(105) 花崗岩の１０００日・９０℃熱水養生における物性変化

㈱大林組技術研究所　鈴木健一郎
同　上　桑原　徹
同　上　丸山　誠
同　上　平間　邦興

Change of Material Properties of Granite cured
in the 90℃ water bath during 1000 days

K. Suzuki, T. Kuwahara, M. Maruyama, K. Hirama
of
TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE of OBAYASHI CORPORATION

Abstract

In the assessment of geologically suitable sites as underground repositories for nuclear wastes, underground caverns for nuclear power house or geothermal developments, the influence of the heat upon long-term mechanical and hydraulic behavior of rock masses is an important consideration. The temperature condition of the repository is simulated in a 90℃ water bath and the time dependence of material properties of GRANITE is investigated. Little change of permeability and P-wave velocity took place in a short period and a marked increase of permeability was found at about 1000 days curing.

１．はじめに

放射性廃棄物の地層処分、地熱開発、地下原子力発電所等のプロジェクトの計画に当たり、岩盤の力学的及び水理学的挙動を把握するには、熱の影響を考慮する必要がある。本研究は特に放射性廃棄物の地層処分に関連して、化学的風化の著しい花崗岩を熱水環境下で長期間養生した場合の岩石の物性、特に透水特性と弾性波伝播速度の長期的な変化を実験的に調べたものである。

岩石物性の温度依存性については様々な形で議論されているが、時間のファクターについての議論は少ない。処分場に対しては、その環境を実験的に模擬して行う試験の場合、重要となるパラメーターとして、温度、地下水流速、地下水のＥｈ（酸化還元電位）やｐＨ（水素イオン濃度）、圧力、水量等があげられる。今回の研究ではこれまでの高温雰囲気下での養生実験に対して、地下水の存在を考慮して熱水中で養生を行った。処分場での最高温度は、廃棄物の発熱量と岩盤の熱伝導率とのバランスで決まるが、通常９０℃に保たれるということで、熱水の温度を９０℃に保ち、その中で岩石の養生を行って３年を経た。その間、主に弾性波速度及び透水係数を測定しそれらの経時変化を調べたので、中間報告として以下にその

概要を述べる。

２．試料及び実験方法

実験に用いた試料は、茨城県笠間産の黒雲母花崗岩である。全供試体数は20個であるが、今回の実験結果に含まれるものは16供試体である。主たる試験項目は単位体積重量、間隙率、弾性波速度、透水係数である。それらの初期値を16供試体の平均と標準偏差として表-1にまとめた。供試体は直径50mm、高さ100mmの円柱である。熱水養生槽（写真-1）は内臓のマイコンにより昇温・降温速度及び一定保持温度を設定できるもので、熱水は通常の水道水を用いている。実験の手順は以下の通りである。

①供試体作成後、透水係数及び弾性波速度の測定を行い、それらを養生前の初期値とした。

②初期値の設定された供試体を養生槽中に水浸させる。

③昇温速度を熱衝撃による破壊が生じないように2℃/minに設定し、一定保持温度９０℃まで上昇させ、所定の期間養生を行う。

④養生期間は2日、10日、40日、180日、670日及び1030日である。

⑤所定の期間養生の行われた供試体を養生槽より取り出す際は、昇温時と同様、急激な温度降下のないように一旦熱水の入った別の容器に移し、そのまま室温相当になるまで放置した。

⑥湿潤重量、乾燥重量、透水係数（注水温度及び雰囲気温度は共に室温相当）及び弾性波速度の測定を行う。

⑦上記を測定後、顕微鏡観察用供試体を除いたものについては再び熱水養生槽にて再養生を行う。この時、熱水養生槽には直接戻さず、水中からある程度時間をかけて温度を上げた後に養生槽に戻した。

⑧養生期間中は槽内の熱水の交換は行わない。従って、花崗岩供試体より溶脱された成分は熱水中に蓄積する。蒸発により水道水の補給はあるが、熱水中への溶脱成分の検討を行うために800日及び1200日の水質分析を行った。（比較試験として使用した水道水の水質分析も行った。）

