

# オイルピークを見据えたエネルギー関連 研究戦略検討委員会

## 成果報告書

2007年3月

(独)産業技術総合研究所  
地質調査情報センター  
技術情報部門



## オリンピックを見据えたエネルギー関連研究戦略検討委員会 名簿

氏名	所属
石井 吉徳	富山国際大学
安藤 満	富山国際大学
田中 知	東京大学大学院工学系研究科 システム量子工学専攻
松井 一秋	(財) エネルギー総合工学研究所
茂木 源人	東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻
矢野 雄策	(独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
六川 修一	東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻
三ヶ田 均	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
芦田 譲	京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻
天野 治	電力中央研究所 原子力技術研究所<次世代サイクル領域>
佃 栄吉	(独) 産業技術総合研究所 研究コーディネータ
松島 潤	東京大学大学院工学系研究科 地球システム工学専攻
稲葉 敦	(独) 産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター長

### 《事務局》

栗本 史雄	(独) 産業技術総合研究所 地質調査情報センター長
大久保 泰邦	(独) 産業技術総合研究所 国際部門
森本 慎一郎	(独) 産業技術総合研究所 技術情報部門
武藤 奈緒子	(独) 産業技術総合研究所 地質調査情報センター
伊藤 忍	(独) 産業技術総合研究所 地質調査情報センター
佐藤 努	(独) 産業技術総合研究所 地質調査情報センター



# 目次

1.総論	1
1.1 はじめに	1
1.2 委員会の目的と活動内容	3
1.3 オイルピーク論に関する総論	4
参考文献	16
2.オイルピーク論の概要と研究動向	17
2.1 石油系炭化水素に関する概要	17
2.1.1 石油系炭化水素の分類	17
2.1.2 資源量・埋蔵量・生産量に関する定義	19
2.2 オイルピーク論の概要と研究動向	28
2.2.1 オイルピーク論の概要	28
2.2.2 オイルピーク論に関する研究動向	30
参考文献	43
3.我が国のオイルピークを見据えた研究戦略	46
3.1 我が国の石油に関する現状	46
3.1.1 我が国の石油製品に関する現状	46
3.1.2 新・国家エネルギー戦略における脱石油戦略	50
3.2 我が国の用途別脱石油戦略の概要	51
3.2.1 自動車燃料における脱石油戦略	51
3.2.2 化学用原料における脱石油戦略	67
3.2.3 農林水産業における脱石油戦略	76
3.2.4 電力における脱石油戦略（原子力の可能性とEPR）	83
参考文献	95
4.結論	96
5.委員会の経緯	100

# 1. 総論

## 1.1 はじめに

今の石油価格高騰を一過性と思う人が多いが、それは間違っている。有限地球の有限石油資源が、増え続ける需要に応えられなくなったからである。これは文明の変革期ともいえる構造的なものと考えるべきで、いわゆる「石油ピーク」が顕在化し、石油が支えた「20世紀型文明」の終焉が近づいたのである。地球の有限性に基づく当然の帰結だが、現代人の多くはその意味、本質を理解出来ないようで、いまでも無限成長を望む。そして石油が無くなればタールサンドがカナダにある、ベネズエラにはオリノコタールがある、その量は中東の石油に匹敵するなどと言うのである。更に日本周辺には、メタンハイドレートが天然ガス需要の何百年分もあると考える人もいるが、本当にそうだろうか。そうでは無さそうである。

その理由は単純、資源を「質」でなく「量」のみで考えるからである。エネルギーにおいて、その入出力比、EPR (Energy Profit Ratio) が大切である。宇宙太陽発電なども EPR で眺めれば幻想であると分かる。経済的に採取できそうにない場所、宇宙の話だからである。そこで、今更ながら資源とは、①濃縮されている、②大量にある、③経済的に採取できる場所にある、ものである。特に濃縮が重要、熱力学第二法則では低エントロピー物質ということになる。かつて永久機関論に終止符をうったのも、このエントロピーである。

このよう背景から「脱石油戦略」を整理すると以下となる。

- 1) 「石油ピーク」をリスク管理、安全保障問題として考える
- 2) EPR の座標でのエネルギー戦略
- 3) 石油依存の現代農業から、自然と共存、地産地消への移行
- 4) 石油に過度に依存する集中社会からの脱却
- 5) 自然と共存する地方分散社会

現代の集中化社会は優れた集中エネルギー源、石油があつてのことだからである。もう一つ重要なこと、それは石油が「常温で流体である」ことである。このことが内燃機関を可能とし、20世紀初頭の車社会、ひいては現代の大量生産型社会を育んだ。このような理由から、石油ピークは車、航空機、船舶などの交通機関を先ず直撃する。これに関して水素がある、21世紀のエネルギー源は水素などと思つてはならない。水素は他のエネルギー源から作る二次エネルギーで、問題の本質である一次エネルギー源そのものでないからで、現在問題である PLAN-B の中核とはなりえないからである。最後になるが日本人にとって重要なこと、6) 日本は大陸でなく、75% が山岳の島国である、長年当然の様に西欧文明、技術、考え方を手本としてきたが、これらの国々は大陸に位置す

る。自然と共に生きる PLAN-B の構築に、欧米は参考となりそうにない。今さらながら日本人は自分で考えるべき時に来ている、のではなかろうか。

## 1.2 本委員会の目的と活動内容

石油はエネルギー、輸送用燃料、化学製品の原料として利用されている。製品一つを作るにしても、大量の石油を使用している。世界は石油を基盤とした社会と言えるため、オイルピークが社会に与える影響は大きく、それは国家の安全保障に係わる社会リスクと捉えることができる。このリスクに対して準備を行うリスクマネージメントの考え方が必要になる。

現在、このリスクマネージメントを検討する学会として、「石油・天然ガスピーク研究協会（The Association of the Study of Peak Oil and Gas或はASPO）<sup>1)</sup>」があり、欧米を中心として世界的に石油資源の現状・将来、及びエネルギー危機に関するリスク回避について、科学的な見地からその議論を深めつつある。しかし、我が国ではこれらリスクマネージメントについてあまり深く議論されていないのが現状である。したがって我が国としても石油需給についてその現状を認識し、リスクマネージメントのあり方を科学的見地から分析し、さらに未来へ向かう現実的なシナリオを予測して我が国の脱石油戦略を組み立てることが緊急な課題となっている。

そこで本委員会では、オイルピークをリスクマネージメント、安全保障問題として位置付け、市場、政府、市民社会のどこにも所属せず中立的な立場で、将来の石油とエネルギー全体の需給と未来社会をいくつかのシナリオで予測し、我が国の取るべき脱石油戦略のあり方について科学的知見のもとに議論を行うことによって、その方向性を提案することを目的とする。さらにオイルピークを踏まえた我が国の取るべき脱石油戦略のあり方について議論する上で必要なデータを整理し、広く一般に公開することを目的とする。

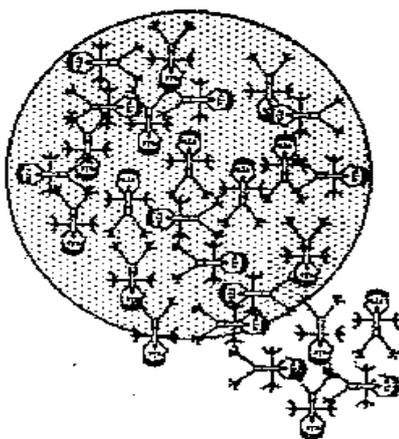
本委員会で議論する脱石油戦略は国の政策に対して提言し、国としての対応を考える必要のある課題であることはもちろんであるが、一般社会人、国民が最後の石油危機になるといっても良いこの問題を正しく認識することが出来るように、そして可能な対応を考え、実行することを促すよう、パブリックアウェアネス推進活動につなげる必要がある。そのため本委員会で議論された結果は、世界のそして日本の21世紀におけるエネルギー問題として総括し、研連所属の学術団体に課題提供しフォローアップ研究を促すとともに、政策提言としてまとめる作業に繋げる計画である。

### 1.3 オイルピーク論に関する総論（「高く乏しい石油時代が来た」<sup>2)</sup>）

(1) 地球は有限、自然にも限りがある：脱石油戦略を考える

地球資源は有限としか思えない。「『足る』を知らない人間」の欲望をそのまま増長させれば、いずれ地球は人類を支えきれなくなる、と考える。

#### ***Limited Our Earth***



(Y. ISHII, 1984.6.27)

図 1-1 「地球は有限」：過剰な人口、資源の大量消費そして自然環境破壊  
(1984年6月27日、未だ人口は44億人)

(2) 大量浪費社会の持続性：循環にも大量エネルギーが必要

図 1-2 の過程は、質の良い資源、低エントロピー物質を分散、拡散させる流れであり、質を低下させる高エントロピー化の過程である。これを循環させる、ごみから資源を回収するには、必ずエネルギーが必要ということである。これは熱力学の第二法則からみても当然だが、社会の理解は必ずしもそうはならない。その典型的な例が、地球温暖化対策のため発電所の排ガスから二酸化炭素を抽出、つまり濃縮して海中あるいは地中に捨てる話である。これでは却って石油消費が増えよう。より一般的には、社会が大量生産型を止めない限り、環境保全には益々大量のエネルギーが必要である。これは地球の有限性と相容れない。その石油にも限りが見えてきた。石油の生産が需要に追いつかず、ピークを迎えるというのが「石油ピーク」だが、そのピークはもう来ているかもしれない。

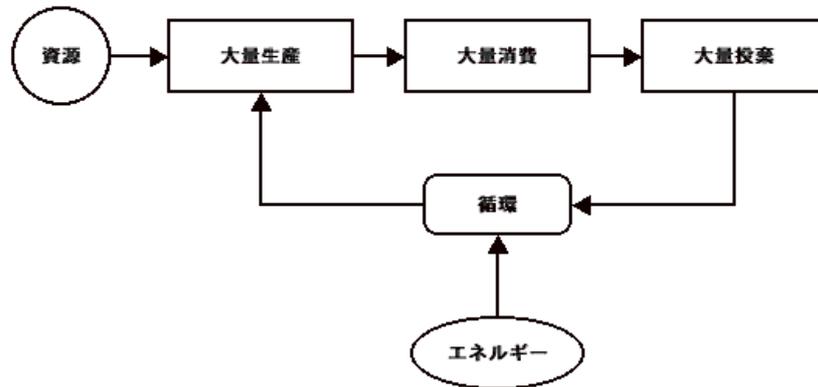


図 1-2 大量生産、消費、投棄社会：循環には大量エネルギーが必要

### (3) 減退する石油発見量と拡大する需要

図 1-3 は石油発見の歴史である。基本的に石油発見量はごく小数の超巨大油田で決まるから、この図のように凹凸が激しい。しかし、これを平均すれば 1964 年がピークであった。それ以来、発見量は減少の一途であり、一方生産量は増大するのみであり、特に近年の増加は鰻登りである。中国、インドなどアジア、それに依然アメリカの増加である。今でもアメリカは 4% の人口で、世界の 4 分の 1 のエネルギーを浪費する国である。

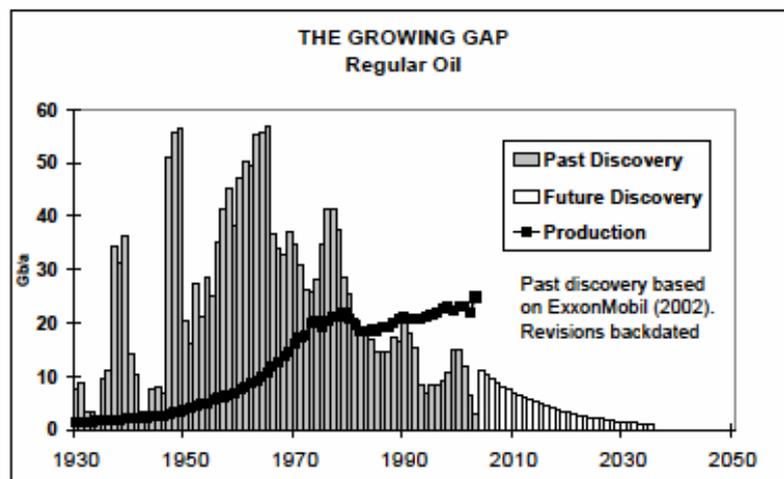


図 1-3 石油発見量と消費量（世界の石油発見ピークは 1964 年であった）

### (4) 「石油ピーク」後の石油生産

地球は有限、当然石油も有限であり、人類はその可採埋蔵量の半分を既に使ったという。これをあと半分と思って安心してはならない、何故なら人間は、質のよい、取り易く儲かるものから取るからである。残りの、後述する EPR は今までの半分に較べて低下

している。ネット・エネルギーが少ないのである。この意味でも 20 世紀型の石油文明は、終焉しつつあると思わねばならない。

だが一方において、そうではないという意見がまだ大勢を占める。石油はまだまだ有るというのだが、これは見方の相違である。「資源とは何か」の理解の問題といってもよい。そこで改めて「資源とは」だが、それは、

- 1) 濃縮されている
- 2) 大量にある
- 3) 経済的に利用できる位置にある

ものである。特に 1) の濃縮が大切である。石油、石炭、天然ガス、ウラン資源など、現在の主流のエネルギー資源は、この 3 条件をみたしている。特に石油は、エネルギー源として優れているだけでなく、流体であるため車、航空機、船舶の内燃機関に欠かせない。そして「常温で流体」であることが、石油が他のエネルギー資源に無い優れた性質である。自然エネルギーの代表の太陽エネルギーは 2)、3) の条件を満たしているが、1) の濃縮条件を満たさない。従って大面積が必要で、濃縮をどうするかが大問題である。これが、太陽エネルギーが期待されるほど進展しない理由である。

人類は既に 2 兆バーレルといわれる石油の半分を使ったようである。しかしこれについて、3 兆バーレルあるという意見など様々であるが、それらの多くは「資源とは」の条件について、同じ基準に立たないための相違と考えられる。つまり、質の良くない価値の低いものまで入れれば、埋蔵量はいくらでも増やせるからである。

1956 年、アメリカ、ヒューストンのシェル石油研究所の地球物理学者 K. ハバートは、1970 年代にはアメリカの石油生産がピークを迎えると主張した。当時は大変な反論に遭ったが、事実 1970 年、アメリカ 48 州の石油生産は頂点に達し、その後再び生産は上向くことはなかった。これをハバート・ピークという。石油生産量のピークは、埋蔵量を半分消費したときに訪れるという。これが石油ピーク、石油減耗論である。ハバートは、石油の生産量は横軸を年代、縦を年生産量とする、「左右対称のベル型」を辿ると考えたのである。曲線の大きさ、面積は埋蔵量に合わせ、カーブの形は過去の生産量から決めた。ハバートはこのアイデアを、アメリカ屈指のアパラチア炭鉱地帯の生産量の推移から学んだという。原理は単純だが、この発想は「資源とは何か」の本質を突くものであった。このハバートの理論を最近、フランスの Total など石油探鉱に長年従事した地質学者 C.J. Campbell が世界に応用した。図 1-4 は 1998 年、Scientific American 誌に発表されたもので、これでは「石油ピーク」は 2004 年となっている。この 2004 年が賛否両論の議論となった。

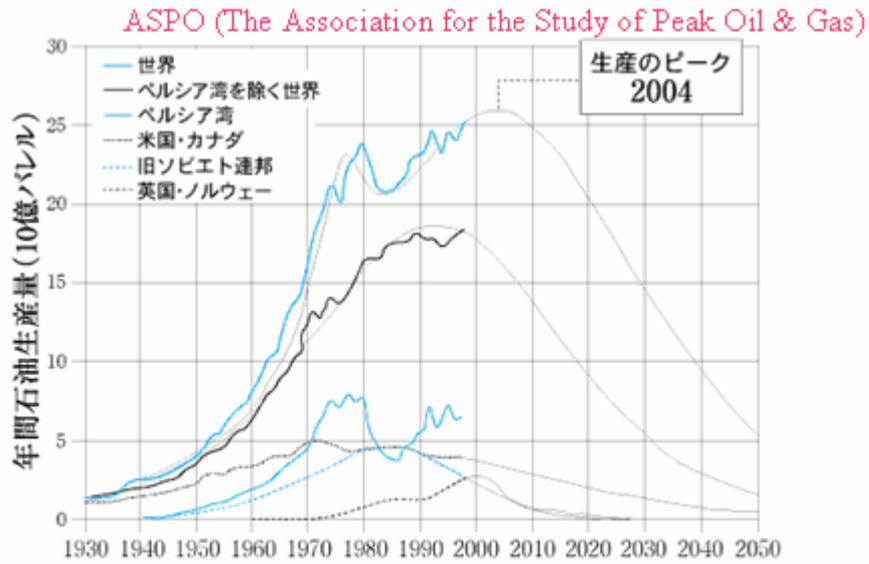


図 1-4 世界の石油生産量：過去と未来、Hubbert ピーク（Campbell）

（5）国際機関における研究例：ExxonMobil の例

**Supplying Oil and Gas Demand Will Require Major Investment**

Millions of Barrels per Day of Oil Equivalent (MBD0E)

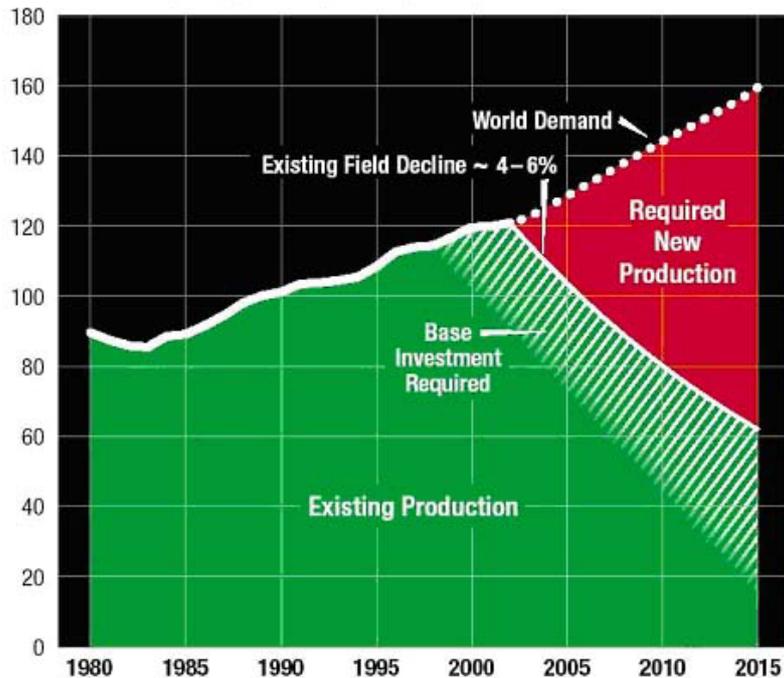


図 1-5 ExxonMobil The Lamp 2004 における予測

図 1-5 は、代表的な巨大石油企業 ExxonMobil 社の報告である。現存油田の生産は年率 4〜6%で減耗すると述べている。その一方、世界の需要は伸びるので需給ギャップは益々広がることになる。表現こそ違おうが「石油ピーク」を容認している。

(6) 「石油ピーク」のまとめ：石油、天然ガスの発見、ピーク、減耗そして二酸化炭素排出問題

ハバートの理論を最近、フランスの Total など石油探鉱に長年従事した地質学者 C.J. Campbell が世界に応用した。図 1-6 の上の図は 1998 年、Scientific American 誌に発表されたもので、これでは「石油ピーク」は 2004 年となっている。この 2004 年が賛否両論の議論となった。

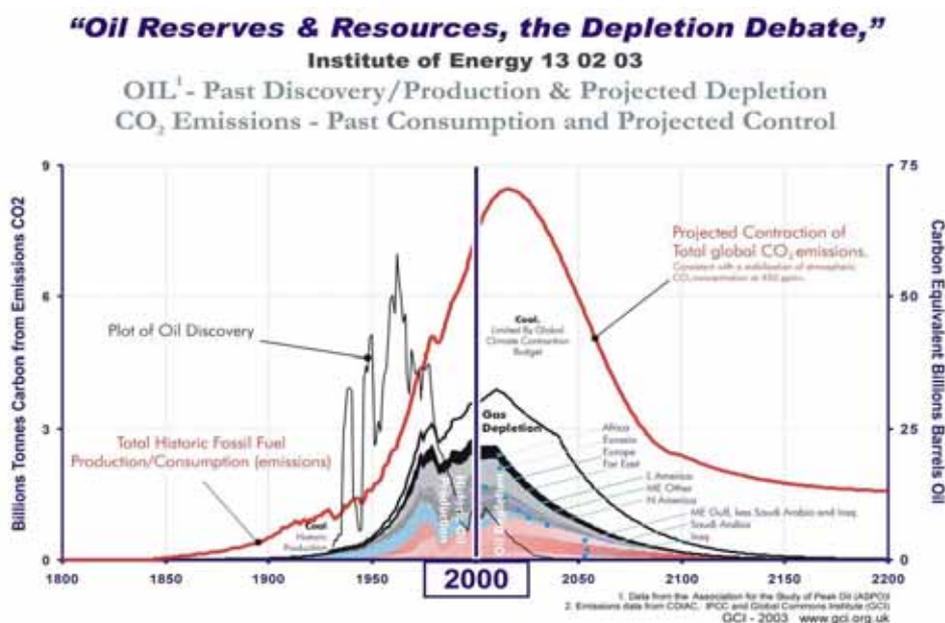


図 1-6 石油、天然ガス、そして石炭の生産量：過去、未来、そして二酸化炭素排出

しかし、これにも見るとおりハバート・カーブは滑らかである。従って 2004 年という具体的な年度は、元々それほど重要ではない。21 世紀の初頭、例えば 2010 年以前に石油の生産限界が来ると理解すればよく、いわゆる石油の寿命はあと 40 年、という石油枯渇の話と違うのである。既述のように、元来量のみに着目する寿命に意味はないのである。それでも「狼と少年」の譬えで反論する人が多く、また悲観に過ぎるなど無視したがる。エコノミストは市場至上主義に立ち、技術者は技術万能と考える。しかしブッシュ大統領のエネルギーアドバイザー、M.シモンズなどは悲観論ですら楽観的に過ぎる、

と言っている。日本ではようやく議論が始まったばかりだが、社会のエネルギー基盤は簡単には変わらないもの、この文明が変わるほど変革期に、日本はどう備えるのか。

図 1-6 の下の図には、石油生産、石油ピークのグラフに加えて、「天然ガスピーク」も示されている。天然ガスも無限でない。そして石油、天然ガスの生産が推定されれば、二酸化炭素排出量は計算される。図の山形の赤線である。このように石油ピーク論に立つと、地球温暖化はまったく違って見えてくる。

(7) 地球温暖化問題：IPCC と石油減耗論はともに根本対策を求める

これからは、地球温暖化の対策、理念を根本から見直す必要があるかも知れない。石油が無限と思い対策を考えるのと、石油が既にピークにあると思うのでは、その理念に雲泥の差がある。図 1-7 は、IPCC と対比して石油減耗論を表現したものである。今後真剣に考える必要があろう。

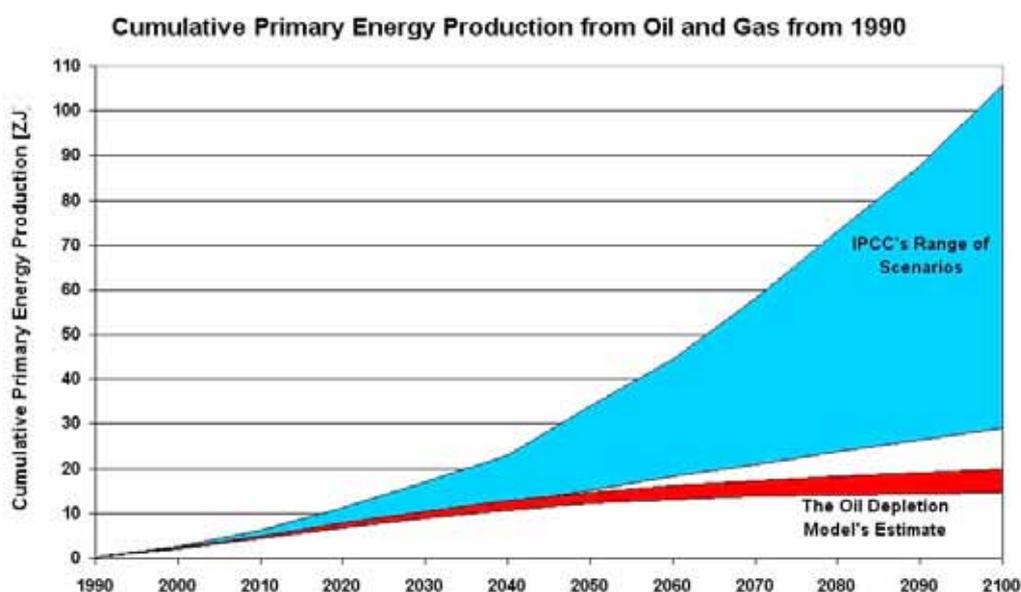


図 1-7 地球温暖化前に石油減退が始まる

(8) EPR (Energy Profit Ratio)の概要：「質」が全てのエネルギー源

エネルギー資源を理解するには、その評価基準としてエネルギーの出力／入力比が本質的である。EPR(Energy Profit Ratio)、EROI (Energy Return on Investment) などがそれだが、残念ながら、日本では殆ど知られていない。これから説明するが、この指標はエネルギー資源を評価するに、欠かすことの出来ない重要性を持っている。EPR は次式で定義される。

$$EPR = \text{出力エネルギー} / \text{入力エネルギー}$$

また図 1-8 に EPR の概念図を示す。

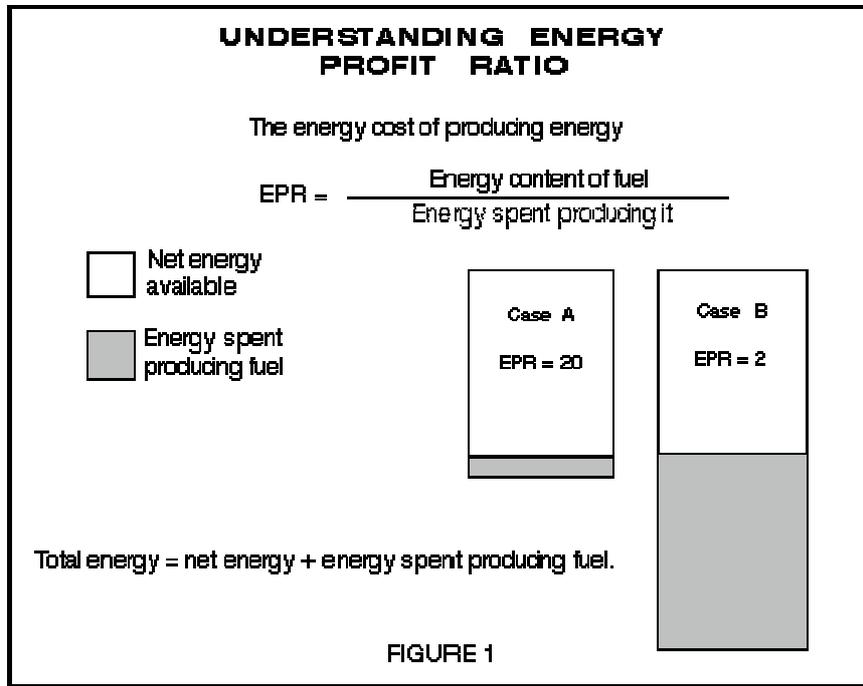


図 1-8 EPR : 1.0 以上でない意味がない

図 1-9 は運輸関係のエネルギー源を、EPR で比較したものである。これから分かるが、殆どの巨大油田は EPR60 と高い。オイルピーク時 1970 年頃のアメリカの油田は 20 と低い。それも 1985 年は 10 を下回る。今では 3 程度に落ちているそうである。同じ石油資源もこのように、EPR の値は大きく異なる。同じ油田でも生産とともに、EPR は変化する。勿論低下する。原子力発電の EPR は、この図で見る限り極めて低い。別の例では 4.0 という数字もあるが、これに対して、原子力関係者の言う EPR は、50 と高いのである。この一桁の違いを説明することは、今後大きな意味を持つと思われる。

地球は有限、いつまでも安く豊かな石油があるのではない。石油価格の乱高下は、これを反映するのであろう。ところがエコノミスト、そしてエネルギー専門家すら、中東が不安定だから石油が高騰する、というのである。そして非在来型の炭化水素資源、オイルサンドなどの重質油が膨大であると楽観する。だが、これらのエネルギーの質は在来型の油田とは比較にならないほど低く、例えばカナダのタールサンドの EPR には 1.5、という数字がある。非在来型はその名のとおり石油とは全く異質の、低品位の資源なのである。

日本で話題のメタンハイドレートなどは資源と言えるどうか、すら疑問である。海水ウランも未だに研究が続けられるが、海水に溶存するウランの濃縮には膨大なエネルギー

ーが必要、エントロピーを下げる話だからである。このように低品位の希薄な物質を量の大きさのみに着目し、未来の資源という話が日本には多すぎる。この意味でも EPR の導入は大事である。

水素も例外ではない。化石燃料から水素を作る話などは、本末転倒の議論である。今後「水素」は慎重に進める必要がある。

流行のバイオ、エネルギー農業だが、既に述べたように、現代農業は大量の石油に支えられている。このためサトウキビからのエタノールは EPR0.8-1.7 と低く、トウモロコシも 1.3 である。またトウモロコシの残渣からの EPR も 0.7-1.8 と低いようである。ハイテクがすべてよい、と思っはならない。自然エネルギーもその性質、意味をよく理解して利用するのがよい。自然エネルギーとは広く分散しているもの、広域分散型は、広域のまま利用するのが最も合理的なのである。無理に集める技術では、EPR は高くない、それはエントロピーを下げる話だからである。

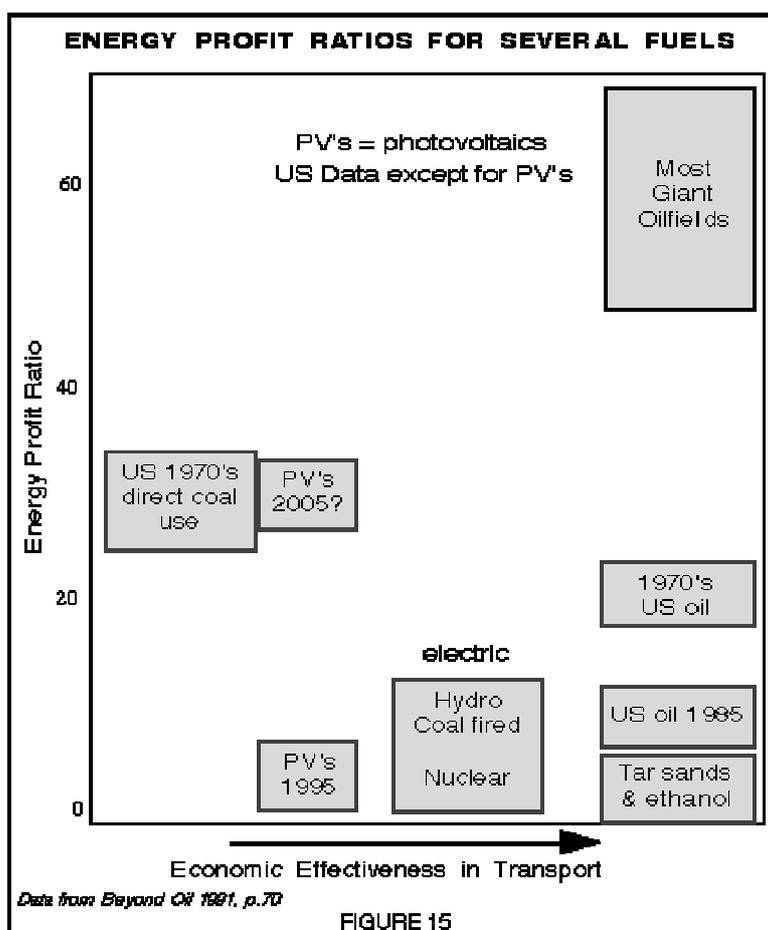


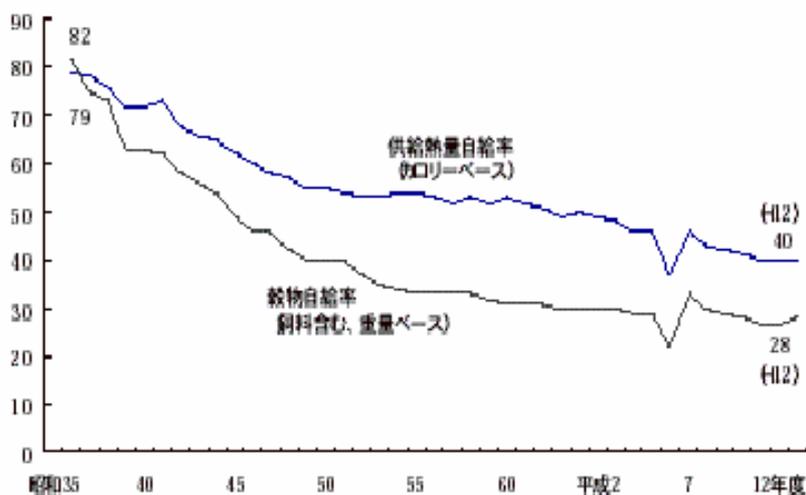
図 1-9 EPR と輸送の容易さ

(9) 日本の農業問題

図 1-10 に日本の食料自給率、供給熱量自給率の推移を示す。

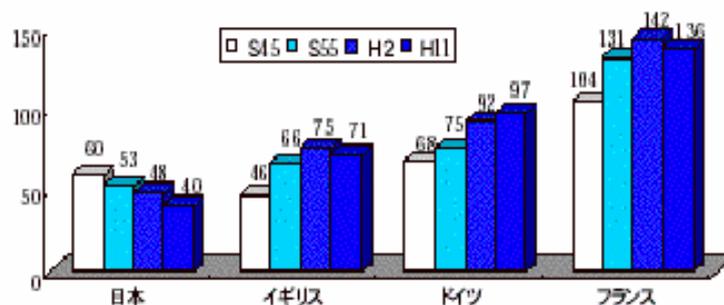
地質学者、大矢暁によると韓国で窒素肥料は、必要量の3倍も使用されているそうである。日本の使用量は、それを上回るかもしれないというのである。肥料も農薬も石油から作るもの、石油ピークは食の安全保障上の大問題なのである。農耕機械なども石油で動く。石油が途絶えたときの影響は、北朝鮮、キューバの例から学ぶことが出来る。北朝鮮では、旧ソ連の石油支援が途絶えて飢餓状態となった。一方キューバは、徹底した有機農業、自然と共存する農業によって国民は飢えることはなかったのである。

