

LPG-FPSO の開発・建造

Development and Construction of LPG-FPSO

栗 島 裕 治	アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッドエンジニアリング事業部 課長
青 木 栄 治	アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド 技監
石 川 寛 樹	アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド呉工場生産管理部 部長
渡 辺 一 夫	アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド呉工場船舶海洋設計部 次長
盛 田 隆	アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド呉工場船舶海洋設計部 課長

世界初、かつ最大の洋上 LPG 貯蔵容量をもつ LPG-FPSO を IHIMU の総合技術力と建造能力を活かし、契約から引渡しまで約 33 か月の短納期で開発、設計、建造を完遂した。遠隔海域での連続稼働、低船体動揺、洋上荷役など FPSO としての要求を満足すべく、信頼性の高い IHI-SPB 方式タンク技術の採用、最適船型、メンテナンスの容易性、安全性、二浮体間の運動解析など種々の検討を行った。石油随伴ガスの製品化という本船の役割が地球環境保全の一助となることを祈念し、その開発・建造の概要を紹介する。

IHI Marine United Inc. has developed, designed and constructed the world's first LPG-FPSO, with the largest storage capacity as a marine storage facility, by applying IHI's excellent technology, design capability and highly qualified construction skills. To meet the unique requirements of the LPG-FPSO, e.g. long operability at a site far from dry docks, reduced vessel motions, cargo transfer between floaters, easiness of maintenance, high safety, etc., IHI has applied several unique technologies such as the IHI-SPB tank system. Continuous operation of the LPG-FPSO to commercialize the associated petroleum gas field will contribute toward reduction of CO₂ emissions to moderate climate change. The outline of the LPG-FPSO is described.

1. 緒 言

株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド（以下、IHIMUと呼ぶ）では、2004 年 11 月、世界初となる浮体式液化石油ガス生産貯蔵積出し設備（LPG-FPSO：LPG Floating Production, Storage and Offloading system）を、船主であるモナコの Single Buoy Moorings 社（以下、SBM 社と呼ぶ）に引き渡した（第 1 図）。本 LPG-FPSO（以下、本船と呼ぶ）は、アンゴラ共和国の沖合約 50 km、水深約 60 m のサンハ鉱区に一点係留装置で設置され、当海域から原油とともに産出されるプロパン、ブタンなどのいわゆる随伴ガスをパイプラインで導き、船上のプロセスプラントでブタンとプロパンに分離し、冷凍装置で冷却した後、船体内のタンクに貯蔵し、適宜配船される LPG 船に LPG を積み出すものである。

本船は、独自開発技術である IHI-SPB（Self-supporting Prismatic shape IMO type B：自立角型 IMO タイプ B）方式タンクなどの高度

な技術力 多くの原油 FPSO および FSO（Floating Storage and Offloading system：浮体式貯蔵積出し設備）の建造実績 1997 年にナイジェリア沖合に建造し、無故障で稼働を続けている LPG-FSO に対しての高い評価、などによって受注した^{(1)~(3)}。なお、IMO とは International Maritime Organization（国際海事機関）をいう。



第 1 図 LPG-FPSO 全景
Fig. 1 Overall view of LPG-FPSO

本船は、SBM 社とアンゴラ国営石油公社 (SONANGOL) との合併会社である SONASING 社に引き渡され、2005 年 5 月現在、前述設置海域で実際の随伴ガスを使用した試運転を実施中である。本稿では、その開発と建造の概要を紹介する。

2. 開発・建造の背景

原油とともに産出される随伴ガス (プロパン、ブタンなどの石油ガス) は、従来はその場で焼却されるか、油田の自噴力保持のため元の油田内に戻されていた。しかし、近年、環境問題のクローズアップ、CO₂ 削減やエネルギー資源の有効利用という観点から、随伴ガスを液化ガスとして製品化し、消費地に運ぶ動きが注目されてきている。製品化のためにはガス分離装置、液化および冷凍装置、貯蔵タンク設備などが必要となる。

