

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT CENTER TOPICS

1999.12.NO.51

目次

国際科学技術センター(ISTC)プロジェクトの岩石物理化学特性研究について	
センターのうごき	

国際科学技術センター(ISTC)プロジェクトの 岩石物理化学特性研究について

はじめに

国際科学技術センター(International Science and Technology Center; ISTC)とは、旧ソ連邦諸国の大量破壊兵器等に関連のある科学者・技術者が平和的な活動に従事できる機会を与えることを主な目的として、1994年に設立された国際機関である。現在までに、日本、米国、EC、スウェーデン、フィンランド、ノルウェー及び韓国が参加しており、ロシア、カザフスタン、グルジア等の旧ソ連邦諸国の科学者・技術者が実施する約600のプロジェクトに約1億6,800万ドルの資金支援を行っている。

(財)原子力環境整備センターでは、これらの科学者・技術者が持つ高度な科学知識・技術を活用し、我が国の放射性廃棄物処分の技術開発に貢献するプロジェクトを選択し、研究を実施している。以下、ISTCプロジェクトNo.793として、実施した岩石物理化学特性研究の概要を報告する。このプロジェクトでは、ロシアで幅広く研究されてきた岩石特性に関する研究成果を整理すると

もに、一部の試験を追加し、データを補完した。これらの実験は、高温・高圧で行われたものが多いため、地震、熱水浸入現象などの地層処分における変動現象の影響を検討するうえで参考になると考えられる。

1. 衝撃減圧と地震振動が岩石の透過性に及ぼす影響

ロシアでは、深さ3,000m程度のボーリング孔を掘削し、この中に高レベル放射性廃棄物を処分する方法(超深孔処分)が有力なオプションとして研究されている。この処分方法の成立には、高温・高圧での岩石の挙動の究明が重要となる。ここでは、常温常圧から高温・高圧にいたる条件下で地震振動が岩石の透過性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

地震振動は、岩石中の間隙水圧の急激な変化(衝撃減圧)により、水圧破壊を発生させる可能性がある。また、地震振動によって発生する引っ張り応力が、岩石中の亀裂の引っ張り強度を超えた場

合には、局所的な水圧破壊が発生し、微細亀裂を伸展させ、岩石の間隙率と透過性を不可逆的に変化させる可能性がある。ここでは、実験的に、衝撃減圧による水圧破壊の可能性と様々な周波数・幅の地震振動が岩石試料の透過性に及ぼす影響を調査した。図-1 に、本研究に使用した実験装置の全体的な配置図を示す。

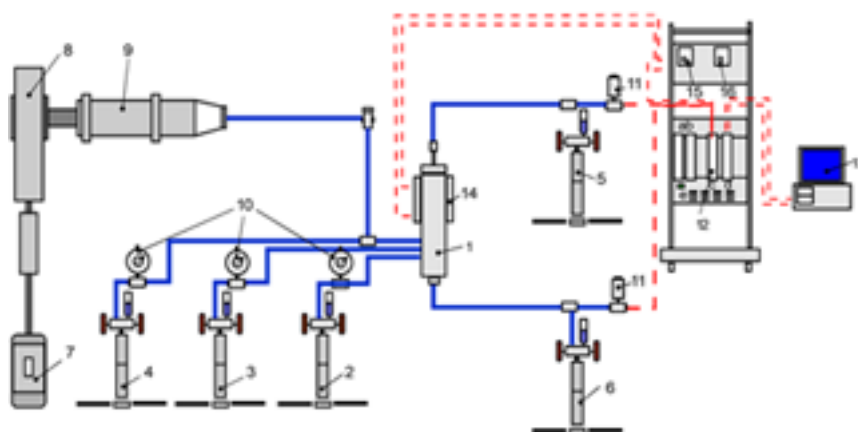
まず、衝撃減圧による単一的な効果を検討した。岩石試料（直径 10～14mm、高さ 20～50mm の標準シリンダー）を、必要な温度と流体（水）圧を生成する高压装置の中に入れ、所定の露出時間後、高压容器内の流体圧を即時($dP/dt=10\text{Kbar/s}$)放出し、衝撃減圧条件を模擬した。圧力放出後も、間隙内の流体は、不定常な間隙圧を示し、これが引っ張り応力を発生させ、岩石の破壊を起こす可能性がある。実験の条件と結果は、表-1 に示すとおりで、試験した試料の大部分は崩壊しなかったものの、高温（450～500）条件の玄武岩、石灰岩、チャーノッカイト（花崗岩の一種）及び片麻岩は崩壊した。崩壊した岩石も、温度 180 では、強度を保持していることから、加熱により高温に達すると、岩石の強度低下がもたらされ、破壊に至る可能性がある」と結論づけられた。