○ 我が国の食料自給率の推移 (%)



資料：農林水産省「食料需給表」

○ 主要先進国の供給熱量自給率の推移 (%)



資料：農林水産省「食料需給表」、FAO「Food Balance Sheet」を基に試算

図 1-10 日本の食料自給率、供給熱量自給率の推移：自立しない日本の農業：「石油問題」は「農業問題」

(10) Matthew Simmons:ブッシュ大統領のエネルギー顧問が提唱する Plan B (2004 SEG)

図 1-11 にブッシュ大統領のエネルギー顧問 Matthew Simmons が提唱する Plan B の概要を示す。



図 1-11 次世代エネルギーへの架け橋が本当の「プラン B」

- ・ 石油が果たしてきた役割を担うための代替品は役に立たないだろうし、また作るのに時間がかかる
- ・ しばらくの間、時間かせぎのために、たくさんの小規模エネルギーによって次世代エネルギーへの架け橋とする
- ・ 架け橋に含まれるエネルギーのリストは長いものになる
- ・ 「悪い形式のエネルギーは無い」
- ・ 非在来型石油資源が架け橋の役割を果たすはずである
- ・ エネルギーの効率化技術が急成長するはずである
- ・ 大々的な節約を進めることが急務
- ・ 環境・エネルギー平和協定の作成が重要
- ・ 全掘削禁止地域を調査することが必須

### (1 1) 資源問題と今後のエネルギー：[Plan B]と[Plan C]

エネルギーの用途は、産業、民生、運輸に3分類される。工業国日本は産業用が多く40%を越えるが、最近では横這い傾向にある。一方民生、運輸が伸びており、一般国民の一層の省エネルギーが重要となっている。

地球温暖化対策を根拠にして、水素社会が推進されている。水素、燃料電池技術なども過熱気味だが、水素は二次エネルギーなので何から作るかが問題となる。水素をメタンから、或いは石炭からと言う話もあるが、これは却って二酸化炭素排出量は増大するのではないだろうか。水素は自然エネルギーなど、再生可能なものから作って初めて意味がある。

風力は最近かなり伸びてはいるものの、全体に占める量はまだまだ少ないもの、日本のように大きな経済を持つ国での本格的な自然エネルギー社会の構築は「今のままでは」殆ど不可能と言ってよい。これからは、集中的なエネルギー社会を見直し、浪費しない、物より価値を求める低エネルギー社会を目指すべきである。

### (1 2) 人類の未来：さらば浪費社会、20世紀型文明の終焉

以上より結論は以下の通りとなる。

資源とは

- 1) 濃縮している
- 2) 大量にある
- 3) 経済的な位置にある

---

質が全て：エネルギー資源

$EPR(\text{Energy Profit Ratio}) = \text{出力エネルギー} / \text{入力エネルギー}$

---

様々なエネルギーの話

天然ガス（これも有限）

原子力；核分裂（一回、再処理、増殖）、核融合（遠い先の話）

石炭（インフラの復活、運輸が問題）

オイルサンド、オリノコタール、オイルシェール（EPR、環境）

自然エネルギー；太陽、風力、地熱、バイオマス、海洋、水力（小型）

メタンハイドレート、宇宙太陽発電（非現実的）

水素、燃料電池、水素社会（エネルギー源ではない、水素とは？）

「成長神話からの脱却」、「止めよう市場・技術原理主義」、「量から質」、「無駄をしない・もったいない社会」、「食の安全保障・安心・自立」、「自然と共存：75%が山岳の日

本列島の活用」、「集中から分散」、「分散型の自然エネルギー」

かつての高度成長時代は「大きいことは良いこと、より速く」などがキーワードであったが、これは高エネルギー社会に通じる道であった。そして石油ショック時、徹底した省エネルギーで、日本はむしろ国際的に優位に立ったのである。しかし今度の石油減耗は、地球の限界による本質的なものである。発想を全く変える必要に迫られている。

幸い国民の意識は、変わりつつある。原点としての理念も、「物より心」である。内閣府の調査によれば、「物の豊かさより心の豊かさ」を優先、重視する国民が6割に達している。この「物と心の逆転」は、20年前から始まっていた。

ところが、不況の90年代、日本政府は膨大な税を費やし、公共事業として橋、道路、箱ものを作り続け、膨大な借金の山を築いた。そして今科学技術振興と称して大学、国研などは建築ラッシュ、箱もの作りに忙しいが、魂はまだ入らない。このように税の浪費は今も続く、環境ですら技術、ビジネス優先である。そして「日本人の心」は貧しくなった、マネーは人心を荒廃させるようである。最後に図1-12は、人類の万年単位の過去、未来である。何も説明を要しない。人類の未来が、こうならないことを願っている。

著名な生態学者A.ロトカは、「エネルギーが豊富なとき、エネルギーを最も多く使う生物種が栄えるが、エネルギーが乏しいときエネルギー使用最小の種のみ生き残る」といつている。教訓的である。尚本報告書においての説明不足は、石井吉徳氏のホームページ<sup>3)</sup>を参照されたい。

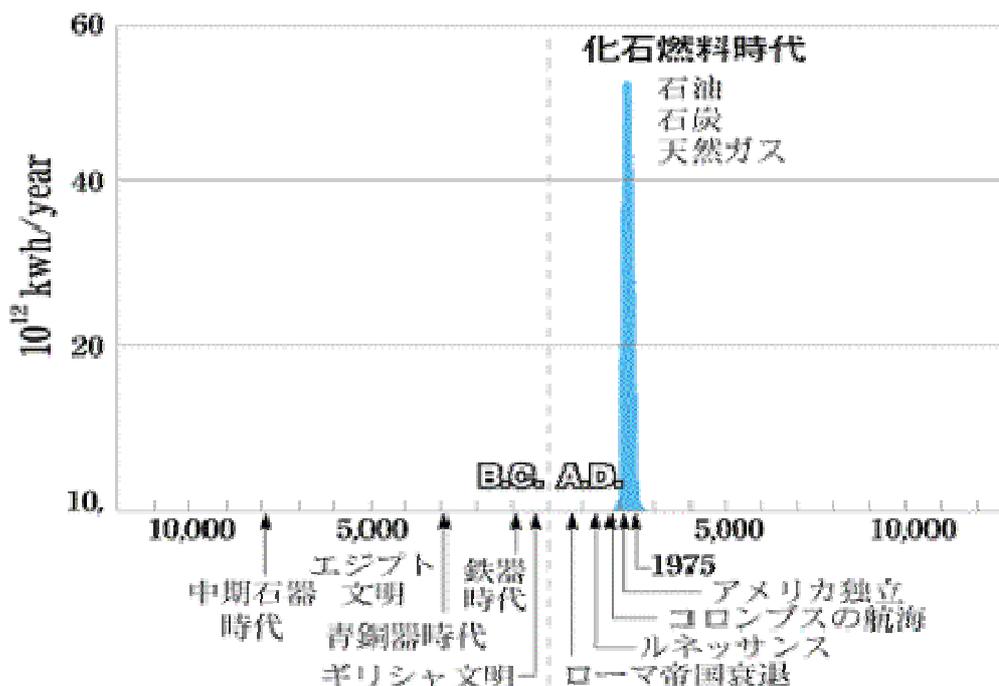


図1-12 化石燃料時代は人類史上では一瞬

## 参考文献

- 1) ASPO ホームページ <http://www.peakoil.net/>
- 2) 石井吉徳、「高く乏しい石油時代が来た」、第1回地質調査総合センターシンポジウム・21世紀のエネルギーをめぐる問題 日米の専門家による講演会とWS資料、2005.
- 3) 石井吉徳氏ホームページ <http://www007.upp.so-net.ne.jp/tikyuu>

## 2. オイルピーク論の概要と研究動向

2 章では本委員会において議論の対象とする石油や石油の埋蔵量等に関する定義を明確にするため、これらの具体的な定義について解説する。さらにオイルピーク論に関する概要と最近の研究動向について解説する。

### 2.1 石油系炭化水素に関する概要

本節では石油系炭化水素の分離、および資源量や埋蔵量等に関する定義について述べる。

#### 2.1.1 石油系炭化水素の分類<sup>1)</sup>

石油と天然ガスは地下の貯留層に天然に存在し、その主成分はメタン、エタンを始めとする各種炭化水素のほか、不純物として硫黄、酸素、窒素などの化合物も含み、極めて多種類の化合物の混合体である。地表状態で液状のものを石油、ガス状のものを天然ガスと一般に呼ぶが、地下で液状のものが地表では一部ガス状となって石油とともに産出するもの（随伴ガス）や地下でガス状のものが地表では液状となるもの（ガスコンデンセート）、またガス状で産出した流体からプラントで液分を抽出処理することで得られる天然ガス液（NGL：Natural Gas Liquid）などの産物もある。また温度圧力条件を低温高圧に保つことで天然ガスを液化して輸送する液化天然ガス（LNG）や随伴ガスからプロパン、ブタン分を抽出して液体燃料として輸送・利用する液化石油ガス（LPG）、は世界的に普及しており、さらには天然ガスを、化学プロセスを通して液体燃料化する GTL（Gas to Liquid）技術などが開発されつつある。また石油には通常原油（液体）のほかには地表条件で固体を呈する天然ビチューメンも含まれる。天然ビチューメンの一部は露天掘りや水蒸気を用いた回収技術により開発されている。これら全てにオイルシェールも含めて石油系炭化水素と総称する。

地下の状態から油田ガス田で地表に生産され、処理・輸送されて消費者に製品として届くまでの流れの概要を図 2-1 に示す。

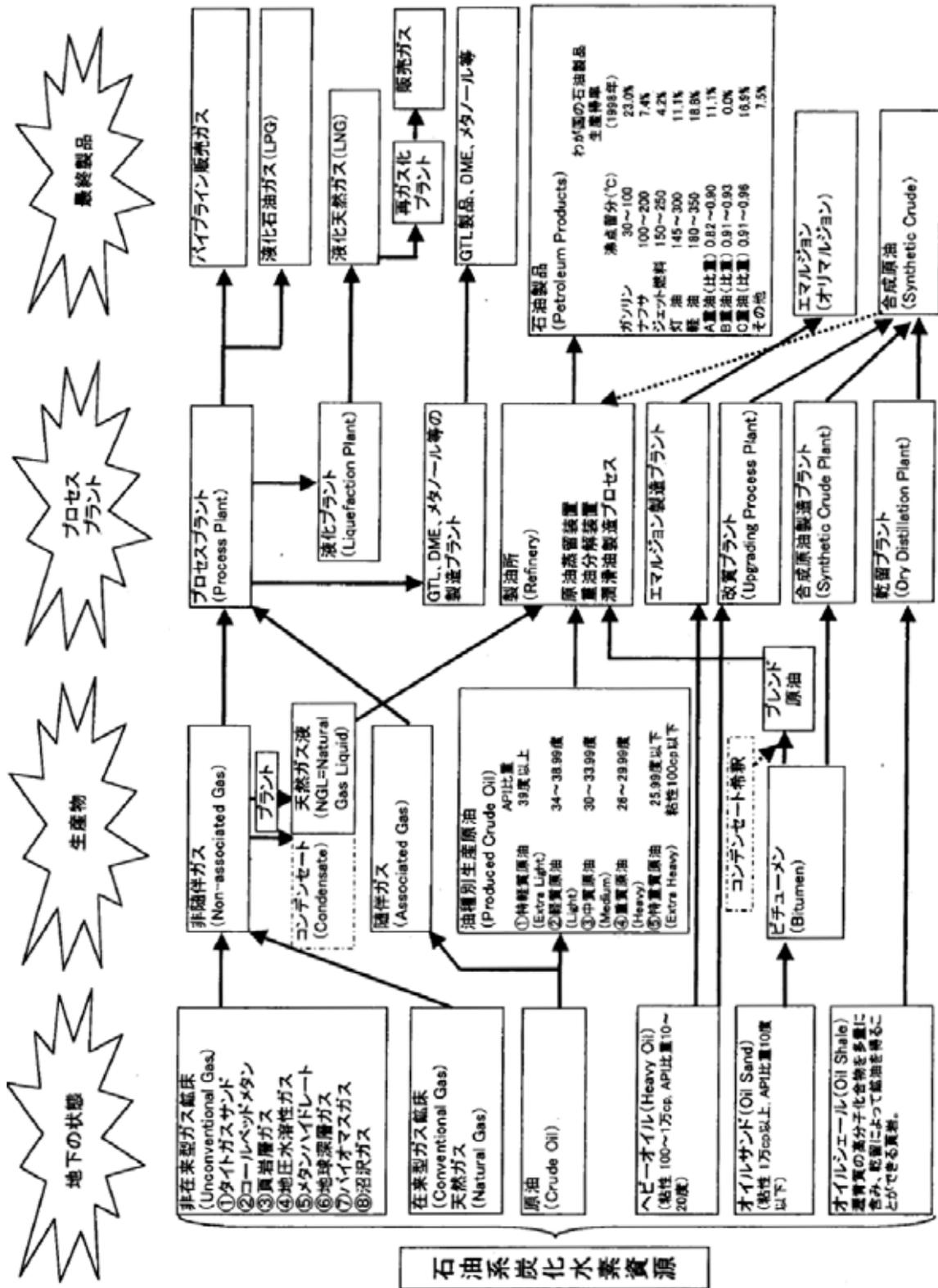


図 2-1 石油系炭化水素資源の分類<sup>1)</sup>

## 2.1.2 資源量・埋蔵量・生産量に関する定義

### (1) 一般的な定義

埋蔵量（埋蔵鉱量あるいは単に鉱量ともいう）とは、貯留岩(油・ガス層)中に存在する石油・ガスの量をいい、通常、1気圧(14.7psia)、常温(60°F)条件(stock tank volume)または油層条件(reservoir condition volume)で換算した値で表す。

埋蔵量については一般的に、生産開始以前に貯留岩中に存在していた油層、ガス層内の原油・ガスの総量を原始埋蔵量(original oil〔又はgas〕 in place)と呼ぶ。そのうち、油・ガス田を実際に開発している場合、適切な技術・経済条件において、今後採収可能な油・ガスの量を究極可採埋蔵量(ultimate recoverable reserves)又は総可採埋蔵量(total recoverable reserves)という。究極可採埋蔵量のうち、試掘井や深堀井、及び評価井の掘削により探し出した資源量を既知埋蔵量(discovered reserves)、まだ未発見の量を未発見埋蔵量(undiscovered reserves)という。既知埋蔵量のうち、既に生産を終えた量を累計生産量(cumulative reserves)、まだ生産していない量を確認埋蔵量(proved reserves, proven reserves)と呼ぶ。さらに未発見埋蔵量のうち、試掘段階に入っており、地質学的に見て賦存が推定されるものを推定埋蔵量(probable reserves)といい、まだ試掘されていないトラップ構造だが、周囲の地質学的資料から算出が予想されるものを予想埋蔵量(possible reserves)という<sup>2)</sup>。

ただし、埋蔵量の定義、分類及び計算方法はさまざまであり、必ずしも統一されていない。例えば日本工業規格(JIS M 1006-1992)では図2-2に示す資源量埋蔵量区分を用いている<sup>1)</sup>。

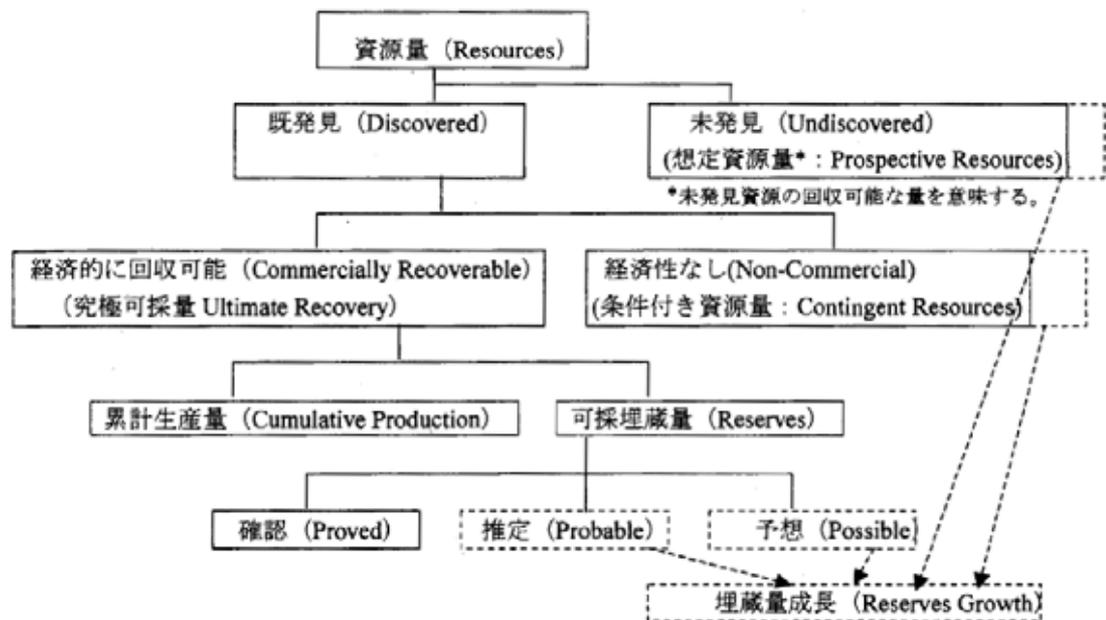


図2-2 資源量埋蔵量区分ツリー図<sup>1)</sup>

そこで本報告書では埋蔵量に対する定義を明確にするため、現在石油業界で最も広汎に用いられている米国証券取引委員会（SEC：Securities and Exchange Commission）及び米国石油技術者協会（SPE：Society of Petroleum Engineers）/世界石油会議（WPC：World Petroleum Congress）による埋蔵量定義について記述し、さらに埋蔵量算定に関するガイドラインを記述する。

## （2）埋蔵量と資源量<sup>3)4)</sup>

資源量とは一般的に地下に存在する全ての炭化水素量を指し、既に生産されている量を含む場合もある。CIM（Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum）は資源量について「資源量とはある時点における石油・ガス及びそれに関連する物質の総量であり、既発見の油・ガス集積（accumulation）に存在すると推定される量、その集積からその時点までに既に生産された量および未発見の集積に存在すると推定される量の総計である。」と定義している。

また埋蔵量の定義については資源量の一部であると広く認識されており、資源量が埋蔵量と認定されるためには a) 既発見である b) 回収可能である c) 経済性を有する d) 残存している、の4つの条件を満たす必要がある。以上から SPE/WEC は埋蔵量について「埋蔵量とはある時点以降に、既発見の油・ガスの集積から経済的に回収可能と考えられる炭化水素の量である」と定義している。

## （3）埋蔵量定義とガイドライン<sup>4)</sup>

現在、業界で用いられている埋蔵量定義には多くのものがあるが、1997年に発表された SPE/WEC の定義が世界基準に最も近いものとなっている。現在、用いられている大部分の定義は埋蔵量評価に伴う不確定性を反映した分類を用いている。一般的には確認、推定、および予想という用語が評価の不確定性を反映するように定義されている。さらに、埋蔵量の「開発状況」に基づいて細分化する定義も見られる。

埋蔵量定義は決定論的な算出手法と確率論的な算出手法の違いを反映し、2つのタイプに大別される。

- ・決定論的には「合理的確実さをもって（reasonably certain）とか、「実質的に確からしい（virtually certain）」、「確立された（established）」といった用語に基づいた定義
- ・確率論的には、確率あるいは確実性のレベルが、例えば 90%、85%、80%であるというように一定の数値レベルに基づいた定義

SPE/WEC 定義は以下の点からその重要性が指摘されている。

- ・一般に用いられている定義のうち最も包括的である
- ・世界の石油・ガス業界で最も広汎に用いられており、認知されている

・国際的に認知され、広く業界で用いられる定義として、最も可能性の高いものである以下ではその定義の詳細について述べる。

(i) 埋蔵量

埋蔵量とは、ある時点以降に既発見の集積から経済的に回収可能と考えられる石油 (petroleum) の量である。全ての埋蔵量評価は主に「評価と解釈の時点において使用可能な、信頼できる地質学のおよび工学的データの量」を反映した、ある程度の不確実性を伴うものである。そして埋蔵量は、「不確定性の程度」に応じて「確認」および「未確認」埋蔵量に分類される。さらに後者は、「推定」および「予想」埋蔵量に細分され、「それらの回収に対する不確定性が増加していく」ことを示す。

(ii) 確認埋蔵量

確認埋蔵量とは地質学的、工学的データの解析により、ある時点以降に既知の貯留層から、現状の経済条件、創業方法および規制の下で、商業的に回収されることが合理的確実さをもって予想される石油の量。

(iii) 未確認埋蔵量

未確認 (推定+予想) 埋蔵量は、「技術、経済、契約、法律上の不確実性により確認埋蔵量からは排除された」部分である。さらに未確認埋蔵量は、「将来経済条件が改善され、技術的進歩がみられる」ことを前提として算定される。

(iv) 推定埋蔵量

地質学的、工学的データの解析により、おそらく (more likely than not) 回収できると考えられる未確認埋蔵量。確率論的手法を用いる場合には確認+推定埋蔵量以上の量が実際に回収できる確率が少なくとも 50%なければならない。

(v) 予想埋蔵量

地質学的、工学的データの解析により、推定埋蔵量よりも回収できる確度が小さいと考えられる未確認埋蔵量。確率論的手法を用いる場合には確認+推定+予想埋蔵量以上の量が実際に回収できる確率が少なくとも 10%なければならない。

表 2-1~3 にこれらの基準について示す。

表 2-1 SPE/WEC埋蔵量定義：確認埋蔵量の基準<sup>4)</sup>

商業生産
実際に生産テストしないフォーメーションテストが実施されていることが必要。ただし、同一地域における生産実績のある貯留層の検層／コアデータとの比較から、炭化水素の胚胎が証明できる場合はその限りではない。
確認埋蔵量エリア
i) 掘削により確認され、流体界面によって定義されるエリア。流体界面に関する確実なデータが存在しない場合は、炭化水素の下限までとする。 または ii) 商業的な生産性を有すると考えられる未掘削域（「未開発ロケーション」の項参照）
確認埋蔵量の算定対象とできる未開発ロケーション
i) 商業的生産性が確認されている坑井の隣接域 かつ ii) 確認されている生産境界の内側 かつ iii) 坑井間隔に関する規定が存在する場合には、それに従ったロケーション かつ iv) 開発されることが確かであるロケーション および v) 貯留層が水平方向に連続しており、商業的に回収可能な石油を胚胎していることが確かな他のロケーション
現在の経済条件
油価とコストは過去のある期間の平均に基づいてもよい。ただし、将来に対しては一定値を保つこととする（契約によって設定されている場合を除く）
施設
i) 現存し、操業可能な状態にあり、埋蔵量の処理および市場への油層が可能であること。 または ii) そのような施設が設置されていることが合理的に期待されること
回収率向上法
A. 確立された手法 i) 同一ないし類似エリアにおいてパイロットが成功していること かつ ii) そのプロジェクトが実施されることが確かであること B. 商業的には実証されていない手法 i) 同一の貯留層においてパイロットないしプログラムが成功していること かつ ii) そのプロジェクトが実施されることが確かであること

表 2-2 SPE/WEC埋蔵量定義：推定埋蔵量の基準<sup>4)</sup>

商業生産
テストは実施されていないものの、検層データおよび／あるいはその地域における既存貯留層との比較から生産性があると考えられる層
推定埋蔵量のエリア
<ul style="list-style-type: none"> <li>i) 確認埋蔵量とするには地下のコントロールが不十分なエリアで、ステップアウト井の掘削によって確認埋蔵量とできるエリア</li> <li style="text-align: center;">または</li> <li>ii) 法定の坑井間隔を適用しなければ、確認埋蔵量とできるエリアで、インフィルドリリングを実施することによって、確認埋蔵量に追加できるエリア</li> <li style="text-align: center;">または</li> <li>iii) 確認埋蔵量のエリアと断層によって隔てられており、確認埋蔵量のエリアより構造的に上位に位置するエリア</li> </ul>
回収率の増加
<ul style="list-style-type: none"> <li>i) 圧力パフォーマンスや容積に関するデータの解釈を変えることにより、より高い回収率が見込める場合の増分</li> <li style="text-align: center;">または</li> <li>ii) 類似した貯留層における有効性は実証されていないものの、改修等の機械的処置によって見込める増分</li> </ul>
回収率向上法
確立された手法 <ul style="list-style-type: none"> <li>i) プロジェクトないしパイロットが計画されているが、実施はされていないもの かつ</li> <li>ii) 流体および貯留層性状からみて、かつ商業上の適用が望ましいもの</li> </ul>

表 2-3 SPE/WEC埋蔵量定義：予想埋蔵量の基準<sup>4)</sup>

商業生産
検層データおよび／あるいはコア分析の結果から、炭化水素の胚胎が考えられるが、商業レートでの生産性は有していない可能性のある層
予想埋蔵量のエリア
<ul style="list-style-type: none"> <li>i) 推定埋蔵量のエリアを超えて埋蔵量が期待できるエリア</li> <li style="text-align: center;">または</li> <li>ii) 技術的な不確実性はあるものの、インフィルドリリングを実施することによって、埋蔵量を追加できるエリア</li> <li style="text-align: center;">または</li> <li>iii) 確認埋蔵量のエリアと断層によって隔てられており、確認埋蔵量のエリアより構造的に下位に位置するエリア</li> </ul>
回収率向上法
<ul style="list-style-type: none"> <li>i) プロジェクトないしパイロットが計画されているが、実施はされていないもの かつ</li> <li>ii) その商業性に関して正当な疑いがもたれるもの</li> </ul>

また表 2-4 に各国における埋蔵量の分類システムを纏めたものを示す。

表 2-4 各国の分類システム<sup>4)</sup>

Country	Reference	Discovered			Undiscovered
		Proved	Probable	Possible	Potential
Australia	Bureau of Mineral Resources	Proved and Probable		Possible	
	Australian Minerals & Energy Council	P1 (93%)	P2 (40%)	P3 (5%)	
	National Energy Advisory Committee	Identified & Economic	Demonstrated	Inferred	Hypothetical & Speculative
Austria		90% Certainty	50 to 90% Certainty	Less than 50% Certainty	Potential
Brazil		Proved-in producing wells	Probable-by statistical methods	Possible-by statistical methods	Potential
Canada	Canadian Petroleum Association and National Energy Board	Proved-Established, Best Current Estimate 90% Certainty	Probable-Best Current Upside Estimate, 50% Certainty	Possible-10% Certainty	Potential Resources (Future Discoveries)
	Petroleum Society, CIMMP, 1994	Remaining Proved-80% Certainty	Remaining Probable-40 to 80% Certainty	Remaining Possible-10 to 40% Certainty	Resources
Denmark	Producing Companies	Proved	Unproved		Potential
	Government	Proved	Probable	Possible	
Ecuador	Ministry for Natural Resources and Energy	Proved-Primary Production	Probable-Primary Production	Possible-Primary Production	Secondary Recovery Separately Handled
	State Oil Company (CEPE)	Proved	Probable	Possible-only by geological and geo-physical methods	
France	Comite des Techniciens Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Petrole et du Gaz Naturel	Proved	Probable	Possible	Hypothetical & Speculative
Germany		Proved	Probable	Technically and Geologically Indicated	Speculative
India		Proved-A+B	Probable-C1	C2	Fragnosticated Reserves-D1+D2
Iran		Proved-Probabilistic	Probable-Probabilistic	Possible and Speculative-Probabilistic	
Malaysia		Proved	Probable	Possible	
Mexico		Proved	Probable		Potential
Netherlands		Proved-90% Certainty	Unproved-Less than 90% Certainty		Potential
P.R. China		Proved	Probable	Possible	Resources
Russia	Semenovich, 1976	A+B+30% C1	70% C1+Part C2	Part C2+Part C3	Part C3+D1+D2
Spain		Proved	Probable	Possible	
UK	UK Department of Energy	Proved-Virtually Certain >90%	Possible-Above 50% Certainty	Possible-Less Than 50% Certainty	
USA	USGS McKelvey, 1975	Measured	Indicated	Inferred	Hypothetical+ Speculative
	SEC, 1979	Proved	Not Recognized	Not Recognized	Not Recognized
	SPE/SPEE, 1987	Proved	Probable	Possible	
	SPE/WPC, 1997	Proved-90% Certainty	Probable-50 to 90% Certainty	Possible-10 to 50% Certainty	
Venezuela	Ministry of Energy and Mines, 1966	Proved	Semi-Proved	Not Proved	Not Proved

(4) 埋蔵量評価と算定方法<sup>3)</sup>

埋蔵量の計算方法としては、容積法、減退曲線法、物質収支法、油層限界ゲスト法、油層シミュレーション法などがある。開発・生産初期段階などのデータが少ない場合には容積法、油層限界テスト法が一般的であり、他の手法は生産がかなり進んだ段階で使用されることが多い。日本工業規格(JIS) M1006-1975「原油及び天然ガス鉱量計算基準」

では、a) 適用範囲、b) 油層・ガス層の定義及び分類、c) 鉱量の定義及び分類、d) 鉱量の計算を定めている。JIS では d) の鉱量の計算につき、油層・遊離型ガス層については容積法、物質収支法、減退曲線法のみを、水溶型ガス層については容積法のみを規定している。容積法の適用に当たっては、いろいろなデータの信頼度に応じ、鉱量を**確認鉱量(proved reserves)**、**推定鉱量(probable reserves)**、**予想鉱量(possible reserves)** の三つに分類し、その計算法を規定している。確認鉱量とは最も信頼度の高い分類であり、その時点の経済条件下で、地質的・油層工学的データに基づき、油・ガス層から採取し得ると判断される油・ガスの量である。

JIS では原油の場合、産出井を中心とした集油構造内半径 100m の円内の地域又はそれらの包絡線内を確認地域とし、その地域内の原始埋蔵量に採取率を乗じて求めるとしている。同様に JIS による推定鉱量、予想鉱量の対象地域はそれぞれ、産出井の存在によって対象とする油層が連続することが地質学的に推定される地域のうちで、確認地域を除いた地域、原油の埋蔵が地質学的に予想される地域であって、確認地域及び推定地域以外の地域と定められている

以下では油層評価の一環として行われ原始埋蔵量又は可採埋蔵量の算定方法について容積法、減退曲線法、物質収支法、油層シミュレーション法の概要について述べる。

#### ( i ) 容積法(volumetric method)

油田開発の初期に原始埋蔵量の算定手段としてよく用いられる手法である。これは貯留岩の孔隙内に存在する流体の体積を概算するもので、次の基本式 (2-1) ~ (2-3) から算出される。この埋蔵量算定には、油層・ガス層部の広がり及び有効層厚、孔隙率、水飽和率の油層・ガス層内分布を求めることが必要である。

$$N = \frac{V_1 \phi (1 - S_w)}{B_o} \quad (2-1)$$

$$G_1 = NR \quad (2-2)$$

$$G_2 = \frac{V_2 \phi (1 - S_w)}{B_g} \quad (2-3)$$

$V_1$  : 油層岩の体積(有効層厚を基準にしたもの)

$\phi$  : 孔隙率

$S_w$  : 水飽和率

$B_o$  : 油容積係数

$B_g$  : ガス容積係数

$R$  : 溶解ガス油比

$V_2$  : ガス層部の岩石の体積(有効層厚を基準にしたもの)

$N$  : 原油の原始埋蔵量

$G_1$  : 溶解ガスの原始埋蔵量

$G_2$  : 遊離型ガスの原始埋蔵量

### (2) 減退曲線法(decline curve method)

油・ガス田の生産が継続されると、油層圧の低下又は水・油比、ガス・油比の上昇などによって個々の坑井あるいは油・ガス田全体の生産レートは漸次減退していく。減退曲線法は、生産レートの減退の傾向と最もよく一致する曲線あるいは式によって将来の減退を予測する方法である。減退曲線を図示する方法としては、生産レートと時間の関係をプロットするのが一般的であるが、水押し強い油層では、累計生産量と水・油比の関係をプロットすることもある。可採埋蔵量は、グラフ上で経済限界生産レートに達する時間までの、今後の累計生産量として評価される。一定傾向の減退曲線を知るためには、長期間一定の採取方法で生産する必要がある。

### (3) 物質収支法(material balance method)

油層又はガス層に質量保存の法則を適用することによって、油層・ガス層から地上に採取された各種流体の累積量と、それに対応する油層・ガス層内の圧力変化、原油—ガス系の相変化、地層水の浸入量などとの関係を式(2-4)に示す物質収支式で表す。

$$N \left\{ m_0 \beta_0 \left( \frac{\alpha}{\alpha_0} - 1 \right) + \alpha (S_0 - S) - (\beta_0 - \beta) \right\} = n \{ \beta + \alpha (\gamma_m - S) \} - (W - \omega) \quad (2-4)$$

$N$  : 原油の原始埋蔵量

$m_0$  : 原始時の層内のガス相容積と油相容積との比

$\beta_0$ 、 $\beta$  : 原油の容積係数

$\alpha_0$ 、 $\alpha$  : ガスの容積係数

$S_0$ 、 $S$  : 原油に対するガスの溶解度

$n$  : 計算時までの累計産油量

$\gamma_m$  : 計算時までの累計ガス・油比

$W$  : 計算時までの累計浸入水量

$\omega$  : 計算時までの累計産出水量

(以上、 $\beta_0$ 、 $\alpha_0$ 、 $S_0$ は原始時の、また $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $S$ は計算時の油層圧力、温度における値) この関係式(2-4)を基にして石油・ガスの産出経過に伴う油層・ガス層内の物理的状態を予知する方法を物質収支法というが、狭義にはこの関係を用いた原始埋蔵量の算出法ということが多い。この方法によって埋蔵量を算出できるのは、少なくとも原始埋蔵量の

5～10%を採取した後で、しかも計算に必要な諸量が的確に測定されている場合に限る。

(iv) 油層シミュレーションによる方法

油・ガス層の生産挙動を予測するために、油層シミュレーション・モデルを用いたスタディが実施される。油層モデルは、油層の大きさや孔隙率、浸透率、飽和率などの初期の分布をあらかじめ入力する必要がある、この初期値を用いて原始埋蔵量が容積法により計算される。更に生産予測計算の段階では、ある一定の採取条件下での油層挙動及び可採埋蔵量が評価される。生産履歴のある油・ガス層では、生産量の実績及び坑底圧力などのデータとモデル計算値との比較検討(履歴・マッチング)が行われ、この過程で原始埋蔵量の見直しが行われることも多い。

