



# 物質移動に関わるパラメータ値の取得

Data Acquisition of Mass Transport Parameters

岩崎 理代 濱 克宏 森川 佳太 細谷 真一

Riyo IWASAKI, Katsuhiro HAMA, Keita MORIKAWA and Shinichi HOSOYA

バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

Geoscientific Research Department Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

□ CV □ 日本原子力研究開発機構

February 2017

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2017

#### 物質移動に関わるパラメータ値の取得

# 日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

#### 岩崎 理代\*1, 濱 克宏, 森川 佳太\*1, 細谷 真一\*1

#### (2016年11月29日受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構では、「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 所計画を岐阜県瑞浪市において進めている。本計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の 基盤の整備」および「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標として定め、「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」、「第3段階: 研究坑道を利用した研究段階」の3段階からなる計画である。現在は、第3段階における調査研 究を進めている。

物質移動に関する調査研究は、研究坑道周辺の数 m~100m 程度のブロックスケールを対象に して、岩盤中の物質移動に関わる現象の理解を進めつつ、物質移動に関わるパラメータ値の測定 技術および物質移動に関わるモデル化・解析・評価技術を体系的に整備することを目標として実 施している。

物質移動に関する調査研究の一環として,割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメー タ値の関係の把握を目的として,透過拡散試験,琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察,収着 試験,間隙率測定を実施した。

本報告書は、これらの試験結果について取りまとめたものである。

東濃地科学センター:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 <sup>※1</sup>技術開発協力員(現所属 (株)ダイヤコンサルタント) <sup>\*1</sup>(株)ダイヤコンサルタント

#### Data Acquisition of Mass Transport Parameters

Riyo IWASAKI<sup>\*\*1</sup>, Katsuhiro HAMA, Keita MORIKAWA<sup>\*1</sup> and Shinichi HOSOYA<sup>\*1</sup>

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 29, 2016)

Tono Geoscience Center of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has been carrying out the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, which is a scientific study understanding the deep geological environment as a basis of research and development for geological disposal of high level radioactive wastes. The aim of the MIU project is to establish comprehensive techniques for the investigation, analysis and assessment of the deep geological environment in fractured crystalline rock, and to develop a range of engineering techniques for deep underground application. This project has three overlapping phases: Surface-based investigation phase (Phase I), Construction phase (Phase III), and Operation phase (Phase III). Currently, the project is being carried out under the Phase III.

Mass transport study is mainly performed as part of Phase III project. In Phase III, the goal of mass transport study is to obtain a better understanding of mass transport phenomena in the geological environment as well as to develop technologies for measurement of the mass transport parameters, model construction, numerical analysis and validation of those technologies.

This study was planned to understand the influence of the geological characteristics of fracture on the mass transport parameters.

This report presents the results of diffusion experiment, observation of polished thin section, sorption experiment and porophysicality measurement.

**Keywords**: Mizunami Underground Research Laboratory Project, Diffusion Experiment, Sorption Experiment, Pore Physicality Measurement

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer (Present Affiliation: DIA CONSULTANTS Corporation)

<sup>\*1</sup> DIA CONSULTANTS Corporation

# 目 次

1. はじめに1
2. 実施概要
2.1 透過拡散試験
2.2 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察5
2.3 収着試験
2.4 間隙率測定
3. 試験結果
3.1 透過拡散試験
3.1.1 透過拡散試験溶液の分析
3.1.2 実効拡散係数(De)の算出方法10
3.1.3 算出結果11
3.2 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察
3.2.1 琢磨薄片の作製
3.2.2 微小割れ目の観察
3.3 収着試験
3.3.1 収着試験試料の作製37
3.3.2 収着試験方法
3.3.3 分配係数(Kd)の算出方法 42
3.3.4 算出結果
3.4 間隙率測定
3.4.1 試料の作製
3.4.2 間隙率測定
3.4.3 間隙物性の算出方法53
3.4.4 算出結果
4. 考察
4.1 微小割れ目本数と間隙率の関係57
4.2 母岩の変質・未変質と実効拡散係数の関係
5. まとめ
参考文献62

# CONTENTS

1. Introduction
2. Overview
2.1 Diffusion experiments
2.2 Preparation of the polished thin section and observation
2.3 Sorption experiments
2.4 Porophysicality measurement
3. Results
3.1 Diffusion experiment
3.1.1 Chemical analysis of tracer solution used for the diffusion experiments
3.1.2 Calculation method 10
3.1.3 Results
3.2 Preparation of the polished thin section and observation
3.2.1 Preparation of the polished thin section
3.2.2 Observation of the polished thin section
3.3 Sorption experiment
3.3.1 Preparation of the sample
3.3.2 Method
$3.3.3$ Calculation method of distribution coefficient $\hfill \ldots \hfill 42$
3.3.4 Results
3.4 Porophysicality measurement
3.4.1 Preparation of the sample
3.4.2 Porophysicality measurement
3.4.3 Calculation method of pore physicality
3.4.4 Results
4. Discussion
4.1 Effect of the number of microclack to the porosity
4.2 Effect of alteration of rock to the diffusion coefficient
5. Summary
References

図リスト

义	2.1-1	岩石試料採取場所	2
义	2.1-2	割れ目のタイプ区分	3
义	2.1 - 3	透過拡散試験の概念図	3
义	3.1-1	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> およびウラニンの濃度変化	7
义	3.1 - 2	透過拡散試験結果(トレーサー: Na <sup>+</sup> )	12
义	3.1-3	透過拡散試験結果(トレーサー:K+)	14
义	3.1-4	透過拡散試験結果(トレーサー: Mg <sup>2+</sup> )	16
义	3.1 - 5	透過拡散試験結果(トレーサー: Cl)	18
义	3.1-6	透過拡散試験結果(トレーサー:ウラニン)	20
义	3.2-1	薄片作製箇所	21
义	3.2-2	スラブ写真	24
义	3.2-3	偏光顕微鏡写真(クロスニコル):12MI30_15.840m	25
义	3.2-4	微小割れ目観察結果:12MI30_15.840m	26
义	3.2 - 5	微小割れ目カウント結果:12MI30_15.840m	26
义	3.2-6	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:12MI30_15.840m	26
义	3.2-7	偏光顕微鏡写真(クロスニコル):12MI31_7.830m	27
义	3.2-8	微小割れ目観察結果:12MI31_7.830m	28
义	3.2-9	微小割れ目カウント結果:12MI31_7.830m	28
义	3.2-10	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:12MI31_7.830m	28
义	3.2-11	偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 12MI30_5.250m	29
义	3.2-12	微小割れ目観察結果:12MI30_5.250m	30
义	3.2-13	微小割れ目カウント結果:12MI30_5.250m	30
义	3.2-14	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:12MI30_5.250m	30
义	3.2 - 15	偏光顕微鏡写真(クロスニコル):10MI25_22.268m	31
义	3.2-16	微小割れ目観察結果:10MI25_22.268m	32
义	3.2 - 17	微小割れ目カウント結果:10MI25_22.268m	32
义	3.2-18	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:10MI25_22.268m	32
义	3.2-19	偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 10MI25_20.782m	33
义	3.2-20	微小割れ目観察結果:10MI25_20.782m	34
义	3.2-21	微小割れ目カウント結果:10MI25_20.782m	34
义	3.2-22	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:10MI25_20.782m	34
义	3.2-23	偏光顕微鏡写真(クロスニコル):10MI24_13.221m	35
义	3.2-24	微小割れ目観察結果:10MI24_13.221m	36
义	3.2-25	微小割れ目カウント結果:10MI24_13.221m	36
义	3.2-26	割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化:10MI24_13.221m	36
叉	3.3-1	収着試験試料作製前の試料	38
叉	3.3-2	収着試験試料の作製手順	39
义	3.3-3	収着試験のフロー	41
汊	3.3-4	収着試験状況	42
汊	3.4-1	間隙率測定試料の作製手順	46
义	3.4-2	間隙率測定試料	47

図 3.4-3	間隙率測定試料の写真	49
図 3.4-4	鉱物トレース図	50
図 3.4-5	間隙直径と累積細孔体積の関係(ブランク)	54
図 3.4-6	間隙直径と細孔体積の関係(ブランク)	54
図 4.1-1	微小割れ目本数と間隙率の関係	57
図 4.1-2	12MI31_7.830m の間隙率測定試料	58
図 4.1-3	長石類の割合と間隙率の関係	59
図 4.2-1	透過拡散試験に用いた試料の変質・未変質による実効拡散係数の差	60
図 4.2-2	母岩の変質・未変質による実効拡散係数の差	60

# 表リスト

表 2.1-1	試験試料一覧3
表 2.1-2	透過拡散試験の条件
表 2.1-3	透過拡散試験溶液のサンプリング4
表 2.2-1	琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察用試料一覧5
表 3.1-1	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> の分析条件
表 3.1-2	ウラニンの分析条件
表 3.1-3	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Cl <sup>-</sup> およびウラニンの濃度変化8
表 3.1-4	試料寸法一覧10
表 3.1-5	実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: Na <sup>+</sup> )11
表 3.1-6	実効拡散係数などの算出結果(トレーサー:K+)13
表 3.1-7	実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: $Mg^{2+}$ )
表 3.1-8	実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: Cl·)17
表 3.1-9	実効拡散係数などの算出結果(トレーサー:ウラニン)19
表 3.2-1	琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察用試料一覧
表 3.2-2	各試料の微小割れ目本数
表 3.3-1	収着試験用試料一覧
表 3.3-2	収着試験条件
表 3.3-3	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> の分析条件
表 3.3-4	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> の分析結果
表 3.3-5	溶出試験結果
表 3.3-6	Mg <sup>2+</sup> の分配係数算出結果
表 3.4-1	間隙率測定試料
表 3.4-2	各鉱物粒子の表面積割合51
表 3.4-3	オートポア IV9520 の仕様一覧52
表 3.4-4	参照試料の測定条件
表 3.4-5	参照試料の測定結果
表 3.4-6	間隙物性一覧 (0.02~2.0µm)
表 4.1-1	ペグマタイトから採取した各鉱物ごとの間隙率 57

This is a blank page.

