Birth place of life on the Hadean Earth

S. Maruyama

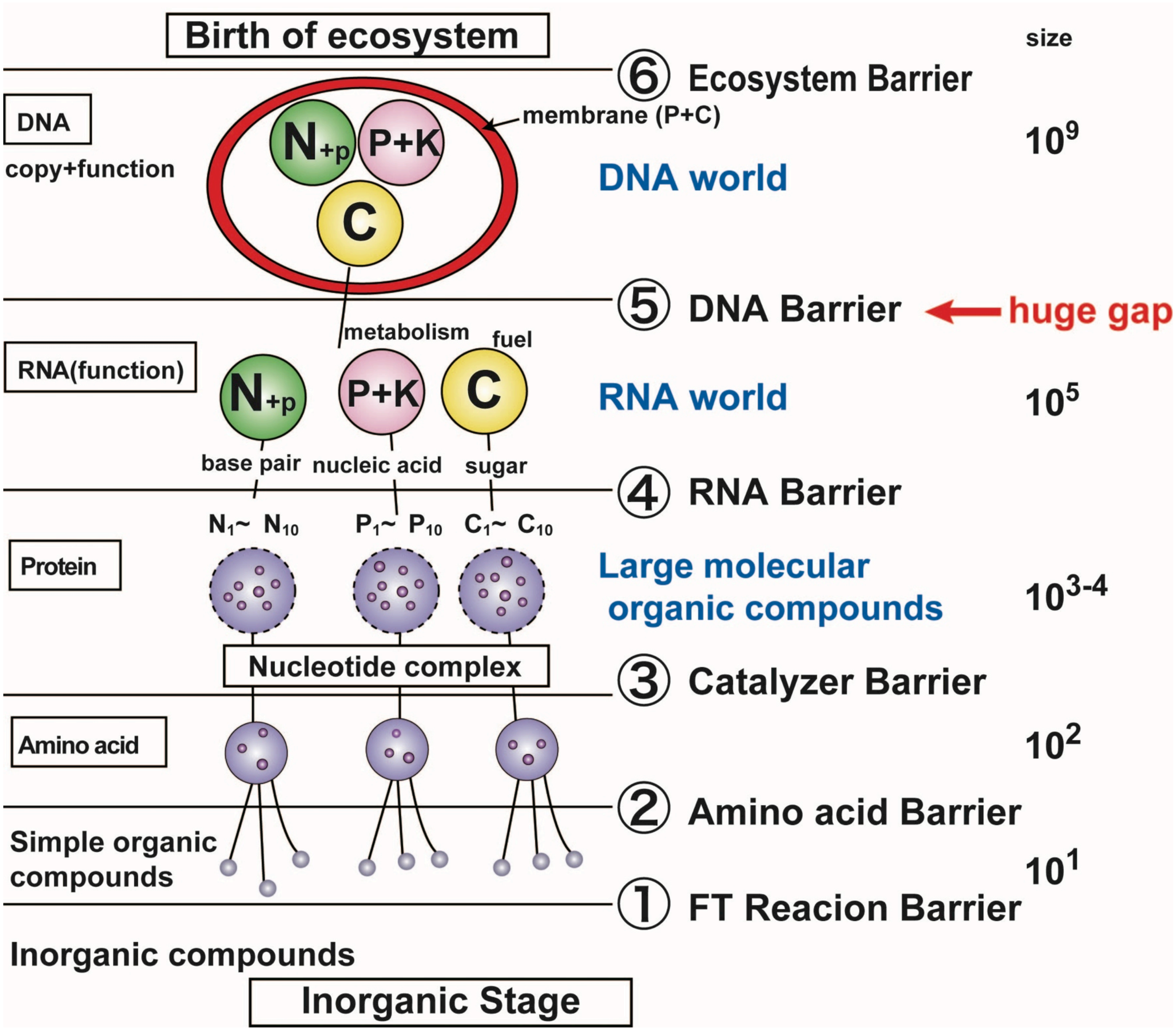
Contents

1. Summary of previous works
2. New concept, Habitable trinity
3. Reconstruction of Hadean Earth
4. Birth of life on the rifted lake on primordial continents

1. Summary of previous works

What is life?

What is life?


Birth of ecosystem
size
⑥ Ecosystem Barrier
DNA
copy+function
membrane (P+C)
N+p
P+K
C
10^9
DNA world
⑤ DNA Barrier
huge gap
metabolism
fuel
RNA(function)
RNA world
10^5
base pair
nucleic acid
sugar
④ RNA Barrier
N1~ N10
P1~ P10
C1~ C10
Protein
Large molecular
organic compounds
10^3-4
Nucleotide complex
③ Catalyzer Barrier
Amino acid
10^2
② Amino acid Barrier
Simple organic
compounds
10^1
① FT Reacion Barrier
Inorganic compounds
Inorganic Stage

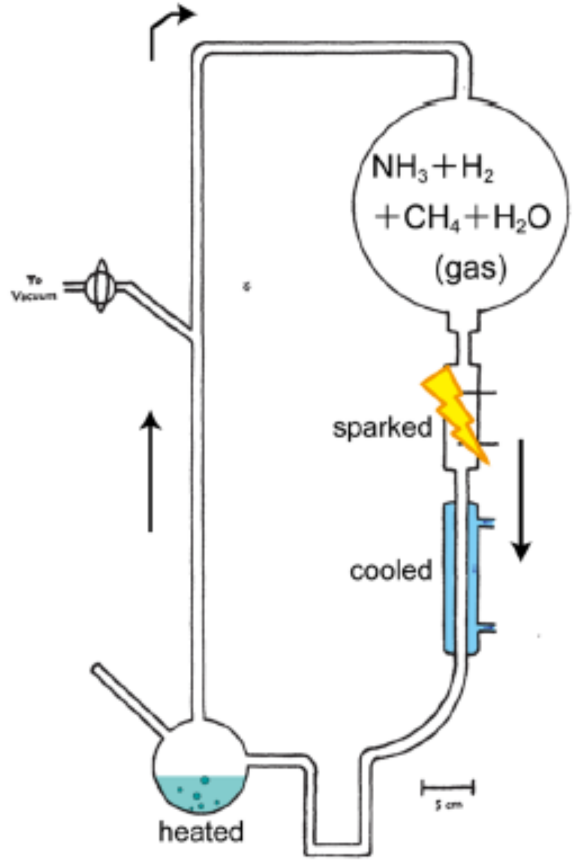


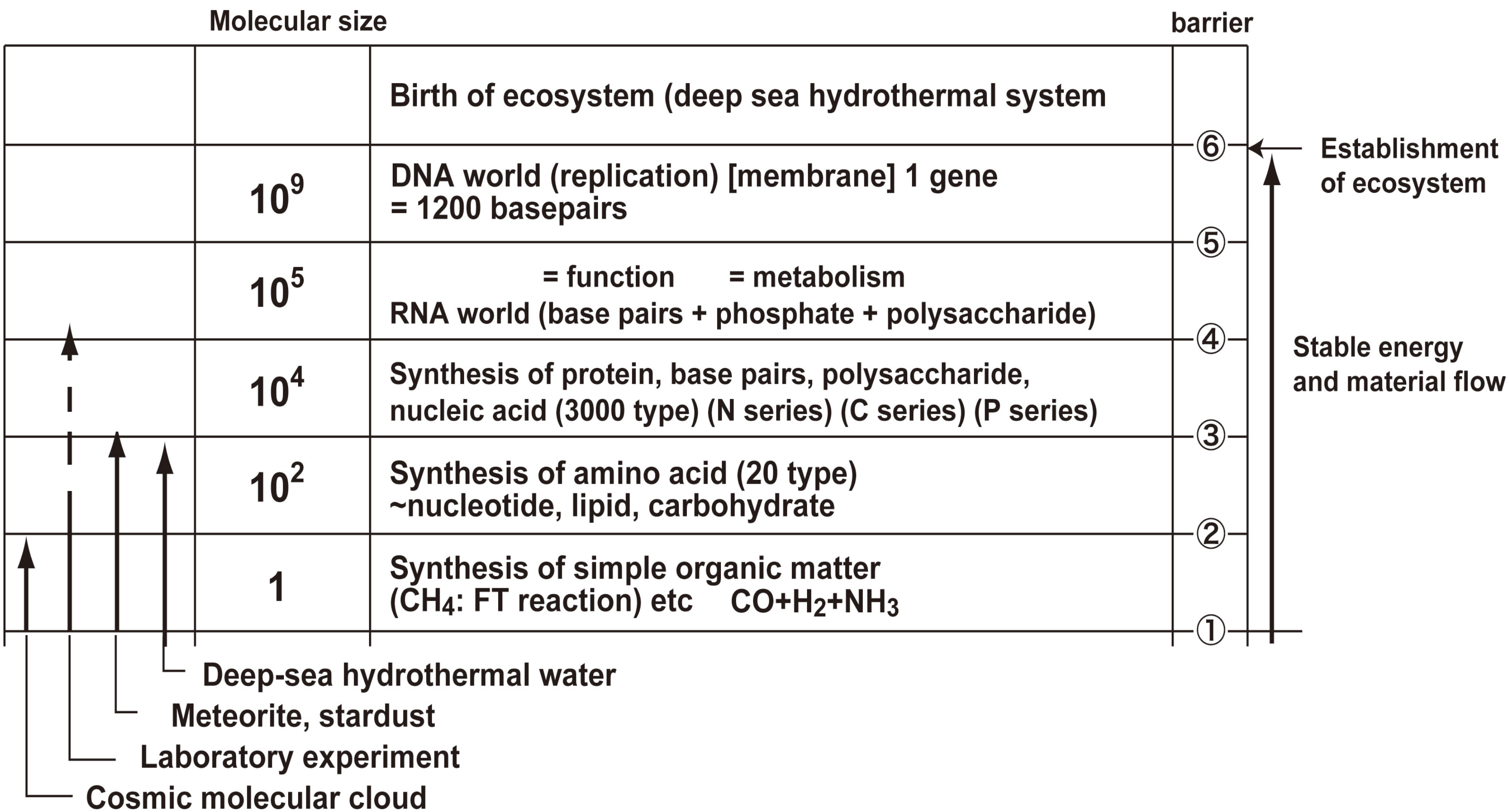
FIG. 1.

(http://universe-review.ca/F11-monocell.htm)

Fig. I-1. The design of the Urey-Miller experiment (Miller, 1953), which included the use of flasks, a pair of electrodes, liquid water, methane, ammonia, and hydrogen, all of which were connected into a loop by a glass tube, is shown. The liquid water was heated to induce evaporation, sparks were fired between the electrode to simulate lightening through the atmosphere and water vapor, and then atmosphere was cooled again so that the water could condense and trickle back into the first flask in a continuous cycle.

Yoshizaki (2013)

Difficulty of synthesis of huge organic compounds



Difficulty of synthesis of life in laboratory. Barrier 4, 5 and 6 are extremely difficult because of stabilization of huge organic molecules. Natural processes more than several thousands of reactions were coded finally into Genome finally to pass over the Barrier 5 to become life.

What is life?

1. ①Membrane, ②metabolism and ③self-replication

2. ④ Organic radicals：endless reactions over 4.4Ga

3. Outer condition:
   ⑤ Habitable trinity+⑥Engine to drive the system (Sun)

Life=Organic radical reactions

１．What is radical reaction? Analogy: Nucleids radiation reactions making continuously unstable nucleids.

２．Organic radical reactions continue over 4.4 Ga

（e.g., **Fertile egg→Baby chick**→adult chicken,

Reactions occur in a restricted T range ca. 37℃）

３．Self-organizations

（Coordinate bond & organic compound:

Frontier of new material industry)

４．Nearly infinite number of organic radical reactions which are possible only by C,H,N,O with metallic elements from rocks, and impossible by silicates only.

Summary(Life)

- 1 Chemical evolution: Laboratory synthesis & natural occurrence
- 2 Synthesis of membrane(oversaturation)
- 3 Coding the program (self-replication):
  It took ca. 300 m.y. combining more than 300 organic radical reactions in the Hadean.

2 New concept, Habitable Trinity

Chemical composition of life

Table shows chemical composition of 70kg weighing human body. C,H,O,N, Ca, Mg, P, K etc, all elements must be supplied from three components, e.g. Ocean, Atmosphere, Rock (landmass)

Element	Weight(Kg)	Wt%	Compose of
O	45.50	65.00	All
H	7.00	10.00	Ocean
C	12.60	18.00	Atmosphere
N	2.10	3.00	Atmosphere
Ca	1.05	1.50	Landmass
P	0.70	1.00	Landmass
Minor*	1.05	1.50	Landmass
Total	70.00	100.00	------

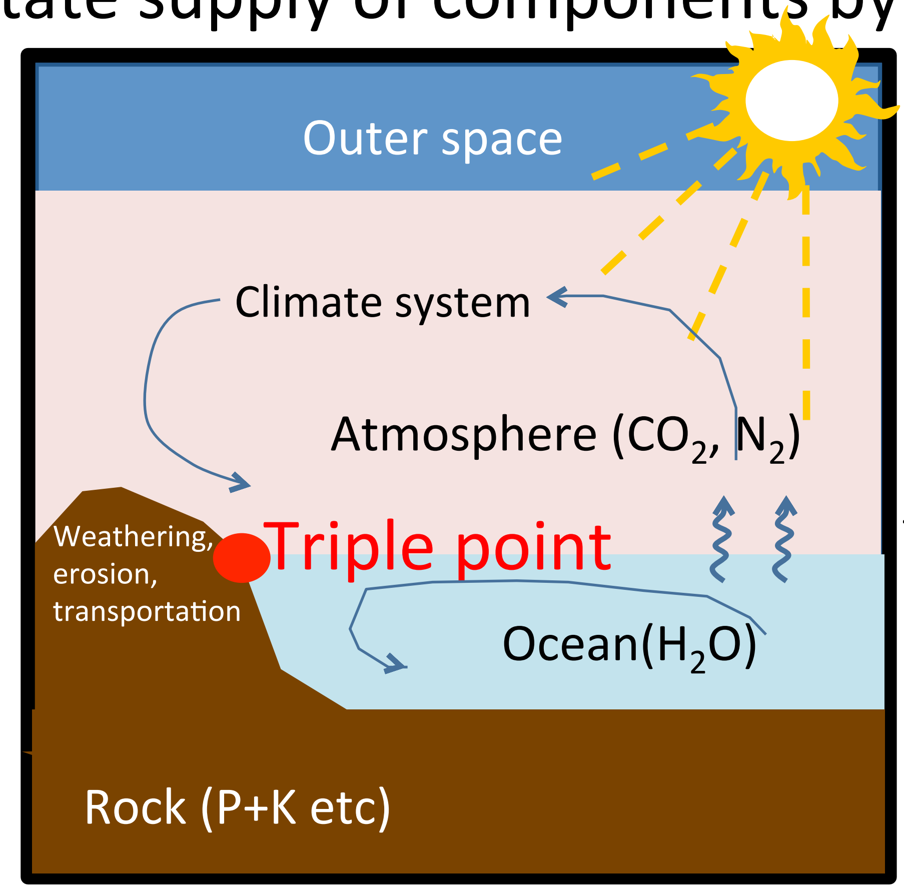
*Minor elements: K, Na, S, Cl, Fe,Cu, Zn, Mo, Cr, Co, Ga, Se, I, Si, F, Cd, Ba, Sn, Hg, Ni, V

Life is not composed of water only.

Habitable Trinity: Co-existence of three components

Steady-state supply of components by an engine (Sun)

Modern Earth



Hadean atmosphere

35-90 atm CO2-rich + N2

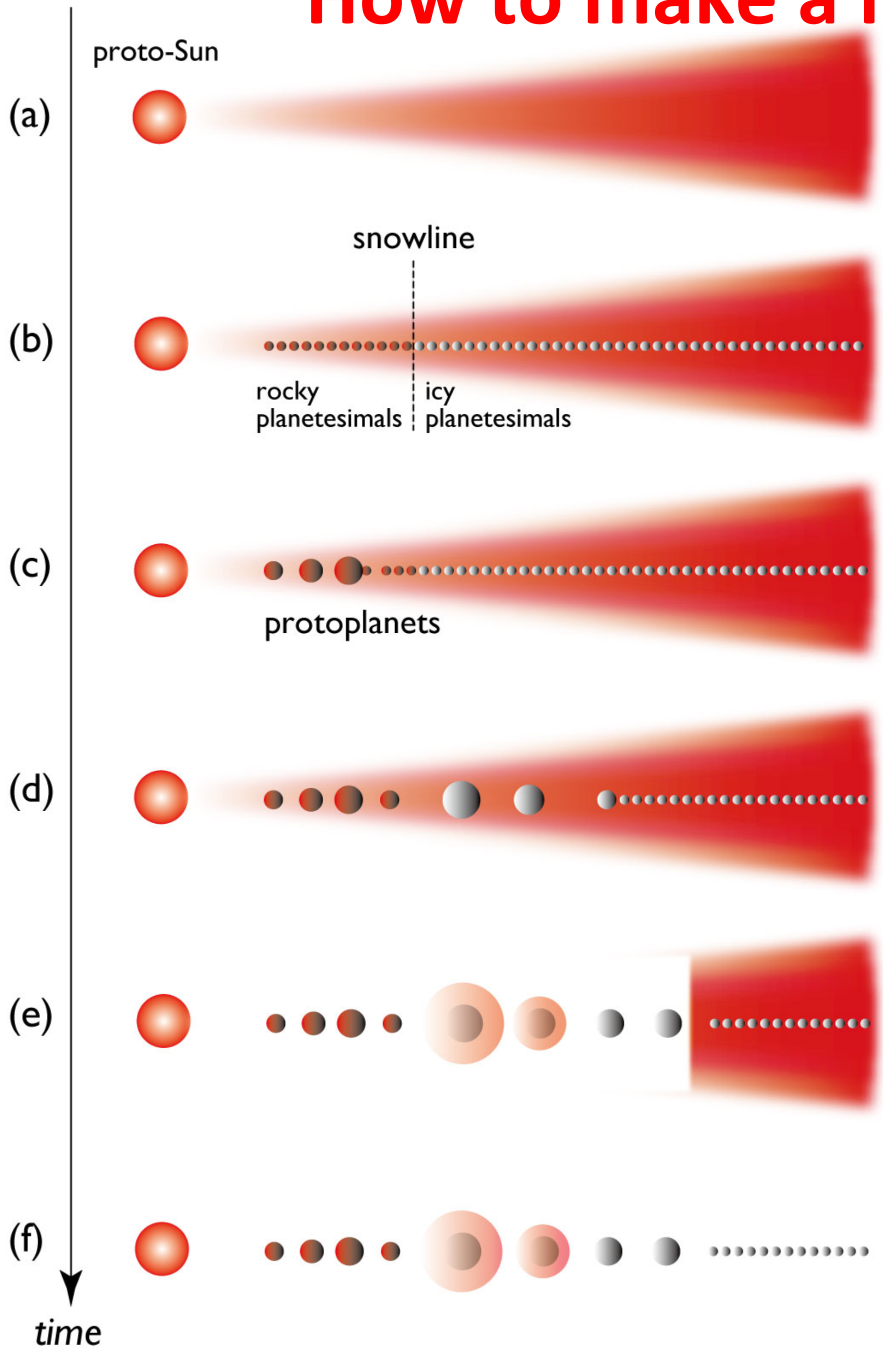
Ocean (all halogens, pH<1 F, Cl, Br, I, S; heavy metals, Cd, Cu, Pb, Zn, Mo, Fe, Mg)

Anorthosite + KREEP

This is essential minimum, not sufficient for the beginning of life, because the chemical compositions for those were all different in the Hadean from the modern Earth.

3. Birth place of life on the Hadean Earth

How to make a naked planet Earth

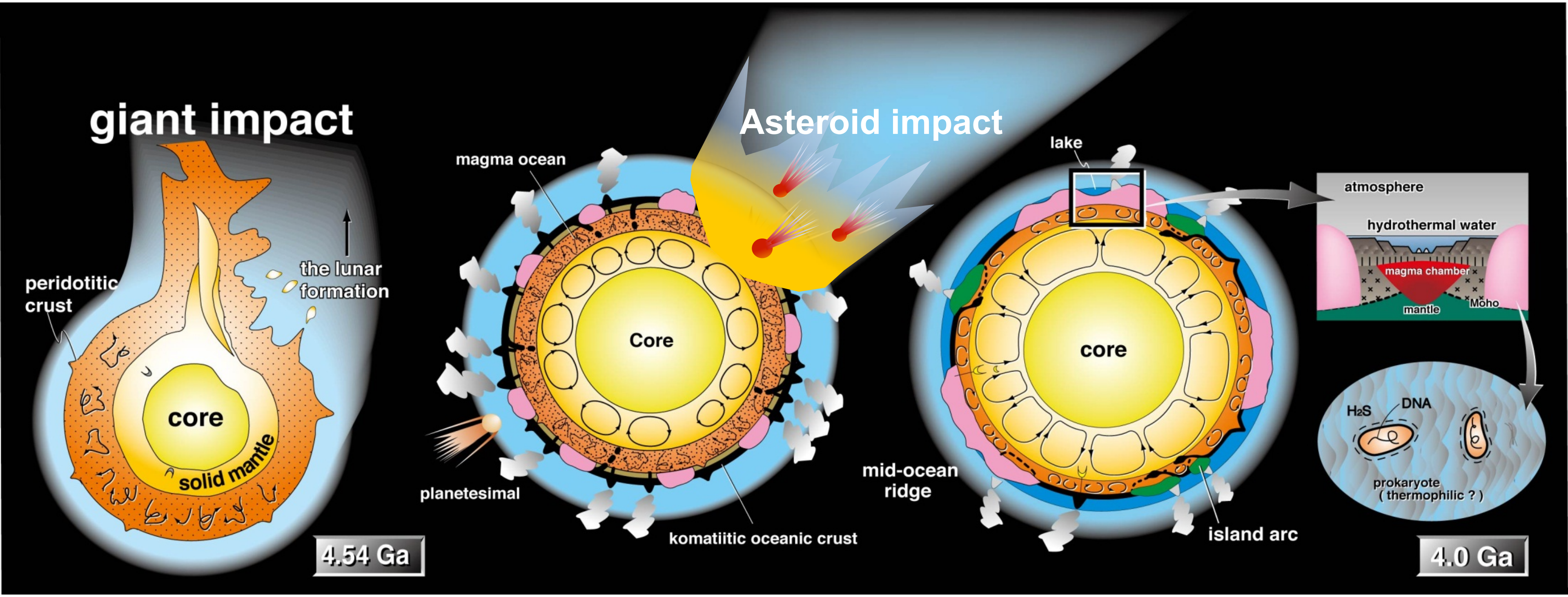


Two steps:
First, formation as a dry rocky planet inside of the snowline.
Second, bombardment of hydrous asteroids.

Cool Jupiter played a key role:
Shielding comet bombardments not to add much water to the inner rocky planets.

D/H ratio of Earth's ocean supports the idea.

Two step formation of the Earth-Moon system
4.56Ga: Dry Earth-Moon system
4.4Ga: 4km thick thin skin of ocean and atmosphere



Birth of life on the primordial continents

Anorthositic continents covered by KREEP basalt with KREEP lower crust

Primordial continents on which first life was born.

Facing to the Earth ←

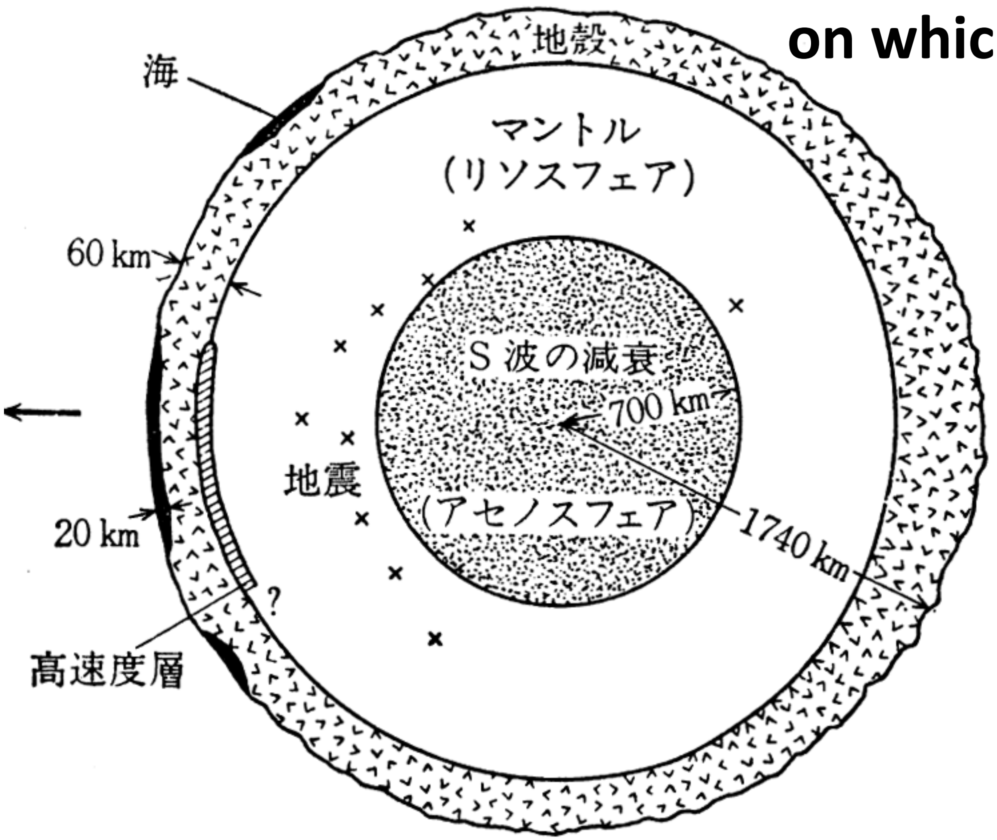


図 5.11　月の内部構造の模式図．地殻の厚さは実際よりも誇張して書いてある(Toksöz & Johnston, 1974 による)．

Anorthositic continents with KREEP are the excellent catalyzer to synthesize amino-acids and much larger organic compounds. Amino acids can be synthesized under the rifted lake on the primordial continents.

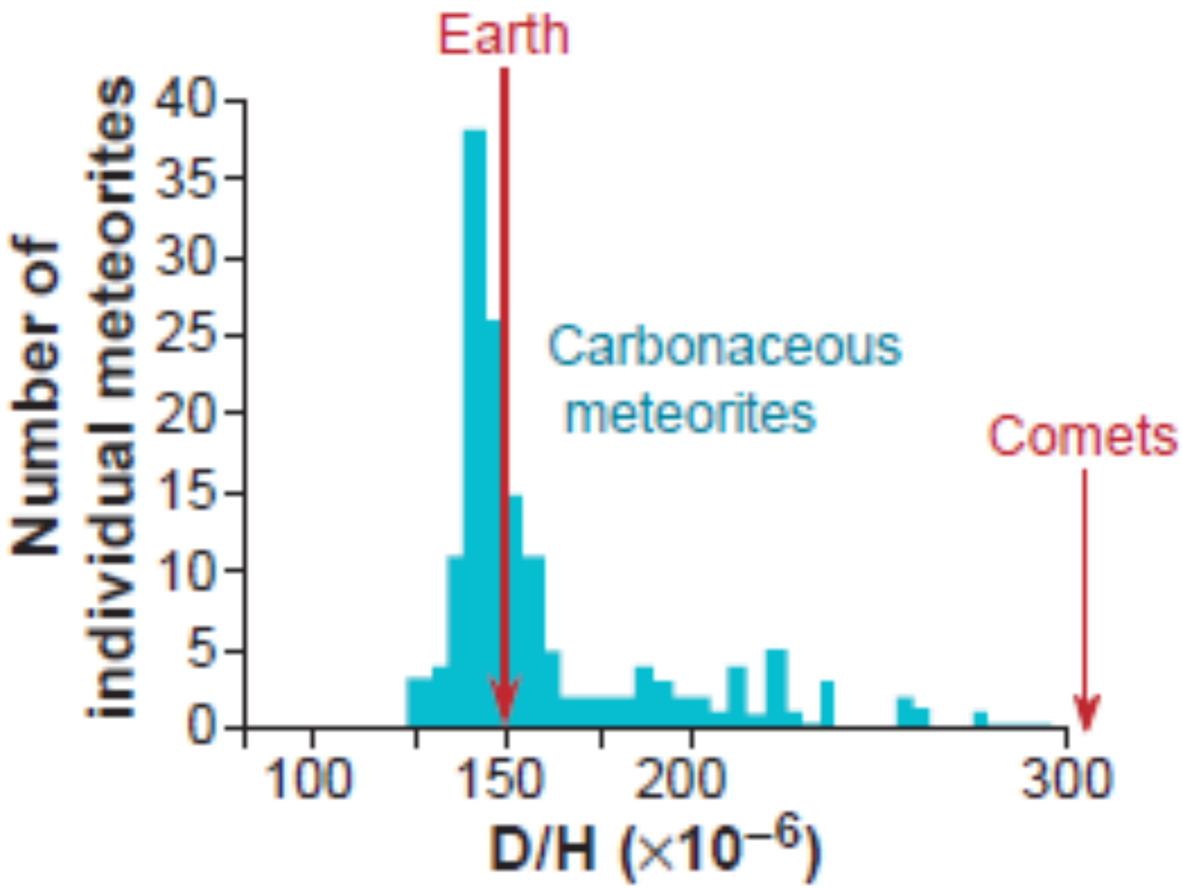
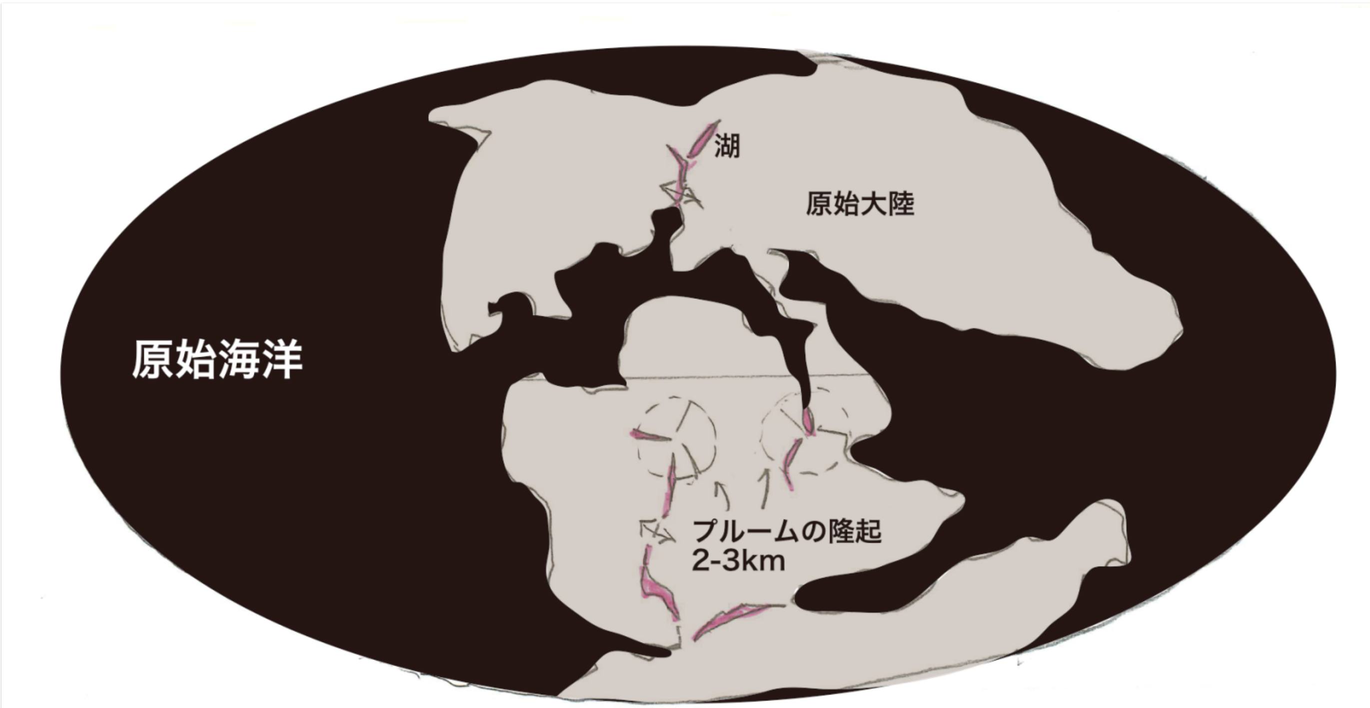


Fig. xxx : Water from meteors. Distribution of the hydrogen isotopic ratio in carbonaceous meteorites compared with Earth and comets. According to this distribution, water on Earth seems mostly derived from a meteoritic source.

Robert, F. (2001)

Surface environment of the 4.4Ga Earth

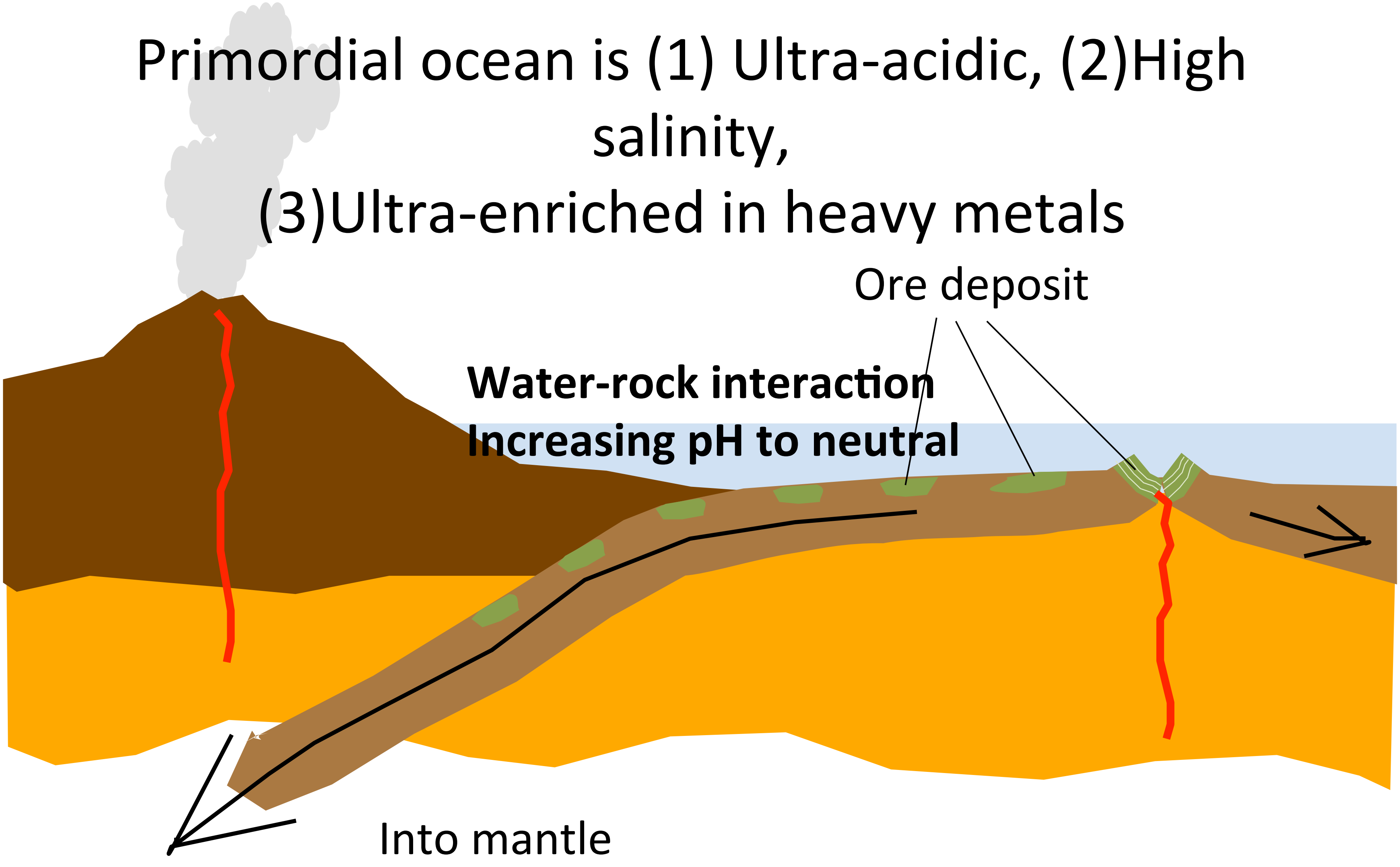
Birth place of life: only one to satisfy numbers of conditions=Lake



- **Toxic Primordial Ocean (Ultra-acidic, high salinity, and super-enriched heavy elements). Imagine an ore solution in a blast furnace. Impossible for life to bear in the toxic primordial ocean. Highly different from the modern Ocean.**
- **Constraints: Geology of Moon, Earth , Mars and meteorites**

Plate tectonics as a cleaner

Primordial ocean is (1) Ultra-acidic, (2)High salinity,
(3)Ultra-enriched in heavy metals



4 Birth of life on the rifted lake on primordial continents

Constraints:

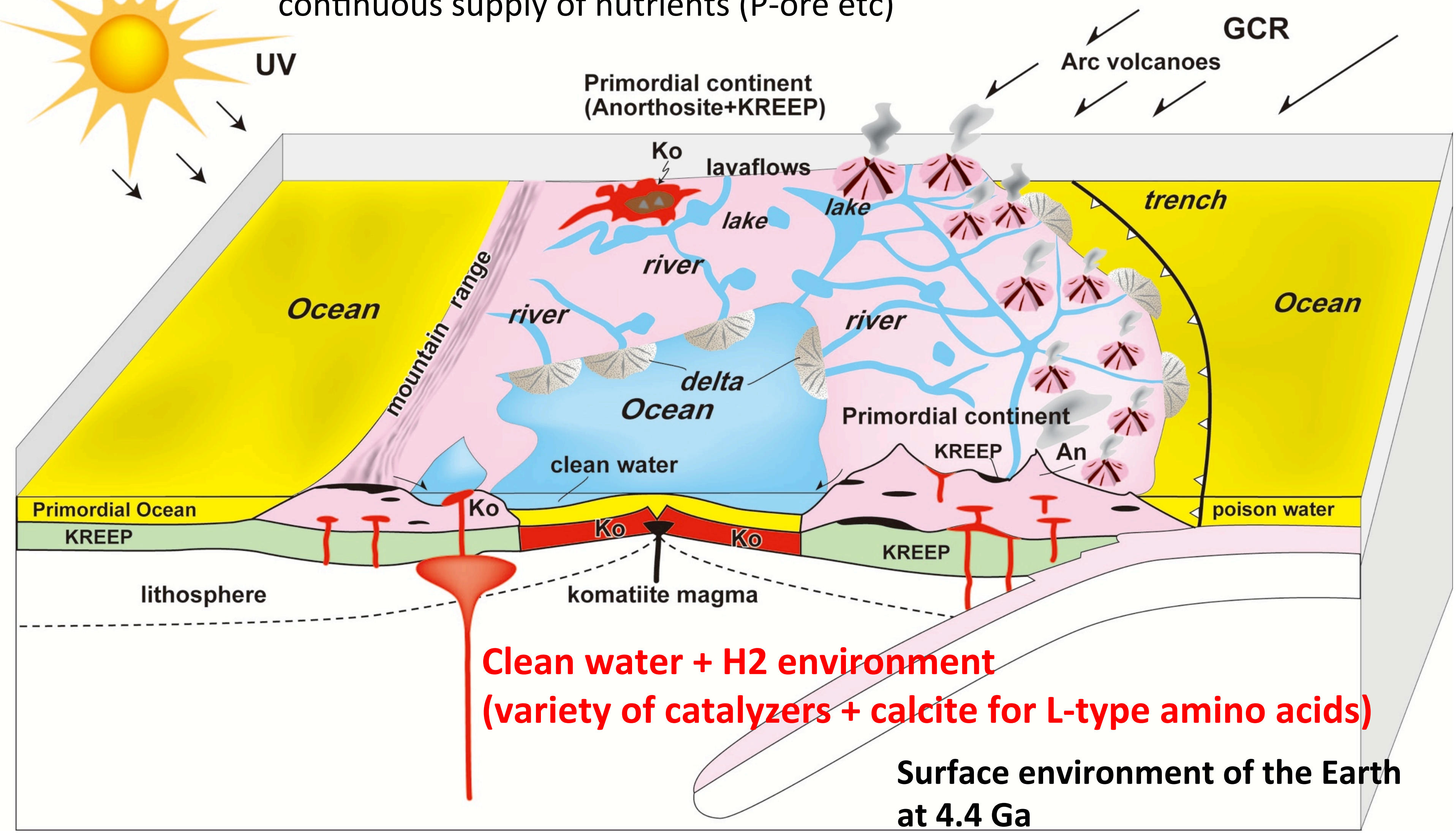
1. Synthetic experiments: on-land, presumably lake, because of oversaturation of lipids to make membrane, and supply of sufficient nutrients (K>Na).
2. Geology of Moon, D/H ratio of ocean, meteorite and comet, and geochronology of meteorites.
3. Geology of Earth; role of tectonic erosion (destroy primordial continents by PT)
4. Toxic ocean has been cleaned up by PT, until 3.8Ga.

