

(8) 岩盤内の気体の透過性

電源開発(株) ○市川 芳忠
 " 田中 堅太郎
 " 牧野 功
 " 能登原 功

1. ま え が き

近年原子力開発の将来に備えるため、わが国の風土に適合する方式として原子炉を地下に設置する新方式発電所や、高レベル廃棄物の地中処分についての技術的検討が行なわれている。

この種の検討の過程で必要となる岩盤内での気体の透過性についての知識経験は、従来その必要性が少なかったこともあって地下水流に対する知見等に比べて十分とは云い難い。われわれは地下立地方式原子力発電所の検討の過程において、従来稀少であった実際の岩盤内における気体の透過性についての現地試験を行なって知見の巾を少しでも広げようと努めて来た。

その成果の概要は試験手法の開発¹⁾²⁾³⁾、実測結果と粗考察⁴⁾、格納効果の評価について⁵⁾、それぞれの機関・学会等に発表した。

今回この報告では、試験結果をやや詳しく検討し、透過現象を解明する上での参考資料を提供したい。

2. 既 往 の 知 見

2-1 基礎方程式 地下の空洞から放出された放射性物質の地中拡散の理論式は 1973年土木学会の委員会の結論としてCを核種濃度とするとその時間変化はフィックの拡散、ダルシーの浸透流則に従う移流、岩盤内での核種の吸脱着および崩壊減衰からなる次の式で表現できるとされている。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s} \left(D \frac{\partial c}{\partial s} \right) - \frac{\partial}{\partial s} (V \cdot C) - \frac{\rho}{e} \left(\frac{\partial}{\partial t} A d C + A b C \right) - \lambda C$$

$$V = K \frac{\partial p}{\partial s}$$

しかし、この式を応用するに際しては実岩盤における実証的な実験による確認が急務であるとされていた。

2-2 試験例 上式中、拡散係数D、透過係数K、間隙比e、吸収係数Ab、付着係数Ad、などについての試験例は少ない。とくに透過性についても、野外の岩盤についての気体の透過試験は例が少ない。実岩盤内に気室を設けて空氣の透過試験を行なった例は表-1に示すとおりである。またボーリング孔を用いて行なった例も数例にすぎない。なかでもスエーデンで1965年に行なわれた長さ146mの水平ボーリング孔試験および、1976年に報告された60mの斜めボーリング孔試験ではトレーサにRIを用いて圧入された空氣の到着時間を測定している。

表-1 世界の気室型透気試験一覧

	Halden (ノルウェー)	Lucens (スイス)	(イタリア)	本 報 告 (下 郷)
試験年月	1960, 8および12	1962		1978, 4
地質岩質	片麻岩	洪積世砂岩	ドロマイト(白雲岩)	閃緑岩
その他	かぶり60m	空隙率 12~26%		かぶり 70m
試験最高圧力	0.3 %g	0.8 %g	0.11 %g	3.6 %g
体積V	4,400 m ³	140 m ³	140 m ³	25 m ³
空 表面積S	2,000 m ²	170 m ²	190 m ²	44.2 m ²
V/S	2.2	0.82	0.74	0.56
洞 構造(巻立て)	コンクリート	素掘	コンクリート	素掘
(内面)	樹脂塗装	アスファルト	モルタル	背面モル注
漏洩率	0.3 vol/時間	アルミ箔	0.2 vol/分	0.01 vol/分
圧力半減時間	25時間	5時間	7分	2.6時間
		220時間	30.3時間	47分

3. 測定装置

岩盤内の気体の透過性は、(イ)透過流量と圧力の関係(ロ)岩盤内での圧力の分布(ハ)岩盤内での透過速度を測定すれば、多孔体中の浸透流の知識を応用して圧力勾配と流量・流速との関係や、それに関係する有効間隙率、透過係数として把握できると考えられる。

