

論 説

地下 4.4 km (地温 250°C) から得られた花崗岩のジルコンの FT 熱特性について 伊藤久敏

Thermal constraints on zircon fission-track annealing as inferred from a granite under present temperature of 250 °C at 4.4 km depth Hisatoshi Ito

電力中央研究所, Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

Abstract

Zircon fission-track (FT) dating was applied to a granite beneath the Cooper Basin, an area with the highest geothermal gradient, in Australia. Zircon FT age and mean track length of 158 ± 16 Ma and 7.9 ± 1.9 μm , respectively, were obtained from a granite at a depth of 4.4 km, whose present temperature is ~ 250 °C. The track length data indicates that the granite had experienced higher thermal conditions (~ 300 °C) over the last 10 m.y. as inferred from the Arrhenius plot of Tagami et al. (1998). The FT data suggests that age reduction is small (less than half), assuming the original crystallization age of $\sim 310 \pm 10$ Ma (U-Pb zircon age), under the above-mentioned annealing conditions (~ 300 °C for a heating duration of ~ 10 m.y.). A DAP detector, recently introduced to FT dating by Yoshioka et al. (2003), was also applied and its etching characteristics were reconfirmed.

Key words: fission-track dating, zircon, closure temperature, diallyl phthalate (DAP), Cooper Basin, Australia

1. はじめに

オーストラリアでは、2005年現在、Cooper Basin (Fig. 1) において高温岩体発電 (Hot Dry Rock ; 以下, HDR) 開発プロジェクトが進行中である。同地域は、オーストラリア大陸で地温が最も高い地域に相当する。著者は、同プロジェクトで掘削された坑井試料 (カッティングス) を入手し、ジルコンのフィッション・トラック (FT) 法を適用する機会を得た。入手した最深部の試料は、深度 4.4 km で地温が約 250°C の花崗岩である。活動的な地熱地帯 (Ito and Tanaka, 1995) を除くと、本試料はジルコンの FT 法を適用した

試料として最も高温の試料である。従ってジルコンの FT の熱特性に対して新たな制約を与えることが期待できる。さらに、この温度はジルコンの FT 法の閉鎖温度 (約 250°C ; Hurford, 1986 ; Tagami et al., 1996 ; Batt et al., 2001) に相当するため、閉鎖温度付近の天然のアニーリングが FT 法に与える影響を検討する上でも興味深い。なお、本試料の年代測定では、外部ディテクターとして DAP (ジアリルフタレート) 樹脂を用いた。同ディテクターは吉岡ほか (2002), Yoshioka et al. (2003) において初めて FT 法に適用されたものであり、その特性についての報告例は少ない。



Fig. 1 Position of Cooper Basin HDR site (Habanero #1) and related basins.

ここでは、DAP 樹脂に関して著者の行った実験結果についても述べる。

2. 地質概要と試料採取

入手した花崗岩は Big Lake Suite と呼ばれ、その貫入・定置した年代はジルコンを用いた U-Pb 法により 300~320 Ma (Gatehouse et al., 1995) とされている。本花崗岩は貫入後、急激に隆起・削剝を受け、二疊紀初期には地表に露出していた (Gravestock and Jensen-Schmidt, 1998)。その後、二疊紀~三疊紀にかけての沈降による Cooper Basin の形成と主として白亜紀の沈降による Eromanga Basin (Fig. 1)の形成を経て、現在、本花崗岩は地下 3.6 km 以深に分布する (Fig. 2)。なお、本花崗岩は白雲母と黒雲母を含有する中粒~粗粒花崗岩であり、黒雲母は緑泥石に変質している (Wyborn et al., 2004; 伊藤・鈴木, 2005)。

FT 年代測定用試料は、Cooper Basin HDR プロジェクトで掘削された Habanero #1 井から採取した合計 5 試料 (すべてカッティングスで、各

