

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料特集に寄せて

### For the Special Feature of Fuel Supporting Jet Engines and Gas Turbines



松崎 裕之\*1

MATSUZAKI Hiroyuki

今やジェットエンジン・ガスタービンは我々の日常生活に欠かすことのできない重要な技術となっている。

我々が安全で快適、かつ高速の旅を楽しめるのも、また、世界中の新鮮な食料品や飲料などを手軽に入手したり、インターネット経由で世界中から商品を安価にかつ短時間で購入したりできるのもジェットエンジンのおかげである。

また、資源とりわけ化石燃料の大部分を海外からの輸入に頼らざるを得ない我が国において、安定的にかつ比較的安価な電力を得ることができるのは、ガスタービンを主要機器とするコンバインドプラントによる高効率発電の寄与するところが大きい。

加えて、太陽光発電や風力発電など、不安定な再生可能エネルギーが大量に導入されている現在の電力需給構造においては、再生可能エネルギーの発電量変動に応じた急激な出力変化や一日に数回の発停など極めて厳しい運用に耐えられる大容量発電設備はガスタービンコンバインドサイクル発電方式以外に無く、一般には知られないところで大活躍しているのが実情である。

こうしたジェットエンジンやガスタービンに活躍の場を与えているのが燃料である。本特集ではジェットエンジンやガスタービンの活躍に欠かせない燃料にスポットを当てることとした。

ジェットエンジン用の燃料としては高高度における低温環境においても安定的にエンジンを機能させるだけの特性に加え、最近では低燃費運用や環境保護性能も重要視されるようになってきている。こうした新しい要求性能を満足する技術開発動向についてご執筆頂いた。

一方、発電用の燃料情勢を見てみると、2011年に発生した東日本大震災の後、2013年9月断面で国内の原子力発電所は関西電力大飯発電所3、4号機を除いて全台運転を停止することとなり、電力需要の大部分を火力発電所が担うこととなった。

このため、火力発電所焚き増しによる燃料費の増加分は2014年度で約3.7兆円、発電用途以外も含めた化石

燃料全体の輸入額は約10兆円増加したと言われている。(平成25年度分貿易統計より)

日本のエネルギー自給率はOECD34ヶ国中2番目に低い水準でわずか6.0% (2012年断面、原子力含め) しかない状況であるが、東日本大震災以降、国による再生可能エネルギーの固定買い取り制度の導入により、既述の通り太陽光発電や風力発電の導入は大幅に進んだが、いずれも安定電源とは言えず、原子力発電の代替電源には程遠い状況であるだけではなく、むしろ安定した火力電源の高効率運用まで脅かしかねない電力需給状況が展開されている。

こうした中、前述の通りガスタービンコンバインドサイクル発電方式の重要度はますます高まっているが、これを高効率でしかも高い環境保護性能を支えているのは天然ガスである。

国内の天然ガスは新潟県などでわずかに産出されるが、その大部分を海外からの液化天然ガス (Liquefied Natural Gas: LNG) に頼らざるを得ないのが現状であり、世界的にも有数のLNG輸入国となっている。

LNG製造には石油随伴ガスなどを $-160^{\circ}\text{C}$ 以下に冷却して液化する深冷法が用いられており、この過程で天然ガス中に含まれる硫黄分などの不純物が除去されることからクリーンエネルギーとして利用が拡大している。

また、産ガス国から日本までの輸送を低コスト化する上でも液化は欠かせない技術となる。液化することによりその容積は約600分の1となりLNG船での輸送が容易になる。

大陸のようにパイプラインによる天然ガスの輸送がままならない日本ではこうした液化、LNG船、そして貯蔵タンクなどが非常に重要な技術となってくる。

本特集では、当学会ではあまりなじみのないLNG船やLNGタンクに関する技術についても国内の当該分野での専門の方に解説をお願いした。

さらに、東日本大震災の際に活躍した国内におけるガスパイプラインについてもご紹介をお願いした。

国内で消費される一次エネルギーの大部分を輸入に頼らざるを得ない我が国のジェットエンジン、ガスタービン技術者にとってこうした燃料の最新情勢を知ることが非常に意義深いものと考えられる。

原稿受付 2017年8月17日

\*1 東北発電工業㈱

〒980-0804 仙台市青葉区大町2-15-29

E-mail: th2017820@tohatu.co.jp

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## 世界の燃料情勢

### Present Situation and Future Trend of World Energy and Fuels



金子 祥三\*1  
KANEKO Shozo

キーワード：天然ガス，シェールガス，LNG，長期固定契約，仕向地条項，船舶用燃料

Key Words：Natural gas, Shale gas, LNG, Long-term fixed price, Destination clause, Marine fuels

#### 1. はじめに

今後の世界の燃料情勢を考えるに当たって、まず世界のエネルギー消費量の今後の推移を予測する。また時間軸としては四半世紀：25年を一つの目安とし、基準を2014年とし、2040年の将来を予測する。

##### (1)世界の一次エネルギー消費予測

日本エネルギー経済研究所の予測（アジア/世界エネルギー・アウトック2016）によると、2040年の世界のエネルギー消費量は189億トン（石油換算）と2014年の137億トンの1.4倍と推測されている。また中国、インド、ASEAN諸国からなるアジアについては55億トンから86億トンに約1.6倍の増加となり、世界のエネルギー消費量の増加分の6割を占めると予想される。

ところでエネルギー消費量のうち、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料の比率はどのようなのであろうか。

まず世界の一次エネルギー消費では化石燃料比率は表1に示すように、2014年の81%から2040年の78%と3%ポイントの減少となっている。そのうち天然ガスのみが4%ポイントの増加で、あと石炭、石油ともに減少している。

次にアジアの一次エネルギー消費は表2に示すように、化石燃料の比率は2014年の83%から2040年の80%と、世界の傾向と同じく3%ポイントの減少となっている。内訳は天然ガスが5%の増加で、石炭が減少し、石油は1%の微増となっている。これはアジアではまだまだ自動車の増加が予想されていることの現れと考えられる。

##### (2)発電電力量構成予測

表3に世界の発電電力量構成の推移予測を示す。まず化石燃料の比率は2014年の67%から2040年の64%に3%ポイントの減少となっている。内訳は天然ガスが6%の増加、石炭が7%の減少、石油は2%の減少となってい

Table 1 World primary energy consumption

種別		割合 (%)	
		2014年	2040年
化石燃料	天然ガス	21	25
	石炭	29	24
	石油	31	29
	小計	81	78
非化石燃料	原子力	5	6
	水力	2	2
	バイオマス・ 廃棄物	10	11
	太陽光・風力 などの再生可能 エネルギー	2	3
	小計	19	22
合計		100	100

Table 2 Asian primary energy consumption

種別		割合 (%)	
		2014年	2040年
化石燃料	天然ガス	10	15
	石炭	50	41
	石油	23	24
	小計	83	80
非化石燃料	原子力	2	6
	水力	2	2
	バイオマス・ 廃棄物	11	8
	太陽光・風力 などの再生可能 エネルギー	2	4
	小計	17	20
合計		100	100

原稿受付 2017年7月31日

\*1 東京大学生産技術研究所・研究顧問  
エネルギー工学連携研究センター  
〒153-8505 目黒区駒場4-6-1

Table 3 World power generation

種別		割合 (%)	
		2014年	2040年
化石燃料	天然ガス	22	28
	石炭	41	34
	石油	4	2
	小計	67	64
非化石燃料	原子力	11	11
	水力	16	13
	バイオマス・ 廃棄物	2	3
	太陽光・風力 などの再生可 能エネルギー	4	9
	小計	33	36
合計		100	100

る。全体として天然ガス火力発電の比率が増大するが、石炭/天然ガスの比率は $34/28=1.21$ と石炭火力は天然ガス火力の約1.2倍である。

一方アジアにおける発電電力量構成の推移を表4に示す。化石燃料の比率は78%から70%と8%ポイントの低下となっている。内訳は天然ガスが7%の増加、石炭が11%の減少、石油が2%の減少である。一見、石炭の落ち込みが非常に大きいようにみえるが、これはもともと石炭火力の比率が62%と高かったため、石炭/天然ガスの比率は $51/28=1.82$ と依然として石炭火力は天然ガス火力の2倍近い比率となっている。実際、石炭火力の増加分は3,963TWhと天然ガス増加分2,189TWhの1.8倍である。

Table 4 Asian power generation

種別		割合 (%)	
		2014年	2040年
化石燃料	天然ガス	13	18
	石炭	62	51
	石油	3	1
	小計	78	70
非化石燃料	原子力	4	9
	水力	15	12
	バイオマス・ 廃棄物	1	2
	太陽光・風力 などの再生可 能エネルギー	2	7
	小計	22	30
合計		100	100

## 2. 各燃料の資源量と消費量

化石燃料として天然ガス、石油、石炭を考える。

### (1)天然ガス

2015年のパリ協定の成立により、地球温暖化防止のためのCO<sub>2</sub>排出量の抑制は大きな世界的な目標となった。このために火力発電など化石燃料の使用に当たっては、より高効率のプラントが求められ、また相対的にCO<sub>2</sub>排出量の少ない天然ガスは他の燃料に対して有利な状況にある。合わせて近年、在来型の天然ガスに比べ、掘削が容易で安価な非在来型のシェールガスが米国を中心に増加しつつある。

また天然ガスの供給も従来のパイプライン供給に対し、LNG供給が大きく増加し約3割に達している。LNGは海上輸送を容易にし、世界中の流通網を大きく拡充して行くことから、今後LNGの生産はますます増加するものと考えられる。

また生産地も従来のロシア、北海、カタルなどの中東に加え、豪州の大型LNGプロジェクトや米国のシェールガス由来のLNGの輸出が大きく増加することから、供給量は十分であり、従って価格も高騰することなく増大する需要を満たすことが出来ると考えられる。

### (2)石油

石油は発電用としての使用は世界、アジア共に減少の一途であり、また輸送用も燃費の向上、電気自動車の増加などにより大きく需要増となる要因は見あたらない。ただしインドなどアジアの一部では急速なモータリゼーションの増加により部分的には増加する地域もある。欧州では北海油田の枯渇が顕著であり（2016年にはピーク時（1999年）の35%以下）、2040年には電気自動車への移行を宣言する国もある。また東欧も石油の輸入の大半をロシアに頼っていることから、電気自動車の研究には真剣である。

石油の最大の生産地域である中東には、国際情勢の変化による減産のリスクはないとはいえないが、米国のシェールオイルによる増産、メキシコ湾の産出などを考えると基本的には供給不安の可能性は少ない。

### (3)石炭

石炭は炭素含有量が多いことから、地球温暖化対策上は不利であるが、その供給安定性と安価な価格から安い電力料金実現の重要な手段であり、成長著しいASEAN諸国では根強い需要がある。またCO<sub>2</sub>発生量がより少ない高効率のプラントである石炭ガス化複合発電IGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle）も増加して行くと考えられる。このIGCCの主機はガスタービンであり、精製された低カロリーガスである石炭ガスが主燃料となる。

従来の微粉炭焼き石炭火力にはほとんど標準的な亜瀝青炭が使用されてきたが、石炭ガス化にはより揮発分の多い亜瀝青炭が有利であり、今後、亜瀝青炭や褐炭など従来あまり利用が進んでいなかった低品位炭の利用が増大

すると考えられる。

但しこれらの低品位炭使用火力は効率が一般的に低く、CO<sub>2</sub>排出量が多いため、IGCCのような高効率プラントの採用が望まれる。

以上、天然ガス、石油、石炭ともに供給が需要に追いつかず、供給不安や価格高騰を招く可能性は高くないと考えられる。いろいろな機関の2040年までの可採埋蔵量の予測も、消費による減少と新規発見による増加がバランスしており、大きな変化はないとされている。

しかし国際情勢は予想もしなかった事態が起こることはあり得るので、リスクヘッジのためにも、各燃料を偏重することなくバランス良く使用するエネルギーミックスの姿勢を堅持することが、資源自給率の低い日本においては重要である。

### 3. 国際的な燃料調達状況と今後の動向

国際的な天然ガスの輸出、輸入をまず調べてみる。

(1)2016年の天然ガスの輸出国のランキングを表5に示す。第1位はロシアで18.8%で世界の天然ガス輸出の約2割を占め、第2位がカタールで11.4%、以下ノルウェー、カナダ、米国の順で、この上位5ヶ国で世界の天然ガス輸出量の54.4%を占めている。これに第6位の豪州、以下オランダ、アルジェリアの3ヶ国を加えると69.2%となり、世界の7割をこれらの国々が輸出していることになる。世界の輸出量の総計は1兆841億立方メートル(メタン換算で約8億8千万トン)である。

(2)一方、天然ガスの輸入国のランキングを表6に示す。第1位が日本で10.0%、第2位はドイツで9.1%、以下米国、中国、イタリアの順で、この上位5ヶ国で世界の天然ガス輸入量の39.5%を占めている。次に第6位の英国、さらにトルコ、韓国を加えた計8ヶ国の比率は51.7%となり、これらの国々で世界の天然ガスの50%を輸入していることになる。

Table 5 Natural gas export by countries (2016)

国名	比率 (%)
ロシア	18.8
カタール	11.4
ノルウェー	10.7
カナダ	7.6
米国	5.9
豪州	5.2
オランダ	4.8
アルジェリア	4.0
インドネシア	2.7
その他	28.1
合計	100.0
	(1億841m <sup>3</sup> )

Table 6 Natural gas import by countries (2016)

国名	比率 (%)
日本	10.0
ドイツ	9.1
米国	7.8
中国	6.6
イタリア	6.0
英国	4.1
トルコ	4.1
韓国	4.0
フランス	3.8
スペイン	2.6
その他	41.9
合計	100.0
	(1億841m <sup>3</sup> )

(3)天然ガスの輸出・輸入は大陸諸国や北海沿岸諸国を除いては海上LNG輸送となる。そこでLNGの貿易量を調べてみる。表7に示すように、2016年のLNG輸出量第1位はカタールで30.2%、第2位が豪州で17.0%、以下マレーシア、インドネシア、ナイジェリアの順で、この上位5ヶ国で世界の全LNG輸出量の71.0%を占めている。2016年の全世界LNG輸出量は2億6362万トンである。LNG輸出量/天然ガス輸出量の比率は約30%となり、残り70%がパイプラインでのガス輸出となる。

なお2016年の日本のLNG輸入量は8413万トンで、世界全体のLNG輸出量の31.9%を占めている。

(4)日本の天然ガス輸入はすべてLNGとしての輸入となるが、この輸入元を表8に示す。第1位は豪州で27.9%、第2位マレーシアで18.5%、第3位カタール14.1%、以下ロシア、インドネシアの順で、この上位5ヶ国で日本のLNG輸入量の77.5%を占めている。日本は世界に先駆けてLNG大量輸入の道を切り開いて来たわけであるが、LNGプロジェクトは大規模な設備投資を必要としており、産出国と連携しての巨大プロジェクトを起こす必要

Table 7 LNG export by countries (2016)

国名	輸出量 (万トン)	うち日本向け 輸出量(万トン)	日本向けの比率 (%)
カタール	7,962	1,190	14.9
豪州	4,488	2,350	52.3
マレーシア	2,508	1,554	61.9
インドネシア	1,995	665	33.3
ナイジェリア	1,778	180	10.1
アルジェリア	1,144	24	2.1
ロシア	1,070	770	71.9
トリニダード・トバゴ	1,046	5	0.4
オマーン	812	252	31.0
その他	3,559	1,423	40.0
合計	26,362	8,413	31.9

Table 8 LNG Import of Japan from various countries (2016)

国名	輸入量 (万トン)	比率(%)
豪州	2,350	27.9
マレーシア	1,554	18.5
カタール	1,190	14.1
ロシア	770	9.1
インドネシア	665	7.9
UAE	486	5.8
パプア・ニューギニア	411	4.9
ブルネイ	404	4.8
オマーン	252	3.0
ナイジェリア	180	2.1
その他	151	1.8
合計	8,413	100.0

があった。このため仕向地は当然日本であり、どうしても産出国やプレーヤーが限られる傾向がある。

(5)この日本のLNG輸入総量8413万トンである。なお2016年の米国のLNG輸出実績は264万トンに過ぎず、うち日本向けはわずか47万トンである。しかし今後米国シェールガス生産の増加、および相次ぐLNG輸出基地の増建設により今後大幅に増加すると考えられる。

(6)この2016年出荷の米国産のLNGは仕向地条項が無いため、今後LNG市場の流動性増加に寄与するものと考えられる。

(7)今後、4つの米国シェールガスLNGプロジェクトから、日本は年間1700万トンの輸入を計画している。これは現在の輸入量の20%に相当する。

(8)2017年5月の貿易統計によるとLNG価格は49,615円/トンとなっている。

これを熱量13,000kcal/kg、1ドル=110円で換算すると、7.3\$/MMBTUとなる。(同月のスポット価格は5.7\$/MMBTU)。2011年の東日本大震災後の輸入価格16~17\$/MMBTUにくらべると半値以下となっている。

[注 MMBTU：熱量単位で百万British Thermal Unit]

#### 4. 燃料輸送に関わる特徴と問題点

今後の天然ガスの消費増大が予想されるアジアと産出量の大幅な増加が予想される米国、オーストラリアなどを考えると、今後の天然ガスの輸送の主体はLNGと考えられる。そこで今後のLNGによる輸送の特徴と課題また今後の動きなどについて考えてみる。

(1)世界の天然ガス輸出の約3割がLNGの形であり、今後アジアなどの天然ガス消費が増大するにつれてこの比率は大きくなって行くと考えられる。

(2)LNG輸出のうち日本向けの割合は31%（全世界の天然ガス輸出における日本の比率は10%）で世界のトップであり、この大量購入の優位性を生かして安く、かつ安定した購入を実現すべきである。

(3)従来LNGのサプライチェーンの構築（LNG液化基地-LNG船-LNG受け入れ基地）は膨大な設備投資を必要とするところから、プロジェクト実現のためには長期固定価格契約や引き取り義務を負うことも多かった。しかし、米国の相次ぐシェールガスLNG基地の建設や、豪州の大型プロジェクトの増加など大量の供給源が出現し、また消費も東南アジア地区にも拡がって市場の流動性も増したため、長期固定契約から短期契約・スポット契約へ進む傾向があり、仕向け先指定などの拘束条件が除外され、より流通性が高まると予想される。また日本国内においても、大容量発電などの超大型消費者向けのみならず、小口のLNG消費も増加し、利用の多様化が進むと考えられる。

(4)船舶用燃料、とくに海洋輸送においてはC重油が主燃料であったが、国際海事機関（IMO）が2020年に硫黄分規制を強化することから、一気に燃料をLNGに変換する動きも出ている。また欧州の主要港湾でも排ガス規制、CO<sub>2</sub>規制から天然ガスの使用を奨励する動きがあり、多数の船舶に供給するバンカリング設備の建設も進んでいる。今後このような動きは日本でも増加して行くと考えられる。その場合、湾内に停泊中の諸船にLNGを供給する運搬船が必要となり、これもLNGの小口利用の増加に寄与すると考えられる。

(5)LNG船は従来の①球形タンク使用のもの（モス方式）②メンブレン形などの大型外航船が使用されて来たが、2016年6月のパナマ運河の拡張で、長さ366m、幅49m、吃水15.2mまで可能となった。また今後LNGの流通性改善に伴い、小口2次輸送のための受け入れタンクと配送を兼ねた船も増えて来ると考えられる。

(6)LNGの備蓄

LNGは-162℃で保管するため、長期保存すると蒸発し（ボイル・オフガス）、再使用のためには昇圧が必要となるので極力短期間の保存としていた。そのため日本国内でLNGをタンクに受け入れても、最短で消費するので実質的な備蓄の概念はなかった。（日本国内のLNG受け入れタンク内のLNG滞留時間は1ヶ月以内である）。しかしLNGの使用量が増大し、小口を含めた用途が拡大する状況では、やはり万一の供給阻害による混乱を考えて、備蓄の概念も必要となるのではないかと考えられる。

#### 5. 新しい燃料の動向

地球温暖化防止のために化石燃料の使用に当たっては、より高効率のものが求められている。一方、再生可能エネルギーの利用拡大のためにバイオマスや廃棄物、再生可能エネルギー由来の水素燃料などが議論されている。

(1)バイオマス

現在、木質系バイオマスの利用が期待されている。（日本のエネルギーミックスでは2014年0.4%を2030年には10倍の4%に増加する計画である）。但し、バイオマ

スは基本的に固体であるから、木質ペレットを石炭火力に混焼する計画が大半である。木質ペレット価格は熱量あたり石炭の2～3倍であるから、利用にはFITなどの補助金を前提にしたものが大半である。

木質バイオマスをガス化してガスタービン燃料とすることも技術的には可能であるが、燃料費はさらに高価になり、また大量の安定供給ができるかも課題となる。

#### (2)廃棄物利用

建築廃材などの廃棄物、下水汚泥、動物の尿尿なども燃料として利用は可能であるが、これらは大量供給や価格に難点があり、やはり廃棄物処理という本来の目的を主として、電気や熱の製造はあくまでも副次的なメリットとして考えるべきである。

#### (3)再生可能エネルギーの副生物

現在日本でも大量の太陽光発電が実現している(2030年のエネルギーミックス目標値は6400万kW)。例えば九州のような孤立した電力系統においては比較的負荷の軽い時期(例えば5月の連休時など)、太陽光発電だけで系統電力のほとんどをまかなえる位の影響が既に出ている。太陽光や風力などの不安定電源が増えると、日常の需要と供給のアンバランスも大きくなり、負荷調整用の火力や揚水などで何とか周波数や電圧の安定を保っている状況である。将来さらに再生可能エネルギーが増加することを懸念し、余剰電力を何らかの形で貯蔵することが考えられている。その場合、一番容易なのは電気分解であり、水素を製造することが考えられる(コストは除外している)。水素は必ずしも利用し易い燃料ではないので、天然ガスへの混合、あるいはメタノールやDMEなどへの変換が考えられる。もちろんこれらはガスタービン燃料として利用可能である。

#### (4)メタンハイドレート

国産資源として日本近海のメタンハイドレートが注目されている。探査や一部の地域で試掘が行われ、2030年代の実用化を目指しているが、まだまだ研究の段階であり、工業的実用化の見通しは立っていない。採掘には膨大なエネルギーが必要であるが、深海にどのようにしてエネルギーを供給するか全く検討がなされていない。

## 6. まとめ

以上、本稿の要旨を纏めると次のようになる。

- (1)化石燃料の資源量は天然ガス、石油、石炭とも2040年までは十分な資源量が確保される見通しで、資源の枯渇が深刻な問題となる可能性は少ない。また新規追加量と消費量がバランスするため、可採年数も大きな変化はないと考えられる。
- (2)今後のエネルギー消費の大きな伸びはアジアであり、また天然ガスについては米国が一大輸出基地となると考えられ、世界の貿易量は大きく伸びると考えられる。
- (3)天然ガスは先進国を中心に今後需要の伸びが期待されるが、シェールガスなどの新たな供給源が増加するため

供給が逼迫する可能性は少ない。むしろここ5年は供給過剰気味となる可能性が高い。また長期固定契約から短期契約・スポット契約へ進む傾向があり、仕向け先指定などの拘束条件が除外され、より流通性が高まると予想される。また大容量発電などの超大型消費者向けのみならず、小口のLNG消費も増加し、利用の多様化が進むと考えられる。

(4)原油は発電用としての消費は確実に減少して行くと考えられる。また輸送用燃料としての使用も、高効率エンジンにより着実に減少し、また電気自動車が増加すると追い打ちをかけることになると考えられる。

(5)石炭は世界全体で見るとCO<sub>2</sub>排出抑制の観点から減少すると考えられるが、大きなエネルギー消費の伸びが予想される東南アジアでは、依然として発電の主体であり、石炭火力の比率はむしろ増加する見通しである。また高効率化の要求はますます強くなり、石炭火力といえどもコンバインド・サイクル化は避けられず、石炭ガス化複合発電IGCCは確実に増加すると予想される。従って石炭ガスを使用するガスタービンの利用はますます増加すると考えられる。

(6)地球温暖化防止の観点からカーボン・ニュートラルであるバイオマスの利用は増大すると考えられる。ただし固体であるバイオマスの利用は石炭火力での混焼利用などに大きな技術的合理性があり、ガスタービンやガスエンジンで使用するためには一旦ガス化する必要がある。また供給量の確保も限界があるため、化石燃料の代替はなかなか難しいと考えられる。

(7)メタンハイドレートなどの海底の新資源はまだ探査や研究の段階であり、商業生産のためには、採掘のための大量のエネルギーをどうして深海底に供給するのか、という大きな壁が存在する。

(8)化石燃料の96%を輸入している日本においては、低廉な化石燃料の確保が国の存続や国民の生存に直結する重要課題となる。そのためには天然ガス、石油、石炭をバランス良く使用し、また産出国も一ヶ国に集中すること無く、つねにソースの分散をはかってリスクを最小化すると共に、価格交渉力を維持することが重要である。

## 謝辞

本稿の作成に当たっては(一財)日本エネルギー経済研究所研究主幹 森川哲男氏ならびに電気事業連合会の皆様にご助言を戴いた。深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- (1) アジア/世界エネルギーアウトルック2016, 2016年10月, (一財)日本エネルギー経済研究所
- (2) 財務省貿易統計
- (3) BP統計

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## ジェット燃料の製造

### Production of Jet Fuel



渡邊 学\*1

WATANABE Manabu

キーワード：ジェットエンジン，ジェット燃料，石油精製，添加剤

Key Words：Jet Engine, Jet fuel, aviation turbine fuel, Petroleum refining, Additives

#### 1. 緒言

ジェットエンジンは1930年に発電用ガスタービンとして発明されたが、1939年にドイツで航空用ジェットエンジンが作られ、さらに1941年以降イギリスで進歩発展してきた。高速で高空を飛ぶことから、使用する燃料にも過酷な条件が要求される。

そのため航空タービン燃料油は、製品規格の管理項目が多く、遊離水分や微粒きょう雑物の除去が規定されているなど、他の燃料油にない特徴がある。

本稿では航空タービン燃料油の変遷と種類、要求品質および製造方法について解説する。

#### 2. ジェット燃料の変遷

航空タービン燃料油としては、イギリスでジェットエンジンが実用化された最初の頃、普通の灯油が使用された。これはエンジンの構造上、ガソリンの様に高い揮発性を要求されたり、アンチノック性を考慮したりする必要が無く、高空で低気圧・低温環境下となることから、ベーパーロックを起こし難くかつ凝固しない性質が必要であり、灯油留分をジェット燃料として着目したと思われる。

このほか、石油製品のうちガソリン留分と軽油留分は自動車用燃料として、また重油は産業用としての需要があったが、世界的には灯油留分の利用先が少ないことから、比較的安価に大量に調達が可能であったことも、ジェット燃料として灯油留分が用いられた要因であると思われる。

航空タービン燃料油は、当初、軍主導で開発がすすめられ、米軍規格 (Military Specification) に最初に採用されたものがJP-1であった。

JP-1はとにかく析出点を $-60^{\circ}\text{C}$ 以下という低温に規定したものであったが、沸点範囲が広く着火性に問題のある事がわかった。そこでこれに変わる燃料の研究がすすめられ、JP-2を経て1949年にJP-3が規格化された。

このJP-3は、ガソリン留分から灯油留分までの広範な沸点範囲を持ち、しかも蒸気圧がガソリンと同程度の、いわゆるガソリン型と称されるものである。しかしこのガソリン型は、対原油得率が高く調達性が良いとの利点があるが、ジェット機が急上昇する際や高高度飛行の際にベーパーロックにより燃料閉塞を引き起こす事があった。

そこで引き続き改良がすすめられ、蒸気圧を下げた広範囲沸点型のJP-4となり、現在も使用されている。

一方、艦載機用には、艦船の火災に対する安全性を向上させる観点から、高引火点のいわゆる灯油型と称されるJP-5が使用されている。

その後、ベトナム戦争を契機に航空機の火災に対する安全性を向上させる見地と、戦車と同一燃料で使用目的などから灯油型のJP-8が開発され、米軍やNATO軍などで広く使用されている。

我が国の防衛省関係では、JP-4, JP-4A, JP-5, Jet A-1, Jet A-1+が「防衛省仕様書」<sup>(3)</sup>に設定されており、調達・使用されている。

民間航空関係は、IATA, ASTMなどで品質規格が設定されているが、灯油型が広く採用されている。民間航空機は、世界各地の空港で給油する必要がある事から、これらの運用はIATAで規定した統一規格 (JFSCL; Joint Fuel System Check List) に基づいて行われている。

我が国では、現在「Jet A-1」が使用されている。Jet A-1の規格としては、石油連盟がJFSCLに基づき「共同利用貯油施設向け統一規格 Jet A-1」<sup>(4)</sup>を設定しており、各社はこれによって航空タービン用燃料を供給・使用している。

原稿受付 2017年8月1日

\* 1 JXTGエネルギー(株) 中央技術研究所 技術戦略室  
エネルギー技術グループ  
〒100-8162 千代田区大手町一丁目1番2号  
E-mail: watanabe.manabu.567@jxtg.com

### 3. ジェット燃料油の種類

現在航空タービン燃料油を大別すると、3種類に分類できる。防衛仕様書 DSP K 2206 Fには次のように分類されている。広沸点範囲ガソリン型と高引火点灯油型、低析出点灯油型である。

JIS K 2209では航空タービン燃料油として1号、2号、3号の3種類を規定しており、各々、Jet A-1;灯油型（低析出点）、Jet A; 灯油型、Jet B; 広範囲沸点型と規定している。

各々の分類に含まれる航空タービン燃料油の名称をまとめると以下の表1ようになる。ただし、相互の名称が必ずしも対応するものではない。

Table 1 Classes

分類	DSP K 2206 F	JIS K 2209
広沸点範囲 ガソリン型	JP-4	3号(Jet B)
	JP-4A	
高引火点灯油型	JP-5	2号(Jet A)
低析出点灯油型	Jet A-1	1号(Jet A-1)
	Jet A-1+	

### 4. 主な要求品質

燃料に起因する飛行中のトラブルは墜落等による人命事故に直結する可能性が大きいことから、厳しい品質が要求されているが、一般的な要求をまとめると以下になる。

- ① 燃焼性が良いこと
- ② 発熱量が大きいこと
- ③ 熱安定性が良いこと
- ④ 異物の混入がないこと

#### 4.1 燃焼性

ガソリン留分を含んだ芳香族分の少ない燃料は燃焼性が良く、エンジンの始動性もよくブローアウト(Blowout)と呼ばれる吹き消えの危険性が少ないが、蒸発損失や蒸気閉塞、引火爆発の面では不利となる。

また、ジェットエンジンの燃焼は排ガスが直接タービン翼に触れることから、不完全燃焼による推力低下や未燃焼カーボンによるタービン翼の汚損防止のため、燃焼室内で完全燃焼することが求められる。

#### 4.2 発熱量

航空タービン燃料の場合、発熱量は重要な意味を持つ。一般に比重の大きい燃料は容量当たりの発熱量が高く比重の小さいものは重量当たりの発熱量が高い。航空機の場合、燃料タンクの容量に制限があるかそれとも重量に制限があるかで使用する燃料の選択が決まってくる。

#### 4.3 熱安定性

航空タービン燃料は、航空機の翼の中に燃料を入れ、エンジンへの供給に際してエンジンから出る熱と熱交換をして熱効率を上げるとともにエンジンの冷却をしてい

ることから熱安定性は重要な要求項目の一つとなっている。

#### 4.4 異物混入

燃料中の固形異物の混入や溶解あるいは遊離水の析出による氷結などの防止は、航空機の安全な運航に重要である。これらの異物はジェット機の飛行中に燃料系統のフィルタの目詰まりを起し事故の原因となる。また、高空での運行時には外気温が $-50^{\circ}\text{C}$ 以下になることから、燃料のパラフィンワックスが析出して航空機の燃料系統内での流れに支障をきたさないようにしなければならない。

### 5. 規格の主要項目

以上述べてきた航空タービン燃料油に必要な性状は規格の中に織り込まれている。またこれ以外にも規定すべき性状はいろいろある。航空タービン燃料油の性状を定めた規格は、国内のみを見ても日本工業規格をはじめ、前述の共同利用貯油施設向け統一規格や防衛省仕様書など複数存在するが、規格項目と規格値は必ずしも同一ではない。例として航空タービン燃料油（灯油型）に対する規格項目と規格値を表2に記載する。

JFCLSに規定されているJet A-1の規格に規定されている規格項目と、その中でジェット燃料に特有な試験項目の意義を以下に示す。

#### (1)外観

- ・ 外観
- ・ 色（セーボルト）
- ・ 微粒きょう雑物（重量法）
  - ▶ ジェット燃料の清浄度を知るための項目である
- ・ 微粒きょう雑物（粒度分布）
  - ▶ 粒子と個数を把握するための項目である。サイズの大きな粒子が問題視される。

#### (2)組成

- ・ 酸価
- ・ 芳香族炭化水素分または全芳香族分
  - ▶ 芳香族の少ない燃料は発熱量が高い。また芳香族が多すぎるとエンジン内に炭素が蓄積する。
- ・ 硫黄分
- ・ メルカプタン硫黄分またはドクター試験
  - ▶ 腐食性硫黄分である硫化水素およびメルカプタンの有無を確認する。
- ・ 水素化処理した燃料比率
- ・ 合成燃料比率

#### (3)二次的物質

- ・ 脂肪酸メチルエステル（FAME）

#### (4)揮発性

- ・ 蒸留性状
- ・ 引火点
- ・ 密度（ $15^{\circ}\text{C}$ ）

Table 2 Comparison of aviation turbine fuel specifications (kerosene type)

項目	単位	日本工業規格 JIS K 2209 (1991) 1号 (Jet A-1)	共同利用貯油施設向け 統一規格 JFSCL Issue29 (2017) Jet A-1	防衛省仕様書 DSP K 2206F (2015) JP-5
外観 ・外観	—	—	清澄	清澄透明で、不溶解の水、沈殿物及び浮遊物のないこと
・微粒きょう雑物 (重量法)	mg/L	—	1.0 以下	1.0 以下
・微粒きょう雑物 (粒度分布)	counts	—	報告	—
・ろ過時間	分	—	—	15以下
組成 ・酸価	mg KOH/g	0.1以下	0.015 以下	0.015 以下
・芳香族炭化水素分	容量%	25以下	25.0 以下	25.0 以下
または全芳香族分	容量%	—	26.5 以下	—
・非芳香族オレフィン炭化水素	容量%	—	—	5.0 以下
・硫黄分	容量%	0.3以下	0.30 以下	0.40 以下
・メルカプタン硫黄分	容量%	0.0030 以下	0.0030 以下	0.002 以下
またはドクター試験	—	陰性	陰性	陰性
・非水素化処理燃料	容量%	—	報告	—
・水素化処理燃料	容量%	—	報告	—
・高水素分圧で処理した燃料	容量%	—	報告	—
・合成燃料	容量%	—	報告	—
二次物質 ・脂肪酸メチルエステル (FAME)	mg/kg	—	50以下	—
揮発性 ・蒸留性状				
初留点	℃	—	報告	報告
10%容量留出温度	℃	204 以下	205.0 以下	205 以下
20%容量留出温度	℃	—	—	報告
50%容量留出温度	℃	記録	報告	報告
90%容量留出温度	℃	記録	報告	報告
終点	℃	300 以下	300.0 以下	300 以下
残油量	容量%	1.5 以下	1.5 以下	1.5 以下
減失量	容量%	1.5 以下	1.5 以下	1.5 以下
・引火点	℃	38 以上	40.0 以上	61を超える
タグ	℃	775.3 以上, 839.8 以下	775.0 以上, 840.0 以下	788以上, 845以下
・密度 (15℃)	kg/m <sup>3</sup>			
流動性 ・析出点	℃	−47 以下	−47.0 以下	−46 以下
・動粘度 (−20℃)	mm <sup>2</sup> /s	8 以下	8.000 以下	8.5 以下
燃焼性 ・発熱量	MJ/kg	42.8 以上	42.80 以上	42.6 以上
・煙点	mm	25 以上	25.0 以上	19.0 以上
または煙点と	mm	18 以上	18.0 以上	—
ナフタレン分	容量%	3 以下	3.00 以下	—
・水素含有量	推定質量%	—	—	13.4 以上
腐食性 ・銅版腐食 (100℃, 2hr)	—	1 以下	1 以下	1 以下
安定性 ・熱安定度 (JFTOT)	℃			
試験温度	℃		260 以上	260 以上
フィルタ差圧	kPa	3.3 以下	3.3 以下	3.3 以下
管堆積度	—	3未満	3未満で孔雀模様や異常色相堆積物なし	3未満
コンタミ物 ・实在ガム	mg/100mL	7 以下	7 以下	7.0 以下
・MSEP	—	—	—	—
静電防止剤添加燃料	—	—	70 以上	—
静電防止剤未添加燃料	—	—	85 以上	70 以上
・水溶解度 (界面状態)	—	1b 以下	—	1b 以下
導電率	pS/m	—	50 以上, 600 以下	—
潤滑性 ・ボークル試験器における摩耗痕径	mm	—	0.85 以下	—
過酸化物価	質量ppm	—	—	8.0 以下
添加剤		詳細省略	詳細省略	詳細省略

注:この表は必ずしも規格項目と規格値をすべて網羅しているものではない。規格項目と規格値の詳細および試験方法は対応する各々の規格を参照のこと。

**(5)流動性**

- ・析出点
  - 極低温における流動性評価
- ・動粘度 (-20℃)

**(6)燃焼性**

- ・真発熱量
- ・煙点または煙点とナフタレン分
  - 煙点は芳香族の多寡を評価する指標である。低いと芳香族分が多く、煤が出やすい。
  - ナフタレンは煤や煙を多く発生させる化合物であり、少ないほうが好ましい。

**(7)腐食性**

- ・銅板腐食

**(8)安定性**

- ・熱安定度 (JFTOT)
  - ジェット燃料は使用時にさまざまな熱ストレスにさらされるため、熱に対して安定である事を評価するため、実施する。

**(9)コンタミ物**

- ・実在ガム
  - 試験温度 (230℃) において形成される酸化生成物の量を測定する。高温時に酸化生成物が生成することはトラブルの原因となり好ましくない。
- ・水分離指数 (MSEP)
  - ジェット燃料中の水分は燃料系統の目詰まりの原因となるため極力地上施設で除去されるが、この際に界面活性剤成分が混入していると水の分離が悪化する。また、静電気防止剤が添加されると水分離性が悪化する。

**(10)導電率**

- ・導電率
  - 静電気の帯電しにくさを評価する指標。導電率が高いほうが静電気帯電による危険性が少ない。主として静電気防止剤添加後に適正な導電率が保たれているかチェックする目的で使用される。

**(11)潤滑性**

- ・ボークル試験法による摩耗痕径

**(12)添加剤**

- ・種類と濃度

**6. 製造プロセス**

共同利用貯油施設向け統一規格 (JFSCL) では、認証された半合成及び合成燃料の使用が認められているが、基本的には原油を精製し製造されている。

原油の精製工程の一例を図1に示す。

ジェット燃料油は原油を常圧蒸留装置 (トッパー) で沸点ごとに分留した留分のうち、灯油型の場合は灯油留分を水素化処理した脱硫灯油を、ガソリン型の場合は灯油留分とナフサ留分をそれぞれ水素化処理した脱硫灯油と脱硫重質ナフサを混合することにより製造している。

実際の製品化に際しては、これらの原料に適切な添加剤が添加される。

**6.1 原油の常圧蒸留**

原油はまず常圧蒸留装置で沸点範囲ごとの留分 (ガス、LPG、ナフサ、灯油、軽油、常圧残油) に分けられる。各留分の沸点範囲は、おおむね次のとおりである。

- ・ナフサ留分： 35 ~ 180℃
- ・灯油留分： 170 ~ 250℃
- ・軽油留分： 240 ~ 350℃
- ・常圧残油： 350℃以上

**6.2 水素化精製**

原油中には不純物として硫黄化合物、窒素化合物、酸素化合物が含まれており、これらの成分は腐食の原因となったり製品の品質を低下させたりする原因となる。硫黄化合物は腐食の原因となり、燃焼時には二酸化硫黄などを発生させる。窒素化合物は色相悪化や酸化安定性の低下などの原因となる。酸素化合物は腐食、乳化促進、色相・酸化安定性の劣化、ガム生成促進の原因となる。これら不純物の除去をするために、以前は硫酸洗浄やアルカリ洗浄が用いられてきたが、現在では水素化精製法が用いられている。

水素化精製は、水素気流中、触媒存在下、高温高压の条件下で原料油中の不純物と水素とを反応させて水添反応を起こさせるものである。原料油の性状、使用触媒、反応条件などにより、脱硫、脱窒素、脱酸素、オレフィン及び芳香族の飽和化反応が起こるほか、金属化合物の脱離、炭化水素の分解など多種多様の反応が起こる。

**7. 添加剤**

認証された添加剤を使用することができる。使用できる添加剤の名称と添加濃度は対応する規格により定められている。

ジェット燃料に用いられる添加剤の種類は以下である。

**7.1 酸化防止剤**

ジェット燃料を含む石油製品は貯蔵時などでの酸化劣化によりガム状物質が析出することがある。そこで酸化安定性を向上させる目的で酸化防止剤が添加される。共同利用貯油施設向け統一規格 (JFSCL) ではJet A-1に対して、水素化処理燃料及び合成燃料に対しては「要添加」、非水素化処理燃料に対しては「任意」とされている。

防衛省仕様書 (DSP) ではJP-5及び水素化処理油を含むJP-4 (JP-4A) の場合は要添加、水素化処理油を含まないJP-4 (JP-4A) の場合は添加可、Jet A-1及びJet A-1+の場合は共同利用貯油施設向け統一規格によるとされている。

**7.2 金属不活性剤**

石油製品が酸化劣化する際に、金属イオンが存在すると酸化劣化を促進することが知られている。そこで流通過程などでの銅の混入等が想定される場合には、金属に

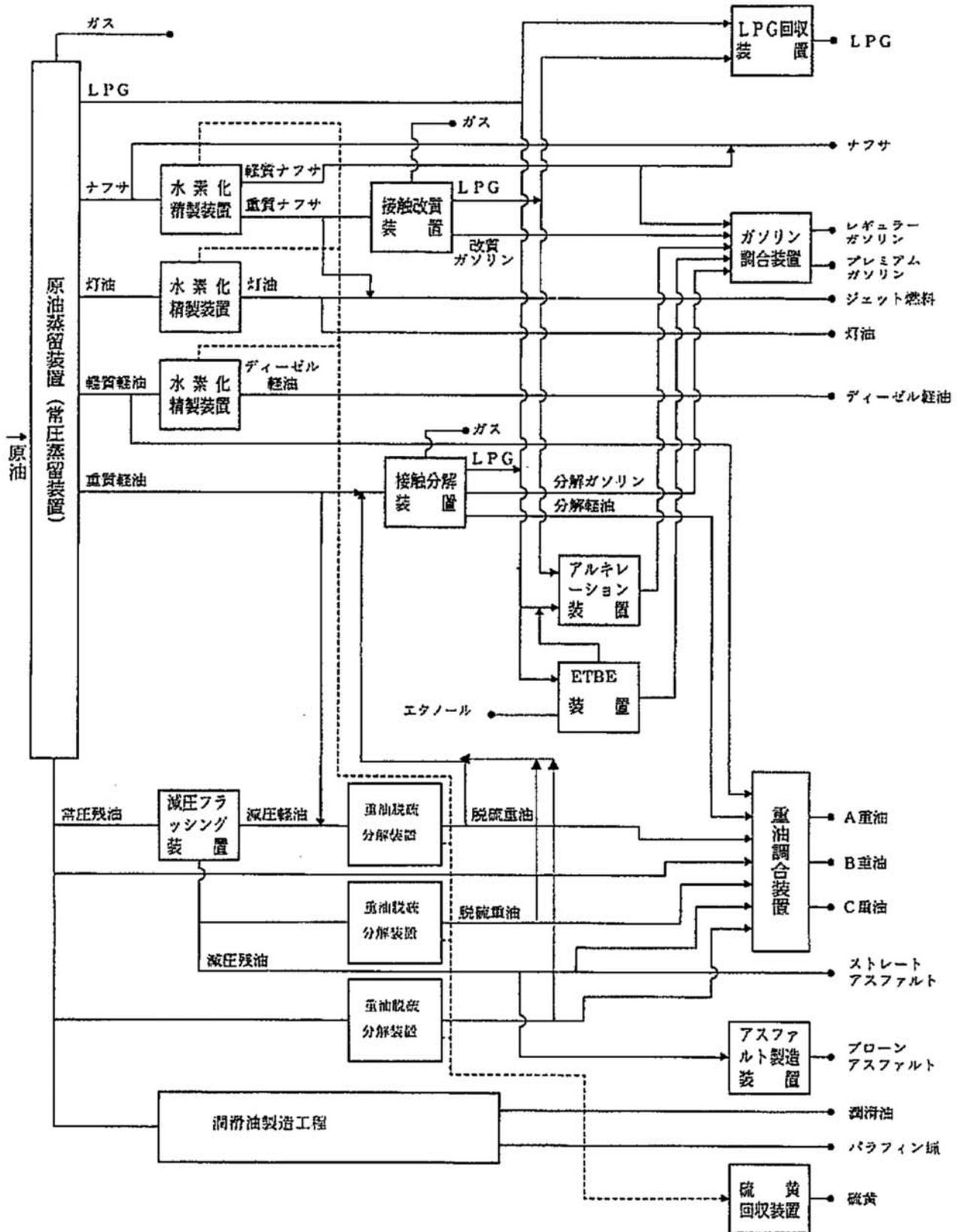


Fig. 1 Example of petroleum refining process

よる酸化安定性の低下を防止するため金属不活性剤が使用される。JFSCLではJet A-1に対して製造時もしくは配送時に許容濃度以下の金属不活性剤の添加が認められている。ただし、製造時に常に使用することは認められていない。

DSPでは、JP-4、JP-4A及びJP-5の場合は規定濃度以下で加えることができるとしている。Jet A-1及びJet A-1+の場合は、共同利用貯油施設向け統一規格によるとされている。

### 7.3 静電気防止剤

ジェット燃料は非常に導電性が低く帯電しやすい。そのため、製造・輸送・貯蔵の各工程や使用時において常に帯電によるスパーク発生、引火の危険性が伴う。そのため液体の導電性を高める静電気防止剤が使用されている。JFSCLではJet A-1に対して静電気防止剤を「要添加」として、規定量以下での添加を規定している。

DSPでは、JP-4、JP-4A及びJP-5に対して導電率の規格値（150～600 pS/m）を満たすように加えなければならぬとしている。Jet A-1及びJet A-1+の場合は、共同利用貯油施設向け統一規格によるとされている。

### 7.4 潤滑性向上剤

ジェットエンジンの燃料システムコンポーネントおよび燃料制御ユニットの運動部分の潤滑は燃料自体に依存している。これらの機器に対する潤滑材としての性能を一般的に「潤滑性」と称している。潤滑性不足により発生する問題としては、燃料ポンプの摩耗による流量不足から、エンジン停止に至るような予期せぬ機械的損傷までさまざまである。

各社が製造するJet A-1の性状の差によっても潤滑性は大きく異なるが、さらに水素化処理の普及によって潤滑性に有効な微量成分をも除去することになり非水素化処理系のJet A-1に比べ、いっそう潤滑性を低下させることになっている。

そこでJFSCLではJet A-1のうち、以下の条件を満たす燃料に対して潤滑性の規格値を設定しており、規格を満たすために潤滑性向上剤を加えることができると規定されている。

- ①高度に水素化処理された燃料を20%以上含み、非水素化処理燃料が5%未満の燃料
- ②合成燃料を含む燃料

なお、ここで「高度に水素化処理された燃料」とは製造時に7000kPaより高い水素分圧で処理された石油系炭化水素のことをいう。

DSPでは、JP-4、JP-4A及びJP-5とJet A-1+に対して使用する添加剤の種類と添加量が規定されている。

### 7.5 氷結防止剤

4.4でも記載したように高空低温環境下で使用されるジェット燃料は、低温で燃料中の遊離水分が氷結することによるフィルタ目詰まりを防ぐ必要がある。そのため、氷結を防止する氷結防止剤が使用されることがある。

ただし、JFSCLではJet A-1に氷結防止剤の使用を原則認めていない。

DSPでは、JP-4A、JP-5、Jet A-1+に対して規定された氷結防止剤を規定濃度範囲で加えるよう指定している。

## 8. 生産量

国内のジェット燃料の需給バランスを表3に示す<sup>(3),(4)</sup>。国内販売量の約2倍が輸出となっているが、そのうちの大部分は国際線向けのボンド輸出となっている。

Table 3 Supply and demand

単位:kL

		2014年	2015年	2016年
ジェット燃料	生産	15,277,964	15,946,408	15,864,487
	輸入	81,337	260,623	225,079
	国内向け販売	5,215,021	5,407,280	5,294,582
	輸出	10,001,805	10,772,593	11,064,075
	内) ボンド輸出	6,961,218	7,265,670	7,597,422

## 参考文献

[書籍等]

- (1) 石油連盟広報室, 石油製品の品質と規格, (2014), 石油連盟
- (2) 石油連盟広報グループ, 石油製品のできるまで, (2010), 石油連盟
- (3) 防衛省, 防衛仕様書 航空タービン燃料 DSP K 2206 F, (2015)
- (4) 石油連盟航空燃料専門委員会, 共同利用貯油施設向け統一規格 (JFSCL) ISSUE 29 Jet A-1, (2017), 石油連盟

[Webサイト]

- (1) JXTGエネルギー株式会社 石油便覧 第2編 第2章 第3節 石油製品の製造工程 <<http://www.no.jxtg-group.co.jp/binran/part02/chapter02/section03.html>> (参照日 2017年7月31日).
- (2) 公益社団法人石油学会 石油豆知識 [燃料] <<http://sekiyu-gakkai.or.jp/jp/dictionary/petdicfuel.html>> (参照日 2017年7月31日).
- (3) 経済産業省 資源・エネルギー統計 石油統計 <<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/sekiyuka/index.html#menu2>> (参照日 2017年7月31日).
- (4) 石油連盟 統計情報 統計資料リスト <<http://www.paj.gr.jp/statis/statis/index.html>> (参照日 2017年7月31日).

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## 世界LNG市場の課題と展望

### Global LNG Market and its Outlook



瀬川 慶一郎\*1  
SEGAWA Keiichiro

キーワード：天然ガス, LNG市場

Key Words : Natural Gas, LNG market

#### 1. はじめに

2040年までの世界のエネルギー需要を見通すと、環境面で優位性ある天然ガスは、他のどのエネルギー源よりも消費量の増加が大きくなる見通しである。一方、その市場・ビジネスモデル・価格形態は、何れも変化の途上であり、特に液化天然ガス（LNG）の取引量増加による市場の柔軟性向上が今後のエネルギー構造における天然ガスの役割を左右すると言われている。そこで本論文では、天然ガス、特にLNGの市場を中心に、日本の施策等を交えながら、その課題と展望を紹介する。

#### 2. 世界の天然ガス市場

##### 2.1 天然ガスの需要

約76億人の世界人口は、2040年までに20億人近く増加し、経済も約2倍に拡大すると見込まれている。その間、単位当たりの国内総生産（GDP）に必要なエネルギーは省エネ進展で3分の1程度改善する事が期待されている一方、消費の増分は世界第一・第二の米国・中国における現行消費量の合計に匹敵する膨大な量となる。

昨今の世界的な環境対策の傾向から、非化石エネルギーへの期待が高まる一方、今後のエネルギー増分の大半が中国・インド・東南アジア諸国連合（ASEAN）といった経済協力開発機構（OECD）域外で発生するため、膨大な需要を満たすのはコスト面からも天然ガス・石油を中心とする化石燃料になるとの見方が支配的である。特に天然ガスは他のどのエネルギー源よりも消費量の増加が大きく、2040年までに石炭を抜き、石油に次ぐ第二のエネルギー源となるとされている。天然ガスは既に世界各国で消費されており、特にパイプライン網が進んだ米国、ヨーロッパ、旧ソ連の三地域が世界の消費量の3分の1を占めている。最大消費国の米国では、2030年迄

に石油を上回り、最大のエネルギーとなる見込みであり、ヨーロッパでも2040年を過ぎ、5年程度で同様の状況となるとされている。また今後は、利用の広域化が進み、2040年には米国・ヨーロッパ・旧ソ連以外の地域が6割を消費する見込みである。全体の消費量も発電部門での石炭からの燃料転換や最終消費での伸長から拡大し、2014年から2040年には1.6倍となり、一次エネルギー消費に占めるシェアは、2014年の21%から2040年には25%に上昇する。経済性・環境面から、天然ガス複合発電等が着実に増加するため、消費量増分の半分は発電部門によるものとなる。2040年には世界の発電電力量に占める天然ガスの割合が28%となるとされている。

##### 2.2 天然ガスの供給

一方、供給側となる天然ガスの生産は、消費同様、米国が世界第一位であり、ロシアが次いでいる。今後、以下のような生産増加が各地域で見込まれ、世界の生産量は、2015年から2040年にかけて63%増加する見通しである。

- ・北米：米国北東部におけるMarcellusシェールガスからの生産や同南部Permianにおけるシェールオイルの生産に伴って生産される随伴ガス生産によって今後も堅調に増加。
- ・カナダ：2020年以降、西海岸のLNG案件が実現すると予想されることから、2030年にかけてその生産量は徐々に拡大。
- ・非OECDヨーロッパ：ロシアやトルクメニスタンといった豊富な埋蔵量を有する国からの増産が予想され、特にロシアでは、パイプライン・LNG双方の輸出増大に伴い、新規のガス田開発が進行。（OECDヨーロッパは、地質学的な限界もあり、域内の生産量は徐々に減少）
- ・中東：核開発に関連する経済制裁が解除されたイランにおける増産に対する期待が高まってきており、2030年にかけて新規プロジェクトが立ち上がれば、その生産量は更に拡大。サウジアラビアにおいては、国内エ

原稿受付 2017年7月28日

\*1 三菱商事(株) エネルギー資源戦略室  
〒100-8086 千代田区丸の内2-3-1

エネルギー需要の拡大を満たすために今後さらに国内のガス田開発に力を入れることが見込まれており、中東の生産量は、これら二か国が牽引し拡大を継続。

- ・アジア：需要が拡大する中国やインドにおいて、国内のガス開発が進み、特に中国では、2025年以降、国内のシェールガス開発に対する投資が本格化されれば、その生産量はさらに増加。
- ・アフリカ：モザンビークやタンザニアなど新興LNG源の登場が生産量を牽引してゆく可能性がある。

### 3. 世界のLNG市場

#### 3.1 LNG生産現況

パイプライン輸送でなく、産ガス国側で天然ガスを液化の上、海上輸送を経て消費地へと運ぶLNGは、現在、プロジェクトが世界20カ国に存在し、液化能力は2016年12月時点で96基、約3.4億トン/年となっている。実際のLNG生産量（2016年）は、約2.6億トンと液化能力より約80百万トン少なく、その背景は、一部の国での原料ガス不足（トリニダードトバゴ）や政情不安（ナイジェリア）等である。

世界最大のLNG輸出国はカタールで、輸出量は全体の約3割を占める約80百万トン/年で、これに豪州（約45百万トン/年）、マレーシア（約25百万トン/年）が続く。太平洋地域の生産が全体供給の4割強を占め、次いで、中東が4割弱、大西洋地域が2割となっている。また、2016年には、米国サビンパスLNG基地が稼働を開始しシェールガス由来のLNGが初出荷されるに至っている。

#### 3.2 今後のLNG生産見通し

LNG生産能力は2016年末時点で約1.1億トン/年が建設中であり、内、米国が58百万トン、豪州が27百万トンを占める。2017年には、約34百万トンの新規液化設備が稼働すると見られており、内18百万トンは豪州である。か

ような動きを受け、2018年頃には豪州がカタールを抜き世界一の輸出国になると見込まれている。

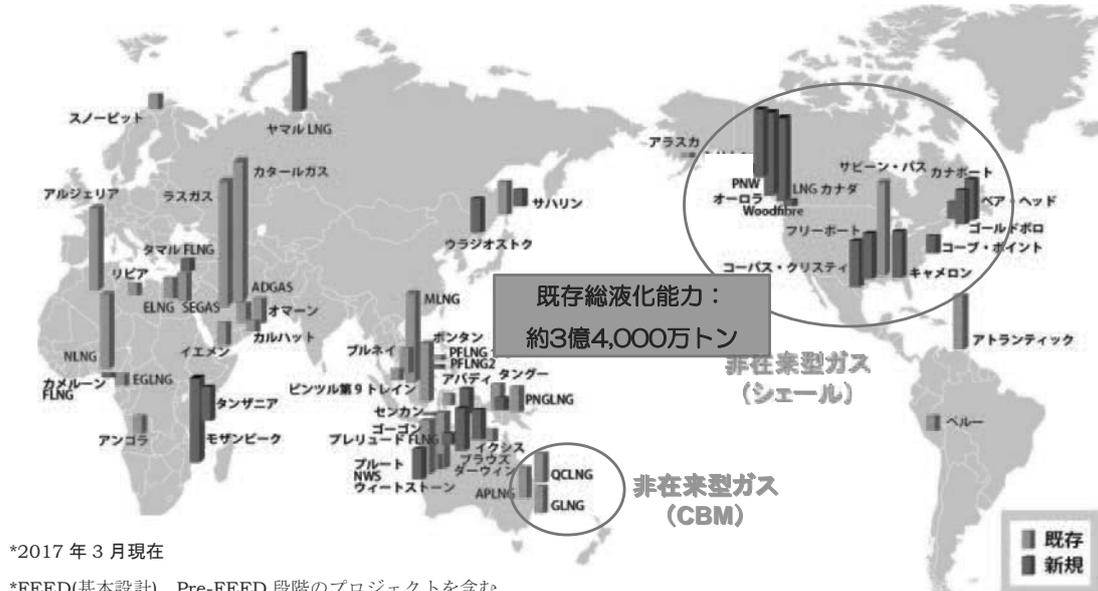
一方、現在着々とプロジェクトが進行している米国も、2020年代後半にカタールを抜き、更に豪州に匹敵する産出国になると見られていたが、IEAは2017年7月に発表のガス年次報告書で2022年にも世界一のレベルにまで達する可能性に付いて言及している。

新たに供給に加わる北米と豪州（東部）のLNGプロジェクトの特徴は、非在来型ガスが主な供給源である点であり、北米ではシェールガスが多く、豪州東部は炭層メタン（CBM）が中心となっている。因みにEIA（エネルギー省エネルギー情報局）が2017年1月に発表した報告書AEO2017によると、米国では2016年のガス生産量全体に占めるシェールガスの割合が53%に達している。

これら建設中のLNGプロジェクトに加え、計画段階のLNGプロジェクトも多数存在する。米国、ロシア（サハリン拡張）、東アフリカ（モザンビーク）等、需要の確保を前提に最終投資決定に移行可能と思われるプロジェクトが約2億トンを超え、2030年頃までの世界需要増にも対応可能と考えられている。

LNG需給の乖離に関しては、現在建設段階のプロジェクトだけでも、2020年代前半までは供給が需要を上回る市場環境が継続すると見通されているが、最終投資決定されなければ、それ以降、需要が供給を上回ると見られている。因みに低油価環境の継続により、2016年に最終投資決定されたプロジェクトは、インドネシアのタンゲー LNGプロジェクト（第3液化トレイン）、及び米国のエルバ・アイランドLNG輸出プロジェクトの2つのみで、合計生産量ベースで2008年以降過去最低となった。

