

# LNG ポンプと LNG エキスパンダタービン

松 村 正 夫\*

## LNG Pumps and Expander Turbine Generator

by Masao MATSUMURA

This report outlines Ebara's pumps for handling LNG, some history and trends, and includes an introduction of a newly developed expander turbine generator.

**Keywords:** Submerged motor pump, Expander turbine generator, Natural gas, Liquefaction plant, Carrier, Receiving terminal, Thrust load, Ball bearing, Self-balance, Clearance

### 1. はじめに

近年、世界的なエネルギー需要増大のために従来の原油、石炭などの化石燃料の供給だけでは明らかに不足してきていることに加え、CO<sub>2</sub>、SO<sub>x</sub>等の環境影響成分排出を飛躍的に少なくできるクリーンなエネルギー源として天然ガスが脚光を浴びている。

天然ガスをエネルギー源として使用するためには、ガス田から採取したガスそのものをパイプラインで供給する方法と産地においてLNG (Liquefied natural gas) とし、主にLNG船による大量輸送で遠隔地のLNG受入基地に供給する方法とがある。こうした天然ガスの採取から消費までの一連のつながりをLNGサプライチェーンと呼んでいる。

LNGサプライチェーンでは、天然ガスを液化し貯蔵、運搬、移送、ガス化する過程で数多くのLNGポンプ、エキスパンダタービンが使用されている。その機能や用途から分類すれば、貯蔵タンクからLNGを出荷するための払出用ポンプ(Send out pump)、貯槽から貯槽までLNGを移送するための移送ポンプ (Transfer pump)、加圧することを主目的とした昇圧 (高圧) ポンプ (High pressure pump)、配管や貯槽を常時低温状態に保持するための循環ポンプ (Circulation pump) 及びスプレーポンプ

(Spray pump)、LNG船からLNGを地上の受入基地に搬送するための荷役ポンプ (Cargo pump) などがある。その他に圧力エネルギーを動力回収すると共に熱エネルギーを系外に除去することによりLNG液化効率向上に寄与するエキスパンダタービンなどがある。

本報では、こうしたLNGサプライチェーンにおける当社の低温用回転機械の開発の歴史とその構造、機能、性能、特徴等に関する最新の技術動向について記述する。

### 2. 荏原サブマージドモータポンプの開発の歴史

当社はLNGポンプの開発を1968年から開始した。仕様は次のとおりである<sup>1)</sup>。

要 項：50 m<sup>3</sup>/h × 60 m × 2950 min<sup>-1</sup> × 19 kW  
機 名：100 × 80VPCS I M  
用 途：緊急ドレインポンプ  
シール構造：ペローズ形メカニカルシール  
液 名：LNG  
温 度：-162℃

全体構造図を図1に示す。

この方式のキーポイントは、大気に接する軸封摺動面の保護をいかに行うかである。対策として、メカニカルシール摺動面に常時ドライ窒素(N<sub>2</sub>)ガスを吹き付けることで凍結を防止した。また、当時は信頼性の高い低温時の材料データが少なかったため、SUS材、Al合金材などの溶接熱影響部の低温衝撃試験等の基礎的研究も実施した。

