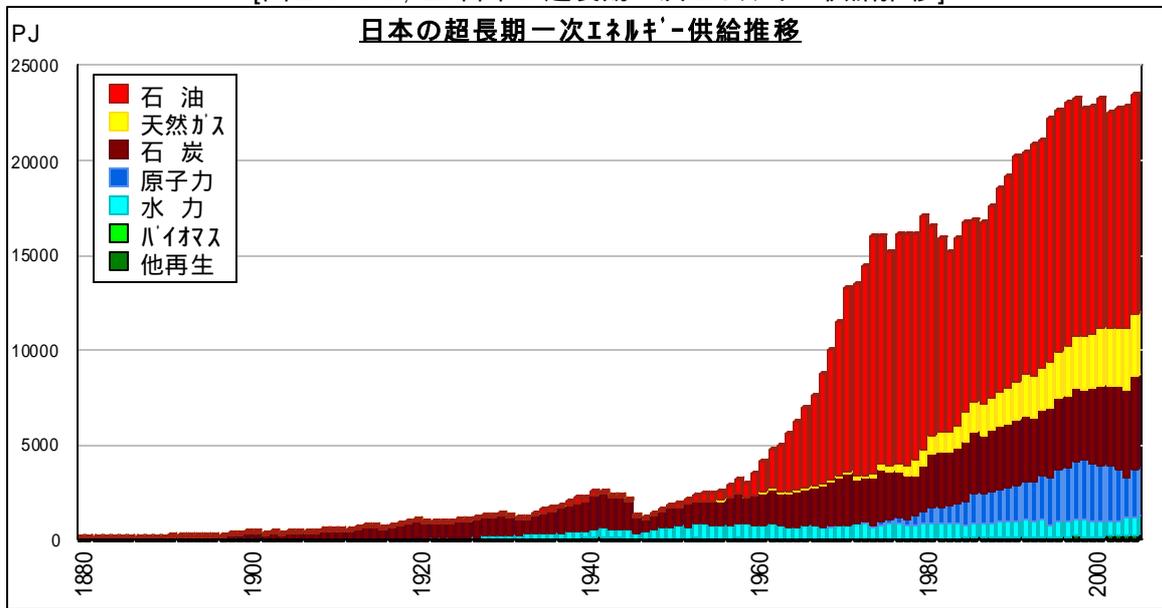
2-1-1. 日本の一次エネルギー総供給の超長期推移

日本の一次エネルギー総供給については、財団法人日本エネルギー経済研究所により歴史的資料の分析が行われており、明治初期から現在迄の約 120 年に亘る超長期エネルギー供給の資料が存在する。

1880 年(明治 13 年)時点では、日本の一次エネルギー供給の 80 % 以上は薪・木炭であり、ほぼ「持続可能」な A. バイオマスエネルギーの時代(縄文時代～江戸時代)にあった。

当該状態から、B. 石炭エネルギーの時代(明治時代～昭和初期)、C. 石油エネルギーの時代(高度成長期～石油危機)、D. エネルギー多様化の時代(石油危機以降)と、日本の一次エネルギー供給は合計 3 回の変遷を経て今日の姿となっていることが理解される。

[図 2-1-1-1.-2. 日本の超長期一次エネルギー供給推移]



2-1-2. 日本のエネルギー需給の超長期変遷過程

日本の一次エネルギー総供給の推移を超長期の経済指標と重ね合わせて見ると、各時代において何がエネルギー需要の増加要因であったかを見ることができる。

1) バイオマスエネルギーの時代(縄文時代～江戸時代)

江戸時代においては、日本には本格的な重工業が存在しておらず、エネルギー需要の大部分は調理・入湯など家計部門の基礎的消費が占めていたと考えられる。

2) 石炭エネルギーの時代(明治時代～昭和初期)

昭和初期迄は、製鉄と石炭化学などの重工業の生産が拡大し、産業部門(・軍事部門)中心に石炭のエネルギー消費が拡大していったと考えられる。

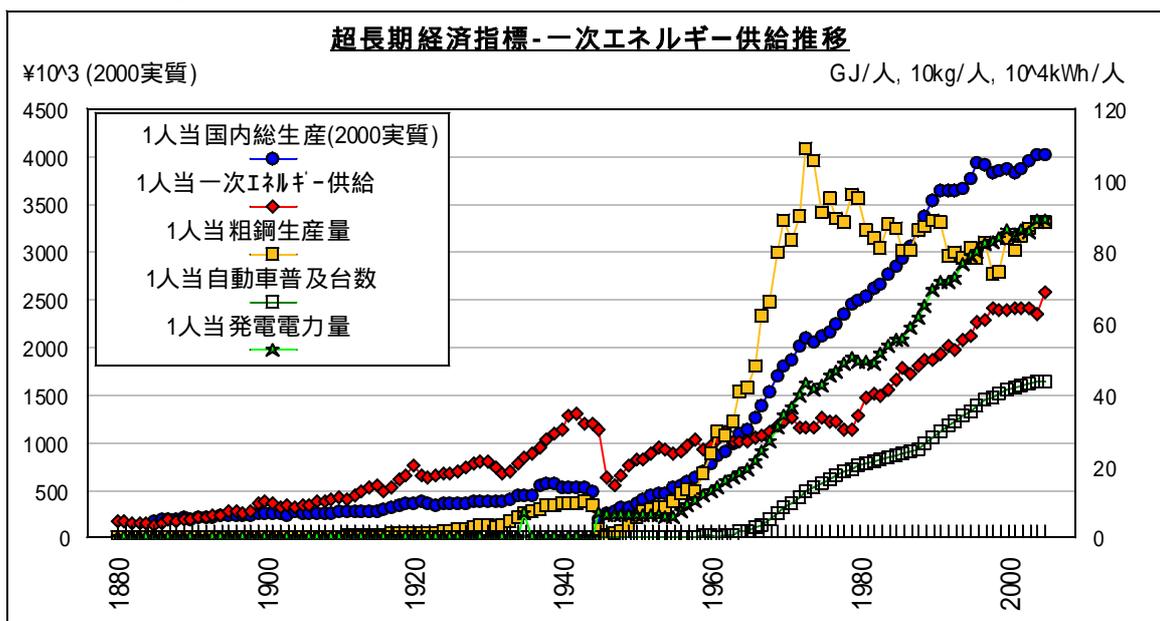
3) 石油エネルギーの時代(高度成長期～石油危機)

高度成長期においては、産業部門の生産拡大とエネルギー需要の相関性が見られなくなり、エネルギー技術の普及より技術進歩の効果が大きかったと考えられる。

4) エネルギー多様化の時代(石油危機以降)

石油危機後の時期においては、産業部門は生産高やエネルギー消費とも横這いとなる一方、電力消費量・自動車普及台数などの増加が示すとおり、家計・業務部門や運輸旅客部門での消費拡大がエネルギー需要の主要な増加要因となっている。

[図 2-1-2-2. 日本の主要経済指標と超長期エネルギー供給推移]



2-2. 日本のエネルギー需給の「持続可能状態」と「過渡的状态」

2-2-1. 日本における「持続可能状態」としての江戸時代

1) 江戸時代を分析する意味

江戸時代迄の日本の一次エネルギー総供給の大部分は薪・木炭などの国産バイオマスであり、ほぼ「持続可能状態」にあったことが知られている。

今後のエネルギー需給問題を考える上では、水力発電・地熱発電など西暦 1900 年以降に開発された再生可能エネルギー技術や各種のエネルギー変換技術が利用可能であり、今後の日本のエネルギー需給は江戸時代とは当然に異なるものと考えられる。

しかし、「持続可能状態」での社会経済像を具体的に想起する上で、江戸時代のエネルギー需給を経済的に分析しておくことは有益であると考えられる。

2) 江戸時代の人口停滞

江戸時代においては、室町時代から続いた農地や植林地の開墾・開発が一巡するにつれ、国内で利用可能な食料資源やエネルギー資源と人口が均衡に達し、1800年頃からはほぼ400年間の間、国内人口約3,000～3,300万人で推移したことが知られている。

3) 江戸時代と現代の家計消費支出内訳の比較

江戸時代の生活水準を示す文献・資料は数多く残されており、これを現代と比較することができる。

例えば、江戸時代の代表的な家計収支の例として、文政年間(1820頃)に江戸で暮らしていた大工の家計の例と、同じく江戸で暮らしていた下級武士の家計記録の例が知られている。

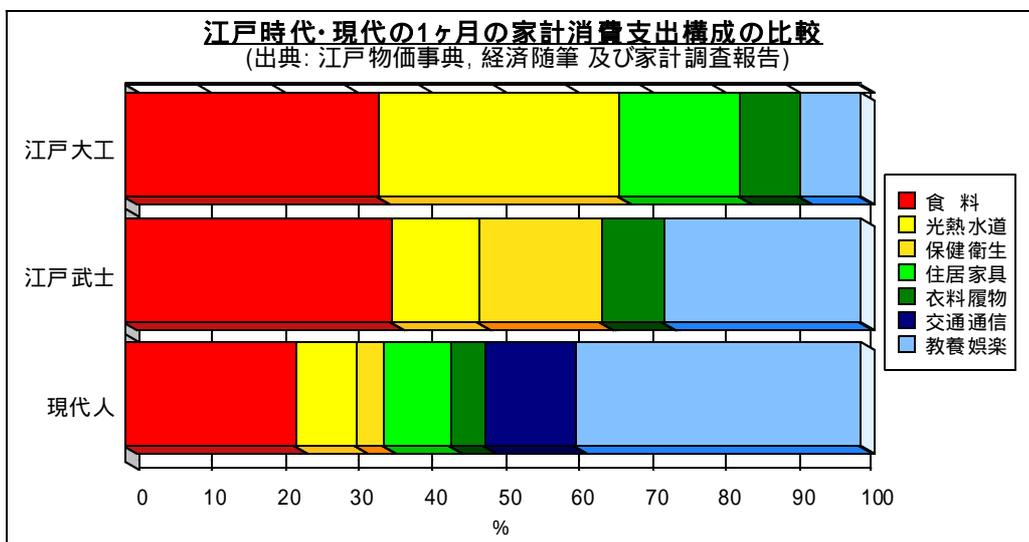
これらの事例を2005年の総務省家計調査報告から作成した現代の家計消費支出平均値と比較すると、以下のような点が観察できる。

- 食料費(エンゲル係数)は、現代が20%前後に対し江戸時代は40%前後と高い。
- 光熱水道費(薪・炭・灯明油・蝋燭)・保健衛生費(風呂・散髪代)は、現代が10%前後に対し江戸時代は30%近くに達しており非常に高い。
- 交通通信費は、現代が10%前後に対し、江戸時代ではほぼゼロである。
- 教養娯楽費は、現代が40%前後に対し、江戸時代では10～20%である。

特に、エネルギー需給という観点から見た場合、当時世界有数の大都市江戸において薪・炭は他地域から輸送してこなければならず極めて高価であったが、江戸での生活では衛生保持上入浴を欠かすことができなかつたため、江戸の住人は非常に大きな光熱費を支払っていたことが注目される。従って、「持続可能状態」では家計は給湯・暖房用燃料にかなり大きな出費を強いられ、その分教養娯楽などへの支出が抑制され相対的に生活水準が低下することを余儀なくされるものと考えられる。

また、交通通信への恒常的な支出は現代人に特有の現象であり、江戸時代においては家計の経済活動が通常は徒歩圏内で完結していたことが推察される。日本国内において得られるバイオマス資源はわずかであり、仮にバイオマス燃料を輸入したとしても相当な高価となることが予想され、現在のようにガソリン・軽油などの輸送用燃料を個人が消費することは「持続可能状態」ではほぼ不可能となることを示唆しているものと考えられる。

[図 2-2-1-2. 江戸時代・現代の1ヶ月の家計消費支出構成の比較]



2-2-2. 「持続可能状態」への「過渡的状态」

1) 一次エネルギー供給の決定要因

日本の一次エネルギー供給は、人口と人口1人当エネルギー消費量で決定される。

人口の長期趨勢については、各時点の年齢別・性別人口構成と出生率から比較的高精度に長期の将来推計を行うことが可能であることが知られている。

一方、人口1人当のエネルギー需給量は、基本的に「1人当国内総生産」と「(平均)エネルギー価格」の関数であると考えられるが、1人当国内総生産やエネルギー価格の将来推計を行うことは非常に困難である。

[式 2-2-2-1. 一次エネルギー供給の決定要因]

$$ES(t) = PO(t) \times CR(t)$$

$$PO(t) = f (PO(t-x), BR(t-x))$$

$$CR(t) = g (GP(t), pE(t))$$

ES(t) ; 一次エネルギー供給量 (PJ)

PO(t) ; t時点での人口 (人)

BR(t) ; t時点での出生率 (-)

CR(t) ; t時点での人口1人当エネルギー消費量 (GJ/人)

GP(t) ; t時点での人口1人当国内総生産 (¥/人)

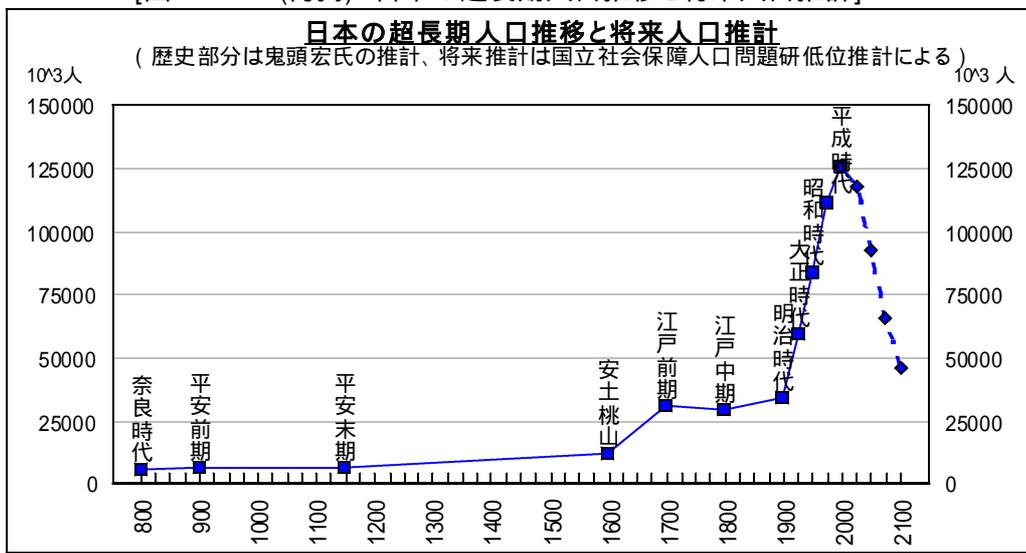
pE(t) ; t時点でのエネルギー価格水準 (¥/GJ)

2) 日本の人口の推移

日本の人口については、室町時代～江戸時代初期の農地開墾・開発、明治時代の産業近代化の2つの時期に大きく増加して推移してきた。

しかし、今後の見通しについては、(独)国立社会保障・人口問題研究所の推計によれば、出生率の低下により今後西暦2100年に向けて人口が減少し、4,000万人台へ向かうものと予測されている。出生率が低下した原因については、人口史や地域別の出生率格差の研究結果から、都市部への人口集中による晩婚化と育児負担の増加が原因であるとされている。

[図 2-2-1-1(再掲). 日本の超長期人口推移と将来人口推計]



3) 日本の1人当一次エネルギー供給の推移

現在までの日本の1人当一次エネルギー総供給は、第二次世界大戦直後の社会経済の混乱期を除いては、殆どの時期で1人当国内総生産の増加に従い正の弾性値で増加を続けてきている。従って、社会経済の混乱が生じていない状況下での1人当のエネルギー供給量は、省エネルギーの進展を考慮したとしても、現状維持か微減で推移すると考えることが妥当である。

[表 2-2-2-1. 日本の一次エネルギー供給と実質国内総生産・エネルギー価格]

弾性値(t値) / 観測期間	1885-2005	1885-1945	1946-1975	1976-2005
実質国内総生産弾性値	+0.693(+27.7)	+1.537(+22.3)	+0.300(+11.2)	+1.200(+26.0)
エネルギー価格弾性値	-0.176(-3.00)	+0.084(+1.08)x	-0.130(-3.53)	+0.062(+2.08)x

2-2-3. 日本の「過渡的状态」での超長期一次エネルギー供給の見通し

西暦 2100 年に向けての「過渡的状态」においては、日本の人口が減少に向かうと同時に石油・天然ガスなどが経済的に枯渇していく見通しであり、エネルギー需給において大変革は不可避であると考えられる。

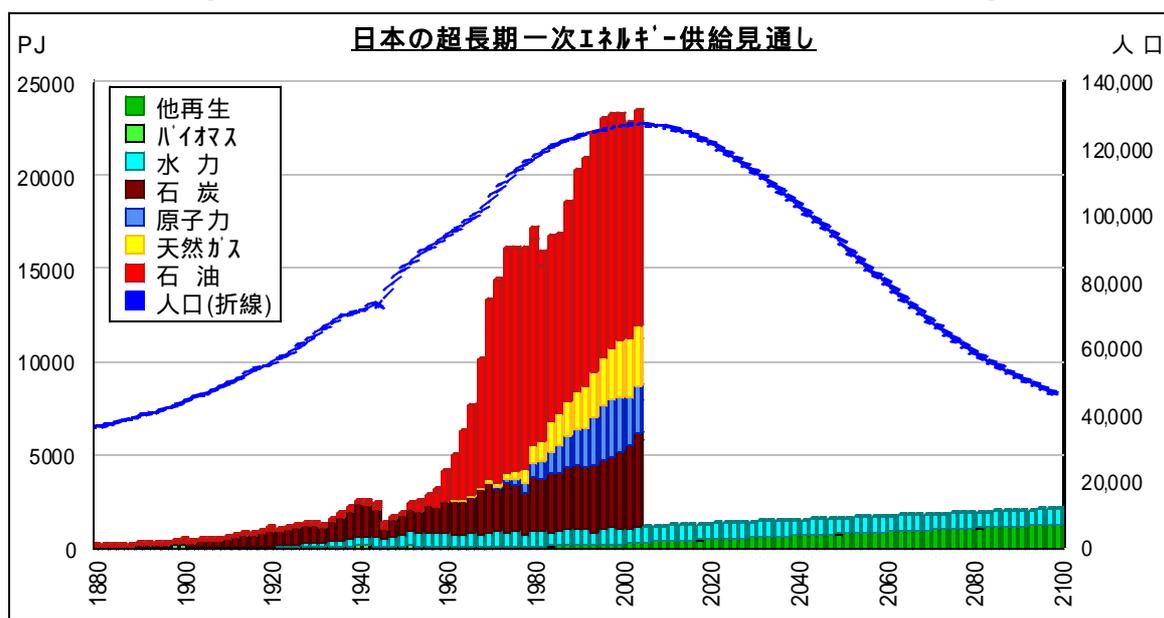
エネルギー需給の将来については様々な不確定要素が存在するが、議論を単純化し見通しを良くするために、以下の4つの仮定を設けて考える。

- 仮定J1: 日本の人口は、国立社会保障人口問題研「低位推計」で推移する
- 仮定J2: 1人当一次エネルギー供給水準は、現状程度で長期的に推移する
- 仮定J3: 国産の再生可能エネルギーの技術進歩は現在の水準で長期的に推移する
- 仮定J4: 国産化石燃料の再探掘や海外産のバイオマスの輸入は考慮しない

これらの仮定から、石油・天然ガスから石炭・原子力・再生可能エネルギーなどへのエネルギー転換を社会経済に混乱をもたらさず進めていくためには、西暦 2030 ~ 2100 年においても現状以上の水準で石炭や原子力発電を利用しなければならないことが理解される。

特に、現状で石油系燃料に完全に依存している輸送用燃料や農林水産用燃料、都市ガスなどについては、「過渡的状态」において石炭や廃プラスチックなどから合成した「合成液体燃料」や「合成気体燃料」へ円滑に移行していくことが不可避である。

[図 2-2-3-1. 「過渡的状态」の超長期一次エネルギー供給見通し]



3. 持続可能性から見た世界のエネルギー需給

3-1. 世界のエネルギー需給の現状 - 「破滅必須状態」 -

3-1-1. 世界のエネルギー需給の推移

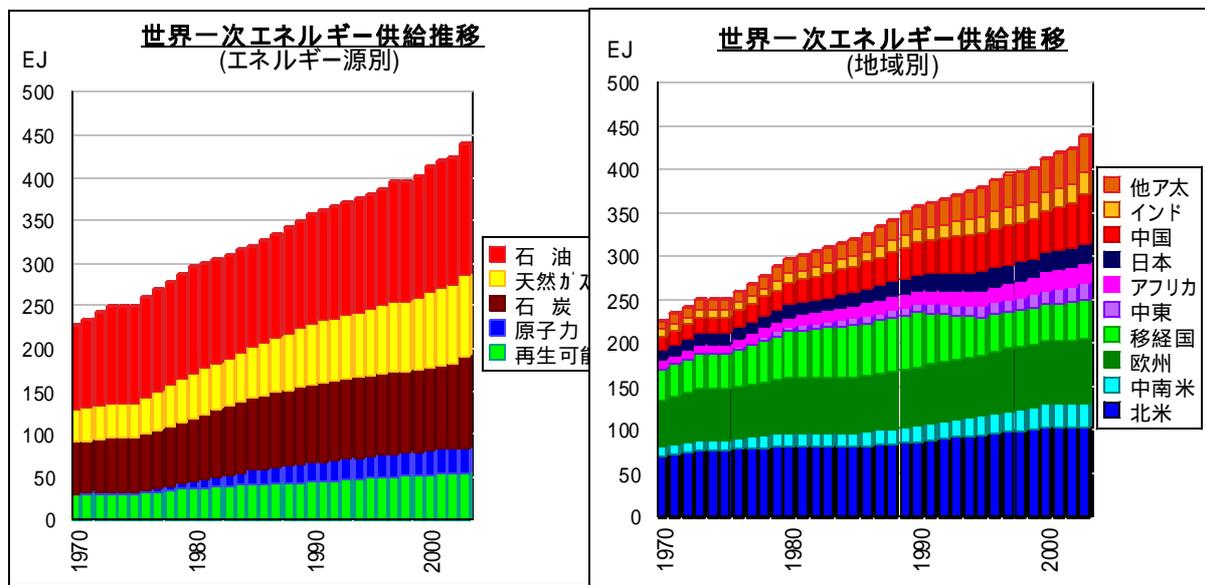
IEA^{*4} が刊行する各種のエネルギー統計においては、1971 ~ 2003 年の世界のエネルギー需給実績がエネルギー源別に調査されている。本稿では、当該統計を用いて世界のエネルギー需給の現状と将来展望を議論する。

世界の一次エネルギー供給は、平均して年率約 2 % で増加を続けている。

エネルギー源別に見た場合、1970 年代から現在に至るまで石油が最も多いが、1990 年代から中国・インドなどでの石炭の消費が増加して推移している。

地域別に見た場合、ほぼ半分を北米・欧州・移行経済国・日本などの先進国が消費しており、残りをアジア・中南米・中東・アフリカなどの発展途上国が消費している。1980 年代から、先進国全体の増加率が 1 % 程度に鈍化したのに対し、発展途上国の増加率は 2 % 以上となっており、経済発展に伴い加速する傾向にある。