かような状況下、最大輸出国であるカタールの今後の動きが注目されている。同国は2005年大規模開発計画の推進を停止するとし、モラトリアムを宣言していたが、



\*2017年3月現在

\*FEED(基本設計)、Pre-FEED 段階のプロジェクトを含む

Fig. 1 World LNG projects

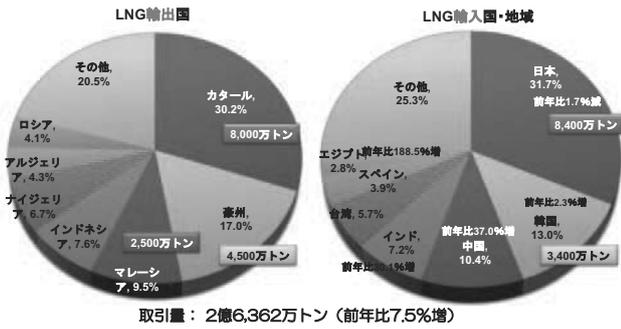


Fig. 2 LNG export/import countries (2016)

2017年4月、同国ノース・フィールドガス田の開発について、LNG換算約1,500万トン/年の能力増強を目標に現行生産能力を増加する意向を表明し、更に同年7月には、1億トン/年への増強を5～7年後に開始する目標を発表した。競争力あるLNG生産が可能となれば、北米・豪州の増加により低下するシェアを再び回復すると共に、長期的な需給に与える影響も大きく、今後の動向が注目されている。

### 3.3 LNG需要の現況

LNGの輸入量は、世界需要全体の2.6億トン（2016年）の内、日本が約84百万トンと最大であり、全体の約32%を占めている。これに韓国（約34百万トン）が続き、中国・インド・台湾とアジアの国々が全体の大部分を占めている一方、輸入国数は世界で39カ国にまで及び、グローバル化が進んでいる。

2016年は、エジプト、インド、パキスタンといった新興国の需要が増加した他、コロンビア、フィンランド（小規模LNG）、ジャマイカ、ポーランドが新たな輸入国として加わった。

### 3.4 FSRUによるLNG需要拡大

2016年に新たに稼働した11のLNG受入・再ガス化基地の内、5基地（コロンビア、インドネシア、ジャマイカ、トルコ、UAE）はFSRU（Floating storage and regasification unit:浮体式貯蔵・再ガス化設備）による導入となった。エネルギー需要の急速な拡大が見込まれる新興国や将来的に自国や周辺地域からの天然ガス生産が見込まれる場合、初期投資が少なく、早期に立ち上げが可能なFSRUの需要が高まっている。FSRUがLNG導入のハードルを下げ、潜在的なLNG市場の裾野を広げたといえる。陸上の通常基地では設計/資材調達/建設（EPC）業務に約3～5年掛かるものの、FSRUの採用により最終投資決定後、約12ヶ月で稼働開始可能となるケースもある。世界では2016年末現在で、24隻のFSRUが稼働中であり、更に9隻が建設中となっており、内6隻は2017年中に操業開始を予定している。

FSRUの再ガス化能力の合計は2008年から急速に増加し、今後も更に伸びるとされている。

FSRUプロジェクトが増加した主要因の一つとして、陸上の再ガス化基地と比較して初期コストが安価である

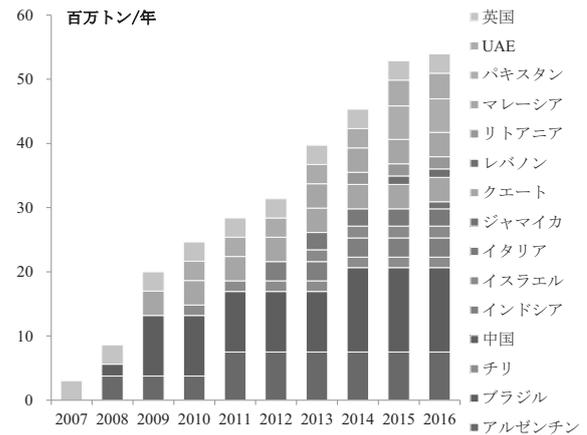


Fig. 3 Installed FSRU capacity by country

ことを挙げたが、既存のLNG船を改造するためのコスト、或いは新造FSRUの建造コストに栈橋などの沖合・陸上インフラの建設コストが上乘せられてもなお、陸上LNG受入基地と比べれば、安い総工費で建設することが出来る。

また、洋上は陸上に比べ、環境影響が少ないため、規制制約が少ないのも利点である。これにより、より早く建設を進めコストを削減することも可能となる。陸上型基地と異なり、移動や撤去が可能のため、コミットメントの期間にあわせ、より高い柔軟性を提供できるFSRUによって、需要やエネルギーミックスの変化といったニーズに対応することが可能となる。

最近では、LNG船からFSRUへの転換に要する時間は6～8ヶ月にまで短縮されており、今後、陸上型LNG受入基地の代替案としてのFSRUのプレゼンスが更に高まると見込まれている。

一方、陸上設備に比べ柔軟な活用が可能とはいえ、下流設備の稼働遅れや導入国の需給状況の変化、信用リスク等もあり、陸上設備と同様、プロジェクト立ち上げ段階でのリスク管理もより重要となってきている。

### 3.5 LNG需要の見通し

世界のLNG需要は、2017年2月にシェルが発表した長期見通しで、2030年に約4億6,000万トン、日本のエネルギー経済研究所の「アジア/世界エネルギーアウトック2016」では、2040年には5億4,500万トンへ2.2倍に拡大し、特にアジアの需要は2.2億トン増加となり、世界需要の増加の7割を占めるとされる等、多くの企業・機関が長期的な伸びを予想している。

需要の牽引は、中国・インドなど潜在性の高いLNG輸入国のほか、パキスタンやバングラディシュ、中東諸国などのLNG新興国。これら新興国では、前項のFSRUを採用してLNG輸入を開始、今後需要が伸びると予想されている。

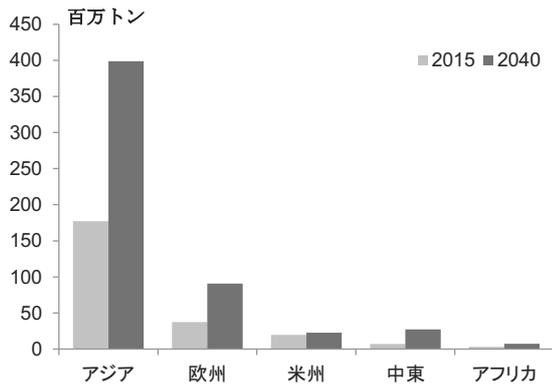


Fig. 4 LNG demand by region (2015-2040)

#### 4. 天然ガス・LNG価格

東南アジア・豪州等から日韓等の北東アジア向けのLNG価格は従来、原油価格に連動して決まる価格体系が主体であったが、北米産LNGが北米天然ガス市場価格（ヘンリーハブ）に連動して決定される事で、その体系に変化の兆しが見られる。北米産LNGの導入は、北東アジアの買主にとり、埋蔵量の大きい北米を供給ソースに加える事で多様化を図ると同時に、原油価格の高騰が継続していた時期に価格低減への期待感、即ち、北米のヘンリーハブ価格に液化と海上輸送等のコストを加算してもなお、持ち届けベースで原油連動よりも安くなるとの期待もあり、導入された経緯がある。その間、2014年半ば、世界の原油価格は急落し、日本が輸入し、LNGに連動する原油価格も2014年7月の110ドル/バレル台から翌年15年2月に50ドル/バレルを割りこみ、2016年2月には30.40ドルと、2004年以來の低値を記録した後、徐々に回復し、2017年現在は50ドル前後で推移している。かような流れの中、各域でのLNG価格の現状は以下の通りである。

##### 4.1 日本着LNG価格

日本向けのLNGは依然、長期契約・石油価格連動による価格決定方式が大半を占め、JCC（全日本平均原油輸入価格）を指標とし、原油価格のレベルに応じた一定の調整要素を加味した上で算出される。原油価格は、概ね50ドル/バレル台で推移しており、2017年3月のJLC（全日本着平均LNG輸入価格）は7.7\$/MMBtu。

[注 MMBtu：熱量単位で百万British thermal unit]

##### 4.2 米国天然ガス価格の推移

米国天然ガス価格（ヘンリーハブ価格）は北米地域の需給、在庫、石炭火力との価格競争力により影響を受け、2016年は当初、冬場の気温が平年を超過、暖房用需要の減少、供給過剰感の高まりから2016年3月には1.49\$/MMBtuにまで下落も、2017年に入り、総じて暖房需要の低迷、天然ガス価格の上昇による発電用需要減傾向、リグ稼働数の増加・生産の回復傾向等により価格は3ドル前後で推移。

##### 4.3 欧州天然ガス価格

欧州・英国の天然ガス価格は、需給（在庫）に基づくハブにおける市場価格連動した価格決定方式と、全体に占める割合は低下したものの石油製品価格連動（約3割程度に減少）によるものがある。パイプラインを通じ天然ガスが流通するため、LNG受入基地からの受け入れも含め、相互に影響を及ぼす。英国天然ガス価格は、2017年3月以降、概ね5\$/MMBtu前後で推移。

##### 4.4 スポットLNG価格動向

東日本大震災以降、LNG需給が逼迫していた時は、日本向けスポット価格は高値で推移したが、2016年5月には4.3ドルとなり欧州のガス価格を下回することもあり、アジアプレミアムの解消と報じられた。

スポットLNG価格は、2016年9月の韓国南部での地震に伴う原子力発電所の停止点検による追加需要や、冬場の需要期を前に11月末からの豪州Gorgonプロジェクトの約1ヶ月の設備トラブル等で価格が急騰し、2017年1月には、一時的に9\$/MMBtu台後半に達した。直近の2017年4月の日本向けスポットLNG価格（経済産業省公表）は、契約ベースは5.7\$/MMBtu、入着ベース5.9\$/MMBtuとなっている。足元の欧州着のLNG価格は約5\$/MMBtu前後であり、需要地までの輸送費を差し引いた米国発FOB価格は欧州・北東アジアともに、4ドル台半ばとなる。急な需給変動が生じた場合には一時的な高騰は起こるものの、安定した需給環境においては地域間の価格差が是正・減少する傾向とも見られている。

今後、豪州・米国等の新規LNGプロジェクトの稼働開始等で、需要の増加を上回るLNG供給見通しや、日本における原発の再稼働進展も、余剰LNGの市場への流入を促す一方、2017年初の需給逼迫にみられるように、短期間でも需給の変動に際しては、価格の高騰・スポット調達に困難となることについても、対処が必要となる。流動性が増してゆく事で、ガス対ガスの価格競争が発じる事、特にアジア価格向けの市場価格が形成される事、ハブ化する事への期待は大きい。

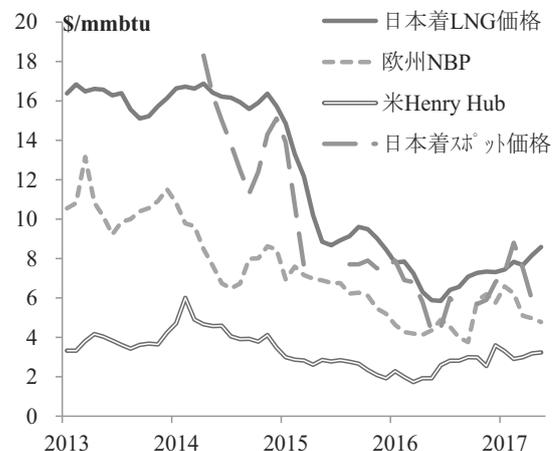


Fig. 5 Major natural gas prices

## 5. LNG市場の課題と展望

### 5.1 LNG事業の課題

天然ガスの需要は今後、中国・インド等を中心に世界で増加してゆく方向には違いないものの、LNGに関しては、「供給過剰」な市場へ更に米国や豪州で建設中の大規模な液化設備からの出荷が加わり、いかに早く「需給均衡」を取り戻せるかが業界の課題となっている。

IEA（世界エネルギー機関）は、供給者と特定の買主群との間の硬直的契約が存在する従来の仕組みから、より競争的かつ柔軟なシステムへと変化する事を予想し、その契機として、(1)機動力ある米国LNGの市場への導入、(2)新たなガス輸出国の出現、(3)非在来型のガス開発の継続的拡大等により、世界全体の供給が多様化することを挙げている。

また、需要側でもFSRUにより、LNGの新しく、より小規模な市場が開拓され、これまでパイプラインによる取引が太宗であった長距離ガス貿易取引に占めるLNGの割合は、2040年には過半に及ぶとされている。一方、市場転換の先行きが不透明なことにより、上流生産開発、並びに新規LNGプロジェクトの投資決定が遅れると、現在の過剰供給分が一旦吸収された後、市場が難しい局面となるリスクも多く指摘されている。

天然ガスは、消費地において特に電力部門における他燃料との激しい競争に晒されるため、供給側の事業者は一層のコスト削減に努め競争力有るLNGを提供する必要がある。アジアのガス輸入国では、石炭火力とも競争する必要があるが、また、再生可能エネルギーの普及とコストの下落によっても天然ガスのシェアは縮小されるリスクもある。案件立ち上げまでに多額の初期投資が必要なLNGプロジェクトの実現には、その大部分の数量引取を長期契約の形で抑える形が前提となってきた。今後、新興国を中心に見込まれる新たな買主は、その規模、信用力ともに、これまでの欧州・アジアの買主と同様の役割を果たすことは難しい。このような市場環境のもと、一部のポートフォリオプレーヤーからは、新興市場での需要開拓のため、自社の高い信用格付けとリスクマネジメント能力を生かして、数量リスクをとり、液化プロジェクトや、FSRUによる受入れ基地・発電まで含めた中下流プロジェクトを実現させようと検討するような動きもでてきている。新規プロジェクトを立ち上げる供給側は、競争力を持つため、コスト削減を厳しく行い、かつ、新興国や用途を広げLNG市場規模を大きくし、流動性を上げ、買主側が不透明性に対応可能にする必要がある。これら一連の課題は容易に解決されるものではないが、市場でも関係国が様々な対策に乗り出している。特に日本は最大LNG輸入国かつ同取引の先駆者として、官民で市場発展への努力を積極的に行っており、その具体施策の一部を以下紹介する。

### 5.2 LNG市場発展に向けての日本の対応

2016年5月、日本の経済産業省が発表した「LNG市場戦略」は、流動性の高いLNG市場を実現し、日本がより低廉かつ安定的にLNGを調達していくための施策であるが、その策定過程において、民間企業をも加わった点で単に官の意向だけを反映しているわけではない。また、日本のみの利害に留まらず、アジアや世界のLNG市場の発展に大きな指針を与え得る点で、その意義は深い。

具体的には、①仕向地制限の廃止等を含むLNGの取引容易性の向上、②健全な競争による日本のLNG需給を反映した価格指標の確立、③オープンかつ十分なガス関連インフラ（LNG輸入基地、天然ガス地下貯蔵施設、広域ガスパイプライン）の整備、といった内容で中長期的な取組が促されており、官民双方で行われている具体的なアクションや議論の例は、以下の通りである。

### 5.3 LNG取引の容易性向上

G7やLNG産消会議や首脳会談などの個別会合の場において、日本側から関係国に対し、仕向地制限の緩和・撤廃の必要性についての消費国間の連携や生産国への働きかけが行われている。

流動的な国際LNG市場を実現するためには買主側の転売自由度が重要となり、配船オペレーション等の課題も、売主と買主が配船計画の調整により対応可能な部分が多い事から、仕向地の自由が取引ルールとして確立するよう、業界全体が取り組みを強化してゆく事が促されている。

同様に利益分配契約等も、緩和・撤廃の方向性が促されている。2016年6月に発表された日本の公正取引委員会によるこれらに関わる報告も、業界での協議を促すものとして、今後の動きが注目されている。

### 5.4 新規のLNGプロジェクトに対する政策金融の役割

天然ガス需要が各国で伸びてゆく方向性は認識されつつも、輸入国側での他燃料との競合等により、長期的な需要を見通す事が難しく、買主が中長期的なコミットを行うことが困難になりつつある。かような状況下、中長期的に供給セキュリティを確保するためには、安定的に上流投資や液化基地建設が行われる必要がある。

政策金融によるファイナンス支援においては、引き続き日本向けのLNGプロジェクトについての支援、加えて、日本の引取り以外の視点、即ち、新興国での需要創出の実現のためにも、これまで以上に柔軟な考え方が重要であるとし、積極的な検討が重要となる。

新興国等のLNGユーザーは、LNG市場の拡大に不可欠な存在であるが、信用力に欠ける場合が少なくなく、民間企業が与信ノウハウを高めると同時に、民間のみでリスクテイクが難しいケースについての官による柔軟な対応が期待されている。

### 5.5 船舶用燃料の如き新たなLNG需要の拡大

LNGを燃料とする船舶の導入・普及の促進や燃料供給インフラの整備に向けた検討は、環境規制による従来型の航海燃料からの転換需要として潜在性高く、日本でも着々と進められている。

今後、需要拡大が見込まれるLNGを燃料とする船舶について、海外の取組や支援策、及び日本におけるIMOの環境規制が段階的に強化される中での民間側の対応の方向性を分析し、日本としてどう取り組むかが議論されている。また、バンカリング拠点については、利便性の高い場所が更にユーザーを呼び込むという集積効果があるため、日本が周辺諸国に遅れをとることのないような取組が必要とされ、国土交通省をも含め、LNGを燃料とする船舶を活用する船主、運航者及びユーザーの発掘・啓蒙に係る活動の強化を検討が期待されている。

### 5.6 LNG需給を反映した価格指標の確立

日本・韓国向けスポットLNG価格の指標が北東アジア、さらに世界のLNG価格指標として浸透しつつある。東京商品取引所は、2016年11月にプラッツと価格指標形成等に向けた協力に関する覚書、シンガポール取引所とLNG市場発展に向けた協力等に関する覚書を各々締結した。

2017年4月からはLNGの先物取引についてラインアップを拡大し、さらに現物取引が可能になっている。スポット取引価格指標は、複数の機関が提供する価格指標の間で競争メカニズムが働く中で民間プレーヤーによって選ばれていくものであるが、当面はスワップ取引等で急速に認知されつつある日韓向けスポット指標が、アジアのスポット価格指標として広く活用されていくと期待されている。また、価格情報の形成・発信が日本で行われることは望ましいが、トレーダ、ブローカー等の集積がその前提となり、中長期的視野での取組が必要となる。当面は、現在広く使われつつある価格指標が、LNG取引の実態や我が国の需給等を適正に反映し、より信頼できるものとなるよう、情報開示への協力等が求められる。

### 5.7 アジアにおけるLNG需要創出ビジネスへの支援

アジアを中心とした海外での天然ガス・LNG利用促進による新規需要家の拡大に向けた関連国との政策対話が実施されており、2016年9月の東アジアサミットエネルギー大臣会合においては、アジアの天然ガスやLNG

の導入促進のためのプラン作りを日本が主導して行う事とされている。

仕向地制限の撤廃を含め、柔軟なLNG市場を実現していくため、生産国との対話や消費国（EU、韓国、中国、インド等）との連携が強化されつつある。アジアは、今後、最もLNGの需要の拡大が見込まれる地域であり、世界に先駆けLNGを活用してきた日本の技術力やノウハウを活用し、アジアの需要を取り込んでいく事は、日本の成長戦略にも貢献する。また、日本に比較的近い地域でLNG市場が拡大すれば、日本企業は近隣国企業と共同調達やスワップ、（緊急時を含む）需給調整などを行いやすくなり、LNG調達の安定・低廉化にも資する。懐の深いアジアLNG市場の形成は、海外展開する日本企業のエネルギーの安定確保にも寄与する。加えて、伸びしろの大きいアジアで需要が拡大すれば、海外での新規LNGプロジェクトが立ち上がりやすくなり、中長期的なLNG価格の安定化にも資する。アジアにおいてLNGのメリットが実感され、石油や石炭からの代替が進めば、資源の供給源多様化や温室効果ガスの削減等、アジア域全体でのエネルギー・セキュリティ強化にも資するとして、日本の官民による協業・イニシアティブが期待されている。

## 6. おわりに

IEAのファティ・ビロル事務局長は「米国のシェールガス革命は、失速する気配はなく、LNGの世界的な進展によるガスの「第二革命」が起こる可能性がある。当該実現は、市場の流動化が図られるか否かである。」と2016年の来日時、関係者に対しコメントした。

LNGプロジェクトのコストダウン、価格形成の透明性・合理性の確保といった市場やインフラの整備等課題は多いものの、LNG産業の発展には大きな期待があり、それが天然ガス全体の伸びとエネルギー構造に於ける位置付けを定めてゆく上で重要だと考える。

## 参考文献

- (1) 日本エネルギー経済研究所「アジア/世界エネルギーアウトック2016」（レファレンスシナリオ）
- (2) JOGMEC 天然ガス・LNGの最新動向（2016年取引実績及び今後の需給動向）
- (3) IEA Gas Market Report 2017
- (4) 経済産業省「LNG市場戦略」（2016年5月）

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## LNGの調達

## Procuring LNG

尾上 幸児\*1  
ONOE Koji

キーワード：生産量・需要の大幅増，柔軟な取引条件，透明性と流動性の高い市場価格

Key Words：Significant growth in production and demand, flexible trading terms and conditions, market price with transparent and high liquidity

## 1. はじめに

世界の液化天然ガス（Liquefied Natural Gas「LNG」）の取引は、1964年10月にアルジェリアの生産基地Arzewから英国の受入基地Canvey Islandに出荷されることで開始された。日本においては、その5年後の1969年11月にアラスカ産LNGを受入れることで開始された。その後、LNGの取引は大幅に増え、2016年の世界の取引量は2億6千万トンに達し、ここ10年間においては年間6%以上の成長を記録している。

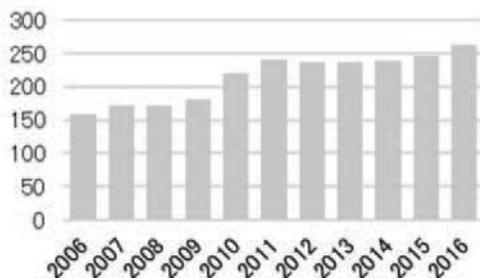


Fig. 1 Global LNG trade volumes (mtpa)

2016年末時点でLNGの生産国は19カ国、輸入国は39カ国に及んでおり、世界のLNG生産設備の能力は3億4千万トン／年、受入れ設備の能力は8億3千万トン／年に達しており、受入れ能力については実際の取引量を大きく上回っている。現在の世界最大のLNG生産国は、1996年より生産を開始している中東のカタールである。同国は豊富に有する天然ガス埋蔵量（世界3位）を有効活用し生産量を拡大、2011年に約77百万トン／年のLNGを生産できる体制を整えている。このカタールの生産能力は世界のLNG需要の約3割に匹敵する能力で

ある。次いで豪州は昨年45百万トンを生産しており、更に同国では大幅な増産開発が進められている。2020年頃までには約86百万トン／年ものLNGを生産できる体制になり、カタールを抜いて世界第一位の生産国に躍り出ることが確実視されている。昨今のLNGの生産国の中で取り分け注目されているのが米国である。同国は1969年にアラスカ産LNGの輸出を開始しているものの、伝統的にはLNGの輸入国であった。近年、同国の豊富な非在来型ガスのシェールガスの開発が急速に進んだ。これを受け国内産ガスが急増産され、国内ガス市況価格が低位安定したことによって、LNG輸出プロジェクトが続々と計画され、多くのプロジェクトの開発が進んだ。同国の現在生産中と建設中のLNG生産プロジェクトの生産能力は66百万トン／年にも及び、近々カタール、豪州に次いで世界第3位の大LNG生産国になる。

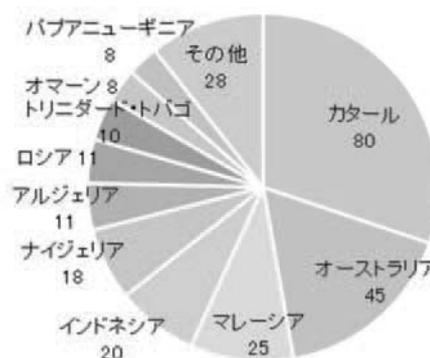


Fig. 2 LNG production by countries in 2016 (mtpa)

消費・輸入については、長年に亘り日本が最大のLNG輸入国であり、2016年は83百万トンを入力し、2位以下の輸入国と2倍以上の開きがある。次いで韓国が34百万トン、中国が27百万トンを入力している。このように最大輸入国としてLNGの流通を牽引してきた日本については再生可能エネルギーの開発、東日本震災後

原稿受付 2017年7月31日

\*1 丸紅(株) エネルギー本部 天然ガス第一部  
〒103-6060 中央区日本橋二丁目7番1号  
E-mail: onoe-k@marubeni.com

に稼働を停止している原子力発電所の再稼働、省エネの促進等によりLNG需要の大幅な伸びは今後見込まれず、むしろ減少する可能性さえもある。韓国についても大幅な伸びは見込まれず伝統的なLNG輸入国の需要は頭打ち状態にある。一方で中国については経済成長や環境面の配慮から今後も10%/年程度の需要増が期待されている。そのような中で消費国側の昨今の特筆すべき点の一つは、輸入国の多様化があげられる。例えばこれまでLNG生産・輸出国であったアラブ首長国連邦、エジプト、マレーシアやエネルギー生産大国であるクウェート等が自国産ガスの減退、国内ガス需要の増加等を背景にLNGの輸入を開始している。またパキスタン、バングラディッシュ、スリランカ、ミャンマー、フィリピン、ベトナムなど西アジア、東南アジア諸国も昨今のLNG価格の下落を受け、他燃料との経済優位性がでてきており、LNGの輸入を開始ないしは将来輸入を計画している。

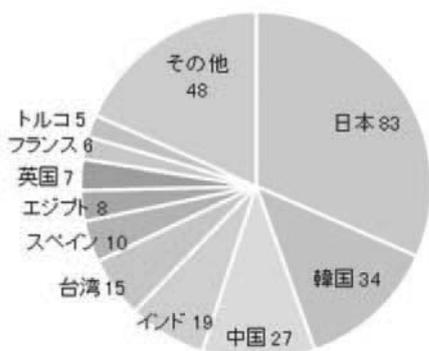


Fig. 3 LNG import by countries in 2016 (mtpa)

LNGを生産国と消費国を結びつける上で欠かせないのがLNGの運搬船である。LNG専用の運搬船は現在478隻が運航しているが、LNGの取引量の増大や米国産LNGの増産によって同地域から極東などへの長距離輸送の必要性に伴い今後更に増加する。また船型については大型化が進んでおり、50年以上前に世界で始めてLNGを運搬したMethane Princess号は27,400m<sup>3</sup>級（=約1.2万トンのLNGを運搬可能）であったのに対して、現在の標準的な船型は150,000-180,000m<sup>3</sup>級（=約7万トンのLNGを運搬可能）、世界最大LNG船型のQ-Max型と呼ばれるLNG船は260,000m<sup>3</sup>級（=約12万トンのLNGを運搬可能）と船型は10倍にまでに大型化し、輸送の効率化が図られている。

LNGの取引、調達のこれまでの特徴としては、

- ①LNG生産施設の計画、開発、生産開始には長期の時間を要する（計画段階から10年程度要するのが一般的）ために急激な需要の変化に生産側が対応しにくい。
- ②長期売買契約に基づく取引が主体で、スポット・短期の取引が限定的であった。
- ③-160℃というLNGの性質から、輸送中にLNGが気化することから品質の変化や数量の減少がおき、輸送上

の制約がある。

- ④受入先によって受入れられるLNGの品質や船型に制約がある。
- ⑤満船単位の取引が一般的であり、取引ごとの数量、金額が大きく、取引に係われる参入者が限定される傾向にある。

等々と他の商品と比べ取引上の難点はある方だが、これまで関係者の協力、努力により取引量が拡大し続け、取引を行う関係者もLNG生産者、需要家を始めトレーディング会社等も参入し、今日では100社程がLNGの取引に参入していると見られている。

## 2. LNGの産地と生産能力

### 2.1 現在のLNG生産国と生産能力

2016年の世界のLNGの生産能力は3億4千万トン/年で、ここ10年で1億トン以上の生産能力が増強されている。現在の主な生産国とその生産能力は表1の通りとなっている。

### 2.2 今後のLNG生産プロジェクトの開発

LNGは堅調に生産能力が増大、また生産国も拡大、分散されてきたが、今後更に拡大されていく。既に最終投資決定され建設が開始されているプロジェクトの生産能力は1億トン/年以上に達し、加えて初期段階のものも含めると計画されている新規のプロジェクトの生産能力は3億トン/年にも達している。計画段階のプロジェクトが全て立上るとは考えにくいものの、現状の3億4

Table 1 LNG liquefaction capacity for major producing countries in 2016

生産国	生産能力 (百万トン/年)
カタール	77
オーストラリア	60
マレーシア	28
アルジェリア	23
ナイジェリア	22
インドネシア	21
オマーン	11
ロシア	10
トリニダードトバゴ	10
エジプト	7
アメリカ	7
ブルネイ	7
パプアニューギニア	7
イエメン	7
アラブ首長国連邦	6
アンゴラ	5
ペルー	4
ノルウエー	4
赤道ギニア	4

千万トン／年の生産能力に対して、2030年頃には5億トン／年～6億トン／年の生産能力に達すると見られており、大幅な増産が期待され、買い手側の立場からは調達先の選択肢が大きく増えることになる（図4）。

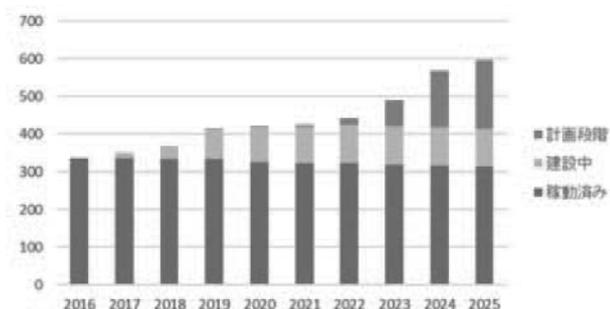


Fig. 4 Global LNG production capacity outlook (mtpa)

このように大幅な拡大が予想されるLNG生産プロジェクトの中で、今後とりわけ開発が進むと見られている、豪州、北米、東アフリカそしてカタール等の開発状況を取り上げたい。

### 2.3 豪州のLNGプロジェクト

豪州ではNorth West Shelf LNGプロジェクト（NWS）が1989年にLNGの生産を開始し、世界でアルジェリア、アメリカ、リビア、インドネシア、アブダビ、マレーシアに次いでLNG生産国の仲間入りをした。現在7つのプロジェクトが稼働しており61百万トン／年の生産能力を有している（表2）。

Table 2 LNG projects in australia - under operation in 2016

プロジェクト名	生産能力 (百万トン)
North West Shelf (NWS)	16
Darwin LNG	4
Pluto LNG	5
Queens Land Curtis LNG	9
Gladstone LNG	8
APLNG	9
Gorgon LNG (T1&T2)	10
合計	61

豪州はLNGの大消費国の日本、韓国、中国、台湾等から比較的近い地理的優位性、豊富な天然ガス資源を活かし、更に生産能力にして26百万トン／年余りのプロジェクトの建設が現在進められている（表3）。

これらの建設中のプロジェクトは何れも2020年以前の生産開始を目指し建設が進んでいる。既設のプロジェクトの中でQueens Land Curtis, Gladstone LNG, APLNGは非在来型ガスのCBM (Coalbed Methane, 炭層ガス) を原料ガスにLNGが生産されており、また建設

Table 3 LNG projects in australia - under construction in 2016

プロジェクト名	生産能力 (百万トン)
Gorgon (T3)	5
Ichthys LNG	8
Wheatstone LNG	9
Prelude LNG	4
合計	26

中のPrelude LNGは在来型の陸上のLNG生産設備ではなく、FLNG（洋上LNG生産設備）を採用したプロジェクトであり、このような新たな技術、方式を採用しLNGプロジェクトの開発が進められている（図5）。

豪州ではこれらの既設・建設中のプロジェクトに加え、複数の新規のプロジェクトが計画されており、将来更に生産能力を増やす潜在性がある。

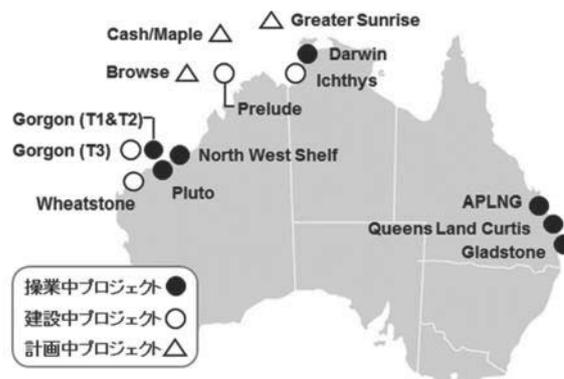


Fig. 5 LNG project in australia

### 2.4 米国のLNGプロジェクト

従来、経済的に難しいと言われてきた非在来型ガスのシェールガスの採掘が技術革新により2006年以降に急速に進み、米国の天然ガス輸入量は急速に減退、国内の天然ガス市況価格も大きく低下した。豊富なガスが国内で生産され国内需要を必要以上に満たすことができるようになったこと、市況価格が低位安定したことで米国国内と極東アジアを始めとするLNG消費国との天然ガス価格差が大きく広がった。これにより米国産ガスを原料ガスに同国内でLNGを生産し輸出しても経済性が確保できる見通しがたったことから、LNG生産プロジェクトが次々と計画、開発されることとなった。また潤沢な国産ガスの供給によってLNGの輸入が必要なくなり稼働を停止した遊休LNG受入基地をLNG生産施設に転換することで有効活用できることもLNG生産計画を促進させた。計画、開発は急ピッチで進み、昨年アラスカ以外で初の米国LNG生産・輸出プロジェクトであるSabine Pass LNGプロジェクトの稼働、出荷が開始した。現在の稼働中と建設を既に開始している米国のLNGプロジェクトは表4、表5の通りとなっている。

Table 4 LNG projects in USA-recently started production

プロジェクト名	生産能力 (百万トン/年)	生産開始
Sabine Pass T1	5	2016年 5月
Sabine Pass T2	5	2016年 9月
Sabine Pass T3	5	2016年 3月
合計	14	

Table 5 LNG projects in USA-under construction

プロジェクト名	生産能力 (百万トン/年)	生産開始予定
Sabine Pass (T4&T5)	9	2017年～
Cameron (T1-T3)	14	2018年～
Freeport (T1-T3)	13	2018年～
Corpus Christi (T1&T2)	9	2018年～
Cove Point	5	2017年～
Elba Island (T1-T5)	3	2018年～
合計	53	

稼働中と建設中のプロジェクトをあわせると生産能力が66百万トン／年にもなり、建設中のプロジェクトが全て稼働を開始する2020年頃の世界のLNGの需要の約2割を米国産のLNGで満たすことが出来ることになる。これらの稼働中、建設中でCorpus Christiプロジェクト以外の全てのプロジェクトが既設のLNG受入基地を生産基地に転換するものである。

更に、開発者の最終投資決定に至っておらず建設が開始されていないプロジェクトの中で既に米国連邦エネルギー規制委員会 (FERC) からLNG輸出施設の建設・操業承認及び米国エネルギー省 (DOE) から同国が自由貿易協定を締結していない相手国へのLNG輸出に必要な承認を付与されているプロジェクトも表6の通り60百万トン／年以上にのぼる。

Table 6 LNG projects in USA - pre FID projects and have received regulatory approval

プロジェクト名	生産能力 (百万トン/年)	生産開始予定
Lake Charles (T1-T3)	15	2022年～
Goledn Pass	16	2022年～
Magnolia LNG	8	2022年～
Corpus Christi (T3)	5	2022年～
Cameron (T4&T5)	9	2022年～
Delfin LNG	13	2022年～
合計	65	

その他に計画が進んでいる米西海岸オレゴン州で計画されているJordan Coveプロジェクトを始め計画の進捗度合いは様々であるものの、40程度のプロジェクトの計画があり、カナダでも複数のプロジェクトの計画がある(図6)。

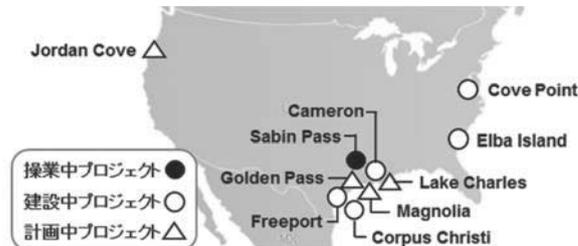


Fig 6 LNG project in USA

### 2.5 東アフリカのプロジェクト

新興のLNG生産国として昨今期待が高まっているのは東アフリカのモザンビークとタンザニアである。両国では2010年以降に150兆立方フィート (Trillion Cubic Feet = TCF)\*以上もの天然ガス埋蔵量が発見され、将来のLNG生産者として着目されている。(\*天然ガス1TCF≒LNG 2千万トン) 両国では以下のプロジェクトが現在計画されており、モザンビークのArea 4 鉱区を原料ガスとする3.3百万トン／年を生産するCoral LNGプロジェクトは本年最終投資決定がなされ、域内で初のLNG生産プロジェクトとして建設が開始された(表7, 表8)。

両国ともLNG需要が伸びているインド、パキスタン等の西アジア、また東南アジア、極東にも地理的に供給しやすいという利点がある。また昨今はコードジボアール、南アフリカなどアフリカ諸国もLNGの輸入を計画しておりそれらの輸入計画が実現すればアフリカ諸国への供給も視野に入ってくるであろう。

### 2.6 カタールなどのプロジェクト開発

現在世界最大のLNG生産能力77百万トン／年を有するカタールは900TCFの天然ガス埋蔵量を持つノースフィールドガス田を原料ガスとしてLNGを生産してい

Table 7 LNG projects in mozambique

原料ガス鉱区	生産能力 (百万トン)	現状
Area 1	12.0	計画中
Area 4	3.3	計画中
Area 4	12.0	計画中



Table 8 LNG projects in tanzania

原料ガス鉱区	生産能力 (百万トン)	現状
Block 1&4	10.0	計画中
Block 2	5.0	計画中



る。同国は2005年に既に最終投資決定済みのプロジェクト以外のノースフィールドガス田のガスを原料とするプロジェクトの開発を凍結していた。今年になりこの凍結を解除し追加開発を行うことが決定され、LNGの生産能力を2020年代半ばに1億トン／年に引き上げることが発表されている。

また、ロシアはこれまでは世界最大の天然ガスのパイプラインでの供給者であるとともにサハリンで10百万トン／年のLNGを生産しているが、16百万トン／年の生産能力を有する北極海のYamalプロジェクトの生産が本年開始される予定である。

2.7 LNGの需要

このように多くの生産プロジェクトの開発計画がある中で、それに見合う需要はあるのであろうか。

図7のように、LNGの需要も現状の2億6千万トン／年から2030年には4億5千万トン／年以上になると見られている。当然ながら、経済状況、他燃料との競合、環境規制・政策など様々な要素により需要の伸びは左右されるものの、LNGの需要は確実に伸びていくとの見方が一般的である。特に中国、東南アジア、西アジアが今後の需要を牽引していくと見られ、世界のLNGの需要地はますます分散化されていく。

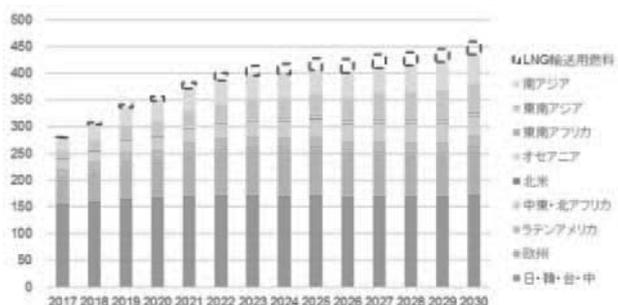


Fig. 7 LNG demand outlook by region (mtpa)

3. LNGの価格

3.1 各地地域のLNG価格

伝統的にLNGの価格は米ドル／MMBtuという単位で取引されている。MMBtu = Million British Thermal Unit = 百万英国熱量単位であり、1 Btuは標準気圧下において質量1ポンドの水の温度を60.5°Fから61.5°Fまで上昇させるのに必要な熱量を示す。

米国ではHenry Hub (HH)に代表される天然ガスの市況価格が形成されており、LNGも含めて域内の天然ガスは市況価格に連動して取引がなされているのが一般的である。欧州についても英国のNational Balancing Point (NBP)、オランダのTitle Transfer Facility (TTF)に代表される天然ガスの市況価格がある。欧州はロシアからのパイプラインで輸送される天然ガス(パイプラインガス)や過去に契約したLNG価格については、契約した時点でこういった市況価格が発達しなかったことや、当時石油製品代替を目的としてパイプラインガスやLNGを調達したことから石油製品価格連動または多くは無いが石炭価格連動といった天然ガス以外の商品連動の価格が存在する。近年はNBP、TTFといった透明性及び流動性の高い天然ガス市況価格が発達したことから、LNG取引についても天然ガス市況価格に連動したものが一般的になってきている。

これまでLNGの大消費国としてLNG取引を牽引してきた日本、韓国、台湾等においては、パイプラインでの天然ガス供給が限定的であったこと等から透明性の高い天然ガス市況価格の形成がなされてこなかった。主に石油代替でLNGの調達が行われてきたことから、Japan Crude Cocktail (JCC)と称する全日本平均原油輸入価格に一定の係数と定数を入れた原油価格連動の価格算定方式が一般的に採用されてきた。このような背景から世界の他地域の天然ガス市況価格とは相関性の低い値動きをしてきた(図8)。

また近年ではそうでもないが、極東の各国はこれまで9割以上のLNG調達をこういったJCCに連動した算定方式を採用した長期の売買契約(20年以上)に基づき調達してきた。こういった長期契約は燃料を長期に安定して



Fig. 8 LNG and natural gas price

調達する必要がある買い手、またLNGプロジェクトを開発するために巨額の資金調達を要する売り手にとって共通のニーズであった。近年は買い手の国々においてLNGが必ずしも石油代替燃料で無くなってきていること、油価に連動した価格が必ずしも買い手のニーズに合致していない、数年前までの油価の高騰に伴い独自の天然ガス市況がある米国や欧州との価格差が大きく広がったことから、アジアにおいても天然ガス市況に連動した価格の必要性が高まった。そのような中で情報誌Platts社が発行するJKM (Japan Korea Marker) やICIS Heren社、リム情報開発等が評価した極東向けLNG価格が日々公示されるようになり、こういった指標を用いた取引が徐々に増している。

### 3.2 今後のLNG価格の動向

これまでのLNG価格は地域間の相関性が低かったものの、今後は欧州、アジアなどの各地域間の価格の相関性が高まってくると思われる。その理由として一つはLNGの売買契約が短期化してくる傾向にあることである。図9の通り短期・スポットでの取引量は近年増加傾向にある。その背景は売り手側の余剰（販売先が決まっていな）LNGの増加、買い手側の需要の不透明性による前広な買い控えが主な理由だろう。今後更にその傾向が強くなると見られており、各地域間の格差が短期のサイクルで収斂されやすくなると考えられる。

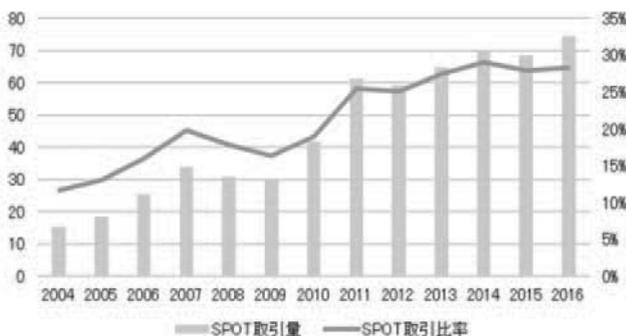


Fig. 9 LNG spot and short-term volume (mtpa)

また先の項で北米産のLNGの今後の大幅な増産についてふれた。これまでのLNGの取引は各地域で比較的完結していた傾向があったが、今後大幅に増産される米国産LNGの一部はアジア、欧州、他地域の内、価格が最も高い地域（＝需要が逼迫している）に流れ、需給調整機能を果たし、各地域の価格の安定化に繋がる可能性があると考えられている。これまでは産地によっては厳しい仕向け地の制限が売り手側からつけられてきたことが多かったLNG取引だが、米国産のLNGの多くはこのような仕向け地の制限が無い、若しくは限定的であることが一般的で、地域間価格格差や需給状況に応じて向け先を変更できる柔軟性を持つのが特徴の一つである。

一方でLNGを生産するコストの観点から価格について簡単に触れておきたい。今日はLNGの需給状況が緩

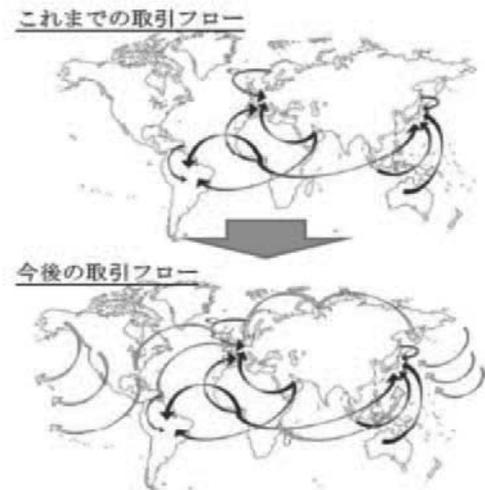


Fig. 10 LNG trade flow (past and future prospect)

和しており、供給が潤沢なために受入れ基地着ベースで米4ドル～米7ドル/MMBtu程度で歴史的にみても低値で取引されている（過去に決めた契約でこのレンジ内に無い取引もある）。現在計画中の新規のLNG生産プロジェクトを立ち上げるためには米8ドル/MMBtu以上の価格でないと経済的に成り立たないプロジェクトが殆どと見られており、現在のLNG市況価格だと新規プロジェクトが成り立たず開発が遅延するリスクが懸念され始めている。先にも触れたように計画、開発に長期の期間を要するLNGプロジェクトは需給がタイトになっても急に増産することはできない。供給が需要に追いつかないとLNG価格が過去にも起きたように急騰することもあり、その結果、他燃料との競合等から需要が減退する可能性も否定できない。健全なLNG取引の発展、拡大のためには、これまで行ってきたように長期的な視野を売り手、買い手、他関係者が持ち、開発コストの削減を図るとともに関係者間で適切なリスクシェアをしながらLNGプロジェクトの開発を支えていく必要性が再認識されている。

## 4. おわりに

LNGは取引が開始されて50年余りの間に大きく発展した。これは生産者＝売り手、需要家＝買い手、建設業者、輸送者、金融機関、他関係者全てが様々な課題に対して協力して取り組んできた成果である。今後も生産、需要ともに堅調に伸びていくと見られているが、LNGの取引が今後更に健全に発展していくためには、全関係者がLNGをより扱いやすく、経済性上成り立つように協調して取り組んでいく必要がある。取引形態も長期契約が主流であったが、多くの参入者のニーズに対応できるように中期、短期、スポット契約、柔軟性の高い取引条件、透明性の高い価格算定方式等の多様な取引形態を導入していくことで取引量は堅調に増えていくと考えられる。

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## LNG製造技術（冷凍圧縮機駆動用ガスタービンの発達）

### Technology of LNG Production (Development of Gas Turbine Driver for Refrigerant Compressor)



大森 英史\*1  
OMORI Hidefumi

キーワード：ガスタービン，LNG，コンバインドサイクル，効率

Key Words：Gas Turbine, LNG, Combined Cycle, Efficiency

#### 1. 緒言

1964年，LNG液化プラントが初めてアルジェリアにおいて稼働して既に半世紀以上が経過した。LNG液化プラントの心臓部は冷凍圧縮機とその駆動機であるが，それらの大型化により，プラントの容量も最初アルジェリアのプラントでは1ト레인当たり年産44万トン程度であったものが現在カタールの液化プラントで最大780万トンと増大している。LNG液化プラントの歴史はこの冷凍圧縮機とその駆動機の発達の歴史といっても過言ではないだろう。本稿では天然ガス液化技術の一般的な概説に加えて，それらの回転機械がどのように液化プラントの設計に影響を与えてきたかという事を中心に記述する。

#### 2. 天然ガス液化技術

##### 2.1 液化の原理

液化プラントの原理はよくエアコンの原理に例えられる。図1に示すように室内機に置かれた熱交換器中において冷媒，通常代替フロンの気化熱により高温側の室内の空気が冷やされる。気化した冷媒は室外機の圧縮機により昇圧された後，熱交換器において室内の空気から移動した熱と圧縮機から受けた熱を低温側の外気に放出し凝縮する。凝縮した冷媒はバルブをとおして減圧され低温になり，再び室内の冷却に用いられるというサイクルである。

##### 2.2 液化プロセス

図2に広く使用されているプロパン予冷混合冷媒プロセスのサイクルを示す。このプロセスの場合冷凍サイクルは2つあるが液化の原理はエアコンと同じである。実際のLNG液化プラントの液化方法は上述のように冷媒の気化熱を用いて天然ガスを冷却する冷媒方式と窒素の

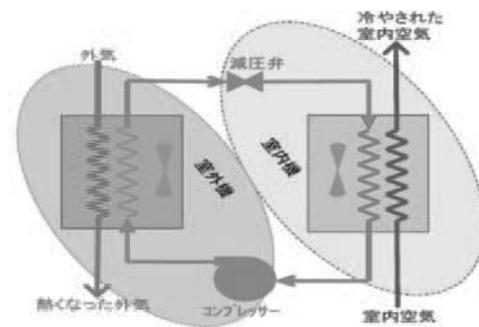


Fig. 1 Principle of air conditioning

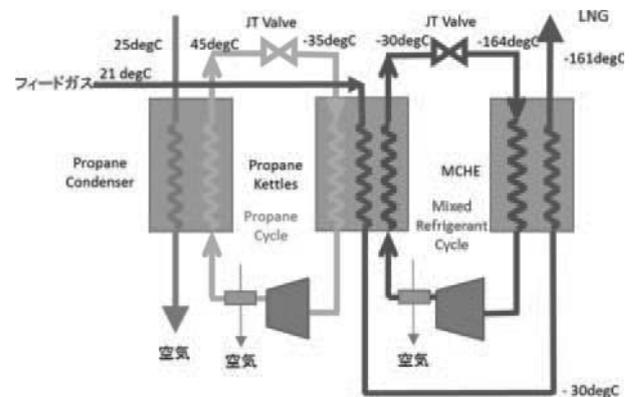


Fig. 2 C3-precooled MR process

ようなガスを高圧域から低圧に膨張させた時に発生する冷熱を使って冷却するエキスパンダー方式の2種類に大別される。冷媒方式では冷媒として混合冷媒（窒素，メタン，エタン，プロパン等の混合物）を使うか或いは純成分からなる単一冷媒（例えば，エチレン，プロパン等）を使うか，また冷媒のサイクルを天然ガスの予冷，液化，過冷却の工程に対応させて3つのサイクルとするか，或いは予冷と液化+過冷却の2つにするか，それとも3つの工程を1つの冷媒サイクルで対応させるかのサイクル数によっても別けられる。

さらに主低温熱交換器（MCHE）のタイプをコイル

原稿受付 2017年7月3日

\*1 日揮㈱ プロセステクノロジー本部  
〒220-6001 横浜市西区みなとみらい2-3-1  
E-mail: omori.hidefumi@jgc.com

式熱交換器(CWHE)とするかプレートフィン熱交換器(PFHE)とするかの違いにより多くのプロセスライセンスにより種々の液化プロセスがライセンスされている。またエキスパンダー方式でもガス冷却に窒素を使うかメタンを使うか、さらに予冷のサイクルを設けるかMCHEのタイプをいずれにするかにより多くのプロセスがある。MCHEのタイプによる違いは主に次のような点である。

- PFHEは多くのサプライヤーが存在するのに対し、CWHEはAPCI, Lindeの2社により寡占化されており価格もCWHEの方が高い
- PFHEの方が短納期で製作可能である
- PFHEは高温側、低温側とも複数流体の運転が可能であるが、CWHEの低温側はシェル側に限られる
- CWHEの方が熱衝撃に対して強い
- CWHEの場合チューブが漏れた場合であってもガスはシェル側に漏れるだけであるがPFHEの場合ガスが大気中へ直接漏れる可能性がある
- 漏れた場合CWHEではチューブをプラグすることにより修復可能であるが、PFHEの場合には漏れたブロック毎交換する必要がある



Fig. 3 CWHE<sup>(2)</sup> and PFHE<sup>(3)</sup>

一般的に大型液化プラントには冷媒方式のサイクルが2つ以上のプロセスが広く採用されており、中型のものには1つのサイクルの冷媒方式が採用され、小型に対してはエキスパンダー方式が採用されている。主な液化プロセス名、ライセンスとその特徴を表1に示す。

### 3. 冷凍圧縮機と駆動機の役割

#### 3.1 歴史的変遷

いずれの液化プロセスにおいてもその心臓部となるのは前述したように冷凍圧縮機とその駆動機である。これを歴史的に追ってみると次のようになる。

- 初期の時代は冷凍圧縮機の駆動にはスチームタービンがその信頼性の高さから広く使われていた。
- しかし1969年に運転が開始されたアラスカのケナイ

Table 1 Liquefaction processes

液化方式	冷媒サイクル	冷媒の種類	MCHEタイプ	プロセス名	ライセンス
冷媒方式	3	混合冷媒	CWHE	MFC <sup>®</sup>	Linde
	3	混合冷媒	CWHE	AP-X <sup>TM</sup>	APCI
	3	単一冷媒	PFHE	Optimized Cascade <sup>®</sup>	ConocoPhillips
	2	混合冷媒	CWHE	AP-C3MR <sup>TM</sup>	APCI
	2	混合冷媒	CWHE	Dual MR	APCI, Shell
	2	混合冷媒	PFHE	Liquefin <sup>TM</sup>	Air Liquide
	1	混合冷媒	CWHE	AP-SMR <sup>TM</sup> , Limum <sup>®</sup>	APCI, Linde
エキスパンダー方式	1	窒素, メタン	CWHE	AP-N <sup>TM</sup> , AP-CI <sup>TM</sup>	APCI
	1	窒素	PFHE	Turbofin <sup>TM</sup>	Air Liquide

にある液化プラントでGE社製のガスタービンFrame 5が初めて冷凍圧縮機の駆動機として使用された。

- その後1978年にインドネシアのアルンLNGプラントにおいてもFrame 5を使って操業が開始されている。
  - オーストラリアのノースウエストシェルフで1989年にFrame 5を使用したプラントが運転を開始されて以降、本格的にガスタービンが冷凍圧縮機の駆動に使用されるようになった。
  - さらにスケールメリットによるプラント価格の低減を目的として発電に使用されていた大型ガスタービン、Frame 6,7が圧縮機の駆動機として1990年代に入ってから多くの液化プラントで使われるようになった。
  - 一方小型の冷凍圧縮機を並列に配置する(Two in One)構成もトリニダードトバコ以降のコノコフィリップス社のOptimized Cascade<sup>®</sup>法を適用したプラントで見られるようになった。
  - 2000年代に入ってからカタールでFrame 9を使用したAPCI社のAP-X<sup>TM</sup>法を適用した年産780万トンの大型トレインが建設された。
  - 2006年にはオーストラリア、ダーウインのプラントで航空機転用型のガスタービンが初めて使用され、この後もパプアニューギニアのプラント、東オーストラリアの炭層メタンを原料とする3つのプラント、北米シェニエールの液化プラントでも稼働している。
  - 大型液化プラントで電動モーターは2007年稼働を開始したスノービットのプラントで初めて使用された。
- 図4に今までの陸上ベースロードの液化プラントで使われた冷凍圧縮機の駆動機タイプを示す。横軸にはプラントの運転開始年、縦軸にそのプラントの1トレイン当たりの容量を示している。

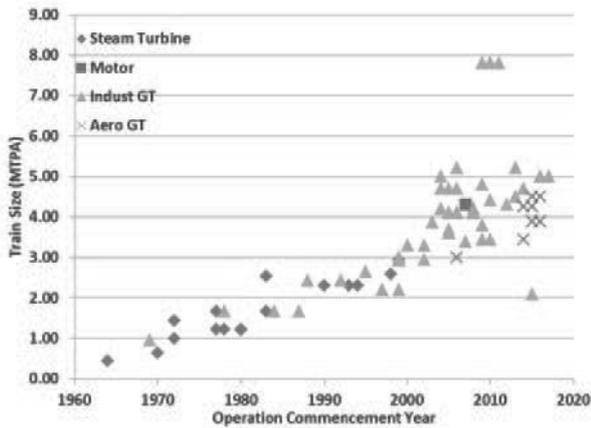


Fig. 4 Driver for refrigerant compressor

3.2 駆動機の特徴

次に工業用ガスタービン、航空機転用型ガスタービン、電動モーターを冷凍圧縮機の駆動機として使用する場合の特徴について説明する。なおスチームタービンについてはコンバインドサイクルにおいて発電用には使われるがLNGプラントの冷凍圧縮機駆動用として今後多く使われるとは考えられないので下表の評価からは除外している。

今までに稼働しているLNGプラントで使用されているガスタービンは工業用、航空機転用型共にGE社製であり、寡占状況にある。SIEMENS社製 Trent 60は新しく計画されているプラントに採用される可能性があり、また三菱・日立により開発されたH100は大型工業用ガスタービンではあるが熱効率も従来型よりは高いこと、2軸なので変速域も広いこと、スタート時に圧縮機側を

Table 2 Characteristic of refrigerant compressor driver

駆動機	特徴
工業用ガスタービン	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●大型サイズまで可能</li> <li>●安価</li> </ul> <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●熱効率はシンプルサイクルでは低い</li> <li>●1軸のタービンは変速域が狭く、運転のフレキシビリティが低い</li> <li>●1軸のタービンはスタート時負荷を下げるためコンプレッサー側を脱圧する必要がある</li> <li>●スタートアップ用の駆動機が別に必要</li> <li>●外気温度により出力が低下する</li> <li>●定期メンテナンスにより稼働率が低下する</li> <li>●供給できるメーカーが限られる</li> <li>●型式により出力が決定される</li> </ul>
航空機転用型ガスタービン	<p>長所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●熱効率高い</li> <li>●プロットエリアが小さい</li> <li>●メンテナンス期間が短い</li> <li>●変速が可能</li> </ul> <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●中型サイズまでに限られる</li> <li>●外気温度による出力低下が工業用ガスタービンよりも著しい</li> <li>●燃料ガス条件が工業用ガスタービンより厳しい</li> <li>●実績が少ない</li> <li>●型式により出力が決定される</li> </ul>

電動モーター	長所
	<ul style="list-style-type: none"> <li>●フレキシブルな出力でのデザインが可能である故プロセス、コンプレッサーのデザイン最適化が可能</li> <li>●変速が可能</li> <li>●メンテナンス期間が短く稼働率が高い</li> <li>●液化トレインのプロットエリアを小さくできる</li> <li>●燃焼器を液化トレインの外に出せる</li> <li>●受電ができる場合コスト削減が可能</li> <li>●出力が外気温度により左右されない</li> </ul> <p>短所</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●大きな発電設備が必要でコストが増大する</li> <li>●大型発電設備を持つ場合燃料コストが増大する</li> <li>●プロセス側と電気系統側の相互作用が大きい</li> <li>●大型プラントへの適用実績が限られている</li> </ul>