## 2.2 オイルピーク論の概要と研究動向

### 2.2.1 オイルピーク論の概要

1945年以降、石油発見量は急増しており1950年以降は石油生産量も急増して現在に至っている。石油需要量はオイルショック時に一時的に減少したが、その後は回復し、現在では1950年頃の10倍近くの約300億バレル/年に達している。

日本を含む多くの国々にとって石油は主要なエネルギー源であり、社会的必需品・商品であることから石油生産量の社会的・経済的な影響は大きいと考えられている。特に近年、原油価格の高騰から石油資源の将来予測に対する関心が急速に高まりつつあり、それらは「ピークオイル説」を唱える悲観論者と「チープオイル説」を唱える楽観論者を中心に議論が行われている。21世紀以降はこれら悲観論者と楽観論者の議論が過熱してきており、様々な場で論文・講演が発表されている。

悲観論者（地質学者が中心）の唱えるピークオイル説は、石油生産は2010年までにピークを迎え、それ以降は増産期を裏返しにした形で急速に減退し、今世紀半ばに枯渇するとするものである。この場合、天然ガスや新エネルギーは石油生産の減退分と今後の需要増を全てまかない、数十年後には完全に代替する必要があるとしている。また高油価により経済競争力は保証されるが、リードタイムが短く、人類は壊滅的な打撃をうける危険があるとしている<sup>5)6)</sup>。

ピークオイル説の議論は1956年にHubbert曲線に代表される左右対称のベル型のロジスティック曲線で米国48州（アラスカ、ハワイの除く48州）の石油生産量を予測したM.King.Hubbertの論文<sup>7)</sup>が元となっている。M.King.Hubbertの考えは地球の石油埋蔵量は既に知られた固定的な量として把握可能であり、Hubbert曲線に基づいて過去の生産履歴から生産量のピーク時期を求めることが可能というものである。また、Hubbert曲線を当てはめると最終累計生産量（究極可採埋蔵量）が約2兆バレルの曲線が最もよく適合するというものであり、ただし最近の悲観論者の論文では究極可採埋蔵量を約1.8兆バレルと予測している<sup>5)8)</sup>。

これら地球の資源が有限であるという議論は、昔から繰り返しなされている。1972年、ローマクラブの発表した報告書『成長の限界』<sup>9)</sup>では、「人口増加と経済成長が空前のレベルに達した現在（ただし30年以上前）、人類は地球の大きさの有限性とその上での人間の生存と活動の限界を考慮しなければならない」と警鐘を發し、資源の有限性を指摘した上で、「成長の継続」のみに拠らない代替策を求めている。

他方、楽観論者（経済学者が中心）が唱えるチープオイル説では、石油資源は豊富で当面は供給サイドに大きな障害はなく、今後の需要増に応じて指数関数的に増産を継続していくが、やはり今世紀半ばまでには需要増に応じた増産は困難になり生産量は急落

せざるを得ないと予測している。このケースでは数十年のリードタイムが与えられるが、その間は低油価で新エネルギーへの転換は進まないと予測され、現在の2倍以上の需要を短期間に全面的に代替する必要があるとしている。

楽観論者は資源量とは固定的なものでなく、埋蔵量成長、技術革新、インフラ整備、政治効果、経済効果などで埋蔵量が上乘せされるという前提に立っている。一般に楽観論者として多く引用される国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）の予測<sup>10)</sup>、および米国エネルギー省エネルギー情報局（EIA：Energy Information Administration）の予測<sup>11)</sup>では、2000年に発表された米国地質調査所（USGS：U.S. Geological Survey）によるP50値である3兆バーレルという究極可採埋蔵量評価を前提<sup>12)</sup>としており、当面供給危機は起こらないと結論している。

我が国でも近年、急速にオイルピークに関する関心が高まっており、オイルピークを踏まえた政策・戦略提言の必要性に関する声が国内の各分野で高まっている<sup>13)14)</sup>。Colin.J.CampbellやJean.H. Laherrereを中心とする悲観論者はASPO（Association for the Study of Peak Oil）を組織し、石油ピークに関する国際的な議論を行っており、我が国にでもこうした国際的な枠組みの中でオイルピークに関する議論を行うべきだという意見も数多くある。

## 2.2.2 オイルピーク論に関する研究動向

本節ではオイルピーク論に関する最近の研究動向について述べる。表 2-5-1～2 に M.King.Hubbert 以降のオイルピークに関する研究の概要についてオイルピーク予測時期、予測者（研究者、著者）、オイルピーク予測結果、および所属について示す。

表 2-5-1 オイルピーク論に関する研究の概要（1956～2000）<sup>15)16)17)18)</sup>

予測時期	研究者・著者	オイルピーク予測結果	所属
1956	M.King.Hubbert	2000	Shell (Major Oil Company)
1969	M.King.Hubbert	2000	Shell (Major Oil Company)
1972	ESSO	increasingly scarce by 2000	Major oil company
1972	Rene Dubos , Barbara Ward	by 2000	Report for the UN Confr. on Human Environment
1976	W.Marshall	about 2000	UK Department of Energy
1977	M.King.Hubbert	1996	Shell (Major Oil Company)
1977	Paul Ehrlich	2000	Stanford University Professor
1979	Shell	plateau within the next 25 years	Major oil company
1979	BP	Peak (non-communist world): 1985	Major oil company
1981	World Bank	plateau around the turn of the century	
1983	Peter R. Odell, Kenneth E. Rosing	2025	Economist, Professor (Erasmus University)
1989	John F. Bookout	2010	Shell (Major Oil Company : geologist)
1991	Colin.J.Campbell	1992-1997	Oil company geologist
1993	Jean.H.Laherrere	2000	Oil company geologist
1993	Townes,H.L.	2010	Geologist
1995	Petroconsultants, '95	about 2005	
1995	John Jennings	2025	Shell (Major Oil Company)
1995	Jean.H.Laherrere	2000	Oil company geologist
1995	Franco Bernabe	2005	Italian oil company ENI
1995	Jean.H.Laherrere, Colin.J.Campbell	2005	Oil company geologist
1996	Wood.Mackenzie	2007-2019 (2014)	Resercher
1996	L.F.Ivanhoe	2010	UNI of CO
1996	John.F.Appleby	2010	BP (Major Oil Company)
1996	Joseph J. Romm, Charles B. Curtis	2030	Department of Energy
1996	Richard C. Duncan	2005	Electrical Engineer
1997	Colin.J.Campbell	1998-2008	Oil company geologist
1997	Murray Edwards	2020	Canadian Natural Resources Ltd
1997	Richard C. Duncan, Walter Lewellyn Youngquist	2007	Electrical Engineer, Geologist
1998	International Energy Agency (WEO1998)	2010-2020 (2014)	
1998	Randy Udall , Steve Andrews	2013	ASPO
1998	Wolfgang.Schollnberger	2015-2020	BP Amoco (Major Oil Company)
1998	Franco Bernabe	2005	Italian oil company ENI
1998	Richard C. Duncan	2006	Electrical Engineer
1999	Richard C. Duncan	2005	Electrical Engineer
1999	L.G.Magoon	-2010	USGS
2000	Richard C. Duncan	2007	Electrical Engineer
2000	L.G.Magoon	2005	USGS
2000	Lord Browne	2010	BP (Major Oil Company)
2000	Albert A. Bartlett	2004/2019	Colorado University (Physicist)
2000	Peter.Davies	not near future	BP Amoco economist

表 2-5-2 オイルピーク論に関する研究の概要 (2001~2006) <sup>15)16)17)18)</sup>

予測時期	研究者・著者	オイルピーク予測結果	所属
2001	Kenneth.S.Deffeyes	2004-2008	Oil company geologist
2001	Matthew.R.Simmons	2010-2015	Investment banker (Simmons & Company International)
2001	Richard C. Duncan	2006	Electrical Engineer
2001	World Energy Council	After 2010	World Non-Governmental Organization
2002	R.W.Bentley	2007-2012	Proffesor (Reading University)
2002	Richard C. Duncan	2008	Electrical Engineer
2002	Jean.H.Laherrere	2015	Oil company geologist
2002	Ray C. Leonard	by 2020	ASPO (Yukos Oil)
2002	Pierre-René Bauquis	by 2020	ASPO
2002	Michael R Smith	2011-2016	Energy Network (global oil and gas forecasting company)
2003	Richard Nehring	2020-2040	NRG Associates
2003	Walter Lewellyn Youngquist	by 2013	Geologist
2003	L.F.Ivanhoe	2010-2020	UNI of CO
2003	Richard C. Duncan	2003-2016	Electrical Engineer
2003	Colin.J.Campbell	Around 2010	Oil company geologist
2003	Kenneth.S.Deffeyes	-2005	Oil company geologist
2003	Mathew.R.Simmons	2007-2009	Investment banker (Simmons & Company International)
2003	Ged Davis	2025 or later	Shell (Major oil company)
2003	Michael.C.Lynch	no peak	Energy economist
2003	Peter.Odell		
2004	A.M.Samsam.Bakhitari	2006-2007	National Iranian Oil company
2004	Chris Skrebowski	2011 (After 2007)	Petroleum journal Editor (Oil Depletion Analysis Centre)
2004	Cambridge Energy Research Associates	After 2020	energy consultants
2004	David.Goodstein	2000-2010	Vice Provost, CalTech (Physicist)
2004	John.H.Wood	2016	Energy Information Administration/US Department of Energy
	Jay Hakes	2026(Low),2037(Mean),2047(High)	
2005	Alfred Cavallo	2015-2020 (n-OPEC)	Energy consultant
2005	Renato Guseo	2007	Department of Statistical Science(Italy)
2005	Ugo Bardi		Proffesor (Italy)
2005	Kenneth.S.Deffeyes	Before 2009 (2005)	Oil company geologist
2005	M.A.Adelman	no peak	MIT
2006	Mamdouh G.Salameh	2004-2005	Consultant
2006	David.L.Greene	2020	National Transportation Research Center, USA
2006	Colin.J.Campbell	Around 2010	Oil company geologist
2006	Jean.H.Laherrere	2010-2020	Oil company geologist
2006	Michael R Smith	2006-2018	Energyfiles (global oil and gas forecasting company)

表 2-5 に示したオイルピークに関する研究概要において、特に 2000 年以降（ただし、M.King.Hubbert は例外とする）に発表された研究について、その詳細を述べる。

表 2-6-1~11 において、2000 年以降の主要な研究の予測時期、研究者・著者、オイルピーク予測結果（表中では「予測結果」と記す）、ピーク時における石油生産量（表中では「石油生産量」と記す）、予測手法、使用データ、および参考文献を示す。

表 2-6-1 オイルピークに関する研究の詳細

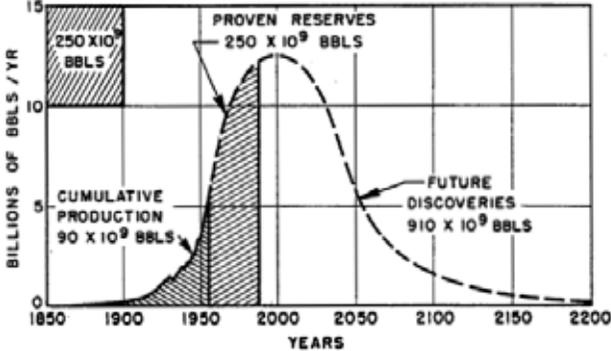
予 測 時期	研究者・著者	予 測 結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
1956	M.King.Hubbert	2000	累積生産量: 90 billion barrels/y 確認埋蔵量: 250 billion barrels/y 未発見埋蔵量: 910 billion barrels/y	<p>ハバート曲線による予測：石油産出量をロジスティック曲線で近似。累積産油量を密度関数に、単位産油量を分布関数で表し、結果的に石油生産量がガウス分布に似た釣鐘型分布になる。1971 に米国の石油生産がピークを向かえることをほぼ正確に予測した。</p>  <p>図 2-3 ハバート曲線による石油ピーク予測結果</p>	<p>世界確認埋蔵量：L.G.Weeks (Standard Oil Company) data 中東確認埋蔵量：Wallace E.Pratt (Report Of the Panel on the Impact of the Peaceful Uses of Atomic Energy) data 米国確認埋蔵量：American Petroleum Institute data</p>	7)
2000	Peter.Davies	not near future		<p>確認埋蔵量、究極可採埋蔵量、新規油田発見量、技術革新の可能性、石油価格高騰による採掘コストへの影響、石油ピーク予測手法などについて経済学的手法により既存データの検証・評価を行った。</p>	<p>確認埋蔵量、R/P 比： BP Amoco Annual Statistical Review of World Energy 究極可採埋蔵量：USGS data 開発量： CERA data 開発コスト：Major international oil companies data</p>	19)

表 2-6-2 オイルピークに関する研究の詳細

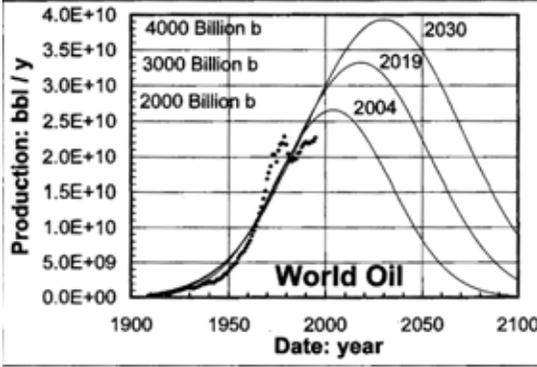
予 測 時期	研究者・著者	予 測 結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献	
2000	Albert A. Bartlett	2004/ 2019		<p>既存の石油生産量データに適合するハバート型ガウス曲線の3変数(究極可採埋蔵量、石油ピーク時期、ガウス曲線の幅)を導出する新たな石油生産量の将来予測手法を提案した。これら石油生産量既存データに適合する3変数は実データとガウス関数間の標準変数を最小化することによって導出することができる。</p>	EIA data	20)	
							
				図 2-4 Bartlett による石油ピーク予測結果			
2001	World Energy Council	After 2010			WEC Member Committees, 2000/2001, Oil & Gas Journal, Annual Statistical, Report, Annual Statistical Bulletin, BP Statistical Review of World Energy	21)	

表 2-6-3 オイルピークに関する研究の詳細

予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
2002	R.W.Bentley	2007-2012		Colin.J.Campbell と Jean.H.Laherrere をはじめとする多数の石油ピーク予測に関する参考データ、予測手法および予測結果の妥当性について Reading 大学のメンバーによる検証・評価を行い、さらにそれらの修正を行うことによって石油ピーク時期を独自に予測。さらには現在公表されている確認埋蔵量データの妥当性、埋蔵量増加の可能性、非在来型石油の可能性などについても検証・評価を行うことで独自の見解を述べている。	IHS Energy (Petroconsultants) data	22)
2002	Alfred Cavallo	2037 (EIA データ引 用)	55 billion barrels/y (EIA データ引用)	埋蔵量に関する USGS データを使用した EIA モデルに基づく石油ピーク予測の妥当性の検証・評価を行った。その結果、埋蔵量成長、未開発埋蔵量、R/P 比、n-OPEC 生産量の推移に関する見直し・修正を行い n-OPEC の石油ピーク時期を独自に予測した。	確認埋蔵量 : USGS World Petroleum Assessment data	23) 24) 25)
2003	Matthew.R.Simmons	2007-2009		エネルギー投資銀行 Simmons & Company International の代表。独自の確認埋蔵量データを用いて石油ピークの予測を行い、中東を始めとする主な石油生産国には既に石油生産減退傾向が出ており、石油ピークは避けられないと予測。シミュレーションやモデルによる予測は行っていない。		26) 27)
2003	Ged Davis	After 2025		USGS の最新のデータより可採埋蔵量を 3 兆バーレル (Shell の推計結果はさらに上回り、非在来型石油や NGL を含めるとさらに 1 兆バーレル増す) とし、石油ピークを予想した。	USGS data	28) 29)

表 2-6-4 オイルピークに関する研究の詳細

予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
2003	Michael.C.Lynch	No peak		悲観論者の予測手法、引用している埋蔵量データに関する矛盾点を指摘しており、経済学的見解から今後も石油需要量の増加を補うだけの石油生産は可能であるとし、石油生産がピークを迎えることはないと予想している。	UK Department of Trade and Industry IHS energy data	30) 31)
2003	L.F.Ivanhoe	2010-2020		USGS の油田開発データを修正して引用し、従来のハバート曲線を用いることによって石油ピークを予測した結果、石油ピークを 2000～2010 年の間と予測（ただし、これは 1997 年の予測であり、2003 年には 2010～2020 年と予測）。	USGS data	32) 33)

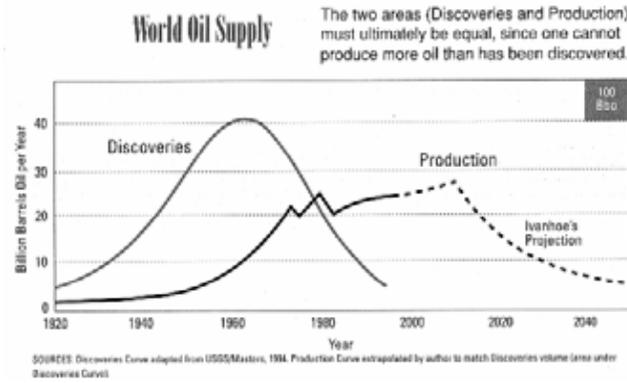


図 2-5 Ivanhoe による石油ピーク予測結果

表 2-6-5 オイルピークに関する研究の詳細

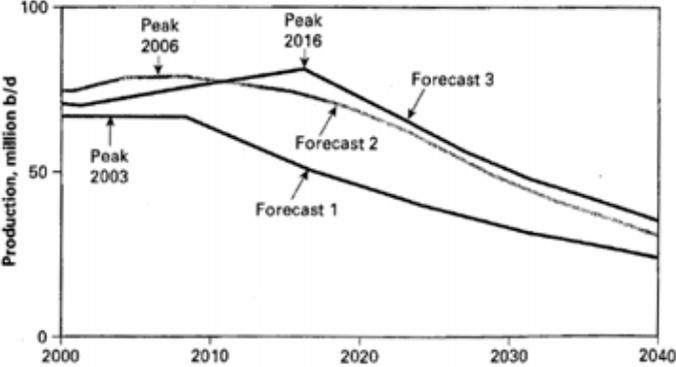
予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
2003	Richard C. Duncan Walter L. Youngquist	2003-2016	67 million barrels/d (2003 peak) 79 million barrels/d (2006 peak) 81 million barrels/d (2016 peak)	<p>ハバート曲線などガウス関数による曲線近似を行わず、7年かけて開発した Heuristic Oil Forecasting Method と呼ばれる石油ピーク予測ソフトウェアを使用するなど独自の手法で石油ピークを予測。</p>  <p>図 2-6 Heuristic Oil Forecasting Method による石油ピーク予測</p>	BP Amoco data Campbell data Bermudez data FLPH data	34) 35) 36)
2004	David Goodstein	2000-2010		<p>熱力学第一、第二法則に従ってオイルピークを分析し、石油採掘に係る投入エネルギーと算出エネルギーの比から Hubbert 曲線の妥当性を主張。独自にシミュレーションでピーク予測を行っていない。</p>	USGS data BP data	37)

表 2-6-6 オイルピークに関する研究の詳細

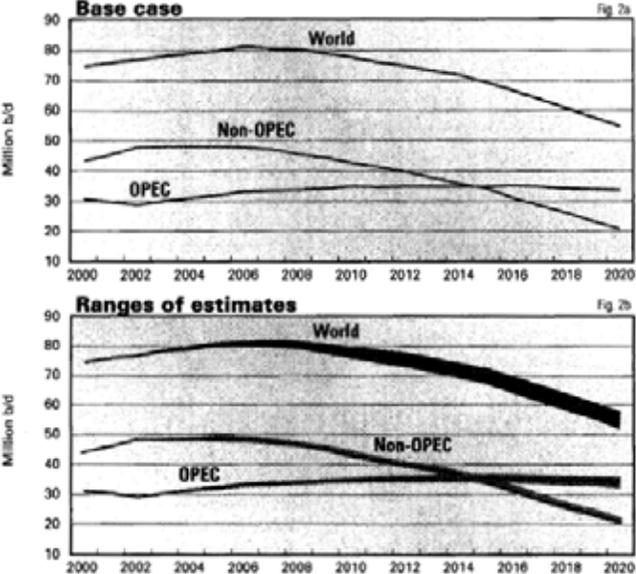
予測時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考文献
2004	A.M.Samsam.Bakhitari	2006-2007	81 million barrels/d	<p>World Oil Production Capacity (WOCAP) Model により石油生産量の中長期シミュレーションを行う。モデルは原油価格、石油産業キャッシュフローを説明変数として上流部門規模、新規油田開発規模、EOR 規模などを求め、世界の世界生産規模を予測する。特に2003年には地政学的要因やOPECの政策的不確実性を加味したモデルの改良を行った。</p> 	<p>究極可採埋蔵量： Campbell data</p>	<p>38) 39)</p>

図 2-7 WOCAP Model による石油ピーク予測

表 2-6-7 オイルピークに関する研究の詳細

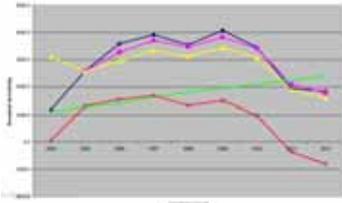
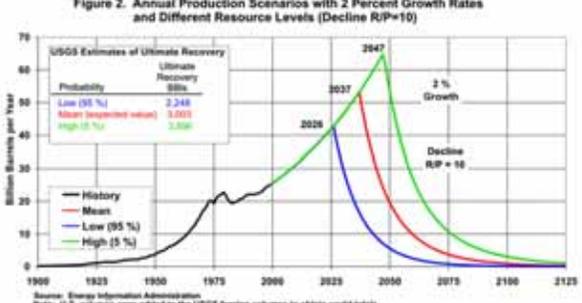
予測時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考文献
2004	Chris Skrebowski	After 2007 2010-2011	92-94 million barrels/d	<p>Petroleum Review および Oil Depletion Analysis Centre の石油開発プロジェクトデータの動向と将来の新規開発傾向との累計、および世界石油需要の傾向から石油生産量の将来予測を行った。2007 年までは需要を満たすだけの開発が可能であるが、それ以降はピークを迎える危険性が高いと予測。</p>  <p>図 2-8 Skrebowski による石油ピーク予測結果</p>	石油開発 PJ データ : Petroleum Review, Oil Depletion Analysis Centre data 世界石油需要量予測 : IEA data Publicly available data, OPEC website data	40) 41)
2004	John.H.Wood Jay Hakes	2016 2026 (Low) 2037 (Mean) 2047 (High)	53.2 billion barrels/y (Mean)	<p>石油生産関数については過去の成長トレンドに基づく成長関数と R/P 比 (石油ピーク時における R/P 比は 10 を使用) に基づく減退関数、さらに技術的に採掘可能な埋蔵量データから石油ピークの予測を行っている。</p>  <p>図 2-9 EIA による石油ピーク予測結果</p>	究極可採埋蔵量 : USGS data	11) 42)

表 2-6-8 オイルピークに関する研究の詳細

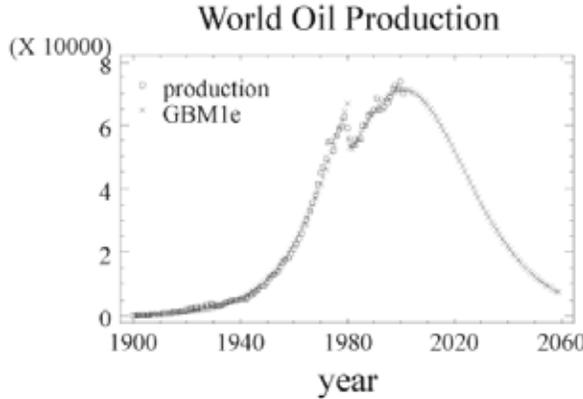
予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
2005	Renato Guseo	2007		<p>油田および天然ガス田における石油と天然ガスの開発、生産から枯渇までのライフサイクル挙動がライフサイクル拡散モデルである Generalized Bass Model (GBM) で近似できることを証明する。また実際に石油生産量データ (1900～2001) を用いてモデルの挙動を確認し、UK、ノルウェー、US、アラスカにおける石油生産データに適用することによって、これら各地域の石油枯渇モデルを構築した。</p>  <p>The graph, titled 'World Oil Production', plots production (in units of 10,000) against year from 1900 to 2060. The y-axis ranges from 0 to 8. The x-axis shows years at 1900, 1940, 1980, 2020, and 2060. Two data series are shown: 'production' (represented by open circles) and 'GBM1e' (represented by a solid line). The production data shows a steady increase until around 1980, followed by a peak around 2000, and then a decline. The GBM1e model closely follows the production data until the peak, after which it shows a smooth, symmetric decline, reaching zero around 2060.</p>	<p>Industry data bank EIA data</p>	<p>43) 44)</p>
2005	Kenneth.S.Deffeyes	Before 2009 (2005)		<p>基本的にはHubbert 曲線に代表されるロジスティック曲線で石油ピークを予測。ただし、可採埋蔵量などデータの見直しを行い新たな石油ピーク時期を 2004.7 年と予測。</p>	<p>Petroleum consultants data (Campbell の可採埋蔵量 1.8 trillion barrels は少し低いと見て 2.1 trillion barrels で予測)</p>	<p>6) 45)</p>

表 2-6-9 オイルピークに関する研究の詳細

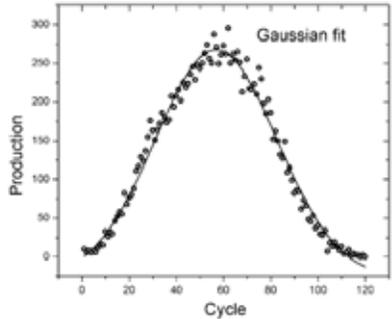
予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献																														
2005	Ugo Bardi			<p>石油生産を予測するための非対称確率モデルを構築した。モデルは Reynold モデルを原型にロトカボルテラモデルの要素を取り入れた改良型で、経済的要素、および技術的要素を加味した石油生産モデルを構築することに成功した。</p>  <p>Fig. 3. Fitting of the results of a "fixed time search" (see text) simulation with a Gaussian function.</p> <p>図 2-11 Bardi による石油ピーク予測結果</p>		46)																														
2006	Mamdouh G.Salameh	2004-2005		<p>世界の石油需要予測、石油生産量と油田枯渇状況に関する現状および今後の動向、究極可採埋蔵量、確認埋蔵量、石油生産減退率、新規油田発見量と今後の動向、非在来型石油の可能性などに関するデータの積み上げから石油ピークを予測。</p> <p>表 2-7 Salameh による石油ピーク予測</p> <table border="1" data-bbox="958 1189 1612 1372"> <thead> <tr> <th></th> <th>2005</th> <th>2010</th> <th>2020</th> <th>2030</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>World demand</td> <td>84.50</td> <td>93.30</td> <td>114.70</td> <td>127.00</td> </tr> <tr> <td>World supply</td> <td>81.09</td> <td>87.90</td> <td>100.60</td> <td>92.50</td> </tr> <tr> <td>  OPEC</td> <td>31.99</td> <td>40.30</td> <td>55.70</td> <td>50.00</td> </tr> <tr> <td>  Non-OPEC</td> <td>49.10</td> <td>47.60</td> <td>44.90</td> <td>42.50</td> </tr> <tr> <td>Supply deficit</td> <td>- 3.41</td> <td>- 5.40</td> <td>- 14.10</td> <td>- 34.50</td> </tr> </tbody> </table> <p>Sources: US Department of Energy / BP Statistical Review of World Energy, June 2006 / IEA / Author's projections.</p>		2005	2010	2020	2030	World demand	84.50	93.30	114.70	127.00	World supply	81.09	87.90	100.60	92.50	OPEC	31.99	40.30	55.70	50.00	Non-OPEC	49.10	47.60	44.90	42.50	Supply deficit	- 3.41	- 5.40	- 14.10	- 34.50	<p>US Department of Energy data, BP Statistical Review of World Energy, Energyfiles Ltd/ Chevron/ Petroleum Review, USGS data, IHS Energy, World Petroleum Trends (WPT)</p>	47)
	2005	2010	2020	2030																																
World demand	84.50	93.30	114.70	127.00																																
World supply	81.09	87.90	100.60	92.50																																
OPEC	31.99	40.30	55.70	50.00																																
Non-OPEC	49.10	47.60	44.90	42.50																																
Supply deficit	- 3.41	- 5.40	- 14.10	- 34.50																																

表 2-6-10 オイルピークに関する研究の詳細

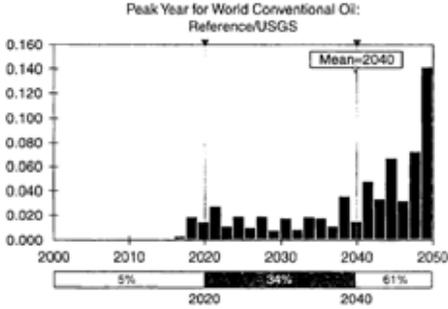
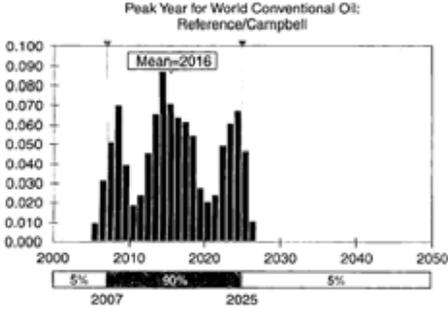
予測時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考文献
2006	David.L.Greene	2016 (Campbell data) 2040 ( USGS data)		<p>石油供給に関するシナリオにおける各地域の在来型石油・非在来型石油の価格を予測し、その価格予測値から各地域での需給バランスを元に石油ピークを予測する World Energy Scenarios Model を構築し、特に在来型石油から非在来型石油への移行時期と割合について詳細な予測を行った。</p> <div style="text-align: center;">  <p>Fig. 10. Peak year for world conventional oil: Reference/USGS.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Fig. 11. Peak year for world conventional oil: Reference/Campbell.</p> </div>	<p>在来型石油 : USGS data 非在来型石油 : USGS/WEC/IEA data Campbell data</p>	48)

図 2-12 Greene による石油ピーク予測結果

表 2-6-11 オイルピークに関する研究の詳細

予 測 時期	研究者・著者	予測結果	石油生産量	予測手法	使用データ	参考 文献
2006	Michael R Smith	2006（需 要増加率 3%） 2018 （需要増 加率一 定）		石油生産量に関して各国の堆積盆地、各油田の分析データ、過去の石油生産傾向、EOR 分析による未開発石油資源などを評価し、さらに 独自の仮説モデル（油田は巨大な物から発見、開発から生産まで約 3～4 年、石油ピークを経過すると 2～3 年は生産量が平坦になりその後は 5～15%で減退するなど）をもとに石油生産の将来予測を行っている。	Oil Company data	49) 50)
2006	Colin.J.Campbell Jean.H.Laherrere	2010-2020		生産量と累積生産量を近似線で表した Depletion Model と呼ばれる統計的手法やハバート曲線を修正した Multi-bell shaped Model と呼ばれる曲線を用いて各油田の減退曲線を近似し、それに新規油田発見量の推計結果を加算することで究極可採埋蔵量を推計し、石油ピークを予測している。	IHS Energy (Petroconsultants) data	5) 51) 52)

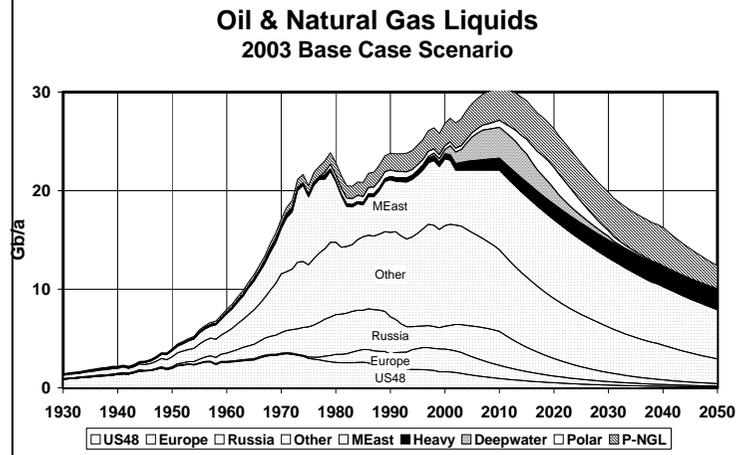


図 2-13 Campbell/ Laherrere による石油ピーク予測結果

## 参考文献

- 1) 石油工業連盟、「石鉱連資源評価スタディ 2002 年：世界の石油・天然ガス等の資源に関する 2000 年末評価」、2002
- 2) 氏家良博、「石油地質学概論」、東海大学出版会、1994
- 3) JOGMECHP : [http://www.jogmec.go.jp/j\\_resource/index.html](http://www.jogmec.go.jp/j_resource/index.html)
- 4) 富田、高山、「石油・天然ガス資源の埋蔵量定義と算定法－最新基礎知識と実際－」、石油／天然ガスレビュー、1999
- 5) Colin.J. Campbell, Jean.H. Laherrere, : "The End of Cheap Oil", Scientific American, March 1998
- 6) Kenneth S. Deffeyes, :“ Hubbert's Peak:The Impending World Oil Shortage”, Princeton University Press,2003
- 7) M.King Hubbert, :“Nuclear Energy and the Fossil Fuels”, Drilling and Production Practice American Petroleum Intsitute, 1956
- 8) Colin.J. Campbell, “The Rimini Protocol an oil depletion protocol: Heading off economic chaos and political conflict during the second half of the age of oil”, Energy Policy 34, 2006
- 9) Dennis Meadows, :”Limits of Growth”
- 1 0) International Energy Agency, :” World Energy Outlook 2004”, 2004
- 1 1) Energy Information Administration, : “International Energy Outlook 2004”, 2004
- 1 2) U.S. Geological Survey: “U.S. Geological Survey World Petroleum assessment 2000-Description and Results”, USGS Digital Data Series DDS-60, Multi Disc Set Version 1.0, 2000
- 1 3) 石井吉徳、「豊かな石油時代が終わる-人類は何処へ行くのか」、日本工学アカデミー・環境フォーラム、丸善、2004
- 1 4) 石井吉徳、「石油最終争奪戦-世界を震撼させる「ピークオイル」の真実」、日刊工業新聞社、2006
- 1 5) Robert L.Hirsch, :“Peaking of World Oil Production: Impact, Mitigation, & Risk Management”, Science Applications International Corp, 2005
- 1 6) Mamdouh G.Salameh, :” Peak Oil & the rising Crude Oil Prices”, ASPO5, 2006
- 1 7) R.W.Bentley, :” Global oil depletion- Methodologies and results”, Proceedings of the IV International workshop on oil and gas depletion, 2005
- 1 8) Steve Andrews, :“Oil Prophets: Looking at World Oil Studies Over time”, Proceedings of the International workshop on oil and gas depletion, 2003
- 1 9) Peter Davies, Paul Weston, "Oil Resources: A Balanced Assessment", Paper to be presented at The Energy Forum: Running on Empty? Prospects for World Oil Supplies, 2000

