

# 天然ガスに依存する文明の基盤

## —世界の天然ガス利用開発動向—

若林宏明

### 1. 序

筆者は2001年3月、流通情報学部紀要（Vol.5, No 2, pp.149-181.）に、安価な石油に依存する文明の終焉—縮小する世界の原油生産—を発表し、今後4～5年後にも世界の原油生産はピークをうち、縮小に転ずるため、需給ギャップが生じ、石油価格の高騰が起こり、石油消費国と OPEC 諸国との石油供給に関する支配関係が逆転し、ゆっくと推移するオイルショックに入るとの見解を発表した。このような需給ギャップが生ずると、10年にも満たない短期間の有効な代替エネルギー開発は限られるので、基本的には、徹底した省エネルギー社会システムへの移行、再生可能自然エネルギー利用促進、石油代替としての天然ガス利用への転換などが残されると述べた。さらに、今後とも、石油代替エネルギーの開発が必須であり、中でも再生可能自然エネルギー利用や IT を活用（計測制御の情報化）した細やかな省エネルギー技術の活用などが文字通り重要となる。いずれにしても、今日すでに石油文明の終焉がすでに緒についており、石油文明から天然ガスとバイオマスなどの水素経済、自然エネルギーを含むソーラーエネルギー経済への移行期にあるという認識が広がっている。このように、21世紀において石油を当てにできない経済が前提になるとすると、国際経済や社会の認識は大幅な変更を要する。エネルギー危機意識をとまなう厳しい経済社会にあって、企業体であれ、個人であれ、地球の未来を守る責任感とそれをみたく貢献への参加を日常生活や職業生活のなかで具体的に実践し、率先して協力する意思が不可欠であり、あらゆる他のシステムと同様、地球システムもそれを具体的に支える必死の力と協力がなければ自立できない。いずれにしても、今後起るであろうことは、石油価格高騰を抑えるべく石油代替燃料の

導入，ことに天然ガス経済文明，自然エネルギー文明への転換であると考えられると述べた<sup>1)</sup>。

本稿では石油代替燃料の一つとして今後社会経済的な浸透が予測される天然ガスを取りあげ，消費・貿易・埋蔵量・生産量の歴史と現状動向を整理する。具体的な特別事例として，北米を対象に発電用燃料としての天然ガス生産とその影響の将来を分析する。

## 2. 背景

### 2.1 石油需給と21世紀の国際関係

まず始めに，文献1)により，あらためて石油代替燃料としての天然ガスの出現の背景をみておこう。

C. J. CampbellとJ. H. Laherrereによると，米国DOEエネルギー情報局(EIA)の予測どおり，2020年までに原油需要は1998年比60%増加し，40Gbo/年になるとすると，需給ギャップが生じ，国際的に政治・経済上のギャップにつながることは疑いがない。したがって，早急に代替石油資源への転換を図らない限り，中東のOPEC産油国の市場占有率が再び上昇し，第4次石油危機発生のおそれが高い。2000年までにこれら産油国の市場占有率が30%を超え(2001年39%)，1970年代のオイルショック時のレベルとなる。そして，2010年を待たずして，市場占有率が50%に達する可能性が極めて高い。その結果，需要は抑制され，産油もほぼ10年間にわたり落ち込むこととなろう。1979年のオイルショック時，消費は10%縮小し，回復に17年間を要したのである。しかし今回の場合，2010年までにこれら産油国も産油のピークを過ぎており，世界の産油は下降期に入っている。したがって，この度の第4次石油ショックによる不況は最後となるが終わりは無いという<sup>2)</sup>。

Duncanはその予測#4において，世界の原油の生産・消費ないしその輸出入の支配関係において4つの主役交代の臨界時点が重要であると指摘した<sup>3)</sup>。

(1) 主役交代事象#1：イスラム/非イスラム諸国の主役交代。イスラム/非イスラムの原油生産交代は現在2001年に[sic：原文のまま]発生しつつある。それ以降，イスラム国の原油生産は2010年まで増加して全世界の55.6%になり，その後も増加する。21世紀に入り，今後イスラム諸国が世界で大きな発言権をもつ。

(2) 主役交代事象#2：消費国より生産国への主役交代。世界原油生産ピーク時点は2005年に生じ，それ以降，原油需給バランスが反転し，売り手市場となる。

(3) 主役交代事象#3：OPEC/非OPEC主役交代。2007年または2008年に発生が予測される。この交代事象により世界が2極化する。余剰の石油を持つ地域と不足する地域である。2008年の初め以降，OPEC産油国が世界の石油の50%以上を生産する。この時点でOPEC/非OPEC交代事象が発生し，世界の原油輸出のほぼ100%をOPECが支配

する。全世界原油の76%がOPECの保有する確定埋蔵量となる。いずれにせよ、それ以降、OPECの支配がますます強まることが懸念される。

(4) 主役交代事象#4：中東/非中東の交代。ここで、中東地域とはアラビア半島を中心とする9原油生産国、イラン、イラク、クウェート、オマーン、カタール、サウジアラビア、シリア、アラブ首長国連邦、及びイエメンを指す。中東/非中東の原油生産主役交代は2023年に発生する。そして、2040年までにこれら9カ国が世界の原油の63.6%を生産する。

## 2.2. 新しい資本主義経済の萌芽

かつての古い資本主義経済認識においては、大気や海水は経済的な価値のない自由財であって経済財とは認められていなかった。しかし、今日地域的あるいは、地球規模の人間活動にともなう大気汚染や海洋汚染を見ても分かるように、自由財はすでに元来の意味を失い、価値喪失を続けている。地域規模であれ、地球規模であれ環境劣化、環境破壊と呼ばれる現象はすべてこの系譜にある。いささかでも無駄な汚染排出の抑制努力は当然であるとして、近年、企業ならびに消費者においてシステム開発や節約が進められているところである。そこでは個々の良心的な努力の積み上げが、必ず生態系（エコシステム）の保全に寄与するとの前提がおかれがちであるがこれは必ずしも正しくない。事実、もし基本的に不適切な構造枠組みのなかでの努力に過ぎないならば、効果が限られたものになるばかりか逆効果にさえなりうる。つまり、一刻も早く、本質的により適切な社会・経済システムを発見し、それへの転換こそが今日の課題である。

P. Hawken, A. B. Lovins, L. H. Lovins も著書「Natural Capitalism」において次のように述べている。

企業が消費する材料や環境影響上小さな改善を示すに止まる通俗的な「エコ効率」概念は、それ以上に重厚かつ複合的な網目状の問題群と問題解決法のごく小さな一部に過ぎない。企業の構造と収益システムを基本的に再構築することを含まない焦点のぼけたエコ効率の概念の特徴は、相変わらず、「不適切な場所」で、「不適切な材料」を使い、「不適切なプロセス」で、「不適切な規模」で作られ、「不適切なビジネスモデル」により流通される結果、「不適切な製品生産」がかえって拡大し、折角の資源節約が水泡に帰してしまい、より環境公害を引き起こす何物でもない。単独では正しい効率的生産であるにも拘らず、かくも多数の過誤が蔓延するということは、持続可能な経済の発展に資するものではなく、敵にさえなりうる。経済的目標と生態学的目的に折り合いをつけるには、単なるエコ効率追求に止まらず、互に独立で相互に補強するさらなる原理の追加が必要である。まとめると、4つの原理に整理できる<sup>4)</sup>。

- ① 省資源・省エネルギーの強化,
- ② プロセスと材料の変更による廃棄物の抑制（ゼロエミッション）,

- ③ 財のストック経済からサービスのフロー経済への移行（経済のサービス化），
- ④ 自然資源の保護・保全のための再投資，である。

これら4つの原理の結合で十分な利益と自然資本主義の論理的な一貫性を合わせもたすことができるという主張である。彼等は、急速に成功した多くの部門（輸送、土地利用、建物と不動産、産業と材料、森林、食物、水）の興味深い企業の数百事例を分析し、一つの結論を得た。これまで社会経済の常識ともみられた「経済」、「環境」、「社会」の3政策分野が競合し、固有の目的間の「トレード・オフ」または、「バランス」の結果、いずれかに優先性が生ずるという経済認識は最早過去のものであり妥当ではなくなりつつある。すなわち、企業の生産システムは言うに及ばず、企業、経済諸部門、都市全体、そして社会全体のレベルで、設計を統合化することにより、全ての目標を合わせ達成する新しい資本主義経済の萌芽が見られる。企業の生産システムは言うに及ばず、企業、経済諸部門、都市全体、そして社会全体のレベルで、設計を統合化することにより、全ての目標を合わせ達成する必要があると結論付けている<sup>4)</sup>。

このことは具体的には何を意味するのであろうか？例えばトヨタ自動車のように企業経営において、利潤の多くの部分を環境保全設計や生産システム努力に投資する姿勢の企業においてはそれ自体がPRとなり、より業績を伸ばし、一人勝ちしていることが上げられる<sup>5)</sup>。このような先端企業は単なる従前の延長上の企業活動の中での省エネルギーや省資源努力のPRすなわち独り善がりのコスメチックな環境活動を行う企業経営を超えている。より身近な例として、輸配送業を考えよう。利潤を大幅に削減してもエコ自動車への転換を宣言することや、都心で現在行われているような同日配送を行わないことを宣言する企業にこそ、明確な時代性が現れ、同業他社との差別化の可能性が高いと考えられる。

### 3. 天然ガス経済の特徴

#### 3.1 天然ガスの資源性

天然ガス（メタン主成分）は石油に比べ、硫黄分や一酸化炭素など公害物質排出が少なくカロリーあたりの炭酸ガス放出が少ないという意味でクリーンで、資源的には偏在しているものの、世界中に広く分布している。埋蔵量は石油と同規模（約900Gboe）以上であり豊富である。したがって、今後の石油枯渇化傾向と、地球環境保全志向からして、天然ガスへのシフトが自然である。しかし、現在の石油文明とは異なる技術も必要であり、開発にコストを伴う。たとえば、輸送にはパイプラインが使われることが多いので需要が大きくなっても供給が間に合わなかったり、政情が不安定になったときの供給保証問題がある。そこで、天然ガスを化学的に転換液化することが考えられている。

天然ガスの一部は液化天然ガスLPG（マイナス162℃）の形で輸送・貯蔵・再ガス化

利用される。わが国への輸入量は世界の LNG 貿易量の約60%を占め、消費は発電（70%）、都市ガス（30%）として利用され、すでに身近な存在である<sup>6)</sup>。

さらに、天然ガスはハイドレード（シャーベット状水和物：メタンの分子を20個ほどの水分子が包み込んだ結晶構造の化合物）として、メタンと水が低温高压条件下で生成する。特徴は世界各地の沿岸に広く分布していることである。130年分、8.7Gtoe（原油87億トン分）のハイドレードが賦存している。しかし、これは海底の比較的浅いところにあるため、圧力が弱くガス田のように自噴しない。そのために在来天然ガスの約200倍の採掘コストがかかるといわれており、これを下げる技術開発が平成13年度からわが国経済産業省で始められている。一方、LNGの代わりに、常圧でも冷蔵庫ほどの簡単な設備で安定な状態のハイドレードにして輸入・貯蔵することが可能である。LNGの場合、液化設備や特殊なタンカーで数千億円規模の設備が必要であるが、この場合はその必要がなく、25%ぐらい安く輸入できると言われる<sup>7)</sup>。

しかし、天然ガスの全地球上の賦存が巨大であるとしても、ガス田の多くがエネルギー需要地から遠隔地にある場合が多い。しかも、長距離パイプラインのガス輸送は、多くの場合高価であり、これまで天然ガスに先立ち、石油が利用されてきた。天然ガスは、単位体積当たりエネルギー密度が小さいので、パイプライン輸送では、原油にくらべ約4倍の輸送費がかかる。そこで、孤立遊離状況の天然ガスは冷却されて液体に圧縮され、LNGタンカーによって出荷される。あいにく、LNGは扱いづらく、必要な転換設備は大型かつ複雑であり、石油に比べ応需が制限されてきた。しかし、仮に天然ガスを常温常圧で液状に転換できる安価な技術が開発されれば事情が変わる。その場合、天然ガスが石油同様パイプ輸送により市場に安価に供給可能になる<sup>8)</sup>。

従って、原油生産が漸減しはじめると予想される2007、8年に、天然ガス由来の液体燃料生産の全体的増加が期待される。すでに、1990年代末より米国カリフォルニア州では、多くの自動車運転者が無意識のまま、環境浄化に協力し始めた。運転者のほとんどは、ガソリンスタンドでディーゼル車の燃料補給時、特別な燃料を給油していることに気づいていない。しかし、天然ガスから作られたこの特製ディーゼル油は、既にカリフォルニア州で販売中であり、アメリカの原油代替政策に寄与し始めている。その排気ガス中には、有害な汚染物質硫黄・窒素・および重金属物質が非常に少ない。天然ガスから合成ディーゼル油（たとえばインドネシアでShell社により商業生産）と普通のディーゼル油の混合油が、カリフォルニア州大気資源局（California Air Resources Board = CARB）の世界で最も厳しい1990年排出規制基準（Zero-Emission Vehicle = ZEV カリフォルニア州で自動車を販売する場合電気自動車などの低公害車・無公害車にすることを義務づける法律で、2001年までに5%、2010年までに10%導入を義務付）を満たしている<sup>9)</sup>。

