

## 深部結晶質岩マトリクス部における微小移行経路と元素拡散現象の特徴

石橋正祐紀<sup>\*1</sup> 笹尾英嗣<sup>\*1</sup> 濱克宏<sup>\*1</sup>

花崗岩などの結晶質岩では、割れ目周辺のマトリクス部への物質の拡散（マトリクス拡散）が、物質の希釈や遅延に効果があることが知られている。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、マトリクス拡散現象は重要である。これまでに、岩石のマトリクス部が熱水等による変質を被っていた場合、マトリクス部の空隙率が高くなり、マトリクス拡散による遅延効果が高くなることが指摘されているものの、変質の少ないマトリクス中での“マトリクス拡散”に着目した研究は少ない。我が国に分布する花崗岩体の多くは、肉眼観察では変質を認めることができないマトリクス部でも、花崗岩マグマが冷却し固結した際に生じる熱水による初生的な変質を被っている場合があり、この影響を検討することは重要であると考えられる。そこで、瑞浪超深地層研究所の地下300mおよび500mで採取した肉眼観察で変質を認めることのできない花崗岩のマトリクス部を対象として、微視的空隙の分布を検討し、マトリクス拡散に与える影響を考察した。その結果、マトリクス部では、初生的な変質により斜長石内部に選択的に微視的空隙が形成されていること、そしてこの空隙はマトリクス拡散経路として機能し、物質移行の遅延効果を増長するものと考えられる。このことは我が国の花崗岩体（結晶質岩）のバリア機能を補強する特徴として重要である。

**Keywords:** マトリクス拡散、微視的空隙、花崗岩体、地層処分

Matrix diffusion is one of the important phenomena for evaluating the safety of the geological disposal of high level waste because it has an effect of retarding mass transport in crystalline rocks. Previous studies indicated that the altered granitic rocks have high retardation functions due to the micropore formation associated with hydrothermal alteration; however, there has not been enough knowledge on the matrix diffusion in weakly unaltered rocks (macroscopically unaltered rocks). Since the macroscopically altered granitic rocks in Japan are likely to be affected by deuterium alteration due to hydrothermal fluid resulting from crystallization of granitic magma, it is important to understand the effect of deuterium alteration on the matrix diffusion. Therefore, detailed observations were carried out to clarify the effects of deuterium alteration focused on the macroscopically unaltered granite sampled from 300m and 500m below ground levels at the Mizunami Underground Research Laboratory, central Japan. The results provide that the micropores are selectively formed in plagioclases due to deuterium alteration and they have the potential of acting as matrix diffusion paths. This is indicating the possibility that deuterium alteration can retard the mass transport in crystalline rocks in Japan. That plays a significant role in enforcing the barrier function of crystalline rocks.

**Keywords:** matrix diffusion, micropore, granitic rock, geological disposal

### 1 はじめに

花崗岩など結晶質岩には、割れ目や断層破碎帯などのマクロスケールの移行経路とマイクロクラックなどの顕微鏡等で確認することのできるマイクロスケールの空隙（以下、「微視的空隙」と呼ぶ）が存在する[1-6など]。この微視的空隙を介して、元素が岩体のマトリクス中に拡散することが知られている[7]。このような現象はマトリクス拡散と呼ばれ[7]、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、物質移動の遅延効果として重要である。そのため、地層処分の安全評価において国内および海外の地下研究施設等での研究が行われている[1-6など]。

花崗岩におけるマトリクス拡散経路としては、天然の割れ目周辺のウラン系列核種の分布や蛍光剤を混入させた樹脂を圧入した岩石のマトリクス部の観察により、粒界亀裂、粒内亀裂および粒間亀裂といったマイクロクラックや劈開などの微視的空隙が指摘されている[1-6など]。また、花崗岩形成後に、熱的イベントなどに伴って割れ目に熱水が流入した場合、割れ目周囲の熱水変質を被ったマトリクス部のカリ長石中に連続的に微視的空隙が観察され、変質を見かけ上受けていないマトリクス部に比較して空隙率が大きくなり、いわゆるマトリクス拡散による遅延効果が高いことが指摘されている[3, 4, 8, 9など]。

Characteristics of micro transfer paths and diffusion phenomena in the matrix of deep crystalline rock by Masayuki ISHIBASHI (ishibashi.masayuki@jaea.go.jp), Eiji SASAO, Katsuhiro HAMA

\*1 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター  
Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency  
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

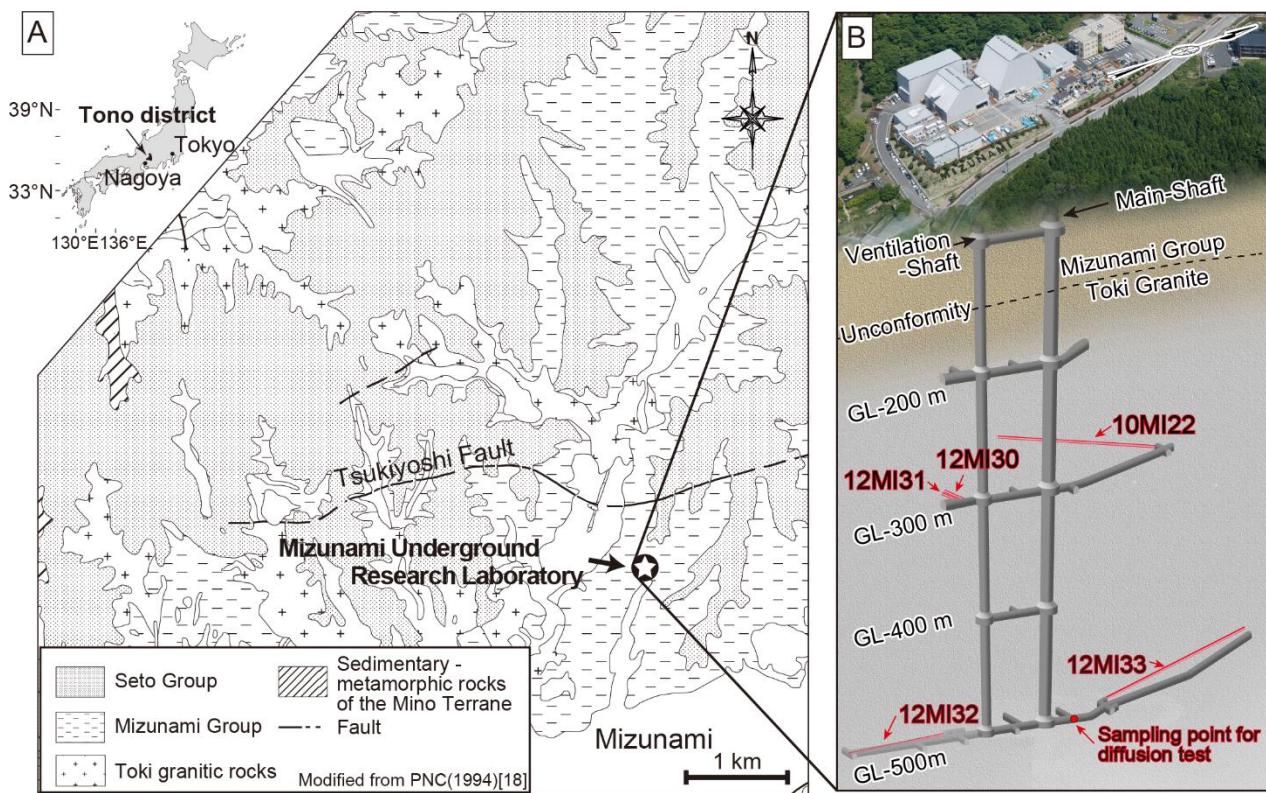
(Received 1 March 2016; accepted 9 July 2016)

