

磐城沖プラットフォーム 撤去工事における技術検討

～大型鋼製プラットフォーム(大水深重量ジャケット)撤去工事～

Technical studies on Offshore Iwaki Platform Decommissioning Work
(Decommissioning project of a large steel offshore gas production platform)

藤原 弘一 Koichi FUJIWARA
海外プロジェクト部
マネジャー

眞田 達朗 Tatsuo SANADA
サブシー事業推進部
マネジャー

久納 淳司 Junji KUNO
海外プロジェクト部
マネジャー

山内 雅也 Masaya YAMAUCHI
海洋設計技術部

大久保 寛 Hiroshi OOKUBO
海洋設計技術部
シニアマネジャー

藤崎 恭功* Yasukoto FUJISAKI
海外プロジェクト部
シニアマネジャー

抄 録

当社は世界有数規模の海洋撤去工事である磐城沖プラットフォーム撤去作業を本年7月に完了した。磐城沖海域における撤去作業においては海象条件の厳しさから作業船の動揺特性検討と重量ジャケット吊上げにおける確実な工法検討が重要と認識された。本稿においては工事概要とともにそれら技術検討内容について紹介するものである。

Abstract

Nippon Steel Engineering Co., Ltd. completed decommissioning of Offshore Iwaki Platform in July this year, which is one of the largest steel offshore platforms(jackets)ever decommissioned. For this decommissioning work, it has been recognized that the motion characteristics study of crane vessels due to harsh sea state at Iwaki field in the Pacific Ocean, and constructability study for lifting of the heavy jacket structure in the water are two of the important engineering factors. This paper presents the summary of the Offshore Iwaki Platform decommissioning work and brief description of such technical studies conducted.

1 緒言

磐城沖プラットフォームは福島県双葉郡楢葉町沖合約40km、水深約150mの位置に据え付けられ1984年より天然ガスの生産を行っていたが2007年に操業を終了した。当社は本プラットフォーム(以下PF)の撤去作業の設計、施工、輸送、揚陸及びプロジェクト全体管理業務を2009年4月に磐城沖石油開発株式会社(以下施主)より受注し、2010年7月に現地撤去工事を完了した。磐城沖PF撤去工事は水

深、重量とも、これまでに当社が行った同様な工事の規模を大きく上回り、世界的にも有数の規模であった。

本稿では本撤去工事の概要とその遂行にあたって行った技術検討の一部を紹介する。

2 撤去工事概要

2.1. プラットフォーム諸元

図1に磐城沖PFの撤去前の状況を示す。比較と

* 〒141-8604 東京都品川区大崎1-5-1 Tel : 03-6665-3248



図1 磐城沖プラットフォーム(撤去前状況)
Fig. 1 Offshore Iwaki Platform (before decommissioning)

表1 過去に撤去されたプラットフォームと磐城沖プラットフォームの比較

Table 1 Comparison between the previously decommissioned platforms and Offshore Iwaki Platform

プラットフォーム	阿賀北 PF	阿賀沖 PF	KTMP-A	NWH	磐城沖 PF
国(海域)	日本(日本海)	日本(日本海)	マレーシア(サラワク沖)	英国(北海)	日本(太平洋)
撤去年	1993	1999	2003	2008~9	2010
水深(m)	90	80	54	144	154
概算重量(トン)					
上載構造	3,500	3,500	880	20,000	6,000
ジャケット+杭	3,000	2,500	1,085	20,100	25,000

して当社が過去に撤去工事を行った PF と昨年北海にて撤去され、これまでのところ世界最大規模の鋼製 PF 撤去例である BP NWH PF と併せて磐城沖 PF の諸元を表1に示す。上載構造物と下部構造(ジャケット)を合わせたプラットフォーム全体構造の3-Dモデルを図2に示す。

2.2. 撤去工事開始までの調査・検討業務

当社は2004年より施主と共に、本 PF 撤去工法を検討するために、大型 PF 撤去技術の調査、現地 PF の状況調査等に着手し、2005年に PF 撤去工法のコセプトをまとめ、2007年からは Basic Engineering を行った。磐城沖海域は太平洋上に位置する波浪条件の厳しい海域であり、当社も参画した建設時の経験よりこの海域で海上作業を行うに際しては作業船の動揺特性が極めて重要なものと認識していたため、クレーン船選定にあたっては各社のクレーン船の動揺特性の比較検討・評価を実施した。比較検討の結果、マレーシアの SapuraAcergy Sdn Bhd(以下 SASB)社の大型クレーン船 Sapura 3000

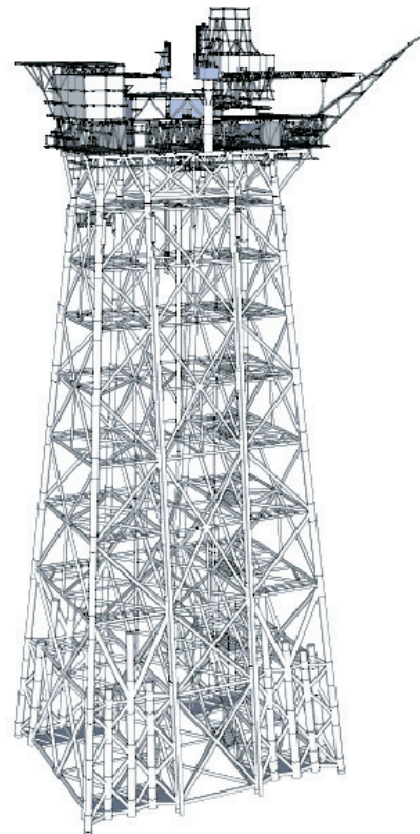


図2 磐城沖プラットフォーム全景3-Dモデル
Fig. 2 3-D model of Offshore Iwaki Platform

を起用することを決めた。

2.3. 撤去準備作業

PF の上載構造物は重量300トンから600トンほどの9つのモジュールとそれらの付属品及び掘削設備で構成され、それら全体が重量約900トンの MSF (Module Support Frame) で支持されている。費用が高価な大型クレーン船での撤去作業期間を最短化するため事前に PF 自体に備わるクレーン設備を用いて撤去準備作業を行うこととした。また、撤去準備作業を効率よく行うため PF の居住設備(LQ)に滞在して作業を行うよう計画した。

