地球科学から見た地球ニュートリノ観測の意義

大谷　栄治　(東北大　理)

- 地球内部の放射性元素のベータ崩壊により生成

$$^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb + 8\,{}^{4}He + 6\,e^{-} + 6\,\bar{\nu}_e + 51.7\ [MeV]$$

$$^{232}Th \rightarrow {}^{208}Pb + 6\,{}^{4}He + 4\,e^{-} + 4\,\bar{\nu}_e + 42.7\ [MeV]$$

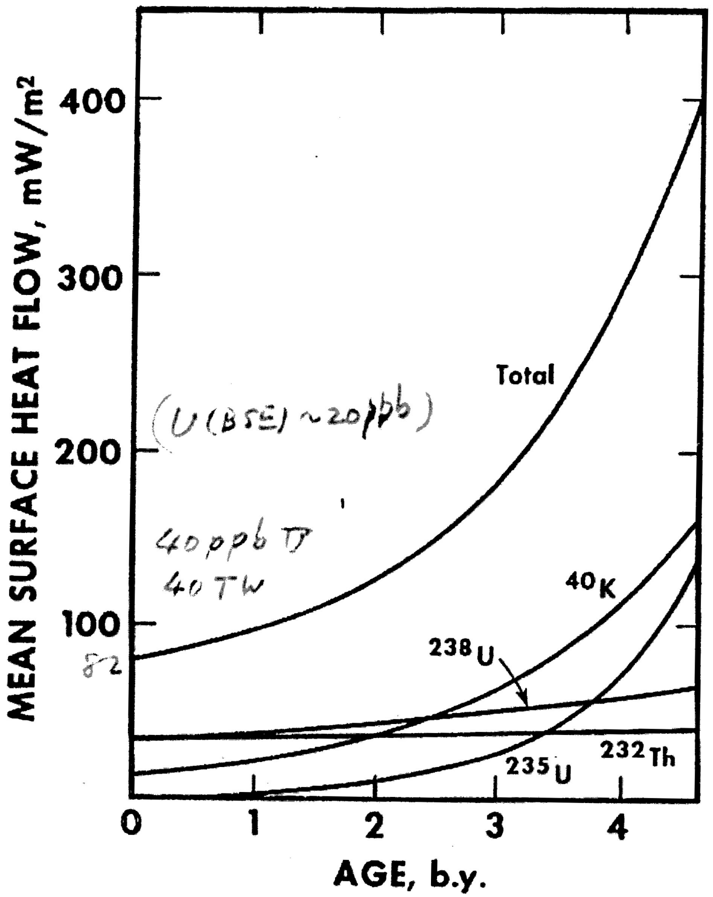
$$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca + e^{-} + \bar{\nu}_e + 1.31\ [MeV]$$

- 放射性熱源は地表熱流量のおよそ半分に寄与
  - 観測地殻熱流量 〜44TW (31TW)
  - U系列 8TW / Th系列 8TW / ^{40}K 4TW〜20TW ???

- 地球深部の化学組成に関する直接の情報

1960年代より提案されていたが,
実際に観測されたことはなかった

Heat generation from long-lived radioactivity				
	Energy Decay/atm	Decay const λ	Relative Isotopic	Present Terrestrial
	10^{-6} erg	10^{-10}/yr	Abundance	Abundance 10^{20} g
^{238}U	75.9	1.55125	0.9928	1.82
^{235}U	72.4	9.8485	0.0072	0.0132
^{232}Th	63.8	0.49475	1	6.79
^{40}K	1.14	5.543	1.167×10^{-4}	2.14



9.4.1 Heat production in the Earth during geological time assuming that the present surface flux is in equilibrium with radiogenic heat production. In the lower part of the diagram the separate contributions of U, Th and K are shown. Present day values of Th/U = 3.7 and K/U = 10,000 are assumed.

Energy Budget of the Earth

Heat flow measurement: 44 TW

Heat Generation:
Crust+Mantle ~ 20 TW (for K, U, and Th): Based on Chondrite model
No radiogenic heat in the core
Heat flux from the core: 1~10 TW (for driving geodynamo)

Invalance of Heat:
Out flow from Earth 44TW > Crust+Mantle+Core 21~30TW
i.e., Urey ratio (Radiogenic heat production/Heat flow)
~ 0.5
Secular cooling ? Periodic change?

地球ニュートリノと地球の熱源

地球構造モデル

地震波解析：地震波トモグラフィ

- 地球内部の３次元物理構造を詳細に記述
- マントル対流を示唆する構造
- 化学組成との対応ははっきりしない

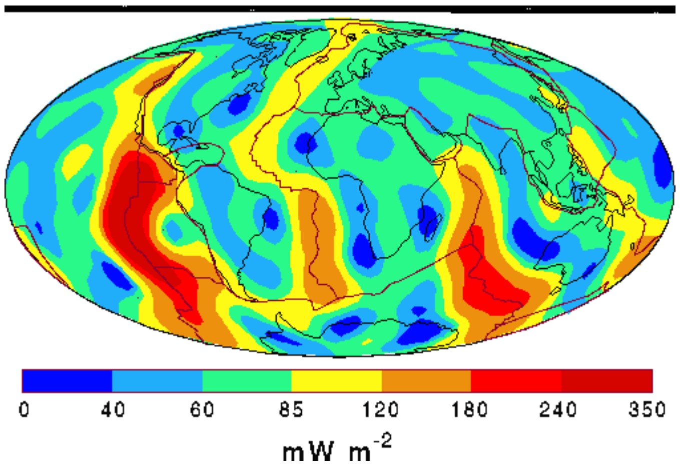
化学組成モデル

BSE モデル

コンドライト組成に基づく
コアを除く固体地球の平均組成

- 地球化学の基本的パラダイム
- U/Th 量に15%～20%の不定性
- 20TW の放射性熱源を予測
- 直接のテストは存在しない

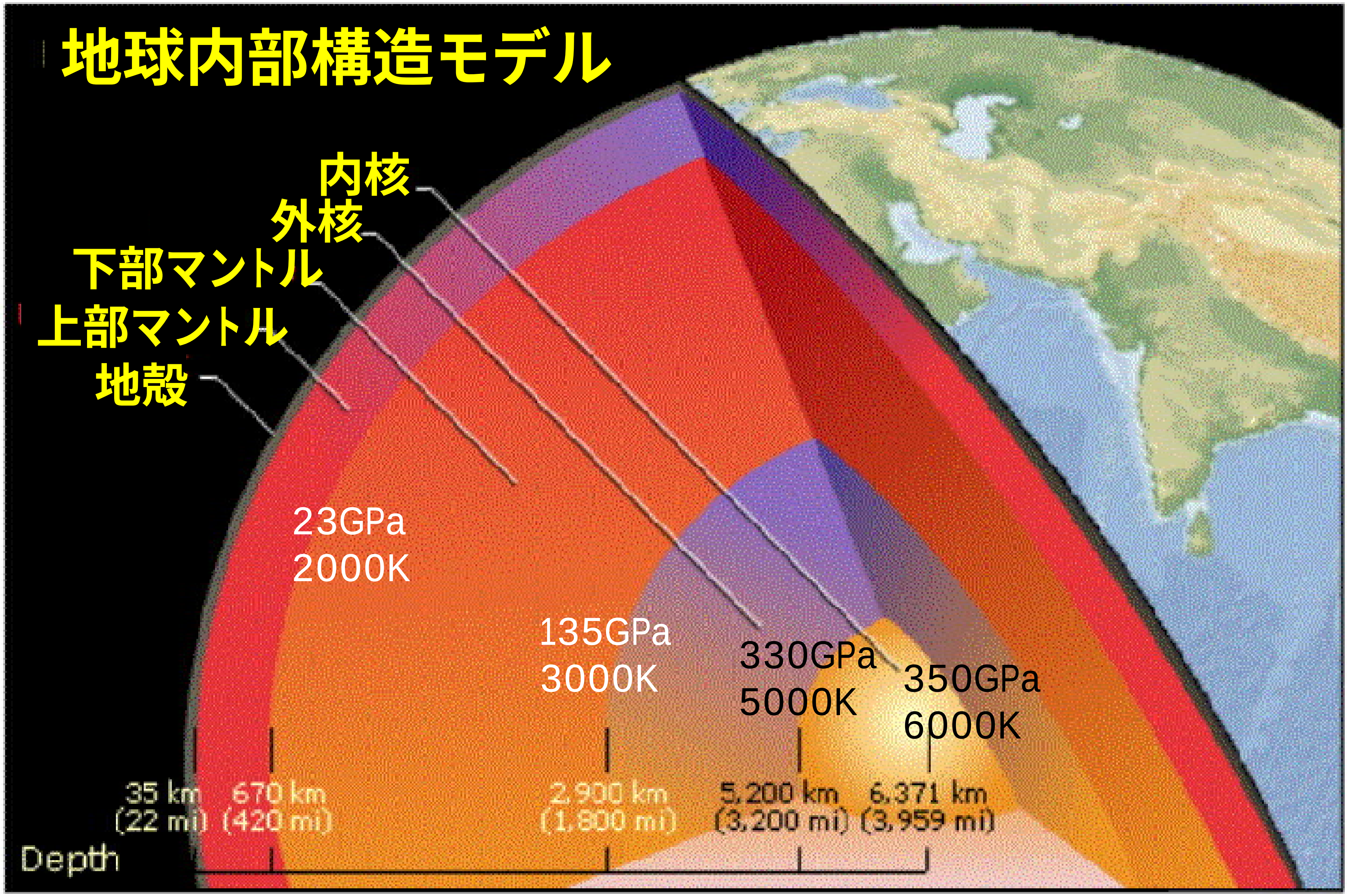
熱収支

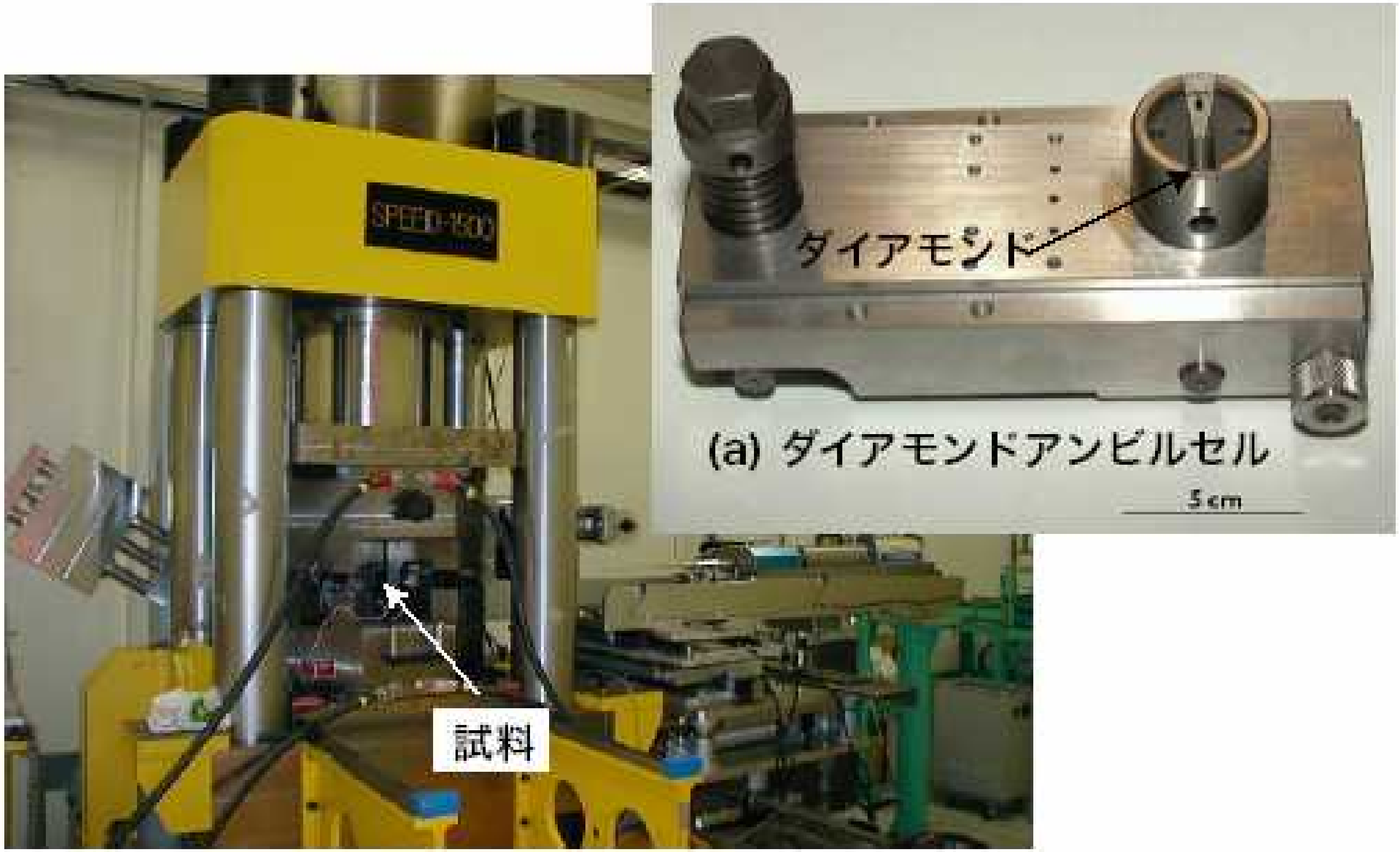


観測地殻熱流量：44±1 TW
(最近の再計算で 31±1 TW)

- 熱源：冷却熱(?)，液体コアの固化の潜熱(?)，放射壊変による発熱(20TW?)
- 熱収支を決定することが全地球ダイナミクスの理解に不可欠

1. 地球内部構造モデル

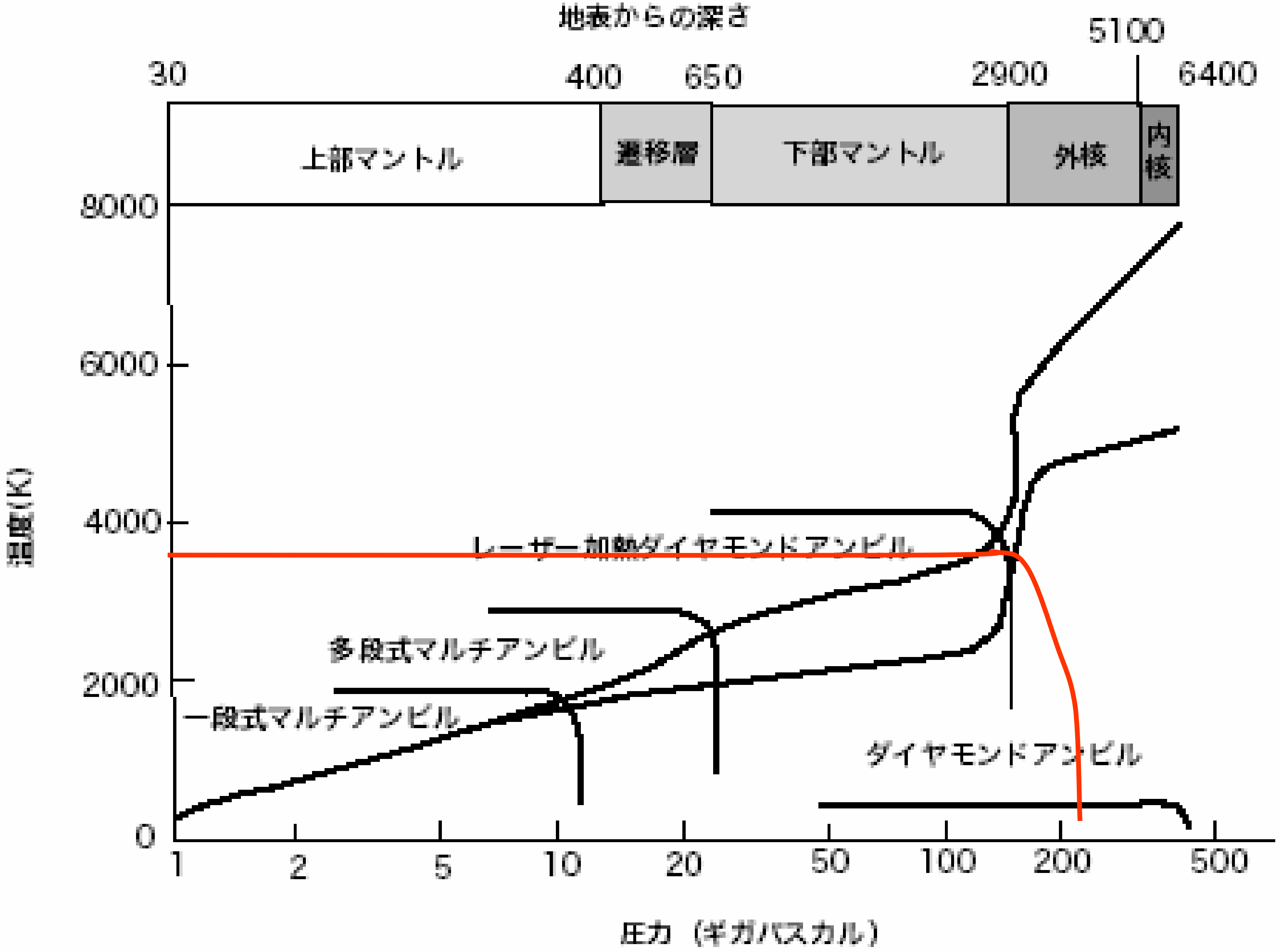

地球内部構造モデル
内核
外核
下部マントル
上部マントル
地殻
23GPa
2000K
135GPa
3000K
330GPa
5000K
350GPa
6000K
35 km
(22 mi)
670 km
(420 mi)
2,900 km
(1,800 mi)
5,200 km
(3,200 mi)
6,371 km
(3,959 mi)
Depth