脱圧する必要もなくスターターとして別駆動機も不要であることなどのメリットがある。GE社も大型の航空機転用型ガスタービンLMS100を開発しそれも新しく計画されている液化プラントへの採用が予定されている。大型LNGプラントへの電動モーターの採用は実績が限られているが安価な電力が安定的に供給されることが可能であれば大きな電気設備を設ける必要がなくなるので初期投資を抑えることができるという点で有効である。図5に今までLNGプラントにおいて使用実績のあるガスタービン、及び近い将来使用される可能性のあるガスタービンの出力と効率の関係を示す。

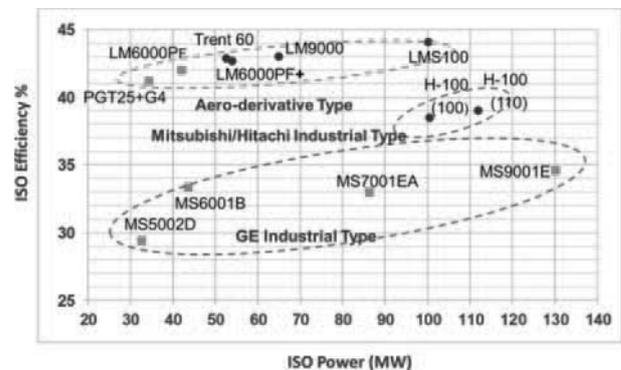


Fig. 5 Gas Turbine application for refrigerant compressor

4. 冷凍圧縮機と駆動機の構成

4.1 LNG生産量と冷凍圧縮機の馬力

前述したように液化は天然ガスの持っている熱を外気に放出するプロセスであるのでその液化効率は外気温度に依存し、外気温度が低いほど液化効率は高くなる。即ち外気温度が低いほど少ない冷凍圧縮機の馬力で天然ガスを液化することが可能である。さらに液化効率に影響するファクターとしては液化プロセスそのものが持っている特性、供給されるガス組成、液化されるガスの圧力、等があるがそれらの条件が決まれば液化効率を推定することは可能である。液化効率が求められれば必要なLNG量を生産するために必要な冷凍圧縮機の馬力を推定することが可能で、結果としてどの程度の大きさの駆動機が何台必要かを知ることができる。また逆に駆動機

の大きさと数を決めることによりLNGの生産量を推定することも可能である。

4.2 冷凍圧縮機と駆動機の構成

駆動機の大きさと数を決める際には液化プロセスのトレイン内で冷凍圧縮機をどのような構成とするかを決めなければならない。それは液化プロセスによっても違ってくるが、例えば広く使われているプロパン予冷混合冷媒プロセスの場合に限ってみても幾つかの構成パターンが考えられる。その際、外気温度によっても多少差はあるが、一般的にプロパン冷媒圧縮機に必要な馬力は混合冷媒圧縮機に必要な馬力よりは小さいという点に注目する必要がある。

(A) プロパン系と混合冷媒系の直列構成

プロパン系(C3)と混合冷媒系、通常低圧混合冷媒(LP MR)と高圧混合冷媒(HP MR)の冷凍圧縮機をそれぞれ独立したサイズの違う駆動機で作動させる。この場合両系を単独の駆動機とする場合もあるし、それぞれ複数の駆動機により並列で運転するケースも考えられる。この構成ではプロパン系に使用する駆動機と混合冷媒系の駆動機は通常サイズが異なる。

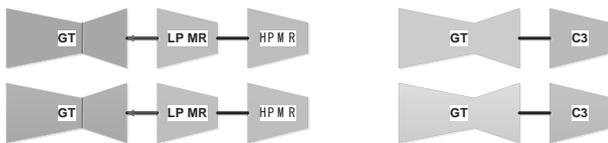


Fig. 6 Series configuration of propane and MR compressor

(B) 混合冷媒を分割する構成

プロパン圧縮機と混合冷媒の高圧側圧縮機を直列の構成とし、混合冷媒の低圧側圧縮機の系統と同じサイズの駆動機で運転する。この場合、混合冷媒の中間の圧力は2つの系統で同じサイズの駆動機が使用できるようにバランスさせる必要がある。この組み合わせで並列の構成で運転するケースもある。



Fig. 7 Split MR configuration

(C) プロパン系と混合冷媒系のタンデム構成

プロパン圧縮機と混合冷媒圧縮機を直列の構成とし、

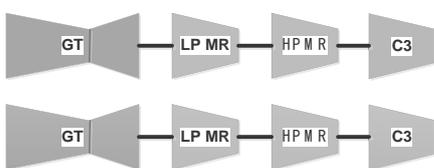


Fig. 8 Tandem configuration

その系を1つの駆動機で運転する。これを並列の構成で運転するケースもある。同サイズの冷凍圧縮機に適用する場合、上記2ケースに比べて大型の駆動機が必要になる。

4.3 ガスタービンの能力増強<sup>(1)</sup>

電動モーターの場合には常に同じパワーが得られるので問題はないが、ガスタービンの場合は外気温度により得られるパワーが影響を受ける。従ってLNGの生産量を推定する際は外気温度の変動を考慮する必要がある。特に航空機転用型のガスタービンはこの影響を大きく受けるので夏場、高温時の生産量を維持するために吸気口に冷却装置を設置するケースがある。図9は吸気温度によりガスタービンの出力がどのように影響を受けるかを、工業用、航空機転用型のガスタービンで比較したものである。

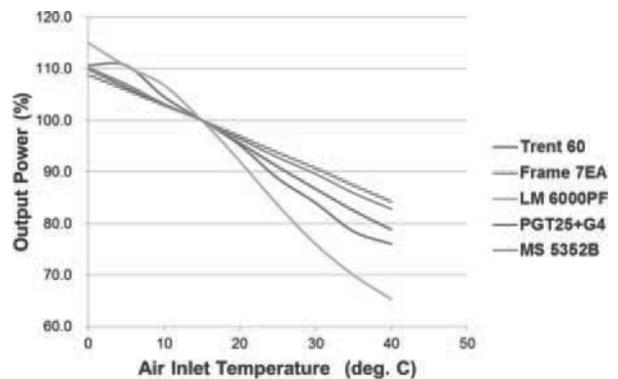


Fig. 9 Effect of air temperature to Gas Turbine power

吸気冷却装置は大別して次の3つのタイプが考えられる。

(A) 蒸発による方法

吸気口に水を落下させることにより蒸発させ、蒸発潜熱により空気温度を下げる。蒸発しきれない水はポンプで循環させる。湿球温度以下には空気温度は下がらず高湿度時には効果が低い

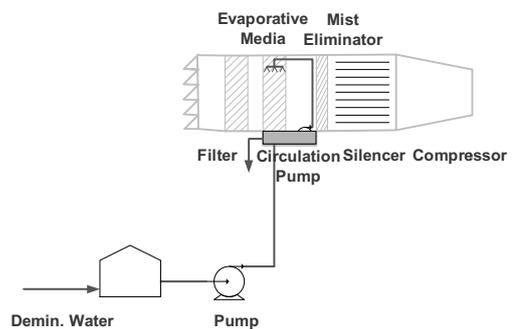


Fig. 10 Inlet air cooling by evaporation

(B) フォギングによる方法

吸気口に水ミストを噴霧しその蒸発潜熱で空気温度を冷やす方式である。特徴は上記(A)蒸発による方法と同じである。

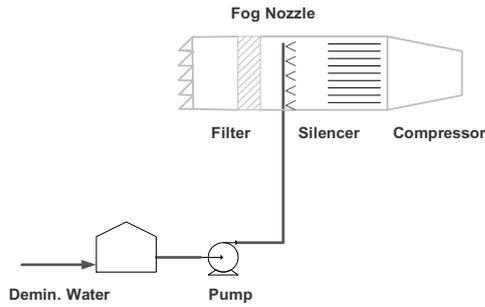


Fig. 11 Inlet air cooling by fogging

(C) チラーによる方法

冷凍機により冷却された水を吸気口の冷却用コイルに供給、循環させることで空気温度を下げる方式である。湿球温度以下に空気を冷やすことが可能である。冷凍システムはプロパン、代替プロン等の冷媒圧縮機を用いる方式、或いはアンモニア、臭化リチウム等の吸収冷凍を用いる方式がある。またLNG液化に用いる冷媒を使用するケースもある。

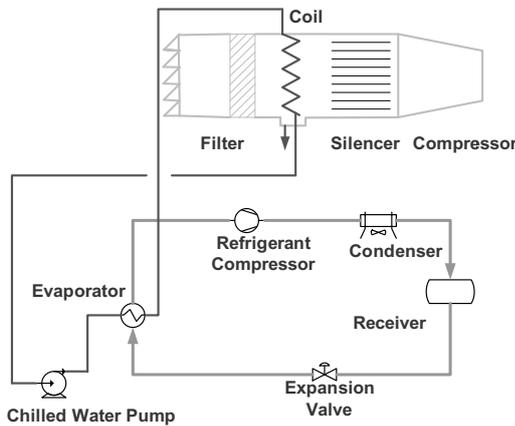


Fig. 12 Inlet air cooling by refrigerant chilling

プロパン冷媒を用いて冷却した水を吸気温度降下に使用した場合の効果为例として下図13に示す。

- 検討ガスタービン： Siemens社製 Trent 60
- ISO Power: 52.8 MW
- 吸気量: 150 kg/s
- 外気温度/相対湿度: 32.5度C/65%

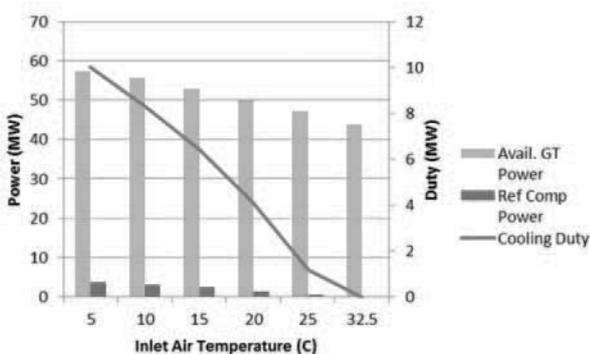


Fig. 13 Effect of inlet air chilling

本例の場合、外気温度32.5度Cにおいてガスタービンから出力可能なパワーは約43.8MWであるが例えば吸気温度を10度Cまで冷やすとすれば、パワーは55.7MWに上がる、即ち11.9MWの増加となる。その際必要な吸気冷却の熱量は8.3MWであり、そのために必要な冷凍圧縮機のパワーは3.1MWとなる。3.1MWのパワーが必要な冷凍圧縮機を付加することにより、11.9MWの冷媒圧縮機用タービンの出力増加が見込め、その分LNG生産量の増加が期待できることになる。

5. 駆動機の違いによるプラントの効率への影響

最後にガスタービンタイプの違いにより、また発電装置の違いによりどの程度液化プラントの効率が影響されるか電動モーターも含めて検討を行い以下にその結果を記述する。また機器構成を示す一例としてケース (A) の構成を図14に示す。

5.1 検討ケース

検討ケースを以下の表3に纏める。

Table 3 Study basis of plant efficiency

ケース	(A)	(B)	(C)	(E)
冷凍圧縮機駆動	工業用ガスタービン	航空機転用ガスタービン	航空機転用ガスタービン	電動モーター
想定機種	Frame 7EA	Trent 60	Trent 60	-
総機数	4	8	8	8
1機当たりの出力 (MW)	78+22 (スターター/ヘルパー)	50	50	50
タービン効率 (%)	33.1	42.8	42.8	-
必要総電気量 (MW)	220	130	130	540
必要総熱量 (MW)	200	200	200	200
発電機駆動ガスタービン (シンプルサイクル)	航空機転用ガスタービン (シンプルサイクル)	航空機転用ガスタービン (シンプルサイクル)	航空機転用ガスタービン (コンパインドサイクル)	工業用ガスタービン (コンパインドサイクル)
想定発電ガスタービン機種	LM6000 PG	LM6000 PC	LM2500 G4	H-100 (110)
発電用ガスタービン機数	6	5	4	6
発電用ガスタービンの出力(MW)/効率 (%) @ ISO条件	54/40.8	44/40.1	33/40.0	111/38.2
発電用蒸気タービン総出力(MW)	-	-	63	138

- 空冷（外気温度10度C）による2つの液化トレイン（LNG年間生産量、約1280万トン相当）からなる液化プラントと想定する。
- 工業用ガスタービンに付帯されるスターター/ヘル

パーモーター、及び電動モーターの出力は航空機転用ガスタービンの出力と同じになるように（LNG生産量が同じになるよう）推定する。両ケース共モーターは可変速運転装置（VSDS）をもっている。

- 上表に記した冷凍圧縮機駆動用ガスタービンの出力はプラントサイト条件での値である。
- プロセスに必要な熱は全てガスタービンからの排熱回収により、或いはコンバインドサイクルから供給される。
- 発電用タービンのスペアはN+1の考えを適用。
- 発電用タービンは航空機転用型を想定するが、電動モーターケースにおいては電気必要量が大きく航空機転用型を考えると数が多くなることから工業用タービンを想定する。

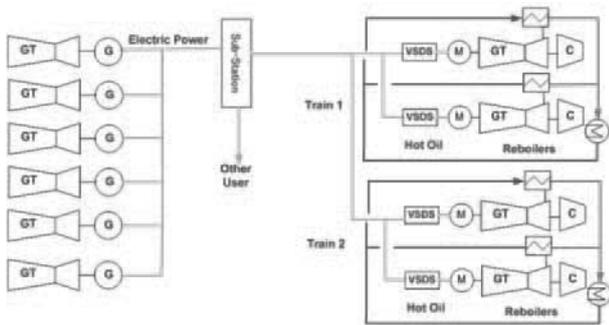


Fig. 14 Plant configuration of case (A)

5.2 検討結果

計算結果を表4及び図11に比較する。

Table 4 Study results of plant efficiency

ケース	(A)	(B)	(C)	(E)
冷凍圧縮機駆動 ガスタービン燃料消費 (MW)	1020	1005	1005	-
発電機駆動 ガスタービン燃料消費 (MW)	635	375	220	1290
総燃料使用量 (MW)	1655	1380	1225	1290
炭酸ガス排出量 (ton/ton LNG)	0.20	0.17	0.15	0.16
効率 (%)	93.1	94.2	94.8	94.5

上記テーブルの値は次の仮定による。

- 燃料、LNG共に組成はメタンとする。
- 効率はLNG総熱量を供給ガス総熱量（即ち燃料総熱量とLNG総熱量）で乗じた値と定義する。

この結果を見てもわかるように冷凍圧縮機駆動にも発電機駆動にも航空機転用型ガスタービンを使用したケースが効率は高く、さらにコンバインドサイクルを考えれ

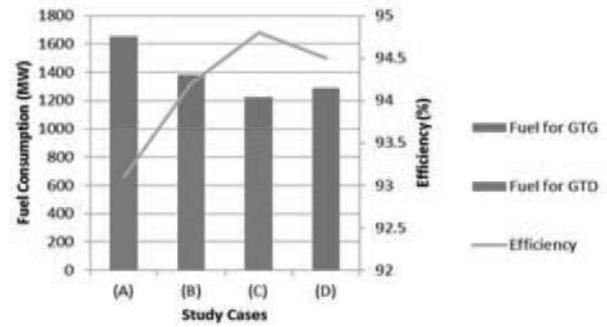


Fig. 15 Fuel gas consumption and liquefaction efficiency

ば効率は上がる。しかしそれはプラント価格の上昇にも繋がるのでその採用には経済性検討が必要である。電動モーターを使用し、コンバインドサイクルを適用した場合、ガスタービン自体が部分的な負荷状態での運転の影響を受けるため、冷凍機圧縮をガスタービンで行いコンバインドサイクルを用いて発電するケースに比較して効率は多少低くなっている。

6. 結言

LNG液化プラント発展は使用される主要機器、即ち主低温熱交換器、冷凍圧縮機及びその駆動機の発展の歴史であり、特に駆動機の変遷が大きくプラントの容量及び効率に影響を与えている。最近は上述したようにガスタービンが広く使用されるようになったがその効率の高さから燃費の削減及び炭酸ガス排出の削減を期待して航空機転用型ガスタービンの使用が増加している傾向がある。そしてさらに高効率、且つNOx排出の低いガスタービンの開発が望まれる。また本稿では記述しなかったが、プラントの運転データ、冷凍圧縮機、及びその駆動機の運転データ等、所謂ビッグデータを読み込み、それを統計解析することによりプラントの異常検知・予測、メンテナンス業務の効率化、さらにプラント運転最適化まで行うことに期待が高まっている。

参考文献

- (1) 小室隆信, 伊藤栄作, 園田隆, 富田康意, 日高孝平, 澁谷誠司, 外気高温化における吸気冷却によるガスタービン複合発電プラントの出力アップ, 三菱重工技報, Vol. 47, No. 4 (2010), pp. 49-54.
- (2) Bach W., Foerg W., Steinbauer M., Stockmann R., Voggenreiter F., Spiral Wound Heat Exchangers for LNG Baseload Plants, Linde AG, The 13<sup>th</sup> International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, Seoul, Korea, may 14-17, 2001
- (3) The Standards of The Brazeed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger Manufacturers' Association, 3rd Edition (2010).

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## LNGの輸送技術

### LNG Transportation Technique

早川 高弘\*1  
HAYAKAWA Takahiro

キーワード：LNG, LNG船, 輸送

Key Words：LNG, LNG Carrier, Transportation

#### 1. はじめに

LNG輸送の歴史を紐解くと、1950年代に米国で天然ガスを液化（LNG：液化天然ガス  $-162^{\circ}\text{C}$ ）して海上輸送したことで始まり、我が国では1969年にアラスカ産のLNG輸入が始まった。その後、LNGの生産基地は東南アジア、中東、豪州、サハリン等へと拡大多様化した。近年、北米シェールガスの発見により北米シェールガス由来のLNGの輸出プロジェクトが複数立ち上がり、新たな輸送ルートが生まれつつある。

また、地球温暖化問題や大気汚染問題がクローズアップされる中で、CO<sub>2</sub>排出量が石油や石炭に比べ少なく、大気汚染物質である硫黄酸化物の排出も無い天然ガス（LNG）は環境負荷の低い燃料としても改めて注目され、今後も市場は拡大していくと見られている。

当社は1984年の泉州丸就航以来、30年以上に渡りLNGの海上輸送に携わる外航海運企業であり、ここでは主に当社が運航する大型LNG船のハードウェアについて概説したい。

#### 2. LNG船の種類

大型LNG船では、LNGをほぼ大気圧、極低温（約 $-160^{\circ}\text{C}$ ）の状態に輸送する。タンク圧力をほぼ大気圧に維持の為、BOG（ボイルオフガス：入熱の為にLNGが気化して発生するガス）をいかに処理するかが重要となり、また発生したBOGは推進燃料として利用する。本項では複数ある貨物タンク方式と推進方式について説明する。

##### 2.1 貨物タンク

大型の外航LNG船の代表的なLNGタンクの方式は大きく分けてメンブレン方式、モス方式、SPB方式の3種類である。

上述の我が国黎明期の泉州丸当時のタンク容量は125,000m<sup>3</sup>、BOR（ボイルオフレート：BOGの1日当りの発生量をLNG総容量で割ったもの）0.25%/day程度であった。タンク容量は輸送効率化の為に大型化し210,000m<sup>3</sup>や260,000m<sup>3</sup>のLNG船も建造されているが、現

在は北米のシェールガス由来のLNG輸送に従事する事を想定し新パナマ運河を通峡できる船型である165,000～180,000m<sup>3</sup>が主流となっている。またBORは断熱技術の進歩と共に向上し、0.08%/day程度となっている。

以下に3種類のタンク方式について以下概説する。

##### 2.1.1 メンブレン方式

フランスのGTT社が開発しライセンスを保有する方式であり、“メンブレン”の言葉の通り金属の薄膜（インバー鋼「NO96」またはステンレス鋼「MarkIII」、最近では新方式「MarkV」も開発されている）により液密を保ち、船体と薄膜の間を断熱材で覆う方式である（図1を参照）。船体形状の自由度が高く容積効率の良い排水量が小さい船に仕上げる事が出来る。日本での建造実績も有るが、最近では韓国、中国で建造されるLNG船での実績が多い。

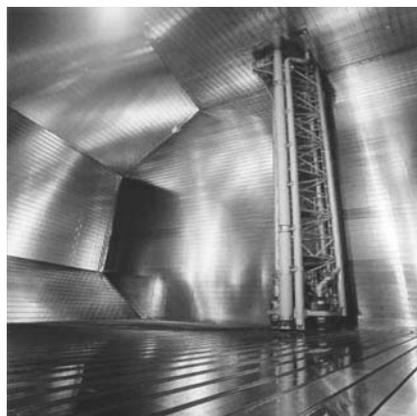


Fig. 1 Membrane tank<sup>(1)</sup>

##### 2.1.2 モス方式

ノルウェーのモスマリタイム社がライセンスを保有するアルミニウム製の球形タンク方式である。その形状から漏洩リスクが低く非常に信頼性が高い（図2を参照）。

球形であるが故に船舶に搭載する上では容積効率が悪いので、積載容量を上げる為にタンク赤道部を筒状に伸ばすストレッチ型を採用するケースも有る。

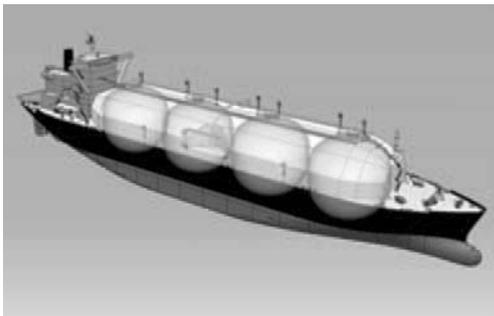
またタンク上下を膨らませて非真球の“リング”形状とすることで船体の大型化をせずに積載容量を増やす工夫もなされている（図3を参照）。

原稿受付 2017年7月30日

\*1 ㈱商船三井  
技術部 LNG船プロジェクト第一グループ



Fig. 2 Moss tank

Fig. 3 Apple-Shaped tank<sup>(2)</sup>

開発当初は欧米の造船所でも建造実績があるが、現在は主に日本の造船所での建造実績が多い。

### 2.1.3 SPB方式<sup>(3)</sup>

日本のIHI/JMUが開発した自立角形タンク方式であり、SPBはSelf-supporting Prismatic-shape IMO type Bの略称である。アルミニウム製の角形タンクであり船体形状にタンク形状を合わせることが出来る為、容積効率が比較的高くまた非常に堅牢な自立型タンクである為、信頼性も高い（図4を参照）。

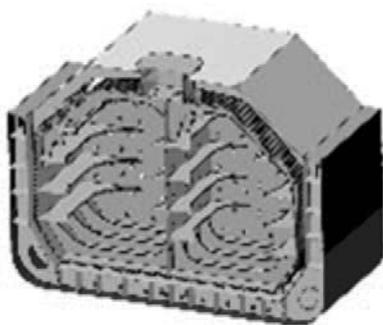


Fig. 4 SPB tank

## 2.2 推進方式

通常、LNG船はBOGを推進や船内電力の燃料として用いている。BOGが燃料消費量を下回る場合にはLNGを強制気化させる（ガス専焼）か、燃料油との混焼で必要な燃料を確保する。そのためガスと燃料油の双方を燃料とできる機関プラントであることが求められる。

また、前述のBORの低下（0.25%⇒0.08%）が推進機関の燃費低減を追及する推進力となり、様々な低燃費の推進プラントが考案され実用化されている。

### 2.2.1 蒸気タービン

従来は、混焼が技術的に確立した蒸気タービン（ボイラで蒸気を作り、蒸気タービンで推進）のプラント構成が主流であった。これは、LNG船以外の商船で一般的な低速2ストロークディーゼル推進機関に比べ極めて信頼性が高いことも理由である（図5を参照）。

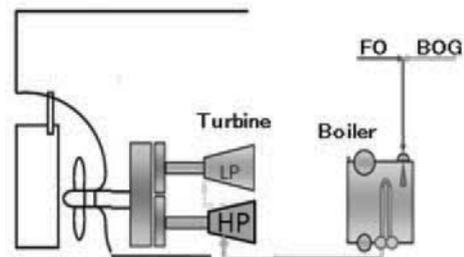


Fig. 5 Steam turbine plant

一方で、蒸気タービンプラントは燃費効率がディーゼル機関に比べ劣る為、近年では燃費効率を高めるべく蒸気タービンプラントに再熱サイクル（一度タービンで仕事をした蒸気をボイラで再加熱する）を採用することで燃費効率を高めたシステムを搭載したLNG船も就航している。

### 2.2.2 電気推進

2000年代に入り、先ず4ストロークの発電用ディーゼル機関で混焼技術（但しガスか燃料油のスイッチ運転）が確立した為、混焼ディーゼル機関で発電した電力で推進モーターを駆動する電気推進システムが普及した（図6を参照）。

電気推進システムでは、ガスタービンエンジンとその廃熱利用による発電で電気推進を行うシステムも考案されている。

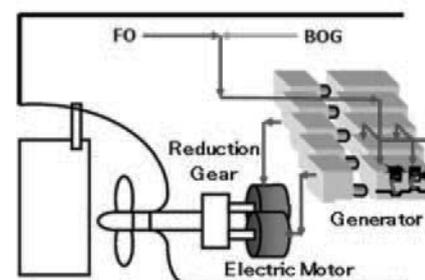


Fig. 6 Dual-Fueled diesel electric propulsion system

### 2.2.3 STaGE (蒸気タービン+電気推進)

更に、電気推進システムと蒸気タービンプラントを組み合わせて、ディーゼルエンジンの廃熱を蒸気発生に用いることで燃費効率を高めたSTaGE (Steam Turbine and Generator Engine) プラントも開発されている (図7を参照)。

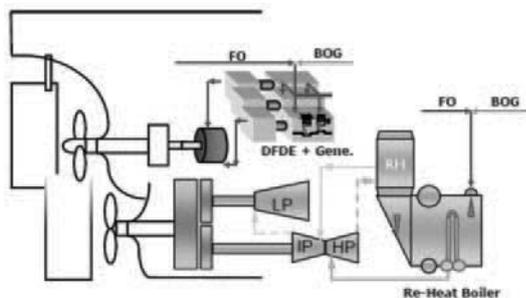


Fig. 7 STaGE

### 2.2.4 低速2ストロークディーゼル機関

現在では機関単体では最も燃費効率の良い2ストロークの低速ディーゼル推進機関で混焼技術が確立したことから最近では2ストロークディーゼル推進機関を搭載したLNG船の建造実績が増えている。

一部ではBOGをLNGに戻す再液化装置を搭載することでBORをゼロとし、LNG船以外の商船と同じ燃料油駆動のディーゼル機関を採用しているLNG船もある (図8を参照)。

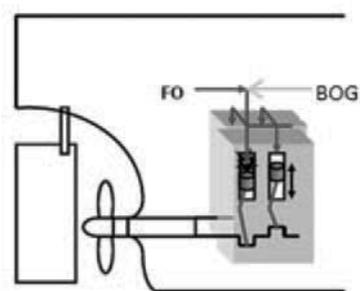


Fig. 8 2-Stroke diesel propulsion system

## 3. LNG輸送のトレンド

従来、天然ガスは原油の副産物として産出され、LNGは海上輸送され先進国で消費されるケースが多かった。

しかし近年では主に以下の要因によりLNGのトレードパターンは大きく変わろうとしている。

### 3.1 北米シェールガス革命

頁岩 (シェール) 層に堆積した天然ガスを採掘する技術が2000年代になって確立し、生産コストも低下したことから、米国は天然ガス輸入国から一大輸出国になろうとしている。

シェールガス由来の天然ガスをLNG化して日本向けに輸入するプロジェクトも複数立ち上がっている。

### 3.2 新パナマ運河の開通<sup>(4)</sup>

従来のパナマ運河は閘門の大きさにより通航可能なのは所謂パナマックスサイズと言われる船型 (船幅32.3m) までに制限されていた為、船幅が概ね45m程度ある大型LNG船は通航することが出来なかった。しかし、2016年に新パナマ運河が開通したことで49mまでの船舶の通航が可能となった。これにより上記シェールガス革命で生産されたLNGの日本を含めた極東へのLNGの輸送が可能となった。

現在、北米からのLNG輸出向けに計画されているLNG船は新パナマ運河の最大幅である49m、積載容量は最大で180,000m<sup>3</sup>で計画されている。

### 3.3 北極海航路

近年、従来は商船の航路として想定されていなかった北極海を航行して欧州-極東を結ぶ航路が注目されている。その中で、ロシア北部のヤマル半島サベッタ港から砕氷LNG船でLNGを極東と欧州へ輸送するプロジェクトがYAMALプロジェクトである (図9を参照)。



Fig. 9 YAMAL project<sup>(5)</sup>

### 3.5 消費地の多様化

従来のLNG消費地は日本を始めとする先進国が主だったが、近年は中国やインド、東南アジア諸国等、LNGの消費地は多様化している。

### 3.6 LNG船関連技術の用途拡大

従来は生産地の陸上プラントで生産されたLNGを消費地の陸上タンクまで輸送するのが船の守備範囲だったが、近年は生産地の洋上で液化貯蔵を行う設備 (FPSO: Floating Production, Storage and Off-loading system) や、消費地の洋上でLNGを受け入れ再ガス化し陸上にガスを供給する設備 (FSRU: Floating Storage And Regasification Unit) も普及が進んでおり、LNG発電船も構想途上にある。

#### 4. おわりに

当社は本稿内で概説したプロジェクトの多くに関わっており、今後とも今迄培ってきたLNGの安全/安定輸送を通じて世界経済と環境保全に貢献していく。

#### 参考文献

- (1) 石丸純史郎 他, 三菱重工技報 Vol. 41 No. 6 (2004-11) P.321 最新鋭大型メンブレン方式LNG 船の建造.
- (2) 平松 彩 他, 三菱重工技報 Vol. 53 No. 2 (2016) P. 3 船舶・海洋特集 “サヤリングSTaGE” の開発.
- (3) JMU独自開発のLNG/LPGタンク技術<[https://www.jmuc.co.jp/products/spb\\_system/](https://www.jmuc.co.jp/products/spb_system/)> (参照日2017年7月21日).
- (4) Panama Canal Authority, OP NOTICE TO SHIPPING No. N-1-2017 Vessel Requirements.
- (5) 商船三井 ロシア・ヤマルLNGプロジェクト向け新造LNG船3隻の造船契約を締結 <<http://www.mol.co.jp/pr/2014/14042.html>> (参照日2017年7月21日).

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## SPB<sup>®</sup>方式LNG輸送船 LNG Carrier with SPB<sup>®</sup> Tank System



橋 洋一\*1

TACHIBANA Youichi

キーワード：SPB<sup>®</sup>タンク方式，ボイルオフ率，船陸整合，三元燃料機関

Key Words：SPB<sup>®</sup> Tank System, Boil Off Rate, Ship-shore Compatibility, Tri Fuel Diesel Engine

### 1. 緒言

環境にやさしいエネルギー資源として天然ガスの需要が増大する中、液化天然ガス（LNG）市場も大きく成長することが予想されている。生産側では、新たなガス田の開発に注目が集まり、こうした環境のもと、米国シェールガスのLNG輸出プロジェクトが具体化され、当社ジャパンマリニュナイツド(株)（以下、JMU）は、東京エルエヌジータンカー(株)殿、(株)商船三井殿および日本郵船(株)殿より大型LNG輸送船を4隻受注した。

このLNG輸送船4隻は、主に米国コーブポイントプロジェクトからのLNG輸送に使用する（図1参照）ために建造するもので、2016年に拡張されたパナマ運河を通峡可能な船型を採用している。



Fig. 1 LNG trading route from cove point in U.S. to japan (illustration)

以下に、本船の概要を紹介する。

### 2. 本船の概要及び特徴

本船は、2016年に増設された新パナマ運河を通峡可能な汎用性の高い船型であり、国産技術であるJMUの自立角形タンク方式（以下、「SPB<sup>®</sup>方式<sup>(1)</sup>」）を採用してい

る。SPB<sup>®</sup>方式は、(株)IHIとJMUが開発したもので、スロッシングが発生しないため、任意の液量を積み付けることが可能で、LNG輸送船だけではなく、LNGを洋上貯蔵或いは生産するFSOやFPSOへの採用が多数検討されている。さらに、タンク形状の自由度が高く、船体形状に合わせたタンクを設計することで、非常に高い推進性能を確保すると共に、低燃費を実現できる。

また、米国沿岸における環境規制<sup>(2)</sup>に対応するため、低硫黄油も使用可能な三元燃料ディーゼル機関（TFDE：Tri Fuel Diesel Engine）電気推進方式<sup>(3)</sup>およびSCR<sup>(4)</sup>の採用、ボイルオフ率<sup>(5)</sup>を世界最小クラス（0.08%/日）にするタンク防熱仕様の採用により、優れた燃費性能と大幅な環境負荷の低減を実現している。

### 3. 主要目

本船は新パナマ運河を通峡可能、かつ、多数のLNG積地・揚地との船陸整合等を考慮した汎用性の高い船型としている。

本船の主要目は、以下の通りである。

全長：	299.9m
型幅：	48.9m
型深さ：	26.4m
満載喫水：	11.5m
貨物タンク形式：	SPB <sup>®</sup> 方式
貨物タンク容積：	約 165,000m <sup>3</sup>
航海速力：	19.5ノット
主機関：	TFDE

また、本船の完成予想イメージを図2に示す。

積地・揚地と本船との船陸整合では、

- ・船体主要目寸法制限
- ・喫水制限
- ・水面上船体の最先端高さであるエアドラフト制限
- ・基地フェンダー配置と本船の船側平坦部の位置関係
- ・基地ローディングアーム／アンローディングアーム

原稿受付 2017年7月31日

\*1 ジャパンマリニュナイツド(株)  
〒108-0014 港区芝五丁目36番7号  
E-mail : tachibana-youichi@jmuc.co.jp



Fig. 2 165,000m<sup>3</sup> LNG carrier with SPB® tank system (illustration)

ム<sup>(6)</sup>稼働範囲と本船マニホールドの位置関係

- ・基地・本船間の乗込み設備の設置位置と稼働範囲
- ・基地係留配置と本船係留設備配置
- ・潮汐

等を確認している。

#### 4. 船体部

本船は、船体中央部の船倉区画に4個の自立角型タンクを配置し、その前部に前部燃料油タンクおよびバラストタンク<sup>(7)</sup>、後部に後部燃料油タンク、機関室、および居住区を設けている。

船倉区画側部は二重船側構造を採用し、上甲板下通路およびバラストタンクとしており、二重底内はバラストタンクおよびバラスト配管等が設置される区画となっている（図4参照）。

本船は、低温海域への航行が可能のように、船体構造を耐氷構造としている。

また、米国沿岸警備隊による液化ガス運搬船の外国船籍に対する規則も適用し、規則で要求される温度条件を満足するよう船体各部の温度計算を行い、その温度に応じた十分な靱性をもつ鋼種を採用している。

省エネルギー対策として、SURF-BULB<sup>(8)</sup>（図3参照）、



Fig. 3 SURF-BULB and SSD

Super Stream Duct (SSD)<sup>(9)</sup>（図3参照）を採用し、推進馬力の低減および燃料消費量の削減を図っている。

#### 5. SPB®タンク

SPB®タンクとして、船倉内に船体から独立した角型タンクを搭載し、タンクを支持台により保持する構造方式を踏襲しているが、以下の点でSPB®タンクは従来のタンクと異なる特徴を有している。

本船のトランクデッキを有する船型に対応し、従来の四角形断面形状から八角形断面形状を採用し、船体とタンク間の空間を最小化することにより、容積効率を確保している（図4参照）。

また、断面形状変更のスロッシング<sup>(10)</sup>に対する影響を評価するため、3次元CFD計算を実施し、タンク内部の隔壁の効果により、全液位で問題なく運航可能であることを確認している。図5に横揺れ時の3次元計算結果の例を示す。

さらに、新船型およびタンク形状改良の影響を広範な強度解析により評価し、タンクの構造部材および支持台の配置・形状の最適化を実施している。この最適化により、構造各部の部材寸法が均質化され、信頼性向上に寄与している。また、支持台の形状最適化は、低ボイルオフ率の達成にも寄与している。

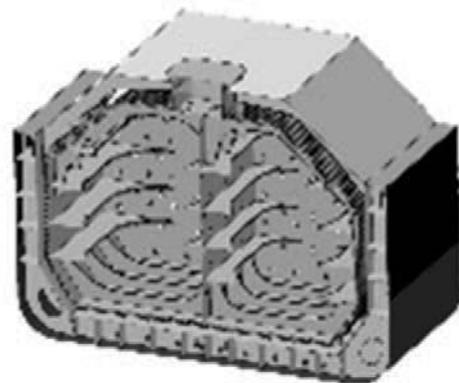


Fig. 4 SPB® tank configuration (typical)

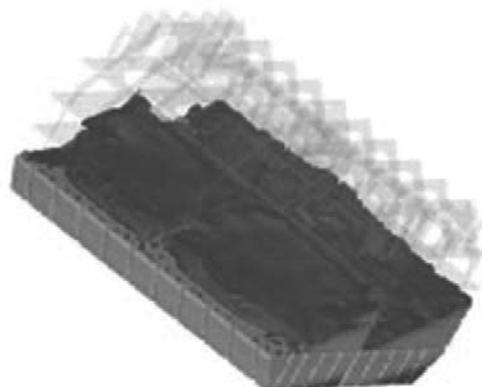


Fig. 5 Result of 3D-CFD sloshing calculation at rolling motion (sample)

## 6. タンク防熱

SPB®タンクの防熱には密度が約40kg / m<sup>3</sup>の断熱性能が高いポリウレタンフォーム（以下、PUF）を用いている。

図6にSPB®タンクの概略保冷システムを示す。本図に示すように、PUFを四角いパネル形状に加工し、PUFパネルの中央部1点でスタッドを用いてタンク外表面に固定させている。

PUFパネルとPUFパネルの間の目地部分は、柔軟性を持たせた構造（クッションジョイント）としている。PUFパネル四周をこのクッションジョイントで囲うことにより、タンク冷却時や昇温時のタンクとPUFパネル間の相対的な動きやPUFパネル自身の伸縮を吸収させ、PUFパネルおよびスタッドに過剰な応力が発生しないように設計されている。

SPB®タンクは自立タンクであるためタンク内の液荷重をPUFパネルが受け持つことは無く、保冷性能本位で保冷システムを設計することが可能である。

PUFパネルの厚さは自由に調整することが可能であり、従来よりも保冷厚を厚くすることで、ボイルオフ率0.08%/日を達成している。

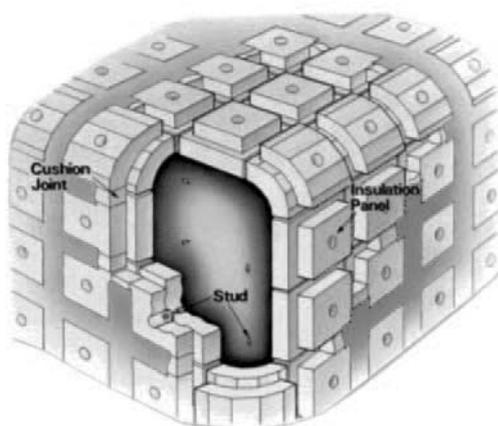


Fig. 6 Insulation system for SPB® tank (typical)

## 7. 結言

SPB®タンク方式LNG輸送船の概要について述べた。地球温暖化対策に対する環境にやさしいエネルギー源として、天然ガスの需要増大の流れは続くと考えられる。当社は今後とも高性能なLNG輸送船の建造を通じ、日本のLNG輸送に貢献すべく取り組んでいきたい。

## 参考用語集

- (1) Self-supporting Prismatic-shape IMO type Bの略
- (2) 米国沿岸の沖合200海里までの多くの海域における、船舶からの排気ガスに含まれる硫黄酸化物（SO<sub>x</sub>）の排出規制
- (3) 低硫黄油（軽油）、重油およびガスの3種を燃料としてディーゼル機関により発電し、電気モーターによりプロペラに推進力を伝えるシステム
- (4) Selective Catalytic Reduction（選択接触還元）の略酸化状態の排ガス中でNO<sub>x</sub>を還元するためにアンモニア源（還元剤）の投入により、窒素と水に還元する後処理装置システム
- (5) 航行中に自然に蒸発する天然ガスの割合
- (6) 本船からLNGを荷揚げする設備。貨物を陸揚げする際に、陸側から船側の積出し用取り合いフランジへ配管を接続し、その配管を用いて陸側タンクへ受入を実施している。このときに用いる配管をアンローディング・アームと呼ぶ。基地から本船へ積み込む設備をローディングアームと呼ぶ。
- (7) 貨物を積んでいない空船では喫水が浅くなり、風圧や波浪のため、推進器の空転や復原力の不足を生じ、航海の安全が保てなくなるので、喫水を増大させるために海水を積むタンク。
- (8) プロペラの後方の舵に装備され、プロペラの中心から発生するハブ渦という推進力に寄与しない強い流れを抑制すると共に、フィンによって揚力を発生させて推進力を得る装置。
- (9) プロペラの前方に装備され、船尾で造られる渦を回収し、揚力を発生させて推進力を得ると共に、プロペラに入る流れを整流してプロペラの推進効率を高める装置。
- (10) タンク内の液体が外部からの比較的長周期な振動によって揺動すること。この揺動により、構造が破壊されたり、液体が容器から溢れ出る被害などが問題となる。

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## PCLNGタンク防液堤構築技術の動向

### The Latest Construction Method of Prestressed Concrete Outer Tank



阿久津 富弘\*<sup>1</sup>  
AKUTSU Tomihiro



田摩 仁\*<sup>1</sup>  
TAMA Hitoshi

キーワード：PCLNG貯槽，防液堤，ジャンプフォーム工法，スリップフォーム工法

Key Words：Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage, Outer Wall, Jumping form, Slipforming

#### 1. はじめに

LNG（液化天然ガス）は、マイナス162℃の極低温に冷却して液化されたメタンを主成分とする可燃性の液化ガスであり、クリーンで熱効率がよく環境にやさしいエネルギーとして、都市ガスおよび発電用としての需要が増大している。LNG船にて海外から運搬されるLNGを貯蔵するタンクの建設が国内外で進んでいる。貯蔵施設には高い安全性と信頼性が求められ、土地の有効活用、経済性からプレストレストコンクリート（PC）構造のPCLNG地上式貯槽（以下、PCLNGタンクと称す）が主流となっている。ガスおよび電気事業の規制緩和が進みエネルギー間競争が激しさを増し、PCLNGタンクの建設には運転開始までのリードタイムの短縮を図るため工期短縮のニーズが高まっている。

本稿では、PCLNGタンクの土木工事のうちPC防液堤構築技術の動向を紹介するとともに、大阪ガス(株)泉北製造所第一工場に建設した世界最大容量PCLNGタンクの防液堤構築で実現したスリップフォーム工法による大幅な工期短縮について述べる。

#### 2. PCLNGタンクの概要

##### 2.1 PCLNGタンクの形式

PCLNGタンクは、金属二重殻LNGタンクとPC防液堤を一体化した構造である。内槽からLNGが漏洩した場合も流出範囲が局限化され保安レベルが高いこと、防液堤スペースが不要となり敷地の利用効率が高いこと、タンクと防液堤の基礎が共有でき外槽もライナ構造となることなど合理的な形式である。

##### 2.2 PCLNGタンクの構造

PCLNGタンクの構造を図1に示す。PCLNGタンクは、マイナス162℃のLNGを貯蔵する内槽（低温鋼（主に

9%または7%Ni鋼)), 内槽を保冷するための保冷材（主にパーライト断熱材）、保冷材を保持し防湿のために封入される窒素ガスを密閉する外槽、万一の内槽からの漏洩時に外部への漏洩を防止する防液堤で構成されている。

PC防液堤は、内槽からの漏洩時、LNG全量を確実に貯留して外部への流出を防止する防災上重要な機能を担っている。防液堤内面にはライナ構造である普通鋼の外槽が埋込みアンカーにより固定されている。LNGを保持する内槽側板と外槽の間には約1.0mの保冷空間が設けられており、外槽は保冷空間を乾燥状態に保つために封入する窒素ガスを保持するとともに外部からの水分の侵入を防止する機能を有する。また、外槽ライナの内面には漏洩後の防液堤に対するLNGの接液によって生じる急激な温度勾配とそれに伴う大きな温度応力を緩和するために冷熱抵抗緩和部が設けられる。

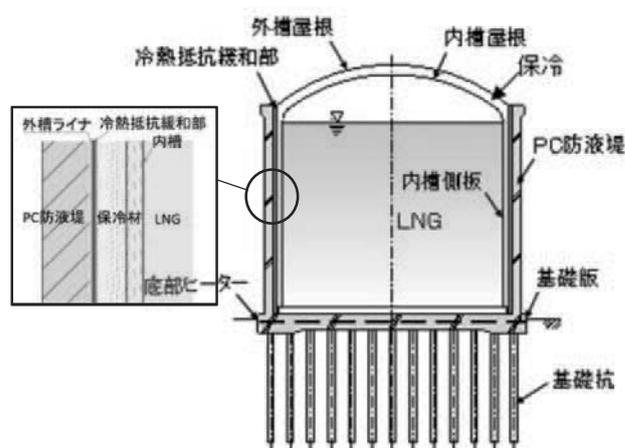


Fig. 1 Typical design concept of PC LNG tank

原稿受付 2017年7月21日

\* 1 (株)大林組土木本部生産技術本部設計第三部  
E-mail: akutsu.tomihiro@obayashi.co.jp  
tama.hitoshi@obayashi.co.jp

### 2.3 PCLNGタンクの施工手順

PCLNGタンクの施工は、①基礎杭打設、②基礎版構築、③防液堤構築、④鋼製屋根組立、⑤鋼製屋根を空気圧により浮上（エアレイジング）、⑥底部保冷、内槽底板・側板の機械工事、⑦内槽および防液堤側面に設けられている工事用開口部の閉塞、⑧水張・耐圧・気密試験、⑨内外槽間の保冷工事、⑩クールダウンの手順で行なわれる。

工事は、基礎杭および基礎版・防液堤の土木工事、鋼製屋根・外槽・内槽・保冷の機械工事に大別される。国内ではゼネコンが担当する土木工事とタンクメーカーが担当する機械工事が分離発注もしくは乙型JVとして発注されることが多く、ゼネコンとタンクメーカーとの混在作業となる。したがって、先行する基礎版および防液堤を機械工事に早期に引き渡し、かつ土木工事期間に占める割合が大きい防液堤の工期短縮が要求される。

## 3. PC防液堤の構築方法

### 3.1 概要

防液堤構築方法として、枠組足場を地上から組み立て防液堤全体を囲む総足場工法と、防液堤構築とともに足場が上昇するスライド足場工法に大別される。

PCLNGタンク工事では、防液堤内側での機械工事が早期に着手できるスライド足場工法が採用されることが多い。スライド足場工法は、円周方向に分割した足場を大型クレーンで上昇させる工法と油圧ジャッキにより全周同時に自昇させる工法がある。また、打設したコンクリート面から一旦型枠を外してジャンプするように上昇させるジャンプフォーム工法とコンクリート面に沿って型枠を滑らせるように上昇させるスリップフォーム工法に区分される。

### 3.2 総足場工法

貯蔵容量が5万 $m^3$ 以下の小規模なPCLNGタンク、かつ全体工期に余裕があり防液堤構築完了後に機械工事が開始できる場合、枠組足場を地上から組み立てる総足場工法が適用できる。枠組足場は全国市中で調達可能であり小規模なPCLNGタンクでは経済的となる。



Fig. 2 Full scaffold method in Japan

### 3.3 ジャンプフォーム工法

ジャンプフォーム工法は防液堤の側面に取り付けることができる足場を用いて、大型クレーンにより順次高くなる防液堤に応じてスライドさせる工法である。この工法により、防液堤内のスペースを広く取ることができ、防液堤内側でのタンク機械工事が土木工事と並行して行えるため全体工期の短縮が図ることができる。

国内のPCLNGタンク工事で実績が多い工法であり、1990年に建設着手した大阪ガス(株)泉北製造所第二工場において日本で初めてとなるPCLNGタンク実用化1号機（貯蔵容量14万 $m^3$ ）の防液堤構築に採用されている。1号機に続き1993年に建設着手した同容量の2号機を同工法で、さらに1997年に建設着手した大容量化した3号機（貯蔵容量18万 $m^3$ ）では高強度の自己充填コンクリートの長を活かしてコンクリート打設リフト高さを従来の約1.5倍である4.4mまで高くし、1・2号機に比べ約4ヶ月の工期短縮を実現している。最近の国内他工事でもコンクリート打設リフト高さを高くし、防液堤の打設リフト数を減らすことにより、機械工事への早期引渡しと防液堤構築期間の短縮を図る傾向が見られる。<sup>(1)</sup>

一方、国内において海外のPCLNGタンクや国内の橋梁工事等で普及している足場と型枠が完全に一体化された図4に示す欧州製のシステム型枠をジャンプフォーム工法として採用する工事が増えている。



Fig. 3 Jumping form method of outer wall at Senboku, Japan



Fig. 4 Formwork and scaffolding system

韓国および中国におけるPCLNGタンクのジャンプフォーム工法による防液堤の構築例を紹介する。

韓国では、日本でPCLNGタンクにシステム型枠を導入する以前の1990年代より欧州製のシステム型枠が防液堤の構築に採用されていた。定置式タワークレーンで大型化したシステム型枠を移動させ、コンクリート打設リフト高さは約5mと日本に比べて高い計画であった。また、複数基が同時に発注され、JVを結成した建設企業がタンク毎に各々担当しており欧州製のシステム型枠も異なるメーカーのものが採用されていた。同じLNG基地内の工事で同時に複数の欧州製のシステム型枠が採用されており、韓国では国内工事であっても海外技術を積極的に導入されていた。



Fig. 5 Jumping form method of outer wall in Korea

図6に示す中国の事例では、単管とH鋼で組まれた簡易な構造の高さ3.6mの足場が採用されていた。型枠は木製型枠とし、高さ3.6mの1リフトに対して1日目に高さ2.4m、2日目に下部1.2mの型枠を外して上部の残り1.2mに取付けコンクリートを打設する方法が採用された。中国では人件費に対して仮設備のコストを抑える傾向にあり、足場を1回上昇させる間に型枠を組み替えてでも仮設備費用の縮減を優先している。日本では1回のコンクリート打設高さを約5mのように高くしコンクリート打設回数を減らすことにより合理化を試みている



Fig. 6 Jumping form method of outer wall in China

ことから全く反対の考え方である。労務単価の差による施工計画の違いが出ている事例である。<sup>(2)</sup>

### 3.4 自昇式足場・型枠工法

1999年以降、ガスおよび電気事業に関する規制緩和が進みエネルギー間競争が激しさを増したことから、PCLNGタンクの建設には運転開始まで短縮を図るためより一層の工期短縮が求められた。

2000年に建設着手した大阪ガス(株)姫路製造所の4号機(貯蔵容量18万 $m^3$ )に自昇式足場・型枠工法を採用した。

大型クレーンを用いたジャンプフォーム工法による防液堤の構築では、足場と型枠の盛り替えに要する工程が防液堤構築作業の約50%を占めていた。石炭サイロや煙突等の急速化施工技術として採用されていたスリップフォーム工法があり、これを適用できれば大幅な工期短縮が可能となる。しかし、型枠を揺動させながら連続的に上昇させることによるコンクリート表面部の仕上がり品質、早期脱型に伴う耐久性への影響、ライナ取付用埋込み金物の取付け精度の確保などが施工上の課題となったため、採用を見送った。そこで、型枠を一定期間存置させ、スリップフォーム工法のようにコンクリート面に沿って上昇させるのではなく、型枠をコンクリート面から外した状態で足場もとも上昇させる自昇式足場・型枠工法を適用した。型枠と足場を全周、内・外側同時にジャッキアップすることでコンクリート打設リフト高さ1.9mの構築が実働6日となり、防液堤全高さを20リフトで打ち上げるのに要した期間は7ヶ月となった。大型クレーンによるジャンピングフォーム工法の同容量の3号機は全10リフトの構築に11ヶ月掛かっており、本工法により4ヶ月の工期短縮効果が得られた。



Fig. 7 Self-Climbing form method at Himeji, Japan

### 3.5 スリップフォーム工法による防液堤の構築

スリップフォーム工法は、型枠・足場が一体となった装置を防液堤側面に配し、ジャッキにより装置全体を上昇させながら鉄筋組立とコンクリート打設を並行して躯体を構築する工法である。コンクリートの打継ぎがなく型枠・足場の盛り替えが不要なことから、工期を短くできるのが特徴である。

2008年、これまでのPCLNGタンクに関する知見・経験をもとにPCLNGタンクの設計安全率が合理的に見直され、さらなる大容量化が可能となった。2012年に建設着手した世界最大容量の大阪ガス(株)泉北製造所第一工場の5号機(貯蔵容量23万m<sup>3</sup>)の防液堤構築にあたり、スリップフォーム工法がコンクリートの耐久性に影響を及ぼさないことを事前評価により確認できたため、スリップフォーム工法が採用された。

スリップフォーム工法は、煙突やサイロ等、縦長で円筒状の地上コンクリート構造物を構築する方法として多くの実績があり、近年では海外のPCLNGタンクでスリップフォーム工法を適用する工事が見られるが、外槽ライナを防液堤内面に設置するため多数配置される埋込みアンカーを有する大容量・大口径のPCLNGタンクに適用するのは世界で初めての試みである。<sup>(3),(4)</sup>

#### 4. スリップフォーム工法による急速化施工の実現

##### 4.1 工事概要

スリップフォーム工法により防液堤を構築した大阪

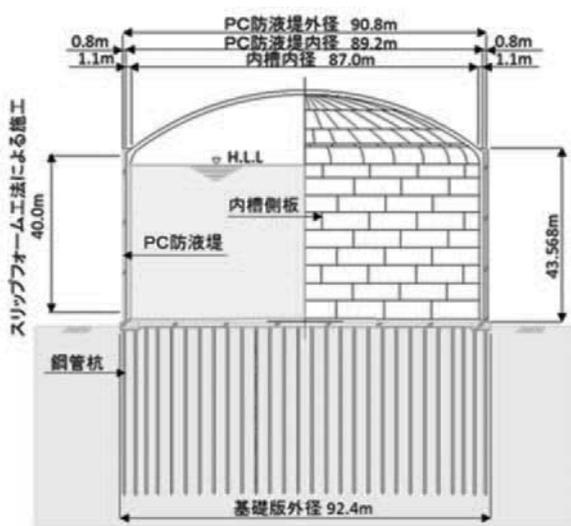


Fig. 8 Sectional drawing of 230,000m<sup>3</sup> PC LNG tank in Senboku LNG Terminal 1, Osaka Gas

ガス(株)泉北製造所第一工場の5号機(貯蔵容量23万m<sup>3</sup>)の構造を図8に示す。

地上式としては世界最大容量であり、2012年に着工し2015年に完成した。プレストレストコンクリート構造の防液堤は外径90.8m、高さ43.568m、厚さ0.8mである。そのうちスリップフォームによる施工区間は高さ40mである。コンクリートの設計基準強度は、LNGの漏液圧に応じて、高さ方向に30、40、60N/mm<sup>2</sup>の3水準の強度を使い分けている。<sup>(3)</sup>

##### 4.2 スリップフォーム装置の概要

スリップフォーム装置は、型枠および型枠を保持するヨーク(鋼製門型フレーム)、装置を上昇させる15トン油圧ジャッキ、装置が上昇するための反力支持材となるクライミングロッド、コンクリートを打込み箇所へ水平搬送するためのレールおよび搬送用バケット(容量0.5m<sup>3</sup>)などから構成されている。スリップフォーム装置は、90分ごとに15cm上昇し、これに合わせて鉄筋・

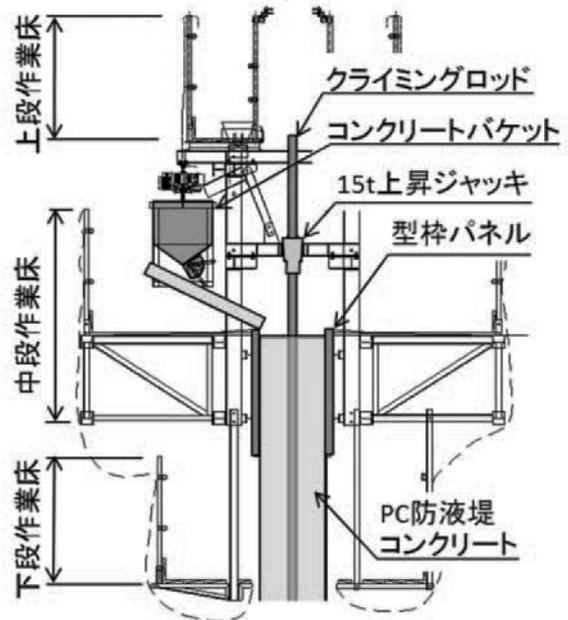


Fig. 9 Section map of slipforming equipment

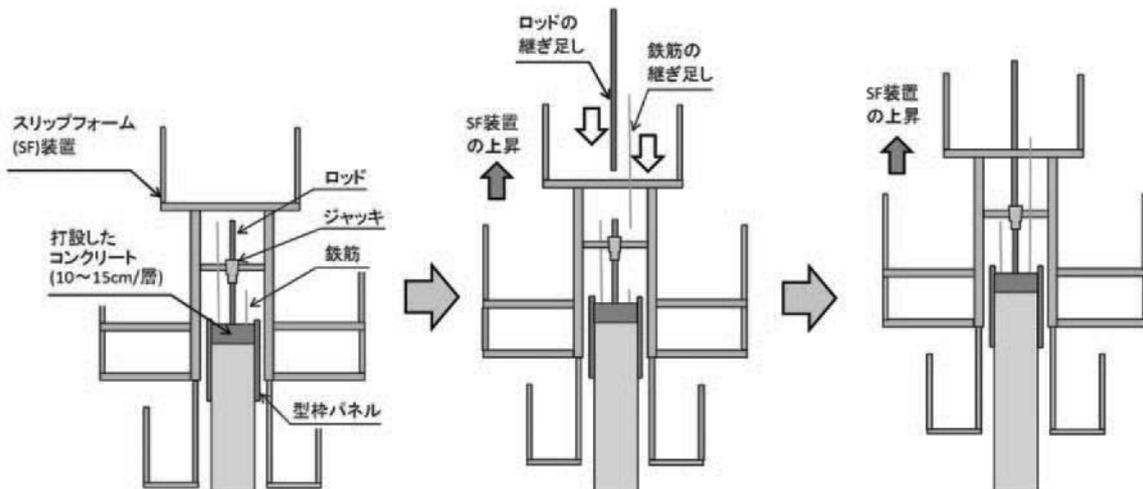


Fig. 10 Construction image of outer tank using slipforming method

PCシース管の組立ておよびコンクリートの打込み作業を行う計画とした。

#### 4.3 スリップフォーム工法による防液堤工期短縮の効果

防液堤の構築をジャンプフォーム工法で行う場合、防液堤を高さ方向に約10段に分割して施工する。高さ約3～4mの1段分を構築するたびに大型クレーンを用いて型枠・足場を円周方向に分割し組立・解体を各段で繰り返していたため、防液堤1段分の構築に約1ヶ月を要している。そのため、高さ約40mの防液堤の構築には10ヶ月前後の工期が必要となる。コンクリートの打継ぎがなく、型枠・足場の盛替えが不要なスリップフォーム工法を採用することにより、これまで約10ヶ月前後要していた防液堤の構築を昼夜連続施工により、構築開始からわずか20日間で高さ40mの防液堤の構築を完了することができた。

