

天然ガスのすべて

—21世紀の主役エネルギーの最新知識—

森 島 宏

hrsmorishima@ybb.ne.jp

元第22回世界ガス会議東京大会組織委員会 天然ガス担当部長

2003年の6月、東京で第22回世界ガス会議が開催された。世界中のガス産業関係者が集まり、これからのガス産業にどんな役割が求められるのかを検討した。この会議が日本で開かれるのも、アジアで開かれるのも初めてであるが、21世紀になって最初の世界ガス会議は、大会史上最大規模、5,200名を超える参加者を集め、成功裏に終了した。大会では、エネルギーの歴史を振り返り、未来を探りながら、天然ガスの果たす役割が論じられた。

世界ガス会議に先立ち、その主旨を広く知ってもらうことを目的として、著者は、天然ガスを種々の異なった観点からとらえ、その優れた価値と豊かな可能性を幅広く論じた著書「天然ガス新世紀」をガスエネルギー新聞社から出版した（2003年4月刊）。

本稿では、これを踏まえつつ、特に、天然ガスの持つ価値とそれが21世紀に果たすべき使命について、その特徴を示す部分を抜粋、再構成して重点的に紹介する。更に興味をもたれた読者は、原著をお読みいただければ幸いである。

21世紀に残された課題

科学技術が発展した20世紀には、欧米を中心にしたいくつかの国々では、工業化に成功し、人々は快適な生活を送るようになった。しかし、世界の人口の大多数を占める途上国においては、経済発展が遅れ、人々の生活向上は実現しなかった。これを解決することが、21世紀の人類に残された最大の課題の一つである。

人類は社会を発展させたその一方で、特に産業革命以後、石炭や石油などの化石燃料の大量消費によって地球環境を大きく破壊してきた。自然の修復力が間に合わないのではないかと心配されるところである。温暖化を含む地球環境問題を解決することは、21世紀の人類にとって、もう一つの残された課題である。

天然ガスへの期待

これらの2大課題を解決するために、これからのエネルギーシステムは、十分なエネルギー量と効率を持つと同時に優れた環境性を持つものでなければならない。

これら二つの条件を兼ね備え、21世紀のエネルギーの主役になるだろうと期待されているのが天然ガスである。その期待に応えることができるかどうかを確かめるために、以下の5方向から考えていきたい。

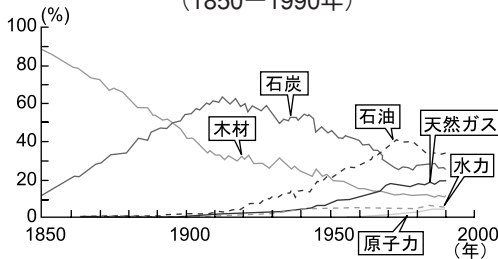
第一はエネルギー源として十分な量が存在するかどうか、第二は効率の高い利用法ができるかどうか、第三は環境性に優れているかどうか、第四は世界中の人々が利用できる供給体制を作ることができるかどうか、そして第五は未来の持続可能なエネルギーシステムへの架け橋となることができるかどうかである。

第1章 究極の化石燃料

—天然ガスの歴史的役割

図1-1に見るように、人類は主なエネルギーとして最初に木材を用い、次に石炭、石油、そして天然ガスと4種のエネルギーを使ってきた。初めに人類が利用したエネルギーのうつり変わりとその理由を考え、人類がエネルギーに

図1-1 世界の1次エネルギー比率
(1850-1990年)



出典：Nakićenović, 1984, updated from BP, 1995 and earlier volumes. WEC 1998年

何を求めたかを見てみたい。

人類の発展と火の利用

人類は、約300万年以前にアフリカで誕生したといわれる。人類による最初のエネルギー利用は火であったと考えられる。火は暖房に、照明に、食物の調理にと、道具の加工に、あるいは野獣に対する防御にと、さまざまな面で人類を助けた。人類がアフリカを出て環境の異なるアジア、ヨーロッパへ移動し始めたのは、火の利用を始めた約100万年前といわれる。火の利用こそが、本来生物学的には弱い人類が全地球の生態系の頂点に立ち、万物の霊長となることを可能にした人類史上最も重要な出来事の一つであると考えられる。

人類社会の基礎を作った木材

木材は、自然環境の中で分解されるので石器などのように残らないが、人類が火を使い始めた原始時代から最も身近な資源として人類社会の発展を支えてきた燃料である。

木材を含むバイオマスは、基本的には再生可能である。近代に至るまで、エネルギー消費は木材などの供給可能な範囲で行われ、自然と調和したエネルギーシステムが成り立っていた。例えば江戸時代の日本は、リサイクルが高度に進んだ典型的な環境調和型社会であったといわれる。バイオマスは、再生可能なエネルギー資源として今日再び大きな期待と注目を集めている。

石炭と産業革命

木材に比べ、格段に高い熱量を持つ石炭は、

18世紀英国で始まった産業革命を推し進めたエネルギーである。西欧を中心にした工業社会の発展と共にエネルギー消費は急増し、19世紀の後半には石炭が木材に替わって主役となった。19世紀には、化学成分を利用する石炭化学が発展した。石炭ガスも、燃料や照明として19世紀からの都市生活を支えた。

石炭は再生可能ではないが、埋蔵量が莫大であるため、資源量の限界が意識されることなく必要に応じて採掘、消費されてきた。残存可採埋蔵量は、今なお200年分以上ある。

石油と現代文明

石油産業誕生のきっかけは、燃料ではなく照明としての利用であった。灯油の原料を求めて、19世紀の半ばに米国のドレークが石油井を掘削したことによる。その後、エジソンによる白熱電球の発明により、照明の主役は灯油から電気へとうつったが、石油の用途は、19世紀末からガソリンや軽油などの動力機関の燃料用原料として更に広がっていった。20世紀になると、石油を原料とする石油化学も急速に発展してきた。

液体の石油は、固体の石炭に比べ、圧倒的な使い良さと高いエネルギー効率を示し、特に交通機関の燃料として需要が急増した。こうして、1960年代には石炭を抜いてエネルギー資源の第1位に躍り出たが、急激な石油の需要増は、1970年代に2度の石油危機を引き起こした。石油の残存可採埋蔵量は、発見量と消費量により変動しているが、石炭より一桁少ない約40年分である。

天然ガスの躍進

パイプライン輸送による天然ガスの大規模な利用は、米国では第二次世界大戦前から、欧州・ロシアでは戦後になってから本格的に始まった。1970年代になると、液化天然ガス(LNG)の海上輸送ができるようになり、生産地から遠く離れた日本においても大規模利用が始まった。

発熱量が高くエネルギー効率の良い天然ガスの需要は、急速に増大している。メタンを主成

分とするので、クリーンな資源エネルギーとして地球環境面からの評価も高い。このため欧米・ロシアでは、天然ガスは1次エネルギーにおいて既に石油と並ぶ位置に近付いている。全世界では、石油、石炭に次いで現在第3位であるが、供給体制の整備と共にその比率が増大すると予想されている。残存可採埋蔵量は60年分以上である。熱量換算でも既に石油より多く、今後の発見により更に増大すると期待されている。

技術力とエネルギーの変遷

資源を利用するには、採取、利用、輸送、貯蔵など各分野の技術の発達が必要である。人類の発展初期には技術も未熟であり、利用できる資源も限られていた。地上の資源より地下資源が取り扱いにくく、固体より液体、そして気体が最も扱いにくい。従って、地上の固体資源である木材から利用が始まり、次に地下資源に移り、固体の石炭、液体の石油、気体の天然ガスへと移行したことは当然であったといえよう。

エネルギーの価値

一方、エネルギーの本質を考えると、それは仕事をする能力である。燃料の場合は、発熱カロリー量がそれに当たる。発熱カロリー量を比べると、木材1,500-2,000kcal/kg、石炭5,000-8,000kcal/kg、石油8,000-1万1,000kcal/kg、天然ガス1万3,000kcal/kgの順に大きくなる。すなわち、人類がエネルギー資源に求めてきたものは、より高い発熱量であったことが分かる。

発熱量は、おおまかにいうと成分元素の発熱量の和である。主要元素の発熱量は、水素分子は3万4,000kcal/kg、炭素は7,800kcal/kgである。従って、水素含有量が多いほど発熱量が多い。燃料資源の水素対炭素比は、木材の1対10から石炭1対1、石油2対1、天然ガス4対1へと、高水素化の方向に進んできた。自然界には、天然ガスの主成分であるメタン CH_4 以上に水素比率の高い物質はない。その意味で、天然ガスは究極の高カロリーエネルギー資源である。

環境性

20世紀の後半、石炭が石油にエネルギーの主

役を譲ったのは、供給力が不足したからではない。大気汚染などの環境面を含む総合的な社会的経済的価値評価によるものである。現在では、温暖化ガスの放出量が重要な評価基準になっている。

炭酸ガスの放出量は、炭素含有量に比例する。各燃料の炭素対水素比を比べると、木材10対1から石炭1対1、石油1対2、天然ガス1対4へと環境性が向上する方向に進んできたことが分かる。メタンより炭素比率が少ない炭化水素資源はないから、天然ガスは環境上からも究極のクリーンエネルギー資源といえるだろう。

価値観の重要性

以上見てきたように、エネルギー資源の移り変わりは、一見、技術的な容易さの順によるようであるが、実は発熱量や環境性において、より価値のあるものを人類が求めてきたからだと言えることができる。技術力がエネルギー選択の制約になったというより、価値のより高いものに入れたいという人類の欲求が技術力を高めてきたといえよう。その意味で、今後どのようなエネルギーシステムを望むのかという人類の価値観が、ますます重要になってくると思われる。そしてそれは、自然エネルギーなどの再生可能なエネルギーに基づいて水素などを利用する、持続可能なシステムであろうと考えられる。

究極の天然資源

天然ガスを究極の天然資源と呼ぶのは、単に化石燃料として最も遅れて登場してきたからではない。天然ガスが、エネルギーの高さにおいても、環境性の高さにおいても、自然界における最高の価値を同時に持つゆえ、そう呼ばれるのである。この両面の価値をたまたま同時に持つ天然ガス資源が地球上に存在していることは、極めて貴重なことである。この幸運を無駄にすることなく、地球の未来のために有効に生かしていくことが、人類の責任であろう。最後の化石燃料として、持続可能なエネルギーシステムを導くという歴史的な使命を果たすべきであるという意味においても、天然ガスは究極の天然資源であるといえよう。

第2章 天然ガスの埋蔵量は十分にある

天然ガスがどのように優れたものであっても、十分な量がないと人々の役に立つことはできない。本章では、天然ガスの存在量について、何がどこまで分かっているかを見ていきたい。

(1) 天然ガスの埋蔵量

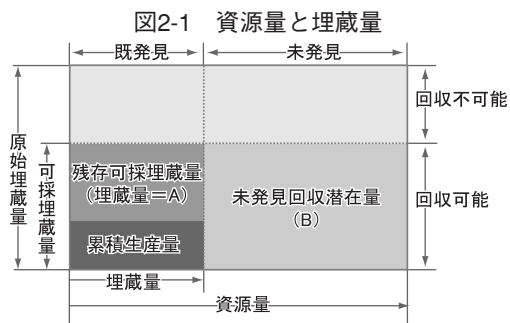
埋蔵量と資源量の区別

資源の量を表すのに、「埋蔵量」と「資源量」という言葉がある。よく混同されて使われるが、はっきりと区別して使う必要がある。

資源量というのは、採取できるかどうかとは関係なく、更には、発見されたかどうかにも関係なく、地球上に存在するすべての量を指す。地球の歴史によって定まっており、本来不変な量である。英語ではリソースである。

埋蔵量とは、ある時点で、技術的・経済的に採取可能な量のことであり、従って時代と共に変動し、減少することもある。埋蔵量は当然、資源量の一部である。英語では、リザーブと呼ばれる。

図2-1に示すように、発見された資源量（原始埋蔵量とも呼ばれる）のうち、採取可能な部分を可採埋蔵量といい、その比率は回収率と呼ばれる。可採埋蔵量から累積生産量を引いた量が、残存可採埋蔵量である。通常、これを略して埋蔵量と言っている。我々の社会、経済活動



図は資源量と埋蔵量の関係を表す。地球上の全存在量を資源量という。既発見資源量のうち、今後回収可能と算定される量が残存可採埋蔵量、略して埋蔵量 (A)。未発見埋蔵量のうち将来発見され、回収可能になると推定される量が未発見回収潜在量 (B) である。A+Bが (残存) 究極可採資源量となる。

に直接関係のあるのはこの量である。

世界の天然ガスは現在、50-60年分あるといわれているが、この場合は残存可採埋蔵量を指している。現時点で今後それだけの量を経済的に採取する見通しが確定している、ということの意味している。

一方、メタンハイドレートについては、数百年分あるといわれる。この場合は資源量のことであり、埋蔵量としてはまだゼロである。すなわち、現在の技術や経済条件の下では、メタンハイドレートの商業的な採取の見通しが立っていないということである。このように、量を論じる際は、埋蔵量であるのか資源量であるのか、両者の違いに気をつけなければならない。

資源量の大きさは、必ずしも埋蔵量の大きさに結びつかない。まだ発見されていない分を見込みで含んでおり、これがすべて発見されるという保証はないからである。更に、発見されても、経済的採取が可能とは限らない。

例えば、海水中には金やウランウムが溶け込んでいることが知られている。希薄だが海水は大量にあるので、海洋におけるこれらの資源量は大きい。日本の経済海域は広く、深いので、日本も相当な資源量を持つといえる。しかし現時点では、海水からのこれらの元素の採取は採算が取れないので、残念ながら、埋蔵量としてはカウントできない。

可採年数の意味

資源の量を分かりやすく表すのに、可採年数が用いられる。残存可採埋蔵量を1年間の生産量で割ると可採年数が算出される。

生産すると残存可採埋蔵量は減少するから、可採年数は年々少なくなるはずである。しかし、近年、石油の場合も天然ガスの場合も、減るところかかえて増加する傾向にある。それは、生産量以上に新規に埋蔵量の追加があるからである。

埋蔵量の増加は、原始埋蔵量における回収率の増大か、新たな発見によって未発見資源量から埋蔵量に加わる分があるかによる。これらが、生産によって減った埋蔵量を埋め合せている。これをリプレースと呼んでいる。

1980年代には、石油の可採年数が30年から40年へ延びた。主として、中東産油国における回収率の見直しによる埋蔵量の増大によるとされる。また、天然ガスの可採年数は近年、50年以上へと増大してきている。これは、年間の新規発見埋蔵量が年間生産量を上回っているためとされる。

究極可採資源量

埋蔵量も資源量も限りのあるものであるから、長年生産を続ければ、リプレースができなくなり、可採年数は減少していくはずである。それでは一体、いつまで採取ができ、最終的にどれぐらいの天然ガスが採取できるのであろうか。それを表すのが究極可採資源量である。これは、残存可採埋蔵量と未発見回収潜在量との和である。未発見回収潜在量は、現時点で未発見である資源量の中から、将来発見され、かつ採取可能となって埋蔵量に移行していくことが期待される量である。

天然ガスの未発見回収潜在量は、現時点では約50年分と推定されている。これを残存可採埋蔵量に加えると、究極可採資源量として100年以上という年数が得られる。すなわち天然ガスは、今のペースで使い続けても今後50年間は確実にもつ。そして、更に50年、合わせて100年間以上採取を続けられる可能性が高いということになる。

この量は、既に大きな量ではあるが、21世紀に天然ガスが期待される役割を果たすには必ずしも十分ではない。世界経済を支え、環境問題を解決するための主要なエネルギー資源となるためには、更に大幅な埋蔵量の追加が望まれる。最近、いくつかの理由から、天然ガスの埋蔵量が将来更に大きく増大する可能性があるとの期待が高まっている。

(2) 天然ガスの成因

本節では、天然ガスの成因から、今後更に新規発見が期待される理由を考察する。

有機物起源

天然ガスは、石油、石炭と共に化石燃料と呼

ばれる。いずれも太古の地球上の生物が残した有機物から生じたとされるからである。

地球上の生物はすべて、食物連鎖に組み込まれ、その中で発生する有機物は、最終的に微生物の代謝により酸化分解され、99.9%は炭酸ガスや水に戻ってしまう。残りの0.1%は主として海水中の嫌気的環境下において分解されずに残り、多くの場合、泥と共に堆積する。

大きなデルタ地帯のように、河川から常に大量の土砂や有機物が運び込まれ、堆積が長期間継続するような地域を堆積盆地という。堆積盆地では、後から来る堆積物によって泥や砂は圧縮されて泥岩や砂岩になっていき、その過程で取り込まれた有機物は、重合して炭素と水素を主成分とするケロジェンと呼ばれる複雑な高分子化合物になる。

ケロジェン成因説

現在最も広く認められている石油、天然ガスの成因説では、図2-2のように、このケロジェン（油母と呼ばれる）が石油や天然ガスの根源物質となる。

ケロジェンを含む根源岩（主として泥岩）が地中へ埋没していくと、地温や圧力が上昇し、ケロジェンの熱分解反応（熟成という）が始まる。分解生成物の成分は、炭素数が1個のメタンから数十個の長いものまで幅広い。これが石油である。ケロジェンの種類と熟成の度合いによって、生成する石油中の炭化水素の成分割合が変わる。実は石炭もケロジェンの一種で、メタンを多く生成する。

岩石の埋没深度が更に増し、地温が更に上昇すると、今度は一度生成した炭化水素が再分解し、最終的にはほとんどすべての炭化水素が炭素1個のメタンにまで分解される。これが天然ガスの主要な生成過程である。こうしてできたガスを熱分解性ガスと呼ぶ。

移動集積とトラップ

隙間の多い砂岩などの岩石がそばにあると、炭化水素は生成した泥岩から砂岩に移動し、浮力に応じてその中を上昇していく。このとき、隙間の少ない岩層（別の泥岩層など）が上部に

あると、炭化水素の移動が止められ、油層やガス層ができる。石油や天然ガスをためる隙間の多い岩石を貯留岩といい、それを覆う隙間の少ない岩石を帽岩という。貯留岩と帽岩の組み合わせにより、炭化水素をためる地質構造をトラップという。背斜構造は、トラップとして最も重要なものである。

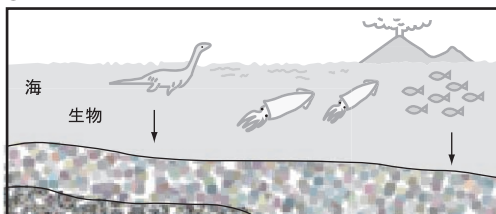
商業規模の炭化水素鉱床が形成されるためには、まず大規模な堆積盆地が長期間存続して、ケロジェンを大量に含む良質の根源岩が堆積

し、それが地熱作用を十分受けて熟成し、大量の炭化水素を生成することが必要である。同時に、生成した炭化水素が移動し、集積する良好な貯留岩と大きなトラップ構造がタイミング良く形成されなくてはならない。

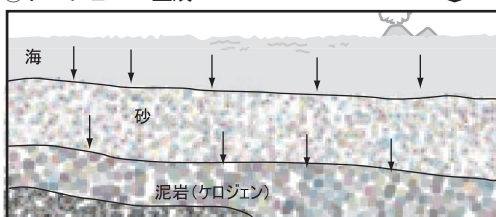
地球の歴史は長いが、地質的にこのような好条件がそろふ確率は極めて低い。堆積岩中に取り込まれた有機炭素のうち、鉱床に集積することができたのは、わずかにその1万分の1以下と推定されている。地球上に油田やガス田が生まれたことは、確率1,000万分の1という極めて稀で貴重な出来事なのである。

図2-2 油ガス田のできかたのモデル

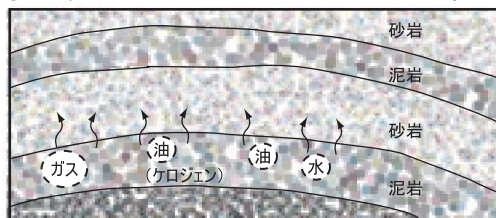
①有機物と土砂の堆積



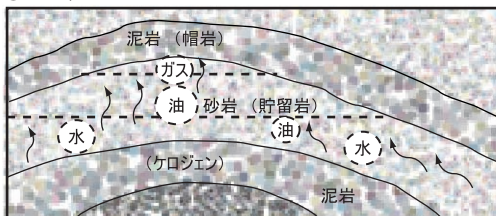
②ケロジェンの生成



③熟成、石油・ガスの生成



④石油、ガスの移動・集積(背斜トラップ)



出典：「暮らしの中の石油」(森島宏，講談社 1988年)

随伴ガスと熱分解性ガス

石油の生成は、根源岩層の埋没深度が比較的浅く、地温が低い時期から始まる。従って、移動、集積し始めるのも早く、浅い深度にも油層は存在する。

多少のメタンも同時に生成するため、条件によっては、同じ貯留層の石油の液相の上部に分離した天然ガス相が生成することがあり、これはガスキャップと呼ばれる。また、石油を地上に汲み上げると、地下の高圧下では石油に溶けていたガスが大気圧下で分離・気化してくる。これが随伴ガスと呼ばれるものである。随伴ガスは、エタン、プロパン、ブタンなどの比率が高いウェットガスであることが多い。石油の埋蔵量は大きいので、随伴ガスも天然ガスの重要な供給源であるといえる。

しかし、天然ガスの全埋蔵量中の比率は、熱分解性ガスであるガス田ガスが80%と圧倒的に多い。ガス田ガスは、メタンがほとんどで、ドライガスと呼ばれる。なお、これらケロジェン起源のガスは、微生物起源の水溶性ガスに対し、構造型ガスと呼ばれる。

期待される深部探鉱

熱分解性ガスは、ケロジェンの熱分解反応の最終生成物であり、貯留層深度も当然深くなる。ハントの教科書(1995年)によれば、地下の温度勾配が3℃/100mの地域においては、中質原油の存在する下限深度は約4,600mである。深度4,600-5,800mでは軽質油やコンデンセート、

ウェットガスが出現し、5,800m以深では主にドライガスが存在する。

石油、天然ガスの探鉱費用のうち8割以上を占めるのが坑井掘削費であり、更に、掘削費は深度が増えると急激に増大する。従来の試掘深度は、こういったコストの点からも制限されたため、ドライガスの存在深度に対し必ずしも十分ではなかったといえるが、今後、より深部の試掘によって、天然ガスを新規に発見する可能性が大きいと考えられる。

(3) 天然ガスの探鉱

本節では、我々が地球上の天然ガスを、これまでどれくらい見つけたか、いわゆる探鉱の成熟度（探査の進捗度合い）から、今後の探鉱余地を考えてみよう。

探鉱の成熟度

前々項で述べたように、埋蔵量とはある時点における経済的・技術的に採取可能な量で、従来の探鉱活動、生産活動などの結果、評価が確定している量である。対する資源量は、未発見の回収潜在量を含み、不確定な量である。探鉱活動が進むと新たな埋蔵量が追加され、生産活動が進むと評価は正確になってくる。資源量に対する未発見回収潜在量の比率が減少し、埋蔵量の比率が高まる度合いを探鉱の成熟度という。探鉱が成熟するほど我々の知識は確実になるが、新規探鉱の余地は減少する。

石油探鉱業連盟の比較的保守的なスタディー（1997年）によれば、究極資源量に対する未発見回収潜在量の割合は、石油の場合は約20%であるのに対し、天然ガスの場合は約40%以上である。これは、石油の場合、地球上に存在する究極資源量の約80%が既に見つかり、未発見分は約20%しか残っていないが、天然ガスは半分近くが未発見のままに残されていることを意味する。

累積生産量を見ると、石油は埋蔵量の45%、究極資源量の36%に達しているのに対し、天然ガスは埋蔵量の31%、究極資源量の約19%にしか過ぎない。このように、石油に比べ、天然ガスの探鉱、生産活動は未成熟である。

天然ガス発見の歩み

天然ガス発見量の推移を見ると、図2-3のように、1940年代から増加し、60年代後半から70年代に高いピークを示し、80年代以降は減少しながらも一定のレベルを保っている。一方、石油の発見は1920年代後半から立ち上がり、60年代前半を中心として70年代まで幅広いピークを持つが、80年からは減少を続けている。二者を比較すると、天然ガスの発見量は石油より20年ほど遅れて増加を始め、ピークは約10年遅れであり、石油ほど急落せず今も継続している。探鉱の成熟度としては、10年から20年ほどの遅れであると見られる。

ガス田の発見数の動き（図2-4）を見ると、発見量の70年代のピークよりも幅広く、60年代から始まり80年代以降も続いている。石油の場合も同様に、発見油田数のピークは発見量のピークよりも幅広く、70年代まで続いている。こ

図2-3 天然ガス発見量と超巨大ガス田の比率
(兆立方フィート)

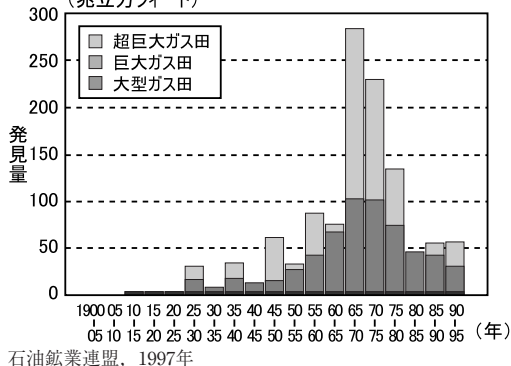
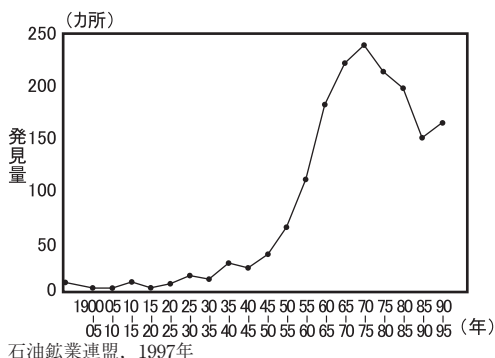


