

(42) 液化ガスの岩盤貯蔵に関する基礎研究

埼玉大学 工学部 正員 ○佐藤 邦明
 磯熊谷組原子力開発室 " 伊藤 洋
 " " 清水 昭男

1. はじめに

液化ガスの岩盤貯蔵の安全性、経済性については既に諸外国でいくつかの実績があり、本邦においてもその有効性が検討されつつある。このエネルギー貯蔵方式は技術的にいくつかの問題点が指摘されているが、中でも岩盤空洞周辺の低温特性は岩盤浸透流、漏気に関与する影響を及ぼすことになる。

本研究は、こういった背景にあって取りあえず従来ほとんど研究がなされていない強制対流（浸透流）があるときの岩石・多孔媒体中の凍結浸透流・伝熱に焦点を当て、新しく製作した室内実験装置を用いてその基本的性質を実験的に検討し報告するものである。

2. 実験装置と実験方法

従来の凍上実験装置とは異って、強制対流（浸透流）下における凍結浸透、伝熱の基礎的性質を実験的に知るため、図-1(b)に示したような多孔媒体カラムを低温制御容器内に設定して、0～30℃の範囲で実験を行う。図-1はその実験装置の概要を示したものである。装置は大きく分けて、①断熱容器、②多孔体充てんカラム、③オーバーフロータンク、④温度調節装置、⑤温度測定・記録装置、⑥液化N₂ ガスタンク、⑦マノメータ、とからなっている。

実験装置の詳細と内容を説明すると、①は厚さ85mmの断熱材（グラスウール）で覆われ、内空寸法は、0.3m×0.3mで高さ0.4mである。②の多孔体充てんカラム両端部位置の断熱材は、カラム両端の凍結防止のため取外してある。②は透明アクリル製で、内径0.115m、長さ0.5mの円筒である。また、多孔媒体の部分のみが凍結するよう冷却容器内の寸法に合わせて仕切り、その長さを0.286mとしている。③は、強制対流（浸透流）を発生させるための水頭差を設定するものである。④は、①の断熱容器内の温度を一定（0～30℃）に制御するためのものであり、所定の位置で検温測定用サーミスターセンサーが接続され、電磁弁の開閉によって自動温度制御されることになる。⑤は、温度自動記録装置であり、必要な時間間隔でデジタル温度記録も