- 2 0 ) Albert A. Bartlett,"An analysis of US and world oil production patterns using Hubbert-style curves", *Mathematical Geology*, 32/1, pp1-17, 2000
- 2 1 ) World Energy Council,"Drivers of the Energy Scene", 2003
- 2 2 ) R.W.Bentley," Global oil & gas depletion: an overview", *Energy Policy* 30 ,(2002)
- 2 3 ) Alfred Cavallo, "Predicting the Peak in World Oil Production", *Natural Resources Research*, Vol.11, No.3,2002
- 2 4 ) Alfred Cavallo, "Hubbert's model:uses, meanings, and limits-1", *OGJ* June6, 2005
- 2 5 ) Alfred Cavallo, "Hubbert's model:uses, meanings, and limits-2", *OGJ* June13, 2005
- 2 6 ) Matthew.R.Simmons, "Twilight in the Desert: The coming Saudi oil shock and the world economy", Wiley, 2005
- 2 7 ) Matthew.R.Simmons, Presented Paper at ASPO2, 2003
- 2 8 ) Ged Davis,"Meeting Future Energy Needs",*The Bridge*, National Academies Press, 2003
- 2 9 ) Shell International , "Shell Global Scenarios to 2025", 2001
- 3 0 ) Michael.C.Lynch,"Petroleum resources pessimism debunked in Hubbert model and Hubbert modeler's assessment", *OGJ* July14, 2003
- 3 1 ) Michael.C.Lynch,"Forecasting oil supply: theory and practice", *The Quarterly Review of Economic and Finance* 42 (2002)
- 3 2 ) L.F.Ivanhoe, "Future world oil supplies: There is a finite limit", *World Oil*, October 1995
- 3 3 ) L.F. Ivanhoe, " Updated Hubbert Curves Analyze World Oil Supply", *World Oil*, Vol. 217, No. 11, November, 1996
- 3 4 ) Richard C.Duncan, "World Energy Production, Population Growth, and the Road to the Olduvai Gorge", *Population and Environment*, Vol.22 No.5, 2001
- 3 5 ) Richard C.Duncan, "Three world oil forecasts predict peak oil production", *OGJ* 101(21), 2003
- 3 6 ) Richard C. Duncan, Walter Lewellyn Youngquist, "Encircling the peak of world oil production", *Natural Resources Research*, 8(2), 1999
- 3 7 ) David Goodstein, "Out of Gas: The End of the Age of Oil", W. W. Norton & Company, 2004
- 3 8 ) A.M.Samsam.Bakhitari,"World oil production capacity model suggests output peak by 2006-07", *Oil and Gas Journal* Apr.26, 2004
- 3 9 ) A.M.Samsam.Bakhitari,"Middle East oil production to peak within next decade", *Oil and Gas Journal* July 7, 2003
- 4 0 ) Chris Skrebowski, "Oil field mega projects 2004", *Petroleum Review* January, 2004
- 4 1 ) Chris Skrebowski, "Peak Oil-The emerging reality", *ASPO5*, 2006

- 4 2 ) John H.Wood, Gary R.Long, David F.Morehouse," Long-Term World Oil Supply Scenarios", Energy Information Administration, 2004
- 4 3 ) Renato Guseo, Alessandra Dalla Valle, "Oil and Gas depletion:diffusion models and forecasting under strategic intervention", Statistical Methods & Applications 14, (2005)
- 4 4 ) R.Guseo, A.Dalla Valle, M.Guidolin, "World oil depletion Models:Price effects compared with strategic or technological interventions", Technological Forecasting & Social Change,2006
- 4 5 ) Kenneth S. Deffeyes," Beyond Oil:The View from Hubbert's Peak", Hill and Wang,2005
- 4 6 ) Ugo Bardi, "The mineral economy: A model for the shape of oil production curves", Energy Policy 33, (2005)
- 4 7 ) Mamdouh G.Salameh," Peak Oil & the rising Crude Oil Prices", ASPO5, 2006
- 4 8 ) David.L.Greene, Janet L..Hopson, Jia Li, "Have we run out of oil yet? Oil Peaking analysis from an optimist's perspective", Energy Policy 34, 2006
- 4 9 ) Michael R.Smith, "Resource Depletion: Modeling and forecasting oil production", Energyfiles, 2006
- 5 0 ) Michael R.Smith, "World oil resources & peak oil production", Presentation for the California Energy Commission, 2003
- 5 1 ) C.J.Campbell, "Updating the depletion model", ASPO, 2004
- 5 2 ) C.J.Campbell, "The Essence of Oil & Gas Depletion", Multi-Science, 2003

### 3. 我が国のオイルピークを見据えた研究戦略

3 章では我が国の石油および石油製品に関する現状についてその概要を解説し、さらにオイルピークを見据えた我が国の脱石油戦略を石油製品の用途別に述べる。

#### 3.1 我が国の石油に関する現状

##### 3.1.1 我が国の石油製品に関する現状

本節では我が国の石油製品に関する現状について述べる。なお、本節の内容は第3回本委員会における天野治委員（(財)電力中央研究所）の講演「石油はどんなところに使われているかーインパクトとEPRからの代替アプローチ」の内容をもとに、その他の情報を各種文献より抜粋して構成した。

##### (1) 石油製品に関する現状

図 3-1 に主要石油消費国の石油製品消費構成について示す。

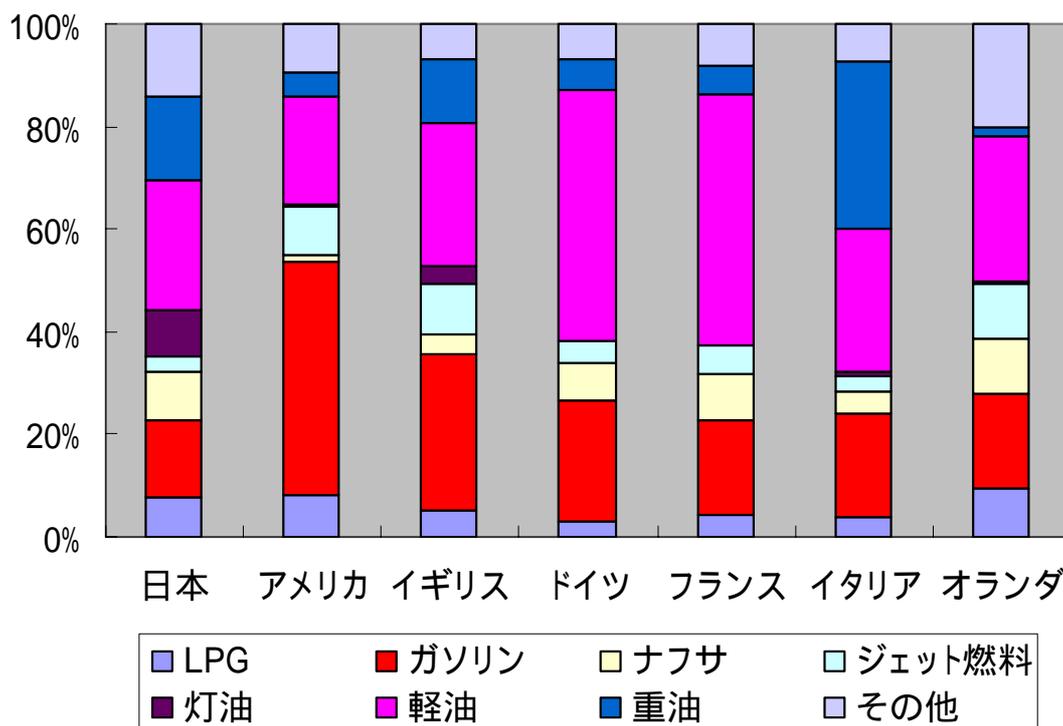
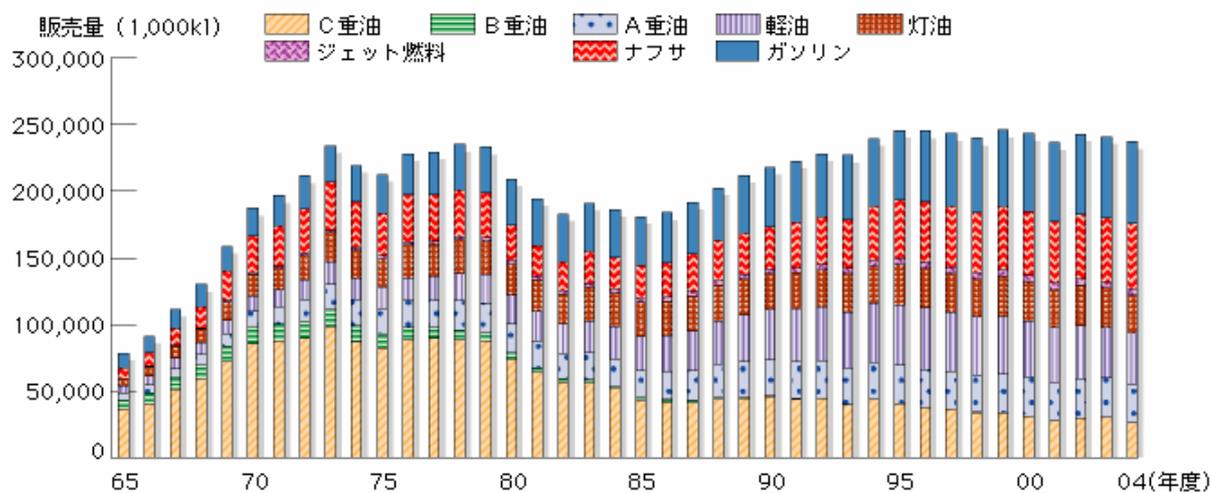


図 3-1 主要石油消費国の石油製品消費構成

図 3-1 より我が国における石油消費量はガソリンや軽油が多いことが分かる。アメリカでも同様で、これは自動車用燃料として使用されているためである。またフランスやドイツは軽油として使用される割合が高く、イタリアでは重油と軽油がほぼ同じ割合で

使用されている。

図 3-2 に燃料油の油種別販売量推移を、図 3-3 に我が国の石油製品の需要変化を示す。



資料：経済産業省「資源・エネルギー統計年報」  
 (注) 2002年1月よりB重油はC重油に含まれる。

図 3-2 燃料油の油種別販売量推移<sup>1)</sup>

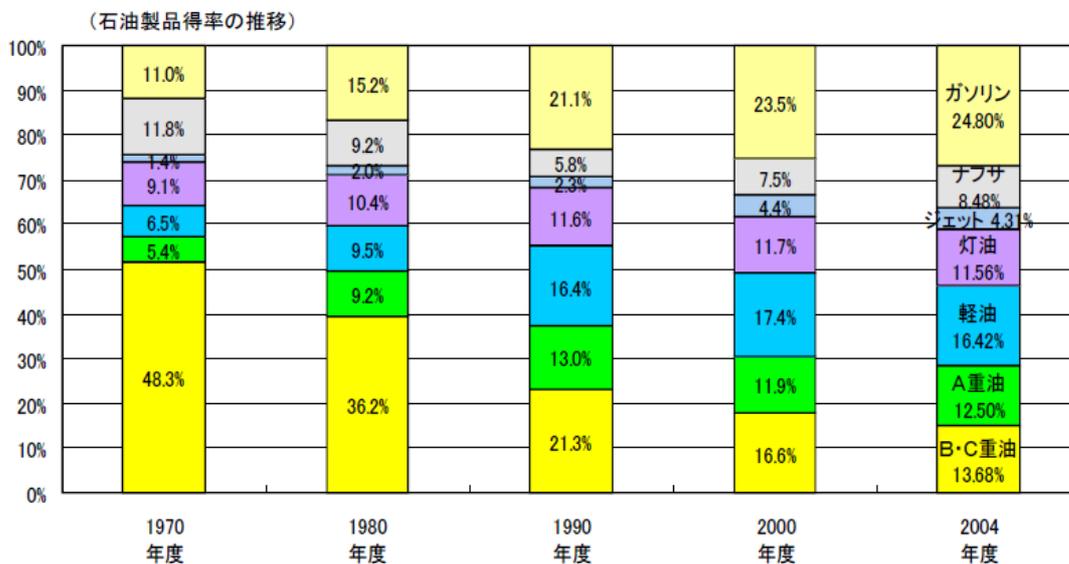


図 3-3 我が国の石油製品の需要変化<sup>2)</sup>

我が国の石油製品需要の推移を見ると、第一次石油ショックまでは急激な右肩上がりで伸びてきたが、2度にわたる石油ショックにより原油価格が高騰し、燃料油販売量は減少に転じたことが分かる。その後、1986年以降は、原油価格の下落と円高定着によって石油価格が安定的に推移したこともあり、堅調な需要の伸びを見せたが、1990年代半ば以降は、ほぼ横ばいの状況にある。

油種別構成を概観すると、ガソリン車、ディーゼル車の保有台数が伸びたことによりガソリン・軽油などの販売量が相対的に増加したこと、石油化学産業の需要の伸びに応じてナフサの販売量が増加したことから、いわゆる白油化（白油とは、ガソリン、灯油、軽油等、無色透明あるいはそれに近い色相のものをいい、黒油とは、重油等、黒い色相のものをいう）が進んでいる。B重油及びC重油の販売量の比率は、石油ショック前では50%以上だったが、1980年代以降、製造業部門の省エネルギー化の進展、電力部門の石油火力の縮小により、販売量は減少し、石油製品全体に占める割合は、2003年度で13%となっている<sup>3)</sup>。

(2) 石油製品の用途

表 3-1 および図 3-4 に石油製品の用途別国内需要量と需要割合を示す。

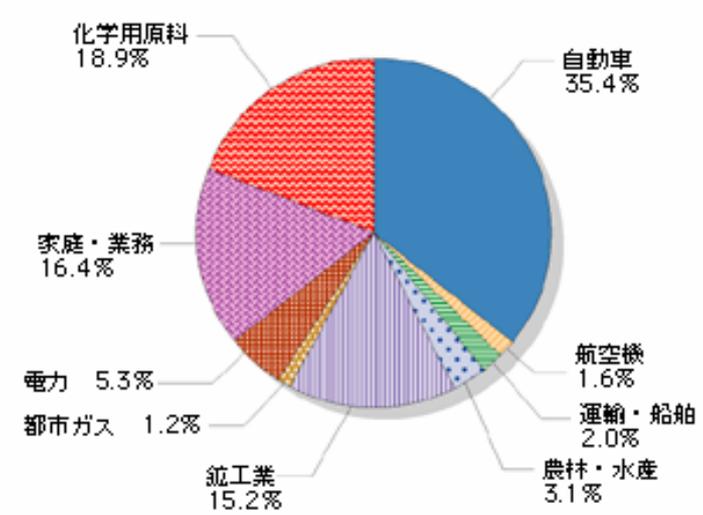
表 3-1 石油製品の用途別国内需要量

■石油製品の用途別国内需要(2003年度) 単位:千t

用途	製品	ガソリン	ナフサ	ジェット燃料油	灯油	軽油	重油	原油	LPガス	潤滑油	合計
自動車		60,453				36,506			2,776	697	100,433
航空機		6		4,502							4,508
運輸・船舶						498	4,918			186	5,602
農林・水産					2,807	824	4,615				8,246
鉱工業		106			6,652	57	25,686		8,802	1,190	42,493
都市ガス			45						2,713		2,757
電力						252	12,455	5,705	731		19,143
家庭・業務					19,595		12,273		14,185		46,054
化学用原料			48,610					1,847	3,602		54,059
合計		60,565	48,655	4,502	29,053	38,137	59,946	7,552	32,809	2,073	283,294

(注)：1. 記入用途例は、産業活動および国民生活のうち「身近なもの」の一例  
2. 四捨五入の関係により合計が一致しない場合がある

出所：石油連盟



資料：石油連盟

図 3-4 石油製品の用途別国内需要割合<sup>3)</sup>

石油製品は燃料油、原料油、潤滑油などに分けられる。燃料油はLPガス（液化石油ガス）、ガソリン、灯油、ジェット燃料、軽油、重油などでありこれらは工業用、家庭用、およびエンジン用燃料として石油製品需要量の80%以上を占める。また原料油は石油化学原料のナフサ、LPガス、原油および灯油などがあり、潤滑油はエンジン油、切削油、作動油、タービン油、電気絶縁油、およびグリースなどがある。その他の石油製品としてはアスファルト、溶剤、オイルコークス、および硫黄などがある<sup>4)</sup>。

ガソリンは自動車用、工業用、航空用などに使用されているが、自動車用が全体の99%を占めている。ガソリンの種類としては十数種類あるが、そのうち現在使用されているものは3種類で、常圧蒸留装置から得られた軽質ナフサをガソリン洗浄装置で処理した「直留ガソリン」、常圧蒸留装置から得られたオクタン価の低い重質ガソリンを白金触媒による改質装置によってオクタン価を100程度まで高めた「改質ガソリン」、および常圧蒸留装置から得られた軽油相当の減圧留出油を原料とし、接触分解装置で分解して製造した「分解ガソリン」がある。

軽油は殆どがディーゼルエンジン用燃料として使用され、バスやトラックの他、ブルドーザー、トラクターなどの建設用重機、鉄道のディーゼルカーなどにも使用されている。その他は工業加熱用や洗浄用にも使用されている。灯油は原油を常圧蒸留装置に通した後、沸点範囲の違いによって分かれた灯油留分を脱硫装置で硫黄除去することによって製造されその用途としては家庭用、業務用、工業用、および農水産用に分かれる。重油は原油を常圧蒸留装置に通した後、残った残渣油と軽質留分（灯油や軽油）を混合したもので用途としてはディーゼルエンジン用、工業用、およびビル暖房用などに分かれる<sup>4)</sup>。

### 3.1.2 新・国家エネルギー戦略における脱石油戦略<sup>5)6)</sup>

平成 17 年 5 月に経済産業が発表された「新・国家エネルギー戦略」ではエネルギー需給構造の変化など我が国を取り巻くエネルギー情勢の現状と課題を踏まえ、我が国の取るべきエネルギー戦略について具体的な数値目標を定めている。この「新・国家エネルギー戦略」において定められているエネルギー戦略は我が国の脱石油戦略とも関連しているため、本節では、「新・国家エネルギー戦略」の概要と設定されている具体的な数値目標について述べる。

「新・国家エネルギー戦略」では全体を二部に分け、第 I 章は現状認識と課題、第 II 章は実現に向けた取組みという構成で纏められている。「現状認識と課題」の中で、第一節は現状に対する基本認識として、エネルギー需給の構造変化が起きつつあり、政情不安定の市場混乱要因および混乱増幅要因が多様化していること、さらにこの状況下で各国はエネルギー戦略の再構築を行っていることについて言及している。第二節は「新・国家エネルギー戦略」の根幹を記述した箇所、戦略により実現を目指す目標、戦略策定のための基本的視点、戦略実施のための留意事項に触れ、さらに戦略の根幹である数値目標の設定がなされている。設定された数値目標は下記の通りである。

#### (1) 省エネルギー目標

今後、2030 年までに更に少なくとも 30%の効率改善を目指す。

#### (2) 石油依存度低減目標

今後、2030 年までに 40%を下回る水準を目指す。

#### (3) 運輸部門における石油依存度低減目標

今後、2030 年までに 80%程度とすることを目指す。

#### (4) 原子力発電目標

2030 年以降においても、発電電力量に占める原子力発電の比率を 30～40%程度以上にすることを目指す。

#### (5) 海外で資源開発目標（全文抜粋）

我が国企業権益下にある原油引取量の我が国への原油総輸入量に占める割合（自主開発比率）は 8%から徐々に向上し、現在、引取量ベースで 15%程度となっている。国際的に資源獲得競争が激化する中、今後は更に拡大し、2030 年までに 40%程度を目指す。

## 3.2 我が国の用途別脱石油戦略の概要

以下ではオイルピークを見据えた我が国の脱石油戦略について用途別（自動車燃料、化学用原料、農林水産業、電力）に述べる。

### 3.2.1 自動車燃料における脱石油戦略

本節ではオイルピークを見据えた我が国の自動車燃料における脱石油戦略の現状について、その動向と課題を述べる。なお、本節の内容は第5回本委員会における中田雅彦氏（トヨタテクニカルディベロップメント㈱）の講演『『オイルピーク』—エンジン技術者の見解』の内容、(財) エネルギー経済研究所主催の国際エネルギーシンポジウム「世界のエネルギー展望 2006」および(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構主催の国際会議「国際バイオフューエル会議 2007」における森光信孝氏（トヨタ自動車㈱）の講演内容をもとに、その他の情報を各種文献より抜粋して構成した。

#### (1) 自動車燃料の現状

現在の我が国における燃料油の需要量推移を図 3-5 に、また燃料油需要構造を図 3-6 に示す。この中で現在、我が国における自動車用燃料とその構成比はガソリン(58.2%)、軽油(39.2%)、およびLPG(2.8%)となっており、つまり自動車用燃料全体の99%近くを石油系燃料に頼っているのが現状である。さらにまた、今後もしばらくは自動車用燃料としてガソリンや軽油が主流となることが予想される。

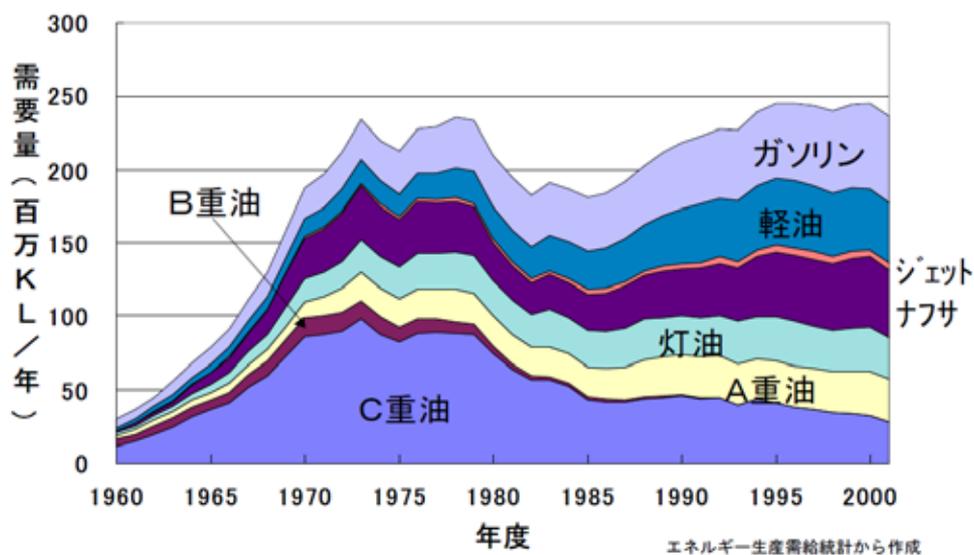


図 3-5 我が国における燃料油の需要量推移<sup>7)</sup>

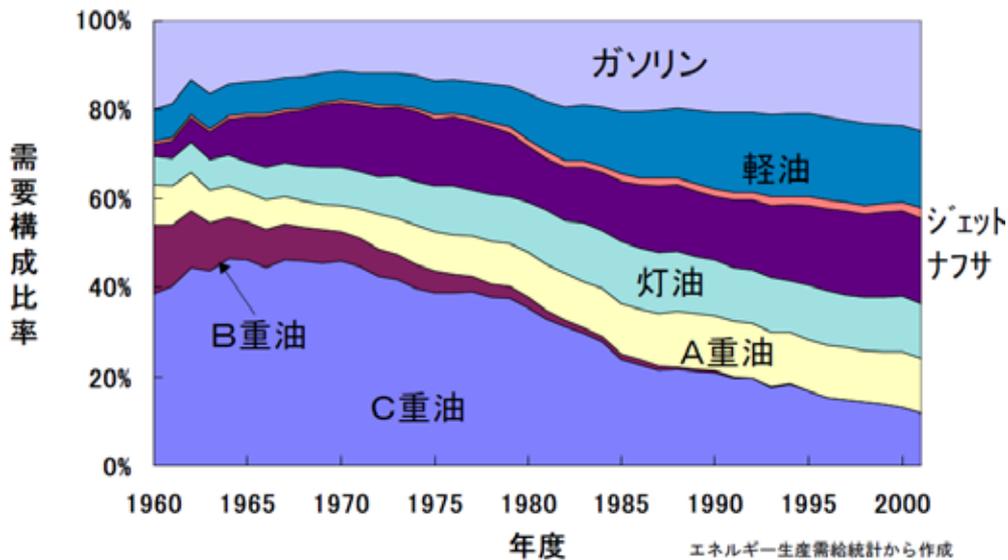


図 3-6 我が国における燃料油需要構造<sup>7)</sup>

自動車用燃料として石油系燃料が主流である理由としては安価であること、資源量が豊富であり長期的に供給可能であること、エネルギー密度が大きいこと、貯蔵・移動・計量が容易であること、供給インフラが充実しており入手が容易であること、および内燃機関との相性がいいことなどがあげられる。図 3-7 に各種自動車燃料における単位容積当たりに対する単位重量当たりのエネルギー密度の関係を示す。図 3-7 より右上方ほど自動車燃料におけるエネルギー密度としての性能が優れていることを示しており、ガソリンおよび軽油が自動車用燃料として極めて適正が良いことを示している。

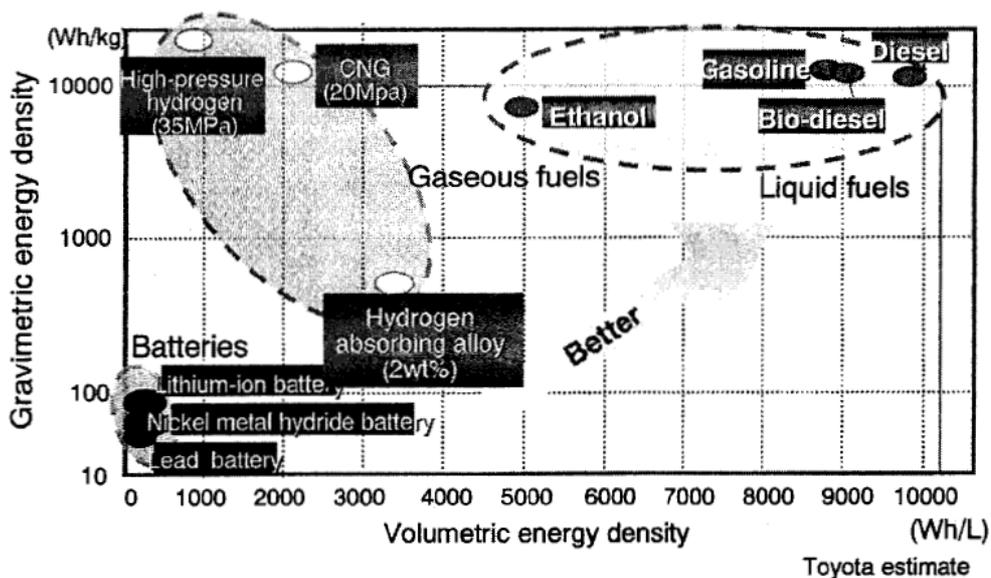


図 3-7 自動車燃料における単位容積に対する単位重量当たりのエネルギー密度

(2) 自動車燃料と内燃機関に関する課題

内燃機関の開発は約 100 年前であり、またガソリンを始めとする石油系自動車用燃料が使用され始めたのもほぼ同時期であるため、これまで内燃機関と石油系自動車用燃料は相互に関与しながら開発が繰り返されてきた。内燃機関にとって適したものが燃料として使われ、また同時に内燃機関がその時に使用されている燃料に適用させて開発されるなど、これまで内燃機関に対する石油系自動車燃料の最適化は継続的に行われてきた。

図 3-8 に石油系自動車燃料と内燃機関の最適化に関する歴史を示す。

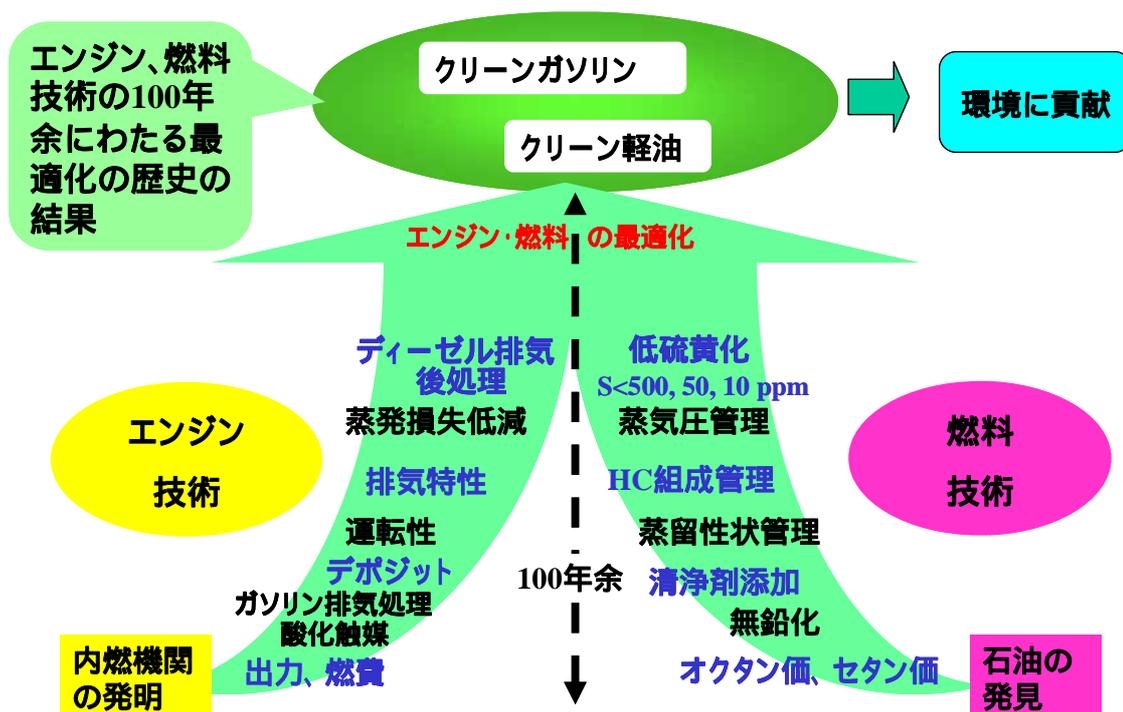


図 3-8 石油系自動車燃料と内燃機関の最適化に関する歴史

また自動車業界はこれまで円滑なエンジン作動や排気ガス対策装置の正常な機能維持に向けて常にエンジン仕様と燃料性状の最適な組み合わせ維持してきた。特に排気ガス対策装置については昭和 53 年に排気ガス規制が大幅に強化されて以来、規制に対応した燃料規格が定められ排気ガス対策装置も大幅に機能強化を行った。

市場においてもエンジン仕様と燃料性状の最適な組み合わせについて常に管理を行っている。例えば燃料供給においては（夏季・冬季の）季節によってもその性状を管理する必要があり、冬ガソリンは揮発性をよくし、逆に夏ガソリンは揮発性をおさえないと自動車の配管中で燃料が気化してしまう恐れがある。また地域においても燃料規格、原油性状および石油精製設備などが異なるため、燃料性状は異なる。例えば先進諸国では排気規制と組み合わせた国家規格を定めており、日本、北米および欧州間においてもこ

これらの規格は異なっており、また発展途上国などでは最近になって規制制定の動きが見えているが、規格が制定されても管理はまだ不十分である。以上のような燃料性状の地域格差から、自動車会社は各地域の燃料性状に合わせた仕様のエンジンを開発している。

図 3-9 に燃料性状と車両性能の関係を、また表 3-2 に燃料性状と車両/エンジン性能に与える影響との関係を示す。

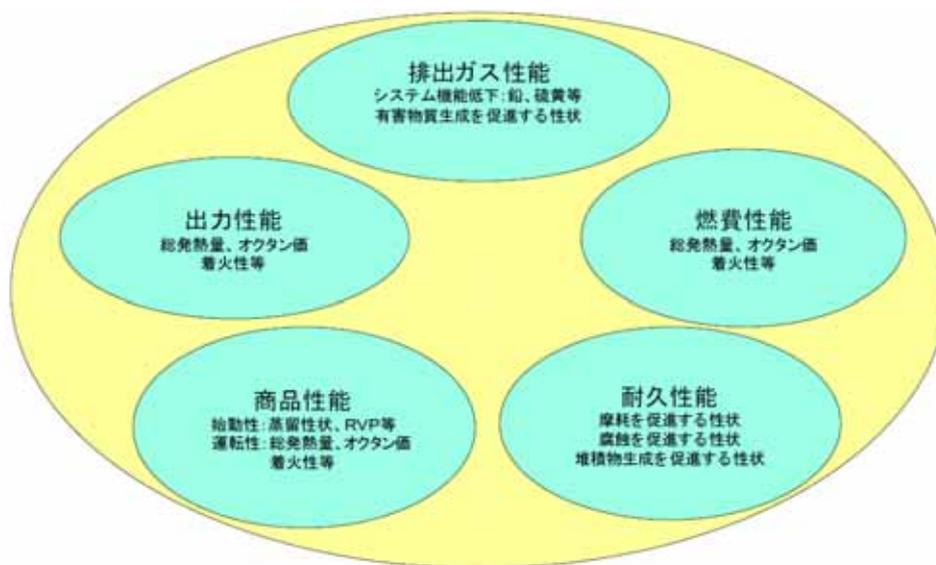


図 3-9 燃料性状と車両性能の関係<sup>7)</sup>

表 3-2 燃料性状が車両/エンジン性能に与える影響

			(XX:強い影響, X:中程度の影響)			
	排気ガス	蒸発ガス	Driveability 運転性	燃費	耐久性	出力
オクタン価				XX		XX
蒸留性状						
T10		XX	X			
T50	XX		XX	X		
T90	X		X			
RVP		XX	X			
HC 組成	X			X	XX	
含酸素化合物	X		X	X	X	X
イオウ濃度	XX					
添加剤	X		XX		XX	