Conflicted nature of life

- 1 Water is highly oxidized material, but amino-acids, proteins and genome are stable under highly reduced environments.
- 2 Miller's experiment clearly demonstrated this.
- 3 Then a problem arose; Amino acids cannot be synthesized in ocean.
- 4 Discovery of H_2-producing hydrothermal system solved this enigma., remaining one problem, i.e., temperature (too high to produce NH_3 >550℃.
- 5 Catalyzer solved this problem, An+water (CaAl zeolite or cement, with helps by metals and brucite ($Mg(OH)_2$:pH=12)
- 6 T<100℃, Shall we do experiments! (Prof. Hara, next talk)

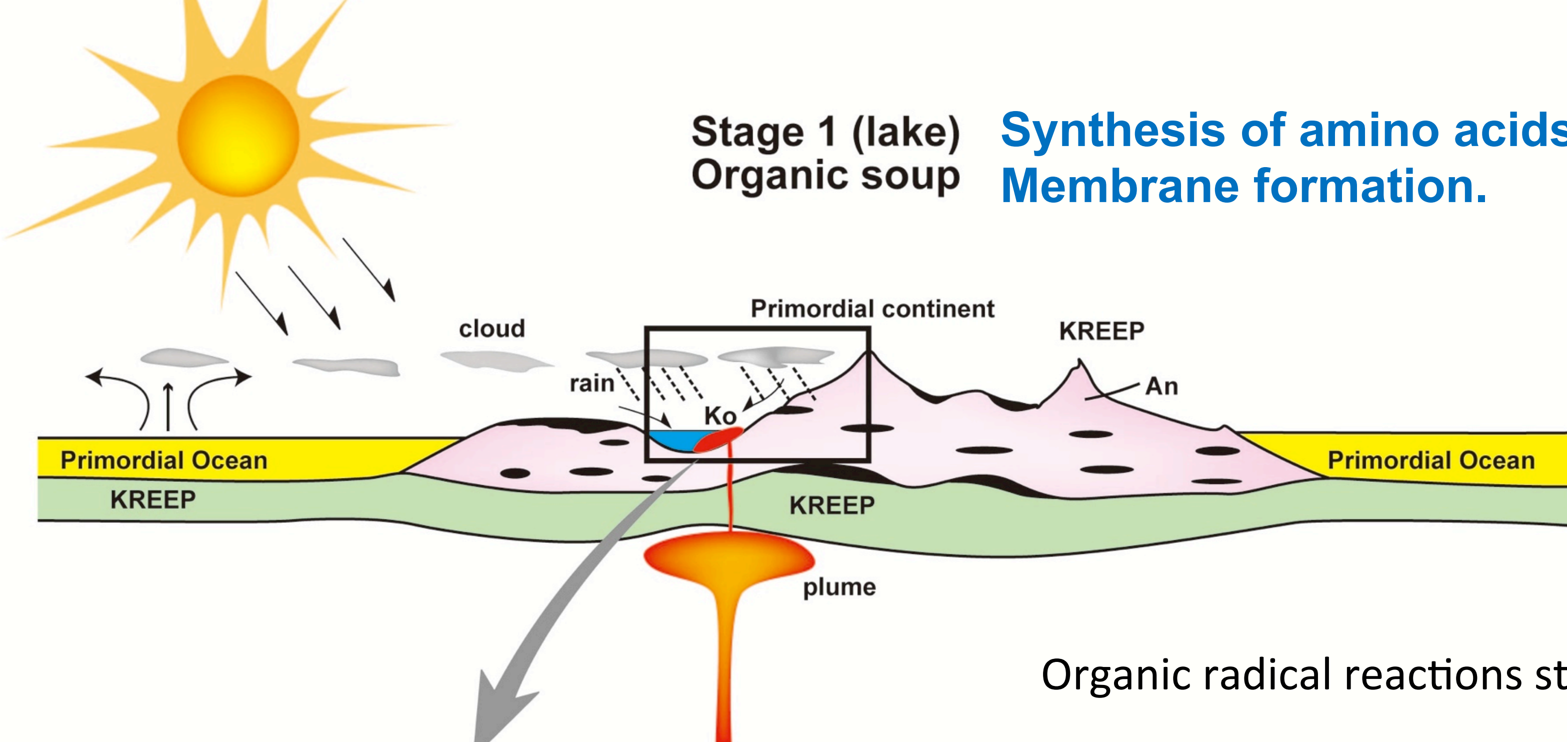
要約

(1) Need landmass (oversaturated P for membrane), (2) Need lakes (primordial ocean is toxic; ultra-acidic, high salinity, ultra-rich in heavy metals), (3) Need continuous supply of nutrients (P-ore etc)

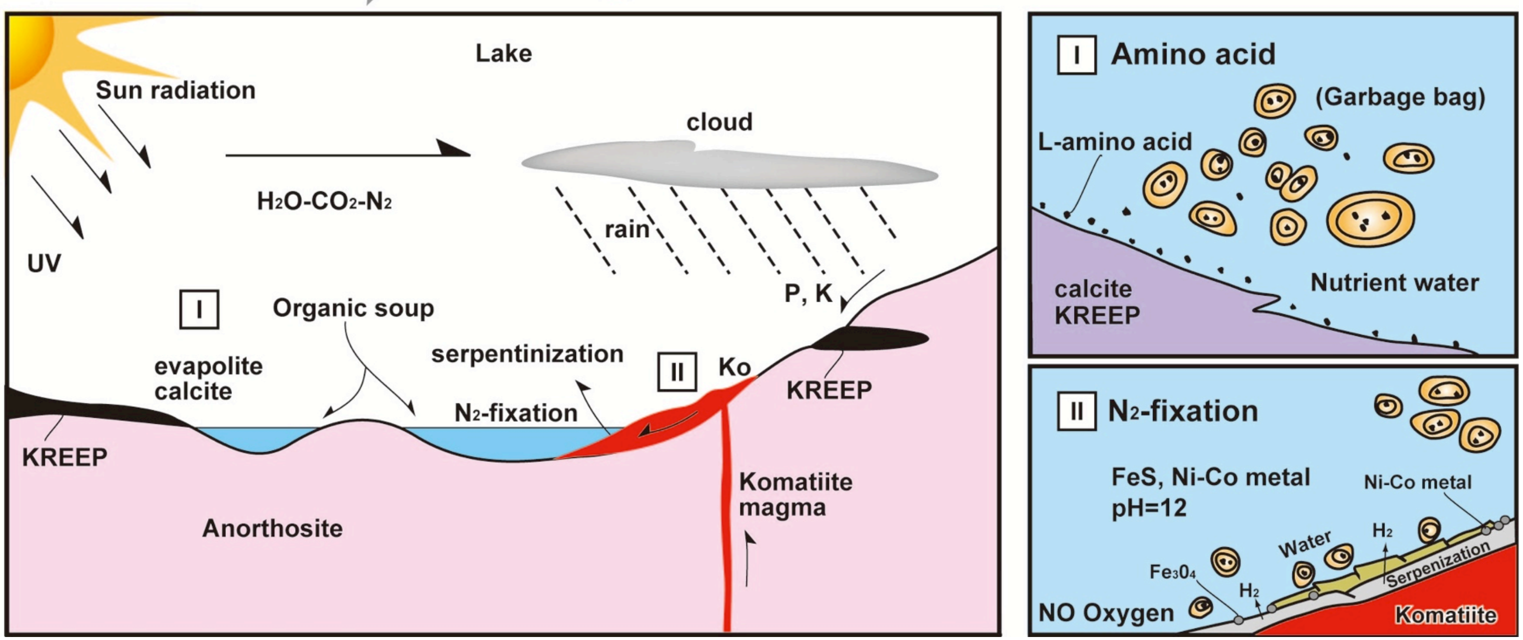


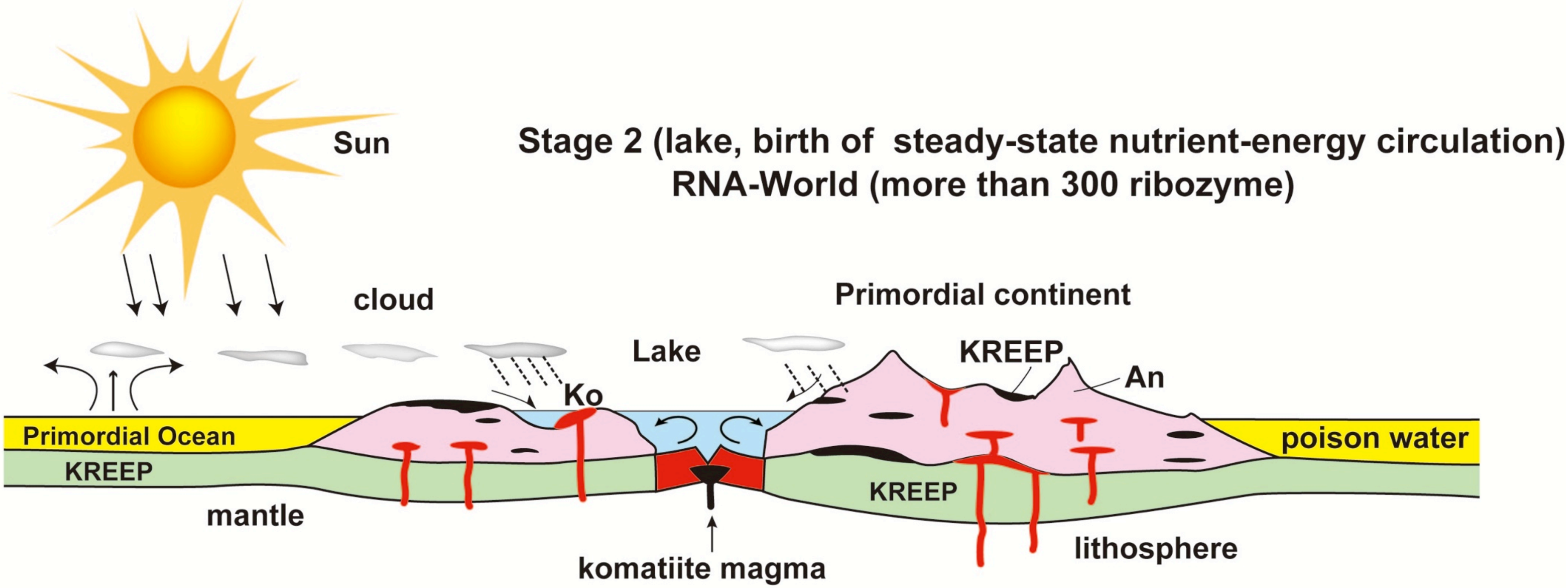
Stage 1 (lake) Organic soup

Synthesis of amino acids and Membrane formation.

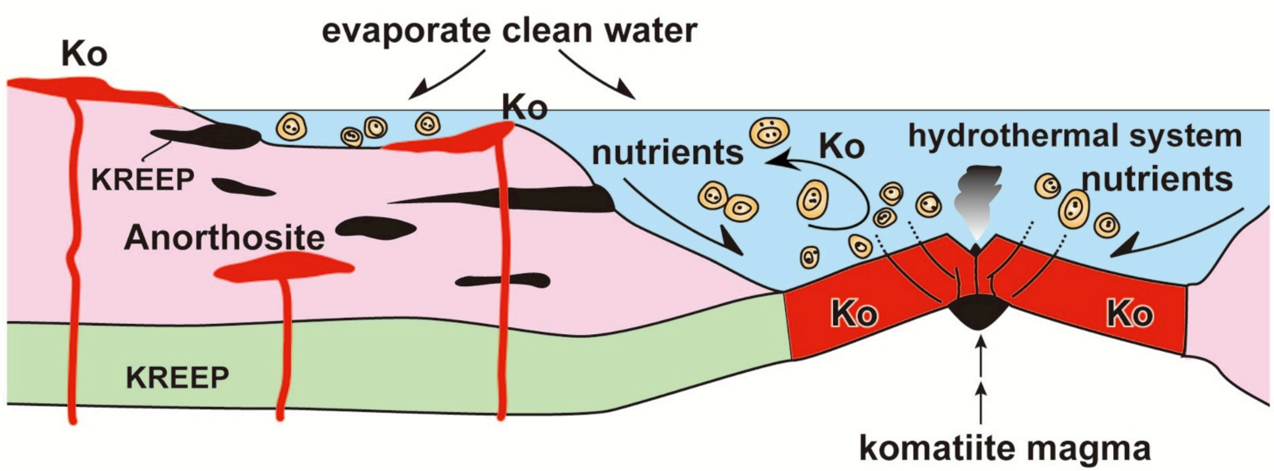


Organic radical reactions started

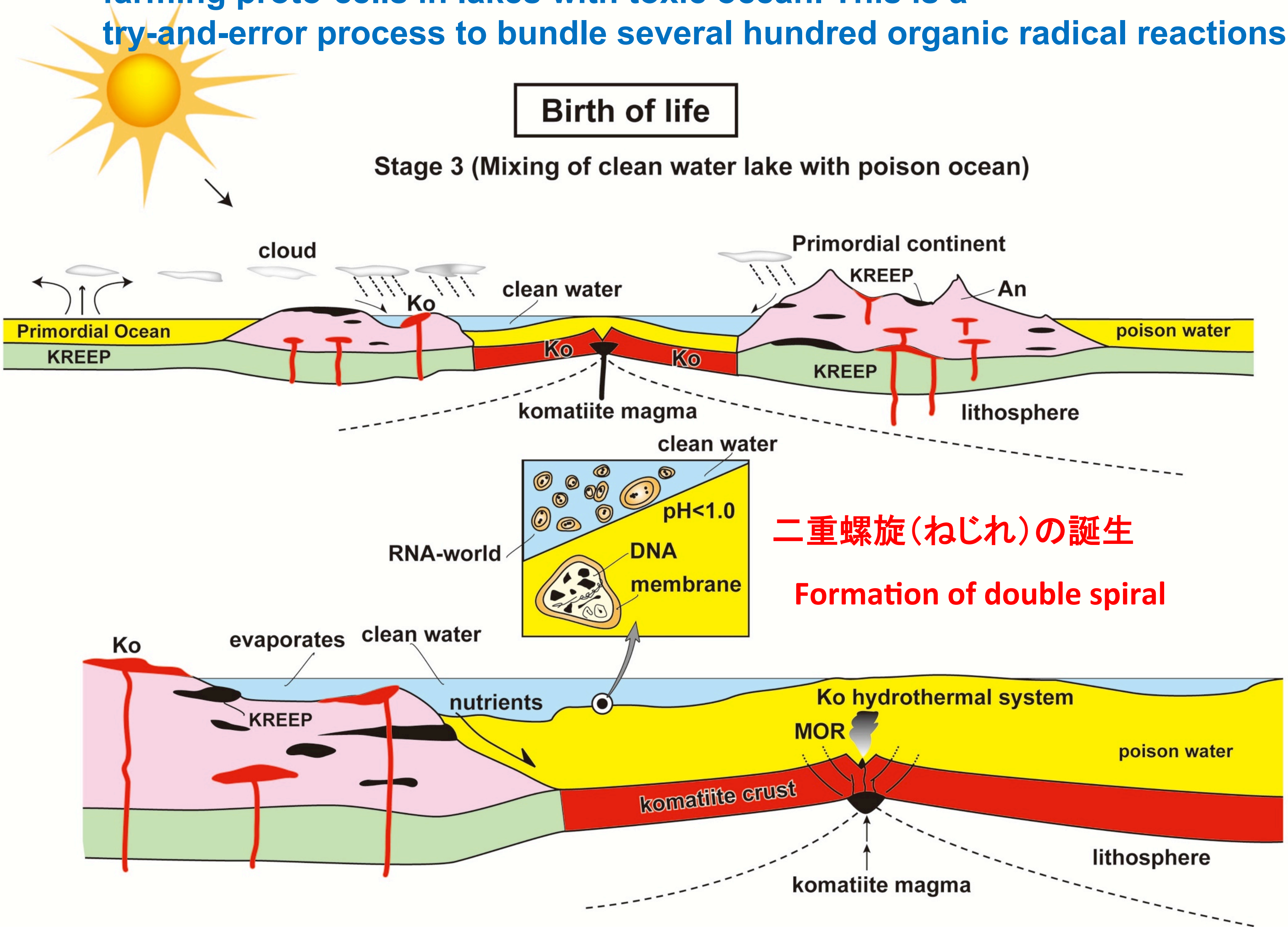




Diversified and evolved ribozymes (replication by steady-state nutrients circulation)



Birth of DNA: Taking time over 300m.y. by repeated mixture of farming proto-cells in lakes with toxic ocean. This is a try-and-error process to bundle several hundred organic radical reactions.



Stage 3 (DNA world):>300m.y. Incubation stage

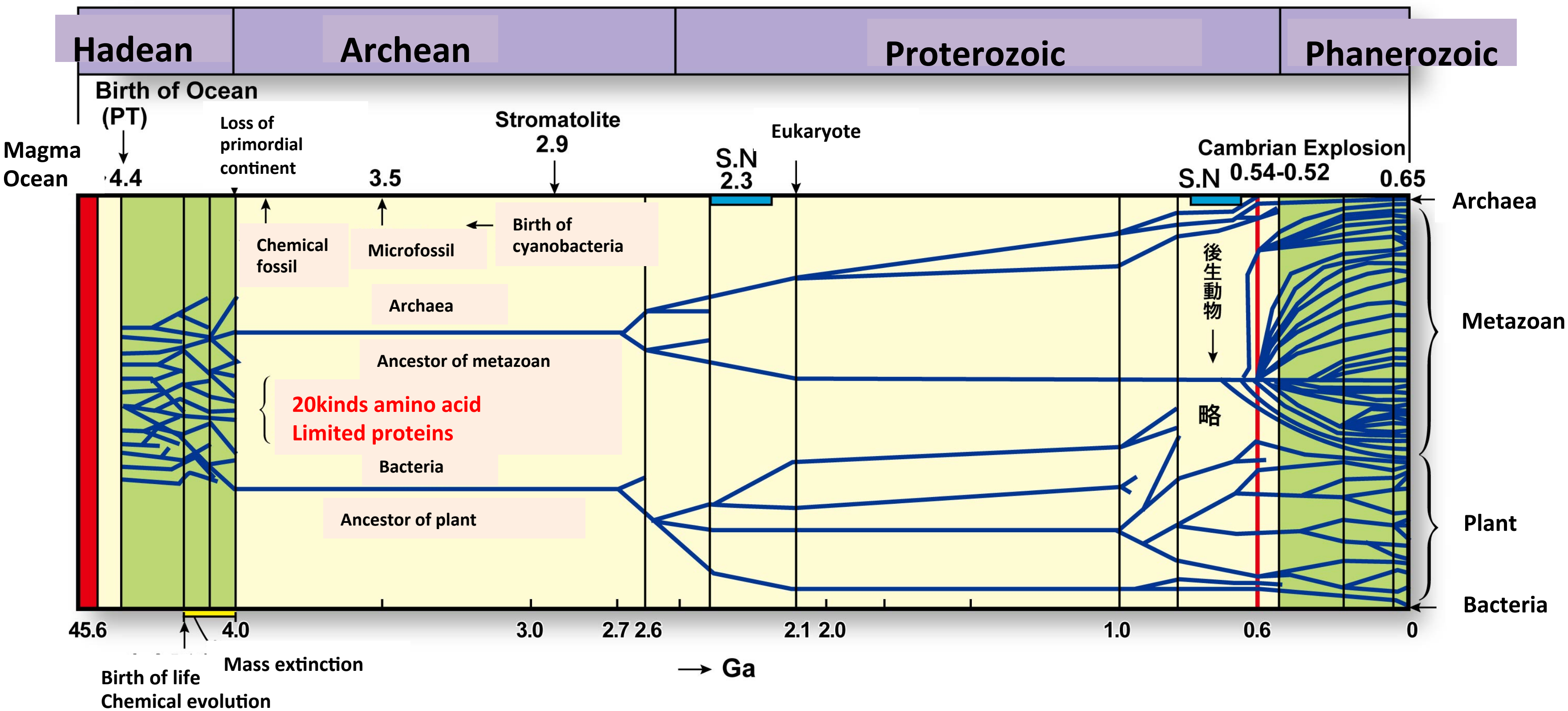
- 1 Toxic Ocean enters to mix with clean lake in which life was born, leading severe survival time and mass extinctions.

- 2 Three hundred kinds of proto-cells (bubbles) aggregate to make one single cell. Aggregation may be caused by electrification.

- 3 Birth of DNA spiral; spiral structure can be completed through mixing by gradually changing toxic ocean.

- 4 Co-evolution of Earth and life over 300 m.y. changed surface environment significantly toward one-direction, hence ***Panspermia*** **cannot be accepted; the problem of pre-established harmony appears. Namely, not only one species, but also whole ecosystem must arrive at pre-established environment on the Earth which was made by the Earth's life.**

Golden age for life:
First and Last 600 million years (Repetition of extinction)



Hadean
- Diversified microorganisms
- Extinction & evolution during 400 m.y.
- Finally, Archaea & eubacteria
- Loss of primordial continent

Phanerozoic
- Golden age for plants and metazoan
- Occupying on-land environment (increase in oxygen content)
- Emergence of huge landmass

LUCA is wrong, commonotes

Mass extinctions in the Hadean, remaining two species, Archea (ancestor of animal) and Bacteria(ancestor of plant)

Conclusions

1. The Earth-Moon system was born first by naked dry planets, followed by addition of thin film of ocean and atmosphere.

2. Hadean surface environment of the Earth was proposed;
huge landmass of An+KREEP with rifted lakes with diversified geochemical and geophysical environments where first life was born.

3. Hadean ocean was highly toxic, and plate tectonics played a critical role of clean-up by 3.8Ga, hence life can live and survive in ocean afterward.

4. Through the mixing of toxic ocean with lake water where life was born, severe survival race was repeated, remaining two kinds of micro-organisms which used organic radical reactions using only 20 kinds of amino-acids and restricted proteins.

What is the next?

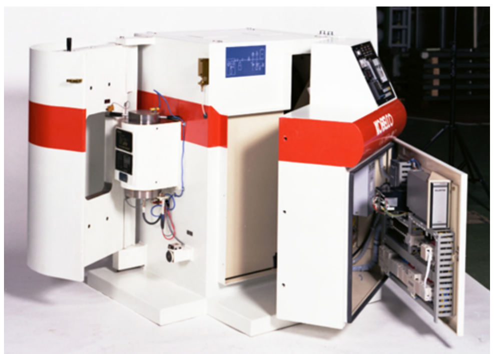
- 1 Shall we do laboratory experiments, considering Hadean surface environments, i.e., catalyzers (An, KREEP, serpentinization, brucite, a variety of metals, magnetite, clays, zeolites, carbonates)!
- 2 Role of catalyzer(metal : supply of free electrons, clay/zeolite:flask, B/Li: stabilization of large C-molecule, brucite: pH increase, etc)
- 3 Next talk by Prof. Hara

検証＝実験で再現：原グループ

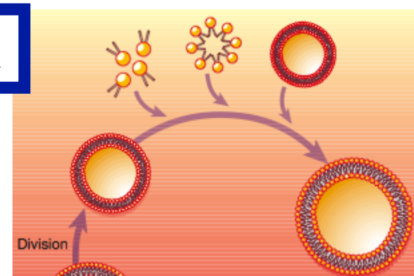
地球史と生命史を結ぶ**実験システム**

地球史G

CAI, CIコンドライト
アノーサイト, KREEP

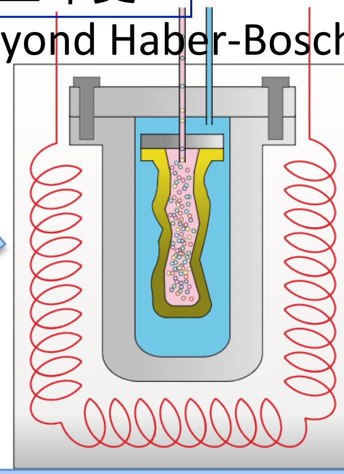


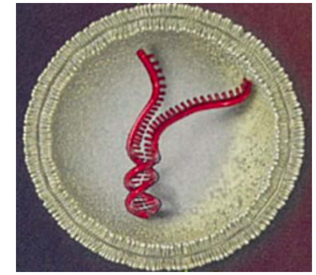
http://www.kobelco.co.jp/machinery/products/



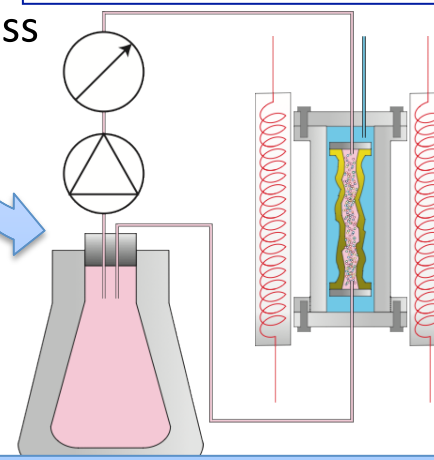
生命史G

Beyond Haber-Bosch Process





Prof. Szostak Group



2000^{O}C, 200MPa
原始地球環境実験
設計2013, 実施2014−

100^{O}C, 1MPa
有機物誕生環境実験
2013−

地球史＋生命史
Origin-of-Life実験
2014−

無水の地球を作る
超強酸性の海洋を作る
超アルカリ・還元性流体を作る

有機物プールを作る
低温環境を実現する

Session3 contents
Origin of life

1. M. Hara (Tokyo Tech/ELSI)
2. S. Benner (U. Florida)
3. K. Kobayashi (Yokohama National U.)
4. I. Chen (UCSB)
5. A. Lazcano (UNAM)
6. K. Soai (Tokyo U. of Sci)
7. K. Takai (JAMSTEC/ELSI)
8. J. Cleaves (ELSI)
9. W. Hordijk (SmartAnalytiX.com)

How to make the birth site of life

(1) Clean water can be made by evaporation of toxic ocean.

(2) Lake can be the site of birth place of life enriched by B and Li which stabilize complex organic compounds. Diversified catalyzers are available.

(3) Highly reduced local environment can be made at rifted lakes where, hydrogen-producing reactions with variety of catalyzers, such as metals (Fe, Ni-Co, Fe_3O_4, REEs,) and highly alkalic pH(up to 12).

(4) Shallow marine local environments are the site of large gradients of redox environments where could be the birth site of life.

(5) Nutrients must be supplied from primordial continents (anorthosite + KREEP) with variety of phosphorous ores. Under anoxic conditions, solubility of PO_2 increases 100,000 times more than oxidized environments.

First stage(Lake)

1. N-fixation（Highly reduced condition is necessary: Komatiite + water = H_2 + serpentine + metals (a series of catalyzers available); formation of NH_3 ＜100℃）→amino acids.
2. Evaporation（clean water＋B, Li and other catalyzers, Calcite is stable：L-type amino acids）
3. Sufficient amounts of nutrients, and energy-material circulation by Sun. Peptides can be synthesized in this system.
4. To make membrane, oversaturation of lipids (P) and its sufficient amounts in shallow water environments is necessary. Liquid immiscibility can make first membrane as bubbles.

Stage 2

1. Birth of steady-state energy-material circulation at rifted lake in which steady-state supply of large organic molecules.

2. Lake environments（clean water + nutrients）with rifts (Nutrients can be reached to primitive MOR); RNA world can be made (300 kinds of ribozyme can be established). Ribozyme can be self-replicated, and more than 300 bubbles can be formed. First membrane is the boundary through which smaller organic and inorganic materials can enter inside to proceed organic radical reaction to grow bigger then difficult to move outside, then proto-cell split into the two (cell division).

3. Local redox environment in the oxidized environment (water)（large pH gradient, Ni-Co, FeS, Fe3O4, Nitrogenase enzyme was completed.

4. Late Hadean time could be under increased PO2 through sediment accumulation to hide organic materials in the solid Earth.

原始海洋は猛毒（理論予測＋実験）

１． 陸上（湖が必要：淡水環境）
２． 後背地の栄養塩岩石
３． 乾燥した内陸湖（B、Li、方解石他蒸発岩鉱物
　＝L型アミノ酸、リン酸塩鉱床他）
４． 多様な表層環境（温度、化学環境、UV環境）
５． 活発なプルーム火山活動（コマチアイト）

原始生命化学進化

１．アミノ酸を創る。水素熱水系＝NH3生成＋触媒（金属、超アルカリ）、コマチアイト蛇紋岩化作用で可能（吉崎PhD）

２．原始大陸（An+KREEP）：アミノ酸生成＋ヌクレオチッド→タンパク質（細野研、100℃、＜10気圧）：閉鎖系の実験で初めて合成可能になった。条件はMiller (1953)と同じだから。

３．新たな実験の時代（ELSI：原G）

生命合成場の時間変化（不安定）

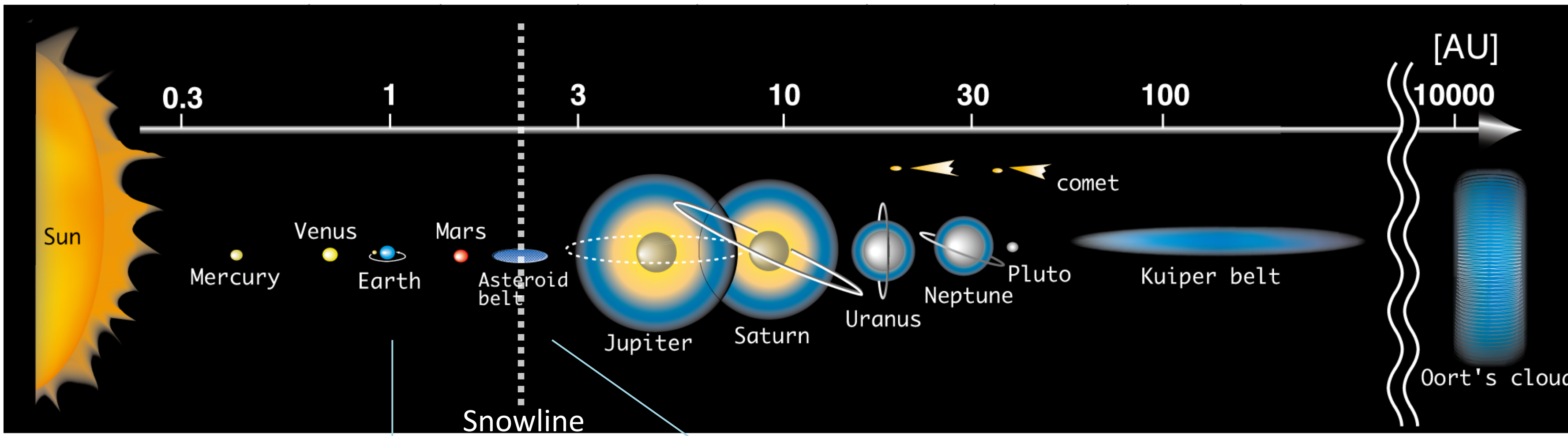
１．大陸はリフトによって分裂し、湖はやがて
猛毒な外洋が侵入する場へ変化する。
２．すると、原始生命は殆どが大量絶滅の宿命
３．プレートテクトニクスは猛毒海洋（超強酸性、
超高塩分、超富重金属元素）の掃除機（鉱床と
ｐHの中性化）
４．大量絶滅は20種類のアミノ酸、限られた
タンパク質（RNA）利用の原因

●その次のＤＮＡ世界（自己複製）までゆけるか

原始地球表層環境のまとめ

- １　二段階で形成（① 45.3億年前＝無水、無大気、栄養塩原始大陸）、② 44億年前＝4㎞厚の海洋＋大気の付加→炭素質コンドライト（3wt%水＋50㎞厚の半径増加→炭素・窒素の量が決まる、その他の成分；ハロゲン元素も：forward modelを創り、地球記録で検証）
- ２　原始海洋はToxic(猛毒, 超酸性、超高塩分、超富金属)→湖（陸地が必要）→海洋質量に大きな制限（裸の岩石惑星：ところが海洋質量はall or nothing）

Fig: If another earth was created in asteroid belt



Earth

Ocean: 4km thick

Another Earth

Ocean: 400km thick

Made from $3H_2O\%$ chondrite

陸地がない→生命の誕生も進化もない

生命合成実験から要請される生命誕生場（回答）

束縛条件→新説へ

- １　合成実験のまとめ→陸地が必要
- ２　大気のNを固定（水素発生場が必要：超酸化物質の水の中で超還元場水素環境）
- ３　触媒（超アルカリ、B、Li、金属など）
- ４　栄養塩
- ５　栄養塩連続供給システム
- ６　猛毒海洋から逃れる為には湖
- ７　期待される原始大陸（An+KREEP）
- ８　ゲノムから、最も原始的な膜、代謝、自己複製の記録解読
- ９　原始細胞質組成
- ●これらに基づき、新説『生命誕生』場→生命誕生化学反応（有機ラジカル）＋組織（膜、遺伝子螺旋）

細胞質のイオン比は海水とは著しく違う＝昔の湖と栄養塩供給岩石の組成は違う

Table 1. Approximate concentrations of key ions in various environments

Ion, mol/L	Modern sea water	Anoxic water of primordial ocean	Cell cytoplasm
Na^+	0.4	>0.4	0.01
カリウム→ K^+	0.01	~0.01	0.1
Ca^{2+}	0.01	~0.01	0.001
Mg^{2+}	0.05	~0.01	0.01
Fe	10^{-8} (mostly Fe^{3+})	10^{-5}	10^{-3} to 10^{-4}
Mn^{2+}	10^{-8}	10^{-6} to 10^{-8}	10^{-6}
Zn^{2+}	10^{-9}	$<10^{-12}$	10^{-3} to 10^{-4}
Cu	10^{-9} (Cu^{2+})	$<10^{-20}$ (Cu^{1+})	10^{-5}
Cl^-	0.5	>0.1	0.1
リン→ PO_4^{3-}	10^{-6} to 10^{-9}	$<10^{-5}$	$\sim10^{-2}$ (mostly bound)

The intracellular concentration is defined here as the total content of a particular element divided by the cell volume and should be discriminated from the much lower free ion concentration, which does not account for the ions that are bound to biological molecules. The reconstructed chemical composition of the anoxic ocean includes data from refs. 14, 15, 58, 141. The data on intracellular concentrations of different chemical elements are based on refs. 14, 142–145.

Armen Mulkjjyanian, et al., 2012

新説：膜、細胞、有機ラジカル、自己複製

- １　リン脂質の濃縮、低分子は外部から内部へ、高分子は出られない、有機ラジカル反応開始→自己組織化と分裂へ（これらが栄養塩の連続供給場で始まる）
- ２　有機ラジカルの原理（鶏の卵）：親水基と疎水基、電荷がプラスとマイナスの４つ（GADV4種類のアミノ酸塩基から始まる）
- ３　自己複製：10^{12}のアミノ酸の種類、RNAは何故限られたタンパク質しか使わないのか？

最後の難関：RNA→DNA世界へ

- １　長時間（数億年かけたプログラムの完成）
- ●原核生物から真核生物へ（2億年）
- ●真核生物から後生動物へ（2億年）
- ２　時間（数億年）＋進化の加速（宇宙＋原爆マグマ：体内被曝）
- ３　原始地球の表層環境：44－38億年の6億年は多様な表層環境＋陸上湖→猛毒海洋の３要素の除去、原始大陸消失（栄養塩ミルク）から離乳食（TTG）へ、PTによる海洋の毒素除去

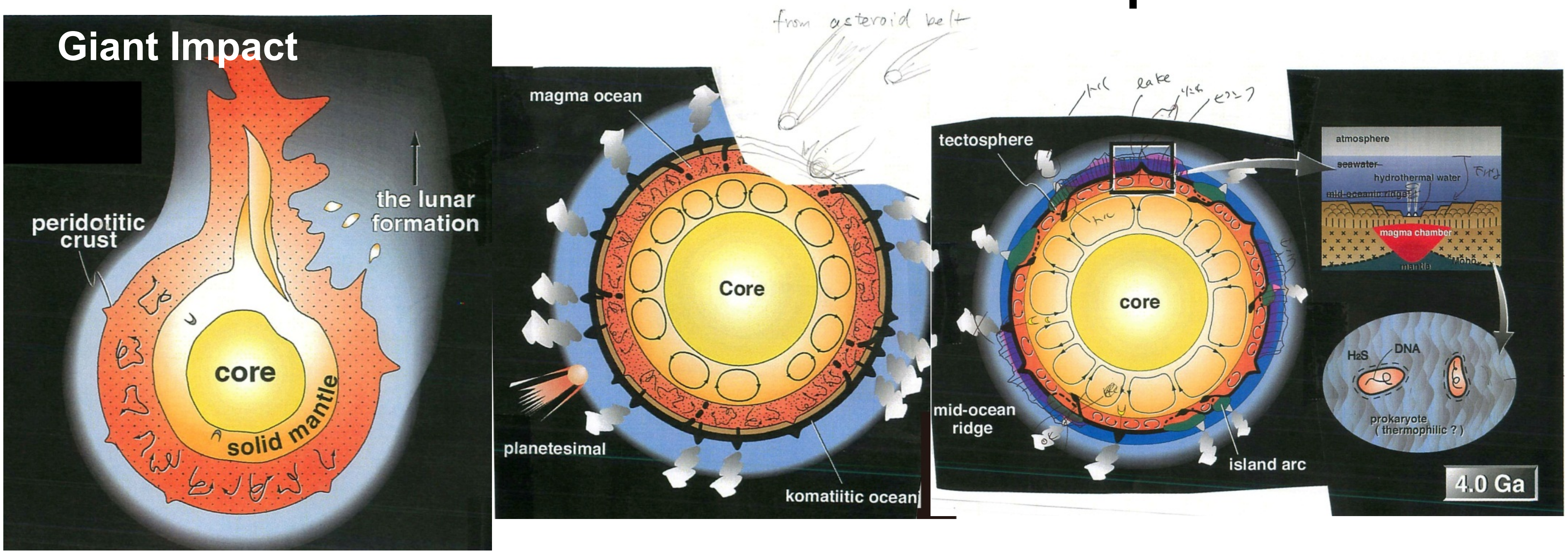
PTIによる猛毒海洋の清掃

- 図、

- 38億年前までにpH=５－６へ（炭酸塩岩の沈積：観測データ）

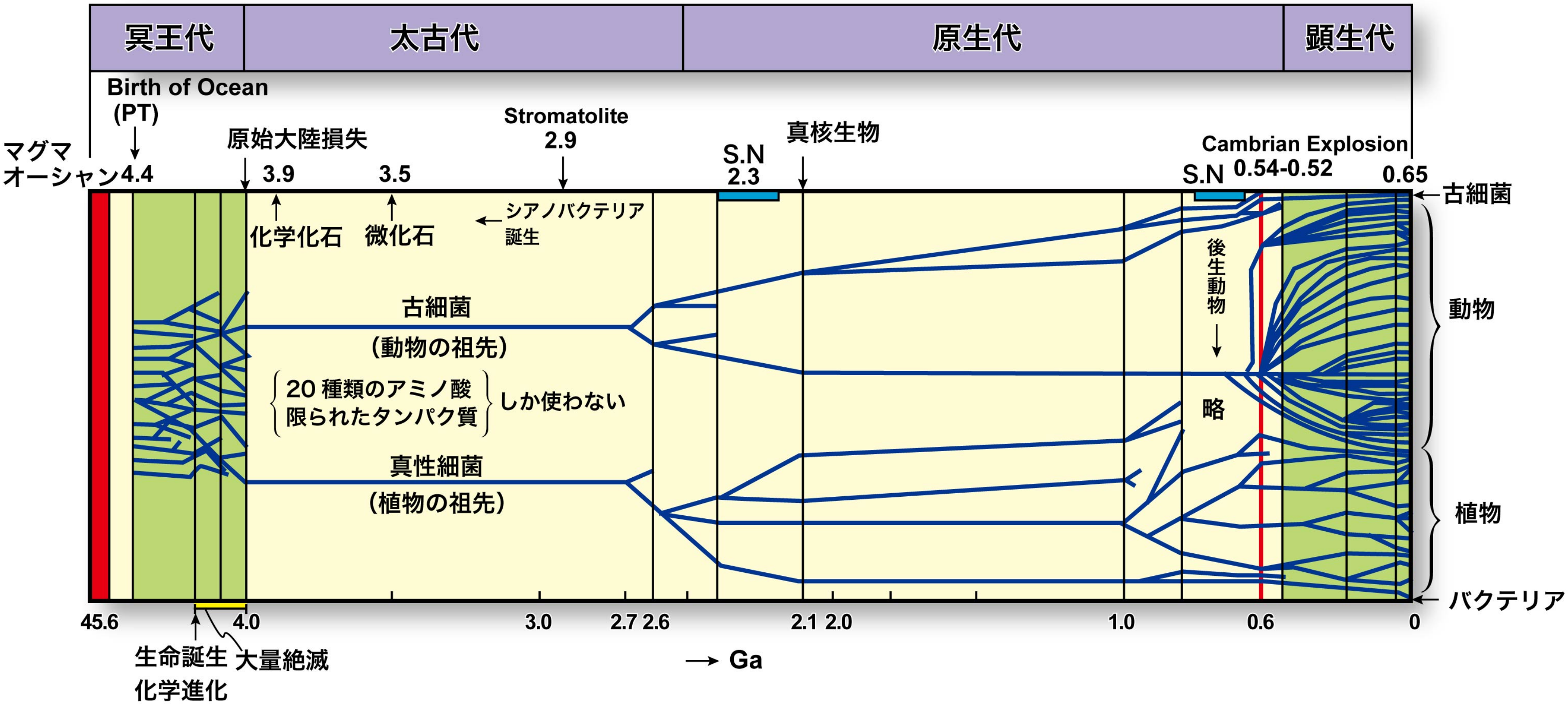
Two step formation of the Earth-Moon system
4.56Ga: Dry Earth-Moon system
4.4Ga: 4km thick thin skin of ocean and atmosphere

Asteroid impact



Birth of life on the primordial continents

生命の黄金時代：
最初と最後の６億年（数千万種類〜：絶滅の繰り返し）



冥王代

- 多種多様な微生物群
- 絶滅と進化の４億年
- 最後に古細菌と真性細菌

顕生代

- 植物と動物の黄金時代
- 陸上の征服（酸素濃度）
- 広大な陸地の出現が原因

新説

検証可能性

- １　実験：リボザイムまでは室内実験で可能(これまではブツ切れ型＝Szostak、これをbottom-upで)。
- ２　RNAからDNAまでは困難だが不可能ではない
- ●原理１：有機ラジカル反応の原理解明
- ●原理２：猛毒海洋に耐えうる有機ラジカル反応（20種類のアミノ酸、限られたタンパクがRNAに使われる理由）←ゲノム解読(膜、代謝、自己複製)　＆　実験
- ３　これらを考慮した環境で原始生命微生物を投入する実験を行う

新説とは？

- １　生命の起源諸説:
- 1ー1　代謝反応（最初は水素代謝、最初期から酸素代謝他）
- 1ー2　組織（膜、螺旋）と自己複製プログラム
- 1ー3　場所（干潟、宇宙飛来説、深海蛇紋岩熱水、アミノ酸は原始大気など）
- 1ー4　総合化（俯瞰的手法）

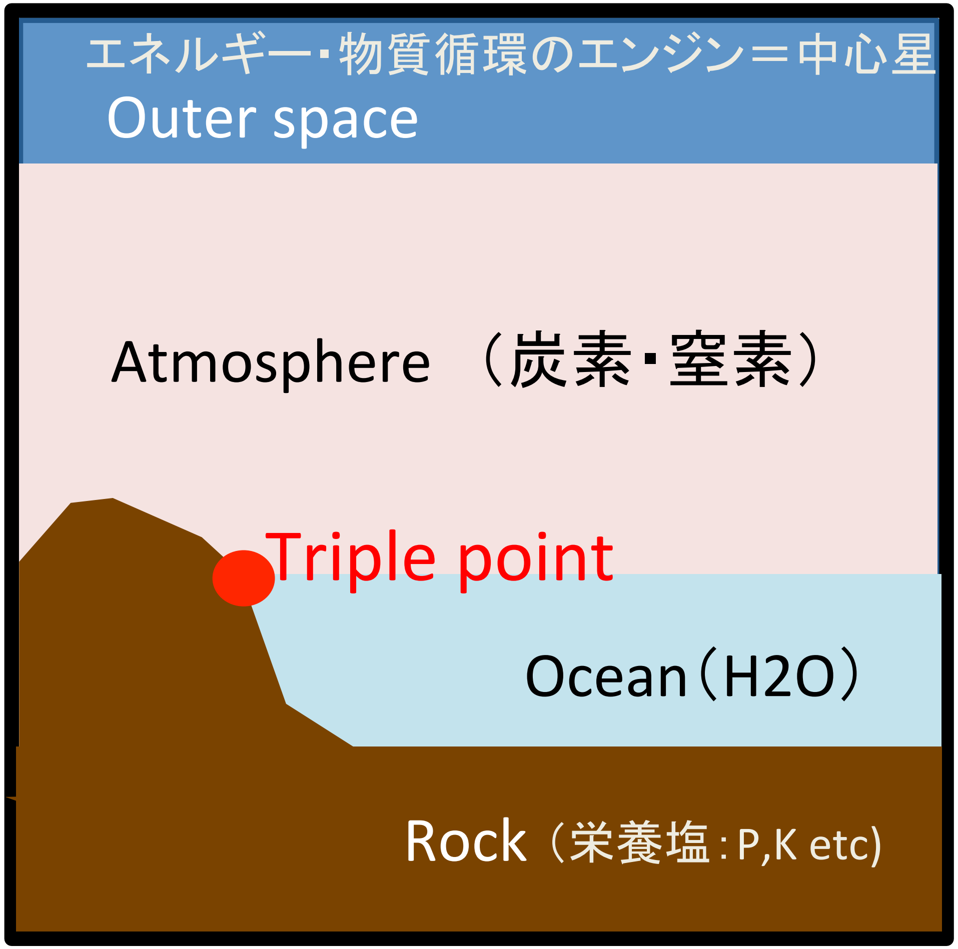
Part II 宇宙生物学

まとめ

- １　生命とは何か＝有機ラジカル反応、種類は無限に近い可能性を持つ（人間：酵素の種類＞6000）：これを可能にするのは、水（海洋＝70％）とC,N（大気＝15％）を主体にして岩石の栄養塩（固体地球＝15％）を組み合わせることで可能になる。ケイ酸塩では不可能。
- ２　その為には、大気/海洋/岩石（分化）が接する三重点を持つ海洋惑星が必要

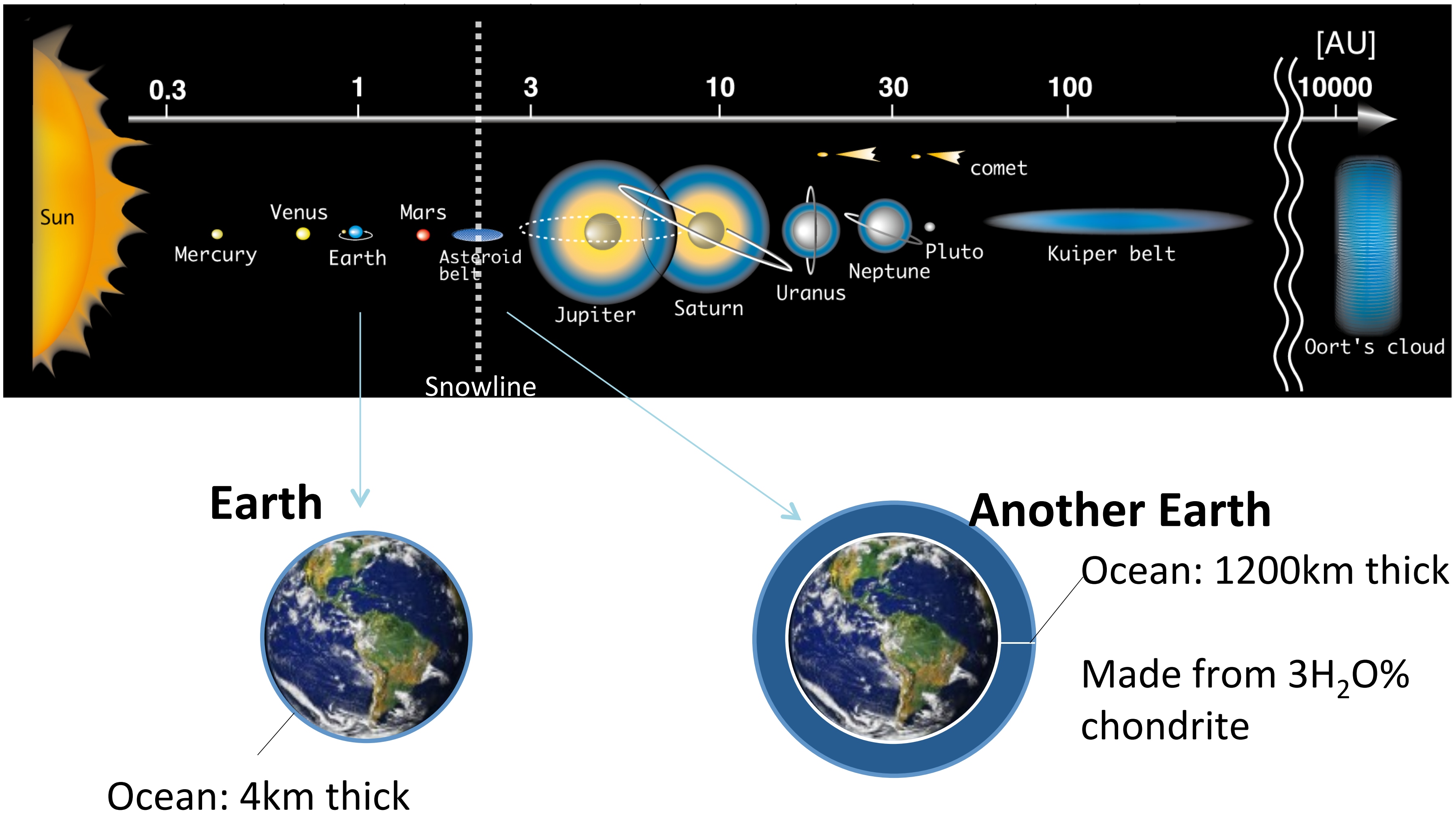
生命を持つ惑星の基本構造（大気、海洋、栄養塩岩石）

生命の化学組成（大気成分15%、水70%、岩石成分15%）

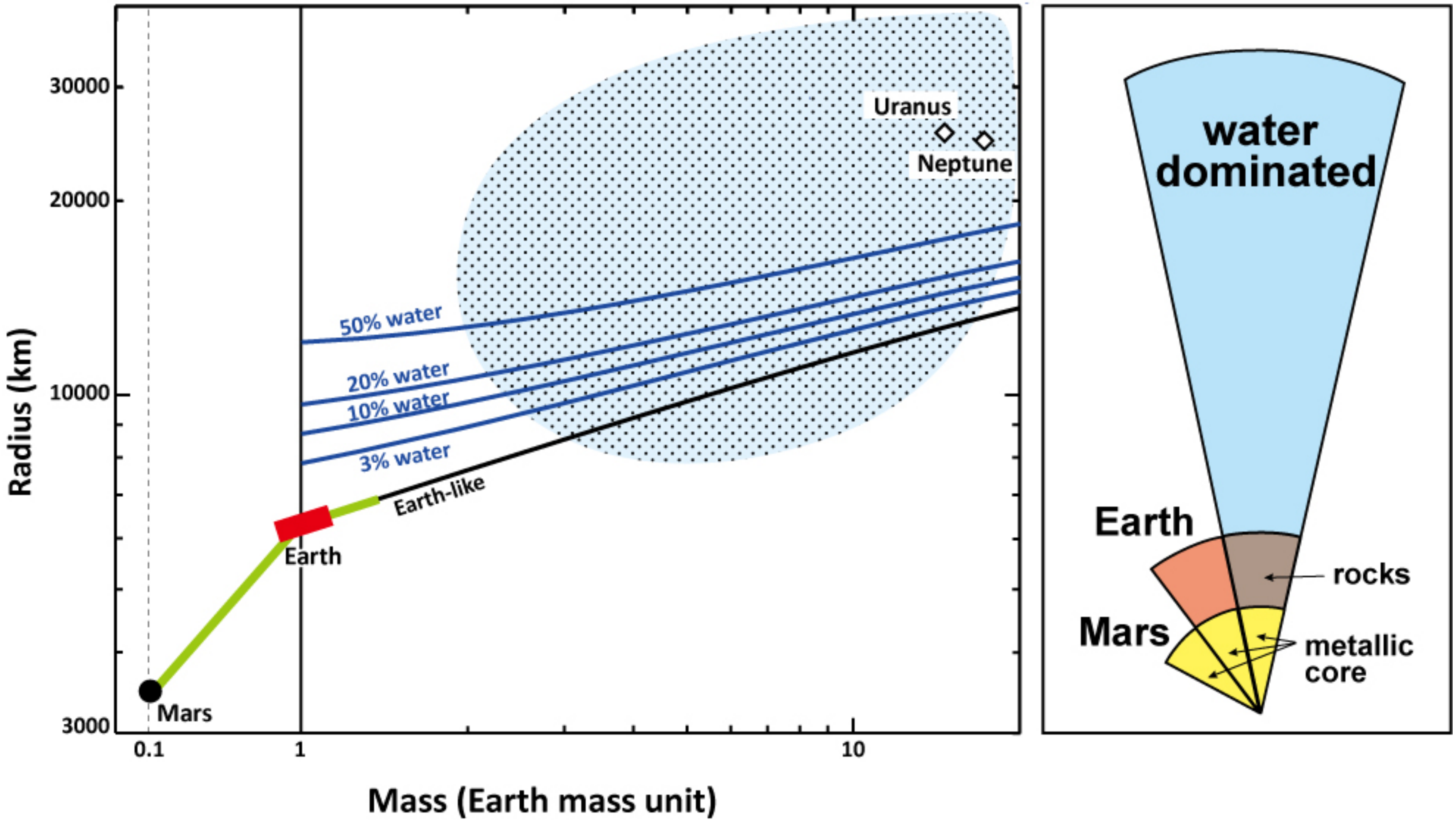


極少量の海洋を岩石惑星に付加する巧妙な機構が必要＝2㎞＜海洋＜10㎞

Fig: If another earth was created in asteroid belt



生命惑星探査の指標



大型化生物への道筋:大きすぎても小さすぎてもダメ

Maruyama, Ikoma, Genda, Hirose, Yokoyama, 2013

宇宙の役割：進化の加速

宇宙生物学の体系化①

- １　生物はC,H,O,Nを基本とする。ケイ素と炭素の間に固溶体は作れない。ケイ酸塩鉱物、炭酸塩鉱物、有機物の間は組成不連続。
- ２　ケイ酸塩鉱物と炭酸塩鉱物ではラジカル反応を創れない。放射性同位体元素は核分裂反応でラジカル反応が起きるが有機ラジカル反応を壊す（ゲノムが傷つく）。
- ３　原始生命の多様性は、（1）アミノ酸、（2）タンパク質、（3）反応中心の金属クラスターの種類の組み合わせで無限の多様性
- ４　進化による多様性の拡大

