

# 深層掘削技術の現状と課題

田中彰 一<sup>1)</sup>

日本の深掘技術は通商産業省の「国内石油及び可燃性天然ガス資源開発5ヶ年計画」の基礎試錐と、石油資源開発(株)片貝ガス田(深層)及び帝国石油(株)南長岡ガス田の探査・開発を中心として発展してきている。日本の陸上の坑井で始めて5,000 mを越えたのは新潟市の郊外で掘削された基礎試錐「下五十嵐」であり、1968年に5,007 mで掘止めている(石油技術協会, 1990)。6,000 mに達したのは新潟県下の基礎試錐「新潟平野」で、1990年である。それ以降6,000 mを越える坑井は3坑井あるが、全て新潟県下の基礎試錐である。最深井は基礎試錐「新竹野町」の6,310 m(1993年)である。参考までに米国の石油ガス探査の最深井は1974年に掘止めされたオクラホマ州アナダルコ盆地のBertha Rogers 1で9,583 mである。

このように基礎試錐は日本の掘削技術の現状を反映しているため、第5次(1980年度から)、第6次(1985年度から)及び第7次(1990年度から)の陸上基礎試錐の概要を第1表、第2表及び第3表に示

す。それらの坑井位置を第1図に示す。なお、海上基礎試錐も平行して行われており、日本全域に及んでいるが、掘削深度は陸上の基礎試錐より浅いので陸上のものに限定した。海上も含めて基礎試錐の成果は参考文献(石油技術協会, 1993)を参照ください。

第1表に示されているように第5次計画の基礎試錐3坑井の掘削は3,000 m台であるが、第6次計画以降は相良と新米山以外は5,000 mを越えている。これら5,000 mを越える坑井は、新潟を中心として秋田及び北海道においても掘削されており、また東頸城と新米山の敷地は山地の中にあり、地理的にも、場所的にも、掘削装置が搬入できれば、日本国内の何処においても6,000 mに達する坑井の掘削は可能な状態に達している。先に搬入可能なという条件を上げたが、日本においては道路・橋梁の重量制限に合うように掘削装置の輸送のための分解単位を工夫する必要がある。海外で使用されている掘削装置の分解単位は重量が大きいためにそのまま持ち

第1表 通商産業省の陸上基礎試錐(第5, 6及び7次計画)の坑井

坑井名	地域	掘削期間		掘削深度, m	坑底付近の地質
		開坑	掘止		
黒松内	北海道	1981.09.23	1981.12.11	3,310	中新世訓縫層
豊頃	北海道	1983.01.14	1983.03.16	3,305	中新世オコッベ沢層
富山	富山	1984.10.20	1985.01.11	3,020	中新世岩稻層
留萌	北海道	1985.07.24	1986.06.02	5,023	白亜紀隈根尻層群
高田平野	新潟	1986.10.20	1987.10.29	5,240.5	中新世火打山層
仁賀保	秋田	1987.10.01	1988.05.05	5,000	中新世八塩沢川層
相良	静岡	1988.12.10	1989.03.26	3,230	中新世/漸新世
新潟平野	新潟	1989.10.17	1990.05.27	6,000	中新世七谷層
東頸城	新潟	1989.09.15	1990.09.27	6,004	中新世七谷層
新米山	新潟	1990.11.19	1991.09.16	4,800	中新世七谷層
三島	新潟	1991.09.01	1992.07.31	6,300	中新世七谷層
新竹野町	新潟	1992.10.14	1993.05.09	6,310	中新世七谷層
天北	北海道	1993.10.01	1994.06.27	5,050	白亜紀上部蝦夷層群