日本は地質学的な変動帯に位置しており、欧州などの安定陸塊の地質環境に比較して、結晶質岩の冷却速度や隆起速度が速いといった違いから、断層や割れ目が多いなどの特徴がある[10, 11など]。また、火成岩では、マグマが冷却し固結した直後の残液により初生的な変質を被る（Deuterium alterationと呼ばれる）。国内の花崗岩では、この初生的な変質により斜長石や黒雲母の一部が変質していることが報告されている[12-15など]。このような初生的な変質は、鉱物からの元素の溶脱を伴うため、空隙率を増加させる可能性があるものの、この初生的な変質とマトリクス拡散との関係についてはほとんど論じられていない。

そこで、本研究では、岐阜県瑞浪市に位置する日本原子力研究開発機構が所有する瑞浪超深地層研究所の地下300mおよび500mにおいて割れ目周辺のマトリクス部を対象として微視的空隙の種類と分布について検討を行った。具体的には、地下坑道から掘削したボーリング調査で回収されたコアから、割れ目周辺に肉眼では変質を認めることのできないマトリクス部を採取し、肉眼観察、偏光顕微鏡観察、実体蛍光顕微鏡観察および走査型電子顕微鏡観察を行った。また、肉眼観察で変質が認められないようなマトリクス部におけるマトリクス拡散の有無を確認するために、地下坑道から岩石ブロックを採取して拡散試験を行った。

### 2 地質概要および使用した試料

本研究では、岩石試料への風化等の影響を排除するため岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所（Fig. 1）の地下300mおよび500mで取得した花崗岩を用いた。瑞浪



**Fig. 1 Geological map of the Mizunami area (simplified after PNC, 1994[19]) with the location of the Mizunami Underground Research Laboratory (A), and layout of shafts and research galleries (B). Red lines in (B) show location of boreholes.**

超深地層研究所は、日本原子力研究開発機構が、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）を実施するために建設している研究所である。瑞浪超深地層研究所は、深度 500m までの 2 本の立坑、深度 100m ごとに 2 本の立坑をつなぐ予備ステージ、並びに深度 300m と 500m に設置した主要な水平坑道（研究坑道）から構成されている（Fig. 1）[16]。

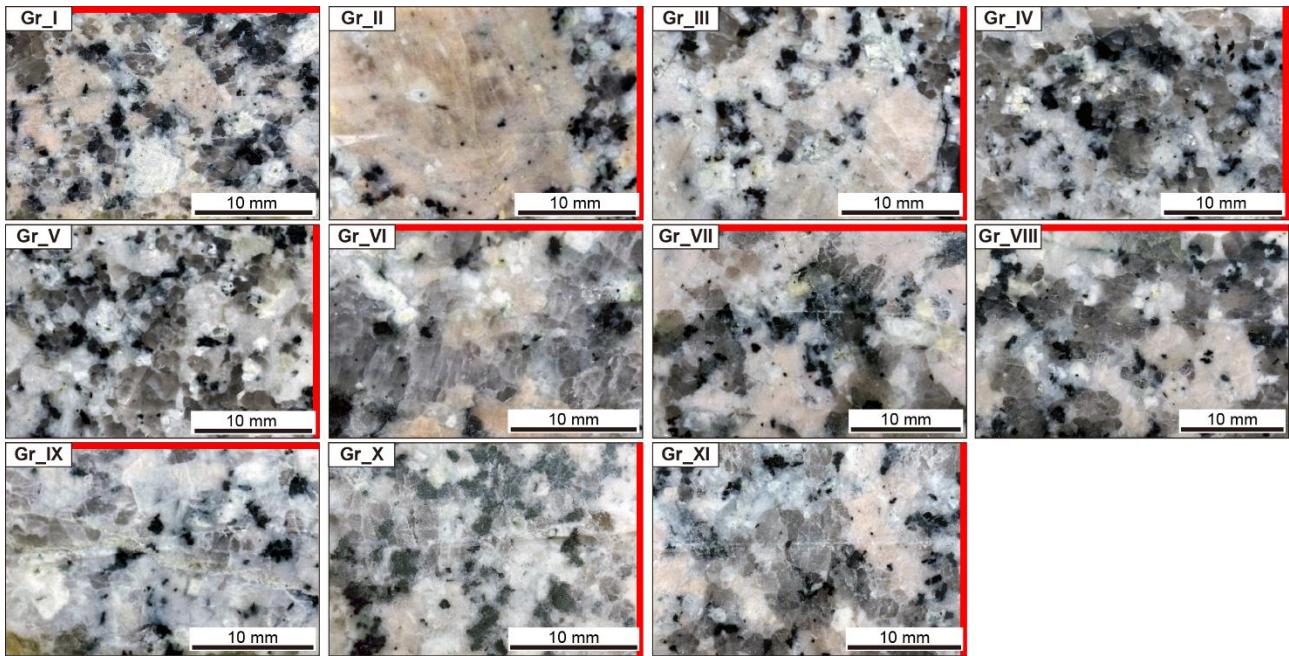
研究所では、深度約 170m 以深において、白亜紀後期～古第三紀の土岐花崗岩[17]が分布し、それ以浅には不整合を介して新第三紀中新世の瑞浪層群[18]が分布している[19]。土岐花崗岩は、西南日本内帯の山陽帯に属する苗木～上松花崗岩体の一岩体であり、地表においては東西約 12km、南北約 14km のほぼ円形の分布を示す[17, 20]。研究所で確認される土岐花崗岩は、主に等粒状で、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母からなり少量のジルコン、モナズ石、燐灰石、褐簾石、不透明鉱物を含む[13]。研究坑道には、土岐花崗岩中に複数条の高角度傾斜の断層が確認されている[21, 22]。なお、土岐花崗岩の形成年代として、 $68.3 \pm 1.8$  Ma (モナザイト CHIME 年代) が得られている[23]。研究所の坑道では、土岐花崗岩中の割れ目から数 cm～十数 cm 程度のマトリクス部が、熱水活動に伴う黒雲母の緑泥石化と斜長石のイライト化によって淡～暗緑色を呈する場合がある[13, 15 など]。また、肉眼観察で変質が認められないマトリクス部においても、花崗岩マグマ冷却に伴って形成される熱水により、顕微鏡観察スケールで黒雲母の緑泥石化や斜長石のイライト化が認められる場合がある[13, 15]。

