

平成 21 年 6 月 30 日現在

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2006 ～ 2008
 課題番号：18684027
 研究課題名 (和文) 始生代地球における初期生命進化を導いた地質-生物相互作用に関する研究
 研究課題名 (英文) Interrelationship between geological settings, geochemical environments and energy metabolisms supporting early evolution of life in the Precambrian Eon
 研究代表者
 高井 研 (TAKAI KEN)
 独立行政法人海洋研究開発機構・極限環境生物圏研究センター・プログラムディレクター
 研究者番号：80359166

研究成果の概要：始生代地球における初期生命進化を導いた地質—生物相互作用としての独創的かつ魅力的な「UltraH³ リンケージ」作業仮説を発表した。フィールドワークに基づく検証では、大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドとインド洋中央海嶺 Kairei フィールドにおける UltraH³ リンケージを実証した。また実験に基づく検証では、世界で初めて「始生代超マフィック岩」であるコマチアイトの熱水反応より水素が生成することを証明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2007 年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	15,700,000	4,710,000	20,410,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：生命の起源、初期生命進化、熱水活動、冥王代、太古代、超マフィック岩、水素生成、エネルギー代謝

1. 研究開始当初の背景

惑星「地球」が形成されたのが約 46 億年前であり、約 43 億年前には海ができあがったと考えられている。現時点で、最古の生命の痕跡は 38 億年前まで遡れるとすると、おそらく 40 億年前には、生命が誕生し初期生命エコシステム（生態系）が形成されていたと考えることができる。地球における生命の誕生及び初期進化の場として、これまで深海底熱水環境が有力な候補と考えられてきた。その根拠の一つは、微生物進化系統学の成果であり、リボゾーマル RNA 等の分子進化系統樹の結果から、最古の系統生物は深海底熱水活動域や温泉に生育する好熱性微生物であることが示唆されてきている。また進化生

学における好熱タンパク質の逆進化実験的アプローチによっても、祖先型微生物のタンパク質を人工的に再現すると好熱性を示すことが明らかとなり、祖先型微生物が好熱性微生物であることを示唆する結果が得られている。また化学進化の面からは、深海底熱水活動域における熱水循環を模した実験系において、タンパク質や核酸の前駆体であるアミノ酸やヌクレオチドが無機合成され、高分子化することが確かめられている。一方地質学の立場からは、生命活動の痕跡が産出する古環境として、始生代における深海底熱水活動域の可能性が示唆されてきた。これら多分野からの研究成果によって、「熱水環境が地球生命誕生の場であった」とする仮説が支

えられ、より堅固なものへと昇華しつつあると言える。しかしながらこの仮説は、分散した個々の研究とそれをつなげた抽象的な概念としてのものでしかなく、具体的な舞台の場やストーリー（物理・化学・生物学的な諸過程）と絡み合い（諸過程のリンケージ）が依然全く不明のままであった。

2. 研究の目的

本研究は、「{超マフィック岩—熱水活動—水素—ハイパースライム} リンケージ (UltraH³ リンケージ) が、地球史のごく初期に生命の起源の場を準備し、引き続き初期生命生態系の誕生を導き、現在に至るまでその生態系を支えてきた」とする独自の作業仮説を、分野横断型研究アプローチにより検証することを目的とする。

3. 研究の方法

上記目的の達成のため、研究の2方向からアプローチとして、

- (1) 初期海底熱水系のモダンタイプとしての現世の低・中速拡大中央海嶺域における海洋地殻の不均一性に支配される UltraH³ リンケージへのフィールドワークによる検証、
- (2) 現世および始生代の超マフィック岩（かんらん岩，コマチアイト），マフィック岩（玄武岩，ドレイト，はんれい岩）を用いた UltraH³ リンケージに対する実験室内再現実験による検証と具体的な諸過程の解明を考えた。

4. 研究成果

(1) 独創的かつ魅力的な「UltraH³ リンケージ」作業仮説を発表し、国内外で広く認められるようになった（例えば文献 1, 2）。フィールドワークに基づく検証では、(2) 大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドにおける UltraH³ リンケージの実証、(3) インド洋中央海嶺かいいいフィールドにおける UltraH³ リンケージの存在様式が、従来の単純なマンテルかんらん岩の海底面への露出に起因する場（例えば Rainbow, Logatchev, Lost City といった大西洋中央海嶺の典型）とは大きく異なり、「かんらん石に富んだはんれい岩」のようなモホ遷移帯付近におけるマンテルとマグマの相互作用にて特異的に形成される岩石においても形成される場であることを明らかにした（文献 3, 4, 5）。