#### 4.4 スリップフォーム工法適用の課題および解決策

##### ①実施工におけるコンクリート打設計画

スリップフォーム工法は、コンクリート打設から脱型されてコンクリート表面が露出する時間が非常に短いため、養生期間が短いことによるコンクリートの組織形成や防液堤としての耐久性に影響を及ぼすことが懸念された。また、脱型時に躯体を自立させるために必要な圧縮強度の発現が求められる。早期脱型時の圧縮強度の発現、経年劣化の要因となる塩分の浸透特性や中性化等に対して供用年数50年の耐久性が確保できるように実際の配合や壁厚を模擬したモデル供試体により暴露試験や耐久性照査を行った。その上で、打設後12時間で脱型する補助的な締固めで充填できる中流動コンクリートを開発し、1層15cmを90分サイクルで打設し1日あたり2mの構築速度を決定した。また、コンクリートを薄層で周長280mの広範囲に渡り24時間連続打設するため、バケットを利用した中流動コンクリート打設システムを採用した。

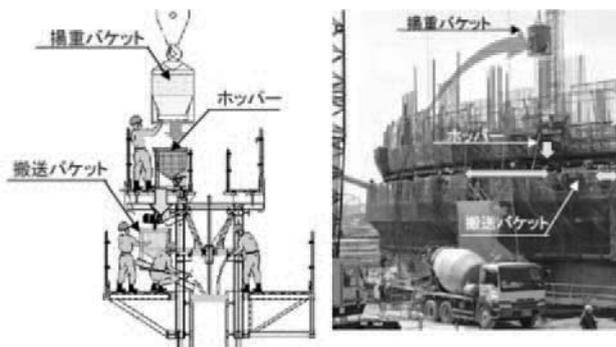


Fig. 11 Concrete Placing System using bucket

##### ②防液堤躯体の精度管理方法

従来工法ではレベル・トランシットを用いて防液堤の出来形、真円度の測定を行えるが、型枠・足場が常に上昇するスリップフォーム工法ではこの測定方法を用いることができない。そこで、連続施工下における十分な構

築精度を確保するため、レーザー距離計等により中心偏位、水平性、真円度、回転等を計測し一括集中管理しながら、油圧ジャッキの稼働制御、ワイヤーの張力によりスリップフォーム装置全体の真円度を調整し構築精度を確保するスポークワイヤーによる形状保持機構にリアルタイムに反映した。



Fig. 12 Spoke wires (the adjustment mechanism)

防液堤内面に気密性を保持するための外槽ライナを取り付けるためのプレート付きアンカーを同一高さに約150個、コンクリート面に設置する。このアンカーを、アンカー面が躯体コンクリート面と平滑になるよう取り付ける必要がある。そこで、「埋込金物付き差込み型枠ユニット」を開発し適用した。埋込金物をあらかじめ取り付けた木製型枠を、スリップフォーム装置に設けたガイド材に差し込むことにより木製型枠を残置する。このユニットを採用することにより、アンカー面と躯体コンクリート面の段差を解消かつ精度を確保し、埋込金物の取付けに要する施工時間を大幅に短縮することができた。



Fig. 13 Inside of the outer tank, and settled form construction method (insert type of formwork units with anchors)



Fig. 14 Result of slipforming construction

Fig. 15 Overview of 230,000m<sup>3</sup> PC LNG tank in Senboku LNG Terminal 1, Osaka Gas

## 5. おわりに

PCLNGタンクの工期短縮のニーズに対し、スリップフォーム工法を適用することにより防液堤構築の大幅な工期短縮を達成できた。今後も引き続きPCLNGタンク全体の工期短縮に対するニーズが高まるものとする。

そのため、防液堤側面の工事用開口部をコンクリートで閉塞する際に外槽ライナを内型枠として利用した実績を発展させ、外槽ライナを防液堤全体の内型枠として兼用するなど土木工事と機械工事の協働によるPCLNGタンク全体工期の短縮が必要である。

また、コンクリート工事における熟練工の減少に伴いプレキャストコンクリートの防液堤への利用が進むと考える。この場合、防液堤には内槽からの漏洩時にLNGの冷熱かつ液圧に対する液密性が要求されるため、プレキャスト部材の目地部における液密性の検証が重要である。

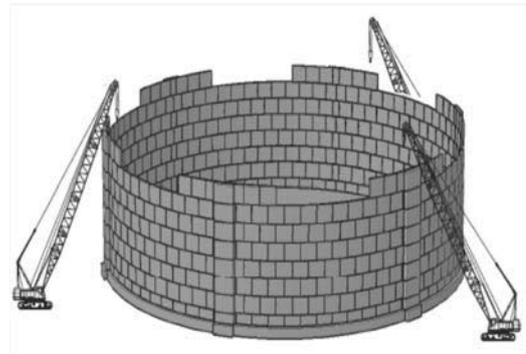


Fig. 16 Precast Segment Tank

## 謝辞

本稿の取り纏め、およびPCLNGタンクの建設を通じて終始ご指導頂いた大阪ガス株式会社エンジニアリング部の西崎丈能氏、大西俊輔氏、新村知也氏に深く感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- (1) 西崎丈能, 岡井大八, 近松竜一, 奥立稔, 鎌田文男, PCLNG貯槽建設工事の合理化研究と実構造物への適用, 土木学会論文集, No.728/VI-58 (2003.3), pp. 141-156
- (2) 阿久津富弘, 永井秀樹, 広谷亮, 中国・PCLNGタンクの設計および工事管理-上海LNGピークシェーピング基地拡張工事-, プレストレストコンクリート, Vol.51, No. 6, (2009.11), pp. 41-48
- (3) 大西俊輔, 西崎丈能, 近松竜一, 桜井邦昭, スリップフォーム工法による世界最大級の地上式LNGタンクのPC防液堤コンクリートの建設-大阪ガス泉北製造所第一工場5号LNGタンク-, コンクリート工学, Vol. 52, No. 4 (2014.4), pp. 323-328
- (4) 大野鷹久, 木村方哉, 西崎丈能, 大西俊輔, 地上式LNGタンク防液堤へのスリップフォーム工法適用事例, 土木学会第69回年次学術講演会, (2014.9)
- (5) 西崎丈能, 大西俊輔, 境恭宏, 阿久津富弘, PCLNGタンク施工技術の変遷とスリップフォーム工法による急速化施工の実現, 電力土木, No. 375, (2015.1), pp. 96-98

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## LNGタンク建設の土木技術

### Civil Engineering Technology of the LNG Tank Construction



若林 雅樹\*1

WAKABAYASHI Masaki

キーワード：LNG地下タンク，LNG地上タンク，PCLNG地上タンク

Key Words：LNG inground tank, LNG above-ground tank, PC LNG above-ground tank

#### 1. 緒言

ガス田から遠く離れ、四方を海に囲まれている日本は早い時期から天然ガスをLNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）として輸入してきた。1964年、英国はアルジェから世界初のLNGを輸入したが、はやくも5年後、1969年にはアラスカから根岸に日本最初のLNG船が到着した。本論文のテーマであるLNGタンクの建設もこのLNG導入とともに始まり、この半世紀にわたって発展してきたものである。

LNGタンクには大きく分けて地上タンクと地下タンクがあるが、それぞれ巨大なタンクである。また、その内容液であるLNGが $-162^{\circ}\text{C}$ の極低温であるため、タンクの土木躯体にも特別な配慮が必要である。本稿ではLNGタンクがどのようにこれらの課題を克服し発展してきたか、主として土木技術の観点で展望する。

本誌はガスタービンの学会誌であり、私のようなゼネコンのエンジニアが寄稿することは珍しく、光栄である。土木構造物は機械設備を載せる大事な基礎であり、機械エンジニアが土木技術についての理解を深めていただければと考えている。

#### 2. LNGタンクの種類と特徴

##### 2.1 LNGタンクの種類

LNGを貯蔵するタンクには、球形、葉巻形、円筒形など様々な形状があり、その容量も小さいものから20万KLを超える大規模なものまでであるが、ここではLNGの積出・受入基地で建設される比較的大規模な平底円筒形のタンクを対象とする。

LNGタンクには地上タンクと地下タンクがある（表1参照）。地下タンクはLNG液面が地表面あるいは盛土天端以下であるため、万が一の漏液時にもLNGが外部

Table 1 Type of LNG tank

	金属二重殻地上タンク	PCLNG地上タンク	LNG地下タンク
概略図			
歴史	1969年～2000年	1993年～現在	1970年～現在
土地利用	広い敷地が必要	狭い敷地で建設可能	狭い敷地で建設可能

に流出しない。そしてタンク本体が地表面以下にあるため景観が良い、という特徴を持つ。

一方、地上タンクは、地下タンクのように大規模な山留めを用いて土を掘削することがないため、比較的安価で建設工期が短い。

地上タンクには金属二重殻LNG地上タンクとPCLNG地上タンクがある。前者は万が一のLNG漏液を貯液するために高さ数メートルの防液堤で敷地全体を囲っているが、その分大きな敷地が必要になる。この防液堤を極限までタンクに近接させ基礎版と一体化したものがPCLNG地上タンクである。PCとはプレストレストコンクリート（Prestressed Concrete）の略称で、PC鋼材を用いてコンクリートに予め圧縮力を導入し、ひび割れの発生を防ぐことで、防液堤（以下、PC防液堤という）の液密性を確保するものである。

地上と地下を比較すると一長一短があるが、最近では経済的で短期に建設することが重要視されており、LNG地下タンクに比べPCLNG地上タンクが多く建設されている。LNGタンクは大容量化の一途をたどっており、その容量は、LNG地下タンクで25万KL（内径72.0m×液深61.7m）、PCLNG地上タンクで23万KL（内径86.0m×液深39.7m）のタンクが稼働している（図1参照）。

原稿受付 2017年7月21日

\*1 清水建設(株)土木技術本部

〒104-8370 中央区京橋2-16-1

E-mail: wakaba@shimz.co.jp

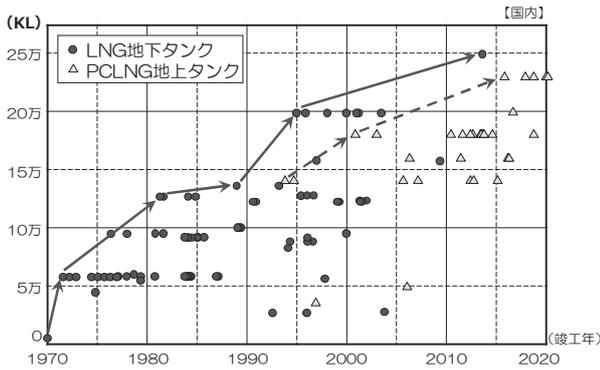


Fig. 1 Increasing capacity of LNG tank

2.2 LNGタンクの特徴

石油タンクに比べると、LNGタンクはLNG地下タンクやPCLNG地上タンクという独特な構造形式であること、LNGの気化を極力抑え貯蔵するために保冷が必要であること、さらに躯体や周囲地盤の凍結が進むため凍結の進行をヒータ設備等により制御する必要があること、等の特徴を持つ。また、LNGタンクは過去の海外の火災爆発事故を教訓に高い安全性が要求され、一般社団法人日本ガス協会の「LNG地下式貯槽指針」<sup>(1)</sup>「LNG地上式貯槽指針」<sup>(2)</sup>に準拠して計画、建設から維持管理まで実施されている。重要度が高いLNGタンクは設計地震動が大きい。

LNG地下タンクは内容物のLNGや周囲地盤の土水圧の荷重を負担する鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete 以下、RCという）の躯体と、液密性および気密性を保持するステンレススチールメンブレン、そして断熱性能を有しメンブレンより受ける力を躯体に伝える保冷から構成されている。屋根は鋼製とRC製があるが、前者は耐圧・気密部材の鋼製ドーム屋根、後者は躯体と同様に保冷・メンブレンとの複合構造となっている（図2参照）。

一方、PCLNG地上タンクは低温用鋼材の内槽（平底球面屋根付円筒型構造）を断熱材で保冷し、その周囲のPC防液堤、基礎版、基礎杭から構成されている（図3参照）。

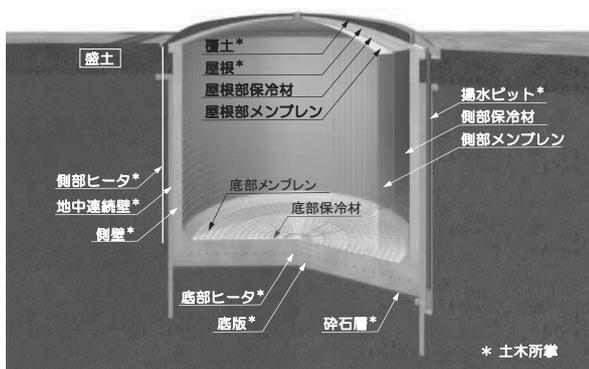


Fig. 2 Inground LNG tank

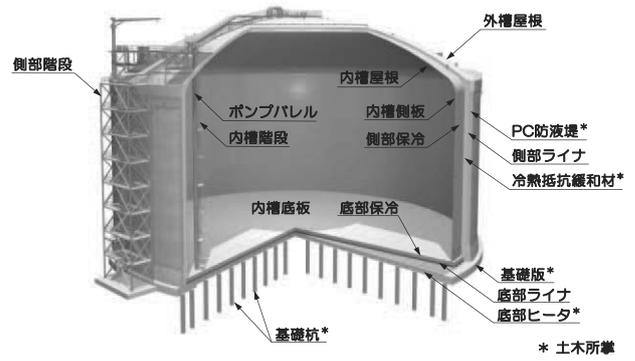


Fig. 3 PC above-ground LNG tank

もう一つの特徴として、LNGタンクの建設に当たっては土木メーカーと機械メーカーが空間的にも工程的にも交錯しながら、お互いに協力して構築を進めることがあげられる。また、設計時点においても、それぞれの構造がお互いに影響しあうので、荷重やバネなどの境界条件を相互に交換・調整し協力して進めることになる。さらにLNG冷熱が機械所掌の保冷を通して土木所掌の躯体や基礎版、そして地盤に伝わるため、熱伝導解析に必要な熱定数、境界条件などのやり取りが必須である。

3. LNG地下タンクの土木技術

3.1 LNG地下タンクの開発：LNG冷熱の利用と制御

世界で初のLNG地下タンクは1964年、英国のキャンベル基地に建設された。このタンクは岩盤に穴を掘り、LNGの冷熱を利用して周囲の岩盤を凍結したシンプルなものであった。

一方、日本においては沿岸部の軟弱な埋立地に建設すること、そして大きな地震があることを考慮して、最初からRC製の躯体を地下に構築した。コンクリートはひび割れのない密実なものでも微小ではあるが透水性、透気性を有する材料である。外力や低温でひび割れが生じたらなおさらである。したがって地下水位以下に構築するLNG地下タンクの躯体は、LNGの冷熱によりRC製の躯体を凍結させるか、さらに側部に1m程度の凍土（図4参照）を発生させ、止水性を保持している。コンクリートは凍結するほど強度が増すので強度の面でもプラ

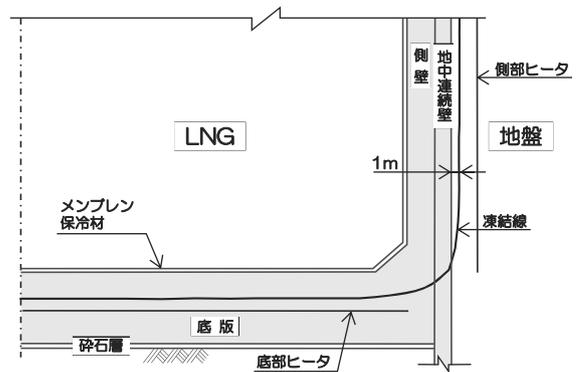
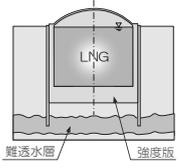
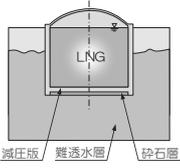


Fig. 4 Temperature analysis of inground LNG tank

Table 2 Type of bottom slab of LNG inground tank

	強度版	減圧版
概略図		
歴史	1970年～現在	1970年～現在
特徴	一般の地盤に建設 底版に揚水圧が作用する	難透水地盤に建設 底版に揚水圧が作用しない

スになるが、温度応力によるひび割れも発生する。これらの止水性向上、強度増加、ひび割れの発生のバランスを考慮して設計することが肝要である。

### 3.2 LNG地下タンクの躯体：巨大な地下構造物

LNG地下タンクの躯体はRC製であり底版と側壁から構成される。また、屋根をRC製とする場合もある。

底版には減圧版と強度版の2種類がある（表2参照）。減圧版は薄いRC製底版でありほとんど地下水が出てこない難透水地盤に適用される。難透水性の地盤からしみ出てきた地下水は底版下部の砕石層に集め揚水することにより、底版に揚水圧が作用しないようにしたものである。一方、強度版は比較的透水性の良い地盤に構築され、揚水圧に対して自重と強度で抵抗するため厚いRC底版となる。最近では信頼性、安全性の観点からほとんどのLNG地下タンクが強度版である。LNG地下タンクの建設で特徴的であるのは底版のコンクリート打設である。現在の最大容量25万KLのLNG地下タンクでは、底版の直径が約80m、厚さ8m、体積39,000m<sup>3</sup>となる。これを立方体にすると一辺が約34mとなる。このコンクリートを4昼夜連続して生コン車延9,200台で打設する。また鉄筋は直径約51mmの太径鉄筋を200mmピッチで網状に組み、この網を3段に配置する。底版全体では約4,500トンの鉄筋が入る。

側壁・底版の内面には保冷とメンブレンを機械メーカーが設置するが、その際土木メーカーと調整するのがコンクリート表面の平滑度である。コンクリート表面の凹凸が大きいと保冷パネルに悪影響を与えるため、平滑度の要求が厳しいものになる。一例をあげると底版上表面では、「どの1mをとっても段差が±10mm以下」との精度が要求される。コンクリートはセメント+砂+水でできているモルタルの中に25mm以下の砂利が混じっているものであり、打設しているときのコンクリート表面はカレーライスの中の米粒やジャガイモがところどころで頭を出しているのと同じ状態である。その表面を平らにしないのは困難を極める。狭いピッチでならし用の定規をセットするとともに、ならし専門の機械の開発、そして熟練技術者の大量投入で精度を確保している（図5参照）。一方、側壁は仮設の鋼製型枠か、RC製埋込セグメントを型枠に利用してコンクリートを打設する。セグメ

ントは表面精度を確保しやすいが比較的高価である。

一般のLNG地下タンクは屋根が地上に出ている。これに対して屋根も地表面以下とした完全埋設型地下タンクもある<sup>(3)</sup>（図6参照）。この場合は屋根の上の土（覆土）の重量を支えるために、圧縮力を受けられるドーム構造のRC製屋根が最適となる。更に覆土を少なくするために低ライズ（扁平型）のドーム型となっている。RC製屋根は少ないが、今後飛来物の落下などの配慮からRC製屋根を採用するケースが出てくるものと考えられる。



Fig. 5 Surface leveling of placed concrete

Fig. 6 Underground LNG tank<sup>(3)</sup>

Fig. 7 Cylindrical slurry wall



Fig. 8 Excavator of slurry wall

### 3.3 LNG地下タンクの大容量化：地下大空間の創出

LNG地下タンクの建設にとって土木的に最も困難な課題は地下に大空間を確保することである。LNG地下タンク以前にも地下構造物は多々あったが、その多くはビルの地下部分であり、一般的に直方体で隔壁と床版の組み合わせで、仮設の山留めと切梁を利用したジャングルジムのような空間に構築していた。それに対してタンクは円筒形であり、内部は床版や隔壁が存在しない。そのため、山留めも円筒形で仮設の切梁もないものが要求され、地中連続壁を円筒形に構築した山留めが開発、発展した。

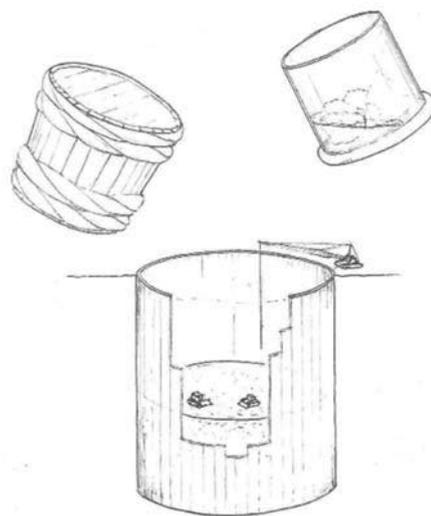
円筒形の地中連続壁というのは、底のない酒樽を地盤に押し込んだようなイメージのものであり、杉板一枚一枚がRC壁でできているものである。その一枚の大きさは幅（円周方向）3～10m、厚さ1～2m、そして長さ（深さ）30～100m程度である。その構築は、安定液を用いて掘削壁面の崩壊を抑えながら地盤を短冊状に掘削し、鉄筋かごを挿入し、穴にコンクリートを打設する。こうしてできたRC壁を円周方向に順次構築して円筒形にするものである（図7参照）。RC壁の出来形は、いかに精度よく地盤に穴をあけるかによるものであるが、専用の地中連続壁掘削機を用いて深さ100mでも水平誤差5cm以下（1/2,000）という高精度の掘削が可能である（図8参照）。

円筒形の地中連続壁を構築した後は内部の土を掘削して大空間を造るが、短冊となるRC壁がばらばらにならないように、酒樽でいえば「たが」で円周方向に圧縮力をいれるように、周囲の土水圧を利用してリングコンプレッションを入れる。酒樽の場合は気中で杉板の品質や、板と板の接触面の凹凸やずれ、そしてたがの効き方を見ながら製作できる。一方、地中連続壁の場合は地中の穴にコンクリートを流し込むので、穴は崩落していないか、コンクリートは隅々まで充填されているか、強度は確保されているか、RC壁とRC壁は目違いがなく全体として正確な円筒形になっているか、などの課題があり、材料や施工機械の開発、施工方法の工夫と品質管理のブラッ

シュアアップで対応してきた。また、円筒形が精度よく構築されても土水圧や地盤の不陸が想定以上だと偏圧で座屈する可能性もある。地盤成層状況の把握と、偏圧を防ぐための内部掘削の施工管理が重要である。

LNGの需要が大きくなるにつれて円筒形地中連続壁も大規模となり、最近では25万KLのLNG地下タンクを建設するために、直径約80m、深さ約80mの円筒形地中連続壁が施工されている。一方、壁厚についてはコンクリートボリュームを減らしてコストダウンを図るために、圧縮強度60N/mm<sup>2</sup>の高強度コンクリートで薄肉を目指した地中連続壁もある。

LNG地下タンクの大容量化に合わせ、いかに円筒形地中連続壁を進化させてきたかを評価する指標として、壁厚／直径の比がある。25万KLのLNG地下タンクでは壁厚1.4mで直径80m程度であり、その比は1.4m／80m＝2％である。比が0.9m／78m＝1.2％のものもある。酒樽の1.5cm／40cm＝4％より小さいのはもちろんのこと、鋼管杭の1％と同程度になっている。円筒形地中連続壁の薄さをイメージしやすいのはウiskiグラスである。厚さ1.5mm、直径80mm程度であり、その比は2％。ガラスはコンクリートとほぼ同じ強度であるので、円筒形地中連続壁の1/1,000モデルと考えられる。このグラスに500kN/m<sup>2</sup>の土水圧が作用していると考えれば、円筒形地中連続壁が究極の土木技術であることが理解できると思われる<sup>(4)</sup>（図9参照）。

Fig. 9 Various cylinder<sup>(4)</sup>

### 3.4 LNG地下タンクで開発された土木技術の展開

LNG地下タンクの土木技術を語る際に忘れてならないことは、開発された土木技術が広く一般の土木構造物の建設に展開されてきたことである。地下に大空間を構築する技術、マスコンクリートの材料・品質管理の技術、そして凍土の制御・活用の技術などがあげられる。

地下に大空間を構築する円筒形地中連続壁の技術は本州四国連絡橋の橋脚基礎やアクアライン川崎人工島（風

の塔)の構築に展開された。川崎人工島では直径102m、深さ119m、壁厚2.8mの円筒形地中連続壁が採用されている<sup>(5)</sup>。LNG地下タンクにおける凍土は制御しないと周辺地盤を押し上げ、躯体にも影響を及ぼすが、制御された凍土は完全な不透水となるので止水壁や山留め壁として活用され、最近では福島第一発電所の凍土壁にも展開されている。この凍土の制御に関してはLNG地下タンクの建設を通じて実施された一連の凍土の研究が役に立っている。また、極低温におけるコンクリートや鉄筋の材質や力学特性は、北極海の石油プラットフォームなどの低温下の構造物に利用され、将来的には液体水素の貯蔵タンクにも活用されると思われる。

### 3.5 LNG地下タンクの今後の展開

地下タンクの大容量化はコストメリットがあるが、工期や基地全体の使い勝手の観点から適切な容量に収束すると思われる。ただし、大容量化の限界は、と問われれば、少なくとも円筒形地中連続壁の施工実績から土木技術的には50万KL以上と答えることができるだろう。

LNG地下タンクとPCLNG地上タンクを比較した場合は、LNG地下タンクは地盤を掘削して構築するため、PCLNG地上タンクに比較して工費工期とも不利である。

しかしながら、地下タンクは地下にあることで目立たないという利点があり、景観が良いことはもちろんのこと、セキュリティの観点からも今後も建設されていくと思われる。

そのためにもさらなるコストダウン、工期短縮が必要であり、掘削残土の有効利用や、機械・土木が一体となった施工の工程調整が望まれる。

一方、初期に建設されたLNG地下タンクは半世紀になろうとしている。もともと土木構造物は耐久性に富むものではあるが、機械を含む貯蔵設備全体として老朽化し使い勝手が悪くなっている。今後は老朽タンクのリニューアルもあらたな開発テーマと考えられる。

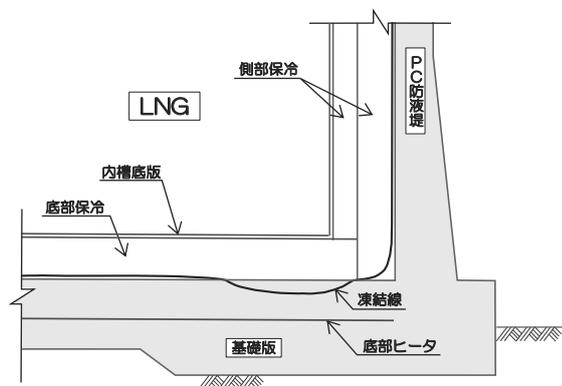


Fig. 10 Temperature analysis of above-ground LNG tank

## 4. PCLNG地上タンクの土木技術

### 4.1 PCLNG地上タンクの基礎

PCLNG地上タンクの基礎の形式は、タンクの建設場所が岩盤のように堅固であれば岩盤に基礎版を直接構築する直接基礎となる。しかしながら日本のLNG基地は軟弱な埋立地であることが多く、基礎版を杭で支える杭基礎となっている。PCLNG地上タンクは背が高いこともあり、巨大地震に起因する慣性力が大きく、それを支えるために杭や地盤および内槽やPC防液堤等には高い耐震性能を確保することが要求される<sup>(6)</sup>。このように上載荷重が大きく、地震力も大きいので、その杭基礎も大規模となり、直径約90mの基礎版の下に直径0.8mの鋼管杭を約600本打設した事例もある。杭の長さも軟弱な地層の下の支持層まで打ち込むため約70mの長さの杭になることもある。杭の種類は鋼管杭の他に既成コンクリート杭やこれらの合成杭も採用されている。杭の施工に当たっては、杭打ちで発生する振動や騒音の低減、土中にある障害物の撤去、そしてそのまま打設すると杭が座屈するような礫(れき：砂利)の中間層をいかに打ち抜くか、などに注意が必要である。

LNGの気化を抑えるために内槽とPC防液堤・基礎版の間には保冷がある。PC防液堤は周囲の外気の入熱により定常時は凍結しないが、底部は保冷があってもほうっておくと基礎版そして地盤が凍結する。地盤が凍ると凍結膨張が生じるため、地盤の凍結を防止する必要がある。PCLNG地上タンク建設初期は基礎版を高床にして地盤の凍結を防止したが、現在では基礎版の中にヒータ管(以下、底部ヒータ管)を設置して凍結線(温度0℃の境界線)を制御している(図10参照)。

### 4.2 PCLNG地上タンクのPC防液堤

PCLNG地上タンクのPC防液堤は内槽の大容量化に伴い大型化した。現在の最大容量23万KLのPCLNG地上タンクのPC防液堤の大きさは直径88.2m、高さ43.6m、厚さ0.65mである。PC防液堤の設計ではLNG漏液時に作用する液圧を打ち消すようにPC鋼より線でプレストレスを導入する。具体的には、漏液時でも断面に10cm以上の残留圧縮領域を確保して、PC防液堤のひび割れから漏液しないようにしている。一方、漏液していない通常運転時には、PC防液堤にはプレストレスによる大きな円周方向圧縮力が導入されていて、PC防液堤全体が中心部に向かって縮んでいる。しかし、PC防液堤は、下端部が基礎版により拘束されているため、PC防液堤下部には縦曲げやせん断力が発生する。したがって、PC防液堤と基礎版の剛結合部には鉄筋が多い。この剛結合部にはこれらの鉄筋だけではなく、PC鋼材や杭の定着筋、そして底部ヒータ管があり、複雑で多量の鋼材が入った構造となる<sup>(7)</sup>(図11参照)。この剛結合部をいかにスマートに設計・施工するかがポイントである。

PC防液堤の構築工法は一般的には基礎版から順次リング状に構築していくが、リングの1ロットの高さを

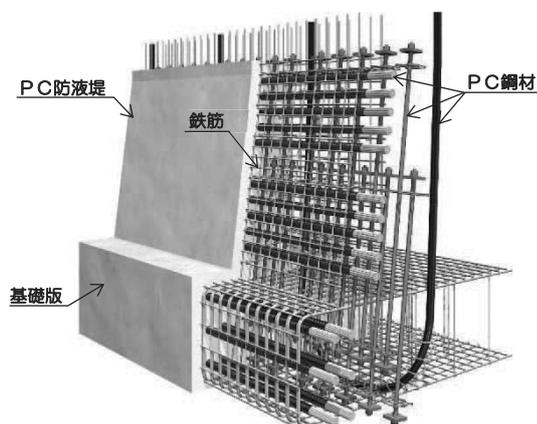


Fig. 11 Joint of slab and PC wall

1 m程度としてコンクリートの硬化中に型枠を上方にずらして次のロットの構築を進めるスリップフォーム工法<sup>8)</sup>、逆に1ロットの高さを5～6m程度と大きくしてコンクリート硬化後に型枠を上方にずらしてロット総数を減らすジャンプアップ工法、そして1ロットの構築を円周方向に4分割して、足場→PC鋼材用フレーム→鉄筋→型枠→コンクリート打設と、らせん状に構築を継続するトルネード工法(図12参照)などがある。また、最近では側壁内面の型枠をRCパネルの埋込型枠としたり、PC防液堤を細分化したプレキャスト製にしたりするなど、工期短縮のためのプレキャスト化も行われている。

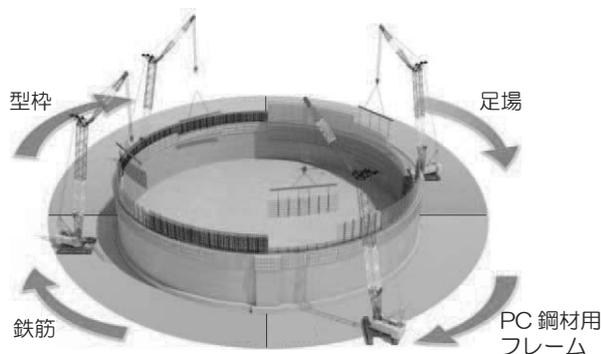


Fig. 12 'Tornado': Building method of PC wall

なお、日本におけるPCLNG地上タンクの屋根は鋼製であるが、世界的にはRC屋根も多い。今後は飛来物落下に対するセキュリティの観点から日本においてもRC屋根が採用されると思われる。

### 4.3 PCLNG地上タンクの今後の展開

PCLNG地上タンクの大容量化はLNG地下タンクと同様に土木技術的にはまだまだ大型化が可能であるが、内槽の限界や基地の効率的な運転を考慮するとある大きさ

に収束すると考えられる。土木的な構造諸元はスリムに絞り込んでおり更なる数量減は難しいと思われる。低コスト・短工期のPCLNG地上タンクの需要は多く、今後も更に機械と土木が協調してエンジニアリングすることで工期短縮を図ることが重要と考える。

## 5. おわりに

日本のLNG導入とともに開発、発展してきたLNGタンクは半世紀にわたって順調に稼働しており、大きな地震を受けても事故もなく、安全なエネルギー施設として定着している。これも日本のLNG基地の特殊性を十分に考慮した調査・設計・施工、そして稼働とメンテナンスのたまものと考えられる。LNGタンクの需要は国内外ともまだまだ増加すると考えられるが、今まで培った技術が展開され、あらたな開発が進み、より合理的なLNGタンクが建設されることを望むものである。

今回はガスタービンの学会誌という、なかなか土木エンジニアにはなじみが薄い専門誌に執筆させていただき、LNGタンクに関する土木技術について紹介させていただいた。また、大げさに言えば地球と機械設備のインターフェイスを、土木のエンジニアリングが基礎構造物の形で提供していることを紹介させていただいた。本稿が、土木技術に対する機械エンジニアの理解に、そして機械・土木の協調に寄与できれば幸いである。

## 参考文献

- (1) 一般社団法人日本ガス協会, LNG地下式貯槽指針, JGA指-107-12, 2012年
- (2) 一般社団法人日本ガス協会, LNG地上式貯槽指針, JGA指-108-12, 2012年
- (3) 後藤貞雄, 中野正文, 中澤亨, 黒田正信, 世界初の埋設式LNG地下タンクの開発と建設, コンクリート工学, Vol. 35, No. 2 (1997), pp. 18-25
- (4) 黒田正信, ロックグラスを傾けて, コンクリート工学, Vol. 55, No. 7 (2017), pp. 610
- (5) 藤田信一, 長谷川明機, 壇峻, 黒田正信, 海洋人口島に構築される換気等の設計, 土木学会構造工学論文集A, Vol. 36, No. 3 (1990), pp. 1319-1328
- (6) 一般社団法人日本ガス協会, 製造設備等耐震設計指針, JGA指-101-12, 2012年
- (7) 和田宙司, 堀見慎吾, 和田智之, 鈴木克男, PC-LNG地上タンクにおける鉛直テンドン省略によるPC構造の合理化方法, 土木学会第67回年次講演会, VI-361
- (8) 大西俊輔, 西崎丈能, 近松竜一, 桜井邦昭, スリップフォーム工法による世界最大級の地上式LNGタンクのPC防液堤コンクリートの建設—大阪ガス泉北製造所第一工場5号LNGタンク—, Vol. 52, No. 4 (2014), pp. 323

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## LNG貯蔵技術（これまでの建設工法と最近の動向）

### Construction Method of LNG Storage Tank (Traditional and Latest Trend)



池上 純矢\*<sup>1</sup>  
IKEGAMI Junya

キーワード：LNG貯蔵タンク，建設工法，プレストレストコンクリート，エアレイジング，ジャッキアップ工法  
Key Words：LNG storage tank, Construction method, Prestressed Concrete, Air lifting, Jack climbing method

#### 1. 緒言

天然ガスは、他の化石燃料に比べて燃焼時の二酸化炭素や窒素酸化物、硫黄酸化物などの排出量が少なく、クリーンなエネルギー源として注目されている。また、その可採年数は石油の3倍以上と推定されるように豊富な埋蔵量を誇り、東日本大震災以降の天然ガス火力発電の強化や世界的なシェールガス開発の広がりによって、今後より一層需要が高まっていくと考えられる。

世界に目を向けると、LNG（液化天然ガス）需要は現状の2.5億トンから2020年までに45%増加すると想定されている。北米、豪州を筆頭に世界各地でLNGプロジェクトが続々と立ち上がり、LNG生産能力は大幅拡大の局面にある。またインドや東南アジアでは需要増が続き、LNG受入れ基地の建設が進んでいる。

当社は、1969年に開始されたLNGの輸入をきっかけに、日本初となる9%Ni鋼製の地上式LNG貯槽を東京ガス株式会社根岸工場に建設、以降LNG受入れ基地およびLNG貯槽において国内トップシェアを持っている。また国内で培った経験・技術を駆使し、海外へも積極的に進出し、LNG貯槽における市場を牽引している。

ここでは、当社のLNG貯槽の従来技術および最近の技術について、紹介する。

#### 2. LNG貯槽の構造

##### 2.1 LNG貯槽の基本設計

LNG貯槽は、 $-162^{\circ}\text{C}$ のLNG（液化天然ガス）を極低温の状態に保持する貯蔵容器であり、液密性及び構造安定性に加えて、LNGの蒸発を抑制する断熱機能が要求される。液を受け入れる内槽の材料は通常の炭素鋼では極低温下で脆性破壊を起こしてしまうため、Niを添加し

低温靱性を高めた9%Ni鋼もしくはステンレス鋼が使用される。

設計は国内、海外問わず各種法規・規格にもとづく、国内の場合、電気事業法、ガス事業法、高圧ガス保安法に従い、海外であれば、API、EN、NFPAなどの規格に代表される。また同じ容量の内槽であっても、各法規によって安全率の違いや設計思想が異なり、必要板厚、要求性能（シャルピー衝撃値）などに違いがある。

##### 2.2 国内におけるLNG貯槽

国内におけるLNG貯槽の構造としては、金属二重殻式LNG貯蔵タンク、地下式LNG貯蔵タンク、PC外槽式LNG貯蔵タンクがあり、それぞれの特徴を以下の表1、図1に示す。

##### 2.3 海外における設計思想

海外向けのLNG貯槽は、基本的な構造は国内と同じであるが、設計思想として「シングルコンテインメント」、「ダブルコンテインメント」、「フルコンテインメント」の3種類のタイプに大別され、地域環境、安全基準、コストなどを考慮し、選択される。各タイプについての設計思想が、API625、BS EN14620に規定されている<sup>(1),(2)</sup>。上記以外にもPCメンブレンタンクと呼ばれる構造があるが、ここでは説明を省略する。

海外では、近年多く建設されているのは、内槽はオーブントップの9%Ni鋼製タンク、外槽はコンクリート製の屋根付きタンクがほとんどである。外槽は鉄筋コンクリート製の基礎スラブ・屋根と、PC（プレストレストコンクリート）製の側壁で構成され、内面にはガス気密性を確保するため鋼製ライナが貼られている。

側壁がPC製の理由は内槽漏洩時の液圧に耐え、圧縮領域を保持することで液密性を確保するためであるが、側壁と基礎スラブの境界近傍・基礎スラブには十分なプレストレスを作用させることが困難であるので、基礎スラブと高さ5mまでの側壁を保護するThermal Corner Protection (TCP) が設置されている。これは9%Ni鋼製の液密カバーと保冷材で構成され、内槽漏洩時に基礎

原稿受付 2017年7月28日

\*1 (株)IHI 資源・エネルギー・環境事業領域  
プロセスプラントSBU タンクプロジェクト部  
エンジニアリンググループ  
E-mail: junya\_ikegami@ihi.co.jp

Table 1 Characteristic of domestic LNG storage tank

形式	金属二重殻式LNGタンク	地下式LNG貯蔵タンク	PC外槽式LNG貯蔵タンク
主な特徴	-コンクリート基礎の上に自立した内槽（低温材）と外槽（常温材）の二重殻で構成された地上タンク -側部保冷にはグラスウール、粒状パーライト、底部保冷には泡ガラスを使用し、LNGの気化を抑制する。 -万が一の漏洩に備え、タンクの周りに防液堤を設置する。 -運転時、内外槽間には窒素が充填され、ブリージングタンク*により圧力を一定範囲に保つことでタンクの破損を防ぐ。	-地中に構築された躯体にLNGを貯蔵する地下タンク -保冷材には硬質ポリウレタンフォームを使用し、LNGの気化を抑制する。また保冷材だけでなく、躯体への液荷重の伝達という役割を果たす。 -液位が地表面より低い場合、万が一の場合でもLNGが地上に流出しない。 -タンク間距離を地上タンクより短くできるので、土地の有効活用ができる。	-自立式の内槽とPC（プレストレストコンクリート**）壁で構成された地上タンク -PC壁によるLNG漏洩時の液保持を行うため、防液堤が不要となり、土地の有効活用ができる。 -PC壁内面に気密性を保持するための金属性のライナーを設置する。 -側部保冷にはグラスウール、粒状パーライト、底部保冷には泡ガラスを使用し、LNGの気化を抑制する。
内槽材	9%Ni鋼	ステンレス鋼	9%Ni鋼
外槽材	炭素鋼	なし	炭素鋼
防液堤	必要	不要	不要（外槽が二次バリアとなる）
図	Fig. 1a	Fig. 1b	Fig. 1c

\*内外槽間と直結し、圧力変動を抑えるため窒素を貯蔵するタンク

\*\*コンクリートは圧縮には強いが引張力には弱いという特徴がある。それを克服するために、コンクリートに予め圧力をかけたものをプレストレストコンクリート（PC: Prestressed Concrete）と呼ぶ。

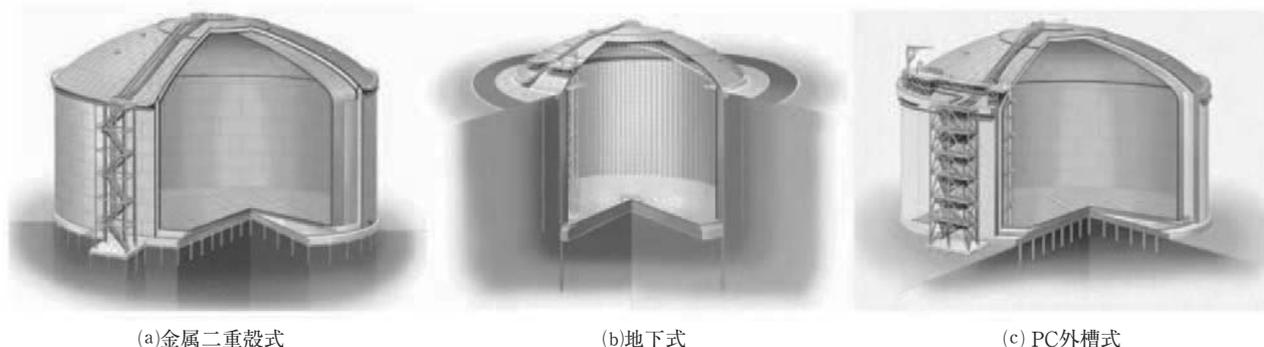


Fig. 1 Illustration of domestic LNG storage tank

スラブ・側壁下部に冷熱が作用することを防いでいる。

### 3. LNG貯槽の需要動向

過去に発生したLPGやLNGタンクの事故の歴史から、米国GRI（Gas Research Institute）をはじめとして9%Niに関する多くの研究・開発・改良がなされてきた<sup>(3),(4)</sup>。その結果、低温下での脆性破壊の防止、あるいは万が一脆性き裂が発生してもそれが直ちに停止する脆性き裂伝播停止特性（Crack-Arresting Property）を発揮するために必要な靱性及びその品質の向上により、タンクの最大許容板厚が50mmまで引き上げられ、タンクの大型化を可能にした。現在では、従来の主流であった16万kLから、20万kLを超える大容量化が進み、最大で25万kLの建設実績が報告されている。

### 4. LNG貯槽の製作技術

#### 4.1 従来の製作技術

基地の建設には一般的に3～4年の工期を要する。そのため、基地建設において最も現地工期が長いLNGタンクの工期短縮が常に求められおり、これまで海外、国内共にエアレイジング（A/R）工法が一般的な工法とし

て広く採用されてきた。

これは、タンク底板上で組み立てた屋根を、ブロワー（送風機）を介して空気を送り込み、その空気圧で屋根を持ち上げ、所定の位置に浮上させて固定する工法である。この工法は図2に示すように屋根の搭載により、タンク内部は風雨等の天候に影響を受けなくなるため、良好な作業環境が確保されるというメリットがある。

一方で、その屋根を固定するPC（プレストレストコンクリート）壁の構築完成を待たなければ、この作業ができないというデメリットもあり、工程の短縮を図る上での大きな改善課題であった。

#### 4.2 新工法JCM（ジャッキ・クライミング・メソッド）

##### 4.2.1 JCMの概要

上記で述べた工期短縮という課題を克服する手段として、JCM（ジャッキ・クライミング・メソッド）と言う新工法が近年生み出された。これによって、図3の通り、従来工法であるA/R工法に比べ、施工期間が9か月程短縮できる。JCMの概要図を図4に示す。JCMは、PC壁の構築と内槽側板の搭載を同時に進める工法で、PC壁にジャッキサポート、ナックルプレートにジャッ

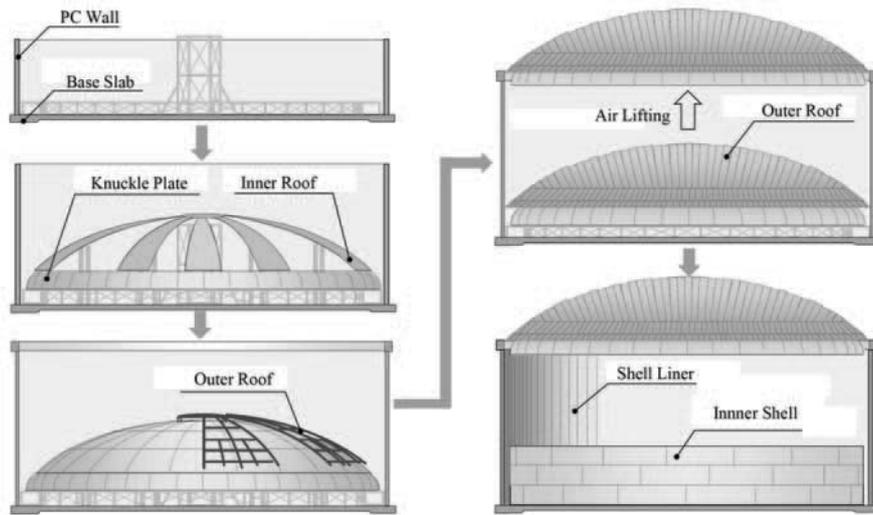


Fig. 2 Construction of air lifting method

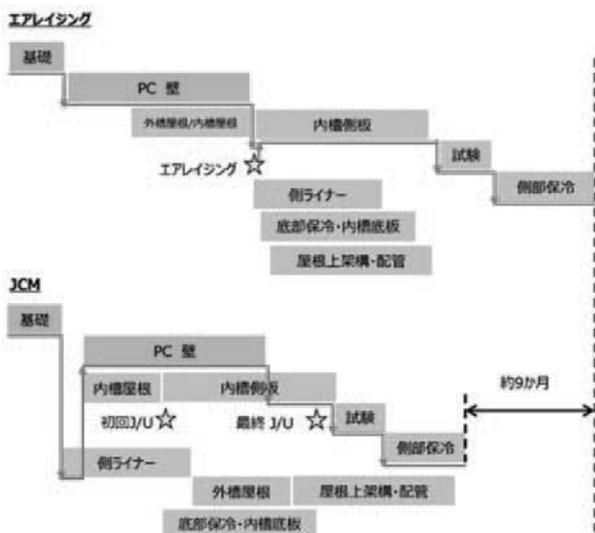


Fig. 3 Comparisons of air lifting and JCM

キをそれぞれ設置し、ロッドで連結し、内槽のジャッキアップ作業と内槽側板の搬入作業を繰り返すことで、PC構築工事と内槽工事の同時並行を可能にしている。

4.2.2 JCMの実績と特徴

JCMを適用したLNG貯槽建設の実績として東北電力(株)殿に納めた新仙台火力発電所のPC外槽式LNGタンクがある。東日本大震災を受け、新仙台火力3号系列での一日も早い発電開始が必要となり、工事途中からではあったがJCMを適用し、約4ヶ月の工程短縮を実現した。

現在工事中の石油資源開発(株)殿 相馬LNG基地23万KL LNGタンクでは、一般的に杭打ちからパージ完了まで42～43ヶ月を要する工期を、JCMを適用することにより34ヶ月まで短縮した工程を描き、順調に推移している。JCMの特徴は以下の通りである。

1) 短納期

PC壁構築工事と内槽工事を並行化することにより、

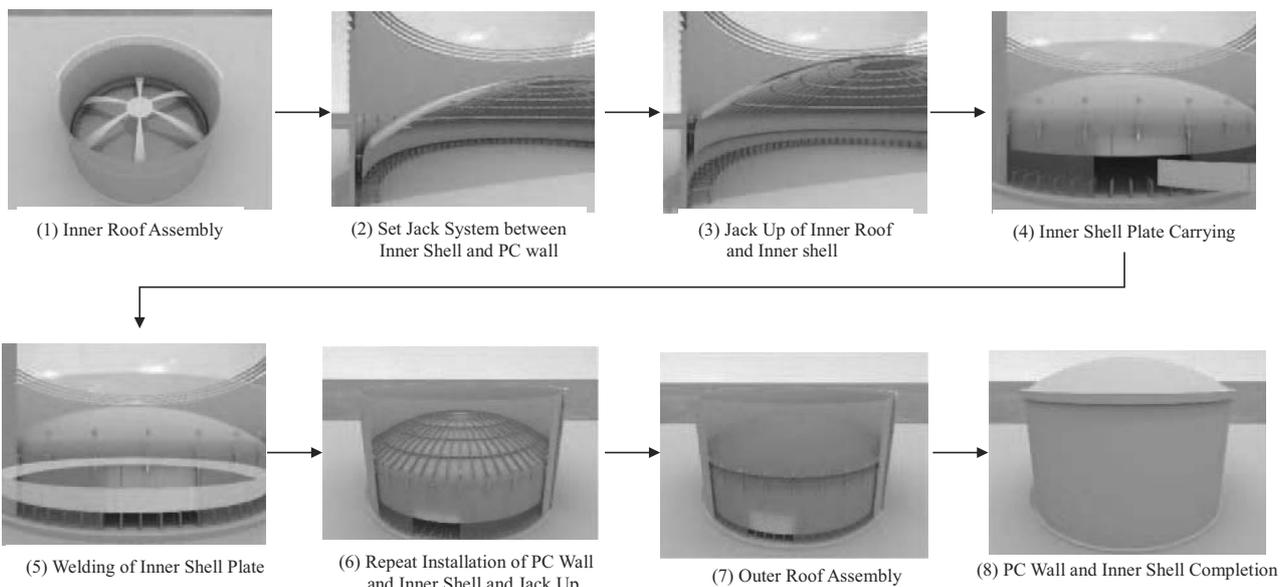


Fig. 4 Construction of JCM (Double Roof Type Tank)

大きな工程短縮を実現した。土木施工会社とのマッチングによっては、外槽A/R工法に比べ、1年近い工程短縮が期待できる。

## 2) 高い安全性と高効率と高品質

作業量の多い内槽側板の組立・溶接・検査作業を高所作業から解放した。上記作業は、低所の安定した足場内で繰り返されるため、安全性とともに効率もアップした。また、足場自体の盛り替え作業も無く、工数低減につながった。従来工法では不可欠な足場懸架用ピース等の取り付けが不要となり、溶接、検査線長の低減だけでなく、基本的な高品質につながっている。

### 4.2.3 海外形式LNG貯槽向けJCMについて

2.3で述べたように海外向けのLNG貯槽は、内槽屋根がないため、外槽屋根と内槽側板をそれぞれ別のジャッキを用いてジャッキアップを行なっている。その建設概要を図5に示す。外槽屋根は、国内式JCMと同様PC壁にジャッキサポートを設け、外槽屋根をジャッキアップさせる。一方で、内槽側板は、底板部に設置したジャッキを側板に取り付けることでジャッキアップさせ、それにより出来た空間に次の内槽側板を搬入し、側板同士を溶接する。この工程を国内形式同様に繰り返すことでJCMを適用した海外形式LNG貯槽の建設を可能にした。

## 5. おわりに

国内外におけるLNG貯槽における構造および従来工法、新工法の比較を中心に紹介した。

現在は、世界的にみてもLNG需要は増加傾向にあり、その市場でトップシェアを維持し続けるためには、常に革新的な新技術の開発を進めるとともに、施工費や材料費の低減、工期短縮を図る事によって、合理化を推進する事が必須である。特に今回紹介したJCMは、元々は短納期を目的に開発したことがきっかけだが、高所作業の削減による本質的な安全性の向上に多方面より高い評価を得ており、2016年7月には、エンジニアリング協会にて表彰された。今後も国内外で実績を積み重ね、タンク貯槽のファブリーケーターとして業界を牽引していく事は、今後天然ガス産業、ひいては世界の発展に寄与していくものと考えている。

## 参考文献

- (1) API Standard 625, "Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage", First Edition Addendum, August 2010.
- (2) BS EN 14620 : Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C, December 2006.
- (3) Consortium of Five Japanese Companies (OG, IHI, TKK, NSC, SMI) : Crack Arrest Properties of 9%Ni Steel and Relation between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests, GRI Report GRI-86-007, GAS Research Institute, 1986.
- (4) 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 萩原行人, 有持和茂 : 厚肉9%Ni鋼板の脆性破壊特性と大形LNGタンクへの適用性, 圧力技術, 第31巻第1号 (1993), P19 - 33.

