

FSRU用途のクライオジェニックポンプと エキスパンダの技術的特徴の紹介

渡 辺 秀 治*

Introduction of the Design Features of Cryogenic Pumps and Expanders for FSRU Applications

by Hideharu WATANABE

This paper describes the design enhancements of cryogenic pumps and expanders for the floating liquefied natural gas (LNG) vessels applications, such as floating storage regasification units (FSRU). The conceptual design of two-phase expander is also discussed for power recovery applications.

Keywords: LNG, Cryogenic pump, Expander, Power recovery system, Shaft stabilizer, Two-phase fluid

1. はじめに

これまで、天然ガスの液化基地、受入基地及び貯槽タンクは大規模な施設として陸上へ建設されていたが、設備の柔軟性、携帯性及び環境に優しい技術としてFSRU (Floating Storage Re-gasification Units) やFPSO (Floating Production Storage and Offloading) と呼ばれる洋上プラントが建設されつつある。さらに建設費用面での優位性もあり液化設備や貯蔵を兼ね備えたこれらの洋上プラントが注目されている。

FSRUは他のLNG船からLNGを受け入れて貯蔵し、再ガス化装置にてガス化した天然ガスを陸上のパイプラインへ送り出す施設である¹⁾。

洋上施設という限られた空間での設置となるためコンパクトな機器設計が必要であることに加え、ローリング、ピッチング、ヨーイング、ヒービングといった船体に受ける揺動に対する直接的な動的荷重を回転機械の設計に考慮しなければならないため複雑な構造が必要となり、従来型ポンプがそのまま適用できない場合がある。

これらの影響による劣化や初期破損のリスクを最小限に抑えるために回転機器には機能を高める工夫が必要となる。

2. 高圧多段クライオジェニックポンプ基本構造

写真に代表的なクライオジェニックポンプであるサクシヨンポット型高圧多段ポンプの外観を、図1にその内部構造を示す。

サクシヨンポットは適切な圧力容器の規格に従い製造されたシンプルで安全性・信頼性を確保した構造であり、



写真 サクシヨンポットから取外した直後の高圧多段ポンプ
Photo Typical vessel mounted high pressure pump during removal from the vessel

* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 藤沢工場 エンジニア
ドポンプ技術室

13-78 01/242

本原稿は、「ターボ機械」第41号第3号P.45-50に掲載された内容を翻訳及び一部加筆・修正したものである。

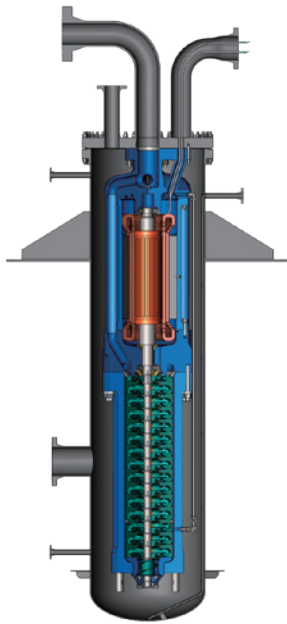


図1 サクションポット型高圧多段ポンプ断面図

Fig. 1 Cross sectional view of the typical vessel mounted high pressure pump

ポンプ・モータの外ケーシングの役目を果たす。このサクションポットには吸込ノズル、ドレンノズル、液面計用ノズル及びサポートブラケットがあり、ヘッドプレートには吐出しノズル、ベントノズル及び電線管を設けている。したがって、全体的にコンパクトで容易な据付ができる。連続24時間の運転に対応する大型多段ポンプとしても十分信頼性のある設計となっている。

この高圧ポンプの主要な技術的特徴は次のとおりである。

- ・ポンプ、モータは一体軸
- ・スラストバランス機構（TEM：Thrust Equalizing Mechanism）
- ・自液潤滑による低温用深溝玉軸受
- ・自液によるモータ冷却ライン

図1に示すとおりポンプはヘッドプレートの下に取り付けられLNGで満たされたサクションポット内に設置される。したがって、ポンプ・モータ共にLNG中に完全に潜没することになる。