本研究では、深度 300m および 500m の研究坑道で実施

されたボーリング調査により取得した花崗岩試料を用いた。具体的には、深度 300m から 5 試料（10MI22 号孔[24]から 2 試料；Gr\_I, II, 12MI30 号孔, 12MI31 号孔[25]から 3 試料；Gr\_III, IV, V, 12MI32 号孔[26]から 4 試料；Gr\_VI, VII, VIII, IX, 12MI33 号孔[27]から 2 試料；Gr\_X, XI）の計 11 試料を選定した（Fig. 1B, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4）。これら 11 試料は、肉眼観察において割れ目周辺のマトリクス部に変質が認められない試料である（Fig. 2）。なお、試料採取箇所の詳細は、Fig. 3, Fig. 4 および Table 1 参照のこと。

### 3 実施内容

本研究では、割れ目面を含むマトリクス部の試料を 11 試料採取し、割れ目面と直交方向に岩石薄片を作製した。そして、鉱物学的特徴および微視的空隙の分布を把握するため、偏光機能を有する実体蛍光顕微鏡（Leica M205 FA）を用いて、偏光下および蛍光フィルタ（励起光の波長領域：450-490nm, 吸收する波長領域：500nm 以上）を通過させた蛍光光源下での岩石薄片の観察、走査型電子顕微鏡（SEM；HITACHI TD-1000）を用いた微視的空隙の分布の観察を行った。さらに、4.2 で示す微視的空隙のマトリクス拡散への寄与を検討するため、深度 500m の水平坑道掘削時に回収した岩石ブロックを用いて拡散試験を実施し、拡散試験を行った岩石ブロックを、紫外光下で観察することによってトレーサー物質（ウラニン）の拡散経路や拡散範囲を確認した（岩石ブロックの採取位置は Fig. 1 を参照）。



**Fig. 2 Magnified photographs of the samples studied. Red lines in each photograph show the position of fracture surface. Sampling points are indicated in Fig. 3 and Fig. 4**

岩石薄片は、岩石中の微視的空隙の分布や量を把握するために、接着剤として蛍光剤（ビスフェノールA）が含まれるもの用いて作製した。この岩石薄片を用いて、各試料中の鉱物分布を把握するとともに、微視的空隙の分布や空隙率を算出した。微視的空隙の分布は、実体蛍光顕微鏡を用いて取得した画像に対して、楠田・西山[28]に基づき、9×9 ラプラシアンフィルタを用いたフィルタ処理を行い、ノイズ除去後に2値化し作成した画像（蛍光画像）に基づき把握した。また、空隙率は作成した蛍光画像から、対象とする画像範囲のピクセル数に対する蛍光部のピクセル数の割合として算出した。なお、Fig. 3, Fig. 4に示した割れ目からの距離ごとの空隙率の変化の図は、蛍光画像の幅1ピクセルごとに、縦方向の領域のピクセル数で蛍光部のピクセル数を除して幅1ピクセルでの空隙率を算出し、それを割れ目面からの距離でプロットし作成した。

岩石ブロックを用いた拡散試験では、縦300mm×横300mm×高さ200mmに成形した岩石ブロックの中心部にトレーサー添加孔を設置し、岩石ブロック全体を蒸留水で浸した状態でトレーサーを添加してから403日間実施した。トレーサーは、非収着性のフルオレセンナトリウム（ $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ ；以降、ウラニン）を用いた。なお、実験水には純水を用い、試験環境は大気圧下の室温条件で実施した[29]。

## 4 結果

### 4.1 対象試料の鉱物学的特徴

採取した岩石試料の産状をFig. 2に示す。本研究に用いた11試料は、一部の試料ではカリ長石が淡橙色を示すが、全体に優白色で肉眼観察では割れ目周辺のマトリクス部に変質は認められない岩石試料である。

偏光顕微鏡観察の結果、これらの試料は主に石英、カリ

長石、斜長石、黒雲母からなり、少量の緑泥石、イライト、方解石を含む（Fig.3, Fig. 4）。このうち、緑泥石は黒雲母の周辺部に、イライトは斜長石の中心部に認められ、方解石はGr\_IXの試料を横断して分布する（Fig. 3, Fig. 4）。