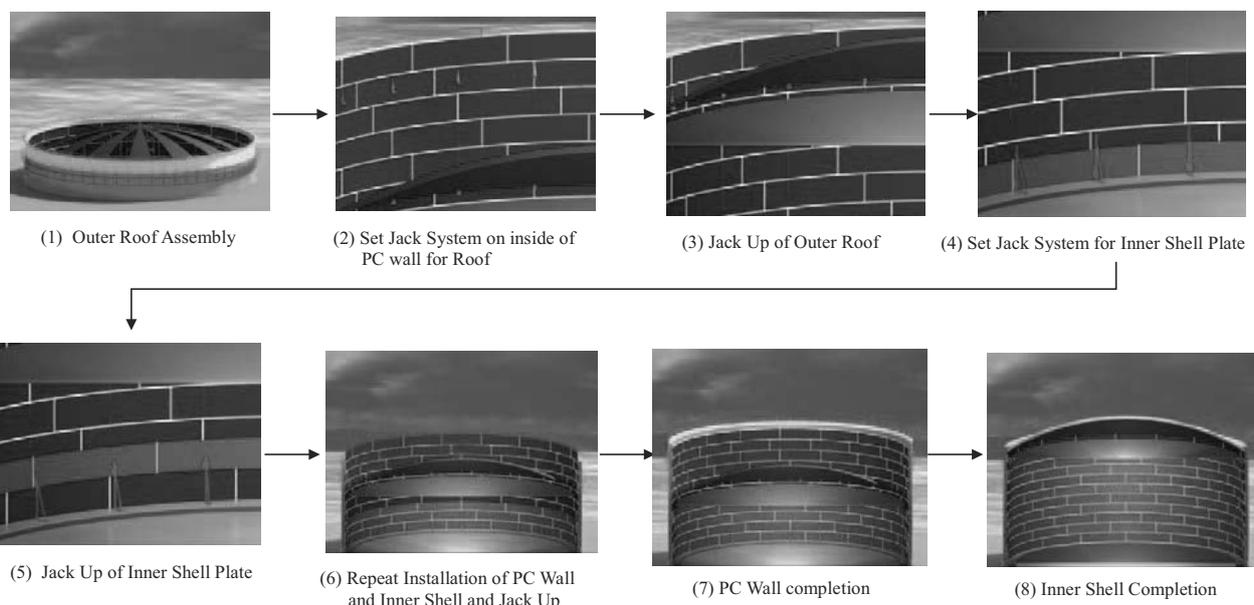


Fig. 5 Construction of JCM (Outer roof with suspended Deck)

特集：ジェットエンジン・ガスタービンを支える燃料

## 天然ガスパイプラインの広域整備と輸送技術

### Transmission Gas Pipeline



菅 剛志\*1  
SUGA Tsuyoshi

キーワード：高圧ガスパイプラインと地下貯蔵施設，新潟・仙台ガスパイプラインの健全性，天然ガスシフト  
Key Words：Transmission Gas Pipeline and Underground Storage, Integrity Assessment of Niigata-Sendai Pipeline, Natural Gas Shift Promotion

#### 1. はじめに

##### 1.1 「東日本大震災の教訓」と「新潟・仙台間ガスパイプライン」の安全性

幹線ガスパイプラインは、大容量の高圧天然ガスを遠隔地需要家に対して、安全かつ安定供給する社会基盤としての性格を有するインフラである。2011年3月11日に発生した東日本大震災（以下、「大震災」）では、当社が運営管理する「新潟・仙台間ガスパイプライン」（以下、「新潟仙台ライン」）が健全性を確保することが出来たことから、大震災後の3月23日には、仙台市ガス局に対して、LNG代替として天然ガスの供給再開を早期に可能としている。

##### 1.2 「天然ガスシフト」を下支えする「広域ガスパイプラインの整備」の必要性

大震災以降、原子力発電の大半が稼働を休止している状況において、エネルギーミックス政策の策定では、我が国の「全体最適」な社会的効果の視点から、天然ガス利用拡大、ならびに大規模な地下貯蔵施設と連結した広域ガスパイプライン・ネットワーク整備の重要性について、以下の視点で検討がなされている。

- ①天然ガスの利用拡大：産業需要家による燃料転換，ガス・コジェネ，スマートコミュニティ等の分散型エネルギーシステムの整備，高効率ガス火力発電所の新設と高経年火力発電所のリプレース，等
- ②環境負荷の低減：CO<sub>2</sub>排出の抑制効果
- ③エネルギーコストの削減：電気・ガス料金の低廉化
- ④長期的な供給安定性の向上：想定外の大規模な自然災害リスクに対する「ガス供給インフラの耐浪性」の確保と「供給ソースの多重化」
- ⑤全体最適的な供給ネットワークの強化：地下貯蔵施設と一体運用する物流システムの整備

原稿受付 2017年7月26日

\*1 石油資源開発(株)営業本部

〒100-0005 千代田区丸の内1-7-12

#### 2. 長距離・高圧ガスパイプラインの安全性

##### 2.1 新潟仙台ラインの健全性確保について（事例紹介）

マグニチュード（以下M）9クラスの広域巨大地震に対して強靱な耐震性能，および対人的災害の強さを実証した新潟仙台ラインについて、「ルート選定（計画段階）、設計・施行，保守管理」の視点から安全性に関して概説する。

###### ①ルート選定の考え方

- a. 安全性が確保できるルート：山間部地すべり地帯，地震時の大きな編土圧変異が予測される場所，液状化・軟弱地盤，不等沈下地域を極力回避。豪雨・土石流に対して安定地盤に敷設し，保守点検・維持管理が容易な場所の選定，等について十分な事前調査を実施。路線選定は公道（道路敷地内に埋設）が中心。
- b. 物理的・社会的立地条件：用地変更に伴う将来の敷設替を回避した計画の策定
- c. 経済性：ガスパイプライン沿線需要を考慮した最短距離の路線確定。専用橋や推進部等の特殊工事が少ないこと。施工性が良好なこと。

###### ②設計・施行の信頼性

- a. 鋼管の特性：不測の地殻変動（M9クラス巨大地震）に対する追従性を有し，弾性域内で挙動変形しない構造で，「変形強度」，「柔軟性/可とう性/延性（引張り強さ）」，「建設機械に対する耐損傷性」等に優れた特性を有する。
- b. 腐食に対する安全性：鋼管は防食性能に優れたポリエチレン被覆（厚さ3mm以上）を外面に施したうえ，更なる防食対策として，ガスパイプライン全線にわたり電気防食（防食電位の定期的な測定と管理）を実施。
- c. 溶接接合と非破壊検査：鋼管本体と同等以上の強度を有する信頼性の高い「突合せ溶接法（アーク溶接結合）」を採用し，溶接結合部は全数に「放射線

透過試験（合格対象：JIS23104-1968 2級以上）」を、ガスパイプライン全線にわたり「気密試験（設計圧力の1.1倍以上）」を実施。また、溶接士の技量は、JIS23801N-2P以上又は同等以上とし、当社の溶接士技量試験合格者のみ作業に従事。

③保守管理

- a. 運転監視制御システム：（「SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）システム」による流量、圧力、温度等の常時送ガス管理体制の整備）
- b. 保安設備：感震装置、漏洩検知装置、緊急遮断装置、大気放散塔、不等沈下測定装置、各種標識類、等の適所設置
- c. 定期パトロール：専門パトロール班による常時路線巡視。他工事影響と異常有無の確認。非常時パトロール：地震、大雨、洪水等の警報発令時のパトロールによる安全確認（地震・津波等の災害対策を定める「保安管理規定」）
- d. 漏えい検査：1回/年（ガス事業法上は1回/14ヶ月実施）
- e. 他社工事からの保安確保：道路調整会議・各種埋設物連絡協議会等への参加と工事情報の収集。他社近傍工事状況の監視と立会の強化。埋設物位置図の整備

2.2 新潟仙台ラインのスペックと耐震設計の基準

管種：UOE鋼管	[機械的強度]
規格：API 5L X60Q (L415)	・引張強度：5270kg/cm <sup>2</sup> 以上 (520MPa以上)
口径：20インチ (508mm)	・降伏強度：4220kg/cm <sup>2</sup> 以上 (415MPa以上)
管肉：11.91mm	・伸び：24%以上
鋼材重量：36,500t	[建設に係る主な設計基準]
総距離：約261km	・適用法規：鉱山保安法
設計内圧：70kg/cm <sup>2</sup> (6.86MPa)	・設計基準：高圧ガスパイプライン技術指針他

2.3 新潟仙台ラインの概説（工程と事業背景）

- ①全体工程：1987年事前調査，1992年本格工事着手，1996年3月末竣工
- ②石油資源開発株（JAPEX）は、昭和30年代後半より新潟県内における豊富な国内天然ガス資源を東北電力株殿のガス火力発電所向けに発電燃料ガス用として長きにわたり安定供給してきた。その後、昭和40年代より、東北経済連合会を中心に東北地方のエネルギー基盤の強化について提唱され、天然ガスの東北市場への広域供給に係る施策について種々検討がなされることとなった。その結果、当該パイプラインの建設・運用について理解者である東北電力株殿の多大なる協力・支援により、同社新仙台火力発電所2号機（60万kW）には1996年4月に供給を開始し、その後、2002年からは仙台市ガス局に対して都市ガス原料用として

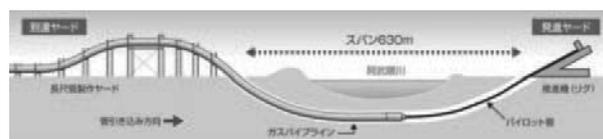
供給開始し、現在に至っている。2011年3月11日に発生した大震災では、東北電力株殿による不断の復旧努力により、同社仙台火力発電所向け燃料ガスの供給再開を、同年12月上旬に実施。

2.4 相馬ガスパイプライン（起点：福島県新地町に建設中の「相馬LNG基地」～終点：「岩沼分岐バルブステーション」、約39km、20インチ、新潟仙台ラインと同一スペック）の建設に係わる最新情報を以下にご紹介する。

①弧状推進工法（JFEエンジニアリング株殿によるRAPID工法）

- a. 工事場所：宮城県亶理郡亶理町～岩沼市。横断箇所は一級水系「阿武隈川」で施行延長は630m
- b. 施工角度と曲率半径：入射角15°/出射角10° 曲率半径は650mR
- c. 最深度：計画河床より約20m
- d. 管仕様：さや管～API5L L415M PSL2 NO26B (660.4mm)×t19.1mm  
ガス管～API5L L415M PSL2 P1H 20B (508.0mm)×t15.9mm
- e. 当該工法はRAPID（Radius Pipeline Drillingの略、「高速施行」の意）と呼ばれるもので、石油掘削に用いられる水平方位掘り技術を応用したもので、以下の特長を有している。

- ・短期化施工が可能。
- ・立坑が不要で掘削断面が小さく経済的な工法。発電ヤードの地上部分から斜めに推進し横下対象（河川、鉄道等）の下を円弧状通過させ、到達ヤードに斜めに到達させるもので長距離推進やカーブ水推進が可能な技術。
- ・発生土砂が少なく環境に優しい工法。
- ・坑内作業が不要で安全性が高い。



②20度VパルスMAG自動溶接法（日鉄住金パイプライン&エンジニアリング株殿が開発した高品質・高能率の溶接技術）

近年、国内での高圧導管建設においては、敷設環境の制約から専用シールドトンネルや大規模推進工法の適用が増加しており、工期短縮にも寄与する工法として、狭開先20度でも高品質・高能率の溶接が行えるVパルスMAG溶接法（NSMAG-PLS）が開発された。溶接開先はV型で、角度は、1990年代の40度Vから、2000年代の30度Vへと狭開先化が進んでおり、高い溶接速度という特徴を効果的に用い高い効率向上を達成することが可能となった。

### 3. 広域ガスパイプラインの整備構想

#### 3.1 現況（課題の整理）

- ①天然ガスは「シェール革命」により可採年数は飛躍的に増加しており（約60年⇒約250年）、また、原油に比べて地域偏在性が低く、調達先の多様化が可能な安定供給性に富んだ基幹エネルギーのひとつである。
- ②これまでは、我が国におけるガスパイプライン・インフラは、個別民間企業が事業主体者として「部分最適」な事業採算性の視点からこれを重要視して、消費地に近接したLNG基地に整備してきたことから、広域ガスパイプラインネットワークは未だに形成に至っておらず、供給セキュリティ上万全の体制とは言い難い状況にある。
- ③環境意識の高まりの中で、天然ガスを利用できないガスパイプライン未整備地域内には、未だに潜在需要家が多数存在している。大震災から学んだ教訓により、巨大自然災害による長期的な供給断絶リスクがあることを改めて再認識された結果、一段と高いレベルの供給セキュリティを確保する必要性から、全国規模での「全体最適」の視点で天然ガス供給基盤整備についての検討が求められている。具体的には、都市間連結、或いはLNG基地間連結を現実的なものとする広域的なガスパイプライン・ネットワークの整備についての詳細検討に迫られている。

#### 3.2 国の役割・制度的措置と官民連携に基づく仕組み作り

- ①電力事業の仕組みに倣った「広域系統整備委員会\*」などの会議体を組成し、ガスパイプライン・ネットワークの「基本要件、整備主体、受益者、費用の負担割合」等について詳細検討を行い、「全体最適」的な広域ガスパイプライン・ネットワークの整備を図ることが重要なエネルギー政策上の課題のひとつである。
- ②電力・ガス小売全面自由化の市場環境（重要な視点：需要家利益の最大化と需要家保安の担保）を踏まえたうえで「a. 天然ガスの利用向上（燃料転換の加速化、ガスコジェネ、地域スマートコミュニティの形成）b. 国内地下貯蔵施設の活用（広域ガスパイプライン・ネットワークとの連結が不可欠）c. 事業者競争の活性化 d. 長期的な供給安定性」の観点から、国の「全体最適」な広域ガスパイプライン実現のための環境整備を行うことが極めて重要である。
- ③「財政的支援」及び「制度的助成」両面からのアプローチによる政策誘導を導き出す。  
具体的施策の例示：利子補給、法人税・固定資産税等の特例措置、政策金融（低利融資）、各種公益特権の適用拡充、事業者供給区域間のガスパイプラインの連結、ガス広域流通を促進するための「託送供給制度（パンケーキ問題の解消・ガスパイプライン投資回収

※国の発議（広域機関の組成）・ガス供給事業者の提起・需要家からの要請

を図るための適正な事業報酬率の適用と一定期間の第三者開放義務の免除）」と原価償却期間の長期化30年間、等

#### 3.3 「天然ガスシフト」を加速するための広域ガスパイプラインの社会的な意義

- ①国内取引の活性化と価格低廉効果、需要家選択肢の拡大、CO<sub>2</sub>削減効果、不測の自然災害に対する供給セキュリティの向上と供給ソースの多重化の実現にとって、広域ガスパイプライン・ネットワークの整備は、換言すれば、公益性の高い社会的インフラの拡充として位置付けられる。
- ②「全体最適」の視点から、大震災の教訓を踏まえた「防災対策（地震・津波）」の抜本的強化を通して、ガスパイプラインを含めた様々なライフライン関連施設の「耐浪性」の確保を図り、「系統多重化」、「供給拠点の分散化」、代替施設の整備等による「代替性」の確保を推進することが社会的に求められている。
- ③広域ガスパイプライン・ネットワークの整備促進に伴う課題について以下に列記し、今後、実現にむけた議論の深堀が必要である。
  - a. 官民の役割分担の整理、整備費用負担の配分基準（特定負担・一般負担・ガス利用者負担・税負担）、及び社会便益性の評価、費用削減の施策（公的支援の拡充、規制緩和）
  - b. ガスパイプライン沿線における需要誘導を講ずることによる期待事業収入の増加（ガス利用設備への優遇策、新規ガス火力発電所へのインセンティブ供与、一定期間の託送義務免除、等）
  - c. 国内枯渇ガス田を活用した「地下貯蔵施設」の市場価値評価\*1と法的な位置付け\*2の整理。
  - d. ガスパイプラインスペックの不統一（口径、圧力・標準熱量等の品位、腐臭対策の有無等）
  - e. ガスパイプライン輸送能力の取扱いとコスト負担に係る利害調整（平時の利用容量と緊急時バックアップ措置のための容量との整理）

#### 4. おわりに

- ①高度に品質管理された長距離・高圧ガスパイプライン・ネットワークの耐震安全性は、過去の災害事例により実証されている。また、ガスパイプラインシステムの健全性は、鋼管の構造的側面のみならず、遠隔監視制御システム、並びに日常的な路線巡回や保守点検により確実なものとしている。
- ②大震災以降の電力供給については、原子力発電の減少

\*1 社会的便益：季節間需要変動の吸収。ピークシェイピングによる製造設備の平準化と高圧ガスパイプラインの利用効率向上、供給途絶時の供給安定性の確保、ガス価格の低廉化等

\*2 現状では、地下空間利用権の対象は、国産ガスに限定されており輸入LNGに対する法的枠組み、保安等の技術課題、コスト負担の考え方は未整備の状態である。

分はガス火力発電所による代替で補っていること、並びに大口産業需要家による燃料転換が加速していること、更には、ガス供給途絶等の危機対応力強化の視点から、分散型エネルギーシステム構築が必要であること、等の現実を踏まえると、天然ガスを安定的・低廉・広範に利用できる広域パイプライン・ネットワークの整備について、民間事業者が思考する「部分最適」的な事業採算性を損なわないことを前提に、国レベルの多様な社会的利便性を伴う「全体最適」の考えのもとで、官民連携による検討を更に深堀されるべきと考える。

- ③今後、主要需要地をつなぐ広域ガスパイプラインの整備促進には、a. 天然ガス利用向上と競争市場の醸成を促すためのLNG基地への第三者オープンアクセス制度の充実（LNG市場の育成）、b. 輸入LNGガスの圧入・再生産を可能とする国内地下貯蔵に対する政策支援措置の創設・拡充、c. 国内地下貯蔵施設と連結した広域ガスパイプラインの建設、等の視点から検討を進めていくことが重要である。

今般の寄稿に際して、最新技術データや技術的な知見をご提供頂いたJFEエンジニアリング株式会社の寺西直之国内PJ営業部長様、並びに日鉄住金パイプライン&エンジニアリング株式会社の岩上恵治執行役員様には、この場をお借りして深甚謝意を表したい。

## 参考文献

- (1) 石油資源開発株式会社「新潟・仙台間ガスパイプラインの安全性」(1991).
- (2) 江川堯・管井英暁・村瀬隆己「新潟・仙台ガスパイプライン鋼構造関連技術」鋼構造論文集第2巻第8号(1995).
- (3) 江川堯「新潟・仙台天然ガスパイプライン建設」石油技術協会誌第2巻第2号(1997).
- (4) 森聡・千葉一元・小池武「2011年東北地方太平洋沖地震における長距離ガスパイプラインの耐震性能」(2013).
- (5) 千葉一元「新潟・仙台ライン」(財)エンジニアリング協会・地下空間利用ガイドブック第6節エネルギー施設の事例(2013).
- (6) 天然ガス鉱業会「ガス導管事業者におけるパイプラインに対する保安対策の状況について」(2010).
- (7) 資源エネルギー庁「我が国の天然ガス及びその供給基盤の現状と課題」(2012).
- (8) 資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会・総合部会・天然ガスシフト基盤整備専門委員会報告書及び参考資料(2012).
- (9) 石油資源開発株式会社「相馬・岩沼間ガスパイプラインの安全性」(2014).
- (10) 資源エネルギー庁 第33回ガスシステム改革小委員会、小売全面自由化にむけた詳細制度設計等(2016).

# 電子ビーム物理蒸着法ZrO<sub>2</sub>系熱遮蔽コーティングの熱生成酸化物層の成長挙動に及ぼす板厚方向の温度分布の影響

## Effect of Temperature Gradient in Through-the-thick Direction on the Growth Behavior of Thermally Grown Oxide Layer in EB-PVD Thermal Barrier Coatings

田中 誠\*<sup>1</sup>  
TANAKA Makoto

香川 豊\*<sup>2</sup>  
KAGAWA Yutaka

### ABSTRACT

Thermal fatigue test has been applied to clamped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> EB-PVD thermal barrier coating (TBC) flat specimen. The effects of temperature gradient in through-the-thick direction of the specimen on growth morphology of thermally grown oxide (TGO) layer have been studied. It is found that the TGO morphology strongly depends both on temperature gradient condition and surface temperature of the coating layer, respectively. In particular, large temperature gradient ( $\Delta T=180^{\circ}\text{C}$ ) and low temperature lead to significant rumpling behavior of the TGO layer observed in this study. This result suggests that growth morphology of TGO layer should be considered the effects of temperature gradient through-the-thickness direction and temperature, because the TGO rumpling induces the stress through-the-thickness direction leading to failure of TBC.

**Key words :** Thermal barrier coatings, Thermal fatigue, Temperature gradient, Thermally grown oxide (TGO), Morphology of TGO layer

### 1. 緒言

熱遮蔽コーティング (TBCs : Thermal Barrier Coatings, 以下TBCsと記す) は発電用・航空機エンジン用ガスタービンの静止部品及び動翼などの高温部分に適用されており, 耐熱金属基材を高温過酷な環境から保護する役割を持っている<sup>(1)-(3)</sup>. TBCを施工した部材では, 使用時にZrO<sub>2</sub>系のTBC層とAl元素を含むPtAlやCoNiCrAlYなどのボンドコート層の間にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を主成分とする酸化物を生成する<sup>(4),(5)</sup>. この酸化物の熱膨張係数はZrO<sub>2</sub>及びボンドコート, 基材よりも小さく冷却時に大きな圧縮残留応力が発生することが知られている. この残留応力により, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系のTGO (Thermally Grown Oxide) 層が面外の変形を生じ, TBC層の基材からの剥離を生じさせる大きな要因になることが明らかになっている<sup>(4),(5)</sup>. このために, 熱と力学負荷を組み合わせた種々の環境下でのTGOの生成現象を知ることは重要である.

これまでの研究から, TGO層の生成厚さは力学負荷の影響は少ないが, 熱履歴に大きく依存することが知られている<sup>(6),(7)</sup>. 実際のTBCsの使用環境下では, 表面は高温になるが, 基材は冷却されているためにコーティング層中では, TBC層内に温度勾配を持つことになるので熱履歴の影響には温度勾配の影響を考えなければならない. これまでに, TBCsの恒温熱曝露試験や熱サイクル試験などが数多く行われ, TGOの生成機構についても調べられてきた<sup>(4)-(7)</sup>. しかし, 実環境で発生する温度勾配が付与されている条件下でのTGO層の成長挙動に関しては限られた範囲のデータしか得られていない. そこで, 本研究ではTBC層に温度勾配が生じる条件下で熱疲労試験を行い, 種々の温度及び温度勾配条件下におけるTGO層の成長挙動を調べることを目的とした.

### 2. 実験方法

#### 2.1 装置の構成

熱サイクル試験に用いた装置はすでに報告したものと同一である<sup>(8)</sup>. 試験片の加熱及び冷却システムの概略図を図1に示す. 高周波発振器 (出力10 kW, 周波数80±30kHz) により試験片のTBC層側に配置されたコイルに電流を流し, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ホルダー内のMoSi<sub>2</sub>製サセプターを加熱し, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ホルダー表面からの輻射熱によりTBC層

原稿受付 2016年10月19日

査読完了 2017年8月9日

\*1 (一財) ファインセラミックスセンター  
〒456-8587 名古屋市熱田区六野 2-4-1

\*2 東京大学大学院工学系研究科  
〒113-8586 文京区本郷 7-3-1  
E-mail: m\_tanaka@jfcc.or.jp

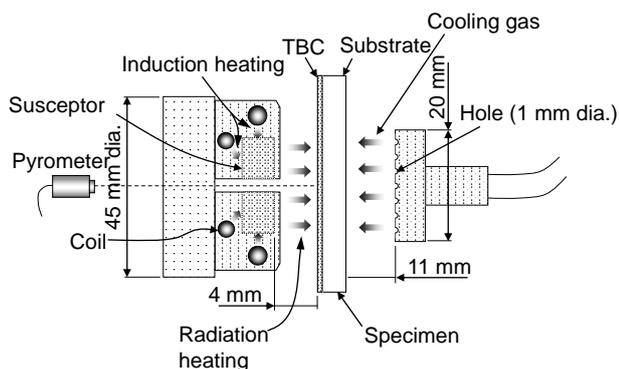


Fig. 1 Schematic drawing of the specimen heating and cooling system.

表面を加熱した。このとき、試験片表面が加熱される部分は直径～20mmの円形であり、TBC層表面とサセプターとの距離は～4mmである。冷却時は、加熱源であるサセプターを冷却するとともに、試験片の基材側に設置したピンホールを設けたエアノズルを用いて圧縮空気を基材に吹き付けた。なお、加熱時には圧縮空気の供給は停止した。

TBC層表面温度は、ファイバ式放射温度計（IR-FAI, 楸チノー）によりサセプター中央部の円筒状穴を介して測定した。TBC層表面での温度測定領域直径は～3.4mmである。この際、サセプターからの熱も放射温度計は測定しているため実際の試験片表面の温度と誤差が生じる。この誤差の補正方法を付録Aに示す。

## 2.2 温度勾配下での熱サイクル試験

厚さ～200 $\mu$ mのTBC層を厚さ～200 $\mu$ mボンドコート層（BC層）の上に電子ビーム物理蒸着法（以後、EB-PVDと記す）によりコーティングした試験片を用いた。TBC層は8mass%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>であり、BC層は減圧プラズマ溶射法にてコーティングした化学組成が（mass%）32.0-Ni, 21.0-Cr, 8.0-Al, 0.5-Y, 残りはCoのものである。基材には厚さ～3mmのInconel 738LCを用いた。基材の化学組成（mass%）は16.0-Cr, 8.5-Co, 3.4-Al, 3.4-Ti, 1.7-Mo, 2.6-W, 1.75-Ta, 0.9-Nb, 0.11-C, 残りはNiである。以後、基材にBC層及びTBC層がコーティングされたものを「TBCシステム」と記述する。試験前のTBC層とBC層間に生成していたTGO層の厚さは $h_{TGO} \approx 0.7 \mu\text{m}$ である。なお、実験に用いたTBCシステムは、すでに種々の特性を報告したものと同一である<sup>(9)-(11)</sup>。

TBCシステム試験片の形状及び寸法を図2に示す。熱負荷のみを加えるために、TBCシステム試験片は上側掴み部のみを試験機に固定し、もう一方の端部は自由に変形できる状態にした。加熱速度は5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、冷却速度は20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ とした。熱サイクル中のTBC層表面の最低温度は $T_{\min} = 300^{\circ}\text{C}$ 、最高温度は $T_h = 1150^{\circ}\text{C}$ で1h保持とした。最大繰り返し数は $N = 250$ 回とした。

加熱時に、試験片には長手方向に温度分布が発生する。そのため、熱サイクル試験前にあらかじめTBCシ

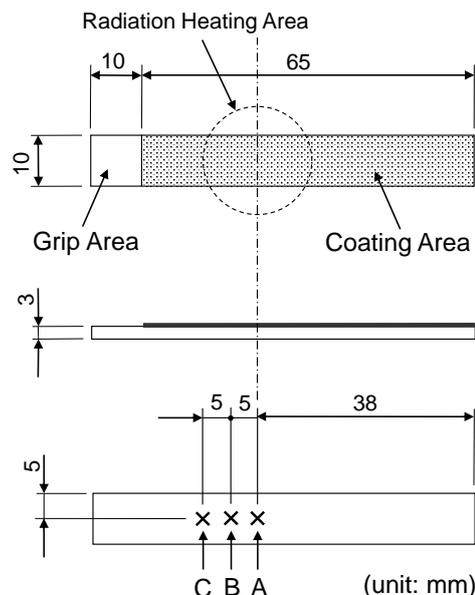


Fig. 2 Shape and dimensions of the specimen.

ステム試験片の長手方向の温度分布を測定した。図2に示した加熱領域中央部のA点と試験片長手方向にA点から5mm及び10mm離れた位置（B及びC点）のTBC層表面と基材裏面にR熱電対を取り付けA点のTBC層表面を1150 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱して保持した。その時のそれぞれの温度を読み取り、A、B及びC点でのコーティング層厚さ方向の温度勾配を確認した。熱サイクル試験後に試験片の厚さ方向の断面を切断研磨し、A、B及びC点の断面組織観察を走査型電子顕微鏡（SEM）にて行った。また、TGO層の厚さはSEMにて観察した写真を用いて測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 試験片の温度分布及び温度勾配

1サイクル中の試験片中A点のTBC層表面と基材裏面の温度履歴を図3(a)に示す。温度の上昇とともに温度勾配も徐々に増加し、最高温度ではほぼ一定の温度勾配を示した。最高温度でTBC層表面温度は $T_{tbc} = 1150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内で保持された。一方、冷却時では圧縮空気が試験片に吹き付けた際に急激に一旦冷却された。熱サイクル中の最高保持温度（TBC層表面温度 $T_{tbc} = 1150^{\circ}\text{C}$ ）でのA、B及びC点のTBC層表面温度 $T_{tbc}$ 、基材裏面温度 $T_s$ 及びその温度勾配 $\Delta T (= T_{tbc} - T_s)$ を図3(b)に示す。熱サイクル中の最高保持温度では、試験片A点のTBC層表面温度は $T_{tbc} = 1150^{\circ}\text{C}$ （制御温度）であり、その基材裏面温度は $T_s = 1020^{\circ}\text{C}$ で $\Delta T = 130^{\circ}\text{C}$ の温度勾配が発生していた。B点ではTBC層表面温度は $T_{tbc} = 1115^{\circ}\text{C}$ であり、基材裏面温度は $T_s = 985^{\circ}\text{C}$ で $\Delta T = 130^{\circ}\text{C}$ であった。また、C点ではTBC層表面温度は $T_{tbc} = 1065^{\circ}\text{C}$ であり、基材裏面温度は $T_s = 885^{\circ}\text{C}$ で $\Delta T = 180^{\circ}\text{C}$ であった。これらの温度データとTBC層、BC層、及び基材の熱伝導率を用いた定常熱伝導計算により、おおよそのTBC/BC層界面の

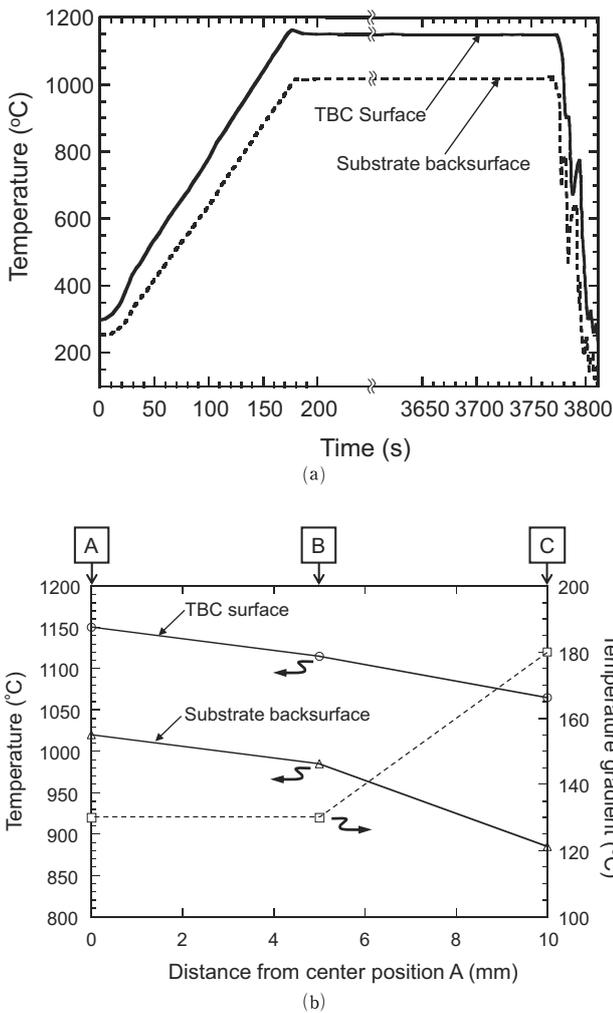


Fig. 3 (a) TBC surface and substrate backsurface temperature at position A during thermal cycling. (b) Temperature gradient at position A, B and C indicated in Fig. 2.

温度  $T_i$  は次式で求まる。

$$T_i = \frac{T_{tbc}(\lambda_{tbc}\lambda_{bc}h_s + \lambda_{tbc}\lambda_s h_{bc}) + T_s\lambda_{bc}\lambda_s h_{tbc}}{\lambda_{tbc}\lambda_{bc}h_s + \lambda_{tbc}\lambda_s h_{bc} + \lambda_{bc}\lambda_s h_{tbc}} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は各層及び基材の熱伝導率、 $h$  は各層及び基材の厚さである。各層及び基材の熱伝導率<sup>12)</sup>を用いて計算すると、試験片A点のTBC/BC層界面の温度は  $T_i = 1090^\circ\text{C}$ 、B点では  $T_i = 1050^\circ\text{C}$ 、C点では  $T_i = 980^\circ\text{C}$  である。これより、加熱領域中央部A点から長手方向に離れるに従い試験片の温度は低下するが、コーティング層厚さ方向の温度勾配は増加していることが明らかになった。このことより、温度分布と同様に試験片長手方向に温度勾配分布が存在し、一度の試験で異なった温度勾配下のTGO層の生成現象が観察できるものと考えられる。

### 3.2 TGO層の成長挙動

図4に熱サイクル試験後のA及びC点の断面組織写真を示す。A及びC点ともにTBC層とBC層の間に試験前に比較してTGO層が成長する現象が観察された。生成したTGO層の厚さはC点よりもA点の方がおよそ2倍厚いことがわかる。また、C点ではTGO層の厚さのばらつきが大きく、その形態のランプリング (Rumpling) と呼ばれるうねりが顕著に観察される。また、C点ではBC層に「D」で示した濃灰色の相が観察された(図4(b), (d))。本研究とほぼ同様な組成のBC層を調べた報告<sup>13), 14)</sup>によると、濃灰色領域は $\beta$ 相あるいは $\gamma'$ 相、その他の薄灰色領域は $\gamma$ 相であり、それぞれはAlに富む相及びAl欠乏相であることが報告されている。また、TGO/BC層界面から数 $\mu\text{m}$ 以内のBC層内において濃灰色の $\beta$ 相はA点では観察されなかった。従って、A点ではBC層内のAlがTBC層側に拡散し $\beta$ 相が消滅して $\gamma$ 相のみとなっており、C点ではAl濃度が高い $\beta$ 相が残っている。このことから、TGO層を形成するために消費されたBC

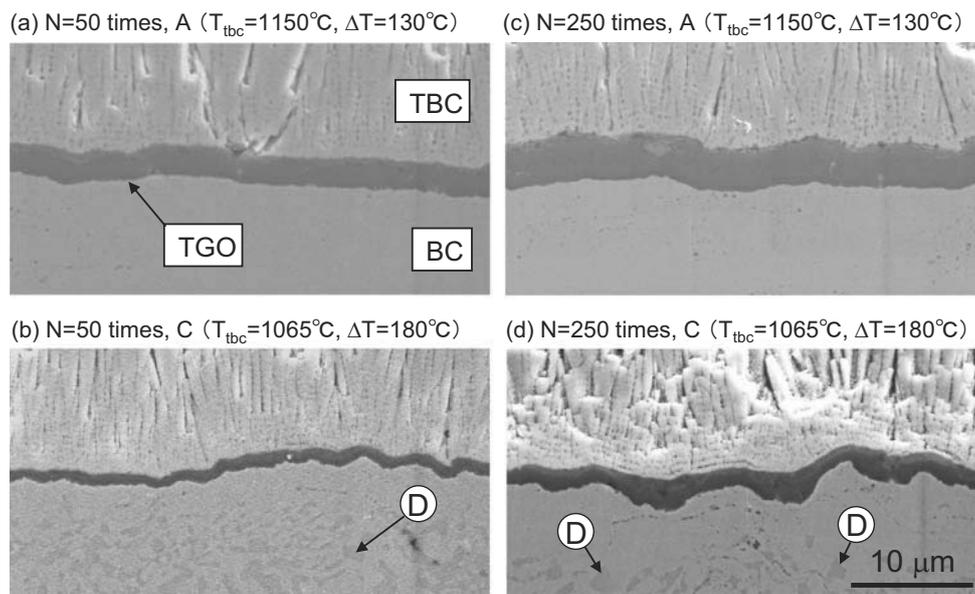


Fig. 4 SEM images of the TGO morphology after thermal cycling, (a) N=50 times, position A, (b) N=50 times, position C, (c) N=250 times, position A and (d) N=250 times, position C.

層内のAlはA点よりもC点の方が少なかったと考えることができる。

TGO層の厚さを定量的に求めるために、平均TGO層厚さ $\bar{h}_{tgo}$ を

$$\bar{h}_{tgo} \equiv \frac{\sum_{i=1}^{N_m} h_{tgo}^i}{N_m} \quad (2)$$

で定義した。ここで、 $h_{tgo}^i$ は測定したTGO層厚さ、 $N_m$ は測定値の数を示している。 $h_{tgo}^i$ は研磨された断面SEM写真（倍率×3000）において $3\mu\text{m}$ 間隔で界面に対して垂直に50箇所測定した。図5にA、B及びC点における平均TGO層厚さ $\bar{h}_{tgo}$ と熱サイクル数 $N$ の関係を示す。図中のエラーバーは、測定したTGO厚さの最大及び最小値を意味する。熱サイクル数の増加に伴い、TGO層厚さが増加している。一般的に、TGO層の平均厚さ（ $\bar{h}_{tgo}$ ）と熱曝露時間（ $t$ ）の関係は

$$\bar{h}_{tgo} \approx k_p t^n \quad (3)$$

で表されることが知られている。ここで、 $k_p$ は速度定数、 $t$ は熱曝露時間（熱サイクルの場合、最高温度での保持時間）を表す。速度定数 $k_p$ は熱曝露温度や曝露条件によって異なるが、熱サイクル負荷と力学負荷が同時に加わる熱機械疲労試験においては負荷荷重に依存しないことが報告されている<sup>(5)</sup>。しかしながら、温度一定の静的クリープ試験では負荷荷重に依存することが報告されている<sup>(6)</sup>。さらに、本研究で用いたTBCシステムと同じ材料系でのTGO層生成時の $n$ の値は0.33程度であることが報告されている<sup>(7)</sup>。本実験で得られたデータを最小二乗法により $n$ を求めたところ、A点では $n=0.29$ 、B点では $n=0.26$ 、C点では $n=0.14$ であった。C点の $n$ の値がA及びB点に比較して小さいのは、TBC層内の大きな温度勾配により内方向への酸素の拡散速度がTBC層内で大きな分布を持つことに関係していると推察される。これより、TBCシステムにおいてTGO層は温度及び温度勾配条件によって異なった成長挙動を示すことが本実験の結果より明らかとなった。

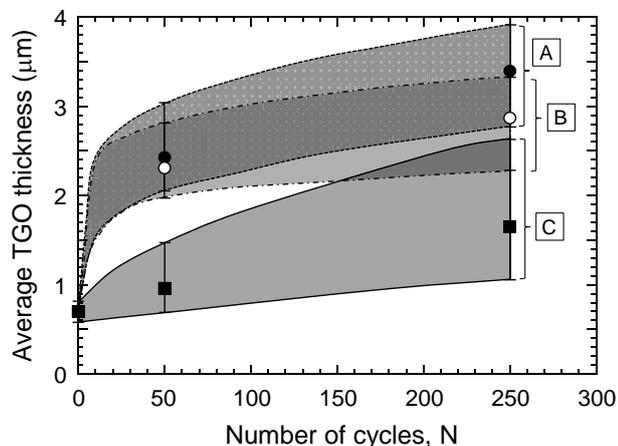


Fig. 5 Plots of TGO layer thickness vs. number of cycles at position A, B and C.

TBCシステム断面から観察したTGO層のランプリングを定量的に評価するために、A、B及びC点で生成したTGO層のランプリングの振幅及び屈曲度を求めた。TGO層厚さ測定に用いた写真において、TBC/TGO層界面のランプリング形状をデジタイザーを用いて、面内方向を $x$ 、膜厚方向を $y$ として二次元座標化した。このときの座標間間隔は $0.08\mu\text{m}$ で、データ数は500点である。座標化したTBC/TGO層界面形状データから次式により定義したランプリング形状の振幅 $\delta$ を求めた。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4)$$

ここで、 $n$ は測定したデータ数、 $y_i$ は膜厚方向座標の平均値とそれぞれの測定値との差である。また、ランプリングの屈曲度 $\Omega$ は、界面に沿った方向の測定範囲及びランプリングの生じた界面の長さをそれぞれ $L_0$ 及び $L$ とし、 $\Omega=L/L_0$ で定義した。ランプリングの生じた界面の長さ $L$ は、次式により算出した。

$$L = \int_{x=0}^{x=L_0} \sqrt{1+(f'(x))^2} dx \quad (5)$$

ここで、 $f(x)$ はデジタイザーにより座標化したデータから求めたものである。

図6に熱サイクル回数とTGO層のランプリングの振幅及び屈曲度の関係を示す。熱サイクル回数 $N=50$ 回で

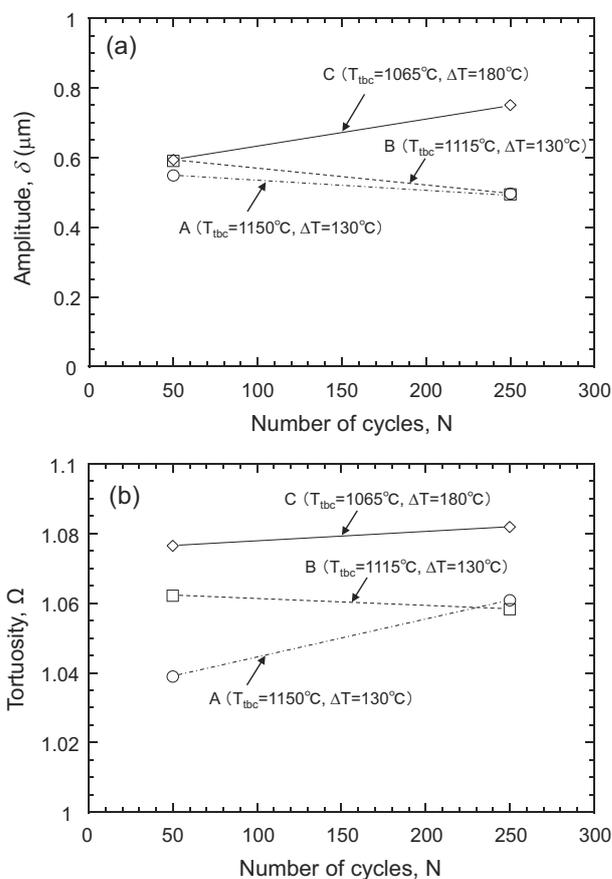


Fig. 6 (a) Amplitude of TGO undulation as a function of number of cycles. (b) Tortuosity of TGO layer as a function of number of cycles.

は、すべての場所において $\sim 0.6 \mu\text{m}$ 程度の振幅を示した。その後、熱サイクル回数の増加によりA及びB点においては振幅が僅かに減少する傾向を示したが、C点においては逆に振幅が増加する傾向を示した。これより、TBCシステムが曝される温度が本実験条件内 ( $T_{tbc} = 1065 \sim 1150^\circ\text{C}$ ) においては、低温度且つ大きい温度勾配条件であると熱サイクル回数の増加に伴いTGO層のランプリングの振幅が増加することが明らかになった。本実験により生成したTGO層の屈曲度は $\Omega = 1.04 - 1.08$ であった。N=50回では、A点において $\Omega = 1.04$ を示し、B及びC点へとTBC表面温度の低下に伴いTGO層の屈曲度は増加した。その後、N=250回においてA及びB点では $\Omega \sim 1.06$ に収束したが、C点においては熱サイクル数の増加に伴い屈曲度が僅かに増加した。N=50回において、ランプリングの振幅は全ての温度条件ではほぼ同じであるが、屈曲度は大きく異なる。ここで、TGO層のランプリング形状を正弦波であると仮定すると、その波長 $W$ は以下の式で表せる。

$$W \approx \frac{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot \delta}{\sqrt{L/L_0 - 1}} \quad (6)$$

式(6)を用いて求めたランプリング波長は、N=50回におけるA、B及びC点でそれぞれ $W = 12.3, 10.5$ 及び $9.5 \mu\text{m}$ であり、温度及び温度勾配条件によりランプリングの波長が異なることが明らかになった。また、N=250回では、A及びB点の振幅と屈曲度はほぼ同じであるが、C点では大きく異なる。したがって、温度勾配が大きい場合、TGO層のランプリングが顕著であることが示唆された。なお、TGO/BC層界面形状についてもTGO層の振幅及び屈曲度を測定したところ同様な結果が得られた。TBC層は熱曝露に伴い焼結が進行し、弾性率が增大することが知られている<sup>18)</sup>。本実験のようにTBC層内に温度勾配が存在する場合、TBC層の表層側とBC層側では弾性率の増大率が異なることが予想され、TGO層近傍において熱サイクル時にかかる局所的な熱応力は、温度勾配が存在しない場合と異なることが考えられる。これより、TBCシステム内の温度勾配が大きい場合、TGO層のランプリングが顕著になったと考えられる。

上述したように、低温度且つ大きい温度勾配条件であると熱サイクル回数の増加に伴いTGO層のランプリングの振幅が増加する。しかしながら、ランプリング挙動に及ぼす支配的因子が温度であるか温度勾配であるかは、完全には明確になっていない。今後、定常熱伝導計算により推定したTBC/BC層界面の温度を最高保持温度として、板厚方向に温度勾配を付与しない熱サイクル試験を実施し、TGO層のランプリング挙動を検証する予定である。

#### 4. 結論

EB-PVD法により作製されたTBC試験片を用いてTBC層と基材間に温度勾配が生じる条件下での熱サイクル試験を行った。その結果、コーティング層の厚さ方向に温度勾配を付与した場合、温度及び温度勾配の条件によってTGO層の成長挙動が大きく異なることが明らかになった。特に、温度勾配が大きい場合 ( $\Delta T = 180^\circ\text{C}$ )、TGO層のランプリングが顕著となり、TGO層内に膜厚方向の応力が発生するため、TGO層の応力や組織変化などからTBCシステムの使用限界を議論する場合は注意が必要である。

#### 参考文献

- (1) Padture N.P., Gell M., Jordan E.H., Science, 296 (2002), p. 280.
- (2) Nicholls J.R., MRS Bulletin, 28 (2003), p. 659.
- (3) Peters M., Leyens C., Schulz U., Kaysser W.A., Adv. Eng. Mater., 3 (2001), p. 193.
- (4) He M.Y., Evans A.G., Hutchinson J.W., Acta Mater., 48 (2000), p. 2593.
- (5) Mumm D.R., Evans A.G., Spitsberg I.T., Acta Mater., 49 (2001), p. 2329.
- (6) Shillington E.A.G., Clarke D.R., Acta Mater., 47 (1999), p. 1297.
- (7) Sohn Y.H., Kim J.H., Jordan E.H., Gell M., Surf. Coat. Tech., 146-147 (2001), p. 70.
- (8) 田中 誠, 香川 豊, 日本ガスタービン学会誌, 37 (2009), p. 168.
- (9) Tanaka M., Liu Y.F., Kim S.S., Kagawa Y., J. Mater. Res., 23 (2008), p. 2382.
- (10) Tanaka M., Kitazawa R., Tomimatsu T., Liu Y.F., Kagawa Y., Surf. Coat. Technol., 204 (2009), p. 657.
- (11) Tanaka M., Mercer C., Kagawa Y., Evans A.G., J. Am. Ceram. Soc., 94 (2011), p. S128.
- (12) 伊藤義康, 機械の研究, 47 (1995), p. 34.
- (13) Toma D., Brandl W., Köster U., Surf. Coat. Technol., 120-121 (1999), p. 8.
- (14) Zhao L., Parco M., Lugscheider E., Surf. Coat. Technol., 179 (2004), p.272.
- (15) Kitazawa R., Kakisawa H., Kagawa Y., Surf. Coat. Technol., 238 (2014), p. 68.
- (16) Manap A., Seo D., Ogawa K., Mater. Sci. Forum, 696 (2011), p. 324.
- (17) Schulz U., Menzebach M., Leyens C., Yang Y.Q., Surf. Coat. Technol., 146-147 (2001), p. 117.
- (18) Guo S., Kagawa Y., Ceram. Intern., 32 (2006), p. 263.

## 付録A

図A1にモデルを示した。表面が $T^{\circ}\text{C}$ の試験片から放射される輻射熱エネルギーは次式で表わせる。

$$\varepsilon \times R(T) \quad (\text{A1})$$

また、 $T_s^{\circ}\text{C}$ のサセプター表面から放射された熱エネルギーが試験片から反射されたものは、

$$(1 - \varepsilon) \times R(T_s) \quad (\text{A2})$$

で表わせ、最終的に放射温度計に入力される反射エネルギーは、

$$\beta(1 - \varepsilon) \times R(T_s) \quad (\text{A3})$$

となる。ここで、 $\beta$ は光学補正係数である。(A1)及び(A3)式から放射温度計に入る総エネルギー $R(T_r)$ は、

$$R(T_r) = \varepsilon \times R(T) + \beta(1 - \varepsilon) \times R(T_s) \quad (\text{A4})$$

となる。よって、試験片表面の真温度 $T^{\circ}\text{C}$ は

$$R(T) = \frac{R(T_r) - \beta(1 - \varepsilon) \times R(T_s)}{\varepsilon} \quad (\text{A5})$$

式より求めることができる。

実際には、反射補正付変換器 (IR-GBG, (株)チノー) を用いて式 (A1)～(A5) で与えられる式より補正を行い、試験片表面の正確な温度情報を検出した。温度校正作業として試験片表面とサセプターにR熱電対を取りつけ、試験片表面の熱電対から出力される温度情報と放射温度計から出力される温度情報が一致するように放射温度計の放射率値と反射補正付変換器の光学補正係数値を調整した後に実験を行った。この温度校正作業は、300℃、600℃、900℃及び1200℃にて一定の温度で行った。その結果、放射温度計の放射率値を $\varepsilon = 0.5$ 、反射補正付変換器の光学補正係数値を $\beta = 0.95$ と決定した。

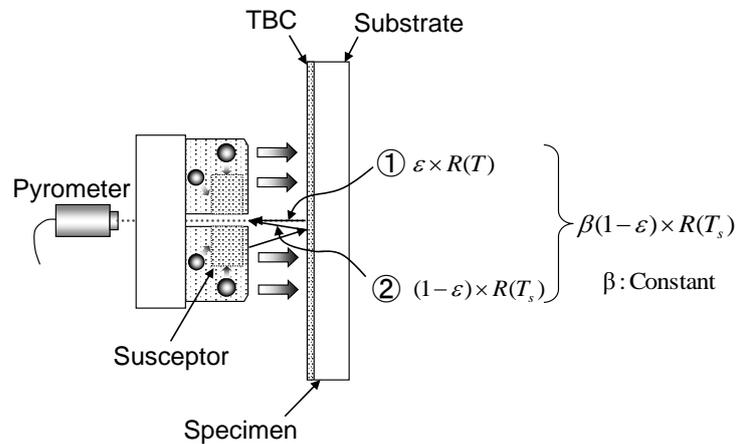


Fig. A1 Correction of the temperature detected by pyrometer.

# 2017年ASME国際ガスタービン会議

## 1. 全般

太田 有\*<sup>1</sup>  
OHTA Yutaka

2017年のASME Turbo Expo (Turbomachinery Technical Conference & Exposition) は、North Carolina州CharlotteにあるCharlotte Convention Center (図1)において、6月26日(月)から30日(金)までの5日間の日程で開催された。Charlotte市はBank of Americaの本社などがある全米第二の金融都市であり、昨年10月には警官が黒人男性を射殺したことによる暴動が起きたことでも有名になった。今回の会議は、ASME Power & Energy Conference & ExhibitionとICOPE (International Conference on Power Engineering) との共同開催となったため、同時期に同じ会場で5つのConference (Power Conference, Energy Sustainability Conference, Fuel Cell Conference, ICOPE, Turbo Expo) と2つのForum (Energy Storage Forum, Nuclear Forum) が開催される運びとなり、参加者も速報値で4000人を突破し、プログラムも約300ページと厚く・重くなった。

26日(月)のオープニングではCharlotte市長Jennifer Roberts氏の歓迎挨拶に続き、“Disruptive Technologies & Accelerating the Pace of Innovation in Gas Turbines”と題したパネル形式のキーノートセッションが行われた。このようなパネル形式のキーノートがオープニングに行われるのは、昨年のソウル大会に続いて2度目である。冒頭、モデレータを務めたSiemensのPaul Garbett氏が、計算機能力の飛躍的な向上とAdditive Manufacturing (AM) 技術の登場によって、ガスタービン関連分野に

限らず設計手法が大きく変わったことを紹介し、その後、Exxon Mobil社のDag Calafell氏、Duke Energy社のKevin Murray氏、Siemens社のKaren Florschuetz氏がパネリストとして登壇した(図2)。この“Disruptive Technology (破壊的技術)”という言葉は、Harvard Business SchoolのClayton Christensen教授が1995年に発表した有名な著書“The Innovator’s Dilemma”の中で“Sustaining Technology (持続的技術)”と対比する形で用いたのが始まりであり、Oil&Gas分野、発電技術および生産設備関連分野での破壊的技術の導入状況がパネリストにより紹介された。しかし、ガスタービンおよびその関連分野では主に3D PrintingをはじめとするAMや各種Digital技術の導入による新製品の設計・生産および運転状況の把握や監視に限定されているという印象を受けた。質疑応答には、昨年のソウル大会の場合と同様に、予めASMEのサイトからアプリをダウンロードして行う形式が採用されており、AMのターボ機械技術への応用やエネルギーストレージの問題点、Digital Twin技術の進捗状況などが質問されていたが、質問者の顔が見えない討論は迫力に欠ける印象を持った。まさにDigital技術応用の一面ではあるが、今後他の会議で定着するかについては疑問の余地があると思われる。

その後、恒例となっている表彰が行われ、Tom Sawyer Awardは、A. Epstein博士(P&W)、2017 Aircraft Engine Technology Awardは、Ohio州立大学のM. Dunn教授、Industrial Gas Turbine Technology Awardは、MHIの伊藤栄作氏がそれぞれ受賞し、記念講演も合わせて開催され多くの聴衆を集めていた。



Fig. 1 Registration of the conference

原稿受付 2017年7月14日

\* 1 早稲田大学 理工学術院  
〒169-8555 新宿区大久保3-4-1



Fig. 2 Keynote panel of the first day (courtesy of ASME/IGTI)

27日(火)午前中のPlenaryでは、“Multidisciplinary Computations and Optimization in Gas Turbine Design”と題して、GTFを始めとする航空エンジンにおける流路形状や翼の最適化設計の実例(P&W)、発電用GTにおける空力・熱伝導連成解析の実例や製造品質の向上(MHI)、および各種数値計算ソフトやシミュレータの開発事例(Canaero社)が学際的最適化手法の一例としてパネリストより紹介された。28日(水)午前中のPlenaryでは、AMに関するパネルが開催され、この新しい技術がGT関連の仕事をどのように変えたのか、GE、P&W、Siemensからのパネリストが紹介した後、AM技術が点検やメンテナンスにどのように役立っているのか、あるいは各社でAM教育はどのように実施されているのかなどの質問が寄せられていた。近年AM技術の産業応用に向けた研究や開発は飛躍的に進んでおり、今回のTurbo ExpoでもAMや3Dプリンティングに関する複数のセッションが開設されている。

本会議の最終的な技術論文の数は、査読の結果約1100編となり、Convention Centerとそこに隣接するWestinホテルの合わせて30を超える講演会場で発表が行われた。今年から査読方法が大きく変わり、withdrawした論文も多かったと聞く。また、査読者には評判の悪い新たな

査読システムの導入は、今後の検討課題の一つになると思われる。一方、展示会場には145のブースが設置された。その隣では、学生のポスター展示も開催され、37機関(大学)が展示を行った。残念ながら日本からの参加はなかったが、韓国からは3大学、中国からは6大学も参加しており、次回以降に日本の大学も存在感を示す必要があろう。

日本ガスタービン学会は2014年のDüsseldorf大会から4大会連続して展示ブースを開設しており、学会の概要や活動を紹介すると共に、2018年に盛岡で開催されるACGT 2018、2019年に虎ノ門ヒルズで開催予定のIGTC 2019のパンフレット、賛助会員と大学を紹介する小冊子などを配布した。毎年、純日本風のファイルが人気を呼んでおり、今年の金閣寺ファイルも用意した300部を全て配布したとのこと。この学会ブースは、夕方5時になるとビール片手に集まる日本人参加者の憩いの場になっており、来年以降も継続して欲しいと思う。

来年のTurbo Expo 2018は、6月11日から15日まで、Norwayの首都Oslo近郊のLillestrømで開催される。初夏の北欧開催ということで、日本からの参加者が増えることを期待したい。

## 2. 航空用ガスタービン

浅子 知昭\*<sup>1</sup>  
ASAKO Tomoaki

### 1. 概要

航空エンジン関連(Aircraft Engine Committee主催)のセッション数は、全部で11セッション(2016年:11/2015年:12)であった。セッションの内訳は、パネルセッションが1セッション(同1/0)、チュートリアルセッションが2セッション(同2/3)で、残りの8セッション(同8/8)がテクニカルセッション(論文発表)であり、昨年度と同数であった。

テクニカルセッションでの発表数は、31件(同38/39件)であり、発表数は、昨年よりも減少している。また、これらとは別にTurbomachinery Committeeとのジョイントセッションとして騒音関係の3つのセッション(同2/3件)が行われた。(なお、セッション数、発表件数とも筆者による集計値である。)

これらのセッションのうち、2つのチュートリアルセッションは、①エンジンの非定常性能シミュレーション

に関するものと、②APU(航空機の補助動力装置)に関するものであった。このうち、非定常性能シミュレーションに関するチュートリアルセッションは、昨年度に引き続き2回目であったが、フリーの予測ソフトによる非定常性能シミュレーションのデモが加わるなど、内容は新しいものになっていた。また、APUに関するチュートリアルセッションは、初めてのものであったが、その中では、APUの種類や運用、型式承認などAPUの一般的なことに関する説明と電動タキシングに関する説明があった。

今回唯一のパネルセッションは、エンジンの計測技術に関するものであり、セッションの進行およびパネリストは、米空軍、計測器メーカーなどから出ており、一般的な圧力計測、温度計測、流量計測の説明から始まり、計測データのサンプリングとフィルタリングについての説明、小型の計測器による要素下流の流れ場(圧力、流れ角、流速)計測についての紹介などがあり、どちらかと言えば、チュートリアルセッション的な内容であった。

論文発表のセッション8件の内訳は、①オペラビリティ、②インレット(2件)、③オイルシステムの熱管

原稿受付 2017年7月20日

\*1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域  
技術開発センター エンジン技術部  
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

理, ④モデル化・シミュレーションと検証, ⑤燃焼器と排出物, ⑥エンジン全体の性能と新エンジンコンセプト(2件)であり, このうち, インレットディストーションに関するセッションと発表が増えている(①と②と合わせて3セッション)。なお, 昨年度聴講者が減少傾向であったプロペラやオープンローター関連は, 発表が1件のみで, セッションは, なくなっている。また, しばらく続いていたエンジンへの火山灰や水・氷などの吸込みに関するものは, セッション・発表を含めて今年は1件もなかった。

以下にそれぞれのテクニカルセッションでの発表の概要を示す。

## 2. テクニカルセッション内容

### 2.1 オペラビリティ

この中では, ディストーションを示すパラメータを定義し, ディストーションが生じたときのファンのスタビリティマージンをそのパラメータで整理し評価した検討(GT-63721), インレットディストーションがある場合にファンの出口静翼を周方向非対称にした場合の性能改善量の検討(GT-63082), インレットディストーションが生じている状態でのファンのCFD解析(GT-63369, 64525), フーリエ記述子を用いたディストーションの示し方(GT-65031)などが発表された。

### 2.2 インレット

ここでは, インレットディストーションを与えた場合の遷音速ファンの流れ場を計算した結果(GT-64612, 63072), ディストーションが付いたときのインレットとファンの連成計算(GT-63868), ヘリコプタ用エンジンのナセルの風洞試験結果とCFDの比較とそこで検証された手法を用いたナセルドラッグ低減形状の検討(GT-63977, 63978), ナセル形状の最適化(GT-64379), エンジンの横風試験結果のCFD評価(GT-63427)などの発表があった。

### 2.3 オイルシステムの熱管理

この中では, 航空用エンジンの軸受け発熱解析に関する発表(GT-63010), ファン駆動用ギアの損失のCFD予測と実験による検証(GT-63028), エンジンの軸受けチャンバー形状とオイルリーク量に関する試験結果(GT-63561), 軸受けサンプ室の最適化設計に関するもの(GT-64030)の発表があった。

### 2.4 モデル化・シミュレーションと検証

このセッションでは, インテークダクト部で圧縮機の間中部の空気を冷やす形式の中間冷却サイクルのターボファンエンジンに関する検討(GT-65218), 3DのCFDとエンジン性能予測計算を練成させた検討に関するもの(GT-63591)などの発表があった。

### 2.5 燃焼器と排出物

このセッションでは, ヘリコプタの飛行解析モデルとエンジン性能モデルおよび排出物予測モデルを組み合わせたミッション全体の計算を行い, 排出物の排出量を評価した結果(GT-63440), 教材用の小型ジェットエンジンを用いて燃料の種類の違いによるエンジン騒音変化を計測した結果(GT-65044)の発表があった。

### 2.6 エンジン全体の性能と新エンジンコンセプト

ここでは, 非定常性能予測計算に組み込む熱モデルに関する発表(GT-63461)や飛行中の推力計測(GT-63277), 電動ハイブリッド推進形態の評価(GT-63834), 低圧軸から抽出力を取る形態に改造した小型ターボファンエンジンの構造設計結果の発表(GT-63320), PDE(パルスデトネーションエンジン)をコアに用いたターボファンエンジンの性能評価(GT-63776), プロペラブレードのオイルフロー試験結果とCFD計算との比較(GT-64545), 実機のAPUを用いた騒音と排出物計測についての発表(GT-63523)などがあった。

### 3. 産業用ガスタービン

倉田 修\*1  
KURATA Osamu

産業用ガスタービンは以下に示す8セッション開催され、“Oil and Gas Applications”と、ガスタービン関連の発展的研究の“Cycle Innovations”, “Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles”の3セッションで全体の半分以上を占めた。産業用ガスタービンの論文発表数は143件と昨年より1割多かった。筆頭発表者の国別にみると、アメリカが58件と最も多く、イタリア(16件)、中国(16件)と続く3カ国は昨年と同様であった。日本は3件と昨年より2件減少した。

#### 1. Electric Power : 発電用途

論文数は9件で、昨年より6件減少した。発電プラントの新展開では、ターンダウン改善(GT-63333)、既存機改善(GT-64404, 64893)、保守と燃費(GT-65266)の4件の発表があった。発電プラントの設計最適化では、動的シミュレーション(GT-63301)、エクセルギー解析(GT-65027)、CO<sub>2</sub>回収(GT-65261)、損傷解析(GT-63650, 63674)の5件の発表があった。パネルセッションでは例年どおり、各メーカーの技術紹介・将来展望に関する発表があり、盛況であった。再生可能エネルギーに伴う起動・停止特性の改善、北米におけるシェールガスの拡大、革新的製造技術等の紹介とともに、各社とも最新の開発状況の説明があった。

#### 2. Industrial and Cogeneration : 産業用途と熱電併給

論文数は11件で、昨年より2件減少した。出力増強では、水噴霧(GT-65149, 64189, 63267)、再生可能エネルギー(GT-64193)の4件の発表があった。熱電併給では、小規模CHP(GT-63335)、最適化モデル(GT-64296, 63854)、水噴霧(GT-63516)の4件の発表があった。熱電併給の性能では、ランキンと複合サイクルの比較(GT-64341)、バイオガス(GT-63656)等3件の発表があった。

#### 3. Oil and Gas Applications : 石油・ガス産業用途

論文数は28件で、昨年より1件増加した。約半数近くが遠心圧縮機を扱ったもので、サージ安定性(GT-63061, 63070, 64894, 63005, 63212)、湿りガス圧縮(GT-65094, 64541, 64783, 64785, 64374)、熱力学状態式の(GT-63106,

65235)の12件の発表があった。軸流圧縮機では、海上での吸気フィルタ監視(GT-63025)、ブレードへの微粒子付着(GT-63563, 64425)の3件の発表があった。監視と長寿命化では、異常検出(GT-63409, 63410, 63411)、保守間隔延長(GT-64906)の4件の発表があった。新応用では、ターボドリル(GT-63456)、ORC(GT-64245)、泡破壊装置(GT-64689)、掘削(GT-64062)の4件の発表があった。試運転では、磁気軸受(GT-64182)、潤滑(GT-64327)、自己回帰性モデル(GT-63332)、可燃ガスの表面着火(GT-64698)の4件の発表があった。その他に1件の発表があった。