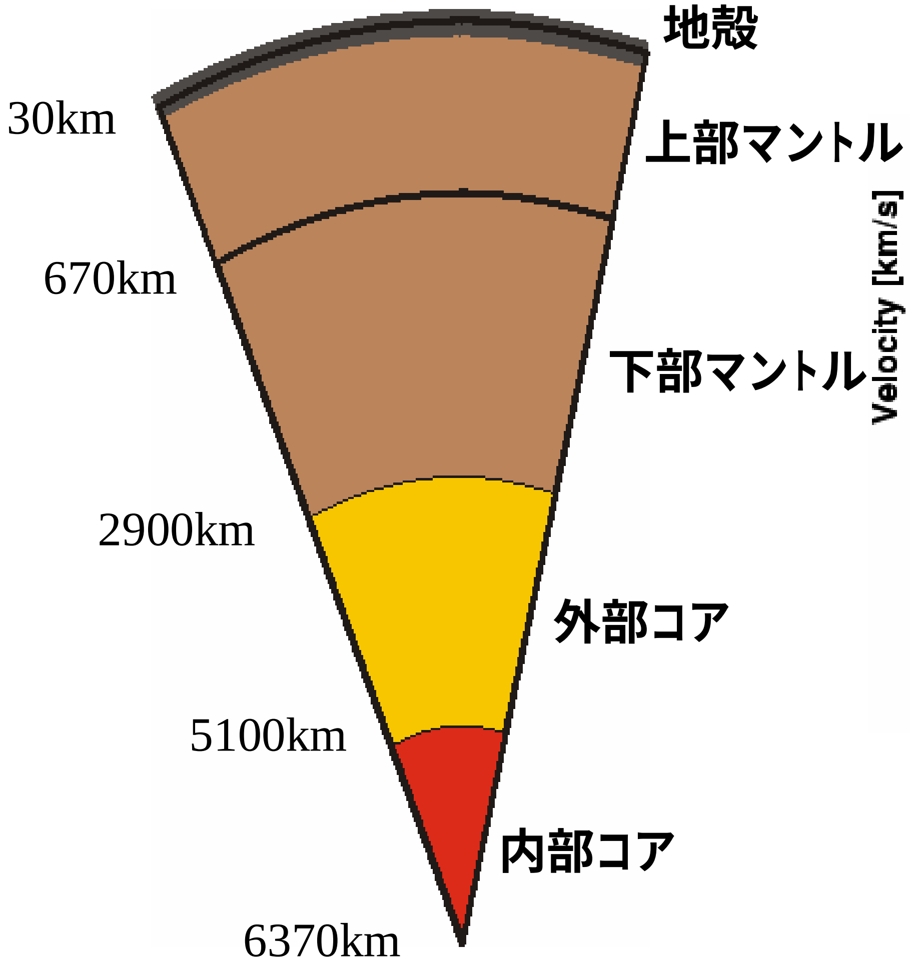


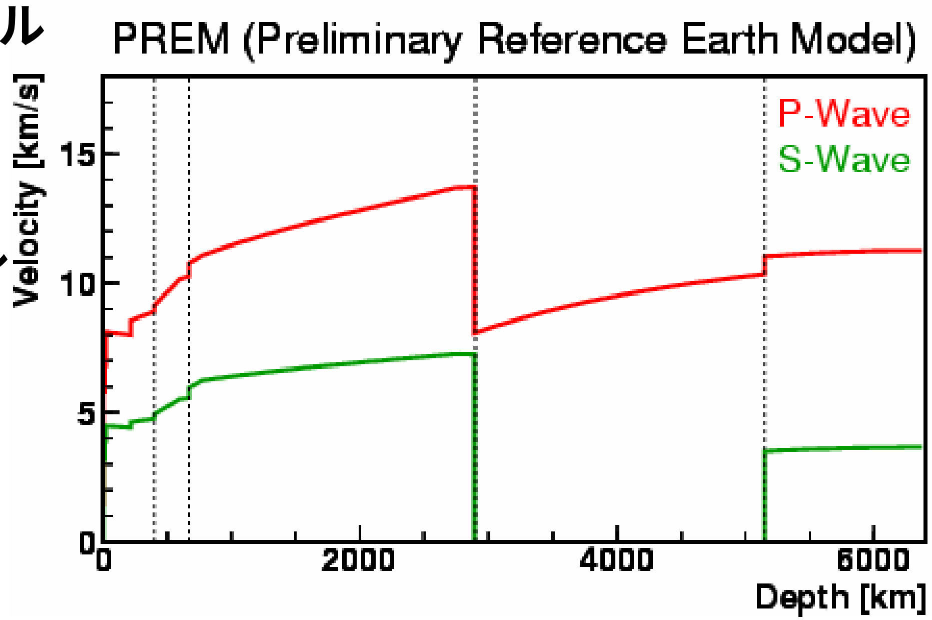
(a) ダイアモンドアンビルセル

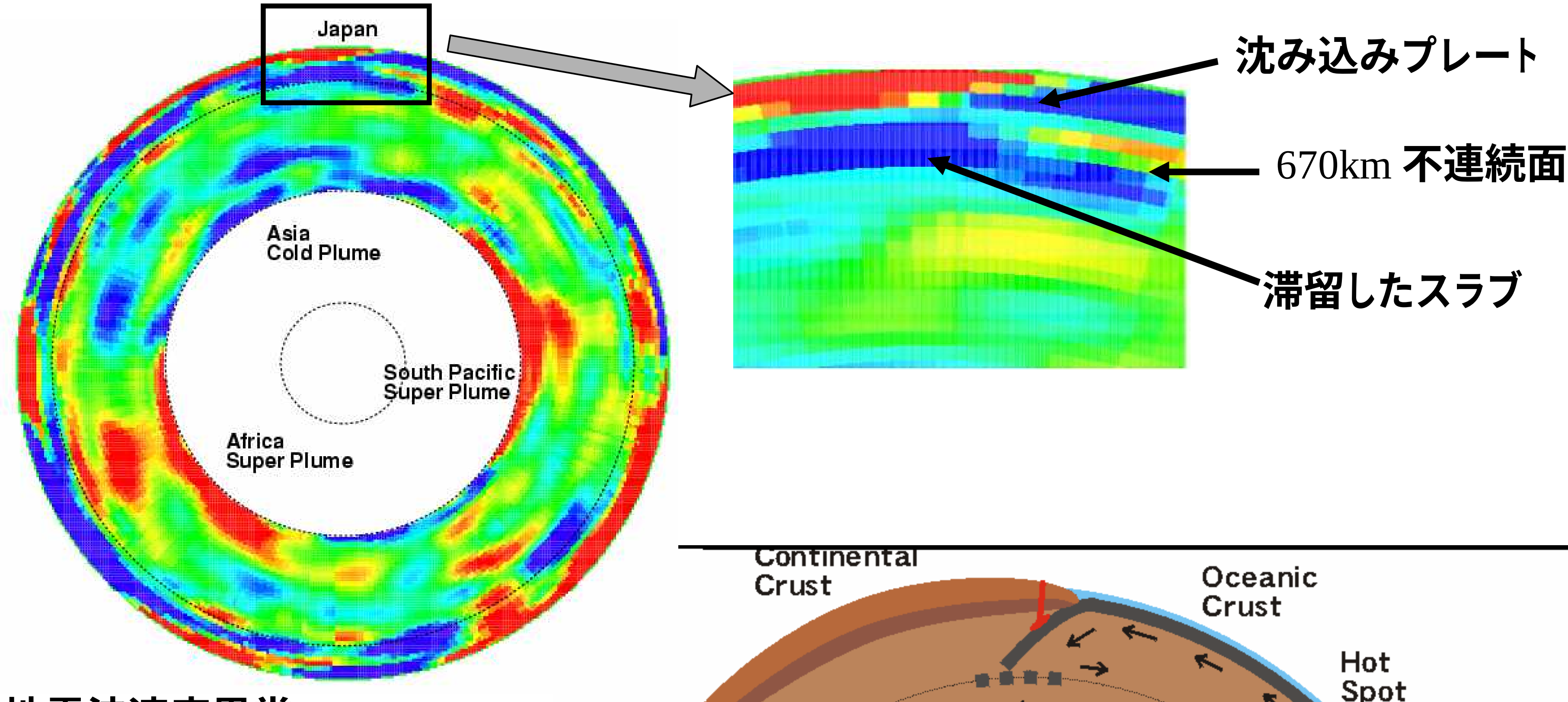
(b) SPring 8に設置されているマルチアンビル型高圧発生装置

地球内部の条件と高温高圧装置の発生条件




地殻
30km
上部マントル
670km
下部マントル
2900km
外部コア
5100km
内部コア
6370km

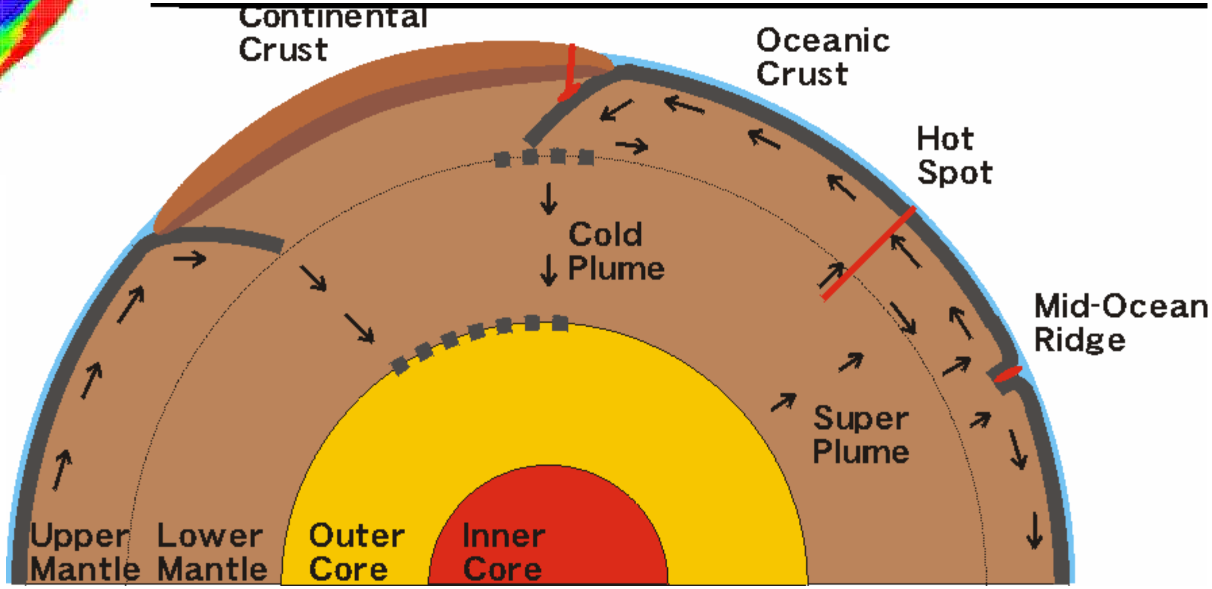

PREM (Preliminary Reference Earth Model)
Velocity [km/s]
P-Wave
S-Wave
0
5
10
15
0
2000
4000
6000
Depth [km]

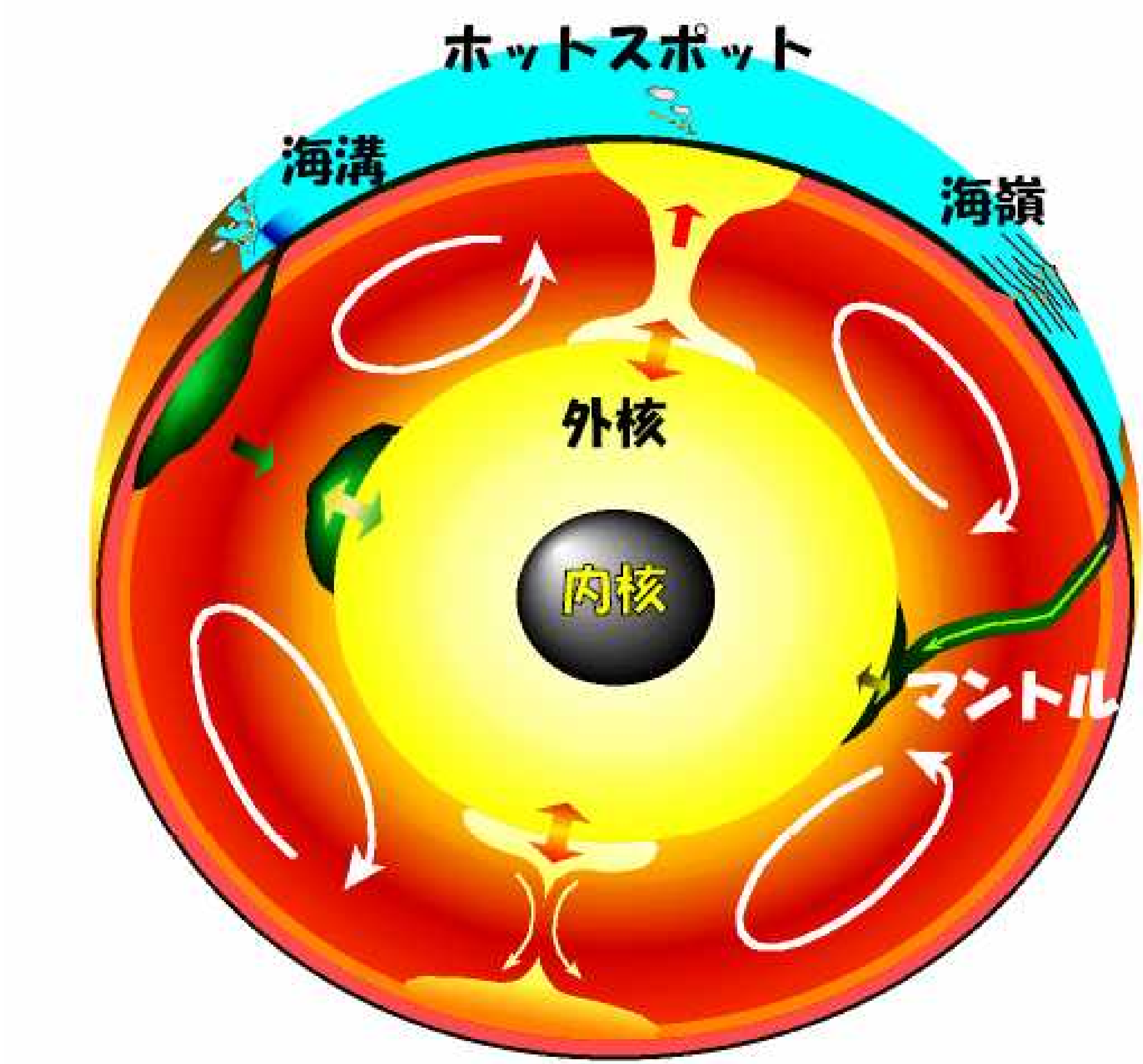


地震波速度異常

+1%　　-1%

高速(低温)　　低速(高温)



