

1000気圧超熱水環境でのメタン生成・硫酸還元反応実験 —巨大氷衛星・火星での物質循環・進化の理解に向けて—

1丹秀也、1関根康人

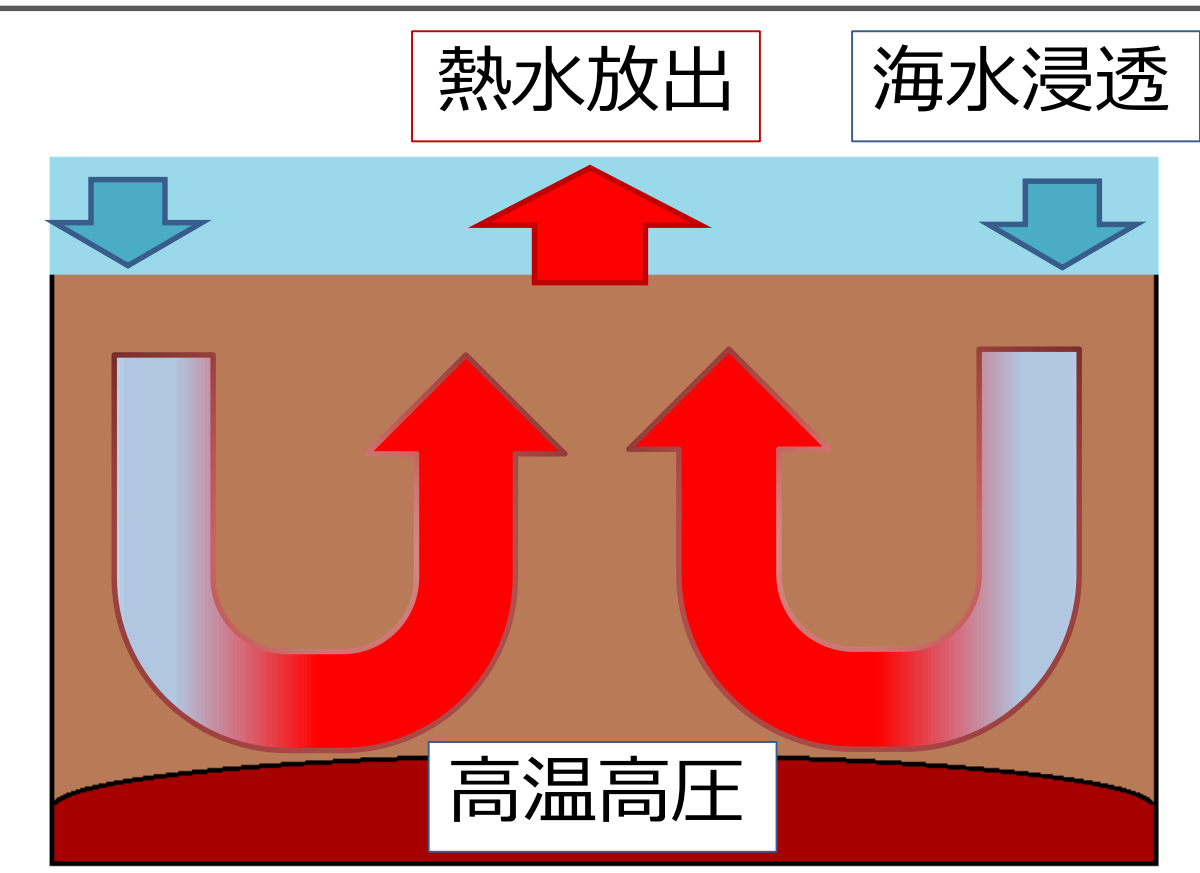
1東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

要旨

地球外の天体で、熱水環境とそこで想定される化学反応についての議論が為されている。特にメタン生成反応や硫酸還元反応は、エウロパやタイタンなどの氷衛星や火星での物質循環・進化を考えるうえで重要な反応である。二つの反応の反応速度は反応条件により大きく変化し、反応速度の算出には適した条件での実験データが必要である。上記の天体の熱水環境は共通して地球以上の高圧下に存在するが、該当する条件下での実験データが不足しており、反応速度が不明であるため反応の定量的評価が不十分である。本研究ではこの問題を解決するための実験を提案する。

