浮体式石油生産貯蔵積出ユニット（FPSO）の設計

Design of Floating Production Storage & Offloading Unit (FPSO)

長崎造船所　村尾尚文*1　氏家祐二*2
佐藤宏一*3
船舶・海洋事業本部　矢野州芳*4

従来，海洋油田の生産設備はプラットホーム及び海底パイプラインから成る大規模な固定式本格生産設備が主流であった．一方，最近の海洋油田の開発は小規模化の傾向にあり，油田枯渇後に他の油田に移設可能な浮体式石油生産貯蔵積出ユニット（FPSO）の需要が伸びている．当社は，これにこたえるべく英国Shellの北海油田向け世界最大級のFPSO“ANASURIA”の船体部を設計・建造し1996年1月に引渡した．本報では当社で設計・建造した“ANASURIA”の技術的特徴を解説する．

In the past, large scale fixed production facilities such as fixed platforms and sub-sea pipelines were normally used for offshore oil production. However, offshore activities are increasingly involving marginal fields which has resulted in an increasing demand for Floating Production Storage and Offloading units (FPSO) as relocatable facilities. Accordingly, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. has designed and built the hull part of the world largest class FPSO, the ANASURIA for Shell UK Exploration and Production (Shell Expro) in the UK North Sea and delivered her to Single Buoy Moorings Inc. on January, 1996. This paper introduces the technical features of MHI's ANASURIA.

1. まえがき

当社は，新造としては世界最大級の浮体式石油生産貯蔵積出ユニット（FPSO：Floating Production Storage and Offloading Unit）をスイスSingle Buoy Moorings Inc.(SBM)から受注し，当社長崎造船所香焼工場で建造の上，1996年1月に図1に示す“ANASURIA”の船体部を引渡した．

本FPSOは英国Aberdeenの沖合い175 kmの英北海に設置され，英国ShellのTeal，Teal South及びGuillemot Aの3油田の石油・ガス生産設備としてドック入りすることなく長期間連続稼働するものである．

従来，海洋油田の生産設備は固定式プラットホームが主流であったが，最近の海洋油田開発の小規模化の傾向に伴い，油田枯渇後に他の油田に移設・転用できるFPSOの需要が伸びている．本FPSOも前述の小規模油田の生産設備として建造されたものであるが，設計に当っては海象条件の非常に厳しい北海で連続稼働する要求にこたえるため，船体部疲労強度，機器の信頼性，安全性，保守性など多くの点に配慮した．以下に本FPSOの技術的特徴を紹介する．

2. FPSOによる石油・ガス生産の概要

本FPSOプロジェクトの石油・ガス生産システムの概要は以下のとおりである．図2は，本プロジェクトの油田開発概略配置[1]を示す．

(1) Teal, Teal South, Guillemot Aの3油田に配置された海底油井から生産されるHydrocarbon（油，ガス，水の混合物）を，海底パイプライン，フレキシブルライザ及び一点係留装置に内蔵したスイベルを介してFPSOに輸送する．

(2) 輸送されたHydrocarbonは，FPSOのデッキ上に設置されたプロセスプラントにて，原油・ガス・水に分離処理される．

図3にプロセスプラントの流れ図[1]を示すが，最大で原油生産60 500 bbl/d，ガス生産36 MMScf/d（百万立方フィート/d），水圧入85 000 bbl/dの能力を有している．

図1　長崎を出港し，英国へ向けて曳航される“ANASURIA”
ANASURIA towed out for UK from Nagasaki

(3) 分離処理された原油はFPSO中央部のレセプションタンク（No.4 COT）に一時貯蔵して原油に残留した水分を最終分離した上で，隣接する6個の貯蔵タンク（No.1, 2, 3, 5, 6, 7 COT）に貯蔵する．貯蔵された原油は計量装置で計量しながら船尾に係留されたシャトルタンカーにオフローディングホースを介して定期的に積出される．

(4) 分離されたガスは，FPSOのデッキ上に設置されたガスタービン発電プラントの燃料として使用されるほか，近隣のFulmar海底パイプラインを介して英国のSt. Fergusに陸揚げされる．

