
中性子を利用した高圧地球科学 -水惑星・地球の理解を目指して

J-PARCセンター 物質・生命科学ディビジョン
中性子利用セクション 研究副主幹

佐野 亜沙美

水の惑星：地球

地球の半径: 6371 km

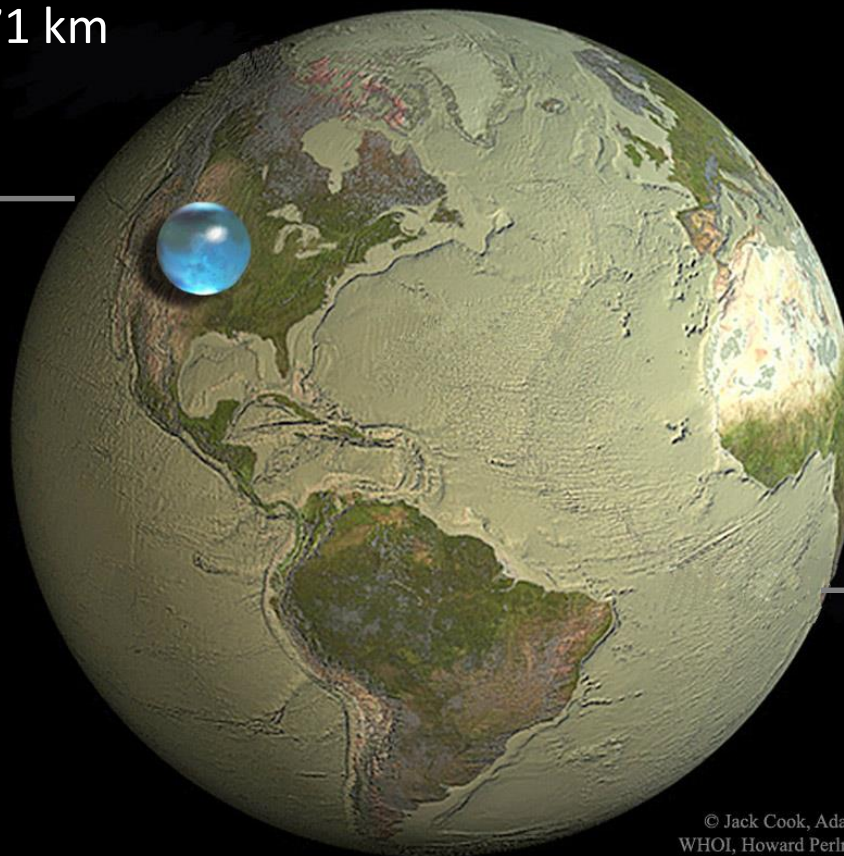


海：地表の70%
 平均の深さ：3.8 km
 地表の水の量：
 1.4×10^{21} kg

<https://visibleearth.nasa.gov>

水の惑星：地球

地球の半径: 6371 km



海: 地表の70%
 平均の深さ: 3.8 km
 地表の水の量:
 1.4×10^{21} kg

全ての水を集めると
 直径 1385 km

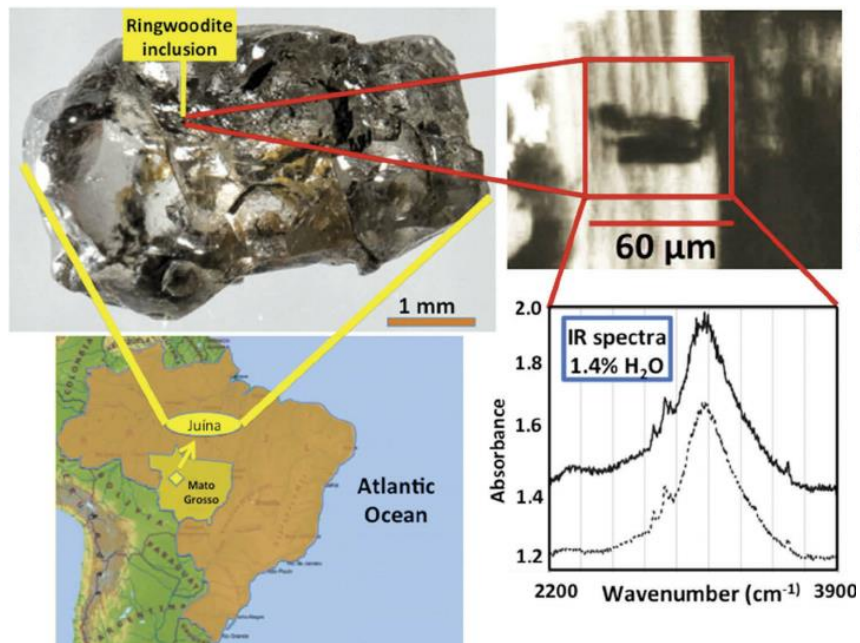
© Jack Cook, Adam Nieman,
 WHOI, Howard Perlman, USGS

Illustration Credit & Copyright: Jack Cook, Adam Nieman, Woods Hole Oceanographic Institution, Howard Perlman, USGS

ダイヤモンド中に見つかった”水”

