

NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の開発

正員 湯川和浩*	正員 浅沼貴之**
佐藤宏*	正員 加藤俊司*
正員 高沖達也***	正員 平井一司***
亀井操***	正員 若狭正明***
正員 有馬俊朗****	正員 浦口能充****
正員 佐尾邦久*****	

Development of the Tandem Offloading System for NGH-FPSO

by Kazuhiro Yukawa, *Member* Takayuki Asanuma, *Member*
 Hiroshi Sato Shunji Kato, *Member*
 Tatsuya Takaoki, *Member* Kazushi Hirai, *Member*
 Misao Kamei Masaaki Wakasa, *Member*
 Toshiro Arima, *Member* Yoshimi Uraguchi, *Member*
 Kunihisa Sao, *Member*

Summary

NGH (Natural Gas Hydrate)-FPSO is deemed as one of the attractive solutions for relatively small gas fields. NGH process plant is installed on board FPSO and it produces NGH from raw gas transferred directly from subsea wells through flowlines and risers. For 3 years since 2004, we have been investigating tandem offloading system for NGH-FPSO and a shuttle tanker in the south east Asia and Oceania. We evaluated workability of the tandem offloading system for NGH-FPSO under combined environmental conditions. As a result, we confirmed that workability under the offloading conditions attained 100% by using a mooring unit that has large restitution force.

Based on the aforementioned results, we carried out a safety assessment of the offloading system according to HAZID (Hazard Identification Study) and were awarded AIP (Approval in Principle) by NK. Furthermore, comparison of economical efficiency between NGH-Chain and LNG-Chain, under the conditions that gas production was between 48 to 275MMscfd, the production period was 30 years, and the destination was Japan, indicated that NGH was advantageous when gas production was 80MMscfd or less.

The results of investigation on the tandem offloading system for NGH-FPSO are reported in this paper.

1. 緒言

天然ガスをハイドレート (NGH) に変換して輸送するシステムは、比較的小規模なガス田においてその優位性を発揮する可能性が高い。対象となる小規模ガス田は、日本から比較的近い東南アジアやオセアニアにも多く、その殆どは海洋ガス田である。そのため、NGH 輸送では、FPSO (洋上生産施設) を設置し、天然ガスを洋上で直接ハイドレート化して輸送船 (以下、シャトルタンカー) に出荷する方法が有力

な開発概念と考えられている。

著者らは、平成 15 年度から 3 ヶ年計画で東南アジア・オセアニア海域の中小規模ガス田開発を対象とした NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の研究開発を進めてきた¹⁾。NGH は微粒子固体であるため、その搬送には種々の方法が検討されているが、この研究開発では、三井造船 (株) において考案された NGH をペレット化して払い出すシステムを対象として、安全性と稼働性能、そして NGH-FPSO の経済性を評価した。本論文では、それらの成果を報告する。

2. 研究の背景

海洋のガス田を開発するために 10 数種類の概念が研究されている。実績のあるパイプラインを含め主な概念について、

* (独)海上技術安全研究所
 ** 海洋政策研究財団 (研究当時 (独)海上技術安全研究所)
 *** 三井造船(株)
 **** (財)日本海事協会
 ***** (株)海洋工学研究所
 原稿受理 平成 19 年 3 月 12 日

Table 1 Gas utilization characteristics

変換	輸送形態	品名	製品効率	製品圧縮率	輸送設備	容積効率
圧縮	常温高压気体	高压ガス	98%	1/130	パイプライン	1
物理変換	極低温常圧液体	LNG	93%	1/600	LNG タンカー	1
	低温高压超臨界状態	CNG	98%	1/300	CNG タンカー	1/3
	低温常圧固体	NGH	abt 90%	1/135	NGH タンカー	4/5
化学変換	常温液体	GTL	abt 50%	1/1000	原油タンカー並み	1
	低温液体	DME	abt 50%	1/1000	LPG タンカー並み	1

変換法、輸送形態、製品効率（材料が持つ熱エネルギーから製品を作るために必要なエネルギーを差し引いた製品のエネルギー）、製品圧縮率（原料ガス比重と製品の輸送時見かけ比重の比）、輸送タンカーの設備、容積効率（タンカーのタンク容積に占める製品の割合）等の特性を比較した結果を Table1 に示す。

物理変換と化学変換は製品効率に大きな差がある。化学変化によりガス（CH₄）を液化するとその過程で約 50%の原料ガスが化学変化に必要な熱エネルギーとして失われる。3種類の物理変換は、極低温常圧液体、低温高压超臨界状態、低温常圧固体という異なる形態を利用して原料ガスに対して、それぞれ 1/600、1/300、1/135 という圧縮率を達成している。圧縮率が高い方が輸送効率は高いが、極低温はタンカーの船価を増大させ、高压はタンカーの容積効率を低下させる。これに対して、原料ガスを高压で送るパイプラインは、原料ガス処理プラントの建造費が小さく熱損失が少なく、他の概念に較べて優れているが、長距離になるとパイプラインの建造費が飛躍的に増大し、経済性を低下させる。CNG もプラントの建造費は小さいが、容積効率が低いため長距離輸送の場合、タンカーの隻数が大幅に増加し、経済性を低下させる。NGH はペレットの場合、大小様々な大きさの球形ペレットを組み合わせることにより容積効率を上げることが出来るが、80%弱が物理的な限界である（同一径の場合、単純立方格子では充填率は 53%、体心立方格子では 68%、面心立方格子では 74%）。また、LNG と CNG に較べれば圧縮率が低いため輸送効率が低い、船価は低いという利点がある。これら 3 種類のシステムの経済性を比較した報告は無いが、その前段階として、従来の検討よりさらに進めて、NGH 輸送の要であるオフローディング装置の開発とその安全性及びシステム全体の経済性を LNG と比較して評価を行った。

