報 告

磐城プラットフォームからの ERD 可能性調査について*

吉 田 肇**

(Received June 29, 2000; accepted September 28, 2000)

Feasibility study of the next challenging ERWs from existing platform

Hajime Yoshida

Abstract: Iwaki Platform was built in 1984, which is located about 40 km off the east coast of Fukushima prefecture, and natural gas has been produced from C-Structure for 15 years. There are a few Satellite fields toward the south-south-west from the platform, which is called C-Satellite North, C-Satellite Central and C-Satellite South and those approximate distances from the platform is 4 km, 6 km and 7.5 km each.

Johban Oki-2 well was drilled to C-Satellite North structure as the first extended reach well in Japan and completed successfully in 1994. After the success of the well, some engineering study mainly regarding rig modification was done for the next ERD to C-Satellite Central structure, however the detail engineering and the execution had been temporarily given up for the various reasons.

From the end of 1998, feasibility study of the ERWs to both C-Satellite Central structure and C-Satellite South structure was conducted as the alternative development instead of subsea completion. The FS covered preliminary drilling engineering, structural analysis of drilling structures and rig modification, and the FS took almost nine months. After all, the execution was totally given up mainly due to the difficulties of the rig modification and reinforcement. This paper reports the critical issues of drilling engineering in this study, 1) well path design, 2) hole cleaning, 3) torque & drag and mud friction, and 4) borehole stability, which will match the subject "The Integration of Technology and Engineering" of the 2000 JAPT Drilling Symposium.

Key words: ERD, extended reach, ERW, borehole stability, torque and drag, hole cleaning

1. 緒 言

福島県東方沖合約 41 km に位置する磐城プラットフォーム (図 1) から 1994 年に日本初の大偏距坑井 (ERW) 常磐沖 2 号井が, C サテライトノース (CSN) 構造に掘削され成功している。ただし, さらに遠い C サテライトセントラル (CSC) 構造に対しての大偏距掘

削 (ERD) に関しては, 主に掘削装置類についてその後スタディしたが, さまざまの理由により詳細検討を実施しなかった。しかし, ここ数年の英国ウィッチファームなどにおける ERD の数々の成功例から, ERD による開発を再検討すべきという考えがなされた。

よって平成10年末から, CSC 構造だけでなく C サテライトサウス (CSS) 構造への適用を含めた, 大偏距掘削井 2 坑に対する掘削可能性について調査を開始した (図 2)。CSC 構造および CSS 構造までのプラットフォームからの水平距離は, それぞれ約 6 km と 7.5 km であり, 掘削深度はそれぞれ約 7,400 m と 8,800 m となることが想定された。可能性調査は, プレリミナリドリリングデザイン作成, ドリリングストラクチャーの構造解析, 掘削設備全般にわたる整備・改造計画まで

* 平成12年5月25日, 平成12年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「技術と工学のインテグレーション」で講演 This paper was presented at the 2000 JAPT Drilling Technology Symposium entitled "Integration of Technology and Engineering", held in Niigata, Japan.

** May 24, 2000.

図1 磐城プラットフォームロケーション図

図2 サテライト構造ロケーション図

を含み、約9ヶ月を費やした。

本スタディの結果、主に掘削設備の改造および補強が予想より大規模になることが判明し、実行を断念することとなった。本論ではこれらの調査の概要を説明し、調査中に見出した掘削技術課題の中から、1) 坑跡の選定、2) ホールクリーニング、3) トルク・ドラグと泥水、および 4) 坑壁安定性について報告し、さらにこれらに関する研究開発を提案したい。

2. スタディの概要

2.1 当社内でのプレリナリデザインと問題点

本調査を外注するとしても、まず当社としての基本となるデザインが必要なこと、また問題点を見出す目的から、約1ヶ月間かけてCSCとCSSについて当社内でプレリナリデザインを作成した。坑跡については、ビルドアッププレートで常磐沖2号井と同じ1.5 deg/30 mとし、ビルドアップ終了後は沿角とした(図3)。その結果、掘削深度はCSC、CSSそれぞれ7,400m、8,800m

図3 当社内でのプレリミナリ坑跡図

となった。ケーシング設置深度については、18-5/8 in ケーシングは常磐沖 2 号井と同深度、13-3/8 in ケーシングはビルドアップ終了後、9-5/8 in ケーシングはターゲット直上とした。掘進編成については、6-5/8 in 掘管はビルドアップセクションをカバーするよう 2,000 m、残りは 5-1/2 in 掘管を使用することとした。

当社内でのプレリミナリデザインを作成した段階で、常磐沖 2 号井の掘削とは明らかに異なり、CSS については水平距離について当時の世界記録に匹敵する坑井となることが判明するとともに、以下の解決すべき問題点が見い出された。