わが国でも平成13年度より、政府の資源開発政策の見直しに伴い天然ガス開発に力を入れる方針にあわせ、石油公団が天然ガスを灯油や軽油に転換するGTL(gas to liquids)

技術開発プロジェクトを立ち上げている。これは、天然ガスを常温で液体の仮運べる石油代替製品に転換することにより、LNGにして運ぶには採算の合わない中小ガス田での実用化を目的としている。

## 4. 天然ガス消費・貿易の現状

### 4.1 天然ガス利用の特徴

1993年米国規則の公害原物質排出規制を受けて、米国の自動車燃料の組成調整により、有害な排気がある程度低下した。Fischer-Tropsch 合成法（付録 A3.参照）を使った天然ガス液化燃料は、在来ディーゼル油に比べ、格段に少ない排気条件となる。図1に排気量比を既存のディーゼル油と比較して示す。

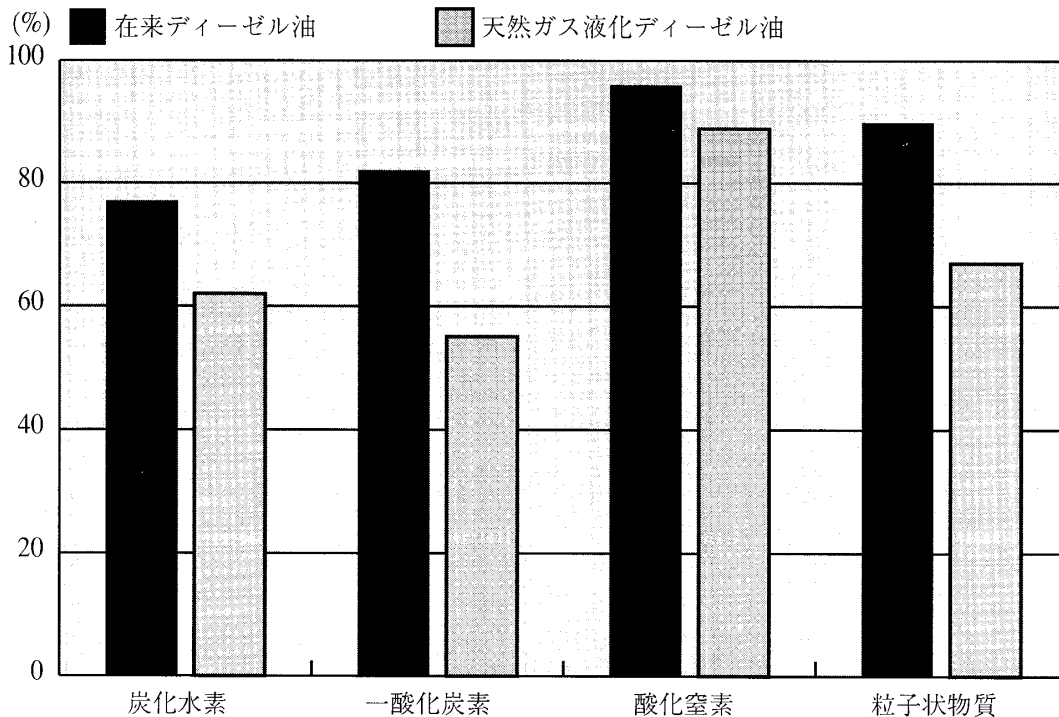


図1. ディーゼル車からの有害排気物質（在来ディーゼル油比較：％）<sup>9)</sup>

技術開発により極めてクリーンな石油代替液体燃料が提供できる。たとえ技術の改善が限られていても、天然ガスから製造される特色ある石油代替液体燃料のうち、経済性のある燃料利用が今後数年で幅広く伸びるであろう。在来原油から精製されたより環境汚染度の高い製品をこの燃料で希釈すれば、今後、ますます厳しくなる環境基準が満たせるであろう。従って、人々が天然ガスの利用が台所での料理以外にもあると認識するようになり、新しい燃料の社会への浸透が始まる<sup>10)</sup>。

今日、コンバインドサイクル（複数のガスタービンと発生する排ガスをボイラーで熱

回収し蒸気タービンで発電する方式で熱効率が50%以上で高い)の天然ガス火力発電所が最新型発電所である。しかし米国では発電所建設は伸びず、消費地における熱電併給(コージェネレーション)で置き換えられ始めている。これは暖房給湯用熱供給と同時に1/2~1/10も安い自家発電の電力を同時に供給できる。一例として、米国ニューヨーク州 White Plains の Trigen Energy Corporation 社は多数の高効率熱電併給システムを全国的に運営している。米国オクラホマ州 Tulsa とペンシルベニア州 Philadelphia に大規模なプラントがある。Tulsa では政府機関・ホテル・住宅・オフィスを含む31棟のビルに地域冷暖房を提供している。システムは89%の変換効率、年あたり燃料費66万ドルの節約と1.6万トン以上の二酸化炭素削減を達成した<sup>11)</sup>。

最終需要における技術進歩は極めて著しい。また、水素と酸素を燃料とする燃料電池が最も熱効率が高い。代表的な利用は燃料自動車である。水素の入手法は多岐にわたるが、燃料スタンドのことを考えると、さしあたり天然ガスから可搬性のあるメタノールをつくり、さらに水素に転換し、燃料とする方法が有利である(A3.5参照)。ダイムラークライスラー社では累計20億マルク(1,170億円)を投じ、開発で米国フォード・モーターと提携している。彼等は来年2002年末、先ず欧州でメタノール燃料電池バスを販売する。さらに、乗用車も2004年に発売開始の予定である<sup>12)</sup>。

## 4.2 世界の天然ガス消費動向

天然ガスの利用には石油に較べて、パイプラインや低温液化など複雑な技術システムが必要で、大幅な利用が始まってからまだ歴史は浅い。しかし、1965-1996年をみると、各地域とも年と共にほぼ比例して消費が増加してきている(図2)。一方、北米ではパイプライン網が整備され、一貫して約5,000~7,000億立方米/年で利用され、世界に先駆け、利用技術が進み確立している。

より具体的に、1889-1999年の世界各国の消費履歴を表1に示す。表1よりわかるように、1999年時点での世界の主要消費国は、アメリカ合衆国(26.9%)、ロシア(15.9%)が群を抜いている。各国の天然ガスの消費割合から見ると、旧ソ連では約50%である。米国は27%、欧州連合21%、日本では11%に過ぎない<sup>15)</sup>。日本の場合天然ガスの広範囲の利用は今後の課題である。

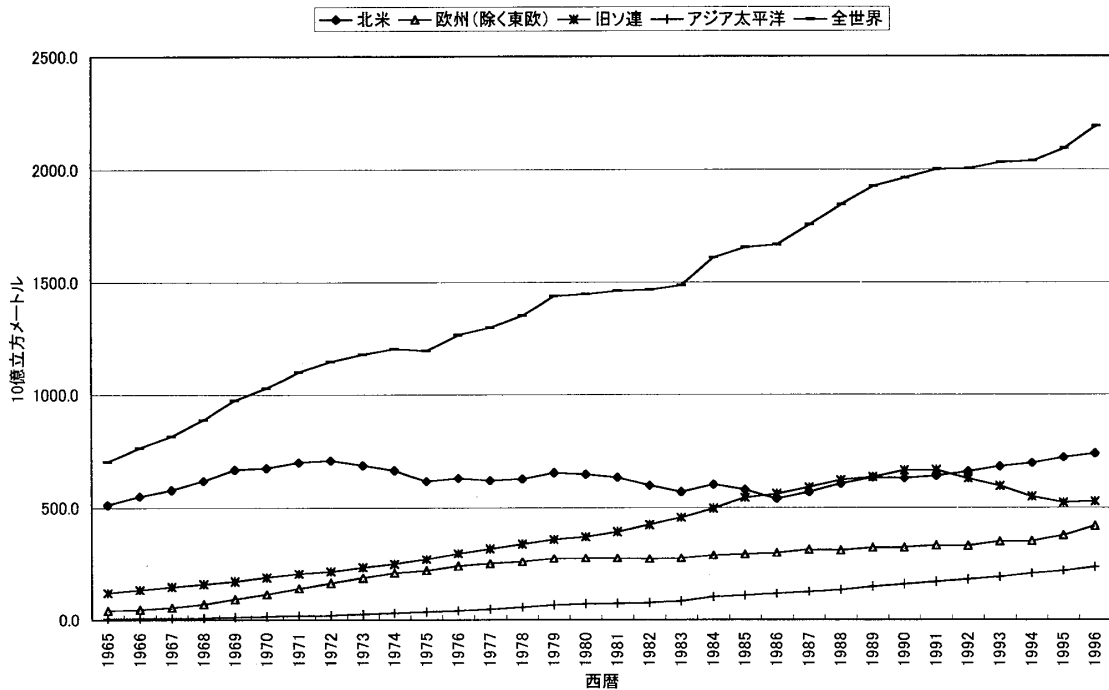


図2. 世界各地域の天然ガス消費の推移 (1965~1995) (BP) 13)

表1. 各国の天然ガス消費量(1989-1999; Mtoe: 百万トン原油等価単位 (BP) 14)

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	伸び率 1999 ~1998	1999 全体シェア
USA	488.5	486.3	494.1	507.3	524.9	536.5	558.5	568.5	567.8	552.4	<b>555.3</b>	0.5%	26.9%
Canada	57.5	55.6	56.7	60.2	61.6	63.8	63.8	66.9	67.3	63.3	<b>64.3</b>	1.6%	3.1%
Mexico	24.3	25.0	24.9	24.9	25.4	26.5	26.7	27.9	28.5	31.9	<b>31.9</b>		1.6%
北米計	570.3	566.9	575.7	592.4	611.9	626.8	649.0	663.3	663.6	647.6	<b>651.5</b>	0.6%	31.6%
Argentina	19.1	18.3	19.9	20.1	21.2	21.9	24.3	25.7	25.7	27.5	<b>30.1</b>	9.5%	1.5%
Brazil	3.5	3.4	3.5	3.6	4.0	4.1	4.3	5.0	5.4	5.6	<b>6.4</b>	14.0%	0.3%
Chile	1.4	1.5	1.3	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	2.5	3.0	<b>3.4</b>	15.2%	0.2%
Colombia	3.6	3.7	3.7	3.6	3.8	3.7	4.0	4.2	5.3	5.6	<b>4.7</b>	6.5%	0.2%
Ecuador	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	<b>0.1</b>		
Peru	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	<b>0.8</b>	3.8%	
Venezuela	17.6	19.8	19.7	19.5	21.0	22.2	24.8	26.8	27.7	29.1	<b>28.8</b>	1.1%	1.4%
Other S. & Cent. America	5.2	5.4	5.8	6.1	6.1	6.5	6.5	7.4	8.0	8.9	<b>9.5</b>	7.3%	0.5%
南・中央アメリカ計	51.3	53.0	54.8	55.2	58.3	60.7	66.2	71.4	75.5	80.6	<b>83.8</b>	4.1%	4.1%
Austria	4.7	5.2	5.4	5.4	5.7	5.8	6.1	6.6	6.9	7.1	<b>7.3</b>	3.7%	0.4%
Belgium & Luxembourg	9.4	9.5	9.0	9.0	9.9	9.7	10.6	11.8	11.3	12.4	<b>13.3</b>	6.9%	0.6%
Bulgaria	5.7	5.3	4.5	3.9	3.7	3.7	4.5	4.6	3.7	3.0	<b>2.7</b>	1.6%	0.1%
Czech Republic	4.6	4.9	5.3	5.2	5.3	5.7	6.5	7.6	7.7	7.6	<b>7.8</b>	1.8%	0.4%
Denmark	1.7	1.8	2.1	2.2	2.5	2.7	3.1	3.7	3.9	4.3	<b>4.5</b>	4.4%	0.2%
Finland	1.9	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	2.9	3.3	<b>3.3</b>	2.2%	0.2%