一方、実験に基づく検証に関しては、まず、(4) 蛇紋岩化に伴う微量元素変動及び生成ガスの迅速定量法の開発と蛇紋岩化高温高圧実験システムの稼働を達成した。その成果を受け、(5) 実際の海水を模して塩化ナトリウム、塩化マグネシウム試薬を用いて合成した人工海水を用いた蛇紋岩化高温高圧実験システムを確立した。(6) 確立した実験シ

ステムを用いて、世界で初めて、「始生代超マフィック岩」であるコマチアイトの熱水反応より水素が生成することを証明した。

(1) 「UltraH³ リンケージ」作業仮説の発表

地球における生命の起源とそれに続く初期進化の舞台を考える上で重要な条件は、生命を誕生させやすい場であること以上に生命活動を持続させうる場であるという点である。つまり、生命が誕生してもすぐに死に絶えるような場や状況では、40 億年も続く地球と生命の共進化を導くことはできないであろう。誕生と同時に持続可能な生命活動が機能するメカニズムが必要となる。どのような熱水環境において、どのようなメカニズムで、どのような持続可能な初期生命のエコシステム（生態系）が形成されたのか？その最も確からしいストーリーとして、我々はウルトラエッチキューブリンケージ仮説を提唱した（文献 1）。ウルトラエッチキューブリンケージとは、Ultramafics-Hydrothermalism-Hydrogenesis-HyperSLiME リンケージの略 (UltraH³) である。日本語に訳すと超マフィック岩*熱水活動-水素生成-ハイパースライム連鎖である。

本仮説のロジックは以下に書かれている通りであるが、より具体的なモデルを構築し、科学的根拠の乏しい他の仮説との徹底的な比較検討を通じて、この仮説の科学的整合性、先見性、独創性を際立たせるものになっている。

- ・地球における生命の起源や初期生命進化の場として深海底熱水活動域環境が指摘されているが、現時点では、科学的証拠に基づいたその地質学的、地球化学的、微生物学的な詳細なモデルは一切ない。

- ・最古の生態系繁栄の場に関しても、深海底熱水活動域での超好熱性以外の特性については、学際的な科学的証拠に基づいた詳細なモデルは一切ない。

- ・これまでの様々な研究分野の成果を踏まえて、始生代地球における大気、海洋、地殻、マンテルの物理化学特性、微生物の進化系統及び微生物エネルギー代謝の特性から、水素と二酸化炭素をエネルギー・炭素源とする超好熱メタン生成菌を一次生産者とする超好熱化学合成微生物生態系（ハイパースライム）が、生命の起源から初期生命進化を結ぶ重要な過程として存在したという仮説を提案する。

- ・ハイパースライムの形成条件は、水素の供給量に大きく依存しているという結果が得られており、大量の水素を供給するための熱水活動の形成条件は、現在の熱水活動域の比較から考えると、かんらん岩の蛇紋岩化作用以外には考えられない。

- ・すなわちこれこそが、「(超マフィック岩—

熱水活動—水素—ハイパースライム) リンケージ(UltraH³ リンケージ)が、初期地球において生命の起源の場を準備し、それに続く初期生命生態系の誕生を導き、現在に至るまでその生態系を支えてきた」とする UltraH³ リンケージ仮説に至った過程である。

・現世の地球では、UltraH³ リンケージが存在する場として、大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドやインド洋中央海嶺の Kairei フィールド、さらには最近報告された大西洋中央海嶺断裂帯の Lost City フィールドが考えられる。しかしながら、微生物活動やエネルギー・炭素代謝から検討すると大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドやインド洋中央海嶺の Kairei フィールドのような場に限られるだろう。

・以上の考えは実際の研究結果からも支持されており、大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドやインド洋中央海嶺の Kairei フィールドの重要な条件として、かんらん岩の蛇紋岩化作用の他に、マグマ成分の供給がある。

