

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13630

研究課題名（和文）高温高压実験による地球形成初期過程における軽元素の探究

研究課題名（英文）Behaviors of light elements during early Earth's formation from high-pressure and high-temperature experiments

研究代表者

飯塚 理子 (Iizuka, Riko)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・客員共同研究員

研究者番号：80632413

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：鉄を主成分とする地球核には、複数の軽元素が存在すると考えられている。中でも宇宙存在度が最大で、最も軽い水素は、鉄水素化物となり鉄の融点や密度を下げることから、地球核の密度欠損を説明する有力候補とされてきた。

本研究では水素と硫黄に着目し、原始地球を模擬した鉄-含水ケイ酸塩系に対して放射線X線とパルス中性子を用いた高温高压その場観察を行った。鉄の水素化に対する硫黄の影響について調べた結果、硫黄の存在によって鉄の水素化が阻害されることが明らかになった。このことから、地球進化の初期段階では水素と硫黄が固体鉄に優先的に取り込まれ、溶融鉄に他の軽元素が徐々に溶け込んだことが示唆される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温高压実験とパルス中性子という先端量子ビームの利用を組み合わせ、地球深部に存在する鉄や含水鉱物の結晶構造や物性、反応や化学形態について調べることで、これまでは実験的に難しいとされてきた高温高压下での鉄中の水素の挙動を解明した。汎用的な高压セルや放射光X線用の高解像度イメージングカメラを構築したという点で高温高压実験の技術開発・改良に貢献しただけでなく、実験によって得られた物質科学的な知見から地球の成り立ちについて新たなシナリオを提唱したことに、学術的な意義が見出される。

研究成果の概要（英文）：The Earth's core mainly consists of iron (Fe) and is considered to contain light elements (H, C, O, Si, S) to explain the density deficit compared to pure iron. Hydrogen (H) is one of the promising candidates. However, its amount dissolved in the core and the process are still unknown due to the difficulty in detecting the lightest element via X-ray and obtaining the unquenchable hydrides.

In this study, we investigated the effect of sulfur (S) on the hydrogenation of iron using in-situ neutron diffraction observations at high pressure and high temperature. The obtained H solubility of Fe and FeS in the sample simulating the primitive Earth indicated that iron hydride was formed by the reaction of Fe and water, while FeS is hardly hydrogenated. Both H and S can be incorporated into solid iron, whereas the other light elements could have dissolved into molten iron hydrides and FeS during the later process of the Earth's evolution.

研究分野： 高压地球科学、地球深部物質学

キーワード： 軽元素 水素 中性子回折 その場観察 地球進化 硫黄 地球核

1. 研究開始当初の背景

現在の地球核(コア、主成分: Fe-Ni 合金)は、純鉄に比べて数%密度が低いことが地震波速度の観測から知られており、この密度欠損は軽元素が溶け込んでいるためだと考えられている。この候補として Si, S, C, O, H が挙げられ、様々な実験的研究がなされてきたが、実際にどの元素がいつどの程度溶けたかはよく分かっていない。宇宙存在度が最大の水素は、地球にも水として大量に含まれ、高圧下では水素の溶解度が劇的に増加して鉄水素化物が生成するとともに密度減少と融点降下を引き起こす。しかし、常温常圧相に戻ると再び水素を吐き出してしまい鉄水素化物は回収が困難なこと、重元素ほど測定しやすい X 線では最も軽い水素原子は検出できないなどの実験上の制約があった。

近年、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)にある高温高圧ビームライン(PLANET)では、水素を直接観察できる強力なパルス中性子線と種々の高圧装置を組み合わせ、地球深部に相当する高温高圧下でのその場観察が行えるようになった(Sano-Furukawa *et al.*, 2014; Hattori *et al.*, 2015)。ここで、これまでに申請者は鉄-ケイ酸塩-水の混合試料に対して鉄が水素化する様子を観察し、その量を決定することに成功した(Iizuka-Oku *et al.*, 2017)。固体の鉄にも有意に水素が取り込まれることを明らかにし、地球形成初期段階の比較的低温下で水素化した鉄に他の軽元素が固溶してコアへと運ばれるという、コア-マントル分化の新たなシナリオを提唱した。