1) 東京大学名誉教授：  
〒349-01 埼玉県蓮田市西新宿2-60-3

キーワード：深層掘削，陸上基礎試錐，掘削技術

第2表 通商産業省の陸上基礎試錐（第5、6及び7次計画）の坑井の坑底付近の状況

坑井名	坑底付近の掘削		坑底の状況			最深ケーシング		最深コア掘	
	ビット径, inch	泥水比重	最高温度, C	偏距, m	傾斜度, 斜分	管径, inch	設置深度, m	深度, m	採取率, %
黒松内	8-1/2	1.24	184	128	2.18	9-5/8	1,600	3,310	92
豊頃	8-1/2	1.18	91	161	6.10	9-5/8	1,606	3,305	100
富山	8-1/2	1.36	137	20	0.06	9-5/8	2,000	3,007	95.6
留萌	8-1/2	1.69	159	79	2.50	9-5/8	4,490	5,023	100
高田平野	8-1/2	1.70	180	347	17.18	9-5/8	4,254	5,104.5	90
仁賀保	8-1/2	1.78	193.5	391	14.24	5-1/2(L)	4,995.4	4,972	100
相良	8-1/2	1.84	94	228	11.12	7(L)	3,051	3,210	100
新潟平野	8-1/2	1.80	192	104	3.30	9-5/8	4,783	5,975.5	99
東頸城	8-1/2	1.64	212.2	673	15.42	9-5/8	5,000	5,983.3	100
新米山	8-1/2	1.35	177	345	7.48	9-5/8	3,715	4,763	100
三島	6	1.91	226.2	174	20	5(L)	6,300	6,279	92
新竹野町	8-1/2	1.82	197	216	6.30	9-5/8	5,006	6,285	100
天北	8-1/2	1.86	156.8	182	8.42	9-5/8	4,640	5,029	98

注 温度には測定値とそれにより Horner 法により補正した値とがある。

(L)はライナーを示す。

「三島」の深部のケーシングとしては 9-5/8 inch×6,004 m, 7 inch(L)×5997 m がある。

込むことが適さないことがある。日本国内で使用されている最大の掘削装置は基礎試錐「東頸城」の掘削のために導入された石油資源開発㈱の所有する 1625-DE であるが、輸送の際の分解単位の最大のものは泥水ポンプの40.3トンである。この掘削装置は第7次計画の最後の坑井である新潟県新井市の基礎試錐「富倉」（目標深度6,000 m）の掘削に現在使用されている。なお、同掘削装置の能力は5 inch(127 mm)掘管で7,500 m まで掘削可能とされている。

