

物質科学

超高压実験室としての地球

渡邊 (2019/8/2)



garden produced by GRACE FUJIMI

Diamond quality

ダイヤモンドの秘密

永遠の愛を誓う証として、生涯のパートナーに贈るダイヤモンド。
特別なものだからこそ、より高品質なダイヤモンドを贈っていただけるよう、
私たちはその価値・大切さをお伝えしたいと願っています。

唐突ですが



garden produced by GRACE FUJIMI

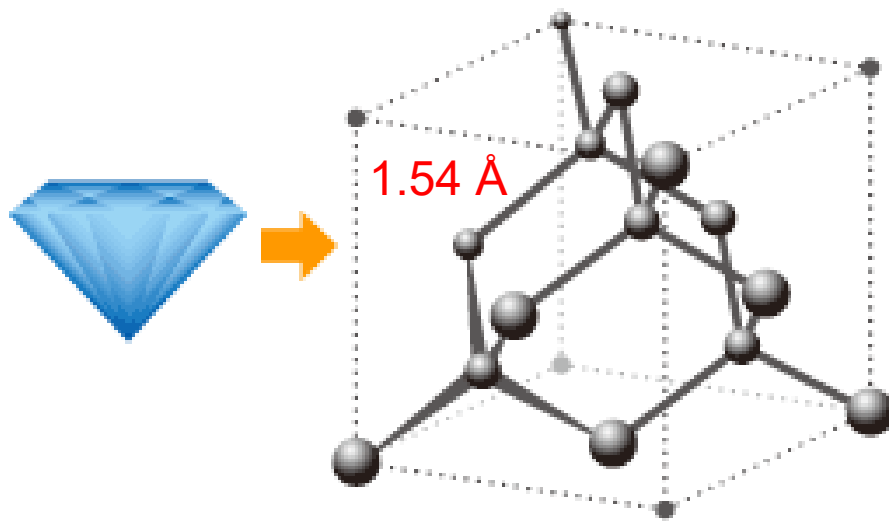
Diamond quality

ダイヤモンドの秘密

永遠の愛を誓う証として、生涯のパートナーに贈るダイヤモンド。
特別なものだからこそ、より高品質なダイヤモンドを贈っていただけるよう、
私たちはその価値・大切さをお伝えしたいと願っています。

ダイヤモンドって何？

■ダイヤモンドの結晶構造

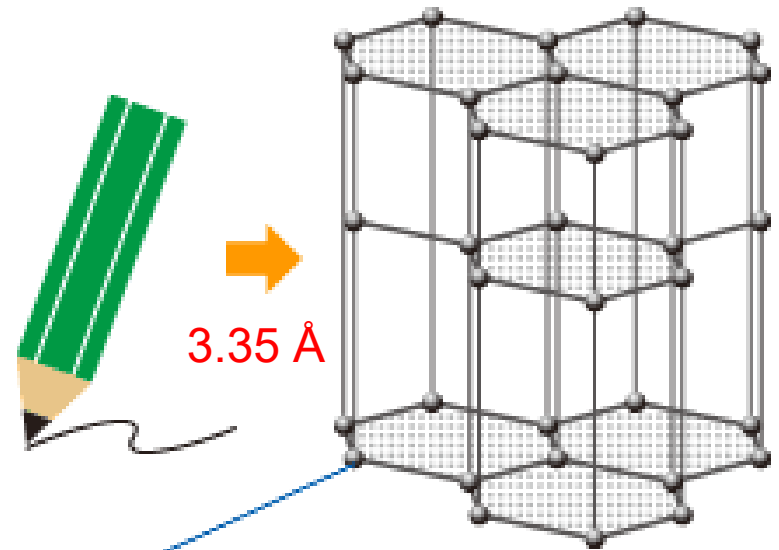


密度 3.52 g/cm^3

共有結合 sp^3 混成軌道

絶縁体

■グラファイトの結晶構造



炭素原子

密度 2.28 g/cm^3

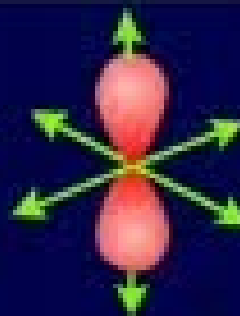
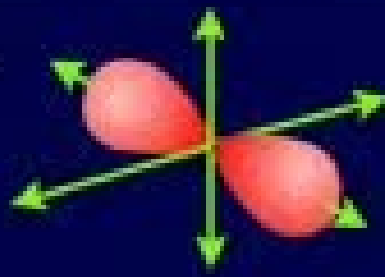
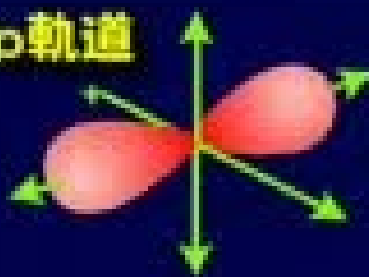
層内 共有結合 sp^2 混成軌道
層間 ファンデルワールス力