図2-4 発見されたガス田の数
(カ所)



れらは、発見数に比べて発見量が減少している、すなわち発見油田の規模が次第に小さくなってきたことを示している。ただし、この発見量のトレンドが、未発見潜在量の顕著な減少によるものか、あるいは中東などにおける深部探鉱の一時的停滞によるものかは判然としない。

超巨大ガス田

埋蔵量の増大にとっては、図2-3に示されるように、巨大なフィールドの発見が果たす役割は極めて大きい。過去の統計によると、世界の発見ガス田において、数では約16%の巨大ガス田（埋蔵量3 tcf（兆立方フィート）以上）が、埋蔵量では約78%を占めている。更に、超巨大ガス田（同30 tcf以上）は、発見ガス田数の1.8%に当たる34個に過ぎないが、埋蔵量では全体の48%を占めるほど大きい。

これは石油においても同様で、埋蔵量5億 bbl（バレル）以上の巨大油田は発見油田数全体の約17%であるが、埋蔵量の総量は全体の約77%にもなる。

更に超巨大油田（同50億 bbl以上）は、油田発見数全体の1.8%に当たる47個に過ぎないが、埋蔵量全体の約45%を占める。

超巨大ガス田の分布

自然界や社会に存在するものは、例えば、宇宙の星雲の規模、世界の大都市の人口など、小さい物は数が多く、大きい物は少ない一定の分布法則が見られることが多い。発見されるガス田の数と大きさの関係を調べることは、超巨大油田の残っている確率を考えるヒントになる可能性がある。

そこで、超巨大フィールドの発見動向を見ると、石油の場合は47個のうち上位20位以内はすべて1950年代以前に発見されている。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個も発見されなかった。一方、天然ガスの場合は、34個の超巨大ガス田のうち、70年代に1位を含む10フィールドもの発見があった。その後、数は減ったが80年代に1個、90年代に2個が発見され、90年代の1個は、1位タイの超巨大ガ

ス田であった。石油の場合は、そろそろ超巨大フィールドは残り少なくなってきたかもしれないが、天然ガスの場合は、まだまだ見つかる可能性が大きいと期待される。

探鉱の成熟度と不確定性

今回見てきた探鉱の歴史、特に超巨大フィールドの発見動向から、天然ガスの探鉱は石油に比べて未成熟であることは明らかであり、今後の探鉱努力によって、資源量の中から新たに発見され、追加される埋蔵量が相当大きいものと期待される。

更に、天然ガスの探鉱が未成熟であることは、我々の持っている知識の不確定性が大きいことを意味している。従って、本来地球の歴史によって定まっている天然ガスの資源量の見積もりそのものも、将来大幅に変更される可能性がある。

(4) 非在来型天然ガス

地球上には、これまで述べてきた以外にも、「非在来型天然ガス」と呼ばれるガスが大量に存在している。これを加えると、天然ガスの資源量は大幅に増加する。

非在来型天然ガス

ガス田ガス、随伴ガス、水溶性ガスなど、従来から採取されてきた経済性のある天然ガスが、在来型のガスである。

これに対して、非在来型天然ガスとは、これまで生産性が低いなどの理由で商業的生産が困難であった次のようなガスを指す。

- ①タイトサンドガス
- ②コールベッドメタン（炭層ガス）
- ③シェールガス（頁岩層ガス）
- ④地圧水溶性ガス
- ⑤メタンハイドレート

しかし、これらのガスも、技術が進み社会的・経済的条件が整うと、商業的な生産が可能になる。実際、米国では、1980年代に非在来型天然ガスに税制上の優遇措置がとられたため、

一部の非在来型ガスの採取が始まった。それにつれて採取技術も発達し、今では非在来型ガスが同国の全ガス生産量の20%にも達するようになってきている。

タイトサンドガス

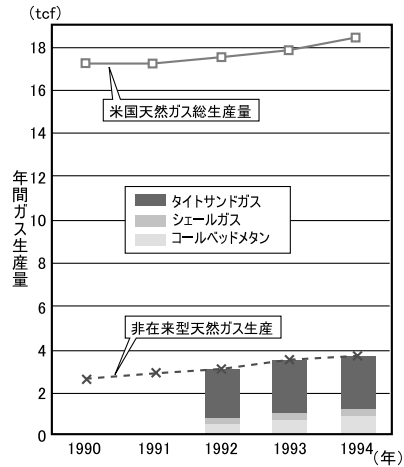
地層中におけるガスや油、水などの流体の通りやすさを浸透率といい、ミリダルシー (md) という単位で表す。浸透率は、地層が浅い場合は大きいですが、深くなると大きな地層圧を受けた岩石粒子間の隙間が少なくなるので小さい。通常、生産性の良い油・ガス田では、浸透率は数十あるいは数百md以上であり、一方、1 mdより低い貯留層では生産性が悪くなる。地層の浸透率は、埋蔵量と並んで油・ガス田の最も重要な性質の一つである。

一般に、浸透率が1 mdより低い砂岩をタイトサンドと呼んでいる。タイトサンド中のガスは世界中に広く分布しているが、浸透率が低く生産速度が上がらない、存在深度が深く坑井掘削費がかさむなどの理由で、商業生産が困難であった。

現在、タイトサンドガスの研究、探鉱、開発、生産が行われているのは、主として米国である。米国では、1970年代の2度の石油危機の後、80年代から未利用資源の活用を奨励する目的で非在来ガスの税制優遇措置を始めた。0.1mdより浸透率が低い砂岩中のガスをタイトサンドガスと定義し、これに対し約0.5米ドル/mcf (百万立方フィート) の優遇措置を行った。これは、当時の米国内ガス価格レンジの3割程度に相当したため、経済性が増し、急速に商業化が進んだ。

優遇措置は92年に撤廃されたが、この間、坑井刺激法 (地層に坑井から高圧水を圧入して割れ目を作り、ガスの流れを良くする方法) などの生産技術が普及し、坑井当たりの生産量が増加した。採算性のある操業プロジェクトが増加したため、それ以後も生産量を維持している。94年のタイトサンドガス生産量は、図2-5に示すように、坑井数12万2,000で2.5tcfに達し、米国の非在来ガス生産量の約70%、全天然ガス生産量18.3tcfの14%となった。

図2-5 米国における非在来型天然ガス生産推移



出典：OGJ1995

タイトサンドガスの資源量は、米国で1,200tcfとされ、究極回収量はその5割を超える約622tcfと推定されている。全世界の資源量は約2,000tcfとされており、仮に同じく5割が回収されるとすれば、究極回収量は1,000tcfとなる。

コールベッドメタン (炭層ガス)

石炭が生成するときに発生したメタンのうち、石炭表面に吸着したものをコールベッドメタン (炭層ガス) と呼ぶ。一方、発生したメタンが近くの砂岩層などにたまと炭田性のガス田となる。オランダのフロニンゲンガス田などがその例として有名である。

炭層ガスも世界の炭田地帯に大量に存在するが、ガス田ガスと異なり、主な貯留メカニズムが吸着であり生産性が低いため、開発が遅れていた。通常、炭層ガスは地下の炭層内で水に封じられているので、地表から坑井で地層水を汲み上げて、石炭層からガスを脱着させ採取する。生産速度が遅いので坑井数を増やす必要があるが、掘削費削減のためには比較的地表から浅い炭層を選ばなければならない。更に、汲み上げた地層水の廃水処理、地盤沈下対策などにも費用がかかる。

米国では、1980年代から炭層ガスに対して約1米ドル/mcfのインセンティブが与えられ、急速に開発が進んだ。探査技術、採取技術の進歩により、坑井当たりの生産量が増加したので、

優遇措置が撤廃された92年以降も生産量は増え続けている。94年の生産量は、坑井数6,300で、858bcf (10億cf (立方フィート)) であり、全米ガス生産量の約5%に当たる。生産量は、非在来ガスの中ではタイトサンドガスに次いで第2位であるが、増加率は最も高い。これは、米国には、比較的浅くて1坑井当たりのガス生産能力の高い炭層が多いため、今後最も生産量が増えるのは、炭層ガスであると期待されている。

炭層へのガス吸着量は、亜炭、瀝青炭、無煙炭と、石炭化度が進むほど増える傾向がある。炭層ガスの埋蔵量は、これらの石炭の埋蔵量に比例して存在すると考えられる。米国の炭層ガスの原始埋蔵量は400-900tcfと見積もられている。石炭埋蔵量の比較から、世界の炭層ガスの原始埋蔵量はおよそ4,000tcfと推定される。

シェールガス (頁岩層ガス)

泥岩の中で、固く、薄片状にはがれやすい性質のものを、特にシェール (頁岩) と呼んでいる。これに含まれるガスがシェールガスである。商業的生産は、これまでのところ、米国東部のアパラチア山脈地域などに分布する古生代デボン紀の頁岩、デボンアンシェールに限られている。在来型との違いは、貯留層が砂岩でなく、頁岩、泥岩であることである。

通常の泥岩は、石油、ガスの根源物質であるケロジェンを含むので根源岩となり、石油、ガスを生成する。それ自身は、隙間 (孔隙率) も浸透率も低いため、生成した石油、ガスの貯留岩にはなりにくい。代わって、近接する砂岩などが、移動してきた石油、ガスの貯留岩となる。デボンアンシェールは非常に厚い泥岩層で、長い地質時代を通じて地下深くで圧密作用を受け、微細な割れ目、フラクチャーを生じた。その結果、貯留岩としての性状も多少持つようになった。しかし、孔隙率は4%以下、浸透率も0.001-2 mdと低く、シェールガス生産の経済性は低い。

米国においては、他の非在来ガスと同様、シェールガスも1980年代から税制優遇1米ドル/mcfを受けることとなり、生産量が増大した。税の優遇が撤廃された92年以後も生産は継続

し、94年には坑井数2万2,000で259bcf (10億立方フィート)、米国全天然ガス生産量の2%弱となった。非在来ガスとしては、タイトサンドガス、コールベッドメタンに次ぐ量である。

シェールガスの生産パターンの特徴は、フラクチャー内の遊離ガスによるとみられる高い初期生産レートと、大きい減退率である。これが1-3年で減退した後、フラクチャー内の、次いで頁岩組織内の吸着ガスによるとみられる、低いレートの生産が長く続く。生産性は、天然のフラクチャーの度合いに大きく依存している。生産性の改善には、坑井刺激法による人工フラクチャーの生成が効果的である。

原始埋蔵量は極めて大きく、米国で800-1,900tcf、世界ではその数倍とされている。可採埋蔵量は現段階ではまだ小さく、米国で究極可採量80tcf、確認可採量3 tcf程度とされている。

非在来ガスの埋蔵量

表2-1に示すように、商業生産の始まった3種の非在来ガスのみでも、原始埋蔵量は約1万tcfに達する。仮に将来、この50%にあたる5,000tcfが回収されるとすると、在来型ガスの残存確認埋蔵量約4,900tcfに匹敵する大きな量となる。

これらに加え、以下に紹介するいまだ商業生産に至らない非在来型天然ガスもあり、在来型を遙かに超える膨大な資源量が推定されている。

地圧水溶性ガス

地下の水圧は、深度が10m増すごとにおよそ1気圧、すなわち1 kg/cm²ずつ増加する。これが静水圧である。静水圧より高い油層圧力 (異常高圧) を持つ油層水に溶解しているガスを地圧水溶性ガスという。

通常、岩石は、埋没深度が増すにつれて圧密され、油、ガス、水を排出するが、何らかの理由で排出経路が閉ざされた場合、これらの流体が閉じこめられて異常高圧が生じる。在来型との違いは、大深度、異常高圧下の水溶性ガスであるという点である。

他の非在来ガスと同様、研究調査は主に米国

表2-1 非在来型天然ガスの資源量、埋蔵量の現状

単位：tcf

ガス	資源量	原始埋蔵量	可採埋蔵量
タイトサンドガス		米国 622-1,200 世界 2,000*	米国 32 (究極 574)
コールベッドメタン		米国 400-900 世界 4,000*	米国 9.7 (究極 90)
シェールガス		米国 800-1,900 世界 4,000*	米国 3 (究極 83)
商業化ガス3種小計		世界 10,000	
地圧水溶性ガス		米国 5,700	0 (経済性低い)
	旧ソ連 87,000*		
地球深層ガス			0 (存在未確認)
メタンハイドレート	世界 700,000		0 (経済性不明)

石油鉱業連盟 (1997年), *ハント (1995年) より作成

で行われてきた。地圧水溶性ガスは、メキシコ湾岸に面するテキサス、ルイジアナ両州の沿岸陸上部及び大陸棚の地下深度3,000-8,000mの地層に集中的に存在する。この地域は異常高圧及び高温の地層水で知られていた。溶けているガスの地層水に対する比率は、20-50cf/ bblで圧力に比例し、温度と塩分濃度に反比例する。ガスの組成は、メタンが約90%、残りがCO₂などである。

この地域における地圧水溶性ガスの原始埋蔵量は、陸上、海上合わせて約5,700tcfという膨大な量が推定されている。なお、旧ソ連には更に大量の8万7,000tcfの地圧水溶性ガスがあるとの報告がある。

現在、地圧水溶性ガスの商業的生産は行われていない。大深度の異常高圧、高温層への坑井掘削、汲み上げた塩水の処理などで、生産コストは高くなる。経済性改善のため、地層水の熱エネルギー（高温）と運動エネルギー（高圧）を利用するシステムの研究も行われた。しかし、コストの差は税制優遇によってもカバーできず、経済的採取の見通しが立たなかった。

地球深層ガス説は未確認

米国のゴールド博士が提唱した地球深層ガス説は、地球の誕生時に宇宙から取り込まれた無機成因のメタンが、10-20kmの地底に大量に存在するというものである。

これを証明するためにスウェーデンで始まった大深度掘削は現在中止されており、またロシアのコラ半島や、ドイツにおける大深度掘削でも、深層メタンの存在は確認されなかった。我が国で行われた基礎試推において、深部で採取された天然ガスの同位元素分析においても、無機起源のガスは発見されなかった。ハントは、教科書 (1995年) の中で、炭素13同位元素を用いたガスの分析では、生物起源以外のガスの集積は、少量のガス徴を除いて発見されたことはないと言っている。

メタンハイドレートとは

非在来型天然ガスの中で、最も資源量の多いとされるメタンハイドレートについて紹介する。ハイドレート（水和物）とは、水分子が他の分子や原子と作る複合体一般を指す。そのうち、水分子が一定の数、規則正しく互いに水素結合して作り上げた立体的なかご状の格子の中に、ガスを取り込んだ包接物をガスハイドレートという。格子に取り込まれるガスは低分子のものに限られ、炭化水素ではメタン、エタン、プロパン等である。その他、炭酸ガス、硫化水素などの低分子ガスも取り込まれる。

在来型ガスとメタンハイドレートとの大きな違いは、水の包摂物でありかつ固体という特殊な存在形態にあり、更に地表及び海底面から比較的浅い地層に大量に存在するという点である。

ハイドレートの物性

ハイドレートが研究されたきっかけは、ガスを輸送するパイプラインの目詰まりの原因として指摘されたことによる。ハイドレートの生成を防ぐための研究により、基本的性質が知られるようになった。

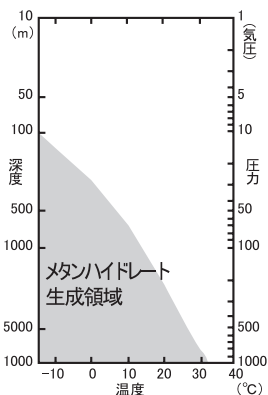
ハイドレートは、実験室でも合成され研究が進められた。外見は、湿った雪のような固体である。取り込まれるガス分子の大きさに応じて異なる結晶構造をとる。メタンが入るのはI型構造といわれるもので、完全に詰まった場合、水分子46個にメタン8個が取り込まれる。比重は0.91で、これが溶けると標準状態（15℃、1気圧）では、1m³のハイドレートから172m³のメタンガスと0.82m³の水が発生する。言い換えれば、ハイドレート中にはメタンが173倍に濃縮されていることになる。

メタンハイドレートが安定する温度・圧力条件は、図2-6に示すように、マイナス10℃・10気圧、0℃・26気圧、10℃・76気圧、20℃・250気圧を結ぶ生成曲線の低温、高压側の領域にある。安定領域は塩分濃度の増加により狭くなり、炭酸ガスや硫化水素の共存により広がる。

自然界におけるハイドレート

ハイドレートの安定領域は圧力が增大する側にあるので、地下深くまで広がっているように思えるがそうではない。生成曲線では温度が一次関数で効くのに対し、圧力は指数関数的な増

図2-6 メタンハイドレートが生成する温度・圧力条件



石油鉱業連盟1997年

加が必要である。深度の増大により地層温度が一定以上に上昇すると、ハイドレートを安定させる地層圧力は足りなくなる。ハイドレート存在領域が比較的浅い地層に限られるのはこのためであり、また後に述べるBSR（ボトム・シミュレーテッド・リフレクター）が観測される理由でもある。

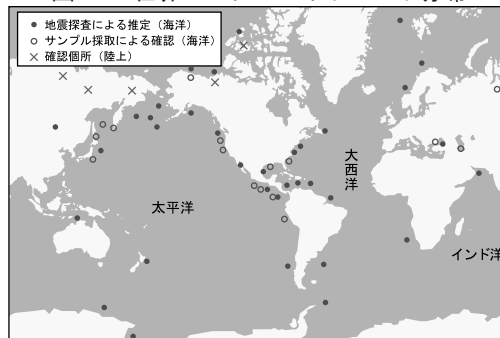
地温勾配が緩く地層圧力が高いと、ハイドレート層は厚くなる。メタンハイドレートの存在領域を推定するには、地温勾配と共に、海域では海底面の深度と温度、凍土地帯では永久凍土層の下端深度を知る必要がある。通常の堆積盆地では、温度がマイナス10℃からプラス20℃、深度が300–1200mとなる。つまり、メタンハイドレートの安定条件を満たす環境は、陸上では永久凍土の下の地層、海洋では水深500–1,000mの海底下の地層にあり、いずれも地下数十から数百mの比較的浅い範囲である。

これまで、メタンハイドレートの存在が実際に示唆あるいは確認された地域を図2-7に示した。陸上ではほぼ極地圏に限られているのに対し、海洋では世界中の大陸斜面に広がっている。日本近海でも、既に数カ所で存在が確認されている。日本は周囲を海で囲まれており、上記の安定条件を満たす海域は広い。この点から、メタンハイドレートは、特に我が国にとっても重要な意味を持つ資源であるといえよう。

メタンハイドレート層の成因

メタンハイドレート層は、まず40–70%の水分を含む地表に近い未固結の泥の中で、微生物

図2-7 世界のメタンハイドレート分布



出典：Kvenvolden and others (1993年)

起源のメタンから形成されると考えられている。いったんハイドレートが形成されると孔隙中の水分は動かなくなり、ハイドレートの安定条件が存在する限り、このゾーンに来るすべてのメタンをハイドレートに変えてしまう。地下のより深いところでは、ケロジェンの熱分解によるメタンが常に生成されて、地表に向かって上昇している。これらのメタンも、ハイドレート層の下端に達するとハイドレート化し、層の厚さは地下深部に向かって延びていく。下端が安定条件の上限温度に達すると、それより深い地層ではハイドレート化せず、その下に遊離ガス層が形成されていく。

陸上では、氷河期に地表面の岩石が冷却され、永久凍土が広範囲に形成された。凍土地帯では地表温度が低いので、メタンハイドレートは、浅い深度から安定存在領域に入り発達することとなる。

BSRとハイドレートの探鉱

地下にハイドレート層がある場合、異常に早い地震反射波が見られたり、坑井掘削中に掘削速度の低下が起こったりすることなどが知られている。しかし、これらが観察されても、必ずメタンハイドレートが発見されるとは限らない。最終的には、掘削して地層のコアサンプルを採取し、その中にハイドレートが存在することを確認しなくてはならない。地下からハイドレートを分解しないように取り出すためには、掘削泥水の比重や温度を注意深くコントロールし、圧力や温度を保ったままコアを採取する特殊な容器を用いる必要がある。

海洋におけるハイドレートの存在は、地震探査においてBSRという反射波から推定されている。BSRは、海底地層からの反射波中、堆積面ではなく海底面に平行に現れる波である。その理由は、上述したようにハイドレートの安定には圧力より地温勾配が効くため、海底面から一定の深度にBSRが現れることになる。

また、ガスハイドレート層の下端では、しばしば反射波速度が約3km/秒から0.5-0.2km/秒まで急激に低下する例が見られる。これは、固体のハイドレート層の下に遊離したガス層が

存在していることに対応しており、BSRはハイドレート層の下端を示すものであると解釈されている。

ハイドレートは、世界各地の約500mより深い海で見つかっているが、発見の多くはBSRによる推定であり、コア資料によって確認されたのはその一部に過ぎない。海洋においてガスハイドレートの存在条件を満たす堆積物が存在する面積は、陸上の8倍以上と見積もられている。

メタンハイドレートの生産

非在来型のガスであるハイドレートの商業的生産そのものを目的とした開発はいまだ行われていない。地下におけるハイドレートの存在状態に関する知見が、まだ不十分であるからである。

これまでのところ世界における生産例は、ロシアの西シベリア及びチマンペチョラ両堆積盆地における、ハイドレート層直下の在来型遊離ガスの生産に伴う副産物としてのみである。下方のガス層の生産による圧力低下により、ハイドレート層にかかる圧力が安定条件から外れ、分解したハイドレートメタンが、遊離ガスに混じって生産されるようになったのである。

ハイドレート層を貫通して掘削する際に、開発の当初は十分な対策を採らなかったため、分解ガスの噴出により坑井が破壊された。今日では、小口径の断熱ケーシングをハイドレート層全区間に降ろし、ハイドレートの分解を防ぎながら、暴噴防止装置をつけて坑井が掘削され、下部遊離ガス層からの生産が行われている。

将来のメタンハイドレートの生産方法としては、基本的に、ハイドレートを安定条件から外して分解する3種の方法—圧力の減少、温度の上昇、薬剤の添加—が考えられる。この中で現在最も経済性を有するのは、ハイドレート層の下方から遊離ガスを生産し圧力を低下させる方法であろうと考えられている。

日本周辺のハイドレート

メタンハイドレートについては、資源の少ない我が国にとって将来貴重な供給源になる可能性があることから、国の機関、大学、民間企業

などが調査研究を行ってきた。その結果、図2-8に示すように、日本周辺海域には、北海道を巡る日本海、オホーツク海、太平洋の3方面及び本州から四国、九州西岸に至る太平洋側の大陸斜面など10カ所に分布していることが、主として地震探査記録の反射波BSRから推定されている。また、北海道南西部沖の奥尻島周辺海域からは、メタンハイドレートの塊状のサンプルが採取されている。

近年我が国では、石油公団が中心となって、メタンハイドレートの資源開発可能性について総合的な調査研究を進めている。特に、世界的に情報が少ない地下におけるハイドレートの存在状態を解明するため、実際に坑井を掘削して試料を採取、分析し、種々の検層により坑内情報を収集して、国際的に注目を集めた。その一端を紹介する（梅津覚石油技術協会講演要旨（2000年）、石油公団ホームページ）。

基礎試錐「南海トラフ」

石油公団は、通産省からの委託事業として国内石油天然ガス基礎調査を実施してきた。その一環として、1999年11月から2000年2月にかけて基礎試錐「南海トラフ」を掘削した。試錐位置は、九州の西方から四国、東海地方の沖合に広がる南海トラフ（船状海盆）の東の端、天竜川河口の約50km南方沖合の地点が選定された。この付近の地震探査記録にはハイドレート層特

図2-8 日本周辺海域のメタンハイドレート分布



奥田義久「エネルギー・資源、1994年」

有の反射波BSRが観察され、またより深部の地層には炭化水素の集積が期待できる地質構造が見られた。

本試錐の海底深度945mは、我が国における海洋掘削の最大水深記録である。従来、大水深海域のハイドレートは、簡便な学術ボーリングによって調査されてきた。今回は、世界で初めて本格的に石油掘削リグを使用し、メタンハイドレート層のコア採取と物理検層の後、ハイドレート層をケーシング管で遮断し、その下部の油・ガスの探鉱を行った。掘削には、米国コントラクター所有の半潜水型石油掘削船が用いられた。

予備掘削

本試錐に備えて、石油公団は1998年にカナダ地質調査所と共同して同国北極圏のマッケンジーデルタにおいて、永久凍土下のハイドレート層の掘削調査を行った。このとき得られたハイドレート試料の存在状態、分析データ、検層、掘削の経験が今回の調査に生かされた。特に、地下の温度、圧力を保持したまま試料を採取するために石油公団が民間企業と共同で開発したPTCS（プレッシャー・テンペラチャー・コア・サンプラー）は、カナダでの実証テストにより改良され、完成されたものである。

高濃度のハイドレートを確認

基礎試錐「南海トラフ」においては、海面下1,110-1,272m（海底面下165-327m）の砂岩層からPTCSによってコアサンプルを採取した。多量のメタンガスの発生、異常に低いサンプル温度、異常に低い地層水の塩分濃度等により、1,152-1,210m（海底面下207-265m）の区間に3層、計16mのメタンハイドレートの存在を確認した。

これらの層はいずれも砂層であり、メタンハイドレートの存在状態はマッケンジーデルタと同様、砂の粒子間の孔隙を埋める孔隙充填型と分類された。実際に一部の試料で、この状態が肉眼で確認された。種々の分析結果から、メタンハイドレートの含有率が全堆積物容量の20%という高集積度の砂岩層が確認された。この値は、1995年の米国フロリダ沖での国際深海掘削

