石油地下備蓄基地建設における鉱業技術 に基づく意思決定*

松村克之¹ 蔦田敏昭² 岡本明夫³
中澤保延³ 小島圭二⁴

Engineering Decisions in Construction of Underground Bases for Stockpiling of Petroleum

by Katsuyuki MATSUMURA¹, Toshiaki MAKITA², Akio OKAMOTO²
Yasunobu NAKAZAWA² and Keiji KOJIMA³

1. President, Japan Underground Oil Storage Co., Ltd., Minato-ku, Tokyo 105
2. Japan Underground Oil Storage Co., Ltd.
3. Prof., Dr., Faculty Engineering, The University of Tokyo

Many problems to be solved happened in the duration of the completion of the stockpiling bases for crude oil. The problems encountered were analyzed by a process of "questions", "information", "judgement criteria", "decision making", "reconsideration of the decisions", "actions", and "verification". The problems and the decision for them are briefly summarized and reviewed in this paper. The paper also includes the characteristics of the project, including the role of the third-sector corporation, paucity of information on underground construction, and the lack of precedents in Japan.

KEY WORDS : Crude Oil Storage Cavern, Engineering Decisions, Analysis of Process in Decision Making, National Oil Stockpiling

1. はじめに

日本地下石油備蓄(株)は、日本で初めての原油地下備蓄基地を岩手県久慈、愛媛県菊間、鹿児島県串木野の3か所(図1~4, 表1)で建設するに当たり、地下岩盤の掘削がその主たる工事態様であることから、地下部分の建設担当者をすべて鉱山技術者で編成して、これら3基地の建設を成功させた(表2)。

まず、会社設立に当たって株主構成の問題があった。次に3基地の設計施工担当組織の編成の問題があった。さらに建設開始後も日本で最初の試みであるため様々な問題に直面した。これらに対応するため、会社設立後ただちに学識経験者による委員会を設立した。なお、その中核は「岩盤施工技术小委員会」の活動であった。

著者らは、最高責任者、中心となるスタッフ、および小委員会の委員長として、本プロジェクトを推進してきた。

以下にわが国で初めての地下石油備蓄基地の建設に当たっての様々な問題と、その解決に当たって著者らがとった組織的・体系的な意思決定の実態について述べる。

2. 新会社の組織

他の石油備蓄方式と異なって、地下石油備蓄の場合には岩盤、断層、地下水の挙動など地下の岩体の性格とその取扱いの技術に精通した技術者が多数必要である。このような技術は地質学、鉱山学、石油開発工学、土木工学などの領域であり、技術者は鉱山、建設などの企業に多く属している。鉱山業界は歴史的にも石油業界と密接な関係にあり、両業界に跨がった有力企業もある。

以上のような考えから、資源エネルギー庁を通じて日本鉱業協

* 1995年6月15日受付 7月25日受理 平成7年(1995年)3月30日 本会第118次通常総会にて第69回渡辺賞受賞

1. 正会員 工博 日本地下石油備蓄(株)代表取締役社長
2. 正会員 日本地下石油備蓄(株)常務取締役安全環境室長
3. 正会員 日本地下石油備蓄(株)安全環境室調査役
4. 正会員 理博 東京大学教授 工学部地球システム工学科

(著者連絡先) FAX 03-3432-7620(日本地下石油備蓄)

キーワード: 岩盤タンク, 意思決定, 判断基準の分析, 国家石油備蓄

松村克之氏 蔦田敏昭氏 岡本明夫氏 中澤保延氏 小島圭二氏

図1 3基地位置図

図2 久慈基地平面図

図3 菊間基地平面図

会に出資による参加を打診した。建設においては地下工事が技術的に最も難しく、かつ予算的にも中心をなし、さらに工事が相当長期にわたるものであることから、出向者の士気および会社との一体感の見地から出資を必要とする旨を説明した。その結果産銅5社が挙げて協力と出資を申し出た。

