講 演

未来エネルギーへのかけ橋—天然ガス—*

森 島 宏**

(Received July 8, 1999: accepted July 16, 1999)

Natural gas bridging to the future energy

Hiroshi Morishima

Abstract: Historical shifts of the four main energy resources—from wood, to coal, to petroleum, and to natural gas—have been investigated from the viewpoints of technology, energy efficiency and environment. It is concluded that the driving force for the energy shifts is desire of human beings to get resources with higher thermal value, or higher hydrogen content, and that technology is a tool or measure—rather than restriction—by which human beings pursue that desire. Having the highest hydrogen to carbon ratio and the lowest carbon to hydrogen ratio, natural gas is stated as the ultimate energy resources, both in terms of energy efficiency and in the environmental issues.

The role of natural gas in the 21st century has been examined from four viewpoints: resources and reserves, global warming, energy efficiency, and transportation and delivery. It is concluded that the ultimate recoverable reserves of natural gas will probably be increased and meet the world demand for energy in the next century. The effects of natural gas in reducing CO₂ are stressed together with the importance of carbon sequestration to stabilize the emission of global warming gases. The efficiency, present state and future outlook are demonstrated by various gas utilizing technologies, such as cascade use of energy in combined cycle power generation and co-generation, natural gas vehicles, fuel cells, and combination technology with other types of energy. The importance of constructing world gas supply networks is emphasized in order that as many people as possible can enjoy the merits of natural gas.

It is proposed that hydrogen will be an ideal and ultimate energy in the 22nd century and beyond, providing the highest energy efficiency and absolutely no environmental damage, and that natural gas, which has the lowest CO₂ emission, is a reasonable bridge to it as the most economic source, reservoir and carrier of hydrogen.

Key words: energy shifts, natural gas, gas reserves and resources, unconventional natural gas, global warming, carbon sequestration, energy efficiency, energy cascade, gas technology, gas supply network, future energy system, hydrogen gas

1. 序 言

* 平成11年 5 月25日, 平成11年度石油技術協会春季講演会の特別講演 This special lecture was delivered at the 1999 JAPT Annual Meeting held in Makuhari, Chiba, Japan, May 25, 1999.

** 第22回世界ガス会議東京大会組織委員会 The National Organizing Committee of the 22nd World Gas Conference Tokyo 2003

2003年に東京において開かれる第22回世界ガス会議は、日本そしてアジアで初めて開催されるとともに、世界のガス産業関係者が21世紀になって初めて一堂に会する場ともなる。この会議に携わるにあたり、来るべき21世紀とその先の未来のエネルギーの在り方につき、個人の立場から、中長期的観点に立った展望を試みたい。

人類は、その歴史の中で、木材から始まって、石炭、石油、そして天然ガスに至る主要な4種のエネルギー資源を用いてきた。その利用の変遷と要因を振り返ることによって、人類がエネルギー資源に何を求めてきたかを明らかにし、さらに未来のエネルギーに求められるものは何かを論じたい。そして天然ガスが21世紀のエネルギー資源の主役となりうるかを検証し、最後にその先の未来エネルギー像とそれへのかけ橋としての天然ガスの位置づけを考察したい。

2. 人類はどんなエネルギー資源を使ってきたか

2.1 人類によるエネルギー資源利用の変遷

人類の最初のエネルギー資源の用途は、火をたくことであった。火は暖房に、照明に、食物の調理に、道具の加工に、あるいは野獣に対する防御に、さまざまな面で人類を助け、本来生物学的には弱い人間があらゆる環境に適応することを可能にした。火の使用こそが人類を生態系の頂点に、万物の霊長になることを可能にした人類史上最も重要な出来事の1つであるといえよう。

(1) 木材

木材は最も身近な資源であり、人類が火を使い始めたときからの燃料であった。木材を含むバイオマスは基本的に再生可能であり、原始時代から古代、中世を通じて人類社会発展のエネルギー消費を支えてきた。近代に至るまでは、エネルギー消費は基本的に木材の供給可能な範囲で行われ、自然と調和したエネルギー経済システムが成り立っていた。

(2) 石炭

木材に比し格段に高い熱量を持つ石炭は、産業革命の進行と、エネルギー消費の急増とともに、19世紀の半ば、木材に替わって燃料の主役となった。19世紀になると乾留によるガス、コークス、コールタールなどの各成分の分離と、それらを原料とする石炭化学も発展し、現代の化学工学の基礎を形成した。石炭は木材と異なり再生可能な資源ではないが、その埋蔵量が膨大であることから、資源量の限界が意識されることなく、採掘利用されてきた。

(3) 石油

石油は20世紀の現代文明の発展をもたらした資源エネルギーである。産業として出発したのは、19世紀の後半、米国のドレークによる石油井の掘削であった。当初は、燃料ではなく、照明のための灯油の原料を得ることが目的であったことは、よく知られている。石油からの灯油は良質の明かりを求める人々に歓迎され、石油産業は短時間のうちに米国だけに限らず世界各地にも広がった。照明の主役はその後電気へと移ったが、石油の用途

は19世紀末からガソリン、軽油など、動力機関の燃料用原料へと拡大していった。また20世紀になってからは、石油を原料とする石油化学も発展した。石油は石炭に比して環境に与える汚染が少なく、産業革命以来発展した都市生活に必要な発電、暖房用のエネルギー源として使用された。交通機関の燃料としても、固体の石炭に比して圧倒的な利便性、エネルギー効率を有した。こうして石油は、1960年代に石炭を抜いてエネルギー資源の第1位に躍り出た。急激な石油の需要増は、1970年代には2度の石油危機を引き起こした。