計画第164次航海において確認されたものの約10倍に相当する。

今回の調査により、日本近海の海底下からメタンハイドレート層の含有層を実際に確認したことは、今後の調査研究の重要な基礎となると考えられる。なお、ハイドレート層下部には、遊離ガス層、油層、ガス層は発見されなかった。

大きな国際貢献

メタンハイドレートの資源量については、全世界で80wtcf、日本周辺で200wtcfとの推定もあるが、可採埋蔵量を論じるには、地下における存在状況の解明が不十分である。それ故、我が国が、永久凍土下及び大水深下の2種のハイドレート層の掘削を実施し、その実体を解明し、試料とデータを国内外に提供していることは、国際的にも極めて大きな貢献であると評価されよう。

石油公団は、次いで2002年3月にもカナダ、米国、ドイツなどと共同してカナダのマッケンジーデルタでハイドレートのガス回収実験を行い、成功したと発表した。間もなく行われる詳しい結果報告の公表に期待が集まっている。

(5) 最近の天然ガス埋蔵量調査

先頃の世界石油会議で報告された、天然ガス埋蔵量の最新の検討結果について紹介する。

米国地質調査所が発表

2000年6月、カナダのカルガリーで第16回世界石油会議が開催された。この会議では1984年以降4大会連続で、米国地質調査所のマスターズ達が世界の石油、天然ガスの埋蔵量評価について報告してきた。それらは、マスターズ報告として石油、エネルギー関係者に最も権威あるものとされ、多くの人に引用されてきた。

前回の北京大会1997年では報告が途絶えたが、今回再び米国地質調査所からマスターズの後継者達が、過去5年間の新しいスタディーの結果を「世界石油資源量評価2000」として報告した。ここで「石油」は広い意味で、気体（天然ガス）、液体（原油）、固体（アスファルト）等すべての石油系炭化水素を含むが、今回は、原油、天

然ガス、液体天然ガス（NGL）が対象である。報告の要旨を、大会で配布されたCD-ROM及び同所ホームページを踏まえて紹介する。

新しいアプローチ

従来の埋蔵量評価は、種々の調査報告や専門家の見解を統計的に取りまとめる、いわゆるデルファイ法であった。

それに対し今回の特徴は、徹底した地質学的スタディーを主眼としていることである。

また今回は、従来の究極可採資源量ではなく、30年間（1995-2025年）に追加される可能性のある埋蔵量に限っている。非在来型資源を取り上げていないのはこのためであろう。

更に、従来あいまいであった未発見資源量からの新規発見と、既発見フィールドからの埋蔵量の増加「埋蔵量成長」とを厳密に区別している。

石油システム

未発見資源量の見積もりは、近年の地質学、特に地球化学の進歩を総合した石油システムという考え方に基礎を置いている。石油システムとは、石油系炭化水素鉱床の成立をもたらすような地質学的・地球化学的な要素と過程の組み合わせを指す。根源岩とトラップ（貯留岩と帽岩の組み合わせ）の形成過程や性質、そして石油、天然ガスの生成、移動、集積のタイミングなどが重要な要素となる。

今回のスタディー結果

埋蔵量成長と未発見資源量の見積もりの中間値、残存埋蔵量、累積生産量を、原油と共に、前回の報告値と並べて表2-2に示した。今回の量的評価により、埋蔵量成長は天然ガスについても、原油についても、残存埋蔵量や未発見資源量に並ぶ重要な量であることが示された。

その結果、天然ガスの場合は、前回の報告に比べて残存可採埋蔵量、未発見資源量共にやや少ない見積もりとなったが、埋蔵量成長を合わせた残存究極可採資源量では、1万927tcfから1万3,649tcfへと大幅に増加している。

天然ガスは原油に比べ、資源量合計に占める累積生産量、埋蔵量成長が小さく、残存埋蔵量、未

表2-2 米国地質調査所による資源量評価

	今回 (2000年) 報告		前回 (1994年) 報告	
	天然ガス	原油	天然ガス	原油
残 存 埋 蔵 量	4,793	8,910	5,136	11,032
埋 蔵 量 成 長	3,660	6,880		
未 発 見 回 収 潜 在 資 源 量	5,196	7,320	5,791	5,826
小計(残存究極可採資源量)	13,649	23,110	10,927	16,858
累 積 生 産 量	1,752	7,100	1,750	6,986
計 (究 極 可 採 資 源 量)	15,401	30,210	12,677	23,844

単位：天然ガスはtcf, 原油は億バレル

発見資源量が大きいことから、探鉱開発の成熟度が小さく、今後の可能性が高いことが分かる。

今回の評価は、従来よりも厳密な地質学的手法によるものであり、それだけ信頼性も高いといえよう。

(6) 資源量のまとめ

1. 在来型天然ガスの資源量が十分に存在することは、最近の米地質調査所のより厳密な調査によっても確認された。残存確認埋蔵量は約5,000tcfあり、現年間生産量約100tcfの約50年分に相当する。これに今後30年間に追加される可能性のある埋蔵量成長及び未発見資源量を加えると、計約1万3,000tcf、約130年分となる。たとえ今後天然ガスの需要が倍増しても、21世紀の前半は供給可能な量である。
2. 鉱床形成機構からみて、天然ガスは原油と比較して鉱床の分布が地下のより深部にあり、また探鉱開発の成熟度が低いことから、今後の探鉱の深部化、技術開発の進展により、資源量の発見が拡大する余地が大きい。また、メタンハイドレート層をシールとし、その下部に存在する遊離ガスも今後の有望探鉱対象として残されている。
3. 非在来型天然ガスには多くの種類があり、かつ大量に存在していることが、近年の調査研究及び探鉱開発の実践により次第に明らかになってきている。経済的採取に関する努力も着実に進められている。中でも、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種は既に米国で生産が始まり、全米ガス生産量の20%を占めるよう

になってきている。これら3種のガスの原始埋蔵量(既発見資源量)は全世界で約1万tcfと推定されており、仮に回収率を50%とすると、可採埋蔵量は約5,000tcfと在来型天然ガスと同程度になる。現在の回収率はまだ数%であるが、今後の技術開発、社会経済条件の進展により回収率が向上し、21世紀の半ばまでには供給源として大きく寄与するものと期待される。

4. 非在来型天然ガスには、地圧水溶性ガスやメタンハイドレートなどのように、更に莫大な資源量が推定されながら、経済的回収が可能かどうかは現段階では不明なものがある。メタンハイドレートは我が国近海にも大量に存在する可能性が指摘されていたが、先頃の石油公団による掘削調査により実際に存在が確かめられ、今後の調査の足がかりが得られたところである。これらのガスも、今後の研究の進展によっては経済的回収の道が開かれ、21世紀の供給源に変わる可能性がある。

第3章 天然ガスの輸送、貯蔵、供給

21世紀の主要エネルギーとして期待される天然ガスは、資源量、利用技術とエネルギー効率、未来のエネルギーシステムへの掛け橋、環境性など、種々の優れた特徴を持っている。しかし、天然ガスがいかに良いものであっても、それが世界の広範な地域に届けられなければ、最終的に人々の役に立つことはできない。そこで、本章では、天然ガスの供給体制の現状と課題を紹介したい。

(1) パイプラインと地下貯蔵

天然ガスの短所をあえて挙げれば、それは輸送貯蔵の非効率性であり、これが供給上の課題となっている。

主成分のメタンは、単位重量当たりの熱量では炭化水素資源の中で最高である。しかし常温では比重が軽い気体であるため、固体の木材、石炭や液体の石油より体積当たりの熱量は1/100以下とずっと小さく、そのままだと輸送貯蔵効率が悪い。その上、拡散しないように気密性の高い導管や容器を用意しなければならず、設備費、管理費も高くなる。

天然ガスの輸送貯蔵効率を上げるためには、単位体積当たりの密度を上げることが必要で、そのために圧力を加えて数十から数百分の一に圧縮し、高圧パイプラインや耐圧容器で運ぶ。あるいは、極低温に冷却して液化天然ガスLNGとして特殊な断熱タンクに入れ、船や車で運搬する。これらの施設、容器の建設や製造及び運用管理には、高い技術力と経済力の両方が必要である。

このような事情から、現在増加中とはいえ、世界各国で生産される天然ガスのうち国外に輸出される分は、いまだ全体の1/4に達していない。そしてこれまでは、主要な天然ガス貿易は、米国を中心とする北米圏、欧州を中心とするロシア、北アフリカ圏、日本を中心とするアジアオセアニア圏という三つの先進工業地域を囲む3地域内に限られていた。

これに比べると石油の輸送は、資源の偏りがあるにしても、中東産の石油が全世界へ輸出されていることに見られるように、技術的にも経済的にもずっと容易であり、その貿易量も全生産量の1/2を超えている。

大規模利用、米国では戦前から

近代的石油産業の発祥の地である米国では、天然ガスの大規模利用も世界に先駆けて第二次大戦前から始まった。中西部で石油の探鉱と共に発見された大量のガスは、鋼鉄製のパイプラインで大陸を横断し、東部の需要地へと運ばれた。

米国では、原油のパイプラインは早くから利用されており、大口径鋼管の製造技術が発達し

ていた。大規模な投資は必要であったが、大きな需要があり、それを長期間支えるだけの大きな埋蔵量が確保されていたので、高圧ガスパイプラインの建設は、スケールメリットにより経済性が確保された。

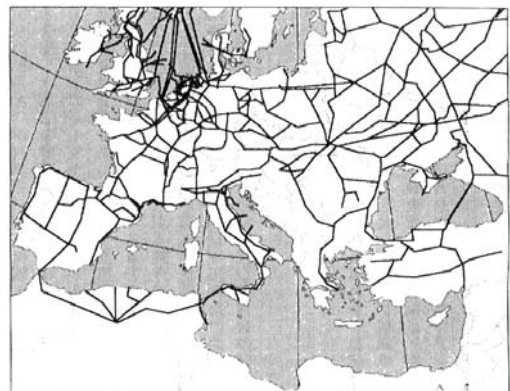
米国の天然ガス需要は戦後も引き続き発展した。産地と需要地を結ぶ多数の大規模高圧パイプラインからなる供給ネットワークが形成された。高圧パイプラインの総延長は、約50万kmに近づいている。米国の天然ガスは、同国一次エネルギー供給の約1/4、石油に次ぐ第2位となり、消費は現在も増大中である。このため、カナダの西部地区から複数の国際パイプラインも建設され、輸入も行われている。

欧州で発達した国際供給網

欧州では戦後まず、フランス南部やイタリア北部でガス田の発見があり、天然ガスの利用が始まった。続いてオランダ領北海の巨大なフロニンゲンガス田が発見され、これを契機に欧州各国でガスを利用する域内パイプラインが敷設された。

その後、欧州域外のロシアやアフリカ北部のアルジェリアなどから天然ガスを輸入する国際パイプラインが相次いで複数建設され、これに北海の中部、北部でその後発見されたガス田からの供給ラインも加わって、現在では図3-1に見るように、欧州を覆う大規模な供給網に発展している。高圧パイプラインの総延長は、約20万kmに近づいている。

図3-1 欧州天然ガスパイプライン網



また、欧州へはアルジェリアからのLNGによる輸入も行われている。供給国・地域や供給方法の多様性、重層性も本地域の特徴で、エネルギー供給の安全性や、価格の安定性に貢献している。

これにより、欧州の一次エネルギーにおける天然ガス供給も20%を超えて、石油に次ぐ第2位となり、更に増大中である。

地下貯蔵の発達

米国及び欧州における天然ガスパイプラインを中心とする供給システムの中で、地下貯蔵は不可欠な構成要素となっている。天然ガスを大規模に使用しているこれらの国々では、年間消費量の20-40%に及ぶ大量の地下貯蔵を行っている。

天然ガスの需要の特徴は、季節的及び1日の内の変動が大きいことである。地下貯蔵の役割は、第一にこのうち季節変動に対処することにある。最大需要規模に対するパイプラインシステムの規模を低く最適に抑え、稼働率を高めることができる。すなわち、非需要期に地下へ貯蔵しておき、需要期に払い出す。これによりガスの長期購入契約条件にある均一な引き取り義務にも対応できる。

第二に、産ガス国や、国際パイプラインが経由している国々で突発する、何らかの事故による供給の緊急遮断時に対する安全保障である。ロシアなど域外からパイプラインガスを輸入する欧州のガス事業者にとって、供給の安定性を確保することは、石油、石炭、電力など、他のエネルギーとの顧客獲得競争においても、欠くことのできない条件であった。

第三に、現在進行しつつあるエネルギー市場の自由化に対処し、ガスや他の競合エネルギーの価格変動に応じて、ガスの買入れや販売を迅速かつ柔軟に行う流通倉庫としての役割である。

油ガス田を活用

地下貯蔵に最も多く用いられているのは、欧米共に生産減退後、あるいは稼働中の油ガス田で、貯蔵量の約8割を占めている。その他は、

地下の帯水層、及び石灰岩層で、それぞれ残りの約1割ずつである。

油ガス田を用いる利点は、新規の建設費が圧入施設を除きほとんど不要で、地上に新たにガスホルダー、タンクを建設するコストに比して、約100分の1程度と安価なこと、耐圧安全性に関しては、少なくとも当該油ガス田の生産初期圧力までは検証済みで問題がないこと、そして何よりも石油天然ガス鉱業のノウハウが活用できることなどである。

油ガス田の所在地が、必ずしも既存のパイプラインや消費地の近隣にない場合もあり、その際には接続用パイプラインの新設が必要となる。しかし、その資金は建設初期には問題になるが、いずれ沿線に新しい需要家が立地し、回収されることになる。

世界ネットワークへ

天然ガスパイプラインは、最近、欧米だけでなく、アジア、アフリカ、中南米の発展途上国でも建設が始まりつつある。これらの天然ガスパイプラインは、やがて国境を超え、大陸をまたいでつながり合い、21世紀の半ばまでには、世界の主要地域をカバーするガスパイプラインネットワークが完成するだろう。それにより世界中の人々が、安定し、かつ需要の変化にも柔軟に対応する天然ガスの供給を受け、その恩恵にあずかる日が来ると期待される。

(2) 液化天然ガス (LNG)

前節で紹介したように、天然ガスの輸送には、高い技術力と経済力を必要とするため、現在世界の全生産量のうち、貿易量は1/4に留まっている。そのうち、約75%がパイプラインによるもので、3大貿易圏のうち、北米及び欧州の2地域への主要な輸送手段となっている。

一方、残りの一つの貿易圏の中心である日本は、欧米と異なり、国内に大規模なガス資源がなく、全国規模のパイプラインも、また島国のため外国からの輸入パイプラインも建設されなかった。しかし、欧米に遅れはしたが70年代に入ると、別のシステム、LNGチェーンの導入により、天然ガスの大規模利用時代を迎えるこ

ととなった。そして、今日では、我が国が消費する天然ガスの95%以上を、海外からのLNGが供給している。

本節では、我が国への天然ガス供給の現段階を概観し、今後我が国が、天然ガスの利用を更に進めて、真に天然ガスの世紀を迎えるために必要な課題を考えてみたい。

日本の天然ガス時代を拓いたLNG

天然ガスの主成分メタンは、常温ではどんなに圧縮しても液化しない。臨界点のマイナス82.5℃まで冷却し45.8気圧で初めて液化する。更に沸点である極低温マイナス161.5℃においては、1気圧で液体となる。これが液化天然ガスLNGであり、密度は気体の約600倍に上昇するので、輸送貯蔵効率は格段に向上する。

しかし、LNGが実用化するまでには、20世紀初頭からの極低温領域での熱力学の進歩や、第二次大戦後の材料工学の発展が必要であった。

米国では40年代から夏場の非需要期に消費地における天然ガスのLNGタンク貯蔵、欧州では50年代から大西洋地域におけるLNGの海上輸送の試みがそれぞれ行われ、関連技術、資機材の研究開発、ノウハウの蓄積が進んだ。

我が国では、第二次大戦後、初めは石炭、次いで石油をエネルギー源として工業化を進め、高度経済成長を成し遂げたが、50年代から60年代にかけて、深刻な大気汚染、水質汚染による公害が発生した。

これに対処するため、クリーンなエネルギー資源である天然ガスによる代替が検討された結果、69年から東京電力及び東京ガスによるアラスカからのLNG輸入が開始された。これが世界における本格的な大型LNGタンカーによる海上輸送の始まりであった。

70年代からの2度の石油危機における油価高騰もあり、他の電力及び都市ガス事業者も加わったLNGの輸入先は、ブルネイ、インドネシア、アブダビ、マレーシア、オーストラリアへと着実に広がり、天然ガスは、石炭と並び石油に次ぐ我が国第3位の基幹エネルギーへと成長してきた。

LNGは世界の天然ガス貿易の約1/4を占める

ようになり、我が国はその内の5割以上を担う世界一のLNG輸入国となり、パイプラインを含めた世界の天然ガス総輸入量においても、米国、西ドイツに次いで第3位、約13%となっている。

天然ガスの比率を早急に上昇させる必要性

このように、我が国における過去30年間に於ける天然ガス利用の成長は著しいものではあったが、一次エネルギーにおける比率はまだ石油の約1/4の約13%と欧米に比して低く、更に上昇させる必要がある。

世界の天然ガス埋蔵量を見ると、石油と同程度であるだけでなく、今後更に発見増加が期待される。一方、石油の年間消費量は天然ガスの約2倍でより早く減退する見込みである。従って、我が国への中長期的なエネルギー安定供給を考えると、天然ガスの比率を上昇させ、まず石油の1/3から少なくとも欧米並みの1/2にし、最終的に石油と並ぶ割合に移行させることが合理的である。石油の埋蔵量及び供給地が中東地域に集中しているのに対し、天然ガスがより広い地域に分散していることも、エネルギー安全保障に寄与する。

更に京都議定書を批准した我が国としては、地球環境を保全し、国民の健康を守る観点から、天然ガス導入については、比率の上昇のみでなく、その速度を早めることも重要である。そのためには、天然ガス供給地域を都市部から全国的に広げることが必要である。

これにより、分散発電やコージェネレーション、熱のカスケード利用などのエネルギー高効率利用が普及し、我が国全体のエネルギー利用効率が向上することになる。

ガス供給網は国土の5%

我が国では、天然ガス供給網の及ぶ範囲は大都市を中心としているため、世帯数としては約50%に相当するが、国土全域に対しては約5%に過ぎない。

これは、天然ガスの大部分を供給する主要なLNG受け入れ基地が、大需要地である東京、大阪、名古屋などの大都市が発展した太平洋沿

岸の港湾部にそれぞれ建設されたためである。LNGはそこでガス化され、これらの大都市及び周辺部用の発電所や、都市ガス導管網に直接供給されたため、国土の主要部を結ぶ幹線パイプラインは建設されなかった。

我が国にも幹線パイプ網を

天然ガス利用の進んだ欧米では、既に紹介したように、米国の約50万km、欧州の約20万kmなど、発達した高圧導管網を持っている。これに比べ、我が国の高圧導管は図3-2に示すように極めて未発達な状態といえる約1,800kmであり、天然ガス利用発展の障害となっていると思われる。しかし、今後我が国の広域導管網建設については、次のようないくつかの可能性がある。

1. 国、あるいは国営企業による幹線パイプライン

歴史的に、米国を除く欧州各国において広く行われてきた。現在もアジア、中南米、アフリカにおいて進められている。既に述べたエネルギーの安全保障、地球環境の保全等の観点から、日本の今後のエネルギー政策の重要な柱として天然ガスシフトを進めるためにも、国の基本インフラとなる幹線導管網建設を求める声が多い。

2. 地下貯蔵基地の建設に伴う横断ライン

上に述べた幹線ラインに不可欠の構成要素である。日本海側の油ガス田を地下貯蔵基地とし、太平洋側へのパイプラインを建設する。経済性調査も行われている。日本海側へのLNG基地の建設、あるいは海外

からの輸入パイプラインのつなぎ込みとの組み合わせも想定される。

3. 海外ガスの国際輸入パイプライン

欧州を中心に行われている一般的な方法である。我が国で最も実現に近いと見られるのは、サハリンIプロジェクトによるサハリン島北東沖合ガス田からのパイプラインである。既に約20tcfの埋蔵量が確認済みで、更に増加する可能性が高い。関東地域までの距離約2,000kmは、LNG方式との比較における経済性分岐点である約5,000kmよりずっと近い。天然ガスの輸入市場に、既存のLNG方式に対して新たにパイプライン方式が参入することは、競争による価格の低減に加え、供給先のみでなく、供給方法の分散化によるエネルギー安全保障などの利点もある。

4. 国内ガス鉱業による供給ライン

我が国においても、60年代の帝国石油の新潟-東京ライン、90年代の石油資源開発による新潟-仙台ラインなど、国内で発見されたガスの供給用ラインが少しずつ建設されてきた。しかし、埋蔵量が限られているため、全国規模への発展はなかった。しかし今後探鉱が進められる日本近海で大規模なガス田が発見されれば、大規模パイプライン網の建設へつながる場合もありうる。

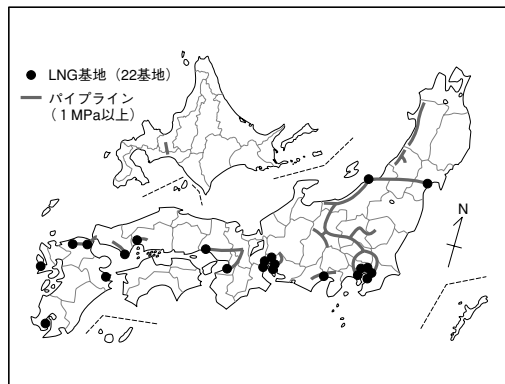
5. 都市ガス事業者による導管延長(しみだし)

従来から徐々に進められてきたが、3大経済圏相互の接続にもいまだ至っていない。今後の市場自由化を前に、加速される可能性もある。

6. バイオガス利用の地域供給ライン

バイオマスは、カーボンニュートラルで、再生可能な持続性エネルギーの希望である。農林畜産物の廃棄物や休耕田を利用したエネルギー作物から、今後メタン発酵などによる安価なガス生産が期待されている。地方が相互に、あるいは都市需要地に供給ラインを延ばすことによって、我が国の広い部分をカバーするグリッド形成の契機となる可能性がある。

図3-2 日本の天然ガスパイプラインとLNG基地



7. 高速道路に沿ったパイプライン建設

02年夏、国土交通省と経済産業省が、高速道路の路肩に、パイプラインの建設を認める方針で検討を行うとの報道が行われた。道路公団の高速道路は、北海道から沖縄まで、既に全国の主要地域を結ぶ約7,000kmに達しており、これを利用することにより、高圧導管の早期かつ経済的な普及が加速される。また、運輸部門の環境負荷低減に求められている天然ガス自動車普及への支援ともなる。

我が国の至るところで天然ガスの利用が可能となり、その優れた特徴を最大限に利用する社会経済システムの実現する時が、1日も早いことが期待される。

第4章 天然ガスで環境を守る

天然ガスは、温暖化現象のような全地球的な環境問題においても、大気、水質、廃棄物などの地域的な環境汚染の問題においても、その解決に極めて有効な役割を演じることができる。

(1) 燃料転換

天然ガスの特徴であるいくつかの優れた価値の中で、ますます評価が高まってきているのが環境性である。21世紀のエネルギー資源の流れが天然ガスへうつりつつあるのは、人々の評価基準が、単にエネルギーの化学的・物理的側面だけでなく、社会経済上の価値、特に地域的及び全地球的な環境上の価値にもより大きな比重を置くようになってきたためである。

燃料の高エネルギー化

人類が最初に求めたエネルギーの価値は、まず燃料としての高カロリーであった。

木材から石炭、石油、天然ガスに至る主要な4種のエネルギーは、基本的に炭化水素燃料である。既に述べたように、その燃焼熱は構成元素である水素及び炭素の酸化燃焼熱のおよその和である。燃焼熱は、水素分子3万4,000kcal/kg、炭素7,800kcal/kgであるから、炭素に対する水

素の比率が高いほど燃焼熱が増加する。

実際、それぞれの平均的水素対炭素比と熱量の関係を見ると、

木材	1対10	1,500-2,000kcal/kg
石炭	1対1	5,000-8,000kcal/kg
石油	2対1	8,000-1万1,000kcal/kg
天然ガス	4対1	1万3,000kcal/kg

となっており、天然ガスが最高の水素含量を、つまり最高の燃焼熱を持つことが分かる。

深刻な大気汚染の発生

しかし、これらの燃焼に伴い、炭素は二酸化炭素、水素は水になる一方で、各種燃料には水素、炭素以外の元素も含まれるため、それによる種々の燃焼排気ガスが発生する。

その成分は硫黄、窒素、酸素、各種金属であり、SO_x、NO_x、金属酸化物等の大気汚染物質が排出される。また炭化水素の中でも高分子の芳香族系化合物は、排気ガス中の微粒子発生の原因となる。

これらの汚染物質は、産業革命以降、工業の発達した諸国において、自然環境や動植物の生態と共に、住民の居住環境、特に人口の集中した都市環境を破壊し、人々の健康に大きな被害を与えることとなった。

19世紀から20世紀の石炭時代には、ロンドンなどの大都市において、冬期には暖房に用いられる石炭から発生する多量の煤煙を原因とする濃霧がたびたび発生し、多くの死者を出した。

20世紀になると、交通機関や都市生活用に、石炭より煤煙が少なく、また利便性の高い石油燃料の導入が急速に進んだ。自動車の利用が最も発達した米国では、有名なロサンジェルスのスモッグなどの環境汚染が早くから始まった。