(5) 油田の生産圧力を維持するために，分離処理された水は大型の水圧入ポンプ2基を介してそれぞれの油田に圧入される．

当社は，上記(3)の機能を担うFPSOの船体部及び居住区の設計・建造を担当した．

3. 設計条件

本FPSOの設計条件及び適用規則は以下のとおりである．

3.1 設計条件

本FPSOは，表1に示す世界でも最も厳しい北海の海象条件及び以下の設計条件に基づき設計されている．

- 設計耐用年数　20年
- 船殻疲労強度安全係数　3（設計耐用年数に対して）
- 原油貯蔵能力（98 % full）　850 000 bbl

*1 造船設計部主査　*3 造船設計部船殻設計課
*2 造船設計部船舶計画課　*4 船舶技術部海洋計画グループ主務

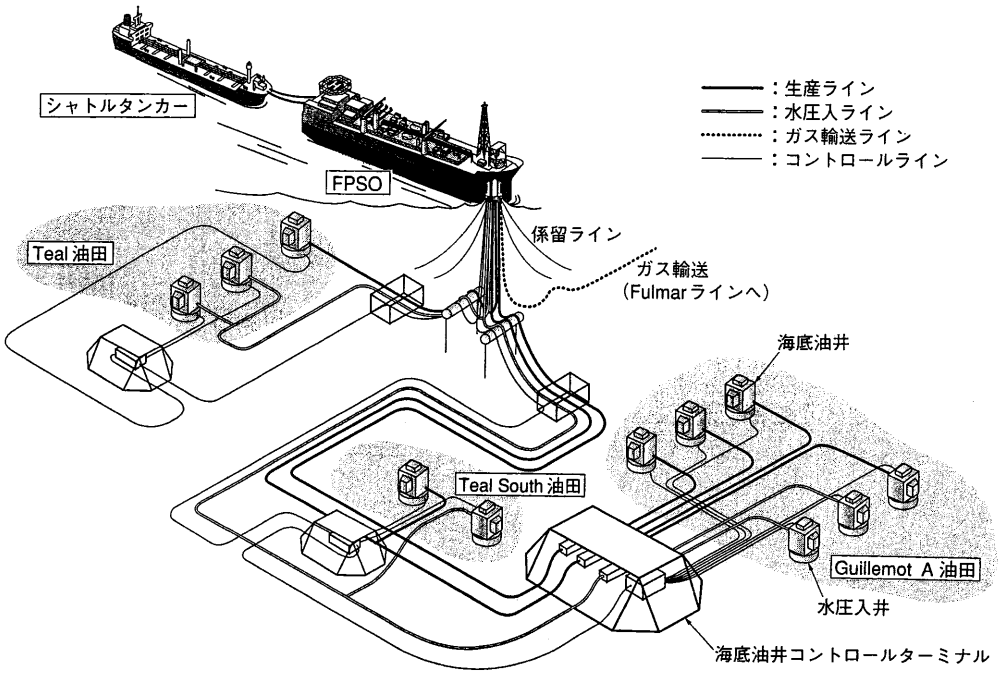

図2　海底油田開発の概略配置
Fields sub-sea development schematic

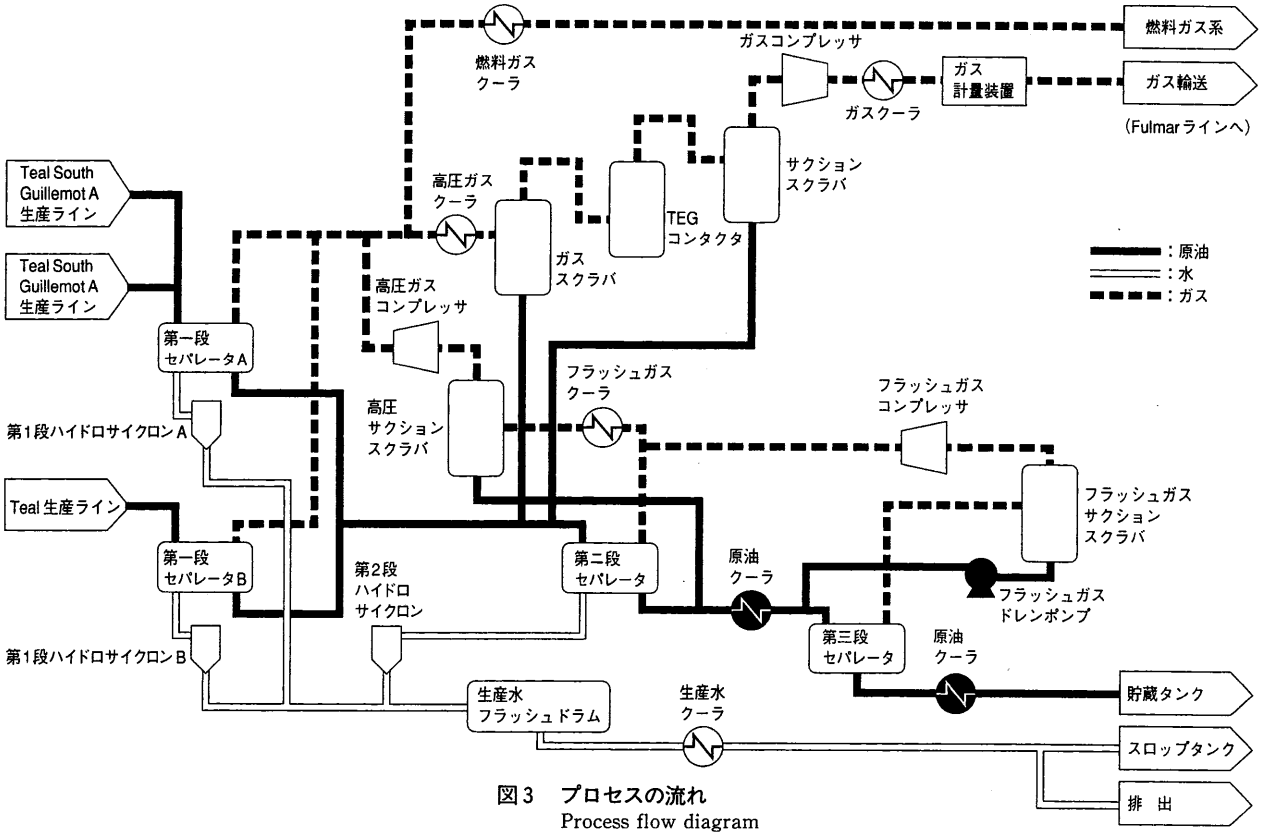

図3　プロセスの流れ
Process flow diagram

表1　設計海象条件（再現期間100年）
Design sea condition (return period : 100 years)

水深（基本水準面下）		88.0 m
最大潮位		1.7 m
波、潮流、風の条件	有義波高	13.6 m
	波周期（ピークスペクトラル）	12.0 s
	最大波高	25.1 m
	波周期（最大波高時）	15.3 s
	最大風速（1 min 平均）	41.5 m/s
	最大潮流	1.05 m/s

●オフローディング容量　　5 600 m^3/h

3．2　適用規則

英国領北海に設置される海洋構造物には，1995年11月に発効した英国HSE（Health and Safety Executive）の新法規Safety Case Regulationの適用が義務付けられるが，本FPSOはこの法規の完全適用・承認を取得した初の海洋構造物となった．また，船体部はロイド船級協会（LRS）の鋼船規則に加え，構造材料に関してはLRSのMobile Offshore Unit規則を適用した．このほ

かにもSOLAS（海上人命安全条約），MARPOL（海洋汚染防止条約）等の船舶関連国際法規及びCAA（英国航空当局），IEC（国際電気標準会議），API（米国石油協会），OCIMF（石油会社国際海事協議会）等のガイドラインを適用し，さらに曳(えい)航期間中に限り英国船籍も取得した．

