

Title	ロケット燃料にLNGを用いた場合の環境負荷(I) : LNGの特徴
Sub Title	
Author	平湯, 直子 (旧姓: 竹中)(Hirayu, Naoko) 吉武, 惇二(Yoshitake, Junji) 桜本, 光(Sakuramoto, Hikaru)
Publisher	Keio Economic Observatory Sangyo Kenkyujo
Publication year	2008
Jtitle	KEO discussion paper No.113 (2008. 10)
JaLC DOI	10.14991/004.00000113-0001
Abstract	環境にやさしい宇宙輸送システムの開発・実現の過程で世界的に注目を集めているLNGロケットに関して、環境負荷(CO2)の計測・軽減の検討をおこなうことを本分析の目的とする。本稿は前編(I)として、現在、地球環境問題への対応やエネルギー安全保障・供給の観点から、今後の幅広い活用が期待されている天然ガス・LNGが持つ特徴を明らかにし、現在日本で開発が進んでいるLNGロケット(GXロケット)の開発動向や、ロケット燃料としてLNGを利用することについての利点を物性上の特徴からみていく。後編(II)では、環境負荷の計測に焦点をあて、GXロケットとH-IIロケットの打ち上げにともなうCO2の計測を行い、ロケット燃料がLNGに代替した場合の負荷軽減を把握し、環境負荷の観点からロケットの最適燃料や最適規模を考察する予定である。
Notes	
Genre	Technical Report
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AA10715861-00000113-0001

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

ロケット燃料に LNG を 用いた場合の環境負荷（Ⅰ）

－LNG の特徴－

平湯直子*、吉武惇二**、桜本光***

2008 年 10 月

KEO Discussion Paper No.113

環境にやさしい宇宙輸送システムの開発・実現の過程で世界的に注目を集めている LNG ロケットに関して、環境負荷（CO₂）の計測・軽減の検討をおこなうことを本分析の目的とする。本稿は前編（Ⅰ）として、現在、地球環境問題への対応やエネルギー安全保障・供給の観点から、今後の幅広い活用が期待されている天然ガス・LNG が持つ特徴を明らかにし、現在日本で開発が進んでいる LNG ロケット（GX ロケット）の開発動向や、ロケット燃料として LNG を利用することについての利点を物性上の特徴からみていく。後編（Ⅱ）では、環境負荷の計測に焦点をあて、GX ロケットと H-II ロケットの打ち上げにともなう CO₂ の計測を行い、ロケット燃料が LNG に代替した場合の負荷軽減を把握し、環境負荷の観点からロケットの最適燃料や最適規模を考察する予定である。

キーワード

LNG、地球環境問題、GX ロケット、宇宙開発委員会、再使用型輸送系、環境負荷、物性

* 慶應義塾大学産業研究所研究員、nhirayu@sanken.keio.ac.jp

** 慶應義塾大学産業研究所研究員、jyoshitake@nifty.com

*** 慶應義塾大学商学部教授、sakura@fbc.keio.ac.jp

はじめに¹.

地球温暖化問題に関心が高まる現在、超長期的なエネルギーの確保には、CO₂ を発生させない、あるいは、CO₂ 発生を抑制した方策で、しかも持続可能な手法が必須となっている。そのためには、さまざまな分野において地球環境保全のために「環境にやさしい」「地球にやさしい」方策を採用することが先決であり、ほぼ無限のエネルギーといわれる太陽光発電の比重を増やすことが必要であり、これらの設備を宇宙に建設するために、宇宙と地球を往復するロケットの開発が先駆的な課題となっている。実際に宇宙と地球を往復するロケットが排出する CO₂ が、結果的にさらなる地球温暖化を導くとすれば本末転倒であり、そこで、宇宙太陽光発電の建設に使用されるロケットの排出する CO₂ を事前に計算し、もっとも負荷の少ない方策を検討しておく必要がある。ロケット燃料としてどのような燃料を使用するかが重要な要件となり、そこで、クリーンなエネルギーであり、地球環境にやさしいといわれ、かつ地球上の豊富に存在する天然ガス (LNG) に我々は着目した。

たとえば宇宙航空開発機構 (JAXA) では、将来の宇宙開発に向けた先行研究として、宇宙太陽発電システム (SPS) の研究開発を積極的におこなっている。SPS は、太陽電池パネルを敷設した巨大な衛星を地球の衛星軌道に打ち上げ、宇宙空間で太陽光を電気に変換し、地球上に送電する宇宙エネルギーの利用を推進するシステムである。資源の枯渇によるエネルギー危機を防ぎ、発電所における CO₂ 発生を抑制に寄与する代替エネルギーという位置づけであり、環境にクリーンなシステムとして期待されている。経済発展にともないますます増加する CO₂ を抑制するために、宇宙開発分野でも研究が着実に進んでいるのである。このような状況のもと、我々はロケット輸送にともなう環境負荷に着目した。現在、「環境にやさしい宇宙輸送システムの開発」の実現をめざし、ロケットの製造から打ち上げ、帰還・回収にともなうすべての工程の中での環境負荷の軽減を考慮することが、ロケット開発の際のひとつの懸案事項となっている。中でも、ロケット燃料の選択は環境負荷軽減にあたり重要な部分を占めるといわれる。現在、地球環境問題への対応やエネルギー安全保障・安定供給の側面から、日本だけでなく今後の世界のエネルギー需要において、数ある燃料の中か LNG の幅広い活用が期待されている。LNG が持つ環境特性・供給可能性・安全性の観点から、中小規模のロケット燃料として、LNG の利用が検討されはじめているのである。本分析では、環境負荷の観点から比較的新しい技術開発である LNG ロケットを評価していく。

本分析は 2 分冊 (I、II) での報告を予定している。前編にあたる本稿 (I) では、世界的にも幅広い利用が検討・実施はじめられている LNG の特徴をみていく。総論として「LNG の特徴」を明らかにすることを目的とし、ロケット燃料として LNG を使用する場合の利点をみる。まず第 1 章では、LNG の特徴を全般的に明らかにする。特に、LNG が持つ長所や短所、幅広い利用用途と今後の利用可能性、世界の輸出状況と輸入動向、輸入価格の決定方法、国内供給の流れ等から LNG の特徴を全般的に明らかにする。つづく第

¹ 本稿では、燃料に LNG を用いたロケットを「LNG ロケット」と表記する。

2章では、世界中で開発が進められてきたロケット燃料の種類と、日本における開発・実用化の歴史をみていく。その中で、需要が高まっている LNG 燃料に焦点をあて、日本や世界における LNG ロケットの開発の動向をみていく。最後に第3章では、物性上の特徴から LNG の利点を明らかにし、ロケット燃料に適しているといわれる理由をさぐっていく。

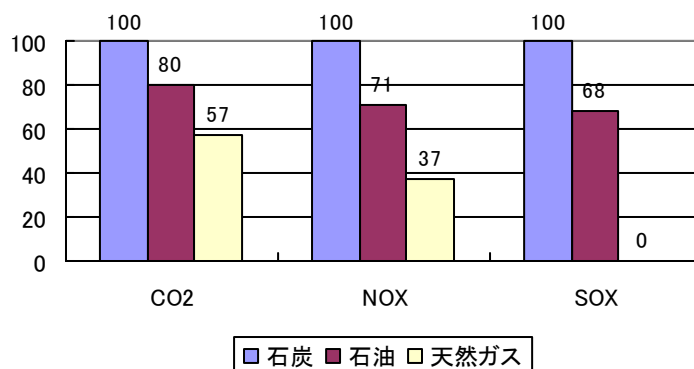
1. LNG（天然ガス）の特徴

(1) 特徴（長所と短所）

LNG (Liquefied Natural Gas) は、気体の状態で地中から産出された天然ガスから、マイナス 162℃まで冷却する過程の中で二酸化炭素や硫化水素等の有害物質を除去した「液化された天然ガス」である。

天然ガスは、石炭、石油とともに化石燃料の有力なエネルギー源である。そのような中、世界のエネルギーの長期的な展望の中で「今後のエネルギーの主演」と期待される²。その理由として、おもに、石炭や石油と比較して、①環境にやさしいエネルギーである、②埋蔵分布や可採年数等の特性から比較的安定的な供給がみこまれる、以上の 2 点が考えられている。

天然ガスは、石炭や石油等の他の化石燃料に比べて燃焼時の生成物が少ないことから、環境にやさしいエネルギーであるといわれる（【図 1 - 1】）。地球温暖化の原因となる二酸化炭素（CO₂）の発生は、環境負荷の高いエネルギーである石炭の約 57%、同様に、大気汚染の原因となる窒素酸化物（NO_x）の発生は石炭のわずか約 37%である。また、天然ガスにはそもそも硫黄分が含まれないので燃焼しても硫黄酸化物（SO_x）は全く発生しない。以上のように、燃焼時の生成物の発生が少ないという点から、天然ガスは優れた環境特性をもつということができ、地球環境保全に幅広く貢献していくエネルギーとして世界で期待されている。



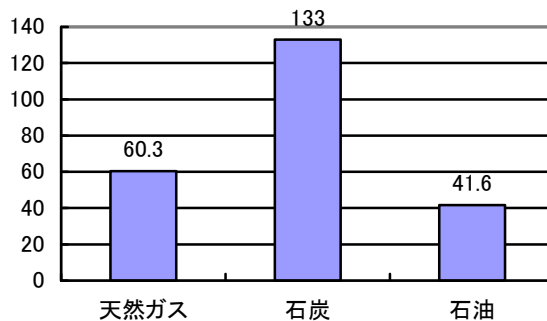
注) 石炭=100とした数値。天然ガスの NO_x の値は 20~37 の間。

² IEA“Energy Outlook 2008”。

出所) 大阪ガス HP。原資料) IEA (1986) Natural Gas Prospects to 2010。

【図 1 - 1】化石燃料の燃焼生成物発生量の比較

つづいて、天然ガスの埋蔵特性をみていく。【図 1 - 2】は各化石燃料の可採年数 (R/P ratio : Reserves/production ratio) を示したものである。可採年数は、地下資源の埋蔵量のうち技術的・経済的に掘り出すことができる埋蔵量³を意味し、近い将来の供給可能性を担う指標といえる。天然ガスの可採年数は、133 年である石炭には及ばないものの、依然として世界のエネルギーの主役である石油の 41.6 年よりは約 20 年ほど長い 60.3 年と計算されている。

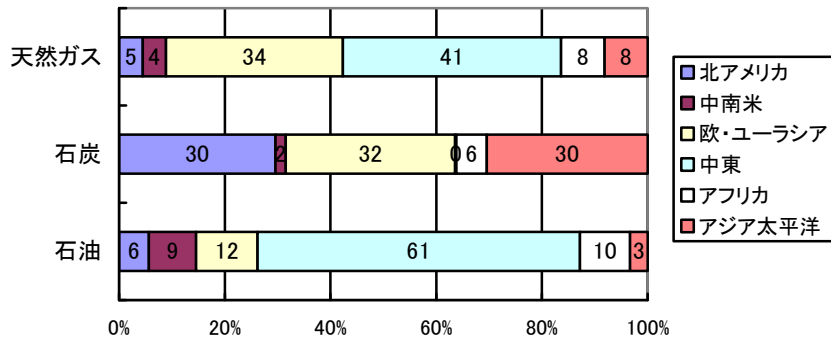


出所) BP (2008)。

【図 1 - 2】化石燃料の可採年数 (年)

また、【図 1 - 3】は各化石燃料の地域別の確認埋蔵量を示したものである。石油は中東偏重の傾向が強く、埋蔵量のうち 60%以上が中東で確認されたものである。石炭は、北アメリカ、欧州、アジア太平洋の 3 地域にそれぞれ約 30%ずつ埋蔵されている。天然ガスは、中東に約 41%、欧州及び旧ソ連に約 34%であり、以上の 2 地域に埋蔵が集中している。天然ガスは、政情が不安定な中東地域に偏重している石油に比べると、安定供給がみこまれる点が特徴である。

³ 【図 1 - 2】の可採年数は、年末の確認可採埋蔵量を同年の生産量で除してもとめたもの。なお、埋蔵量には、地質学的に推定される資源の総量である原始埋蔵量、掘削により存在が確認された確認埋蔵量、原始埋蔵量のうち技術・経済的に生産が可能な資源量である可採埋蔵量、確認埋蔵量のうち採取可能な量である確認可採埋蔵量などの区分がある (日本ガス協会 HP (2008))。埋蔵量は商業性を持つ資源の一部であり、評価の不確実性や回収の確実度合いを反映して、確認埋蔵量、推定埋蔵量、予想埋蔵量の 3 区分する場合もある (日本エネルギー学会天然ガス部会編 (2008))。



単位) %、出所) BP (2008)。

【図1-3】化石燃料の地域別の確認埋蔵量

つづいて【表1-1】は、天然ガスの上位埋蔵国と可採年数を一覧にしたものである。世界一の埋蔵量を誇るのはロシアであり、全埋蔵量の約4分の1以上を保有している。つづいて、中東地域に属するイラン、カタール、サウジアラビア、アラブ首長国連邦において埋蔵量が多い。中東地域の場合、多くの国において、可採年数が100年以上であり、長期間での安定供給が見込まれる。逆に、6番目に埋蔵量の多いアメリカは、可採年数が約10年と非常に短くなっている⁴。

【表1-1】天然ガスの上位埋蔵国

	国名	地域	シェア	R/P 比率 (年)
1	ロシア	欧州・ロシア	25.2%	73.5年
2	イラン	中東	15.7%	100年以上
3	カタール	中東	14.4%	100年以上
4	サウジアラビア	中東	4.0%	94.4年
5	アラブ首長国連邦	中東	3.4%	100年以上
6	アメリカ	北米	3.4%	10.9年
7	ナイジェリア	アフリカ	3.0%	100年以上
8	ベネズエラ	中南米	2.9%	100年以上
9	アルジェリア	アフリカ	2.5%	54.4年
10	イラク	中東	1.8%	100年以上

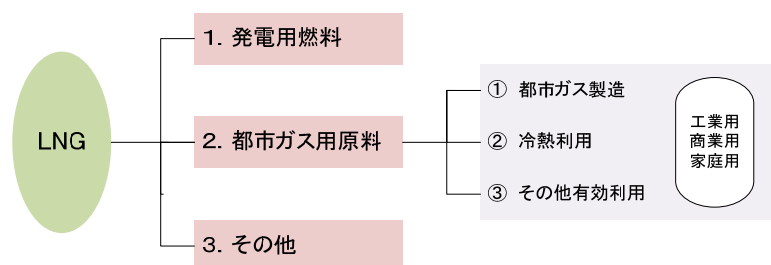
注) 地域名は【図1-3】に対応。出所) BP(2008)。

⁴ アメリカでの R/P 比率が極端に短いのは、公表 R/P 比率の概念が異なるためであり、実際に、約 10 年経過したら埋蔵量がゼロになるというわけではないようである。

(2) 利用用途

輸入されたLNGの利用・用途は広範に及び、多方面に渡って原料・燃料として利用されている。そのおもなものは、発電用の燃料と都市ガス製造用の原料としての利用である。

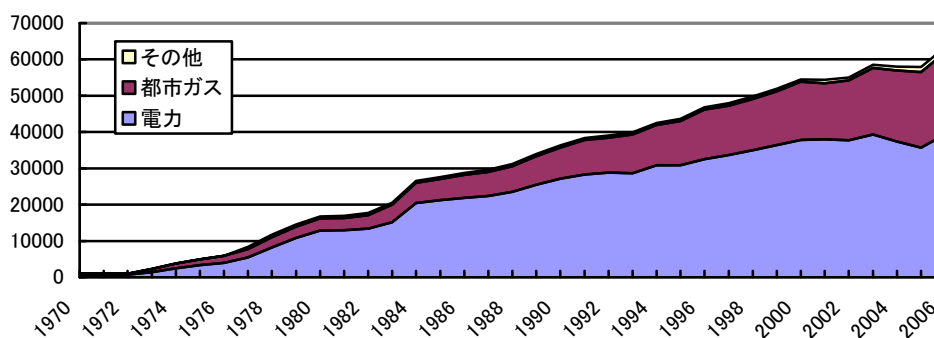
【図1-5】は日本でのLNG受入量に占める用途別のシェアの時系列推移を示したものである。70年代前半から都市ガス用が全体の約40%を占めた時期もあったが、その後は受け入れたLNGのうち70%が電力用、約30%が都市ガス用というのが広く知られていた。その後は都市ガスが20~30%の間で推移していたが、最新の値である2006年では約60%が電力用、約40%が都市ガス用となっている。また、都市ガスと発電用で受入LNGの大部分を占めているが、残りのわずかな部分は「その他」の用途で利用されている(【図1-4】)。その他はおもに工業用燃料であり、具体的には、圧延用加熱源として新日鐵、特定需要家への供給として石油資源開発が利用している。その他比率は依然としてわずかであるが、近年の地球環境問題への早急な対応の必要性などにより、工業用の需要増加がみられている。ただし、この比率は受入基地によって大きく異なり、たとえば、東京ガス根岸工場では都市ガスに約80%以上を利用するのに対し、発電用としては約15%であり、都市ガス利用のウェイトが高い⁵。これは近隣に都市ガス需要の大きい首都圏を擁していることが大きく影響していると思われ、首都圏内に長距離に及ぶガス導管網の整備をおこない、1都8県に都市ガスの供給をおこなっている。