\* 風水力機械カンパニー 開発統括部

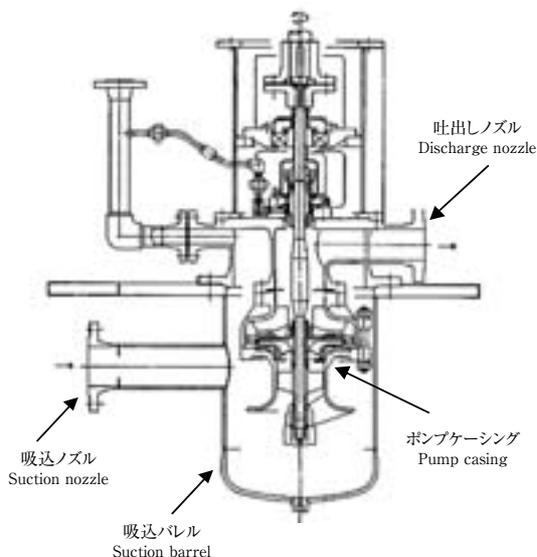


図1 LNG緊急ドレインポンプ  
Fig. 1 LNG emergency drain pump

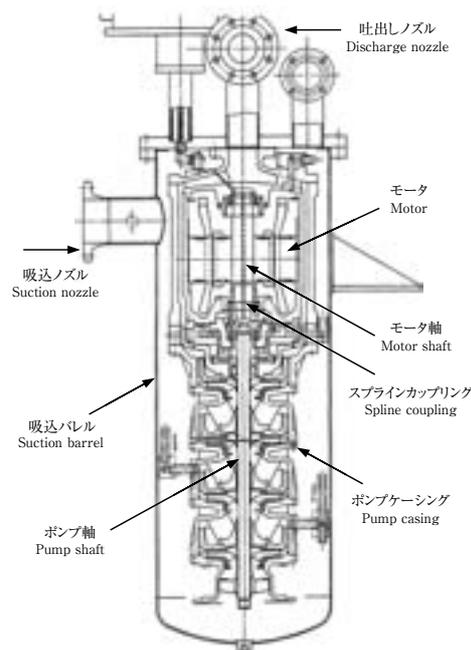


図2 国産初のLNGサブマージドモータポンプ  
Fig. 2 LNG submerged motor pump (first domestic production)

性能試験は $-196^{\circ}\text{C}$ の液体窒素 ( $\text{LN}_2$ ) 試験設備において良好な結果を確認した後、試作機を実際のLNG受入基地に設置し、実液運転を行った。その結果は機能性能共にメカニカルシール使用ポンプとしては、実用上十分満足のいくものであった。

当時は、LNGポンプとして米国のJ. C. CARTER社製のサブマージドモータポンプが全盛であったが、LNG自液による潤滑方式であるため実用的ポンプ玉軸受寿命を得るには程遠い状況であった。そのために日本のユーザはメンテナンスに追われる状況に置かれ、国産化による玉軸受の長寿命化が悲願であった。こうした背景を受け、1970年から荏原独自方式によるサブマージドモータポンプ (図2) の開発に着手した<sup>2)</sup>。

本開発において最も重点課題とされたのは、いかなる手段で軸受寿命を延ばすかであった。軸受寿命が短いのは、潤滑性能が極めて悪い自液潤滑条件下で軸受に過大な荷重がかかり、ボールに焼きつきやクラック、はく離を生じるためであろうと推定し、その対策を検討し、次のような荏原独自の工夫を加えた。

(1) 玉軸受にかかる荷重を最小にするため、ポンプで発生するスラスト荷重は、多段階給水ポンプ等でノウハウを保有しているバランスピストン及びバランスディスク機構によるセルフバランス方式を採用することで完全バランスを図ることとした。

(2) 軸はモータ軸とポンプ軸に分離し、モータ回転体自重及びモータに発生するアンバランス荷重はモータ軸専用の2個の玉軸受で支持し、ポンプ軸荷重 (ポンプ回

転体自重が主) はポンプ軸専用の玉軸受を使用し、両軸の結合は特殊なスプラインを使用することで、ポンプ軸の上下移動の吸収 (軸間で互いに影響を及ぼさない) を図った。

(3) 玉軸受のリテーナ材料を試行錯誤のうへ、最適な選定とし適切な軸受潤滑 (自液) 構造とした。

機能、性能の実証のために新たに整備した図3の $\text{LN}_2$ 試験設備で低温確認試験を行い、計画値を十分満足することが確認できたため、実際にLNG受入基地においてLNGによる耐久テストを行い、定期的に振動計測データの取得などを実施した。

1973年末から1975年8月まで累計約13500時間に及ぶ運転実績を記録し、当初目標とした8000時間を十分満足

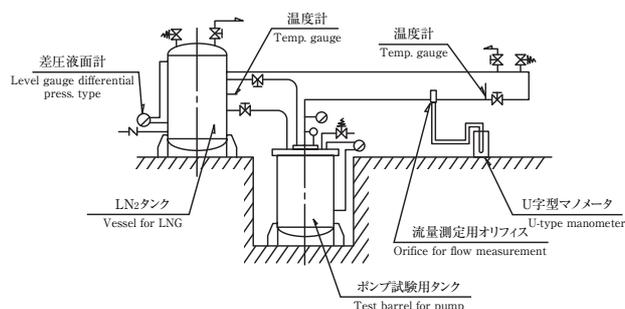


図3 サブマージドモータポンプ用 $\text{LN}_2$ 試験設備  
Fig. 3  $\text{LN}_2$  test facility for submerged motor pump

することができた。国産第1号のLNGサブマージドモータポンプの開発及び実液による実証試験完了後、モータ供給の目処が立たなくなるなど諸般の事情から製品開発が停滞していたが、1982年には、国内LNG受入基地に高圧多段のLPG (Liquefied petroleum gas) サブマージドモータポンプを設計製作納入した (図4)<sup>3)</sup>。