衝撃減圧などの単一効果以外に、地震波の伝播のような反復的に生じる周期的プロセスも発生する可能性がある。これらのプロセスは、間隙圧や水

効圧の著しい変化を引き起こすので、処分場周辺の岩盤の透過性を増加する可能性がある。

この試験では、Gutenberg-Richter の式に基づいて地震エネルギーを計算し、これに相当する軸圧と封圧の周期的振動変化（圧力振動振幅 $\pm 5\text{bar} \sim \pm 90\text{bar}$ ）を試料に与え、振動付与前後の透過性を調査した。試験で与えた振動エネルギーは、マグニチュード 2 で震央からの距離 0.087km 地点での地震エネルギー相当（マグニチュード 5 で距離 400km）からマグニチュード 2 で震央からの距離 1.3km 相当（マグニチュード 5 で距離 1,300km）の範囲であった。玄武岩、石灰岩、斑れい岩に対し、各種の条件で実験を行った。そのなかで、透過性が最も大きく増加したのは、玄武岩にマグニチュード 2 で距離 0.087km 相当の振動エネルギー（圧力振動振幅 $\pm 90\text{bar}$ ）を、250 で 15 分間与えたケースであった。その条件では、振動を与えた後の透過係数は、初期値の 3.7 倍となった。これ以外に 180 の玄武岩でも、透過係数は 2.5 倍に増加した。20 で行った試験では、いずれの条件でも、試験前後の透過性の変化は認められなかった。

以上の試験結果をまとめると以下のとおりとなる。「水-岩石」システムに対する地震振動作用による透過性の上昇は、振動の振幅が大きく、岩石基質への封圧が流体圧と岩石の引っ張り強さの合計よりも小さい場合に生じる。このような場合、水



- 1 高压容器；2～4 軸圧(σ_x 、 σ_y 、 σ_z)生成用スクリュー・プレス機；
- 5、6 流体圧生成用スクリュー・プレス機；7 モーター；8 レデューサ；
- 9 マイクロスクリュー・プレス機；10 ゲージ；11 変換器；12 記録装置；13 コンピュータ；
- 14 電気炉；15 温度制御器；16 プログラムされた温度制御器

図-1 岩石透過性に対する地震動の影響評価の実験設備配置図

表-1 圧力・温度パラメータと衝撃減圧実験の結果（流体圧低減率： $dp/dt \cong 10\text{Kbar/s}$ ）.

サンプル	圧力 (bar)	温度 ()	圧力・温度パラメータに対する露出時間 (時間)	試験結果
花崗岩 Z-32/82	400	300	1/4	-
花崗岩 Z-32/82	400	500	1/4	-
花崗岩 Z-32/82	1000	300	1/4	-
花崗岩 Z-32/82	1000	500	1/4	-
花崗閃緑岩-82066	1150	300	3	-
花崗閃緑岩-83056	950	500	22	-
花崗閃緑岩-N2625	2600	550	22	-
玄武岩 DSDP 5	500	180	1	-
玄武岩 DSDP 3	500	450	1	(+)
玄武岩 DSDP 2*	1000	20	1	-
玄武岩 DSDP 2*	1000	20	24	-
角閃岩 SD-3	1000	100	24	-
角閃岩 SD-3	2000	200	24	-
角閃岩 SD-3	3000	300	24	-
角閃岩 SD-3	2800	550	24	-
斑れい岩	500	180	1	-
斑れい岩	500	450	1	-
石灰岩 83086	1200	500	5	(+)
石灰岩 83068	1200	500	5	-
チャーノックイト L-31	500	180	1/4	-
チャーノックイト L-31	500	450	1/4	(+)
片麻岩 Sri Lanka	500	180	1/4	-
片麻岩 Sri Lanka	500	450	1/4	(+)

凡例： * アルゴン飽和 他は水飽和；(+) 試料は崩壊した.