3. オフローディング装置の概要

NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の全体図を Fig.1 に示す。No.1 及び No.2 水平コンベヤと垂直コンベ

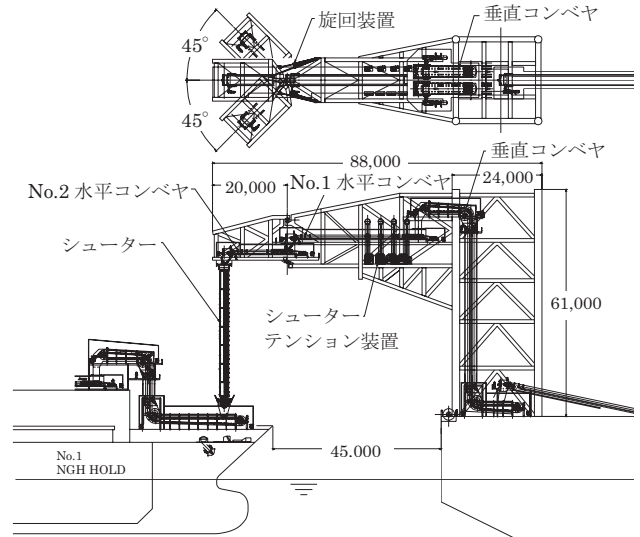


Fig.1 General view of an offloading system

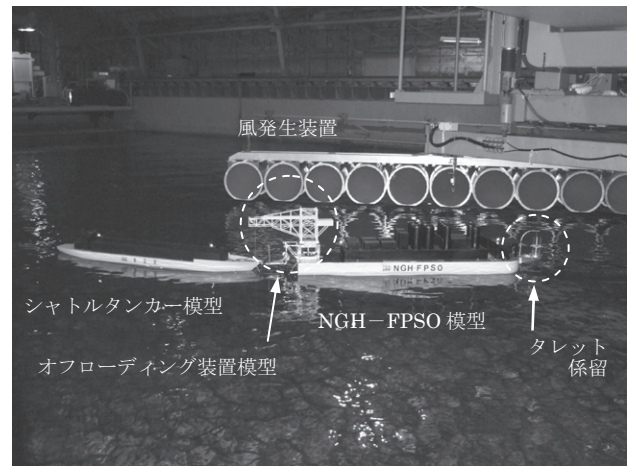


Photo 1 General view of model test

ヤからなるコンベヤシステム、NGH のシャトルタンカーへの受け渡し部となるシューター、そして NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの長周期振れ回り運動によるシューターの変形を吸収するための旋回装置から構成される¹⁾。過去に海上技術安全研究所で実施した本オフローディング装置の機構模型試験²⁾及び NGH-FPSO とシャトルタンカーの動揺試験結果³⁾を基に、ワイヤーロープで形状を保持する蛇腹式のシューターを採用し、その伸縮幅を 24.5[m]とした。また、No.2 水平コンベヤ部分を左右に最大 45[deg]旋回可能な機構とした。

4. 総合模型試験

海上技術安全研究所の海洋構造物試験水槽において、風、波、流れの複合環境条件下における総合模型試験を行い、オフローディング装置の稼働性能に影響を及ぼすと考えられるシューターの相対上下変位並びに浮体の長周期振れ回り

Table 2 Principal dimensions of the model ships

	NGH-FPSO	シャトルタンカー
LPP	300.0 [m]	285.0 [m]
B	60.0 [m]	46.0 [m]
D	33.0 [m]	24.5 [m]
d	16.0 [m]	14.5 [m]

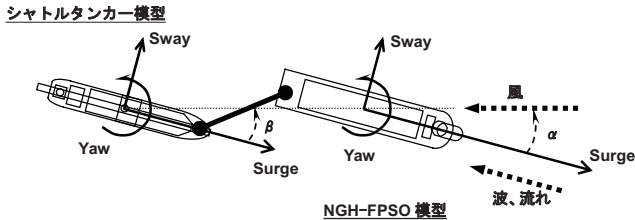


Fig.2 Coordinate system

Table 3 Conditions of the model test

係船装置	ヨーク式係船装置、緊張ワイヤー式係船装置
水深	225 [m]
風	風速：15 [m/s] 風向：0~90 [deg] 30deg 刻み
流れ	流速：1.2 [m/s] 流向：0 [deg]
波	不規則波 スペクトル形：JONSWAP 有義波高：4 [m] 平均波周期：7~15 [sec] 1sec 刻み 入射角：0 [deg]