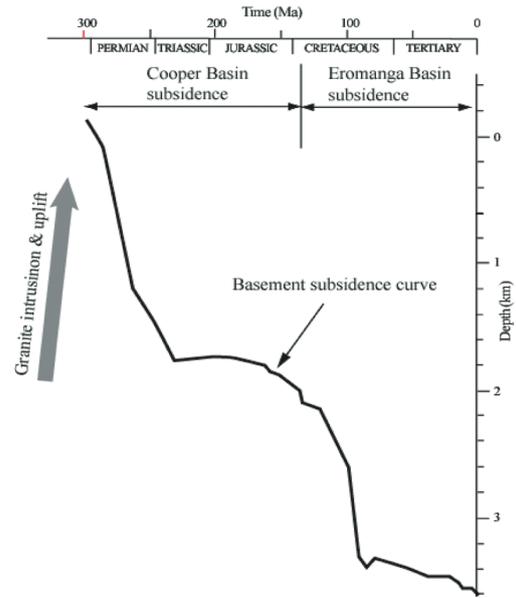


Fig. 2 Simplified subsidence history of the Cooper Basin HDR site (modified from Deighton and Hill, 1998, Fig. 9.4).

約 1.5 kg) である (Table 1)。採取した試料のうち、最上部の試料 (HB3650 : 深度 3650 m に相当) は堆積岩の基底付近のものであり、その他は花崗岩から得たもので、最深部の試料 (HB4400) は Habanero #1 井の坑底 (深度 4421 m) 付近の試料 (温度は 248℃ : 温度検層データを外挿したもの。他の温度も同様) である。

3. ジルコンの FT 年代測定実験

ジルコンの分離は以下の手順で行った。各試料について、ディスクミルによる粉碎の後、篩掛けと椀掛けにより 74~250 μm の範囲の重鉱物を濃集し、磁気分離 (ハンドマグネットを使用)、重液分離 (ポリタングステン酸ナトリウム (SPT) とジヨードメタンを使用) を行った。ジヨードメ

Table 1 List of Habanero #1 samples for zircon fission-track dating method

Sample code	Sampling depth (m)	Temp.(°C)	Description
HB3650	3642-3652	221	Bottom of sedimentary rock
HB3675	3673-3682	222	Top of granite (weathered part?)
HB4000	3999-4008	233	Granite
HB4255	4249-4258	242	Granite. Near a major fracture.
HB4400	4398-4407	248	Granite. Bottom of wellbore.

タン (比重 3.33) による分離後も、ジルコン以外の大量 (各 1~2 g 以上) の白色鉱物が残ったので、フッ酸処理を行ったが、この白色鉱物は除去できなかった。そこで XRD による鉱物の同定を行ったところ、重晶石 (Barite : 化学式は BaSO_4 , 比重は 4.5) と同定された。重晶石は $\text{NaOH} \cdot \text{KOH}$ 共融液 (225°C, 1 時間) で溶けることが確認されたので、その処理を経て、ジルコンを各 200 粒程度得た。なお、重晶石は掘削時に人為的に混ぜたものとのことであった。ジルコンは長径 (結晶の c 軸方向の径) が 200 μm , 短径 (結晶の a 軸方向の径) が 80 μm 程度で、自形性は概ね良好なものが多かった。

得られたジルコンを PFA テフロンシートに埋め込み、ダイヤモンドペーストで研磨後に、 $\text{NaOH} \cdot \text{KOH}$ 共融液 (225°C) で 9~10 時間のエッチングを行い、FT 年代測定に適する自発トラックの出現を確認した (Fig. 3)。この条件で、自発トラックの数 (密度) と長さ (horizontal confined track ; Laslett et al., 1982) の計測を行った。計測には FT STAge システム (Dumitru, 1993) を用いた (伊藤, 1999)。年代測定は外部ディテクター法 (ED1 : Gleadow, 1981) に従い、外部ディテクターとして次項に述べる DAP 樹脂を使用した。また、年代計算はゼータ較正法 (Hurford, 1990) により行った。熱中性子照射は日本原子力研究所の研究炉 JRR-3 の気送管 PN-2 (下段) を使用し、20 秒間の照射を行った。