機器の仕様は次のとおりである。

要項：42.2 kL/h × 1316～1050 m  
× 2960 min<sup>-1</sup> × 155 kW

機名：150 × 100VPCH21M

液名：LPG

温度：0～40℃

軸受寿命を延ばすことと、機器としての高い信頼性を確立することが最大の課題であった。

軸受寿命を延ばす方法として前述のLNGポンプと同様にバランスピストン+バランスディスクによる完全バランス方式を採用した。

軸方向の移動による玉軸受への負荷荷重増大を避けるため、2個の玉軸受外周をスライドさせる方法を開発し玉軸受の数を3個から2個に減らし、スプラインカップリングを不要にした。したがってポンプ軸とモータ軸 (中空軸) とは一体化した構造となった。

信頼性の確保のために、前記設計上の配慮のほかには次のような実証試験も実施した。試験結果は設計時の計画

に対して十分満足のいく結果が得られ、設計手法や設計データの一層の充実を図ることができた。

- (1) ポンプ性能
- (2) 始動停止及び定常運転における軸変位と回転速度変化
- (3) バランスディスク部すき間
- (4) ポンプ軸の軸振動、ポンプケーシングの振動加速度
- (5) モータ単独試験
- (6) LPGに近い液特性を有する試験液を使用した総合運転試験 (ON-OFF 運転による機能確認試験, 軸受ブッシュクリアランス試験等含む)

実証試験後LNG受入基地に納入し、数万時間にわたってノーメンテナンス運転を実現し、現在も稼動中である。

当社はこのようにサブマージドモータポンプに独自の技術を培ってきたが、より一層のユーザの期待にこたえるべく1983年、米国にCDE社〔Cryodynamics-co. Ebara groupの略、前身はCDI社 (Cryodynamics incorporate) で、現在のEIC社 (Ebara International Corp.)〕を設立することとなった。

当社のポンプ、タービン全般にわたる優れた設計、解析技術、生産管理、品質管理等に、CDE社のLNG、LPG実液試験設備や世界市場での納入実績等に加え、世界市場において、飛躍的に事業を発展させる相乗効果を得ることができた。

特に1984～1989年に掛けてLNG船用ポンプ、LPG船

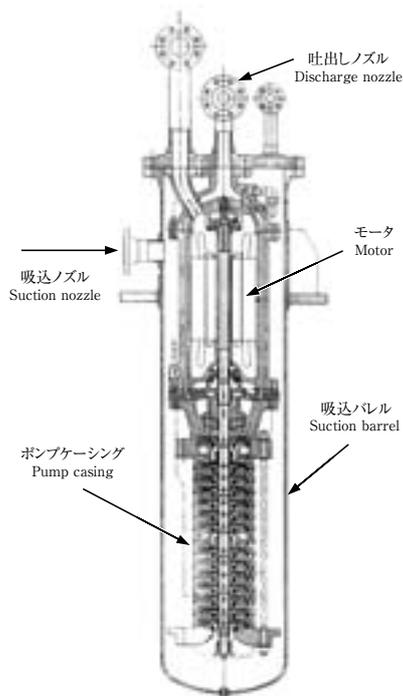


図4 LPGサブマージドモータポンプ  
Fig. 4 LPG submerged motor pump

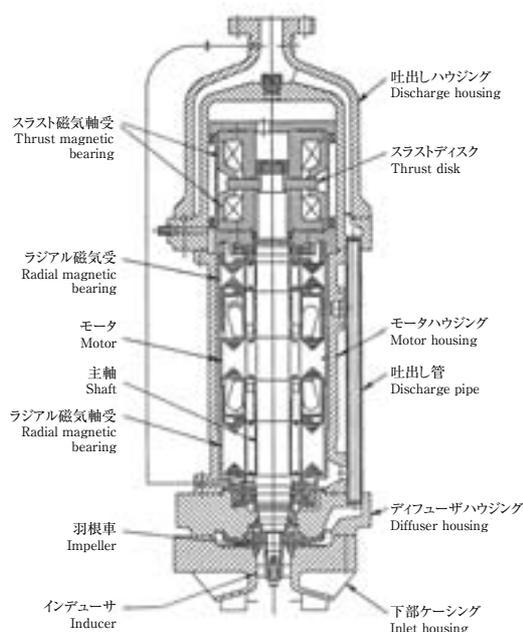


図5 磁気軸受ポンプ  
Fig. 5 Magnetic bearing pump

用ポンプの顧客立会いの共同実証試験において、スラストバランス機構の確証、性能・機能の確認試験等を行うことで、膨大なバックデータが得られた。今日の各機種の基本形がこの時点で確立することができた。また、その間に当社は図5に示す磁気軸受サブマージドモータポンプや静圧軸受ポンプ等のLNG実液試験による開発を実施し技術確立をすることができた。現在累積生産台数は4500台以上にのぼり、船用では世界市場の約70%以上、陸用では60%以上を占めるに至っている。