欧州や我が国においても、50年代から60年代の高度経済成長期に、工業地帯や自動車から石油燃料の燃焼排気物質が大量に排出された。SO_x、NO_x及び微粒子などによる大気汚染や光化学スモッグが発生し、周辺の住民や勤務者に喘息や肺がんなどの深刻な健康被害を与えた。また、SO_xやNO_xは風に運ばれて国境を越え長距離移動し、遠く離れた国々にも酸性雨などの被害を与え、国際的な問題を引き起こすように

なった。

各国では、これに対処するために、60年代から70年代にかけて、自動車の排気ガス規制や、各種石油製品の硫黄分や金属成分の制限が行われるようになったが、汚染の進行はなかなか止められなかった。

天然ガスの登場

このような状況下で、欧米を中心に天然ガスの利用が促進された。天然ガスは、エネルギー効率が高いだけでなく、硫黄、窒素、金属成分を含まないため、排気ガスが清浄であり、その環境性が高く評価されるようになった。

早くから、石油と共に多量の天然ガス埋蔵量が発見されていた米国では、既に第二次大戦前から国内の産ガス地と消費地を結ぶ長距離パイプラインが建設され、大規模な利用が始まっていた。

欧州では、第二次大戦後、域内の北海やイタリア、フランスにおけるガス田の発見を契機に、やはりパイプラインによる天然ガス供給網が建設され、大規模利用が始まった。後には、域外のロシアや北アフリカからも、パイプラインやLNGによる輸入が行われるようになった。

我が国においては、新潟産のガスを東京まで運ぶパイプラインが、帝国石油によって62年に建設されたが、生産量が増大せず、大規模な利用に至らなかった。また、島国であるため、海外からの輸入パイプラインも建設されなかった。

しかし、当時実用化されてきたLNG技術を利用して海外から天然ガスを輸入する計画が、電力業界と都市ガス業界の協力によって進められた結果、69年のアラスカプロジェクトを皮切

りに、70年代からはアジア、中東、オーストラリアからの輸入も加わり、LNGによる天然ガスの本格的な利用が始まった。

当初、LNGの価格は石油よりも高かったが、大気汚染などの環境対策費が不要であり、総合コストとしては石油とほぼ同じになった。その後、73年と79年の石油ショックで石油価格が高騰すると、LNGは価格面でも有利になり、80年代、90年代を通じて、着実に導入が進んだ。

更に、今後特に重要になってくる地球温暖化対策においても、天然ガスの導入が、各国の二酸化炭素排出削減のための中心的な対処法として期待され、需要の増大が予測されている。

大きな燃料転換効果

主要な燃料を、産業用ボイラーで燃焼した際の生成物の例を表4-1に示す。

微粒子の発生量は、燃料（石油換算）1t（トン）当たり、石炭の100kgに対し石油は1.8kgと少ないが、天然ガスは0.1-0.3kgと更にもう一桁少ない。NO_x、COについても、石炭、石油より数分の一少ない。特に、SO_xは、石炭、石油とも約30kg、20kgの排出があるのに対し、天然ガスから全く排出されない。また、炭化水素の排出もゼロである。

地球温暖化の主要な原因となっている二酸化炭素の排出については、成分元素中の炭素の比率が小さいほど減少する。炭素対水素比は、木材10対1、石炭1対1、石油1対2に対して、天然ガスは1対4と最も小さい。従って、燃焼に伴う炭酸ガスの発生量を同一熱量当たりで比較すると、石炭100、石油76に対して、天然ガスは最少の55となる。また、生産から、輸送、

表4-1 化石燃料燃焼生成物中の含有成分

(単位：石油換算t当たりのkg数)

排出物質	石炭 (1%S,10%ash)	石油 (1%S)	天然ガス
微粒子	100	1.8	0.1~0.3
S O x	29.2	20.0	0
C O	1.5	0.7	0.3
炭化水素	1.5	0.1	0
N O x	11.5	8.2	2.3~4.3
(指数)	(100)	(71)	(20~37)

「天然ガス（2010年への展望）」OECD/IEA, 1987.3 国際エネルギー問題研究会、天然ガス鉱業会発行より

貯蔵、燃焼、廃棄に至る全過程、すなわちライフタイムの発生量で比較しても、石炭100、石油73に対し、天然ガスは60とやはり最も少ない(表4-2)。

「日本エネルギー経済研究所統計要覧2002」によれば、00年の一次エネルギー国内供給に伴う二酸化炭素排出量(炭素換算t)は、石炭約98百万t、石油約1億78百万t、ガス約41百万tであった。

仮に、石炭と石油を全量同一熱量の天然ガスに置き換えると、二酸化炭素排出量の減少はそれぞれ、4400万t、4900万t、合わせて9,300万tとなる。これは、我が国の二酸化炭素全発生量の約29%に当たり、燃料転換のみでも、大きな環境改善効果をもたらすことが分かる。

これに加えて、次節で述べるように天然ガス利用による省エネルギー技術を組み合わせると、更に大きな温暖化ガス削減が可能となる。

(2) 省エネルギー

エネルギー消費量の削減、省エネルギーは、燃料転換と並んで燃焼排気ガスを減らし、環境負荷を少なくする有効な方法である。エネルギー効率を高めれば、同じ仕事を少ないエネルギーで行うことができる。天然ガスは、エネルギーの高効率利用に適した資源であり、最近の利用技術の発展がその実現を加速している。

高エネルギーと高温燃焼

前節で述べたように、木材から石炭、石油、天然ガスに至る4種のエネルギーの中で、天然ガスが最高の水素含量を、従って最高の燃焼熱を持っている。

大きい燃焼熱は、二つの理由で高いエネルギー効率を可能にする。一つは、高い燃焼温度であり、もう一つは、それから導かれるカスケード利用である。

温度が高い状態とは、分子の運動が激しいことを意味する。燃料が燃える時、高温であるほど、燃焼排気ガス中の二酸化炭素や水蒸気の分子が激しく運動することとなり、エンジンのピストンやガスタービンの羽根を強い圧力で押すことができ、出力が大きくなる。

例えば、火力発電の発展過程を見ると、先行した蒸気タービンにおいても、また最近のガスタービンにおいても、発電効率向上は、システムの高温度化、高圧化の追求によって行われてきた。

カスケード利用

次に、燃焼温度が十分に高ければ、最初の熱機関で仕事をした後の排気ガスでも、十分に高温で、次の熱機関でも仕事をする余力がある。更にその排気ガスの熱を三次的に利用する余地もある。このように、高い温度から低い温度へ、

表4-2 ライフサイクルCO₂排出量

(g-C/Mcal)

ライフサイクル	石炭	石油	LPG	天然ガス(LNG)
採掘、液化等	3.08	0.27	3.68	6.78
フレア燃焼	0.32	0.70	0.70	0.58
メタン放散	2.36	2.36	3.87	0.97
随伴CO ₂ 排出	-	0.03	0.49	2.20
海上輸送	2.79	0.81	2.12	2.22
国内製造	-	1.86	1.01	0.29
冷熱利用	-	-	-	▲0.32
〈小計〉	〈12.2〉	〈5.7〉	〈11.9〉	〈12.7〉
燃焼	103.2	78.1	68.3	56.4
合計	115	84	80	69
(指数)	(100)	(73)	(70)	(60)

(メタン放散は温暖化係数：21でCO₂量に換算)

「採掘から燃焼までグローバルにみた各化エネルギー源の温室効果の比較」エネルギー経済：第24巻第5号(1996)より

水が階段状に流れ落ちる滝（カスケード）のように、順に多段階で熱エネルギーを利用すると、それぞれの段階の熱効率の和として、高い総合熱効率が得られる。

コンバインド発電やコージェネレーションが、高い発電効率や総合熱効率を発揮することができるのは、熱のカスケード利用を行っているからに他ならない。

高効率を求める火力発電において、現在天然ガスコンバインド発電が主流となりつつあるが、それは高温高压、及び大型化によっても、単一の発電機では、40%以上の発電効率の実現が困難であることによる。

これに対して、ガスタービンとその排熱による蒸気タービンを組み合わせたコンバインドシステムでは、初期のタービン入り口温度約1,100℃級でも40%以上を実現し、現在主力である1,300℃級では48%、最新の1,500℃級では50%以上の発電効率が得られる。

熱力学において、熱エネルギーの高い有効利用率を得るために最も重要な要素は高い燃焼温度であるが、それを可能とするエネルギーが天然ガスである。

我が国におけるエネルギー有効利用の現状

それでは、我が国におけるエネルギーの有効利用率は、どの程度であろうか。図4-1に75年から、86年、94年に至るほぼ10年ごとの我が国のエネルギー供給と消費の流れの推移を示した（環境白書、97年）。

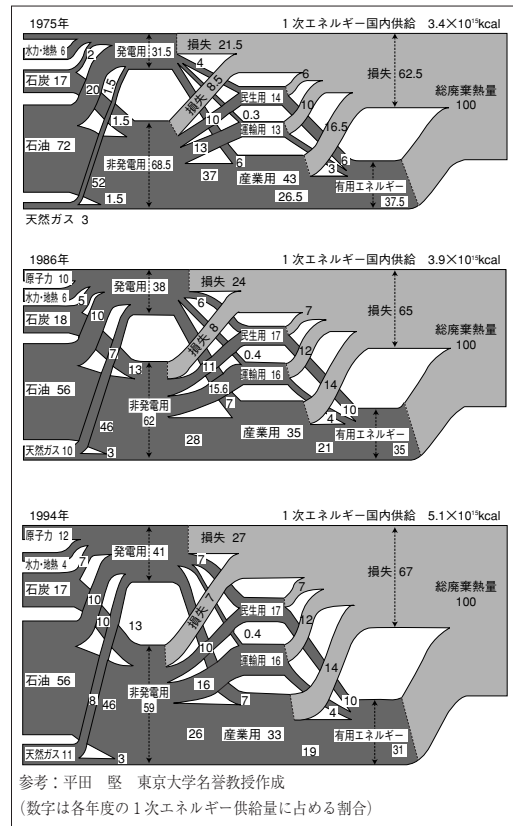
図の左から右へと、エネルギーの供給、転換、消費の流れに沿って、損失と有効利用の大きさが、熱量に比例した幅で示されている。左側から、原子力、水力・地熱、石炭、石油及び天然ガスの各一次エネルギーが供給され、これらはそれぞれいったん発電用と非発電用にまとめられる。発電部門では損失分以外のエネルギーが電力に転換されたのち、民生、運輸、及び産業用の3部門に振り分けられ、再び非発電用のエネルギーと合流して消費される。消費段階では、それぞれ損失と有用エネルギーに分けられ、これらの和として、消費における全損失と全有用エネルギーが示される。有用エネルギーも最終

的には熱となり、一番右に示される両者の和、総廃棄熱量は、総供給エネルギー量と等しく100となる。

これによると、一次エネルギーの国内総供給量は、75年の 3.4×10^{15} kcalから86年の 3.9×10^{15} kcal、95年の 5.1×10^{15} kcalまで約1.5倍に増加した。ところがその一方で、それから生まれる総廃棄熱量中の有用エネルギー比率（エネルギー有効利用率）は、75年の37.5%から86年の35%、94年の33%に減少した。

我が国全体のエネルギー効率が低下した原因は、この間、31.5%から38%、41%へと、一次エネルギーに占める発電用消費が急上昇したことにある。元々、発電部門のエネルギー利用効率は30%台で、非発電部門の50%台よりかなり低かった。従って、オフィスや家庭の電化など

図4-1 我が国におけるエネルギー供給・消費のフローチャート



参考：平田 堅 東京大学名誉教授作成

（数字は各年度の1次エネルギー供給量に占める割合）

出典：環境白書97年度版

による電力需要増大に応じて、電力化率が急速に上昇すると、発電効率が多少改善されてもカバーできず、全体の効率は低下することとなった。

分散利用とコージェネで省エネを

国内の電力需要は、今後とも、OA化や空調の普及などによる増大が見込まれ、電力化率の上昇は避けられないと見られる。発電効率は、大型化やコンバインドサイクルなどの導入によって、最近約40%まで改善されてきたが、大規模発電所の立地は最大需要地である都市部からますます離れていくため、送電ロスと排熱利用の困難さのために、それ以上の改善は容易ではない。たとえ発電効率が50%となっても、郊外の発電所では、残りのエネルギー50%は利用できず、熱として環境中に廃棄せざるを得ない。

これを解決する方法は、輸送と貯蔵が困難な電力や、特に熱の需要地に、需要の規模と内容に柔軟に対応することができる分散型の発電所や電熱併給のコージェネレーションシステムを立地することである。都市部の住宅地や商業地区では、電力の需要のみでなく、冷暖房の熱需要が高いため、両者合わせて80-90%の総合熱率を実現することは容易である。

天然ガスを用いる小型分散型の発電所やコージェネレーションによる地域冷暖房システムの普及は、工業化が進み都市に人口が集中した我が国のエネルギー需要構造に対応して、エネルギー効率を改善し、環境負荷を低減するために最も有効な方法である。

(3) 炭酸ガス隔離 一最後の手段

排出ガスを隔離

産業革命以来の人類の経済活動により、二酸化炭素CO₂の排出量は年々増加し、近年の加速度的な増大に対しては、自然の修復力が追いつかない恐れが出てきた。

図4-2に90年代前半の地球における炭酸ガスの循環を示した。人類の活動により、化石燃料の使用などから年間平均で74億炭素tのCO₂が大気中への排出される。これに対し、陸海の植物などによる吸収は合わせて39億炭素tで、残

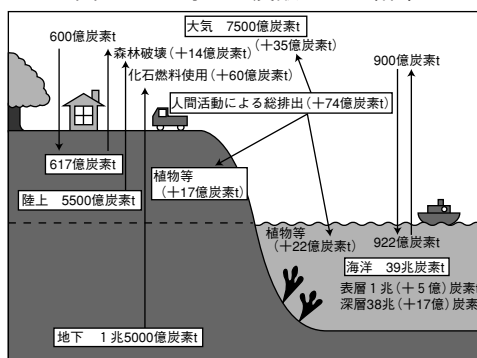
りの約半分35億炭素tが年々蓄積されていく。

省エネルギーや天然ガスへの燃料転換は有効な対策であるが、他の燃料資源に比べて少ないとはいえ、やはり燃焼排気ガスとしてCO₂が放出される。従って、これを何らかの方法で捕集、処理して、一時的に、あるいは恒久的に大気中に出ないようにすれば完璧となる。これが、炭酸ガスの隔離、シーケストレーションである。

しかし、CO₂隔離の実施例はいまだに極めて少ない。それは省エネルギーや燃料転換に比べて、CO₂の隔離には経済的、技術的課題がまだ多く、特別にいくつかの有利な条件がそろわないと実施が困難だからで、この方法が広く行われるようになるには、相当の年月を要すると考えられる。

一方、地球温暖化問題の解決は容易ではなく、省エネルギーや燃料転換のみでそれが可能かどうかは、必ずしも見通しは明らかではない。また、再生可能なエネルギーを用いる持続可能なシステムへの移行も、どれほどの速さでどの程度まで進むかが、現段階では不明である。従って、我が国を含む世界の工業国は、中長期的な観点から、CO₂隔離の技術的、経済的調査研究に取り組んでいるところである。

図4-2 地球上の炭酸ガスの循環



「石油技術協会誌」森島宏：1999年より作成

物理的隔離

CO₂の隔離、シーケストレーションには、大別して物理的、化学的、生物学的な三手法がある。

物理的隔離では、二酸化炭素をそのまま特定の空間に圧入し、あるいは他の物質に吸着、吸

収させて固定し、大気から隔離する。

圧入対象は、地下の油ガス層や帯水層、海洋深海層、石炭層などである。比較的原理や機構は簡単であるが、その反面、隔離は必ずしも永久的ではなく、物理的な条件が変化すればCO₂が再び大気中に戻ってくる恐れもある。

しかし、このことは逆に言えば、将来、より有効な隔離技術や利用技術が出現した時には、再処理しやすいことも意味する。緊急避難的な隔離も、技術的、経済的合理性があれば選択枝の一つであろう。

また、海洋への貯蔵については、その生態学的な影響も事前に十分に調査する必要がある。

CO₂圧入で原油を回収

百数十年間の近代的石油産業の中で、地下における流体挙動、地質に関する知識と、それらを対象とする種々の技術が培われてきた。

その中で、特にCO₂隔離に関連するのは、EOR（原油増進回収）技術の一つとしてのCO₂ミシブル攻法と、天然ガスの地下貯蔵技術である。

CO₂ミシブル攻法は、CO₂が32℃、72気圧で超臨界状態になることを利用する。このとき、CO₂は気体でも液体でもない熔融（ミシブル）状態となり、他の物質との親和性が極めて高くなる。油層中に高圧のCO₂を圧入し、原油の抽出を容易にして回収量を10-20%増大させる。

米国においては、70年代の2度の石油危機による油価高騰を契機として、特にCO₂攻法の技術開発が進んだ。その結果、現在テキサス州を中心に、約70の商業プロジェクトが実施されている。いずれも近隣の油ガス田からの炭酸ガスが安価に供給される地区で、年間約2,000万tのCO₂が圧入されている。

我が国では、ジャパン石油開発が、アラブ首長国連邦のアブダビに同社が鉱区を保有し操業している上部ザクム油田に対し、大規模なCO₂ミシブル攻法を、三菱重工業と協力して実施する構想がある。

その特徴は、アブダビの発電所や工業団地などから現在大気中に放散されているCO₂を回収し、圧入する点にあり、同国及び地球環境保全に対する大きな貢献となる。同社の試算では、

利用可能なCO₂は年間約1,600万tとなる。これを年々利用することによるEOR効果は、超巨大油田（50億bbl以上）の創出に匹敵する量になると期待される。

地下帯水層への圧入

ガスの地下貯蔵は、既に述べたように、第二次大戦後の米国及び欧州における天然ガスの大規模利用時代において、供給システムの合理的運用、及び緊急時対応のために欠くことのできない構成要素として、パイプライン網に組み合わせて導入された。欧米における天然ガスの地下貯蔵は極めて大規模で、各国の年間総消費量の20-40%に相当する。その大部分は、減退した、あるいは稼働中の油ガス田及び帯水層を利用している。このような中で発達した天然ガスの地下貯蔵技術は、炭酸ガスの油ガス層や帯水層への圧入にとっても極めて有効である。

既に実施されているものとしては、ノルウェーの石油会社スタットオイルが、北海で操業中のスライプナー油ガス田において、生産天然ガス中の二酸化炭素を回収して、海底下1,100mの帯水層に再圧入している例がある。

ノルウェーの環境規制では、CO₂の放出1tあたり、51米ドルの炭素税が課せられる。同油ガス田の埋蔵量からは、約20年間の操業が可能とされ、この間のCO₂放出予想量計約2,000万tに対し、課税総額は約10億2,000万ドルと予想された。これに対し、CO₂回収、圧入施設建設費と20年間の運転管理費の総額は、約5億1,400万ドルと算定された。このことから、スタットオイル社は、CO₂の再圧入は、環境上からだけでなく経営上からも優れていると判断し、96年から実施に踏み切った。

我が国においても、地球環境研究機構（RITE）とエンジニアリング振興協会が、2003年夏から、新潟県長岡市の帝国石油の鉱区内で地下約1,100mの帯水層へのCO₂圧入、隔離技術の実証試験を開始したところである。

石炭層、ハイドレート層への圧入

非在来型資源の項で紹介したように、世界の炭田地帯の石炭層には、コールベッドメタンと

呼ばれる天然ガス資源の一種である吸着メタンが大量にある。その石炭層に対し、CO₂を圧入すると、メタンより吸着力が強いいため、メタンを追い出して、代わりに吸着する。これを利用すると、コールベッドメタンの生産とCO₂の隔離を同時に行うことが可能であるので、経済性と環境対策を兼ねた技術として注目され、各国で開発が進められている。いわゆる一石二鳥である。

同様に、最近注目されている非在来型天然ガス資源である海底下のメタンハイドレート層にCO₂を圧入し、メタンを置換して回収すると共に、CO₂をハイドレートとして固定するアイデアも登場している。

海洋への隔離

海洋のCO₂の蓄積量は膨大で、図4-2に示したように、全地球上の90%以上を蓄えており、その大部分は深層部にある。しかし、海面表層からのCO₂吸収速度はそれほど早くない。

海洋貯蔵法としては、陸上で回収したCO₂を、パイプから海水のほとんど動かない4,000m前後の深海層へ落とし込む方法、逆に拡散速度の速い500m前後の深度に注入して、海水に吸収させる方法など、種々検討されている。しかし、これらのCO₂が海洋の生態系などにどのような影響を与えるかはまだ明らかでなく、慎重な評価が必要である。

化学的隔離

CO₂を、化学反応によって、温暖化効果を持たない他の物質に変える方法であり、従って隔離効果は恒久的である。付加価値のある物質の製造に利用できれば、経済性を持たせることができる。カーボンファイバー、石灰石などの製造が試みられている。

生物学的隔離

植物は、炭酸同化作用によってCO₂を吸収し、炭水化物を作ることができる。このため、近年はCO₂削減を目指す工業国の企業や団体によって国内外における大規模な植林が盛んに行われるようになってきている。

更に、森林資源やエネルギー作物によってCO₂を吸収し、再びこれをエネルギー資源として用いるサイクルは、環境に負荷を与えない。

バイオマスは、在来エネルギーと比べ、技術的・経済的にまだ十分な競争力を得ていないが、天然ガスの時代の後に、人類が理想とする持続可能なシステムにおいては、他の自然エネルギーと並んで最も重要な役割を果たすものと期待されている。

(4) 資源循環型社会形成で環境汚染を防ぐ

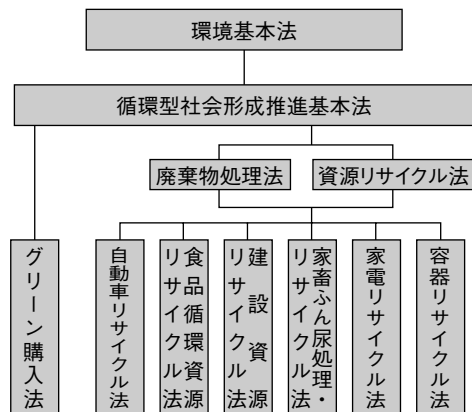
戦後の高度成長は、我々に快適で効率の良い生活をもたらす一方、ごみ、工業廃棄物、各種排ガスによる深刻な環境汚染を引き起こしてきた。60年代の環境対策は汚染物質の排出防止が中心であったが、最近の取り組みは、地球全体を考慮して天然資源の消費を抑制し、循環型社会を目指す方向へと変化してきている。この分野でもまた、スーパーごみ発電やダイオキシンの削減など、天然ガスの活躍に大きな期待が寄せられている。

循環型社会の形成をめざす

我が国では、93年の環境基本法の施行に引き続き、2000年6月に循環型社会形成推進基本法が公布され、相次いで関連法案が成立し、施行されている(図4-3)。

「循環型社会形成推進基本法」の考えは、循環、リサイクルを重視し、天然資源の消費を抑

図4-3 物質循環を促進する法体系



制しながら、環境への負荷をできる限り低減し、持続可能な社会の実現を目指そうとするものである。

従って、廃棄物処理の優先順位も、発生抑制がまず第一で、次いで再使用、再生利用となり、その後が熱回収で、最後が適正処分（埋め立て）となる。

更に、生産者が製品の廃棄段階まで責任を持つという「拡大生産者責任」の理念も明確に打ち出された。

ごみ対策

家庭などから出る一般廃棄物（ごみ）の処理に関しては、資源のリサイクル、環境保全などさまざまな観点から、いくつかの方式が検討され、採用されている。従来多くのごみは、埋め立てられてきたが、近年は、最終処分場としての埋め立て地の確保が困難となってきたため、分別後、再使用、再資源化できないごみの大部分が焼却され、減量した後、埋め立てられるようになってきた。

再生可能エネルギーであるごみの焼却熱を発電に用いることは、電力会社の火力発電における化石燃料の焼却量を削減し、温室効果ガスによる地球環境の悪化を減らす効果がある。また、大部分を輸入に頼っている我が国一次エネルギーエネルギーの削減に貢献する。

また、多くのごみ焼却施設は、都市部に設置されているので、送電ロスや送電コストが少ない。災害発生時には、独立型発電所として電力を供給することが可能で、防災施設や避難所となることもできる。

ごみの処理を実施している自治体にとっても、発電電力を清掃工場の需要に当て、余った分を他施設に供給することにより、ごみ処理事業の採算性や、ひいては自治体全体の財政の向上に役立てることができる。発電後の排熱を地域熱供給などに有効利用できる。

スーパーごみ発電

一方、ごみ燃焼排ガスには塩素など多量の腐食性物質が含まれる。そこで、ごみ発電用の蒸気発生ボイラーは、管の材料腐食を避けるため、

従来多くの場合、300℃以下の温度に設定されてきた。蒸気タービンの発電効率は、蒸気の温度、圧力に比例する。このため、ごみ発電の効率は、通常10%以下という極めて低い効率に留まってきた。

この低い蒸気温度を、クリーンなガスタービン発電の排気ガスにより、再過熱（スーパーヒート）して、蒸気タービン発電の効率を上げ、合わせて20-30%以上の高い発電効率を得ようとするのが「スーパーごみ発電」である。

世界では90年代からスーパーごみ発電の建設が始まった。ヨーロッパが最も多く10施設、次いで日本において3施設の建設されているが、米国にはまだない。ヨーロッパに多いのは、元々地域熱供給が盛んで熱利用に対する関心が深かった上に、ごみ及び資源の有効利用、地球環境対策などから、ごみ焼却熱の高度利用が求められたためである。