撤去準備作業においては、大きく分けて下記作業を行った。

- (1) Life Line の復旧作業(LQ の再立上げ)
- (2) モジュールの分離及び仮固定作業
- (3) 撤去作業用治具取付、吊金具復旧作業
- (4) 撤去作業用モジュール補強部材取付作業
- (5) LQ 等の閉止作業

(1)は2008年7月の PF 閉止より無人状態であった

PF 上で再び作業員が生活できるよう給排水設備、電気設備、その他通信、安全、生活設備等の復旧もしくは新規設置を行うものである。

(2)は上下左右に連なるモジュール同士及び付属品、掘削設備とを結ぶ配管、配線、構造部材、鋼板等とをとりはずし、モジュールの溶接固定箇所をはつり取り、吊上げまでの間の仮固定材を設置するものである。

(3)は取り外したモジュールを撤去作業時に台船の指定箇所に正しく設置するためのガイド部材の取り付けと、建設時に使用されたが切断撤去されていたモジュールの吊金具について再度撤去作業で用いることができるように復旧するものである。吊金具復旧のための溶接は重要箇所であることと吊作業に海外の業者を起用することから国際的な基準である AWS D1.1-2008 に従い溶接施工法及び溶接士の技量認定試験を事前に実施した。

(4)については構造解析によりモジュール撤去時に強度的に十分でないと判定された箇所について補強を行うものである。27年前の建設時には強度的に十分な部材であっても撤去作業では現在の基準をもとに検討したため建設時とは DAF(Dynamic Amplification Factor、荷重係数)が異なる等の理由でこのような補強が必要となるものがあつた。

(5)は撤去準備作業完了時に Life Line 等の切断、解体を行いクレーン船の現場到着後 PF をすぐに撤去開始できる状態とする作業である。

上記作業を行うにあたり、PF クレーン(吊能力 65トン、15トン各1基)は PF の閉止期間中1年以上使用されていなかったため、撤去準備作業期間中に故障することなく使えるか心配されたが、それに対しては整備記録と故障履歴の調査を行ったうえでスペアパーツを手配するとともにクレーンの整備と荷重試験を行い、また老朽化による影響に配慮して使用荷重制限を設けることで工期中故障することなく使用することができた。LQ の復旧についても閉止期間中もメンテナンスが行われていたため、特に問題なく立ち上げることができた。

(2)以降の作業においても PF 上での作業であるため作業人員、作業スペース、資機材置場等の制約があり、更に撤去作業用に動員する大型クレーン船を滞船させないよう厳しい工期の制約があつた。こう

した制約の中、効率よく撤去準備作業を行うための作業計画立案には正確な作業量の把握が必須であり PF の完成図書図面からの情報を補うため事前に20回以上の現地調査を行った。特に上下に重なるモジュールを固定するために建設時に施されたモジュール間の現地溶接箇所については確実なはつり撤去、分離確認を行うことがクレーン船での吊り上げ作業を安全に行うために必要であつた。しかし、どこにそうした接合部があるかということが個々のモジュールの製作図面では不明確であつた。そのため上下に重なるモジュールの3-Dモデルを構築し上下モジュール部材の接触箇所を特定した上で現地ですその位置が実際に溶接されているかどうかを徹底調査し、溶接箇所の特定に努めた。そうした調査に基づき作業量を推定し作業箇所、作業要員、作業順序、設備の計画を立てた上で撤去準備作業を実施した。新設工事と異なり情報が不確かな撤去工事を確実に行うにはこうした徹底した現地調査実施が必須であつた。

撤去準備作業は、後工程の大型クレーン船での撤去作業を海象のよくなる5月以降に行うよう計画したため、2009年12月半ばからの冬場の厳しい海象時期での海上作業となり、時には風速30m/sを超える強風で作業を休まざるを得ない日もあつたが、ほぼ計画通りの2010年3月末に無事完了することができた。

2.4. 撤去作業

PF撤去作業は2,722メトリックトン(3,000ショートトン)の吊能力を有し波浪等に対する自身の位置保持を係留索でなく7つの全旋回スクリュー(スラスタ)により行う DP(ダイナミックポジショニング)能力を有する大型クレーン作業船 Sapura 3000(以下 S3K)をマレーシアから廻航し行った。

S3K による撤去作業においては主に下記作業を行った。

- (1) 上載構造物(モジュール、MSF)の吊上げ撤去
- (2) ジャケット部材の水中切断
- (3) 杭の吊上げ撤去
- (4) ケーソンセパレーターの吊上げ撤去
- (5) 上部ジャケットの吊上げ、横移動、海底面上に仮置き

