

液化石油ガス地下岩盤貯槽方式における水封システムの要点

The Key Issues for Ensuring the Water Sealing System of LPG Underground Rock Caverns

大竹 健 司 (おおたけ たけし)

石油公団備蓄業務部 調査役補佐

橋本 信 雄 (はしもと のぶお)

(株)開発土木コンサルタント土木第二事業部水力部 部長代理

1. はじめに

石油公団は、LPG 国家備蓄事業を推進するため、平成5年度から立地可能性を評価するための調査を行っている。液化して貯蔵する石油ガスの貯蔵方式については、大量の貯蔵に適する低温タンク方式と水封式地下岩盤貯槽方式が検討の対象になっている。水封式地下岩盤貯槽方式については、平成6年度より愛媛県波方計画地点および平成7年度より岡山県倉敷計画地点で調査を実施している。

低温タンク方式は、あらかじめ冷却された石油ガスを低温常圧で貯蔵する方式で、日本でも建設実績が多数あり、各地の石油ガス輸入基地で採用されている。

一方、水封式地下岩盤貯槽方式は、液化された石油ガスを常温高圧で貯蔵するもので、地下水面下の岩盤内に空洞（岩盤貯槽）を掘削し、スチールあるいはコンクリート等のライニングを行うことなく、岩盤内の地下水流の水圧で空洞からの漏洩を防止する貯蔵方式である。

したがって、岩盤貯槽に対しては、安定した地下水位が保たれ、地下水圧によって貯蔵液およびガスを水封する機能が十分発揮されることが重要な要件となり、このような水封機能を長期にわたって確保していくための水封システムの構築が必要となる。

本稿は、地下石油備蓄、LPG 地下貯蔵の海外事例および水島実証プラントの実績等を踏まえ、水封式地下岩盤貯槽の水封システムを構築する際の留意点を列挙し、「水封システムの要点」としてとりまとめたものである。

2. 水封システムの要点作成に当たっての基本的な考え方

「水封システムの要点」作成に当たっては、水封システムの設計・施工の基本的フローを理解した上で、LPG 貯蔵の水封に関する留意点を認識して、これを行う必要がある。ここでは、これら検討に当たっての基本的事項を整理する。

2.1 水封システムについて

水封とは貯蔵液による液圧、ガス圧よりも大きい地下水圧を貯蔵槽の周囲に作用させることにより液密、気密構造を形成させる機能である。すなわち、貯蔵槽空洞を地下水位以下の岩盤中に掘削すれば、空洞内の排水により周辺岩盤から空洞内への地下水浸透が生ずる。この状態でLPGを貯蔵すれば貯蔵されたLPGは水との比重差により、混合することなく水床に浮き、さらに空洞周辺全体からしみ出してくる地下水に押し込まれて漏液

・漏気を生じることなく貯蔵することが可能となる。

2.2 水封システム構築に関する基本的フロー

水封システムとは、直接的にはシステムのハードとしての水封トンネル、水封ボーリング等からなる水封設備本体および地下水位観測孔等による監視により水封機能を確認するモニタリング設備を指すが、ここではソフトとしての水封管理まで含めたトータルシステムとして定義した。地下岩盤貯槽の水封システムの主体は貯槽周辺の岩盤と地下水であり、その挙動は岩盤の性状（亀裂系）に大きく影響されるため、事前調査～施工～完成時～操業のそれぞれの段階で得られる精度に応じてこれを調査・検討し、順次システムを改良・検証し、最終的に水封機能を実証する水封システムを構築することが必要である。