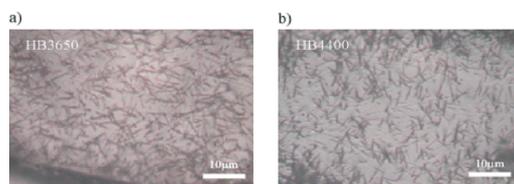


Fig. 3 Spontaneous tracks in zircon from Habanero #1. a) Zircon from sedimentary rock at a depth of 3650 m (Temp. ~220 °C). b) Zircon from granite at a depth of 4400 m (Temp. ~250 °C).

なお、年代測定に用いたゼータ較正法は、本来、複数の年代標準試料 (ジルコン) を用い、複数回の照射により得られるゼータ値をもとに行うものである (Hurford, 1990)。しかし、今回は、DAP 樹脂を用いた最初の照射であったため、1つの年代標準試料 (Fish Canyon Tuff) を用い、1回の照射から得られたゼータ値をもとに年代値を得た。従って、得られた年代値の信頼性は通常のゼータ較正法により得られる年代値よりも劣ると考えられるが、このことは以下での議論には影響しないと考えられる。

DAP ディテクターの適用

DAP 樹脂は、白雲母に比べ、熱中性子照射による放射化の程度が極めて小さいという特徴を有するため、吉岡ほか (2002) により FT 法の外部ディテクターとしての適用が試みられた。吉岡ほか (2002) では、DAP 樹脂のエッチング溶液として、針状のトラックが得られる (但し、エッチング時間が長く、リコイルトラックも検出されてしまう) PW 溶液 (30% KOH 水溶液) とエッチング時間が短く、エッチピットが楕円状で短く尾を引く形状が得られる PEW-65 溶液 (15% KOH , 65%エタノールの水溶液) を比較し、後者を推奨している。

今回、DAP 樹脂のエッチング溶液として PEW-50 溶液 (20% KOH , 50%エタノールの水溶液) を採用した。その理由は、PEW-65 溶液では、高密度の誘導トラックを計測する場合、隣接するエッチピットが重なることで、正確な計数に支障をきたすことが想定されたためであり、PEW-65 溶液よりも、より PW 溶液に近い組成である PEW-50 を用いることで、よりエッチピットの径の小さいトラックが得られることが推定されたためである。

まず、最適なエッチング時間を決めるため、Fish Canyon Tuff に用いた DAP 樹脂に対して、PEW-50 溶液 (60°C) で 1~3.5 分間の段階エッチングを行った (Fig. 4, 5)。トラックは、1分後のエッチングでは確認できず、2分後では不明瞭で、2.5分後で明瞭となり、3.5分後では、エッ

