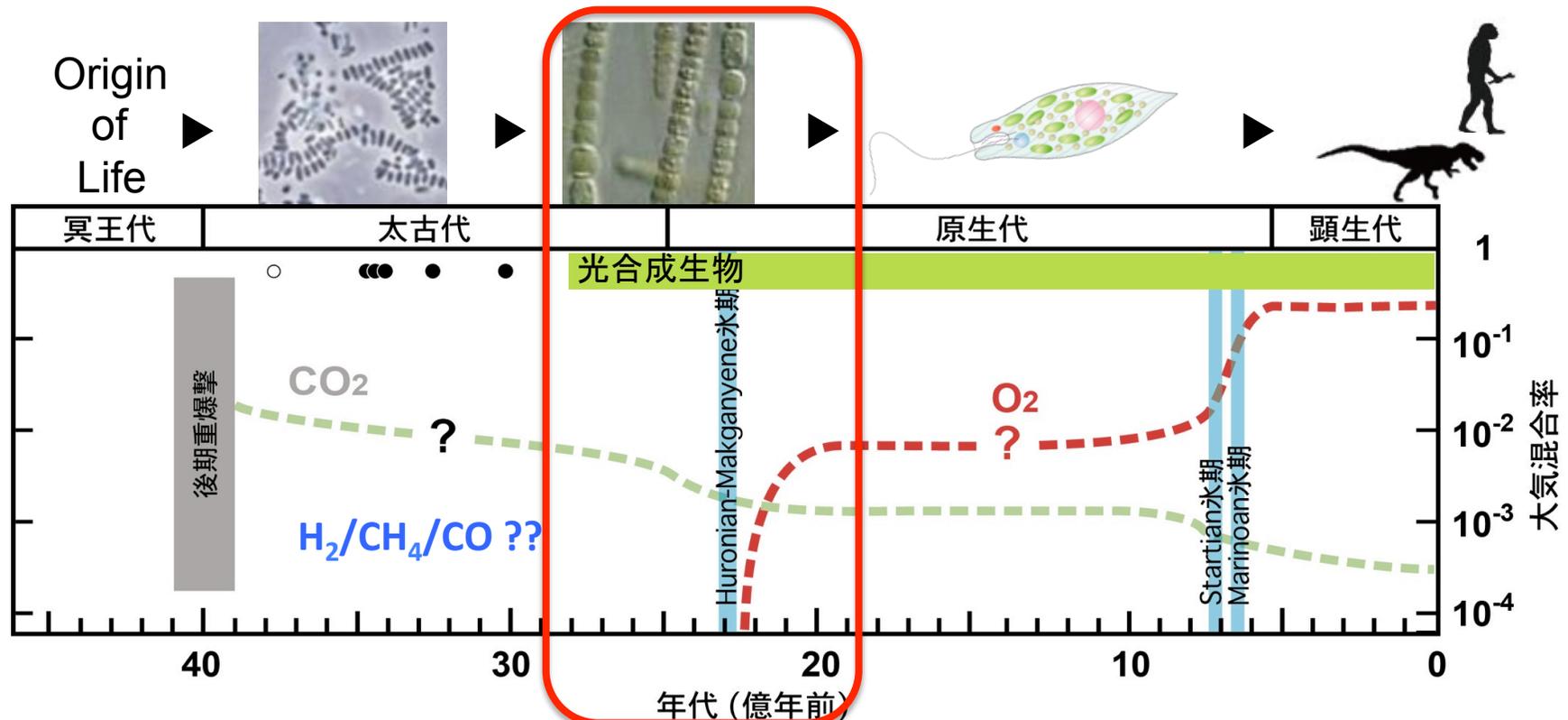


初期地球環境と生物進化

上野 雄一郎 (東工大・地惑専攻准教授 / 地球生命研究所API)

- 1日目午後 (1) 地球形成と初期大気 (冥王代)
- 2日目午前 (2) 地球生命の起源
- 2日目午後 (3) 光合成と酸素上昇 (太古代/原生代)**
- 3日目午前 (4) カンブリア爆発 (原生代/顕生代)



惑星の比較：地球が生命の発生する惑星環境をもつ？

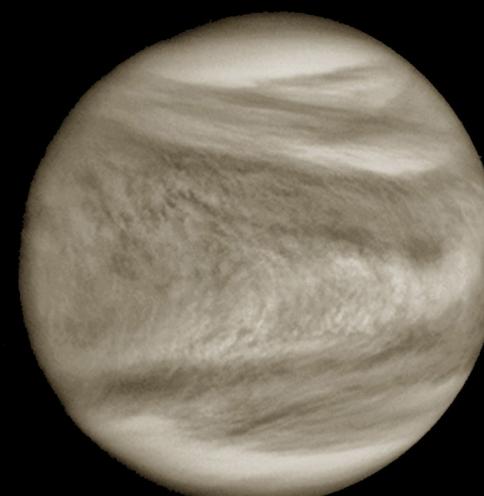
火星



地球



金星



太陽からの距離

1.524 AU

1 AU

0.723 AU

半径

3400 km

6400 km

6100 km

アルベド

0.3

0.3

0.65

表面温度

220°K (-53°C)

288°K (15°C)

737°K (464°C)

表面気圧

0.006 bar

1 bar

92 bar

大気組成

CO₂ : 95.3

N₂ : 78.0

CO₂ : 96.5

N₂ : 2.7

O₂ : 20.9

N₂ : 3.5

Ar : 1.6

Ar : 0.93

SO₂ : 0.015

O₂ : 0.13

H₂O_(v) : ~ 0.4

Ar : 0.007

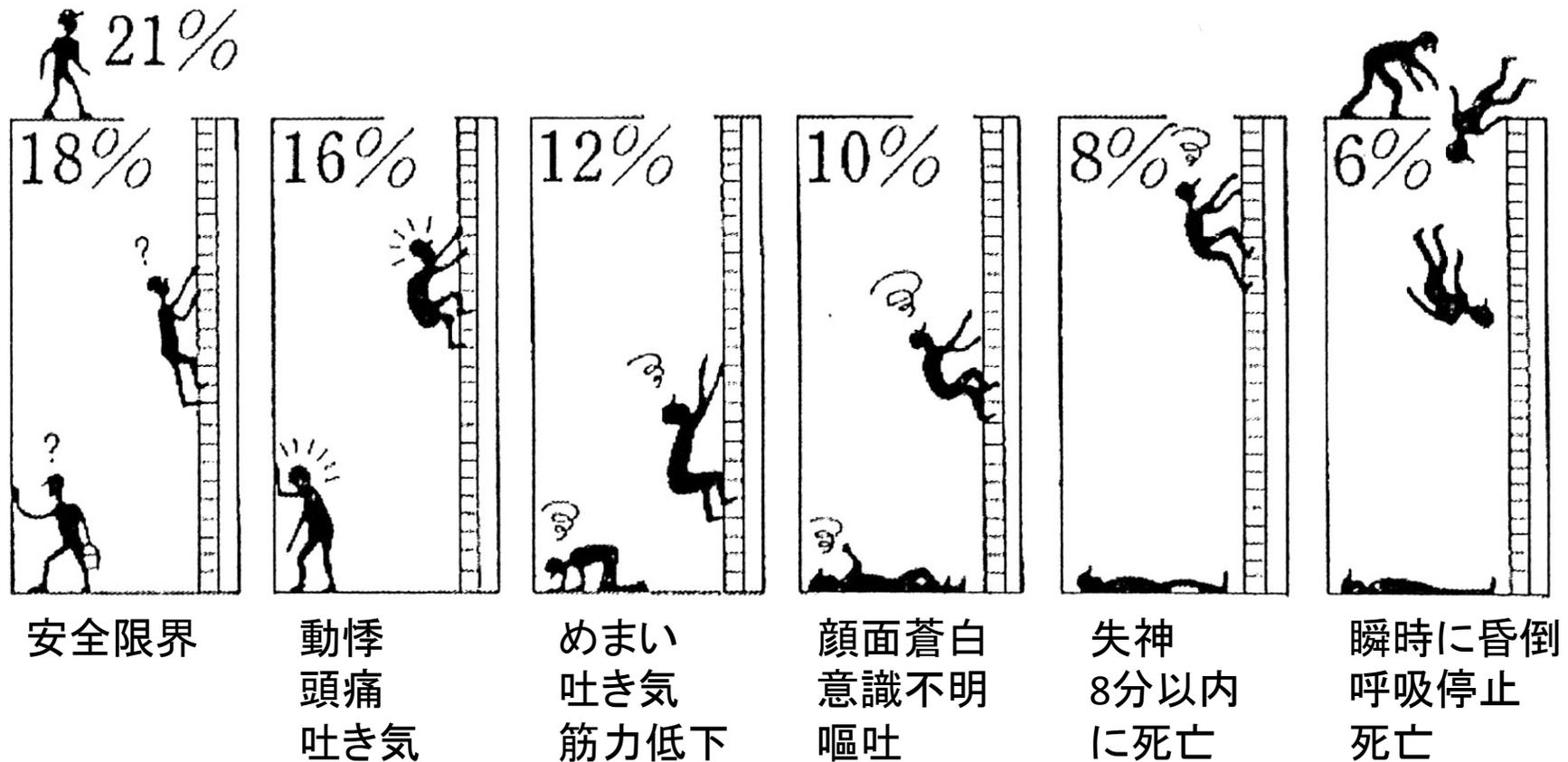
H₂O_(v) : 0.03

CO₂ : 0.038

H₂O_(v) : 0.002

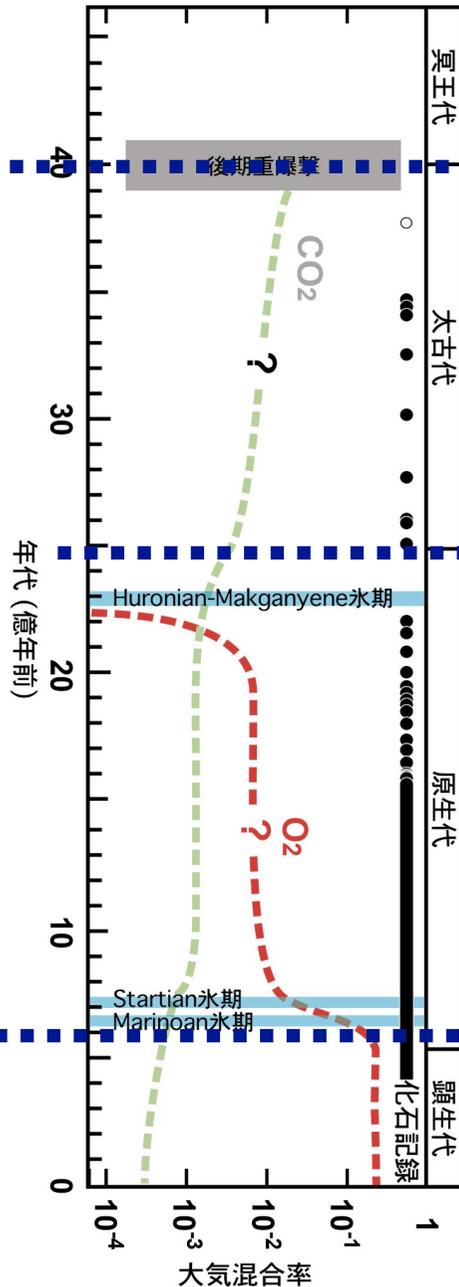
酸素はなぜ今21%もあるのか？

人間にとっての酸欠



中災防労働安全衛生法テキストより

地球史と古環境 (表層酸化イベント)



(0) 冥王代

“岩石記録がない”

(1) 太古代

化学合成 (+光合成?) 原核生物
 貧酸素大気 (CO₂に富む??)
 鉄に富む還元海洋
 少ない大陸地殻

← Great Oxidation Event (GOE) 約23億年前

(2) 原生代

+酸素発生型光合成、真核藻類
 >1% PAL O₂ 大気 (酸化的) 大陸の増加
 成層海洋 (酸化的浅海 + 硫化物に富む深海?)