#### 4. Marine : 船舶用途

論文数は11件で、昨年より1件増加した。設計と展開では、タービンシュラウド内流れの干渉(GT-63043)、可逆転回(GT-63176)、排気管タブ周りの渦(GT-64381)、産業用(GT-63503)の4件の発表があった。応用では、吸気水噴霧(GT-63580)、米軍認証(GT-64048)、米軍上陸用舟艇(GT-63651)、燃料硫黄分除去と高温腐食(GT-65281)の4件の発表があった。補機では、米軍水陸両用車のエアフィルタ(GT-63346)、電気起動(GT-63718)、サイクロン分離器(GT-63751)の3件の発表があった。

#### 5. Coal, Biomass and Alternative Fuels :

##### 石炭, バイオマス, 代替燃料

論文数は15件で、昨年より2件増加した。燃焼では、重質油灰の堆積(GT-63724)、バイオマス焙煎温度(GT-64941)、バイオガスレーザー着火(GT-64902)の3件の発表があった。燃料使用法の改善では、重質油によるバナジウム阻害(GT-64215)、メタン火炎乱れ度のルイス数効果(GT-64821)、噴霧の非ニュートン流体効果(GT-63033)、バイオマスCHP(GT-64947)、IGCC(GT-64507, 65246)の6件の発表があった。代替液体燃料では、噴霧(GT-63198, 65199, 64420, 65191)、ジェット代替燃料による金属材料(GT-63364)、ブタノール燃焼(GT-64551)の6件の発表があった。

#### 6. Cycle Innovations : 革新サイクル

論文数は29件で、昨年より6件増加した。SOFCガスタービンハイブリッドシステムについて、劣化制御(GT-65036)、管径(GT-65060)、蓄熱(GT-65074)、エジェクター(GT-63745)、SOFC-MCFC複産システム(GT-63483)、陽極リサイクル(GT-64055)、サイバー・

原稿受付 2017年7月18日

\*1 国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
エネルギー・環境領域 省エネルギー研究部門  
ターボマシングループ  
〒305-8564 つくば市並木1-2

フィジックス (GT-64204, 65013, 65242, 63685, 65492), 予測制御 (GT-64194) の12件の発表があった。また, MCFC (GT-63859) の1件の発表があった。太陽熱はサイクル最適化 (GT-65227) の1件の発表があった。水噴霧について, 圧縮機の洗浄 (GT-64950), セミクロード再生サイクル (GT-63375), AHAT (GT-64699) 等4件の発表があった。その他に, EGR (GT-64387, 63288), 電動タービン (GT-63429), 多段高効率 (GT-65029), 空気噴射 (GT-63307), 改善と検証 (GT-64173), 爆燃 (GT-63439), 再生サイクルのエクセルギー解析 (GT-63705), 液体燃料 (GT-63881), 超臨界CO<sub>2</sub> (GT-63990), 流動床化学ループ (GT-64881) の11件の発表があった。なお, 航空用と小型ガスタービンは除外した。

#### 7. Supercritical CO<sub>2</sub> Power Cycles : 超臨界CO<sub>2</sub> 発電サイクル

論文数は35件で, 昨年より14件増加した。サイクルの試験・解析に関しては, 韓国での試験装置開発状況 (GT-64349, 64287), 合金の亀裂 (GT-65169), 米軍原

子力研での運用 (GT-63056), ランキンサイクルとの比較 (GT-64933, 65214), シミュレーションと試験 (GT-63279) の7件の発表があった。サイクル構成要素機器については, 圧縮機 (GT-63090, 64631, 65172), 熱交換器 (GT-63058, 63639, 64560, 64908, 63187), シール (GT-63549), 燃焼 (GT-65224, 65219, 65217, 64952, 63311) の14件の発表があった。サイクルの最適化については, 遺伝アルゴリズム (GT-63696), 圧縮機 (GT-63707), システム評価 (GT-64418, 64625) の4件の発表があった。その他に, 熱力学状態式 (GT-63148, 63149, 63570, 64641), 不純物の影響 (GT-64044, 64261), 合金耐性 (GT-65066), 太陽熱 (GT-63322, 64958) 等10件の発表があった。

#### 8. Organic Rankine Cycle Power Systems : 有機ランキンサイクル発電システム

論文数は5件で, 昨年より8件減少した。船用 (GT-63026), LNG冷熱 (GT-63164), 1Dモデル解析 (GT-63797) 等5件の発表があった。

## 4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

壹岐 典彦<sup>\*1</sup>  
IKI Norihiko

マイクロタービン・ターボチャージャー・小型ターボ機械の委員会で32件, セラミックスの委員会で10件の論文が発表されている。その他にもサイクルイノベーションの委員会で小型ターボ機械に関連する論文が23件発表されている。これらのうち, 燃料電池ガスタービンハイブリッド関連が昨年の3件から14件と著しく増えているが, それ以外の小型ガスタービン関係が15件と減っている。ターボチャージャー関連が23件と増加しており, 他に3件発表された。

#### 1. マイクロタービン・小型ターボ機械

小型ガスタービンの発表としては, 試験設備にマイクロガスタービンT100を用いた例が目立った。具体的には, 燃料電池ハイブリッド, HATなど様々なサイクルの試験に用いているマイクロガスタービン設備について, 規模の異なるシステムを検討するために動的な試験データ分析を行ったもの (GT-63579), マイクロガスタービンでの蒸気噴射 (GT-63801), コージェネレーションの制御スキーム (GT-64329), モデルベースの故障診断技

術 (GT-64619) が発表されている。また, 高温分サイクルのマイクロガスタービンのレビュー (GT-64857), 3ステージのガスタービンシステム (GT-64361), 太陽熱とマイクロガスタービンの組み合わせ (GT-63987, 64351), マイクロガスタービンでのCO<sub>2</sub>回収を検討したもの (GT-63551), 逆ブレイトンサイクルでコージェネレーションを検討したもの (GT-64029, 64490), 逆ブレイトンサイクルで排気ガス中の水分濃縮を検討したもの (GT-64695) など, サイクルに関わる研究が発表された。

また, Inside-out Ceramic Turbine (ICT) について外周リムの超合金の冷却 (GT-64007) の発表があり, 注目されていた。中心軸周りを柔構造のハブとしてセラミックスのブレードを炭素繊維外周リムで支える構造となっており, 当該発表では外周リムとセラミックブレードの間に冷却用空気を流す超合金流路について検討し, 設計可能であるとしている。さらにアンモニア燃焼ガスタービン (GT-64250), マイクロガスタービン燃焼器のCFD解析 (GT-63661) が発表された。なお, マイクロガスタービンの燃焼器については, 燃焼・燃料・排気の委員会で2セッション7件の発表があった。

燃料電池-マイクロガスタービンのハイブリッドシステムについては, システムの運転制御に関するもの

原稿受付 2017年7月20日

\*1 (国研) 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域  
省エネルギー研究部門 ターボマシングループ  
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

が多く発表され、SOFCの劣化等の影響について考慮したものが増えてきている。具体的には、SOFC/GTハイブリッドの運転制御のコンセプトを検討したもの(GT-65013)、SOFCの劣化に対応した運転制御を検討したもの(GT-65036)、燃料電池の劣化を考慮した3基のSOFC/GTハイブリッドの運転制御を検討したもの(GT-64194)が発表された。さらに、技術開発推進目的でSOFCモデル化が進められており、ハイブリッドシステム運転用に開発したSOFCエミュレーターに関するもの(GT-63685, 64204)、cyber-physical systemsとしてリアルタイムで動作するSOFCモデルと物理的なマイクロガスタービンの組み合わせを検討したもの(GT-65242)、システム性能特に燃料電池寿命など不確定性の影響評価を検討したもの(GT-63178)が発表された。

また、SOFCシステムの性能に関わる研究では、アノードガス再循環を検討したもの(GT-65060)、エジェクターによるアノードガス再循環・カソードガス再循環(GT-63745)、燃料利用率について検討したもの(GT-64055)だけでなく、SOFCの蓄熱のポテンシャルについて検討した結果、蓄熱性能付与が燃料自体の性能向上に寄与することを示したもの(GT-65074)が発表された。

単なる発電目的ではない検討としては、CO<sub>2</sub>回収についてMCFCを用いたもの(GT-63859)、SOFCだけでなくMCFCも組み合わせて検討したもの(GT-63843)、航空機の電動化目的にSOFC/GTハイブリッドを検討したもの(GT-64804)が発表された。

ターボチャージャーに関しては、解析・評価などの発表が行われた。具体的には、空力的なミスチューニングの影響(GT-63069)、Inlet Guide Vaneなどにより運転範囲拡大して準断熱的な条件で性能を試験し評価したもの(GT-63360)、さらにフローパターンなどをCFD解析したもの(GT-63368)、可変形状の圧縮機を設計・評価したもの(GT-64178)、CFD解析により圧縮機の効率改善を図ったもの(GT-64359)、遷音速遠心圧縮機のCFD解析(GT-63887)、過給エンジンの非定常で過渡的な応答に着目してCFD解析を用いて軸流タービンの改良を図ったもの(GT-64825)、熱伝達と摩擦の影響評価(GT-

64283)が発表された。

さらにターボチャージャー・過給機の構成に特徴があるものとしては、二段過給システムについて、運転点に応じて異なるタービンホイール及び段間ダクト設計を評価したもの(GT-63370)、異なる高度で評価したもの(GT-63923)が発表され、ツインスクロールタービン(GT-63462, 63658, 64190)、電動化(GT-63526, 64732, 64960)、高圧アキュムレータを適用したシステム(GT-64927)も発表された。一次元的モデル(GT-64743)、エンジン性能予測(GT-63195)、試験設備(GT-64218)の発表もあった。また、要素技術としては、フォイル軸受け(GT-63185)、フルフローティングリング軸受け(GT-64628)、軸受け潤滑(GT-64839)の発表が行われた。

その他の小型ターボ機械に関して、タービンプレードの試験設備(GT-64562)、ODCのラジアルタービンの設計(GT-64028)、太陽熱と超臨界CO<sub>2</sub>タービンの組み合わせ(GT-65227)が発表された。

## 2. セラミックス

セラミックスの委員会のセッションでは、SiCf/SiCの発表がほとんどでCMCに関連する発表一色であった。まず材料強度試験に関して様々な形状と方法が行われており、FODに関するもの(GT-63073, 63475, 64944)、Acoustic Emission, Digital Image Correlationで計測を行っているもの(GT-63045, 64370)、電気抵抗で亀裂成長を監視したもの(GT-65168)、酸化環境下でのクリープ試験(GT-65247)が発表された。また、タービンの部品形状にした場合について、ベーン(GT-63264)やタービンプレード(GT-65089)の検討例が発表された。またジルコニア強化アルミナ/ムライトウイスカーについてエロージョンを評価したもの(GT-63736)が発表された。

なお遮熱コーティングについては材料加工および冶金の委員会で3セッション11件の発表が行われている。単身のセラミックに関するものは前述のInside-out Ceramic Turbine (ICT) (GT-64007) だけであった。

## 5. ターボ機械の性能と流れ

### 5.1 軸流関係 5.1.1 ファン・圧縮機

室岡 武\*<sup>1</sup>

MUROOKA Takeshi

#### 1. 概要

「軸流ファンと圧縮機の空気力学」関係では、全9セッション、46件の講演があった。国別の講演者では、中国からの発表が18件と最も多く、これに米国8件、ドイツ7件、英国5件と続いている。

研究内容は、多段圧縮機の性能予測や流れ場の詳細に関する研究や遷音速流れに関する研究が多く、大手エンジンメーカーと大学・研究機関により共同で実施された発表が目立った。また、翼列流れを改善するデバイスの研究としては、従来通りケーシング・トリートメントが継続的に研究されている一方で、流体制御は少ない印象であった。

「ダクト」関係のセッションにおいても軸流ファンと圧縮機間のダクトの研究がなされており、エンジン性能向上の中でダクトも注目されている。また、「多分野統合設計、統計手法」関係のセッションにおいても、軸流ファンと圧縮機に関わる講演があり、量産の翼面の形状公差内での形状ばらつきに対する性能変化に対しても研究がなされている。

以下にそれぞれのテクニカルセッションでの発表の概要を示す。

#### 2. テクニカルセッション内容

##### 2.1 多段圧縮機・圧縮機性能

多段圧縮機は、従来からの多段解析における課題である流量予測のずれや前段側と後段側のマッチングのずれを改善するため、キャビティ等の複雑形状を詳細に模擬する研究 (GT-63771) や、新たな乱流モデル (EARS, SST-RM) を適用した研究 (GT-64786, 64964) があった。詳細なところでは、ウェークの拡散の圧縮機性能に対する影響を詳細に調査した研究があった。また、高バイパス比化にともなう重量増を打ち消すような短軸長・高アスペクト比の翼設計に関する研究 (GT-63590) があった。

##### 2.2 ファンおよび遷音速流れ

ファン動翼形状の設計変数と性能の関係をわかりやすくマップで整理した研究 (GT-64528) や、ギアドターボファンエンジンを想定した低速ファンと従来ファンを設計・試験比較した研究 (GT-64585)、遷音速ファン

の静翼のキャンバや3次元設計を最適化した研究 (GT-63031) があった。

また、遷音速ファンは、フラッタ近傍の絞り側の流れ場がCFDで不安定であることでフラッタ予測が難しかったことに対し、乱流モデル (SA) を修正して合わせこむ研究 (GT-63245) があった。

##### 2.3 壁面流れ、コーナー剥離

壁面流れについて、試験計測で翼端漏れ渦を詳細に可視化・分析した研究 (GT-65114) や、翼端隙間の性能への影響について、ケースのコーティングが削れている場合と削れていない場合で翼端隙間が同じであっても性能が違う点を調査した研究 (GT-64403) があった。

コーナー剥離について、RANSが過大に予測する一方で、DDESで前縁付近に非常に細かい格子をきることで精度よく予測できることを示した研究 (GT-63454) があった。

##### 2.4 ケーシング・トリートメント、流れ制御

翼端隙間が狭い場合と広い場合で、周方向溝型のケーシング・トリートメントの効果を詳細に調査した研究 (GT-63051) や、軸方向溝型のケーシング・トリートメントの流れ場をPIVにて可視化して詳細を分析した研究 (GT-65099)、軸方向ケーシング・トリートメント形状を最適化した研究 (GT-65226) があった。

##### 2.5 実験

計測技術として、5孔ヨーメータの詳細CFD解析を援用し試験による流れ計測の補正を実施した研究 (GT-63399) や、翼振動応答やサージ中の挙動を把握するための非定常試験データの分析手法 (Wavelet Transformation) に関するTutorial (GT-65423) があった。

##### 2.6 ダクト、多分野統合設計、統計手法

ファンと圧縮機間のダクトについて、通常の試験用の機械加工ダクトと、鋳造で製造された形状公差が大きく表面粗さの大きい量産エンジン用のダクト性能に関する研究 (GT-64274) があった。また、翼面の形状公差内での形状ばらつきに対する性能変化 (非線型) を効率よくモデル化・予測するUncertainty Quantification手法に関する研究 (GT-64842, 64845, 64968) があった。

原稿受付 2017年7月21日

\*1 (株)IHI 航空・宇宙・防衛事業領域 技術開発センター  
要素技術部  
〒190-1297 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

## 5.1 軸流関係 5.1.2 タービン

伊藤 栄作\*1  
ITO Eisaku

シミュレーションと実験を組合せた翼列流れの現象論を中心に、全般的にバランス良く発表がなされた。それぞれの内容は年々高度化している。具体的には、高圧タービンの境界条件による翼列性能への影響をCFDで解析し、実験データと合わせて考察している発表が、従来に比べ増加している。境界条件の項目として、多様な入口条件、すなわち、乱れ度 (GT-63079)・脈動 (GT-63490)・フローパス形状・燃焼器からのスワール/乱れ等があげられる。さらに、段間の軸流ギャップ、翼面とガスの温度比の遷移現象への影響 (GT-63524) も論じられた。燃焼器と冷却翼の内部冷却流路も含めた現象論も増えつつある。このように、境界条件をより精度良く考慮することにより、現象把握の精度を上げる努力が継続して行われている。

また、キャピティの有無の影響や、シール空気のHPT-LPT間の接続流路の流れ場への影響を論じたものもあった。シミュレーションと精緻な実験を行い、流入空気の流れ場への影響について渦度を用いて新しい現象論を展開した発表もあり、活発な質疑応答がなされた (GT-63606, 63616)。

一方、設計最適化としての形状スタディの研究は若干減少気味である。具体的には、チップインジェクションやウイングレット形状・チップのグループ・ハニカムのチップリーケージへの影響、3次元設計・非対称エンドウォール、クロッキングなどがあった。チップクリアランスのリーケージに関する設計的な考察や現象論は、今回も比較的多かった。

CFD/非定常現象の項と重複するが、清華大学がGE等の協力を得て、Delayed detached eddy simulation (DDES) による遷音速ステージの非定常流れ場の解析は、タービン空力技術としても重要である。特に、ウエ

イク現象を後縁からの渦列の放出として、より実現象に忠実に表現・評価することが、研究レベルから設計適用レベルに移行しつつあることを示している。翼列間干渉を数値シュリーレンとして可視化することは、シミュレーションならではのであるが、実用上も、渦列のブロック効果の影響やエントロピー生成 (損失発生) メカニズムの理解として有用である。(GT-64152)

また、CFDのみならず、実験の重要性も示された。Darmstadt大は、燃焼器モデルとタービンモデルの組合せによる実験データを、詳細なCFDモデルで解析し、流動と伝熱の両面で考察した。(GT-64504) DLRの燃焼器の影響を考慮可能な2.5段・圧力比10のタービン試験装置の発表があった (GT-64409, 64153)。また、Oxford大とRolls-Royceは、実機コンポーネントの高圧タービン静翼を供試体として使用でき、燃焼器から流入する温度分布と脈動を1 MWのヒーター2個とソレノイドバルブで模擬、静翼及びハブ/ケーシングの冷却空気やシール空気も模擬可能な熱流動試験装置の発表があった。The Engine Component AeroThermal facility (ECAT) と命名され、高圧タンクからのブローダウン方式による短時間の試験装置であるが、大きな影響因子を全て兼ね備え、それぞれの影響度を個別に確認可能な試験装置である。燃焼器とシール・冷却空気の影響を、流体と伝熱の両面で確認可能である。実機条件下では計測が非常に困難な現象を、ラボ試験として詳細な計測デバイスを駆使しながら確認できる点が魅力である (GT-64736)。

最後に、空力設計者は、これらの論文を参考に、自らが使用するCFD手法や実験装置の「実現象との違い」を良く認識したうえで作業することが大切である。

原稿受付 2017年7月10日

\*1 三菱重工業(株)  
〒108-8215 港区港南2-16-5

## 5.2 遠心関係

山田 和豊\*1

YAMADA Kazutoyo

遠心関係では、7セッションが生まれ、30件の発表があった。中国、英国からの発表が全体の半数近くを占め、日本からは4件の発表があった。研究内容としては、非設計点性能の向上、特に作動範囲拡大を目的とした研究が多くみられ、また失速・サージ関係の発表についても昨年同様に多かった。失速・サージ関係や自動設計最適化関係など一部については、遠心関係のセッションと並行して行われた別のセッション（非常常流れ関係、多分野設計手法・最適化・不確かさ定量化関係など）でも発表されている。そちらも参照頂きたい。

失速とサージ関係では、実機運転環境下での影響を調査した研究がみられた。加速時と減速時での回転数変化に伴う圧縮機の過渡特性を実験的に調査した研究報告（GT-64499）があり、減速時に発生する不安定性について議論された。また、入口配管の曲がりとボリュートの舌部との相対位置関係が失速初生に及ぼす影響について調査した研究（GT-63356）があった。予測手法として、翼端漏れ渦の非定常性を予測するモデル（GT-63758）や、単流路解析を基にサージ限界を予測する手法（GT-63352）が紹介された。他に、サージ初生メカニズムの解明を目的とした大規模数値解析（GT-63568）があった。

安定作動範囲拡大を目的とした研究では、ケーシングトリートメント関連の研究発表が多い。離散的に配置したキャビティの形状や位置に関してRANS計算を用いてパラメトリックに調査した研究（GT-63535）や、効率低下に関連した流れやエントロピー生成について調査した研究（GT-63678）が報告された。また、ディフューザに関して、周方向一本溝による失速マージンおよび効率の改善効果について数値的に調べた研究（GT-63151）や多孔性スロートディフューザによる安定化機構について流れ場を調査した研究（GT-63071）が発表された。その他に、安定作動範囲拡大への効果を調べた研究として、両吸込形遠心圧縮機において、各インペラで異なる後退角を設定し、出力および質量流量分配を変化させた影響を調査した研究（GT-63372）や、インペラ上流の部分スパンバイパス流路に設置された流量調節可変デバイス翼の効果を調べた研究（GT-65062）が報告された。後者と同様な研究として、圧縮機の安定性に関してIGVの効果を調査した研究（GT-63918）があった。

タービン関係では、脈動流が性能に大きく影響することから、これに関連した研究が見受けられる。脈動流の効果を取り込んだ次元モデルを新たに開発し実験で検証した研究（GT-63983）や、次元エンジンシミュレーションソフトを用いて脈動流に関連するタービン設計変数や排気マニホールド体積の影響を評価した研究（GT-63641）が発表された。他に、慣性が小さく低速度比で性能改善が期待される斜流タービンに関連して、脈動条件において傾斜ボリュート設計の性能を調査した研究（GT-63668）があった。また、可変ノズルに関して、衝撃波低減を目的とした溝付きペーンの効果を調べた研究（GT-63967）や、漏れ流れを低減化するために新たに開発されたsplit sliding VNT（GT-64419）が紹介された。

設計手法およびツール関係では、設計が従来の線織面設計から三次元設計へ変化し、インペラの三次元翼形状の効果が最適化と組み合わせられて研究されている。子午面粘性流れ解析に基づく逆解法と遺伝的アルゴリズムを用いた最適空力設計例（GT-64539）や、効率および空力騒音を目的関数としたANNによるインペラの最適化結果（GT-63470）が紹介された。また、機械特性を維持しつつ流路衝撃波の位置と強さを制御したbarreled forward swept翼の試験結果（GT-63538）や、リーン翼による二次流れ抑制効果（GT-63213）が報告された。他に、低弦節比ディフューザについて、三次元翼の適用効果を実験的・数値的に調査した研究（GT-64210）もあった。

一次元性能予測モデルに関する研究も多い。モデルの改良を目的とした研究に、損失を要素ごとに分類し、RANSおよび実験結果との比較からその予測精度を評価した研究（GT-65230）や、インペラで生じる逆流について、損失だけでなく、そのブロック効果による速度三角形の変化を考慮する必要性を示した研究（GT-63047）があった。プロセス用多段圧縮機についての次元設計ツールを用いた最適設計手法の提案（GT-63770）や、設計段階で機械加工可能であることを保証した設計手法の提案（GT-64724）などもあった。

原稿受付 2017年7月28日

\*1 九州大学大学院工学研究院機械工学部門  
〒819-0395 福岡市西区元岡744番地

## 5.3 非定常流れと数値流体力学

立石 敦<sup>\*1</sup>

TATEISHI Atsushi

### 1. Unsteady Flows in Turbomachinery

非定常流れ関連では8セッション31件の発表があった。国別に見ると中国16, 米国4, 英国4, インド2, フランス・ドイツ・オーストラリア・日本・チェコそれぞれ1であり, 中国が半数以上を占めている。分野別には圧縮機の失速, 動静翼干渉, クロッキングに関連したものが大部分ではあるが, 計測データに基づく数値解析手法の検証に関するものも散見される。その他, キャビテーション, 層流剥離泡遷移に関するものもあった。

今年はタービン関係の発表が少なく, わずか1セッションであった。低散逸・高解像度スキームによるDDESを用いてHPT静動翼間干渉における後流挙動を調べた研究 (GT-64152), HPT・LPT・これら接続部のフレームダクトを模したリグでダクト前後の変動流のモードを計測したもの (GT-63619) などがあった。

圧縮機の失速・サージ関係は軸流2, 遠心1セッションであった。遠心圧縮機ディフューザ内における失速セルの形成過程や渦構造が調べられた (GT-63400, 63913)。安定に生じている旋回失速について, 二重位相固定法によるケーシング壁圧, 段後方全圧計測により全周の翼列作動状態が明らかにされた (GT-64901)。計測結果より再構築された失速セル伝播の動画は圧巻であった。ほか, スパイク型失速について, 失速流量を最小にする翼端間隙や漏れ流れ運動量分布を調べ, 翼端部の三次元設計指針を提案したもの (GT-63655), ファン部分回転数における翼振動解析に用いるコードのSAモデルと壁関数を改良した研究 (GT-63245) があった。多段全周・要素間干渉・翼振動など大きな空間・時間スケールを扱う場合には壁関数は有効であり, 応用対象にあった改良がなされている。

多段圧縮機・動静翼干渉関連では, 定常・非定常段解析間で生じる効率の差の考察 (GT-64022), 壁圧の面計測ができるパッチ型素子の開発とケーシングの変動圧力計測 (GT-63548), 3段のリグを用い, 詳細な効率・全圧分布計測, 可視化によりクロッキングの影響を調べた報告 (GT-63548) があった。

### 2. Design Methods & CFD Modeling for Turbomachinery

設計手法とCFDモデリング関連では, 初期設計手法

からRANS, LES, DNSまで様々な分野を含む13セッション・58件の発表があった。国別には米国12, 英国10, 中国9, フランス7, ドイツ6, オーストラリア3, インド2などであり, 欧米からの発表が多い。

初期設計手法のセッションでは, 元ケンブリッジ大Denton教授により, 多段ターボ機械空力設計ソフトの構成と使用例が発表され, コードが公開された (GT-63993)。講演は大部屋が満員になる盛況ぶりであった。他, スルーフロー法の改良 (熱構造連成: GT-63614, 周方向変動成分の考慮: GT-63929) があった。

形状のばらつきや表面粗さ, 境界層遷移など, 現実の壁面や流れの状態に着目した現象調査やモデル化の試みがRANS・LES共に盛んである。表面粗さについて,  $\gamma$ - $Re_\theta$  遷移モデル向けに粗さ要素が遷移に与える影響のモデル化と検証 (GT-63237), 粗さ要素を格子で表現するLESの実践 (GT-64889) があった。これらは形の決まった粗さ要素に対してなされているが, 一般の表面粗さに対してどう拡張するかという問題も併せて提起された。遷移直後の非平衡境界層のある圧縮機翼列のプロファイルロスをDNSで調査, 結果が簡易予測モデルへ反映された (GT-64635)。実形状のモデル化に関して, タービン超音速流出段下流の非定常圧力について製造ばらつきを模擬したCFDで観察 (GT-63497), LESにおける燃焼器ライナ冷却孔壁面モデルの提案 (GT-64622) などがあった。

複雑乱流のHigh-Fidelity解析がRANSに反映される将来が目前に迫っている。後流のロス分布やフィルム冷却の広がりなど従来のRANSの精度が悪いものについて, 高解像度のLES結果を参照した機械学習により非線形渦粘性モデルが決定された (GT-63497, 63403)。今後, 様々な翼列作動状態での学習やアポステリオリテストの実施が期待される。

LES・DNS関連では高解像度コードの開発・応用検証の報告が多かった。手法としては高次精度非構造格子法または構造格子と重合格子の組み合わせが多い。VKIタービン翼列に対する検証や流れ場の調査 (GT-63358, 64697), 拡散制御翼の乱流遷移に対する解析 (GT-64195, 64279) が発表された。特にGT-64697では遷移機構 (クレバノフモード波数, 音響的な効果) について議論が活発に行われていた。

原稿受付 2017年7月10日

\* 1 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻  
〒113-8656 文京区本郷7-3-1  
E-mail: tateishi@aero.tu-tokyo.ac.jp

## 6. 伝熱関係

大北 洋治\*<sup>1</sup>  
OKITA Yoji

### 1. 全般

Heat Transfer Committeeが主催した約50のセッションでは、例年同等の約200件もの多数の発表があった(Turbomachinery Committeeに次ぎ第2位)。発表数の多いベスト3のカテゴリーはここ数年と変わらず、フィルム冷却、内部冷却、2次空気システムであるが、2011年以降の推移を調べてみると、ここ数年はフィルム冷却の発表数に、やや減少傾向が見られる。

伝熱分野で今回特筆すべきことが2点あった。ひとつは、GE社OBのBunker氏が、Scholar Lectureで、タービン翼の冷却技術のこれまでの進化、今後の展望を総括したこと。もうひとつは、Additive Manufacturing (AM) 技術の、伝熱・冷却分野への展開について、GE、Siemensなど大手企業から各社のビジョンが紹介される特別セッション(口頭発表のみ)が企画されたことが挙げられる。

それでは以下、主要カテゴリーを中心に、それぞれの動向を紹介する。

### 2. 各カテゴリーの動向

#### 2.1 フィルム冷却

フィルム冷却は、最も発表数の多いカテゴリーで、12セッションで、51件の発表があった。新しい動向としては、AMで製造したフィルム冷却孔の性能に関する研究や、フィルム冷却流の数値解析における機械学習による解析モデルの精度改善、などがあった。これらを含め、以下に代表的な論文を幾つか紹介する。

代表的なシェイプド孔形状につき、放電加工品とAM品の冷却性能の比較が報告された(GT-64903)。AM品は孔内面の表面粗さが大きいので、フィルム効率は放電加工品より悪いが、その粗さの効果で孔内の吸熱効果が高まり、孔近傍の全体冷却効率は著しく悪化はしないという結果が示された。

フィルム冷却の数値解析に、一般的なレイノルズ平均Navier-Stokes解析(RANS)を用いると、精度面で様々な問題があることが知られているが、乱流モデルのパラメータを機械学習によりチューニングすることで、精度改善できるとの報告があった(GT-63299, 63403)。

主流が加速流の場合のフィルム冷却性能については、これまで諸説あり、いまだ統一的な見解が得られていな

い。今回発表されたGT-63818では、他要因が干渉しないよう細心の注意を払った実験により、主流加速の影響を評価しており、噴出し比が上がるにつれて、加速流では流路渦が拡散し、それによってフィルム効率が良化すると示された。

一般的には高性能化が期待できるシェイプド孔だが、諸々の形状パラメータを注意深く選定しないと、期待通りの効果が得られないという警鐘的な発表がなされる一方で(GT-63679)、これら形状パラメータのうち支配的なものを抽出して適切に整理することで、性能感度に対する統一的な理解が可能との発表もなされた(GT-63692)。即ち、横軸に正味噴出し比(=噴出し比/流路拡大率)、縦軸に孔開口部長さと孔ピッチの比で基準化したフィルム効率をとると、全てのデータが同じ挙動となり、正味噴出し比0.5~0.7で最適性能となると示された。

#### 2.2 内部冷却

内部冷却も、フィルム冷却に次いで発表数の多いカテゴリーで、9セッションで、35件の発表があった。内部冷却についても、AM適用に係る技術課題への取り組みが見られた他、新しい最適化手法であるトポロジー最適化の適用等が新しい動向として注目された。以下、代表的な論文を紹介する。

内部冷却構造へのAM適用に係り、流路表面の微視構造が空力・伝熱特性に及ぼす影響が報告された(GT-63582)。従来の平均粗さ(Ra値)だけでは情報不足とし、粗さの波長( $\lambda$ )というパラメータも考慮することで、特に遷移域から乱流域の流体特性を、より整理しやすくなると報告している。

新しい形状最適化技術として近年注目されているトポロジー最適化を、タービン動翼内部構造に特徴的なサーペンタイン流路の180°折り返し部の形状最適化へ適用した報告があった(GT-63618)。流れの剥離が小さくなるように最適化を行うことで、当該部の圧力損失低減および40%もの熱伝達率向上が達成できている。

斬新な冷却技術を独自に開発してきた歴史がある旧ソ連のウクライナからは、二重壁冷却構造をタービン動翼に適用し、エンジン試験まで実施した結果が発表された(GT-64915)。製造面では、鑄造自体は従来技術で対応しているものの、中子のセラミクスに特殊材料やAM技術を適用している。エンジン試験では、翼に260個ものクリスタルセンサを埋め込み温度計測。何度か改良設計も経た結果として、従来冷却翼に対し、大幅な冷却性能向上を実証している。

原稿受付 2016年7月25日

\*1 (株)IHI 技術開発本部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

E-mail: youj-ookita@ihi.co.jp

## 2.3 その他

2次空気システム分野では、9セッションで、35件の発表があり、特に、タービン部の主流巻込み現象およびリムシールに係る技術、また、ギアやベアリング周り、サンプ室の流体・伝熱特性に関する発表が多かった。

また、燃焼器の伝熱問題については、3セッションで、12件の発表があった。周方向に強い旋回をかけて反応速度を増すことで軸長を大幅に短縮できる新しい燃焼器のコンセプトに関し、燃焼器の内径側に配置されたタービン静翼の冷却構造を数値解析によりスタディした結果が報告された(GT-63319)。

General Heat Transfer (伝熱一般)としては、7セッ

ションで、30件の発表があった。ペンシルバニア州立大に新たに建てられた空力・冷却実証用タービン回転試験設備での様々な新技術実証に先立ち、比較のベースラインとして、現時点で実用化済みの最先端技術を踏まえた動翼冷却構造を定義する取組みが報告された(GT-64728)。

また、空力や構造等と伝熱の連成問題(Multiphysics)を扱うセッションも設けられ、例えばGT-65241では、タービン部チップクリアランスの能動制御における様々な形態の伝熱性能の比較やクリアランス量への感度を調査している。

# 7. 燃焼および燃料関係

穂山 恭大\*<sup>1</sup>

AKIYAMA Yasuhiro

## 1. 概要

Combustion, Fuel & Emissionsでは、論文発表が159件、パネルが8件、チュートリアルが5件開催された。韓国開催であった昨年の発表件数118件より大幅に増加しており、米国開催の一昨年の発表件数142件と比べても17件増加している。国別の論文発表数は、多い順に、ドイツ(48件)、アメリカ(45件)、中国(11件)、イギリス(9件)、スイス(7件)である。日本の論文発表は2件であった。本分野では、日本の発表件数が、昨年、一昨年の4件から減少しており、次回大会では日本から多くの発表を期待したい。

各会場は少なくとも100人程度収容可能で、30分間の発表および質疑が行われた。どの論文発表のセッションも席が埋まるほど盛況であり、活発な議論が交わされた。

## 2. 個別セッション

### 2.1 燃焼不安定

論文発表のセッションの36件中、9件が燃焼不安定のセッションである。燃焼振動の問題は、希薄予混合燃焼を利用した低NO<sub>x</sub>化に伴う重要なテーマであり、立ち見となるセッションが出るなど大きな関心を集めていることがうかがえた。

本セッションでは、熱音響方程式をベースとした燃焼振動予測ツールに関する研究が進められており、CFDを活用した適用例(GT-63338, 63342, 64817)が報告された。

また、実験及び数値解析の両方を用いた研究も多く、

OH自発光計測を利用した振動発振過程と火炎挙動に関する研究(GT-63479, 64943)やOH自発光計測から火炎伝達関数を評価した研究(GT-63997)、液体噴霧式燃焼器のOH-PLIF計測と動的モード分解(GT-64102)などが報告された。

他方で燃焼振動抑制の研究も進められており、環状燃焼器へのヘルムホルツ共振器の適用例(GT-64239)や同体系におけるOH自発光計測と火炎伝達関評価(GT-64238)、希薄予混合気の旋回流中における渦芯の歳差運動をアクチュエータで制御し振動抑制する研究(GT-63542)などが報告された。

本セッションはモデル燃焼器を対象とした報告が多数であったが、今後も研究を継続して実機燃焼器設計への有効活用が望まれる。

### 2.2 高水素燃焼/燃料多様化

昨年と同様に水素含有燃料、燃料多様化技術に関する研究発表が数多く実施された。特にIGCC、バイオマスのガス化といった水素含有燃料に関する燃焼特性、不安定性、燃焼速度の計測技術が多数報告された。対象となる水素含有量も様々で、高水素濃度燃料の発表ではMicromix燃焼に関する実験と数値解析の結果比較(GT-64719, 64795)、旋回保炎式バーナの渦崩壊逆火現象のPIV計測(GT-63367)、音響加振時の逆火特性の研究(GT-63080)、ブラフボディ火炎のOH自発光計測(GT-63414)などがあった。水素含有率が低い燃料では旋回保炎バーナのOH自発光計測(GT-63924)などがあった。

### 2.3 燃焼モデル

今回もCFD(数値流体力学)を用いた研究が多数報告された。

RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)

原稿受付 2017年8月1日

\*1 三菱日立パワーシステムズ(株)

〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2

による解析を用いた研究として、実機燃焼器、もしくはそれを模擬したモデル燃焼器の体系でNO<sub>x</sub>、COといった微量成分の予測精度を検証した結果が複数報告されている (GT-64401, 64782)。

また、Reactor Networkを用いた実機燃焼器のNO<sub>x</sub>濃度の検証結果 (GT-63063) もあり、予測精度を追及しつつも短時間で計算可能なモデル開発も進める傾向がうかがえた。

LES (Large Eddy Simulation) による解析では熱音響方程式を併用した火炎伝達関数の予測 (GT-63247) や空力音響方程式との連成計算 (GT-63271) など、燃焼振動分野に特化した報告があった。

計算コードに関しては商用コードを用いた検討が多く見られた。展示ブースにおいてもCFD関連企業が数多く出展しており、ユーザー目線での商用コード開発を期待する。

#### 2.4 低NO<sub>x</sub>燃焼器開発

低NO<sub>x</sub>燃焼器開発に関する発表では、ガスタービンの運用範囲拡大の報告が多く、油とガスのデュアル燃焼器の改良による運用範囲拡大 (GT-63089) や予混合器噴射システム適用 (GT-63998) などが報告された。また、実機燃焼器の体系で天然ガス中に不活性ガス (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) を添加した場合の燃焼特性 (GT-63412) といった燃料多様化の発表もあった。

## 8. 制御と診断

浅賀 健太郎\*1  
ASAKA Kentaro

### 1. 全般

制御技術分野の主管は、Controls, Diagnostics & Instrumentation (CDI) コミッティであり、制御技術分野は、制御 (Controls)、診断 (Diagnostics) 及び計測 (Instrumentation) に分けられる。これらのセッションを聴講した内容を報告する。

### 2. 制御技術分野の動向

CDIのセッションは総数10であり、そのうち制御分野が2 (論文7件)、診断分野が4 (論文17件)、計測分野が4 (論文18件) であった。(モデリングに関してはモニタリング技術に関するものとして診断分野に含める。) また、これらのペーパーセッションとは別に制御分野のチュートリアルが1件あった。

CDIコミッティの論文総数は、数年前までは30件程度で横ばいであったが、昨年度の37件に続いて今年度も論文総数が増加した。技術分野ごとでは、制御分野は横ばい、計測および診断分野の論文数が増加傾向にある。

発表の内容としては、計測と診断分野の両方にまたがる論文が多く見受けられた。診断のための計測手法やセンサ開発に関する論文が多く、モニタリング技術に注目が集まっていることが窺えた。制御分野に関しては、モニタリング技術程に顕著ではないが、電動化技術やMRAC (モデル規範形適応) 制御等のモデルベースト制御に関する技術が例年に続いて注目される傾向であり、チュートリアル・セッションでも紹介があった。

全分野に共通する技術としてモデリングに関しても今

後論文が増加していくと推定される。他のコミッティでもモデリングに関するチュートリアルが実施され、注目されている。

### 3. 各技術分野の発表

#### (1) 制御分野

制御分野のセッションは、先進制御と制御トピックの2セッションがあった。

先進制御では、スライディングモード制御を適用したアクチュエータの制御手法 (GT-63571) やMRAC (モデル規範形適応) 制御のターボファンエンジンへの適用例 (GT-64840) 等の発表が行われた。モデルの精度やカルマンフィルタに関する質疑があり、診断・計測分野との共通技術としてモデリングに対する関心は高い。

制御トピックとしては、電動化技術である低圧軸発電 (GT-63222) や航空機エンジンの試験設備を対象とした $\mu$ 解析結果 (GT-63529) 等の発表が行われた。電動化に関してはAircraft Engineのセッションでも発表があり、技術分野およびコミッティを横断した大きなテーマとなっている。(GT-65579, 63320等)

制御分野については学術的な制御理論に関する論文よりも産業界の実用的な視野に立った発表が多い傾向にある。

#### (2) 診断分野

診断分野のセッションは、モニタリングと故障診断、およびモデリングの内容で計4セッションがあった。モニタリングに関しては、手法としてはカルマンフィルタ (GT-64071等) やニューラルネットワーク (GT-63253等) を用いており、従来のエンジン性能パラメータに関する推定 (GT-63181) だけでなく、軸受け回りの振動

原稿受付 2017年7月19日

\*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 制御技術部  
〒190-1297 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

の推定 (GT-64443, 64899) や、船舶用ガスタービンの塩霧の影響に関する検討 (GT-64464) が実施され、モニタリング技術の適用範囲が広がり、実験的検証も多いことから実用化が進んでいることが示唆された。

モデリングは制御分野の傾向を踏まえ、モデルベースト制御で扱い易いモデリング手法 (GT-63543, 63546) や、モデルの過渡応答に関する解析結果 (GT-65110) に関する発表があった。モデリングに関しては、Aircraft Engineのコミッティでチュートリアル・セッションが実施され (GT-63799)、多くの聴講者がいたことから注目技術となりつつある。チュートリアルはベーシックな内容であったが、加減速操作時の熱伝達をモデル化する重要性や高度化のトピックとしてクリアランスロスモデル化することの紹介があった。

### (3)計測分野

計測分野は先進計測技術と高温部の計測技術の2つのセッションに大別された。先進計測技術では、音響センサと光学センサを組み合わせ燃焼の安定性をモニタリングするセンサの開発 (GT-63626) や、試験により耐久性を検証したチップクリアランスを計測するセンサの開発 (GT-63803, 63807)、従来法よりも精度が良いニューラルネットワークを用いた流れ場の解析手法 (GT-64932) 等の発表があった。燃焼の安定性評価

やチップクリアランスの計測センサ開発はモニタリング技術を見込んだ技術として提案されていた。

高温部の計測技術でも、高圧タービンのチップクリアランス計測が今後のモニタリングでの課題であることが示され、振動計測を行ったブレードのモニタリングに関する論文 (GT-65377) の発表等があった。

### (4)チュートリアル・セッション

チュートリアル・セッションは制御分野の1件であり、NASA Glenn Research Centerより、航空機推進システムの先進制御に関する講義が実施された。(GT-65536)

内容としては、民間航空機の運用時の安全性向上や高効率化に向けた取り組み、超音速機の開発等のNASAの研究プログラムの紹介や基本的なエンジン制御の説明であった。

モニタリングの研究では、緊急時にはメインのコントローラのバックアップとして制御ができるようにモニタリングのモデルを制御則に取り込む構想やチップクリアランスの計測技術の紹介があった。さらに、Active Component Controlというコンセプトのもと、燃焼器の安定性制御を行い、圧縮機の圧力比の最適化や排出ガスの最小化を行う研究も紹介され、モニタリング技術に注力していることが示唆された。

## 9. 材料, 構造および製造技術

茂山 治久<sup>\*1</sup>

SHIGEYAMA Haruhisa

### 1. 全般

材料、構造および製造技術の分野では、製造と冶金 (Manufacturing Materials and Metallurgy) から44件、構造とダイナミクス (Structures and Dynamics) から96件 (ロータダイナミクスとベアリングおよびシールドダイナミクスは除く) の発表があった。構造とダイナミクスの分野における内訳は、疲労・破壊および寿命予測が18件、新設計手法が9件、確率論的手法が10件、空力振動および減衰が25件、構造力学・振動および減衰が34件である。筆者は主に製造と冶金のセッションおよび構造とダイナミクスのうち疲労・破壊および寿命予測のセッションを聴講した。以下にこれらの発表内容について概説する。

### 2. Manufacturing Materials and Metallurgy

製造と冶金の分野では、12のセッションが開催され、うちテクニカルセッションが5件、パネルセッションが5件、チュートリアルセッションが2件であった。

積層造形 (AM) に関しては18件の発表があり、AMによるガスタービン部品の製造や補修に大きな期待と注目が集まっていた。AMにより製造された材料で問題となるのは、延性の低下や残留応力、表面粗さの影響による疲労強度の低下であり、これらに関する発表が数多くみられた。粉末床熔融結合 (PBF) で作製されたTi-6Al-4V合金の疲労強度や引張特性と表面粗さや積層方向の関係を調査した研究 (GT-63482, 64049)、単結晶Ni基超合金に直接金属レーザー焼結法 (DMLS) で酸化物分散強化コーティング層を作製し、レーザー出力強度と界面接着、機械強度、表面状態および微視組織の関係を調査した研究 (GT-63714)、レーザー熔融法 (SLM) により作製された材料をスモールパンチ試験により評価することの妥当性を評価した研究 (GT-64896) などがあった。

原稿受付 2017年7月12日

\*1 (一財)電力中央研究所 材料科学研究所 構造材料領域  
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1  
E-mail: haruhisa@criepi.denken.or.jp

コーティングに関しても12件の発表があり、活発な議論が行われていた。遮熱コーティング (TBC) 内に発生する様々なき裂を想定し、FEMによってき裂成長特性を評価した研究 (GT-63610)、冷却孔周りのTBCの熱機械挙動をFEMにより評価した報告 (GT-63883)、高熱流束レーザー試験によりTBCの寿命を調査した研究 (GT-63683)、4点曲げ疲労試験によるTBCのき裂発生に関する研究 (GT-63604) などがあった。

この他にも、基材や補修、解析モデリング、劣化・寿命予測等に関する発表が計14件あった。基材については、長時間酸化挙動 (GT-64605) やクリープ予ひずみと熱時効による $\gamma'$ のラフト化挙動 (GT-64104) 等の発表があり、劣化・寿命予測については、改良 $\theta$ 法のさらなる改良によるクリープ変形挙動や寿命の予測 (GT-63675)、単結晶動翼の再生熱処理に関する研究 (GT-63698) 等があった。

### 3. Structures and Dynamics: Fatigue, Fracture and Life Prediction

疲労・破壊および寿命予測の分野では、4つのセッションが開催され、そのすべてがテクニカルセッションであった。

き裂成長モデリングに関しては4件の発表があり、弾塑性破壊解析における塑性拘束の影響を、低炭素鋼の2次元および3次元有限要素解析および弾塑性破壊靱性試験により調査した報告 (GT-63871)、動翼先端に発生したき裂に対して2次元および3次元破壊力学解析を適用し、3次元解析でき裂成長挙動や寿命をより適切に

予測可能であることを示した報告 (GT-64890)、Ni基粉末冶金合金中の介在物や細孔の数や位置、形状などをコンピュータ断層撮影法により調査し、FEMによるき裂進展解析などの工学シミュレーションと組み合わせることで寿命評価に結び付ける試み (GT-65087)、確率論的N-Rモデルを構築し、Ni基超合金中の微小き裂成長に及ぼす粒径の影響を調査した報告 (GT-65189) があった。

寿命予測に関しては7件の発表があり、そのすべてが低サイクル疲労 (LCF) に関連するものであった。その内容は、エネルギーベースの損傷評価法によるもの (GT-63775, 64791)、結晶すべり理論と臨界面アプローチによるもの (GT-64598)、温度履歴に基づく経験則によるもの (GT-63229)、使用済動翼から採取した小型試験片による破壊試験によるもの (GT-63422)、クリープ損傷と疲労損傷の線形和則によるもの (GT-63341, 64147) である。

強度評価や寿命延伸に関しては4件の発表があり、動翼に作用する1次応力と2次応力の影響を識別する手法の開発 (GT-64634)、翼根の高サイクル疲労 (HCF) への塑性の影響評価 (GT-63857)、実機使用により腐食損傷を受けたタービンディスクの寿命延伸手法の開発 (GT-63366)、圧縮機動翼の高サイクル疲労強度に及ぼす異物損傷の影響評価 (GT-63599) について報告がなされた。

LCFとHCFを重畳させた試験に関する発表も3件あり、試験データの整理方法 (GT-64414) や寿命予測 (GT-64435)、レーザーショックピーニングによる疲労強度向上 (GT-63789) について報告がなされた。

## 10. ロータダイナミクスとベアリング

庄山 直芳\*<sup>1</sup>

SHOYAMA Tadayoshi

### 1. 全般

この分野のセッションでは、軸受、ダンパ、シールに関する専門家が多く参加しており、全てロータダイナミクスを横串しとして関連している。講演件数の内訳は、ロータダイナミクス8件、動特性測定法3件、ティルティングパッド軸受6件、玉軸受3件、磁気軸受2件、気体軸受9件、油・水潤滑5件、スクイズフィルムダンパ3件、シール6件である。磁気軸受の講演数が少ないのは、専門の国際会議 (ISMB) が盛んであるためと思われる。発表後の討議は活発で、質問数、発表件数においてTexas A&M大学 Dr. San Andresの研究室関係者の存在感が大きい。

### 2. ロータダイナミクス

従来の1次元の振動解析から更に複雑な系を対象としたものが多く、支持構造や土台を含めた全体振動解析 (GT-63035, 63926)、20本の軸が連なった地中ポンプの釣合解析 (GT-63459)、計算負荷を抑えた3次元モデルの振動解析手法 (GT-64954) の発表があった。また、ロータ部品を構造的に等価なトラス構造に置き換えるトポロジー最適化手法 (GT-64369) が紹介された。これにより内部を肉抜きした非常に軽量の構造部品を3Dプリンタで製造することができる。飛翔する鳥類の骨断面に見られる比強度が最適化されたポーラス構造を連想させ、革新的な軽量構造設計製造技術の到来を予感させた。

### 3. 軸受・シール

気体軸受は全てフォイル軸受に関するものであり、気体膜に不足する減衰を与える支持構造に関するものとして、バンプフォイル軸受の詳細力学モデル (GT-63284)、バンプとメッシュを周方向に交互に並べるなどの新しい弾性支持構造 (GT-64206, 63185) の他、負荷容量増加

のための外部静圧加給 (GT-63495, 65233) の発表があった。また、薄いフォイル軸受は製造ばらつきの課題があるため、製造誤差の影響評価 (GT-63822)、形状ばらつきの少ない製造方法 (GT-63615) が報告された。

油潤滑軸受はターボチャージャに関するものが中心であった (GT-63658, 64628, 64839)。水潤滑軸受については、水の低粘性が故に生じる効果として、非線形振動の分岐解析 (GT-63752, 筆者)、質量効果を取り入れた拡張レイノルズ方程式 (GT-63687) について発表があった。

ティルティングパッド軸受は、スターブ潤滑時のパッド背面接触によるSSVハッシュと呼ばれる自励振動に関するもの (GT-65040, 64822)、ピボット摩擦の影響を検討したもの (GT-65240) があった。

磁気軸受については、永久磁石で磁場を補助することでアンプの低コスト化を狙ったもの (GT-64050)、タッチダウン用固体潤滑軸受の温度解析 (GT-63662) があった。

シールについても、ラビリンスシールの動特性 (GT-63012, 63014, 64745)、液体シールのCFD解析 (GT-64745, 63380) について発表があった。

### 4. 軸受支持構造

スクイズフィルムダンパ (SFD) に関しては、軸方向絞りで作動するIntegral SFD (GT-63448) や、円筒状のエラストマ部品で内側隙間と外側隙間を分けた構造のERSFD (GT-63276) など、新しいSFD構造の発表が興味深かった。後者は、エラストマに設けられたオリフィスの流路圧損やエラストマの内部減衰も作用するため、構造は複雑であるが、結果的に線形に近い力学特性が得られたという結論で、従来型に対する優位性を主張していた。

原稿受付 2017年7月7日

\* 1 パナソニック(株)アプライアンス社  
〒570-8501 守口市八雲中町3-1-1  
E-mail: shoyama.tadayoshi@jp.panasonic.com

## 11. 蒸気タービン

佃 知彦\*<sup>1</sup>

TSUKUDA Tomohiko

### 概要

論文数は31編で、前年度の43編から減少となったが、8件のテクニカルセッションに加えて、パネル、チュートリアル、ディスカッションのセッションが1件ずつあり、蒸気タービンの性能、構造、運用まで幅広い内容をカバーする構成であった。

### テクニカルセッション

長翼の振動・流体特性、弁・シール技術、排気ディフューザ特性、翼列性能評価、運用、熱応力評価、余寿命予測等多岐に渡る内容の発表があった。

発表者別にみると、欧州からはSiemensやGE（旧Alstom）等のメーカーやStuttgart大学等の研究機関を中心に20件と全体の発表件数の約3分の2を占めた。次いで中国からは上海電気、東方タービン等のメーカーや西安交通大学等を中心に8件と、欧州と中国で大半の発表件数を占めた。開催地である米国からの発表は2件、日本国内からの発表はMHPSからの1件であった。

最も発表件数の多かった長翼の振動セッションでは、長翼のダンピング評価やミスチューニングに関連する発表が盛況であり、CFDを用いた流体ダンピングの評価（GT-63401, 64021）は新しい分野として発展しそうである。今年は湿り蒸気のセッションは無かったものの、長翼セッションの中で凝縮流れコードを用いた損失評価法に関する発表が2件（GT-63404, 64278）あり、ディスカッションセッションでの発表も含めて着実に研究が進展している。温度・熱応力評価に関連するセッションでは、蒸気タービン起動時の熱応力評価に加えて、蒸気タービン停止後自然冷却時の温度予測（GT-63592）やHot Airによるタービンの停止時保温に関する研究（GT-63555）等、蒸気タービンの急速起動を意識した研究が多かった。

### パネルセッション

「プラント出力最適化と環境負荷最小化に向けた蒸気タービン運用の向上」と題してタービンメーカー及び電力会社から発表があった。近年の再生エネルギーの出力割合増加を背景として、急速起動、低負荷運転、広域系統周波数対応、負荷変化、起動停止回数の増加等の蒸気タービンに要請される具体的項目と、それらに対する各社の取り組みが紹介された。ディスカッションでは電力会社とタービンメーカーの協力体制の重要性やプラントの経年劣化を考慮した運用等について活発に議論された。

### ディスカッションセッション

「湿り蒸気試験プロジェクト」と題して、まずCambridge大学が中心となって13の研究機関が参加したInternational Wet Steam Modeling Project (IWSMP) についての結果サマリー紹介があった。その結果を受け、湿り蒸気流れ解析コードの更なる検証精度向上を目的とした新しい凝縮ノズルの設計・構成・蒸気条件等が紹介された。ディスカッションでは液滴径の計測方法や非定常計測の重要性などの専門的な内容からプロジェクトの将来の方向性まで幅広い観点から議論された。

### チュートリアルセッション

「シール技術とリーク流れ」と題して、現在の蒸気タービンに最も幅広く使用されているラビリンスシール技術から、次世代のシール技術まで幅広いシール技術の紹介があり、蒸気タービン技術者にとって有用なものであった。

### 委員会

第3日の夕刻に、蒸気タービン委員会（Committee Meeting）が開催され、論文数統計紹介、活動報告、来期の幹事体制、表彰等が実施された。

原稿受付 2017年7月20日

\* 1 (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター  
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4  
E-mail: tomohiko.tsukuda@toshiba.co.jp

## 12. 展 示

石田 克彦\*<sup>1</sup>

ISHIDA Katsuhiko

展示会は学会2日目(6月27日)から4日目(29日)までの3日間、会場Charlotte Convention Centerの地下ホールにて開催された。メーカ、団体など合計約130の展示ブースが設けられた。出展者の内訳は、民間企業が121社、大学、研究機関、学会など10団体である。国別にみると、米国が99件と全体の8割程度を占めている。次に多いのは英国10件、ドイツ9件で欧州全体は29件である。アジアからの出展は日本3件、韓国1件の計4件、その他に、トルコ、南アフリカから各々1件の出展があった。前年度に比べ米国が大幅に増加し、アジアからの出展者が減っている。

ブースでの展示の他に、会場内のステージでの参加各社からの30分のプレゼンテーション12件が開催された。27日、28日の夕刻にはレセプションが開催され会場内で参加者がビールなどを手に歓談する時間が設けられた。展示会場に隣接して学生のポスターセッション会場が設けられ70の研究成果が掲示されていた。

筆者は出展者として参加したので、展示ブースの中から見た印象を交えて報告したいと思う。

会場となった地下ホールは奥行約60m幅は約150mと広大で、中央に設けられた入口を挟んで、展示ブースと3か所のレセプション用の広場が配置されている。大きな会場に多数のブースが配置されており、会場で配布されるプログラム冊子からは目的の製品、会社を捜すのが大変であるが、学会のホームページに便利な案内が掲載されており、社名、団体名、業種別等の検索やその結果をブース配置図上に表示してくれる。(http://www.expcadweb.com/17pete/ec/forms/attendee/indexTab.aspx# 会議後も閲覧可能) 入口正面には、GE、ANSYS、P&W等の主要スポンサーの大きなブースが高いバナーを立て並んでおり、壮観である。昼食が提供される食堂は学生のポスターセッション会場を挟んで展示会場と隣接しているので、参加者は必ず展示会場入り口から展示会場とポスター展示を通して、昼食に行くようになっている。出展する場合は全体配置から人の流れを読んでよい場所のブースを確保することが大事である。今回の会場は幅、奥行ともに大きいので、場所と時間帯によって人の流れにかなり差があったように思う。

開場時間は1,2日目が12時30分から18時30分、最終日のみ11時30分から14時30分までとなっている。

原稿受付 2017年7月27日

\* 1 川崎重工(株) ガスタービンビジネスセンター技術企画部  
〒673-8666 明石市川崎町1-1  
E-mail: ihisda\_katsuhiko@khi.co.jp

入場者の多いのは昼食時間と午後のセッション開始までの間である。展示会場入口と昼食会場を結ぶ通路沿いが最もにぎわう。昼の休憩を兼ねて会場をまわっている方が多いので、まずは記念品、パンフレットなどを渡してブースの存在を知っていただく時間帯になる。多くのパンフレット、記念品を手に次々とブースをまわる入場者の姿が多かった。筆者のところで訪問者の数、記念品の配布は昼休みに集中していた。次に入場者の多い時間帯は、夕方のセッション終了後であるが、この時間帯は入口と反対側のレセプションが開催される部分が賑わうことになる。ただし、歓談タイムなので売り込みには向かないかもしれない。筆者はレセプション会場に面したところにいたが、通行量の多いわりにブースへの訪問者があまり増えなかったように思う。また、訪問者も技術史に関する議論、日本を訪れた時の思い出話など商売拔きの楽しい話をしていられる方が多かった。最も楽しい時間帯である。午後のセッションの開催されている時間帯は全体的に人影もまばらになる。しかし、筆者のブースでは名刺を交換してじっくりお話を伺うというお客様への対応はここに集中していた。詳しい説明、商談をお望みの方は、この時間帯にお目当ての出展者を訪れるのがよい。

ガスタービン本体のメーカは、GE、P&W等8社が出展していた。実物エンジンを持ち込んだところはなく部品、ディスプレイモデル、ポスター等の展示などが中心である。何れの会社も個々の商品ではなく、企業全体のイメージ広告の色彩が強いように思う。一方、商談、売り込みに熱心なのは、ガスタービンの構成機器、加工、材料、計測、解析ソフトウェアなどのメーカで、これらの企業が出展者数の9割程度を占めている。主催者発表の統計によれば、学会参加者の過半数は、研究開発者、エンジニアで占められている。彼らが必要とする各種の材料、ツールを供給するメーカもビジネスチャンスを求めて、ここに集まってくるのでこういう出展者の構成になるのだと思う。計測器メーカは実際に機器を持ち込んでデモンストレーションを行っているところが多い。ソフトウェアベンダは解析過程、結果等のビデオ展示をおこなっていた。加工、材料メーカも数多くのサンプルの展示を行っていた。