大深度掘削が難しい技術的な理由としては以下の事項が上げられる(石油技術協会, 1990; 石油技術協会, 1993b; 藤井ほか, 1990)。

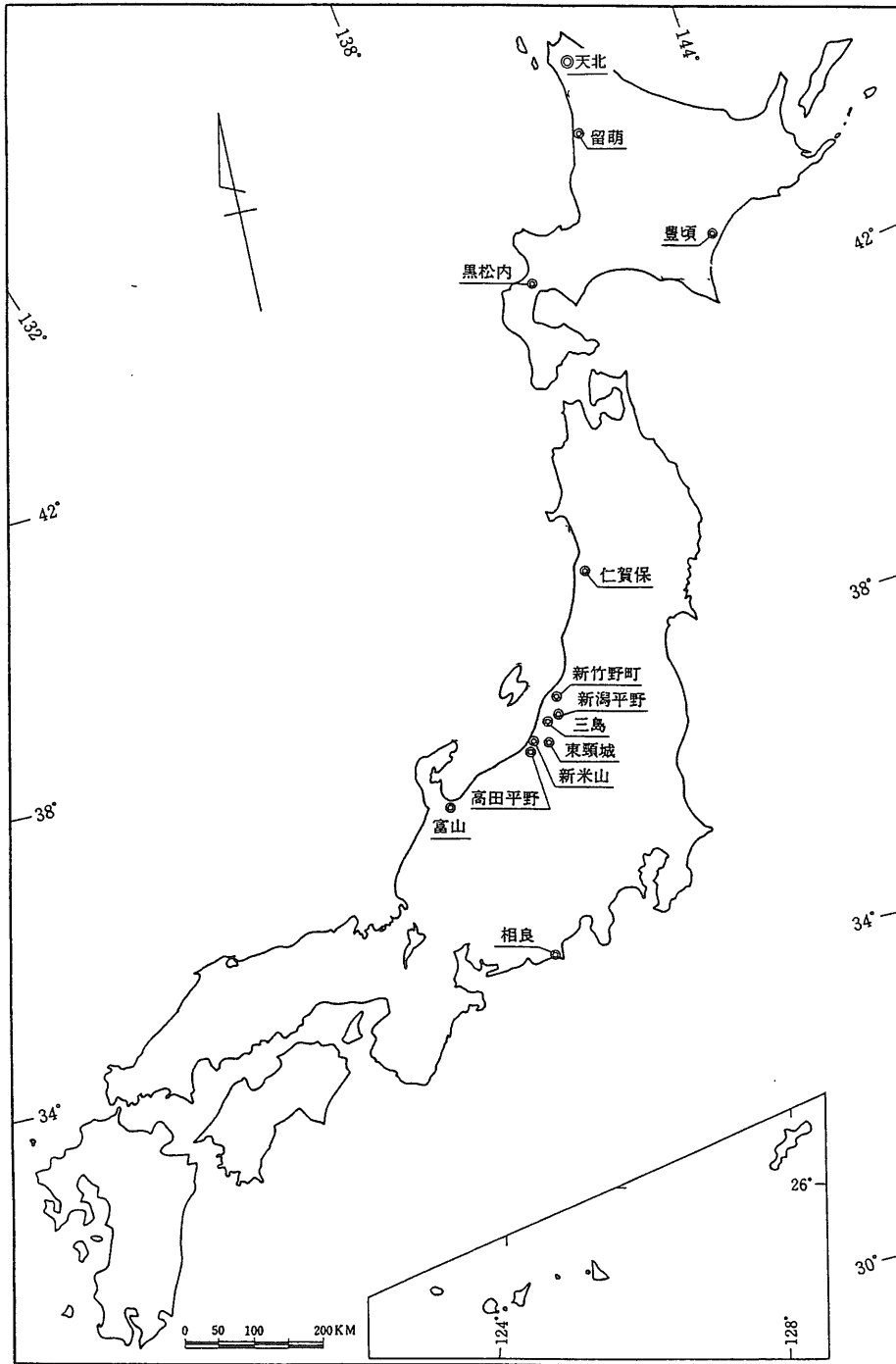
- ◎地層の掘れ難さが増すこと(低掘進率)
  - ◎坑壁の不安定さが激しくなること(坑壁の崩壊)
  - ◎高い地層圧力勾配の層に遭遇することが多くなること
  - ◎地層の破壊圧力勾配が低い層に遭遇することが多くなること
  - ◎高い地層温度になること
  - ◎重いケーシングを降下する必要があること
  - ◎坑井曲がりに対する制限が厳しくなること
- これらについて主要な点を説明するが、詳しくは前記参考文献を参照のこと。

第3表 通商産業省の陸上基礎試錐（第5、6及び7次計画）の坑井の坑底付近で使用された泥水とサイドトラックの深度

坑井名	坑底付近の泥水	備考
黒松内	リグネート	
豊頃	リグネート	
富山	リグネート	
留萌	KCI リグネート	
高田平野	BM ナイト・テルコン 泥水	
仁賀保	KOH リグネート	
相良	KCI リグネート	
新潟平野	KOH リグネート	サイドトラック (4,450 m)
東頸	KCI リグネート	サイドトラック (4,067.5 m)
新米山	リグネート	
三島	サーマビス/G-500泥水	
新竹野町	サーマビス/G-500泥水	サイドトラック (1,466 m)
天北	KCI リグネート泥水	

掘進率に関係するのはビット、荷重と回転速度、及び泥水である。最近ビットの回転方式は進歩し、次の3つの方式が使用されている。

- ◎ロータリテーブル
- ◎泥水駆動坑底モーター
- ◎トップドライブ



第1図 通商産業省の陸上基礎試験(第5,6及び7次計画)の坑井の位置

ロータリテーブルは従来から用いられているので説明は省略する。泥水駆動坑底モーターは、タービン型と容積型に分けられ、容積型は更に中心軸の断面の形により円形のもの多数の凸部のあるものと

に分けられる。これらは回転速度、回転トルク、耐熱性などにより使い分けられる。最も新しい機器はトップドライブであり、3本継ぎの掘管の使用、回転しながらの揚管など作業能率の向上と抑留回避に