#### 1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センターは、「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)を進めている。その一環として実施してい る超深地層研究所計画は、岐阜県瑞浪市において進めている結晶質岩(花崗岩)を対象とした深 地層の研究施設計画である<sup>1)</sup>。

超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層 における工学技術の基盤の整備」を全体目標として定め、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て、「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」、および「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。現在は、第3段階における調査研究を進 めている<sup>1)</sup>。

超深地層研究所計画における物質移動に関する調査研究の目標は、研究坑道周辺の数 m~ 100m 程度のブロックスケールを対象にして、岩盤中の物質移動に関わる現象の理解を進めつつ、 物質移動に関わるパラメータ値の測定技術および物質移動に関わるモデル化・解析・評価技術を 体系的に整備することである<sup>20</sup>。結晶質岩中における物質移動現象は、物質の移動場として機能 する透水性割れ目や、割れ目周辺のマトリクス部における拡散や収着によって支配される<sup>30</sup>。こ れまでの調査研究により、研究坑道周辺に認められる割れ目は、割れ目の走向・傾斜、その周辺 の変質の程度、充填鉱物の有無などの観点に基づき分類(タイプ分け)が行われている<sup>40</sup>。そこ で、タイプごとの割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を把握すること を目的とした透過拡散試験を 2010 年度に実施した<sup>50</sup>。

2010年度の試験の結果,割れ目タイプの地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係の把握や試料サイズ依存性を確認する必要があるなどの課題が抽出された 5%。これらの課題を検討するため,2012年度から新たな透過拡散試験を計画し,供試体の作製などの試験環境を整備してきた。この試験は,割れ目表面形状を残した試料を用いて透過拡散試験を行うものであり,割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を十分に把握できないという課題に取り組むものである。この透過拡散試験の結果を考察するために必要な間隙率などの物性値をあわせて取得した。

## 2. 実施概要

#### 2.1 透過拡散試験

透過拡散試験に使用した試料(表 2.1-1)は深度 300m 研究アクセス坑道,12MI30,31 号孔および 10MI24,25 号孔で採取した(図 2.1-1)。





山之寺町友	中山 ロ カ ノ プ ル	岩石試料の特徴				
石口訊科名	割れ日グイノ ジ	母岩の変質	充填鉱物			
12MI30_15.840m	I-1	なし	方解石			
12MI31_7.830m	I-2	なし	緑色充填鉱物と方解石			
$12MI30\_5.250m$	12MI30_5.250m I-3		緑色充填鉱物			
10MI25_22.268m	II-1	あり	緑色充填鉱物と方解石			
10MI25_20.782m	II-2	あり	方解石			
10MI24_13.221m	II-3	あり	緑色充填鉱物			

表 2.1-1 試験試料一覧

透過拡散試験の条件を表 2.1-2 に示す。ボーリングコアの観察結果をもとに、割れ目タイプ 4) (図 2.1-2) ごとに試料をサンプリングし、充填鉱物の洗い流しに注意しながら φ 25 mmでコアリ ングした後に、厚さ 5 mmに成型した後にアクリルセルの中央部に設置した(図 2.1-3)。Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンを混合したトレーサー溶液を高濃度リザーバーに添加した。低濃度リ ザーバーには純水を満たした。試験開始時より定期的に高濃度リザーバー溶液を 0.1ml,および 低濃度リザーバー溶液を 5ml サンプリングした。サンプリングした高濃度リザーバー溶液 0.1ml は 5ml の純水により希釈して保管し、低濃度リザーバーから採取した測定溶液 5ml は希釈せず に保管した。



図 2.1-2 割れ目のタイプ区分<sup>4)</sup>



図 2.1-3 透過拡散試験の概念図

岩石試料	土岐花崗岩				
試料形状	直径 25mm×厚さ 5mm 程度				
試料数	7 試料				
実験水	純水				
測字溶液の量	高濃度リザーバー:100	高濃度リザーバー:100 ml			
例定俗徴の重	低濃度リザーバー:100 ml				
	Na+ : 162 ppm	$\mathrm{Cl}^-$ : 143 ppm			
トレーサーの種類と濃度	K+ : 52 ppm	ウラニン:1000 ppm			
	$\mathrm{Mg}^{2+}$ : 12ppm				
高濃度リザーバーのサンプリング量	0.1ml				
低濃度リザーバーのサンプリング量	5ml				
試験環境	大気雰囲気, 室温				

表 2.1-2 透過拡散試験の条件

表 2.1-3 の水色着色部の試料についてトレーサー濃度分析を行った。低濃度リザーバーの測定 溶液は、サンプリングの際に同量の純水を注水していたため、それによる希釈を補正した値を解 析に用いた。トレーサー濃度の分析結果を基に実効拡散係数を算出した。実効拡散係数の算出方 法は國丸ほか(2012)<sup>5</sup>に従った。

		2013/6/21	2013/6/24	2013/6/28	2013/7/5	2013/7/19	2013/8/8	2013/9/6	2013/10/11	2013/11/12	2013/12/25	2014/2/6
経過日数		試験開始	3日	7日	14日	28日	48日	77日	112日	144日	187日	230日
サンプリング間隔			3日	4日	7日	14日	20日	29日	35日	32日	43日	43日
	12MI30_15.840m_H	0									0	
Ļ	12MI31_7.830m_H	0									0	
ţ,	12MI30_5.250m_H	0									0	
腹小	10MI25_22.268m_H	0									0	
高	10MI25_20.782m_H	0									0	
	10MI24_13.221m_H	0									0	
	12MI30_15.840m_L	0	0	×	0	×	×	0	0	0	0	0
Ļ	12MI31_7.830m_L	0	×	×	0	×	×	0	0	0	0	0
低濃度リザー/	12MI30_5.250m_L	0	×	×	0	×	×	0	0	0	0	0
	10MI25_22.268m_L	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	×
	10MI25_20.782m_L	0	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0
	10MI24_13.221m_L	0	×	0	0	0	0	0	0	0	0	×

表 2.1-3 透過拡散試験溶液のサンプリング

○:サンプリングおよび分析を実施

×:サンプリングのみ実施

## 2.2 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察

割れ目表面近傍の母岩の変質の程度を把握することを目的に,表 2.2-1 の試料を対象に琢磨薄 片を作製し,微小割れ目の観察を実施した。微小割れ目は金折ほか(1988)<sup>6)</sup>を参考に,粒内, 粒間,粒界割れ目に区分してカウントした。微小割れ目本数のカウント方法については,割れ目 面から奥行1mmごとに割れ目面に対し平行するライン上に交差する微小割れ目をカウントした。

表 2.2-1 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察用試料一覧

岩石試料					
12MI30_15.840m	10MI25_22.268m				
12MI31_7.830m	10MI25_20.782m				
12MI30_5.250m	10MI24_13.221m				

## 2.3 収着試験

物質移動パラメータの1つである分配係数を把握することおよび割れ目タイプや割れ目面からの距離(母岩の変質の程度)による分配係数の違いを把握することを目的に,収着試験を実施した。琢磨薄片作製後の残試料6試料を用いて収着試験を実施した。

## 2.4 間隙率測定

表 2.1-1 の試料について,水銀圧入法を用いた各間隙物性(間隙率,全細孔容積,全細孔比表 面積,メディアン細孔直径,平均細孔径,カサ密度,真密度)の測定を行った。

水銀圧入測定に際しては、参照試料を用いて測定機器の性能を確認した。また、測定対象岩石 試料は細孔体積が小さいことが予想されるため、試料を入れない状態の測定(ブランク測定)も 合わせて行った。

#### 3. 試験結果

#### 3.1 透過拡散試験

## 3.1.1 透過拡散試験溶液の分析

サンプリングした溶液のうち,70 試料を対象に Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, ウラニンの濃度分析を 行った。分析条件を表 3.1-1 と表 3.1-2 に示す。

	5				
項目	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>			
分析方法	イオンクロマトグラフ法				
使用機器	ダイオネクス(株)製 イオンクロマトグラフ ICS-1000				
分析カラム	IonPac CG16/IonPac Cs16	IonPac AG9-HC/IonPac Cs16			
溶離液	30mM メタンスルホン酸	$9 \mathrm{mM} \mathrm{Na_2CO_3}$			
定量下限	0.02 ppm	0.1ppm			

表 3.1-1 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>の分析条件

表 3.1-2 ウラニンの分析条件

項目	ウラニン
分析方法	蛍光光度法
使用機器	(株)日立ハイテクノロジーズ製
	F-3000型蛍光分光光度計
励起波長	490nm
検出波長	514nm
定量下限	0.02 ppm

Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>の濃度分析では, 試料を超純水で適宜希釈し測定した。ウラニン濃度分 析では, 試料に四ほう酸ナトリウム溶液 (pH 緩衝液) をその濃度が 5mM になるように添加し 測定した。

図 3.1-1, 表 3.1-3 に各試料の低濃度リザーバー中の Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンの濃 度変化を示す。10MI25\_22.268m と 10MI24\_13.221m の破過量が多く, 12MI30\_5.250m の破 過量は小さかった。



図 3.1-1 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンの濃度変化

	沃고 뉴 봐 = + 태소 = + 포시	经运口米			分析值(ppm)				
	迈迥加你就歌动科	だ回口奴	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$Mg^{2+}$	Cl⁻	ウラニン		
	12MI20 15 940m	0	156	52.0	10.8	156	1,080		
	1210130_13.84011	187	144	52.8	10.1	144	816		
	12MI21 7 920m	0	160	50.4	10.9	151	1,050		
	12MI31_7.630m	187	152	53.9	10.3	147	882		
	10MI20 E 250m	0	156	53.2	12.5	156	1,102		
  ‡	12MI30_5.250m	187	152	49.0	8.8	152	882		
度り	10MI25 22 260m	0	158	52.8	11.9	158	1,056		
悥	10W125_22.200m	187	149	52.8	10.1	154	912		
1-0-	101405 00 700	0	152	49.2	11.1	152	1,066		
	10MI25_20.782m	187	157	53.9	10.3	152	882		
	101404 10 001	0	152	48.1	11.8	148	1,036		
	10MI24_13.221m	187	147	49.0	9.8	137	833		
		0	0.38	0.11	<0.02	0.48	<0.02		
		3	0.07	0.05	0.03	0.09	<0.02		
	12MI30_15.840m	7	_	_	-	-	_		
		14	0.18	0.10	0.02	0.21	0.03		
		28	_	_	-	-	-		
		48	-	_	-	-	-		
		77	0.45	0.23	0.03	0.50	0.33		
		112	0.57	0.31	0.03	0.69	0.55		
Ι.		144	0.84	0.41	0.05	0.93	0.84		
~		187	0.90	0.55	0.05	1.08	0.88		
  ‡		230	1.06	0.60	0.05	1.25	1.15		
度リ		0	0.13	0.04	0.01	0.18	<0.02		
氏濃		3	_	-	-	-	-		
~		7	_	-	-	-	-		
		14	0.18	0.08	0.02	0.16	0.04		
		28	_	-	_	-	-		
	12MI31_7.830m	48	_	_	-	-	_		
		77	0.78	0.40	0.06	0.61	0.41		
		112	1.03	0.56	0.07	0.76	0.64		
		144	1.25	0.66	0.08	0.86	0.96		
		187	1.63	0.96	0.11	1.15	1.06		
		230	1.82	1.15	0.11	1.25	1.15		

