資 料

汎用物理検層機による大深度検層

—その実際と諸問題—*

近 藤 信 也**

(Received July 20, 1993; accepted July 27, 1993)

Wirelinelogging in very deep wells
—Current method and associated problems—

By

Shinya Kondo

1. はじめに

油井検層に使われるシュルンベルジュの汎用物理検層機器の標準環境仕様は、温度 175℃、圧力 1,400bar で、かつ最小抗径は一般に 6" に設定してあります。大深度における様々の条件はこれらの限界を越えることもあり、機器の改良および特別仕様機器の使用などを考慮する必要があります。以下、個々の問題点ごとに現状可能な解決方法および将来の可能性などを説明したいと思います。

2. 高温環境

2.1 検層機器の温度仕様

集積度の高い電子部品を多量に使用している現在の検層機器にとって、やはり高温環境というのは最大の壁になるようです。図 1 は通常使用されている検層機器の仕様を列挙したもので、ここにはまだ記載のない最新型の機器のほとんど 175℃、1,400bar の仕様となっています。これらの機器も、デュワー断熱容器に入れることになり高温使用が可能になるものが多種ありますが、これは 2.3 項で説明します。図 2 は高温高圧下用に設計された Hostile Environment Logging (HEL) サービス用機器の仕様です。これらの機器の特徴は、一部の機器

図 1 標準仕様の検層機器

* 平成 5 年 6 月 10 日平成 5 年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「大深度掘削にかかわる技術的問題点」にて講演

** シュルンベルジュ(株) 長岡支店

図2 高温高圧仕様“HEL”検層機器

(HLDT, HNGT等)を除いてアナログ機器であること、外径が小さいことの2つです。最新のデジタル機器と比較した場合、測定上の性能はどうしても若干落ちるのは否定できません。

図3は検層用ケーブルの仕様であり、機器自体と同様、温度に応じて正しいタイプを選択する必要があります。

2.2 ワイパートリップの効果

長時間にわたる数種の電気検層において、その途中にワイパートリップを入れることは一般的によく行われています。その過程での泥水循環は冷却効果があるわけですが、これもよほど長時間に及ばない限り完全ではないようです。図4は6,000m級の坑井で、途中3回のワイパートリップを入れて検層を行ったときの、坑内温度記録です。確かにある程度の冷却効果はみられますが、それでも掘削終了直後の温度163℃には二度と達していません。温度に関する限りは、ワイパートリップに100%頼るわけにはいかないと思います。

2.3 デュワー断熱容器¹⁾

図1で示したような通常仕様の機器も、断熱容器を併用することによって一定時間内での高温下使用が可能に

図3 ケーブルの温度仕様

なります。図5にデュワー断熱容器 (Dewar Flask) を用いた検層機器の電気回路部を示します。高い断熱性を保つために、外壁と内壁の間にアルミシートを入れ、さらに高真空を維持するためにゲッターを入れています。

図6は外気温175℃の環境で、デュワー内の回路部の温度を測定したものです。図7はこの測定結果をもとに、実際の検層における環境温度の時間的変化に対してデュワー内の温度がどう変化するかをシミュレーションした結果です。外部温度の変化に比べ、機器の内部温度がゆるやかに上昇していることがわかります。

実際に機器内部といっても、温度分布は一様ではありません。自己発熱のため、例えば変圧機などのパワーセクション近くは最も温度が高くなります。図8には、別の実験中に記録した、デュワー内各部の温度の変化を示しました。やはり変圧機の近くが最も高温で、これは外気温を下げた後も上昇が続き、外気温の最高よりさらに20°近く高くなっています。これにともなって、他の電子回路部も温度上昇が続いていることがわかります。

図4 ワイパトリップ後の坑内温度

図5 デュワーに入った回路基板

図6 デュワー内外の温度測定結果

図7 デュワー内外温度のシミュレーション

図8 デュワー内各部の温度測定結果

表1 デュワー仕様可能な機器

Tools Combinable with Dewar Flask
DLT, SRT/SDT, SLT
LDT, NGT, SGT/SHDT, FMI
RFT/CSAT/USIT

結論から言いますと、デュワーによる断熱効果は高く、ある程度の時間内では非常に有効な手段であると言えます。同時に、内部の自己発熱などによる時間的限界もはっきりしており、結局スピーディな検層方法が重要になるでしょう。