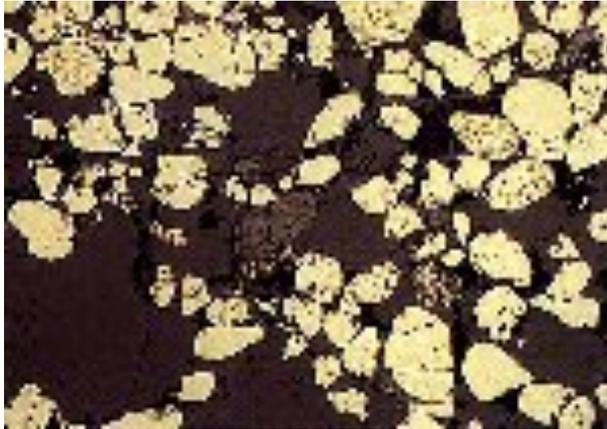
← Second Oxidation Event (SOE) 約6億年前

(3) 顕生代

+後生動物
 酸化的な大気海洋

Before or After GOE ?

(A) 碎屑性黄鉄鉱(detrital pyrite)



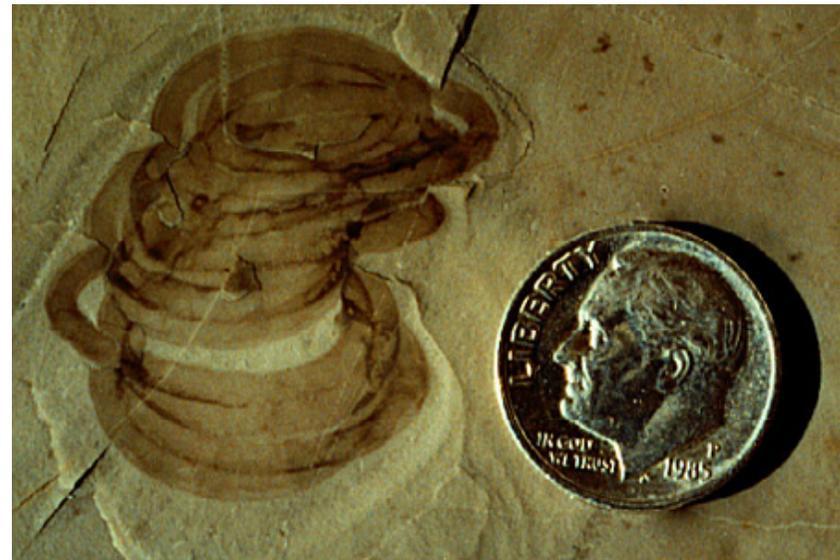
(B) 赤色砂岩層(Red Bed)



(C) 縞状鉄鉱層(BIF)



(D) 真核生物化石



大気酸化還元状態の記録

・定性的な指標:

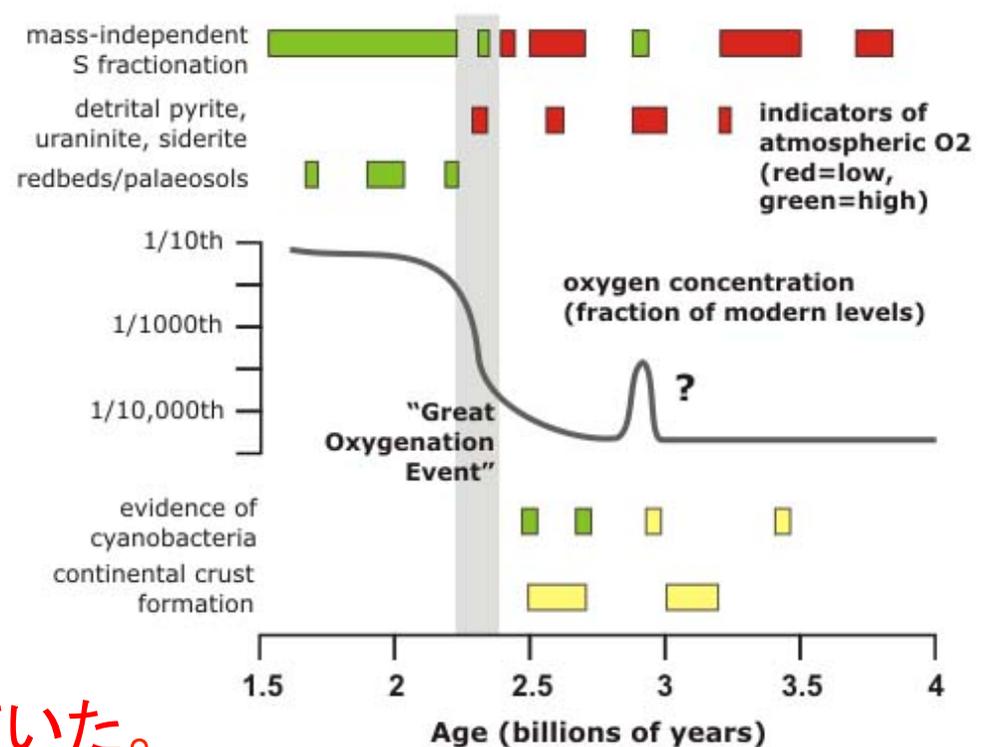
(還元大気)

砕屑性黄鉄鉱・ウラン鉱・BIF

(酸化大気)

赤色砂岩層、真核生物化石

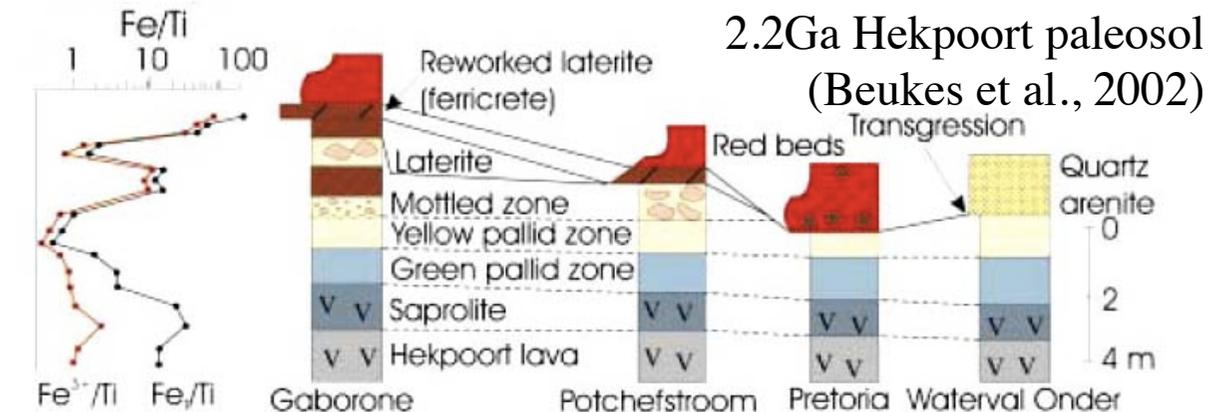
おそくとも20億年前には
地表の酸化的風化がはじまっていた。



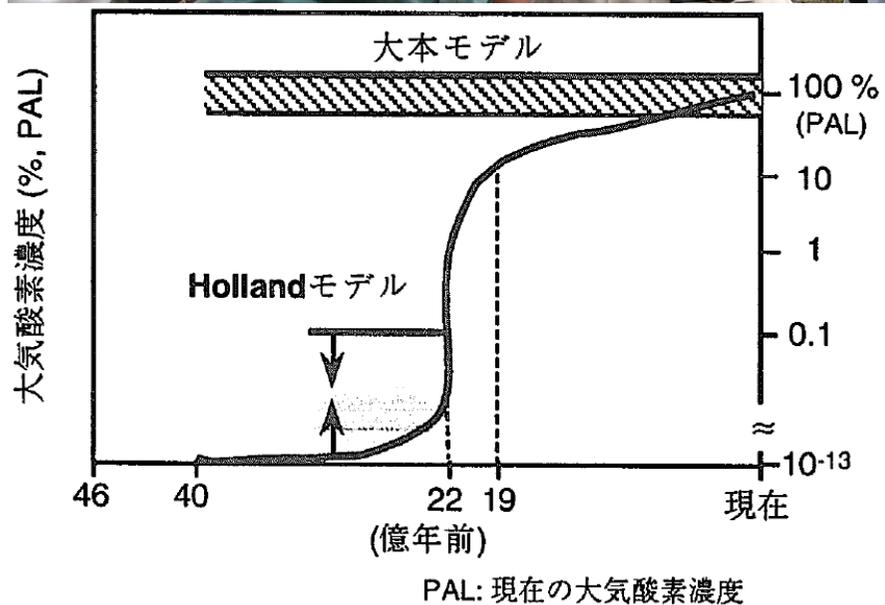
・化学指標(1): 古土壌(Paleosol)

風化により溶岩から溶脱したFeは
大気が酸化的ならば酸化鉄として
土壌表面で再沈殿(還元的なら失われる)