出所) 筆者作成。

【図1-4】 LNGの利用用途

⁵ 2006年度。



単位) 千トン。注) 2001 年以降は別の統計資料を用いているため、結果の読み取りには注意が必要である。

出所) 2000 年まではエネルギー・生産需給統計年報 2002、2001 年以降は日本貿易統計。

【図 1-5】LNG の利用内訳—発電・都市ガス比率

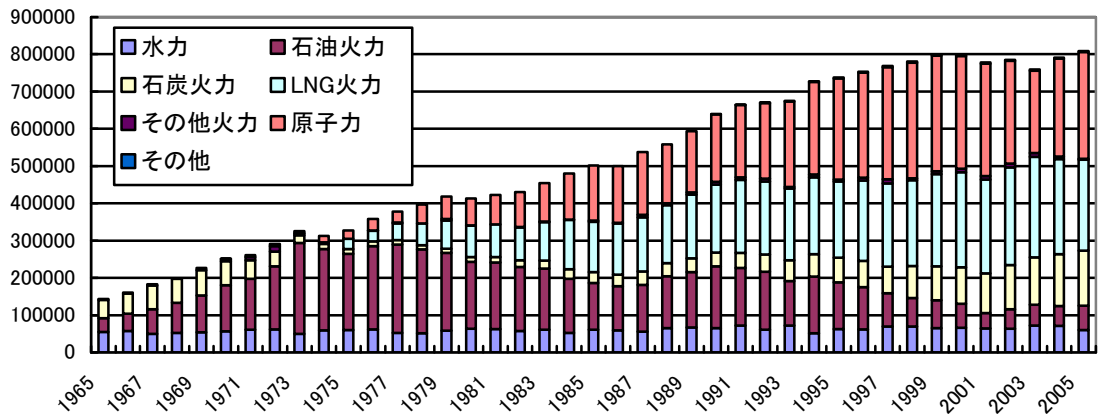
1. 発電用

受入LNGの多くは発電用であり、各電力会社の発電所においてLNG火力発電の燃料として利用されている。この背景に、電力需要が大幅に増加する昨今、発電用燃料としてLNGは欠かせない存在になってきている点があげられる。【図 1-6】は、電源構成の推移をみたものである。約 40 年の間で、電力需要が約 6 倍に拡大する中、LNG火力のシェアは、1975 年に約 8%であったものが、1980 年には約 20%を越え、その後、石油火力がシェアを減らす一方で着実にシェアを伸ばし、1999 年以降は 30%以上となっている⁶。各LNG受入基地では電力会社を併設しているケースが多く、たとえば東京ガス根岸工場は、東京電力・南横浜火力発電所を隣接し、受入れたLNGに多額の運搬コストをかけることなく利用できるよう利便性をはかっている。ただし、電源構成は各電力会社によって大きく異なる（【図 1-7】）。東京電力や中部電力は総発電のうち約 24%がLNG火力によるものとなっている。また、東北電力や関西電力でも約 15%以上がLNG火力である。他方、歴史的に石炭利用が多い北海道電力や沖縄電力、その他に四国電力や北陸電力でのLNG利用は現在のところみられない⁷。このような地域差は、LNG受入基地の立地に由来するものと思われる⁸。

⁶ 1969 年に LNG 輸入の開始された後、1974 年度までは「その他火力」に LNG 火力が含まれている。

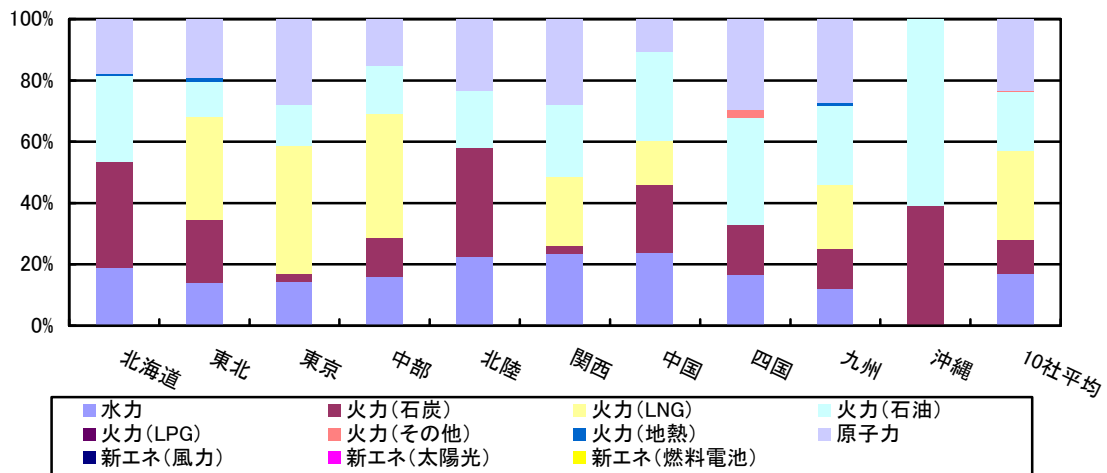
⁷ ただし、北海道電力はサハリンからの LNG 輸入計画があり、また、沖縄電力では吉の浦受入基地の建設計画がある（後述参照）。また、四国電力では 2010 年からの LNG 受入が計画中であり、北陸電力でも帝国石油が直江津に受入基地の建設を予定していることから、今後、電源としての LNG 利用の開始が見込まれる。

⁸ 日本の LNG 受入基地については後述。



注) その他は地熱発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池の合計、一般電気事業者分のみ記載。
 単位) 百万 kWh、出所) エネルギー・経済統計要覧 2008、原データ) 経済産業省「電力需給の概要」。

【図 1 - 6】 電源構成の推移



出所) 電源開発の概要 H19 年版。

【図 1 - 7】 各電力会社における電源構成の比較 (2006 年)

2. 都市ガス用

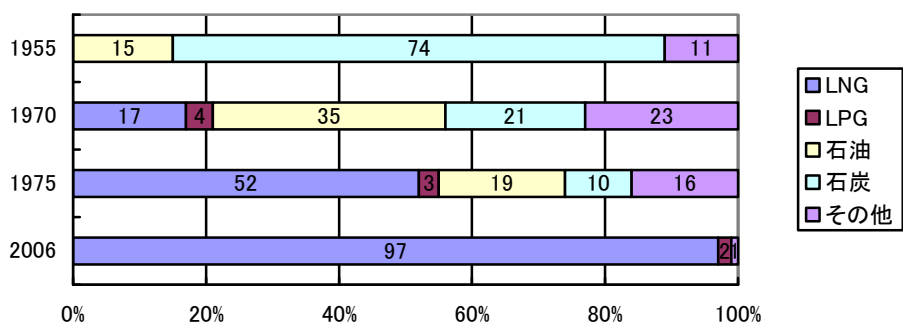
受入LNGのうち約 30%は、都市ガス製造の原料として利用される。天然ガス産地において冷却・液化され外航タンカーで日本の受入基地まで輸送されてきたLNGは、海水または温水の熱を利用し再ガス化させることで都市ガスが製造される。この際、LPGを付加することで熱量の調整をおこない、また、無臭であることから安全性確保のために臭い付けをおこなう若干の工程を経る必要があるが、海水という身近なものを利用した非常にシンプルな方法でLNGから都市ガスが製造され、近隣家庭に送出されることになる⁹。かつて、

⁹ 東京ガス株式会社根岸工場 (2008) 参照した。

現在ほどにLNGが注目されていない時期には、都市ガスの主原料は異なっていた。

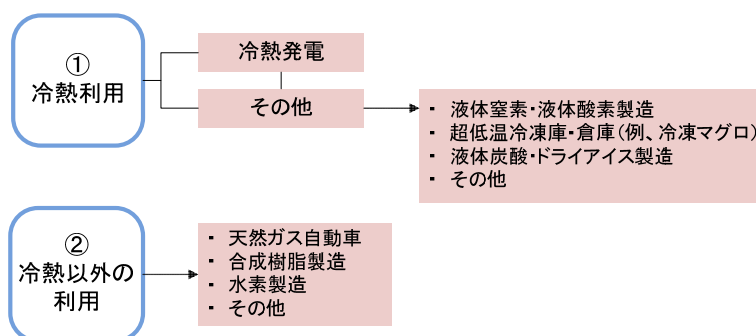
【図1-8】は東京ガスの資料による都市ガスの原料構成の推移を示したものである。都市ガスの主原料は、1955年は石炭であったが（74%）、1970年は石炭に代替し石油が主原料となる（35%）。この当時、すでにLNGの輸入は開始されており、少しずつLNG比率が増加している。1975年になると、石油に代替してLNGが都市ガスの主原料となり（52%）、現在では都市ガスの97%がLNGを原料とするものとなっている¹⁰。LNGの持つ環境特性や大量に安定的に入手が可能な供給安定性、また価格面での優位性に由来し、都市ガス製造の主原料としてLNGが利用されるようになってきている¹¹。

また、都市ガス製造用の原料として利用する以外にも多様な利用方法があり、LNGは幅広く利用されている。



出所) 東京ガス根岸工場ヒアリング時配布資料。

【図1-8】都市ガスの原料構成の推移



出所) 東京ガスヒアリング時配布資料を参考に筆者作成。

¹⁰ ただし、値は東京ガスの資料に基づくものである。各電力会社によって若干、数値が異なるが、LNGが都市ガス製造の主原料である点は共通である。

¹¹ ただし、昨今では原油高騰により原油価格にリンクしているLNG価格も高騰していることから、都市ガス価格の値上げが余儀なくされている。現状のLNGに代わるものとして、コールベットメタン(CBM: Coal Bed Methane)を加工してLNGを生成する新プロジェクトが豪州等で注目されはじめている(シンバイオ社会研究会(2001))。

【図1-9】LNGの発電・都市ガス以外の利用法

① 冷熱利用

まず、マイナス 162 度という極低温状態で日本に輸送されてくるという点をうまく活用した冷熱利用での方法が複数あげられる（【図1-9】）。冷熱利用は大別すると、「冷熱発電」と「その他」に分けられる。冷熱発電は、低温液体のLNGに海水をかけて気化する際の圧力を利用してタービンを回転させ発電機の動力とすることで電気をおこす発電システムであり、おもに工場・基地内の電力として利用される¹²。LNGの持つ特性を活かした発電システムにより工場・敷地内の省エネルギー実現に役立つ利用方法といえる。また、冷熱発電以外にも、空気分離による液体酸素・液体窒素の製造や、液体炭酸・ドライアイスの製造、超低温冷蔵庫・倉庫として冷熱が多方面に渡って利用されている。一例として、東京ガス根岸工場では、東京炭酸（株）、日本超低温（株）、東京液化酸素（株）を併設しており、ドライアイスの製造、マグロ・甘えび・ウニ等の魚介類の長期冷凍保存、液化窒素・液化酸素の製造にLNGから得られる多量の冷熱エネルギーを有効利用している。

② その他有効利用

冷熱以外にもLNGの持つ特性を活かしてさまざまな分野で有効利用されている。その代表的なものとして、天然ガス自動車、水槽などのアクリル樹脂（合成樹脂）等があげられる。特に、現在主流であるガソリン車と比較すると、天然ガスの特徴である「環境にクリーン」「安定供給が見込まれる」「安全性」の3つの観点から天然ガス自動車への期待は非常に大きい¹³。天然ガス自動車は、天然ガスの貯蔵方式に応じて、①圧縮天然ガス自動車（CNG）、②液化天然ガス自動車（LNG）、③吸着天然ガス自動車（ANG）の3種に区分されている。現在、世界で使用されている天然ガス自動車の多くはCNG自動車であり、バス、配送トラック、塵芥車としてすでに利用されている¹⁴。一方、日本国内では1996年からLNG自動車の開発がおこなわれており、インフラ整備等を含め早期の実用化がもたれる状況にある。地球温暖化の原因となるCO₂の排出が少ない点に加えて、その他の環境汚染物質の排出が少ない点も特徴のひとつである。また、クリーンな原料として水槽等に利用されるアクリル樹脂をはじめとする各種合成樹脂の製造にも利用されている。

3. 今後の利用可能性

以上は、現状での有効利用をみてきたが、未来においてもさらなる多様な利用がみ込まれている。特に、近い将来に到来すると言われている「水素エネルギーシステム社会」の実現に天然ガスの利用は一役を担うといわれている。水素は単独では存在しないため、

¹² 東京ガス株式会社根岸工場（2008）、日本海エル・エヌ・ジー株式会社のHPを参照した。

¹³ 日本ガス協会HPを参照した。

¹⁴ 2008年3月末時点で、天然ガススタンドは全国に327か所、天然ガス自動車の導入台数は約34200台である（日本エネルギー学会天然ガス部会編（2008））。

各種燃料（都市ガス、LPガス、灯油、メタノール、ガソリン等）から改質によって取り出す必要がある。なかでも、①天然ガスの主成分であるメタンガスの輸送・貯蔵に関する優れた技術の確立・高い安全性、②天然ガス用のインフラを活用できるための高い経済性・利便性、③改質の過程での二酸化炭素の発生量が他燃料に比べて少ない、以上の3点から、水素を製造する際の燃料として天然ガスの果たす役割が特に期待されている¹⁵。そこで、一例として東京ガスでは、天然ガスから生成した都市ガスから製造した水素の発展的利用法として、燃料電池、特に優れた環境特性と高エネルギー効率を持つといわれる燃料電池自動車への利用・幅広い普及を考えている¹⁶。燃料電池自動車への燃料補給地として、水素充填ステーションを各所に設置し、幅広い普及へ向けての実証実験をすでにおこなっており、来る社会へ向けて益々の天然ガス利用が期待される場所である。

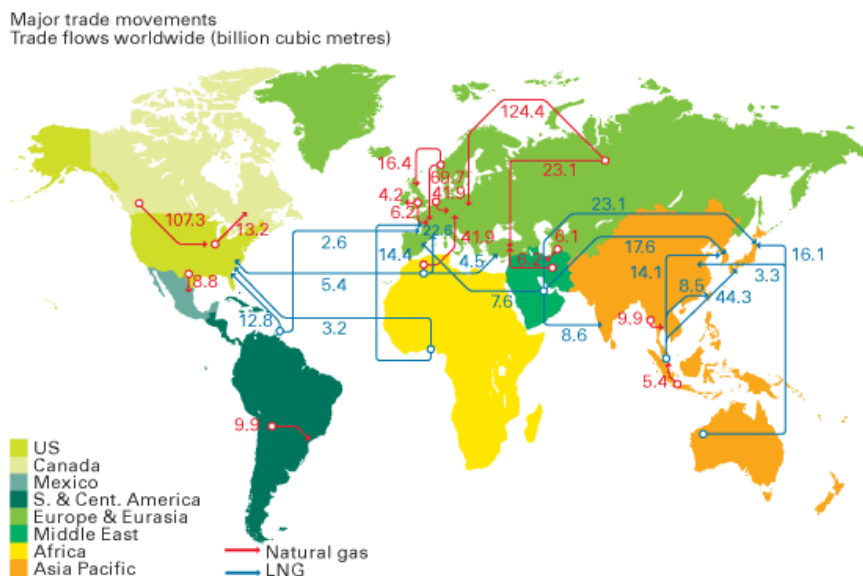
（3）輸出入動向

天然ガスの国際取得には、パイプラインによるものとLNGの2つの方法がある。以前は、パイプラインによる輸出が大部分であったが、現在ではLNGの割合が大きく増え、いわゆるLNGのグローバル化が進展しているといえる¹⁷。天然ガスを気体のまま輸出するか、あるいは液化してLNGの状態では輸出するかは、地理的特性が大きく影響する。【図1-10】はLNGをめぐる世界の貿易構造を地図上で示したものである。一般に、生産地と需要地が同一の大陸あるいは近隣に位置する場合は、陸上・海底パイプラインで「天然ガス」として輸出されるが、海を大きく越える大陸間輸送となる場合は、LNG輸送船を利用した「LNG」としての輸出となる。たとえば、生産地ロシアは、陸続きの欧州へ、同様に、カナダはアメリカ、オランダは欧州、というようにパイプラインによる輸出のみでLNGとしての輸出はない。他方、生産地カタールはアメリカや欧州へ、同様に、インドネシア・マレーシアは日本や韓国等のアジア諸国にLNGとして輸出をおこなっている。LNG輸送に利用する専用運搬船の技術改良にとともに、かつてよりも距離を伸ばしたLNG形状での国際間輸送が増加している。他方、その背景には、各国での天然ガスに対する需要増加・用途の拡大がある、需要量の拡大や需要国の多様化が近年ではみられ、LNGをめぐる世界の貿易構造図は変化の過程にあるといえる。

¹⁵ 森島（2002）第8章を参照した。

¹⁶ 東京ガス HP 参照。

¹⁷ 2007年では天然ガス生産量のうち約26%が輸出され（前田（2006））、そのうち、パイプラインでの輸出が約70%、同様に、LNGが約30%である（BP（2008））。



出所) BP(2008)Statistical Review of World energy 2008, Natural Gas trade movements.