### 4.2 微視的空隙の分布の評価

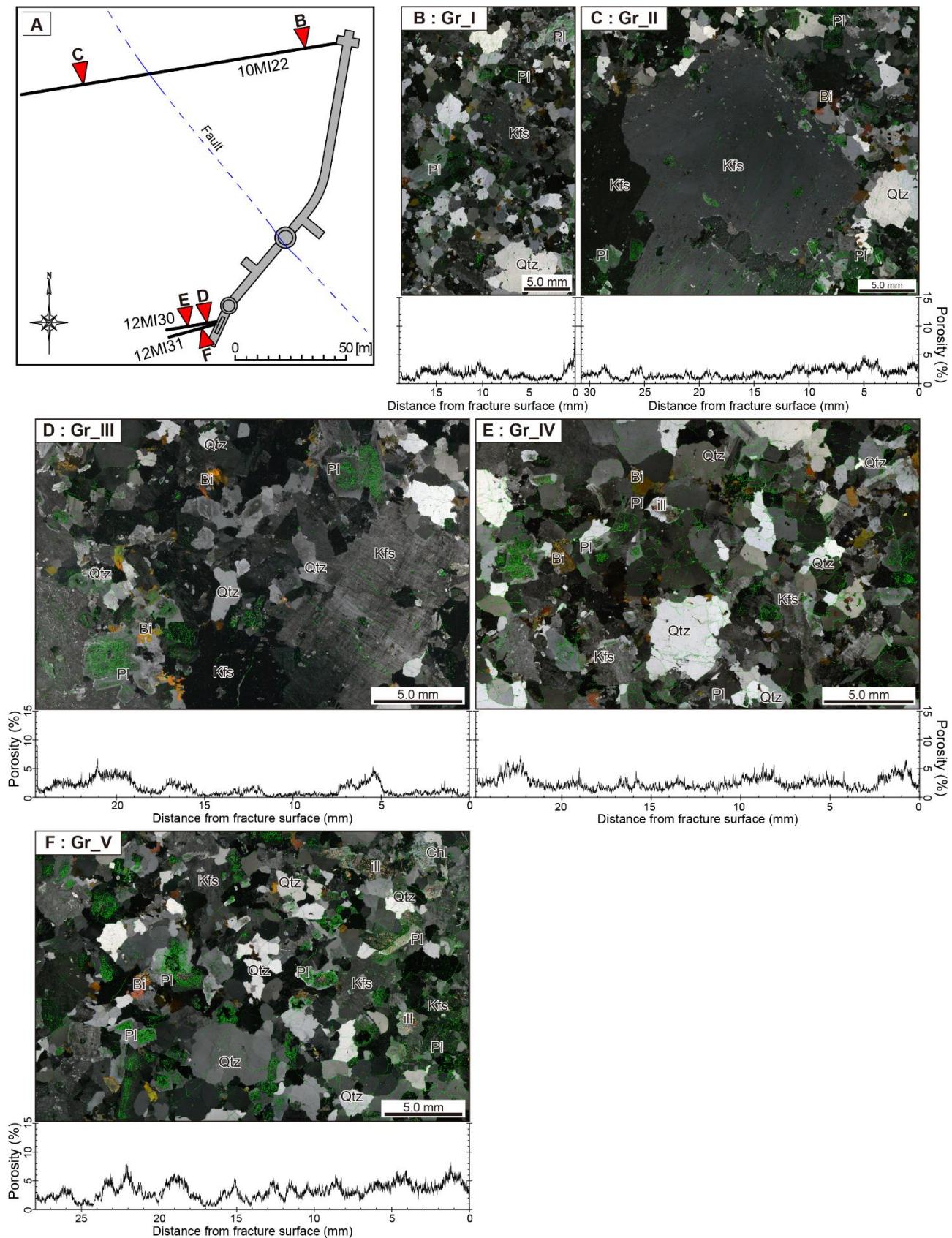
実体蛍光顕微鏡を用いて、薄片中の蛍光部を抽出した（Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5）。また、SEM観察（Fig. 6）によって、蛍光部と微視的空隙の分布や幅が整合することが確認できたことから、蛍光部は微視的空隙の位置や面積の情報を有するとみなされる。この蛍光画像から推定した空隙率は約1.45～5.63%であった（Table 1）。なお、蛍光画像から推定した空隙率は、欧米の安定陸塊の結晶質岩体に比較して大きな値を示す（スウェーデンのÄspö graniteやBohus graniteで0.6%以下[30]）。既存研究で示された空隙率は、水銀圧入

**Table 1 Porosity estimated by distribution of fluorescent dye**

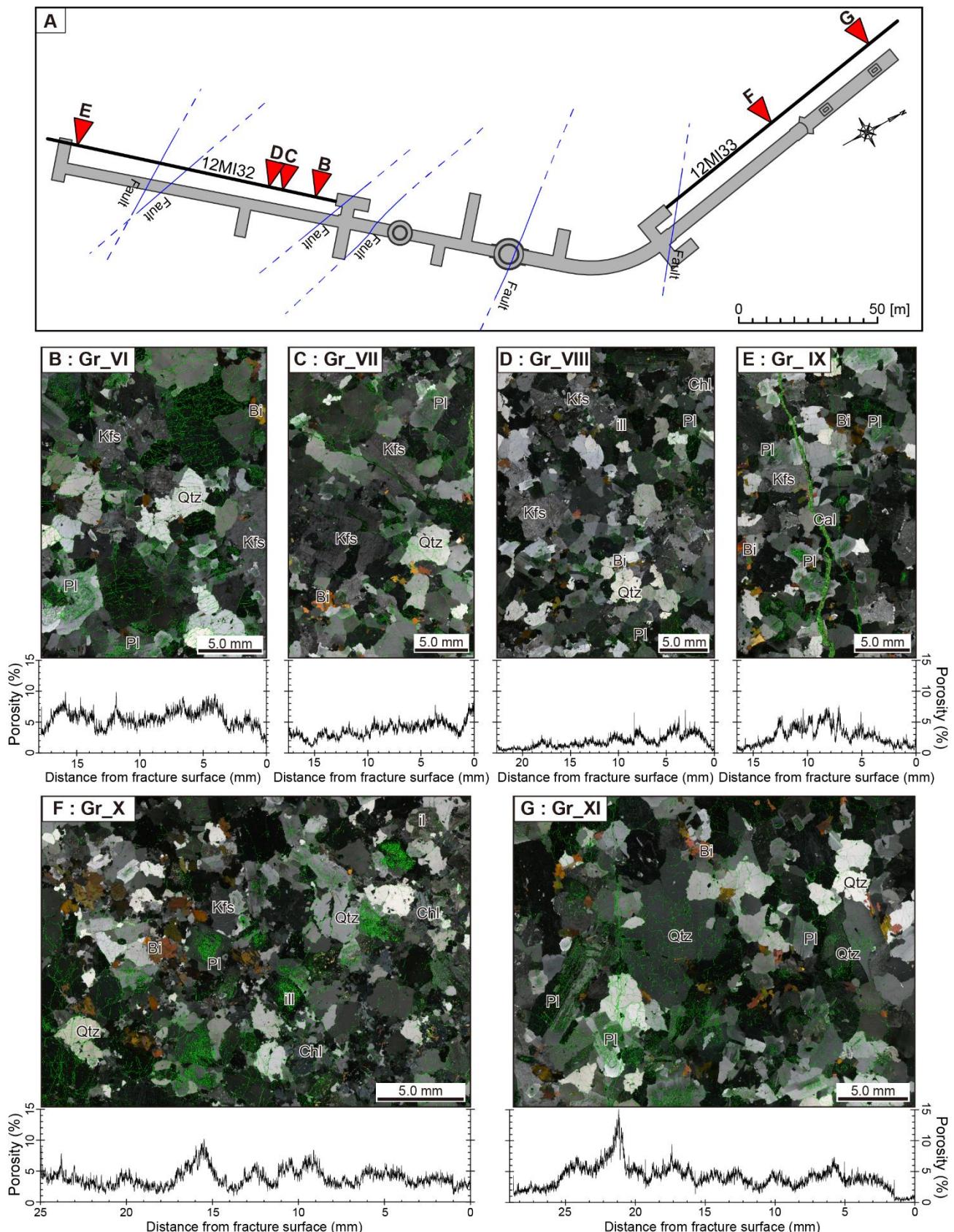
Sample name	Depth (m)	Location* <sup>1</sup>	Porosity* <sup>2</sup> (%)
Gr_I	300m	10MI22 : 10MI22	13.45m 1.68
Gr_II	300m	10MI22 : 10MI22	112.23m 1.81
Gr_III	300m	12MI30 : 12MI30	5.250m 1.45
Gr_IV	300m	12MI30 : 12MI30	15.840m 2.51
Gr_V	300m	12MI31 : 12MI31	7.830m 3.23
Gr_VI	500m	12MI32 : 12MI32	7.30m 5.63
Gr_VII	500m	12MI32 : 12MI32	19.43m 3.77
Gr_VIII	500m	12MI32 : 12MI32	24.50m 1.82
Gr_IX	500m	12MI32 : 12MI32	95.30m 2.83
Gr_X	500m	12MI33 : 12MI33	48.28m 3.89
Gr_XI	500m	12MI33 : 12MI33	93.70m 4.08