海上プラットフォームと陸上タンクを利用する方式や陸上に全施設を設置する方式など各種方式がある。そのなかで、貯蔵タンクを船体内に設け、甲板上にプラントや冷凍装置を設ける LPG-FPSO は、コスト削減が期待できる方式であり、今後の建造増大が予想される。陸地から遠く、かつ深い海域など採算的に限界に近い海域にも活用が期待される方式である。

3. 要求仕様と適用技術

本 LPG-FPSO を実現するために要求された主な仕様と適用技術は以下のとおりである。

3.1 20 年間入渠なしでの連続稼働を実現するための高い信頼性

本船の一生にわたってその信頼性が確保される IHI-SPB 方式のカーゴタンクの採用を始め、各種機器についても、材料、塗装などに特に耐久性に優れたものを採用した。また、構造強度については船体、タンク、プラント部も含めて、設置海域よりも厳しい条件である北大西洋の海象をベースとして解析を行い、その健全性を確認した。

3.2 プラントシャットダウン (緊急稼働停止) を回避するための技術

プラント自身の高仕様、高冗長性に加えて 10 年に一度の大波でもプラントの性能が落ちないようにする。このため、運動解析と水槽試験を基に船体運動を極力抑える船型を追求した。この結果、ロール角度を 5 度以内とする最適な船型を開発した。また、想定される風波の組合せにおいても船体運動を抑えるため、船方位維持用に 3 000 kW 級

スラストを搭載した。また、発電機そのほかのユーティリティについても十分な冗長性をもたせた。

3.3 洋上でのメンテナンスの容易性

浮体設備では限られたエリア上に多くの機器が配置される。洋上でのメンテナンスを容易にするため本船では各機器の搬出経路、修理エリアの確保などの配置要素を十分検討した。この結果、5 台のデッキクレーンを設置し、最適な配置によってスムーズな保守性能を実現した。

3.4 安全性の確保

プラント部、貨物部、機関部とその関連設備、配管、機器については、客先とともに HAZID (Hazard Identification)、HAZOP (Hazard and Operability) と呼ばれる安全性を確認した。累積被害の少ない管配置、緊急時の LPG 放出用プロセスベント、圧力容器の耐熱保護、プラント部での爆発を想定した居住区構造や貨物装置室などへの爆風軽減パネルの設置など種々の対策を講じた。

3.5 大型化への挑戦

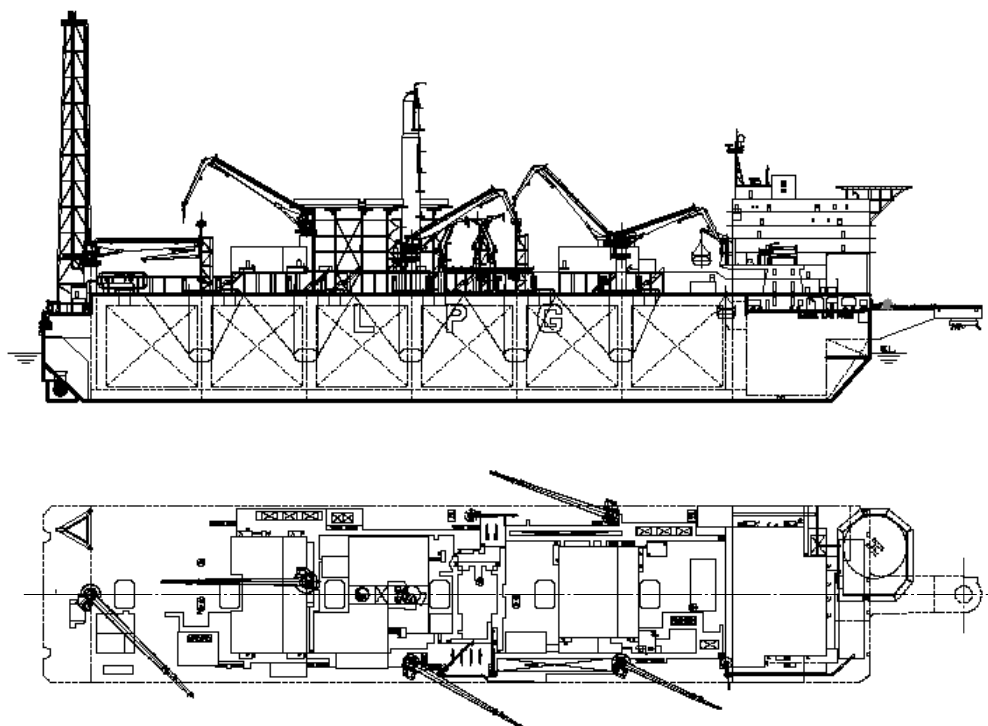
本船は、既存の LPG 船 (最大約 85 000 m³) と比較しても世界最大のカーゴ容積である。その設計解析、建造に当たっては細心の注意を払った。