【図 1 - 1 0】LNG をめぐる世界の貿易構造

つづいてLNG貿易の動向をみていく。【表 1 - 2】は 2007 年のLNGの輸出上位国とおもな輸出相手国を一覧にしたものである。世界最大のLNG輸出国はカタールであり、その主要相手国は日本・韓国とインドである。カタールにつづいてマレーシア、インドネシアからの輸出が多い。両国とも上述の世界の貿易構造図で見られるように、相手国は、日本が約 60%、つづいて韓国となっている。つづいて、アルジェリア、ナイジェリアのアフリカ勢、アジア太平洋のオーストラリア、中南米のトリニダード・トバゴからの輸出が多い。アルジェリアやナイジェリアは、フランスやスペイン等の欧州国への輸出が多い。他方、オーストラリアは地理的な影響もあり、日本への輸出が多く、また、輸出先国として中国が上位に来ている点が特徴である。また、トリニダード・トバゴはアメリカや大西洋を横断するスペインへの輸出が多くなっている。2005 年以降、LNG輸出上位国に大きな変動がみられている¹⁸。以前はインドネシアが最大の輸出国であったが、現在ではカタールが最大の輸出国となっている。また、アフリカ勢の輸出も増加している。これは、需要地としてアジアの存在が強くなったことが背景にあるといわれ、特に、ナイジェリア、アルジェリア、ギニア、エジプト等においてアジアへの輸出シェアが増加している。また、LNG購入にあたっては、日本では依然として長期契約が主流であるが、他アジア諸国ではスポット取引の比率が増加していることも、輸出上位国の変遷に影響していると考えられる¹⁹。

¹⁸ カタールは 2006 年に世界最大の LNG 輸出国となった。また、ギニアとノルウェーの 2 国が 2007 年から輸出国の仲間入りとなった。

¹⁹ 日本以外のアジア諸国がアジア以外の輸出国とスポット取引を開始している。後述参照。

【表 1 - 2】 LNG の輸出上位国とその相手国 (2007)

	輸出国		相手国		
1	カタール	17.0%	日本 (28.2%)	韓国 (28.0%)	インド (21.5%)
2	マレーシア	13.2%	日本 (59.2%)	韓国 (27.4%)	台湾 (13.2%)
3	インドネシア	12.3%	日本 (65.1%)	韓国 (18.5%)	台湾 (16.4%)
4	アルジェリア	10.9%	フランス (31.8%)	トルコ (18.0%)	スペイン (17.5%)
5	ナイジェリア	9.3%	スペイン (39.4%)	フランス (17.9%)	ポルトガル (10.9%)
6	オーストラリア	8.9%	日本 (79.3%)	中国 (16.3%)	韓国 (2.8%)
7	トリニダード・トバゴ	8.0%	アメリカ (12.8%)	スペイン (11.5%)	プエルトリコ (4.0%)

注) おもな輸出国の () 内の%は各輸出力に占めるシェア。出所) BP(2008)。

つづいて、【表 1 - 3】はLNGの輸入上位国とその輸入元国を一覧にしたものである。2007年時点で、日本は最もLNG輸入の多い国であり、世界のLNG輸入量の約40%を占め、その約半分がインドネシアやマレーシアからの近隣アジア諸国からの輸入である²⁰。日本に続いて、韓国(約16%)、スペイン(約11%)、アメリカ(約10%)の順にLNG輸入が多い。韓国は暖房用の高価な灯油からの燃料転換で、家庭用ガス需要が増加しているため積極的にLNG輸入をおこなっている。スペインはアルジェリアやナイジェリア、アメリカは、トリニダード・トバゴからの輸入が多い点が特徴である。アジアでは、従来、日本・韓国・台湾がおもなLNG輸入国であったが、近年では2005年からインド、2006年からは中国が新規LNG輸入国として仲間入りした。タイ、フィリピン、シンガポール、パキスタン等でもLNG受入基地の建設計画がはじまっており、輸入国の多様化、今後は、特にアジア地域内でのLNG獲得をめぐる国際競争が激化してくることが十分、予想される。その他にも、アルゼンチン、ブラジルでは2008年にLNG受け入れを開始し、カナダ、チリにおいても近年中に開始される予定である。

【表 1 - 3】 LNG の輸入上位国とその輸入元国 (2007)

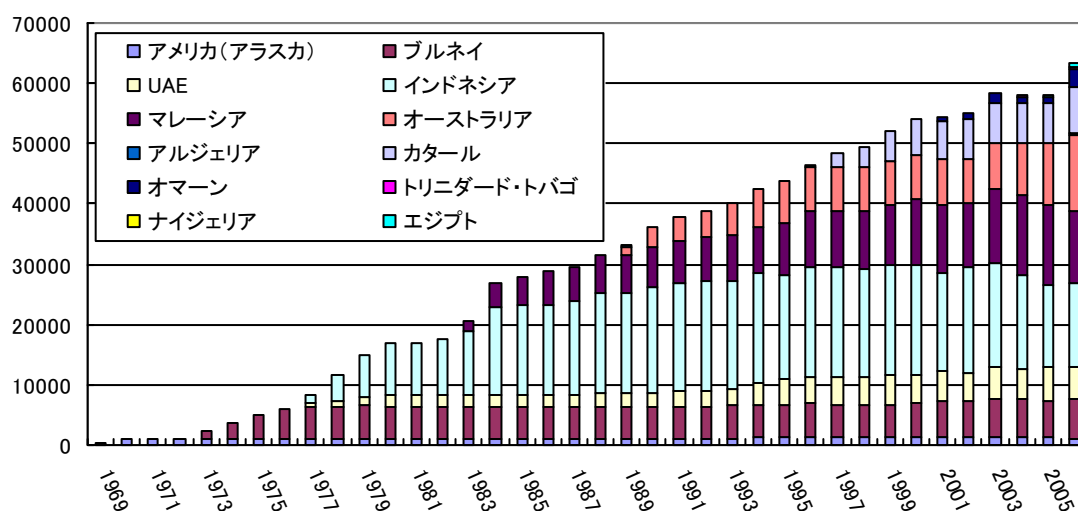
	輸入国		相手国		
1	日本	39.2%	インドネシア (20.3%)	マレーシア (19.9%)	オーストラリア (18.1%)
2	韓国	15.2%	カタール (31.4%)	マレーシア (23.7%)	インドネシア (14.9%)
3	スペイン	10.7%	ナイジェリア (34.4%)	アルジェリア (17.9%)	トリニダード・トバゴ (8.6%)
4	アメリカ	9.6%	トリニダード・トバゴ (58.5%)	エジプト (14.8%)	ナイジェリア (12.3%)
5	フランス	5.7%	アルジェリア (6.0%)	ナイジェリア (29.1%)	エジプト (9.3%)
6	台湾	4.8%	インドネシア (41.7%)	マレーシア (35.9%)	カタール (5.2%)
7	インド	4.4%	カタール (82.9%)	ナイジェリア (6.4%)	アルジェリア (4.4%)

²⁰ 日本の LNG 輸入量や輸入相手国の長期推移については後述。

注) () 内の%は輸入量に占める相手国シェア。出所) BP(2008)。

つづいて、日本でのLNG輸入をめぐる長期の動向をみていく（【図1-11】）。日本で利用される天然ガスの多くは海外で液化加工されたLNGとして輸入されたものである。日本でのLNG輸入は1969年に開始され、日本初のLNG受入基地は東京ガス株式会社・根岸工場である²¹。輸入にともない受入基地での受入パース、貯蔵タンク、気化設備、出荷場等の新規対応設備の整備が必要となる。

LNGの輸入が開始された1969年当初は、アラスカからのみの輸入であり、輸入総量は18.2万トンであった²²。その後、輸入相手国の多様化がみられ、1972年からブルネイ、1977年からUAE・インドネシア、1982年からマレーシア、1989年からオーストラリア・アルジェリア、1996年からカタール、2000年からオマーン、2003年からトリニダード・トバゴ、2004年からナイジェリア、2005年からエジプト、2007年から赤道ギニア、ノルウェーの輸入が開始されている。輸入総量は、1978年には1千万トンを越え、その後は年率平均6.4%で増加し、最新のデータである2007年では、1969年の約350倍となる約6,830万トンの輸入総量となっている。また、約40年間の輸入相手国の変遷をみると、1972年からアラスカに代わりブルネイ、1979年からブルネイに代わりインドネシアが主要相手国となっている。90年代後半からはマレーシア、2000年以降はオーストラリアからの輸入が増えはじめ、インドネシアに匹敵する輸入相手国となっている。



単位) 千トン。出所) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編 (2008) p.190。

²¹ 筆者は東京ガス株式会社・根岸工場の見学をおこない、LNG受入れの歴史・現在の受入状況・利用状況等に関するヒアリングをおこなった(2008年5月)。首都圏のガス需要の増加と環境問題に対応するために天然ガスの優れた特性に着目してきた東京ガスは、アラスカからLNGを輸入し、天然ガスを原料とする都市ガスの供給を開始した(東京ガス株式会社根岸工場(2008)参照)。

²² 輸入開始日は年度末後半の1969年11月4日であるため1年間分の輸入量を示さない。

【図 1 - 1 1】日本の供給国別の LNG 輸入量の推移（年度）

（４）長期取引契約の価格の決定方法と価格推移

世界におけるLNGの取引では、あらかじめ期間と購入量を定めた取引契約²³とスポット取引の２種がある。スポット取引は、供給者側に余剰が生じた際に、需要者側の不足分とうまく合致した場合に臨時的に成立する取引である。従来は、大西洋をまたぐ取引でみられていたが、近年では、日本以外のアジア国の急速な需要増加により、スポット取引の比率は全体的に増加傾向にある²⁴。

世界の LNG の消費市場は主としてアジア・欧州・米国の 3 つに分けられる。LNG の取引は、欧州では 60 年代中旬、日本では 1969 年、アメリカでは 70 年代前半に開始されたことにみられるように、市場に新規参入した商品であり、また、すべての国で取引されている共通の商品ではないことなどから、価格メカニズムは需要地ごとに個別の方式が適用されている。また、価格メカニズムは、各需要地における天然ガス・LNG に対する考え方が反映されたものとなっている。【表 1 - 4】は長期取引契約における需要地別の LNG 価格の決定方法を一覧にしたものである。

【表 1 - 4】LNG 価格（長期取引契約）の決定の仕方－需要地別

	リンク方式	LNG に対する考え方	備考
アジア	原油価格にリンク ※ただしインドネシア産は除く	石油代替エネルギー	現在は、JCC 価格決定の主要指数
欧州	競合燃料の価格にリンク	原油・石油製品と競合するエネルギー	パイプラインガスとの競合もあり
米国	NYMEX で取引される天然ガス価格 (H/H) にリンク	国内天然ガスの需給に委ねる	原油価格との相関性が希薄で変動幅が大きいため輸入量は大幅に変動

出所) 三菱商事株式会社 (2006)、立田 (2007) を参照し、筆者作成。

アジアでは、供給者と需要者側²⁵での長期的かつ安定的な相対契約のもと LNG 売買がおこなわれている。契約を結ぶことにより、一定の取引の実現が確約され、輸送設備等のインフラ整備の投資資金が確保されるというメリットがあるが、他方で、供給・需要者間での価格交渉が激化する可能性もある²⁶。日本では、LNG は「石油に代替するエネルギー

²³ LNG 取引は期間に応じて短期・中期・長期取引契約の 3 区分に分類でき、年数の区分は明確されていないが、その目安として、短期：5 年未満、中期：5～10 年、長期：15 年以上となっている。

²⁴ LNG の全取引に占めるスポット取引の比率は 0.6% (1992) から 16% (2006) に大幅に増加している (立田 (2007))。

²⁵ 日本において LNG 相対契約を結んでいるのは、5 ガス会社、6 電力会社、新日鉄の他に、仙台市ガス局や石油資源開発である (2005 年時点) (吉武 (2006))。

²⁶ ジャン (2007)。

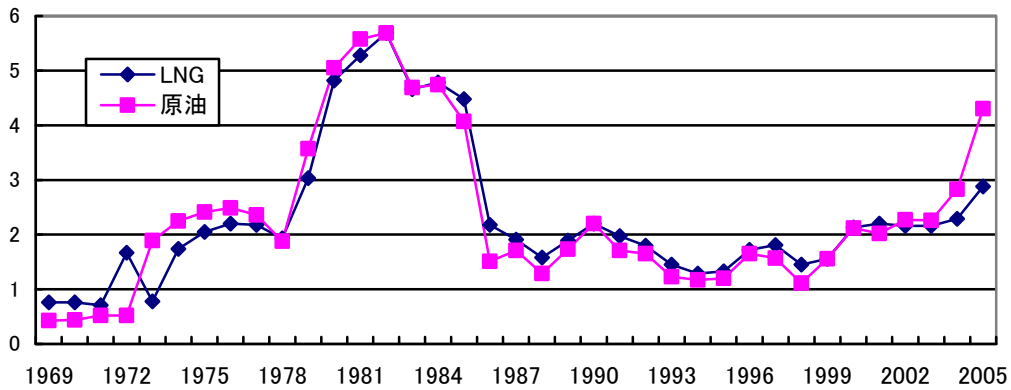
である」との認識から、LNG価格は、日本入着原油価格の平均CIF価格であるJCC (Japan Crude Cocktail) にリンクさせた価格メカニズムを採用している²⁷。【図1-12】は、日本におけるLNG価格と原油価格の長期推移を示したものである。日本でLNGの輸入が開始された当初は、アラスカ産のみであり 1MMBtuあたり 0.52\$の固定価格を採用していた。その後、上述の通り 1972年から開始されたブルネイ産についても固定価格を採用されていたが、第1次石油危機を契機とする急激な原油価格高騰に追従してLNG価格も値上げを余儀なくされた。そのような中、LNG供給者は原油の高価格から得られる利益をLNGに取り組むため、LNG価格を原油等価にすべきと強く主張した。その結果、第2次石油危機を経験した1979年以降は原油等価方式が採用され、原油価格（政府販売価格GSP）にリンクした熱量等価によるLNG価格の決定方式が1985年まで採用されることとなった²⁸。しかし、1980年代後半にはいり、原油の価格崩壊が生じた結果、GSPリンクのLNG価格と原油価格が顕著に乖離した。そこで、新たにJCCにリンクした価格決定方式が採用されることとなった。その際、原油価格の不安定性によるLNG価格の大きな変動を緩和するためSカーブ価格フォーミュラの考え方が取り入れられている（【図1-13】）²⁹。Sカーブ価格フォーミュラとは、売主・買主双方の互助精神に基づくものであり、高価格・低価格帯での価格線の傾きが緩やかに傾斜させることで、低価格帯においては売主の収益減少リスクを低減し、他方、高価格帯においては買主のコスト増加リスクを低減する効果を持つ。よって、図のⅠの部分では、売主保護、逆に、Ⅲは買主保護の範囲であり、Ⅱは原油等価の範囲となる。Sカーブ価格フォーミュラの導入により、LNG価格は、熱量等価で原油よりも安いレベルで推移しているが、昨今では、急激な原油高を背景に、売主は直線フォーミュラの導入を主張することでSカーブ適用による大きな機会損失を回避しようとする傾向がみられる³⁰。

27 ただし、最大輸入相手国であるインドネシアのみ例外である。インドネシア産のLNG価格は、インドネシア産の公式原油販売価格（ICP）に連動させている（立田（2007））。

28 詳細は吉武（2007）。

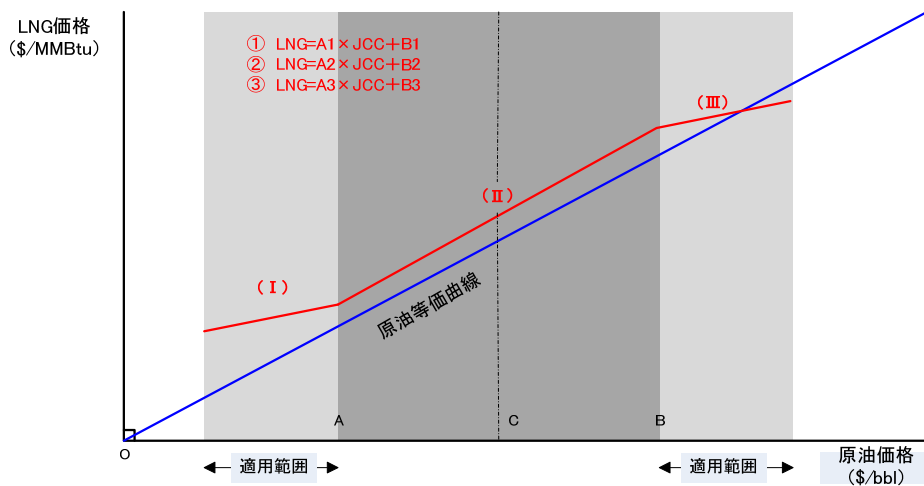
29 吉武（2007）。ただし、Sカーブ価格フォーミュラを適用しているのは日本のみである。

30 河本（2008）を参照した。80年代は原油等価の範囲（図のAB間）が、約20\$~30\$であったが、近年では高騰の方向（右側）に大きくシフトしているため、Sカーブ適用の意味をなさなくなっている。