[図 3-1-1-1.,-2. 世界の一次エネルギー供給推移 / エネルギー源別・地域別]



3-1-2. 世界人口と 1 人当一次エネルギー供給の推移

1) 世界人口と 1 人当一次エネルギー供給の現状

世界の一次エネルギー供給の決定要因は、人口と 1 人当一次エネルギー供給である。

世界人口については、年率約 2 % 弱で増加して推移している。特に、インド・東南アジア・中東・アフリカなどで急激に人口が増加して推移している。一方、先進国の多くと、人口抑制政策を重視している中国では、人口はほぼ横這いで推移している。

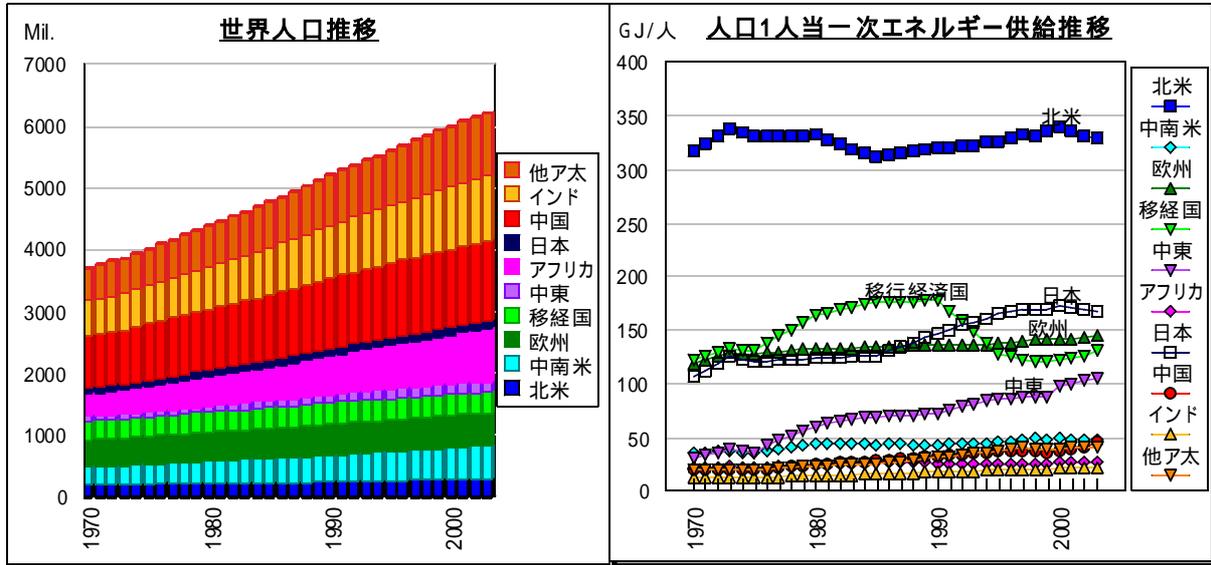
世界の 1 人当一次エネルギー供給については、全体として見た場合、年率 0.4 % 程度の微増で推移している。地域別の 1 人当一次エネルギー供給を見た場合、アメリカ・カナダなど北米が圧倒的に多く、日本・欧州・移行経済国などは北米の 50 % 程度の水準にある。さらに

*4 International Energy Agency / 国際エネルギー機関

中東以外の発展途上国は、北米の10%程度の水準に過ぎない。

1人当一次エネルギー供給の増加率を見た場合、1970～2003年の期間では、日本・中東などで1人当一次エネルギー供給が大きく増加したが、1990年以降では中国・東南アジアが著しく増加している。1990年代に政治経済体制の崩壊に伴い移行経済国の1人当一次エネルギー供給が急減したが、最近では回復の傾向にある。

[図 3-1-2-1.,-2. 世界人口推移、1人当一次エネルギー供給推移]

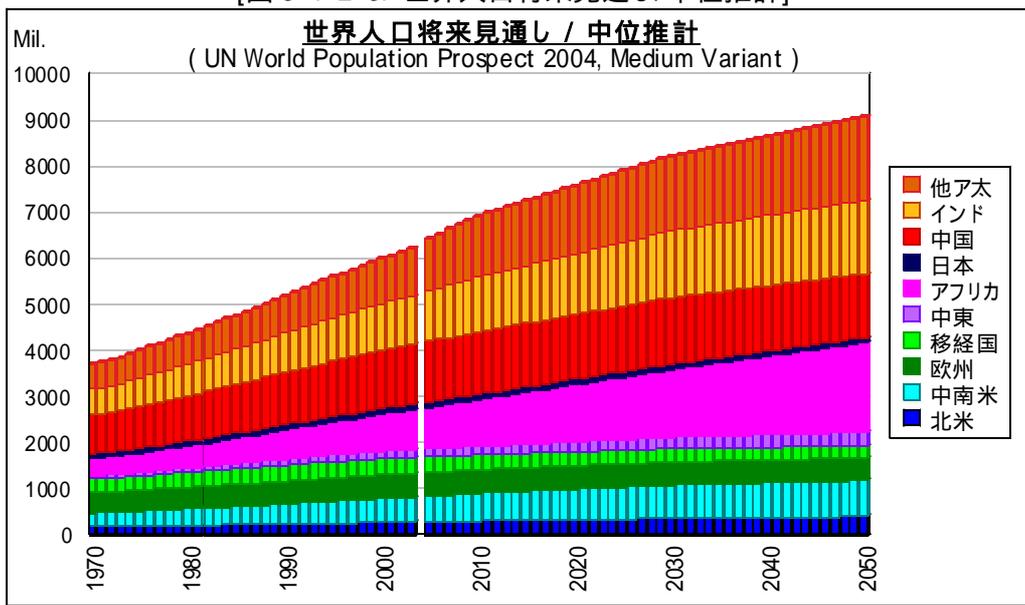


2) 世界人口の長期見通し

世界人口の長期見通しについては、UN "World Population Prospects; The 2004 Edition" において、現在の年齢別・性別人口構成の実績値及び出生率の見通しなどに基づいて、西暦2050年迄の地域別の超長期人口見通しが高位・中位・低位の3通り示されている。

中位推計では、西暦2050年に向けて人口増加率は逡減し人口は約90億人から微増とされており、低位推計では西暦2050年頃人口は約80億人で飽和すると見込まれている。

[図 3-1-2-3. 世界人口将来見通し/中位推計]



3) 世界の1人当一次エネルギー供給の推移

1970年代以降の世界の1人当エネルギー総供給は、殆どの国で実質国内総生産に対する弾性値は有意に正であり、世界経済の拡大につれて増加を続けている。

発展途上国の多くの国では、近年に至るまで計画経済体制が採られており、エネルギー価格は統制価格となっていたため、実質国内総生産や原油の実質国際市場価格に対する弾性値が有意でなく、慣性項が非常に大きい特徴が観察される。

[表 3-1-2-1. 世界の一次エネルギー供給と実質国内総生産・エネルギー価格]

$$\text{回帰式 } \ln(\text{TPEi}(t)) = a_0 + a_1 \cdot \ln(\text{GDPRi}(t)) + a_2 \cdot \ln(\text{PO}(t)) + a_3 \cdot \ln(\text{TPEi}(t-1))$$

TPEi(t) i地域 t年の一次エネルギー総供給 (EJ) (1971 ~ 2003年)

GDPRi(t) i地域 t年の実質国内総生産 (2000年US\$)

PO(t) t年の実質国際原油市場価格 (2000年US\$)

a0 定数項、 a1 GDPR弾性値、 a2 油価弾性値、 a3 慣性項弾性値

地域/弾性値 (t値)	実質GDP弾性値	油価弾性値	慣性項弾性値	定数項	R ²
北米	+0.006(1.023)x	-0.017(7.420)	+0.883(18.72)	+0.667(106.7)	0.932
欧州	+0.093(3.658)	+0.001(0.276)x	+0.545(4.958)	+1.347(239.9)	0.982
日本	+0.173(7.211)	-0.032(8.238)	+0.713(18.81)	-0.256(25.57)	0.996
移行経済国	+0.316(7.897)	-0.017(1.945)	+0.662(14.67)	-0.614(30.24)	0.982
中南米	+0.431(5.395)	-0.009(1.545)	+0.636(9.919)	-2.109(146.9)	0.979
東南ア・大洋州	+0.273(2.408)	-0.010(1.059)x	+0.705(5.749)	-1.007(45.92)	0.994
中国	+0.054(1.475)x	+0.020(1.852)x	+0.848(7.944)	+0.168(6.237)	0.989
インド	+0.002(0.031)x	+0.009(1.788)x	+1.008(10.35)	-0.044(3.143)	0.993
中東	+0.124(1.446)x	-0.008(0.477)x	+0.983(32.24)	-0.936(24.38)	0.988
アフリカ	+0.076(1.103)x	+0.006(0.878)x	+0.979(15.65)	-0.447(31.80)	0.962

3-1-3. 「現状継続」シナリオでの世界の超長期一次エネルギー供給の見通し

仮に、現状での世界のエネルギー需給が以下のような4つの仮定を満たしていると考えた状態で、化石燃料の減耗や価格上昇を省みず、世界が現状のまま一次エネルギー供給を増加させ続けた場合に一次エネルギー供給は超長期的にどのような推移となるかを試算した。

仮定W1: 世界の人口は、国連人口推計「中位推計」で推移する

仮定W2: 1人当一次エネルギー供給水準は、現状の増加率で推移する

仮定W3: 原子力発電・再生可能エネルギーの導入は現在の水準で長期的に推移する

仮定W4: 世界の化石燃料の埋蔵量は、現時点での確認可採埋蔵量を超えない

また化石燃料埋蔵国は、国際市場に無制限に供給を行う

当該状態を「現状継続」シナリオ^{*5}と呼称する。

「現状継続」シナリオでは、人口が西暦2050年に向けて約90億人を超えて増加し、かつ1人当一次エネルギー供給量が現状の増加率で増加を続けることとなるため、化石燃料は逐

*5 現実には、化石燃料の需要が増加し埋蔵量が減少していくとともに、各化石燃料の価格は上昇し若干の埋蔵量の増加と価格効果による需要の減少が見込まれる。一方で、化石燃料埋蔵国は埋蔵量が残り少なくなった場合、自国内向けへの供給を優先し国際市場への供給を制限する可能性がある。「現状維持」シナリオでは、議論を簡素化するために、このような要素を捨象して単純化した極端な将来像を敢えて記述している。

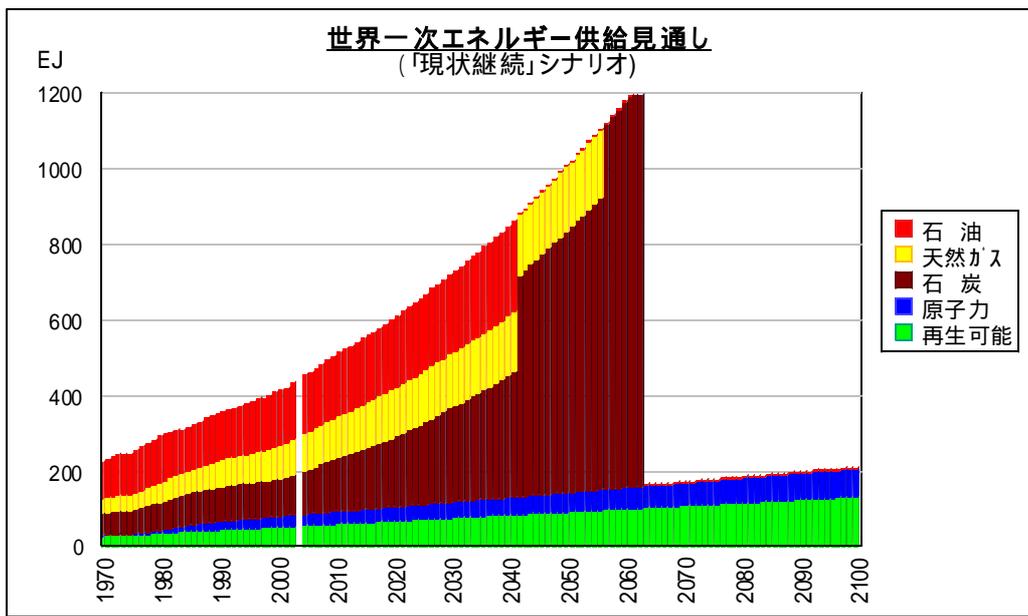
次枯渇し、石油が経済的枯渇した後を天然ガスと石炭が埋め、次に天然ガスが経済的に枯渇した後を石炭が埋めることとなる。

その結果、西暦 2050 年頃には 1000EJ を超える過大な需要が石炭にかかり、西暦 2060 年頃迄にほぼ全部の化石燃料を使い尽くしてしまう結果となる。

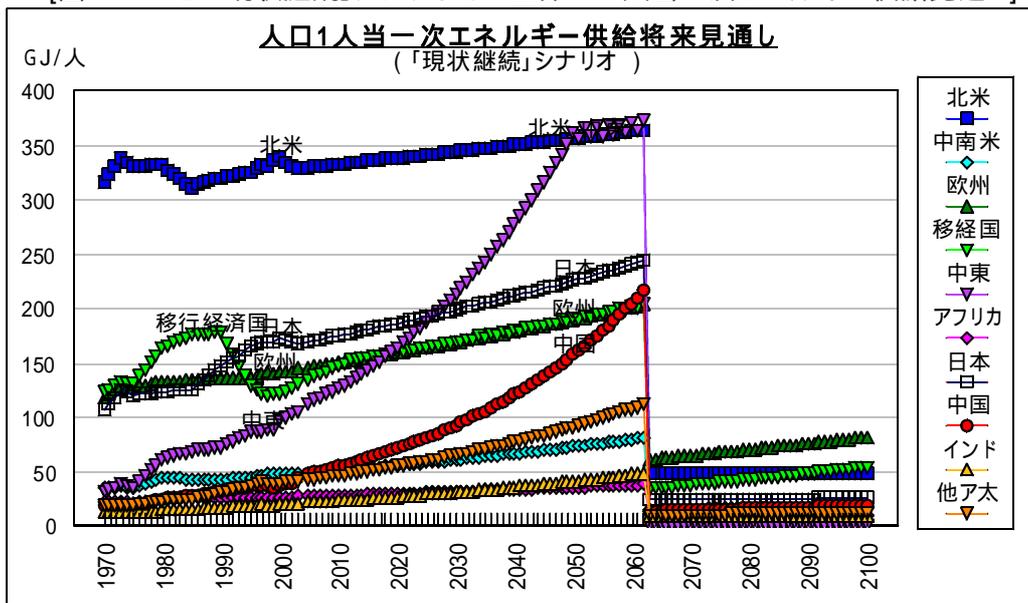
現実には、化石燃料の需給は価格が調整するため、石油・天然ガスや石炭の価格は急激に上昇し、1 人当一次エネルギー供給が価格効果で減少することによって西暦 2100 年頃迄化石燃料の供給は続くと考えられるが、西暦 2030 ~ 2050 年頃においては急激かつ全面的な化石燃料価格の上昇によって世界経済は深刻な影響を受けるものと考えられる。

従って、現在の世界の一次エネルギー総供給の推移は、「持続可能状態」はおろか、「過渡的状态」としての条件も満たさない、「破滅必須状態」であると評価される。

[図 3-1-3-1. 「現状継続」シナリオでの世界の一次エネルギー供給見通し]



[図 3-1-3-2. 「現状継続」シナリオでの世界の 1 人当一次エネルギー供給見通し]



3-2. 「過渡的状态」へ回帰するために必要な対応

3-2-1. 「過渡的状态」への回帰シナリオ - 「省エネルギー・原子力推進シナリオ」 -

現在の世界の一次エネルギー供給は、そのままでは「持続可能状態」に向けた「過渡的状态」の条件を満たしていないことが再認識されたが、ではどのようなシナリオを構成すれば「過渡的状态」に回帰でき、化石燃料の経済的枯渇による社会経済への混乱を回避することができるかを考察する。

「持続可能状態」に向けて遷移可能なシナリオは、化石燃料への依存度を下げる^{*6}ため、人口の抑制、1人当一次エネルギー供給水準の省エネルギーによる削減、原子力発電・再生可能エネルギーの導入拡大などを行う必要がある。

当該シナリオを「省エネルギー・原子力推進」シナリオと呼称する。

1) 世界の人口推移

仮定W1: 国連人口推計「中位推計」 「低位推計」

国連人口推計の「中位推計」では、西暦2050年以降も約90億人を超えて人口が増加するとしているが、化石燃料が有限である限り増加し続ける人口に対して100年単位でのエネルギー供給を行うことは困難である。

従って、中国以外の発展途上国においても人口抑制策が採られ、世界人口が「低位推計」で推移するものと仮定する。

2) 1人当一次エネルギー供給水準

仮定W2: 現状の増加率

先進国 西暦2020年頃から年率0.5%程度で削減

発展途上国 1人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州の水準に達した段階で先進国並削減

1人当一次エネルギー供給が現状の増加率を維持した場合、仮に人口が一定でも100年単位でのエネルギー供給を行うことは困難である。

従って、先進国においては西暦2020年頃から年率0.5%相当の省エネルギー対策を行い1人当一次エネルギー供給を削減し、発展途上国においては現在の日本や欧州の水準に達した段階で先進国並みの省エネルギー対策により1人当一次エネルギー供給の削減を行うものと仮定する。

3) 原子力発電・再生可能エネルギー導入

仮定W3: 原子力発電の導入は現在の水準

先進国 脱化石燃料化を西暦2080年迄に達成

発展途上国 1人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州の水準に達した段階から先進国並みの脱化石燃料化を推進

仮に人口が「低位推計」であり、1人当一次エネルギー供給が先進国から率先して省エネルギー対策により低減したとしても、現在のように一次エネルギー供給構成が化石燃料中心のまま発展途上国が一次エネルギー供給を増加させた場合には、西暦2100年迄の化石燃料の経済的枯渇は不可避である。

従って、先進国を中心に一次エネルギー供給のほぼ全部を原子力発電により賄う水準迄原子力発電の開発導入を推進するものと仮定する。

*6 化石燃料の探査強化による確認可採埋蔵量の拡大や、オイルサンド・オイルシェール、メタンハイドレートなどの開発は問題の「緩和」には大きく寄与するが、明らかに持続可能状態に向けた遷移シナリオではないため、ここでは捨象する。

3-2-2. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの世界の超長期一次エネルギー供給の見通し

「省エネルギー・原子力推進」シナリオでは、世界のエネルギー需給は以下のような4つの仮定を満たすことにより、化石燃料が経済的枯渇に至る迄に、省エネルギーや原子力発電の推進により一次エネルギー供給を安定化させることを目指すこととなる。

仮定W1: 世界の人口は、国連人口推計「低位推計」で推移する。

仮定W2: 1人当一次エネルギー供給水準は、先進国では西暦2020年頃から年率0.5%程度の削減を図り、発展途上国では1人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州の水準に達した段階で先進国並みの削減を図る。

仮定W3: 再生可能エネルギーの導入は現在の水準で長期的に推移する。

原子力発電については、脱化石燃料化を西暦2080年迄に達成する水準で導入を拡大し、発展途上国においては1人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州の水準にした段階から先進国並みの脱化石燃料化を推進する。

仮定W4: 世界の化石燃料の埋蔵量は、現時点での確認可採埋蔵量を超えない

また化石燃料埋蔵国は、国際市場に無制限に供給を行う（「現状維持」と同じ）

「省エネルギー・原子力推進」シナリオでは、人口が西暦2050年頃に約80億人で飽和し、かつ1人当一次エネルギー供給量が省エネルギーの推進により安定化し減少を始める。

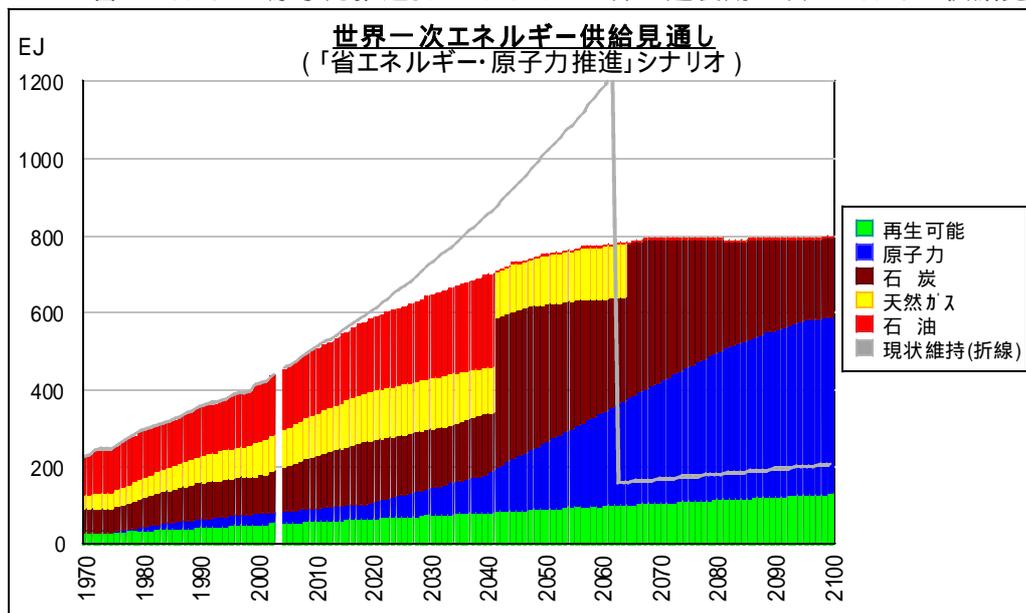
その結果、化石燃料は逐次枯渇していくが、西暦2090年頃に原子力発電と再生可能エネルギーが世界の一次エネルギー供給の大半を占め、現在の一次エネルギー供給から破綻を起こすことなく西暦2100年頃迄移行することが可能となる。

現実には、化石燃料の需給は価格が調整するため、石油・天然ガスや石炭の価格は順次上昇していき、1人当一次エネルギー供給が価格効果で減少することによって西暦2100年以降も化石燃料の供給は続くと考えられる。

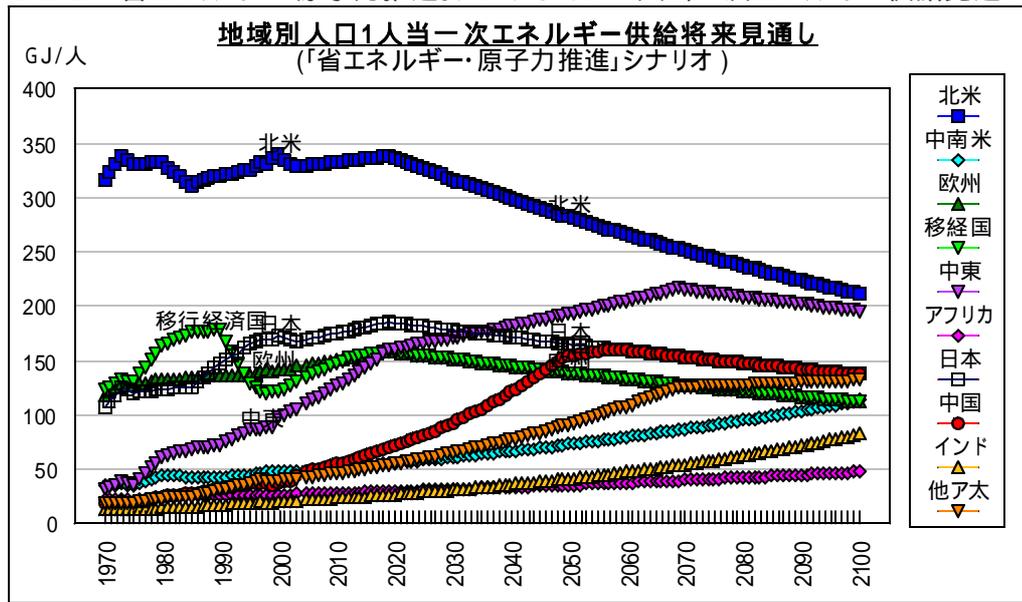
従って、「省エネルギー・原子力推進」シナリオと等価な対策を地球規模で講じることが可能ならば、世界の一次エネルギー総供給の推移を「破滅必須状態」から「持続可能状態」への「過渡的状态」に回帰させることができるものと評価される。

