

カーボンニュートラルなLNG、LPガスとメタネーションの活用

—— 脱炭素への現実解 ——

和光大学 経済経営学部 経済学科
教授

岩間 剛一



1. はじめに

世界は脱炭素への動きを加速させ、気候変動対策として、EU、日本、米国をはじめとした主要国は、2050年までにカーボンニュートラル（温室効果ガス排出実質ゼロ）の意欲的な目標を掲げ、太陽光発電、風力発電をはじめとした再生可能エネルギーの普及、燃焼しても炭酸ガスを排出しないアンモニア、水素の利用拡大を目指している。そのために、燃焼時に炭酸ガスを排出する石炭、石油をはじめとした化石燃料の消費抑制、ESG（環境・社会・企業統治）投資による、石炭、石油の新規開発への投資・融資の禁止の動きが強まっている。天然ガスは、燃焼時の炭酸ガス排出量が石炭の半分程度で、窒素酸化物の排出が少なく、硫黄酸化物の排出がゼロという、クリーンなエネルギーであることから、21世紀半ばに実現を目指す脱炭素社会へのトランジション（橋渡し）・エネルギーとして期待されている。原油生産時、天然ガス生産時に随伴するプロパンをはじめとしたLPガス（液化石油ガス）も、炭酸ガス排出量が少ないクリーンなエネルギーとして、途上国を中心に、暖房用、調理用の消費の拡大が期待されている。天然ガスについて

は、発電用燃料、都市ガス用原料、工業用ボイラーの熱源として、天然ガスをマイナス162度に冷却して液化したLNG（液化天然ガス）の国際貿易の拡大が見込まれ、インドネシア、フィリピン、ベトナム、タイなどのアジア諸国において、LNG火力発電の新設計画が相次いでいる。しかし、石炭、石油と同じく炭酸ガスを排出する化石燃料として、欧州諸国、環境保護団体などからは天然ガスを利用す

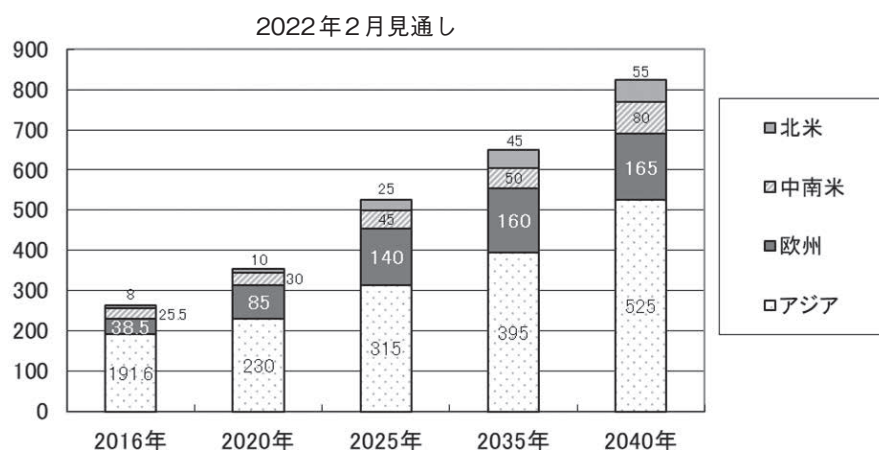
ることへの批判が生まれている。こうしたクリーンなエネルギーとされる天然ガス、LPガスに対する脱炭素への要請に対するひとつの現実解が、カーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガス、メタネーションであるといえる。

2. これからも増加が見込まれるLNG

2021年10月から11月にかけて英国で開催されたCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）において、地球温暖化対策として、地球の気温上昇を産業革命前から1.5度以内とする努力が明記され、そのために21世紀半ばには、人類の経済活動による炭酸ガスの排出量と森林などによる炭酸ガスの吸収量を均衡させるカーボンニュートラルが求められている。21世紀半ばに実現する炭酸ガス排出実質ゼロへの道筋として、相対的に炭酸ガス排出量が多い石炭、石油から、天然ガスへの切り替えが行われており、特にアジアを中心として発電用、冷暖房用のLNG需要の増加が見込まれている（図表1）。