・このような条件を満たした場合にのみ、UltraH³ リンケージが形成されるに違いない。

・大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドやインド洋中央海嶺の Kairei フィールドでは、UltraH³ リンケージが存在している可能性は極めて高いが、Rainbow フィールドではハイパースライムの存在が証明できていないし、Kairei フィールドではかんらん岩の蛇紋岩化作用の関与が証明できていない。

・一方、初期地球において生命の起源の場を準備し、それに続く初期生命生態系の誕生を導いたとする UltraH³ リンケージはどのようなものであったか？

・近年の始生代地球の海洋、地殻、マントル、プレートテクトニクスについての知見に基づく、マントル温度が高く、マントル対流は小さく激しい循環で、海洋地殻は厚く、プレートは小さく分断されていたとするモデルが考えられる。

・このようなモデルでは、かんらん岩が関与する熱水活動は極めて考えにくく、かんらん岩以外の超塩基性岩が必要である。

・最も可能性が高いのは、コマチアイトであろう。始生代地球におけるコマチアイトの分布は大きく、マントルスーパーホットブルームによる巨大海台のような場所ではコマチアイトが関与するマグマ成分に富んだ熱水活動は現世の地球における熱水活動よりも盛んであったであろう。

・さらに大気中の高濃度の二酸化炭素は、よりハイパースライムの形成に適した環境条件を用意したと考える。

・以上のような考察から、図1のような現世の地球と始生代地球における UltraH³ リンケージモデルを提唱する。

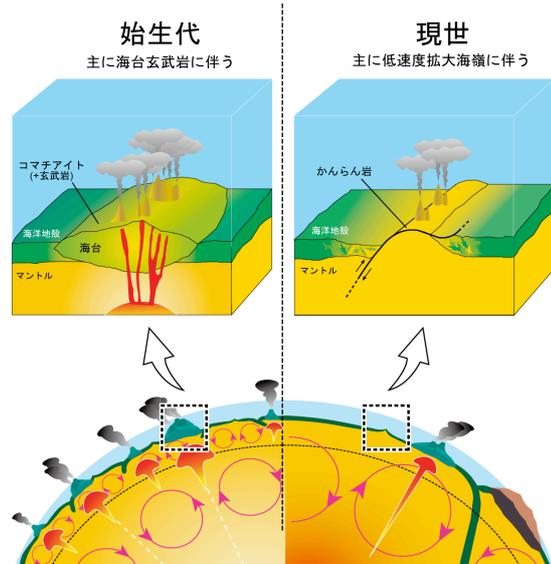


図1 始生代地球と現世地球における UltraH³ リンケージモデル

(2) 大西洋中央海嶺の Rainbow フィールドにおける UltraH³ リンケージの実証

低速拡大として知られる大西洋中央海嶺における様々な熱水活動域における微生物生態系の調査を行った。フランス IFREMER の研究調査船 L' Atalante 及び ROV VICTOR6000 を用いた調査に参加し、Lucky Strike (ホットスポット起源のマグマによる火山性熱水活動域)、TAG (典型的な大西洋中央海嶺玄武岩質マグマによる熱水活動域)、Rainbow (かんらん岩蛇紋岩化作用と玄武岩質マグマインプットの相互作用に基づく熱水活動域) 及び Lost City (かんらん岩蛇紋岩化作用に伴う発熱反応による熱水活動域) の微生物生態系を明らかにした。この中で、現世の低・中速拡大中央海嶺域におけるマントルの不均一性に支配される UltraH³ リンケージの検証する最大のターゲットが、熱水に含まれる水素が世界で最も高濃度であることが知られていた Rainbow フィールドであり、当初の作業仮説が正しいとするならば、4つの熱水活動域の中で Rainbow フィールドにのみハイパースライム(水素をエネルギー源とする好熱性メタン菌に富んだ超好熱微生物生態系)が存在することが予想された。また単に超マフィック岩の関与だけでなく、UltraH³ リンケージの科学的正しさを立証するためには、米国の研究者が「生命起源の場」として注目する Lost City フィールドでのハイパースライムの存在を否定する結果が必要であった。

結果として、培養に基づいた微生物生態系の群集構造解析から、4つの異なるタイプの熱水活動域でそれぞれ異なる群集構造を持つ微生物生態系の存在が明確となった。その中でも、Rainbow フィールドでは超好熱メタン菌 Methanococcales が優占し、その群集規模は Kairei Field における規模に匹敵する