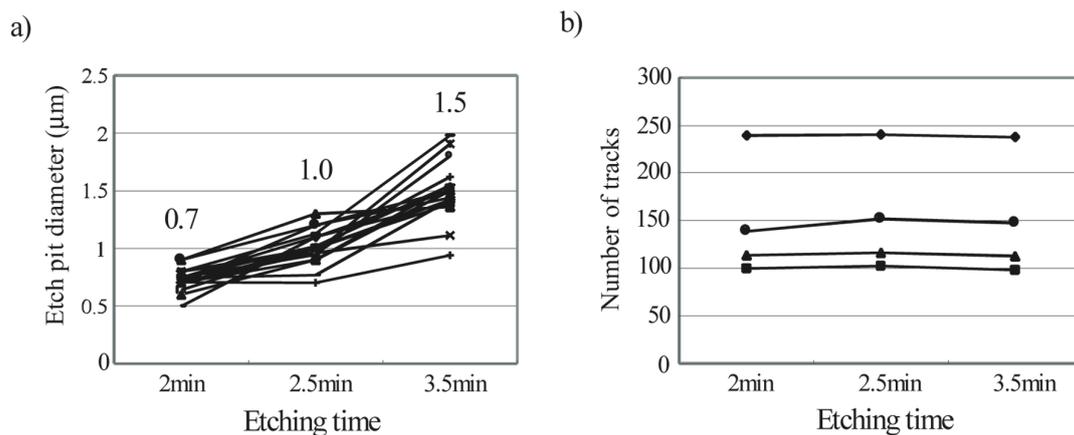


Fig. 4 Stepwise etching results of DAP detector using PEW-50 etchant. a) Plot of etch pit diameter vs. etching time (numbers above plots are mean etch pit diameter of each etching time), b) plot of number of tracks per unit area vs. etching time. PEW-50 etchant is solution of 20% KOH and 50% ethanol in water. Etching temperature is 60 °C.

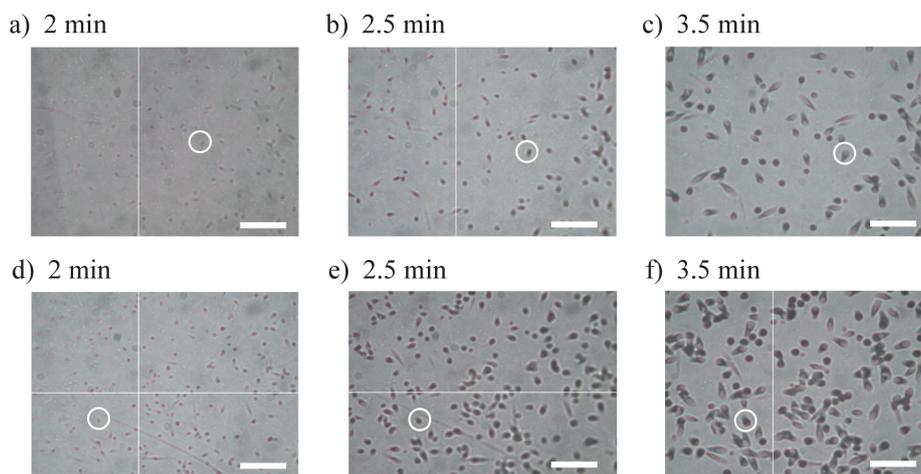


Fig. 5 Photomicrographs of fission tracks in DAP detector etched in PEW-50 at 60 °C. White circles denote the same tracks for a) – c) and for d) – f). Scale bar is 10 μm.

チピットの径がかなり大きく (平均 1.5 μm) なった. なお, トラックの形状は吉岡ほか (2002; 図 5) に示されている PEW-65 を用いた場合とほぼ同様である. トラック数の変化は 2~3.5 分のエッチングで変化はなかった (Fig. 4b). このことから, エッチング時間としてトラックが明瞭に観察され, エッチピットの重なりが少ない 2.5 分が適当であると判断した. なお, エッチング溶液は, 作成直後は無色透明であるが, 数日で褐色化した. また, 溶液は二層に分離した. 褐色化の程度や上下二層でのエッチングの相違について別試料を用いて検討したが, いずれの場合もエ

ッチングは良好に行われることを確認した (但し, 後者は予備的な検討のみ実施).

以上のことから, Fish Canyon Tuff は 2.5 分間, Habanero #1 試料は 2.5~3 分間のエッチング条件の DAP ディテクターを用い, 年代測定用の誘導トラックの計数を行った.

4. 年代測定およびトラック長測定結果

FT 年代測定および自発トラック長測定結果を Table 2 に示す. 自発トラック長は, 平均が 7.2~8.4 μm であり, 平均長と深度 (温度) との相関は認められない. トラック長は, 二次的な熱に

Table 2 Zircon fission-track dating results of Habanero #1.

