JAEA-Research 2012-008



超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究) 主立坑断層を対象とした水理学的調査

Study on Hydrogeology in the Mizunami Underground Research Laboratory Project Hydrogeological Investigation to Evaluate Hydraulic Characteristic of Main-shaft Fault

> 大丸 修二 尾上 博則 竹内 竜史 Shuji DAIMARU, Hironori ONOE and Ryuji TAKEUCHI

> > 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

↓ ▼ 日本原子力研究開発機構

June 2012

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究) 主立坑断層を対象とした水理学的調査

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット 大丸 修二*・尾上 博則・竹内 竜史

(2012年3月9日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学研究ユニットでは,「地層処分技術に関する 研究開発」のうち深地層の科学的研究(地層科学研究)の一環として,結晶質岩(花崗岩)を対 象とした超深地層研究所計画を進めている。現在は,第2段階および第3段階における調査研究 を進めている。第2段階における調査研究では,「研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環 境モデルの構築および研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」を段階目標の一つとし て調査研究を実施している。

その一環として,第1段階において構築した地質構造モデル,水理地質構造モデル及び地下水の地球化学概念モデルの妥当性の確認と更新を目的として,2010年度に瑞浪超深地層研究所の深度 300m研究アクセス坑道 100m計測横坑においてボーリング調査を実施した。

本報告書は、ボーリング調査のうち、主立坑沿いに確認されている断層(以下,主立坑断層) を対象とした水理学的調査(長期揚水試験及び単孔式水理試験)の結果を取りまとめたものであ る。

長期揚水試験の結果では,主立坑断層を境として水圧応答の傾向が大きく異なることが確認され,主立坑断層がその直交方向に対して低透水性であり,水理学的な境界を形成する地質構造で あることが確認された。

単孔式水理試験の結果では、地質学的調査によって確認された母岩の変質を伴う割れ目帯において、9.35E-7m/sから 3.80E-11m/s の透水係数を確認した。今回の結果から、母岩の変質を伴う割れ目帯は、透水係数が土岐花崗岩の上部割れ目帯の平均的な値である 1E-7m/s オーダーの区間と、それよりも4 オーダー程度低い主立坑断層近傍の区間に分類されることが分かった。

東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64 ※技術開発協力員 Study on Hydrogeology in the Mizunami Underground Research Laboratory Project Hydrogeological Investigation to Evaluate Hydraulic Characteristic of Main-shaft Fault

Shuji DAIMARU^{**}, Hironori ONOE and Ryuji TAKEUCHI

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency Akeyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received March 9, 2012)

Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is performing the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project, which is a scientific study of the deep geological environment as a basis of research and development for geological disposal of high level radioactive wastes (HLW), in order to establish comprehensive techniques for the investigation, analysis and assessment of the deep geological environment in fractured crystalline rock.

Currently, the project is under Phase II and Phase III. One of Phase II goals is set up to develop and revise models of the geological environment using the investigation results obtained during excavation, and to determine and assess changes in the geological environment in response to excavation.

As part of Phase II, the borehole investigation developing and revising model of geological, hydrogeological, and hydrochemical was conducted at 100m Measurement Niche in -300m Access/Research Gallery in 2010.

This document presents results of hydrogeological investigation (long-term pumping test and hydraulic test) in the two boreholes, 10MI22 and 10MI23, to understand hydrogeological features in and around a fault along the Main shaft of MIU, termed the Main-shaft fault.

As a result of long-term pumping test, completely different pressures due to the pumping test were observed in monitoring boreholes on opposite sides of the Main-shaft fault. This observation indicates that the normal direction of the Main-shaft fault is low permeable. And , the Main-shaft fault acts as a flow barrier normal to the fault plane.

As a result of hydraulic test, permeability of fracture zone with accompanying host rock zone was from 9.35E-7m/s to 3.80E-11m/s. And, fracture zone with accompanying host rock zone was classified as two sections, permeability of the section is same as the upper highly fractured domain (UHFD; average: 1.0E-7m/s) and the section of its permeability is 4 order lower than UHFD.

Keywords: Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, Main-shaft Fault, Test Specifications, Long-term Pumping Test, Hydraulic Test, Permeability

^{*}Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに
 2. 超深地層研究所計画の概要 ····································
3. 主立坑断層を対象とした水理学的調査の概要 7 3.1 目的 7 3.2 水理学的調査の計画 8 3.2.1 ボーリング孔の掘削レイアウト 8 3.2.2 長期揚水試験 9 3.2.3 単孔式水理試験 11 3.2.4 調査手法 14
 4. 長期揚水試験結果に基づく主立坑断層の水理特性の評価
5.単孔式水理試験結果に基づく主立坑断層の水理特性の評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
 6. まとめ

Contents

1. Introduction ······1
2. Overview of the Mizunami Underground Research Laboratory Project
2.2 Current status of the investigation in MIU project ······5
3. Outline of the hydrological investigations for the Main-shaft fault7
3.1 Aims of the hydrological investigations7
3.2 Plan of hydrological investigations8
3.2.1 The layout of borehole ······8
3.2.2 Plan of pumping test ······9
3.2.3 Plan of hydraulic test ······11
3.2.4 Method of hydrological investigations14
4. Evaluations of hydraulic characteristics for Main-shaft fault based on pumping test $\cdots 22$
4.1 Contents
4.2 Result of the pumping test ······25
4.2.1 Observed Data at pumping section25
4.2.2 Observed Data at monitoring well ······28
4.3 Hydrogeological concept based on the result of pumping test43
5. Evaluations of hydraulic characteristics for Main-shaft fault based on hydraulic test \cdots 45
5.1 Contents45
5.2 Result of the hydraulic test
5.3 Hydrogeological concept based on the result of hydraulic test
6. Summary
References ······63

1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下,原子力機構) 東濃地科学研究ユニットでは,「地 層処分技術に関する研究開発」のうち,深地層の科学的研究(地層科学研究)の一環として,結 晶質岩(花崗岩)を対象とした超深地層研究所計画を進めている¹⁾。超深地層研究所計画は岐阜 県瑞浪市において進められている結晶質岩(花崗岩)を対象とした研究計画である。瑞浪超深地 層研究所(以下,研究所)は主に2本の立坑(主立坑,換気立坑)とそれらを結ぶ深度100m 毎 の水平坑道(予備ステージ)ならびに深度300m,500m 及び1,000m で展開される水平坑道(深 度300m 研究アクセス坑道,中間ステージ及び最深ステージ)から構成される(図1-1)。

本計画では、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、空間スケールなどの違いを考慮し、計画全体を第1段階(地表からの調査予測研究段階),第2段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)及び第3段階(研究坑道を利用した研究段階)の3段階に区分して調査研究を進めている。

そのうち第2段階では、「研究坑道の掘削を伴う調査研究による地質環境モデルの構築及び研究坑道の掘削による深部地質環境の変化の把握」を段階目標の一つとして調査研究を進めており、 その一環として、2010年度に研究所の深度300m研究アクセス坑道100m計測横坑においてボ ーリング調査を実施した。

本ボーリング調査は、主立坑沿いに確認されている断層(以下、主立坑断層;図 1-2)を対象 とし、第2段階の段階目標のうち、第1段階において構築した地質構造モデル、水理地質構造モ デルおよび地下水の地球化学概念モデルの妥当性の確認と更新を目的として実施した。

主立坑断層は,孔間水理試験や研究坑道の掘削に伴う水圧の変化が主立坑断層を境として異なること,および研究坑道の掘削に伴う水質分布の変化が異なることから遮水性を有する断層であると推定されている 2.3^{3など}。

しかしながら、これまでの調査では、第2段階の目標である水理地質構造や地下水の地球化学 などの地質環境モデルの構築に必要な主立坑断層の透水異方性や断層周辺岩盤の透水性分布など の情報が取得されていない。そこで、主立坑断層および周辺岩盤の地質・地質構造の特徴と水理 特性及び地下水の水質分布を把握することを目的として本ボーリング調査を実施した。本ボーリ ング調査においては、水理学的調査として長期揚水試験及び単孔式水理試験を実施した。

本報告書は、本ボーリング調査における水理学的調査の実施内容及び結果を取りまとめたもの である。



図 1-1 瑞浪超深地層研究所の研究坑道のイメージ図



図 1-2 研究所用地の地質及び主立坑断層の分布

2. 超深地層研究所計画の概要

2.1 瑞浪超深地層研究所周辺の地形及び地質概要

研究所が位置する東濃地域は、北西部に美濃飛騨山地、南東部に三河山地が分布し、その間に 丘陵地が広がる北東-南西方向の軸をもった船底状の地形概観を示す。北部の山地には、木曽川 が流れ、先行性の河川として深い谷を刻んでいる。研究所の南には北東から南西に向かって土岐 川が流れ、その本流及び支流の沿岸には段丘が発達して台地を形成し、河川周辺の低地には沖積 層が分布する⁴。

研究所用地の周辺の地質は、白亜紀後期の花崗岩(土岐花崗岩)からなる基盤を、新第三紀中 新世の堆積岩(瑞浪層群)が不整合で覆い、さらにその上位に固結度の低い新第三紀鮮新世の砂 礫層(瀬戸層群)が不整合で覆う⁵⁾。瑞浪層群は、下位より、泥岩・砂岩・礫岩からなり亜炭を 挟む土岐夾炭累層、凝灰質の泥岩・砂岩を主体とする明世累層/本郷累層、シルト岩・砂岩を主体 とする生俵累層に区分される。土岐夾炭累層及び明世累層/本郷累層の下部には、それぞれ基底礫 岩が分布する。また、土岐花崗岩は、不整合面から約 100~500m 程度の厚さで分布する 30°以 下の低角度傾斜の割れ目が卓越する領域(上部割れ目帯; Upper Highly Fractured Domain,以 下, UHFD)と、その下位の比較的割れ目密度が低い領域(下部割れ目低密度帯; Lower Sparsely Fractured Domain,以下,LSFD)の2つに大きく区分されている。さらに、UHFD中には低 角度傾斜を有する割れ目の集中帯(低角度割れ目集中帯; Low Angle Fractured Zone,以下,LAFZ) が存在することが確認されている⁶。研究所用地の北側には、主要な断層として土岐花崗岩及び 瑞浪層群を変位させる月吉断層が分布する(図 2.1-1)。





2.2 超深地層研究所計画における調査研究の現状

超深地層研究所計画は 3 つの研究段階からなり,その第 1 段階は 2002 年度から 2005 年度ま で実施された。第 1 段階においては,繰り返しアプローチに基づき段階的な調査研究が実施され, それらの成果は,研究報告書として取りまとめられている ⁶。また,2003 年度に開始した第 2 段 階では研究坑道の掘削が進められ,2011 年 7 月には 2 本の立坑が深度 500m まで到達し,深度 400m の予備ステージ掘削が終了した。

第2段階においては第1段階と同様に,段階的に調査研究を進めながら,地質環境の調査技術 や評価手法などの信頼性や適用性などを確認していくこととしている。超深地層研究所計画では, 正馬様用地内,研究所用地内で地上から掘削したボーリング孔の,さらに,研究坑道近傍のボー リング孔(以下,水圧観測孔)に水圧モニタリング装置を設置し,地下水の水圧長期モニタリン グを実施している。研究所用地内及び周辺の水圧観測孔を図 2.2-1 に,研究坑道内のボーリング 孔位置を図 2.2-2 に示す。図 2.2-1 に示したボーリング孔のうち,MSB-3 号孔は傾斜孔,MIZ-1 号孔は掘削長約 250m までは鉛直,それ以深はコントロールボーリングで傾斜掘りされている。 その他のボーリング孔は鉛直孔である。なお,DH-2 号孔及び DH-15 号孔は広域地下水流動研究 ⁸における水圧モニタリング孔である。



12,500瑞浪市都市計画基本図(平成11年測量)に加筆 *1 点線は傾斜孔の孔跡の地表投影位置

図 2.2-1 研究所用地内及び研究所用地周辺におけるボーリング孔位置図



図 2.2-2 研究坑道内における主な調査位置(2011年度末時点)

3. 主立坑断層を対象とした水理学的調査の概要

3.1 目的

第1段階の調査研究における MIZ-1号孔を揚水孔とした孔間水理試験によって,主立坑断層 は研究所用地周辺の地下水流動を規制する低透水性の地質構造であることが確認された⁹。

また,第2段階の調査研究では,研究坑道の掘削に伴う研究所用地周辺の全水頭変化の長期モニタリングによって主立坑断層が断層に直交する方向に対して低透水性であることが確認された¹⁰⁾。

さらに、深度 300m 研究アクセス坑道(図 1-1)の掘削に伴う調査では、主立坑断層中心から 約 40m 程度の領域で割れ目沿いが淡緑色~暗緑色を呈する変質を伴い、緑泥石及び粘土を介在 する割れ目が卓越することが確認された¹¹⁾。主立坑から約 40m 程度の領域の外側では割れ目沿 いの変質はほとんど確認されず、主に方解石を介在する割れ目の割合が増加するとともに、坑道 掘削時に岩盤に注入したグラウト材を介在する割れ目が多数分布する¹¹⁾。これらの情報から、主 立坑断層から約 40m の範囲に分布する割れ目沿いに変質が認められる範囲は"母岩の変質を伴う 割れ目帯"として区分されている(図 3.1-1)。母岩の変質を伴う割れ目帯では多量の湧水が確認さ れていないことから、変質が岩盤の透水性に影響を与える可能性が指摘されている¹²⁾。

しかしながら、これまでの調査では第2段階の目標である水理地質構造や地下水の地球化学な どの地質環境モデルの構築に必要な主立坑断層の透水異方性や断層の周辺岩盤の透水性分布など の定量的な情報が取得されていない。