貯槽周辺岩盤の性状は、事前調査では水封システムの構築に必要なすべてのデータを把握することは困難である。したがって、事前調査結果に基づく設計に対して施工中のより詳細な調査結果に基づき見直しを行い、水封システムをフレキシブルに変更する必要がある。特に、岩盤貯槽掘削前の作業トンネル、水封トンネル掘削時の岩盤水理情報は非常に重要であり、これにより岩盤貯槽位置での岩盤状況をより精度良く推定し、貯槽掘削前に設計の見直しを行い、それに基づいた水封システムを施工する。しかしながら、これで水封システムの構築が終了したわけではなく、貯槽本体掘削の過程で得られる岩盤水理情報に基づいてシステムの妥当性を常に確認して掘削を進めていくことが必要である。貯槽本体の掘削は、アーチ部より始まり順次ベンチ掘削へと進んでいくが、その過程で貯槽に対する水封機能を確認し、掘削と並行してあるいは必要があれば掘削を中断し、水封機能維持のための対応策を講じる必要がある。すなわち、事前調査～施工中の岩盤水理情報を総合的に分析・評価し、設計・施工へフィードバックするいわゆる「情報化施工」が水封システム構築として重要となる（図1参照）。

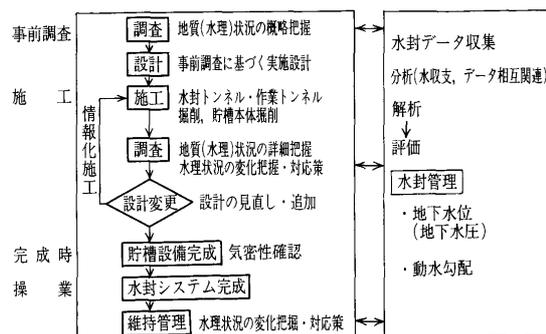


図1 水封システム構築に関する基本的フロー

ここで、情報化施工のベースとなる貯槽周辺の水理状況の把握は、地下水位、湧水量等水封データの収集・分析・評価といったいわゆる水封管理によりなされるが、これは施工段階だけにとどまらず、すべての段階に共通して必要な情報（データベース）となる。

このように、地下岩盤貯槽の水封システムの構築については、①事前調査段階、②施工段階、③完成時段階、④操業段階という一連のフローの中でそれぞれの段階で見直しを行い、これを完成させていくことが肝要である。

2.3 LPG 貯蔵の水封に関する留意点

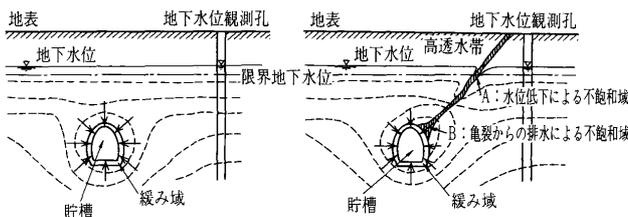
貯槽を地下水位以下の岩盤中に掘削すれば、貯槽周辺のポテンシャル(位置水頭+圧力水頭)の差から生じる動水勾配により周辺岩盤から貯槽内への地下水浸透が生じる(図一2 参照)。すなわち、水封機能とはこの貯槽周辺全体から滲み出して来る地下水が貯蔵液を押し込み、漏洩を生じることなく貯蔵できる水封原理に基づいている。

水封機能が不十分と判断される現象としては、高透水性割目の存在等による空洞への過剰湧水、長期にわたる異常湧水による地下水涵養量の減少等のために自然地下水の異常低下が考えられる。この場合に注意すべきは、水封機能として最も直接的に重要なものは地下水圧であり、地下水位でないということである。特に、貯槽周辺において高透水帯^{注1)}が存在する場合には、地下水位は水封機能上、必要条件であり、十分条件でなく、高透水帯部で局部的に地下水圧が低下し、貯槽に向かう必要動水勾配を与える地下水圧が確保されない可能性がある(図一3 参照)。