### 3. LNG ポンプの概要<sup>4)</sup>

#### 3-1 LNGの特性と設計上の対応事項

LNGには次のような特性があるため設計にあたってはそれぞれ十分な検討を要する。

##### 3-1-1 低粘度

粘度は水に比べて1桁小さい。玉軸受や段間ブッシュなどのようにLNGによる自液潤滑となる部分は、嚙り付きを生じにくい材料の選定や負荷荷重の低減を図る必要がある。

当社では玉軸受のリテーナ材料に特殊な樹脂材を使用し潤滑性を高め、図6に示すようにポンプ発生軸スラストを低減する構造としている。

##### 3-1-2 低密度

密度が水に比べて約1/2のため、同じ圧力に対して揚程は水の約2倍となるため、多段構造も必要となる。

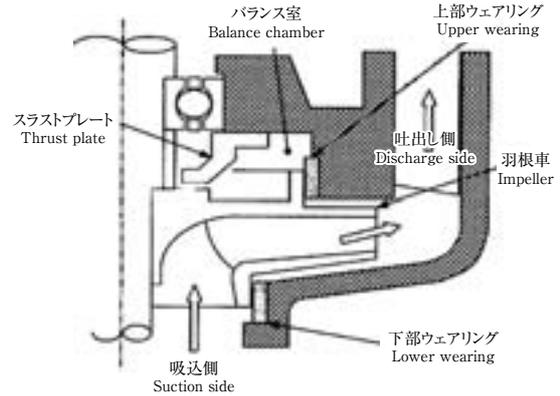


図6 スラストバランス機構  
Fig. 6 Thrust balance mechanism

##### 3-1-3 気化性物質

ポンプ内部でLNGがガス化すると流路で流体が閉塞し、摺動部の冷却量不足、潤滑不足などを招くため、液温に対応する飽和蒸気圧より高い圧力とする設計が必要である。また発生したガスはベント配管により速やかに貯槽気相部などに排出させる構造としなければならない。

##### 3-1-4 危険物質

LNGはメタンが主成分であるため、高圧ガス保安法の対象となる。したがって、ポンプ外部への漏洩がないように設計しなければならない。その点ノンシールポンプであるサブマージドモータポンプは、理想的構造といえることができる。

表 用途別LNGポンプ型式  
Table LNG pump type according to usage

設置場所 Location	ポンプ用途 Usage of pumps	型式名 Type of pumps	備考 Remarks
液化基地 Liquefaction plant	貯槽払出ポンプ Sendout pump	タンク内設置型 図7 In-tank type	
	移送ポンプ Transfer pump	サクシヨンベッセル型 図8 Suction vessel type	
	循環ポンプ Circulation pump	サクシヨンベッセル型 Suction vessel type	
受入基地 Receiving terminal	貯槽払出ポンプ Sendout pump	タンク内設置型 In-tank type	共用の場合もある。 その場合タンク内設置型になる。
	昇圧ポンプ Secondary pump	サクシヨンベッセル型 Suction vessel type	
	循環ポンプ Circulation pump	サクシヨンベッセル型 Suction vessel type	
	移送ポンプ Transfer pump	サクシヨンベッセル型 Suction vessel type	
LNG船 LNG carrier	カーゴポンプ Cargo pump	定置型 図9 Fixed type	モスタイタンク、メンブレン型タンク Moss type tank, Membrane type tank
	スプレーポンプ Spray pump	定置型 Fixed type	モスタイタンク、メンブレン型タンク Moss type tank, Membrane type tank
	エマージェンシーポンプ Emergency pump	タンク内設置型 In-tank type	メンブレン型タンク Membrane type tank

3-1-5 低温

LNGは-160℃前後の低温であるため、ポンプ構造の中で高応力を発生する部材は、低温脆性に対応した材料を選定している。また常温から低温までの温度変化による伸縮を考慮した材料組合せ、すき間設計を行っている。

3-1-6 非電導性

LNG液は非電導性であるため、モータ巻線などの通電部はLNG中にじかに浸漬し直接LNG液による冷却を行っている。また線間絶縁を主目的とする絶縁材は低温と常温間の温度サイクルに耐える材料でなければならない。

