

神戸集会：冥王代地球表層環境進化 化解明のロードマップ

丸山茂徳（東工大/岡山大学）・林祥介（
神戸大学）・戎崎俊一（理研）

講演の順番と議論

- 1 丸山・新井: 冥王代地球表層環境進化
- 2 橋本: CO₂-H₂O大気放射限界問題
- 3 石渡: 暴走に近い状態の大気大循環
- 4 戎崎・今枝: 新しい惑星形成理論(物質科学を組み込む)
- 5 議論

次の課題

- 1 原始地球表層環境(個性の研究)
- 2 新しい惑星形成理論→物質科学を組み込み、原始惑星表層環境進化→地球以外の太陽系惑星(個性から普遍的パラメータを探る)
- 3 汎惑星形成理論(中心星のサイズと化学組成を与えると、生命誕生可能惑星の存否が決まる)
- ●**鍵は原始惑星表層環境進化**

東工大＋三朝G＋理研＋神戸G

- ○固体地球と大気・海洋物質循環の科学(丸山G)
- ○惑星形成理論(理研戎崎＋、物質科学:三朝中村・丸山G)
- ○惑星表層の大気・海洋科学(神戸林G)
- ●各Gの長所を結び、世界最前線を創り出す
- ●長期的なゴール:生命進化可能惑星の探索指標の確立と生命惑星学の創成

原始地球表層環境進化

第6回 冥王代の地球と表層環境進化

1 原始地球の誕生から海洋の誕生まで

- ① 無大気・無海洋状態で原初大陸誕生
- ② 大気海洋(生命の主要構成元素)成分の付加
- ③ 原始海洋の誕生とプレートテクトニクス運動の開始

2 冥王代の表層環境の多様性

- ① いつから生物は太陽エネルギーを
利用できるようになったのか

冥王代の地球

冥王代: 45.6億~40億年前頃
証拠が残されていないとされた時代



どんな岩石や地層が覆っていたか?
なぜ現代の地層から消失したか?

①

鉱物

(21世紀になって44~40億年前のジルコン発見)

②

岩石の証拠

(42億年前)

③

月の地質研究

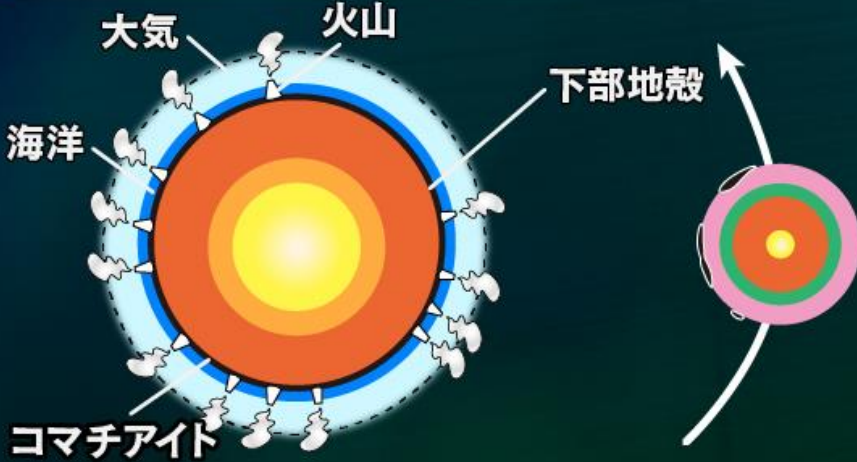
(マグマオーシャン、45.3億年前の岩石)

地球形成モデル

I 原初大陸があった

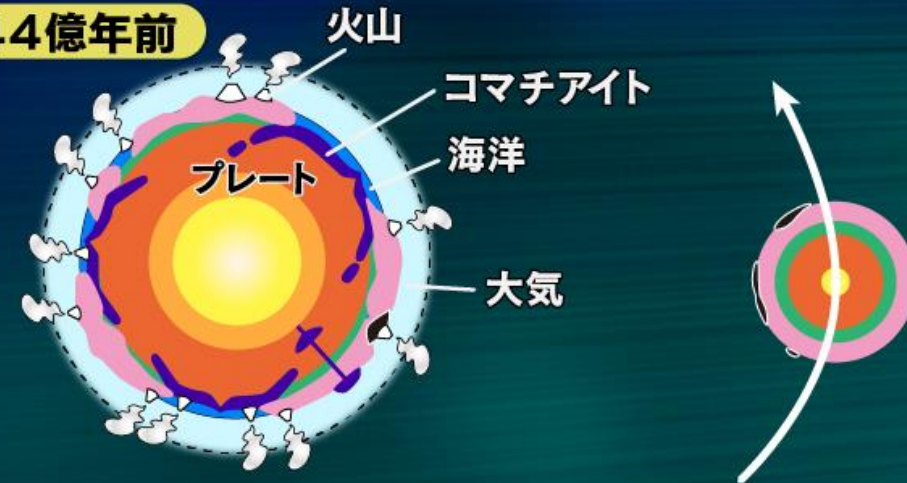


II 原初大陸はなかった



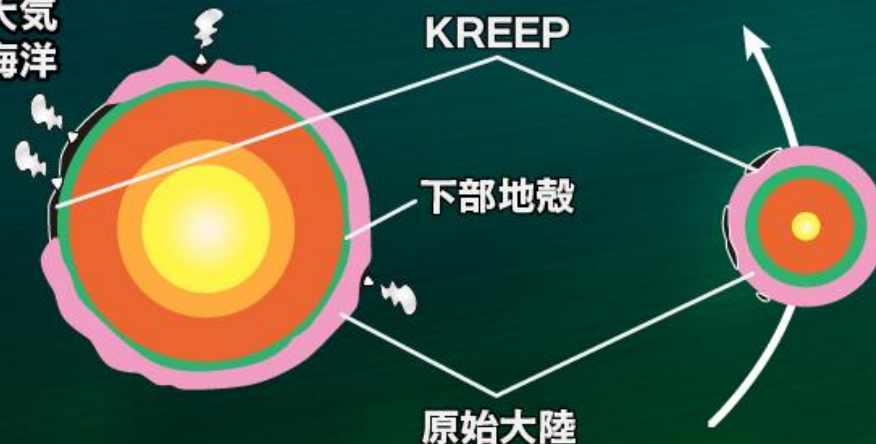
III ABELモデル

44億年前



45.3億年前

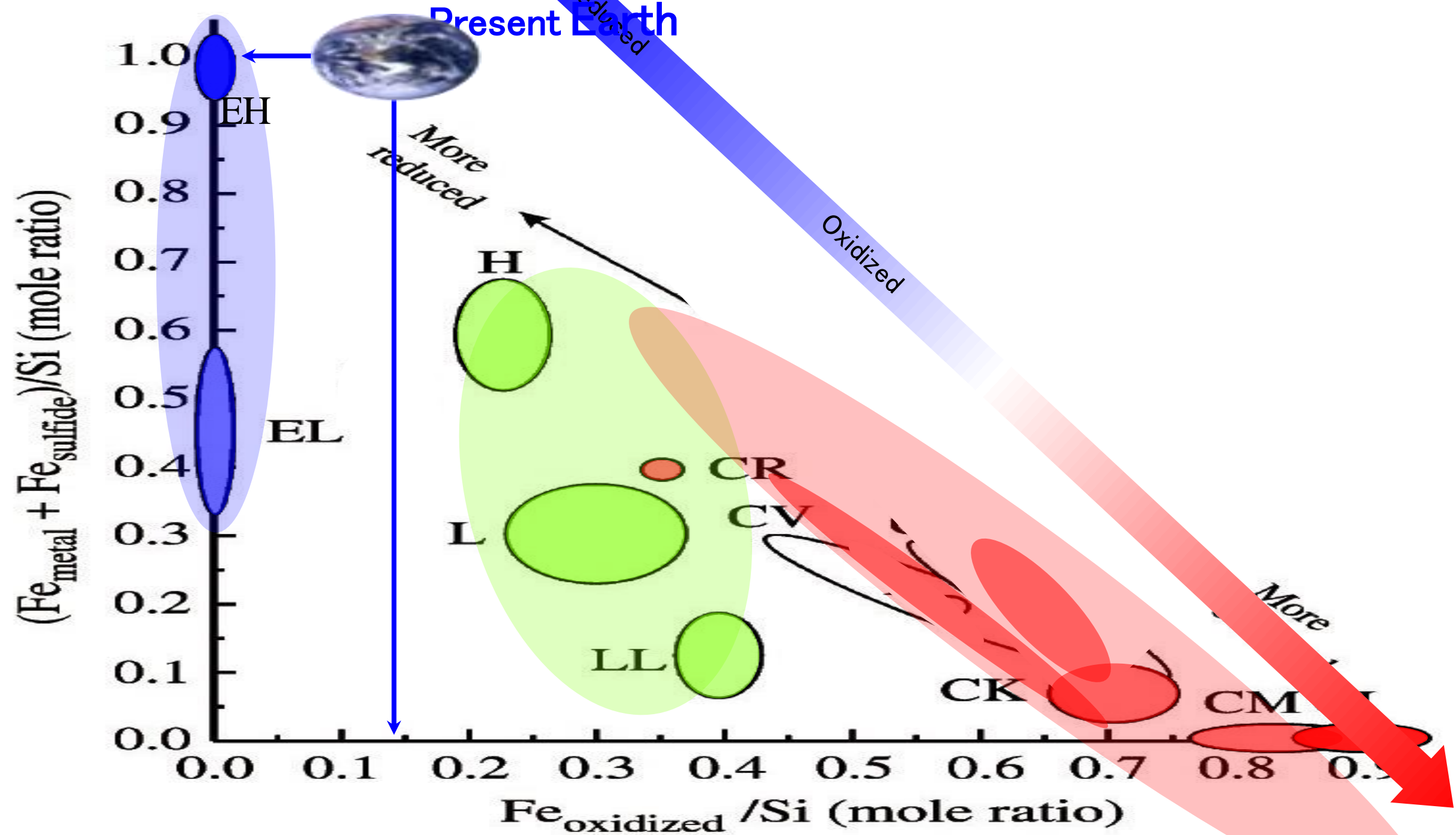
無大気
無海洋



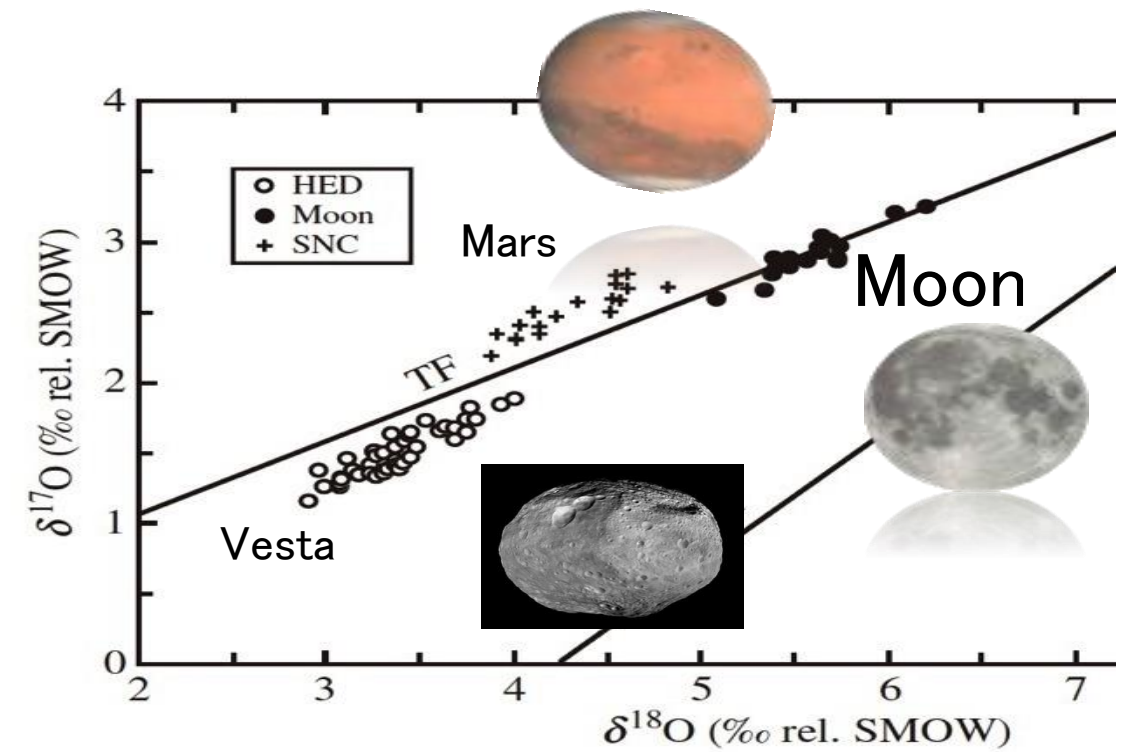
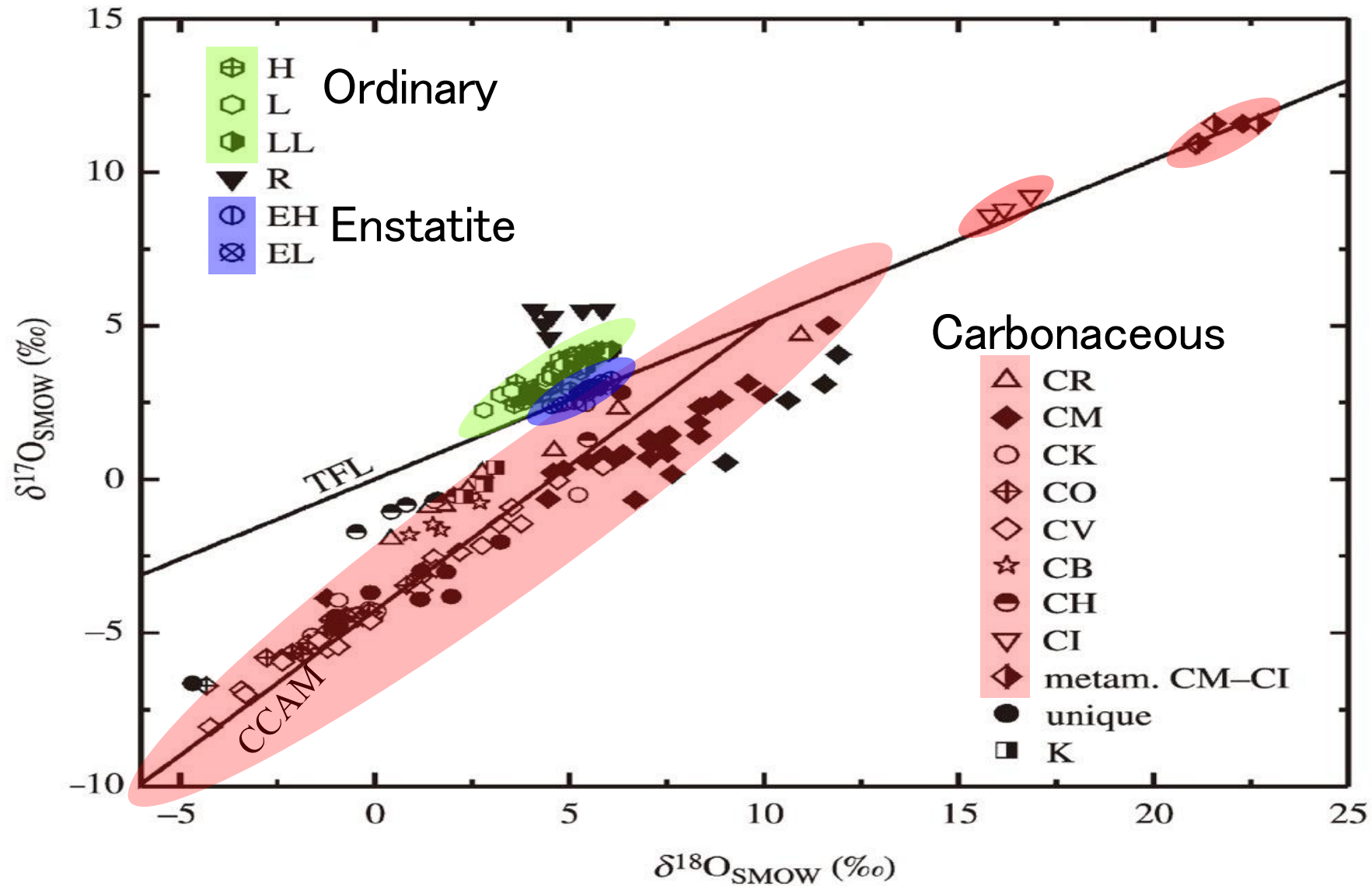
ABELモデル

- 1 根拠(8種の元素同位体の制約:地球一月系はエンスタタイトコンドライト起源だが水は炭素質コンドライト)起源
- 2 まず無水・無海洋の裸の地球が生まれ45.3億年前に固化し、44億年前に大気・海洋が誕生した)
- 3 炭素質コンドライトから100気圧CO₂, 300気圧海洋をどのようにして創るか？

Dry and highly reduced Earth



Oxygen isotope fractionation



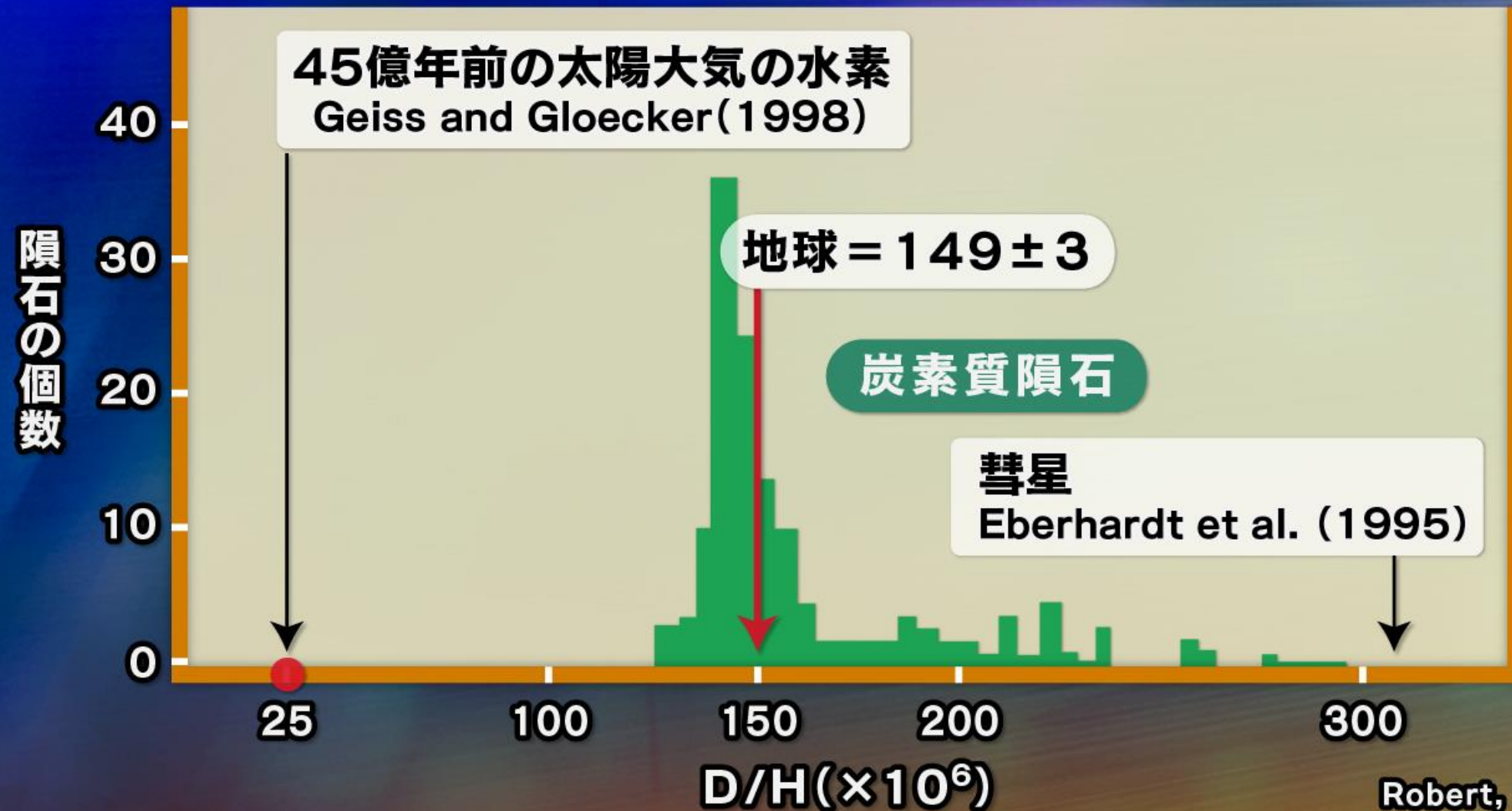
	Chondrites								Ordinary	Enstatite		
<i>zss</i> →	Carbonaceous											
<i>Group</i> →	CI	CM	CO	CR	CB	CH	CV	CK	H	LL	EH	EL
<i>Petr. type</i> →	1	1-2	3-4	1-2	3	3	3-4	3-6	3-6		3-6	
<i>Subgroup</i> →					CB _a CB _b		CV _A CV _B CV _{red}					

Krot et al., in *Treatise on Geochemistry* 1.05, 83 (2005)

Clayton, in *Treatise on Geochemistry* 1.06 129 (2005)

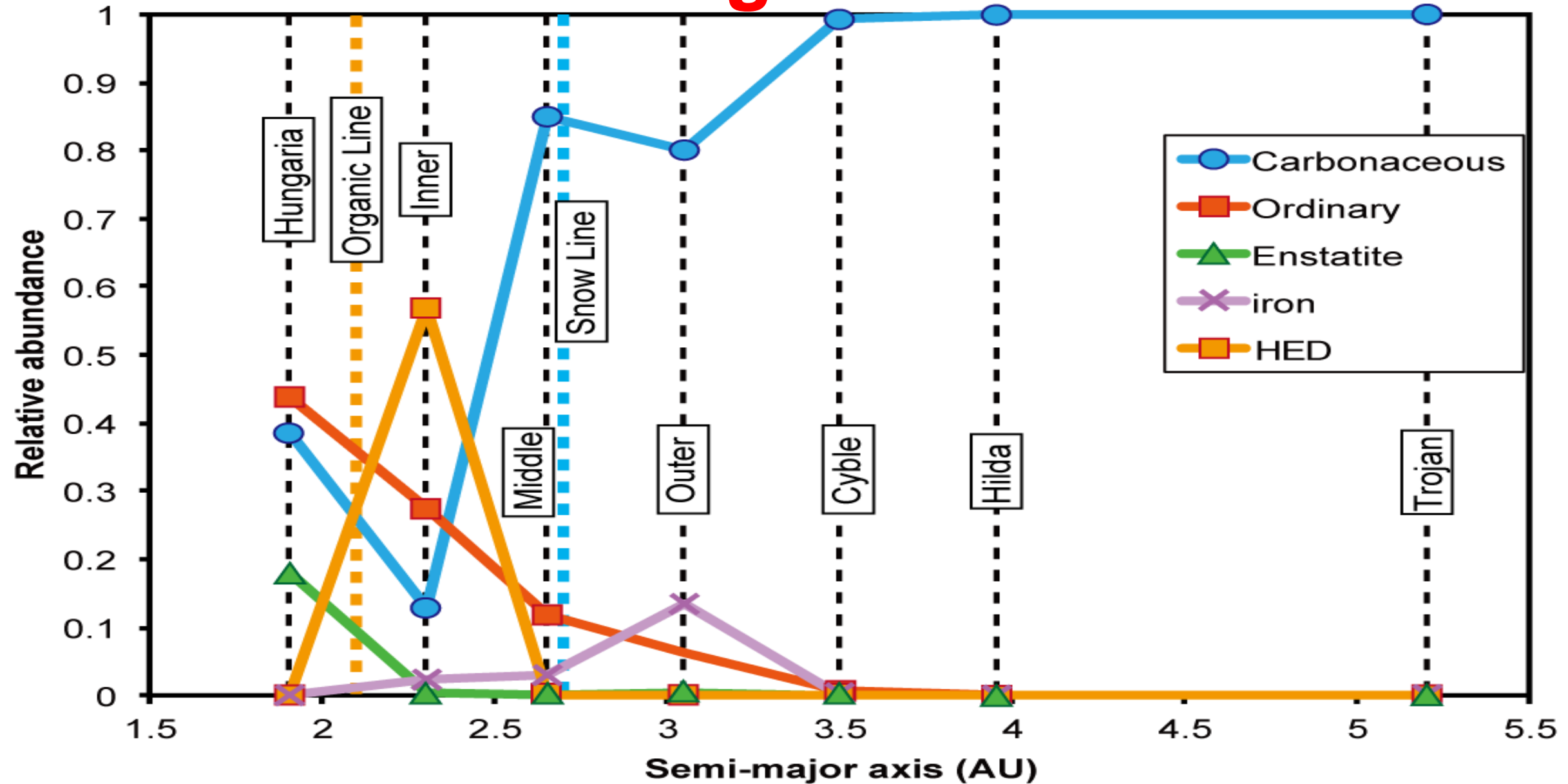
重水素/水素比 (D/H) から見た地球の水の起源

小惑星帯の炭素質隕石からやってきた



Robert, F. (2001) を加筆修正

Chemical zoning in the asteroid belt



- Carry, 2010とDeMeo et al., 2012から作成した各小惑星を隕石と対応させて作成した図。
- アステロイドベルト中の各隕石の存在比を示す。Enstatiteは2.5AUより内側で存在する。
- 炭素質コンドライトは主に2.5AUより外側に存在する。

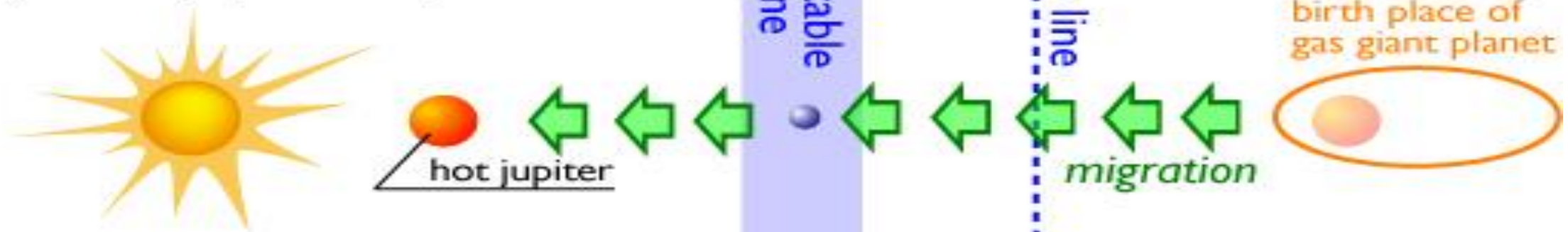
化学組成累帯構造の形成と そこから生まれる惑星の化学組成

粘土鉱物線? 有機物線(2.1)