(4) 天然ガス

天然ガスの大規模な利用は、米国では第2次世界大戦前から、そして欧州、ロシアでは戦後になってから本格的に始まった。発熱量が高くエネルギー効率のよい天然ガスの需要は急速に増大した。1960年代からは液化天然ガス(LNG)の海上輸送によって、近隣に大規模ガス田を持たない日本などの国においても大規模利用が進むこととなった。メタンを主成分とする天然ガスは、地球環境に優しい資源エネルギーとしても評価されてきた。欧米、ロシアでは、天然ガスはすでに一次エネルギーにおいて石油と同等あるいは石油以上の比率を占めている。全世界ではまだその比率は石油および石炭に次いで第3位であるが、今後急速に増大し、21世紀におけるエネルギーの主役になるものと期待されている。

2.2 エネルギー利用の変遷を左右した技術力の発展

(1) 採取技術

人類社会の発展の初期、技術が不十分な時代においては、地上資源である木材のみが採取可能な資源であった。

地下資源である石炭は木材と同じく固体であり、採取を除いて基本的には木材に関する技術が生かされた。当初は露頭からの採取であったが、採炭深度が増すにつれて坑道掘となり、掘削、排水、換気、運搬、各種探査技術など各分野に高度の技術を必要とするようになった。これらの条件が整ってきた18世紀になって大量採掘が可能となり、19世紀後半には石炭は木材を抜いてエネルギー資源の主役になることができた。

地下資源の中でも、流体である石油、ガスの発見、生産には、より高度の技術を要し、19世紀から20世紀にかけての石油地質学および油層工学の発展とともに、発見量、生産量が増大していった。

(2) 利用技術

人類によるエネルギー資源の最初の利用は、火をおこすことであった。他の動物が恐れる火を制御する技術を獲得したときから、人類は生物としての限界を大きく超え、活動能力、環境適用範囲を広げはじめた。アフリカ

で発生した人類が、環境の異なるアジア、ヨーロッパへと移動し始めた時期も、火を使い始めた今から約100万年前であるといわれる。

火による照明もまた、人類にとって重要な用途であった。人類の照明に対する欲求は極めて強力なものであり、各種の照明材料を求める努力が続けられた。産業革命後、急速に社会、経済活動が発展すると、欧米では鯨油が求められ、19世紀には欧米の捕鯨船が世界各地へ進出し、これが米国の日本開国要求の直接のきっかけともなった。さらに、石油産業の発端となった19世紀半ばの米国におけるドレークによる石油開発1号井の掘削も、また灯油の原料となる原油の採取を目的としたものであった。石炭ガスによる照明も、電気照明が普及するまで灯油と並ぶ重要な照明であった。

技術の進歩とともにエネルギー資源は、化学製品の原材料としても用いられるようになった。19世紀に始まった石炭の乾留に始まる石炭化学、20世紀に発展した石油の精留による石油化学の発展に引き続き、現在は天然ガスの主成分メタンを出発点としたいわゆる C_1 化学が発展している。

技術の進歩はまたエネルギー効率の最大限の発揮を目指して進んできた。石炭を熱源とする蒸気機関に始まった効率追求は、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、あるいは各種タービンの開発と改良を通じて現在も行われている。最近のエネルギー効率向上のための研究開発の対象は、電気化学の原理に基づく燃料電池である。

個々の熱機関の効率向上と同時に、コンバインドサイクル、コージェネレーションシステムなど、システムを複合化することによって全体としての効率高度化を図る努力も進められている。その際、効率向上のための熱力学的に重要なファクターは燃焼温度である。最初の機関で仕事をした後、高温の排ガスは次のシステムでも十分な仕事をする能力を有し、順次その熱を使い切るまで何段階もの仕事をするいわゆる「熱のカスケード利用」が可能とする。

(3) 輸送技術

産業、経済が発達すると、資源も重要な商品として輸送されるようになった。固体の木材や石炭の場合には特に大きな困難はなかったが、液体の石油となると特別の容器が必要となり、石油産業の初期には木製の樽が用いられ、その名残がよく知られている石油の単位バーレル(bbl)である。その後、さらに大量の石油輸送のために陸上ではパイプライン、海上ではタンカーによる輸送技術が発展した。

これに対して、天然ガスは常温で気体でありエネルギ

-密度も低いことから、その輸送にはさらに技術的、経済的困難が伴った。20世紀になって国内および近隣に大規模なガス田が発見された欧米では、このガスを利用するためのパイプラインの布設が進んだ。米国では第2次大戦前に、欧州、ロシアでは1950年代以降にパイプライン網の整備が行われて、天然ガス時代を迎えた。しかしパイプラインが布設できない場合は、天然ガスを有効に活用する方法はなかった。極低温における天然ガスの液化、輸送、貯蔵による利用システム(LNGチェーン)は、低温熱力学の発展および優れた断熱材料の開発に基づき、1960年代に実用化された。これによって天然ガスの遠距離海上輸送が可能となり、1970年代から島国である日本における天然ガスの大規模利用も始まった。

現在でも天然ガス利用上の最大の障害の1つは輸送である。そこで、より経済的な天然ガスの輸送および貯蔵方法として、化学的に液化したり、水との包接物であるメタンハイドレート化するシステムの研究開発が引き続き行われている。

(4) 貯蔵技術

燃料の需要には、季節的、時間的増減が大きい。固体の木材や石炭の場合、貯蔵は最も容易であり、液体の石油の場合がこれに次ぐ。石油の貯蔵は通常タンクによって行われている。2度の石油危機の後、各工業国はいずれも消費数か月分の大量の備蓄を行うようになり、岩塩ドームや岩盤貯蔵などの地下貯蔵も行われている。常温で気体である天然ガスの貯蔵には、さらに技術的、経済的困難が伴う。欧米のガス利用国では、需要における大きな季節変動を吸収し、パイプラインに関する設備投資を最小にするため、主として枯渇油ガス田を利用した大規模な地下貯蔵が行われている。その量は年間使用量の20%から40%にも上っている。一方、ガスの輸入をLNGで行っている日本においては、貯蔵用LNGタンクの建設にはばく大な費用がかかるので、欧米のような大量の貯蔵施設は持たず、定期的なLNG船の運航に依存している。