ことがわかった。培養に依存しないメタン菌の定量においても、メタン菌の優占が確認され、ハイパースライム存在の完全なる証明に成功した。

(3) インド洋中央海嶺かいいいフィールドにおける UltraH³ リンケージの実証

中央インド洋海嶺のかいいいフィールドは、これまで特異的に高濃度の水素を含む熱水が噴出すること、その水素をエネルギー源とする最古の生態系 HyperSLiME が存在することが知られていたが、その特異な熱水を生み出す地質学的背景は明らかとなっていなかった。しかし、2006年に「よこすか」と「しんかい6500」を用いて行われた調査データから、かいいいフィールドの近傍に「かんらん石に富んだはんれい岩」が露出していることをはじめ明らかになった(文献4, 5)。この岩石は、これまで水素型熱水のホストとして知られていた「マントルかんらん岩」とは異なる岩石であるが、かんらん石を主成分鉱物とする超マフィック岩であるという共通点がある。そのため、かんらん岩同様熱水変質の際に蛇紋石化を起こして水素を発生し、これがかいいいフィールドの熱水の高濃度水素の原因となっていることがわかった(文献6)。また、「かんらん石に富んだはんれい岩」は「マントルかんらん岩」とは異なり、かんらん岩から融け出したメルトがその成因に密接に関与する。そのため、「マントルかんらん岩」とは異なった元素組成(特に微量元素)を持っており、例えば微量元素であるNi含有量の両者の違いが、蛇紋石化に伴うメタンの生成量に決定的な影響を与えている可能性が高いことがわかった(文献6)。このような「かんらん石に富んだはんれい岩」の元素組成の特徴は、メルトの介在という成因的な共通点を反映して、むしろ「マントルかんらん岩」よりも太古代のコマチアイトとの類似性が高い。そのため、初期地球における「UltraH³ リンケージ」の解明を行う上で、かいいいフィールドは最も重要なモダンアナログである可能性が高い。

(4) 蛇紋岩化に伴う微量元素変動及び生成ガスの迅速定量法の開発と蛇紋岩化高温高压実験システムの稼働

フロー型熱水実験装置においては、配管の腐食という問題に直面した。フロー型では、海水を高温分に送り込む配管については、常温では腐食に耐えると考えられていたステンレス SUS316 を用いて、作成している。しかしながら、常圧、高温にてわずか数日反応させたケースにおいても、SUS316 配管内部はシビアに腐食し、その結果岩石試料を入れて反応させるサンプル管のフィルターを詰まらせ、また水素を発生させて、水素ガスのブランク値を上昇させる結果となった。さらに、高温反応部に使用しているチタン2種(チタ

ン素材の1種、チタン95%)に関して、反応部全体を覆っている高温高压反応管については、切断して分析を行った結果、問題になるような腐食は見られなかったのに対し、熱電対を保護している保護管については同様のチタン2種を用いているにもかかわらず、明らかな腐食が見られた。この違いは、熱電対の保護管は溶接を行っており、その部分から腐食が促進されたこと、及び、保護管に使用されたチタン2種の素材自身の鉄濃度の高さ、によるものと考えられる。これらの対策として、SUS316 配管に関しては、内部に①金メッキを施す、②酸化イリジウムなどを内部に塗布する、③配管部内部に金パイプを通して、配管接合部のバルブなどはチタン製を用いる、の3つの対策のうち、最適な方法を実際の高温高压条件で試しているところであり、近い将来、世界のどのラボにも先んじたフロー型熱水実験装置が完成することは間違いない。

一方、バッチ型熱水実験装置に関しては、反応水に接する部分はすべて海水との反応性がないと言われている金、チタンを用いた。反応容器は金、反応容器の蓋はチタン、反応溶液を採取するチューブは素材はステンレス SUS316 であるが、内部に金パイプを入れてステンレスとは触れないようにした。サンプルを取り出すバルブはチタン、および金で作成した。ところが、実験当初のブランク実験(かんらん石を含まない実験系)においても無視できない量の水素が発生することを観察した。上記フロー型の熱電対保護管と同様のチタン素材の問題も考えられたが、実際にはチタンが水素を吸蔵する性質によるものであることが実験の結果明らかになった。チタンの蓋を高温高压にさらすことにより、吸蔵された水素は追い出され、現在ではブランク値は問題ないほどに下がった