この局部的な地下水圧の低下は、貯槽周辺における不飽和域の発生によるものと考えられており、水封機能確保には空洞掘削中の不飽和域の発生をできるだけ抑える必要がある。

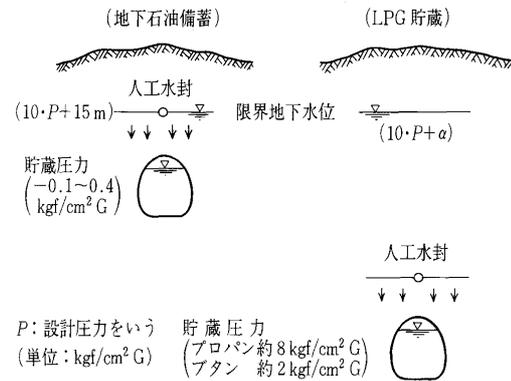
貯槽空洞掘削に伴って生じる不飽和域は、図一3に示すA、Bの両形態に大きく分類できる。これらは、いずれも高透水性の亀裂の存在に起因している。

- A：空洞への湧水が、地表面からの地下水補給量を上回るために、地下水位の保持ができないゾーン。水みちとなる高透水帯周辺で水位低下量、水位低下速度が大きい。
- B：貯槽掘削により壁面に交差する高透水帯からの湧水が、上部からの水の流入量を上回る場合に、空洞壁面から岩盤内部に向かって形成される不飽和ゾーン。開口性の高透水亀裂に沿って生じやすい。



図一2 貯槽周辺地下水圧分布 図一3 貯槽周辺地下水圧分布 (高透水帯部)

注1) 高透水帯：高透水帯になりやすい地質構造として、断層、破碎帯、開口亀裂等がある。ここでは水封機能に影響する平均透水係数が $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec 程度以上を高透水帯として定義した。



図一4 地下石油備蓄とLPG貯蔵の相違

一般的に、Aは広域的な不飽和ゾーン、Bは局所的なゾーンを形成するが、Bのゾーンでも排水が継続すると、貯槽上部に広範囲の不飽和ゾーンを形成する可能性がある。

したがって、本報文においては、水封機能を確保する上では、①貯槽周辺の必要動水勾配を与える地下水圧の確保、②貯槽周辺の不飽和域発生の防止という2点を念頭において検討を進める。

2.4 LPG 貯蔵の水封特性について

LPG貯蔵の場合には、石油ガスの物性の違いにより貯蔵圧力が高くなることから、石油備蓄と比較し、より大きい水封圧を得るため、岩盤貯槽の設置位置が深くなる(図一4 参照)。したがって、LPG貯蔵を計画するにあたり、以下の特性を特に考慮する必要がある。

- ①岩盤貯槽設置位置が深いため、地下空洞の掘削時に大きな地下水圧に伴う大量の湧水が発生することが予想され、湧水発生に伴う地下水面の低下・空洞周辺の不飽和化に留意する必要がある。このうち、地下水面の低下は岩盤貯槽が深いので、石油備蓄と比較して低下が起こりにくいと考えられるが、逆に空洞周辺の不飽和化に対しては、十分留意する必要がある。
- ②特に、貯槽周辺に高透水帯が存在する場合には、空洞周辺に不飽和域が発生する場合があります。同部の地下水圧低下により、低ポテンシャル域を発生させる可能性がある。したがって、LPG貯蔵は石油備蓄に比較して貯蔵圧が大きいので、それだけ水封条件が厳しくなっていると言える。
- ③また、石油備蓄と異なり、貯槽空洞間の設置深さ等を決定するための設計上の水位である限界地下水位^{注2)}が水封トンネル上部よりかなり高い位置にあるため、限界地下水位以下水封トンネル間の岩盤飽和状態の人工的なコントロールが難しいので、高透水帯に対しては慎重かつ十分な配慮が必要である。

その意味で、LPGは工学的により十分な配慮が必要であり、貯槽周辺の不飽和域の発生をできるだけ抑え、貯槽周辺の必要地下水圧を確保できる水封システムを構築する必要がある。

注2) 限界地下水位：貯槽空洞の設置深さ等を決定するための設計上の水位をいう。

3. 水封システムの要点

2.章に基づき、水封システムの要点に関する検討を行った。検討方法は、まず地下石油備蓄建設の経験および海外における事例を参考に、LPG貯蔵を実施するに当たり留意する必要があると考えられる重要ポイントを抽出した上で、今度は、①事前調査段階、②施工段階、③完成時段階、④操業段階といった水封システム構築のための各段階で具体的に留意しなければならない要点をリストアップした。ここで各段階の時期的な区分を定義すると以下ようになる。