・デリックセットバック能力

現デリックのセットバックは、5 in 掘管で 185 スタンド (5,273 m) が限界であるが、CSC では 260 スタンド、また CSS については 309 スタンドが必要となる。フィンガーボードの改造は必ず必要となり、デリックの改造若しくは入れ替えが必要となる可能性もある。

・パイプラックエリア

7,000 m 以上の 9-5/8 in ケーシングをパイプラックに載せることが可能か。載せることができなければ、どう対処するのか。

・ドリリングライン能力および巻揚装置類

現在のドリリングラインは 1-3/8 in 径であり、すでに 110-UE (現在搭載されているドローワークス) の標準である 1-1/4 in 径をグレードアップしている。1-3/8 in 径のドリリングラインで掘削可能か。1-1/2 in 径に変更するには巻揚装置類にどのような変更を行わなければならないか。

・マッドポンプ (パワーユニット含む)

少なくとも 3 台のマッドポンプは必要であり、コンティンジェンシーを考慮した場合、4 台必要となる可能性もある。追加ポンプをどう設置するか、およびポンプ

追加で必要となるパワーユニットをどうするか。

・ソリッドコントロール機器

現在レトロタイプシェーカー 2 台が設置されているが、この場所に 3 台のリニアモーションタイプシェーカーが設置可能か。

・ホールクリーニングと地層破壊圧

近接坑井の実績より、予想地層破壊圧は 11.2 ppig と想定されるが、この地層破壊圧を超えないように十分なホールクリーニングを達成できるか。

・構造解析およびリグ改造

トップドライブの設置および掘管のセットバック増加により、ドリリングストラクチャーの構造解析は必須であるが、どのように実施するか。またその結果としての改造の度合いはどれほどのものか。

2.2 調査の流れ

本調査の大まかな項目および流れを図 4 に示す。まず、当社内で作成したプレリミナリデザインについて、常磐沖 2 号井掘削当時にもかかわっていたコンサルタントにプレリミナリチェックを依頼した。このチェックは、世界記録にも匹敵する ERD について、限られたハードウェアの中で検討する価値があるかどうかのチェックを含めた。

コンサルタントのチェックの後、ERD のサービスを総合的に実施可能なサービス会社 3 社に当社内でのプレリミナリデザインの評価を依頼した。フィンガーボードの改造については、トップドライブの作業性もあることからトップドライブ製造会社に依頼した。

フィンガーボードのデザイン検討の結果、6-5/8 in の掘管を使用すると、デリック自体を改造しなければ CSC でさえも掘管を計画深度分の長さまで立てられないことが判明した。さらに、CSS については、5-1/2 in 掘管を使用してもデリック改造が必要となることが判明

図4 調査の流れ図

した。よって12-1/4in 坑全深度について5-1/2in 掘管を使用する計画に変更して、トルク・ドラッグおよびホールクリーニングについて掘削可能性を再度調査することとした。

ドリリングストラクチャーの構造解析については、当初は構造解析専門会社を予定していたが、その結果から想定される改造工事の見積もりも必要なことから、実際にデリックを建造した会社に構造解析および改造度合いの調査を依頼した。上述したように、CSCとCSSではデリックのデザインが異なることが判明したことにより、調査自体をフェーズに分け、まずCSCに対する調査を行いその結果を考慮してCSSについての調査を行うこととした。またドリリングストラクチャーの土台となるモジュールについても静的ではあるが解析を行い、補強度合いを調査した。

プラットフォーム上の掘削機器の点検、整備および改造については、設置後15年以上経ていることから、実際に正常に機器類が作動するのかどうかの調査から始め、既存機材の整備計画、ソリッドコントロール機器の入れ替え、ドローワークスの入れ替え、トップドライブの設置、追加エンジンおよびジェネレータの設置など、多岐にわたる検討を実施した。

2.3 スタディ結果

約9ヶ月間にわたるスタディの結果、下記の事柄が判明し、結局大偏距掘削の実行を断念した。

(1) 掘削技術関連

CSCについては、現在までの調査では技術的に掘削実施可能な範囲にあるが、確実性を増すために泥水のスタディおよびコンティンジェンシープランを追加することが必要。CSSについては技術的に実施可能ぎりぎりのところであり、CSCの掘削結果によってその可能性を左右すると想定される。

(2) 設備関連

CSCについては、構造解析の結果から当初想定より大規模な補強工事が必要となることが判明した。それによってプラットフォームの生産を長期間停止しなければならない可能性が高い。CSSについては構造解析は実施しなかったが、さらに大規模な工事が予想される。