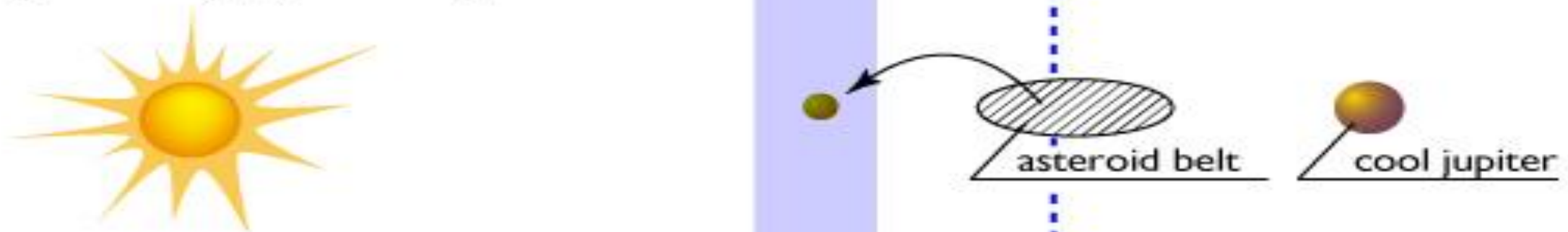
雪線(2.7)



(a) hot-jupiter system



(b) cool-jupiter system



(c) jupiter-less system

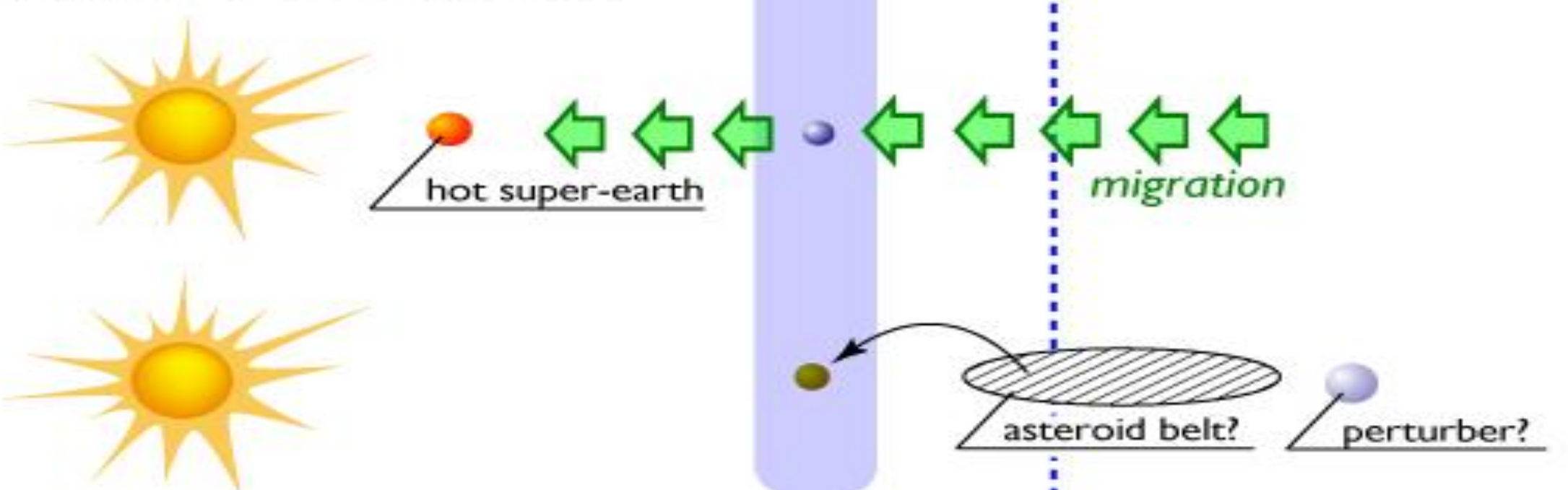
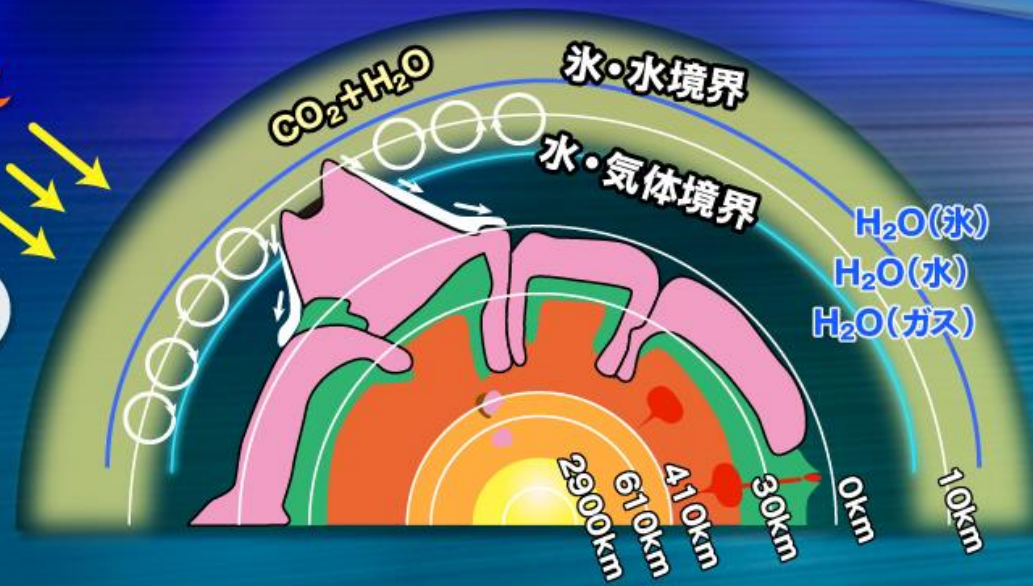


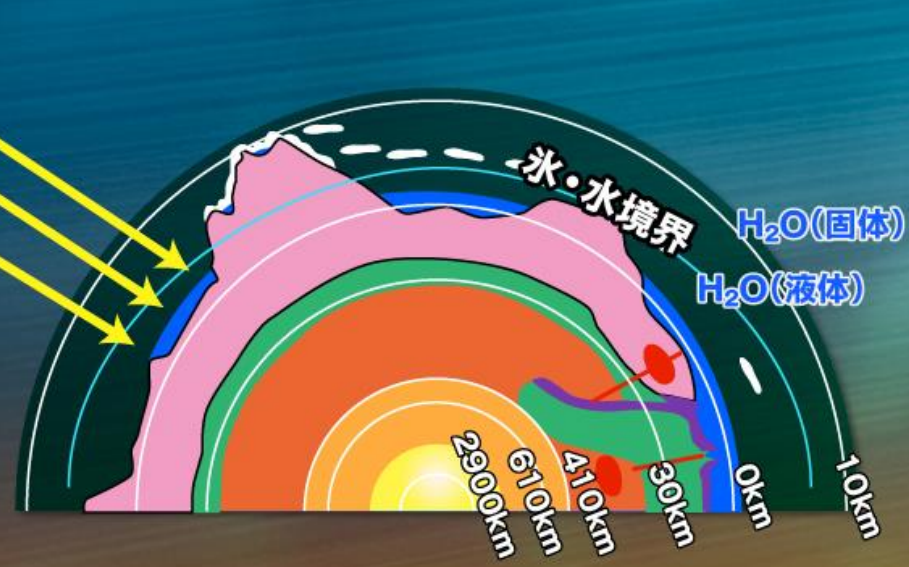
Fig.16

原始海洋誕生

擬似プレートテクトニクス



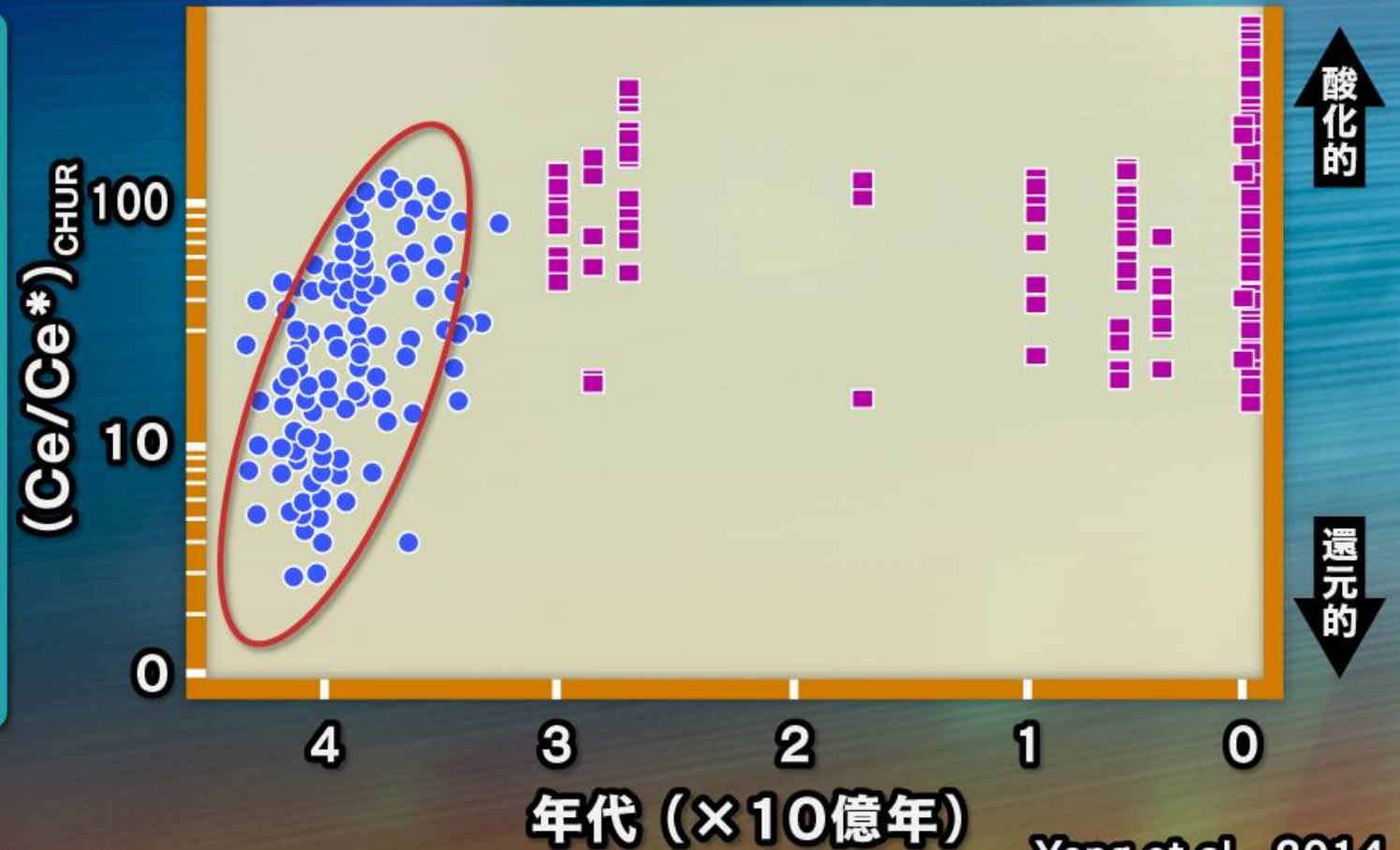
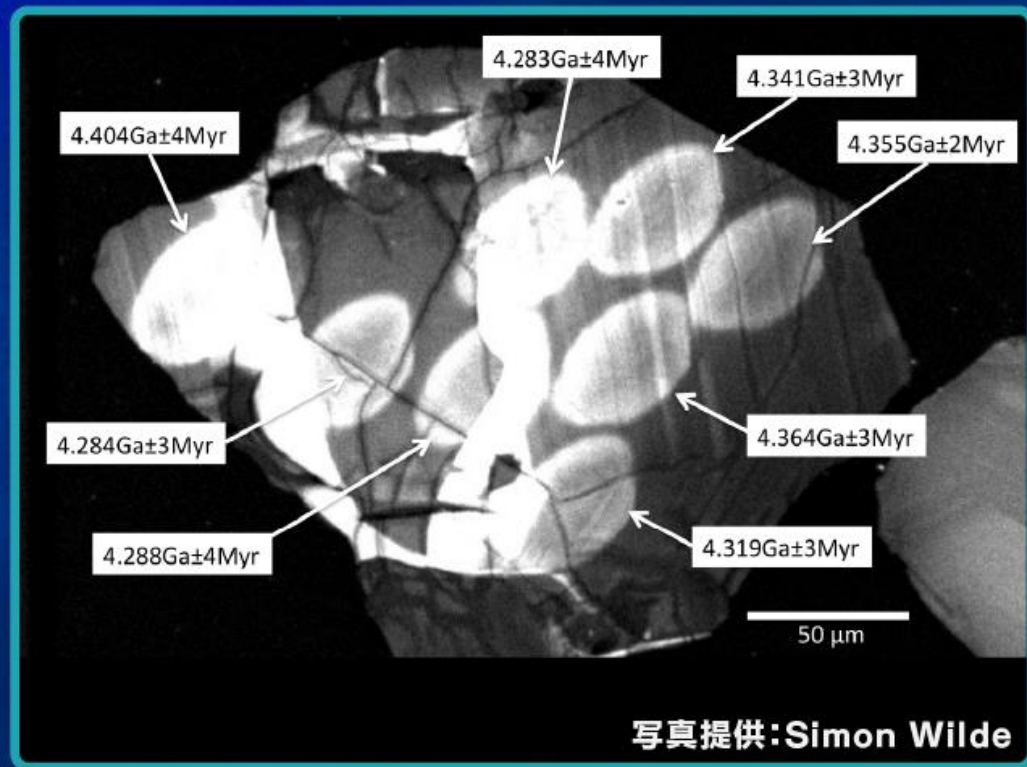
プレートテクトニクス開始



冥王代ジルコンの酸化還元状態の変化

大気海洋成分が約44億年前に付加されたことを実証するデータ

上部マントル中の酸素が徐々に増加していったことが読み取れる
水は、岩石に対して酸化剤として働く



地球の2段階形成モデル: ABELモ デル

生命誕生に何故、2段階形成が重要な
か

ABEL モデル

二段階形成モデル

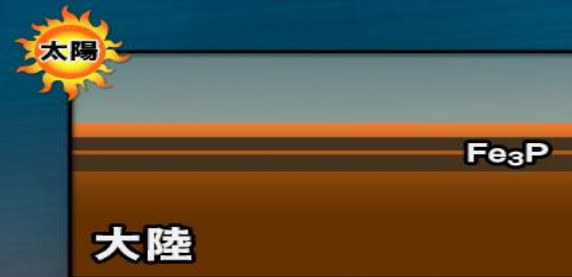
第一段階 Fe_3P (シュライバサイト)が普遍的に存在

第二段階 そこに生命構成主成分元素が降臨

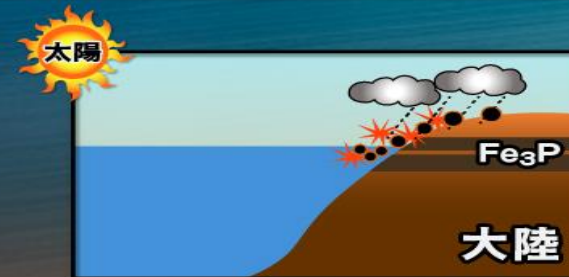
Fe_3P が、裸の地球(原初大陸)上に存在

海洋誕生時(44億年前)の地上でリンと水が激しく反応

多種多様な高分子有機物が生まれ、生命合成反応が開始

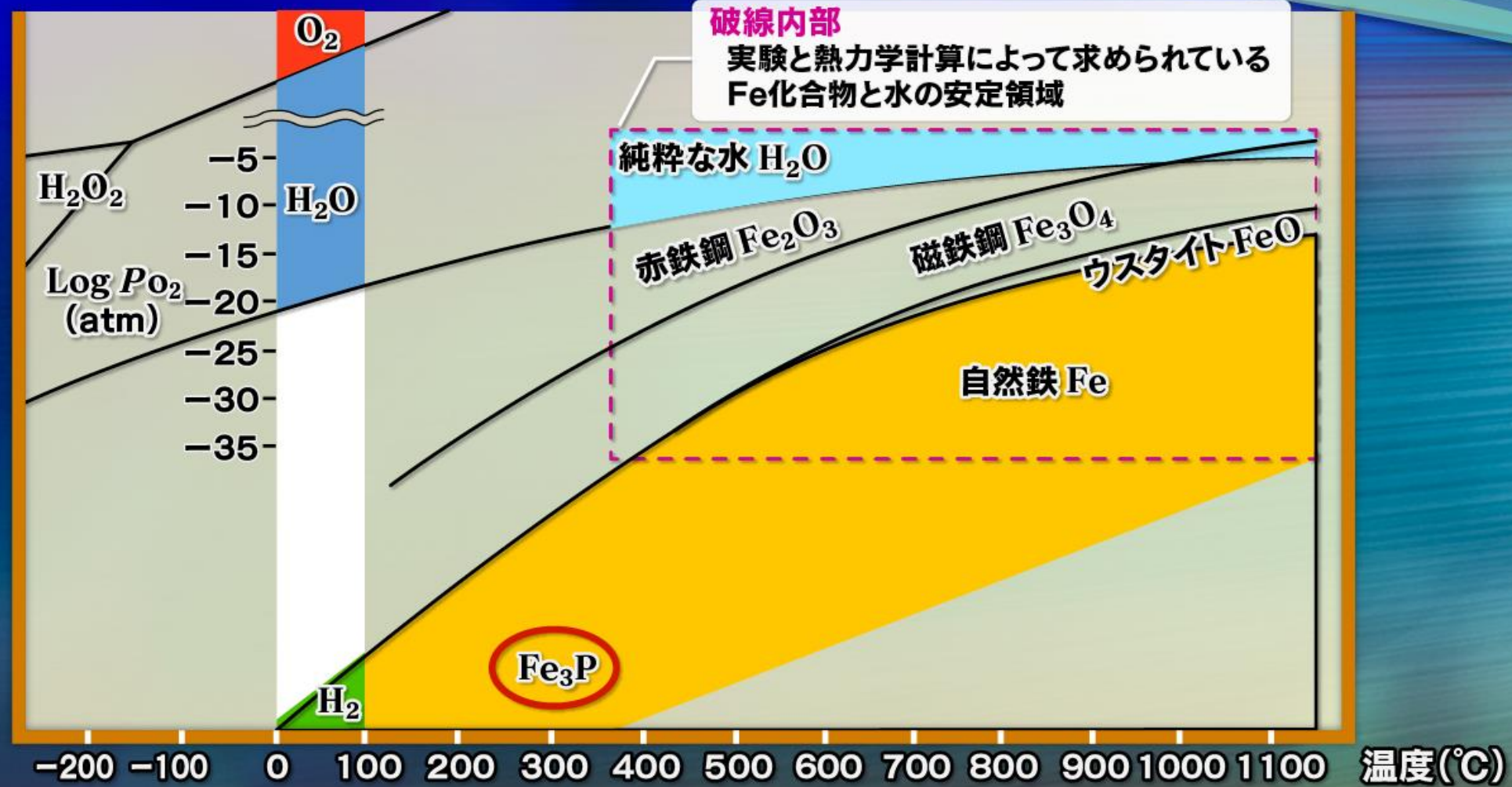


大気・海洋なし



大気・海洋あり

安定領域が極端に違う物質の化学反応

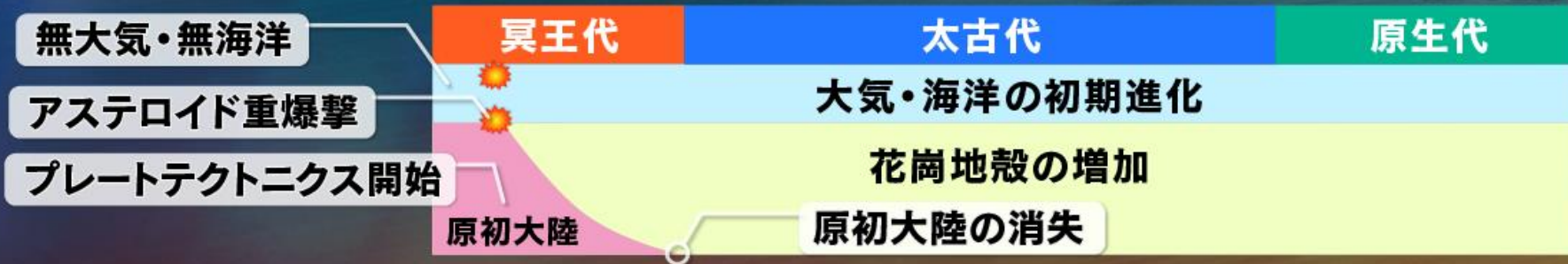
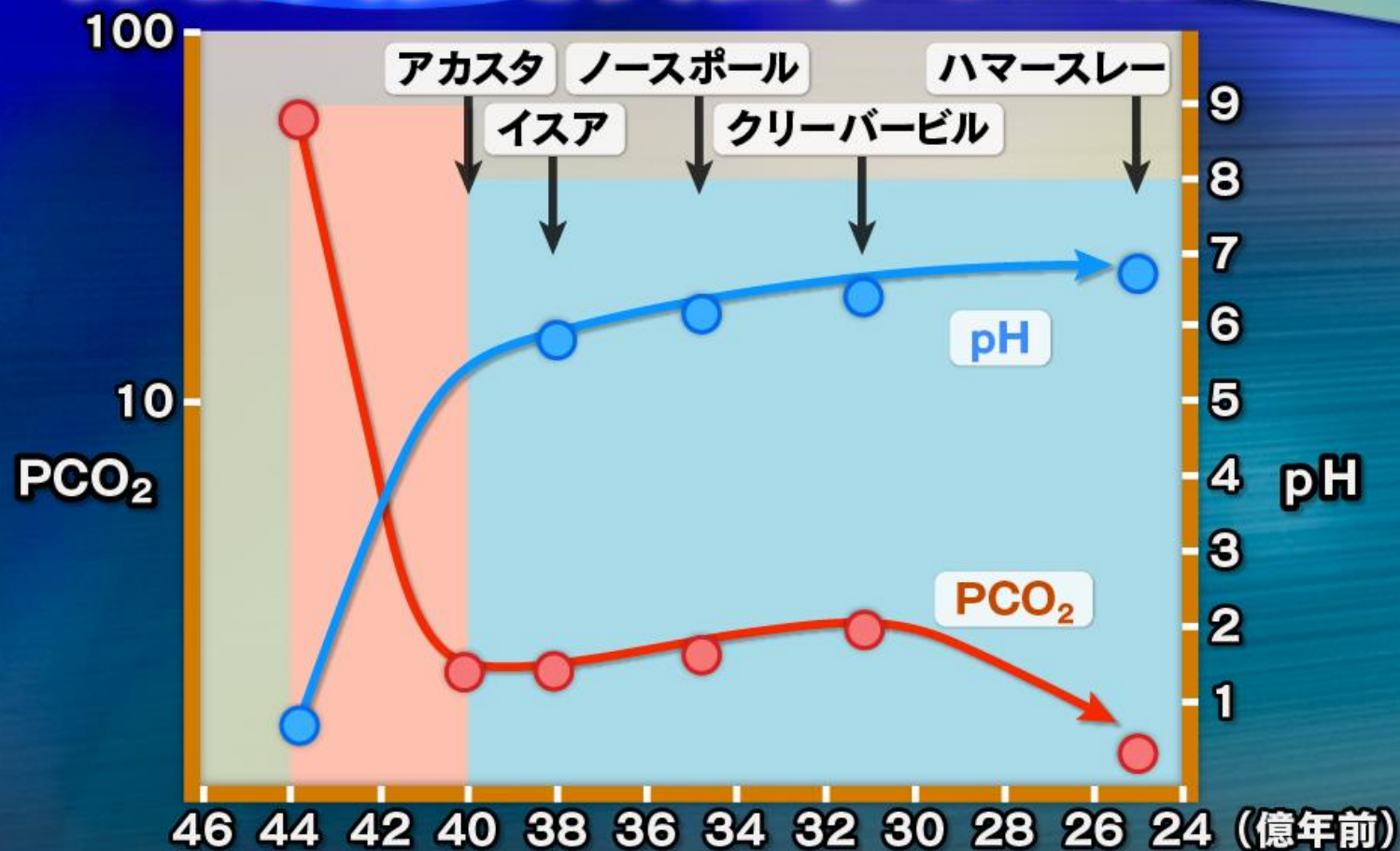


生命現象に至る前駆的化學進化は CO_2 、 N_2 、 H_2O が Fe_3P と化學反応することから始まり、その後誕生した生命はさらに40億年以上絶え間なく連鎖反応し続けた

原始地球表層の大気の質と量

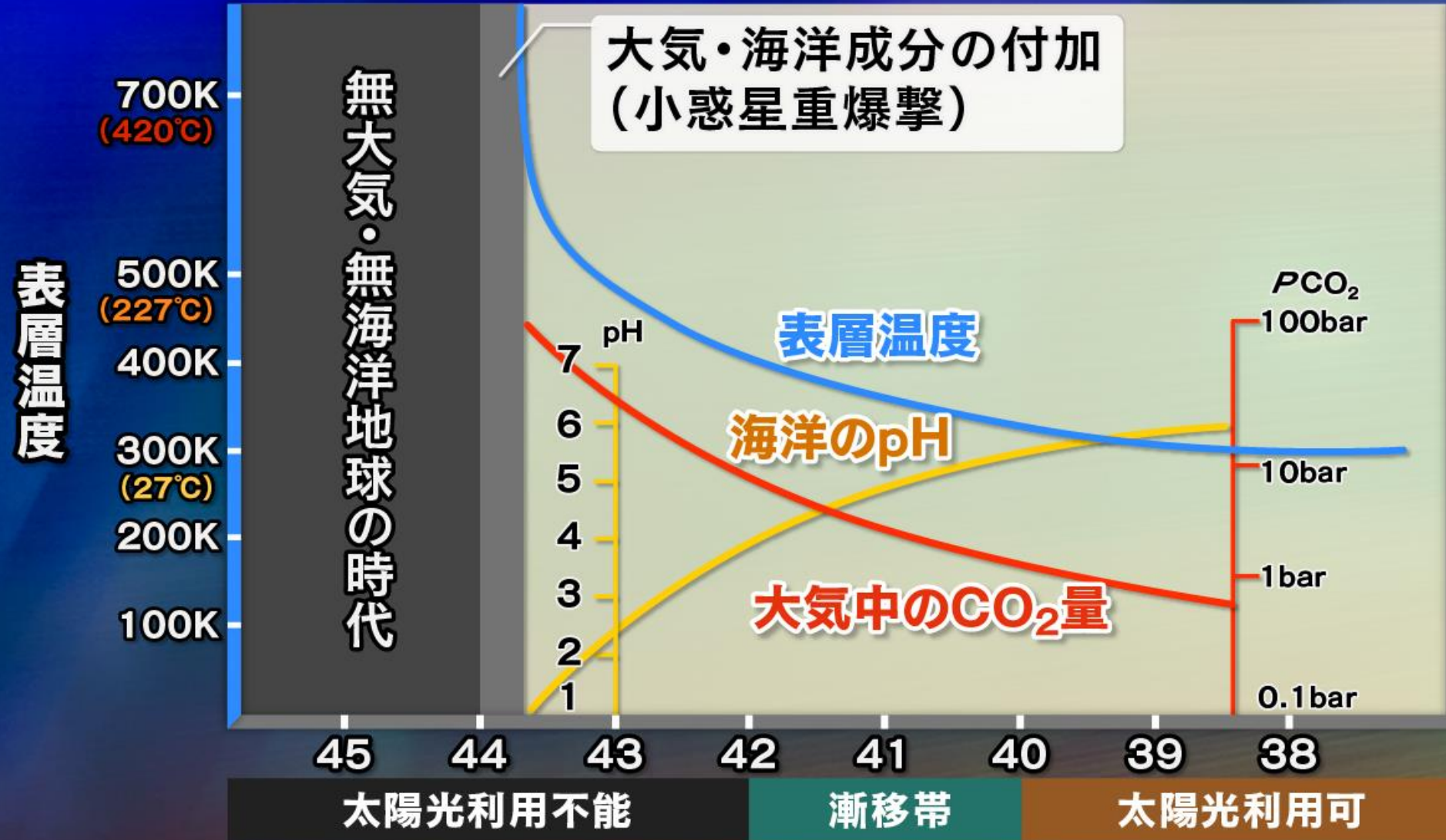
- 1 現在の地球の表層に残された石灰岩 (CaCO_3) + 石炭・石油・天然ガス + 堆積岩中の有機物 = 80-100気圧 + マントルの炭素
- 2 炭素質コンドライトの水と有機物含有量から海洋質量 = 4km厚として、有機物量 (CH_2O) を計算
- 3 両者のずれをマントル炭素とする

