講 演

DRA (drag reducing agent)/leak detection system の紹介*

高 井 卓 朗**

(Received December 25, 2007 ; accepted March 7, 2008)

Introduction of drag reducing agent and leak detection system

Takuro Takai

Abstract : The BTC crude oil pipeline runs 1,768 km from the Sangachal Terminal near Baku in Azerbaijan, via Tbilisi in Georgia, through to the Ceyhan Marine Terminal on Turkish Mediterranean coast. The pipeline has started its operation on June 2006 and exported around 220 million barrels as of the end of September 2007.

This presentation introduces the outline of drag reducing agent (DRA) which is currently evaluated for the purpose of increasing the pipeline capacity, and the sophisticated leak detection system (LDS) installed in the system.

Key words : BTC Pipeline, DRA, drag reducing agent, drag reduction, leak detection

1. はじめに

BTC パイプラインは、アゼルバイジャン共和国のバクーからグルジアのトビリシを経由し、トルコ共和国のジェイハンに至る全長 1,768 km の原油パイプラインである。本パイプラインは、2006 年 6 月から本格的な操業を開始しており、現在の送油能力は設計流量の日量 100 万 bbl に達している。本講演では、送油能力の拡張を目的として導入が検討されている DRA (drag reducing agent: 流動抵抗低減剤) の概要、ならびに原油の漏洩検知を目的として導入されている LDS (leak detection system) の概要について紹介する。

2. BTC パイプラインプロジェクトの概要

BTC パイプラインは、カスピ海周辺地域で生産される原油を、航行船舶が多く原油タンカーの運航リスクが高まりつつあるボスポラス海峡を経由することなく、地中海まで搬出することを目的に建設された。本パイプラインは、2002 年 8 月のプロジェクトサンクション後、2003 年 4 月から本格的な現地工事が開始され、2005 年 5 月には、パイプライン内に原油を充填するラインフィル作業がパイプラインの始点であるサンガチャルターミナルから開始された。2006 年 6 月には、地中海に面するジェイハンマリンターミナルからの原油出荷が開始され、2007 年 9 月末現在の累計出荷量は 220 百万 bbl に達している。

本パイプラインのルート図および仕様を図 1 に示す。ライン径は、セクションによって 34"~46" と異なるが、約 8 割のセクションで 42" ラインが使用されている。ポンプステーションは、サンガチャルターミナルを含め 8 箇所 (アゼルバイジャン:2 箇所, グルジア:2 箇所, トルコ:4 箇所) に設置されている。ジェイハンマリンターミナルには、貯油能力 95 万 bbl の原油タンクが 7 基設置されているほか、30 万トン級タンカーが同時に 2 隻着岸可能な出荷バースが設置されている。本パイプラインの特徴は、パイプラインルートに山岳地帯が含まれていることであり、グルジアからトルコにかけては標高 2,000 m を超える地域を通過する。最も標高の高い地点は、標高約 2,800 m に達する。

プロジェクト参加会社は、表 1 に示す 11 社であり、アゼルバイジャンの ACG 油田の権益を持つ会社、カザフスタンのカシャガン油田を含む北カスピ沖合鉱区やテンギス油田の権益を持つ会社がプロジェクトに参加している。BTC パイプラインには、これらのプロジェクトで生産される原油のほか、アゼルバイジャンのシャクデニスガス田から生産されるコンデンセートや、そのほかのアゼルバイジャン/カザフスタン産原油の通油が見込まれている。また、トルクメニスタン産原油の通油についても検討されている。

BTC パイプラインの設計流量は、日量 100 万 bbl であるが、ACG 油田単体でも生産ピーク時には、日量 100 万 bbl を超える生産量が見込まれており、カシャガン油田やテンギス油田からも相当量の原油がカスピ海の海上輸送を経て、BTC パイプラインに持ちこまれる見通しである。このような背景から、送油能力の拡張が求められており、現在、日量 160 万 bbl までの拡張を対象とした技術/コマー

*平成 19 年 10 月 19 日、平成 19 年度石油技術協会秋季講演会「エネルギー輸送への新たな挑戦」にて講演 This paper was presented at the 2007 JAPT Autumn Meeting entitled "New Challenges for Energy Transportation" held in Tokyo, Japan, on October 19, 2007.