3. 掘削技術課題

本調査においては数多くの問題点が見出された。今後も研究開発を必要とし、かつ当社だけでは解決が困難である次の4つの技術課題について報告するとともに、これらに関する研究開発を提案したい。

3.1 坑跡の選定

坑跡設計では、カテナリ曲線タイプの坑跡が最もトルク・ドラグを減少させると言われている。しかし、実際の坑井計画では、最終深度の時点で最もトルク・ドラグを減少させる坑跡がベストとは限らない。

当社内でのプレリミナリデザインでは、常磐沖2号井と同じく、ビルドアップレートが1.5deg/30mで計画した。調査中にこの坑跡は、スラックオフのドラグがクリティカルな状況であることが分かった。スラックオフがクリティカルであれば、従来の傾斜掘り技術で掘削時方位・傾斜のコントロールができなくなる。またケーシング降下も困難となることが予想される。

したがって、ビルドアップレートを深度とともに1.5、2.5および3.5deg/30mと徐々に増加させ、最大傾斜を80度に抑える坑跡に変更した(図5)。この坑跡の採用によって、表1に示すように、ピックアップ時のドラグおよびトルク計算結果は以前のデザインと比較して上昇したが、スラックオフにかかわるドラグは減少した。

CSCについてはこの坑跡で問題ないと思われるが、CSSの12-1/4in坑の深度では予測されるトルクが上昇したため、予定しているトップドライブのトルク限界に迫っている。このためCSSについてはさらなる坑跡の最適化若しくはケーシング設置深度の変更などが必要となるであろう。

この一例で示したように、坑跡設計は各ハードウェアの限界、泥水摩擦係数、ケーシング設置深度などのさまざまな要因によって変えていかねばならず、坑井ごとに最適化する必要がある。

コンピュータのソフトウェアなどで最適化の計算を行わせようとしても、数々の設定を行い繰り返し計算を実施する必要があると思われる。

3.2 ホールクリーニング

ホールクリーニングはトルク・ドラグのシミュレーションとともに、ERD計画時の重要事項の1つである。ホールクリーニング性、泥水レオロジーおよび圧力損失は互いに密接な関係にあり、実現可能な範囲内でいかに十分なホールクリーニング性を達成できるかがスタディ

図5 坑跡変更図

表1 坑跡変更によるトルク・ドラグ変化

CSC		String Wt.@pick up (lbf)		String Wt.@slack off (lbf)		Drill Torque (ft-lb)	
		Preliminary	Revised	Preliminary	Revised	Preliminary	Revised
12-1/4" hole	DRLG ASSY	297,672	338,100	21,334	30,790	32,064	38,190
	9-5/8" CSG	556,979	614,002	52,316	61,338	—	—
8-1/2" hole	DRLG ASSY	327,863	330,590	37,530	42,080	31,764	35,960

CSS		String Wt.@pick up (lbf)		String Wt.@slack off (lbf)		Drill Torque (ft-lb)	
		Preliminary	Revised	Preliminary	Revised	Preliminary	Revised
12-1/4" hole	DRLG ASSY	334,239	376,600	-9,920	4,830	38,290	45,420
	9-5/8" CSG	629,956	675,427	-7,461	15,756	—	—
8-1/2" hole	DRLG ASSY	367,986	370,410	4,810	18,990	38,559	43,240

の焦点となった。また当社ではホールクリーニングに関するソフトウェアを所持していないため外注に行ったが、会社によって計算結果にはばらつきがあり、どれが信頼できるかも問題となった。

当社内でのプレリミナリデザインでは、アニュラー流速を 200 ft/min になるようにポンプレートを設定して、ビンガムモデルおよびパワーローモデルを使用してハイドロリクスを計算した。結果の一例を図 6 に示す。図中上 3 つがパワーローモデルであり、総圧力損失（ポンプ圧力）の計算結果はほぼ 5,000 psi を下回る。下 3 つがビンガムモデルであり、結果はすべて 5,000 psi をオーバーし、ビンガムモデルを信用すれば、地上循環装置類を全て変更しなければ ERD は実施不可能となる。またパワーローモデルでは、YP 値が下がるにしたがってアニュラスの圧力損失は減少するが、管内の圧力損失は増加し総圧力損失は上昇する。反対にビンガムモデルでは、YP 値が下がると管内の圧力損失は変化せずにアニュラスの圧力損失が下がり、総圧力損失は減少する。このように使用するハイドロリクスモデルによって大幅に計算値が変化し、泥水レオロジーの変化に対してそれぞれの計算結果が全く逆の現象を示すことが分かる。ハイドロリクスモデルは、現在最も実際の値と近似しているといわれる Herschl-Bulkley rheological Model を使用するべきであろう。本調査中には当モデルの計算ソフトがなかったために、実施はしなかったが、実際に計画する場合には外注による当モデルを使用した泥水スタディが必要であったと考えている。