天然ガスに依存する文明の基盤—世界の天然ガス利用開発動向—

France	24.4	26.4	27.5	28.3	29.0	27.8	29.6	32.5	31.2	33.3	<b>33.9</b>	1.7%	1.6%
Germany	53.6	53.9	56.6	56.7	59.8	61.1	67.0	75.2	71.3	71.7	<b>72.1</b>	0.5%	3.5%
Greece	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.7	1.5	0.2	0.7	<b>1.5</b>	>100%	0.1%
Hungary	9.2	8.7	8.6	7.4	8.1	8.4	9.2	10.2	9.7	9.7	<b>9.9</b>	1.1%	0.5%
Iceland Republic of Ireland	1.9	1.9	1.9	1.9	2.2	2.2	2.3	2.7	2.8	2.8	<b>3.0</b>	7.0%	0.1%
Italy	36.9	39.1	41.5	41.1	42.1	40.8	44.9	46.4	47.9	51.5	<b>55.5</b>	7.8%	2.7%
Netherlands	31.3	31.0	34.2	33.0	34.1	33.2	34.0	37.5	35.2	34.9	<b>34.1</b>	・2%	1.7%
Norway	1.8	1.9	2.2	2.3	2.4	2.6	2.7	2.9	3.3	3.4	<b>3.4</b>	0.2%	0.2%
Poland	9.5	8.9	7.9	7.8	8.1	8.2	8.9	9.5	9.4	9.5	<b>9.3</b>	・6%	0.4%
Portugal									0.1	0.7	<b>2.0</b>	>100%	0.1%
Romania	31.9	27.7	22.3	22.8	22.7	21.8	21.6	21.8	18.0	16.8	<b>15.7</b>	・6%	0.8%
Slovakia	4.6	5.3	4.9	4.9	4.6	4.5	5.1	5.5	5.6	5.7	<b>5.8</b>	1.3%	0.3%
Spain	4.5	5.0	5.5	5.9	5.8	6.5	7.5	8.4	11.1	11.8	<b>13.5</b>	14.5%	0.7%
Sweden	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	<b>0.7</b>	・6%	
Switzerland	1.5	1.6	1.8	1.9	2.0	2.0	2.2	2.4	2.3	2.4	<b>2.4</b>	0.3%	0.1%
Turkey	2.7	3.0	4.0	4.1	4.5	5.9	6.2	8.1	8.5	8.9	<b>10.8</b>	21.8%	0.5%
United Kingdom	45.6	47.2	50.9	50.7	57.8	59.5	63.5	73.9	75.0	77.9	<b>82.5</b>	5.8%	4.0%
Other Europe	6.2	6.2	6.0	5.1	4.8	3.6	3.7	5.3	5.4	5.3	<b>4.6</b>	・3.0%	0.2%
ヨーロッパ計	294.3	297.5	305.2	302.9	318.5	319.2	342.8	380.4	374.1	385.4	<b>399.6</b>	3.6%	19.4%
Azerbaijan	13.9	14.2	13.6	10.6	7.8	7.3	7.2	5.3	5.0	4.7	<b>5.0</b>	7.1%	0.2%
Belarus	11.7	12.4	13.0	15.1	14.0	12.3	11.1	11.7	13.3	13.5	<b>13.8</b>	1.9%	0.7%
Kazakhstan	10.6	11.3	11.8	12.2	11.7	9.2	9.7	8.1	6.4	6.5	<b>7.1</b>	9.0%	0.3%
Russian Federation	372.5	378.1	388.0	375.5	374.4	351.8	340.0	341.9	315.3	328.3	<b>327.3</b>	・3%	15.9%
Turkmenistan	13.1	8.8	8.6	8.4	8.4	9.2	7.2	9.0	9.1	9.2	<b>10.2</b>	10.0%	0.5%
Ukraine	93.4	115.0	109.3	93.2	83.6	73.2	68.6	74.2	66.8	61.9	<b>65.7</b>	6.2%	3.2%
Uzbekistan	31.1	33.2	33.4	33.6	36.6	37.2	38.1	39.0	40.9	42.3	<b>44.3</b>	4.8%	2.2%
Bulgaria	5.7	5.3	4.5	3.9	3.7	3.7	4.5	4.6	3.7	3.0	<b>2.7</b>	・1.6%	0.1%
Czech Republic	4.6	4.9	5.3	5.2	5.3	5.7	6.5	7.6	7.7	7.6	<b>7.8</b>	1.8%	0.4%
Denmark	1.7	1.8	2.1	2.2	2.5	2.7	3.1	3.7	3.9	4.3	<b>4.5</b>	4.4%	0.2%
Finland	1.9	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	2.9	3.3	<b>3.3</b>	・2%	0.2%
France	24.4	26.4	27.5	28.3	29.0	27.8	29.6	32.5	31.2	33.3	<b>33.9</b>	1.7%	1.6%
Germany	53.6	53.9	56.6	56.7	59.8	61.1	67.0	75.2	71.3	71.7	<b>72.1</b>	0.5%	3.5%
Greece	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.7	1.5	0.2	0.7	<b>1.5</b>	>100%	0.1%
Hungary	9.2	8.7	8.6	7.4	8.1	8.4	9.2	10.2	9.7	9.7	<b>9.9</b>	1.1%	0.5%
Other Former Soviet Union	24.1	23.5	21.2	16.8	11.5	10.2	10.3	8.5	9.1	10.3	<b>9.2</b>	・0.9%	0.4%
旧ソ連計	570.4	596.5	598.9	565.4	548.0	510.4	492.2	497.7	465.9	476.7	<b>482.6</b>	1.2%	23.4%
Iran	20.0	20.4	20.5	22.5	23.9	28.6	31.5	36.1	42.4	46.6	<b>50.1</b>	7.6%	2.4%
Kuwait	10.6	5.6	0.5	2.4	4.9	5.4	8.4	8.4	8.3	8.1	<b>6.3</b>	・2.2%	0.3%
Saudi Arabia	26.8	27.5	28.8	30.6	32.3	33.9	34.2	40.0	40.8	42.1	<b>41.6</b>	・3%	2.0%
United Arab Emirates	15.5	15.2	18.3	16.9	17.7	19.5	22.3	24.4	26.1	27.3	<b>28.3</b>	3.5%	1.4%
Other Middle East	16.3	16.4	17.3	23.4	24.6	25.6	26.6	27.3	28.9	29.5	<b>31.5</b>	6.6%	1.5%
中東計	89.2	85.1	85.4	95.8	103.4	113.0	123.0	136.2	146.5	153.6	<b>157.8</b>	2.7%	7.6%
Algeria	13.3	14.5	15.3	16.0	16.7	17.6	18.9	19.3	18.1	19.4	<b>20.3</b>	4.7%	1.0%
Egypt	5.9	6.1	6.9	7.5	8.7	9.4	9.9	10.4	10.5	11.0	<b>13.2</b>	19.9%	0.6%
South Africa													
Other Africa	10.2	9.9	9.5	10.1	10.5	10.7	11.5	12.9	12.9	13.3	<b>13.4</b>	0.4%	0.6%
アフリカ計	29.4	30.5	31.7	33.6	35.9	37.7	40.3	42.6	41.5	43.7	<b>46.9</b>	7.2%	2.2%
Australia	15.7	16.5	15.3	15.2	15.7	17.5	17.6	17.9	17.6	18.3	<b>17.8</b>	・5%	0.9%
Bangladesh	4.2	4.3	4.8	5.2	5.5	6.0	6.6	6.8	6.8	7.0	<b>7.1</b>	1.7%	0.3%
China	12.9	13.2	13.4	13.6	14.6	14.9	15.9	15.9	17.4	17.4	<b>19.3</b>	10.9%	0.9%
China Hong Kong SAR								1.5	2.4	2.2	<b>2.4</b>	10.3%	0.1%
India	9.6	11.2	12.7	14.3	14.7	15.7	17.7	18.5	19.1	20.9	<b>21.4</b>	2.2%	1.0%
Indonesia	16.5	18.0	19.5	20.3	21.5	24.6	27.0	28.2	28.7	24.4	<b>24.5</b>	0.4%	1.2%
Japan	43.1	46.1	49.2	50.4	50.7	54.3	55.0	59.5	58.6	62.5	<b>67.1</b>	7.3%	3.3%
Malaysia	6.7	6.8	8.1	9.5	11.7	12.3	12.4	14.3	15.0	17.4	<b>18.9</b>	8.8%	0.9%
New Zealand	3.9	3.8	4.2	4.4	4.3	4.0	3.7	4.3	4.6	4.0	<b>4.4</b>	8.3%	0.2%

Pakistan	9.6	10.1	10.0	10.3	10.9	12.0	13.3	14.0	14.3	14.6	16.1	10.0%	0.8%
Philippines												5.0%	
Singapore				1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.1%	0.1%
South Korea	2.6	3.0	3.5	4.6	5.7	7.6	9.2	12.2	14.8	13.8	16.9	21.8%	0.8%
Taiwan	1.0	1.7	2.7	2.8	2.7	3.6	3.9	4.0	4.6	5.7	5.6	7.7%	0.3%
Thailand	4.9	4.9	6.3	6.8	7.6	8.6	9.0	10.7	13.1	14.3	14.8	3.4%	0.7%
Other Asia Pacific	2.4	2.4	2.3	2.4	2.7	2.9	3.0	3.4	3.8	3.9	4.0	5.0%	0.2%
アジア太平洋計	133.1	142.0	152.0	160.8	169.7	185.4	195.7	212.6	222.2	227.8	241.7	6.0%	11.7%
世界計	1738.0	1771.5	1803.7	1806.1	1845.7	1853.2	1909.2	2004.2	1989.3	2015.4	2063.9	2.4%	100.0%
OECD	881.5	889.3	915.4	933.2	971.0	995.8	1042.4	1100.4	1100.6	1100.8	1128.5	2.5%	54.7%
EU15カ国	216.6	224.0	237.7	237.5	252.3	252.8	272.2	302.5	300.5	313.1	327.2	4.5%	15.9%
他の新興経済国(EMEs;\$)	237.7	241.2	251.7	270.8	290.9	313.4	339.7	368.9	390.1	407.1	424.0	4.1%	20.5%

表1の空白：0.05以下，・：マイナス，\$：(Emerging Economies, 中央ヨーロッパと旧ソ連以外，主としてアジアの新興経済国) 表1の注：これらの消費と生産の差は統計量の不一致と貯蔵施設・液化プラントのストック供給と需要データの定義，計測，換算の不確定に基づく。10億立方フィート/日(billion cubic feet per day=bcfd)単位の天然ガス消費量データは，<http://www.bpamoco.com/worldenergy/gas/consumption> 参照のこと。

### 4.3 天然ガス貿易動向

天然ガスの国際的貿易はパイプラインによる直接輸送と液化天然ガス(LNG)のタンカー輸送の2輸送モードにより行われている。1999年時点での輸出国と輸入国の連関表を，各々表2.1，2.2に示す。パイプライン輸送モード貿易量(表2.1)は輸出国としてのロシアならびにノルウェーからヨーロッパ諸国への輸出が大部分を占めている。輸入国として代表的な国は，フランス，ドイツ，イタリアである。さらに，カナダからアメリカへの輸出も規模が大きく見逃せない。一方，LNGタンカー輸送モードの天然ガス貿易量(表2.2)は，主として，中東，オーストラリア，インドネシア，マレーシア，ブルネイから，日本，韓国，台湾に輸出されている。

表2.1 パイプライン輸送天然ガス貿易量(1999)(Bcm:10億立方米)<sup>16)</sup>

輸入国	輸出国															輸入量計	
	USA	Canada	Mexico	Argentina	Bolivia	Denmark	France	Germany	Netherlands	Norway	UK	Russia	Turkmenistan	Oman	Algeria		Malaysia
North America																	
USA		94.7	1.56														96.26
Canada	0.88																0.88
Mexico	1.81																1.81
S. & Cent. America																	
Argentina					1.8												1.8
Brazil					0.37												0.37
Chile				2													2
Europe																	
Austria								0.35	0.56		5.3						6.21
Belgium								0.5	5.4	5.64	0.3						11.84
Bulgaria												3.2					3.2
Croatia												1.11					1.11
Czech Republic										1.3		7.8					9.1
Finland												4.2					4.2
France										5.6	13	0.3	11.96				30.86



## 5.天然ガス確認埋蔵量

### 5.1確認埋蔵量

1979～1999年の世界各国の天然ガス確認埋蔵量を表3に示す。世界の確認埋蔵量は約146兆立方米，5,172兆立方フィートである。天然ガスの確認埋蔵量の桁違いに大きな国は，ロシア（32.9%）とイラン（15.7%）であるが，旧ソ連自治国（38.7%）と中東諸国（33.8%）に偏在しているといっても過言ではない。全世界の天然ガス埋蔵量は，1999年現在原油換算（付録A2のデータにより換算）では919Gboeであり，現在の原油埋蔵量とほぼ同レベルである。