今後、原始地球の進化過程のさらなる解明に向けて、地球核中の軽元素の相互の影響を明らかにしていく必要がある。そこで本研究では、より高い温度圧力領域での中性子実験を実現させ、『高温高圧下で水素化した鉄に、他の軽元素はどの段階(鉄の状態、温度条件)でどのように取り込まれ、また鉄に取り込まれた水素は他の軽元素によって影響を受けるのか?』という学術的な問いを明らかにすべく、より発展的な研究を遂行するに至った。

2. 研究の目的

本研究では水素と硫黄を含む鉄-含水ケイ酸塩の多成分系に着目し、放射光 X 線・パルス中性子線のマルチ量子ビームを用いた高温高圧下その場観察から、反応生成物や反応プロセス、鉄の水素化に対する硫黄の影響や、複数の軽元素の相互影響を探索することを目的とした。これにより、地球形成初期のコアに溶け込んだ軽元素問題に新たな展開が期待される。

3. 研究の方法

地球の始源物質(鉄とエンスタタイト組成のケイ酸塩)に見立てた初期試料として、鉄と硫黄の混合粉末とブルーサイトとクォーツの粉末を準備した。含水鉱物であるブルーサイトは高温高圧下で脱水して水と MgO になる水(水素)源である。水や硫黄の有無を比較するために、無水試料としてブルーサイトの代わりに MgO を使った試料、硫黄を含まない試料も用いた。中性子回折実験では、軽水素(¹H)は非干渉性散乱による高いバックグラウンドを与えるため、重水素(²H, D)化させた試料で実験を行うことが通例である。このため、本研究でも重水素化させたブルーサイト Mg(OD)₂ を用いた。独自に開発・改良した高圧セルを用いて中性子回折実験を行った。また、中性子実験と相補的な情報が得られる放射光 X 線その場観察の実験も行い、X 線回折測定と X 線イメージングの両方から、鉄が溶融して球となって凝集し溶融したケイ酸塩中を沈んでいくコア-マントル分化の様子を捉えた。

(1) 中性子回折その場観察と、より高温高圧領域での測定を実現するための高圧セルの改良

これまでにも中性子実験を行うにあたり、長時間(数時間~半日)安定した高温高圧発生が可能で、かつ試料体積とアンビルギャップを大きくすることで中性子回折強度を稼ぎ、解析に十分なシグナル強度の回折データを取得できるセルアセンブリの開発を行ってきた。本研究では 10 GPa (= 万気圧)、1000 K 以上のより高温高圧領域での中性子実験を実現するために、セルのサイズや用いる材質を再検討し、セル構成を最適化した。Cr ドープの MgO と断熱の良い ZrO₂ 材とのハイブリッドにした圧媒体に目的の温度圧力条件に応じたヒーター材(グラファイト、TiC+Al₂O₃ コンポジット)を組み合わせ、高温高圧下での圧力抜けやアンビルセルからの中性子の吸収を軽減させることで従来セルの課題を克服した(図 1)。また高温高圧で脱水した水と発生した水素の両方を試料室内に閉じ込めるために NaCl とグラファイトのハイブリッドの試料カプセル

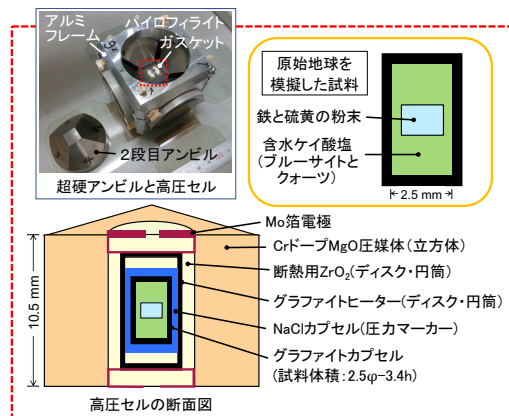


図 1. 開発した高温高圧中性子回折実験用アンビルセルアセンブリ。

ルを用い、試料体積を大きく保ったまま試料中の鉄部分のみからのシグナルを選択的に取得できるよう工夫を施した。J-PARCのPLANET(BL11)ビームラインにて、2つの異なる先端サイズのアンビルを用いて6-7 GPa, 1000 Kと10-12 GPa, 1200Kの温度圧力条件で実験を行った。