見方を変えれば、「省エネルギー・原子力推進」シナリオの各仮定が平穩に満たされないならば、西暦2100年迄の間に大きな経済的社会的混乱は避けられないと考えられる。

[図 3-2-2-1. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの世界の超長期一次エネルギー供給見通し]



[図 3-2-2-2. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの 1 人当一次エネルギー供給見通し]



3-2-3. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオが成立するために必要な対応

「省エネルギー・原子力推進」シナリオでは、人口抑制、省エネルギー、原子力発電の推進などの対策を総動員して、辛うじて西暦 2100 年頃迄に「過渡的状态」へ遷移することが可能であることが判明した。

当該シナリオを社会経済に混乱を招くことなく成立させるためには、先進国・発展途上国別に以下のような取組みが必要である。

1) 先進国

- 人口については、先進国は停滞・自然減の傾向にあるため特段の対応はない。
- 1 人当一次エネルギー供給については、西暦 2020 年頃から年率 0.5 % を目標に省エネルギー対策を行い、1 人当エネルギー供給の継続的な削減を図る。
省エネルギー対策の実施においては、化石燃料価格の上昇が見込まれることから、価格効果を活用した経済的方策の実施など様々な方策の選択が考えられる。
- 原子力発電・再生可能エネルギーの推進については、最大限の努力を行う。
特に原子力発電については、高速増殖炉サイクルの拡大などにより、西暦 2100 年頃迄に一次エネルギー供給の大部分を原子力発電で賄うべく拡大を図る。

2) 発展途上国

- 人口については、東南アジア・中東・インド・アフリカなどで実効のある人口抑制策を実施し、「低位推計」の実現に向けて西暦 2050 年頃迄の人口の安定化を図る。
- 1 人当一次エネルギー供給については、現在の日本・欧州並 (1 人当約 150GJ/年/人) の水準に達するまでは特段の対応はない。1 人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州並の水準に達した以降は、先進国として取扱い、年率 0.5 % を目標に省エネルギー対策を行い、1 人当エネルギー供給の継続的な削減を図る。
現状の発展途上国の多くは、計画経済・エネルギー価格統制などにより国内向エネルギー価格を廉価に設定している国が多いが、省エネルギー対策の観点からはこのような措置を廃止し国際価格に整合化させるべきである。
- 原子力発電・再生可能エネルギーの推進については、最大限の努力を行う。
特に原子力発電については、1 人当一次エネルギー供給が現在の日本・欧州並の水準に達した以降は、先進国として取扱い原子力発電の導入拡大を図る。

4. 日本のエネルギー需給の持続可能性への遷移シナリオ

4-1. 日本のエネルギー需給の「過渡的状态」

4-1-1. 過渡的状态の課題 1) 石油・天然ガスの転換・代替

現状において、日本の一次エネルギー供給の約 60 %は石油・天然ガスが占めている。

西暦 2100 年迄の世界においては、まず最初に石油・天然ガスの経済的な枯渇が見込まれることから、石油・天然ガスを他のエネルギー源で賄うか、石炭などからの「合成液体燃料」「合成気体燃料」に振替えていくことが必要である。

以下、石油と天然ガスのそれぞれについての現在の需給の問題点を検討する。

1) 石油製品

現在日本で使用されている原油は、ほぼ全部が石油精製部門で石油製品に転換されており、ごくわずかな量が発電用燃料として使用されている。従って石油製品の需給を検討する。

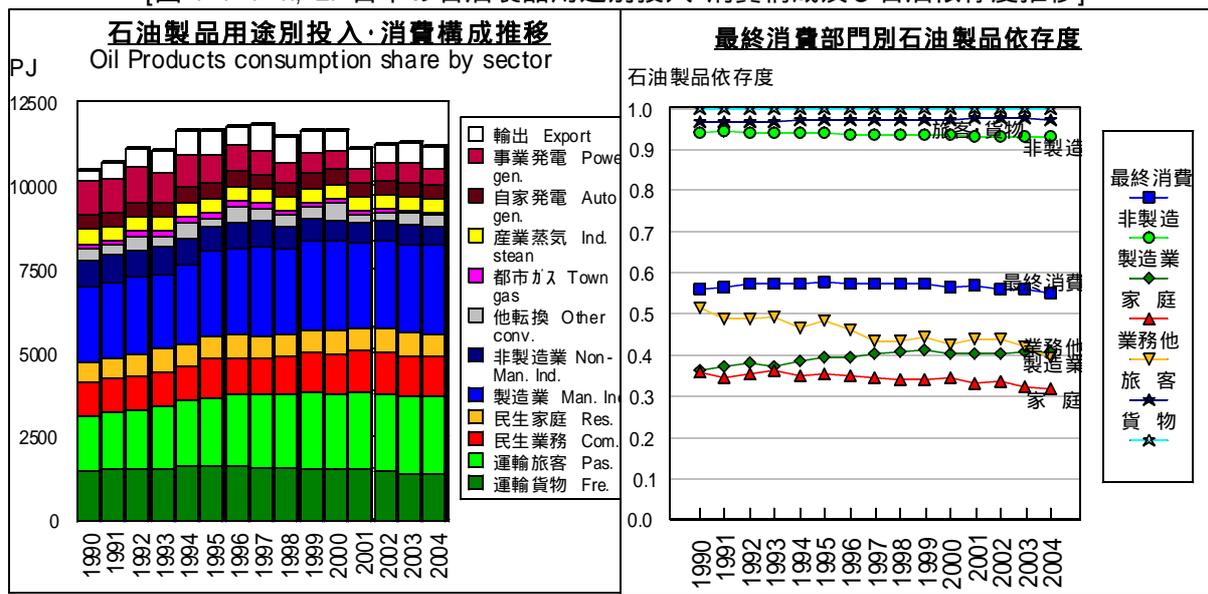
石油製品の約 40 %は、ガソリン・軽油などの形で運輸部門で消費されており、現在のところ他のエネルギー源への転換は進んでいない。一方、産業部門で消費されている重油や民生部門で消費されている灯油・LPGなどは、現在においても石炭・バイオマス・電力などの他のエネルギー源と競合関係にあり、他のエネルギー源への転換は可能であると考えられる。

各最終エネルギー消費部門別に石油製品への依存度を見た場合、運輸旅客・貨物部門や非製造業部門(農林水産・鉱・建設業)では依存度がほぼ 100 %近い値となっているが、他の部門では 40 %程度の水準に留まっている。

製造業部門や民生家庭・業務部門においては、現状において石油製品への依存度が 50 %以下であることから、暖房や厨房用途に使用されている重油・灯油やLPGなどの石油製品を、石炭や電力など他のエネルギー源への転換を進めることは可能であると考えられる。

一方、運輸部門や非製造業部門では、現状において石油製品への依存度がほぼ 100 %の状態にあり、他のエネルギー源への転換を進めることは困難であると考えられる。このため、ガソリン・軽油などの輸送用燃料や農業機械・漁船用燃料については、石炭やバイオマスなどからの「合成液体燃料」に代替していくことが必要であると考えられる。

[図 4-1-1-1., -2. 日本の石油製品用途別投入・消費構成及び石油依存度推移]



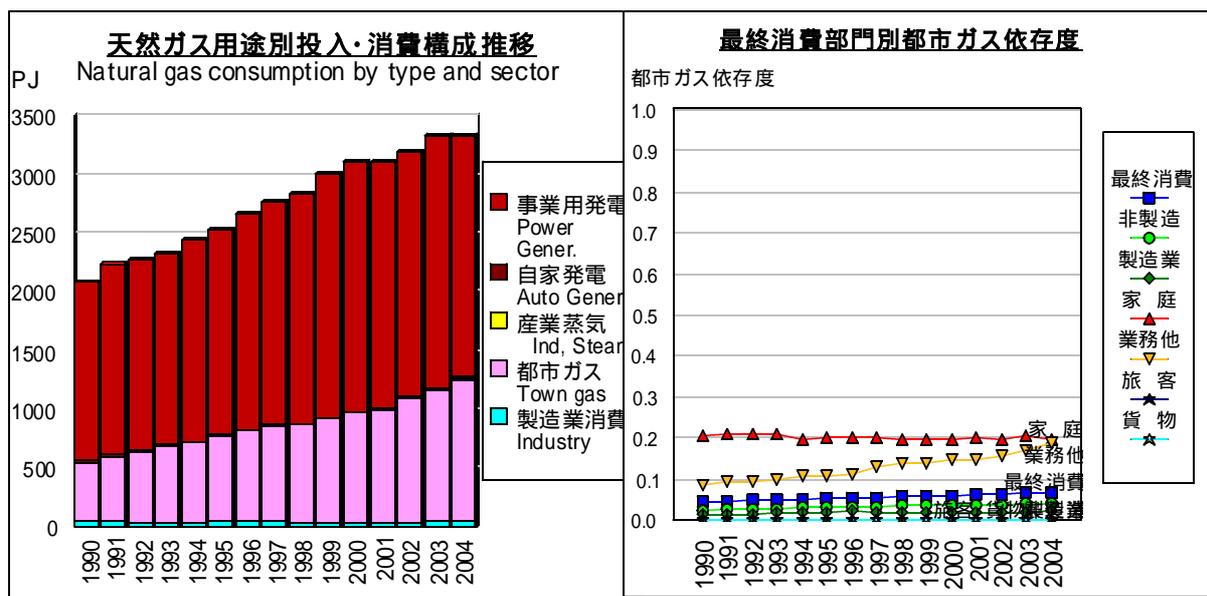
2) 天然ガス

天然ガスの約 60 %は、発電用燃料として消費されており、石炭・原子力発電などの他のエネルギー源への転換が可能であると考えられる。

天然ガスの約 40 %は都市ガス用原料として消費されているが、都市ガスについては水性ガスなどの石炭ガスや、バイオマスからの発生ガスなどで代替が可能であると考えられる。

さらに、都市ガスは最終エネルギー消費のいずれの部門においても 20 %を超える依存度となっている部門はなく、仮に天然ガスが経済合理的に他のエネルギー源に代替できない場合であっても、都市ガスの主な用途であるボイラー・給湯用途の最終エネルギー消費は、電気温水器・ヒートポンプ式給湯器などにより代替が可能であると考えられる。

[図 4-1-1-3,-4. 日本の天然ガス用途別構成・都市ガス依存度推移]



4-1-2. 過渡的状態の課題 2) 軽水炉の停止・高速増殖炉への代替

現状において、日本の一次エネルギー供給のうち原子力発電については 100 %軽水炉により供給されている。

軽水炉燃料の一部は、国内で商業規模の再処理が行われる予定であるが、現在日本が海外に委託している天然ウランの同位体濃縮においては、劣化ウランを日本に引き取らず同位体濃縮時に一部放棄している。従って、国内では高速増殖炉サイクルに移行できるだけの核燃料サイクルの体制整備はなおかなりの時間が掛かる状況にある。

一方、西暦 2100 年迄の世界においては、天然ウランの経済的な枯渇が見込まれることから、仮に原子力発電を利用し続けるというシナリオを採る場合、高速増殖炉-再処理サイクルを確立させてウラン資源の有効利用を図るため、以下の 5 つの段階での対応が必要である。

- 劣化ウランの海外からの引取及び軽水炉燃料の再処理時の回収・蓄積
- 高速増殖炉燃料の製造体制の確立
- 軽水炉の段階的な高速増殖炉への置換
- 高速増殖炉燃料の再処理体制の確立
- 高速増殖炉燃料の再処理による高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設の整備

高速増殖炉の燃料となるプルトニウムの再処理による生産過程の問題から、最も円滑に導入が進んだとしても高速増殖炉が既存軽水炉を置換する規模の導入が開始されるのは 2020 年頃であると考えられる。

4-2. 「過渡的状態」での遷移シナリオとその姿

4-2-1. 「過渡的状態」での遷移シナリオ

議論を簡素化するために、「過渡的状態」においては以下の4つの仮定^{*7}を設ける。

- 仮定J1: 日本の人口は、国立社会保障人口問題研「低位推計」で推移する
- 仮定J2: 1人当一次エネルギー供給水準は、現状程度で長期的に推移する
- 仮定J3: 国産の再生可能エネルギーの技術進歩は現在の水準で長期的に推移する
- 仮定J4: 国産化石燃料の再探掘や海外産のバイオマスの輸入は考慮しない

当該仮定の下で、現在から西暦2100年頃までの「過渡的状態」においては、エネルギー需給に関する遷移シナリオは以下のとおり3通り考えられる。

1) 供給制限・消費抑制シナリオ

西暦2050年に向けて、価格上昇・供給減少により経済的枯渇に向かう石油・天然ガスの供給減少に伴い、石炭や軽水炉による原子力発電の供給を制限し、再生可能エネルギーのみによるエネルギー需給を成立させるシナリオ。

2) 石炭供給・反原子力シナリオ

西暦2050年に向けて、価格上昇・供給減少が続き経済的枯渇に向かう石油・天然ガスを石炭と石炭由来の「合成液体燃料」などで代替するが、高速増殖炉サイクルによる原子力発電を利用しないシナリオ。

3) 石炭・増殖炉併用シナリオ

西暦2050年に向けて、価格上昇・供給減少が続き経済的枯渇に向かう石油・天然ガスを石炭と石炭由来の「合成液体燃料」などで代替し、さらに高速増殖炉サイクルによる原子力発電を併用してエネルギー供給を行うシナリオ。

[表 4-2-1-1. 「過渡的状態」での超長期エネルギー需給の遷移シナリオ]

内容 / シナリオ	供給制限・消費抑制	石炭供給・反原子力	石炭・増殖炉併用
最終消費抑制		×	×
石炭の供給制限		×	×
原子力発電の供給制限			×

4-2-2. 供給制限・消費抑制シナリオ

当該シナリオは、西暦2050年に向けて価格上昇・供給減少により経済的枯渇に向かう石油・天然ガスの供給減少に伴い、石炭や軽水炉による原子力発電の供給を制限し、再生可能エネルギーのみによるエネルギー需給を政策的に成立させようとするシナリオである。

本来、石油・天然ガスの価格が上昇すれば、代替エネルギー源として相対的に廉価な石炭が輸入されるはずであるが、これを輸入制限などの規制的措置や輸入課税などの経済的措置により供給制限し、あるいは最終エネルギー消費側で同様の措置を採ることにより、石炭の相対的な経済的優位性を滅失させ、また高速増殖炉サイクルによる原子力発電も行わないことに

*7 これらの仮定は、超長期においては本質的な仮定ではない。仮に経済成長などにより1人当最終エネルギー消費が増加を続けた場合、本項での過渡的状態の条件がより早期かつ急激に生じると考え、逆に、1人当最終エネルギー消費が減少したり、再生可能エネルギーの技術進歩や海外調達が可能であれば、本項での過渡的状態の条件が遅延し緩和されると考えることとなる。

より、再生可能エネルギーのみが経済合理的に導入可能な状態に政策的に移行させた場合に該当する。

当該シナリオでは、他のシナリオと比較して量的・質的に以下のような特徴がある。

1) 量的特徴

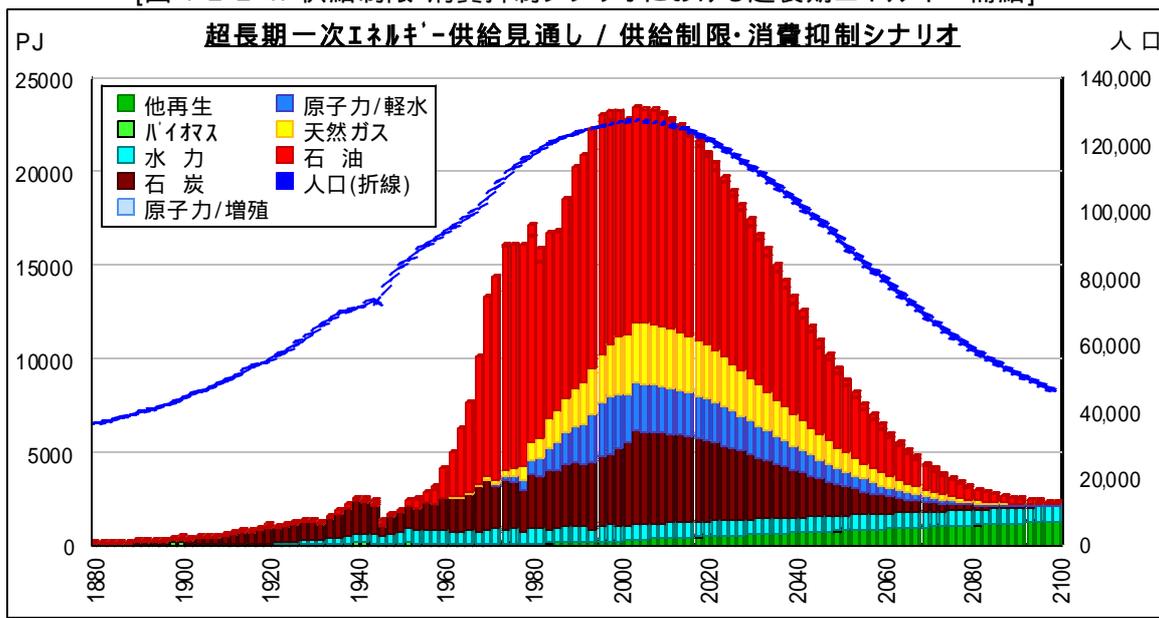
- 「西暦 2050 年に向けて 1 人当エネルギー供給を明治時代並に急激に抑制」
再生可能エネルギー以外の化石燃料・核燃料を、政策的に西暦 2050 年に向けて減少させていくため、1 人当エネルギー供給は急激に減少して推移し、明治時代並の水準に迄低下する。

2) 質的特徴

以下のような理由から、現代の日本人にとって本シナリオを採択することは生活水準の直裁的な低下を意味し耐乏を強いるものであるため、国内政策として合意することは非常に困難であるものと考えられる。

- 「トラック輸送用・農林水産用燃料の不足の懸念」
バイオマス以外の炭化水素の需給が急激に減少していくため、西暦 2050 年以降は石油・天然ガスなどを代替する「合成液体燃料」「合成気体燃料」としてはバイオマスを起源とするごくわずかな量だけが使える状態となる。このため、現状と比較すると、トラック輸送用・農林水産用燃料など石油製品依存度の高い部門でのエネルギー供給が制約されることになるので、国内の輸送需要の処理や食料生産の遂行が円滑に実施できるかどうかは精密に検証してみることが必要である。
- 「空調用・娯楽用家電用電力の不足の懸念」
一方、石炭・原子力発電などのエネルギー供給を制約するため、西暦 2050 年以降も電力として使えるのは水力発電などのエネルギー源に限定される。火力発電・原子力発電を逐次廃止していくので、現状と比較すると 1 人当で使用できる電力量は大幅に制限される。
1 人当電力供給が江戸時代末期～明治時代前期並の水準に迄低下した場合、家庭部門で使えるのは事実上照明や厨房など生活必需用途に制限されることになると考えられる。

[図 4-2-2-1. 供給制限・消費抑制シナリオにおける超長期エネルギー需給]



4-2-3. 石炭供給・反原子力シナリオ

当該シナリオは、西暦 2050 年に向けて価格上昇・供給減少により経済的枯渇に向かう石油・天然ガスの供給減少に伴い、石炭と石炭由来の「合成液体燃料」などで代替するが、高速増殖炉サイクルによる原子力発電を利用せず軽水炉を順次廃止していくシナリオである。

石油・天然ガスの価格が上昇すれば、石炭や石炭由来の「合成液体燃料」あるいは廉価な再生可能エネルギーなどがこれらを代替していくと考えられ、政府が供給制限・消費抑制策をとらず、また高速増殖炉サイクル路線を断念・放棄すれば自動的にこのシナリオが成立する可能性が高いものと考えられる。

当該シナリオでは、他のシナリオと比較して量的・質的に以下のような特徴がある。

1) 量的特徴

- 「西暦 2050 年に向けて 1 人当エネルギー供給は安定的に推移」

石油・天然ガスや軽水炉による原子力発電が経済的に枯渇していった後を石炭が埋めていくため、石炭の価格が上昇することが見込まれるが、1 人当たりエネルギー供給は西暦 2050 年頃に向けて安定的に推移させることが可能であると見込まれる。

2) 質的特徴

- 「西暦 2030 年頃から、エネルギー供給を石炭に全面依存し危険度大」

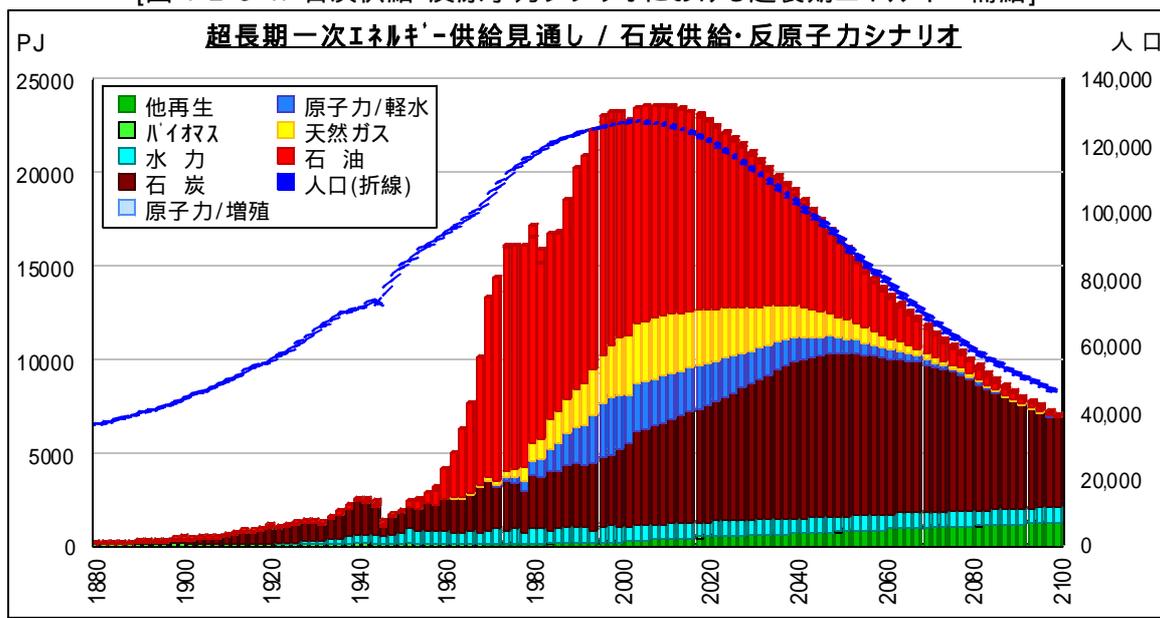
西暦 2050 年頃から液体燃料・気体燃料から電力に至るほぼ全部のエネルギー源を海外から輸入される石炭に依存することとなる。