*ただし保存の問題

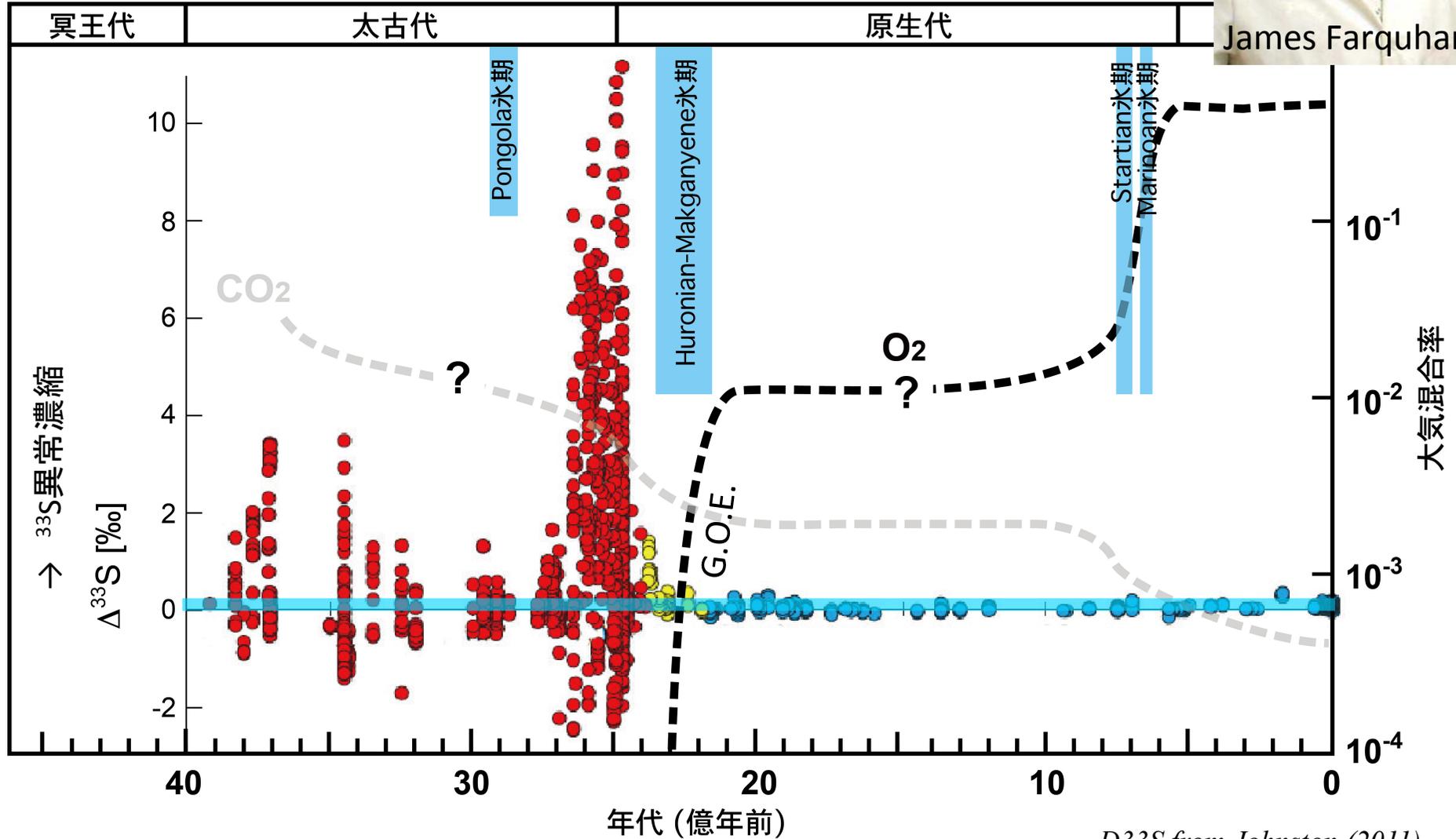


・化学指標(2): 硫黄の非質量依存同位体分別(MIF)



硫黄同位体異常の発見 (Farquhar et al., 2000)

大気O₂濃度上昇を示す最も強力な証拠



GOEの証拠： 硫黄同位体異常の発見 (Farquhar et al., 2000)

^{32}S	95.02%
^{33}S	0.75%
^{34}S	4.21%
^{36}S	0.02%

通常の物理化学過程

$$\delta^{33}\text{S} = 0.5 \delta^{34}\text{S}$$

Thermochemical
Biological, Physical processes

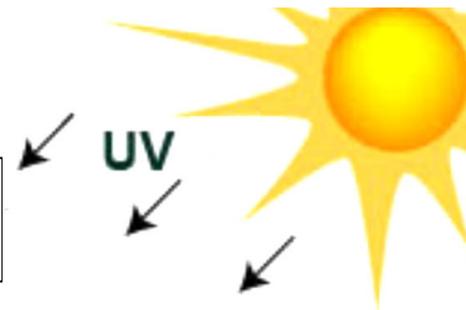
同位体異常

$$\delta^{33}\text{S} \neq 0.5 \delta^{34}\text{S}$$

A few photochemistry



$$\Delta^{33}\text{S} = \delta^{33}\text{S} - 0.5 \delta^{34}\text{S}$$

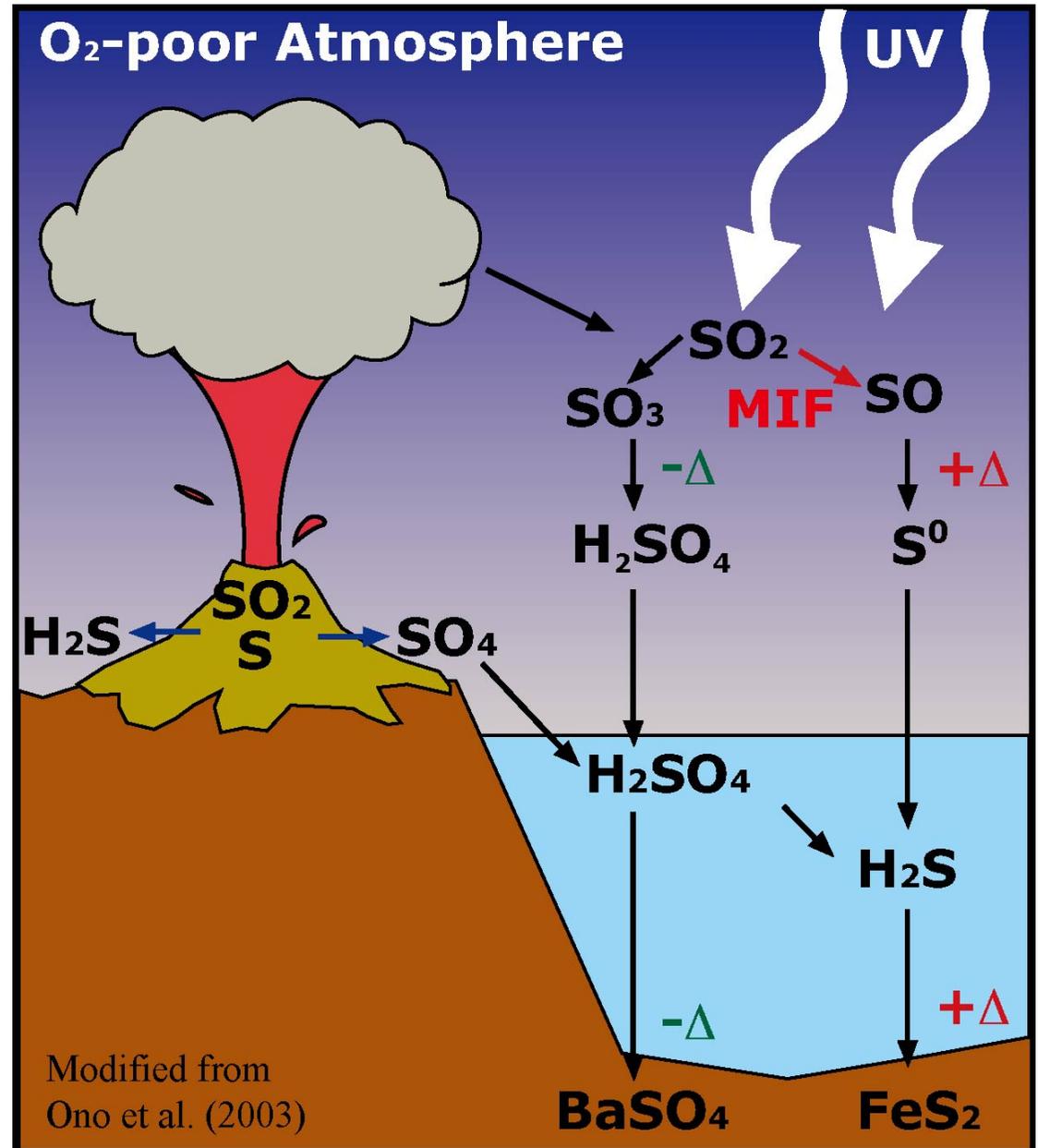


硫黄同位体異常の発見 (Farquhar et al., 2000)



23億年前までは無酸素大気であったため紫外線による大気化学反応が硫黄の同位体異常を起こし、硫酸塩・硫化鉱物として地層に記録された。

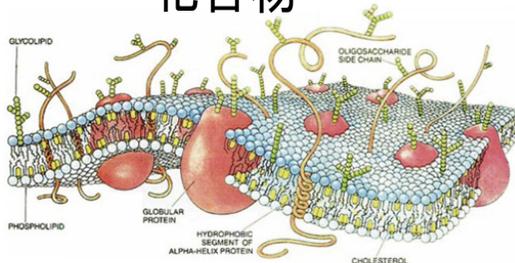
大気 O_2 濃度上昇を示す最も強力な証拠



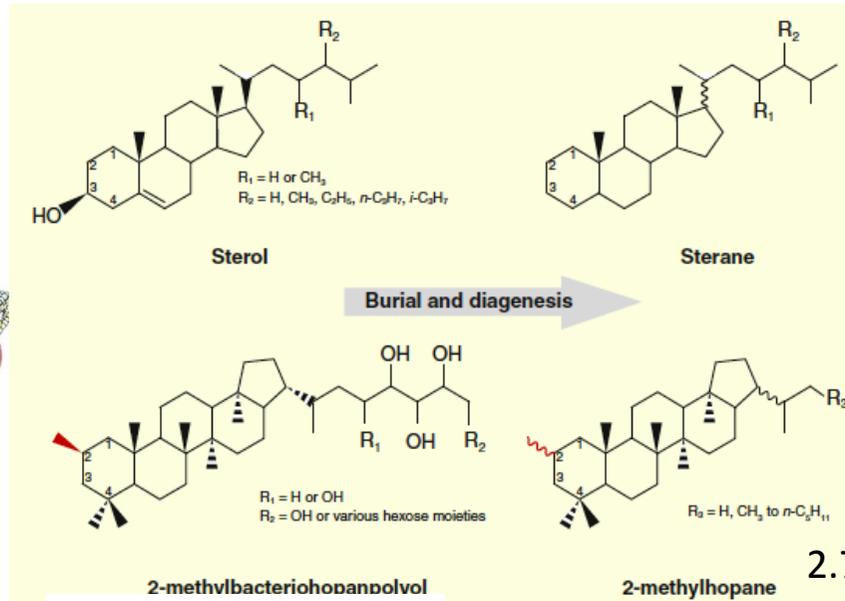
GOEの直前： 光合成の証拠

分子化石 Molecular Fossil (Biomarker Molecules)

