

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2008～2012

課題番号：20103002

研究課題名（和文） 高圧下における水の鉱物への固定機構とダイナミカルな挙動

研究課題名（英文） Incorporation mechanism of hydrogen into some minerals and its dynamical behavior at high pressure

研究代表者

永井 隆哉（NAGAI TAKAYA）

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：20243131

研究成果の概要（和文）：

鉱物物理研究において今後ますますの活用が期待される研究手法である中性子回折法を用いて、いくつかの重要な含水鉱物の水素位置に関する情報を、常圧、常圧高温、常温高压、高温高压と幅広い温度圧力条件で得ることに成功した。マントル鉱物中の水素位置、水素結合の圧力誘起対称化、熱膨張の特異な挙動と水素位置の無秩序化との関係、地殻に産する固溶体鉱物中の金属元素置換と水素位置の関係など、多くの新しい知見が得られた。

研究成果の概要（英文）：

More and more application of neutron diffraction technique is expected in the field of mineral physics in the near future. Crystallographic information about hydrogen positions in some important hydrous minerals was successfully obtained in quite wide range of pressure-temperature conditions. These could give some new insights of hydrogen positions in some mantle minerals, a pressure-induced hydrogen-bond symmetrization mechanism, the relationship between specific thermal expansion and dynamical behavior of hydrogen atoms, and the relationship between cationic substitution and hydrogen positions in some crustal minerals.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2009年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2010年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2011年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2012年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
総計	64,800,000	19,440,000	84,240,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 ・ 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：含水鉱物、氷、結晶構造、高温高压、水素結合、中性子回折

1. 研究開始当初の背景

近年のブルームテクトニクスによる地球のダイナミックな描像は、地球表層と深部が物質科学的に密接にリンクした一つのシステムであることを強く認識させた。しかし、太陽系惑星の中で地球を特徴付ける水に関しては、地球内部は高压であり、かつ、高温であるため、従来、地球内部物質候補として

は無水の鉱物が考えられてきた。ところが、近年の様々な観測結果は、地球内部にも多量の水が存在する可能性を示唆している。水は見かけ上、無水の鉱物に固定されている可能性もあるし、独自の構造をとる含水鉱物となる可能性もある。いずれにせよ結晶構造中に水を固定した鉱物の物性は無水の鉱物と大きく異なり、無水鉱物の物性を元に構築した

地球内部の描像と含水鉱物を元に構築した描像は大きく違う。一例を挙げると、最上部マントル主要構成鉱物の olivine は、見かけ上無水鉱物であるが、数 1000ppm の水を結晶構造中に固定することができ、それにより流動速度は 1000 倍以上も速くなる可能性が示されている。従って、地球内部における鉱物中への水の固定機構を解明することは、固体地球科学の最重要課題である。

以上の理由から、多くの研究者により含水鉱物の物性が研究されてきたが、水の地球内部物質の性質に対する影響の解明には、鉱物中における水素原子の存在位置を正確に決定することが基本的に重要である。しかし、鉱物の構造を調べるために広く用いられてきたX線や、赤外線吸収などの分光法は、それら量子ビームのプロープとしての特性から結晶中の水素原子に関する間接的な情報しか与えない。一方、中性子回折は鉱物中の水素原子を直接「見る」ことが出来る殆ど唯一の手法であるが、これまでの中性子線源は強度が不足していたため、地球深部のような高温高压の極限環境での回折実験が出来なかった。しかし、鉱物中の水素に関する構造が温度圧力によって大きく変化することは明らかであり、高温高压下でのその場中性子回折実験は、地球内部での鉱物中に固定された水の挙動を知る上で必要不可欠である。今回計画されている高温高压中性子散乱ビームラインは、この夢を現実の物とする。近年、米国、欧州でも同規模の中性子源が稼働を開始し、物質科学的アプローチをメインとする地球科学者らも、地球深部における水の問題には大きな関心を寄せており、数年後にはこの分野のイニシアティブを巡って激しい国際競争となることは確実である。しかし、現在の各計画を見る限り、高压、かつ高温下という実際の地球深部条件での中性子回折実験の実現を目標にしているのは本計画だけであり、この機を失することなく、水と鉱物の相互作用という地球物質科学の根本的課題を世界に先駆け解明したい。