運動等の計測を行った。

総合模型試験の様子を Photo1 に示す。NGH-FPSO 及びシャトルタンカーは 1/150 スケール模型であり、主要目を Table2、模型試験の座標系及び外力との出会い角の定義を Fig.2 に示す。但し、表中の数値は実機スケールの値である。また、試験条件を Table3 に示す。本試験では、計測用ケーブルが模型の運動に及ぼす影響を極力排除するために船体内臓型のコードレス計測システムを構築しており、計測項目及び計測システムの詳細については参考文献⁴⁾を参照して頂きたい。

NGH-FPSO とシャトルタンカーを結合する係船装置は、ヨーク式係船装置と緊張ワイヤー式係船装置の 2 種類とした。両係船装置模型の外観を Photo2 に示す。緊張ワイヤー式係船装置は新たに提案する係船装置で、Fig.3 に示すようにウインチ機構とワイヤーロープ、そしてワイヤーロープに結合した係船部材で構成され、ウインチ機構で課せられる適切な初期張力とワイヤーロープ自身の張力特性により大きな復原力を生み出すことを特徴としている。また、初期張力は任意可変であり、係船装置全体の復原力特性を係船する船舶に応じて自由に設定できることも特徴の一つである。

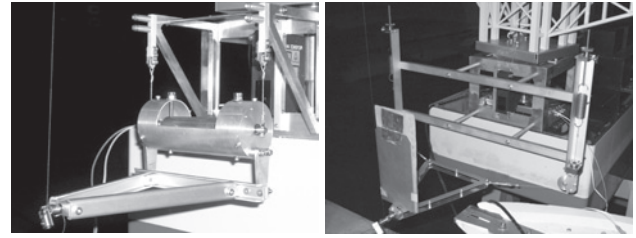


Photo 2 General view of the mooring units

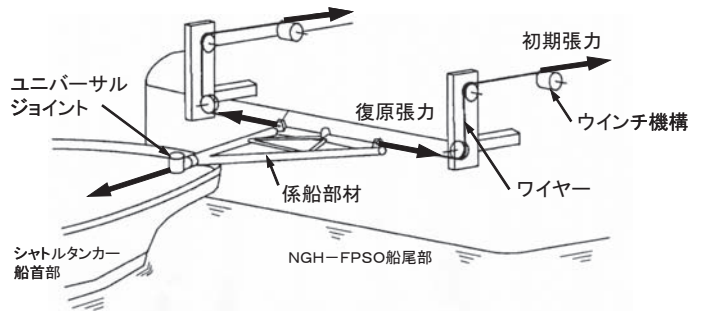


Fig.3 Schematic mechanism of a tension wire mooring unit

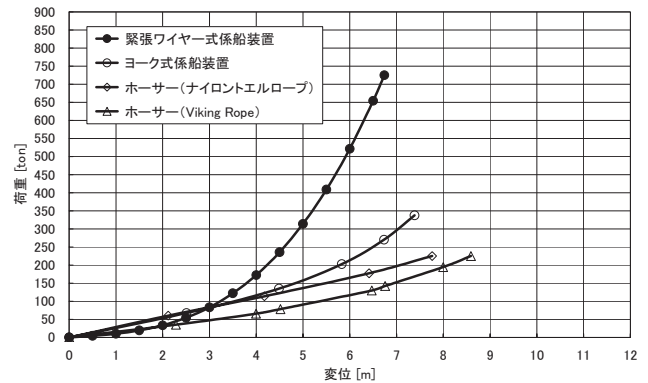


Fig.4 Comparison of the static force of restitution

Fig.4 に各種係船装置の静的復原特性を比較した結果を示す。緊張ワイヤー式係船装置は、従来技術の係船装置に比べて大きな復原力を有し、特に 100[ton]以上の大きな荷重が作用する範囲において、変位量を小さく押さえることが可能であることが分かる。但し、図中のホーサーは直径 168[mm]の Viking Rope 及びナイロントエルロープであるが、実際には直径 168[mm]のナイロントエルロープは無いため、120[mm]までの特性を基にして外挿した推定値である。

5. オフローディング装置の稼働性能評価

5.1 環境条件並びに許容値の設定

シャトルタンカーは 3 隻配船し、10 日に 1 回 (2 日の予備日を考慮) NGH の払い出しを行う。また、環境外力の組み合わせについては、「UKOOA FPSO DESIGN GUIDANCE NOTES」⁵⁾によると設置海域の調査結果によ

Table 4 Environmental conditions

外力	条件
風	風速：15[m/s] (オフローディング条件) 風向：0~90[deg] 30[deg]刻み
波	不規則波 (スペクトル形：JONSWAP) 有義波高：4[m] (オフローディング条件) 平均波周期：4~15[sec] 波向：0~90[deg] 30[deg]刻み
流れ	流速：1.2[m/s] (オフローディング条件) 流向：0[deg]