導電性（層間の電子による）

s軌道

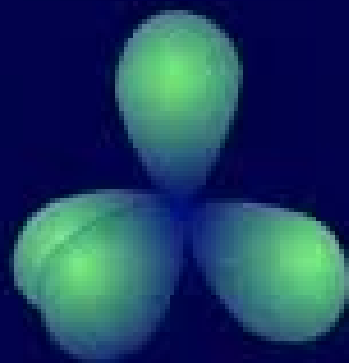


p軌道

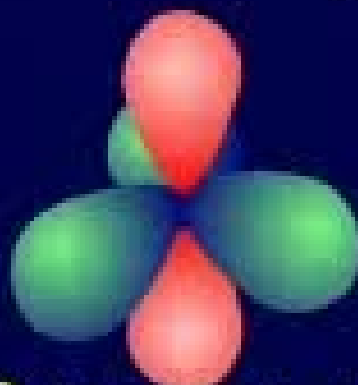


炭素の
原子軌道

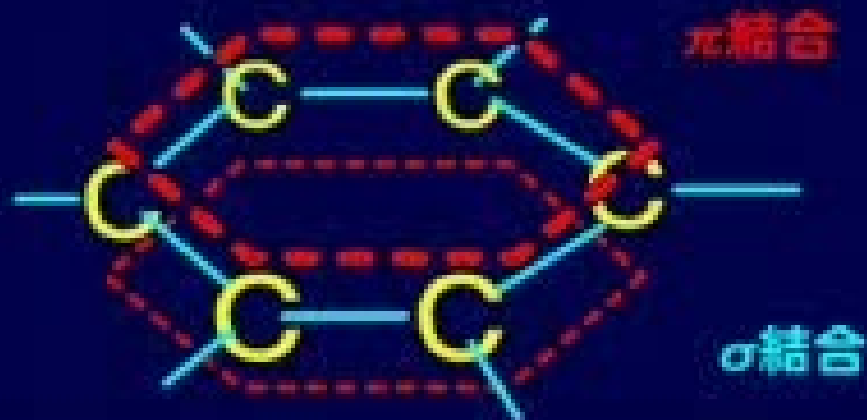
sp^3 混成軌道



sp^2 混成軌道とp軌道



sp混成軌道とp軌道2個



なぜ色が違う？



ダイヤモンド

無色透明



グラファイト

黒

物質の色は何が決めているか？

色： 可視光（電磁波）と電子の 相互作用で決まる

金属： 多くの原子で非局在化した
電子（自由電子）を共有

非金属： 局在化した電子
（特定の原子間で共有される）

金属が金属光沢を示すのはなぜ？

金属が金属光沢を示すのはなぜ？

金属： 表面付近の自由電子が電磁波に
追隨して振動

⇒ 新しい波源として電磁波を放射

⇒ 高い反射率（金属光沢）

※ 波長の長い光をより反射すると
赤っぽくなる （Cu）

ダイヤモンドとグラファイト

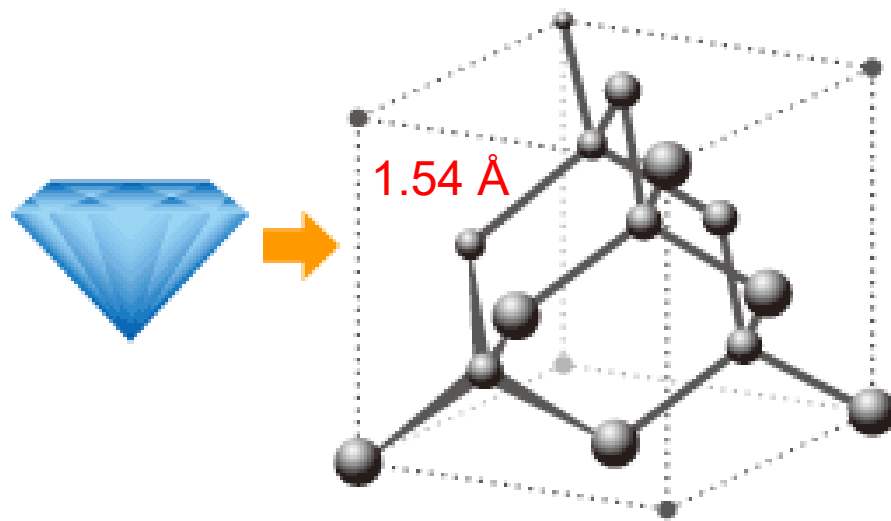
無色透明： 可視光を吸収しない

基底状態と励起状態のエネルギー差が
可視光のエネルギーよりも大きい

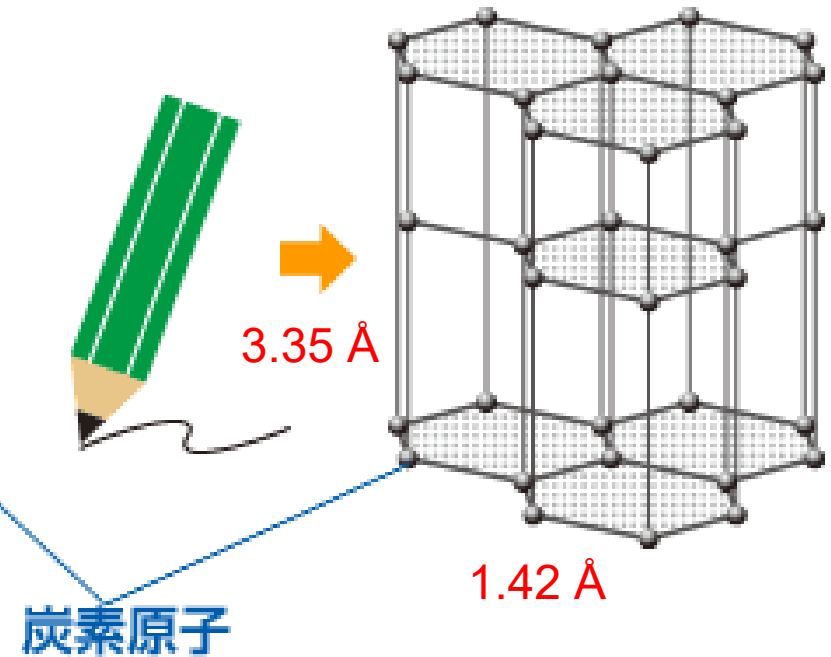
黒： 可視光を吸収

基底状態と励起状態のエネルギー差が
可視光のエネルギーよりも小さい

■ダイヤモンドの結晶構造

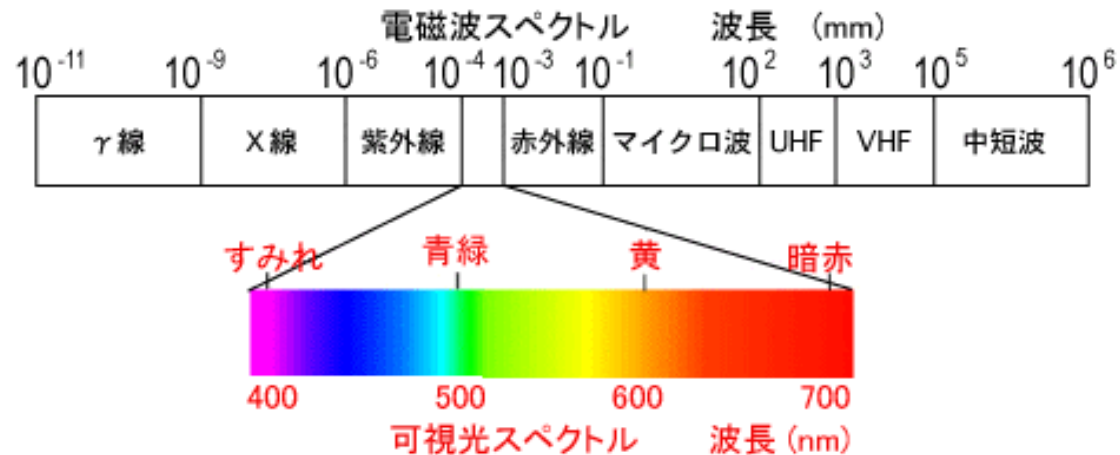


■グラファイトの結晶構造

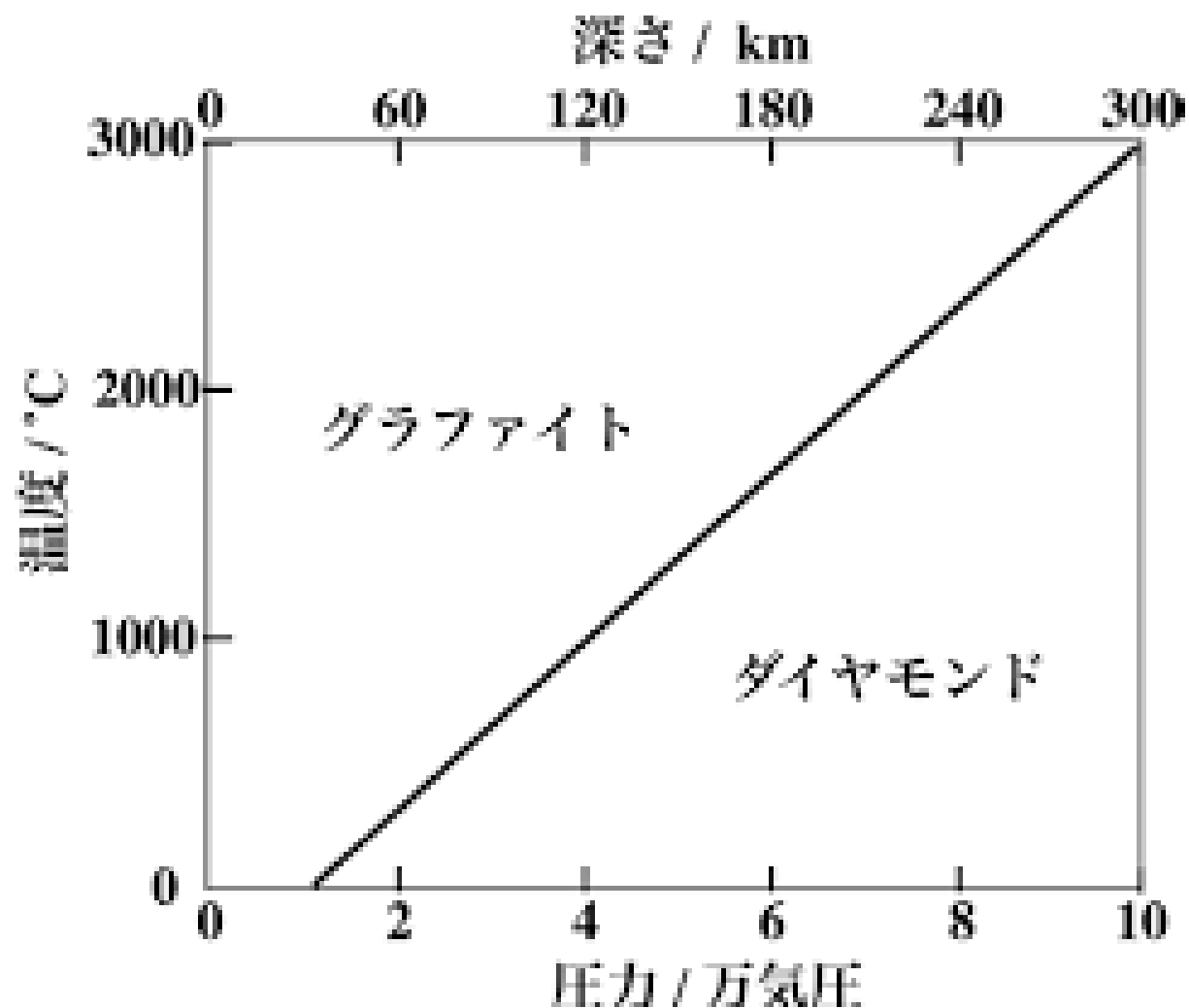


紫外線領域の光を吸収

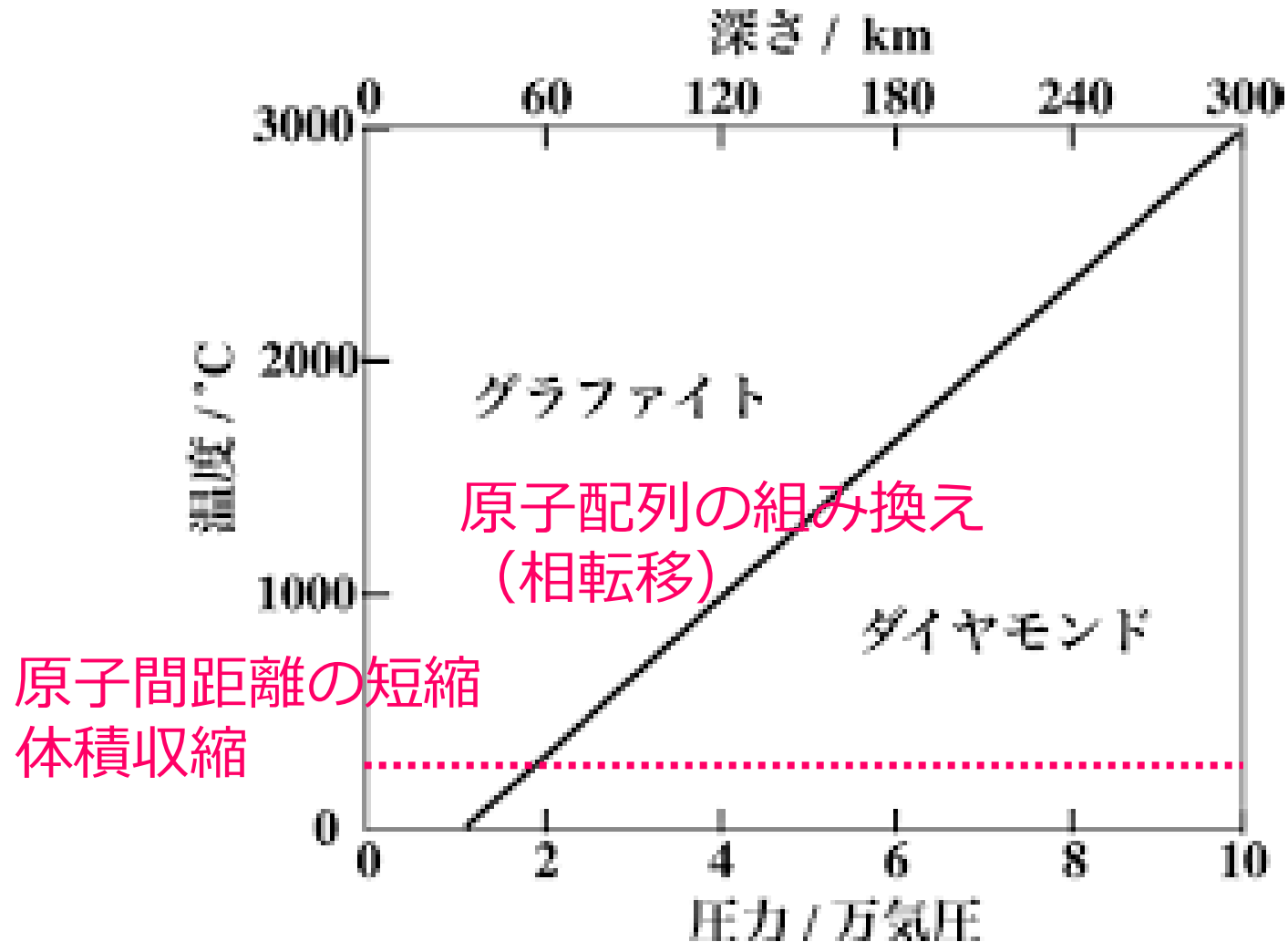
可視光領域の光を吸収



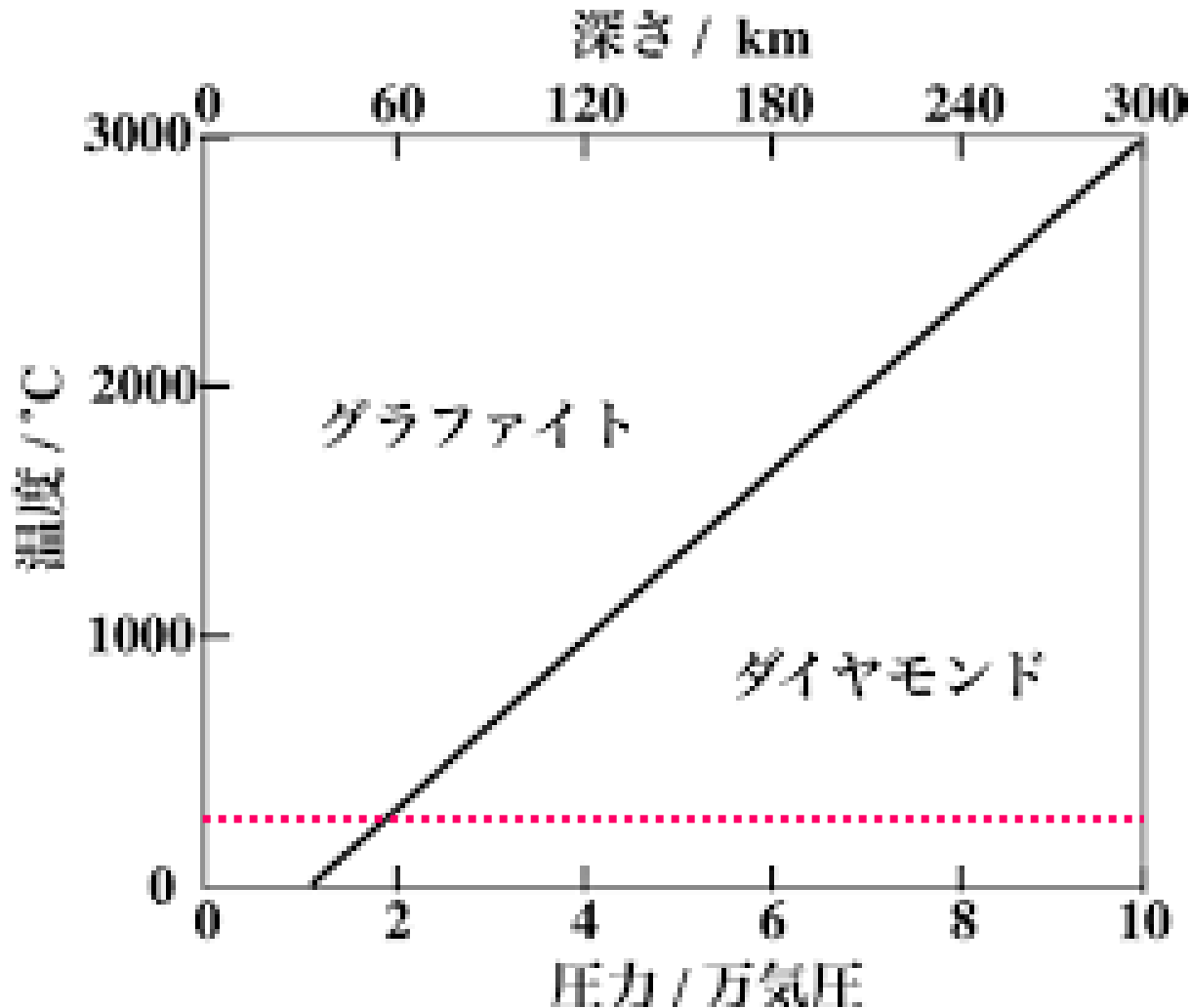
炭素の相図



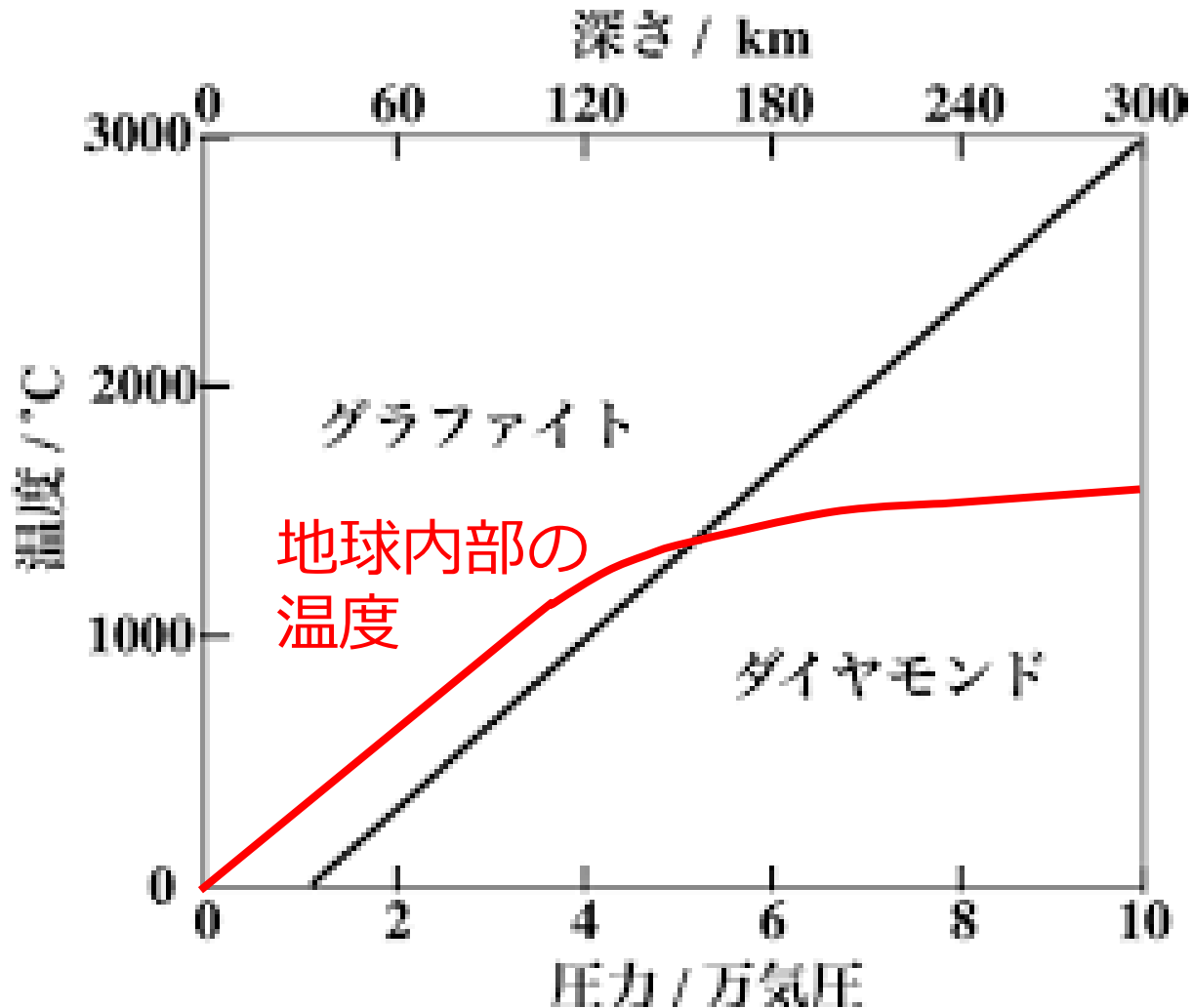
炭素の相図



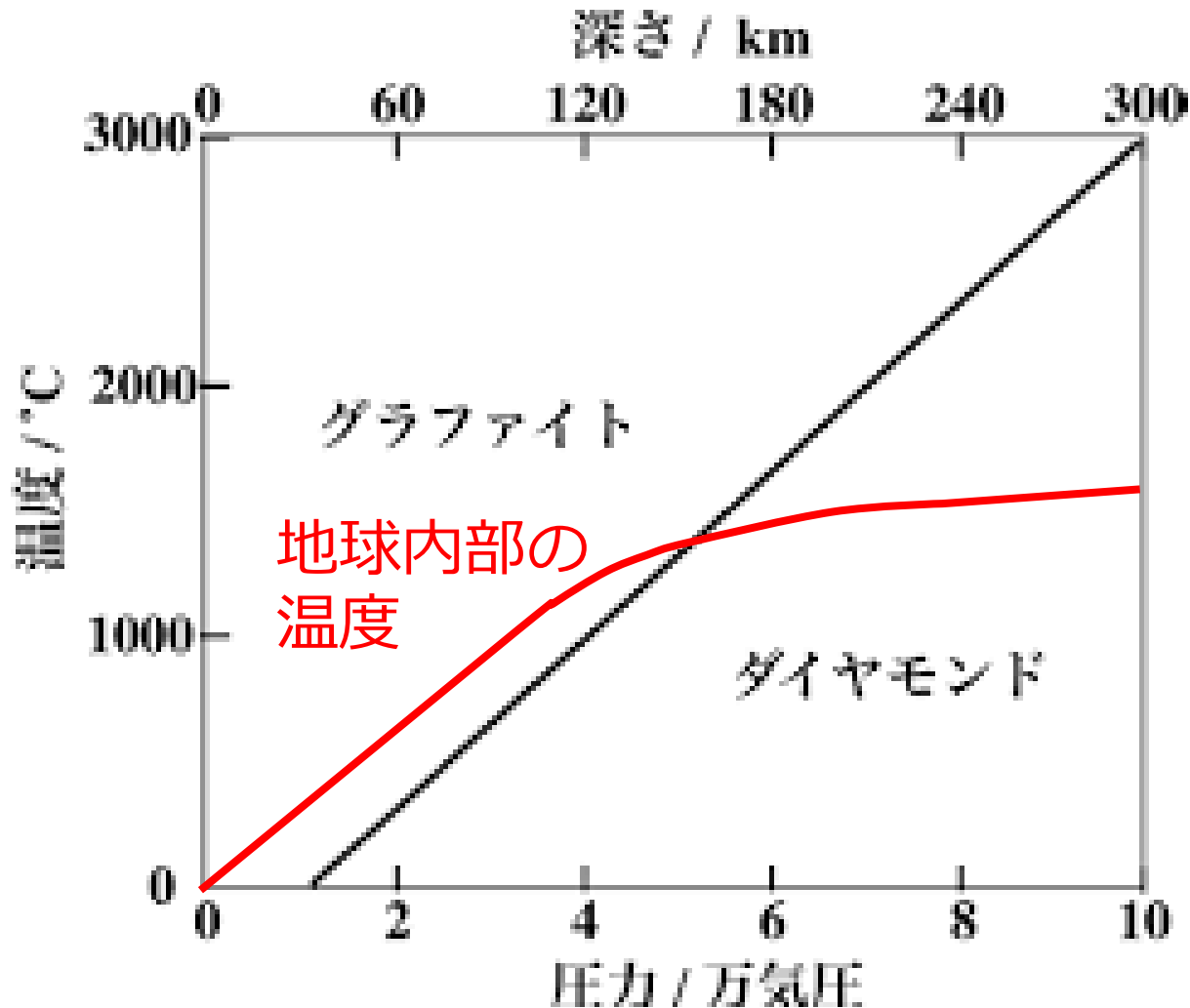
どこで ダイヤモンドが生成されるのか？



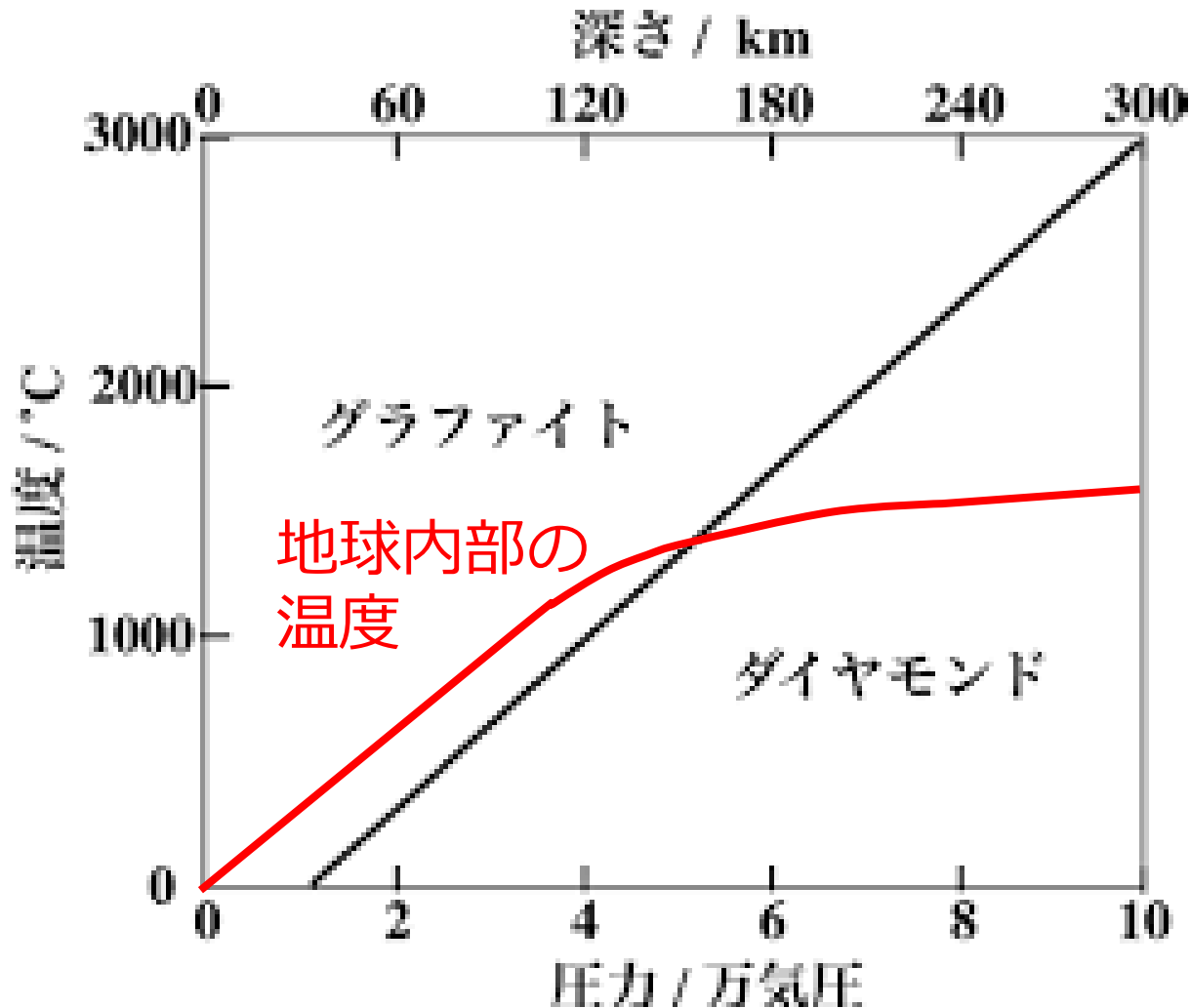
どこで ダイヤモンドが生成されるのか？



なぜダイヤモンドが地上に存在するのか？



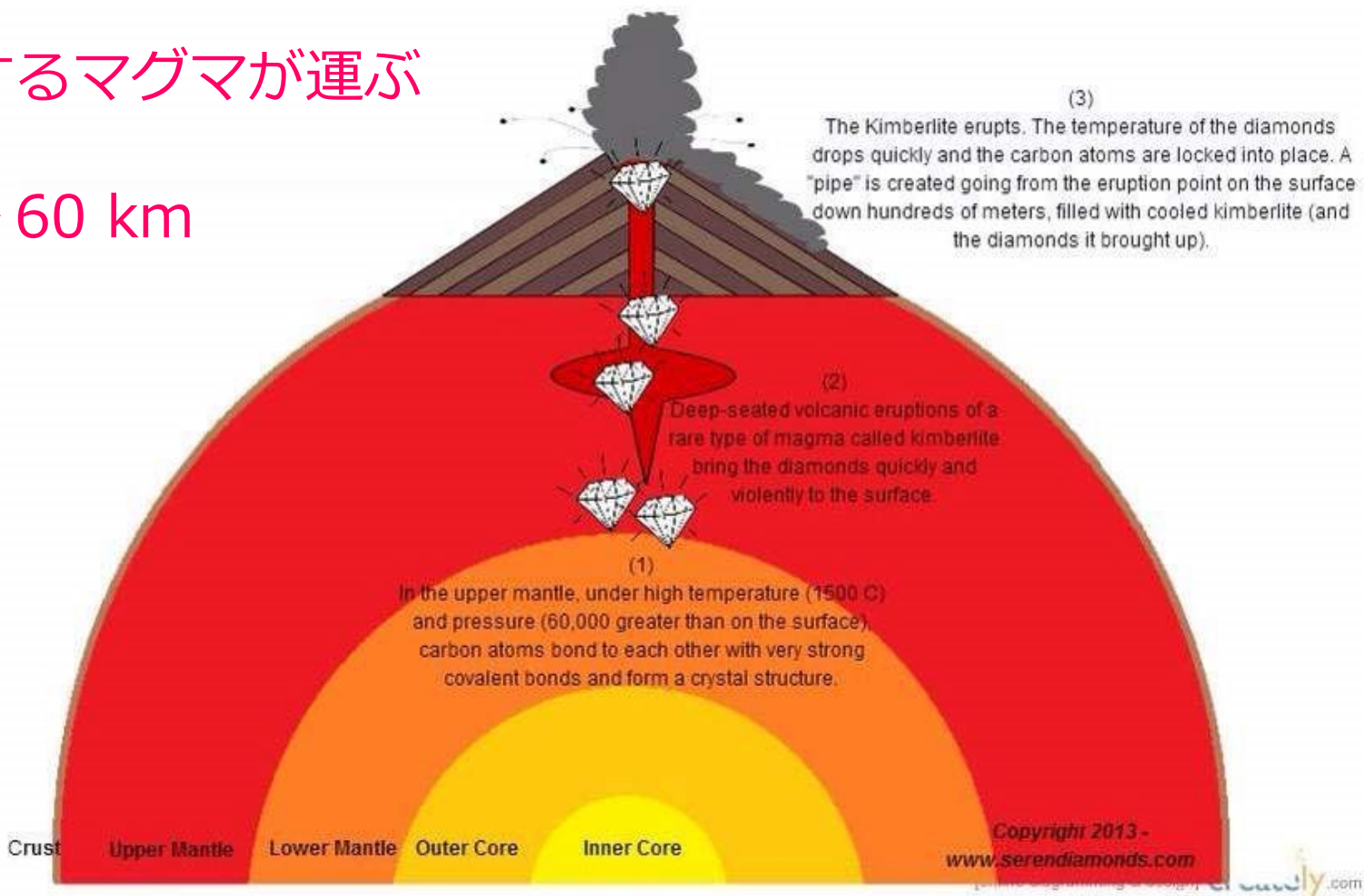
ゆっくり上昇すると，途中で グラファイトに変わってしまう



高速で低温領域に運ぶ必要がある

上昇するマグマが運ぶ