(2) 放射光 X 線その場観察と、高解像度イメージングシステムの立ち上げ

中性子回折よりも短時間(分単位)でデータが取得できる X 線回折測定により、高温高圧下で起こる反応をリアルタイムで観察した。X 線回折パターン測定と同時に、鉄とケイ酸塩の溶融現象をクリアに観察するための高解像度イメージングカメラシステムを開発した(図2)。このシステムは研究期間内に随時アップデートし、z 軸ステージの制御自動化や動画撮影用のソフトウェアプログラムも導入した。これによりシリケート中で鉄滴が凝集して球となり沈降していく様子を静止画ではなく連続したタイムスケールでの観察が可能となった。

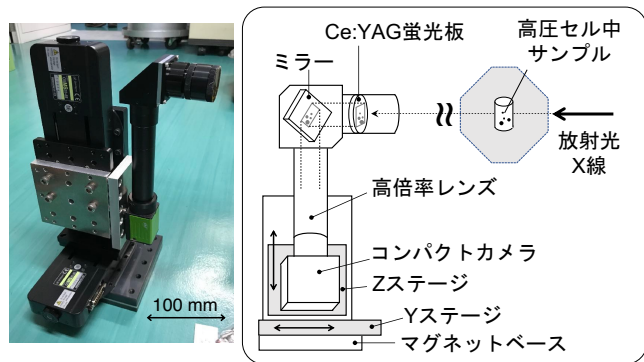


図2. 本研究で立ち上げた放射光 X 線イメージング用高解像度カメラシステム

(3) 回収試料の分析と反応物の同定

回収した試料の断面を研磨し、分光測定や X 線回折、走査型電子顕微鏡(SEM)などを用いて、生成物の組成や元素分布について詳しく調べた。常温常圧で回収した試料中の鉄から水素はすでに抜けてしまっているが、鉄と硫化鉄・ケイ酸塩の分布から、元素の拡散や起きた反応プロセスについて考察した。また赤外吸収分光を用いて、ケイ酸塩部分に残存する水分を調べた。

4. 研究成果

(1) 中性子実験

10 GPa, 1000 K を超えるこれまでよりも高い温度圧力領域で鉄水素化物の中性子回折パターン(図3)を取得することに初めて成功した。回折パターンのリートベルト結晶構造解析から、種々の温度圧力条件での鉄化合物(鉄水素化物および硫化鉄)中の水素固溶量と結晶構造中の原子位置を決定した。試料の組成を変えて複数回の実験を行った結果、とりわけ面心立方格子構造 fcc の鉄重水素化物(FeD_x)中に取り込まれた水素量 x は、温度・圧力が高いほど増加した。本実験の条件下では Hiroi *et al.* (2005) で報告されている $x \sim 0.4$ の溶解度ギャップ(miscibility gap)を超えることなく飽和する傾向が見られた(図4)。硫黄を含まない含水試料で水素量は最も多く、共存する硫化鉄 FeS は水素を取り込まない上に、鉄の水素化を阻害することが明らかになった。このことから、地球進化の初期段階では水素と硫黄が固体の鉄に優先的に取り込まれ、鉄の融点を効果的に下げることで溶融した鉄中に他の軽元素が徐々に溶け込んでいったことが示唆される。この研究成果は、Scientific Reports に論文として発表した(Iizuka-Oku *et al.*, 2021)。