出所) 貿易統計掲載のデータを加工³¹。

【図 1 - 1 2】 LNG 価格の推移—原油価格との比較



出所) 筆者作成。一部、河本他 (2008) を参照した。

【図 1 - 1 3】 Sカーブ価格フォーミュラ

他方、欧州では、「LNG は原油や石油製品と競合するエネルギーである」との認識から、重油や軽油などの競合燃料の価格とリンクして LNG 価格が決定する。また、LNG は石油化学製品や各種燃料油と競合するパイプラインガスとも競合するという考えもあり、LNG 価格の決定はパイプラインガスの価格決定と同一の方式になっている。また、米国では、LNG の需給は天然ガスの需給に大きく影響を受けるという認識があり、米国での LNG 価格は、ニューヨーク商業取引所 (NYMEX) で取引される天然ガス先物価格 (ヘンリーハブ価格 (H/H)) にリンクしている。原油価格との相関性は希薄である。国内天然ガスの需給に影響するため、国際天然ガスの価格が高くなれば LNG の輸入量が増え、国際天然ガス

³¹ LNG : 13,000kcal/kg、原油 : 9,400kcal/l (1985 年度まで)、9,250kcal/l (1986 年度以降) で熱量換算を行っている。

の価格が低くなれば LNG の輸入を減らして天然ガスを購入する動きがみられる。したがって、LNG の輸入量は大幅に変動する傾向にある。

(5) 国内の受入基地³²

日本は資源が乏しく、しかも島国であるため、船による LNG 形式での海外調達をせざるを得ないため、受入基地の数が非常に多い。現在、日本での LNG 受入基地は全国に 27 箇所ある（【表 1－5】）。日本の LNG 輸入基地は、前述の通り日本で最初に受入れを開始した根岸工場（1969 年）につづいて、70 年代には袖ヶ浦、姫路等の計 6 箇所、80 年代には東新潟、富津、東扇島等の計 6 箇所、90 年代には清水、四日市、川越等の計 10 箇所、さらに 2000 年以降は堺、水島、長崎等の 4 箇所が加わり、2007 年時点では計 27 箇所となっている。中でも、東京電力・東京ガスの袖ヶ浦基地は最大の受入能力を持つ基地であり、つづいて富津、泉北なども受入れ規模が大きい。立地状況をみると、27 箇所のうち本州太平洋側に 21 箇所、九州に 5 箇所の配置であり、現在のところ北海道や四国には受入基地は存在しない。反面、日本海側は東新潟 LNG 基地の 1 箇所のみとなっている。これは、日本の LNG 相手国がおもにアジア太平洋諸国であり、さらに、人口が多い太平洋側に需要が集中しているためであると考えられる。2007 年時点で新たに、和歌山 LNG 基地（関西電力）（2017 年度以降）や御前崎港 LNG 基地（中部ガス、東海ガス、鈴与商事）（2010 年以降）、東新潟基地に続いて日本海側 2 つめとなる上越 LNG 基地（中部電力・東北電力）（2012 年以降）、沖縄にはじめての建設となる吉の浦 LNG 基地（沖縄電力）（2010 年）の 4 基地の建設計画が具体化されている。

【表 1－5】日本の LNG 受入基地一覧

	基地名	出資・運営	輸入会社	稼働開始	受入能力 (万トン/年)	貯蔵容量 (万 kl)
1	仙台市ガス局港工場	仙台市ガス局	仙台市ガス局	1997	15	8
2	東新潟 LNG 基地	日本海エル・エヌ・ジー	東北電力・石油資源開発	1984	400	72
3	富津 LNG 基地	東京電力	東京電力	1985	700	111
4	根岸工場	東京電力・東京ガス	東京電力・東京ガス	1969	350	118
5	袖ヶ浦 LNG 基地	東京電力・東京ガス	東京電力・東京ガス	1973	950	266
6	東扇島 LNG 基地	東京電力	東京電力	1984	600	54
7	扇島工場	東京ガス	東京ガス	1998	150	60
8	清水 LNG 袖師基地	静岡ガス	静岡ガス	1996	34	17.72
9	知多 LNG 共同基地	中部電力・東邦ガス	中部電力・東邦ガス	1977	140	30
10	知多 LNG 基地	知多エル・エヌ・ジー	中部電力・東邦ガス	1983	310	64

³² ガス年鑑 2007 を参照している。

11	知多緑浜工場	東邦ガス	東邦ガス	2001	80	20
12	四日市工場	東邦ガス	東邦ガス	1991	33	16
13	四日市 LNG センター	中部電力	中部電力	1987	300	32
14	川越 LNG 基地	中部電力	中部電力	1997	400	48
15	泉北第一	大阪ガス	大阪ガス	1972	80	18
16	泉北第二	大阪ガス	大阪ガス	1977	770	158.5
17	姫路製造所	大阪ガス	大阪ガス	1984	260	74
18	姫路 LNG 管理所	関西電力	関西電力	1979	260	52
19	堺 LNG センター	堺 LNG	関西電力	2006	270	42
20	水島 LNG 基地	水島エルエヌジー	中国電力・新日本石油	2006	70	16
21	柳井 LNG 基地	中国電力	中国電力	1990	130	48
22	廿日市 LNG 基地	広島ガス	広島ガス	1996	50	17.03
23	大分 LNG 基地	大分エル・エヌ・ジー	九州電力	1990	260	46
24	戸畑 LNG 基地	北九州エル・エヌ・ジー	九州電力・新日本製鉄	1977	130	48
25	福北 LNG 基地	西部ガス	西部ガス	1993	23	7
26	長崎 LNG 基地	西部ガス	西部ガス	2003	11	3.5
27	鹿児島工場	日本ガス	日本ガス	1996	10	8.6
					6786	1455.35

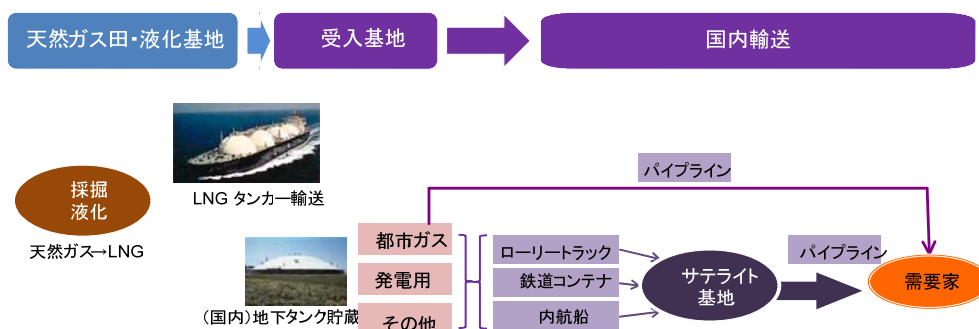
出所) ガス年鑑 2007p.73。

(6) 国内の輸送方法³³

採掘・液化されたLNGは、タンカー（外航船）によって需要国の受入基地³⁴まで海上輸送される。その後、一時的に受入基地内に設置されているタンクに貯蔵されたあと、一部は、距離的に離れた国内需要地に輸送されることになる。その輸送手段として、①パイプライン、②ローリートラック、③鉄道コンテナ、④LNG内航船の4手段があり、個々が持つ経済性・安全性や安定供給性などの特徴を考慮したうえで選択されている。

³³ 本節は吉武（2006）第4章を参考に、LNG輸送手段の紹介をおこなう。距離・輸送量・輸送費を考慮したベストなLNG輸送手段の検討については吉武（2006）第4章参照。

³⁴ 前節参照。



出所) 天然ガス導入促進センターHP、東京ガス HP 掲載資料を参考に筆者作成。

【図 1 - 1 4】LNG 国内供給の流れ

①パイプライン

電力は国内全域に及ぶ広域供給ネットワークをもっているのに対し、天然ガスのパイプライン網は、一部の都市間や都市内のみに限られ、インフラ整備状況は未成熟な状況にある。山岳地帯を多く擁することから日本を縦断するパイプライン建設は困難な状況にある。過去に、国内基幹エネルギーとして天然ガスの利用増大の必要性が強調された際に、関東から近畿圏に及ぶ長距離パイプライン建設が検討された時期もあったが、巨額な投資を伴うこともあり計画は頓挫している。需要に見合った迅速、安全、安定供給が求められるが、依然として天然ガスのパイプライン建設は進んでいない。総パイプライン距離は、米国が約 50 万km、欧州全体では約 15 万km整備されているのに対し、日本は約 3 千km、韓国や台湾も短い距離の敷設である（【表 1 - 6】）³⁵。それに対し、日本のLNG受け入れ基地数は 27 か所であり、世界最大の基地数を備え、しかも、太平洋側に多く存在する。需要地に隣接した受入基地の設置、つまり、受入基地のすぐ背後に需要地が存在する点が日本の特徴であり、結果的に短いパイプラインで対応されている。他方、受入基地が近くにない需要地までは、ローリートラック、鉄道コンテナや内航船により運搬される構図になっている。

【表 1 - 6】パイプラインの距離と国内受入基地数の各国比較

		日本	米国	イギリス	フランス	イタリア	韓国	台湾
天然ガスパイプライン	千 km	3	477	7	36	32	3	1
LNG 受入基地数	基 (箇所)	27	5	4	2	1	4	1

注) LNG 受入基地数は稼働中のもののみ。出所) 日本ガス協会 (2004) (2007)。一部は筆者調べ。

②ローリートラック

受入基地からの比較的近隣の輸送手段としてローリートラックが活用されている（【図

³⁵ 国内パイプラインでは、東京ライン（柿崎（新潟）－足立（東京））間の約 310km、新潟仙台ライン（東新潟（新潟）－仙台（宮城））間の約 262km が長く、短いものでは 10km 未満のものもある。

1-15 (左側)】)。おもに都市ガス製造の際に利用され、受入基地からガス会社が備えているサテライト基地までLNGを輸送し、都市ガスを製造したうえでパイプラインによって各需要家にガスが供給される仕組みである³⁶。ローリートラックでの輸送は、一般的に400kmまでの距離が対象であり、1台で約10tの輸送が可能である。



出所) エアウォーター・プラント・エンジニアリング株式会社 HP より抜粋。

【図1-15】LNGローリートラックと鉄道コンテナ

③鉄道コンテナ

約200kmから500kmの輸送には鉄道コンテナによる輸送が適する。当初は受入基地まで鉄道の引込線を敷設し貨車による輸送が主流であったが、最近では、トレーラー車のコンテナを鉄道貨車の台車に移動させる方法が増えてきた(【図1-15(右側)】)。自然環境を補うものとして、また、供給安定性を実現させるものとして、また、排ガスなどの環境負荷を考慮したモーダルシフトの一環として、ローリートラックに補完する手段として鉄道コンテナによる輸送が期待されている。現在のところ、基地がない日本海側の供給網に一役を担っている。

④LNG内航船

受入基地から離れた需要地への遠距離輸送にはLNG内航船を利用した海上輸送となる。地理的自然状況からパイプライン敷設が可能ではない需要地や、トラックや鉄道輸送よりも海上輸送が適する需要・供給地の場合に適する。現在のところ、袖ヶ浦(東京ガス)一函館(北海道ガス)間の約900km輸送が最長距離である。



出所) 川崎造船 HP より抜粋。

³⁶ 都市ガス事業者が所有する全国のサテライト基地数は約60箇所である。

【図1-16】LNG内航船の一例（新珠丸）

4つの輸送手段の特徴をまとめると【表1-7】のようになる。パイプラインは、設置に膨大な費用が必要となるが、一度建設されると、地下埋設物であることから、災害や自然状況の影響を受けずに安全かつ安定的な輸送が可能となる。また、輸送システム自体が自動化されているために荷積荷卸に人員が不要であり、低コストでの輸送が可能となる。ただし、パイプライン建設により長期的な供給が可能となるが腐食による劣化を防ぐため、定期的なメンテナンス費用が必要となる。また、供給先や輸送能力があらかじめ固定されているため、フレキシビリティという点では他の輸送手段には確実に劣る。ローリートラックは、離れた需要地に容易に輸送できる点が最大の長所である。ただし、一度に運搬可能な量は少量に限られ、荷積荷卸や実際の運搬の際に人員が必要となり、さらに、帰路は空荷となることから、効率性が劣る。また、ガソリン等の燃料の高騰による影響をダイレクトに受けることは確実であり、道路上を走ることによる排気ガス・騒音・振動の問題も抱え、事故のリスクも高い。それに対し、鉄道コンテナはローリートラックの欠点を一部補う役割を担っている。冬場などの自然状況の影響を受けずに安定的な供給が可能である点が最大の長所であり、また燃料価格の影響はローリートラックに比べれば比較的少ない。帰路は空荷であり輸送量があらかじめ限定されていることから効率性の点でパイプラインよりも劣る。また、脱線により複合的に重大な事故を巻き起こす可能性もある。内航船は一度に、多くの量を輸送することが可能である。ただし、天候の影響を大きく受ける点が欠点であり、さらに、海上輸送を規定する法令の影響を受ける。大量の輸送が可能ではあるが、円滑な輸送は困難でありコストを抑えられない。結果として、どの輸送手段も一長一短がみられる。効率性という点ではパイプラインが飛びぬけているが、設置コストやメンテナンスコストが必要となることからコストという点では経済的には劣る。他方、環境問題への対応を考えると、特に4手段の中でローリートラックは劣性であり、鉄道や船へのモーダルシフトが予想されるが、それぞれの持つ欠点から単純なシフトは困難であり、パイプラインが最適であるように感じられる。また、次章以降で検討をおこなうロケット燃料としてLNGを利用する場合には、射場等に大量に的確な輸送が可能となるパイプラインでの輸送が有効であると考えられる。今後ますます高まる天然ガス・LNG需要にこたえることができる輸送手段を、効率的・経済的かつ環境面から選択することが必要であり、諸外国の事例も踏まえて、あらかじめ最適な輸送手段の選択が求められるといえる。

【表1-7】各輸送手段の特徴

	長所	短所
パイプライン	<ul style="list-style-type: none"> 安全かつ安定的で経済的な輸送システム 省エネで環境にやさしい（低騒音・低振動・低排気） 大量連続輸送が可能、無空荷 	<ul style="list-style-type: none"> 初期投資に莫大な費用 フレキシビリティの欠如 定期的なメンテナンスが必要

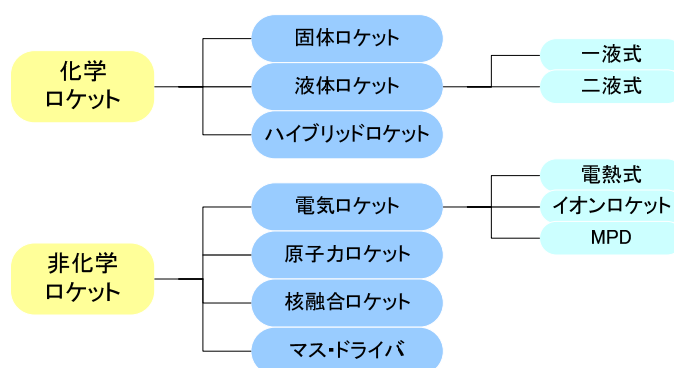
	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長寿命 	
ローリー トラック	<ul style="list-style-type: none"> ・ 離れた需要地に容易に輸送が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷積荷卸作業に時間がかかる ・ 2名体制が必要（人員確保の問題） ・ 復路は空荷（効率性の問題）、輸送量に制約 ・ 道路上での事故のリスク高い ・ 排ガス、騒音、振動の問題（環境問題） ・ 燃料高騰の影響を受ける
鉄道コンテナ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 離れた需要地に容易に輸送が可能 ・ ローリートラックより供給安定性に優れる 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 復路は空荷（効率性の問題） ・ 輸送量に制約 ・ 線路上での事故のリスク伴う
内航船	<ul style="list-style-type: none"> ・ ローリートラックや鉄道よりも一度に大量の輸送が可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷積荷卸作業に時間がかかる ・ 自然状況に影響を受ける ・ 燃料高騰の影響を受ける

出所) 筆者作成。

2. ロケット燃料の種類と日本での実用化の歴史

(1) ロケット燃料の種類³⁷

ロケット燃料は、エネルギー源で区分すると「化学ロケット」「非化学ロケット」の2種にわかれる（【図2-1】）。化学ロケットは、燃料の燃焼によって生じる熱エネルギーを利用し、燃料自体を推進剤として噴射する。実用化されたロケットの多くは化学ロケットである。