Sample code	N	Dosimeter		Spontaneous		Induced		P(χ^2) %	U- content ppm	T \pm 1 σ Ma	n	L \pm 1 σ μ m
		number	density $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^7 \text{ cm}^{-2}$	number	density $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$					
HB3650	9	1455	3.737	1453	1.99	145	1.99	27	218	257 \pm 26	18	8.4 \pm 1.6
HB3675	9	1455	3.737	1278	1.84	115	1.66	2	184	304 \pm 33	22	7.9 \pm 1.6
HB4000	7	1455	3.737	749	2.80	118	4.41	20	455	164 \pm 18	14	7.5 \pm 1.1
HB4255	8	1455	3.737	892	2.82	115	3.64	91	408	200 \pm 22	20	7.2 \pm 2.2
HB4400	9	1455	3.737	872	2.70	143	4.43	53	461	158 \pm 16	18	7.9 \pm 1.9

Ages are calculated using $\zeta=140.0\pm 6.0$ (1 σ error). Dosimeter glass CN-1 used. P(χ^2): Probability of obtaining χ^2 value for ν degrees of freedom (where ν = number of grains - 1) (Galbraith, 1981). Ages are pooled age for samples that pass the χ^2 test and mean age for samples that fail the χ^2 test at 5% (Green, 1981). N: number of grains dated, T: age, n: number of tracks used for length measurement, L: mean track length with standard deviation of length distribution.

よる短縮がない場合、平均長は 10~11 μ m の範囲にある (例えば, Ito et al., 1989; Hasebe et al., 1994) ため, Habanero #1 井のジルコンのトラックは熱による短縮を被っていると言える。

ジルコンの FT 年代として 158~304 Ma が得られた (Table 2). FT 年代は, HB3675 のみ χ^2 検定に不合格であり, この試料のみ年代値のばらつきが大きかったが, 全体として年代値のまとまりが良い結果となった. また, 年代値と深度 (温度) との関係は, 花崗岩の上面付近 (深度: 3660 m 付近, 温度: 約 220 $^{\circ}$ C) で 257~304 Ma であり, より深部の深度 4000~4400 m (温度: 約 235~250 $^{\circ}$ C) で 158~200 Ma であることから, 深部の方が若い年代を示す傾向が見られる. 但し, HB4000 と HB4255 ではこの傾向と合っていない. また, 同一岩体からの試料での自発トラック長と年代値の関係として, 完全リセットには至っていない場合, 自発トラック長が短いほど年代値が若い結果が期待される (Tagami et al., 1990) が, 今回の試料では最もトラック長の短い HB4255 が最も若い年代を示しているわけではない.

以上のように, 採取した試料区間 (深度 3650~4400 m) 内では, 試料間比較による詳細な熱史を検討するに足る結果は得られなかった. そこで, ここでは最深部の試料 (HB4400) から得られたトラック長 (7.9 \pm 1.9 μ m) を用いた議論を行う。

今回のトラック長測定結果を Tagami et al. (1998) のトラック長と熱アニーリングの関係図 (アレニウスプロット) に示す (Fig. 6). 今回の結果 (図の黒塗り楕円) は, 花崗岩の加熱期間が 1~100m.y. の範囲内にあるとすると, 280 $^{\circ}$ C で 100m.y.~320 $^{\circ}$ C で 1m.y.の加熱温度・時間, の範囲にプロットされる. なお, Tagami et al. (1998) や Hasebe et al. (2003) と同様に, ジルコン結晶の c 軸と 60 $^{\circ}$ 以上で交わるトラックのみを対象とする場合, HB4400 のトラック長は 7.6 \pm 2.1 μ m (データ数: 13) となるので, この場合, 加熱温度はさらに高かったことになる. い