そこで、第2段階の調査研究の一環として、深度300m研究アクセス坑道から主立坑断層を対



図 3.1-1 深度 460mまでの調査結果に基づき構築した地質構造モデル¹³⁾ における 深度 300m の地質平面図

象としたボーリング調査(10MI22 号孔及び 10MI23 号孔)を実施することとした。本ボーリン グ調査における水理学的調査としては、サイトスケールの水理地質構造モデルの更新を目的とし て、主立坑断層の透水異方性の評価を含む水理地質構造の推定を実施することとした。具体的に は、主立坑断層両側の水圧応答データを取得するための長期揚水試験、主立坑断層及び主立坑断 層周辺の地質区分ごとの水理特性を取得するための単孔式水理試験を実施することとした。

3.2 水理学的調査の計画

3.2.1 ボーリング孔の掘削レイアウト

図 3.1-1 に示すように,深度 300m には土岐花崗岩の上部割れ目帯が分布しており ⁶,主要な 地質構造として,主立坑断層が確認されているほか, DH-2 号孔や 06MI02 号孔 ¹⁴)で確認され た断層(S200_13_2 断層, S200_06MI02_2 断層)及びこれらの断層に伴う割れ目帯の分布が推 定されている ^{14),15),16)}。

主立坑断層は深度 300m 付近においてはほぼ鉛直傾斜である ¹⁷⁰。主立坑断層では厚さ数 cm 程 度の断層ガウジを伴う断層面が多く確認されており,断層に沿って貫入岩が認められている。断 層とその近傍では,強い変質の影響によると推定される全体に白色を帯びた粘土状の岩盤(強変 質帯)が分布する。図 3.1-1 では,これらの断層ガウジと断層ガウジ間に分布する貫入岩,強変 質帯をまとめて主立坑断層として表示している。

水理学的調査は主立坑断層の両側(北東側および南西側)の試験を計画したが,主立坑断層が 脆弱な岩盤であることから,1本のボーリング孔で断層の両側において試験を行うことは困難と 考えられた。したがって,図 3.2-1に示すように,深度 300m 研究アクセス坑道先端部の 100m 計測横坑から主立坑断層に向けて水平方向に 10MI22 号孔,10MI23 号孔の2 孔を掘削し,それ ぞれのボーリング孔で地質学的調査,水理学的調査及び地下水の地球化学的調査を実施した¹⁸⁾。

各ボーリング孔の掘削長については、10MI22 号孔は主立坑断層南西側に分布が推定されている S200_13_2 断層までを調査対象とするため、この断層を抜く掘削長である 170m とした。 10MI23 号孔は主立坑断層北東側の領域を調査対象とすることから、主立坑断層のほぼ中心までの掘削長となる 90m とした。



*研究坑道の深度 460m までの調査結果に基づく地質構造モデルより作成した深度 300m の地質平面図 ¹⁸に加筆修正
 図 3. 2-1 10MI22 号孔及び 10MI23 号孔の掘削レイアウト

3.2.2 長期揚水試験

長期揚水試験における揚水区間の選定や揚水期間の設定などの計画策定にあたっては、事前に 長期揚水試験を模擬した非定常状態における3次元飽和地下水流動解析を実施し¹⁹⁾,水圧観測孔 (図 3.2-4) での水圧応答量および傾向を推定した。なお、地下水流動解析には GEOMASS (GEOLOGICAL MODELLING ANALYSIS AND SIMULATION SOFTWARE) システム²⁰⁾ を使用し、深度 300mまで掘削後の調査結果を反映した地質構造モデル²¹⁾に基づき構築した水理 地質構造モデル¹⁹⁾を使用した。図 3.2-2 に地下水流動解析に使用された水理地質構造モデルにお いてモデル化の対象とされた断層を示す。



12500瑞浪市都市計画基本図(平成11年測量)に加筆 青線:モデル化対象断層

図 3.2-2 地下水流動解析に使用した水理地質構造モデルでモデル化の対象とした断層¹⁹⁾

地下水流動解析の結果,主立坑断層両側の非変質帯を揚水区間とし,揚水量を30L/minとした揚 水試験を実施することにより,主立坑断層を境として異なる水圧応答のデータ取得および地球潮 汐の変動幅(約 20cm)以上の明瞭な水圧応答データの取得が可能であることが分かったため, 長期揚水試験の揚水区間は,地下水流動解析結果と図 3.1-1 に示す地質の分布予測に基づきそれ ぞれのボーリング孔で30L/min以上の湧水が見込める1区間を設定した(表 3.2-1,図 3.2-3)。 また,地下水流動解析における揚水期間に着目した感度解析の結果¹⁹⁾,揚水期間(2週間および 4週間)の違いが水圧観測孔での水圧応答に与える影響は小さいことが確認されたため,長期揚 水試験の揚水期間は2週間,水圧回復期間を2週間と計画した。

揚水量については、水圧観測孔で明瞭な水圧応答データを取得するために、ボーリング孔掘削 に伴う湧水量上限値の目安となる約 500L/min の範囲内で可能な限り大きくすることとした。

揚水試験に伴う研究所用地内及び周辺の水圧観測は図 3.2-4 に示す水圧観測孔で観測すること とした。

ボーリング孔	掘削深度(mabh)	地質区分
10MI22号孔	109.50 ~ 146.00	主立坑断層南西側に分布する非変質帯
10MI23号孔	4.00~37.50	主立坑断層北東側に分布する非変質帯

表 3.2-1 長期揚水試験の揚水区間の深度及び地質区分(計画時)



図 3.2-3 長期揚水試験の揚水区間位置(青丸で表示)¹⁸⁾



図 3.2-4 長期揚水試験の揚水区間と水圧観測孔の配置

3.2.3 単孔式水理試験

各ボーリング孔における単孔式水理試験の試験区間としては、図 3.2-3 に示す地質の分布に基づき、10MI22 号孔では主立坑断層南西側を、10MI23 号孔では主立坑断層北東側を調査の対象として、それぞれ 3 区間を設定した(表 3.2-2、図 3.2-3 の赤丸)。

試験対象として設定した図 3.2-3 に示す地質構造が確認されなかった場合には,予備試験区間 で単孔式水理試験を実施する計画とした。予備試験区間として,10MI22 号孔では主立坑断層南 西側の花崗岩の非変質帯を,10MI23 号孔では主立坑断層北東側の花崗岩の非変質帯を試験区間 に設定した。なお,母岩の変質を伴う割れ目帯の外側にある上部割れ目帯(図 3.2-3 中の青丸) については,長期揚水試験にて水理特性を評価することとした。

測定区間はコア観察による割れ目(帯)分布,変質の特徴とその分布,孔内検層,BTV 観察の 結果に基づいて設定する計画とした。

調査計画柱状図における長期揚水試験及び単孔式水理試験の実施予定深度を,図 3.2-5,図 3.2-6 にそれぞれ示す。

ボーリング孔	掘削深度(mabh)	地質区分		
10,0022 문 7	82.70 ~ 109.50	主立坑断層沿いの母岩の変質を伴う割れ目帯		
	146.00~158.00	サイトスケールの地質構造モデルに考慮されている断層 (DH2FZ03断層)		
	158.00~170.00	DH2FZ03断層南西側に分布する非変質帯		
	109.50 ~ 146.00	主立坑断層南西側に分布する非変質帯(予備試験区間)		
	80.50~90.00	主立坑断層		
	46.70 ~ 80.50	主立坑断層沿いの母岩の変質を伴う割れ目帯		
10MI23号孔	37.50 ~ 46.70	サイトスケールの地質構造モデルに考慮されている断層 (S200_06MI02_2断層)		
	4.00~37.50	主立坑断層北東側に分布する非変質帯(予備試験区間)		

表3.3-2 単孔式水理試験の実施予定深度及び地質区分(計画時)

mabh:meter along borehole



10M	10MI23 号孔調査計画柱状図															
(hdi	地質・地	也質構造		ボーリング掘削			ボーリング掘削 地質調査		査	水理 / 地球化学調査						
(ma			公子	ケーシ	ィングプロ	ログラム			Ú		掘削御	受	掘削中		掘削後	
深度	岩相	地質 柱状図	也質口	1	屈削径 [n	nm] 如汉\(mm)	「ア径 mm]	間小	チン	観察	回真	魚層 / 観察	長期揚水	単孔	式水理詞	試験
福創				-9-92 t	ジバ住(ット1至)[IIIIII] ング		転	4×	А П	РП	₹ BTV	地下水採水	地	下水採フ	rk
0 _	\bigtriangledown		\searrow	-	193.7mm									PW: /	ペルス記	、験
	4.00	+ + +	4.00	4] 6" SUS	→ 4.00mabh	4.00		00	4.00	4.00	4.00	4.00	RWS:	定流量即	試験
		+ + +		/ 外	径:165.2 径:151.0	mm			4					後 WS:北	の回復 也下水挧	試験 『水
10-		+ + +		チン												
		+ + +		メン												
		+ + + +	±۵	+									S,WS			
20-		+ + +	遊										RW			
-		+ + +	非										RW			
		+ + +														
		+ + +														
30-		+ + +														
=		· + · + + + ·														
-	37.50-	+ +	37.50										37.50	37.50		
40-		[]]]	00WI 1005		HQ 98.4mm											
			200				61.10									
	46.70-	<i>[][]]</i>	26 70											46.70	46.70	
50-		+ + +	10.70											SM		
		+ + +						清水						WS,		
=		+ + +												RW,R		
		+ + +	11-14C											PW,F	S,WS	
60-	岩	+ + +	質目												,RWS	
=	花尚	+ + +	も見る												',RW	
=	土	+ + +	母伴												PW	~
70-		+ +														S,WS
		+ + +														V,RW
		+ + +														W,RV
80-	80.50-	+ + +	80.50													云 80.50
			御												80.50	
			立坑													
	90.00	1///	т Н			90.00mabh	90.00	90.00		↓	↓	↓				
90-			90.00							90.00	90.00	90.00]			90.00
100																
<u>100</u> - mabh:n	neter alo	ong bore	hole			100100				- 10 -	18)					
_	-	-		図じ	ა. ა−4	1011123	亏扎調	宜計	凹石	いてじ	<u>ี</u> 100/					

3.2.4 調査手法

(1) 長期揚水試験及び単孔式水理試験で使用する装置

長期揚水試験及び単孔式水理試験では、ダブルパッカーシステム及びボーリング孔の口元を閉 鎖する口元パッカーを有する水理試験装置を使用した(図 3.2-7)。本水理試験装置は、日本原子 力研究開発機構が所有する「深度 1000m 対応揚水試験機²²⁾」を、地下坑道内での湧水環境下に おける試験を念頭に改良¹⁴⁾したものである。水理試験装置の孔内部仕様を表 3.2-3 に、孔外部仕 様を表 3.2-4 に示す。

本水理試験装置は、圧力計、気圧計、流量計などの電気・通信系機器を孔外に配置し、孔内装 置はパッカー、ロッド及びストレーナのみの単純な構成としたものである。孔内装置を単純な構 成にすることにより挿入時及び回収時における孔内装置の取扱いが容易となり、かつ漏水などに よる電気的なトラブルを避けることができる。水理試験装置のパッカー編成は、試験区間をダブ ルパッカーで形成し、試験区間の上部区間における湧水を止めるためのロ元パッカーを追加した トリプルパッカー編成とした。ボーリング孔の孔底部を含む区間で試験を行う場合は、試験区間 をシングルパッカーで形成し、ロ元パッカーを含めたダブルパッカー編成とした。揚水試験時に はロッドロ元(残尺部)に電磁流量計を取り付け、試験区間からの揚水量を測定する。試験区間 の開閉はメインバルブによって制御し、試験区間からの揚水量はグローブバルブの開度によって 制御する。

長期揚水試験,単孔式水理試験では,各区間の圧力,湧水量を連続的に測定することで,区間 の透水係数等を算定・評価する。なお,閉鎖区間の圧力漏えい等の監視とデータの品質管理のた め,各パッカー圧力の連続測定を実施する。



図 3.2-7 水理試験装置概念図

分類	装	置(丸数字は図3.2-7に対応)	主要部品 数量など	仕様	
	1	パッカーユニット	3台(下部用、上部用、口元用)	スライド式 最大拡張圧5MPa, 適用孔径 Ø 100~140mm	
② 孔内部 ③	ストレーナ(試験区間用)	定尺0.5m,1m,2m,3m(ステンレス製)	穴あきパイプ,外形 042.7mm		
	ロッド(中継用)	定尺1m,2m,2.5m,3m ステンレス製	外形φ42.7mm 内径φ35.8mm 連結部外径φ49.0mm		
	圧カライン(パッカー圧用)	設置深度に応じて調整	ナイロン製 6×4mm 最高使用圧力5.0MPa		
	圧カライン(区間圧用)	設置深度に応じて調整	ナイロン製 6×4mm 最高使用圧力3.0MPa		

表 3.2-3 水理試験装置の構成・仕様(孔内部)

表 3.2-4 水理試験装置の構成・仕様(孔外部)

分類	装	置(丸数字は図3.2-7に対応)	主要部品 数量など	仕様
	4	電磁流量計	2台	MAX:290L/min, 精度:0.1%FS MAX:30L/min, 精度:0.1%FS
	メインバルブ		1台	ボールバルブ 高耐圧仕様
	9	グローブバルブ	2台	流量調整用(1-1/2"、1/2")
孔外部 ⑥		水晶振動式絶対圧計2台	MAX:13.8MPa 精度:0.01%FS	
	圧カ計ボックス	ひずみゲージ圧力計4台	MAX:10MPa 精度:0.1%FS	
			気圧計1台	0~1034hPa,精度0.05%FS
	\bigcirc	パッカー拡張用タンク	3台(パッカー1台につきタンク1台)	パッカー拡張用 容量10L
	8	データ表示・収録コンピュータ	パソコン(PC)、表示器、バッテリー	HOST-PC(サンプリング間隔1sec)、 Graph-PC