3-2 LNGポンプの用途による型式

LNG用ポンプは用途に応じて、最も適した型式が選定される。ポンプ自体の基本的な機能、構造は同じであるが、用途によって、ケーシング形状、取り付け形態が変わってくるためにおよそ3種類の型式にまとめることができる。

詳細を表にまとめる(図7, 8, 9)。

3-3 LNGポンプの動向

天然ガス供給圏の広域化やLNGプラントの大型化などから高揚程ポンプ、大容量ポンプが増加してきている。

3-3-1 高揚程ポンプ

中国やインドのように広大な領域にガス供給するため、LNGを2000 m以上昇圧する必要がある。そのために図10に示すような高揚程多段ポンプが目立って増加している。

このような高圧仕様に対して二重ケーシング構造を採用することでポンプのケーシング肉厚を薄いものとし、ポンプ質量の軽減やポンプ外径の低減、組立の容易化を図っている。

また段数が飛躍的に増加し軸長も長くなるため、ポン

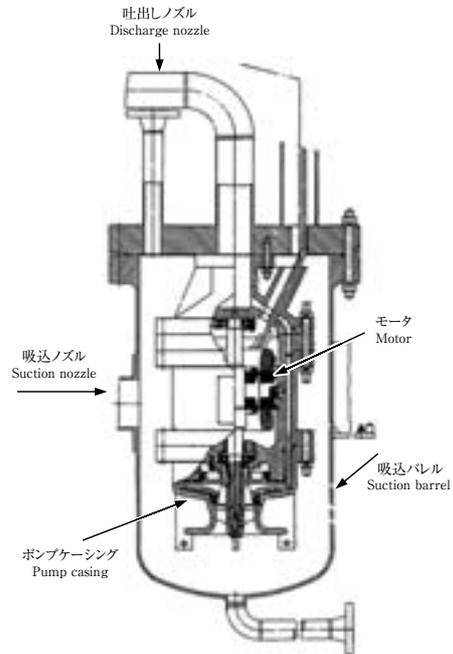


図8 サクションベッセル型  
Fig. 8 Suction vessel type

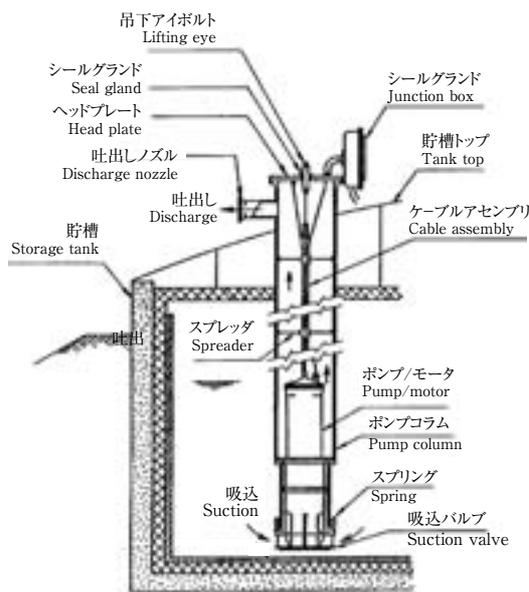


図7 タンク内設置型  
Fig. 7 In-tank type

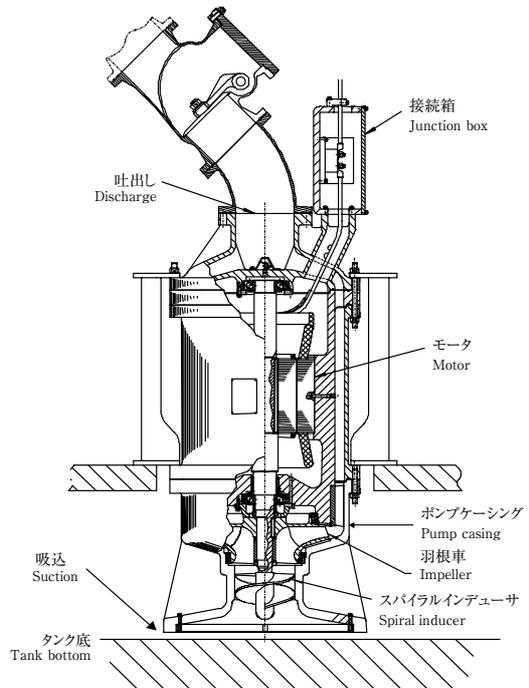


図9 定置型  
Fig. 9 Fixed type

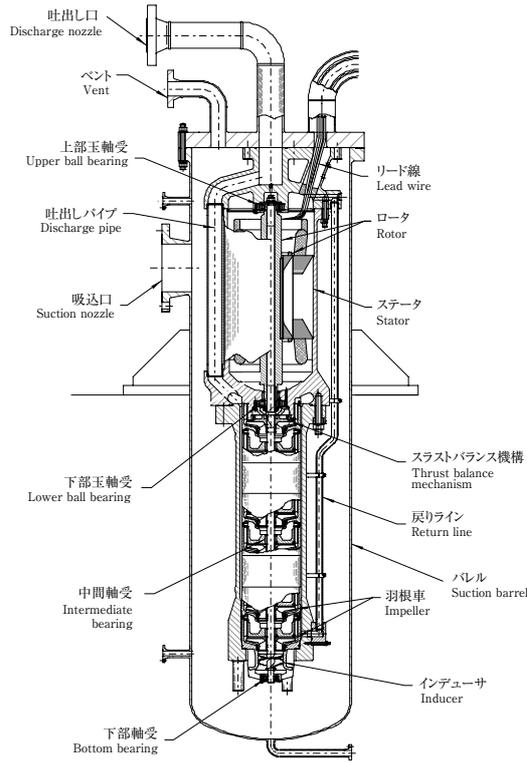


図10 高圧多段ポンプ構造図  
Fig. 10 High pressure, multi-stage type

プ全体が長尺になり、据付やメンテナンスが難しくなってくる。そのため高揚程用低Ns羽根車，ガイドベーン，ケーシングを開発し，段数を減らすと共に一段あたりの軸長を短くするようにしている。