事前調査段階：調査設計段階における事前検討期間であり、通常、実施設計完了までの期間を指す。

施工段階：水封トンネル、作業トンネル等および貯槽本体掘削開始前から貯槽掘削完了時点までの期間を指す。なお、施工段階の完了時においては貯槽内立入りが可能である。

完成時段階：施工完了に伴って、作業トンネル等の水没、堅坑プラグ打設等を行って貯槽設備として完成し、LPG受入れを直前にひかえた段階を指す。

操業段階：LPG受入れ後の操業時の段階を指す。

3.1 重要ポイントの抽出

(1) すべての段階を通して、水収支を把握しておくことが重要である。

- ①地下水の水収支は、貯槽を中心に考えた場合、自然涵養量+人工給水量=空洞内湧水量+地下水位変動量と表され、水収支的に自然涵養量に見合う湧水量があり、地下水位、貯槽空洞周辺の地下水位を安定させるための補給水として人工給水量が位置付けられることが理想の水封状態と言える。
 - ②一方で、自然涵養量は常に一定であるとは限らず、降雨の季節変動とともに、貯槽掘削に伴う貯槽および水封ボーリング孔周辺のポテンシャル変化等によって自然涵養量も変化する。
 - ③よって、水収支関係を事前調査～操業に至るすべての段階で把握することにより、貯槽周辺の水封状況の正常性を間接的に概略把握することができる。このことは、水封管理における最も基本的な事項であり、各段階での水収支の把握は水封機能確保において非常に重要な調査である。
 - ④事前調査段階における水収支調査は、貯槽掘削開始以降の水封管理を検討する上での初期データという意味で重要であり、施工段階においては、水封強化対策（グラウト、水封ボーリング孔増加等）を計画する上で必要となり、さらに対策工事による水封機能強化のマクロ的効果判定にも利用される。
 - ⑤もちろん操業段階においても、水封機能の異常を間接的に確認し、対応策を計画する上で有効な情報を提供するものである。
- (2) 断層等の高透水帯を把握することが重要である。
- ①石油備蓄建設においては、設計上は岩盤を均質多孔質体と仮定したが、実際の岩盤は大小多くの「水みち」

が存在し、特に、水脈となる割れ目の帯が水封機能を確保する上での支配的阻害要因となった。

- ②この水脈となる大きな割れ目は、断層等の高透水帯であり、事前調査～施工の過程でこの存在を早期発見し、グラウト、注水等により早期対応してこれを処置しておくことが水封管理上最も重要なことである。
 - ③従来の岩盤に対する水封評価は、透水係数や割れ目密度をもってなされていたが、「水みち」の性状、連続性が重要であり、事前調査～施工でのより高い精度できめ細かい観察を行う必要がある。この意味で石油備蓄で用いられた岩盤分類を発展改良する水封評価技術が要求される。
 - ④「水みち」となる岩盤の割れ目には、湧水が急激あるいは短時間に抜けきってしまう割れ目があり、掘削現場においてはこの水が抜けきった亀裂あるいは水が減少した亀裂を見逃す確率が大きく、いわゆる「潜在水みち」となり、不飽和域を形成する。
 - ⑤この意味で、掘削中の岩盤亀裂の目視確認と空洞内湧水の確認によるより詳細で、その経時変化を含めた岩盤水理情報の入手は非常に重要であるとともに、この膨大なデータをデータベース化して、得られたデータが設計および施工にフィードバックされる、いわゆる水封の情報化施工ができる組織体制を含めた環境作りを工事開始前に構築しておく必要がある。
- (3) 貯槽周辺の水封状況を常時把握・管理することが必要である。
- ①事前調査～操業に至る過程で、貯槽周辺の水封状況をマクロ的に把握する意味では、(1)で述べた水収支あるいは地下水位観測孔による地下水位管理が重要であるが、高透水帯の水封状況の確認等局所的部分に対する管理は本質の意味で重要である。
 - ②特に、貯槽掘削期間中は最も貯槽に対する水封が不安定な時期であり、断層等高透水帯が存在する場合には、地下水位観測孔による地下水位測定では正確に貯槽に対する水封状況を把握できない可能性が高いため、間隙水圧計等により貯槽周辺の地下水位を測定し、水封機能が常時確保されていることをチェックする必要がある。
 - ③また、貯槽周辺の水封状況を概略把握し、各種対策工を検討する過程で、各段階での岩盤水理情報に応じた浸透流解析を実施し、この結果を活用するのが有用である。亀裂性岩盤をモデル化して正確な地下水挙動を予測することは困難であるが、事前調査～施工の過程で得られた岩盤水理情報を逐次取り込むことによりモデルを改良し、その精度を高めていくことが必要である。
 - ④以下に各段階での浸透流解析の位置づけを整理しておく。