表3. 天然ガス確認埋蔵量（1兆立方米）<sup>18)</sup>

	1979期末	1989	1998	1999	1999 1兆立方 フィート	1999 全体比	1999 R/P (年)
USA	5.49	4.67	4.74	4.65	164.	3.2%	8.8
Canada	2.42	2.67	1.81	1.81	63.9	1.2%	11.1
Mexico	1.67	2.08	1.8	0.85	30.1	0.6%	22.8
北米計	9.58	9.42	8.35	7.31	258.	5.0%	10.
Argentina	0.43	0.77	0.68	0.69	24.2	0.5%	20.4
Bolivia	0.15	0.16	0.12	0.12	4.3	0.1%	29.8
Brazil	0.04	0.11	0.23	0.23	8.	0.1%	33.8
Colombia	0.14	0.11	0.2	0.2	6.9	0.1%	37.9
Ecuador	0.11	0.11	0.1	0.1	3.7	0.1%	*
Trinidad & Tobago	0.23	0.28	0.52	0.56	19.8	0.4%	51.5
Venezuela	1.21	2.86	4.04	4.04	142.5	2.8%	*
Other S. & Cent. America	0.11	0.14	0.32	0.37	13.2	0.2%	*
南・中央アメリカ計	2.42	4.54	6.21	6.31	222.6	4.3%	66.2
Denmark	0.08	0.13	0.11	0.1	3.4	0.1%	12.4
Germany	0.18	0.19	0.35	0.34	12.	0.2%	19.
Hungary	n/a	n/a	0.09	0.08	2.9	0.1%	26.1
Italy	0.1	0.33	0.23	0.23	8.1	0.2%	13.
Netherlands	1.68	1.73	1.79	1.77	62.5	1.2%	25.6
Norway	0.67	2.33	1.17	1.17	41.4	0.8%	23.
Romania	n/a	n/a	0.37	0.37	13.2	0.2%	27.1
United Kingdom	0.71	0.59	0.77	0.76	26.7	0.5%	7.6
Other Europe	0.71	0.88	0.33	0.33	11.5	0.2%	27.6
ヨーロッパ計	4.13	6.18	5.21	5.15	181.7	3.5%	17.6
Azerbaijan	n/a	n/a	0.85	0.85	30.	0.6%	*
Kazakhstan	n/a	n/a	1.84	1.84	65.	1.2%	*
Russian Federation	n/a	n/a	48.14	48.14	1700.	32.9%	82.7
Turkmenistan	n/a	n/a	2.86	2.86	101.	1.9%	*
Ukraine	n/a	n/a	1.12	1.12	39.6	0.8%	63.2
Uzbekistan	n/a	n/a	1.87	1.87	66.2	1.3%	34.2
Other Former Soviet Union	n/a	n/a	0.02	0.02		0.8	51.1
旧ソ連計	25.48	42.47	56.7	56.7	2002.6	38.7%	81.8
Bahrain	0.25	0.18	0.12	0.11	3.9	0.1%	12.9
Iran	13.88	14.16	23.	23.	812.3	15.7%	*
Iraq	0.78	2.69	3.11	3.11	109.8	2.1%	*
Kuwait	0.95	1.55	1.49	1.49	52.7	1.0%	*
Oman	0.06	0.26	0.8	0.8	28.4	0.5%	*

天然ガスに依存する文明の基盤 —世界の天然ガス利用開発動向—

Qatar	1.7	4.62	8.49	8.49	300.	5.8%	*
Saudi Arabia	2.71	5.3	5.79	5.79	204.5	4.0%	*
United Arab Emirates	0.58	5.69	6.	6.	212.	4.1%	*
Yemen		0.16	0.48	0.48	16.9	0.3%	*
Other Middle East	0.04	0.11	0.25	0.25	8.8	0.2%	*
中東計	20.95	34.72	49.53	49.52	1749.3	33.8%	*
Algeria	3.74	3.23	3.69	4.52	159.7	3.1%	55.
Egypt	0.09	0.33	0.89	1.	35.2	0.7%	67.9
Libya	0.68	0.72	1.31	1.31	46.4	0.9%	*
Nigeria	1.17	2.47	3.51	3.51	124.	2.4%	*
Other Africa	0.28	0.8	0.82	0.82	28.9	0.6%	*
アフリカ計	5.96	7.55	10.22	11.16	394.2	7.7%	98.2
Australia	0.88	0.47	1.26	1.26	44.6	0.9%	41.3
Bangladesh	0.23	0.35	0.3	0.3	10.6	0.2%	37.1
Brunei	0.22	0.32	0.39	0.39	13.8	0.3%	34.7
China	0.71	1.	1.37	1.37	48.3	0.9%	56.3
India	0.26	0.65	0.54	0.65	22.9	0.4%	26.
Indonesia	0.68	2.46	2.05	2.05	72.3	1.4%	30.8
Malaysia	0.48	1.47	2.31	2.31	81.7	1.6%	53.8
Pakistan	0.45	0.51	0.61	0.61	21.6	0.4%	34.3
Papua New Guinea	0.13	0.13	0.15	0.15	5.4	0.1%	*
Thailand	0.23	0.2	0.35	0.35	12.5	0.2%	20.7
Vietnam	0.19	6.8	0.19	0.19	6.8	0.1%	*
Other Asia Pacific	0.21	0.47	0.65	0.65	22.9	0.5%	65.6
アジア太平洋計	4.35	8.03	10.17	10.28	363.4	7.0%	40.4
全世界	72.87	112.91	146.39	146.43	5171.8	100.0	61.9
OECD#	14.47	15.45	14.44	13.34	471.2	9.1%	12.8
EU15カ国	3.14	3.04	3.31	3.25	114.9	2.2%	15.

\*100年以上, 空白: 0.05以下, #: 1978と1988は中央ヨーロッパメンバー国を除く, n/a: 未入手

## 6.天然ガス生産量

### 6.1世界各地の天然ガス生産動向

米国の天然ガス生産は、1970年以来ほぼ6,000-7,000億立方米で安定している。欧州（除く東欧）も2,500-3,000億立方米で安定している。一方、旧ソ連は1971-1990年まで約270億立方米/年の成長であったが、ソ連崩壊とともに、経済的混乱のため生産はピークを打った。（図3）今後の経済開発、輸出向けに生産は増加すると考えられる。

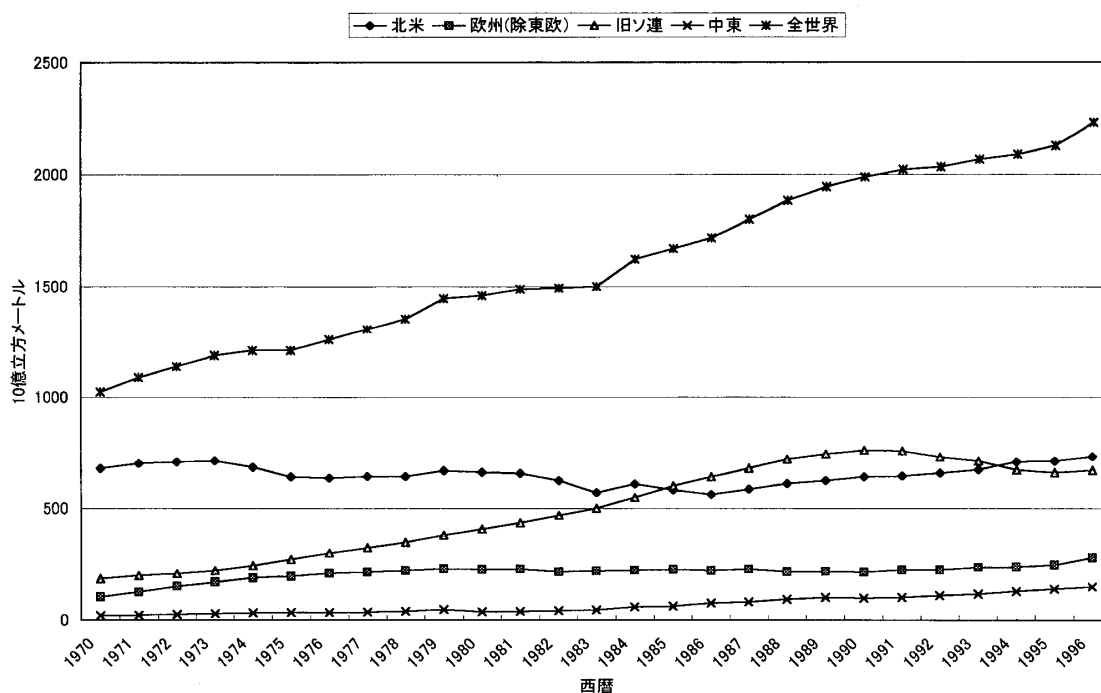


図3.世界各地の天然ガス生産量（1970-1996；現地燃焼と再注入を除く，BP）<sup>19)</sup>

1989年以降の各国の天然ガス生産量を Mtoe 単位で表4に示す。1999年時点で、天然ガス生産の代表的な国としては、米国（486.4Mtoe, シェヤ23.2%）とロシア（495.9Mtoe, シェヤ23.7%）が上げられる。これらの国は自国内消費が大きいですが、他の生産国は輸出が多い。

表4. 各国の天然ガス生産量\*(1989-1999; Mtoe: 百万トン原油等価単位)<sup>20)</sup>

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	伸び率 1999	
												～1998	全体シェア
USA	449.8	462.8	459.4	463.1	468.3	487.6	481.4	488.0	488.8	486.1	486.4	0.1%	23.2%
Canada	87.0	89.4	94.8	104.5	112.9	122.3	133.4	138.2	140.6	144.5	146.1	1.1%	7.0%
Mexico	24.0	24.1	25.1	25.0	25.0	25.8	25.3	28.1	30.4	32.9	33.6	2.2%	1.6%
北米計	560.8	576.3	579.3	592.6	606.2	635.7	640.1	654.3	659.8	663.5	666.1	0.4%	31.8%
Argentina	17.1	16.1	17.9	18.1	19.4	20.0	22.5	23.9	24.6	26.6	30.2	13.5%	1.4%
Bolivia	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	3.0	2.8	2.9	2.9	3.0	3.7	24.7%	0.2%
Brazil	3.5	3.4	3.5	3.6	4.0	4.1	4.3	5.0	5.4	5.6	6.0	6.6%	0.3%
Colombia	3.6	3.7	3.7	3.6	3.8	3.7	4.0	4.2	5.3	5.6	4.7	7.3%	0.2%
Trinidad & Tobago	4.6	4.7	5.1	5.4	5.3	5.6	5.5	6.4	6.7	7.8	9.8	25.7%	0.5%
Venezuela	17.6	19.8	19.7	19.5	21.0	22.2	24.8	26.8	27.7	29.1	28.8	9.9%	1.4%
Other S. & Cent. America	2.4	2.5	2.2	2.3	2.3	2.4	2.3	2.4	2.7	2.6	2.5	5.5%	0.1%
南・中央アメリカ計	51.4	52.9	54.8	55.2	58.5	61.0	66.2	71.6	75.3	80.3	85.7	6.7%	4.1%
Denmark	2.8	2.8	3.6	3.7	4.1	4.4	4.8	5.8	7.1	6.8	7.0	2.6%	0.3%
Germany	14.2	14.3	13.2	13.4	13.4	14.0	14.5	15.7	15.4	15.0	16.1	6.8%	0.8%
Hungary	4.7	3.8	3.8	3.6	3.9	3.7	3.7	3.6	3.3	3.0	2.7	2.4%	0.1%
Italy	15.3	15.6	15.7	16.3	17.5	18.6	18.3	18.0	17.3	17.1	15.9	2.2%	0.7%
Netherlands	54.1	54.5	62.1	62.2	63.0	59.7	60.3	68.2	60.4	57.2	54.1	5.5%	2.6%
Norway	27.7	25.0	24.6	26.5	26.0	27.7	28.0	36.9	42.0	43.0	45.9	6.7%	2.2%
Romania	26.5	25.5	22.0	19.6	18.5	16.8	16.2	15.5	13.5	12.6	12.4	6.6%	0.6%
United Kingdom	37.1	40.9	45.6	46.3	54.5	58.2	63.7	76.1	77.8	81.7	89.7	9.8%	4.3%
Other Europe	14.1	12.7	12.9	12.6	13.6	13.0	13.2	12.0	11.5	11.0	10.4	1.1%	0.5%
ヨーロッパ計	196.5	195.1	203.5	204.2	214.5	216.1	222.7	251.8	248.3	247.4	254.2	2.6%	12.1%
Azerbaijan	9.3	8.3	7.2	6.6	5.7	5.4	5.5	5.3	5.0	4.7	5.0	7.1%	0.2%
Kazakhstan	5.6	6.0	6.6	6.8	5.6	3.8	5.0	5.5	6.8	6.9	8.3	20.7%	0.4%
Russian Federation	517.0	538.2	539.8	537.6	518.8	509.8	499.9	505.0	479.3	496.2	495.9	1.1%	23.7%
Turkmenistan	75.5	73.7	70.8	50.5	54.8	30.0	27.1	29.6	14.5	11.2	19.1	71.4%	0.9%
Ukraine	25.9	23.6	20.5	17.6	16.1	15.3	15.3	15.4	15.2	15.0	15.1	0.6%	0.7%
Uzbekistan	34.5	34.3	35.2	35.9	37.8	39.6	40.8	41.1	43.0	46.0	46.7	1.5%	2.2%
Other Former Soviet Union	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.3	0.4	0.4		
旧ソ連計	668.4	684.6	680.6	655.5	639.2	604.2	593.9	602.1	564.1	580.4	590.5	1.8%	28.1%
Bahrain	5.0	5.2	5.0	5.8	6.2	6.4	6.5	6.7	7.2	7.5	7.7	2.5%	0.4%
Iran	20.0	20.8	23.2	22.5	24.4	28.6	31.8	36.2	42.3	45.0	47.3	5.0%	2.3%
Kuwait	7.3	3.8	0.5	2.4	4.9	5.4	8.4	8.4	8.3	8.1	6.3	2.2%	0.3%
Oman	2.2	2.3	2.4	2.6	2.5	2.6	3.6	3.9	4.5	4.5	5.0	10.4%	0.2%
Qatar	5.6	5.7	6.9	11.4	12.2	12.2	12.2	12.3	15.7	17.6	21.6	22.6%	1.0%
Saudi Arabia	26.8	27.5	28.8	30.6	32.3	33.9	34.2	40.0	40.8	42.1	41.6	3.3%	2.0%
United Arab Emirates	18.3	18.1	21.4	20.0	20.7	23.2	28.2	30.4	32.7	33.4	34.2	2.6%	1.6%
Other Middle East	6.8	5.0	3.1	3.6	3.8	4.4	4.8	4.8	4.5	4.6	4.9	6.4%	0.2%
中東計	92.0	88.4	91.3	98.9	107.0	116.7	129.7	142.7	156.0	162.8	168.6	3.5%	8.0%
Algeria	41.8	44.3	47.8	49.5	49.5	45.5	51.5	55.0	63.4	67.8	74.0	9.0%	3.5%
Egypt	5.9	6.1	7.0	7.6	9.0	9.5	9.9	10.4	10.5	11.0	13.2	19.9%	0.6%
Libya	5.7	5.2	5.7	5.9	5.6	5.6	5.5	5.6	5.8	5.6	5.3	1.1%	0.3%
Nigeria	3.8	3.6	3.5	3.8	4.4	4.0	4.4	4.9	4.6	4.6	5.1	10.2%	0.3%
Other Africa	0.8	1.0	1.0	1.0	2.4	2.6	2.7	3.8	4.4	4.5	4.7	4.3%	0.2%
アフリカ計	58.0	60.2	65.0	67.8	70.9	67.2	74.0	79.7	88.7	93.5	102.3	9.3%	4.9%
Australia	16.0	18.6	19.5	21.1	22.0	25.3	26.8	27.5	27.0	27.3	27.5	0.7%	1.3%
Bangladesh	4.3	4.3	4.7	5.2	5.5	6.0	6.6	6.8	6.8	7.0	7.3	4.2%	0.4%
Brunei	7.9	8.0	8.2	8.8	9.3	9.4	10.6	10.5	10.5	9.7	10.1	4.6%	0.5%
China	12.6	12.8	13.4	13.6	14.6	14.9	15.8	17.9	20.0	19.8	21.9	10.3%	1.0%
India	9.6	11.1	12.8	14.3	14.5	15.6	16.9	18.4	18.6	22.2	22.4	1.1%	1.1%
Indonesia	37.2	40.8	46.4	48.9	50.6	56.6	57.4	60.4	60.8	57.5	59.8	4.0%	2.9%
Malaysia	15.7	16.0	18.3	20.5	22.4	23.5	26.0	31.3	34.6	36.6	38.7	5.7%	1.8%