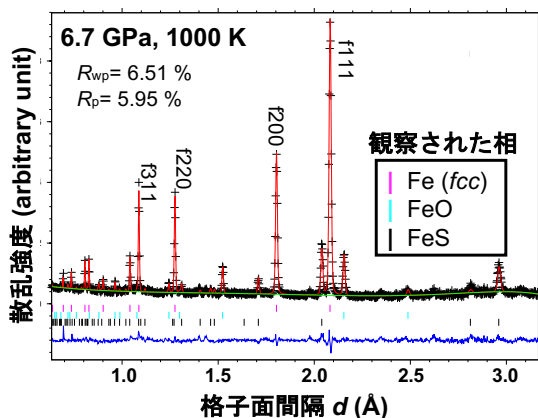


図3. 得られた中性子回折パターンの一例。

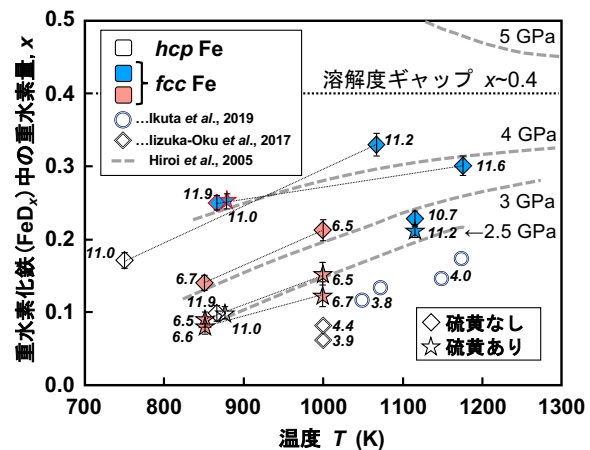


図4. 鉄重水素化物中の水素量の温度圧力依存性.各プロット横に圧力値(GPa)を示す。

(2) 放射光 X 線実験

空間分解能 10 μm を実現させた高解像度 X 線イメージングカメラを用いて、1 mm 四方の試料

カプセル内で溶融した鉄の液滴が凝集して球となりケイ酸塩メルトの中を徐々に沈降していく様子をクリアに捉えることに成功した(図5)。数十ミクロン程度の鉄の小さな液滴の生成から、それらが熱対流によって浮き沈む様子を捉えたのは本研究が初めてである。さらに、表面活性な硫黄が鉄球のサイズや形に影響を及ぼし、凝集・沈降の様子が変わることを見事に明らかにした。また X 線回折パターンの変化から、昇温とともに起きた一連の反応(含水鉱物の脱水、鉄や硫化鉄の相転移と水素化、ケイ酸塩の鉄の溶融など)を把握し、高温高压下で鉄の相転移とともに硫黄が鉄と反応して FeS の高温高压相の生成がほぼ同時に起こることが分かった。イメージングと回折測定による同時観察から鉄とケイ酸塩の溶融を見極めることで、部分溶融した残存ケイ酸塩の結晶と溶融した鉄粒子のクラスターが集合体を形成してパーコレーションによって完全溶融していない状態でも少しずつ沈んでいくことが分かった。この結果は現在学術雑誌に投稿・査読中である。