Table 5 Scatter diagram for south east Asia and Oceania

		平均波周期 [sec]					
		4-	5-	6-	7-	8-	9-
有義波高 [m]	1	317	683	418	456	455	241
	2	37	221	270	316	441	371
	3	11	106	173	213	370	410
	4	1	17	45	137	384	547
	5	0	7	18	45	138	228
	6	0	2	8	21	75	144
	7	0	1	3	6	23	51
	8	0	0	1	3	12	28
	9	0	0	0	1	5	11
	10	0	0	0	0	1	3
	11	0	0	0	0	0	0

		平均波周期 [sec]					
		10-	11-	12-	13-	14-	15-
有義波高 [m]	1	77	17	3	0	0	0
	2	186	63	16	3	1	0
	3	267	114	36	9	2	0
	4	433	220	80	23	5	1
	5	209	121	49	15	4	1
	6	148	96	43	15	4	1
	7	59	42	21	8	2	1
	8	33	25	13	5	1	0
	9	13	10	6	2	1	0
	10	4	4	2	1	0	0
	11	1	1	0	0	0	0

るとされており、もし調査結果が無ければ、最低でも以下の状態を参考にするように記載されている。

- (a) 風、波、流れは同一方向 (Colinear)
- (b) 風と流れは同一方向 (Colinear) だが、波はそれに対し 30[deg]方向
- (c) 波に対し風は 30[deg]、流れは 90[deg]方向

この条件は、想定設置海域における環境外力の組み合わせの大部分を模擬出来るものと考え、それに対するオフローディング装置の稼働性能を評価した。

稼働性能評価のための環境条件と想定設置海域の長期波浪頻度表¹⁾をそれぞれ Table4 及び Table5 に示す。また、NGH-FPSO とシャトルタンカーを結合する係船装置として、ヨーク式係船装置及び緊張ワイヤー式係船装置の 2 種類を対象とした。

ここで、オフローディング装置の稼働率に影響を及ぼす主な要因として次の 2 項目に着目した。

- (1) NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対上下変位

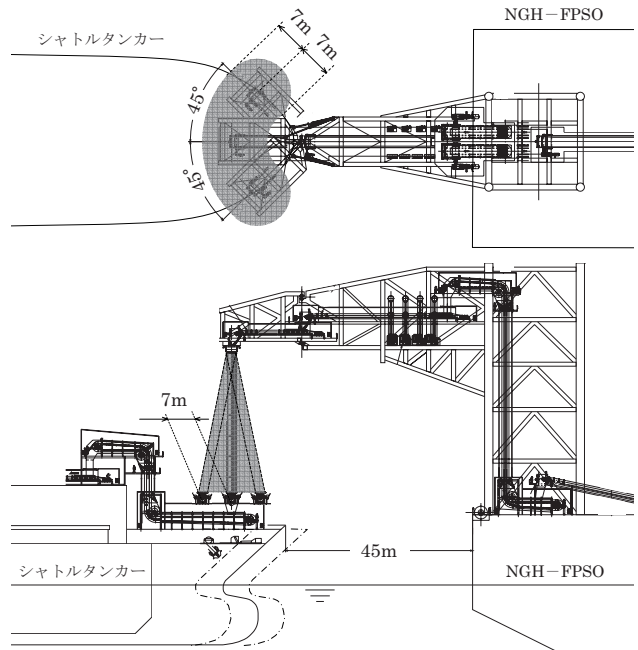


Fig.5 Allowable area for an evaluation of workability

Table 6 Allowance for an evaluation of workability

シューターの相対上下変位	24.5 [m]
NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対水平変位	±7 [m]