4. 本船の仕様

4.1 全 般

主要目を以下に、全体配置図を第 2 図に示す。

Length overall (Loa)	
全	長 262.65 m
Length between perpendicular (Lbp)	
垂	線 間 長 230.00 m
Breadth (Mould)	
型	幅 49.00 m
Depth (Mould)	
型	深 さ 29.30 m
Design draft (Mould)	
計画満載喫水 (型)	
13.20 m	
Scantling draft (Mould)	
構造 喫 水 (型)	
13.20 m	
Cargo storage capacity	
貨物 (LPG) 槽容積 (-50)	
135 000 m ³	
Cargo production capacity	
L P G 生 産 能 力	
5 940 m ³ /d	
Cargo offloading capacity	
L P G 荷 上 げ 能 力	
5 400 m ³ /h	



第 2 図 全体配置図
Fig. 2 General arrangement

Deadweight Approx.

載 貨 重 量 約 93 000 t

International gross tonnage

国 際 総 ト ン 数 111 246 トン

International net tonnage

国 際 純 ト ン 数 33 374 トン

カーゴタンクは左右一対の 6 タンクから成り、 -50°C で $135\,000\text{ m}^3$ の容量をもち、すべてのタンクはプロパン、ブタンの両者を搭載できる仕様となっている。船体前端部には一点係留装置（ターレット）と 60 人仕様の居住区を配置した。デッキ上には船体前方から、プロパン冷凍装置室、プロパン・ブタン分離プラント（デプロパナイザ）、ブタン冷凍装置・再液化装置室を配置している。また、船尾には LPG 放出用プロセスベントタワーを配置した。

なお、船籍はバハマ共和国、船級は ABS（American Bureau of Shipping）である。

4.2 プラント、貨物部

常温・高圧のプロパン・ブタンの混合体（ 22 bar ， 18°C ）は、海底パイプラインとライザ管を通じて本船に導入され、デプロパナイザプラントによってプロパンとブタンに分離される。第 3 図にプロセスフローを示す。