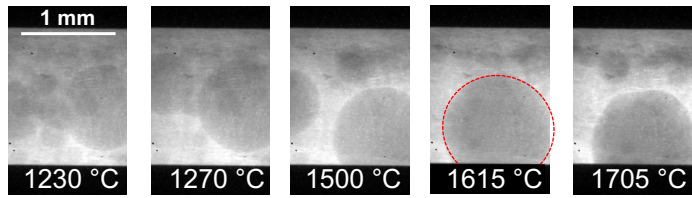


図 5. 高温高压下で得られたイメージング画像の一例。鉄の液滴が徐々に凝縮して球となり沈んでいった。

(3) 回収試料の分析

① X 線回折測定と SEM 分析

鉄部分において鉄と硫化鉄、ケイ酸塩部分には含水試料ではオリビン(Mg,Fe)₂SiO₄が鉄の近傍に卓越して生成し、パイロキシン(Mg,Fe)SiO₃がその周りに分布していることが分かった(図6)。鉄とオリビンとの間にわずかにみられる酸化鉄の存在が、水と鉄とが酸化還元反応を介して鉄水素化物を生成したことを裏付けている。特に、SEM の元素分析からはオリビンが鉄に富み、その周りに鉄に乏しいパイロキシンあるいはエンスタタイト MgSiO₃が分布していたことが明らかになった。一方で、無水試料にオリビンは生成しなかった。現在の地球深部にオリビンが多く存在することからも、水は地球の進化において必須要素であり地球核の鉄中に軽元素として水素が取り込まれていたという確たる証拠であると考えられる。

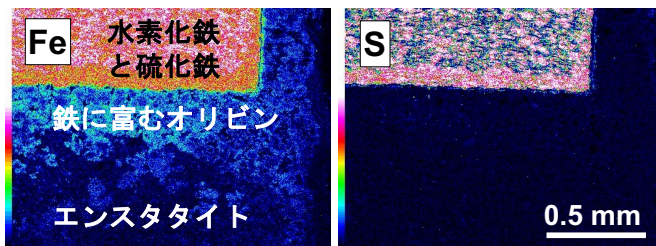


図 6. 回収試料の SEM 分析による Fe と S の元素マッピングの結果。

② 赤外吸収スペクトル分析

実験の回収試料のケイ酸塩部分の赤外吸収測定を行い、残存する水分を調べた。新型コロナウイルス感染拡大の影響により数ヶ月～1年以上の時間が経過した回収試料では重水素が水素に置換されていたこと、両面研磨して薄片の作成が難しかったことにより、水分量の決定や鉄水素化物とケイ酸塩間の水素分配についての詳細な考察には至らなかった。しかし、軽水素由来の水分量を見積もっても、ケイ酸塩に取り込まれた水分はごく微量の ppm オーダーであると予想される。含水・無水の試料間で赤外吸収スペクトルの OH 伸縮振動バンドの有無の差が明瞭だったことから、含水試料中の水の大部分が鉄に有意に取り込まれていたことが裏付けられた。

(4) 本研究の結論と国内外における位置づけ、今後の展望など

これまでの鉄の水素化現象についての放射光 X 線や中性子実験による先行研究(例えば、Machida *et al.*, 2014; 2019, Ikuta *et al.*, 2019; Shibazaki *et al.*, 2009; 2011)では、水を介さない水素源(アンモニウムボランや LiAlH₄ などの高温高压下で分解して水素 H₂ を発生させる化合物)が出発試料に用いられていた。本研究では鉄-ケイ酸塩-水に硫黄を加えた多成分系の原始地球の組成に近い試料を対象として、地球形成初期のマグマオーシャン中に大量に存在したとされる水と鉄との酸化還元反応を実験的に再現し、地球進化における水の存在の重要性を示すとともに、微惑星の集積時の地球核の鉄中への水素と硫黄の優先的な取り込みを明らかにした(図7)。本研究の成果は、国内外において

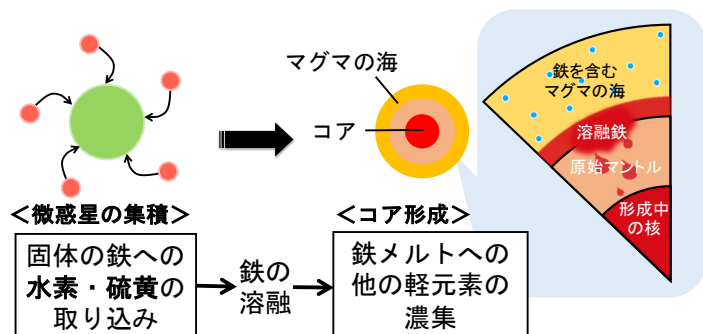


図 7. 原始地球の形成過程における、鉄への軽元素の取り込みのシナリオ。水がいつ、どの程度地球にもたらされたかが核中の軽元素の謎を解明する鍵となる。

非常に先駆的な実験的アプローチであり、高温高压下で生成した鉄水素化物とケイ酸塩間の軽元素の分配と、鉄の水素化に対する軽元素の相互の影響や反応プロセスを解き明かしたことのインパクトは大きい。さらに独自に開発した高压セルや新たに立ち上げた X 線イメージングシステムを用いて、相補的な情報が得られる放射光 X 線と中性子線の両ビームの特徴を活かしつつ、双方の質の高いデータを取得したという点が、本研究の最大の特色である。