バイオマス・再生可能エネルギーなどのうち相対的に廉価なものは導入が進むと考えられるが、それ以外のものは石炭の価格が十分上昇した後に代替が進んでいくものと考えられる。

当該シナリオは、石炭が妥当な価格水準で海外から長期的に輸入可能であることを前提としているが、このような状況が長期的に継続するとは考えにくい問題点がある。

石炭が入手可能であっても、価格が不安定な状態で高騰しながら推移した場合、国内の政治経済が混乱し、結果としてエネルギー供給の不足や生活水準の低下をもたらしてしまう危険性が高いものと考えられる。

[図 4-2-3-1. 石炭供給・反原子力シナリオにおける超長期エネルギー需給]



4-2-4. 石炭・増殖炉併用シナリオ

当該シナリオは、西暦 2100 年に向けて価格上昇・供給減少により経済的枯渇に向かう石油・天然ガスの供給減少に伴い、石炭と石炭由来の「合成液体燃料」などで代替し、さらに高速増殖炉サイクルによる原子力発電を併用してエネルギー供給を行うシナリオである。

石油・天然ガスの価格が上昇すれば、石炭や石炭による「合成液体燃料」あるいは廉価な再生可能エネルギーがこれらを代替していくが、電力の相当部分を高速増殖炉サイクルによる原子力発電で賄うことにより、海外から輸入される石炭への過度のエネルギー供給の集中が回避される利点がある。

当該シナリオでは、他のシナリオと比較して量的・質的に以下のような特徴がある。

1) 量的特徴

- 「西暦 2050 年に向けて 1 人当エネルギー供給をほぼ現状で維持」

石油・天然ガスや軽水炉による原子力発電が経済的に枯渇していった後を石炭と高速増殖炉による原子力発電が埋めていくため、石炭の価格上昇はさらに相対的に緩慢となることを見込まれる。このため、1 人当たりエネルギー供給は西暦 2050 年頃に向けてほぼ現状を維持することが可能であると見込まれる。

2) 質的特徴

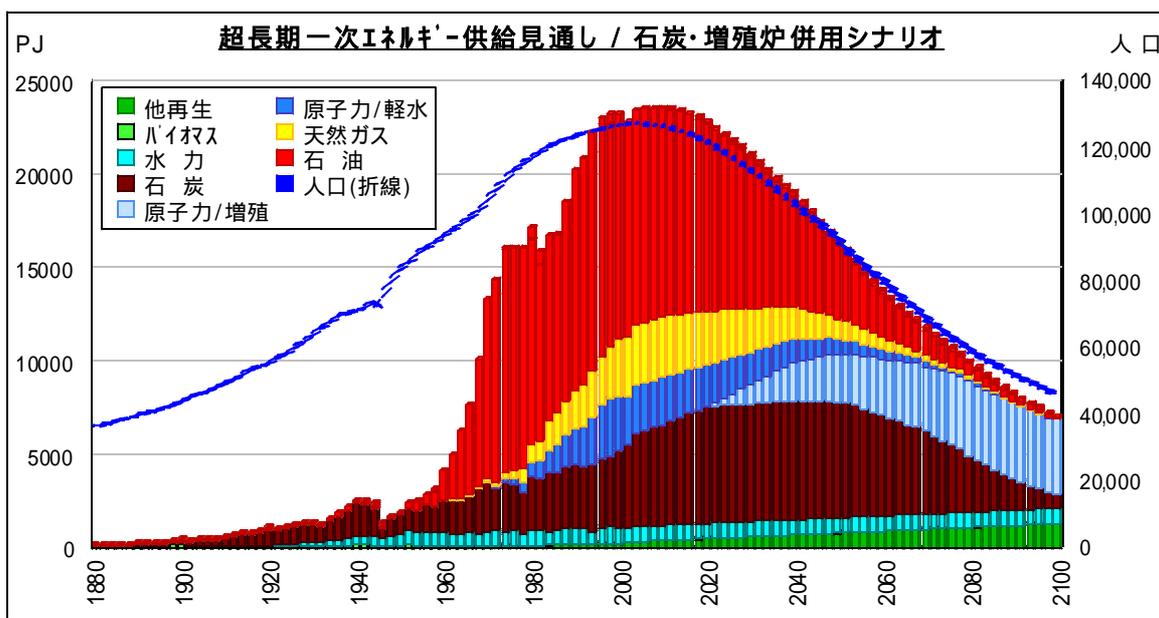
- 「西暦 2030 年頃から、エネルギー供給は石炭、次いで高速増殖炉により代替」

西暦 2050 年頃から液体燃料・気体燃料などは石炭由来の「合成液体燃料」「合成気体燃料」により代替されると見込まれる。

一方、電力の大部分は高速増殖炉サイクルによる原子力発電と水力発電で賄われると見込まれる。

さらに、西暦 2080 年頃から一次エネルギー供給の大部分は原子力発電と再生可能エネルギーとなり、脱化石燃料化とエネルギー起源CO2 排出抑制の両立が実現することとなる。

[図 4-2-4-1. 石炭・増殖炉併用シナリオにおける超長期エネルギー需給]



4-2-5. 「過渡的状态」での遷移シナリオの比較と評価

1) 世界情勢との整合性

西暦 2100 年に向けた「過渡的状态」において、3つの遷移シナリオのうち「供給制限・消費抑制」シナリオについては、急激なエネルギーの供給制限と消費抑制策によって「持続可能状態」へ遷移しようとするものであるが、日本以外の先進国は高速増殖炉サイクルによる原子力発電を指向し、発展途上国では石炭の高度利用を指向すると考えられるため、このような政策措置は「過剰適応」であり、他の国々において類似の政策が採られる可能性は殆どないと考えられる。

「石炭供給・反原子力」シナリオについては、西暦 2050 年以降先進国・発展途上国とも石炭の入手を巡って国際的な緊張が高まることが予想され、価格の急激な高騰や戦略的な供給途絶などにより経済社会に大きな打撃を受けるなど、エネルギー安全保障上の危険性が高い者と評価される。さらに、当該シナリオの下では日本のエネルギー起源CO2排出量は西暦 2080 年頃迄増加を続ける結果となり、気候変動問題という観点から見ても問題がある。

「石炭・増殖炉併用」シナリオについては、日本以外の先進国や上位発展途上国での「持続可能性」に向けての政策と方向性が一致するものである。

2) 国内政策の実行可能性

西暦 2100 年に向けた「過渡的状态」において、3つの遷移シナリオのうち「供給制限・消費抑制」シナリオについては、急激なエネルギーの供給制限と消費抑制政策によって「持続可能状態」へ遷移しようとするものであるが、このような政策措置は社会経済への深刻な影響をもたらすものであり、当該措置が国内政策として合意され実行される可能性は極めて低いと考えられる。

「石炭供給・反原子力」シナリオについては、エネルギー安全保障や気候変動問題に全く配慮していないものではあるが、エネルギーの厳しい供給制限・消費抑制政策や、高速増殖炉サイクルの推進に関する政治的な合意が得られなかった場合に「消去法」で採択されてしまう可能性がある。

「石炭・増殖炉併用」シナリオについては、エネルギー安全保障や気候変動問題上の問題は比較的少なく、エネルギーの厳しい供給制限・消費抑制政策などを必要としない点で優れている。但し、本シナリオにおいては、高速増殖炉サイクルの推進についての政治的な合意の形成が唯一の課題である。

[表 4-2-5-1. 「過渡的状态」での遷移シナリオとエネルギー需給諸元]

内容 / シナリオ	供給制限・消費抑制	石炭供給・反原子力	石炭・増殖炉併用
1人当エネルギー供給	明治時代並	安定的に推移	現状で推移
輸入石炭への依存度	非常に低	ほぼ全面依存	現状で推移
エネルギー起源CO2総量	2050年迄に急低下	徐々に低下	(両シナリオの中間)
1人当エネルギー起源CO2	2050年迄に急低下	2080年頃迄増加	徐々に低下
世界情勢との整合性	過剰適応	情勢逆行	整合
国内政策の実行可能性	低	高	中

5. 持続可能性と世界情勢から見た日本のエネルギー政策の超長期的課題

5-1. 「新・国家エネルギー戦略」

5-1-1. 「新・国家エネルギー戦略」の概要

経済産業省・資源エネルギー庁が 2006 年 5 月に公表した「新・国家エネルギー戦略」においては、西暦 2030 年頃迄の日本のエネルギー需給を念頭に、以下のような体系的な戦略を提示している。

(戦略の目標)

- 国民に信頼されるエネルギー安全保障の確立
- エネルギー問題と環境問題の一体的解決による持続可能な成長基盤の確立
- アジア・世界のエネルギー問題克服への積極的貢献

(戦略の基本的視点と対応項目)

- 1- 世界最先端のエネルギー需給構造の実現
 - 1. 省エネルギーフロントランナー計画 西暦 2030 年迄に 30 %以上の消費効率改善
 - 2. 運輸エネルギーの次世代化計画 西暦 2030 年迄に石油依存度を 80 %に低減
 - 3. 新エネルギーイノベーション計画 西暦 2030 年迄に太陽光発電費用を火力並に
 - 4. 原子力立国計画 西暦 2030 年迄に発電の原子力発電比率を 30 ~ 40 %以上に
- 2- 資源外交・エネルギー環境協力の総合的強化
 - 1. 総合資源確保戦略 西暦 2030 年迄に自主開発比率 40 %に
 - 2. アジア・エネルギー協力戦略 新エネ・化石燃料利用・原子力での協力強化
- 3- 緊急時対応体制の充実
- 4- 技術戦略・政策環境整備

5-1-2. 超長期的視点からの「新・国家エネルギー戦略」の評価

「新・国家エネルギー戦略」は西暦 2030 年迄の期間を対象としたものであり、石油・天然ガス資源はまだ存在し国際市場で平穏に入手可能である状態での対応を議論しているものである。

従って、西暦 2030 年迄の間に起きるであろう事態への対応理念を明確に示し、具体的な数値目標を伴った戦略を立案したという点では、問題点を的確に捉えた対応であり、高く評価できるものである。

しかし、西暦 2030 年以降に起きるであろう問題について何を準備しておくべきか、という点では、将来の不確実性に配慮するあまり迫力に欠ける内容となっている。

超長期的に考えた場合、エネルギーインフラの整備や社会経済活動の本格的対応など事前に長期間の準備を必要とする問題については、誤謬をおそれず警告を発し回避策を提示することが本来の政府の役割であると考えられる。

5-2. 超長期的なエネルギー政策の課題

5-2-1. 西暦 2040 年迄の課題

1) 石油の経済的枯渇への対応-1: 供給面での対応

西暦 2040 年迄の第一の課題は、世界的にみても国内的にみても石油の経済的枯渇である。現象面では、国際価格の連続的高騰や、産油国の供給制限、地域紛争による出荷停止などの問題が頻発することが予想される。

日本が採り得る供給面での対応としては 2 つ考えられる。

1 つ目は、中東などの産油国への協力強化による国際市場への供給制限回避である。

産油国の多くは、石油資源が経済的枯渇に向かった場合、国内利用分を留保し国際市場への供給を制限する政策を採ることが予想される。特に、中東産油国は石炭資源に恵まれておらず原子力発電技術もないため、国内でのエネルギー需給の転換体制が整うまで石油を温存する政策を採る可能性が高い。見方を変えれば、石炭利用技術や原子力発電技術を供与し将来への懸念を除去することが、石油資源が国際市場に安定的に供給される条件であると考えられる。

2つ目は、石油を代替する「合成液体燃料」の供給体制整備である。

天然ガス・石炭・バイオマスなどから「合成液体燃料」を製造する技術は既に存在しており、原油価格が高騰を続ければ相対価格の大きさに応じて商業ベースで自律的に導入され供給が増加していくものと見込まれる。しかし、海外での液化設備建設への資金供給や輸送体制の整備などの面でなお克服すべき課題が多く、西暦 2020 年頃からの円滑な供給体制整備に向けた準備が必要である。

2) 石油の経済的枯渇への対応-2: 需要面での対応

石油の経済的枯渇に対しては、価格高騰に伴い産業用の重油などは石炭・電力などへ、家庭用・業務用の灯油・LPGなどは電力へ徐々に転換されていくと考えられる。

最も転換が困難な運輸用・農林水産用のガソリン・軽油については、日本が採り得る需要面での対応としては3つ考えられる。

1つ目は、自動車などの燃費向上である。

内燃機関の効率化から燃料電池迄の様々な技術的対応が想定されがちであるが、発展途上国や移行経済国を視野に入れた場合、自動二輪車への回帰などの経済的対応が考えられる。

2つ目は、自動車などの燃料転換である。

西暦 2040 年迄の段階では、ガソリン・軽油から「合成液体燃料」への転換が当面の主流であると考えられる。西暦 2070 年迄の移行を考慮した場合、電池式電気自動車の技術開発や充電インフラ整備などの準備を進めていくことが必要である。

3つ目は、自動車から鉄道へのモーダルシフトである。

自動車以外の輸送機関では、航空機は「合成液体燃料」に移行すると考えられるが、航空輸送は極端に高価なものとなることが予想される。鉄道は電力に、船舶は石炭に収束していくと考えられるが、20 世紀の後半で一旦廃止に追い込まれた線路や港湾などの輸送インフラを再整備することは、相応の期間と巨額の公共投資を必要とすると考えられる。

見方を変えれば、鉄道・港湾などの整備が遅れた、自動車の自由な利用を前提とするような都市は原油価格の上昇と人口の減少とともに徐々に見捨てられていくと考えられる。

3) 軽水炉の廃止・高速増殖炉サイクル設備の整備

西暦 2040 年頃には、天然ウランも経済的枯渇に向かうことが予想されるため、寿命を迎える軽水炉を段階的に廃止し、高速増殖炉に移行させていくことが必要である。

高速増殖炉の運転においては、再処理・廃棄物中間貯蔵などのサイクル施設の操業が不可欠であり、遅くとも西暦 2040 年頃迄にはこれらの一連の設備を整備し、サイクルを完結させておくことが必要である。

4) 再生可能エネルギーの設備整備

再生可能エネルギーは、西暦 2040 年頃であってもエネルギー需給の数%を占めるにとどまると予想される。しかし、超長期的視野から見た場合再生可能エネルギーは「持続可能状態」での唯一のエネルギー源であり、その供給拡大に向けた取組みは「過熱せず・絶望せず」に淡々と継続されることが必要である。

5-2-2. 西暦 2070 年迄の課題

1) 天然ガスの経済的枯渇への対応

西暦 2070 年頃の第一の課題は天然ガスの経済的枯渇である。

西暦 2040 年頃から天然ガスを「合成液体燃料」として利用するようになると、天然ガス価格の急激な増加が見込まれる。このため、発電用・産業用の天然ガス利用などは経済原理に従い消滅すると考えられる。

家庭用・業務用の都市ガス等の気体燃料は、一部は石炭からの「合成気体燃料」に転換するが、大部分は相対的に廉価な電力に代替されると考えられる。

2) 石炭の価格上昇・安定供給確保への対応-1: 供給面での対応

西暦 2070 年頃の第二の課題は石炭資源の価格上昇と安定供給確保である。

西暦 2040 年頃から天然ガス・石炭が「合成液体燃料」として利用されるが、天然ガスが枯渇すると事実上唯一の「合成液体燃料」の原料となる良質の石炭資源の価格は上昇し、安定供給に支障を生じるようになると考えられる。

従って、西暦 2040 年頃から計画的に中国・インド・移行経済国など主要な産炭国で「日の丸合成液体燃料供給拠点」を整備していき、戦略的な供給制限の未然防止と安定供給の確保を図っていくことが必要である。

また、高速増殖炉サイクル施設を計画的に増設することにより、石炭へのエネルギー需要の集中と極端な価格形成を緩和することが必要である。

3) 石炭の価格上昇・安定供給確保への対応-2: 需要面での対応

西暦 2070 年頃においては、石炭資源は貴重な「合成液体燃料」の原料であり、単純な発電や小型ボイラー利用などに石炭を使うことは経済的に見合わなくなると考えられる。

このため、一般的な産業用需要については相対的に廉価な電力への転換が進むものと考えられる。この際、鉄鋼や一部の有機化学など石炭の利用がどうしても必要なプロセスについては、原子力や電力、場合によりバイオマスに転換するための技術開発などが必要であると考えられる。

[表 5-2-2-1. 超長期的なエネルギー需給と政策の課題 / 一次エネルギー供給・エネルギー転換]

	現 状	西暦 2040 年迄	西暦 2070 年迄	西暦 2070 年以降
[一次エネルギー供給]				
石油・天然ガス	資源開発・確保	供給抑制防止	(経済的枯渇)	--
石 炭	(開発停滞)	資源開発・確保	供給抑制防止	供給抑制防止
原子力	(開発停滞)	増殖サイクル導入	増殖サイクル拡大	核融合開発
再生可能エネルギー	導入促進	導入促進	導入促進	導入促進
[エネルギー転換]				
発電(火力発電)	LNG・石炭・石油	脱石油・LNG化	脱石炭・電力化	--
(原子力発電)	軽水炉	脱軽水炉・増殖化	増殖サイクル拡大	増殖サイクル拡大
都市ガス	導入促進	合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--
石油石炭製品				
産業・民生用	重油 ~ LPG	石炭・電力転換	脱石炭/電力化	--
		合成液体燃料化	電力転換	--
輸送・農林用	ガソリン・軽油	合成液体燃料化	電力転換	脱合成液体燃料化

[表 5-2-2-2. 超長期的なエネルギー需給と政策の課題 / 最終エネルギー消費]

現 状		西暦 2040 年迄	西暦 2070 年迄	西暦 2070 年以降
[最終エネルギー消費]				
産業(製造業)部門				
重油・LPG減	∧	脱石油化	(経済的枯渇)	--
		合成液体燃料化	(経済的枯渇)	--
都市ガス増	∧	脱都市ガス化	(経済的枯渇)	--
		合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--
石炭増		石炭利用拡大	脱石炭・電力化	(経済的枯渇)
系統電力停滞		電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大
再生可能E停滞		再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大
民生部門				
灯油・LPG減	∧	脱石油化	(経済的枯渇)	--
		合成液体燃料化	(経済的枯渇)	--
都市ガス増	∧	脱都市ガス化	(経済的枯渇)	--
		合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--
系統電力増		電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大
再生可能E停滞		再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大
輸送・農林部門				
ガソリン・軽油増		合成液体燃料化	合成液体燃料化	バイオ燃料化
電力(鉄道)停滞		E-ダクト化	鉄道利用拡大	鉄道利用拡大
(再生可能Eなし)		再生可能E導入	再生可能E拡大	再生可能E拡大

5-2-3. さらなる研究の必要性和不確実性

- 政治・経済・技術・資源など多面的な超長期展望研究の必要性 -

ここまでの議論は、既知の国際機関や日本政府による統計・見通しなどを基礎に展開してきたが、当然にこれらの見通しには前提としている条件があり、必ず一定水準の不確実性を伴っていると考えるべきである。

特に、超長期エネルギー需給を考える上では、人口の推移に関する各種の前提条件は非常に重要であるが、エネルギー需給が激変し政治経済に影響が及ぶことによって、出生率・死亡率に変化をもたらす可能性がある。

また、1人当一次エネルギー供給を考える上では、経済成長に伴う生活水準の変化やエネルギー価格の変化などの影響を考慮する必要があるが、長期にわたり計画経済体制・エネルギー統制価格の状況にあった発展途上国の経済とエネルギー需給の関係を推計することは非常に困難である。

さらに、本稿では考慮しなかったが、水力発電やバイオマス生産の拡大が、水資源需給や食糧需給に及ぼす影響は必ずしも明らかではなく、こうした側面からの政治経済への影響が再帰的にエネルギー需給に変化をもたらす可能性がある。

こうした点については、政治・経済・技術・資源など様々な分野の将来展望に関する知識を集積し、各分野でのあり得べき将来像の範囲や将来推計において与えている前提条件を揃えていくことによって、より不確実性の少ない将来展望を与えることが可能であると考えられる。

2006年現在、東京大学・大阪大学などでサステナブル・サイエンス研究が開始されたところであるが、本稿がこうした研究への一助となれば幸いである。

[図表]

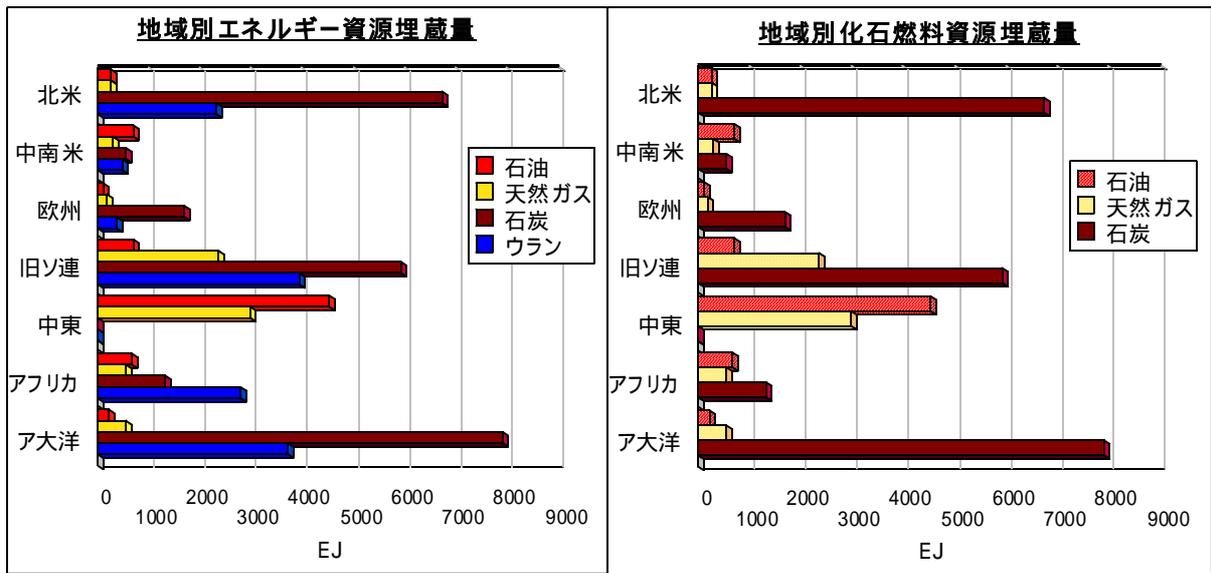
[表 1-2-1-1. 化石燃料・核燃料の可採年数(2004)]