\*1: Location shows borehole ID and sampling point (meter along borehole)

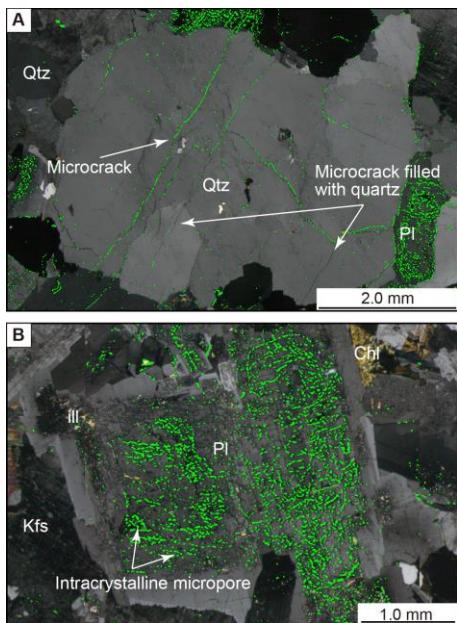
\*2: Porosities are the calculated values based on fluorescence images in Fig. 3 and Fig. 4.



**Fig. 3** Sample locations at the GL -300m depth with distribution of the fault [21] (A), and distribution of fluorescent dye (greenish part) observed by the fluorescence microscope, superposed on polarizing microscopic images (B-F). Fracture surfaces are located in right side in each image. Symbols: Qtz = Quartz, Kfs = K-feldspar, Pl = Plagioclase, Bi = Biotite, Chl = Chlorite, ill = illite.



**Fig. 4** Sample locations at the GL -500m depth with fault distribution [22] (A), and distribution of fluorescent dye (greenish part) observed by the fluorescence microscope, superposed on polarizing microscopic images (B-G). Fracture surfaces are located in right side in these each images. Symbols: Qtz = Quartz, Kfs = K-feldspar, Pl = Plagioclase, Bi = Biotite, Chl = Chlorite, ill = illite, Cal = Calcite.



**Fig. 5** Mode of occurrences of micropores indicated by the distribution of fluorescent dye (greenish part) observed by the fluorescence microscope, superposed on polarizing microscopic images. A; occurrences of microcrack in quartz, B; occurrences of micropore in plagioclase (enlargement of Fig. 3D).

法や水飽和法によって評価された値であり、サンプル表面から内部にかけて連続した微視的空隙（拡散経路として機能しうる微視的空隙）の割合を示していると考えられる。一方、蛍光画像から推定した空隙率は薄片観察に基づき算出していることから、他の微視的空隙と連結していない空隙（拡散経路として機能しない微視的空隙）も含まれた値であると考えられ、本空隙率と既存研究で示された空隙率を直接的に比較することはできないといえる。

実体蛍光顕微鏡およびSEM観察の結果、微視的空隙と

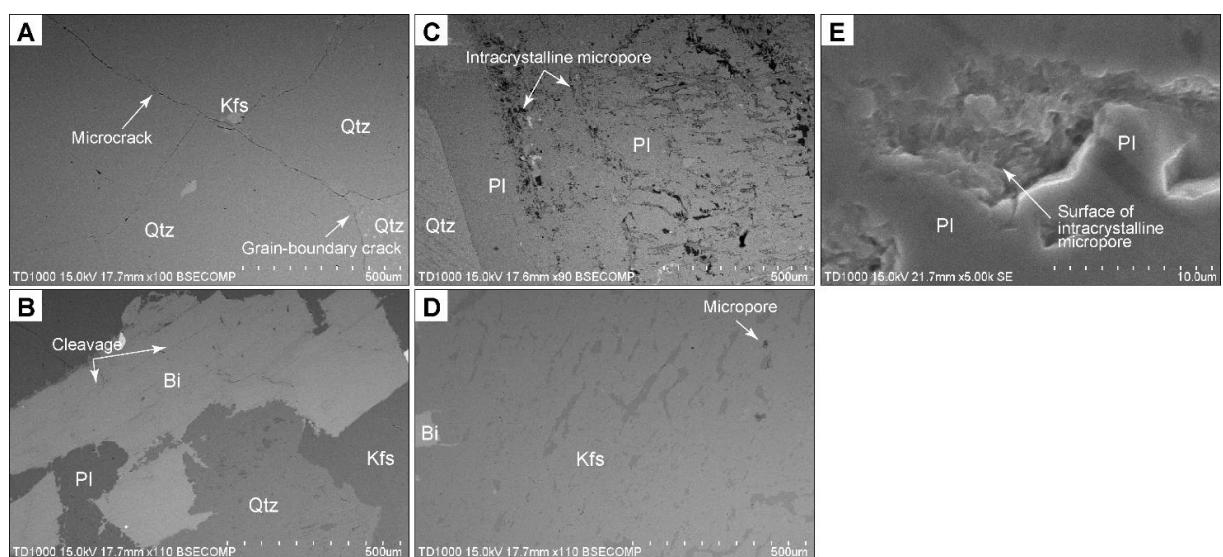
しては、粒界亀裂、粒内亀裂、粒間亀裂と劈開が認められ、とくに斜長石中には屈曲した形状の微視的空隙が認められる（Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6）。割れ目面からの空隙率の変化をFig. 3とFig. 4の各薄片画像の下段に示す。Gr\_I, VIIでは、割れ目面近傍の空隙率が高い傾向があるが、全体としては空隙率はほぼ一定の値を示す。