陸上施設向け用途では基礎が安定しているためサクションポットはノズル荷重とポンプ運転による動的荷重だけを受ける。

3. 洋上用途向けクライオジェニックポンプの特徴的設計

FSRU等の洋上向けの場合、船体の動揺による影響を考慮した構造をとる必要がある。サクションポット及び

ポンプ本体も基礎構造物から動揺を常時受けることになる。そのため、船体の動揺がポンプ運転へ与える影響を極力抑え製品の信頼性を高める工夫がされている。個別の強化策を次項に示す。

3-1 サクションポットサポート

高圧多段ポンプ用サクションポットは通常3、4本の据付用脚が用意され、この脚でポンプを含むサクションポットの全体重量が支持される。この脚自体は、船体側の架構へボルトによって固定される。この据付用脚を含めサクションポットに船体の動揺による荷重が付加される可能性がある。

この荷重の大きさは、船体架構が受ける加速度やポンプ及びサクションポットの据付位置が影響する。

高圧多段ポンプは比較的に長細い構造となるため、船体の動揺によって作用される荷重により振動や応力が高まる傾向にある。FSRU等の洋上施設向けのポンプにはこの対策として、図2に示したサポートパッドをサクションポットの下部に均等に装備し、この応力上昇を低減させ、振動の増加をなくす構造が採用されている。

3-2 ポンプケーシングサポート

サクションポット型ポンプは吐出し側フランジをヘッドプレートの下面にボルトで取付けるため、吊下げられた状態で設置される。このヘッドプレートにはポンプ自重とそれとは反対方向に働く吸込圧力による荷重を受ける。オンショア（陸上向）では両荷重は鉛直方向だけが支配的となる。一方、オフショア用途の場合、合力の中心がずれるためポンプが片持ち梁の作用を受けて剛性が低下し、横方向の荷重で加振される可能性がある。

そのため、FSRU等の洋上施設向けのポンプ本体の下部に図3に示したポンプサポートを装備しサクション

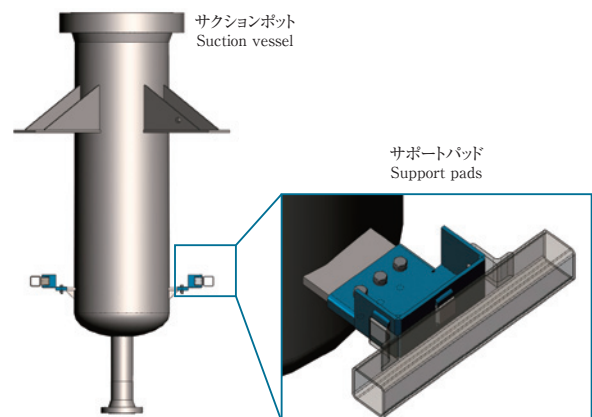


図2 サポートパッドを設けた高圧多段ポンプ用サクションポット
Fig. 2 Vessel mounted high pressure pump with lower support pads

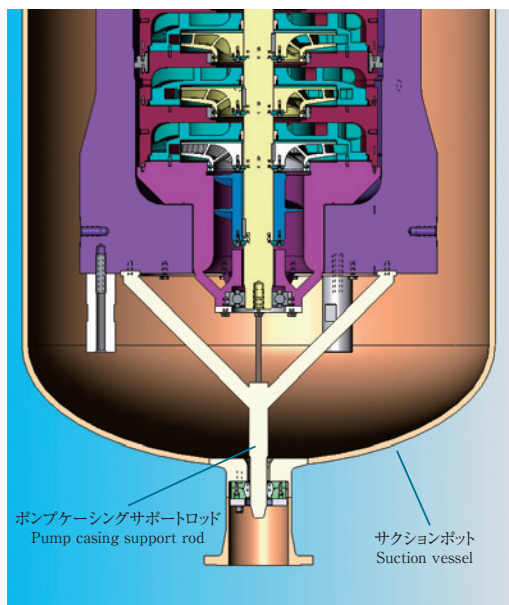


図3 ポンプケーシングサポート

Fig. 3 Pump casing support with the suction vessel

ポットから支持することによってポンプ本体の剛性を向上させている。このサポートによってベアリング装備部のケーシング剛性及び固有値を大きく高め、さらに、船体から受ける揺動による横方向荷重を受けるヘッドプレートとポンプ本体を取り付けるボルトへの曲げ応力を低減している。