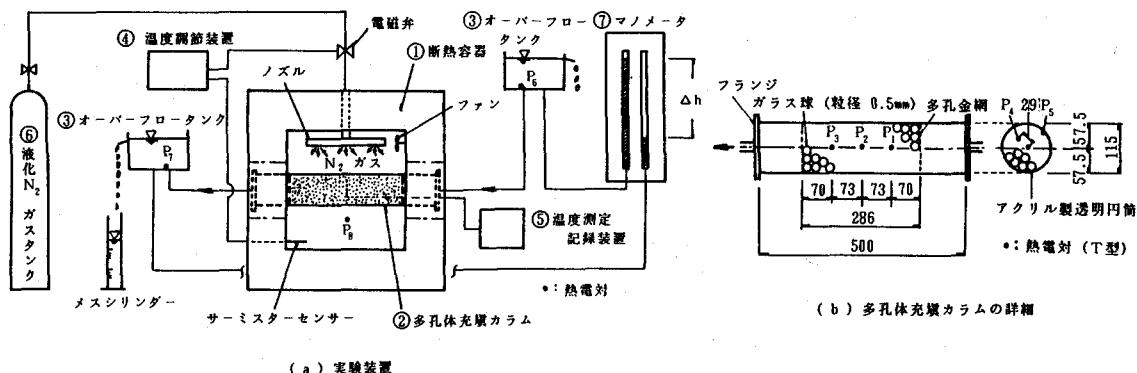


図-1 実験装置の概略

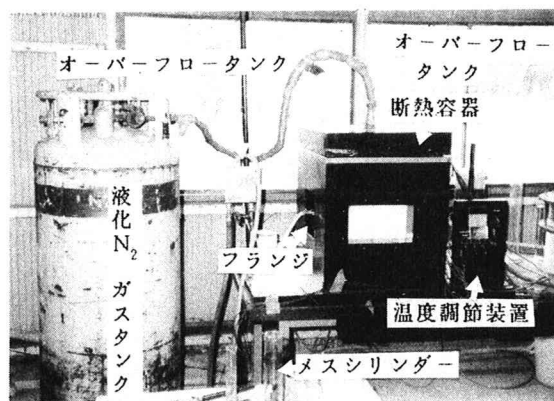


写真-1 実験装置の全景

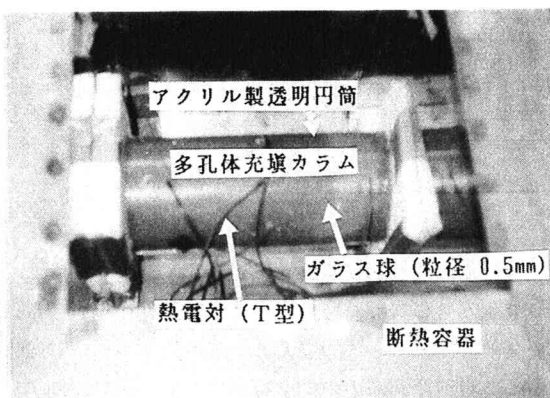


写真-2 多孔体充てんカラム

とれる。温度測定は、同図中に示したように②多孔体充てんカラム内（ $P_1 \sim P_5$ の5点）、③オーバーフロータンク内水（ P_6, P_7 ）および①の容器内（ P_8 ）の計8点について行われる。⑥の液化 N_2 ガスタンクは液化 N_2 ガス（ -160°C 以下）により①容器内を冷却するためのものであり、ノズルを通じて噴霧状に放出される。噴出したガスはできるだけ容器内に平均的に分散させ、容器内温度を一様に一定とするためファンによって攪拌させる。⑦はオーバーフロータンク内の水頭差を読み取るものである。

今回の実験に用いられた多孔媒体ガラス球（平均粒径 $d_m = 0.5\text{mm}$ 、透水係数 k （ $8 \sim 14^\circ\text{C}$ ） $= 3.0 \sim 5.0 \times 10^{-3}\text{m/s}$ 、空隙率 $\lambda = 38\%$ ）であり、実験ケースは容器内温度（ P_8 ） $0, -10, -20, -30^\circ\text{C}$ に対し、水頭差 Δh を 0.01m (Run-1)、 0.04m (Run-2)、 0.10m (Run-3) と変えて行われる。実験ケースの表示は Run-（設定絶対温度）-（水頭差）の順とし、たとえば Run-20-1 は設定温度 $P_8 = -20^\circ\text{C}$ 、水頭差 $\Delta h = 0.01\text{m}$ とした場合であることを表している。

実験手順は次のようである。まず、多孔媒体（ガラス球）をカラム内に均質に充てんしつつ、熱電対を図-1(b)に示した位置に埋込み、固定する。つぎにカラム・媒体内を十分飽和させた状態で容器内に取付ける。ここまで準備が整うとオーバーフロー装置により所定の水頭差を設定して常温状態（ $8 \sim 14^\circ\text{C}$ ）で浸透流を発生させて流量を測定する。ついで、温度調節装置を所定の温度に設定して液化 N_2 ガスをノズルより噴出し冷却する。この状態で $P_1 \sim P_8$ の温度および流量を経時的に測定することになる。温度は所定の時間間隔で自動記録されるが、流量はオーバーフローした水を高精度メスシリンダーに導いて直接測定する。

なお、写真-1、2 は実験装置の全景および多孔体充てんカラムを示したものである。

3. 実験結果とその考察

実験は浸透流の動水こう配を一定にして温度レベルを変えて十数ケース行われたが、その内特徴的な結果を中心に揭示しつつその基本的性質を吟味してみることとする。

まず、図-2 は Run-20-1 における媒体内中心の浸透方向温度の経時変化を示したものである。流入水の温度は 10°C 程度（ P_6 点）であり、容器内温度（ P_8 点）は実験開始後約40分で -20°C となりその後は一定となっている。媒体内温度はいずれも低下するが、中でも中央の P_2 点温度が最も低く、4時間半後には 0°C を下回りその後はさらに低下率が大きくなって7時間後直前には -11.7°C に達している。後述するが、この時点で媒体の空隙水が全凍結して浸透流が停止している。また、下流の P_3 点温度が中央の P_2 点より高くなっているが、これはカラム端部が容器外にあり不凍水となっていることによる。一方、このときの断面内半径方向の温度は、図-3に示したようである。当然ながら、冷却源に近い P_5 点温度が最も低くなり、内部点 P_2 、