プラント内では、混合液はまず LPG サージベッセルで 6.2 bar ， 18°C に調整され、 H_2S スクラバで硫黄分を除去し

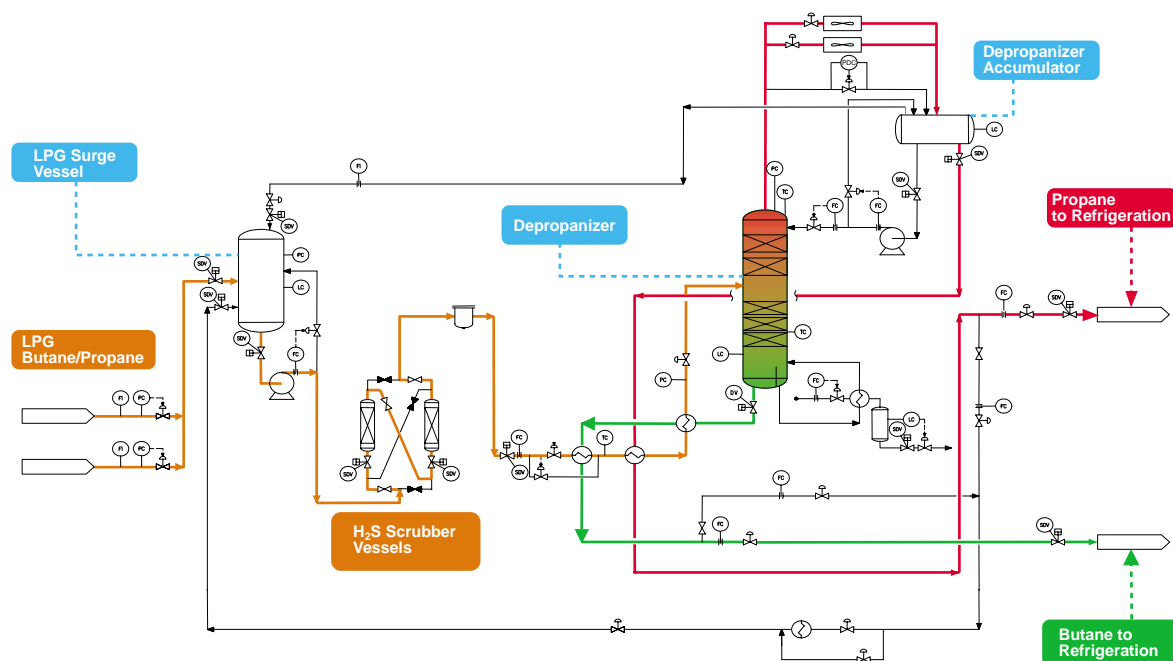
たのち 30°C に昇温され、分留塔で 17 bar ， 100°C のプロパンとブタンに分離される。分離されたプロパン、ブタンは冷凍装置室でそれぞれ、 -42°C ， -10°C 程度に冷却され、液化ガス（LPG）としてカーゴタンクに貯蔵される。プロパン、ブタンの冷凍装置はそれぞれ、必要能力の $50\% \times 3$ 台、 $100\% \times 2$ 台の能力をもつ。

タンク内の LPG は外部からの熱侵入によって気化するが、再液化装置で液化し、再びタンクに戻す。再液化装置としてはプロパン専用に必要な能力の $100\% \times 2$ 台、プロパン・ブタン兼用に $100\% \times 1$ 台、ブタン専用 $100\% \times 1$ 台を装備している。冷媒はプロパンを使用している。デプロパナイザプラントは国内の日揮株式会社、冷凍・再液化装置はノルウェーの HGS（Hamworthy Gas Systems AS）社のものを採用した。

タンク内の LPG は適宜配船される LPG 船に最大 10 台のカーゴポンプで積み出される。また、加圧されたブタンの積み出しも可能であり、その能力は $550\text{ m}^3/\text{h}$ である。

4.3 船殻、タンク部

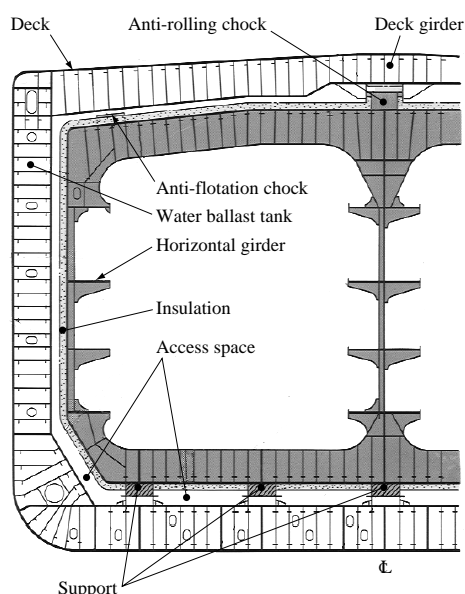
構造については船殻、タンク、プラントデッキも含めてすべて北大西洋の海象（再現期間 20 年）、サイトでの海象（再現期間 100 年）、曳航時の海象すべてに対して最大応力および疲労解析（設計寿命 30 年）を行い十分な強度をもたせている。