3. 設計組織の選定

工事業者が地下備蓄基地の設計に参加することに対しては、設計と施工を厳しく分離させるべきだとの考えを優先して、早い段階で断念した。

設計を施工から独立して行うことにした結果、それを日本地下石油備蓄(株)自らが行うか、専門の業者に発注するかの問題が生

じた。

いくつかの専門設計業者から強い希望が提出された。しかし第三セクターとして当社がこの建設を国家的事業として行う以上、その経験、ノウハウを、特定の設計業者に独占させるべきでないと判断した。

大規模地下空洞については、地下発電所の建設経験がわが国では唯一といってよい。発注者として地下発電所にかかわった電源開発(株)に助力を仰ぐことにした。電源開発(株)は当時法制上ただちに協力してもらえる状況にはなかったが、後の法改正を待って正式に設計に参加することとなった。

3基地のそれぞれについて、別個の組織に設計を担当してもらい競争原理を働かすという考えは、この場合については適切でな

図4 串木野基地平面図

表1 貯油施設概要

項 目	久 慈 基 地	菊 間 基 地	串 木 野 基 地
敷地面積			
地上部 (ha)	約 6	約 10	約 5
地下部 (ha)	約 26	約 15	約 26
全備蓄施設容量 (万kl)	175	150	175
岩盤タンク形状	卵 型	変形食パン型	卵 型
岩質	久喜花崗岩	新期領家花崗岩	北薩古期安山岩
水封方式	人工水封	人工水封	自然水封 (一部人工水封)
設置深さ (天端)			
海面より (m)	約 -20	約 -35	約 -20
地表より (m)	-100 以深	約 -65~-110	-100 以深
寸法：幅×高さ×長さ (m/ユニット)	18×22×1,080 ~2,160	20.5×30×1,030 ~1,313	18×22×1,100 ~2,220
貯蔵容量 (万kl/ユニット)	34.3~69.0	58.6~76.3	34.7~69.2
ユニット数 (タンク数)	3 (10)	3 (8)	3 (10)
発 注 者	日本地下石油備蓄(株)		
設 計 会 社	電源開発・日鉱資源工営 J・V		
施 工 管 理 会 社	日鉱資源工営・電源開発 J・V		
施 行 会 社	鹿島・西松・熊谷・奥村	大成・戸田・飛鳥・佐藤	清水・間・大林・三井・
(主 要 工 事)	・青木・国土 J・V	・鴻池 J・V	・前田・鉄建・フジタ J・V

いと思われた。なぜなら、審査する消防庁にとってそのような事態は煩に耐えないであろうし、また事後の会計検査時にも、3基地の設計の細かな差異や積算の違いなどが続出する結果になりかねない。

以上のような考え方に立って、当社の株主である鉱山系5社と電源開発(株)とがJVを組むこととし、これに3基地の土木部分の詳細設計と施工管理を委託することにした。

4. 建設における課題とその解決に当たった意思決定

地下石油タンクは、岩盤内の地下水面以下に空洞を掘削し、内張りなどせず素掘に近い状態で石油を貯蔵する方式である。その際地下水圧によって液密、気密が保たれる水封システムを採用す

ることを最大の特徴とする。これをわが国に建設するには、設計上も施工上も解決しなければならない多くの課題が予想され、また実際にも独自に克服すべき課題が多かった。以下、その主要なものに関する技術的意思決定の経緯を記す。

4・1 大規模空洞の急速施工技術

岩盤タンクの掘削に当たっては、経済性を高めるため合理的な急速施工の必要があり、以下のような技術により成功させた。そのためには、各段階で複雑な意思決定が必要であった。

4・1・1 日本地下石油備蓄(株)方式の岩盤分類の設定

空洞掘削中、切羽で技術者が速やかに地質評価を行い、支保パターン(吹付コンクリート厚さ、ロックボルト長・ピッチ)を決定できる「硬さ」と「割れ目間隔」に着目した独自の岩盤分類を

表2 建設工事およびオイルイン工程

年 度		86	87	88	89	90	91	92	93	94
工事項目										
久 慈	作業トンネル工事									
	サービストンネル等工事									
	水封トンネル等工事									
	岩盤タンク工事									
	プラグ工事									
	設備関連工事									
菊 間	作業トンネル工事									
	サービストンネル等工事									
	水封トンネル等工事									
	岩盤タンク工事									
	プラグ工事									
	設備関連工事									
串 木 野	作業トンネル工事									
	サービストンネル等工事									
	水封トンネル等工事									
	岩盤タンク工事									
	プラグ工事									
	設備関連工事									
オイルイン										