車両の寿命は 10～15 年と言われている。したがってこの車両寿命 10～15 年の間は車両整備や燃料整備も変更できないため、市場において燃料性状の大幅な変更は出来ない。

したがって石油代替燃料を導入する場合において最も大きな課題となるのは以上述べたように燃料性状と内燃機関との適合性である。今後、石油代替燃料を導入し、燃料性状の大幅な変更を行う場合、従来の車両を保障できる範囲内で、また市場での燃料性状のばらつき幅を狭める方向性で、さらには10～15年のリードタイムを設けて燃料性状／エンジン仕様を平行させて変更する必要がある。

(3) 自動車産業における脱石油戦略の動向

以上に述べた燃料性状と内燃機関との適合性に関する課題を踏まえ、ここでは我が国の自動車産業における脱石油戦略の動向について述べる。図3-10に自動車産業における脱石油戦略について現状の課題とそれぞれ短期、中期および長期の戦略について一例を示す。図に示した通り、短期戦略としては車両の燃費向上などがあげられ、これは現在推進中である。また中期戦略における限定市場での石油系燃料と非石油系燃料の併用については天然ガス、合成燃料やバイオ燃料などの導入、また同様にハイブリッド自動車や電気自動車などクリーンエネルギー車の導入があげられる。

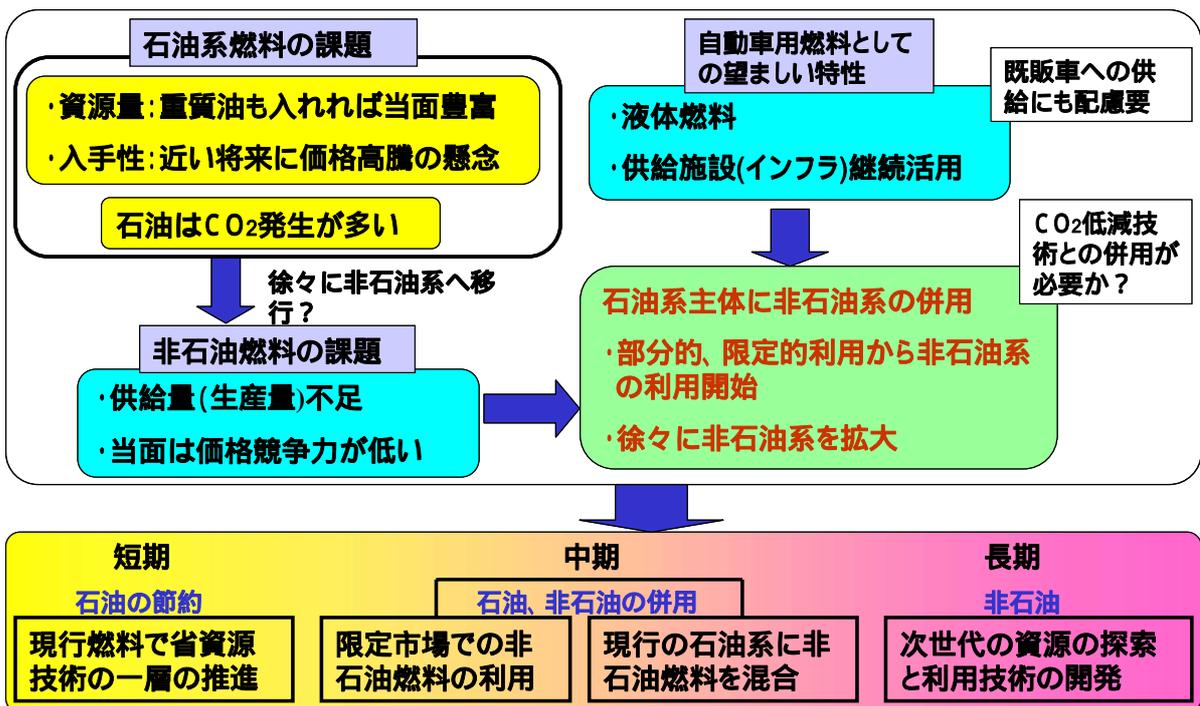


図 3-10 自動車産業における脱石油戦略の一例

また図3-11に現状におけるトヨタ自動車(株)が想定している脱石油戦略の一例を示す。図は左下が現状であり、右上が目標とする持続発展可能な社会を表している。図3-11では2050年までは電気自動車を中心に開発を進め、それ以降、もし技術的ブレークスルー

が解決した場合にはバイオ燃料とプラグインハイブリッド自動車（PHV）に移行していく事を示しており、その場合には将来の電源構成も大きな要因となる。したがって我が国における自動車産業の脱石油戦略は短期的には燃費向上などの省資源技術の推進、中期的には電気自動車やハイブリッド自動車の導入、さらに技術的なブレークスルーが解決した場合に非石油系燃料および非石油系燃料に対応するクリーンエネルギー車を段階的に導入することを想定していると考えられる。

以下では具体的な脱石油戦略について（i）燃費向上における開發現状、（ii）将来の自動車用燃料の概要と課題、および（iii）クリーンエネルギー車の開發現状と課題を解説する。

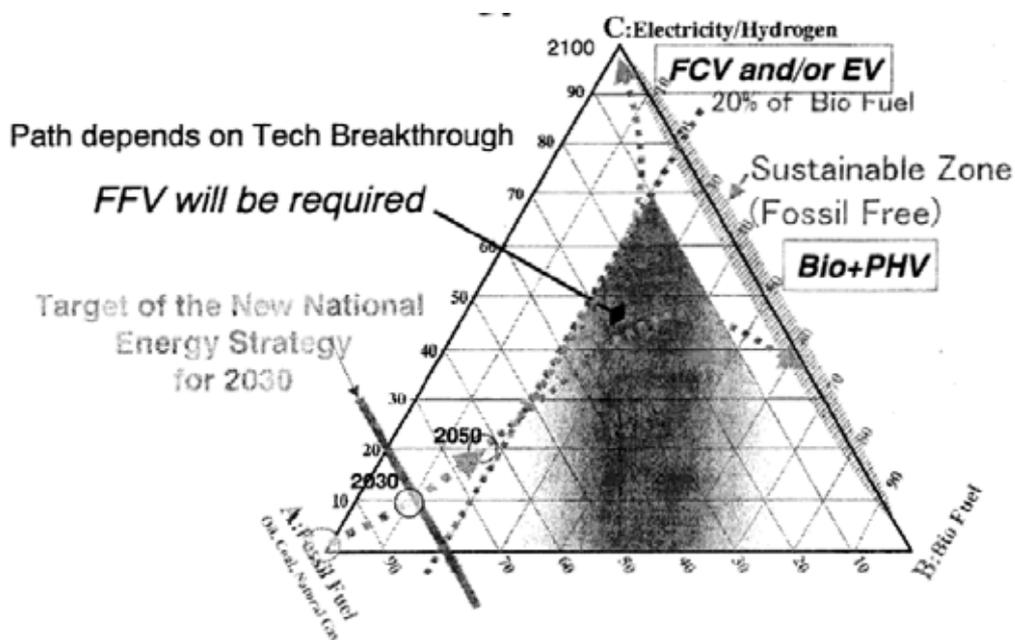


図 3-11 トヨタ自動車(株)が想定する脱石油戦略の一例

（i）車両の燃費向上における開發現状<sup>8)</sup>

現在、各自動車メーカーは燃費向上のために様々な技術開発を行っており、燃費改善技術はモード燃費だけでなく、実用燃費も改良するなど細かい技術の積み重ねによって達成される。具体的にはエンジン効率の向上、精密な制御技術、駆動系の改良、空気抵抗の低減、ころがり抵抗の低減、および車両の軽量化などがあげられる。

2005年に国内で販売された日本車（車両総重量2.5トン以下）における日本自動車工業会が定めた燃費基準達成車の台数比率はガソリン自動車で86%を占めている。その結果、自動車の燃費は年々向上し、ガソリン乗用車の平均燃費は15.5km/lとなり、2010年度の燃費基準相当レベルを既に上回っている。

図 3-12 にガソリン乗用車の平均燃費推移を示す。

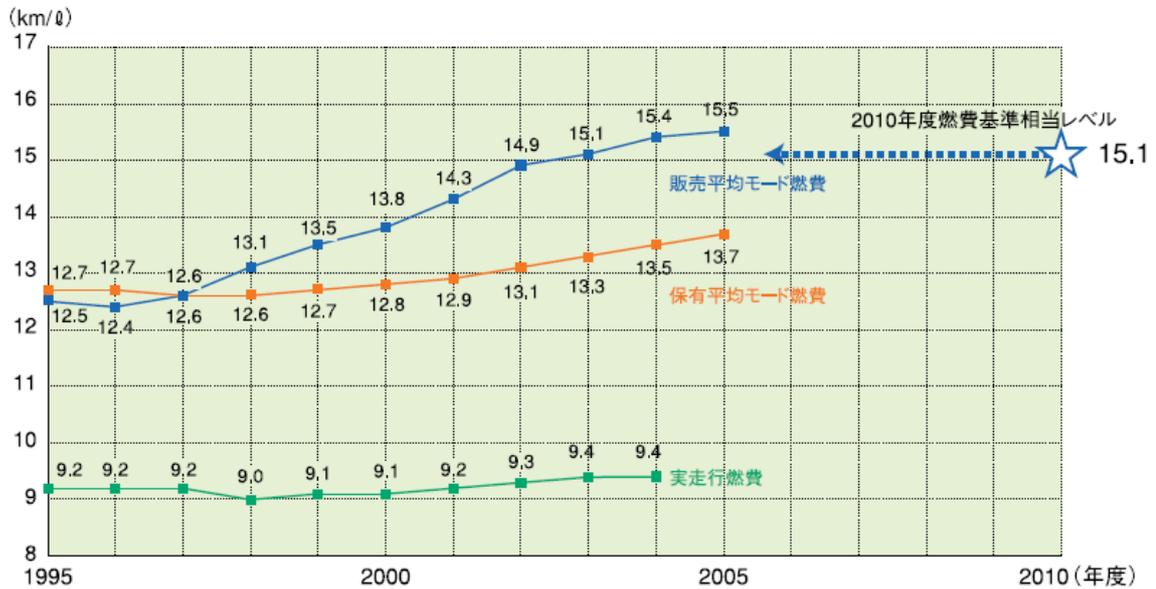


図 3-12 ガソリン乗用車の平均燃費推移<sup>8)</sup>

(ii) 非石油系燃料の概要と課題

表 3-3 に将来の自動車用燃料の概要を示す。さらに表 3-4 に将来の自動車用燃料の燃料特性について比較を行った結果を示す。

表 3-3 将来の自動車用燃料の概要<sup>7)</sup>

	GTL	DME	バイオマス燃料		水素 (燃料電池)
				廃食用油再生燃料	
原料	天然ガス、石炭等	天然ガス、石炭、バイオマス等	バイオマス (生物資源)	廃食用油+メタノール	天然ガス、ガソリン、LPG、DME、メタノール等
組成	炭化水素油	ジメチルエーテル(CH <sub>3</sub> O-CH <sub>3</sub> )	エタノールと炭化水素油の混合物	炭化水素油 (軽油)、メチルエステル	水素(H <sub>2</sub> )
対象自動車 (見込み)	ハイブリッド車	専用車	専用車	ハイブリッド車	専用車
主な特徴 (長所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>硫黄分、多環芳香族炭化水素を含まない</li> <li>セタン価が高い</li> <li>既存の供給施設が利用可能 (軽油にブレンドする場合)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硫黄分を含まない</li> <li>物性がLPGと類似</li> <li>ガス・ピピン、ディーゼルエンジン等の燃料として民生用、発電用、輸送用等幅広い用途で利用可能</li> <li>自動車用燃料電池の燃料へ利用する場合、改質温度が低い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生可能な資源 (植物) を使用できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硫黄分が少ない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃焼反応ではないため、NOx、SOx、PM等の排出量がゼロ又は極微量。</li> </ul>
主な課題 (短所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造コスト低減</li> <li>100%GTL油は専用の供給施設が必要</li> <li>PMが発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全性・法規制整備等の検討</li> <li>LPG供給施設活用の実証</li> <li>専用車の開発</li> <li>専用供給施設整備</li> <li>製造コスト低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>製造コスト低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>再生時にグリセリンが副産物として発生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>経済性・耐久性の向上</li> <li>燃料供給体制の整備</li> <li>安全性・耐久性等の基準や機器等の標準の整備</li> </ul>
燃料実用化に向けた主な取組状況	我が国で燃料製造技術開発を実施中	わが国には2006~7年頃に輸入される見込み 専用車の技術開発を実施中 製造コスト低減のための研究開発を実施中	ブラジル、米国等海外の一部では実用化済み	地方自治体でモデル事業として実施中	我が国では、実証試験を実施中 燃料電池自動車は年内に試験的な市販開始予定

表 3-4 将来の自動車用燃料の燃料特性比較結果<sup>9)</sup>

Target	将来の自動車用燃料候補							
	現行:石油系			天然ガス CNG	合成 燃料	バイオ燃料		再生可能 水素
クリーン ガソリン	クリーン ディーゼル	LPG	バイオ エタノール			バイオ ディーゼル		
排気の清浄性 都市の大気質	3/4	3	3	4	4	2	2	5
CO <sub>2</sub> 気候変動	2	3	2	3	2	4	4	5
Energy Alternative 地域性、偏在	2	2	3	4	4	3	3	5
市場での入手性 コスト、量、供給性	5	5	3	2	2/4	3	2	1

↑  
DME/FTD(GTL)

**TOYOTA**

点数による比較: 1 ~ 5点

表 3-4 より将来の自動車用燃料について、脱石油戦略という観点からの実用性については一長一短であることが分かる。石油系燃料はCO<sub>2</sub>排出量という観点から他の燃料に比べて不利であり、非石油系燃料は当面はコストや供給性に多くの課題を残している。

図 3-13 に非石油系燃料の現状コストとコスト削減ポテンシャルについて評価した結果を示す。

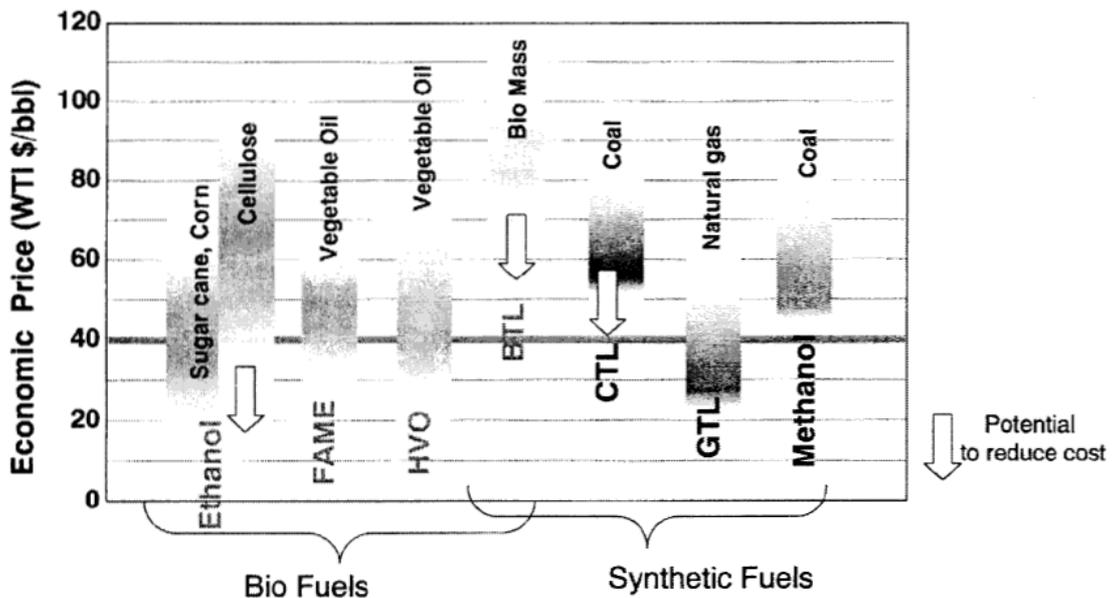


図 3-13 非石油系燃料の現状コストとコスト削減ポテンシャル評価結果

ここで中期的脱石油戦略として石油系燃料に非石油系燃料を混合する場合の実用可能性と課題について述べる。

まず非石油系燃料をガソリンに混合する場合の、バイオエタノールに関する実用可能性と課題について述べる<sup>7)10)</sup>。我が国ではエタノールをガソリンに3%（含酸素1.3wt%）まで混合することが法制上認められているが、現在はまだ供給安定性や経済性に大きな課題がある。

供給安定性という面では現在、エタノールの供給はデンプンや糖質系植物を用いた輸入エタノールに頼らざるをえない。しかし供給余力があるのはブラジル一国であり、そのブラジルでもエタノールの国内需要が高まっていることから最近では国内供給に力を入れ始めている。また、バイオエタノールの利用が進むブラジルや米国ではエタノール価格のガソリンとの連動性が高まっており（図3-14）、さらにはエタノールの国際価格上昇と連動して米国ではとうもろこしの価格が上がるなど食料価格が上昇しており、エタノールの導入には食料との競合が大きな課題となっている。

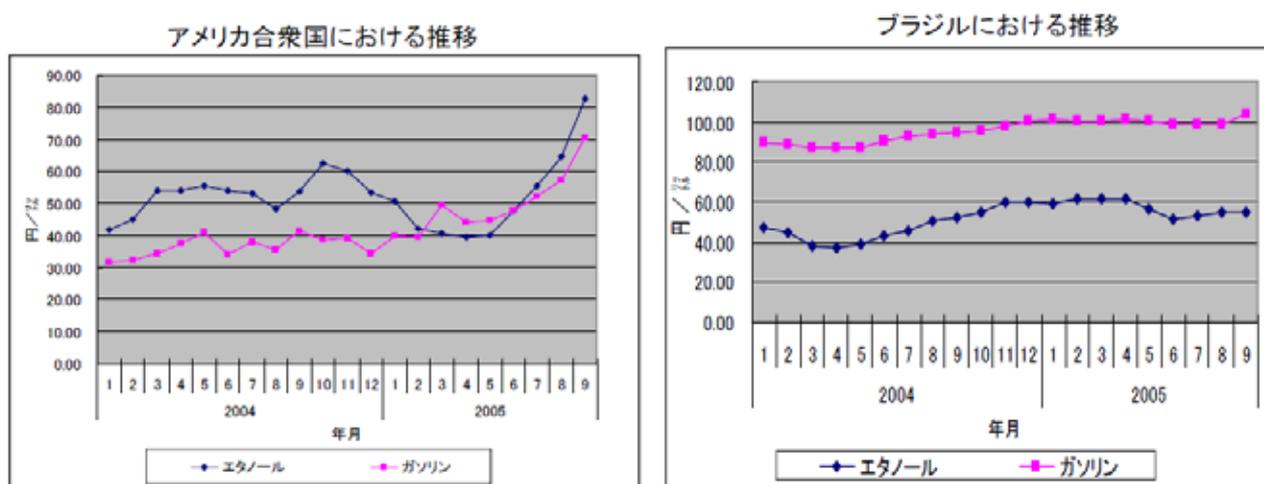


図3-14 エタノール価格のガソリンとの連動性<sup>7)</sup>

さらに東南アジアでは森林伐採による環境破壊なども大きな問題としてあげられており、長期的には輸入エタノールに頼るのでなく、国産エタノールの供給を模索すべきである。しかし、国内で供給可能な原料を考慮すると廃木材などを原料としたセルロースエタノールに注目せざるをえず、セルロースエタノールは採掘コストや製造コストが高く、実用化に至るためには今後の課題解決に向けたブレークスルーが重要となる。

また技術的・インフラ課題についてはエタノールを利用する場合にはガソリンスタンド等石油供給インフラ側の対応が必要となる。また、エタノール直接混合ガソリンは僅かな水分が混入しても相分離（エタノールが水分と混和してガソリンと分離すること）

が発生し、ガソリンの性状が変化するため、流通段階での水分混入を防止する必要がある。さらに、自動車の改良についてもエタノールは金属腐食やゴム部品の膨張などを起こすため、金属部分の腐食性処理や耐膨潤性のゴム材料の使用が必要となる。またエタノールは通常のガソリンより酸素を多く含んでいるため空燃比を調整しなければ排出ガス性能が悪化し、さらにエタノール混合ガソリンは光化学スモッグの原因となる燃料蒸発ガスの量が増加するため、通常より大きなガス吸収装置が必要となる。図 3-15 にガソリンにエタノールを混合することによる温度別性状変化について示す。

しかしながら、GTLやBTLはガソリンには不向きでコストの面からも実用可能性は低く、直接式CTLも石炭資源の問題やCO<sub>2</sub>排出の問題から可能性は低いとされている。したがって脱石油戦略から見た中期的なガソリン混合非石油系燃料としてはバイオエタノールが最も有望であるが、実用化のためには上記に述べた多くの課題を解決する必要がある。

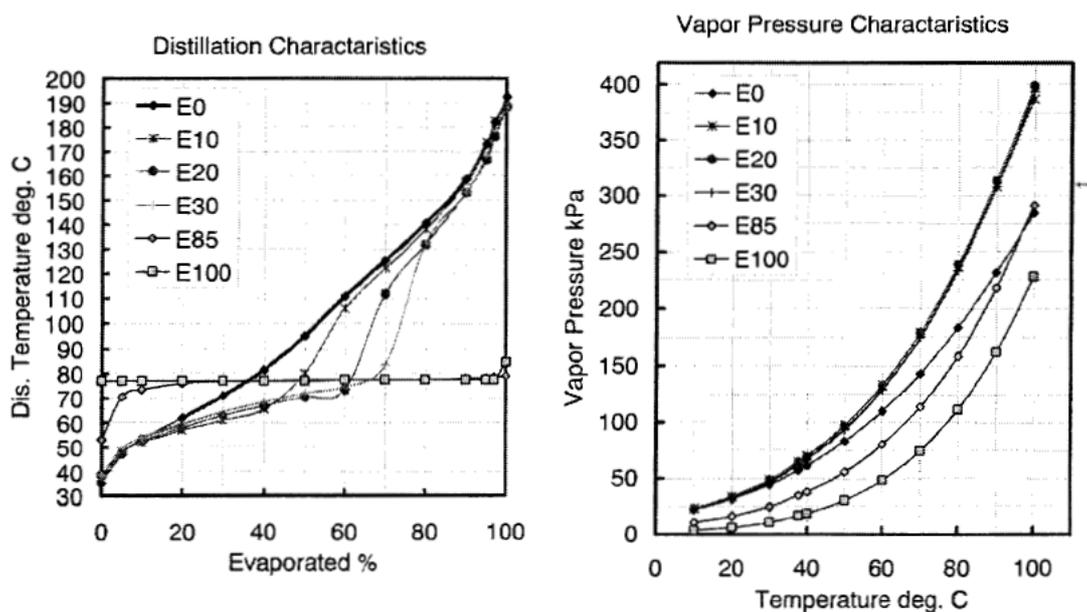


図 3-15 ガソリンにエタノールを今後することによる温度別性状変化

次に非石油系燃料を軽油に混合する場合であるが<sup>7)10)</sup>、バイオディーゼルであるFAME (Fatty acid methyl esters) は現在、我が国においては廃食油FAMEが一般的であるが国内の原材料は少なく東南アジアで栽培されているパーム油からのメチルエステルを使用するケースが検討されている。バイオディーゼルの品質の課題として低温性状と貯蔵安定性があり、貯蔵安定性は酸化防止剤の使用で対応可能であるが、低温性状については軽油基材配合にまで影響するため製油所への影響は大きいとされている。またバイオディーゼルは軽油と比較して曇り点、流動点などが高く、特に飽和脂肪酸の含有割合が多い

原料油からのバイオディーゼルにおいて顕著である。また軽油にFAMEを多く混合すると、バルブの付着やフィルター汚れなどが生じ、実際に多くの事例がある。

GTLはセタン価が高く着火性に優れており、また技術的課題も少ないため、ディーゼル車におけるGTL混合軽油として今後、活用することが期待されている。現在では自動車メーカーにおいては、GTL専用エンジンの実証試験も行われている。

以上より非石油系燃料としては将来、ガソリン混合を想定するとバイオエタノール(ただし、我が国においては現状ではエタノール10%混合のE10が限度)、軽油混合を想定するとFAME(ただし、我が国においては現状ではFAME5%混合のB5が限度)およびGTLが有望であるが、いずれも実用化には上述した多くの課題があり、本格的に導入するにはこれらの課題におけるブレークスルーが必要となる。

(iii) クリーンエネルギー車の開発現状と課題

クリーンエネルギー車(電気自動車、ハイブリッド自動車、天然ガス自動車、およびのディーゼル代替LPG自動車など)は2005年の我が国市場において普及台数約32万台となっており、政府は2010年度に約230万台普及させることを目標としている。図3-16に我が国市場におけるクリーンエネルギー車普及台数の推移について示す。

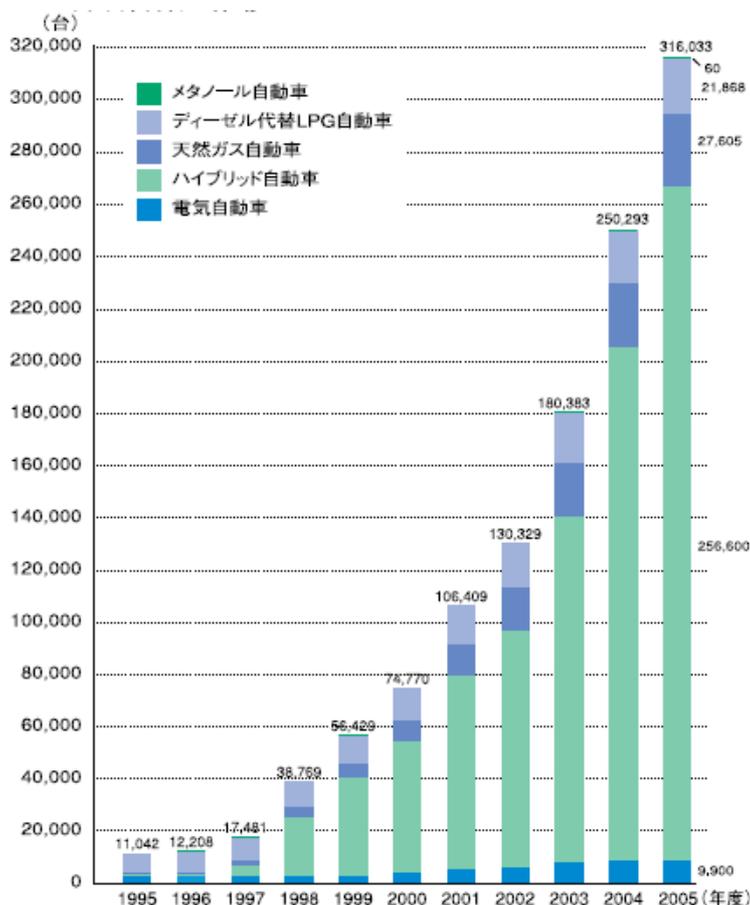


図 3-16 我が国市場におけるクリーンエネルギー車普及台数の推移<sup>8)</sup>

また図 3-17 に現在開発中のクリーンエネルギー車の概要を示す。

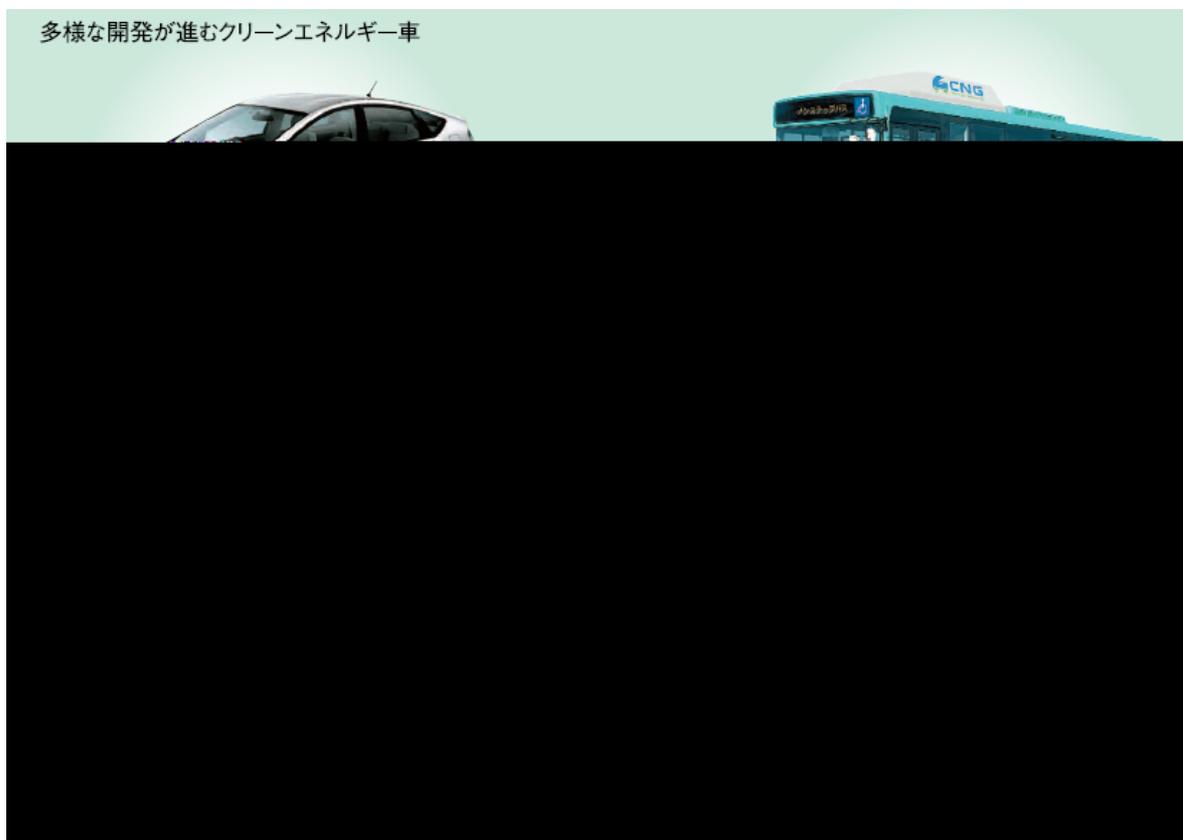


図 3-17 現在開発中のクリーンエネルギー車の概要<sup>8)</sup>

ここでは特に燃料電池自動車に関して我が国の主な自動車メーカーの開発動向について述べる<sup>10)</sup>。

・トヨタ自動車㈱の開発状況

トヨタ自動車㈱は脱石油戦略としての位置付け、および走行距離も含めた総合評価でメタノールが最も優れているとの観点からメタノール改質器を搭載した燃料電池自動車の開発に取り組んでいる。同社は 1990 年から燃料電池の開発を行っており、水素吸蔵合金と固体高分子膜型燃料電池の開発に注力してきた。1996 年に開発した燃料電池／蓄電池のハイブリッド電気自動車は水素－空気の 15kW 燃料電池と水素吸蔵合金の組み合わせとして開発された。

またトヨタ自動車㈱は独自開発でメタノール改質器には水蒸気改質方式を選択している。ただし、「燃料電池はメタノールの利用が良いと思われるが、恒久的な燃料となる水素をどう供給するかが課題である」と述べていることから、メタノール改質型は水素型への繋ぎと見られている。

・日産自動車㈱の開発動向

日産自動車は新エネルギー・産業技術総合開発機構のファンドを受けており、燃料電池自動車の効率と排ガスを推定し、内燃機関のガソリン車と比較することに注力している。同社は直接メタノール燃料電池の開発を 1996 年から行っており、Nafion がクロスオーバーを起こすことと運転可能温度が低いことが最も大きな課題となっている。また同社は石油燃料に代わる代替燃料としてメタノールが優れていると考えており、メタノール改質器を用いる燃料電池自動車を独自に開発した。これは同社独自のリチウム電池やネオジウム磁石同期モーターを組み合わせている。それによって従来のガソリン車に比べて燃費を 50%向上させることに成功した。

・本田技研工業の開発動向

本田技研工業はメタノール自己改質型の開発を独自に進めており、改質ガスの CO 濃度を低減するために CO 変成器と CO 選択部分酸化器を備えている。1989 年から開発してきた小型燃料電池の開発はその規模が拡大しており、同社は燃料電池自動車が CNG 車と並ぶ将来の高効率で低公害な電気自動車市場になると見て投資を行っている。

以上の通り、現状では燃料電池自動車の燃料としてメタノールが主流となっているが、多くの自動車メーカーは、長期的には直接水素を使用する方式が望ましいということで意見が一致している。

表 3-5 に自動車メーカーによる燃料電池自動車に関する燃料選択の意見を示す。また表 3-6 に燃料電池自動車における各種燃料の特性を示す。

表 3-5 自動車メーカーによる燃料電池自動車に関する燃料選択<sup>11)</sup>

	FCV の燃料の選択についてどう考えるか
トヨタ	<p>FCV は、初期には直接水素形の限定少量での導入があり、その次に CHF のような内燃機関との共用燃料の改質形、最終的には、CO<sub>2</sub>・エネルギー問題が深刻になる時期にもよるが、直接水素になると考えられる。ただし、中間にある改質形のフェーズは、技術開発の如何によっては抜ける可能性がある。</p> <p>改質形は内燃機関と共用の燃料（CHF 等）を使った改質が望ましい。ただし、同じ燃料を使う HEV の効率をはるかに超えなければ、大量普及させる意味がないので、早期に技術開発を行う必要がある。このためにはブレークスルーが必要。</p>
日産	<p>FCV の導入シナリオとしては、内燃機関の改良から直接水素形に移行していくと考えられる。ガソリン改質は、実際に研究開発をすると難しく、現在は直接水素に注力している。ただし、全くあり得ないということではないので、改質形での商品化を否定することはできない。</p>
ホンダ	<p>FCV の燃料としては、基本的に直接水素以外の可能性は低いと考えている。内燃機関の改良から直接水素形 FCV に移行するシナリオの可能性が非常に高いと考えている。車上改質は極めて技術的ハードルが高く、たとえ完成したとしても CO<sub>2</sub> 排出量の削減メリットはほとんど見出せないと考えている。</p>
三菱	<p>既に限定的に市場導入されているように、短期的には直接水素搭載と考えている。中期的には水素供給インフラの普及の問題から、メタノール、ガソリン等の車上改質も考えられる。ただし、現在は水素インフラを広げようという方向に進んでいるので、メタノール、ガソリン等の車上改質はややトーンダウンしているという印象を受けている。</p>
マツダ	<p>最終的には水素燃料を直接利用する FCV の導入の方向に進んでいくと考えている。ただし、その過程で、化石燃料等の改質技術が進歩するならば一時的に利用の可能性はあるだろう。また、導入シナリオについては、技術の進歩、インフラ整備、普及促進の導入等、周辺の状況の進展を考慮しながら、様々なケースで検討している。</p>