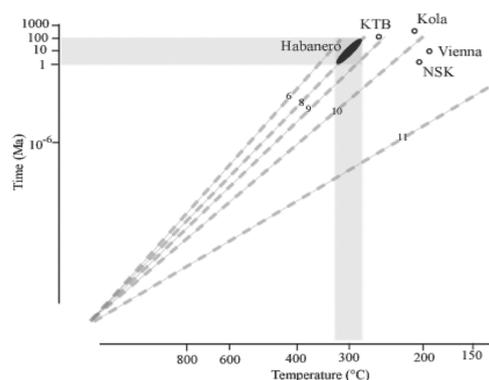


Fig. 6 Thermal annealing property of fission-track length in zircon shown in the Arrhenius plot (modified from Tagami et al., 1998).

Filled ellipsoid denotes temperature range of HB4400 zircons assuming annealing period from 1 to 100 m.y. Open circles are previous borehole data whose references are shown in Tagami et al. (1998) and Hasebe et al. (2003).

ずれにせよ、試料採取深度における現在の花崗岩の温度は約 250℃であることから、同花崗岩は、地表付近に隆起後に、現在の深度まで沈降する過程 (Fig. 2) で、現在よりも高温の状態にあった時期が存在したことが推定される。

Gallagher et al. (1994) は Cooper Basin の坑井試料 (堆積岩) を用い、現在の地温が約 120℃ のアパタイト FT 年代がリセットしていないことから、現在の高い地温勾配は比較的最近 (10 Ma 以降) の現象と考えられるとしている。このことに従えば、同花崗岩 (深度 4.4km 付近) は、最近の 10m.y. の間に地温 300℃ 付近にあったことが推定される。さらに、10Ma 以降の花崗岩の上面深度はほとんど変化していない (Fig. 2) ので、この時期に現在よりも地温勾配の高い時期が存在したことが推定される。なお、同花崗岩は採取した試料すべてにおいて黒雲母が緑泥石化している (伊藤・鈴木, 2005)。黒雲母の緑泥石化は 300℃ 程度で生じる (Wilamowski, 2002) ため、この緑泥石化は、10Ma 以降の再加熱により生じたものと推定される。

FT 法は他の年代測定法とともに閉鎖温度の概念を用い、対象とする岩体の冷却史の評価に多用されている。FT 法の場合、閉鎖温度以上でトラックが消滅し、それ以下の温度でトラックが蓄積され始める、と解釈されている (Dodson, 1973 ; Tagami et al., 1996)。閉鎖温度は冷却速度に依存するが、 $\sim 10\text{--}100^\circ\text{C}/\text{Ma}$ の冷却速度でのジルコン FT の閉鎖温度は約 250℃ とされている (Hurford, 1986 ; Tagami et al., 1996 ; Batt et al., 2001)。今回の試料では、現在の温度が閉鎖温度に相当し、トラック長の検討から閉鎖温度以上の再加熱を受けたことが推定された。閉鎖温度およびそれ以上の再加熱が年代値に及ぼす影響についての報告はほとんど皆無であるため、そのことを検討する上で本試料は興味深いと思われる。

本花崗岩は 300~320Ma に貫入し、二疊紀初期には地表に露出する程度に地殻浅部にあった (Fig. 2) ことから、二次的な熱アニーリングを受けていなければ期待される FT 年代は約

300Ma である。従って得られた年代 (158Ma) の若返りの程度は約 50% である (なお、他の試料ではトラック長の短縮は同程度であるが、より古い年代を示すため、この若返りの程度の見積もりは最大限の見積もりである)。トラック長の検討から、本試料は 10Ma 以降に閉鎖温度以上に相当する 300℃ 程度の熱アニーリングを受けたと推定されたが、この条件でも得られる年代値は半分以下にはなっていない。