日本のスーパーごみ発電

全国の自治体には約2,000カ所の清掃工場があり、一部では70年代からごみ焼却熱を利用した蒸気タービン発電を行ってきたが、その比率はまだ全体の10%にも満たない。最近では、埋め立て地の制約によるごみの容量減少のための焼却、その熱の有効利用、省資源、環境対策の必要性などから、ごみ発電の推進が目指されるようになってきた。また従来、発電を計画しても、種々の規制のため電力会社への販売が難しく、投資効率が悪いと見送られることが多かったが、最近の規制緩和によりこの面での条件は改善されつつある。更に国や自治体による補助金などの推進策も、打ち出されている。

このような状況の下で、96年11月、我が国におけるスーパーごみ発電所の第1号として、群馬県企業局の高浜発電所が同県榛名町に開業した。続いて、97年3月に大阪府堺市環境保健局のクリーンセンター東第2工場、そして98年7月には、北九州市環境局の皇后崎（こうがさき）工場も、それぞれ操業を開始した。

いずれも、ごみ燃焼によって作られた蒸気の温度を天然ガスによるタービン発電機の排気熱によって加熱する「ガスタービン複合方式」で

ある。

産業廃棄物

産業界の廃棄物対策も、このような変化を背景に、急速に進んでいる。経団連の99年度の調査では、90年度に6,124万tであった最終処分量（埋め立て）は、99年度には2,407万tと約40%に減少した（図4-4）。我が国の全産業廃棄物は、厚生労働省の調査では、90年度に8,900万tとなっていることから、経団連の調査範囲は同年度比較で、全体の約70%をカバーしていると考えられる。

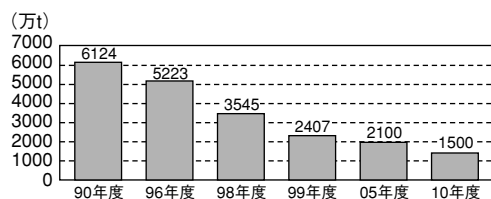
減少した埋め立て分は、既に紹介した一般廃棄物（ごみ）の場合と同様に、大部分は焼却され、再使用や再生利用は、最近増えてきたが、いまだ一部であると見られる。

焼却により発生する熱の利用も進んでおり、一部は、発電にも用いられている。新エネルギー財団の調査報告では、97年時点で、一般廃棄物を除く産業廃棄物の熱利用施設は全国で142あり、報道によると、その後も引き続き熱利用施設、発電施設共増加中である。

利用主体は、地方公共団体16に対し、民間が126と多い。そのうち発電は23件で、1件を除いてすべて民間、いずれも小規模で、総発電容量は約5万kWである。

利用される産業廃棄物は、木くずや、廃タイヤ、バガス（サトウキビの搾りかす）、畜産廃棄物メタン発酵、工場廃液メタン発酵、廃プラスチック油化などである。熱の用途は、給湯、暖房が多い。発電用には、全国的には木くずが多いが、鹿児島、沖縄では、バガスがほとんどである。

図4-4 産業廃棄物最終処理量の実績と目標



経団連調べ

厄介なシュレッダーごみ

産業廃棄物の中で対策が遅れているのが自動車である。経済産業省では、現在2004年の自動車リサイクル法制定を検討していると言われる。

解体された廃自動車から出る破砕くず（シュレッダーごみ）は、プラスチックのほか、金属、ガラス、ビニール、皮革など種々の物質を含む。燃えないごみが約40%を占めるため、焼却すると不完全燃焼により、ダイオキシンが発生する。埋め立てられてきたが、全国で年間約120万tも発生し、最終処分場の受け入れ余地は少ない。

このため、日本各地で廃自動車の野焼きや、シュレッダーごみの不法投棄が行われた。瀬戸内海の香川県豊島^{てしま}では、深刻な環境汚染を起こし、大きな社会問題となった。

ガス化溶融炉で対応

このような状況を打開するために登場してきたのが、ガス化溶融炉である。ごみを無酸素状態で熱分解・ガス化し、燃焼灰を高温で溶融する。ダイオキシンの発生を押さえ、ごみの大幅減と、スラグ化再利用を可能とする。

ガス化溶融炉技術としては、流動床ガス化炉方式、キルンガス化方式、シャフト炉ガス化方式の3種が開発されてきた。更に、従来から清掃工場で使用されてきたストーカー炉に都市ガスによる高温燃焼機能を付加する方式も開発されている。

シュレッダーごみの焼却実績は、世界中でこれまで、熊本・カネムラのキルン式ガス化溶融炉だけであった。2000年になって、青森で、荏原による1日処理量450tの流動床ガス化溶融炉と、神戸製鋼所による同60tが実用化に入った。更に現在、新日鉄、NKK、川崎製鉄などの鉄鋼メーカー各社は、高炉タイプのシャフト炉方式のガス化溶融炉を建設している。相次いで立ち上る新式炉によって、シュレッダーごみの処理が促進されると期待されている。

豊島に不法投棄された産業廃棄物については、2000年12月、クボタが香川県から、溶融処理設備を受注した。同社は、独自開発した回転式表面溶融炉により、2003年から10年間かけて、55

万m³の廃棄物と汚染土壌を処理する計画である。

廃プラスチック処理も進展

2000年4月から容器包装リサイクル法が全面施行された。同法の対象となる廃プラスチックは、年間約1,000万tで、その半分500万tは産業分野からと見られる。本来カロリーの高い廃プラスチックであるが、これまでは半分が最終処分場に埋め立てられ、2割は単純焼却され、有効にリサイクルされてこなかった。

日本容器包装リサイクル協会の調べによると、全国の自治体から出される再生原料用の廃プラスチック容器包装の量は、2000年度は約10万tであったが、2001年度は、約23万tへと2倍以上に増大する見込みである。再商品化は、約8割がケミカルリサイクル（油化、高炉還元化、コークス炉化学原料化、ガス化）で、材料リサイクルはまだ少ない。

ケミカルリサイクルの実施は、現在は、新日鉄、NKKなどの鉄鋼メーカーが主体で、コークス炉、高炉で、廃プラスチックを、化学原料に転換している。各自治体が現在建設中のガス化熔融炉の総処理能力は、年間数百万tに達する。1、2年中に稼動を開始し、熱分解ガスの化学原料化、高効率複合発電、そして熔融スラグの再利用などにより、廃棄物リサイクルは一挙に促進されると期待される。

RDFごみ固形燃料の登場

最近注目を集めているのが、ごみの中から可燃物である木材、紙、プラスチックを集めて、ペレット状に固めたごみ固形燃料、RDF（リフューズ・ドライブド・フューエル）である。

RDFは、直径約1.5cm、長さ4～6cmの円筒状の固体で、運搬も貯蔵も簡便である。しかしながら、燃焼時の発熱量は、4,000～5,000kcal、石炭の2/3程度と高く、RDFはあくまでもごみでなく燃料としての、慎重な取り扱いが必要とされる。通常のごみ焼却施設よりも、焼却温度が高く、安定した燃焼も可能となり、熱利用効率が向上するほか、ダイオキシン対策としても有効である。

我が国の約2,000カ所の清掃工場、ごみ（一

般廃棄物）焼却施設のうち、97年時点で焼却熱を利用する施設は、約430カ所、更にそのうち、発電を行っているのは、約170カ所に過ぎない。しかも既に述べたように、ごみ焼却ガスによる蒸気ボイラーの部材への腐食反応を避けるため、燃焼温度を300℃以下に低く保つようになっているので、発電効率は10%前後と低い。

近年、一部の大規模な焼却所では、天然ガスタービンを併設して、回収蒸気を500℃以上に過熱するスーパーごみ発電を導入して、30%を超える高い効率を実現している。しかし、ごみ処理量の小さい清掃工場では、発電もスーパーごみ発電も、経済性が悪い。

そこで、各地にRDF製造施設を造り、複数の小規模ごみ清掃工場から、ごみを集約して、RDFを製造し、これらをRDF専焼施設で、スーパーごみ発電などにより一括処理するシステムが導入された。

地域熱供給事業へも活用

RDF製造及び利用施設は、1990年から登場し、新エネルギー財団の97年時点の調査結果では、全国に19施設、うち製造（利用も含む）は13、利用専用は6となっている。

製造施設では、受け入れたごみから、重量比で約半分のRDFが製造される。規模を見ると、1日あるいは8時間あたりのRDF生産量1～5tの小型が最多数で6施設、5～20tが3、20～100tが3、そして100t以上が1である。小規模ごみ処理施設の熱利用を促進するというRDF導入の目的に沿った分布となっている。

事業主体としては、地方公共団体が13、民間が6である。地方公共団体の13のうち、10が製造、3が利用専用である。民間では、製造、利用共に3施設ずつである。地方公共団体の製造施設の半数6施設と、民間の3製造施設は、利用施設を持たず、製造したRDFをすべて外部に販売する。

利用施設を持つ製造施設もすべて、施設内のほか、外部の温水プールや保養所、温室などへ暖房、冷房、給湯などの熱供給を行っている。大規模なRDF利用としては、札幌市で、91年8月から地域熱供給事業の熱源として用いられ

ている。

RDF発電は、地方公共団体の三つの施設と民間の1利用専用施設が、実施あるいは計画中である。

ダイオキシン対策

一般廃棄物（ごみ）焼却については、燃焼温度が低いため、有毒物質のダイオキシンが発生するという深刻な問題がある。その対策としては、ろ過式集塵機などの設置が必要であるが、大部分が小規模であるごみ清掃工場にとっては、追加の設備投資資金や管理運用費は、経済的に困難な課題であった。

そこで、環境省は、1日の処理量は100t以上が望ましいとのガイドラインにより、ごみ処理施設の大型化・広域化を指導してきた。RDFも、その有力な切り札であると推奨されてきた。

しかし、広域化については、複数の自治体による調整が円滑に進まないため、施設大型化の動きも遅れがちである。2002年12月のダイオキシン規制強化に備え、日量100t以下の処理施設を採用する自治体も出てきた。

専焼施設が不足

最近の報道によればRDF製造施設は、その後も着実に増加し、現在約30に達するとされているが、利用施設の建設が進んでいない。RDF専焼施設の建設費が高額で、利用業者が積極的に事業に乗り出してこないためと言われる。製造されたRDFが消費されずに余り、倉庫に積まれる事態も出ている。

これを解決するための経済性の高い専焼装置の開発も進められている。最近、岐阜県恵那市は、栗本鐵工所に、国内初の「炭化設備付きごみ固形燃料化施設」を発注した。炭化されたRDFは、そのまま、微粉炭ボイラーなどの産業用に利用できるのが高く売れる。

ガス化溶融炉によるRDF発電

ごみ焼却炉の中で、ガス化焼却炉は高温の燃焼熱によってダイオキシンの発生を大きく抑え、ごみの減容化でも効果が大きく、灰も無害化するという三大特徴を持つ。強化されるダイオキ

シン規制強化に備え、98年3件、99年5件と増えてきた自治体発注数は、2000年度には、従来の主流であったストーカー炉の倍の31に伸びた。

その中で、自治体の広域化の動きもようやく活発化し、大型のRDF発電所が具体化してきた。広島福山リサイクル発電は、NKKに2万kWのRDF専焼の高温ガス化溶融炉を、福岡の大牟田リサイクル発電は、川崎重工に2万6,000kWのRDF循環流動床炉を、三重県は米フォスターウイラー・富士電機グループに1万2,000kWの循環流動床炉を、そして石川県北部24市町村は、日立造船に流動床ガス化溶融炉RDF発電所を、それぞれ発注している。

天然ガスによるダイオキシン抑制

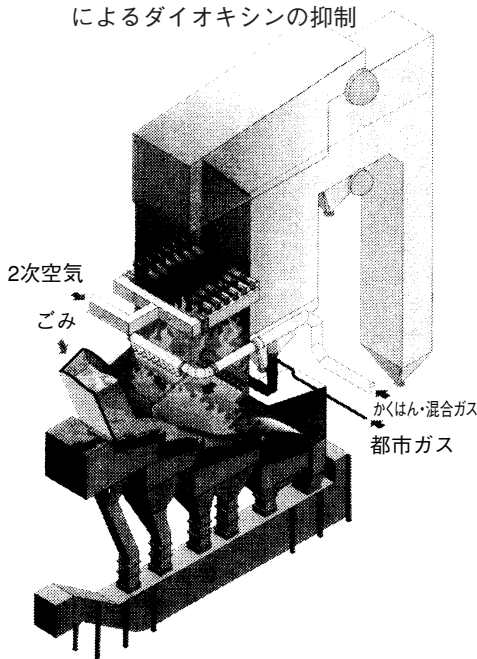
これに対し、比較的小型の焼却施設でも、ダイオキシン規制に対応できる対策技術の開発も進められている。

東京ガスは、最近、川崎重工業と共同で、これまでのごみ焼却の主役であったストーカー炉に天然ガスを吹き込み、ごみを燃やして、発生するガスに含まれるNO_xを分解すると共に、ダイオキシンの発生濃度を、新設炉の基準である排ガス1m³当たり0.1ナノグラム（ナノ10億分の1）以下に抑える技術を確認したと発表した図4-5。1日の処理量150t程度の焼却炉の場合で、工事費は約1億円、一般的なるろ過式集塵機の10分の1程度で、工事も天然ガスや空気の吹き込み口などを取り付けるだけで、特別な装置を設置する必要がない。

また、東京都清掃局（現東京23区清掃一部事務組合）では、タクマと協力して、焼却後の灰を天然ガス燃焼高温炉で溶融し、残っているダイオキシンを分解すると共に、重金属のダストと無害化したスラグに分離する技術を開発している。

既に紹介したスーパーごみ発電と共に、天然ガスの活躍が期待される分野である。

図4-5 ごみ焼却炉における都市ガス吹き込みによるダイオキシンの抑制



第5章 最高のエネルギー効率と多彩な利用技術

現在、天然ガスの90%は、動力や熱のエネルギー源として利用されている。この分野には、高い熱効率と環境性を兼ね備えた天然ガスの優れた特徴が、最も良く現れている。

エネルギー源としての価値は、仕事をする能力で示される。燃料資源の場合は、燃える際の発熱量である。既に述べたように、代表的な燃料の発熱量kcal/kgを比較すると、天然ガスが最も高い。発熱量が大きいということは、燃焼ガスの分子運動が激しく、仕事をする能力が高いことを意味する。

発熱量が大きくて燃焼温度が高いということは、更に熱利用がしやすいというもう一つの価値を持つ。すなわち、熱のカスケード（段階的）利用に適している。これにより、熱を最大限に利用し尽くすことにより、最高のエネルギー効率を得ることが可能となる。熱の効率利用にとって、熱力学的に最重要のファクターが、燃焼温度である。天然ガスは、最も高い発熱量を持

つが故に、最も高い燃焼温度が可能となり、従って熱のカスケード利用にも最も適している。

本章では、コンバインドサイクル、コージェネレーション、燃料電池などの代表的なエネルギー利用技術を中心に紹介する。加えてガスターリキッドなどの化学原料としての役割にも触れる。

(1) コンバインドサイクル発電

最も発熱量の高い天然ガスを燃焼させてガスタービンエンジンを回し、次にその排気ガスの熱を回収して蒸気タービンを回し、両者を合わせて（コンバインドして）高い発電効率を得るのが、天然ガスコンバインドサイクル発電である。すなわち、熱のカスケード利用によって発電効率を上げようとするもので、当然その効率は、今述べたように、はじめのガスタービンの燃焼温度が高いほど大きくなる。ガスタービン発電の熱効率30-40%に蒸気タービンの熱効率10-20%が加わり、総合熱効率40-60%が可能となる。

LNG発電の導入

我が国は70年代から海外LNGの海上輸送により、天然ガスの大規模利用時代に入った。輸入LNGの主要用途は、大気汚染対策のための石油に代わる火力発電燃料であった。

当初LNG発電は石油火力より高価であったが、大気汚染の対策費用を含めると経済性があった。その後70年代の2度の石油危機により原油価格が高騰すると、LNG発電の優位性は更に増し、急速に普及していった。

LNG火力発電の設備は、水蒸気を作るボイラーと、発電機につながる蒸気タービンとが一組のユニットになっている。熱効率と経済性の向上は、ユニットを大型化し、水蒸気を高温高圧化することにより追求されてきた。しかし、ユニット方式による効率追求は、既に技術的、コスト的な限界に近づいていると言われる。最新鋭の火力発電プラントでも熱効率は約40%で、これ以上飛躍的な向上は困難であると見られている。

ユニット方式からコンバインドサイクルへ

これに対して、熱効率の更なる向上を目指して、70年代後半から、コンバインドサイクルプラントの導入が、各電力会社によって進められた。

コンバインドサイクル発電ではまず、空気を圧縮機によって十数気圧に加圧し、この中で天然ガスを燃やす。燃えたガスが急速に膨張する力でガスタービンを回し、発電器を回す。更に、ガスタービンから出た排気ガスの余熱（約550℃）をボイラーに導き水蒸気を発生させ、その力で蒸気タービンを回して発電器を回す。

コンバインドサイクル発電の形式には、一軸型と多軸型がある。

一軸型は、図5-1に示すように、ガスタービン1台、蒸気タービン1台、発電器1台を一つの軸で直結させてユニットを構成し、数ユニットで1系列を構成するものである。

多軸型は、図5-2に示すように複数のガスタービン発電機を1台の蒸気タービン発電機と組み合わせて1系列を構成するものである。

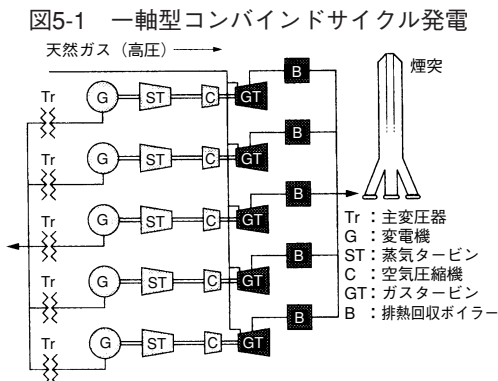
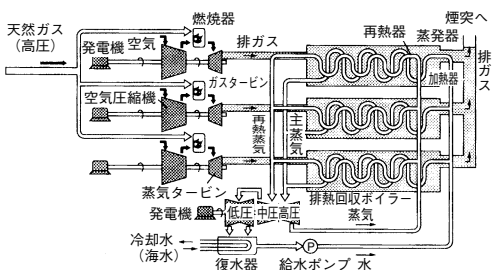


図5-2 多軸再燃型コンバインドサイクル発電



一軸型は、多軸型に比べ、熱効率はやや劣るが、一部のユニットの運転を、迅速に停止したり、再起動したりすることが可能で、電力需要に応じた運用に適している。我が国で現在運転中、建設中、及び計画中のコンバインドサイクル発電プラントは、26基であるが、そのうち22基は、一軸型である。

リパワリング

我が国におけるコンバインドサイクルは、リパワリングから始まった。

既設の火力発電設備を改造して、出力の増大、効率の向上、寿命の延長、環境への対応などを図ることを、一般に「リパワリング」と呼んでいる。我が国では、このうち特に他の発電設備を追加することによる出力や効率の向上を火力のリパワリングと呼んでいる。

当初導入されたコンバインドサイクル発電は、既設のボイラーと蒸気タービンから構成されるユニット方式発電設備にガスタービンを付加することにより、発電出力と効率を上げるリパワリングであった。ガスタービンからの熱の回収の方式は、排気中の残存酸素をボイラー燃焼用空気源として利用するいわゆる排気再燃式であった。

高効率の排熱回収式

これに対し、新設のコンバインドサイクル発電所では、排熱回収式による効率向上が追求された。これは、ガスタービン燃焼温度高温化とそれに伴う排ガス温度の上昇を最大限に利用しようとするものであった。

LNGを燃料とする本格的なコンバインドサイクルは、1984年12月運転開始の東北電力東新潟3号系列、1985年12月運転開始の東京電力富津1号系列から導入された。

第1世代では、タービン入り口のガス燃焼温度は、材質の耐熱性を考慮して、比較的低い約1,100℃に押さえられていた。それでも、総合熱効率は43%前後で、在来型のユニット方式の限界を大幅に超える性能を発揮した。

第2世代で熱効率50%を実現

第2世代では、ガスの燃焼温度を高めるために、タービン翼の材質の改良やコーティングを行ったり、翼に空気流を流して冷却する方式を開発して、耐熱性、耐運動性を高める工夫が行われた。この改良型コンバインドサイクルでは、タービン入り口のガス燃焼温度が1,300-1,350℃に上昇し、これにより熱効率は48-50%にまで向上した。最近稼動したLNG発電プラントでは、この第2世代が主力である。

60%超を目指す第3世代

第3世代機の目標は、タービン温度1,450-1,500℃、最高効率50-60%である。今後、燃焼温度の上昇に備えて、タービン翼の材質、冷却方式に一層の改良を加えた各社の第3世代プラントが登場してくる。

東北電力は、1999年、世界で初めて1,450℃のコンバインドサイクル発電設備を東新潟火力発電所で運転開始して、50.6%の熱効率を達成した。空気を用いた高性能翼冷却方式、ニッケル基超合金を用いた高温耐熱材料、蒸気冷却式燃焼器など、新規技術が採用されている。

東京電力では、2003年に運転開始を予定している富津4号系列において、ガスタービンの耐熱材料と冷却機構の改良など最新の技術を導入し、熱効率60%以上の実現を目指している。

タービン入り口温度の1,450℃への上昇対策として、タービン1、2段動静翼に対する冷却方式を、従来の空気冷却から回収式蒸気冷却方式に変更している。蒸気は空気と比較して熱伝導率が高いので、ガス温度の上昇にもかかわらず、翼自体の温度を従来通りに維持することができる。1段動静翼には高温強度に優れた単結晶材を採用し、遮熱コーティングとの併用によって、設計寿命の確保を図っている。

更に高性能を目指して

コンバインドサイクル発電の熱効率は、燃焼温度の上昇と共に実現されてきた。天然ガスは燃料資源の中で最大の発熱量を有しており、燃焼温度は更に高温の2,000℃までも上がるので、原理的には熱効率の向上は可能である。

しかし、今後1,500℃を超えて、更にガスタービンの燃焼温度を上げるには、タービン翼の耐高温材、遮熱コーティング材や冷却方式の改良、開発が必要である。現在、超高温に耐えるセラミックの適用などを目指した開発努力が継続されており、その成果が期待される。

コンバインドサイクルの特徴

第一の特徴は、既に述べたその高い熱効率である。

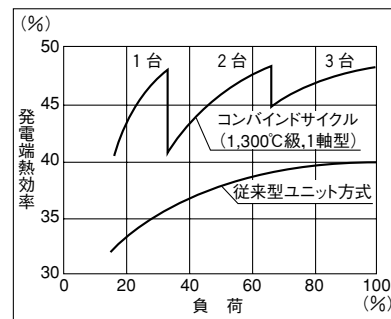
第2に、コンバインドサイクル方式では、図5-3に示すように在来型のユニット方式に比し、比較的小容量でも、負荷が低くても、高い熱効率を得ることができるという特徴を持つ。そこで、大容量の発電プラントを、複数の小容量のユニットを組み合わせ作り、需要が少ない場合は、運転するユニット数を減らし、残ったユニットを高い熱効率で運転することにより、全発電効率を高く保つことができる。ガスタービンが短時間に運転停止、始動が可能であることも、コンバインドサイクルのこの利点につながっている。

第三に、運転コストも資本費も安く、建設期間も短い。

火力発電の主力に

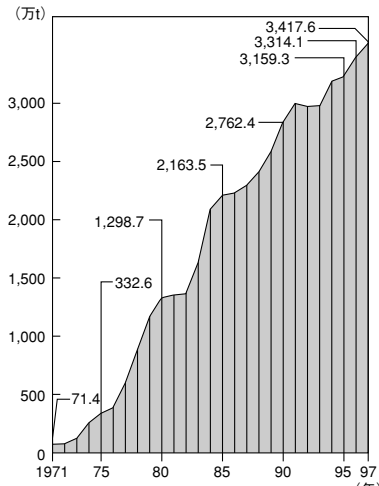
天然ガスのクリーンな特性に加え、このような特徴は天然ガスコンバインドサイクルが、発電におけるベースとしても、需要変動の大きなピーク対応としても、そしてこれらの中間のミ

図5-3 コンバインドサイクルと在来型ユニットとの発電熱効率の比較



出典：「電気事業の現状1998年」

図5-4 日本の発電用LNG消費量



出典：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」

ドル対応としても、いずれにも対応できるオールラウンドの電源であることを示している。

LNG火力発電電力量は、全発電量の25%に達し、発電用LNG消費も年々増加している図5-4。LNG火力に占めるコンバインドサイクル発電の出力比率は既に3割を超えている。各電力会社では、稼動中のLNG火力発電を、順次コンバインド方式に切り替え、また新規建設の設備はすべてコンバインドサイクルの予定であるので、いずれ今後の火力設備の主力はコンバインドサイクルになると見られる。

今後の技術開発により、コンバインドサイクル発電の効率は60%を超えると予想される。従って、発電効率が30%台である従来型の石炭火力を、天然ガスコンバインドサイクルに切り替えることにより、炭酸ガスの発生量は、燃料転換の効果とあいまって、約1/3に減少するという大きな効果が期待される。

(2) コージェネレーション

熱と電力を一緒に生む

コージェネレーションとは、一つのエネルギー源から複数のエネルギーの形を、共に(コ-), 生み出すこと(ジェネレーション)を指す。通常、熱と電力が対象となる。

天然ガスコージェネレーションでは、まずガスエンジン、ガスタービン、あるいは燃料電池

で電力を取り出し、次いでエンジンの冷却水、タービンの排気ガス、燃料電池などからの排熱を、温水あるいは蒸気として回収して、給湯、暖房、冷房などに利用する。これら両者を合わせてエネルギーのカスケード利用を図り、総合熱効率を高めようとする技術である。