(2)試験方法

湧水環境下である坑道内から掘削した水平ボーリング孔で実施できる単孔式水理試験は,パル ス試験,定流量揚水試験及び定圧揚水試験である。

単孔式水理試験における揚水試験では、水理試験装置の構造上、バルブ操作による定流量制御の方が定圧力制御よりも安定した精度を保て、かつ操作が容易であることから、定流量揚水試験 を選択した。図 3.2-8 に基本的な試験手順フローを示す。

パルス試験は低透水性区間に適用する試験手法であるが、今回は概算の透水性の把握と地下水 中の溶存ガスの遊離状況を把握するための圧縮率の算定を目的として、湧水量に関わらず全区間 で実施した。また、パルス試験後の定流量揚水試験は、区間湧水量が 2L/min 以上の場合に実施 することとした。

単孔式水理試験中は、原位置にて圧力の時間変化とそのデリバティブプロットを用いた実測データをリアルタイムで確認することにより²³、解析の前提となる放射状の均質な流れ(Infinite acting radial flow: IARF),井戸貯留の影響,及び境界条件の影響の有無を判断することで品質の向上に努めた。

以下にパルス試験及び定流量試験の概要を示す。



①パルス試験 (PW:<u>Pu</u>lse <u>W</u>ithdrawal)

パルス試験は、メインバルブを閉鎖して閉鎖区間を形成し、瞬時にメインバルブの開閉を行う ことにより区間の間隙水圧に対して差圧を生じさせ、その後の水圧変化を水圧計で測定する方法 である(図 3.2-9)。パルス試験は、試験に伴う水の移動量が少なく水圧収束が早いため、透水性 の低い箇所での試験に適している。



図 3.2-9 パルス試験概要

②定流量揚水試験(RW:Constant <u>R</u>ate Withdrawal) 及び定流量揚水試験後の回復試験 (RWS:Pressure Recovery after Constant Rate Withdrawal(shut-in))

定流量揚水試験は、一定の揚水量で試験区間の地下水を汲み上げ、このときの試験区間の水位 変化を水圧計で測定する方法である(図 3.2-10)。

回復試験は,定流量揚水試験終了後,メインバルブを閉鎖し,閉鎖系での圧力回復を水圧計で 測定する方法である。

定流量揚水試験は試験区間の湧水量が 2L/min 以上の場合に実施した。本試験では、事前に調整したグローブバルブの開度を一定のままメインバルブを開放し、試験を開始した。試験の終了はデリバティブプロットにより判断した。



図 3.2-10 定流量揚水試験概要

(3) 解析方法

単孔式水理試験結果に基づく水理特性の算出は理論式による解析を基本とし、パルス試験は Hvorslev 法²⁴⁾ または Cooper 法²⁵⁾、定流量試験は Jacob-Cooper 法²⁶⁾、定流量揚水試験後の圧 力回復試験は Agarwal 法²⁷⁾による解析を行った。

①Hvorslevの解析式²⁴⁾

解析式は、以下のとおりである。

$$k = \frac{(2Rw)^2 \cdot Ln(mL/r)}{8L(t_2 - t_1)} Ln(h_1/h_2)$$

ここで, k : 透水係数 (m/s)

Rw: ピエゾメーターの管内半径(m)

r : ボーリング孔の半径 (m)

- m:縦横方向の透水係数比(通常は1)
- L :試験区間長 (m)
- *t* : 経過時間 (s)
- h :経過時間に対応する水頭差(m)

*t*₁, *t*₂及び *h*₁, *h*₂は, *t*Log *h*曲線から読み取る。

②Cooper 等の解析式²⁵⁾

地盤の貯留係数が大きく,t-Logh曲線の直線性が損なわれる場合は,定常式であるHvorslevの解析式では対応ができなくなることから非定常式であるCooperの解析式を用いた。

以下に Cooper 等による解析法について述べる。

a)標準曲線を準備する(図 3.2-11)。

b)実測した水位変化のデータを標準曲線と同じスケールで Log t - h/hoのグラフにプロットする。 c)標準曲線と Log t - h/ho 曲線とを平衡移動させてマッチングポイントを決め、 α 、 β o及び toの 値を決定する。

d)得られた α , β_0 及び to の値を用いて, Cooper 等の解析式により透水係数と比貯留係数を算出 する。

Cooper 等の解析式は、以下のとおりである。

$$k = \frac{Rw^2 \beta_0}{t_0 \cdot L}$$

$$Ss = \frac{\alpha}{(r/Rw)^2 \cdot L}$$

ここで, k: 透水係数 (m/s)

Rw: ピエゾメーターの管内半径(m)
r:ボーリング孔の半径(m)
L:試験区間長(m)
Ss:比貯留係数(m⁻¹)
to:時間(s)
α :貯留係数によって変化する係数[=S·(r/Rw)²]
β₀:透水係数によって変化する係数[=T·to/Rw²]

ただし,S:貯留係数[=Ss·L] T:透水量係数[=k·L]

PW の場合, ピエゾメーターの管内半径 **Rw** は, 仮想半径 **R** とする。 仮想半径 **R** の計算式は以下のとおりである。

ここで, R: 仮想半径(m) Vw: 閉鎖区間内の水の体積(m³) Ew: 水の変形係数(=2.3×1011gf/m²) α:パッカーの弾性係数(m⁵/gf) ΔP: 単位圧力(=10000 gf/m²) ΔH: 単位水頭(=0.01m)

閉鎖区間内の水の体積は、孔内部ユニットのメインバルブ以深の内部配管容積と、遮水パッカ

ーで区切られる試錐孔の内容積の和である。

パッカーの弾性係数 α は、室内試験で孔内部の遮水パッカーのキャリブレーションを行って求 める。遮水パッカーのキャリブレーションは、閉鎖した圧力チャンバー内でパッカーを拡張させ、 閉鎖したチャンバー内に水を加えることにより増加するパッカーの圧力(初期圧との差圧)と加 えた水の量を測定する。また、逆にチャンバーから水を抜いた場合の変化も測定する。 弾性係数 α は、以下のように、このキャリブレーションの勾配で示される。

 $\alpha = Q/\Delta P$

- ここで、 α :弾性係数 (m³/gf/m²=m⁵/gf)
- Q:段階的に変化させた水量(m³)

ΔP:パッカーの差圧 (gf/m²)



図 3.2-11 Cooper の標準曲線

③
 定流量揚水試験の解析方法

定流量揚水試験の解析は,2次元放射状流れを前提とした Jacob の解析法¹⁸⁾を主に用いた。以下に,解析方法を示す。

- a) 片対数グラフの対数目盛りに 経過時間 t を,算術目盛りに初期水位からの水位低下量 s をとり, Log t-s 曲線を作成する。
- b) Log t s 曲線に近似する直線を引き,直線の 1log サイクル間における水位差Δs を求め, 透水量係数 T を算出する。
- c) 解析に使用するデータ領域は,圧力変化の時間微分(デリバティブ)プロットの放射状浸 透流の領域とする(図 3.2-12)。
- d) Log t s 曲線の直線部分の延長が s = 0 と交わる点 to を求め、貯留係数 S を算出する(図 3.2-13)。

解析式は、以下のとおりである。

$$T = \frac{0.183 \ q}{\Delta s}$$
$$S = \frac{2.25 \ T}{r^2} \cdot t_0$$

ここに, T:透水量係数 (m²/s)

S:貯留係数

s:水位低下量(m) Δs:Logtのllogサイクル間における水位低下量(m) r:ボーリング孔半径(m) q:平均揚水量(m³/s) to:s=0における経過時間t(s)



図 3.2-12 圧力変化とその時間微分(デリバティブ)プロット





④定流量揚水試験後の回復試験の解析手順

回復過程における解析は, Agarwal の解析法²⁷⁾(図 3.2-14)を用いる。以下に, 解析手順を示 す。

- ・ 片対数グラフの対数目盛りに Agarwal の等価時間 ($tp \times \Delta t / (tp + \Delta t)$) を, 算術目盛りに 水位回復量 Sr をとり, Log ($tp \times \Delta t / (tp + \Delta t)$) -Sr 曲線を作成する。
- Log (tp×Δt/(tp+Δt)) -Sr 曲線に近似する直線を引き,直線の 1log サイクル間における 水位差ΔSr を求め,透水量係数 T を算出する。
- ・ 解析は圧力変化のデリバティブプロットにおける放射状浸透流の領域とする。この際デリ バティブプロットの時間軸 t は、($tp \times \Delta t / (tp + \Delta t)$)とする。
- ・ Log (tp× Δ t /(tp + Δ t)) -Sr 曲線の直線部分の延長が, Sr = 0 と交わる点(tp× Δ t /(tp + Δ t)) を求め, 貯留係数Sを算出する。

解析式は、以下のとおりである。

$$S = \frac{2.25T}{r^2} \cdot (t_p \times \Delta t / (t_p + \Delta t))_0$$

S:貯留係数

s:水位低下量(m)

 $\Delta Sr: Log(tp \times \Delta t / (tp + \Delta t)) の 1 サイクル間における水位降下量(m)$

- r:ボーリング孔半径 (m)
- q:平均揚水量 (m³/s)

 $(tp \times \Delta t / (tp + \Delta t)_0 : s=0 における(tp \times \Delta t / (tp + \Delta t))(s)$



図 3.2-14 定流量試験後の回復試験における Agarwal の解析方法

4. 長期揚水試験結果に基づく主立坑断層の水理特性の評価

4.1 試験の実績

表 4.1-1 に長期揚水試験の計画数量と実績数量を示す。

調査項目		10MI22号孔	10MI23号孔	
長期揚水試験	計画	109.50~146.00mabh 1点	4.00~37.50mabh 1点	
	実績	6.20~59.00mabh 1点	主立坑断層北東側の試験は10MI22号孔 で実施のため, 10MI23号孔では中止	

表 4.1-1 調査計画と実績

主立坑断層南西側を揚水区間とする長期揚水試験は、3 章に示した当初計画では 10MI22 号孔の 109.50~146.00mabhに分布する主立坑断層南西側の非変質帯を揚水区間として設定していたが、10MI22 号孔の約 102mabh 以深の孔壁崩壊によって試験区間を確保できなかったため実施できなかった¹⁸⁾。

また,主立坑断層北東側を揚水区間とする長期揚水試験は,当初計画では10MI23 号孔の4.00 ~37.50mabh に分布する主立坑断層北東側の非変質帯を揚水区間として設定していたが,下記の理由により10MI22 号孔の 6.2~59.0mabh の区間を揚水区間とした長期揚水試験を実施することとした。

- ・10MI22 号孔での湧水の発生に伴い,同孔における主立坑断層までのケーシングの固定にあ たっては,フルホールセメンチングを実施することとなったため,10MI23 号孔における長 期揚水試験区間の透水性割れ目の目詰まりが懸念された。
- ・10MI22 号孔の 0~100mabh までの掘削中に研究所用地内及びその周辺の水圧観測孔において水圧応答が確認されたことから、長期揚水試験が成立すると判断した。

主立坑断層北東側における長期揚水試験の工程は、当初計画では揚水期間を2週間,回復期間 を2週間としていたが、下記の理由により揚水期間を3日間程度に短縮し、残りの期間を回復期 間とした。

- ・既往の調査(MIZ-1号孔の揚水試験)²⁸⁾から,水位回復に必要な期間は揚水期間と同等の期間が必要と想定された。このことから,約 10mabh における湧水発生時(140L/min)から 周辺孔の水圧低下が生じており,湧水発生から長期揚水試験の着手までに3週間以上経過し ていたため,初期状態への水圧回復に3週間以上が必要と想定された。
- ・全調査項目を当初予定のボーリング調査工期内に完了させるためには、長期揚水試験の工程 を当初の予定(4週間)から延長することはできない。
- ・掘削期間中の湧水量は概ね 200L/min で安定していたため, 湧水発生後の掘削期間を 200L/min 程度の湧水を伴う揚水期間とみなせると判断した。

図 4.1-1 に孔内検層結果及び最終的に選定した長期揚水試験区間を,図 4.1-2 に掘削期間中に 孔口で測定したボーリング孔内からの湧水量を示す。なお,約 75mabh 以深では孔内保孔のため のセメンチングを実施したことから,電磁フローメーター検層は実施していない。

今回の試験では、掘削中に確認された 200L/min 以上の揚水量を確保するとともに、長期揚水 試験に伴う水圧低下がボーリング孔を介して主立坑断層南西側へ伝播することを防ぐ必要があっ た。したがって、試験区間の下端深度は、パッカーが挿入可能な最大深度に設定することとした。 10MI22 号孔における湧水箇所は主に 10mabh 付近及び 27mabh 付近に存在し、最も大きな湧水 箇所は 10mabh 付近であった。また,孔径検層の結果から,孔径は 68mabh 付近まで直径 124 ~126mm でほぼ一様であり孔壁状態は良好であるが,68mabh 付近以深では孔径変化が大きく,パッカー設置が困難であった。以上のことから,主立坑断層の北東側における長期揚水試験は 6.20~59.00mabh の区間を揚水区間として実施した。

なお,パッカー設置位置については,パッカーバイパスの原因となりうる割れ目の有無をコア 観察及び BTV 観察結果から確認するとともに,パッカー破損の原因となり得る孔径拡大箇所の 有無を孔径検層結果から確認し,パッカーバイパスやパッカー破損が生じないと考えられる箇所 を選定した。





図 4.1-2 10MI22 号孔の掘削中に孔口で測定したボーリング孔からの湧水量¹⁸⁾

図 4.1-3 に実際の長期揚水試験で用いた装置構成を示す。湧水環境下での水理試験における水 圧測定区間は、試験区間に対してダブルパッカーで上下を仕切り、孔口湧水を遮水するためのロ 元パッカーを設置したトリプルパッカー編成とする場合、試験対象区間(P2)、試験対象区間の 下部区間(P1)及び試験対象区間の上部区間(P3)の計3区間となるのが通常である(図 3.2-7 参照)。しかし、主立坑断層北東側の長期揚水試験における孔内装置構成については、上部パッカ ーの設置深度である 6.20mabh 以浅での湧水は確認されなかったため、ロ元パッカーの設置を省 略したダブルパッカー編成として P3 区間は設けなかった(図 4.1-3 参照)。