圧破壊による微細亀裂が生じる。加熱下では高エネルギー流体（水）の粒間境界への浸透によってこの効果が強まり、その侵食へとつながる。岩石構造の不可逆的崩壊が起これば、地震動作用が収まった後でも、上昇した透過性は、不可逆的にその値にとどまると予想される。したがって、地層処分場周辺岩盤の温度が 200 以上になるような条件では、地震振動による岩石の破壊や透過性の増加を検討に加える必要があると考えられる。

2. 水が高温高压下で岩石の弾性特性に及ぼす影響

実験的及び理論的研究によって、水流体が深部の岩石の物理条件に著しい影響を及ぼし得ること、それにより岩石の構造変化を解釈できることが明

らかになっている。また、様々な実験で示されているように、岩石の構造変化は、その地球物理学特性に大きな影響を及ぼす。

ここでは高温高压下において水が岩石の弾性特性（P波速度： V_p ）に及ぼす影響を実験的に調査した結果を示す。この実験では、砂岩、角閃岩及び玄武岩が、堆積岩、変成岩及び火成岩の最も代表的な試料として用いられた。また、流体としては、水と、それとの比較のため窒素ガスが使用された。

実験は、内部加熱機構を備えた装置（図-2・図-3）を用いて行われ、パルス超音波音響法によって岩石内の弾性波速度が評価された。岩石試料と音響伝導体が、水を満たしたプラチナ炉内に置かれた。「乾式」試験では、気体（窒素ガス）が直接サンプルに注入された。装置内の総圧力は窒素

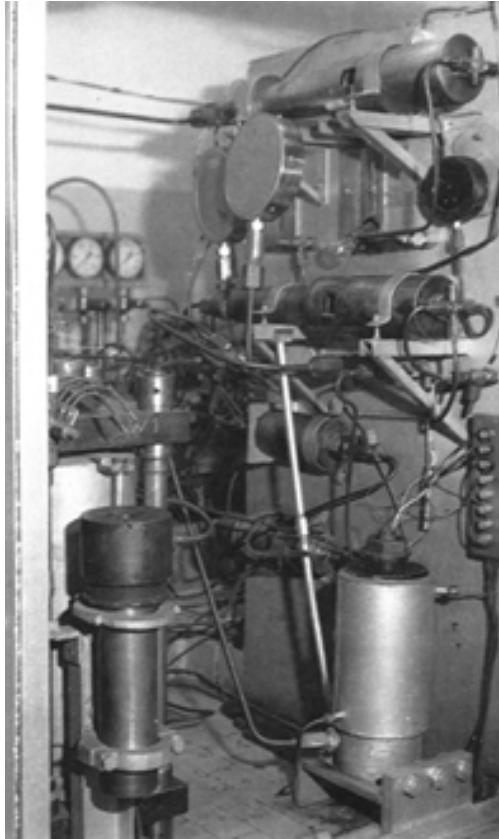
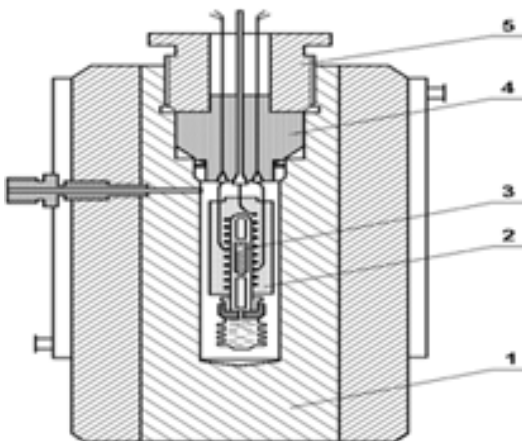