表 3.1-3 Na<sup>⁺</sup>, K<sup>⁺</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>−</sup>およびウラニンの濃度変化(1/2)

表 3.1-3 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンの濃度変化(2/2)

添過拉散試驗試料 经過日数		分析值(ppm)					
ሥረ ሥር ሥብ ዘአ በ ካማ በላ ተተ		11世口 奴	$Na^+$	K <sup>+</sup>	$Mg^{2+}$	CI⁻	ウラニン
		0	0.13	0.05	<0.02	0.16	<0.02
		3	-	-	-		-
		7	-	-	-	-	-
		14	0.24	0.11	0.02	0.17	<0.02
		28	-	-	-	I	-
	12MI30_5.250m	48	-	-	-	-	-
		77	0.79	0.34	0.03	0.34	0.03
		112	1.01	0.44	<0.02	0.30	0.06
		144	1.25	0.48	<0.02	0.35	0.08
		187	1.37	0.61	<0.02	0.39	0.11
		230	1.37	0.65	<0.02	0.35	0.13
		0	0.19	0.07	<0.02	0.24	<0.02
		3	-	-	-	-	-
		7	0.21	0.08	0.02	0.27	0.11
		14	0.22	0.07	0.02	0.30	0.23
		28	0.75	0.39	0.04	0.84	0.53
	10M125_22.268m	48	0.86	0.40	0.07	0.97	1.06
		77	1.66	0.82	0.12	1.75	1.84
		112	2.12	1.10	0.17	2.30	2.85
1		144	2.69	1.34	0.20	2.78	4.22
Ť I		187	3.33	1.76	0.26	3.53	4.61
度り		0	0.17	0.05	<0.02	0.23	<0.02
氏濃		3	-	-	-	-	-
ł		7	-	-	-	-	-
		14	0.21	0.10	0.03	0.20	0.07
		28	0.46	0.20	0.05	0.43	0.17
	10MI25_20.782m	48	0.71	0.40	0.08	0.63	0.33
		77	0.81	0.46	0.11	0.62	0.52
		112	1.22	0.76	0.18	0.94	0.87
		144	1.60	0.83	0.19	1.13	1.32
		187	1.92	1.15	0.23	1.34	1.44
		230	2.11	1.25	0.23	1.63	1.63
		0	0.16	0.05	<0.02	0.24	<0.02
		3	-	-	-	-	-
	10MI24_13.221m	7	0.35	0.15	0.02	0.46	0.24
		14	0.52	0.25	0.03	0.62	0.60
		28	1.18	0.64	0.05	1.26	1.26
		48	2.02	1.06	0.09	2.20	2.38
		77	3.28	1.85	0.16	3.53	3.95
		112	4.50	2.61	0.24	4.86	5.85
		144	5.80	3.04	0.29	6.26	8.92
		187	7.39	4.13	0.38	7.87	10.56

#### 3.1.2 実効拡散係数(De)の算出方法

実効拡散係数は Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンの濃度分析結果を用いて算出した。実効 拡散係数の算出に必要な各試料の厚さおよび直径を表 3.1-4 に示す。

	試料寸法(mm)						
試料名	試料厚1	試料厚 2	試料厚3	試料厚4	試料厚	直径	
	(0 時位置)	(3 時位置)	(6時位置)	(9 時位置)	平均值		
10MI24_13.221m	6.85	5.25	5.10	4.60	5.45	25.40	
10MI25_20.782m	5.40	5.20	5.70	5.10	5.35	25.35	
10MI25_22.268m	7.00	5.00	4.60	5.25	5.46	25.30	
12MI30_5.250m	6.35	6.65	5.70	6.05	6.19	25.35	
12MI30_15.840m	5.50	5.80	5.45	5.50	5.56	25.30	
12MI31_7.830m	5.40	6.50	6.35	6.85	6.28	25.35	

表 3.1-4 試料寸法一覧

透過拡散試験において、定常状態になる前のトレーサーの拡散挙動も含めると、低濃度リザー バーに拡散したトレーサーの量と経過時間の関係は次のように記述される<sup>3</sup>。

$$\frac{Q(t)}{SLC_0} = \frac{De t}{L^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{De n^2 \pi^2 t}{L^2 \alpha}\right)$$
(£ 3.1-1)

Q(t): 積算破過量 (F(t)を時間 t=0→t まで積分した量)

- α : 収着容量 (α=ε+ρ(1-ε)Kd)
- ε :間隙率
- ρ :媒体の真密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- Kd : 分配係数(m<sup>3</sup>/kg)
- De : 実効拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)
- S :供試体の断面積 (m<sup>2</sup>)
- L :供試体の厚さ (m)
- C<sub>0</sub> : 高濃度側リザーバー中のトレーサー濃度 (ppm)

この式はt→∞において,次のように近似できる。

$$\frac{Q(t)}{SLC_0} = \frac{Det}{L^2} - \frac{\alpha}{6}$$

(式 3.1-2)

Q(t)をtに対してプロットし、tに対する直線近似を行うことによって、その傾きから実効拡散 係数を、また切片から a を求めることができる。また収着容量の値から、 $\epsilon \ge \rho$ が既知であれば  $\alpha = \epsilon + \rho(1-\epsilon) K_d$ の式から分配係数が算出できる。Coには試験開始時(2013年6月21日)の高濃 度リザーバー中の Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>およびウラニンの濃度を与えた。

本試験では、低濃度リザーバーの試験溶液については、サンプリング時に液の補充を行った。

そのため、低濃度側に拡散してきたトレーサー濃度は希釈されることになる。ここでは、以下の 式によりトレーサー濃度の補正を実施した。

$$C'_{n} = C_{n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{v_{i}}{V} C_{i} \quad (n = 2, 3, 4 - --)$$

$$C'_{1} = C_{1} \quad (n = 1)$$

$$C_{n}' : n 番目のサンプリング溶液の補正濃度(ppm)$$

$$Cn : n 番目のサンプリング溶液の分析濃度(ppm)$$

- Ⅴ :測定リザーバー中の溶液量(L)
- vi : i 番目のサンプリング溶液の液量(L)

また,試験開始時にサンプリングした低濃度リザーバー側の測定溶液からトレーサーが検出さ れた場合,それはバックグラウンドとして取扱い,バックグラウンドを取り除いて実効拡散係数 を算出した。

## 3.1.3 算出結果

(1)Na+

それぞれの試料での試験結果を図 3.1-2 に示す。表 3.1-5 に算出した実効拡散係数, 収着容量, および分配係数を示す。収着容量と分配係数の算出に必要な間隙率と真密度は,後述の間隙率測 定結果と既知の間隙率(12MI31\_7.830m)<sup>5)</sup>を用いた。

10MI25\_22.268m と 10MI24\_13.221m の実効拡散係数は 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーであり,その他の試料の実効拡散係数は 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーであった。収着容量および分配係数が負として算出された場合には「-」と表示した。

	岩石試料	透過拡散試験結果				
		実効拡散係数	収着容量	分配係数		
トレーサー		De	α	$\mathbf{K}_{d}$		
		$(m^2/s)$	(-)	( m³/kg )		
	12MI30_15.840m	4.0E-13	—	_		
	12MI31_7.830m	8.0E-13	_	_		
No+	12MI30_5.250m	8.1E-13	_			
INa'	10MI25_22.268m	1.6E-12	1.2E-01	4.3E-05		
	10MI25_20.782m	8.5E-13	_			
	10MI24_13.221m	3.6E-12	2.0E-01	7.2E-05		

表 3.1-5 実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: Na<sup>+</sup>)



図 3.1-2 透過拡散試験結果(トレーサー: Na<sup>+</sup>)

 $(2)K^{+}$ 

試験結果を図 3.1-3 に示す。表 3.1-6 に算出した実効拡散係数,収着容量,および分配係数を示す。収着容量と分配係数の算出に必要な間隙率と真密度は,後述の間隙率測定結果と既知の間隙率(12MI31\_7.830m) 5 を用いた。

実効拡散係数は 10<sup>-13</sup>~10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s オーダーであった。収着容量および分配係数が負として算出 された場合には「-」と表示した。

	岩石試料	透過拡散試験結果			
		実効拡散係数	収着容量	分配係数	
トレーサー		De	α	K <sub>d</sub>	
		$(m^{2}/s)$	(-)	( m³/kg )	
	12MI30_15.840m	7.2E-13	1.3E-02	3.2E-06	
	12MI31_7.830m	1.6E-12	1.9E-01	7.1E-05	
IZ+	12MI30_5.250m	8.9E-13	_	—	
N'	10MI25_22.268m	2.6E-12	3.8E-01	1.4E-04	
	$10MI25\_20.782m$	1.6E-12	_	—	
	10MI24_13.221m	6.3E-12	2.0E-01	7.4E-05	

表 3.1-6 実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: K<sup>+</sup>)



図 3.1-3 透過拡散試験結果(トレーサー:K<sup>+</sup>)

 $(3)Mg^{2+}$ 

試験結果を図 3.1-4 に示す。表 3.1-7 に算出した実効拡散係数,収着容量,および分配係数を示す。収着容量と分配係数の算出に必要な間隙率と真密度は,後述の間隙率測定結果と既知の間隙率(12MI31\_7.830m) 5 を用いた。