2021年に中国は日本を抜いて世界最大のLNG輸入

図表1 世界のLNG需要見通し（単位：百万トン）



出所：各種専門機関の資料をもとに筆者推計

国となった。今後も、大気汚染防止策、地球温暖化対策として、発電用、産業用の燃料を石炭、重油から天然ガスに切り替える動きを強化することは間違いない。インド、インドネシア、フィリピン、ベトナムをはじめとしたアジア諸国も、急速に増加する電力需要に対して、再生可能エネルギーだけで対応することには限界があり、炭酸ガス排出量を削減する現実的な対策として、石炭火力発電を抑制し、LNG火力発電の利用を拡大する方向にある。さらに、2021年秋以降は、地球温暖化対策、脱化石燃料の先陣を切っている欧州諸国も、気温低下による暖房需要の増加に対して、①風が十分に吹かないために風力発電の出力が低下し、②ウクライナ情勢の緊張化から、ロシアの天然ガスに依存することによる地政学リスクの高まりもあり、化石燃料のひとつであるLNGの輸入を増加させるという、想定外のLNG需要が発生し、2021年10月には、極東アジアのLNGスポット価格は、100万Btu（ブリティッシュ熱量単位）当たり56ドルと史上最高値を記録している。2022年2月時点においては、アジア諸国と欧州諸国のLNG争奪戦が展開されており、米国のシェール・ガスを原料としたLNG輸送船は、アジア向けから欧州向けに航路を変更している。世界のLNG需要は、現在の年間3億6000万トンから、2040年には年間8億トンに増加することが見込まれ、天然ガスを液化するプラントの建設に、5年～10年のリードタイムを必要とすることから、2025年までは国際的なLNG需給の逼迫が続くものと考えられる。

3. カーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガスとは何か

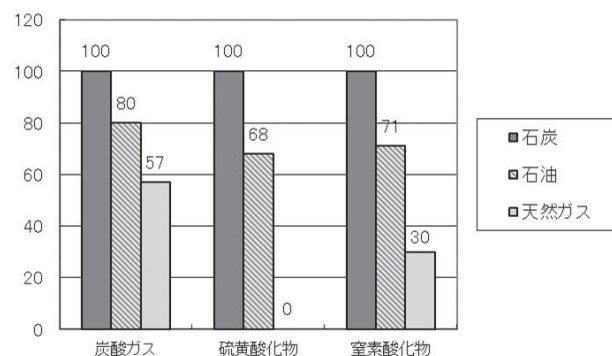
上述のように、世界が脱炭素に向けて動くなか、2030年に向けた段階的な炭酸ガス排出削減策として、アジア諸国を中心にLNG需要の増加が見込まれている。気候変動対策を強化する欧州諸国も、出力変動が激しい再生可能エネルギーの電力需給調整用としてLNG火力発電の必要性が高まっている。また、LPガスも、インドネシアをはじめとしたアジア諸国において、暖房用、調理用として需要が増加している。しかし、LNGもLPガスも、石炭、石油と比較すると、単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が少ないクリーンなエネルギーであるものの、燃焼すると炭酸ガスを排出する化石燃料であるという批判がある。そのために考え出されたものが、カーボンニュートラルLNGである。カーボンニュートラルLNGとは、天然ガスの生産、液化、輸送、再気化、燃焼のすべてのプロセスにおいて排出される炭酸ガスを、植林、森林保全、土壌保全、