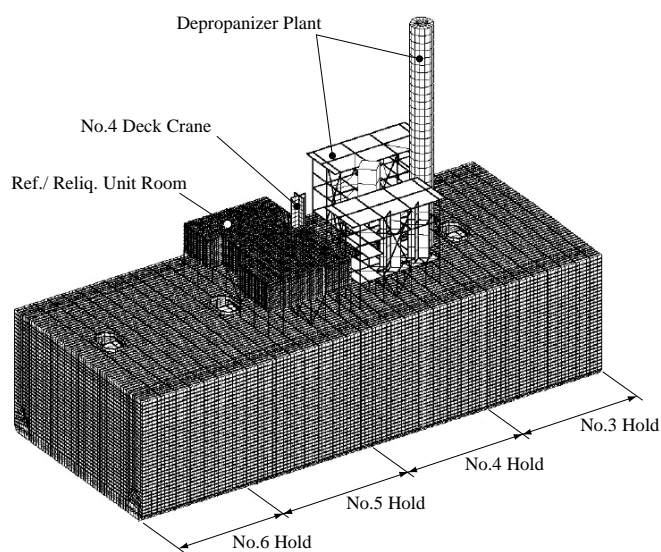
第 3 図 プロセスフロー
Fig. 3 Process flow of plant part

タンクは前述のとおり，他社建造の LPG 船で主流である自立角型 IMO タイプ A とは全く異なる設計，建造思想に基づいており，高い信頼性を誇る IHI-SPB 方式を採用している．第 4 図に SPB タンク断面図を示す．IHIMU が建造した IHI-SPB 方式の LPG 船，LNG 船，LPG-FSO においてタンクの損傷事例は皆無である．本船のように長期間にわたり連続稼働が要求される FPSO には最適の方式であることが客先から評価されている．

また，本船ではデプロパナイザプラント，冷凍装置室，再液化装置室が甲板上から高さ約 8 m 以上に設置されている．非常に大型の構造物であるため船体と切り離して設計することは適切でなく，船体デッキ部と一体として構造解析を行った．第 5 図に全体解析モデルを示す．特にデプロパナイザプラントは，陸上プラントと異なり動揺する船体上に設置されるため，疲労強度も含めて IHIMU で詳細に強度チェックを行った．



第 4 図 SPB タンク断面図
Fig. 4 Cross section of IHI-SPB tank



第 5 図 全体解析モデル
Fig. 5 Structural model of plant part and hull part for FEM analysis

4.4 船体部

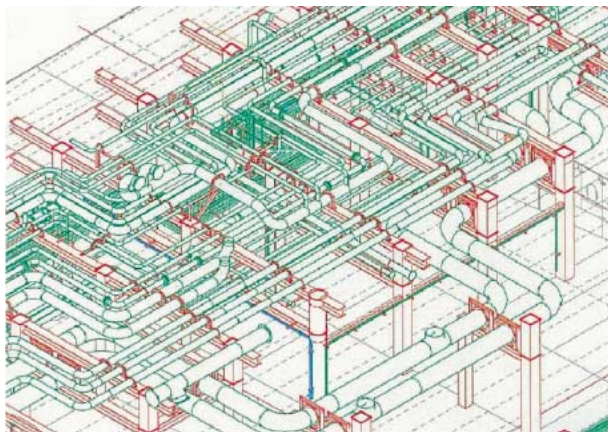
LPG 積出し時に LPG 船（計画最大 85 000 m³）は船体に横付けされるが、その係船に必要なフェンダ、ウインチおよびクイックリリースフックを甲板上に装備している。仕様決定に当たっては、LPG 積出しの海象に基づき独自開発の解析プログラムを用いて本船と LPG 船の両者の相対運動を推定し、安全に積出しのできる設計とした⁽⁴⁾。また将来の輸送量拡大に備え、船体後方に最大 125 000 m³ 級の LPG 船に対応したタンデム式の係船装備および荷役設備を備えている。