3-3 ポンプ軸サポート

通常のポンプ運転中は、TEM機構（Thrust Equalizing Mechanism）によって回転体重量及びスラスト力を軸方向にバランスし、自己潤滑玉軸受で半径方向は支持されている。

ポンプを停止すると、下部玉軸受によってポンプ回転体重量が支持される。船体の動揺によって主軸を回転させる加速力が作用した場合、十分な潤滑がないまま玉軸受がスピンしてしまう。このような状態が長く続くと玉軸受の初期劣化に繋がるおそれがある。

このため停止状態において、不測の回転を防止するため主軸抑え機構も用意されている。本機構は、単純に主軸を固定し、ポンプ停止時において回転を防止する構造となっている。図4及び図5に本機構を示す。

図5に示すとおりフレキシブルチューブを使用し外部からの気体圧力によって本機構を制御している。

4. 動力回収システム

再ガス化プロセスでのエネルギー回収法の原理であるランキンサイクルは熱を動力に変換する熱力学的サイク

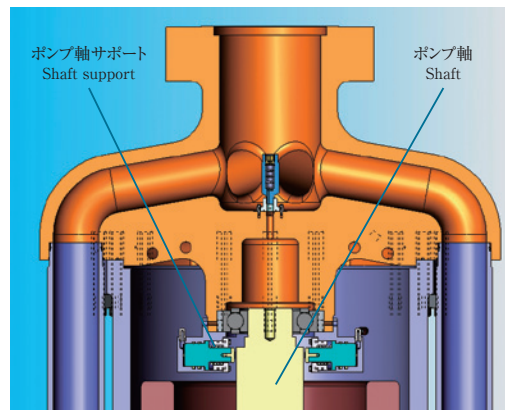


図4 ポンプ軸安定装置断面図

Fig. 4 Cross sectional view of the shaft stabilizer

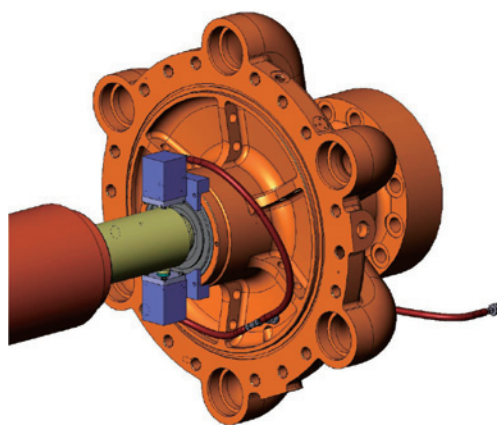


図5 ポンプ軸安定装置外観

Fig. 5 Overview of the shaft stabilizer

ルの一つである。

閉ループ内にある特定の作動流体に外部から熱を供給し、放熱器によってサイクルを起こす。全世界の電力の約80%は本基本サイクルを用いて発電されている。圧力とエンタルピーの表示は典型的なモリエール図で示される²⁾。

1相の蒸気膨張による理想的なランキンサイクル³⁾は以下の4過程からなる（図6）。

- ・1→2 ポンプ内部での作動液体昇圧による等エンタルピー圧縮
- ・2→3 ボイラでの加熱による液体の完全蒸発
- ・3→4 タービンエキスパンダ減圧による等エンタルピー膨張
- ・4→1 低圧での放熱による再液化

〈2相ランキン動力サイクル〉

2相流体の理想ランキンサイクルは前記同様の4過程（図7）からなるが、加圧された液体は飽和ドーム内に留まり部分的に蒸発したまま、2相液エキスパンダ内で2相流として等エンタルピー膨張変化する。