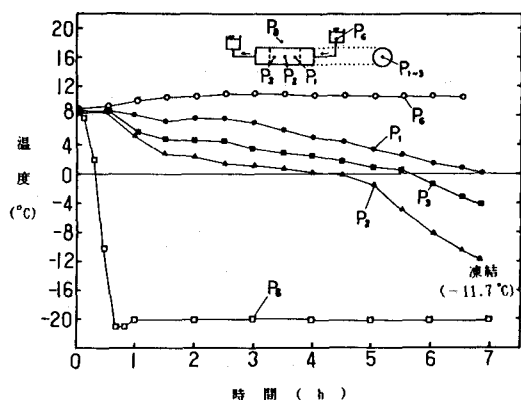


図-2 Run-20-1における媒体内中心温度の経時変化

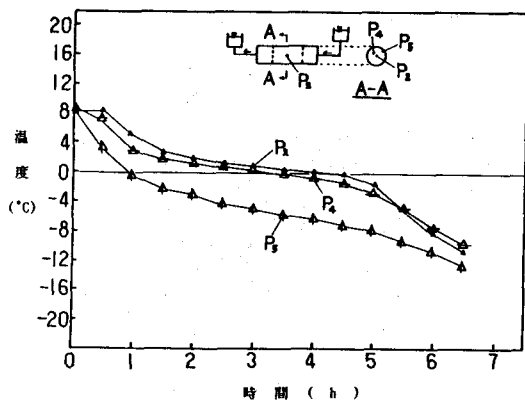


図-3 Run-20-1におけるA-A断面半径方向温度の経時変化

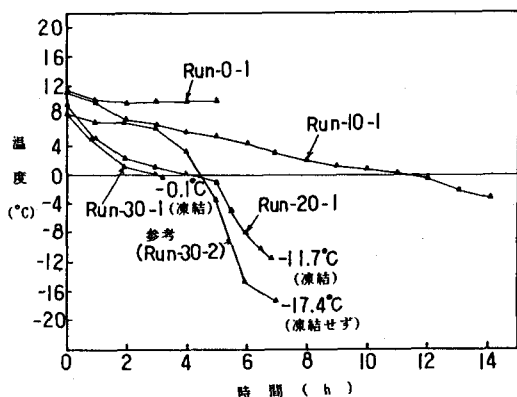


図-4 Run-0～30-1における媒体内中心温度の経時変化

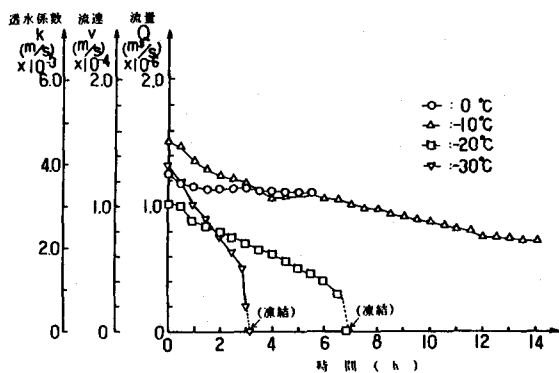


図-5 Run-0～30-1における流量、流速、透水係数の経時変化

P_4 の温度もそれに遅れてゆっくり低下する。温度が 0°C 以下となるのは P_5 点では約 1 時間後であるが、 P_2, P_4 は 4 時間後でありかなり時間的ずれがある。しかし、それ以後の 3 点の温度差は急速に縮まり、凍結時 (7 時間後) には、 $-11.6 \sim -13.8^{\circ}\text{C}$ となっている。

図-4 は、Run-0～30-1 における媒体内中心温度の経時変化をまとめて示したものである。温度は、容器内設定温度レベルが低いほど低下率は大きい、その低下率は 0°C に近づくとやや小さくなりそれ以下になると逆に大きくなる傾向が認められる。これは、水の潜熱や媒体材料物性の非線形性 (温度依存性) が影響しているものと思われる。凍結時 (流出停止時、図-5 参照) の温度は $-0.1^{\circ}\text{C} \sim -11.7^{\circ}\text{C}$ と差があり、さらに参考までに掲示した Run-30-2 では -17.4°C に達しても凍結しない。

つぎに、こういった温度場をもつときの流量の経時変化を示したものが図-5 である。縦軸には、流量、流速、透水係数を同時に表している。同図より、流量はいずれも経時的に減少する傾向にあるが、 0°C では初期に若干低下するもののその後はほぼ一定値となっている。 -10°C ではそれは指数で減的に徐々に減少するが、 -20°C 以下になるとかなり顕著に減し、凍結によって急減して流れは止るといった特徴が見られる。この流量の減少は、流体粘性の変化と共に間隙水の凍結による有効空隙の減少、つまりある種の目づまり的現象によって生じるものと判断される。また、凍結にはある限界流速的なものが存在して、それを下回ると瞬時にそれに至ることも同え大変興味深い。しかし、いずれにしても従来より水は 0°C 程度で凍結

