

LNGの岩盤内貯蔵時に発生する亀裂内の氷の挙動

愛媛大学工学部 正会員 稲田 善紀
愛媛大学大学院 学生員 甲村 雄一

1 はじめに

LNGの輸入量は、年々増加する傾向にあり、その受け皿としての貯蔵方式は重要な課題となっている。現在の貯蔵方式としては、地上式と半地下式が主流を成しているが、これらの方式は土地の立体的有効利用の観点からは必ずしも得策とはいえない。そこで、それらの問題を考慮した貯蔵方式として、地下岩盤内空洞にLNGを直接貯蔵することが考えられる。

上述の方式で貯蔵する場合、LNGが -162°C という極低温であるため、空洞周辺の岩盤には、熱応力の影響により、放射状に亀裂が発生することが報告されている¹⁾。このため、液漏れやガス漏れが生じることが予想されるが、その対策として本研究では、現在原油の貯蔵に用いられている水封式貯蔵を適用させることを想定した。すなわち、LNGが -162°C という極低温であるため、空洞周辺の地下水は氷結し、液漏れやガス漏れを防ぐことが期待できる。そこで、空洞周辺にスリットを設けた場合を想定し、スリット内に形成される氷の挙動を解析によって求め、別に実験を行い水封式の効果を検討した結果について述べる。

2 空洞周辺の温度分布

土盛り100mの新鮮な花崗岩中に、直径10mの単一円形空洞を掘削し、その水平軸に長さ2m、幅3cmのスリットを設けた場合を想定し、空洞周辺の温度分布を要素分割法²⁾によって求めた。解析に用いた熱物性値を表1に、結果を図1に示す。LNG貯蔵1日後において、スリットの部分およびその周辺に熱伝導の遅れが見られる。これは、初期の間スリット内にまだ水が残っており、水の熱拡散率が岩盤の約1/10であることが原因と考えられる。別の解析により、貯蔵1年後において温度分布は準定常状態となることがわかっている²⁾。図1(b)より、スリット周辺の熱伝導の遅れも見られなくなり、 0°C 以下の範囲は空洞表面より12.3mにまで達していることがわかる。

表1 解析に用いた熱物性値

	Rock mass	Water	Ice
Thermal diffusivity $\times (\text{cm}^2/\text{sec}) \times 10^{-3}$	11.0	1.36	12.5
Thermal conductivity $\lambda (\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{sec}\cdot^{\circ}\text{C}) \times 10^{-3}$	7.77	1.36	5.28
Thermal capacity $\text{cp} (\text{cal}/\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$	0.7064	0.9995	0.4230

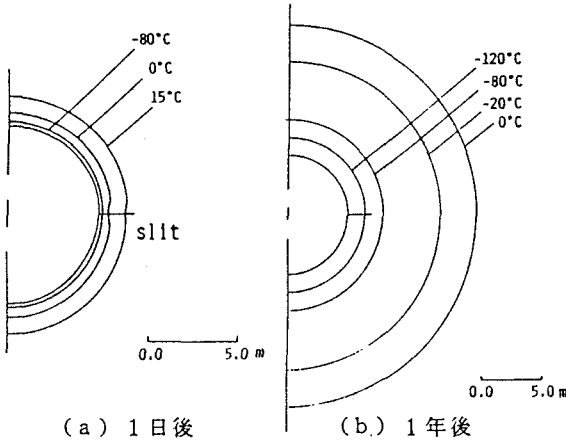


図1 空洞周辺の温度分布

3 空洞周辺の応力解析

本解析には、有限要素法に逐次破壊を考慮した亀裂解析法¹⁾を用い、すべて平面ひずみ問題として取り扱い、破壊判定はMohrの破壊包絡線説に従うものとした。

ここでは、温度分布が準定常状態となる貯蔵1年後までを7つのステップに分割し、それぞれのステップにおいて、1つ前のステップからの温度差にともなう物理定数を用いて順次解析を行った。すなわち、有限要素法による破壊判定の結果、破壊を生じている要素があれば、亀裂解析法を適用して再度計算を行い、得