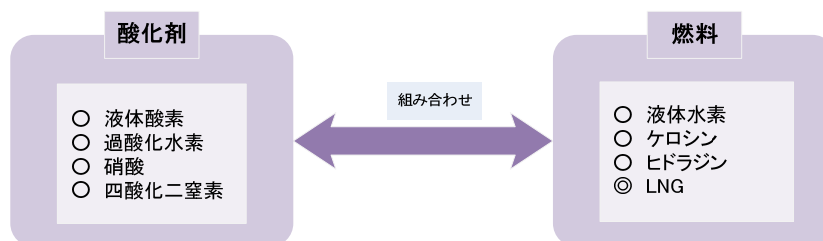
出所) 中村他（2004）。

【図2-1】ロケット燃料の種類³⁸

³⁷ 本節作成にあたり中村他（2004）参照している。

³⁸ 一液式は、ヒドラジンや過酸化水素を触媒で分解させて噴射させる構造が簡単なロケット。

化学ロケットは、燃料・酸化剤の形状により 3 つに分類され、両者が固体の場合が固体ロケット、液体の場合が液体ロケット、そして固体燃料と液体酸化剤の組み合わせの場合はハイブリッドロケットと呼ばれる。固体ロケットは、構造が比較的シンプルであり、製作費が安価である。固体であることから燃料の貯蔵が容易である、短期間に大推力³⁹が得られることなどの利点に着目して小型ロケットに適するロケット燃料として研究開発がすすめられてきた。しかし、固体であるがゆえに一度燃焼すると中断が困難である点、比推力⁴⁰が悪く推力の制御が困難である点などの欠点を持つ。他方、液体ロケットは、大推力を得やすく、燃焼の停止・再点火が可能であり制御可能という利点を持ち、大型ロケットに適する。しかし、燃料を送りだすためのポンプや配管システムの設置など綿密な構造が必要となり、その分、固体ロケットと比較すると開発が複雑となり、開発費用がかさむという欠点をもつ。代表的な燃料として開発当初はヒドラジンやケロシン、酸化剤として四酸化二窒素が用いられていたが、高い比推力が得られ、かつ環境にやさしい、液体水素、液体酸素の組み合わせが現在の主流となっている（【図 2-2】）。また、再使用可能なロケット開発をめざし、世界では液化天然ガス（LNG）を用いた燃料開発が急ピッチですすめられている。



出所) 推進剤に関する情報をもとに筆者作成。

【図 2-1】ロケット燃料の種類⁴¹

また、固体ロケットと液体ロケットの複合系であるハイブリッドロケットは、それぞれの利点を兼ね備え、固体ロケットの特徴であるシンプルな構造と、液体ロケットの制御可能な推力を特徴とするが、双方の欠点を併せ持つといわれる。スペースド・コンポジット社が開発をおこなった有人宇宙飛行船「スペースシップワン」において実用化された例があり、米国の大学では複数の実験がおこなわれているようである。

また、非化学ロケットとして、電気ロケット、原子力ロケット、核融合ロケットなど

³⁹ 後述の比推力と同様に、ロケットエンジンの性能を示す重要な指標のひとつである。ロケットの力量（どのくらいの重さを持ち上げられるか）を示す。毎秒噴射される燃焼ガスの量×燃焼ガスの噴射速度で計算される（宇宙情報センターHP）。

⁴⁰ 推進剤流量に対する推力の大きさで、推進剤を噴射に使い切ったあとの到達速度を示す指標である。比推力が大きいほど燃焼が長く持続することを意味し、性能が高いロケットエンジンといえる。

⁴¹ 一液式は、ヒドラジンや過酸化水素を触媒で分解させて噴射させる構造が簡単なロケット。

がある。電気ロケットは、電気エネルギー（電熱・電磁力・静電気力）を用いて推力を得るが、化学ロケットと比較すると少ない推力である。他方、比推力が非常に高く、環境に与える影響が少ない利点に着目し、研究開発がすすめられている。長時間制御に適することが予想されるが、電力供給に関連する装置が重く、また、搭載実績が少ないため実用化にあたり信頼性が低い。原子力ロケットは、エネルギー源として原子力発電を利用し、推進方式としては電気ロケットと同様の形態を持つものである。安全性の問題、宇宙圏への核兵器持ち込みに関する規約である宇宙条約や部分的核実験禁止の規定から実用段階にはいたっていない。またエネルギー源に核融合を利用するものを核融合ロケットという。実用化の時期は未定であるが、ロケットエンジンのひとつとして開発が開始されているのは事実である。

（２）日本でのロケットエンジン開発の歴史⁴²

エンジンはロケットの心臓部の役割を担い、多額の開発コストや開発期間を多くあてることに見られるようにロケット開発ではエンジン開発が大きな要素を占める。本節では、1975年以降の日本のロケット開発の歴史を、燃料に着目してみていく（【表2-1】）。

日本では、当初、固体ロケットの開発に着手していたが、その後は科学技術により将来の実用衛星打上げには液体ロケットが不可欠という観点から、液体ロケットの開発方針を打ち出し、研究をすすめてきている。宇宙開発事業団（NASDA）⁴³による日本初の大型ロケットは1975年に打ち上げられたN-I型である。N-I型は米国の技術供与を受けた3段式ロケットであり、きく、うめ、あやめなどの通信、放送、気象、地球観測に関する多くの人工衛星の打上げをおこない、計7機の打上げ実績を持つ。燃料として、1段目に液体酸素/ケロシン、2段目には日本が開発をすすめていたLE-3（四酸化二窒素（NTO）/エアロジン）を用い（【表2-2】）、3段目は固体燃料である。N-I型の成功を受けて、さらなる大型ロケット開発が進み、1981年からは同様の燃料をエンジンとするより信頼性の高いN-II型の打上げがはじまった。N-I型、N-II型はともに、米国の技術供与を受けた大型ロケットであるが、続いて開発がおこなわれたH-I型からは日本の独自開発のエンジンを使用としたものとなる。H-I型の1段目・3段目はN-II型と同様のものであるが、2段目は、日本が独自に開発をおこなった再着火能力を持つLE-5（液体酸素/液体水素）が使用され、1986年に初号機が打ち上げられた。つづくH-II型ロケットは、「100%国産」を目指したものであり、重量2t級の静止衛星打上げ能力をもち、全段国産技術による2段式ロケットである。1段目は大型で高性能なLE-7、2段目には従来のH-I型で使用されたLE-5よりもさらに高性能なLE-5Aを用いている。静止軌道以外にも、低・中高度の軌道に打上げが可能であることから、経済的なロケットといわれる。1994年に初号機が打ち上げられ、以後、

⁴² 大澤監修（2003）、齋藤（1992）、JAXAのHPを参照している。

⁴³ 2003年10月、航空宇宙技術研究所、宇宙科学研究所と統合し、独立行政法人宇宙航空開発機構（JAXA）に改組されている。

順調に打上げがおこなわれていくかにみえたが、5号機の軌道投入失敗、8号機の打上げ失敗など、相次ぐ失敗により運用中止が決定された。その後、信頼性と低コストを求めたH-IIの改良型であるH-IIA型が登場した。H-IIA型は、1段目、2段目ともにH-II型よりも高性能なエンジンLE-7A、LE-5Aを搭載し、各種人工衛星を宇宙空間で別々の軌道に導入できるなど、柔軟性の高いロケットで、日本が世界に誇れる技術開発であるといわれる。2001年から試験機がうちあげられ、3号機からは実用機として実際の衛星の打上げをおこなっている。現在のところ14号機まで打上げがおこなわれている。

【表2-1】過去の打上げロケットの型と概要

型	打上げ年	段別の燃料	全長・幅・重量	打上げ総数
N-I型	1975年	1段：液体酸素/RJ-1（ケロシン） 2段：LE3（四酸化二窒素/A-50） 3段：固体	32.57m,2.44m, 90.4t	7機 (きく、うめ、 あやめなど)
N-II型	1981年	1段：液体酸素/RJ-1（ケロシン） 2段：LE3（四酸化二窒素/A-50） 3段：固体	35.36m,2.44m, 135.2t	8機 (ひまわり、さくら、 ゆり、ももなど)
H-I型	1986年	1段：液体酸素/RJ-1（ケロシン） 2段：LE-5（液体酸素/液体水素） 3段：固体	40.30m,2.49m, 139.3t	9機 (あじさい、ふじ、さ くら、きくなど)
H-II型	1994年	1段：LE-7（液体酸素/液体水素） 2段：LE-5A（液体酸素/液体水素）	50m,4m, 260t	予定8機 (ひまわりなど)
J-I型	1996年	1段：固体 2段：固体 3段：固体	33.1m, 87.7t	2機
M-V型	1997年	全段固体	31m,2.5m,139t	8機
H-IIA型	2001年	1段：LE-7A（液体酸素/液体水素） 2段：LE-5B（液体酸素/液体水素）	50m,4m, 260t	14機
J-II型 (GX)	未	1段：液体酸素/（RP-1）ケロシン 2段：液体酸素/LNG	—	—

注) 打上げ年は初号機のもの。RP-1：ロシア製のケロシン。打上げ総数は2008年8月時点の状況。

出所) 宇宙開発委員会各種報告書、大澤監修（2003）齋藤（1992）を参考に筆者作成。

【表2-2】日本が開発をおこなったエンジンの種類

	形式	酸化剤	燃料	推力	比推力
LE-3	液体	四酸化二窒素	A-50（エアロジン）	53kN（真空中）	290.2秒（真空中）
LE-5	液体	液体酸素	液体水素	103kN（真空中）	440秒（真空中）

LE-5A	液体	液体酸素	液体水素	137kN (真空中)	452 秒 (真空中)
LE-5B	液体	液体酸素	液体水素	137kN (真空中)	447 秒 (真空中)
LE-7	液体	液体酸素	液体水素	843kN (海面上)	445 秒 (海面上)
LE-7A	液体	液体酸素	液体水素	843kN (真空中)	440 秒 (真空中)
MB-3	液体	RJ1 (ケロシン)	液体酸素	77ton (地上)	249 秒以上

注) エアロジンはヒドラジン系燃料。出所) 大澤監修 (2003) より抜粋。

以上は液体ロケットの開発の歴史であるが、併行して固体ロケットの開発もおこなわれてきた。生物実験、材料実験のための無人回収衛星や地球環境監視、移動体通信のための小型通信衛星などの小型衛星の打上げ需要に対応するために、3 段式小型ロケット J-I 型が開発された。多くの部分で H-II 型などの既存技術を有効活用し、短期間での上上げを実現している。また、1997 年に打上げが開始された M-V 型は、磁気圏化学、天文学 (火星探査機・X線天文衛星など) のさらなる発展への貢献が期待されている。全段、固体燃料で構成される、世界でも稀な構造を持ち、宇宙開発に新しい時代を拓くロケットであり、月や惑星探査にも利用されている。また、J-I 型の後継として J-II 型の開発が現在、おこなわれている。J-II 型は、今後需要の増加が見込まれる地球観測衛星などの中・小型衛星の打上げ需要に対応したもので、再使用型輸送系の実現をめざすものである。液体酸素/液体水素に代替して液体酸素/液化天然ガスを推進剤としたエンジン、複合材超低温推進剤タンクなどを特徴とし、別名、GXロケットと呼ばれるものである⁴⁴。

(3) LNGロケットをめぐる日本での動き⁴⁵

2003 年 3 月、宇宙開発委員会は、それまでの液体酸素/液体水素を推進薬とする推進系の代わりに、液体酸素と液化天然ガス (以後、LNG) を組み合わせた推進系である「LNG 推進系」が適当と判断し研究開発を進めることを決定した。LNG を用いることによるロケットの小型軽量化の実現、複合材推進薬タンクを用いることによるタンク重量の軽減が可能となる。2001 年から打ち上げが開始されている H-IIA ロケットの欠点を補い、「安くて高性能」をねらうものである。LNG 推進系の開発は 2002 年から開始され、民間が開発する GX ロケットの第 2 段として飛行実証する計画となっている。

GXロケットは、JAXAと民間の航空宇宙関連企業が官民共同で開発を進めているLNGを燃料とした、将来的には国内外の衛星打ち上げビジネスに参画することを目的とした商用中型ロケットである⁴⁶。2001 年 3 月、「中小型衛星打ち上げ用ロケットの開発、製造及び打ち上げサービス」を目的として、石川島播磨重工業やIHAエアロスペースをはじめとする

⁴⁴ 詳細は次節以降を参照。

⁴⁵ 本節作成にあたりギャラクシーエクスプレス (2007)、JAXA HP、ギャラクシーエクスプレス社 HP を参照した。

⁴⁶ GX ロケットの 2008 年 1 月までの開発の経緯・官民の動向の一覧表は【付表 5】に記載。

国内宇宙関連 7 社により株式会社ギャラクシーエクスプレス（GALEX）が、JAXAの協力のもと設立された。LNGを燃料とするロケット開発の基礎的研究は、上述の通り、欧米等でも着々とおこなわれているが、いまだに飛行実証をおこなった国はなく、日本では国際打ち上げ市場への新規投入をめざし、打ち上げコスト低減、信頼性や確実性の高いロケット開発をめざしている。当初の 1 号機打ち上げ予定は 2005 年であったが、技術的な面での開発の遅れ、大幅に超過した見込み開発費用の問題などから、現在では 2011 年に打ち上げが予定されている。

開発が進められているGXロケットは、2 段式の液体燃料ロケットである（【表 2-3】）。1 段目は、信頼性の高い飛行実績を持つアトラスⅢ（ロッキードマーティン社製）の 1 段目の推進薬タンク・供給系を活用し、エンジン部分にはロシアから技術移転されたRD-180 の使用が計画されていた。しかし、その後、米国での運用停止を受けてアトラスⅢからアトラスⅤに変更されたこともあり、結果として開発スケジュールが延期となった。2 段目は、JAXAが開発をおこなっている液体酸素/液化天然ガスを推進剤に使用した世界初のLNG推進系の搭載を予定している⁴⁷。JAXAとしては、1、基本技術の確立、2、官民連携のもとでの技術実証、3、技術移転・GXプロジェクトの支援、以上の 3 点を研究開発の目的としてあげている⁴⁸。また、ペイロードアダプタにはすでに実績のあるH-IIA型の成果を活用し、コスト削減をめざしている。結果として、GXロケットの打ち上げ能力は、H-IIA型の約 1/2 倍、M-V型の約 2 倍が見込まれ、先進技術をフルに使用した、信頼性・確実性が高く、かつ、性能の高いロケット開発をめざしている⁴⁹。しかし、計画の遅れや超過費用の面での問題が明らかとなり、計画そのものに対する疑問の声が宇宙開発委員会をはじめ各方面においても大きくなってきているのが現実である。

【表 2-3】 GX ロケットの概要

・ 国際打ち上げ市場の参入をめざし、先進技術を利用した官民共同開発による 信頼性・確実性の高い中型ロケット		
打上 能力	低軌道（LEO）	約 4 トン（高度 200km）※開発目標値
	太陽同期軌道（SSO）	約 2 トン（高度 800km）
射場		JAXA 種子島宇宙センター大崎射点→米国射場[変更]
初号機打ち上げ		2005 年度→2011 年度 [変更]
開発主体		民間→JAXA/民間 [変更]

出所) 推進部会 GX ロケット評価小委員会（2008 年 2 月 5 日）配布資料 1-3、ギャラクシーエクスプレス（2007）を参考に作成。

⁴⁷ 経済産業省もロケットシステム全体の設計開発システムと制御システムの開発に参画している。

⁴⁸ LNG 推進系飛行実証プロジェクト評価小委員会（2008 年 2 月 5 日開催）議事録を参照した。

⁴⁹ 設計変更により、現時点では、M-V と同程度の打ち上げ能力が見込まれている。



出所) 松浦 (2008a) より抜粋。原資料) 2002年5月8日宇宙開発委員会報告資料。

【図2-3】GX ロケットの外観例

【表2-4】GX ロケットの主要諸元

		1 段	2 段
寸法	長さ、全長、直径	38m,48m,3.1m	8m,48m,3.3m
	質量	各段質量 (全備)	196.9t
全段質量 (全備)		210.2t	210.2t
エンジン	型式	液体ロケット	液体ロケット
	推進薬	液体酸素 (LOX) ケロシン (RP-1)	液体酸素 (LOX) 液化天然ガス (LNG)
	推進薬重量	182.3t	17t
	真空中推力	4152kN	118kN
	真空中比推力	338S	323S
	燃焼時間	237S	480S
	推進薬供給方式	ターボポンプ方式	ブーストポンプ方式
	推進薬タンク	ステンレス製	金属製
誘導方法		慣性誘導方式	慣性誘導方式
制御システム	ピッチ/ヨー	ジンバル	ジンバル
	ロール	ジンバル	ヒドラジンガスジェット

注) 2段は計画値。出所) ギャラクシーエクスプレス (2007) より抜粋。

GXロケット開発の背景には、総合科学技術会議⁵⁰の後押しがある。欧米諸国が科学技術分野に力を入れる傾向が強くなり、他方、アジア諸国が技術力を急速に高めたことで、

⁵⁰ 内閣総理大臣、科学技術政策担当大臣のリーダーシップのもと、各省より一段高い立場から総合的・基本的な科学技術政策の企画立案及び総合調整を行うことを目的とした「重要政策に関する会議」の一つであり、2001年に設置された(総合科学技術会議 HP)。

世界は科学技術をめぐる激化した頭脳競争の渦中にある。このような現状のもと、世界の技術開発の潮流に乗り遅れることがないように、創造性豊かな人材の育成や、資源を有効活用することで成果を生み出す仕組みを創り出すことを目指し、総合科学技術会議において科学技術に関する基本政策の検討が開始された⁵¹。2006年3月には、第3期科学技術基本計画が閣議決定され計画に沿った科学技術政策が推進されているが、基本計画の策定段階において科学技術に関する産官学連携の重要性が強調され、戦略重点科学技術のひとつに「GXロケット開発」が位置づけられた⁵²。GXロケットは、すでに開発・初号機の打ち上げにより実績をあげているM-V型やHII-A型と同様に「国産ロケット」に含まれるが、民が主導のプロジェクトという点で他とは異なるという認識のもと開発が期待されることとなった。