しかし、現実の岩盤は多様であるので、このような理論が適用できるかどうかを実岩盤を対象として観測する必要がある。そこで、実際のサイトで気体の透過性を把握することができ観測装置を開発し実用化した。上記の3項目のうち(イ)、(ロ)は既知の技術であるが、岩盤中の気体の透過速度および拡散係数を直接測定する方法にヘリウムガスを応用し、充分実用に供しうることを示したのは今回が初めてである。

4. 実施した現場試験

実岩盤試験は、昭和53年春および秋に異なる二地点でほぼ同一の装置を用いて実施した。

4-1 下郷試験(Sシリーズ)

第一回は、53年4月当社下郷発電所地質調査坑内で試験手法の開発を目的として実施した直径2.5m長さ5m容積約25m³の現場気室試験であり、実施概要は下記のとおりである。

試験名	実施月日	所要時間	最高圧力	主要内容
S-1	4月15日	5時間	3.5 kg/cm ²	予備加圧試験
S-3	4月19日	7時間	4.0	検出孔圧力変化測定(16孔)、減圧試験
S-4	4月21日	9時間	3.0	長期加圧及び流速測定試験、同上
S-5	4月22日	11時間	3.9	同上
S-6	4月25日	13時間	3.7	同上
S-7	4月26日	11時間	3.4	同上

試験箇所は当時融雪期にあたり、日変動は大きい、最高0.3kg/cm²の地下水位を有していた。試験坑の構造および検出孔の配置を図-1に示す。とくに閉塞部は入念に施工した。付近の地質は中生代の水成岩(大戸層)に貫入した閃緑岩で、RQDは約60%、ボーリング孔を利用した透水試験では約10⁻⁵ cm/sの透水係数であった。岩石の平均物性は $\rho = 2.8 \text{ g/cm}^3$ $V_p = 5.5 \text{ km/s}$ 動弾性係数 $4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であった。実験結果の一例を図-2に示す。

4-2 沼原試験(Mシリーズ)

昭和53年度通産省新立地方式検討に関する委託調査の一環として同年12月沼原発電所で実施した。この試験は、地質調査を兼用した通常の内径56mmのコアボーリング孔を通して給気した透気試験である。試験箇所は地下水のない乾燥した不飽和場であった。付近の地質は、第三紀中新世の流紋岩質凝灰岩で地山までの最小かぶりは約50mである。ボーリング孔を利用した透水係数は孔口側が10⁻⁵ cm/s 奥部10⁻⁴ cm/s で給気孔は $0.7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であった。この試験結果の一部は、土木

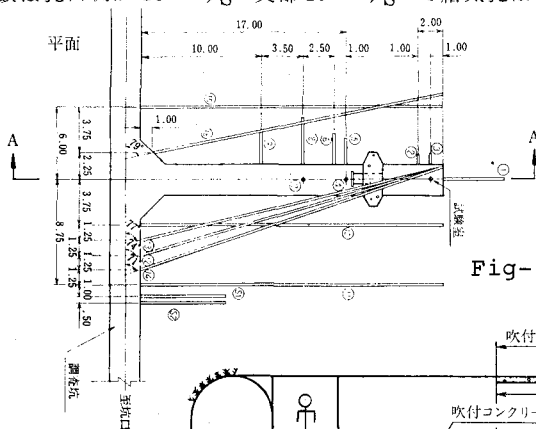
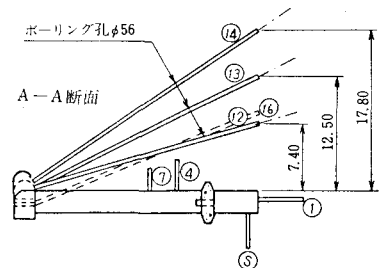
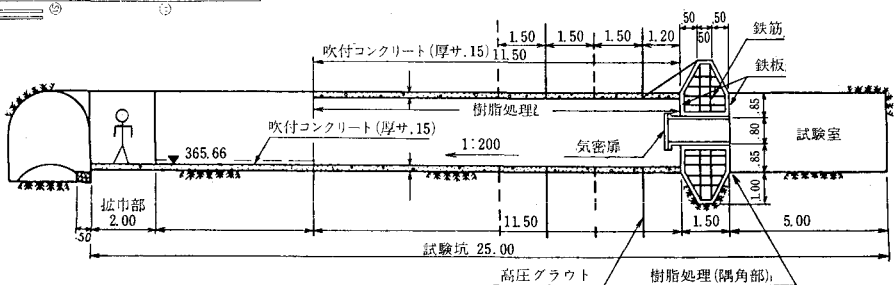