包有物 = 地球深部の情報をもたらす天然のカプセル

1.4 重量%の水を含む鉱物

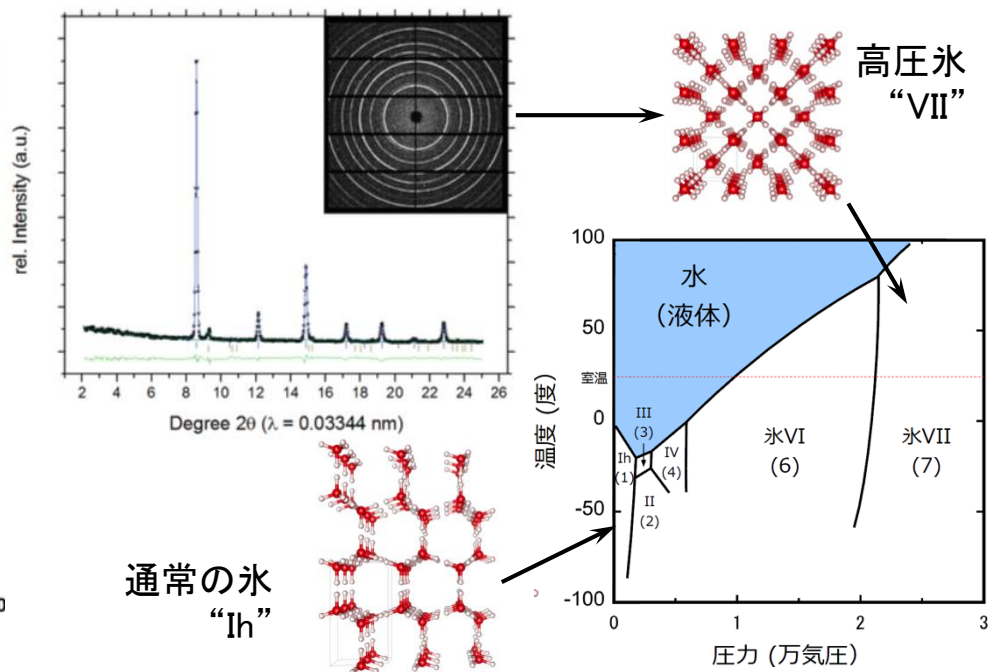


(Pearson et al., Nature, 2014)

(Nestola and Smyth, Int. Geol. Rev., 2015)

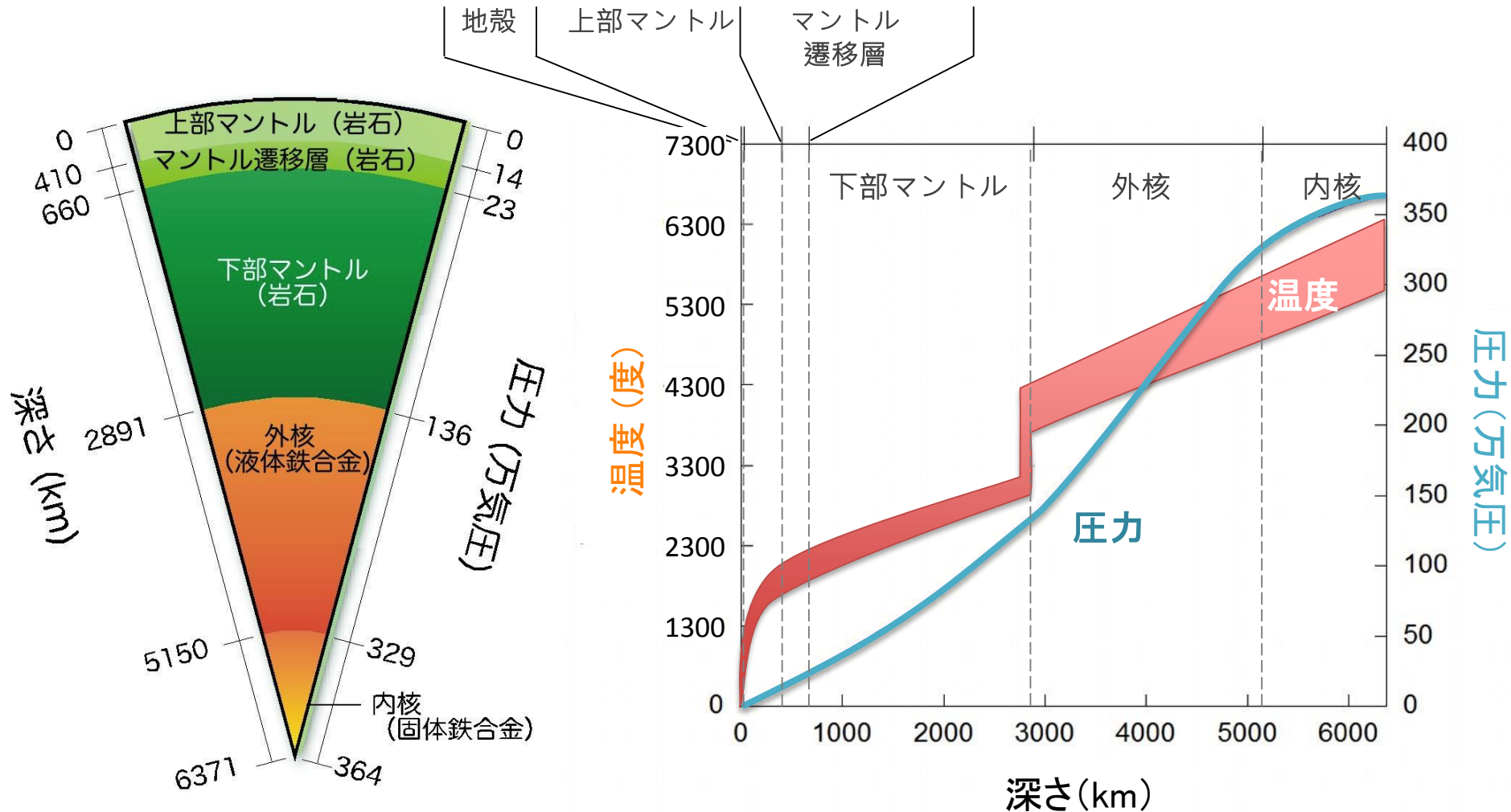
(Tschauer et al., Science, 2018)

通常の氷とは異なる構造の氷



地球深部にも”水”が存在する

地球深部は高温高压の世界



地球内部を探る方法

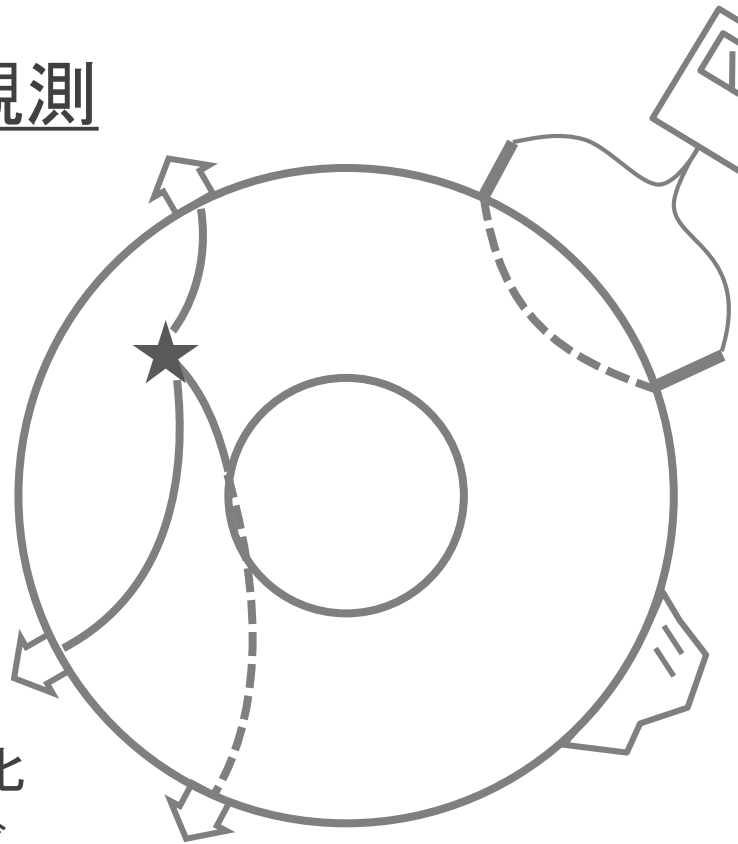
問: どんなものが、どんな状態で存在?

地震波等による観測

速度構造 遅い/早い
→ 密度や温度情報

理論計算

実験室では不可能な
長い時間スケールの変化
対流シミュレーションなど



天然の岩石

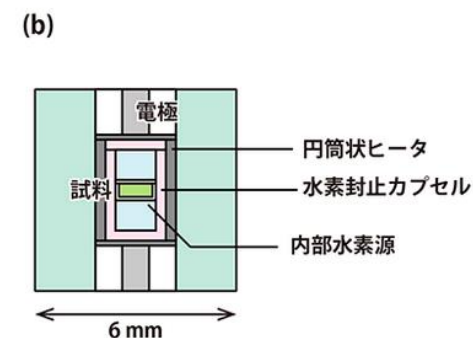
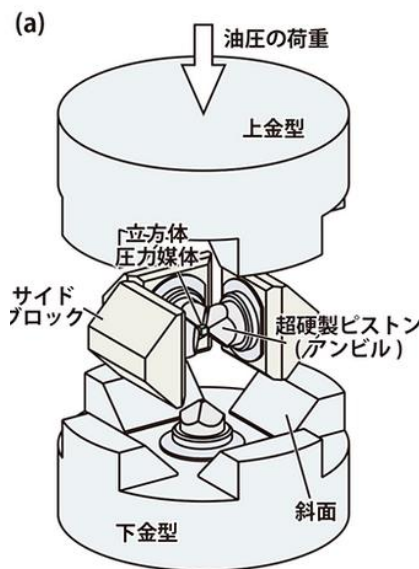
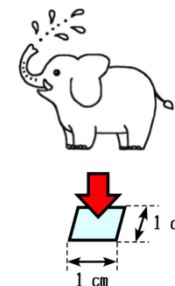
地表に噴出する岩石・
宇宙から飛来する隕石...

高温高圧実験

ある温度圧力での
鉱物の構造・物性値

実験室で地球深部を再現する

- 圧力 = 力 ÷ 面積
 - 1万気圧: 1cm²あたり10トンの荷重
- 高圧発生装置の例



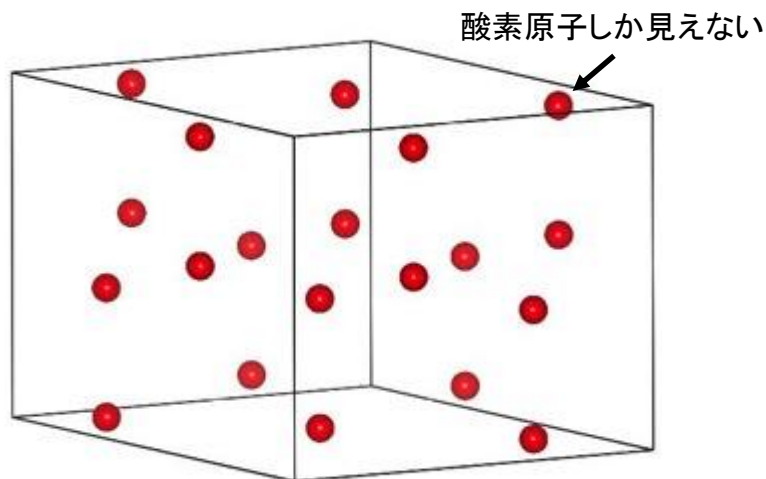
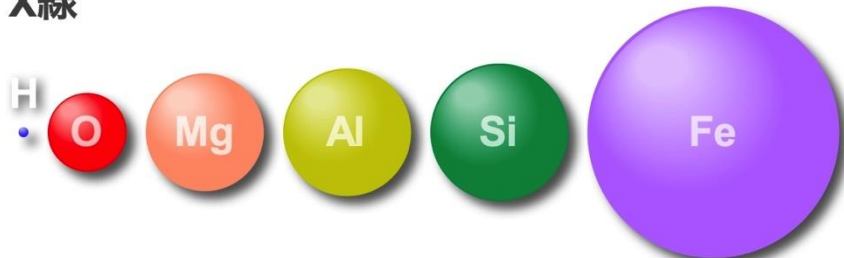
<https://user.spring8.or.jp/sp8info/?p=35134>

- 微小な試料、回収不能な相
 - 輝度の高い量子ビームを用いたその場観察が必要

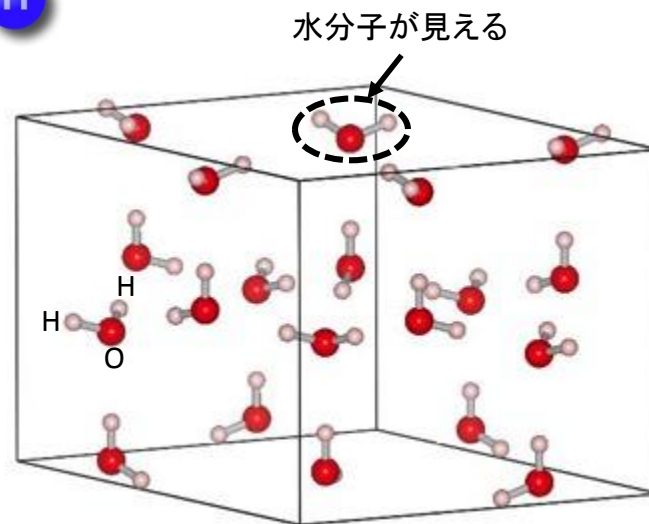
中性子実験の有用性

< 元素ごとの散乱能力の比較 >

X線



中性子

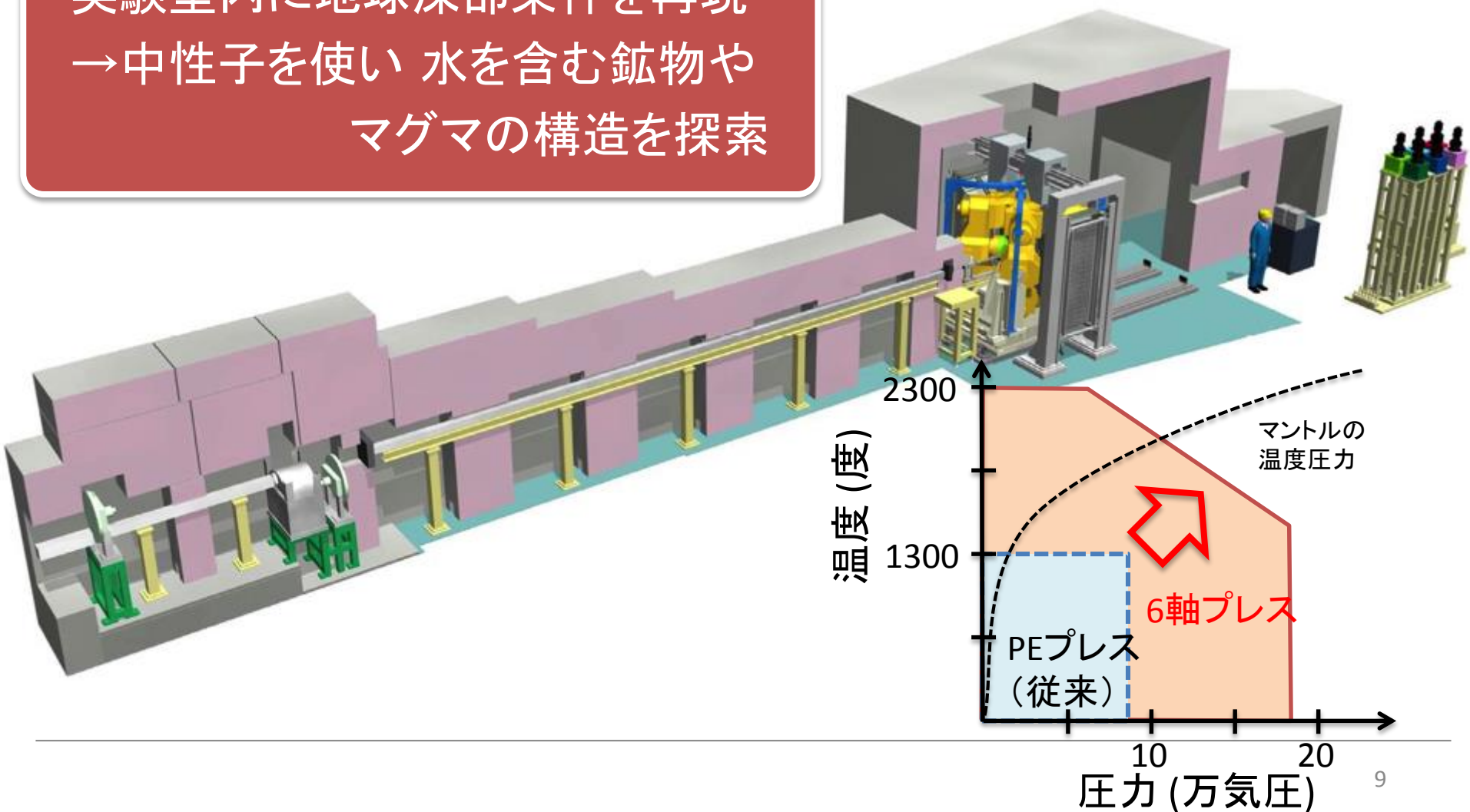


構造中の水素の位置を決定できる

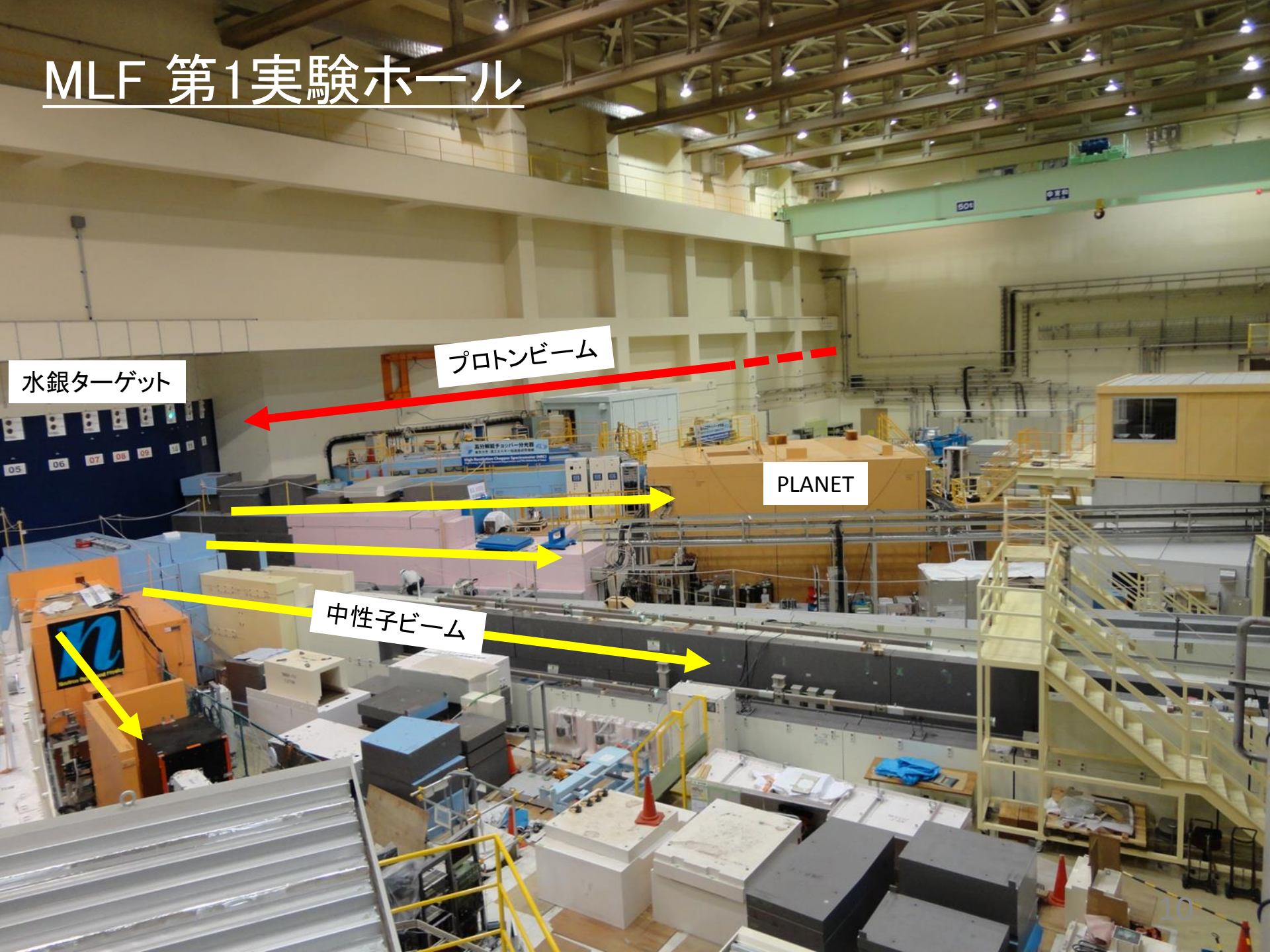
高温高圧実験における新たな手法としての期待

超高圧回折装置 PLANET@J-PARC MLF

実験室内に地球深部条件を再現
 →中性子を使い 水を含む鉱物や
 マグマの構造を探索



MLF 第1実験ホール



水銀ターゲット

プロトンビーム

PLANET

中性子ビーム

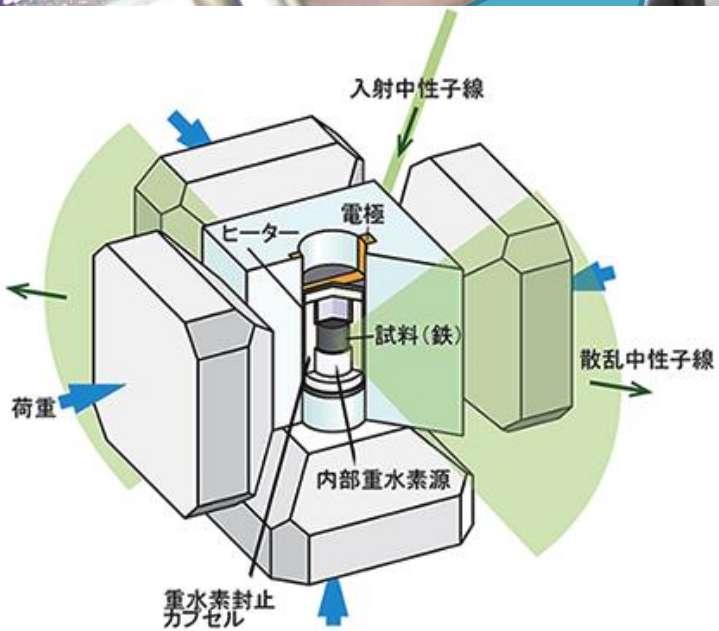
90° 検出器バンク

6軸型マルチアンビル装置 "圧姫"

- ・最大荷重 500トン/ 軸
- ・アンビル位置を1ミクロン単位で精密に制御

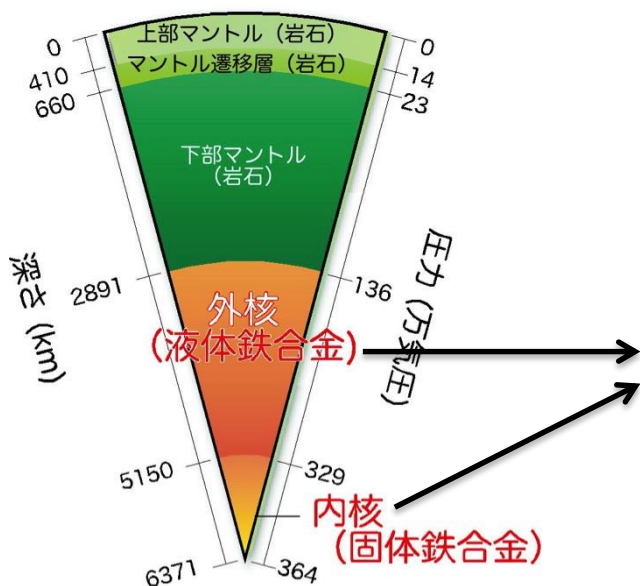
測定試料の入ったセル

油圧

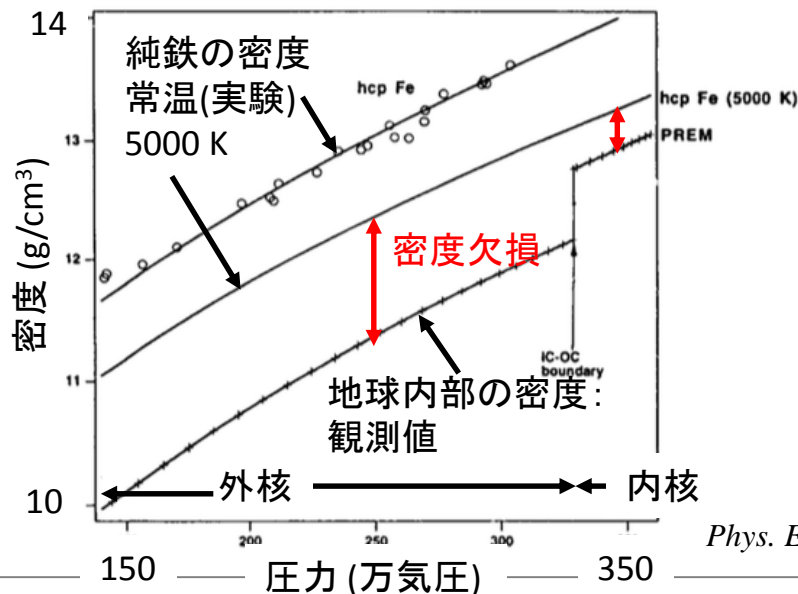


研究例1: 地球核における密度欠損

- 核の密度: 純粋なFe-Ni合金から予測される値より低い
→ 8-15%程度の軽元素が含まれる
- 軽元素の候補: Si, S, O, H, C ...
- いつ、どのように、どんな軽元素がとりにこまれたか?



<地球内部の密度分布と鉄の密度の比較>



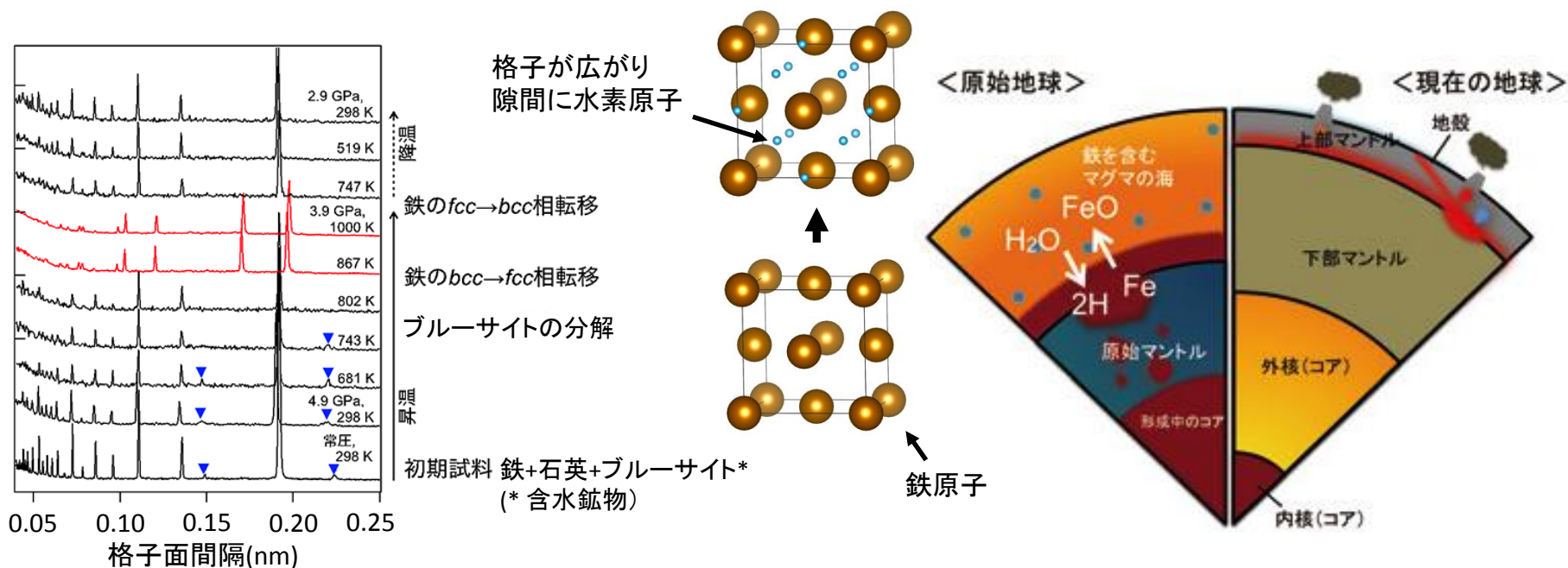
(Poirier, 1994
Phys. Earth Planet. Inter.)

含水鉱物と鉄の反応を直接観察

Iizuka-Oku et al. (2016) Nature Communications

700度程度でも、水が存在すれば固体の鉄に水素が溶け込む
 →原始地球で始源物質が集積していく初期段階で

水素が核に取り込まれうる

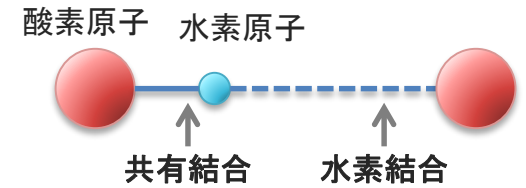
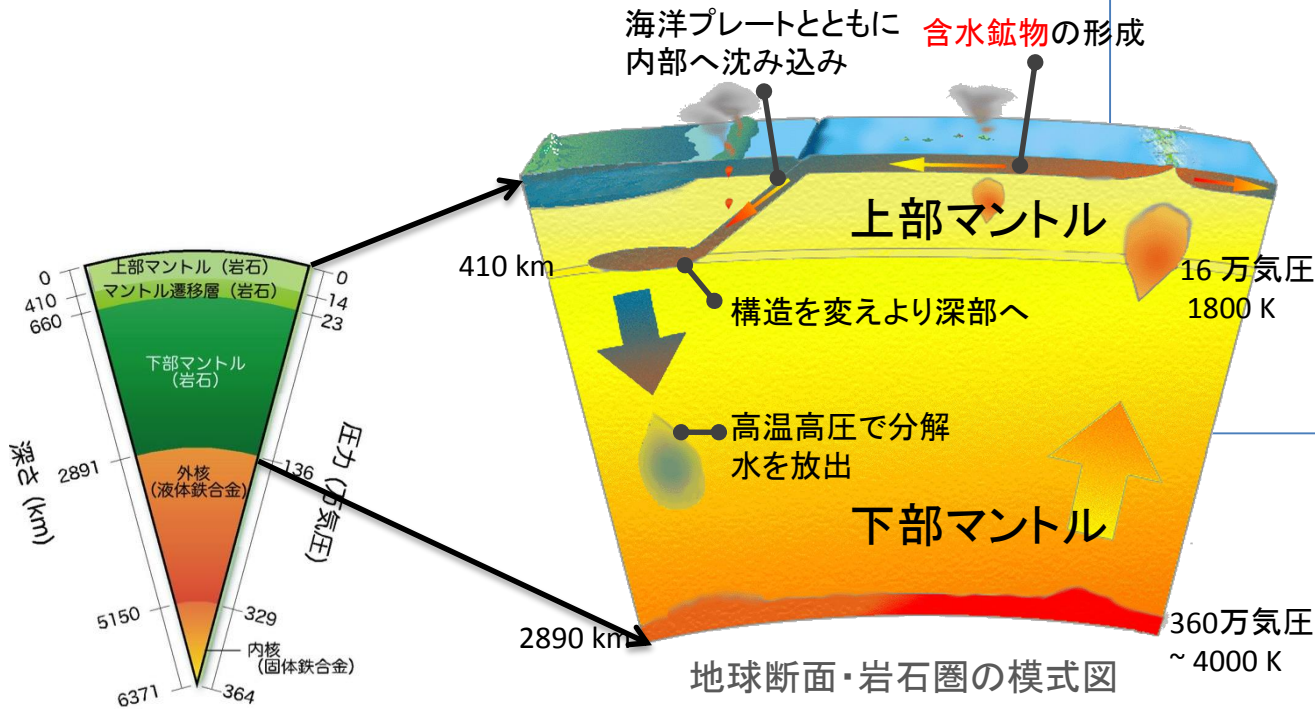


研究例2: 地球深部で含水鉱物に起きる変化

Sano-Furukawa et al. (2018) Scientific Report

水は含水鉱物中にとりこまれ
表層～地球深部を循環している

鉱物中の水: 水素結合



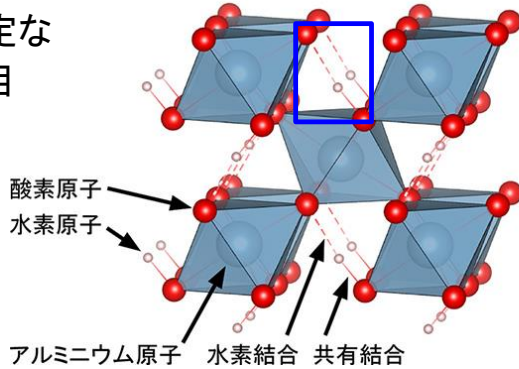
非対称な結合
↓
圧力をかけると
何が起きる？

初めて直接とらえた”水素結合の対称化”

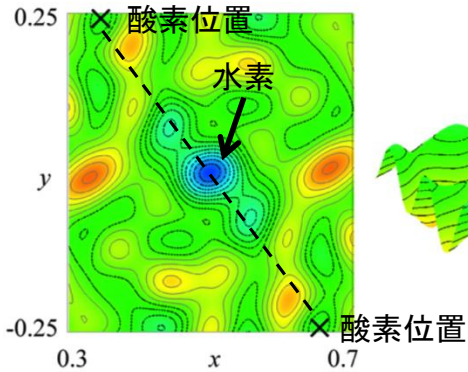
“ δ -AlOOH”

マントル底部でも安定な
含水鉱物として注目

常圧

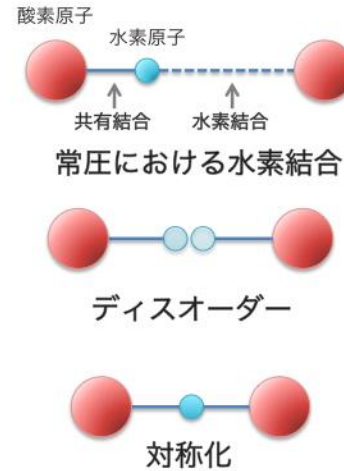


18.1 万気圧
(525 km相当)

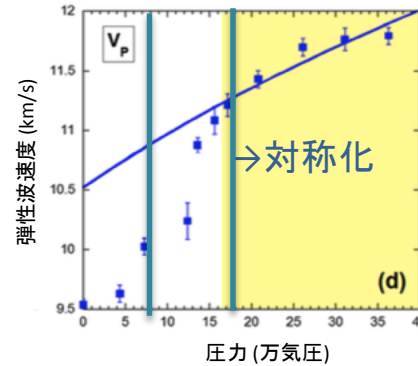
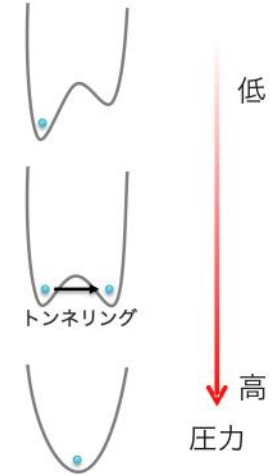


水素が二つの
酸素間の中点に

対称化の模式図



ポテンシャルの変化



対称化がみられた圧力と
弾性波速度の変化する
圧力が一致

Mashino et al. *J. Geophys. Res.* (2016)

圧力による水素結合の変化が鉱物の”硬さ”を支配 → 地震波速度の解釈などに影響

まとめと展望

- ❖ 高温高圧実験により地球深部でおきる現象を明らかに
- ❖ 中性子実験の役割: 水素位置を含む構造の決定
 - 水素は地球のどこにいる？
 - なぜ水素の存在下で物性が変化する？ 解明の手助けに
- ❖ 現状PLANETで可能な実験圧力~ 20万気圧
 - 技術開発によりさらに深くへ！