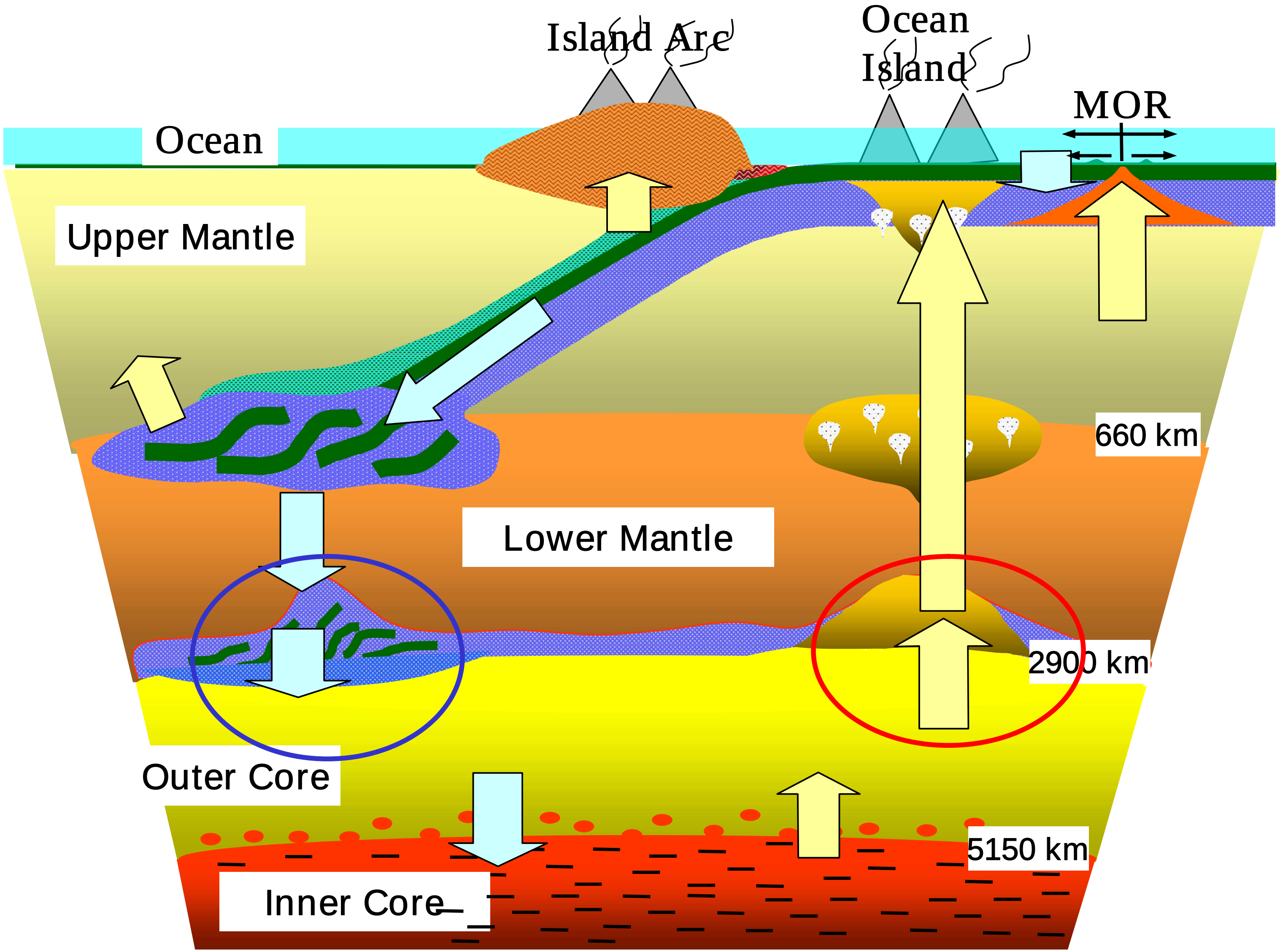


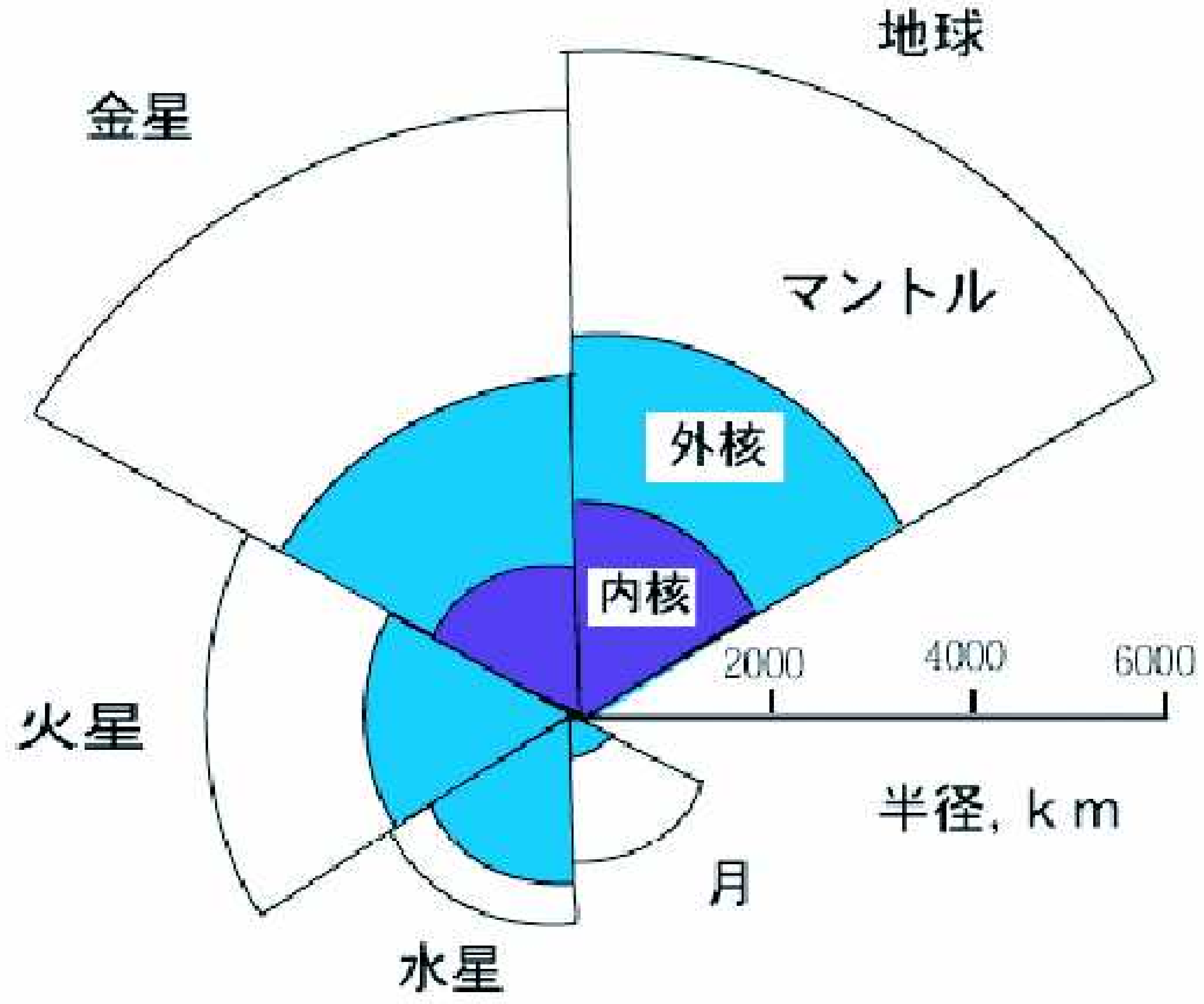
地表から核へ：地球内部における物質の大循環

マントル対流：約10cm/年　(ウイルソンサイクル：約2億年)