設定した。これは、地表部と異なり風化の少ない地下深部の空洞に適用するため、従来からあるダム基礎岩盤をベースにした電中研方式に比べ、断層を含む下級の岩盤の評価を引き上げているのが特徴である。また、補助要素として、「割れ目の状態」「風化・変質」「湧水状況」を考慮し岩盤の総合評価を行っている。さらに、岩盤分類に対応する代表的な岩盤物性値を設定し、予め支保パターンを決めておいた。

4・1・2 卵型を主体とする岩盤タンク断面の設定 岩盤タンクは基本的に開放点検しないこととなっており、構造上メンテナンスフリーを想定して設計する必要がある。したがって、岩盤タンクの型状としては、岩盤が非常に良好で素掘りで掘削可能な「北欧型」の断面に較べて、ロックボルト、吹付コンクリート等の支保効果が有効に作用し、かつ地震等に対する安全性、長期耐久性にも優れていると考えられる「卵型」もしくは、それに近い断面形状を採用することにした。また通常のロックボルトと吹付コンクリートによる補強が不足する場合、基本的には空洞断面形状の変更や部分的な盤下げ中止によるロックストラット形成等の方針に対応することとした。さらに大規模空洞が建設されるため、隣接空洞間の力学的相互作用を極力低減させるよう空洞間に必要な離間距離を確保した。

4・1・3 NATMによる掘削方式の採用 岩盤タンクは、NATMによる掘削方式を採用して、急速施工を行った。複数切羽(6~7切羽)を同時施工できるよう、全面トラックレス化し、大型掘削機械を大量に投入した。この結果、1基地当たり総掘削量約200万 m^3 (地山)を短期間(3年)で仕上げることであった。

4・1・4 内空変位計測を主体とする施工管理基準の設定 内空変位等岩盤の挙動の測定結果が、速やかに施工に反映できるような計測システムと、施工管理基準を設定した。なお、岩盤タンクは大断面であるため、上からアーチ、ベンチ1, 2, 3の順で分割施工することになるが、地質が悪くなるとベンチ掘削を行った場合に直上の水平測線部の内空変位が非常に大きくなる。したがって、この内空変位の計測が施工管理上の最重要課題となるが、従来のコンバージェンスメジャー(スチールテープ)を用いる方法では、施工能率と安全性の上で大きな問題がある。そこで、光波測距儀を用いる「内空変位計測システム」を開発し、使用した。

このシステムを用いることによって、2人の技術者と計測台車だけで工事に影響を与えることなく、短時間に複数断面の測定を行うことが可能となった。

串木野基地では、一部区間において基準値よりも大きな岩盤変形が発生したので、断面形状を変更することで、適切な処置を行うことができた。

4・1・5 基地周辺に対する発破騒音・振動対策 特に菊間基地では、タンク設置域が製油所・民家に近接していることから、発破騒音・振動等、環境に対する配慮のため、あらかじめ発破振動試験を行い、75dB以下になるように制限発破工法を採用した。発破振動を低減させる方法として、低爆速スラリー、高精度特殊雷管、高精度段発破器の組合せによる1孔1段差による発破が効果的であった。

4・1・6 情報化施工の採用 特に久慈基地では、調査段階で弱層部の存在が予測できたことから、岩盤タンクに先行して掘削される水封トンネルの地質、水理情報を、下部タンクの掘削に活かすことにより、弱層部に対する処置を適切に行うことができた。具体的には、水封トンネル掘削時の切羽および側壁の湧水状況、さらには過大湧水をもたらす断層あるいはその周辺の節理密集帯の分布を分析することにより、タンクアーチ部の掘削に適切なプレグラウト工等を実施できた。

4・1・7 ファイバーメッシュの開発 溶接金網に代わる、能率的な施工が可能で錆の心配のない、ファイバーメッシュを開発した。これは、高強度のガラス繊維を耐蝕性に優れた樹脂に含浸させて、連続成形機を用いてメッシュ状に成形したものである。耐久性に優れ軽量なことから、施工能率が向上した。