長期揚水試験では,前述した当初計画からの変更経緯よりパルス試験は省略した。なお,揚水 試験は掘削期間中の湧水量が概ね一定値であったことから定流量試験とした。

通常の揚水試験では、原位置にて圧力の時間変化とその時間微分プロットをリアルタイムで確認することにより、解析の前提となる放射状の均質な流れ(Infinite acting radial flow: IARF)、 井戸貯留の影響及び境界条件の影響の有無を判断して揚水試験の水理特性を算定し、試験終了と する²³⁾。しかし、今回の試験では、水理地質構造モデルのキャリブレーションに資するための水 圧応答データの取得が優先であったため、水圧観測孔での水圧応答データの取得状況から試験終 了を判断した。

また,10MI22 号孔における水圧回復過程で測定した揚水区間の水圧データから,長期揚水試 験区間の透水係数及び透水量係数を算出した。さらに,60mabh以深の平均的な透水性を把握す るために,長期揚水試験の装置編成を利用(図 4.1-3 の P1 区間)して,単孔式水理試験手法の 一つであるパルス試験を実施し,透水係数及び透水量係数を算出した。



図 4.1-3 長期揚水試験の装置構成

なお、主立坑断層北東側を揚水区間とした長期揚水試験は当初計画では 10MI23 号孔で実施す る予定であった。しかし、10MI22 号孔でのケーシング固定のためのフルホールセメンチングに よって、10MI23 号孔の長期揚水試験区間に連結すると予想された透水性割れ目の目詰まりが懸 念されたため、10MI23 号孔での試験は中止した。

4.2 試験結果

4.2.1 揚水孔で取得したデータ

図 4.2-1 に 10MI22 号孔で実施した長期揚水試験時の圧力変化を示す。図 4.2-1 中の赤線が揚水区間に相当する圧力変化曲線である。揚水区間の湧水量は、バルブを全開とした状態で約 240L/min であった。揚水区間での湧水量を測定した後、2010 年 9 月 9 日 14 時に長期揚水試験 における水圧回復試験へ移行した。試験区間の間隙水圧の平衡状態は、図 4.2-2 に示す時間微分 プロット(以下,デリバティブプロット)から確認した。なお、10MI22 号孔における揚水区間 の間隙水圧は 2.12MPa であった。

定流量揚水試験後の圧力回復試験のデータを用いた,理論式に基づく長期揚水試験の解析の結果,揚水区間の透水量係数は3.46E-3m²/s,透水係数は6.56E-5m/s であった。また,長期揚水試験終了後に実施したパルス試験の結果,60.0~100.0mabhの透水量係数は3.92E-7m²/s,透水係数は9.81E-9m/s であった。なお,この区間の湧水量は2.14L/min であった。

図 4.2-3 に 10MI22 号孔のコア観察結果, 孔内検層結果及び長期揚水試験によって算出した透水量係数,透水係数,区間湧水量,間隙水圧を示す。



図 4.2-1 長期揚水試験圧力変化図(10MI22 号孔)



図 4.2-2 揚水孔(10MI22 号孔)における水圧変化のデリバティブプロット



mabh:<u>m</u>eter <u>a</u>long <u>b</u>ore<u>h</u>ole

図 4.2-3 10MI22 号孔での物理検層結果及び水理特性¹⁸⁾

4.2.2 水圧観測孔で取得したデータ

(1)水圧観測孔の位置

図 4.2-4 に,10MI22 号孔で実施した長期揚水試験の揚水区間と各水圧観測孔の位置関係を示 す。また,表 4.2-1 に各水圧観測孔における水圧観測区間の地質及び区間深度を示す。



図 4.2-4 長期揚水試験の揚水区間と水圧観測孔の位置関係

孔名	地質	観測区間番号	区間深度(E.L.m)
	明世累層および本郷累層	1	186.7~136.8
	明世累層および本郷累層(基底礫岩)	2	135.9~121.5
MSB-1	土岐夾炭累層	3	120.6~76.8
	土岐夾炭累層(基底礫岩)	4	75.9~58.0
	土岐花崗岩	5	57.1 ~ 52.1
	明世累層および本郷累層	1	190.2~137.7
MSB-3	明世累層および本郷累層(基底礫岩)	2	136.9~123.9
	主立坑断層	3	123.1~117.0
	土岐夾炭累層	4	116.2~73.1
	土岐夾炭累層(基底礫岩)	5	72.2~38.6
	土岐花崗岩	6-7	37.7~17.6
DH-2	土岐花崗岩	1,5,9,12	20.7 ~ -307.5
	土岐夾炭累層	1	49.2 ~ -8.3
DH-13	土岐花崗岩	2-10	-10.8~ -796.8
MIZ-1	土岐花崗岩	1-10	90.06~ -1069.5
05ME06	土岐花崗岩(変質部)	1-11	18.5~ -102.9
07MI08	土岐花崗岩	1-7	-15.2~ -29.0
07MI09	土岐花崗岩	1-5	-3.6~ -124.3

ダキム - 古小江航別11-031 の小江航別区间の地員及び区 障
--

(2) 水圧観測データの補正

各水圧観測孔での間隙水圧モニタリングによる計測値には大気圧による水圧変動だけでなく, 地球潮汐や計測機器の分解能に起因するノイズ成分(地球潮汐成分,気圧成分,イレギュラー成 分)が含まれているため,揚水試験に同期した明瞭な水圧応答を抽出するために,それらのノイ ズ成分の除去を行うことが必要である²⁹⁾。そこで分離解析プログラムである BAYTAP-G³⁰⁾を使 用してノイズ成分を抽出し,表 4.2-1 に示す水圧観測区間において得られた計測値に含まれるノ イズ成分の除去を行った。図 4.2-5 に DH-2 号孔の観測区間 5 におけるノイズ成分除去例を示す。 ノイズ成分を除去した結果,同観測区間での揚水試験に同期した水圧の変化量は最大で 4kPa 程 度(水頭換算で約 0.4cm)であると評価できた。





図 4.2-5 BAYTAP-G³⁰⁾ によるノイズ成分の除去例

また、研究所における主立坑及び換気立坑では 740m³/day の湧水が確認されており、長期水圧 観測孔での間隙水圧モニタリングによる計測値には研究坑道への湧水に起因するバックグラウン ド成分が含まれている。本研究では、研究坑道の掘削が行われていない期間の水圧低下量は研究 坑道への湧水に起因するものとみなし、この期間の水圧の低下傾向を直線で近似し、その直線近 似式を用いて、計測値からバックグラウンド成分を除去した。各水圧観測孔における観測区間ご との直線近似式を表 4.2-2 に示す。図 4.2-6 に MSB-1 号孔の観測区間 5 の計測値からバックグラ ウンド成分を除去した例を示す。バックグラウンド成分を除去した結果、同観測区間での揚水試 験に同期した水圧の変化量は最大で 34kPa 程度(水頭換算で約 3.5m)であることが確認できた。 各観測孔の水圧観測データから立坑への湧水の影響を除去した上で長期揚水試験の応答の有無を 判断した。



図 4.2-6 立坑への湧水影響の除去例

ボーリング孔	観測区間	近似式*	備考
	観測区間1	Y=0.0000X	
	観測区間2	Y=-0.0025X	
MSB-1	観測区間3	Y=0.0033X	
	観測区間4	Y=-0.0128X	
	観測区間5	Y=-0.0132X	
MSB-3	観測区間 ¹ ~7	補正無し	水圧低下量が1mm/dayのため、研究坑道の湧水に伴う水 圧変動は無しと判断
	観測区間1	Y=-0.0155X	
MIZ-1	観測区間2	Y=-0.0127X	
	観測区間3	Y=-0.0132X	
DH-2	観測区間1~12	Y=0.0000X	データの欠側に加え,水圧観測装置のメンテナン スの影響があり,水圧変動傾向の判断が困難
	観測区間1	Y=-0.0125X	
	観測区間2	Y=-0.0124X	
	観測区間3	Y=-0.0123X	
	観測区間4	Y=-0.0125X	
DH 15	観測区間5	Y=-0.0124X	
DIFIS	観測区間6	Y=-0.0124X	
	観測区間7	Y=-0.0124X	
	観測区間8	Y=-0.0118X	
	観測区間9	Y=-0.0124X	
	観測区間10	Y=-0.0121X	
05ME06	観測区間1~11	Y=0.0000X	水圧観測装置のメンテナンスの影響があり,変動 傾向の判断が困難
	観測区間1	Y=-0.0050X	
	観測区間2	Y=-0.0010X	
	観測区間3	Y=-0.0143X	
07MI08	観測区間4	Y=-0.0030X	
	観測区間5	Y=-0.0021X	
	観測区間6	Y=-0.0068X	
	観測区間7	Y=-0.0112X	
	観測区間1	Y=0.00750X	
07MI09	観測区間2	Y=0.00640X	
0710109	観測区間3	Y=0.0066X	
	観測区間4	Y=-0.01030X	

表 4.2-2 バックグラウンド成分の補正に用いた近似式

* Y:水位変動量(m) X:時間(日)

(3)長期揚水試験に伴う水圧応答の観測結果

水圧観測孔での観測の結果,主立坑断層北東側の揚水に対して,同断層北東側と南西側で異なる水圧応答が得られた。図 4.2-7 から図 4.2-21 に主立坑断層北東側及び南西側の水圧観測孔における水圧応答を示す。

花崗岩部では、主立坑断層北東側では長期揚水試験に伴う水位の低下及び回復を確認できたものの、低下した水位は初期水位まで回復しない傾向が認められる。また、主立坑断層南西側では水位の低下を確認できたものの、同断層北東側に比べてその低下量は少なく、さらに水位回復は認められない。これらの主立坑断層を境とした水圧応答の違いは、既往の水圧観測結果 9,10)と整合している。

以下に地質ごとに分類した各観測区間の水圧応答の傾向を示す。

1) 主立坑断層北東側における花崗岩部の水圧応答

主立坑断層北東側の花崗岩に位置する観測区間(MSB-1 号孔の観測区間 No.5, MIZ-1 号孔の 観測区間 No.1~No.3, 07MI08 号孔, DH-15 号孔の観測区間 No.2~No.9) では, 揚水の開始
に伴う明瞭な水位低下が確認され,また回復期間への移行に伴って,水位回復が生じていること がわかる。揚水期間においては,直線的に地下水圧が低下し,回復期間では試験開始前の地下水 位にまで回復していない。

2) 主立坑断層北東側における堆積岩部の水圧応答

堆積岩部に観測区間を有する MSB-1 号孔においては、観測区間ごとに異なる水圧応答が認め られる。明世/本郷累層に位置する観測区間 No.1 では、揚水試験に伴う明瞭な水圧応答は観測さ れなかった。明世/本郷累層の基底礫岩に位置する観測区間 No.2 では、揚水に伴うと考えられる 水位低下を観測したものの、明瞭な水位回復は認められない。土岐夾炭累層、その基底礫岩に位 置する観測区間 No.3 及び観測区間 No.4 では、揚水試験に伴う明瞭な水圧応答を観測したものの、 土岐夾炭累層の観測区間 No.3 の水位低下量は、それ以深の観測区間 No.4 の半分程度であった。

また,堆積岩部に観測区間を有する MSB-3 号孔においては,明世/本郷累層に位置する観測区間 No.1 及び No.2 では,揚水試験に伴う明瞭な水圧応答は観測されなかった。

3) 主立坑断層南西側における花崗岩部の水圧応答

主立坑断層南西側の花崗岩に位置する観測区間(MSB-1号孔の観測区間 No.5, MSB-3号孔の 観測区間 No.6~No.7, DH-2号孔の観測区間 No.1, No.5, No.9, No.12, 07MI09 号孔)では, 揚水の開始に伴う水位低下は確認されるものの,その低下量は北東側の 1/20 程度と小さい。また, 回復期間に移行した後も,水位の低下は継続し,明瞭な水位回復は認められない傾向がある。

4) 主立坑断層南西側における堆積岩部の水圧応答

堆積岩部に観測区間を有する MSB-3 号孔においては、観測区間ごとに異なる水圧応答が認め られる。土岐夾炭累層に位置する観測区間 No.4 では、揚水試験に伴う明瞭な水位の低下、回復 を観測している。その水圧応答量は、より深部にあり揚水区間に近い花崗岩中の観測区間 No.5 の3倍程度である。土岐夾炭累層基底礫岩に位置する観測区間 No.5 では、花崗岩中に位置する 観測区間 No.6 及び No.7 と同程度の水位低下が生じている。この区間では、回復試験への移行に 伴う水位回復は認められなかった。



図 4.2-7 MSB-1 号孔における水圧応答



図 4.2-8 MSB-3 号孔における水圧応答(観測区間No.1~No.5)



図 4.2-9 MSB-3 号孔における水圧応答(観測区間No.6~No.7)



図 4.2-10 DH-2 号孔における水圧応答(観測区間No.1, No.5, No.9)







図 4.2-12 DH-15 号孔における水圧応答(観測区間No.1~No.3, No.5)



図 4.2-14 MIZ-1 号孔における水圧応答(観測区間No.1~No.3)



図 4.2-15 07MI08 号孔における水圧応答(観測区間No.1~No.4)









図 4.2-19 05ME06 号孔における水圧応答(観測区間No.1~No.4)





5) 地質及び水圧応答量による観測区間の分類

長期揚水試験に伴う水圧観測区間での水圧応答量を観測区間の地質ごとに分類した結果を図 4.2-22 に示す。

具体的には、各水圧観測孔の掘削時に確認された地質ごとに観測区間を分類した。水圧低下量 については、0.5mを基準として、0.5m以下(凡例:水圧応答不明瞭)、0.5m以上で分類した。