原初大陸を実証するには？



いつから太陽光を使えるようになったのか？

文明を持つ惑星への進化の鍵

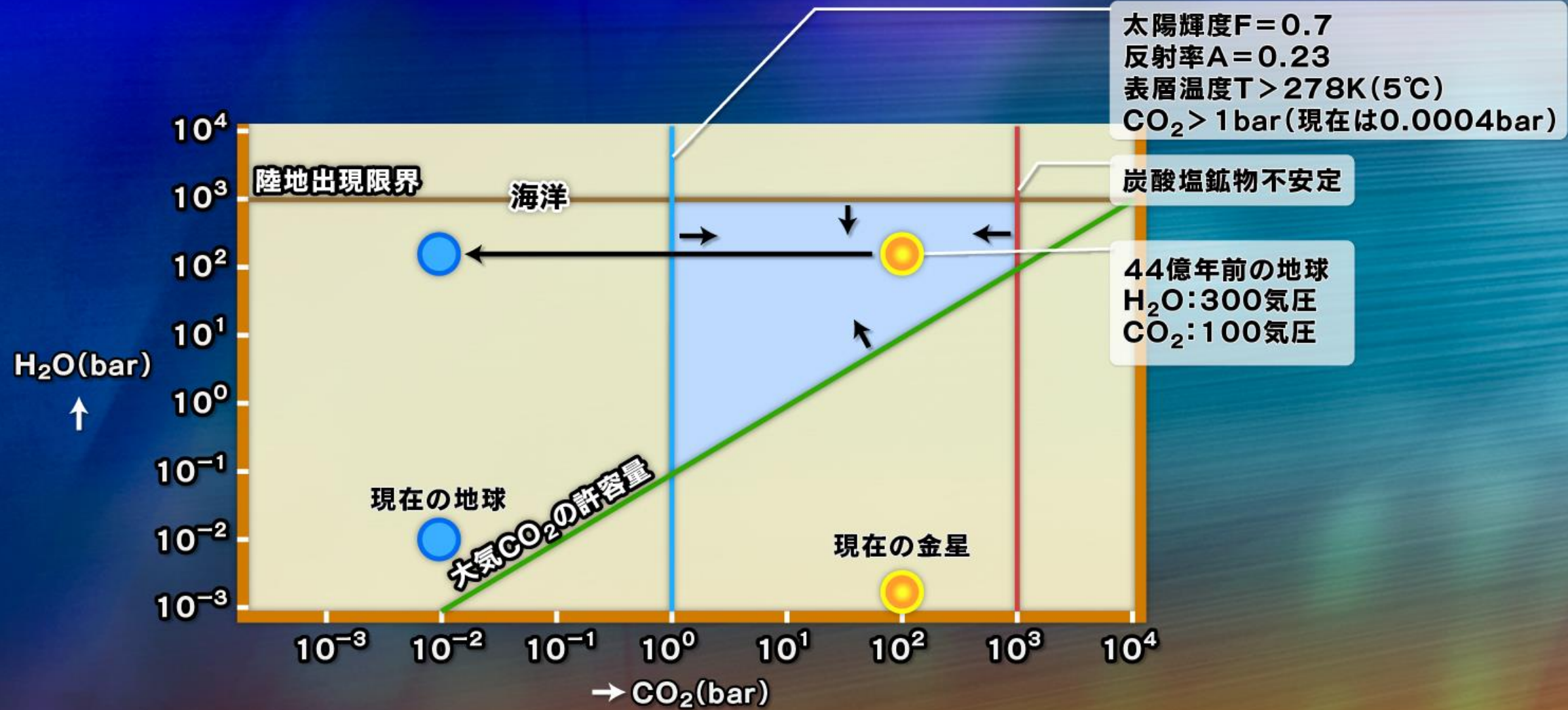


原始地球表層環境進化が如何に重要か！

新井君パワポ

44億年前の地球表層環境

地表に液体の水が存在できる条件



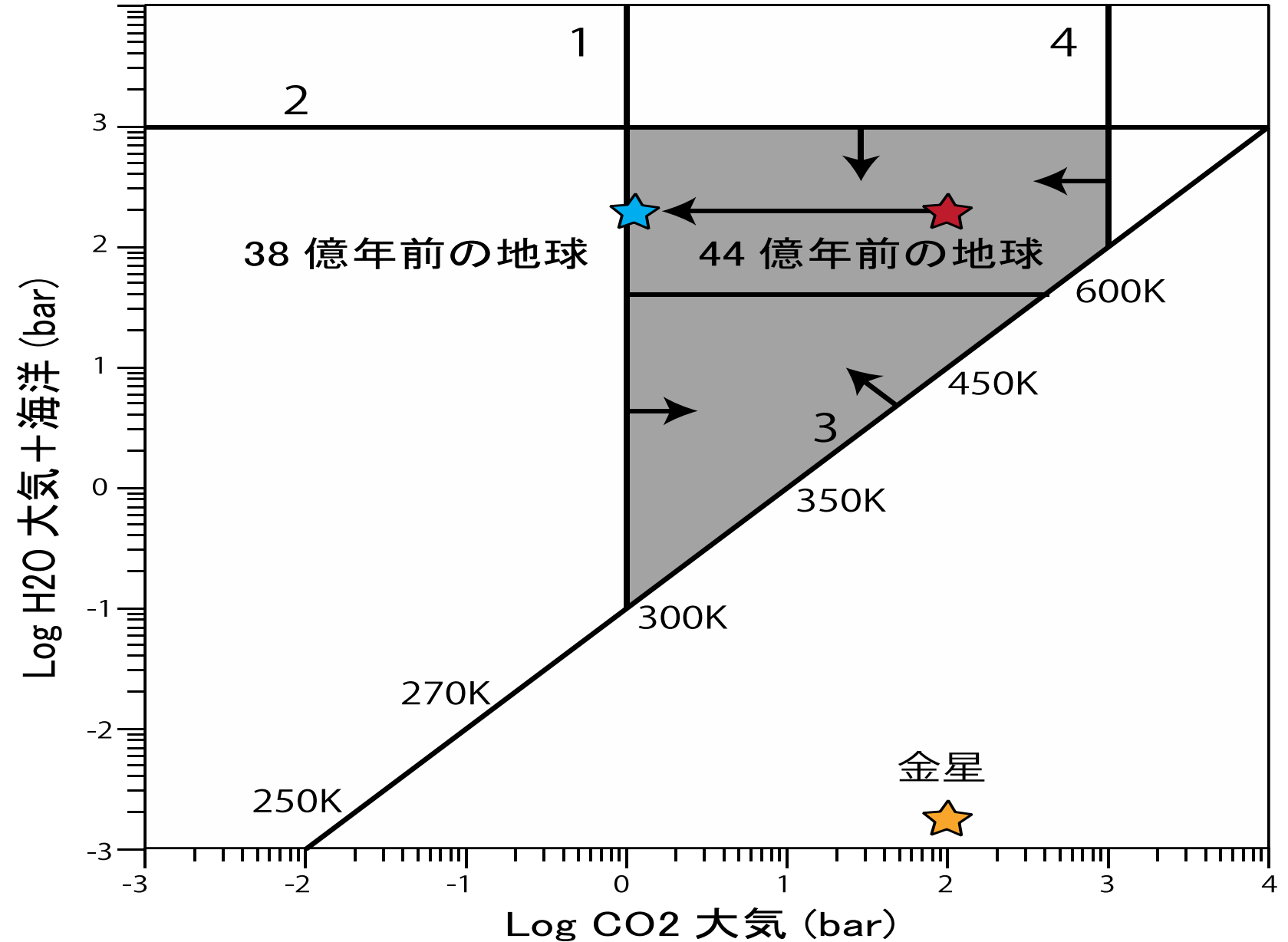
CO₂大気分圧と水の存在条件

前提条件

- 太陽輝度 $F=0.7$
- 反射率 $A = 0.23$

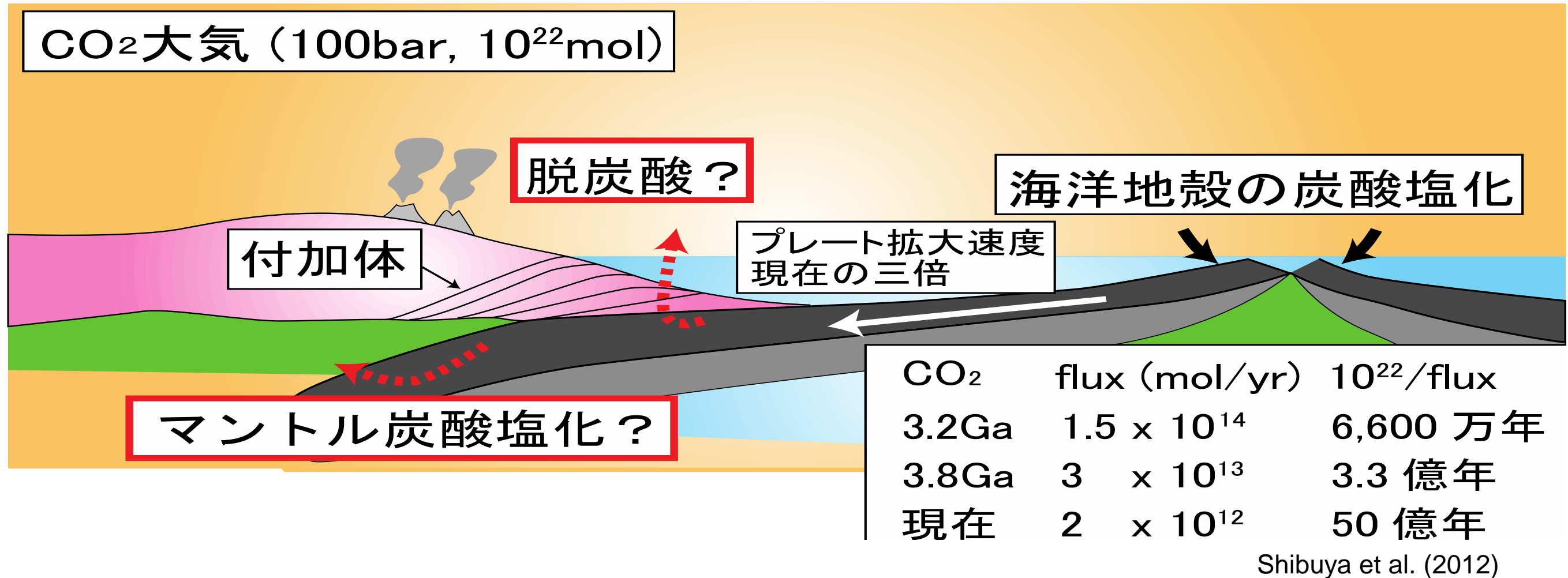
制約条件

1. $T > 278\text{K}$
2. 陸地出現
3. 大気CO₂条件下におけるH₂O飽和水蒸気圧
4. H₂Oの臨界点温度



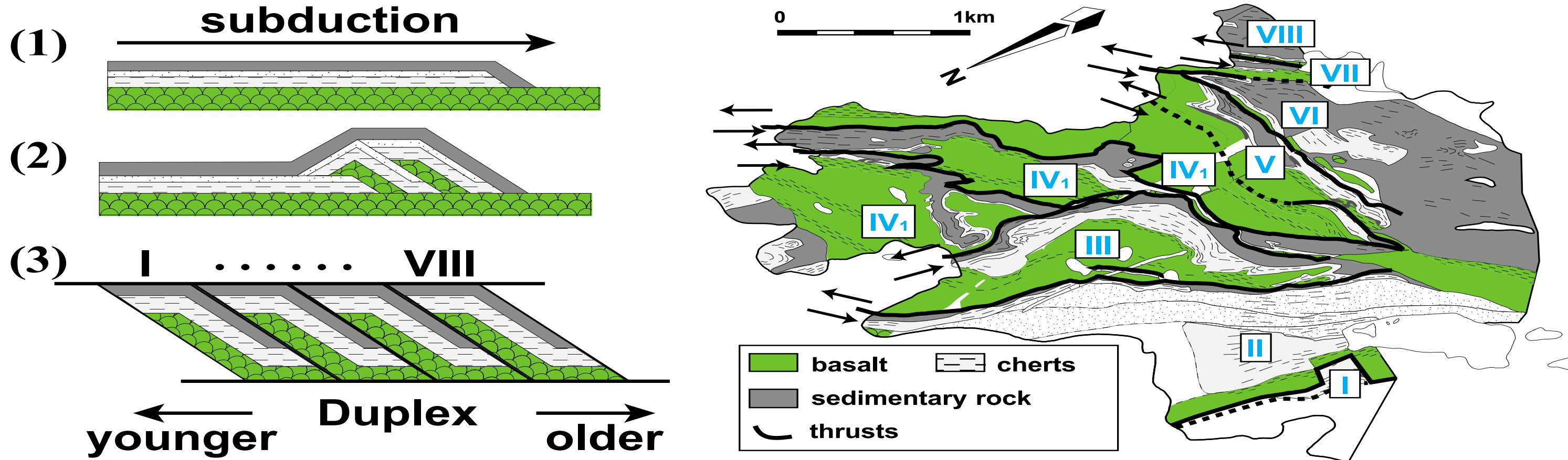
- 金星: 暴走温室効果による水素散逸でH₂Oが無くなった
- 地球: 暴走温室効果はなく、液体の水は存在. 38億年前までにCO₂は数bar以下
- どのようにして100barのCO₂大気を固定したのか?

海洋地殻の炭酸塩化と沈み込み



- 中央海嶺熱水反応で海洋地殻が炭酸塩化 ■ 沈み込み帯でマントルへ運ぶ Sleep et al. (2001)
- 問題点 沈み込み温度圧力下で炭酸塩が分解、地表へ戻る可能性
- 解決方法
 - 初期地球の沈み込み帯の温度圧力を制約

38億年前の付加体：イスア表成岩



Komiya et al. (1999)

- 付加体：沈み込み帯で形成される地質
- 変成帯：沈み込み帯の温度圧力を記録
- グリーンランド・イスア表成岩：38億年前の付加体・変成を受けている
→初期地球沈み込み帯の地温勾配を記録

Komiya et al. (1999)

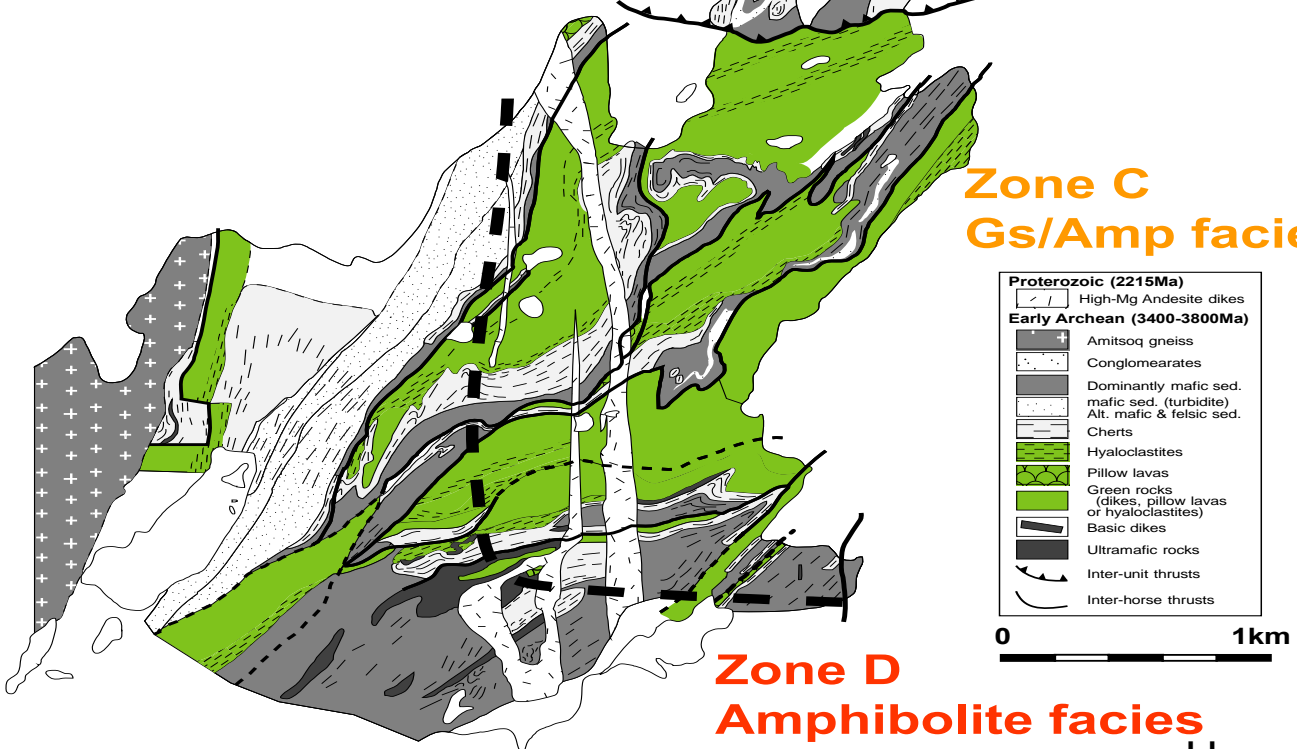
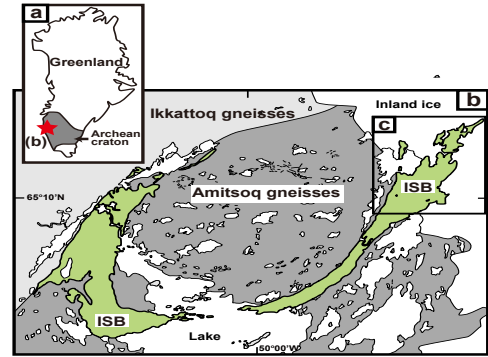
変成分帯

Zone A
Greenschist facies

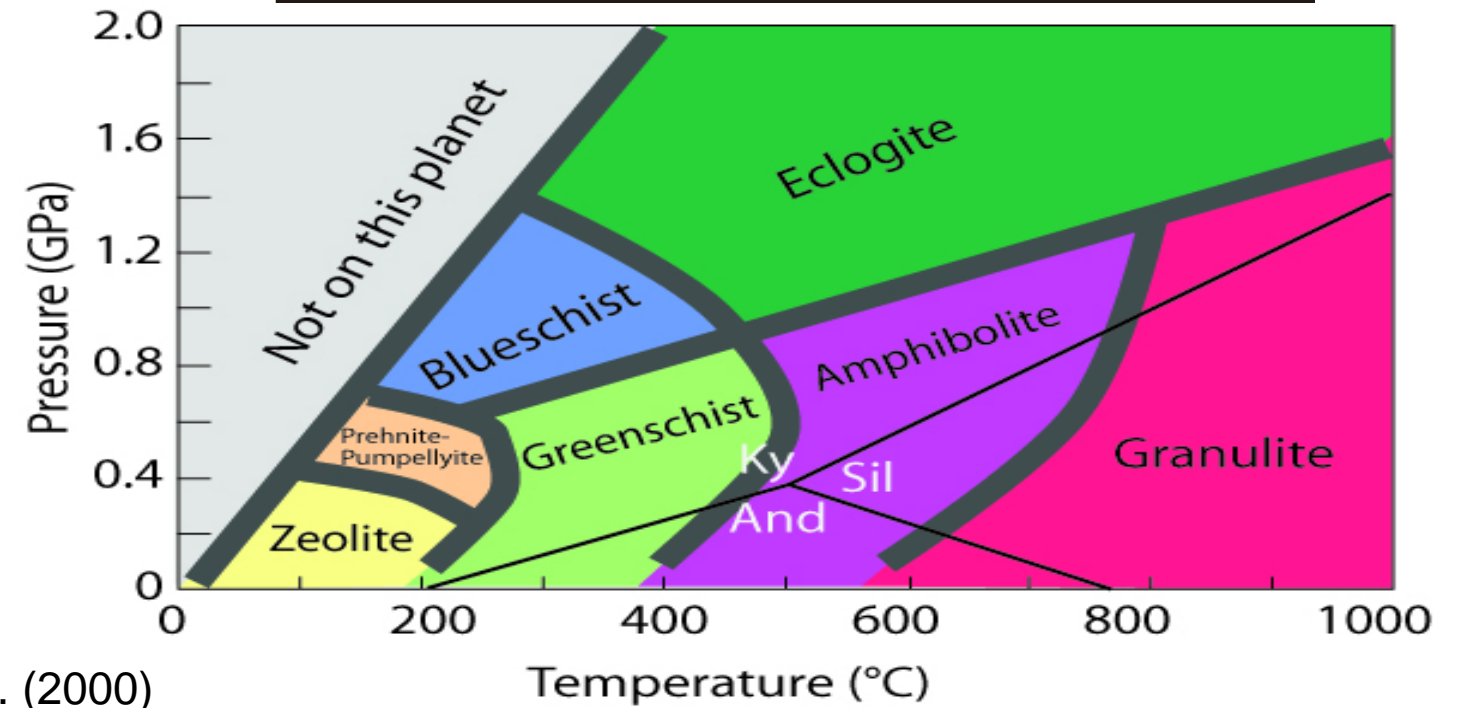
Zone B
Gs/Amp facies

Zone C
Gs/Amp facies

Zone D
Amphibolite facies



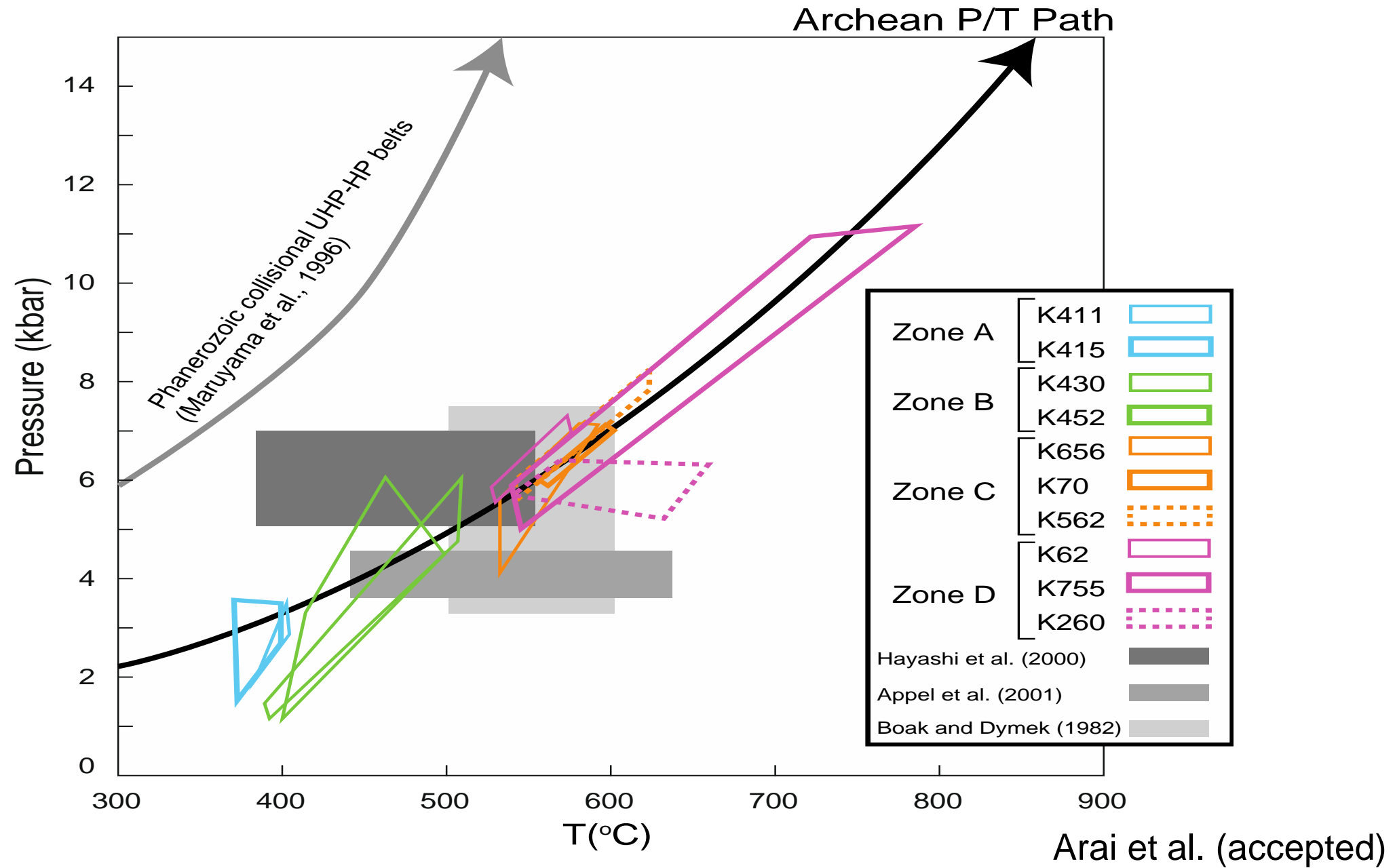
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D
chl				
ep				
cal				
act				
hbl				
grt				
cum				
bt				
qz				
ab				
Ca-plg				
metamorphic facies	Gs	Gs/Amp	Gs/Amp	Amp



Hayashi et al. (2000)