	確認可採埋蔵量(R)	年生産量(P)	可採年数(R/P)
(固有単位)			
[第一段階枯渇]			
石油	1.1886 兆bbl	0.0293 兆bbl/年	40.6 年
天然ガス	180 兆m ³	2.7 兆m ³ /年	66.7 年
ウラン(軽水炉)	459 万t	3.6 万t/年	85.0 年*
[第二段階枯渇]			
石炭	9,091 億t	55.4 億t/年	164.0 年
ウラン(増殖炉)	--	--	~ 1,000 年
			(軽水炉の約 120 倍)
(エネルギー単位)			
石油	7,324 EJ	181 EJ/年	40.6 年
天然ガス	7,362 EJ	110 EJ/年	66.7 年
ウラン(軽水炉)	13,721 EJ	108 EJ/年	85.0 年*
石炭	24,182 EJ	147 EJ/年	164.0 年
(合計・平均)	52,589 EJ	546 EJ/年	96.3 年
(炭素単位)			
石油	136,964 MtC	3,376 MtC/年	40.6 年
天然ガス	102,332 MtC	1,535 MtC/年	66.7 年
石炭	597,297 MtC	3,640 MtC/年	164.0 年
(合計・平均)	836,593 MtC	10,827 MtC/年	

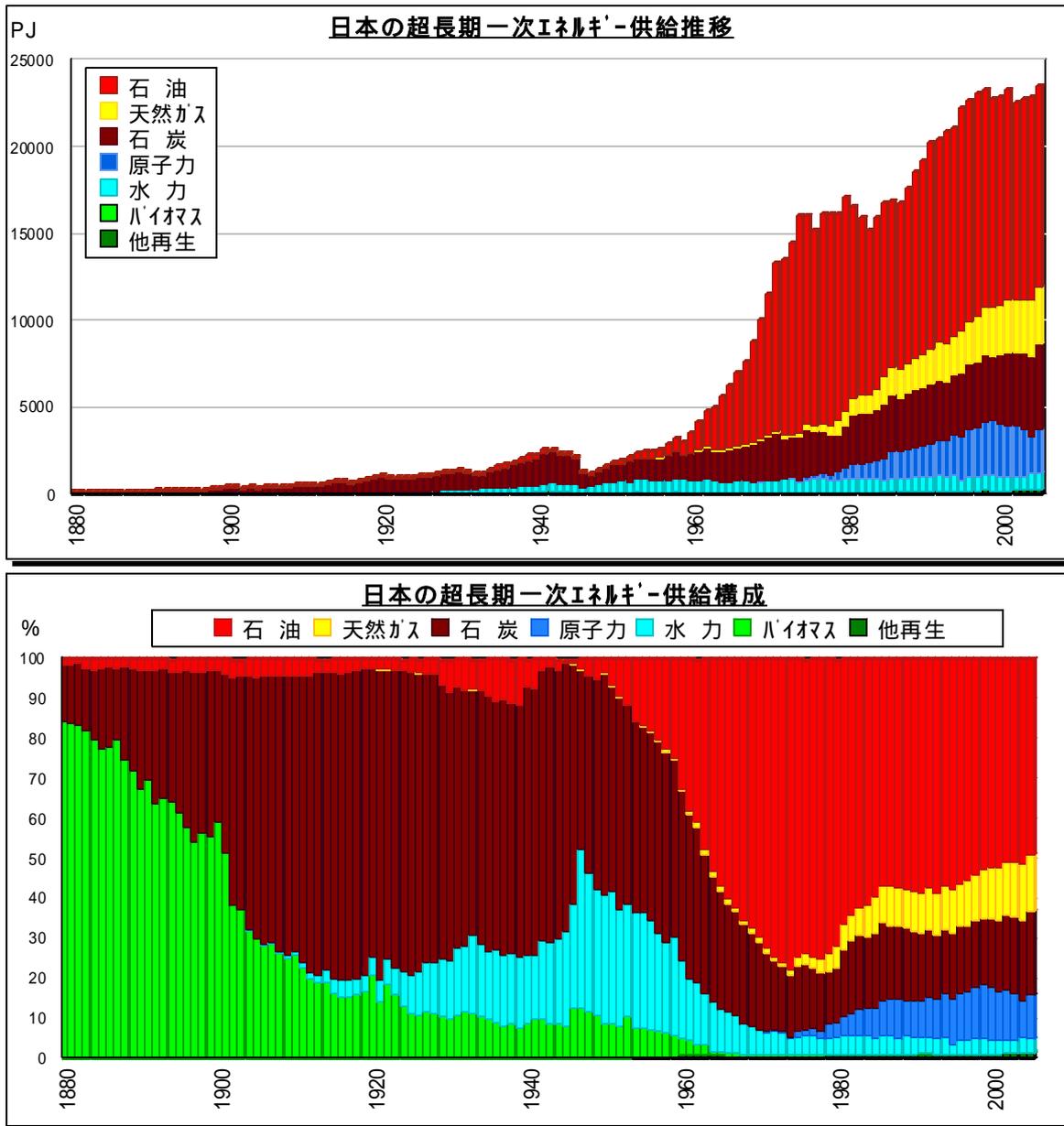
出典: 総合エネルギー統計(2004), BP統計・OECD-NEA/IAEA から筆者換算
 1 EJ: エクサジュール 10¹⁸ J, 使用単位は総発熱量。

* ウランの軽水炉利用による可採年数は、単純なR/Pでは 128 年となるが、現在の消費水準と在庫変動を補正すれば約 85 年となる(OECD-NEA/IAEA)。

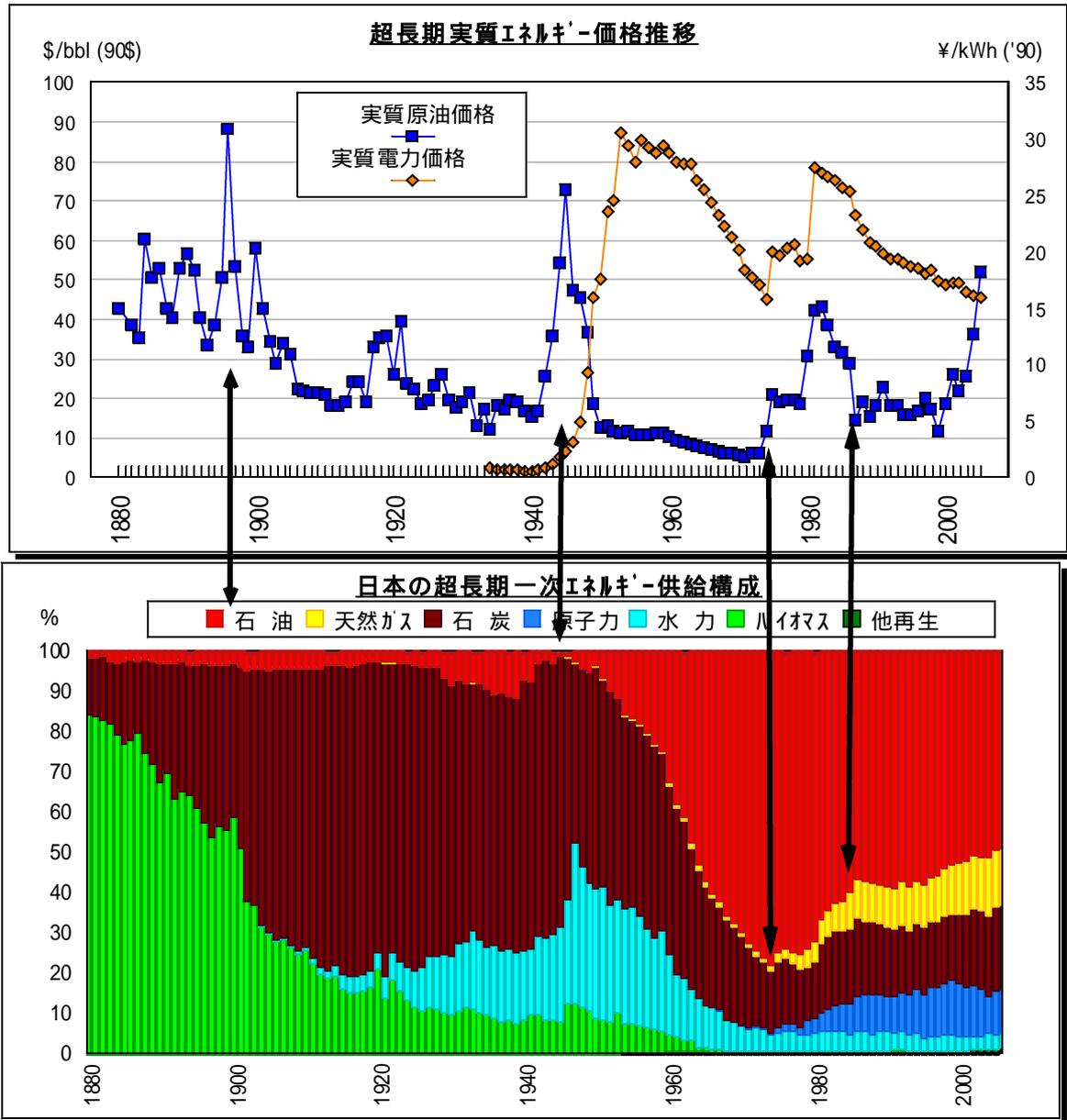
[図 1-2-2-1. 地域別エネルギー資源の確認可採埋蔵量分布]



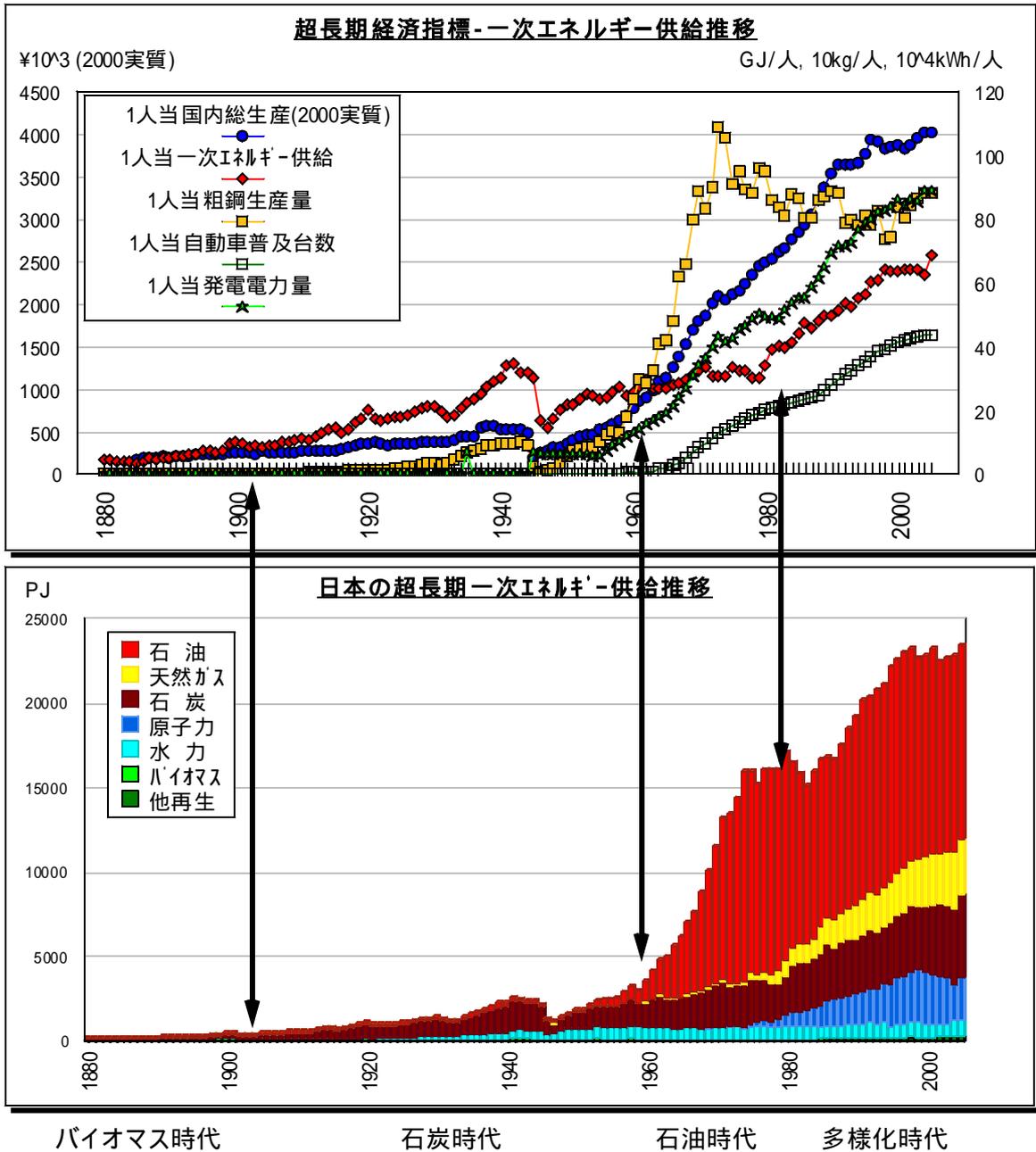
[図 2-1-1-1.,-2. 日本の超長期一次エネルギー供給推移]



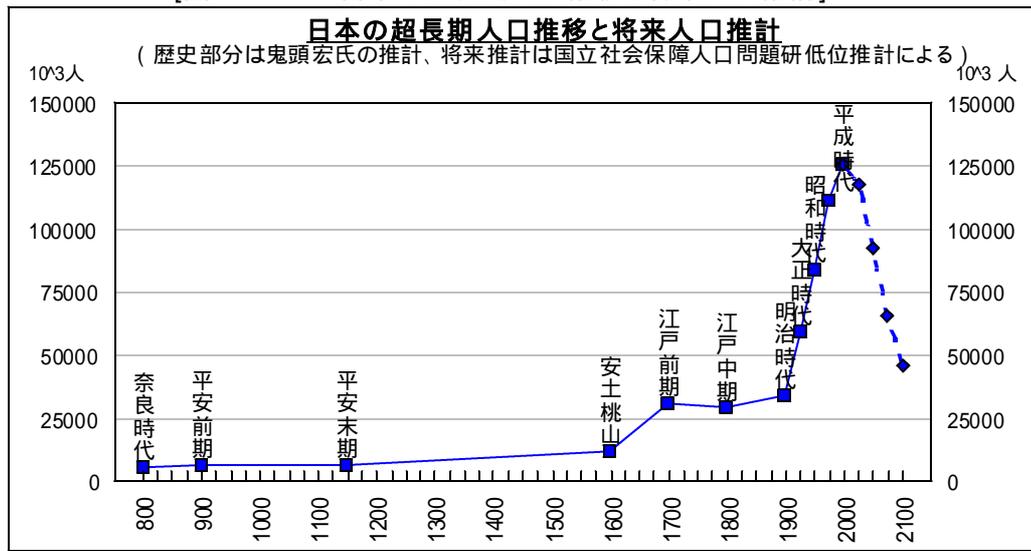
[図 2-1-2-1. 日本の超長期エネルギー価格推移]



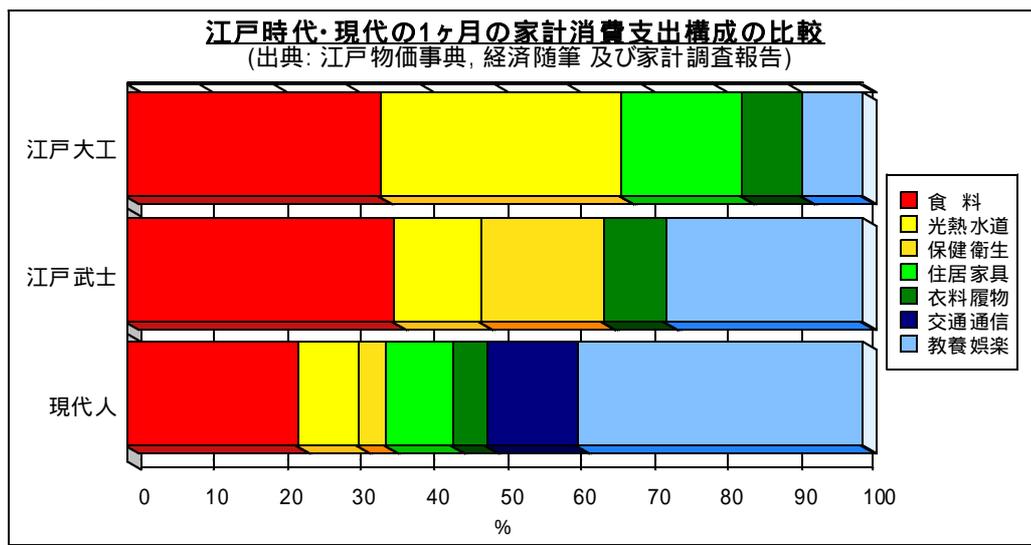
[図 2-1-2-2-3. 日本の主要経済指標と超長期エネルギー供給推移]



[図 2-2-1-1. 日本の超長期人口推移と将来人口推計]



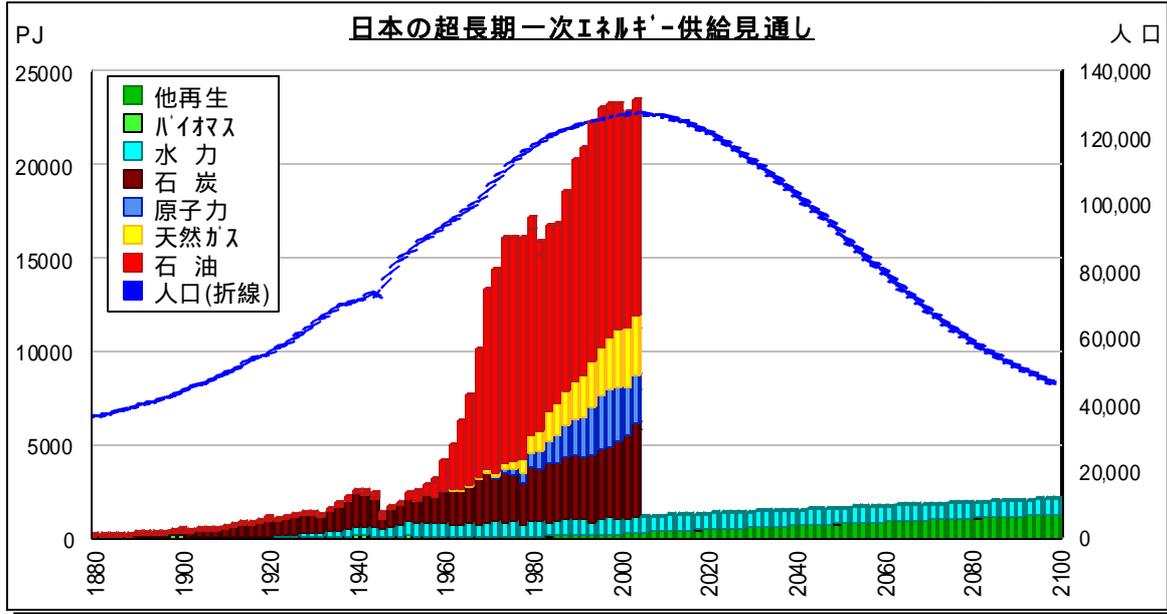
[図 2-2-1-2. 江戸時代・現代の1ヶ月の家計消費支出構成の比較]



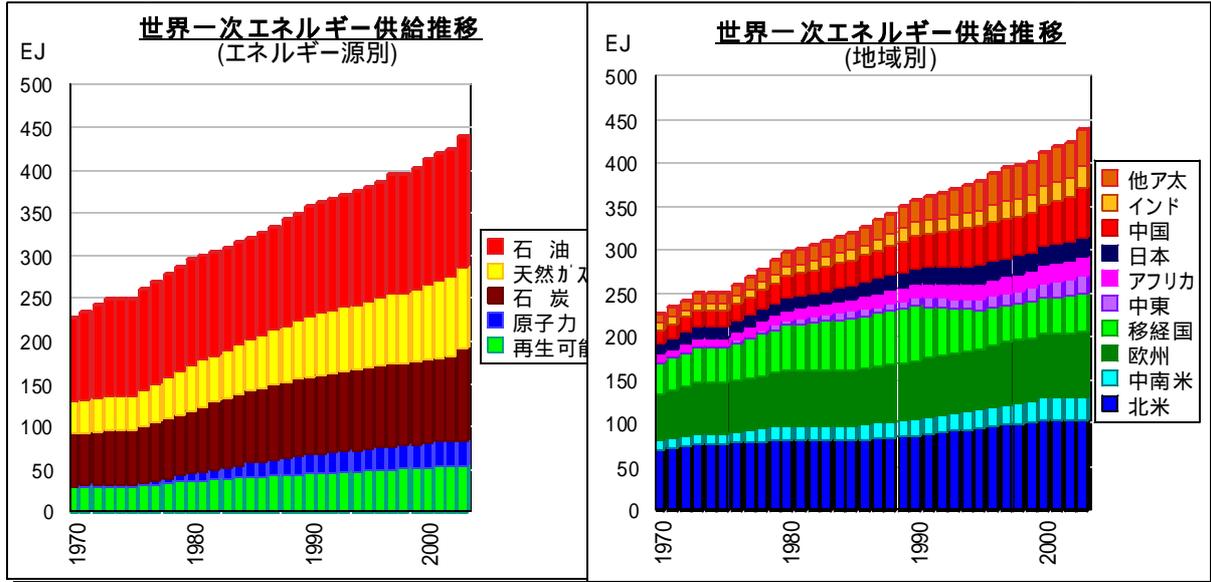
[表 2-2-2-1. 日本の一次エネルギー供給と実質国内総生産・エネルギー価格]

弾性値(t値) / 観測期間	1885-2005	1885-1945	1946-1975	1976-2005
実質国内総生産弾性値	+0.693(+27.7)	+1.537(+22.3)	+0.300(+11.2)	+1.200(+26.0)
エネルギー価格弾性値	-0.176(-3.00)	+0.084(+1.08)x	-0.130(-3.53)	+0.062(+2.08)x