⑨養生期間180日、670日及び1030日の供試体については、マイクロクラックの進展状況を顕微鏡観察するための薄片作成及びＸ線分析を行い、必要に応じて走査・透過電子顕微鏡写真の撮影を行った。

表-1 養生前の物性一覧表

	単体重量 g/cm³	間隙率 %	透水係数 cm/sec	乾燥V_P km/sec	湿潤V_P km/sec
平均	2.61	0.75	$1.84*10^{-9}$	4.33	5.13
標準偏差	0.01	0.17	$1.84*10^{-9}$	0.57	0.76

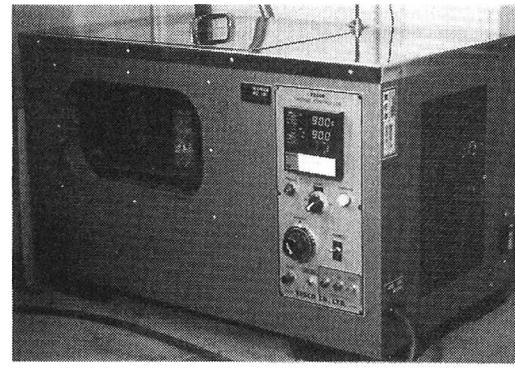


写真-1　熱水養生槽

３．実験結果及び考察

（１）透水係数の変化

透水試験は拘束圧5 kgf/cm²、透水圧3 kgf/cm²で供試体の上端から下端への一様流型の試験である。図-1に透水係数の時間的な変化を示す。横軸は養生日数を対数で、縦軸は養生前の透水係数により無次元化した透水係数の変化率を対数でとっている。透水係数の初期値は10^{-10}～10^{-9}cm/secであるが、養生２日以降は全て10^{-9}cm/secとなり、180日までほとんど変化しない。ところが670日の

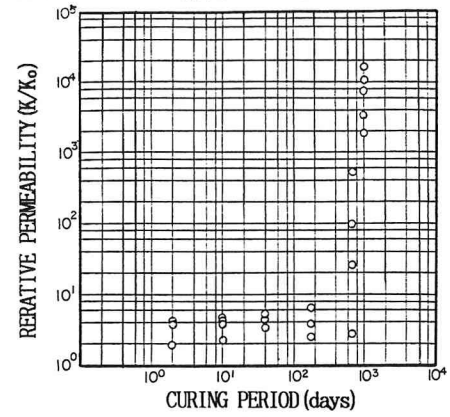


図-1　透水係数と養生期間の関係

養生期間を経た供試体では２オーダーも大きくなるものが現れ始めている。1030日を経ると全てが３～４オーダー大きくなっている。即ち、短期的には熱水の影響で僅かに透水性が増加しその後余り変化しないが、600日程度養生を行うと新たな変化が起こり始め、急激に透水係数が増加することが明らかとなった。

（２）弾性波速度の変化

図-2に弾性波速度の時間的な変化を示す。図-1と同様、横軸は養生日数を対数で、縦軸は養生前の弾性波速度で無次元化した弾性波速度（Ｐ波速度）の変化率をとっている。○印で示したものは透水試験後に室内で自然乾燥させた状態で測定した弾性波速度、●印は透水試験前の飽和状態で測定した弾性波速度をそれぞれ示している。Ｐ波速度は水の影響を受けるため●印のものはほとんど変化しないが、1000日養生のものは多少減少している。また、○印のものは短期養生期間のものから養生日数に伴う減少傾向がみられ、1000日養生では60％まで減少している。

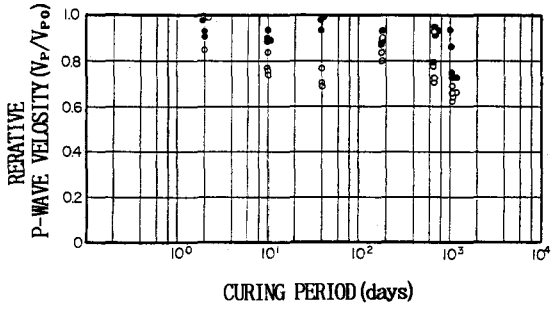


図-2 弾性波速度と養生期間の関係

（３）間隙率の変化

初期の間隙率は表-1に示したように平均0.75％であり、その後ほとんど変化はないが、1000日養生になると平均で1.68％となり、明らかに間隙が増加している。間隙率と透水係数の相関性をとると図-3の様に比較的良好な関係が示される。