図 7 に、泥水のレオロジーの変化によってカッティングス運搬限界の指標となるクリティカルフローレートが変化することを示す。シアニング性の低い泥水の方が、クリティカルフローレートは減少し、計画に余裕がもてることが分かる。しかし、実際の泥水でどこまでシアニング性を下げられるかの検討も必要となり、上述した泥水スタディに含めることを考えた。

ホールクリーニングは Schlumberger (SLB) モデル、BP と共同で開発した Baker Hughes Inteq (BHI) 所有のモデル、および BHI モデルで計算してみた。その結果を表 2 に示す。12-1/4 in 坑で BP モデルを使用すると、クリティカルフローレートをクリアするフローレートを出そうとすれば地上循環装置の限界圧力 5,000 psi を超えてしまう。SLB モデルでは 900 GPM (U. S. gal/min.) で良いという結果だが、それを BHI モデルで計算すると 5.6% のカッティングベッドが形成することとなる。各社ともにそれぞれの理論に基づき計算されているが、掘管の偏芯は考慮するが回転は考慮していないなどの違いもあり、より厳しいモデルを採用すべきかどうか判断に窮した。

なお最終坑径については当初 8-1/2 in 坑としていたが、当量循環比重 (ECD) を予想地層破壊圧より下げるために 8-3/4 in 坑に変更した。

石油公団ではホールクリーニングの実験設備もできていることから、信頼できるホールクリーニングモデルの開発を望む。

図 6 ハイドロリクスモデルによる計算結果比較

図 7 泥水レオロジーによるクリティカルフローレート比較

表 2 ホールクリーニングモデルによるクリティカルフローレート比較

CS-C	Model	Rotation	CFR (gpm)	PP rate (gpm)	SPP (psi)	ECD @bit (ppg)	Cutting Bed
17-1/2 in hole	SLB validation	Non Rotate	—	1,200	2,929	9.22	
12-1/4 in hole	SLB	—	894	900	3,866	9.65	
	BP model	Rotate	1,041	1,041	4,817	9.54	
	BP model	Non Rotate	1,166	1,166	5,804	9.56	
	BHI	—	—	900	4,081	—	5.60%
8-3/4in hole	SLB	—	435	440	2,429	10.53	
	BP model	Rotate	518	518	3,209	10.37	
	BP model	Non Rotate	571	571	3,817	10.44	
	BHI	—	—	440	2,471	10.28	2.40%

CS-C	Model	Rotation	CFR (gpm)	PP rate (gpm)	SPP (psi)	ECD @bit (ppg)	Cutting Bed
17-1/2 in hole	SLB validation	Non Rotate	—	1,200	2,932	9.32	
12-1/4 in hole	SLB	-	894	900	4,290	9.70	
	BP model	Rotate	1,042	1,042	5,250	9.59	
	BP model	Non Rotate	1,167	1,167	6,333	9.61	
	BHI	—	—	900	4,425	9.57	5.60%
8-3/4 in hole	SLB	—	435	440	2,619	10.70	
	BP model	Rotate	518	518	3,420	10.53	
	BP model	Non Rotate	572	572	4,067	10.61	
	BHI	—	—	440	2,668	10.43	2.40%

注記
SLB: Schlumberger
BHI: Baker Hughes Intaq
CFR: Critical Flow Rate
PP rate: Pump output
SPP: Standpipe Pressure
ECD: Equivalent Circulating Density

3.3 トルク・ドラッグと泥水

ERD でのトルク・ドラッグに対処する方法としては、ハードウェアの強化、坑跡の最適化などがあるが、一番簡単な方法は泥水の摩擦係数を低減することである。実際に世界記録に近い ERD ではそのほとんどで、泥水の摩擦係数を減じる目的でオイルベース泥水 (OBM) 若しくはシンセティックベース泥水 (SBM) が使用されている。

図 8 に本スタディで設定したウォーターベース泥水 (WBM) の摩擦係数と一般的な OBM および SBM の摩擦係数とで計算したトルク・ドラッグとの比較を示す。計算結果から顕著に掘削難度の違いが現れるのは、スラックオフドラッグとトルクである。WBM では 12-1/4in 坑のボトムでストリング荷重がゼロに近づき、方位傾斜のコントロールが困難となるが、OBM の場合はまだ余裕がある。また WBM の場合は計画しているトップドライブの限界トルク (46,000 lb-ft) に切迫しているが、OBM の場合は同様に余裕がある。この一例でも理解できるように、泥水の摩擦係数を減少させることができれば、ハードウェアの選定が楽になり、全体的な掘削コストを減少させることができる。本スタディでは SBM の使用可能性も検討したが、法規制などの不確実性から WBM を選択してスタディを行った。