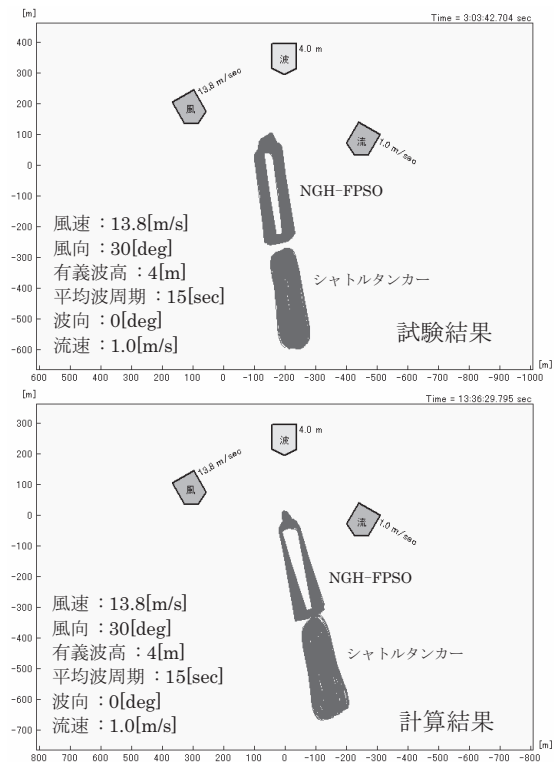


Fig.6 Comparison of the unstable track of two ships

- (2) NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対水平変位

各項目に対する許容値は、以下の検討を基に決定した。まず、NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対上下変位については、3 章で述べたとおりシューターの伸縮幅が 24.5[m]であるため、その値を適用した。また、NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対水平変位については、旋回装置の最大旋回角が $\pm 45[\text{deg}]$ であることと、オフローディング装置に対するシューター接合部の首振り角を考慮して決定した²⁾。これらの検討の結果、Table6 並びに Fig.5 のメッシュ部で示す領域を稼働性能評価のための許容値とした。なお、評価では海上技術安全研究所で開発した計算プログラム^{6),7)}を使用した。いずれも 4 章で述べた水槽試験結果と比較し、その精度を確認したものである。計算で使用する環境外力については、平成 16 年度に海上技術安全研究所で実施した風洞・水槽試験⁸⁾の結果をデータベース化⁹⁾して用いた。また、ヨーク式係船装置及び緊張ワイヤー式係船装置については、それぞれ挙動解析プログラム¹⁰⁾を作成するとともに、1/150 スケールの係船装置模型を対象とした復原力特性把握試験を実施し、数値計算結果と試験結果の比較から、復原力特性の一致度が良好であることを事前に確認した。

Fig.6 に長周期振れ回り運動の航跡を比較した一例を示す。上図が総合模型試験、下図が数値計算で求めた航跡であり、両者の一致度は比較的良好であり、他の条件についても同様の精度であった。

5.2 稼働性能評価の結果

24 時間同じ平均波周期、有義波高の波浪が継続しているという仮定のもと、シューターの相対上下変位の 24 時間中最大値の期待値を計算し、最も厳しい環境外力の組み合わせに対して長期波浪頻度表を用いて許容値を超える確率を求め、稼働率を算定した。その結果、ヨーク式係船装置及び緊張ワイヤー式係船装置のいずれの係船装置を用いても、オフローディング条件下における最大値は平均波周期 15[sec]、有義波高 4[m]で 22.5[m]、平均稼働率は 100[%]となった。

次に、NGH-FPSO に対するシャトルタンカーの相対水平変位の 24 時間中最大値を計算した結果、ヨーク式係船装置及び緊張ワイヤー式係船装置のいずれの係船装置を用いた場合でも風向 0[deg]、波向 60[deg]、流向 0[deg]の条件が最も厳しかった。稼働率を算定した結果を Table7 に示す。但し、Table7(a)に示す表中の数値は、ヨーク式係船装置を用いた場合の相対水平変位の最大値を表し、Table6 に示す許容値を超える場合にはメッシュを掛けて色分けしている。また、(a)に示すメッシュ部分を Table5 の長期波浪頻度表に重ね合わせた結果が Table7(b)となる。オフローディング条件である有義波高 4[m]以下において、許容値以下に収まる割合 (Table7(b)においてメッシュが掛かっていない部分の割合)を求めることで稼働率を算定した。Table7(c)、(d)は、

緊張ワイヤー式係船装置を用いた場合の結果である。

Table7(b)及び(d)よりヨーク式係船装置を用いた場合の平均稼働率は 74.6[%]であり、緊張ワイヤー式係船装置を用いた場合は 100[%]という結果であった。

ここで、オフローディング計画に基づき出荷の頻度を 10 日に 1 回とし、2 日の予備日を考慮すると、最終的にヨーク式係船装置を用いた場合には 93.6[%]となる。

復原力の大きな係船装置を使用して、オフローディング装置の稼働率が 100[%]であることを前提として、複数の専門家判断に基づく HAZID による NGH-FPSO 用タンデムオフローディング装置の安全性評価を実施した。

6. HAZID

より適用性の高いオフローディング装置の開発を目指し、技術・安全性評価のための基本設計を行うとともに、HAZID による安全性評価を実施した。以下に、その概要を示す。

HAZID は、IMO のルール策定プロセスである FSA のファーストステップとして用いられる手法¹¹⁾で、潜在的な危険因子 (Hazard) の発見を目的としている。今回は、下記を目的として、専門家メンバーによるブレンストーミング形式の HAZID ミーティングを実施し、ブレンストーミングの手法としては SWIFT (Structured What If Technique) 法を用いた。

- (1) 潜在的な危険項目 (Hazard) を同定し、そのリスク (頻度と影響の大きさ)を評価するとともに、必要な対策、改善案を検討し、提言を行う。
- (2) 潜在的な危険項目の抽出と対策の検討を通じて、今後の設計・開発のための知見を得る。
- (3) HAZID ミーティングを通じて、安全上の重大な問題がなく、開発継続の妥当性を確認する。

SWIFT 法は、構造化されたワークシートを用いる一種のブレンストーミングの手法で、今回の NGH-FPSO オフローディング装置のように新形態のシステムや、運転の記録や事故の情報の得られないシステムに関し内在する Hazard を特定、識別するのに適した柔軟性のある手法である。

また、HAZID ミーティングは、3 章に示されるオフローディング装置の機構、主要部品の構成等の基本設計に加え、安全を考慮したオペレーション手順や装置の具体的な安全対策についての検討結果をベースとして、下記手順により実施した。