Pakistan	9.6	10.1	10.0	10.3	10.9	12.0	13.3	14.0	14.3	14.6	16.1	10.0%	0.8%
Thailand	4.9	4.9	6.3	6.8	7.6	8.6	9.1	10.6	12.7	13.9	15.4	10.6%	0.7%
Other Asia Pacific	8.4	8.3	7.9	8.2	8.5	8.5	8.3	9.2	9.8	9.6	10.2	6.3%	0.5%
アジア太平洋計	126.2	134.9	147.5	157.7	165.9	180.4	190.8	206.6	215.1	218.2	229.4	5.1%	11.0%
世界計	1753.3	1792.4	1822.0	1831.9	1862.2	1881.3	1917.4	2008.8	2007.3	2046.1	2096.8	2.5%	100.0%
OECD	749.3	767.8	783.6	802.1	827.5	863.8	876.1	922.0	925.7	929.5	939.5	1.1%	44.8%
欧州連合15カ国	130.6	135.4	147.4	149.2	159.3	161.8	168.3	189.7	183.4	182.6	187.1	2.5%	8.9%
他の新興経済国 (EMEs: \$)	305.7	311.9	333.1	352.1	373.8	393.9	428.2	466.6	501.4	521.6	552.0	5.8%	26.3%

\* 燃焼放出ガスおよび再注入ガスを除く、空白：0.05以下、\$：(Emerging Economies, 中央ヨーロッパと旧ソ連以外の主としてアジアの新興経済国)、10億立方フィート/日 (billion cubic feet per day = bcf/d) 単位の天然ガス消費量データは [www.bpamoco.com/worldenergy/naturalgas](http://www.bpamoco.com/worldenergy/naturalgas) を参照のこと。

## 7 北米の天然ガス動向予測

北米自由貿易協定(North American Free Trade Agreement = NAFTA)を擁する北米経済は米国という世界文明の旗頭を含むがゆえにその動向もまた構造的に世界的な影響を齎す可能性が大きい。ITを支えるC3(通信-Communication, 計算-Computation, 制御-Control)の電力確保が現代の産業と生活上極めて重要であり、化石燃料の種類を問わず電力が米国のみならず現代文明を支えている。2001年1月米国カリフォルニア州で発生した電力危機が、発電用天然ガス不足を新たな原因として米国各地に波及し、その影響が世界にも影響しかねない。したがって、北米の天然ガス需給は決定的な重要性をもつ恐れがある。そこで、ここでは、電力システムの燃料としての北米の天然ガスに焦点をおき分析する。

### 7.1 米国の天然ガス不足問題

米国のエネルギー問題でなによりも象徴的であったのは2001年1月18日に発生したカリフォルニアでの大停電である。米国では高価な石油は発電所ではほとんど燃料として使われていない(図4参照)。したがって、世界石油生産のピークは今後2010年を待たず起こると予測されるものの、それによって電力危機が直接引き起こされる可能性は小さい。しかし、図4より分かるように、これまで米国における発電用燃料は石炭火力が主流であったが、今後石炭利用にまつわる環境問題、安全問題を緩和させるために、天然ガス火力が主流になりつつある。したがって、米国の電力問題は取りも直さず天然ガスが不足する場合に発生する恐れがある。米国では2001年現在、272の新規天然ガス火力発電所が、建設中、もしくは計画中である。したがって、ガス-タービン発電所の急激な需要増加が必要とする天然ガス生産を予測する必要がある。供給不足を補うために、北アフリカ・アルジェリアからのLNG輸入を増加させなければならないが、これは欧州への輸出と競合する。



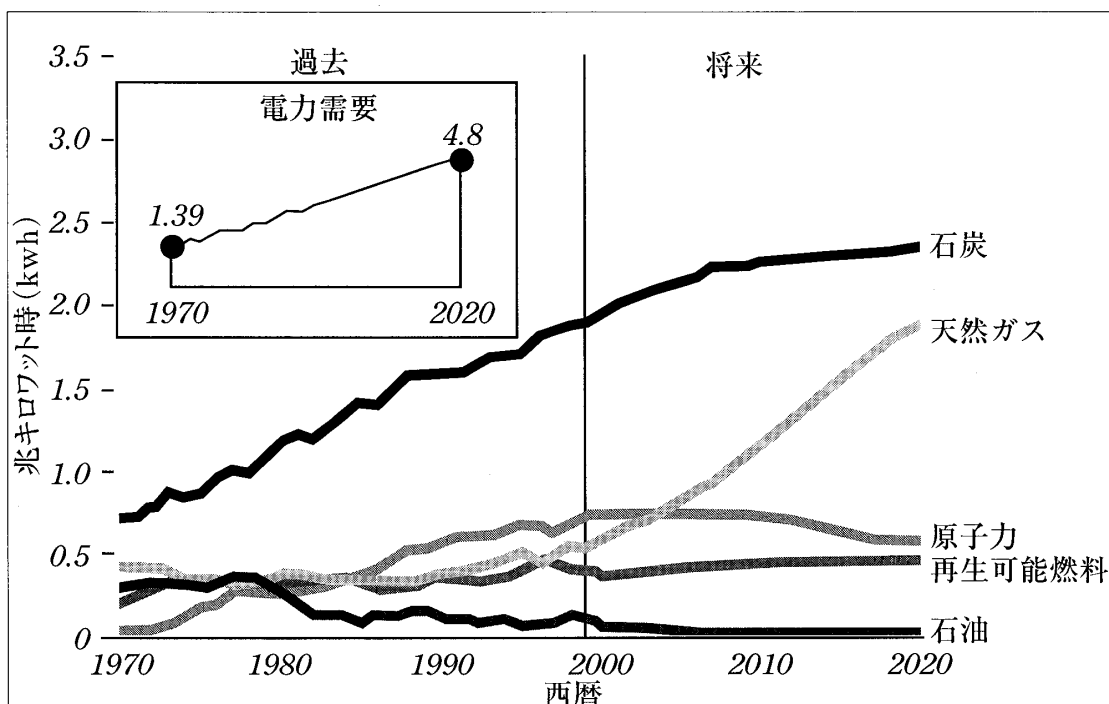


図4. 米国の各種燃料による発電と電力消費の動向 (1970-2020) 21)

## 7.2 北米の天然ガス消費動向

北米の電力供給問題は、基本的に北米の天然ガス供給問題であるので、電力供給を天

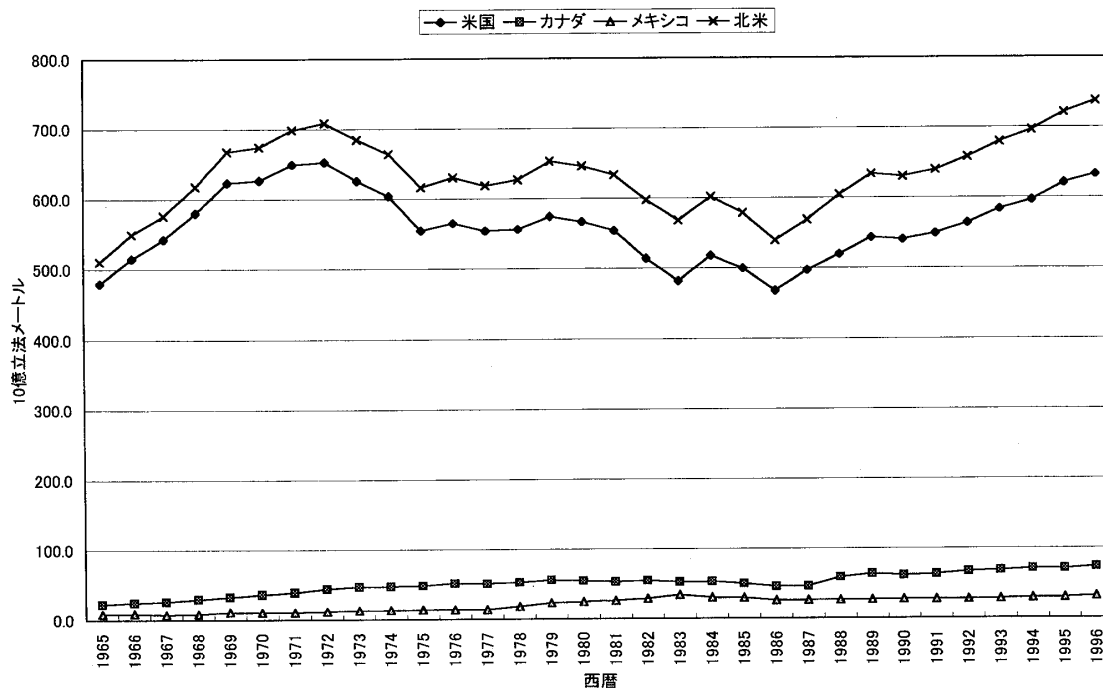


図5. 北米の天然ガス消費 (1965-1996) 22)

然ガス発電で解決するためには、天然ガスの供給が基本的な前提条件となる。北米における過去30年間の天然ガス消費（1965-1996年）を図5に示す。主要3国のうち、カナダ、メキシコに較べて米国が群を抜いていることが分かる。しかし、残る2国も順調な伸びを維持している。全体的に1973年と1979年の石油危機の影響を受けて、天然ガスの消費も落ち込みをみせたが、1986年以降堅調な消費の伸びを示していることがわかる。

### 7.3 北米の天然ガス生産予測

米国のアナリスト R.C. Duncan の手許に、最近になって世界の天然ガス生産を予測に耐える1985-1998年(メキシコを除いて)の詳細な生産量データが整い、それをを用いて石油生産を予測する Duncan モデル(1), (3)と同じモデルを利用して、北米のガス生産予測が可能になった<sup>13)</sup>。

Duncan は米国・カナダ・メキシコの北米天然ガスデータ(1950-1999年)と英国石油の世界エネルギー統計年報(British Petroleum Statistical Review of World Energy: 以下BPデータ)の生産量と埋蔵量評価値データ(BPデータ)を入力して Duncan モデルにあてはめ、予測計算をした。その結果、2012年に北米の天然ガス不足が引き金となり米国での「停電」がなだれ現象的に発生し、世界中の発電所にも波及する恐れがあるとした(文献23)中の論文 Duncan,2001)。彼よりの私信では、この予測はごく最近の新しいデータによる分析では楽観的に過ぎ、2007年頃にも起こると予測を修正した<sup>23)</sup>。

Duncan の使用したデータはBPデータの北米(米国、カナダ、メキシコ)の天然ガス埋蔵量評価と、「米国地質調査所による世界の石油評価(US Geological Survey World Petroleum Assessment2000)」(2000年3月に刊行された5年間の調査)データである。これらのモデル計算による米国・カナダ・メキシコの天然ガス生産予測(2000-2040年)の結果は以下の通りである。