水圧回復量については、0.5m以上の水圧低下を確認した観測区間を、回復試験に伴う水圧回 復の有無で分類した(水圧回復が認められない区間の凡例:水圧低下のみ確認)。0.5m以上の水 圧回復が確認された観測区間は、3mを基準として分類した。同図から各水圧観測孔における水 圧応答は主立坑断層を境として異なっていることがわかる。

6)距離と最大水圧応答量

土岐花崗岩の水圧観測区間について,揚水区間からの距離と最大水位低下量の関係を図 4.2-23 に示す。主立坑断層北東側の水圧観測区間においては水圧が最も低下したのは回復試験への移行 直前であった。また,主立坑断層北東側の水圧観測孔の最大水圧低下量は,揚水区間からの距離 が大きく異なるもののほぼ同程度であった。



図 4.2-22 長期揚水試験に伴う水圧観測区間での水圧応答量



図 4.2-23 揚水区間からの距離と各水圧観測孔における最大水位低下量

4.3 長期揚水試験結果に基づく主立坑断層を含む研究所用地周辺の水理地質構造の推定

図 4.2-22 に示す主立坑断層の北東側及び南西側で観測された揚水試験の水圧応答の違いに基づき,研究所用地内及び周辺の水理地質構造の推定を行った。その推定結果を概念図として図 4.3-1 に示す。

主立坑断層を境として水圧応答の傾向が大きく異なることから,主立坑断層がその直交方向に 対して低透水性であり,水理境界を形成する水理地質構造であることが確認された。これは,既 往の調査研究成果と整合している³¹⁾。

図 4.2-23 に示すように,主立坑断層北東側においては揚水区間からの距離が大きく異なる土岐 花崗岩中の観測区間での水圧応答がほぼ同等程度であった。この結果により,試験対象領域の土 岐花崗岩は透水性割れ目などにより水理学的な連続性が高い可能性が示唆された。これは既往の 調査研究成果と整合している³²⁾。

また,主立坑断層北東側の全ての観測区間において,揚水中に伴い低下した水位は本試験中の 回復期間(20日程度)には揚水開始前の初期水位まで回復しなかった。これは揚水試験中の揚水 量が周辺からの地下水流入量よりも大きいことが要因として考えられる。前述の花崗岩中の水理 的な連続性の高さを考えると,このことは,揚水試験が周辺からの地下水流入が制限されたある 限られた領域で実施された可能性を示唆している。すなわち,主立坑断層北東側に位置する水圧 観測孔は主立抗断層をはじめとして断層などの低透水性の水理地質構造によって囲まれた領域 (以下,コンパートメント領域)内に位置すると考えられる。さらに,主立坑断層南西側の領域 について,主立坑断層南西側で唯一明瞭な水位の低下及び回復が見られた MSB-3 号孔の観測区 間 No.4 でも主立坑断層北東側と同様に初期水位の回復が遅い。このことから,主立坑断層南西 側においても低透水性の断層などによってコンパートメント領域が形成されている可能性が考え られる。これは今回の揚水試験によって得られた研究所用地周辺の地下水流動に関する新たな知 見である。

揚水試験に伴う水圧応答が明瞭に確認された主立坑断層北東側においても, MSB-1 号孔の観測 区間 No.1, MSB-3 号孔の観測区間 No.1 では明瞭な水圧応答が見られなかった。この深度には泥 岩があることから,これが水理境界として機能しているものと考えられる。これは,既往の調査 研究成果とも整合している⁶。

主立坑断層南西側では,MSB-3 号孔の観測区間 No.4 においてのみ揚水試験に伴う明瞭な水圧 応答が確認された。この観測区間は透水性の高い土岐夾炭累層に位置していることから,堆積岩 中において主要な水みちとして機能しているものの堆積岩深部においては主立抗断層が地下深部 の土岐花崗岩で見られるほど水理境界として機能していない可能性も示唆される。また,MSB-1 号孔の観測区間 No.2 と No.3 の水圧応答の違い及び,MSB-3 号孔の観測区間 No.4 と No.5 の違 いからは、土岐夾炭累層の水平方向の透水性は鉛直方向の透水性と比較して高く、透水異方性を 有している可能性が考えられる。

これらの結果に基づく研究所用地周辺のコンパートメント領域の概念図を図 4.3-2 に示す。図 4.3-2 には,既往の地質調査によって確認及び推定されている断層のうち,コンパートメント領域を形成していると考えられる断層を示した。

JAEA-Research 2012-008



図 4.3-1 長期揚水試験結果に基づく水理地質構造概念



*2) 点線は傾斜孔の孔跡の地表投影位置

図 4.3-2 研究所用地周辺のコンパートメント領域(模式図)

5. 単孔式水理試験結果に基づく主立坑断層の水理特性の評価

5.1 試験の実績

表 5.1-1 に単孔式水理試験(以下,水理試験)の計画数量と実績数量を示す。

表 5.1-1 調査計画と実績

調査項目		10MI22号孔	10MI23号孔		
	計画	試験点数:3点	試験点数:3点		
単孔式水理試験	実績	主立坑断層南西側の試験は, 試験区間 を確保できなかったため, 中止	試験点数:9点		

主立坑断層南西側での水理試験の当初計画では,

- ・82.70~146.00mabh:主立坑断層沿いの母岩の変質を伴う割れ目帯
- ・146.00~158.00mabh: サイトスケールの地質構造モデルに考慮されている断層(DH2FZ03 断層)
- ・158.00~170.00mabh: DH2FZ03 断層南西側に分布する花崗岩の非変質帯

を試験区間として設定したが、10MI22 号孔の約 102mabh 以深の孔壁崩壊によって試験区間を 確保できなかったため実施できなかった。

また, 主立坑断層北東側での水理試験の当初計画では,

- ・80.50~90.00mabh:主立坑断層
- ・46.70~80.50mabh:主立坑断層沿いの母岩の変質を伴う割れ目帯
- ・37.50~46.70mabh: サイトスケールの地質構造モデルに考慮されている断層 (S200_06MI02_2断層)

を試験区間として設定した。しかし、以下に示す10MI22号孔のボーリング調査で取得した地質 学的情報を踏まえて、水理試験数を9区間に変更した¹⁸⁾。

- ・主立坑断層の北東側に分布すると想定されていた S200_06MI02_2 断層(図 3.1-1) が分布しないことが確認された。
- ・10MI22 号孔及び 10MI23 号孔のコア観察及び BTV 観察の結果、母岩の変質を伴う割れ目帯において変質の範囲がコア全体に及ぶ区間と割れ目沿いのみの区間に大別されること、及び変質が割れ目沿いのみの区間には割れ目密度の高い区間と割れ目密度の低い区間が繰り返し分布することが確認された。
- ・10MI22 号孔で主立坑断層の両側に確認された変質がコア全体に及ぶ区間を 10MI23 号孔の 107.75mabh~109.70mabh において確認した。

これらを考慮し、10MI23 号孔の水理試験は、割れ目密度の高い区間及び割れ目周辺の母岩の 変質の有無と透水性との相関を評価するためのデータ、及び母岩の変質を伴う割れ目帯のうち、 変質がコア全体に及ぶ区間の透水性データの取得を目的として実施した。

試験区間は、電磁フローメーター検層結果,掘削時の孔口湧水量測定結果,変質及び割れ目密 度分布を考慮して選定した。さらに、各試験区間のパッカー設置位置は、長期揚水試験と同様に、 パッカーバイパスとなる割れ目の有無をコア観察や BTV 観察結果及び孔径検層結果から確認す るとともに、パッカー破損の原因となり得る孔径拡大箇所の有無を孔径検層結果から確認し、パ ッカーバイパスやパッカー破損が生じないと考えられる箇所を選定した。なお、隣接する 10MI22 号孔のグラウト工法を用いたケーシングセメンチングの影響が懸念される 20mabh 以浅は、試験 の対象外とした。

図 5.1-1 に孔内検層結果と割れ目密度を示すとともに、選定した試験区間を図中右端に示す。 No.1 は変質がコア全体に及ぶ区間, No.2, No.4, No.5, No.7, No.9 は変質が割れ目沿いのみの 区間のうち,割れ目密度の高い区間, No.3, No.6, No.8 は割れ目密度の低い区間に該当する。 このうち,高透水性が予想される透水性割れ目を含む試験区間は、掘削時の孔口湧水量や電磁フ ローメーター検層の結果より, No.4, No.6, No.7 が該当する。表 5.1-1 に単孔式水理試験の区間 の概要を,表 5.1-2 に各水理試験区間で実施した試験シーケンスを示す。また,10MI22 号孔及 び 10MI23 号孔で実施したコア観察及び BTV 観察に基づく総合柱状図を図 5.1-2,図 5.1-3 に示 す。



図 5.1-1 孔内検層結果と割れ目密度分布に基づく水理試験区間の設定(10MI23 号孔)¹⁸⁾

試験区間	試験深度 (mabh)	区間長 (m)	パッカー 構成	選定理由
No. 1	106.80 ~ 109.70	2.9	Single	変質がコア全体に及ぶ区間を対象
No.2	95.30 ~ 106.60	11.3	Double	割れ目密度の高い区間を対象
No.3	75.00 ~ 95.30	20.3	Double	割れ目密度の低い区間を対象
No.4	70.00~74.30	4.3	Double	割れ目密度の高い区間を対象 湧水箇所含む
No.5	52.00 ~ 68.80	16.8	Double	割れ目密度の高い区間を対象
No.6	48.00 ~ 52.30	4.3	Double	割れ目密度の低い区間を対象 湧水箇所含む
No.7	40.00~48.30	8.3	Double	割れ目密度の高い区間を対象 湧水箇所含む
No.8	26.00 ~ 39.30	13.3	Double	割れ目密度の低い区間を対象
No.9	23.00 ~ 25.30	2.3	Double	割れ目密度の高い区間を対象

表 5.1-1 水理試験区間の概要(10MI23 号孔)

mabh:meter along borehole

表 5.1-2 各試験区間における試験シーケンス(10MI23 号孔)

試験区間	試験深度 (mabh)	区間長 (m)	パッカー 構成	試験シーケンス
No.1	106.80 ~ 109.70	2.9	Single	INF-PSR-PW1-PW2-DEF
No.2	95.30 ~ 106.60	11.3	Double	INF-PSR-PW1-PW2-DEF
No.3	75.00 ~ 95.30	20.3	Double	INF-PSR-PW1-PW2-DEF
No.4	70.00 ~ 74.30	4.3	Double	INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF
No.5	52.00 ~ 68.80	16.8	Double	INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF
No.6	48.00 ~ 52.30	4.3	Double	INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF
No.7	40.00~48.30	8.3	Double	INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF
No.8	26.00 ~ 39.30	13.3	Double	INF-PSR-PW1-RW-RWS-PW2-DEF
No.9	23.00 ~ 25.30	2.3	Double	INF-PSR-PW1-PW2-DEF

INF: パッカー拡張

PW1 : パルス試験1回目(回復法) PW2 : パルス試験2回目(回復法)

PSR:間隙水圧測定(メインバルブ閉鎖) RWS:定流量揚水試験後の圧力回復試験 DEF:パッカー収縮

mabh:meter <u>a</u>long <u>b</u>ore<u>h</u>ole

RW: 定流量揚水試験

試験装置のパッカー編成は、試験区間をダブルパッカーで形成し、試験区間の上部区間におけ る湧水を止めるための口元パッカーを追加したトリプルパッカー編成とした。ボーリング孔の孔 底部を含む区間で試験を行う場合は、試験区間をシングルパッカーで形成し、ロ元パッカーを含 めたダブルパッカー編成とした。揚水試験時はロッド残尺部に電磁流量計を取り付け試験区間か らの揚水量を測定した。試験区間の開閉はメインバルブによって制御した。また、試験区間から の揚水量はグローブバルブの開度によって制御した。



図 5.1-2 10MI23 号孔コア観察・BTV 観察総合柱状図¹⁸⁾



mabh:<u>m</u>eter <u>a</u>long <u>b</u>ore<u>h</u>ole

図 5.1-3 10MI23 号孔コア観察・BTV 観察総合柱状図¹⁸⁾

5.2 試験結果

(1)透水性

10MI23 号孔で実施した水理試験により,主立坑断層北東側に分布する母岩の変質を伴う割れ 目帯のうち,変質がコア全体に及ぶ区間と変質が割れ目沿いのみの区間の水理特性データを取得 した。

表 5.2-1 に 10MI23 号孔で取得した透水係数,透水量係数,比貯留係数,貯留係数,区間湧水 量(以下,水理特性)を示す。また,図 5.2-1 に透水係数及び比貯留係数の深度ごとの分布を示 す。水理試験では,図 3.3-2 に示す試験フローのように,同一の試験区間内で複数の試験及び試 験結果の解析を実施した。複数の試験を実施した区間では,流量変化の影響が少ない定流量揚水 試験後の圧力回復試験の結果を代表値とした。定流量揚水試験を実施していない区間については, パルス試験の Cooper 法による 2 回の試験結果に対して,標準曲線へのフィッティングの程度に より結果を選定し代表値とした。

10MI23 号孔で水理試験を実施した区間(試験区間 No.1~No.9)の地質区分は、コア観察及び BTV 観察の結果から、母岩の変質を伴う割れ目帯であることが確認されている。表 5.2-2 に示す ように、この区間の透水係数の平均値は 1.25E-7m/s であり、上部割れ目帯の平均的な透水係数 (10⁻⁷~10⁻⁶m/s オーダー)^{2),19)}とほぼ同等であることが確認された。