石英粒子に着目すると、偏光顕微鏡観察によってマイクロクラックが認められるものの、蛍光が認められない個所が複数認められる（Fig. 5A）。偏光顕微鏡観察およびSEM観察の結果、これらはマイクロクラック形成後に石英でシーリングされたマイクロクラックであることが明らかになった（Fig. 5A, Fig. 6A）。石英中のマイクロクラックは、断層から7m程度の位置から採取したGr\_VIでとくに多く認められる（Fig. 4A, B）。このマイクロクラックは断層からの距離に応じてGr\_VI, Gr\_VII, Gr\_VIIIの順に減少する傾向があり、空隙率も同様に低下する（Table 1）。

黒雲母中では、主に劈開が微視的空隙として認められる（Fig. 6B）。斜長石内部では、とくに多くの微視的空隙が分布しており、斜長石が分布する範囲では空隙率が他の領域に比較して高い値を示す（Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5B, Fig. 6C）。斜長石中の微視的空隙と斜長石との境界面は、曲線的な凹凸を有する産状を示す（Fig. 6E）。一方、カリ長石では、微視的空隙はほとんど認められない（Fig. 6D）。

#### 4.3 岩石プロックを用いた拡散試験

拡散試験に供した岩石プロックを切断して紫外光下で観察を行いトレーサー物質（ウラニン）の拡散経路や拡散範囲を確認した結果、トレーサー添加孔から数十mmの範囲にウラニンが分布し、蛍光を発することが確認された（Fig. 7B）。この蛍光を発する箇所は不均質に分布しているが、主に斜長石で明瞭にウラニンによる蛍光が確認される（Fig. 7C）。また、まれに鉱物粒界でも蛍光が認められる（Fig. 7C）。



**Fig. 6** SEM images showing distributions of micropore (black part). A; mode of occurrences of microcrack in quartz, B; mode of occurrences of cleavage in biotite, C; mode of occurrences of micropore in plagioclase, D; mode of occurrences of micropore in K-feldspar, E; enlarged mode of occurrences of micropore in plagioclase.

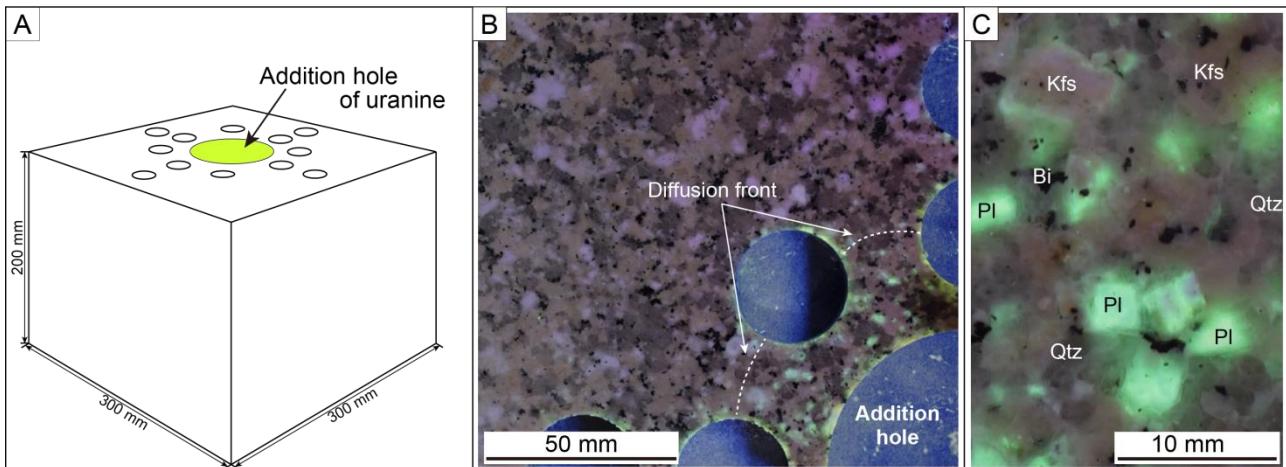


Fig. 7 Schematic diagram of rock block used for diffusion test (A), and distribution of fluorescent dyes under the ultraviolet source (B and C)

## 5 考察：花崗岩マトリクス中におけるマトリクス拡散経路

割れ目周辺のマトリクス部の試料（11試料）における微視的空隙は、粒界亀裂、粒内亀裂および粒間亀裂といったマイクロクラックや黒雲母中の劈開に加えて、斜長石内部の屈曲した微視的空隙として分布することが明らかになった。割れ目周辺のマトリクス中のウランの分布や蛍光樹脂を圧入して微視的空隙の分布を観察した既存研究の結果においても、マイクロクラックや劈開が、マトリクス拡散に寄与した空隙として指摘されている[1-6, 8, 9など]。

本研究の結果、石英粒子中に認められるマイクロクラックは、断層から7m程度の位置から採取したGr\_VIでは有意にその量が多い（Fig. 4B）。断層周辺の破碎帶では、石英鉱物中においてクラックの壁面が熱水などの流体の移動に伴い癒合し流体包有物の配列として認められるヒールドマイクロクラック、クラック内部に二次鉱物が充填することにより形成されるシールドマイクロクラックや開口したオープンマイクロクラックが増加し、断層から離れると共に減少することが数多く報告されている[例えば、31-34]。本研究では、Gr\_VIからGr\_VIIIにかけて断層から離れるにしたがい石英粒子中のマイクロクラックおよび空隙率が低下する傾向が認められる（Table 1）。このことから、Gr\_VIの石英粒子中のマイクロクラックは、断層活動に伴って増加した可能性が考えられるが、断層とマイクロクラックの関係については、今後検討を行う必要がある。

斜長石中には微視的空隙が多く認められ、割れ目面からの空隙率分布の変化からも斜長石が分布する領域で高い値を示すこと、SEM観察でも斜長石中に明瞭な微視的空隙が多数確認されることから、斜長石中の微視的空隙は他の鉱物に比較して多いと言える。また、岩石ブロックを用いた拡散試験の結果からは、主に斜長石の位置で蛍光を発することが明らかである（Fig. 7C）。既存研究では斜長石中の空隙についてはほとんど指摘されていないものの[1-6, 8, 9など]、これらの観察結果から、斜長石中の微視的空隙はマトリクス部におけるマトリクス拡散に寄与する微視的空隙の分布を把握する上で重要であると考えられる（Fig. 3, Fig. 4,

Fig. 5B, Fig. 6C, Fig. 7C).