#### 7.3.1 米国の天然ガス生産

すでに表4.に示したように、1999年の米国の天然ガス生産量は、北米全生産の73.5%であり注目に値する。過去、米国のガス生産は米国の石油生産がピークを打った1年後、22.0Tcf (trillion (10<sup>12</sup>) cubic feet: 1兆立方フィート)で1971年にピークになった。それ以後、生産高は1999年まで平均0.50%/年低下した。

Duncan モデルによる今後の予測では、米国の第2の生産ピークが2007年に20.1Tcfで発生する。その後、2007年から2040年まで、米国の天然ガス生産は約41%低下する。これは33年間、1.5%/年の平均低下である。モデル計算では、米国のEUR(expected ultimate recovery: 推定究極回収量/Tcf単位: 原油のEUR (expected ultimate reserves: 推定究極埋蔵量)に対応する)=1,840Tcfと予測される。しかるに、米国USGSレポートによると、米国のUSGSのP50(確率50%)平均値がGCPE (grown conventional petroleum

endowment：在来石油（天然ガス）賦存量/Tcf単位）= 1,910Tcfである。このように、米国の天然ガス USGS 平均値 GCPE が米国のモデル予測と一致がよいことは注目に値する。（GCPE と EUR は事実上、同義語である。）

米国ではメキシコ湾東部の豊富なガス資源の開発が行われているが、フロリダ州が近距離の海上採掘を禁じていることが開発の制約となっている<sup>24)</sup>。

関連して、アナリストの最近の意見を紹介する<sup>23)</sup>。

- 1967年、米国の確定埋蔵量は293Tcfでピークを打ち、その後堅調に低下し始めた。その直前で米国の埋蔵量は EUR の 1/2 をやや越すレベルにあったといえる。メキシコ湾海底埋蔵量は、25-30%/年で枯渇しつつある。(Parent,2001)
- 2001年、米国の一次エネルギー消費（原子力を除く）は増加するであろう。シェヤの最大は天然ガスであり、需要は2.4%上昇して23.45q (quads)になると予測される。2001年の天然ガス消費は、電力会社と産業部門における需要の増加と、冬場の天候がほぼ平年なみに推移したために、記録的な高レベルに達するであろう。(Radler, 2001b, p.67)
- 米国エネルギー省 (DOE) のエネルギー情報庁(EIA)は2020年まで、主として発電用天然ガスの需要成長にもとづく米国の天然ガス需要は、1999-2020年の間62%増加し、21.4Tcfから34.7Tcfに上昇すると予測している。今後20年間に建造される米国の発電所容量の89%は天然ガス火力発電となり、発電用天然ガス需要はこの間に3倍に増加する。(True,2001)
- Bush (George W.) 大統領は必ずしも EIA と意見が一致していない。Bush 大統領曰く、「国家のエネルギー政策を確立することは、政府の第一級関心事である。言うまでも無く、それが米国の高い国家懸念であるためである。需要が供給を上回っており、新発電所建設を上回り電気と天然ガスの需要が増加している現状よりすると、国が何とかしなければならぬことは極めて明白になりつつある。」(Crow,2001)

事実、2001年5月16日発表された米国政府の新しいエネルギー政策は、大統領のこの懸念を反映したものとなった。米国は供給重視の姿勢を明確にし、原子力発電に消極的であったこれまでの方針を転換、固有の安全性を重視した原発の開発推進に舵を切った。また、石油や天然ガスの増産に力をいれる方針である<sup>25)</sup>。5月18日米国電力最大手のエクセロン社（米国103基中17基保有）は新型固有安全ガス冷却原子炉（冷却材喪失事故と制御不能事故に自律的に安全性が確保される）の建設申請を明年提出予定を発表した<sup>26)</sup>。5月18日サウジアラビア政府が天然ガス開発事業に欧米メジャー〔国際石油資本：米国エクソンモービル、エンロン、英蘭のロイヤル・ダッチ・シェル、英BP、仏トタルフィナ・エルフ社他8社〕の参加を認めることを発表した<sup>27)</sup>。これらの報道が

最近相次いでいることは偶然ではないことを物語っている。

### 7.3.2 カナダの天然ガス生産

1999年のカナダ天然ガス生産は、北米生産の22%に達した。驚くべきことに、1983—1995年までカナダ生産高は114%、すなわち12年間に6.0%/年の平均成長率で増大した。その後1995—1999年まで、成長は2.1%/年に減速した。Duncan モデルによる今後の予測では、カナダの天然ガス生産は2005年に6.1Tcfでピークになると予測される。それ以後、2005年から2040年まで、カナダの生産は35年間の、4.3%/年平均で低下し86%下落する。モデル計算では、USGS とカナダ政府との合議した定義によるカナダの EUR (= 290Tcf) は対応する値 GCPE (= 290Tcf) と一致する<sup>23)</sup>。

関連して、アナリストの最近の意見を紹介する<sup>23)</sup>。

- カナダのガス市場は、この数年、生産が確定埋蔵量の増加を上回る急成長を経験し、埋蔵量の持続的低下に帰着した。カナダでのガス井の記録的穿孔にもかかわらず、引渡し可能量は、ごく僅か増加したに過ぎない。一つには、単位ガス井平均でみると、引渡し量の低い浅い井戸の穿孔の増加が原因で生産量は低下しつつある。(Parent, 2001)
- 既存のガス井からの生産の継続的低下がみられ、新しい井戸からの生産で相殺しようとする、結局、現生産を20%増加しなければならないが、この条件は厳しすぎる。(Parent, 2001)

### 7.3.3 メキシコの天然ガス生産

1999年のメキシコの天然ガス生産は北米生産の5.4%を占めたに過ぎない。メキシコ生産量は1982年に局所ピーク1.3Tcfを示した後1995年まで全体的に堅調低下した。しかし、1995年から1999年にかけて、生産高は29%大幅に増大した。これは平均6.4%/年の増加であり注目に値する。

Duncan モデルによる今後の予測は、メキシコの天然ガス生産は2011年に1.5Tcfでピークになる。その後、2011年から2040年まで、生産は約56%下がる。これは、29年間平均2.7%/年の低下である。しかるに、彼のモデル計算と USGS の予測の間に明白な不一致が発見された。すなわち、モデル計算ではメキシコ EUR=85Tcfである。一方 USGS の GCPE (平均値) = 150Tcf である。この食い違いは、USGS2000レポートが1995年の基準データを採用しているためであると考えられる。1999年メキシコ(国営企業 Pemex 社)は、天然ガス「確定埋蔵量」を63.5Tcfから30.1Tcfに下方修正した(表3参照)。これは、一挙に53%の減少であった。(Pemex は過去の埋蔵量報告の誇張を認めている。)したがって、かりに150Tcfの USGS 値を0.53倍するならば、80Tcfを得る。これはモデル計算結果の85Tcfとほぼ一致している<sup>23)</sup>。1999年メキシコの「確定埋蔵量」が50%も減

少したことの意味は小さくない。

まとめて言えることは、

- (1) 北米においてメキシコ天然ガス埋蔵量は全体の12%、米国の18%に過ぎず、天然ガス生産規模も小さい。
- (2) メキシコは2001時点すでに、米国からの天然ガス実質輸入国である。
- (3) メキシコの内需は生産を上回っている。

わが国との関係でみると、2001年6月5日、小泉首相はフォックス・メキシコ大統領と首脳会談を行い、自由貿易協定(FTA)の締結を含む両国の貿易体制の強化にむけて、産学官の研究会を設置することで合意をした。FTAの日本側メリットは日本製品に対する関税の撤廃であり、メキシコ側のメリットは、石油・天然ガスなどのエネルギー分野などへの投資拡大、農産物の対日輸出の増大であるという<sup>28)</sup>。しかし、エネルギー分野への参加に関する限り、天然ガスの引き取り的な意義は限られたものである。

関連して、アナリストの最近の意見を紹介する<sup>23)</sup>。

- 1994-99年、メキシコの天然ガス需要は年6%/年増加した。電力需要は、大部分天然ガスを必要とするコンバインドサイクルタービン技術採用で増加したため、より高い年率9%/年で増加した。(Baker,2001)
- 2001年時点で、国内市場にガスを供給するメキシコ Pemex 社の能力には疑問がある。大量のガス需要全部が米国との長期契約で賄われることは疑わしい。(Baker,2001)
- メキシコのガス生産高は平均して1999年の4.79bcfd (billion cubic feet per day:10億立方フィート/日)から2000年では4.69bcfdに下がった、一方、需要は約10%上昇した。米国の天然ガス需要増がこれを上回ることを考えると、メキシコが更に長期に米国からの輸入に頼り続けられるとは考えられない。(Radler,2001a, p.17)
- 近年、Pemex 社はメキシコのガス需要の高成長率を認めた。1995-99年、ガスの需要は4.4%/年で増大した。シナリオに基づく将来消費予測では、今後10年間9%/年の需要増加を示す。コンバインドサイクルタービン発電所の燃料を石油より天然ガスへ転換するこれまでの慣行の僅かな変化のみで、ガス需要を年間成長率16%/年まで増加させる可能性がある。メキシコは、将来とも、米国からのガスの実質輸入国にならざるをえないと予想される。(Barbosa,2001)

#### 7.4 北米の天然ガス生産と電力

1999年北米の天然ガス生産は総額26.23Tcfであった。北米の生産の局所的ピークは25.0Tcfで1972年に発生した。その後、1972年から1986年まで、北米の生産高は約20%低下した。しかし、その後この傾向は急速に逆転し、1986年から1999年までの13年間、北米の生産は2.0%/年で堅調に増加した。Duncan モデルによる予測では、今後北米天

然ガス生産は2007年にピークを打ち28.5Tcfになり、2007年から2040年まで、北米の生産高は51%減少する。すなわち、33年間にわたり、2.1%/年の平均減少率で減少する<sup>23)</sup>。

関連して、アナリストの最近の意見を紹介する<sup>23)</sup>。

- 天然ガスの不足は、米国に限らず、メキシコでも問題である。メキシコから米国への輸出量は、1999年の54bcfより、2000年の4.71bcfへと減少し、その後ゼロに下落した。天然ガスのメキシコの国内需要が増大し、輸出は無理になった。(Radler,2001a, p.17)
- 今後、カナダは資源開発計画を強化するであろう。メキシコはエネルギー開発と利用を上方修正し、近い将来、米国からガス輸入を必要とするであろう。米国は供給選択肢をてこ入れするために、液化天然ガス (LNG) 輸入が必須である。消費者の環境意識が向上し、よりエネルギーコストが高くなっても仕方がないとする以上、今後エネルギー効率向上と燃料節約施策も必須である。そうすると30Tcf規模の[北米]市場は存在しないかもしれない。(Parent,2001)
- 最近の米国カリフォルニア州の電力危機が特に米国の天然ガス産業に懸念を引き起こしたところをみると、電力部門が今後、天然ガス需要の最も急速な成長分野の要因であると予測される。この10年間、米国で開発計画予定の200以上の発電所は殆ど100%、天然ガス火力になると予測される。(Rouffignac,2001)
- 2001年カリフォルニア州の電力危機は、エネルギー開発意欲を抑制する政策から生じた。すなわち、破滅的電力不足の中心には発電容量の慢性的な不足があった。今後米国各州は同じ路線にあるカリフォルニア州電力危機再来の二の舞を避けるべきである。(O&GJ,2001)

## 7.5. 世界的停電波及の恐れ

停電は電力自由化や規制緩和政策によってのみならず、個別の発電所でみると、ごく一時的でも燃料供給が不足すると発生する。

米国 EIA (エネルギー情報局) の予測では、米国では天然ガス需要が2020年に62%増加して34.7Tcfになる。一方、アナリストの意見と、Duncan 予測のいずれからも、将来米国がメキシコとカナダからの輸入に依存することは無理であり、米国の生産増加そのものにも疑問がある。然るに、北米全体では今後、建物、商業、産業、発電の各部門で需要の大幅増加が予想される。それにもかかわらず、北米で既に見え隠れする「天然ガス不足」という重大な問題を理解しているアナリストは少ない<sup>23)</sup>。その結果、北米(米国)の天然ガスを Sakhalin I~VI 等の油井を含め、ロシアが補う可能性が生れるが、供給施設の開発が遅れると、欧州諸国など他の輸入国へその影響が波及する恐れがある。

最新式のガス火力発電所と送電線を建造するに必要な資本が十分あれば発電と送電容量の破壊的な不足を取り除けることは確かである。しかし、Jay Forrester 流にいうと、

時を措かず更に高く厳しい成長の限界に遭遇する。天然ガスに引き続き、(既に再び始まった)原子力<sup>26)</sup>、その後(再び)石炭、より強力なバイオマス燃料への再挑戦が始まるであろう。いずれにしてもソーラーエネルギー開発に成功しなければ、最終的には18世紀に逆戻りすることになりかねない。(MIT教授 Jay Forrester は「科学技術的解決」と「成長の物理的限界」の関係を述べた：「人類は、成長の物理的限界を取り除くために技術を使うことができる。しかし、そうするたびにより手強い新しい成長の限界に常に衝突する。究極的に、大規模な科学技術的解決は成功しない。」<sup>23)</sup>。筆者も最近同様の意見を発表した<sup>29)</sup>。)