3. 人類はエネルギーに何を求めたか—人類の発展にとってのエネルギー資源の役割

3.1 人類がエネルギーに求めたもの—高カロリー化

エネルギー資源の価値は、何よりもまずどれだけ仕事をする能力(ポテンシャルエネルギー)があるかで計られる。燃料資源の場合は燃焼するときに発生する熱量がその尺度となる。

燃料資源の歴史的動きを発熱量によってたどってみると、以下のとおりである。

木 材 1,500—2,000 kcal/kg

石炭	5,000—8,000kcal/kg
石油	9,000—11,000kcal/kg
天然ガス	13,000kcal/kg

これを見ると、人類は燃料資源として単位当たりのより高い熱量、高カロリー化を追求してきたことが示される。この中では、特に木材から石炭への移行時の熱量ギャップが極めて大きく、これが火の利用に勝るとも劣らない産業革命と呼ばれる人類史の大変化をもたらした理由であることがわかる。

物質の発熱量はほぼ成分元素の燃焼熱の和に等しい。主要成分の発熱量は、水素分子が約 34,000 kcal/kg、炭素が 7,800 kcal/kg となり、水素含量の多い炭化水素ほど発熱量が大きくなる。上記燃料の元素組成を見ると、水素対炭素元素比は木材の 1/10 から、石炭 1/1、石油 2/1、そして天然ガスの 4/1 へと増加している。

このように燃料資源のたどってきた高エネルギー化への道は、化学構造的に言うところ高水素化への道であったことが示される。そしてメタン以上に水素比率の高い天然資源がないことから、天然ガスは究極の高エネルギー資源であると言える。

3.2 環境性—エネルギーに求められるもう 1 つの条件

3.2.1 人類をはぐくんだ地球の自然条件

真空の宇宙に浮かぶ地球の表面温度は、太陽からのエネルギーの入射と地表からの放射という 2 つの流れの平衡によって決定される。これに加えて地球を取り巻く大気圏中の炭酸ガスや水蒸気などのガスによる温室効果が存在し、大気成分による対流などのために温度勾配が生じる。これらの結果として、地表の平均温度は 15℃ を保つこととなり、地表の大部分では水は液体として、かつ海として存在することとなった。地球が水の惑星と呼ばれるゆえんである。

多くの元素や単純な分子を溶かし込んだ原始の海中は、宇宙からの放射線や紫外線が適度に和らげられ、生命の誕生と進化の舞台となったと考えられている。原始の海で誕生した生物は、やがて大量の酸素を大気中へ排出し、成層圏はオゾン層によって覆われることとなった。これにより、太陽からの紫外線の大部分がさえぎられ、生物は陸上へも進出することとなり、陸上と海上に広がる地球生態系が成立した。その後も環境条件は幾度も変遷し、その中で適応した生物群が生き残って今日の生態系を形作っているのである。約 300 万年前に現れた人類もまた自然の一部であり、生態系の一部であった。

3.2.2 人類による地球環境の破壊

(1) 原始時代から中世まで

約 200 万年以前から人類は道具などを用いることなど

により、生態学的な位置を超えて動物、植物を含めた自然界の秩序を破壊し始めた。資源エネルギーの利用による環境の悪化は、古代においても存在した。エネルギー資源として木材を主として使用していた時代、人口が集中した古代都市においては、その使用量が木材の生成の速さを上回り、周辺森林が消失したケースも見られる。しかし、産業革命が始まるまでは、基本的にはエネルギーの利用量は主要な資源である森林の再生速度と釣り合っており、地球規模ではいわゆる持続可能なシステムであった。

(2) 産業革命以降の環境汚染

産業革命において主要エネルギー資源は、木材に比して数倍のカロリーを持つ石炭に移行し、かつ利用量が急速に増加した。このため、石炭の利用が集中する大都市や工業都市では、亜硫酸ガス、油煙、煤煙などの発生による大気汚染が進行し、深刻な公害問題が発生した。急速な人口増加に伴う土地利用形態の変化は、地球規模で森林を始めとする生態系を破壊していった。大都市の公害問題は、20 世紀になって石油、天然ガスが新たなエネルギー源として登場し、また電化が進んで石炭の果たしている役割に取って代わるまで、基本的には解決されなかった。石炭は 20 世紀の後半になって、石油にエネルギー資源の首位を奪われたが、それはエネルギー価格、使い勝手、環境負荷などの総合的な経済的、技術的、社会的評価によるものであり、資源の枯渇あるいは供給力の減少によるものではなかった。

石炭に取って代わった石油もまた、その燃焼排気ガスによって環境汚染をもたらすこととなった。エネルギー効率の高さ、利便性などのため、石油の使用量は加速度的に上昇し、交通機関などを中心とした石油の使用による排気ガスは、 SO_x 、 NO_x の発生、酸性雨の発生など、大都市のみならず広域な、場合によっては国境を越えた環境汚染を引き起こし、深刻な社会問題をもたらした。このため、各国は公害対策に乗り出し、いくつかの工業先進国では、ようやく環境汚染の進行をくい止めつつあるところである。

第 2 次大戦後の欧米における天然ガスの大規模利用は、環境上からも望ましいものであった。日本においても、1970 年代から LNG の輸入による天然ガスの大規模利用が開始されたが、これには大気汚染公害への対策、環境対策上の目的も含まれていた。天然ガスは主成分がメタンであり、イオウ分が含まれていないため、燃焼しても SO_x を排出しない。また、当然のことながら重金属や高分子の発ガン性の化合物も含んでいないので、それらを排出しない。 NO_x の発生についても、もともと窒素原子を含んでいないので少ないうえ、燃焼条件を選