現在デュワーが使える機器として代表的なものを表1に列記します。これ以外でも、専用デュワーの作製によって使用可能になる機器がまだ多数存在します。

2.4 冷却装置

現在まだ実用化されていませんが、検層機器の中に冷却装置を入れるという方法も考えられます。図9に示したのは、エアコン等に用いられる冷却機と同じ原理を用いたものです。当然、全体の電力消費量も多くなり、システムとして実用化されるためにはまだ研究の必要があります。

2.5 電子回路そのものの検討

前項までは電子回路全体の温度をいかにしてなるべく低く保つか、ということをお話ししたわけですが、同時に電子回路に使用される部品自体の、高温下での信頼性を向上させることも重要であります。通常シュルンベルジュの検層機器は製作後に仕様を満たすための各種のテストを受け、合格したもののみが出荷されます。その後、実際の現場（大半は準備点検中）で万が一故障が発生した場合、その原因は部品レベルまで徹底的に究明した後に修理されます。これはその後データベースに入れられ、世界的規模でその分析が行われます。もし、ある特定の部品もしくは接続部分などに故障が多いと判断された場合、デザインおよび部品自体の見直しが行われ、早い時点での改良プログラムが実行されます。

特に仕様の上限に近い条件での信頼性、例えば175℃の仕様で160℃の環境下での信頼性は大変に重要であります。

現場においても、高温での検層の前には実際機器をオープン内で高温に熱し、その信頼性をチェックする、いわゆる熱試験（ヒートチェック）を行い、故障の発生を事前に試験します。万一故障した場合、その部品を交換して再び加熱し、合格するまで繰り返すわけです。

図9 冷凍機を組み込んだ回路部分

図 10 シーラントの温度仕様

3. 高圧環境

前章の温度に比較し、圧力に関しては、検層機器に限って言えば、それほど問題にならないと思います。大半の機器の仕様が1,400barであり、これは仮に1.6g/ccの泥水を用いて掘った垂直坑の場合8,500m以上に相当します。ただし、機器に使用している“O” ringなどのシーラントの高温下での仕様を考えた場合、やはり温度による限界の方が先にくるようです。高温下でも使える適切な仕様のシーラント材料を選ぶ必要があります。図10にいろいろなシーラント材料の温度仕様を示します。

4. ケーブル長と張力²⁾

図3ですすでにケーブルの温度仕様を示しましたが、高深度下ではそれに加えて、ケーブルの自重による引っ張り強度の限界も考えなければなりません。一般に太いケーブルほど引っ張り強度があるわけですが、同時に太いほど自重も多くなります。通常、安全にケーブルを引っ張れる限界は、破断強度の50%とされており、深さの限界もケーブルの自重がこの50%に達したときと言えます。

図11に、一般的に使われているケーブルの深度と自重による引っ張りの関係を示しました。例えば、7-52 (7コンダクター、0.52" 径) ケーブルでは深さの限界は、約16,000' (4,800m) ですが、7-46 (7コンダクター 0.46" 径) ケーブルではこれが21,000' (6,300m) となります。この図以外にも、引っ張り強度を強化した特別仕様のケーブルも存在し、現在日本でも高深度検層時に使用されています。この場合、限界深度は7,500m程度となります。

ケーブルに関して、もう一つ重要な課題は抑留 (Stick-ing) です。これは坑内条件が良好でなく、検層機器及びケーブルと坑壁との抵抗が極端に大きくなり、ケーブルにかかる張力が一定しない状態をいいます。ケーブルの伸び縮みのために、検層機器の移動速度と地上でのケーブルの巻き取り速度が一致しくなくなり、地上のケーブルで測る深度測定の精度が悪くなります。大深度になる程、この影響も大きくなるため、検層速度を必要に応じて遅くしたり、または上げ検層と下げ検層の両方を行って、深度の比較調整をするような方法がとられます。

図 11 ケーブル長の限界

5. 小 坑 径

図1ですでに示したように、一般検層機器の外径はだいたい3.37"から5"前後であり、設計上の最小坑径を6"に設定しているものが大半となっています。大深度掘削においては、最終坑径が6"以下になる場合も十分考えられ、これらの機器が使えない場合もあります。図2で示したHELシリーズは、最初から小坑径を考慮して設計されており、2.75"径のものが多数含まれています。何度も言いますようにHELシリーズの多くはアナログ機器を含み、測定性能では最新のデジタル機器に比べて若干劣るわけですが、6"を大きく下回るような小坑径においては、唯一の検層手段だと言えるでしょう。