我が国では、一次エネルギーの有効利用度は平均約34%とされるが、ガスコージェネレーションでは、既に70-80%という高い総合熱効率が実現されている。発電と熱利用の両面で、技術開発が進められているので、熱効率は更に向上すると予想される。

省エネルギー及び環境対策上、最も有力な方法であると期待されているのが、このガスコージェネレーションの普及である。

エネルギーの分散利用

ガスコージェネレーションは、エネルギーの分散利用にとっても、最も適した技術である。

我々のエネルギーに対する要求は多種多様であり、熱、照明、動力、電気など、その形態と量も常に変動している。理想的なエネルギーの使い方は、欲しいときに、欲しい場所で、欲しい量だけ、欲しい形で取り出し、利用できることである。これがエネルギーの分散利用である。

一般には、一種類のエネルギーを大量に生産すれば、コストは低くなる。大規模発電のエネルギー効率は、年々向上しており、小規模の分散発電は、発電効率だけを比較すると劣っている。しかし、電力だけでなく熱も必要とする時には、コージェネレーションによる熱の発生を合わせると、大規模発電より、総合効率は遙かに高くなる。

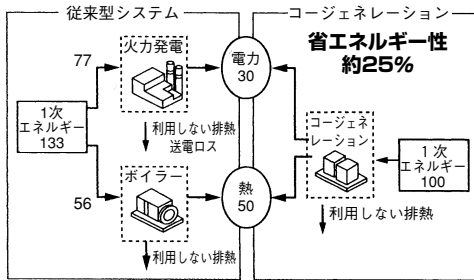
しかも、電力や熱は、長距離輸送や長時間貯蔵による損失が大きい。従って、特に大規模発電所から離れている利用者が、電力も熱も必要とするときには、その都度、その場でガスからコージェネレーションで、必要な分を作り出す方が合理的である。

省エネルギー

例えば、電力と熱を従来型の商用電力とボイラーから得る場合と、ガスコージェネレーシ

ンとを比較してみよう。図5-5のように、商用火力発電の平均熱効率は約30/77=38%で、コージェネレーションの発電熱効率約30%より高い。ボイラーの熱効率は約50/56=90%で、これもコージェネレーションの排熱回収効率50%より高い。しかし総合熱効率では、コージェネレーションが従来型に対して100/133=75%と、約25%も省エネルギーになる。

図5-5 従来型システムとコージェネレーションの効率比較

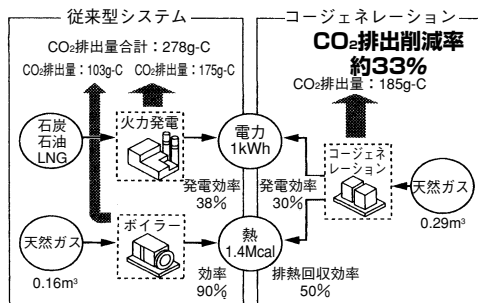


出典：環境白書（平成9年版）の数値をLHV換算

高い環境性

同じケースで、炭酸ガスの排出量を比較してみよう。図5-6のように、天然ガスのコージェネレーションで電力1kWhと熱1.4Mcalを発生させたとき、約0.29m³の天然ガスから約185g炭素の炭酸ガスが排出される。一方、従来型システムでは、火力発電から175g炭素の炭酸ガス、ボイラーから天然ガス0.16m³を燃焼した103gの炭素、合わせて278g炭素の炭酸ガスが排出される。コージェネレーションにより185/278=67%と、

図5-6 従来型システムとコージェネレーションのCO₂排出量比較



出典：環境白書（平成9年版）の数値をLHV換算

約33%の炭酸ガスの排出が削減される。

更に、天然ガスはイオウを含まないので、SO_xの排出はなく、また燃焼方式の工夫や触媒の開発により、NO_xの発生も大幅に削減されている。このように、天然ガスコージェネレーションは、環境上からも利点が多い。

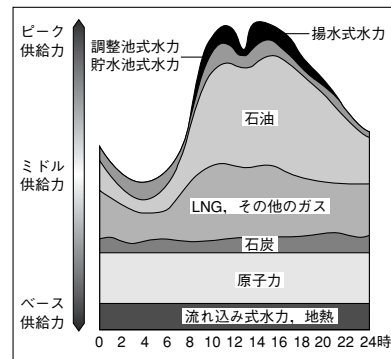
コージェネレーションの効果

先述のエネルギー効率及び炭酸ガス削減におけるコージェネレーションの効果の比較は、全電源とではなく、全火力発電との間で行われた。その理由は電気事業者の立場から見ると理解しやすい。

電力会社は、需要の増大や変動に対して、各種電源の特色を生かした最適な組み合わせ（ベストミックス）で、対応を図ってきた。例えば1日の需要変動に対しては、各電源を図5-7のようなイメージで組み合わせ、対応している。その構成は、常にほぼ一定の出力で運転するベース供給力（原子力など）、需要の変動に対して稼働し、主にピーク時に必要な供給を行うピーク供給力（揚水式水力など）、そして両者の中間の役割を担うミドル供給力（石炭、石油、LNG火力）である。

このような状況下でコージェネレーションが行われ、消費電力が減少すると、電力会社はその分の発電量を減らす。しかし、全電源を均等に減らすことはせず、ピーク需要時にはピーク供給用電源の、ミドル需要時にはミドル供給用電源の稼働率をそれぞれ下げ、ベース電源は、

図5-7 電源の組み合わせ（イメージ図）



出典：「電気事業の現状2002年」電気事業連合会

最後まで止めないようにするのが合理的である。一般的な比較では、ミドルの需要時を対象として差し支えないと考えられるから、ミドル供給を担う石炭、石油、LNGの3火力と比較するか、あるいは最も単位当たりCO₂発生量の多い石炭火力と比較するのが妥当な選択となるだろう。

電力需要ピークを下げる

我が国では、夏の昼間に電力の需要ピークがあり、季節間においても、1日の中においても、需要の変動幅は年々増加する傾向にある。そこで、ガスコージェネレーションを夏場、日中に運転すると、電力需要のピークを下げ、変動幅を減らすこと（電力負荷平準化）となる。コージェネレーションの効果は、その発電量と、排熱を利用して行われる冷房による冷房用電力の節約を加えた分となる。これにより、電力会社の過剰な投資が軽減され、また、都市ガス会社の夏場の需要も増大し、双方の設備稼働率が向上する。電力、都市ガス事業の効率改善、ひいてはエネルギー価格の引き下げにつながると期待される。

技術的には、電力、あるいは熱に対する季節や日中の需要変動に対応するため、コージェネレーションにおける熱と電気の出力の割合を変える熱電可変型システムの開発を更に進めることが重要である。

コージェネレーション導入の経済性

コージェネレーションの導入者にとっては、新規設備費が必要であり、ガス料金も増加する。一方、電力については契約電力量が減るので、基本料金が下がり、発電量に応じて、従量料金も下がる。排熱利用ができるので、給湯その他の熱設備の運転も減り、全体のエネルギー経費を下げることができる。

また、従来設備との兼ね合いにもよるが、特別高圧受電が不要となり、受変電設備費を減らしたり、非常用発電設備を兼用して、その設備費を減らすことができる場合もある。

エネルギー供給の安定化

コージェネレーションを採用すれば、エネルギー源の供給が商用電力と都市ガスとの二重となり、電熱共に供給の確実性が増す。

天然ガスコージェネレーションのエネルギー供給安定性に着目して、いくつかの企業や自治体では、常用と非常用の兼用設備として採用を行っている。天然ガス燃料電池のコージェネレーションでは、排出される水も緊急時の飲料水に想定されている。また、情報産業などで、電力の無停電システムとして採用する事例も増加している。

80年代後半から急増

我が国における天然ガスコージェネレーションの導入は、1981年の東京霞ヶ丘国立競技場(200kW)に始まった。

都市ガスコージェネレーションの導入は、80年代前半は徐々に進んだが、後半になって、件数、容量共に急速に増加し、一時90年、91年と経済状態の悪化から停滞したが、90年代半ばから、再び着実に増加を示している。最近10年間の伸びは、容量で約10倍、件数で約5倍に達している。

しかし、99年度末の発電容量はまだ約200万kWであり、これは我が国の総発電容量約2億5,000万kWの約0.8%にしか過ぎない。なお、石油などのコージェネレーションを含めた我が国全コージェネレーションの総容量は約500万kWであるので、都市ガスコージェネレーション比率は、現在40%を少し超えたところである。

(3) エネルギー状況を一変させる新技術

—燃料電池

天然ガス利用技術の中で、あらゆる意味で今後、最も大きなインパクトを与えると予想されるのが、燃料電池である。

その影響は、従来のガス事業の枠を越えて、電力、石油石炭を含むエネルギーシステムや、環境問題、住宅及び家庭電機システム、自動車交通運輸、都市及び地域開発計画など、広範な範囲にも及ぶだろう。燃料電池によるエネルギーの小規模分散利用、熱と電気のコージェネレ

ーション、環境と効率に配慮したその利用などが、社会や生活の有り方、人々の意識にまでも、変化をもたらすことになると考えられる。

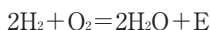
この燃料電池の主要な燃料である水素の供給源として、量的にも、経済的にも、そして技術的にも、最も現実的で実用的であるとされるのが、天然ガスからの改質である。

以下に、文献（小澤丈夫「燃料電池」誌、2002年1月号）などにより、原理面から燃料電池の特徴を整理してみたい。

高い総合エネルギー効率と環境性を両立

第一の特徴は、燃料電池の発電動作原理が、電気化学反応である点にある。

水の電気分解とは逆反応で、水素と酸素の反応により水が生成する時に、発生するエネルギーEが、直接電力（電位差）として得られる。



従来の火力発電では、熱化学反応で発生する燃焼熱エネルギーEを使って、水蒸気タービン、あるいは直接ガスエンジンやガスタービンを回し、発電機により電力を得ていた。

これに対し、燃料電池では燃焼を行わないため、エネルギー効率は、温度などの熱力学上の制約を受けないので、冷却の必要がなく、廃熱の最大限の有効利用が可能で、総合エネルギー効率として、極めて高い80-90%が得られる。

逆に、単位エネルギー変換当たりの二酸化炭素排出量は極めて低くなる。

また、回転する機械部分が少ないので、振動や騒音も少ない。精製された燃料を用いるので、排出ガスも清浄であり、特に水素の場合は、水しか排出されない。

このように、燃料電池は、地域的、地球規模的環境性にも、極めて優れている。

小規模分散発電に最適

第二の特徴として、構造上、燃料電池の出力は電極面積に比例し、発電効率は規模によらない。

従って、従来型の発電施設とは異なり、効率を求めて大容量化を追求する必要がない。規模と立地の自由度が高く、需要に応じて、小規模分散配置も可能である。特に、環境性にも優れ

ているので、電力と熱の両方の需要のある住宅地、商業地域、業務用ビルなどにも設置することができ、特徴である高い総合エネルギー効率を発揮することができる。

輸送効率の悪い排熱の有効利用が図れることは、省エネルギー及び温暖化ガス対策上、特に優れた点である。

系統電源との関係性が良い

第三の特徴として、燃料電池は直流電源であり、直交変換装置を必要とする。しかし、系統電源と直交変換装置を介して連係していることは逆に、系統との関係が緩く、系統側で発生した事故から燃料電池は保護されることとなる。

第四には、燃料電池は、電池の性質として、負荷の変動に対応した発電が可能な負荷追従性、定格以下の負荷でも効率が変らない部分負荷特性、定格を超える負荷にも耐えられる過負荷特性などを持っている。このため、電力系統と連係した場合、負荷変動に対応する役割を演じることができ、系統全体の効率向上に寄与することができる。

更に、過負荷特性は供給予備力を有することを意味し、短い暖気始動時間とあいまって、燃料電池は系統全体の瞬時予備力となることができる。

燃料電池は無停電装置としての役割も果たすことができるので、情報化時代においてより重要となってきた電力の安定供給にも寄与する。

モジュール単位で柔軟に

第五の特徴は、直流で低電圧電源であることである。

従って実用的な電圧を得るためには、ある程度の数の電池を直流接続させる必要がある。その目的で製造過程で作成された集積単位を集合電池と呼ぶ。日常の保守管理は、これを更にくつか組み合わせたモジュールと呼ばれる単位で行われている。

故障時には、モジュール単位で差し替えればよく、交換には特に熟練を要しない。また、故障したモジュールを取り除いて接続しても、残りのモジュールの過負荷特性で分担して、発電が続行できる。

製造工場では、同じモジュールを多数生産するので、量産効果による生産コストの低減が期待できる。

発電は、モジュール、直交変換機、燃料改質装置を組み合わせたユニットによって行われる。発電ユニットは工場で生産し出荷するので、設置現場での作業は少なく、短い工事期間で建設することが可能である。

モジュールを組み合わせて、必要な規模の発電ユニットを作ることができるので、各需要地に需要量に対応した規模の施設を、分散して立地することが可能である。また、建設後においても、需要の変動に応じて、規模の変更を柔軟に、短期間で実施することができる。

燃料電池の構造と発電機構

燃料電池の基本構造は、電極（プラスとマイナスの2極）、電解質、そして伝導体の3要素からなる。

発電機構を、水素と酸素の反応を例にとってみると図5-8のように、まず水素分子 H_2 が、陰極でイオン化して、水素イオン H^+ と、電子 e^- と

に解離する。水素イオンは電解質中を移動し、陽極へ向かう。一方、電子は外部伝導体回路中を通り、やはり陽極へ向かう。陽極では、酸素分子 O_2 が、別々に移動してきた水素イオン4個及び電子4個と結合して、水分子 H_2O が1個生成する。この一連の動きの中で、外部回路中を電子が通ることにより、逆向きに電流が発生する。これが燃料電池の発電機構である。

現在、主として4種類の燃料電池の開発が進められているが、それらは、用いられる電解質

図5-8 燃料電池の作動原理

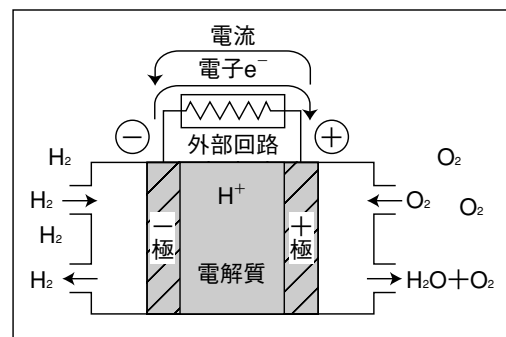


表5-1 燃料電池の種類

	りん酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体電解質形 (SOFC)	固体高分子形 (PEFC)	
電 解 質	りん酸	(Li, K, Na)CO ₃	安定化ジルコニア	高分子電解質	
移 動 イ オ ン	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻	H ⁺	
- 極	触 媒	Pt/C	Ni	Ni	Pt/C
	反 応	H ₂ →2H ⁺ +2e	H ₂ +CO ₃ ²⁻ →H ₂ O+CO ₂ +2e	H ₂ +C ²⁻ →H ₂ O+2e	H ₂ →2H ⁺ +2e
+ 極	触 媒	Pt/C	NiO	La _{1-x} Sr _x MnO ₃	Pt/C
	反 応	½O ₂ +2H ⁺ +2e→H ₂ O	½O ₂ +CO ₂ +2e→CO ₃ ²⁻	½O ₂ +2e→O ²⁻	½O ₂ +2H ⁺ +2e→H ₂ O
作 動 温 度	150~220℃	600~700℃	900~1,000℃	常温~100℃	
燃 料 (改 質)	水素,天然ガス,メタノール,ナフサ	天然ガス,メタノール,石油,石炭ガス	天然ガス,メタノール,石油,石炭ガス	水素,天然ガス,メタノール,ナフサ	
内 部 改 質	不可	可	可	不可	
シ ス テ ム 発 電 効 率	35~45%	45~55%以上	60%以上	~50%	
特 徴	排熱利用が可能	CO含有燃料可 Ni系触媒の利用 排熱利用が可能	CO含有燃料可 高温のため、触媒の必要なし 排熱利用が可能	高出力密度 材料選択の幅が広い スタッキングが容易	
適 用 分 野	熱併給発電 オンサイト発電	オンサイト,分散型 発電,熱併給発電, 大規模発電	熱併給発電 分散型発電 大規模発電	移動体用 家庭・集合住宅用 熱併給発電	
開 発 規 模	10MW	1MW	10kW	100kW	

小澤丈夫「燃料電池」vol.1 (2001) から作成

の違いによって、燐酸型、熔融炭酸塩型、固体電解質型、及び固体高分子型と呼ばれている。

このうち、移動イオンとして水素イオンを用いるのが、燐酸型及び固体高分子型、炭酸イオンが熔融炭酸塩型、そして酸素イオンが固体電解質型である。

現在開発中の4種類の燃料電池の特徴を、表5-1に示した。

リン酸形は、この中で最も開発が進み、既に実用化段階に入ったとされる。世界で数百台、我が国でも約200台の稼働実績がある。

商業化段階のリン酸形

燃料電池の基本システムは、図5-9のように電池本体と、それに接続する燃料処理、空気供給、直交変換、及び排熱回収の4サブシステムからなっている。

リン酸形電池では、電解質がリン酸で、水素イオンが移動し、最終的に、水素と酸素が反応する。

水素は通常、天然ガス、ナフサ、メタノールなどの燃料を水蒸気と混合し、改質器中で約800℃の高温で処理して製造される。改質された水素ガスには、Pt（プラチナ）触媒を不活性化する一酸化炭素（CO）が含まれるので、これを除去する一酸化炭素変成器を通してから電池へ供給する。

電池本体では、反応温度を180-200℃に設定して電気を発生させる。低すぎると電池が作動せず、高すぎるとリン酸の蒸発や材料腐食が起るので、冷却システムで温度をコントロールする。

電池冷却システムの水蒸気分離器で発生した蒸気は、改質蒸気として用いられる。電池部分で水

素と酸素が反応してできる水も、回収して再利用する。

水素と反応させる酸素は、空気供給システムからの圧縮空気を用いる。圧縮空気は、改質器バーナーの燃焼空気としても用いられる。

直交変換システムは、直流である燃料電池の出力を交流に変換する。燃料電池に特有の出力上昇に伴う電圧低下傾向に対し、交流出力を一定に保つ調整機能、及び触媒や電極材料の劣化をもたらす過電圧を防止する機能を備えている。

排熱回収システムは、各系統から出てくる熱を熱交換器で回収し、システムの熱効率、及び外部への冷暖房や給湯に供給することによる総合エネルギー効率の向上を図っている。

一般に、電池や改質器では温度などの条件によって化学反応が起こるので、停止時には腐食防止などのため装置を不活性ガスなどで封入、あるいは冷却しておくことが必要である。これらのことは、再起動のリードタイムを長引かせることにもなる。

導入現状

リン酸形の発電効率は35-45%で、現在電力事業で主力となっている100万kW規模の大型LNGコンバインドサイクル発電と同等の効率が可能である。更に熱利用を含めたコージェネレーションを行えば、総合エネルギー効率は70-80%にも達する。

コージェネレーションセンターの調査によれば、我が国における導入状況は99年9月時点で74台が稼働、発電容量は13,232kWとなっている。導入時期は90年代の前半が多く、その後は横ばいないし減少傾向にある。

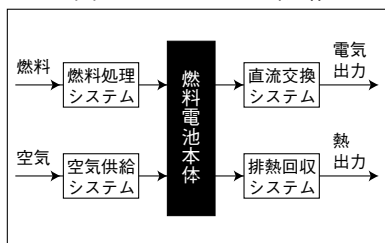
システム規模の分布は、発電容量200kW級が最も多く、次いで50kW級、100kW級の順で、1台当たりの平均容量は約160kWである。

熱利用は、排熱の回収を温水で行うものが6割以上と最も多く、用途は給湯、次いで給湯+冷暖房の順である。

熔融炭酸塩形

電解質が炭酸リチウムと炭酸カリウムの混合塩で、移動するのは炭酸イオン（CO₃²⁻）であ

図5-9 システムの概略



る。炭酸塩は高温で溶融して液状となると、炭酸イオンが移動しやすくなるので、電池の作動は600–700℃で行う。

陽極では、酸素と二酸化炭素が外部回路から電子を受け取って、炭酸イオンとなる。

陰極では、移動してきた炭酸イオンが、水素と反応して水と二酸化炭素を生成し、電子を放出する。

ネットとしての電極反応は、炭酸イオンを仲介とした水素と酸素の反応である。

溶融炭酸塩形では、運転温度が高いので、冷却系統は不要である。また、一酸化炭素による触媒の不活性化がないので、一酸化炭素変成器も不要である。一方、陽極反応に二酸化炭素が必要なため、改質器燃焼排ガスを空気共に供給するラインが必要となる。

発電効率としては、リン酸形より更に10%程度高い45–55%の高効率が可能である。溶融炭酸塩形のもう一つの特徴は、高温の排熱が得られることで、冷暖房の熱源や、蒸気タービン、ガスタービンの動力として利用することにより、極めて高い総合熱効率が期待できることである。

現在、電力会社やメーカーが、次世代の分散発電や大規模発電システムの候補として実用化試験を進めているところである。

固体電解質形

電解質は安定化ジルコニア、移動イオンは酸素イオン (O_2) である。

ジルコニアは、金属酸化物ジルコニアを主成分とするセラミックスで、機械的強度が強く安価である。電池の作動は、酸素イオンの移動を容易にするため、900–1,000℃という更に高温を用いる。

燃料電池として最も高い60%以上の発電効率が可能であり、次世代の火力代替の分散型発電システムや、大規模発電システムの候補として開発が進められている。

固体高分子形

現在、最も注目を集めている燃料電池が、固体高分子形である。

その特徴は、電池本体の電解質が固体の高分

子膜で、液体の部分がないため、動揺や振動に強く構造が簡素化できること、出力密度が高いので小型でも高い発電効率が得られること、電池の基本単位が電解質の高分子膜を炭素電極膜で挟んだ平板構造であるため、出力はその重ね合わせ（スタック）の数により決定されることなどである。

一方、他の燃料電池と比べ、固体高分子形の作動温度が80–100℃と低いため、排熱利用効率については他の燃料電池よりやや劣るものの、周辺装置が簡素化でき、取り扱いも容易になるという利点が生まれる。

これらの特徴から、固体高分子形は、燃料電池の中でも小型分散型の電源として、特に自動車や家庭用に最適であると考えられ、実用化を目指した激しい開発競争が展開されている。

固体高分子形の開発では、カナダのパラード社が世界のトップランナーであり、自動車メーカーや機器メーカーの多くは、同社と協力してそれぞれのシステム開発を進めている。

小型分散利用の必要性

地球温暖化ガスの排出量削減を目指す京都条約を、我が国も2002年6月に批准した。今後、特にCO₂（二酸化炭素）の排出量削減に取り組んでいく。

最近の我が国におけるCO₂排出量の部門別内訳を見ると、産業部門が約40%で最大となっており、これに比べれば民生部門は約25%（内訳は家庭用と業務用がほぼ半分ずつ）、交通部門は約20%と小さい。

しかし、増減傾向を見ると、産業用部門がほぼ横ばいないし減少しつつあるのに対し、民生及び運輸部門は増大する勢いを示しており、これら2部門のCO₂削減対策が急がれる。

まず民生部門においては、家庭部門でも業務部門でも、冷暖房用などの熱利用及び家庭電器、事務用機器、情報化機器などの増加に伴う電力利用が増大中である。従って、熱と電力を合わせた総合エネルギー効率の向上を図らなければならない。

そのために極めて有効な手法が、電熱併給のコージェネレーションシステムである。その際

特に重要なことは、最も効率の悪い熱の移動を行わなくて済むように、熱の需要地に立地する小規模分散型コージェネレーションシステムを導入することである。これにより、排熱の有効利用が最大限となり、総合エネルギー効率を高めることが可能となる。

一方、運輸部門では、人の移動や物流のために自動車が出すCO₂の増加が続いている。同じく自動車から排出されるSO_x、NO_x及び微粒子による大気汚染の抑制と合わせて、その削減が緊急の課題となっている。そのため、排出ガス中のCO₂が少なく、清浄な動力源の実用化に期待が寄せられている。

これら両部門の要請に最も適合すると期待され、開発が進められているのが固体高分子形燃料電池である。

家庭用燃料電池

民生用に求められるエネルギーシステムの要件は、まず小規模であることである。

特に家庭用は、1件当たり1～3kW程度の小容量であり、当然のことであるが、システムの寸法や重量、また騒音や振動も、住宅で受け入れが可能な小ささでなければならない。また、主婦が主に使うのであるから、運転が簡単で壊れにくく、保守点検の不要なものが求められる。

これらの諸点は、始めに述べた固体高分子形燃料電池の特徴を生かすことによって、対応することができる。

家庭での熱需要の多くは、風呂、給湯、冷暖房などであり、作動温度80～100℃の高分子形の排熱を有効に利用することで対応することができる。

残る課題は、コストダウンである。家庭で導入できる程度に、システムの初期設備費や月々の運転コストを安くすることが必要である。

燃料の水素は、都市ガス（天然ガス）の改質によって、効率よく製造できる小型システムが既に我が国の都市ガス会社によって実用化され、経済的な供給が可能となっている。

システム価格については、現在1kW当たり50万円を目標にした開発努力が続けられており、1、2年のうちに商品化されると期待されている。

自動車用燃料電池

ダイムラークライスラー社が、燃料電池車を2004年に発売すると発表して以来、世界の各自動車メーカーも相次いでそれぞれ開発、発売予定を早め、商業化を巡る激しい主導権争いが展開されている。