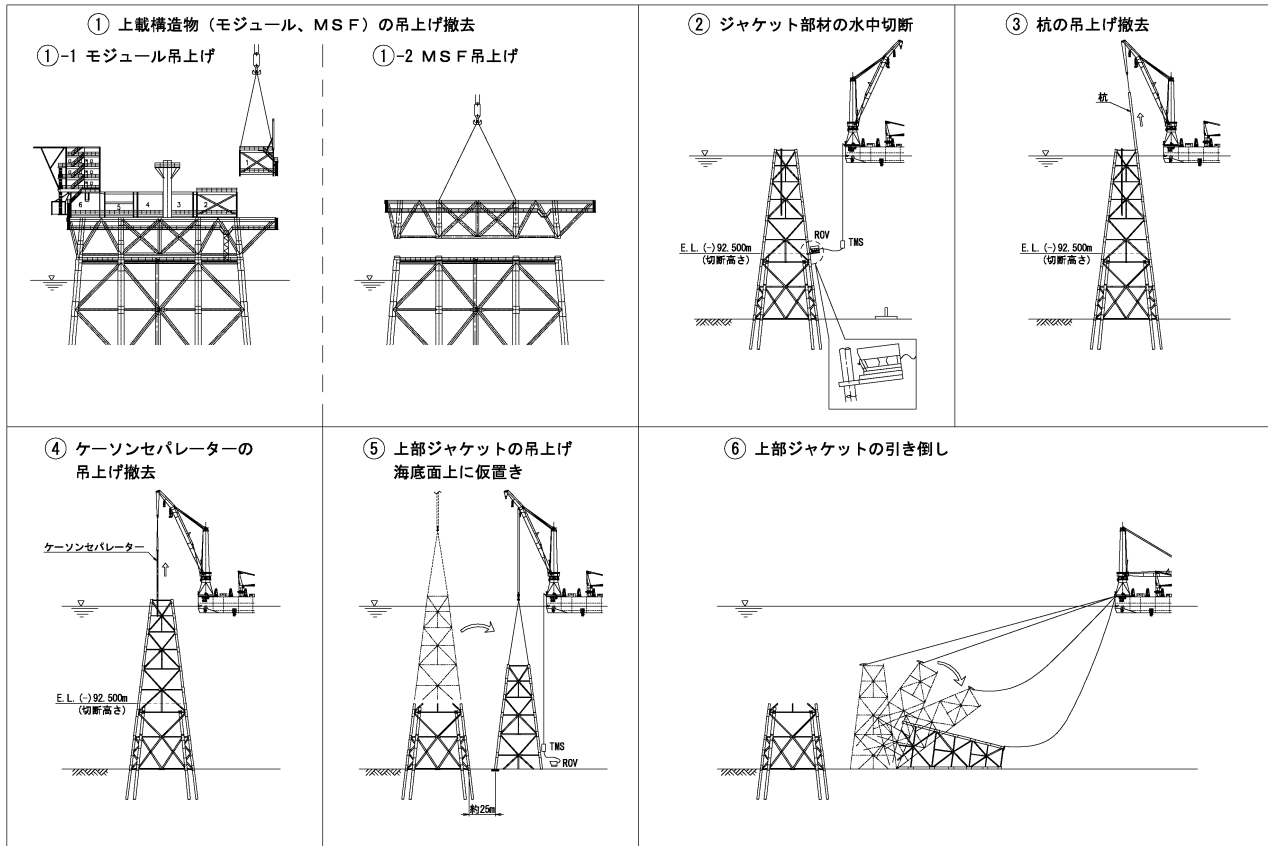


図3 プラットフォーム撤去作業概要図
Fig. 3 Platform decommissioning sequence

表2 上載構造物 各ユニット重量
Table 2 Weight for each Topside component

	上載構造物	概算重量 (mt)
1	Module-1	450
2	Module-2	400
3	Module-3	300
4	Module-4	300
5	Module-5	330
6	Module-6	310
7	Module-7	610
8	Module-8	470
9	Module-9	340
10	Module Support Frame(MSF)	880
11	Vent Boom	80
12	Skid Base	110
13	Derrick Lower Section	500
14	60t Crane Base	50
15	60t Crane A-Frame	10
16	60t Crane Boom	16

(注)上記重量は撤去時に計測された重量

(6) 上部ジャケットの引き倒し

S3Kによるプラットフォーム撤去作業概要図を
図3に示す。

2.4.1. 上載構造物(モジュール, MSF)の吊上げ撤去

上載構造物は表2に示す16の構造に分けて吊上げ、撤去を行った。各構造物の重量と重心位置についてはPFの建設時の記録と操業中の設備の改造記録等より推定しそれにDNV規準(DNV-RP-H102、Marine Operations during Removal of Offshore Installations)に基づいた重量コンテと重心のずれを見込んだ。吊具の設計においてはPFから吊上げた構造物をクレーン船舷側に係留されている台船上に載せる時のクレーン船と台船の相対的な動揺の影響を考慮した動的解析を行い、吊荷重の動的変動を考慮した。吊上げ作業前には毎回第三者検査機関の外国人検査官が吊具の確認、作業要領の確認等を現地にて行い、吊作業開始許可証の発行を受けた上で吊り作業を実施した。台船上には予め工場にて、撤去した構造物を支持するための架台と吊荷の動揺を抑制し台船上の想定した位置に吊り下ろすためのバンパーとガイドを配置・艀装した。このバンパーの設計においてもクレーン船と台船との相対的な動揺による影響を考慮し吊荷との衝突による荷重係数を一



図4 Sapura 3000による上載構造物撤去作業状況
Fig. 4 Topside removal work by Sapura 3000

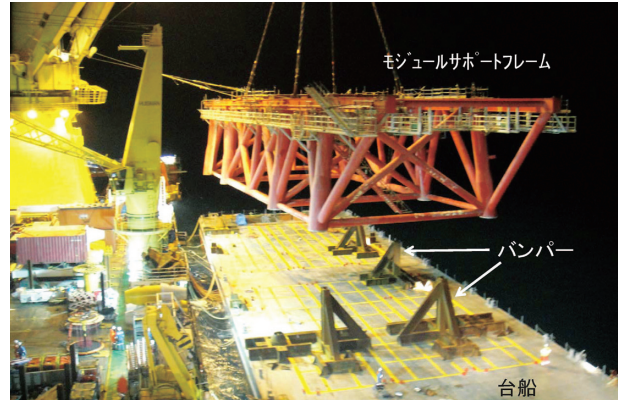


図5 MSFの台船への積み込み状況
Fig. 5 Loading of MSF onto a cargo barge

一般的にPFの建設時に用いられるバンパーの設計係数より大きく設定し、高さも最大で6mと大きなものとした。実際の吊作業においてはS3KがそのDP能力を活かし船体の動揺が小さくなるよう船向きを調整しつつ行い、上述のバンパー、ガイドが設計通りに機能し、いずれの構造物も台船上の所定の位置に問題なく設置できた。また事前に懸念されたPFからの地切り(吊上げ)時の溶接はつり忘れによる引っ掛かりも重心位置算定誤差による吊荷の傾き・横移動もほとんど問題なかった。吊上げ中は時々刻々とクレーン荷重の数値データが記録され、この結果から算定した各モジュールの吊荷重は計画重量と比べてほぼ±10%以内に収まっており、計画上見込んだ重量コンテとの大きな乖離は見られなかったことから適切に重量の推定を行うことができたと考えられた。S3Kによる上載構造物の撤去作業状況写真を図4に、台船上に設置したバンパーとモジュールサポートフレーム回収中の状況写真を図5に示す。