事前調査段階：水封状況の初期値の把握としての意味合い。つまり、貯槽を掘削した時に周辺岩盤がどの程度の自然水封機能を与えられるかをチェックし、人工水封機能への依存度を把握する。

施工段階：施工中に得られる岩盤水理情報を順次取り込んだ解析により、水封機能の健全性を把握し、

表-1 「水封システムの要点」総括表

重要ポイント	段階	事前調査段階	施工段階	完成時段階	操業段階
1. すべての段階を通して、水収支を把握しておくことが重要である。		全体1-1) 工事の進捗状況に応じて、域内の降水量、蒸発散量、流出入量、湧水量、水封水供給量、地下水位等のデータを継続して収集・分析し、そのデータの因果関係を調べるとともに、水収支を把握しておくことが重要である。			
2. 断層等の高透水帯を把握することが重要である。		事前2-1) 地質調査等より、高透水帯の分布状況を概略把握することが、設計を行う上で重要である。 事前2-2) 断層・破碎帯等の透水特性は、適切な測定方法によって把握する必要がある。	施工2-1) 作業トンネル、水封トンネルおよび貯槽の頂設導坑掘削時に、掘削切羽において、高透水帯を主とした顕著な水みちを把握することを目的とした亀裂調査を継続的に行うことが重要である。		
3. 貯槽周辺の水封状況を常時把握・管理することが必要である。		事前3-1) 高透水帯および岩盤の地下水圧を適切な方法により測定し、その分布を把握することが重要である。 事前3-2) 地質情報に応じた浸透流解析を行い、設計施工管理に必要な湧水量等を概略把握する必要がある。	施工3-1) 掘削時の湧水状況調査および地下水位、間隙水圧測定等により、貯槽周辺の水封状況を把握し、対応することが重要である。 施工3-2) 貯槽本体掘削の最終ステップにおいて、水封状況に支障がないかどうか最終的に確認する必要がある。	完成3-1) 施工段階の終了時点において、水封機能の最終状態を確認しておく必要がある。	操業3-1) 水封水供給量、地下水位、間隙水圧、湧水量、涵養量、水質等のデータから、現状の水封機能を確認するとともに、測定データに基づいて管理基準を作成し、発生する現象の異常を判断できるようにしておく必要がある。
4. 水封機能を保持するには、操業時に大きな不飽和域を残さないことが重要である。		事前4-1) 水封トンネルおよび水封ボーリングの計画は調査結果に基づく基本的な配置とする必要がある。	4.1 作業トンネル、水封トンネル掘削段階 施工4-1-1) 貯槽より上、特に作業トンネル、水封トンネル上部の領域の地下水位の顕著な低下を防ぐことが重要である。 施工4-1-2) 人工水封を行う	完成4-1) 貯槽の気密性を最終的に確認する方法の一つとして、気密試験がある。 完成4-2) 万一、水封機能において問題が認められた場合を想定して、その対策方法を事前に検討しておく必要がある。	操業4-1) 顕著な地下水位低下等の水封機能に影響するような異常現象の発生に対処する方法を事前に検討しておく必要がある。