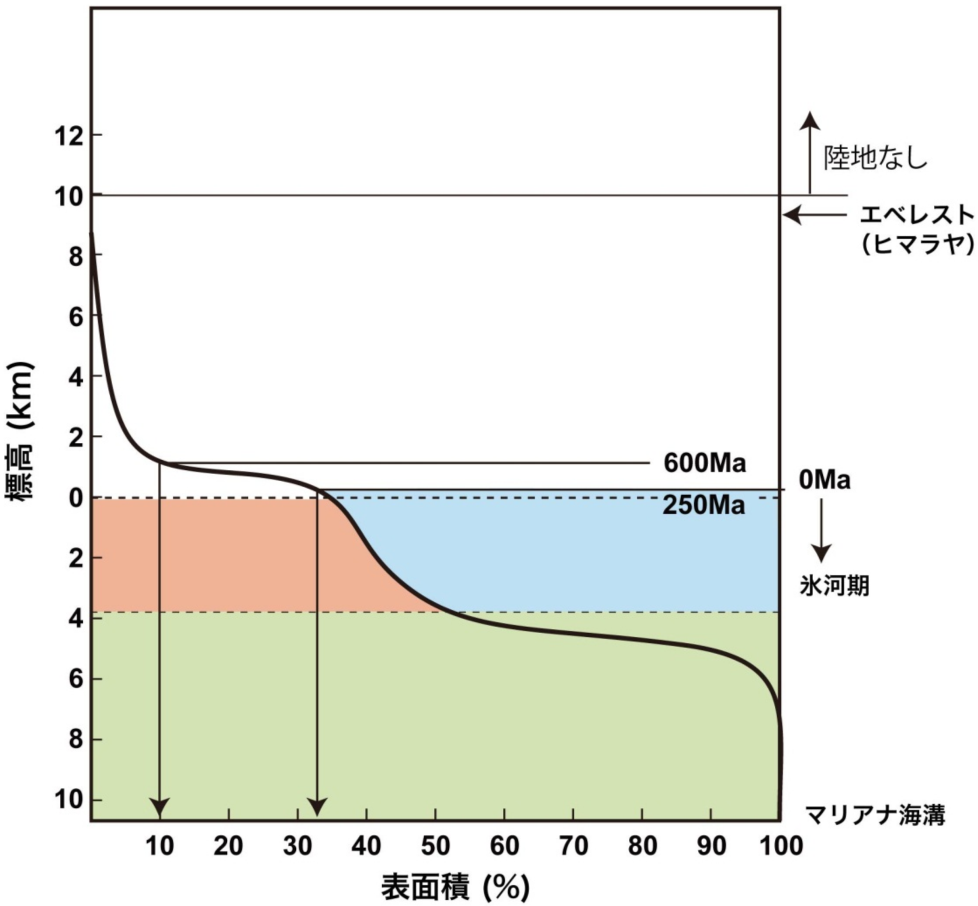
宇宙生物学の体系化②

- １　地球生物学から普遍性を導き出す。普遍性：①陸地（マントルと核の鉱物を落とした残りかす元素が生命の元素）、②海洋質量（4km厚の海洋）、③サイズ（スーパー地球はダメ）、④原始海洋は猛毒（PTの役割）
- ２　太陽系生物学から普遍性を導き出す。①all or nothing（海洋質量）、②裸の地球を創るメカニズム、③新概念（revised concept of habitable）、④惑星生命の寿命（炭素の争奪固体地球vs生物）vs中心星の寿命

惑星生命の寿命（例：地球→一般化）

- １　生命の化学反応（水＋C，N＋栄養塩＝生命）
- ２　これを可能にするには、極めて限られた海洋質量（3－5km厚）と惑星質量を持ち、陸地の必要性、太陽からの距離（habitable zone）
- ３　最初と最後の6億年が生物の黄金時代
- ４　固体地球と生物の間で炭素の争奪（地球炭素は残り400ppm）

地球は水が殆どない岩石惑星：どのように創るか？



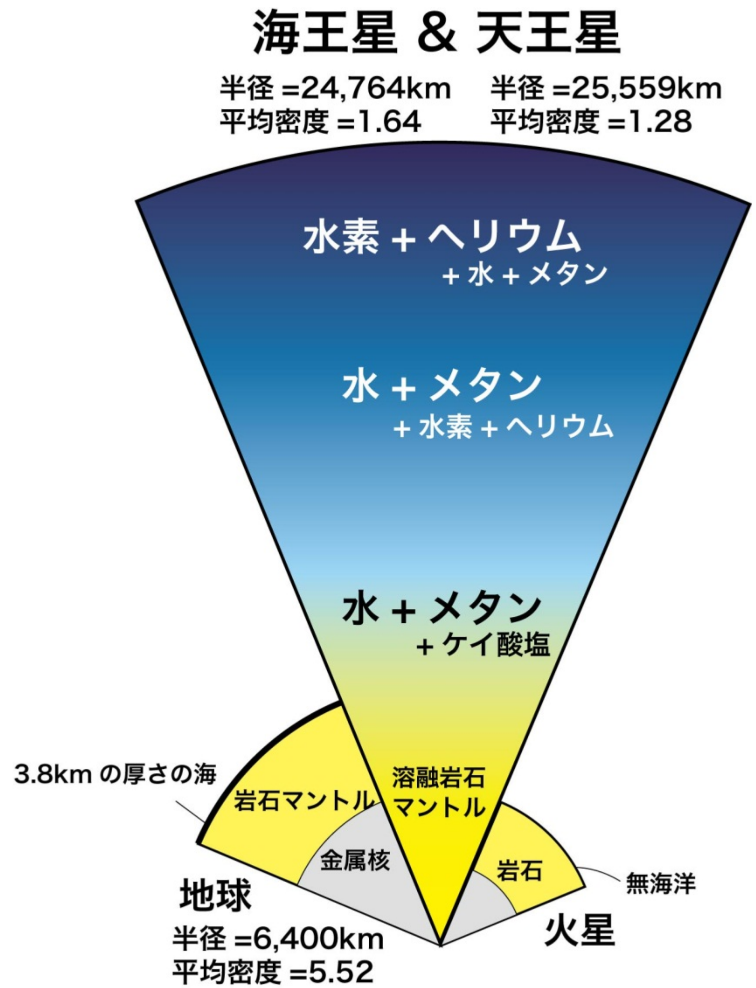
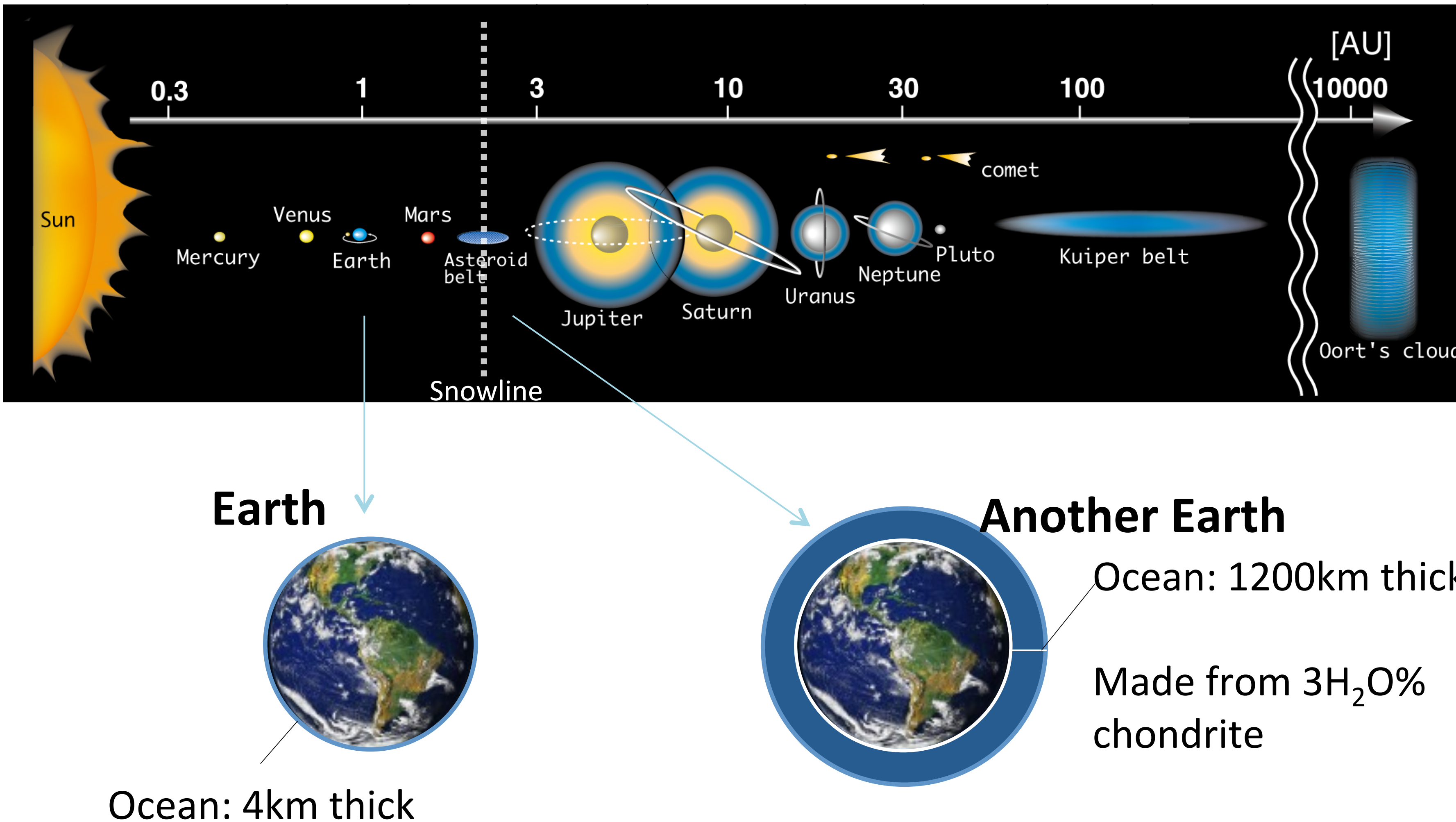


図4

400km厚の海洋を持つ模擬地球＋無水地球

- １　snowlineの内側と外側でall or nothing
- ２　その解をかいくぐる解＝小惑星帯から含水隕石の重爆撃
- ３　habitable zone→栄養塩供給システム

Fig: If another earth was created in asteroid belt

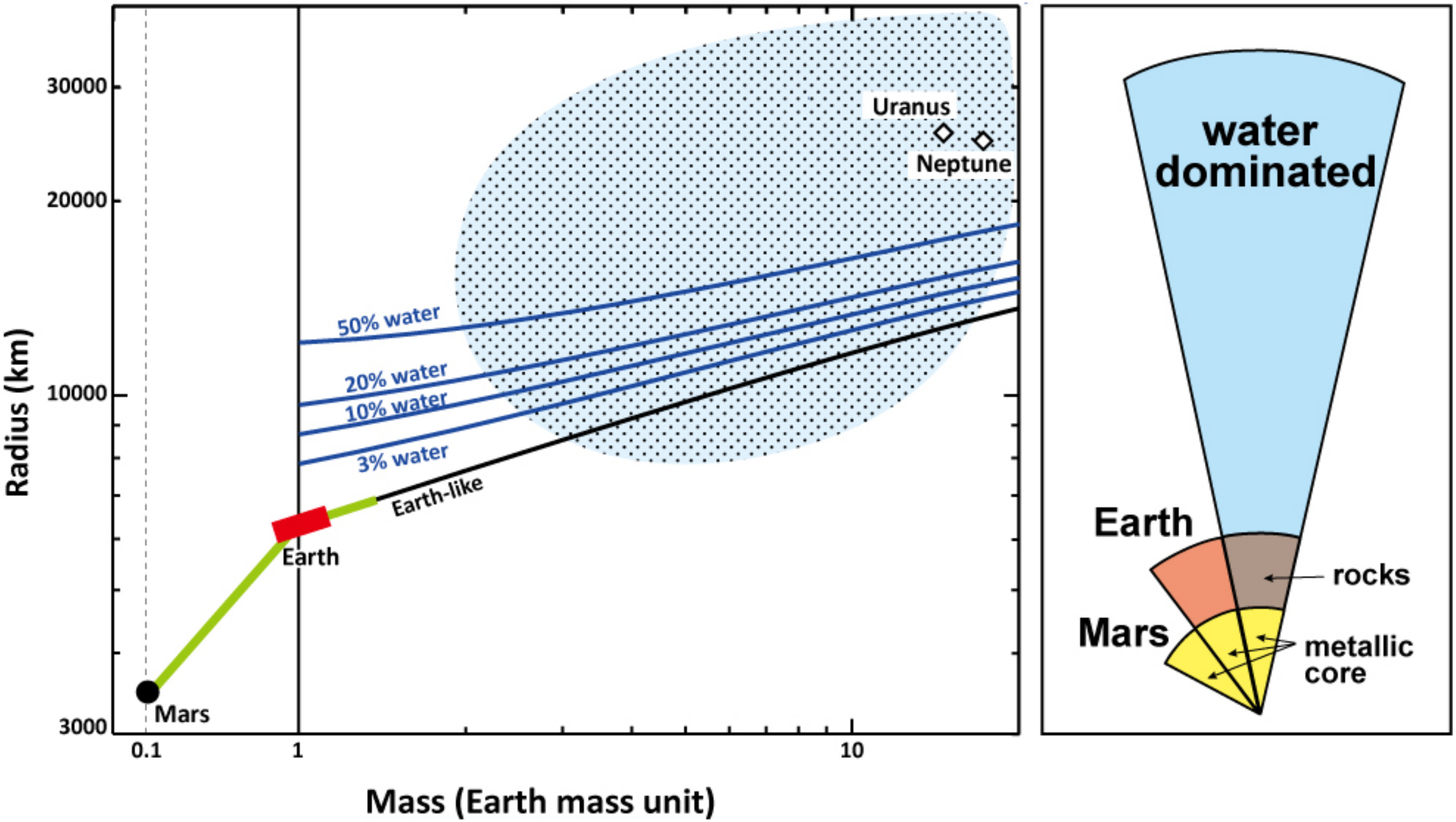


宇宙生物学の体系化③（惑星科学）

１　中心星（M,G,OOOOO）とハビタブル惑星の関係（表層で液体の水の安定領域を持つ惑星があるか？＝C,H,O,N、栄養塩は海洋を挟む3層を含む循環系）

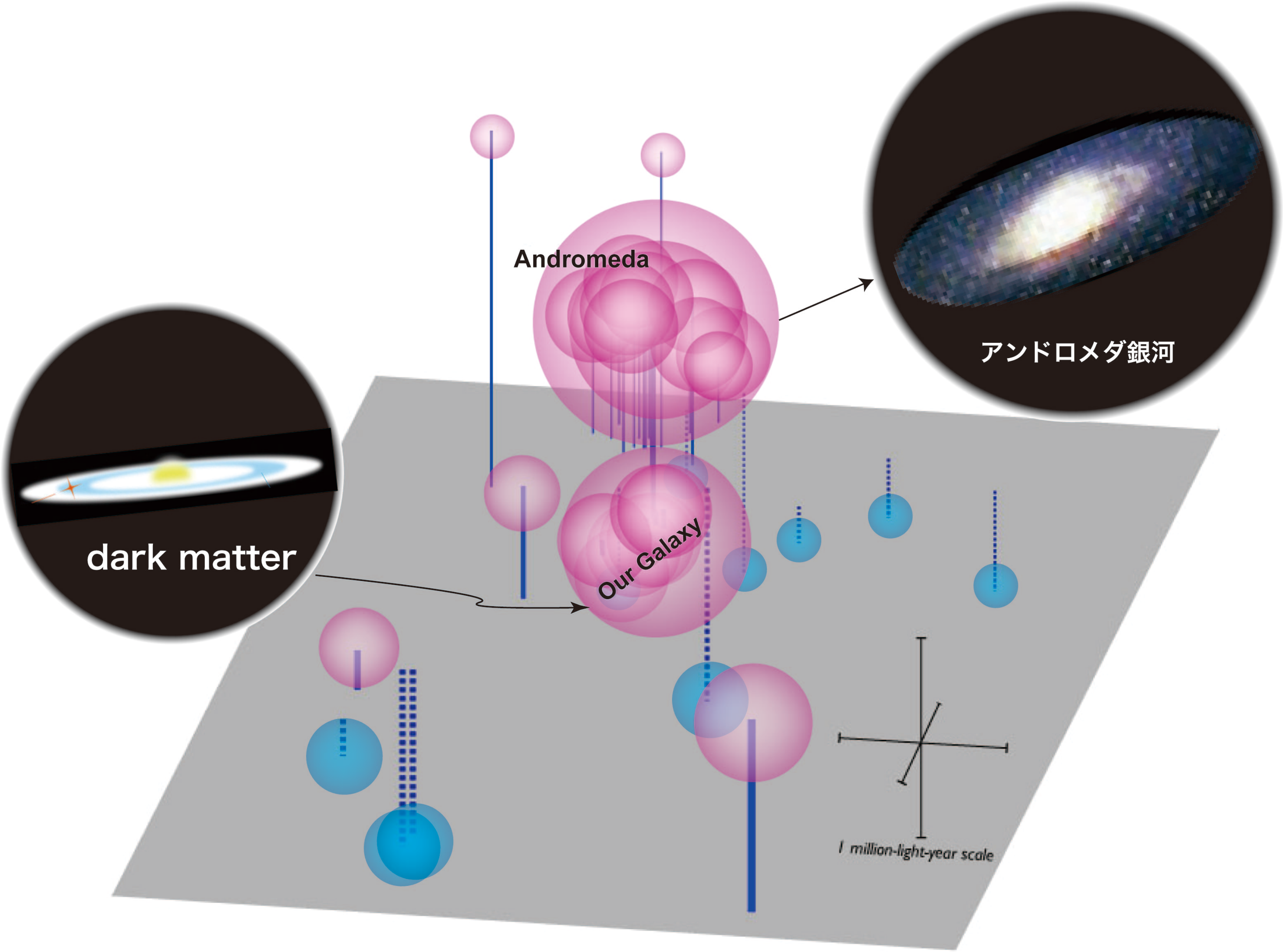
２　物質と栄養塩の連続循環システム（有機ラジカル反応の駆動）があるか:revised concept of habitable planet,

３　生命惑星の指標①（表層に液体の水）、指標②陸地の存在）、指標③進化の指標（中心星の年齢とリンク）、④光学的指標（既存、酸素他、1960年代にバック）


30000
20000
10000
3000
Radius (km)
0.1
1
10
Mass (Earth mass unit)
Uranus
Neptune
50% water
20% water
10% water
3% water
Earth-like
Earth
Mars
water dominated
Earth
rocks
Mars
metallic core

宇宙生物学の体系化④

- ６　Galactic habitable zoneの確立
- ７　銀河の構造進化が惑星表層環境（生物）に与える影響（①近傍超新星爆発、②暗黒星雲との衝突、③starburst:天の川銀河と矮小銀河400との衝突）: 地球史Gとの共同研究
- ８　宇宙古地理図の完成と太陽系進化史の相関関係

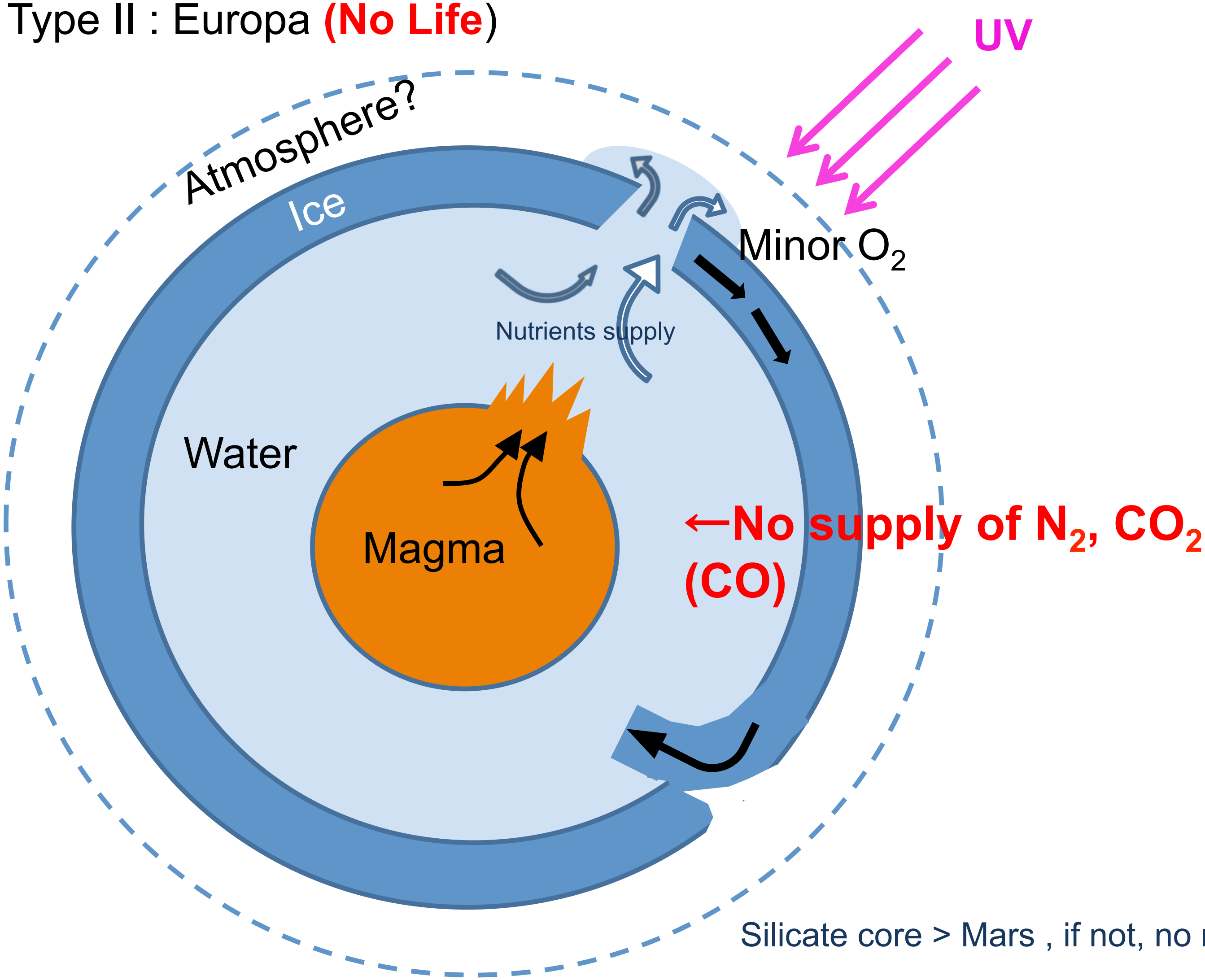

Andromeda
アンドロメダ銀河
dark matter
Our Galaxy
1 million-light-year scale

例題 疑似科学を区別しよう

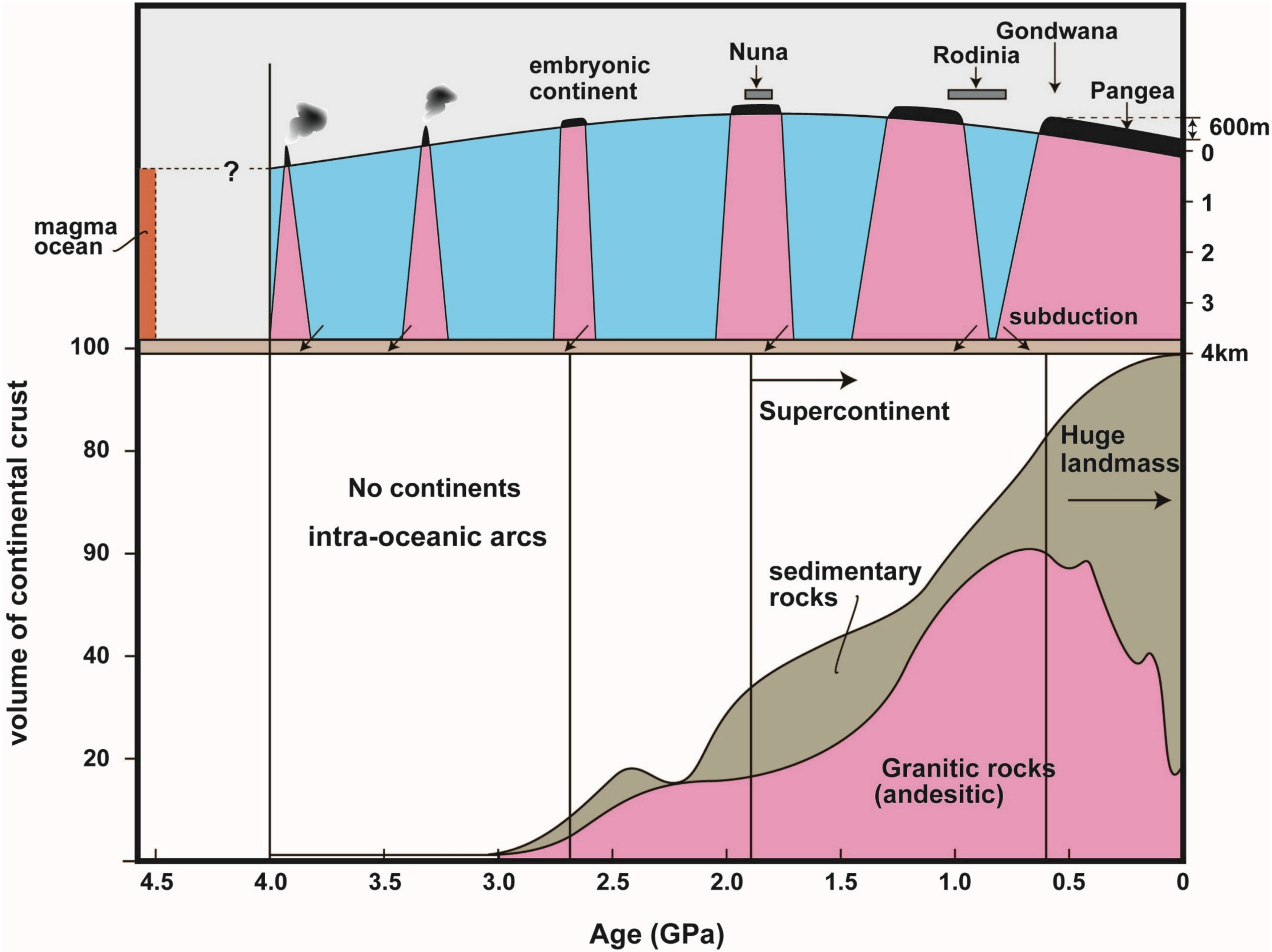
New Concept of Planetary Tectonics

- Deeper concept of habitable planet -

Type II : Europa **(No Life)**



Silicate core > Mars , if not, no magmatism ?



Gondwana
Nuna
Rodinia
embryonic continent
Pangea
600m
0
1
2
3
4km
?
magma ocean
subduction
100
80
90
40
20
volume of continental crust
Supercontinent
Huge landmass
No continents
intra-oceanic arcs
sedimentary rocks
Granitic rocks (andesitic)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0
Age (GPa)

Fig.6

宇宙生物学の体系（文明の存否）

- １　フェルミのパラドックス(Fermi, 1950)
- ２　Drakeの方程式(Drake, 1961)
- ３　Hart (1975)の拡張論理
- ４　学問としての積み上げ（ELSIの目指すもの）の上で議論
- ５　しかし、大枠は判明（Fermi & Hart と同じ）
- ６　我々（地球文明は）天の川銀河の中で一つ、アンドロメダに１－２個あるかも？今後数百年の科学で判明するだろう？

アミノ酸からペプチッドまで

- １　岡田さん指摘（木賀の図と解説を入れる）
- ２　これを実験室で創れるか？触媒の問題でなく有機ラジカル反応の鍵穴＋鍵問題（木賀）、或いは触媒（金属＝自由電子供給、溶質：B,Li,セメント、OOO、の理論背景が鍵）

Ⅱ 新しい視点、作業仮説があるか？

- 生命とは何か？
- これまでの生命に対する定義は（1）膜で周囲から隔離され、膜を通して周囲と物質とエネルギーをやり取り、（2）代謝を行う、（3）自己複製する、の3つである。これでは生命の定義は不十分である。新たに**、（4）栄養塩（特殊な岩石の無機的な成分）の連続供給（人間も微生物も栄養の定常供給がなければ死滅）、及び、（5）生命とは有機ラジカル反応である、を加える。**（5）は代謝だけを意味するのではなく、生命体そのものを特徴づける化学反応であり、その普遍性の解明は、宇宙生物学の体系化の基盤となる。
- 　そこで太陽系の諸惑星や衛星のデータを基に**、栄養塩の連続供給を賄う『planetary tectonics』を一般化する**（James Dohm）。

原始地球環境の復元（２段階）

Albarede(隕石学G)＋Maruyama et al. (2013): 原始海洋4km厚さが根拠：これはたたき台で、集中した学際勉強会でELSIモデルを創る

原始海洋･大気の質量と組成

- １　Titech Model (裸の惑星→小惑星帯から44億年前に隕石で運ぶ)＝量は4kmの海洋質量
- ２　すると、CO_2とN_2も決まる
- ３　検証１:原始大気の量はCO_2/N_2比で金星、地球、火星を比較するとわかる＝３５気圧（原始大気の質量）
- ４　検証２:地球史から埋没有機物（砂岩･泥岩、石灰岩、石油･石炭）の量からの制約（ＣとＮ）、
- ５　ハロゲン元素（どこにも入らない、海洋だけ）の復元→原始海洋の組成推定

検証可能性

- １　炭素は中央海嶺で固定された量が決まる（横軸46億年研究）→地球史の時代ごとに復元できる。
- ２　炭素は冥王代では海洋で固定できない（強酸なので炭酸塩鉱物は不安定で分解し、ガスは大気へ移動）。太古代以降の堆積岩中に有機物・炭酸塩岩として固定された。
- ３　窒素は不活性で大気にしか入らない。殆ど大気に残存し、一部が有機物として堆積岩中に固定された。もとに戻せばよい。
- ４　生物の総量（バイオマス）は供給されるリンの量で決まる。

検証可能性

- １　原始大気・海洋（量と組成）の推定は、地球史backward modelから検証できる。
- ２　その方法は複数で、相互に独立しているので、極めて有効
- ３　更に、惑星生命の寿命へと発展させる

地球生命の寿命

- １　原始海洋と大気の量と化学組成が決まれば計算できる。
- ２　窒素は大気にしか分配されない
- ３　炭素は大気＞海洋＞固体地球（総量は別）
- ４　ハロゲンは海洋だけ
- ５　炭素は固体内部循環と競合
- ６　惑星生命の寿命モデルが創れる
- ７　Backward model（地球史記録）で検証できる

惑星生命の寿命

- １　地球生命の寿命から（誕生まで）
- ２　地球生命の寿命
- ３　一般化（PTの役割、原始大気の窒素/炭素比、それぞれの量、原始大陸の存否、海洋質量他）
- ４　次が惑星生命の寿命（中心星、海洋の創り方：all or nothing、太陽系惑星周辺の変成分帯の重要性）
- ５　ケイ酸塩鉱物の累帯組成分布とその原因（横山/臼井/大森）
- ６　小惑星帯の成因論（①存否の原因、②サイズ、③cool Jupiterの成因と質量、④）

複雑系科学の研究手法

- １　無数の変数は等価ではない
- ２　最も重要な要素を掴み、できるだけ単純で誰にでも分るモデルを創る
- ３　原始地球の場合はどうか（snowlineの内側と外側で、all or nothingの海洋ができる）
- ４　その隙間の例外的な海洋質量を創るモデルが小惑星帯起源の海洋＋大気
- ５　検証可能性がなければモデルに意味がない

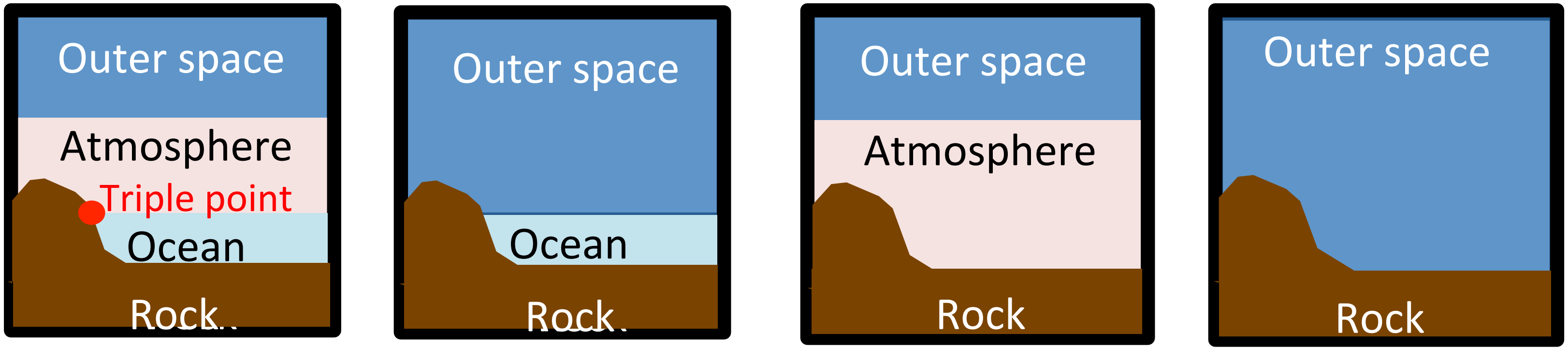
もう1つの海洋地球を創る方法

- １　ジャイアントインパクトで揮発性元素を飛ばす（月）
- ２　その後で、星雲ガスの水素と地球内部からでるマグマの水、二酸化炭素で酸化させて海洋を創る→何故ダメか？もしジャイアントインパクトで揮発性元素を飛ばすなら、地球内部起源マグマはドライの筈。

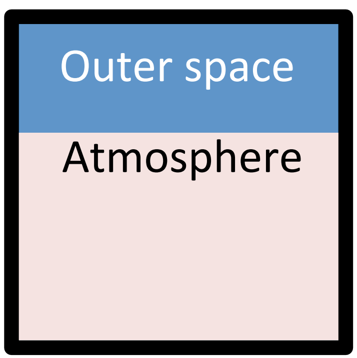
１　生命の起源、既存の説のまとめ

- １　生命とは何か？
- ２　『化学進化』から『生命誕生』までのプロセス
- ３　場（環境）の論争

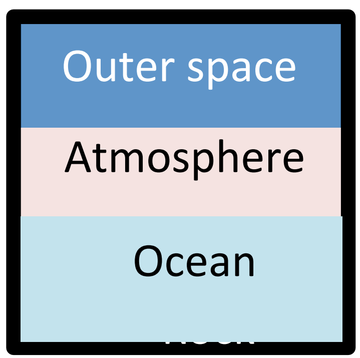
Rocky planet

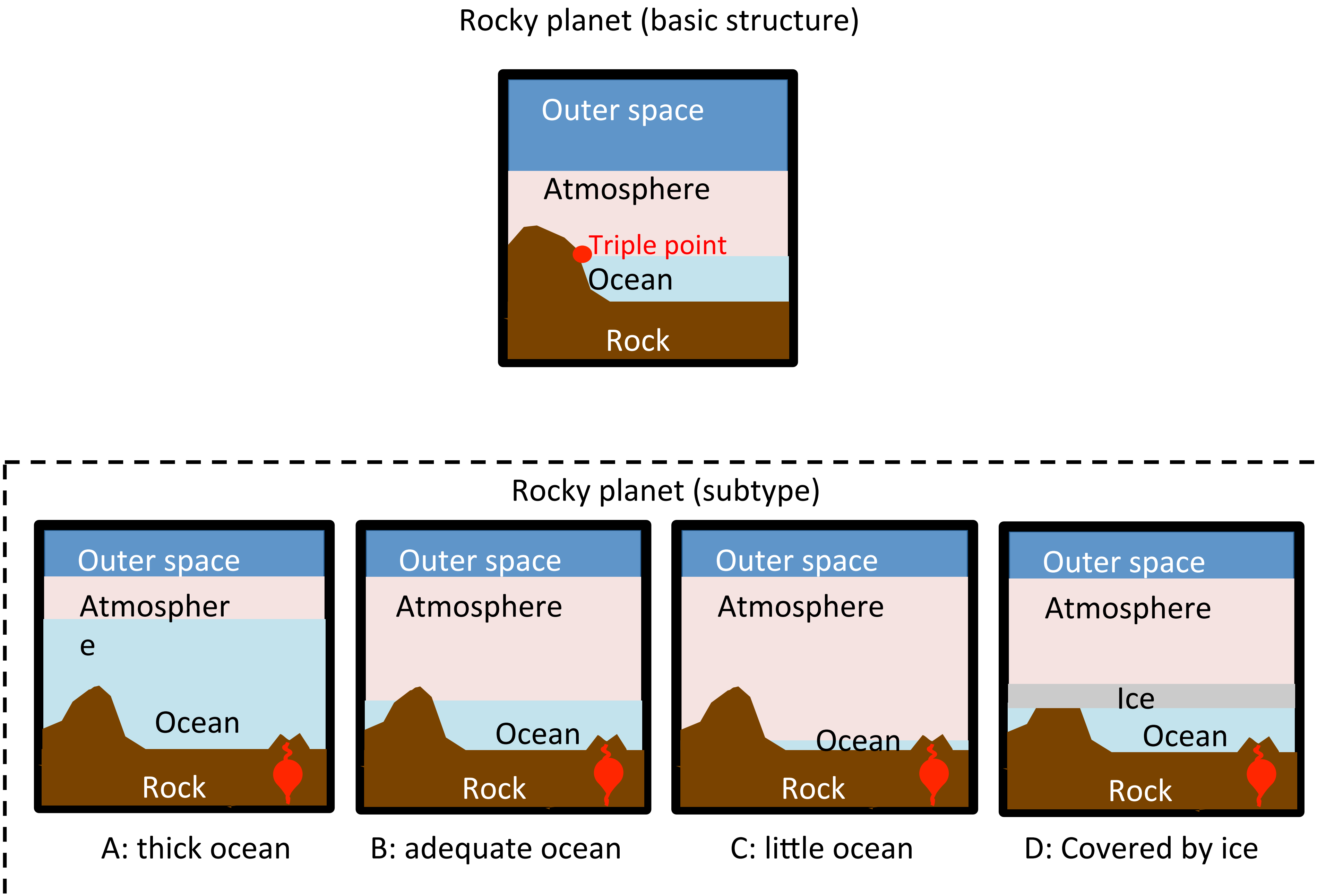


Gas Giant planet



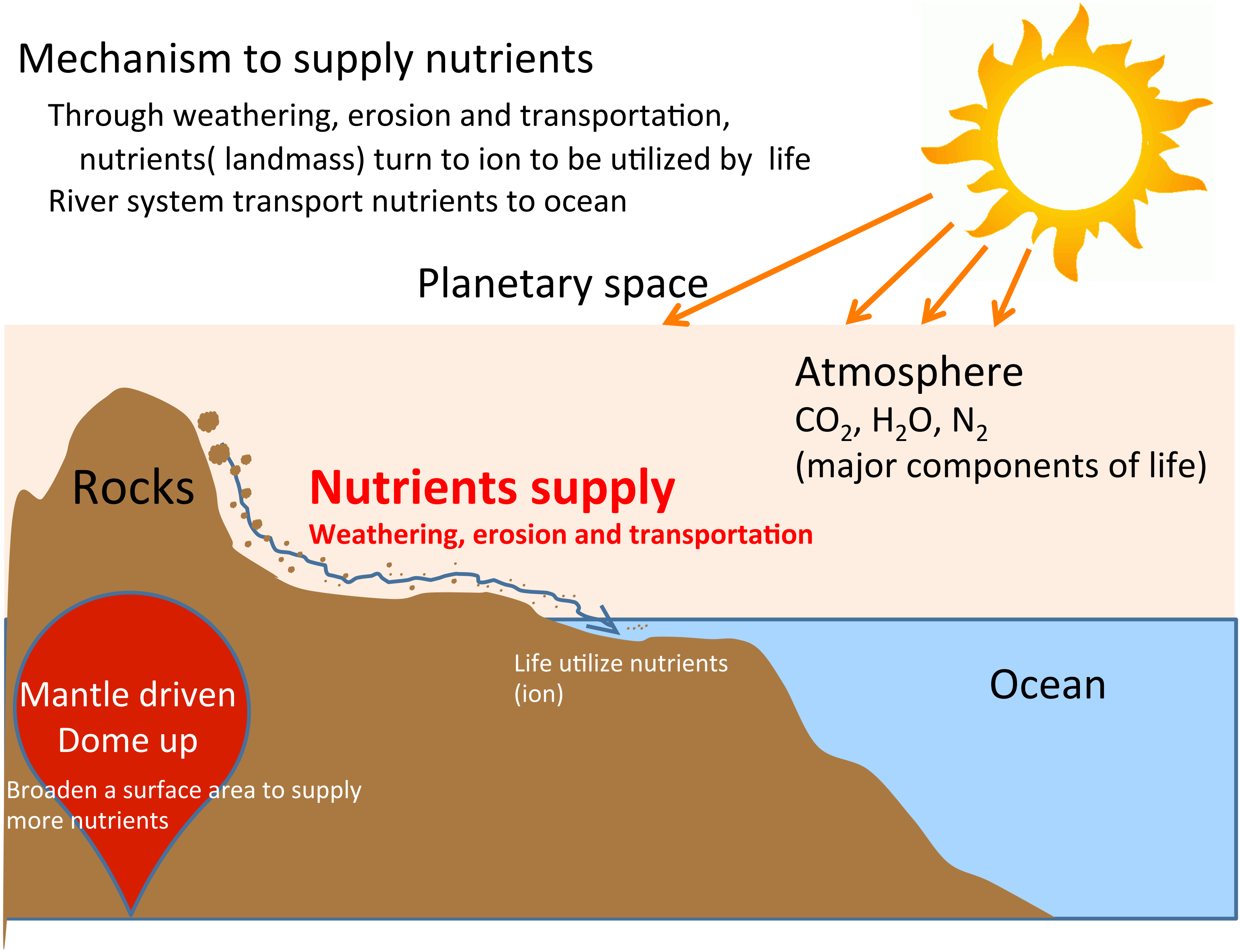
Ice Giant planet

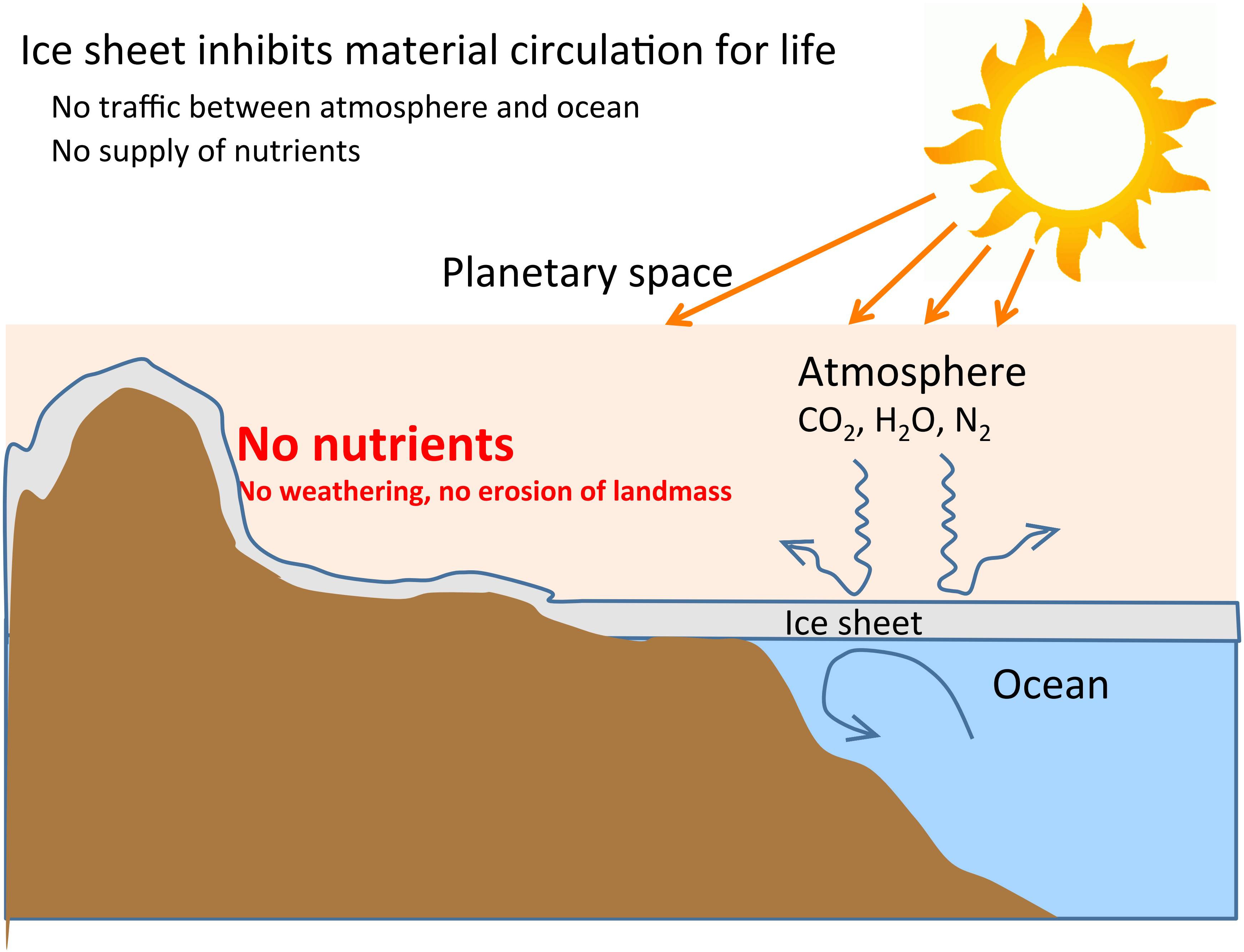



Rocky planet (basic structure)
Outer space
Atmosphere
Triple point
Ocean
Rock
Rocky planet (subtype)
Outer space
Atmospher
e
Ocean
Rock
A: thick ocean
Outer space
Atmosphere
Ocean
Rock
B: adequate ocean
Outer space
Atmosphere
Ocean
Rock
C: little ocean
Outer space
Atmosphere
Ice
Ocean
Rock
D: Covered by ice