6. 泥水の影響

6.1 泥水のゲル化

高温高压下で使用する泥水は、これも特別な仕様になるわけですが、過去に経験した問題に“Thixotropy”があります。これは高温高压下で、泥水がある深度以上で粘性を増し、降下中の機器が大きな抵抗を受ける現象だと思われます。場合によっては、ゲル状の泥水の一部が一時半固体に近い状態になることも考えられます。

過去に、坑内条件が比較的良好と思われる中を検層機器が降下中、ある深度で突然それ以上降下できなくなり、数度のワイパートリップにもかかわらず、やはり似たような深度で降下ができなくなった例があります。ワイパートリップ中の状況から、坑壁自体の問題とは考えにくく、

表2 オイルマッドの影響を受ける機器

Effect of Oil Base MUD (OBM)		
Service	Not in OBM	OK in OBM
Resistivity	DLT	AIT, DIT
Micro Resistivity	SRT	
Dipmeter	SHDT, FMS, FMI	OBDT
Electromagnetic		EPT*
Nuclear		LDT, CNT, SGT
Sonic		DSL, SDT, SLT
Sampling		MDT, RFT, CST

* Subject to condition

結局検層機器の自重が半固体化した泥水の抵抗に打ち勝つことができなかったという結論に達しました。これも今後、研究していくべき課題の1つだと思います。

6.2 バライトの影響

泥水の比重を上げるために、バライトはよく使われる材料ですが、検層に対する影響もよく理解しておく必要があります。バライトの化学式は BaSO_4 であり、原子番号の大きなバリウムを含むため、比重が大きい上にガンマ線の吸収能力も高い物質です。これにより特に影響を受ける検層機器としては、LDT(Litho Density Tool)とNGT(Natural Gammaray Tool)の2つがあります。

LDTは ρ_b (岩石密度)とPEF(フォトエレクトリック効果)の2つの測定をし、その双方ともにバライトの影響を受けます。密度については通常の補正方法ではば満足いく結果ができますが、PEFについてはある程度以上のバライト効果に対しては補正不可能になる場合があります。

NGTについても、バライトの影響はかなり大きくなります。この場合、通常検層前の降下中にバライトの影響自体を測定する方法が一般にとられ、補正のアルゴリズムにとり入れられています。

6.3 オイルマッド

大深度掘削という場合、オイルマッドの使用を余儀なくされる場合も想定する必要があると思います。この場合、検層機器に関しては影響を受けるものと、受けないものとあり、その一覧を表2に示します。最も影響を受けるのは、電流を流すことによって測定するタイプの機器で、DLT、MSFLなどがその代表です。特にMSFLについては、その代替機器が存在せず、唯一EPTがある条件の下でそれに近い測定をできるだけです。他の機器については、ほぼ通常の泥水と同じ条件で測定ができます。OBDTはオイルマッド専用で作製されたディプメーターであり、原理上解像度はSHDTより

劣ります。FMI、FMSに相当する代替機器は存在せず、坑壁イメージをとるためには音波を用いた機器(BHTV、UBIなど)を用いる必要があります。

6.4 腐食性ガス

直接泥水自体とは関係ありませんが、地層から侵入した H_2S や CO_2 などの腐食性ガスは、たとえ微量でも高温下においては非常に活発であると考えられます。機器、特にケーブルおよびシーラント("O" ringなど)の選択において、これらのガスの可能性を十分チェックする必要があります。また、RFTなどのサンプルをとった後、地上での扱いには特に注意する必要があります。

7. その他の問題点

大深度検層では作業時間自体も当然長くなり、作業員の疲労、機器への負担などを考慮して、綿密な事前計画をたてる必要があります。

デュワーに入れた機器で長時間の検層が予想される場合は、あらかじめ温度限界に達する時間を予測しておき、次ぎの機器をスタンバイさせておくことも必要でしょう。また、万が一の故障に備えて、高温下で故障の多い部品をあらかじめストックしておき、素早い修理態勢を積極的に作っておくことも重要だと思います。

8. おわりに

大深度検層における諸問題を列記すると、次のようになります。

- 1) 温度
- 2) 圧力
- 3) ケーブル長と張力
- 4) 坑径
- 5) 泥水の影響
- 6) 長時間

最大の問題はやはり温度で、現在デュワー断熱容器を使った方法などさまざまな手段でそれを克服しながらの検層がなされています。他の問題も、高温問題と同様十分な研究をした上で、総合的なプラン作りが不可欠であると思います。

文 献

- 1) 小淵晶男, 1990: 高温環境下で用いられる検層機器, シュルンベルジュ.
- 2) Grady Hobbs, 1988: Middle Heart Hostice Environment Logging Review, Schiumberger.