Global circulation of materials in the Earth

Materials moves from Surface to Core and vice versa

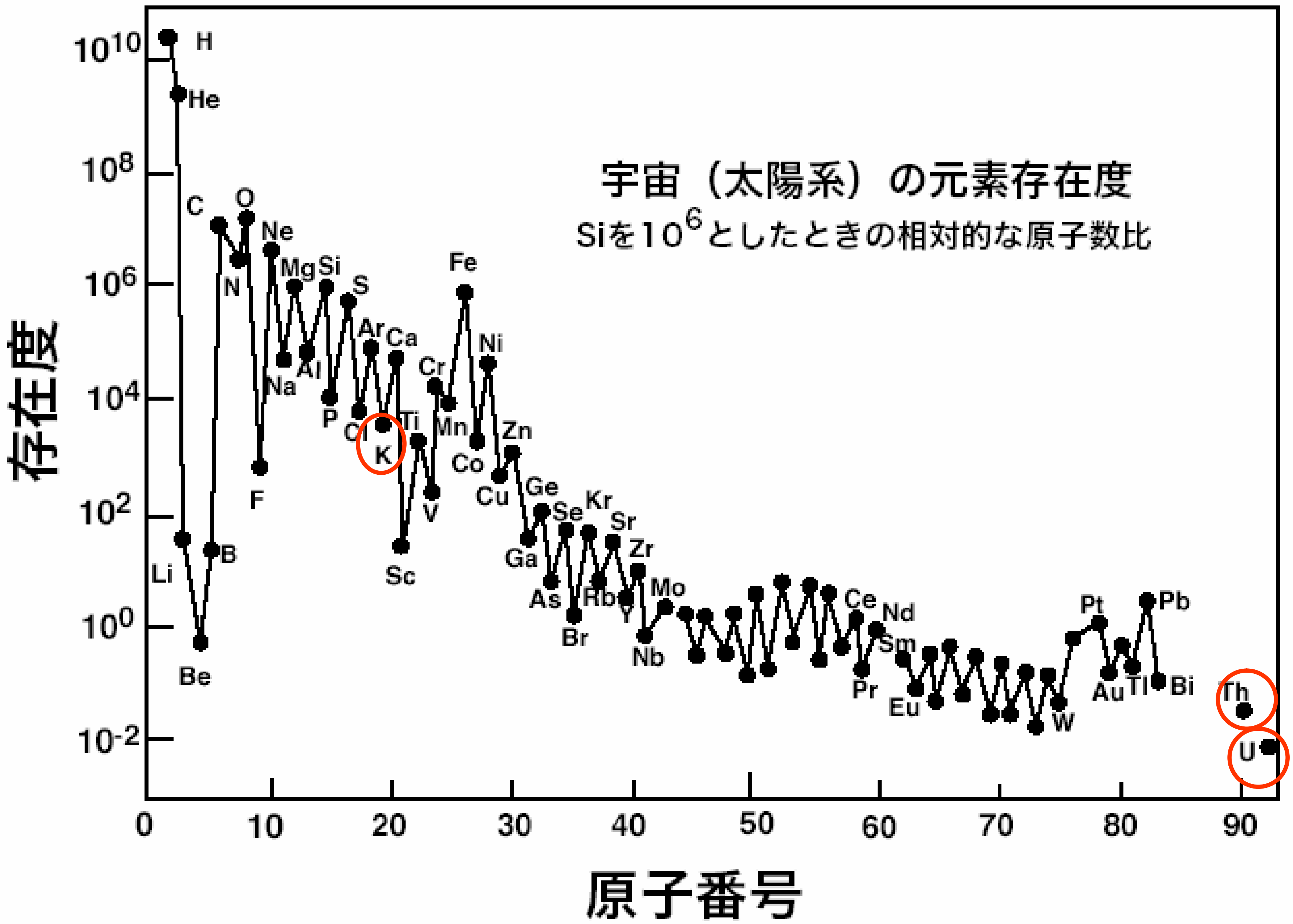



地球
金星
マントル
外核
内核
2000
4000
6000
火星
半径, km
月
水星

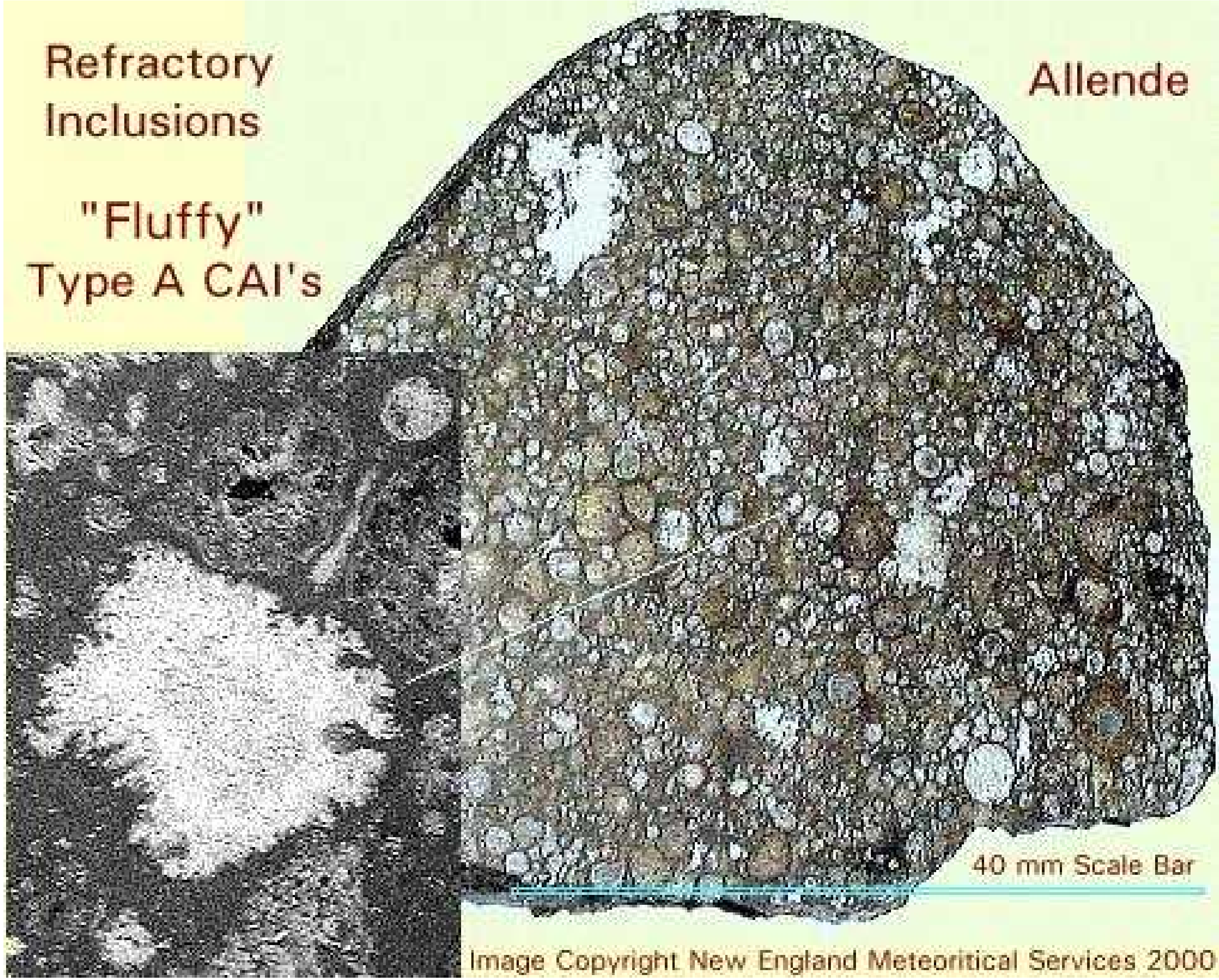
２．地球の化学組成

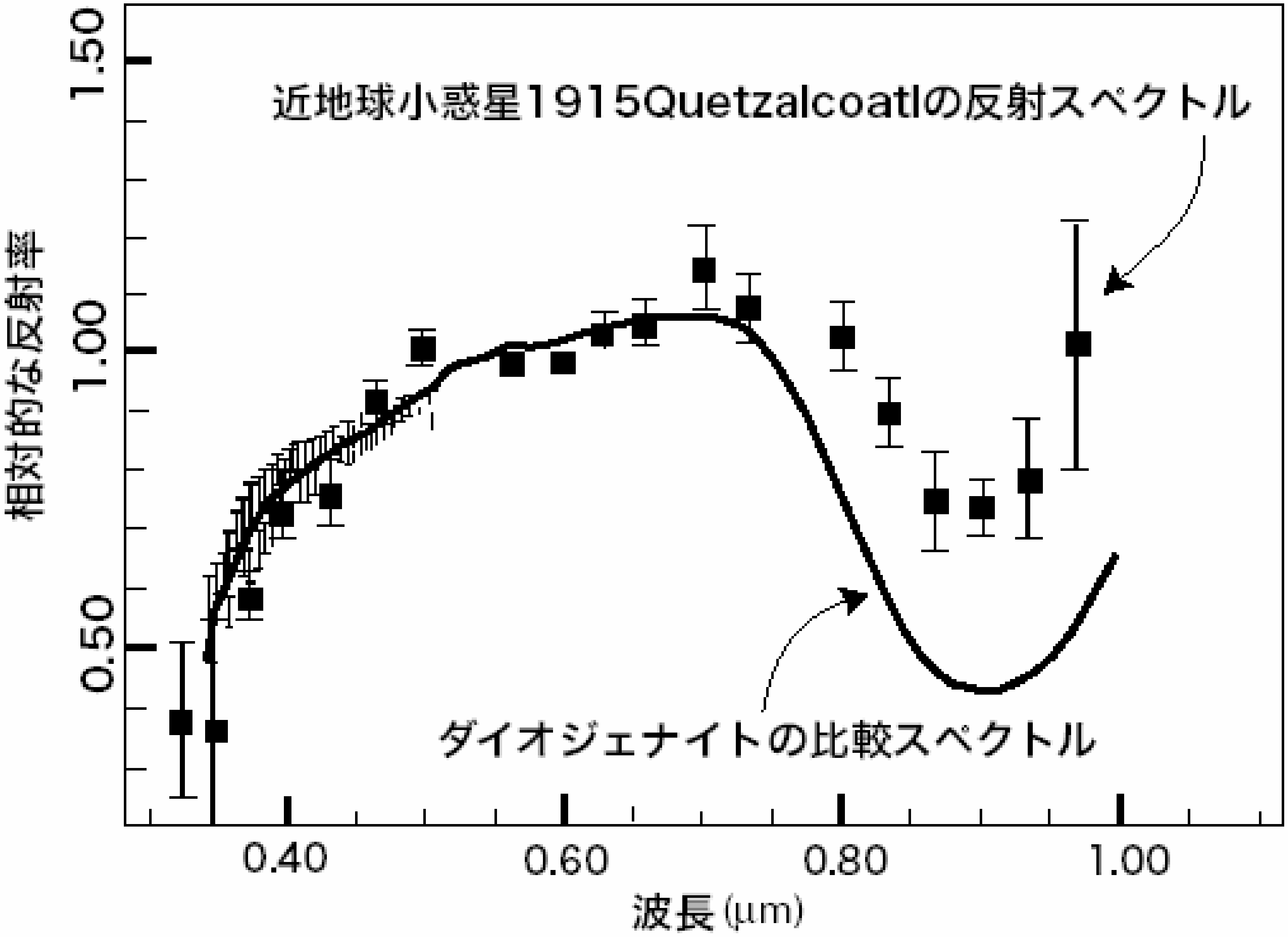
コンドライトモデル

太陽系と地球の組成の違い



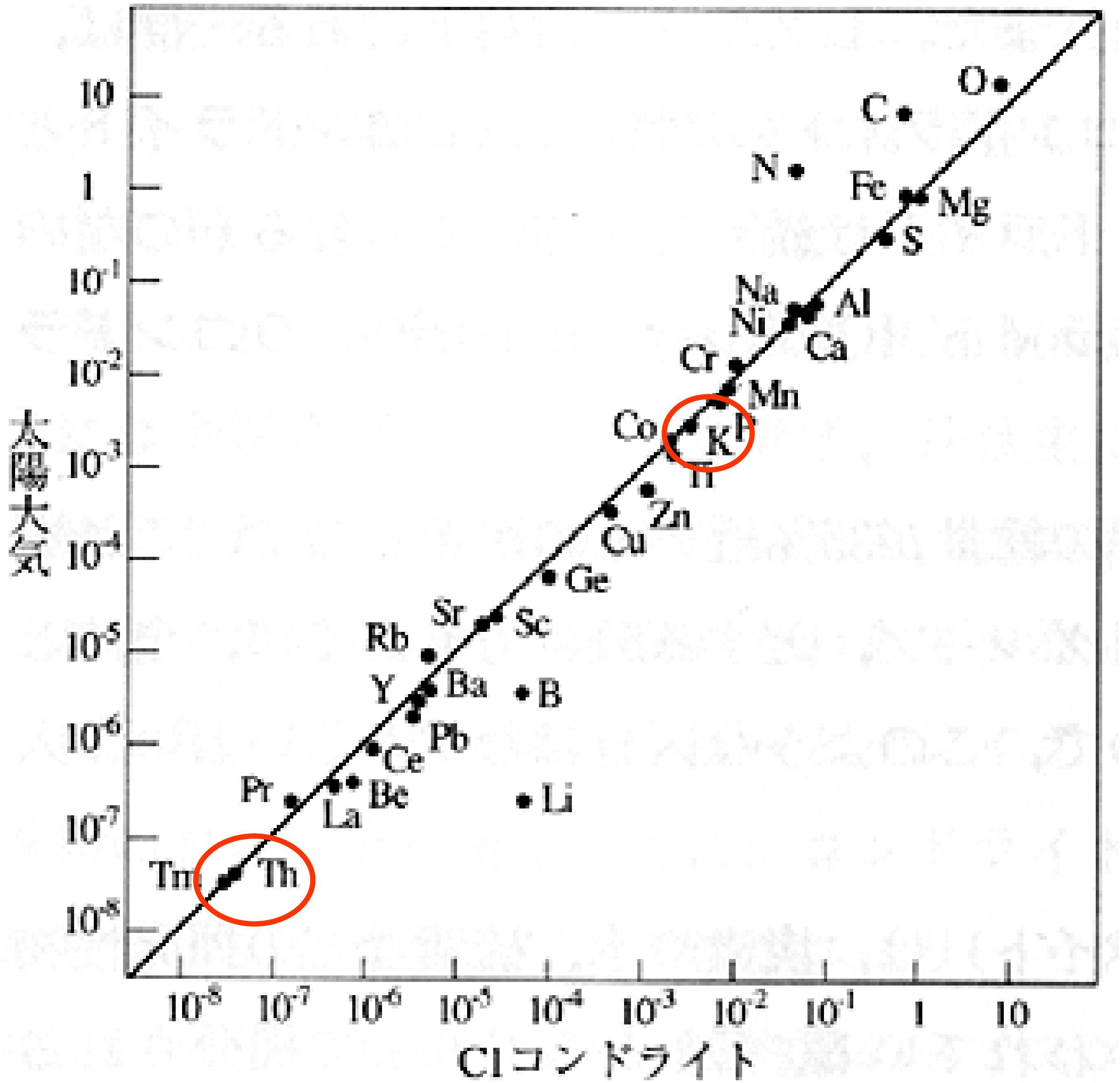
宇宙（太陽系）の元素存在度
Siを10^6としたときの相対的な原子数比
存在度
原子番号
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
H
He
Li
Be
B
C
N
O
F
Ne
Na
Mg
Al
Si
P
S
Cl
Ar
K
Ca
Sc
Ti
V
Cr
Mn
Fe
Co
Ni
Cu
Zn
Ga
Ge
As
Se
Br
Kr
Rb
Sr
Y
Zr
Nb
Mo
Ce
Pr
Nd
Sm
Eu
W
Pt
Au
Tl
Pb
Bi
Th
U

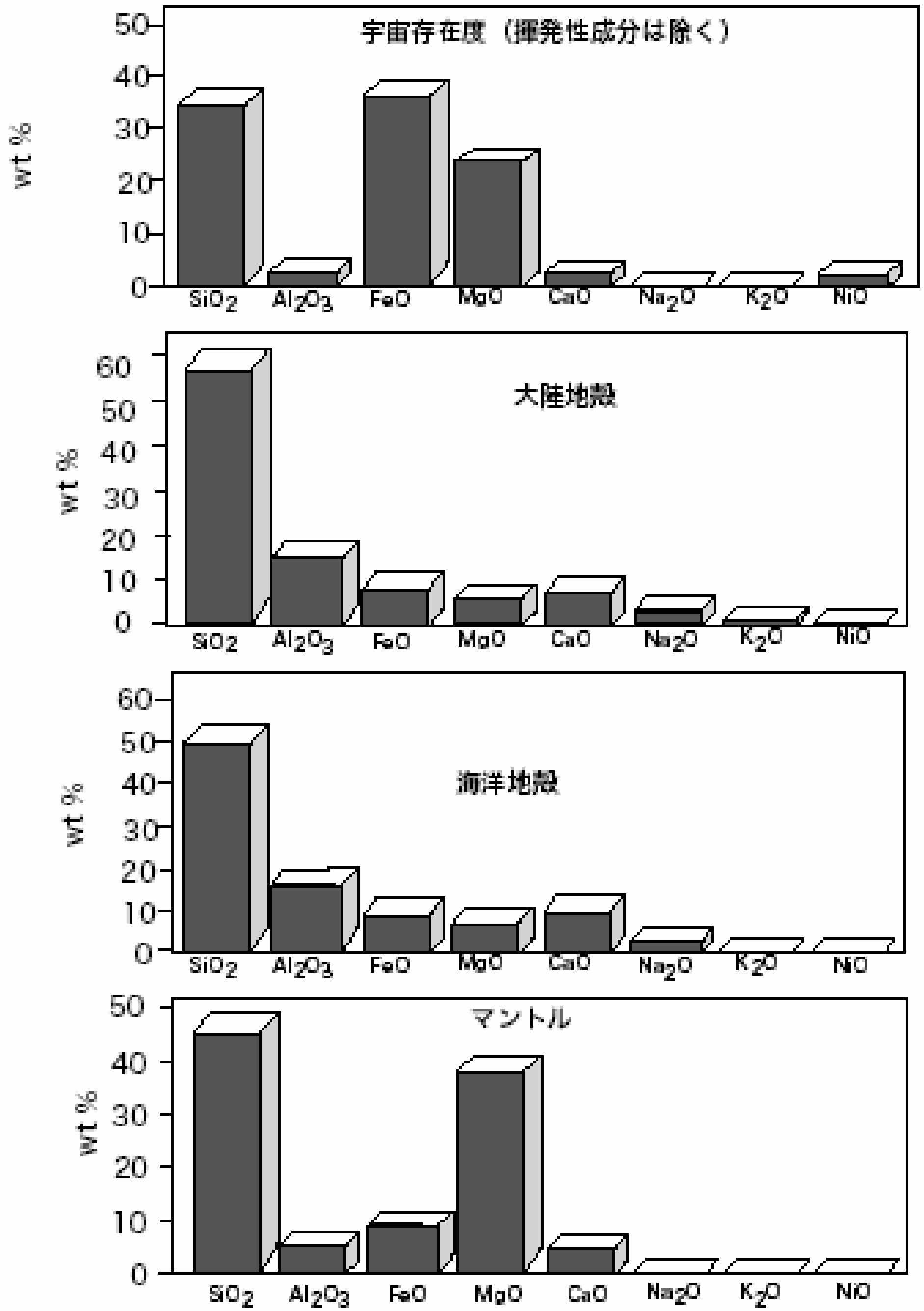

Refractory
Inclusions
"Fluffy"
Type A CAI's
Allende
40 mm Scale Bar
Image Copyright New England Meteoritical Services 2000

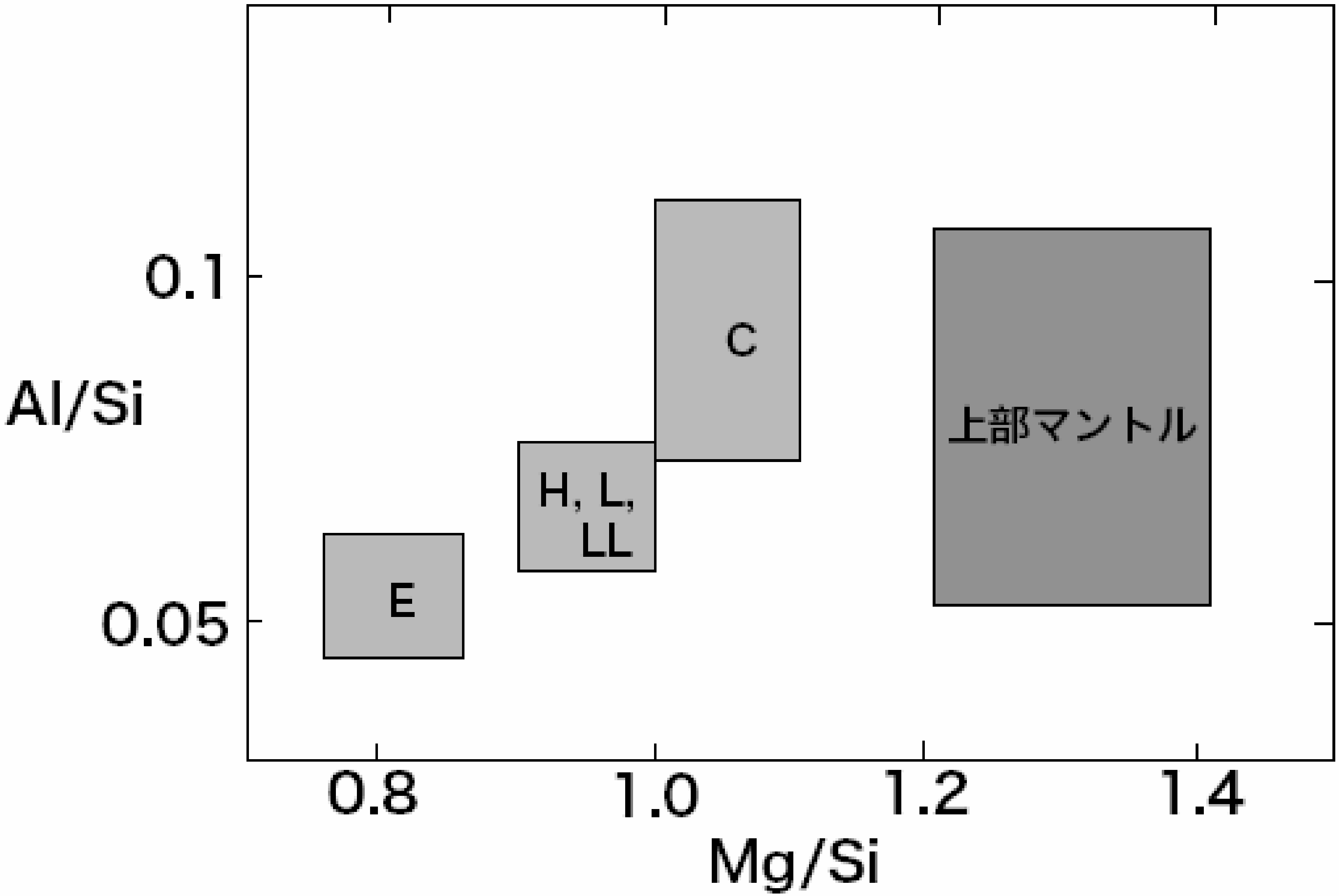


近地球小惑星1915Quetzalcoatlの反射スペクトル
ダイオジェナイトの比較スペクトル
相対的な反射率
1.50
1.00
0.50
0.40
0.60
0.80
1.00
波長(μm)

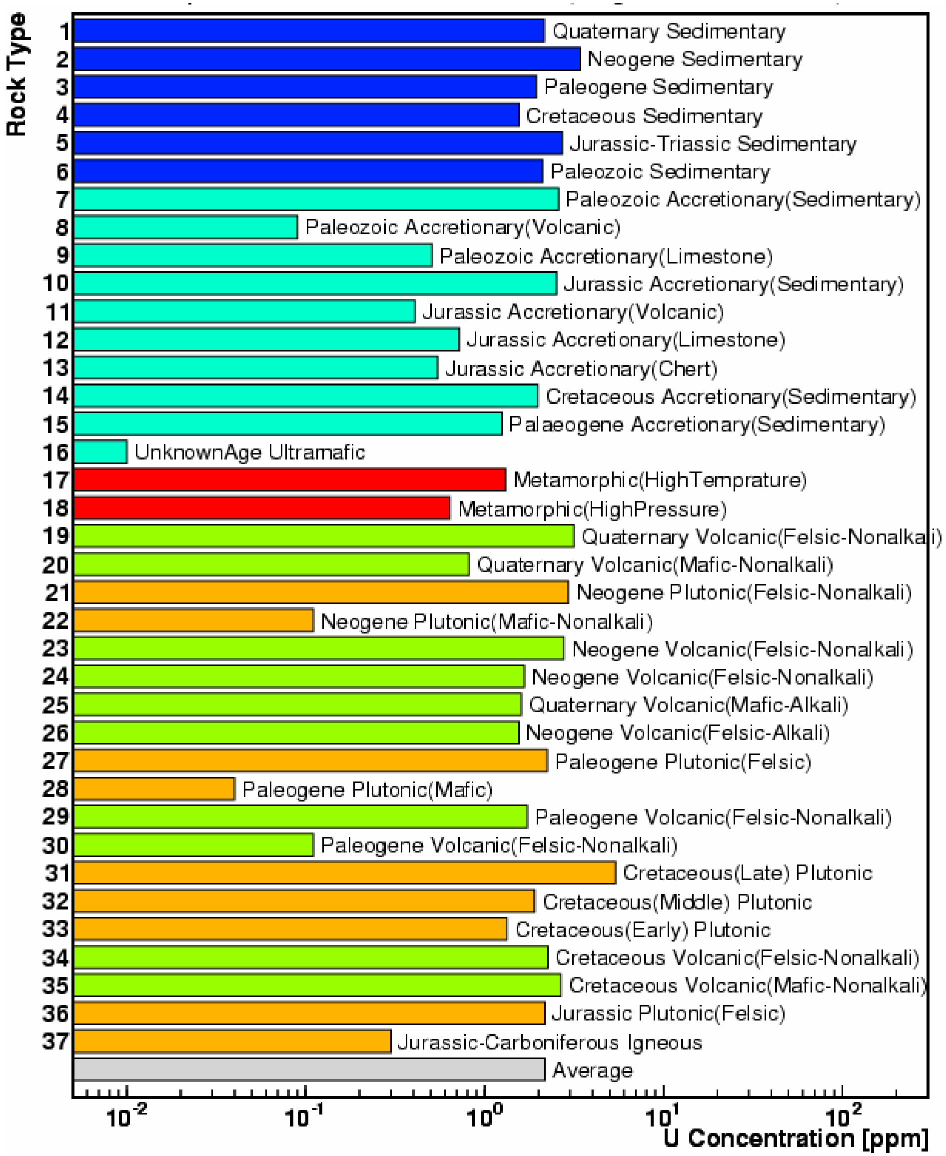
太陽大気の組成（宇宙存在度）とC1コンドライト存在度




宇宙存在度（揮発性成分は除く）
大陸地殻
海洋地殻
マントル
wt %
SiO2
Al2O3
FeO
MgO
CaO
Na2O
K2O
NiO
0
10
20
30
40
50
60



Al/Si
0.1
0.05
Mg/Si
0.8
1.0
1.2
1.4
E
H, L,
LL
C
上部マントル



Togashi et.al. (2000)

(Geochemistry Geophysics Geosystems, volume 1 number 27)