反応生成物中のガス測定には、島津製作所とともに、海水、熱水溶液中の水素、二酸化炭素、メタンの直接分析が可能なタンデムガスクロを新たに設計した。特に工夫をした部分は気液分離管、試料導入系であり、溶液中のガスを直接分析するガスクロはもちろん世界初である。溶存ガスの直接分析のメリットは、試料分析前の前処理が必要ないために、①大気からの汚染の可能性を限りなくゼロにしうる、②測定が迅速である、③高感度が期待できる、ことである。この直接方法は、他種のガス分析にも有効であり、技術的には汎用性が非常に高い。副産物であるが、特許申請につなげることも考慮している。

一方、元素分析については、ICP 質量分析計を導入し、高濃度からごく低濃度の元素分析に備えた。高温高压下で、反応岩石中の金属元素の触媒としての働きは、化学反応の反応速度を規定するため、反応に関与している

触媒の濃度を把握することは重要である。しかしながら、実験に用いる現世のかんらん岩、かんらん岩質はんれい岩、始生代の超マフィック岩であるコマチアイト中のある種の元素は非常に濃度が低く、その元素濃度の分析は容易ではない。また、岩石と反応させる海水についても、塩化ナトリウムなどマトリックスが非常に高く、微量元素の定量の最も困難な天然物のひとつである。この課題についても問題点を克服し、実験システムを構築することに成功した。

(5) 実際の海水を模して塩化ナトリウム、塩化マグネシウム試薬を用いて合成した人工海水を用いた蛇紋岩化高温高压実験

こうして準備の整った実験システムによって、オリビンと海水(塩化ナトリウムと塩化マグネシウムによる人工海水)、および斜方輝石と海水との反応実験を行った。図2にオリビンと海水の反応実験の結果を示す。オリビンと海水の反応によって、確かに3mmol/kgに及ぶ大量の水素の発生が認められた。オリビンと模擬海水との反応では唯一、報告があるが(図2で緑で示したデータ)、水素濃度増加のプロファイルは似ているものの水素濃度自体は1.5倍を示している。ただし、我々のデータはややばらつきがあり、既報と有意の差があるかどうかは、再度実験を行って、確認する。いずれにせよ、これらの実験により、世界最先端の蛇紋岩化高温高压実験が可能となった。

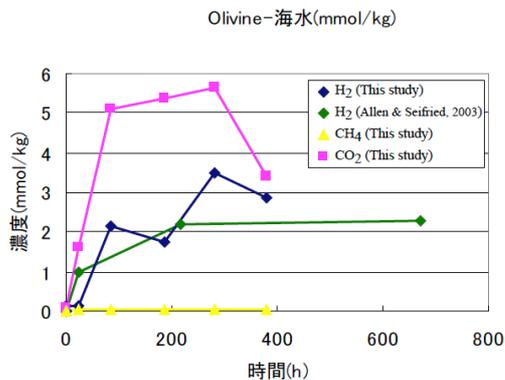


図2 オリビンと海水の反応実験の結果

(6) 世界初のコマチアイト熱水反応による水素生成

これまでの実験システム確立を受けて、始生代地球における UltraH³ リンケージの鍵となる超マフィック岩コマチアイトを用いた高温高压実験を行った。コマチアイトは太古代までは、比較的普遍的に産出する火成岩であるが、25億年以降は地球上にほぼ存在しない岩石である。今回の実験では、約30億年前のコマチアイトを用いたが、すでに激しく

熱水変質を被っており、新鮮な状態に戻す必要があった。変質したコマチアイトを再融解させ、コマチアイトガラスを作成し、実験に用いた。実験は、純粋と350°C、500気圧で数ヶ月反応させた。その結果図3に示されるように、2ヶ月間の反応により、2mM以上の水素が生成されることが明らかとなった。この結果は、世界で初めて示された結果であり、これまでコマチアイトの熱水変質によって、充分量の水素が生成されることは理論的には予想されていたことであったが、その実験的証明に初めて成功したことを意味する。