膜脂質
テルペノイド由来
化合物



Cartoon of a biomembrane



sterane

真核生物

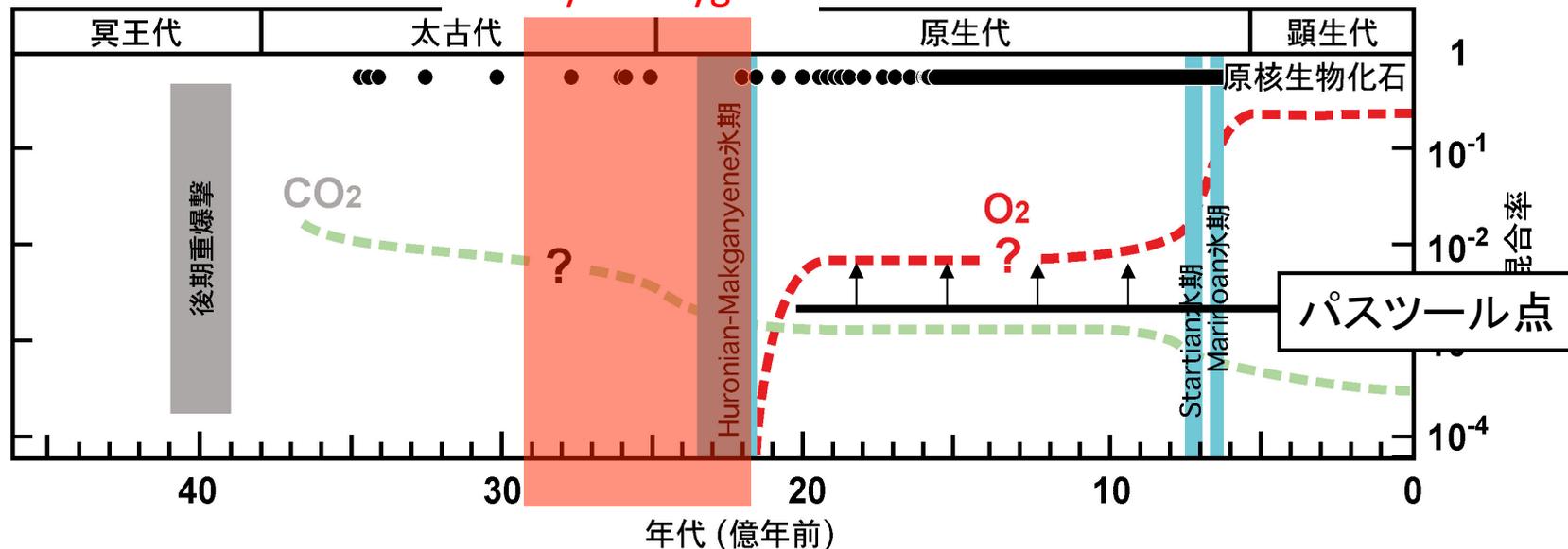
2 α - methyl hopane

シアノバクテリア

2.7 Ga Brocks et al. (1999)

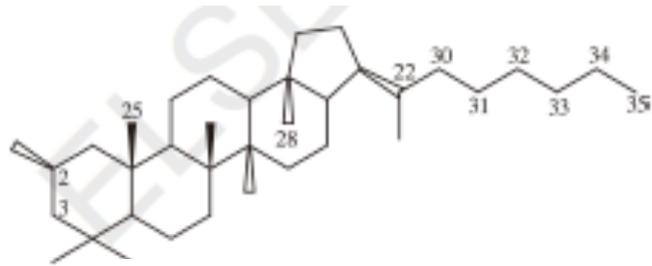
2.7 Ga Eigenbrode et al. (2008)

"Delay of Oxygen"



生命進化と古大気

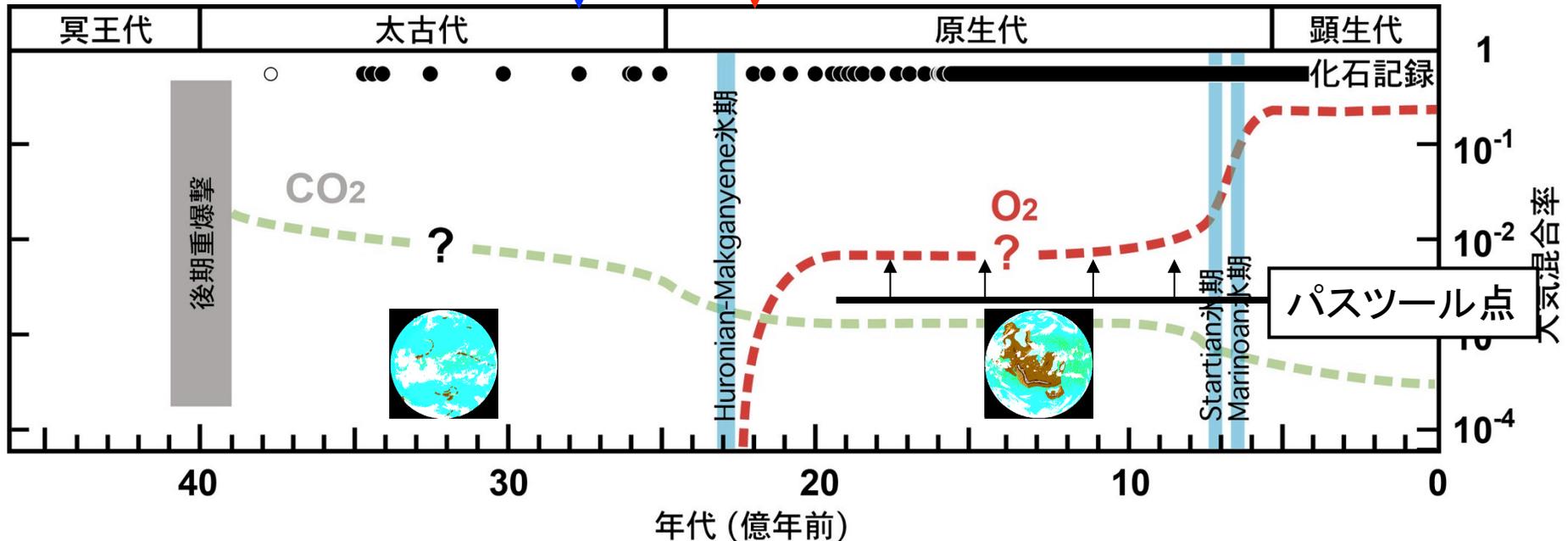
- ・地球大気の酸素濃度は遅くとも20億年前までに1%PAL以上に上昇
- ・光合成はその5億年以上前に出現していたらしい(論争中)



シアノバクテリア分子化石
酸素発生型光合成

硫黄MIFの消滅($O_2 > 10^{-5}$ PAL)

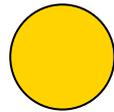
真核生物 ($O_2 > 1\%$ PAL)