宇宙開発委員会は、日本の宇宙開発利用の目標と方向性を話し合う重要な機関であり、その歴史は古く昭和43年から継続して開催されているものである。JAXAが開発をおこなっているGXロケット2段部分に関しての評価を集中的におこなうことを目的とする「LNG推進系飛行実証プロジェクト評価小委員会（以下、LNG評価小委員会）」が宇宙開発委員会推進部会の下部に設置された。2006年には集中審議が3回開催され、飛行実証プロジェクトの中間評価をおこなうとともに、10月24日の小委員会では、2011年に実現を目指すGXロケット初飛行に向け、それまでの官民計450億円⁵³に加え、250億円を追加投入することを決定した⁵⁴。2008年には2月から6月にかけて、「推進部会GXロケット評価小委員会（以下、GX評価小委員会）」が8回開催されている。1段目ロケットを従来の民間主導からJAXA主体に変更する要望が出されたことを受け、JAXAの技術的状況や、今後の果たすべき役割、また、目指している「安くて高性能」の実現の可能性について評価をおこなっている。元来、国際市場において競合可能な、信頼性が確実に高く、安くて高性能な民間提唱の中型ロケットの開発をめざしてきているが、開発開始後、5年が経過し、当初の予定と実際の開発の差が明らかとなってきている。はじめに、技術面に関してであり、炭素複合材製の推進剤タンクの開発難航、機体重量の大幅超過による2段目の計画変更があげられる。結果として、2段目の設計変更を余儀なくされ、複合材料をあきらめ従来の軽合金製タンクを使用することになり、結果として当初予定の2005年度の打ち上げは現実的に無理な状況となった。また、設計変更作業の中でLNGエンジンは、高圧のヘリウムガスで推進剤をエンジン燃焼室内に押し込む最先端のガス押し方式から、ターボポンプを使用するガス・ジェネレーター方式に変更されている。これらの変更により、LNGを使用した世界初のロケットであるという独特な点のみ残り、他の部分においては、当初の目標とは大きく異なるロケットが製造されることになった⁵⁵。つづいて、コスト面に関する不具合が問題となった。

⁵¹ 科学技術政策に関する情報を記載している内閣府HPを参照した。

⁵² 推進部会GXロケット評価小委員会（2008年2月5日）議事録を参照した。

⁵³ 実証試験機代を含まない。

⁵⁴ 松浦（2008c）。

⁵⁵ 松浦（2008c）。

GX評価小委員会（2008年2月5日、3月18日）に提出された資料によると、当初、官民合わせて約450億円だったものが、2007年度の見積もりでは約700億円、そして、開発遅延を考慮した2008年度の見積もりでは、約1,250億円にまで激増している。実証試験機を含むと約1,500億円超に達し、また、射場を当初の予定通り種子島（大崎射場）にするのか、または米国の射場（バンデンバーグ空軍基地（VAFB））を借用するのかわで見積もり総費用は大きく変わる。いずれにせよ、当初の3倍を越える莫大な開発資金が必要となることなどの理由から、2008年5月、宇宙開発委員会において「開発中止」勧告の方針が固められた⁵⁶。中止勧告の具体的な理由として、①民間側が要望している2011年度の打ち上げ可能性が低い、②予定よりも高価格となり、民間側が目指す世界の打ち上げ市場への参入は困難、③民間側が提案する米国打ち上げでは、失敗時の費用負担リスクが高い、以上の3点があげられている⁵⁷。結局のところ、5月29日のGX評価小委員会で予定されていた中止勧告は先送りされたが、当初の目的である「安く、かつ、高性能」な中型ロケットの開発が困難であることは確実である。民間側はすでに投資済みである500億円以上が回収不能であることなどから反発しているが、費用をめぐる官民の利害調整が焦点となり、「中止」という事態に結果として追い込まれることになるのか、今後の小委員会の動向が注目される場所である。その後の6月30日のGX評価小委員会では、各国の中型ロケット開発にかかわる動向を考察することで、改めて中型ロケットの必要性・期待される能力や機能を確認しあい、その他に、射場や官民役割分担に関して議論がかわされ、今後検討が必要な事項の確認がおこなわれた⁵⁸。

【表2-5】宇宙開発委員会・推進部会 GX ロケット評価小委員会の内容

	開催日	おもな内容・報告
宇宙開発委員会	2003/3/12	LNG 推進系が適当であり、開発をすすめることを決定
LNG 評価小委員会	2006/9/26	※飛行実証プロジェクトの中間評価（他国との開発比較 ⁵⁹ ）
LNG 評価小委員会	2006/10/13	※飛行実証プロジェクトの中間評価
LNG 評価小委員会	2006/10/24	※飛行実証プロジェクトの中間評価（2011年初飛行に向けてさらに予算250億円を投入、2段エンジンは設計一新へ）
宇宙開発委員会	2008/1/9	試験機打ち上げ費用の見直しを行いたい（JAXA）
GX 評価小委員会	2008/2/5	※GX ロケット2段についての評価（開発の経緯）
GX 評価小委員会	2008/2/25	※GX ロケット2段についての評価（開発状況・官民の資金分担）

⁵⁶ 立花（2008）。

⁵⁷ 読売新聞 2008年5月30日夕刊。

⁵⁸ 7月31日にGX評価小委員会が開催されているが、2008年9月末時点で議事録が公開されていないため、会合内容についての詳細な情報は得られていない。

⁵⁹ 棚次亘弘教授（室蘭工業大学）は、「LNG推進系プロジェクトに対する提言」を提出し、韓国で開発中の液体酸素/LNGエンジンと比べ、「将来に発展すべき基盤技術が乏しい」と評価し、GXロケット開発に苦言を呈した（松浦（2008c）、推進部会GX）。

GX 評価小委員会	2008/3/18	※GX ロケット 2 段についての評価 (今後の開発の進め方・射場・開発資金)
GX 評価小委員会	2008/4/7	※GX ロケット 2 段についての評価 (目的意義について再確認)
GX 評価小委員会	2008/4/24	※GX ロケット 2 段についての評価 (民間要望を踏まえ今後のあり方)
GX 評価小委員会	2008/5/15	※GX ロケット 2 段についての評価 (今後の開発検討) →試験機を除く開発費は最終的に 1500~2100 億円に達する見通し (当初は 450 億円)
GX 評価小委員会	2008/5/29	※GX ロケット 2 段についての評価 (費用についての検討、開発中止勧告は先送り)
宇宙開発委員会	2008/5/30	開発中止を勧告する方針を固めた (宇宙開発委員会)
GX 評価小委員会	2008/6/30	※GX ロケット 2 段についての評価 (各国の中型ロケット開発の動向・射場・官民分担)
GX 評価小委員会	2008/7/31	※GX ロケット 2 段についての評価

出所) 文部科学省 HP 審議会情報宇宙開発委員会の各種議事録より作成。

【表 2-6】 H2A ロケットと GX ロケットの比較

	H2A	GX (当初の計画)	GX (現状)
位置づけ	・国の基幹 ・大型ロケット	・安くて国際競争力のある中型商用ロケット	—
特徴	全段自主開発 (一部、部品のみ海外製)	1 段目: 米国より購入 (民間) 2 段目: 新規開発 (JAXA)	1 段目: 米国より購入 (JAXA・民間) 2 段目: 新規開発 (JAXA)
全長	53m	48m	52~54m
打上げ能力	静止軌道へ・4~6 トン	低軌道へ・約 2 トン	低軌道へ・1.4~3.4 トン
開発費	約 1500 億円 (実証機除く)	約 450 億円 (実証機除く)	1500~2100 億円 (実証機 2 機を含む)

出所) 朝日新聞 2008 年 6 月 13 日朝刊、GX 評価小委員会 (2008 年 2 月 25 日、3 月 18 日) 配布資料。

(4) 世界の LNG ロケット開発の動き・開発の実績⁶⁰

ロケット燃料の新しい主役である期待されている液体酸素/LNG を用いたロケット開発が現在、欧州国、ロシア、アメリカ、韓国でもおこなわれはじめています。ただし、いずれの国・地域も LNG エンジンの基礎的な研究にとどまり、日本は JAXA の LNG 推進系の飛行実証を世界に先駆けておこなうことで世界の先導に立とうとしている⁶¹。LNG は主要原料がメタンであることから、LNG を用いたエンジンは「メタン・エンジン」と呼ばれている。1970 年代から、宇宙航空開発分野で世界の先陣を争うアメリカとロシアにおいてメタン・エンジンの開発がすすめられてきたが、実際に、具体化し話題となったのは 90 年代になってからのロシアである。ロシアでは 1990 年から推力 1 トンから 200 トンまでの各種サイズのメタン・エンジン開発に着手し、燃焼実験をおこなっている。なかでも、フランスとロシアの共同の技術実証プロジェクト「ウラル」の一環として、2020 年の再使用型輸

⁶⁰ 宇宙航空研究開発機構 LNG プロジェクト (2008)、松浦 (2008d)、棚次 (2006) を参照した。

送機の実現をめざしたメタン・エンジンの開発が急ピッチでおこなわれている。また、欧州の大手航空・宇宙企業であり国際宇宙ステーション（ISS）建設に参画しているEADS社（European Aeronautic Defence and Space Company）は、メタン推進系を搭載した弾道飛行ロケットプレーン事業構想を発表し、宇宙観光需要が高まる中、商用としての宇宙観光用のロケットにメタン・エンジンを使用を検討している。また、アメリカでは、NASAが月面着陸機へのメタン・エンジン利用の検討を開始している。すでに、2007年12月に、推力4トンの小型の液体酸素/LNGエンジンの燃焼実験に成功している。韓国では、日本のJAXAが開発をおこなっているGXロケット2段エンジンと同程度の推力を擁するエンジン「CHASE-10」の開発がおこなわれている。ベンチャー企業のシーエヌスペース（株）がロシアの技術支援を受けて開発をおこなっている。50回までの繰り返し使用が可能な再使用型メタン・エンジンであり、すでに燃焼実験に成功している。高い推力を達成しているが、比推力に依然として改善すべき点が残し、推進系にまとめるには数年かかるようである。以上のように、欧州、ロシア、アメリカ、韓国においても日本と同様にいち早い実用化をめざしてメタン・エンジンの開発が進められている。ただし、超過費用をめぐる日本の動向からも明らかなように、実用化に向けてなによりも必要なのは基礎的な研究である。液体酸素/LNGの前段階である液体酸素/液体水素やケロシンを燃料に用いたエンジン開発は、欧米・日本の他に、すでに中国・インドでも開発され、世界の技術水準が格段にあがってきている。とくに日本は、両分野において遅れをとらないためにも、データ蓄積を入念におこなったうえでの技術開発が必要な点が指摘されている。

本節において、世界や日本におけるLNGロケットの開発の動向をみてきた。メタン・エンジンは、その必要性に大きな注目が集まる一方で、①比推力が低いため水素推進系ほど高性能ではない、②ケロシン推進系ほど高密度ではない、等の理由から、実用化されてこなかった⁶²。そこで、次章では、ロケット燃料としてのLNGの適正を、LNGのもつ物性上の特徴から液体水素と比較することで検証していく。

3. LNGの物性上の利点ーロケット燃料としてのLNGの適正の検証

これまでロケット燃料といえば、液体水素が従来からの定説であった。しかし液体水素の製造面、貯蔵面を考えると、その物性が持つ維持管理の難しさから、新たにLNGの利用が脚光を浴びようとしている。そこで、LNGと液体水素（LH₂）を（1）物性値、（2）タンク容積、（3）CO₂排出量、（4）推進薬重量、以上の4つの側面から比較をおこなっていく。なお、LNGのメタン含有量が99%を越えることから、ここでは、LNGとCH₄は等しいものとして説明する（以後、LNG（CH₄）⁶³。

⁶¹ JAXAのHPを参照した。

⁶² 宇宙開発事業団（2002）。

⁶³ 天然ガスは産地によってメタンの含有量が異なる。特に、アラスカ産天然ガスはメタン含有量が99.2%を越えることからLNG=CH₄であることを前提条件とした。

(1) 物性値

【表 3-1】は、各指標による LNG (CH₄) と LH₂を比較したものである。

【表 3-1】 LNG (CH₄) と LH₂物性値の比較

		単位	LNG (CH ₄)	LH ₂
1	分子量	g/mol	16	2
2	融点	°C	-182	-259
3	沸点	°C	-161	-253
4	液体密度 ^(※)	g/cm ³	0.43	0.07
5	ガス密度	g/Nm ³	0.71	0.09
6	気化量	Nm ³ /L	0.59	0.78
7	産気	Nm ³ /kg	1.4	11.2
8	総発熱量	kcal/Nm ³	9520	3030
		kcal/kg	13270	33800
		kcal/L (液)	5706	2366
9	空気爆発範囲	%	5~14	4~74
10	蒸発潜熱 ^(※)	kcal/kg	121	106
		kcal/L	52	7

注) (※) =B.P.1 atm。出所) 各種資料を参考に筆者作成。

1. 分子量

C=12、H=1 であることから、LNG (CH₄) =12+1×4、LH₂=1×2=2。よって、LNG (CH₄) と LH₂の分子量は、16、2 となる。

2. 融点

融点とは、固体が溶けて液体になりはじめる温度であり、通常、1 気圧のもとでの値 (=融解点) を示す。融解点は、LNG (CH₄) が-182°C、LH₂は-259°Cであり、固体から液体になりはじめる温度は、LNG (CH₄) の方が LH₂よりも高い。この差は、材料選定や断熱技術を考慮する際に影響が生じる。

3. 沸点

沸点とは、液体が沸騰しはじめる温度 (気体になる温度) であり、通常、1 気圧のもとでの値 (=沸騰点) を示す。沸騰点は、LNG (CH₄) が-161°C、LH₂は-253°Cであり、液体から気体になりはじめる温度は、LNG (CH₄) の方が LH₂よりも高い。この差は、材料選定や断熱技術を考慮する際に影響が生じる。

4. 液体密度

ここでの液体密度は、1cm³あたりの重さを計量したものである。液体密度は、LNG (CH₄) が 0.43g/cm³、LH₂は 0.07g/cm³であり、LNG (CH₄) は LH₂の約 6.14 倍 (=0.43 ÷ 0.07) の重さである。

5. ガス密度

ガス密度は、別名、気体密度といわれるもので、1 気圧・0°Cの状態に換算した際の気体の体積である 1Nm³あたりの重さを計量したものである⁶⁴。気化してガス体になった時の密度は、LNG (CH₄) が 0.71g/Nm³、LH₂は 0.09g/Nm³であり、LNG (CH₄) はLH₂の約 7.89 倍 (=0.71 ÷ 0.09) の重さである。

6. 気化量

ここでの気化量は、液体 1 リットルが気化した際の体積 Nm³である。気化量は、LNG (CH₄) が 0.59Nm³/L、LH₂は 0.78 Nm³/Lであり、気化する際の体積は、LNG (CH₄) が LH₂の約 0.76 倍 (=0.59 ÷ 0.78) である。前述のガス密度は重量を反映しているのに対し、気化量は気化した際の体積を反映している。

7. 産気

産気とは、通常、Nm³/kg で表記され、一定質量の液体が気化した場合に占める体積を割合で示したものである。LNG (CH₄) 1kg が気化すると、1.4Nm³、同様に、LH₂は 11.2 Nm³であり、LNG (CH₄) は LH₂の 8 倍 (=11.2 ÷ 1.4) の産気である。

8. 総発熱量

発熱量には総発熱量と真発熱量の 2 種があるが、ここで扱う総発熱量は、燃焼により生じた水蒸気の蒸発潜熱を含む場合の発熱量であり、高発熱量ともいわれる。総発熱量は、気体 1m³N でみた場合は、LNG (CH₄) が 9,520kcal/Nm³、LH₂は 3,030kcal/ Nm³であり、LNG (CH₄) は LH₂の 3.14 倍 (=9,520 ÷ 3,030) の発熱量である。重量 1kg でみた場合は、LNG (CH₄) が 13,270kcal/kg、LH₂は 33,800kcal/ kg であり、LNG (CH₄) は LH₂の 2.55 倍 (=13,270 ÷ 33,800) の発熱量である。同様に、液体 1 リットルで見た場合は、LNG (CH₄) が 5,706kcal/L、LH₂は 2,366kcal/ L であり、LNG (CH₄) は LH₂の 2.41 倍 (=5,706 ÷ 2,366) の発熱量である。よって、液体の場合は、ロケットに搭載する燃料タンクが同容積であるならば、LH₂に対して LNG (CH₄) の方が、2.41 倍のエネルギーを搭

⁶⁴ N (ノルマル) m³とは、1 気圧 0°Cの状態に換算した気体の体積を表す。他に、1 気圧 20°Cの状態に換算した気体の体積である S (スタンダード) m³がある。産業ガス業界では S を 35°C1 気圧としている。また、高圧ガス保安法 (旧、高圧ガス高圧取締法) では、高圧ガスとは 35°Cで圧力 1 メガパスカル (MPa) 以上と定義している。

載できることを意味する。

9. 空気爆発範囲

空気爆発範囲とは、LNG (CH₄) と LH₂ が気化して空気中に混合すると、何%の混合状態になると爆発するか、その範囲を示したものである。範囲の幅が狭いほど爆発を起こしにくくより安全といえる。空気爆発範囲は、LNG (CH₄) が 5~14%、LH₂ が 4~74% であることから、LNG (CH₄) の方が LH₂ よりも範囲が狭く、安全性が高いことを意味する。逆に、LH₂ の方が範囲の幅が広いことから、点火しやすい特性を持つともいえる。