表 3-6 燃料電池自動車における各種燃料の特性<sup>11)</sup>

燃 料	長 所	短 所
直接水素	<ul style="list-style-type: none"> <li>①改質器等の車載が不要で、燃料電池の構造簡素化、小型軽量化、コスト削減が可能。</li> <li>②走行時には水のみ排出。ゼロエミッション。</li> <li>③FC スタック技術の成熟度が高い。</li> <li>④Tank-to-Wheel でのエネルギー効率が高く、CO<sub>2</sub>排出量も少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①水素供給インフラの整備が必要。</li> <li>②現状の技術レベルではエネルギー貯蔵量が不十分で航続距離が短い。</li> <li>③気体燃料の取り扱いの経験が少ないので、燃料として利用した場合の安全性の確認が必要。</li> <li>④Well-to-Tank の効率が低い。</li> <li>⑤火炎が見えない。</li> </ul>
メタノール	<ul style="list-style-type: none"> <li>①改質が比較的容易。</li> <li>②インフラ面での制約が水素に比べて小さい。</li> <li>③液体燃料のため、取り扱いが容易。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①現状では、メタノール精製時の効率が悪く、エネルギーパスによっては総合的なエネルギー効率、CO<sub>2</sub>排出量の優位性が低い。</li> <li>②システム構成や制御の複雑さ、改質器の容量、重量などからくるパッケージング上の問題がある。</li> <li>③スタンドが少ないのでインフラ整備が必要。</li> <li>④安全性（毒性、地下水への混入の危険性）についての対策が必要。</li> <li>⑤走行時にはゼロエミッションでない。</li> <li>⑥火炎が見えない。</li> </ul>
ガソリン系燃料	<ul style="list-style-type: none"> <li>①既存のインフラを活用できる。</li> <li>②安全性、取扱性について、十分な知見の蓄積がある。</li> <li>③天然ガスからも合成可能（GTL）。</li> <li>④Well-to-Tank でのエネルギー効率が比較的高い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①改質が難しい。基礎段階。</li> <li>②現行ガソリン中の硫黄分、芳香族分等を除く必要がある。</li> <li>③走行時ゼロエミッションではない。</li> <li>④石油代替エネルギーではない。</li> <li>⑤GTL は現状ではコスト的に不利。</li> </ul>

(4) まとめ

以上より本節の内容は下記の通り、まとめられる。

- ・石油代替燃料を導入する場合において最も大きな課題となるのは燃料性状と内燃機関との適合性である。今後、石油代替燃料を導入し、燃料性状の大幅な変更を行う場合、従来の車両を保障できる範囲内で、また市場での燃料性状のばらつき幅を狭める方向性で、さらには 10～15 年のリードタイムを設けて燃料性状／エンジン仕様を平行させて変更する必要がある。
- ・自動車産業における脱石油戦略としては短期的には燃費向上などの省資源技術の推進、中期的には電気自動車やハイブリッド自動車の導入、さらに技術的なブレークスルーが解決した場合にバイオ燃料などの非石油系燃料および非石油系燃料に対応するクリーンエネルギー車を段階的に導入することを想定している。
- ・将来の自動車用燃料について、脱石油戦略という観点からの実用性については一長一

短であり、石油系燃料はCO<sub>2</sub>排出量という観点から他の燃料に比べて不利であり、非石油系燃料は当面はコストや供給生に多くの課題を残している。

- 非石油系燃料としては将来、ガソリン混合を想定するとバイオエタノール（ただし、我が国においては現状ではエタノール 10%混合の E10 を段階的に導入）、軽油混合を想定すると FAME（ただし、我が国においては現状では FAME5%混合の B5 を段階的に導入）および GTL が有望であるが、いずれも実用化には食料との競合、国産セルロースエタノールの導入に向けた技術的ブレークスルー解決など多くの課題があり、本格的に導入するにはこれらの課題におけるブレークスルーが必要となる。

### 3.2.2 化学用原料における脱石油戦略

本節ではオイルピークを見据えた我が国の化学用原料における脱石油戦略について述べる。なお、本節の内容は第5回本委員会における佐藤裕久（長瀬産業株式会社）の講演「石油化学分野の課題」の内容をもとに、その他の情報を各種文献より抜粋して構成した。

#### (1) 石油化学業界の概要と原油価格による影響

レジン（樹脂）や溶剤などの石油化学製品は原油を石油精製設備でナフサ、ガソリン、重油、灯油などに精製し、そのナフサをエチレンセンターでエチレン、プロピレン、ブタジエンなどの石油化学基礎製品に分解し、さらに分解したエチレン等の石油化学基礎製品から製造される。

ここでは、レジン（樹脂）や溶剤などの石油化学製品について製造プロセスと価格形成メカニズム、さらに原油価格高騰による石油化学製品価格への影響について述べる。

図 3-18 にエチレン、プロピレン、ブタジエンなど石油化学基礎製品 6 品目について産業連関表をベースにした物質フローを示す<sup>12)</sup>。

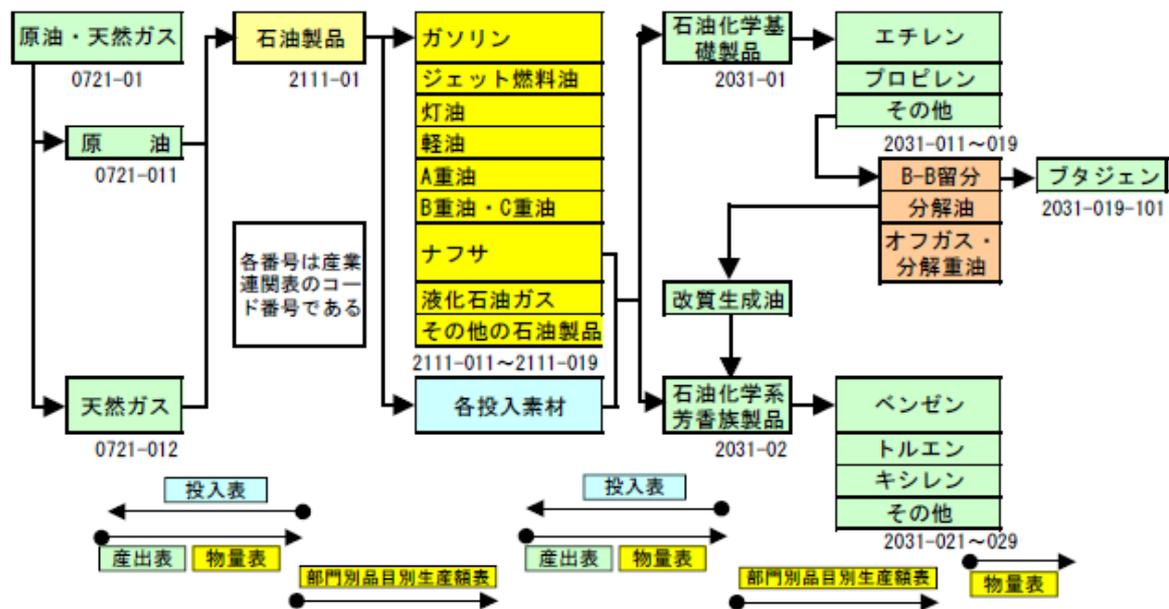


図 3-18 石油化学基礎製品 6 品目の物質フロー<sup>12)</sup>

さらに図 3-19 に石油基礎製品の一例としてエチレンの製造における物質フローの詳細を示す。エチレン 7,616 千トン製造するため、輸入原油、前年繰越原油、繰越天然ガス、天然ガスから 3,280 千トンのナフサを製造し、これと輸入ナフサや石炭等の素材を投入して製造される。

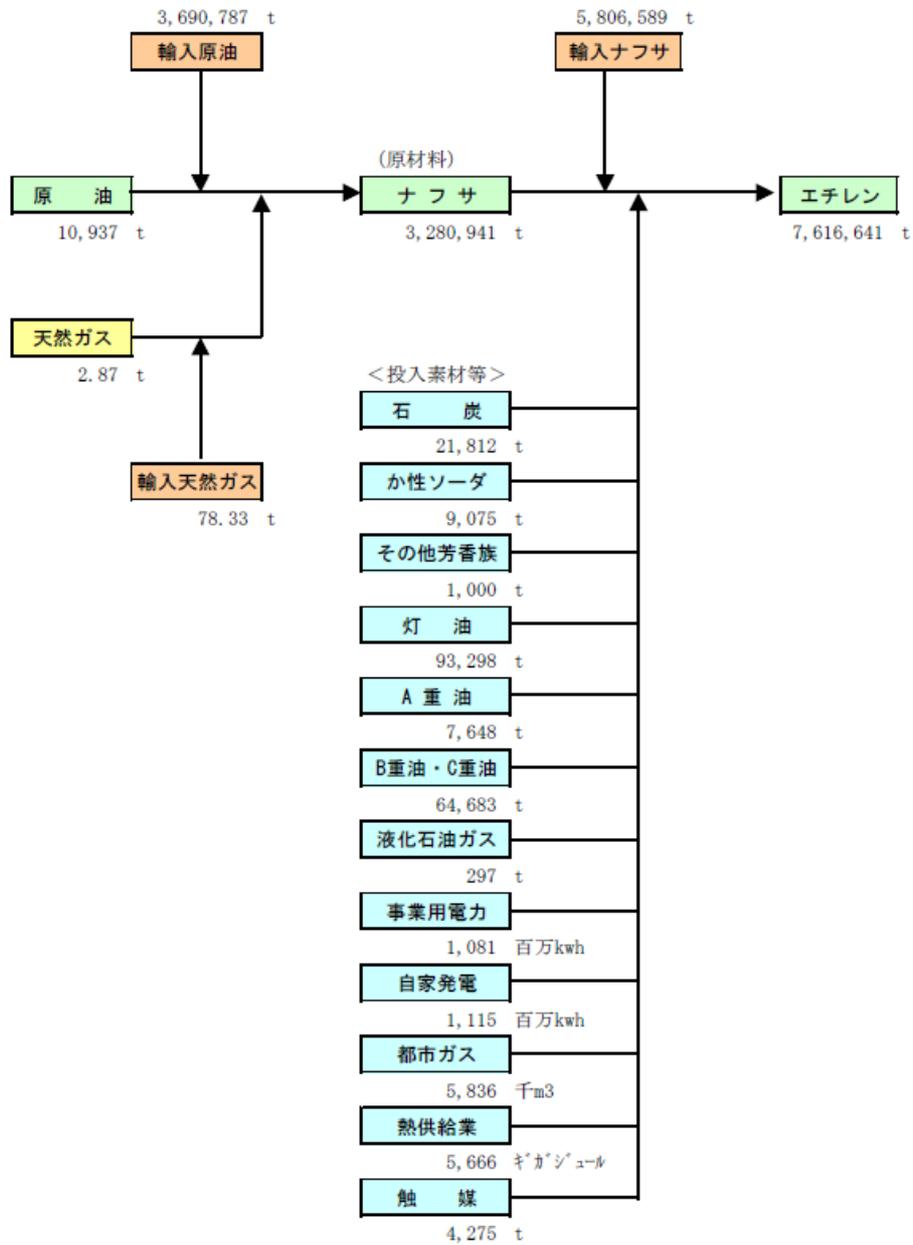


図 3-19 エチレンの製造における物質フロー<sup>12)</sup>

さらにエチレン等の石油化学基礎製品からレジンや溶剤が製造され、それがさらに成型されて（プラスチック製品等の）最終需要製品として一般消費者にわたる。図 3-20 にレジンから一般消費者にわたる最終需要製品までの製造プロセスを示す。

レジン着色料等との混合によって材料製造が行われるコンパウンドプロセス、さらに成型プロセスを経てメーカーにセットされ、最終需要製品として一般消費者に販売される。

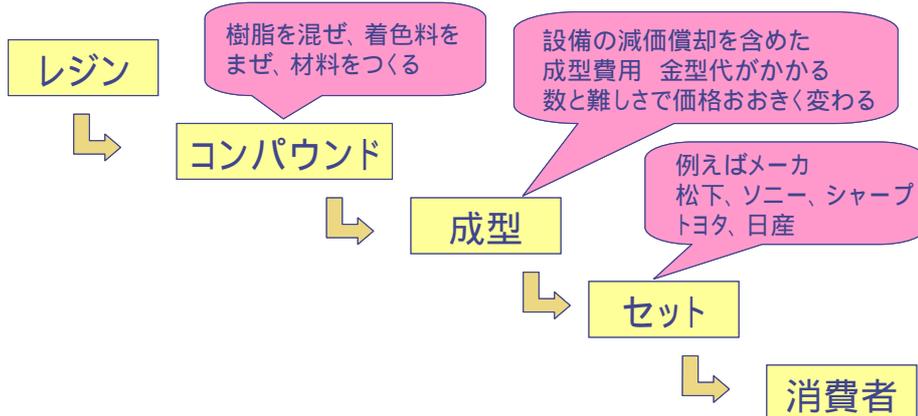


図 3-20 レジンから最終需要製品が製造されるまでのプロセス

以上より石油化学製品における価格転嫁は、原油→ナフサ→（エチレン等の）石油化学基礎製品→レジン→（プラスチック製品などの）最終需要製品という形で進むことが分かる。これらの価格転嫁は最終用途によって多少のバラツキが生じる。

表 3-7 及び図 3-21 にレジンの価格推移について示す。さらに表 3-8 及び図 3-22 に原油価格の高騰と石油化学製品の価格への影響について示す。

表 3-7 レジンの価格推移

	ポリ塩化ビニル	ポリエチレン	ポリプロピレン	ポリスチレン
2004,1	102	135	125	158
2004,4	105	147	131	163
2004,7	105	147	133	167
2004,10	105	150	136	171
2005,1	105	150	140	171
2005,4	105	150	140	171
2005,7	105	160	150	171
2005,10	105	160	150	171
2006,1	110	165	160	181
2006,4	110	165	160	181

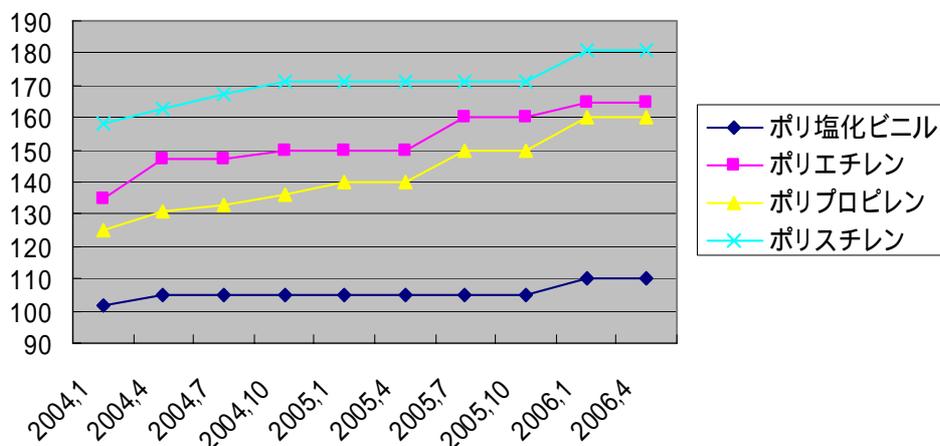


図 3-21 レジンの価格推移

表 3-8 原油価格の高騰と石油化学製品価格への影響

時期	為替 円/\$	原油(ドバイ) \$/bl	国産ナフサ 円/kL	プロピレン \$/t	PP レジン \$/t	PP 国内 円/t
2004Q1	106.87	37.46	27,600	693.3	826.7	125,000
2004Q2	108.78	39.01	29,100	721.7	846.7	132,300
2004Q3	110.17	42.48	31,300	940.0	1,081.7	133,000
2004Q4	104.52	48.93	35,000	933.3	1,123.3	138,700
2005Q1	105.11	46.78	33,200	975.0	1,106.7	140,000
2005Q2	107.70	48.53	36,900	895.0	1,066.7	140,000
2005Q3	111.42	55.50	39,100	985.0	1,095.0	150,000
2005Q4	117.34	51.58	47,300	928.0	1,095.0	150,000
2006Q1	116.77	58.93	46,100	955.0	1,126.7	160,000
2006Q2	114.83	65.73	48,800	1,047.0	1,228.3	160,000

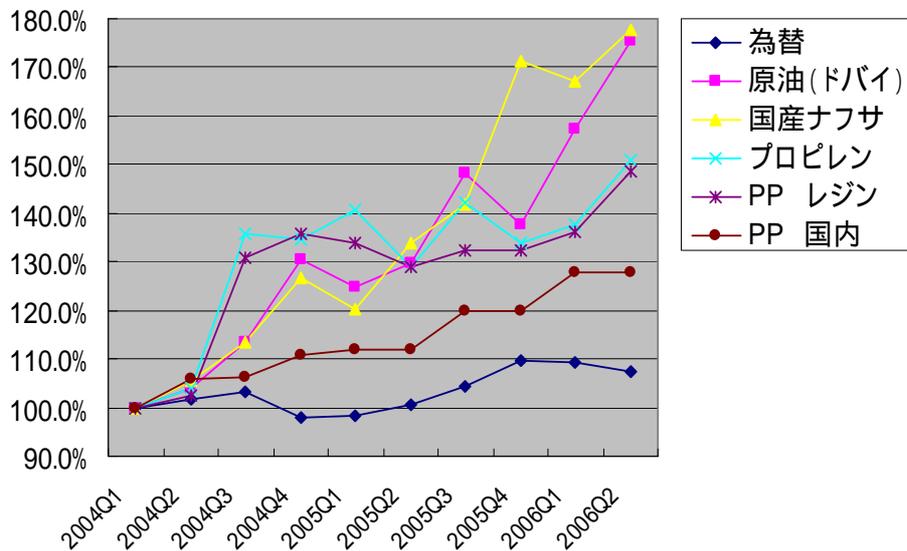


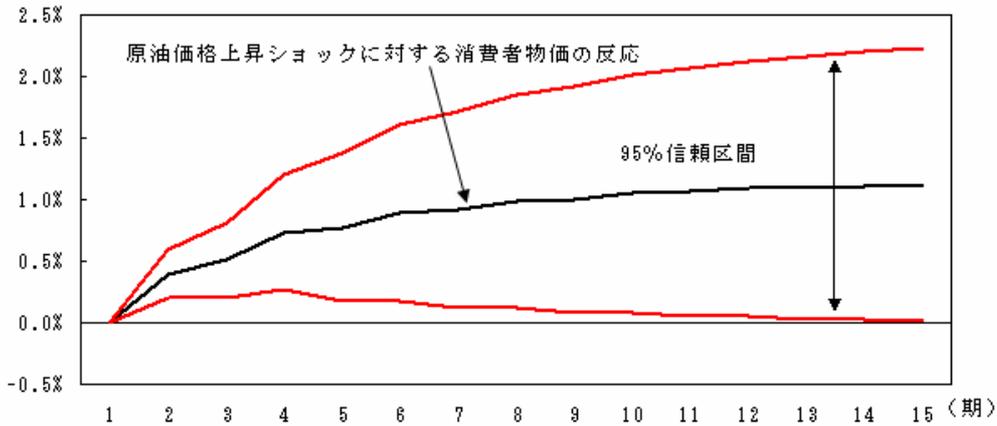
図 3-22 原油価格の高騰と石油化学製品価格への影響 (04Q1 を 100 とした場合)

原油価格の高騰は、国内物価に対しても影響を与えている。国内企業物価については、プラスチック製品などの石油化学製品をはじめとする石油製品は、2004年第2四半期以降前年比プラスに寄与して推移しており、他の素原材料価格の上昇とあいまって国内企業物価の上昇の背景となっている。財別においては、原油価格の上昇は素原材料や中間財への波及が進んでいる一方、最終需要製品など最終財においては、ガソリン等一部の財には波及しているものの図 3-22 でも示す通り全体としてみると波及の力は弱い<sup>13)</sup>。

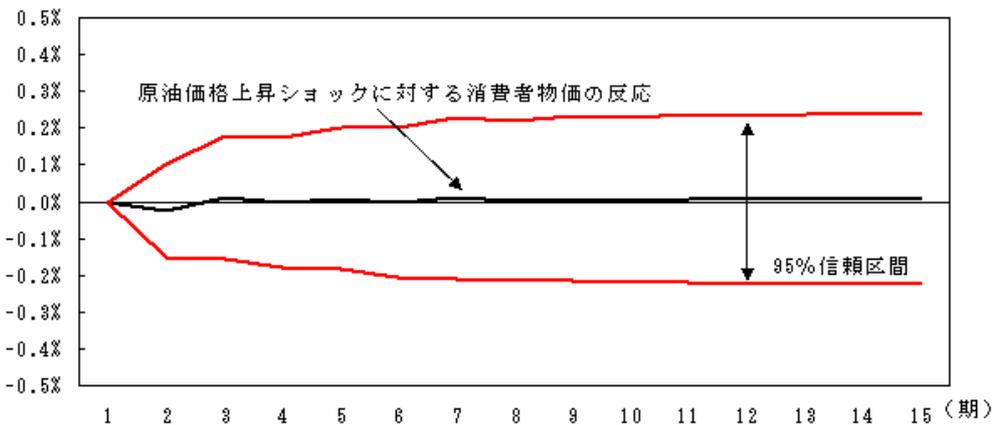
原油価格の最終需要製品価格への波及の状況をみるために、輸入原油価格（通関ベース）と消費者物価の2変数からなるベクトル自己回帰モデル（VAR）を推計した、原油価格上昇ショックに対する消費者物価のインパルス応答をみると（図 3-23）、80年代までは、少なくとも1年以上は原油価格のショックが消費者物価に影響し続けていたのに対し、90年代以降は、消費者物価は原油価格の上昇ショックにほとんど反応していな

いことが分かる。

(1) 1970年から89年まで



(2) 90年以降



- (備考) 1. 財務省「貿易統計」、総務省「消費者物価指数」による。  
 2. 推計の手法等は、付注1-5を参照。  
 3. 累積インパルス応答。

図 3-23 原油価格上昇ショックに対する消費者物価のインパルス応答<sup>13)</sup>

このような原油価格の最終需要製品価格への波及効果の低下には、最終需要製品市場での競争の激化の他に、エネルギー効率の向上といった点も背景にあると考えられる。

以上のように、原油価格の高騰はガソリン価格等一部には波及しているものの最終需要製品価格に十分波及していない。原油価格の波及の程度は、各産業の原油投入比率が長期的には低下傾向にあることから、以前と比べれば小さくなっているものと考えられる。しかし、前年と比べて原油価格はドバイ価格で25%上昇しており、単純な計算の下でも理論上は前年比で企業物価を0.73%、消費者物価を0.4%それぞれ押し上げる効果

を持つ。これに対して、実際の最終需要製品価格への波及は、産業連関表で試算される理論的な波及効果よりも小さく、特に最終財部門の企業に少なからず影響を与えている<sup>13)</sup>。

石油化学製品に関連する企業が原油価格高騰による影響を抑えるためには販売価格の引き上げ、調達先の変更や代替製品の導入、固定費を中心とする経費削減などがあげられている<sup>14)</sup>。しかし、十分な販売価格の引き上げを実施できている企業は少数であり、経済産業省が行っている「原油価格上昇の我が国産業への影響に関する調査結果」<sup>15)</sup>では石油化学製品に関連する（化学、板ガラス、繊維、および紙・パルプなどの）企業では価格転嫁について困難であると回答する企業が増加しており、その理由として市場における競争が激しいこと、さらに販売先との交渉が困難であることを挙げている。

## （２）石油化学業界における脱石油戦略

ここでは石油化学業界における脱石油戦略について述べる。上記でも述べた通り、石油化学業界では原油価格高騰による価格転嫁が困難であることから現在、経費削減などの企業努力によって原料値上がり分を吸収するか、もしくは3R（リデュース、リユース、リサイクル）の推進による脱石油を図ることによって原油価格高騰に対応している。ここでは3R技術の推進を脱石油戦略と位置付け、リデュース、およびリサイクルの詳細について述べる。なお、国内外の3R技術の詳細については（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）がデータベースを構築しており<sup>16)</sup>、NEDOでは将来の技術導入ロードマップを構築している<sup>17)</sup>。

### （i）石油化学業界におけるリデュースの現状

石油化学業界におけるリデュース推進の内容として製品軽量化、原料多様化（代替燃料の利用を含む）などが挙げられる。

製品軽量化技術としては、製品の必要な強度や性能を保ちながらレジン消費量を軽減する技術があり、具体的にはPETボトルにおける重量の軽減（旧ボトル20.75g → 新ボトル20.5g）、プラスチック成型バケツにおける軽量化（開発時から5%減）、ポリ袋（バランスフィルム）における軽量化（開発時から33%減）、食用油ボトルにおける軽量化（EVOHの開発による強度維持、開発時から10%減）などの事例がある。

また原料多様化については現在、各社でコンデンセート（天然ガス随伴原油）、天然ガス成分の重質NGL、およびC<sub>5</sub>ラフィネート（抽出残油）など重質原料を中心とする非ナフサ原料に向けて使用拡大が進んでいる。

以下のその一例として我が国の各社原料多様化対応について詳細を述べる<sup>18)</sup>。

①三菱化学：コンデンセート（天然ガス随伴原油）やガスオイル（灯油・軽油）など重質原料使用拡大に向けて設備増強を行っている。その結果、エチレン製造

設備の精製系と芳香族製造設備を改造し、原料全体のうち重質原料を 20% (現状では 10%未満) 採用できる体制を整える。

②昭和電工：ナフサ以外の重質原料に対応する設備増強・改造を行っており、天然ガス成分の重質 NGL やブタンといった非ナフサ原料使用比率が焼く 30%と国内業界では最も高い。さらに 2006 年春には比率を 50%まで高められる体制にし、最適運転条件の追求や最適原料フィードシステムを共同開発している。

③丸善石油化学：C<sub>5</sub>ラフィネート（抽出残油）の水素添加設備を新設し、これまで燃料に使用してきたC<sub>5</sub>ラフィネートを水添してナフサ代替原料に採用を開始した。

④三井化学：重質原料対応を進めており、重質 NGL の使用拡大を検討している。

さらに代替燃料の利用について、天然ガスの利用については上記で述べたコンデンセートや NGL 利用の他に天然ガスから直接エチレンやプロピレンを製造するプロセスが開発されており、現在、我が国ではナフサでも天然ガスでも対応できるエチレンセンターの建設が増加している。

また、天然ガスの他ではポリ乳酸などバイオマス由来の原料を用いた石油化学製品の製造方法が開発されており、例えばユニチカ㈱では植物由来の自然循環素材である「テラマック」でフィルム、シート、スパンボンド、繊維、不織布、高機能性樹脂を総合展開しているなど、国内でもいくつか事例がある。しかし、現在のところポリ乳酸などは性能的に競争力を持たず、本格的に導入されるためには多くの課題がある。また 3.2.2 でも述べた通り、とうもろこしを原料としたポリ乳酸などは食料との競合など多くの問題があり、原料多様化については当面、天然ガスを中心に推進されることが予想される。

表 3-9 にポリ乳酸とその他の石油化学製品における性能比較結果を示す。

表 3-9 ポリ乳酸とその他の石油化学製品における性能比較結果

製品	耐熱性	衝撃性	透明性	屈折率	価格	用途例
		J / M			円	
ポリ乳酸	55	29		1.45	300	フィルム、シート、雑貨
ポリプロピレン	95-100	30-80	×	-	160	バンパー、家電
ポリスチレン	75-80	21		1.58	170	フィルム、カップ、雑貨
PET	67	59		1.6	400	ボトル、フィルム、シート

(ii) 石油化学業界におけるリサイクルの現状<sup>19)</sup>

ここではプラスチックにおけるリサイクルの現状について述べる。環境省による容器包装リサイクル法によって我が国における廃プラスチックの有効利用は順調に拡大し、平成 15 年における廃プラスチックの有効利用率は総排出量の 62%となっている。

表 3-10 に我が国におけるプラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況について示す。

表 3-10 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況<sup>19)</sup>

年	樹脂生産量	再生樹脂投入量	国内樹脂消費量	使用済製品排出量	生産・加工ロス排出量	廃プラ総排出量	一般廃棄物	産業廃棄物	廃棄物計							有効利用量	（%）
									再生利用	油化/ガス化/高炉・コークス炉原料化	固形燃料	廃棄物発電	熱利用焼却	単純焼却	埋立		
1990	1,263	56	999			557	313	244	59			85		209	204	144	26
1991	1,280	74	1,007			622	345	277	77			98		218	229	175	28
1992	1,258	72	928			692	391	301	75			120		240	255	195	28
1993	1,225	66	902			756	419	337	69			122		266	299	191	25
1994	1,304	69	966	773	73	846	423	423	85			108		303	350	193	23
1995	1,403	75	979	806	78	884	443	441	95		4	122		327	336	221	25
1996	1,466	83	1,081	829	80	909	455	454	103		5	137	113	214	337	358	39
1997	1,521	88	1,136	866	83	949	478	471	113	1	5	147	133	225	325	399	42
1998	1,391	95	1,020	900	84	984	499	485	122	4	7	164	138	221	328	435	44
1999	1,457	108	1,081	888	88	976	486	490	134	4	9	169	136	206	318	452	46
2000	1,474	115	1,098	907	89	997	508	489	139	10	19	191	135	195	307	494	50
2001	1,388	109	1,096	929	87	1,016	528	489	147	21	29	207	132	192	289	535	53
2002	1,385	107	1,057	906	85	990	508	482	152	25	32	205	127	173	276	542	55
2003	1,398	97	1,101	913	88	1,001	513	488	164	33	43	208	127	161	265	575	58
2004	1,446	96	1,136	923	91	1,013	519	494	181	30	55	215	129	142	261	611	60
2005	1,451	96	1,159	914	92	1,006	520	486	185	29	62	231	121	123	255	628	62

プラスチックの生産量は、2000 年をピークとして減少傾向にあったが景気回復を反映し 2004 年には増加に転じ、2005 年も 1,451 万 t と微増で推移した。他方、有効利用廃プラスチック 628 万 t は前年+17 万 t と増加しており、有効利用率は 62% に到達した。

その中で使用済み品からのマテリアルリサイクルは容器包装リサイクル法や家電リサイクル法が大きく機能した結果となり、サーマルリサイクル（エネルギー回収）は、廃棄物発電の増加が顕著となったが、固形燃料化の増加は鈍化した。循環型社会形成に向けた動きが進む一方で中国向け廃プラスチックの輸出が増えてきており、特に PET ボトルでは国内循環システム崩れかねない状況となっていており、海外を含めたリサイクルシステムの維持問題が課題となっている。国内循環システムでも、種々のリサイクル手法が開発されて来ている中で、廃プラスチック製容器包装材の利用先ではマテリアルリサイクル分野の伸びが顕著であり、他の手法を含めた循環システムがアンバランスになる懸念がある。

（3）まとめ

以上より化学用原料における脱石油戦略について下記の通りまとめられる。

- ・石油化学業界では石油化学製品市場における競争激化などから原油価格高騰による最終需要製品への価格転嫁が困難であるため現在、経費削減などの企業努力によって原料値上がり分を吸収するか、もしくは 3R（リデュース、リユース、リサイクル）の推進による脱石油を図ることによって原油価格高騰に対応している。
- ・石油化学業界における脱石油戦略は短期的には製品軽量化、原料多様化（代替燃料の

利用を含む) などのリデュース技術が中心となっている。原料多様化については短期的にはコンデンセート (天然ガス随伴原油)、天然ガス成分の重質 NGL、および天然ガスからのエチレンやプロピレンを製造など天然ガスが中心となると予想される。

- ポリ乳酸などバイオマス由来の原料を用いた石油化学製品については性能的に石油由来の石油化学製品に対して競争力を持たず、食料との競合など本格的に導入されるためには多くの課題がある。課題解決に向けたブレークスルー達成により、長期的には導入される可能性がある。
- リサイクル技術については環境省による容器包装リサイクル法によって我が国における廃プラスチックの有効利用が総排出量の 62%になるなど順調に拡大しているが、脱石油戦略という観点からの中期的な大幅導入には多くの課題があり、石油化学業界は懐疑的である。

### 3.2.3 農林水産業における脱石油戦略

本節ではオイルピークを見据えた我が国の農林水産業界における脱石油戦略について概要と課題を述べる。なお、本節の内容は第5回本委員会における安藤満委員（富山国際大学）の講演「日本の農業を取り巻く環境」「地方農村の抱える問題―品目横断的政策（担い手育成）と農村」の内容、および第6回本委員会におけるアントニーF.F. ボーイズ先生（和光大学）の講演「日本における農業とエネルギー」の内容および論文をもとに構成した。

#### （1）日本の農業を取り巻く環境

日本の農業を取り巻く状況は危機的であるが、ここではその主要な原因について検討し、将来に向けた石油減耗後の影響と今後の対応策について述べる。ただしこの議論は富山県の農業関係者との長い議論がベースにあり、富山県の農業の特徴である米栽培農家の状況を反映した議論である。

一般的に農業は自然環境に大きく依存しているため、山地と丘陵地が73%を占める日本においては、陸水域等を除いた残り25%を占める台地や低地を、工業用地・住宅地と農地が競うことになる。日本農業の制約の一端はこの自然条件から来ている。この制約のためアメリカ合衆国型農業は無論のこと、北欧型の農業形態も困難と考えられる。広い扇状地に恵まれた富山県においてさえも欧米型農業は困難で、日本型の農業形態を模索するしかない。現農政は「支援の集中化・重点化による大規模農業を目指す」方向であるが、実は主要な農業の担い手である「中高年の離職者・女性に魅力のある小規模農業・集落営農を目指す」方向が正解ではないかと考えられる。

食糧自給率は1965年（昭和40年）供給熱量ベース73%であったものが、1999年（平成11年）以降40%の状況が続いている。「食料・農業・農村基本計画」<sup>20)</sup>では、平成27年度に自給率45%を目指している。簡単に達成できる目標の様であるが、前計画で達成できなかった数値であり、その達成は容易ではない。国内農業生産について問題としては、農業生産全体の段階的低下（図3-24）が顕著である。就農者の高齢化が進み、農薬・肥料の大量投入、機械化といった石油依存による生産体制に依存し易い現状がある。高齢化は若者が農業に夢を持ってないことを意味し、特に地方において著しく、富山県においては2003年（平成15年）には65歳以上の高齢農業者が63%を占めるに至っている（表3-11）。