- (1) NGH-FPSO オフローディングシステム概要説明 (設計思想、運航モード、海象条件等)
- (2) サブシステムの説明 (基本設計、設計条件、安全装置等)

Table7 Workability of the offloading system from the viewpoint of relative horizontal displacement

(a) 相対水平変位の最大値 (ヨーク式係船装置)

		平均波周期 [sec]											
		4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-
有義波高 [m]	1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.272	2.544	5.491	8.437	6.383	4.329	3.434	2.539
	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2.205	4.410	6.147	7.885	6.683	5.481	4.863	4.244
	3	4.830	4.770	4.708	4.646	5.425	6.205	6.877	7.549	6.970	6.392	6.005	5.618
	4	9.724	9.681	9.639	9.596	8.762	7.929	7.679	7.430	7.245	7.060	6.860	6.660
	5	13.774	13.604	13.431	13.259	11.420	9.581	8.554	7.528	7.508	7.487	7.429	7.371
	6	16.980	16.535	16.085	15.636	13.399	11.163	9.502	7.842	7.757	7.673	7.711	7.750
	7	19.343	18.472	17.601	16.730	14.703	12.676	10.523	8.371	7.993	7.615	7.706	7.798
	8	20.860	19.423	17.978	16.534	15.323	14.113	11.617	9.120	8.220	7.319	7.416	7.513
	9	21.535	19.380	17.217	15.054	15.268	15.482	12.783	10.084	8.432	6.780	6.838	6.897
	10	21.368	18.343	15.318	12.293	14.538	16.784	14.023	11.262	8.628	5.995	5.973	5.952
	11	20.353	16.323	12.280	8.237	13.121	18.006	15.334	12.662	8.819	4.976	4.824	4.671

(b) 稼働率の算定 (ヨーク式係船装置)

		平均波周期 [sec]											
		4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-
有義波高 [m]	1	317	683	418	456	455	241	77	17	3	0	0	0
	2	37	221	270	316	441	371	186	63	16	3	1	0
	3	11	106	173	213	370	410	267	114	36	9	2	0
	4	1	17	45	137	384	547	433	220	80	23	5	1
	5	0	7	18	45	138	228	209	121	49	15	4	1
	6	0	2	8	21	75	144	148	96	43	15	4	1
	7	0	1	3	6	23	51	59	42	21	8	2	1
	8	0	0	1	3	12	28	33	25	13	5	1	0
	9	0	0	0	1	5	11	13	10	6	2	1	0
	10	0	0	0	0	1	3	4	4	2	1	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

(c) 相対水平変位の最大値 (緊張ワイヤー式係船装置)

		平均波周期 [sec]											
		4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-
有義波高 [m]	1	0.695	0.085	0.042	0.000	0.183	0.366	1.101	1.836	1.446	1.057	0.828	0.600
	2	1.196	0.853	0.511	0.168	0.516	0.864	1.290	1.716	1.491	1.266	1.113	0.960
	3	1.678	1.532	1.388	1.243	1.282	1.321	1.480	1.639	1.532	1.425	1.334	1.243
	4	2.141	2.123	2.106	2.089	1.913	1.737	1.670	1.603	1.568	1.534	1.492	1.450
	5	2.586	2.625	2.665	2.705	2.409	2.112	1.861	1.610	1.602	1.594	1.587	1.581
	6	3.013	3.037	3.065	3.093	2.770	2.446	2.053	1.660	1.631	1.603	1.619	1.636
	7	3.418	3.363	3.307	3.252	2.995	2.737	2.243	1.749	1.655	1.561	1.587	1.614
	8	3.809	3.597	3.389	3.181	3.086	2.991	2.438	1.884	1.678	1.471	1.494	1.516
	9	4.180	3.743	3.312	2.882	3.042	3.202	2.631	2.060	1.695	1.330	1.336	1.343
	10	4.528	3.804	3.079	2.354	2.861	3.368	2.821	2.274	1.706	1.138	1.115	1.092
	11	4.865	3.770	2.683	1.596	2.549	3.501	3.020	2.538	1.718	0.899	0.832	0.766

(d) 稼働率の算定 (緊張ワイヤー式係船装置)

		平均波周期 [sec]											
		4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-	13-	14-	15-
有義波高 [m]	1	317	683	418	456	455	241	77	17	3	0	0	0
	2	37	221	270	316	441	371	186	63	16	3	1	0
	3	11	106	173	213	370	410	267	114	36	9	2	0
	4	1	17	45	137	384	547	433	220	80	23	5	1
	5	0	7	18	45	138	228	209	121	49	15	4	1
	6	0	2	8	21	75	144	148	96	43	15	4	1
	7	0	1	3	6	23	51	59	42	21	8	2	1
	8	0	0	1	3	12	28	33	25	13	5	1	0
	9	0	0	0	1	5	11	13	10	6	2	1	0
	10	0	0	0	0	1	3	4	4	2	1	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0

(3) リスク評価基準の設定

(使用するリスクマトリックスの決定)