CCS（Carbon Capture and Storage：炭酸ガスを吸収して、地下貯留する技術）によって吸収した炭酸ガスとオフセット（相殺）することによって、LNGを燃焼させても、全体として炭酸ガス排出実質ゼロのLNGのことをいう。植林などによる炭酸ガス吸収については、国際的な民間の認証機関による排出枠クレジットを得る。カーボンニュートラルLPガスについても、同様に生産から日本における燃焼までのすべての過程における炭酸ガス排出量を、植林などの炭酸ガス吸収量によって相殺するため、ライフ・サイクルでみると、炭酸ガス排出実質ゼロのLPガスである。LNG輸送船1隻は、通常は7万トンのLNGを積載しており、生産から燃焼までに約24万トンの炭酸ガスを排出する。24万トン分の炭酸ガスを植林などにより吸収したものが、カーボンニュートラルLNGであり、こうしたカーボンニュートラルLNGやカーボンニュートラルLPガスは、普通に発電用燃料として利用しても、ライフ・サイクルでみて、地球の炭酸ガス濃度上昇につながらない、脱炭素の潮流に適合した、現実的なエネルギーとして期待されている。

4. メタネーションとはなにか

天然ガスの主成分メタン（CH₄）は、都市ガスの主成分であり、あらゆる炭化水素の中で、最もクリーンなエネルギーといえる（図表2）。

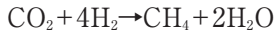
図表2 炭化水素別燃焼時排出比較（石炭を100とする）



出所：資源エネルギー庁統計

しかし、天然ガスも炭酸ガスを排出する化石燃料のひとつであり、脱炭素時代に適合しないという批判が欧州諸国を中心に強まっている。そこで開発に取り組まれているものが、火力発電所、工場などから排出された10%程度の高濃度の炭酸ガスと、再生可能エネルギーの電気により水を電気分解して生成された水素を反応させて、メタンを合成するメタネーションという

技術である。メタネーションによりつくられたメタンは、排出された炭酸ガスを再利用するカーボン・リサイクルという技術であり、ライフ・サイクルで見ると炭酸ガス排出実質ゼロの天然ガスとなる。炭酸ガスと水素を反応させてメタンを合成する技術は、サバティエ反応という。



高温・高圧の化学反応の技術は確立している。しかし、メタン生成コストの削減、反応効率の向上のために、大阪ガスによる固体酸化物型電解セル（SOEC）、東京ガスによるハイブリッドサバティエなどのさまざまな研究開発が行われている。

5. カーボンニュートラルLNGとカーボンニュートラルLPガスの大きな可能性

植林、森林保全などによる炭酸ガス吸収と組み合わせたカーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガスは、無限の可能性をもった、脱炭素への現実解といえる。そのメリットは、これまで通りにLNG、LPガスを利用しつつ、従来の天然ガス液化設備、LNG輸送船、再気化基地、都市ガス導管、LNG火力発電所という、既存のインフラストラクチャーをそのまま利用して、巨額の設備投資を行うことなく、炭酸ガス排出削減を実現できることにある。すでに、LNG、LPガスは石炭や石油と比較して、よりクリーンなエネルギーとして、船舶においてはLNGを燃料としたLNG燃料船の運航が始まっている。重油からLNGに燃料を切り替えることによって、炭酸ガス排出量を25%程度削減できる。トヨタ自動車をはじめとした自動車業界は、自動車の海外輸出において、自動車輸送時の炭酸ガス排出を含めたライフ・サイクルの炭酸ガス排出削減を求められており、日本郵船、商船三井、川崎汽船をはじめとした海運企業は、LNGを燃料とする自動車輸送船を増強している。LNGを燃料とする船舶は、世界的に増加基調にあり、そこにカーボンニュートラルLNGを利用するならば、これまでのLNG燃料船を改造することなく脱炭素を実現できる（図表3）。

自動車についても、脱炭素を目指して、電気自動車、燃料電池車などの環境対応車の開発に世界の自動車メーカーが激しい競争を繰り広げている。しかし、電気自動車については、リチウムイオン電池