際には、水封ボーリングから確実に高透水帯に吸水できるような計画するとともに、水封ボーリングの目詰まり対策を明らかにしておく必要がある。

4.2 貯槽本体掘削段階
施工4-2-1) 貯槽周辺岩盤中に大きな不飽和域を残さないようにするには、貯槽本体掘削前に水封トンネルおよび水封ボーリングから吸水することが原則である。
施工4-2-2) 事前の地質調査および周辺トンネルの掘削時情報に基づいて高透水帯を予測した場合は、調査の後必要に応じ、プレグラウトを行う。
施工4-2-3) 予測した高透水帯以外の高透水帯に対しては、湧水量の調整のため、必要に応じてポストグラウトを行う。

4.3 堅坑周辺の対策
施工4-3-1) 堅坑周辺は、特に不飽和が生じやすいので、不飽和域の発生防止のため、特別な対策が必要である。

4.4 地下水位が下がった場合の対処方法
施工4-4-1) 掘削の進行に伴い、地下水位が顕著に低下した場合には、その対応について検討しグラウトあるいは注水等の対策を講じる必要がある。

グラウト等必要な対応策を検討する指標としての意味合い。

完成時段階 : 施工段階で得られた岩盤水理情報に基づいたシミュレーションと間隙水圧等水封管理データを照合することにより、貯槽完成時の水封機能の最終チェックを行う資料とする。

操業段階 : 操業時に水封機能性に影響を及ぼす異常湧水、亀裂目詰まり等の現象が生じた場合の対応策を検討するためのシミュレーションとしての意味合い。

(4) 水封機能を保持するには、操業時に大きな不飽和域を残さないことが重要である。

- ①あくまで不飽和域を最小限に抑えることが基本であり、そのための努力を最大限行わなければならない。結果として不飽和域が生じた場合には、その発生原因を明らかにし、適切な処置を行ってこれを最小限に抑え貯槽周辺の必要地下水圧を確保する必要がある。
- ②不飽和域の発生を最小限に抑えるには、空洞掘削中の地下水位をできる限り下げないことが重要であり、そのためには貯槽本体掘削前の水封トンネルや作業トンネル掘削時にも上部の水位を著しく下げないよう努めると共に、地下水位が下がった場合の施工法・対策法をあらかじめ検討しておき、状況の変化に対して柔軟に対応する必要がある。
- ③地下石油備蓄建設の経験からも、一度水位が低下した

高透水帯は、水位を回復させることが難しい場合があることや貯槽下部から注水(貯槽充水)しないとかなかなか飽和しない場合もあることから、高透水帯に対しては、慎重な施工が必要である。

3.2 水封システムの要点の作成

3.1に基づいて、①事前調査段階、②施工段階、③完成時段階、④操業段階の各段階で考慮すべき具体的な要点をリストアップした。

表-1は、各段階ごとの要点を経時的に追えるよう記載された総括表としてまとめた。

4. おわりに

最後に、「水封システムの要点」の作成にあたり、御多忙中にもかかわらず、積極的に御協力いただきました小島圭二東京大学名誉教授、駒田広也(勲)電力中央研究所我孫子研究所バックエンドプロジェクトリーダー、岡本明夫日本地下石油備蓄(株)調査役をはじめとする関係各位に対し、深く感謝する次第であります。

今後、我が国において立地決定される水封式地下岩盤貯槽方式の石油ガス国家備蓄基地の建設・操業において、本稿が最大限生かされることを望むものであります。

参考文献

- 1) 岡本明夫・中澤保延・長谷川誠・小島圭二: 岩盤の「割れ目」に対応した水封評価法, 資源と素材, Vol. 114, 1月号, pp. 19~27, 1998. (原稿受理 1998.1.23)