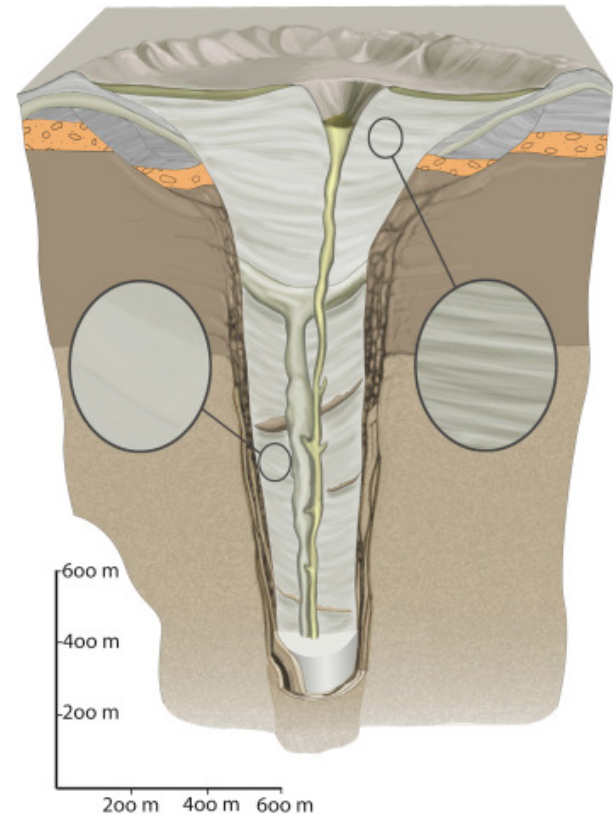
時速 > 60 km



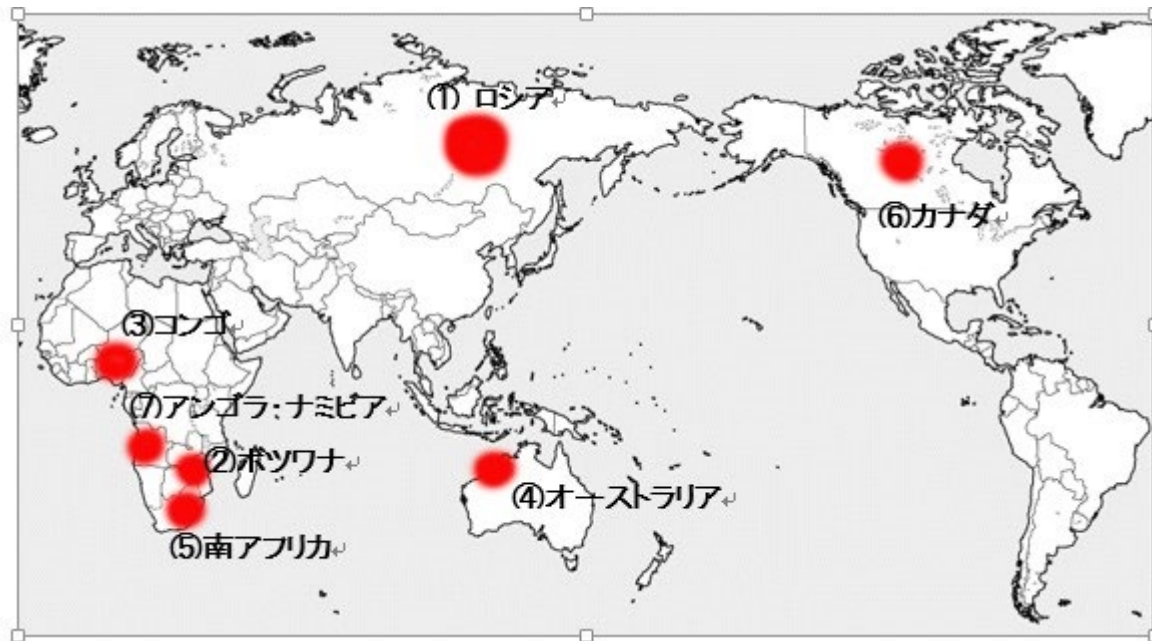
キンバーライト・パイプ



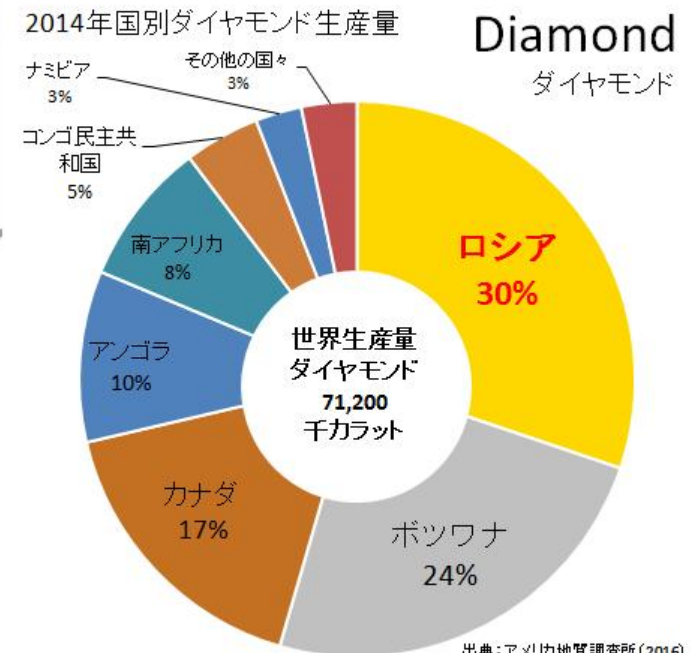
Ekati mine, Canada



ダイヤモンドの産出



5億年以上前から存在する
安定陸塊（クラトン）で
噴出している



ここからの内容

1. 地球内部の圧力
2. 地球内部の地震波速度構造
3. マントルを構成する物質
4. コアを構成する物質

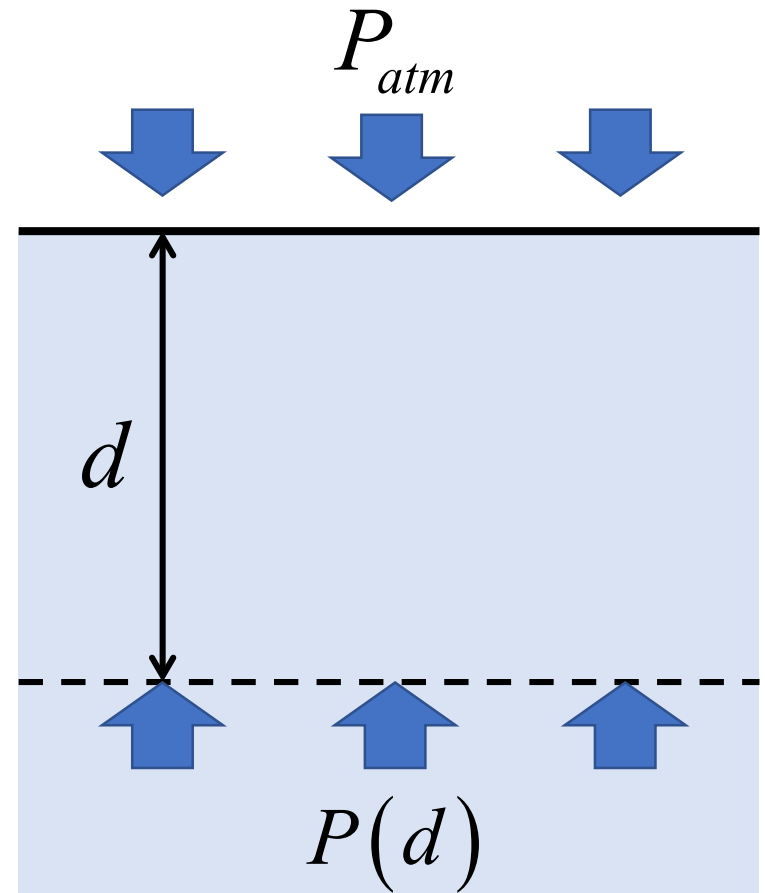
水の中の圧力

圧力：単位面積当たりの力（Pa）

水中での圧力

$$P(d) = P_{atm} + \rho_w g d$$

ρ_w ：水の密度



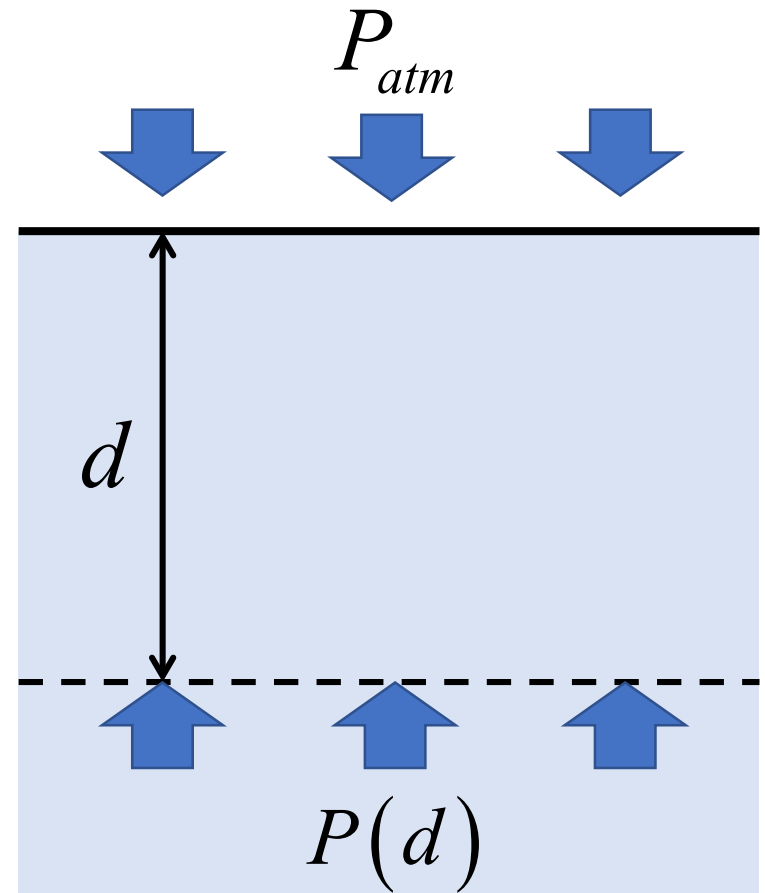
水の中の圧力

水深10 mでの水圧を求めよう。

$$P(d) = P_{atm} + \rho_w g d$$

$$\rho_w = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$g = 10 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

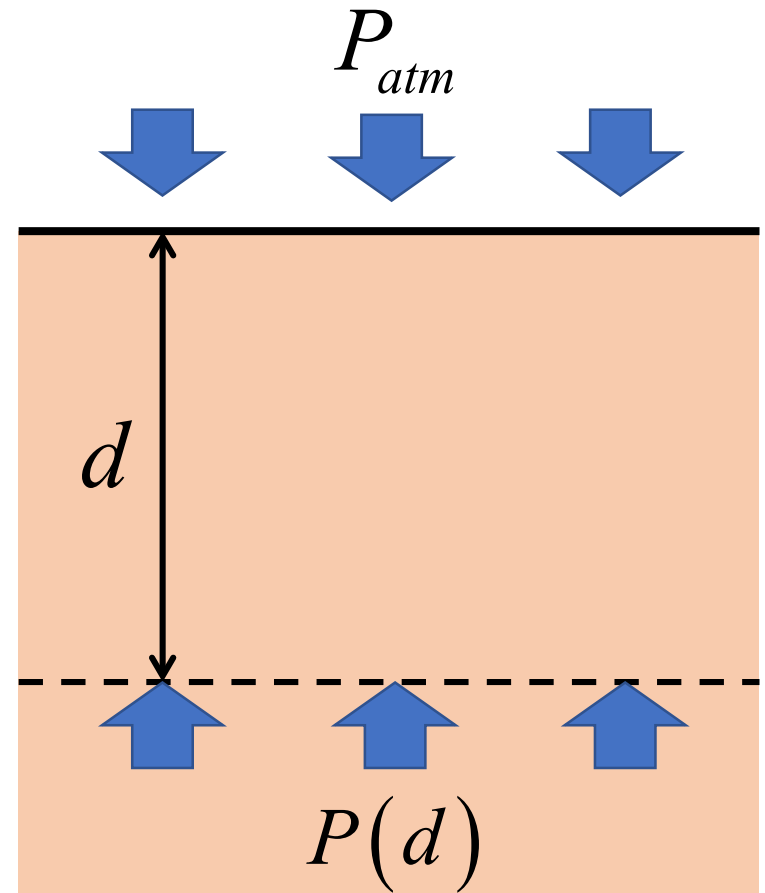


地球内部の圧力

浅いところでは、水中と同様に考える

$$P(d) = P_{atm} + \rho_r g d$$

ρ_r : 岩石の密度

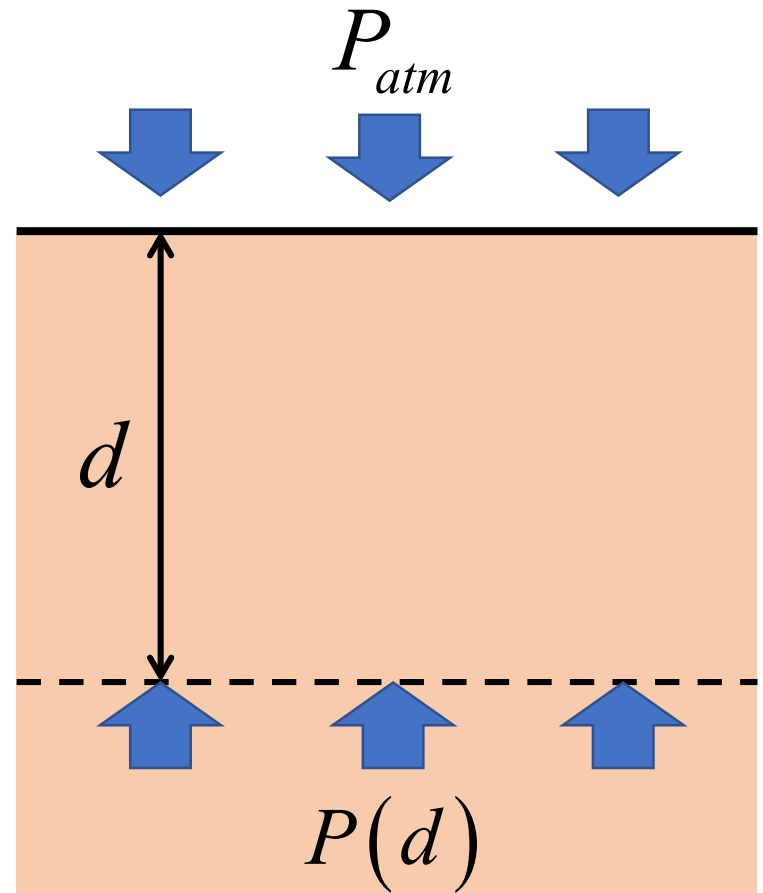


地球内部の圧力

深さ 5 kmでの圧力を求めよう

$$P(d) = P_{atm} + \rho_r g d$$

$$\rho_r = 2500 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$



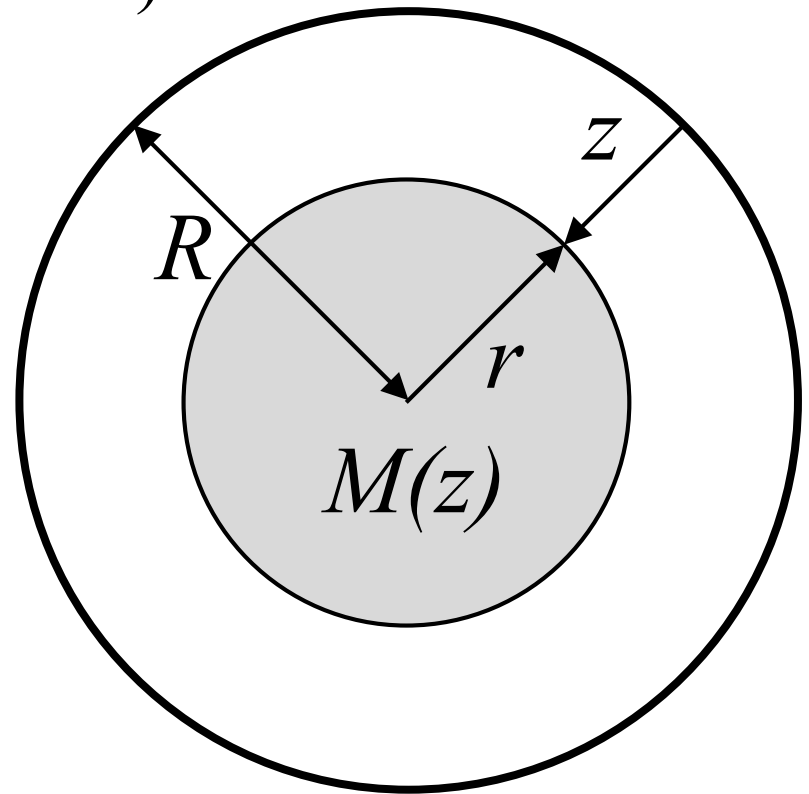
深さ 5 kmでの圧力

$$\begin{aligned} P &= P_{atm} + \rho_r g d \\ &= 1.013 \times 10^5 + (2.5 \times 10^3) \times 10 \times (5 \times 10^3) \\ &\sim 1.25 \times 10^8 = 125 \times 10^6 \\ &\Rightarrow 125 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