図表3 自動車輸送のためのLNG燃料船

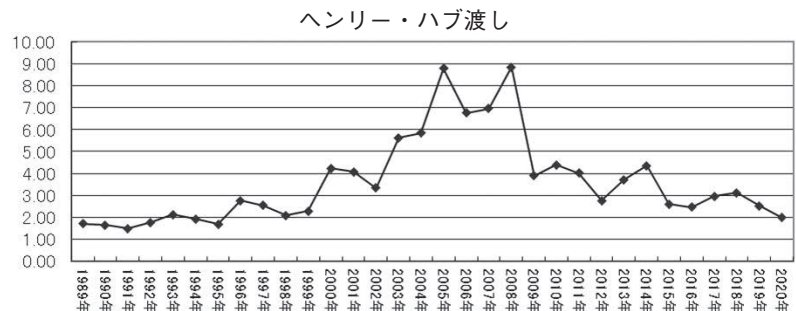


出所：日本郵船ホームページ

の性能向上への技術開発が難しいうえに、必要とされるリチウム、コバルトなどのレアメタルの価格高騰や地政学リスクの課題もあげられている。水素と酸素を反応させる燃料電池車は、水しか排出しないため、究極のエコカーとされているものの、価格が高く、水素の生成やハンドリングが難しく、水素の液化設備、水素ステーションなどの巨額の設備投資が求められる。電気自動車、燃料電池車は、ともに技術開発の途上にあり、割高な生産コスト、巨額のインフラストラクチャー整備など、技術的な課題が多い。2021年における世界の自動車保有台数15億台のうち、電気自動車は1000万台、燃料電池車は1万台と比べて少なく、自動車の大部分はガソリンエンジン、ディーゼルエンジンという内燃機関である。このように、脱炭素への動きが加速する状況においても、新型コロナウイルスの感染拡大に収束の兆しが見え、人々の行動が自由となると石油需要が増加し、原油価格が高騰するのは、現時点における世界の自動車の大部分が石油を燃料としていることが大きな要因となっている。それに対して、米国のシェール・ガス革命により、米国の天然ガス価格は長期的に下落基調にある（図表4）。

熱量換算では、天然ガス価格が原油価格の5分の1程度に下落したことから、米国においては、天然ガ

図表4 米国の天然ガス価格（単位：ドル／百万Btu）



出所：BP統計2021年7月

スを燃料としたCNG（圧縮天然ガス）車、LNGトラックなどが普及し始めている。天然ガス自動車のメリットは、既存のガソリンエンジンの噴射装置を改良するだけで天然ガスを燃料とすることができ、LNGを燃料とすると、通常の石油を燃料とした自動車と同じ程度の航続距離を維持できることがあげられる。既存のガソリンスタンド網を、天然ガス充填ステーションとすることもできる。日本においても、いすゞ自動車をはじめとしたトラック、バスメーカーは、環境特性の優れた、圧縮天然ガスのトラックやバスなどを生産し、ゴミ収集車、都バスなどに利用されている。さらに、鉄道における天然ガス利用も行われるようになっていく。日本と異なり、欧米の鉄道は電化されている地域が少なく、ディーゼル機関車が運行している場合が多い。鉄道についても、LNG機関車を利用することによって、炭酸ガスの排出削減を行えるだけでなく、カーボンニュートラルLNGを燃料とすることによって、従来の鉄道システムそのものを脱炭素化することが可能となる。

LPガスについても、平地が少なく、山間部が7割を占める日本においては、全国5000万世帯の半分は、都市ガスの導管が敷設されておらず、LPガスを暖房用、調理用に利用している。さらに、法人タクシーを中心に全国17万台のLPガス自動車が走行している。意外に思われるかもしれないが、世界においては2774万台ものLPガス自動車が普及しており、電気自動車普及台数よりも数は多い（図表5）。

LPガス自動車も、ガソリンエンジンの簡単な改良によって生産することができ、LPガス充填スタンドも、全国に整備されている。東京オリンピックにおいて環境対応車を世界に示すために導入された、トヨタ自動