発生頻度指数 (F.I) として7段階、影響度指数 (S.I) として5段階を設定し、リスクマトリックス評価を行うこととした。

(4) SWIFT 法による Hazard の同定

(5) 発生頻度、影響度の推定

(6) 予防、緩和措置の検討 (必要な項目について)

(7) Hazard リストの作成 (ワークシートの記入)

オフローディングシステムを構成するサブシステム毎に(4)

~(6)を繰返し実施する。

また、影響・頻度の評価については、同定した Hazard に対し、リスク低減措置検討の是非を検討する必要から、個々の Hazard の重大度(発生頻度及び影響度)について Table8 に示すリスクマトリックスの値により評価した。なお、ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 以上のリスクにランクされたものについて、必要な対策案の提言を行うこととした。

Fig.7のリスクマトリックスに HAZID 結果を丸印で示す。同定された Hazard の中は、リスクレベル9以上の項目は無

Table 8 Definition of the risk matrix value

リスクマトリックスの値	Hazard の重大度に対する評価
2~6	リスクは無視できる(Negligible)
7~8	ALARP の範囲
9~13	リスクは許容できない(Intolerable)

頻度(F.I)		影響度(S.I)					
		軽微	中程度	重大	かなり重大	非常に重大	大惨事
		1	2	3	4	5	6
頻繁に発生	7	8	9	10	11	12	13
	6	7	8	9	Intolerable リスクは許容できない		12
起こり得る	5	6	7	8	9	10	11
	4	5	6	7	8	9	10
起こり難い	3	4	5	6	7	8	9
	2	3	4	5	6	7	ALARP領域
非常に起こり難い	1	2	Negligible リスクは無視できる		5	6	7

Fig.7 Result of HAZID

く、全て ALARP (リスクレベル 8) 以下に管理可能であるとの結論を得た。これにより当該基本設計において安全上の重大な問題が無く、現時点で開発の継続が妥当であることが確認されたため、NK (日本海事協会) より鑑定書が発行された。

さらに、一連の安全性評価過程において得られた項目、提言等から今後の研究開発、設計、関連規則の制定等に役立つ下記の知見を得た。

- (1) 当該装置の安全性確保のためには気密装置内のメタンリッチ環境維持が必須であり、気密監視システムが必要である。
- (2) システムの状態監視情報の集中管理及び、非常時の緊急操作方法の検討と各操作に係わる時間余裕の検討が必要である。
- (3) オフローディングシステムの垂直シューター部分について、気密性保持の観点より蛇腹構造を2重化し、機密性とガス検知性能を向上させることが有効である。

今回の HAZID 評価にて得られた HAZARD 項目、対策案、安全性確保のための提言等を今後の詳細設計等に反映することで、更に安全性の高いシステムの構築が可能となった。

7. 経済性評価

生産量 48~275[MMscfd]、生産期間 30 年、従って、30 年間総ガス生産量は 0.5~3.0[Tcf]、出荷先日本という条件で NGH-Chain と LNG-Chain の LCC (Life Cycle Cost) を比較した。経済性は一般的には販売価格(ガス価格)を想

Table 9 Evaluation results of NGH-Chain and LNG-Chain

Sub-System	System	NGH		LNG	
FPSO	Production Rate (MMscfd)	95	275	95	275
	LxBxD ~d(m)	300x60x33 ~16	350x64x36 ~22.5	290x50x29 ~9	322x58x3 ~12
	CAPEX (Million US\$)	475	790	712	1179
	OPEX (Million US\$/year)	55	55	78	78
Tanker	Production Rate (MMscfd)	95	275	95	275
	Number	3	5	2	2
	LxBxD ~d(m)	285x46x24.5 ~14.5	318x60x28.6 ~15.5	173x28.3x15.7 ~7.9	263x43.2x24.0 ~12.0
	CAPEX (Million US\$)	171	450	213	367
	OPEX (Million US\$/year)	49	106	21	32
(Total)	LCC (Million US\$)	3766	6070	3895	4846

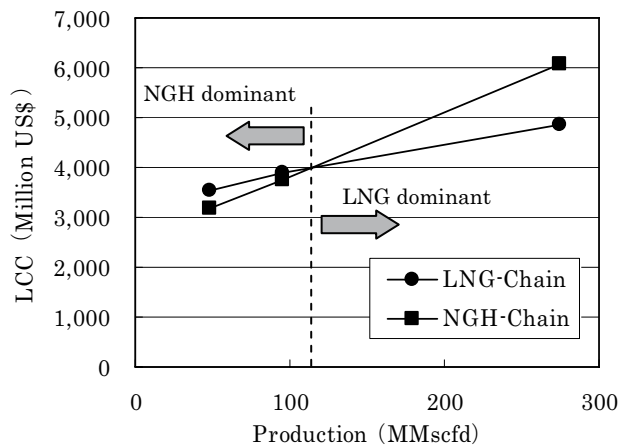


Fig.8 Comparison of LCC of NGH-Chain and LNG-Chain

定し、また産ガス国へのロイヤルティなどを考慮するが、LNG と NGH の場合、どちらもそれらの条件は同じと想定できるので、コストのみの比較を行った。もちろん、事業としての採算性はそれらの経済的条件により大きく異なるが、両システムの相対的優位性はコストが支配的な要素となるので、LCC 比較は有用なデータと考える。