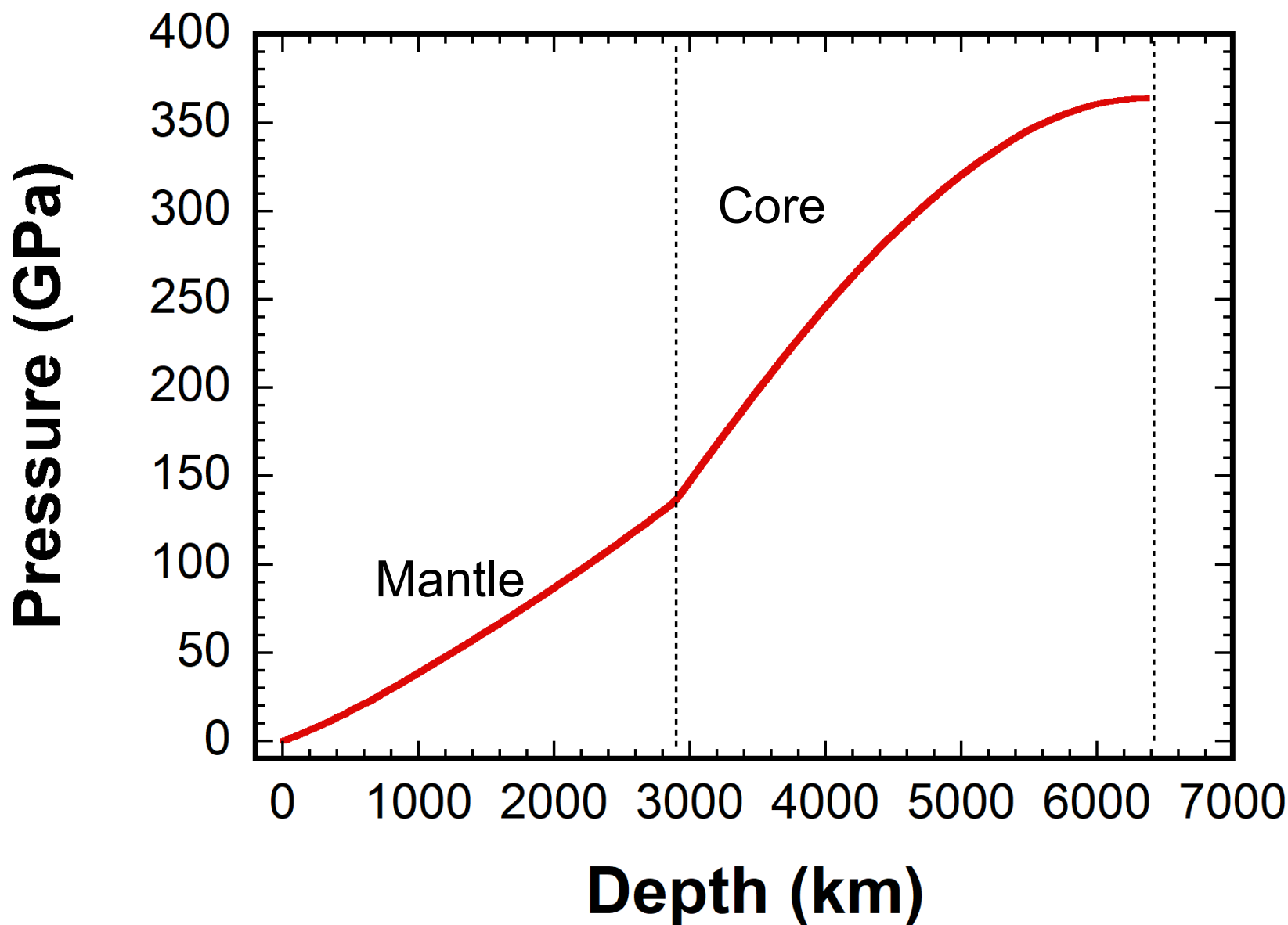
地球内部の圧力

$$\frac{dP}{dz} = \rho(z) g(z) = \rho(z) G \frac{M(z)}{(R-z)^2}$$

$$P(z) = P_{atm} + \int_0^z \rho(z') G \frac{M(z')}{(R-z')^2} dz'$$



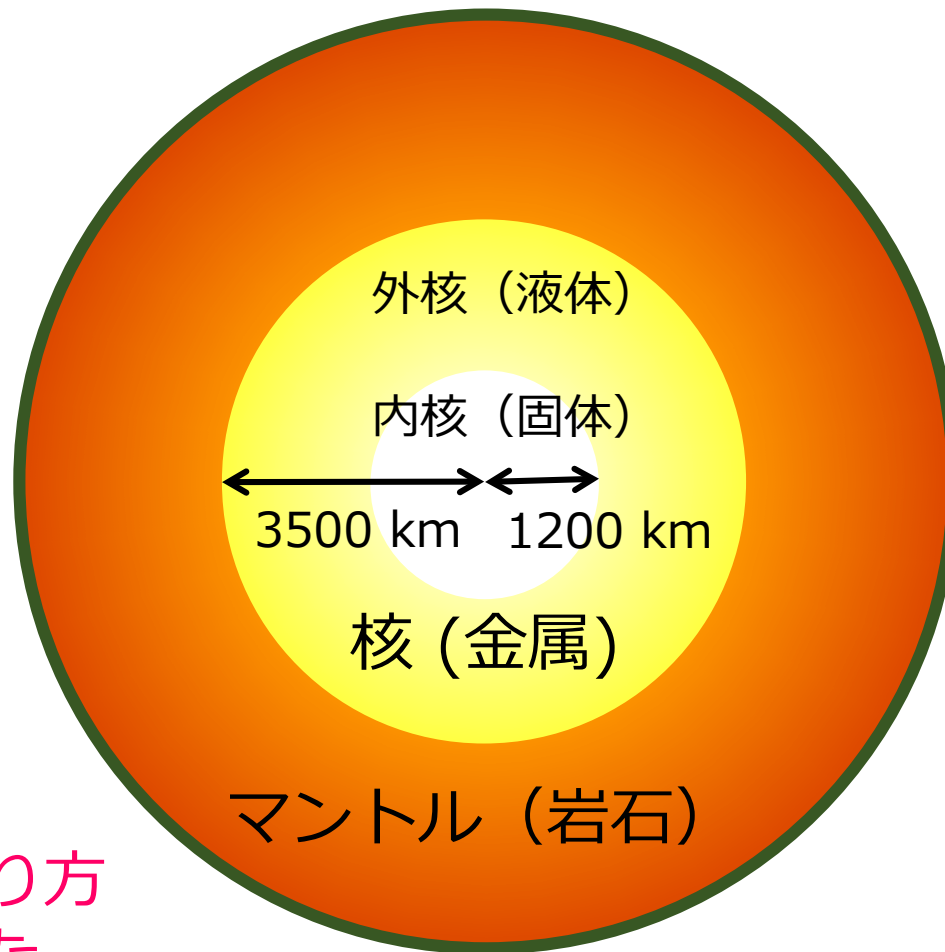
地球内部の圧力



地球の内部構造

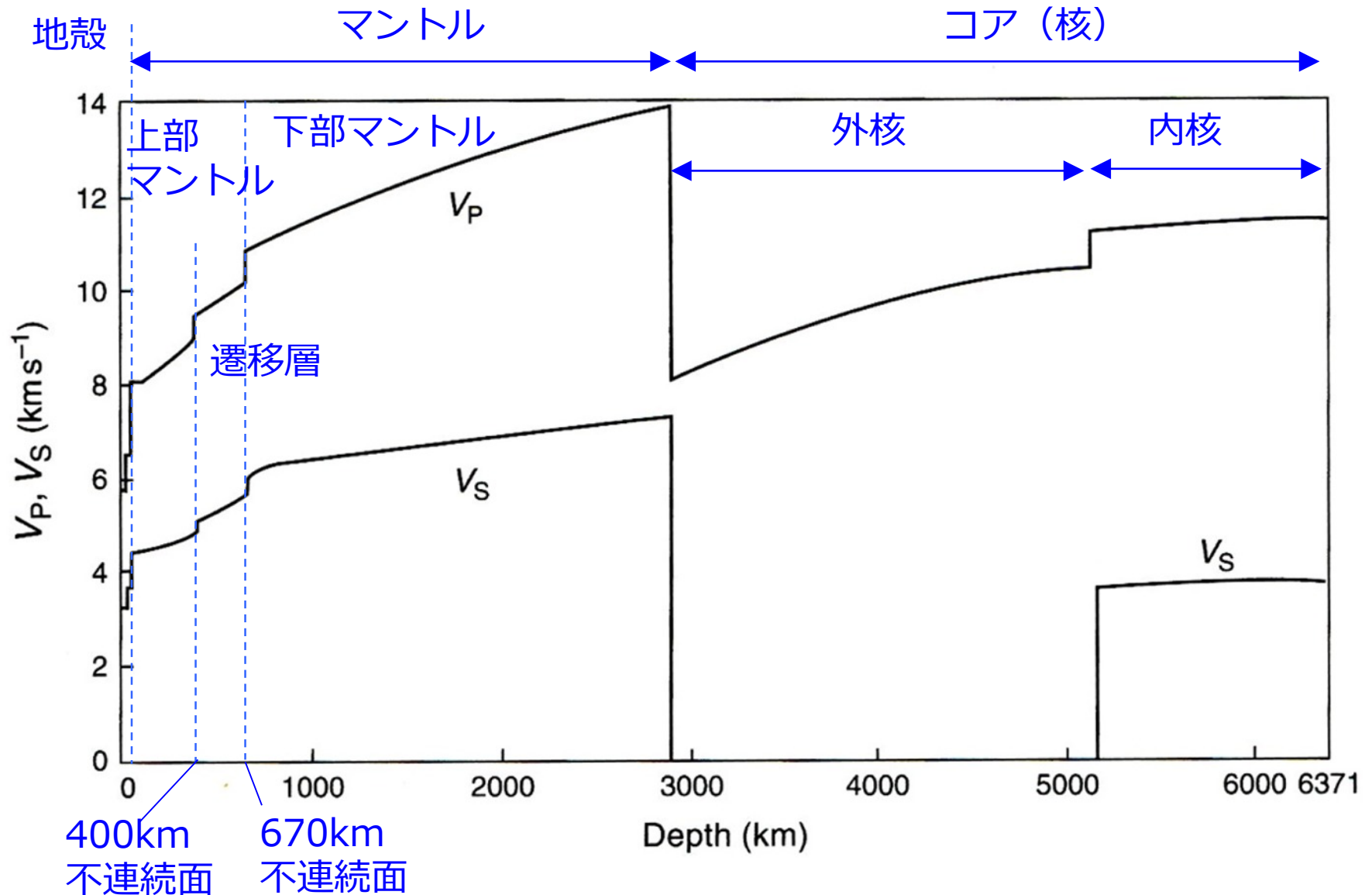
半径 : 6400 km

地殻 (岩石) 厚さ : 10~100 km

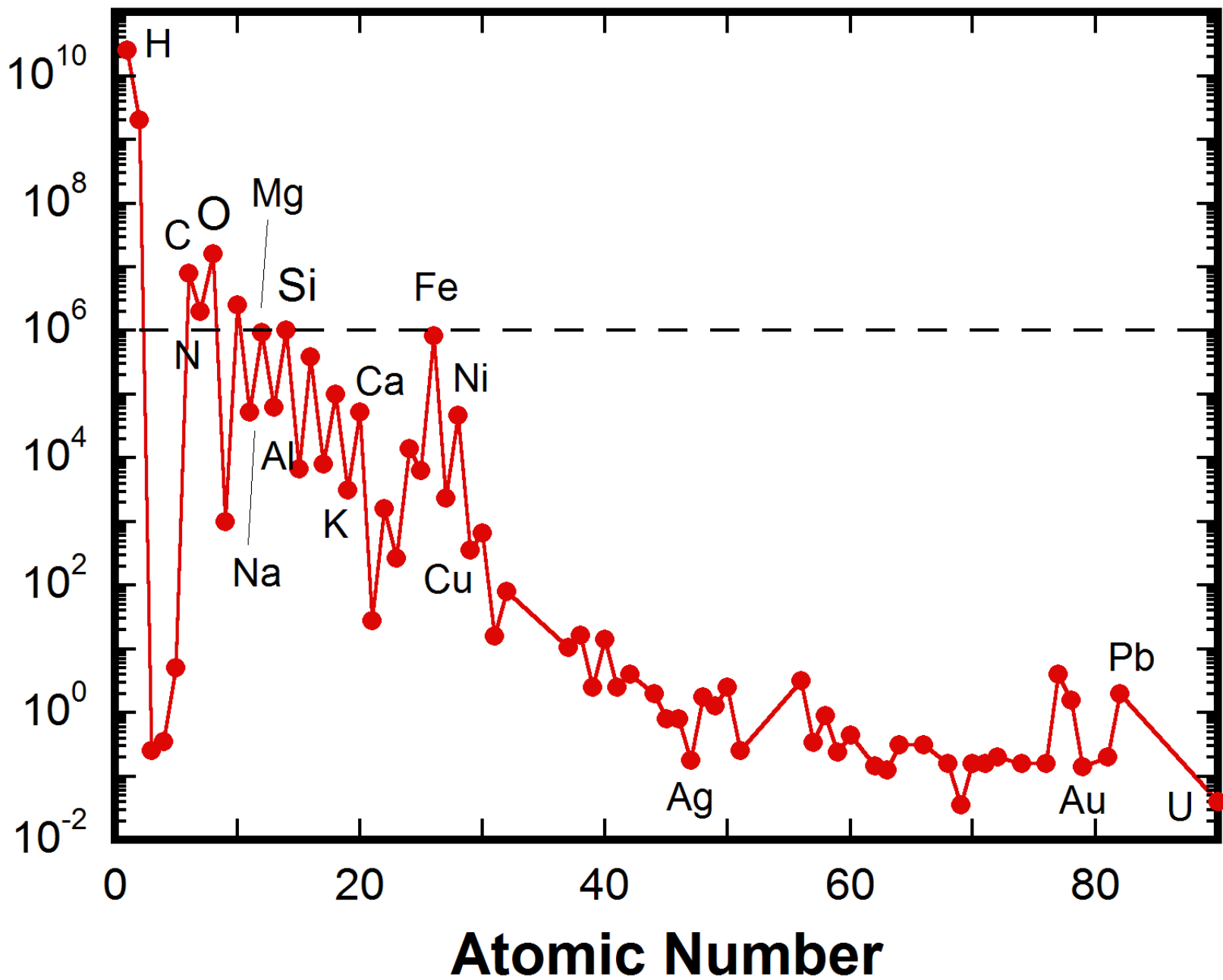


内部構造は
地震波の伝わり方
から推定された

地球内部の地震波速度 (球対称モデル)

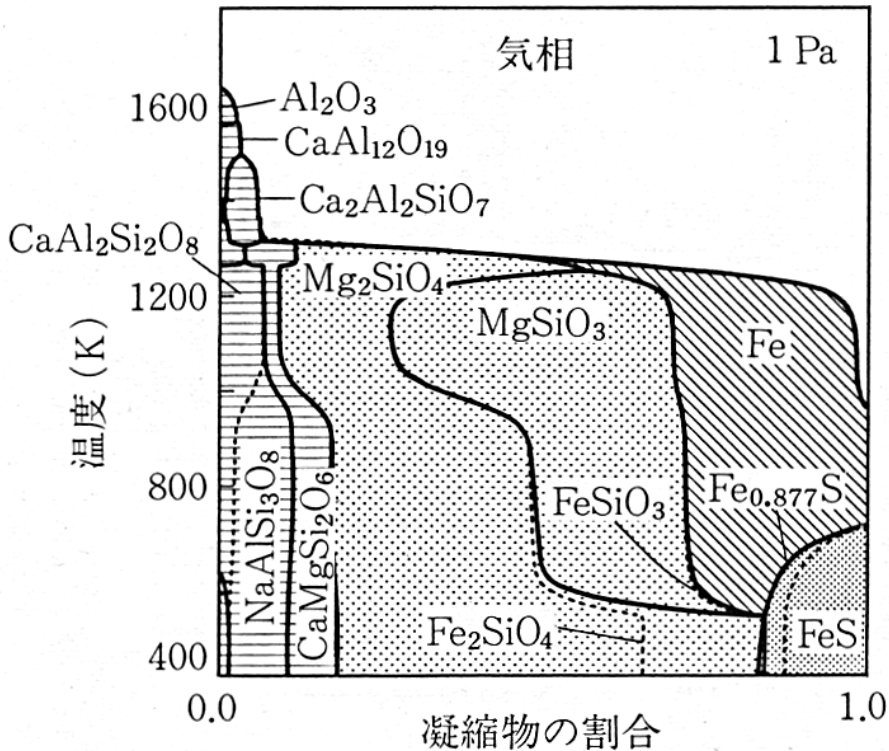
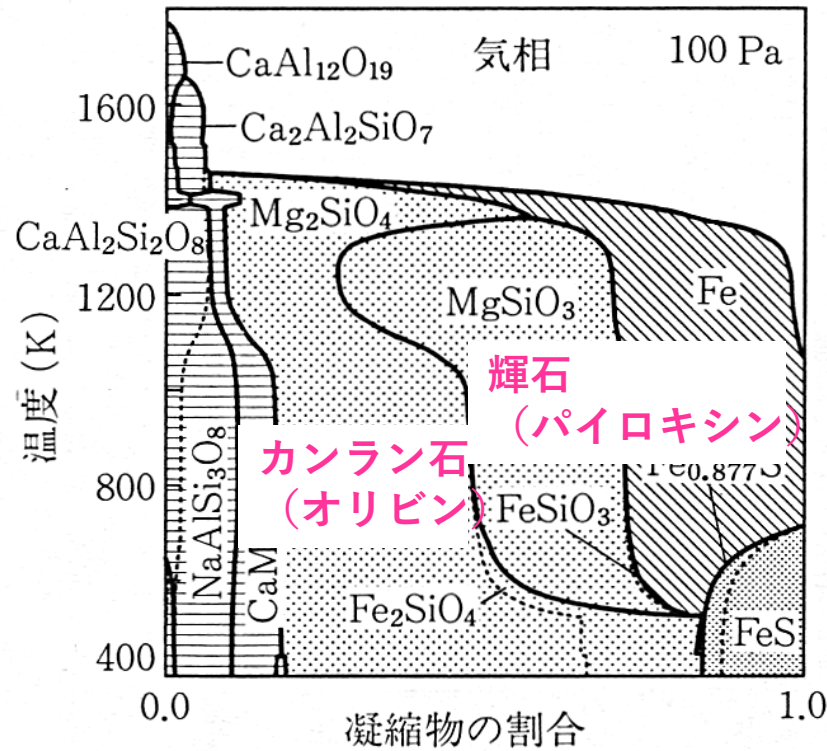


Relative Abundance (Si=10⁶)



太陽系星雲の温度と凝縮物の割合

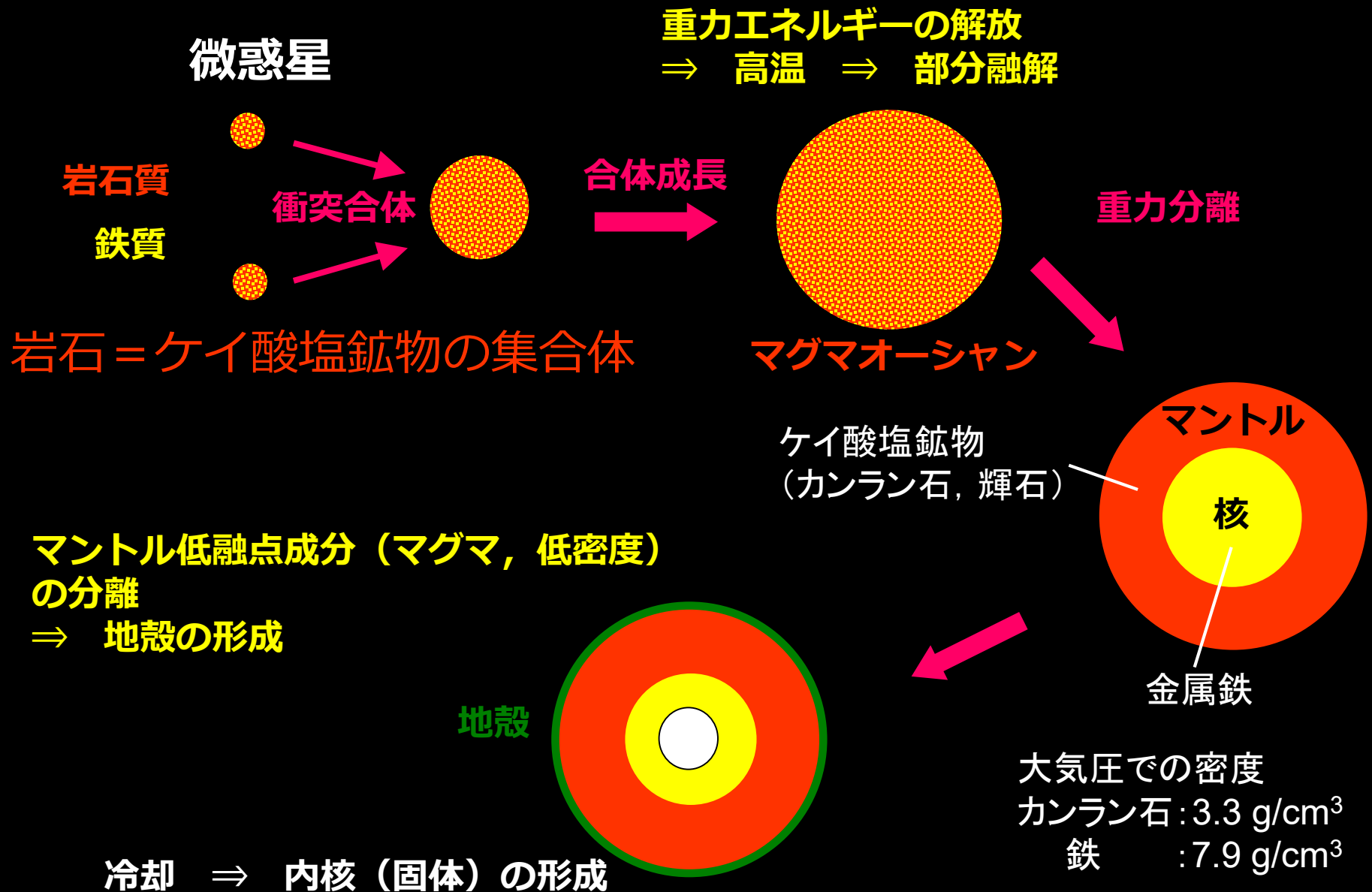
Wood & Hashimoto (1993)



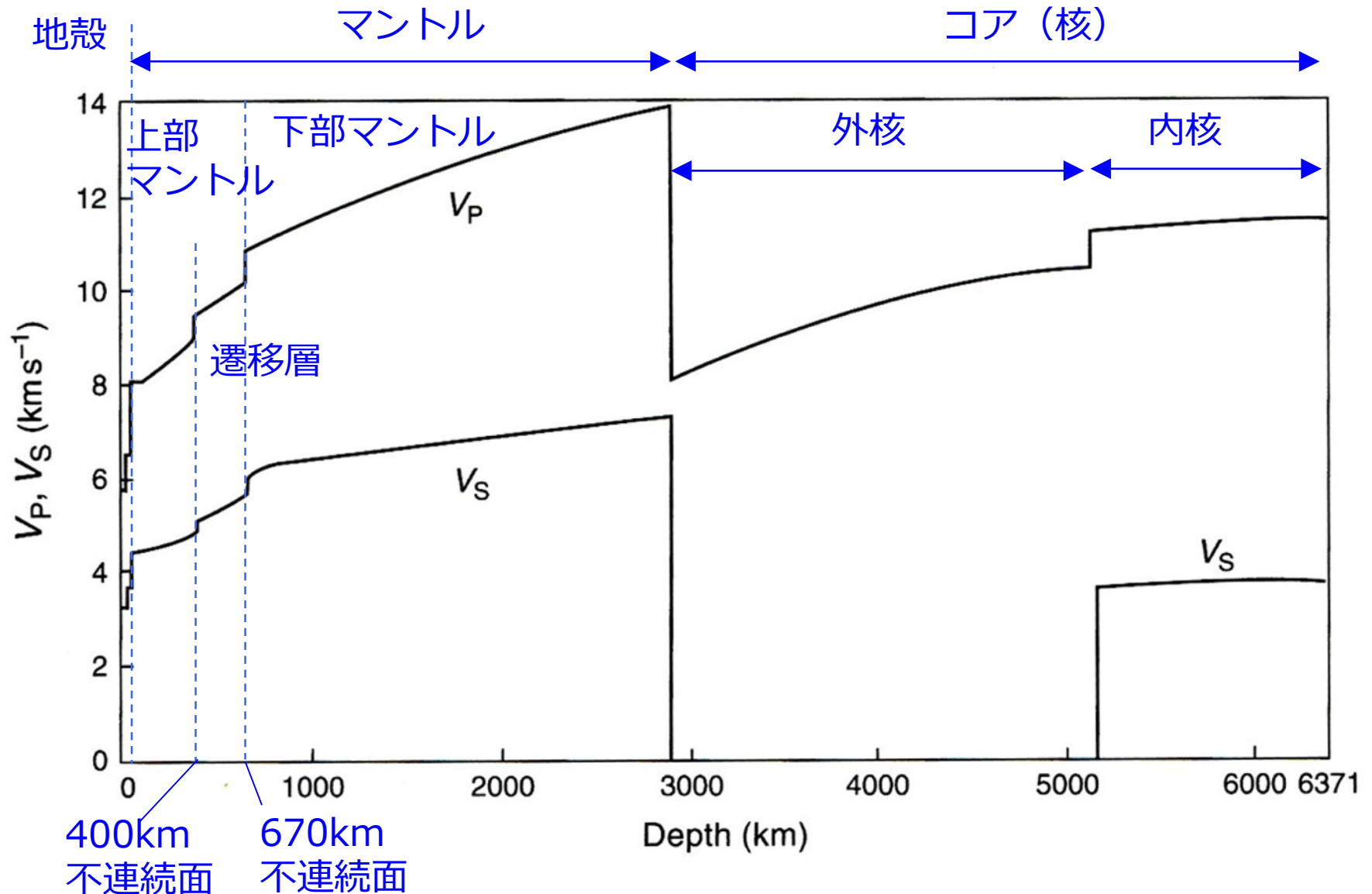
- 気相
- ▨ Ca,Alを含む鉱物
- ▤ 主なケイ酸塩 (オリビンとパイロキシン)
- ▧ 金属鉄
- ▩ 硫化物

鉱物 = 天然に存在する固体の相 (マクロに一樣)

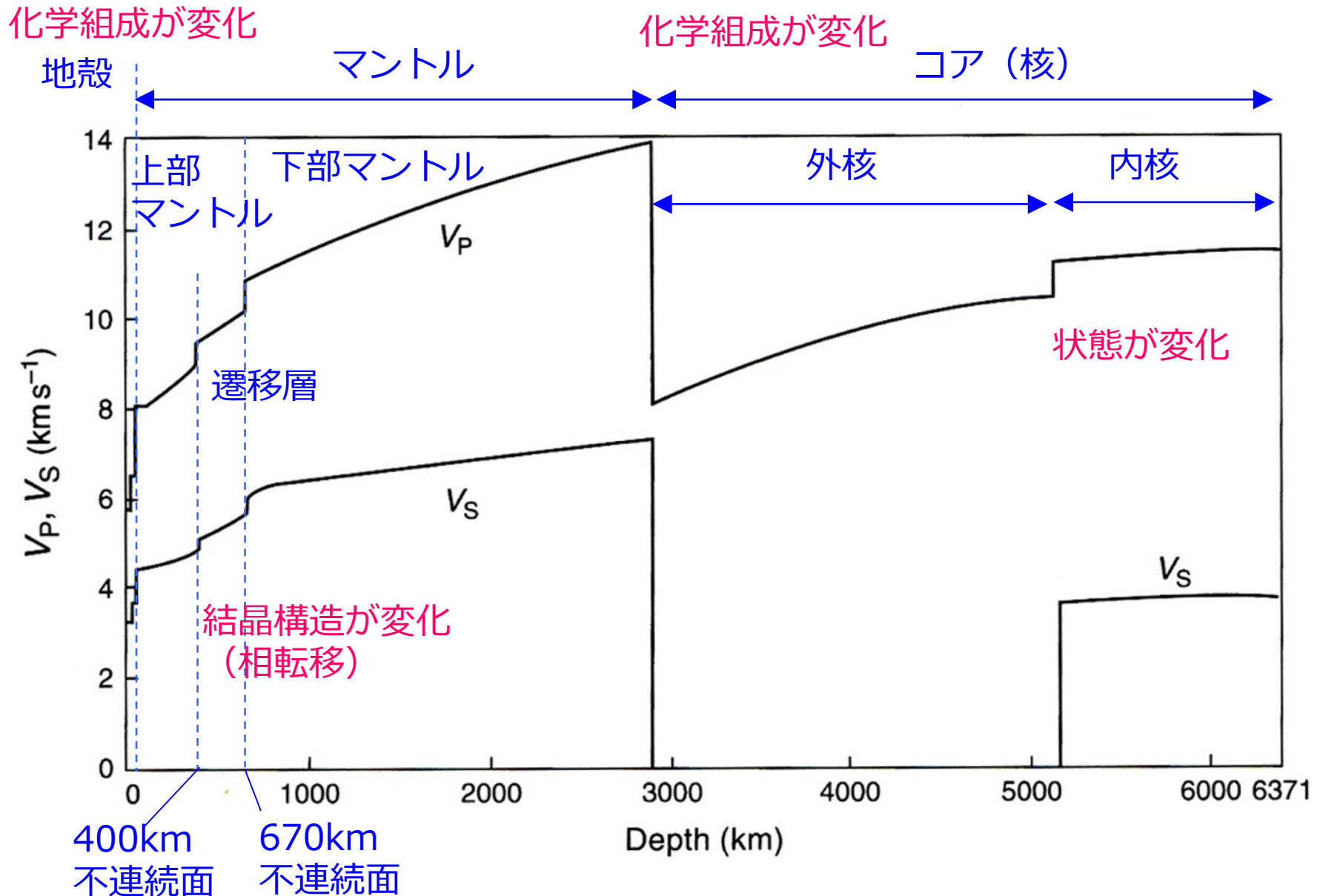
層構造の形成



地球内部の地震波速度（球対称モデル）



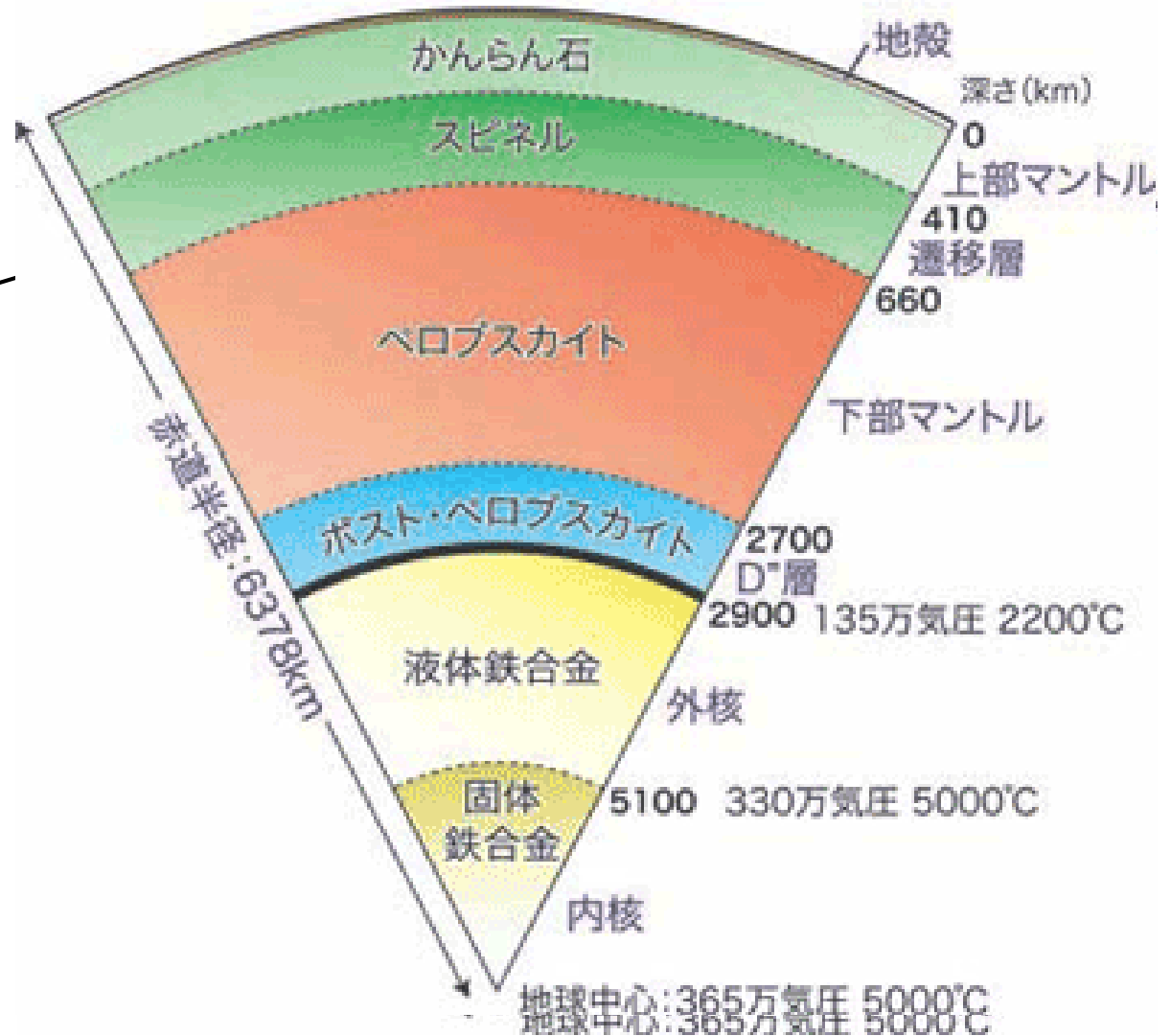
地球内部の地震波速度（球対称モデル）



地球内部の層構造

主要な鉱物

ウォズリアイト
リングウッドイト



どのようにして調べるか？

- 高温高圧実験

マルチアンビル装置

ダイヤモンド・アンビルセル

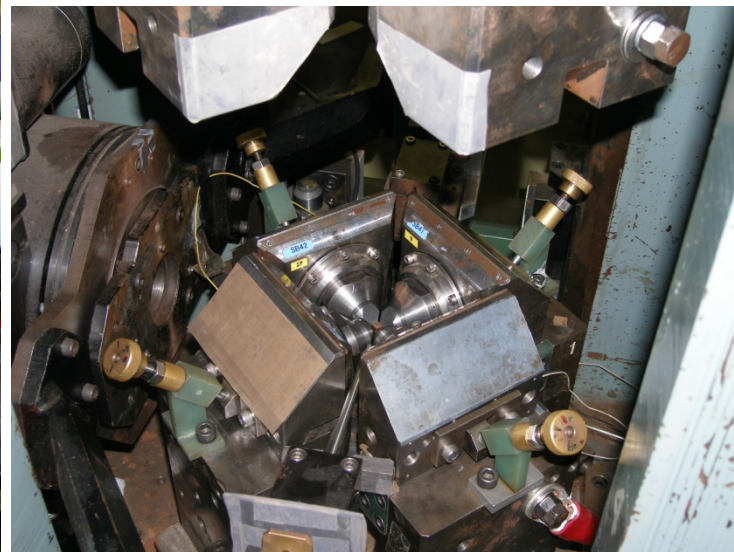
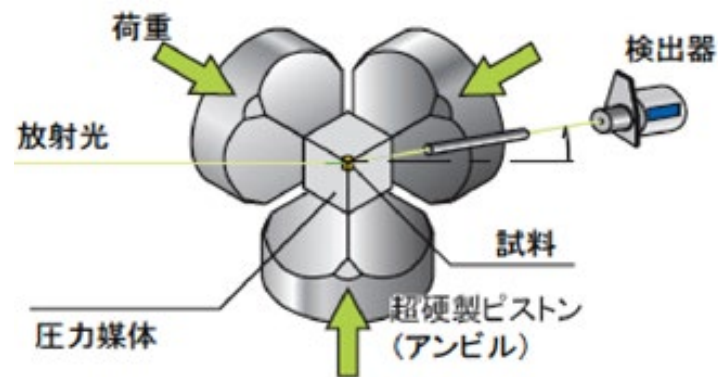
- X線回折

放射光実験施設

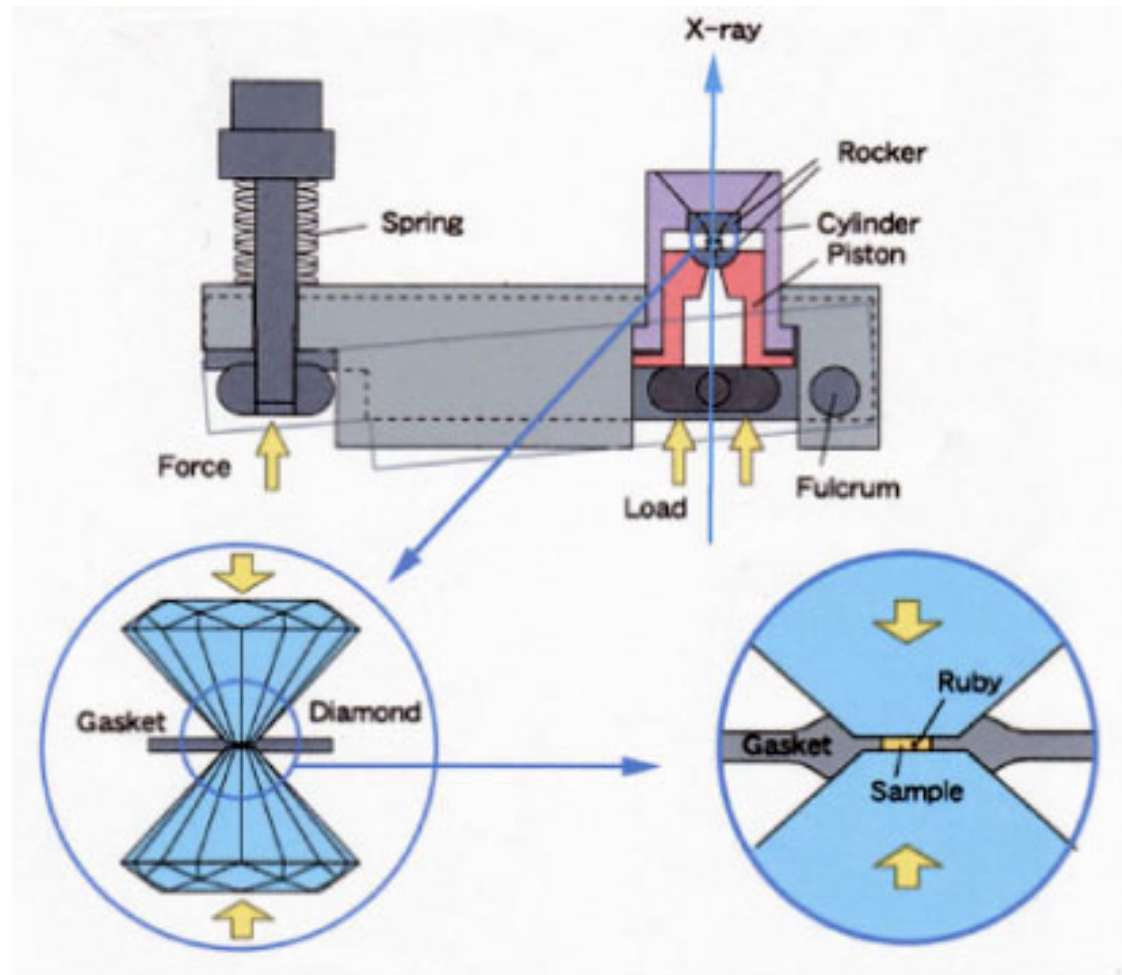
KEK（つくば研究学園都市）

Spring-8（播磨科学公園都市）

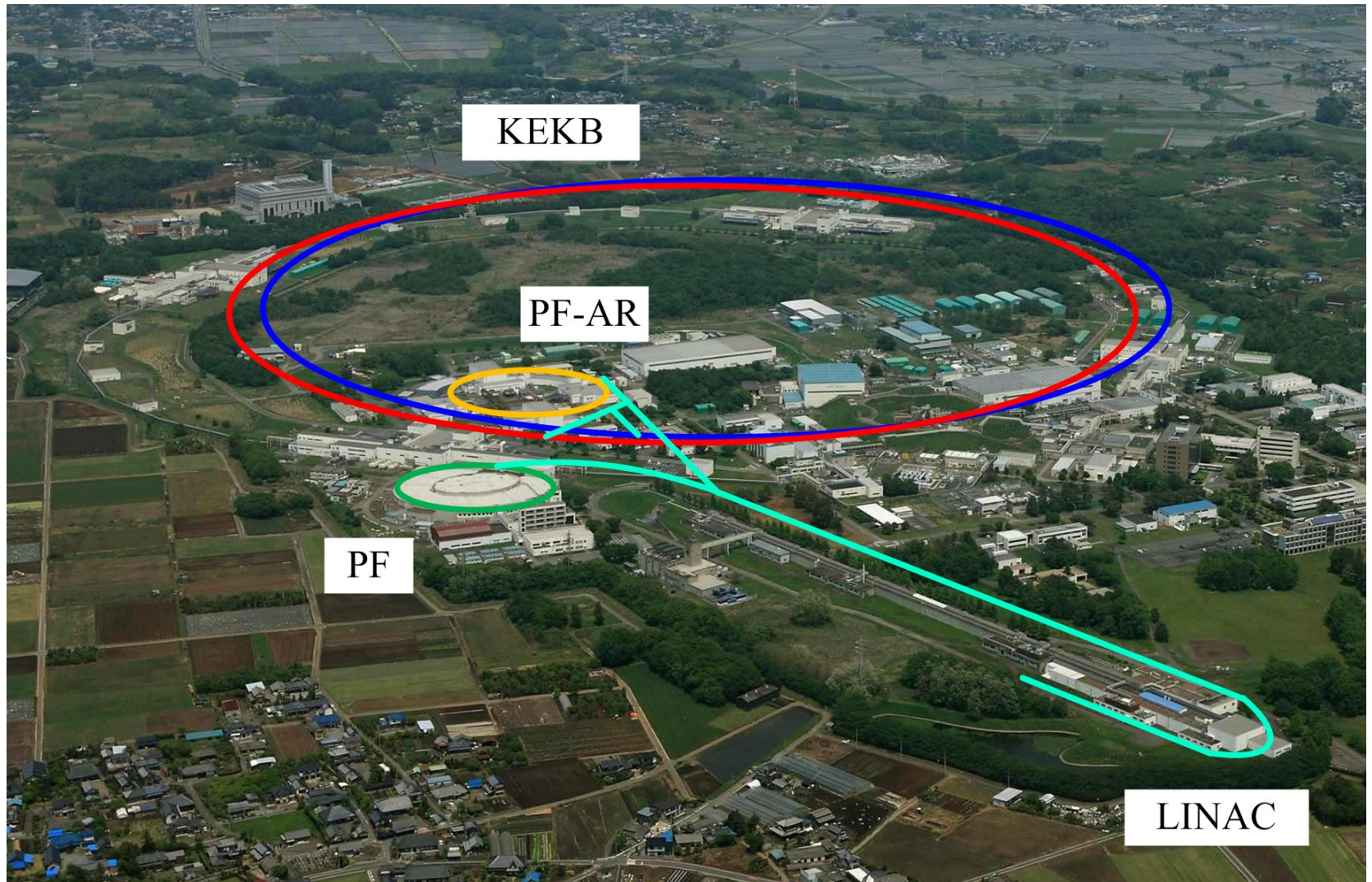
マルチアンビル装置 KEK, PF-AR

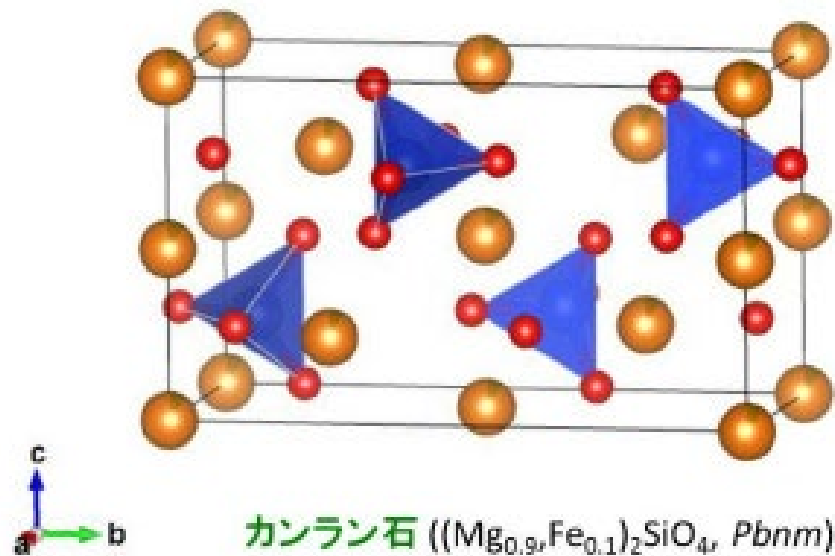


ダイヤモンド・アンビルセル

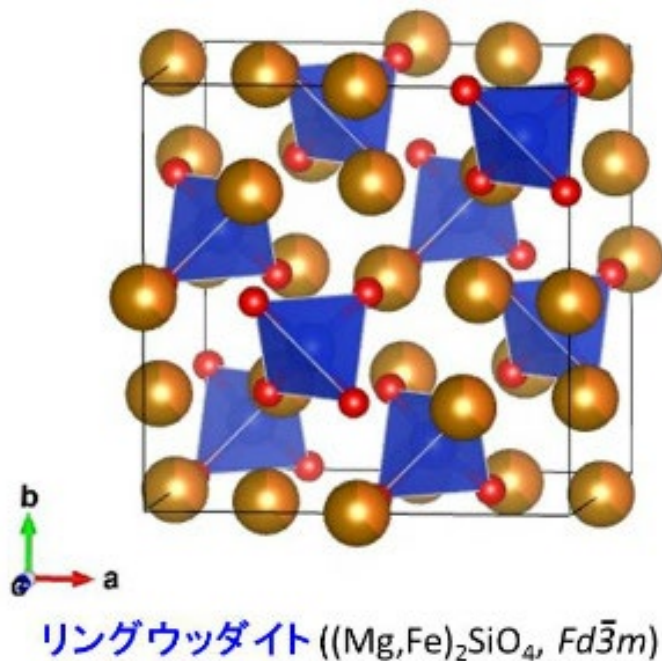


高エネルギー—加速器研究機構 KEK



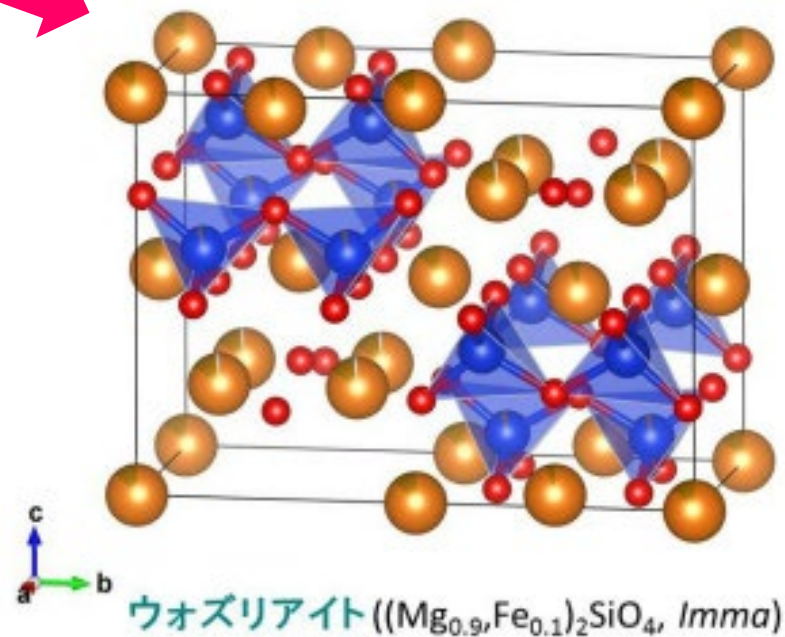


スピネル構造



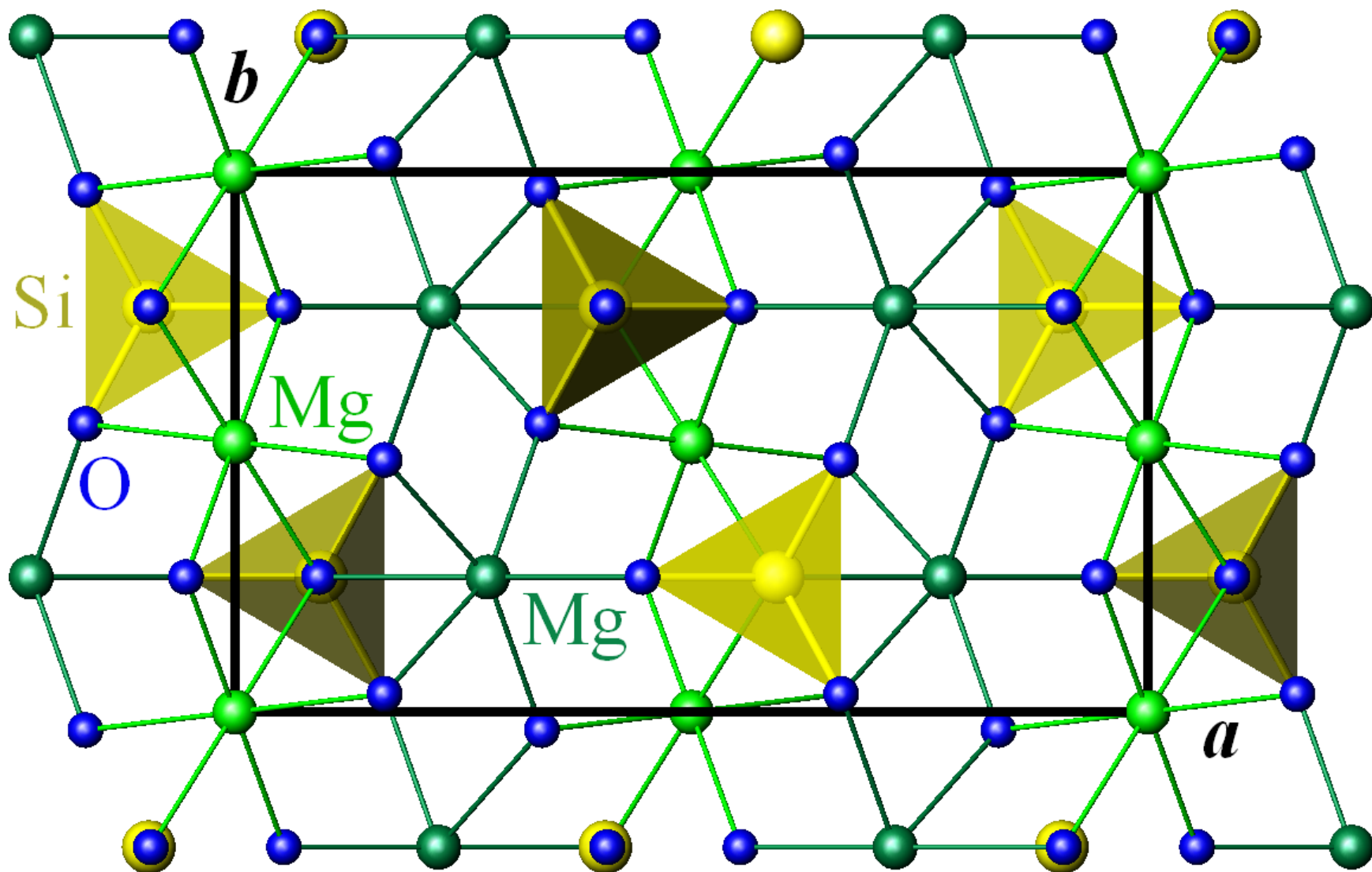
密度 8 % 増加

変形スピネル構造

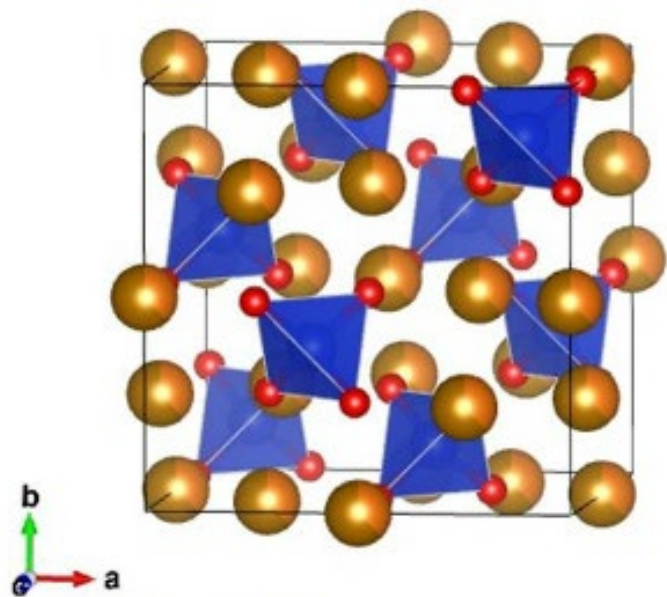


密度 2 % 増加

カンラン石の結晶構造



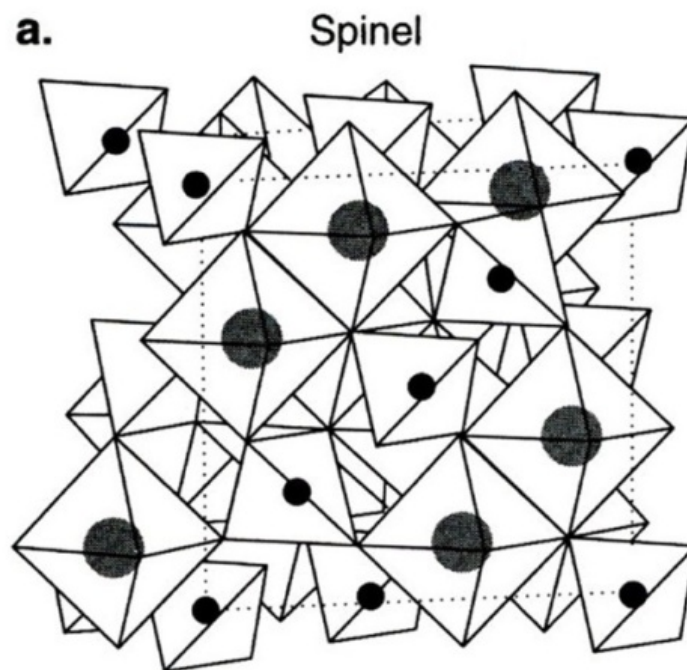
スピネル構造

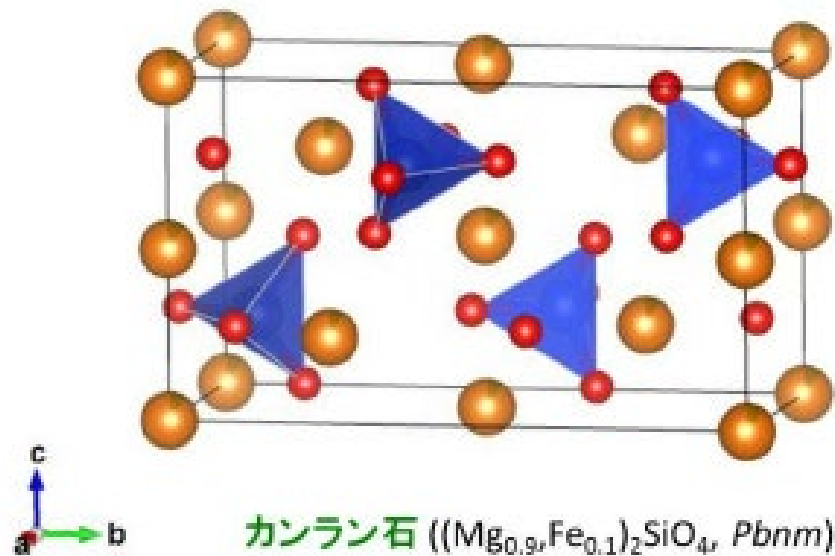


リングウッダイト ((Mg,Fe)₂SiO₄, $Fd\bar{3}m$)

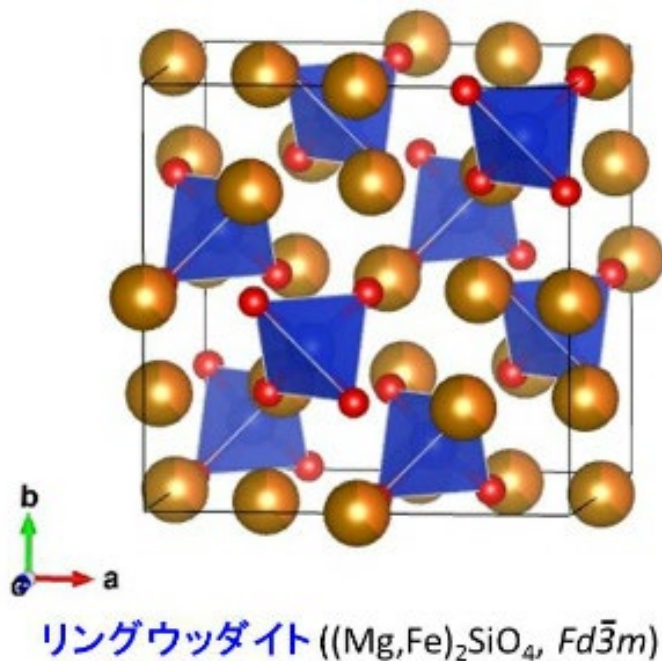
SiO₄ 四面体

MgO₆ 八面体



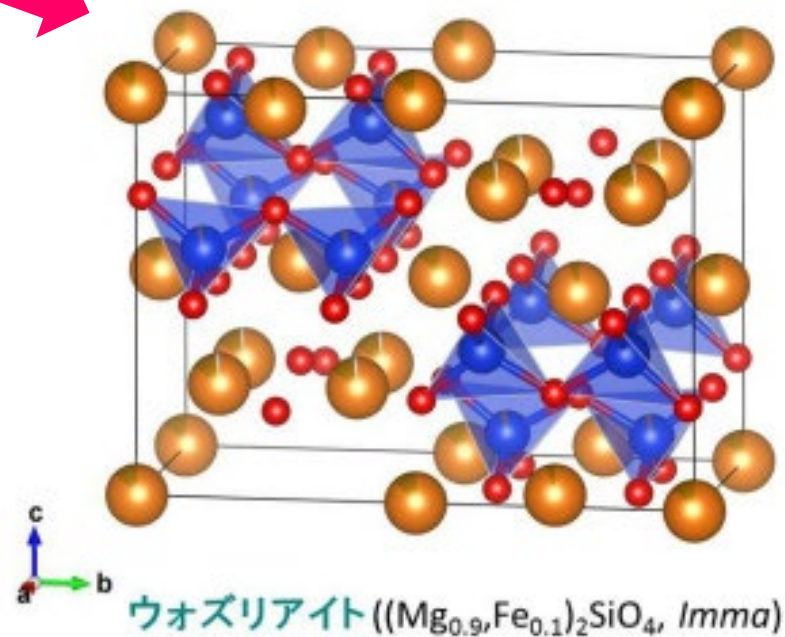


スピネル構造



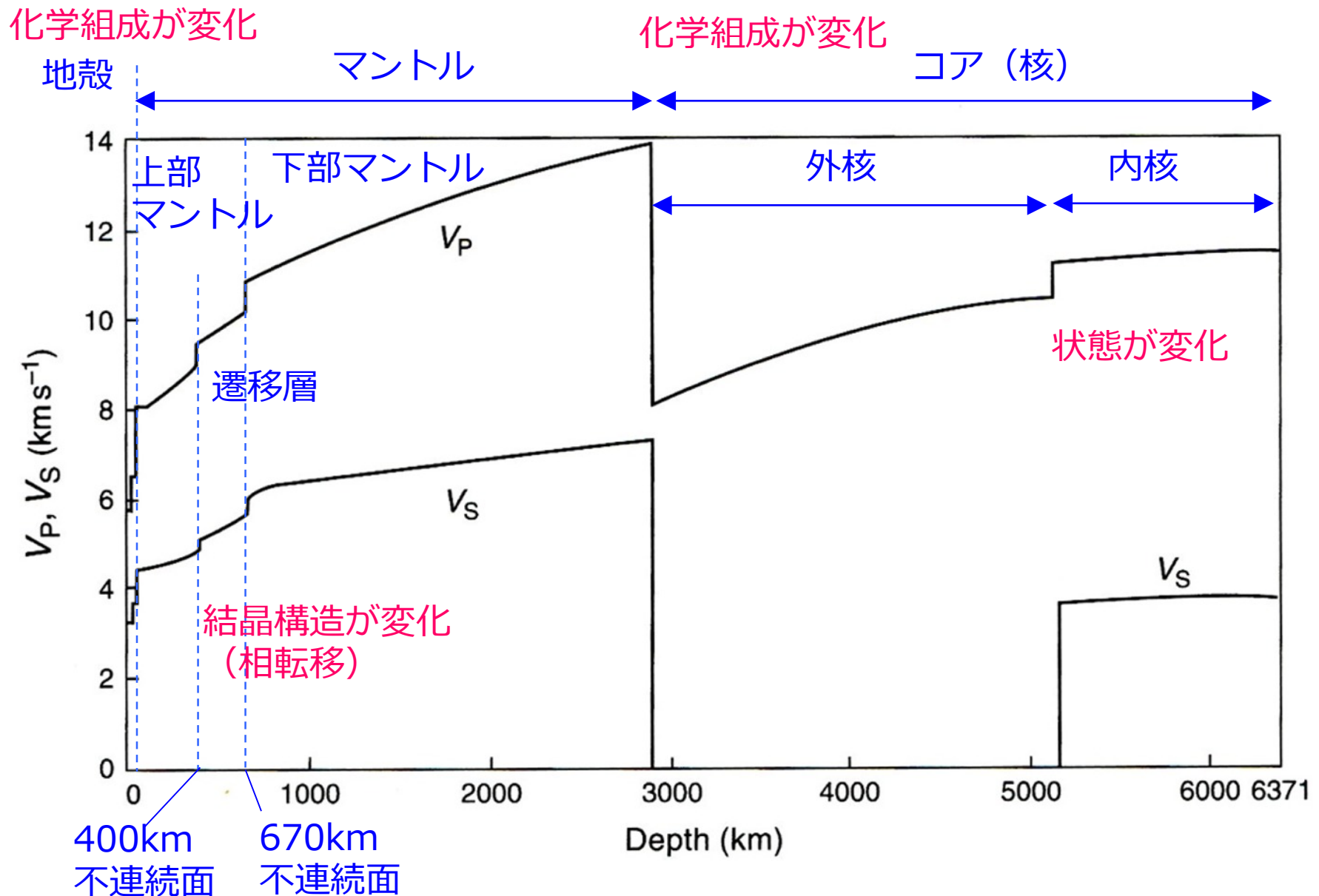
密度 8 % 増加

変形スピネル構造

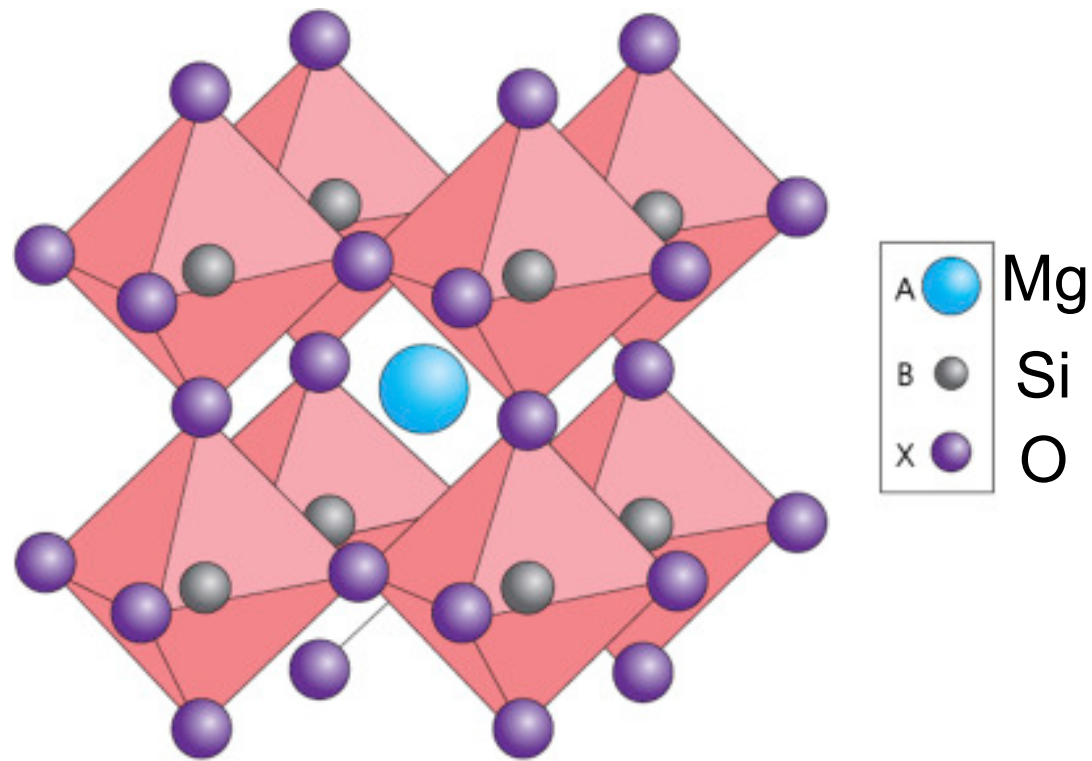


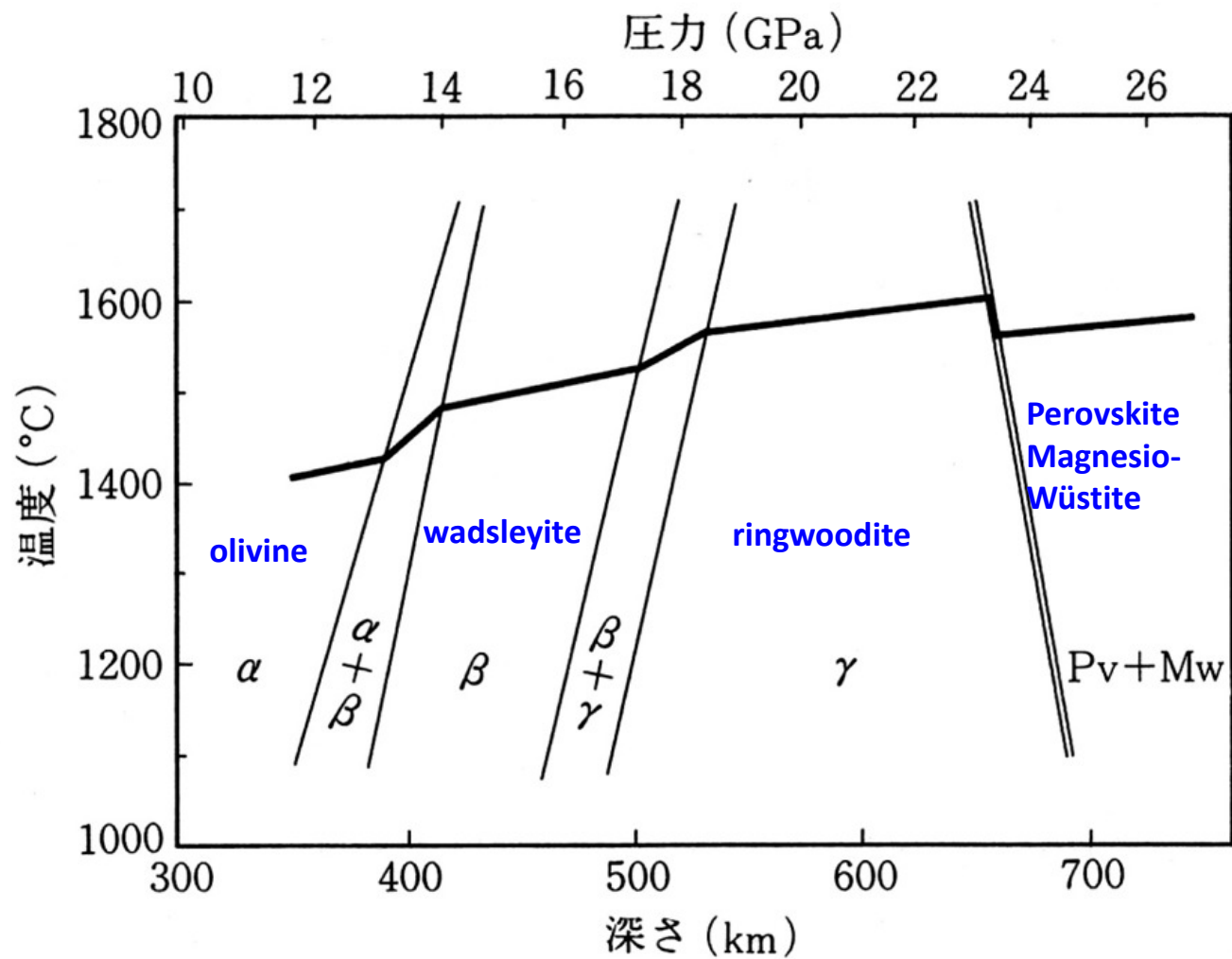
密度 2 % 増加

地球内部の地震波速度（球対称モデル）



ペロブスカイト構造



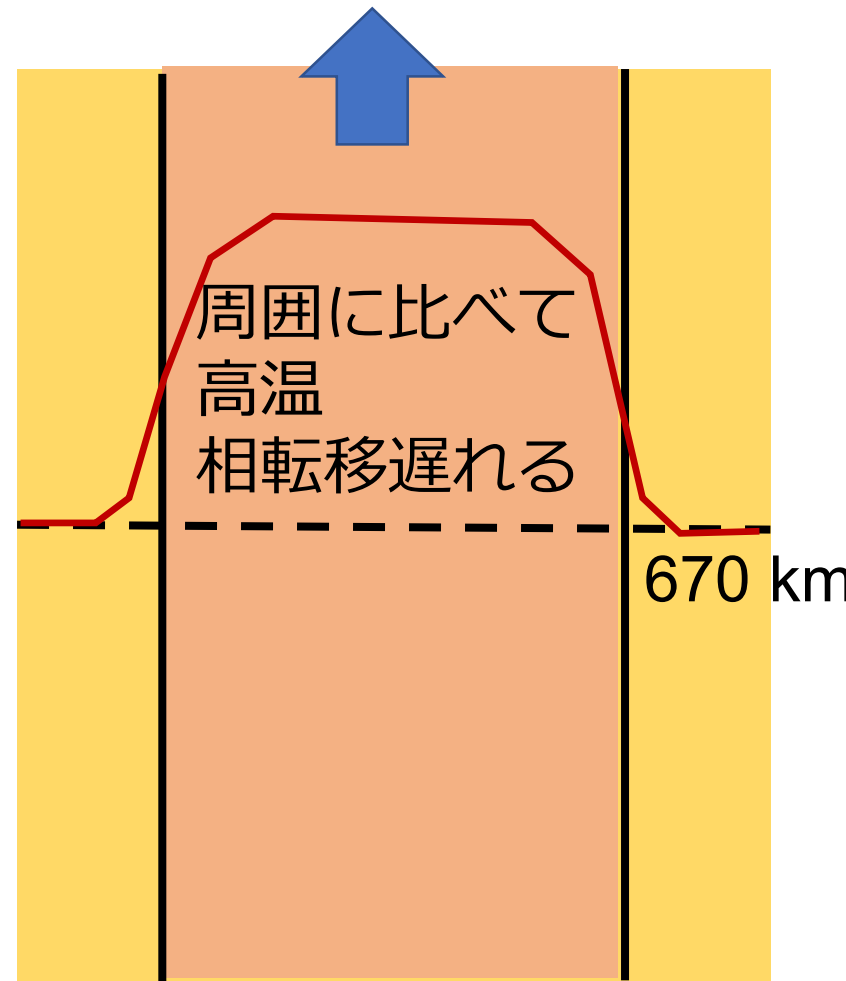
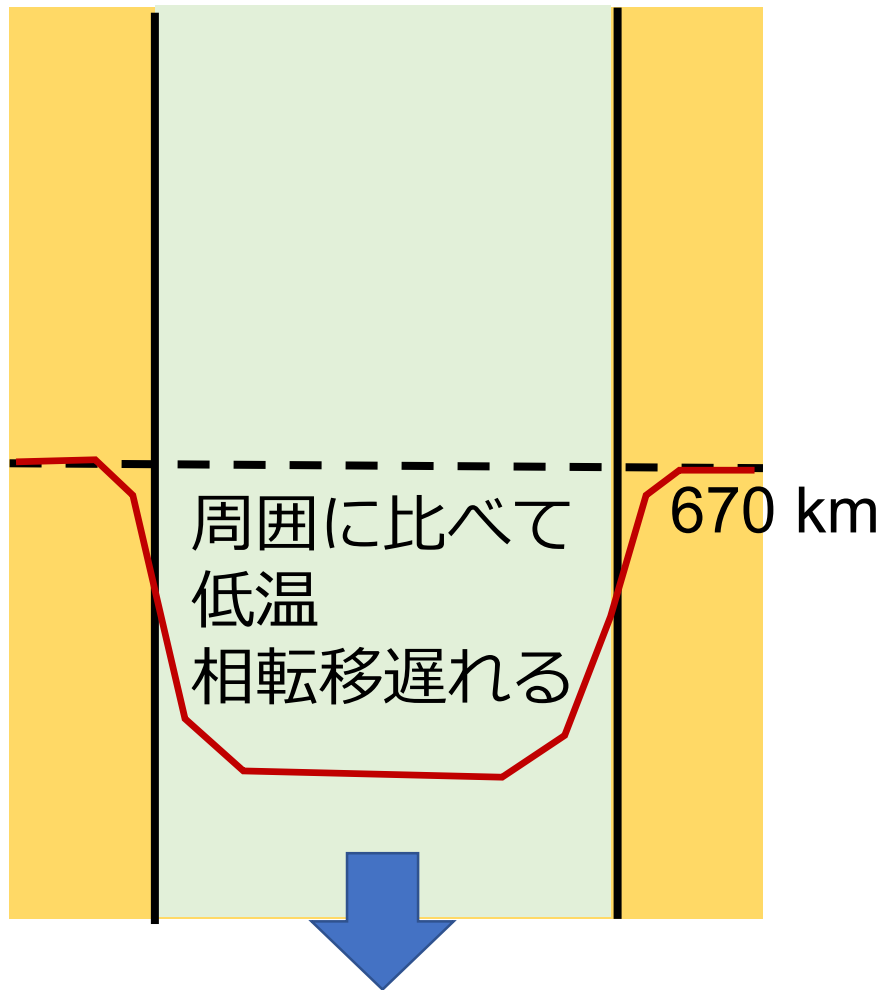