未来の自動車動力源として、燃料電池導入が追及されている理由は、言うまでもなく水素などの清浄な燃料を利用し、優れた環境性と高いエネルギー効率を併せ持っているからである。

その際、燃料電池がクリアしなければならない自動車に固有の課題としては、走行に伴う振動や加速への耐久性、短い立ち上げ時間、頻繁な加速や減速への迅速な出力対応、低温や極暑、乾燥や湿潤など、さまざまな環境下での安定した出力、馬力当たりの少ない荷重や容量、十分な航続距離などがある。

固体高分子形は、電解質が固体で振動に強い点、そして、作動温度が低く立ち上げ時間が短い点等が、自動車駆動用電源として適している。頻繁な加速減速には、蓄電池との組み合わせによる対応が行われる。

必要な50～100kWの出力は、単位電池のスタックにより、従来の自動車エンジンに負けない小さな容積・重量で確保できる見通しである。

価格削減と開発課題

しかし、自動車には100年の歴史があり、従来のガソリン、ディーゼルエンジン車に伍して本格的に市場へ参入するには、乗り越えなければならない壁、価格競争がある。

従来エンジン車と競合するためには、価格を1kW当たり5,000円程度まで下げる必要があり、現状から更に2桁のコストダウンが必要であるとされる。そのためには今後更に多くのブレークスルーが必要である。

高分子膜の耐熱性、耐腐食性、電極の耐久性、改質機の性能、各触媒の耐腐食性などをそれぞれ向上させ、かつコストダウンを図る努力が進められているが、実現には、更に10年以上かかると考えられている。

また、燃料についても、水素を直接車に搭載するか、それともメタノールかガソリンを搭載

しこれを車上で改質するかなど、主要な3候補の間でまだ結論が出ておらず、今後の業界標準を目指して、世界の自動車業界を巻き込んだ激しい競争が行われているところである。

課題多い自動車用

現在、市販されているフッ素系高分子膜は、米デュポン社が主要なメーカーで、1 m²当たりの出力は約8 kW、価格は約5万円である。

家庭用は、これを用いて、1、2年のうちに1 kW当たり50万円を切るコージェネレーションシステムが実用化されようとしている。

これに対し自動車用は、電池本体のコストダウンや水素供給方法など、解決すべき課題が残っている。特に価格は、1 kW当たり5,000円、50 kWのシステムで25万円を目標とした大幅な引き下げが求められている。

中でも大きい割合を占め、価格削減の対象となっているのは、触媒、電解質、及びセパレーターである。これらを巡る動きを、最近の報道から紹介する。

白金触媒の減量

固体高分子形電池の+極で水素の解離に用いられる白金触媒は高価で、現在1 g (グラム) 約2,000円である。出力1 kWあたり約5 gが必要とされるので、出力50 kWでは約50万円となる。

コスト削減を目指した研究開発が我が国のメーカーや大学で進められているが、日本電池は最近、白金量を従来の1/10に減らした触媒を開発したと発表した。

+極側の白金とルテニウムを担持した触媒と、-極側の多孔性ポリマーを組み合わせたもので、単独の電池では、0.7Vの世界最高の出力性能を示した。

カーボンと接して形成されたイオン交換膜ポリマーの表面に、選択的に白金とルテニウム合金を析出させることにより、使用された白金がほぼ全量電極として働き、従来の1/10の量で同等の触媒能力を示した。そして、ルテニウムにより、水素ガスに含まれる一酸化炭素濃度が10 ppmでも、触媒の劣化は防止された。同社は、この技術の実用化に取り組んでいる。

電解質作動の高温化

固体高分子形の電解質はフッ素系の高分子であり、スルホン基を導入することにより、水素イオンの伝導性を持たせている。

温度を上げるとイオン伝導度は高まるが、一方でスルホン基の離脱が起こるので、高分子形の作動温度は80℃前後に保たなくてはならない。自動車には冷却系としてラジエーターがあるが、常に80℃を確実に保つには不十分で、冷却系の能力増強が必要となり、コスト上昇の要因となっている。

これに対し、80℃より高い作動温度が可能となれば、冷却能力の追加が不要となるだけでなく、イオン伝導度の上昇による発電効率の向上、排熱エネルギーの利用効率向上など、大きな波及効果が期待される。

より高温で作動する耐熱性の電解質膜の開発を目指して、従来のフッ素系の改良や、新たに炭化水素系、あるいは無機系の材料開発が、各方面で進められている。

積水化学は2001年、160℃まで水素イオンの伝導度が下がらない有機無機複合の高分子電解質を、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発したと発表した。ポリオレフィン（炭素数の多いパラフィン系炭化水素）にシリカを結合し、伝導性供与体としてヘテロポリ酸を添加した。高温作動で、一酸化炭素による白金触媒の劣化を防ぐことができる。また、オレフィン素材であるので、コストダウンが可能である。同社は、次世代燃料電池用の電解質として開発を進めている。

また価格は、50 kW用には高分子膜が約62 m²必要なので約31万円となり、この面での大幅な改善も、新材料の開発などを通じて追求されている。

セパレーター

高分子形燃料電池の出力は、電池1個当たり1 V以下であるので、面積にもよるが、数十 kWの出力のためには通常単電池を数十から数百枚スタック（積み重ね）する。

セパレーターは、各電池のイオン交換膜を分離すると共に、水素や空気の通路や、場合によっては冷却水路管の溝などを持っている。

従来の製法は、カーボンを数千度に熱し、黒鉛に焼成した後、水素ガス用の溝などをNC工作機械で手作りしており、1枚（10cm角）当たり1万円以上と高価である。

コストダウンのために開発中の方法は、水素用の溝などを掘った金型を使って、天然黒鉛や人造黒鉛に樹脂を混ぜて焼成し、成形射出する方法である。

ユニチカは、特殊フェノール樹脂から製造するアモルファスカーボンによるセパレーターのサンプル出荷を、2000年に開始した。1,000℃の高温で焼成し、1回の射出で製造しており、量産効果により、価格を一桁下げることが可能であるとしている。

大日本インキも、米プリミックス社と共同開発したセパレーターを02年からサンプル出荷した。カーボンに不飽和ポリエステルなどの熱硬化樹脂を混ぜ合わせて、焼成したものである。

一方、成形性や導電性が良く、コスト低下も期待できる材質として、ステンレス鋼やアルミなどを用いた金属セパレーターの開発も行われている。強度の弱いカーボンでは、厚さが15mm程度は必要であるが、金属であれば3mm程度でも強度は十分であり、容量の削減も可能である。他方、腐食に弱いため、メッキ、コーティングなどの対策が必要である。

以上のような燃料電池システムを構成する各要素のコストダウンと技術課題の解決が達成されるとき、燃料電池車の本格的普及が開始され、それには、なお数年から10年ほどの年月が必要と見られる。

水素供給方法

燃料である水素の自動車への供給法については、水素の搭載と他の燃料からの車上改質の2通りの考えがある。また、水素の搭載方法についても、また、改質する燃料についても、いくつかの候補がある（表5-2）。

各方式について、自動車メーカー、石油会社などを巻き込んだ主導権争いが行われているが、まだ決着がついていない。

どの方法を採用にしても、必要なインフラやシステムが整備されていない現状であり、02年から燃料電池車を先行販売したトヨタを始めとする各自動車メーカーは、当面、高圧水素（350気圧など）を搭載する方針を採用した。

(4) マイクロガスタービン

天然ガスに今後期待される分散エネルギー利用において、燃料電池と並ぶ重要な技術として登場してきたマイクロガスタービンを紹介する。

燃焼ガスでタービンを回転

ガスタービンは、燃料ガスを圧縮空気と燃焼させ、その爆発的な燃焼ガスの膨張力で、翼を高速回転させる原動機である。

コンバインドサイクルの項で既に紹介した発電所用の大型ガスタービンは、一基数万から数十万kWの規模であるが、マイクロガスタービンは、その名のとおりに、ずっと小型の数十から数百kWの規模である。

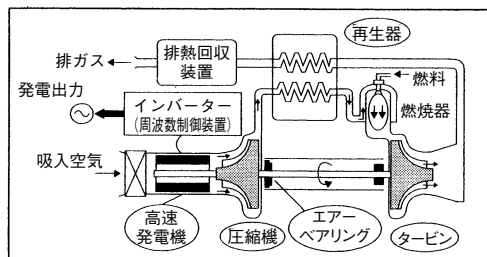
システムの基本構造は、高速回転翼の付いたタービンローター、この回転軸に通常軸を直結

表5-2 燃料電池自動車への種々の水素搭載方式案

水素の製造	処理方法、原料など
別途製造した水素を処理して搭載	加圧（当面各自動車メーカーが採用）
	冷却（液化水素）
	吸着（合金、活性炭、黒鉛、カーボンナノチューブ、金属含有体など）
	化学変化（有機ヒドライド、シクロヘキサン、デカリン、ホウ素／水素溶液など）
他の化合物を搭載し、車上で水素発生（改質）	石油製品（ガソリン、灯油、LPGなど）
	アルコール類（メタノール、エタノールなど）
	天然ガス（メタン、GTL、DMEなど）
	水（鉄触媒による水分解）

した発電機（一軸式）、タービンに燃焼ガスを供給する燃焼器、タービン排気ガスからの熱回収システムなどから構成される極めて単純なものである（図5-10）。

図5-10 マイクロガスタービンの構造



出典：中川良治, PETROTECH, 第23巻, 第4号

大型タービンでは、回転翼の冷却システムによって、燃焼ガスの入り口温度を1,500℃もの超高温にすることによって、40%以上の高い発電効率を得ていた。

これに対し、マイクロガスタービンでは、冷却装置はスケールメリットがないので利用せず、燃焼ガスのタービン入り口温度も800-900℃止まりとなる。これによる発電効率の低下を、高速回転と排気熱の再生利用によって、可能な限り補おうとしている。ローターは、毎分10万回転もの高速で回転させ、摩擦の軽減のためには、空気軸受け（エアベアリング）等が用いられる。

空気は、回転軸に取り付けられた回転圧縮機によって吸入圧縮され、燃焼排ガスによって加熱され、燃焼器中の天然ガスを燃焼させる。

構造が単純、保守が容易

このような単純な構造のため、潤滑油系統、冷却水系統も不要で、また減速ギア、別置きスターターなども用意する必要がない。

マイクロガスタービンシステムは、同規模の往復式エンジンと比較して、小型、軽量で振動も少ない。ただ高速回転による高周波ノイズが生じるので、防音装置によって対処する必要がある。

起動性、制御性が良く、ハイブリッドシステムや系統電源への組み込みも容易である。

設置が容易で、導入コストも安価である。構造

も単純で、保守が簡単で、保守費も安価である。

発電効率は十数%であるが、タービンからの排熱を利用する再生サイクル技術により、同クラスのガスエンジン、ディーゼルエンジンと同等の30%前後の発電効率まで上昇する。電力の品質についても、高精度インバーターにより高品質の供給が可能となる。

排熱回収により、80-90%の高い総合熱効率を得ることができる。

天然ガスを燃料とすることにより、SO_xや微粒子の排出はなく、CO₂の排出も少ない。NO_xについても、希薄予混合燃焼技術により、10-20ppmに抑えることができる。

これら、小型で立地が容易、高効率、高環境性などの特徴は、小型分散エネルギー利用、特に都市部の商業施設や集合住宅等の民需用に最適である。

導入現状

世界では、米キャプストン社が先行して製造販売しており、我が国へも直接に、あるいは複数の提携企業を通じて、28kW級数百台が納入されていると見られる。これに続いて、米エリオット社、スウェーデンのターバック社その他の製品も導入されつつある。

一方、日本のメーカーとしては、トヨタが01年50kW級の自社製品の供給を開始し、他メーカーも開発製造に乗り出している。

導入された機器は、コージェネあるいは発電用として、性能試験あるいは実事業に用いられていると見られるが、まとまった統計はいまだない。

日本コージェネレーションセンターのまとめた02年3月末の我が国のコージェネレーション導入状況によると、ガスタービンは計814台、発電容量約303万kWであり、1台当たり平均容量規模は約3,700kWとなる。これは、明らかに大型もマイクロも含めた数字でである。用途別平均容量を算出すると、産業用4,674kWに対し民生用は1,247kWと小さく、マイクロガスタービンの導入を反映している可能性がある。

特に、00年、01年における民生分野の導入機の平均容量を算出すると、305kW及び893kWと、前年までの2,000kWを超える規模よりずっと小

規模で、これらは最近のマイクロガスタービンの導入を反映しているものと解釈できよう。

今後の課題と展望

マイクロガスタービンは、技術的にはほぼ完成されたと言ってもいい。

ただ、現状の発電効率30%は、今後10年ほどの後に実用化されると見られる燃料電池等との競争を考えると、一層の向上が望まれる。そのためには、無冷却方式のまま入り口温度を上げる技術として、セラミック翼の開発が待たれる。燃焼温度約1,300℃が可能となり、発電効率も35-40%が期待できる。

更に高効率を目指して、燃料電池とのハイブリット技術の開発も進められている。例えば、高温型の固体酸化物形燃料電池の高温排ガスをマイクロガスタービンの燃焼器として用いることにより、60%もの高効率発電が可能とされる。

また、総合熱効率の向上については、熱需要とのより有効な結合が求められる。我が国の気候風土から、従来の温熱需要に加えて、冷房需要への対応が有望と考えられマイクロガスタービンに適合した小型で安価な吸収式冷凍機などの開発が望まれる。

(5) ガスエンジン

ガスエンジンは、次節に紹介する天然ガス自動車に先行して、既に冷暖房用ヒートポンプ、あるいは分散型コージェネレーションの分野で活躍している。

電力の需要変動とガス冷房

我が国の電力需要は、1年の中では、特に冷房用のエアコンが最も使用される夏に、そして1日の中では午後3時ごろにピークがある。その大きさは、需要の少ない季節や時間に比べて数倍あり、しかもエアコン、家電、OA機器などの普及と共に、その比率は年々拡大してきた。

電力会社は、需要の最大規模に合わせて設備を増強せざるを得ないので、設備稼働率は低下することになる。これを解消するために登場してきたのが、ガス冷房である。

吸収式とガスエンジンヒートポンプ (GHP)

ガス冷房には、大別してガス吸収式ヒートポンプとガスエンジンヒートポンプGHPの2方式がある。

ヒートポンプは、物質の気化あるいは液化に伴う熱エネルギーの出入りを利用して、熱源となる周囲の外気や水に対して、熱を放出し、あるいはそこから熱を吸収する。これにより冷却、あるいは加温された媒体物質（冷媒あるいは熱媒）を使って、冷房あるいは暖房を行う。

従来の冷房は、電動式の圧縮式ヒートポンプが、ほとんどを占めていた。この方式では、冷媒が気化するとき周りに熱を奪うことにより、冷却が行われるが、気化した冷媒を再液化するために、電力コンプレッサーで圧縮する。

GHPでは、コンプレッサーをガスエンジンの動力で動かすので、電力の消費が1/10程度まで、大幅に削減される。

一方、吸収式システムでは、吸収液の作用で冷媒の気化が進行し、その際に冷却が行われる。吸収液を再生するための加熱熱源として、ガスの燃焼熱が、用いられるため、やはり電力の節減が可能となる。

GHPの伸びでガス冷房は全冷房の20%に

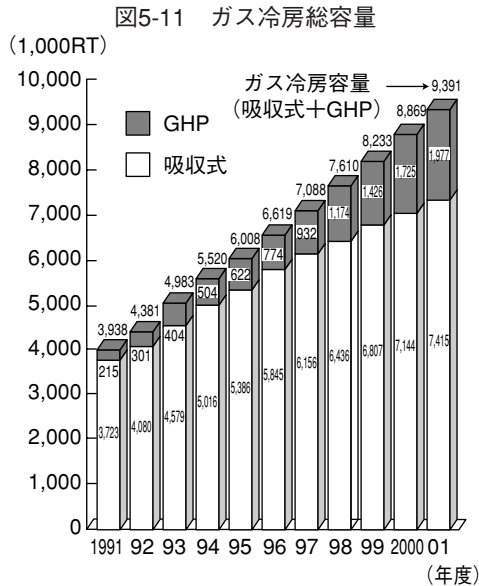
80年代から増加し始めたガス冷房は、着実に増加し、日本ガス協会によれば、91年には全国総冷房の約15%に、00年には約20%を超え、約8.9百万冷凍t (RT)、約31百万kWとなった。01年には、約9.4百万RTとなり、03年には1,000万RTを超える勢いである (図5-11)。

この中で、GHPの占める比率は、ガス冷房の中で、91年の約5%から00年には約19%に、全国総冷房に対しても91年の0.8%から00年の約4%に、それぞれ増加しており、GHPがガス冷房増大の主力を担っていることが分かる。

GHP技術の開発は、ガス事業者やメーカーの協力によって着実に進展しており、エネルギー効率も年々高まっている。

エネルギー価格、環境保全に貢献

NEDO新エネルギー・産業技術総合開発機構の調査では、00年度の普及実績、ガス冷房約31



百万kW及びGHP約6百万kWから、電力ピークカット効果を全ガス冷房で約20%の約6.1百万kW、GHPはその約27%の約1.6百万kWと試算している。これらはそれぞれ、同年度の全国ピーク電力量約173百万kWの約3.5%及び0.9%に相当する。

NEDOは、2010年度のGHP最大普及導入量を約67百万kW、同じくピークカット量を18百万kWと予測し、全国ピーク電力の10%以上のカットが可能であるとしている。

ガス冷房の導入促進は、電力事業者における施設稼働率の向上のみならず、ガスの夏期需要を高めることにより、ガス施設の稼働率をも上昇させる。電力及びガス事業の効率化、安定化によって、両分野のエネルギー価格の引き下げを可能とし、我が国経済の発展にも寄与することが期待される。

これに加え、今後とも需要増大が予想される空調分野における天然ガスの導入促進は、大きな省エネルギー効果をもたらすと共に、大気汚染の抑制、地球温暖化ガスの削減にも極めて有効となる。

ガスエンジンコージェネレーション

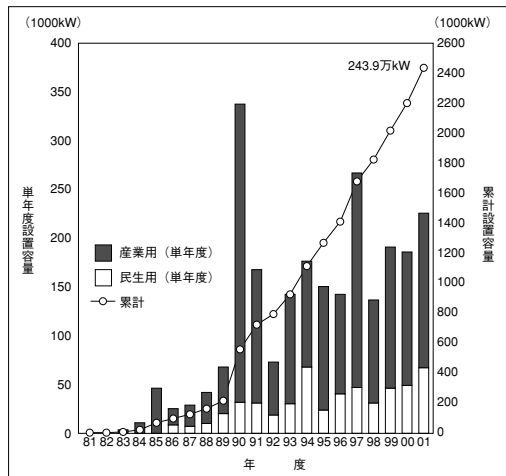
日本ガス協会の調べによると、2001年度の都市ガスコージェネレーションの実績（スチーム

タービンを含む）は、図5-12に示すように、設置容量が昨年の10.3%増の244万kWに達した。

設置容量は、毎年10万から20万kW、前年比10%前後で着実に増加している。全国の総発電設備容量に対する都市ガスコージェネ発電容量の比率も、99年度の0.80%、00年度の0.86から、01年度は0.94%へと伸びている。

用途別では、民生分野が約55万kW増で、前年度約48万kWから14%増加した。産業分野も約9%、約189万kWの増加を示した。

図5-12 ガスコージェネ設置容量の推移



民生分野で小型ガスエンジンが急増

一方、01年度導入件数は、前年度比19.3%増の1,686件となり、小型のコージェネシステムの増加を示している。分野別で見ると民生分野は、22%、1,226件の増加、産業用は12%、460件の増加で、民生分野の増加が約3/4を占めている。

特に近年増加が著しいのは、9.8/8.2kW級の小規模マイクロガスエンジンで、01年度は328件と、00年度の169件の約2倍増となっている。また、マイクロガスタービンも、昨年の10件から大幅増の45件となっている。

家庭用コージェネを実現

ガスエンジンの特徴の一つは、大型から小型まで広い範囲での高効率出力が可能な点である。数100kW級から数1,000kW級では、30-40%の高効率発電システムが開発され、産業用

コージェネの主力となっている。

一方、より小型の分野では既に紹介したマイクロガスタービンが、数十kWより大きな出力範囲を対象として発展してきているが、10kW以下はコスト高となる。これに対し、ガスエンジンでは10kW以下が既に商品化されており、現在は更に小型機の開発が進められている。

特に家庭用には、1kW前後が最適とされ、複数の都市ガス会社が、ホンダの開発した163ccのガスエンジンなどを用い、総合熱効率率85%以上のコージェネシステムの実用化に取り組んできた。その結果、初の家庭用コージェネレーションシステムが、燃料電池に先駆けて、マイクロガスをエンジンを用いて商品化され、2003年3月より、大阪ガス、東邦ガス、西部ガスの3社から発売された。

(6) 天然ガス自動車

地球温暖化ガスや自動車排気ガスによる大気汚染の削減に有効な手段として期待されてきた天然ガス自動車が、いよいよ本格的普及の段階に差し掛かった。

クリーンな排気ガス

我が国の温暖化ガス排出源のうち、運輸部門は約20%を占める。その90%近くは石油燃料で走る自動車によるものであり、民生部門と同じく、削減がなかなか進まない部門である。

更に、その排気ガスは、SO_x、NO_x、及び微粒子による深刻な大気汚染を引き起こしており、国民の健康を守る上でも、早急な削減が求められている。

天然ガス自動車NGVは、燃料である天然ガスの主成分メタンの水素対炭素比が4/1と高いので、二酸化炭素の排出は、ガソリン車やディーゼル車に比べて、20%以上も少ない。更に、硫黄分、芳香族化合物とも含まないため、SO_xも微粒子も排出しない。またNO_x排出も少ない理想的な低公害車である。

メタンは、ガソリンエンジンの燃料特性として重要なアンチノッキング性を示すオクタン価が高いので、従来の自動車の構造を大きく改造することなく、必要な動力性能を得ることがで

きる。従ってNGVは、小型車から、大型車、乗用車からトラックまで、幅広く利用することができる。

このような特徴から、NGVは、自動車のみならず環境問題を解決するための、当面最も有効な方法と考えられた。

しかし、世界で既に100万台以上が走行しているが、我が国では最近に至るまで、導入が進まなかった。その原因は、燃料ガスの搭載、供給、及び車両価格などの問題であった。

高圧ガス容器と供給スタンド

我が国では、都市ガスの導管網が国土の5%しかカバーしていない上に、従来の天然ガス自動車は、1回の燃料充填で走行できる距離が十分でなく、また供給用のスタンドの設置も遅れていた。

NGVへのガス搭載方法としては、圧縮ガス(CNG)、液化ガス(LNG)、及び吸着ガス(ANG)の3方法が検討されてきた。

このうち、最も実用化が進んだのが、CNGである。90年代になって、従来の鋼鉄製よりも軽量の合成樹脂製で、200気圧を超える耐圧性能を持つ燃料容器が商品化されるようになり、実用上最低限必要とされる200km以上の走行が可能でCNG量の充填が可能となってきた。

一方、燃料ガス供給用の急速充填所も、90年代になって登場し、93年の12カ所から、ゆっくりであるが着実に、2年ごとにはほぼ倍増し、99年に107カ所、02年3月末には、181カ所にまで増加した。

助成策による量産と価格低下の好循環

車両価格は、燃料容器及び高圧部品等、NGV仕様に要する費用のため、当初、従来車より2倍以上高く、導入の障害となっていた。

現在最もNGV車導入による代替が進んでいる2tトラックの場合も、ベース車両(2tディーゼル、価格約300-400万円)との差額は、当初、図5-13に示すように、300万円以上あった。しかし、最近5年間に、製造数の増加による量産効果やメーカーの販売政策などにより、差額は約120万円まで急速に縮小してきた。

これらの動きの背景には、政府各省庁、地方自治体、及び日本ガス協会を始めとする関連分野の事業者諸団体によって継続的に追求されてきた普及のための制度的、経済的、及び技術的努力があった。

90年代に進められた各種の補助金などの導入支援策は、NGV車両の購入及び急速充填所の増設を促進した。特にこれによるNGV需要の増加は、メーカーにおけるコストダウン、専用製造ラインの採用、技術開発努力などを促して、車両価格を低下させ、これがまた需要を増加させると言う好循環をもたらしている。

その結果、我が国のNGV導入台数は、92年の100台、96年の1,000台から、昨01年11月には1万台を突破するという勢いで増加し、02年3月末には1万2,000台に達した(図5-14)。03年末には2万台に達する見込みである。

図5-13 CNG 2tトラックとベース車との価格差推移

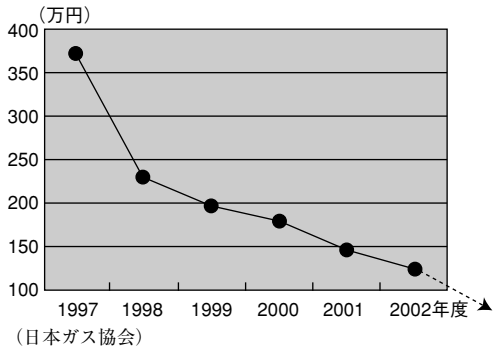
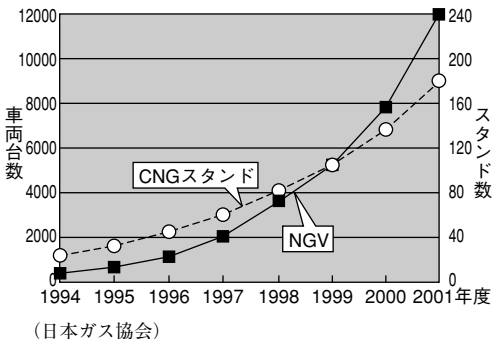