べばほとんどゼロにすることが可能である。

(3) 地球温暖化現象

産業革命以来の人類活動の影響は、生物界のみならず、地球上の水質、土壌、大気圏の下部から上部の成層圏のガス組成に至るまで、自然界のあらゆる面に広がってきている。現在に近づくほどその速度は増し、自然の修復能力が追いつかないおそれが出てきた。近年の資源エネルギーのあまりにも急速な消費に対し、発生する炭酸ガスの植物による固定などが追いつかず、大気中の濃度が増大している（図1）。そのため大気温度が上昇し、海水面の上昇や気候の変動を引き起こすおそれが指摘されている。

炭酸ガスの排出は、燃焼に際して組成中の炭素が酸素と反応することによって生じる。したがって、炭素の比率が少ないほど炭酸ガスの排出は少ない。水素に対する炭素の比率をみると、木材 10/1、石炭 1/1、石油 1/2 に対し、天然ガスは極めて低く（1/4）、化学構造的には炭素比率減少の方向であったということが示される。自然界にはメタンよりも水素に対する炭素の比率の低い炭化水素は存在しないという意味で、天然ガスは環境面から

も究極のエネルギー資源であると言えよう。

3.3 究極の資源エネルギー

人類はエネルギーに対し、一方で高カロリー、他方で環境性を追求してきた。それらは、化学的には一方は高水素化、他方は低炭素化であるが、それらがたまたまメタンという1つの分子によって実現されたことになる。自然界においてそれは天然ガスであり、その意味で天然ガスは究極の資源エネルギーと言えよう。

歴史の各時点で、人類は利用できる技術力に応じて資源を選択し、その資源の持つ化学的、物理的なポテンシャルをできる限り利用しようと努力してきたとみることもできる。しかしながら、その根本にあるのは、より高い価値のあるエネルギーを求めるという人類の飽くなく欲求であり、技術力はそれに対する制約ではなく、それを実現するための手段であったと言えるのではなからうか。

今後の人類の発展を展望するとき、人類が何を望むのか、何に価値を置くのか、どのようなエネルギー、あるいはそれを利用する社会経済体制を望むのが最も重要なファクターであると考えられる。なぜなら、歴史が示す

図1 地球上の炭酸ガスの循環

1990年代前半の年平均値、単位炭素トン。毎年、人間活動（化石燃料の消費と森林破壊など）による炭酸ガス排出量のうち、約半分の35億炭素トンが大気中に蓄積する（U. S. Department of Energy, 1999に基づく）。

ように、人類はどのような困難があろうとも、価値のあるものを獲得するためにはあらゆる努力を惜しまないであろうし、その困難を解決する技術の開発を決してあきらめないであろうと考えられるからである。

4. 21世紀における天然ガスの役割

本章では、21世紀において天然ガスが期待される役割を果たすことができるかどうかについて、資源量、環境性、エネルギー効率、供給体制の4方向から考察する。

4.1 天然ガスの究極可採資源量の増加は期待できる

石油鉱業連盟のスタディ報告(1997)によると、天然ガスの可採年数として、残存確認可採埋蔵量を約4,800兆 ft^3 として約49年分、未発見回収潜在量を約4,600兆 ft^3 として約46年分、あわせて残存究極可採資源量を約9,400兆 ft^3 として約95年分としている。原油の場合は、確認約9,200億 bbl の約41年と、未発見約4,000億 bbl の約18年、あわせて残存究極可採資源量約1兆3,200億 bbl の約59年になっており、天然ガスのほうが35年以上多い。熱量換算でも天然ガスの残存可採究極資源量は原油換算約1兆5,700億 bbl となり、原油の場合より約2,500億 bbl 多い。

天然ガスが石油の次のエネルギー資源の主役となるには、今後ともさらに十分な資源量が発見される必要があると思われるが、その可能性については以下の点からかなり高いと考える。

(1) 探鉱の成熟度

確認埋蔵量の数字については、従来の探鉱開発活動に基づくもので不確定要素は少ない。問題は未発見資源量中から将来発見され、回収可能と期待される可採埋蔵量であり、この見積もりの精度については、探鉱活動の成熟度に反比例して不確定な要素が大きくなると考えられる。

天然ガスの未発見回収潜在量は究極資源量の約40%とされ、原油の場合の約20%に比べれば、今後の探鉱に待つ部分が多い。また、天然ガスの場合、既生産量も既発見資源量の約31%、究極資源量の約19%でしかなく、原油の既生産量が既発見資源量の45%、究極資源量の36%であるのに比べて少ない。このように、天然ガスの探鉱生産活動は、まだ原油ほど成熟していないと言えよう。

原油の発見量のカーブは1920年代に立ち上がり、1960年前後を頂点として1970年代まで続く幅広いピークを持つが、1980年代からは次第に減少している。一方、天然ガスの発見量は1940年代から急増し、1970年台に高いピークをもち、その後減少しているが80年代以降も一定のレベルを維持している。このトレンドからも、天然ガスの探鉱は原油ほど成熟していないと言えよう。

これら原油、天然ガスの発見量の推移を見ると、超巨大フィールドの発見に依存していることがわかる。原油の場合、地球上には可採埋蔵量50億 bbl 以上の超巨大油田は47油田あるが、上位20位には60年代以降の発見がない。さらに、70年代に21位、22位、39位、41位の4油田が発見された後は、80年代、90年代とも超巨大油田は1油田も発見されていない。一方、天然ガスの場合、埋蔵量30兆 ft^3 以上の超巨大ガス田は34フィールドであるが、70年代にはこのうち1位を含む10フィールドもの発見があった。その後の発見は、80年代には1ガス田、90年代には2ガス田と減少したが、それでも90年代の発見ガス田のうち1つは第9位である。このような結果から見ても、天然ガスの探鉱は原油の場合ほど成熟しておらず、20年ほどの遅れがあると言えよう。