4．主要目及び一般配置

4．1　主要目及び主要機器

本FPSOの船体部主要目は**表2**に示すとおりである．

表2　船体部主要目
Principal particulars of hull part

船級	
ロイド船級協会	
“+100 AT, Storage Barge for Service in the Central North Sea”, CCS, IGS, *IWS, with the descriptive notes “pt higher tensile steel”, SBT (LR), COW (LR), Helideck	
主寸法	
全長	231.6 m
垂線間長	225.8 m
型幅	44.8 m
型深さ	23.8 m
計画型喫水	16.65 m
載貨重量	131 180 t
貨油タンク容積（98 % full）	136 664 m^3
発電システム	
ガスタービン発電機*：AC 6 600 V，10 000 kW× 3 基	
非常用ディーゼル発電機：AC 450 V，750 kW× 1 基	
カーゴ及びバラストポンプ	
カーゴポンプ：油圧駆動／サブマージド型　1 400 m^3/h× 7 基	
スロップポンプ：油圧駆動／サブマージド型　450 m^3/h× 2 基	
バラストポンプ：油圧駆動／サブマージド型　1 000 m^3/h× 2 基	
甲板機械	
デッキクレーン*：ディーゼル駆動油圧式　12 t× 2 基	
カーゴホースリール：油圧駆動，8 m 径　巻取り速度　6.5 m/min× 1 基	

注）*：当社所管外の機器

4．2　船　　型

北海の非常に厳しい海象条件（最大波高25 m）下で安定した稼働率を確保するために，船首部は砕波時の衝撃緩和のため半円柱型形状を採用し，またデッキ上への青波打込み防止のため大型のブルワークを設けている．船首部を除く主船体の形状については，建造中の工作精度の確保と船殻重量低減をねらい，極力簡素化した直線形状としている．

また，主寸法の選定についても建造工費低減をねらい，係留装置側から要求される一点係留時姿勢保持性能を確保し得る範囲で，できる限り短尺・幅広（長さ/幅比：5）の船型とした．なお，曳航時の進路安定性と現地での係留安定性向上のため船尾船底をカットアップし，センタにスケグを設けている．

4．3　一 般 配 置

本FPSOの一般配置を**図4**に示すが，厳しい海象条件を考慮して係留装置は船首部に配置した内部ターレット方式係留装置を採用している．居住区は，相対的にガス漏れ等の危険性の高いスイベルを内蔵した船首部のターレットからできる限り離れた船尾に配置している．また，乗組員交代等に常用するヘリコプタデッキは居住区の上部に設けられており，ヘリコプタの事故等万一の際にも居住区への直接の影響を最小限に止めるため，デッキと居住区の間に厚さ1.5 mの緩衝スペースを設けている．

プロセスプラント及びガスタービン発電プラントは，甲板上の3.3 mの高さに設けたプラットホームデッキの上に配置されている．フレアタワーはヘリコプタの発着に支障を来さぬよう，船首

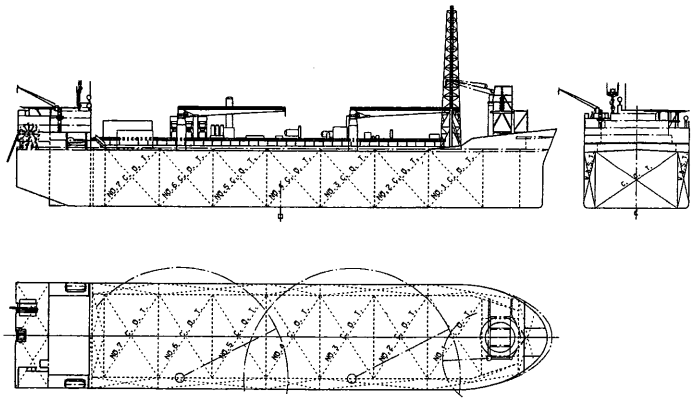

図4　“ANASURIA” 一般配置図
General arrangement of ANASURIA

部に設置している．また，サプライボートからの資材搬入，プロセスプラントのメインテナンスに使用する目的で全旋回式12 t型クレーン2基をデッキ上の右舷(げん)側に配置している．

カーゴタンク部の構造は，他船舶の万一の衝突事故に対してカーゴタンクを防護するため，4.8 m幅のバラストタンクを両サイドに配置した二重船側構造としている（FPSOは定点に係留され，座礁の恐れがないので二重底は設けていない）．

タンデムオフローディング装置として，シャトルタンカー係船用ホーサ・リール装置及び16 inオフローディングホース・リール装置を居住区後方の甲板上に設置しており，また原油出荷に使用する計量装置は，居住区前方の甲板上に設置している．