会場では製品紹介、商談をおこなうプロフェッショナルの方々の他に、学生たちが機器、部品サンプル等を熱心に見学する姿が印象に残った。さまざまな部品のサンプルやカットモデル、特殊な計測器等、普段目にする機会のないものが多く展示されておりガスタービンの勉強

になるのだと思う。筆者のブースでは産業用の小型機のカットモデルを展示したが、教科書にはあまり載っていない遠心圧縮機と単缶式燃焼器の組合せは珍しいらしく学生からの質問があったり、先生が連れてきた学生に構造を説明する姿がみられた。

この展示会は、情報収集、商談、勉強いずれの面でも大変楽しく、役に立つものなので、来年のTURBO EXPOに参加される方は、一度会場を訪れることをお勧めする。



Expo Hall (photo courtesy of ASME/IGTI)



## ウィーンの森を守った日本の環境技術

### Japanese Environment Technology to Protect the Vienna Forest



毛利 邦彦\*<sup>1</sup>  
MOURI Kunihiko

#### 1. はじめに

1979年、オーストリアでは原子力発電所が国民投票の結果、僅か1%の差で廃止となり、代替の石炭火力発電所建設にもNO<sub>x</sub>排出規制が適用となり、その運転許可が懸念されるなど電力会社としてはNO<sub>x</sub>低減技術の導入は急務であった。当時、日本は、いち早くNO<sub>x</sub>低減技術開発を独自に推進してきた。特に電源開発株式会社（以下「電発」と云う）はボイラーメーカーとの共同研究の成果をベースに、竹原火力1号機（250MW）に石炭火力用実証試験を開始し、更にその成果をベースに排煙脱硝装置を導入した竹原火力3号機（700MW）1983年に運転開始し、信頼性あるNO<sub>x</sub>低減技術を所有していた。オーストリア電力会社は日本の状況を調査するために1983年に技術者を日本に派遣した。その結果、電発とオーナーコンサルタント契約を締結し、日本の触媒式脱硝装置の導入を1984年に決定した。本プロジェクトは欧州の電力会社などに衝撃を与え、日本の環境対策技術が海外に移転する大きな契機となった。本プロジェクトの事実を整理しながら取りまとめたので背景と経緯およびその影響などを紹介する。

#### 2. オーストリアの状況

オーストリアの電力会社は Zwentendorf原子力発電所（692MW）を建設完了したが、1978年（昭和53年）に国民投票により廃止となり、代替の石炭火力発電所を1981年に建設を開始した。代替石炭火力発電所のDuernrohr発電所は、図1に示すウィーン郊外に立地され、政府系の電力会社VKG（Verbundkraft Elektrizitaetswerke GmbH）が1号機405MWを、NEWAG（Energieversorgung Niederoesterreich; 現EVN）社が2号機352MWを担当した。図2に完成したDuernrohr発電所の写真を示す。

当時の欧州は酸性雨による湖沼の酸性化や、黒い森、ウィーンの森の枯渇が大きな議論になっていた。この対策としてDuernrohr発電所にはスプレードライヤー方式

による排煙脱硝装置が導入されていたが、原因物質のNO<sub>x</sub>削減技術の導入計画はなかった。

オーストリア共和国はこの背景を受けてNO<sub>x</sub>の排出規制を強化したので、電力会社としては、信頼ある石炭火力用のNO<sub>x</sub>低減技術の導入が不可欠となり、世界中にNO<sub>x</sub>低減技術を探し求めている。



Fig. 1 Duernrohr発電所の位置



Fig. 2 完成したDuernrohr発電所  
（写真提供：EVN）

#### 3. オーストリア電力調査団の来日

オーストリア電力会社が最初に電発に接触したのは1983年の4月頃だった。シーメンス日本の所長が電発を訪問して、日本のNO<sub>x</sub>低減技術についての実情を聞き、オーストリアの調査団の受け入れが可能かとの相談から始まった。オーストリア電力会社の調査団は、1983年6月に来日して、電発のNO<sub>x</sub>低減技術開発の状況と松島火

原稿受付 2017年8月7日

\* 1 毛利塾塾長（元 電源開発株式会社）  
〒238-0042 横須賀市汐入町 2-36  
E-mail: mourik@jcom.zaq.ne.jp

力（石炭：500MW×2）の視察および東北電力株式会社仙台火力発電所（石炭：175MW×3）の視察を実施した。

図3に当時の調査団の写真を紹介するが、VKGの責任者はSchumocher氏、NEWAGはRaffelsberger氏であった。

この視察の後で、オーストリア側から電発に脱硝触媒方式によるオーナーコンサルタントの非公式な打診があったが、欧州の国が、日本に技術移転協力を求めることには半信半疑であった。1983年9月にテレックスにて長文のLOI (Letter Of Interest) が届き、オーストリア側の本気度が解った。1983年10月にウィーンにてプロジェクトの交渉が開始された。



Fig. 3 オーストリア使節団と筆者  
松島火力向け通船上にて

#### 4. 1983年代までの日本の公害問題と大気汚染状況

1960年代の高度成長時代の影の部分として、表1に示す四大公害病が深刻な課題として四日市喘息、水俣病、イタイイタイ病、光化学スモッグ等の大気、水質に健康に影響する大きな被害が顕在化し、政府はその防止の為に厳しい公害規制を製造業に課し、技術開発を国、電力会社、メーカーなどが一体化して実用化を目指した。

大気については、酸性雨による森林の枯渇や湖の酸性化など自然破壊の懸念と四日市喘息に代表される呼吸器疾患の増大が社会問題として大きく取り挙げられていた。

Table 1 日本の四大公害病

公害名	年代	公害の内容	原因
水俣病	1960年代	チッソ(現在JNC)の熊本県水俣市にある水俣工場が水俣湾に流した廃液による水銀汚染の食物連鎖で起きた公害病である。そして、環境汚染の食物連鎖で起きた人類史上最初の病気である。1956年(昭和31年)に発生が確認された。	メチル水銀化合物
イタイイタイ病	1910年頃、1968年に問題化	三井金属工業神岡鉱山からの廃水により神通川流域に「いたいたい」との症状を訴える患者が多く、カドミウム化合物由来である公害と判明した。荻野昇医師が解明	カドミウム
第二水俣病	1965年に顕在化	昭和電工の廃液による水銀汚染の食物連鎖で起きた公害病である。そして、1965年(昭和40年)に確認された四大公害病の一つである。	メチル水銀
四日市喘息	1960年から1972年頃	四日市コンビナートより排出された硫酸酸化物などにより大気汚染により住民の気管支系疾患が政治問題化した公害問題	硫酸酸化物

WHO(世界保健機構)が定めた健康に影響のない環境基準を達成するために国は排出基準を定めたが、横浜方式と呼ばれる自治体が国の基準より厳しい排出協定を締結して、排出量を年々低減させて行った。環境基準の達成には技術開発の成功や燃料転換などにより改善されて行き、二酸化硫黄について1983年度以降はほぼ達成して現在に至っている。

窒素酸化物については、1983年時点では達成出来て無く、その後も横ばいが続いた状況で排煙脱硝装置の導入が不可欠の時代であった。二酸化硫黄の低減と二酸化窒素の環境基準の推移は図4に示すとおりである。

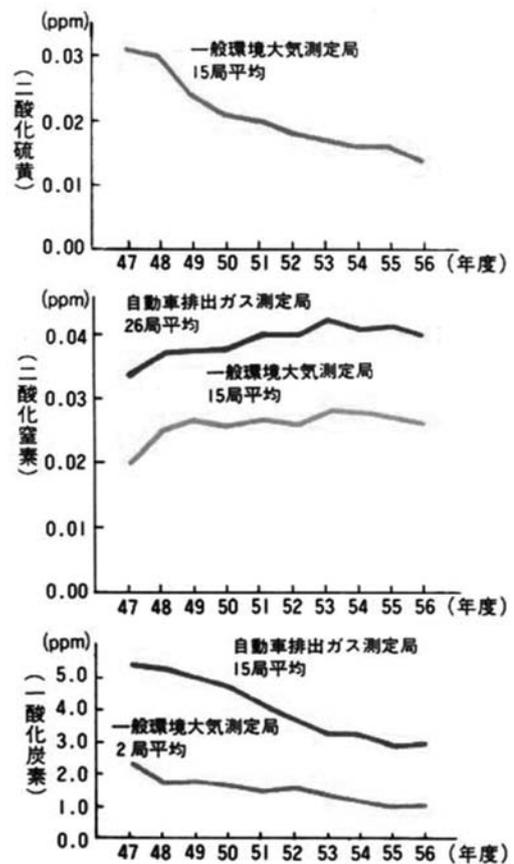


Fig. 4 環境基準の年度別測定結果  
出典：昭和58年度環境白書

#### 5. 電発石炭火力用の窒素酸化物の技術開発

電発の技術開発は大手ボイラーメーカーとの共同研究として脱硝触媒開発と燃焼改善による制硝技術開発の二本立てで進められた。燃焼改善技術は発生NO<sub>x</sub>が低減できれば、脱硝触媒設備費が減少出来るとの評価による。

脱硝技術に対して燃焼改善によるNO<sub>x</sub>低減技術を制硝技術と云うが、主な開発状況を表2に取りまとめた。1983年当時の目標は試験炉で100ppm以下を目標とした。

ボイラーメーカーの試験炉による削減結果と実ボイラーとのNO<sub>x</sub>発生量は相違するので、試験炉と実ボイラーとの相関性を見いだすことが課題の一つでもあった。

Duernrohr発電所のボイラー供給者であるSteinmuller,

Table 2 制硝技術開発の一覧

項目	概要	特記	成果	実プラント
(2)燃焼改善				
IHI	DFバーナーに至るまで、フォスターウィラーのライセンス関係で開発が遅れた。	IHI独自で開発発しても、ライセンスはFWとなる。	相生研究所で大型試験プラント、複数バーナーにて海外炭を試験	IHIのボイラーに採用。現在はFWとのライセンス契約は解除
バブ日立	PGバーナーとNOx発生メカニズムに対応したバーナー開発に成功	バブ日立試験所で複数バーナーにて試験を実施。	海外炭での試験で100ppmを着る成果を得た。	英国バブを買収するなど海外にも展開
MHI	香焼工場に試験装置を増設して、コーナーファイヤリングへの概要	濃淡燃焼論でバーナー開発	PMバーナーに至るまで、SGRバーナーなど試行錯誤を実施	CREバーナー関係のライセンス関係はなく、海外への展開が容易
KHI	貫流ボイラー用のスワールバーナーを開発	試験所で、二段燃焼率を上昇させると、均一燃焼を成ることを確認	一次空気のスワールによる注入方法は効果がある事を確認	自社ボイラーへの採用
備考	NOx規制強化に伴い、触媒開発は不可欠であったが、設置スペースの関係で磯子・高砂既設には触媒式は不可能。また触媒入り口濃度が低いと触媒量が減少するので経済的であったので、試験炉で目標値を100ppm以下と定めた。			

注：バブ日立はバブコック日立、MHIは三菱重工業、IHIは石川島播磨重工業、KHIは川崎重工業

Table 3 電発の触媒式パイロット試験総括

項目	概要	特記	成果	実プラント
(1)脱硝触媒				
日立造船	最初にパイロット試験を磯子火力で実施	石炭火力用の触媒を最初に開発	アルミ系は硫黄による被毒があり、寿命が短く、触媒の再生技術開発も実施	東電のガスタービン用触媒に採用
バブ日立	竹原1号機で1,000Nm <sup>3</sup> /hパイロットおよび100Nm <sup>3</sup> /h	リング触媒失敗、移動床による触媒破風採用、低酸化触媒と自社製造	100Nm <sup>3</sup> /hのパイロットで10,000時間以上の性能を達成	竹原1号実証装置、デュールンロールなど
MHI	高砂火力でパイロットを実施した。	ボード触媒最初に採用グリッド、無垢触媒開発は若干遅延。	石炭火力用の触媒開発に成功	電力会社のプラントに採用
IHI	パイロット試験はかなり遅れて磯子火力で実施。	酸化率を達成に時間を要した。	石炭火力用触媒の開発に成功	電力会社のプラントに採用
KHI	竹原火力でパイロット試験。大手メーカーより早期に開発を始めた。	円筒触媒に固守したが触媒開発の取り組みは評価	性能は満足、触媒の再生試験も実施	竹原1号実証装置、など

酸化率（1%以下）の目標を達成した。

この触媒開発の結果、触媒寿命は1年以上を保証させたが、Duernrohr発電所は2年以上とした。現在では長期間の性能が維持されている事が確認されている。

開発初期の触媒は数ヶ月で性能は低下して、実用に供給できる触媒開発には時間を多く要した。特に脱硝触媒は硫酸を製造する酸化触媒（V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>）を用いていたために、排煙中の二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）を酸化し三酸化硫黄（SO<sub>3</sub> 無水硫酸）になりやすいので、酸化率の低い脱硝触媒を開発しなければならなかった。

1981年までに電発は石炭火力用触媒式脱硝装置の技術確立の自信を得たので、竹原火力1号機に国の補助により250MWの実証試験を1981年に開始した。この実証試験装置は、現在も稼働中で有るが、新竹原1号機（600MW；2020年運開）の建設により2018年3月に停止が予定されている。

7. 会議は踊る@ウィーン、されど進んだ

オーストリア電力会社の求めに応じて、ウィーンにてDuernrohr発電所のオーナーコンサルタント業務の交渉が1984年10月に行われた。

会議室はVKGの本社で、天井の高い薄暗い広い会議室であった。中林恭之氏を代表として、VKG、NEWAGと交渉が開始された。

電発側からは概念設計、詳細設計と見積もり評価、および施工管理を提案した。この内容について問題は無かったが、業務期間を5年と提案したが、オーストリア側は2年で完了して貰いたいと要求してきた。中林氏はこの期間については譲らず、英語で「This project is cancelled」と叫んだ瞬間、オーストリア参加者は一瞬の静寂のあと、ドイツ語で「ざわつき」、終始が付かなくなった。10分位経ったあとで、副社長のWagner氏が電発の提案を受け入れるが、業務の進行を早めて貰いたいと発言があり、本契約に向けた交渉が始まった。1984年1月に概念設計の契約が締結された。

EVTとの技術会議で明らかになったことであるが、欧州はボイラーメーカーとバーナーメーカーは独立した技術と見なしていた。

NOxの排出量の保証はボイラーメーカーの実績、経験に基づいて、設計をしていたので、日本の設計思想とは大きく相違していた。

確かに、家庭で使う「ガスコンロ（バーナー）」と「やかん」は別であるが、日本の技術開発はボイラーとバーナーを一体システムとして、試験炉による低NOxバーナーと二段燃焼などの総合的な制硝技術開発を進めていた。

欧州ボイラーメーカーには試験炉によるNOx制硝技術開発の手法はなく、合理性のある日本の燃焼技術は欧州に比べて遙かに進んでいたと感じた。

ただし留意しなければ成らないこととして

- ①欧州のボイラーはwet boiler であり、日本のボイラーはdry boiler であること。
- ②欧州はタワーボイラーでボイラーと煙突が一体化していること、日本は米国式のコンベクション式であること。

6. 触媒式脱硝装置の開発

電発は触媒式脱硝装置を1974年（昭和49年）旧磯子火力発電所（250MW×2）に100Nm<sup>3</sup>/hのパラレルフロー式の触媒のパイロット試験を実施した。石炭火力用脱硝触媒の課題は性能、寿命の他に、触媒が石炭灰による閉塞があった。この磯子火力での試験結果からパラレルフローは石炭灰による閉塞はない事が確認され、空気予熱器のエレメント形状、ハニカム形状、格子形状の触媒も石炭火力に適用できるとの成果を得た。当時は色々な形状の触媒をパイロット試験で研究を実施した。リング状触媒、シリンダー触媒、ボード状触媒などがあったが、格子状触媒のようなパラレル形状が主流の形状となった。

触媒式脱硝装置共同研究の実施概要を表3に示すが、1974年（昭和49年）から1981年（昭和56年）までの長期に亘り、性能（80%以上）、寿命（1年以上）、SO<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>

## 8. Duernrohr発電所概要

Duernrohr発電所の概要は表4に示す。

ポーランド炭が主燃料であり、燃焼性硫黄は0.6-0.8%、と比較的低く、灰分は約12%、窒素分は1.6%あった。環境技術対策としては脱硫率90%のスプレッドライヤー（半乾式脱硫装置）、99.8%の電気集塵装置が初期の設計に組み入れられていた。脱硝装置の仕様は日本での開発目標値である脱硝効率80%以上とした。

Table 4 発電所主仕様

項目	単位	1号機 (VKG)	2号機 (NEWAG)
発電所出力	MW	405	352
ボイラー蒸発量	t/h	1,135	1,018
ボイラー主蒸気温度	℃	540	540
ボイラー主蒸気圧力	bar	258	206
石炭性状(ポーランド炭)			
○到着ベース発熱量	MJ/kg	23.4-29.3	
○灰分(工業分析)	%	8~18	
○水分(工業分析)	%	7~12	
○意窒素分(元素分析)	%	1.6	

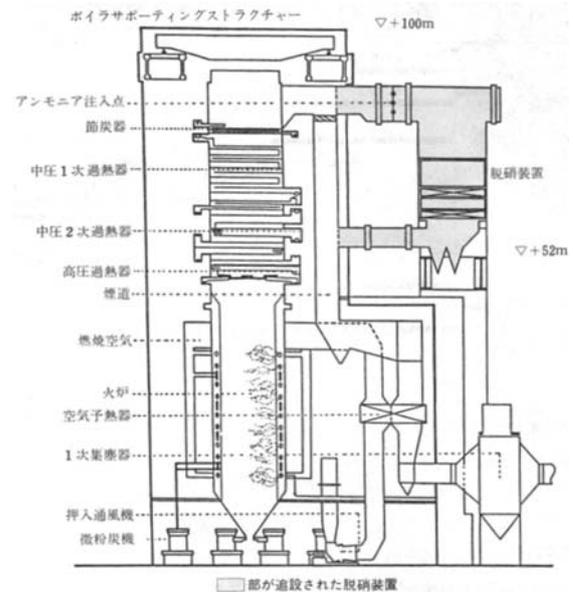


Fig. 5 タワーボイラーでの脱硝装置の配置

## 9. プロジェクト業務と工期

プロジェクト業務は概念設計、詳細設計、入札審査、および施工管理であるが、前項で5年とした工期については、EVN (IHNEWAG) より発電所の竣工時期が繰り上がったので、業務の大幅繰り上げの要請があった。結局1987年に業務は完了した。

この時の契約金額交渉で相手から期間が短くなるので「人工(にんく)」が削減されるので、契約金額を下げるべきでは無いかと提案に、中林氏は早く業務を終了させるので、むしろ「新幹線料金」を頂きたいと提案した結果、予め合意に足していた金額に落ち着いた。成熟した社会での「紳士の」交渉と思った。

## 10. 脱硝装置の仕様

脱硝装置の仕様は基本的に、日本の仕様と同じとした。表5にその概要を示す。脱硝装置は排ガスの全量を処理する大型の反応器が必要とされた。

Table 5 脱硝装置の概要仕様

項目	単位	1号機 (VKG)	2号機 (NEWAG)
処理容量	Nm <sup>3</sup> /h	1,210,000	1,038,000
脱硝効率	%	80以上	80以上
入り口NO <sub>x</sub> 濃度	ppm	800	800
出口NO <sub>x</sub> 濃度	ppm	160	160
転換酸化率	%	1.5以下	1.5以下

## 11. 脱硝装置の配置について

タワーボイラーにおける脱硝反応領域は節炭器の上流で420℃領域である。タワーボイラーの節炭器はボイラー上部にあるので、相当の高さに配置しなければならなかった。図5にその断面図を示す。また図6に完成後の脱硝装置の写真を示す。



Fig. 6 Duernrohr発電所の脱硝装置の位置

## 12. 日本メーカーと欧州メーカーの共同応札

日本の技術をどのように導入するかについては、オーストリア側からの提案により、入札条件に日本と欧州メーカーとの共同体にて応札する条件を付した。

これにより、次の日本メーカーと欧州メーカーとの連携を模索して、上記三者による応札が行われた。

日立とVoestalpine

MHIとSimmering-Graz-Pauker (SGP)

IHIとWagner Biro

KHIとGerman Babcock

結果は日立グループとなり、日立の触媒が納入された。

海外へのシステムを輸出する場合は、Turn-key契約で、「お任せ契約」が多いが、オーストリア側は日本の技術の調達を意図していたので、相互に相談しながらプロジェクトを推進させた。それ故本プロジェクトは、一般の製品の輸出では無く、「オーストリアに適合した」技術移転の思惑を持っており、広い意味での共同プロジェクトではないかと思っている。

### 13. プロジェクトの工程

プロジェクトの概念設計は1984年10月に終了し、詳細設計は1985年2月に終了した。

入札は1985年3月-5月まで実施された。発電所の建設に併せて脱硝装置が据え付けられたが、その施工管理、試運転まで実施して、Duernrohr発電所の運開の1985年3月に間に合わせる事が出来た。

### 14. オーストリアにおける本プロジェクト関心

オーストリア共和国ではこのプロジェクトへの関心は非常に高く、新聞もこのプロジェクトの中心人物である中林氏のインタビュー記事を載せている。

この記事について図7、図8に示す。日本ではあまり知られていない本プロジェクトはオーストリアだけではなく、欧州全体に強い関心をもたらしした。スイスの雑誌には「0型新幹線」の技術と共にDuernrohrプロジェクトが紹介されていた。



Fig. 7 中林氏のインタビュー記事



Fig. 8 竹原火力と中林氏のインタビュー記事

### 15. 欧州への電発の環境技術移転

ポストDuernrohrプロジェクトとして、EVNは電発と技術情報交換協定を締結して、関係の維持を図った。

このプロジェクトの成功は欧州各国に波及して、日本の優秀な技術のPRとなった。電発もNOx低減技術の技術移転のプロジェクトをデンマーク、フィンランドなどの電力会社と実施した。この実績を表6に示す。電発はオーナーコンサルタン業務の提供のみを実施していたためビジネス成立には限界があり、電発と共同研究したメーカーが触媒技術と燃焼改善技術を欧州に展開した。

残念ながら、電発の欧州での環境ビジネスは花開かなかったが、日本の環境技術の高さを紹介する先兵として

Table 6 電発の欧州へのプロジェクト展開

技術提供内容	相手方	国名	契約年	業務内容
脱硝技術	フレクト社	スウェーデン	1984年	スウェーデン石炭火力のSCR設置のFS
脱硝技術	KWU	ドイツ	1985年	SCR技術の開発現況報告書作成
I脱硝技術	IAW	ドイツ	1986年	ライニンガーベルグ石炭火力発電所へのSXR技術供与
燃焼改善	IVO	フィンランド	1988年	インコ-石炭火力への燃焼改善技術報告書作成
燃焼改善	SEP	スウェーデン	1988年	石油ボイラーの燃焼改善技術報告書

貴重な役割を担った。

### 16. Duernrohrプロジェクトの評価について

このプロジェクトについて、EVNの技術者Frank Klemmとメールの交換(2016年1月)をしたが、彼はDuernrohrプロジェクトについて次のようにコメントしてきた。原文は長文であるので、その一部を紹介する。「Dear Mouri-San!

First of all an excellent project depends on excellence people and the right configuration or constellation of this people. In this case the president, his adviser and the assistant.

The power station with catalyst plant was constructed and went into operation in September 1986 in time and the best example for success is that parts of the first layer of catalyst are still in operation today. (原文のまま)」

このプロジェクトの成功で欧州での酸性雨対策が浸透してウィーンの森の枯渇を救ったと考えている。

### 17. あとがき

オーストリアのプロジェクトについて、時代と共に忘れ去れて来ている。今から30年の昔話であるので電発の現役もその実態を把握していない。大正初期には「明治は遠くなりにはけり」と感じた人がいた。平成の今「昭和は遠くなりにはけり」と思う方も多いと思う。

しかしながら、歴史の中に学ぶことは多い。過去と現在の延長線の上に未来がある。歴史を深く理解することが未来を見通せる創造力の醸成に繋がる。それは現在の研究者や技術者が確実に未来の人に見られ評価される運命にあることを自覚しなければならない。

本件について今まで語る機会が無かったが、京都大学の吉田英生氏より「東西南北地水火風」のコラムを設けたのでとのお誘いを受けた。ガスタービンの広がりには関係が薄い海外との電力会社との繋がりとして、またエネルギー関連の事例として、整理して取りまとめたものである。

本書が、未来の技術の展開についての少しでも道筋を見いだして頂けることを切望している。

末尾であるが、本プロジェクトで最も活躍した電発の故本多勝哉氏の奥様英子氏より資料をお借りしたことに感謝を申し上げたい。また、電発OBの中林恭之氏および電源開発株式会社の一部情報を提供して頂いたことに感謝申し上げたい。



## 学校で習わない英語 (13)

### English Which Is Not Taught in School (13)

吉中 司\*1  
YOSHINAKA Tsukasa

#### —L—章

**【英語】** : the bottom line

**【意味】** : 「最も重要なもの」, 「結末」

**【説明】** : 家の家計簿から会社の収支簿記まで, 収入には収入の行, 支出には支出の行があって, 上から下へ記入してゆき, 最後に簿記の一番下に引いた線の上に, 正味収入額 (または残額) を書き入れます。

この, 一番下に引いた線 (つまり “the bottom line”) に書かれた額が, 一番大切な値であるところから, この言葉が, 「最も重要なもの」とか「結末」という意味を持つようになりました (以上, 参考資料15)。この言葉, 俗語や卑語ではありません。れっきとした常用語です。

この言葉を使った例を挙げましょう。例えば, ある会社の今年の業績が落ちたとしましょう。しかし, 社長は強気で「確かに業績は落ちたさ。しかしな, 一番大切なのは今年も黒字だ, という事だ。」と言いました。この社長の弁の後半を英語にすると, “However, the bottom line is that we finished this year, again in black.” でしょう。

#### —M—章

**【英語】** : a monkey off one's back

**【意味】** : 「肩の荷が降りた」

**【説明】** : 文字通り訳せば, 「猿が背中から降りた」でしょうか。この猿ですが, この場合, 本当の猿ではなく, その人にとっての, 仕事上のまたは日常の, 或る程度の長期に亘る問題です。

では具体的に, 一体どんな問題でしょうか。長年, スネをかじっていたセガレが, やっと就職して独立する事になったとしましょう。この場合, 父親なら「これで私も肩の荷が降りたよ。」と言うでしょう。これがその一例です。

別の例を挙げましょう。負けの混んでいた野球チームが, やっと一勝しました。ゲーム後の記者会見で感想を聞かれたそのチームの監督が, 「やっとの事で勝てた。これで私の肩の荷が降りた感だナ。」と言う場合, この言い回しが使えます。“Finally we won! It was a monkey off my back.” となります。

上の例にも見られます様に, 五つもの単語の集まりですが, 一つにまとめて使われます。

#### —N—章

**【英語】** : in a nutshell

**【意味】** : 「かいつまんで言えば」

**【説明】** : この言葉, 職場での会議中で, よく聞かれます。この言葉の起源ですが, 調べた参考資料によると, 非常に古いです。そして話が長くなりますので, かいつまんで話しますと, 大体, 次の様です。

原稿受付 2017年6月12日

\*1 独立コンサルタント

E-mail: tsuyoshi@videotron.ca

1世紀末にいた或るローマ人が, それより千年ほど前にギリシャのホメロスによって書かれたと信じられる「イリアス」(英語では「イリアッド」という長編抒情詩の全部を, クルミの殻の内側に, それはそれは小さい字で, 書くことが出来たのです。その後, この話が英国に伝えられ, 「非常に小さい, 凝縮された」という意味で, “Iliad in the nutshell” という熟語が生まれました。それが時代と共に変わり, “Iliad” がとれ, 意味も「簡約すれば」とか「かいつまんで言えば」になり, 今日に至ったのです (以上, 参考資料1, 16, 17, 18)。

一例を挙げましょう。会議中に, 或る職員が, 「話しは長くなってしまいましたが, それをかいつまんで結論しますと, …となります。」と言ったとしましょう。その後半を英語にすると, “In a nutshell, my conclusion is —.” でしょう。

#### —P—章

**【英語】** : piggyback

**【意味】** : 「便乗させる」, 「抱き合わせる」, 「ついでに…する」

**【説明】** : この単語を私が初めて聞いた時, 「子豚の背中」かと思いました。しかし, 文脈からすると, そうではなさそうで, 理解に苦しんだことを, 覚えています。

これは, もともと “pickaback” と書かれ, 「(子供などを) 背負う」という意味で, 16世紀末から使われていたのですが, 時とともにくずれ, 18世紀の末には “piggyback” とか “pigback” に変わっていました (参考資料1)。

“piggyback” は今日, 「便乗させる」, 「抱き合わせる」などの意味で, 名詞, 動詞, または副詞として使われます (参考資料19)。ここで, 動詞として使われる場合の例を示しましょう。

或る政党Zが, 法案Aと法案Bを議会に提出するはずでしたが, 法案Bはその性格として法案Aの付帯的なものであるところから, 法案Aに抱き合わせる形で, 提出することにしました。上の文章の後ろ半分を新聞記事にすると, “Z party has decided to piggyback Bill B with Bill A, when they introduce both Bills to the Parliament.” となるでしょう。

参考資料 (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

1. "QPB (Quarterly Paper Book Club) Encyclopedia of Word and Phrase Origins", by Robert Hendrickson, published by Facts On File, 2nd Edition, 2004
15. <https://www.google.com/#q=the+bottom+line+definition&&dobs=bottom%20line>
16. [www.dictionary.com/browse/in-a-nutshell](http://www.dictionary.com/browse/in-a-nutshell)
17. [www.infoplease.com/dictionary/brewers/iliad.html](http://www.infoplease.com/dictionary/brewers/iliad.html)
18. 広辞苑, 新村出編, 第六版, 岩波書店, 2008
19. “Webster’s II New College Dictionary”, Houghton Mifflin Company, 1995

## 2016年ガスタービン及び過給機生産統計

### ガスタービン統計作成委員会

ガスタービン統計作成委員会は、関係各社の協力を得て2016年1月から12月の間におけるガスタービン及び過給機を生産状況を調査・集計し、生産統計資料を作成した。資料提供を、陸船用ガスタービンは14社、航空用ガスタービンは3社、過給機は9社に依頼し、提供を受けた範囲で生産統計資料を纏めた。なお、過給機はすべて排気タービン方式のターボチャージャーであり、機械駆動によるものではない。

#### 1. 概要

##### 1. 2016年陸船用ガスタービン生産統計概要

(1) 生産台数および出力(図1)をみると、台数は前年の385台に対し256台で、前年に比べて129台(34%)の減少となった。出力区分別の前年との比較では、小型が26台、中型が110台の減少となり、大型は7台の増加となった。また、出力では前年の4,922MWに対し4,951MWと、前年から29MW(0.6%)の増加となった。出力区分別の前年との比較では、小型が14MW、中型が396MWの減少、大型が439MWの増加となっている。最近6年間では台数では最も少なく、出力では5番目となっている。台数の減少が著しいが、出力に関しては横ばいで推移している。

ア) 小型(735kW以下)は前年と比べて、台数は23%、出力は29%の減少で、それぞれ86台、35MWとなった。

イ) 中型(736～22,064kW)は前年と比べて、台数は44%、出力は53%の減少で、それぞれ142台、353MWとなった。

ウ) 大型(22,065kW以上)は前年と比べて、台数は33%、出力は11%の増加で、それぞれ28台、4,563MWとなった。

(2) 用途別(表1, 図2, 図3)にみると、ベースロード発電用(BL)、非常用発電用(EM)、およびその他(MC)の用途向けで占められている。台数で最も多いのは非常用発電用(EM)の201台(79%)、出力で最も多いのはベースロード発電用(BL)の4,667MW

(94%)である。前年同様ピークロード発電用(PL)は実績なしとなった。艦艇用(MM)は前年8台であったが、今年は実績なしとなった。全体的な構成は例年と大きく変わっていない。

ア) 非常用発電用(EM)は前年と比べて、台数は115台(36%)減少の201台、出力は207MW(43%)減少の279MWとなった。出力区分別にみると、小型は台数で21%、出力で22%の減少、中型は台数で44%、出力でも44%の減少となった。今年は小型・中型ともに台数・出力いずれも前年より減少となっている。

イ) ベースロード発電用(BL)は前年と比べて、台数は3台(6%)増加の50台、出力は402MW(9%)増加の4,667MWとなり、台数・出力ともに増加した。出力区分別にみると、前年実績がなかった小型は今年4台の実績があった。中型は台数で31%、出力で27%の減少、大型は台数で33%、出力で11%の増加となっている。1台あたりの出力を前年と比べると、小型：前年なし 今年45kW/台、中型：前年5.4MW/台 今年5.7MW/台、大型：前年196MW/台 今年163MW/台となっており、中型はやや大出力化、大型は小出力化という結果となった。

ウ) 艦艇用(MM)は、今年は実績なしとなった。

エ) その他用途向け(MC)は前年と比べて、台数は9台減少の5台、出力は2MW(29%)減少の5MWとなっている。

(3) 燃料の種類別(表2, 図4, 図5)にみると、台数ではガス燃料が前年から19%減少の55台、液体燃料が前年から37%減少の201台となっている。出力ではガス燃料が前年から8%増加の4,675MW、液体燃料が前年から55%減少の276MWとなっている。台数はガス燃料・液体燃料とも前年より大幅に減少し、出力はガス燃料が増加、液体燃料は減少している。構成比率は、台数ではガス燃料が全体の21%に対し液体燃料が79%、出力ではガス燃料が94%に対し液体燃料が6%で、ガス燃料の割合が前年に比べ台数、出力ともに増加した。ア) 液体燃料では、台数・出力ともに最も多いの

※文中の前年との差異や増加率などの出力に関する数値は、後に示す数表に基づきkW単位で算出している。

が重油1種(H1)で、台数は127台で燃料全体の50%、出力は166MWで燃料全体の3%をそれぞれ占めており、前年と比べると台数は36%の減少、出力は37%の減少となっている。台数で見ると、灯油(T)と軽油(K)が並んで37台で、灯油(T)は前年に比べると43%の減少となっている。軽油(K)は前年に比べると31%の減少となっている。出力で見ると、灯油(T)が60MW、軽油(K)が50MWとなっており、前年と比べると、灯油(T)は42%の減少、軽油(K)は79%の減少となっている。前年増加した灯油(T)は、今年台数・出力ともに減少している。同じく前年増加した軽油(K)は、一気に台数・出力ともに減少となり、前年以前の水準に戻った。

イ) ガス燃料では、天然ガス(GNG)と液化天然ガス(LNG)が22台と並んで台数が多く、全体の9%を占めている。他の燃料としては、都市ガス(GTW)の11台がある。出力では液化天然ガス(LNG)が最も多く3,182MWで全体の64%を占めている。出力で次に多いのは天然ガス(GNG)の1,467MW、以下は都市ガス(GTW)の26MWとなっている。昨年は台数・出力ともに天然ガス(GNG)が最多だったが、今年は台数は天然ガス(GNG)と液化天然ガス(LNG)が並んでトップを占め、出力は液化天然ガス(LNG)が最多となった。また、今年の実績は、前年に引き続き天然ガス(GNG)、液化天然ガス(LNG)、都市ガス(GTW)の3種で構成されており、以前は実績のあった高炉ガス(GBF)、液化石油ガス(LPG)、石油プラントガス(GOG)、石炭(ガス化)ガス(GCG)は、今年も実績がなかった。

ウ) 燃料別比率を出力区分別にみると、台数の上位3種は、小型が重油1種(63%)、灯油(17%)、軽油(15%)、中型が重油1種(51%)、軽油(17%)、灯油(15%)で、大型は天然ガス(61%)、液化天然ガス(39%)の2種のみとなっている。全体では重油1種(50%)、灯油(14%)、軽油(14%)となっている。出力の上位3種は、小型が重油1種(68%)、灯油(17%)、軽油(15%)、中型が重油1種(40%)、液化天然ガス(21%)、灯油(15%)で、大型は液化天然ガス(68%)、天然ガス(32%)となっている。全体では液化天然ガス(64%)、天然ガス(30%)、重油1種(3%)となっている。

エ) 2種類以上の燃料が使用できるものは、全体で18台、40MWであった。

注：燃料の集計にあたっては、2種類以上の燃料を使用する場合は、納入時点で最も多く使用する燃料で集計している。

(4) 納入地域別(表3)で見ると、台数では国内向けが前年に比べて115台減少の227台、輸出向けが14台減少の29台となった。出力では国内向けが前年に比べて506MW減少の1,446MW、輸出向けが535MW増加の3,505MWとなっている。

ア) 国内向けは総台数の89%、全出力の29%を占めており、全体に占める割合を前年と比べると、台数では変わらず、出力では11%減少となっている。また前年から台数で34%減少し、出力でも26%減少となっている。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型で26台、14MWの減少、中型で92台、275MWの減少、大型では台数は3台の増加、出力は217MWの減少となっている。前年は小型・中型は台数・出力ともに増加、大型は台数・出力ともに減少したが、今年は小型・中型で台数・出力ともに減少、大型は台数が増加、出力は減少となっている。また、前年に8台、165MWの実績があった船用主機向けは、今年は実績がなかった。

イ) 輸出は総台数の11%、全出力の71%を占めており、前年と比べた全体に占める割合は台数では変わらず、出力では11%増加となっている。前年より台数は14台減少、出力は535MW増加している。出力区分別に台数・出力を前年と比べると、小型は前年同様今年も実績なし、中型で18台、122MWの減少、大型で4台、655MWの増加となっている。輸出先別にみると、台数ではアジア(69%)、欧州(10%)、ロシア・NIS諸国(10%)で、前年実績のあった北米・大洋州・中東は、今年は実績なしとなっている。出力ではアジア(95%)、アフリカ(2%)、ロシア・NIS諸国(2%)となっている。台数・出力ともにアジア向けが最も多くなっているのは例年どおりである。アジア向けは前年と比べて、台数は9台減少、出力は1,440MW増加となっている。

(5) 被駆動機械別(表4、図6、図7)では、これまでと同様に、台数・出力とも発電機(G)がほとんどを占め、全体に占める割合は台数で98%、出力で99.9%であった。発電機(G)について出力区分別にみると、小型・中型では台数・出力ともに前年に比べて減少しているが、大型では台数・出力ともに増加している。それぞれ前年と比べると、台数では小型が22%、中型が42%の減少、大型が33%の増加である。出力では小型が22%、中型が40%の減少、大型が11%の増加と

なっている。水ポンプ（W）は全体で、前年に比べて3台、1.7MWの減少となっており、出力区分別にみると、小型は3台、2.8MWの減少、中型は台数が変わらず、出力は1.1MWの増加となっている。その他の被駆動機械では、前年に中型で8台、165MWの実績があった推進機または回転翼（PRR）が、今年は実績なしとなった。

- (6) 出力区分別（表5）を前年と比べると、小型は全体で台数・出力ともに減少している。さらに詳細な区分別にみると、0～146kWでは、台数では2台の減少、出力では0.1MWの増加、147～367kWでは4台、0.6MWの減少、368～735kWでは20台、13MWの減少となった。中型は全体で台数・出力ともに減少したが、さらに詳細な区分別にみると、736～4,412kWでは83台、111MWの減少、4,413～10,296kWでは16台、73MWの減少、10,297～16,180kWでは1台、10MWの減少、16,181～22,064kWでは10台、202MWの減少となった。大型は全体で台数・出力ともに増加し、さらに詳細な区分別にみると、22,065～44,129kWで3台、49MWの増加、44,130kW以上では、4台、390MWの増加となった。台数の多い順では、736～4,412kW、368～735kW、147～367kWとなっており、1・2番目は前年から変わっていないが、前年は4番目だった147～367kWが今年は3番目に多くなっている。また出力の多い順では44,130kW以上、736～4,412kW、22,065～44,129kW、となっており、前年と変わっていない。
- (7) 発電用ガスタービン（表6）の台数と出力を前年と比較すると、事業用は、国内では7台、1,080MWとなり、前年と比べて台数は3台の増加、出力は217MWの減少となった。輸出では16台、3,062MWとなり、前年と比べて8台、2,743MWの増加となった。自家用は、国内が215台、362MWとなり、前年と比べて101台、121MWの減少となった。輸出は13台、443MWとなり、前年と比べて22台、2,208MWの減少であった。事業用は、前年に比べて国内では台数は増加したものの出力が減少し、輸出は台数・出力ともに増加した。自家用は、前年に比べて国内、輸出とも台数・出力が減少した。

## 2. 2016年航空用ガスタービン生産統計概要

- (1) ターボジェットエンジン／ターボファンエンジンの新規製造状況については、昨年と同様にP-1固定翼哨戒機用のF7-10のみであり、製造台数は15台、合計推力は861kNであった。製造台数は昨年の6台から増加した。その他に国内で開発されたターボファンエン

ジンとして、HondaJetに搭載されているHF120があり、2014年に米国連邦航空局（FAA）の型式承認を取得し、2015年に出荷が開始されている。HF120エンジンは米国GEホンダ・エアロ・エンジンズ社製であり、米国内で製造されているため、本統計には含まれていない。（表7、図8参照）

- (2) 前年同様にターボプロップエンジンの新規製造は無く、ターボシャフトエンジンの新規製造状況は、AH-64D用のT700のみとなり、合計台数は12台、合計出力は16,104kWであった。製造台数は昨年の19台から減少した。（表8、図9参照）
- (3) 民間航空機用エンジン向けモジュールの新規製造状況については、過去5年間、航空輸送需要の回復に伴い増加傾向にあり、2016年は1,906台となり過去最高を更新した。従来機種用モジュール（V2500、CF34）が高い生産台数を維持しているだけでなく、新機種用モジュール（Trent1000、GENx、TrentXWB、PW1100G-JM）の生産が順調に増えている。2015年からPW1100G-JMエンジンのファンモジュールと低圧圧縮機モジュールの製造が開始されたが、2016年1月にPW1100G-JMを搭載したA320neoが商業運航を開始し、本格的な量産に入っている。（図10参照）
- (4) 日本の航空用ガスタービン生産全体の動向としては、近年防衛省向けエンジンの製造台数はあまり変化がないが、将来開発プロジェクトとしてXF5が開発されており、ステルス性能を持った先進技術実証機「X-2」に搭載され、2016年4月に初飛行を終えた。一方民間航空機用エンジン向けモジュールの製造台数については、増加傾向にあり、今後世界的な航空機需要の増加<sup>(1)</sup>に伴い、Trent1000、GENx、新機種のTrentXWB、PW1100G-JMのモジュール製造、部品製造が本格化することが予測される。更にビジネスジェット機であるGlobal7000及びGlobal8000に搭載されるPassport 20（2016年4月にFAAからエンジン型式承認を取得）や次世代大型民間輸送機B777Xシリーズに搭載予定のGE9X（2018年にエンジン型式承認を取得予定）等、新機種エンジンの国際共同開発が複数行われている状況<sup>(2)</sup>であり、今後も民間航空機用エンジン関連の占める割合が増加する傾向は続くと思われる。

出典(1)：(財)日本航空機開発協会「民間航空機の需要動向予測」

出典(2)：一般社団法人 日本航空宇宙工業会「平成29年版 日本の航空宇宙工業」, ISSN 0910-1527

### 3. 2016年過給機生産統計概要

(1) 生産台数(表9)については、主に自動車向けに使用される圧縮機翼車外径100mm以下のClass 1 過給機の実産台数は2010年以降増加を続ける世界自動車生産台数を背景に増加傾向を保っていたが、前年同様の約441万台となった。主に建設機械、陸上発電設備、小型船舶用機関等向けに使用される圧縮機翼車外径101mm～200mmのClass 2 過給機の実産台数は、前年比5%減の約3.4万台となった。主に船舶用機関向けに使用される圧縮機翼車外径201mm以上のClass 3以上の過給機については、Class 6, 7, 8の大型サイズは減少しているものの、Class 3, Class 4及びClass 5に

おいて、それぞれ42%増、7%増、40%増となっており、総じて22%増の約1.9千台となった。歴史的な国内新造船不況となった昨年からの底を抜けた影響によるものと考えられる。

(2) 生産型式数(表10, 図11)については、2016年には型式廃止が多く、前年比43型式減の140型式(全Class含む)であった。これはますます厳しくなる環境汚染物質に対する規制に対応するため、エンジン機関型式の淘汰が進んだことに伴い旧過給機型式も淘汰が進んでいるためと考えられる。今後も各種規制に合わせて、高度な環境技術を持つ日本メーカー製品の過給機のラインアップは更新されていくと考えられる。

## II. 統計

### 1. 陸船用ガスタービン

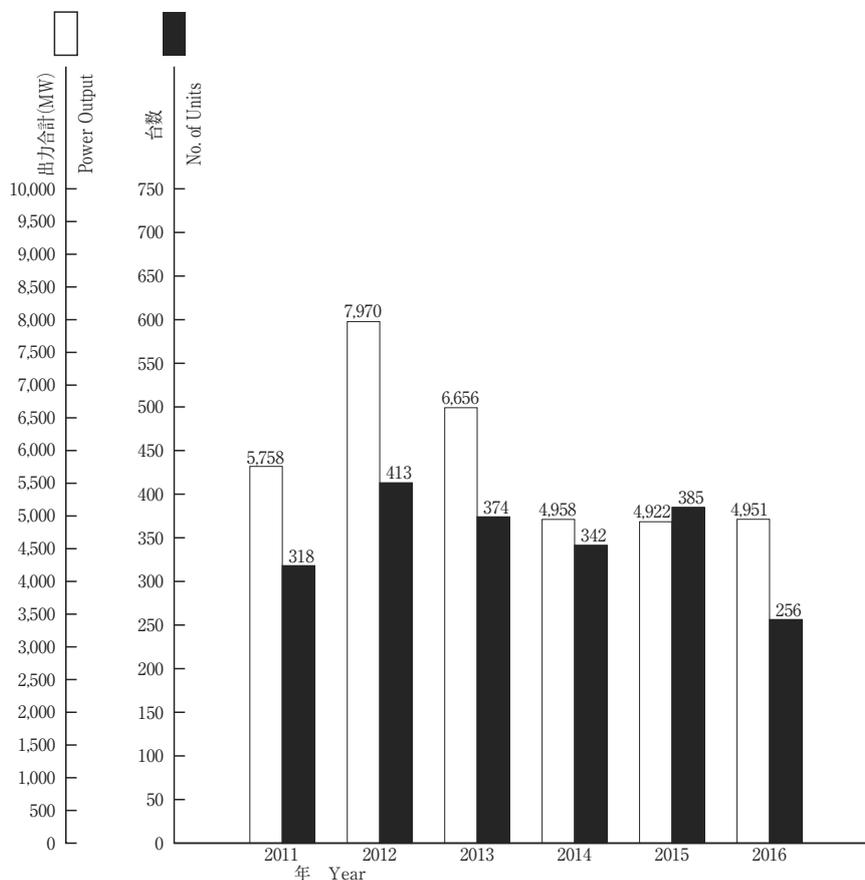


図1 陸船用ガスタービン

表1 2016年用途別生産台数及び出力 (kW)

用途 Application	区分 Code	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
ベースロード発電用 Generator Drive for Base Load	BL	4	180	18	103,485	28	4,563,260	50	4,666,925
ピークロード発電用 Generator Drive for Peak Load	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
非常用発電用 Generator Drive for Emergency	EM	79	34,503	122	244,934	0	0	201	279,437
商船用 Merchant Marine	M	0	0	0	0	0	0	0	0
艦艇用 Military Marine	MM	0	0	0	0	0	0	0	0
石油化学プロセス用 Oil Refinery and Chemical Process	OR	0	0	0	0	0	0	0	0
その他のプロセス用 Miscellaneous Chemical Process	PR	0	0	0	0	0	0	0	0
実験用 Experimental	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
空調用 Air Conditioning	ACD	0	0	0	0	0	0	0	0
その他 Miscellaneous	MC	3	605	2	4,225	0	0	5	4,830
合計 Total		86	35,288	142	352,644	28	4,563,260	256	4,951,192

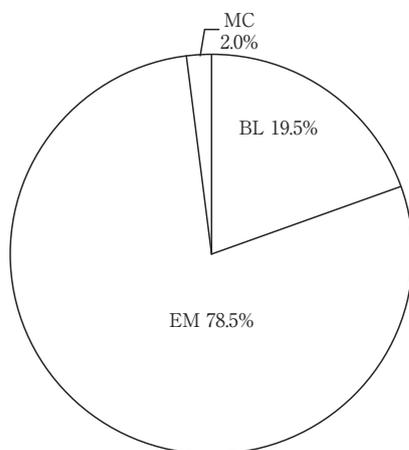


図2 2016年用途別生産台数割合 (%)

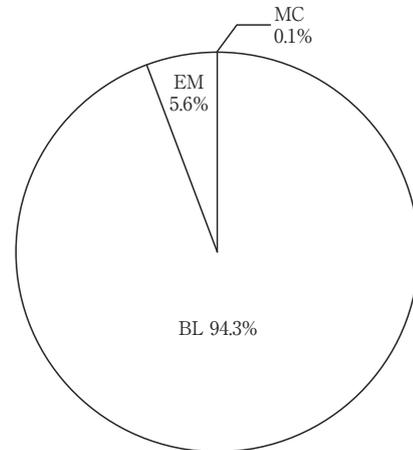


図3 2016年用途別出力割合 (%)

表2 2016年燃料別生産台数及び出力 (kW)

燃料種類 Kind of Fuel		区分 Code	Size 小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
			台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)	台数 Units	出力 Output(kW)
ガス燃料 Gaseous Fuel	液化天然ガス Liquefied Natural Gas	LNG	0	0	11	72,780	11	3,109,200	22	3,181,980
	天然ガス Natural Gas	GNG	0	0	5	13,190	17	1,454,060	22	1,467,250
	高炉ガス Blast Furnace Gas	GBF	0	0	0	0	0	0	0	0
	都市ガス Town Gas	GTW	4	180	7	25,395	0	0	11	25,575
	液化石油ガス	LPG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石油プラントオフガス	GOG	0	0	0	0	0	0	0	0
	石炭(ガス化)ガス	GCG	0	0	0	0	0	0	0	0
ガス燃料 小計 Sub Total			4	180	23	111,365	28	4,563,260	55	4,674,805
液体燃料 Liquid Fuel	灯油 Kerosene	T	15	5,825	22	54,159	0	0	37	59,984
	軽油 Gas Oil	K	13	5,180	24	44,980	0	0	37	50,160
	重油1種 Heavy Oil No.1	H1	54	24,103	73	142,140	0	0	127	166,243
	液体燃料 小計 Sub Total			82	35,108	119	241,279	0	0	201
その他 Miscellaneous Fuel		MF	0	0	0	0	0	0	0	0
合計 Total			86	35,288	142	352,644	28	4,563,260	256	4,951,192

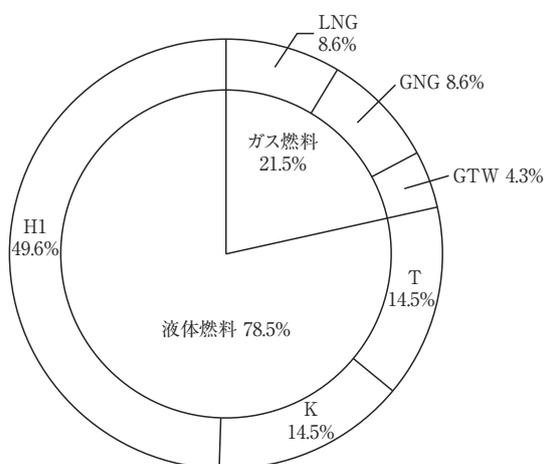


図4 2016年燃料別生産台数割合 (%)

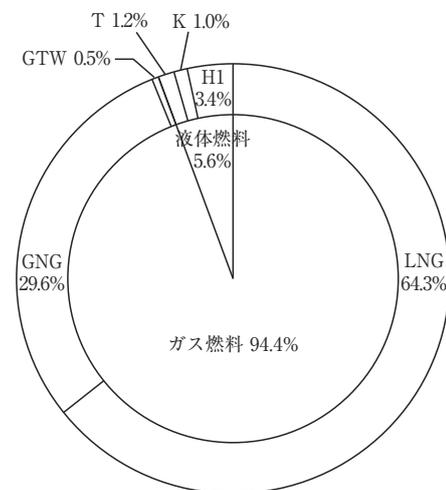


図5 2016年燃料別出力割合 (%)

表3 2016年地域別納入台数及び出力 (kW)

地域 Location		区分 Size	小型 Small Unit ~735kW	中型 Medium Unit 736~22,064kW	大型 Large Unit 22,065kW~	全出力 Total				
		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	
Domestic Use	北海道 Hokkaido	1	400	3	4,800	0	0	4	5,200	
	東北 Tohoku	7	3,400	2	2,250	0	0	9	5,650	
	関東 Kanto	39	16,471	76	183,874	5	952,660	120	1,153,005	
	中部 Chubu	12	4,535	27	89,430	1	40,700	40	134,665	
	近畿 Kinki	15	5,862	14	31,350	0	0	29	37,212	
	中国 Chugoku	3	1,180	4	8,800	0	0	7	9,980	
	四国 Shikoku	2	600	2	2,050	0	0	4	2,650	
	九州 Kyushu	7	2,840	6	8,800	1	86,450	14	98,090	
	沖縄 Okinawa	0	0	0	0	0	0	0	0	
	国内向け 小計 Sub Total		86	35,288	134	331,354	7	1,079,810	227	1,446,452
Export For	北米 North America	0	0	0	0	0	0	0	0	
	中南米 South Central America	0	0	0	0	0	0	0	0	
	アジア Asia	0	0	5	10,100	15	3,324,820	20	3,334,920	
	大洋州 Oceania	0	0	0	0	0	0	0	0	
	欧州 Europe	0	0	3	11,190	0	0	3	11,190	
	ロシア・NIS諸国 Russia・NIS	0	0	0	0	3	74,720	3	74,720	
	中東 Middle East	0	0	0	0	0	0	0	0	
	アフリカ Africa	0	0	0	0	3	83,910	3	83,910	
	輸出向け 小計 Sub Total		0	0	8	21,290	21	3,483,450	29	3,504,740
	合計 Total		86	35,288	142	352,644	28	4,563,260	256	4,951,192

表4 2016年被駆動機械別生産台数及び出力 (kW)

被駆動機械 Driven Machinery	区分 Size コード Code	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
		台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
発電機 Electric Generator	G	83	34,683	140	348,419	28	4,563,260	251	4,946,362
水ポンプ Water Pump	W	3	605	2	4,225	0	0	5	4,830
推進機または回転翼	PRR	0	0	0	0	0	0	0	0
動力計	DM	0	0	0	0	0	0	0	0
その他圧縮機	GC	0	0	0	0	0	0	0	0
合計 Total		86	35,288	142	352,644	28	4,563,260	256	4,951,192

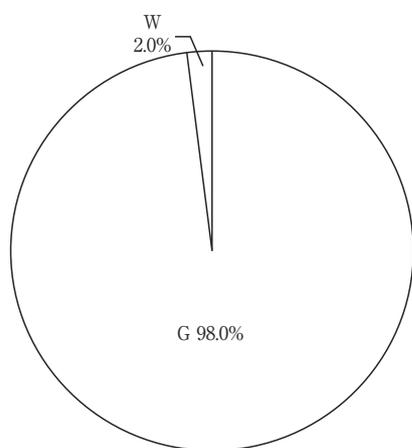


図6 2016年被駆動機械別生産台数割合 (%)

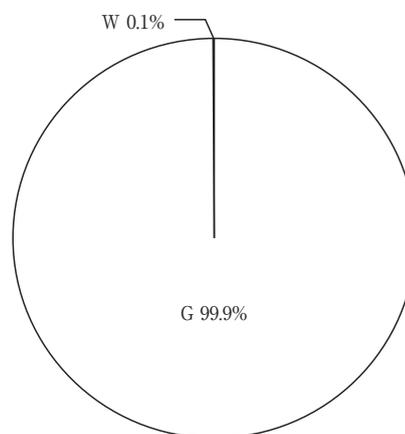


図7 2016年被駆動機械別出力割合 (%)

表5 2016年出力区分別生産台数及び出力 (kW)

出力区分 (kW) Units Output		台数 Units	出力 Output (kW)
小型 Small Unit 0~735kW	0~146	4	180
	147~367	20	4,815
	368~735	62	30,293
	小計 Sub Total	86	35,288
中型 Medium Unit 736~22,064kW	736~4,412	130	259,574
	4,413~10,296	12	93,070
	10,297~16,180	0	0
	16,181~22,064	0	0
小計 Sub Total	142	352,644	
大型 Large Unit 22,065kW~	22,065~44,129	9	255,750
	44,130~	19	4,307,510
	小計 Sub Total	28	4,563,260
合計 Total		256	4,951,192

表6 2016年発電用ガスタービン用途別生産台数及び出力 (kW)

区分		Size	小型 Small Unit ~735kW		中型 Medium Unit 736~22,064kW		大型 Large Unit 22,065kW~		全出力 Total	
			台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)	台数 Units	出力 Output (kW)
用途 Application	コード Code									
国内事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	7	1,079,810	7	1,079,810
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Public Use 国内事業用 小計 Sub Total			0	0	0	0	7	1,079,810	7	1,079,810
国内自家用	ベースロード発電用	BL	4	180	13	90,295	0	0	17	90,475
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	79	34,503	119	236,834	0	0	198	271,337
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Domestic/Private Use 国内自家用 小計 Sub Total			83	34,683	132	327,129	0	0	215	361,812
国内合計 Domestic Use Total			83	34,683	132	327,129	7	1,079,810	222	1,441,622
輸出事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	16	3,062,110	16	3,062,110
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Public Use 輸出事業用 小計 Sub Total			0	0	0	0	16	3,062,110	16	3,062,110
輸出自家用	ベースロード発電用	BL	0	0	5	13,190	5	421,340	10	434,530
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	3	8,100	0	0	3	8,100
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
For Export/Private Use 輸出自家用 小計 Sub Total			0	0	8	21,290	5	421,340	13	442,630
輸出合計 For Export Total			0	0	8	21,290	21	3,483,450	29	3,504,740
事業用	ベースロード発電用	BL	0	0	0	0	23	4,141,920	23	4,141,920
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	0	0	0	0	0	0	0	0
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Public Use 事業用 合計 Total			0	0	0	0	23	4,141,920	23	4,141,920
自家用	ベースロード発電用	BL	4	180	18	103,485	5	421,340	27	525,005
	ピークロード発電用	PL	0	0	0	0	0	0	0	0
	非常用発電用	EM	79	34,503	122	244,934	0	0	201	279,437
	試験用	XP	0	0	0	0	0	0	0	0
	その他	MC	0	0	0	0	0	0	0	0
Private Use 自家用 合計 Total			83	34,683	140	348,419	5	421,340	228	804,442
総計 Grand Total			83	34,683	140	348,419	28	4,563,260	251	4,946,362

Note : Code Explanation BL : for Base Load PL : for Peak Load EM : for Emergency

2. 航空用ガスタービン

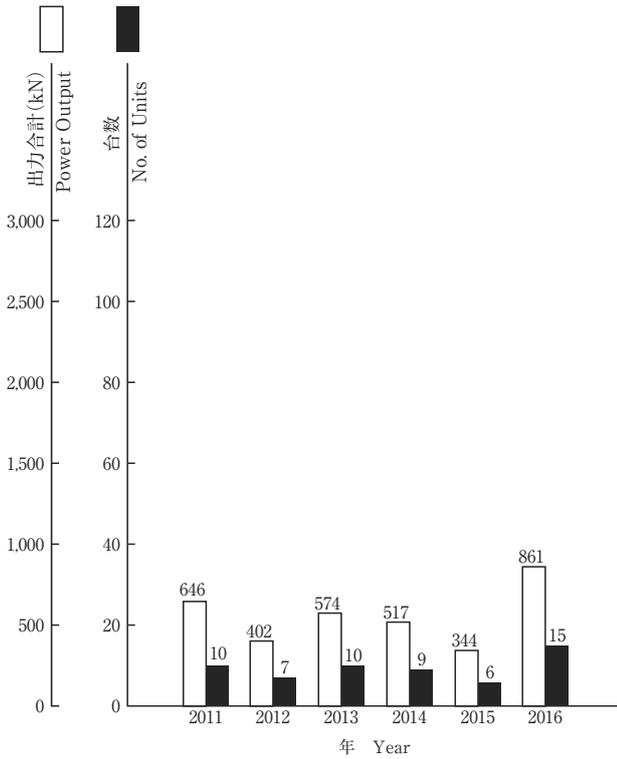


図8 ターボジェットエンジン／ターボファンエンジン

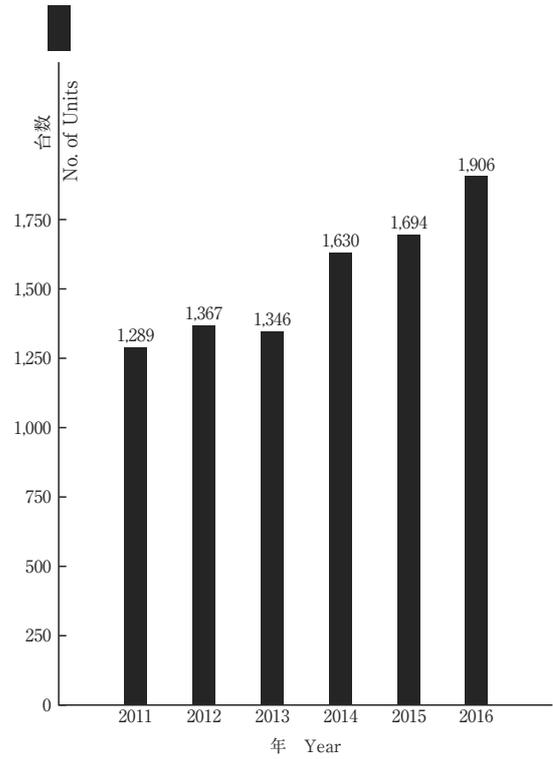


図10 民間航空エンジン用モジュール  
2015年の集計に誤りがあった為、今回の集計より訂正致しました。

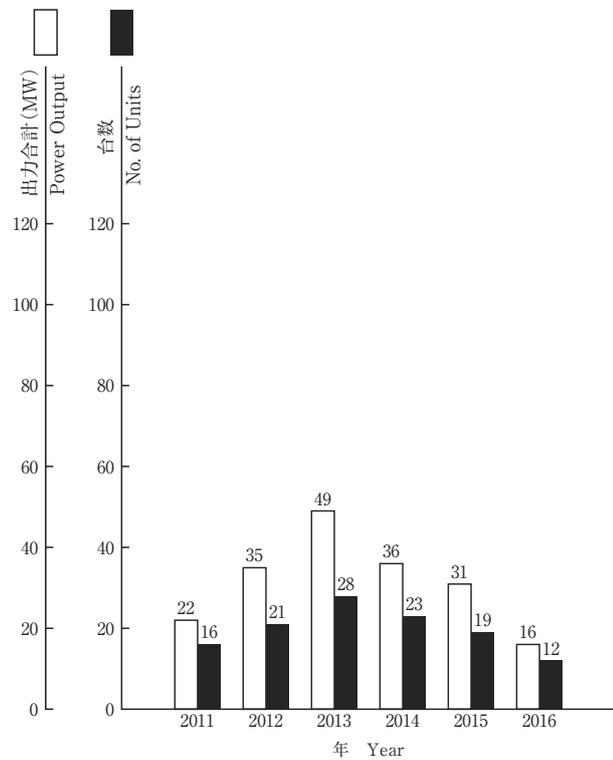


図9 ターボシャフトエンジン／ターボプロップエンジン

表7 2016年ターボジェットエンジン／ターボファン・エンジン  
生産台数及びスラスト合計 (kN)

生産台数 Number of Units	15	スラスト合計*1 Thrust	861
-------------------------	----	--------------------	-----

※1 海面上静止最大スラスト  
Maximum Thrust at Sea Level Static Condition

表8 2016年ターボシャフトエンジン／ターボプロップ・エンジン  
生産台数及び出力 (kW)

区分 Size	0~735kW		736kW~		全出力	
	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)	台数 Units	出力*2 Output (kW)
固定翼機 Fixed Wing Aircraft	0	0	0	0	0	0
ヘリコプタ用 Helicopter	0	0	12	16104	12	16,104
補助機関駆動用 Aux. Drive Units	0	0	0	0	0	0
合計 Total	0	0	12	16,104	12	16,104

※2 海面上静止常用出力  
Normal Output at Sea Level Static Condition

3. 過給機

表9 クラス別の年間生産台数

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	年間生産台数					
		2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
Class 1	0～100	約354万	約365万	約395万	約413万	約441万	約441万
Class 2	101～200	45,680	32,774	29,930	35,294	35,810	34,041
Class 3	201～300	643	538	574	641	668	951
Class 4	301～400	111	265	260	310	183	196
Class 5	401～500	57	73	74	161	214	299
Class 6	501～600	294	221	195	255	241	233
Class 7	601～700	362	274	150	232	184	148
Class 8	701～800	55	58	33	46	35	22
Class 9	801～900	214	130	94	81	11	25
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	24	0	0	0	0	0
合計 Total*		47,440	34,333	31,310	37,020	37,346	35,915

Class 1 の台数が多いため、Class 2～11の合計を示す。  
As the Production number of Class1 is too many, Total number only includes Class 2 to 11.