母岩の変質を伴う割れ目帯は、コア観察結果及び BTV 観察の結果から、割れ目沿いの母岩の 変質の程度に応じて、コア全体に変質が及んでいる区間(試験区間 No.1)と割れ目沿いの母岩の みが変質している区間(試験区間 No.2~No.9)に区分される。変質がコア全体に及ぶ区間の透 水性(透水係数:3.17×10⁻¹¹m/s)は、母岩である土岐花崗岩の非変質帯の平均的な透水性^{2),19)} (透水係数:10⁻⁷~10⁻⁶m/s オーダー)と比較して4 オーダー低い。

また、変質が割れ目沿いのみの区間の平均的な透水性(透水係数:1.30E-7m/s)は、先述の土 岐花崗岩の透水性と同程度であるものの、主立坑断層主要部に近い 75~106.6mabh 区間は、変 質がコア全体に及ぶ区間と同等の低い透水性(透水係数:4.34E-11m/s)であることが確認され た。

		~	,.				5.10	/		
試験 区間	区間深度	透水係数	透水量係数	比貯留係数	貯留係数	区間 湧水量	試験 手法	解析式	試験区間の 地質区分	試験区間の 変質の程度
	(mabh*)	(m/sec)	(m²/sec)	(1/m)	(-)	(L/min)				
No.1	106.80~ 109.70	3.17E-11	9.19E-11	2.77E-07	8.04E-07	0.008	PW1	Cooper		コア全体が 変質
No.2	95.30~ 106.60	5.70E-11	6.44E-10	1.02E-06	1.15E-05	0.025	PW1	Cooper	母	
No.3	75.00 ~ 95.30	3.80E-11	7.71E-10	6.95E-08	1.41E-06	0.025	PW1	Cooper	岩 の	
No.4	70.00~ 74.30	3.31E-07	1.42E-06	1.85E-04	7.94E-04	23.000	RWS	Agarwal	<u>変</u> 質	割 れ
No.5	52.00~ 68.80	1.47E-07	2.47E-06	1.34E-15	2.25E-14	10.000	RWS	Agarwal	を 伴	目沿
No.6	48.00~ 52.30	9.35E-07	4.02E-06	2.44E-03	1.05E-02	80.000	RWS	Agarwal	う 割	い が
No.7	40.00~ 48.30	3.42E-07	2.84E-06	2.03E-03	1.68E-02	47.000	RWS	Agarwal	れ目	変質
No.8	26.00~ 39.30	8.28E-09	1.10E-07	3.22E-05	4.29E-04	2.000	RWS	Agarwal	帯	
No.9	23.00~ 25.30	6.65E-10	1.53E-09	1.65E-07	3.79E-07	0.120	PW1	Cooper		

表 5.2-1 水理試験結果一覧(10MI23 号孔)¹⁸⁾

*mabh:<u>m</u>eter <u>a</u>long <u>b</u>ore<u>h</u>ole





試験区間	区間深度	試験区間の 地質区分	地質区分ご との平均透 水係数	試験区間の 変質の程度	変質区分ご との平均透 水係数	湧水量で区 分した区間 の平均透水 係数	
	(mabn*)		(m/sec)		(m/sec)	(m/sec)	
No. 1	106.80 ~ 109.70	母		コア全体が 変質	3.17E-11		
No.2	95.30 ~ 106.60	岩の				4.34E-11	
No.3	75.00 ~ 95.30	変		割れ			
No.4	70.00~74.30	質を					
No.5	52.00 ~ 68.80	伴	1.25E-07	日沿	1 30E-07	3 13E-07	
No.6	48.00~52.30	う割		いが	1.302 07	3.13L 07	
No.7	40.00~48.30	れ		変			
No.8	26.00 ~ 39.30	日常		質		6 94E-00	
No.9	23.00~25.30					0.84E-09	

表 5 2-2	地質的な特徴と平均的な透水係数
10.22	

mabh:<u>m</u>eter <u>a</u>long <u>b</u>ore<u>h</u>ole

(2) 貯留性

表 5.2-3 に 10MI23 号孔の地質的な特徴に応じた平均的な比貯留係数を示す。表 5.2-3 に示す ように、この区間の比貯留係数の平均値は 5.41E-5m/s であり、上部割れ目帯の平均的な比貯留 係数(2.0E-7(1/m))²と比較して 2 オーダー高いことが確認された。

変質がコア全体に及ぶ区間の貯留性(比貯留係数:2.77E-7 (1/m))は、母岩である土岐花崗 岩の非変質帯の平均的な貯留性²⁾(比貯留係数:2.0E-7 (1/m))と同等であった。また、変質が 割れ目沿いのみの区間の平均的な貯留性(比貯留係数:5.61E-5 (1/m))は、先述の土岐花崗岩 の貯留性と比較して2オーダー高いものの、主立坑断層主要部に近い75~106.6mabh区間は、 変質がコア全体に及ぶ区間よりも1オーダー低い貯留性(比貯留係数:3.94E-8 (1/m))である ことが確認された。

試験区間	区間深度	試験区間の 地質区分	地質区分ご との平均比 貯留係数	試験区間の 変質の程度	変質区分ご との平均比 貯留係数	湧水量で区 分した区間 の平均比貯 留係数 (1/m)
	(mabn*)		(I/m)		(1/m)	(I/m)
No. 1	106.80 ~ 109.70	日		コア全体が 変質	2.77E-07	
No.2	95.30 ~ 106.60	岩の				3.94E-08
No.3	75.00 ~ 95.30	変		割れ		
No.4	70.00~74.30	質を				
No.5	52.00 ~ 68.80	伴	5.41E-05	日沿	5 61 E-05	1 265-04
No.6	48.00~52.30	う割		いが	5.01E-05	1.30E-04
No.7	40.00~48.30	n		変		
No.8	26.00 ~ 39.30	目		質		1.005.06
No.9	23.00~25.30					1.995-00

表 5.2-3 地質的な特徴と平均的な比貯留係数

mabh: meter along borehole

(3)間隙水圧

図 5.2-3 に各試験区間の間隙水圧の換算水位を示す¹⁸⁾。



図 5.2-3 各試験区間の換算水位(10MI23 号孔)

(4)水理試験への遊離ガスの影響

パルス試験では、Hvorslev法または Cooper 法の解析を行うとともに、水理試験中のガスの発 生状況の把握とガスが試験結果に及ぼす影響の程度を把握するために圧縮率の算定を行った。各 試験区間の圧縮率はパルス試験から得られた排水量と水頭差を基に算出した。算出結果を表 5.2-4 に示す。算定された圧縮率は、理論値に対して1オーダーから2オーダー程度大きいが、この値 は MIZ-1 号孔で実施された水理試験での母岩の透水係数への影響を感度解析的に検討した結果 に基づき、ガスに影響されていないと確認された圧縮率 ²⁸⁾と同程度であることから、試験開始時 において試験区間にガスはほぼ存在していなかったことが考えられる。また、試験区間の圧縮率 は、定流量揚水試験及び定流量揚水試験後の圧力回復試験の試験前後でも概ね一致している。し たがって、試験時の減圧に伴う顕著なガスの発生は無く、遊離した溶存ガスが試験結果に与える 影響はないと考えられる。

	Ŀ	圧縮率 (m ³ /Pa)										
試験区間	PW1	PW2	理論値 (m ³ /Pa)	区間湧水量 (L/min)								
No. 1	1.19E-10	2.06E-10	7.71E-11	0.008								
No.2	1.25E-10	1.46E-10	1.02E-10	0.025								
No.3	1.67E-10	1.47E-10	1.25E-10	0.025								
No.4	6.30E-10	1.38E-09	6.34E-11	23.000								
No.5	3.68E-10	4.25E-10	1.01E-10	10.000								
No.6	1.47E-08	1.03E-08	5.24E-11	80.000								
No.7	5.44E-09	3.55E-09	6.32E-11	47.000								
No.8	8.07E-10	1.17E-09	7.47E-11	2.000								
No.9	2.35E-10	2.39E-10	3.23E-11	0.120								

表 5.2-4 水理試験区間の圧縮率(10MI23 号孔)

(5) 各試験区間における水理特性と地質特性の比較

図 5.2-2 に 10MI23 号孔におけるコア観察,孔径検層,電磁フローメーター検層,及び水理試験の各結果を示す。

表 5.2-5 に 10MI23 号孔で実施した水理試験によって得られた水理特性と各水理試験区間にお ける地質特性(ステレオネット,割れ目卓越方向,割れ目密度,割れ目本数,割れ目沿いの母岩 の変質程度及び割れ目充填率)を示す。



図 5.2-2 10MI23 号孔での水理試験による主立坑断層北東側の水理特性

JAEA-Research 2012-008

表 5.2-5 10MI23 号孔の水理試験結果及び各試験区間の地質特徴

	試験区間							水理特性	生												地質特性																				
試験 区間 番号	試験深度 (mabh)	区間長 (m)	透水係数 (m/s)	透水量係数 (m²/s)	比貯留係数 (1/m)	貯留係数 (-)	区間湧水量 (L/min)	間隙水圧 (MPa)	水理特性の代表 値とした試験	解析式	地質区分ご との幾何平 均透水係数 (m/s)	変質区分ご との幾何平 均透水係数 (m/s)	湧水量 (2L/min)を 基準に区分 した区間の 幾何平均透 水係数 (m/s)	試験区間の 地質区分	試験区間 の変質	ステレオネット	卓越している 割れ目の走 向(傾斜)	割れ目 密度 (本/m)	割れ目 本数 (本)	割れ (割	目沿いの母 りれ目本数に (%)	岩の変質程度 対する割合)	(:	割れ目充 割れ目本数に (%))	真率 対する割合	各水理試験区間の地質的な特徴															
1	106.80~ 109.70	2.90	3.17E-11	9.19E-11	2.77E-07	8.04E-07	0.01	2.06	1回目の パルス試験	Cooper		3.17E-11			コ ア 全 体 が		NE−SW (高角度)	5.17	15	変質の程度	未変質 中変質 強変質	1(7%) 1(7%) 13(87%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上	0(0%) 0(0%) 0(0%) 13(87%)	 コア全体が変質 NE走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、強変質が卓越 ・内部が90%以上充填されている割れ目が9割程度 ・ 充填物は緑泥石が貞越 															
2	95.30~ 106.60	11.30	5.70E-11	6.44E-10	1.02E-06	1.15E-05	0.03	1.98	1回目の パルス試験	Cooper			4.09E-11				NE-SW (高角度) NW-SE (高角度)	5.31	60	変質の程度	物変頁 未変質 弱変質 中変質 公式 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質 の変質	0(0%) 15(25%) 16(27%) 14(23%)	充填率	用基 10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 間定	2(13%) 0(0%) 0(0%) 0(0%) 34(57%) 25(42%)	・割れ目沿いのみが変質 ・NE走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、未変質から強変質まで同程度に分布 ・内部が90%以上充填されている割れ目が9割以上 ・充填物は緑泥石が卓越															
3	75.00~ 95.30	20.30	3.80E-11	7.71E-10	6.95E-08	1.41E-06	0.03	2.06	1回目の パルス試験	Cooper							NE−SW (高角度)	2.71	55	変質の程度	· 强 夏 未 変 質 弱 変 質 中 変 質 中 変 質 · · · · · · · · · ·	15(23%) 36(65%) 16(29%) 0(0%) 3(5%)	充填率	闭差 10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	23(42%) 0(0%) 0(0%) 2(4%) 23(42%) 31(56%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NE走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、未変質が卓越 ・内部が90%以上充填されている割れ目が9割以上 ・充填物は方解石が卓越 															
4	70.00~ 74.30	4.30	3.31E-07	1.42E-06	1.85E-04	7.94E-04	23.00	2.09	定流量試験後の 圧力回復試験	Agarwal	-			- - - - - - - - - - - - - - - - - - -			NE−SW (低角度)	8.84	38	変質の程度	未 変 質 弱 変 質 中 変 質 強 変 質	36(95%) 2(5%) 0(0%) 0(87%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	1(3%) 1(3%) 7(18%) 5(13%) 24(63%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NE走向低角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、未変質が卓越 ・割れ目が6割、次いで50~90%充填されている割目が2割程度 ・充填物は方解石が卓越 															
5	52.00~ 68.80	16.80	1.47E-07	2.47E-06	1.34E-15	2.25E-14	10.00	2.10	定流量試験後の 圧力回復試験	Agarwal	5.65E-09			れの変質を伴う割れ	割れ目沿		NW-SE (高角度)	7.02	118	変質の程度	未変質 弱変質 中変質 強変質	14(12%) 76(64%) 9(8%) 19(16%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	0(0%) 1(1%) 4(3%) 44(37%) 69(58%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NW走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は,弱変質が卓越 ・内部が90%以上充填されている割れ目が9割以上 ・充填物は、「無し」または緑泥石が同程度 															
6	48.00~ 52.30	4.30	9.35E-07	4.02E-06	2.44E-03	1.05E-02	80.00	2.10	定流量試験後の 圧カ回復試験	Agarwal		1.08E-08	3.53E-07	.53E-07 日 常	ー い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	日 帯 が 変 質 -			u 帯 が 変 質 		日 帯 が 変質 -	日 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質	目 い 帯 が 変 質		NE-SW (高角度)	3.95	17	変質の程度	未変質 弱変質 中変質 強変質	16(94%) 1(6%) 0(0%) 0(0%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	0(0%) 0(0%) 0(0%) 1(6%) 16(94%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・WW走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、未変質が卓越 ・閉塞している割れ目が9割以上 ・充填物が確認されない割れ目が卓越
7	40.00~ 48.30	8.30	3.42E-07	2.84E-06	2.03E-03	1.68E-02	47.00	2.10	定流量試験後の 圧力回復試験	Agarwal	-													N₩-SE (高角度)	8.19	68	変質の程度	未変質 弱変質 中変質 強変質	16(24%) 44(65%) 2(3%) 6(9%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	1(1%) 3(4%) 2(3%) 13(19%) 49(72%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NW走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、弱変質が卓越 ・閉塞している割れ目が7割以上 ・充填物は、「無し」または緑泥石が同程度 								
8	26.00~ 39.30	13.30	8.28E-09	1.10E-07	3.22E-05	4.29E-04	2.00	2.10	定流量試験後の 圧力回復試験	Agarwal																	NE−SW (高角度) NW−SE (高角度)	2.41	32	変質の程度	未変質 弱変質 中変質 強変質	17(53%) 15(47%) 0(0%) 0(0%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	1 (3%) 3(9%) 4 (13%) 11 (34%) 16 (50%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NE走向高角度傾斜及びNW走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は、未変質が卓越 ・閉塞している割れ目が5割以上 ・充填物は、「無し」または方解石が同程度 					
9	23.00~ 25.30	2.30	6.65E-10	1.53E-09	1.65E-07	3.79E-07	0.12	2.09	1回目の パルス試験	Cooper			2.35E-09	9			NW-SE (高角度)	16.09	37	変質の程度	未変質 弱変質 中変質 強変質	5(14%) 2(5%) 1(3%) 29(78%)	充填率	10%以下 10~50% 50~90% 90%以上 閉塞	0(0%) 0(0%) 0(0%) 29(78%) 8(22%)	 ・割れ目沿いのみが変質 ・NW走向高角度傾斜の割れ目が卓越 ・割れ目沿いの変質は, 強変質が卓越 ・90%以上充填されている割れ目が8割程度 ・充填物は緑泥石が卓越 															

mabh: meter along borehole

図 5.2-2,表 5.2-5 に基づき、以下に各水理試験区間の結果の概要を示す。

1) 試験区間1(106.80~109.70mabh;母岩の変質を伴う区間のうち,変質がコア全体に及ぶ区間) 水理試験の結果,透水係数は3.17E-11m/s,区間湧水量は0.01L/minであった。コア観察及び BTV 観察の結果から,NE 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認した。また,割れ 目沿いの母岩の変質の程度は強変質であり,その90%以上が充填されている割れ目が卓越してい ることを確認した。