- 日本の表層地質を37種に分類
- 各グループから計166個のサンプルを採取し組成を解析
- 分布面積で重みづけして上部地殻の平均組成を計算

⇩

日本の上部地殻の平均組成
U: 2.32ppm
Th: 8.3 ppm

上部地殻全体の平均組成は
U: 2.8 ppm
Th: 10.7 ppm

コンドライトと一致する。

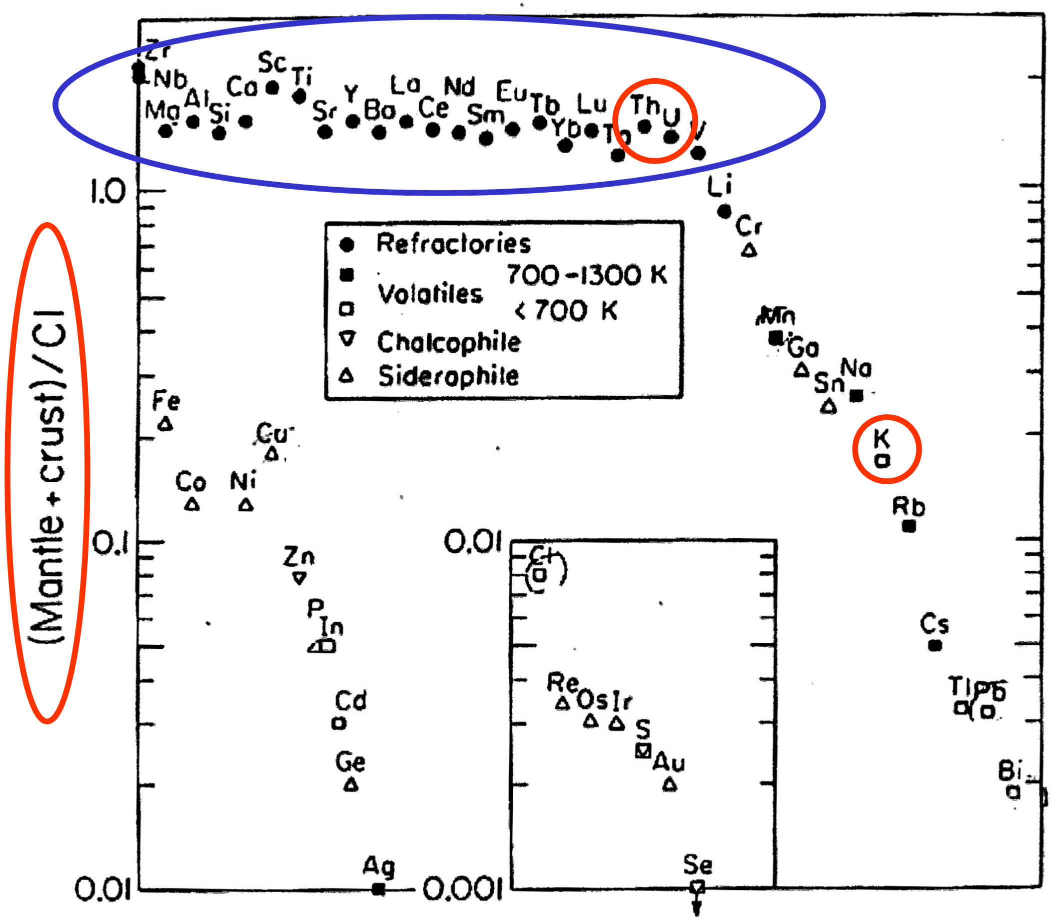
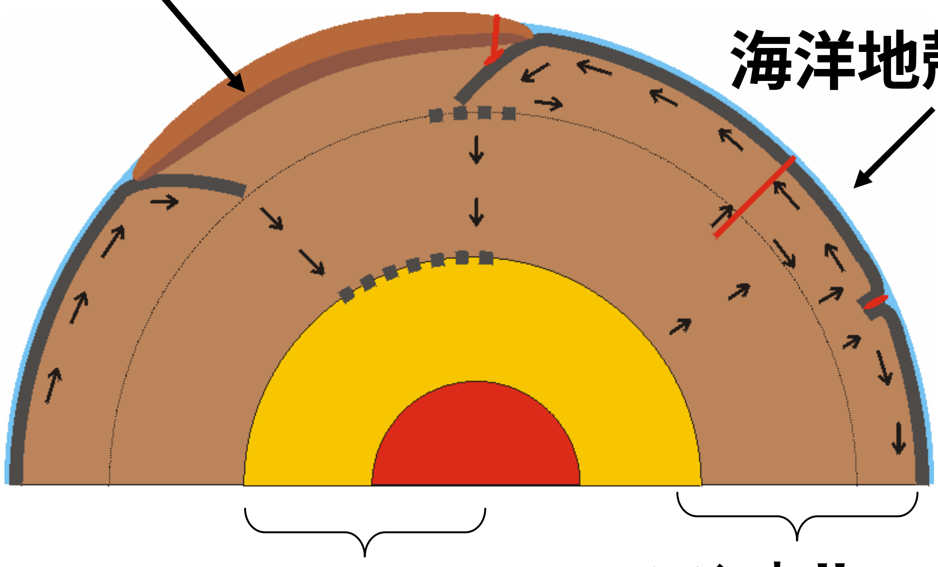


FIGURE 8-2
Abundances of elements in "primitive mantle" (mantle + crust) relative to C1, derived by mixing mantle components to obtain chondritic ratios of the refractory lithophile elements.

大陸上部地殻　U: 2.8ppm / Th: 10.7ppm
大陸中部地殻　U: 1.6ppm / Th: 6.1ppm
大陸下部地殻　U: 0.2ppm / Th: 1.2ppm

Rudnick et.al. (1995)
をとりあえず参照.
不定性は別に議論.

海洋地殻　U: 0.08ppm / Th: 0.32ppm



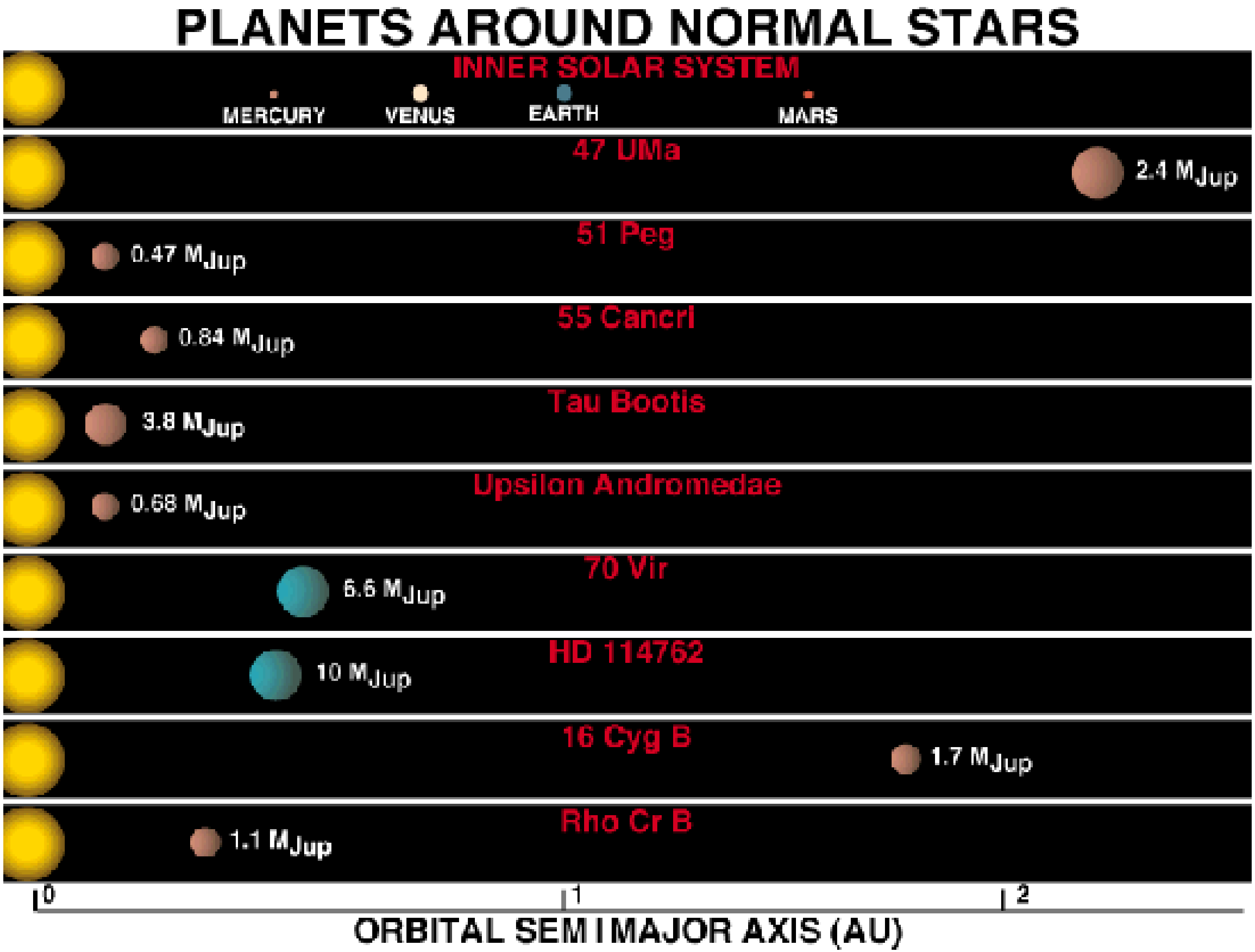
マントル組成はBSEから地
殻を差し引いて求める.
とりあえず一様を仮定.

マントル　U: 0.012ppm / Th: 0.048ppm

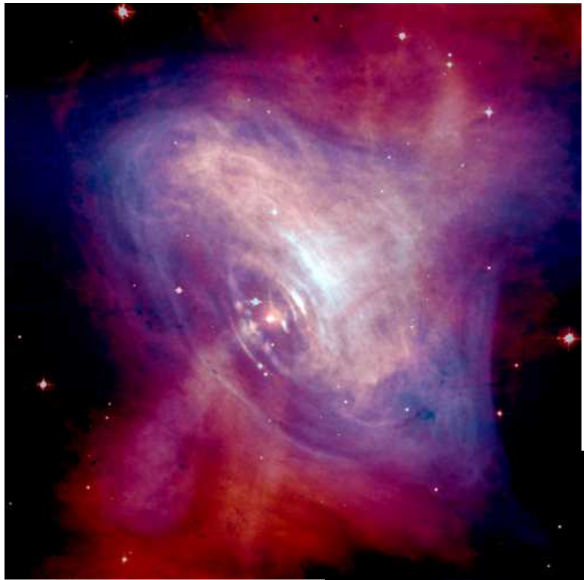
外核・内核　U: 0ppm / Th: 0ppm

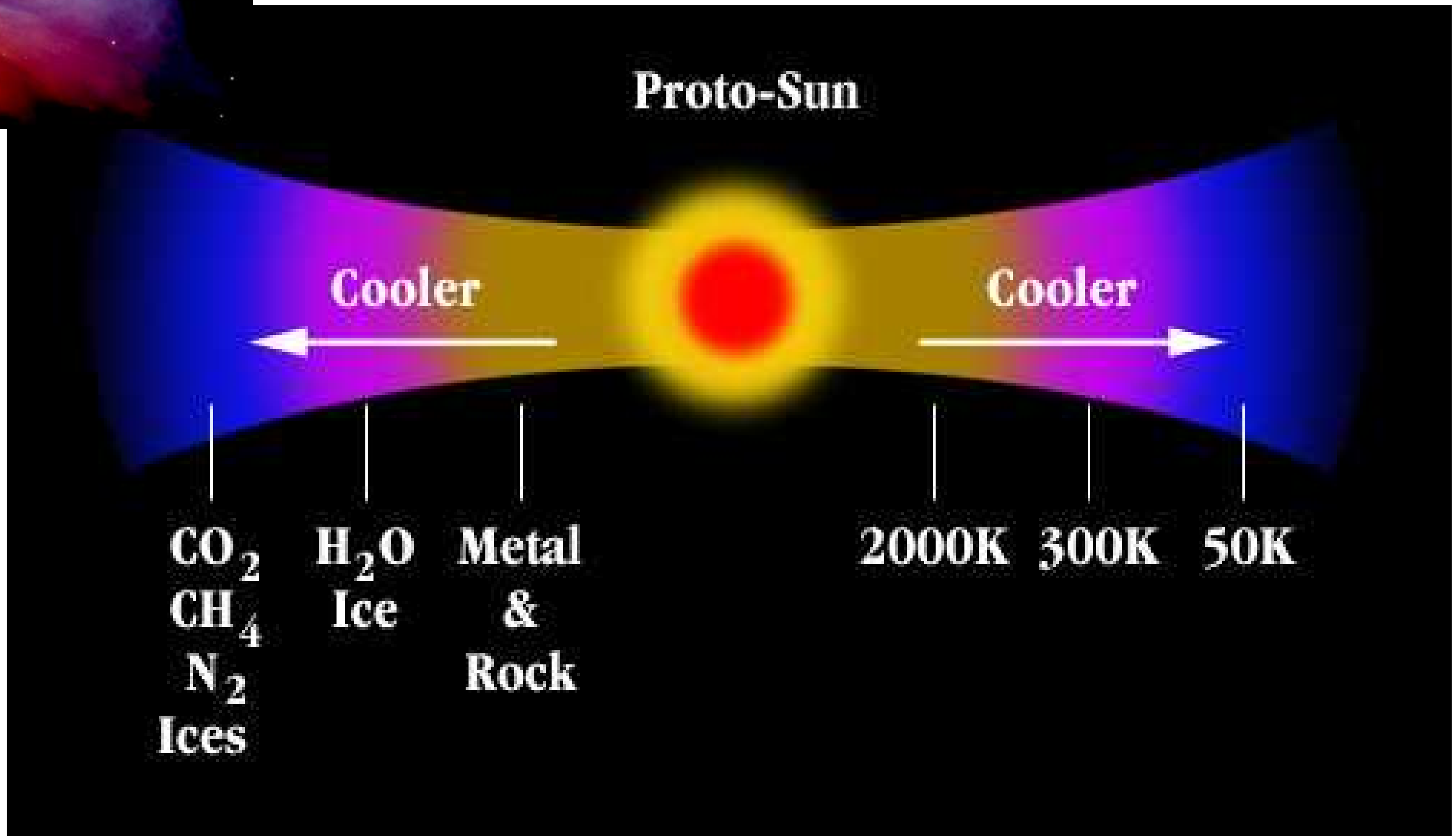
核にはU/Thは
存在しないとする

3．地球の化学組成の起源



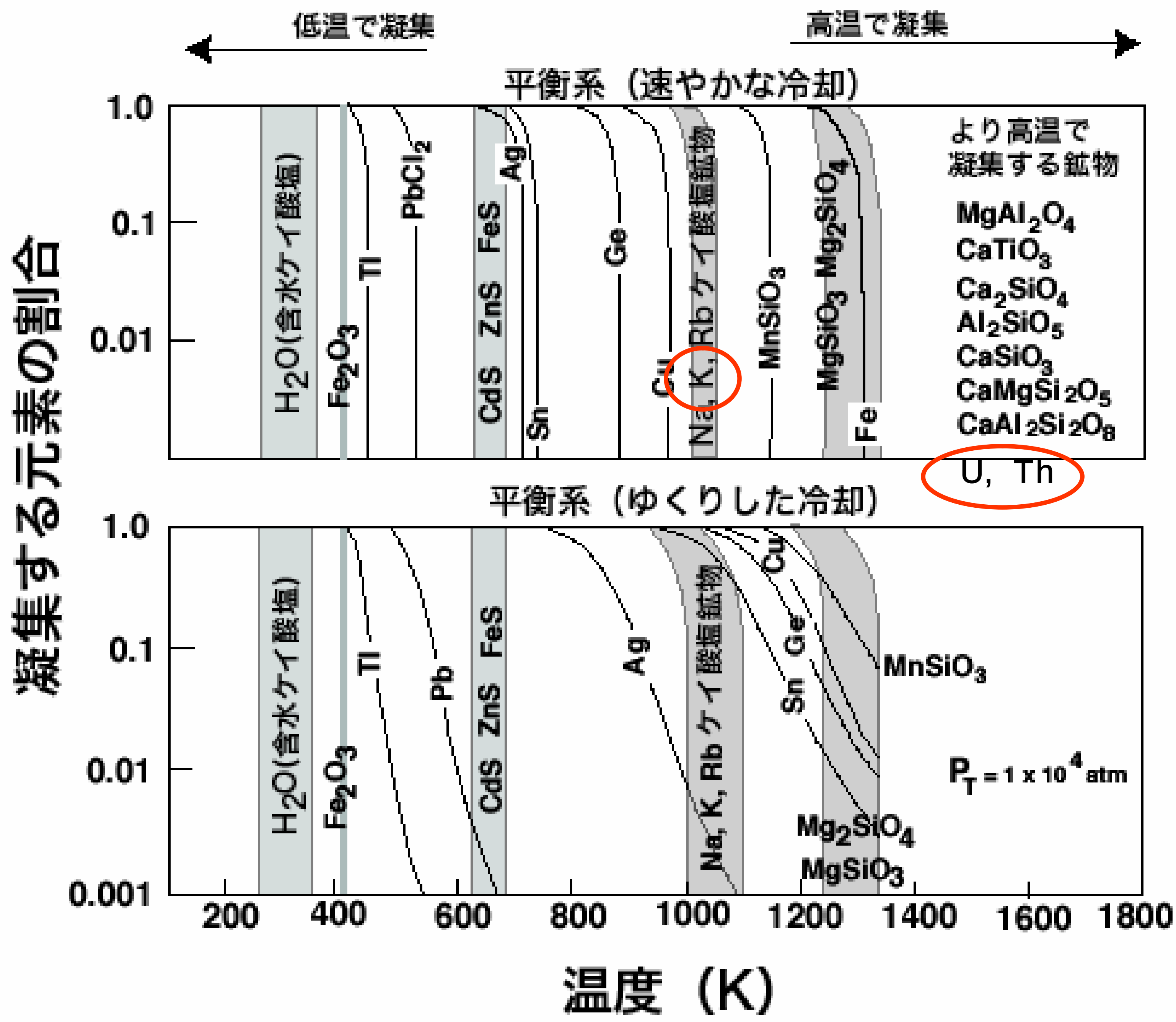
PLANETS AROUND NORMAL STARS
INNER SOLAR SYSTEM
MERCURY
VENUS
EARTH
MARS
47 UMa
2.4 MJup
51 Peg
0.47 MJup
55 Cancri
0.84 MJup
Tau Bootis
3.8 MJup
Upsilon Andromedae
0.68 MJup
70 Vir
6.6 MJup
HD 114762
10 MJup
16 Cyg B
1.7 MJup
Rho Cr B
1.1 MJup
0
1
2
ORBITAL SEMI MAJOR AXIS (AU)



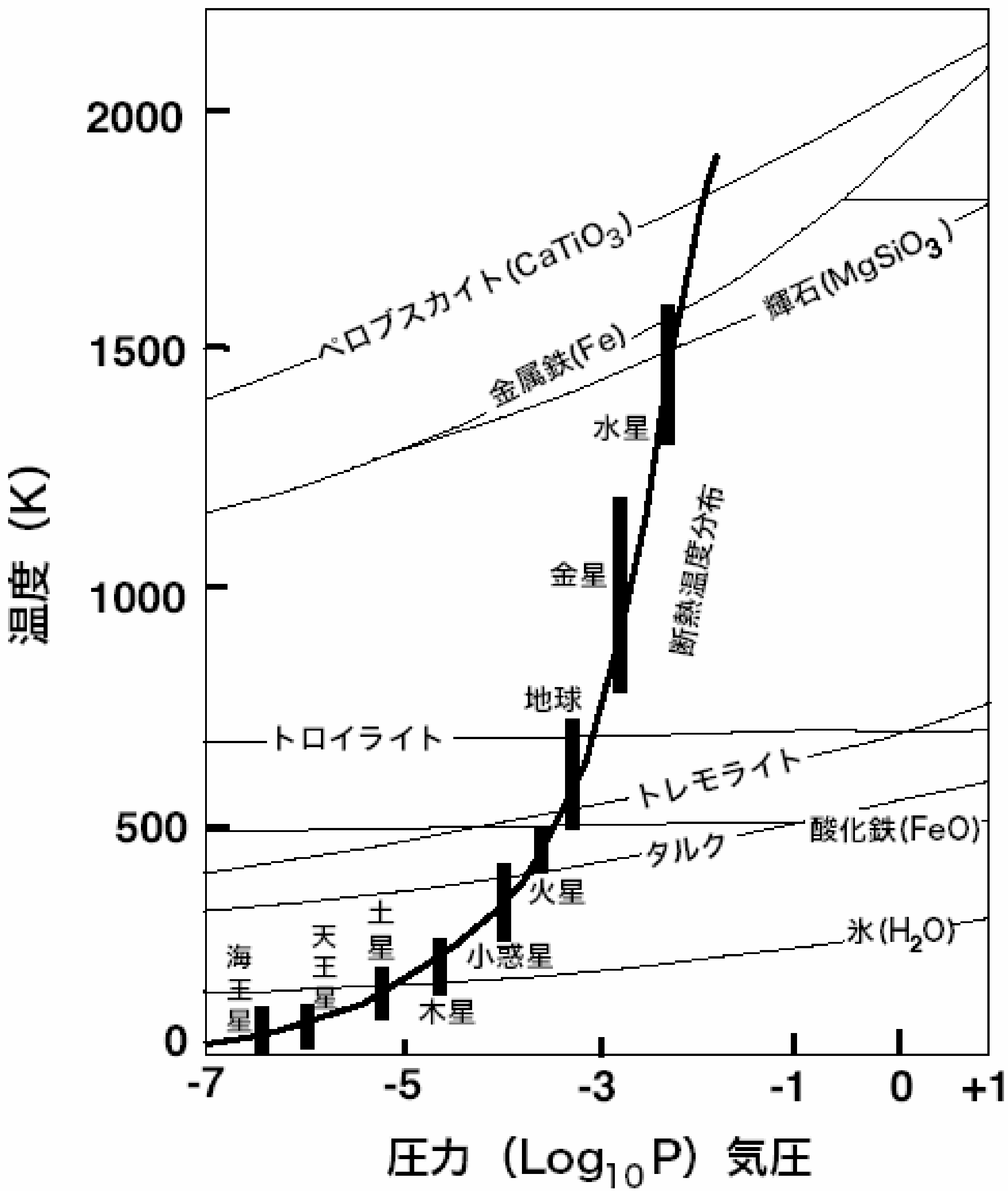

Proto-Sun
Cooler
Cooler
CO2
CH4
N2
Ices
H2O
Ice
Metal
&
Rock
2000K
300K
50K

Condensation temperatures and sequence of phasesnand
elements separating from gas of solar compositions at 10^{-4} atm total pressure
Temperature corresond to 50 percent condensation of a given element or compound

Element or compound	K
Ca, Al, Ti, U, Th oxides and silicates	>1400
platinum metals, W, Mo,Ta, Zr, REE	
Mg2SiO4	~1360
Fe-Ni metal	~1360
Remaining SiO2 (as MgSiO3)	1200~1350
Cr2O3	-
P	1290
Au	1230
Li	1225
Mn2SiO4	1190
As	1135
Cu	1118
Ga	1075
(K,Na)AlSi3O8	~1000
Ag	952
Sb	910
F	855
Ge	812
Sn	720
Zn	660-760
Se	684
Cd	680
S (as FeS)	648
FeO (10% ss. As (Mg0.9Fe0.1)2SiO4)	~600
Pb	520
Bi	470
In	460
Tl	440
Fe3O4	400
NiO	-
H2O (as hydrated silicates)	~300



低温で凝集
高温で凝集
平衡系（速やかな冷却）
より高温で凝集する鉱物
MgAl2O4
CaTiO3
Ca2SiO4
Al2SiO5
CaSiO3
CaMgSi2O5
CaAl2Si2O8
U, Th
H2O(含水ケイ酸塩)
Fe2O3
Tl
PbCl2
CdS ZnS FeS
Ag
Sn
Ge
Cu
Na, K, Rb ケイ酸塩鉱物
MnSiO3
MgSiO3 Mg2SiO4
Fe
平衡系（ゆくりした冷却）
Pb
Mg2SiO4
MgSiO3
PT = 1 x 10-4 atm
凝集する元素の割合
1.0
0.1
0.01
0.001
200
400
600
800
1000
1200
1400
1600
1800
温度（K）



2000
1500
1000
500
0
温度（K）
-7
-5
-3
-1
0
+1
圧力（Log10P）気圧
ペロブスカイト(CaTiO3)
金属鉄(Fe)
輝石(MgSiO3)
水星
金星
断熱温度分布
地球
トロイライト
トレモライト
酸化鉄(FeO)
タルク
火星
小惑星
氷(H2O)
土星
天王星
海王星
木星

コンドライトと一致する。

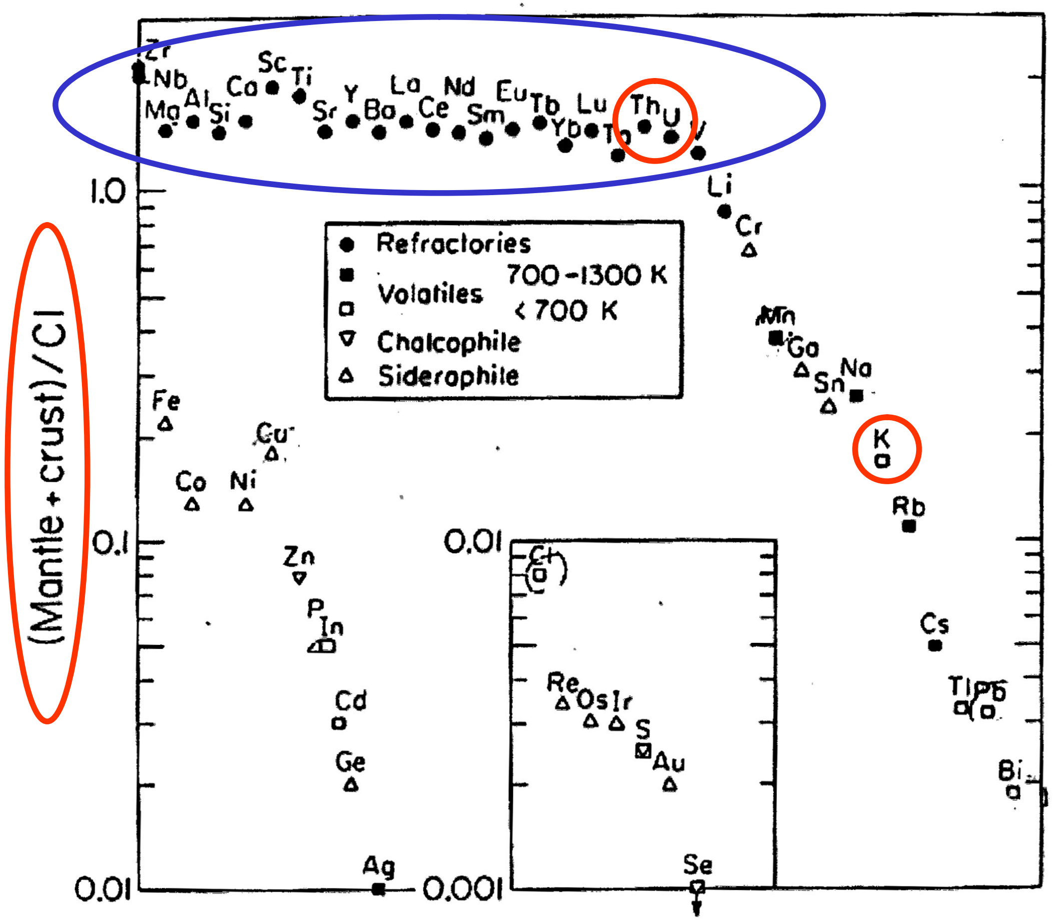


FIGURE 8-2
Abundances of elements in "primitive mantle" (mantle + crust) relative to C1, derived by mixing mantle components to obtain chondritic ratios of the refractory lithophile elements.

Cosmochemical predictions for U and Th sbundances

(1) Is the U content in the Earth similar to the Moon?
40ppb U and Th/U~3.7
40ppb U and corresponding K and Th ~ total heat flux of 40TW of the present Earth

Geochemical model model suggests about 20 ppb in the bulk silicate Earth

(2) Is the Th/U ratio of the Earth the same as the chondritic ratio, 3.7. It varies from 2.2 to 6 in the rock samples in the Earth.

A model for formation of the planets

Two comonent model:
High temperature component, A; no K and Th/U~3.7
And low temperature component, B; chondritic K, Th/U~3.7
(Ringwood, 1985; Wanke, 1989)

High temperature ↑

	A:B	K/U	Th/U	U
Marcurey		0	3.7	38ppb
Moon		2000~2500	3.7	40ppb
Earth	90:10	10000	3.7	14ppb
Mars	80:20	50000~70000	3.7	11~15ppb
Chondrite		50000~80000	3.7	12ppb