幸いにも離職者の一部の就農意識は高いものが有り、上述した「中高年の離職者・女性に魅力のある小規模農業・集落営農を目指す」方向が、農村の活気を甦らせる可能性がある。「食料・農業・農村基本法」に基づき農水省が進めている政策は、専ら農業を営む者（大規模な専業農家）への集中支援が骨子である。第五条で農村振興を説いているが、農村の大部分を占める兼業・小規模農家の切捨ては、集落の崩壊を導くことにな

る。現実には兼業・小規模農家では、農業の担い手の主婦層も含め有機農法の拡大や地産地消を目指し、認証制を利用した農産物の安全性強化や加工による付加価値の増加による農業利益確保の取り組みを強めている。石油に依存した農業形態のため、石油の高騰が生産価格の上昇となり、農業所得の一層の低収益化を導くことが懸念される現在、農業と集落の担い手を積極的に支援する時期に来ていると考えられる。

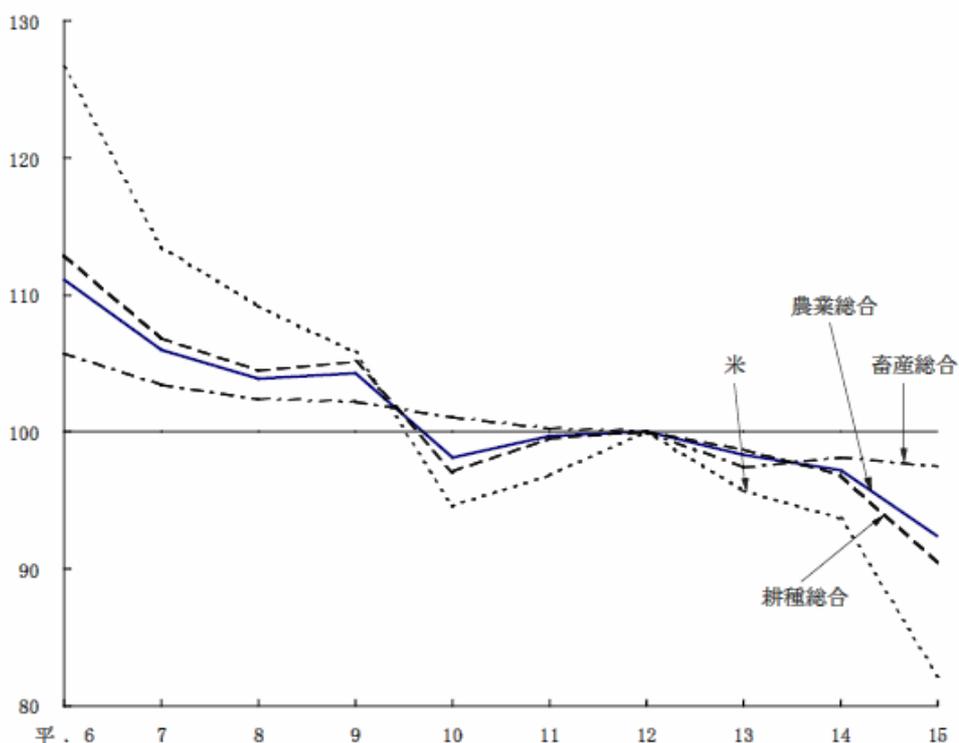


図 3-24 農業生産指数の推移

表 3-11 富山県の農業就業人口

		(3) 農業就業人口(15歳以上)							(実数:人 比率:%)
		計	男 女 別		年 齢 別				
	男		女	15~29歳	30~69歳	60歳以上	65歳以上		
実 数	平.15	43,750	16,990	26,760	3,410	6,660	33,680	27,580	
	平.14	44,970	17,430	27,540	3,630	6,980	34,380	27,980	
対前年増減率		△ 2.7	△ 2.5	△ 2.8	△ 6.1	△ 4.6	△ 2.0	△ 1.4	
構 成 比	平.15	100.0	38.8	61.2	7.8	15.2	77.0	63.0	
	平.14	100.0	38.8	61.2	8.1	15.5	76.5	62.2	

## (2) 地方農村の抱える問題

現在、「食料・農業・農村基本法」に基づき「食料・農業・農村基本計画」（農村基本計画）により、農政改革が進行している。食糧安全保障のため、食料自給率向上を計画しているが、その一方、高齢化する農村で地域社会の自立と自給率向上をいかに達成するかについての政策は、地方の存立基盤を強化するものでなければならない難しさがある。

現在の日本の農業は兼業農家で支えられてきている。その結果今日まで大部分の農地は維持され、地域社会の生活もその上に成り立っている。兼業の困難な中山間地については、直接支払いが行われるようになってきた。農業の品目横断的政策（担い手育成）では、大規模経営者・経営体支援の姿勢は明確であるが、農村を支えている大部分の小規模経営の農民（高齢者や女性の占める割合も高い）への配慮は明確でない。地勢的に山間部の多い日本で、歴史的に日本文化と自然環境の担い手となってきた農村社会の生活基盤の弱体化は、日本の食・文化の伝統と緑の環境の荒廃を招く恐れがある。今後、品目横断的政策を通じて地産地消を支える「集落営農」への積極的支援対策が望まれる

## (3) 農業へのエネルギー投入量と脱石油戦略<sup>21)</sup>

### (i) 農業の近代化と農作物収量

第2次大戦後から1980年代半ば頃までは、「緑の革命」による新品種の導入と農業のエネルギー集約化が食料増産をもたらした。この時期に世界の穀物生産は約2.6倍増え、世界人口は25億人から50億人にまで倍増した。緑の革命の成功の基盤は、高収量品種だけでなく、化学肥料、農薬と灌漑水供給のための化石資源の投入増強にある。農業でのエネルギー集約度を100倍まで増やしたケースもあるという。収量が増大したことで、土地生産性も大きく向上した。その2次的影響としては、大面積において単作を繰り返すことができるようになり、伝統的な輪作体系が放棄されてしまった。農業機器類も広範に導入され、更なる化石資源の投入によって労働生産性も向上した。

しかし、緑の革命は「新品種が在来品種にとって変わり、生物多様性が低下した」、「化学肥料の大量投下によって土壌が破壊された」、「単作の繰り返しで輪作体系が放棄され、人間の栄養バランスが崩れた」、「化学品による汚染の結果で環境や人間の健康に悪影響をもたらした」などの問題をもたらした。

シバ（Vandana Shiva, 1991年）は異なる25の稲栽培方法におけるエネルギーと労働力の投入の比較に関する研究を発表した。図3-25に25の稲栽培方法におけるエネルギーの産出：投入比率を示す。図は化石燃料の投入量が増加するにつれ収量は増えるが、投入エネルギー単当たりの産出エネルギーはかえって低下するというを示している。しかし、データは極めて労働集約的な稲栽培方法で高い収量をあげることも可能なことをほのめかしている。これらのデータを対数グラフで表わしたものが図3-26である。

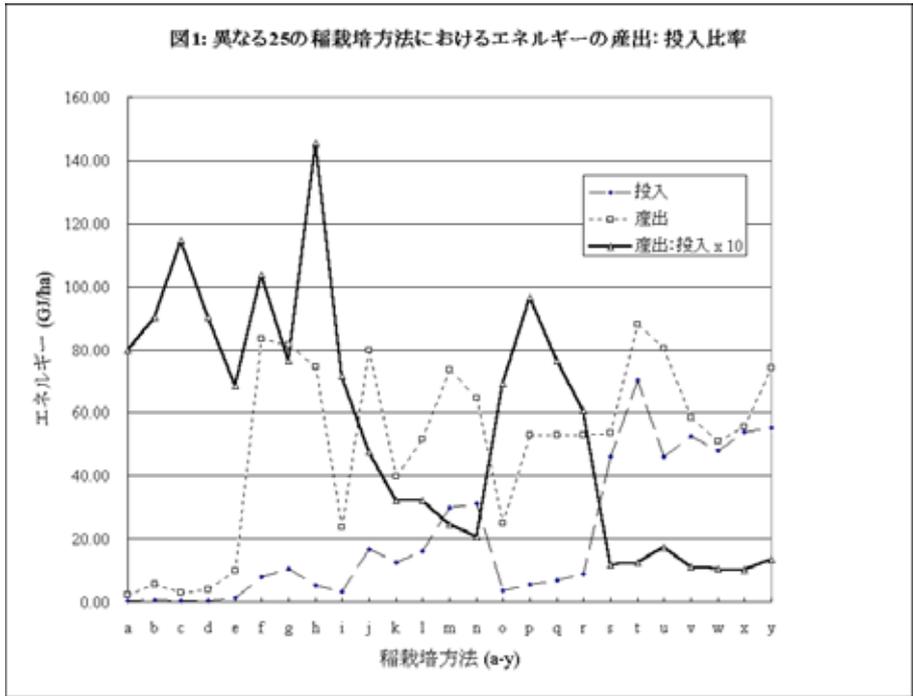


図 3-25 25 の稲栽培方法におけるエネルギーの産出：投入比率

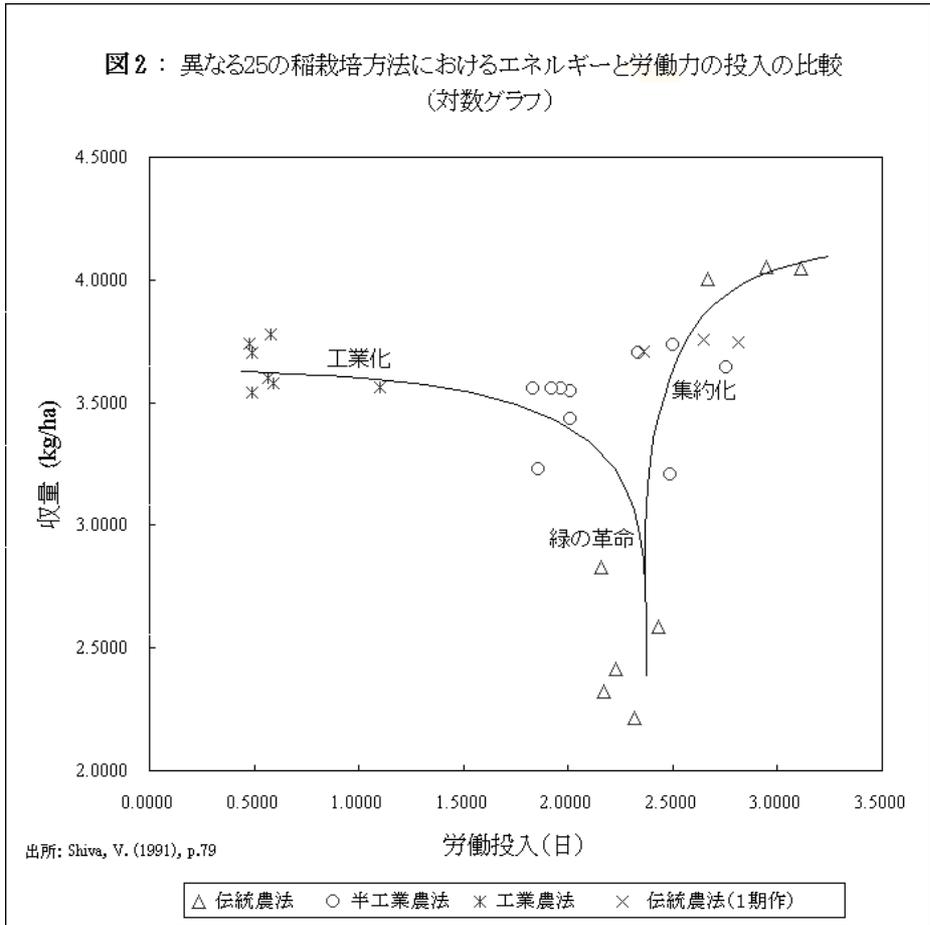


図 3-26 25 の稲栽培方法におけるエネルギーと労働力投入の比較

稲栽培方法が高い収量をあげる「方向」には二つあることがわかる。つまり一方は、近代化、工業化された「方向」であり、もう一方は、緑の革命の労働集約化、伝統的な有機農法の強化という「方向」である。後者の方をギェーツ（Geertz）は"involution"という造語で呼んだが、ここではそれを「集約化」と訳すことにする。ここで注意しておかなければならないのは、図 3-26 の右上の三角印の収量が極めて多いことである。これは二期作の合計を示している可能性があるため、その数値を 2 で割って、図 3-26 に×印で示した。その結果、両者に大きな差異はなく、同様の傾向が見られた。また、インド、日本、香港の"o"の位置とほぼ重なる。インド、日本、香港はいずれも、エネルギーと労働力の投入が両方とも比較的高い半工業的な稲栽培方法をとっており、1ha 当たり 4.4 トンから 5.4 トンというまずまずの収量がある。化石エネルギーを投入すれば、労働の節約につながるといわれているが、これらの地域ではそう単純ではないようである。家畜（水牛など）の代わりにトラクターを、糞を堆肥にする代わりに化学肥料を使っているが、水田の管理には依然として多くの時間をかけているのではないだろうか。これはつまり、稲の収量増加が、農民の知識や技能、手入れの良し悪しによって左右されるということを示している。大量の化石エネルギー補助は労働力の大幅節約につながるが、土地生産性は頭打ちになる。つまり、緑の革命の工業化・化学化の「方向」は、永続性(sustainability)を犠牲にして高収量を可能にし、反面、労働集約化、伝統的な有機農法の強化という「集約化」の「方向」は永続性を保障しながら高収量を可能にしている。

(ii) 農業へのエネルギー投入量

全世界の農業へのエネルギー投入の推計を表 3-12 に示す。全世界で年間に使われる窒素質化学肥料（約 8,200 万トン N 養分）を製造するには約 5.5EJ のエネルギー投入が必要である。リンの場合のエネルギー投入は 350PJ 程度、カリウムは 250PJ 程度なので、全世界の化学肥料製造のエネルギー投入は 6.1EJ 程度になる（2002 年の世界の年間原油産出量は 27.3Gb 程度で、これは 168EJ に当たる）。全世界の農薬製造における投入エネルギーは年間約 500PJ と推計される。

表 3-12 全世界の農業へのエネルギー投入の推計結果

作物の種類	投入エネルギー (GJ/ha)	全世界エネルギー補助 (EJ)	
畑作穀類	8-15	機械類	5
水稲	40-65	化学肥料	6.1
いも類	40-90	農薬	0.5
野菜	25-100	灌漑	0.3
ハウス栽培野菜	2000-4000		
果樹など	50-150	合計	12

出所：Smil, (1991), p.236

表 3-13 日本人が食料の生産、加工、流通、調理に必要なエネルギー

	直接農業で (20%)	農業以外 (80%)	合計
国内	0.70 EJ	2.82 EJ	3.52 EJ
国外	0.75 EJ	2.99 EJ	3.74 EJ
合計	1.45 EJ	5.81 EJ	7.26 EJ

全世界の農業における化石エネルギー補助が年間 12EJ ということは、耕地 1ha 当たり平均 8GJ になるが、大雑把に分けると、先進国では平均 10.5GJ、途上国では平均 7.5GJ 程度である。12EJ という最終エネルギー投入なら、世界原油産出量が年間 27.3Gb 水準とすれば、その約 10%にあたる。

現在は、消費される食料の 1J を供給するには 10J 以上の化石エネルギーが消費されている。このうち 2 割程度は農場で直接に作物や動物に由来する食物を生産するために消費され、約 8 割はその後の食品加工、輸送、販売や調理などに消費される。日本を例にとれば、1 億 2,700 万人の一日一人当たりの約 4GJ (2617 kcal) の熱量を供給するには 1 年間 5.08EJ の最終エネルギーが必要である。全体のエネルギー効率約 70%では、これは約 7.26EJ の一次エネルギーに相当する。2002 年には、日本の一次エネルギー供給は約 22EJ だったので、日本人全体に食料を供給するためには、日本の一次エネルギー供給の約 3 分の 1 に相当する（主に化石）エネルギーが消費されたということになる。そのうち、直接に農業で消費されたのはその 2 割程度で、更に、日本の食料自給率が 4 割程度（カロリーベース）なので、国内の農業で消費された分は上述した 7.26EJ の 8%程度になるだろう

食料の生産と消費に伴うエネルギー消費は日本の場合、エネルギー消費総量の約 16%と推計されている。そうすると、日本の食料の 6 割分が輸入であるから、それらを供給・輸送するためには残りのエネルギー消費約 17%分が国外で消費されるはずである。日本人が 1 年間に消費する食料の生産、加工、流通、調理などに必要なエネルギーのまとめは表 3-13 の通りである。

以上より、現在人類は、a) 有限の農地資源で大きく膨れ上がっている世界人口を維持していると同時に、b) 中期的な将来において減退することが常識になっている有限の化石エネルギー資源の使用によって、究極的な資源の基盤である肥沃度の高い土壌を破壊している。このような緑の革命の「方向」を、有機的な「集約化」の「方向」へと変える、つまり、有機農法（永続可能な農法）で世界を養うことができるのだろうか。

動力源と肥料の供給のために化石エネルギー資源に頼ることができなくなった場合、残る選択肢は労働力や畜力で適切な有機（その他の永続可能な）農法を営み、同時に資源基盤である肥沃度の高い土壌の面積に見合ったレベル内に人口を調整させることである。20 世紀は農業へのエネルギー投入の悪夢の世紀だったと言えるが、今世紀は、化石資源の減退によって生活様式の変更を余儀なくされた我々が、それに伴う諸問題、特に農業とエネルギーとのかかわり、をいかに解決していくかが課題となる。

#### (4) まとめ

以上より本節の内容は下記の通り、まとめられる。

- ・現在、我が国は石油に依存した農業形態であるため、石油の高騰が生産価格の上昇と

なり、農業所得の一層の低収益化を導くことが懸念される。そのため食料自給率を向上させるためにも農業と集落の担い手を積極的に支援する政策、具体的には主要な農業の担い手である「中高年の離職者・女性に魅力のある小規模農業・集落営農」を目指すことが重要となる。さらに今後、品目横断的政策を通じて地産地消を支える「集落営農」への積極的支援対策が重要となる。

- ・脱石油を踏まえて今後、緑の革命の「方向」を、有機的な「集約化」の「方向」へと変える、つまり、有機農法（永続可能な農法）が重要となる。具体的には動力源と肥料の供給のために化石エネルギー資源に頼らず、労働力や畜力で適切な有機（その他の永続可能な）農法を営み、同時に資源基盤である肥沃度の高い土壌の面積に見合ったレベル内に人口を調整させることが重要となる。

### 3.2.4 電力における脱石油戦略（原子力の可能性と EPR）

本節ではオイルピークを見据えた我が国の電力における脱石油戦略(原子力の可能性)についてについて検討するため、原子力に関する総論とフランスにおける原子力政策の概要を EPR (Energy Profit Ratio) の観点からも含めて述べる。なお、本節の内容は第 4 回本委員会、および第 5 回本委員会における天野治委員 ((財) 電力中央研究所) の講演「原子力発電を EPR から考える」、および「世界の一次エネルギー、2050 年修正予測とフランス戦略」の内容をもとに構成した。

#### (1) フランス、および世界主要国における原子力の位置付け

2050 年における世界エネルギー構成予測について、図 3-27 に IASA (International Institute for Applied Systems Analysis) において提示されているシナリオの一つを示す。図 3-27 におけるシナリオ B では、2000 年におけるエネルギー消費量 10.1Gtoe が 2050 年においては 19.7Gtoe に増大すると予測している。しかし、この予測では石油や天然ガスなどの化石燃料に従来以上に依存することになり、現在の化石資源の制約を踏まえたエネルギー情勢を考慮すると、このシナリオは現実的であるとは言えない。そこで図中に持続的発展可能な社会という観点から修正を加えた新たな世界エネルギー構成予測の結果を示す。修正したシナリオでは石油や天然ガスなど化石燃料の供給量減退を想定し、化石燃料の依存度を減少させるため、節約及び効率向上によってエネルギー消費量をシナリオ B に対して 30% 近く減少させたシナリオを修正予測した。修正予測したシナリオでは水力などの再生エネルギーを従来以上に導入する必要がある、さらには原子力発電を大幅に拡充する必要があることを示している。また、それでもさらに必要となるエネルギー量 2.5Gtoe については、石炭のクリーン化、太陽熱発電、太陽光発電、エネルギー効率の更なる向上、およびナノ技術・バイオ技術における新発明に期待せざるを得ない。

世界主要各国が様々なエネルギー政策を行っているが、本節ではオイルピークを見据えた我が国の原子力における可能性を検討する意味から、特にフランスにおける原子力政策について概説する。フランスでは、1973 年および 1979 年のオイルショックを契機として原子力発電所を全国各地に建設した。

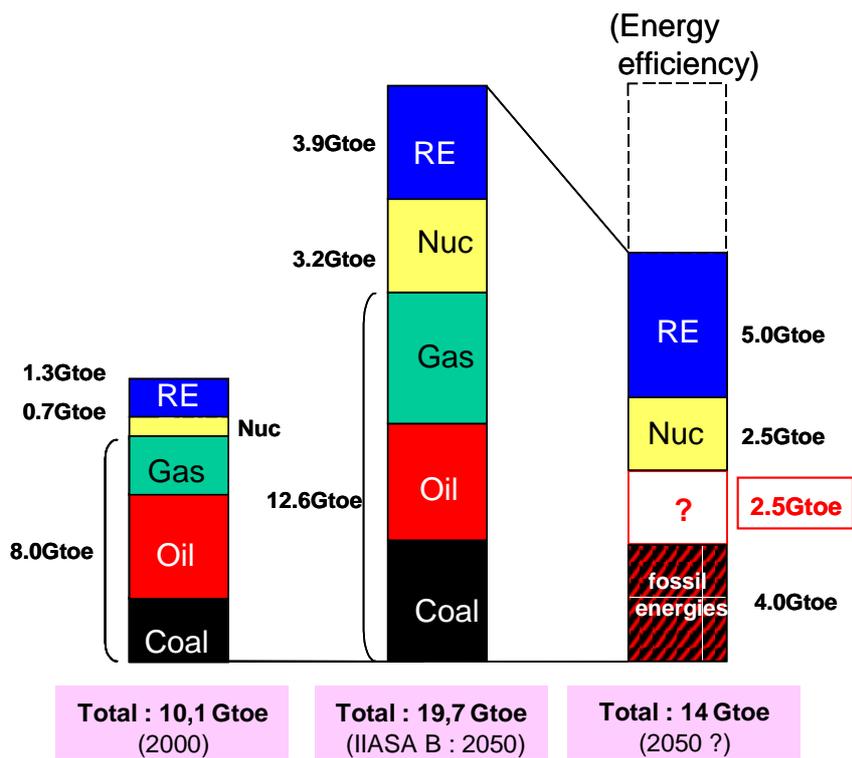


図 3-27 世界エネルギー構成予測

図 3-28 に世界主要国の電源別構成を示す。

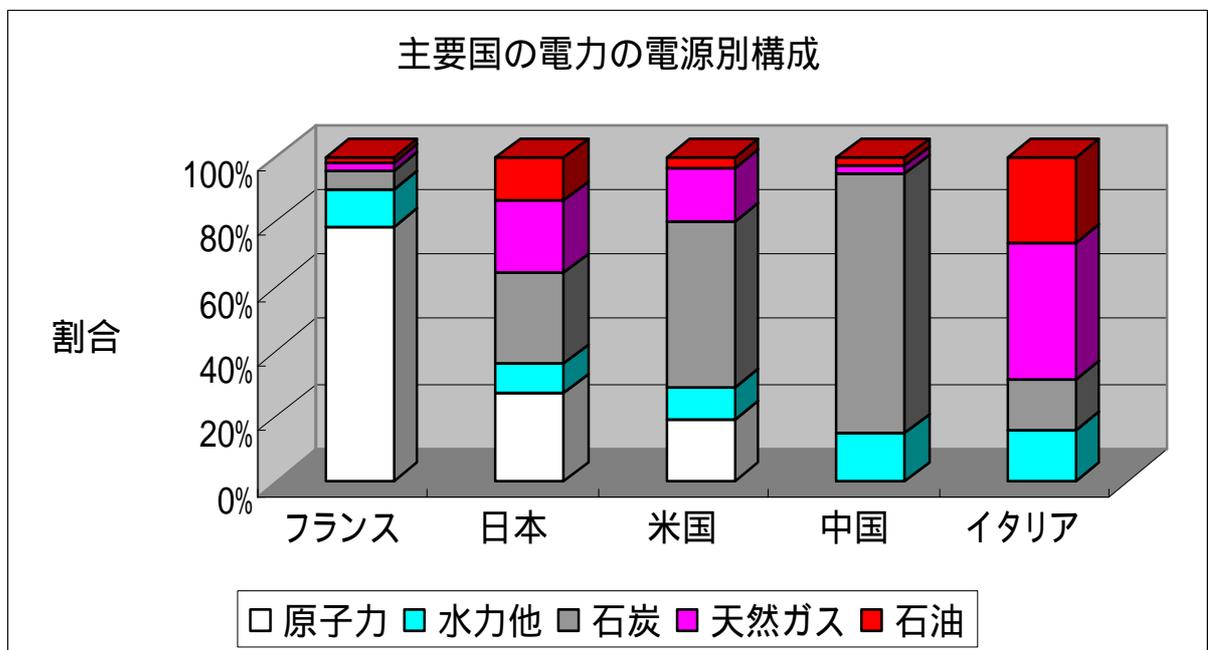


図 3-28 世界主要国の電源別構成図

図 3-28 に示したとおり世界主要国の中でフランスは、電力用電源として原子力 80%、水力 10%、石炭 5%、石油、天然ガスあわせて 5%であり、石油、天然ガスにほとんど頼っていないため、石油や天然ガスのピークには現在でも対応できるエネルギー先進国である。他方、日本は原子力 30%、石油 10%、天然ガス 20%であり、石油は今後、減らす傾向にある。イタリアは石油 30%、天然ガス 40%であるため、石油ピークや天然ガスピークに大きく影響を受ける国である。また中国は、石炭が 80%であり、その石炭を西方から北京や上海まで輸送するため、その輸送用エネルギーが全体の 1/3 から半分を占めているのが現状である。現在、石油や天然ガスには大きく依存していないが、中国における石油需要の大幅な拡大は今後起こることが予想されており、石炭だけでは今後のエネルギー需要拡大に対応できないと考えられている。そのため、今後は中国を始めとする各国で原子力発電の新規設置に本格的に取り組むことが予想される。

また図 3-29 に世界の原子力発電の設備容量（実績と予測）を示す。米国、フランス、ロシア、英国、およびカナダなどは、1960 年代に原子力発電の商業化にむけて小型炉で開発を進めた。1973 年と 1979 年のオイルショックを契機に 1970 年代、および 80 年代にフランスを中心に原子力発電の大幅な普及展開が始まった。しかし、先進国における社会成熟による電力需要の低迷、石炭や天然ガス価格の低下、TMI、チェルノブイルの原子力発電事故、規制の硬直化などがマイナス因子となり、1990 年代以降は新規の原子力発電所建設が大幅に減少した。他方、中国では 1990 年代から原子力発電所が導入された。

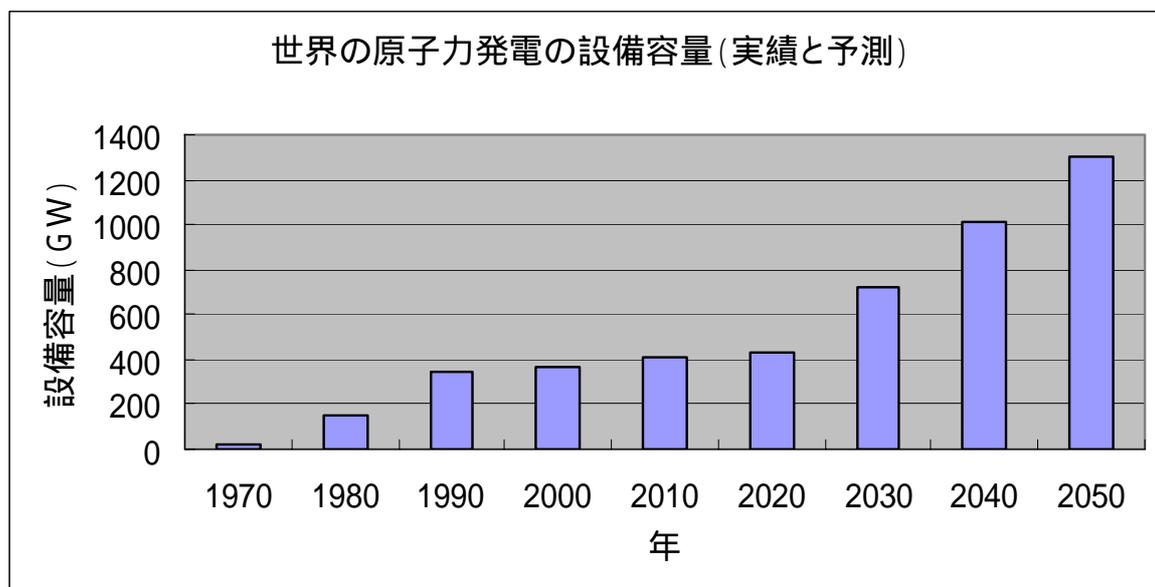


図 3-29 世界の原子力発電の設備容量（実績と予測）

ここでエネルギー資源を量と質の観点から評価するため、質を定量的に評価するエネルギー収支比、EPR について述べる。エネルギーを産出するための燃料の採掘、輸送、発電所の建設、運転、補修、および廃棄物処理などライフサイクル全般に関わるエネルギー投入量を入力値とし、また発電設備が例えば、30年間の寿命（運転年数）中に出力するエネルギーを出力値とした場合、この出力値を入力値で除した割合が EPR である。EPR は高いほど効率が良いこと、またエネルギー密度が高いことを意味する。図 3-30 に発電電源別に EPR を比較した結果を示す。

図 3-30 では、出力エネルギーとしては電気エネルギーを考える。太陽光は太陽の出ている間の 8 時間程度発電可能であり、また風力は風の吹いている間は発電できるが、なぎの状況では発電できないため稼働率は悪くなる。さらに夏場の強風は定格電力における風力の 20%程度風力が強くなるため、逆に出力される発電電力量は小さくなり、EPR は低くなる。LNG 火力発電では、天然ガスを液化して体積を（約 1/760 まで）小さくし、船で輸送するためこの輸送エネルギーに出力エネルギーの 80%以上が消費されるため大幅なエネルギーロスとなる。また石炭火力発電も海外から船で石炭を輸送してくるため、輸送エネルギーに出力エネルギーの 1/3 が消費されるため、EPR は低くなる。水力は存在する河川水を利用するのみにとどまるため、EPR は他の発電方法と比較して高くなる。ここでは原子力発電の EPR は 17.4 となったが、ウラン濃縮における遠心濃縮などの技術革新、稼働率 90%の達成や定格出力の増強、及び免震構造の採用などにより、将来的には EPR50 程度は可能となる。

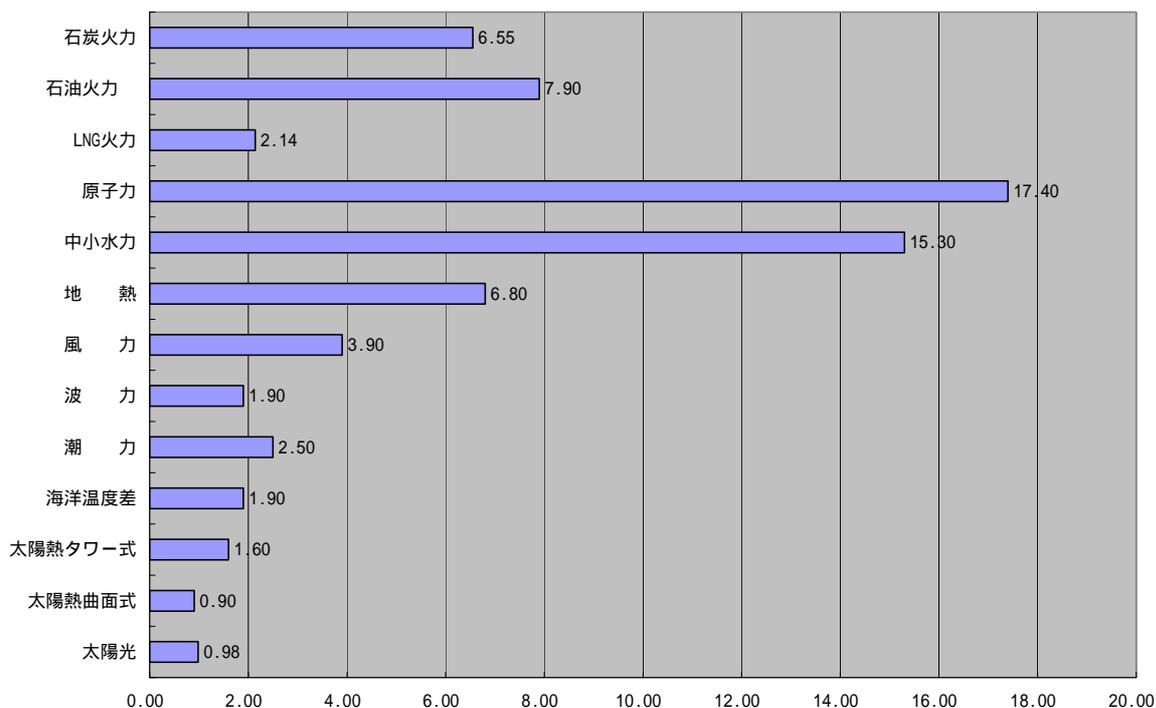


図 3-30 発電電源別の EPR 比較

ここで原子力発電における EPR 評価の詳細について述べる。

原子力発電はエネルギー密度が高いために、資源の 3 要素（濃縮されている・大量にある・経済的に利用できる位置にある）を満足する。

原子力発電では、ウラン 235 を天然の 0.7% から 3.5% 程度に 5 倍濃縮して、それを核分裂させて、エネルギーを取り出している。残りの大半はウラン 238 であり、ウラン 235 とは、化学的に同一であるが、重さが若干異なる。このわずかの差を利用して分離するために効率が悪くなり、ここに大半のエネルギーを消費することになる。従来は、ガス拡散法で、隔膜の分離係数の違いを利用しているが、この方法は多段に組む必要があり、また圧力をかけるため、消費電力が大きくなる。このときの EPR は 6.6 である。現在は、遠心分離法に置き換わりつつある。遠心濃縮では、遠心機の起動時に電力を消費するが、その後は一定速度で摩擦ロスを少なくしており、消費電力はガス拡散法に比べて 1/24 である。遠心濃縮での EPR2 は 28.2 である。現在では、濃縮はガス拡散法と遠心法の生産規模がちょうど同じ程度であり、このため、現在の原子力発電の EPR は  $(6.6+28.2)/2=17.4$  となる。図 3-31 にガス拡散法、図 3-32 に遠心分離法の原理図を、さらに表 3-14 に各種ウラン濃縮法を示す。