効果を上げている。日本国内には基礎試錐「東頸城」の掘削装置と同時に導入され、現在では帝国石油㈱の掘削装置にも装備され、機種も多様化している。

ビットはベアリングのあるローラービット(ローラーコーンビット, ロックビットなどと呼ばれていたもの)とフィックスドカッタードリルビット(ソリッドビットと呼ばれていたもの)に大別されるが、ローラービットについてはベアリングの耐熱性が深部での問題点である。フィックスドカッタードリルビットの内の焼結ダイヤモンド(PDC)を用いるものはビットの回転方式と地質に合わせて多様化してきているが、硬い地層用が課題である。

大深度掘削において最も問題になるのは温度である。坑井内で使用する泥水、掘削機器、検層機器などの選択の基準は圧力と温度である。掘削の際には泥水が循環されているので、坑井内の温度は冷やされているが、泥水循環を中止すると温度回復が始まる。正しい地層の温度(地温)を測定するには半年間ぐらい坑井を密閉しておくことが必要であると言われている。第2表に示す温度は回復中の段階の温度あるいはそれらから Horner 法で推定した地温である。地温は地域により異なるものである。3,000 m 台の4坑井の値は91-161°C, 5,000 m 付近で156-193°C, 6,000 m 以深では200°Cを越え、「三島」では226°Cを記録している。

ドイツ KTB 計画では温度が地域の選択と深部調査井の深度の決定の重要な事項となっている。浅部調査井の実測温度は坑底深度4,000 m で118°Cであり、これより推定される10,000 m の温度は290°Cとなり、地域選定段階での予想の220°Cより大幅に高い温度が予想され、計画深度の見直しが行われた。

泥水に及ぼす温度の影響を見る際には泥水の比重を考慮することが必要である。比重が重いことは固形分が多いことである。固形分が多いと低い温度で泥水は流動性を失う。泥水の比重は地層の応力に対抗する圧力を坑壁に加えて坑壁の崩壊を防ぐためと、地層流体の坑井への流入を防ぐために調節される。高温下で高比重の泥水を使用するには泥水材料と固形分管理(ソリッドコントロール)の2つの面の進歩が要求される。

第3表に示すように基礎試錐「三島」で導入されたサーマビス/G-500泥水は耐熱性と高比重の点で世界の最高水準を行く泥水である(今野, 1993)。

サーマビスはドイツ KTB 計画で開発された合成無機ポリマーであり、G-500は日本の泥水会社(株)テルナイトが開発した薬品である。

第2表には坑底の偏距の計算値と坑底付近での傾斜の測定値が示されている。基礎試錐では垂直掘が基本であるが、地層の性質や掘り方による自然の曲りの修正や抑留対策等としてサイドトラックが行われることがある。サイドトラックは第3表に示すように3坑井で行われている。

大深度掘削で坑井曲りが問題になるのは、地質的な目標地点から外れる恐れと、急激なドグレグ(dogleg)は掘管の破損と抑留の危険性を伴うことに起因する(田中・吉田, 1981)。ドグレグの強さは坑井の傾斜と方位の変化を総合した坑跡の方向の変化角度の単位掘削長さ当たりで表し、通常は度/30 m の単位が用いられる。地質的な目標に到達することが危ぶまれる場合には、坑底駆動モーターを用いて坑跡修正あるいはサイドトラックを行う。掘管の破損には坑井の上部での曲りが関係する。曲がった状態では掘管には1回転ごとに正と負の曲げ応力が1回づつ発生し、曲げ疲労試験を行っている状態となり、引張り応力が大きいと低い曲げ応力と少ない繰返し数で掘管は破損する。急激な曲りが坑井の上部にある場合にはその箇所の修正が必要になる。急激な坑井の曲がり箇所では掘管と坑壁が接触して坑壁が溝状に抉られるキーシートが発生し、ドリルカラーやビットの抑留の原因となる。これは坑底付近でも発生する危険性がある。これらのことより坑井の曲がりが大きくなると坑跡の修正あるいはサイドトラックが行われる。

ドイツ KTB の浅部調査井では坑底駆動モーターによる修正が4箇所、サイドトラックが2回行われている。坑底の偏距は約190 m である。深部調査井では新たに開発された垂直掘削用機器であるVDSを7,500 m まで使用している。それ以深は温度などの関係で使用していない。深度8,714 m で傾斜18度、偏距250 m である。この深度までに抑留事故1回を経験し、サイドトラック2回を行っている。ロシアのSG-3では12,066 m に達した後8,770 m に245 mm のケーシングを設置した。その後11,000 m を越えるサイドトラックを2回行っているようである。