2. 研究の目的

本計画研究では、地球表層の水が鉱物中にどのような形で固定され、地球深部に沈み込んでいく際、水素結合の形態がどのように変化していくのかを、世界的にも先駆的な高温高压下中性子回折実験を通じ、物質科学的に明らかにすることを目的とする。さらに、水素は鉱物中であっても移動度が非常に高いことから、鉱物中に取り込まれた水素が地球内部の高温高压下でどのようなダイナミカルな挙動（結合、切断、拡散、組織化）を示すのかを原子レベルで明らかにする。

具体的には、地殻と上部マントルにおける

主要な含水鉱物中での水素固定形態の結晶化学、温度圧力上昇に伴う含水鉱物中の水素結合の変化の解明、含水鉱物中の水素の熱振動解析による高温高压下での水素のダイナミクスの解明をテーマとする。

3. 研究の方法

総括班を中心とした高温高压中性子散乱ビームラインPLANETの設計・建設のフェーズにあつては、鉱物結晶中の水素原子の結晶化学的情報を得るという観点から、必要とする中性子ビームの強度や分解能などの検討を行うことにより積極的に協力する。また、PLANET建設中は、含水鉱物の重水素置換が与える脱水反応速度への同位体効果に関する研究や、様々な含水鉱物の重水素置換体の合成、MEM解析の活用によるX線を使った含水鉱物の水素位置情報を含む圧力下での構造研究、J-PARCの先行ビームライン「匠」での水を試料とした予備的な高压中性子実験、国内あるいは外国の定常原子炉を利用した含水鉱物の高温中性子回折実験、米国SNSでの高压下中性子回折の予備実験などを精力的に行う。

PLANET稼働後は、高温高压下での含水鉱物中での水素の挙動について明らかにするための利用実験を速やかに遂行する。

4. 研究成果

(1) 沈み込むスラブ内に存在する含水鉱物の高温高压下での挙動は、マントルへの水の供給に関与する素反応として重要である。本研究では、最もシンプルな含水鉱物であり、複雑な含水ケイ酸塩鉱物の結晶構造基本単位でもある $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ を用い、脱水反応の速度論、高温下での O-H 変換の速度論、中性子回折実験による高温下での構造変化、本領域で建設した中性子回折ビームライン PLANET を用いた高温高压下における構造変化に関しての実験的研究を行った。

① $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ およびその重水素置換体の熱重量測定の結果、脱水反応の速度論的考察における同位体効果が予想より小さく、脱水前駆反応の可能性や脱水メカニズムの再考が必要な可能性を指摘した。

② $Mg(OH)_2$ の H-D 変換実験を高温下で行い、H-D 変換率の時間変化を赤外吸収測定で決定し、Avrami の方法で解析した結果、活性化エネルギー約 70 kJ/mol を得た。この値は、同構造である $Ca(OH)_2$ 中の水素拡散の活性化エネルギーとほぼ同値であり、構造中での相互拡散が H-D 変換の速度を律速していることを明らかにした。

③ 米国オークリッジ国立研究所内の定常原子炉中性子施設 HFIR 内の WAND ビームラインで、 $Mg(OD)_2$ 、 $Ca(OD)_2$ について高温下での粉末中性子回折実験を行い、結晶構造の温度

変化を調べたところ、予想に反して $\text{Mg}(\text{OD})_2$ と $\text{Ca}(\text{OD})_2$ が異なった熱膨張挙動を示し、 $\text{Mg}(\text{OD})_2$ 構造中の層間は負の熱膨張を示す結果を得た。これは、水素原子の高温下での異方的な熱振動の増大によると考えると、 $\text{Ca}(\text{OD})_2$ も高压下では同様の熱膨張挙動を示す可能性を示唆する。

④ 上述の結果が予想する現象を調べるため、ビームライン PLANET における中性子回折実験によって、 $\text{Ca}(\text{OD})_2$ について、3 GPa の高压下での結晶構造の温度変化を測定し、予測通り層間が負の熱膨張挙動を示すことが明らかとなり、水素原子の高温下での異方的な熱振動の増大がこの系の物質の熱膨張をコントロールすることが示唆される結果を得た。

(2) 含水ケイ酸塩鉱物における陽イオン置換と OH 基の分布、すなわち水素結合との関係の解明のために、重要な含水ケイ酸塩鉱物である緑簾石族鉱物における陽イオン置換と OH 基の関係を研究した。 $\text{Ag}_{90}\text{Pd}_{10}$ パイプを内部カプセルに、金パイプを外部カプセルに用いた熱水合成法により、3–4 kb、500°C の条件で $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Mn}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ -紅簾石を合成し、赤外線分光分析により、合成相に重水素が存在することを確かめ、X線粉末回折法と中性子回折法により結晶構造解析を行った。これにより、3 種類の 6 配位席における Al、Mn、および重水素の位置を決定し、中性子回折の有用性を示した。

また、世界的にも産出が稀な沸石種（フェリエライト）の中性子回折測定を行い、水素位置の決定を行い、南極セーヌロンダーネ山塊産含水バナジウム・クロムザクロ石の研究、含水準輝石族のバビングトナイトの結晶構造、造岩鉱物における鉄の酸化数、陽イオン席における分布、結晶構造を解明した。

本研究により、複雑な化学組成を持つ造岩鉱物の含水水素合成物を合成することに成功し、合成試料の中性子回折データの構造解析に成功したことにより、複雑な化学組成の固溶体鉱物における陽イオン席間のイオン置換と水素の挙動の関係の系統的研究に道を開くことができた。このような研究は国内外でも限られており、今後、系統的研究を行うことによって陽イオンと OH 基の挙動の関係を解明することが期待される。また、結晶内における複数の金属元素の分布を決定することができ、鉱物の物理化学的性質の高度な解明に道が開かれる。

(3) 中性子回折実験と X 線回折実験は、得られる情報は相補的な関係にあるため、放射光を用いた高压下その場単結晶 X 線回折を幾つかの含水物質に対して行うことで結晶構造への圧力効果を解明し、その結果から水

素結合の振舞いについて考察を行い、中性子回折実験の効率化を図った。

① Super hydrous phase B 相の高压下单結晶 X 線回折実験により、高压下における水素位置の精密化に成功した。

② 高压下单結晶 X 線回折実験による回折強度分布の解析から、8.2 GPa 付近において $\delta\text{-AlOOH}$ 相の圧力誘起相転移を観察し、この相転移が二次相転移であること、ならびに構造中の水素占有サイトの変化に伴って生じる位置的無秩序化が原因であることを解明した。この結果は、水素結合の対称化へ向けた $\delta\text{-AlOOH}$ 構造における重要な移行プロセスを観察したという点だけでなく、同様な現象が確認されている H_2O との比較において重要である。 $\delta\text{-AlOOH}$ では室温かつ 10 GPa 以下という比較的实验を行い易い条件で観察されており、水素結合の特性を解明するための研究対象として非常に有用である。特に、水素結合の対称化を目指した実験は継続的に進めて行く必要があり、水素原子そのものの位置を解明するためにも中性子回折実験がより重要になる。

(4) 歪んだルチル構造をとる含水鉱物 ($\delta\text{-AlOOH}$) の水素結合が圧力により対称化に至るまでの相転移機構の解明をめざして、米国オークリッジ国立研究所内のパルス中性子施設 SNS にて高压下における中性子散乱実験を実施した。Paris-Edinburgh プレスを用いた高压実験を行い、7 GPa までのデータを取得した。その結果、空間群 $P2_1nm$ に固有なピークが弱くなっていくのが観測され、高压下では水素位置が無秩序化もしくは対称化した相への相転移が起きていることが明らかになった。

また、マントル遷移層の主要構成鉱物であるワズレアイト ($\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$) には、重量比にして最大 3 % 程度の H_2O が含まれることが知られていたが、含水量がごく微量のためその水素位置については分光学的手法等間接的な手法に頼って議論が行われているにすぎなかった。直接的な証拠を得るために、重水素化したワズレアイトを合成し、フランス ILL の D20 にて粉末中性子回折実験を行った。また相補的手法として単結晶 X 線回折実験を KEK 内 PF BL-10A にて行い、水素以外の原子についての精密構造解析を実施した。その結果、差フーリエ図中において M3 サイトの稜に明瞭なピークが確認され、O1 と O4 の間に水素結合があることが初めて明らかになった。またこの結果から、含水ワズレアイトにおける電気伝導度およびイオンの拡散の異方性について考察を行った。

(5) 惑星内部に存在する水分子凝集系の水素挙動の解明を目的として、中性子回折実験と

赤外吸収測定による水素秩序機構の研究を実施した。この研究で、惑星内部を模擬した高圧氷の中性子回折をパルス中性子源施設で測定することが初めて可能になった。開発した冷凍機及び高圧セルを利用した中性子回折の実験より、天王星、海王星、冥王星等と同じ温度条件下(約-200°C)で、氷結晶中の水素が自発的に揃う様子を初めて観測した。また、秩序化に起因して赤外吸収スペクトルが大きく変化することを発見した。水分子の水素は正の電荷を帯びているので、これが揃うと氷自体が正負に分極して強誘電体になる。従って、本研究は惑星内部に強誘電体の氷が存在することを示唆する。

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 54 件)

以下、すべて査読有の論文

- Hamada M. and Akasaka M. (2013) Distribution of cations at two tetrahedral sites in $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7\text{-Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{AlSiO}_7$ series synthetic melilite and its relation to incommensurate structure. *Physics and Chemistry of Minerals*, **40**, 259-270. Doi:10.1007/s00269-013-0566-8.
- Sano-Furukawa A., Yagi T., Okada T., Gotou H. and Kikegawa T. (2012) Compression behaviors of distorted rutile-type hydrous phases, MOOH (M=Ga, In, Cr) and CrOOD. *Physics and Chemistry of Minerals*, **39**, 375-383. Doi 10.1007/s00269-012-0487-y.
- Ejima T., Akasaka M., Nagao T. and Ohfuji H. (2012) Oxidation state of Fe in olivine in andesitic scoria from Kasayama volcano, Hagi, Yamaguchi Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **107**, 215-225. Doi: 10.2465/jmps.120605.
- 佐野亜沙美 (2012) 中性子散乱実験により明らかにする鉱物中の水素結合とその役割. *波紋*, **22**, 162-165.
- Iizuka R., Kagi H., Komatsu K., Ushijima D., Nakano S., Sano-Furukawa A., Nagai T. and Yagi T. (2011) Pressure responses of portlandite and H-D isotope effects on pressure-induced phase transitions. *Physics and Chemistry of Minerals*, **38**, 777-785. Doi 10.1007/s00269-011-0450-3.
- Sano-Furukawa A., Kuribayashi T., Komatsu K., Yagi T. and Ohtani E. (2011) Investigation of hydrogen site of hydrous wadsleyite: A neutron diffraction study, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **189**, 56-62. Doi: 10.1016/j.pepi.2011.07.003.
- Fukazawa H., Arakawa M., Kagi H., Fernandez-Baca J.A. and Chakoumakos B.C. (2011) Structure and properties of ferroelectric water ice. *Physics and Chemistry of ice*, 421-428.
- Ejima T. and Akasaka M. (2011) Oxidation state of Fe in olivine in a lherzolite xenolith from Oku district, Oki-Dogo Island, Shimane Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **106**, 110-125. Doi:10.2465/jmps.110125.
- 江島輝美, 赤坂正秀 (2011) 電子マイクロプローブ分析によるかんらん石中の $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 比の見積もり: メスバウアー分光法による検証, *岩石鉱物科学*, **40**, 55-62. Doi: 10.2465/gkk.10091.
- 栗林貴弘 (2011) スラブやマントル鉱物の結晶構造中における水素原子の振る舞い, *日本結晶学会誌*, **53**, 19-24.
- Nagashima, M. and Akasaka, M. (2010) X-ray Rietveld and ^{57}Fe Mössbauer studies of epidote and piemontite on the join $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Fe}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})\text{-Ca}_2\text{Al}_2\text{Mn}^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{O})$ formed by hydrothermal synthesis. *American Mineralogist*, **95**, 1237-1246. Doi: 10.2138/am.2010.3418.
- Hamada, M., Akasaka, M., Seto, S. and Makino, K. (2010) Crystal chemistry of chromian pumpellyite from Osayama, Okayama Prefecture, Japan. *American Mineralogist*, **95**, 1294-1304. Doi: 10.2138/am.2010.3376.
- Kagi K., Ushijima D., Sano-Furukawa A., Komatsu K., Iizuka R., Nagai T. and Nakano S. (2010) Infrared absorption spectra of $\delta\text{-AlOOH}$ and its deuteride at high pressure and implication to pressure response of the hydrogen bonds. *Jour. Physics: Conference Series*, Doi: 0.1088/1742-6596/215/1/012052.
- Arakawa M., Kagi H. and Fukazawa H. (2010) Annealing effects on hydrogen ordering in KOD-doped ice observed using neutron diffraction, *Journal of Molecular Structure*, **972**, 111-114. Doi:10.1016/j.molstruc.2010.02.016.
- Igawa N., Taguchi T., Hoshikawa A., Fukazawa H., Yamauchi H., Utsumi W. and Ishii Y. (2010) CO_2 motion in carbon dioxide deuterohydrate determined by applying maximum entropy method to neutron powder diffraction data, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **71**, 899-905. Doi:10.1016/j.jpics.2010.03.039.
- Kagi K., Ushijima D., Sano-Furukawa A., Komatsu K., Iizuka R., Nagai T. and Nakano S. (2010) Infrared absorption spectra of $\delta\text{-AlOOH}$ and its deuteride at high pressure and implication to pressure response of the hydrogen bonds. *Jour. Physics: Conference Series*, Doi:10.1088/1742-6596/215/1/012052.

16. Sano-Furukawa A., Kagi H., Nagai T., Nakano S., Fukura S., Ushijima D., Iizuka R., Ohtani E. and Yagi T. (2009) Change in compressibility of delta-AIOOH and delta-AIOOD at high pressure: A study of isotope effect and hydrogen-bond symmetrization., *American Mineralogist*, **94**, 1255-1261. Doi: 10.2138/am.2009.3109.
 17. Utsumi W., Kagi H., Komatsu K., Arima H., Nagai T., Okuchi T., Kamiyama T., Uwatoko Y., Matsubayashi K. and Yagi T. (2009) Neutron Powder Diffraction under High Pressure at J-PARC, *Nuclear Instruments and Methods of Physics Research Section A.*, **600**, 50-52. Doi:10.1016/j.nima.2008.11.065.
 18. 永井隆哉, 有馬寛, 奥地拓生, 鍵裕之, 八木健彦(2009) J-PARCでの高压高温専用ビームラインの実現に向けて, *高压力の科学と技術*, 19, 15-23
 19. Fukazawa H., Hoshikawa A., Chakoumakos B.C. and Fernandez-Baca J.A.. (2009) Existence of ferroelectric ice on planets -a neutron diffraction study, *Nuclear Instruments and Methods of Physics Research Section A.*, **600**, 279-281. Doi:10.1016/j.nima.2008.11.044.
 20. Kuribayashi T., Tanaka M. and Kudoh Y. (2008) Synchrotron x-ray study of norbergite, $Mg_{2.98}Fe_{0.01}Ti_{0.02}Si_{0.99}O_8(OH_{0.31}F_{1.69})$, crystal structure under high-pressure up to 8.2 GPa. *Physics and Chemistry of Minerals*, **35**, 559-568. Doi: 10.1007/s00269-008-0248-0.
- [学会発表] (計 91 件)
1. 永井隆哉, 佐野亜沙美, 飯塚理子, 鍵裕之: 中性子回折によるポートランドタイトの熱膨張機構の研究. 日本鉱物科学会 2012 年度年会, 京都大学 (京都府), 2012 年 9 月 20 日.
 2. 赤坂正秀, 平田みお, 濱田麻希, 永嶋真理子, 牧野邦明, 小山内康人: 東南極セーヌロンダーネ山地産含バナジウムざくろ石: X 線単結晶構造解析と赤外分光分析. 日本鉱物科学会 2012 年度年会, 京都大学 (京都府), 2012 年 9 月 20 日.
 3. 永井隆哉, 佐野亜沙美, 飯塚理子, 鍵裕之: 中性子回折を用いた $Mg(OD)_2$ の高温での構造変化の研究. 2012 年度地球惑星科学連合大会, 幕張メッセ (千葉県), 2012 年 5 月 22 日.
 4. Kuribayashi T.: Hydrogen position refinement in super hydrous phase B structure under high-pressure conditions, IUCr Commission on High Pressure 2012 Meeting "Advances in Crystallography at High Pressures", Mito, Japan, 23-27 September, 2012.
 5. Sano-Furukawa A., Hattori T., Arima H., Utsumi W., Kagi H. and Yagi T.: 6-rams multi anvil press for neutron diffraction experiment at J-PARC. Joint 2012 COMPRES Annual Meeting and High-Pressure Mineral Physics Seminar-8, Lake Tahoe, USA, 9-13 July, 2012.
 6. 永井隆哉, 佐野亜沙美, 飯塚理子, 鍵裕之: $Mg(OD)_2$ の高温中性子回折実験. 日本鉱物科学会 2011 年度年会, 茨城大学(水戸市), 2011 年 9 月 11 日.
 7. 永井隆哉: $Mg(OD)_2$ の高温中性子回折実験について. 2011 年地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2011 年 5 月 25 日.
 8. 赤坂正秀, 永嶋真理子, 濱田麻希, 佐野亜沙美, 江島輝美: 含重水素紅簾石の合成と生成相の評価, 地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2011 年 5 月 25 日.
 9. Nagai T., Sano-Furukawa A., Iizuka R., Chakoumakos B.C. and Fernandez-Baca J.A.: Hydrogen motions of $Mg(OD)_2$ and $Ca(OD)_2$ at several temperatures. International Union of Crystallography (IUCr) 2011, Madrid, Spain, 22-30 August, 2011.
 10. Sano-Furukawa A., Komatsu K., Hattori T., Nagai T., Kagi H., Molaison J.J., Moreia-Dos Santos A.F. and Tulk C.A.: Neutron diffraction study on δ -AIOOH at high pressure. AIRAPT-23, Mumbai, India, 25-30 September, 2011.
 11. Fukazawa H.: Neutron powder diffraction study using HRPD at JRR-3 and WAND at HFIR -Recent results on H-bond- (invited) Korean Physics Society April Meeting, Daejeon, Korea, 14 April, 2011.
 12. Kuribayashi T., Sano-Furukawa A., Komatsu K., Yagi T. and Ohtani E.: Determination of hydrogen sites of nominally anhydrous minerals of the mantle transition zone. 1st Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, Tsukuba, Japan, 21-23 November, 2011.
 13. Sano-Furukawa A., Kuribayashi T., Komatsu K., Yagi T. and Ohtani E.: Determination of hydrogen sites of nominally anhydrous mineral of the mantle transition zone. 1st Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, Tsukuba, Japan, 21-23 November, 2011.
 14. 永井隆哉, 小林紗和, 栗林貴弘: 熱重量測定による $Ca(OH)_2$ と $Ca(OD)_2$ の脱水反応の速度論的解析, 2010 年日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2010 年 5 月 23 日.
 15. 栗林貴弘, 工藤康弘: 単結晶 MEM 解析による super B 相の 1 GPa および 3.5 GPa の高压下における水素位置の推定, 2010 年日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2010 年 5 月 23 日.
 16. 赤坂正秀, 永嶋真理子, 濱田麻希, 佐野亜

- 沙美, 江島輝美: 合成 $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{-pMn}^{3+}\text{pSi}_3\text{O}_{12}$ (OD)-紅簾石の X線・中性子結晶構造解析, 2010 年日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2010 年 5 月 23 日.
17. 永井隆哉, 小林紗和: 熱重量測定による脱水反応速度への同位体効果, 日本鉱物科学会 2010 年度年会, 島根大学(松江市), 2010 年 9 月 23-25 日.
 18. 赤坂 正秀・浜田 麻希・永嶋 真理子・大橋 晴夫: Ca 単斜輝石の 6 配位席と 4 配位席における Fe^{3+} と Ga^{3+} の分布, 島根大学 (松江市), 2010 年 9 月 23-25 日.
 19. Nagai T., Ishido T. and Fujino K. : Formation of a perovskite solid solution between MgSiO_3 and MnSiO_3 at the lower mantle condition, the 20th General Meeting of International Mineralogical Association, Budapest, 21-27 August, 2010.
 20. 佐野亜沙美・服部高典・内海渉・小松一生・鍵裕之・永井隆哉, 米国パルス中性子施設 SNS の SNAP における高圧中性子実験, 第 51 回高圧討論会, 戦災復興会館 (仙台市), 2010 年 10 月 20-22 日.
 21. Fukazawa H., Arakawa M., Kagi H., Chakoumakos B.C. and Fernandez-Baca J.A. : Structure and Properties of Ferroelectric Water Ices –accelerating evolution of icy grain-, 12th International Conference on Physics and Chemistry of ice, Sapporo, Japan, 7 September, 2010.
 22. Akasaka M., Nagashima M., Hamada M., Sano-Furukawa A. and Ejima T. : X-ray and neutron Rietveld study of synthetic $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{-pMn}^{3+}\text{pSi}_3\text{O}_{12}$ (OD)-piemontite, International Mineralogical Association, Budapest, 21-27 August, 2010.
 23. Fukazawa H. : Properties of ferroelectric and hydrogen ordered ices in space, XVIII International Conference on "Horizons in Hydrogen Bond Research", Paris, 15 September, 2009.
 24. 佐野亜沙美, 八木健彦, 小松一生, 栗林貴弘: マントル遷移層構成鉱物の構造解析, 日本中性子科学会, 東海村 (茨城県), 2009 年 11 月 9 日.
 25. 永井隆哉, 佐野亜佐美, 鍵裕之, 飯塚理子, 栗林貴弘: 中性子回折実験による $\text{Ca}(\text{OD})_2$ の重水素位置の精密化, 日本鉱物科学会 2009 年度年会, 北海道大学 (札幌市), 2009 年 9 月 8 日.
 26. 赤坂正秀, 永嶋真理子, 濱田麻希, 佐野亜沙美: $\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{-pMn}^{3+}\text{pSi}_3\text{O}_{12}$ (OD)-紅簾石の合成と中性子結晶構造解析, 日本鉱物科学会 2009 年度年会, 北海道大学 (札幌市), 2009 年 9 月 8 日.
 27. 永井隆哉: 新規採択された中性子散乱を用いた鉱物中の水の固定機構に関する研究

計画について, 2009 年日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ (千葉県), 2009 年 5 月 16 日.

[図書] (計 1 件)

在田一則, 竹下徹, 見延庄士郎, 渡部重十 編者 (永井隆哉: 第 3 章執筆), 北海道大学出版会, 地球惑星科学入門, 2010 年, 427 ページ (第 3 章 p25-34)

[その他]

ホームページ

<http://yagi.issp.u-tokyo.ac.jp/shingakujutsu/mineral.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 隆哉 (NAGAI TAKAYA)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 20243131

(2) 研究分担者

赤坂 正秀 (AKASAKA MASAHIDE)
島根大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号: 20202509

栗林 貴弘 (KURIBAYASHI TAKAHIRO)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 20302086

深澤 裕 (NFUKAZAWA HIROSHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・主任研究員
研究者番号: 30370464

佐野 亜沙美 (SANO ASAMI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員
研究者番号: 30547104

内海 渉 (UTSUMI WATARU)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究推進室長
研究者番号: 60193918

(3) 連携研究者

なし