4・1・8 通気対策等 複数切羽におけるダンプ、ショベル等の排気ガスを効率的に排出するために本格的な強制給排気システムを採用するほか、ずりを効率的に搬出するため、MOS(Mine On-line System)による運行管理システムを採用した。

4・2 タンクの液密・気密を確保するための地下水制御 岩盤タンクが他の地下発電所等の大規模地下空洞掘削と大きく異なる点は、タンクの液密・気密性を確保するために、工事中からタンク周辺岩盤の地下水を制御する必要がある点である。そのために、岩盤の透水性や自然涵養量を調査し、岩盤タンクの水封機能性を検討した。

久慈、菊間基地では、タンク上部に人工の水封設備を設けた人工水封システムを採用し、工事中から注水しながら掘削を行った。また、串木野基地では、タンク域の一部に断層等の透水性が大きい箇所が確認されたため、自然水封システムを部分的に人工水封システムに変更した。

このように、各基地とも地下水位の安定を図るため、水封設備による地下水制御を行うとともに、岩盤を改良し、湧水量低減のため、セメントおよび粘土によるグラウトを実施し、液密・気密を確保した。

4・3 水封工事における粘土グラウト採用

湧水量をできる限り減少させるための対策として、普通のセメントグラウト工法(図5)によるほか、粘土グラウト工法(図6)も併用したかどうかの提案がなされた。特に久慈基地では、他の基地に比べて透水係数も大きく、対策の必要面積が膨大であること、セメントグラウト工法では改良結果に限界が考えられることなどを考慮した結果の提案である。

その骨子は、貯油槽付近の局所的に透水係数の大きい部分にはタンク内からセメントグラウト工法を適用する。一方タンクの外から、ボーリングを行って注水し、その中に粘土を混入して流下させる。貯油槽掘削期間中これを継続して、ボーリング孔とタン

図5 セメントによるプレ・ポストグラウト

クの中の岩盤に目詰まりを起こさせようというアイデアである。

電源開発(株)では、まず同社の研究所において基礎的な実験を行った。さらに現地において小規模試験を実施した後、久慈基地における実地施工に踏み切った。その後、串木野基地、菊間基地においても小規模ながら粘土グラウトの特徴を生かした工事を行った。

海外の水封技術先進諸国に学びながら実施に踏み切った地下石油備蓄建設であるが、我々の直面した岩盤は、菊間基地を除いて海外諸国とは地質条件が大きく異なり、透水係数の大きさ、断層

ゾーン	
A	自然涵養水が流下
B	自然涵養水+清水が流下
C	自然涵養水+清水が流下+粘土水が流下
D	主として縦ボーリングからの粘土水が流下

図6 粘土グラウト概念図

の存在など独自に克服すべき課題は多かった。粘土グラウトなどもこういった地質、岩盤、岩質の不利を承知でなおかつ地下備蓄を進めなければならないわが国の国土の狭隘さ、環境条件の厳しさに対応する日本的な技術の芽といえよう。

4・4 串木野基地の水封対策とオイルイン一部先行(図4および図7)

串木野基地にはTK-101、TK-102およびTK-103の3基のタンクがある。当初から水位観測孔の孔内水位はEL+50m以上で安定していた。ところが、90年2月に深部ボーリングを行っているとき、TK-103のほぼ全域に亘って地下水位の顕著な低下が発見された。タンク底盤がEL-42mであるのに対して地下水位の最も低い部分では水位がEL-58mまでしかなかった。このような状態では「水封機能」が働かないことは明らかである。この付近の地下水位観測井の水位はEL+130mぐらいで維持されているので、このような2つの深度で地下水位が現れた現象は岩盤タンク上部に難透水性の地層が、その下のタンク領

図7 串木野基地 TK-103 水封対策 (H 4. 11. 22 現在)