大気O₂は光合成に由来するか？

大気O₂
21%

大気CO₂
380ppm

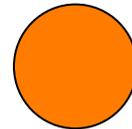


光合成



全海洋CO₂
4万ギガトン

全生物
炭素量

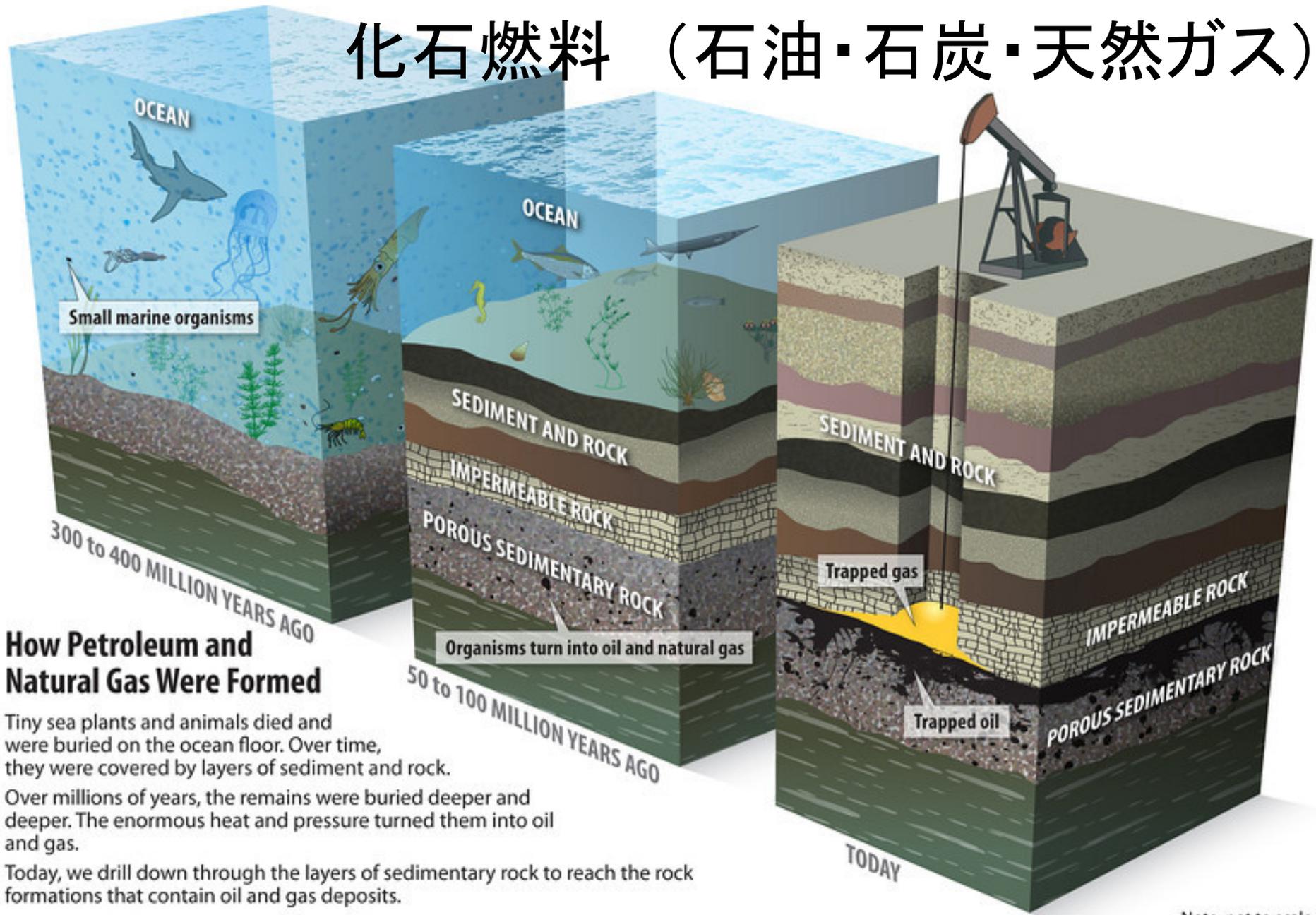


6百ギガトン

*有機炭素と同量の酸素
が出来るはずだが。。。

人間が貯った炭素を掘り起こす

化石燃料（石油・石炭・天然ガス）



How Petroleum and Natural Gas Were Formed

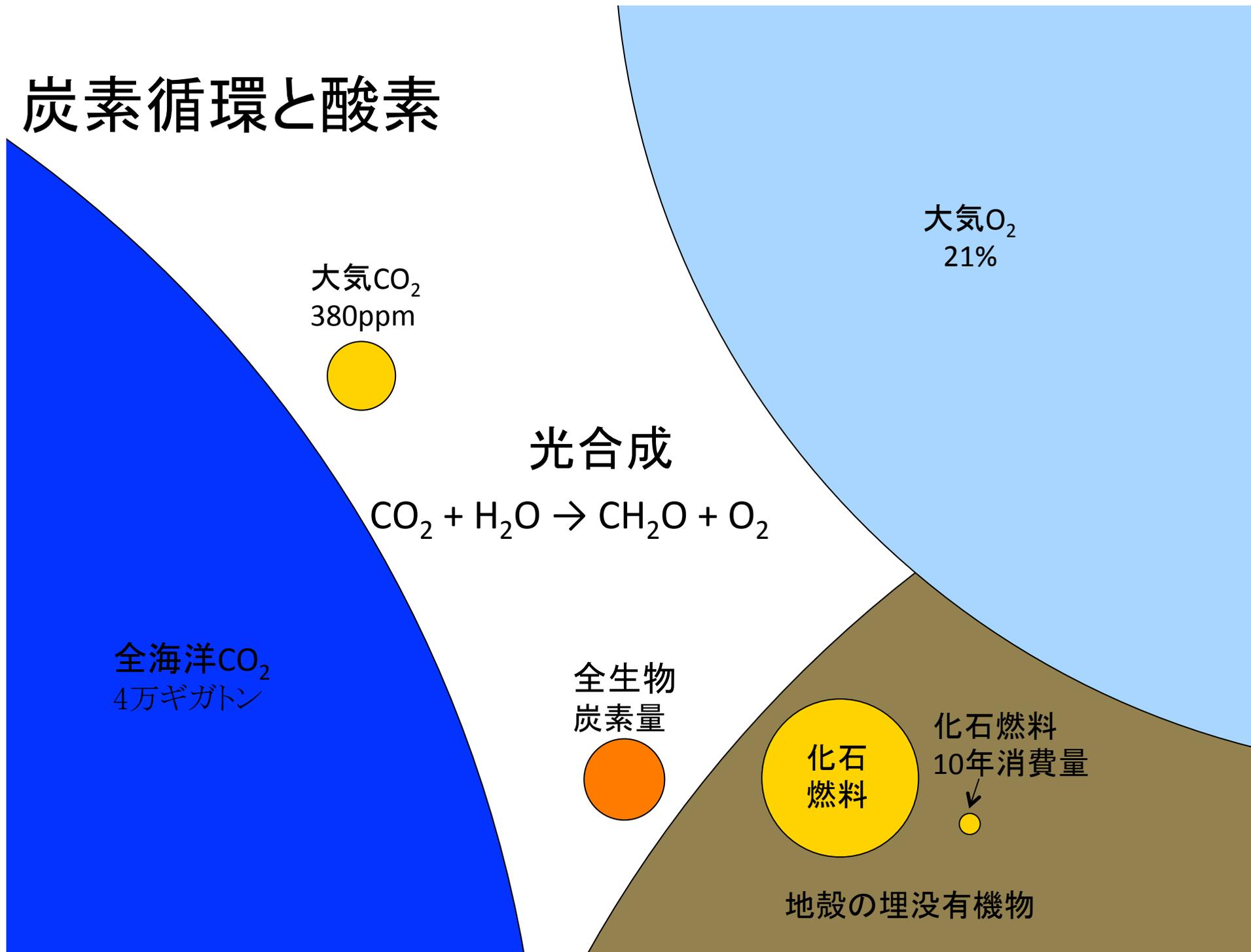
Tiny sea plants and animals died and were buried on the ocean floor. Over time, they were covered by layers of sediment and rock.

Over millions of years, the remains were buried deeper and deeper. The enormous heat and pressure turned them into oil and gas.

Today, we drill down through the layers of sedimentary rock to reach the rock formations that contain oil and gas deposits.