### 3-3-2 大容量ポンプ

LNGプラントの大型化に伴い、移送用ポンプなどが大容量化し、2500 m<sup>3</sup>/hに及ぶものも出てきている。ポンプの大型化に伴い、アルミ鋳物の最適化，流体の解析，高効率化などがより重要になってきている。

## 4. エクスパンダタービン

タービン発電技術は基本的に水車発電あるいは動力回収タービンの技術によっている。

当社におけるこれらの基盤技術の概要と応用技術の一つである液化基地におけるエキスパンダタービンの原理，構造，性能について概要を記す。

### 4-1 当社のタービン発電技術の概要

#### 4-1-1 水車発電技術

水車発電機の世界市場における当社の納入実績は1921年から現在までに260台に上っている。

最大出力は100 MW級の実績がある。

代表的な構造を図11に示す。

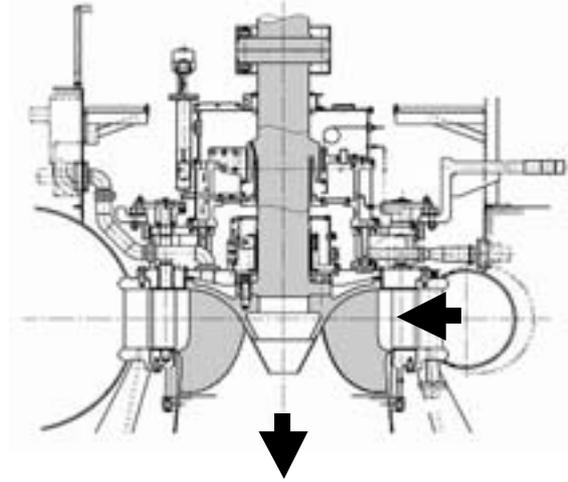


図11 水車発電機  
Fig. 11 Hydraulic turbine for power generation

#### 4-1-2 動力回収ポンプタービン発電技術

ポンプタービンによる動力回収発電機は1979年以来70台以上の納入実績を有する。

最大出力は2000 kW級の実績がある。

二重ケーシング型の構造を図12に示す。

### 4-2 LNGの液化基地におけるエキスパンダタービン<sup>5, 6, 7)</sup>

#### 4-2-1 液化工程の改善

LNG製造の液化にJ-T（ジュール・トムソン）バルブを利用した工程があり，図13の液化工程例では，LNG，MR（MIXED REFRIGERANT）の2系統がある。高圧液に等エンタルピー的状态変化を与えることで温度低下させることができる。

J-Tバルブによるこのような等エンタルピー減圧工程の場合には，エネルギー的に損失が大きい。この欠点を改善するためにLNGエキスパンダタービン（後述図15）が導入される。J-Tバルブでは，減圧の際に損失となっ