これら現地吊作業の実施においては現地より約30kmの位置に設置されている国土交通省の波浪観測ブイ(NOWPHAS)の観測データ(有義波高、有義周期、波向)をインターネット経由でほぼリアルタイムで入手し大いに活用した。台船への荷下ろし後各構造物を架台に溶接固縛し現地海上にて海事検定協会検査官による確認を受けたのち各台船を解体ヤードに向けて廻航した。

2.4.2. ジャケット部材の水中切断

今回、ジャケットは水深92.5m位置で切断しそれより下側の構造(下部ジャケット)はそのまま海底面に残置、それより上側(上部ジャケット)は下部ジャケット近傍の海底面に横倒した状態で残置するよう計画した。上載構造物の撤去作業と並行し、海中ではジャケット部材の切断を2台のROV(Remotely Operated Vehicle)と切断装置を用いてクレーン船船上からの遠隔操作にて行った。切断対象箇所は、2,000mmφ(板厚50mm)レグ+1,830mmφ(板厚48mm)杭で構成される二重管8本、610mmφ~1,067mmφ(板厚15.9mm~38.1mm)のブレース材26本、J-tube、ケーソンセパレーター支管、グラウト配管等の配管40本、ジャケットに繋がる海底配管(324mmφ)2箇所の計76箇所であった。これまでに当社が国内で行った2つのプラットフォーム撤去工事においてはジャケットレグの切断は発破(爆薬)を用いて行ったが今回は海洋環境への影響に配慮して発破は用いず全てメカニカルな切断方法とした。主要部材の切断にはDWC(Diamond Wire Cutting)とAWJ(Abrasive Water Jet)の2つの異なる装置を用い、小径管切断にはチョップソー、水中グラインダー等を使用した。DWCは工業用ダイヤモンドを配したワイヤーソーを部材に押し当てて切断するもの、AWJは研磨剤(garnet)を含んだ水をノズルより100MPa(15,000psi)もの高圧に絞って部材表面に当て切断するものである。DWCとAWJの切断装置写真を図6、図7に、一般的な両装置の性能上の比較を表3に示す。ジャケットレグの切断は時間が掛るが切断が確実に行え

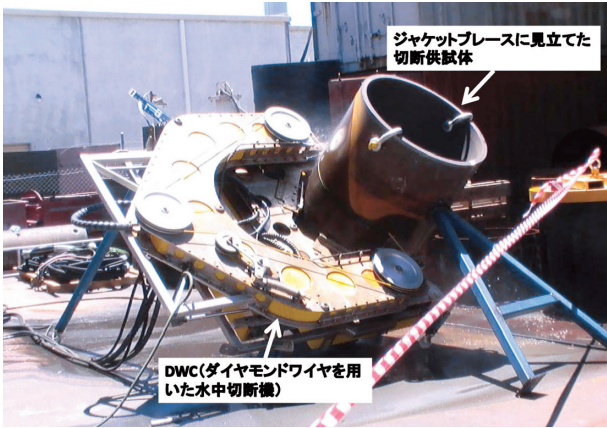


図6 DWC(気中切断試験中)
Fig. 6 DWC(Cutting Trial in air)

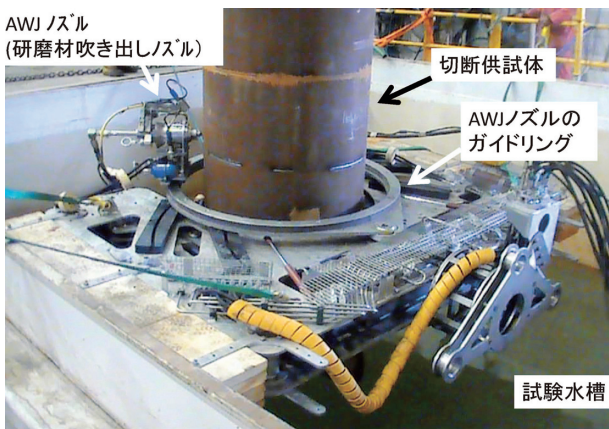


図7 AWJ(水槽での切断試験準備中)
Fig. 7 AWJ(under preparation for cutting trial in a pool)

表3 DWC と AWJ の性能比較

Table3 Comparison between DWC and AWJ performances

	長所	短所
DWC	切断確認が確実、容易。	切断速度が遅い。 (切断ごとに装置回収、ダイヤモンドワイヤーソーの付け替えが必要)
AWJ	切断速度が速い。 圧縮部材の切断も可能。	切断確認が困難。