表10 クラス別の型式数\*

区分 Class	Size 圧縮機翼車外径(mm) Outside Diameter of Compressor Impeller	型式数					
		2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年
Class 1	0～100	64	64	64	55	55	50
Class 2	101～200	29	29	29	29	29	20
Class 3	201～300	18	18	18	18	18	15
Class 4	301～400	15	17	18	18	18	12
Class 5	401～500	10	16	14	16	16	13
Class 6	501～600	14	15	15	16	16	14
Class 7	601～700	17	18	15	17	17	7
Class 8	701～800	5	7	5	5	5	5
Class 9	801～900	8	10	10	9	9	4
Class 10	901～1000	0	0	0	0	0	0
Class 11	1001～	1	1	0	0	0	0
合計 Total*		117	131	124	128	128	90

※3 型式はいずれも排気タービンである。  
Every model is an exhaust turbine type supercharger.

※4 合計数は、圧縮機翼車外径100mmを越す分を示す。  
The figure shows total number of superchargers over 100mm in impeller diameter.

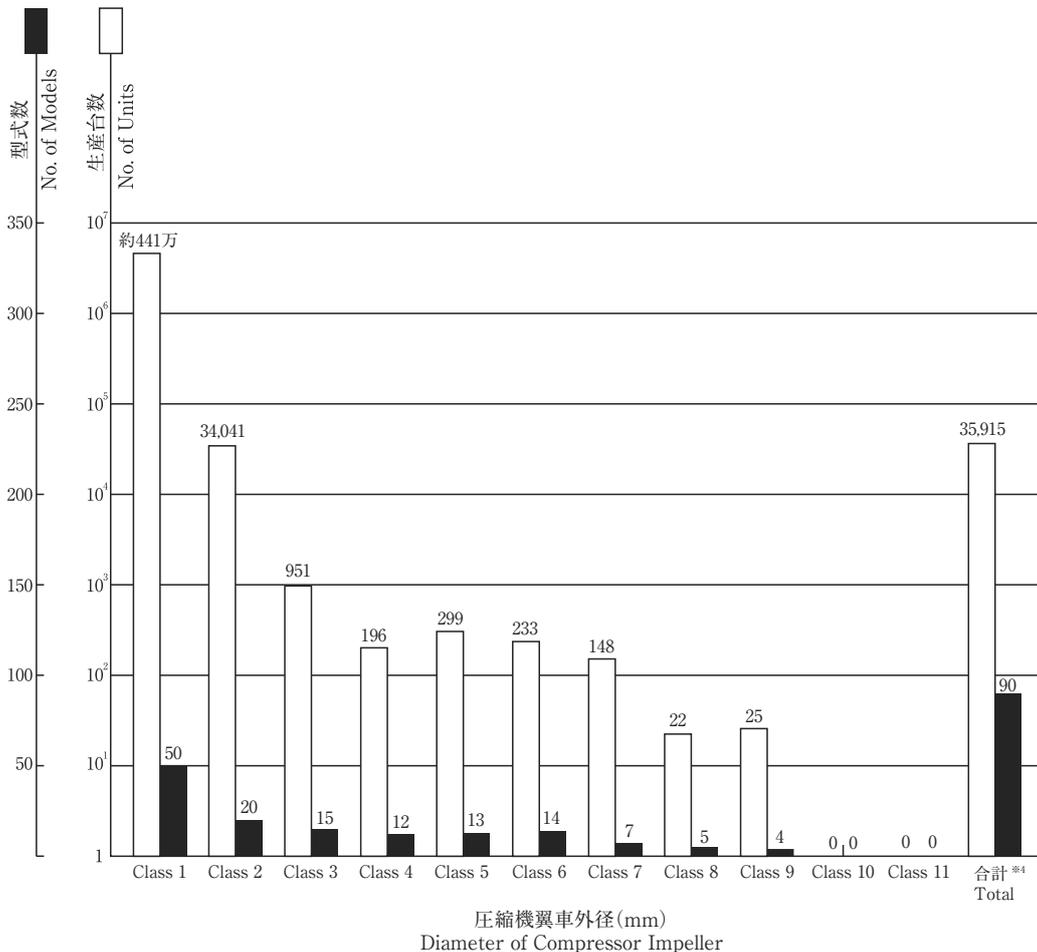


図11 2016年過給機生産台数及び型式数

## ASME Turbo Expo 2017 GTSJ展示 実施報告

国際委員会

日本ガスタービン学会では4年前から毎年ASME Turbo Expoの展示にブースを出展し、学会活動や日本のガスタービン研究開発に関する情報を発信しています。今年Charlotteで開催されたTurbo Expoでも、展示期間の6月27日から29日まで、事務局の中村さんを含む国際委員会展示ワーキンググループが中心となって展示を行いました。この事業はASME/IGTIとの協力協定に基づいて実施しており、出展費用や参加登録料などについて、IGTI事務局に大変お世話になっています。

展示ブースではこれまでと同様に、ポスターの展示と各種資料の配布を行いました。ポスターはGTSJの紹介2017年度版と、日本のガスタービン開発史を紹介するものの2点です。今回は来年盛岡で開催するAsian Congress on Gas Turbines (ACGT) 2018と、2019年に虎ノ門ヒルズで開催する次回のIGTCの情報を盛り込みました。また配布物は、(1)GTSJ英文パンフレット、(2)日本のガスタービン関連機関情報パンフレット、(3)学会ネーム入りクリアファイル(金閣寺)、(4)ACGT2018のパンフレット、(5)IGTC2019のパンフレットの5点と、盛岡市から提供された英文観光マップでした。これらを280部用意し、クリアファイルに入れて配布しました。

展示事業は4回目になり、実施側も少しずつ慣れてきました。ワーキンググループのメンバー以外に国際委員

や会員の方々にもご協力をいただき、無事円滑に展示を行うことができました。また、ASME/IGTIのスタッフの皆さんには親切に面倒を見ていただいています。皆さまのご協力に深く感謝します。

ブースは日本人の参加者が集う場としても機能しており、情報の伝達にも便利な拠点として定着してきました。外国人の皆さんにも知られるようになり、いろいろ声をかけていただきます。特にIGTCやACGTの情報を広く伝えることができているように感じます。英文論文集についての問合せも多くいただきます。これからもIGTIとの友好的な関係のもと、活動を継続して行きたいと思っております。ご協力を宜しくお願い致します。



GTSJ ブース

## ASME Turbo Expo 2017 参加報告

日本ガスタービン学会事務局  
中村優美

アメリカ・ノースカロライナ州Charlotteで開催のASME Turbo Expoに参加してまいりました。展示ブース出展も4回目となり、ブース設営等もスムーズに行うことができました。ブースでは、国際委員会メンバーの方々と共に来訪者の対応にあたり、GTSJの紹介や、来年開催のACGT(アジア国際会議)、2019年開催のIGTCの紹介をいたしました。会場では、今回もお世話になったASME-IGTI事務局のBarrangerさんや、Turbo Expoに参加していたEuropean Turbine Network(ETN)のBjorkqvist事務局長ともご挨拶ができました。講演会2日目には恒例のWomen in Engineering Eventがあり、こちらにも出席してまいりました。年々、参加者が増えていて、各国で若いパワフルな女性が活躍している様子を実感いたしました。また、今年もTurbo Expo会期中にGTSJ International Advisory Committeeのミーティングを、開催いたしました。今回は現地には詳しい方がいらっしゃらず、事前に新宿の学会事務局にてwebsiteで会議会場を探して予約をし、Charlotteに到着

してから会場に赴き、先方の方との打ち合わせをするという多少不安な準備作業となったのですが、結果的にはとてもよい環境で会議を開催することができ、安堵いたしました。

Turbo Expoに参加された国際委員会委員やGTSJ会員のみなさまのご協力により、今年も無事に、そして充実した日々を送ることができました。この場をお借りして御礼申し上げます。



IAC ミーティング

## 2017年度特別講演会報告

藤井 智晴  
FUJII Tomoharu

2017年4月19日に川崎重工業株式会社東京本社にて開催された2016年度通常総会の後、特別講演会が開催され、65名の参加者がありました。今年度は、株式会社JALエンジニアリングのエンジン整備センター長である萩川宏樹氏に、「エアラインが航空機エンジンに期待する運航品質と整備コスト」というタイトルで講演をお願いしました。萩川氏は、日本航空株式会社に入社以降、一貫して航空エンジンの整備に関わる業務に従事されており、エンジン整備に関わるプロフェッショナルの立場から、非常に興味深い内容の講演を行っていただきました。

講演では、まず、萩川氏がセンター長を務めるエンジン整備センターの体制と、整備センターでの作業状況やテストセルにおける試験状況などが写真で紹介されました。その後、JALグループが保有する各航空機で使用されているエンジンの整備形態として、「自社整備」「包括整備契約」「部品供給契約」の3種類で対応されていることが説明され、参加者の高い関心を集めていました。また、「最高の品質の追求は、最小の整備コストの実現へつながる」という本講演の結論となる言葉が、不具合の発生件数と整備費の関係を示すグラフとともに示されました。通常であれば、最高の品質を求めることで整備費が高くなってしまわないかと考えてしまいがちですが、この一見矛盾するような言葉を最初に示していただいたことで、その後の講演内容に対する期待が高まりました。

次に、運航品質に関わる項目として、定時出発率の考え方や目標値について説明され、IFSD (In Flight Shut Down: エンジン空中停止) の回数の推移について紹介されました。これらの説明の中で、わずかな回数しか発生しない出発の遅れやIFSDが、お客様からの信頼に及ぼす影響が大きいこと、特定の種類のエンジンや機体の引退により、IFSDの発生回数が大きく変化することが紹介され、普段よく航空機を利用する立場から大変興味深く拝聴しました。

続いて、エアラインが品質を向上させるための手段として、エンジンの状態のモニタリングにより不具合の予兆を捉えていることが説明され、これまでの定点観測で得られたデータではなく、フルフライトデータを活用した不具合の原因解明などに取り組んでいることが紹介されました。また、「不具合を予見し、壊れる前に予防保

全を行う」ことがエアラインとしての目標であることが説明され、航空機においてもIoTやビッグデータの活用が進んでいることが理解できました。

次に、エンジンの整備コストの内訳として、以前よりも整備費が増加していること、双発機時代となってエンジンの整備台数が減っているにもかかわらず、1台当たりのエンジン整備コストが増加している現実について紹介されました。また、個別契約と包括整備契約を比較した場合のコストに関わるメリットとデメリットを示した上で、モニタリングや部品の状態の把握、部品の廃棄率の把握などにより、整備費を正しく評価できる「目利き」が必要であることが強調されました。さらに、エアラインはメーカーと対抗するのではなく、連携しながら「目利き」を育てることが大事であること、品質の更なる向上がエアラインとメーカーにとってのWin-Winの関係をもたらすことが説明され、最初に示された結論に納得しました。

最後に、2005年8月12日に福岡空港を飛び立った航空機で発生したエンジントラブルの映像が紹介され、この8月12日が御巢鷹山での墜落事故が発生した日と同じ日であったことから、エアラインとしての責任を痛感したとの説明があり、大変印象的でした。

最後になりますが、今回、貴重なご講演をいただいた萩川氏、特別講演会にご参加いただいた皆様、会場を提供していただいた川崎重工業の皆様に深く感謝申し上げます。

(2016年度 ガスタービン技術普及委員会 委員長)



講演中の萩川宏樹氏

## 第29回ガスタービン教育シンポジウム報告

佐久間 康典  
SAKUMA Yasunori

2017年7月6日(木)、7日(金)の2日間にわたり、第29回ガスタービン教育シンポジウムが、東京都調布市の国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)調布航空宇宙センターにて開催された。参加者は83名(学生32名、社会人51名)と例年を上回り、大変盛況であった。ガスタービン教育シンポジウムは、関西地区でも隔年で開催されているが、今年度は関東地区のみでの開催の年にあたる。

この教育シンポジウムは学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設の見学を併せた企画である。今回も1日目に講義3テーマとJAXA調布航空宇宙センターの試験設備の見学を実施し、2日目に講義4テーマを実施した。

1日目は、集会行事委員会の輪嶋委員長による開会挨拶の後、3テーマの講義、(1)ガスタービン概論(渡辺紀徳氏)、(2)ガスタービンと伝熱工学(村田章氏)、(3)JAXAにおける航空エンジン研究紹介(山根敬氏)が行われた。その後、試験設備見学として、ファンや圧縮機を電動モータで回転させて性能を測定する回転要素試験設備、エンジン内部の高温・高圧環境を模擬してセクタ形態で燃焼器の性能試験を行うことができる高温高圧燃焼試験設備、遷音速域で巡航する航空機の空力特性とフラッタ特性の把握に用いられる遷音速フラッタ風洞、大型試験設備の稼動時などに一時的に増大する設備稼働電力のピークカットを目的として導入・運用されているガスタービン自家発電設備を見学した。設備見学終了後、調布航空宇宙センター内の食堂にて懇親会が行われた。懇親会には、シンポジウム出席者の7割以上が参加し、1日目の講師の先生方にも出席頂いた。会場の各所

で活発な議論と相互交流がなされ、参加者の方には有意義な時間を過ごして頂けたと思う。

2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(4)ガスタービンと流体力学(山本誠氏)、(5)ガスタービンと燃焼工学(岩井保憲氏)、(6)ガスタービンと材料工学(屋口正次氏)、(7)ガスタービンと制御工学(中村恵子氏)が行われた。それぞれの講義はガスタービンの基礎から最新の技術動向について専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の研究・開発などを進める上で多いに役立つ内容となっており、活発な質疑応答が行われた。

全講義終了後、2日間の講義に出席した参加者全員に修了の証として受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートにご協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改定に反映する予定である。

本シンポジウムでは2013年に出版され今年改定された「ガスタービン工学」を教材として用いており、その執筆者の先生方を中心に講師をお願いしている。「ガスタービン工学」は学会ホームページから購入することができ、今回の参加者の中にも事前に教材を購入し受講した方もいた。講義では時間の都合もあり、教材の一部しか扱うことができなかったが、参加された皆様にはこの教材を有効に活用し、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の作成・準備にご尽力頂いた講師の先生方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力を頂いた国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構の関係者各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景



懇親会風景

## 第45回日本ガスタービン学会定期講演会(松山)・見学会のお知らせ

第45回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。  
多数のご参加をお待ちしております。

**主 催：**公益社団法人 日本ガスタービン学会  
**協 賛：**協賛団体は、学会ホームページ (<http://www.gtsj.org/>) をご覧ください。

### 開 催 日：

- ・講演会 2017年10月18日(水), 19日(木)
- ・見学会 2017年10月20日(金)

### 開催場所：

- ・松山市総合コミュニティセンター  
〒790-0012 愛媛県松山市湊町7丁目5  
Tel：089-921-8222 <http://www.cul-spo.or.jp/comcen/>

### 講 演 会：

- ・講演会プログラムを次ページに示します。
- ・一般講演：空力，燃焼，材料，システム，伝熱，タービン等
- ・パネルセッション：航空エンジン技術開発プロジェクトの展望
- ・オーガナイズドセッション：ガスタービンへの溶射技術（日本溶射学会との共同企画）
- ・特別講演：四国遍路の歴史と文化 寺内 浩 氏（愛媛大学法文学部教授）

### 参加登録費（税込）：

- ・会員・協賛団体会員 14,040円（ただし、学生は論文集ありで4,320円，論文集なしで1,080円）
- ・会員外 19,440円（ただし、学生は論文集ありで7,560円，論文集なしで4,320円）

### 宿 泊：

会期中のご宿泊は、各自で手配ください。

### 懇 親 会：

- ・第1日目の講演会終了後、「松山モノリス」（講演会場より徒歩1分）にて懇親会を開催します。  
懇親会参加費（税込）：4,320円

### 見 学 会：

- ・日 時：10月20日(金) 7：50～17：50  
\*JR松山駅（17：20着），松山空港（17：50着）にて解散予定
- ・見学先：三浦工業(株)，(株)井関松山製造所等の見学を予定しています。
- ・定 員：45名程度，先着順，講演会参加登録者に限ります。
- ・参加費：6,480円
- ・申込締切日：10月6日(金)

### 参加申込方法：

- ・学会ホームページ (<http://www.gtsj.org/>) から登録されるか，本号掲載の参加申込書に必要事項をご記入の上，学会事務局宛にお申込みください。参加登録は，受付の混乱を避けるため，事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

### 関連情報：

- ・講演会の前日（10月17日(火)）に，愛媛大学にて大学生・高専生・高校生・一般の方を対象とする「ガスタービン市民フォーラム2017」を開催します。参加は無料です。
- ・演題：ガスタービンのお話 -空を飛ぶ，電気をつくる，機械を動かす-
- ・講師：石田 克彦氏（川崎重工業株式会社）
- ・日時：10月17日(火) 16：20～17：50（15：50開場）
- ・会場：愛媛大学 城北キャンパス 南加記念ホール

## 第45回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会 (2017年10月18～20日)

## 参加申込書

(公社) 日本ガスタービン学会 行 FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095

参加者の連絡先 (複数人申込まれる場合は、代表者の方の連絡先)

会社/大学等名称	
所在地	〒
TEL/FAX	
E-MAIL	

## 参加者名

フリガナ 氏 名*1	所 属	TEL/FAX E-MAIL	所属学会 (GTSJ会員 番号)	会員 資格 (正/学)	懇親会 (18日) (4,320円)	見学会 (20日) (6,480円)
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加
					出席 欠席	参加 不参加

\*1 登壇者の方は氏名の後に○を記入してください。

論文集なし (学生のみ) の場合は、下記の参加登録費の金額に反映してください。

## 【事務局への連絡事項】

払込方法 (○印をつけてください) 参加登録料・参加費入金予定日 月 日 (10月17日までに払込みください)

- 銀行 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1812298)
- 郵便振替 (00170-9-179578)
- 現金書留

送金金額 \_\_\_\_\_円 (内訳: 参加登録費 \_\_\_\_\_円 懇親会参加費 \_\_\_\_\_円 見学会参加費 \_\_\_\_\_円)

当日支払いは原則として受け付けません。(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

\*請求書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

\*領収書の発行について

- 要 宛名 ( )
- 不要

## 第45回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第1日(暫定)

(一般講演 講演時間15分 討論5分, [学]: 学生優秀講演賞の審査対象講演, 連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ)

	A室	B室	C室
第1日 10月18日 9:00	空力(翼列・数値解析) 座長: 未定	燃焼 座長: 未定	材料(合金) 座長: 未定
9:20	[A-1]三段軸流圧縮機の数値解析と実験的検証 *佐久間康典, 渡辺紀徳, 姫野武洋(東大)	[B-1] [講演中止]	[C-1]発電用ガスタービン動翼の拡散ろう付け補修技術 *齋藤大蔵, 北山和弘, 酒井義明(東芝)
9:40	[A-2]低圧タービン静翼列環状リグフラッタ試験のミスチューン解析 *服部博明, 青塚瑞穂, 谷直樹(IHI), 賀澤順一(JAXA)	[B-2][学]航空用希薄ステージバーナの燃料分布及び排出ガス特性に及ぼすメインノズル旋回翼と燃料噴射孔の周方向位置関係の影響 *上坂峻也, 江口貴広(法政大院), 松浦一哲, 山本武(JAXA), 林茂(法政大)	[C-2]Ni基単結晶超合金の硫化腐食挙動 *小泉裕, 原田広史, 小林敏治, 横川忠晴, 大澤真人, 坂本正雄, 湯山道也, 川岸京子(物材機構)
10:00	[A-3]ハーモニックバランス法の解析手法による翼振動励振力への影響 *谷直樹, 青塚瑞穂(IHI)	[B-3][学]液体燃料希薄多段燃焼器の一段目に用いる交差噴流衝突逆流炭燃焼の排出特性 *酒井恒太(法政大院), 中島優(法政大院・現川崎重工), 伊藤慎吾, 横山貴一, 林茂(法政大)	[C-3]選択的レーザー溶融法により作製した $\gamma'$ 析出型Ni基超合金IN939の組織と高温強度 *寛幸次, 平塚耀(首都大)
10:20	[A-4]重合格子手法による遷音速振動翼列風洞の特性解析 *立石敦, 渡辺紀徳, 姫野武洋, 賀澤聖治(東大)	[B-4][学]マイクロガスタービン用アナユラ型燃焼器の可視化と数値解析 *八幡和典(新潟大院), 松原幸治, 松平雄策(新潟大), 小式澤広之, 阿部和幸(YSEC)	[C-4]20kgインゴットレベルでのタービン翼用Ni基超合金の直接完全リサイクル 宇多田悟志, 横川忠晴, 大澤真人, 小林敏治, 川岸京子, 原田広史(物材機構), 井口登雄, 鈴木進輔(早大), 米田隆志(ヨネダアドキャスト)
10:40	A室 空力(翼列・複雑流) 座長: 未定	B室 燃焼 座長: 未定	C室 材料(合金) 座長: 未定
11:00	[A-5]発電用大型蒸気タービン最終段落の極低負荷解析 *田沼唯士(帝京大), 奥田洋司, 橋本学(東大), 洪川直紀, 奥野研一, 佃知彦(東芝), 秋山久実(オフィスケイ)	[B-5]希薄予混合燃焼器の燃焼特性に与える円錐形遮熱板の広がり角の影響 *吉田征二, 山本武, 牧田光正, 下平一雄(JAXA)	[C-5][学]選択的レーザー溶融法および電子ビーム溶融法で積層造形したIN718のクリープ特性 *上垣内梓, 郭妍伶, 寛幸次(首都大)
11:20	[A-6]タービン前方段のチップクリアランス損失低減検討 *渡邊浩史, 藤村大悟, 中村剛士, 坂元康朗, 石坂浩一(三菱重工)	[B-6]アンモニア用ガスタービン燃焼器の研究開発 *倉田修, 壹岐典彦, 井上貴博, 松沼孝幸, 辻村拓, 古谷博秀(産総研), 小林秀昭, 早川晃弘(東北大)	[C-6][学]選択的レーザー溶融法を用いて積層造形した固溶強化型Ni基超合金IN625の高温強度と組織 *磯部諒也(首都大院), 寛幸次(首都大)
11:40	[A-7]遷音速風洞試験を用いた航空エンジンファンの乱流遷移に関する研究 *林亮輔, 田中望, 榎友謙, 室岡武, 加藤大(IHI), 賀澤順一, 榎本俊治, 西澤敏雄(JAXA)	[B-7]2MW級ガスタービン用ドライ水素専焼低NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発 *古賀和樹, 堀川敦史, 岡田邦夫, 飴雅英(川崎重工)	[C-7][学]EBM・SLM積層造形法により作製したステンレス鋼の機械的性質および組織 *秋野一輝(首都大院), 寛幸次(首都大)
12:00	[A-8]翼面の気流改善のためにプラズマアクチュエータへ要求されるスラストの調査 *浅海典男, 山口方正(IHI), 松野隆, 川添博光(鳥取大)	[B-8] [講演中止]	[C-8][学]MoSiB <sub>2</sub> TiC合金のミクロ組織形成と材料特性に及ぼすTiの効果 *畠山友孝(東北大院), 吉見享祐(東北大)
12:20	[A-9]ガスタービン用圧縮機翼列流れへの湿りの影響に関する数値的研究 *森口昇太, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟(東北大), 田中隆太, 青塚瑞穂(IHI)		[C-9][学]第1世代モンブチック合金の高温クリープ変形によるミクロ組織劣化 *鎌田詩歩(東北大院), Yuanyuan Lu, 吉見享祐(東北大)
12:40	A室	(昼休憩)	C室
14:00	OS: ガスタービンへの溶射技術 座長: 未定		空力(翼列・音響) 座長: 未定
14:20	[A-10]最新セラミックスコーティング技術 *鈴木雅人(産総研)		[C-10][学]垂直入射管での吸音パネル頭部切欠き形状の吸音特性への影響 *稲垣諒, 赤見坂祐輔, 藤秀実, 佐々木大輔(金沢工大), 石井達哉, 榎本俊治, 長井健一(東大)
14:40	[A-11]最新のコーティング技術 *深沼博隆(プラズマ技研)		[C-11][学]ターボジェットエンジンのシェブロンノズルに関する研究 *玉田岳洋, 土屋利明(金沢工大)
15:00	[A-12]コーティングの密着性評価法の検討 *山崎泰広(千葉大)		[C-12][学]遠心圧縮機内部に発生するディフューザ失速の流量低下に伴う拡大メカニズム *乾哲也(早大院), 藤澤信道, 太田有(早大)
15:20	[A-13]高温酸化を利用した遮熱コーティングの耐はく離性改善 *小川和洋(東北大)		[C-13][学]軸流圧縮機のウインドミル状態における動翼特性と内部流れ構造 *平山卓, 太田有(早大), 後藤尚志, 加藤大(IHI)
15:40	全体討論 ガスタービンへの溶射技術と今後の展望		[C-14][学]遷音速多段軸流圧縮機の静翼列流れに及ぼす動翼列の三次元効果に関する全周DES解析 *齋藤誠志朗(九大院), 山田和豊, 古川雅人(九大), 松岡右典, 丹羽直之(川崎重工)
16:00	A室		[C-15][学]超高負荷軸流タービン直線翼列内の遷音速条件下での流れの挙動 *矢崎和貴, 田澤敏之(法政大院), 辻田星歩(法政大), 金子雅直(東京電機大)
16:30	特別講演 座長: 松沼 孝幸(産総研)		
18:00	[S-1] 四国遍路の歴史と文化 寺内 浩(愛媛大学法文学部附属四国遍路・世界の巡礼研究センター)		
18:30	懇親会 司会: 平野 孝典(拓大)		
20:30	[松山モリス] (※講演会場から徒歩1分)		

## 第45回日本ガスタービン学会定期講演会プログラム：第2日(暫定)

(一般講演 講演時間15分 討論5分, [学]: 学生優秀講演賞の審査対象講演, 連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ)

	A室	B室	C室
第2日 10月19日	システム・サイクル 座長: 未定	空力(翼列・実験) 座長: 未定	伝熱・タービン 座長: 未定
9:00	【A-16】高空環境におけるエンジン性能最適制御の研究 *田頭剛, 國安清治, 杉山七契(JAXA)	【B-16】[学]超高負荷タービン直線翼列の漏れ損失の低減に関する実験的研究 - 間隙高さがスキューラ効果に及ぼす影響 - *脇田悠介(法政大院), 秋山浩二(法政大院), 辻田星歩(法政大)	【C-16】高温高速固気二相流の数値シミュレーション *鈴木正也, 山根敬(JAXA)
9:20	【A-17】エンジン性能に湿度、降雨が及ぼす影響 *二村尚夫(JAXA)	【B-17】[学]圧縮機翼列実験の環境整備 *山城紹吾, 安藤宏晃(高知工科大), 伊志嶺朝史, 野崎理, 筒井康賢(高知工科大)	【C-17】低圧タービン翼列後流の混合や下流翼列との干渉に与える下流翼列速度三角形の違いの影響 *樫川卓也, 浜辺正昭, 古川樹生(IHI), 船崎健一(岩手大)
9:40	【A-18】中容量ガスタービン用動作解析シミュレータの開発 *鈴木晃純(東北大院), 中野晋(東北大), 田中翔悟(東北大院), 竹田陽一(東北大), 菅原由貴(東北電力)	【B-18】[学]小型ガスタービン試験装置の試作について *宮城喜一, 河端恭平, 水野佑樹(高知工科大), 野崎理, 筒井康賢(高知工科大)	【C-18】動翼シラウド漏れ流れ制御による蒸気タービンの段効率向上 *柴田貴範, 福島久剛, 瀬川清(MHPS)
10:00	【A-19】超音速機推進機関としての再熱効果の検討 *福山佳孝, 山根敬(JAXA)	【B-19】[学]噴霧流れ中の圧縮機翼面周りの液挙動に関する研究 - 翼面の濡れ性の影響 - *村田遼(東大院), 渡辺紀徳, 姫野武洋, 鶴沢聖治, 井上智博, 佐久間康典(東大)	【C-19】フィルム冷却効率予測のための計測データ駆動型乱流モデリング *三坂孝志(東北大), 浅海典男, 出田武臣(IHI), 大林茂(東北大)
10:20	【A-20】超高バイパス比ダクト・ターボファンのサイクル特性 *根本勇	【B-20】[学]マイクロガスタービンへの水噴射に関する研究 *上田翔太, 土屋利明(金沢工大)	【C-20】フィルム冷却タービン翼の熱伝達評価における壁面温度条件の影響 *高橋俊彦, 酒井英司(電中研)
10:40	A室		C室
	運用・耐久性 座長:		伝熱・タービン 座長: 未定
11:00	【A-21】等温場熱サイクル条件下における遮熱コーティングのはく離予測手法 *岡田満利, 百合功, 久松暢(電中研), 有川秀行, 児島慶享, 泉岳志(MHPS)		【C-21】[学]タービン翼内部の複雑冷却流路内における流れ場の可視化・PIV計測 *小田桐輝(岩手大院), 船崎健一(岩手大), 寺部世界(岩手大院), 筋雅英, 堀内豪(川崎重工)
11:20	【A-22】超合金模擬冷却孔からのクリープ・疲労微小き裂の進展 *岡崎正和, 山岸郷志, 杉原一興, 與邦国優希(長岡技科大)		【C-22】[学]翼列試験装置を用いたガスタービン翼フィルム冷却における冷却孔複合角に関する研究 *菊池史哉(岩手大院), 船崎健一(岩手大), 田代一誠(岩手大院), 出田武臣, 田中雄飛(IHI)
11:40	【A-23】高性能冷却構造を有するガスタービン動翼の経年劣化評価 *伊藤明洋, 小林大輔(中部電力)		【C-23】[学]流れ制御デバイスを用いたフィルム冷却の高効率化に関する研究 - 高密度比条件におけるデバイス最適形状検討 - *河村朋広(岩手大院), 瀧澤隼人, 船崎健一(岩手大), 田川久人, 森崎哲郎(MHPS)
12:00	【A-24】長寿命ガスタービン油の開発 *伊藤岳史(JXTGエネルギー)		【C-24】[学]逆熱伝導解析による翼型熱交換器の伝熱性能評価 *中西仁(東工大院), 伊藤優, 長崎孝夫(東工大)
12:20	A室	(昼休憩)	
13:50	学生優秀講演賞 審査結果報告 座長: 松沼 孝幸 (産総研)		
	A室	パネルセッション: 航空エンジン技術開発プロジェクトの展望 座長: 渡邊 裕章 (九大), 渡辺 紀徳 (東大)	
14:00	【登壇者】 ・今成 邦之 (IHI) ・西澤 敏雄 (JAXA) ・高原 雄児 (航装研) ・碓川 宏樹 (JALエンジニアリング) ・渡辺 紀徳 (東大)		
16:00	※9月7日時点での暫定プログラムです。		

## 2017年度 第2回見学会のお知らせ

2017年度第2回見学会を、JFEスチール株式会社 東日本製鉄所千葉地区にて開催致します。概要は以下のとおりです。

### 1. 日時

2017年 11月 10日(金) 13:00 ~ 17:00 (予定)

JR蘇我駅集合・解散

### 2. 場所および内容

JFEスチール株式会社 東日本製鉄所 千葉地区 (千葉県千葉市川崎町)

自家発電所, 製鉄関連設備等の見学

### 3. 参加要領

(1)参加資格: 大学生以上

(2)定員: 40名程度 (申し込み多数の場合, お断りする可能性があります)

(3)参加費 (税込): 当日お支払ください (移動バス代含む)

正会員 3,780円

学生会員 2,700円

非会員 4,860円

学生非会員 2,700円

### 4. スケジュール

13:00	JR蘇我駅集合, 貸切バスにて移動
13:15 ~ 13:45	製鉄所紹介ビデオ
13:45 ~ 16:15	自家発電所, 製鉄関連設備等見学
16:15 ~ 16:45	千葉地区の発電設備紹介, 質疑応答
17:00	JR蘇我駅解散

\*参加者には別途, 集合場所・スケジュール等の詳細をお知らせする予定です。

### 5. 申込方法

「2017年度 第2回見学会 参加申し込み」と明記のうえ, 下記の情報を, E-MailまたはFAXにて学会事務局 (E-mail: gtsj-office@gtsj.org, Fax: 03-3365-0387) までお送り下さい。

(1)氏名 (ふりがな)

(2)性別

(3)会員種別 (会員の場合は, 会員番号)

(4)ご所属 (名称, 部署)

(5)電話番号

(6)E-Mail

◆申込締切: 2017年10月20日(金)

申込者全員に, 参加可否を10月30日(月)までにお知らせいたします。

学会からの連絡がない場合には, お問い合わせください。

## 2017年度日本ガスタービン学会賞候補募集のお知らせ（再掲）

応募締切日：2017年10月31日(火)

日本ガスタービン学会では、下記の趣旨により2年毎に学会賞（論文賞、技術賞および奨励賞）の贈呈を行っております。つきましては、今年度も下記要領により学会賞の募集を行うこととなりましたので、お知らせ致します。

### 募集要領

#### 1. 日本ガスタービン学会賞の趣旨

本会はガスタービンおよびエネルギー関連技術に関する工学および技術の発展を奨励することを目的として、優れた論文、技術ならびに新進会員個人の業績に対して、それぞれ日本ガスタービン学会論文賞、技術賞、奨励賞を贈り、表彰を行う。

#### 2. 対象となる業績

- (1)論文賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) に2013年11月以降2017年10月迄に公表された論文で、独創性があり工学および技術に寄与したものの。
- (2)技術賞：ガスタービンおよびエネルギー関連の技術で画期的な新製品の開発、製品の品質または性能の向上、材料開発、制御計測および保守技術の向上等に寄与したものの。
- (3)奨励賞：日本ガスタービン学会誌および日本ガスタービン学会英文電子ジャーナルJGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) に2013年11月以降2017年10月迄に公表された独創的な論文（本人が中心的役割を果たしたものの）。なお、萌芽的研究も対象とする。  
奨励賞の候補者は、1982年4月2日以降生まれの個人とする。ただし、論文賞、技術賞あるいは奨励賞をすでに受けた者および今年度の論文賞、技術賞内定者は奨励賞を受けることはできない。

#### 3. 受賞件数

論文賞2件、技術賞2件、奨励賞2名程度とする。

#### 4. 表彰の方法

審査の上、表彰状および賞牌を授与する。

#### 5. 表彰の時期

表彰は、2018年4月開催予定の日本ガスタービン学会総会において行う。

#### 6. 応募の方法

公募によるものとし、論文賞、技術賞は推薦または本人より申請、奨励賞は推薦による。なお、一度申請して受賞しなかったものでも、再度応募して差し支えない。

#### 7. 提出書類

推薦または申請には、本会の所定用紙に必要事項を記載して、1件につき正1通、副2通（コピーで可）の計3通を提出する。

・日本ガスタービン学会賞（論文・奨励）申請書・推薦書

・日本ガスタービン学会賞（技術）申請書・推薦書

所定用紙は本会ホームページ（<http://www.gtsj.org/>）からダウンロード可能。

#### 8. 提出締切日

2017年10月31日(火)17時必着

#### 9. 提出先

〒160-0023

東京都新宿区西新宿7-5-13

第3工新ビル402

公益社団法人日本ガスタービン学会

表彰委員会 宛

## 第46回ガスタービンセミナー開催のお知らせ（予告）

第46回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

今回は、「ガスタービンおよびエネルギー関連技術の最新動向」（予定）をテーマとしています。最前線で活躍されている方々のご講演を通して、航空用および発電用のガスタービンに関する最新技術動向を学ぶと共に、エネルギーに関する幅広い技術分野の知見を高める内容とします。

（詳細につきましては、11月号学会誌、ホームページ等で後日お知らせいたします）

1. 日 時：2018年1月25日(木) 9：30～17：00（予定）  
26日(金) 9：30～17：00（予定）
2. 場 所：首都大学東京 南大沢キャンパス  
〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1  
京王線相模原線「南大沢」駅改札口から徒歩約5分
3. テ ー マ：「ガスタービンおよびエネルギー関連技術の最新動向」（予定）
4. 参加要領：11月号学会誌、当学会ホームページに掲載予定です。（<http://www.gtsj.org/>）

### 次号予告 日本ガスタービン学会誌2017年11月号（Vol.45 No. 6）

#### 特集 ガスタービンを支える最新の材料技術の現状（動向）と課題

巻頭言 吉岡 洋明（愛媛大学）

製造性に優れた高強度Ni基鍛造合金およびその製造プロセス 芝山 隆史，太田 敦夫，今野 晋也（三菱日立パワーシステムズ）

タービン翼用超合金の進化とリサイクル技術開発 宇多田 悟志（物質・材料研究機構）

発電用ガスタービン高温部品の寿命評価のための材料技術 岡田満利（電力中央研究所）

熱過渡現象を考慮した遮熱コーティング部材の熱疲労破損特性 岡崎 正和，与那国 優希（長岡技術科学大学）

最新セラミックスコーティング技術 鈴木 雅人（産業技術総合研究所）

コールドスプレー法を用いたガスタービン高温部材補修の可能性 小川 和洋（東北大学）

発電用ガスタービン高温部品における補修技術開発（東芝）

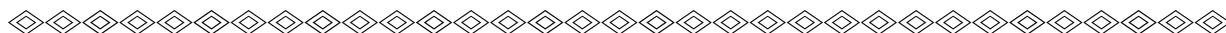
#### 文部科学大臣表彰受賞記念記事

Hondaでのターボファンエンジン開発30年の取組み 野田 悦生（本田技術研究所）

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

## ○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催/協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本機械学会	No.17-70講習会「『伝熱工学資料(改定第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用」	協賛	2017/9/28-29	日本機械学会 会議室	日本機械学会熱工学部門 電話：(03) 5360-3502
日本機械学会 関西支部	第351回講習会「応力計測の基礎とその応用(デモンストレーション付き)」	協賛	2017/10/16-17	大阪科学技術センター 8階 中ホール	URL: <a href="http://www.kansaijsme.or.jp/">http://www.kansaijsme.or.jp/</a>
日本機械学会	No.17-102講習会「見学会付」[プラントオペレーションのスマート化最前線]	協賛	2017/10/17	常陸那珂火力発電所, 東海テラパーク	日本機械学会 電話：(03) 5360-3505
日本機械学会 関西支部	第18回秋季技術交流フォーラム	協賛	2017/10/21	神戸大学 六甲台キャンパス	URL: <a href="http://www.kansaijsme.or.jp/">http://www.kansaijsme.or.jp/</a>
気象影響防御技術 コンソーシアム	第2回 WEATHER-Eye オープンフォーラム「航空輸送を特殊気象(雪氷・雷・火山灰等)から守るために」	協賛	2017/11/10	東京大学 武田ホール	URL: <a href="http://www.aero.jaxa.jp/publication/event/weye2017.html">http://www.aero.jaxa.jp/publication/event/weye2017.html</a>
日本機械学会	第1回機械材料・材料加工部門 若手ポスターシンポジウム	協賛	2017/11/17	早稲田大学 西早稲田キャンパス 63号館 1F	URL: <a href="http://mp-poster.org/2017/">http://mp-poster.org/2017/</a>



## ▷ 入会者名簿 ◁

## 〔正会員〕

和田 正一(オリンパス)  
千葉 秀樹(酒田共同火力発電)  
宮久 靖夫(三菱日立パワーシステムズ)

今村 謙一(川崎重工業)  
本田 浩範(三菱重工業)

川勝 光紘(川崎重工業)  
宮城 能智(三菱重工業)

## 〔学生会員〕

河村 朋広(岩手大学大学院)  
磯部 諒也(首都大学東京大学院)  
岩倉 正尚(法政大学大学院)  
任 憲鵬(法政大学大学院)  
平山 卓(早稲田大学)

稲垣 諒(金沢工業大学大学院)  
岩崎 祐介(東京大学)  
上坂 峻也(法政大学大学院)  
矢崎 和貴(法政大学大学院)

宮城 喜一(高知工科大学大学院)  
森口 昇太(東北大学大学院)  
酒井 恒太(法政大学大学院)  
脇田 悠介(法政大学大学院)

## 2017年度役員名簿

- 会長** 船崎 健一 (岩手大)
- 副会長** 油谷 好浩 (東芝)
- 法人管理担当執理事** 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大) (兼務), 渋川 直紀 (東芝), 福泉 靖史 (三菱重工), 渡辺 紀徳 (東大)
- 公益目的事業担当執理事** 太田 有 (早大), 谷村 聡 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 福山 佳孝 (JAXA), 松岡 右典 (川崎重工), 松沼 孝幸 (産総研), 山根 秀公 (防衛装備庁), 山本 悟 (東北大), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大) (兼務)
- 理事** 川岸 京子 (物材研), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 萩川 宏樹 (JALエンジニアリング), 松崎 裕之 (東北発電工業)
- 監事** 田沼 唯士 (帝京大), 佃 嘉章 (三菱重工)

## 2017年度委員名簿 (順不同)

2017年7月26日現在

○は委員長

- 倫理規定委員会** ○福泉 靖史 (三菱重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 渋川 直紀 (東芝), 松沼 孝幸 (産総研)
- 自己点検委員会** ○福泉 靖史 (三菱重工), 今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 渋川 直紀 (東芝), 松沼 孝幸 (産総研)
- 運営委員会** ○今成 邦之 (IHI), 太田 有 (早大), 酒井 義明 (東芝), 渋川 直紀 (東芝), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 福泉 靖史 (三菱重工), 松沼 孝幸 (産総研), 森岡 典子 (IHI), 渡辺 紀徳 (東大)
- 企画委員会** ○太田 有 (早大), 今成 邦之 (IHI), 塚原 章友 (MHPS), 辻田 星歩 (法政大), 福泉 靖史 (三菱重工), 松沼 孝幸 (産総研), 安田 聡 (MHPS), 輪嶋 善彦 (本田), 渡辺 紀徳 (東大)
- 国際委員会** ○渡辺 紀徳 (東大), 井上 智博 (東大), 太田 有 (早大), 岡井 敬一 (JAXA), 小森 豊明 (三菱重工), 谷 直樹 (IHI), 都留 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研究所), 三好 市朗 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)
- 学術講演会委員会** ○松沼 孝幸 (産総研), 阿部 一幾 (MHPS), 小熊 英隆 (三菱重工), 尾関 高行 (電中研), 武田 淳一郎 (富士電機), 富永 純一 (東芝), 中山 健太郎 (川崎重工), 浜辺 正昭 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 藤原 仁志 (JAXA), 渡邊 裕章 (九大)
- 集行事委員会** ○輪嶋 善彦 (本田), 金澤 直毅 (川崎重工), 佐久間 康典 (東大), 澤 徹 (東芝), 泰中 一樹 (電中研), 谷村 聡 (MHPS), 手塚 津奈生 (IHI), 長野 啓明 (本田), 西江 俊介 (三井造船), 西村 英彦 (MHPS), 萩川 宏樹 (JALエンジニアリング), 藤井 達 (日立), 山形 通史 (富士電機), 山田 誠一 (防衛装備庁), 吉田 征二 (JAXA)
- ガスタービン技術普及委員会** ○福山 佳孝 (JAXA), 石田 克彦 (川崎重工), 岡田 満利 (電中研), 賀澤 順一 (JAXA), 齊藤 大蔵 (東芝), 中村 恵子 (IHI), 花井 直人 (JALエンジニアリング), 檜山 貴志 (三菱重工), 村田 章 (東京農工大), 山本 誠 (東京理科大), 横山 喬 (MHPS), 渡辺 紀徳 (東大)
- 学会誌編集委員会** ○辻田 星歩 (法政大), 荒木 秀文 (MHPS), 壹岐 典彦 (産総研), 加藤 千幸 (東大), 金子 雅直 (東京電機大), 川岸 京子 (物材研), 阪井 直人 (川崎重工), 佐藤 哲也 (早大), 渋川 直紀 (東芝), 杉本 富男 (三井造船), 高橋 俊彦 (電中研), 田尻 敬次 (荏原エリオット), 多田 暁 (JALエンジニアリング), 寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 賢治 (IHI), 新関 良樹 (東芝), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 原 浩之 (MHPS), 馬場 勝 (IHI), 北條 正弘 (JAXA), 松崎 裕之 (東北発電工業), 森澤 優一 (東芝), 山下 一憲 (荏原製作所), 山根 喜三郎 (防衛装備庁), 吉田 英生 (京大)
- 論文委員会** ○山根 敬 (JAXA), 青塚 瑞穂 (IHI), 壹岐 典彦 (産総研), 小田 剛生 (川崎重工), 柴田 貴範 (MHPS), 田頭 剛 (JAXA), 寺本 進 (東大), 中谷 辰爾 (東大), 姫野 武洋 (東大), 山本 悟 (東北大), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡 洋明 (愛媛大)
- ガスタービン統計作成委員会** ○松岡 右典 (川崎重工), 荒井 慎吾 (ターボシステムズユニテッド), 恵比寿 幹 (三菱重工), 澤 徹 (東芝), 原田 純 (川崎重工), 村上 麻里子 (川崎重工), 山上 展由 (MHPS), 山上 舞 (IHI), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)
- 産官学連携委員会** ○渡辺 紀徳 (東大), 赤城 正弘 (防衛装備庁), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 岸部 忠晴 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝), 武 浩司 (川崎重工), 藤岡 順三 (物材研), 二村 尚夫 (JAXA), 古川 雅人 (九大), 松崎 裕之 (東北発電工業), 吉田 英生 (京大)
- 広報委員会** ○山根 秀公 (防衛装備庁), 壹岐 典彦 (産総研), 酒井 義明 (東芝), 姫野 武洋 (東大), 村田 章 (東京農工大), 山根 敬 (JAXA), 吉田 征二 (JAXA)
- 表彰委員会** ○油谷 好浩 (東芝), 太田 有 (早大), 辻田 星歩 (法政大), 福泉 靖史 (三菱重工), 松沼 孝幸 (産総研), 山根 敬 (JAXA)
- 将来ビジョン検討委員会** ○寺本 進 (東大), 小田 豊 (関西大), 賀澤 順一 (JAXA), 柴田 貴範 (MHPS), 柴田 良輔 (本田), 高橋 徹 (電中研), 仲俣 千由紀 (IHI), 姫野 武洋 (東大), 森澤 優一 (東芝), 山崎 裕之 (東北電力)
- 女性参画推進委員会** ○仲俣 千由紀 (IHI), 猪亦 麻子 (東芝), 川岸 京子 (物材研), 都留 智子 (川崎重工), 森川 朋子 (MHPS)
- ACGT2018実行委員会** ○山根 敬 (JAXA), 都留 智子 (川崎重工), 仲俣千由紀 (IHI), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS)
- IGTC2019準備委員会** ○西澤 敏雄 (JAXA), 太田 有 (早大), 渋川 直紀 (東芝), 寺本 進 (東大), 仲俣 千由紀 (IHI), 安田 聡 (MHPS), 山根 敬 (JAXA)

## 日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は、「エネルギー」をいかにして効率よく運用し、地球規模の環境要請に応えるかを、ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは、「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学、研究機関、産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており、学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と、家族的雰囲気や階層を意識せず自由な議論ができ、専門家の指導を得られた。

### 学会の概要（2017年3月現在）

会員数：2,060名（正会員 1,995名、学生会員 65名） 賛助会員：110社  
 会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300、学校 約100

### 会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年6回）、学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格、本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典、本会刊行物の購入資格と会員価格の特典、調査研究委員会等への参加  
 賛助会員：

学会誌の無料配布、学会誌広告・会告掲載（有料）、新製品・新設備紹介欄への投稿、本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

### 入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正会員	500円	8,000円	4,000円
正会員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし、一口以上	一口 35,000円

※当該年度3月1日現在

後期・・・9月1日～翌2月末まで

### 入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（<http://www.gtsj.org/index.html>）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。



公益社団法人

日本ガスタービン学会

Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13 第3工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail: [gtsj-office@gtsj.org](mailto:gtsj-office@gtsj.org)

# 編集 後記

梅雨明け後、東日本では気温の低い日が続く、私が住んでいる仙台では36日連続で雨が降り続くという異常気象。日中の最高気温も25℃に届かず、農産物の生育にも大きな影響が出るのではないかと心配されています。

またこの間、発生以来18日18時間と歴代3位の長寿命となる台風5号が日本列島に上陸するなどまさに異常気象となりました。こうした異常気象も地球温暖化の影響らしいと聞くと、我が学会で扱うジェットエンジンやガスタービンの熱効率向上へ向けて会員の皆様の英知を結集して取り組む必要があると痛感しております。

さて、今月号ではジェットエンジンやガスタービンのエネルギー源であるジェット燃料とLNG・天然ガスについて特集を組みました。

普段はなかなかこれら燃料の技術開発やサプライチェーンについて思いを巡らす機会は少ないと思いますが、東日本大震災以降、日本全体のエネルギー構造が大きく変化する中で、我が学会で扱うジェットエンジンやガスタービンの燃料は一次エネルギー全体の中でどのような位置づけにあるのか、またその特徴や製造、輸送そして貯蔵に関する技術開発動向はどのようになっているのか、会員の皆様にも是非知っていただきたく特集を組みました。

とりわけ、LNG・天然ガスの項目では当学会への投稿は極めて珍しい大手ゼネコンや船会社、商社などの著者の皆様からご投稿を頂き、また、東日本対震災の際に被災した方々への燃料ガス供給を極めて短時間で再開する上で大きな原動力となったガスパイプラインについてもご投稿いただきました。大変幅広い特集の内容となったことは編集委員や理事の皆様のお力添えがあったからこそと感謝申し上げます。

編集作業に当たっては、各企業、大学の夏休み期間と

重なることから入稿の遅れも懸念されましたが、ご投稿をお願いした著者の皆様のご協力のお陰でほぼ当初工程通り編集作業を完了することができました。この場をお借りしてご投稿いただいた著者の皆様に厚く感謝申し上げます。

原稿をお願いした時点では、まず当学会の紹介から始め、特集の趣旨をメール等でやり取りした上、さらに詳しく内容についてご確認されたいということで、わざわざ私の元にお越しいただいた著者の方もいらっしゃいました。心より感謝申し上げます。

当学会誌の特集としては極めて珍しい内容となりましたが、ハードだけではなく燃料があつてこそジェットエンジンもガスタービンも社会生活の役に立てるのだということ会員各位に再確認いただければ幸いです。

(松崎 裕之)

- 9月号アソシエイトエディター  
松崎 裕之 (東北発電工業)
- 9月号担当委員  
加藤 千幸 (東京大学)  
寺澤 秀彰 (東京ガス)  
中野 賢治 (IHI)  
ASME見聞記: 金子 雅直 (東京電機大学)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「SPB®方式LNG輸送船」…………… (P.359 ~ 361)
- ・「PCLNGタンク防液堤構築技術の動向」…………… (P.362 ~ 367)

だより

## ✪事務局 ✪

今年の夏は、猛暑日もあれば、梅雨を思わせるような日が続くこともあり、不安定な天気が多かったように思いますが、皆さまいかがお過ごしでしたでしょうか？

夏の間は、毎年恒例となっている実家の果実の出荷作業に駆り出され、何度か帰省してきました。毎年同じ様に栽培していても、その年の気象条件で収穫量も出来具合も変わってきます。今年は梅雨の時期に雨が少なかったのちょっと心配でしたが、ここ数年の中では、なかなか良い出来だったようです。収穫したブドウやスモモは、箱詰め前に1つずつ重さでサイズを選別していきます。手間のかかる作業ですが、数年前に、重さを測って音声(女性の声)でサイズを知らせてくれる専用の秤を導入してからは、作業スピード、精度とも格段にアップしました。そして、最近ますます小さな文字が見づらく

なってきた私も、今年は大いにこの秤に助けられました。とはいえ、世の中ではIT化がこれほど進んでいるのに、農業の省力化は全然進んでいない、といつもながら思わされました。

9月も後半となり、いよいよ秋の定期講演会の季節が近づいて来ました。第45回目となる今年は愛媛県松山市で開催されます。こちらは、「みかん県」と言われるだけあって、柑橘類の栽培がさかんな地域ですね。旬は、冬場～春先ということなので、10月中旬ではちょっと早いのが残念です。私事ですが、実は今回初めて事務局スタッフとして定期講演会に参加させていただくことになりました。ご参加予定の皆様、今年は現地でお会いできることを楽しみにしております。たくさんの皆様のご参加をお待ちしています。

(山本 由香)

## 学会誌編集および発行要領 (抜粋)

2017年2月8日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
  - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
  - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
  - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。
 

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。なお、非会員の第一著者には掲載号学会誌1部も贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）  
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部  
 学会誌担当：高橋 邦和  
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
 TEL：03-5733-5158  
 FAX：03-5733-5164  
 E-mail：eblo\_h3@eblo.co.jp

## 技術論文投稿要領 (抜粋)

2015年3月10日制定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
  - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
  - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
  - 3) 原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
  - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
    - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
    - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
    - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、所定の論文表紙および英文アブストラクトとともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文査読に関する内規に従って査読を行い、論文委員会が掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌  
Vol.45 No.5 2017.9

発行日 2017年9月20日  
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会  
 編集者 辻田 星歩  
 発行者 船崎 健一  
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13  
 第3工新ビル402  
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387  
 郵便振替 00170-9-179578  
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店  
 (普) 1703707  
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)  
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4  
 Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164

©2017, 公益社団法人日本ガスタービン学会

## 複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会  
 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F  
 FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致していません。直接、本学会へお問い合わせください。