## 8.新規探査・採掘技術の進歩の見通し

### 8.1 新規ガス田の探査・採掘可能性

原油の場合と同様に天然ガスの探査・開発は米国で最も進んでいるが、世界的には原油にくらべて著しく遅れている。今後米国並に世界の天然ガス開発が行われれば、大幅な埋蔵量増加が見込まれる。この埋蔵量は1999年時点での埋蔵量の5倍に相当する<sup>30)</sup>。一例として、現在、日本に近いロシア樺太近海油井サハリンI~VIは大規模の天然ガスを埋蔵するが、天然ガス埋蔵量は全体で1,300bcmで米国の埋蔵量4,650bcmの28%であり、ロシア、米国、日本、韓国などの共同開発が進んでいる<sup>31)</sup>。1991年5月31日、サハリンIIプロジェクトで、国際石油資本ロイヤル・ダッチ・シェル社、三井物産、三菱商事の作るサハリンエナジー社が共同開発するロシア・サハリン沖の油田から日本向けに同年6月65万バレル船積みされる予定がきまった。2006年以降、同社はサハリンIIプロジェクトのピルトン・アストフスコエ鉱区からの天然ガスを、又米エクソンモービル社の石油資源開発、伊藤忠商事などが、同鉱区南側に位置するサハリンIプロジェクトからの原油、天然ガスの生産を目指している。これらはともに、推定埋蔵量は原油が日本の年間需要の約1年分、天然ガスが約6年分と膨大で、将来性が期待されている<sup>32)</sup>。

### 8.2 新しい液化天然ガス生産技術

天然ガスを化学転換(合成)して液体燃料にする新技術により、遠からず合成天然ガスが石油と同程度の価格で自動車など移動体燃料として利用されるようになる。この合成液体燃料が既存の自動車燃料として、ガソリンとディーゼル油を代替する可能性がある。多くの場合、石油生産者も石油井に付随するガスを原料として、液体燃料のみならず、化学薬品を製造販売し貴重な利益が得られる。

現状、世界油田の油井より原油と同時に放出する随伴ガスの多くは、殆どその価値が認められず、現地で燃焼されるか、油田に再注入されている。アラスカだけでも、製油

会社は地球温暖化ガスである二酸化炭素とメタンの大気放出を避けるために、約2億立方メートル（約70億立方フィート）の天然ガスの殆どをポンプで地中に再注入している。しかし、最近の技術進歩により、いくつかの製油会社がアラスカパイプラインを利用して経済的に輸送できる天然ガス液化プラントの建設計画を立案した。アラビア半島では、カタール国が世界のガス確認埋蔵量の1割を占める莫大な洋上のガス田を利用するガス液化プラント建造に向けて、石油化学会社3社と協議している。また、ノルウェーの最大の製油会社 Statoil 社が、比較的小型モジュールにより、隔離された北海油田でガスを液化プラントのプラットフォームを浮かべることを考慮している<sup>23)</sup>。

## 9. 結論

これまでの資本主義では「経済」、「環境」、「社会」の3政策分野が競合し、これら目的間の「トレード・オフ」または、「バランス」で、いずれかに優先性が生じざるを得ないとする社会経済が常識であり、いわゆる外部経済の内部化が課題であるとみられた。この、過去の古い経済認識は最早妥当ではなくなりつつあるとの考えが生れた。すなわち、企業の生産システムは言うに及ばず、企業、経済諸部門、都市全体、そして社会全体のレベルで、設計を統合化することにより、全ての目標を合わせ同時に達成する新しい資本主義経済の萌芽が見られる。今後起るであろう石油価格高騰とともに、石油代替文明としての天然ガス（水素系）による環境保全型経済文明、ならびにソーラー発電、バイオマス燃料など、自然エネルギー文明への転換がこの動きとともに起こると考えられる。

そこで、本稿ではまず、石油代替燃料の一つとして今後社会経済的な浸透が予測される天然ガスをとりあげ、世界的な現状動向を、消費・貿易・確認埋蔵量・生産についてBPデータをもとに整理・概観した。

天然ガスは火力発電用燃料としてすでに幅広く利用されている。最近のITを始め電力は現代文明を支えるものであり、現代の産業と生活維持に極めて重要である。石油など化石燃料のみならず、電力が現代文明を支えているためである。最近、なによりも象徴的であった現象は2001年1月18日に発生した米国カリフォルニア州での大停電である。今後発電用燃料の確保にあたり、将来とも米国がメキシコとカナダからの天然ガス輸入に依存することは無理であり、米国の生産そのものも限られた状態にある。然るに、北米では今後、建物、商業、産業、発電部門に需要の大幅増加が予想される。したがって、北米で「天然ガス不足」発生の恐れがある。その場合、北米（主として米国）の天然ガスをロシアが補う可能性が生れるが、欧州諸国など他の輸入国へその影響が波及するおそれがある。

天然ガスを化学的に転換（合成）して液体燃料にする新技術により、遠からず合成液



体燃料が石油と同程度の価格で自動車など移動体燃料として利用され、ガソリンとディーゼル油を代替する可能性がある。今日すでに原油価格バレル約10%高い価格で天然ガスが転換液化できる状況にある。事実、最近の技術進歩により、いくつかの製油会社がアラスカパイプラインを利用して経済的に輸送できる天然ガス液化プラントの建設計画がある。

今後、世界は先進国を中心に比較的急速に天然ガス経済に入っていくと予測されるが、生産・供給において多くの課題を残している。また、国際的な戦略物質である点は天然ガスも石油と変わらない。わが国としては多様な供給源を確保するとともに、省エネルギー努力、新エネルギー開発に力を注がなければならない。

## 付録

### A1. 天然ガスの種類

普通石油と呼ばれているものは天然に産出する炭化水素類の混合体であって、そのうち液体を原油、気体を天然ガス、固体をアスファルトと呼んでおり、通常理解より幅広い。じつは、原油と共に、天然ガスが噴出することが多い。炭化水素を主とするものには、油田ガス(oil field gas：石油鉱床中に含まれる気体炭化水素)、炭田ガス(coal field gas：石炭から熱分解により発生したメタンを主成分とする)、水溶性天然ガス(natural gas dissolved in water：有機物がバクテリアにより分解されて発生したメタン)、地球深層ガス(deep earth gas：地球深部で炭素と水素が直接反応して生成したもの)がある。ここで、天然ガスと呼んでいるものは、事実上油田ガスであるが最近ではメタンハイドレードも注目をあつめているA1)。

### A.2. 原油・天然ガスのエネルギー・体積単位換算

原油・天然ガスは性状の違いに応じ、各種の単位が使われる。ここで、それらの間の換算係数について整理するA2)。

#### • 原油の主要単位：

1 kl (キロリットル) = 6.29b(バレル), 1 b = 159l, 1 l (= 0.26Usgal 米国ガロン) は約9250 kcal, 1 ton (= 0.92kl) は107kcal に相当, 比重は約0.92 (エネルギーよりの換算値) である。

#### • 天然ガスと LNG の主要単位：

天然ガス 1 立方メートル (= 35.3立方フィート) は 9,000 - 9,500kcal に相当する。1 tonLNG = 天然ガス1400立方メートル, 比重は0.425, 体積圧縮比は 1/595である。これらより、天然ガス 1 立方メートルはほぼ原油 1 l = 0.00629bo(原油等価バレル) に相当する。従って、表 3 の

データより、現在世界の天然ガス埋蔵量を原油換算すると、 $1461012 \times 0.00629\text{bo} = 0.9181012\text{bo} = 918\text{Gbo}$  に相当する

### A.3. 各種化石燃料と水素燃料の特性

各種化石燃料と水素について、燃料性能および環境保全性など特徴を表 A1 に比較する。

表 A1 化石燃料の特性比較 (A3.)

	石炭(一般炭)	原油	天然ガス	水素
発熱量[kcal/kg]	7000	10890	12800	23850
H/C比[atom/atom]	0.93	1.77	3.93	—
CO <sub>2</sub> 発生量[g/kcal]	0.408	0.286	0.212	0.0
対原油CO <sub>2</sub> 発生量比	1.43	1.0	0.74	0.0

表 A3 より、同じエネルギーを得るときに発生する地球温暖化物質 CO<sub>2</sub> は、石炭では原油の約1.4倍、天然ガスでは石油の0.7倍となっている。これを見て分かるように、地球温暖化防止の観点のみからでも、天然ガスが有利であることがわかる。なお、参考までにあげた水素は1次エネルギーより生産される2次エネルギーであって、水の電気分解、化石燃料の改質（熱分解など）、原子力利用による化学反応などによって得られるが最もクリーンな製造方法はソーラーエネルギー利用によるものである。

そこで、石炭・石油から天然ガスへの移行が考えられるところであるが、製品が最終的に燃焼される限り、炭素は全て二酸化炭素として大気中に放出されるので二酸化炭素の低減に寄与しないばかりか、軽質化に必要なエネルギー分だけ二酸化炭素排出はふえる。したがって、水素燃料による温暖化防止策に意味があるのは、太陽エネルギーや原子力エネルギーを利用して水素を製造する場合である。

環境影響を評価する際、単純に燃焼に伴う炭酸ガス発生量だけで比較はできない、すなわち、天然ガスの温室効果は炭酸ガスに比べて一桁大きくごく僅かもある場合でも無視できない。ある試算（Dean E. Abrahamson ミネソタ大名誉教授）では産出、輸送過程で主成分のメタンは約0.7%漏出し、さらに最終消費段階までに1～3%漏れる。温室効果貢献度が石油より低く抑えられるのは漏出の合計が2.6%以下の場合である。したがって、漏洩抑制技術が確立しない限り、天然ガスが石油にくらべ環境保全上有利であるとは言えない。この点注意が必要である。

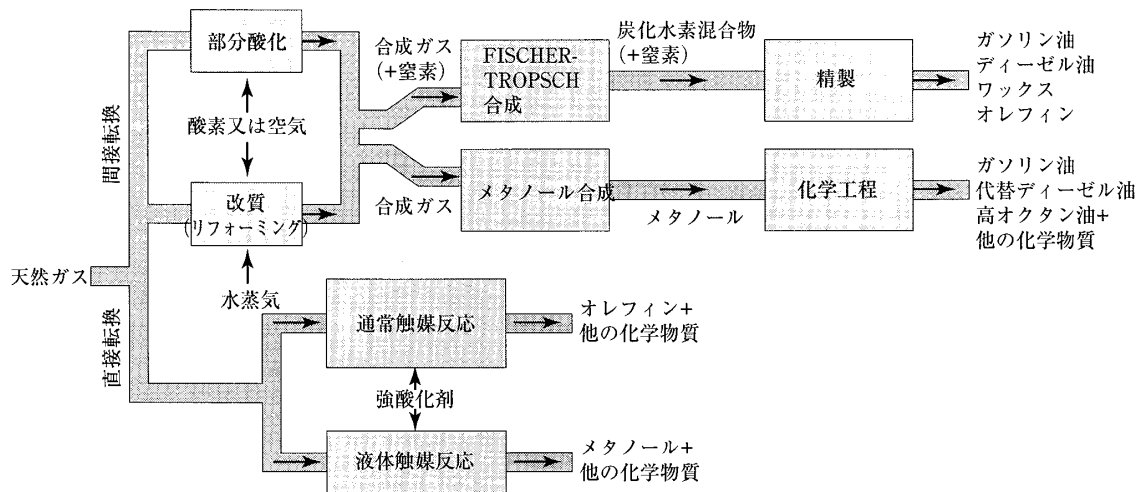
### A.3. 天然ガス転換液体燃料

ここで、Fauda の論文をもとに、今後の天然ガス経済の基本産業となると考えられる最新の転換液体燃料の製造（GTL：Gas-To-Liquids）プロセスを整理しておく（文献8）。

### A3.1. 天然ガス転換液化法

天然ガスの合成液化技術には旧くから多くの種類があり、各々の液化法多少異なるものの、いずれも小さい炭化水素分子の合成技術である点で共通している。天然ガスの主要成分はメタン (CH<sub>4</sub>)である。メタンは1つの炭素原子の廻りに4つの水素原子が整然と配列された簡単な分子である。この対称性のためにメタンは基本的に安定な化合物である。それを液体燃料に転換するには、その化学結合を切る必要がある。天然ガスの転換液化の一般的アプローチには「直説法」と「間接法」がある。これらの位置付けを図A1.に示す。

高温高压で結合を切断できる。触媒により燃焼を伴わずにこの化学反応を持続できる。天然ガスを液化する既存の技術は「間接法」と呼ばれ、高温条件に依存している。まず、高温蒸気とニッケルベースの触媒によりメタンの化学結合を切断し、一酸化炭素と水素の混合物、いわゆる「合成ガス」を生産する。このプロセスは「水蒸気改質」と呼ばれる。合成ガスからは、他にも貴重な化学製品が得られるが、目的の液体燃料生産の第2段階としては、1923年にドイツで Franz Fischer と Hans Tropsch により発明された Fischer-Tropsch 転換法を利用する。(第二次世界大戦中、ドイツは石炭と空気中酸素から作られた合成ガスより液体燃料を生産するために、この方法を利用して信頼性の高いガソリンとディーゼル内燃油製造を確立した。)