12MI30\_15.840m と 12MI31\_7.830m の実効拡散係数は 10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s オーダーであり, 10MI25\_22.268m, 10MI25\_20.782m, 10MI24\_13.221m の実効拡散係数は 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s オーダー であった。12MI30\_5.250m は Mg<sup>2+</sup>の濃度のほとんどが定量下限を下回り(表 3.1-3), 実効拡散 係数を算出することができなかった。収着容量および分配係数が負として算出された場合には「-」 と表示した。

	岩石試料	透過拡散試験結果			
		実効拡散係数	収着容量	分配係数	
トレーサー		De	α	$K_{d}$	
		$(m^2/s)$	(-)	( m³/kg )	
	12MI30_15.840m	2.5E-13	_	_	
	12MI31_7.830m	6.7E-13	—	—	
<b>M</b> ~2+	12MI30_5.250m	×	×	×	
Mg2	10MI25_22.268m	1.7E-12	—	—	
	10MI25_20.782m	1.4E-12	—	—	
	10MI24_13.221m	2.5E-12	2.3E-01	8.5E-05	
				lata in a	

表 3.1-7 実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: Mg<sup>2+</sup>)

×:算出不可





# 図 3.1-4 透過拡散試験結果(トレーサー: Mg<sup>2+</sup>)

 $(4)Cl^{-}$ 

試験結果を図 3.1-5 に示す。表 3.1-8 に算出した実効拡散係数,収着容量,および分配係数を示す。収着容量と分配係数の算出に必要な間隙率と真密度は,後述の間隙率測定結果と既知の間隙率(12MI31\_7.830m) 5 を用いた。

実効拡散係数は 10<sup>-13</sup>~10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s オーダーであった。12MI30\_5.250m の実効拡散係数は測定値 のばらつきが大きかったため(図 3.1<sup>-5</sup>),参考値とした。収着容量および分配係数が負として算 出された場合には「-」と表示した。

				,		
	岩石試料	透過拡散試験結果				
		実効拡散係数	収着容量	分配係数		
トレーサー		De	α	K <sub>d</sub>		
		$(m^2/s)$	(-)	( m³/kg )		
	12MI30_15.840m	4.9E-13	—	—		
	12MI31_7.830m	5.6E-13	—	—		
$C1^{-}$	12MI30_5.250m	(1.4E-13)		—		
CI	10MI25_22.268m	1.7E-12	1.8E-01	6.7E-05		
	10MI25_20.782m	6.2E-13	9.0E-02	$3.5 \text{E} \cdot 05$		
	10MI24_13.221m	4.0E-12	2.5E-01	9.3E-05		
			(	):参考值		

表 3.1-8 実効拡散係数などの算出結果(トレーサー: Cl<sup>-</sup>)



図 3.1-5 透過拡散試験結果(トレーサー: Cl<sup>-</sup>)

(5)ウラニン

試験結果を図 3.1-6 に示す。表 3.1-9 に算出した実効拡散係数, 収着容量, および分配係数を示す。収着容量と分配係数の算出に必要な間隙率と真密度は,後述の間隙率測定結果と既知の間隙率(12MI31\_7.830m) 5を用いた。

12MI30\_15.840m, 12MI31\_7.830m, 12MI30\_5.250m の実効拡散係数は 10<sup>-15</sup>~10<sup>-14</sup>m<sup>2</sup>/s オー ダーであり, 10MI25\_22.268m, 10MI25\_20.782m, 10MI24\_13.221m の実効拡散係数は 10<sup>-13</sup>m<sup>2</sup>/s オーダーであった。

	岩石試料	透過拡散試験結果			
		実効拡散係数	収着容量	分配係数	
トレーサー		De	α	K <sub>d</sub>	
		$(m^2/s)$	(-)	( m³/kg )	
	12MI30_15.840m	7.1E-14	2.0E-02	5.9E-06	
	12MI31_7.830m	9.2E-14	1.3E-02	4.0E-06	
ウラーン	12MI30_5.250m	9.6E-15	4.0E-03	3.9E-07	
97-2	10MI25_22.268m	3.5E-13	5.8E-02	2.1E-05	
	$10MI25_{20.782m}$	1.0E-13	1.5E-02	5.6E-06	
	10MI24_13.221m	7.9E-13	1.5E-01	5.4E-05	

表 3.1-9 実効拡散係数などの算出結果(トレーサー:ウラニン)



図 3.1-6 透過拡散試験結果(トレーサー:ウラニン)

# 3.2 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察

琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察は、割れ目表面近傍の母岩の変質の程度を把握することを目的に実施した。対象試料を表 3.2-1 に示す。

岩石	試料
12MI30_15.840m	10MI25_22.268m
12MI31_7.830m	10MI25_20.782m
12MI30_5.250m	10MI24_13.221m

表 3.2-1 琢磨薄片の作製および微小割れ目の観察用試料一覧

## 3.2.1 琢磨薄片の作製

岩石試料から図 3.2-1 に示す箇所において琢磨薄片を作製した。琢磨薄片の作製過程のスラブの接着面側写真を図 3.2-2 に示す。

琢磨薄片の作製手順は以下のとおりである。

- ① 岩石カッターを用いて、割れ目に対し直行方向に切断する。
- ② ①の切断面を琢磨薄片の作製面とし,幅1cm以上,長さ2cm以上の岩石チップを作製する。
- ③ 岩石チップのスライドガラスに張り付ける試料面を研磨したのち、スラブ写真を撮影する。
- ④ スライスカッターを用いてスライドガラスに接着した岩石チップをスライドガラスから数 mmの位置で切断する。
- ⑤ コランダム研磨(段階的に#3000まで)を実施したのち、ダイヤモンドペースト琢磨(3μm, 1μm, 0.25μmまで)する。





(a) 12MI30\_15.840m

図 3.2-1 薄片作製箇所(1/3)



(b) 12MI31\_7.830m



(c) 12MI30\_5.250m



(d) 10MI25\_22.268m

図 3.2-1 薄片作製箇所(2/3)



(e) 10MI25\_20.782m



(f) 10MI24\_13.221m

図 3.2-1 薄片作製箇所 (3/3)



12MI30\_15.840m



10MI25\_22.268m



12MI31\_7.830m



10MI25\_20.782m



12MI30\_5.250m



10MI24\_13.221m

図 3.2-2 スラブ写真 (写真の右側が割れ目面)

#### 3.2.2 微小割れ目の観察

琢磨薄片を用いて微小割れ目本数をカウントした。微小割れ目は金折ほか(1988)<sup>6</sup>を参考に, 粒内割れ目,粒間割れ目および粒界割れ目として以下のように分類した。

粒内割れ目:単一結晶内に認められる割れ目で粒界を超えて連続していないもの 粒間割れ目:複数の鉱物結晶粒子に連続して認められる割れ目 粒界割れ目:結晶の粒界に認められる割れ目

#### (1)12MI30\_15.840m

12MI30\_15.840mの偏光顕微鏡写真を図 3.2-3 に示す。観察範囲は図 3.2-3 の赤枠(1cm×2cm) の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微小割れ目の本 数をカウントした。図 3.2-4 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-5 に微小割れ目 本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は、石英、長石、黒雲母からなり、顕著な変質は認められない。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は372本で、そのうち粒内割れ目は252本、粒間割れ 目は65本、粒界割れ目は55本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図3.2-6に 示す。

粒内割れ目は主に石英中に認められ、割れ目面近傍の粒内割れ目は、割れ目に平行に発達していることが観察される。割れ目面からの距離による粒内割れ目本数の変化は認められない。粒間割れ目のうち、割れ目面側では割れ目に平行に石英や長石を横断しているが、割れ目面より奥側では主に複数の石英を横断している。図 3.2-6 に示したように、粒間割れ目は割れ目面近傍に多く発達していることが分かる。粒界割れ目は主に石英-石英間または石英-長石間に認められる。割れ目面からの距離による粒界割れ目本数の変化は認められない。



図 3.2-3 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 12MI30\_15.840m (写真の右側が割れ目面)



.....



図 3.2-4 微小割れ目観察結果: 12MI30\_15.840m



図 3.2-5 微小割れ目カウント結果: 12MI30\_15.840m



図 3.2-6 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 12MI30\_15.840m
(2)12MI31\_7.830m

12MI31\_7.830m の偏光顕微鏡写真を図 3.2-7 に示す。観察範囲は図 3.2-7 の赤枠 (1cm×2cm) の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微小割れ目の本数をカウントした。図 3.2-8 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-9 に微小割れ目 本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は、石英、長石、黒雲母からなる。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は405本で、そのうち粒内割れ目は310本、粒間割れ 目は43本、粒界割れ目は52本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図3.2-10 に示す。

粒内割れ目は主に石英中に認められる。割れ目面からの距離による粒内割れ目本数の変化は認 められない。粒間割れ目については、石英や長石を横断する粒間割れ目が認められる。割れ目面 からの距離による粒間割れ目本数の変化は認められない。粒界割れ目は主に石英-石英間または石 英-長石間に認められる。割れ目面からの距離による粒界割れ目本数の変化は認められない。



図 3.2-7 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 12MI31\_7.830m (図の右側が割れ目面)





図 3.2-8 微小割れ目観察結果:12MI31\_7.830m



図 3.2-9 微小割れ目カウント結果: 12MI31\_7.830m



図 3.2-10 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 12MI31\_7.830m

(3)12MI30\_5.250m

12MI30\_5.250m の偏光顕微鏡写真を図 3.2-11 に示す。観察範囲は図 3.2-11 の赤枠(1cm×2cm) の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微小割れ目の本 数をカウントした。図 3.2-12 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-13 に微小割れ 目本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は、石英、長石類、黒雲母からなり、観察範囲では長石が多く分布している。 割れ目面には 2mm 程度の充填鉱物が認められ、充填鉱物は母岩を構成する鉱物が破砕された細 粒の粒子からなる。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は265本で、そのうち粒内割れ目は180本、粒間割れ 目は41本、粒界割れ目は44本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図3.2-14 に示す。

粒内割れ目は石英と割れ目面近傍の長石中に認められる。図 3.2-12 に示すように,充填鉱物層 中には微小割れ目は認められていない。図 3.2-14 のように割れ目面近傍に粒内割れ目が多い傾向 にあるが,観察範囲に石英粒子が少なく,その石英が割れ目面近傍に多く集中していたためであ ると考えられる。粒間割れ目と粒界割れ目は石英-長石間や石英-石英間に認められ,割れ目面か らの距離による本数の変化は認められない。