なお、未発見潜在回収量の不確実性を反映するため、Masters たち(1994)はこれを単一の数字でなく確率分布で報告している。この考えそのものは合理的なものであると思われるが、その分布曲線には問題があるのではないかと考える。それは天然ガスも原油も、その分布曲線で最頻度値(モード値)を100とすると、少ない回収量の5%期待値を62、多い場合の5%期待値を123とどちらも同じとしていることである。これは、探鉱開発の熟成度を無視した機械的な分布の与え方であり、原油より情報が少ない天然ガスのほうには、当然、不確実性を考慮したより幅広い分布を与えるべきであろう。

(2) 石油システム

石油システムから天然ガスの追加発見が期待される理由の1つは、天然ガス鉱床の深度である。鉱床形成上、天然ガスの賦存深度は原油より大きいとされ、例えば Hunt の教科書(1995)によれば、地温勾配 $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ の地域においては、API 50 度以下の通常の原油の下限深度は約4,600mであり、4,600mから5,800mでは軽質油、コンデンセート、ウェットガスとなり、5,800m以深ではドライガスが主となる。従来の探鉱深度では主要なガス賦存層の多くは未探鉱であり、今後の探鉱活動の深部化によって、ガス鉱床発見の可能性は増大すると考えるのが妥当であろう。

次に述べるメタンハイドレートとの関連で注目されるのは、その下部の遊離ガスの集積である。きわめて移動しやすいガスを封じ込めるには、シール性能のよい帽岩が必要である。その順位は、ガスハイドレート、蒸発岩、低浸透率かつ低孔隙率の頁岩となっている。世界の超巨大ガス田の多くはロシアおよび中東に分布するが、ロシアの場合はハイドレートを伴う永久凍土が、中東の場合は蒸発岩がそれぞれ帽岩となることが多いとされる。今後の天然ガスの探鉱対象として、極地あるいは深

海のハイドレートを帽岩とする鉱床がターゲットとして考えられる。

(3) 非在来型天然ガス

種々の非在来型天然ガスの中には、存在が実証され、あるいはすでにある程度の生産実績があり、将来の技術進歩、経済社会条件などの変化によっては、中長期的に天然ガスのソースとして期待できるものが相当量存在している。

タイトサンドガス、コールベッドメタン、シェールガスの3種類のガスは、すでに米国において生産実績を上げており、1994年の年産量は合計3.6兆 ft^3 となり、全米生産量の20%に上っている。これら3種類のガスの原始鉱量は全世界で約10,000兆 ft^3 を超えると推定される。究極可採鉱量は、米国のタイトサンドの場合、原始鉱量1,200兆 ft^3 に対し622兆 ft^3 と50%以上の回収が可能との推定が行われている。仮に3種類のガスの回収率がともに50%とすると、究極可採鉱量は5,000兆 ft^3 以上となる。

上記3種以外に、米国においては地圧水溶性ガスの存在が報告され、原始鉱量として5,700兆 ft^3 というばくだいな量が推定されているが、現在の技術と経済条件では商業化は困難として、可採埋蔵量の算定は行われていない。また、同ガスについては、ロシアから旧ソ連地域の原始鉱量としてさらにばくだいな86,000兆 ft^3 という値が報告されている。

一時話題となった地球深層ガスは存在が証明されておらず、検討の対象から外すべきであろう。

現在最も注目を集めているメタンハイドレートは、存在が証明されており、原始鉱量として700,000兆 ft^3 とのばくだいな推定値も報告されている。しかし、商業化のための技術的、経済的検討は緒に就いたばかりであり、可採鉱量について論じるのは時期尚早で、今後の調査に期待されるところである。

ここに述べた地球深層ガス以外の非在来型ガスは存在が証明されているので、21世紀になって技術がさらに進歩し、また経済社会条件の展開によっては、在来ガスに匹敵する程度の回収は期待できよう。

以上みてきたように、天然ガスの資源量については探鉱の成熟度からも、石油システムからも、現時点の確認埋蔵量に加えて、未発見回収量からの相当量の埋蔵量の追加が今後期待され、かつ非在来型天然ガスからの回収量も期待されることから、たとえ相当量の需要増を見込んだとしても、少なくとも今後100年間は量的制約の問題は生じないと考える。

4.2 環境性

日本エネルギー学会の最近のテキスト(1999)によれ

ば、各種燃料のライフサイクル分析の結果、温室効果ガスの放出レベルは、石炭 100、石油 73、LPG 70 に対し、LNG は60という低い値であることが示されている。また、天然ガスコージェネレーションと従来システム(石油火力発電+A 重油ボイラー)を比較すると、同じ電力1kWh および熱1.7Mcalを得る場合に、炭素排出量を従来の346g から222g に35%も減少させることができると算定される。

このように、天然ガスは他の資源に対して環境性が優れているとはいえ、やはり炭酸ガスを排出することには変わりはない。したがって、天然ガスの採取から燃焼に至る全サイクルにおける完全な排出ガス管理、および排出された炭酸ガスの経済的隔離技術(捕集、転用、長期保存)の開発に取り組む必要がある。

炭酸ガスの隔離の主要な方法は、化学的処理、物理的処理、そして生物学的処理である。化学的処理としては、カルシウムとの炭酸塩などを作り建材などに利用する方法、物理的処理としては膜などで濃縮した後、地層に圧入する方法、液体炭酸ガスやハイドレートにして深海に沈める方法、生物学的処理としては植物に光合成で吸収させる方法などがある。どの方法が有効であるかは、炭酸ガスの発生する状況によるが、今後天然ガスの利用にあたっては、炭酸ガスの処理のしやすさについての技術的、経済的検討を併せて行っていく必要がある。