図-2 高温高圧実験装置



- 1 圧力容器、2 測定セル、3 サンプル、
4 装置の頭部、5 密封用ナット

図-3 内部加熱可能な加圧容器

によって作り出された。この実験の測定精度は、温度： ± 5 、圧力：1%、P波速度 (V_p) 及び S波速度 (V_s)：約 5% である。

岩石試料は、円筒形のコア(長さ 1.5cm、直径 0.8cm)で、組成と構造が均質なひとかたまりの岩石からなる。試料は水または窒素内で特定温度 (480、590、658、705 及び 808)まで加熱され、その温度で 3 時間にわたり所定圧に維持される。その後、急速に冷却 (焼き入れ) されて、硬化させられた後、弾性波速度測定、微細亀裂調査等が実施された。

水の存在を伴う実験の結果は、気体圧下で乾燥状態で得られた結果とは大きく異なっている。たとえば、水圧下の角閃岩は、2つの明確な最小 V_p 値を示す (図-4)。第1の弱い最小値は、温度 330 ~ 360 までの範囲で認められる。第2の深い最小値は温度 650 付近で認められる。この深い最小 V_p 値の特徴は、初期条件 (300MPa、20) に対する最小点において約 1.5km/s の差が見られることである。

岩石内の微細構造の開閉メカニズムを研究するため、水圧 300MPa、温度 200、300、350、480、590、658、705 及び 808 という条件で、一連の焼き入れ実験が行われた。焼き入れ試料の構造は、実験の後に光学顕微鏡と電子顕微鏡を使用して調査された。

角閃岩では、温度 650 以下の範囲では岩石内に目立った鉱物学的変質は見られなかった。弾性波速度が最低となる温度に近づくとき、岩石の微細亀裂は成長し、鉱物の薄層や裂け目が発生し、粒間空間が増大する。これより高温では、水が存在する場合は、粒子が成長し、微細亀裂は閉じる (図-5)。すなわち、弾性波速度の増加の開始は、微細亀裂の癒合 (再堆積した珪素物質の過剰な成長、そしてより高温下では、溶解物による亀裂の充填による) と関連している。

玄武岩では、温度が約 200、水圧が 300MPa という条件で、新たに形成された沸石が現れ、間隙や微細亀裂を充填するため、弾性波速度の増加が全域で生じる。温度が 350 を超えると、沸石鉱物は不安定になり、脱水プロセスの中で分解され、石英や長石などの鉱物が形成される。このため、密度が低く、間隙率と透過性の高い岩石が形成される。この結果、弾性波速度は急激に低下する。650 では、岩石が部分的に溶解するだけでなく、温度 250 ~ 300 で生成した新しい熱水鉱物が

成長することにより微細亀裂が閉塞し、より剛性のある岩石構造が出現し、弾性波速度が上昇する。

砂岩では、温度 150 ~ 400 で、アルカリ性流体が存在する場合には、弾性波速度の上昇が認められる。これは、砂岩中のカオリナイトの部分的な脱水と雲母の発生が原因と推定された。これらの反応は $K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ 系内の均衡状態とも関連している。

実験データをまとめると以下のようなになる。圧力が 300MPa で温度域 100 ~ 850 という条件において、様々な特性を備えた水を主成分とした流体が、水と岩石の相互作用によって、様々な岩石の

弾性波速度に著しい影響を及ぼす。圧力下での岩石内の弾性波速度に対する温度効果曲線の極点は、イオン交換に伴う交代変成反応、水和及び脱水反応、岩石の珪岩化、相変形(石英を含む岩石内の石英の - 転位)、そして岩石の溶解などの化学反応やプロセスが原因だと考えられる。これらのプロセスによって、岩石の微細亀裂と間隙空間が増大した場合は、通常、弾性波速度の低下を引き起こす。また、新しい熱水層状鉱物の出現に伴う微細亀裂の閉鎖と、より堅固な岩石構造の形成によって、弾性波速度の増加が生じる。このように、水が存在する高温高压条件では、造岩鉱物の地球