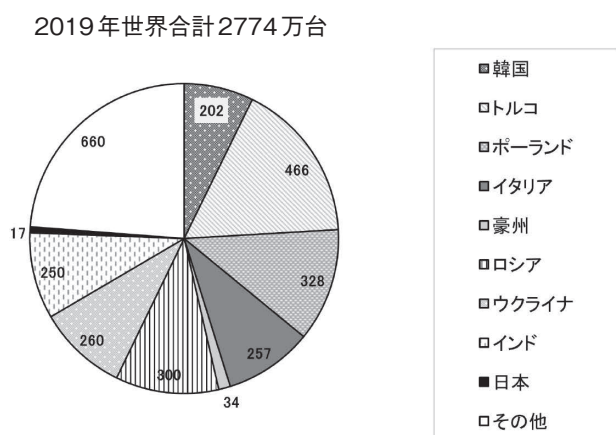
車によるLPガス・ハイブリッド車の「ジャパン・タクシー」、も普及している。カーボンニュートラルLPガスを利用すれば、従来の家庭のガス器具、LPガス法人タクシーに新たな負担、改造を強いることなく、全国2400万世帯の家庭用エネルギーの脱炭素化、LPガス自動車の炭酸ガス排出削減を実現できる。

6. メタネーションの未来

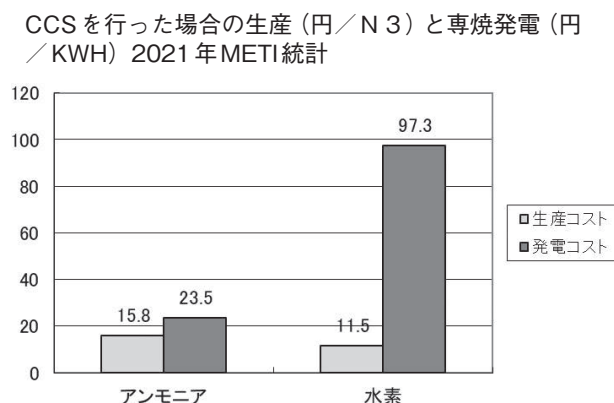
従来から、炭酸ガスの再利用技術としてメタネーションは研究されてきたものの、ここに来て注目の度合いが強まっているのは、都市ガス業界も脱炭素の必要性に迫られていることがあげられる。脱炭素の目標を達成するために、太陽光発電、風力発電をはじめとした再生可能エネルギーによる電気の利用促進が求められているものの、高温の熱を必要とする鉄鋼の高炉、産業用ボイラーなどには電気は対応できない。さらに、電気は、安価かつ大量に秋から冬へと季節を超えて長期間保存しておくことができない。つまり、電力需要が増加する冬のために、前もって在庫をもつことができないのである。他方、水素は、燃焼させると高温の熱を出せるものの、水素の生成、輸送、貯蔵の技術的なブレーク・スルーが必要であり、アンモニア、水素ともに、生産、輸送、発電の総コストは割高であるという現実がある（図表6）。

水素は、マイナス253度に冷却して液化するコスト、液化水素の輸送コストがかかる。アンモニアについても、再生可能エネルギーの電気による水の電気分解によって得られた水素と窒素を反応させるグリーンアンモニア、天然ガスを改質して水素を生成し、排出された炭酸ガスをCCSによって地下貯留し、窒素を反応させるブルーアンモニアともにマイナス33度に冷却する

図表5 国別LPガス自動車普及状況2019年（単位：万台）



図表6 ブルーアンモニアとブルー水素のコスト比較（単位：円／KWH）



だけで液化することから、輸送コストは水素と比較すると安価である。しかし、アンモニアは水素との反応コストがかかる（再生可能エネルギーの電気から水素をつくり、アンモニアを生成することを純粋に炭酸ガス排出ゼロのグリーンと呼び、天然ガスから改質して水素とアンモニアをつくり、排出された炭酸ガスをCCSにより地下貯留することを、ブルーと呼ぶ）。メタネーションによる天然ガスを安価に生産できる技術が完成するならば、天然ガス火力発電の燃料として利用を続け、炭酸ガス排出削減が可能となる。

メタネーションのメリットは、従来から利用されている都市ガス導管、貯蔵タンク、家庭のガス器具などの設備をそのまま利用することができ、巨額の設備投資を必要としないことがあげられる。また、天然ガスを還元剤として、直接還元鉄を生産するときの脱炭素化も可能となる。