10. 蒸発潜熱

蒸発潜熱とは、気化するの必要なエネルギーを示したものである。重量で比較すると 1kg 分気化するのに、LNG (CH₄) が 121kcal/kg、LH₂ が 106kcal/kg であり、気化する際に LNG (CH₄) の方が 1.14 倍のエネルギーを必要とする。液体状態で比較すると、1 リットル分気化するのに、LNG (CH₄) が 52kcal/L、LH₂ が 7kcal/L であり、気化する際に LNG (CH₄) の方が 7.43 倍のエネルギーを必要とする。以上より、LH₂ は気化しやすく、LNG (CH₄) は気化しにくい特性を持つといえる。

また、貯蔵に際しては、LNG (CH₄) と LH₂ ような極低温液体の貯蔵には、熱伝導と輻射による浸入熱の遮断を考慮する必要がある。

1. 熱伝導量の大小は、常温 20℃ と極低温体の温度差による。

- LNG (CH₄) の温度差 = 20℃ - (-161℃) = 181℃

- LH₂ の温度差 = 20℃ - (-253℃) = 273℃

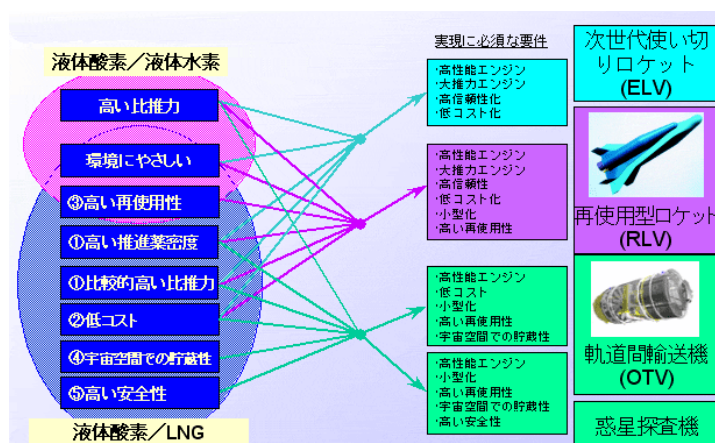
→ よって、両者の間に 92℃ の温度差、比率で見ると約 1.5 倍の温度差があり、熱伝導量は LH₂ の方が大きいといえる。

2. 輻射熱の一般式は、 $Q=K \times ((T_1)^4 - (T_2)^4)$ であらわされる。この場合、T₁ は常温 (20℃ = 293℃ K)、T₂ は LNG (CH₄) と LH₂ の温度を意味する。この式から輻射による浸入熱も LH₂ の方が大きいといえる。

以上の結果より、LNG (CH₄) と LH₂ を比較すると、まず密度に関しては、液体では約 6.1 倍、同様に気体では約 7.9 倍、LNG (CH₄) の方が LH₂ よりも大きい。また、液状で比較した総発熱量は、LNG (CH₄) の方が LH₂ よりも約 2.4 倍大きいことから、ロケットに搭載する燃料タンクが同じ容積なら、LNG (CH₄) の方が多量のエネルギーを搭載できるといえる。また、液状で比較した蒸発潜熱は LNG (CH₄) の方が LH₂ よりも約 7.4 倍であることから、LNG (CH₄) は LH₂ よりも気化しにくい特性をもつといえる。さらに、空気爆発の限界範囲が LNG (CH₄) の方が狭いことから、LNG (CH₄) は LH₂ よりも安全性が高いといえる。また、両者の沸点は約 90℃ の差があることからロケット燃料タンクの材料選定や断熱技術の水準に差が生じる。

以上で明らかになった物性上の特性より、従来使用されてきた液体水素と、使用が検討されはじめている LNG の場合を比較すると、ロケット燃料としてのハンドリングの点に関しては、LNGの方が気化しにくい性質を備えるため長期間の保存が可能となり、貯蔵・ハンドリングの面から扱いやすいといえる。また、密度が高いことから、小規模タンクでの設計が可能となる。さらに、空気爆発範囲が狭いことから安全性がより高い性質を持つといえる。一方、液化水素はより気化しやすく、沸点が -252°C と極低温であることを考慮すると、取扱いがより困難であるといえる。

【図3-1】は宇宙開発事業団によってまとめられた液体水素とLNGの利点の相違を図示したもの、【図3-2】は上記の分析結果から、物性上の特徴からみたロケット燃料としてのLNGの利点をまとめたものである。上記の物性上の特性でみた点以外にも、液体水素の場合は、高い比推力を持つことに加え、二酸化炭素を発生しないことからより環境にやさしく⁶⁵、その他に、高い再使用可能性を持つという点が利点である。他方、LNGは、①高い推進薬密度や比較的高い比推力を備えることから、大推力エンジンの実現が可能となり、また、ブースタ段に適用することで機体の小型化が可能となる、②推進薬の取扱性が良く推進薬単価が安いことから低コストの実現が可能となる、③すすの発生が少なくエンジンの再使用が可能となることから需要が増加している再使用型輸送系への適用が可能となる、以上の3点が利点としてあげられている。また、上記でみたように、液体水素に比べて蒸発率が小さいことから宇宙空間での貯蔵性が高く、長時間運用する軌道間輸送機の高性能化に寄与が見込まれる点、空気爆発範囲が狭いことから、液体水素に比較して漏洩や引火の危険性が低く安全性が高いことから、有人活動を想定した運用リスクの低減にも寄与する点が見込まれ、利点としてあげられている。以上の点より、LNGは将来の輸送系システムの構築にむけてさらなる選択肢の拡大の一つとして期待され、研究開発がすすめられている。



出所) 宇宙開発事業団 (2002)。

【図3-1】LNGエンジンの利点

⁶⁵ ここでは、液体水素を製造する過程でのCO₂発生については考えていない。

【表 3-2】物性からみた LNG エンジンの利点

	判断指標	LNG と LH ₂ の比較	利点
推進系としての性能	液体密度 総発熱量	LNG は LH ₂ の約 6 倍 LNG は LH ₂ の約 2.4 倍	→ タンクの小型化が可能
運用性	沸点	LNG の方が LH ₂ よりも約 100 度高い	→ LNG の方が取扱いやすい。
安全性	空気爆発範囲	LNG の方が範囲が狭い	→ LNG の方が漏れにくく爆発しにくい
貯蔵性	蒸発潜熱	LNG の方が LH ₂ の約 7 倍	→ LNG の方が気化しにくく、長期間運用の軌道間輸送機に適する

出所) 筆者作成。

(2) タンク容積

ロケットに燃料として LNG あるいは、液体水素を搭載する場合、どのくらいのタンク容積を必要としているかを試算しておく必要がある。LNG と液体水素の両燃料を燃焼させるためには、液体酸素と組み合わせて搭載することが必要であり、その際の燃焼化学式は、1) $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ 、2) $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 、となる。また、ここで、液体酸素の分量を 0.88 リットル/kg、必要とするエネルギー量を 1,000,000kcal と仮定し、エネルギー量 100 万 kcal を得るために必要となるタンク容積の計算をおこなう。

【表 3-3】タンク容積の比較

		単位	LNG (CH ₄)	LH ₂
1	100 万 kcal	kg	75	30
2	液体積	リットル	175	423
3	モル数	kmol	4.7	15
4	燃焼 O ₂ 量	kmol	9.4	7.5
		kg	301	237
5	液化 O₂ 量	リットル	265	208
6	タンク容積合計	リットル	441	631
<前提条件>				
1)	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$			
2)	$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$			
3)	液体酸素 0.88 リットル/kg			
4)	エネルギー量 1,000,000kcal			

出所) 各種資料を参考に筆者作成。

1. 100万 kcal を得るための分量（重量）

100万 kcal を得ための LNG と液体水素の分量を算出する。【表 3-1】より、LNG の総発熱量は 13,270kcal/kg であることから、必要となる分量は約 75.36kg ($=1,000,000\text{kcal} \div 13,270\text{kcal/kg}$) となる。同様に、液体水素の総発熱量は 33,800kcal/kg であることから、必要となる分量は約 29.59kg ($=1,000,000\text{kcal} \div 33,800\text{kcal/kg}$) となる。

2. 体積換算

①で算出された分量の体積換算をおこなう。【表 3-1】より、LNG の液体密度は 0.43g/cm^3 であることから、100万 kcal を得るために必要な分量（体積）は、約 175.25 リットル ($=1,000,000\text{kcal} \div 13,270\text{kcal/kg} \div 0.43\text{g/cm}^3$) となる。同様に、液体水素の場合は、約 422.65 リットル ($=1,000,000\text{kcal} \div 33,800\text{kcal/kg} \div 0.07\text{g/cm}^3$) となる。以上より、ロケット燃料として LNG と液体水素を用いる際のタンク容積を比較すると、液体水素は LNG の約 2.4 倍の大きさが必要になるといえる。

3. モル数

モル数とは、物質に関する基本単位であり、質量数 12 の炭素 12 グラム中に含まれる炭素原子と同数の単位粒子を含む物質を 1 モルと呼ぶ。元素記号を考慮してモル数を計算すると、LNG のモル数は 4.7kmol ($=75\text{kg} \div (12+1 \times 4) \text{ kg/kmol}$)、液体水素のモル数は 15kmol ($=30\text{kg} \div (1 \times 2) \text{ kg/kmol}$) となる。

4. 燃焼 O₂ 量

つづいて、上述のモル数と燃焼化学式を参考に燃焼 O₂ 量の算出をおこなう。LNG の燃焼 O₂ 量 (kmol) は 9.4kmol ($=4.7\text{kmol} \times 2$)、重量換算をおこなうと燃焼 O₂ 量 (kg) は 301kg ($=9.4\text{kmol} \times 32\text{kg/kmol}$) となる。同様に、液体水素の燃焼 O₂ 量 (kmol) は 7.4kmol ($=15\text{kmol} \div 2$)、重量換算をおこなうと燃焼 O₂ 量 (kg) は 237kg ($=7.4\text{kmol} \times 32\text{kg/kmol}$) となる。

5. 液化 O₂ 量

④をもとに燃焼 O₂ 量の体積換算をおこなう。LNG の燃焼 O₂ 量は 265 リットル ($=301\text{kg} \times 0.88 \text{ リットル/kg}$)、同様に液体水素の場合は 208 リットル ($=237\text{kg} \times 0.88 \text{ リットル/kg}$) となる。

6. タンク容積合計

②と⑤より、タンク容積の合計は LNG の場合は 441 リットル ($=175+265$)、液体水素の場合は 631 リットル ($=423+208$) となる。よって、液体酸素を考慮したタンク容積は、液体水素の方が LNG の約 1.43 倍であり、LNG を使用するとより小規模のタンクで済

むことがわかる。

(3) CO₂排出量

エネルギー量 100 万 kcal を得る際に発生する CO₂ の計算をおこなう。ただし、液体水素は CO₂ を発生しない。100 万 kcal を得るための分量は、前述のとおり、LNG は 75kg、液体水素の場合は 30kg である。その際のモル数は、LNG は 4.7kmol、液体水素は 15kmol である。燃焼化学式を考慮すると、発生する CO₂ モル量は、LNG は 4.6kmol、液体水素の場合は発生しない。最後に CO₂ モル量を重量換算すると、LNG の場合の CO₂ 発生量は 207kg (=7.4kmol×32kg/kmol×0.88) となる。

【表 3-4】 100 万 kcal を得るための CO₂ 発生量

		単位	LNG (CH ₄)	LH ₂
1	100 万 kcal	Kg	75	30
2	モル数	kmol	4.7	15
3	発生 CO ₂ モル量	kmol	4.7	0
4	発生 CO ₂ 量	Kg	207	0

出所) 各種資料を参考に筆者作成。

(4) 推進薬重量から求めた炭酸ガスの発生量

GX ロケットの主要諸元は【表 2-4】に示した通りである。推進薬とは推進用の燃料を指し、イグナイターにより推進薬に点火されると、ノズルから燃焼ガスが噴射して推力を得ることになり、この際にロケットが加速されることになる。JAXA が開発をおこなっている 2 段目の推進薬重量 (LNG+O₂) については、17t であることが現在、計画されている。

【表 3-5】 推進薬重量から求めた炭酸ガスの発生量

	単位	LNG	液体水素
分子量	kg/kmol	16	32
反応ストイキ	モル	1	2
反応ストイキ重量	kg	16	64
推進薬配分	kg	3,400	13,600
↓			
炭酸ガス発生量	kg	9,350	

出所) 各種資料を参考に筆者作成。

【表 3-4】のストイキとは、ストイキオメトリー (Stoichiometry) の略で、「理論空燃比」のことを意味する。空燃比とは、混合気における空気質量を燃料質量で割ったもの

である。従来の筒内直接噴射（D-4）が、超希薄燃焼によって低燃費を実現するのとは異なり、空気と燃料が理想的な濃度で混合し完全燃焼することで、高出力、低燃費、低排出を高次元でバランスさせるものである。計画中の GX ロケット 2 段の推進薬重量が 17t であることから、LNG（CH₄）と液化水素に按分すると【表 3-4】のようになる。

- ① LNG の分子量 (kg/kmol) = 12+1×4 =16
- ② LNG の反応ストイキ (モル) =1
液体水素の反応ストイキ (重量) =2
- ③ LNG の反応ストイキ重量 (kg) = 12+1×4 =16
液体水素の反応ストイキ重量 (kg) =2×32=64
- ④ LNG の推進薬配分 (kg) =17,000kg×16 (16+64) =3,400
液体水素の推進薬配分 (kg) =17,000kg×64 (16+64) =13,600
- ⑤ 発生炭酸ガス量 (kg) =16 : (12+16×2) =3,400 : X
=3,400kg×44 (=12+16×2) ÷16=9,350

以上の計算により、ロケット燃料として LNG+液体酸素の組み合わせを用いた場合、推進薬としての LNG は 3400kg 必要であり、発生する二酸化炭素は、9,350kg である。一方、液体水素+液体酸素の組み合わせを持ちいた場合は、推進薬として 13,600kg 必要であるが発生する二酸化炭素は 0kg である。

GX ロケットの前段階である H-II A ロケットは、推進剤に液体水素と液体酸素を使っている。この組み合わせは高い性能を持っているが、上記でみてきた液体水素の特性から考えると、より燃料タンクが大きくなり、ロケット全体も巨大化し、かさばるという欠点が明らかである。また、液体水素は-250℃という極低温なため取扱いが難しく、非常に小さな間隙からでも蒸発してしまうという欠点を持っている。これらの欠点を補うために、より比重が大きくて扱いやすい推進剤を用いた方を液体酸素と組み合わせる利用することが有効である。このような状況を踏まえて宇宙開発委員会は、推進系として液化天然ガスとの組み合わせが適当と判断して、研究が進められているわけである。

おわりに。(今後の研究展開)

これまでロケット燃料といえば、液体水素/液体酸素の組み合わせが主流であり、日本においても N-I 型にはじまり現在も打ち上げが続いている H-II A まで一部を除いてすべて液体水素/液体酸素が使用されてきた。他方で、世界では併行して、ロケットの規模に応じた適正な燃料として LNG が古くから着目されてきた。結果として、実用化の目処がたたないまま約 30 年の時を経てきたが、地球環境への対応の必要性が声高に主張されるようになった近年、より「環境にやさしい」燃料である天然ガス・LNG の有効利用が脚光を浴

びるようになった。また、大規模ではなく各用途に見合った中小規模のロケットへの需要が高まる中、ロケット燃料としての LNG 利用に期待が集まっている。その背景には、1 章（1）で明らかになったように安定的な供給が見込まれる点もある。クリーンエネルギーといわれる LNG は、地球環境問題への対応策のひとつとして、また、エネルギー安全保障・安定供給の面からエネルギーの基幹的な位置づけとしてのさらなる活用が期待されている状況にあることから、現在、開発国は競い合って実用化をめざしている。

本稿では、LNG とは何かを明らかにすることを目的に、第 1 章では LNG の特徴、第 2 章では他燃料や LNG を使用したロケット開発の状況、第 3 章では物性上の特性から LNG ロケットの利点をみてきた。ここでは、100 万 kcal を得るための体積を計算することで、LNG と液化水素の比較をおこなった。

天然ガス・LNG の特徴は、①環境にやさしい、②安定供給が可能、③高い安全性の 3 点である。特に、石炭や石油と比較すると、地球温暖化の原因といわれる二酸化炭素や大気汚染・都市汚染の原因となる窒素酸化物や硫黄酸化物の発生が極端に少ない。よって、石炭や石油に代替するものとして地球環境保全に幅広く貢献可能なエネルギーとして期待が集まるものである。また、政情が非常に不安定な中東に偏重する石油とは異なり安定供給が十分に見込まれることから、LNG の有効利用に対する開発需要が高まっている。そのような中、LNG の利用用途が拡大し、今後の利用展開可能性も高い。輸入された LNG はおもに火力発電用の燃料と都市ガス製造用の原料として利用される。その他に、冷熱を利用した発電、ドライアイス製造、超低温冷蔵庫や天然ガス自動車の燃料としても利用が開始されている。今後は、近い将来に到来すると予想される水素エネルギーシステム社会への架け橋として、水素製造の燃料として LNG の利用が期待され、燃料電池、燃料電池自動車等への幅広い利用が検討され、ますますの利用拡大が世界的に見込まれている。そのような中、世界での LNG 需要の高まりとともに、輸入価格や価格決定方式に変更が生じてきている。LNG 価格は、輸入地域によって異なる決定方式を採用し、従来の主流は、原油価格や競合燃料の価格にリンクした長期取引契約である。しかし、中国・インドなどのアジア諸国での用途拡大による急速な需要増加により、特にアジアではスポット取引比率が全体的に増加している。LNG は、分布特性や埋蔵量でみるかぎり安定的な供給が可能であるのは確実であるが、今後は、アジア域内などの地域内での獲得争いが激化する可能性が十分あるといえる。