図 3.2-11 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 12MI30\_5.250m (図の右側が割れ目面)



図 3.2-12 微小割れ目観察結果:12MI30\_5.250m









図 3.2-13 微小割れ目カウント結果:12MI30\_5.250m



図 3.2-14 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 12MI30\_5.250m

(4)10MI25\_22.268m

10MI25\_22.268m の偏光顕微鏡写真を図 3.2-15 に示す。観察範囲は図 3.2-15 中の赤枠 (1cm×2cm)の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微 小割れ目の本数をカウントした。図 3.2-16 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-17 に微小割れ目本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は石英,長石,黒雲母からなり,長石に変質が認められるが,そのほかの鉱物 に顕著な変質は認められない。また,目視により微小割れ目が観察できる(図 3.2-2)。顕微鏡下 ではこれらの微小割れ目は方解石によって充填されていることが確認できる。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は462本で、そのうち粒内割れ目は163本、粒間割れ 目は283本、粒界割れ目は16本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図3.2-18 に示す。

粒内割れ目は石英中に認められる。粒界割れ目もわずかに認められるが、本数は少ない。図 3.2-18 に示すように、粒内割れ目は健岩側から割れ目面に向かうにしたがって増加傾向にある。 粒間割れ目は観察範囲全体で観察され、粒間割れ目の多くは方解石によって充填されている。粒 間割れ目の発達により、粒内割れ目および粒間割れ目が連結したため、粒内割れ目、粒界割れ目 の本数は相対的に少ないものと考えられる。また割れ目面近傍の粒間割れ目は割れ目に対し平行 に発達しているが、割れ目面より奥側では割れ目面に対し直交方向に発達している。



図 3.2-15 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 10MI25\_22.268m (図の右側が割れ目面)





図 3.2-16 微小割れ目観察結果: 10MI25\_22.268m



	- 주포 1 태	미습니	ιH																
		1	1					3	4	1				2	6	4	2		
	1	2	2	1	4	5	3	2	2	2	1	2	2	2	5	3	1		
2	3	3	2	1	2	2	3	3	2	1	1	2	1	2	3	2			1
4	1		2	5	5			1	1	2	1		1	3	3	1			1
1	1	1	1	1		1	1			1				4	3	1			1
2	2	1	2	1	1	3	3			1	1	1	3	4					2
	1	2	2	1	2	3	3			2	2	2	3		2	2			2
		2	1	2	1	2					2	3	3	1	2	1		1	1
2	4	1			3	2			1	2	4	1	2	1		2	1	2	1
1	1				2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	4	2
 1	1				2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	4	



	微小	小割れ	n⊟																
3	2	4	2			1		3	5	3	1	1		2	6	4	3	3	4
	2	3	2	1	4	6	3	2	2	2	2	3	2	2	7	4	2	5	4
З	4	4	3	1	2	2	3	3	2	1	1	2	5	4	5	3		1	4
4	1		2	5	5			2	1	2	1		1	3	3	1	1	6	8
1	2	2	2	1		1	2	2		3	2			4	4	3	1	4	10
2	4	1	2	1	1	3	3			2	1	1	3	4		3	1	2	4
1	2	2	2	1	2	3	3			2	2	2	3		2	4	7		3
		2	1	2	1	2			1	2	3	3	3	1	2	1	1	1	3
4	6	1			3	2			1	3	4	1	2	1		2	5	10	7
5	4		4	2	2	1	2	2	4	4	4	1	1	2	2	2	1	6	5

図 3.2-17 微小割れ目カウント結果: 10MI25\_22.268m



図 3.2-18 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 10MI25\_22.268m

(5)10MI25\_20.782m

10MI25\_20.782mの偏光顕微鏡写真を図 3.2-19に示す。観察範囲は図 3.2-19の赤枠(1cm×2cm) の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微小割れ目の本 数をカウントした。図 3.2-20 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-21 に微小割れ 目本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は、石英、長石、黒雲母からなり、長石に変質が認められるが、そのほかの鉱 物に顕著な変質は認められない。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は 157 本で,そのうち粒内割れ目は 89 本,粒間割れ 目は 39 本,粒界割れ目は 29 本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図 3.2-22 に示す。

粒内割れ目は石英と長石中に認められるが、割れ目面からの距離による発達する方向性や本数 の変化は認められない。粒間割れ目は石英-石英、または石英-長石を横断している。割れ目面か らの距離による方向性の違いや本数の変化は認められない。粒界割れ目は石英-石英、または石英 -長石の境界に発達する。割れ目面からの距離による方向性の違いや本数の変化は認められない。



図 3.2-19 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 10Ml25\_20.782m (図の右側が割れ目面)





図 3.2-20 微小割れ目観察結果: 10MI25\_20.782m









図 3.2-21 微小割れ目カウント結果:10MI25\_20.782m



図 3.2-22 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 10MI25\_20.782m

(6)10MI24\_13.221m

10MI24\_13.221mの偏光顕微鏡写真を図 3.2-23 に示す。観察範囲は図 3.2-23 の赤枠(1cm×2cm) の範囲であり、この範囲を 1mm メッシュに分割し、そのメッシュ内に遭遇する微小割れ目の本 数をカウントした。図 3.2-24 に微小割れ目のトレース図を示すとともに、図 3.2-25 に微小割れ 目本数のカウント結果を示す。

母岩の構成鉱物は、石英、長石、黒雲母からなり、長石に変質が認められるが、そのほかの鉱 物に顕著な変質は認められない。

メッシュ内に遭遇する微小割れ目の総数は 197 本で,そのうち粒内割れ目は 66 本,粒間割れ 目は 84 本,粒界割れ目は 47 本である。割れ目面からの距離ごとの微小割れ目本数を図 3.2-26 に示す。

粒内割れ目は石英と長石中に認められるが、割れ目面からの距離による発達する方向性や本数 の変化は認められない。粒間割れ目は石英-石英、または石英-長石を横断している。割れ目面か らの距離による方向性の違いや本数の変化は認められない。粒界割れ目は石英-石英、または石英 -長石の境界に発達する。割れ目面からの距離による方向性の違いや本数の変化は認められない。



図 3.2-23 偏光顕微鏡写真(クロスニコル): 10MI24\_13.221m (図の右側が割れ目面)



4119181401 4119181401 419











図 3.2-25 微小割れ目カウント結果: 10MI24\_13.221m



図 3.2-26 割れ目面からの距離による微小割れ目本数の変化: 10MI24\_13.221m

表 3.2-2 に観察した 1cm×2cm の範囲の微小割れ目本数を示す。粒内割れ目本数は試料により 差が大きいが、粒内割れ目は主に石英中に観察されており、石英の量に依存していることが考え られる。粒間割れ目本数は 10MI25\_22.268m が最も多かった。

試料名	粒内割れ目	粒間割れ目	粒界割れ目	合計
12MI30_15.840m	252 本	65本	55本	372 本
12MI31_7.830m	310 本	43 本	52本	405 本
$12\mathrm{MI30}\_5.250\mathrm{m}$	180 本	41 本	44 本	265本
10MI25_22.268m	163 本	283 本	16本	462 本
10MI25_20.782m	89 本	39 本	29 本	157 本
10MI24_13.221m	66本	84 本	47 本	197 本

表 3.2-2 各試料の微小割れ目本数

## 3.3 収着試験

収着試験は、割れ目タイプや割れ目面からの距離(母岩の変質の程度)による分配係数の違いを 把握することを目的とした。

## 3.3.1 収着試験試料の作製

琢磨薄片の残試料から割れ目近傍(割れ目面~5mm 間)と割れ目面から離れた箇所(割れ目 面から 5mm~10mm 間)の 2 箇所について収着試験試料を作製した。収着試験試料作製前の試 料を図 3.3-1 に示す。



(a) 12MI30\_15.840m



(b) 12MI31\_7.830m



(c) 12MI30\_5.250m



(d) 10MI25\_22.268m



(e) 10MI25\_20.782m



(f) 10MI24\_13.221m

図 3.3-1 収着試験試料作製前の試料

収着試験試料は以下の手順で作製した(図3.3-2)。

- ① 図 3.3-1 に示した岩石試料を,割れ目面側と割れ目面から離れた試料の2箇所からそれぞれ約5mm幅に切り出した。
- ② 切り出した試料を厚手のビニール袋に入れ, 粒径がおよそ 5mm 以下になるまでハンマーで 粗粉砕した。
- ③ 粗粉砕した試料は、メノウ自動擂潰器で微粉末になるまで粉砕し、250µmのフルイに通過することを確認した。



(左図:切出し前,中図:割れ目面側試料の切出し,右図:割れ目面から離れた試料の切出し) (a) 試料の切り出し



(b) 粗粉砕後の試料



(c) メノウ自動擂潰器による粉砕

図 3.3-2 収着試験試料の作製手順

## 3.3.2 収着試験方法

ブランク試料を含めて計 13 試料を用いて,日本原子力学会標準委員会(2006)<sup>7</sup>および齋藤ほか(2004)<sup>8</sup>などを参考に,バッチ法による収着試験を実施した。試験試料一覧を表 3.3-1 に, 試験条件を表 3.3-2 に, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>の分析条件を表 3.3-3 に示す。

No.	岩石試料名	作製箇所	備考
1	19MI20 15 940-	割れ目面近傍	
2	12W1130_15.840m	割れ目面から離れた箇所	
3	19MI91 7 890m	割れ目面近傍	
4	12W131_7.830m	割れ目面から離れた箇所	
5	19MI20 5 950m	割れ目面近傍	
6	12W130_3.230m	割れ目面から離れた箇所	
7	10MI07 00.000	割れ目面近傍	
8	101/1125_22.26811	割れ目面から離れた箇所	
9	10MI95 90 799m	割れ目面近傍	
10	101/1125_20.782111	割れ目面から離れた箇所	
11	10MI94 12 991m	割れ目面近傍	
12	10111124_13.221m	割れ目面から離れた箇所	
13			ブランク溶液 (トレーサー溶液のみ)

