

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

第73回 愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター (2024.2.2)

12:05 – 12:10(5分) : 研究所・センターの概要
センター長 入船 徹男

12:10 – 12:25(15分) : 若手研究者からのプレゼン
・先端計算技術による地球深部の熱輸送特性 講師 出倉 春彦
・超高温高圧実験による惑星形成過程の再現 助教 桑原 秀治

12:25 – 12:45(20分) : 質疑応答

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

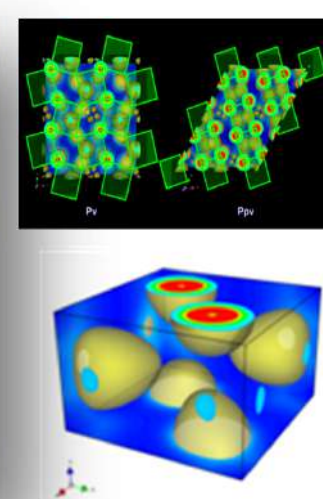
Geodynamics Research Center (GRC)

&

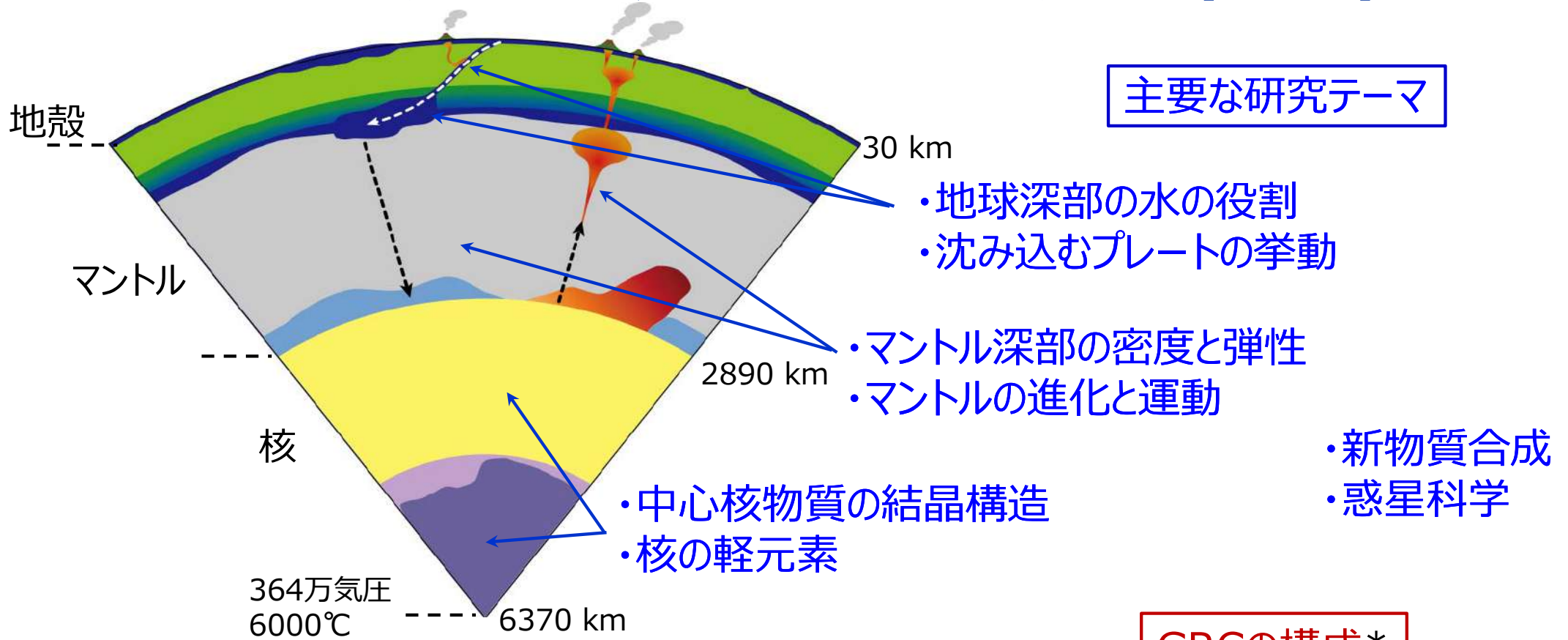
先進超高压科学研究拠点

Premier Research Institute for Ultrahigh-pressure Sciences
(PRIUS)

- **2001年**：文部科学省令に基づく、学内共同教育研究施設として設置
- **2008-2012年**：グローバルCOE拠点「先進的実験と理論による地球深部物質科学拠点」
- **2013年-現在**：共同利用・共同研究拠点「先進超高压科学研究拠点 (PRIUS)」



地球深部ダイナミクス研究センター (GRC)



GRCの構成*

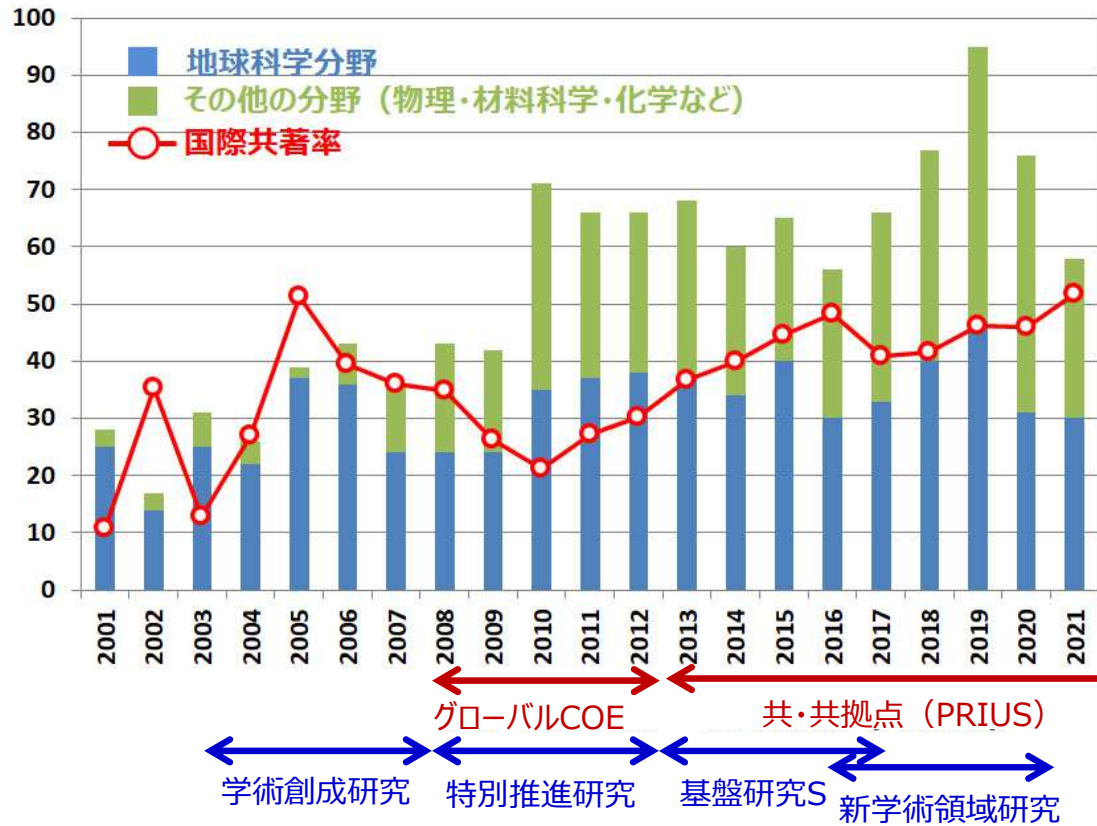
- ・実験系地球科学部門
- ・数値系地球科学部門
- ・超高压科学部門
- ・先端研究高度支援室 (連携)

* 専任教員12名 (女性2名、外国人1名)
+ 専任URA1名・ラボマネージャー1名

実験系 + 数値系による成果例 : Kuwayama et al., Phys. Rev. Lett. (2020)
Nishi et al., Nature (2017)
Nishi et al., Nature Geosci. (2014)

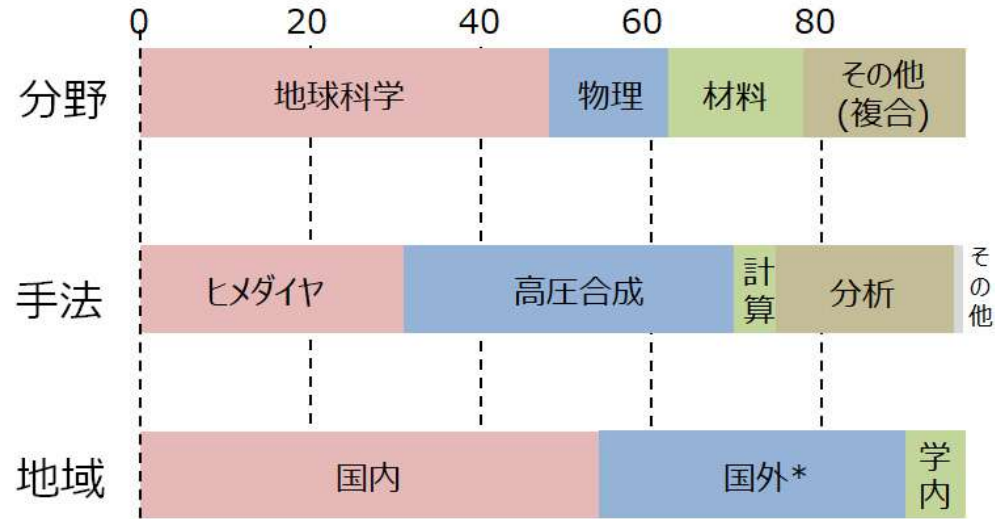
GRC/PRIUSの国際誌発表論文と共同研究の内訳

国際誌論文数



【ハイインパクト論文 (第3期以降, 2016-)】
 Nature (4), Nature Com. (10), Nature Geo. (3),
 Nature Chem. (1), Sci. Adv. (3), PNAS (2)など

国際共著率



*仏 (9)、独 (5)、米 (4)、英 (4)、西 (3)、露 (3)、中 (2)、
 伊 (2)、葡 (1)、瑞 (1)、伯 (1)、白 (1)

【企業との共同研究】

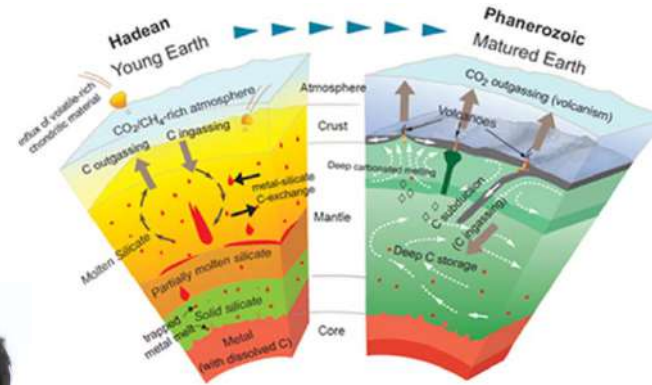
住友電工, リタケ, 積水化学, 京セラ, トライテック, フジロイ,
 シンテック, 三石ハイセラム, 日進製作所, 米国宝石学研究所など

地球科学以外の分野との共同研究・国際共同研究がそれぞれ約50%

第4期における研究の方向性

(1) 「動的地球科学」

- ・ 深発地震発生メカニズム
- ・ 軽元素の地球内部大循環
- ・ 地球の進化とダイナミクス

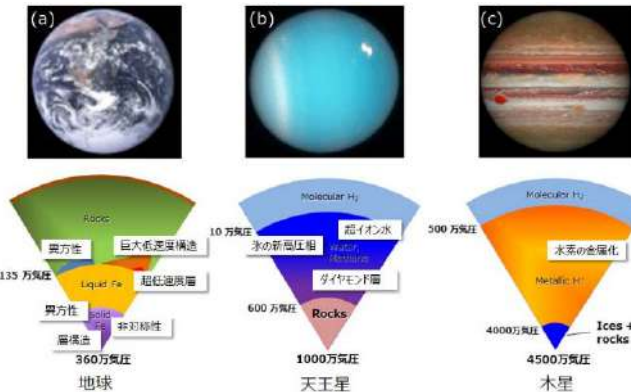


- ・ SPring-8-IIに向けた高圧地球科学BLの高度化を先導

Dekura & Tsuchiya, J. Phys. Cond. Matt. (2023) 数値系・物理学

(2) 「惑星深部科学」

- ・ テラパスカル発生技術
- ・ スーパーアースの内部構造
- ・ 水素・氷の構造変化

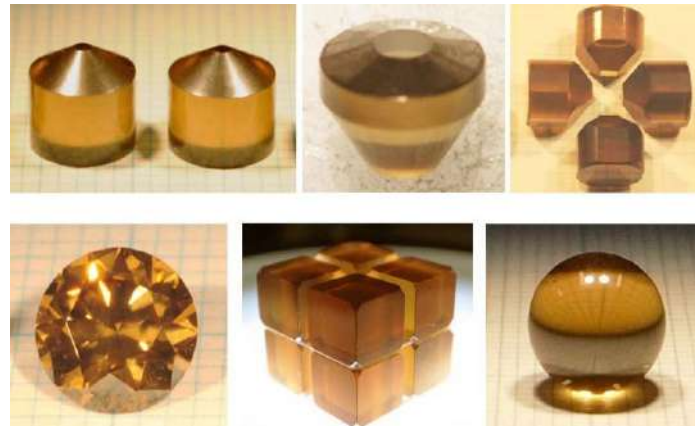


- ・ 全国規模の「惑星深部研究会」を定例開催

Kuwahara et al., Nature Geosci. (2023) 実験系・惑星科学

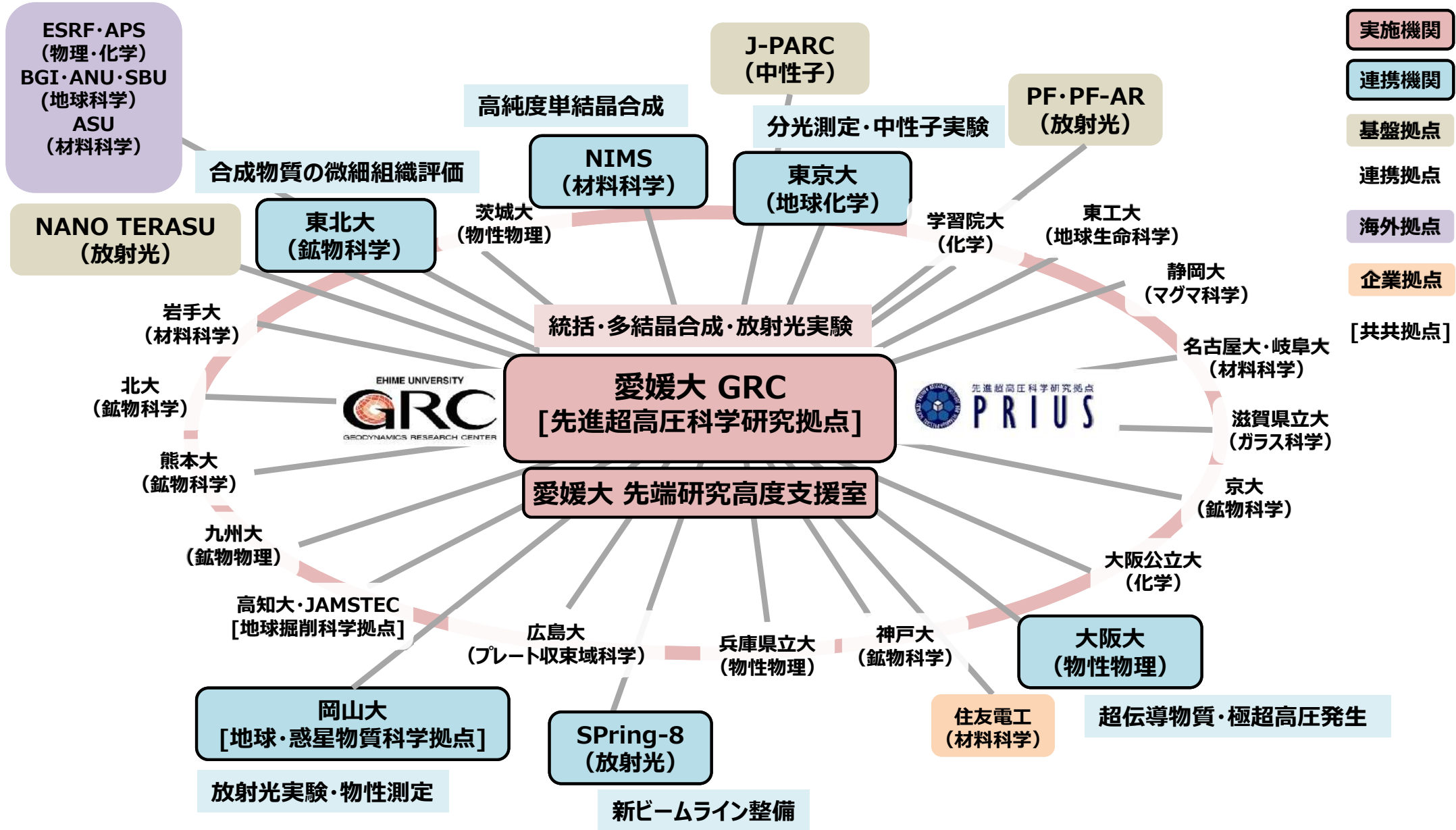
(3) 「超高压材料科学」

- ・ 超硬物質
- ・ 透明ナノセラミックス
- ・ 超伝導材料



- ・ ヒメダイヤ：世界初の超高压合成物質の製品化に成功

国内外との連携と新たな融合分野の創出



日本学術会議 学術の中期計画ビジョン

「革新的超高压技術に基づく地球深部科学と材料科学の新たな融合分野の創成」

文部科学省と国立大学附置研究所・センター個別定例ミーティング (2024.2.2)

先端計算技術による 地球深部の熱輸送特性

愛媛大学 地球深部ダイナミクス研究センター

数値系地球科学部門 講師

出倉 春彦



略歴



研究分野

計算物質科学
高温高压物性
熱輸送特性

学歴

学生時代: 固体の**理論物性物理学**・**極低温物性**

2000年 柏日体高等学校 (現 日本体育大学柏高等学校) 卒業

2005年 中央大学理工学部 物理学科 卒業

(数理物理学・統計物理研究室)

2007年 大阪大学大学院理学研究科

物理学専攻 博士前期課程修了

(量子物性理論研究室)

2010年 大阪大学大学院理学研究科

物理学専攻 博士後期課程修了

博士 (理学) の学位を取得

博士論文題目「 α ホウ素の超伝導に関する研究」

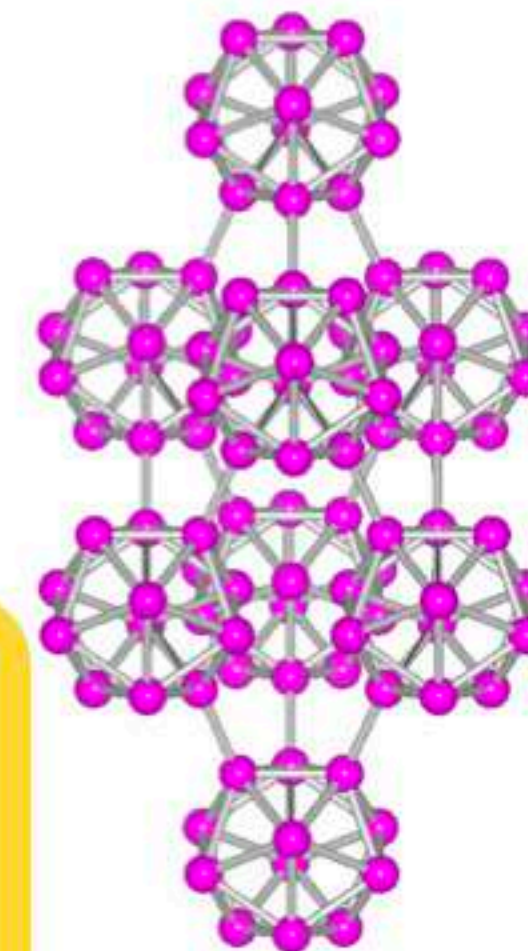


約半年間のフランス留学

@エコール・ポリテクニーク



IP PARIS



固体ホウ素

職歴

GRC時代: **地球科学の世界へ**・**高温物性**

2010年4月ー2012年12月

愛媛大学上級研究員センター 博士研究員

2013年1月ー2016年 3月

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 助教

2016年4月ー現在

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター 講師



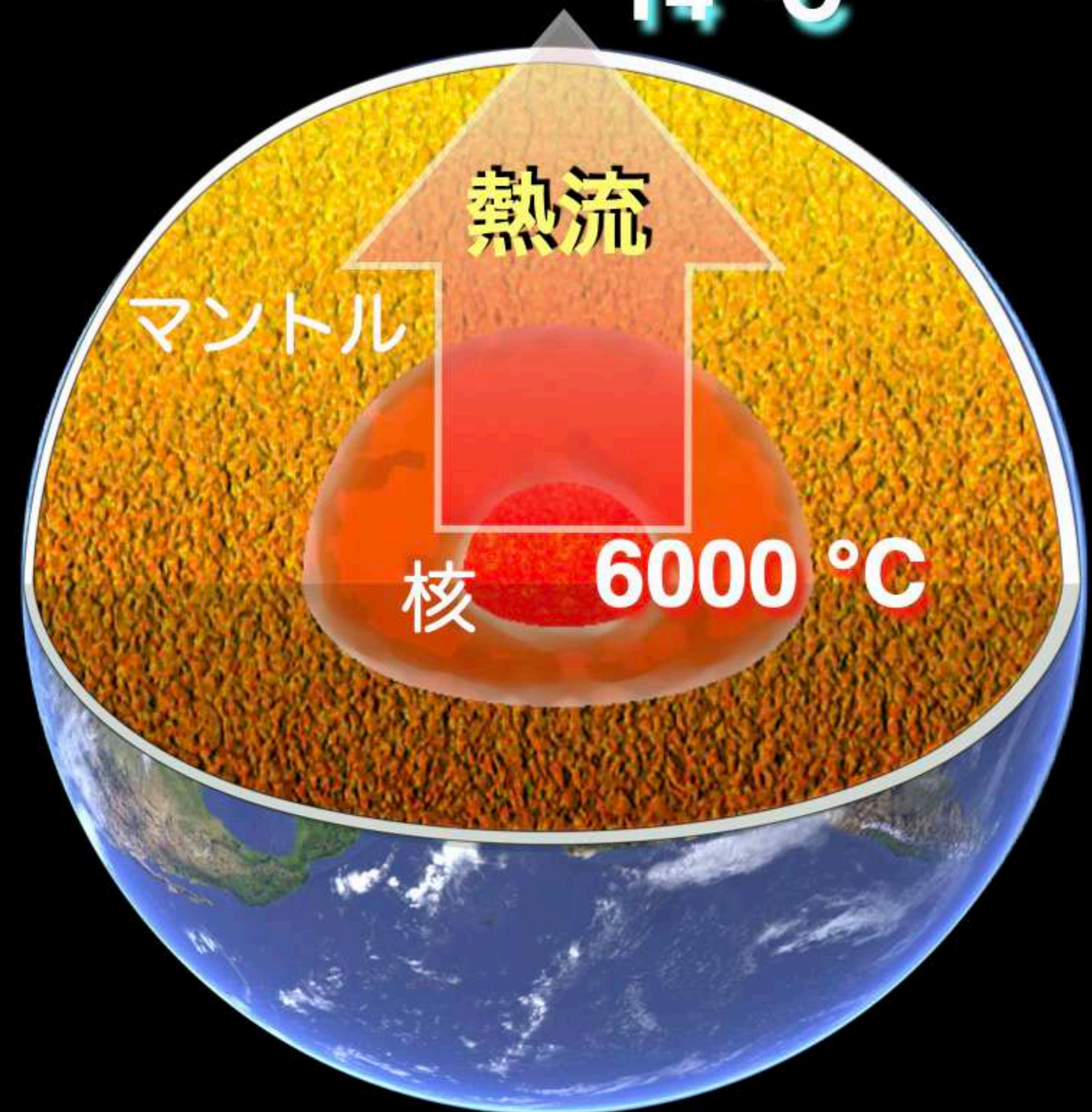
地球は冷えている

46億年前

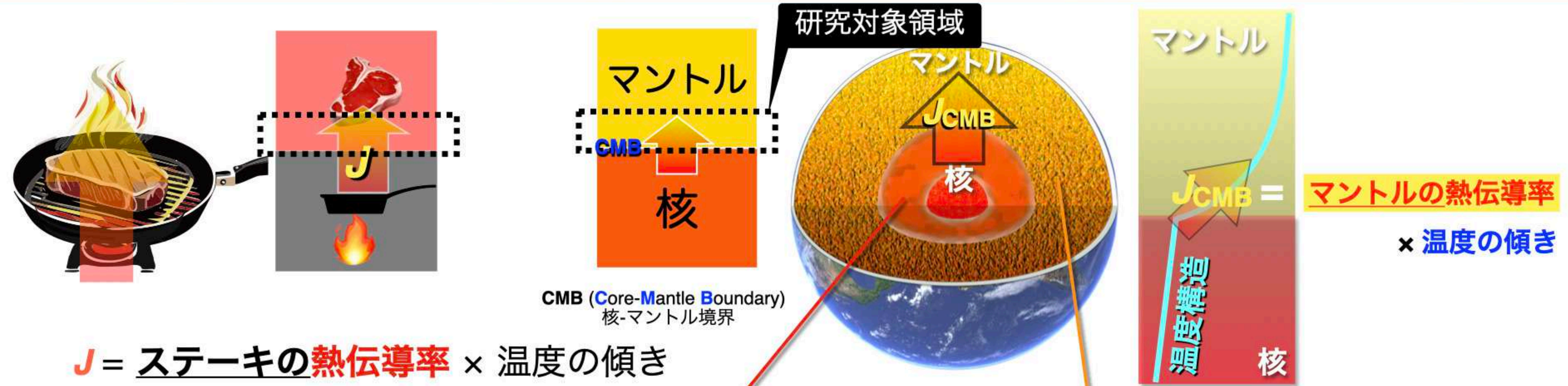


現在

14 °C



地球核からマントルへ横切る熱流量の定量理解による地球内部ダイナミクスの解明



核 (フライパン)

マントルの底部から冷やされる



内核の成長

- ⇒ 液体外核の対流の駆動
- ⇒ 地磁気の生成・維持

核の経年的な冷却: どのくらいの速度?
内核の年齢は?
地磁気はどのように変化した? などなど



マントル (ステーキ)

コア上部からあたためられる

- ⇒ マントル上昇流の駆動
- ⇒ 表層で海洋プレートの生成
- ⇒ プレート運動とともに冷える

マントルの経年的な冷却: どのくらいの速度?
対流の活発さ, などなど

目的: 先端計算技術によるマントルの熱伝導率・熱輸送特性の解明

熱伝導率の第一原理計算技術の確立@GRC

GRC 数値計算部門の有する熱物性計算技術との統合

Dekura & Tsuchiya (2011, 2013, 2017, 2019, 2023)

量子力学・統計力学

固体電子論

格子動力学理論

計算物理学

+ **スーパーコンピュータ**

◆ 密度汎関数理論 (DFT)

$$\left(-\frac{1}{2}\nabla^2 + V_{ext}(\vec{r}) + \int \frac{n(\vec{r}')}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d\vec{r}' + V_{xc}(\vec{r})\right) \Psi_i = \epsilon_i \Psi_i$$

◆ 内部無撞着DFT+U法

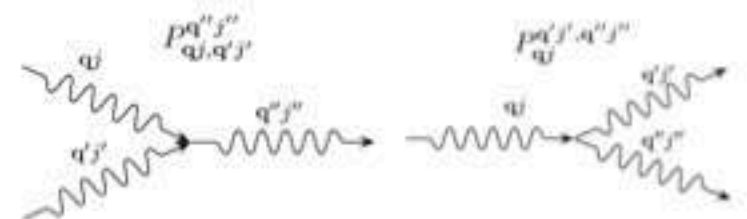
$$E = E_{LDA} + \sum_I \left[\frac{U^I}{2} \sum_{m,\sigma \neq m',\sigma'} n_m^{I\sigma} n_{m'}^{I\sigma'} - \frac{U^I}{2} n^I (n^I - 1) \right]$$

◆ 非調和格子動力学理論

$$\tau_{\lambda}^{-1} \propto \Gamma_{\lambda\lambda',\lambda''}^{\pm} = \frac{\hbar\pi}{4\omega_{\lambda}\omega_{\lambda'}\omega_{\lambda''}} \left(\frac{n_{\lambda'}^{(0)} - n_{\lambda''}^{(0)}}{n_{\lambda'}^{(0)} + n_{\lambda''}^{(0)} + 1} \right) |\psi_{\lambda,\lambda',\lambda''}^{\pm}|^2 \delta(\omega_{\lambda} \pm \omega_{\lambda'} - \omega_{\lambda''})$$

◆ フォノン-ボルツマン輸送理論

$$-v_{\lambda} \cdot \nabla T \left(\frac{\partial n_{\lambda}}{\partial T} \right) + \left(\frac{\partial n_{\lambda}}{\partial t} \right)_{scatt} = 0$$



$$\kappa_{\alpha\beta} = \frac{1}{k_B T^2 \Omega N} \sum_{\lambda} \left(n_{\lambda}^{(0)} \right) \left(n_{\lambda}^{(0)} + 1 \right) (\hbar\omega_{\lambda})^2 v_{\lambda\alpha} F_{\lambda\beta}$$

我々の第一原理熱輸送研究の特徴

地球深部

✓ 複雑な結晶構造

✓ 超高温高圧環境

✓ 鉄などの不純物

高圧

核-マントル境界条件

我々の ★ 136 万気圧
第一原理計算技術 ~ 4000 K

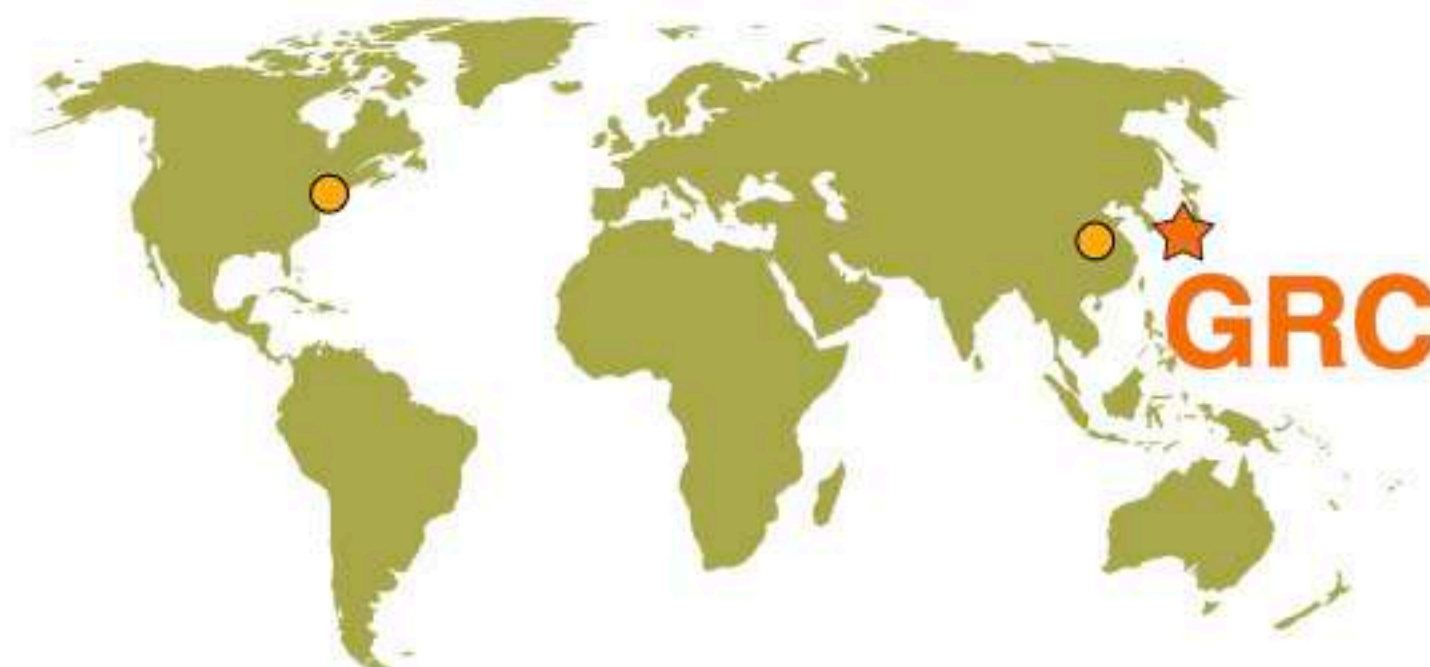
実験

高温

by 堅牢な物性理論 & 大規模第一原理計算

* 世界の研究

非第一原理, 低解像度, ...



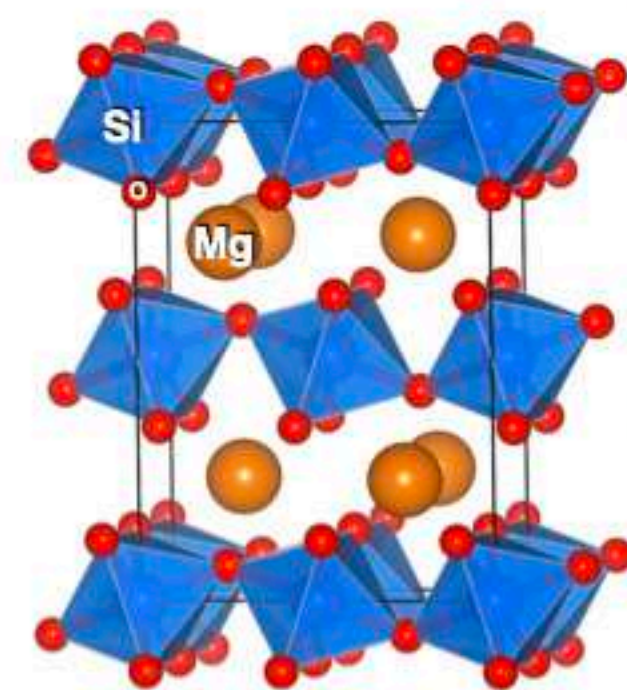
☆ 複雑な鉱物の高温高圧下における熱伝導率の先端的な第一原理計算技術のノウハウを有するのは世界でもGRC数値系グループだけ

下部マントル鉱物の熱伝導率の第一原理理論予測

最深部マントルの温度・圧力その場条件 (~ 4000 K, ~ 136 万気圧) における

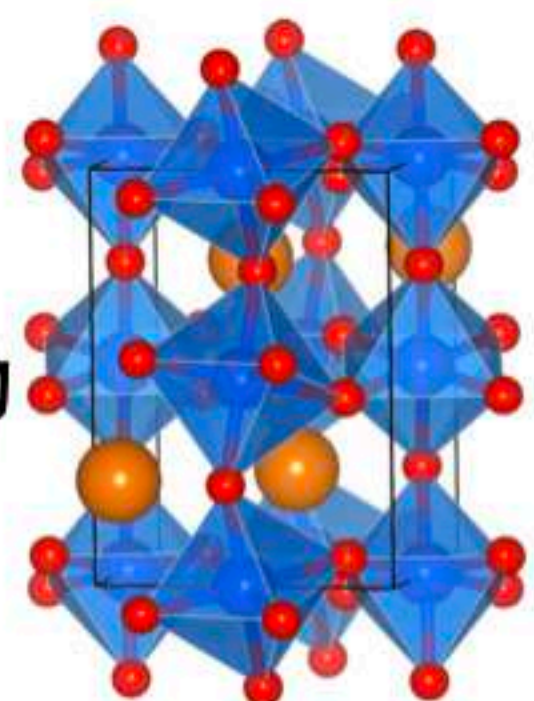
下部マントル鉱物の熱伝導率の第一原理決定!! (ほとんどの高圧実験研究は室温測定 ~ 300 K)

ポストペロブスカイト (PPv)

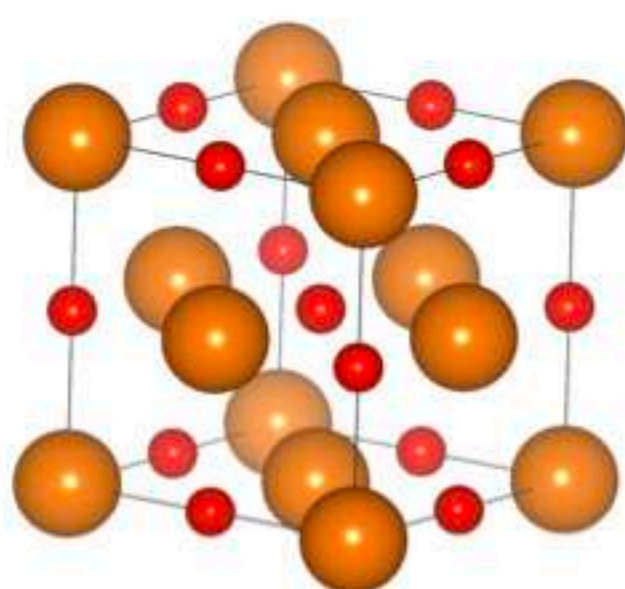


マントル最主要鉱物 (Brg・PPv) の **世界初の** 第一原理計算報告

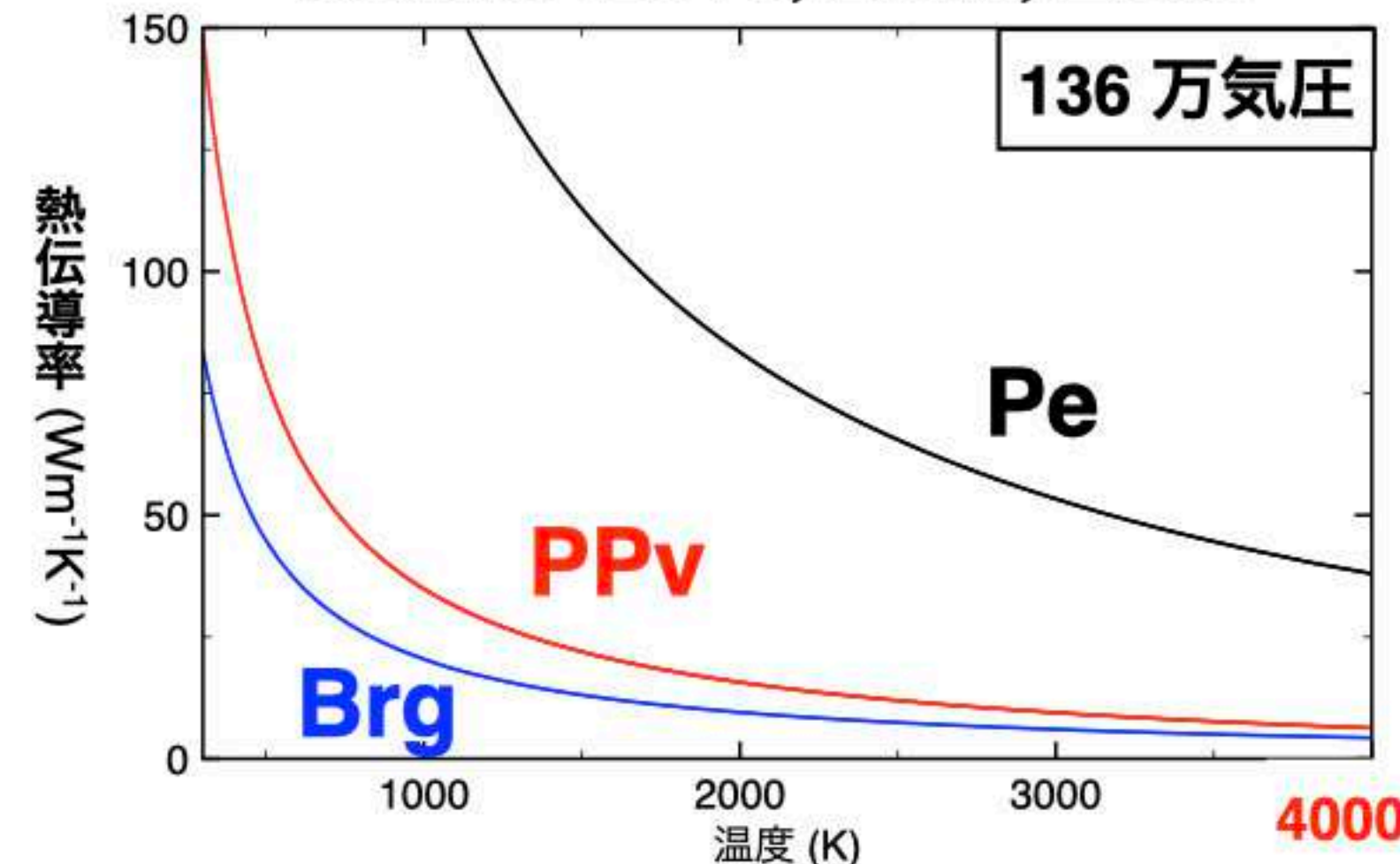
ブリッジマナイト (Brg)



ペリクレイス (Pe)



Dekura+2013, 2017, 2019



熱伝導率 ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

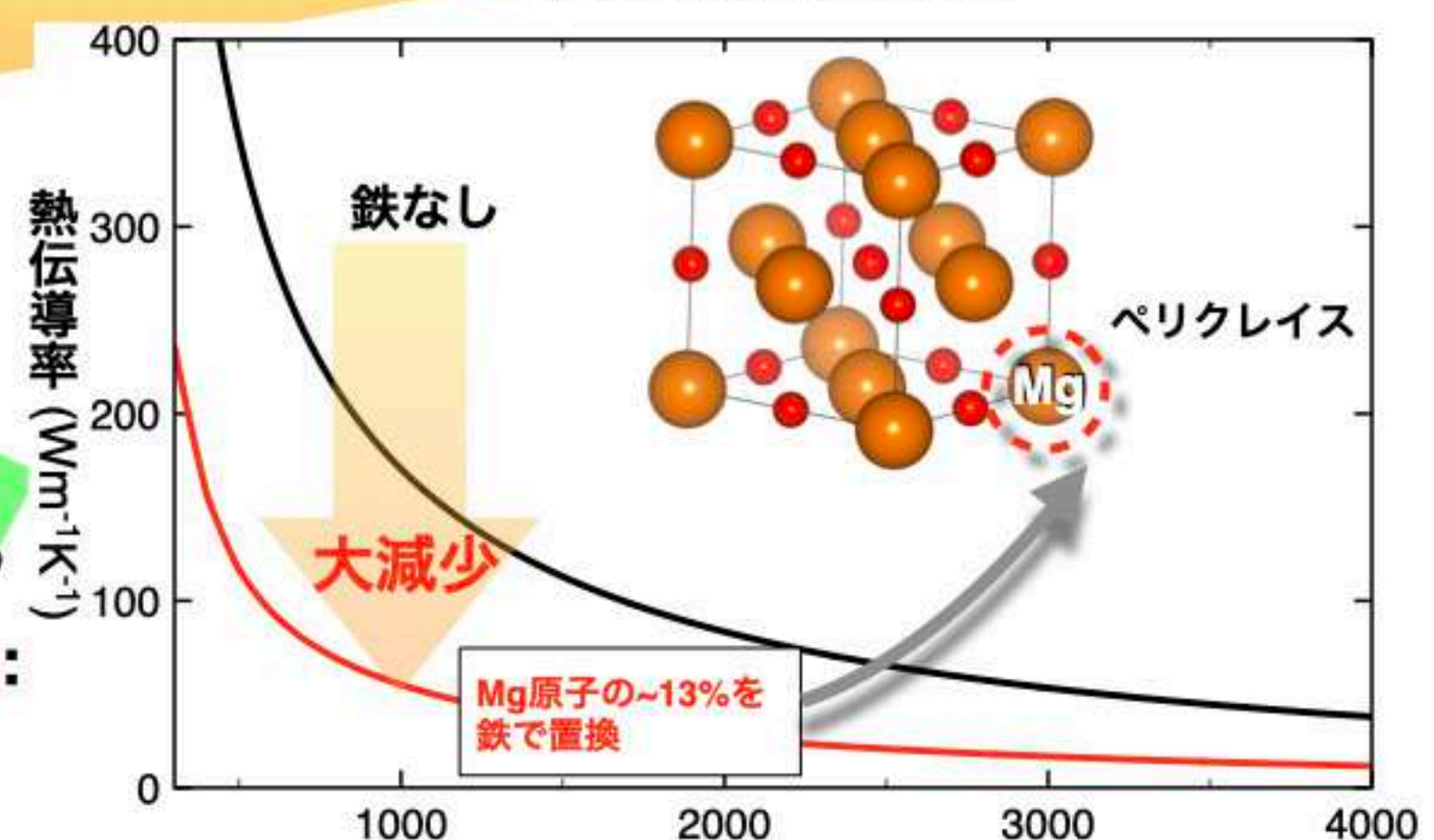
~ 7 ~ 17

~ 5 ~ 9 ~ 35 ~ 20

実験研究による外挿推定値 (e.g., Manthilake+2011)

鉄が混入すると...

Dekura+2023



論文準備中

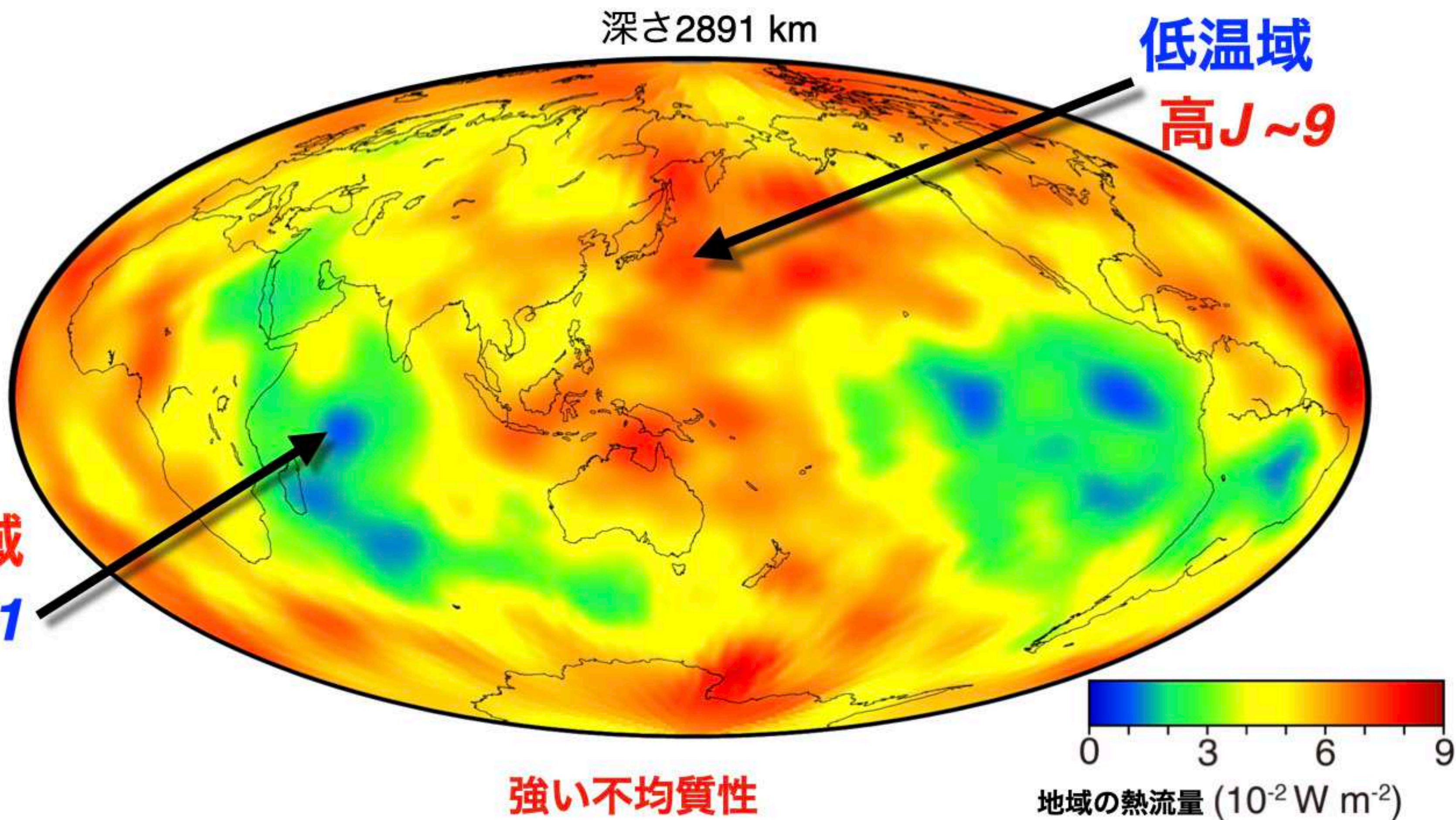
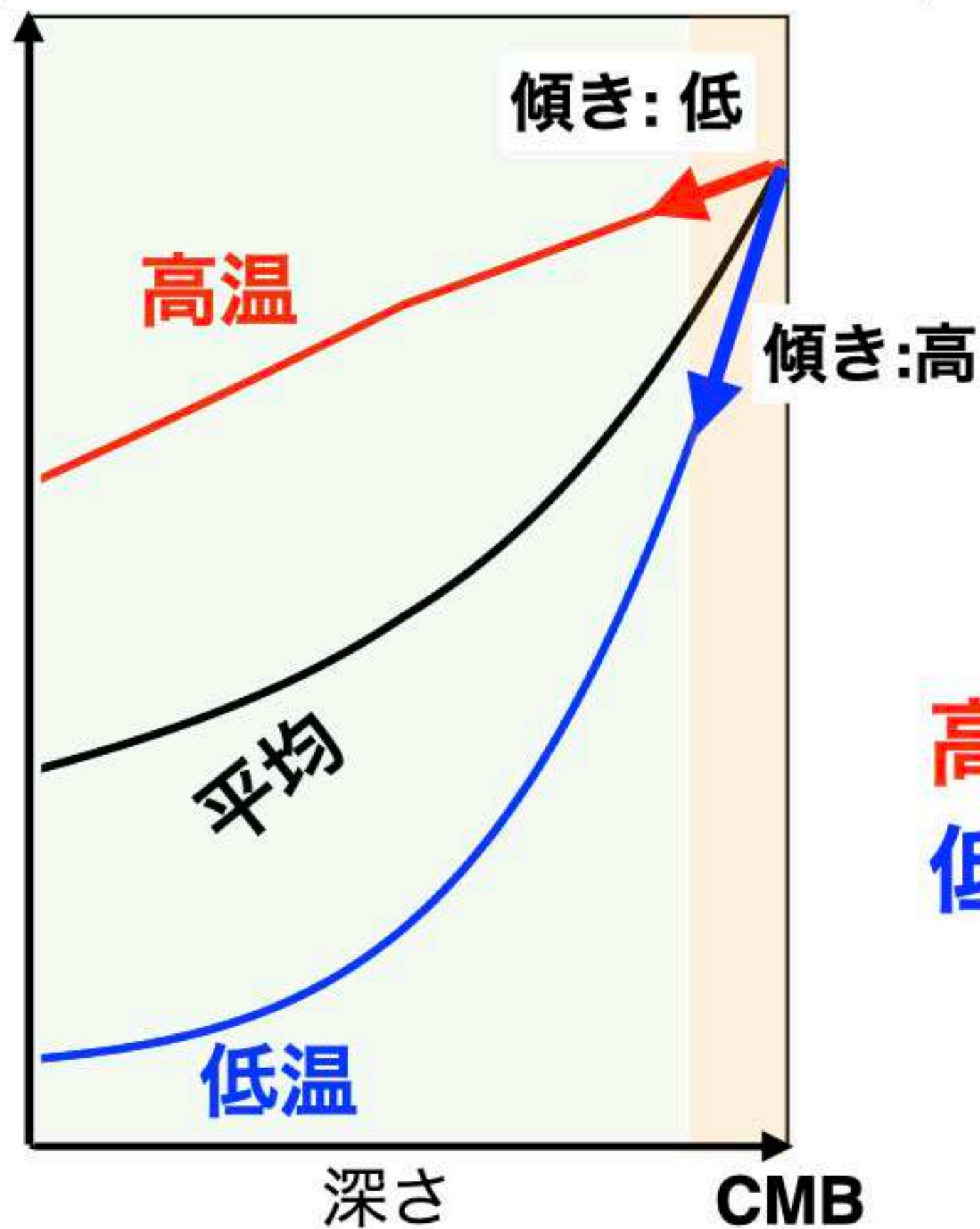
~ 10

マントル鉱物の高温高圧下における **大きな鉄の混入効果:** **世界初の理論予測**

高温高圧下における **大きな鉄固溶効果の発見:** 物質中を伝わる波(“フォノン”)の速さの大きな減少が主要因 \Rightarrow PPv・Brgでも同じ効果を確認! (Dekura, 2024, in prep)

最深部マンントルの熱流モデリング

最深部マンントルの温度構造
(熱伝導方程式 & 地震波トモグラフィーから構築)



全熱流量 J_{CMB} = 色々な地域での熱流量の足し合わせ

マンントルの熱伝導率 × 各地域の温度の傾き

$$J_{\text{CMB}} = \sim 7 \text{ 兆W}$$

☆ マンントル最深部の κ の第一原理決定による
全熱流量の定量推定に成功

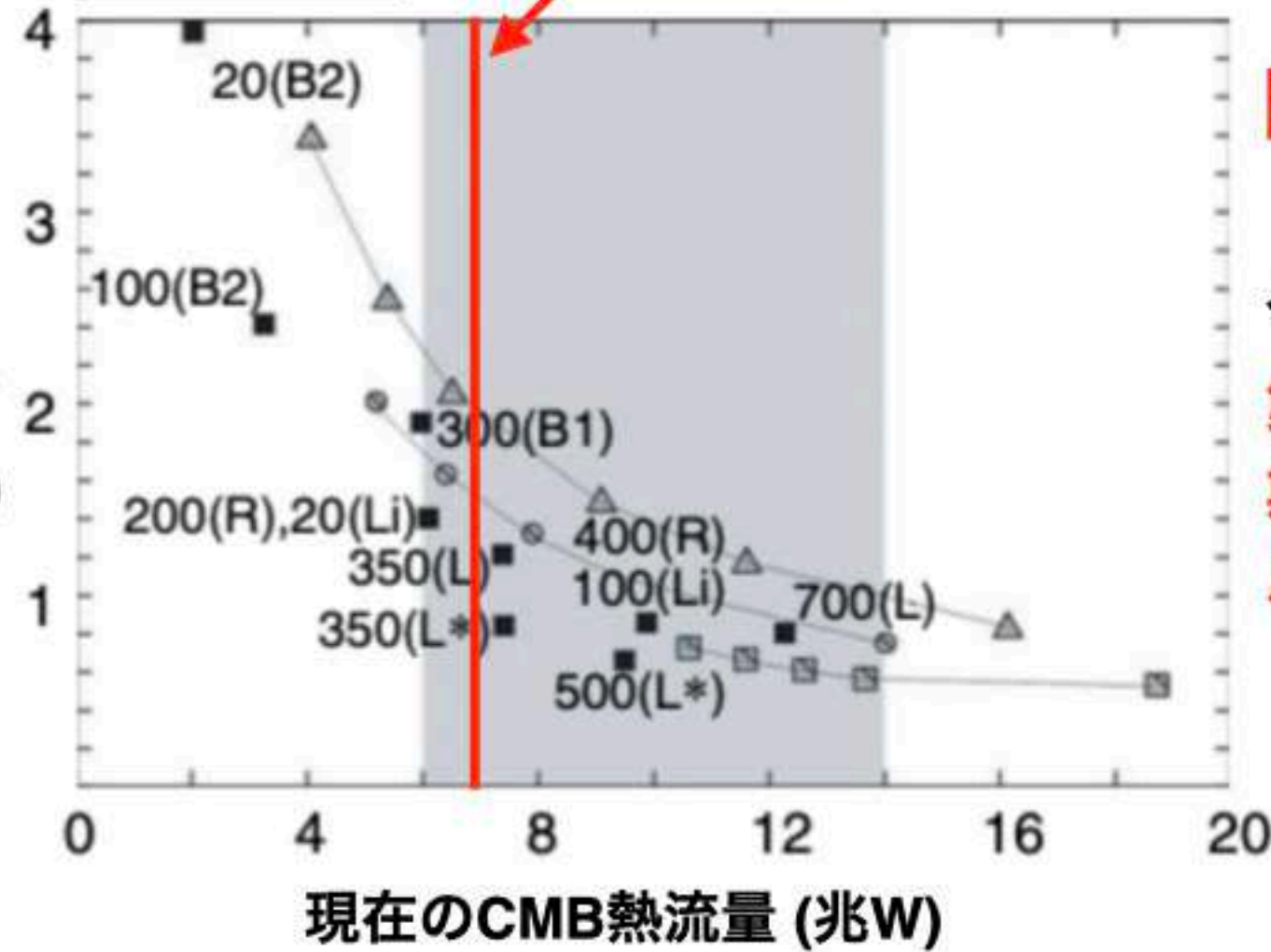
地球ダイナミクスとの関連

核の進化

本研究の推定値 ~7兆 W

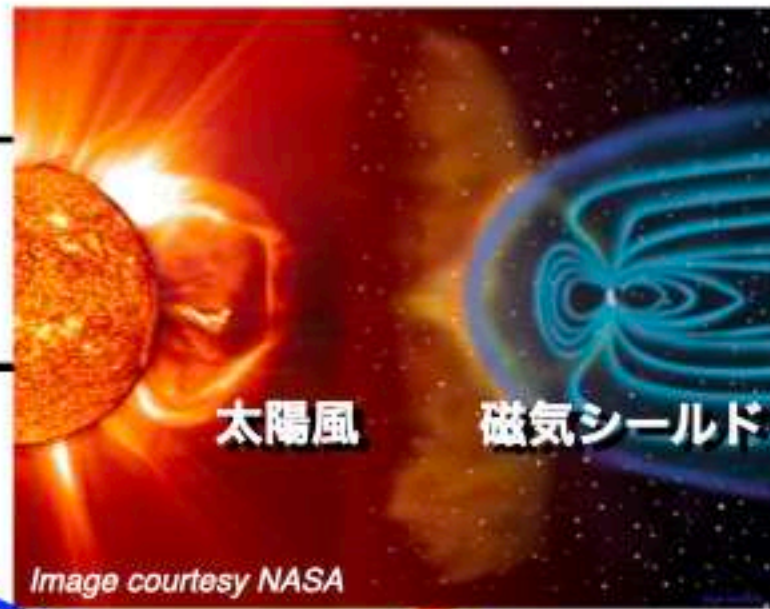
内核年齢 ~10-20 億歳?

今後: 本研究結果を足がかりとして,
第一原理物性値を反映した地球初
期-現在-未来に至る内核成長モデ
ルの構築へ



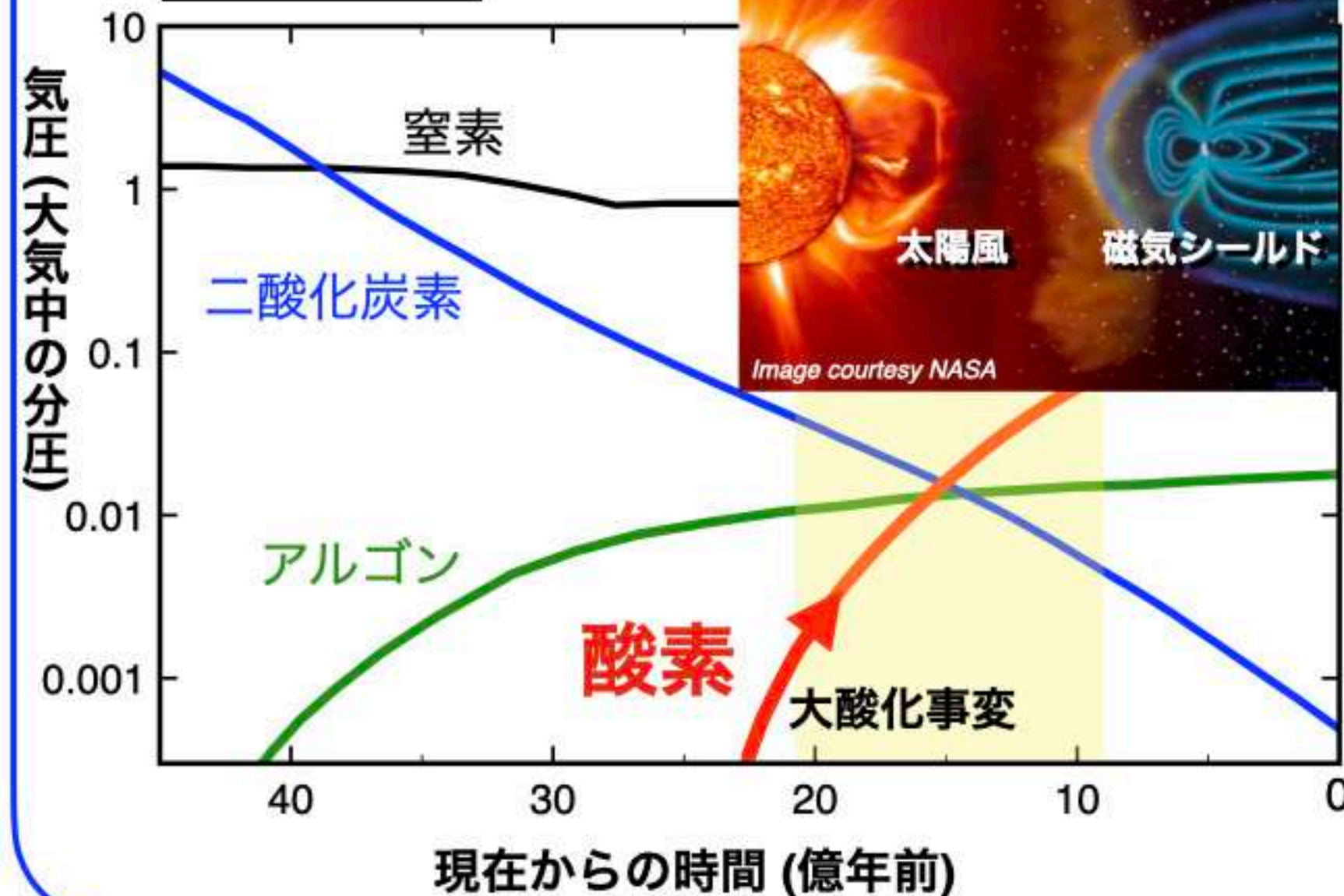
after, Treatise on geophysics, vol. 9

大気の進化



10-20億年前から開始した
内核成長に伴う地球磁気
シールドの増強

20-25億年前に起こった大
気酸素濃度の急上昇イベ
ントと関連?



丸山・磯崎, 1998,
の図を改編

固体地球の熱収支

宇宙空間

地表から宇宙へ

~46 兆W

放射性壊変による
発熱量 ~20兆 W

コアから
マントルへ

~7兆 W

マントル
(+地殻)

冷却量
~19 兆W

コア

冷却量 ~7 兆W

GRCによる先端的な第一原理計算技術

- 地球内部のダイナミクス, 熱的歴史, 地球磁場構造などの
地球内部のさまざまな動的性質の解明への手がかり
- ダイナミクス研究に用いる高精度インプット物性データの構築
による学際的協同研究の展開が招く地球深部研究の促進

謝辞

愛媛大学 GRC [第一原理計算手法開発・理論・超高压物性など]

土屋 卓久 教授 (数値系)

土屋 旬 教授 (数値系)

境 毅 准教授 (実験系)

東京工業大学 [熱伝導率測定・議論]

太田 健二 准教授 (実験系)

九州大学 [核の地震学的な議論]

金嶋 聰 教授 (数値系)

東京大学 [マントルの地震学的な議論]

河合 研志 准教授 (数値系)

大阪大学 [深部マントルの鉱物学的議論]

西 真之 准教授 (前GRC准教授・実験系)

Chinese Academy of Sciences [電子状態の議論]

Prof. Xianlong Wang (前GRC研究員・数値系)

University of California [地球磁場の議論]

Dr. Hiroaki Matsui (数値系)

+惑星深部研究会の参加者のみなさま

全国の大学から教員・研究員・学生
のべ50人が参加

第4回惑星深部研究会

The 4th Meeting of the Study of Planetary Deep Interiors

15th ~ 18th Mar. 2023
@Ehime Univ.

世話人代表 愛媛大GRC 出倉 春彦



文部科学省

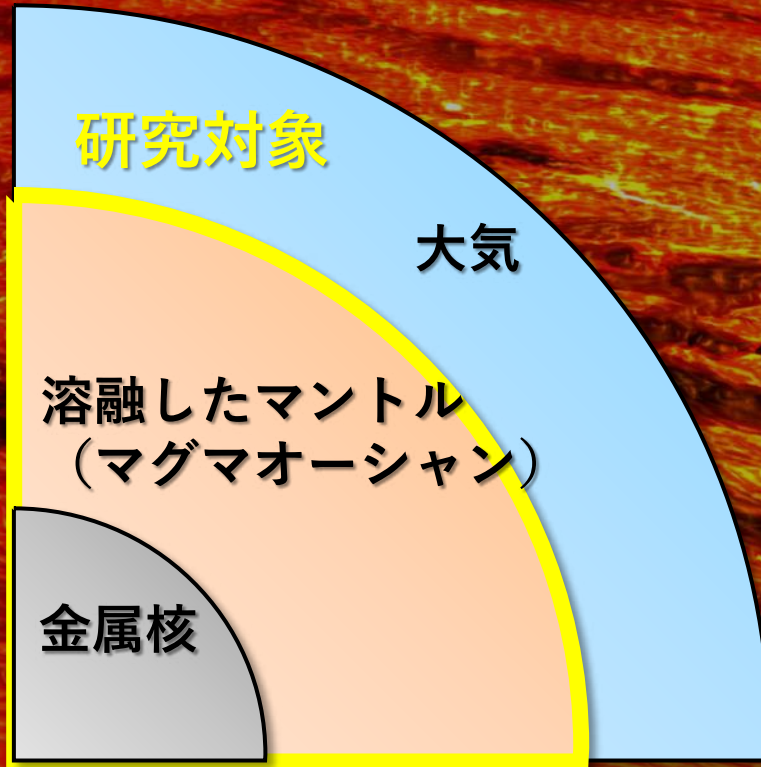
科研費
KAKENHI

CoreMantle
evolution



<https://icts.nagoya-u.ac.jp/ja/sc/>

HPCI High Performance
Computing Infrastructure



超高温高圧実験による惑星形成過程の再現

Illustration by Shinichiro Kinoshita

略歴



学歴

- 2006年3月 愛知県立岡崎北高等学校 卒業
- 2011年3月 横浜国立大学工学部第二部物質工学科 卒業
大気中の雷放電による化学反応に関する実験的研究
- 2013年3月 東京大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程 修了
未分化天体衝突による大気形成に関する理論的研究
- 2016年6月 東京大学大学院新領域創成科学研究科博士後期課程 修了
岩石天体内部の核-マントル間の塩素分配に関する実験的研究

職歴

- 2015年4月 東京大学大学院新領域創成科学研究科
日本学術振興会特別研究員 (DC2)
- 2016年7月 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター
特定研究員、日本学術振興会特別研究員 (PD)
- 2020年4月 岡山大学惑星物質研究所 特任助教
- 2021年3月 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター (GRC) 助教 (現職)

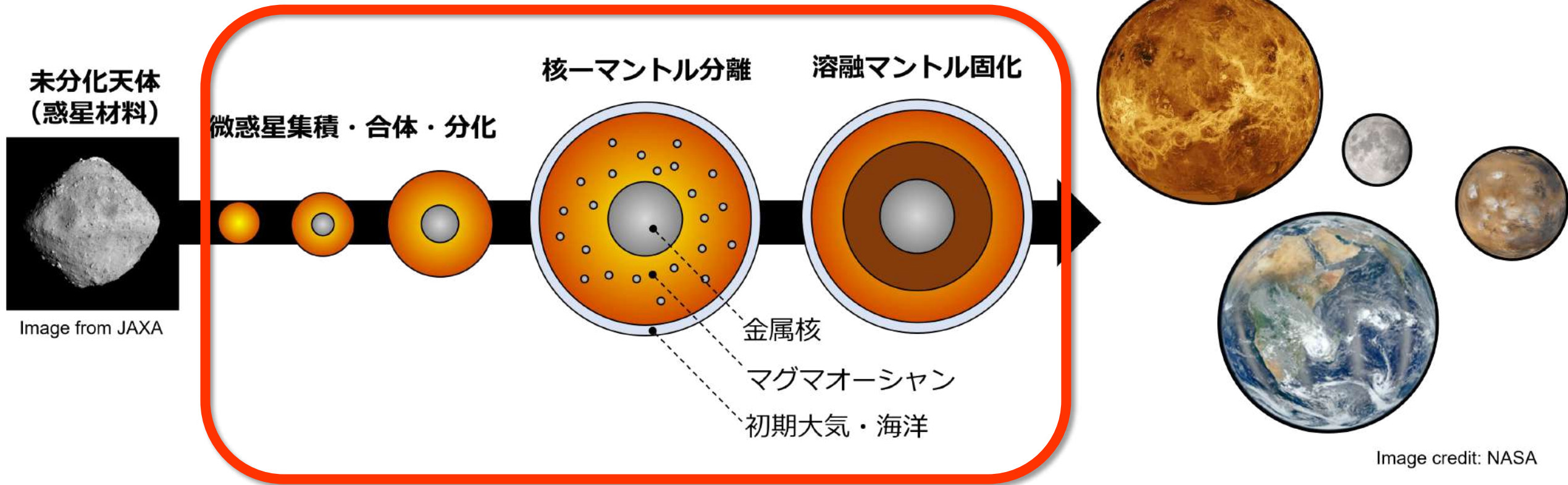
研究分野

比較惑星科学、地球化学、高压地球科学

研究の興味：惑星の多様性の起源の理解

惑星分化過程はブラックボックス

多様な環境を持つ岩石天体

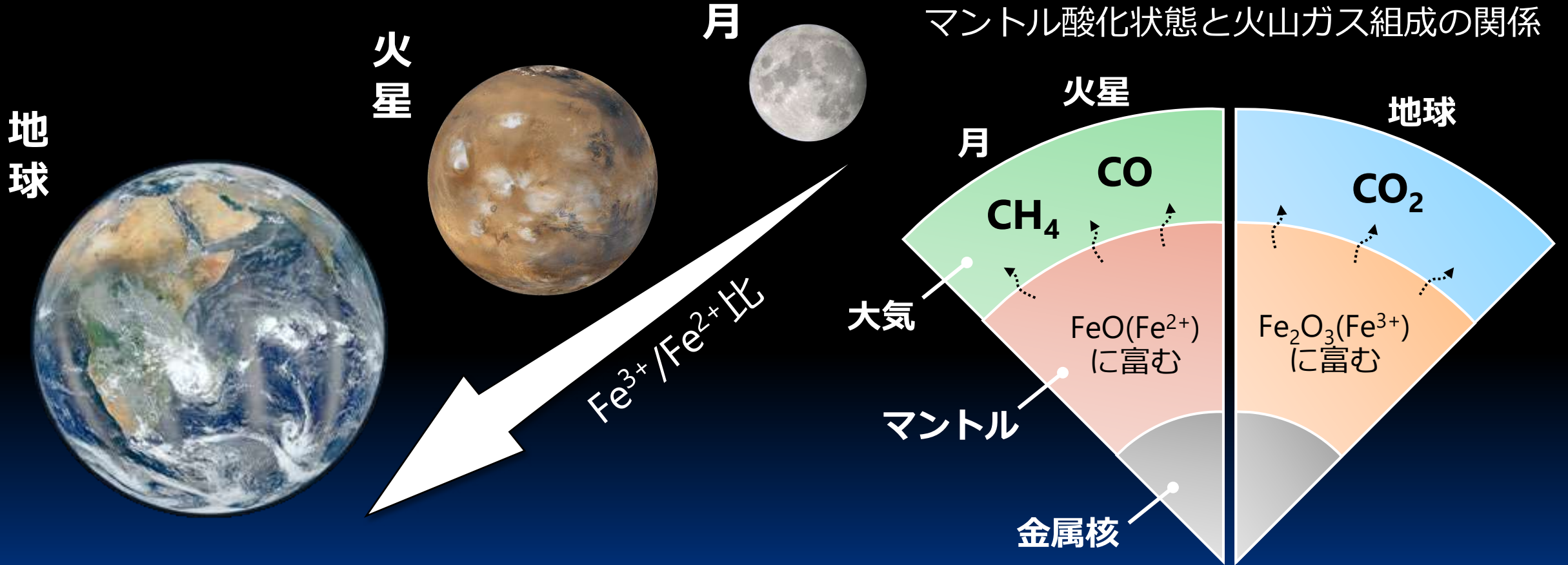


研究意義： 多様な惑星環境を理解するうえで、惑星の分化過程の解明はとても大事

問題点： 地質記録が無いので分化過程の解明は困難

解明手段： **実験的に分化過程を再現し、どのような反応が起こるのか観察 (私の研究)**
→ **天体内部が表層環境形成に果たした役割の理解を目指す (研究の特長)**

多様な惑星環境とは：異なる酸化状態を持った岩石天体



マンタルの酸化状態 (Fe³⁺/Fe²⁺比) と大気組成と密接な関係にある。

例：地球マンタルの火山ガスがCO₂主体でなかったら、現在のような生命居住に適した酸素に富む大気は発生しなかった！ [e.g., Kadoya et al., 2020, Nature Communications]

(2CO + O₂ → 2CO₂などの反応により酸素が消費されてしまうから)

超高压环境下における酸素 (Fe^{3+}) に富むマグマの形成

2023年5月 プレスリリース (Nature Geoscience掲載)
(JAMSTEC、岡山大学惑星物質研究所との共同研究)

マグマオーシャン中での起こる Fe^{2+} の電荷不均化反応:

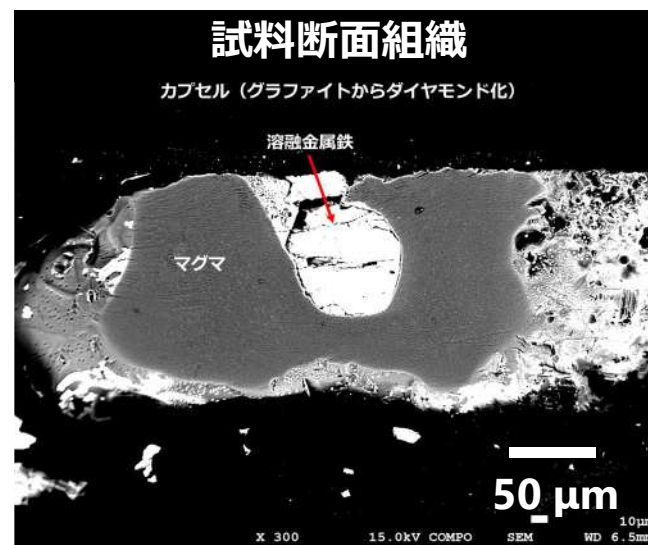
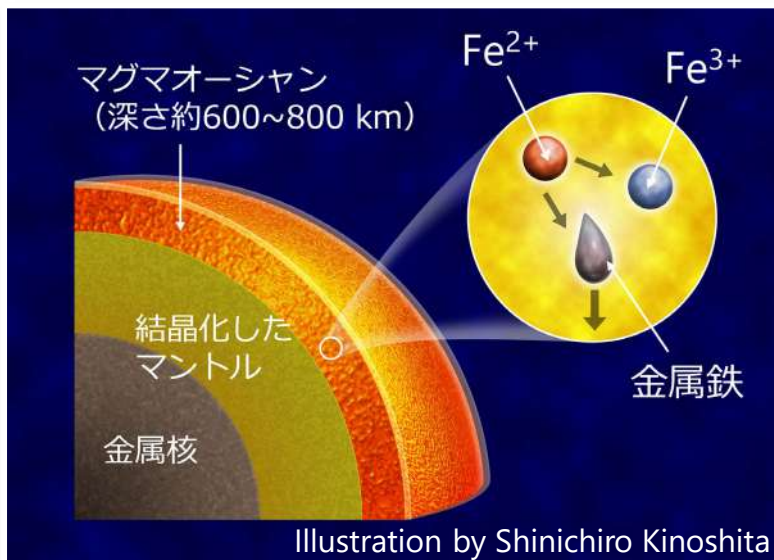
マントル酸化状態(Fe^{3+} 生成量)を決める重要な反応

[Armstrong et al., 2019, Science]

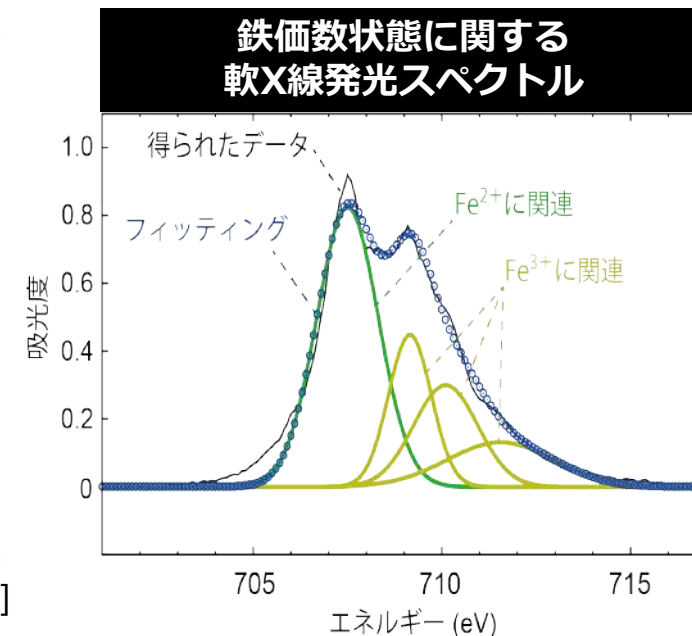


問題点: 地球マグマオーシャンの高温高压条件の実験が無く、 Fe^{3+} の生成量は未解明。

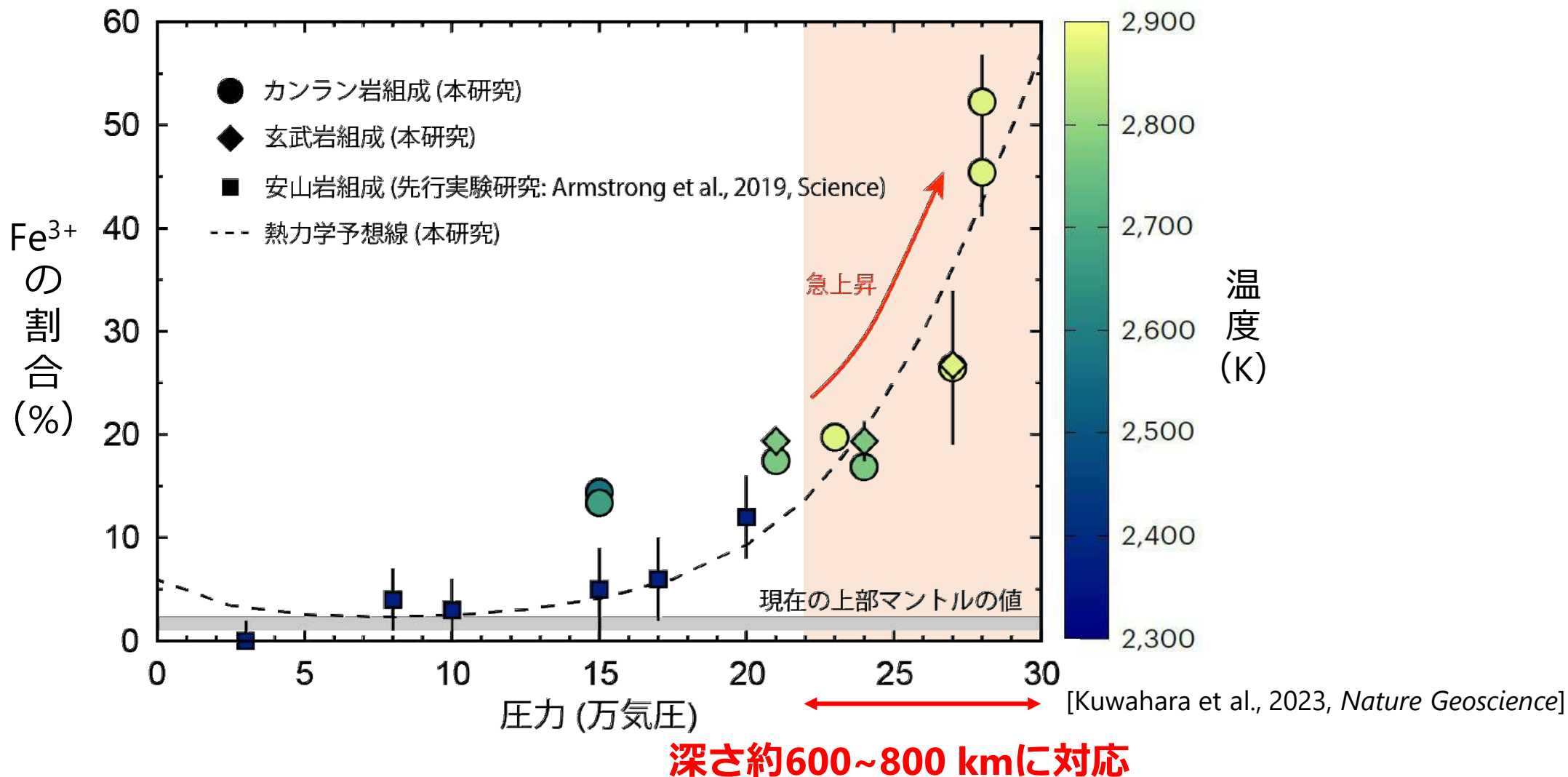
本研究: **GRCの高温高压発生技術のノウハウを生かし、上記条件下における Fe^{3+} 量の制約に成功!**



[Kuwahara et al., 2023, Nature Geoscience]

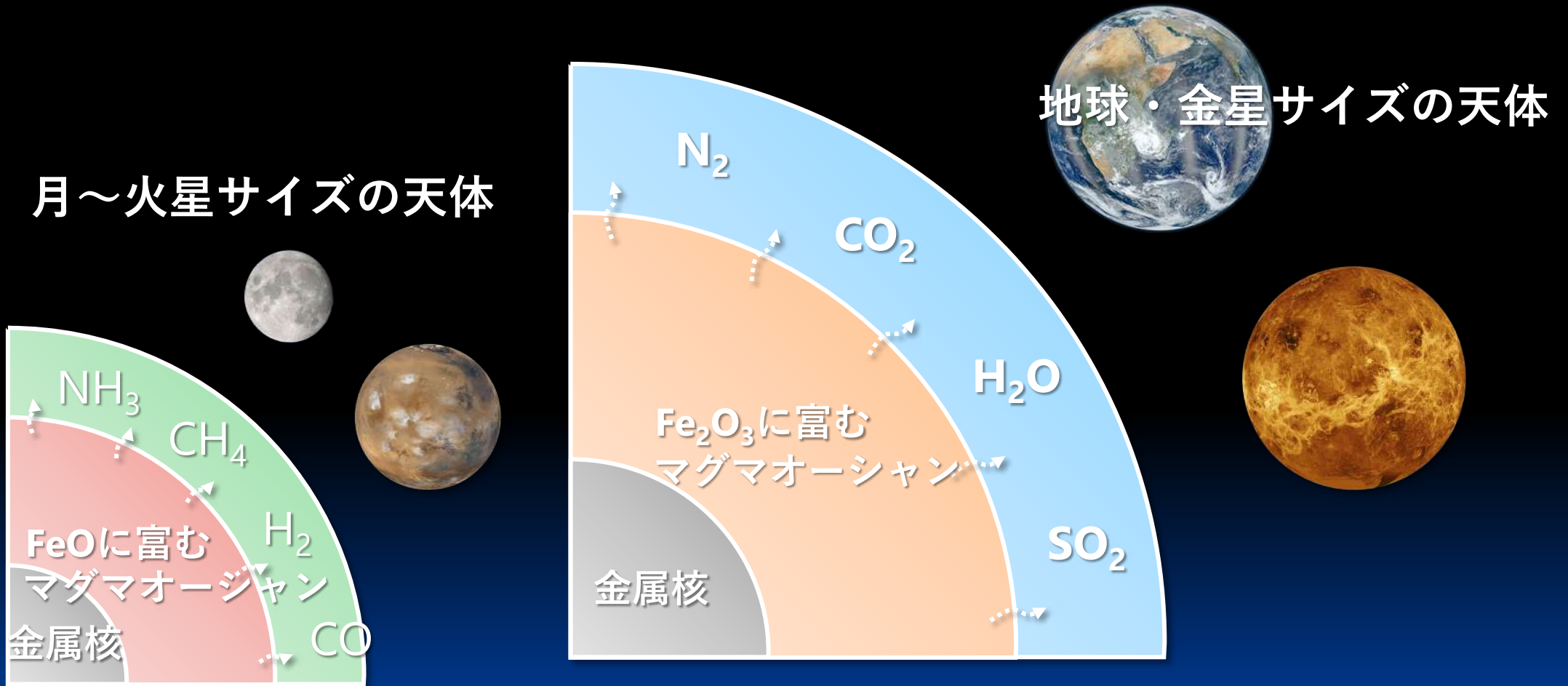


超高压環境下における酸素 (Fe^{3+}) に富むマグマの形成



地球マグマオーシャンに相当する圧力条件下では Fe^{2+} の電荷不均化反応が急速に進む

惑星科学・天文学分野への波及効果：地球、太陽系を超えて



- 宇宙望遠鏡による太陽系外惑星の大気観測による仮説の検証
- 惑星科学・天文学分野との協力による分野融合型研究への発展！
 - 岩石天体内部－大気の関係に関する普遍的な理論の枠組み構築へ！

謝辞

超高压下のマグマ酸化状態に関する共同研究

- 愛媛大学 入船 徹男 教授・センター長
- 岡山大学 芳野 極 教授
- 海洋研究開発機構(JAMSTEC・高知コア研究所) 中田 亮一 主任研究員
- 海洋研究開発機構(JAMSTEC) 門屋 辰太郎 研究員

太陽系外惑星の内部－大気モデルに関する議論

- 国立天文台 藤井 友香 准教授、伊藤 祐一 研究員
- 神戸大学 黒崎 健二 特命助教
- 東北大学 吉田 辰哉 研究員

岩石天体内部の酸化状態の進化モデルに関する議論

- イェール大学 Jun Korenaga 教授
- カリフォルニア工科大学 Yoshinori Miyazaki 研究員
- アリゾナ州立大学 Damanveer Grewal 助教

研究成果プレスリリースに関するイラスト提供

- Kinoshita Design Office 木下 真一郎 氏