泥水の潤滑性のテストは通常 API 若しくはバロイド社のテスターで行われるが、これらはトルク・ドラッグ計算における摩擦係数とは一致しない。常磐沖 2 号井計画時には、Falex 社の Block-on-Ring Test を使用して泥

水の摩擦係数試験を行い、当時で最も低い値を出した泥水を使用した。またこの試験で予想された摩擦係数は、実フィールドから計算される摩擦係数値とほぼ一致していた。WBM の摩擦減少剤としては、テルナイト社の PPG (常磐沖 2 号井で使用)、テルクリーン S およびエクソンケミカル社の TEK MUD8588 (常磐沖 2 号井で使用) などがあるが、OBM, SBM の使用が困難になりつつある現状においてはさらに画期的な摩擦減少剤の調査および研究開発が望まれる。

3.4 坑壁安定性

岩石力学的な坑壁安定性についてはさまざまな式があり、またログデータからも推定できるようになってきている。エクソンプロダクションリサーチ社 (EPRCO) では、正確で信頼できる頁岩試験技術を開発することおよび頁岩の機械的物性のデータベースを構築することを目的として、1984年にシェール・リサーチ・プログラムを立ち上げ、その中で以下のものが開発されている。

- ・頁岩のサーフェスエリアと岩石物性との関連づけ
- ・簡易サーフェスエリア測定法の開発
- ・坑壁安定性分析 PC プログラムの開発

開発された PC プログラムのアウトプットは以下のものが含まれる。

- ・ウェルボアでの 3 軸応力
- ・シェール・サーフェスエリア・コレレーションを用いたダウンホールシェール強度
- ・ウェルボア・インスタビリティを防ぐ泥水比重
- ・地層破壊圧

注記

0.24/0.27: 摩擦係数ケーシング内0.24/裸坑0.27(計画ウォーターベース泥水)

0.20/0.20: 摩擦係数ケーシング内0.20/裸坑0.20(オイルベース泥水を想定)

PU: String Wt. @pick up

SO: String Wt. @slack off

ROB: String Wt. @rotating off bottom

図 8 WBM と OBM のトルク・ドラッグ比較

・シェールハイドレーションを抑制し、岩石強度を維持するのに必要とされる KCL 濃度

実際に常磐沖 2 号井計画時の EPRCO スタディでは、近接坑井のカッティングサンプルから頁岩のサーフェスエリアを測定し、また、シェールの強度を計算して、泥水比重はもとより K イオンのパーセントまでリコメンドを出している。

しかし、EPRCO がこの種の技術開発を行うためにさまざまな頁岩特性を特徴づけ、またデータベースを構築するために何百もの頁岩の 3 軸応力試験を実施していることも事実である。このような研究は当社だけでは到底実施不可能であり、国内の石油開発会社、大学および国とを交えた研究が必要であろう。個人的には時系列変化を含めた頁岩の坑壁安定性に関する研究開発を望む。

4. ま と め

数多く大偏距坑井を掘削している石油会社は、その必要性および学習効果により多くの技術を蓄積している。しかし、国内の 1 石油会社が世界記録に匹敵する大偏距掘削を計画する場合には、技術の蓄積は乏しく、単独での調査研究にも限界がある。今回の調査では、総括的な技術力を持ったコンサルタントと ERD の経験豊富な

サービス会社を使用して、さまざまなエンジニアリングスタディを行わせるとともにその経験を引き出すことによりなんとかスタディ自体を終えることができた。

掘削技術力の維持・向上のためには、上述したような掘削技術課題について、日頃から研究開発を行っていくことが必要であることは理解していても、1 石油会社には人的資源および資金力などの問題があり、実行できずにいるのが現状であろう。しかしこのような状況を打破するためには、やはり石油会社がリーダーシップを取りながら、官学に働きかけて研究開発を促し助言していくことが是非とも必要であり、それが日本国内石油会社全体の技術力を向上させていくものとする。

SI 単位換算係数

In × 2.54	E-02 = m
ft × 3.048	E-01 = m
U. S. gal × 3.785412	E-03 = m ³
lbf × 9.806650	E+00 = N
lbf-ft × 1.355818	E+00 = Nm
Psi × 6.894757	E+03 = Pa
Ppg × 1.198264	E+02 = kg/m ³