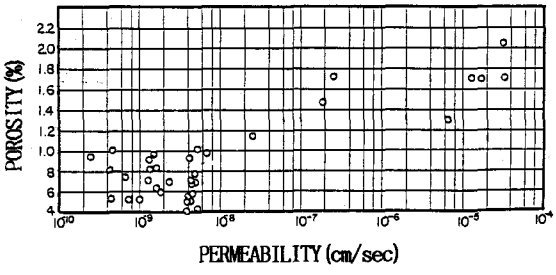


図-3 間隙率と透水係数の相関性

（４）水質の変化

水質の変化から供試体よりの溶脱の有無及びその成分を調べるために800日及び1200日後の養生槽中の熱水の水質分析を行った。計量結果を表-2に示す。花崗岩は主に石英、斜長石、黒雲母からなり、それらの一般式はそれぞれSiO_2、$(Na,Ca)Al(Si,Al)Si_2O_8$、及び$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$である。シリカ、ナトリウム、カリウム及びカルシウムが1200日後の熱水で５倍、硫酸イオンが８倍にも増加していることから、溶脱は明らかに起こり、それらは時間と共に増加していることが確認された。

表-2 水質分析結果

項　目	単位	水道水	800日	1200日	計量方法
ナトリウム	mg/l	8.73	29.1	44.8	JIS K0102.48.1
カリウム	mg/l	1.28	3.68	6.78	JIS K0102.49.1
カルシウム	mg/l	16.2	24.5	95.1	JIS K0102.50.2
マグネシウム	mg/l	5.70	5.26	0.18	JIS K0102.51.2
塩素イオン	mg/l	21	47	76	JIS K0102.32.2
硫酸イオン	mg/l	2.1	5.0	17.5	JIS K0102.41.1
重炭酸イオン	mg/l	64.9	20.8	113	鉱泉分析法
全シリカ	mg/l	42.7	54.0	115	JIS K0102.44.3

（５）Ｘ線分析、走査・透過電子顕微鏡分析結果

図-4にＸ線分析結果のチャートを示す。これによると熱水への溶脱量が多いのに対して、養生期間によるＸ線チャートの変化はほとんど見られな

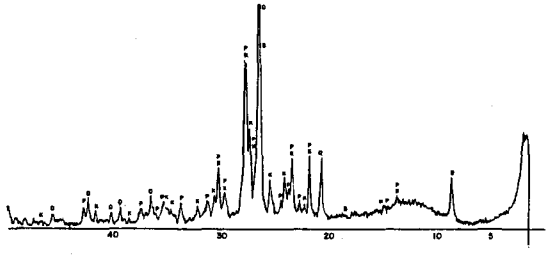


図-4　Ｘ線回折チャート

かった。溶脱の対象と考えられる斜長石に対して走査電顕（ＳＥＭ）及び透過電顕（ＴＥＭ）の分析を行った。養生期間0日と1030日のＳＥＭ映像（写真-2,3）を見ると0日では斜長石の表面は非常に滑らかで特別な変化も見られないが、1200日後では明瞭なマイクロクラックと粘土鉱物の初期状態と推定される生成物が認められた。これを更に透過電顕（ＴＥＭ）で分析すると結晶度の低いチューブ状、針状のハロイサイトが認められ（写真-4）、熱水変質の影響が予想される。