- 南に向かい緑色片岩相から角閃岩相へ上昇 Hayashi et al. (2000)
- 本研究では熱力学計算による詳細な変成PTの制約を行う

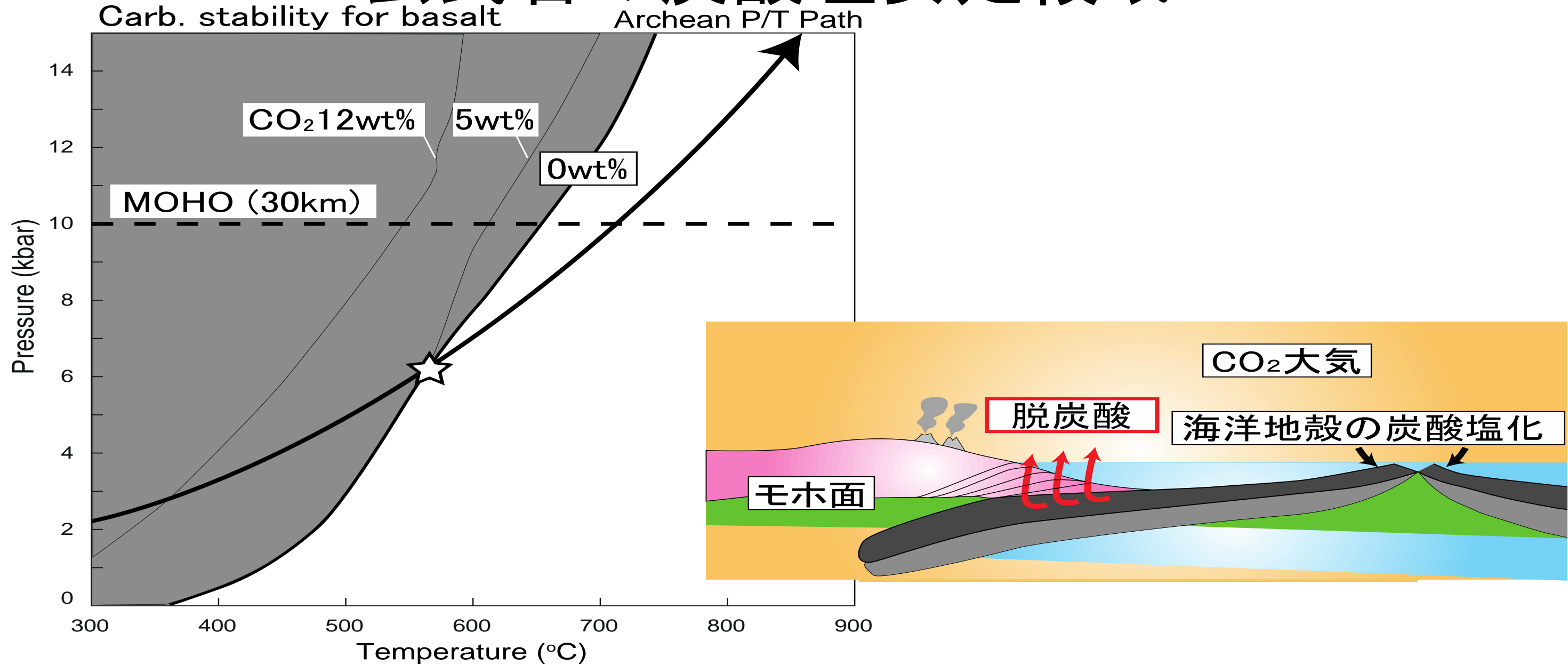
太古代沈み込み帯の地温勾配



- 変成PTが3kbar 380°Cから6kbar, 560°Cへ単一増加

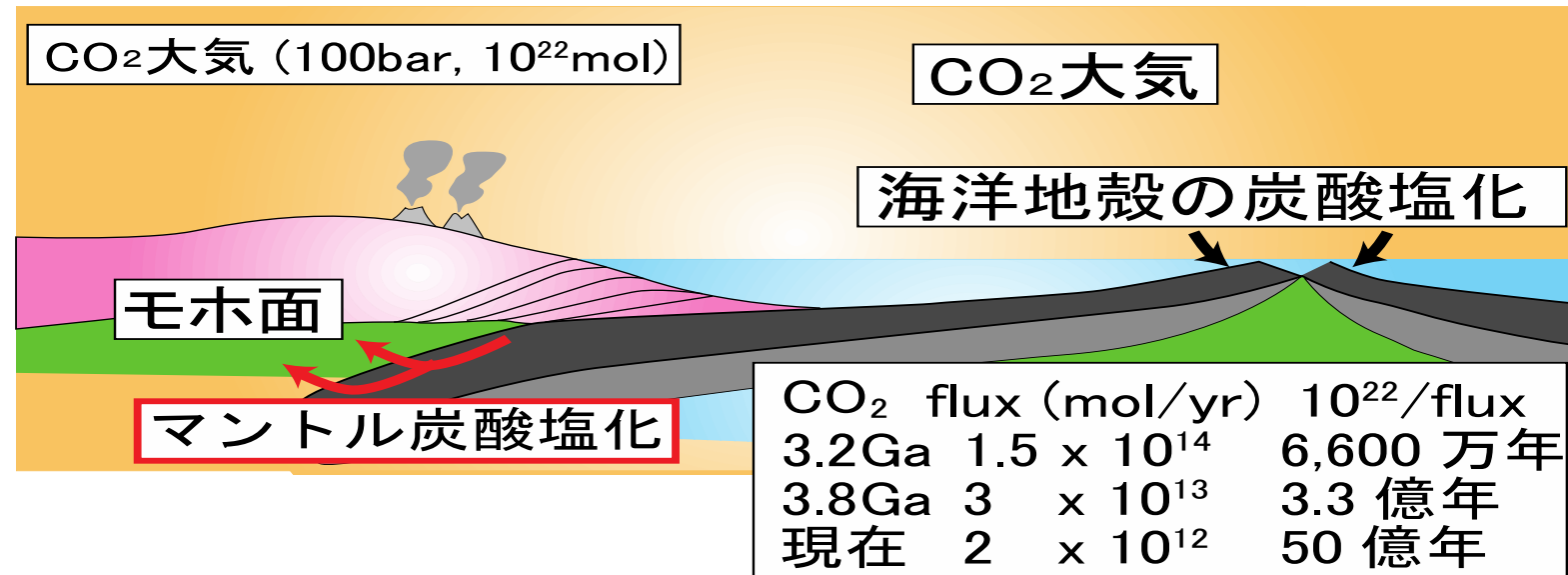
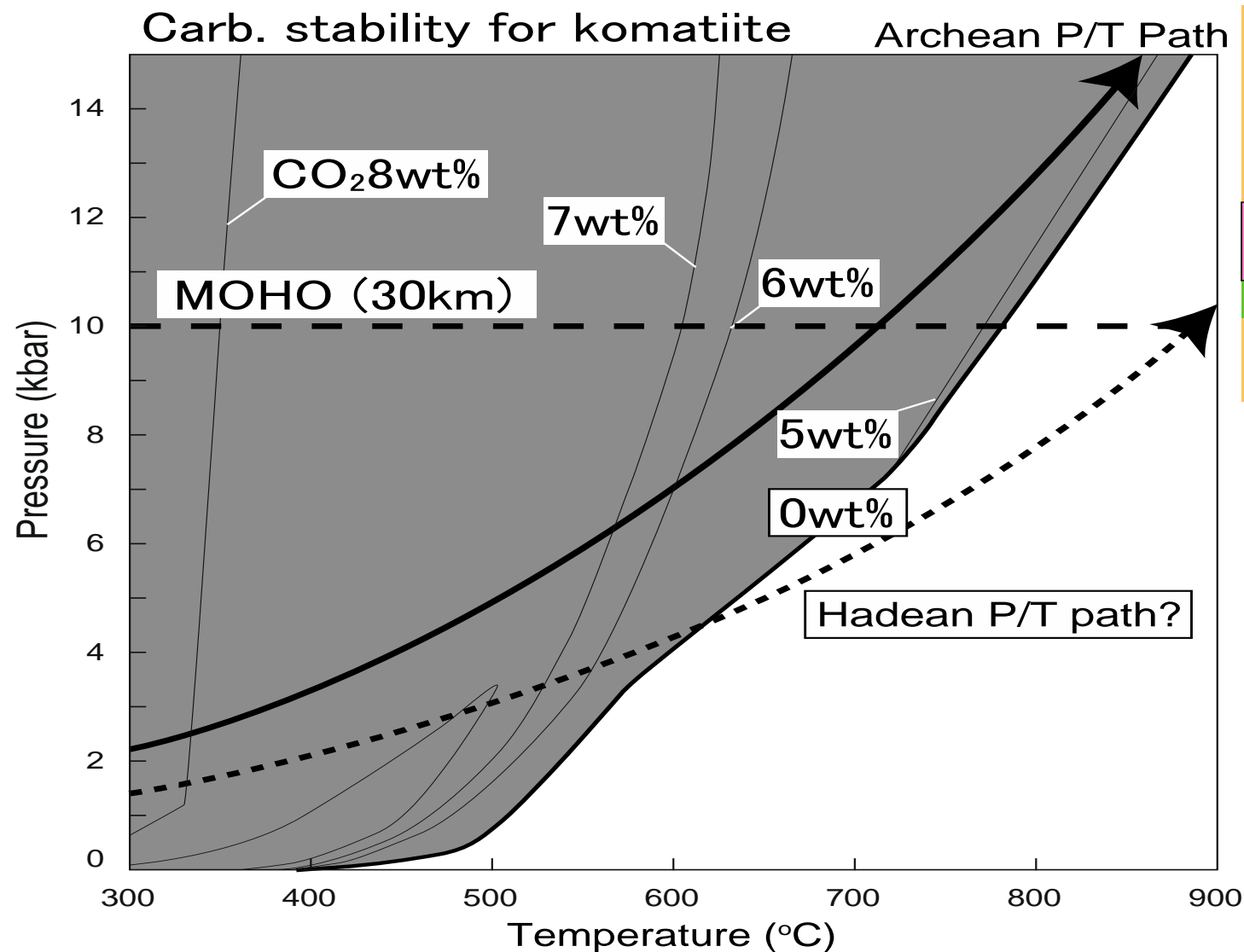
太古代沈み込み帯の地温勾配は現在より約300°C高い

玄武岩の炭酸塩安定領域



- 38億年前は玄武岩海洋地殻
- 玄武岩質の海洋地殻における炭酸塩安定領域を

コマチアイトの炭酸塩安定領域



CO₂をマントルへ運ぶ過程で考慮すべき条件

1. マントルポテンシャル温度
2. 海水pH
3. 沈み込み帯温度

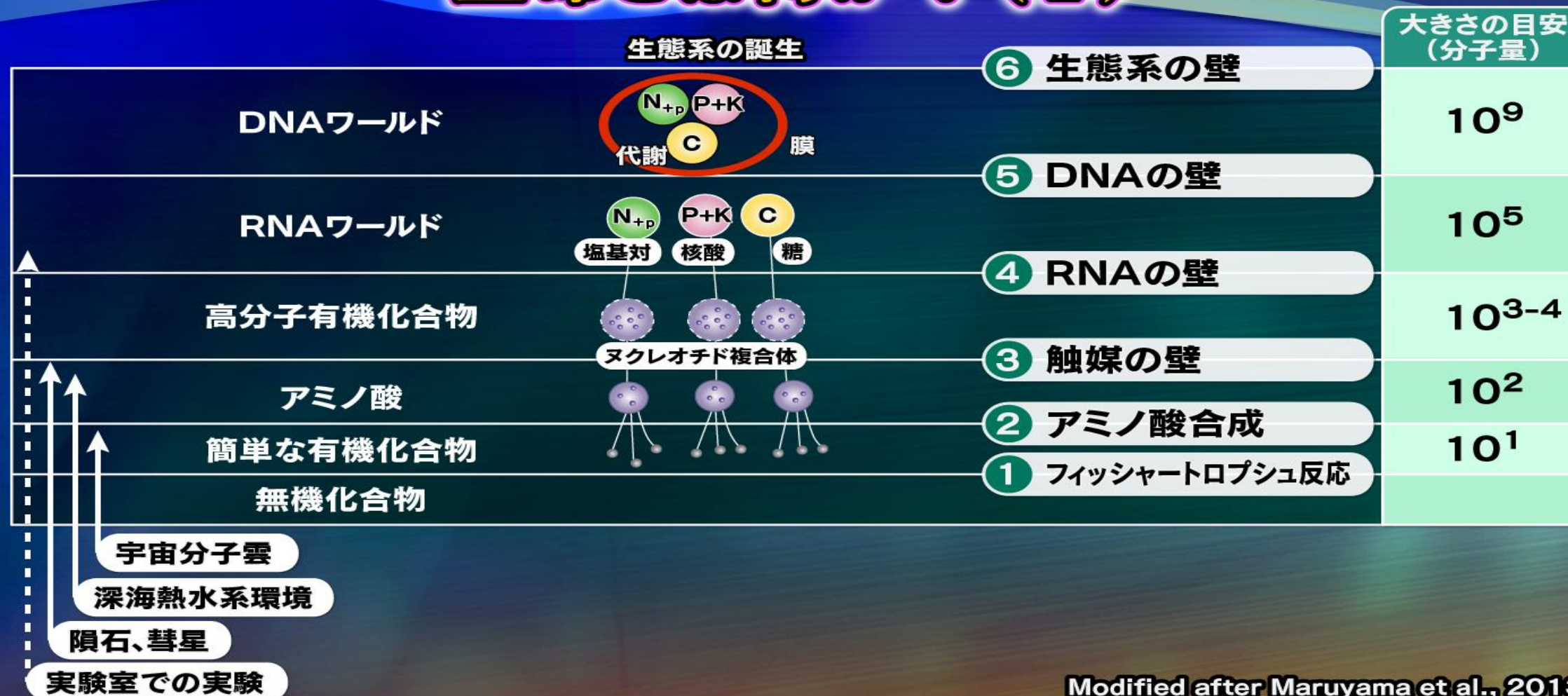
- 冥王代マントルは太古代より200°C高い. コマチアイトの海洋地殻か

何故原始惑星の表層環境進化の研究 が必要か？

- 1 生命の起源と進化を決定的に支配
- 2 研究が何故困難か？ 答え：超学際分野；信じられない程の困難（論理が理解できる研究者が極端に少ない：ELSI）
- 3 逆にチャンス：超学際集団をどうアレンジし、ゴールに向かって進めるか？

2 What is life and necessary conditions to bear life

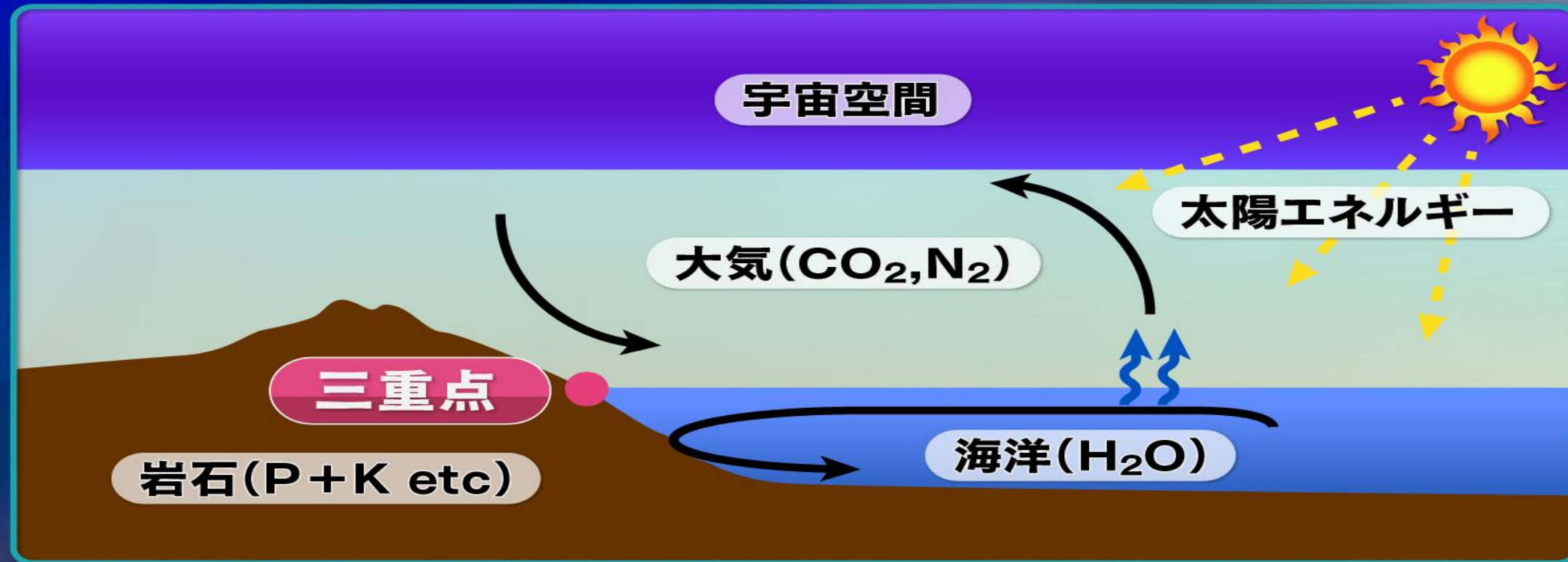
生命とは何か？(1)



Modified after Maruyama et al., 2013

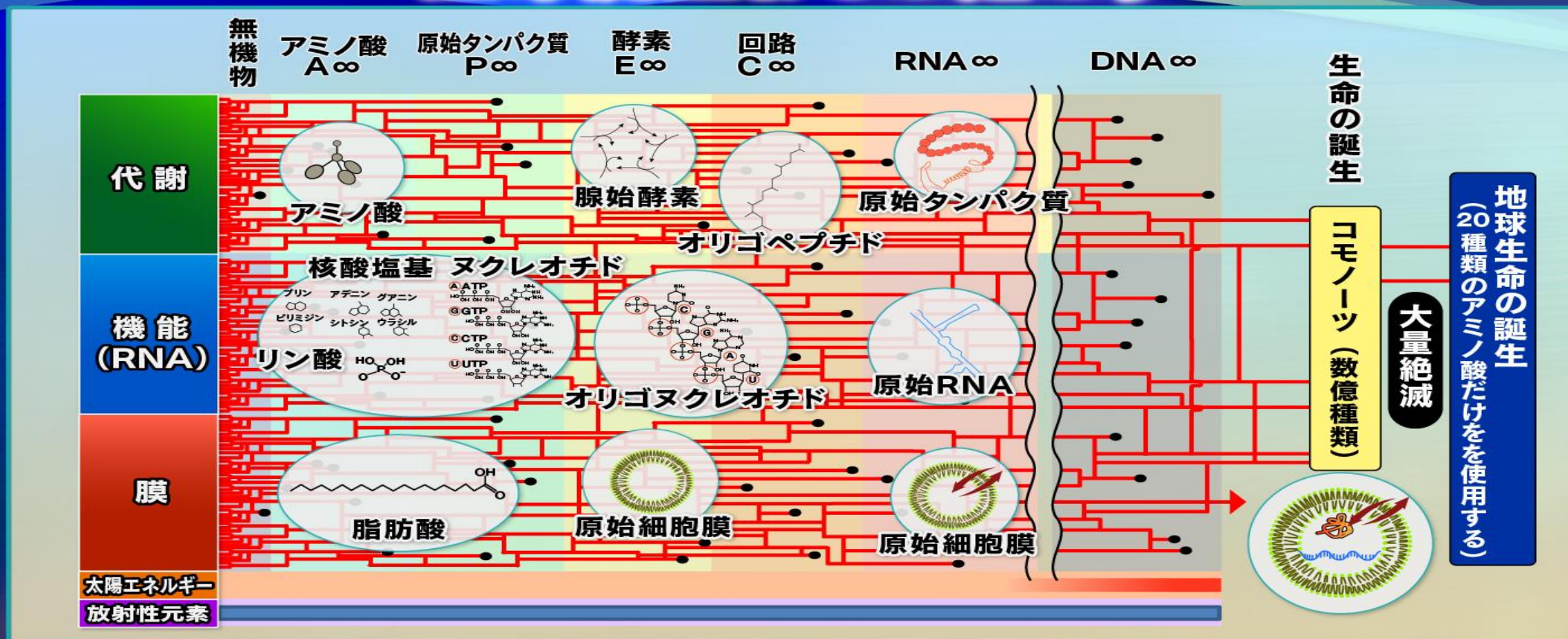
“Habitable Trinity” モデル

大気・海洋・大陸の共存と太陽エネルギーによる定常的物質循環



(Dohm and Maruyama, 2014)