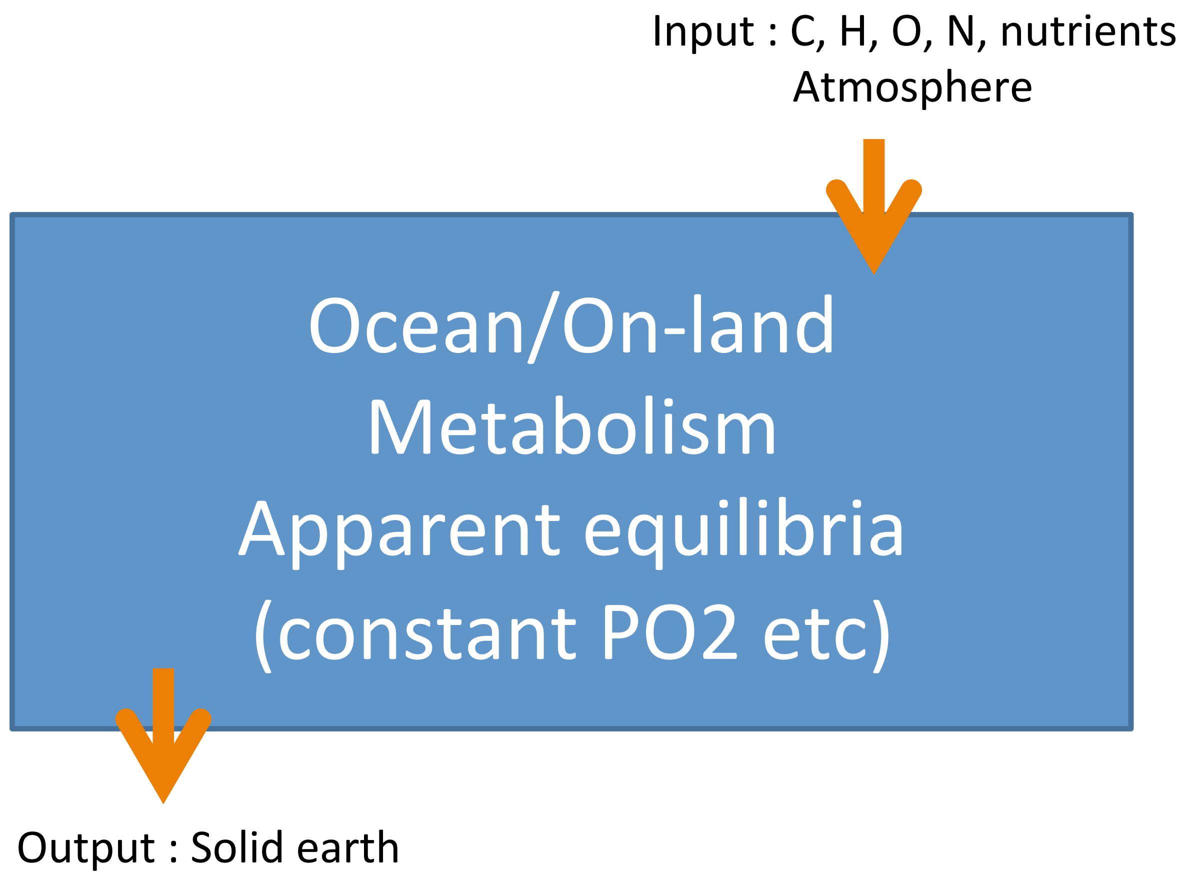
Mechanism to supply nutrients

Through weathering, erosion and transportation,
nutrients(landmass) turn to ion to be utilized by life
River system transport nutrients to ocean



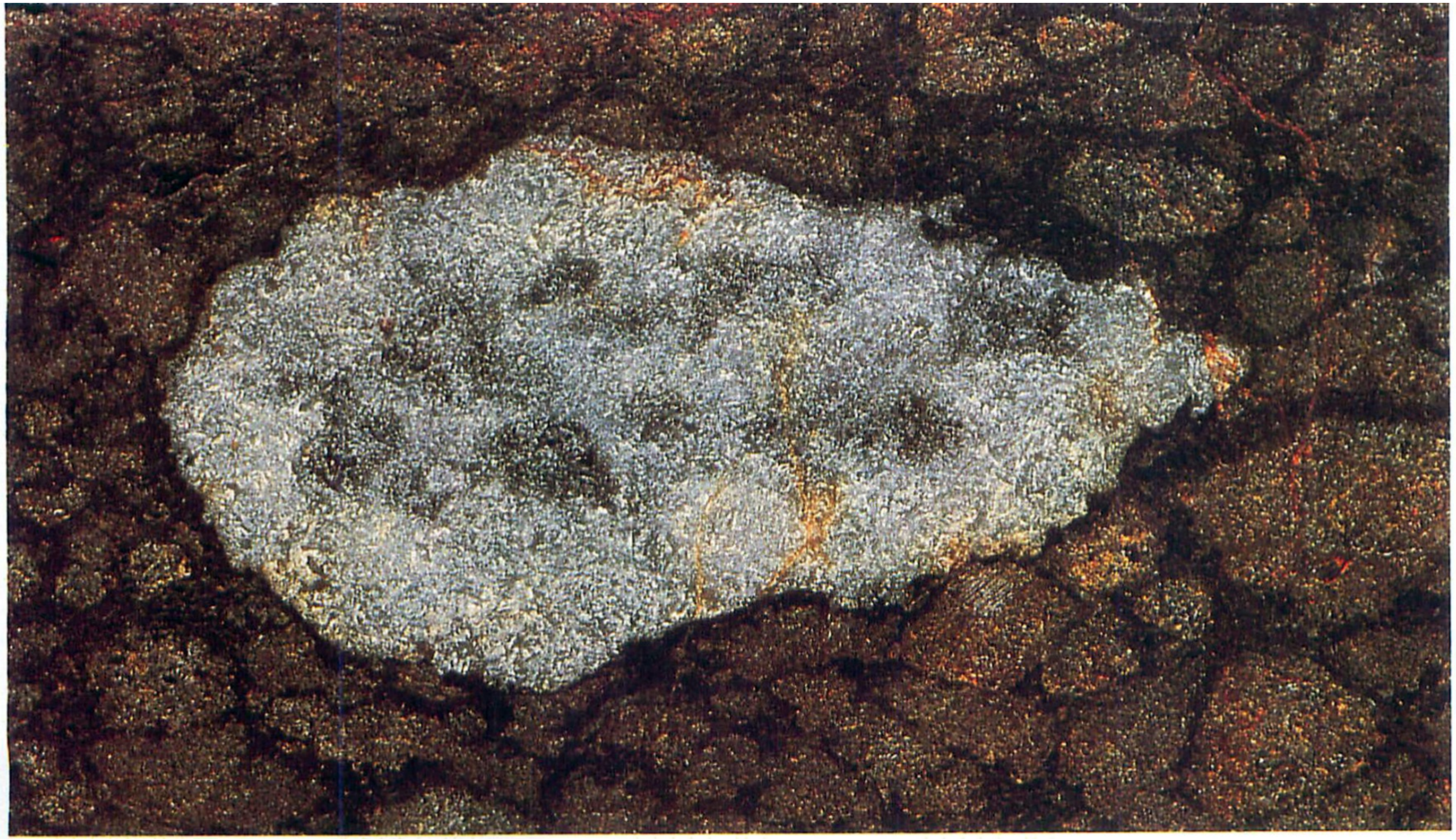

Ice sheet inhibits material circulation for life
No traffic between atmosphere and ocean
No supply of nutrients
Planetary space
Atmosphere
CO_2, H_2O, N_2
No nutrients
No weathering, no erosion of landmass
Ice sheet
Ocean

Dynamic equilibria



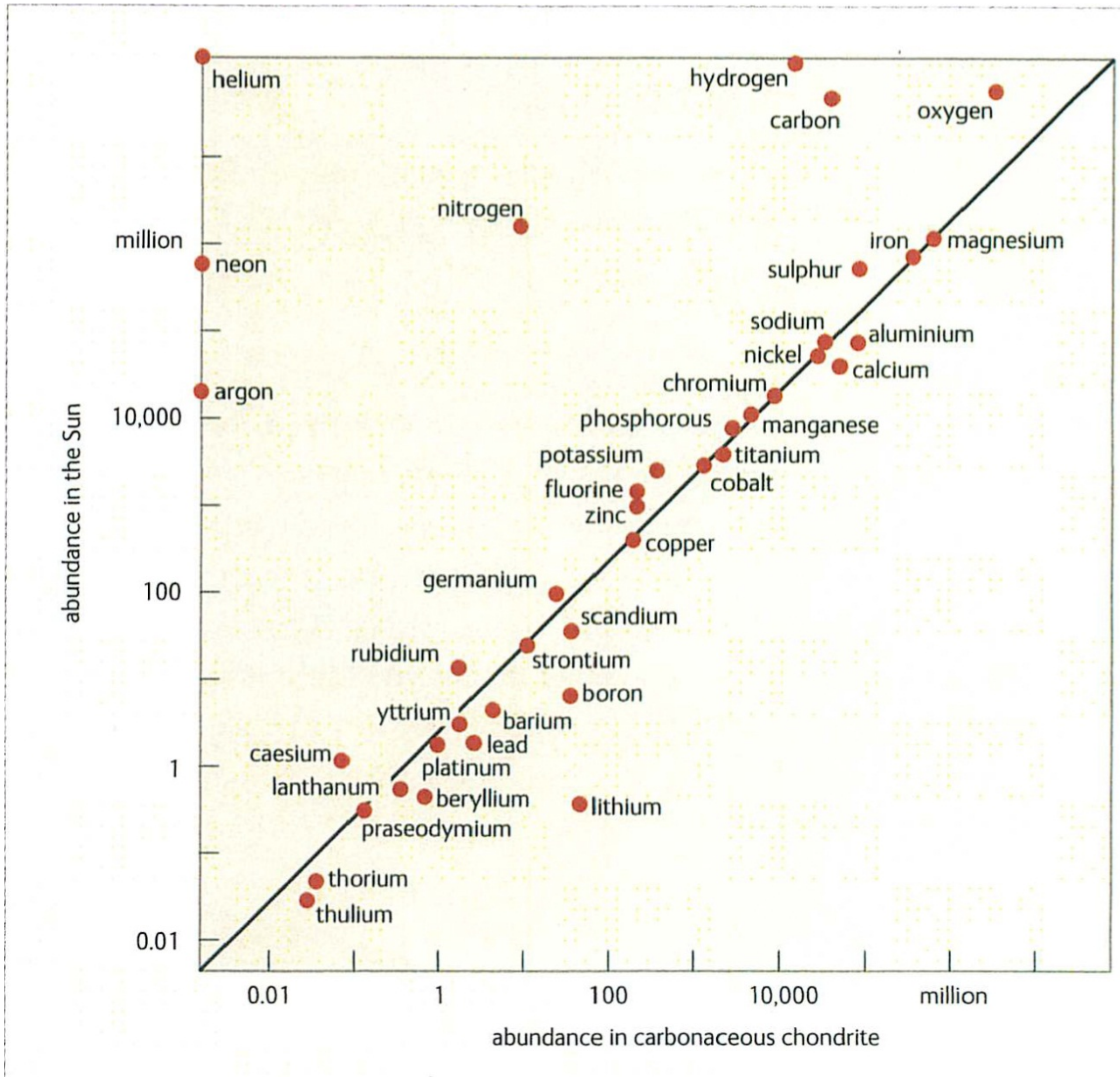
The Allende carbonaceous chondrite, partly covered in jet-black fusion crust. This contains numerous white inclusions called CAIs. This stone is about 10m (4 in) across.

Smith et al., (2011)



A CAI from the Leoville carbonaceous chondrite. It is 2 cm across (3/4 in).

Smith et al., (2011)



Except for gases such as hydrogen and helium, the chemical composition of carbonaceous chondrites such as Ivuna and the sun is very similar.

Smith et al., (2011)

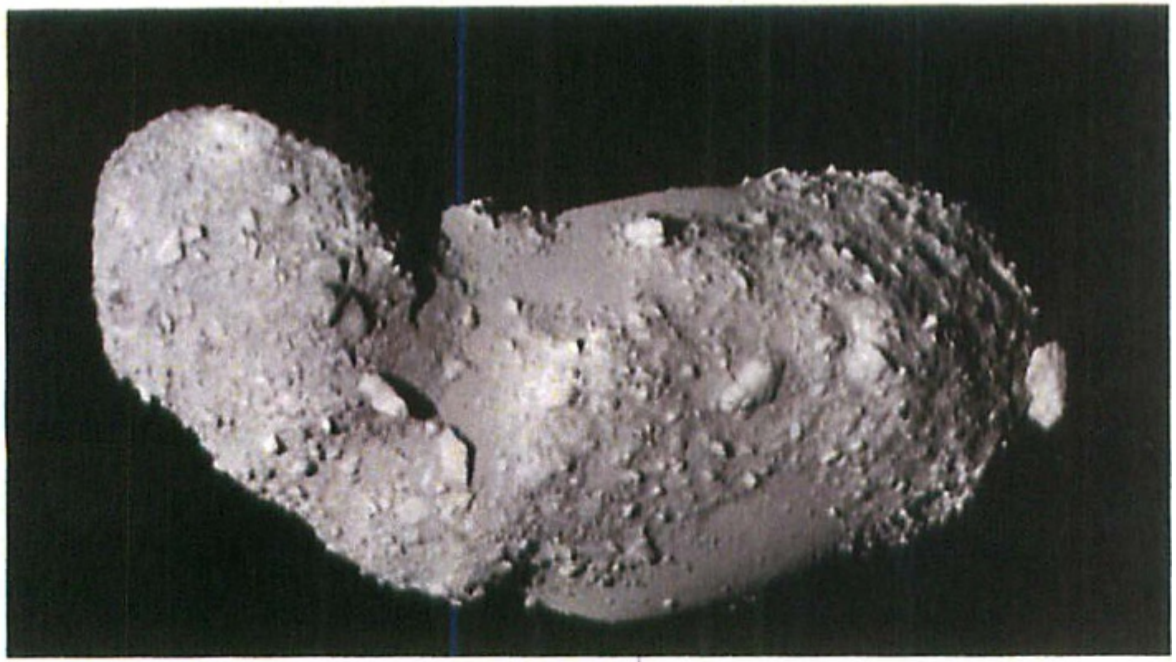


Image of the asteroid Itokawa as imaged by the Hayabusa (Japanese) space mission. This is very small asteroid of about 500m (1640ft) long. The surface of the asteroid shows a rubbly texture.

Smith et al., (2011)

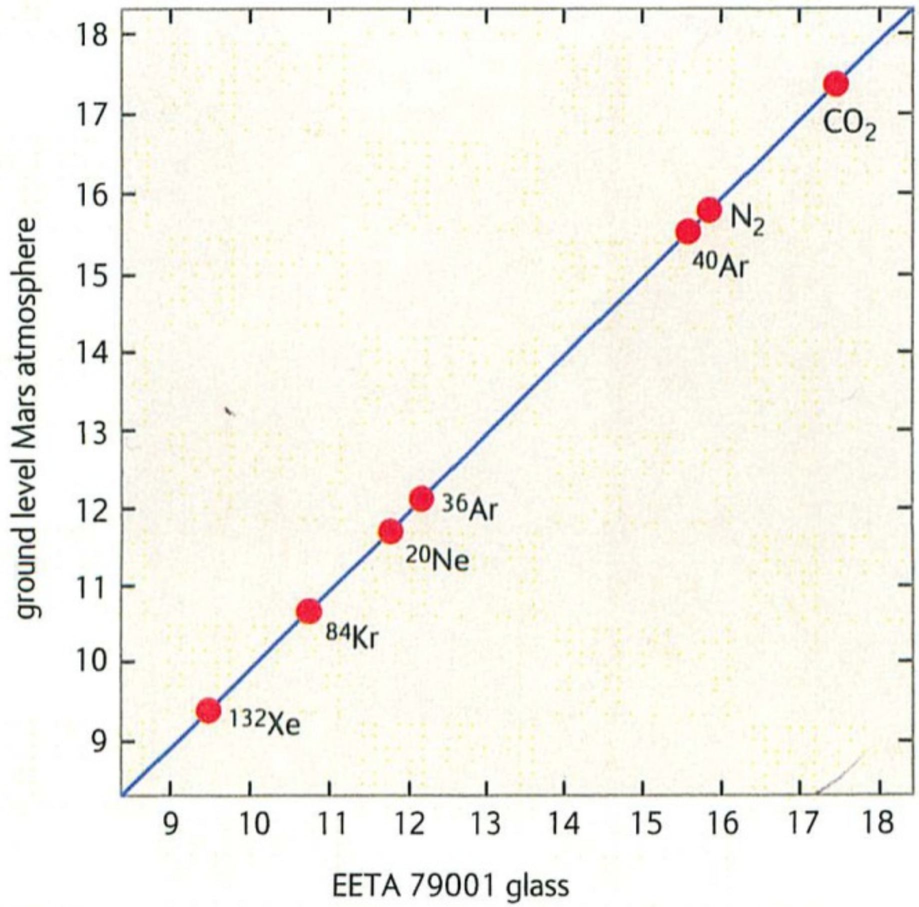
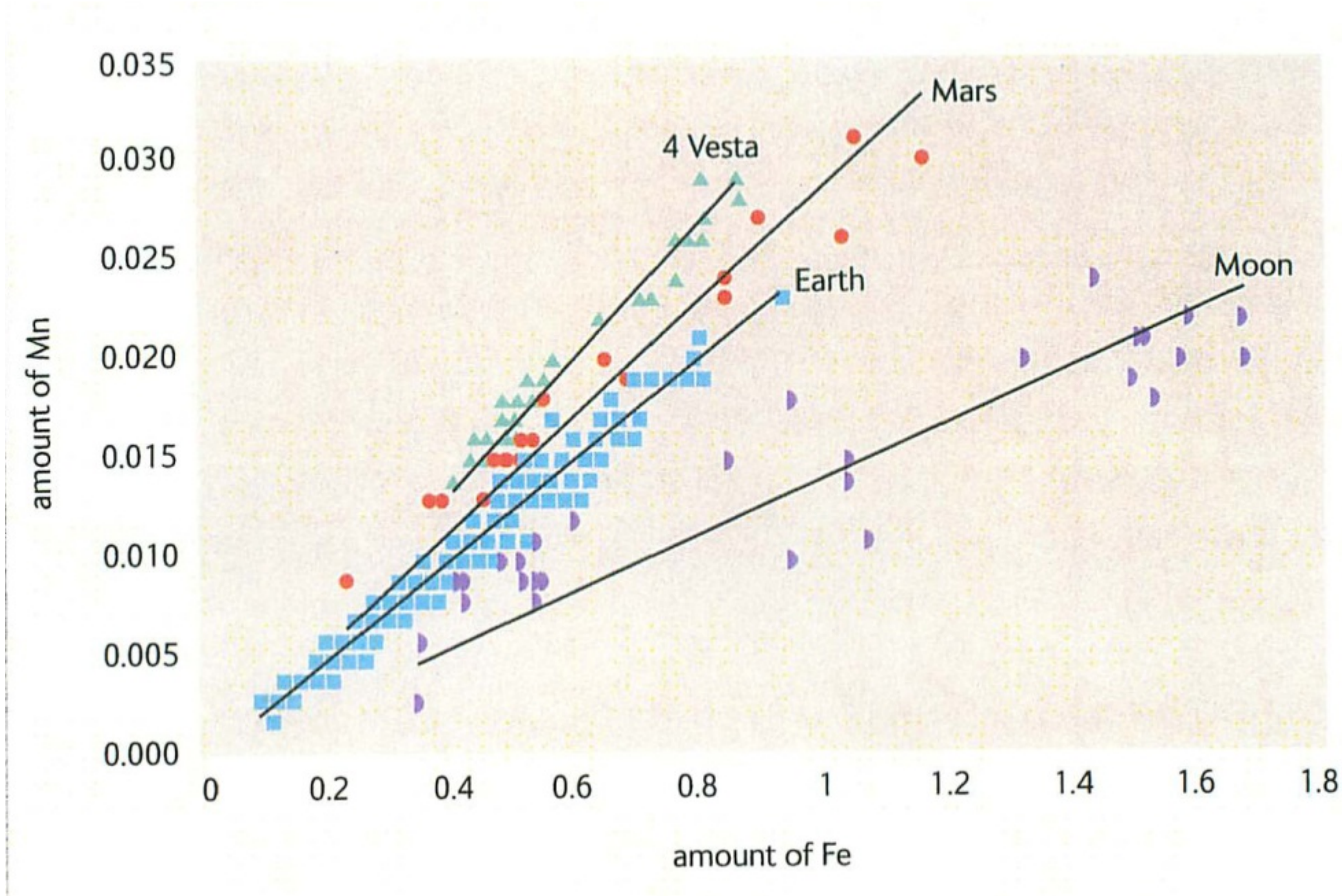


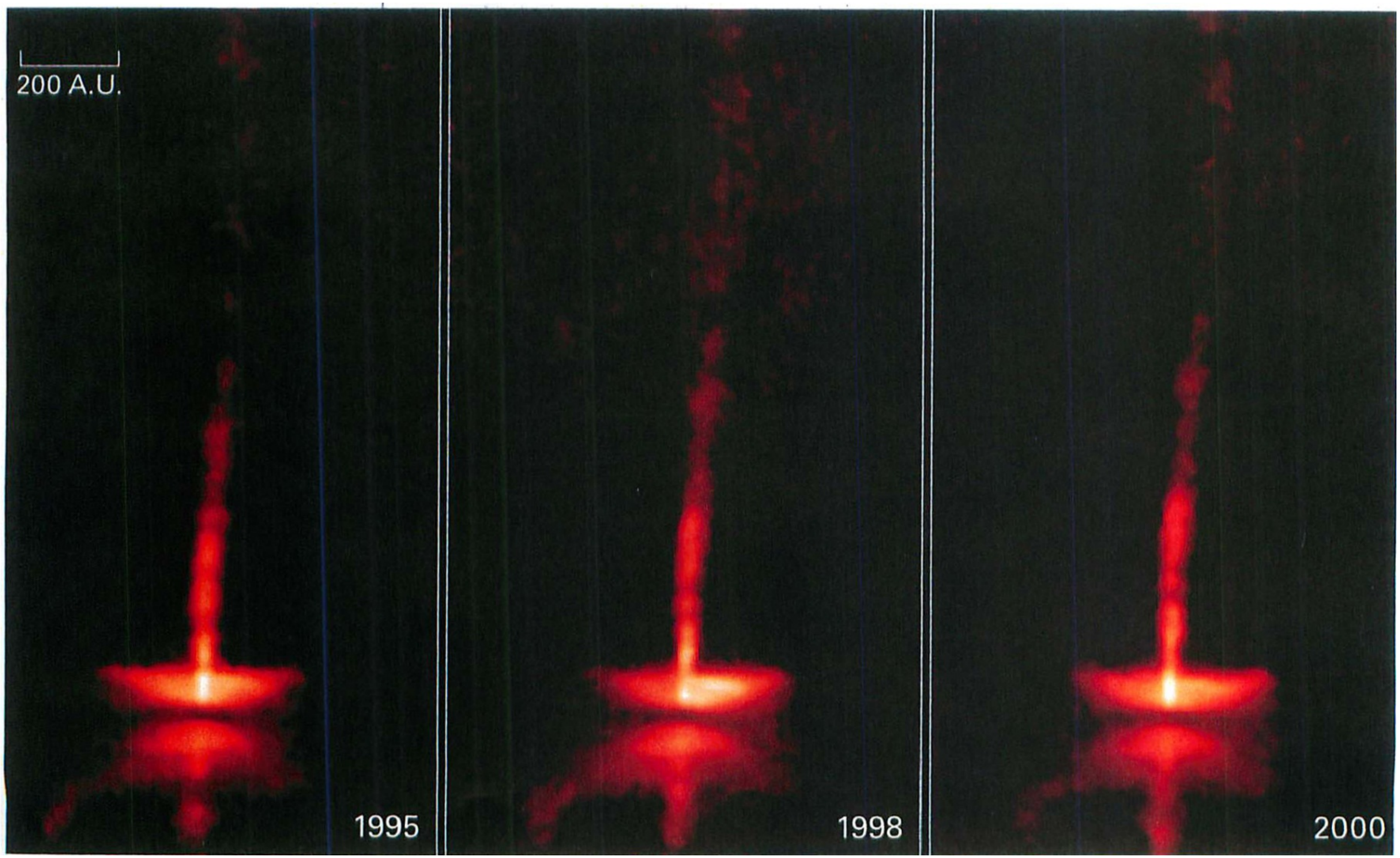
Diagram showing that the gases trapped inside EET A79001 are the same, and in the same relative proportions, as those in Mars' atmosphere.

Smith et al., (2011)



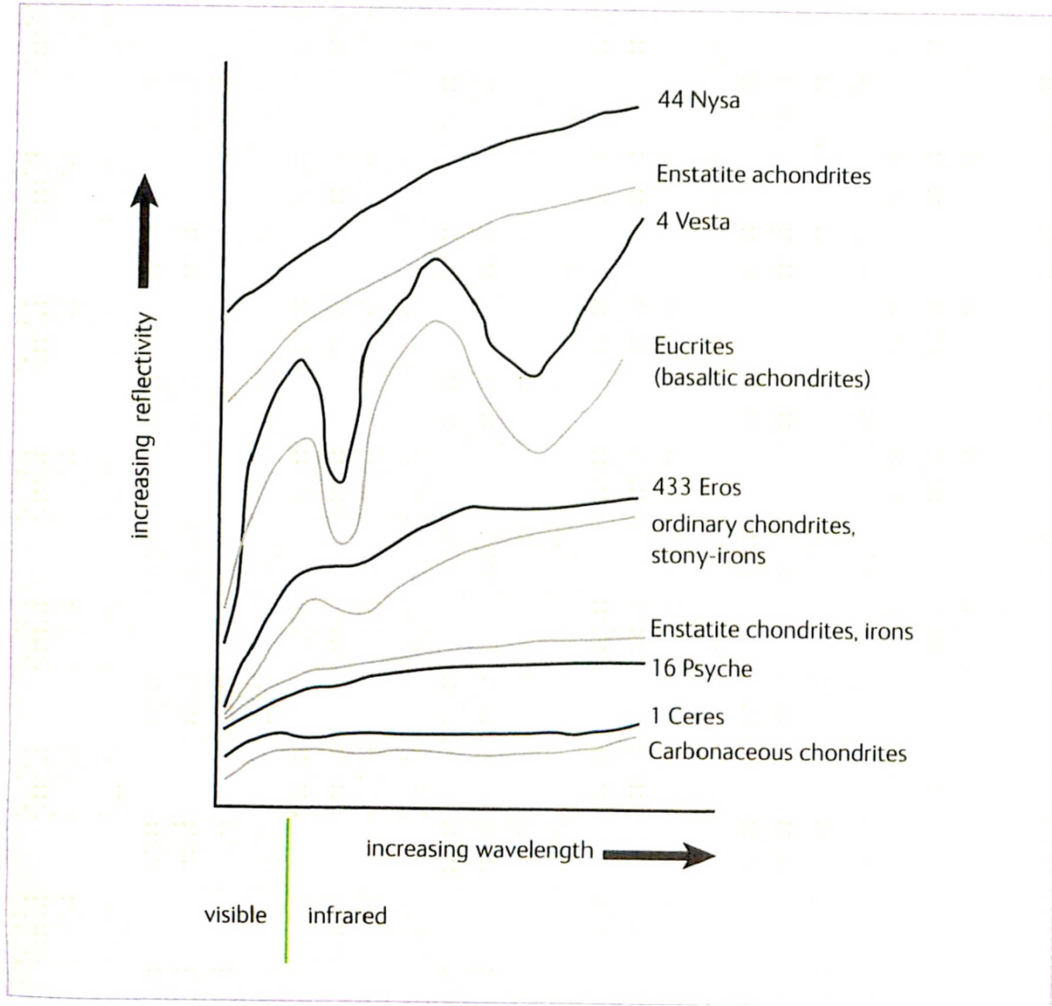
Fe/Mn ratios for meteorites from different bodies.

Smith et al., (2011)



These images show changes over only a five-year period in the disc can jets of this newborn star, which is about half a million years old. The young stars are obscured by a dark disc of dust. Because of changes in the local magnetic field, violent jets of material are ejected from near to the central star.

Smith et al., (2011)



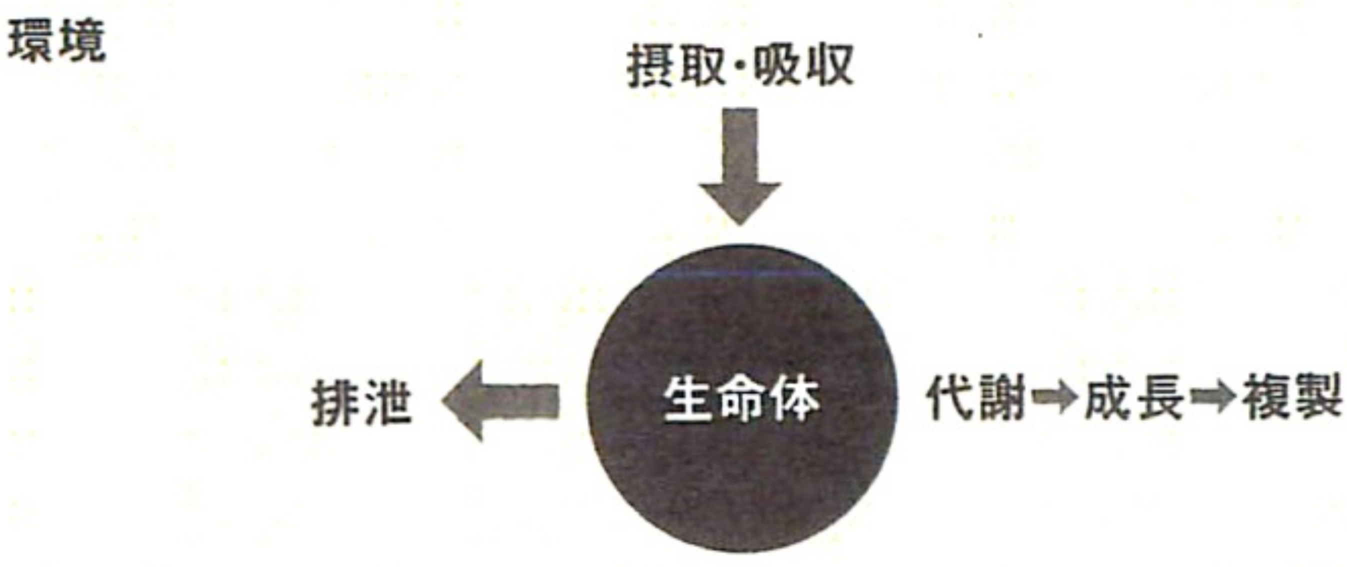
Spectra of asteroid show some similarities with the measured spectra of meteorites. The strong similarity between the basaltic achondrites (eucrites and also the related howardites and diogenites) suggest that these meteorites were derived from 4 Vesta.

Smith et al., (2011)

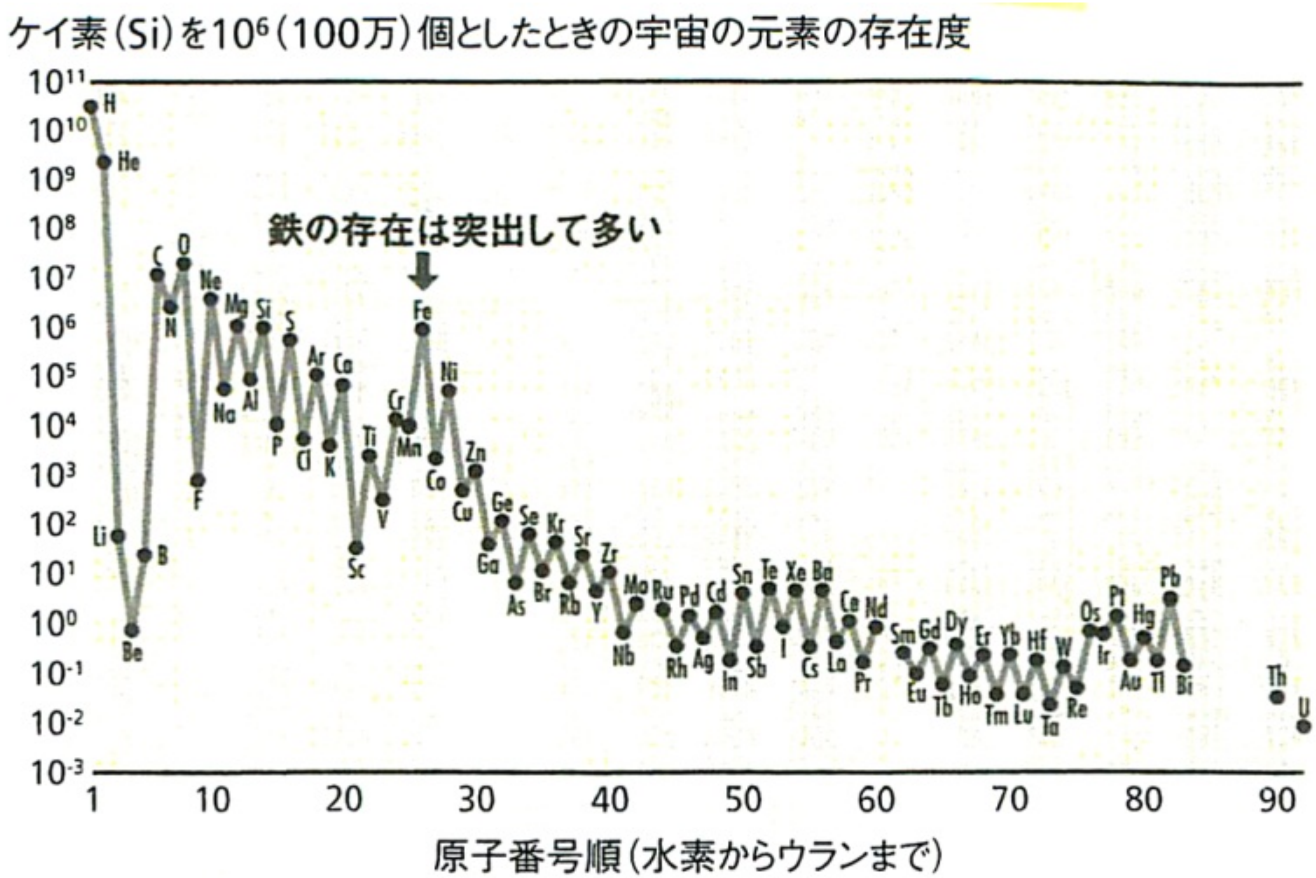
表2-2◉重金属を含むタンパク質、酵素、ビタミンと色素の例

種類	金属タンパク、含金属酵素・ビタミン	含まれる重金属	生理的役割や効果など
金属タンパク	メタロチオネイン（動物）	亜鉛、銅、カドミウムなど	重金属の貯蔵、カドミウムの解毒等
	ファイトケラチン（植物）	亜鉛、銅、カドミウムなど	重金属の貯蔵、カドミウムの解毒等
ビタミン	ビタミンB_{12}（シアノコバラミン）	コバルト	眼精疲労・神経障害の治療
酵素	シトクロムP450（酵素群）	鉄	毒物の解毒（薬物代謝）
	カタラーゼ	鉄	過酸化水素（活性酸素種）を分解
	ニトロゲナーゼ	鉄、モリブデン、バナジウム	大気中の窒素からアンモニアを合成
	DNAポリメラーゼ	亜鉛	DNAの複製や修復
	デヒドロゲナーゼ	亜鉛	アルコールを酸化して分解等
	ヒドロゲナーゼ	鉄、ニッケル	水素の酸化還元反応に関係
	スーパーオキシドジスムターゼ	銅、亜鉛、マンガン	スーパーオキシド（活性酸素）を消去
	グルタチオンペルオキシターゼ	セレン	活性酸素を除去する反応を助ける
	ウレアーゼ	ニッケル	尿素をアンモニアに分解
色素	ヘモグロビン（ヘム・ポルフィリン）	鉄	酸素と結合し体内に運搬
	クロロフィル	マグネシウム	植物の光合成を行う
	ヘモシアニン	銅	一部の無脊椎動物で酸素を運搬

Watanabe (2012)

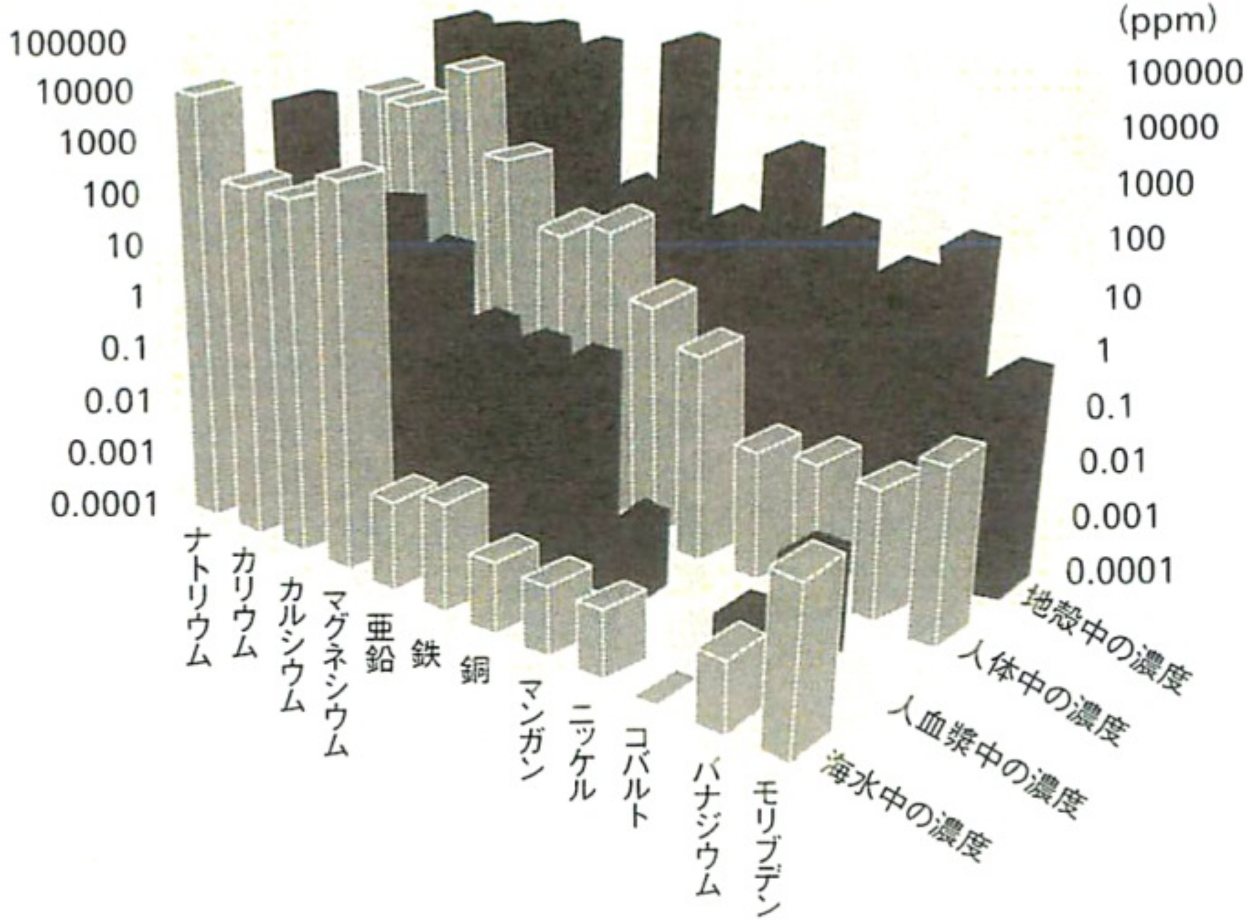


生物のシンプルなモデル　　Watanabe (2012)



太陽系における元素の存在量

Watanabe (2012)



地殻と人体、血漿と海水の元素濃度
ヒトの濃度パターンは近くよりも海水に似ている

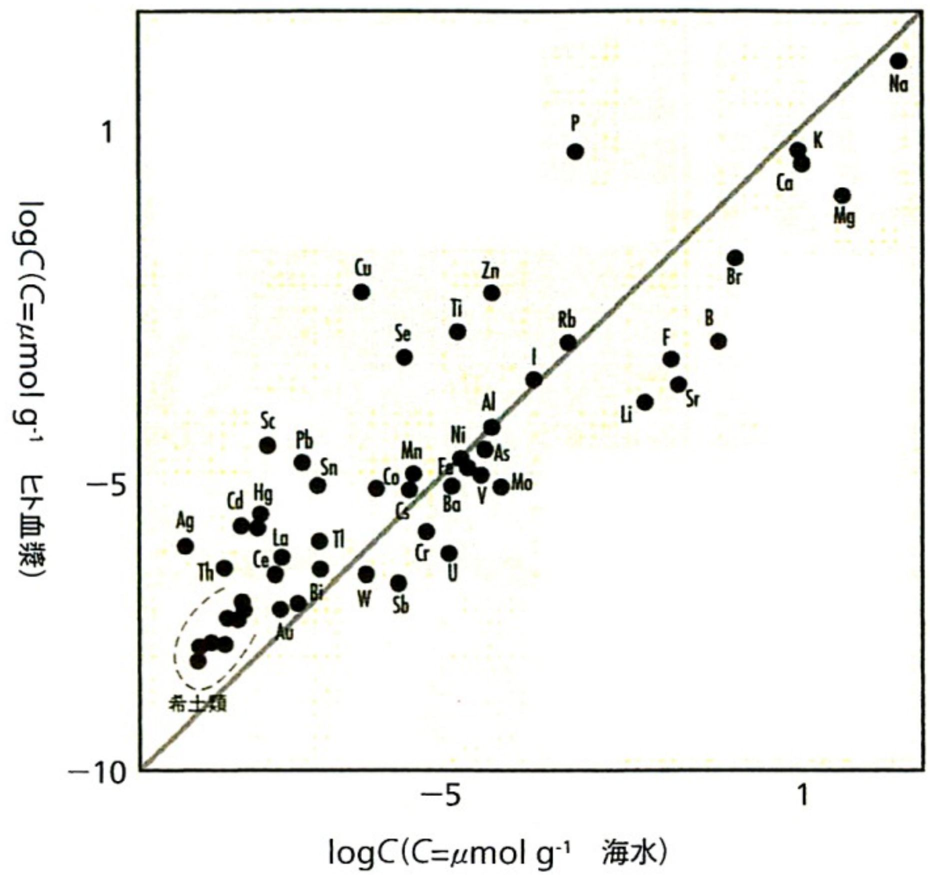
Watanabe (2012)