Fig-1



学会54年度年次講演会で発表したもので本報告では必要に応じてMシリーズを引用することにする。



5. 試験結果および考察

5-1 試験室圧力と透過流量

Sシリーズの測定結果を図-3に示す。Mシリーズでは直線であったが、Sシリーズでは直線とは言い難い。これは地下水の存否もあるが、不飽和材料の透過性または、毛管法則で説明できる。しかし、Nm³/分を絶対圧力で除した実体流量はほぼ直線となる。

5-2 試験中の温度履歴

気体はそのエネルギーを圧力及び温度エネルギーで保有するから、

透気試験の期間を通して試験室内の温度を測定した。試験室圧力と温度の関係の一例は図-4に示す。断熱圧縮による温度上昇、定常圧状態の置換による低下、送気停止後の断熱膨張による急速な温度低下、過冷却からの再熱の各過程がいずれの場合もよく把握されている。この温度上昇低下の割合はSシリーズを通してほぼ等しく1℃当り0.2±0.02 kg/cm²であった。なお、Mシリーズではこのような明瞭な温度履歴は認められていない。

これらの観測値から岩盤の熱力学的な情報を得る可能性もある。

5-3 透水係数と透気係数との比

先に、岩盤の比透水量と比透気量との比は、1ケタから3ケタまで幅広い値をとることを示した⁴⁾。一般に多孔体の透過性については

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K} \frac{V}{\epsilon} + \frac{\rho}{B} \left(\frac{V}{\epsilon} \right)^2, \quad Q = \frac{V}{\epsilon} \cdot \epsilon A$$

ここにμ：粘性係数、K：透過係数、V/ε：実流速、ρ：密度、B：透過抵抗、εA：有効間隙率と透過面積との積で示されると考えられる。したがって、透水係数が10⁻⁸cm/s(1ルヂオン)程度以下の

難透水性地盤では空気も水も共に層流状態であるから、μの逆数の比(60~70)であるべきであるが、地下水で飽和する場では透水性に支配されて1ケタとなるものと考えられ、逆に10⁻⁴cm/s程度以上では水は層流状態であるが、空気は支配則が変わり、最終的には密度の比に達するに至るからでないかと考えられる。また、岩盤や流体の変形を考慮に入れた貯留係数を考慮すべきであるとする考え方もある。

5-4 送気停止後の減圧曲線

長時間送気して定常状態を得た後、急激に送気を停止すると圧入されていた空気は周辺岩辺を透過して圧力を減少して行く。

この減圧状態を試験室の初期圧力P₀に対する比P/P₀と経過時間との関係をP₀が3, 2, 1 kg/cm²の場合を半対数にプロットすれば図-5のとおりで直線の勾配は約3.6×10⁻⁴ 1/secであった。初期圧力P₀の大きさにより勾配が異なるが、絶対圧力1 kg/cm²当りの勾配はほぼ1×10⁻⁴ 1/secであった。このように、P=P₀e^{-λt}で表現したときの1/λ