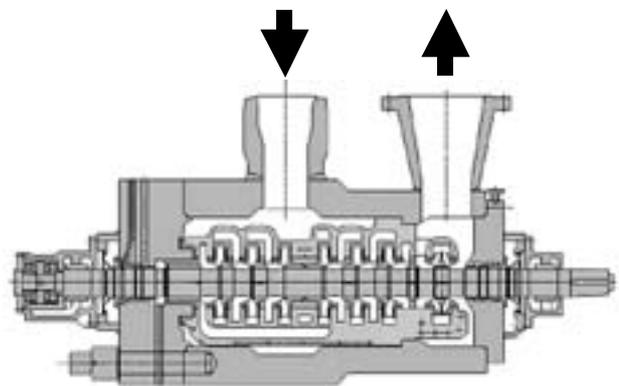


図12 多段動力回収ポンプタービン（二重ケーシング型）  
Fig. 12 Multi-stage, double casing type

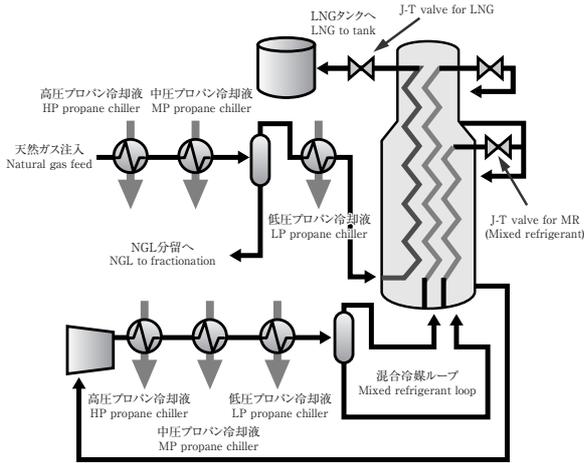


図 13 液化工程フロー例

Fig. 13 Flow chart of typical liquefaction process

ていたエネルギーを電気エネルギーとして取り出すこと（発電）と LNG 気化量を減少させることが可能となる。プラントの消費エネルギーの回収と液化効率の向上により、プラント効率を 3~5% 向上させることも可能である。

図 14 は、液化工程の h-s 線図による説明である。下記仕様例の場合、次のような数値と想定される。LNG エキスパンダタービンを導入することで、J-T バルブでは気化していた気化分が減少することによる液化抽出製品質量  $\Delta m$  及び発電による回収電力  $\Delta kW$  は次のとおりである。