マントルオリビンの相転移境界線と温度分布(Akaogi et al., 1989 など

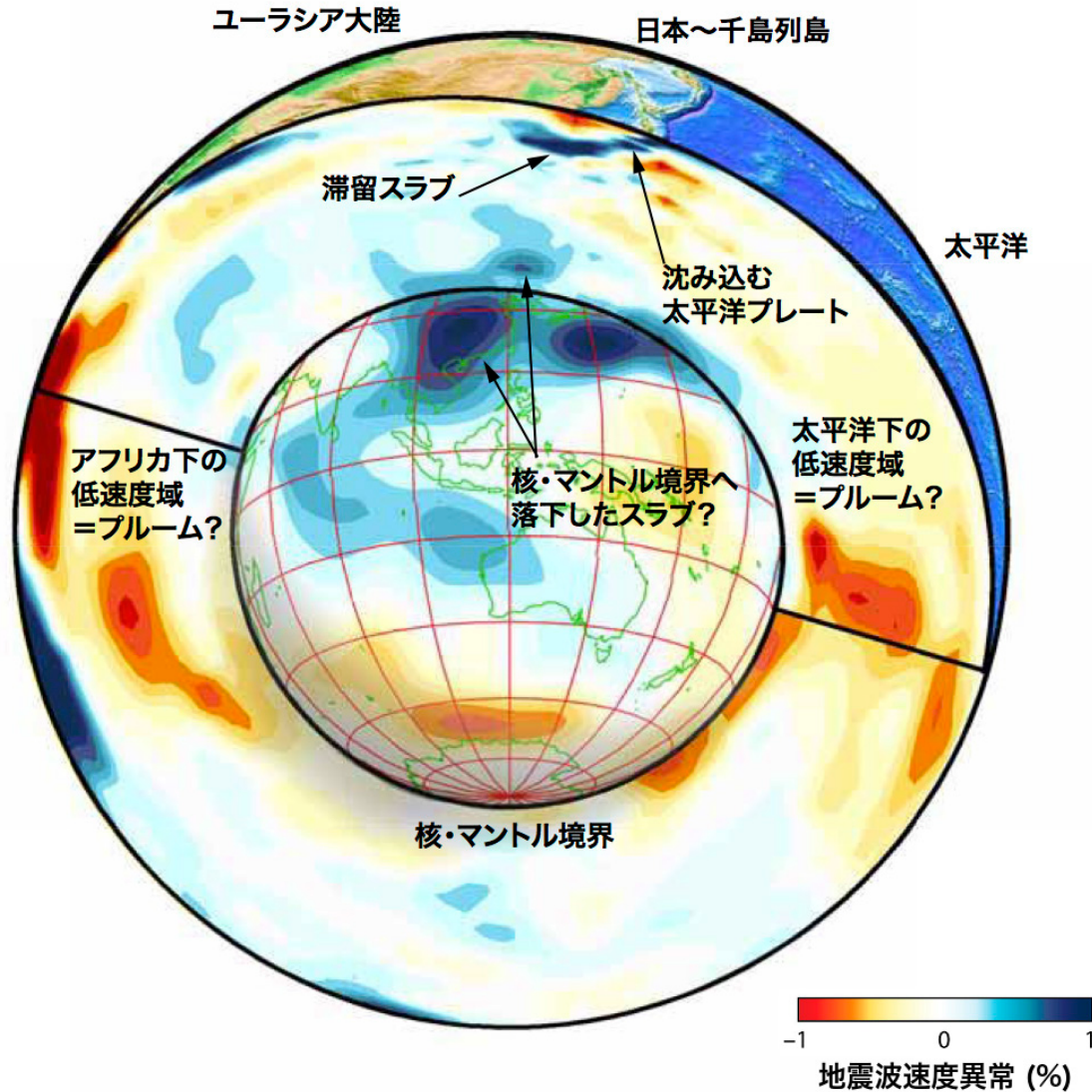
マントル対流への影響

下降流

上昇流



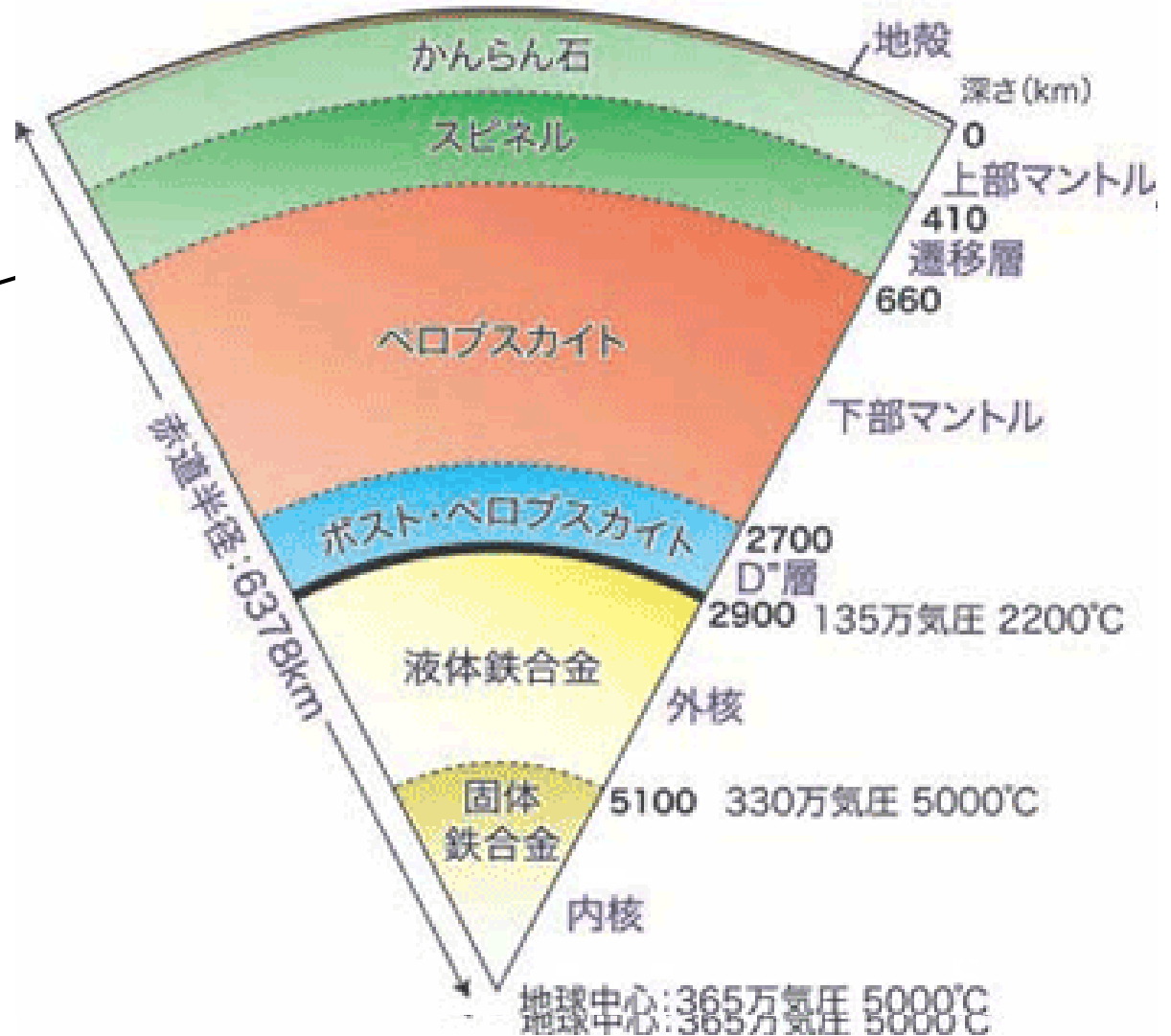
相転移による流れの阻害



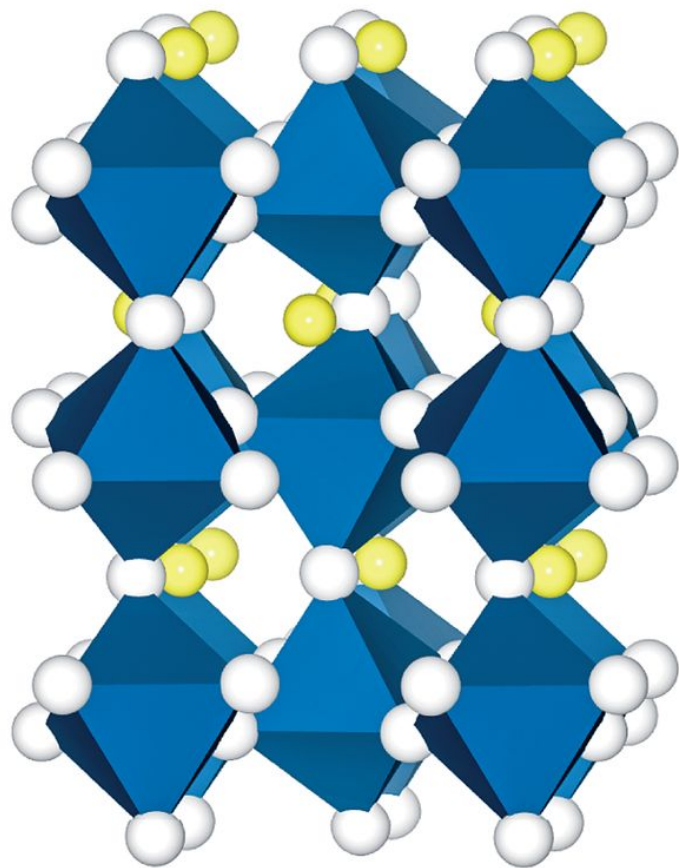
地球内部の層構造

主要な鉱物

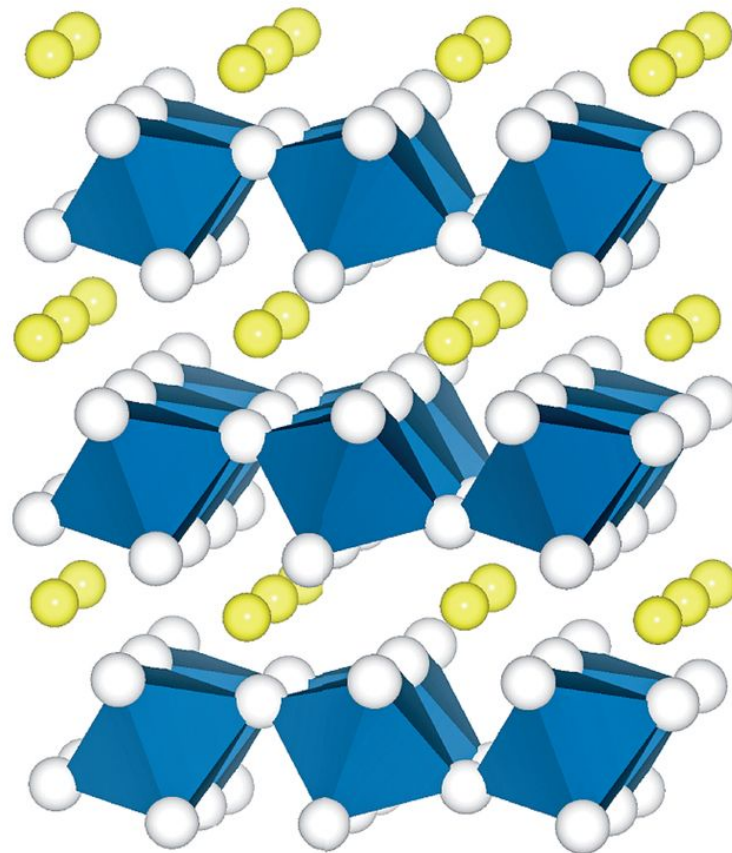
ウォズリアイト
リングウッドイト



Mg-perovskite



Post-perovskite

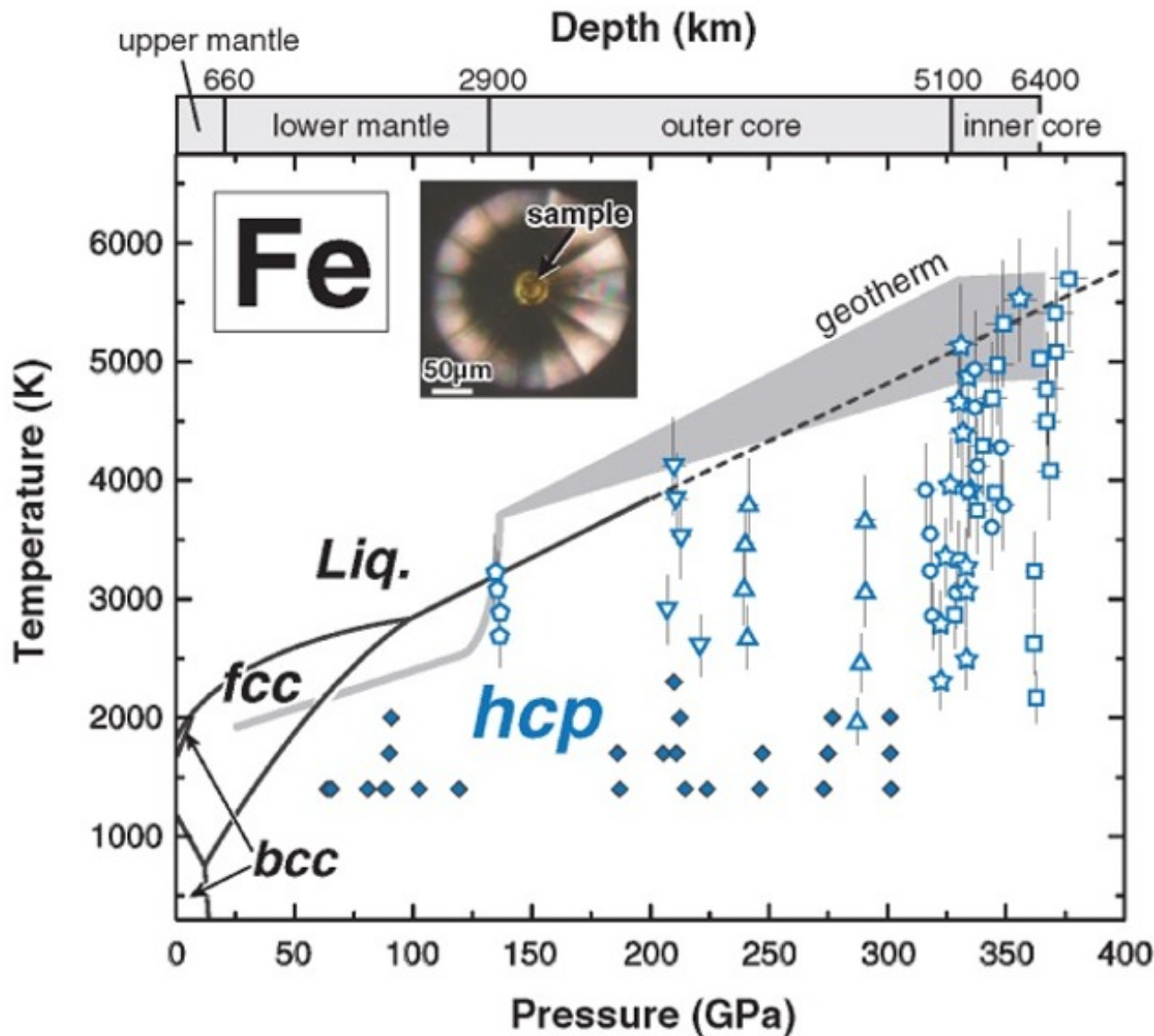


SiO_6

Mg

等方的

異方的



body centered cubic

face centered cubic

hexagonal closed
packing

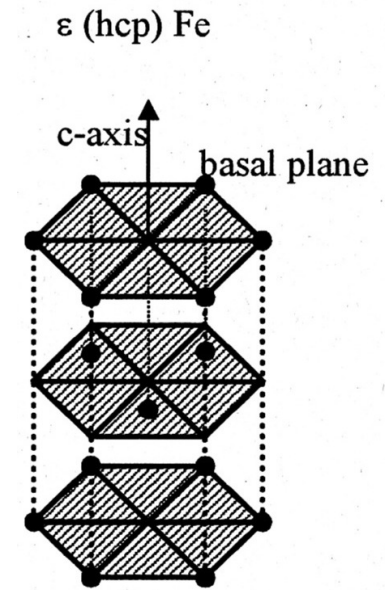


Fig. 3. Phase diagram of Fe and the inferred temperature profile inside Earth (19, 23, 24). Open symbols indicate the present results (different symbols indicate different runs), and solid diamonds indicate data from previous experimental work (5). The low-pressure solid-solid phase transition boundaries and melting curve are from Boehler (19). Liq., liquid. (**Inset**) Sample photograph at 335 GPa in the DAC.

充填率

単純立方格子構造： 52%

体心立方格子構造： 68% α -Fe, W, Mo

面心立方格子構造： 74% γ -Fe, Al, Cu, Ni, Au

六方最密充填構造： 74% Mg, Ti, Zn, Cd

Cf. ダイヤモンド構造： 34%

課題（8月7日提出）

六方最密充填構造の鉄は、面心立方格子構造の鉄と比べてどのような性質をもつと予想されるか？

密度

弾性

塑性

について考察しなさい。