(注)DWC でも圧縮部材の切断は可能だが、試験による確認が必要。

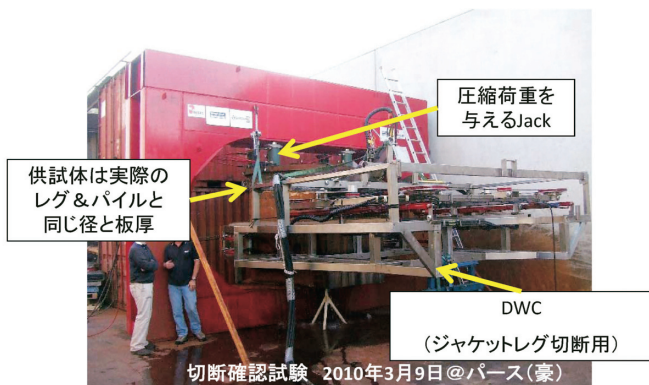


図8 DWC 気中載荷切断試験状況
Fig. 8 DWC cutting trial in air under compressive load

る DWC で計画し、本数の多いブレース材切断は切断時間が早い AWJ で切断することを当初計画した。また、海中での部材切断作業の重要性から、全ての切断対象部材に対し、DWC、AWJ 等異なる 2 通りの切断機材で対応できるように計画し、更に各切断機材には予備機を用意し機材の故障時にも万全に対応できるように準備した。DWC、AWJ 等の切断装置の制御は ROV と一体化されたスキッドと呼ばれる装置から送られる油圧、電気信号で行い、部材への切断装置の取り付けも ROV により行った。ジャケット撤去においては部材の切断を海中で如何に確実にを行うかが非常に重要となることからそれら装置の切断機能確認試験を事前にパース(豪)とアバディーン(英)にて行った。また ROV オペレーターの技量確認も兼ねた ROV との統合機能確認試験も本年 1 月と 2 月の 2 回、マレーシア半島沖合海域に S3K を廻航し実際のジャケットレグと杭のモックアップを海中に据えて行った。これら一連の試験は 2009 年 12 月から 2010 年 3 月までの間に合計約 2 カ月間掛け徹底して行った。図 8 はジャケットレグと杭二重管の実際の荷重条件を模して行った DWC の気中載荷切断試験(荷重 560 トン)状況の写真である。なお、ROV 操作は SASB 社が行い、切断作業は SASB 社の下 Proserv 社(英、豪)を起用して行った。切断業者の選定にあたっては、同様な海中切断作業の実績を持つことが重要であるが、今回はそれに加え 1 社で DWC と AWJ の 2 通りの異なる切断装置を有することから、SASB 社は Proserv 社起用を決めた。実際の切断作業においては全てのレグと杭の二重管は DWC により問題なく切断が完了したが、ジャケットブレース材においては当初計画していた AWJ での切断では部材切断後に切断完了が目視で確認できず、結局時間はかかるが切断確認が確実にできる DWC に変えて切断を無事完了した。これら部材の切断箇所、順序については上載建造物の撤去進捗に合わせジャケットの構造強度と安定性を考慮し事前に決めた順序で行った。今回は切断試験単体のみならず、ROV と統合した海中での切断試験も実施したが、今後の PF 撤去作業においても、こうした実地状況を模した事前切断試験の徹底的な実施が重要である。現地での撤去工事中の ROV による海中での切断装置のジャケット部材への取付状

況の写真を図9に示す。

2.4.3. 杭の吊上げ撤去

上載構造物の撤去が完了しジャケット外側4本のジャケットレグと杭の切断完了後、杭の吊上げ撤去を行った。ジャケット頂部でレグと杭とを固定するシムプレートの撤去後杭上部先端2か所を補強し吊り孔を設けクレーンで吊上げ回収した。杭吊上げに当たっては作業効率の良いILT(Internal Lifting Tool)の使用も検討したが信頼性の観点から使用を取りやめた。撤去する杭長は1本およそ100mもあるためクレーンの揚程制限より吊上げ途中で2分割し台船上に回収した。2分割するにあたっては、レグ頂部にPEG(Pile External Gripper)と呼ばれる油圧で杭を外側から押さえ固定する装置を取り付け、吊上られた杭を押さえて仮支持することで安全に杭の切断、吊具のもり替え、回収を行った。外側4本の杭の回収後、下部ジャケットの上に乗っている状態の上部ジャケットが切断分離されて横方向にずれることを防ぐための治具(Slip Stopper)を外側4本のレグ内部の切断箇所差し込み、その後内側4本のジャケットレグと杭の二重管切断、杭の回収を行った。

プラットフォームの上載構造物撤去、杭の切断・回収等の吊り作業においては、海象に対し船体動揺が最も小さくなるようプラットフォームに対するクレーン船の位置、向きを都度変えながら行った。自船の位置保持を係留索で海底面に固定し行うタイプ

の作業船においてはそうした船体の移動は係留索の打ち変えに毎回数時間乃至8時間程度かかることが想定されるが、DP船であるS3KにおいてはDP能力をフルに活かし、30分/回も掛らず移動を行い、効率よく作業を進めることができた。図10に杭撤去作業中の状況写真を示す。

2.4.4. ケーソンセパレーター吊上げ撤去

ジャケットにはPFが操業中に発生する水分・油分を分離し水分だけを海中に排水するためのケーソンセパレーター(以下CS)が設置されていた。磐城沖PFはガス田であり鉍水中に含まれる油分は少なく、また事前にPF上の油水分離器で前処理された状態で処理されるので油分が含まれる可能性は少ないが万一の漏油を考慮しCS(1m径、60m長)内上部の油分を含む可能性のある海水をCS内に留めそのまま回収する工法とした。具体的にはCS撤去前にCS最下端にホースとバルブ付きの特注のプラグをROVにより設置し、CSをクレーンで吊上げ気中に保持した状態で台船上に用意したタンク内にCS内部の液体を回収後CSを台船に回収した。

2.4.5. 上部ジャケット吊上げ、横移動、海底面上に仮置き

CS撤去とジャケット部材の水深92.5m位置での水中切断完了後、上部ジャケットの吊上げ、横移動、海底面への仮置きの一連の作業を行った。本作業に先立ち、ジャケットの8本のレグ頂部にはレグ



図9 ROVによるDWC切断装置のジャケット部材への海中での取付状況

Fig. 9 Setting of the DWC cutting tool onto the jacket brace member by ROV



図10 杭撤去作業状況

Fig. 10 Removal operations of the jacket pile

を浮力タンクとして用いることができるよう気密性のある閉止板を取りつけた。ジャケットの内側4本のレグ頂部に取り付けた閉止板にはジャケットを吊り上げるための吊金具も備えた。

ジャケット切断完了後、吊上げられた上部ジャケット下端が下部ジャケットレグ上部に取り付けられた横滑り防止用治具(Slip Stopper)をかかず様に、上部ジャケットを4m吊上げた状態でS3Kを沖合方向に約80m前進させた後、浮力を調整しつつ上部ジャケットを海中に吊り下ろし海底面に仮置きした。海中の上部ジャケットの位置と姿勢の把握のため、上部ジャケットにビーコンとジャイロスコープを取付け船上で随時測定、管理しながら作業を進めた。また、海底面への仮置き後上部ジャケット頂部位置は水深約50mになるが吊具の海中からの回収は油圧で開閉するシャックルをROVにて操作することで難なく行えた。