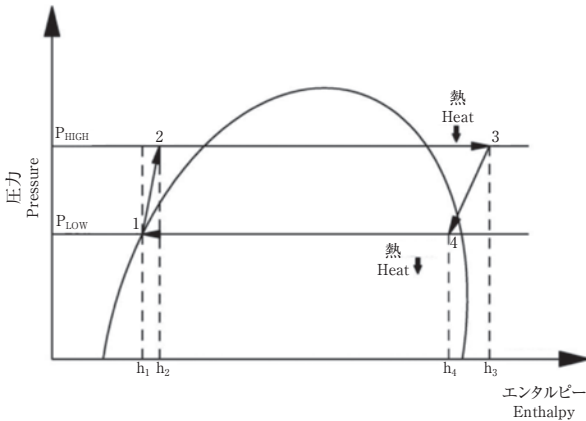


図6 理想状態のランキンサイクル変化
Fig. 6 Four steps of an ideal Rankine cycle

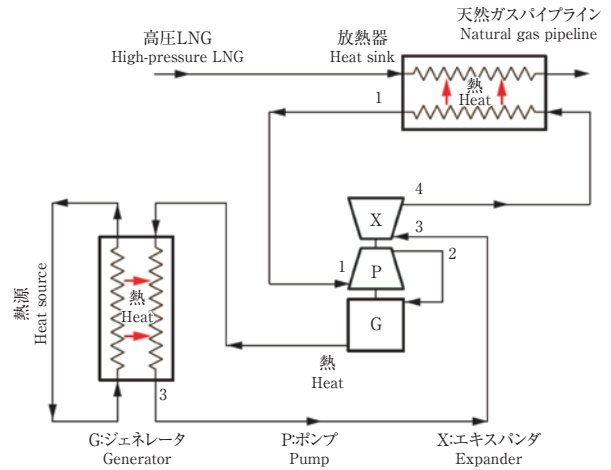


図8 ランキンサイクル機器配置概念図
Fig. 8 Rankine cycle equipment schematic

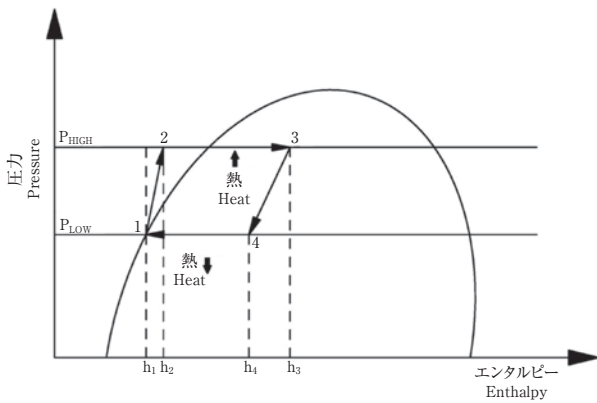


図7 2相状態でのランキンサイクル変化代表例
Fig. 7 Graphical representation of the Rankine cycle with a liquid vapor two-phase expansion

等エンタルピー膨張過程でのエネルギー回収を高効率にするため、2台の熱交換器と1台のポンプ2相エキスパンダジェネレータ (PTPXG) で構成されたランキンサイクル概念図を図8に示す。

このPTPXGは高効率のエネルギー回収を実現するため、小型化したポンプ、2相エキスパンダ及び誘導ジェネレータを1本の回転軸に取り付けた構造となる。

図8に示す2相膨張によるランキン動力サイクルは、以下の4過程の2相膨張を繰り返す。

- ・ 1→2 動力入力を受けたポンプ“P”によって1相作動流体を低圧から高圧へ昇圧
- ・ 2→3 昇圧された1相作動流体はジェネレータ“G”通過時に熱せられ部分的に蒸発した状態で海水又は他の熱源を使った熱交換器を通過し加熱
- ・ 3→4 2相エキスパンダ“X”内を昇圧され加熱された2相飽和作動流体が通過し減圧して動力発生
- ・ 4→1 LNGを媒体とする放熱器を装備した熱交換器を通過し低圧2相飽和作動流体から1相作動流体