表 3.3-1 収着試験試料一覧

表 3.3-2 収着試験条件

項目	内容
試験方法	バッチ法
トレーサーの	$M_{2}$ + 100 mm $K_{2}$ + 50 mm $M_{2}$ + 10 mm
種類と濃度	Na $^{\circ}$ : 162 ppm, K $^{\circ}$ : 52 ppm, Mg $^{\circ}$ : 12 ppm
試料数	13 試料(岩石 12 試料,ブランク 1 試料)
試料形状	250µm 以下
サンプリング間隔	1, 7, 14, 28日目
液固比	100 : 1
試験環境	大気雰囲気,室温条件

項目	Na+, K+, Mg <sup>2+</sup>
分析方法	イオンクロマトグラフ法
使用機器	(株)島津製作所製 イオンクロマトグラフ HIC-10A-SP
分析カラム	Shim-Pac IC-SC1
溶離液	7mmol/L メタンスルホン酸
定量下限	0.1 ppm

表 3.3-3 Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>の分析条件

収着試験を以下の手順で実施した。フローを図 3.3-3 に示す。

- 反応容器(ポリビン)に粉砕した花崗岩試料 1g を入れ,98mlの実験水(純水)を加えた。
- ② 表 3.3-2 に示したトレーサー濃度の 50 倍で調製したトレーサー溶液を 2ml 添加した。
- ③ 試験開始後 1, 7, 14, 28 日目にサンプリングを行うとともに, pH 測定を行った。
- ④ サンプリングした溶液をフィルターによりろ過したのち、トレーサー濃度を測定し、収 着量の経時変化を測定した。

図 3.3-4 に収着試験の状況を示す。



図 3.3-3 収着試験のフロー

## JAEA-Technology 2016-037



図 3.3-4 収着試験状況

# 3.3.3 分配係数(K<sub>d</sub>)の算出方法

バッチ法による測定での分配係数 Kdは,次式により算出した。

$$K_d = \frac{C_b - C_t}{C_t} \times \frac{L}{S} \tag{₹ 3.3-1}$$

- K<sub>d</sub> :分配係数 (m<sup>3</sup>/kg)
- Cb :ブランク溶液中のトレーサーの濃度 (ppm)
- Ct : 平衡後の液相のトレーサー濃度 (ppm)
- L/S :液固比 (m<sup>3</sup>/kg)

### 3.3.4 算出結果

結果の例として、28日目のNa+、K+、Mg<sup>2+</sup>の分析結果を表 3.3-4 に示す。

一	占石試料	試験結果						
<u>국</u> 1월(七)	<b>冶 平</b>	時間	TT	濃	度( ppm	n )		
		(日)	рН	Na+	K+	$Mg^{2+}$		
10MI20 15 040	割れ目面近傍	28	7.22	164.1	55.2	10.4		
12W1130_15.840m	割れ目面から離れた箇所	28	7.13	164.0	53.7	10.4		
19MI91 7 990m	割れ目面近傍	28	8.69	162.5	53.7	8.9		
12M131_7.830m	割れ目面から離れた箇所	28	8.35	164.0	53.7	8.9		
	割れ目面近傍	28	8.64	163.8	55.1	7.4		
121v1130_5.250m	割れ目面から離れた箇所	28	7.71	164.0	53.7	10.4		
10MI07 00 000	割れ目面近傍	28	8.93	163.9	53.6	10.4		
10W125_22.268m	割れ目面から離れた箇所	28	8.97	162.5	53.7	8.9		
10MI05 00 700	割れ目面近傍	28	8.72	164.0	53.7	10.4		
101v1125_20.782m	割れ目面から離れた箇所	28	8.97	164.1	53.7	10.4		
10MI04 19 001	割れ目面近傍	28	9.03	164.0	53.7	10.2		
1011124_13.221m	割れ目面から離れた箇所	28	8.59	164.0	53.7	10.4		
Blank	_	28	6.73	162.9	52.3	12.0		

Blank は、ポリ瓶に岩石試料を添加していない状態である。Blankの各トレーサー元素の濃度 は、試験に用いたトレーサーの初期の濃度と等しい。一方、その他の試料では、Na+と K+の濃度 がトレーサーの初期の濃度より高い値を示した。これは試料に含まれている Na+と K+が溶出した と考えられるため、予備岩石試料を用いた溶出試験を実施した。溶出試験では、純水 100ml に粉 砕した岩石試料を 1g 添加し(液固比 100:1), 1, 7, 14, 28 日目の溶液中の陽イオン濃度分析 を実施した。分析結果を表 3.3-5 に示す。

岩石試料	試験結果								
⇒ balatata	時間		濃度(ppm)						
試料名	(日)	pН	Na+	K+	$\mathrm{Mg}^{2+}$				
	1	8.72	0.6	0.8	0.0				
淡山對醫	7	7.27	0.7	0.9	0.0				
俗山叶映	14	7.92	0.8	0.9	0.0				
	28	9.23	0.7	0.9	0.0				

表 3.3-5 溶出試験結果

表 3.3-5 に示すように、岩石からの Na+および K+の溶出が確認できた。なお、試験に用いた純水の水質分析も実施し、全ての元素濃度は 0ppm であることを確認している。したがって、表 3.3-4

に示した各試料の Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>の増加は試料からの溶出によるものであるため, Mg<sup>2+</sup>のみ分配係数を 算出した。Mg<sup>2+</sup>の分配係数は  $1.4 \sim 6.1 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/kg であった(表  $3.3 \cdot 6$ )。先に述べた透過拡散試 験結果から算出された分配係数は  $8.5 \times 10^{-5}$ m<sup>3</sup>/kg であり,収着試験によって算出した分配係数と は 3 桁の差が認められる。

;	岩石試料	試験結果					
三十 11 万	拉田住里	II	測定濃度	分配係数			
武州石	休収位直	рн	(ppm)	(m³/kg)			
10MI20 15 040	割れ目面近傍	7.22	10.4	1.5E-02			
121/1130_15.840m	割れ目面から離れた箇所	7.13	10.4	1.5 E- 02			
19MI91 7 990m	割れ目面近傍	8.69	8.9	$3.5 \text{E} \cdot 02$			
1211131_7.830m	割れ目面から離れた箇所	8.35	8.9	$3.5 \text{E} \cdot 02$			
19MI20 5 950m	割れ目面近傍	8.64	7.4	6.2E-02			
12101130_3.230 m	割れ目面から離れた箇所	7.71	10.4	1.5 E- 02			
10MI07 00 000	割れ目面近傍	8.93	10.4	1.5E-02			
10101125_22.268m	割れ目面から離れた箇所	8.97	8.9	$3.5 \text{E} \cdot 02$			
10MI95 90 789m	割れ目面近傍	8.72	10.4	1.5 E- 02			
101v1125_20.782m	割れ目面から離れた箇所	8.97	10.4	1.5E-02			
10MI94 19 991m	割れ目面近傍	9.03	10.2	1.8E-02			
10101124_13.22111	割れ目面から離れた箇所	8.59	10.4	1.5E-02			
Blank	_	6.73	12.0	_			

表 3.3-6 Mg<sup>2+</sup>の分配係数算出結果

## 3.4 間隙率測定

表 3.4-1 に作製した間隙率測定試料と寸法を示す。

間隙率測定試料名	試料形状	備考
12MI30_15.840m_B	φ10mm×厚さ5mm	石英優勢
12MI30_15.840m_E	φ10mm×厚さ5mm	長石類優勢
12MI30_5.250m	φ10mm×厚さ5mm	
10MI25_22.268m	φ10mm×厚さ5mm	
10MI25_20.782m	φ10mm×厚さ5mm	
10MI24_13.221m	φ10mm×厚さ5mm	

表 3.4-1 間隙率測定試料

## 3.4.1 試料の作製

水銀圧入法による間隙率測定では,試料を  $\phi$  16mm×20mm の円柱形サンプルホルダーに収める。試料の形状はこのサンプルホルダーに収まり,かつ透過拡散試験に用いた試料と同じ領域(割れ目面から 5mm までの距離)の間隙率を把握するため,  $\phi$  10mm,厚さ 5mm の円盤状とした。間隙率測定試料の作製手順を以下に示す(図 3.4-1)。

- ① 割れ目面とダイヤモンドビット(内径 10mm)が直交するように岩石試料を固定し,リ ボーリングした。
- ② リボーリングした \$\phi 10mm の岩石試料を割れ目面と平行になるように固定し、スライス カッターにより厚さ 5mm になるように切断した。
- ③ 12MI30\_15.840m は割れ目面からφ10mmの岩石試料を複数作製し、2 試料 (12MI30\_15.840m\_B, 12MI30\_15.840m\_E)を②の手順で厚さ5mmに切断した。
  間隙率測定試料を図3.4-2に示す。

間隙率測定試料のうち,12MI30\_15.840m\_Bと12MI30\_15.840m\_Eは石英,長石類,黒雲母の表面積の割合を算出した。表面積の算出方法は次の通りである。

- 割れ目面,その裏面,側面の写真を撮影(図 3.4-3)
- ② 石英,長石類,黒雲母を Adobe Illustrator®によりトレース・着色(図 3.4-4)
- ③ 各鉱物粒子の色のピクセル数から表面積の割合を算出

各鉱物の表面積の割合一覧を表 3.4-2 に示す。ただし、試料側面の写真合成は正確ではないため、鉱物の表面積割合は参考値とした。



(a) リボーリング状況



(b) リボーリング後の岩石試料



(c) リボーリング後岩石試料の切断

図 3.4-1 間隙率測定試料の作製手順



(a) 12MI30\_15.840m\_B (左:割れ目面,右:裏面)





(b) 12MI30\_15.840m\_E (左:割れ目面,右:裏面)







(d) 10MI25\_22.268m (左:割れ目面,右:裏面)

図 3.4-2 間隙率測定試料(1/2)











(e) 10MI25\_20.782m (左:割れ目面,右:裏面)





(f) 10MI24\_13.221m (左:割れ目面,右:裏面)

図 3.4-2 間隙率測定試料(2/2)







12MI30\_15.840m\_B (上図:側面,下左図:割れ目面,下右図:裏面)







12MI30\_15.840m\_E (上図:側面,下左図:割れ目面,下右図:裏面)

図 3.4-3 間隙率測定試料の写真



12MI30\_15.840m\_B (上図:側面,下左図:割れ目面,下右図:裏面)





12MI30\_15.840m\_E (上図:側面,下左図:割れ目面,下右図:裏面)

図 3.4-4 鉱物トレース図 (灰色:石英,白:長石類,黒:黒雲母)