2.4.6. 上部ジャケットの引き倒し

ジャケット吊上げ用の吊具回収後S3Kのパイプライン敷設用のウィンチ(A&R Winch、360トン能力)ケーブルをROVにより上部ジャケットの2本のレグ頂部に事前に取り付けたワイヤーに接続し、海底面上に仮置きした上部ジャケットの引き倒し作業を行った。上部ジャケット引き倒しにあたり、ジャケットが転倒しやすくなるようにジャケットレグ内は排水し浮力を調整、その後レグのバラスト調整用のホースをROVにてはずし引き倒しに備えた。S3KはA&Rウィンチケーブルを延ばしながらジャケットから500mほど沖合に離れ、DPで自船位置を保持したままA&Rウィンチを巻き上げることで上部ジャケットを海底面に転倒させた。作業時の海上は濃い霧に覆われており、ジャケットが転倒する際にレグ下端から出る気泡は目視確認できなかったが、ウィンチ張力をモニターしつつジャケット頂部両端に設置したビーコンの位置を計測することで高さ100mもの巨大構造物の転倒作業が無事完了したことを確認した。その後S3Kをジャケット転倒位置に戻しROVにて転倒状況の目視確認と転倒位置の確認を行った。転倒時の最大張力はおよそ150トンであった。

途中荒天による台船の避難等での荒天待機が2週

間ほどあったが後半は好天に恵まれ、5～6月の想定稼働率が50%前後であったのに対して、約65%の実績稼働率を確保でき、結果として計画工期内の59日間で撤去作業を無事完了することができた。

S3Kが現場海域から離れた後、横倒し残置した上部ジャケットと下部ジャケットの位置、水深の確認のため測量船にて測量を実施しほぼ計画通りの海底面位置にジャケットを残置できたことを確認した。図11に海中に残置したジャケットの状況図を示す。

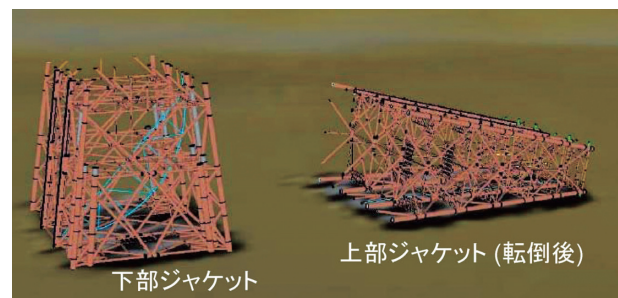


図11 海底面のジャケット横倒し残置状況 (イメージ図)
Fig. 11 Upper and lower jacket structures left on the seabed (estimate)

2.5. 輸送・揚陸作業

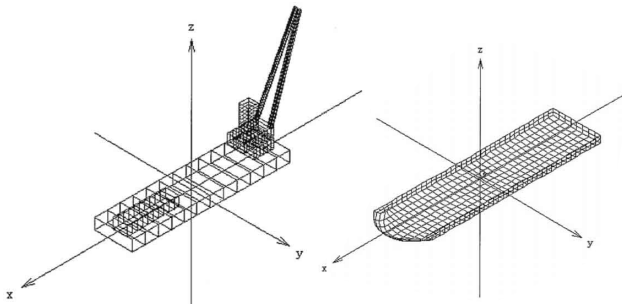
現地にてS3Kにより撤去された上載構造物と杭は5隻の台船で陸上ヤードまで輸送し、そこで解体業者による解体、スクラップ処理のため2,200トン起重機船等にて陸揚げした。揚陸作業は2回の期間に分けて行われ、本年7月29日に全作業を無事完了した。

3 撤去技術検討

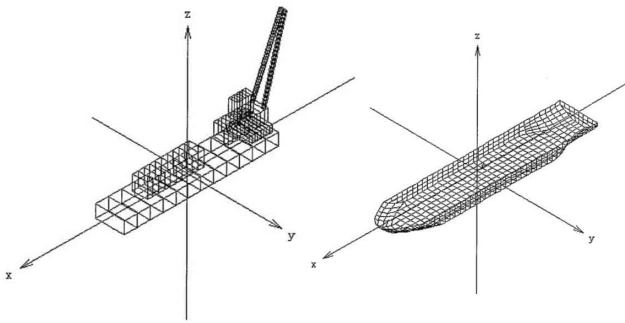
本章では前章で述べた磐城沖PF撤去作業に関連して行った技術検討の内、クレーン作業船選定検討のために行った作業船の動揺特性検討及びジャケットの吊上げ作業のための浮力調整検討について述べる。

3.1. クレーン作業船の動揺特性検討

撤去工事海域は太平洋に位置する波浪条件の厳しい海域であり、1983年のPF建設当時、PF据付の実績工程がクレーン船の荒天待機等により計画工程を大幅に上回ったこと、パイプライン敷設工事を実施した当社作業船においても、船体動揺の影響から



箱形クレーン船の動揺解析モデル(左)と流体力学モデル(右)



Ship型クレーン船動揺解析モデル(左)と流体力学解析モデル(右)

図12 解析モデル図(例)

Fig. 12 Analysis models for the barge type (above) and the ship type (below)
(Left side; Motion Analysis models, Right side; Analysis models for calculation of hydrodynamic load)

クレーンを立て起こすことが困難であったことなどから、撤去工事に起用するクレーン船を選定する際の重要検討項目の一つとして、クレーン船の波浪中における動揺特性を比較した。

動揺解析にあたっては、スペクトル法による不規則波応答解析手法を採用し、規則波に対する浮体動揺の周波数応答特性を算出した。また、不規則波浪スペクトルをPierson-Moskowitz(ピアソン・モスコヴィッツ)型とし、Cos自乗分布型の方向スペクトルを設定し、動揺量を算定した。図12に解析モデル例を、表4に比較を実施したクレーン船のタイプ・諸元を示す。比較ケースに用いたクレーン船は、いずれも磐城沖PF撤去に必要な2,000t以上の吊り能力を有しているものである。