2) 試験区間2(95.30~106.60mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は5.70E-11 m/s,区間湧水量は0.03L/minであった。コア観察及び BTV 観察の結果から,NE 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認した。また、割れ 目沿いの母岩が、弱変質、中変質、強変質で変質している割れ目、及び変質が認められない割れ 目がほぼ均等に分布していることを確認した。この区間の割れ目は、90%以上が充填されている 割れ目及び開口していない割れ目が卓越している。なお、開口していない割れ目は BTV 観察に よって確認されたものである。

3) 試験区間3(75.00~95.30mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は3.80E-11 m/s,区間湧水量は0.03L/minであった。コア観察及び BTV 観察の結果から、NE 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認した。また、割れ 目沿いの母岩は未変質である割れ目が卓越していることを確認した。この区間の割れ目は、90% 以上が充填されている割れ目及び開口していない割れ目が卓越している。

4) 試験区間4 (70.00~74.30mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は3.31E·7m/s,区間湧水量は23.00L/minであった。これは、電磁 フローメーター検層で流速の変化が確認された 72.03mabh 付近の割れ目によるものと考えられ る。コア観察及び BTV 観察の結果から、NE 走向低角度傾斜の割れ目が卓越しており、その傾斜 は10°程度であることを確認した。また、割れ目沿いの母岩が変質していない割れ目が卓越して いることを確認した。割れ目の充填状況は、BTV 観察の結果、開口が認められない割れ目が卓越 していることを確認した。

5) 試験区間 5 (52.00~68.80mabh;母岩の変質を伴う区間のうち,割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は 1.47E-7m/s,区間湧水量は 10.00L/min であった。コア観察及び BTV 観察の結果から,NW 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認した。また,割れ 目沿いの母岩が弱変質している割目及び未変質の割れ目が同程度分布していることを確認した。 この区間では,90%以上が充填されている割れ目と,BTV 観察によって確認された開口が認めら れない割れ目が同程度分布している。

6) 試験区間6(48.00~52.30mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間)水理試験の結果、透水係数は9.35E-7m/s、区間湧水量は80L/min であった。区間湧水量は10MI23号孔で実施した水理試験区間において最大であった。これは電磁フローメーター検層で流速の変化が確認された48.87mabh付近の割れ目交差部によるものと考えられる。また、コア観察及びBTV観察の結果から、NW 走向高角度傾斜の割れ目が卓越し、割れ目沿いの母岩が変質していない割れ目が卓越していることを確認した。BTV 観察の結果、この区間で開口が認めら

れない割れ目が卓越していることを確認した。

7) 試験区間7(40.00~48.3mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は3.42E-7m/s,区間湧水量は47.00L/minであった。この区間では、 電磁フローメーター検層及び BTV 観察によって、40.54mabh、42.99mabh、43.13mabh、 43.15mabh、46.61mabh、47.02mabhの割れ目が湧水を伴う割れ目であることが確認されている。 コア観察及び BTV 観察の結果から、NW 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認し た。また、割れ目沿いの母岩が弱変質している割目及び未変質の割れ目が同程度分布しているこ とを確認した。BTV 観察の結果、この区間で開口が認められない割れ目が卓越していることを確 認した。

8) 試験区間8(26.00~39.30mabh;母岩の変質を伴う区間のうち,割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は8.28E-9 m/s,区間湧水量は2.00L/minであった。コア観察及び BTV 観察の結果から,NE 走向高角度傾斜及び NW 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していること を確認した。また,割れ目沿いの母岩が弱変質している割目及び未変質の割れ目が同程度分布し ていることを確認した。BTV 観察の結果,この区間で開口が認められない割れ目が卓越している ことを確認した。

9) 試験区間9(23.00~25.30mabh;母岩の変質を伴う区間のうち、割れ目沿いが変質する区間) 水理試験の結果,透水係数は6.65E-10 m/s,区間湧水量は0.12L/minであった。コア観察及び BTV 観察の結果から、NW 走向高角度傾斜の割れ目が卓越していることを確認した。また、割れ 目沿いの母岩の変質の程度は強変質であり、その90%以上が充填されている割れ目が卓越してい ることを確認した。

(6) これまでの調査で確認された主立坑断層周辺の透水性及び湧水箇所

深度 300m ステージに関する水理学的な情報は,2008 年度に実施された深度 300m 研究アク セス坑道掘削前の先行ボーリング孔の 08MI13 号孔及び 2009 年度に予備ステージから掘削され た 09MI20 号孔においても取得されている。

08MI13 号孔の掘削時に測定した湧水量を図 5.2-6 に示す。08MI13 号孔では孔口から 13mabh (立坑中心から約 27m) までの湧水量は 4L/min 程度であったが、13mabh 以深の掘削で湧水量 が増加し、立坑中心から約 40m の位置で 100L/min 程度の湧水が生じている。なお、08MI13 号 孔では水理試験は実施されていない。

表 5.2-6 に 09MI20 号孔の水理試験結果と、本調査で実施した 10MI22 号孔での長期揚水試験 及び 10MI23 号孔での水理試験によって取得した透水係数,区間湧水量,区間湧水圧を示す。

09MI20 号孔の掘削及び調査では, 試験区間 10 (孔口~19.50mabh)の湧水量は 1.7L/min で, 透水係数は 6.04E-10m/s であった。また, 試験区間 9 (19.50~34.80mabh) では 2.56E-7m/s の 透水係数が確認されたものの, 試験区間 7~8 (34.70~58.80mabh)の合計湧水量は 0.31L/min, 透水係数の幾何平均値は 1.27E-9m/s であり,上部割れ目帯の平均的な透水係数 (1.0E-7m/s)よ りも 2 オーダー程度低いことが確認されている。

10MI22 号孔では、長期揚水試験に伴うパルス試験によって、60.00~100.00mabh の透水係数 は 9.80E-9m/s,区間湧水量は 2.10L/min であることが確認された。また、10MI23 号孔では、水 理試験によって、試験区間 1~3 (75.0~109.7mabh)の透水係数の平均値は 4.34E-11m/s,区間 湧水量は 1L/min 以下であることを確認した。 本調査以前に実施された 08MI13 号孔及び 09MI20 号孔と,本調査で確認された 10MI22 号孔及び 10MI23 号孔おける 5L/min 以上の湧水箇所を図 5.2-7 に示す。図 5.2-7 に示されるように,深 度 300m ステージにおいては,主立坑断層に沿って 5L/min 以上の湧水が確認されていない領域 があることがわかる。



図 5.2-6 08MI13 号孔掘削時に孔口で測定した湧水量¹¹⁾

ボーリング孔	試験区間 番号	試験上端 深度 (mabh)	試験下端 深度 (mabh)	区間長 (m)	透水係数 _{(m/s})	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)
	1	96.00	101.90	5.90	5.01E-06	6.20	1.90
	2	93.70	96.00	2.30	4.29E-05	90.00	1.90
	3	84.90	93.70	8.80	1.17E-05	35.00	1.89
	4	76.10	84.90	8.80	1.95E-06	4.10	1.90
0014120	5	67.30	76.10	8.80	3.27E-07	1.90	1.90
0910120	6	58.50	67.30	8.80	1.02E-05	12.00	1.90
	7	50.00	58.80	8.80	3.53E-09	0.21	1.90
	8	34.70	50.00	15.30	4.56E-10	0.10	1.86
	9	19.50	34.80	15.30	2.56E-07	2.10	1.86
	10	6.20	19.50	13.30	6.04E-10	1.70	1.38
10MI22	1	6.20	59.00	52.80	6.69E-05	240.00	2.12
10101122	2	60.00	100.00	40.00	9.80E-09	2.10	1.98
	1	106.80	109.70	2.90	3.17E-11	0.01	2.06
	2	95.30	106.60	11.30	5.70E-11	0.03	1.98
	3	75.00	95.30	20.30	3.80E-11	0.03	2.06
	4	70.00	74.30	4.30	3.31E-07	23.00	2.09
10MI23	5	52.00	68.80	16.80	1.47E-07	10.00	2.10
	6	48.00	52.30	4.30	9.35E-07	80.00	2.10
	7	40.00	48.30	8.30	3.42E-07	47.00	2.10
	8	26.00	39.30	13.30	8.28E-09	2.00	2.10
	9	23.00	25.30	2.30	6.65E-10	0.12	2.09

表 5.2-6 深度 300m研究アクセス坑道で実施した単孔式水理試験結果

mabh: meter along borehole



図 5.2-7 深度 300m研究アクセス坑道でのボーリング調査で確認した 透水係数, 湧水箇所及び湧水量

5.3 単孔式水理試験結果に基づく主立坑断層の水理地質構造の推定

(1)水理地質構造の推定

図 5.2-7 に示される,深度 300m ステージでこれまでに実施されたボーリング調査(08MI13 号孔及び 09MI20 号孔)と、本ボーリング調査(10MI22 号孔,10MI23 号孔)によって取得し た透水係数,湧水量及び湧水箇所に基づき主立抗断層周辺の水理地質構造の推定を行った。

図 5.2-7 に示すように,主立坑断層に沿った領域では 5L/min 以上の湧水が確認されていない ことから,主立坑断層の走向方向に沿って低透水性の領域が分布していると考えられる。図 5.3-1 に推定した低透水性領域を示す。この領域の透水係数は,09MI20 号孔及び 10MI23 号孔での水 理試験,10MI22 号孔での長期揚水試験に伴うパルス試験で得られた透水係数から,3.17E-11~ 9.80E-9m/s(幾何平均値:2.10E-10m/s)であった。上部割れ目帯の透水係数の平均値は 1.0E-7m/s であることから、この低透水性領域が水理境界を形成する地質構造の一部であると考えられる。

主立坑断層は,既往の調査研究結果 ^{2),9),10)}から,主立坑断層の直交方向に対して低透水性の水 理地質構造であるとされてきたが,表 5.2-4 及び表 5.2-6 に示す深度 300m ステージで実施され たボーリング調査によって,その透水係数が 1.0E-8~1.0E-11m/s であることが示唆された。

研究所用地周辺の地下水流動を規制する水理地質構造としての主立坑断層主要部の幅は,既往の調査によって 5m 程度とされてきた²⁰。しかし,深度 300m ステージにおける各ボーリング孔 で確認された湧水箇所から,主立坑断層は幅 40m 程度の厚さを有する低透水性の水理地質構造であることが示唆された。



図 5.3-1 深度 300mステージにおける低透水性領域の概念図(模式図)

08MI13 号孔の調査結果では、立坑中心から 40m までの領域は低透水性であり、この要因は母 岩の変質や粘土の介在であると推定されている¹¹⁾。10MI22 号孔の 60.0mabh~85.40mabh 及び 10MI23 号孔の 75.00~109.70mabh の区間では割れ目沿いの変質(絹雲母化及び緑泥石化)なら びに割れ目への粘土介在が認められることから既往の調査研究結果¹¹⁾と整合しているといえる。 10MI23 号孔の 75.00~109.70mabh の区間でコア観察及び BTV 観察によって確認された割れ目 は、その表面積の 9 割以上が粘土鉱物によって充填されていたことから、この割れ目の充填状況 も低透水性の要因であると考えられる。

なお、割れ目の走向傾斜及び割れ目頻度と透水性の相関は認められなかったことから、割れ目の性状のうち、透水性の低下の要因となるのは変質の程度、粘土の狭在による割れ目の充填であると推定される。これは既往の調査研究結果¹¹⁾と整合している。

(2) モデル化への課題

表 5.2-2 に示すように、10MI23 号孔の水理試験区間の地質区分は、全区間が母岩の変質を伴う割れ目帯である。しかし、母岩の変質を伴う割れ目帯はコア全体に変質が及ぶ区間及び割れ目沿いのみが変質している区間に区分され、コア全体に変質が及ぶ区間の透水係数は割れ目沿いのみが変質している区間の平均的な透水係数よりも4オーダー低い。さらに、割れ目沿いのみが変 質している区間には、透水係数がコア全体に変質が及ぶ区間と同等である区間(75.00~ 95.30mabh)も確認されている。 サイトスケールの水理地質構造モデルの更新にあたっては、母岩の変質を伴う割れ目帯における 75.00~109.70mabh の区間のモデル化方法を特定するために主立坑断層または主立坑断層と 同様の母岩の変質を伴う割れ目帯を伴う断層を対象とした調査の実施によるデータの蓄積が重要 である。