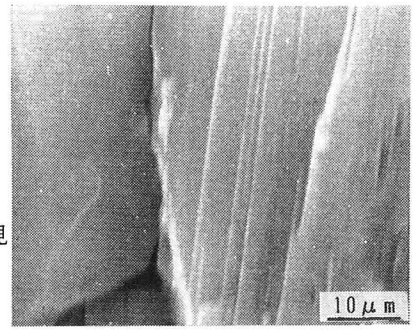


写真-2 0日養生のＳＥＭ映像

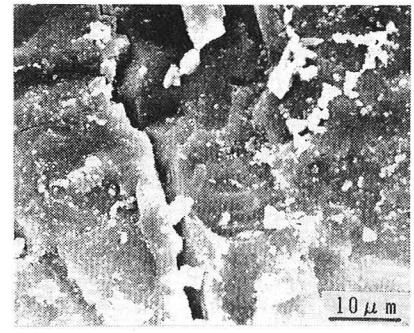
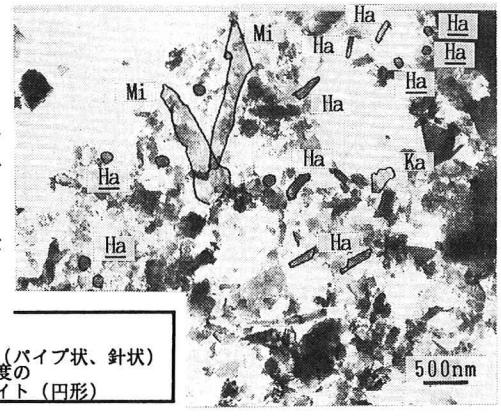


写真-3 1030日養生のＳＥＭ映像



凡例
Ka：カオリナイト
Mi：雲母粘土鉱物
Ha：ハロイサイト（パイプ状、針状）
Ha：初期的な結晶度の低いハロイサイト（円形）

写真-4 1030日養生のＴＥＭ映像

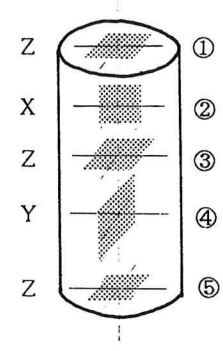


図-5 薄片作成断面

（６）マイクロクラック観察結果

マイクロクラック観察用の薄片を図-5に示すような３方向、５試料作成した。①、③、⑤は供試体端部と内部でのマイクロクラックの分布の違いを調べるために、②及び④はＸ面及びＹ面での分布の違いを調べるためのものである。写真-5及び図-6にその一例として1030日養生の顕微鏡写真及びクラックトレース図を示す。クラックの発生は主に石英と他の鉱物との境界において起こり、内部に進展し、更に横断する形で進行しており、その傾向は一部斜長石にもみられる。クラックの発生量や方向をクラックテンソルを用いて表した結果を図に併記したが、それらには供試体中の薄片を作成した位置及び方向に関する依存性がみられず、ほぼ等方的であるといえる。

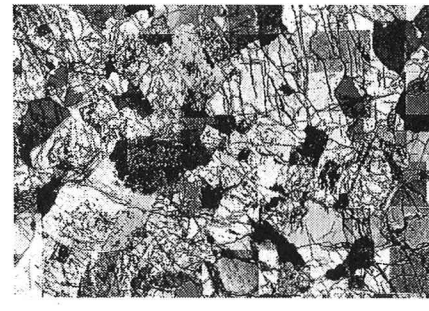


写真-5 1030日養生の顕微鏡写真

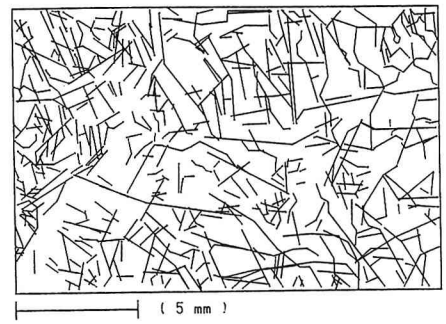


図-6 クラックトレース

（７）高温雰囲気下での実験結果との比較

高温雰囲気下での実験は加熱炉において100℃で最長400日まで、300℃で 80日まで行っている。詳細は文献1)を参照されたい。

1030 days	F_{11} F_{12} F_{21} F_{22}	F_0
X面	1.26 0.31 0.31 1.42	2.68
Y面	1.67 -0.13 -0.13 2.11	3.78
Z面	2.40 -0.20 -0.20 2.75	5.15