生命誕生までの道のり

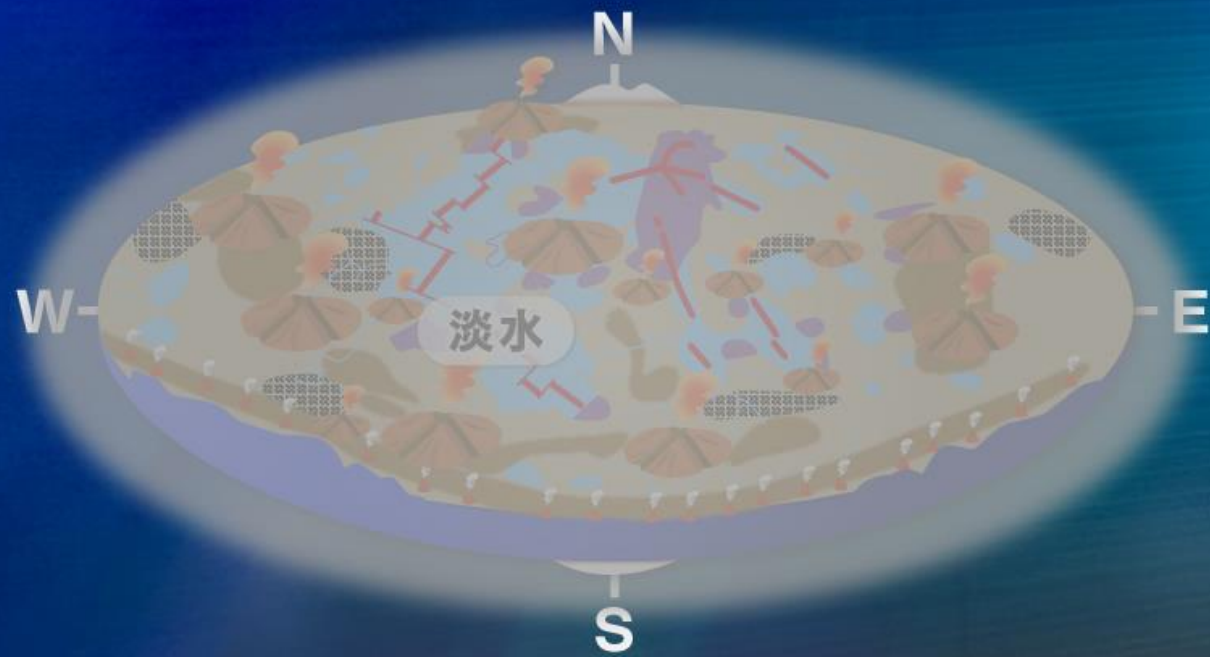


互いに矛盾する環境場でのみ起きる多段階の前駆的生命進化プロセスを可能にする誕生場とは？

3 Hadean surface environment of Earth

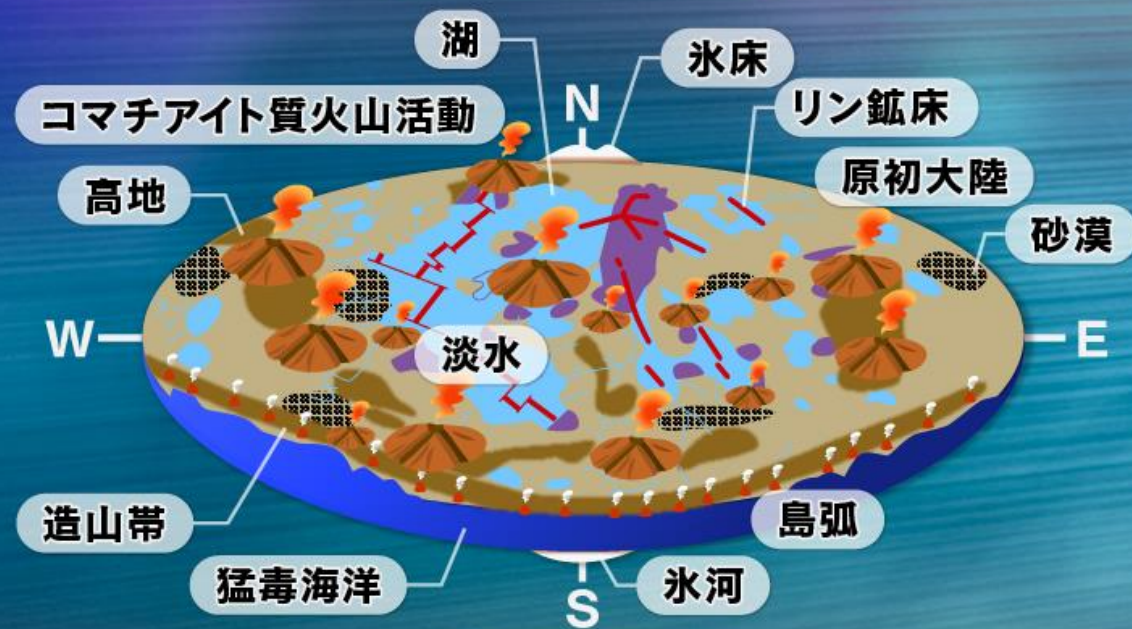
多様で動的な冥王代表層環境

44億年前



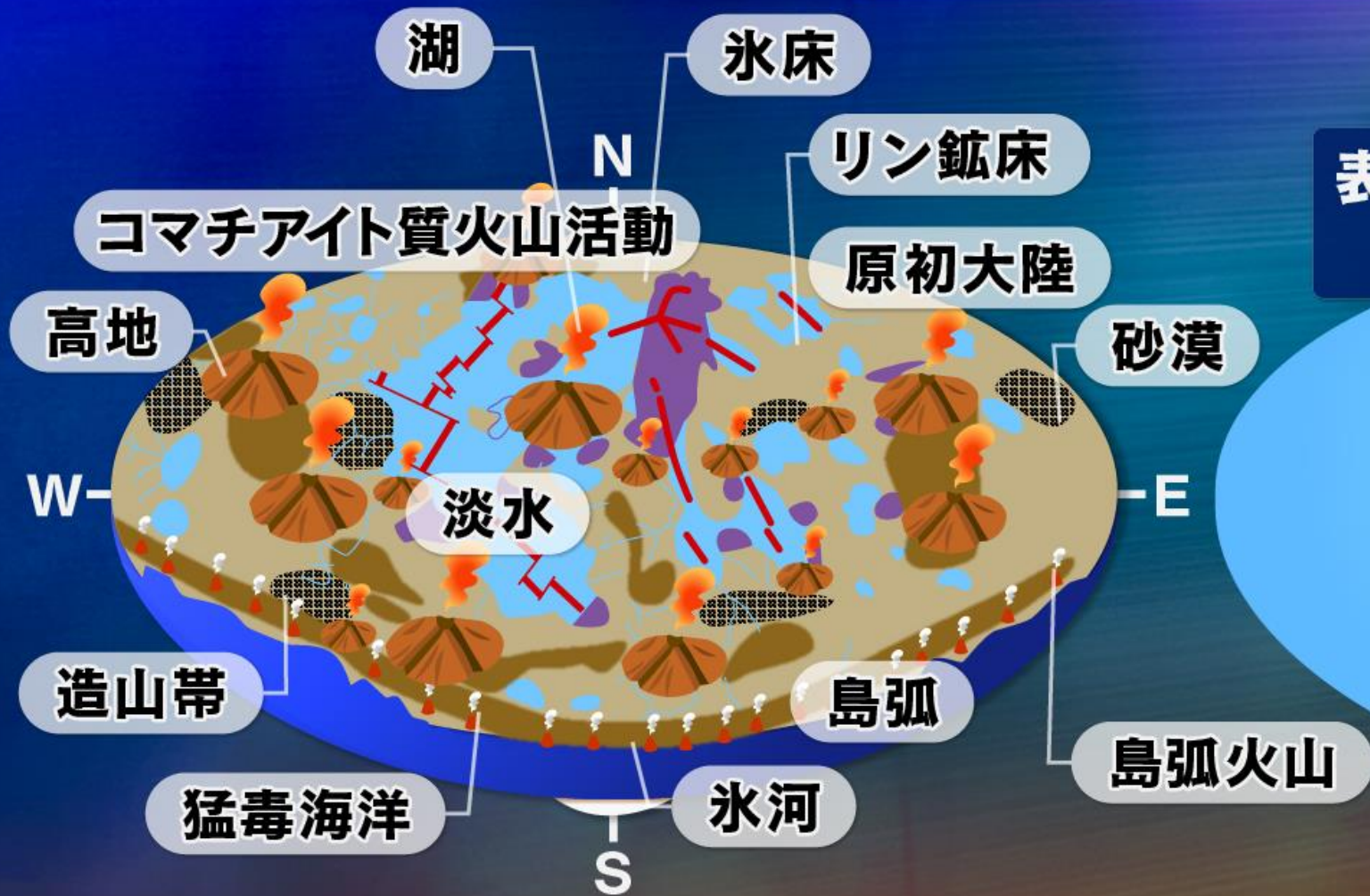
厚い大気

40億年前



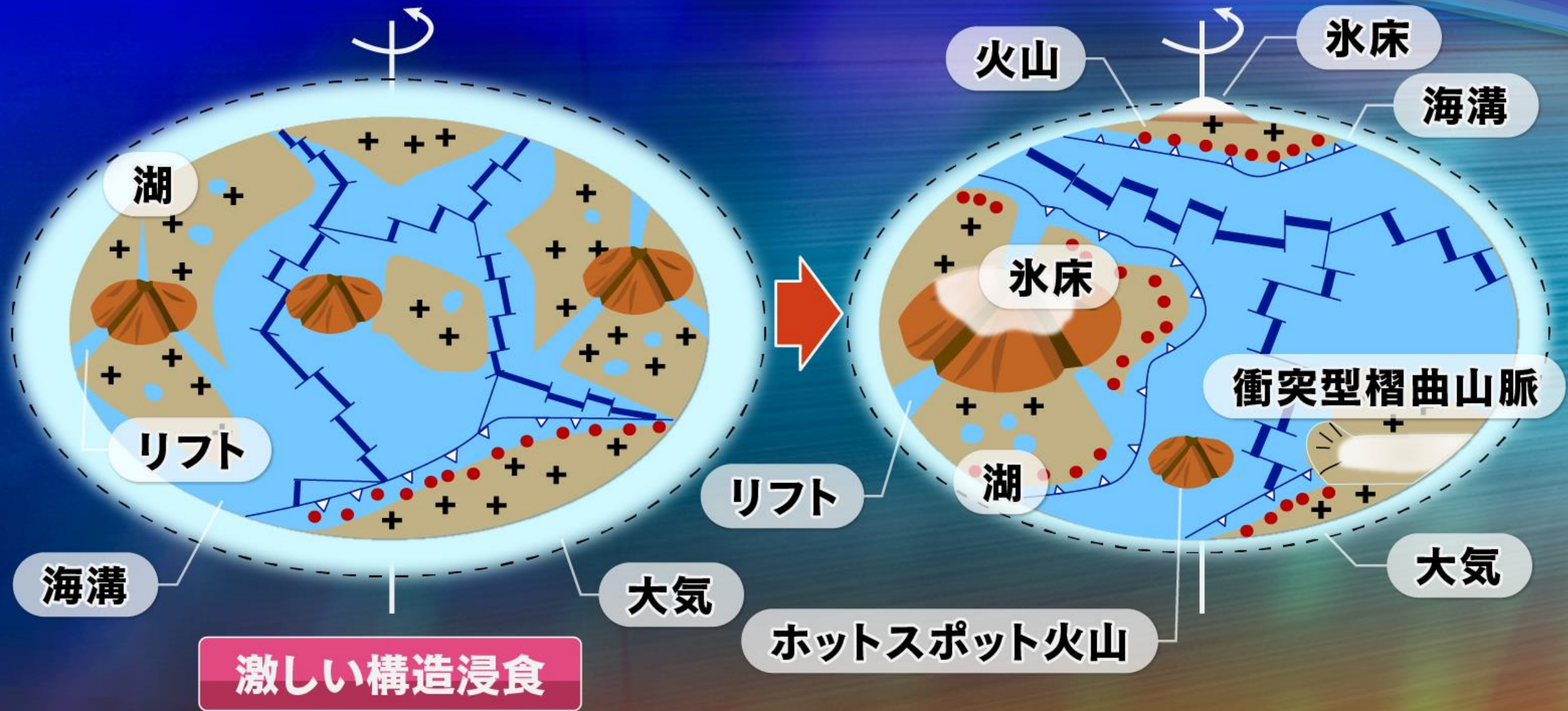
多様な表層環境1：自然地理と表層地質

40～44億年前



表層が海洋で覆われると
環境多様性が失われる

多様な表層環境2: 動的な変化



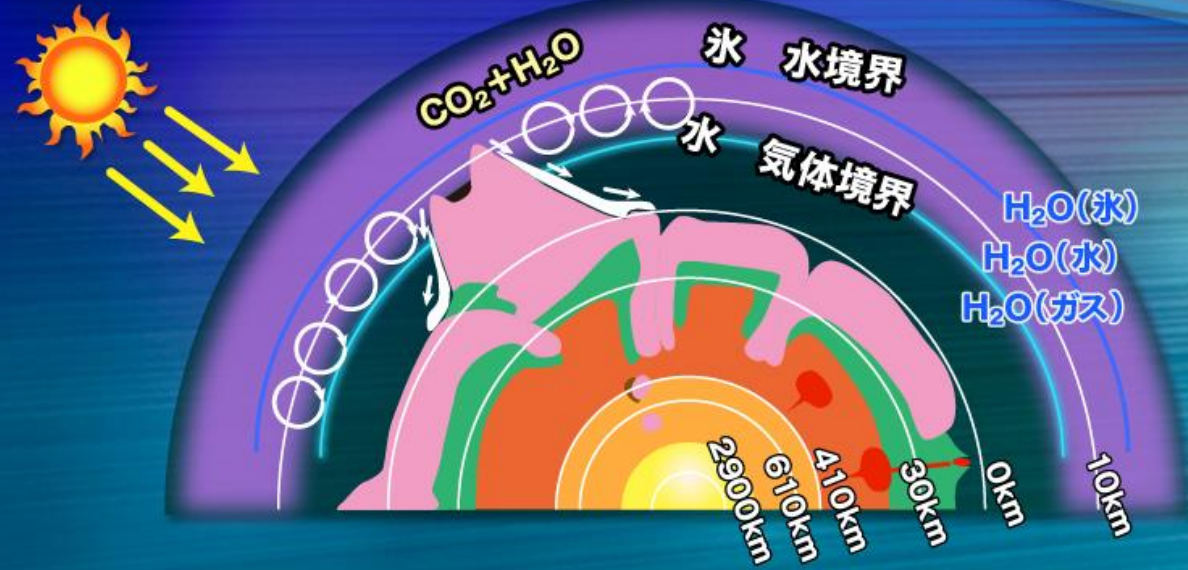
多様な表層環境3：地球外要因と高速自転



多様な表層環境4：原始大気と海洋の量と組成の急激な変化

44億年前

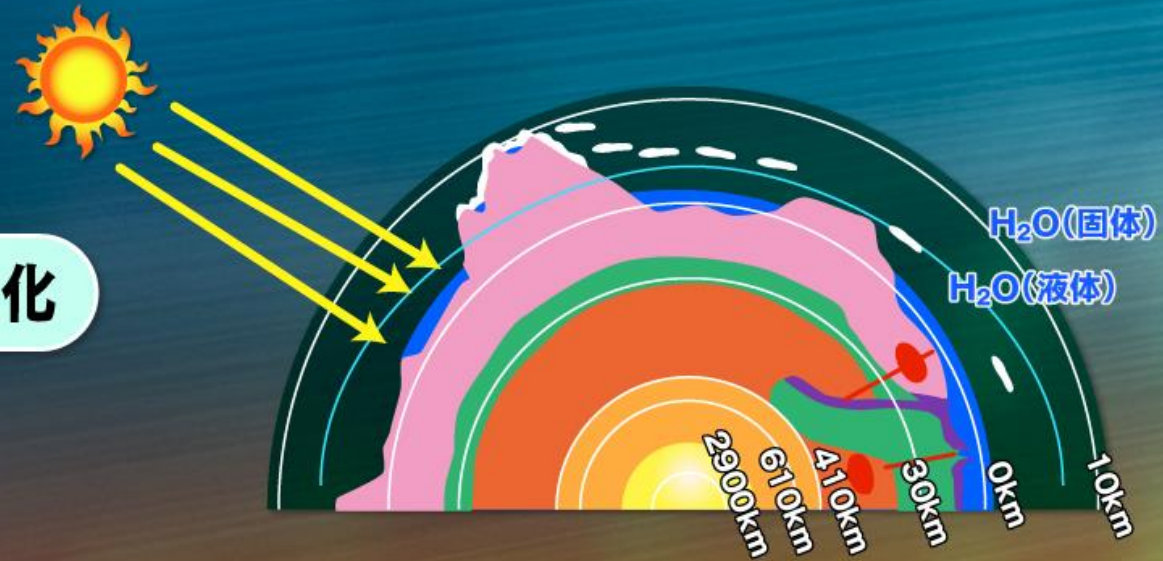
厚い原始大気(暗黒の時代)



40億年前

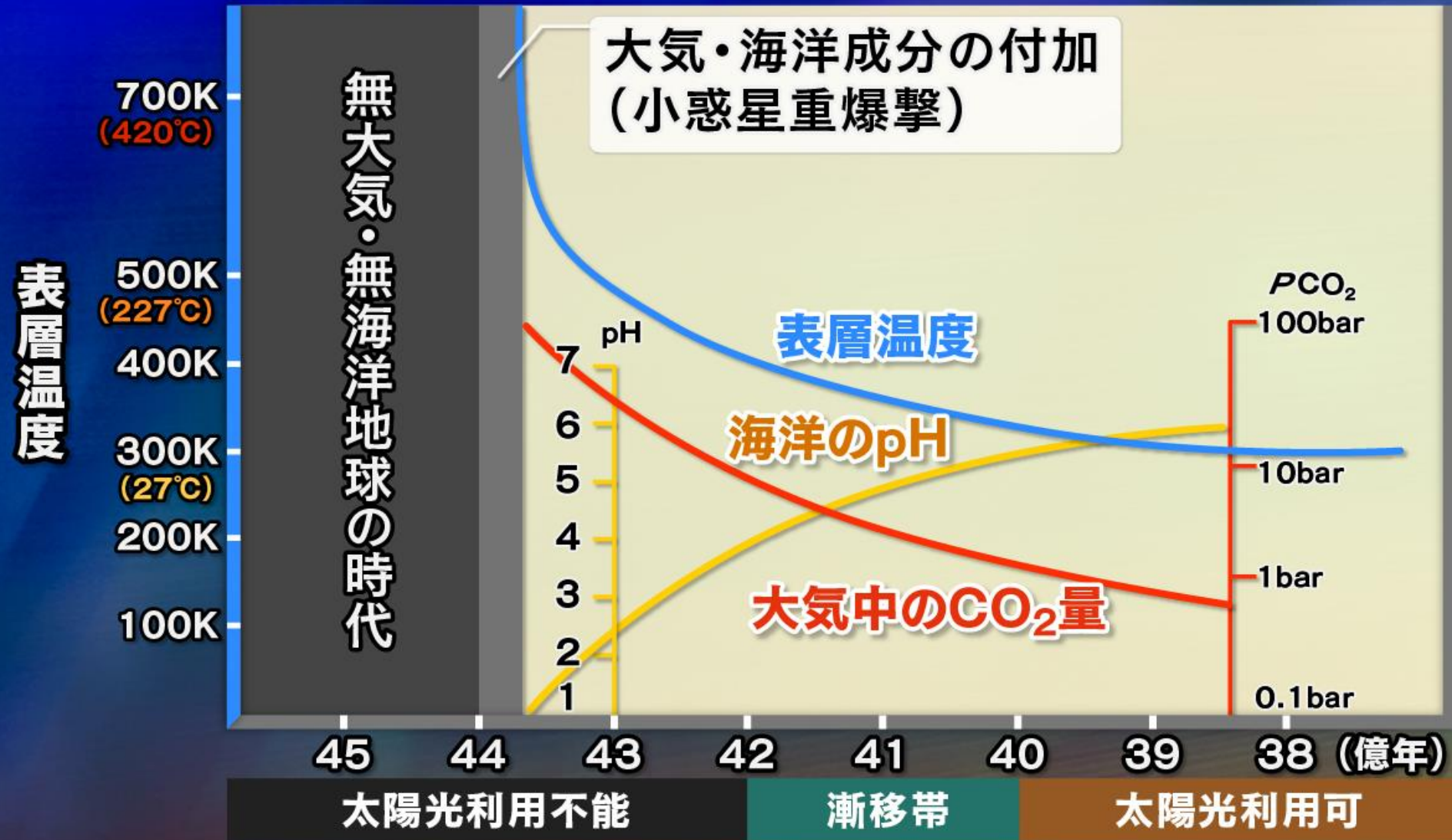
原始海洋の誕生と中性化

薄い原始大気と太陽光の利用



大気中のCO₂減少と海洋pHの減少

文明を持つ惑星への進化の鍵



Necessary conditions to bear life

生命の誕生場はどこか？

環境的要素	原始大陸上 温泉説	中央海嶺 熱水系説	火星説	宇宙説
酸化的大気(CO ₂ -H ₂ O, O ₂ なし)	○	×	○	×
窒素の供給	○	×	○	×
局所還元的アルカリ熱水系	○	○	?	×
乾湿反復環境	○	×	○	×
多様な鉱物 (Ni,Co,Fe3P)	○	△	?	○
KREEP玄武岩	○	×	?	×
ウラン鉱床	○	×	?	×
放電 (落雷)	○	×	?	×
太陽エネルギー	○	×	○	×
低温アンモニア合成(An+)	○	×	?	×
還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
周期性のある環境	○	×	?	×
エネルギー供給源 (太陽が使えない)	○	×	?	×

ロードマップ：惑星大気の進化

- 1 地球
- 2 金星、火星
- 3 ガス惑星の衛星
- 4 系外惑星の大気：普遍性を持つ惑星大気の起源と進化論（生命を育む惑星への道筋）

1 地球

- 1 冥王代地球表層環境の進化
- ○次の課題:水の量の違いが生み出す表層環境の多様性
- ○次の課題:原始大気・海洋組成に固体地球から供給される酸素の量(有機物=CH₂O vs 300気圧の酸化剤=H₂O)→直接実験(500°C、水+有機物)
- 2 初期海洋質量に依存した大気・海洋循環の一般化

地球に飛来した炭素：原始大気の酸化還元度

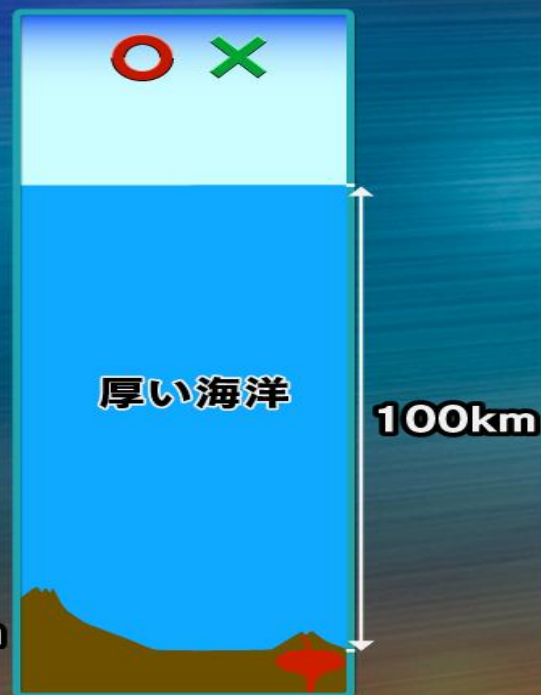
- 1 地球に残る証拠から原始大気のCO₂を求めると、約100気圧だが、炭素の起源を有機物に換算すると、炭素(C H₂Oと仮定)の総量は000トンで、水と等量(分子)
- 2 これが酸化的H₂O(+少量のN₂)と反応して、CO₂ 100気圧(内訳: CH₄, HCN、COを創り、残り80気圧のCO₂)と300気圧の水になるか？
- 3 ならない場合、酸素を原始大陸から引き抜く必要が生まれる。その場合、どれだけの酸素をどのようにして原始大気に移動させるか？

実験によって直接原始大気の組成
を決める(三朝)

水惑星の分類

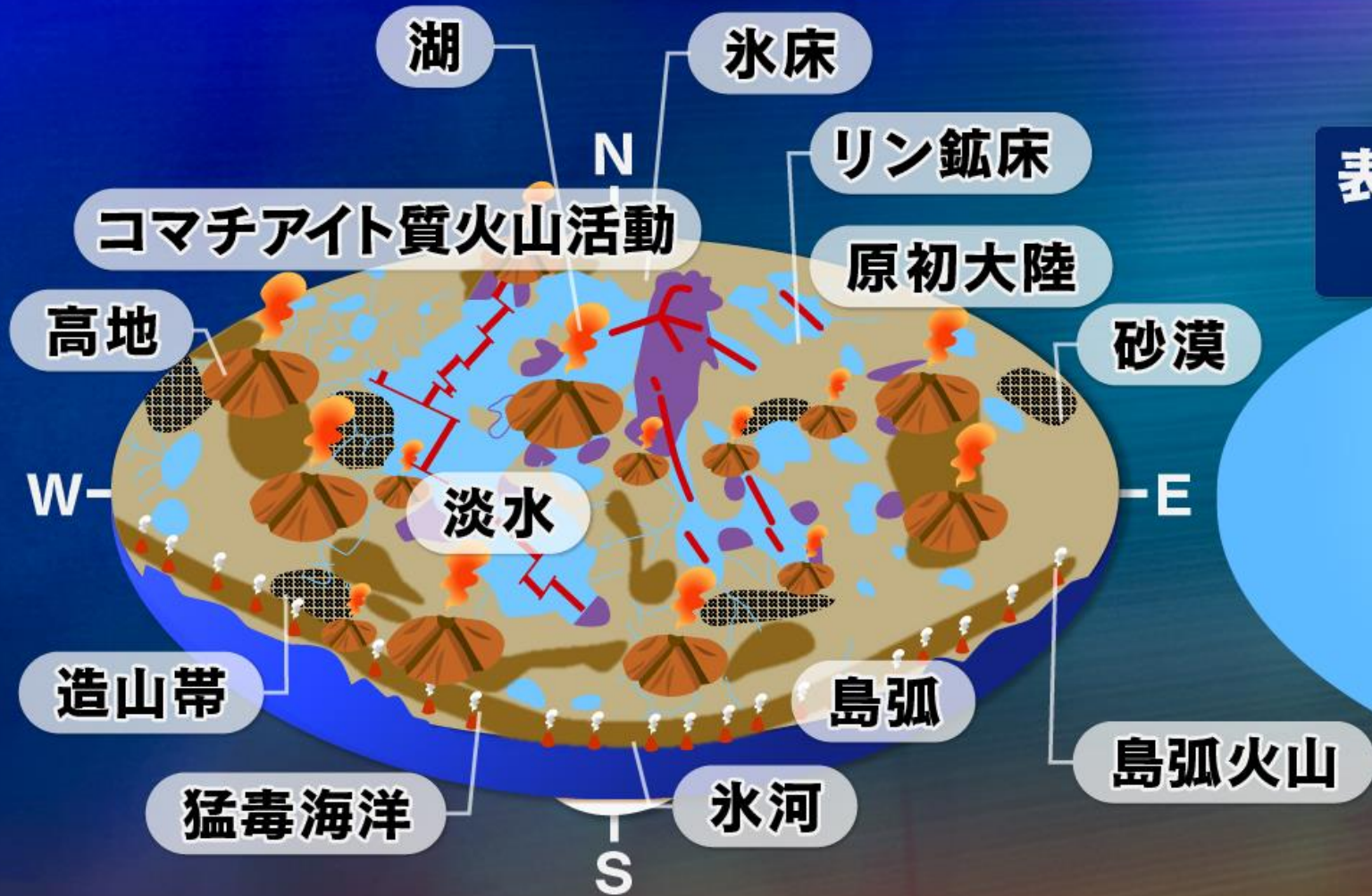
初期海洋質量が鍵

プレートテクトニクス ○ ×
生命 ○ ×



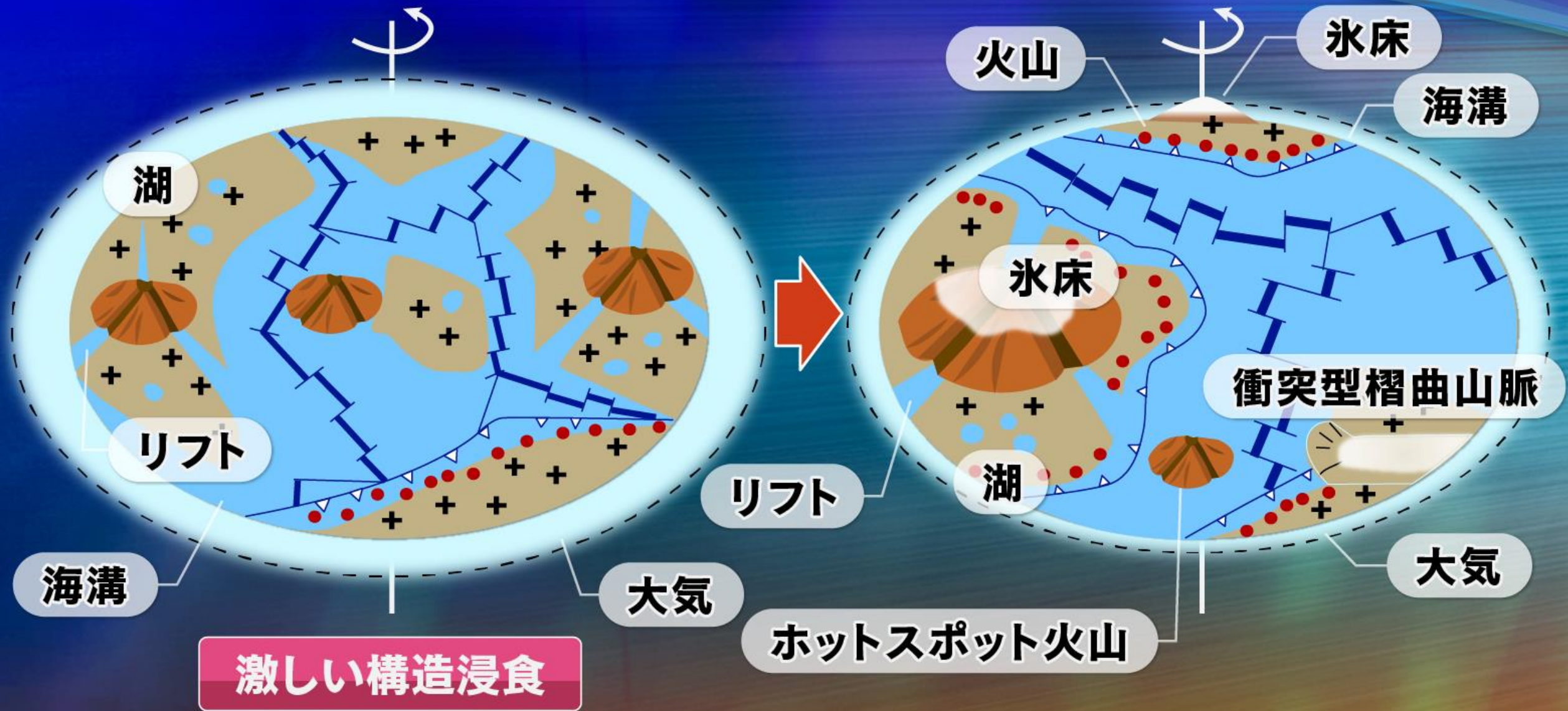
多様な表層環境1：自然地理と表層地質

40～44億年前



表層が海洋で覆われると
環境多様性が失われる

多様な表層環境2: 動的な変化



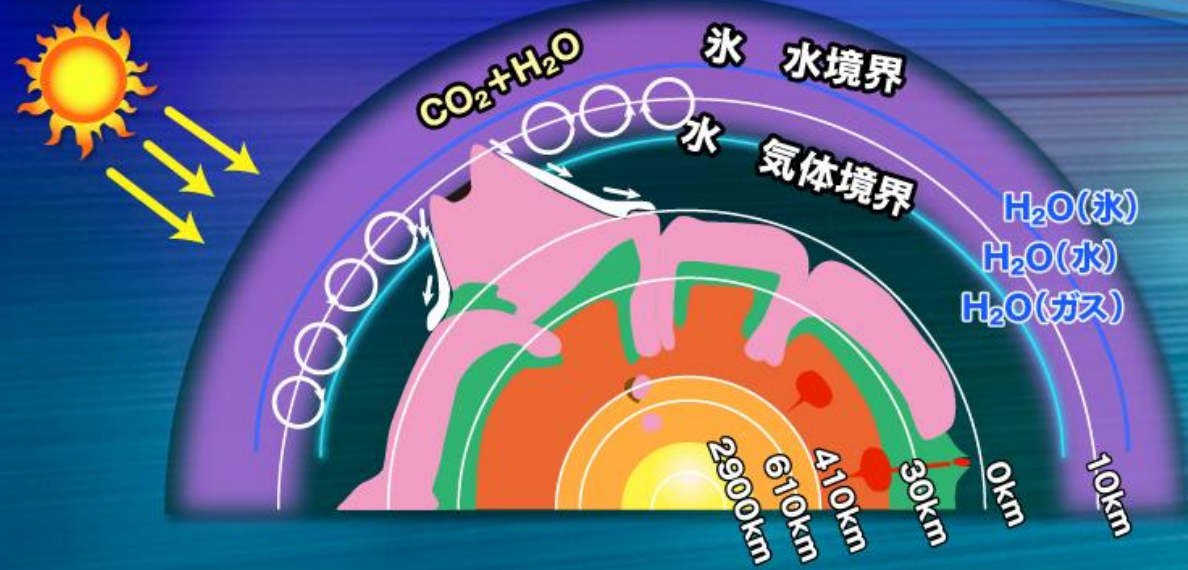
多様な表層環境3：地球外要因と高速自転



多様な表層環境4：原始大気と海洋の量と組成の急激な変化

44億年前

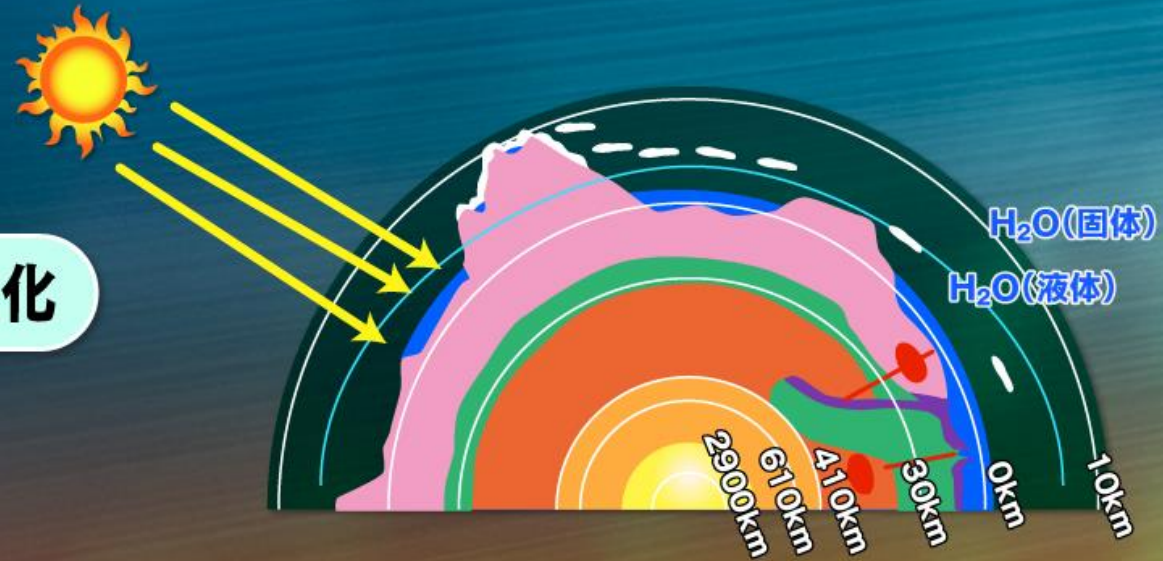
厚い原始大気(暗黒の時代)