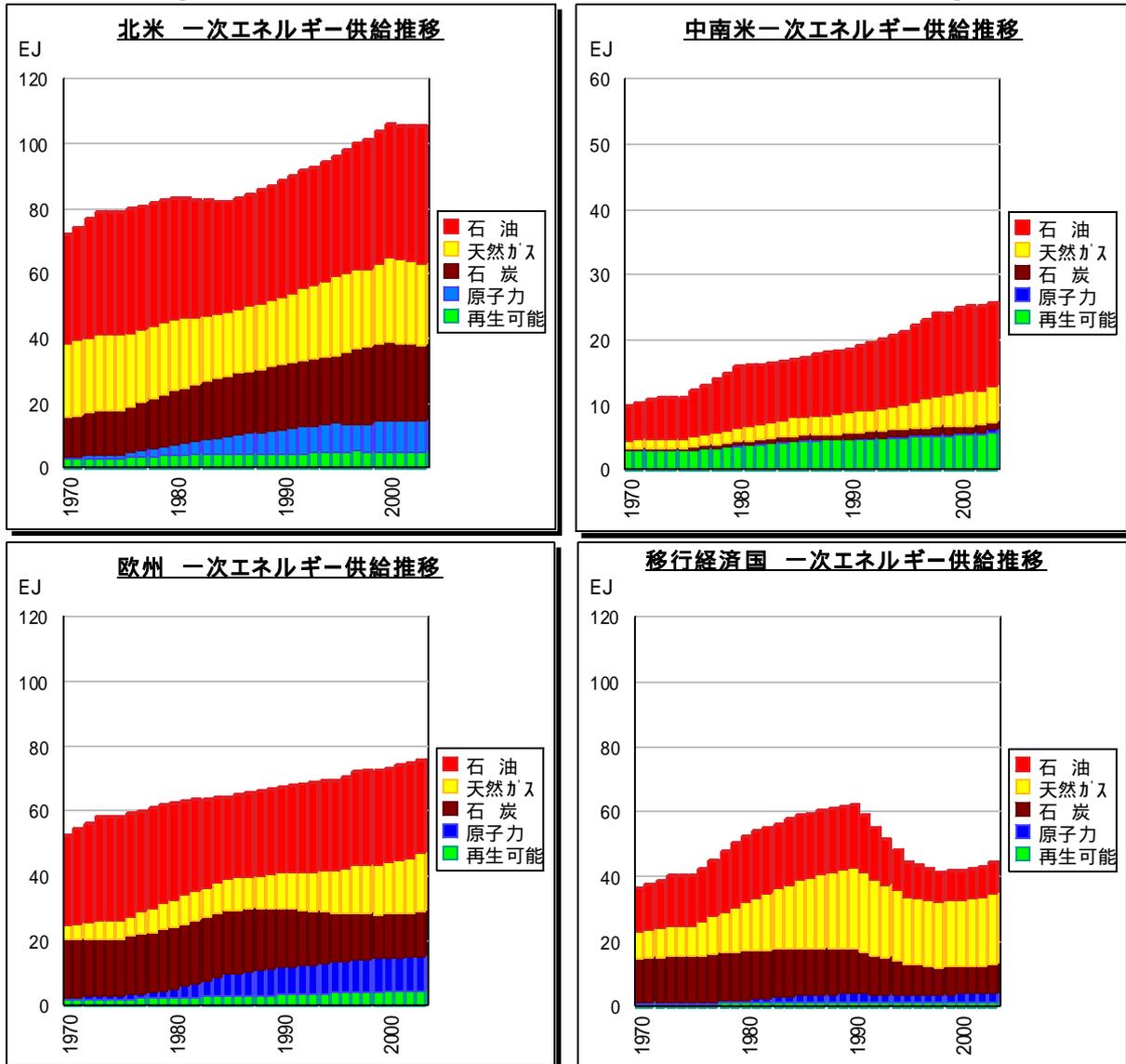
[図 2-2-3-1. 「過渡的状态」の超長期一次エネルギー供給見通し]

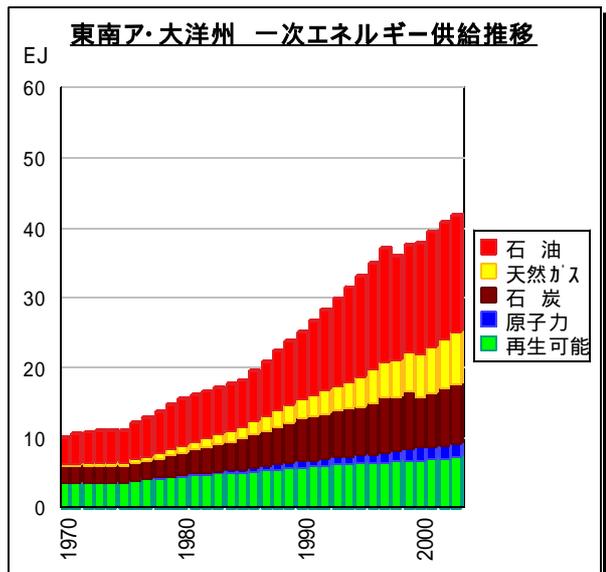
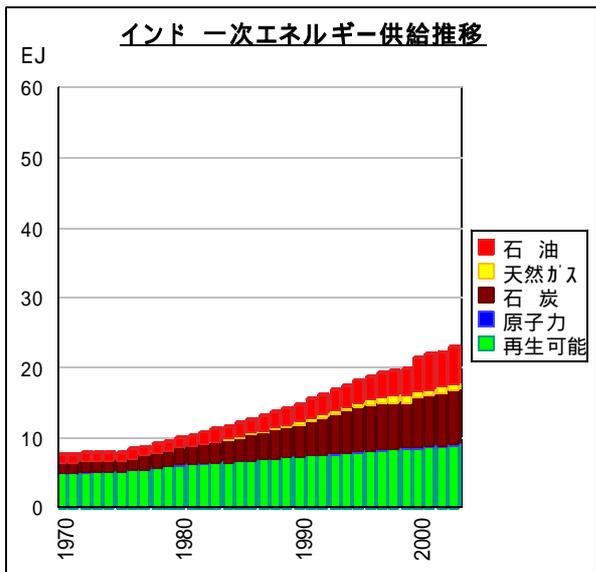
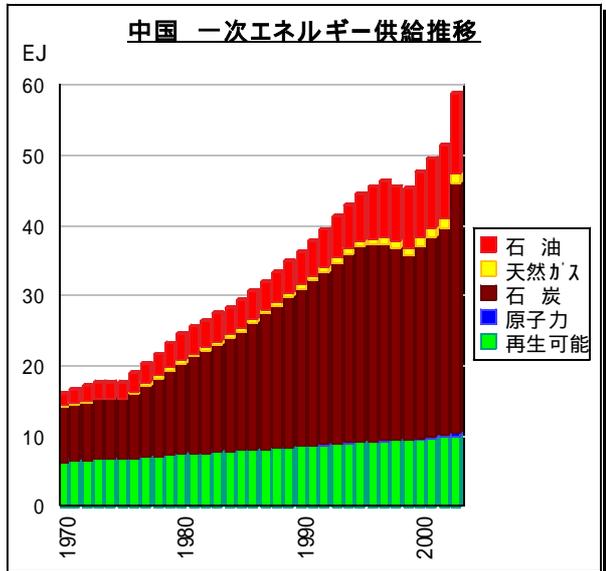
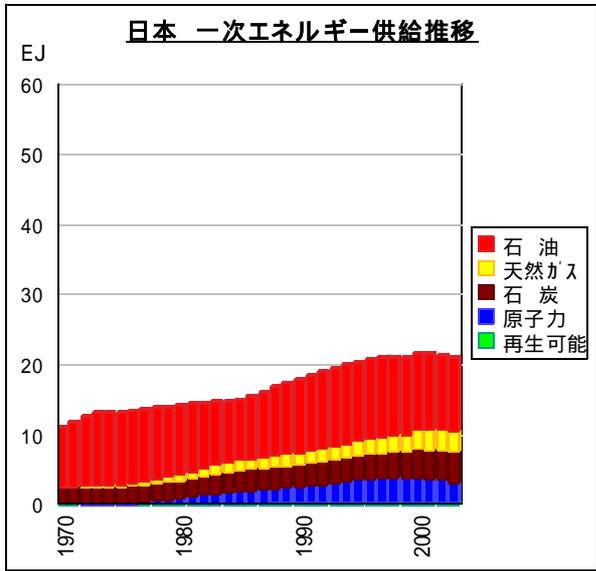
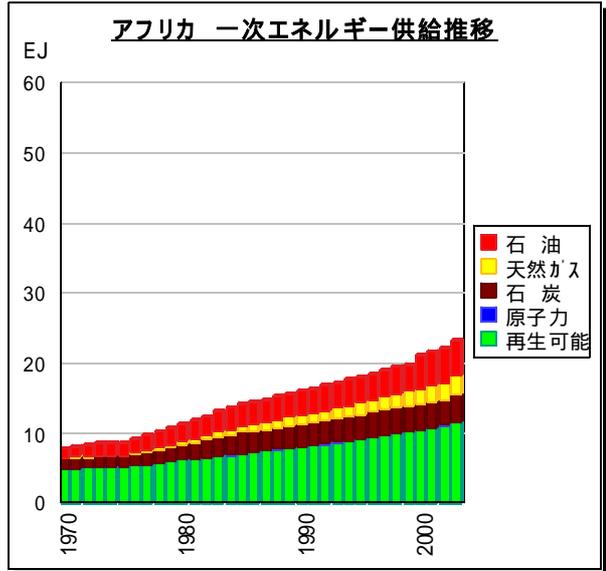
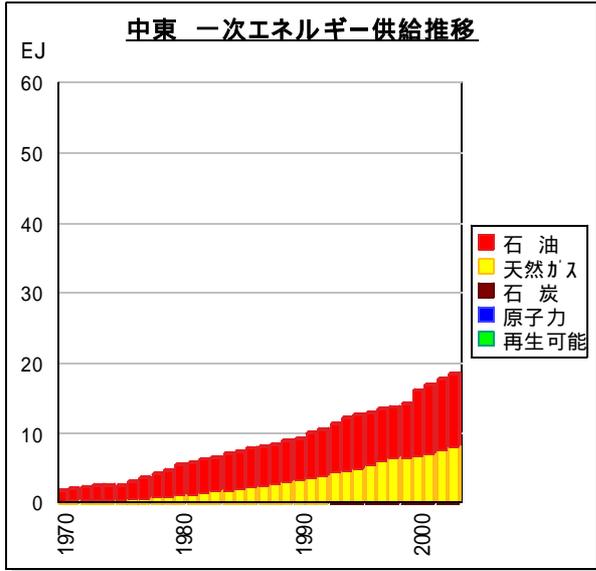


[図 3-1-1-1,-2. 世界の一次エネルギー供給推移 / エネルギー源別・地域別]

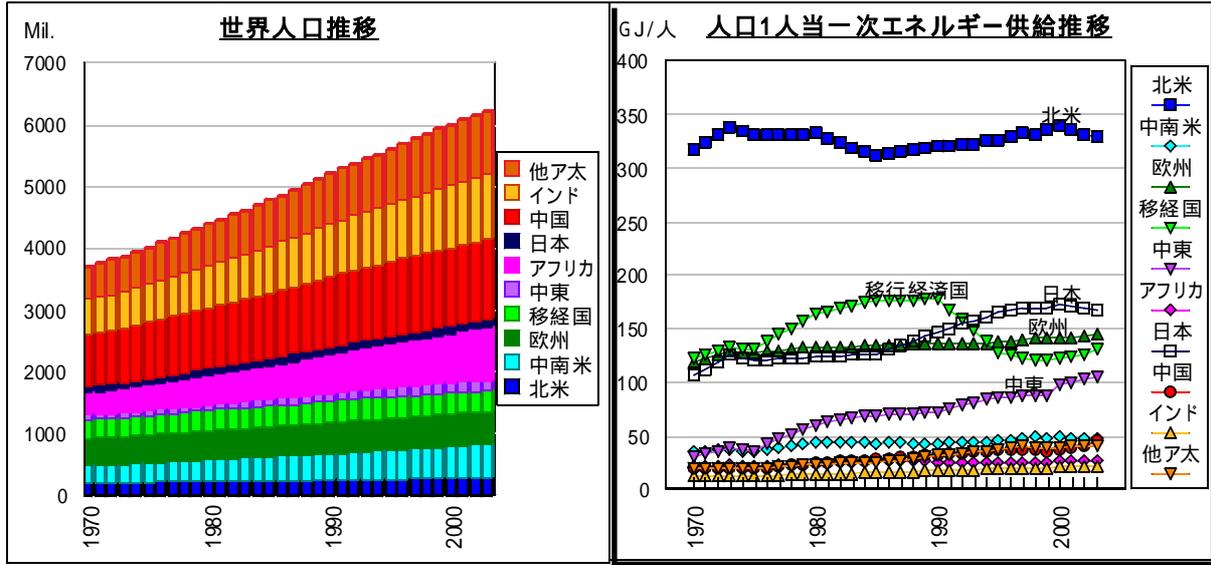


[図 3-1-1-3. ~ 13. 地域別・エネルギー源別一次エネルギー供給推移]

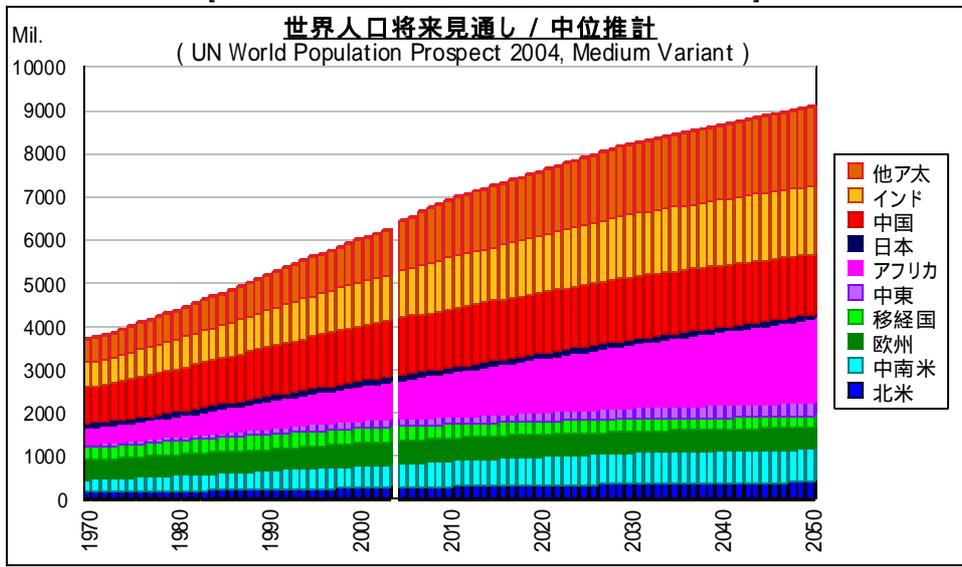




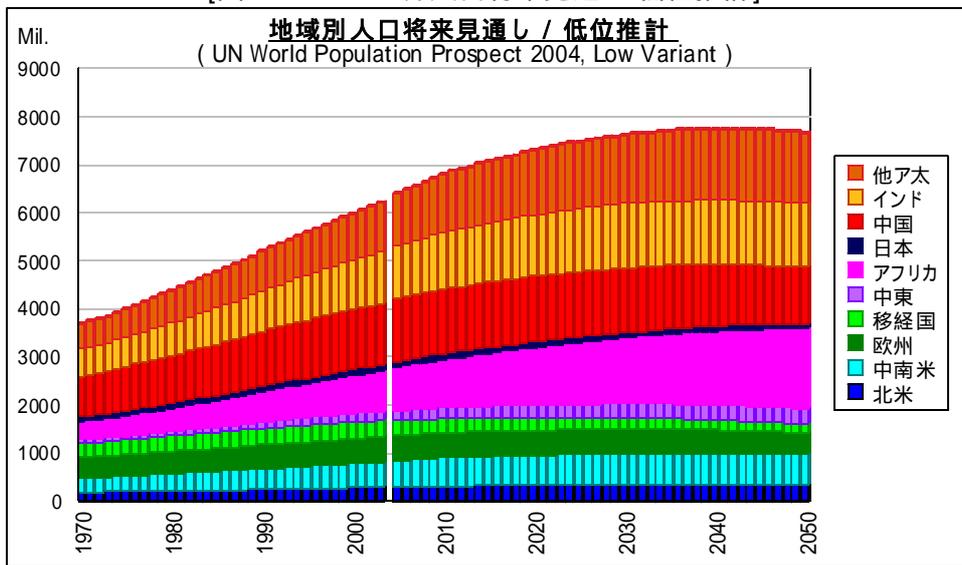
[図 3-1-2-1,-2. 世界人口推移、1人当一次エネルギー供給推移]



[図 3-1-2-3. 世界人口将来見通し/中位推計]



[図 3-1-2-4. 世界人口将来見通し/低位推計]



[表 3-1-2-1. 世界の一次エネルギー供給と実質国内総生産・エネルギー価格]

回帰式 $\ln(\text{TPEi}(t)) = a0 + a1 * \ln(\text{GDPRi}(t)) + a2 * \ln(\text{PO}(t)) + a3 * \ln(\text{TPEi}(t-1))$

TPEi(t) i地域 t年の一次エネルギー総供給 (EJ) (1971 ~ 2003 年)

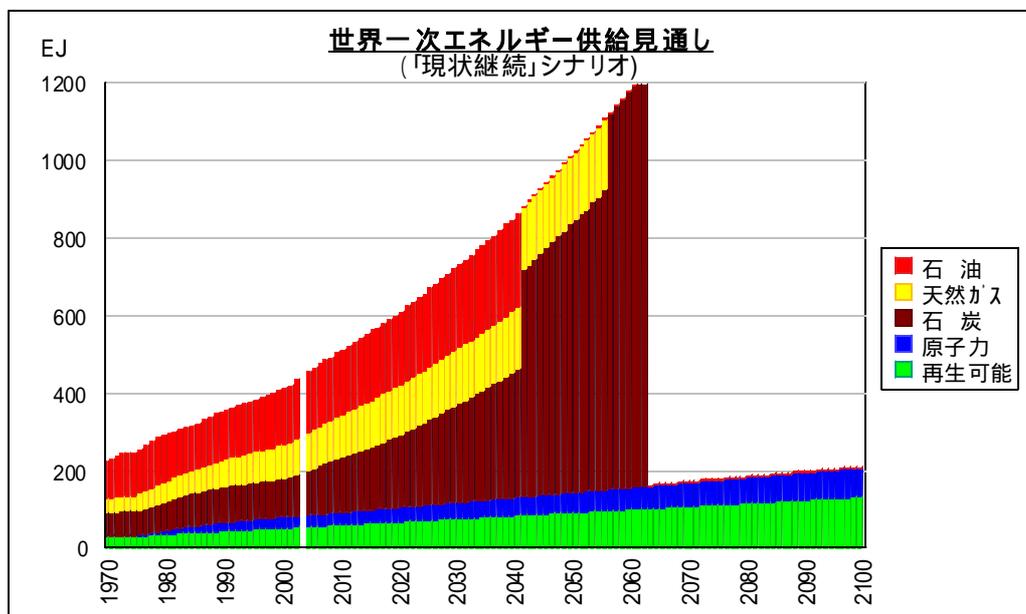
GDPRi(t) i地域 t年の実質国内総生産 (2000 年US\$)

PO(t) t年の実質国際原油市場価格 (2000 年US\$)

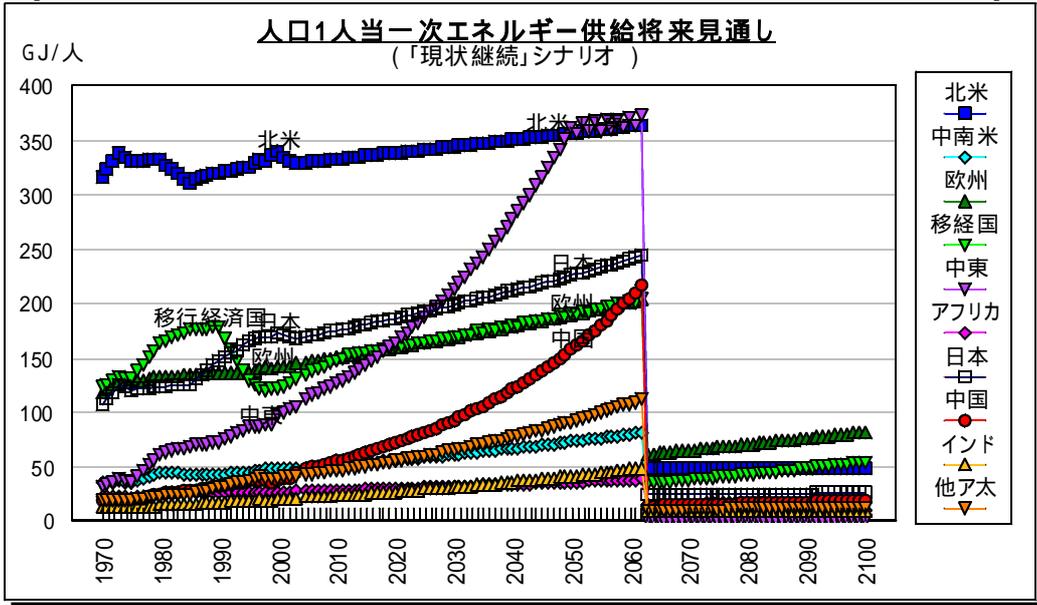
a0 定数項、 a1 GDPR弾性値、 a2 油価弾性値、 a3 慣性項弾性値

地域/弾性値 (t値)	実質GDP弾性値	油価弾性値	慣性項弾性値	定数項	R^2
北米	+0.006(1.023)x	-0.017(7.420)	+0.883(18.72)	+0.667(106.7)	0.932
欧州	+0.093(3.658)	+0.001(0.276)x	+0.545(4.958)	+1.347(239.9)	0.982
日本	+0.173(7.211)	-0.032(8.238)	+0.713(18.81)	-0.256(25.57)	0.996
移行経済国	+0.316(7.897)	-0.017(1.945)	+0.662(14.67)	-0.614(30.24)	0.982
中南米	+0.431(5.395)	-0.009(1.545)	+0.636(9.919)	-2.109(146.9)	0.979
東南ア・大洋州	+0.273(2.408)	-0.010(1.059)x	+0.705(5.749)	-1.007(45.92)	0.994
中国	+0.054(1.475)x	+0.020(1.852)x	+0.848(7.944)	+0.168(6.237)	0.989
インド	+0.002(0.031)x	+0.009(1.788)x	+1.008(10.35)	-0.044(3.143)	0.993
中東	+0.124(1.446)x	-0.008(0.477)x	+0.983(32.24)	-0.936(24.38)	0.988
アフリカ	+0.076(1.103)x	+0.006(0.878)x	+0.979(15.65)	-0.447(31.80)	0.962

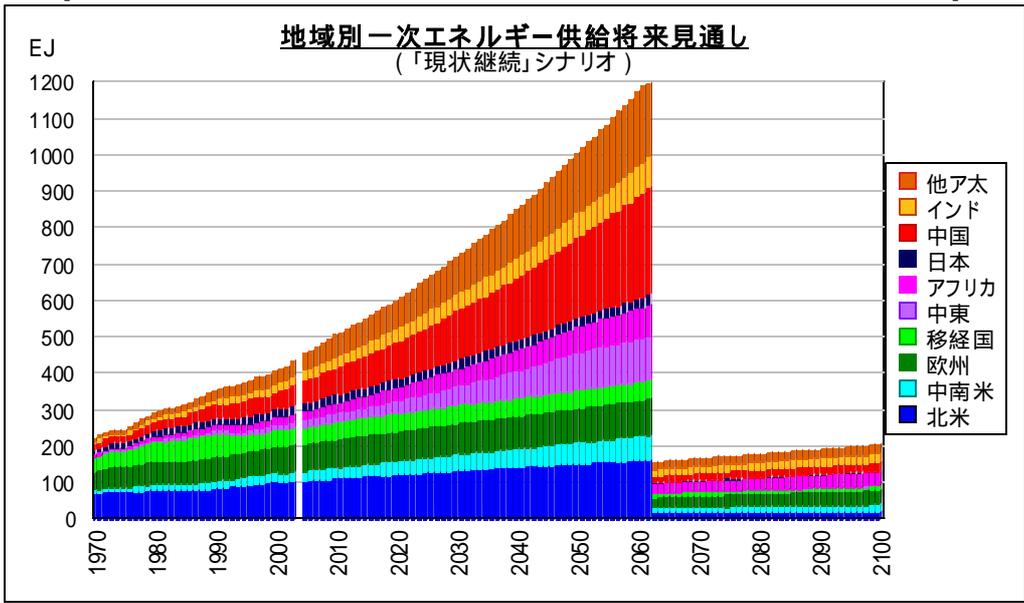
[図 3-1-3-1. 「現状継続」シナリオでの世界の一次エネルギー供給見通し]