炭酸ガスの隔離は、省エネルギー・燃料転換とならんで、炭酸ガス削減のための重要な手段となる。

4.3 エネルギー効率

天然ガスの高いエネルギー効率は、水素組成が高く、発熱量、燃焼温度ともに極めて高いので、いわゆるエネルギーのカスケード利用に最適であることから生じる。これを活用するための種々の技術の現状と課題は以下のとおりである。ガス利用技術の開発は今後ますます活発化すると考えられ、天然ガスの利用価値も一層増大すると期待される。

(1) コンバインドサイクル発電

まず天然ガスを燃焼させてガスタービンエンジンを回し、次にその高温排気ガスにより蒸気タービンを回し、両者あわせて高い発電効率を得るシステムである。したがって、タービン燃焼温度が高いほど熱効率が向上する。我が国では、LNG 発電によるコンバインドサイクル発電プラントは1980年代から各電力会社によって導入された。燃焼温度は初期のプラントでは1,100℃であったが、その後1,300℃に引き上げられ、これに従い熱効率も43%から48%に上昇している。現在開発中のものは、さらに燃焼温度1,500℃、熱効率53%を目指している。高い燃焼温度が得られる天然ガスの特性を生かした

エネルギーのカスケード利用の代表的な例である。

(2) コージェネレーション

1つのエネルギー源から、複数のエネルギー形態を取り出すことを言い、通常は熱と電気を取り出す。ガスエンジン、あるいはガスタービンで発電機を回して発電するとともに、排気ガスや冷却水の廃熱を温水または蒸気として回収し、冷房、給湯、暖房に利用することによって、高い総合エネルギー効率を得るシステムとなる。我が国では、一次エネルギーの有効利用度は平均約34%に過ぎないのに対し、ガスコージェネレーションでは70%から80%の高い総合効率が実現されている。ガスコージェネレーションの普及は、省エネルギーおよび環境対策上最も有力な方法の1つであると考えられている。

(3) ガス空調

ガス空調は、今後の天然ガスの最終利用形態の中で最も増加が多いと予想されている分野である。フロンを用いない吸収式冷温水機ガス冷房は、オゾン層保護とともに地球温暖化の防止にも役立っている。排ガスからの熱回収、溶液熱交換器の効率向上など、高効率化に関する技術開発も着実に進み、ガス冷温水機の省エネルギーは1970年代からの20年間に、大型機で32%、中小型機で53%を達成している。ガス冷房は冷熱量で我が国の全冷房の10%をまかなうようになったが、これは電力にして400万 kWh を超え、発電所4か所分に相当する。今後ともガス冷房の増加は、ガス需要の季節変動の平準化、夏期の電力ピークの緩和、石油代替エネルギーの推進にも大きな役割を果たすものと期待される。

(4) 未利用エネルギーの活用と他のエネルギーとの併用

都市ゴミ焼却余熱、下水処理温排水、河川水、海水の熱など、未利用のエネルギーは多い。例えば、東京首都圏の年間未利用エネルギーは、790兆 kcal となり、原油換算では5億2,500万 bbl/年、140万 bbl/日というばく大な量となる。このエネルギーを都市ガス燃焼と効率的に結び付ける地域給湯および冷暖房、スーパーゴミ発電などのさまざまな展開が進んでいる。

天然ガスは単独で用いるだけでなく、石炭、石油、あるいは太陽光熱などの自然エネルギーなどとの併用において、その高い熱効率と環境性によってトータルのエネルギー効率、利便性、環境性などを高めることができる。今後、天然ガスが21世紀のエネルギーの主役へと移行していくうえで、この分野の利用法の重要性が増していくと思われる。

(5) 天然ガス自動車

炭酸ガス排出量に占める自動車の比率は数十%と高く、削減が求められている。天然ガス自動車は、SO_xや

ススなどの粒状物質を排出せず、ガソリンやディーゼル車に比べて、NO_xや炭酸ガスの排出量が少ない。炭酸ガスについては、ガソリン車に比べて2, 3割低減することが可能とされる。他のクリーンエネルギー自動車、低排出車と比べ、バス、トラックから軽自動車に至るまであらゆる車種がそろっているのが特徴である。課題は走行距離とガス供給体制である。現在、世界では約100万台がすでに利用されている。普及が遅れていた我が国においても、90年代になって急速に増加し、1998年度は前年度の2,093台に対し、約1,600台増の3,640台となり、引き続き大幅な増加が予想されている。

(6) 燃料電池

通常の電池は内部に化学エネルギーを貯蔵しており、それを消費して電気エネルギーとして放出してしまえば寿命を終える。これに対して燃料電池では内部に化学エネルギーを持たず、常に外部から燃料と酸化剤を供給することによって、原理的には永久に電気エネルギーを発生し続けることができる。

燃料電池は電気化学反応によって、燃料の持つ化学ポテンシャルを直接電気エネルギーに変換する発電装置である。このため、エネルギー変換に伴って発生する損失が少なく、容量にかかわらず約40%の高い発電効率を得られる。この変換は燃焼を伴わず、また機械的運動を経ないため、排ガスがクリーンであり、騒音や振動もきわめて小さい。コージェネレーションに利用すると高い総合的なエネルギー効率を得られる。

燃料電池は使用される電解質の違いにより4種に分類される。このうちリン酸型の開発が最も進んでおり、実用化段階に入った。原燃料は主として天然ガスであり、ローカル発電、小型コージェネレーションに用いられている。現在世界で200台近く運転されているが、半数以上は日本国内にある。溶融炭酸塩型および固体炭酸化物型(固体電解質型とも呼ばれる)は、リン酸型の発展型として開発が進められ、さらに高温の燃料電池としてより高い発電効率、総合エネルギー効率を目指している。中型から大型の火力代替発電用である。これに対し固体高分子型は、高効率でかつ小型化が可能で作動温度が低く、家庭用、自動車用として現在開発が進められている。最近ダイムラーベンツ社が、2003年に燃料電池を動力とした乗用車を市場に出すと発表し、競合他社も開発計画を発表した。