40億年前

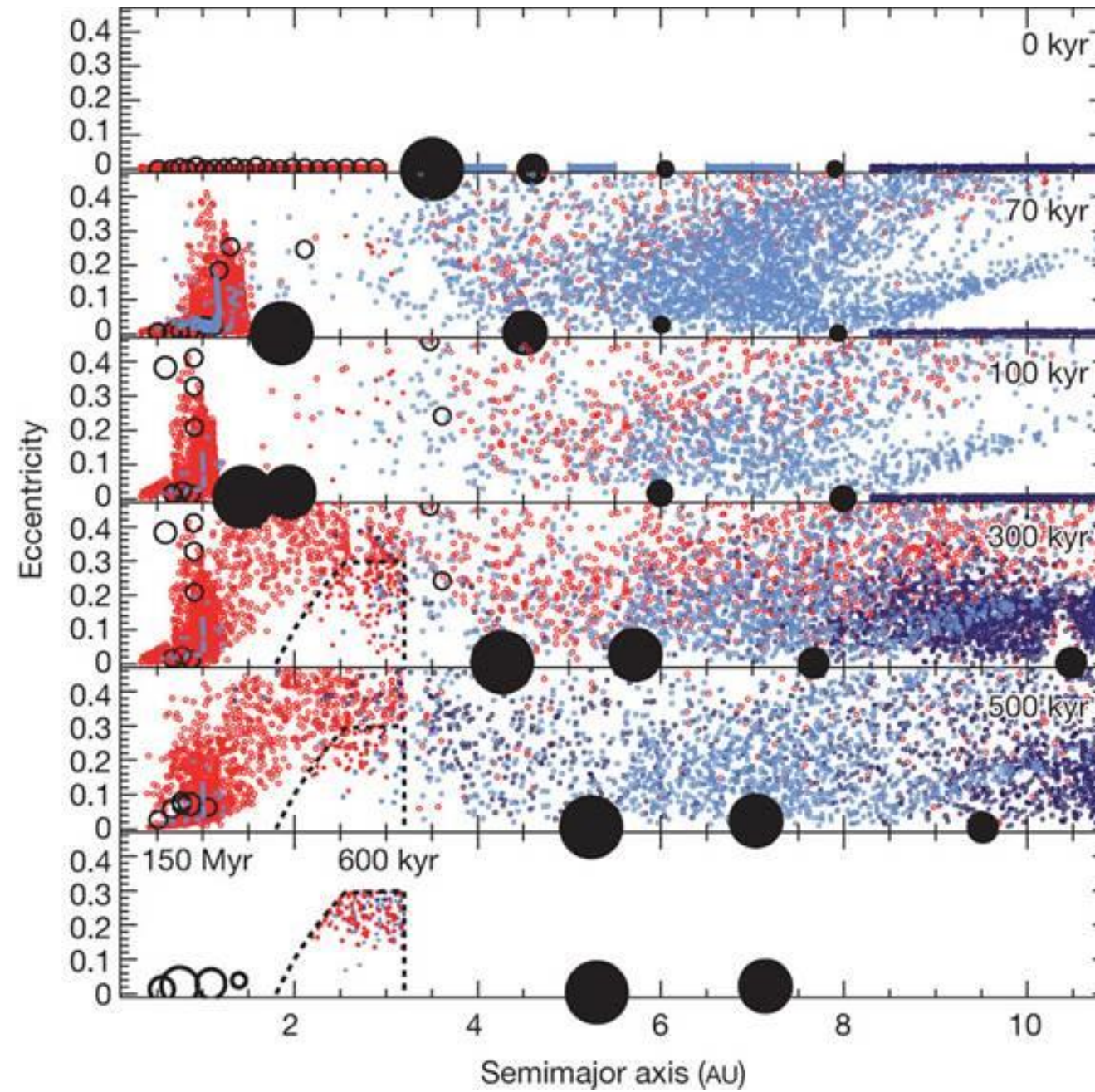
原始海洋の誕生と中性化

薄い原始大気と太陽光の利用



1 Origin of solar system

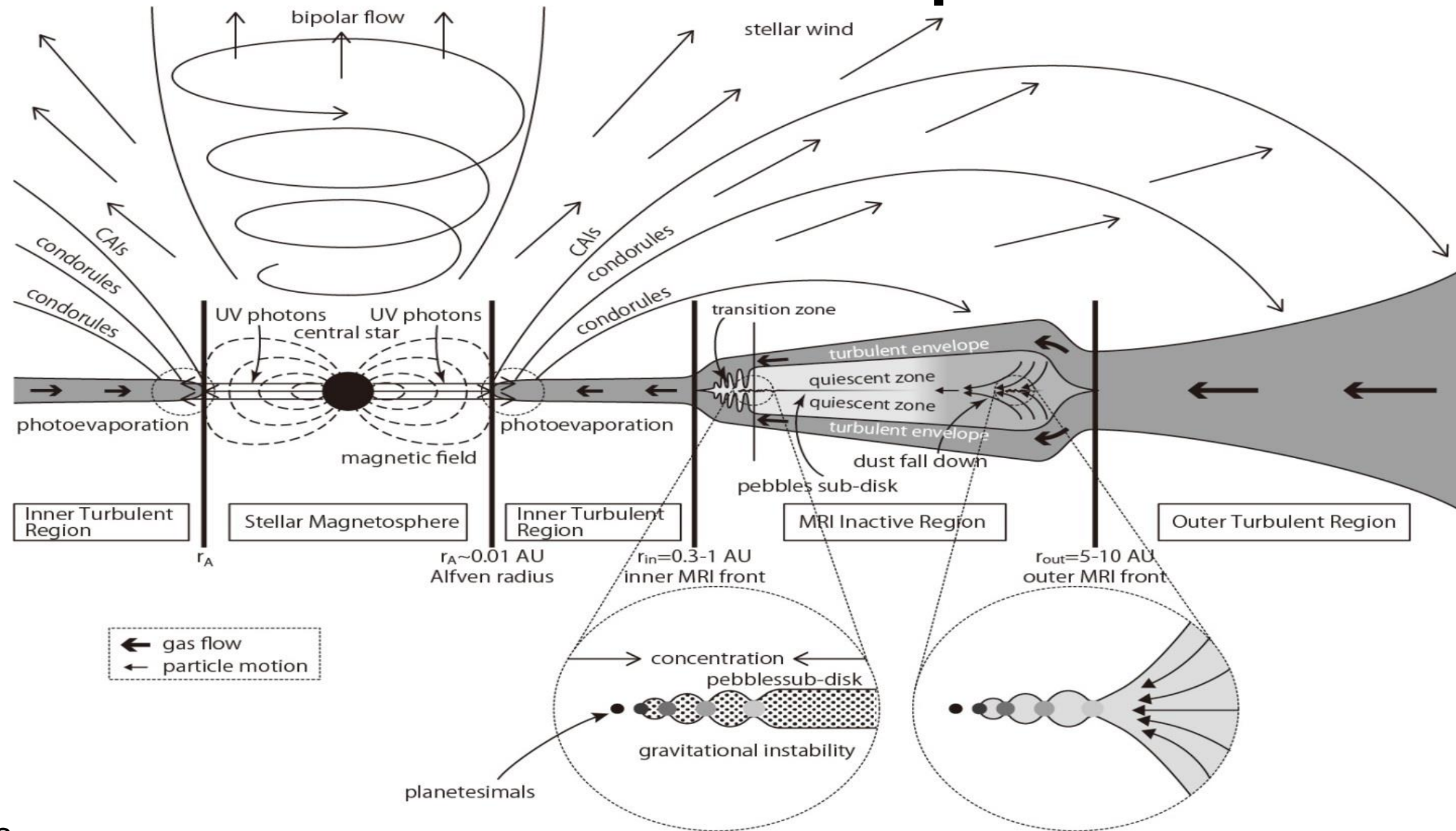
Grand TACK Model



How to solve the debate and to
propose a new model

Kyoto Model(Earth first) vs Nice
Model(Jupiter first): A key is **geology**
of asteroid belt

Tandem formation of planetesimals



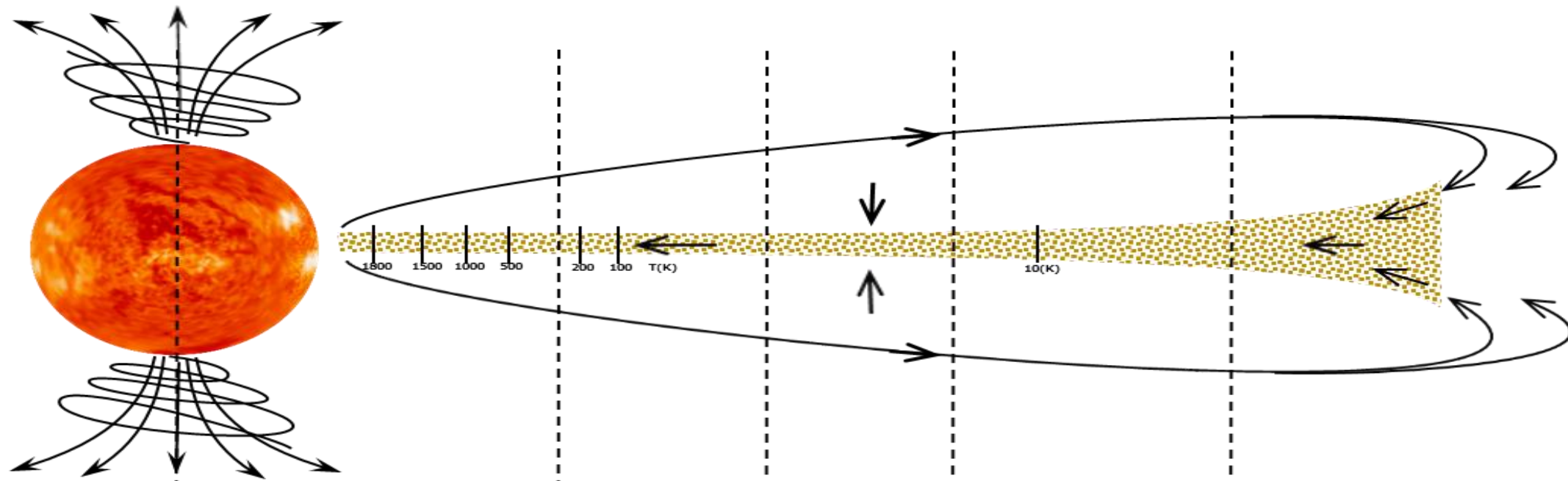
化学組成累帯構造の形成と そこから生まれる惑星の化学組成

粘土鉱物線? 有機物線(2.1)

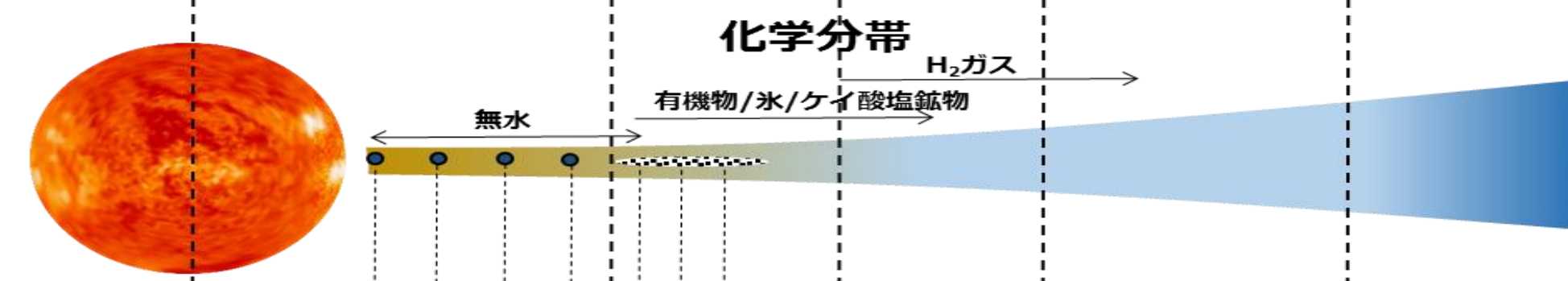
雪線(2.7)



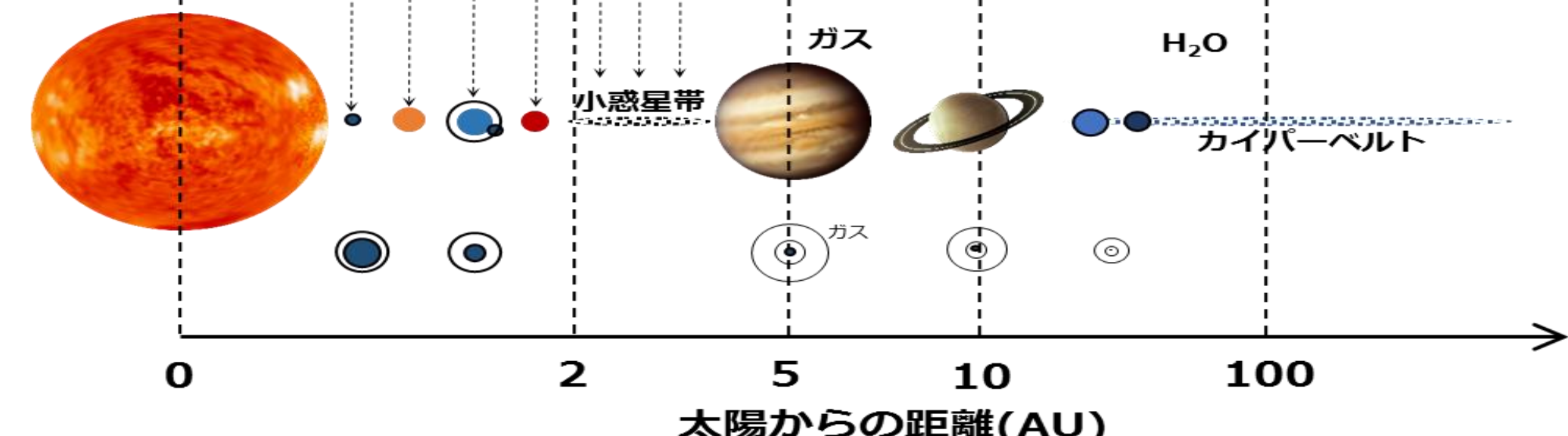
Stage 1 :
物質大循環



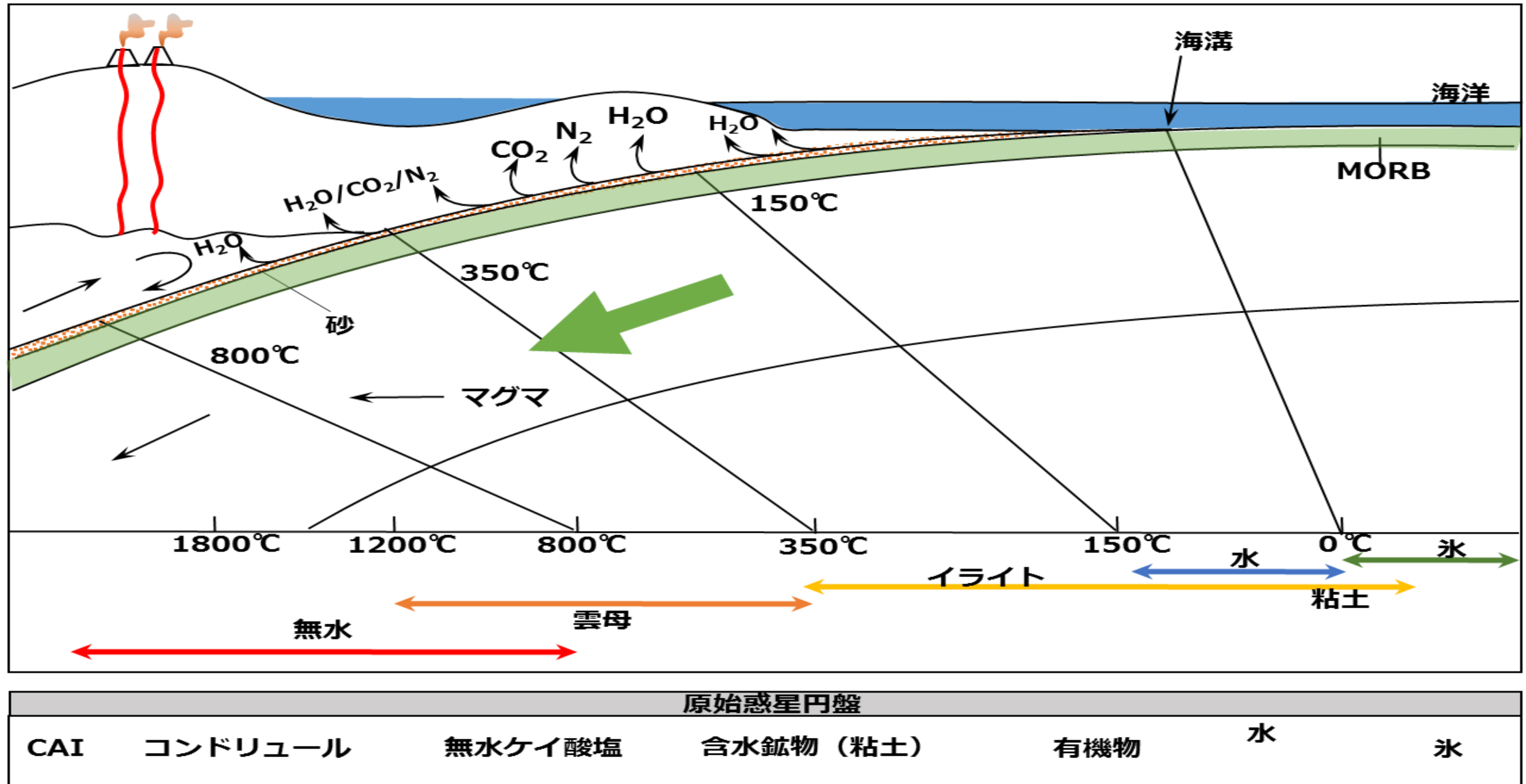
Stage 2 :
循環停止



Stage 3 :
惑星形成

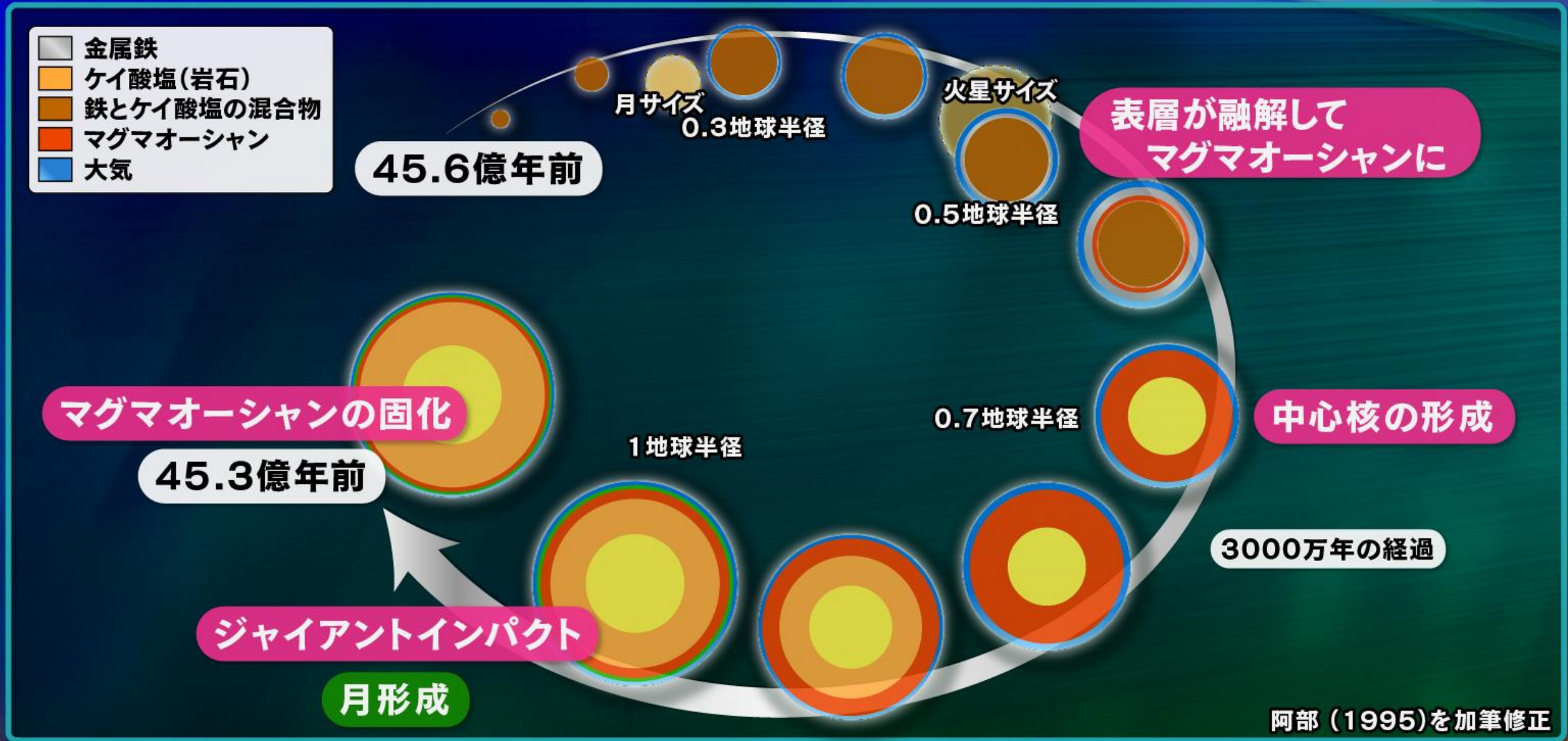


粘土鉱物の累進的鉱物変化と8元素の同位体進化の地球アナログ



2 Origin and early evolution of Earth

微惑星から地球の層状構造の形成まで



Accretionary process of Earth

(1) dust

(2) meteorite
(mixture sandstone in space)

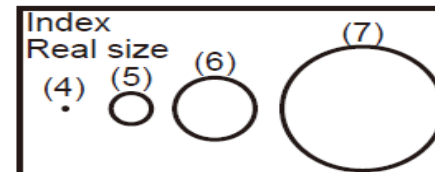
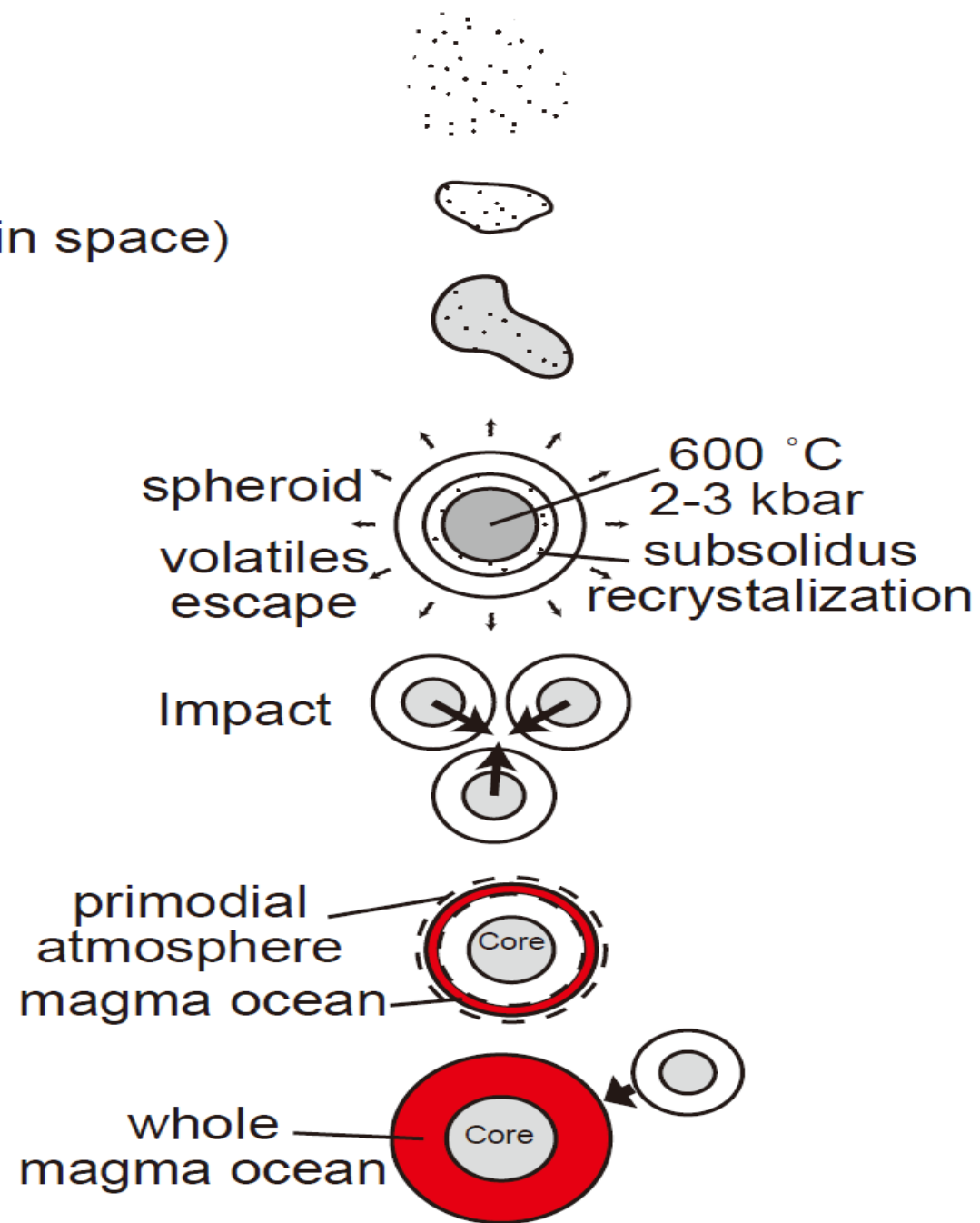
(3) planetesimal
($\Phi=10\text{km}$)

(4) asteroid
($\Phi=200\text{km}$)

(5) Moon size
($\Phi\sim 3000\text{km}$)

(6) Mars size
($\Phi\sim 6000\text{ km}$)