** 国際石油開発株 INPEX Corporation

図1 パイプラインルートおよび仕様

表1 プロジェクト参加会社

30.10% (Operator)	5.00%
25.00%	3.40%
8.90%	2.50%
8.71%	2.50%
6.53%	2.36%
5.00%	

シャルスタディが実施されている。

3. Drag reducing agent

3.1 発見経緯 / メカニズム

管内を乱流状態で流れる流体に微量の長鎖状高分子や、棒状ミセル（分子が集合した棒状コロイド粒子）を形成する界面活性剤を添加することによって流動抵抗が大幅に低下する現象は、1948年にB.A. Tomsによって発見され、発見者の名前からトムズ効果と呼ばれている。長鎖状高分子や界面活性剤などの添加が流動抵抗を低減させるメカニズム

は、未だ十分に解明されていないものの、高分子鎖が複雑に絡み合ったり、棒状ミセルがネットワークを組むことによって巨大な構造を形成し、これが流れに干渉することによって管内の乱流を抑制していると考えられている。

図2は、管内の乱流状態とDRAによる乱流抑制効果を表した図である。通常、パイプラインを流れる原油は乱流状態で流れている。管内中央部は、turbulent coreと呼ばれる領域で、管内を流れる流体の大部分が通過する領域であり、流体は乱流状態で流れている。管壁部は、laminar sublayerと呼ばれる領域で、流体は層流状態で流れている。これらの中間に位置する領域は、buffer regionと呼ばれる領域で、turbulent coreに存在する乱流の形成に重要な役割を果たしている領域と考えられている。DRAの添加は、buffer regionにおいて形成される乱流の発生を抑制することによって乱流によるエネルギーロスを低減していると考えられている。

3.2 原油パイプラインへの適用

DRAの原油パイプラインへの適用は、1979年にアラスカを縦断するTAPS（Trans-Alaska pipeline system）から始

図2 DRAの乱流抑制メカニズム

図3 DRA 性能曲線

まり、現在では、アメリカや北海のパイプライン網で広く使用されている。また、カスピ海周辺地域においてもテンギス油田を始点として黒海のノボロシクに至るCPC (Caspian Pipeline Consortium) や、サンガチャルターミナルを始点として黒海のノボロシクに至る西ルートパイプラインなどで使用された実績がある。

図3は、実際の原油パイプラインで計測されたDRAの流動抵抗低減効果を示したグラフである。データが計測されたセクション長は、約250 kmである。このグラフが示すとおり、原油中に20 ppm程度のDRAを添加することによって流動抵抗を半減させる効果があることが確認されている。DRAによる流動抵抗低減効果は、原油の性状やパイプラインの敷設/操業条件によって影響を受けるものの、流動抵抗を最大80%程度低減可能であることが知られている。

一般的に、原油パイプラインには長鎖状高分子を用いたDRAが使用される。長鎖状高分子を用いたDRAは、大別してジェルタイプとスラリータイプの2つのタイプに分けられる。現在、主流となっているのは、スラリータイプのDRAであり、ジェルタイプのDRAに比べ粘性が低く、取り扱いやすい特徴がある。

3.3 原油パイプラインの送油能力拡張手法

送油能力の拡張手法は、ポンプステーションの追加やパイプラインの併設などの機械的な拡張手法と、DRAによる拡張手法が一般的である。ポンプステーションの追加による拡張は、既存のポンプステーション間に新たなポンプステーションを追加する手法であり、最も一般的な拡張手法である。パイプラインの併設による拡張は、パイプラインの併設によって管内の流速を低下させ、圧力損失を低減させる拡張手法である。DRAによる拡張は、各ポンプステーションにおいてDRAの添加を行い、流動抵抗を低下させ、圧力損失を低減させる拡張手法である。

3.4 DRAの特徴

先にも述べたように、DRAは微量の添加によっても流動抵抗を大幅に低減させる働きがある。一般的な添加濃度は、10～30 ppm程度、最大でも50 ppm程度といわれている。50 ppmを超える添加が行われない理由は、多量の添

図4 送油能力の拡張手法

加を行っても得られる効果が頭打ちとなり、費用対効果が得られず、機械的な拡張手法に対して経済的なメリットを失うためである。

DRAの性能に影響を与える原油性状として、比重や粘性、ワックス含有量などが挙げられる。図5は、原油比重と流動抵抗低減効果の関係を示したグラフである。図で示した領域のうち、上部が粘性の低い軽質油で得られる流動抵抗低減効果、下部が粘性の高い重質油で得られる流動抵抗低減効果を表している。DRAを40 ppm添加した場合、前者では70%を超える流動抵抗低減効果が期待できる一方、後者では40%程度の流動抵抗低減効果しか期待できないことが示されている。原油の粘性で留意すべき点は、同一の原油であっても温度変化に伴い粘性が変化するため、DRAによる流動抵抗低減効果に違いが生じることである。