に凝縮

小型化したポンプ2相エキスパンダジェネレータ(PTPXG) 2種類概念図を図9及び図10に示す。図9に示す構造のPTPXGでは下側ノズルからポンプに作動流体を吸い込み横側ノズルから吐き出し、ポンプ上部のジェネレータハウジングに横側ノズルから導入されジェネレータを冷却しジェネレータの熱損を回収後横側ノズルから排出される。その後、熱交換器で加熱され飽和状態の作動流体が2相エキスパンダ内で膨張することで動力を発生し、ポンプと誘導ジェネレータを回転させる。

図10に示す構造のPTPXGではポンプを出た作動流体が直接ジェネレータハウジング内を通過しジェネレータを冷却した後、横側ノズルから排出される。

両構造共に、羽根車上部のシール前後で圧力差を抑えることによってシールを通過する漏れ量及びポンプスラスト力を最小限にできる。

小型PTPXGには以下の利点が挙げられる。

- ・ エクスパンダの出力動力はポンプ消費動力より高く、その差がジェネレータによって電気エネルギーに変換される。
- ・ ポンプとモータの分割がなく損失が解消される。
- ・ 海水若しくは別の熱源による加熱に加え、誘導ジェネレータの損失が作動流体の一部加熱に使用されるため効率向上となる。
- ・ シール間の圧力差がないため作動流体の漏れを最小限にできる。また、少量の漏れは閉ループ内のポンプ、エキスパンダ及びジェネレータ間だけで発生する。
- ・ 逆方向のスラスト力によって玉軸受荷重が低減でき、玉軸受の寿命が長くなる。

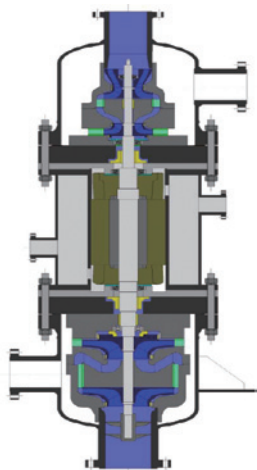


図9 小型化ポンプ2相エキスパンダ組立図 (PTPXG) 1
Fig. 9 Compact assembly of a pump two-phase expander generator (PTPXG) 1

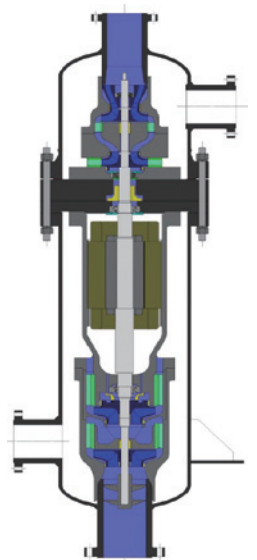


図10 小型化ポンプ2相エキスパンダ組立図 (PTPXG) 2
Fig. 10 Compact assembly of a pump two-phase expander generator (PTPXG) 2

5. おわりに

本稿で紹介した増強策はオフショア向け高圧多段クライオジェニックポンプに既に取り入れた実績があり、各種仕様にも対応可能である。また、FSRUの効果的かつ経済的な動力回収手法として、1軸のポンプ・2相エキスパンダ・誘導ジェネレータを使用したランキン動力サイクルの概念を紹介した。

参考文献

- 1) JOGMEC ホームページ：石油・天然ガス用語辞典.
- 2) Goswami, A. et al “Two-phase fluid cycle efficiently recovers power from FSRUs” Hydrocarbon Engineering, July 2011, p 37- 41.
- 3) Yunus A. Cengel et al., “Thermodynamics: An Engineering Approach” The McGraw-Hill Companies, Inc., Hightstown, NJ, USA 1998, ISBN 0-07-011927-9.