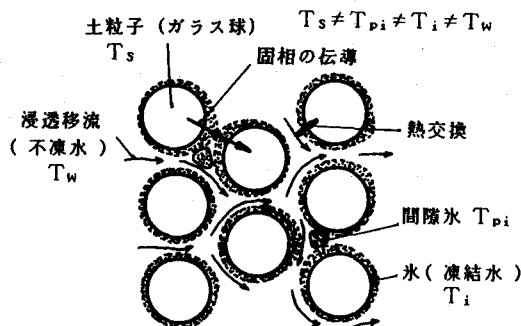


図-6 低温下で強制対流（浸透流）があるときの多孔媒体内の伝熱概念

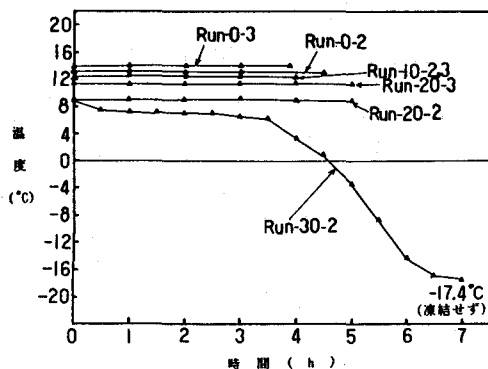


図-7 Run-0～30-2,3 における媒体内中心温度の経時変化

するといったことからすると、 $-10 \sim -20^\circ\text{C}$ 程度での浸透流停止現象は矛盾することになる。そこで、上述の媒体内温度というものを考えてみると、この場合の温度は固相（ガラス球）、氷、間隙水（不凍水）の温度、あるいはそれらの平均温度的なものと判断せざるを得ない。つまり、図-6の低温下での伝熱概念で示したように媒体内温度分布をミクロに見ると各相の温度がかなり異っているのではないかということである。この可能性は高いと思われるが、このことは低温下において浸透流が存在するときの伝熱を考える上で重要なポイントとなろう。

図-7,8 は、水頭差が0.04m, 0.10mである Run-0～30-2,3 における媒体内中心温度と流量の経時変化を各々示している。この場合は、Run-30-2を除いて温度、流量共経時的にほとんど変化していないことがわかる。これは、流速が速いため媒体内への冷却源よりの伝熱より浸透移流による熱輸送量が卓越したものとなっていることを示唆しているものと考え得る。Run-30-2では温度の低下と共に流量の減少もみられるが、温度のそれに比べて小さくしかも -17.4°C にあっては流れは停止していない。このことも、浸透媒体中の各相で温度が異なり、移流伝熱効果がかなり大きいことを裏付けているものとみなせる。

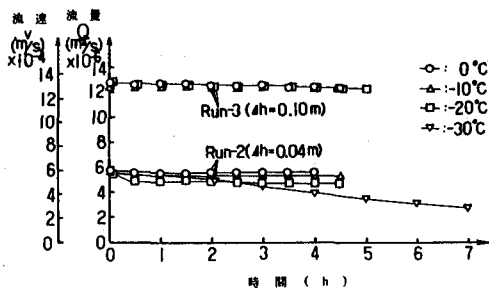


図-8 Run-0～30-2,3 における流量の経時変化

4. むすび

低温環境における飽和浸透流の凍結過程は凍土の形成に伴う凍土現象とは違った性質を有する。一定水頭下にある飽和浸透流の凍結機構を明らかにするため室内実験を試み、新しくいくつかの成果を得た。それによると、①浸透流は周辺の温度低下によって予想以上に凍結しにくいこと、②多孔媒体の粒径が小さく、かつ水頭差が小さくなると、間隙中に氷が形成されて流量が時間と共に減少してついに流れなくなってしまうこと、③多孔媒体の粒径がある程度大きくても、周辺温度が下がってくると、局部的な氷結が発生して流速が小さくなっていくことなどが示唆された。この種の現象のモデル化に当って、新しくいくつか実験を追加して検討して行くことが大切となろう。このことも含め今後も実験を重ねるつもりである。最後に本実験に協力していただいた埼玉大学学生、吉田達也君にお礼申し上げる。

参考文献 1) 木下誠一：凍土の物理学，森北出版。 2) R.L. Harlan: Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil, Water Resour. Res, Vol.9, No.5, 1973.

(42) EXPERIMENTAL STUDY ON ROCK STORE OF LIQUIFIED GAS

By K.Sato*, Y.Ito** and T.Shimizu**

ABSTRACT

Until now, the freezing phenomena have been studied in the many fields of science.^{1,2)} It seems that the freezing process of saturated seepage under low temperature, as compared with that of frozen soils, may reveal somewhat different feature. The present study aims at to clarify the fundamental characteristics of freezing seepage flow below zero temperature. The permeability tests of saturated porous media are carried out by using a newly designed apparatus. The seepage flow rate and temperature in porous medium are measured under constant hydraulic gradient. The experimental results show that the seepage flow diminishes with time because of freezing of pore water, and that the existence of critical freezing hydraulic gradient is experimentally recognized.

* Faculty of Engineering, Saitama University.

** Dept., Nuclear Power Development, Kumagai Gumi Co., Ltd.