CAPEX は、FPSO の場合、Hull のサイズ、鋼材重量、係留システム、プラントの概念設計を行い、2005 年時点の材料価格、施工価格、作業船の Day-Rate に準拠して積算した。LNG タンカーは 2005 年時点の建造価格実績に準拠した。NGH タンカーはタンカーの建造価格実績に、NGH タンクの建造費、NGH 搬送設備費などを考慮した。また、OPEX は、Offshore における実績とタンカー運行費の実績に準拠した。

その結果を Table9 及び Fig.8 に示す。図表から、検討の範囲内において次のような傾向が見える。

- (1) NGH は圧縮効率と容積効率が劣るため、生産量が増加するとタンカーの隻数が増加し LCC を増大させる(経済性が低下する)。

- (2) LNGはCAPEXが大きいがおPEXが小さく、生産量増加に対するコスト増加が小さい。
- (3) 生産量120[MMscfd]を境に、NGHとLNGの優位性が分かれる。
- (4) FPSOのCAPEXのうちLNGまたはNGH製造Plantの占める割合は、生産量48-95-275[MMscfd]に対して、NGHの場合44-51-57[%]と変化し、LNGの場合60-65-70[%]と変化する。即ち、経済性を改善するためには、Plantコストの低減が重要である。

8. 結 言

開発したNGH-FPSO用オフローディング装置に関する研究成果は次の通りである。

- (1) NGH-FPSOとシャトルタンカーの相対水平変位が出荷稼働率に及ぼす影響が大きく、平均稼働率はヨーク式係船装置を用いた場合が93.6[%]、緊張ワイヤー式係船装置を用いた場合が100[%]であった。以上の検討から、開発したオフローディング装置の成立性を確認するとともに、オフローディング装置の稼働性能を高めるには大きな復原力を有する係船装置が必要であることが分かった。
- (2) 複数の専門家によるHAZIDをNK主催で実施し、オフローディング装置の安全性に関して船級協会の基本承認(AIP: Approval in Principle)を取得した。
- (3) 生産量48~275[MMscfd]、30年、出荷先日本という条件で、NGH-FPSOとLNG-FPSOの経済性をLCC(Life Cycle Cost)で比較すると、ガス生産量80[MMscfd]以下ではNGHが有利、80[MMscfd]以上ではLNGが有利という結果が得られた(Table9、Fig.8)。

NGHは本研究のように洋上生産から消費地での販売までを含めた一環事業としての調査・開発を進めてゆくとともに、例えば日本国内に於ける近距離ガス輸送に応用することも検討されており、これらを含めて、今後、NGH輸送の経済性をLNG、CNGなどの物理変換システムと詳細に比較し、さらに技術展望の検討を行い、NGH輸送の有望性と限界性を明確にし、効率的な研究開発を行うことが重要と考えられる。

謝 辞

本研究は、競艇交付金により日本財団の援助を受けて海洋政策研究財団が行う技術開発基金の補助金により実施されたものであり、関係各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 三井造船(株): NGH-FPSO(天然ガスハイドレート洋上生産設備)の開発ーオフローディング装置の開発ー、平成15,16,17年度研究開発報告書、2004, 2005, 2006年3月。
- 2) 難波康広他: NGH-FPSO用オフローディング装置の開発ー浮体動揺を再現した搬送模型試験ー、第4回海上技術安全研究所 研究発表会講演集、pp. 93-98、2004年6月。
- 3) 正信聡太郎他: 複合環境条件下でのオフローディング装置の稼働性評価、第5回海上技術安全研究所 研究発表会講演集、pp. 43-46、2005年6月。
- 4) 浅沼貴之他: 2浮体間を結ぶ係船装置の性能評価ーコードレス計測システムの開発ー: 第6回海上技術安全研究所 研究発表会講演集、pp. 279-282、2006年6月。
- 5) UKOOA FPSO DESIGN GUIDANCE NOTES FOR UKCS SERVICE、March 2002。
- 6) 加藤俊司他: 高次元境界要素法によるFPSO波力、流体力、動揺計算プログラム(著作権登録番号P第7704号-1)、2003年10月。
- 7) 浅沼貴之: 複合環境外力下における2浮体挙動シミュレーションプログラム、2006年5月。
- 8) 佐藤 宏他: NGH-FPSOに関する風洞・水槽実験、第5回海上技術安全研究所 研究発表会講演集、pp. 285-288、2005年6月。
- 9) 浅沼貴之他: FPSOとシャトルタンカーに作用する複合環境外力推定法に関する研究、第5回海上技術安全研究所 研究発表会講演集、pp. 47-52、2005年6月。
- 10) 湯川和浩: 緊張ワイヤー式係船装置の挙動解析プログラム、2006年5月。
- 11) IMO MSC/Circ.1023 MEPC/Circ.392 "GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT(FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS"、April 2002。