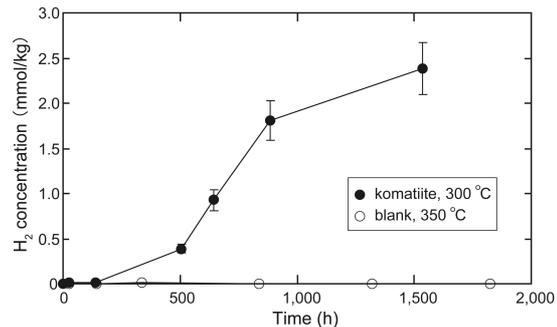


図3 コマチアイトと純水の反応実験の結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. Nakamura, K., et al. (6th author) (2009) Serpentinized troctolites exposed near the Kairei Hydrothermal Field, Central Indian Ridge: Insights into the origin of the Kairei hydrothermal fluid supporting a unique microbial ecosystem. *Earth Planet. Sci. Lett.* 280, 128-136. (査読有り)
2. Morishita, T., et al. (8th author) (2009) Igneous, alteration and exhumation processes recorded in abyssal peridotites and related fault rocks from an oceanic core complex along the Central Indian Ridge. *J. Petrol.*, in press. (査読有り)
3. Kumagai, H., et al. (15th author) (2008) Geological background of the Kairei and Edmond hydrothermal fields along the Central Indian Ridge: implications of their vent fluids' distinct chemistry. *Geofluid*, 8, 239-251. (査読有り)
4. 高井 研, 他 (2007) エネルギー代謝の進化から見た初期生命進化-UltraH³ リンケージ仮説 生物の科学 遺伝 vol. 61, No. 6, p. 28-36. (査読無し)
5. Takai, K., et al. (2006) Ultramafics-Hydrothermalism-Hydrogenesis-HyperSLiME (UltraH³) linkage: a key insight into early microbial ecosystem in

the Archean deep-sea hydrothermal systems. Paleontological Res. 10, 269-282. (査読有り)

[学会発表] (計 9 件)

1. Nakamura, K., et al. (3rd author) (2008) Serpentinized olivine-rich gabbros near the Kairei Hydrothermal Field, Central Indian Ridge: A key to understanding the unique chemistry of the vent fluid. Goldschmidt 2008 - "from Sea to Sky", Vancouver, Canada (July 15, 2008)
2. Takai, K. (2008) 極限環境微生物から見える生命(圏)の限界と habitability, 2008 年度日本極限環境生物学会第 8 回年会, 立教大学 (November 4, 2008)
3. Takai, K. (2008) 先カンブリア代の知られざる大進化: 地球最古の生態系誕生から多細胞生物の誕生まで, 日本地質学会第 115 年学術大会, 秋田大学手形キャンパス (October 22, 2008)
4. Takai, K. (2008) 最古の生態系はどのような熱水系で繁栄したか: ウルトラエッチキューブリンテージ仮説, 2008 年度日本地球化学会第 55 回年会, 東京大学駒場キャンパス (October 17, 2008)
5. Takai, K. (2008) アストロバイオロジーとアーキア: 極限環境におけるアーキアのポテンシャル, 第 20 回日本 Archaea 研究会, 那覇 (July 5, 2008)
6. Takai, K. (2007) Diversity of chemolithoautotrophs associated with hot hydrothermal fluid chemistry. IRTI Biogeochemical Interaction at deep-sea vents, Woods Hole, MA. (September 10, 2007)
7. 高井研、中村謙太郎、土岐知弘、角皆潤 (2007) 深海・地殻内微生物活動の模擬現場環境条件下解析法(高井法)の開発と応用 2007 年地球惑星合同大会年会 (May 24, 2007)
8. Ultramafics-Hydrothermalism-Hydrogenesis-HyperSLiME (UltraH3) linkage: a key insight into early microbial ecosystem in the Archean deep-sea hydrothermal systems. Ken Takai, Extremophiles 2006, Brest, France, September 19, 2006.
9. Ultramafics-Hydrothermalism-Hydrogenesis-HyperSLiME (UltraH3) linkage: a key insight into early microbial ecosystem in the Archean deep-sea hydrothermal systems. Ken Takai, 2nd Okazaki Biological Conference, Okazaki, Japan, September 13, 2006

[図書] (計 1 件)

1. 爆笑問題、高井 研 「深海に四〇億年前の世界を見た!」 爆笑問題のニッポンの教

養 File 17 講談社 2008 年

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高井 研 (TAKAI KEN)
独立行政法人海洋研究開発機構・極限環境
生物圏研究センター・プログラムディレク
ター
研究者番号: 80359166

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし