



の量を求めたところ、温度を保持してからおよそ 10 時間後には約 0.79 wt.%の水素が含まれていることが分かった。この重水素量は、町田ら[8]の 6.3 GPa, 988K で求められた重水素量 2.24 wt.%よりも少なく、放射光 X 線を用いて 10 GPa 以上で求められた値と比べても、非常に小さな値となった。その理由としては、今回の実験の温度圧力条件が低いこと、また鉄と水素の単純系ではなく反応に水が関与する多成分系であるために、水素化物の生成速度が遅かったことが考えられる。図 2 に示す回収試料の SEM 観察からは、水分を含む試料系にのみ、鉄中に溶け込んでいた水素が減圧中に発泡して抜けた跡を示す丸い空孔が粒界に沿って見られた。さらに  $\text{SiO}_2$  と  $\text{MgO}$ , Fe が反応してできた鉄に富んだケイ酸塩のオリビン  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$  と鉄との間に、酸化鉄  $\text{FeO}$  の薄い層が確認された。このことから、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  から吐き出された水と鉄との酸化還元反応により、 $\text{FeH}_x$  とともに生成した  $\text{FeO}$  が鉄の周囲に被膜を形成したために、鉄の水素化が阻害されたと考えられる。

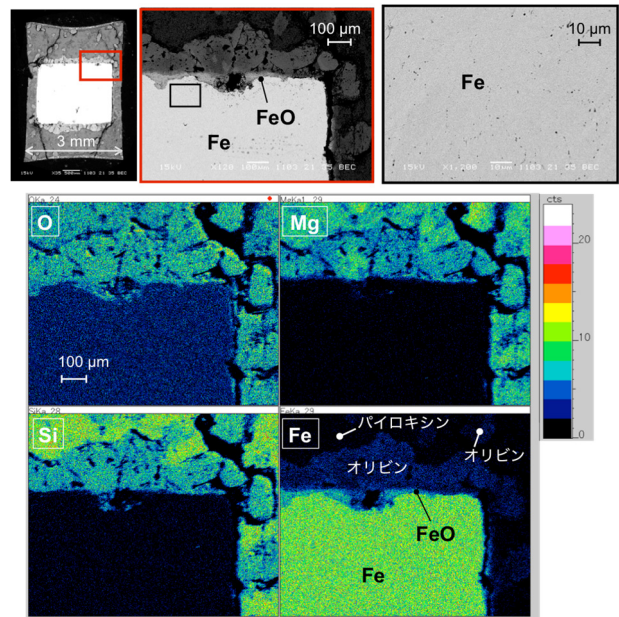


図 2 鉄-ケイ酸塩-水系の高温高压中性子実験で得られた回収試料の電子像（上図、赤枠および黒枠がそれぞれの拡大図）と（下図）SEM-EDS による元素マッピング分析の結果。鉄中には水素が抜けた後の空孔が見られた。ケイ酸塩部分には、 $\text{MgO}$  と  $\text{SiO}_2$  が反応してオリビン  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$  とパイロキシン  $\text{MgSiO}_3$  が生成し、水素を含んだ鉄の周りを酸化鉄  $\text{FeO}$  の薄い層が覆っていた。

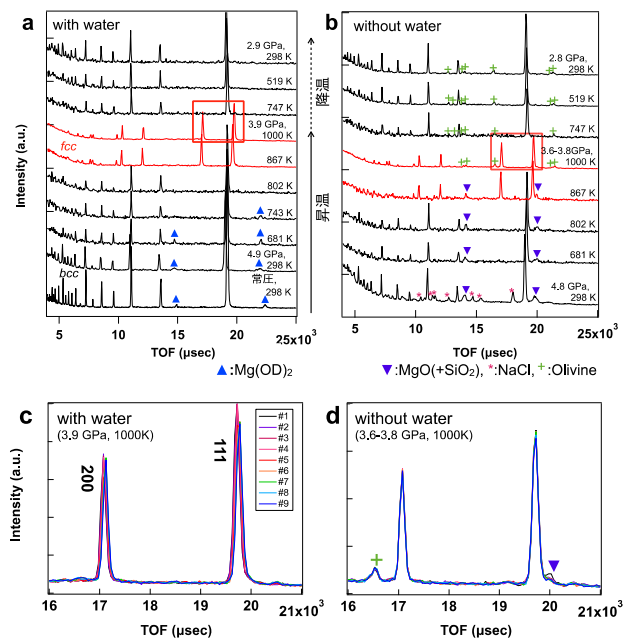


図 1 中性子回折パターンの温度-圧力-時間変化。(a)水を含んだ系と(b)水を含まない系。水を含んだ系では、温度圧力の変化とともに含水鉱物  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  の脱水を経て、鉄が *bcc* 相(黒線)から *fcc* 相(赤線)へ相転移が起きた。(c),(d) 3.9 GPa-1000 K で 10 時間保持した時の *fcc* 相の 111 と 200 回折ピーク (a)と(b)の図中の太枠で囲った部分)の変化。#1~#9 はそれぞれ約 1 時間毎に得られた回折線。水を含んだ系でのみ徐々にシフトしていき、水素を取り込んだことによる顕著な体積膨張が観察された。

本研究の結果から、高温高压下で含水鉱物の脱水が起きて水が供給されれば、~4 GPa, 1000K という比較的低い温度圧力条件下の固体の鉄にも有意に水素が溶け込むことが明らかになった。このことは、太陽系で地球が形成された時に、始源物質が集積して徐々に温度が上がっていく初期の段階で、水素は他の軽元素に先駆けて鉄へと溶け込み始めていたことを示唆している。これを基に我々は、原始地球が進化する過程で、まず初めに鉄に水素が固溶し、温度が更に上がって熔融した鉄水素化物に他の軽元素が次々と溶け込みながら地球の中心へ沈んでいき、コアを形成したという地球史のコア-マントル分化過程における新たなシナリオを提唱した。

### 今後の展開

今後の展望として、コア-マントルの分離過程や他の軽元素の溶融鉄への溶解の可能性をより詳しく検証していくためには、純鉄とケイ酸塩の系ばかりではなく、水素化した鉄とケイ酸塩との間での複数の軽元素の分配を調べることも重要となる。さらに、より高い温度圧力領域を調べることも必要である。本研究の結果は、地球コアにおける軽元素の謎について、これからの研究の展開に大きな示唆を与えるものであると捉えている。PLANET を用いた中性

子回折実験のメリットを生かしつつ、水素を含めた多軽元素の高温高圧下での挙動とその反応過程について、今も探索を続けている。

本研究の詳細な内容は、R. Iizuka-Oku, T. Yagi, H. Gotou, T. Okuchi, T. Hattori, and A. Sano-Furukawa (2017) Hydrogenation of iron in the early stage of Earth's evolution. *Nature Communications*, 8, 14096, DOI: 10.1038/ncomms14096. から閲覧できます。

## 謝辞

中性子実験に向けた新しい高圧セルアSEMBリの開発を含むオフラインの高温高圧実験は、物性研究所高圧合成室の500トンプレスを用いて行われました。また、回収試料の分析は電子顕微鏡室のSEM-EDSを用いました。本研究は、日本原子力研究開発機構 J-PARC センターの服部高典 主任研究員と佐野亜沙美 副主任研究員、岡山大学惑星物質研究所の奥地拓生 准教授との共同研究として行われました。J-PARC MLF の実験課題(2013B0034, 2014A0049, 2014B0044)で中性子実験を行い、科学研究費補助金基盤研究 A(No. 25246037)と JSPS 特別研究員 PD の研究奨励費の支援を受け、実施されました。ここに感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] J. P. Poirier, *Phys. Earth Planet. Inter.* **85**, 319-337 (1994).
- [2] Y. Fukai, *Nature* **308**, 174 (1984).
- [3] T. Okuchi, *Science* **278**, 1781-1784 (1997).
- [4] K. Sakamaki et al., *Phys. Earth Planet. Inter.* **174**, 192 (2009).
- [5] T. Yagi, T. Hishinuma, *Geophys. Res. Lett.* **22**, 1933-1936 (1995).
- [6] A. Sano-Furukawa et al., *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 113905 (2014).
- [7] T. Hattori et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **780**, 55-67 (2015).
- [8] A. Machida et al., *Nature Commun.* **5**, 5063 (2014).
- [9] R. Iizuka-Oku et al., *Nature Commun.* **8**, 14096 (2017).
- [10] 飯塚理子ら、日本中性子科学会「波紋」、**27**, 104-108 (2017).
- [11] 山田明寛ら、高圧力の科学と技術 **26**, 99-107 (2016).