(1) 仕様例

断熱効率  $\eta_i$  : 0.75

密度  $\rho$  : 450 kg/m<sup>3</sup>

流量  $Q$  : 0.3 m<sup>3</sup>/s

トータルヘッド  $\Delta H$  : 1000 m

重力加速度  $g$  : 9.81 m/s<sup>2</sup>

気化潜熱  $C_p$  : 511 800 J/kg

トランス効率  $\eta_t$  : 0.90

・  $\Delta m = 1.94$  kg/s

年間に換算すると、

・  $\Delta m = 61180000$  kg/年

電力価格を US\$0.3/kg とすると年間の増収分は最大でおよそ US\$18 ミリオン/年と想定される。

・  $\Delta kW = 894$  kW

年間に換算すると

・  $\Delta kW = 7831440$  kWh

電力価格を US\$0.05/kWh とすると年間の増収分は最大でおよそ US\$0.4 ミリオン/年となる。

この試算例から、発電よりも、気化防止による経済的

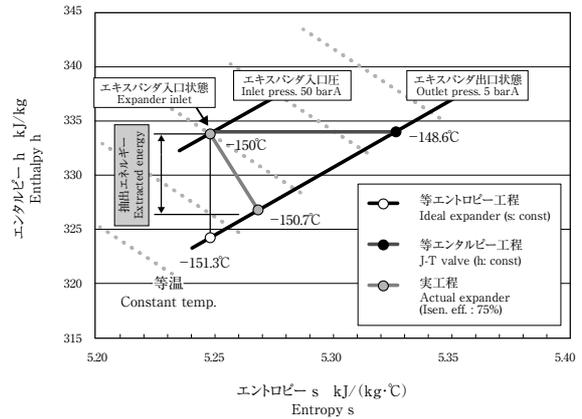


図 14 エキスパンダタービンと h-s 線図

Fig. 14 h-s diagram for expander turbine

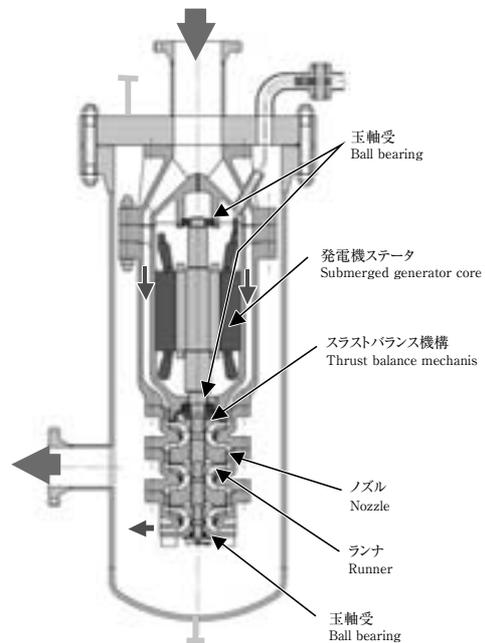


図 15 エキスパンダタービン

Fig. 15 Configuration of TG

効果の方が大きいことが分かる。

#### 4-2-2 タービン発電機構成

当社の LNG エキスパンダタービンは LNG ポンプと同様なサブマージド型であり、メカニカルシールを使用した型式に比較し、LNG 漏洩に対する安全性、設置スペース、メンテナンス性（シンプルな構造）等で優れている。

図 15 はサブマージド型エキスパンダタービンの構造図である。図 16 はエキスパンダタービン発電機全体構成例である。

全体システム構成は、タービン、発電機、インバータ、トランス、系統連携設備等から構成されている。インバー

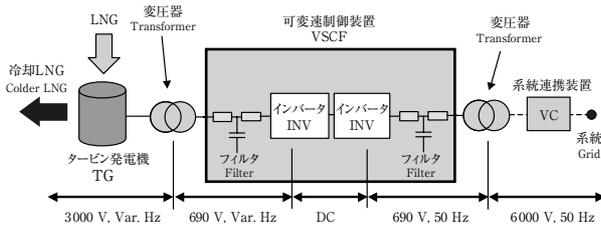


図 16 タービン発電機構成図  
Fig. 16 TG system configuration

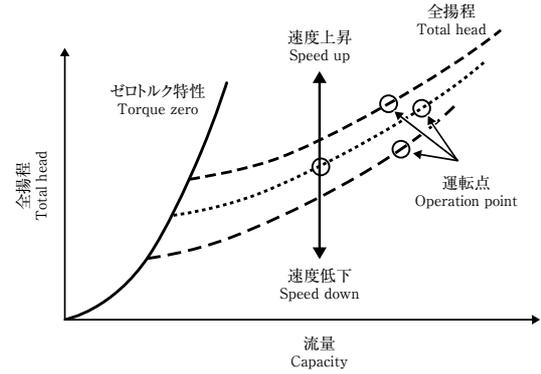


図 17 エキスパンダタービン性能特性  
Fig. 17 Characteristic curve of expander turbine

タで運転回転速度を制御し最適な運転点を調節し常に高効率点での運転を可能にしている。

#### 4-2-3 タービン発電機性能

タービン性能を図 17 に示す。

タービン回転速度ごとの特性、ゼロトルク特性等を示す。タービン仕様点に応じてタービン回転速度を制御し最適な運転を行うことで、最適発電を行うことができる。

### 5. おわりに

当社は LNG ポンプの国産化めざして早くから開発に着手し、関係業界、ユーザの強力な支援を得て完成することができた。

その後、モータ供給の問題などから一時製品化が停滞したが、モータの自力供給が可能となり、LPG 用サブマージドモータポンプを製品化し納入することができた。更に現在の EIC 社の前身である米国 CDI 社を買収することで当社のサブマージドモータ技術に、実液試験設備や世界市場における納入実績などを獲得し、世界市場での事

業展開を推進してきた。

今後とも各製品をブラッシュアップし、また次世代の要請にこたえる新製品を生み出すことに鋭意努力する所存である。

#### 参考文献

- 1) 勝田, LNG 用低温ポンプ, 配管と装置, P79~86, JUN. 1970.
- 2) 勝田, 超低温技術・25, LNG 用サブマージドモータポンプ, P71~73.
- 3) 中村, 川崎, 小林, エバラ時報124号, P29~34.
- 4) 寺島, 松村, エバラ時報138号, P39~44.
- 5) Gilbert HABET and Hans KIMMEL, "Economics of Cryogenic Turbine Expanders", HYDROCARBON ENGINEERING, DEC. /JAN. 1998/99.
- 6) David A.Coyle and Vinod Patel, Processes and pump services in the LNG industry.
- 7) 松村, LNG ポンプとエキスパンダタービン, 配管技術2006年2月号 LNG 特集号.