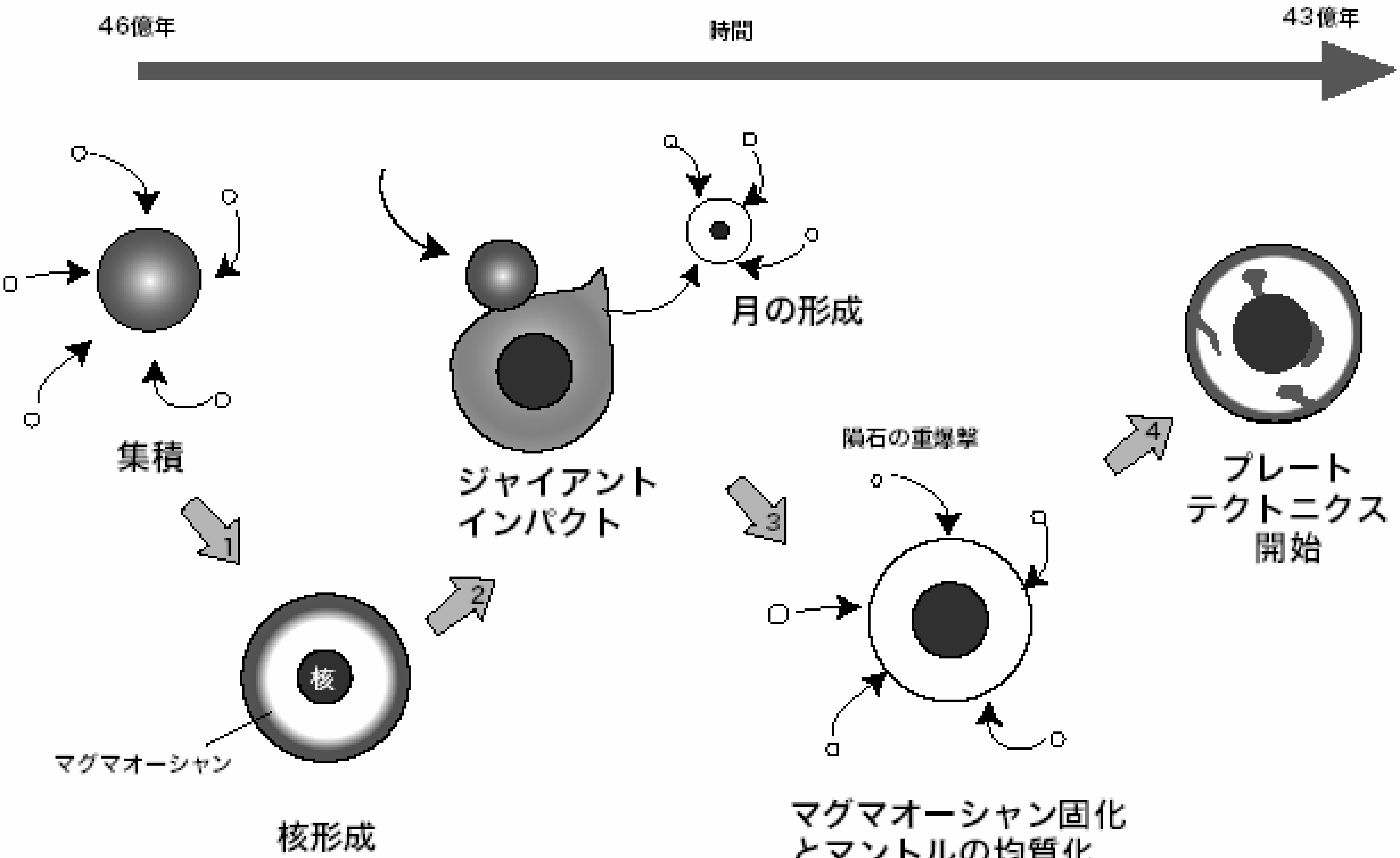
↓ Low temperature

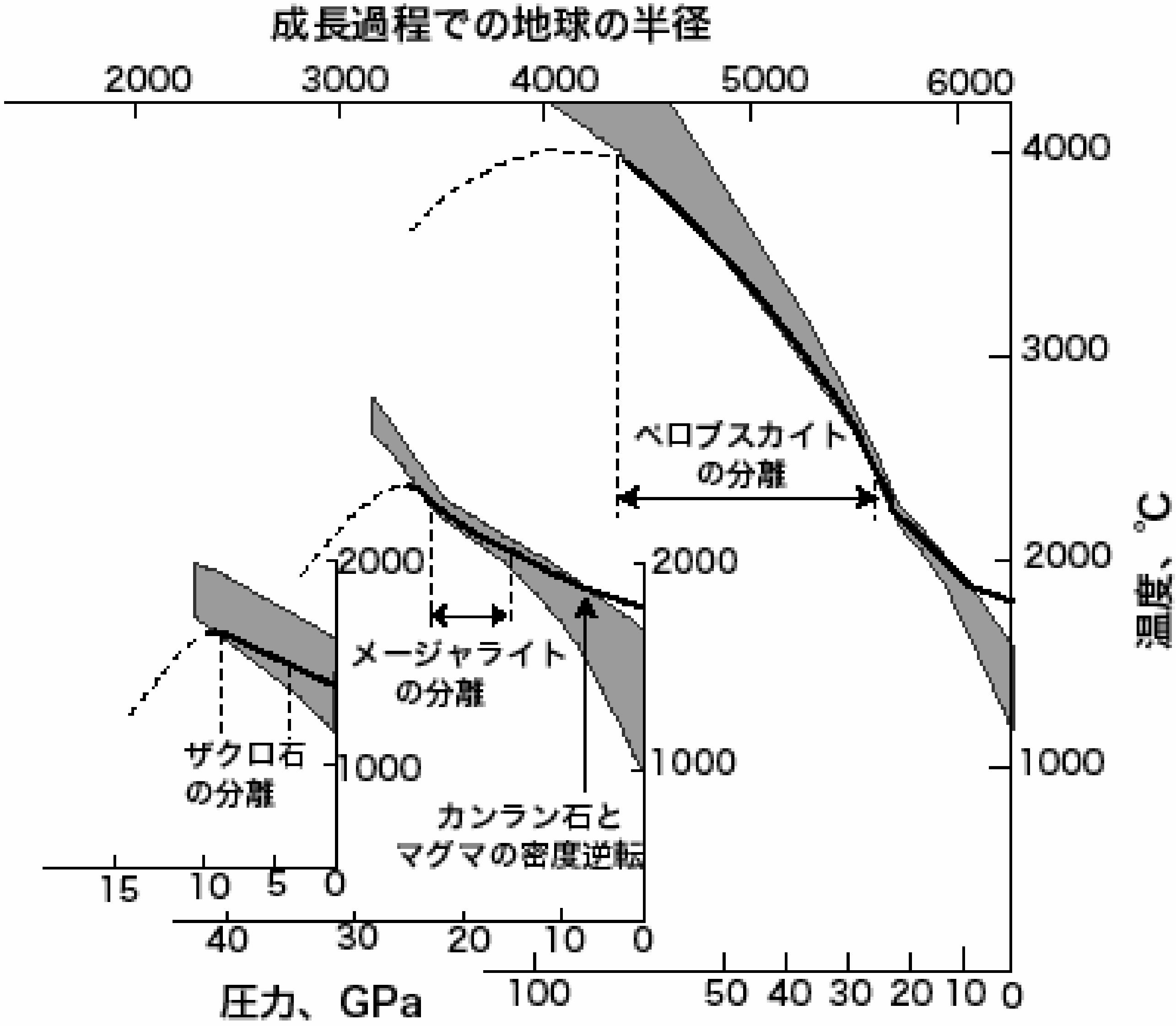
4. Thermal budget of the Earth

Energy Budget of the Earth

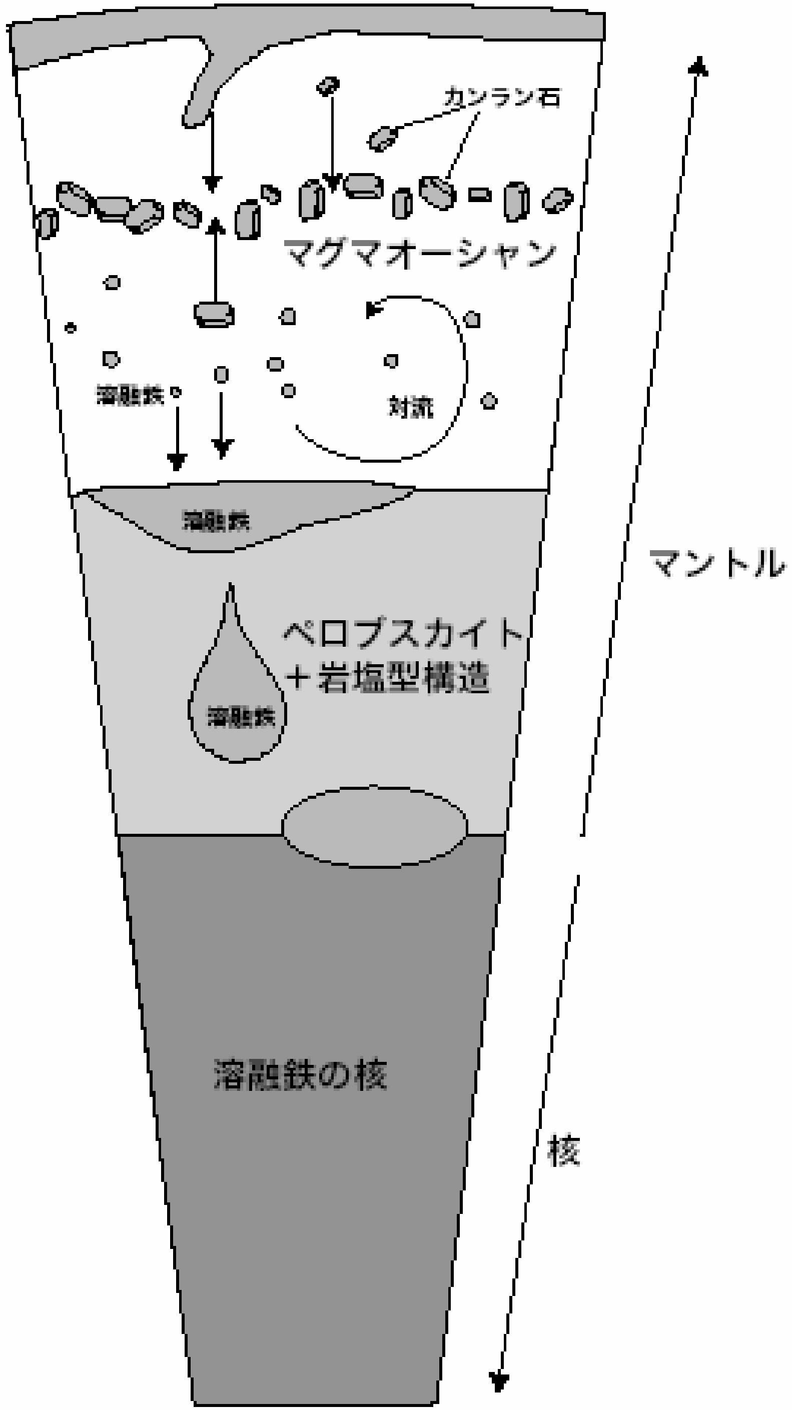
Invalance of Heat:
Out flow from Earth 44TW > Crust+Mantle+Core 21~30TW
i.e., Urey ratio (Radiogenic heat production/Heat flow)
~ 0.5
Secular cooling ? Periodic change?
Energy release stored in the Early stage

Heat flow measurement: 44 TW
Heat Generation:
Crust+Mantle ~ 20 TW (for K, U, and Th): Based on Chondrite model
No radiogenic heat in the core
Heat flux from the core: 1~10 TW (for driving geodynamo)


46億年
時間
43億年
集積
1
ジャイアント
インパクト
月の形成
2
核
マグマオーシャン
核形成
3
隕石の重爆撃
マグマオーシャン固化
とマントルの均質化
4
プレート
テクトニクス
開始

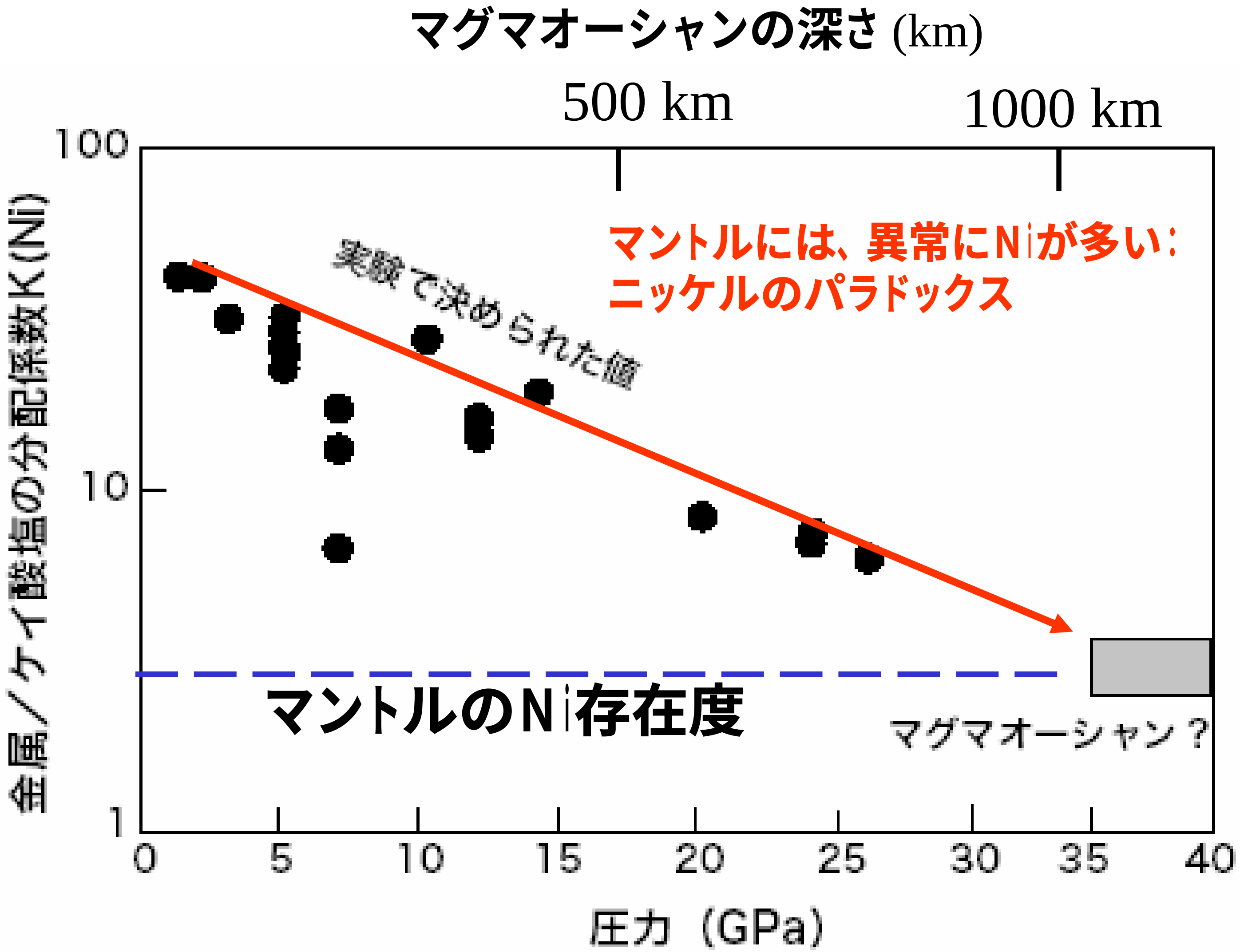


成長過程での地球の半径
2000
3000
4000
5000
6000
4000
3000
2000
1000
温度、°C
ペロブスカイト
の分離
メージャライト
の分離
ザクロ石
の分離
カンラン石と
マグマの密度逆転
2000
1000
2000
1000
15
10
5
0
40
30
20
10
0
100
50
40
30
20
10
0
圧力、GPa



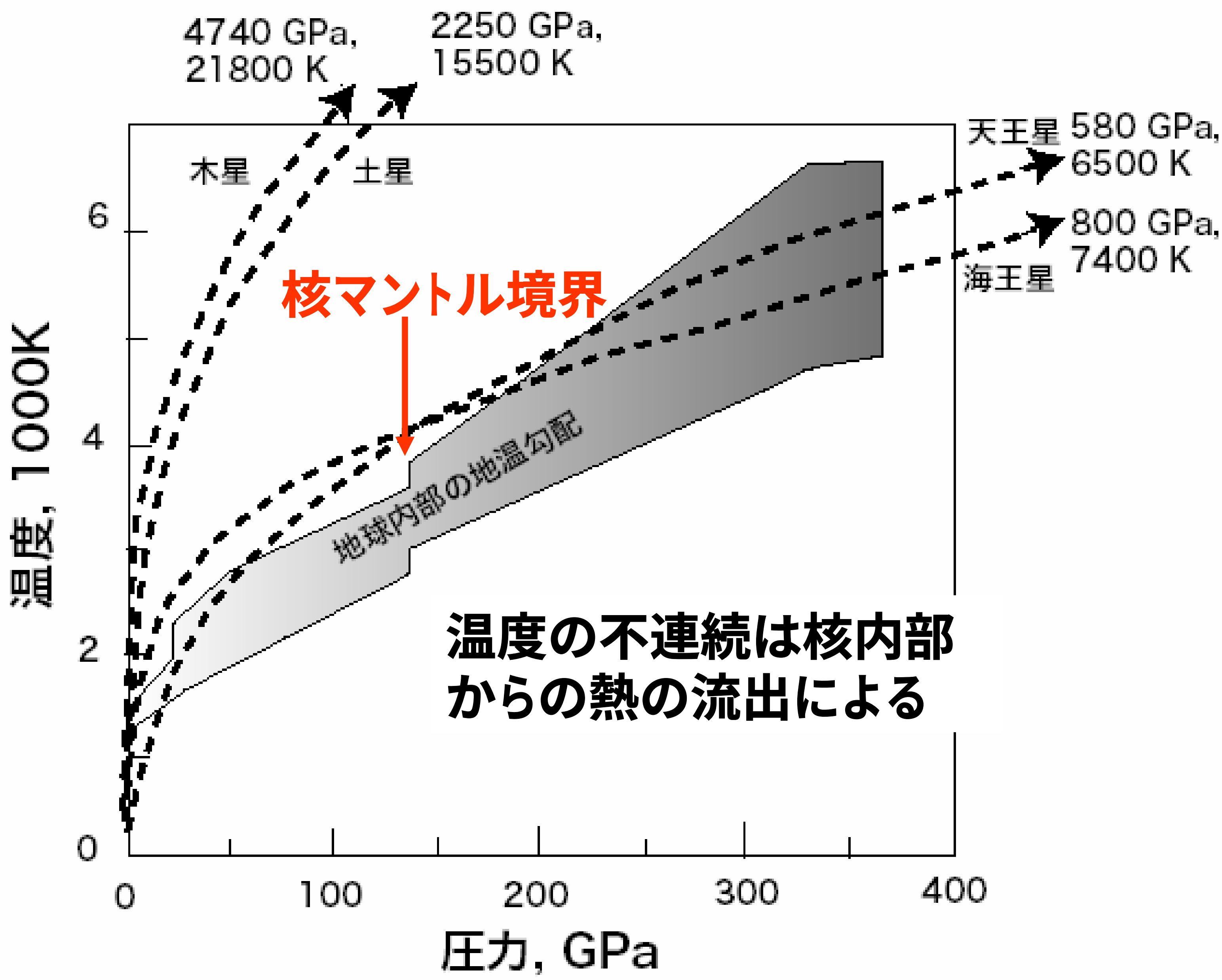
カンラン石
マグマオーシャン
溶融鉄
対流
溶融鉄
ペロブスカイト
＋岩塩型構造
溶融鉄
溶融鉄の核
マントル
核

マグマオーシャンの深さ：
マントルのNiの存在度　→　Niの核・マントル分配



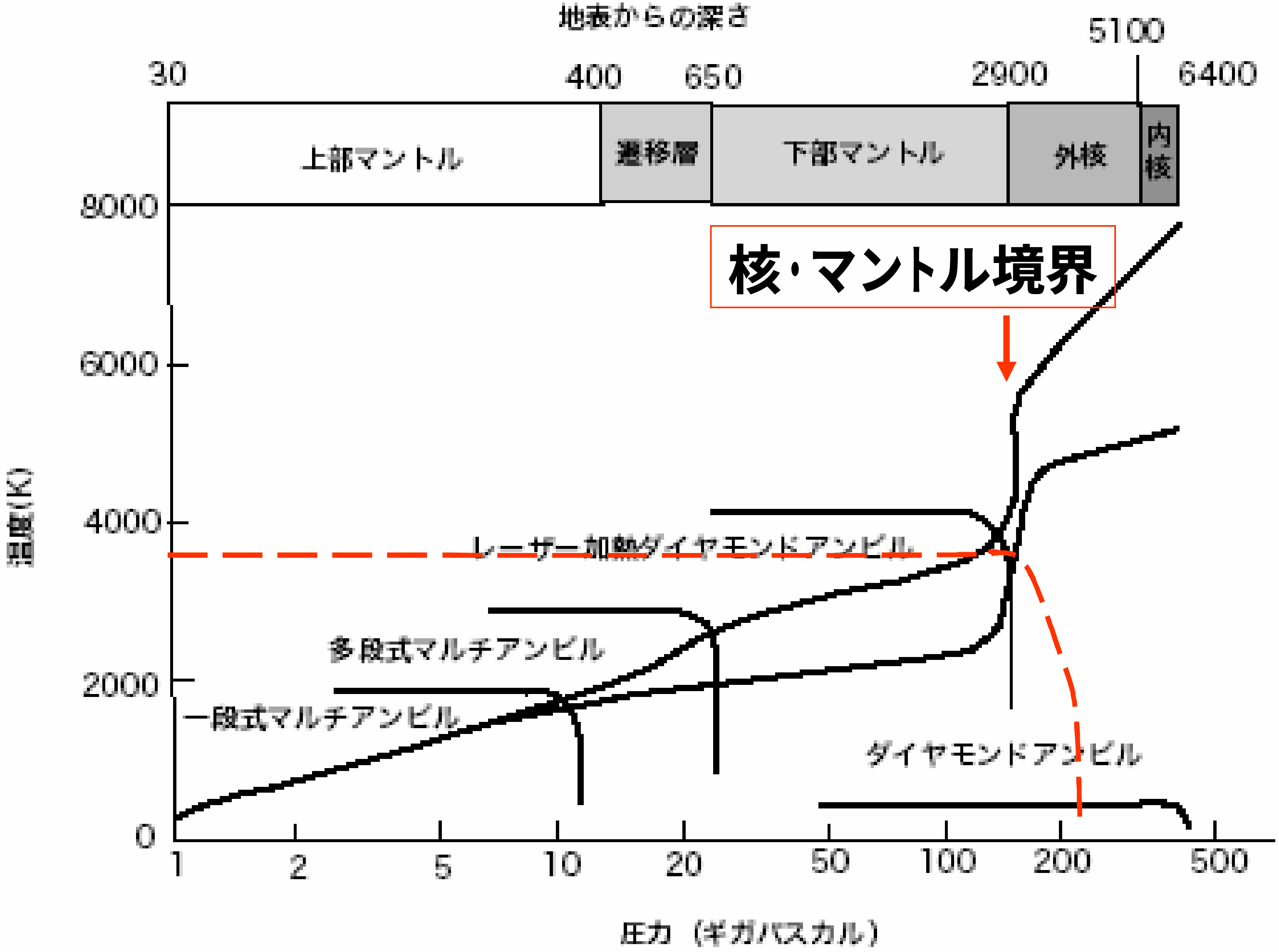
Energy released by core formation in an oliginally homogeneous plar