Tagami et al. (1990) は実験室でのアニーリング実験により、トラック長とトラック密度 (すなわち年代値) の関係を求め、トラック長の 25% の短縮でトラック密度が 30% 程度減少することを示した。今回は天然のアニーリング実験とも位置づけられるが、その結果では、トラック長の短縮は 25% 程度であり、年代値の若返りは、全体としてばらつきはあるが 35% 程度である (全試料から得られる、トラック長および年代値の (誤差の重みを考慮した) 加重平均値は、それぞれ、 $7.8 \pm 0.7 \mu\text{m}$, $192 \pm 9 \text{Ma}$ (誤差はともに 1σ) である。花崗岩の二次的再加熱を受けていないトラック長を $10.5 \mu\text{m}$ とした場合、トラック長の短縮は 26% となり、年代値の若返りは 36% と計算されるため)。従って、今回の結果は、概ね Tagami et al. (1990) に整合していると考えられる。

5. まとめ

1. 外部ディテクターとして DAP 樹脂を適用した。エッチングに PEW-50 溶液を用い、吉岡ほか (2002) の PEW-65 溶液と同様の誘導トラックの出現を確認した。

2. 深度 4.4 km、現在の地温 250℃ の花崗岩試料を用い、ジルコンの FT 年代とトラック長を求めた。トラック長の平均が $7.9 \mu\text{m}$ であったことから、同花崗岩は、地表付近に隆起後、現在の深度まで沈降する過程で、地質学的長期間 (1~100m.y.) に亘って、現在よりも高温の状態 (280~320℃) にあった時期が存在したことが推定された。

3. ジルコンの FT 年代は、地質学的長期間 (~10m.y.) に亘って 300℃程度の熱アニーリングを受けた場合でも、年代値の若返りの程度は半分以下であることが推定された。

謝辞

電力中央研究所の海江田秀志氏，Geodynamics の Dr. Doone Wyborn，オーストラリア国立大学の Dr. Fiona Holgate には試料採取でお世話になるとともに，Cooper Basin の地質に関して議論して頂いた。Geotrack の Dr. Paul Green には Cooper Basin の文献を紹介して頂いた。株式会社セレスの谷口友規氏には試料の調製等でお世話になった。京都フィッション・トラックの檀原 徹氏には DAP 樹脂を提供して頂いた。日本原子力研究所東海研究所の市村茂樹氏には照射の便宜を図って頂いた。査読者の渡辺公一郎氏，吉岡 哲氏および編集幹事の長谷部徳子氏の指摘により本論文は改善された。以上の方々に記してお礼申し上げます。

文献

Batt, G.E., Brandon, M.T., Farley, K.A., and Roden-Tice, M., 2001, Tectonic synthesis of the Olympic Mountains segment of the Cascadia wedge, using 2-D thermal and kinematic modeling of isotopic age. *J. Geophys. Res.*, 106, 26731-26746.

Deighton, I., and Hill, A.J., 1998, Thermal and burial history. in *Petroleum Geology of South Australia Volume 4 -Cooper Basin-*, Chapter 9., 143-155, Edited by D.I.Gravestock, J.Hibbert, and J.F.Drexel, PIRSA. (<http://www.pir.sa.gov.au/pages/petrol/data/pgsa4/vol4-9.pdf>)

Dodson, M.H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contr. Mineral. Petrol.*, 40, 259-274.

Dumitru, T.A., 1993, A new computer-automated microscope stage system for fission-track

analysis, *Nucl. Tracks Radiat. Meas.*, 21, 575-580.

Galbraith, R. F., 1981, On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, 13, 471-438.

Gallagher, K, Dumitru, T.A. and Gleadow, A.J.W., 1994, Constraints on the vertical motion of eastern Australia during the Mesozoic. *Basin Research*, 6, 77-94.

Gatehouse, C.G., Fanning, C.M., and Flint, R.B., 1995. Geochronology of the Big Lake Granite Suite, Warburton Basin, northeastern South Australia. South Australia. Geological Survey. *Quarterly Geological Notes*, 128, 8-16.

Gleadow, A.J.W., 1981. Fission-track dating methods: What are the real alternatives?, *Nucl. Tracks*, 5, 3-14.