三十七 万	马布	石英	長石類	黒雲母
武件名	刈家	(%)	(%)	(%)
	割れ目面	77	21	2
10MI20 17 040 D	裏面	52	42	6
12M130_15.840m_B	側面	41	53	6
	全面	53	42	5
	割れ目面	50	46	5
19MI90 15 940m E	裏面	38	59	3
12M1150_15.840m_E	側面	40	55	5
	全面	42	<b>5</b> 3	5

表 3.4-2 各鉱物粒子の表面積割合

## 3.4.2 間隙率測定

ポロシメータを用いた水銀圧入による間隙物性の測定は,供試体を入れた測定セル内を水銀で 満たしたのち,水銀に圧力を付加することによって供試体内に水銀を侵入させ,水銀に与える圧 力と供試体内への水銀の侵入量を測定するものであり,測定後の処理によって,細孔分布や間隙 率などの間隙物性(間隙率,全細孔容積,全細孔比表面積,メディアン細孔直径,平均細孔径, カサ密度,真密度)を算出することができる。

測定に用いたアメリカ Micromeritics 社製の「オートポア IV9520」の仕様 <sup>9</sup>を表 3.4-3 に示す。 測定に先立ち,装置の性能を確認するために,株式会社島津製作所提供の参照試料(シリカーア ルミナ)を用いて,ポロシメータによる測定を行った。測定の条件を表 3.4-4 に,測定結果を表 3.4-5 に示す。規定の 3 圧力において参照試料の測定値が基準値内であることを確認した。次に, 測定データからバックグラウンドの影響除去を目的として測定セルに供試体を入れない状態(ブ ランク)で測定した。

その後,作製した間隙率測定試料を用いて水銀圧入法により各間隙物性(間隙率,全細孔容積, 全細孔比表面積,メディアン細孔直径,平均細孔径,カサ密度,真密度)の測定を行った。

表 3.4-3	オートポア	IV9520	の仕様ー	·覧 <sup>9</sup>	)
---------	-------	--------	------	-----------------	---

項目	仕様			
測定方式	水銀圧入方式			
細孔直径 測定範囲	約500~0.003µm(30Å)			
圧力 測定範囲	0~345kPa(50psia) 大気圧~414MPa(60,000psia)			
圧力測定 分解能	低圧部 69Pa(0.01psi) 高圧部 大気圧~34MPa(5,000psia) 689Pa(0.1psi) 34~414MPa(5,000~60,000psia) 2,070Pa(0.3psi)			
圧力測定 精度	低圧部 ±1.0%FS 高圧部 ±1.0%FS			
測定 ステージ数	低圧部 4 高圧部 2			
圧入量 分解能	0.1mm <sup>3</sup> 以下			
圧入量 測定精度	試料セルの圧入体積の±1%			
測定データ数	最大2,500点			
高圧示差測定	ד <u>آ</u>			
圧入平衡判定条件	時間判定 0~10,000s 圧入速度判定 0~1,000,000mm <sup>3</sup> /g/s 連続スキャンモード			
演算物性	全細孔容積, 全細孔比表面積, 平均細孔直径, メディアン細孔直径, 密度, 気孔率, 粒度分布, 細孔屈曲度, 浸透率など			
サイズ・重量	幅543×奥行780×高さ1430mm, 250kg			
所要電源	本体:100/120/220/240VAC±10%, 50/60Hz, 500VA(真空ポンプ除く) コンピューター:100VAC±10%, 50/60Hz, 500VA			

表 3.4-4 参照試料の測定条件

項目	条件
前処理	温度 300℃で 1 時間以上の脱ガス処理
使用セル	5 ml, ステム容積約 0.4 ml
試料ロット	シリカーアルミナ ロット番号 (A-501-45)
試料重量	$0.5091\mathrm{g}$
測字範囲	3.0-60,000psi
但此些	(約 60-0.0030 µm)

	圧力	30,000psia	33,000psia	60,000psia
基準データ	Total intrusion volume (mL/g)	$0.55 \pm 0.03$	$0.56 \pm 0.03$	$0.58 \pm 0.03$
	Medianpore diameter (volume) (µm)	$0.0075 \pm 0.0005$	0.0075±0.0005	$0.0074 \pm 0.0005$
测空气力	Total intrusion volume (mL/g)	0.522	0.538	0.550
例だノーク	Medianpore diameter (volume) (µm)	0.0071	0.0071	0.0071

表 3.4-5 参照試料の測定結果

## 3.4.3 間隙物性の算出方法

水銀圧入法による測定では、生データとして圧力と水銀の圧入量が得られる。細孔半径は、 Washburnの式<sup>10)</sup>を用いて圧力から求められる。

$$r = \frac{2\sigma\cos\theta}{1}$$

r = ------P

(式 3.4-1)

r:細孔半径 (μm) σ:水銀の表面張力 (0.480 N/m) θ:水銀の接触角 (140°) P:圧力 (psia)

このようにして求めた間隙直径と累積細孔体積の関係を図 3.4-5 に、間隙直径と細孔体積の関係を図 3.4-6 に示す。なお、この 2 つの図は試験セルに測定試料を入れない状態(ブランク)の 測定結果である。同図からわかるように、ブランクの測定では、間隙直径が 3.0µm より大きい領域で水銀が圧入されている。また、國丸ほか(2012)<sup>5</sup>、山下ほか(2014)<sup>11)</sup>においても水銀圧入法による間隙率測定を実施しており、ブランクの測定も実施している。ブランクの結果から、 2.0µm より大きい領域はブランクの影響によるものと考察されており、間隙直径が 2.0µm 以上を除外して間隙率を算出している。これらのことから、今回の検討においても 2.0µm より大きい領域はブランクの影響があるものとし、2.0µm 以下の範囲に限定して間隙物性を算出した。



ポロシメータによって得られる間隙体積 D<sub>i</sub>に対する累積細孔体積(V/W<sub>dry</sub>)から,以下の式に 基づいて間隙率を算出した。下付きのiは,各圧力段階を示し,1≤i≤Nとする。

(1)全細孔容積(total intrusion volume)

$$\begin{aligned} \frac{V_{pore}}{W_{dry}} &= \left(\frac{V}{W_{dry}}\right)_{N} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\Delta V}{W_{dry}}\right)_{i} \end{aligned} \qquad (\mbox{it } 3.4\mbox{-}2) \\ (\mbox{it } 3.4\mbox{-}2) \\ \mbox{it } 1 = \left(\frac{V}{W_{dry}}\right)_{1} = \left(\frac{V}{W_{dry}}\right)_{1} \qquad (i=1), \quad \left(\frac{\Delta V}{W_{dry}}\right)_{i} = \left(\frac{V}{W_{dry}}\right)_{i} - \left(\frac{V}{W_{dry}}\right)_{i-1} \qquad (2 \le i \le N) \quad \mbox{it } 5 < \infty \end{aligned}$$

(2)全細孔表面積(total pore surface area)

(3)メディアン細孔直径 (median pore diameter)

メディアン細孔直径とは、累積細孔体積が全細孔容積の 50%、すなわち 0.5 ( $V_{pore}/W_{dry}$ ) に相当するときの細孔直径の値  $D_{median}$  である。

(4)平均細孔径 (average pore diameter)

$$D_{ave} = \frac{4V_{pore}}{S} = \frac{4\frac{V_{pore}}{W_{dry}}}{\frac{S}{W_{dry}}}$$
(式 3.4-4)

(5)カサ密度(bulk density)

$$\rho_{bulk} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk}} \tag{₹ 3.4-5}$$

ここに、 $W_{dry}$ はポロシメータ測定の直前に測定した乾燥重量である。また、 $V_{bulk}$ は試料の体積であり、以下のように求めた。

$$\begin{split} V_{bulk} &= V_{sample+mercury} - V_{mercury} = V_{sampple+mercury} - \frac{W_{mercury}}{\rho_{mercury}} \\ &= V_{sample+mercury} - \frac{W_{cell+sample+mercury} - W_{cell} - W_{dry}}{\rho_{mercury}} \end{split}$$
(式 3.4-6)

ここに、 $V_{sample+mercury}$ は試料と水銀の体積(これは、セル全体の体積として測定)、 $V_{mercury}$ は水銀の体積である。水銀の体積は、セル+試料+水銀の重量  $W_{cell+sample+mercury}$ を測定し、これからセルの重量  $W_{cell}$ と試料の乾燥重量  $W_{dry}$ を引いた値を水銀の密度  $\rho_{mercury}$ (本分析では、13.534 g/cm<sup>3</sup>とした)で除して求める。

(6)真密度 (skeletal density)

$$\rho_{skeltal} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk} - V_{pore}} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk} - \frac{V_{pore}}{W_{dry}} \times W_{dry}}$$
(式 3.4-7)

このうち、Vbulkは(式 3.4-6)に従って算出した。

(7)間隙率 (porosity)

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{bulk}} = \frac{\frac{V_{pore}}{W_{dry}} \times W_{dry}}{V_{bulk}}$$
(式 3.4-8)

このうち、Vbulkは(式 3.4-6)に従って算出した。

## 3.4.4 算出結果

算出した間隙物性を表 3.4-6 に示す。

試料名	全細孔容積	全細孔表面積	メディアン細孔直径	平均細孔径	カサ密度	真密度	間隙率	試料重量
	ml/g	m²/g	μm	μm	g/ml	g/ml	%	g
12MI30_15.840m_B	0.0016	0.01	0.59	0.51	2.63	2.64	0.4	0.796
12MI30_15.840m_E	0.0015	0.01	0.60	0.43	2.61	2.62	0.4	0.933
12MI30_5.250m	0.0010	0.02	0.31	0.25	2.60	2.61	0.3	0.891
10MI25_22.268m	0.0007	0.02	0.26	0.19	2.64	2.65	0.2	0.784
10MI25_20.782m	0.0038	0.11	0.31	0.14	2.54	2.56	1.0	0.801
10MI24_13.221m	0.0056	0.25	0.13	0.09	2.52	2.56	1.4	0.797

表 3.4-6 間隙物性一覧 (0.02~2.0µm)

#### 4. 考察

#### 4.1 微小割れ目本数と間隙率の関係

今回用いた試料は、石橋ほか(2012)<sup>4</sup>の割れ目タイプに基づいて採取したものである。 12MI30\_15.840m, 12MI31\_7.830m, 12MI30\_5.250mの3試料は母岩が変質していない試料であ り、10MI25\_22.268m, 10MI25\_20.782m, 10MI24\_13.221mの3試料は母岩が変質している試料 である。