図5-14 NGV, CNGスタンドの普及



2010年に100万台

天然ガス自動車の2010年時点の普及目標として、経済産業省は01年に、政府は02年に、それぞれ100万台という数字を打ち出している。

日本ガス協会は、これに関し、これまでの車両数と充填スタンドの増加傾向を分析して、これらが片対数グラフでは直線となり、2010年まで延長すると、車両台数は約100万台、スタンド数は約2,400カ所となることを示した(図5-15)。

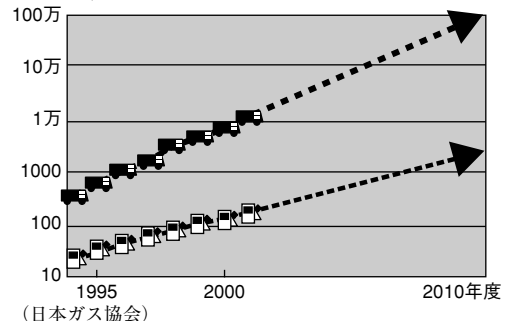
これらを含めた種々の状況を総合的に判断し、同協会は02年8月、「天然ガス自動車普及ビジョン21」を発表し、2010年までの8年間に、100万台到達は可能であるとし、実現のための具体的な3段階プランを提案した。

第1期(03年度まで)は、各種導入支援策の下に、大都市圏の営業用トラックを中心に、車両3万6,000台、スタンド300カ所を目指す。

第2期(06年まで)は、普及支援策の下に、地方都市へ広げて、トラックから小型バン、乗用車、路線バスなどへ拡大し、車両20万台、スタンド700-1,000カ所を目指す。

第3期(10年まで)は、天然ガス自動車の市場性を確立し、車両100万台、スタンド2,000-3,000カ所を目指す。

図5-15 NGV, CNGスタンドの導入見込み
車両台数、スタンド数



今後の課題

これらの目標の実現には、従来にも増して、関係各分野の協力と努力が必要となる。

技術面では、ガス搭載能力の向上とコストダウンである。CNG方式については、更に容器

の耐圧強度の引き上げによる走行距離の増大が望まれる。LNGについては、大型トラックによる試験が行われているが、更に研究が必要である。

ANGについても、各種吸蔵物質の開発が進んでいる。大阪ガスは、02年7月、低圧でも高いメタン吸着能力を持つ有機金属錯体を開発したと発表した。35気圧の低圧で、1 cm³当たり224cm³のメタンを吸着する。低圧であるので、タンクの形状を自由に設計できるため、自動車への搭載スペースが有効に利用でき、タンク容量の拡大、走行距離の延長が可能となる。

スタンドの増設には、ガス導管の地方へ延長が必要である。国土建設省と産業経済省は最近、高速道路の路側帯へのガスパイプラインの建設を認めることで同意した。高速道に沿って建設されるガス導管は、高速道路のスタンドのみならず、全国の主要な地域への天然ガスを供給する幹線となることができ、NGVを含めた天然ガスの利用地域の拡大に、貢献するものと期待される。

(7) ガスツーリキッド (GTL)

化学原料としての天然ガス

天然ガスには、エネルギー源と材料資源との両面がある。エネルギー源としての燃料は現在、天然ガスの用途の約90%を占めている。

一方、用途としては、全体の1/10と少ないが、今後重要性を増すと考えられるのが、もう一つの面、材料資源、化学原料としての利用価値である。

天然ガスを原料とする各種の液体燃料、化学製品は、GTL (ガスツーリキッド) と呼ばれている。最近、GTLの新しい合成技術の開発や、大規模なGTL製造プラント建設計画が発表され、話題となっている。

期待される三つの役割

GTLに期待される役割は、第一には減退していく石油に代わる石油精製や石油化学の原料として、第二には未利用天然ガス資源の経済的な輸送貯蔵法として、更に第三には最近環境面から注目を集めている純度の高い輸送用燃料の

製造法としてである。

第一の石油の代替原料としての役割は、長期的なエネルギー資源の移り変わりのなかで、天然ガスが果たさなければならない歴史的な使命であるといえよう。第二の輸送貯蔵方法としての役割は、天然ガスのこの面での短所を補い、未利用資源の有効活用を図ろうとするものである。第三の自動車用燃料の製造は、天然ガスのクリーンな長所を生かそうとするものである。

エネルギーセキュリティ

先進工業国の一次エネルギーの構成を、図5-16に示した。

第二次大戦前からパイプラインにより天然ガスを大規模に利用していた北米では、天然ガスは早くから石炭を抜いて第2位を占めてきた。

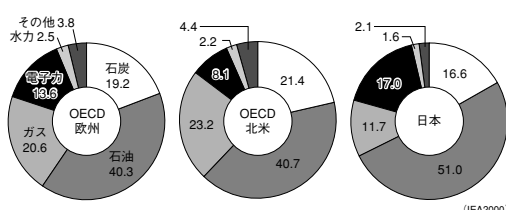
戦後にパイプラインによる大規模利用を開始した欧州OECD諸国でも、いまや天然ガスは石炭を抜いて石油に次ぐ第2位となっている。

北米、欧州地域とも、石油は全体の40%程度で、天然ガスはその1/2、全エネルギーの20%以上になっている。

これに対して、70年代になってLNGによる海外からの天然ガス大規模利用を開始した我が国では、その比率はようやく11%を超えたところで、石炭よりも低く、石油、原子力、石炭に次ぐ4位である。しかも、全エネルギーの50%以上をいまだに石油に依存し、天然ガスはその1/4にも達していない。

このような各国の現在のエネルギー構成は、それぞれが置かれた地理的・資源的状況や、政治的・経済的歴史を反映したものであり、変えていくことは容易ではなかろう。しかし、石油と天然ガスの資源量は、熱量換算ではほぼ同量であるが、石油は消費量が2倍近く多いため減

図5-16 1次エネルギー構成 (%) 1998年



退が早い。石油から天然ガスへのシフトを進め、将来の世界の社会経済の安定を図ることが必要である。

天然ガスの用途拡大

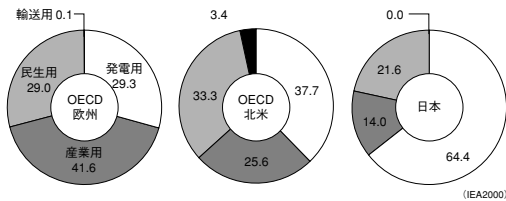
OECD各国の天然ガスの用途を図5-17に示した。石油を天然ガスに代替するには、石油による発電が多い場合は、ガス発電を増加させればよい。しかし、我が国では、既に天然ガスの6割以上を発電用に用いており、これ以上に発電における石油の代替をすすめることは、従来ほど容易ではない。

これに対し、北米及び欧州のOECD諸国では、天然ガスの用途は、発電用、産業用、そして民生用がほぼ1/3ずつと分散しており、より柔軟な対応が可能である。特に、天然ガス先進国である米国では、輸送用の消費が統計上に現れるほど大きくなりつつあるのも目につく。

このような消費の多様性は、天然ガス利用の歴史と経緯、特にパイプラインによる供給ネットワーク（グリッド）の発展によるところも大きいと思われる。

天然ガスの比率が他国に比して低い我が国にとっては、これを高める努力が他の国々以上に必要である。

図5-17 天然ガスの用途（％）1998年



GTLによる石油の代替

我が国における石油の用途は、図5-18に示すように、輸送用燃料が最大で、全体の1/3以上を占め、続いて産業用、民生用が続く。輸送用の消費は、欧米ではもっと多く、石油の全消費のうち北米では62%、欧州では48%となっている。石油の比率を下げ天然ガスの比率を上げるには、これら用途における代替を着実に進める必要がある。

自動車用燃料の天然ガスによる代替については、各国で進められている。しかし、圧縮天然ガスを燃料とするNGVの普及は、燃料の補給や航続距離の問題等から、世界的には一部の国を除いてまだ軌道に乗っていない。NGVの普及が遅れていた我が国では、近年急速に増加し、近々2万台に達するところである。

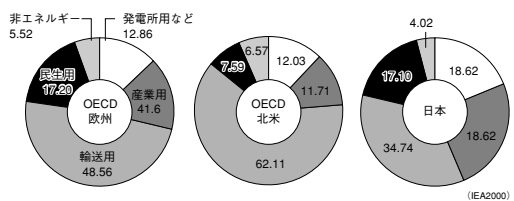
究極のエコロジーカーとして現在注目を集めているのが、水素を燃料とする燃料電池車である。水素の供給源としては、ガソリンやメタノール等と並んで、天然ガスが最有力な候補となっている。しかし実用化までには、いくつかの技術的なハードルがあり、普及するまでには、相当の年月が必要であると言われている。

このような状況下で、自動車用燃料をGTLにより製造しようとする動きが最近注目されている。

また、石油は従来、石油精製や化学工業の原料としても重要な役割を果たしている。南アフリカなど一部の国では天然ガスから石油製品が製造されていたが、経済性は十分ではなく、広く普及しなかった。しかし、最近、世界各地で大規模なGTLプラント建設計画が発表され、注目を集めている。

このように石油化学原料を天然ガスに置き換える動きは、徐々に始まったところである。しかし長期的に見るならば、GTLを発展させることは、天然ガスが21世紀のエネルギー資源の主役を引き受ける上で、避けて通れない重要な課題であり、我が国としても積極的に取り組むべきものであると言える。

図5-18 石油の用途（％）1998年



相次ぐ新規プラント計画

ロイヤルダッチシェル社は、既にインドネシアに大規模なGTLプラントを建設する計画を

発表している。同社は現在、マレーシアで天然ガスを原料に、合成ガスを経由してGTL製品を生産中である。新計画では、その規模を現行の日産1万2,000bblより格段に大きな7万bblに拡大する。更に、同社は最近、カタールにおいて、同国産の天然ガスを原料に日量14万bblの大型GTL製造プラントを建設する契約を結んだと発表した。

2000年の第17回世界石油会議で同社が発表した論文によれば、図5-19に示すように規模の拡大と技術の改良により、日産bbl当たりの投資コストは2万5,000-3万ドルに半減する。これにより、原料ガス価格を0.5ドル/百万btu(英国熱量単位)として、原油価格が18ドル/bblの下でも採算が取れると述べている。

南アフリカのサソル社も、同会議で論文を発表、図5-20の様に同社の技術改良で、生産規模を日産3万bblに拡大することにより、日産bbl当たりの投資は、2万5,000ドルに下がると述べている。また同社は、現在ナイジェリアでシェブロン社と共同で、日産3万bblのプラント

を、また中東のカタールでは、同国国営石油会社と同2万bblのプラントを計画中である。

これら2社の他にも、BP社ほかによる複数の計画が発表されている。

最近のこのような活発な動きの背景としては、第一に長年積み重ねられてきた技術開発と、特に近年の3件の商業プラントの操業による技術と経済性の改善がある。

これに加えて、最近の原油価格の高騰による石油製品との価格接近、環境性に優れた清浄な燃料への要求、各石油企業による所有する天然ガス埋蔵量の有効利用への動き等が挙げられる。

注目されるDME

GTLの製品としては、従来アルコール類、炭化水素燃料などが生産されてきたが、最近今後の有力な候補として登場してきたのがジメチルエーテル(DME)である。

DMEは、分子式 $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ で表され、メタノール2分子から水1分子が脱水されて縮合したエーテルである。合成ガスからメタノールを経由して2段階反応で、あるいは複合触媒により単反応で生成する。

常温では気体であるので厳密な意味でのGTLではないが、沸点がマイナス25.1℃なので、比較的容易に冷却、液化することができる。臨界温度が常温より高いので、少し圧力をかければ(約6気圧)、LPGのように簡単に液化することもできる。輸送、貯蔵には、LPG用のタンカー等が使える。

DMEの優れた性質

DMEは、ガソリン等の液体燃料合成の中間原料として用いられるが、それ自身も化学品や燃料として、優れた特徴を持っている。

メタノールとの比較で、明らかに優れているのは、環境性である。メタノールには毒性があり、腐食性もあるので、輸送、貯蔵には不安がある。一方、DMEには毒性がない。また、大気中に放出されても数十時間で分解してしまう。フロンによるオゾン層の破壊が、明らかになって以来、これに代わる噴射剤としてDMEが広く用いられている。化粧品のスプレー剤な

図5-19 ロイヤル・ダッチ/シェルのGTL設備コスト削減

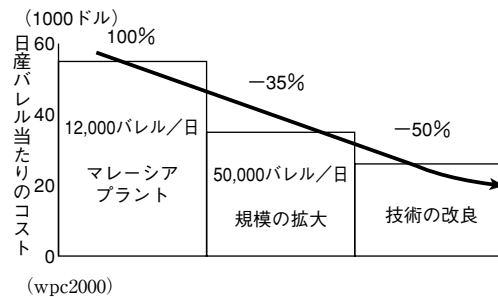
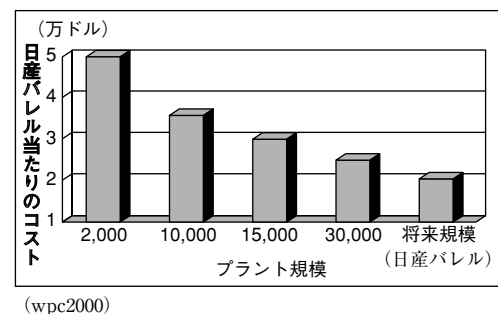


図5-20 サソル社のGTL設備コスト削減



どとして屋内でも用いられているように、健康に対する影響は小さいとされている。

燃料としても、発熱量はメタノールの約4,800 kcal/kgに対し、DMEは約6,900 kcal/kgと大きい。沸点などの性状が似ているので、LPG代替燃料として発電用、民生用に期待される。

超清浄燃料として

DMEは、セタン価が55-60と高いので、ディーゼル燃料に適している。更に、環境上問題となっている排気ガス対策にとって、DMEが硫黄分、芳香族化合物を含まず、粒子状廃棄物、窒素化合物を排出しないことは、極めて優れた点である。石油製品の場合は、精製度を一桁上げるごとに巨額の追加設備投資が必要となるので、元々清浄なGTLに価格競争力が生まれてきている。

次世代のエンジンとしての開発競争が進められている燃料電池においては、どのような燃料を用いるかが焦点の一つとなっている。水素のみを搭載する案と共に、ガソリンやLPG、メタノールを搭載し、車上で水素に改質する案も検討されている。クリーンであるという点、安全性、環境性からDMEも有力な候補となろう。

我が国の取り組み

我が国においても、GTLに対し、国、民間、大学が、いくつかの共同プロジェクトに取り組んでいる。天然ガス、石炭ガス等を原料とした液体燃料、ベンゼンといった化学品の合成技術の開発に関する動きが報じられている。石油公団は石油資源開発の所有する北海道の勇払ガス田において、2002年から、パイロットプラントによるGTL製造技術実証試験を実施中である。また、DMEの実用化を目指すプロジェクトも、資源エネルギー庁の支援の下に活発化している。

今後の課題

GTLの現状は、長年の技術開発の結果、ようやく原油の高値安定という条件付きではあるが、日産数万bbl以上の大規模プロジェクトでは、採算が取れる段階になっている。当面の課題は、更に各要素技術の改良により、トータル

コストを下げ、中小規模でも採算性が取れるシステムに近づけることである。

究極の課題は、なんと言っても、エネルギー収支の改善に限界のある合成ガス経由ではないメタンの直接酸化法（触媒）の開発である。我が国の石油公団や欧米の研究グループが挑戦してきたが、いまだ成功していない。これが可能となったとき、輸送貯蔵においても合成化学の原料としても、天然ガスは真に優れたエネルギー資源となる。ブレイクスルーの日が待たれる。

第6章 持続可能なエネルギーシステムへの架け橋

天然ガスが今後のエネルギーの主役として期待される理由は、残存資源量が多く、エネルギー効率がよく、しかも環境性に優れているだけではない。未来の理想のエネルギーシステム、すなわち、化石燃料に頼らず再生可能なエネルギーから造られる水素などを利用するシステムへの合理的な架け橋であると考えられるからである。本章では、天然ガスをこの点から見てみたい。

(1) 天然ガスが導く理想のエネルギーシステム

再生可能エネルギー

再生可能なエネルギー源とは、不断に供給される太陽エネルギーのような自然エネルギーや、生物活動によって生産されるバイオマス、及びリサイクルエネルギーを指す。

自然エネルギーには、太陽光熱、風力、地熱、水力、海流、潮汐、及び海水、河川水、氷雪、地下水の温度差エネルギーなどがある。また、バイオマスは、森林資源、農作物、海藻類などである。リサイクルエネルギーは、有機系廃棄物や都市排熱などである。

このシステムが優れている理由は、まず、基本的にこれらのエネルギー源が、消費すると枯渇する一方の化石燃料と異なり、未来永劫に持続的な供給が可能なことである。ただし、リサイクルエネルギーは、物質循環型社会の発展と共に次第に利用可能な量は減少していくだろう。

次に、利用に際して、自然エネルギーの場合

は炭酸ガスを発生しない。また、バイオマスは燃焼により炭酸ガスを発生するが、成長する時に炭酸同化作用によって同量の炭酸ガスを空気中から吸収するので、差し引き発生量はゼロであり、地球環境に影響を与えない。そして、リサイクルエネルギーは新たな資源の投入を必要としないので、炭酸ガスの発生を抑制することができる。

再生可能なエネルギーから製造される水素は、燃料として燃焼しても、水に変わるだけで、温暖化の原因となるCO₂を排出しないので、種々の熱機関の燃料として、特に将来増加すると思われる燃料電池などによるエネルギーの分散利用や輸送用燃料としても、コストが解決すれば最適である。

水素システムへの課題

しかし、水素はそれ自身天然には産出せず、他のエネルギー資源から生産されなければならない2次エネルギーである。再生可能なエネルギーに基づく水素エネルギーシステムの実現には、相当長期間が必要で、多分21世紀の後半以降であろうと思われる。

その理由の一つは、他のエネルギーに比べて製造コストが高いことである。再生可能なエネルギーからの電力で、水を電気分解したりバイオマスから水素を製造する方法は、天然ガスからの製造に比べて、現時点ではまだ経済性はずっと低く、供給可能量も限られている。

また、水素の経済的な輸送貯蔵技術や供給体制もまだ確立されていない。パイプラインや圧縮容器による輸送については、水素脆性による材質破壊により、水素の漏洩が起こる危険性がある。安全で経済的な材質の開発が待たれる。水素を他の物質に吸蔵、吸着させて運搬する方法については、各種の金属や炭素材料、有機化合物が開発中であるが、まだ確立されていない。極低温に冷却して液体水素として輸送、貯蔵する方法も試されているが、いまだコストが高く、実用化の段階ではない。

天然ガスが水素への近道

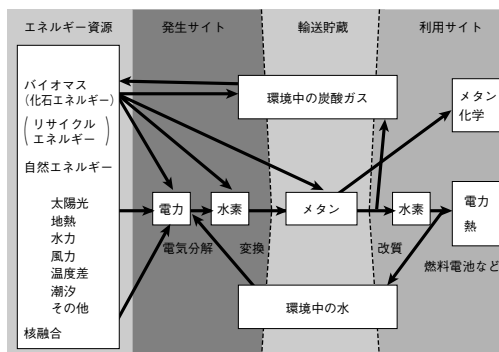
このような見通しの下で、天然ガスを21世紀

のエネルギーの主演とするシステムは、その未来にやってくると期待される水素システムへの架け橋として、極めて有効であると考えられる。

この考えは、図6-1に示すように、再生可能なエネルギーシステムが経済的にも供給可能量的にも可能となるまで、天然ガスが中心となって他の化石燃料と共に水素を製造するエネルギー源、及び原料として働き、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、利用するサイトで改質して水素を取り出し、使用しようというものである。

自然エネルギー、バイオマスなどから製造される水素が増加するにつれて、天然ガスなどの化石エネルギーの役割は縮小する。

図6-1 未来エネルギーシステムへの懸け橋としてのメタン



出典：「石油技術協会誌」森島 宏、99年

合理的なシステム移行

天然ガスから水素へのシステム移行は、以下の点から合理的であると考えられる。

1. 天然ガスには、十分な埋蔵量があり、持続可能なシステムへの移行に長期間がかかっても供給には全く問題がない。
2. 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。
3. 天然ガス用のパイプラインなど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、貯蔵インフラは既に

世界の主要工業国で整備が進んでいる。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。21世紀の前半には、世界中の大部分の国々では、必要に応じて天然ガスが利用できる体制（ガスグリッド）が整うと考えられる。

4. メタンは、水素に改質する際の炭酸ガスの発生量が、ガソリン、LPG、メタノールなど、どの原料に比べても少ない。

今後のエネルギーの利用法としては、必要な時に、必要な分だけ、必要なところで、必要な形で、燃料電池などで効率よく分散利用する形態が増加すると予想される。炭酸ガスの処理については、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。しかし、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思われる。従って、燃料電池などへ水素を供給する場合、炭酸ガス発生量の最も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。

5. 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。電力がさまざまなエネルギー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に換えて、輸送、貯蔵することが可能である。将来、水素がずっと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も、炭酸ガスの隔離法、固定法として考えられる。

メタンが水素のキャリアー（運搬体）として、また同時に炭酸ガスのシンク（吸収体）として働くシステムは、環境上からもエネルギー効率からも、優れたシステムと期待される。

6. 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。

(2) 再生可能エネルギー

ここで、再生可能エネルギー、未利用エネルギー、新エネルギーなど、各種エネルギーの定義を図6-2により整理しておこう。

我が国では、従来、「新エネルギー」という言葉が使われてきたが、これは、三つのグループからなる。

第一は、自然エネルギーの一部である太陽光熱、風力、潮汐などの海洋エネルギー、及び海水、河川水などの温度差エネルギーである。

第二は廃棄物焼却熱、下水熱、各種都市排熱、工場排熱などのリサイクルエネルギーである。

第三は、コージェネレーションや燃料電池など化石燃料の高効率利用技術と、電気自動車や天然ガス自動車などのクリーンエネルギー自動車などである。

未利用エネルギーは、このうち、第一の自然エネルギーグループ中の温度差エネルギーと、第二のリサイクルエネルギーグループを合わせたものを指す。

これに対し、欧米では新エネルギーという分け方でなく、「再生可能エネルギー」という分類が使われる。これは水力や地熱を含めた全自然エネルギーと、バイオマス、そしてリサイクルエネルギーを合わせたものを指す。しかし、第三の高度利用技術やクリーン自動車は含まない。

両者の違いは、我が国では、従来利用が進んでいない新しい種類のエネルギー、あるいは新技術の利用促進といった政策的観点に重きを置いているのに対し、欧米では、新旧を問わず、（化石燃料と異なる）再生可能なエネルギーで

図6-2 未利用エネルギーなどの定義

新 エ ネ ル ギ ー	未 利 用 エ ネ ル ギ ー	バイオマス		自 然 エ ネ ル ギ ー	再 生 可 能 エ ネ ル ギ ー		
		水	力			地	熱
		太	陽				
		風	力			海	洋
		温	度	差			
		廃	棄	物	リ サ イ ク ル エ ネ ル ギ ー		
		下	水	熱			
		都	市	排			
		工	場	熱			
		コージェネレーション、燃料電池 クリーンエネルギー自動車					

あるかどうかにかき重きを置いた分類になっている点である。最近我が国でも、国際的な分類にそるえようという議論が行われている。

重要な他エネルギーとの共用

天然ガスがその価値を發揮するのは、単独に用いられる時だけではない。他の種々のエネルギーと共に用いられることによって、一層その優れた特質が明瞭となる。この節では、天然ガスの長をこのような面から検討してみたい。

他のエネルギーとの共用、併用が重要な理由の第一は、天然ガスの普及の加速である。現在、世界的にも我が国においても、1次エネルギーの第1位は石油であるが、地球環境の点からも、また残存する埋蔵量を考慮した今後のエネルギー需給の安定性の点からも、天然ガスの比重を早急に高める必要がある。その点で、現在使用されている石油を中心とする各種エネルギーとの共用、併用を、種々のケースで推進することは現実的な方法であろう。これによって、将来の天然ガスへの移行に必要な、技術的な、あるいはインフラ、法制などの経済的、社会的な条件の整備が円滑に進められるからである。

単に天然ガスが優れた性質を持つと言うことだけに依存せず、エネルギー効率の点からも、使い勝手の点からも、他のエネルギーと馴染みの良い、お互いの特徴を生かし合えるような利用システム、技術体系、あるいはインフラを作っていくことが、天然ガスが21世紀のエネルギー

の主役に成長していくために有効な方策である。

第二に、天然ガスのエネルギー効率や環境性の高さによって、従来十分に利用できなかった種々のエネルギーの有効な利用が可能になることである。いわゆる未利用エネルギーに活用の道が開かれることになる。

同様に、環境性に優れているが、経済性、エネルギー効率、あるいは使い勝手の点から期待されるほどには普及が進んでいない種々の自然エネルギーの利用も、天然ガスとの共用、併用によって利用の促進が可能となる。21世紀後半に実現が期待される理想のエネルギーシステム、すなわち自然エネルギーなどに依存する持続可能なエネルギーシステムに向け、天然ガスがそのための掛け橋となる具体的な道筋がここにある。

文献

「天然ガス新世紀」 森島 宏著、2003年4月、(株)ガスエネルギー新聞
世界ガス会議については、以下を参照されたい。

森島 宏、第22回世界ガス会議東京大会（Ⅰ）—概要編—、日本エネルギー学会誌、第82巻第10号、pp714-718、2003年10月

森島 宏、市来 洋介、第22回世界ガス会議東京大会（Ⅱ）—セッション編—、日本エネルギー学会誌、第82巻第10号、pp719-771、2003年10月