機関室は船体後部の居住区下に配置され，カーゴポンプ駆動用油圧パワーユニット，イナートガス発生装置，消火ポンプ，補機類を配置している．

5．船体強度及び主な仕様

5．1　船 体 強 度

本FPSOの厳しい設計海象条件を考慮し，構造設計には当社の最新解析技術を投入した．すなわち波浪中縦曲げモーメントを始めとする外力荷重については，浮体の係留特性を考慮できる自社開発プログラムMACOF（Motion Analysis program of COmposite Floating bodies in waves）[2]を用い，当該海域の波浪データに基づく推定を行った．また，構造設計上の最重要課題である疲労強度に関しては，当社開発のDISAM（DIScrete Analysis Method）[3]によりターレット周辺構造から小骨の取合い部等30種類以上の対象構造に対して疲労被害度の推定を行った．**図5**は，本FPSO構造疲労解析のFEMメッシュ図を示す．この解析結果に基づき，20年間での累積疲労被害度に対する安全率を3とするため，局部詳細構造のソフト化等改良を織込んでいる．なおDISAMでは複合荷重下での応力，例えば，係留力と波浪変動圧が同時に作用した場合の変動応力等を精度良く推定することが可能であり，現状では最も合理的な応力推定法とされているが，通常の商船を含めて実船設計への適用は本FPSOが初めてである．また，本FPSOには英国DOE（Department of Energy）のOffshore Ruleが完全適用されたため，主要部材にはほとんどD級鋼が使用されている．また，疲労強度評価に関するDOEのクライテリア[4]や耐衝突強度に関するDOE要求等，通常の船舶以上の設計基準が適用されている．

5．2　係 留 装 置

本FPSOの係留装置として，船首部にSBM社製の内部ターレ

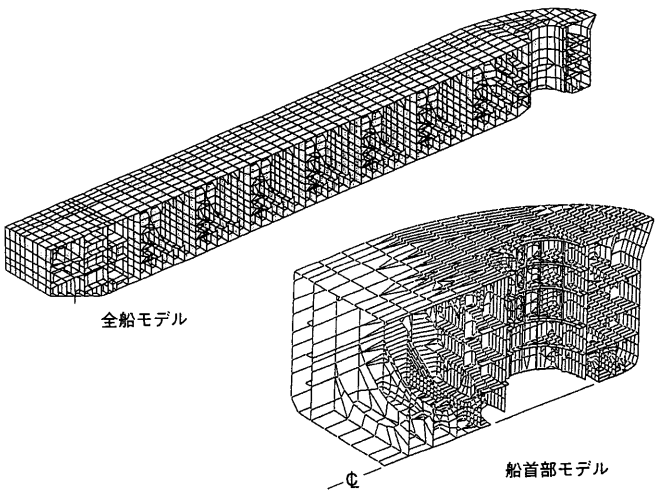

図5　構造疲労解析 FEM メッシュモデル図
Finite Element Model for fatigue strength analysis

ット方式係留装置（Bottom Mounted Internal Turret Mooring System）を装備している．本係留装置は，先端のアンカーパイルから延びた 6 in 径のチェーンと 5.5 in 径の鋼製ケーブルで構成された総長 1 140 m の係留ライン 12 本により，水深約 90 m の海底に係留されている．また，海底油井から生産される Hydrocarbon を受入れるライン，油田へ水を圧入するためのライン，生産ガスを輸送するためのラインなど，合計 14 本のフレキシブルライザが係留装置に結合されている．本 FPSO のプロセスプラントは，係留装置の上部に配置された多段型スイベルを経由して，ライザ・海底油井に連結されている[1]．

5．3　荷役装置・計装制御装置

本 FPSO は，カーゴオイルハンドリングに多機能性を持たせるため，各カーゴタンク及びスロップタンクに独立の油圧駆動サブマージドポンプを装備している．

また，プロセスプラントを含め，本 FPSO のすべてのシステムを制御・監視するための中央制御室（CCR：Central control Room）を居住区内に配置している．計装制御装置として協調分散型制御システム（DCS：Distributed Control System）を装備し，プロセスプラント，機関室内装置の制御・監視を行っている．また，独立した安全システム（火災・ガス検知器，FPSO/プロセス非常遮断装置）や他のシステム（非常消火ポンプ，サブマージドポンプ，HVAC 等）が DCS に接続され，CCR 内に装備した DCS コンソールからすべての制御・監視がコンピュータで集中管理されている．