微小割れ目本数と間隙率について,母岩の変質,未変質に区分して整理した(図 4.1-1)。結晶 質岩において,微小割れ目本数の増加に伴い,間隙率が大きくなることを予想していたが,微小 割れ目が多いものほど,間隙率が低い傾向を示した。

そこで、間隙率と鉱物組成比の依存性について検討した。今回実施した間隙率測定の試料サイズは、 φ10mm×厚さ5mm と非常に小さく、鉱物組成比に偏りがあった可能性がある。鈴木ほか

(1989)<sup>12)</sup>では、KMnO4水溶液に花崗岩を浸し、染色した微小間隙を観察している。この結果, 主に長石のまわりの結晶粒界と長石自身が赤褐色に染色されることを確認した。また、石英と黒 雲母もわずかに染色されているものの、長石の染色量に比べ、ごくわずかであった。さらに、鈴 木ほか(1989)<sup>12)</sup>では、ペグマタイトから採取した各鉱物を 1cm 角に成形し、水飽和法によっ て間隙率を求めており(表 4.1-1)、染色した微小間隙の観察結果と調和することを確認した。こ れらのことから、間隙率は鉱物組成比に依存する可能性が大きいことが考えられる。

以上のことを踏まえ,間隙率測定に用いた試料の鉱物組成比の検討を行った。ただし,試料は 水銀を使用した間隙率測定後に処分したため,以下の鉱物組成比の検討は,画像観察により行っ た。



図 4.1-1 微小割れ目本数と間隙率の関係

	鉱物	サンプル1	サンプル 2	サンプル 3		
	石英	0.39 %	0.26~%	0.32~%		
カリ長石		1.89 %	2.48 %	2.09 %		
	黒雲母	U.D	U.D	U.D		

表 4.1-1 ペグマタイトから採取した鉱物ごとの間隙率<sup>12)</sup>

U.D : Under detection limit.

## (1)12MI30\_15.840m\_B

12MI30\_15.840m\_B(図 3.4-3)の間隙率は 0.4%である。各鉱物の表面積割合は石英 53%,長石類 42%,黒雲母 5%である。

### (2)12MI30\_15.840m\_E

12MI30\_15.840m\_E (図 3.4-3)の間隙率は 0.4%である。各鉱物の表面積割合は石英 42%,長石類 53%,黒雲母 5%である。

### (3)12MI31\_7.830m

12MI31\_7.830m(図 4.1-2)の間隙率は 0.8%である。本試料の間隙率測定は 2012 年度に実施 され、このときは 1cm 角に成形している。一面のみの観察であるが、80%程度が長石類である。



図 4.1-2 12MI31 7.830mの間隙率測定試料

### (4)12MI30\_5.250m

12MI30\_5.280m (図 3.4-2)の間隙率は 0.3%である。割れ目面は固結した充填鉱物に覆われている。裏面では長石類が 60%程度である。

## (5)10MI25\_22.268m

10MI25\_22.268m (図 3.4-2)の間隙率は 0.2%である。割れ目面の多くは固結した充填鉱物に 覆われているが母岩部は石英である。また裏面では 70%程度が石英であり、15%程度が長石類で ある。

### (6)10MI25\_20.782m

10MI25\_20.782m (図 3.4-2)の間隙率は 1.0%である。割れ目面は固結した充填鉱物に覆われている。裏面では 70%程度が変質した長石類である。

## (7)10MI24\_13.221m

10MI24\_13.221m (図 3.4-2)の間隙率は 1.4%である。割れ目面は固結した充填鉱物に覆われている。裏面では 80%程度が変質した長石類である。

以上の観察結果を基に、長石類の割合と間隙率の関係を整理した(図 4.1-3)。目視観察は、試料の一部の面のみであり、定量的とは言えないものの、長石類の割合が大きいほど間隙率が高い 傾向にある。これらのことからも間隙率は鉱物組成に依存している可能性がある。

今後,間隙率を測定する場合,岩石試料から測定試料を採取する場合には,鉱物の分布に留意 し,採取する必要がある。



図 4.1-3 長石類の割合と間隙率の関係

#### 4.2 母岩の変質・未変質と実効拡散係数の関係

透過拡散試験から求めた実効拡散係数と分配係数について、試料の変質・未変質に着目して検 討する。

図 4.2-1 に Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, ウラニンの実効拡散係数について, 試料の変質・未変質に よる違いを示した。図中の実効拡散係数は, 12MI30\_15.840m, 12MI31\_7.830m, 12MI30\_5.250m の 3 つの未変質試料の試料について,算出された Na<sup>+</sup>の実効拡散係数の平均値 を意味する。全てのトレーサーについて,変質試料の実効拡散係数は未変質試料の実効拡散係数 よりも高い値を示す傾向があった。同じような傾向が既存の研究においても認められる(図 4.2-2) <sup>13)</sup>。ここでは,花崗閃緑岩の未変質部と変質部,そして充填鉱物層を対象に透過拡散試験を行っ ている。Cl<sup>-</sup>については未変質試料の実効拡散係数が変質試料の実効拡散係数よりも高い値と なっているが,そのほかの元素については、変質試料の実効拡散係数は未変質試料の実効拡散係 数よりも高い値を示す傾向がある。



図 4.2-1 透過拡散試験に用いた試料の変質・未変質による実効拡散係数の差



図 4.2-2 母岩の変質・未変質による実効拡散係数の差<sup>13)</sup>

## 5. まとめ

超深地層研究所計画における物質移動に関する調査研究の一環として、タイプ分けした割れ目 を含む岩石試料を対象に、物質移動に関するパラメータ値の取得や、そこで生じる現象を理解す るための調査技術を構築することを目的とした室内試験を実施した。

本報告書は、以下の試験・解析結果をまとめたものである。

- ・透過拡散試験による実効拡散係数の取得
- ・薄片観察による微小割れ目分布の把握
- ・収着試験による分配係数の取得
- ・水銀圧入法による間隙率測定

透過拡散試験では、Na<sup>+</sup>の実効拡散係数は 4.0×10<sup>-13</sup>~3.6×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, K<sup>+</sup>の実効拡散係数は 7.2×10<sup>-13</sup>~6.3×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, Mg<sup>2+</sup>の実効拡散係数は 2.5×10<sup>-13</sup>~2.5×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, Cl<sup>-</sup>の実効拡散係 数は 2.9×10<sup>-13</sup>~4.0×10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s, ウラニンの実効拡散係数は 9.6×10<sup>-15</sup>~1.0×10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>/s を示し, 岩石試料の変質・未変質により実効拡散係数の差が認められ、変質している岩石試料の実効拡散 係数は未変質の岩石試料の実効拡散係数より高い値であった。

微小割れ目の観察では、割れ目面からの距離による微小割れ目分布の差は認められず、割れ目 タイプごとによる特徴は認められなかった。

間隙率については,長石類の割合が大きいほど間隙率が高い傾向があることから,間隙率が鉱 物組成に依存している可能性が示唆される。

## 参考文献

- 日本原子力研究開発機構: "超深地層研究所地層科学研究基本計画", JAEA-Review 2015-015 (2015), 39p.
- 2) 濱 克宏,岩月輝希,松井裕哉,見掛信一郎,笹尾英嗣,大澤英昭: "超深地層研究所計画における調査研究計画-第3期中長期計画における調査研究", JAEA-Review 2016-004 (2016), 38p.
- 3) Crank, J. : "The Mathematics of Diffusion", Oxford University Press, 2<sup>nd</sup> edition (1980).
- 4) 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 尾上博則:"深部結晶質岩における割れ目の地質学的特徴と水理学的特徴", 応用地質学会, 平成24 年度研究発表会講演論文集(2012).
- 5) 國丸貴紀, 森川佳太, 舘幸男, 久野義夫, 細谷真一, 下田紗音子, 加藤博康, 中澤俊之, 生瀬博之, 久保田政子: "花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定", JAEA-Data/Code 2012-013 (2012), 96p.
- 金折裕司, 矢入憲二, 宮脇勝義: "跡津川断層北西部における花崗岩類の微小変形構造とその形成 過程", 地質学雑誌, Vol.94, No.11, pp.887-901 (1988).
- 7) 日本原子力学会標準委員会: "収着分配係数の測定方法-浅地中処分のバリア材を対象としたバッ チ法の基本手順及び深地層処分のバリア材を対象とした測定の基本手順-", AESJ-SC-TR001: 2006 (2006).
- 8) 齋藤好彦, Ochs, Michael, 神徳敬, 陶山忠宏, 柴田雅博, 笹本広, 油井三和: "JNC 収着データ ベースを用いた収着分配係数の信頼度評価手法の開発", JNC TN8410 2005-011 (2005), 33p.
- 9) オートポア IV 9520: "島津製作所", http://www.an.shimadzu.co.jp/powder/products/03porosi/spec.htm (accessed 2016-10-31).
- 10) Washburn, E. W. : "Note on Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material", Proceedings, National Academy of Sciences, Vol.7, pp.115-116 (1921).
- 11) 山下理代, 濱 克宏, 竹内竜史, 森川佳太, 細谷真一, 中村敏明, 田中由美子:"花崗岩試料を用いた拡散試験環境の整備と間隙率測定および鉱物試験", JAEA-Technology 2014-029 (2014), 118p.
- 12) 鈴木隆次, 中嶋悟, 永野哲志, 喜多治之: "花崗岩中における物質移動経路としての微小間隙の存 在状態", 鉱山地質, Vol.39, No.6, pp.349-354 (1989).
- Sato, H., Shibutani, T., Tachi, Y., Ota, K., Amano, K. and Yui, M. : "Diffusion Behaviour of Nuclides Considering Pathways in Fractured Crystalline Rocks", PNC TN8410 97-127 (1997), 57p.
\_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	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			

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例				
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>				
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 毎メートル	m <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(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 租立单位	
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 <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
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 <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
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 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)測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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はとおらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM物告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	[ 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 <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
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 <sup>-3</sup>
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 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
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 <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	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 <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	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	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	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	v		

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=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

# 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	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> 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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 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		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	<b>属さないその他の単位の例</b>
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$