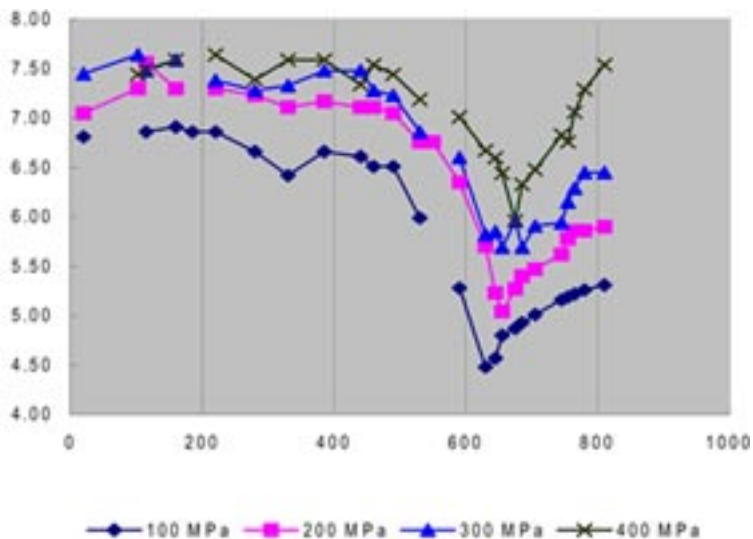


図-4 封圧下の角閃岩試験の結果

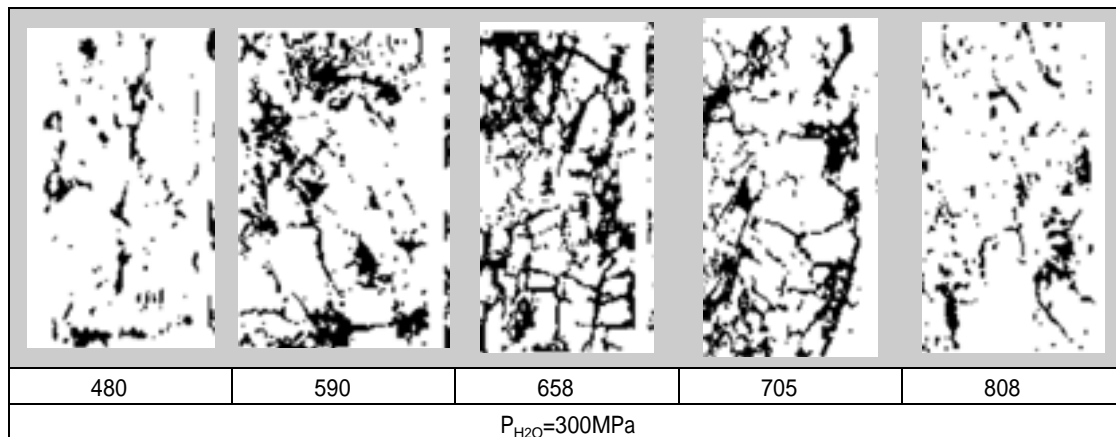


図-5 封圧 300MPa で様々な温度における試験後の角閃岩の構造変化

化学的な反応によって、岩石の弾性波速度の増加、すなわち、より堅固な岩石への変化も期待できることが分かった。

3. 三軸不均一応力が岩石の透過性に及ぼす影響

タートル地方の探鉱用ボーリングコアから選ばれた岩石試料を対象として、三軸不均一成分圧縮がその透過性に及ぼす影響の実験的検討を行った。

立方体状の供試体に対して、標準3方向に非同一応力を荷重し、かつ各応力段階での透過性の測定を行う試験では、特殊な試験装置（真の意味での三軸圧縮試験装置：図-6）が使用された。このために、一対の荷重プレートに孔があけられた。図-7に、荷重装置の原理図を示す。

供試体は、トンネル/坑井壁、切羽等で起こる応力状態の推移（すなわち原位置状態から、3つの主応力がすべて異なる最終状態までの応力の変動）の複雑な特性をシミュレーションする荷重プログラムの下で試験された。