配管設計は船殻設計同様、IHIMU 独自開発の三次元 CAD システム（「あじさい」システム）を用いて最適な設計を行った。第 6 図に三次元甲板上配管配置図を示す。

居住区は 60 人仕様で、長期滞在にも快適な生活を保障する豪華な内装を誇るとともに、H 級防火仕切（H-60）仕様の防火壁、窓、ドアの採用などによって安全面を強化している。居住区画の最上段に設置されるヘリコプタデッキの設計に当たっては、突風と煙突の排気ガスの影響を検討するため石川島播磨重工業株式会社（以下、IHI と呼ぶ）技術開発本部（横浜）で風洞試験を行い、最適形状・配置を実現した。第 7 図に風洞試験の様子を示す。

4.5 機関部

すべての必要電力をまかなうため、軽油および天然ガス焚き兼用のボイラ（90 t/h × 3 台）、タービン発電機（9 000 kW × 3 台）、ディーゼル発電機（3 000 kW × 1 台）、非常用発電機（850 kW × 1 台）を装備している。また、そのほかユーティリティとしてはイナートガス発生装置、冷却水ポンプ（50% × 3 台）、消火ポンプ（50% × 2 台）、デリュージポンプ（50% × 2 台）、非常用消火ポンプ（50% × 2 台）などを備えている。



第 6 図 三次元甲板上配管配置図
Fig. 6 Three dimensional piping arrangement on deck



第 7 図 風洞試験
Fig. 7 Tunnel test

4.6 電気計装部

本船では浮体部、プラント部全体を集中制御する巨大なコンピュータシステム（Monitor and Control System：M&CS）を備え、FPSO コントロールセンター（FCC）で集中管理を行っている（第 8 図）。M&CS は機器の自動制御と監視を行うプロセスコントロールシステムと緊急時の警報およびシャットダウンを行うセーフティシャットダウンシステムから成りたっている。

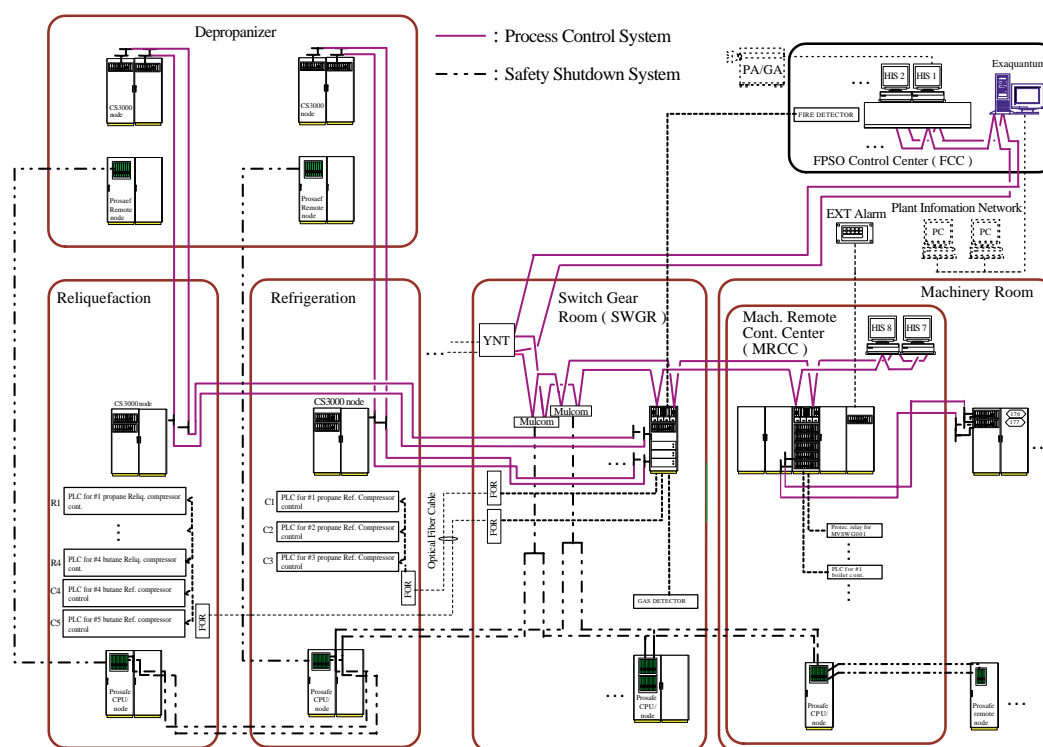
第 9 図に M&CS システムダイアグラムを示す。本 M&CS によって最小人数で連続稼働が実現されている。