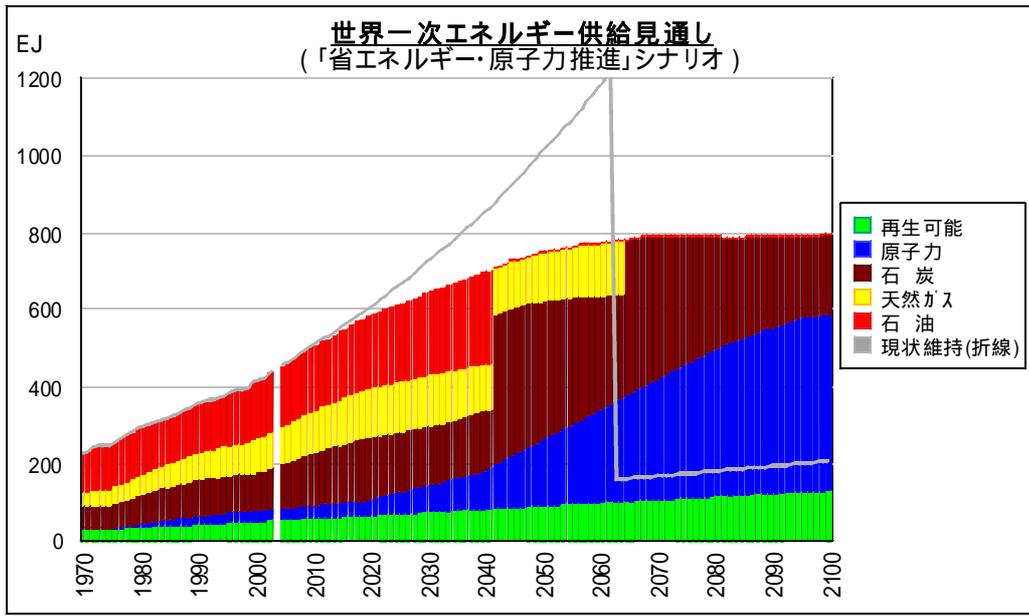
[図 3-1-3-2. 「現状継続」シナリオでの世界の1人当一次エネルギー供給見通し]



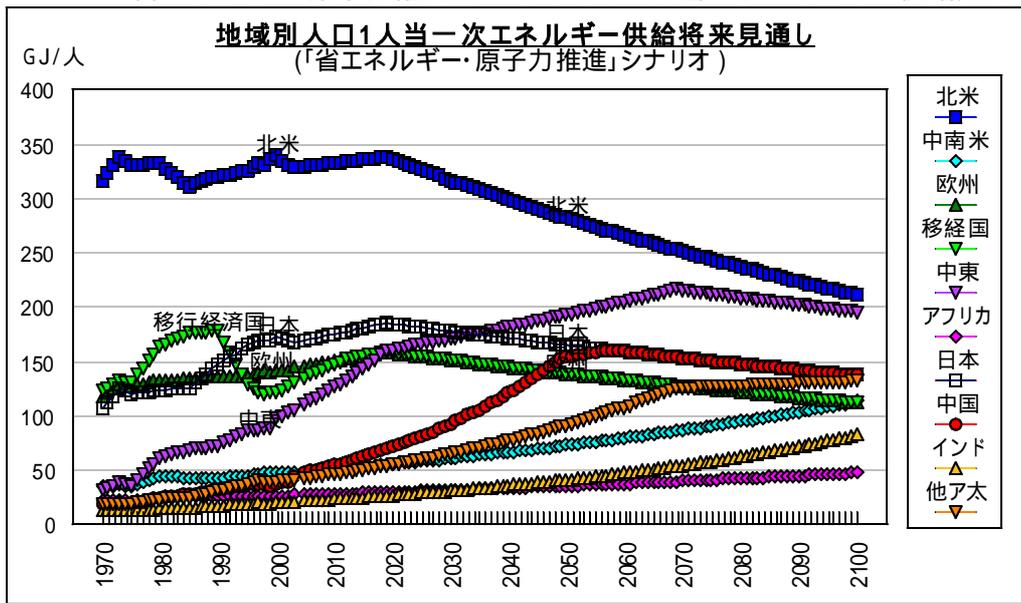
[図 3-1-3-3. 「現状継続」シナリオでの世界の一次エネルギー供給見通し]



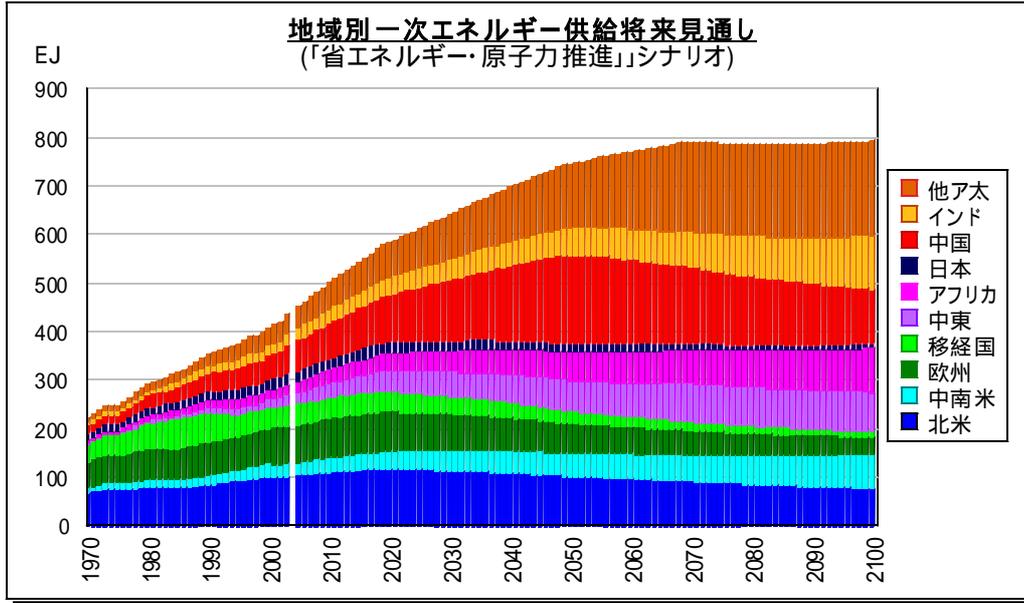
[図 3-2-2-1. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの世界の超長期一次エネルギー供給見通し]



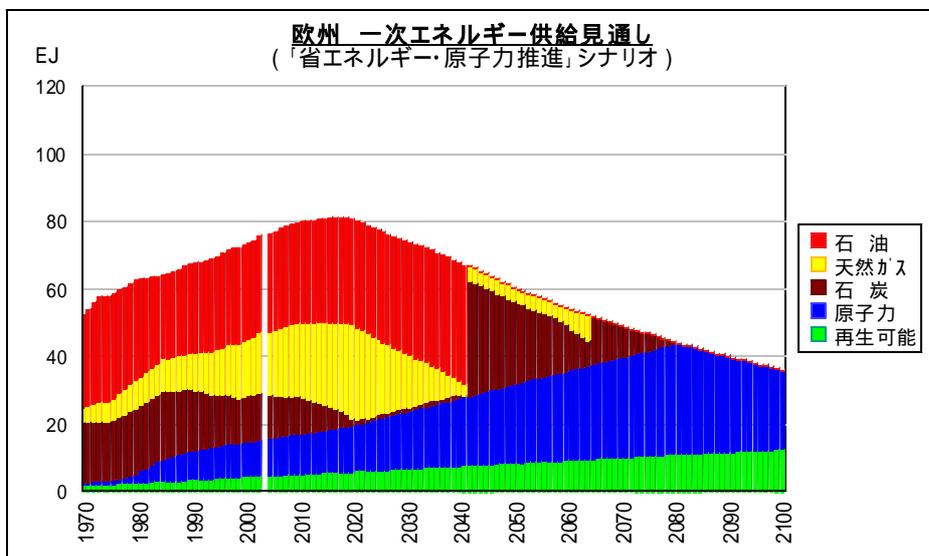
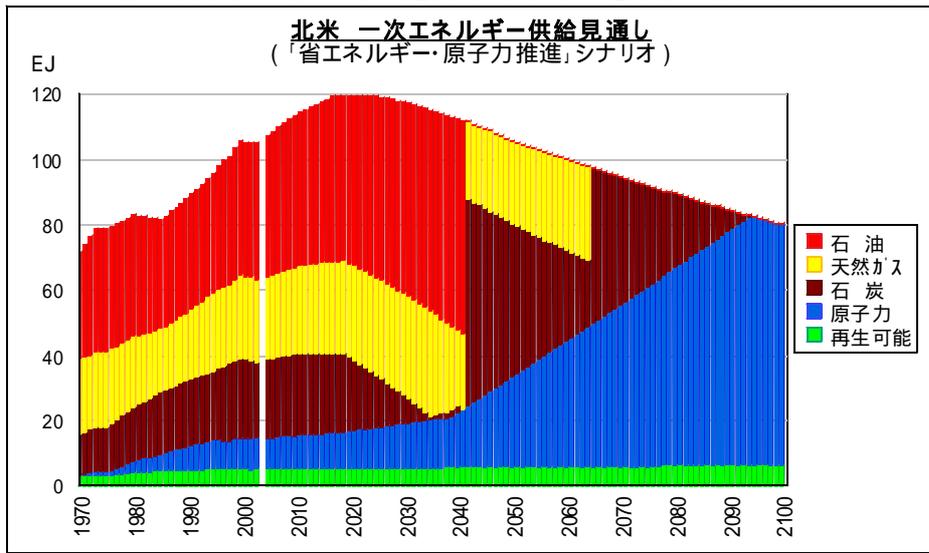
[図 3-2-2-2. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの1人当一次エネルギー供給将来見通し]

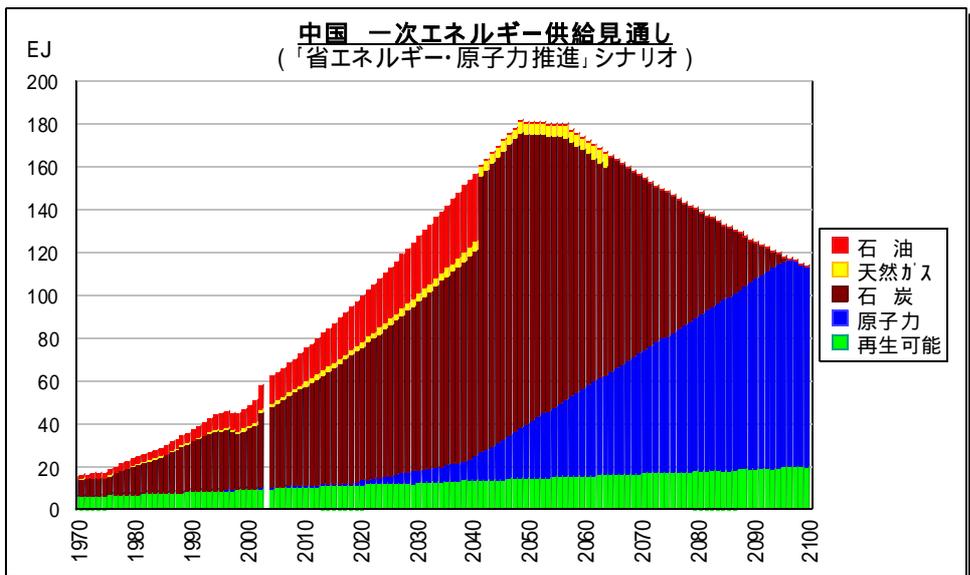
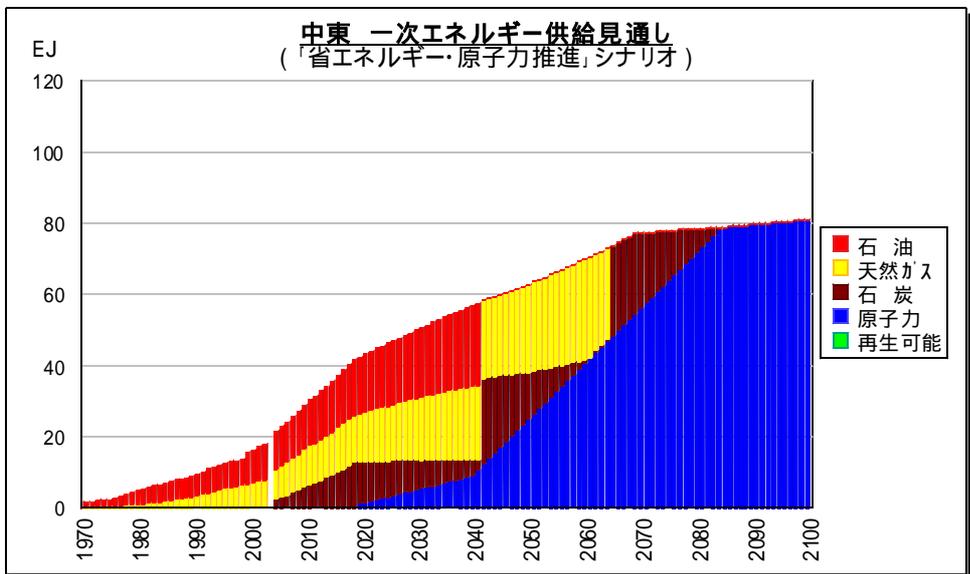
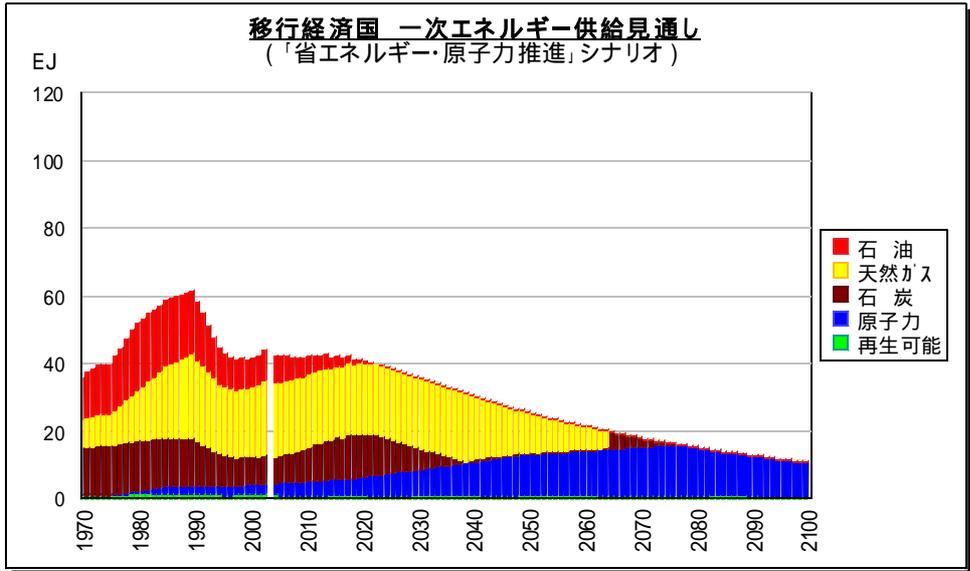


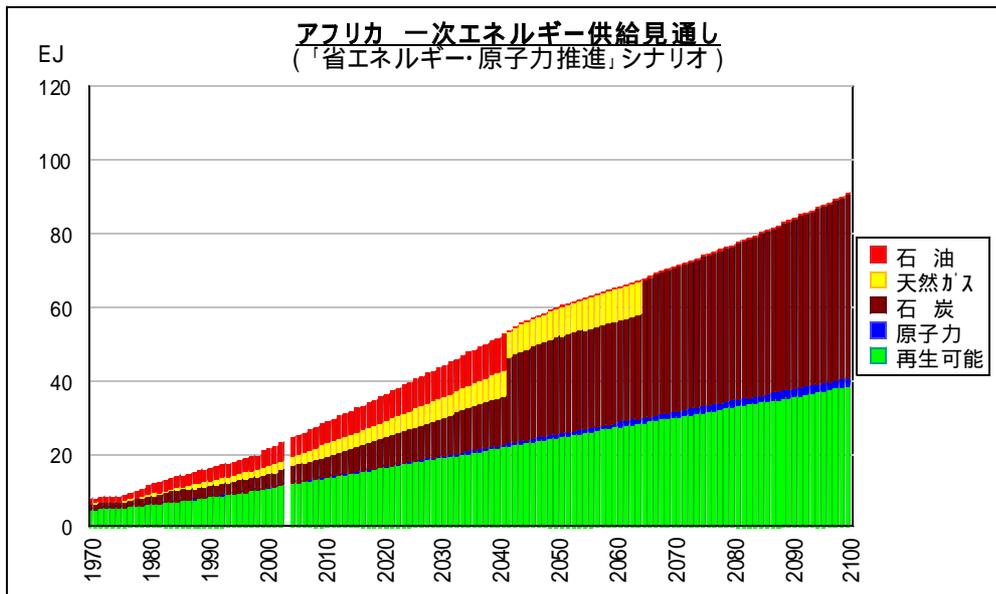
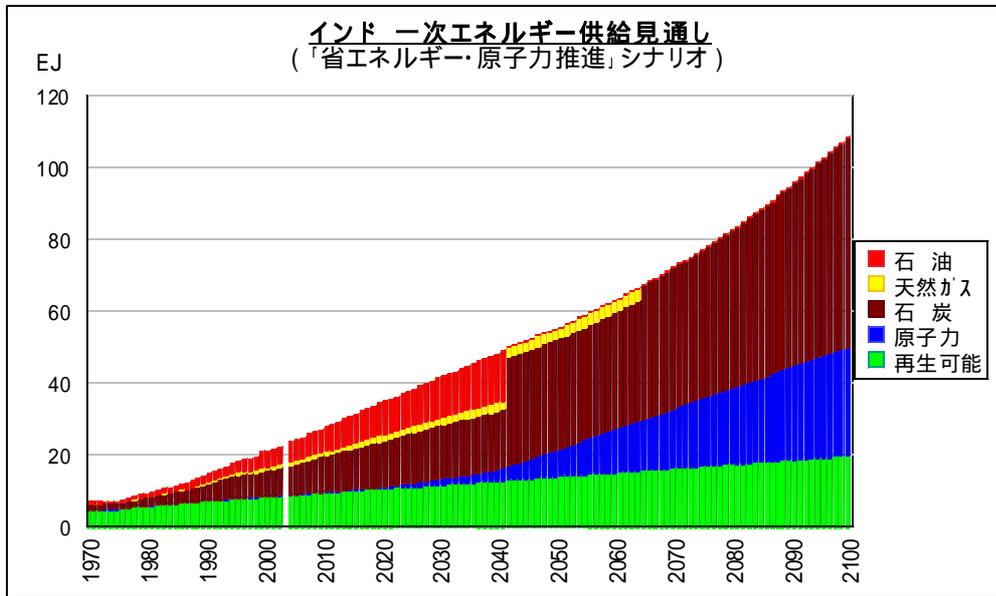
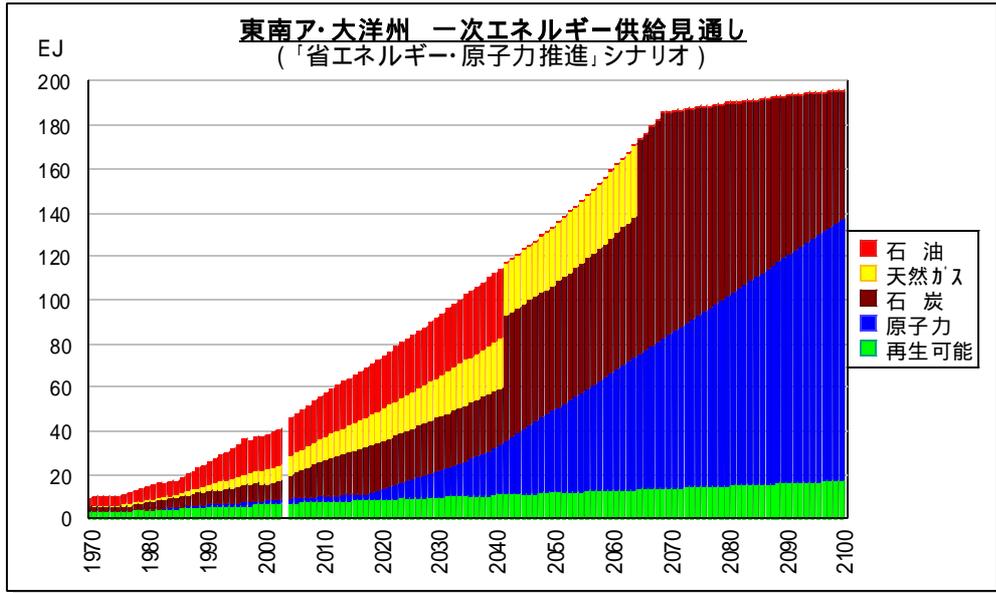
[図 3-2-2-3. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの地域別一次エネルギー供給見通し]



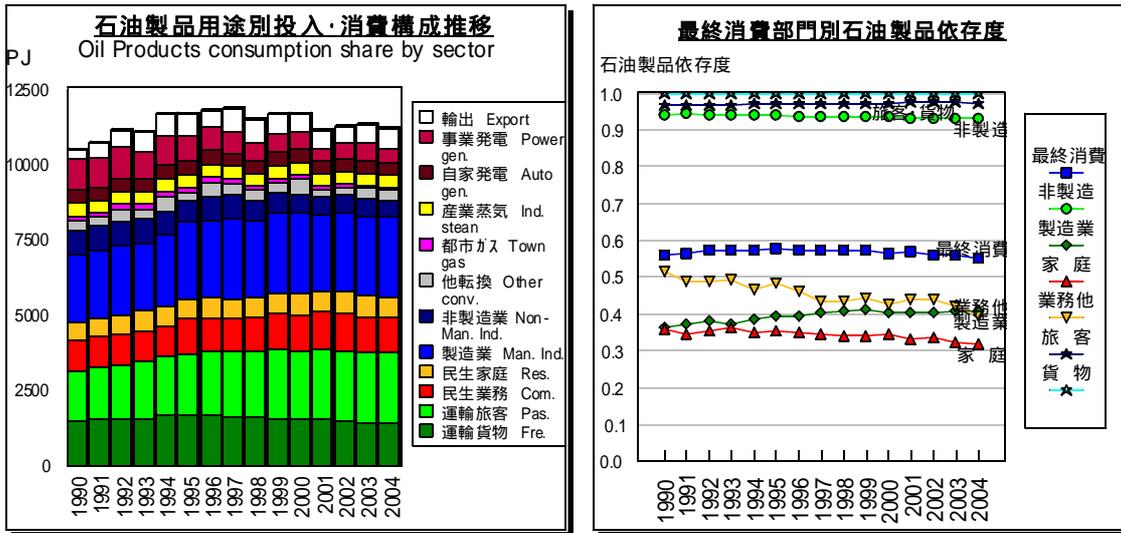
[図 3-2-2-4. ~ 11. 「省エネルギー・原子力推進」シナリオでの地域別一次エネルギー供給見通し]