また、そのほかの留意すべき点は、DRAの添加後に流体に強いせん断力が加わると高分子鎖が破壊され、DRAの持つ流動抵抗低減効果が著しく低下してしまうことである(界面活性剤を用いたDRAの場合は、棒状ミセルのネットワークが再構築されるため効果は回復する)。具体例として、ポンプを通過するとDRAの効果がほとんど失われてしまうこと、エルボの通過やライン径の急激な変化によっても効果が低下すること、などが挙げられる。そのためDRAの添加は、パイプラインの始点のみならず、すべてのポンプステーションで行われるのが一般的である。また、パイプラインを通過中にも徐々に効果が失われるため、パイプラインの敷設/操業条件や拡張条件によっては、ポンプステーション以外にもDRAのインジェクションサイ

図5 原油性状のDRA性能に及ぼす影響

図6 DRA 関連機器

写真1 ポンプステーション/パイプライン敷設作業

トが必要となる場合もある。

3.5 DRA 関連機器

図6は、DRA のインジェクションサイトに必要となる主要機器を示した図である。インジェクションサイトには、DRA 貯蔵タンク、インジェクションポンプ、インジェクション配管、インジェクションポート、計量/コントロール機器などが設置される。なお、原油ポンプの設計流量を超える送油能力の拡張を行う場合には、ほかの拡張手法と同様に既存ポンプステーションへのポンプの追加が必要となる。

3.6 DRA による拡張のメリット

DRA による拡張は、機械的な拡張手法と比べ必要となる機器や工事が非常に小規模であるといった特徴がある。この特徴から、①CAPEX が小さい、②拡張までのリードタイムが短い、③新たに広大な用地を確保する必要がない、④環境負荷が小さい、などのメリットがある。また、流量を低下させることなくパイプラインの操業圧力を低下させたい場合（腐食によるパイプラインの肉厚減少など）にも

DRA の添加は有効である。

写真1は、BTC パイプラインのポンプステーションおよびパイプライン敷設作業の写真である。ポンプステーション追加には、このように広大な用地を取得する必要があり、設置される機器也多岐にわたる。また、パイプラインの併設も用地の取得や大規模な敷設工事が必要となる。

3.7 DRA による拡張の留意点

DRA による拡張の留意点として、DRA の添加のみでは拡張ボリュームに限界があり、それ以上の拡張を行う場合には、機械的な拡張手法との組み合わせが必要となること、DRA の添加量が増加すると、得られる効果が頭打ちとなり、機械的な拡張手法に対する経済的なメリットを失う場合もあること、などが挙げられる。

原油にケミカルなどを添加する場合、原油の販売価格や輸送/精製過程に悪影響を及ぼすことが懸念されるが、DRA に関しては、そのような問題は報告されていない。

図7 LDS ディスプレイの一例

4. Leak detection system

4.1 LDS の役割 / 設計条件

LDS の役割は、原油の漏洩や不正な抜き取りを速やかに検知し、万一、漏洩が発生した場合でも環境負荷を可能な限り軽減すること、事故の発生や盗油を未然に防ぐことにある。BTC パイプラインは、①山岳地帯を含む長距離パイプラインであり、アクセスが困難なエリアが存在すること、②非常に厳しい環境保全基準を設けていること、などから、高度な LDS が導入されている。

BTC パイプラインに導入されている LDS の設計条件は、次のとおりである（いずれも日量 100 万 bbl 送油時の値）。

- ・ 1% の漏洩を 30 秒以内に検知
- ・ 0.2% までの漏洩を検知
- ・ パイプの破断など深刻な漏洩を 5 ～ 20 秒以内に検知

図7は、コントロールルームに設置されている LDS のディスプレイの一部である。漏洩が検知された場合には、漏洩が発生していると断定されたセクションが赤く表示され、推定漏洩地点や推定漏洩量、漏洩検知の信頼度などが表示される。

4.2 LDS の設備構成 / 計測データ

BTC パイプラインには、ポンプステーションが 8 箇所、ピギングステーションが 3 箇所、ブロックバルブステーションが 87 箇所設置されている。これらの施設で計測された流量 / 圧力 / 温度 / 密度といった情報は、パイプラインルートに埋設された通信 / 制御用光ファイバーケーブルを通じて、サンガチャルターミナル内の中央制御室内に設置された LDS に送られ、漏洩の検知が行われる。