大深度においては地質や地殻応力により坑壁の崩

壊や坑井曲りが発生しやすくなることがKTBやSG-3で示されている。その対策としては5,000 mあるいはもっと深くまでできるだけ垂直に掘削することが上げられるが、掘進率が低くなる恐れがある。また、適当な間隔でケーシングを設置する必要がある。このことは掘削装置の重量物の吊り下げ容量に関係してくる。日本の1625-DEのフック容量は650トン、KTBの掘削装置のフック容量は750トンである。KTBでは13-3/8 inch×6,013.5 mのケーシングと9-5/8 inch×7,784.8 mのライナーの設置を行っている。

日本の深層掘削の現状とその参考としてKTBとSG-3の現状について記した。今後の課題としては、高温用のビット、坑底駆動モーターとMWD機器、硬い地層用のPDCビット、垂直掘削の掘り方、KTBのように浅部と深部との2坑井方式か、SG-3のように1坑井方式か、あるいはもっと坑井

数を増やすかの戦略の方式の検討システムなどの開発が上げられる。

参考文献

今野 淳(1993): 高温度泥水について 石油技術協会誌 vol. 58, p. 389-392.  
 石油技術協会(1990): 技術資料14 超深部陸上學術ボーリングへのアプローチ 石油技術協会(1993a): 最近の我が国の石油開発, 第I編及び第II編  
 石油技術協会(1993): 最近の我が国の石油開発, 第III編  
 田中彰一・吉田恒夫(1981): 技術資料6 ドクレグの許容値と掘削管の寿命について 石油技術協会  
 藤井邦夫・石田信一・伊藤 寛・佐野守宏(1990): 大深度掘削技術の現状 石油技術協会誌 vol. 55, p. 142-152.

TANAKA Shoichi (1995): Present Status of Deep Drilling Technology in Japan.

〈受付: 1994年11月18日〉

「超深度科学掘削に関する東京'93ワークショップ」から

熱音響効果を用いた坑井内小型冷却器

Gloria A. BENNETT (Los Alamos National Lab.)

深くて高温の坑井内で使用する検層機器にとって、耐熱性は最も脆弱な部分である。従来型の耐熱システムは受動的なものであり、使用可能時間は限定される。このため、高温の坑井内で長時間検層機器を使用するには、能動的な冷却システムが必要になる。

坑井内で使用するための能動的冷却システムを選択するにあたって、多くのシステムの評価と比較検討を行った。最後に坑井内での使用条件を考えた際の設計変更に対する柔軟性を中心に、最大のシステム利用率をあげるものを検

討した。検討の結果、最終的に熱音響理論を用いたHoflerチューブが最適と判断された。

この方式の冷却器は、中空の管内に平板を密接配置したスタックと、一端にスピーカーを設置した構造になっており、平板スタックの両端がそれぞれ高温、低温側の熱交換器となっている。このシステムは、スピーカーの振動によって、平板近傍のガス粒子を振動させて圧縮・膨張を起こし、これによって生じる微小な温度差を平板を一時的な蓄熱媒体として利用しながら、低温端(Tc)から高温端(Th)に向かって熱を移動させるものである。

熱音響方式を利用した坑井内冷却システムは、熱音響システム本体、補助熱移動、機械的保護装置の3つのサブシステムから構成される。検層装置の電子回路は、低温側熱交換器とつながった低温ヒートパイプとその外側の魔法瓶により熱的に保護され、更にシステム全体は外側の耐圧容器によって機械的に保護されている。冷却スタックとエンジンスタックの両側から高温熱交換器に達した熱は、高温側のヒートパイプを通じて外部へ放出される。この小型の高温用冷却器は、可動部分や循環媒体を必要としないため、機械的あるいは熱的に非常に堅固で広い範囲の温度条件で使用することができ、超深度ボーリング計画の検層機器の冷却システムとして期待できる。(抄訳: 松永 烈)