一般的に、セミサブ型、Ship型、箱型の順にクレーン船の船体動揺特性が優れることは周知の事実であるが、本比較検討により各クレーン船の横揺れ特性の相対的差異を定量的に把握し、且つ、同じ箱型のクレーン船においても、その形状・重心位置等の違いにより、動揺特性に大きな差異が生じること

表4 比較に用いたクレーン船諸元
Table 4 Analysis cases

比較ケース	船タイプ、諸元
クレーン船A	箱型、140m×34m×10m
クレーン船B	箱型、150m×38m×15m
クレーン船C	Ship型、180m×35m×15m
クレーン船D	セミサブ型、150m×38m×15m

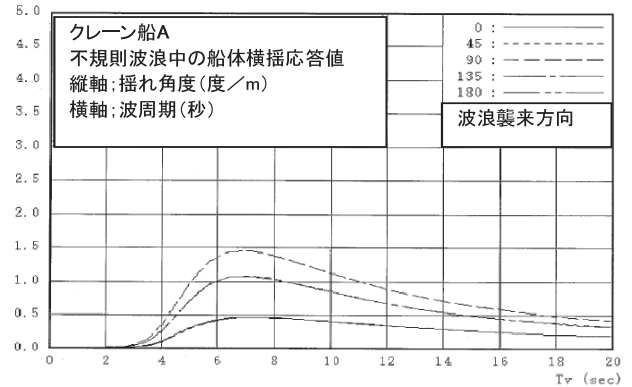


図13 不規則波浪中横揺れ応答解析結果の例
Fig. 13 Sample of motion analysis results

が把握できた。また、磐城沖においては、波浪観測データから卓越する波浪周期帯が6～8秒の範囲にあり、この周期帯に横揺れ応答周期のピークが現れる作業船(表4に示すクレーン船A)については、作業稼働率が殆ど見込めないため、磐城沖における撤去作業の候補から外すこととした。クレーン船の選定、入札においては、表4のクレーン船B-Dの3隻を対象に行い、本動揺特性値から作業限界波高を設定し、観測統計データを使用して稼働率を推定し評価に用いた。クレーン船の選定は、これら3隻に対し上記推定稼働率評価に加え、契約条件、費用、工事に使用可能な期間等も勘案し行った。

なお、最終的に起用することになったクレーン船S3Kについては、契約交渉の段階で、海象条件の比較的厳しい東南アジア海域でのモンスーン時期にマレーシア沖合で作業中の本船に施主とともに現地調査に赴き、実際の船体動揺量を計測して、解析と大きな差異がみられないことも確認した。

3.2. ジャケット吊上げの浮力調整検討

3.2.1. 吊上げ対象となるジャケット本体重量

プラットフォームのジャケット部は、建設後約27年間海中に設置されていたことから吊上げに際しては部材の腐食や部材へのマリングロース(貝殻、藻

類の海生物)の付着などが吊上げ重量に影響することが懸念された。そのためPFの状況調査段階に行ったダイバーによる水中調査の結果をもとに推定重量値を算出した上で、その値にDNV規準で推奨されたContingency Factorを考慮し、最大と最小の幅を持たせた上部ジャケットの推定水中重量(2,084t~3,041t)を算出した。

なお、今回撤去準備作業と並行して、作業船から充水検知器(Flooded Member Detector)を取り付けたROVを操作し、ジャケットブレス材の充水検査を実施し、ブレス部材内の海水浸水の有無を確認した。検査の結果、建設時に損傷が確認されている1本を除き検査実施部材に充水は全く無く、ジャケットブレス材の浮力はジャケット吊り検討に考慮できると判断した。これは磐城沖ジャケットの設計においては地震荷重が卓越条件となっており波浪荷重に対しては余裕があるため部材の疲労強度にも余裕があったものと考えられる。

吊作業に用いるクレーン船S3Kは今回の吊り作業を行う作業半径35mでの吊上げ能力は2,200tしかなく、上記の推定水中重量に吊スリングワイヤー等の吊具重量約100tと4m吊上時の浮力減衰約240tを追加した上でDAFによる割増を考慮すると吊上げ最大重量は5,000tを超え、クレーン船の吊能力を大きく超えてしまう。そこでこのクレーン船で吊上げ作業を行うためには、吊上げ重量を低減させるための付加浮力を与えるシステムを構築する必要があった。

3.2.2. 付加浮力

付加浮力の追加には、現場での作業を大幅に複雑にする新たなフローター設備を追加することはせず、既存の上部ジャケットレグ内部の杭を撤去した後レグ上端に閉止板を設けてエアを注入し、内部の海水を排出することで浮力容器として利用することとした。

上部ジャケットの初期吊上げ開始時点では、吊上想定重量の約1,000tの幅に対応するため約1,100tから1,900tまで付加浮力を段階的に増加させつつ吊上げ荷重をかける手順としたが、浮力を十分に得ることを優先しエアを入れすぎると、ジャケットが軽くなり過ぎてしまい吊下ろし工程の途中でジャ