(7) マイクロガスタービン

最近欧米の複数のメーカーが、相次いで10kW から100kW 級の小規模ガスタービンを開発し販売すると発表した。主要な用途は安価な電力の供給である。既存の競合するガスエンジンと比較しても、サイズ、重量、導

入価格、メンテナンスコスト、環境性において優位性があり、発電効率においても同等あるいはそれ以上の性能を有すると考えられる。ガス業界、電力業界とも、分散型電源として購入を検討していると報じられている。また、小規模および家庭用のマイクロコジェネレーションシステムの発電機としても、市場性が高いと考えられる。

また、我が国ではガスエンジン、ガスタービンの特に高温燃焼ガスに接する部分を、高温に強いセラミックにする研究が進められている。これによって40%から50%の高発電効率、また高温の廃熱による高いコジェネレーション効率が期待されている。

(8) 天然ガス化学

天然ガスを原料とする天然ガス化学も発展しつつある。現在のところ天然ガスの全消費量のうち、約10%が化学用原料となっている。用途の主流はメタンを改質した合成ガスを經由するアンモニアとメタノールの製造であり、現在世界のこれら化合物合成の70%から80%を占める主要製法となっている。現在の主要な研究対象は、より炭素数の多いオレフィン化合物の合成である。

メタンはその構造上、水素リッチでもあることから水素源としても有用であり、燃料電池用水素の主要原料として有望視されている。

(9) 化学的液化

天然ガスを化学的に常温で液状の物資に変換して、輸送性、貯蔵性を改善し、未利用資源の利用を促進するための技術開発が進められてきた。化学的液化には次の3方法が研究されてきた。

第1は、合成ガスを経る方法で、最もよく研究され実績も上げている。メタノール、エタノールなど各種アルコール、ジメチルエーテル、フィッシュアトロプシユ法による液状炭化水素、各種オレフィンの製造が行われ、商業化も一部に進められている。

第2は合成ガスを経ないメタンの直接酸化法であり、これが実現すれば省資源、省エネルギーに上きわめて大きな意義がある。天然ガスが石油化学工業原料として使えるかどうかは、メタノール、オレフィン類がメタンから安価に合成できるかにかかっている。種々の方法や触媒が研究されており、今後の技術の発展が期待されている。

第3は熱あるいはその他のエネルギーを与えて、メタン分子のC-H結合を解離させ、重合を開始させる方法である。いくつかの有望な触媒あるいは燃料電池型反応器を利用した試みが報告されている。

(10) LNG 冷熱利用

我が国は天然ガスの大部分をLNGで輸入している。

LNGは大気圧下では1kgあたり約840kJの冷熱を有しており、LNG 1tトンから約120kWhのエネルギーが利用可能とされている。LNGを気化させる場合、熱源を海水から得ている現状の冷熱の利用度は30%以下であり、ほかは未利用である。そこで海水に変わる冷媒を用いることによって、天然ガスのコンバインドサイクル発電の廃熱をLNG冷熱発電と複合させるシステムも提案されている。この場合、LNG気化1tあたり60kWhと50%以上の動力回収が可能と算定されている。今後さらにLNGの冷熱利用を行ううえで制約となる、ガスの需要変動パターンの影響を軽減するための蓄冷技術、再液化システムの開発が必要である。

4.4 供給体制ーガスグリッド

欧米の多くの工業国では、国境を越えた天然ガスの供給体制の整備が進み、人々は電気や天然ガスを自由に選択して利用できるようになってきている。複数のガス田からの供給ラインと各消費地とのパイプラインネットワーク（グリッド）が形成されており、一部ガス田からの供給途絶の場合にも柔軟な融通が可能であり、セキュリティは高い。我が国の場合はすでに人口の50%が天然ガス供給地域に居住しているとはいえ、それは国土面積の約5%にしか過ぎない。途上国の場合の一部の産ガス国を除いて、供給体制の整備はほとんど進んでいないのが現状である。これらの地域に住む人々や企業が天然ガスのメリットを享受するためには、各国内の主要地域を結ぶガスパイプラインのネットワーク、すなわちグリッドを作る必要がある。今後、特に分散型の発電と熱供給に適したガスコジェネレーションシステムや、環境負荷が少なく、省エネルギーにも適した天然ガス自動車、燃料電池自動車の普及にとって、天然ガス供給地域の拡大は不可欠である。逆に、供給網の拡大によって新しい形の天然ガスの利用や需要が急速に増加すると考えられる。

工業先進国においては、エネルギー資源の主役は石炭から、石油、そして天然ガスへと移行してきた。現在、発展途上国において大気汚染などの環境問題の解決が大きな課題となっている。今後、環境問題の解決が国際的に重要性を増してくると、途上国では先進国が石炭、石油、天然ガスと歩んだ順でなく、最初から天然ガスの利用が図られる場合も考えられる。

また、将来天然ガスに次いで水素ガスが主要なエネルギー資源になるとしても、供給体制としてグリッドは必要である。

5. 未来エネルギーへのかけ橋

5.1 理想のエネルギー—水素ガス

第3章において考察したように、人類の求めてきたエネルギー資源の姿は高カロリーと優れた環境性であり、これは化学的に言えば高水素化、低炭素化の方向であった。その意味で、まさに天然ガスであるメタンが自然界における究極の炭化水素資源であった。この方向ををさらに推し進めていくと、それは水素ガス H_2 に到達する。

水素ガスを燃焼すると、高発熱量によって最高のエネルギー効率が達成されるとともに、クリーンであり、ノーカーボンであり、燃焼により発生するのは水のみである。今後の主流になると考えられる分散型のエネルギー利用では、燃料電池が最も多く利用されると考えられているが、水素はその燃料として最適なものである。