表2-1◉動物とヒトで認知されている必須元素

族／周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	**H** 水素																	He ヘリウム
2	*Li* リチウム	*Be* ベリリウム											*B* ホウ素	**C** 炭素	**N** 窒素	**O** 酸素	F フッ素	Ne ネオン
3	**Na** ナトリウム	**Mg** マグネシウム											*Al* アルミニウム	Si ケイ素	**P** リン	**S** 硫黄	**Cl** 塩素	Ar アルゴン
4	**K** カリウム	**Ca** カルシウム	Sc スカンジウム	Ti チタン	V バナジウム	**Cr** クロム	**Mn** マンガン	**Fe** 鉄	**Co** コバルト	Ni ニッケル	**Cu** 銅	**Zn** 亜鉛	Ga ガリウム	*Ge* ゲルマニウム	As ヒ素	**Se** セレン	*Br* 臭素	Kr クリプトン
5	Rb ルビジウム	*Sr* ストロンチウム	Y イットリウム	Zr ジルコニウム	Nb ニオブ	**Mo** モリブデン	Tc テクネチウム	Ru ルテニウム	Rh ロジウム	Pd パラジウム	*Ag* 銀	*Cd* カドミウム	In インジウム	Sn スズ	*Sb* アンチモン	Te テルル	**I** ヨウ素	Xe キセノン
6	*Cs* セシウム	*Ba* バリウム	L ランタノイド	Hf ハフニウム	Ta タンタル	*W* タングステン	Re レニウム	Os オスミウム	Ir イリジウム	Pt 白金	*Au* 金	*Hg* 水銀	Tl タリウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム	At アスタチン	Rn ラドン
7	Fr フランシウム	Ra ラジウム	A アクチノイド	Rf ラザホージウム	Db ドブニウム	Sg シーボーギウム	Bh ボーリウム	Hs ハッシウム	Mt マイトネリウム	Ds ダームスタチウム	Rg レントゲニウム	Cn コペルニシウム		Fl フレロビウム		Lv リバモリウム		

濃いグレーの背景が動物で確認されているもの。
太字がヒトで確認されている必須元素。
斜体は動物で疑われている必須元素

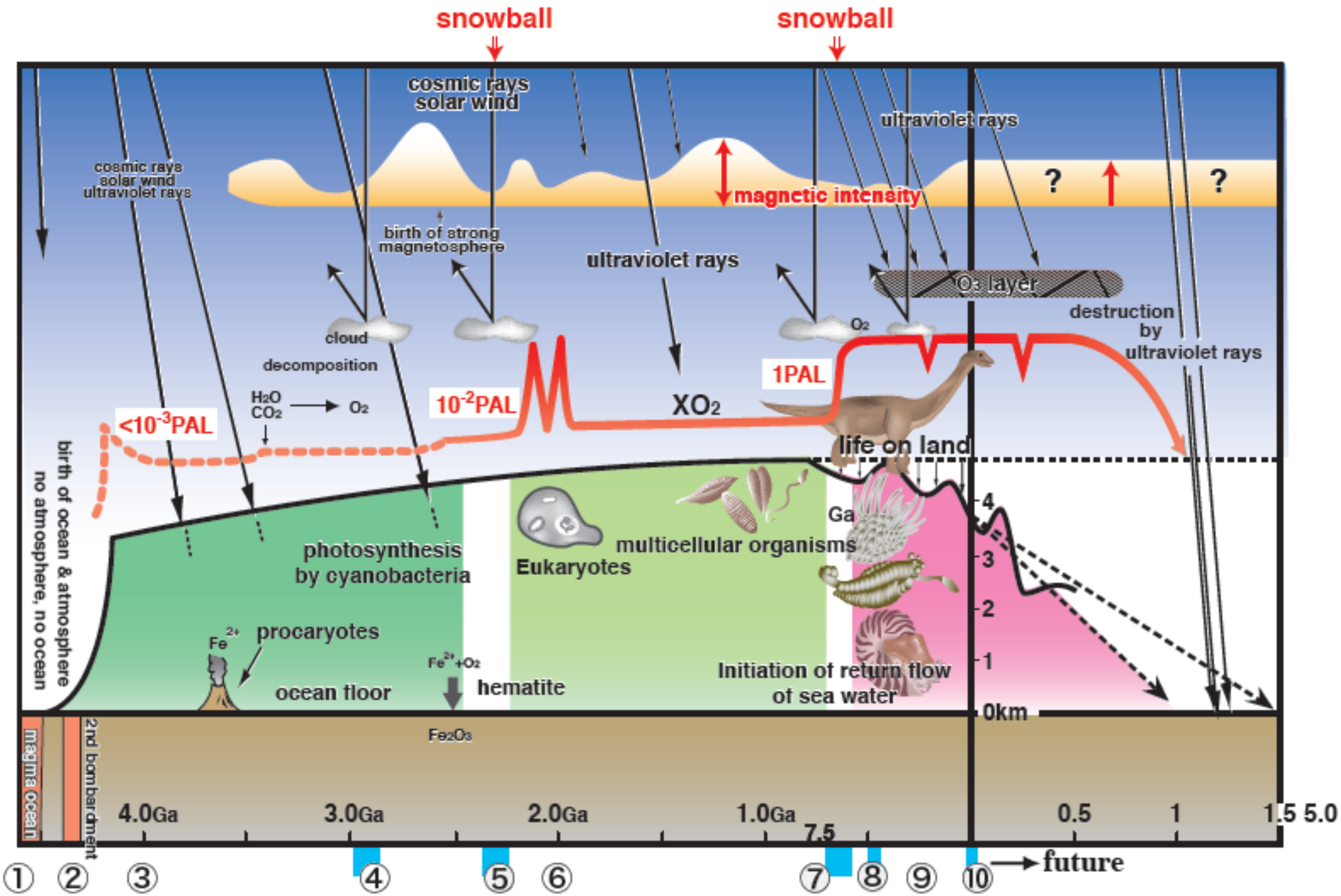
Watanabe (2012)



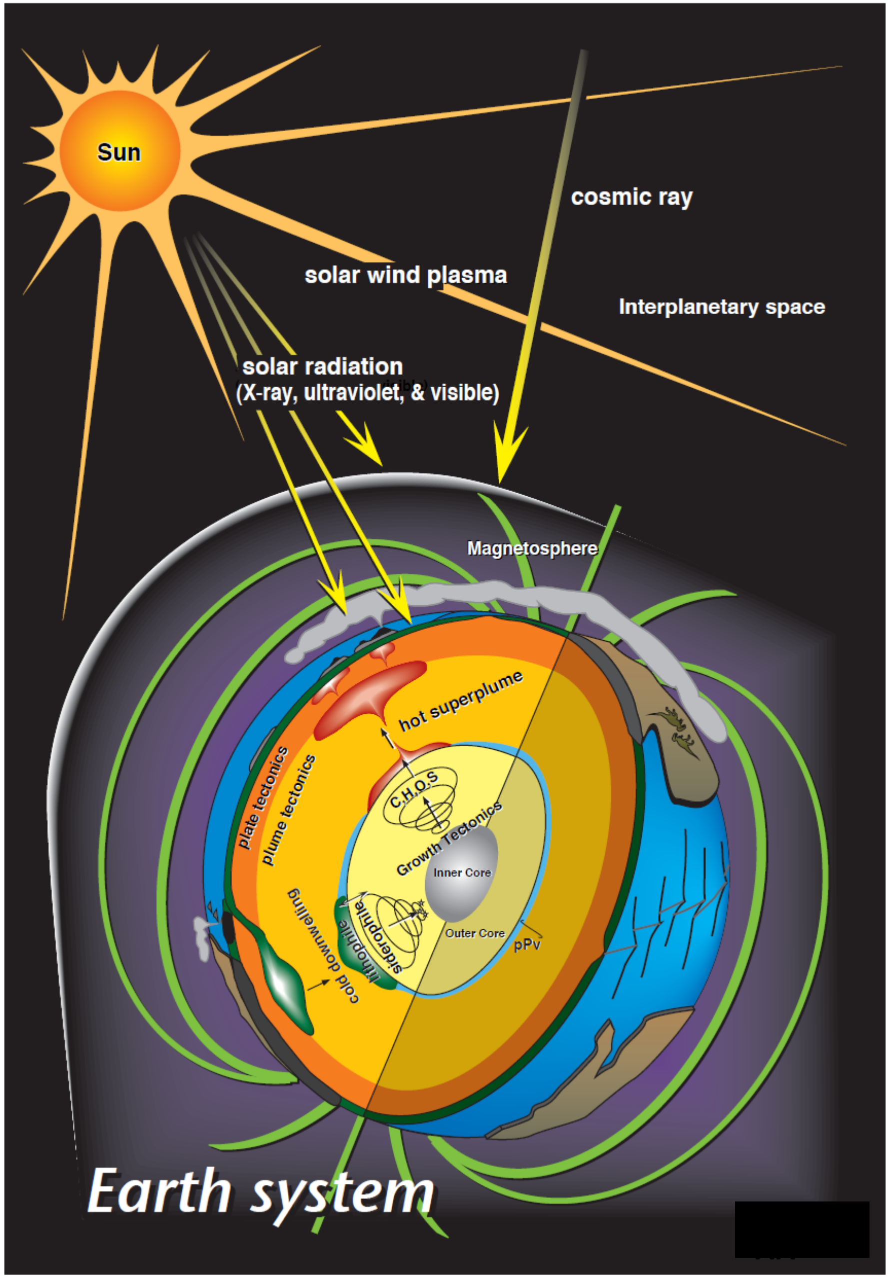
◉海水中の元素と人間の血漿中の元素組成の関係

海における多くの微量元素の組成が体内の血漿と似ている

Watanabe (2012)

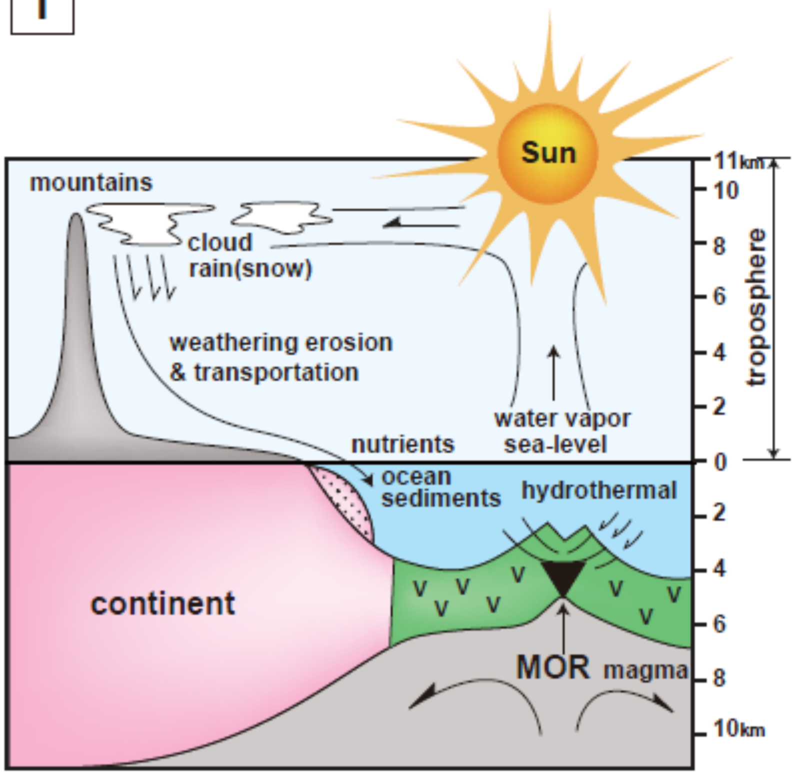


Maruyama et al., 2013

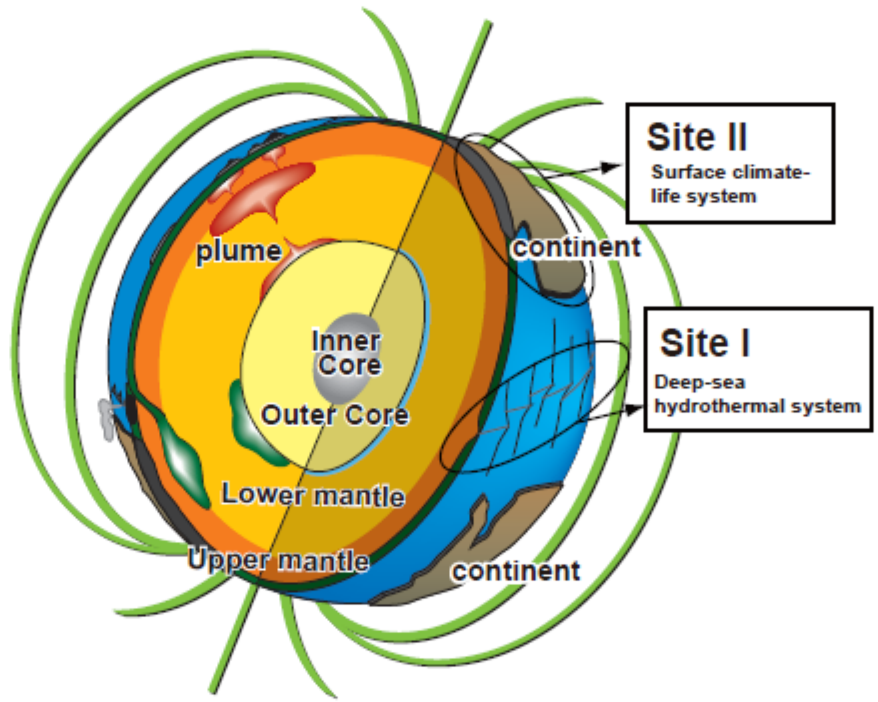


Maruyama et al., 2013

I

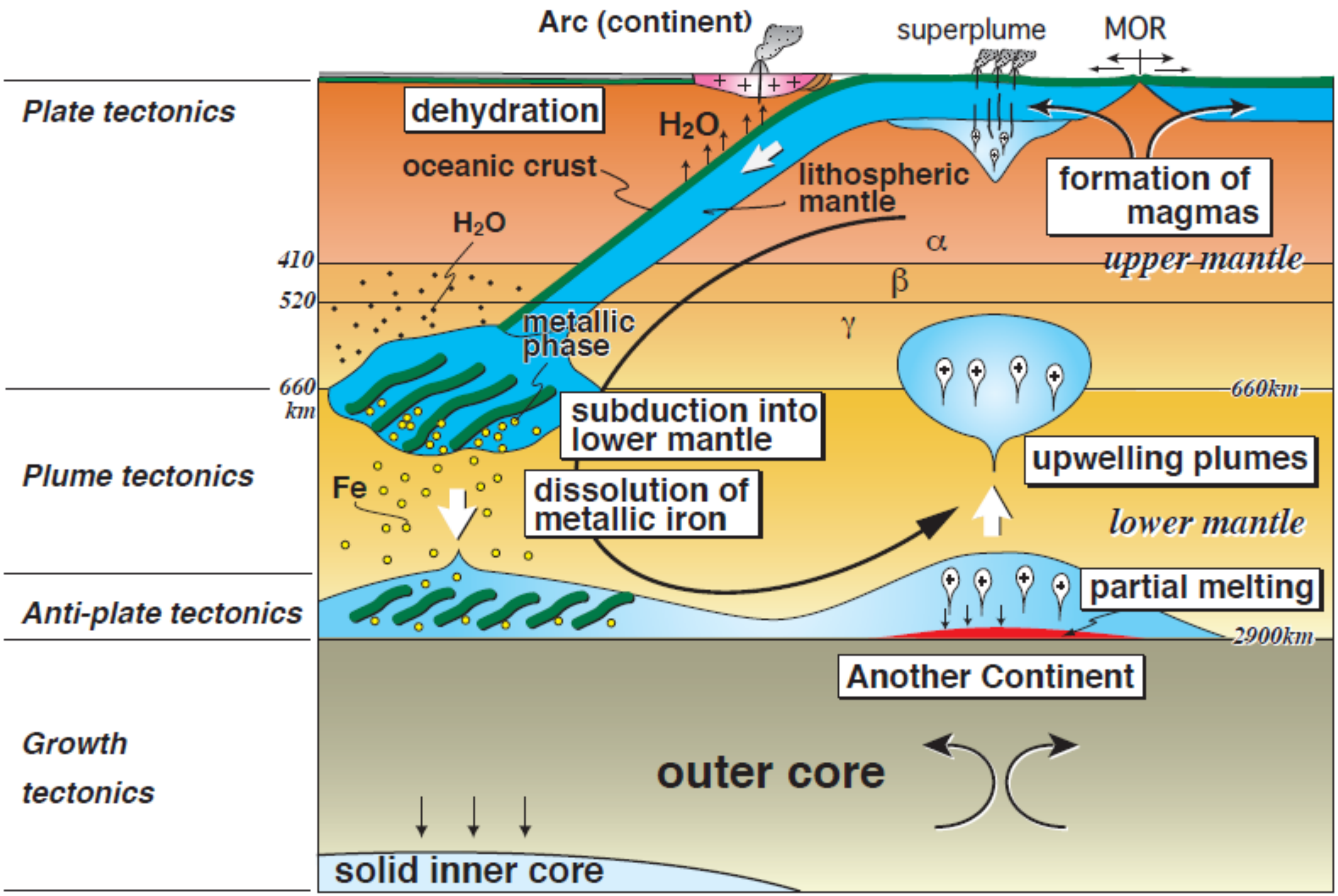


II Two sites of ecosystem

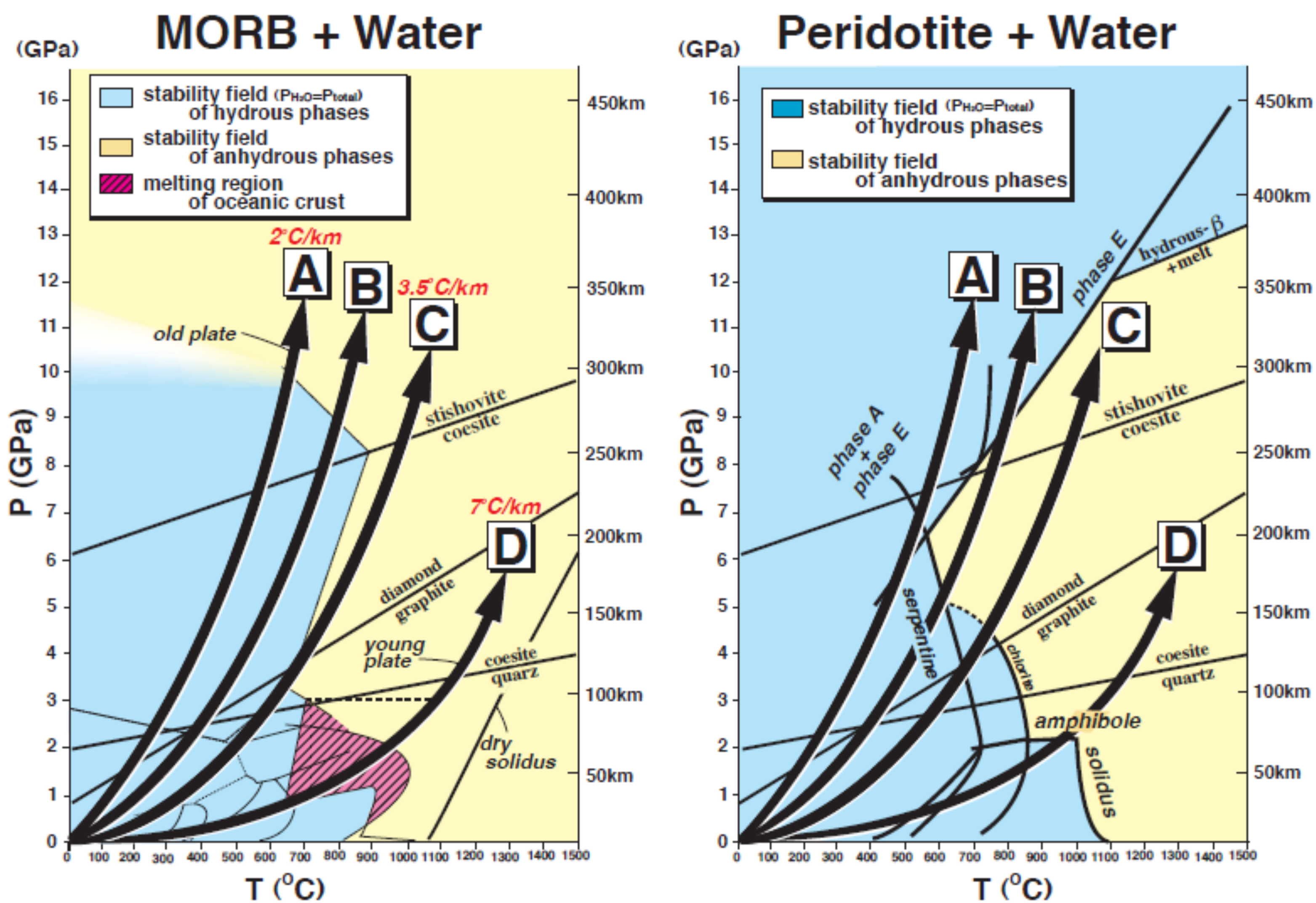


Maruyama et al., 2013

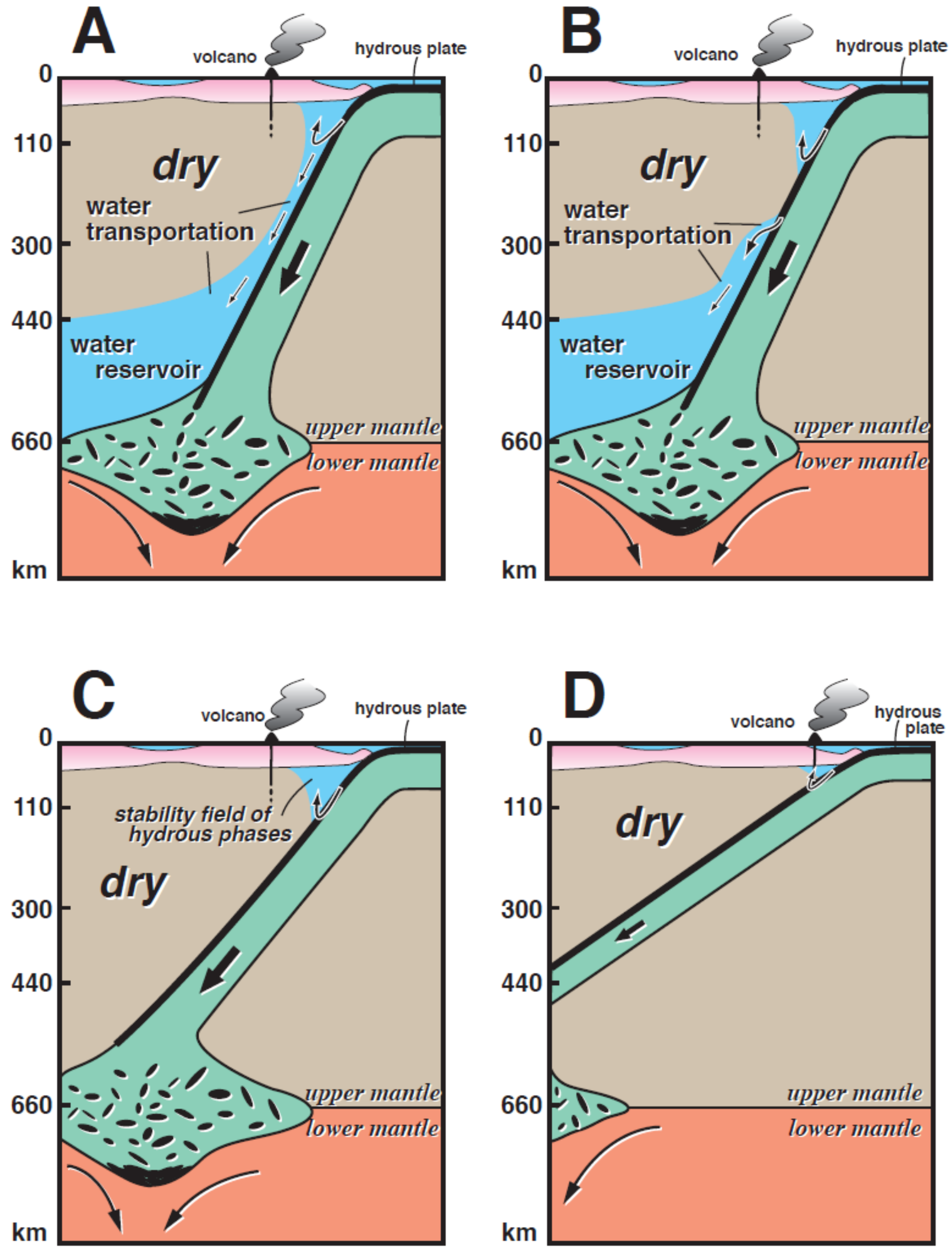
Recycling of slab



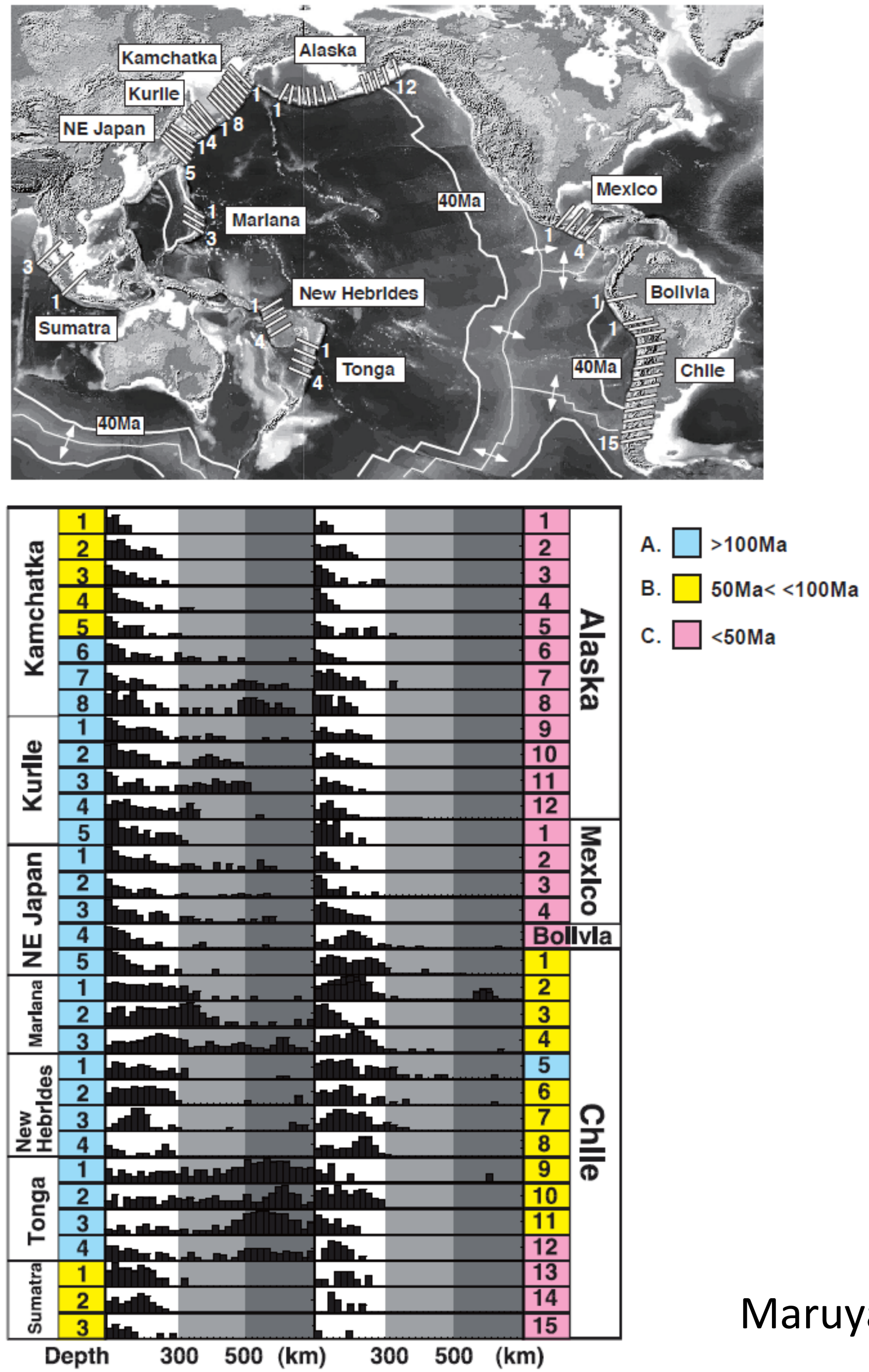
Maruyama et al., 2013



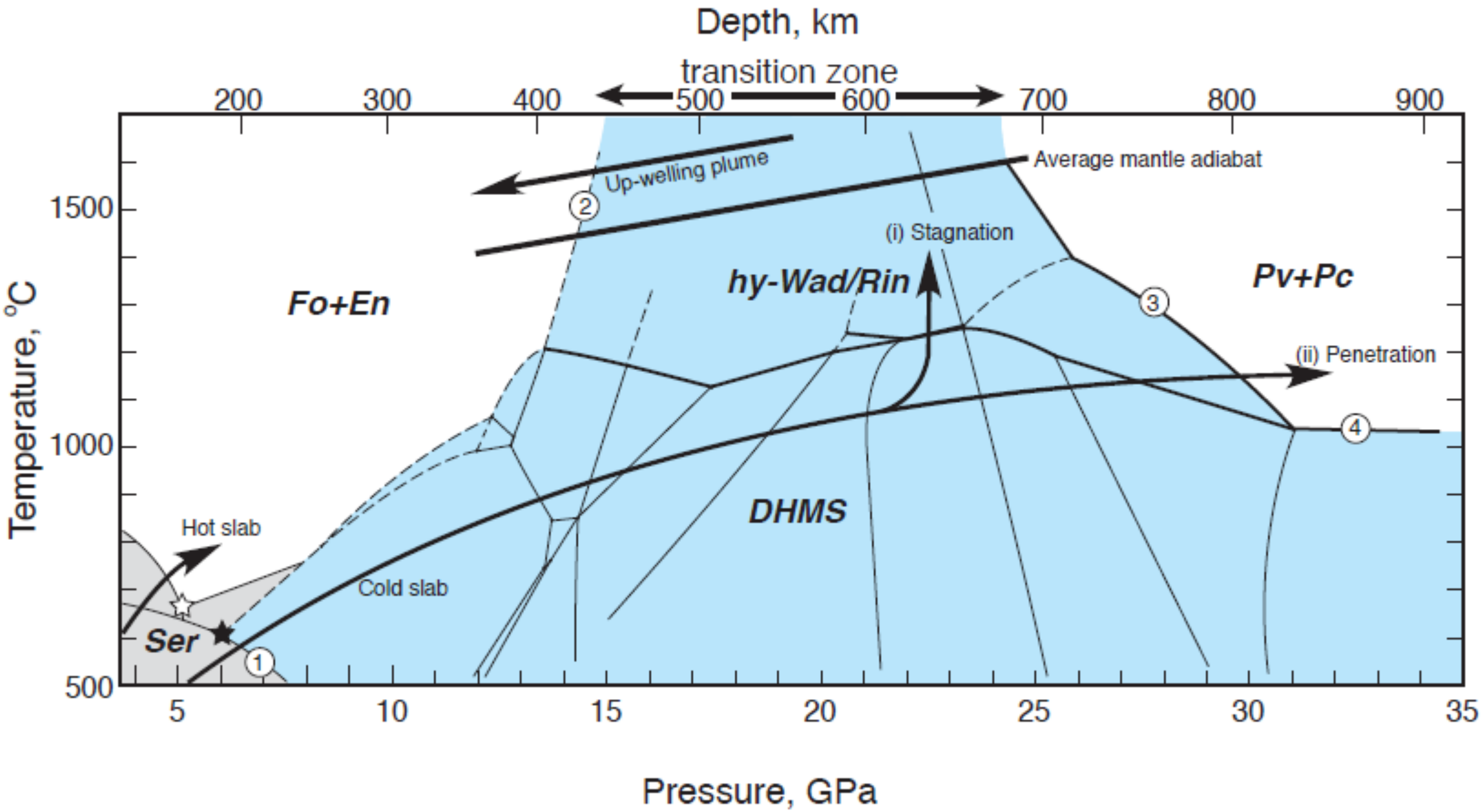
Maruyama et al., 2013



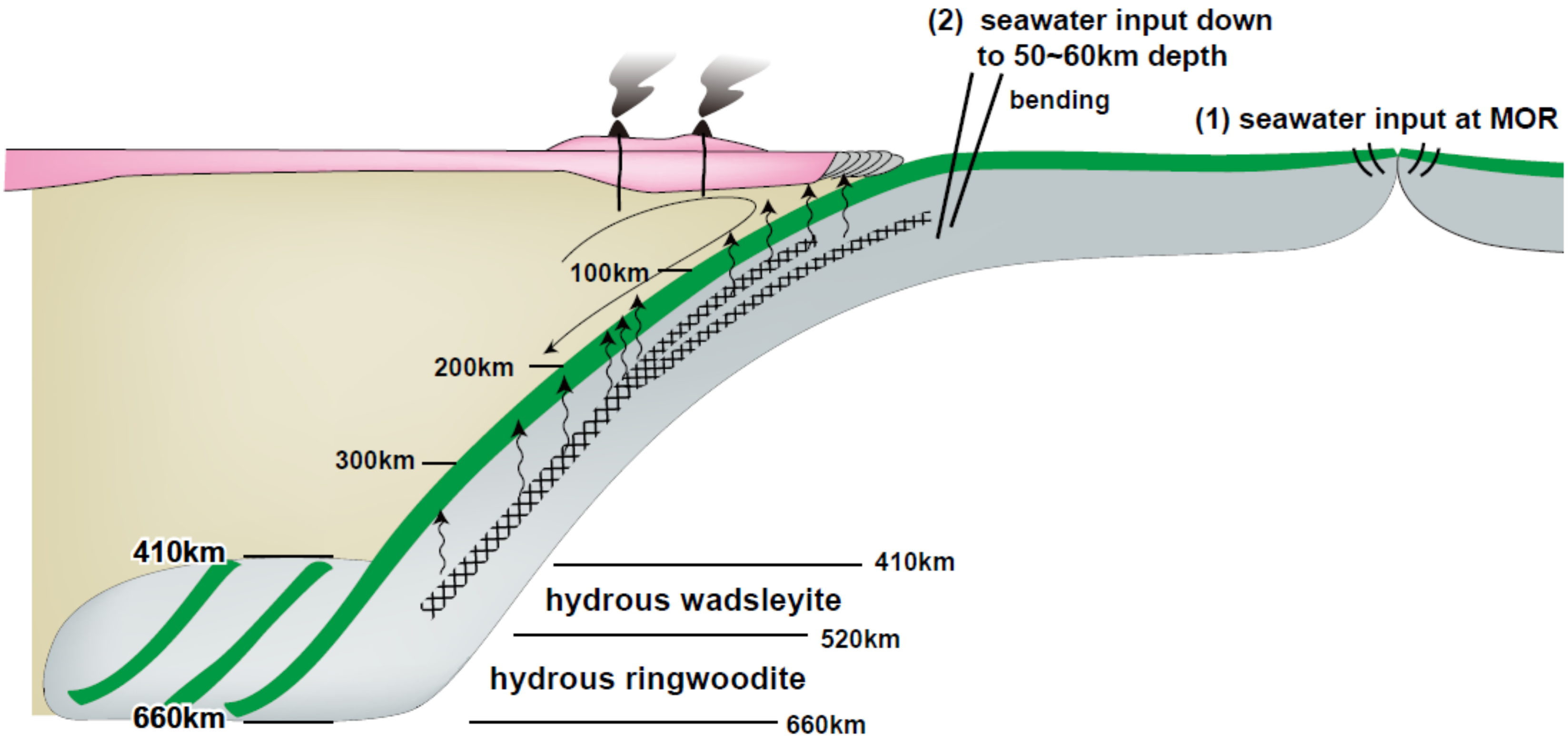
Maruyama & Okamoto (1998, 2001)



Maruyama et al., 2013

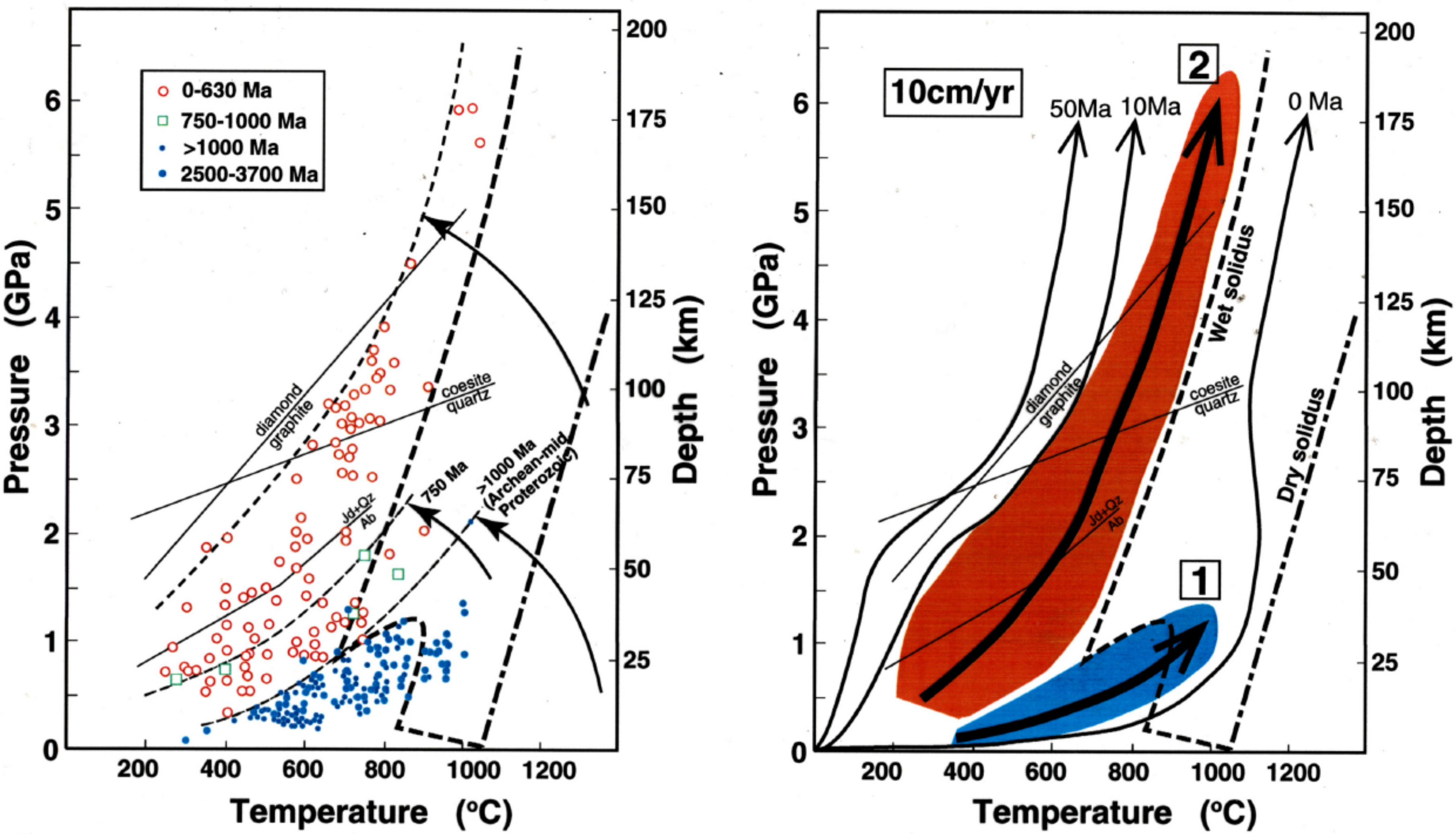


Maruyama et al., 2013



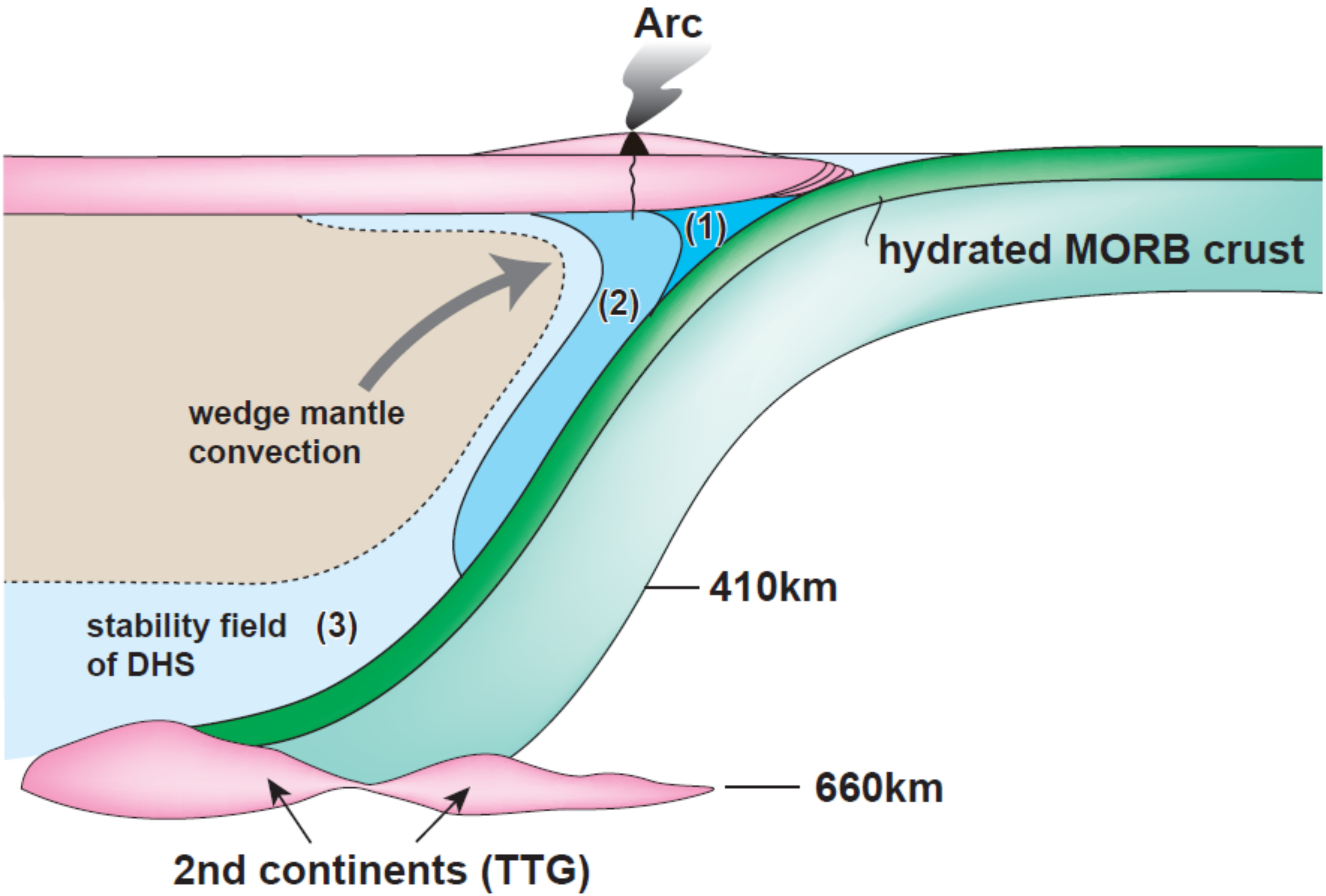
Maruyama et al., 2013

Secular variation of P-T conditions of regional metamorphic belts

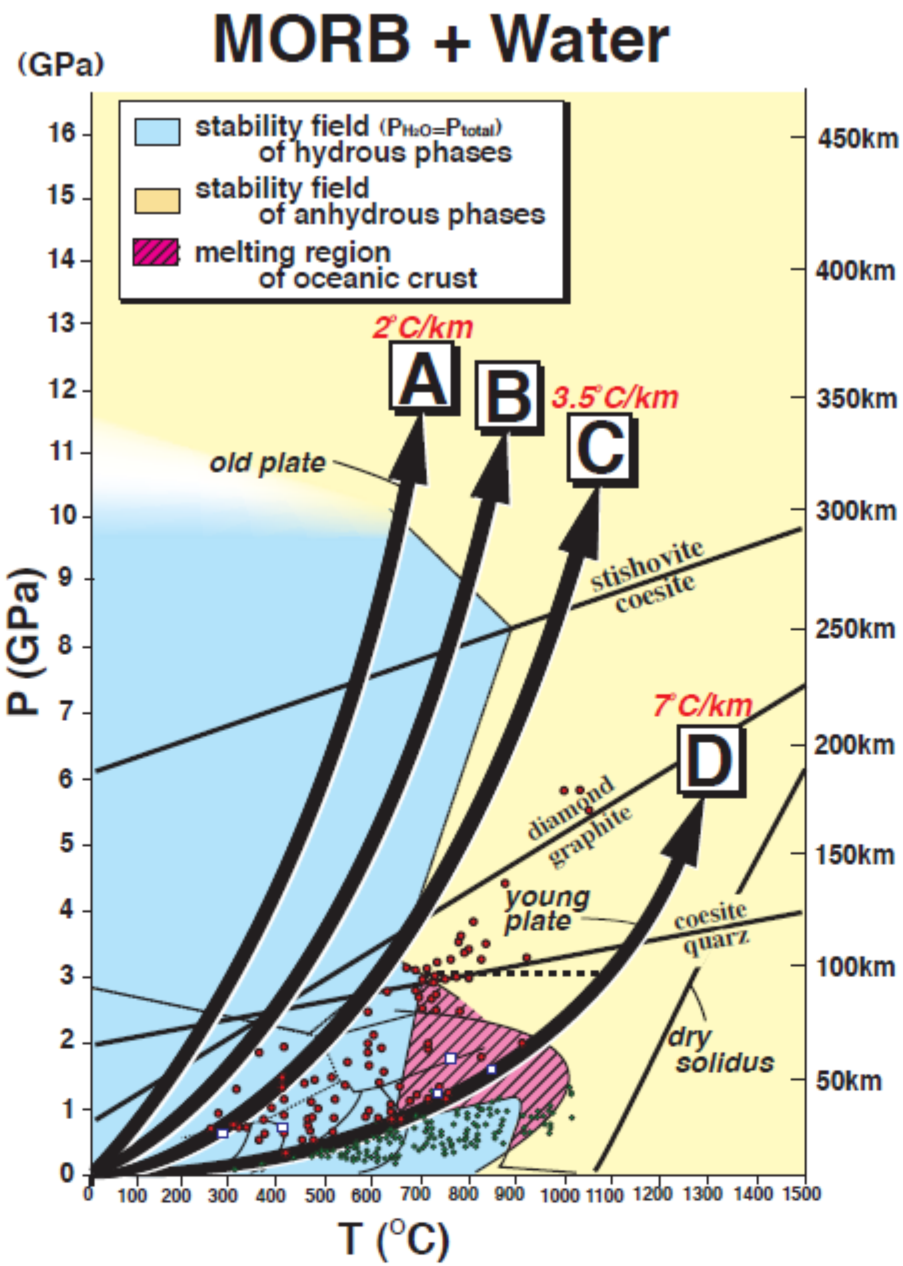


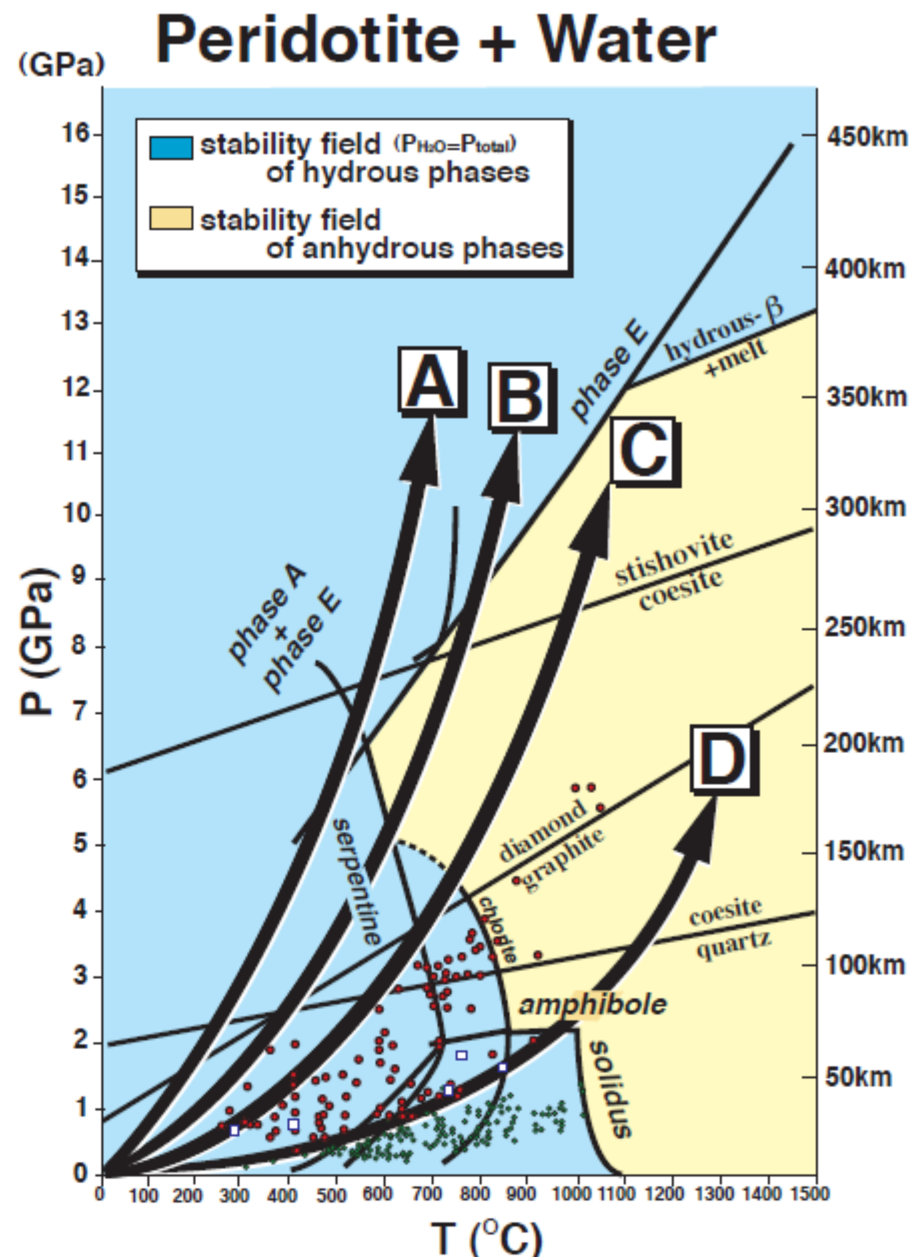
The subduction zone geothermal gradient has cooled gradually with time. UHP metamorphism has only occured after the Late Proterozoic.