Note: not to scale

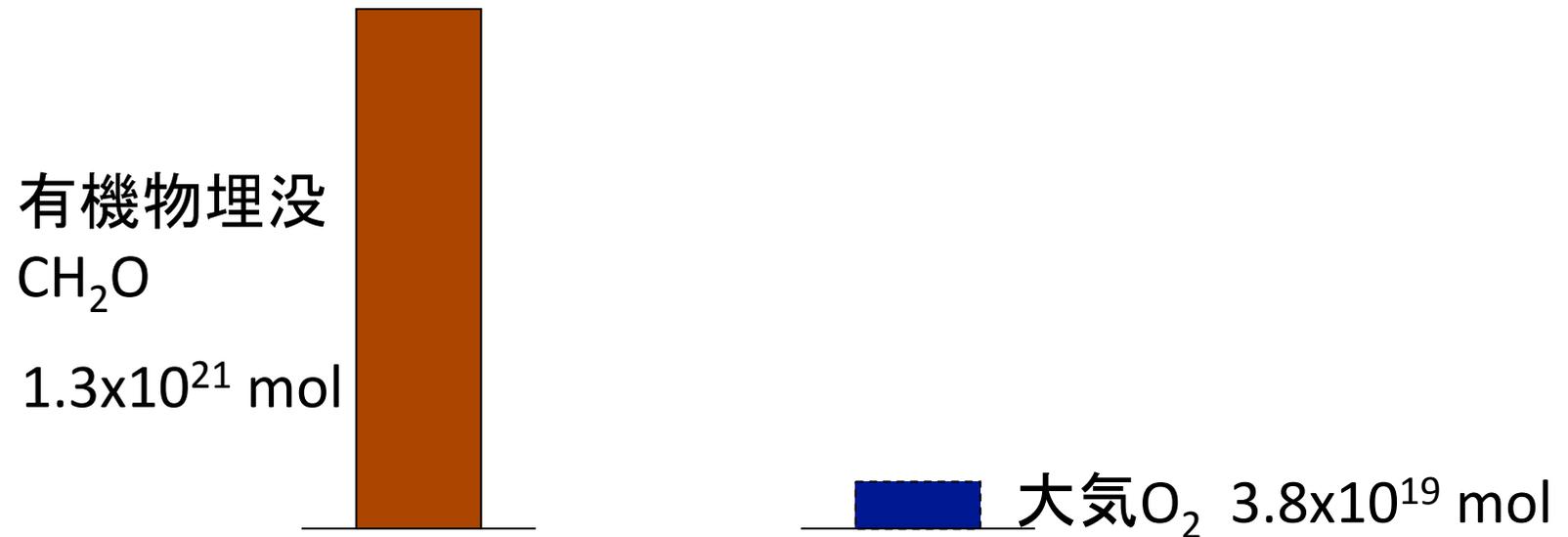
炭素循環と酸素



46億年間の総酸素生成・消費の収支

生成

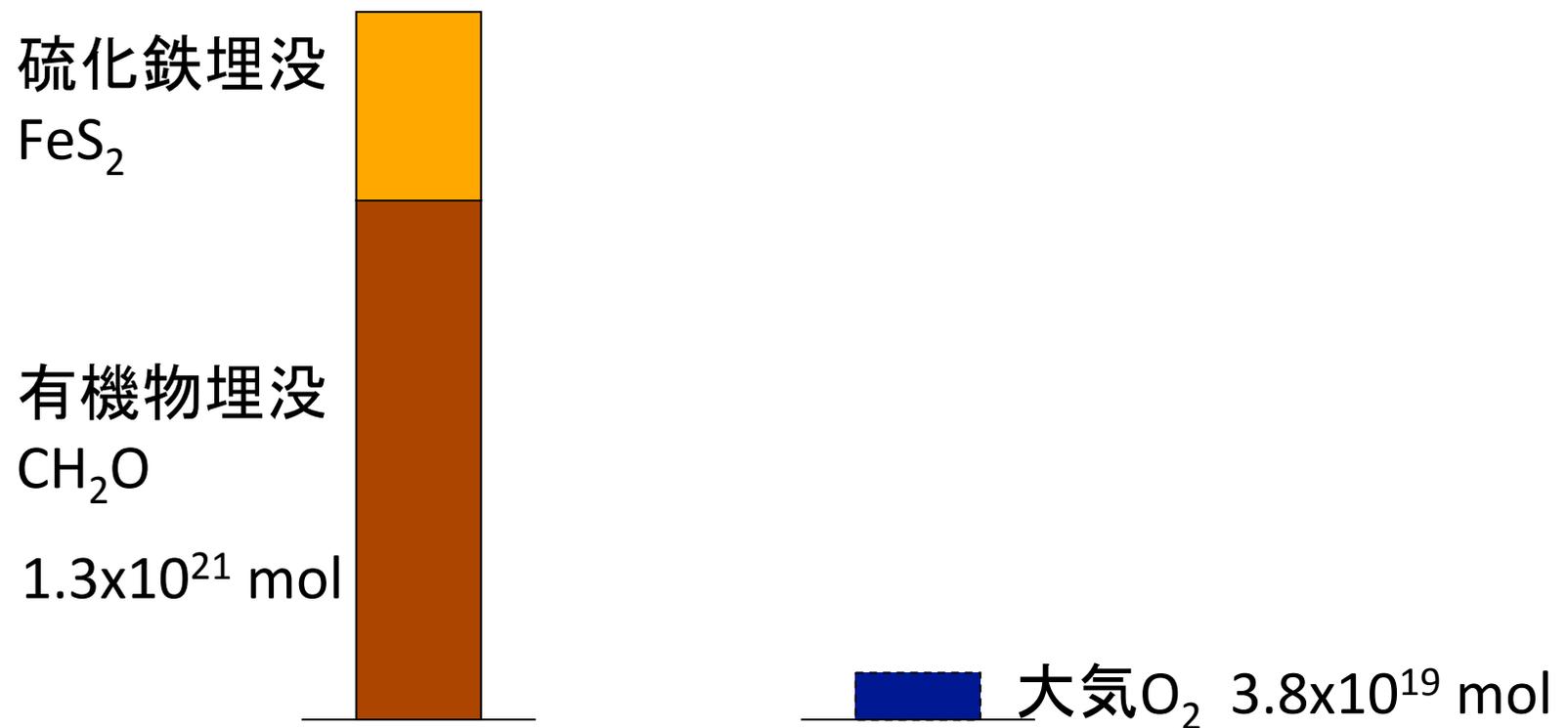
消費



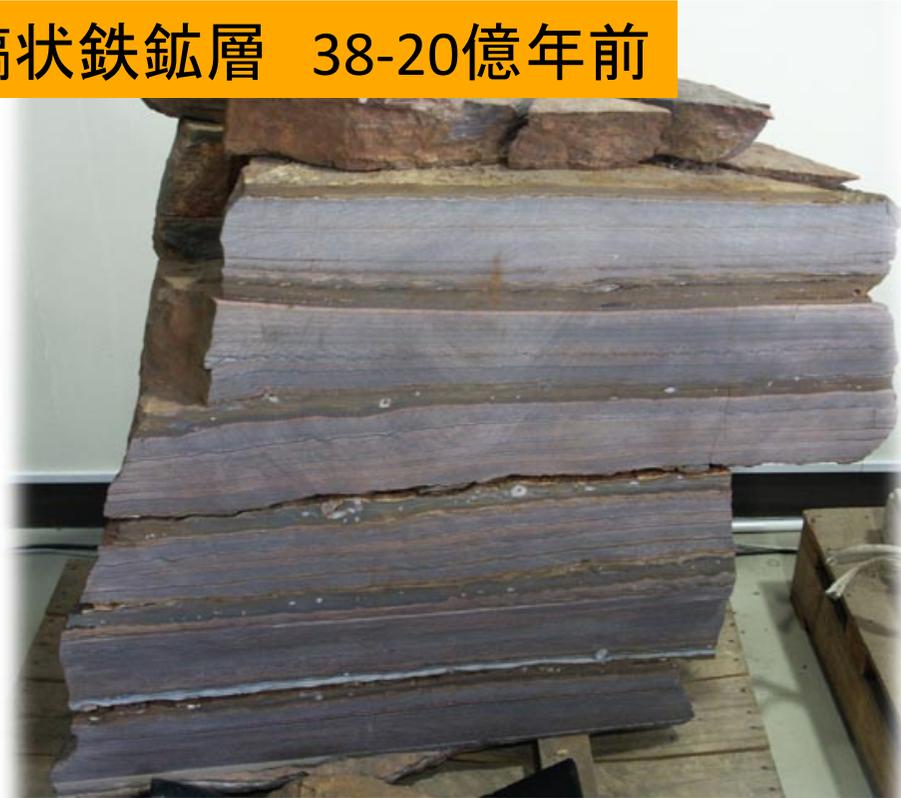
46億年間の総酸素生成・消費の収支

生成

消費



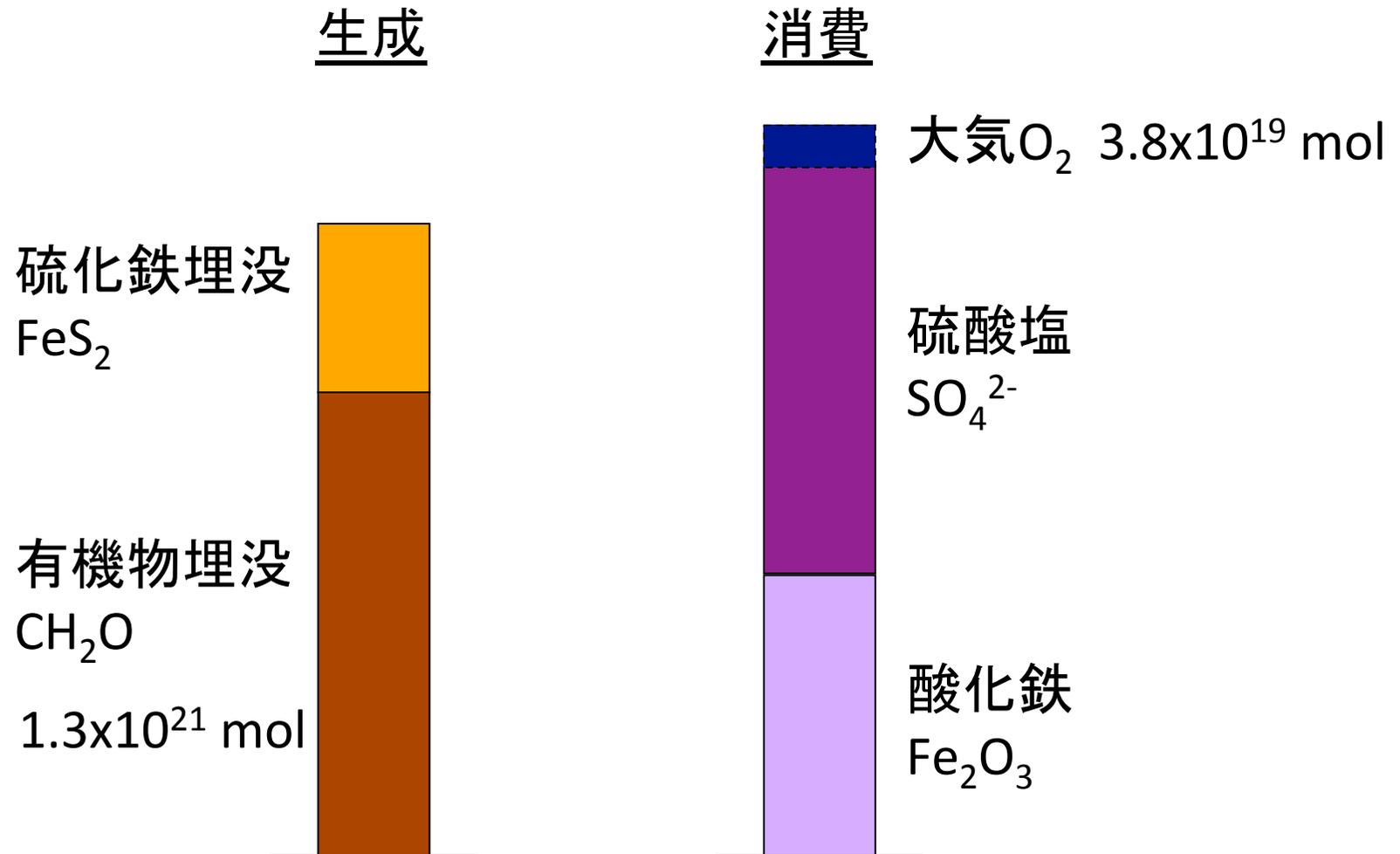
縞状鉄鉱層 38-20億年前

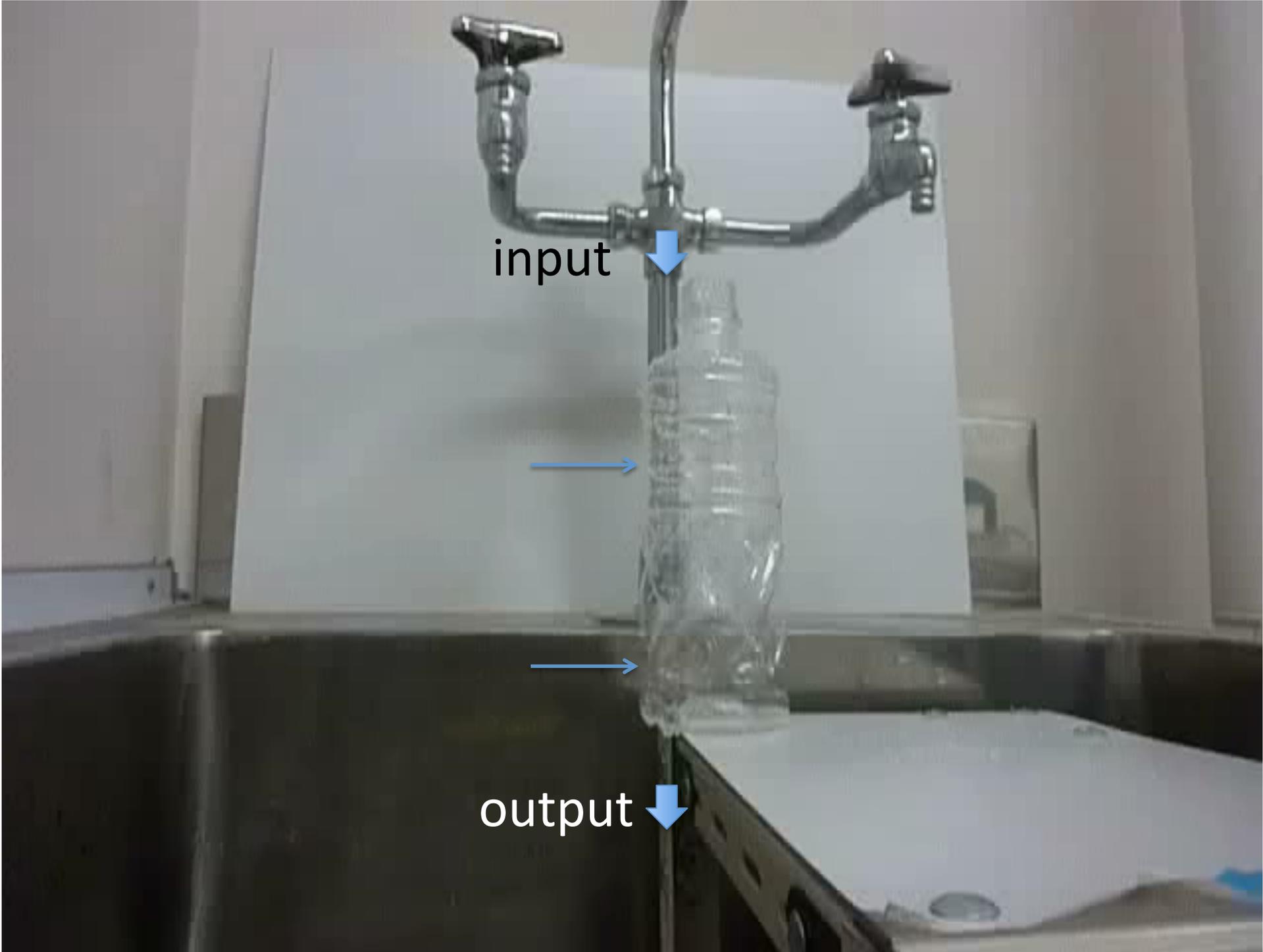


縞状鉄鉱層 (BIF):
約20億年前までに限り堆積

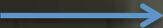


46億年間の総酸素生成・消費の収支





input

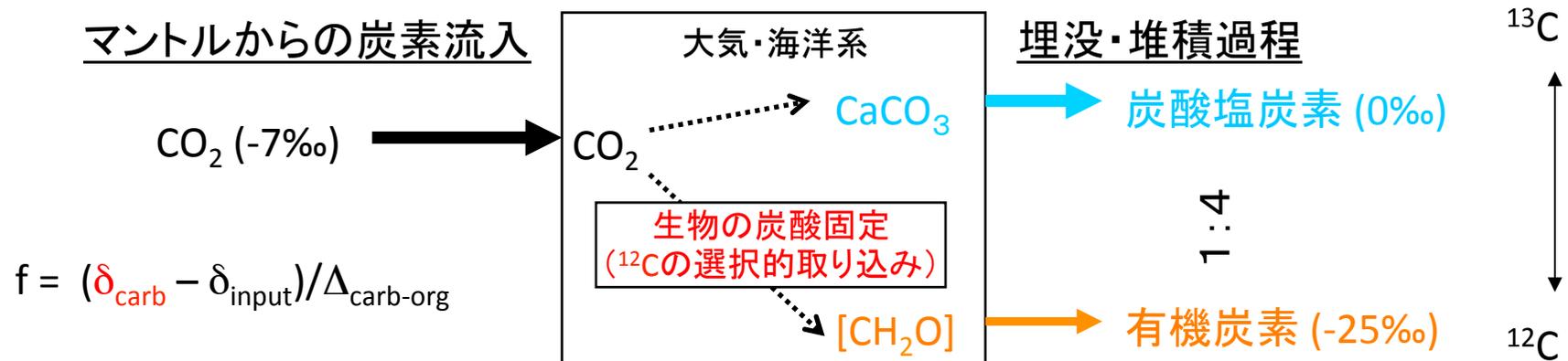
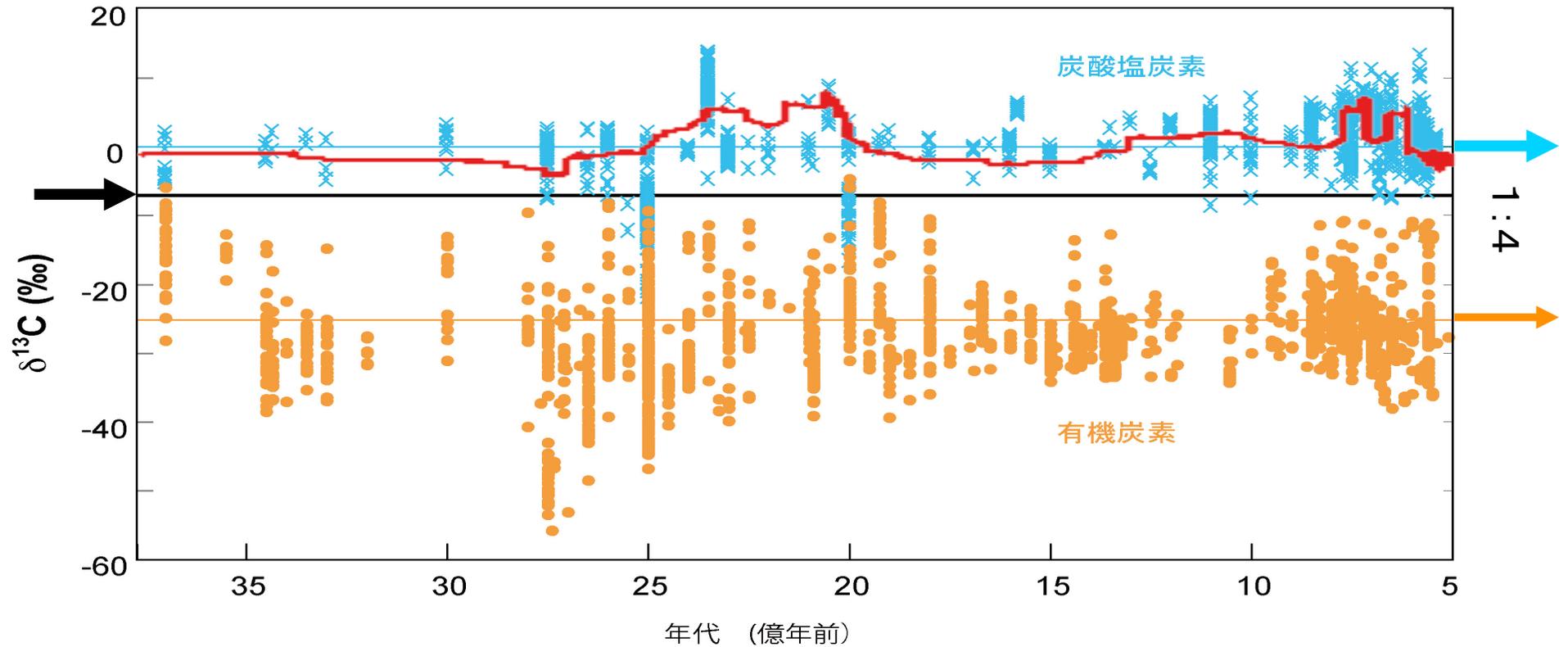


output



炭素循環の長期変動（大気海洋系についての物質移動）

炭酸塩炭素同位体比は有機物埋没率(f)を反映



Q2)

地球内部から火成活動を通して大気海洋系に流入する炭素のフラックスは平均 8×10^{12} mol/yearであり、またその炭素同位体組成($\delta^{13}\text{C}$)は-5‰である。この炭素は長期的には光合成により固定された有機物の埋没と、炭酸塩の沈殿により大気海洋系から除去される。

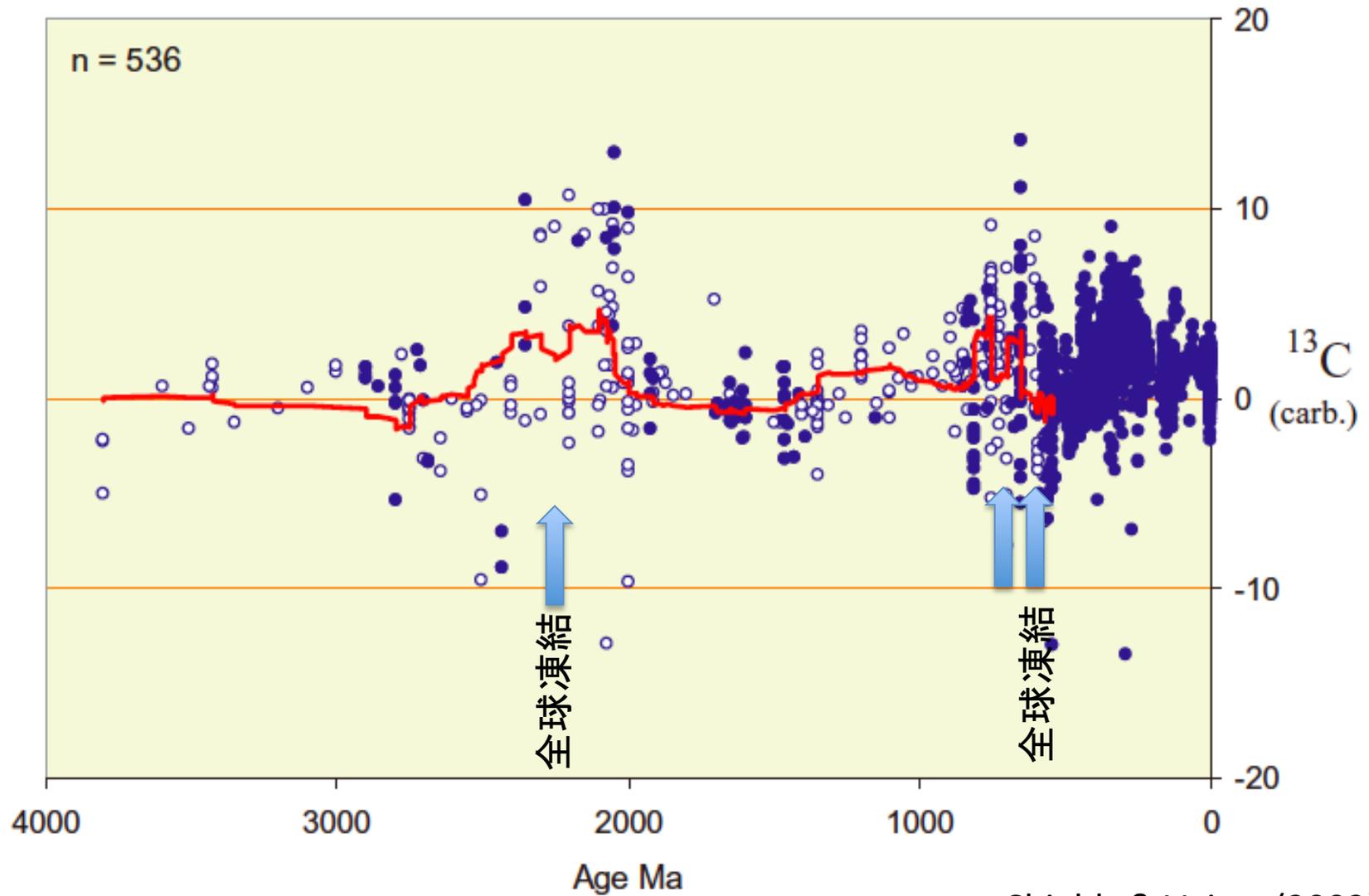
定常状態で大気海洋系から除去される有機炭素、炭酸塩炭素の全球平均同位体組成がそれぞれ-25‰、0‰であったとする。このとき、同位体収支を考慮して、有機炭素の埋没フラックス(mol/year)を求めよ。