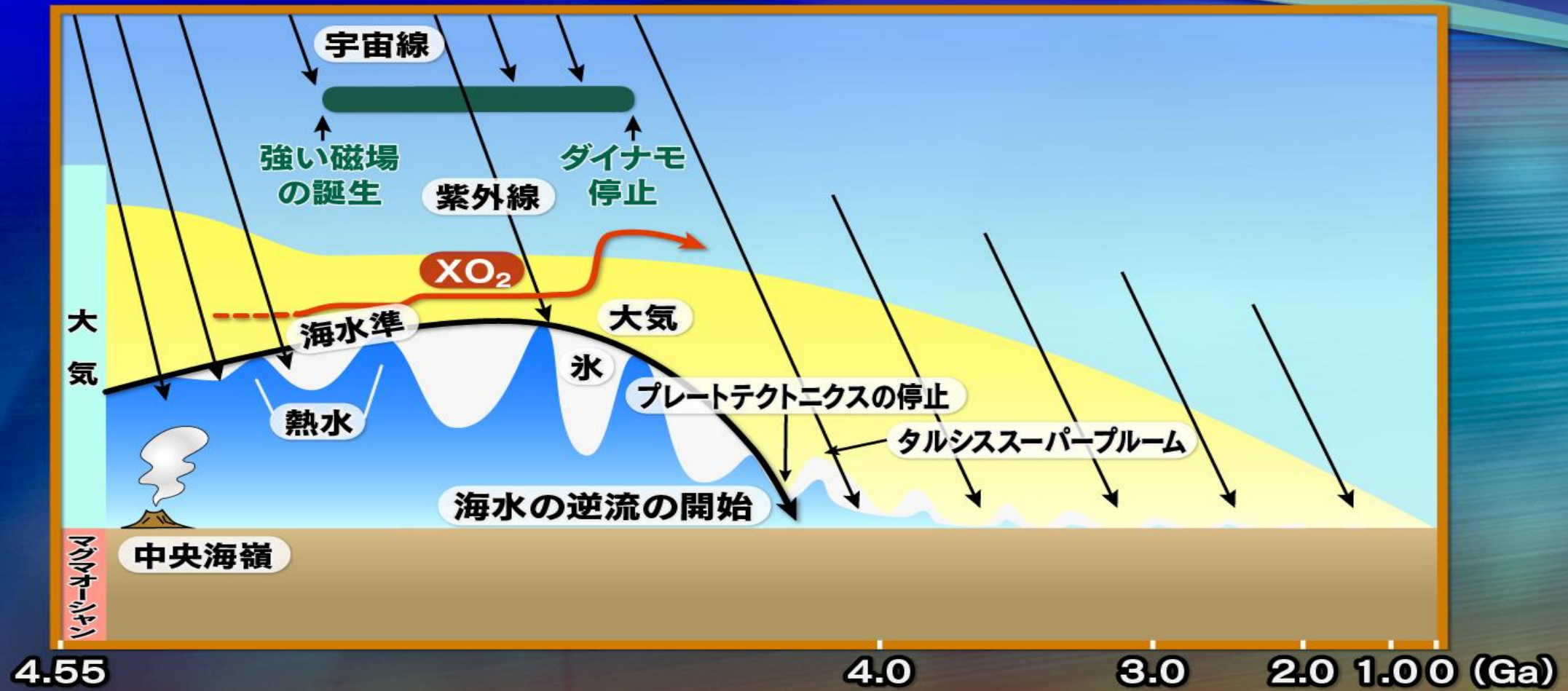
(7) Giant Impact
($\Phi\sim 12000\text{ km}$)



2 金星、火星

- 1 金星は何故灼熱化したのか？通説：HZから外れた（答えになっていない）→**HZの再定義**が必要→LWZを決める最大の要素は雲
- ○**雲**は宇宙線、地球磁場、太陽風、雲核（砂塵や火山灰）で決まる→冥王代地球表層モデルとリンクさせて一般化
- ○金星の歴史とモデル→**表層地質と比較**（イシュタール大陸＝花崗岩→PT運動、原始海洋＋大気）

火星の歴史



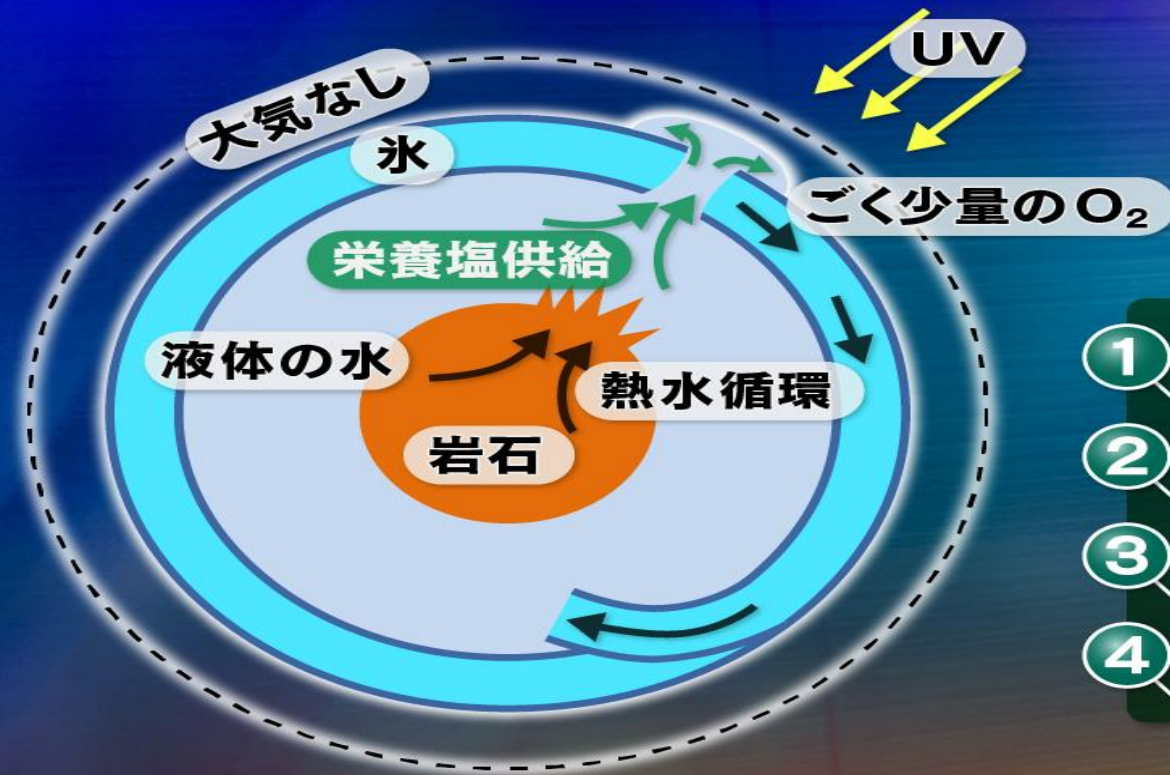
火星

3 ガス惑星の衛星

- 木星の衛星群、イオ、エウロパ、ガニメデの成因と惑星内部構造の岩石学的モデル

エウロパには生命はいない

エンケラドゥス、ガニメデも同様



- ① 猛毒海洋
- ② 窒素と炭素の供給がない
- ③ 乾湿反復環境がない
- ④ 環境多様性がない

4 系外惑星の大気：普遍性を持つ 惑星大気の起源と進化論

今後の日程

- 1 集会(新しいタイプ;学会に代わる)
- ●2泊3日で、初日は2名程度のキーノートを発表を聞く(各1時間)、3-5名程度のコメント(各10分);午後は自由(夜の部の総合討論に向けて各人パワポ作成)、夜の部は総合討論(司会者が鍵)
- ●二つ目のトピックス
- 2 会議の内容をそのまま特集号(国際雑誌, Springer)へ、編集責任者(大学退官者、100万円/1冊で雇用)

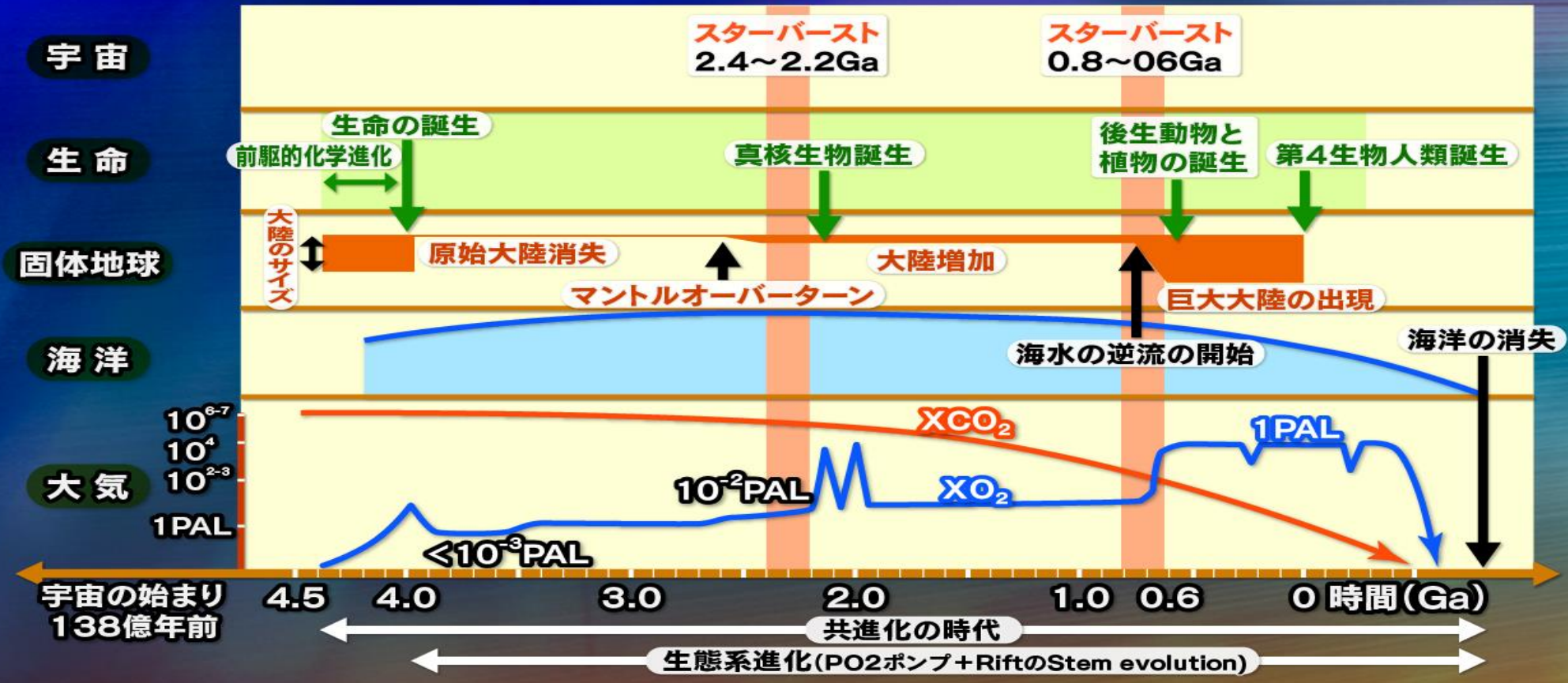
図：水圏（イオンの状態）の酸化還元 電位勾配

附録

Astrobiologyの体系化

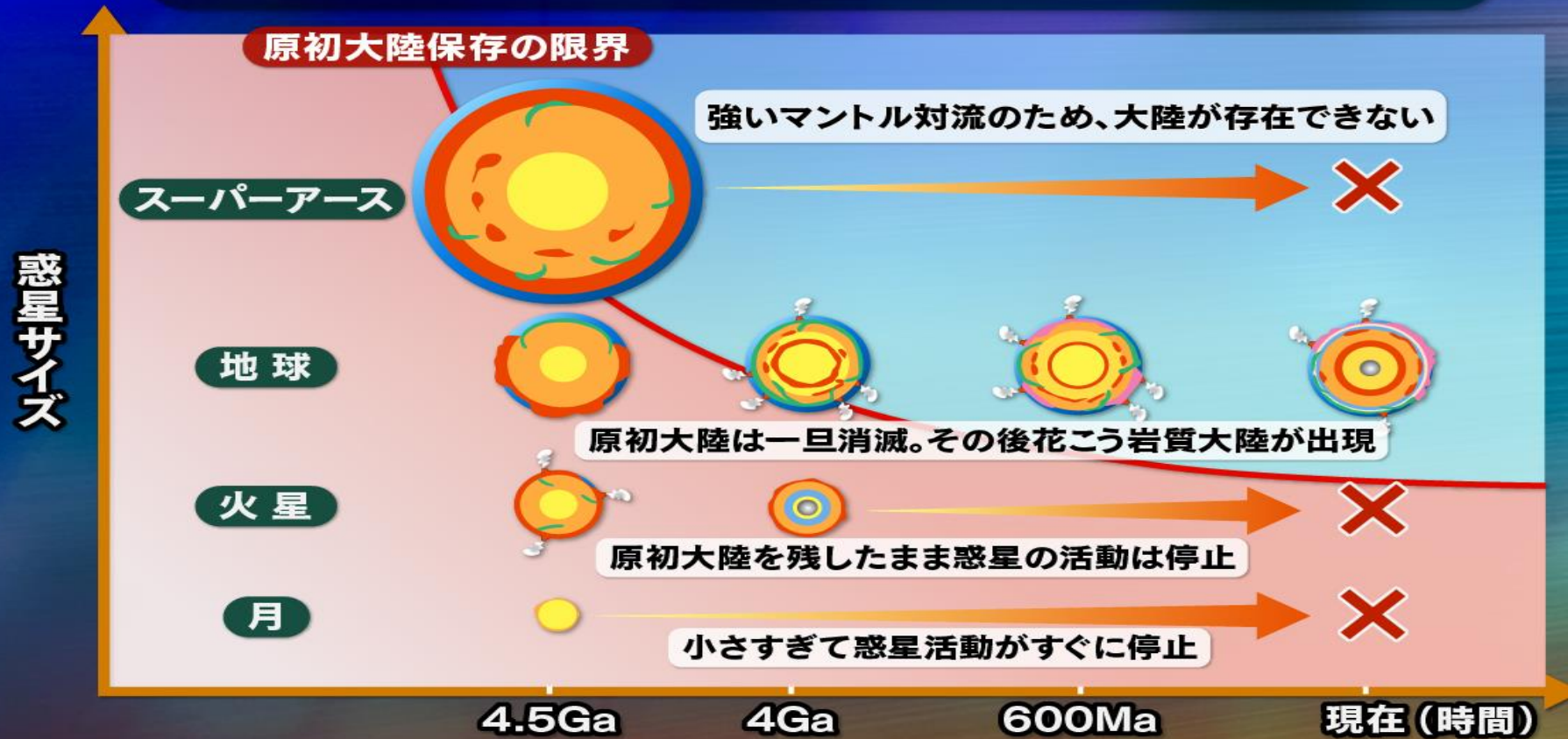
進化の為の時間

Habitable Trinity Planetの安定時間



なぜ惑星のサイズが重要なのか

惑星サイズがハビタブルトリニティ環境を支配する



生命惑星誕生のための条件

第1グループ

- 1 中心星の化学組成と大きさ
- 2 円軌道を持つ
- 3 惑星のサイズ (火星より大きくスーパーアースより小さい)
- 4 衛星を持つ
- 5 自転軸が傾斜している
- 6 惑星の2段階形成 (ABELモデル)
- 7 Fe_3P が存在する
- 8 適当な量の生命構成元素の付加
- 9 適当な量の原始大気
- 10 適当な量の窒素
- 11 液体の水の存在領域内に惑星が位置する
- 12 Habitable Trinity条件を満たす
- 13 適当な量の初期海洋質量
- 14 プレートテクトニクスの開始
- 15 海洋の浄化が進む
- 16 大気中の CO_2 の減少
- 17 生命構成元素の消費時間
- 18 構造浸食の度合い
- 19 ハビタブルトリニティ環境の維持時間
- 20 彗星落下の阻止 (巨大ガス惑星の存在)

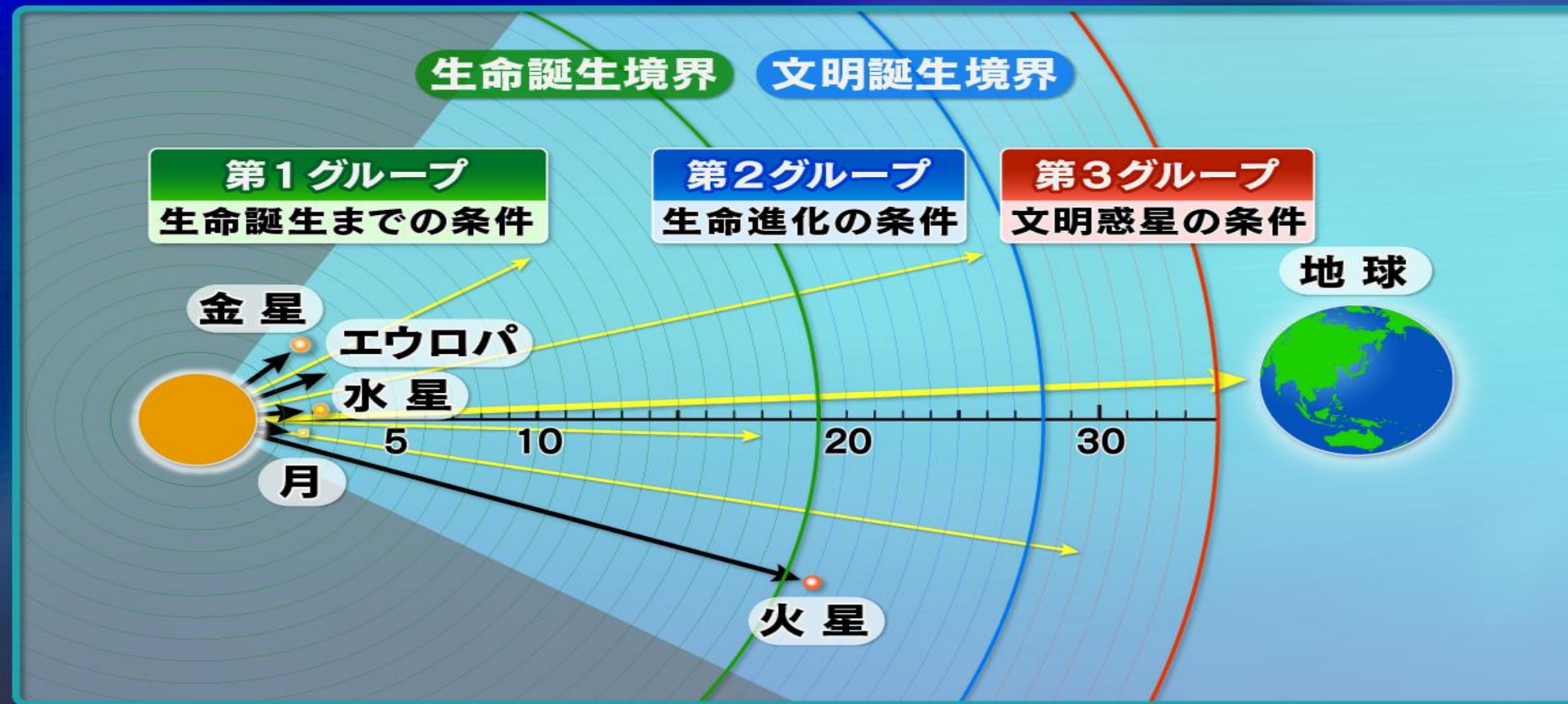
第2グループ

- 1 花こう岩質巨大陸地の存在
- 2 強い磁場の形成
- 3 海水のマントルへの逆流の開始時刻
- 4 生命進化の加速1 (宇宙:大量絶滅)
- 5 生命進化の加速2 (リフト:HiRマグマ)
- 6 後生動物への進化
- 7 オゾン層の形成
- 8 生命構成元素の寿命

第3グループ

- 1 脊椎動物への進化
- 2 哺乳類への進化
- 3 霊長類への進化
- 4 ホモサピエンスへの進化
- 5 脳の発達
- 6 生命構成元素の寿命

ハビタブルプラネットに進化するための条件



生命惑星誕生のための条件をクリアできるか

第1グループ条件	金星	月	火星	エウロパ	地球
1 中心星の化学組成と大きさ	○	○	○	○	○
2 円軌道を持つ	○	○	○	○	○
3 惑星のサイズ	○	×	○	×	○
4 衛星を持つ	×	×	○	×	○
5 自転軸が傾斜している	○	×	○	×	○
6 惑星の2段階形成 (ABELモデル)	○	○	○	×	○
7 Fe ₃ Pが存在する	○	○	○	×	○
8 適当な量の生命構成元素の付加	○	○	○	×	○
9 適当な量の原始大気	?	×	?	×	○
10 適当な量の窒素	?	×	?	×	○
11 液体の水の存在領域内に惑星が位置する	×	×	○	×	○
12 Habitable Trinity条件を満たす	×	×	○	×	○
13 適当な量の初期海洋質量	×	×	○	×	○
14 プレートテクトニクスの開始	×	×	○	×	○
15 海洋の浄化が進む	×	×	○	×	○
16 大気中のCO ₂ の減少	×	×	○	×	○
17 生命構成元素の消費時間	×	×	○	×	○
18 構造浸食の度合い	×	×	○	×	○
19 ハビタブルトリニティ環境の維持時間	×	×	○	×	○
20 彗星落下の阻止 (巨大ガス惑星の存在)	○	○	○	×	○

Birth place of life on the Hadean Earth

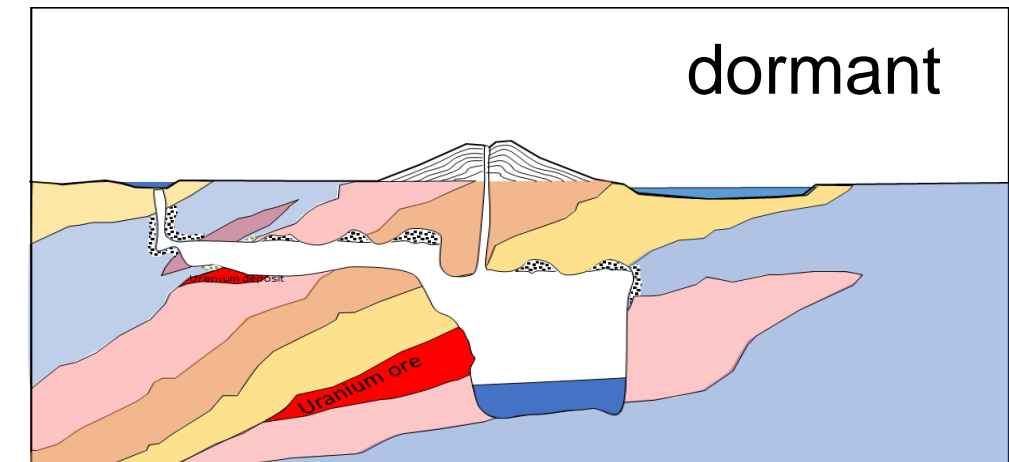
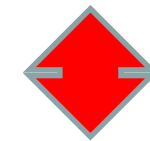
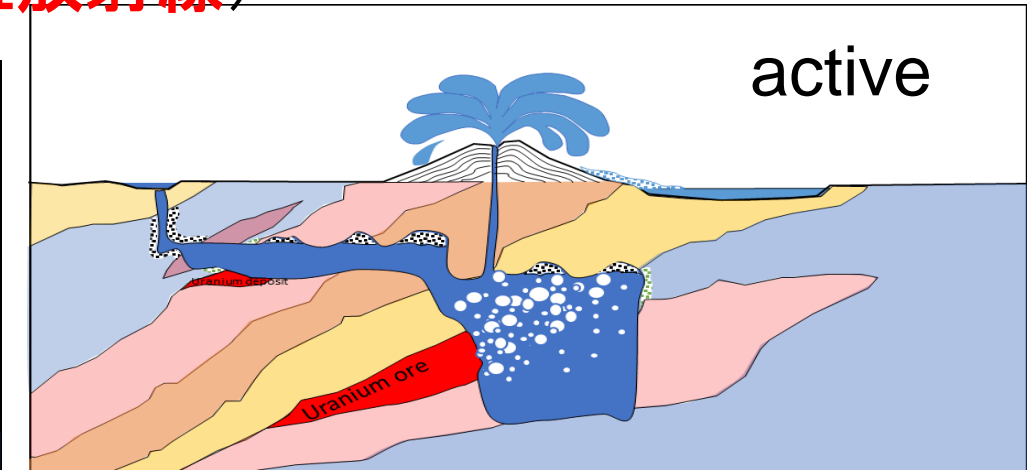
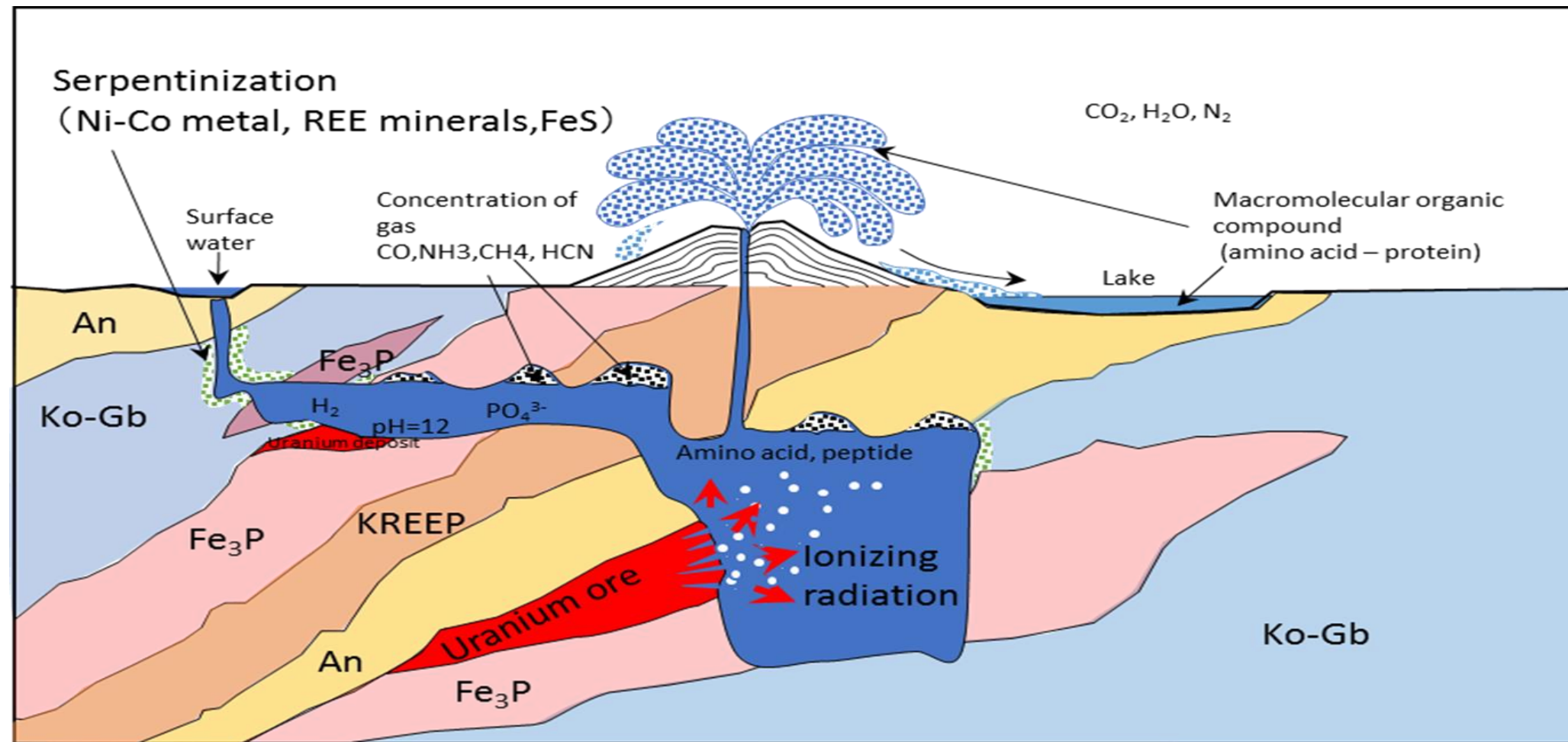
Maruyama, S. and Ebisuzaki, T.