図-8に基本荷重プログラムの一つを示す。原位置（点2）からトンネル/坑井表面（点3）を経て、当初の応力状態（点4）へ復帰するという、有効

応力の変化をおおむねモデル化したものである。

砂岩供試体に対する試験で得られた結果から、岩石の微細構造が、地下開口部や坑井（トンネル）近くでの岩石の透過性の変化メカニズムに大きく影響することがわかった。垂直坑井表面近くの応力状態をシミュレートしたケースでは、静水荷重も複合荷重（載荷、除荷）も透過性に大きな影響を与えなかった。しかし、水平坑井表面近くをシミュレートしたケースでは、静水荷重は、大きな影響を与えなかったものの、載荷経路においては透過性の著しい低下が観察された。一方、除荷経路においても透過性は低いままであった。測定結果から作成した応力 - ひずみ曲線から判断すると、この場合には不可逆的なひずみが発生していると推定された。

石灰岩供試体に対する2つの試験では、透過性の静水圧への何らかの依存は見出されなかった。複合荷重下では、透過性の変化は正反対の形で生じる可能性がある。実際にどう変化するかは、砂岩の場合のように、岩石の微細構造の特異性によって決定されるものと思われる。一つの例では透過性の急激な増加が認められた。これは、おそらく脆性微細亀裂形成に起因する。これとは反対に