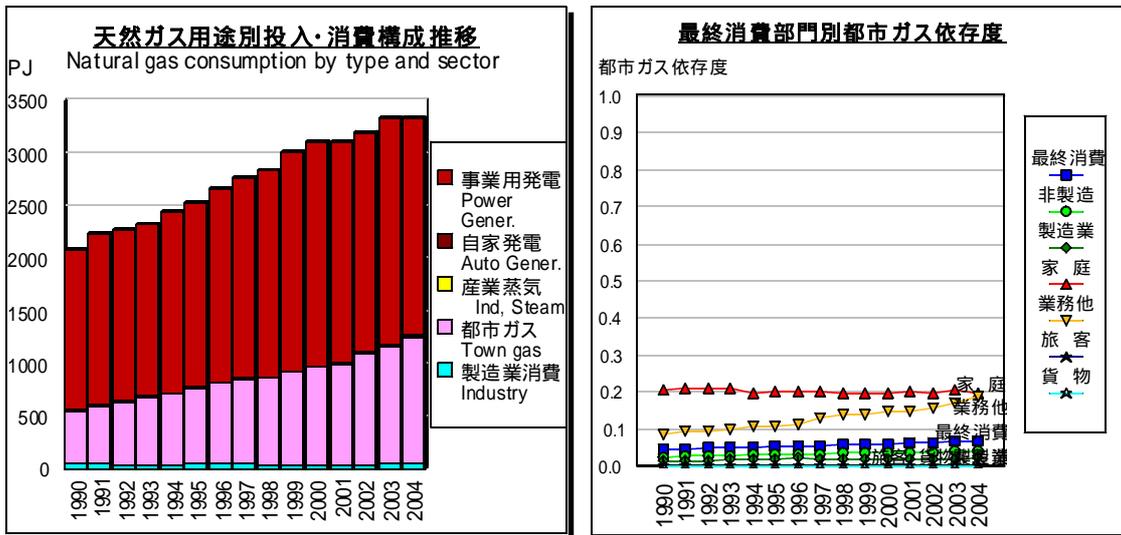




[図 4-1-1-1.,-2. 日本の石油製品用途別投入・消費構成及び石油依存度推移]



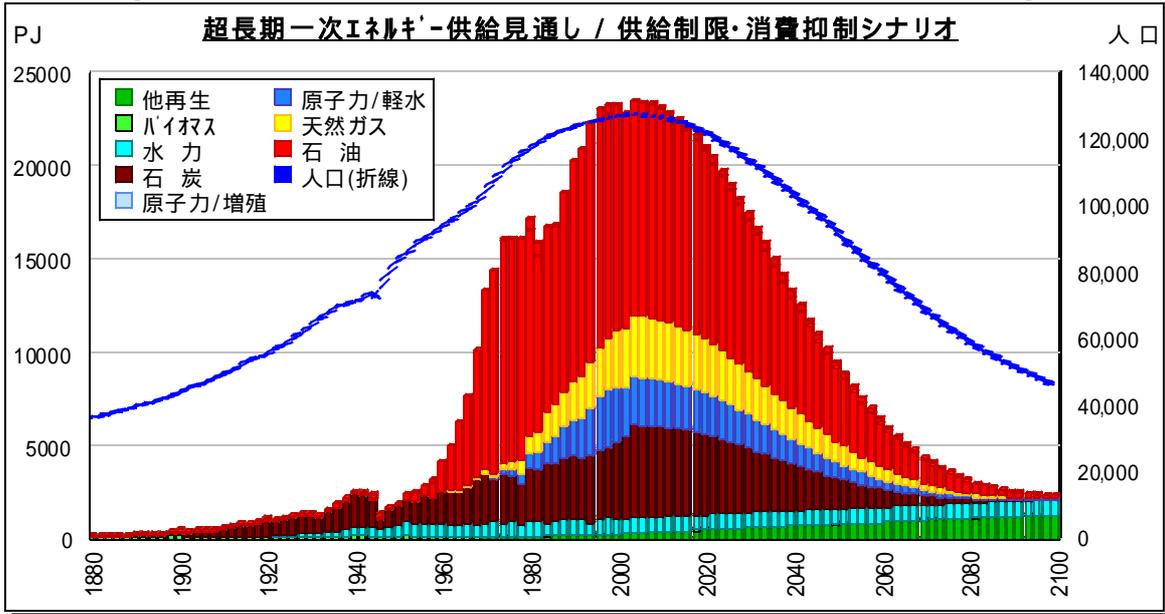
[図 4-1-1-3.,-4. 日本の天然ガス用途別構成・都市ガス依存度推移]



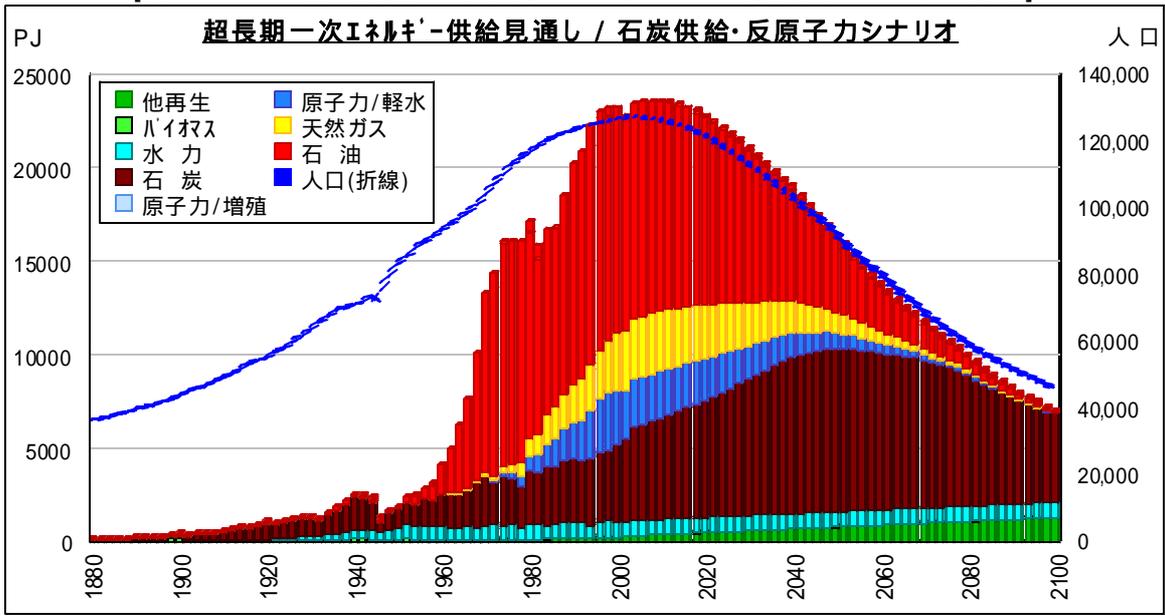
[表 4-2-1-1. 「過渡的状态」での超長期エネルギー需給の遷移シナリオ]

内容 / シナリオ	供給制限・消費抑制	石炭供給・反原子力	石炭・増殖炉併用
最終消費抑制		×	×
石炭の供給制限	×		×
原子力発電の供給制限			×

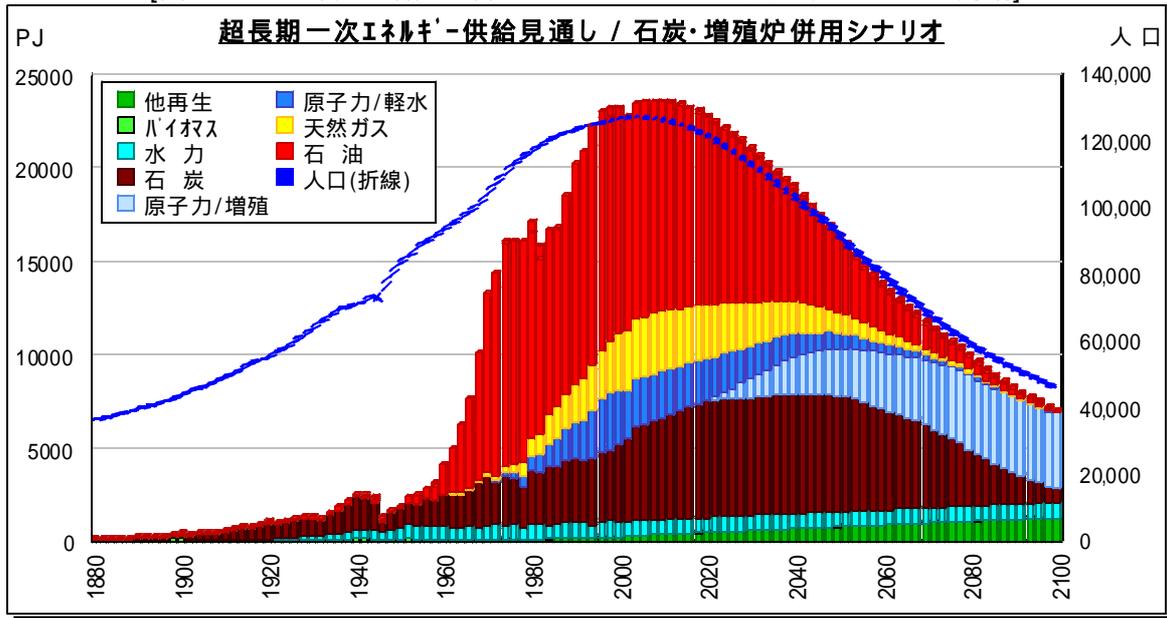
[図 4-2-2-1. 供給制限・消費抑制シナリオにおける超長期エネルギー需給]



[図 4-2-3-1. 石炭供給・反原子力シナリオにおける超長期エネルギー需給]



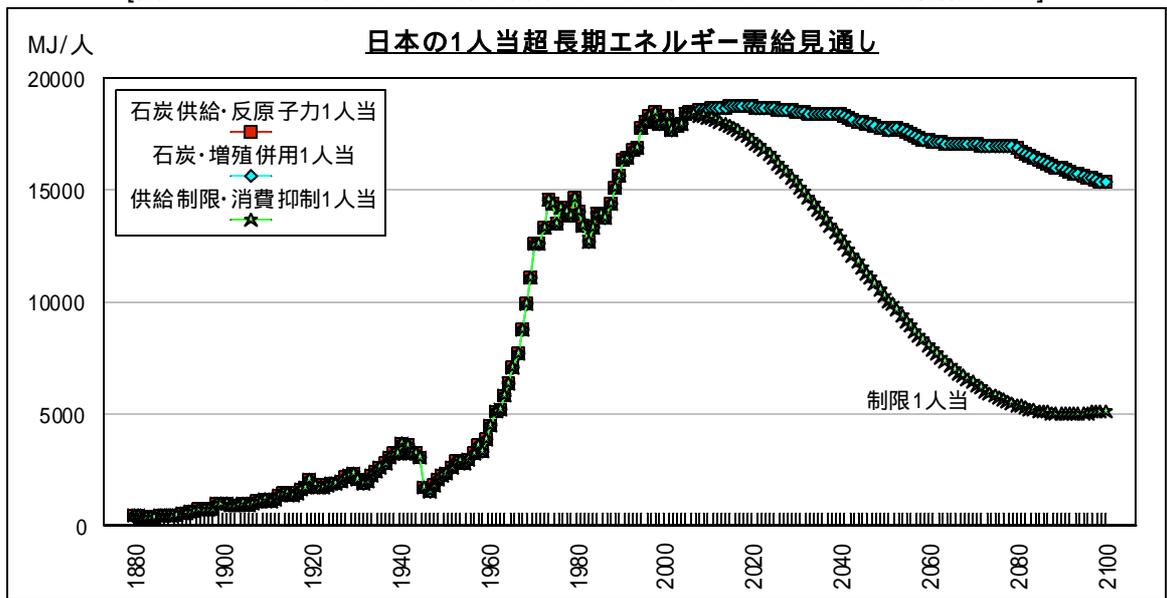
[図 4-2-4-1. 石炭・増殖炉併用シナリオにおける超長期エネルギー需給]



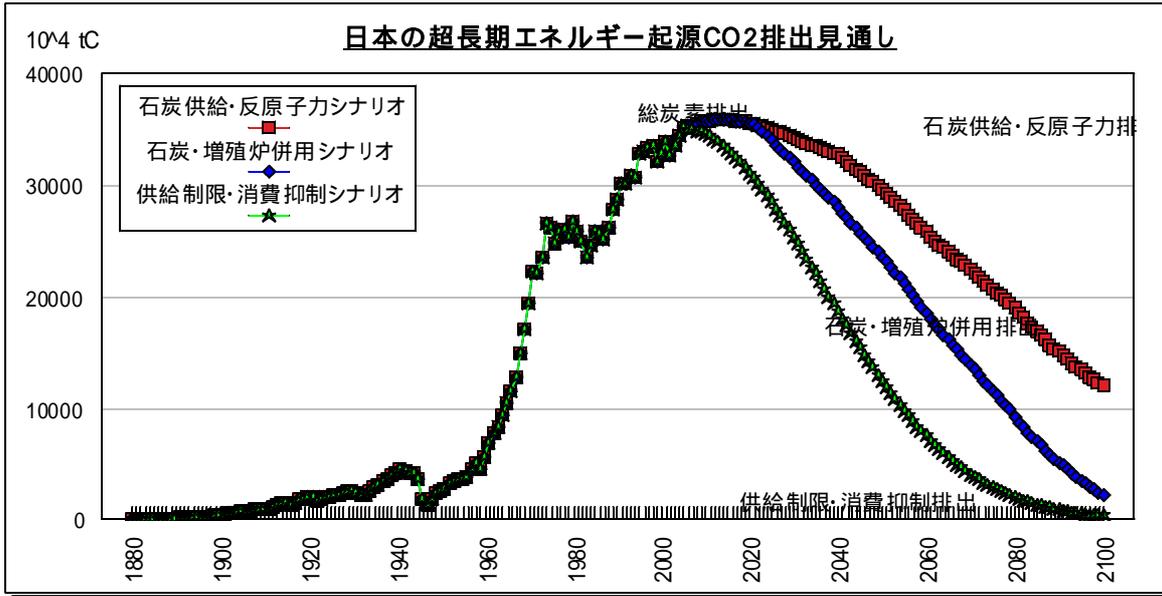
[表 4-2-5-1. 「過渡的状态」での遷移シナリオとエネルギー需給諸元]

内容 / シナリオ	供給制限・消費抑制	石炭供給・反原子力	石炭・増殖炉併用
1人当エネルギー供給	明治時代並	安定的に推移	現状で推移
輸入石炭への依存度	非常に低	ほぼ全面依存	現状で推移
エネルギー起源CO2総量	2050年迄に急低下	徐々に低下	(両シナリオの中間)
1人当エネルギー起源CO2	2050年迄に急低下	2080年頃迄増加	徐々に低下
世界情勢との整合性	過剰適応	情勢逆行	整合
国内政策の実行可能性	低	高	中

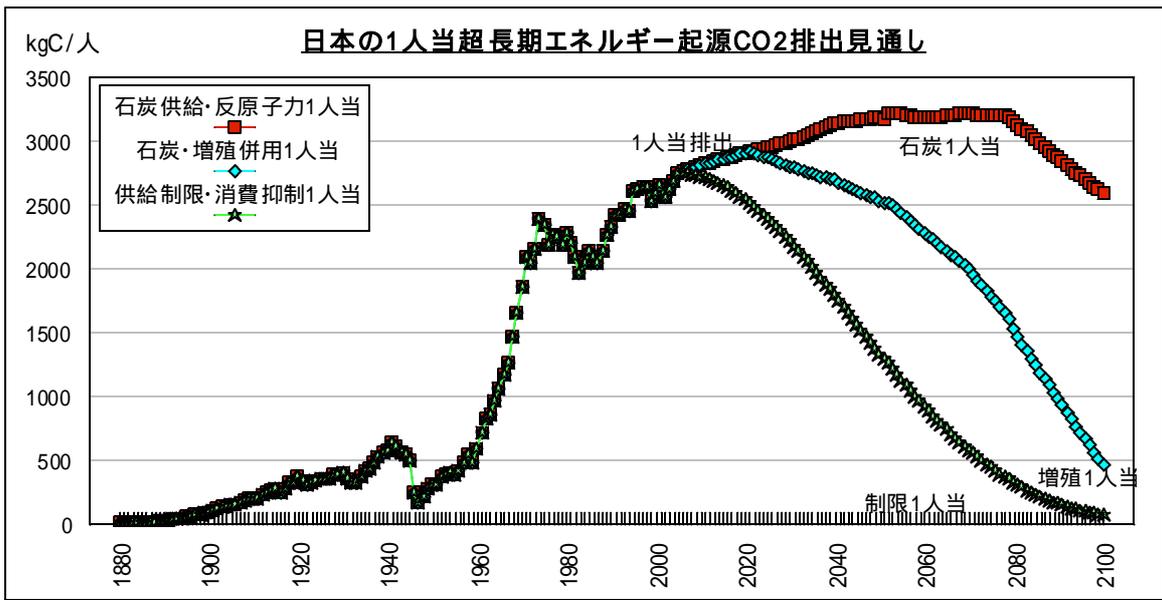
[図 4-2-5-1. 遷移シナリオ別の日本の1人当超長期エネルギー需給見通し]



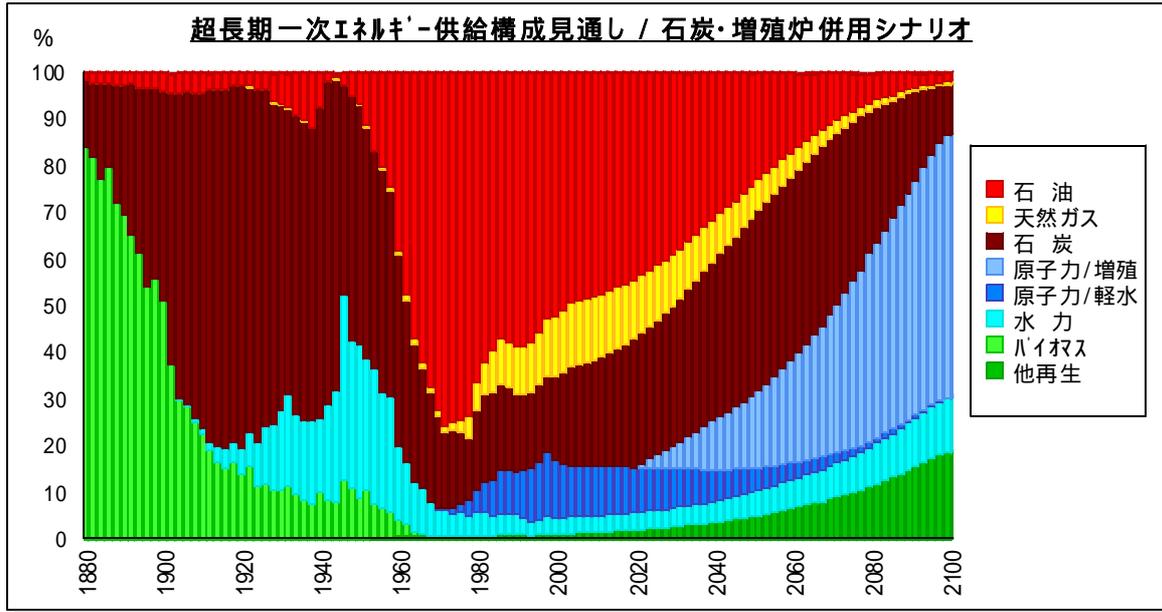
[図 4-2-5-2. 遷移シナリオ別の日本の超長期エネルギー起源CO2 排出見通し]



[図 4-2-5-3. 遷移シナリオ別の日本の1人当超長期エネルギー起源CO2 排出見通し]



[図 5-2-1-1. 石炭・増殖炉併用シナリオにおける超長期エネルギー需給構成]



[表 5-2-2-1. 超長期的なエネルギー需給と政策の課題 / 一次エネルギー供給・エネルギー転換]

	現 状	西暦 2040 年迄	西暦 2070 年迄	西暦 2070 年以降
[一次エネルギー供給]				
石油・天然ガス	資源開発・確保	供給抑制防止	(経済的枯渇)	--
石 炭	(開発停滞)	資源開発・確保	供給抑制防止	供給抑制防止
原子力	(開発停滞)	増殖サイクル導入	増殖サイクル拡大	核融合開発
再生可能エネルギー	導入促進	導入促進	導入促進	導入促進
[エネルギー転換]				
発電(火力発電)	LNG・石炭・石油	脱石油・LNG化	脱石炭・電力化	--
(原子力発電)	軽水炉	脱軽水炉・増殖化	増殖サイクル拡大	増殖サイクル拡大
都市ガス	導入促進	合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--
石油石炭製品				
産業・民生用	重油～LPG	石炭・電力転換	脱石炭/電力化	--
		合成液体燃料化	電力転換	--
輸送・農林用	ガソリン・軽油	合成液体燃料化	電力転換	脱合成液体燃料化

[表 5-2-2-2. 超長期的なエネルギー需給と政策の課題 / 最終エネルギー消費]

	現 状	西暦 2040 年迄	西暦 2070 年迄	西暦 2070 年以降
[最終エネルギー消費]				
産業(製造業)部門				
重油・LPG減	脱石油化	(経済的枯渇)	--	--
	合成液体燃料化	(経済的枯渇)	--	--
都市ガス増	脱都市ガス化	(経済的枯渇)	--	--
	合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--	--
石炭増	石炭利用拡大	脱石炭・電力化	(経済的枯渇)	(経済的枯渇)
系統電力停滞	電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大
再生可能E停滞	再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大
民生部門				
灯油・LPG減	脱石油化	(経済的枯渇)	--	--
	合成液体燃料化	(経済的枯渇)	--	--
都市ガス増	脱都市ガス化	(経済的枯渇)	--	--
	合成気体燃料化	(経済的枯渇)	--	--
系統電力増	電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大	電力利用拡大
再生可能E停滞	再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大
輸送・農林部門				
ガソリン・軽油増	合成液体燃料化	合成液体燃料化	バイオ燃料化	バイオ燃料化
電力(鉄道)停滞	E-ダクト化	鉄道利用拡大	鉄道利用拡大	鉄道利用拡大
(再生可能Eなし)	再生可能E導入	再生可能E拡大	再生可能E拡大	再生可能E拡大

[参考文献]

- # 1. Brundtland Commission (1987) "Our Common Future"
- # 2. UN (1992) "Rio Declaration on Environment and Development (Agenda21)"
- # 3. L. Kotrikoff (1983) "Generation Account" Boston Univ.
- # 4. IPCC(2001) "the Third Assessment Report (TAR)"
- # 5. 資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」(各年度版)
- # 6. 戒能一成(2005)「総合エネルギー統計の解説」
- # 7. 国立社会保障・人口問題研究所(2002)「総人口推計」
- # 8. 財団法人日本エネルギー経済研究所(2004)「エネルギー経済統計要覧」省エネルギーセンター
- # 9. 橋本敬簡(1825)「経済随筆」 / 三田村鳶魚(1950)「鳶魚江戸文庫」より再引用
- #10. 小野武雄(1980)「江戸物価事典」
- #11. 鬼頭宏(2000)「人口から見る日本の歴史」
- #12. 本川裕(2003)「社会実情データ図録」
- #13. IEA(2006) "Energy Balances of OECD Countries, 2003-2004"
- #14. IEA(2006) "Energy Balances of Non-OECD Countries, 2003-2004"
- #15. UN(2005) "World Population Prospects; The 2004 Revision"
- #16. 経済産業省資源エネルギー庁(2006)「国家エネルギー戦略」