表2は、各計測地点で計測されるデータを示している。アゼルバイジャンおよびグルジアに設置されている 4 箇所のポンプステーションでは、上流 / 下流の流量 / 圧力 / 温度が計測され、うち 2 箇所のポンプステーションでは、密度の計測も行われる。トルコの 4 箇所のポンプステーションでは、下流側の流量 / 密度、上流 / 下流の圧力が計測され、うち 1 箇所のポンプステーションでは、密度の計測も行われる。ブロックバルブステーションおよびピギングステーションでは、上流 / 下流の圧力と下流側の温度が計測される。

表2 計測データ

計測地点	計測データ
AZ/GE ポンプステーション (全 4 箇所)	流量（上流 & 下流） 圧力（上流 & 下流） 温度（上流 & 下流） 密度（PSA1 & PSG1）
TK ポンプステーション (全 4 箇所)	流量（下流） 圧力（上流 & 下流） 温度（下流） 密度（PST1）
ブロックバルブステーション / ピギングステーション (全 90 箇所)	圧力（上流 & 下流） 温度（下流）

ンでは、下流側の流量 / 密度、上流 / 下流の圧力が計測され、うち 1 箇所のポンプステーションでは、密度の計測も行われる。ブロックバルブステーションおよびピギングステーションでは、上流 / 下流の圧力と下流側の温度が計測される。

4.3 LDS の解析手法

LDS には、漏洩検知の信頼性の向上や多様な漏洩形態に対応するため、さまざまな解析手法が取り入れられている。主な解析手法の概要は次のとおりである。

- ・ Pressure surge analysis；パイプラインの破裂や破断によって生じる衝撃波（sonic wave）や圧力のうねり（pressure surge）を解析。漏洩や破断箇所の特定に利用。ただし、衝撃波を伴わない緩やかな破断の形成による漏洩の検知には適さない。
- ・ Pressure flow analysis；流速の減少や、圧力損失の実測値とシミュレーションモデルの計算値との差を解析。比較的大きな漏洩の検知に利用。
- ・ Mass balance analysis；セクションごとのマスバランスを解析。ほかの手法で検知できない小さな漏洩の検知や累計漏洩量の特定に利用。

図8 漏洩検知テスト

4.4 LDSのチューニング

LDSに所要の精度を持たせるためには、ラインフィル段階や操業の初期段階におけるチューニングが不可欠である。

パイプライン内に原油を充填するラインフィル段階では、実際のセクションボリュームや流動抵抗などのデータが収集される。これらのデータは、LDSの基礎データとして活用される。BTCパイプラインでは、ラインフィル段階にシャットイン状態での漏洩検知テストが行われている(詳細は4.5参照)。

操業段階では、各計測地点で計測されたデータとシミュレーションモデルの計算結果との比較を行い、実データにマッチするようシミュレーションモデルの補正が行われる。また、BTCパイプラインでは、ワックスの除去を目的としたピグ作業が頻繁に行われることから、ピグ作業が各計測データに及ぼす影響についても評価が行われている。ピグ作業時に計測されたデータは、LDSのピグトラッキングシステムに入力され、ピグ作業によってLDSが誤作動しないよう補正が施されている。

4.5 漏洩検知テスト

図8は、約340 kmの区間をシャットインし、故意に原油を行き取った際に計測されたデータである。このテストでは、30分をかけて徐々に抜き取りレートを増加させ、最終的に10 m³/hまで抜き取りレートを増加させている。

このテストでは、抜き取りレートが低かったために、抜き取り開始から漏洩の断定までに45分を要している。ただし、抜き取り開始から漏洩検知までの累計抜き取り量は6 m³であり、セクションボリューム約30万 m³のわずか0.002%での漏洩検知を達成している。

4.6 操業段階での漏洩検知

BTCパイプラインに導入されたLDSは、操業開始後も必要に応じて適宜シミュレーションモデルの補正が施されており、良好に稼動している。また、これまでに不正な原油の抜き取りを複数検知した実績があり、第三者が設置したillegal tapの発見にも貢献している。

引用文献

- 黒田明慈・工藤一彦, 2003: ダンベル状離散要素に基づくトムズ効果のモデリング, 第17回数値流体力学シンポジウム, 日本流体力学会。
- 井口泰男, 2004: 配管摩擦抵抗低減(Drag Reduction)剤, 空気調和・衛生工学12号, 空気調和・衛生工学会
- ConocoPhillips Specialty Products Inc.: <http://www.liquidpower.com/index.htm> (cited 2007/10/01).
- Joanna M., *et al.*, 2007: Commissioning a real-time leak detection system on the BTC crude oil pipeline during start up, *World Pipeline July 2007*, Palladian Publications Limited.