ELSI, Titech, Tokyo, Japan

Riken, Wako, Japan

Natural Nuclear Reactor

ただの温泉(=MOR)ではダメ: 非熱的エネルギー源が必要
(紫外線、X線、放射線、 γ 線、高エネルギー粒子=電離放射線)

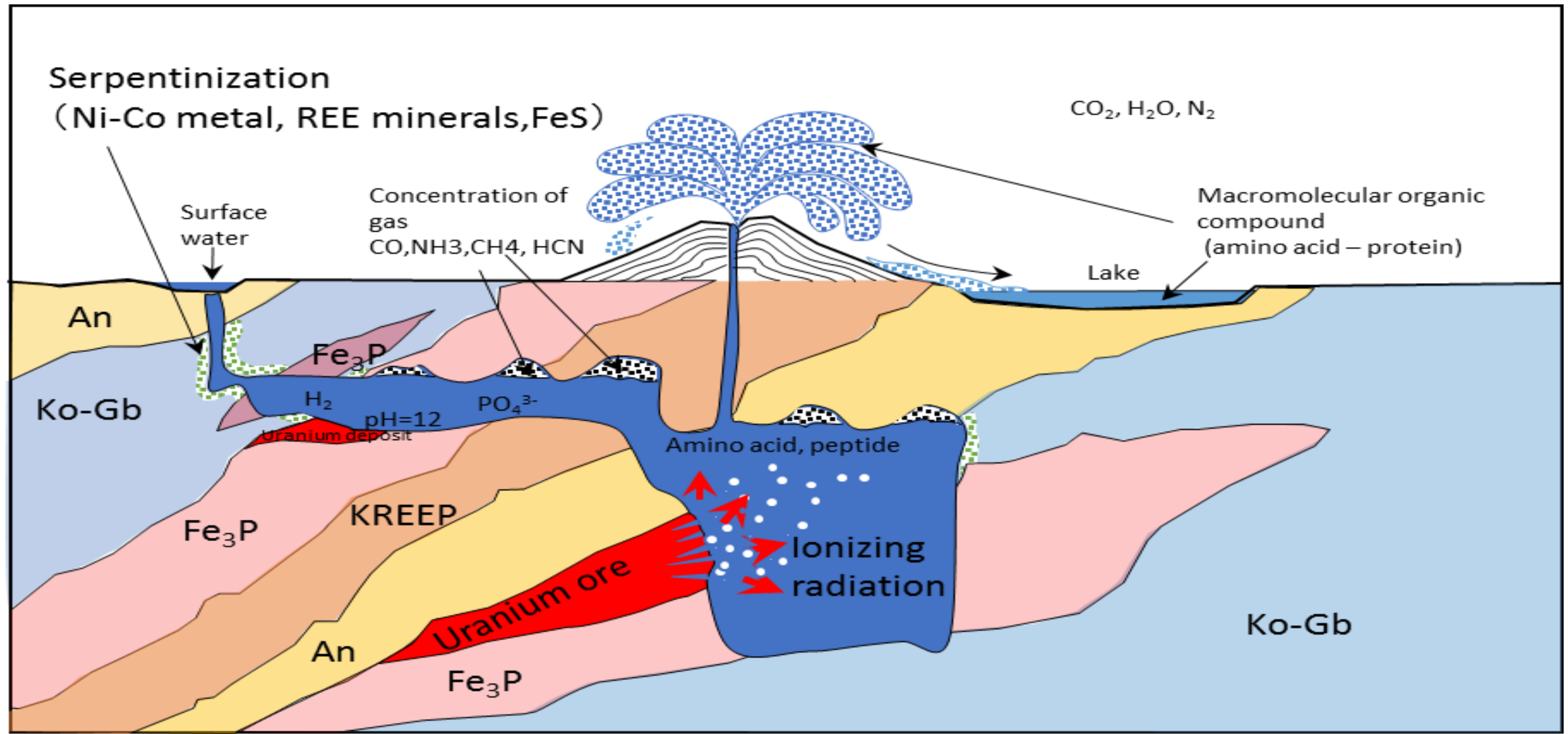


Discussion : 生命誕生場は原初大陸上の間欠泉 (ウラン鉱床)

環境的要素	原始大陸上 自然原子炉温泉 説	中央海嶺 熱水系説	火星説	宇宙説
酸化的大気(CO ₂ -H ₂ O, O ₂ なし)	○	×	○	×
窒素の供給	○	×	○	×
局所還元的アルカリ熱水系	○	○	?	×
乾湿反復環境	○	×	○	×
多様な鉱物 (Ni,Co,Fe3P)	○	△	?	○
KREEP玄武岩	○	×	?	×
ウラン鉱床	○	×	?	×
放電 (落雷)	○	×	?	×
太陽エネルギー	○	×	○	×
低温アンモニア合成(An+)	○	×	?	×
還元的気体の高濃度化	○	×	?	×
周期性のある環境	○	×	?	×
非熱的エネルギー供給源 (太陽が使えない)	○	×	?	×

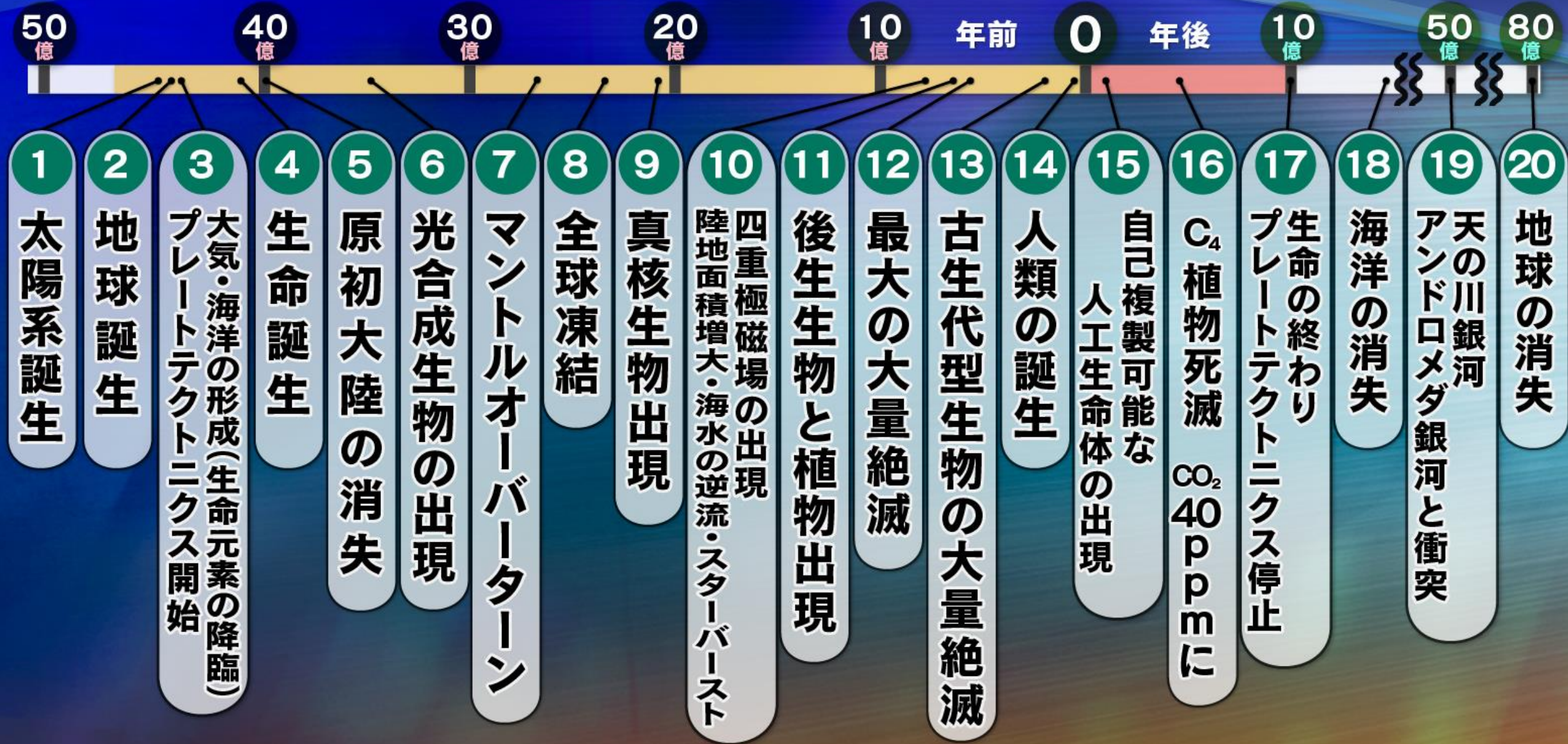
Nuclear Geyser:

Concentration of gas and synthesis of Biomolecules



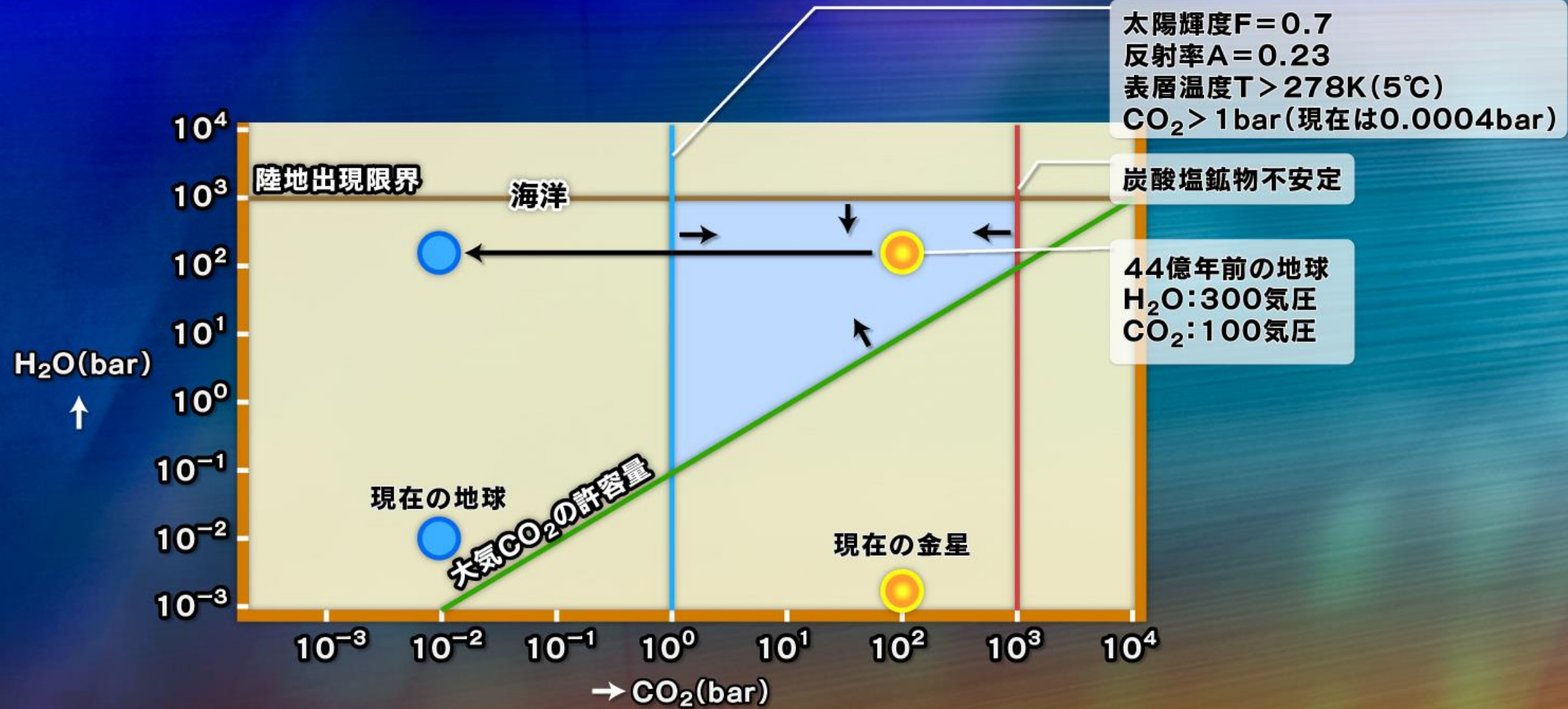
生命惑星探査と惑星大気

地球史20大事件



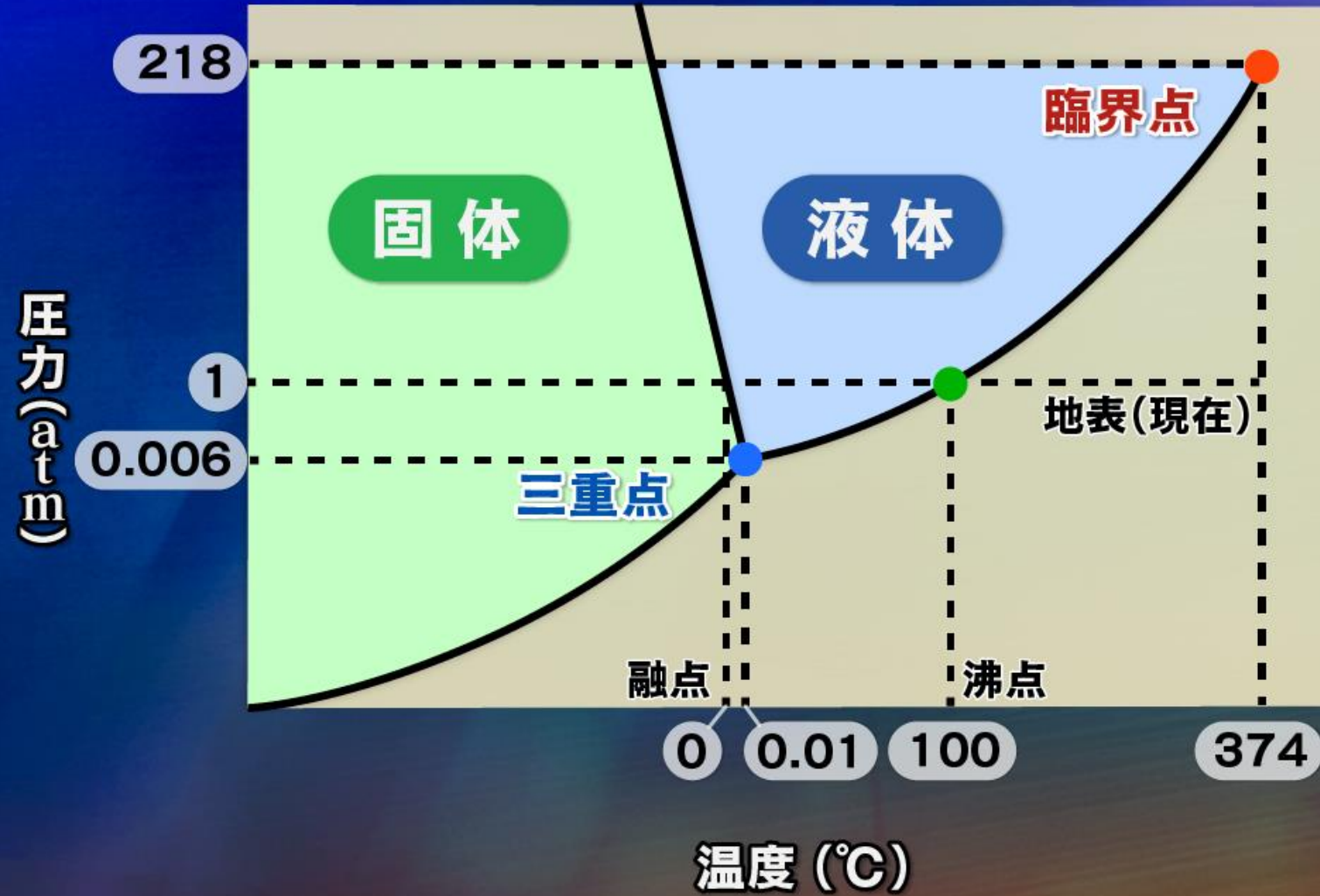
44億年前の地球表層環境

地表に液体の水が存在できる条件



水の状態図

374°Cの海洋を100°C以下に冷やすにはどうすればよいか？



三重点	固体、液体、気体が共存
臨界点	液体として存在できる限界

大気中のCO₂をマントルへ捨てる方法



原始大気 100気圧のCO₂大気

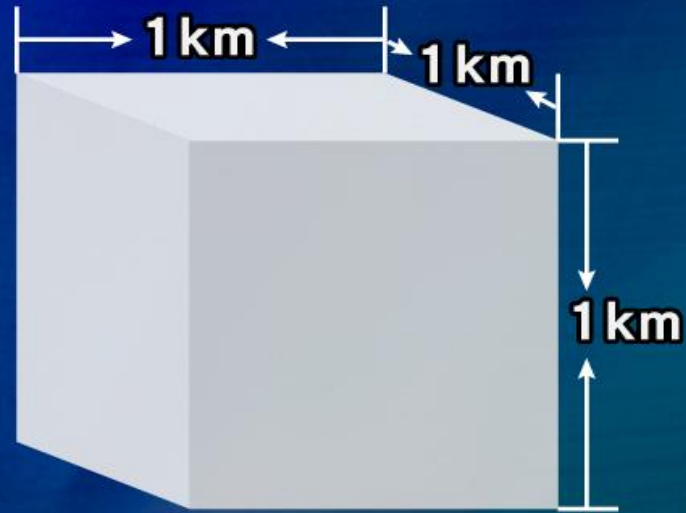
- 海洋に融解
- 中央海嶺で炭酸塩鉱物として固定
- 海溝からマントルに捨てる

問題：海洋のpH

超酸性の猛毒海洋を中性化する方法

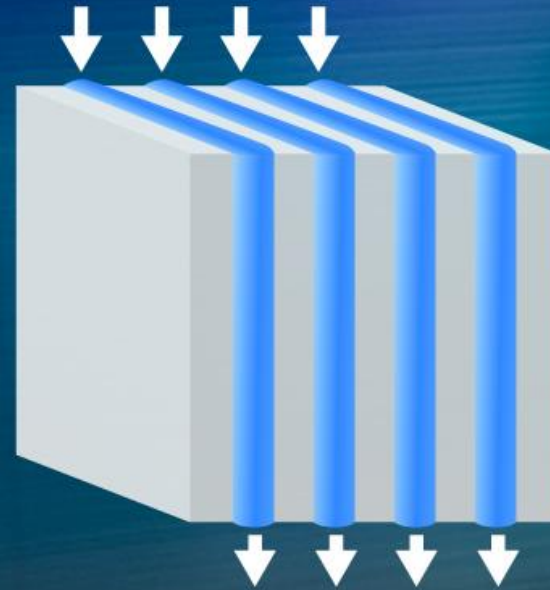
～ 風化侵食運搬作用の重要性 ～

1 表面だけの反応の場合



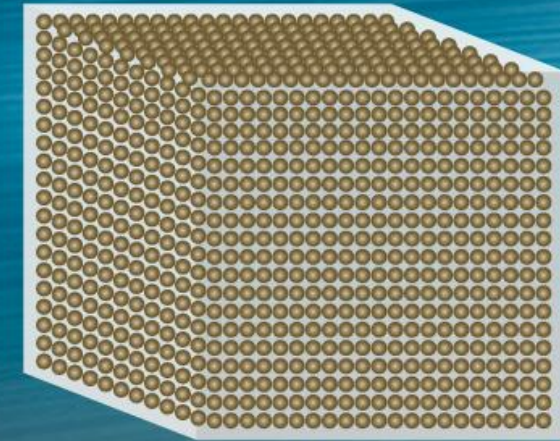
1 μm の被膜(粘土)が
反応を停止(拡散のみ)

2 割れ目に沿った壁面で
熱水が反応する場合



10^6
100万倍

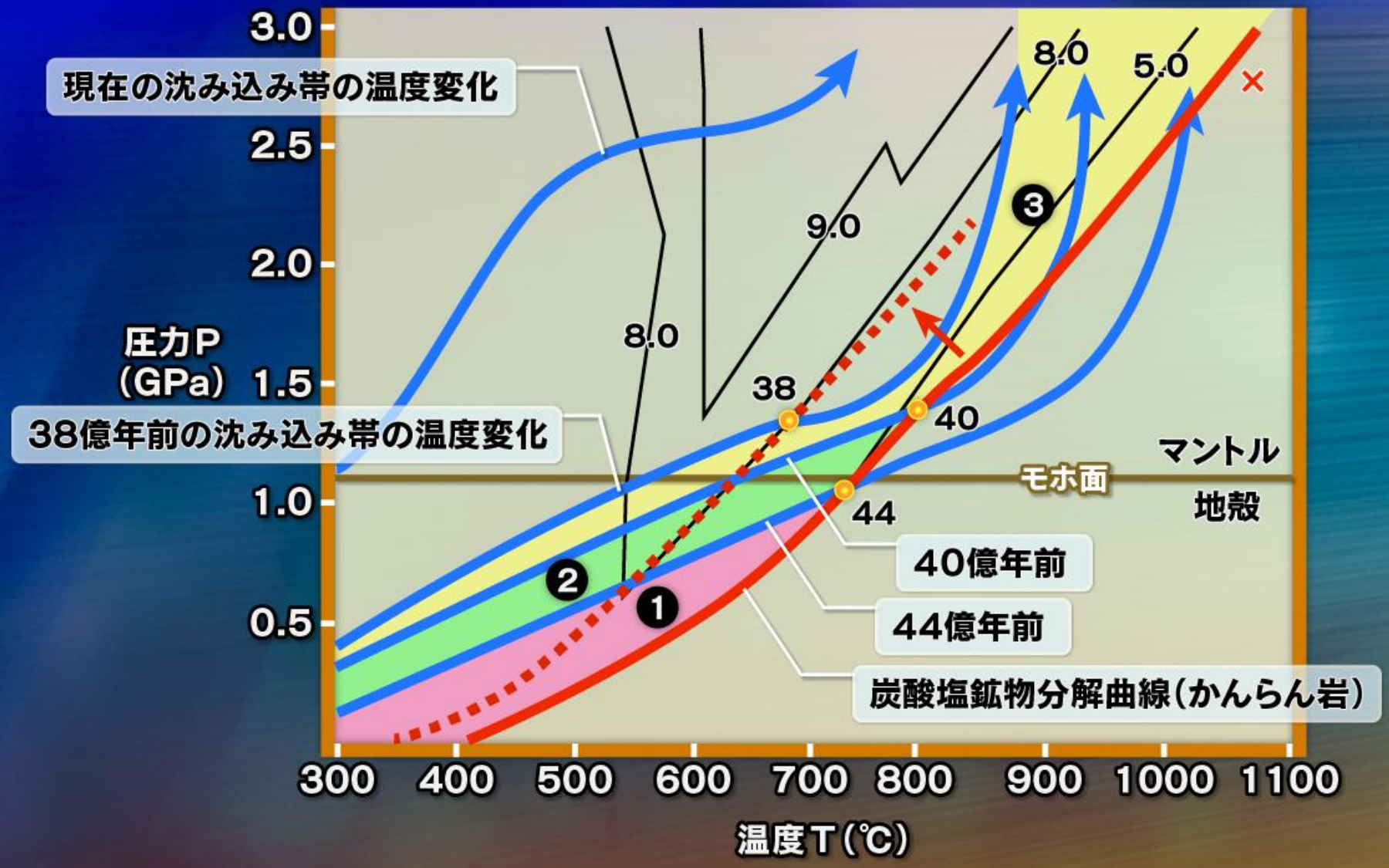
3 風化侵食運搬作用を通して
岩石が直径1ミクロンの
微粒子になって反応する場合



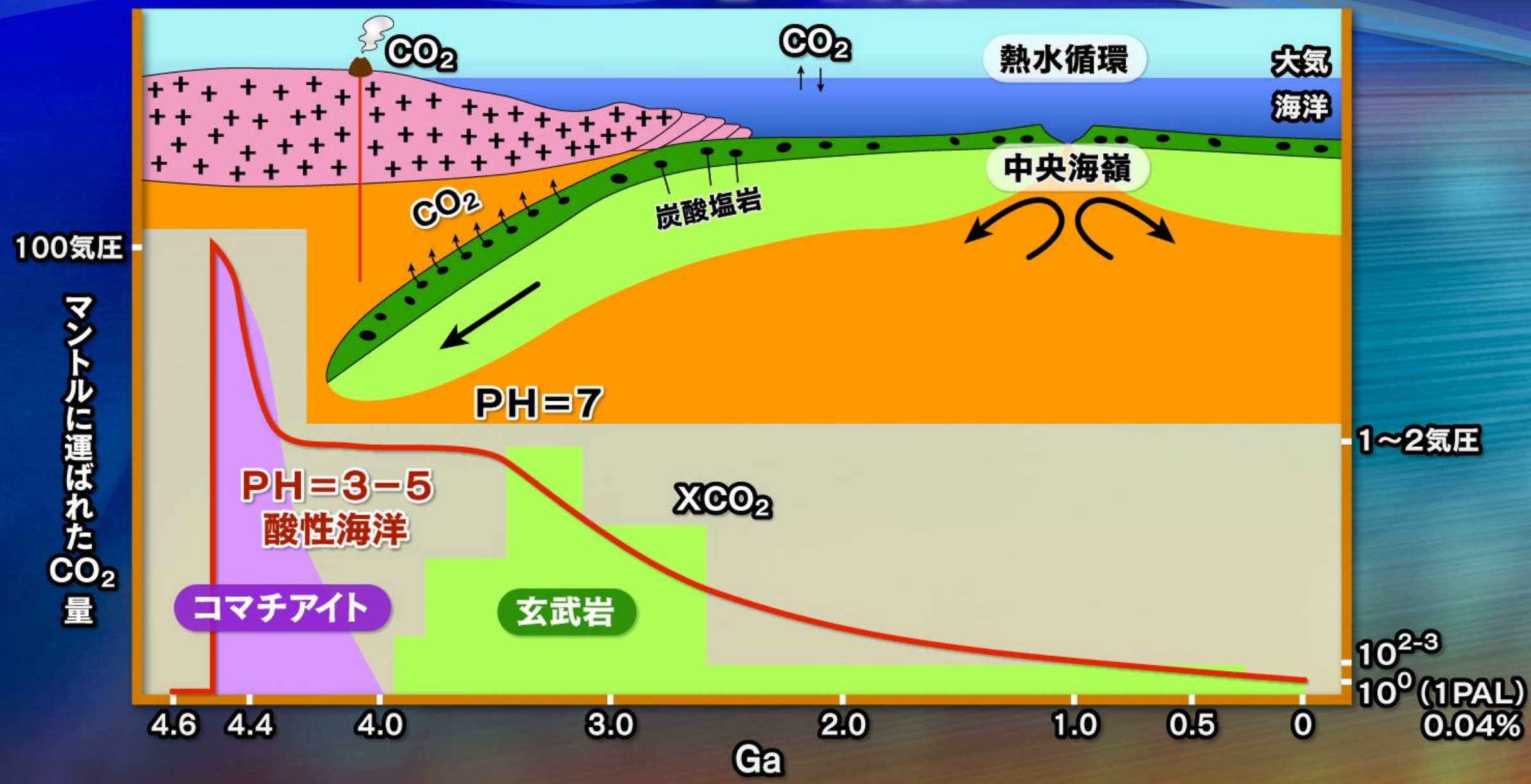
10^{13}
1兆倍

プレートの沈み込みによってCO₂をマントルに捨てる

マントルに固定できるCO₂量 (wt%)



CO₂の変化



1 Research history: Proposed birth
places of life?

生命誕生場の諸説