Maruyama et al., 2013

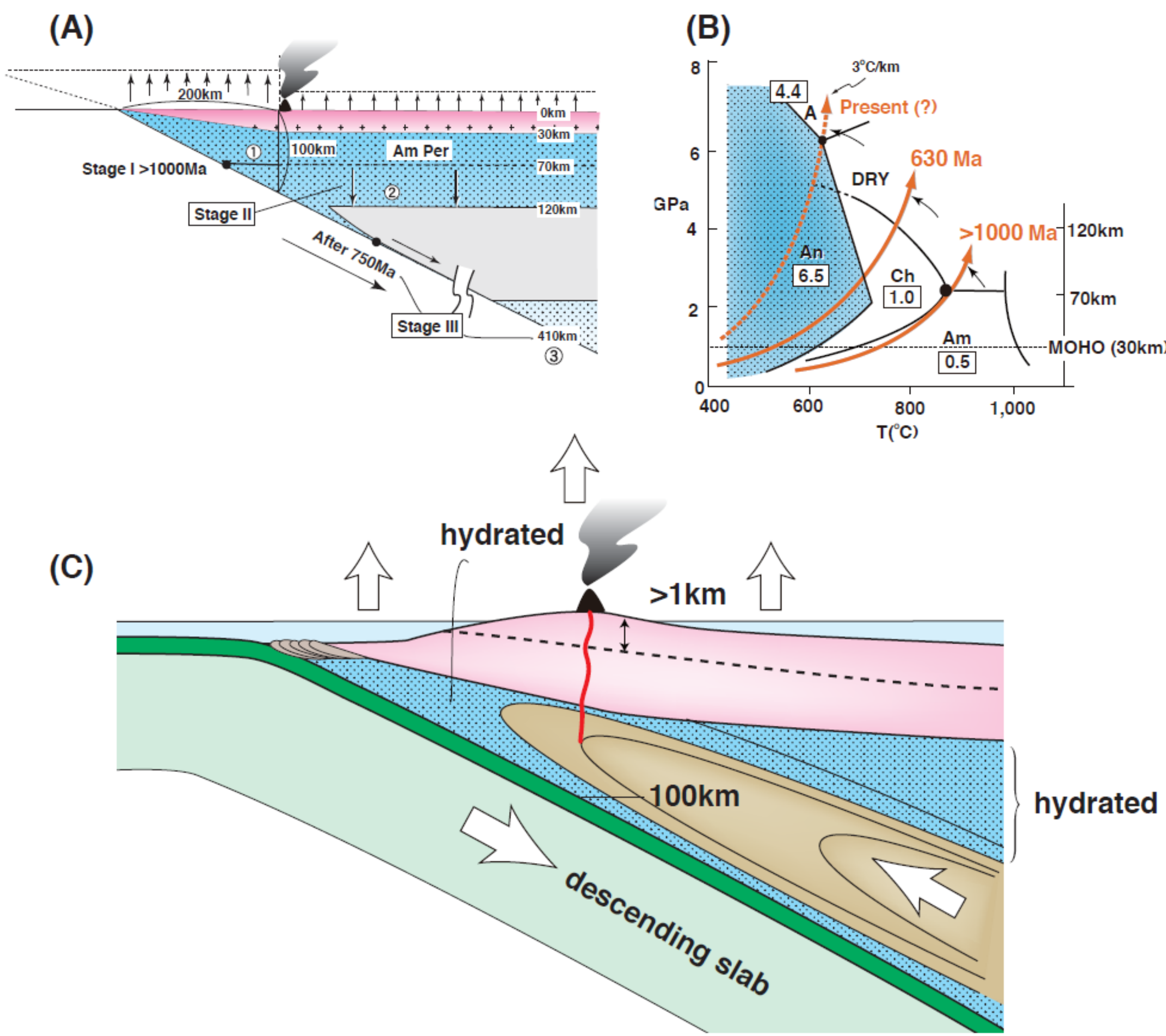


Maruyama et al., 2013

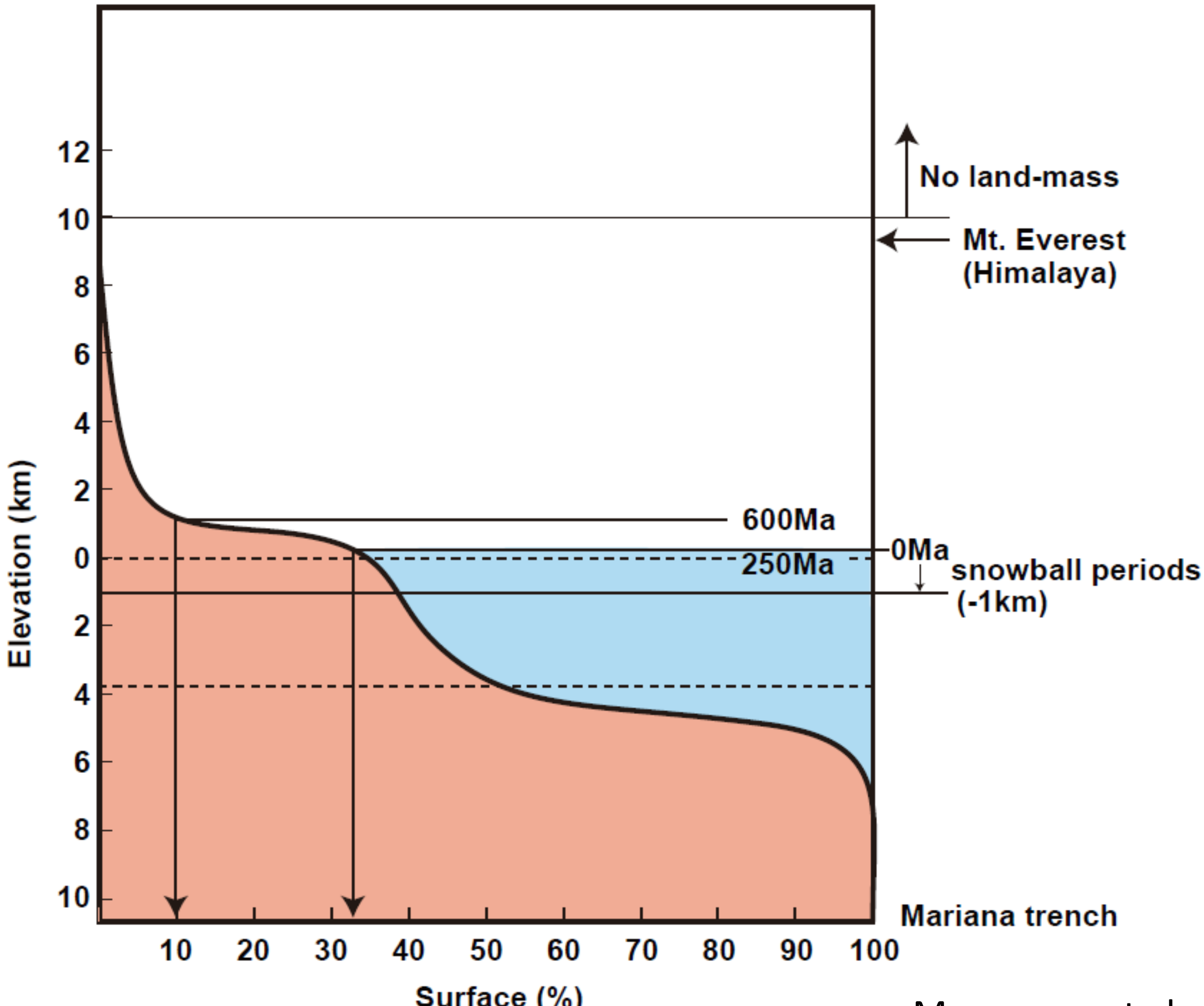




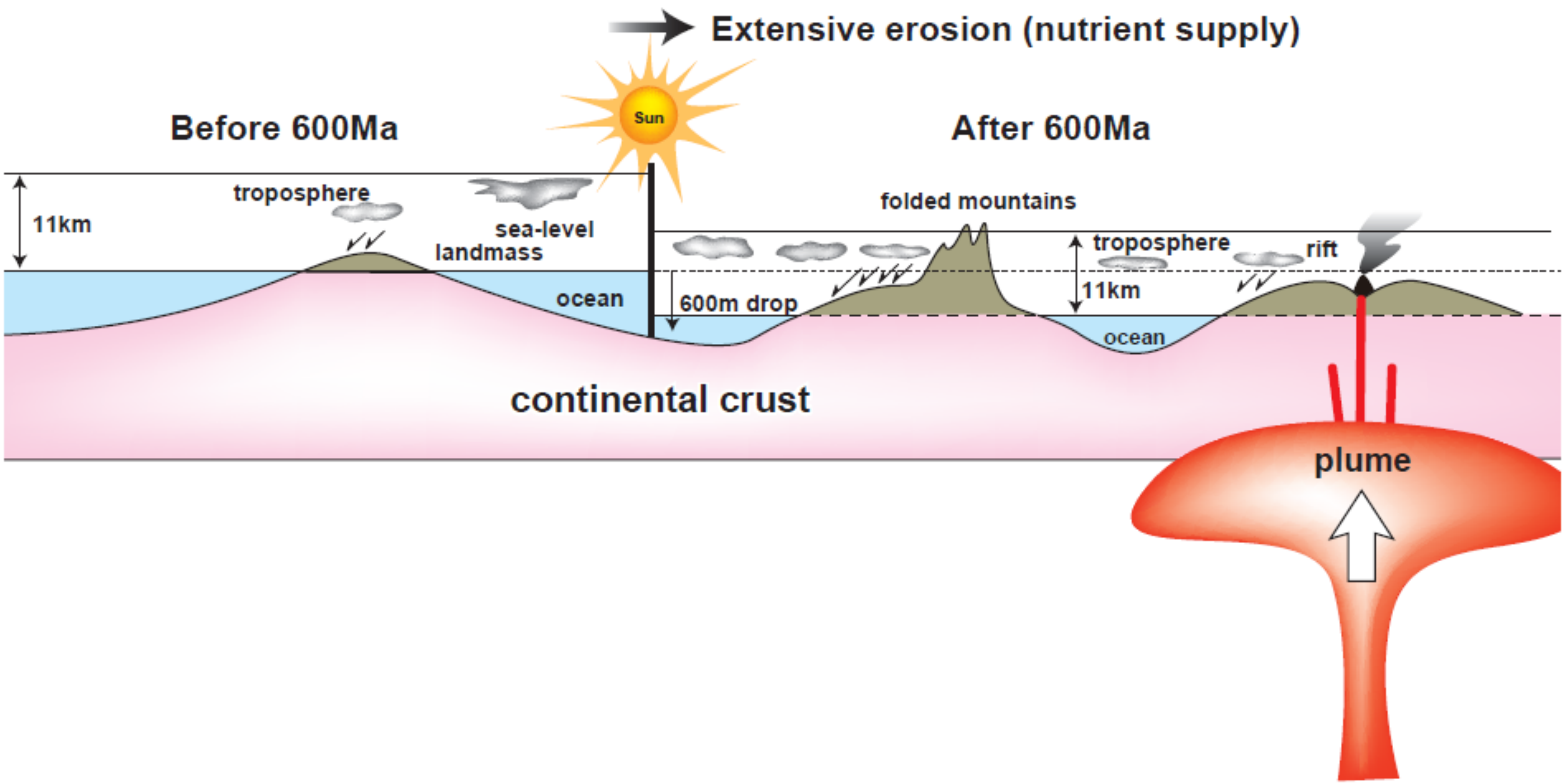
Maruyama et al., 2013



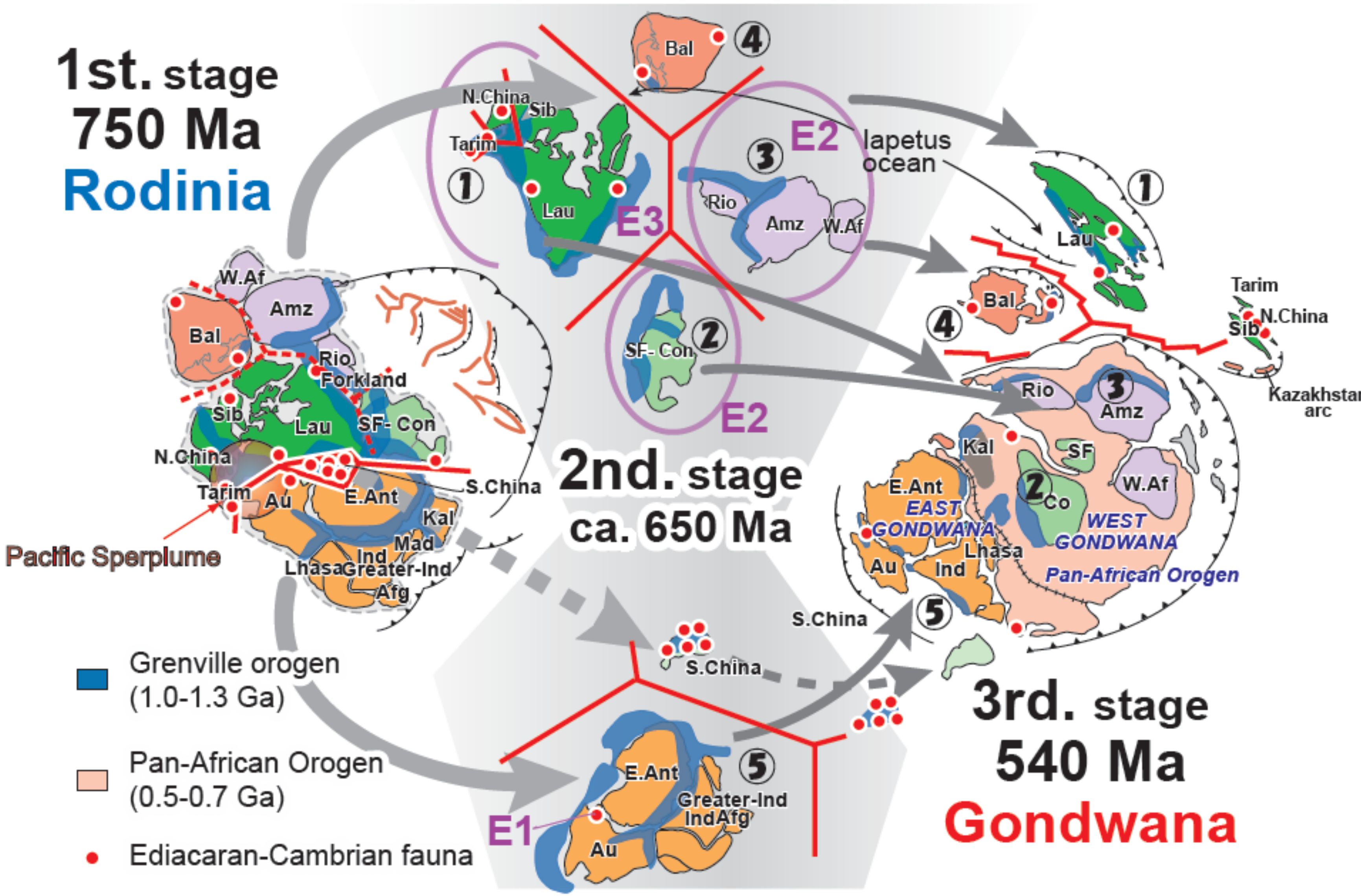
Maruyama et al., 2013



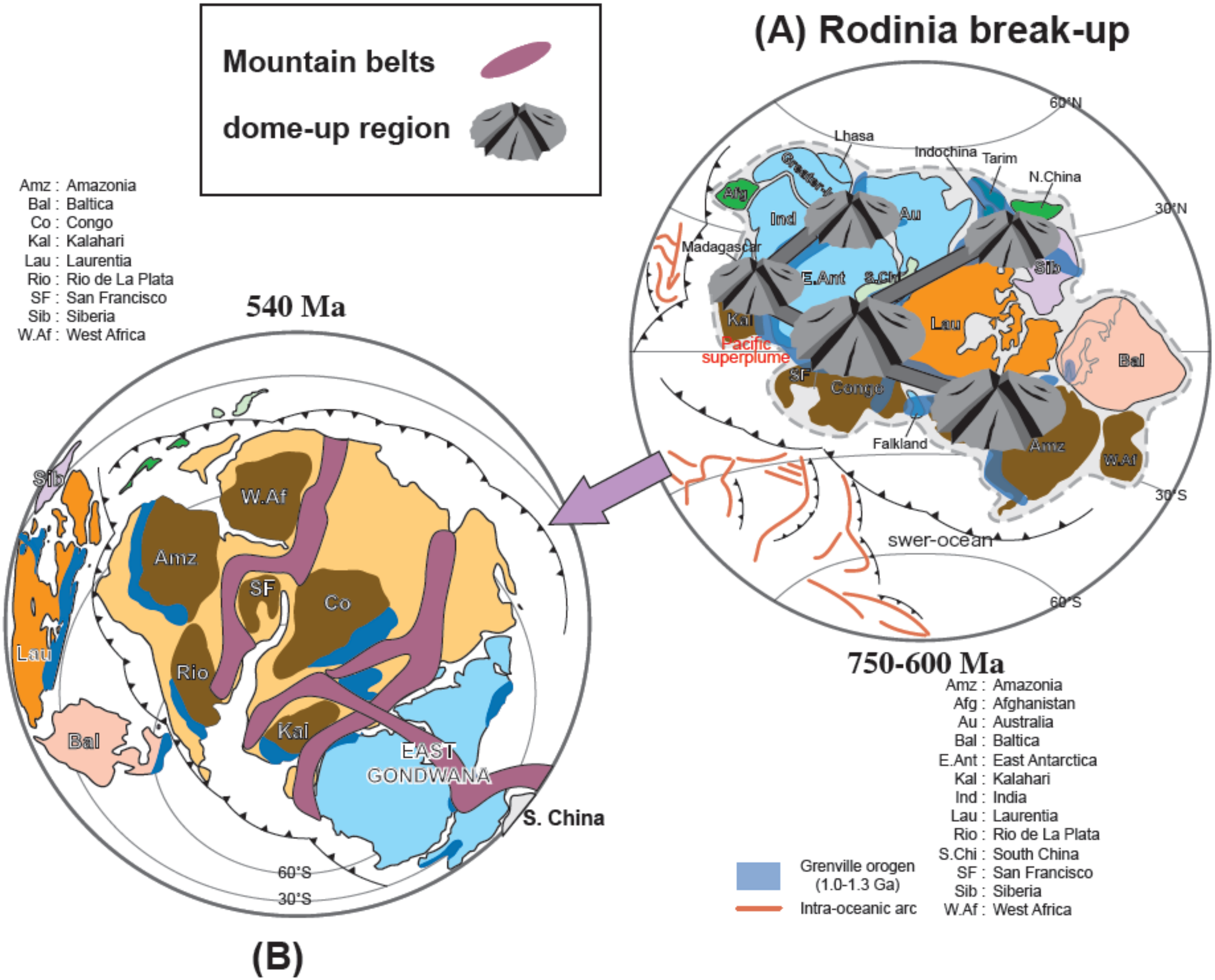
Maruyama et al., 2013



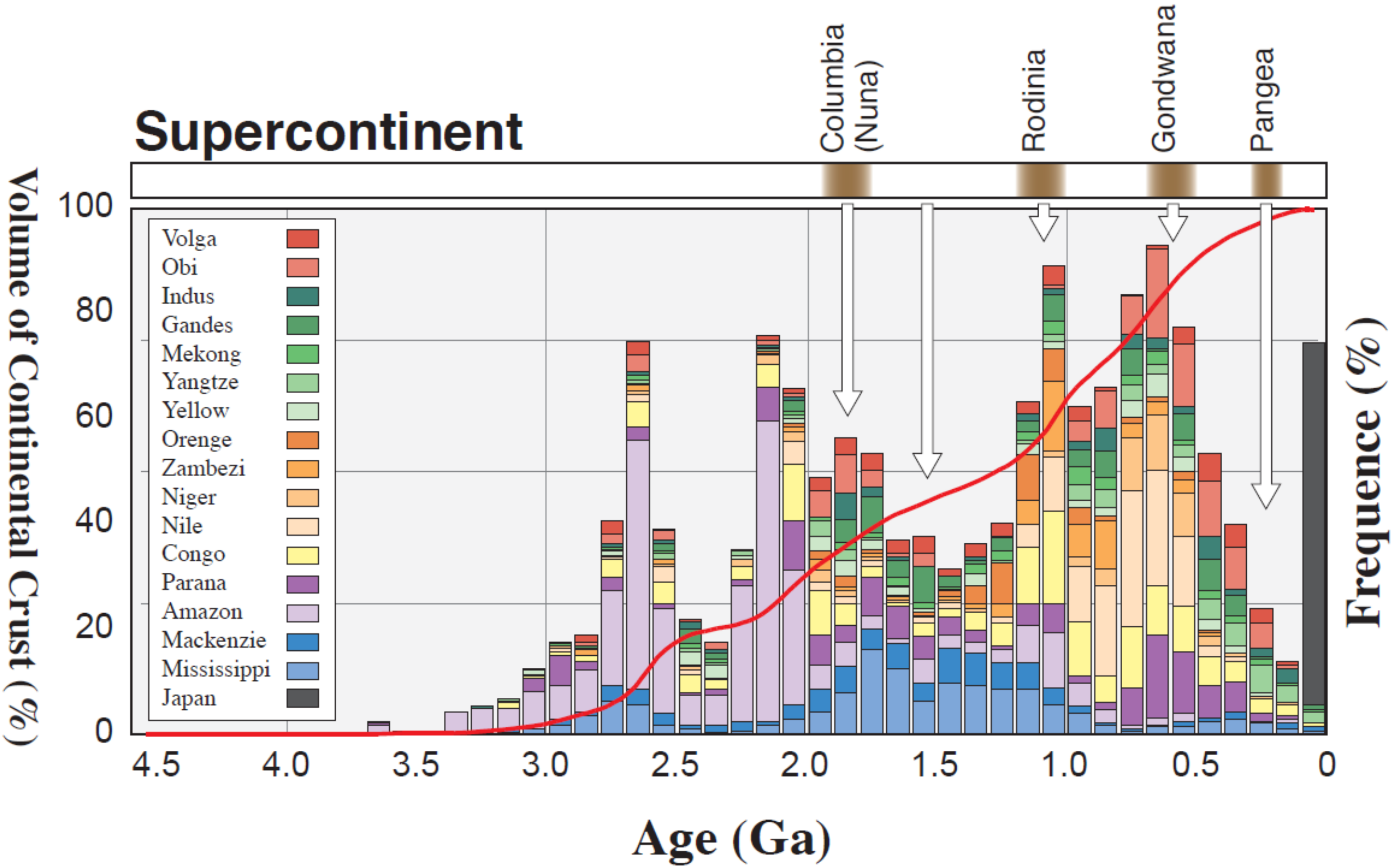
Maruyama et al., 2013



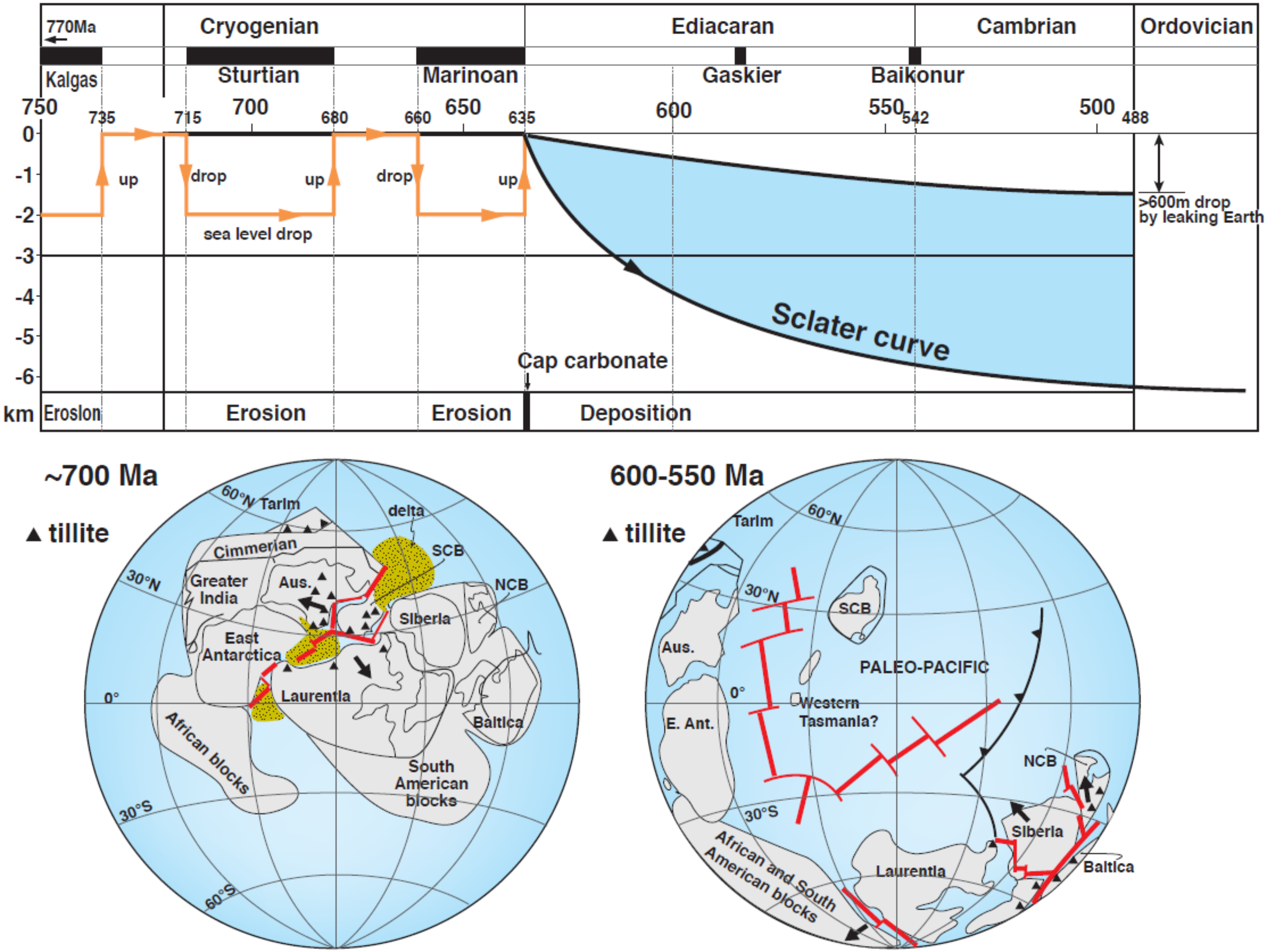
Maruyama et al., 2013



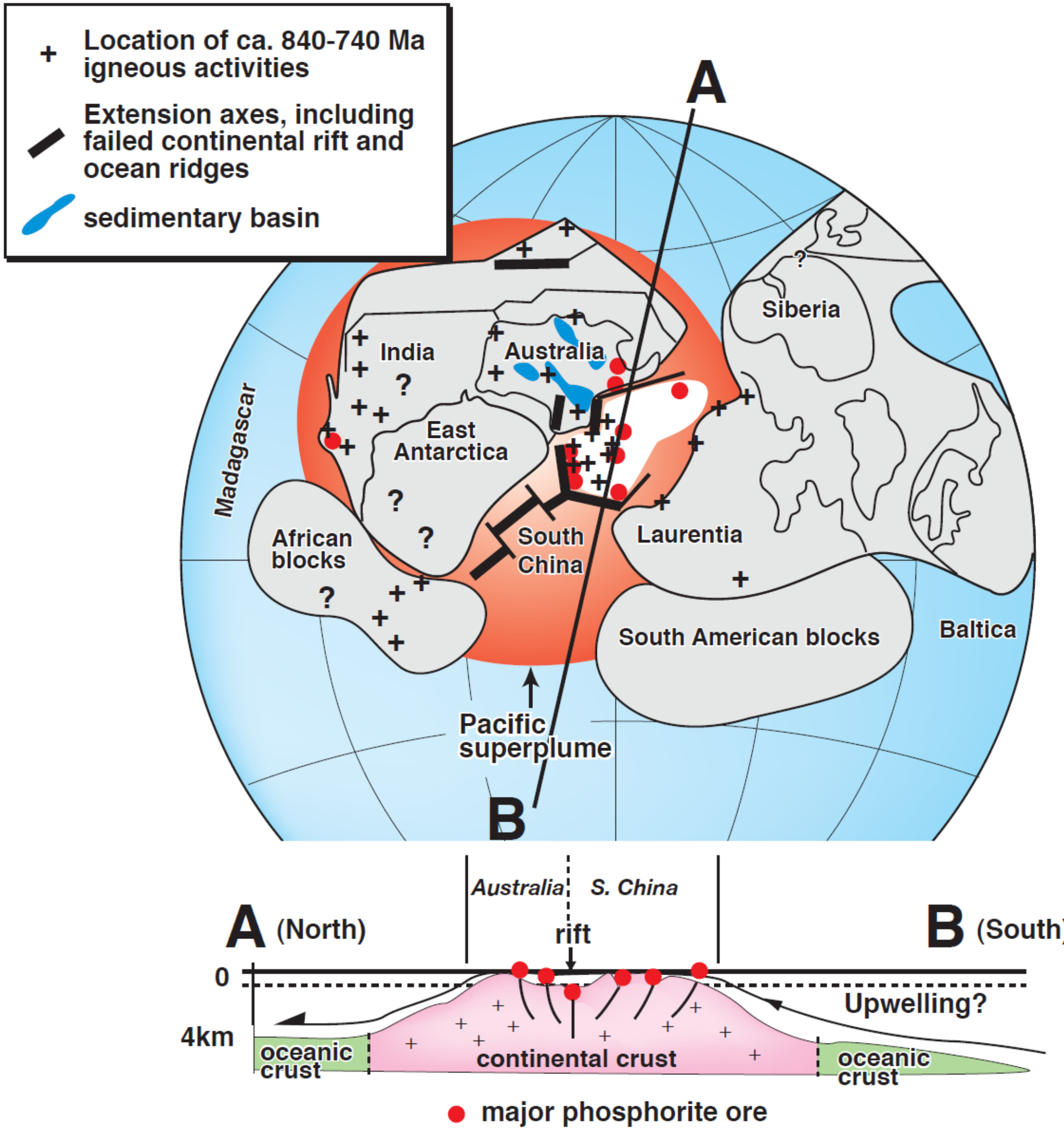
Maruyama et al., 2013



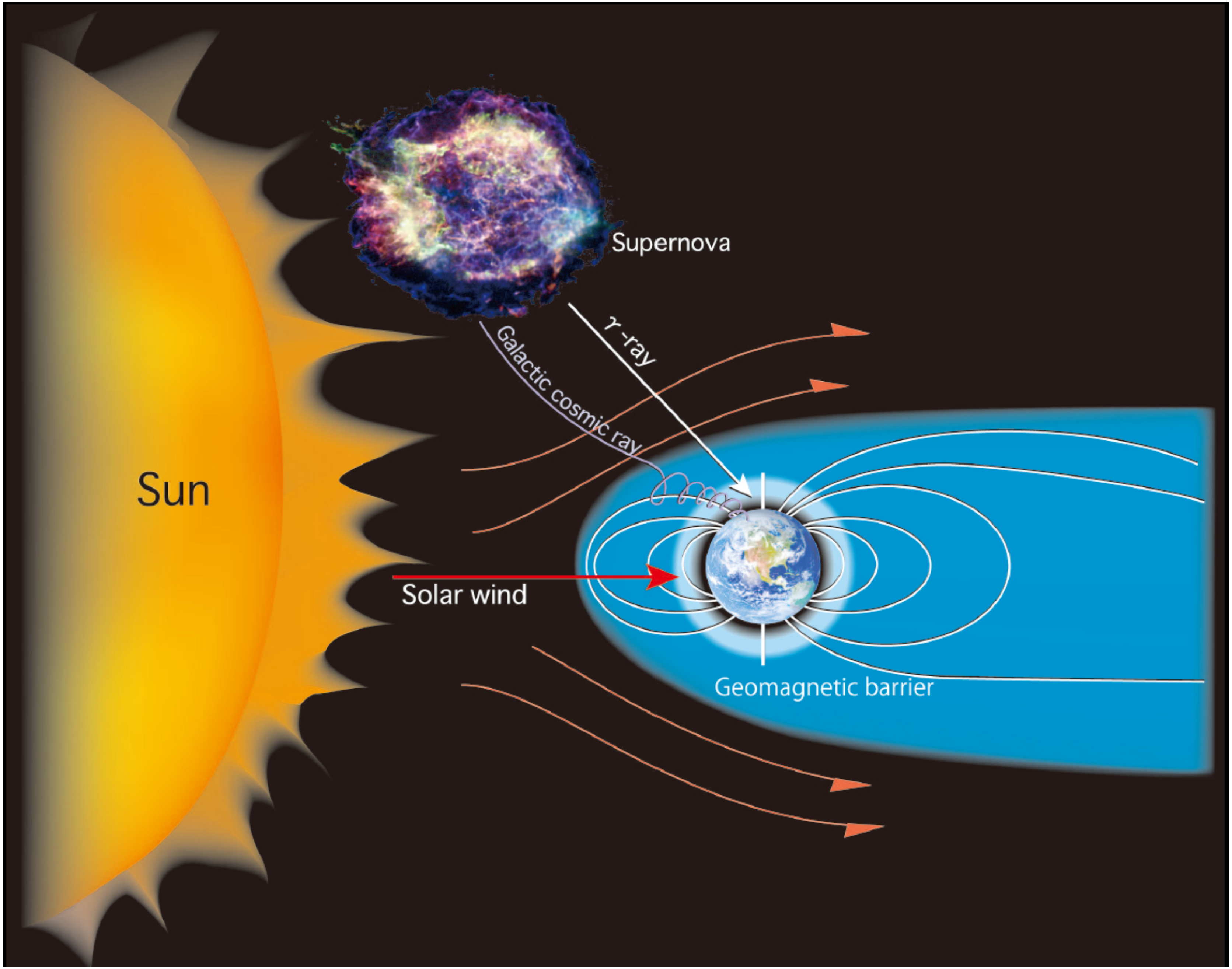
Maruyama et al., 2013



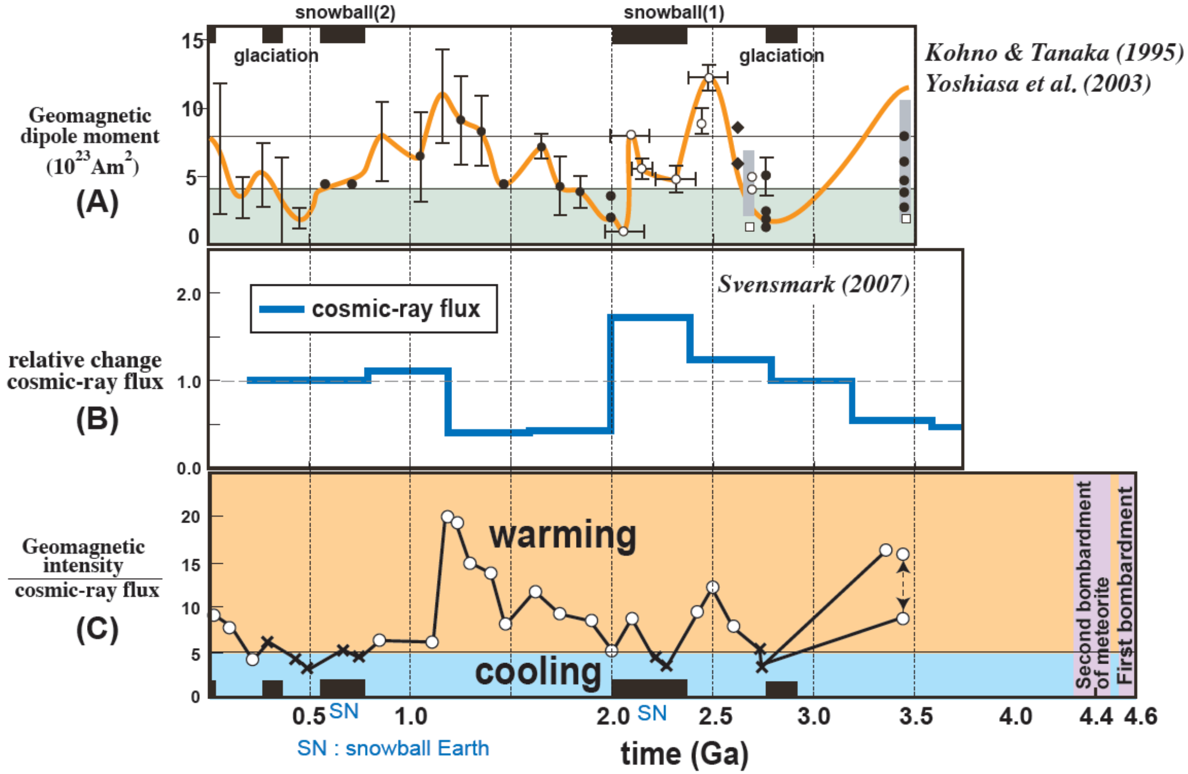
Maruyama et al., 2013

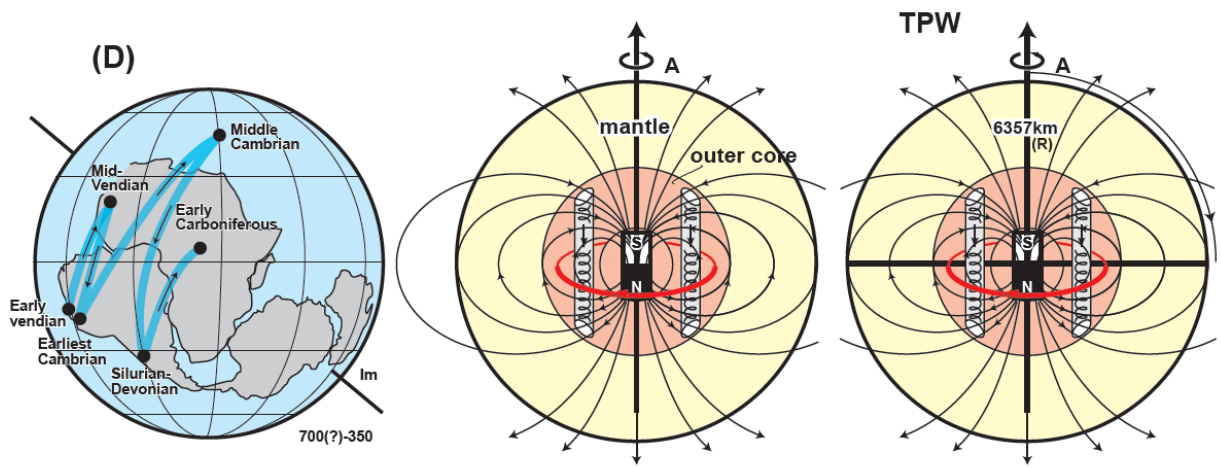


Maruyama et al., 2013



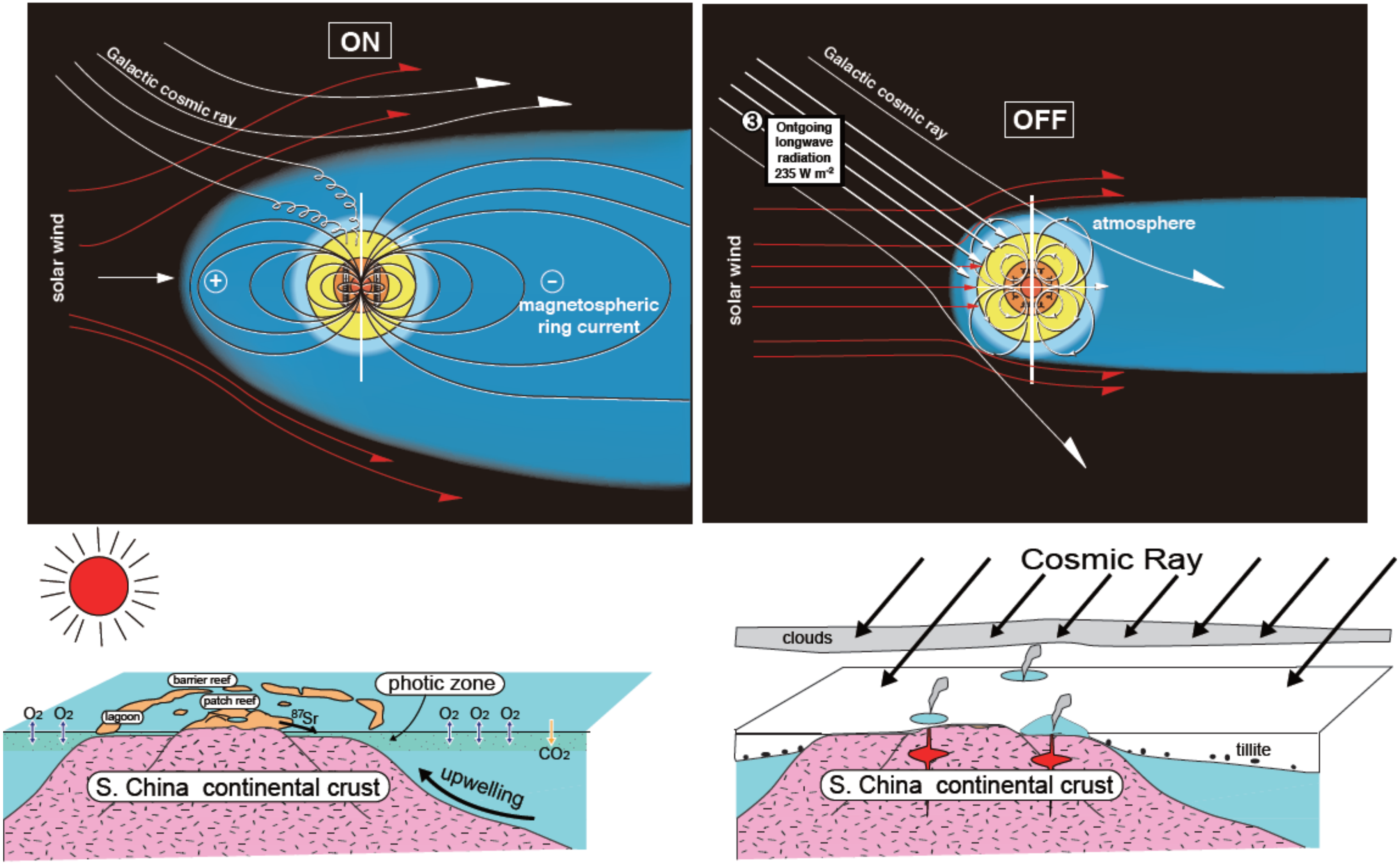
Maruyama et al., 2013



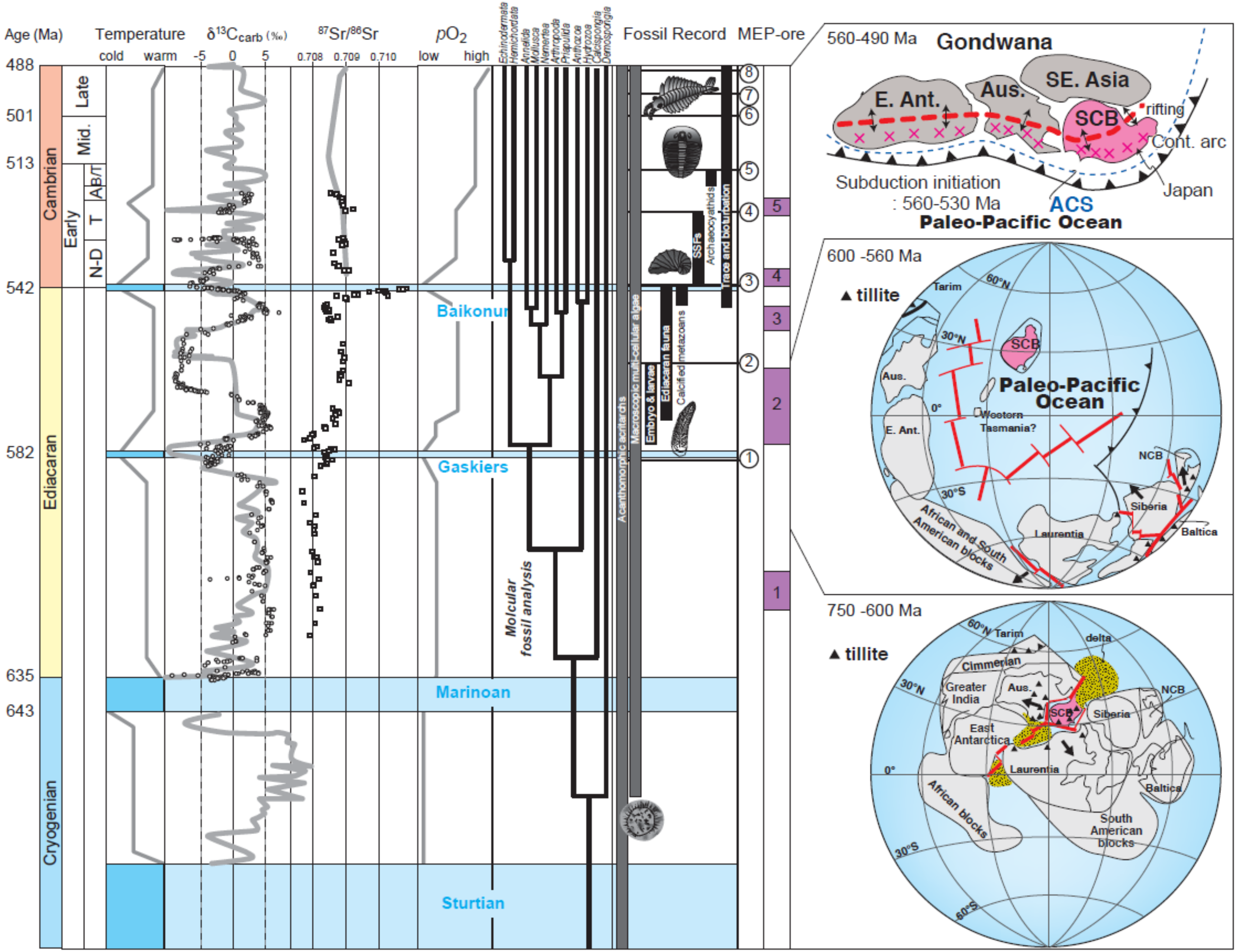


Maruyama et al., 2013

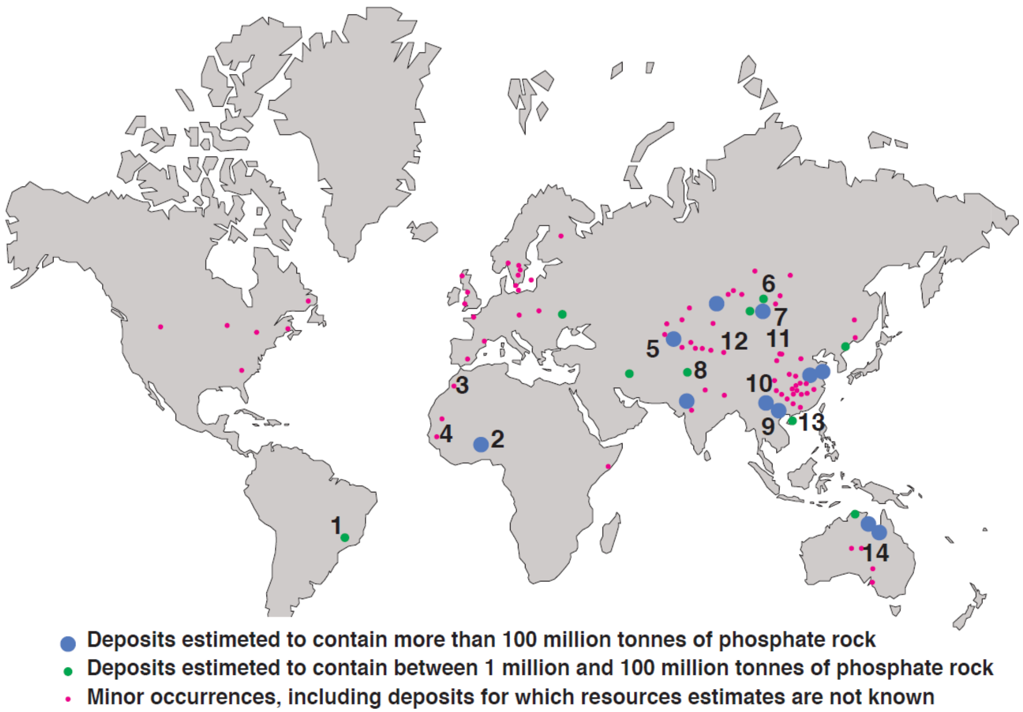
Only mantle rotation remaining core same as before!

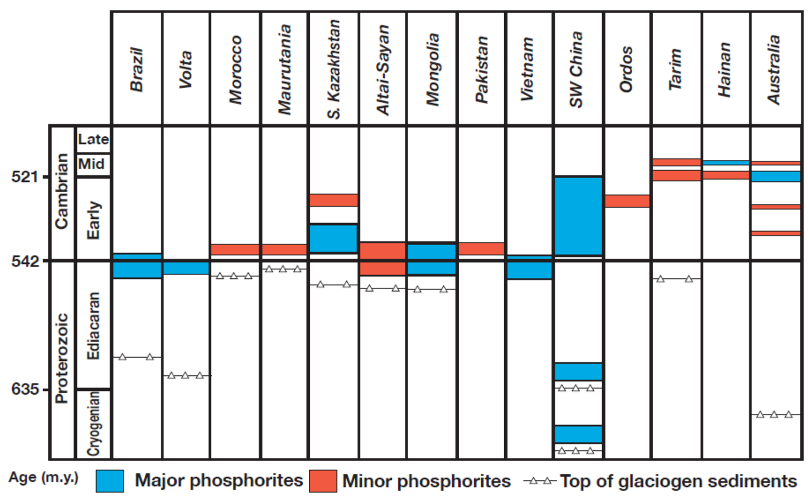


Maruyama et al., 2013

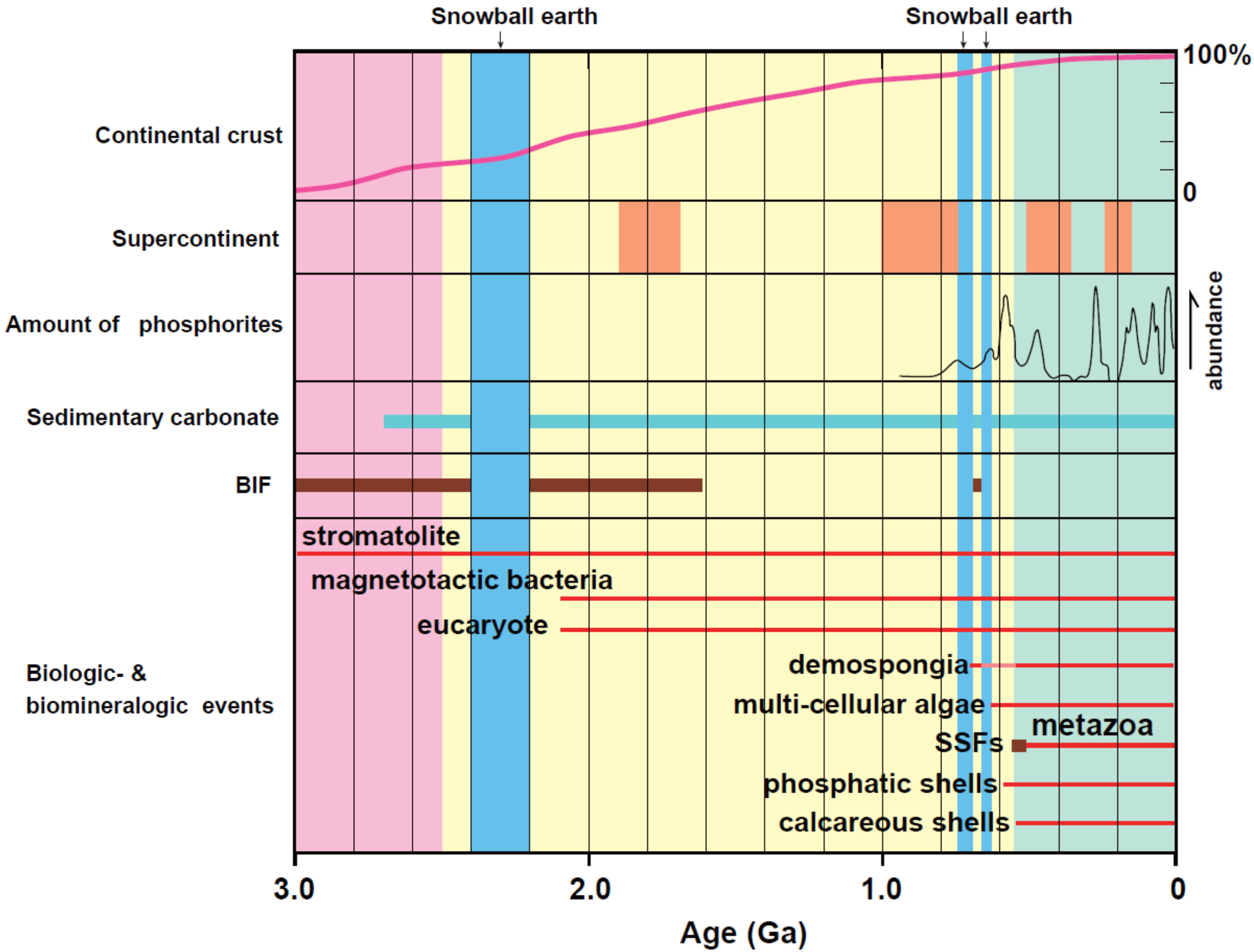


Maruyama et al., 2013

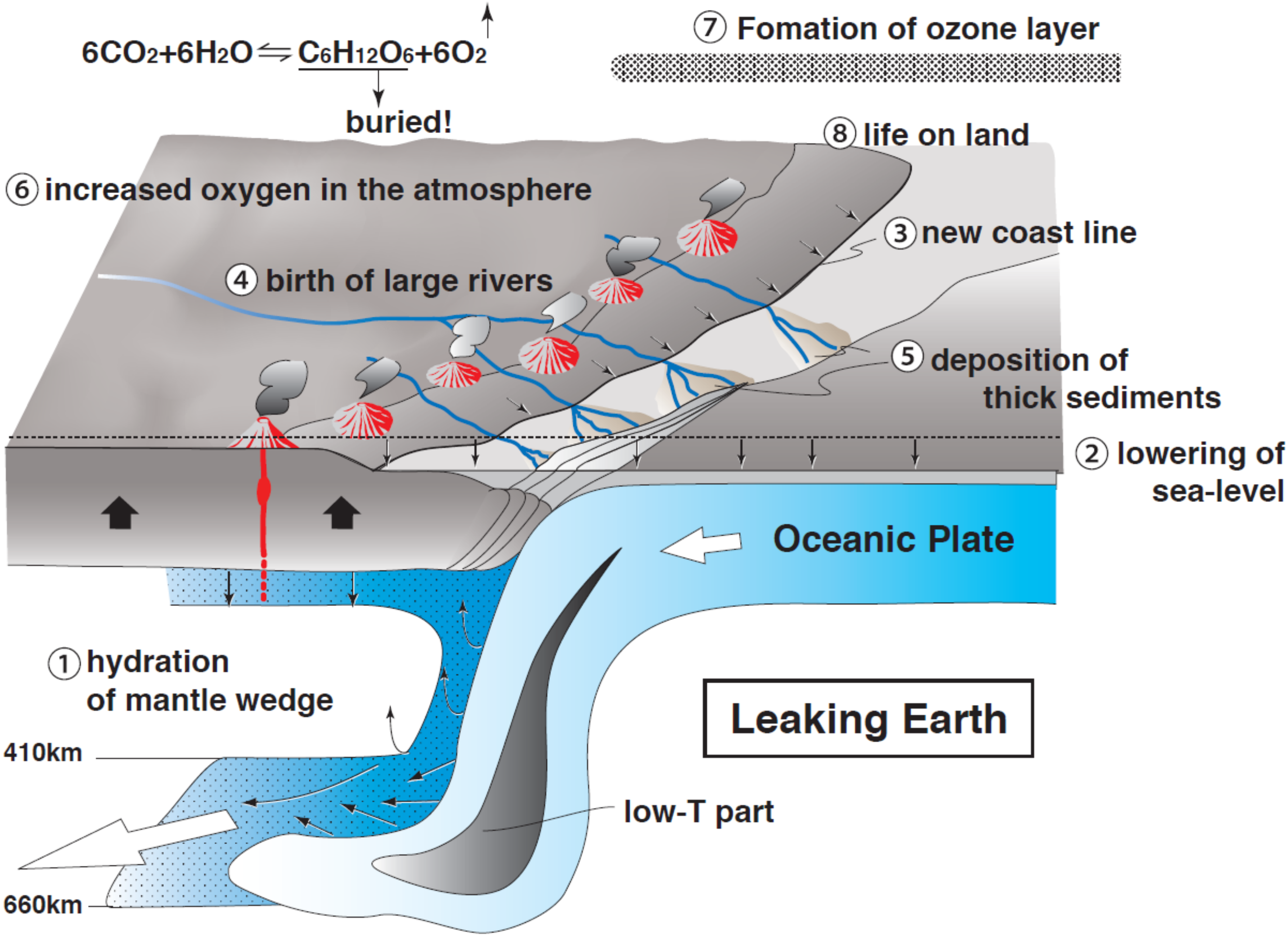




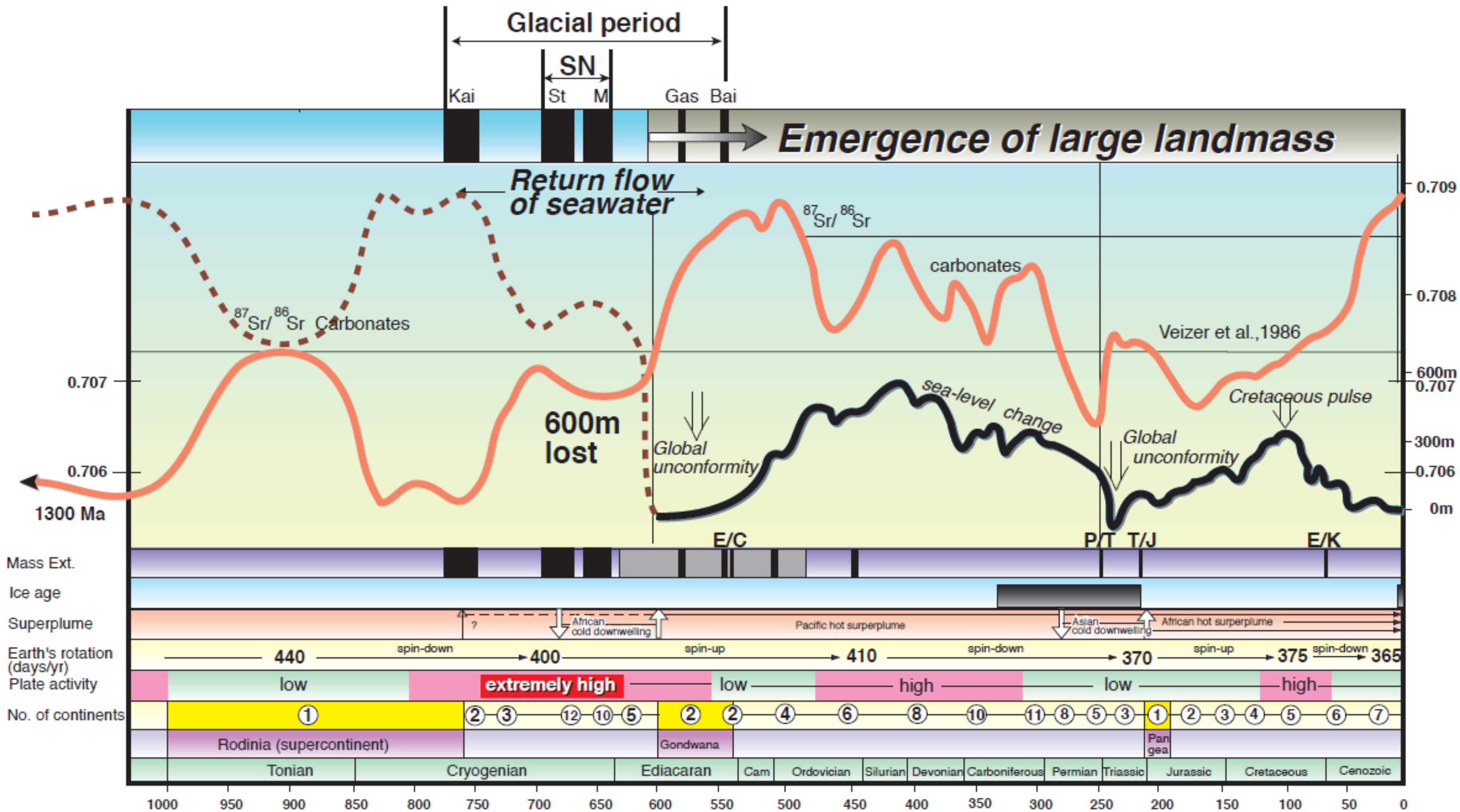
Maruyama et al., 2013



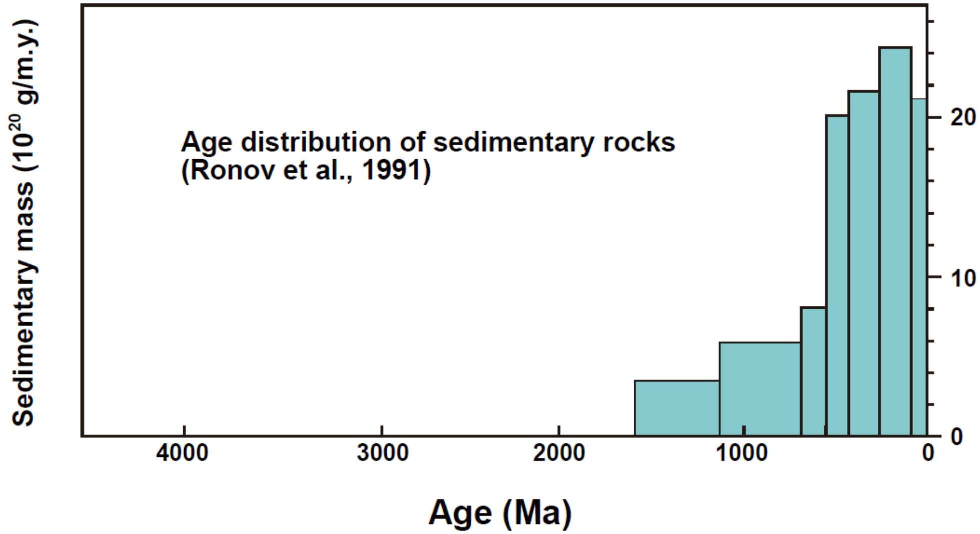
Maruyama et al., 2013

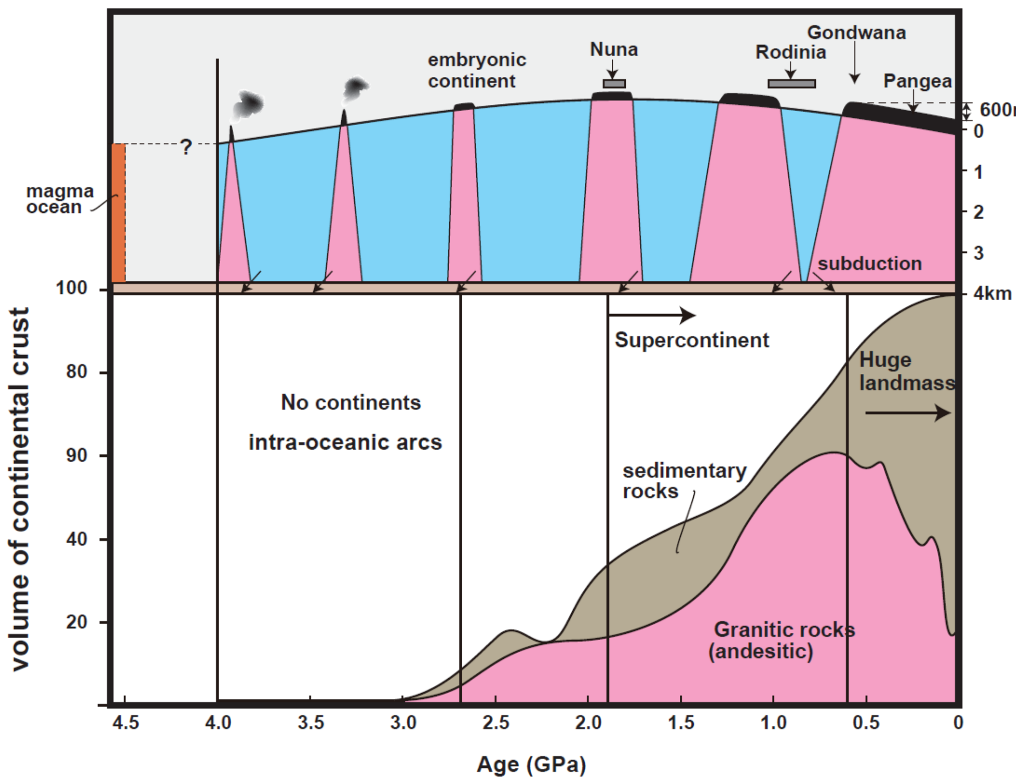


Maruyama et al., 2013

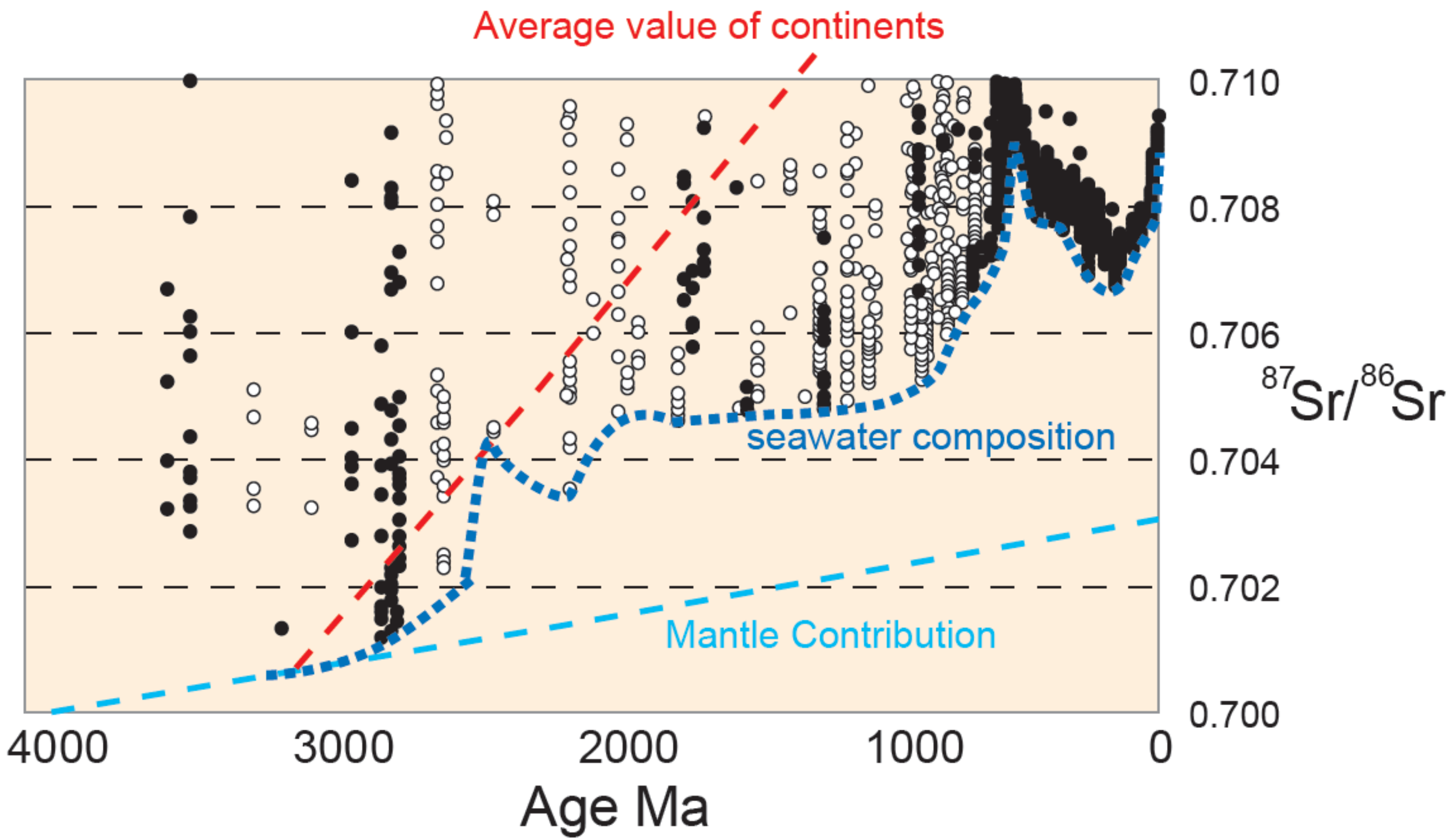


Maruyama et al., 2013



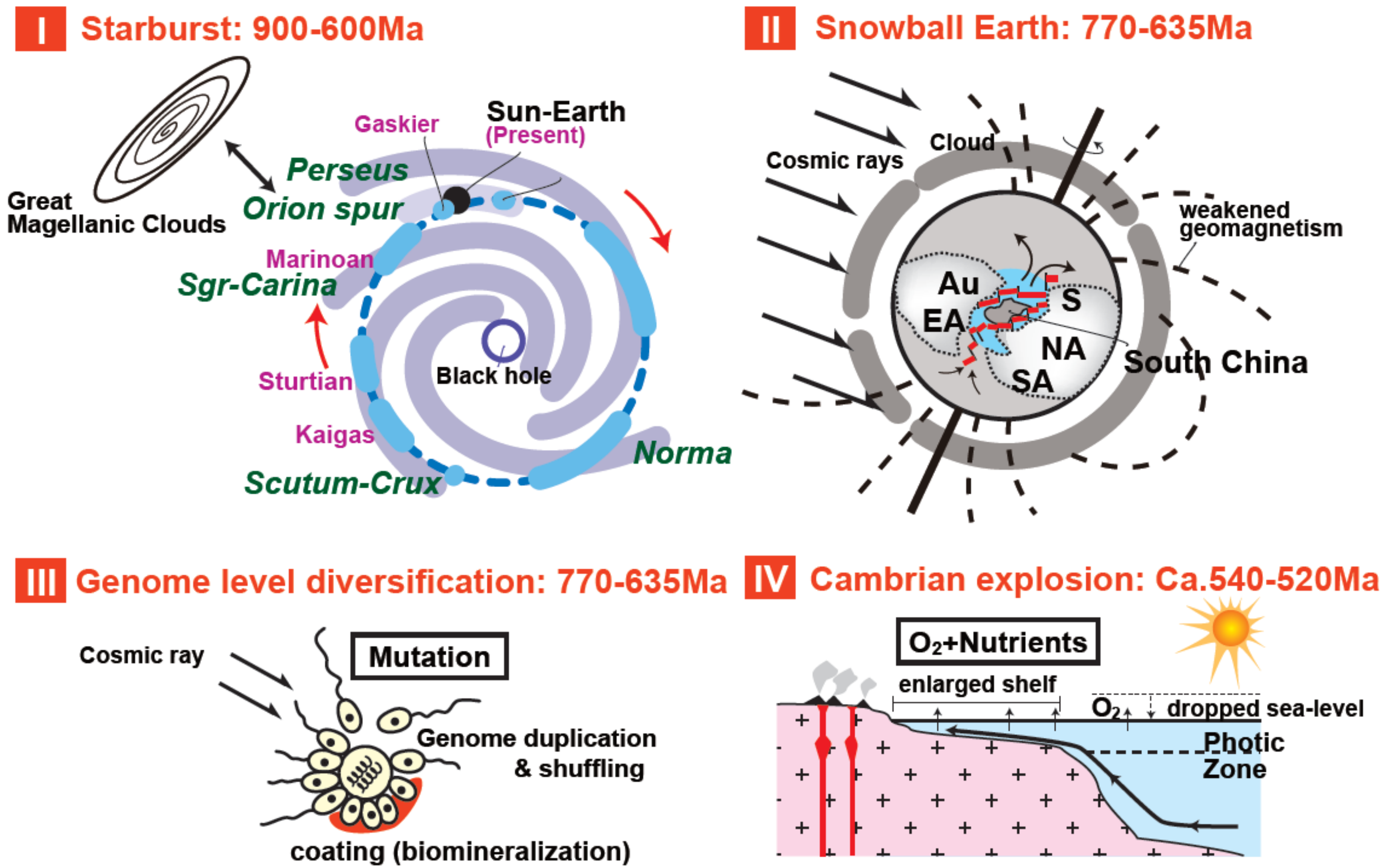


Maruyama et al., 2013

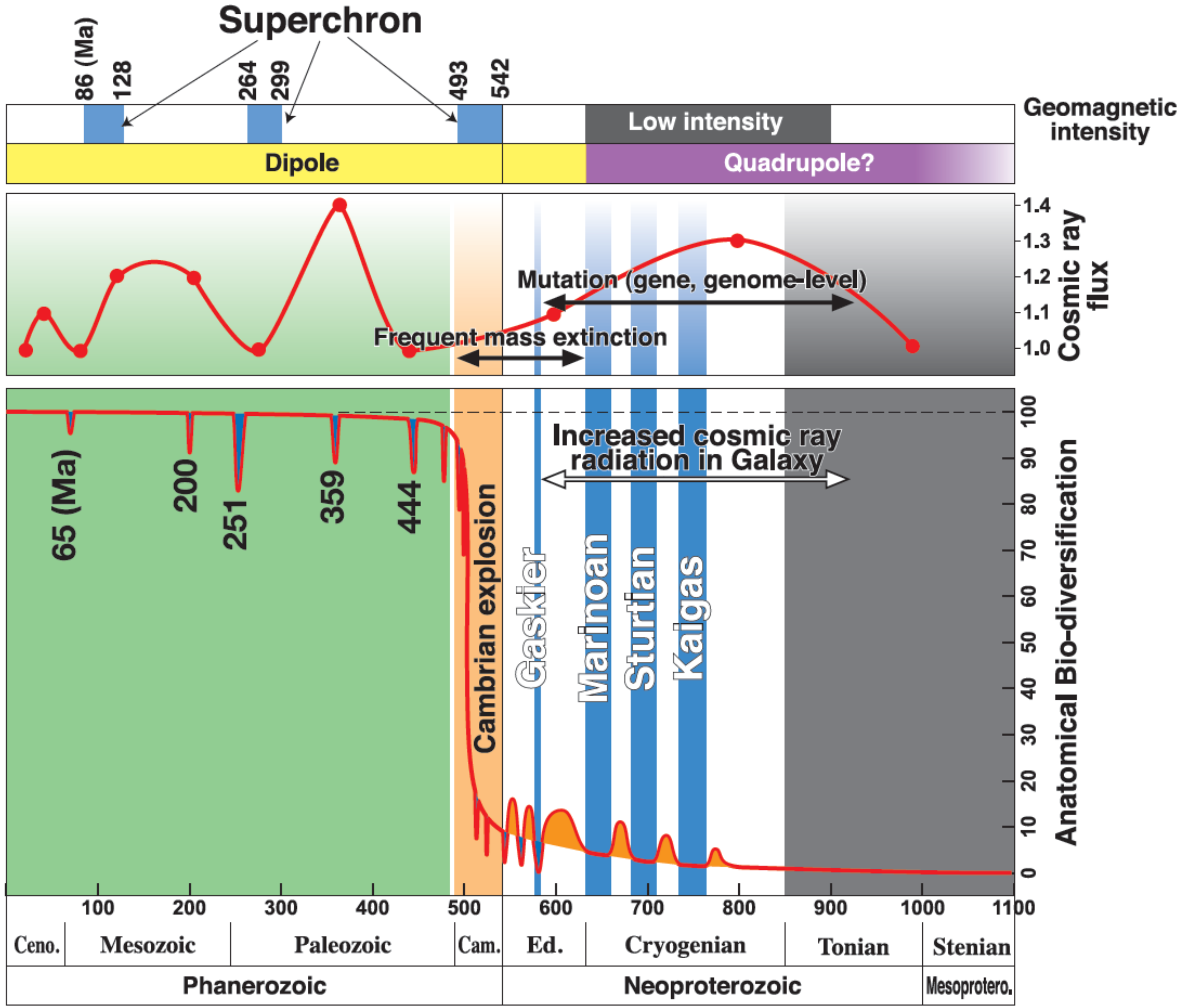


(modified after Shields and Veizer, 2002)