EXAMPLE OF TEST RESULTS

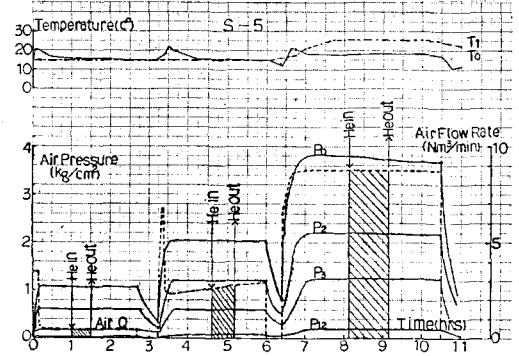


Fig-2

PRESSURE VS. FLOW RATE

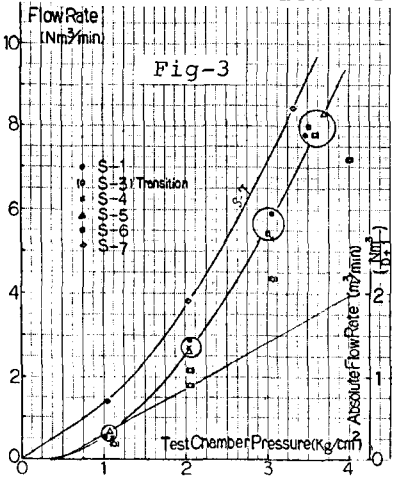


Fig-3

TEMPERATURE HYSTERESIS

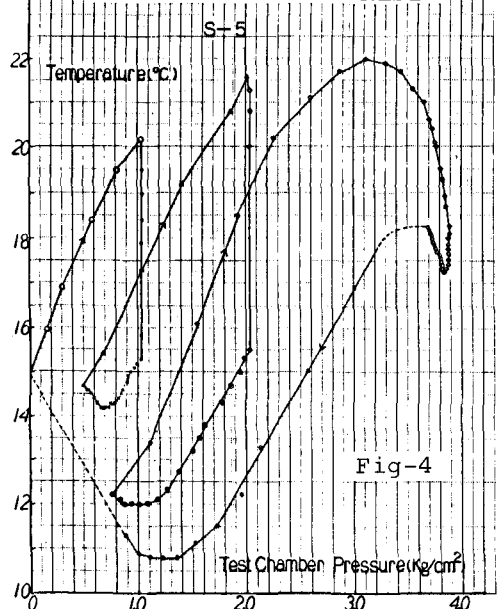


Fig-4

を圧力減少時間と称すると、Sシリーズでは47分であった。

5-5 気体の移行速度 試験室からの空気の透過状態が定常過程となった後に送気中にトレーサガス(He, Kr)を混入し、試験室内トレーサガス濃度をほぼ一定に維持した後トレーサガスの混入を停止した時のガス濃度の時間変化を測定すれば空気の移行速度(V/ϵ)を直接測定できる。そのような一例を図-6に示す。この場合B-0からB-13までの到達時間は約2分であるので平均5m/分であり、B-14までは約1m/分であり予想以上に早い。また、これらの観測値から解析的に推定した間隙率は約1%と推定された。

Mシリーズにおける観測値では注入圧力が0.1~0.2Kで0.5m/分程度2K以上では約1.7m/分の値が観測され、間隙率は給気孔からの距離に反比例するが、検出孔までを平均した有効間隙率は1%と推定された。

このように、岩盤の気体移行に関する間隙率は岩石の組成に示される文献値よりも1ケタ小さい値を示すが、これは有効間隙率と呼ぶのが妥当であって、その値は現地観測によって定めることができる。

5-6 岩盤内の分子拡散による拡散係数 以上述べた空気を圧入した場合の透過現象と異なり、圧力勾配が殆どない場においても気体は濃度差により均一化しようとするが、その度合いは拡散係数 cm^2/s で表現する。岩盤では間隙率と屈曲度との比を乗じた有効拡散係数があると考えられている。

Mシリーズで測定した結果は、図-7に示すとおり間隙率は先に述べた有効間隙率1%がよく適合し、屈曲度についてはほぼ20と観測された。したがって、地下原子力施設の環境安全評価上問題となるKr, Xe, Iの拡散係数は $10^{-4} cm^2/s$ オーダーとしてよいと考えられるが、有効間隙率は従来考えられていた値よりも小さくするのが妥当ではないかと思われる。