られた応力および変位を次のステップにおける初期条件とした。ただし、この際スリット内の氷に亀裂が生じている場合、亀裂先端における温度が 0°C 以上であれば、そこから水が瞬間的に亀裂内に浸入し、氷結して亀裂をふさぐものと仮定した。すなわち、次のステップを解析する際には、亀裂を生じたスリット内の氷の応力は一たん解放され、そこに地下水が浸入し氷結すると考えているので、全体としての氷の応力は残留しないものと考え、亀裂がふさがった状態から各ステップにおける解析を始めることとした。以上に述べた解析の手順を図2に示す。

スリット内における解析結果を図3に示す。貯蔵1日後においては、空洞表面から80cmの範囲で氷結しているが、この氷には亀裂を生じており不安定な状態にある。貯蔵5日後を過ぎると、空洞表面から次第に亀裂がふさがっていく現象がみられ、1年後には70cmの範囲で亀裂がふさがっており、水封式の効果が十分に得られていることがわかる。

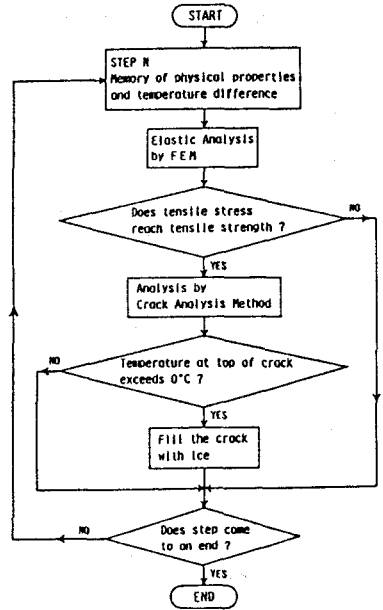


図2 解析の手順

4 水封式の効果に関する一考察

水封式の効果を確かめるため、モルタル供試体を用いて実験を行った。供試体の寸法は、 $30 \times 30 \times 25\text{cm}$ で、中央に直径 42mm の孔と幅 15mm のスリットを設けた。実験に際しては、モルタル供試体の上面が水面と等しくなるようにし、中央の孔に -196°C の液体窒素を注入してスリット部分の水が氷結したのち外力を加えてスリットを広げ、スリット内の氷に徐々に亀裂を生じさせ、その時の液体窒素の漏出の有無および亀裂の閉合の様子を観察した。その結果、亀裂は瞬間的に閉合し、液体窒素の漏出は認められなかった。このことから、水封式は有効な手段の一つとなり得ることが予想される。

5 おわりに

本研究では、LNGを地下岩盤内に水封式を併用し、直接貯蔵した場合を想定した。そして水封式貯蔵の効果について解析を行い考察した。その結果、貯蔵1日後以降においては、亀裂内の氷がふさがり、水封式の効果が十分に得られていることがわかった。また、液体窒素とモルタル供試体を用い周辺を水で満たした実験により、スリット内の氷に亀裂が生じても、瞬間的に亀裂がふさがることが確かめられ、水封式は有効な手段の一つとなり得ることが予想された。

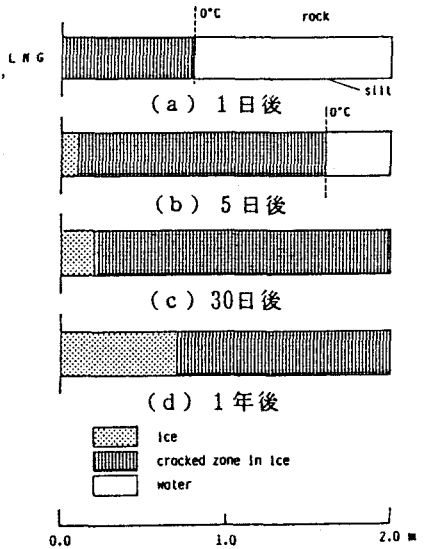


図3 スリット内の氷の挙動

参考文献

- 1) 稲田善紀, 谷口浩二: 液化天然ガスの地下岩盤内空洞貯蔵による空洞周辺の塑性領域, 日本鉱業会誌, vol. 103, No. 1192, pp. 365-372, 1987
- 2) 稲田善紀, 重信純: 液化天然ガスを地下岩盤内空洞に貯蔵した場合の空洞周辺の温度分布, 日本鉱業会誌, vol. 99, No. 1141, pp. 179-185, 1983