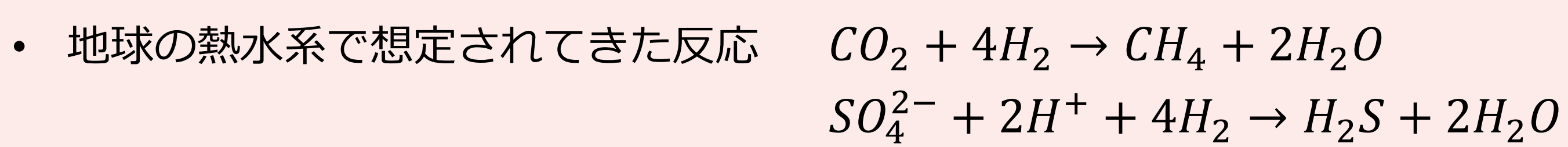
①熱水環境と化学反応

- 岩石と水が存在する系の一種
海底熱水系や地下熱水系 など
- 高温高圧条件・鉱物の緩衝作用が
化学反応に影響
例：鉄鉱物の酸化
→H₂richの還元的環境形成
- **メタン生成反応や硫酸還元反応が進行**



熱水環境の例：海底熱水系の模式図

●メタン生成反応・硫酸還元反応



●反応条件で反応速度が大きく変化

(原因：非常に大きい活性化エネルギー (Seewald et al., 2006, Truche et al., 2009など))
高温：反応速度大の可能性
非生命 / 低温：ほぼ反応しない場合も (非平衡成立)

- 非生命の系での炭素・硫黄の状態 (地球外含む) :
熱水環境の規模に依存する可能性
- 生成量などの定量的評価：対応する反応速度が必要

- 反応速度・メカニズムに関する先行研究：
地球海底の模擬条件 (最高500気圧・400℃) での熱水実験

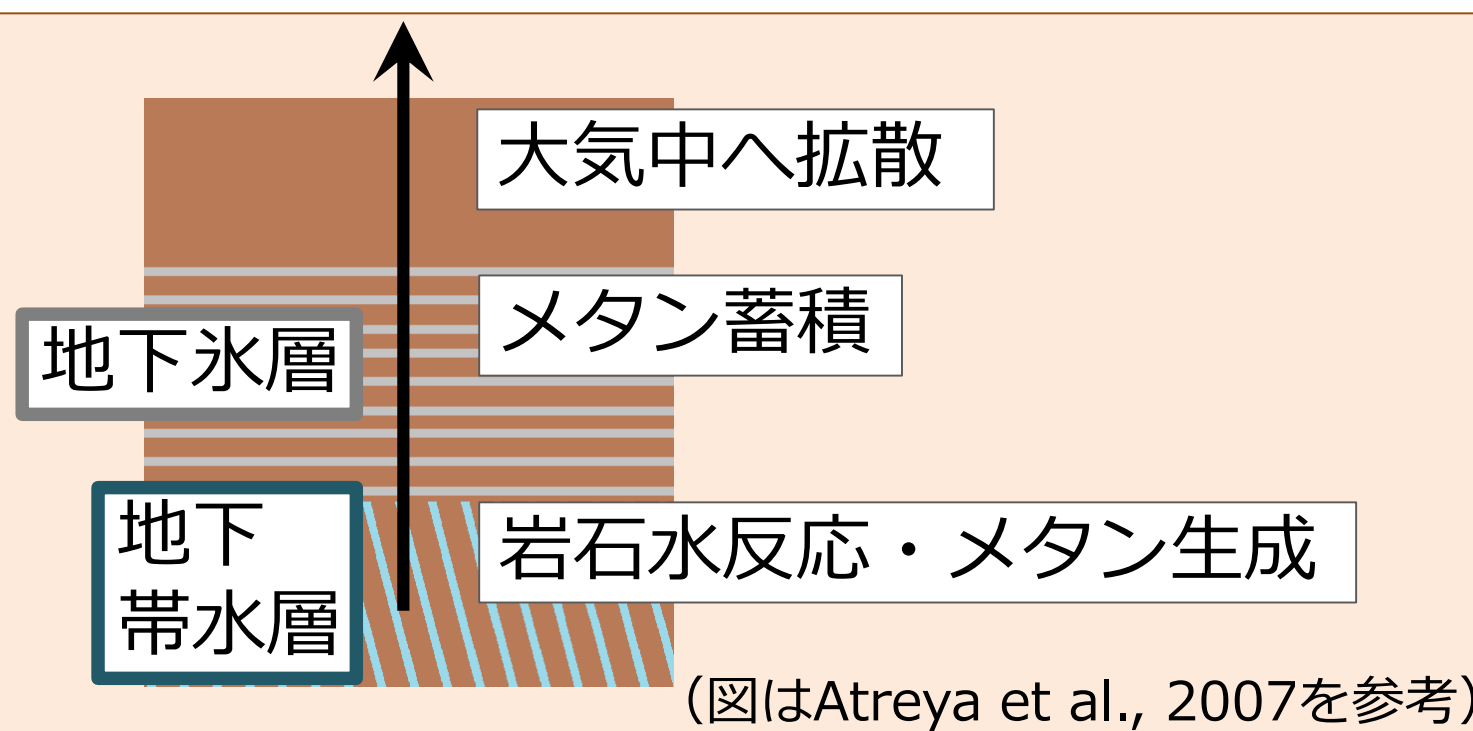
(McCollom et al., 2001など)

②地球外熱水系でのメタン生成・硫酸還元

- 地球外の天体で熱水環境を想定、上記の反応についての議論から
観測事実の説明や物質循環・進化の理解につながる可能性
- 巨大氷衛星の海底下・火星地下などは1000気圧超の条件が想定

火星

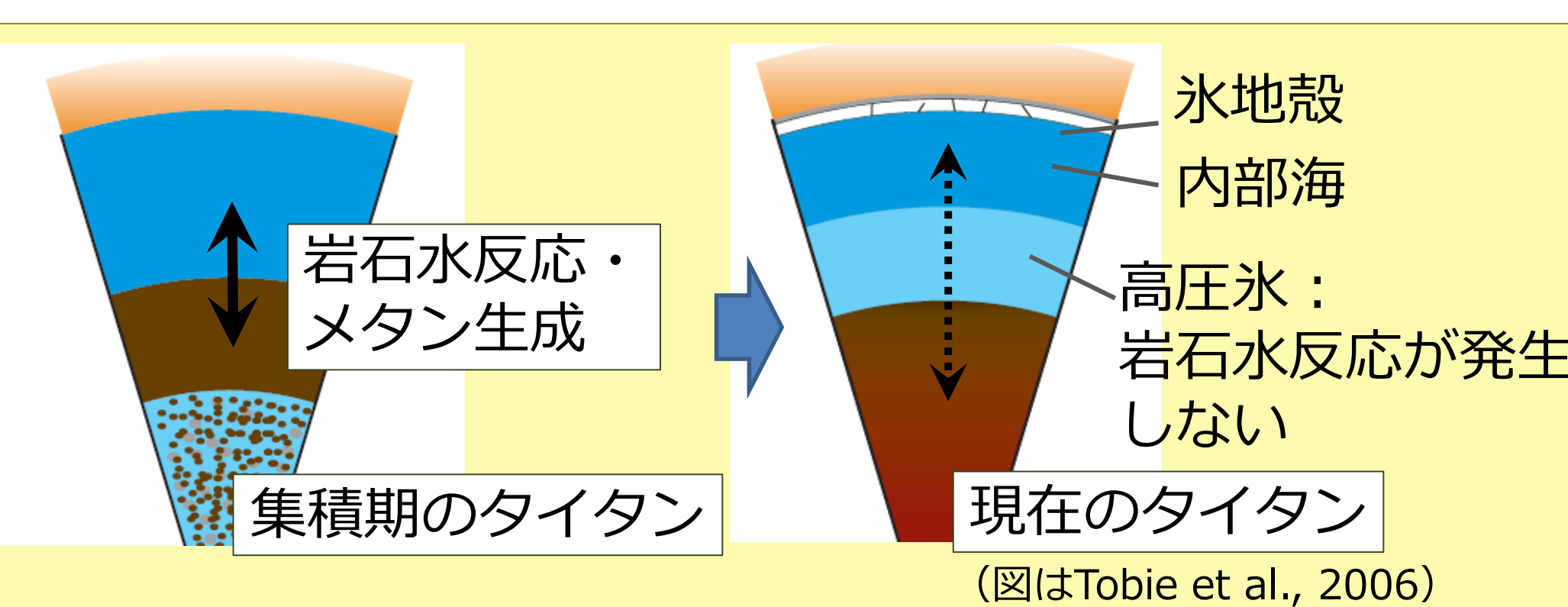
- 大気中に微量メタンが観測
(Webster et al., 2015など)
- 複数の発生源候補・内訳不明
(生命活動・火成活動・外部由来など)
(Atreya et al., 2007など)
- 地下熱水活動は候補のひとつ
(右図：推定メカニズム)



火星地下の条件でのメタン生成量算出 → 観測と比較、メタン源としての熱水活動の妥当性検討・他の候補との比率の検討

タイタン

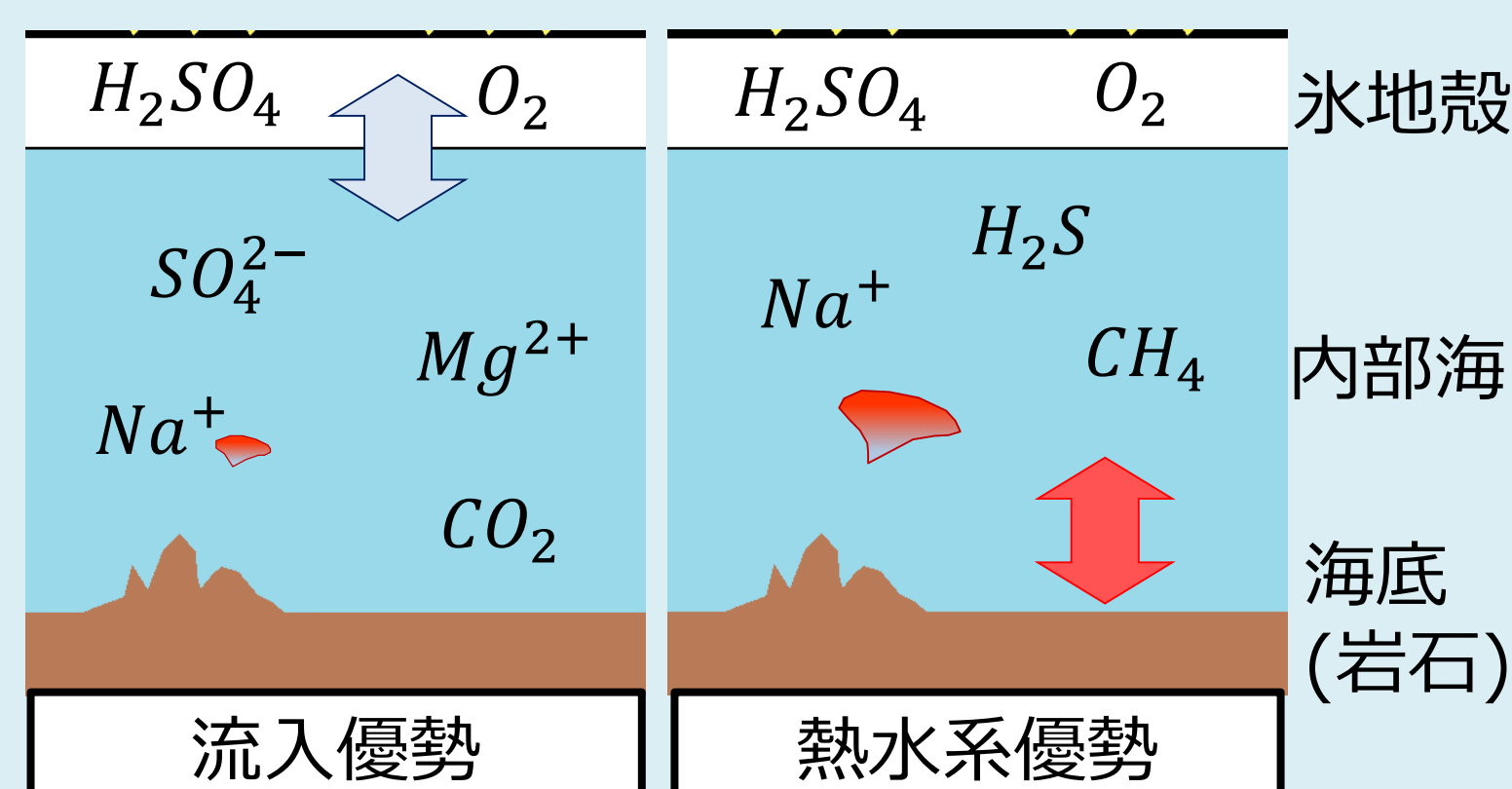
- 大気成分にメタンを含む
- 起源の候補：
集積期の内部生成・外部からの獲得
(Atreya et al., 2006など)