また、岩石ブロックを用いた拡散試験では、主に斜長石部のみが蛍光を発し、斜長石以外の微視的空隙では蛍光はほとんど確認されていない（Fig. 7C）。実効拡散係数は、屈曲度（物質の移動長さ/サンプルの長さ）の二乗）に反比例する[35]。中嶋[36]が示したように、屈曲度が大きな場合には、物質の移行経路が長くなるため、結果的に物質が鉱物を通過しきる時間が長くなる（拡散速度が低下する）。斜長石中の微視的空隙はマイクロクラックに比較して複雑に屈曲している（Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5B, Fig. 6C）ことから、屈曲度は大きいと考えられ、斜長石中の空隙における拡散速度は他の鉱物内に比較して遅い可能性がある。また、斜長石は他の鉱物に比較して微視的空隙が多いことから、斜長石中にはウラニンが拡散できる領域が多いと考えられる。ウラニンは非吸着性であることから、岩石ブロックを用いた拡散試験で主に斜長石の部分で蛍光が認められた原因是、ウラニンは斜長石内部を通過する速度が遅い（拡散に時間がかかる）ため、斜長石中の微視的空隙にウラニンが滞留した結果であると考えられる。すなわち、一見変質をしていないような割れ目周辺のマトリクス部に分布する斜長石中の微視的空隙は、拡散経路として機能していると考えることができる。

土岐花崗岩では、肉眼観察で変質が認められない花崗岩マトリクス部においても、初生的な熱水変質により、普遍的に斜長石がイライトに変質していることが認められている[13, 15など]。花崗岩中の斜長石は、中心部ほどアノーサイト成分に富み外側ほどアルバイト成分に富む（つまり、中心部ほどCaに富み、外側ほどNaに富む）累帯構造を呈するのが一般的であり、アノーサイト成分が多い斜長石ほど溶解しやすいことが実験的に確かめられている[37]。本研究で認められた斜長石中の微視的空隙の表面は、曲線的で凹凸を有し溶解によって形成されたような産状を示していること（Fig. 6E）、肉眼観察で変質が認められないマトリクス部でも顕微鏡観察スケールでは斜長石中に普遍的に熱水変質鉱物であるイライトが認められていることから、斜長石中の微視的空隙は、花崗岩質マグマが冷却し固結した際に生じる熱水による初生的な変質によって形成されたと

考えられる[13-15]。すなわち、花崗岩固結直後の初生的な熱水変質は、とくに斜長石中の微視的空隙を増加させた（すなわち、空隙率を増加させた）と考えられる。これらの微視的空隙は岩石ブロックを用いた拡散試験の結果から、マトリクス拡散経路として機能していると考えられることから、初生的な熱水変質は、マトリクス拡散を助長していると考えられる。

肉眼観察で変質が認められない岩石マトリクス部における斜長石の熱水変質は、土岐花崗岩以外でも、茨城県の稻田花崗岩、岩手県の葛根田花崗岩や岡山県の万成花崗岩など、国内の他の花崗岩体でも一般的に認められている[12-14など]。また、斜長石中の微視的空隙は複雑に屈曲していることが稻田花崗岩でも確認されている[36]。土岐花崗岩以外では、微視的空隙に関する研究は不十分であるものの、上述した花崗岩でもマトリクス部において初生的変質が認められることから、肉眼では変質していないと判断される花崗岩のマトリクス部でも、空隙が増加し、マトリクス拡散経路が増えている可能性がある。

今後、土岐花崗岩の割れ目からさらに離れた試料に加えて、他の花崗岩において調査研究を進める必要はあるものの、我が国の花崗岩体はマトリクス拡散による物質移行の遅延が期待できる可能性が考えられ、地層処分の安全評価の観点から重要な知見であると考えられる。

## 6 まとめ

岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所の地下300mおよび500mから採取した、割れ目周辺のマトリクス部の花崗岩試料（肉眼観察において割れ目周辺に変質が認められない試料）を対象として、微視的空隙の分布とその特徴およびマトリクス拡散経路との関連性について検討を実施した。

その結果、検討した花崗岩のマトリクス部では、花崗岩固結直後の初生的な熱水による変質に伴い微視的空隙が斜長石内部に集中して形成されることを確認した。また、岩石ブロックを用いた拡散試験の結果、このような微視的空隙がマトリクス拡散経路として機能しており、マトリクス拡散を助長している可能性が考えられた。

このような、初生的な熱水変質に伴う斜長石中の微視的空隙は、国内の他の花崗岩でも認められており、我が国の花崗岩では、初生的な熱水変質によって斜長石内部に微視的空隙が形成され、これにより、一見して変質していないような岩石のマトリクス部でもマトリクス拡散による物質移行の遅延が期待できる可能性が示された。

## 謝辞

本研究で用いた試料の採取・整形などには、株式会社ダイヤコンサルタントの森川佳太氏および岩崎理代氏にご助力頂いた。また、匿名の査読者の方々および出版小委員会の皆様より頂いた多数の貴重なご指導・ご意見により本稿を大幅に改善することができた。これらの方々に、厚く御礼を申し上げる。