地球外核が液体鉄であることに照らして、今後の展望として熔融した鉄中の水素固溶量を明らかにしていくことが重要と考えている。また、硫黄だけではなく複数の軽元素の相互影響を同時に推察できれば、地球進化における軽元素の寄与にさらなる制約を与え得る。また本研究では、レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた高温高压実験(~30 GPa, 3000 K)も計画し、一部遂行していたが、DAC 中の数十 μm オーダーの極微量の試料の安定な加熱と回収後の分析が困難で、研究期間内にまとまった結果が得られなかった。将来的には、20–30 GPa のより高い圧力範囲での中性子実験にもチャレンジしていく。

<引用文献>

- Hattori, T. et al. (2015) Design and performance of high-pressure PLANET beamline at pulsed neutron source at J-PARC. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 780, 55–67.
- Hiroi, T., Fukai, Y., Mori, K. (2005) The phase diagram and superabundant vacancy formation in Fe–H alloys revisited. *J. Alloy Compd.* 404–406, 252–255.
- Iizuka-Oku, R., Yagi, T., Gotou, H., Okuchi, T., Hattori, T., Sano-Furukawa, A. (2017) Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. *Nat. Comm.* 8, 14096, <https://doi.org/10.1038/ncomms14096>.
- Iizuka-Oku, R., Gotou, H., Shito, C., Fukuyama, K., Mori, Y., Hattori, T., Sano-Furukawa, A., Funakoshi, K., Kagi, H. (2021) Behavior of light elements in iron–silicate–water–sulfur system during early Earth's evolution. *Sci. Rep.* 11:12632, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91801-3> (2021).
- Ikuta, D., Ohtani, E., Sano-Furukawa, A., Shibazaki, Y., Terasaki, H., Yuan, L., Hattori, T. (2019) Interstitial hydrogen atoms in face-centered cubic iron in the Earth's core. *Sci. Rep.* 9, 7108, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43601-z>.
- Machida, A., Saitoh, H., Sugimoto, H., Hattori, T., Sano-Furukawa, A., Endo, N., Katayama, Y., Iizuka, R., Sato, T., Matsuo, M., Orimo, S., Aoki, K. (2014) Site occupancy of interstitial deuterium atoms in face-centred cubic iron. *Nat. Comm.* 5, 5063, <https://doi.org/10.1038/ncoms6063>.
- Machida, A., Saitoh, H., Hattori, T., Sano-Furukawa, A., Funakoshi, K., Sato, T., Orimo, S., Aoki, K. (2019) Hexagonal close-packed iron hydride behind the conventional phase diagram. *Sci. Rep.* 9, 12290, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48817-7>.
- Sano-Furukawa, A., Hattori, T., Arima, H., Yamada, A., Tabata, S., Kondo, M., Nakamura, A., Kagi, H., Yagi, T. (2014) Six-axis multi-anvil press for high-pressure, high-temperature neutron diffraction experiments. *Rev. Sci. Instrum.* 85, 113905.
- Shibazaki, Y., Ohtani, E., Terasaki, H., Suzuki, A., Funakoshi, K. (2009) Hydrogen partitioning between iron and ringwoodite: Implications for water transport into the Martian core. *Earth Planet. Sci. Lett.* 287, 463–470.
- Shibazaki, Y., Ohtani, E., Terasaki, H., Tateyama, R., Sakamaki, T., Tsuchiya, T., Funakoshi, K. (2011) Effect of hydrogen on the melting temperature of FeS at high pressure: Implications for the core of Ganymede. *Earth Planet. Sci. Lett.* 301, 153–158.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Iizuka-Oku Riko, Gotou Hirotsada, Shito Chikara, Fukuyama Ko, Mori Yuichiro, Hattori Takanori, Sano-Furukawa Asami, Funakoshi Ken-ichi, Kagi Hiroyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Behavior of light elements in iron-silicate-water-sulfur system during early Earth's evolution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12632
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-91801-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 MORI Yuichiro, KAGI Hiroyuki, KAKIZAWA Sho, KOMATSU Kazuki, SHITO Chikara, IIZUKA-OKU Riko, AOKI Katsutoshi, HATTORI Takanori, SANO?FURUKAWA Asami, FUNAKOSHI Ken-ichi, SAITOH Hirouyuki	4. 巻 116