集積期に内部で生成されるメタン量算出 → 現在の存在量と比較し、起源としての妥当性の議論・集積期の内部の温度圧力条件の推定

エウロパ

- 表面に硫酸水和物などの酸化物、内部へ流入すると海中に硫酸蓄積
(Pasek et al., 2012)
- 海中の硫黄の状態と内部海の酸化還元状態は不明
- 海底の熱水系の規模 (不明) に
対応する硫酸還元速度・酸化物の流入率に依存



(図はHand et al., 2009より改変)

海底熱水系のパラメータに対応する硫酸還元速度の推定 → 内部海の酸化還元状態・硫黄の状態と海底熱水系の条件との対応を検討

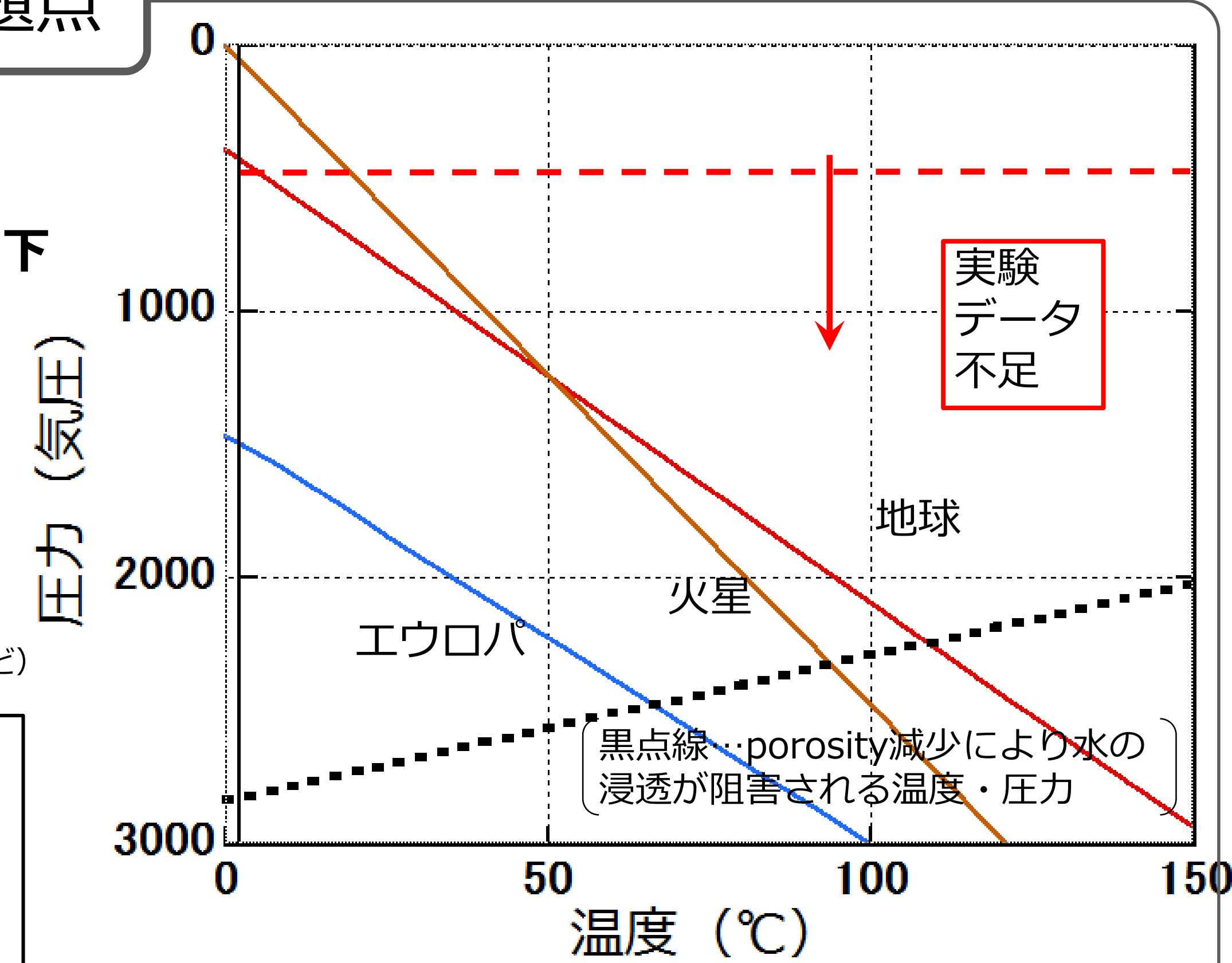
③先行研究の問題点

●エウロパや火星が熱水系をもつ場合、1000気圧以上の高圧下

- 主な先行研究：
500気圧以下の実験
- 500気圧以上の実験：
反応前後の比較のみ
(オンライン溶液採取可能な装置でない)
(Lazer et al., 2015など)

■対応する圧力での実験データが不足

■反応の経過を追うデータが無く反応速度の算出が不可能



地下・海底下の温度圧力分布 (Vance et al., 2007を元に作図)

④本研究の目的

地球海底以上の高圧領域 (~1350気圧) での硫酸還元とメタン生成の反応率・メカニズムを**オンライン溶液採取可能**な実験装置で明らかにする

⑤熱水実験概要

●鉱物用超臨界装置

圧力容器内の上限温度圧力：325℃・1350気圧
金バッグ内に反応溶液を封入
・チューブを経由し外部へ接続

- ✓ 1000気圧以上での実験が可能
- ✓ 溶液を任意の時間に採取可能

●反応溶液 (検討中)

メタン生成反応・・・NaHCO₃aq
硫酸還元反応・・・検討中
H₂はガスとして封入予定
(封入後、高圧下で溶液に溶解)

●実験手順

減圧・溶存成分脱ガス
ガス抽出

GC/GCMS分析

H₂, CH₄, CO₂など

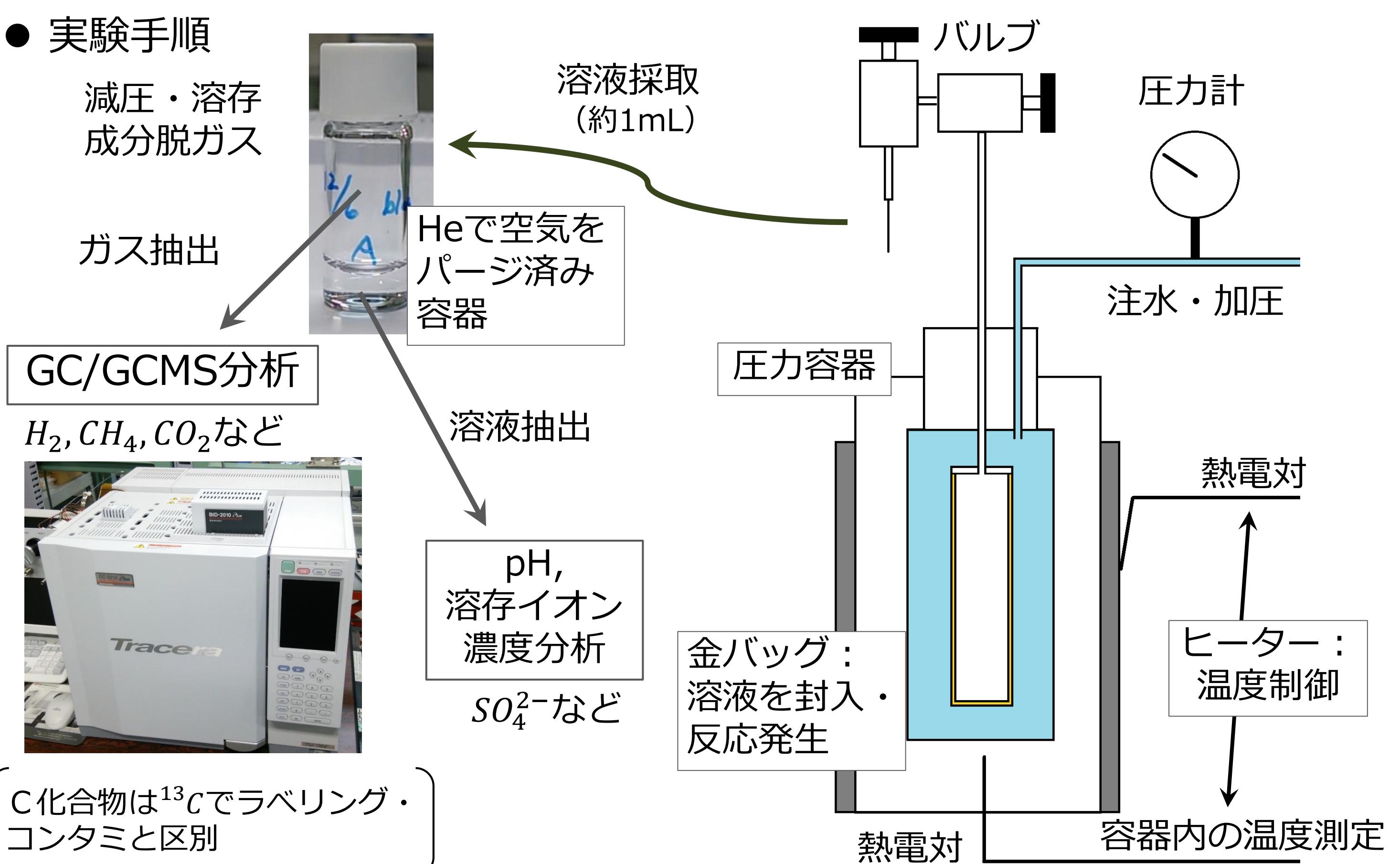
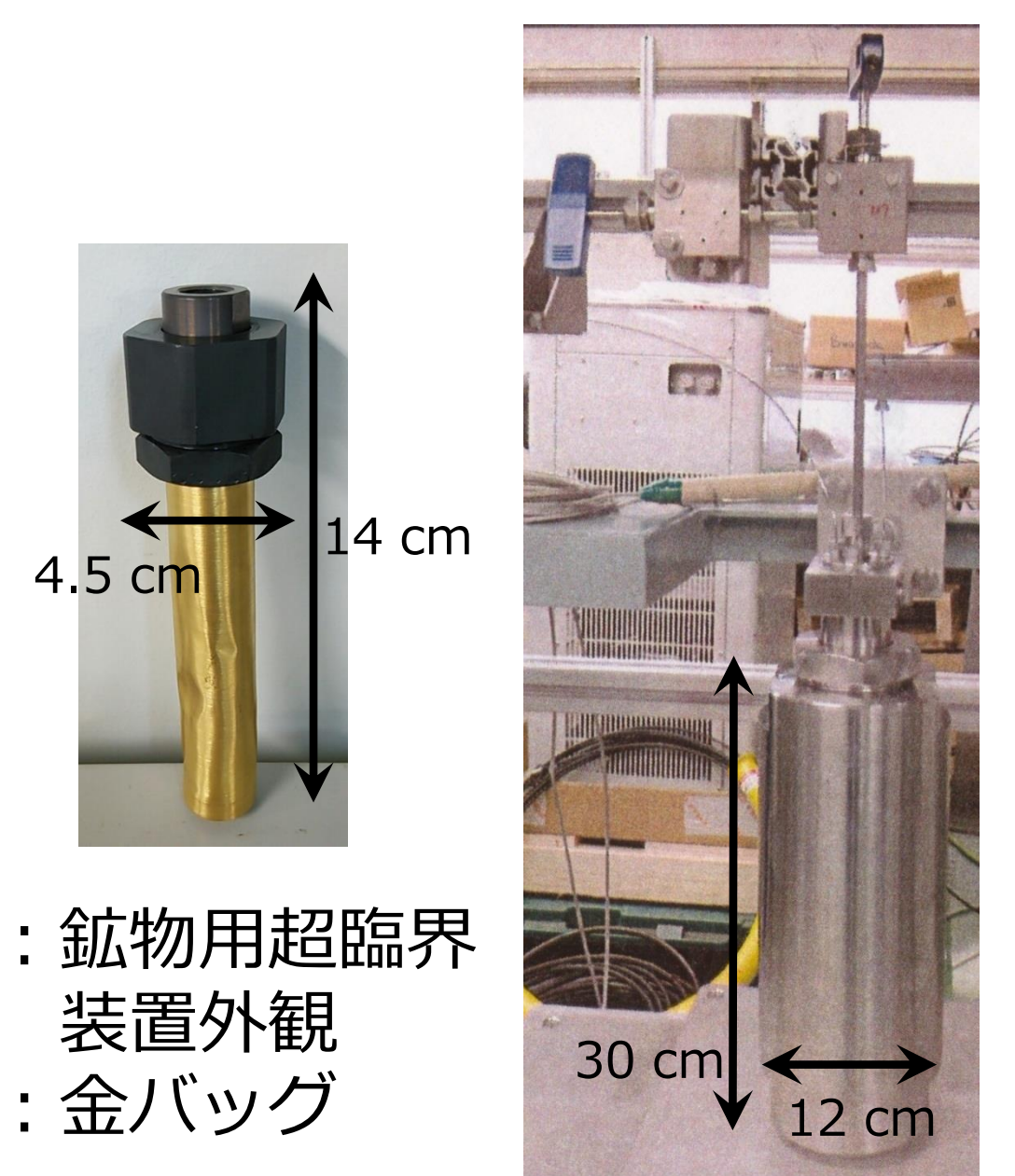


〔C化合物は¹³Cでラベリング・コンタミと区別〕

●反応速度測定

溶液を長期にわたり採取・成分濃度を測定、時間変化から算出

- 温度依存性 → 活性化エネルギー算出
- 圧力依存性 → 中間生成物と関連の可能性
(メタン生成反応の場合：CH₃OH) (Lazer et al., 2015, Truche et al., 2006など)
- ◆ 測定項目の検討・平衡計算との比較の必要性



参考文献

Atreya, S. K. et al., 2007, Planet. Space Sci. 55, 358-369. Tobie, G. et al., 2006, Nature 440, 61-64. Hand K. P. et al., 2009, In: Pappalardo, R.T. et al. (Eds.), Europa. University of Arizona Press, Tucson. McCollom, T. M. and Seewald, J. S., 2001, Geochim. et Cosmochim. Acta. 65, 3769-3778. Seewald, J. S. et al., 2006, Geochim. Cosmochim. Acta. 70, 446-460. Truche, L. et al., 2009, Geochim. Cosmochim. Acta. 73, 4824-4835. Vance, S. et al., 2007, Astrobiology 7, 987-1004. Lazer, C. et al., 2015, Geochim. Cosmochim. Acta. 151, 34-48.