なお、本研究で用いた試料の一部は、一般財団法人電力中央研究所が経済産業省資源エネルギー庁より受託する「平成24年度 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発」にて行われたボーリング調査で得られた岩石コアを用いたことをここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 山口徹治, 磯部博志, 中山真一: 花崗岩内の微小間隙構造の解析. 放射性廃棄物研究 **3**, 99-107 (1997).
- [2] Frieg, B., Alexander, W. R., Dollinger, H., Bühler, C., Haag P., Möri, A., Ota, K.: In situ resin impregnation for investigating radionuclide retardation in fractured repository host rocks. *Journal of Contaminant Hydrology* **35**, 115-130 (1998).
- [3] Ota, K., Amano, K., Ando, T.: Brief overview of in situ contaminant retardation in fractured crystalline rock at the Kamaishi In Situ Test Site. *Proceedings of an international workshop for the Kamaishi in situ experiments*, Iwate, Japan, August 24-25, 1998, pp.67-76 (1998).
- [4] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第2次とりまとめ- 分冊1 わが国地質環境. JNC TN1400 99-021 (1999).
- [5] Ota, K., Mori, A., Alexander, W. R., Frieg, B., Schild, M.: Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations. *Journal of Contaminant Hydrology* **61**, 131-145 (2003).
- [6] Tachi, Y., Ebina, T., Takeda, C., Saito, T., Takahashi, H., Ohuchi, Y., Martin, A. J.: Matrix diffusion and sorption of Cs+, Na+, I- and HTO in granodiorite: Laboratory-scale results and their extrapolation to the in situ condition. *Journal of Contaminant Hydrology* **179**, 10-24 (2015).
- [7] Neretnieks, I.: Diffusion in the rock matrix: An important factor in radionuclide retardation?. *Journal of Geophysical Research* **85**, 4379-4397 (1982).
- [8] 吉田英一, 佐藤治夫, 仙波毅: マトリクス拡散による物質移動の遅延効果の評価手法とその検討. 応用地質 **43**, 24-34 (2002).
- [9] Yoshida, H., Metcalfe, R., Seida, Y., Takahashi, H., Kikuchi, T.: Retardation capacity of altered granitic rock distributed along fractured and faulted zones in the orogenic belt of Japan. *Engineering Geology* **106**, 116-122 (2009).
- [10] 小島圭二: 北欧の花崗岩・日本の花崗岩-地下空洞に関する特徴-. 応用地質 **23**, 109-113 (1982).
- [11] 吉田英一: 岩盤中の透水性亀裂とその長期的挙動-現状と今後の課題-. 地学雑誌 **121**, 68-95 (2012).
- [12] 藤本光一郎: 鉱物粒界での水/岩石反応から見た深部地熱系. 地質ニュース **447**, 21-25 (1994).
- [13] 西本昌司, 鵜飼恵美, 天野健治, 吉田英一: 地下深部花崗岩の変質プロセス解析-土岐花崗岩を例にして-. 応用地質 **49**, 94-104 (2008).

- [14] 吉田英一, 西本昌司, 長秋雄, 山本鋼志, 勝田長貴: 地下花崗岩体の変質とその形態-産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に-. 応用地質 **49**, 256-265 (2008).
- [15] 石橋正祐紀, 安藤友美, 笹尾英嗣, 湯口貴史, 西本昌司, 吉田英一: 深部結晶質岩における割れ目の形成・充填過程と透水性割れ目の地質学的特徴-土岐花崗岩を例として-. 応用地質 **55**, 156-165 (2014).
- [16] 日本原子力研究開発機構: 東濃地科学センター平成26年度事業報告及び平成27年度事業計画の概要. <http://www.jaea.go.jp/04/tono/jigyou/jigyouse.html> (2015).
- [17] 石原舜三, 鈴木淑夫: 東濃ウラン鉱床の基盤花崗岩類. 地質調査所報告 **232**, 1-178 (1969).
- [18] 糸井川淳二: 瑞浪地域の地質. 瑞浪市化石博物館専報 **1**, 85-144 (1980).
- [19] 動力炉・核燃料開発事業団: 日本のウラン資源. PNC TN7420 94-006 (1994).
- [20] Ishihara, S., Terashima, S.: Chemical variation of the Cretaceous granitoid across southwestern Japan: Shirakawa-Toki-Okazaki transaction. *Journal of the Geological Society of Japan* **83**, 1-18 (1977).
- [21] 窪島光志, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣, 鶴田忠彦, 田上雅彦, 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; 深度300mまでの地質・地質構造. JAEA-Research 2012-037 (2012).
- [22] 川本康司, 窪島光志, 村上裕晃, 石橋正祐紀, 笹尾英嗣: 超深地層研究所計画 地質・地質構造に関する調査研究-深度500mステージの地質・地質構造-. JAEA-Research 2014-021 (2014).
- [23] Suzuki, K., Adachi, M.: Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Journal of Metamorphic Geology* **16**, 23-37 (1998).
- [24] 鶴田忠彦, 武田匡樹, 上野孝志, 大丸修二, 徳安真吾, 新宮信也, 石橋正祐紀, 竹内竜史, 松岡稔幸, 水野崇, 田上雅彦: 超深地層研究所計画; 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 (2012).
- [25] 電力中央研究所: 平成24年度地層処分技術調査等事業(地層処分共通技術調査: 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発) -岩盤中物質移行特性評価技術高度化調査-. 経済産業省 資源エネルギー庁 (2013).
- [26] 川本康司, 黒岩弘, 山田信人, 大貫賢二, 大森一秋, 竹内竜史, 尾方伸久, 大森将樹, 渡辺和彦: 深度500m研究アクセス南坑道における先行ボーリング調査報告書(12MI32号孔). JAEA-Technology 2014-011 (2014).
- [27] 露口耕治, 黒岩弘, 川本康司, 山田信人, 大貫賢二, 岩月輝希, 竹内竜史, 尾方伸久, 須藤正大, 見掛信一郎: 深度500m研究アクセス北坑道における先行ボーリング調査報告書(12MI27号孔, 12MI33号孔). JAEA-Technology 2013-044 (2014).
- [28] 楠田啓, 西山孝: 画像処理による微細な割れ目の抽出と評価 -風化した花崗岩と一軸圧縮試験を行った安山岩における微細な割れ目の解析-. 応用地質 **34**, 32-39 (1994).
- [29] 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).
- [30] Eliasson, T.: Mineralogy, geochemistry and petrophysics of red coloured granite adjacent to fractures. SKB Technical Report TR 93-06, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1993).
- [31] Engelder, J. T.: Cataclasis and the generation of fault gouge. *Geological Society of America Bulletin* **85**, 1515-1522 (1974).
- [32] Kanaori, Y., Yairi, Y., Ishida, T.: Grain boundary microcracking of granitic rocks from the northeastern region of the Atotsugawa fault, central Japan. *Engineering Geology* **30**, 221-235 (1991).
- [33] Anders, M. H., Wiltschko, D. V.: Microfracturing, paleostress and the growth of fault. *Journal of Structural Geology* **16**, 795-815 (1994).
- [34] 高木秀雄, 三輪成徳, 山田哲史, 西嶋圭, 山崎聰, 円城寺守: 淡路島北部に分布する白亜紀花崗岩類中の石英に発達するマイクロクラックの三次元方位分布による古応力場の復元と生成環境. 地質学雑誌 **118**, 571-581 (2012).
- [35] Boving, T. B., Grathwohl, P.: Tracer diffusion coefficients in sedimentary rocks: correlation to porosity and hydraulic conductivity. *Journal of Contaminant Hydrology* **53**, 85-100 (2001).
- [36] 中嶋悟: 花崗岩の割れ目, 粒界, 間隙構造のフラクタル解析と物質移動・流動. 鉱物学雑誌 **24**, 125-130 (1995).
- [37] White, A. F., Brantley, S. L.: The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field?. *Chemical Geology* **202**, 479-506 (2003).