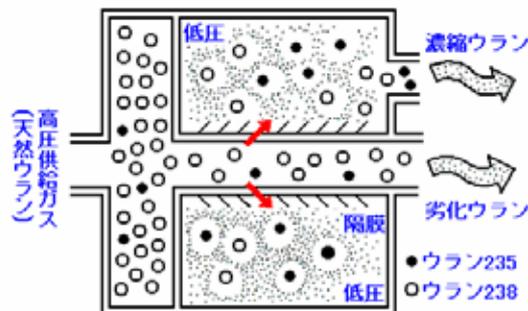


図 3-31 ガス拡散法の原理図

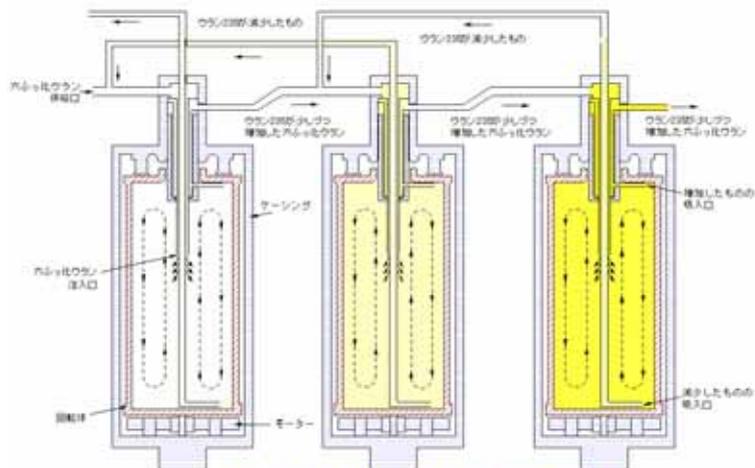


図 3-32 遠心分離法の原理図

表 3-14 各種ウラン濃縮法

	ガス拡散法	遠心分離法	レーザー法(原子法)	レーザー法(分子法)	化学法
濃縮原理	<ul style="list-style-type: none"> <li>235UF6と238UF6の質量差に基づく運動速度の差を利用する。</li> <li>UF6ガスを圧縮機により加圧し、多孔質膜を利用して238UF6を分離し回収する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>235UF6と238UF6の質量差を利用する。</li> <li>常温UF6ガスを遠心分離機により遠心力を作用させて238UF6を分離し回収する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>235Uと238Uの電子エネルギー単位の差を利用する。</li> <li>レーザー光を高温U蒸気に照射し235Uを励起、イオン化し、電磁界を用いて分離回収する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>235UF6と238UF6の赤外線吸収スペクトルの差を利用する。</li> <li>レーザー光を低温UF6蒸気に照射し235UF6を励起、解離させ、反応生成した235UF5を分離し回収する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>235U-イオンと238U-イオンで化学反応速度が異なることを利用する。</li> <li>U+6を吸着する濃縮剤に酸化剤、U+6 + U+4混合液、還元剤の順番で液を注入すると塔上部に235Uが濃縮される。</li> </ul>
分離係数	約1.003	約1.4	>10	<10	約1.001
分離段数	約1,000段	約10段	1段	1段	約1,000段(濃縮塔は1本)
消費電力	2,400kWh/SWU ※1	~100kWh/SWU ※1	~100kWh/SWU ※1	~100kWh/SWU ※2	130kWh/SWU ※3
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>消費電力が大きい</li> <li>設備が大規模</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>可動部が多い</li> <li>ガス拡散法より経済的</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>可動部が少なく設備がコンパクトである。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>取扱実績の多いUF6を使う</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>濃縮に時間がかかる</li> <li>装置が簡単</li> </ul>
原料ウラン	UF6	UF6	金属U(単位)	UF6	ウラン溶液
参考文献	◀04-05-01-05▶図1参照	◀04-05-01-04▶図1参照	◀04-05-01-06▶図1参照	◀04-05-01-06▶図2参照	◀04-05-01-11▶図2参照

注) ※1 原子力工業第33巻第4号(1987)「レーザーによるウラン濃縮」  
 ※2 原子力工業第32巻第6号(1986)「レーザーウラン濃縮法の研究の現状とその評価」  
 ※3 原子力学会(1988年3月)「原子燃料サイクル技術の現状と将来」

[出典] 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電課(編)：原子力発電便覧-1995年版、電力新報社(1995年2月)

原子力発電を進化させている国では、稼働率が90%、定格出力も運転経験から一部を改良して、120%のエネルギーを取り出している。これに、エネルギーのかかるガス拡散法がすべて遠心法に置き換わると、改善した原子力発電のEPRは48.8(約50)となる。

図3-28~30にも示したとおり、原子力発電先進国では石油や天然ガスの代替として原子力発電が有望であり、人材などのインフラ(発電所、大学、研究機関)も豊富に存在する。またその他の国では、石油や天然ガスの代替および拡大するエネルギー需要の対策として原子力発電の導入検討は本格化することが予想できる。その検討が2010年まで続き、その後は、設計、製造、建設、試運転が10年間続くが、この間に石油ピークや天然ガスピークの理解と危機感が国際的に拡大し、原子力発電導入に対する渴望はますます強くなることが予想される。2020年以降は、急激に原子力発電の建設、運転が始まり、2050年には1300GWに達する可能性がある。

また原子力発電に使用するウラン資源について、表3-15および図3-33にウラン資源消費量の将来予測について示す。

表 3-15 原子力発電規模とウラン消費量の将来予測

原子力発電(軽水炉) in 2050 (Gwe)	400	1000	1330 (≈ 2,5 Gteo)	2000
天然ウランの消費される量と契約量 (Mt)	6	12	15	21

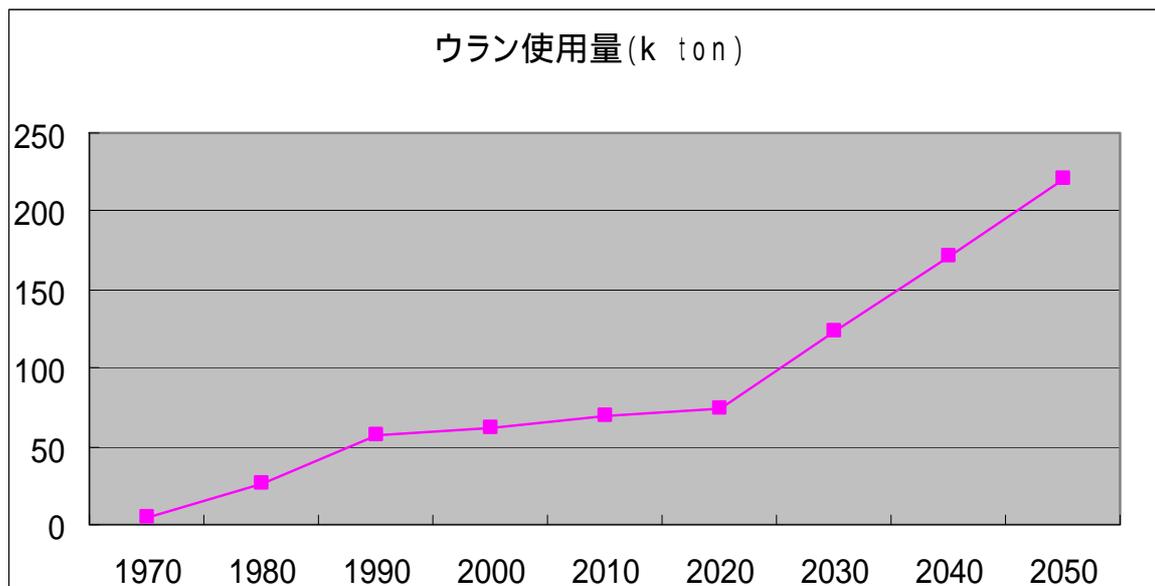


図 3-33 ウラン消費量の将来予測

現在、天然ウランの究極可採埋蔵量は 15Mton（確認埋蔵量：4Mton）と見積もられている。標準的な 1 GW の原子力発電所における天然ウラン消費量は 170 t/年であるため、表 3-15 で示した通り、2020 年から急激に原子力発電所が増加し、2050 年に 1,330GW に達すると想定した場合、天然ウランの枯渇時期は単純計算でも 66 年となる。さらにまた、2050 年より前にも原子力発電でウランが消費されている分を加算すると、天然ウラン枯渇時期は 60 年程度となる。2050 年における原子力発電所プラント数（1,330GW 相当）を今後 60 年間運転できる天然ウラン資源量を確保しなければいけない点を考慮すると、2050 年が天然ウラン資源のピークと理解できる。ただしここで補足説明すると、オイルピークは石油の生産が増加から減退に転じた時点をピークと意味するが、ウランピークは天然ウラン資源量を使い切る分の原子力発電プラントを建設すると、それ以降に新設する原子力発電プラントには 60 年間運転するのに必要な天然ウラン資源は存在しないことを意味している。そのため、それ以降の原子力発電炉はウランを増殖して使う高速増殖炉（FBR）が必要となるか、あるいはウランと同等な核分裂性能を持つトリウム資源の利用を検討する必要がある。

## （2）フランスにおける原子力政策と高速増殖炉

図 3-34 にフランスにおける原子力発電計画について、電力構成の推移を示す。フランスでは EPR という第三世代炉に 2020 年から切り替える予定である。さらに 2050 年のウランピークに対して、第 4 世代炉である高速増殖炉を 2040 年から年間 2 基（2GW）ペースで導入し、その結果 2050 年までに合計 20 基を導入して、高速増殖炉で発電をする体制を整える予定である。このため、2020 年にプロトタイプ（商業化データを取る原子

力発電炉) を建設する予定である。

フランスにおける FBR 開発は 1953 年から開始され、実験炉 (ラブソデイ、1967 臨界、20MWe)、原型炉 (フェニックス、1973 臨界、250MWe)、実証炉 (スーパーフェニックス、1985 臨界、1,240MWe) の世界一の開発実績を持っている。しかし、1997 年に豊富な石油に押される形で FBR 開発が大幅に縮小された。

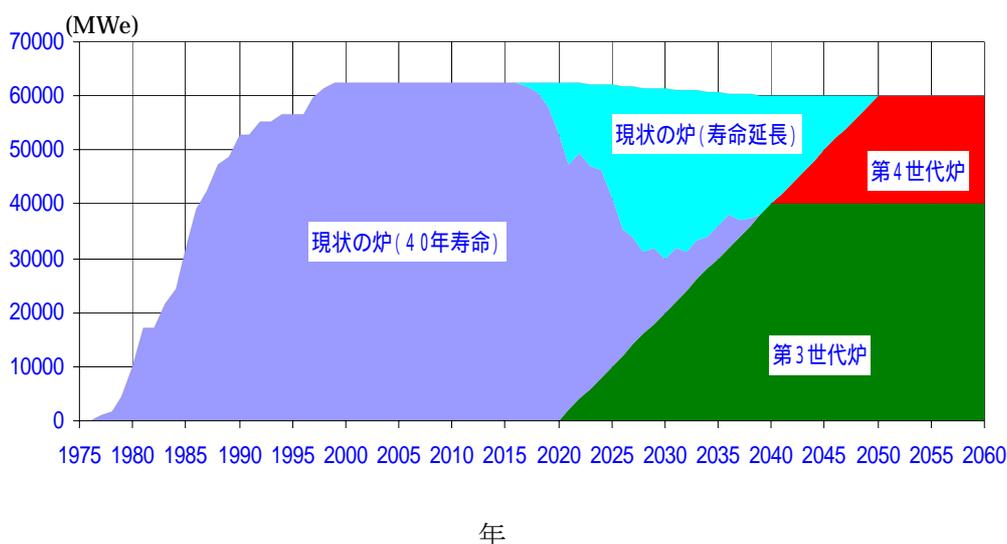


図 3-34 フランスにおける原子力発電計画：電力構成推移

ここで FBR の仕組みについて解説する (図 3-35~36)。ウラン 235 を 5 倍程度濃縮して使う現状の軽水炉は、中性子を低速 (2,200m/s) で使うため、ウラン核分裂で発生した中性子を水と何回か衝突させて、そのスピードを下げている。また低速化するための水は冷却にも用いている。FBR ではプルトニウムの核分裂を一桁高い高速領域で使うため、中性子を低速化する水は使えない。そこで中性子を低速化せずに、冷却効果の高い Na 金属を用いている。また、プルトニウムの核分裂で発生する中性子が 3 個であるため、軽水炉のウランの核分裂に比べて、一つ余分となる。この余分な中性子でウラン 238 をプルトニウム 239 に変える。これが FBR における「増殖」である。

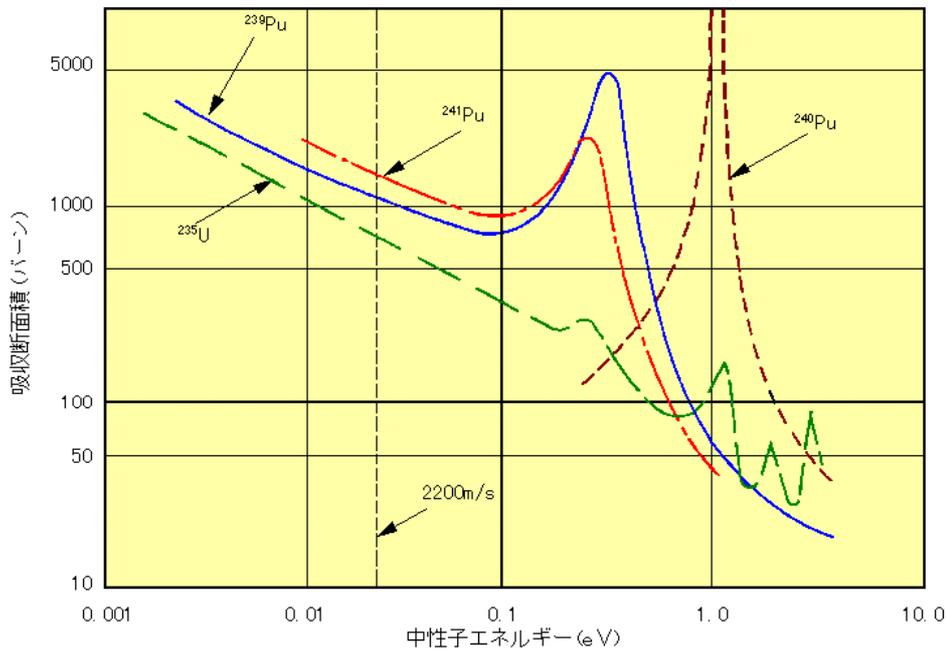


図 3-35 核分裂性核種の中性子吸収断面積

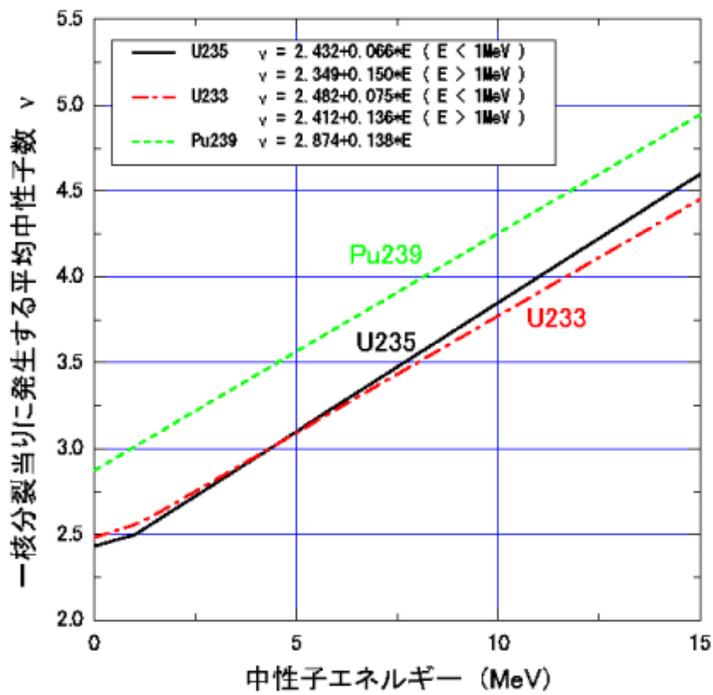


図 3-36 入射中性子エネルギーに対する 1 核分裂あたりに発生する中性子数の変化

図 3-37 に FBR の仕組みを示す。1GW の FBR を最初に運転にするためには、14 トンのプルトニウムが必要である。これは、六ヶ所再処理工場を 2 年間操業してやっと得られるものである。高速炉は、運転を実現するドライバー燃料（ウランとプルトニウムの混合で Pu 濃度 15~20%相当）と増殖を受け持つブランケット燃料（天然ウランで大半が U238）で構成される。

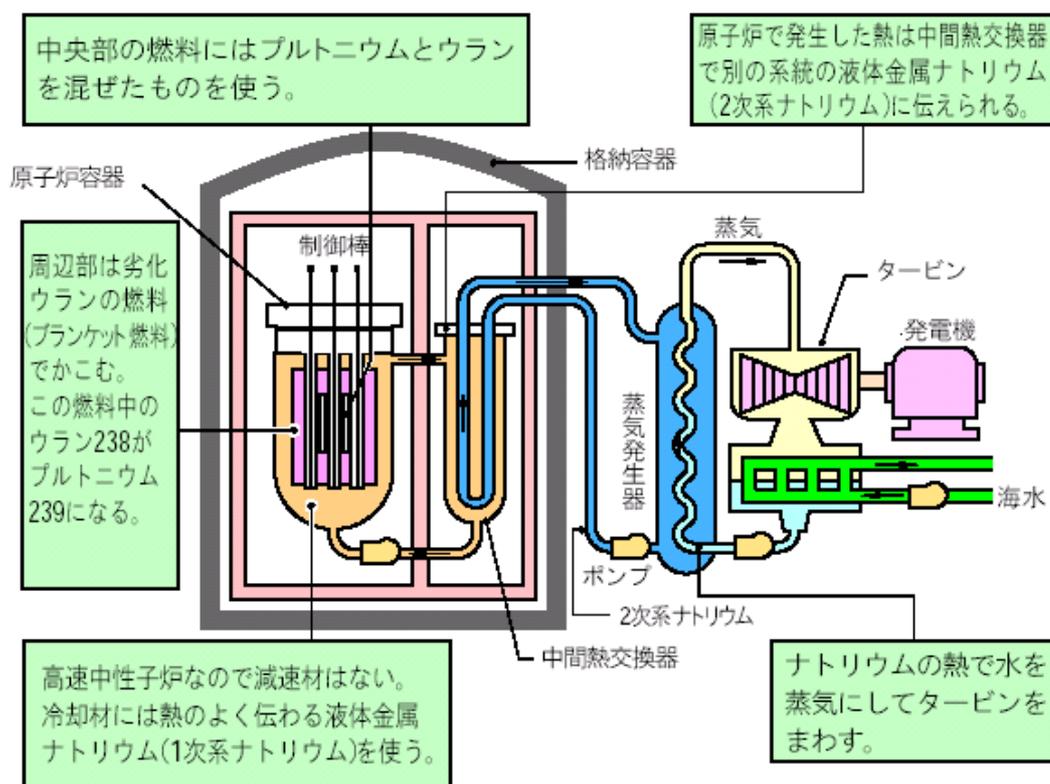


図 3-37 FBR の仕組み

FBR20GW (20 基相当) を起動させるために 280 トンのプルトニウムが必要である。フランスはこれまで再処理工場を操業した蓄積分もあり、2040 年までに 320 トンのプルトニウムが使用済み燃料に蓄積される予定である。

軽水炉燃料中のウランの 1%が運転中に Pu に変換されるため、使用済み燃料には Pu が 1%含まれ、この Pu は資源となる。Pu を取り出し、ウランとプルトニウムを混合した酸化物燃料 (MOx 燃料) には、Pu は 7%含まれ、この MOx 燃料は軽水炉の発電に用いられる (発電の 15%程度を分担)。発電の後、取り出した使用済み MOx 燃料には、Pu が 5%程度残っている。使用済み MOx 燃料中の Pu 濃度は、通常の使用済みウラン酸化物燃料の 5 倍であり、使用済み MOx 燃料のほうが Pu の貯蔵効率がよい。燃料プールの貯蔵スペースもほとんど増加しない。

フランスでは、これらウラン鉱山の保有、精錬と転換、濃縮、燃料製造、発電、使用済み燃料貯蔵、再処理、MOx 燃料製造、9 割の回収ウランの貯蔵などを全て自国内で可能としている（図 3-38）。そのため、フランスは資源小国であるにもかかわらず、エネルギー資源的に独立している。

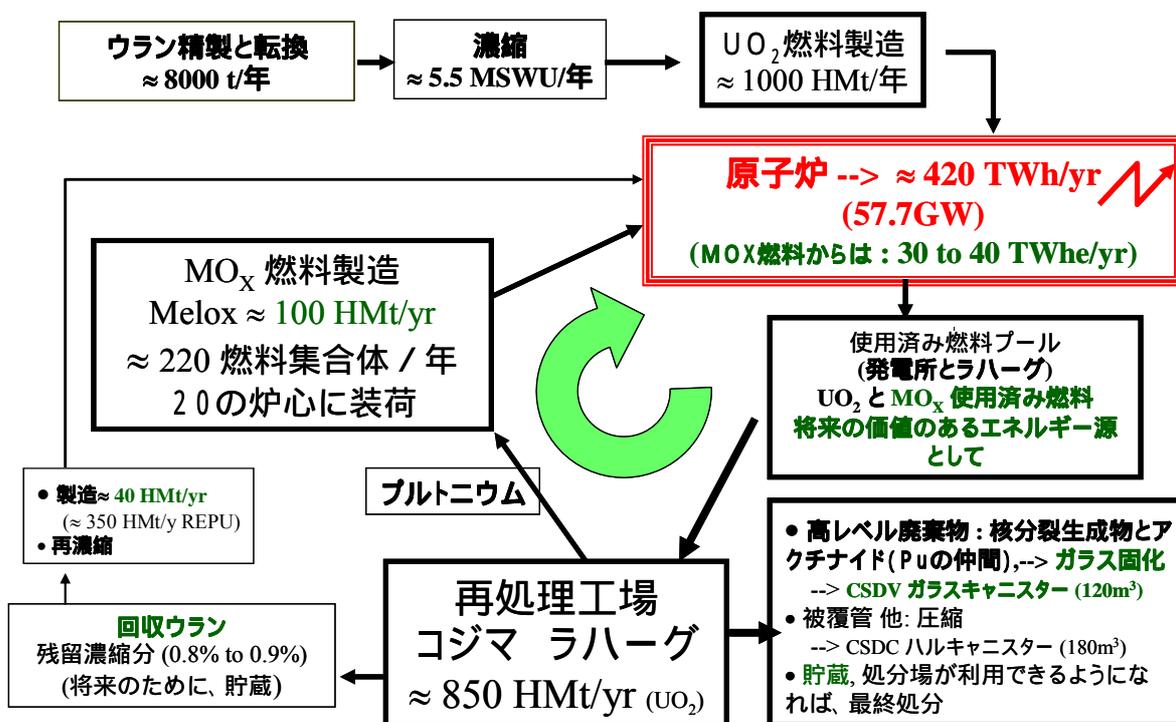


図 3-38 フランスにおける原子力産業界の構造

また高レベル廃棄物について、政府は国民に下記のように説明している。

- ・政府は公開討論会を実施した。これは、高レベル廃棄物への対応と新しい炉である EPR の 2 点がテーマである。
- ・大多数の国民および環境派も原子力発電を支持した。支持率が上昇しているが、これは石油価格の上昇が大きく影響している。
- ・国民との対話のため、1991 年法で 15 年かけて以下の項目の調査・試験を実施した。
  - ①分離変換技術の可能性、②深地層処分、③ガラスキャニスターでの長期中間保管
- ・原子力はエネルギー源として優れているだけではなく、発生する廃棄物がガラス固化体という安定な形になること。また使用済み燃料の中の Pu が再利用できるというメリットがある。
- ・高レベル廃棄物は線量が高いものの、キャニスターなどで安全に取り扱える程度まで遮蔽できる。
- ・しかし、一般世論が理解するのは難しい。最終処分の国民的合意は未だ得られていな

い。このため分離変換の研究開発が必要である。

- ・その点についてはさらに 10 年から 15 年かけて研究を継続する。

### (3) まとめ

以上より本節の内容は下記の通り、まとめられる。

- ・発電電源別に EPR を比較した結果、原子力発電の EPR は 17.4 となり（改善した原子力発電の EPR は 48.8）、他の発電に比べて圧倒的に有利となった。
- ・原子力発電先進国では石油や天然ガスの代替として原子力発電が有望であり、人材などのインフラ（発電所、大学、研究機関）も豊富に存在する。またその他の国では、石油や天然ガスの代替および拡大するエネルギー需要の対策として原子力発電の導入検討は本格化することが予想できる。その検討が 2010 年まで続き、その後は、設計、製造、建設、試運転が 10 年間続くが、この間に石油ピークや天然ガスピークの理解と危機感が国際的に拡大し、原子力発電導入に対する渴望はますます強くなることが予想される。2020 年以降は、急激に原子力発電の建設、運転が始まり、2050 年には 1300 GW に達する可能性がある。
- ・ウランピーク以降は、原子力発電炉はウランを増殖して使う高速増殖炉（FBR）が必要となるか、あるいはウランと同等な核分裂性能を持つトリウム資源の利用を検討する必要がある。
- ・フランスでは EPR という第三世代炉に 2020 年から切り替える予定であり、さらに 2050 年のウランピークに対して、第 4 世代炉である高速増殖炉を 2040 年から年間 2 基（2GW）ベースで導入し、その結果 2050 年までに合計 20 基を導入して、高速増殖炉で発電をする体制を整える予定である。

## 参考文献

- 1) 経済産業省、「資源・エネルギー統計年報」、2006
- 2) 総合資源エネルギー調査会石油分科会石油部会 審議会配布資料、2005
- 3) 資源エネルギー庁、「平成 17 年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書)」、  
経済産業省、2006
- 4) 化学工業日報社、「石油の話 改定第 6 版」、2001
- 5) 資源エネルギー庁、「新・国家エネルギー戦略」、経済産業省、2006
- 6) 石油鉱業連盟、「我が国石油・天然ガス開発の現状と課題」、2006
- 7) 総合資源エネルギー調査会 石油分科会石油部会 審議会配布資料、2006
- 8) (社) 日本自動車工業会、「環境レポート 2006」、2006
- 9) 2003 JSAE/SAE F&L Panel Session 発表資料
- 10) (財) 石油産業活性化センター報告書 PEC-1998TB-19、「ガソリン改質燃料電池自動車  
の技術開発動向と課題の調査報告書」、1999
- 11) (財) 日本自動車研究所、「平成 16 年度 燃料電池自動車に関する調査報告書」、  
2005
- 12) (財) 省エネルギーセンター、「平成 17 年度省エネルギー技術普及促進事業調査報  
告書」、2006
- 13) 内閣府政策統括官室、「日本経済 2004」、2004
- 14) 中小企業金融公庫総合研究所、「中小企業動向トピックス」、No.41、2006
- 15) 経済産業省、「原油価格上昇の我が国産業への影響に関する調査結果」、2006
- 16) NEDO 平成 17 年度調査報告書、「3R (Reduce, Reuse, Recycle) 技術の俯瞰的調査」、  
2006
- 17) NEDO、「3R 分野における技術戦略マップの更新に関する調査」、2006
- 18) 重化学工業通信社、「日本の石油化学工業」、2007
- 19) (社) プラスチック処理促進協会 HP : <http://www.pwmi.or.jp/home.htm>
- 20) 農林水産省、「食料・農業・農村基本計画」、2005
- 21) Antony F.F.Boys, “Energy Inputs to Agriculture”, 2005.

## 4. 結論

本委員会では我が国の取るべき脱石油戦略のあり方について科学的知見のもとに議論を行い、その結果我が国の石油用途別脱石油戦略について、具体的な方向性を提案することができた。

以下では石油用途別の具体的な脱石油戦略について、本委員会における主な結論を述べる。

### (1) 自動車燃料における脱石油戦略

- ・石油代替燃料を導入する場合において最も大きな課題となるのは燃料性状と内燃機関との適合性である。今後、石油代替燃料を導入し、燃料性状の大幅な変更を行う場合、従来の車両を保障できる範囲内で、また市場での燃料性状のばらつき幅を狭める方向性で、さらには10～15年のリードタイムを設けて燃料性状／エンジン仕様を平行させて変更する必要がある。
- ・自動車産業における脱石油戦略としては短期的には燃費向上などの省資源技術の推進、中期的には電気自動車やハイブリッド自動車の導入、さらに技術的なブレークスルーが解決した場合にバイオ燃料などの非石油系燃料および非石油系燃料に対応するクリーンエネルギー車を段階的に導入することを想定している。
- ・非石油系燃料としては将来、ガソリン混合を想定するとバイオエタノール（ただし、我が国においては現状ではエタノール10%混合のE10を段階的に導入）、軽油混合を想定するとFAME（ただし、我が国においては現状ではFAME5%混合のB5を段階的に導入）およびGTLが有望であるが、いずれも実用化には食料との競合、国産セルロースエタノールの導入に向けた技術的ブレークスルー解決など多くの課題があり、本格的に導入するにはこれらの課題におけるブレークスルーが必要となる。

### (2) 化学用原料における脱石油戦略

- ・石油化学業界では石油化学製品市場における競争激化などから原油価格高騰による最終需要製品への価格転嫁が困難であるため現在、経費削減などの企業努力によって原料値上がり分を吸収するか、もしくは3R（リデュース、リユース、リサイクル）の推進による脱石油を図ることによって原油価格高騰に対応している。
- ・石油化学業界における脱石油戦略は短期的には製品軽量化、原料多様化（代替燃料の利用を含む）などのリデュース技術が中心となっている。原料多様化については短期的にはコンデンセート（天然ガス随伴原油）、天然ガス成分の重質NGL、および天然ガスからのエチレンやプロピレンを製造など天然ガスが中心となると予想される。
- ・ポリ乳酸などバイオマス由来の原料を用いた石油化学製品については性能的に石油由

来の石油化学製品に対して競争力を持たず、食料との競合など本格的に導入されるためには多くの課題がある。課題解決に向けたブレークスルー達成により、長期的には導入される可能性がある。

- ・リサイクル技術については環境省による容器包装リサイクル法によって我が国における廃プラスチックの有効利用が総排出量の62%になるなど順調に拡大しているが、脱石油戦略という観点からの中期的な大幅導入には多くの課題があり、石油化学業界は懐疑的である。

### (3) 農林水産業における脱石油戦略

- ・現在、我が国は石油に依存した農業形態であるため、石油の高騰が生産価格の上昇となり、農業所得の一層の低収益化を導くことが懸念される。そのため食料自給率を向上させるためにも農業と集落の担い手を積極的に支援する政策、具体的には主要な農業の担い手である「中高年の離職者・女性に魅力のある小規模農業・集落営農」を目指すことが重要となる。さらに今後、品目横断的政策を通じて地産地消を支える「集落営農」への積極的支援対策が重要となる。
- ・脱石油を踏まえて今後、緑の革命の「方向」を、有機的な「集約化」の「方向」へと変える、つまり、有機農法（永続可能な農法）が重要となる。具体的には動力源と肥料の供給のために化石エネルギー資源に頼らず、労働力や畜力で適切な有機（その他の永続可能な）農法を営み、同時に資源基盤である肥沃度の高い土壌の面積に見合ったレベル内に人口を調整させることが重要となる。

### (4) 電力における脱石油戦略（原子力の可能性とEPR）

- ・発電電源別にEPRを比較した結果、原子力発電のEPRは17.4となり（改善した原子力発電のEPRは48.8）、他の発電に比べて圧倒的に有利となった。
- ・原子力発電先進国では石油や天然ガスの代替として原子力発電が有望であり、人材などのインフラ（発電所、大学、研究機関）も豊富に存在する。またその他の国では、石油や天然ガスの代替および拡大するエネルギー需要の対策として原子力発電の導入検討は本格化することが予想できる。その検討が2010年まで続き、その後は、設計、製造、建設、試運転が10年間続くが、この間に石油ピークや天然ガスピークの理解と危機感が国際的に拡大し、原子力発電導入に対する渴望はますます強くなることが予想される。2020年以降は、急激に原子力発電の建設、運転が始まり、2050年には1300GWに達する可能性がある。
- ・ウランピーク以降は、原子力発電炉はウランを増殖して使う高速増殖炉（FBR）が必要となるか、あるいはウランと同等な核分裂性能を持つトリウム資源の利用を検討す

る必要がある。

オイルピークは我が国の安全保障に関わる社会リスクであり、我が国としても石油需給についてその現状を認識し、具体的な脱石油戦略を組み立てることが緊急な課題となっている。

本委員会の結論である我が国の取るべき脱石油戦略の方向性に関する提案、および脱石油戦略のあり方について議論する上で必要なデータが今後、我が国の脱石油戦略としての国家政策の検討、さらに一般社会人・国民へのパブリックアウェアネス推進活動に対して一助となることを期待している。

## 5. 委員会の経緯

(1) 第1回委員会

日時：平成17(2005)年3月14日(月)

場所：(社)日本工学アカデミー

(2) 第2回委員会

日時：平成17(2005)年8月4日(木)

場所：(独)産業技術総合研究所 東京本部

(3) 第3回委員会

日時：平成17(2005)年12月26日(月)

場所：(独)産業技術総合研究所 秋葉原サイト

(4) 第4回委員会

日時：平成18(2006)年2月20日(月)

場所：(独)産業技術総合研究所 臨海副都心センター

(5) 第5回委員会

日時：平成18(2006)年8月7日(月)

場所：(社)日本工学アカデミー

(6) 第6回委員会

日時：平成18(2006)年10月3日(火)

場所：(社)日本工学アカデミー

(7) 第7回委員会

日時：平成19(2007)年1月19日(金)

場所：(社)日本工学アカデミー

### その他

第1回地質調査総合センターシンポジウム「高く乏しい石油時代が来た」

日時：2005年6月28日(火)午後1時開会

場所：日本学術会議 講堂 (港区六本木)

主催：日本学術会議資源開発研究連絡委員会

日本学術会議地質学研究連絡委員会

(独)産業技術総合研究所・地質調査総合センター