ロケット燃料としての LNG 利用は、今後に必要な増加が見込まれる地球観測・災害・測位衛星などの中・小型衛星の打ち上げ需要に対応し、さらに再使用型輸送系の実現をめざすものとして、世界で開発がすすめられてきている。実用化に一步近づく世界をリードした存在として、日本の GX ロケットがあげられるが、技術面に関する相次ぐ不具合、予想以上に膨大なコストを必要とすることが明らかとなった。従来の燃料に代替可能となる「安く高性能」の実現・LNG ロケットの実用化は先行きが暗い状況にあるといえる。開発は暗礁に乗り上げているが、しかし、LNG の物性上の特性から、ロケット燃料に LNG は適

していることは事実である。特に、密度の観点から小型化が可能である反面、大推力エンジンの実現が可能である点、エンジンの再使用が可能である点、蒸発率の観点から長期間運用の軌道間輸送機に適する点、沸点の観点から取り扱いが比較的容易な点、漏洩・引火の危険性が低いことから高い安全性を持つ点、LNG 自体が低コストである点などから、再使用可能で長期軌道間輸送を前提とする将来の輸送系システムの確立には有用であるといえる。今後、ロケット燃料として LNG を使用する際には、ロケット製造基地・打ち上げ基地などへのスムーズで需要にみあった量の安定供給が必要といえ、国内輸送基盤の充実が必須といえる。鉄道・道路・船舶輸送の路線網の充実に加え、日本では整備が遅れているとされるパイプラインの早急な装備も必要となる。科学技術のさらなる進歩に期待したロケット開発・実用化に期待する一方、同時に、国際間だけでなく国内の安定的な供給体制を整えることも、LNG ロケットの実用化を確実にする要因のひとつであると考えられる。

本稿では物性上の特性から LNG をみてきた。物性はひとつの判断基準にすぎず、ロケット工学や燃焼工学などの多方面な視点から LNG を考察する必要がある、今後の課題としたい。続編（Ⅱ）では、LNG ロケットの環境負荷の計測に焦点をあてる予定である。実際に LNG ロケットが実用化されたと想定し、打ち上げの実現が予想される GX ロケットと、現在打ち上げが行われている HⅡ-A ロケットの環境負荷（二酸化炭素発生量など）の計測をおこない、HⅡ-A 型の燃料が LNG に代替した場合などの負荷軽減をみていく予定である。また、両者の比較の際にはロケットの規模について考慮する必要がある。中小型ロケットを多数打ち上げることによる量産効果と、大型ロケット1機を打ち上げることの比較をおこない、環境負荷・経済性の観点からロケットの最適規模・最適燃料を探る予定である。

付表1. 世界のLNG取引（2007年）

		北中米		北欧	中東			アフリカ					アジア・太平洋				合計
		アメリカ	トリニダード・トバゴ	ノルウェー	オマーン	カタール	UAE	アルジェリア	エジプト	赤道ギニア	リビア	ナイジェリア	オーストラリア	ブルネイ	インドネシア	マレーシア	
北中南米	アメリカ		947			39		156	240	37		199					1620
	メキシコ		46						73			42					161
	ドミニカ		27														27
	プエルトリコ		55														55
欧州	ベルギー		5			204		26									235
	フランス		4	5				583	90			281					963
	ギリシャ							37	23								60
	イタリア							180									180
	ポルトガル											172					171
	スペイン		155	5	9	330		321	300		56	618					1795
	トルコ		4					330	6			105					446
	イギリス		29			20		48	12								108
アジア	中国				5			31				6	245				287
	インド		16		16	614	5	33	5			48				5	741
	日本	88	42		357	807	550	58	120	27		65	1192	636	1342	1310	6506
	韓国		16		502	800	5	18	110			18	42	58	380	605	2553
	台湾				16	42		10	30	42		17	25		338	291	811
合計	88	1347	10	904	2857	561	1831	1010	105	56	1571	1503	694	2059	2212	16721	

単位) 1万t/年。注) 表頭：輸出国、表側：輸入国。出所) BP統計2008を筆者加工。

付表2. アジア各国のLNG輸入契約

	開始	期間	韓国		台湾	中国	タイ	インド		合計
			a	b	c	d	e	f	g	
ブルネイ	1994	20	70	—	—	—	—	—	—	70
マレーシアⅡ	1995	20	200	—	225	—	—	—	—	425
	2005	3	40	—	—	—	—	—	—	40
マレーシアⅢ	2003	7	200	—	—	—	—	—	—	200
	2004	4	70.5	—	—	—	—	—	—	70.3

インドネシア	1	1990	20	—	—	165	—	—	—	—	165
	2	1986	22	230	—	—	—	—	—	—	230
	3	1994	21	205	—	—	—	—	—	—	205
	4	1998	20	103	—	—	—	—	—	—	103
	5	1998	20	—	—	184	—	—	—	—	184
	6	1995	20	—	55	—	—	—	—	—	55
カタール	7	1999	25	480	—	—	—	—	—	—	480
		2005	4	96	—	—	—	—	—	—	96
	8	2005	25	—	—	—	—	—	750	—	750
オマーン		2000	25	410	—	—	—	—	—	—	410
豪州		2003	7	50	—	—	—	—	—	—	50
		2006	25	—	—	—	330	—	—	—	330
計				2155	55	574	330	0	750	0	3864

単位) 万トン/年、注) a : Kogas (韓国ガス公社)、b : POSCO (浦項製鉄) /SK、c : CPC (台湾中油公司)、
d : CNDOC、e : PTT、f : Petronet、g : IOC、GAIL、1 : Badak III、2 : Arun III、3 : Korea II、4 :
Badak V、5 : Badak VI、6 : Tangguh、7 : Pasgas I、8 : Pasgas II。出所) ガス年鑑 2007p.222。

付表 3. アジア各国の新規 LNG 輸入契約 (2008 年以降)

	開始	期間	韓国		台湾	中国	タイ	インド		合計
			a	b	c	d	e	f	g	
Malaysia	2008	20	200	—	—	—	—	—	—	200
Indonesia	2008	25	—	—	—	260	—	—	—	260
	2008	20	—	80	—	—	—	—	—	80
Qatar	2008	25	—	—	300	—	—	—	—	300
Sakhalin	2008	20	150	—	—	—	—	—	—	150
Gorgon	—	20	—	—	—	300	—	—	—	300
Browse	—	20	—	—	—	100	—	—	—	100
Yemen	2008	20	200	—	—	—	—	—	—	200
Iran (NIOC LNG)	2009	25	—	—	—	—	—	—	750	750
IRAN(Pars LNG)	2011	—	—	—	—	—	300	—	—	300
計	—	—	550	80	300	660	300	0	750	2640

単位) 万トン/年、出所) ガス年鑑 2007p.222。

付表4. 会社別のLNG輸入契約（相手国別）（2007年度）

	電力会社						
	東北	東京	中部	関西	中国	四国	九州
アラスカ		97					
ブルネイ		403					
アブダビ		483					
マレーシア	100	480	0	42			
インドネシア	83	13	380	345			156
西豪州	40	118	105	113	111		155
カタール	52	20	400	29	12		
オマーン		80			70		
ダーウィン		200					
計	275	1894	885	529	193	0	311
輸入シェア	4.4	30.4	14.2	8.5	3.1	0	5.0

	ガス会社他											
	仙台	東京	東邦	大阪	静岡	広島	西部	日本	新日鉄	石油資源開発	三菱商事	伊藤忠商事
アラスカ		32										
ブルネイ		124		74								
アブダビ												
マレーシア	15	374	50	72	45	2	36	0		48		
インドネシア		92	92	301		30		10	62			
西豪州		186	53	179	13							
カタール		35	17	35								
オマーン				66							80	70
ダーウィン		100										
計	15	943	212	727	58	32	36	10	62	48	80	70
輸入シェア	0.2	15.1	3.4	11.7	0.9	0.5	0.6	0.2	1.0	0.8	0.0	0.0

注) 輸入シェアは電力会社・ガス会社・その他の計19社に占める比率。単位) 万トン/年。

出所) ガス年鑑2007p.198-199。

付表 5. GX ロケットー開発の経緯 (2008 年 1 月まで)

		おもな動き	NASDA・JAXA	民間 (IHI・GALEX)
1997	5 月			ロッキード社と技術支援許可締結 (NASDA も参加)
	8 月	SAC が J-I 改良型の研究着手承認		
	9 月		J-I 型の改良検討を実施	NASDA 受託契約として J-I 改良検討実施
1998	6 月		J-I 改良型業者選定 (1 段 : アトラスⅢ、2 段 LNG 推進系)	J-I 改良型業者に選定される (IHI がシステム設計、打上げ 2001 予定)
1999	—		燃焼試験開始	
	8 月	SAC が先端技術実証ロケット (J-I ~ 名称変更) の研究着手承認 (打上げ 2002 目標)		
	12 月	H-II A8 号機失敗を受け、H-II A 開発を着実に遂行するため先端技術実証ロケットの開発先送り		
2000	—	STA からの提案で、STA、MITI、NASDA、民間の 4 社協力プロジェクト (民主導) として検討進めることに		
2001	1 月	省庁再編で SAC は総理府→文科省		
	3 月			GALEX 設立 (契約相手を IHI から変更し、LNG 推進系の研究継続)
2002	3 月			1 段エンジンを変更 (NK-33→RD-180)
	5 月	SAC での評価の結果、LNG 推進系飛行実証プロジェクトに対して研究を継続することが妥当と評価		
	10 月			ロッキード社との開発契約を正式締結
	11 月		実機大タンク試作試験で剥離不具合	
	12 月	SAC での再評価の結果、開発段階に進むことが妥当と判断		
2003	4 月		LNG 推進系飛行実証プロジェクト着手	
	7 月	2005 年打上げ目標 (SAC)		
	9 月		複合材タンク試作試験で剥離不具合	
	10 月		JAXA 発足	
2004	1 月		複合材気蓄器試作試験で剥離不具合	
	3 月	2006 年打上げ目標		GX1 段の実機調達着手

	4月		複合材タンク試作試験で剥離再不具合	
2005	3月	GXを戦略重点化学技術として位置づけ（総合科学技術会議）		
	7月		実機大エンジン試験で技術課題発生	
2006	8月		SAC 中間評価に、開発費用の増加、打上げ 2011 年を報告	
2007	4月			1段をアトラスⅢからⅤに変更可能性 JAXAの役割拡大要請
2008	1月		SAC 定例会で民間より JAXA の役割拡大要請があることを報告	

注) SAC : 宇宙開発委員会、STA : 科学技術庁、GALEX : ギャラクシーエクスプレス、GX : GX ロケット。出所) GX 評価小委員会 (2008 年 5 月 29 日開催) 資料 7-2「GX ロケット評価小委員会審議経過報告」、p.25-26 より作成。

参考文献

- BP (2006) Statistical Review of World Energy 2006.
- BP (2008) Statistical Review of World Energy 2008.
- LNG 推進系飛行実証プロジェクト評価小委員会 (2006) 「LNG 推進系プロジェクトに対する提言」 LNG 小委員会要資料 1-2-6 (2006年9月26日),
<http://www.mext.go.jp/b-menu/shingi/uchuu/haifu/h18/lng/06100308/003.pdf>.
- 大澤弘之監修 (2003) 『新版日本ロケット物語』、誠文堂新光社。
- 宇宙開発事業団 (2002) 「LNG 推進系の開発」宇宙開発委員会 2002年5月8日、NASDA
プレスリリース。
- 宇宙航空研究開発機構 LNG プロジェクト (2008) 「LNG 推進系研究開発の取組状況について(その2)」推進部会 GX ロケット評価小委員会 2008年4月7日開催、資料4-2。
- 河本薫、津崎賢治 (2008) 「金融工学を用いた LNG 価格フォーミュラの市場価値評価」、
Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol.29, No2。
- ギャラクシーエクスプレス社 (2007) 「GX ロケット概要」、
<http://www.galaxy-express.co.jp/aboutGXrocket-final.pdf>、ギャラクシーエクスプレス社 HP 掲載。
- 齋藤成文 (1992) 『日本宇宙開発物語』、三田出版会。
- ジャン・マリー・シュヴァリエ著、増田達夫監訳、林昌宏翻訳 (2007) 『世界エネルギー市場—石油・天然ガス・電気・原子力・新エネルギー・地球環境をめぐる 21 世紀の経済戦争』、作品社。
- シンビオ社会研究会 (2001) 『京都からの提言 明日のエネルギーと環境 その続編』、日本工業新聞社。
- 立花健治 (2008) 「GX ロケット、開発中止へ—国産中型とケットは必要なのか」Ohmy News、
2008年6月5日付。
- 立田潤一郎 (2007) 「LNG 価格と原油価格の決まり方、見通しについて」、*Best Value* Vol.16、
2007.10。
- 棚次亘弘 (2006) 「LNG 推進系プロジェクトに対する提言」、LNG 推進系飛行実証プロジェクト評価小委員会、2006年9月26日開催、資料1-2-6。
- 東京ガス株式会社根岸工場 (2008) 「クリーンエネルギー・LNG 時代を支える東京ガス根岸工場」、配布冊子。
- 通産資料調査会 (2007) 『資源・エネルギー年鑑 2007-2008』、通産資料出版会。
- 通商産業省公益事業局編 (2007) 『電源開発の概要』、奥村印刷。
- 通商産業調査会 (2002) 『エネルギー・生産需給統計年報 2002』、経済産業調査会。
- テックスレポート (2007) ガス年鑑 2007 年度版、株式会社テックスレポート。
- 中村佳朗監修、鈴木弘一著 (2004) 『ロケットエンジン』森北出版株式会社。
- 日本エネルギー学会天然ガス部会編 (2008) 『天然ガスのすべて—その資源開発から利用技

- 術まで一』、コロナ社。
- 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編（2008）『エネルギー・経済統計要覧 2008』、財団法人省エネルギーセンター。
- 日本ガス協会（各年版）「ガス事業便覧」。
- 日本ガス協会（2008）「都市ガスデータ集」、日本ガス協会 HP 掲載。
- 前田高行（2006）「BP 統計に見るエネルギー資源の埋蔵量・生産量・消費量（その 2：天然ガス篇）」、[ronso2006maedabpgas.pdf](#)。
- 松浦晋也（2008a）「GX ロケット、計画見直しへ（1）～十分な基礎研究を行わず、いきなり本番のロケットエンジン開発へ」 [nikkei BPnet](#)、2008 年 1 月 28 日付。
- 松浦晋也（2008b）「GX ロケット、計画見直しへ（2）～技術の問題に政治と組織の問題を持ち込む予算を取るためにシステム設計が先鋭化」 [nikkei BPnet](#)、2008 年 1 月 30 日付。
- 松浦晋也（2008c）「GX ロケット、計画見直しへ（3）～開発段階で相次ぐトラブル計画は延期に次ぐ延期、性能は低下、コストは高騰」 [nikkei BPnet](#)、2008 年 2 月 1 日付。
- 松浦晋也（2008d）「GX ロケット、計画見直しへ（4）～こじれにこじれたプロジェクトをどう収束させるか、ロケットは中止し、基礎研究にシフトを」 [nikkei BPnet](#)、2008 年 2 月 5 日付。
- 三菱商事株式会社（2006）「天然ガス／LNG 市場の現状」
総合資源エネルギー調査会（石油分科会石油政策小委員会）参考資料 8、
[www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g60926d16j.pdf](#)。
- 森島宏（2003）『天然ガス新世紀－持続可能なエネルギーシステムに導く究極の化石燃料』、株式会社ガスエネルギー新聞。
- 吉武惇二（2006）「天然ガス市場の国際動向と日本の都市ガス事業の展開に関する分析研究」、京都大学大学院エネルギー・科学研究科博士学位論文。
- 吉武惇二（2007）「LNG 価格のこれまでの経緯と将来の展望（パート I）」、
[www.rim-intelligence.co.jp/contents/lng/lngsouron2007zenhan-071220.pdf](#)、リム情報開発株式会社。
- 吉武惇二（2008）「活況を呈する西豪州 LNG プロジェクトは万全か？」、RIM INTELLIGENCE LNG、2008 年 3 月 5 日付、リム情報開発株式会社。

□ 英文タイトル

Environmental load of LNG rocket Vol.1:

What is LNG? and the strong point of LNG fueled rocket.

□ 英文概要

We focus on the LNG fueled rocket, which has the possibility to establish the environmentally friendly space system in the near future. Main purpose in our analysis is to assess CO₂ emission of LNG fueled rocket and considerate the reduction of CO₂. So in this paper, as a first volume, we analysis the features of LNG as the fuel of rocket and reduce CO₂ emission.