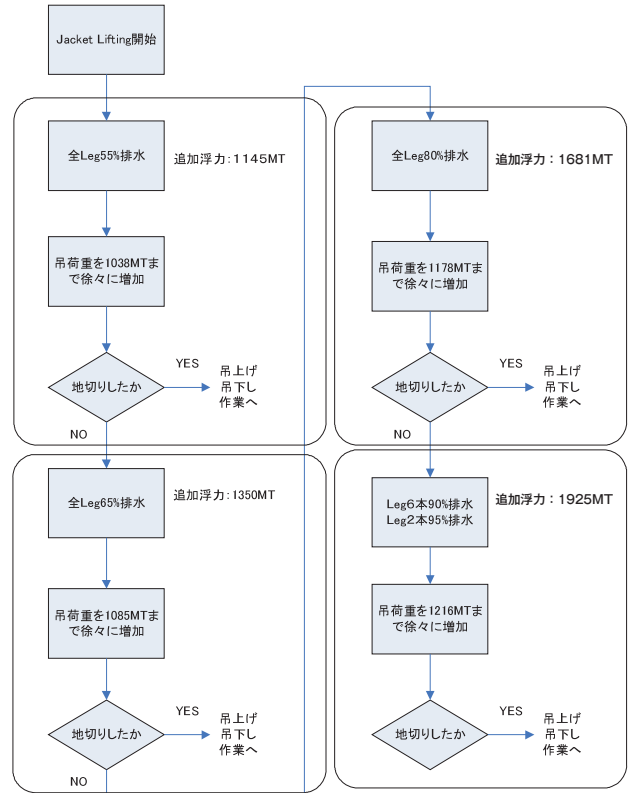


図14 ジャケット初期吊上げフロー
Fig. 14 Jacket Lifting and Ballasting Work Flow

ケットが全没水すると浮力が増すことによりジャケットが軽くなり、波高と周期が大きい場合にはスリングがたるむ危険な吊状態となりうる可能性があった。

そうした過剰な浮力は、浮力が増大する局面でレグからエアを抜くことで低減することも考えられたが、今回は一旦エアを注入した後は加圧システムの機構上と安全上の理由からエアの排出を行うことはしない方針としたことから、初期吊上げ段階から過剰に付加浮力を与えることがないようにしつつも確実な初期吊上げができるようにエア加圧のステップを図14に示すように設定し、その後の吊下ろし工程の最中に浮力が減少する分については、エアを追加して浮力をとりもどすこととした。

3.2.3. 動揺解析

吊上げ中の動揺による吊りスリングへの過大な張力やたるみの発生を確認するために、吊上げ工程を①初期吊上げ段階、②4m吊上げ段階、③海中吊下ろし段階、④海底面上仮置き段階の4フェーズに分け、想定される施工時の波高と周期を変化させて

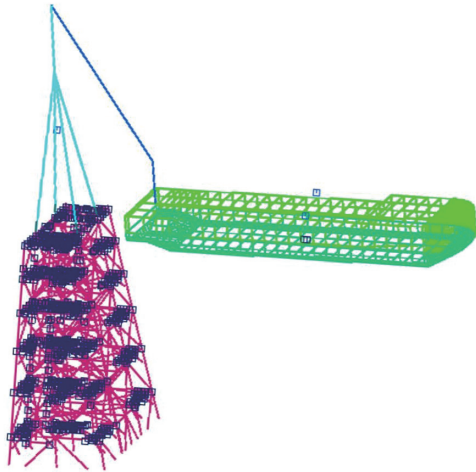


図15 ジャケット吊上げ動揺解析モデル図
Fig. 15 Dynamic lifting analysis model for the crane vessel and the jacket

動揺解析を行った。(解析に用いたクレーン船とジャケットの一体構造モデル例を図15に示す。)

解析の結果、①、②フェーズでは作業船で規定されている作業限界波高までは吊作業が可能であることが判ったが、③、④フェーズにおいては波高 $H_s = 1\text{ m}$ を超え周期 $T = 7$ 秒を超えるとジャケットが水中に没した状態ではジャケットに対する付加重量が増大してDAFが2を超えるほど大きくなったり、増大する浮力によって重量が軽減された状態で動揺することでスリング張力がマイナス値(スリングがたるむ)となる瞬間が生じる(図16)ことから吊作業が不可能な条件があることが判ったため、これらの海象条件をジャケット吊上げ作業を実行するかどうかの判断基準とした。動揺解析の結果一覧を表5に示す。

3.2.4. 作業手順の具体化

前述したように、今回のジャケットの吊上げについては不確定要素と厳密な作業可能条件が前提となったため、作業開始条件と作業ステップを明確に設定し、それを現場で厳密に管理することが重要であった。具体的には

- ①解析結果をもとに吊上げが可能なクレーンの動揺状態を規定し、現場の動揺量観測値をもとに吊上げ作業の開始を判断。
- ②作業ステップごとに変化する浮力と吊重量の状態をきめ細かく規定した作業ステップ資料の整備。

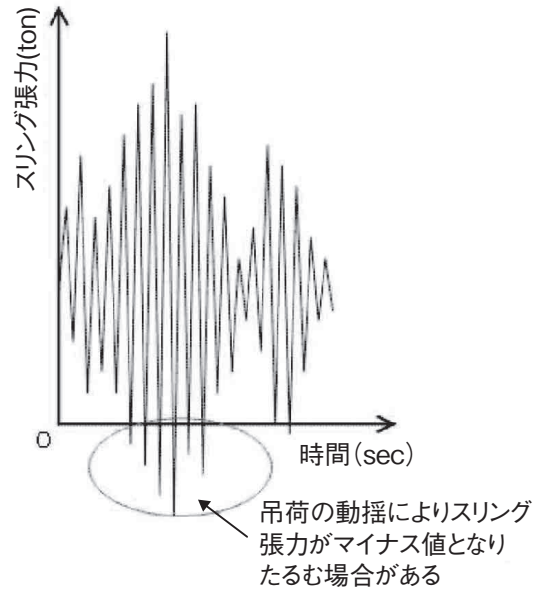


図16 吊上げ動揺解析におけるスリング張力算出結果(イメージ図)
Fig. 16 A typical graph of sling tension from dynamic lifting analysis

表5 ジャケット吊上げ限界稼働条件
Table 5 Seastate limit criteria for jacket lifting

周期(秒)	①初期吊上げ	②4m吊上げ	③海中吊下し	④海底仮置き
4	作業船が規定する可働最大波高(1.5m)まで作業可能		1.5	1.5
5			1.5	1.5
6			1.5	1.5
7			1	1
8			作業不可能	
9				
10				

数値は H_s (m)

これらの準備を行った上で、クレーン荷重とエア注入圧を同時にモニターしつつ施工管理を行った結果、海象条件にも恵まれ無事にジャケット吊上げ作業を完了することができた。なお、ジャケットの水中重量は想定幅のほぼ中央値の約2,600tであった。

4 結言

以上磐城沖 PF 撤去工事の概要と本工事において行った技術検討の一部について述べた。

本工事で得た知見、経験を活かし、今後海外マーケットで盛んになるであろう鋼製海洋プラットフォームの撤去事業と将来の大水深開発事業においても積極的な対応に努めていきたい。