弾性波速度の変化率及び透水係数の変化率をそれぞれ図-7及び図-8に示す。弾性波速度の変化は熱水中でも高温雰囲気下でもほぼ同じ傾向を示すが、透水性については400日程度までは熱水養生の方が低下が大きくなっている。これは吸水によるマイクロクラックの拡大が原因であると考えられる。また、クラックの発生及び進展が両者共主に石英において起こり、更にX線分析結果とあわせて考えると1000日程度の期間では熱水の存在下での各物性の劣化は化学的な要因によるよりも力学的な要因、即ち、各鉱物の熱膨張率の差が原因となるクラックの進展によるものであることが示唆される。

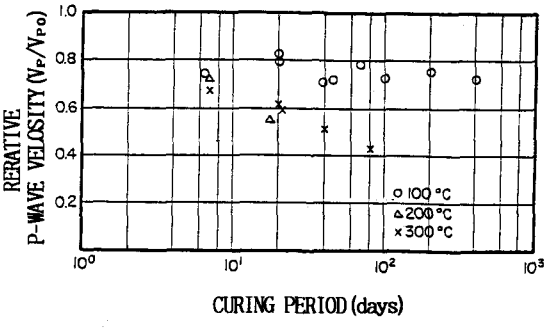


図-7　弾性波速度の変化率と加熱時間の関係

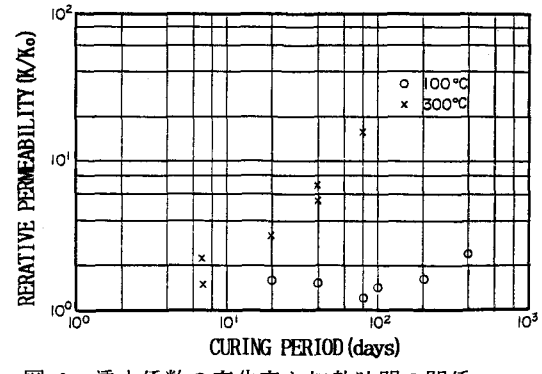


図-8　透水係数の変化率と加熱時間の関係

4．結論

結論を述べる前に今回の試験の適用限界に付いてまとめておかねばならない。即ち

- 実際の処分場付近の岩盤は拘束状態にあるが、今回の試験での養生条件は非拘束状態である。
- 地下深部の地下水は還元状態にある等、化学的な活性度が用いた水道水とは異なる。
- 養生槽内で熱水には対流等の流れが存在するが、それは局所的なものであり、岩盤中の大きな水の移動とは異なる。

等の条件の違いはあるが結論として以下の点が指摘される。

(1)1000日程度の熱水養生下では、X線回折からわかるように二次的鉱物や粘土鉱物に変質する様な変化は少ない。従って、物性の変化は主に力学的な要因により、溶脱は供試体の極表面において起こったものであると考えられる。

(2)石英は風化に対して非常に安定な鉱物であるが、熱膨張率は長石に比べて2倍以上ある。（石英：$34*10^{-6}$ 1/℃, 長石：$12\sim18*10^{-6}$ 1/℃）[2] この膨張率の差がクラック発生の大きな要因となっており、水の存在はクラック内への吸水によりクラック進展を助長する働きをする。これは短期的な実験[3]によっても確認されている。

(3)弾性波速度の変化には急激な変曲点が存在しないが、透水性は600日程度の養生により急激な透水性の増加が現れ、1030日養生で3～4オーダー増加し、$10^{-8}\sim10^{-5}$ cm/secの透水係数となる。

放射性廃棄物の地層処分における安全性の評価は、非常に長い時間スケールを考えている。それ故、種々の解析において周辺岩盤の物性を不変のもとして考えるには危険が伴う。限定された条件下での実験結果ではあるが、マイクロクラックの進展に伴う顕著な透水係数の増加、及び弾性波速度の時間にともなう漸減傾向が指摘された。今後、これらの結果を評価につなげていく必要がある。

【参考文献】

1)平間　邦興、丸山　誠、桑原　徹、鈴木健一郎、“花崗岩の熱履歴に伴う微視的構造と工学的性状の変化に関する実験的研究”大林組技術研究所報, No.34, p1～5, 1987

2)The Geological Society of America, Handbook of Physical Constants, The Geological Society of America, Inc., 1966

3)稲田　善紀、横田　公忠、時川　忠“熱水が岩石の強度および変形特性に及ぼす影響”土木学会論文集、第370号／III-5, 1986