2. 論文標題 Neutron diffraction study of hydrogen site occupancy in Fe _{0.95} Si _{0.05} at 14.7 GPa and 800 K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 309-313
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2465/jmps.210825	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 C. Shito, H. Kagi, S. Kakizawa, K. Aoki, K. Komatsu, R. Iizuka-Oku, J. Abe, H. Saitoh, A. Sano-Furukawa and T. Hattori	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Hydrogen occupation and hydrogen-induced volume expansion in Fe _{0.9} Ni _{0.1} Dx at high P-T conditions.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2138/am-2022-8348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 飯塚理子, 鍵裕之	4. 巻 61
2. 論文標題 金属鉄の水素化反応に硫黄が及ぼす影響と地球核の進化過程	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本金属学会会報誌「まてりあ」	6. 最初と最後の頁 202 - 209
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2320/materia.61.202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Riko Iizuka-Oku, Hiroyuki Kagi	4. 巻 17
2. 論文標題 Dissolution of light elements into iron during the early earth's evolution.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Elements	6. 最初と最後の頁 272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Saitoh, A. Machida, R. Iizuka-Oku, T. Hattori, A. Sano-Furukawa, K. Funakoshi, T. Sato, S. Orimo, K. Aoki	4. 巻 10
2. 論文標題 Crystal and Magnetic Structures of Double Hexagonal Close-Packed Iron Deuteride.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 9934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-66669-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Iizuka-Oku, W. Gui, K. Komatsu, T. Yagi and H. Kagi	4. 巻 283
2. 論文標題 High-pressure responses of alkali metal hydrogen carbonates, RbHCO ₃ and CsHCO ₃ : Findings of new phases and unique compressional behavior	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Solid State Chemistry	6. 最初と最後の頁 121139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jssc.2019.121139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 R. Iizuka-Oku, V. Soustelle, N. Miyajima, N. Walte, D. J. Frost, and T. Yagi	4. 巻 295
2. 論文標題 Experimentally deformed lawsonite at high pressure and high temperature: Implication for low velocity layers in subduction zones	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of the Earth and Planetary Interiors	6. 最初と最後の頁 106282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pepi.2019.106282	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Iizuka-Oku, T. Yagi, H. Gotou, T. Okuchi, T. Hattori, and A. Sano-Furukawa	4. 巻 2
2. 論文標題 Behavior of Hydrogen in the Early Stage of Earth's Evolution.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Research and Development Highlights, MLF annual report	6. 最初と最後の頁 14-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 鍵 裕之・小松 一生・飯塚理子	4. 巻 32
2. 論文標題 放射光と中性子がつなく地球惑星深部における水素の物質科学	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本放射光学会 学会誌「放射光」	6. 最初と最後の頁 50-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, C. Chito, K. Fukuyama, Y. Mori, T. Hattori, A. Sano-Furukawa and K. Funakoshi, H. Kagi
2. 発表標題 Effects of sulfur on the hydrogenation of iron in early Earth's evolution.
3. 学会等名 Goldschmidt 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, H. Kagi