Gravestock, D.I. and Jensen-Schmidt, B., 1998, Structural setting. in *Petroleum Geology of South Australia Volume 4 -Cooper Basin-*, Chapter 5., 47-67, Edited by D.I.Gravestock, J.Hibbert, and J.F.Drexel, PIRSA. (<http://www.pir.sa.gov.au/pages/petrol/data/pgsa4/vol4-5.pdf>)

Green, P.F., 1981, A new look at statistics in fission track dating. *Nucl. Tracks*, 5, 77-86.

Hasebe, N., Tagami, T. and Nishimura, S., 1994, Towards zircon fission-track thermochronology: Reference framework for confined track length measurements. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 112, 169-178.

Hasebe, N., Mori, S., Tagami, T., and Matsui, R., 2003, Geological partial annealing zone of zircon fission-track system: additional constrains from the deep drilling MITI-Nishikubiki and MITI-Mishima. *Chemical Geology*. 199, 45-52.

Hurford, A.J., 1986, Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the

- Insubric fault line. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 92, 413-427.
- Hurford, A.J., 1990, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommission on Geochronology. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 80, 171-178.
- 伊藤久敏, 1999, 高精度 FT 年代測定に向けて—多粒子年代測定を容易にした FT STAge システムの利用—. *月刊地球*, 号外 No.26, 83-87.
- Ito, H. and Tanaka, K., 1995, Insights on the thermal history of the Valles Caldera, New Mexico: evidence from zircon fission-track analysis. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 67, 153-160.
- Ito, H., Sorkhabi, R.B., Tagami, T. and Susumu, N., 1989, Tectonic history of granitic bodies in the South Fossa Magna region, central Japan: new evidence from fission-track analysis of zircon. *Tectonophysics*, 166, 331-344.
- 伊藤久敏, 鈴木浩一, 2005, オーストラリア高温岩体発電サイト Cooper Basin の地質—文献調査, 電磁探査, カットिंगス調査, FT 年代測定に基づいて—. *電力中央研究所研究報告*: N04035, 23p.
- Laslett, G.M., Kendall, W.S., Gleadow, A.J.W. and Duddy, I.R., 1982, Bias in measurement of fission-track length distributions. *Nucl. Tracks*, 6, 79-85.
- Tagami, T., Ito, H. and Nisimura, S., 1990, Thermal annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 80, 159-169.
- Tagami, T., Carter, A. and Hurford, A., 1996, Natural long term annealing of the zircon fission-track system in Vienna Basin deep borehole samples; constraints upon the partial annealing zone and closure temperature. *Chemical Geology*, 130, 147-157.
- Tagami, T., Galbraith, R.F., Yamada, R. and Laslett, G.M., 1998, Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. P. Van den haute and F. De Corte (eds.), *Advances in Fission-Track Geochronology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 99-112.
- Wilamowski, A., 2002, Chloritization and polytypism of biotite in the Lomnica granite, Karkonosze Massif, Sudetes, Poland: stable isotope evidence. *Chemical Geology*, 182, 529-547.
- Wyborn, D., de Graaf, L., Davidson, S., and Hann, S., 2004, Development of Australia's first hot fractured rock (HFR) underground heat exchanger, Cooper Basin, South Australia. *PESA Eastern Australasian Basins Symposium II*, 423-430. (http://www.geodynamics.com.au/IRM/content/05_investor/05.6.html)
- 吉岡 哲, 鶴田隆雄, 岩野英樹, 檀原 徹, 2002, DAP デテクターのフィッション・トラック年代測定への利用. *フィッション・トラック ニュースレター*, No.15, 1-8.
- Yoshioka, T., Tsuruta, T., Iwano, H., Danhara, T. and Koguchi, Y., 2003, Fission-fragment registration and etching properties of diallyl phthalate with reference to its use as an external detector in fission-track dating. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B207, 323-332.