5．4　居住区安全対策

本 FPSO の居住区は，プロセスプラントでの事故発生等の緊急時の一時避難場所（Temporary Refuge）となっている．このため，プロセスプラントに面した前壁面は H-120（1 100℃にて 2 h 耐用）の防熱壁仕様となっているほか，爆風から居住区を守るための Blast Wall としての強度を確保している．居住区の他の面についても A-60 の防熱壁としており，特に緊急時にヘリコプタで脱出する際の集合場所（muster area）となっている“04”デッキは，下の階の“03”デッキとの間を A-60 の防熱仕様デッキで仕切っている．また，空調システム（HVAC：Heating, Ventilation and Air Conditioning）は，居住区内への可燃性ガスや煙の進入を防ぐため居住区全体を常時 25 Pa から 65 Pa で加圧するほか，空気取入れ口に関しては，風洞試験で確認した上で安全な配置を決定するなど特別な配慮がなされている．

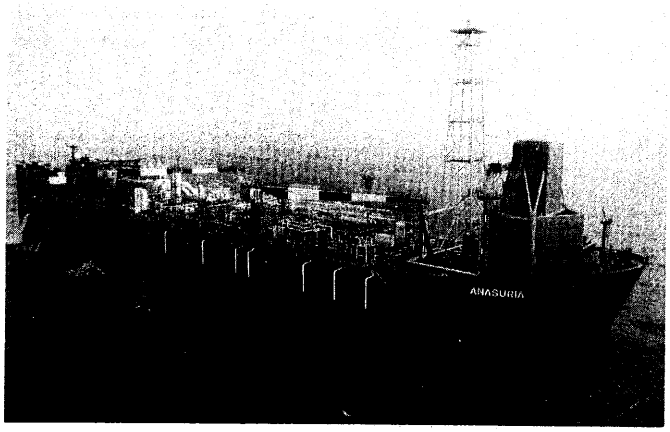

図6　現地据付け完了の“ANASURIA”
ANASURIA on completion at site

5．5　防火・防爆・消火装置

FPSO はプロセスプラント，ターレット，高圧原油・ガス等の危険物を常時取扱い，また，陸地から遠く離れた洋上に孤立しているため，防火・防爆・消火等安全装置の充実が義務付けられている．本 FPSO では，災害予防・検知システムとしての火災・ガス検知器を二重・三重配備し，プロセスプラントを始めすべての区画を包含した防災管理システムが採用されている．また，各対象区画に対応して Deluge, Foam, Automatic Sprinkler, CO_2 等の消火装置が配備され，かつ，コンピュータで集中管理されている．

6．む　す　び

本 FPSO での当社の所管範囲は船体部のみの設計・建造ながら，FPSO の新造は当社にとって初めての取組みであったこと，初の英国 HSE Safety Case Regulation の適用，不慣れな Offshore 法規及び石油産業界の Standard への対応等，多くの面で Offshore のノウハウを勉強しながらの設計・建造であった．

こういった中，客先と技術面で根気よくすり合せ・折衝を行い，また Offshore Standard に習熟した客先及び船級協会の助言を頂くことにより，当初のスケジュールより 2 箇月早く引渡すことができた．今後は本 FPSO で得た経験を生かし，海洋石油開発分野への本格参入に向けて一歩でも前進すべく，鋭意取組んでいく所存である．

最後に，本 FPSO は，当社引渡し後英国 Newcastle に曳航され，AMEC 社にてプロセスプラント及び係留装置を搭載された後，図 6 に示すように 1996 年 10 月現地据付けを完了し，現在順調に稼働中であることを報告する．

参　考　文　献

(1) Alan Dickey, Andrea Felsted, Iain Esau, Nail Potter, ANASURIA, Lloyd's List January 1997
(2) 松浦正己ほか，係留・連結された複数浮体の波浪中挙動解析法，三菱重工技報 Vol.31　No.4（1994）p.266
(3) 倉本美男ほか，波浪中の船体局部応力のシミュレーション手法に関する研究，日本造船学会論文集第 170 号　3-4　p.425
(4) 川野　始ほか，疲労強度精査手法に関する基礎的研究（その 2．板要素 FEM モデル化における構造的応力集中部の SN 線図について），日本造船学会論文集第 176 号　4-1　p.409