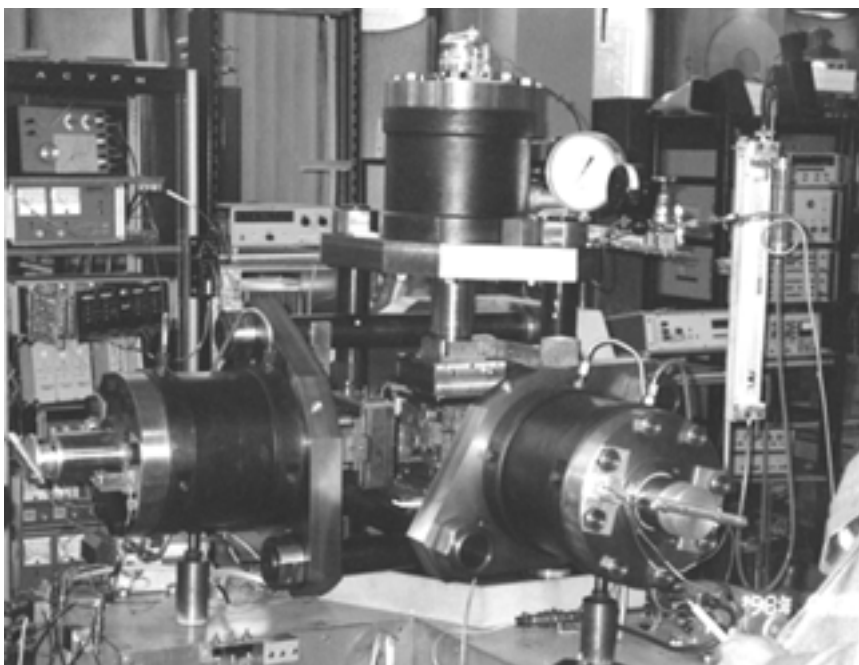


図-6 三軸不均一成分圧縮試験装置

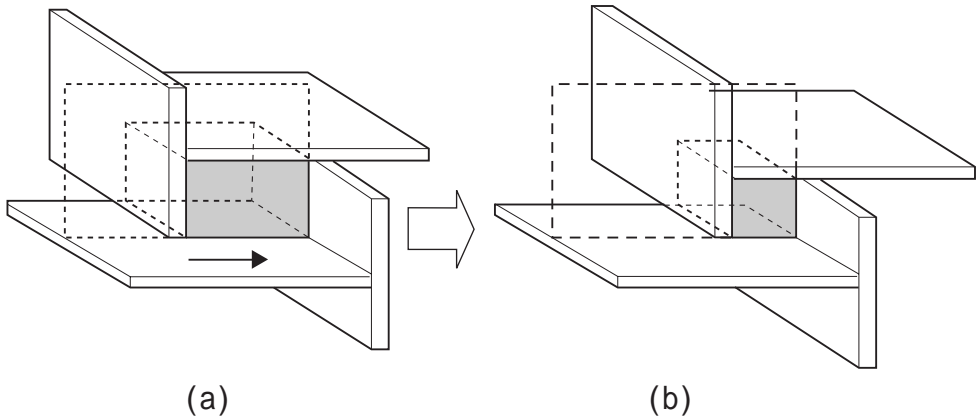


図-7 真の三軸圧縮試験装置で採用した基本原理図
(試験下での荷重プレートの位置変化：荷重プレートの初期位置(a)及び載荷後の位置(b))

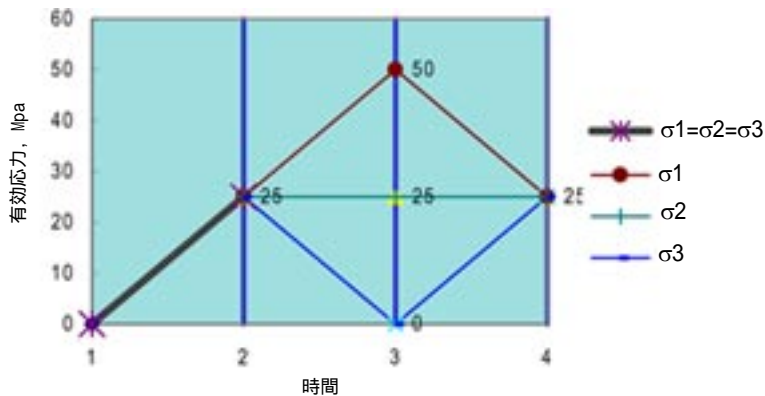


図-8 透過性測定対象の岩石試料の基本荷重プログラム例
(時間軸上の1,2,3,4は、下記の応力状態を模擬した時点)

透過性の劇的な減少プロセスが、粘土質石灰岩で観察されている。ここでは、粘土の存在により、塑性剪断流が発生することにより、流過経路の部分的な閉塞が生じるためと推定された。

透過性の変化モードの幅は、静水圧下よりも複合(非静水)荷重下の方が大きい。このことは、研究対象となった複合荷重経路では、高レベルの剪断断応力が発生し、それがさらに複雑な岩石変形モードにつながり、その結果として、岩石の透

過性の変化に影響するという事実と関連している。塑性変形の傾向のある岩石では、透過性の著しい低下が見られるが、一方、亀裂のある岩石では透過性の大きな(そしておそらく不可逆的)な増加を示すと思われる。したがって、不均一荷重条件の透過性への影響は、原位置での荷重を考慮し、岩石の特性を加味して評価していくことが必要であると考えられる。

(藤原 愛)

センターのうごき

研究発表会の開催

平成 11 年 11 月 8 日（月）に開催し、「クリアランスレベル区分マニュアルの作成」、「TRU 廃棄物処分の安全性」及び「スイス・グリムゼル試験場におけるガス移行挙動試験」の 3 テーマについて発表を行うとともに講演「リスク・コミュニケーション」を行いました。

平成 11 年度調査研究受託状況

平成 11 年 9 月 1 日以降、11 月末までの間で、次の受託契約が行われました。

委託者	調査研究課題	契約年月日
科学技術庁	・低レベル放射性廃棄物限定再利用技術開発	11. 9. 1
通商産業省	・地層処分サイト評価技術確証試験（2）	11.10.28
電力各社等	・ウラン廃棄物の処分方策に関する研究（フェーズ1）	11. 9.22
	・未固化廃棄物の合理的な放射能評価シナリオ設定に関する研究	11.11.30
	・施設概念・施設設計の再検討による浅地中処分施設の合理化研究	11.11.25
核燃料サイクル開発機構	・地層処分技術高度化の観点からの一般産業界における開発技術適用性の調査	11. 9.20

編集発行

財団法人 原子力環境整備センター

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目8番10号 第15森ビル

TEL 03-3504-1081（代表） FAX 03-3504-1297

<http://www.rwmc.or.jp/>