7. カーボンニュートラルLNG、メタネーションの今後の展望と課題

現在注目されているカーボンニュートラルLNGは、シェル・イースタン・トレーディング、三菱商事、三井物産などが取り扱いを始めており、東京ガス、大阪ガス、西部ガスをはじめとした都市ガス企業も、炭酸ガス排出実質ゼロのLNGとして、環境を重視する需要家に販売を始めている（図表7）。

都市ガス業界をまとめる日本ガス協会は、2050年にカーボンニュートラルを実現することを宣言している。2050年には、カーボンニュートラルLNG、メタネーション、水素を利用して、カーボンフリーな社会構築を目指している（図表8）。

現在の脱炭素への動きは、電気自動車とリチウムイオン電池の技術開発、燃料電池車の研究、水素社会の構築、水素エンジンの開発、再生可能エネルギーのコスト削減など、さまざまな分野の研究開発に拡大をみせている。しかし、現時点においては、量的、コスト的に実用レベルに達していないことも間違いない。リチウムイオン電池の安価・大容量化も開発途上であり、期待されている全固体電池の完成時期も不透明である。水素も取り扱いが難しく、燃焼速度が速く、金属を劣化させる性質をもち、水素を利用した直接還元鉄も商用化は2050年ごろになると見込まれる。水素は、もともと気体のエネルギー密度が単位体積当たりガソリンの3000分の1程度しかなく、現時点の技術では、水素を圧縮して用いるとしても、水素をそのまま燃料とする水素エンジンの航続距離はガソリンエンジンの半分程度にとどまる。アンモニアを火力発電に利用す

る場合も、アンモニアは燃焼速度が遅く取り扱いが比較的容易で、石炭火力発電への混燃も可能であるものの、燃焼効率の向上、窒素酸化物の排出抑制の技術開発は今後の課題として求められる。つまり、脱炭素技術が完成していないにもかかわらず、脱炭素を急いでいることから、現実には石油・天然ガスが必要である状況のもと、ESG投資により、油田の新規開発を抑制することによって、現在の原油価格高騰をもたらしている。その点、カーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガス、メタネーションは、現在の人類が取り扱いに習熟している通常の炭化水素エネルギーであり、実現できるかどうかが不確定な技術開発を必要としない。人類にとって、脱炭素への努力は喫緊の課題であるものの、燃料電池車をはじめとした難しい技術、水素社会という巨額の投資を必要とするプロジェクトに一足飛びに向かうのではなく、現時点において可能な技術を用いて、漸進的に脱炭素への戦略をとることが、気候変動対策と人類が負担するコストの最小化を両立させる現実的な方策なのである。

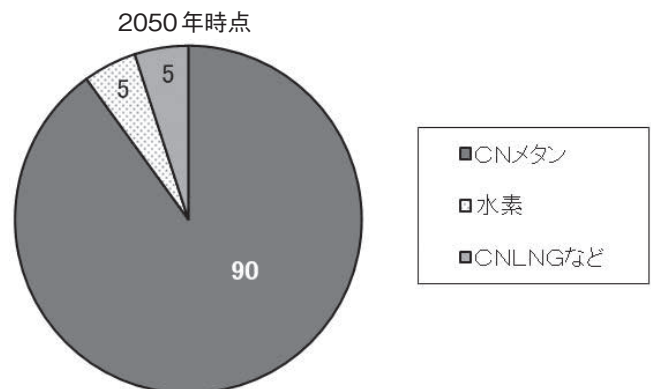
もちろん、カーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガス、メタネーションにも課題はある。カーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガスについては、第一に植林などへのコストがかかることから、100万Btu当たり0.6ドル程度の上乗せコストがかかる。脱炭素のためのコストを誰が負担するの