	R Core Radius (km)	E Energy Release (J)	ΔT Temperature Rize (K)
Earth	3485	1.5*10^31	2300
Mars	1400-2100	(1.8-2.3)*10^29	300-330
Mercury	1840	2*10^29	680
Moon	~200	10^27	12



4740 GPa,
21800 K
2250 GPa,
15500 K
木星
土星
天王星 580 GPa,
6500 K
800 GPa,
7400 K
海王星
核マントル境界
地球内部の地温勾配
温度の不連続は核内部
からの熱の流出による
温度, 1000K
0
2
4
6
0
100
200
300
400
圧力, GPa

地球内部の条件と高温高圧装置の発生条件



Future directions

1. Heterogeneity in U and Th contents in the Earth
   Test of Geochemical models

2. Heat source in the Deep Earth, i.e.

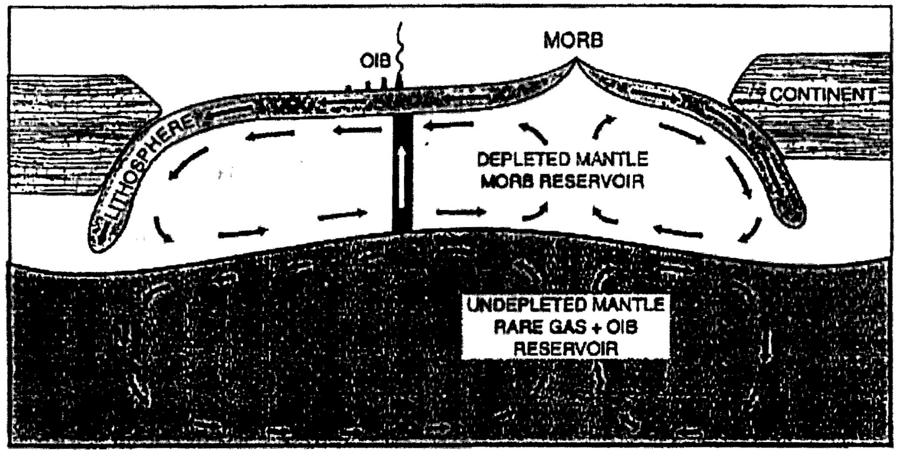
Lower manlte:
   Existence of primitive source at CMB

Core:
   Heat source in the Core
   Evolution of the core: Formation of the inner core
   Formation of the magnetic field
   Growth of the inner core

様々なマントルモデル：検証する必要がある。

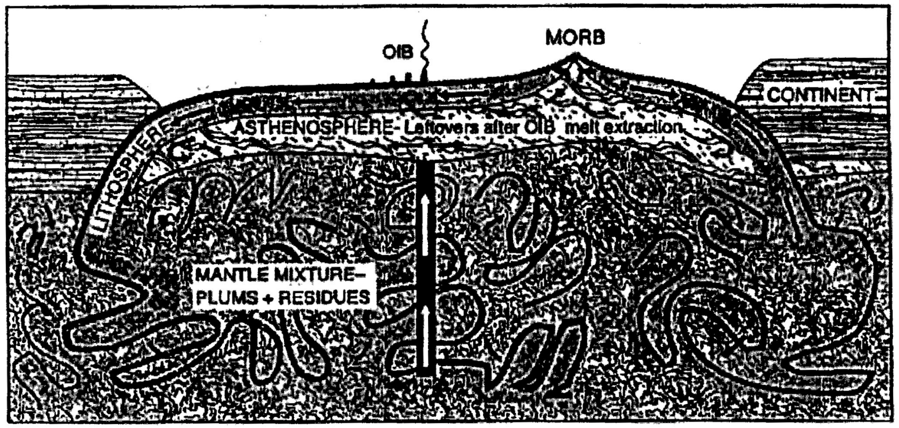
J. Phipps Morgan, W.J. Morgan / Earth and Planetary Science Letters 170 (1999) 215–239

(a)



2層のマントル
上部マントルｖｓ
下部マントル

(b)



均質に近いマントル：対流による混合

Fig. 1. (a) Cartoon of stratified mantle convection that is consistent with the observed geochemistry of mid-ocean ridge basalt (*MORB*) and continental crust. This paradigm is often invoked to explain observed rare gas differences between ocean island basalt (*OIB*) and MORB, observed isotopic depletion of MORB and isotopic enrichment of continental crust, and trace element contrasts between MORB and continental crust. However, it does not seem to be consistent with geophysical evidence for significant present-day flow between the upper and lower mantle. (b) Alternative paradigm of whole mantle convection that may prove to be consistent with both geochemical and geophysical evidence. In this scenario the mantle is a 'plum-pudding' mixture of recycled basalts and continental sediments, rich in incompatible elements, that have been stirred by convection into recycled residues from plume and ridge melt-extraction and surviving 'primitive' mantle. The asthenosphere 'MORB-source' is derived from typical plum-pudding mantle by melting an upwelling plume — the plume melts become an OIB, while the depleted leftovers from plume-melting pond beneath the lithosphere to supply the asthenosphere. When this depleted asthenosphere upwells and melts a second time beneath a ridge, its melts become a MORB.

下部マントル内部に不均質：層構造？

Kellogg et al. (1999)

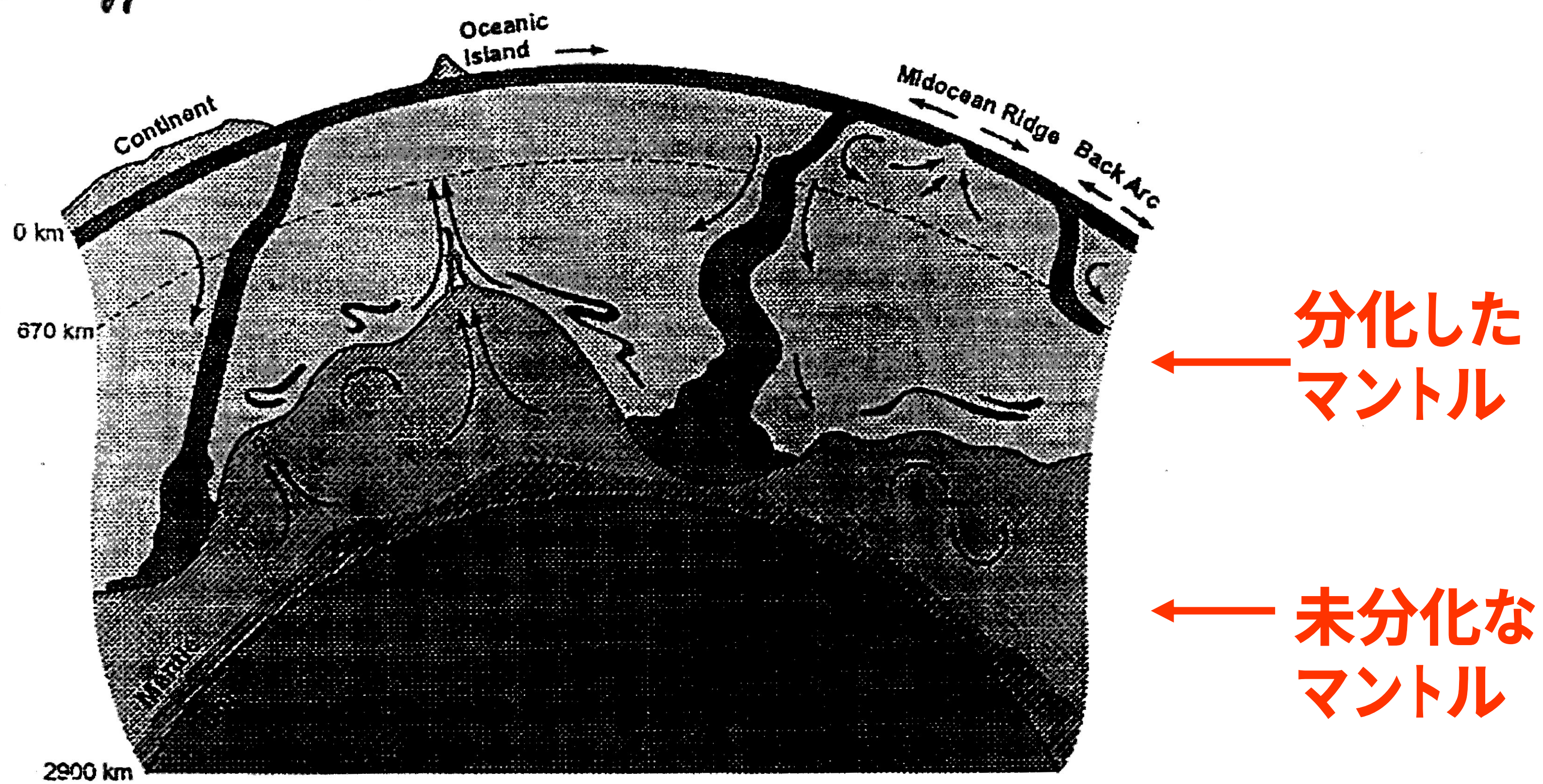


Fig. 1. Diagram illustrating the possible dynamics of an intrinsically dense layer in the lower mantle. Depth to the top of the layer ranges from ~1600 km to near the CMB, where it is deflected by downwelling slabs. Internal circulation within the layer is driven by internal heating and by heat flow across the CMB. A thermal boundary layer develops at the interface, and plumes arise from local high spots, carrying recycled slab and some primordial material.

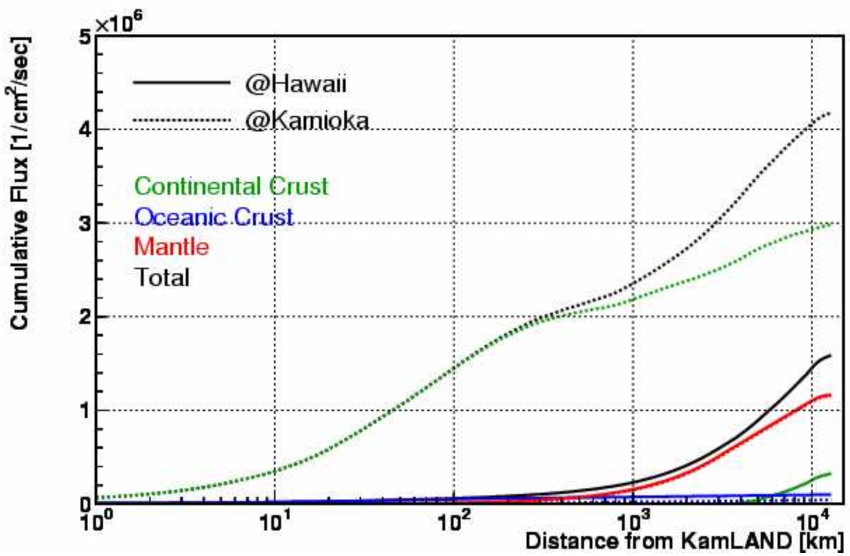
19 MARCH 1999 VOL 283 SCIENCE www.sciencema

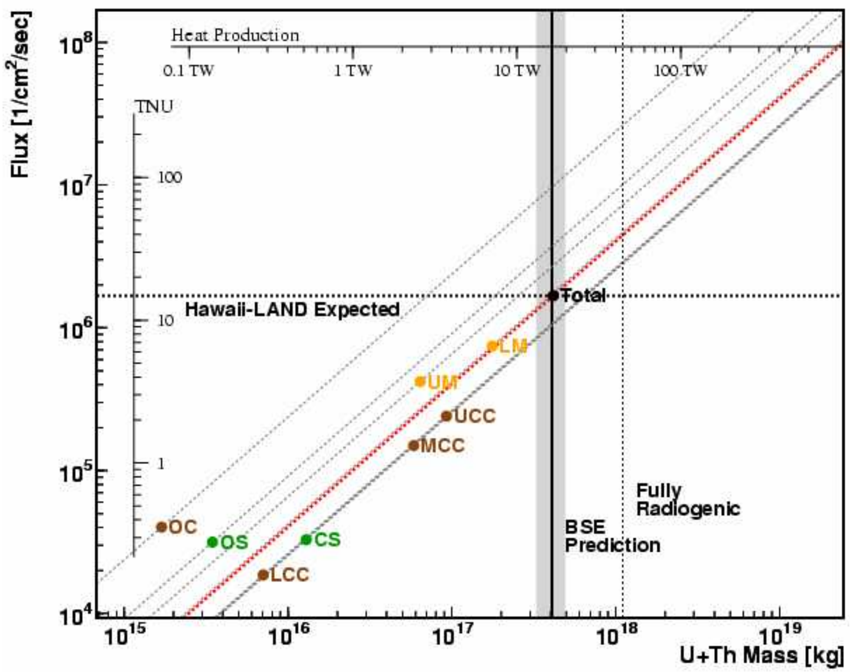
核内部の熱源の有無、存在量

ジオダイナモの駆動
内核の進化：いつ内核は生まれたのか、外核はいつ固化するのか。

地球磁場の形成期、進化
地球磁場の形成は、生命を有害宇宙線から防護：
生命の進化と海から陸への移動に影響？

核と下部マントルの熱源を調べるために！



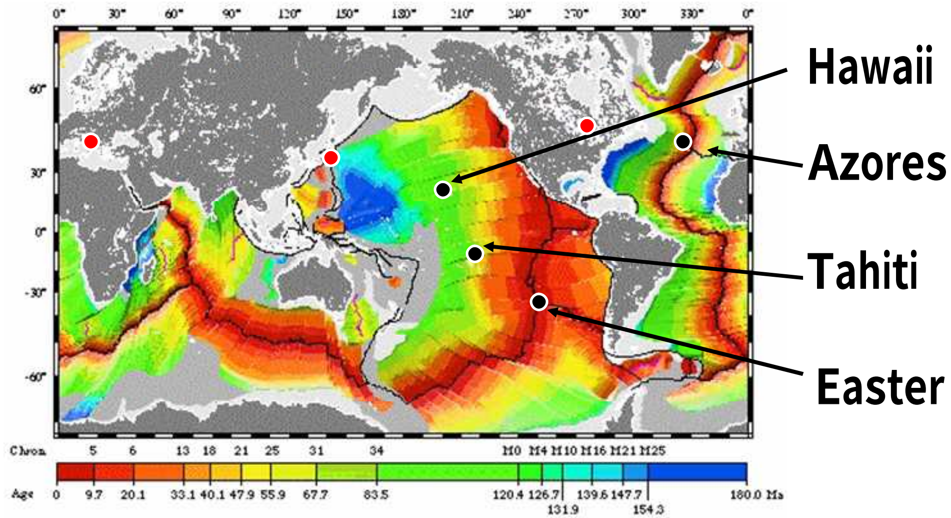


Hawaii での観測では

- フラックスの半分が下部マントル起源
- フラックスの3/4がマントル起源
- 近距離地質が単純で不定性が少ない
- 周辺に原子炉がない (原子力潜水艦?)

地球ニュートリノは ~1000kmの平均組成を見る

- 海嶺の下のマントル組成
- Super Plume のマントル組成
- 各時代の大陸の平均組成



- ニュートリノ観測は，地球科学，特に深部組成と熱収支に関するユニークな情報をもたらす．
- KamLAND 実験によって，地球ニュートリノの観測が現実になった．
- KamLAND の周辺地質を詳細に見積もり，全地球的な議論ができるようになった．
- 将来の地球ニュートリノ観測の候補地として，特にハワイを提案．下部マントルと核の組成に感度がある．