図A1. 天然ガスの転換液化法<sup>7)</sup>

天然ガスの1ステップ「直接転換法」では、特別な液体触媒として強力な酸化剤を必要とする。多段ステップの間接法では蒸気と酸素または酸素のみを追加することで、まず「合成ガス (一酸化炭素ガスと水素の混合物)」(Syntroleum社では、酸素に代わり直接空気を使うが後段のプロセスで不要な窒素を取り去る。)を製造する。2番目のステップで、合成ガスからより大きい分子が合成し(転換)、3番目のステップは様々な製品を再精製ないし、化学的に調整する。Fischer-Tropsch技術により、南アフリカ

の Sasol 社は、過去数10年、石炭由来の合成ガスより液体燃料を商業生産してきた。Sasol 社は今日でも基本的に同じ手法（合成ガスをコバルト/ニッケル/鉄触媒に噴射し転換させる）を用いて、液状の各種炭化水素を生産している。Fischer-Tropsch 反応は同時に発熱する発熱反応で、その熱でガス合成に必要な酸素圧縮機が駆動する。

反応生成液体の生成量は温度に強く依存する。たとえば、反応塔を330℃から350℃の間に維持する場合、主としてガソリンとオレフィン（プラスチックを製造に良く利用される原料）を生成する。より低温（180～250℃まで）の場合、主にディーゼル油とワックスを生成する。いずれにしても、反応生産物はこれらの混合物である。従って、反応生成物を実用的な燃料に精製するために、第3ステップと最終の第4ステップが必要である。天然ガス液化合成原油の精製は、通常の原油の精製に比べより容易である。合成原油は事実上硫黄を含まず、発ガン物質の含有も従来の石油より少ない。従って、最終生産物は有害排気がより少ない高品質燃料になる。

### A3.2. 部分酸化プロセス

高温によりガスを液化する手法は信頼性が高いが、エネルギー多消費であり高価である。従来の水蒸気改質では約30気圧までメタンと水蒸気を圧縮し、反応生成物を約900℃まで加熱する。吸熱反応を持続維持するためには、より多くの熱を追加しなければならない。この追加熱の操作プロセスは「部分酸化」と呼ばれ、少量の酸素を混合物に吹き込むことにより、メタンを追加燃焼して得られ、ガス合成量増加に寄与するので有利である。一般に、合成ガスは水蒸気改質と部分酸化の多様な組み合わせで生成される。通常このプロセスは大量の酸素を必要とする。しかるに酸素は高価である。

### A3.3. 酸素と触媒の入手性

空気から酸素を分離する既存の原理としては、ほとんどの場合冷却液化が採用される。これは、エネルギー集約的で高価な方法である。それゆえ、酸素の原価を下げるのが安価な合成ガス製造の鍵になる。この点、幸いにも最近の開発により期待される革新的酸素製造法が開発されつつある。

戦略の一つは純粋な酸素の代わり、空気を利用するものである。これの方が酸素を使う場合に比べてより安全であると言う利点もある。米国オクラホマ州 Tulsa の Synpetroleum 社は、独自の自動熱改質器（auto-thermal-reformer reactor）で空気とメタン改質して、窒素で希釈された合成ガスを生成する（第1）ステップの後に、Fischer-Tropsch 原油生成で独自の触媒を使う第2ステップを適用して、「合成原油製造法」を開発した<sup>A4</sup>。1999年7月より同社は Arco 社と共同で、米国ワシントン州 Bellingham 近郊にある Arco 社の Cherry Point Refinery で70バレル/日の GTL パイロットプラントの稼働をはじめ、2000年2月には西オーストラリア州で一万バレル/日のプラント

Sweetwater の建設予定を公表した。現在、随伴ガスを燃焼処理する油井の場合のように天然ガスが十分安いサイトでは、現在の原油価格レベルと比較しても、2000バレル／日といった小容量プラントにおいてさえこのプロセスに経済性があるとされる<sup>A5)</sup>。

現在、民間会社、大学、および政府研究所などいくつかの機関でも独自のアプローチで酸素を選択的に通過させる新しいセラミック膜により、酸素製造法を開発中である。これらの膜には空気中の酸素を精製するフィルター機能がある。工場規模では未だ問題が残り、高価であるが、実験室レベルでは原理的に問題が無い。膜は2010年までに商業的に生産可能と考えられると言われる。

この膜により、合成ガスの製造原価の約25%、生産液体燃料の原価は15%低減できると考えられる。これらの節約が生れるのは、合成ガスの反応温度を現在より約200℃低く出来るので、空気の液化が不要となるためである。安価で豊富な酸素が入手できれば、部分酸化だけで合成ガスが供給できる。このプロセスの第1ステップでは消費される熱以上に発熱する。現在カナダと米国フロリダの大学の共同研究が進んでいる最新のセラミック膜は、混合ガスから水素を除去し、メタンの部分酸化を促し、最終生産物を精製し、熱源となる純粋な水素流を提供するというものである。

合成ガス製造用触媒の重要な改善が遠からず期待できる。特に、オックスフォード大学では金属カーバイドをとりあげており、カナダ金属・エネルギー工業技術センター (Canadian Center for Mineral and Energy Technology) では大きな空隙容量のゼオライト (沸石) の利用を研究している。運転中の煤の発生反応炉を詰まらせるだけでなく、時間とともに触媒機能を低下させる原因であるので抑制機能を持つこれら両物質には大きな期待が持てる。

#### A3.4. 安価な合成油の可能性

古典的な天然ガスの液体転換法は常に改良され、進歩しているが、将来より巧妙な手法による「1段転換」が可能であろうと見られている。このアプローチにより転換コストが1/2になる可能性がある。その結果、天然ガスからの液体燃料は、事実上、原油からの精製製品に較べ、より安価であることが実証されるであろう。種々の触媒を使い、大量の酸素を添加する「直接法」は、当初、失敗した事例が多いが、一つの問題は、合成された炭化水素は原料のメタンより反応性が高いことにあった。要するに、何とかして、生成物を反応領域から分離しない限り、歩留りが低すぎ実用的でない。幸いにも、90年代の終り、この問題を回避する方法が見つかった。ポイントは、比較的低温で特殊な触媒を使って反応を促進させるか、製品を化学的に安定化するかのはずれか、または両方の条件を満たすことである。

米国ペンシルバニア州立大学では、いわゆる均質触媒 (反応生成物と同相で完全混合され、100℃以下に維持された液体) を使ってメタンのメタノール直接変換法を研究し

ている。米国カリフォルニア州 Mountain View の Catalytica 社でも、同様なプロセスを使い直接変換率70%という高歩留りが達成された。その液状触媒で比較的安定で酸化されにくい化学中間体であるメチルエステルを生成する。最終生産物としてメタノール派生物質が最後のステップ1段で容易に生成する。メタノールはすぐにガソリンまたはオクタン価向上添加物に変換できるので貴重である。遠からずメタノールは直接、又は、水素ガス転換後、幅広く大規模の電力用燃料電池燃料に使われ、乗用車用にも利用できる。したがって、燃料前駆物質としての価値がある。事実、メタノール合成反応により、燃焼に伴い発生する除去の困難な汚染物質がずっと少ないジメチルエーテルなど代替ディーゼル油が製造できる。しかし、最近、米国ペンシルベニア州 Allentown のガス供給会社 Air Products 社は室温条件で液状のジメチルエーテル誘導体の生産を発表した。これまでに、ジメチルエーテル（ガス）は、プロパンのように室温と常圧で自動車燃料としてほとんど使用出来なかったが、公害ガス排出削減ができる代替ディーゼル油になり、既存の車と燃料供給ステーションの大規模変更が不必要である。

#### 参考文献

- 1) 若林宏明, 安価な石油に依存する文明の終焉—縮小する世界の原油生産—, 流通経済大学流通情報学部紀要, Vol.5, No.2,2001.3, pp.149-181.
- 2) C. J. Campbell and J. H. Laherrere, The End of Cheap Oil, Scientific American, March1998, p.65.
- 3) R.C. Duncan, Heuristic Oil Forecasting Method, (<http://www.halcyon.com/duncanrc/text.htm>, 2000)
- 4) P. Hawken, A. B. Lovins, and L H. Lovins, Natural Capitalism, Little Brown, New York,1999, x-xi.
- 5) 千葉三樹男, トヨタ環境経営—ゼロエミッションへの挑戦—, かんき出版, 2001.
- 6) 小山茂樹, 石油は何時なくなるのか, 時事通信社, 1998, p.243.
- 7) メタンハイドレード: 採掘コスト課題 輸送・貯蔵革新狙う, 2001年3月4日「朝日」.
- 8) Safaa A. Fouada, Liquid Fuels from Natural Gas, Scientific American March1998, pp.74-77.
- 9) 既出8), p.75.
- 10) 既出8), p.77.
- 11) J.J. Romm, Trigen Energy Corporation, Book of "Cool Companies", Island Press, pp.121-123, 1999.
- 12) 燃料電池車熱意に濃淡, 2001年4月6日付「朝日」.
- 13) R. C. Duncan([duncanrc@halcyon.com](mailto:duncanrc@halcyon.com))私信, 2001年3月28日, 添付書類 (the BP files for world natural gas consumption, production, reserves, and trade : 1960-1996.
- 14) <http://www.bp.com/downloads/downloads/index.asp>, Natural gas consumption (million

tonnes oil equivalent).

- 15) 既出 6 ) p.222.
- 16) 既出14), Trade movements1999by pipeline.
- 17) 既出14), Trade movements1999by LNG.
- 18) 既出14), Natural gas proved reserves individual worksheet.
- 19) 既出13), NATURAL GAS PRODUCTION (Billion cubic metres) より作成.
- 20) 既出14), Natural gas production (million tonnes oil equivalent).
- 21) Energy Information Administration(EIA), Form EIA-860B,“Annual Electricity Generation Report-Nonutility;” EIA, Annual Energy Review1999, DOE/EIA-0384(99) (Washington, DC, July2000); and Edison Electric Institute.
- 22) 既出13), NATURAL GAS CONSUMPTION (Billion cubic metres) より作成.
- 23) Richard C. Duncan, 私信, 2001年 3 月 6 日付, THE OLDUVAI CLIFF EVENT: ca.2007, 関連する公表論文は, *Duncan, R.C., World energy production, population growth, and the road to the Olduvai Gorge. Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, Vol.22, No.5, May 2001, pp.503-522. 尚, 本私信で引用された最新のエコノミストの意見の一次文献は以下の通りである.  
*Baker, G., Mexico's natural gas pricing crisis: Will confrontation lead to policy liberalization? O&GJ*, 1-22-01, pp.18-25.,2001.  
*Barbosa, F., Pemex targets major increase in natural gas production to meet soaring domestic demand. O&GJ*, 1-22-01, pp.70-74,2001.  
*Crow, P., US oil and gas industry has high expectations from Bush administration on energy issues. O&GJ*, 2-12-01, pp.66-77,2001.  
*Parent, L., Natural Gas: There's work to be done to meet increasing demand. World Oil, February*, pp.94-98,2001.  
*Radler, M., More gas for Mexico. O&GJ*, 1-29-01, p.17,2001a.  
*Radler, M., US demand growth in 2001 to respond to slowing economy. O&GJ*, 1-29-01, pp.66-78,2001b.  
*Rouffignac A. de., California power crisis energy policy flashpoint for Bush. O&GJ*, 2-12-01, pp.70-71,2001.  
*True, W. R., Major gas projects fuel surge in long-term plans. O&GJ*, 2-5-01, pp.61-68, 2001.
- 24) Daniel Fisher,天然ガス供給の落とし穴, Forbes(日本版), May, 2001, p.80.
- 25) 米, 原発推進に転換, 石油・ガスも増産, 2001年 5 月17 「朝日」.
- 26) 米電力大手新型原発申請へ, 2001年 5 月18日, 「朝日」.
- 27) サウジ天然ガス開発をメジャーに開放, 2001年 5 月20日, 「朝日」.

- 28) 対メキシコ自由貿易協定研究会, 2001年6月6日, 「朝日」
- 29) 若林宏明, 21世紀の科学技術は人間を救えるか? - 社会の僕 (しもべ) としての21世紀科学技術一, 流通経済大学流通情報学部紀要, Vol.4, No.2,2000.3, pp.139-147.
- 30) 既出6), p.224.
- 31) Dinty Miller et al. Sakhalin Oil and Gas Status and Prospect, Oct., 1998, <http://russia.shaps.hawaii.edu/energy/sakhalinog981001.html>.
- 32) サハリン沖油田, 日本向け原油初の輸出, 2001年5月31日, 「朝日」
- A1.) 茅陽一他編: 天然ガス, 地球環境工学ハンドブック, オーム社, pp.192-193, 1993.
- A2.) 松井賢一, 新エネルギーデータの読み方使い方, pp.16-17,45,電力新報社, 1994.
- A3.) 化石資源の消費に伴う二酸化炭素排出の抑制, 天然ガスへの移行, 既出A1), pp.497-498.
- A4.) [http://www.syntroleum.com/sp1\\_gs.htm](http://www.syntroleum.com/sp1_gs.htm)
- A5.) <http://www.syntroleum.com/about.htm>