5. 建 造

主船体およびカーゴタンクは IHIMU 呉工場で建造、デプロパナイザプラントは IHI 新宮工場、居住区は株式会社アイ・エイチ・アイ・アムテック、また、甲板上パイプラックは IHI 相生工場でそれぞれ建造し、IHIMU 呉工場で本船に搭載した。特に、ターレット、デプロパナイザプラントおよび居住区はフローティングクレーンを利用し、一体化して搭載した。第 10 図にタンク建造の状況を、第 11



第 8 図 FPSO コントロールセンター（FCC）
Fig. 8 FPSO control center（FCC）



第 9 図 M&CS システムダイアグラム

Fig. 9 System diagram of monitoring and control system (M&CS)



第 10 図 タンク建造の状況

Fig. 10 Tank construction



第 11 図 プラント搭載の状況

Fig. 11 Installation of topsides

図にプラント搭載の状況を示す。

2002 年 11 月に建造を開始し、2003 年 11 月からターレット、居住区、デプロパナイザプラントなどを搭載し、諸性能の調整、確認の後、2004 年 6 月に命名式において「SANHA LPG-FPSO」と名付けられ、同年 10 月にガストライアルを終了し、同年 11 月に引き渡した。その後現地まで曳航され、2005 年 5 月現在、設置海域で最終調整と性能確認中である。

FPSO においては設計のみならず、建造、品質管理に関して船体側とプラント側では適用規則や客先要求が異なる

ため、その調整と遵守が注力点の一つであった。また、本船は船主である SBM 社のほか、同鉾区プロジェクトの事業主体である Chevron 社（アメリカ）をはじめとする国際コンソーシアムの仕様要求や安全確認を織り込みながらの設計、建造であり、建造プロジェクトのスケジュール管理にも注力した。

6. 結 言

本船は世界初、かつ LPG 船としても世界最大のLPG-FPSO であり、IHIMU の総合技術力と建造能力を活かし、契約から引渡しまで約 33 か月という短納期で、開発、設計

から建造まで一貫して執り行ったものである。本船が安定した連続稼働を続け、客先およびアンゴラ共和国の発展と地球温暖化防止の一助となるよう祈念するとともに、今後も本船の経験を活かせる同様のコンセプト（LPG-FPSO，LNG-FPSO など）に基づくプロジェクトが増加することを期待する。

参 考 文 献

- (1) M. Ximense, G. J. Adia and A. Abe : Design and Construction of a Floating Storage and Offloading Vessel Escravos LPG FSO SNAME Transactions

Vol.105 (1997) pp.455 - 489

- (2) E. Aoki, Y. Okumura, A. Abe, S. Yamashita and T. Ishiguro : Technological Innovation of SPB Floating Terminal GASTECH'98 Proceedings (1998)
- (3) 奥村好問, 安東明俊, 後川 理 : SPB LNG 船技術の概要と特長 石川島播磨技報 第34巻 第4号 1994年7月 pp.235 - 240
- (4) 横澤 均, 青木栄治, 山下誠也, 石井亮一 : LNG-FPSO と LNG 船との波浪中相対運動に関する実験的研究 日本造船学会 第15回海洋工学シンポジウム論文集 2000年