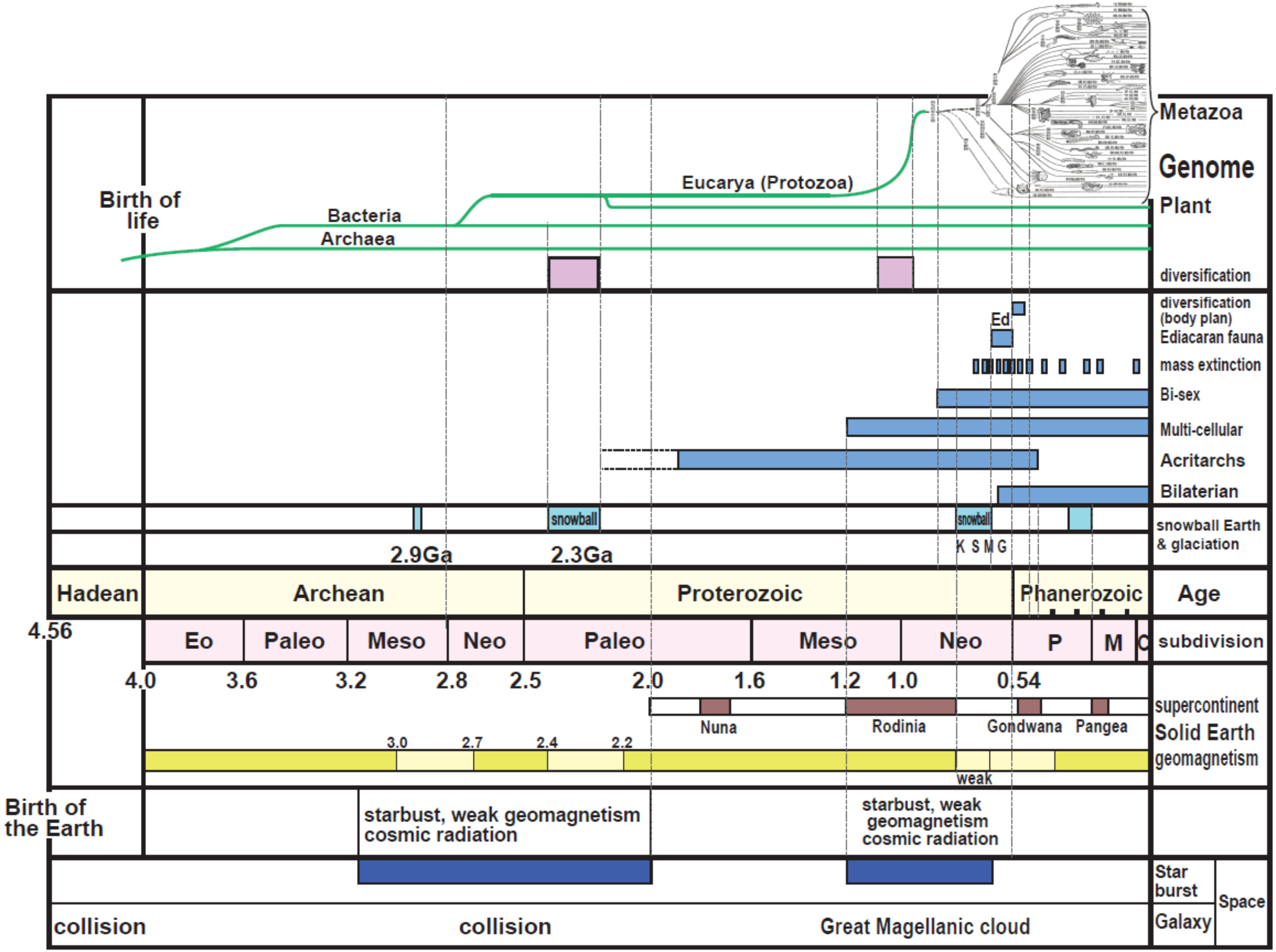
From Starburst to Cambrian Explosion



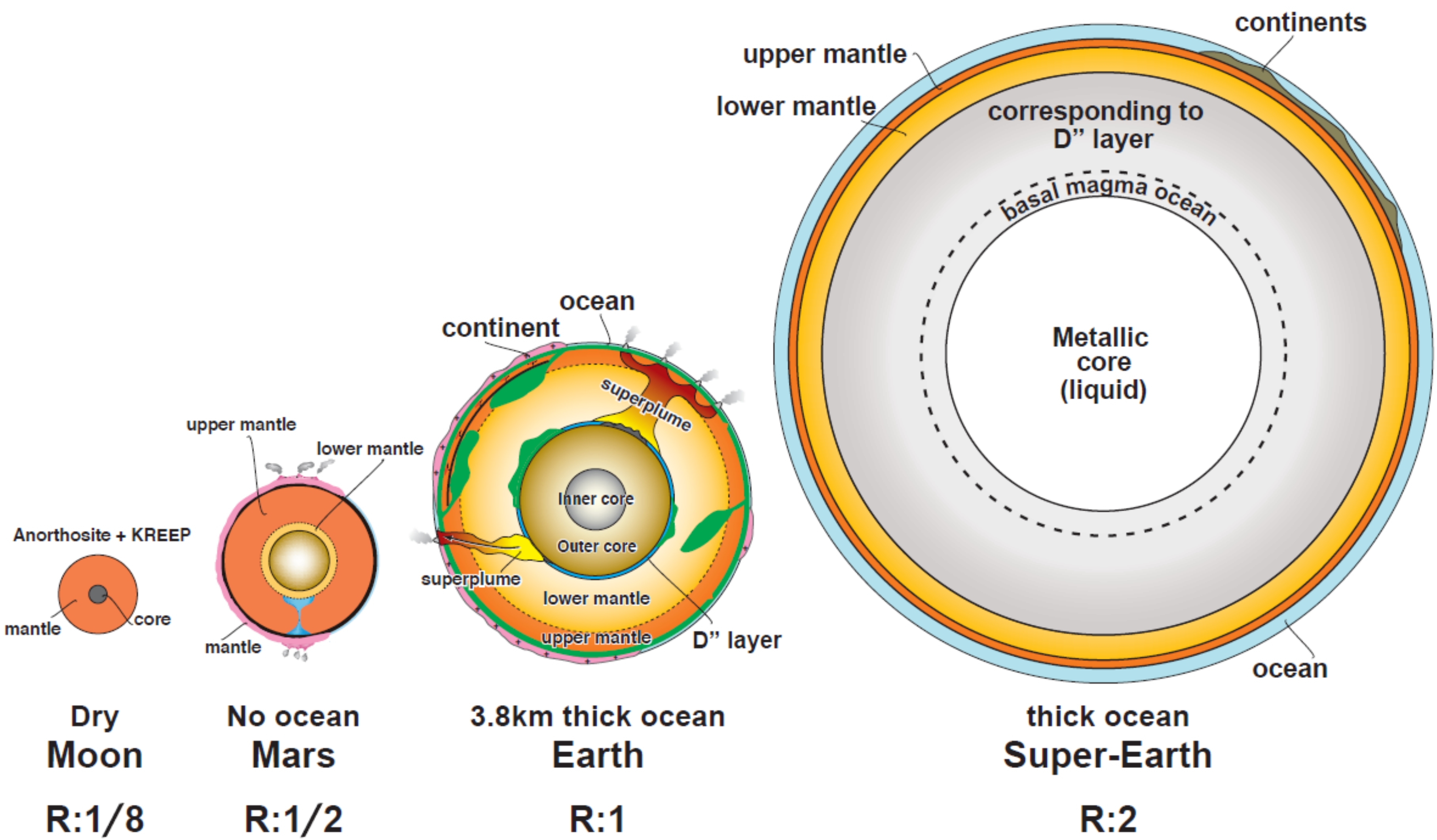
Maruyama et al., 2013



Maruyama et al., 2013



Maruyama et al., 2013



Maruyama et al., 2013

合成実験

- 1 Miller (1953):何故大気中でしか合成できなかったのか？：水は超酸化的物質
- ●原始大気は酸化大気（CO2, H2O, N2）
- ●中央海嶺熱水系で超好熱菌の発見
- ２　中央海嶺熱水系模擬実験
- ３　蛇紋岩熱水系（Takai, Sleep, Russel）:ダメだ！何故：栄養塩が不十分（過飽和が必要）

生命合成実験のまとめ①

- １）膜の合成にはリンとC,H,O,Nの過剰が必要
- 　原始地球表層環境を視点に入れた実験は極めて少なく、予測される原始地球表層環境の実態からかけ離れた環境の下でなされてきた。例えば、**膜の合成実験は、過剰なリン脂質の存在下**で行われてきた。
- ２）地球表層でアミノ酸は合成できるか？
- 　超酸化的物質『水』の中ではアミノ酸が合成できない（Miller,1953の実験以降）。そこで、NH4Cl etc. の触媒の工夫で低温化（＞550℃→＜100℃）が可能になった（2012年）。

生命合成実験のまとめ②化学進化

- （１）地球表層でアミノ酸の合成は困難（NH3合成＞550℃）。
- （２）生体高分子有機物の合成はリボザイム（自己複製できる）まで成功（ただしbottom-upでない：途中がぶつ切れ）
- （３）生命誕生まではまだ遠く、最低３００種類のリボザイムが必要。

生命合成実験のまとめ③誕生場

冥王代の地球記録岩石がない。マントルのポテンシャル温度からマグマの組成が推定できる。それがコマチアイト質地殻だが、冥王代の地球表層にはリンやカリウムなどの生命にとって必須栄養塩はないことになる。冥王代中央海嶺生命誕生説（ナンセンス）。

- 原始大陸地殻は？→月の地質

Birth site of life: New viewpoint (ELSI)

３．原始地球表層環境の復元

- 冥王代の記録を残す岩石が地球に無い→太陽系の惑星地質からモデルを創り、検証する。原始地球—月系はCAIに近い高温凝縮鉱物から形成された。従来のモデル（C1 chondrite）に比べて、CaO, Al2O3　に富む。揮発性成分に著しく枯渇。**地球—月系は無水、無大気で生まれた**。検証：月の岩石学（OK）

- **地球の大気・海洋の起源**＝44億年前に小惑星からもたらされた含水鉱物・炭酸塩鉱物・有機物を含む隕石（地球半径表層の50㎞が付加）の重爆撃によって海洋と大気がもたらされた。

玄田の鉄の雨（ジャイアントインパクト）は月にない（大量のBIF）
地球に降らなかったか、少なくとも1億年も浮遊したことはない

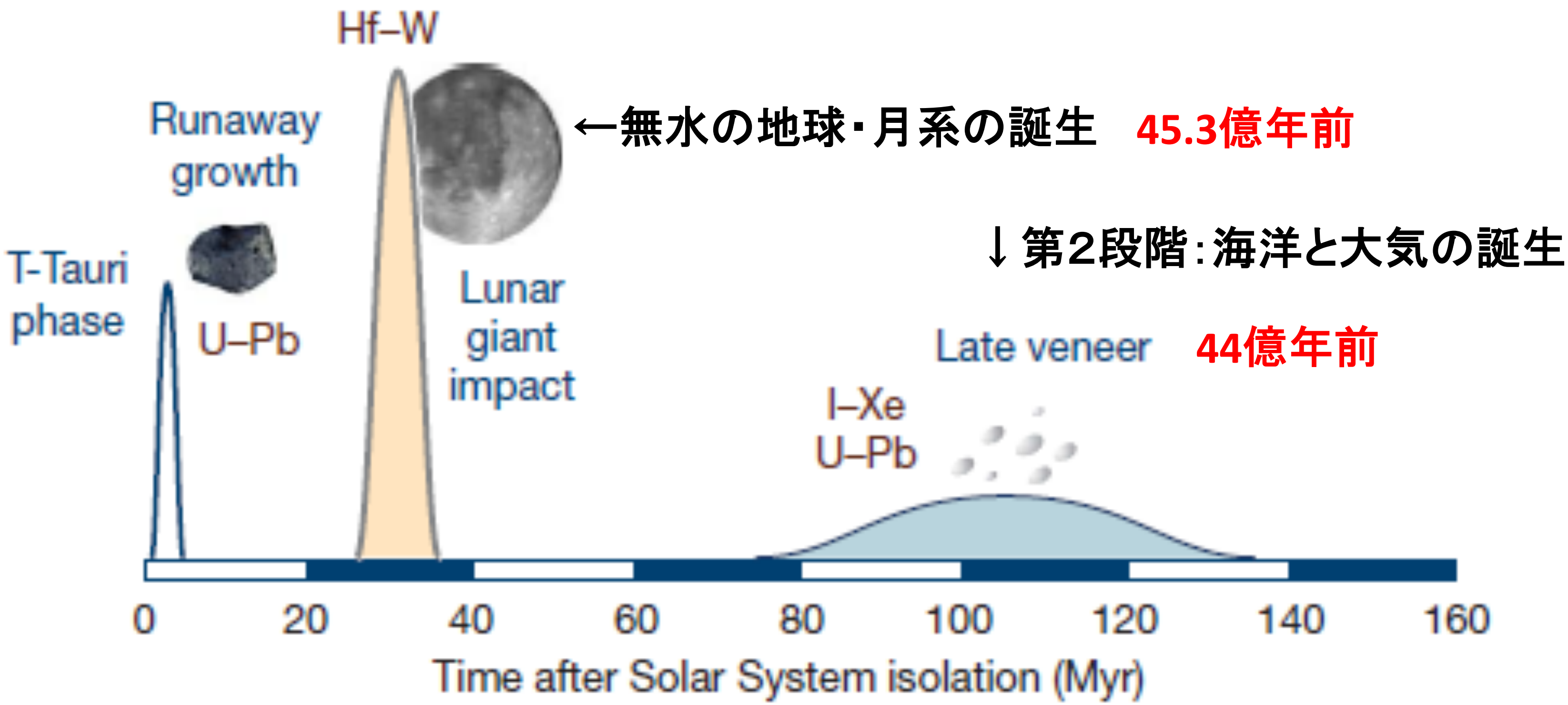
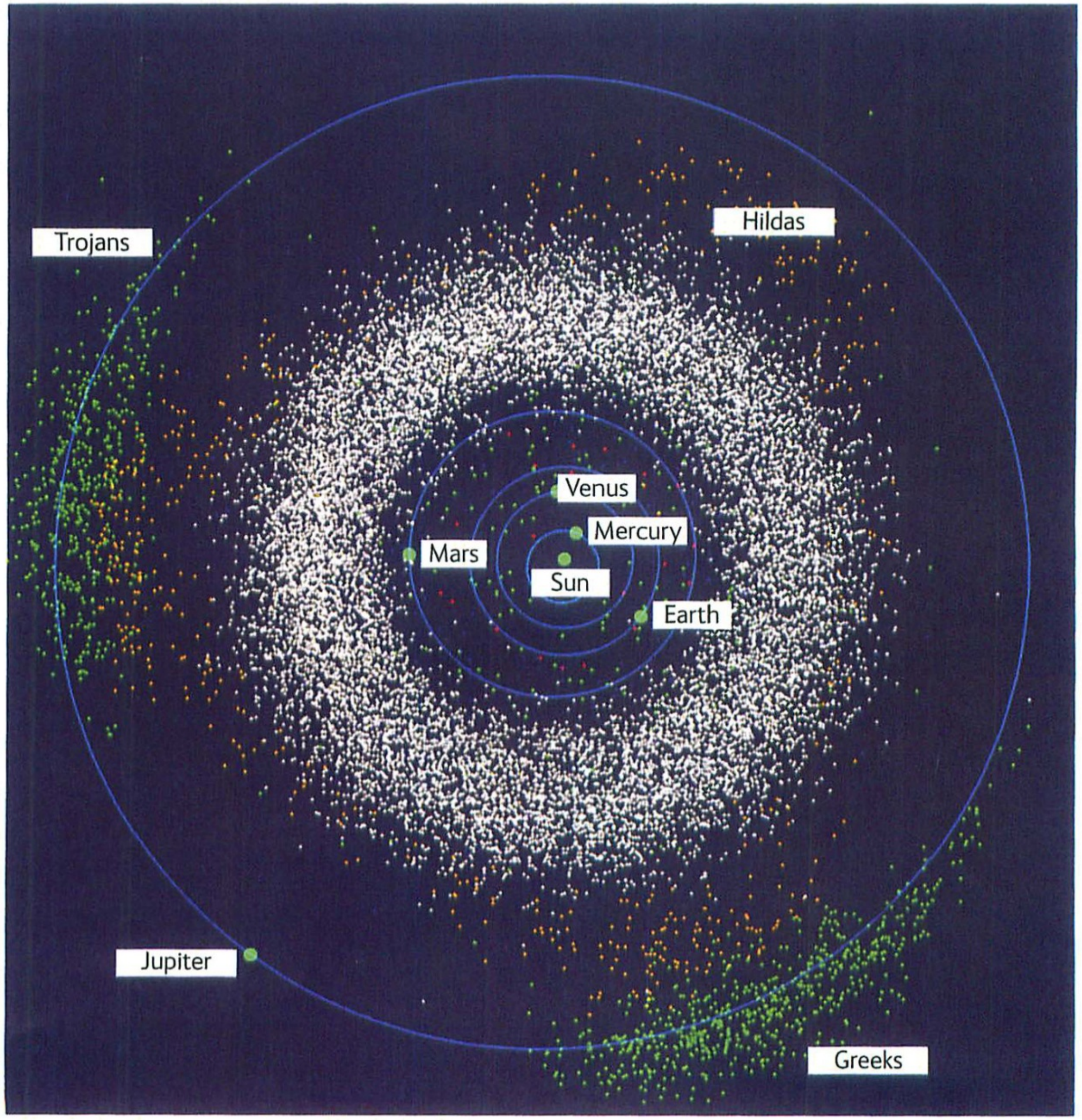


Fig. x: A tentative chronology of the Earth’s accretion
Albarede (2009)



Distribution of asteroids in the inner solar system.

次の課題：太陽周辺からカイパーベルトまでの鉱物分帯（組成変化）と観測

Smith et al., (2011)

Habitable Trinity

Dohm, J. (ELSI)

Contents

1. Concept habitable
2. Habitable trinity proposed
3. Application to the solar planets
   and satellites
4. Application to the exo-solar planets
5. Conclusions

Habitable zone

<Previous works>

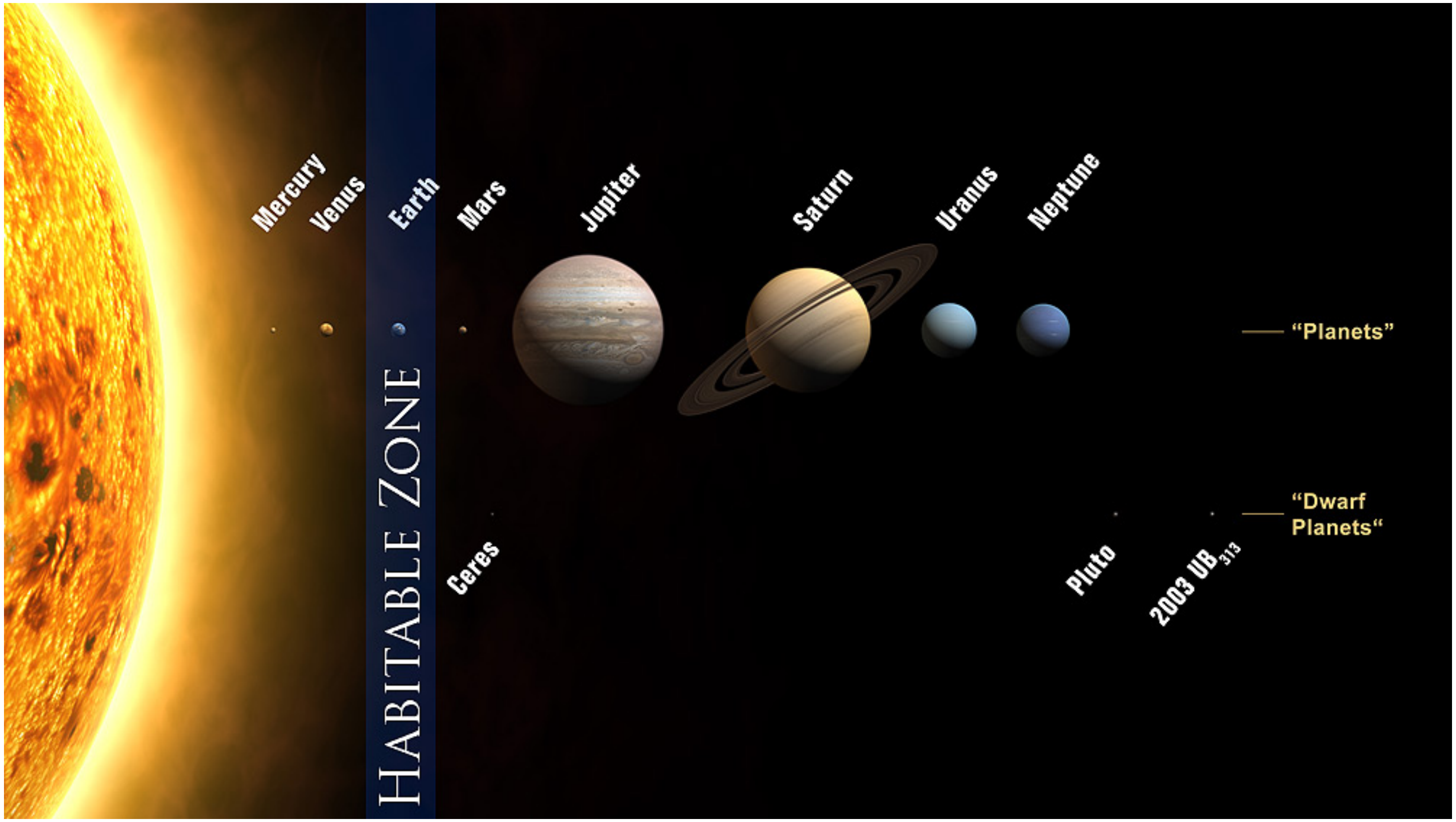
Dole: Habitable planets for man (1964), Dole & Asimov: Planets for Man (1964)

Hart: Explanation for absence of extraterrestrials on Earth (1975)

Hohlfeld & Terian: Multiple stars and number of habitable planets in the Galaxy (1976)

Kasting et al: Habitable zones around main-sequence stars (1993)

Leger et al: A new family of planets "Ocean-Planets" (2004) etc etc



Chemical composition of life

Table shows chemical composition of 70kg weighing human body. C,H,O,N, Ca, Mg, P, K etc, all elements must be supplied from three components, e.g. Ocean, Atmosphere, Rock (landmass)

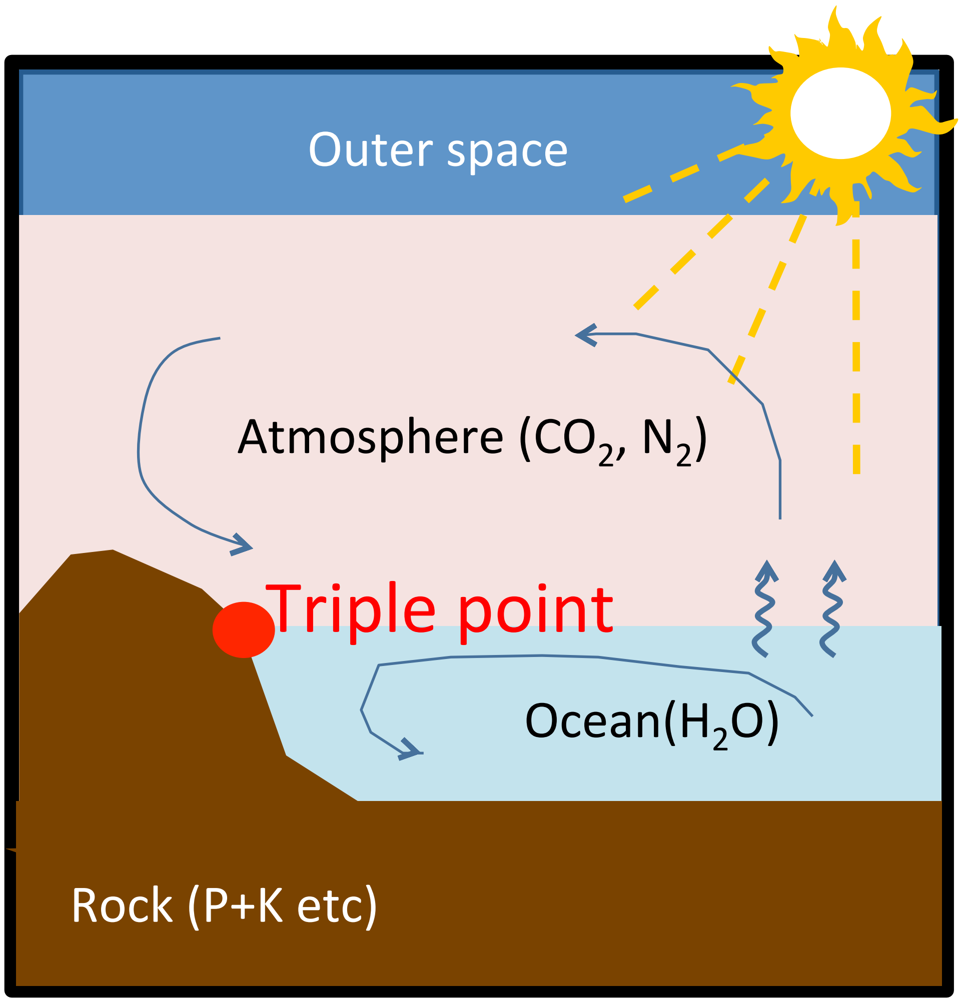
Element	Weight(Kg)	Wt%	Compose of
O	45.50	65.00	All
H	7.00	10.00	Ocean
C	12.60	18.00	Atmosphere
N	2.10	3.00	Atmosphere
Ca	1.05	1.50	Landmass
P	0.70	1.00	Landmass
Minor*	1.05	1.05	Landmass

*Minor elements: K, Na, S, Cl, Fe,Cu, Zn, Mo, Cr, Co, Ga, Se, I, Si, F, Cd, Ba, Sn, Hg, Ni, V

Life is not composed of water only.

Habitable Trinity: three components

Steady-state supply of components by an engine (Sun)



Toxic primordial ocean

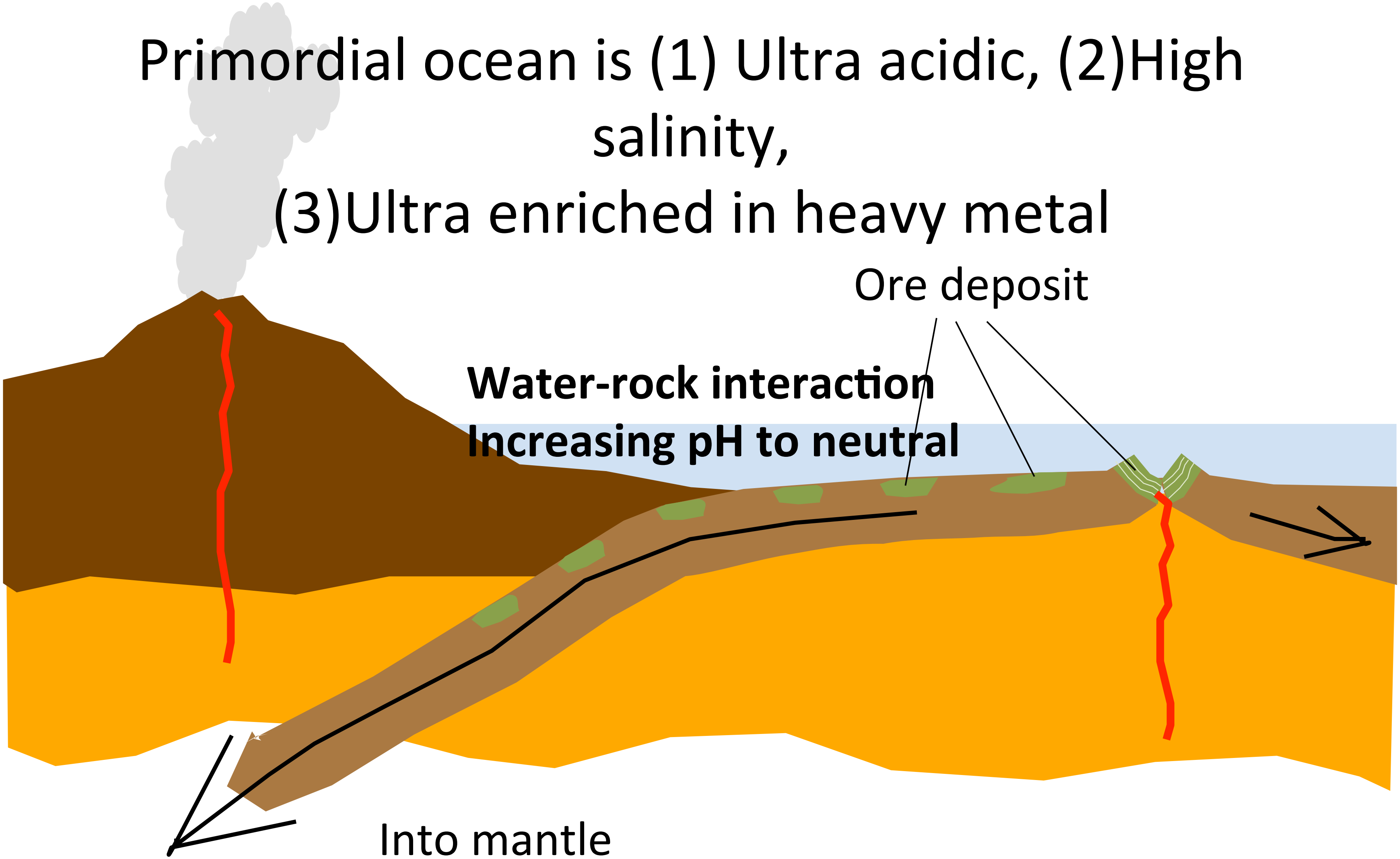
1. Ultra-acidic
2. Highly enriched salinity
3. Highly enriched heavy metal elements
   (Cd, Cu,Pb, Zn, etc)

● How to clean-up toxic primordial ocean=
Plate tectonics (ore and water-rock interaction).
Need time

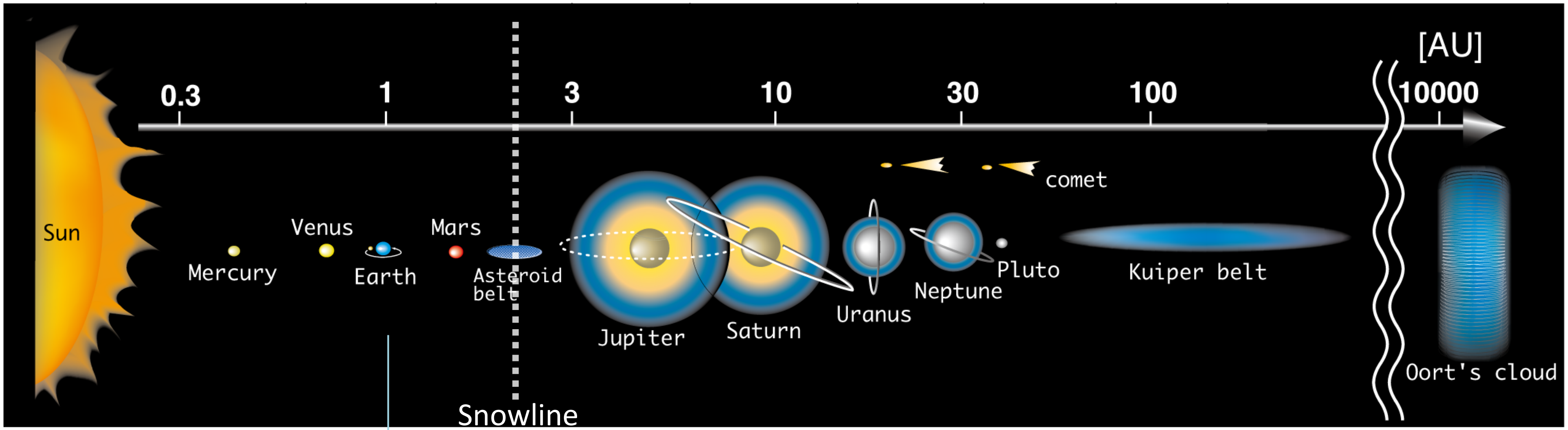
● Birth place of life: Lake
We need landmass= initial mass of ocean<5km
(naked planet)

Plate tectonics as a cleaner

Primordial ocean is (1) Ultra acidic, (2)High salinity,
(3)Ultra enriched in heavy metal



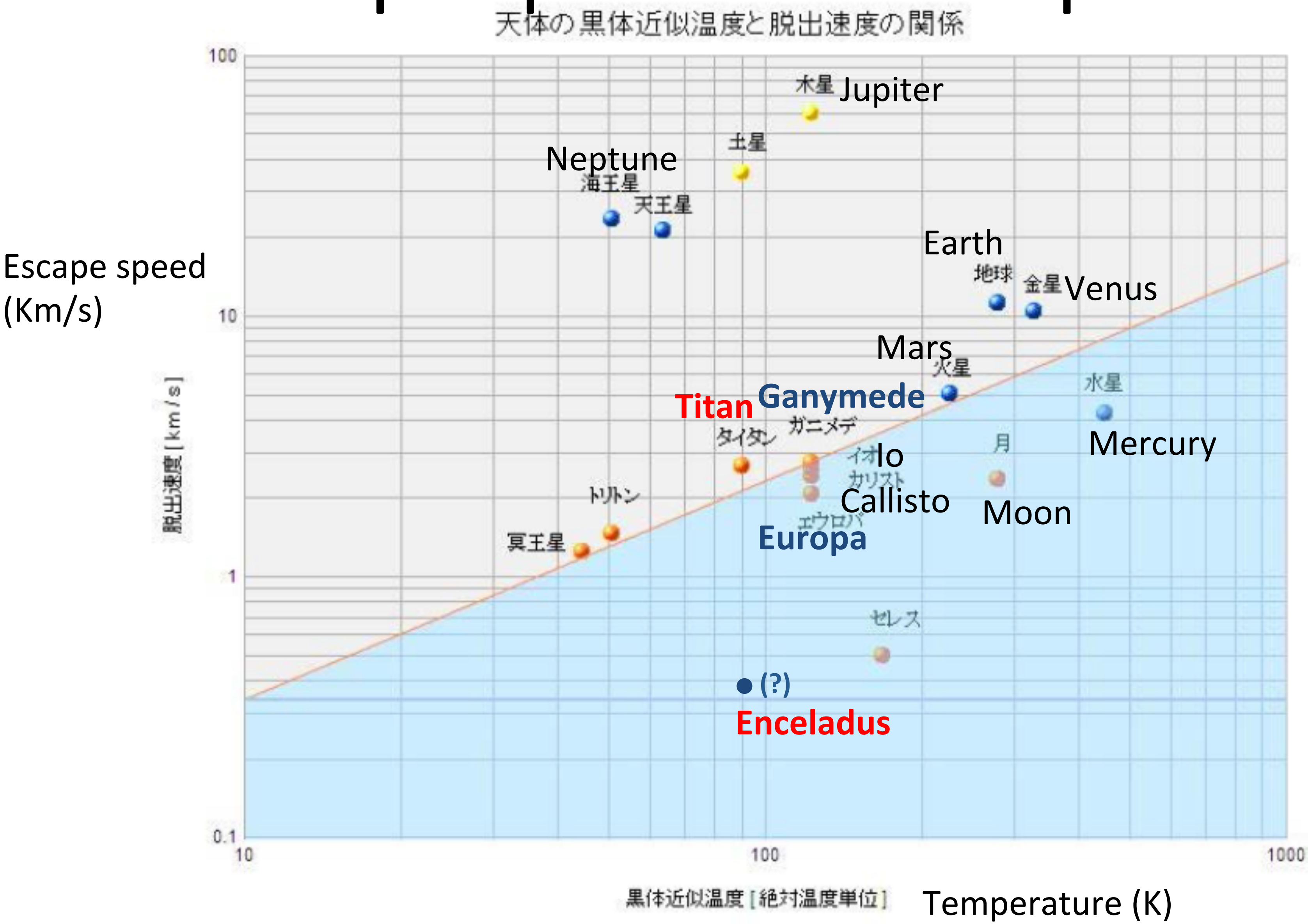
Application 1: Solar planets and satellites



Earth & early Mars

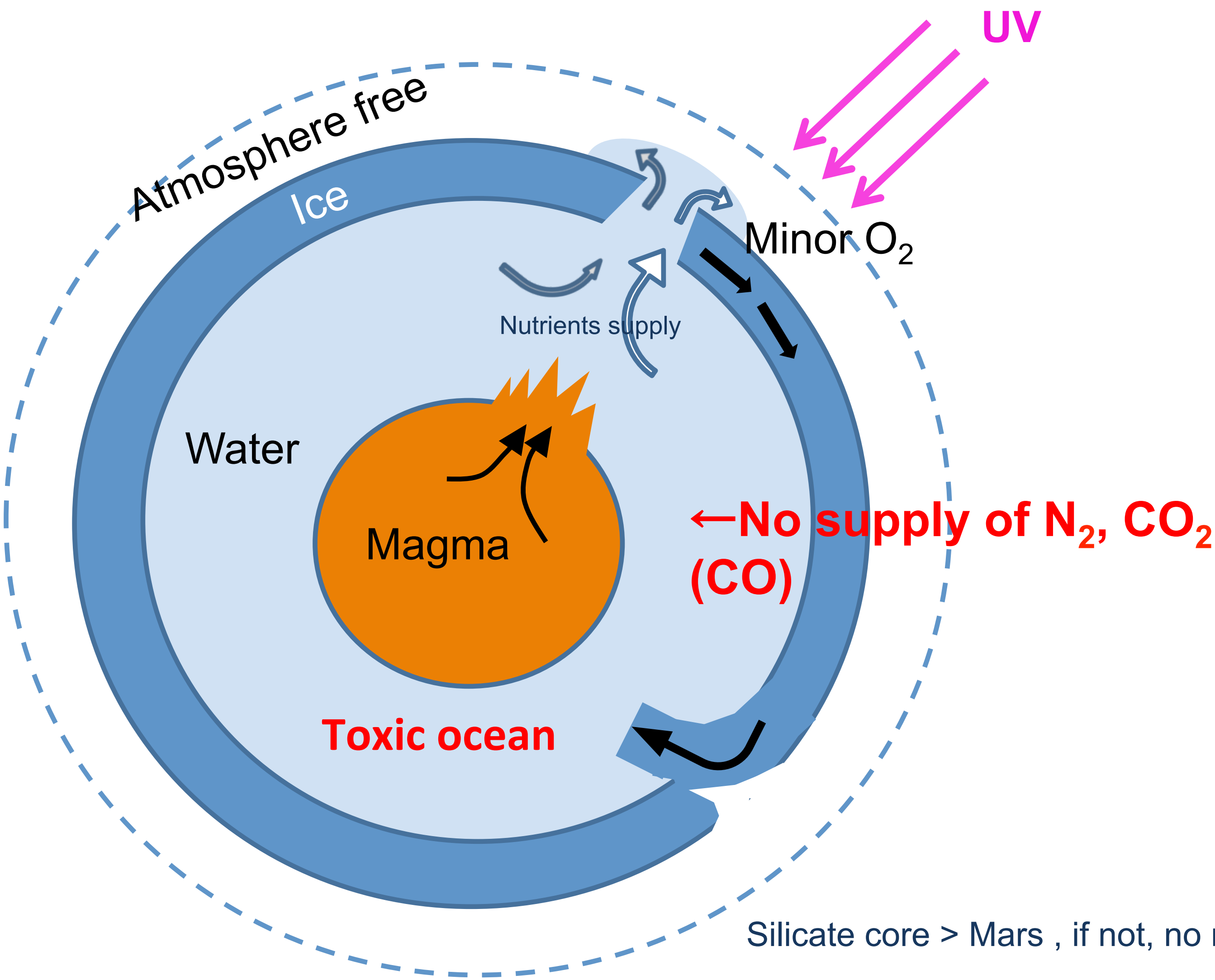
Ocean: 4km thick

Escape speed of atmosphere



http://blogs.yahoo.co.jp/huriidorihi4sei/3005126.htmlより引用

Europa / Enceladus / Ganymede
(No Life on those satellites)



Silicate core > Mars , if not, no magmatism ?

Titan

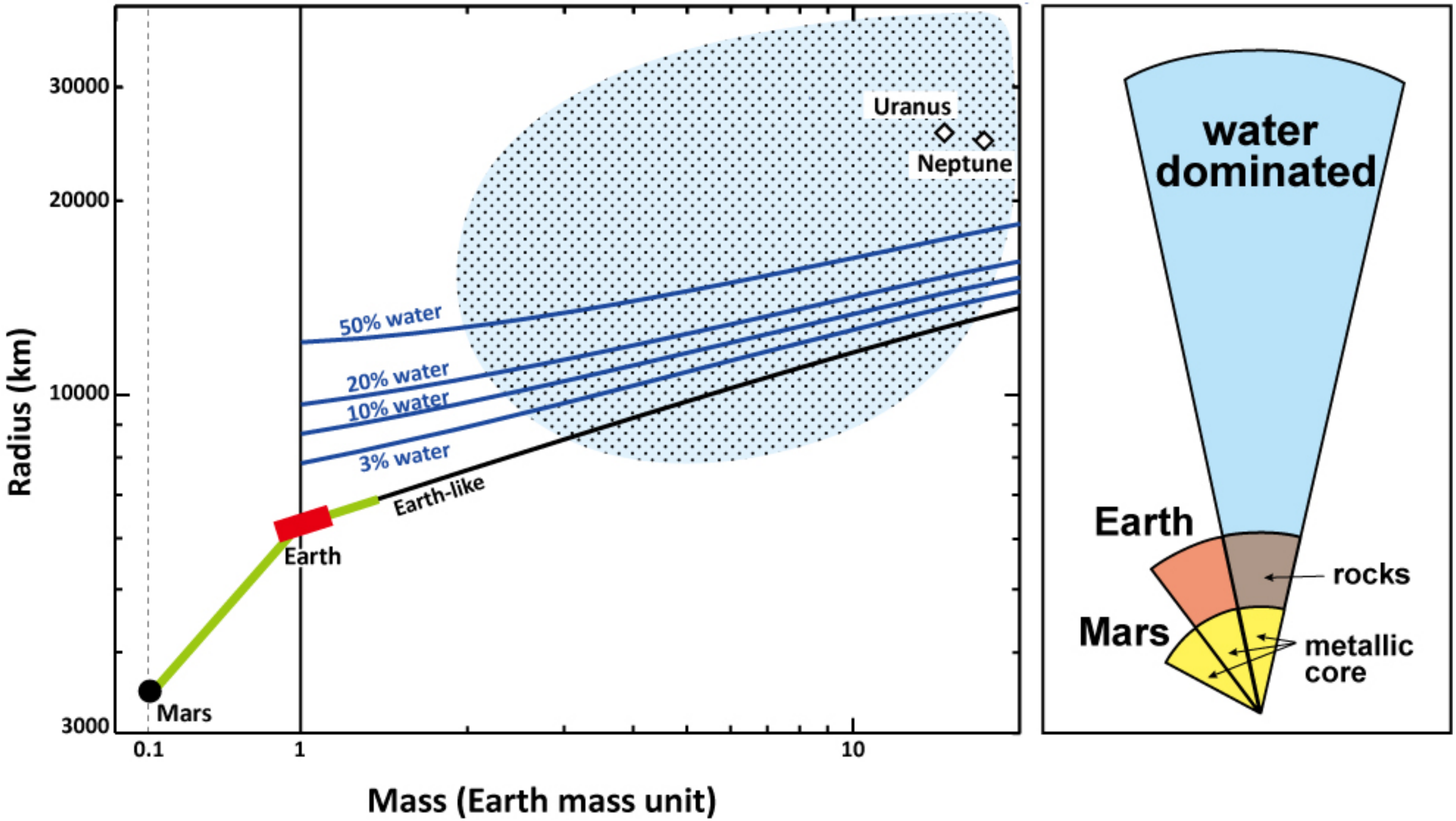
Application2:Exo-solar planets

1. 60/3600=habitable zone planet (2013)

2. If Habitable trinity is applied

   = how many left?

Index to explore life sustaining exo-planet

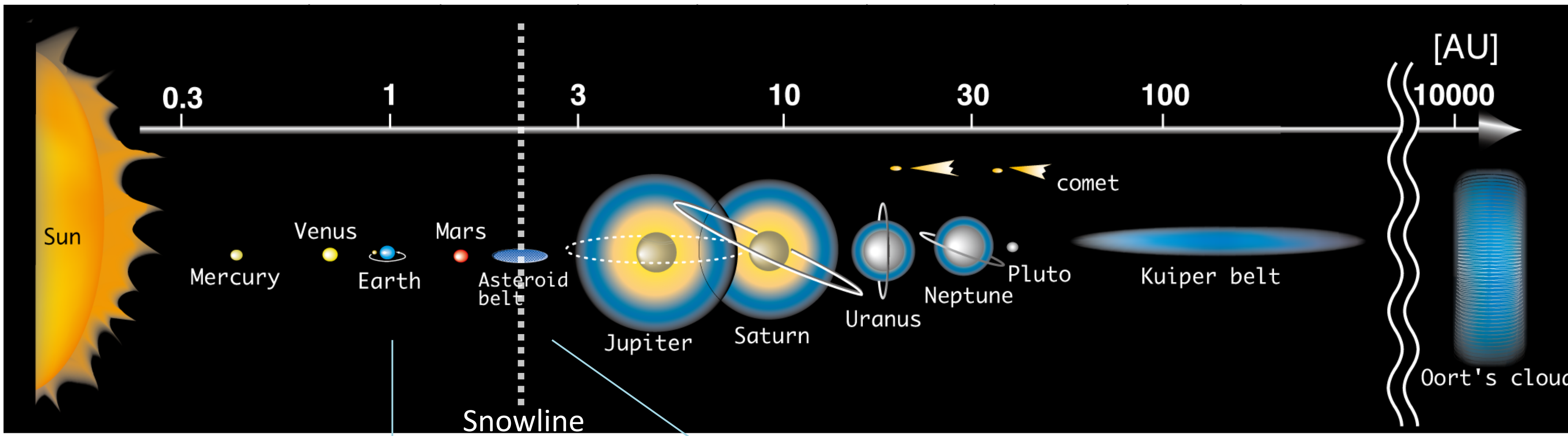


Very narrow window to find life-sustaining exo-planet

Maruyama, Ikoma, Genda, Hirose, Yokoyama, 2013

Extremely tight condition:
Ocean thickness must be 3-5km = Naked rocky planet

Fig: If another earth was created in asteroid belt



Earth

Ocean: 4km thick

Another Earth

Ocean: 1200km thick

Made from 3H_2O% chondrite

Conclusions

1. Habitable Trinity (coexistence of atmosphere, ocean and landmass) is new concept to verify the presence of life
2. Index to verify Habitable Trinity
   - the size of planet
   - initial mass of primordial ocean
   - snowline & origin of ocean
3. Application of the new concept to solar planets/ satellites & exo-solar planets to explore life

海洋に栄養塩を供給する方法

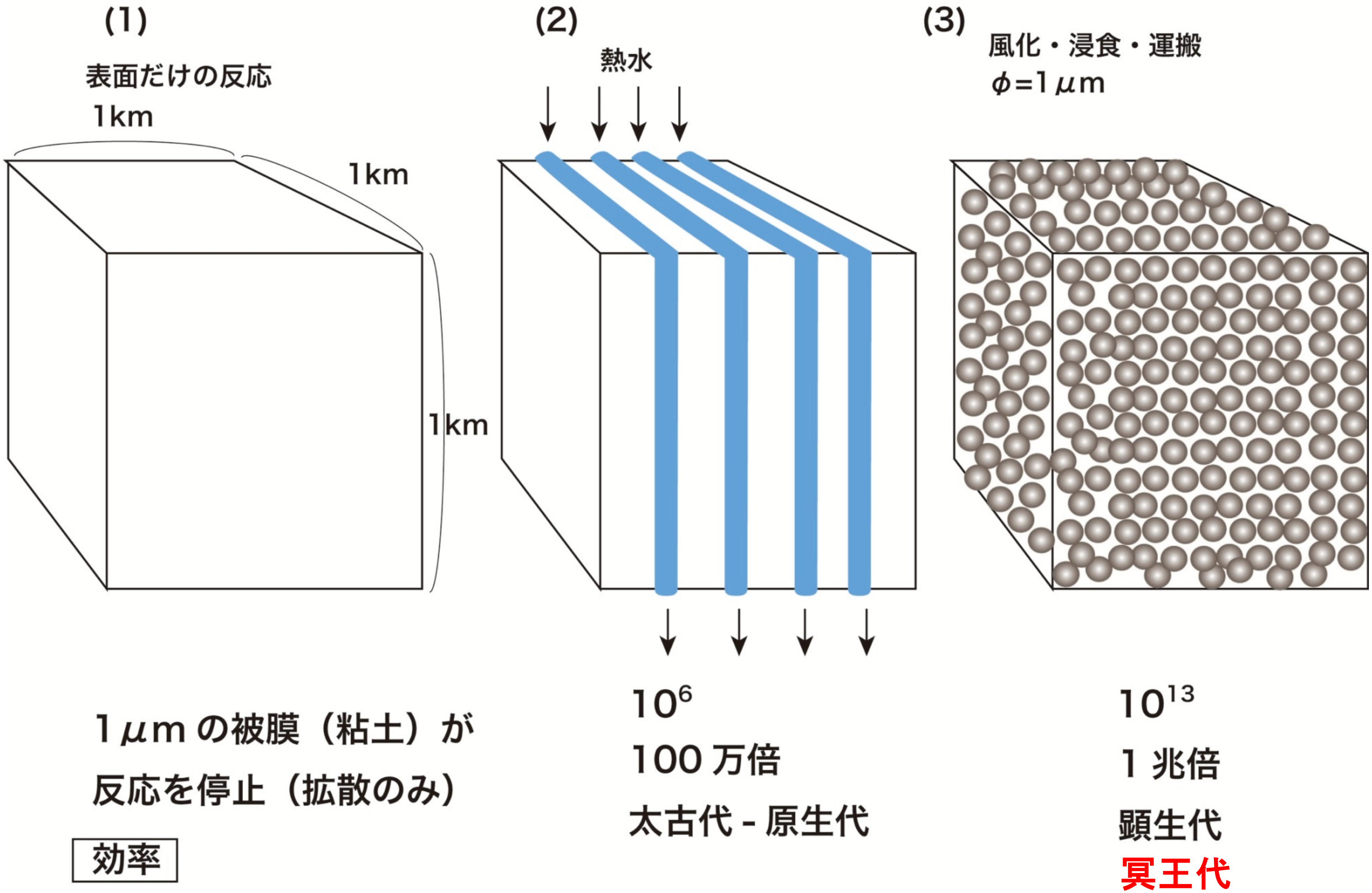
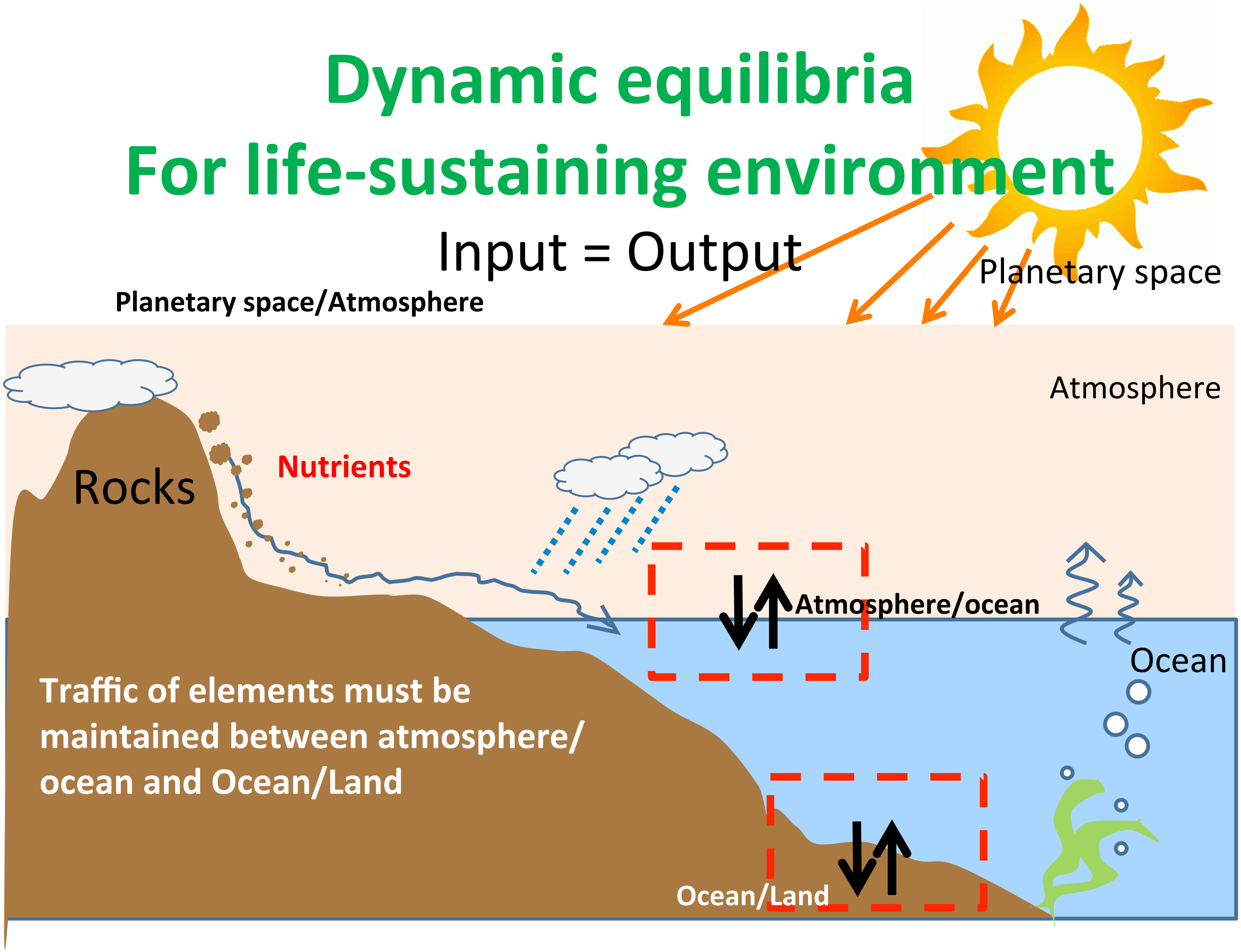


Fig.4

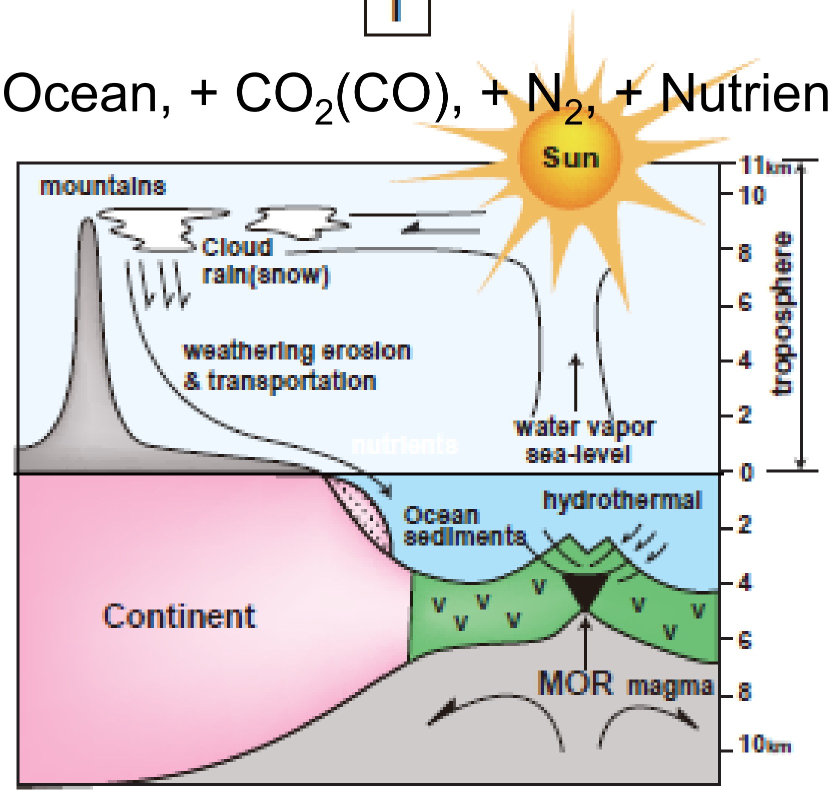
Dynamic equilibria
For life-sustaining environment



Habitable trinity: a New Concept

(a) How to supply nutrients, (b) How to clean up toxic ocean

Life = H_2O = Ocean, + CO_2(CO), + N_2, + Nutrients (P, K, Fe etc)



(c) Two sites of ecosystem, but on-land surface was the first.