6. まとめ

本研究では、第1段階の調査研究において構築した水理地質構造モデルの妥当性の確認と更新 を背景に、主立坑断層および周辺岩盤の地質・地質構造の特徴と水理特性の関係の把握ならびに サイトスケールの主立坑断層の水理地質構造の推定を目的として長期揚水試験及び単孔式水理試 験を実施した。

10MI22 号孔で実施した長期揚水試験においては,主立坑断層北東側での揚水により,主立坑 断層北東側及び南西側における水圧観測孔で揚水に伴う水圧応答データを取得した。その結果, 主立坑断層を境として水圧応答の傾向が大きく異なることが確認され,主立坑断層がその直交方 向に対して低透水性であり,水理境界を形成する水理地質構造であることが確認された。また、 主立坑断層北東側に位置する水圧観測孔は既往の調査によって推定されているコンパートメント 領域内に位置することを確認した。さらに、このコンパートメント領域は主立坑断層南西側にお いても形成されている可能性が示唆された。

10MI23 号孔で実施した水理試験では,主立坑断層周辺に分布する母岩の変質を伴う割れ帯に おける変質の程度や割れ目の充填状況などの地質的な特徴に応じた水理特性データを取得した。 その結果,母岩の変質を伴う割れ目帯の平均的な透水係数は 1.25E・7m/s であったが,母岩の変 質を伴う割れ目帯のうち,主立抗断層近傍のコア全体に変質が及ぶ区間の透水係数は,割れ目沿 いのみが変質している区間の平均的な透水係数よりも4オーダー低いことを確認した。さらに, コア全体に変質が及ぶ区間に隣接する,割れ目沿いのみが変質している区間においては,透水係 数がコア全体に変質が及ぶ区間との同程度の区間(75.00~95.30mabh)の分布を確認した。ま た,本ボーリング調査結果と深度 300m ステージでこれまでに実施してきたボーリング調査結果 から,主立坑断層に沿って 3.17E・11~9.80E・8m/s 程度の領域が幅 40m 程度で分布していること が示唆された。

今後の課題としては、主立坑断層南西側でのコンパートメント領域の形成及び母岩の変質を伴 う割れ目帯のモデル化方法の特定が挙げられる。これらの課題のうち、主立坑断層南西側でのコ ンパートメント領域の形成を確認するために、主立坑断層南西側のコンパートメント領域外での 水圧観測の実施が重要である。また、長期揚水試験データを用いた地下水流動解析の実施により、 本研究で構築した水理地質構造概念の妥当性の確認を行うこととする。さらに、それらに基づき、 サイトスケールの水理地質構造モデルの更新を行うこととする。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構:"超深地層研究所地層科学研究基本計画",JNC TN7410 2001-018 (2002).
- 2) 三枝博光,瀬野康弘,中間茂雄,鶴田忠彦,岩月輝希,天野健治,竹内竜史,松岡稔幸,尾 上博則,水野 崇,大山卓也,濱 克宏,佐藤稔紀,久慈雅栄,黒田英高,仙波 毅,内田 雅大,杉原弘造,坂巻昌工:"超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第 1段階)研究成果報告書", JAEA-Research 2007-043(2007).
- 3) 竹内真司,國丸貴紀,見掛信一郎,西尾和久,鶴田忠彦,松岡稔幸,早野 明,竹内竜史, 三枝博光,大山卓也,水野 崇,平野 享,尾方伸久,濱 克宏,池田幸喜,山本 勝,弥 富洋介,島田顕臣,松井裕哉,伊藤洋昭,杉原弘造:"超深地層研究所計画 年度報告書(2008 年度)", JAEA-Review 2010-014(2010).
- 4) 貝塚爽平,木曾敏行,町田 貞,太田陽子,吉川虎雄:"木曽川・矢作川流域の地形発達", 地理学評論, 37, pp.89-102 (1964).
- 5) 糸魚川淳二: "瑞浪地域の地質", 瑞浪市化石博物館専報, 第1号, pp.1-50 (1980).
- 6) 三枝博光,瀬野康弘,中間茂雄,鶴田忠彦,岩月輝希,天野健治,竹内竜史,松岡稔幸,尾 上博則,水野崇,大山卓也,濱克宏,佐藤稔紀,久慈雅栄,黒田英高,仙波毅,内田雅大, 杉原弘造,坂巻昌工:"超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階) 研究成果報告書", JAEA-Research 2007-043 (2007).
- 7) 三枝博光,松井裕哉,濱克宏,佐藤稔紀,鶴田忠彦,竹内竜史,國丸貴紀,松岡稔幸,水野崇; "超深地層研究所計画における調査研究の考え方と進め方;深度 500m までの調査研究計画", JAEA-Review 2011-022(2011).
- 8) 核燃料サイクル開発機構: "広域地下水流動研究年度報告書(平成16年度)", JNC TN7400 2005-013 (2005).
- 竹内真司,藤田有二,安藤賢一:"亀裂性岩盤を対象とした長期揚水試験",2005 年秋季講演 会講演要旨,日本地下水学会,10-15(2005).
- 10) 毛屋博道,武田匡樹,竹内竜史:"長期水圧モニタリング結果を用いた水理地質構造モデルの 検討(その2)",2009年度秋季講演会要旨,日本地下水学会,320-325(2009).
- 11) 見掛信一郎,山本勝,池田幸喜,杉原弘造,竹内真司,早野明,佐藤稔紀,武田信一,石井洋司,石田英明,浅井秀明,原雅人,久慈雅栄,南出賢司,黒田英高,松井裕哉,鶴田忠彦,竹内竜史,三枝博光,松岡稔幸,水野崇,大山,卓也:"結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察", JAEA-Technology 2010-026, (2010).
- 12) 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行, 田上雅彦, 石田英明, 早野 明, 栗原 新, 湯口貴史:" 超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究 (2008 年度)報告書", JAEA-Research 2010-039(2010).
- 13) 國丸 貴紀, 見掛 信一郎, 西尾 和久, 鶴田 忠彦, 松岡 稔幸, 竹内 竜史, 三枝 博光, 水野 崇, 丹野 剛男, 大丸 修二, 狩野 智之, 萩原 大樹, 武田 匡樹, 森川 佳太, 湯口 貴史, 尾方 伸久, 濱 克宏, 池田 幸喜, 山本 勝, 島田 顕臣, 松井 裕哉, 伊藤 洋昭, 杉原 弘造:"超深地 層研究所計画 年度報告書(2010 年度)", JAEA-Review 2012-020(2012).
- 14) 鶴田忠彦, 竹内真司, 竹内竜史, 水野崇, 大山卓也:"瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書", JAEA-Research 2008-098(2009).
- 15) 天野健治, 岩月輝希, 上原大二郎, 佐々木圭一, 竹内真司, 中間茂雄: "広域地下水流動研究 年度報告書(平成14年度)", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN 7400 2003-002(2003).

- 16) 松岡稔幸, 熊崎直樹, 三枝博光, 佐々木圭一, 遠藤令誕, 天野健治:"繰返しアプローチに基づく地質構造のモデル化(Step1 および Step2)", 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-007 (2005).
- 17) 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 程塚保行, 田上雅彦, 石田英明, 早野 明, 栗原 新, 湯口貴史:" 超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究(2008 年度)報告書", JAEA-Research 2010-039(2010).
- 18) 鶴田忠彦,武田匡樹,上野孝志,大丸修二,徳安真吾,尾上博則,新宮信也,石橋正祐紀, 竹内竜史,松岡稔幸,水野 崇,田上雅彦:"主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報 告書", JAEA-Technology 2012-001 (2011).
- 19) 小坂 寛, 三枝博光, 尾上博則, 竹内竜史: "超深地層研究所計画(岩盤の水理に関する調査研究)長期揚水試験計画策定のための水理地質構造のモデル化・地下水流動解析", JAEA-Research 2010-037(2011).
- 20) Takuya OHYAMA, Hiromitsu SAEGUSA: "GEOMASS System", 日本原子力研究開発機構, JAEA-Testing 2008-007 (2009).
- 21) 徳安真吾, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 田上雅彦, 栗原 新: "MIU の現状その① ~地質・地質 構造に関する調査研究", 日本原子力学会バックエンド部会, 第26回バックエンド夏期セミ ナー 資料集, ポスター6 (2010).
- 22) 後藤和幸, 牧野章也, 奥寺勇, 松本隆史: "1,000m 対応水理試験装置(高温環境型)の 製作", JNC-TJ7440 99-001(1999).
- 23) 竹内真司,中野勝志,平田洋一,進士喜英,西垣誠,"深層岩盤を対象としたシーケンシャル 水理試験手法の開発と適用",地下水学会誌,第49巻,第1号,pp.17-32 (2007).
- 24) Hvorslev, M.T.: "Time lag and soil permeability in ground-water observations", U.S. Army Waterways Experiment Station, Bull No.36, 50p. (1951).
- 25) Cooper, H.H.JR., J.D.Bredehoeft, and I.S.Papadopulos:"Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water", Water Resource Research, Vol.3, No.1, pp.263-269(1967).
- 26) Cooper, H.H.JR., and C.E.Jacob:"A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well-field history", Transactions, American geophysical Union, Vol.27, No.4, pp.526-534(1946).
- 27) Agarwal, R.G.:"A New Method to Account for Producing Time Effects When Drawdown Type Curves are Used to Analyze Pressure Buildup and Other Test Data"paper SPE 9289 presented at the 55th SPE Annual Technical Conference and Exhibition,Dallas, TX,Sept.21-24(1980).
- 28) 魚住直己,村上真也,大石保政,河村秀記:"超深地層研究所計画における試錐調査(MIZ-1 号孔)", JNC TJ7440 2005-091(2005).
- 29) 後藤和幸, 升元一彦, 向井圭, 竹内真司:"水圧モニタリングデータの地球潮汐・気圧変動成 分の分離解析", 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.445-450(2004).
- 30) Isiguro, M., et al., 1981, "A bayesian approach to the analysis of earth tides", Proceeding of the 9th International Symposium of Earth Tides, pp. 282-292.
- 31) Takeuchi, S., et al.,2007, "Hydrogeological conceptual model determined from baseline and construction phase groundwater pressure and surface tiltmeter data at the Mizunami Underground Research Laboratory, Japan", Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste

Management, ICEM07-7117.

32) 尾上博則,三枝博光,大山卓也,竹内真司:"孔間水理試験による水圧応答に基づく地下深部 の水理地質構造の解析的推定",地下水学会誌,第50巻,第4号, pp.251-274(2008).

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本単位								
基个里	名称	記号							
長さ	メートル	m							
質 量	キログラム	kg							
時 間	秒	s							
電 流	アンペア	Α							
熱力学温度	ケルビン	Κ							
物質量	モル	mol							
光 度	カンデラ	cd							

	100						
组立量		SI 基本単位					
和立里		名称	記号				
面	積	平方メートル	m ²				
体	積五	立法メートル	m ³				
速さ,速	度 >	メートル毎秒	m/s				
加速	度 >	メートル毎秒毎秒	m/s^2				
波	数每	毎メートル	m ⁻¹				
密度,質量密	度 =	キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
面 積 密	度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²				
比 体	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2				
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m				
量濃度 ^(a) ,濃	度日	モル毎立方メートル	mol/m ³				

第一の「濃度」での「海」で「シートル」 mol/m³ 量濃度にの、濃度モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度キログラム毎立法メートル g^{\dagger} かンデラ毎平方メートル cd/m^2 折率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 透磁率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのこと を表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位					
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方		
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m		
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m^{2}/m^{2}		
周 波 数	(ヘルツ ^(d)	Hz		s ¹		
力	ニュートン	Ν		m kg s ^{"2}		
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²		
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²		
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$		
電荷,電気量	クーロン	С		s A		
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹		
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$		
電 気 抵 扩	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$		
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$		
磁床	(ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$		
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$		
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$		
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K		
光 束	[ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd		
照良	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd		
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹		
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²		
カーマ		C, j	0/11g	111 0		
線量当量,周辺線量当量,方向 地線量当量,個人線量当量,	シーベルト (g)	Sv	J/kg	$m^2 s^2$		
融 表 活 州	カタール	kat		e ⁻¹ mol		
RX 215 10 1		nat		5 1101		

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (o)剤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の	中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S. S.	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ^{'3}
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{2} kg s^{3} = m^2 kg s^{3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{3} s^{1} mol$

表 5. SI 接頭語								
乗数	接頭語	頭語 記号 乗数		接頭語	記号			
10^{24}	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d			
10^{21}	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с			
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m			
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ			
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n			
10^{9}	ギガ	G	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р			
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f			
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	アト	а			
10^{2}	ヘクト	h	$10^{.21}$	ゼプト	z			
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У			

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	1t=10 ³ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの						
名称				記号	SI 単位で表される数値	
電	子 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統-	一原子	質量単	〔位	u	1u=1 Da	
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m	

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位						
	名称		記号	SI 単位で表される数値		
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa		
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa		
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m		
海		里	М	1 M=1852m		
バ		\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²		
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s		
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は		
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。		
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 /C42(19) X110		

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルフ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{2} = 10^{4} \text{ cd} \text{ m}^{2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm 2 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウジ	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≜ (10 ³ /4π)A m ⁻¹				
(。) 2 元 系のCCC単位 系しCIでけ直接比較できないため 年早 [△						

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 属	属さないその他の単位の例
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラッ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	Ц		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$
この印刷物は再生紙を使用しています