域に高透水層が存在しているためと推測された。

タンク領域の高透水層を通して、タンク地域外に逸水する地下水を抑制するため、新たに掘削したグラウトトンネルからセメント系のカーテングラウトを施工した。さらにタンク底盤から自然浸透方式の粘土グラウトを行って、亀裂の「目詰まり」促進を図った。また新たに掘削した No.3 水封トンネルから鉛直および水平方向に給水ボーリング孔を 10 m 間隔で設置し、91 年 11 月から給水を開始した。その結果、水位の回復については実現の見込みが立った。しかし、今度は TK-103 内の湧水の増加が著しくなっており、その対策としてなお一層のグラウト作業が必要となってきた。

92 年に入っても湧水減少の目途は立たず、完成期限である同年 9 月までに目標を達成できる自信は誰ももてなかった。そこからでる結論は、予定通りのオイルインは不可能に近いということになる。完成期間を延ばすことは、地下石油備蓄の安全性について地域社会の信頼を著しく損なう恐れが強いこと等から、結局事態打開のため TK-103 の工事と独立して TK-101 にまずオイルインすることにした。この間、海外の実情調査を含めて、設計変更、監督官庁との折衝を行い、一部オイルインについて地元の了解などを取りつけた結果、予定期日をほとんど遅らさずに、オイルインすることに成功した。

4・5 係留ブイの陸上保管方式の採用

串木野基地の原油タンカー係留施設としては、事前確認業務の段階で一点係留ブイの採用が決まっていた。

このタイプのブイの形式として日本には SALM (Single Anchor Leg Mooring) 型と CALM (Catenary Anchor Leg Mooring) 型の 2 種類があるが (図 8, 9), 『技術的に本海域のような外洋では、SALM 型の方が優れていることが判明した。(中略)したがって、串木野海域における一点係留ブイバースの型式としては、SALM 型が適当と考える。』というコンサルタン

図 8 SALM 略図

図 9 CALM 略図

表 3 串木野基地における両型式費用比較 (単位: 億円)

	CALM	SALM
建設費	9.5	19.5
保全費	1.6	2.0

表 4 Dry 化による合理化 (3 基地合計)

	Dry 化前 (想定)	Dry 化後 (現状)
船舶数	6	2
要員数	24	8
消防者台数	9	3
要員数	45	15

トの判断が途中段階でなされていた。しかしその両型式の価格差が余りに大きいことが分かったので、設計思想を大幅に変更し、平常時はブイ本体を陸上に揚げておく方式を採用することによって、CALM 型を採用する技術的検討を行い、相当額の予算の節約が可能になった (表 3)。

4・6 Dry 化と防災に関する合理化

ここで「Dry 化」というのは、基地全体を (地下タンク内を除いて) 石油を残さない状態にして、基地の安全性を飛躍的に増加させようという試みを指している。

地震ないしは何らかの事故のとき、陸上タンクには、水島事故のような石油の海上流出あるいは火災の危険が付き纏っている。これに対して、地下備蓄では地下と地表をつなぐ配管系を除けば原理的にそのような危険はまったくない。したがって、基地の陸上部にはまったく原油を残さないよう、また海底パイプラインにも原油を残さないよう、常時はこれらの部分を水で置換しておくことを検討した。

この設計思想にもとづいて監督官庁と共同研究を行い、基地の防災と安全面において大幅な設備と人員の削減を実現した (表 4)。

5. ま と め

著者らは、石油地下備蓄基地建設に際して発生した上記のような問題に対して、関連ある情報の調査にできる限りの努力をばらうとともに、常にそれらの情報を処理する判断基準の整備に配慮した。さらに直面した諸問題に対処する技術開発の実施に関する意思決定を行い、成果をおさめた。この過程で蓄積された国内、海外の情報を含めた地下開発技術についての情報、判断基準は今回の地下備蓄基地の建設に大きな効果を発揮した。その結果、わが国で初めての地下石油備蓄基地の建設で 3 基地ともに成功させることができた。今後の鉱山技術の応用発展に 1 つの大きな示唆を与えるものと確信する。

謝辞 最後に、3 基地の完成にまで無事漕ぎつけることができ、かつ渡辺賞の栄に浴したことは、著者ら以外の多くの関係者の協力と努力の結果である。日本で初めての地下石油備蓄基地の建設というこの技術的挑戦に対して、このように関係者のすべてが心を込めて対応してくれたことに、深い敬意と感謝を払うものである。