図表7 日本企業によるカーボンニュートラルLNG取引例

年月	売主	買い手
2019年6月	シェル・イースタン・トレーディング	東京ガス
2021年2月	三井物産	北海道ガス
2021年4月	三菱商事	東邦ガス
2021年5月	INPEX	日本海ガス
2021年7月	シェル・イースタン・トレーディング	大阪ガス

出所：各種新聞報道

図表8 日本ガス協会のカーボンニュートラル構想（%）



出所：日本ガス協会資料
 (注：CNとはカーボンニュートラルを意味する)

かという課題があげられる。環境意識の強い企業や大学などにはカーボンニュートラルLNGを購入する動きがあるものの、日本全体としては、これからの環境対応へのコスト負担の動きに注目する必要がある。第二に植林などにより炭酸ガスを吸収するとしても、炭酸ガス吸収に適した森林には限界があり、年間4億トン近いLNGのすべてをカーボンニュートラルLNGとすることは難しい。第三にカーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガスの認証基準が100%決まっているわけではなく、炭酸ガス吸収量の認定量も不透明な部分があるためカーボンニュートラルLNG、カーボンニュートラルLPガスの国際的認証基準を明確化する必要がある。メタネーションについては、第一に高濃度の炭酸ガス回収、水素との反応という基本技術は確立しているものの、量産化、コスト低減という実用化への課題が解決していない。資源エネルギー庁の推計によれば、現時点におけるコスト比較を行うと、通常の天然ガスの生産コストは1ノルマル立方メートル（ノルマルは、標準状態の気体の体積）当たり40円程度であるのに対して、メタネーションによるメタンは、1ノルマル立方メートル当たり350円とコストが高い。理論的には、発電所、工場から回収した炭酸ガスを水素と反応させれば、メタンに加えて、プロパン、ガソリンなども生成することは可能である。しかし、コスト的、量的に経済的な技術が現時点において確立していない。第二に大気中の0.04%程度の炭酸ガスを直接回収して、地下貯留する技術（DACCS：Direct Air Carbon Capture and Storage）も開発中であり、DACCSによって、安価に大気中の炭酸ガスを回収することが可能となれば、高コストのメタネーションの技術開発を行う意味がなくなる。こうした課題もあるものの、18世紀後半の産業革命期からの高度工業化社会を支えてきたものは、石炭、石油、天然ガスをはじめとした炭化水素である。炭化水素は、再生可能エネルギー、原子力などの他のエネルギーと比較して、エネルギー密度、取り扱いの容易さからみて、20世紀、21世紀の人類がもつ技術において、最適のエネルギーであることは間違いない。20世紀が石油の世紀であったことには理由がある。再生可能エネルギーはエネルギー密度が低く、出力変動が激しいことから、安定したエネルギーとはならない。原子力はエネルギー密度が高すぎて、取り扱いに高度な技術を必要とする。人類が容易に利用できるLNG、LPガス、天然ガスを利用し続けながら、脱炭素を実現できる現実解として、カーボンニュートラルLNGをはじめとした、実質的に炭酸ガス排出ゼロの炭化水素は、日本企業にとって重

要なエネルギー戦略事業分野となることは確かなのである。

（筆者略歴）

1981年東京大学法学部卒業後、東京銀行（現三菱UFJ銀行）入行。産業調査部にて資源エネルギー調査などを担当。現石油天然ガス・金属鉱物資源機構（資源エネルギー・チーフ・エコノミスト）、日本格付研究所（チーフ・アナリスト：ソブリン、資源エネルギー担当）にも出向経験をもつ。

2003年から和光大学経済経営学部教授（資源エネルギー論、産業組織論、マクロ経済学）。東京大学工学部非常勤講師（金融工学、資源開発プロジェクト・ファイナンス論）、三菱UFJリサーチ&コンサルティング客員主任研究員、石油技術協会資源経済委員会委員長兼任。

著書には、『資源開発プロジェクトの経済工学と環境問題－資源開発プロジェクト評価と地球環境問題』、『「ガソリン」本当の値段 石油高騰から始まる“食の危機”』、その他、新聞、雑誌などへの寄稿、テレビ、ラジオ出演多数。