2. 発表標題 In-situ observations of Iron-silicate-water-sulfur system and behaviors of light elements during the Earth's core-mantle formation
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) - American Geophysical Union (AGU) Joint Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯部隆仁, 鍵裕之, 飯塚理子, 後藤弘匡
2. 発表標題 レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高压下でのポストペロブスカイト構造 CaIrO ₃ とXeの反応性
3. 学会等名 第62回高压討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, C. Shito, H. Kagi
2. 発表標題 Light elements in iron-hydrous silicate system: Searching for core formation process using in-situ high-pressure and high temperature neutron and X-ray observations.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) - American Geophysical Union (AGU) Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 C. Shito, H. Kagi, A. Sano-Furukawa, S. Kakizawa, K. Komatsu, K. Aoki, R. Iizuka-Oku, S. Machida, N. Furukawa, A. Suzuki
2. 発表標題 Pressure-temperature dependence of hydrogen bonding in deuterated guyanaite.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) - American Geophysical Union (AGU) Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚理子, 後藤弘匡, 市東力, 森悠一郎, 佐野亜沙美, 服部高典, 舟越賢一, 鍵裕之
2. 発表標題 高温高压下での鉄 - 含水ケイ酸塩系における鉄の水素化への軽元素の影響
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 磯部隆仁, 飯塚理子, 鍵裕之, 後藤弘匡
2. 発表標題 レーザー加熱ダイヤモンドアンビルセルを用いた高温高压下でのポストペロブスカイト構造 CaIrO ₃ とXeの反応性
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市東力, 鍵裕之, 柿澤翔, 森悠一郎, 飯塚理子, 青木勝敏, 齋藤寛之, 阿部淳, 佐野亜沙美, 服部高典
2. 発表標題 高温高压中性子回折による fcc Fe _{0.9} Ni _{0.1} 水素化物の結晶構造解析
3. 学会等名 第61回高压討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, C. Shito, H. Kagi
2. 発表標題 Light elements in iron-hydrous silicate system: Searching for core formation process using in-situ high-pressure and high temperature neutron and X-ray observations
3. 学会等名 Japan Geoscience Union (JpGU) - American Geophysical Union (AGU) Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯塚理子, 後藤弘匡, 市東力, 服部高典, 佐野亜沙美, 鈴木昭夫, 鍵裕之
2. 発表標題 高温高压下での鉄 - 含水ケイ酸塩中の軽元素の振る舞い: 地球進化への応用
3. 学会等名 量子ビームサイエンスフェスタ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, K. Fukuyama, H. Kagi
2. 発表標題 Behavior of light elements in the Earth's evolution: In-situ high pressure and high temperature neutron observations of iron-silicate-water system
3. 学会等名 Goldschmidt 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯塚理子, 後藤弘匡, 市東力, 福山鴻, 佐野亜沙美, 服部高典, 舟越賢一, 鍵裕之
2. 発表標題 高温高圧中性子回折その場観察による鉄化合物中の水素量の定量
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木勝敏, 飯塚理子, 齋藤寛之, 町田晃彦, 服部高典, 佐野亜沙美, 舟越賢一, 佐藤豊人, 折茂慎一
2. 発表標題 dhcp FeDxの結晶・磁気構造
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯塚理子, 後藤弘匡, 鈴木昭夫, 鍵裕之
2. 発表標題 鉄-含水シリケートの高温高圧 X 線イメージングによる 地球進化過程の解明
3. 学会等名 地球化学会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, K. Fukuyama, H. Kagi
2. 発表標題 Investigation of multi light elements in iron-silicate-water system using high pressure and temperature neutron experiments: Implications for the Earth's evolution
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Iizuka-Oku, H. Gotou, H. Kagi
2. 発表標題 Dissolution of multi light elements in iron-silicate system using high pressure and high temperature experiments: Implications for the Earth's evolution.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鍵裕之・福山鴻・飯塚理子	4. 発行年 2018年
2. 出版社 海洋出版	5. 総ページ数 339-345 (7)
3. 書名 月刊地球 総特集「核 - マントルの相互作用と共進化」マントルでの軽元素のふるまい	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関