6. 結 論

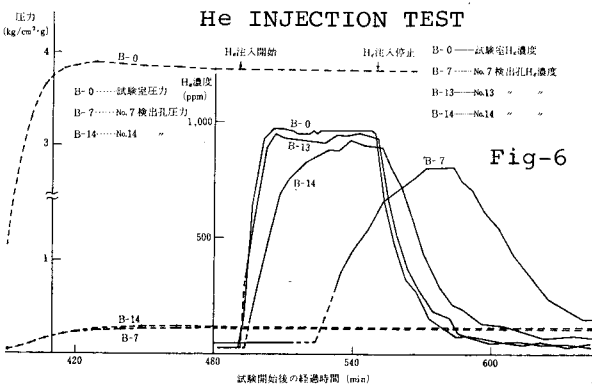
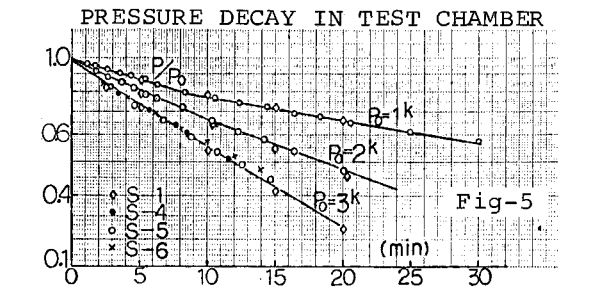
岩盤の透過性について、実際の岩盤を対象にして試験を行ない、送気圧力と漏洩空気量、定常状態の岩盤内圧力分布、岩盤中の気体の移行速度、拡散係数および屈曲度などの現地測定を行なうことができた。

今後、観測して得られた非定常過程や熱力学的挙動についても検討を進めていきたいと考えている。

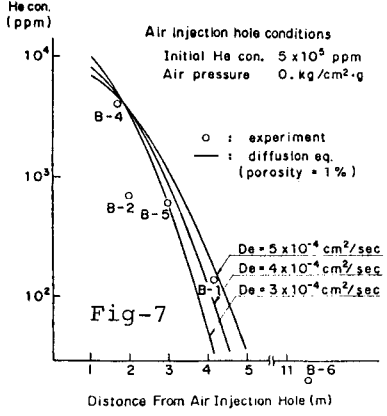
謝 辞

試験手法の開発、現地試験の評価検討に関しては、一貫して京都大学高橋幹二教授の懇切なる御指導を頂いた。また、測定機器システムの開発実用化試験に成果が得られたのは、関係者各位の御努力の賜である。

- 参照報文 (1) 原子力学会 53 年秋の分科会 E-28, 29 (2) 電発調査資料 No.62, 54.4
(3) 科技庁 原子力安全研究 53 年度研究発表会 54.5 (4) 土木学会 54 年年次学術講演会 II-374
(5) 原子力学会 54 年秋の分科会 D-24.



DISTRIBUTION OF He CONCENTRATION AROUND AIR INJECTION HOLE AFTER 63 HRS.



FIELD EXPERIMENT CONCERNING GAS FLOW IN ROCK

K. TANAKA
Y. ICHIKAWA
I. MAKINO
I. NOTOHARA

Electric Power Development Co., Ltd., Tokyo, Japan

In the safety assessment on the underground siting of nuclear power plant, it is necessary to know the transport behavior of gaseous fission products in the underground. The behavior can be basically expressed by a couple of equations with Darcy's and Fick's laws. At the present time, there are however a few field data which are applicable to determine parameters used in the equations.

The present paper describes on an outline of field experiment which, designed to obtain such data, was carried out in the underground siting of the pumped storage hydraulic power station.

A series of measurements has been done using test chamber excavated in Diorite, which has 2.5m in dia by 5m in length. The measurement system developed by EPDC for this experiment consists of gas sampling equipment using vacuum technique, mass spectrometer as helium detector and some conventional instruments.

The experimental results make it possible to determine such parameters to be used in the equations as air permeability, effective porosity and effective diffusion coefficients of gaseous fission products. Therefore, it becomes possible to assess actually the transport behavior of gaseous fission products in the underground, and also our developed system is said to be suitable to the field experiment of such purpose.