将来の理想のエネルギーシステムとして考えられているのは、再生可能なエネルギーシステムであり、化石燃料に依存しない水素の製造とその利用システムである。その場合、水素は太陽光などの自然エネルギーによる発電、あるいは核融合発電による水の電気分解、およびバイオマスから生産される。

5.2 水素システム実現への課題

水素システムの到来は、21世紀の後半から22世紀にかけてであろうと考えられている。

課題の1つは、水素の経済的な供給である。水の電気分解用電力を再生可能エネルギーだけから経済的に取り出すことが可能になるには、相当長い期間が必要であると考えられている。それまでの間、水素はLPG、ガソリン、灯油などの石油製品、メタノールなどの各種アルコール、バイオマスなどの化合物の改質、水の電気分解などさまざまな手段によって製造されると考えられる。その中でも最も有力な方法は、天然ガスであるメタンの改質である。

もう1つの問題は水素ガスの輸送、貯蔵の困難性である。圧力容器、パイプラインによる方法については、水素脆性による材質破壊から水素ガスの漏洩が起こる危険性があるが、安全で経済的な材質が完成していない。水素ガスを吸着させる特殊な金属の開発には、まだ時間がかかるようである。極低温により液体水素として輸送貯蔵する方法は、現在のところきわめてコストがかかり、実用的ではない。

5.3 水素時代へのかけ橋としての天然ガス

天然ガスをエネルギー資源の主役とするシステムは、21世紀だけではなく、その未来に到来すると予想される

図2 未来のエネルギーシステムへのかけ橋としてのメタン

再生可能なエネルギーから作られる水素を用いる未来エネルギーシステムに向け、メタンは水素の輸送貯蔵役として、水素の原料として働く。バイオマス、自然エネルギーなどから製造される水素が増加するにつれ、化石エネルギーの役割は縮小する。

水素時代へのかけ橋としても、きわめて有効な役割を果たすことができると考えられる。それは、再生可能なエネルギーシステムが確立するまで、そして水素の輸送貯蔵に関する技術的問題が解決するまで、水素をメタンの形で輸送、貯蔵し、利用するサイトにおいて改質して、水素を取り出し利用するシステムである。すなわち、メタンを水素の、言い換えればエネルギーのキャリアとしても用いる方法である（図2）。この方法の特徴は以下のとおりである。

- (1) メタンガスの輸送、貯蔵は確立された技術であり、安全性が実証されている。
- (2) 天然ガスの各種インフラが活用できるので、経済性、利便性が高い。天然ガスの輸送、貯蔵インフラは、すでに世界の主要工業国で整備が進んでおり、今後中国、インド、中南米、アフリカなど世界の他の地域へのネットワーク拡大が予想されている。したがって、21世紀の前半には世界中の大部分の国々の人々が、必要に応じて天然ガスを利用できる体制（ガスグリッド）が整うと考えられる。
- (3) メタンは水素に改質する際の炭酸ガスの発生量が、他のメタノールやLPG、ガソリンなどに比して最も少ない。21世紀のエネルギー利用法としては、必要なときに必要な分だけ必要な場所で、燃料電池などで効率よく分散利用する形態がますます増加すると考えられる。炭酸ガスの処理に関しては、大規模発電所などの大量発生に対しては、効率よく回収することが可能であるが、小規模分散利用によって発生する炭酸ガスを経済的に回収することは、今後関連技術の開発努力が行われるとしても、当分の間容易ではないと考えられる。燃料電池などへ水素を供給する場合、炭酸ガスの発生のもっと少ない天然ガスを改質することが、環境対策上最も優れた方法であると考えられる。
- (4) メタンは他のエネルギー資源からの転換、合成が可能である。電力がさまざまなソースから発電されるように、他のエネルギー資源をメタンの形にして輸送貯蔵することが可能である。将来、水素がより安価に製造できるようになると、炭酸ガスと反応させてメタン化する方法が炭酸ガスの隔離法としても考えられる。メタンが水素のキャリアとして、また同時に炭酸ガスを吸収するシンクとして働くシステ

ムは、エネルギー効率からも環境上からも優れたシステムになると考えられる。

- (5) メタンは化学原料として炭素源が必要な場合にも対応できる。

6. 結 語

来るべき21世紀には、途上国を含めた世界の経済発展と人々の生活向上のために、さらに多くのエネルギー資源が必要となろう。一方、それに伴う地球環境の悪化をくい止める努力が今以上に必要となろう。天然ガスは資源量からもエネルギー効率からも、そして環境負荷のいずれの点からも、この矛盾する課題の解決のために中心的な役割を果たすことができる。そして天然ガスは単にそれだけでなく、より理想に近づいた未来のエネルギーシステム、すなわち化石燃料に依存しない水素の製造とその利用システムへの合理的なかけ橋となることができよう。

謝 辞

発表の許可を頂いた(株)日本ガス協会および発表の機会を与えていただいた石油技術協会に感謝いたします。また、種々ご教示いただいた日本ガス協会のかたがたに感謝いたします。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \quad \text{E}-01 = \text{m}^3$$

$$\text{ft}^3 \times 2.831685 \quad \text{E}-02 = \text{m}^3$$

$$\text{cal} \times 4.186 = \text{J}$$

引 用 文 献

- 1) U.S. Department of Energy, 1999: Working paper for roadmapping future carbon sequestration R&D. 1-5, U.S. Department of Energy.
- 2) Hunt, J. M., 1995: Petroleum geochemistry and geology, second edition. 443-445, W. H. Freeman and Company.
- 3) Masters, C. D., Attanasi, E. D. and Root, D. H., 1994: World petroleum assessment and analysis. Print of 14th World Petroleum Congress, 530-534.
- 4) 日本エネルギー学会編, 1999: よくわかる天然ガス. 190-197, 日本エネルギー学会.
- 5) 石油鉱業連盟編, 1997: 石油・天然ガス等の資源に関するスタディ. 45-132, 石油鉱業連盟.