1万年以上の長期タイムスケールでは、有機炭素の埋没が大気海洋系への酸素(O_2)供給過程と考えられる。その理由を説明せよ。

また、これ以外にどのような酸素供給過程があるか1つ答えよ

$\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 正異常: 高い有機物埋没率

= 酸素の放出 + 有機物生産



Shields & Veizer (2002)

大陸の役割

- 1) 風化過程を通じた海洋への栄養塩供給
- 2) 生物生産(有機物生産)
- 3) 沿海での有機物埋没

光合成



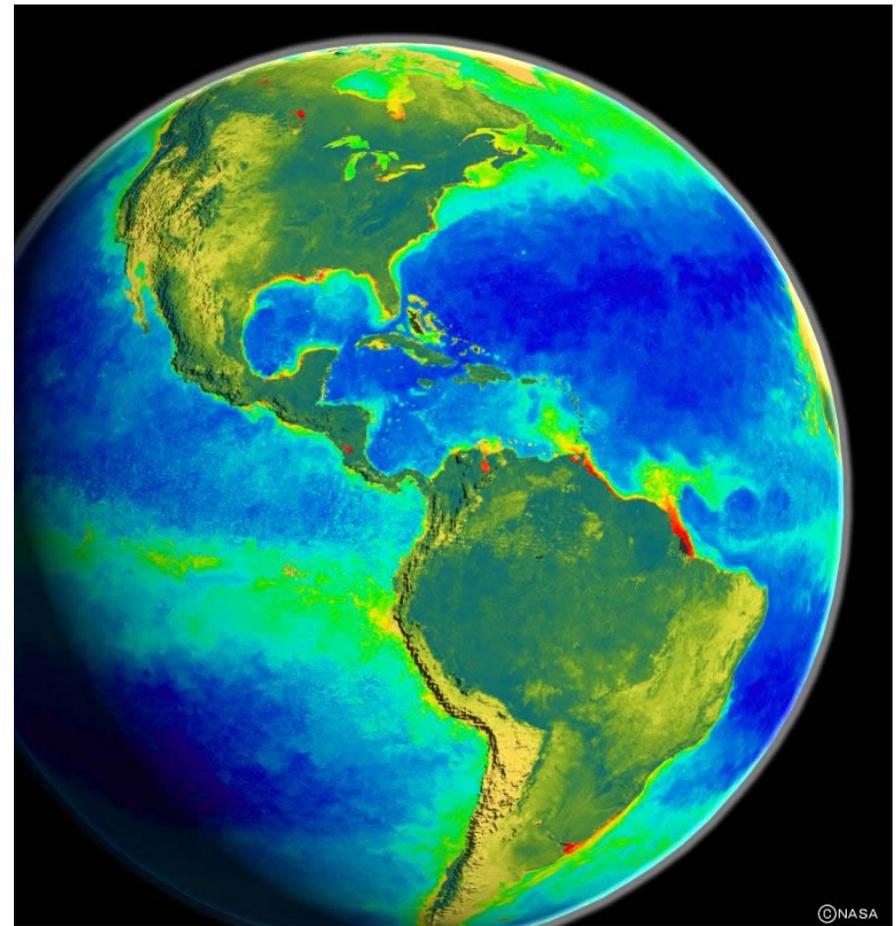
呼吸

光合成・呼吸のバランスを考慮すると、大陸成長は大気への酸素供給を左右しているはずである

(クロロフィル分布)

有機物埋没速度を増やす要因

大陸成長

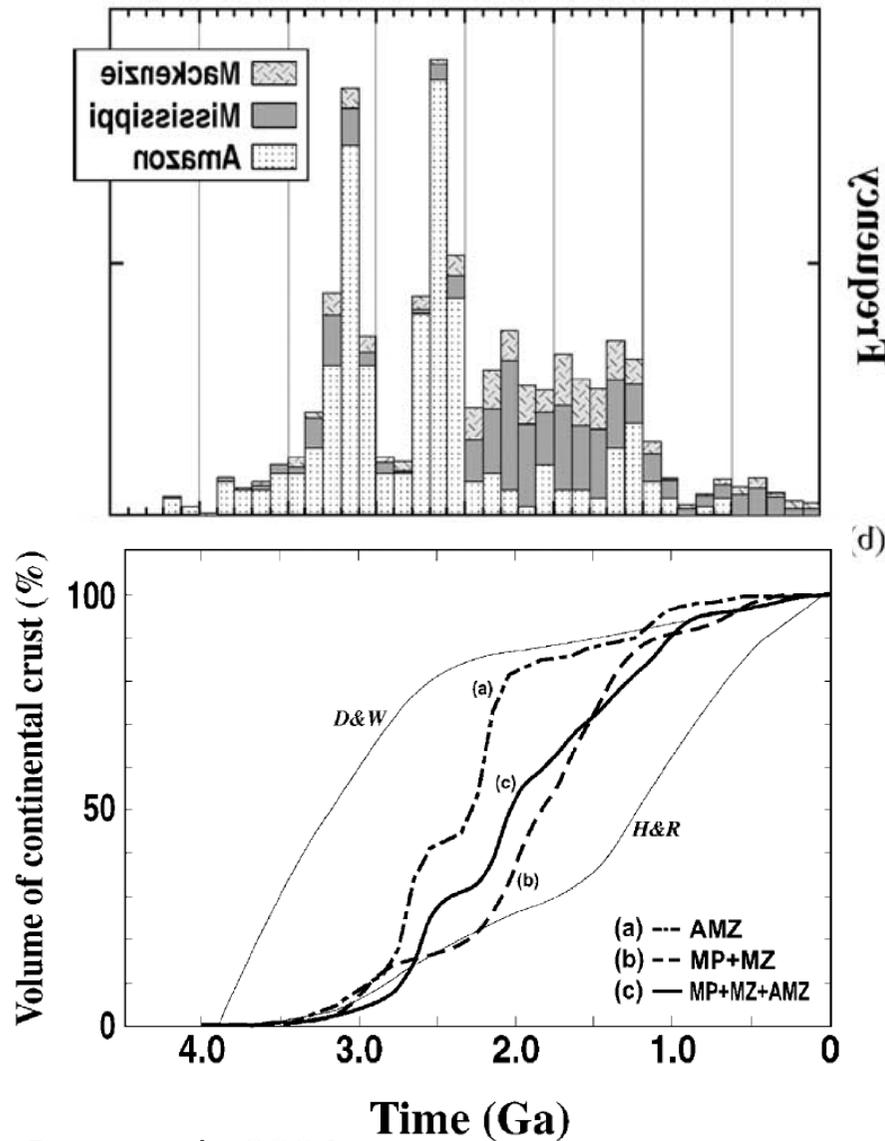


レッドフィールド比 $P : N : C = 1 : 16 : 106$ PとNが足りない

(栄養塩供給・基礎生産・埋没量を支配)

段階的な大陸成長

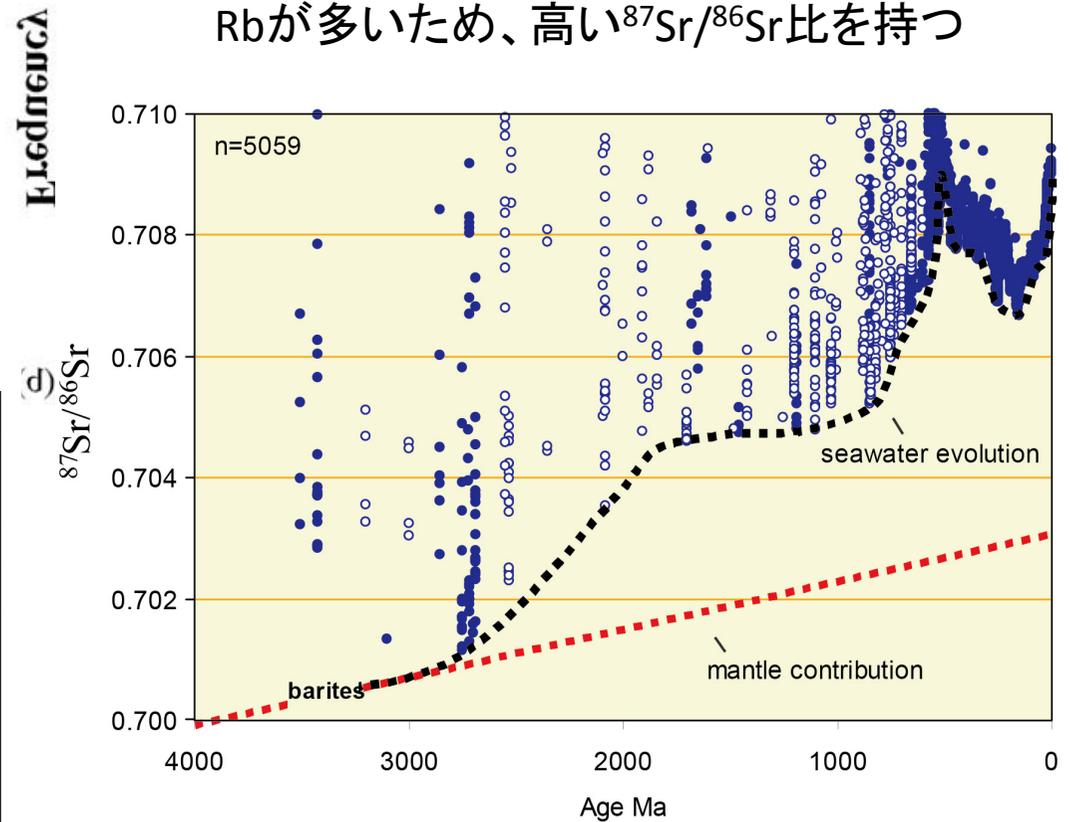
(28と23億年前頃に増加)



Rino et al., 2004

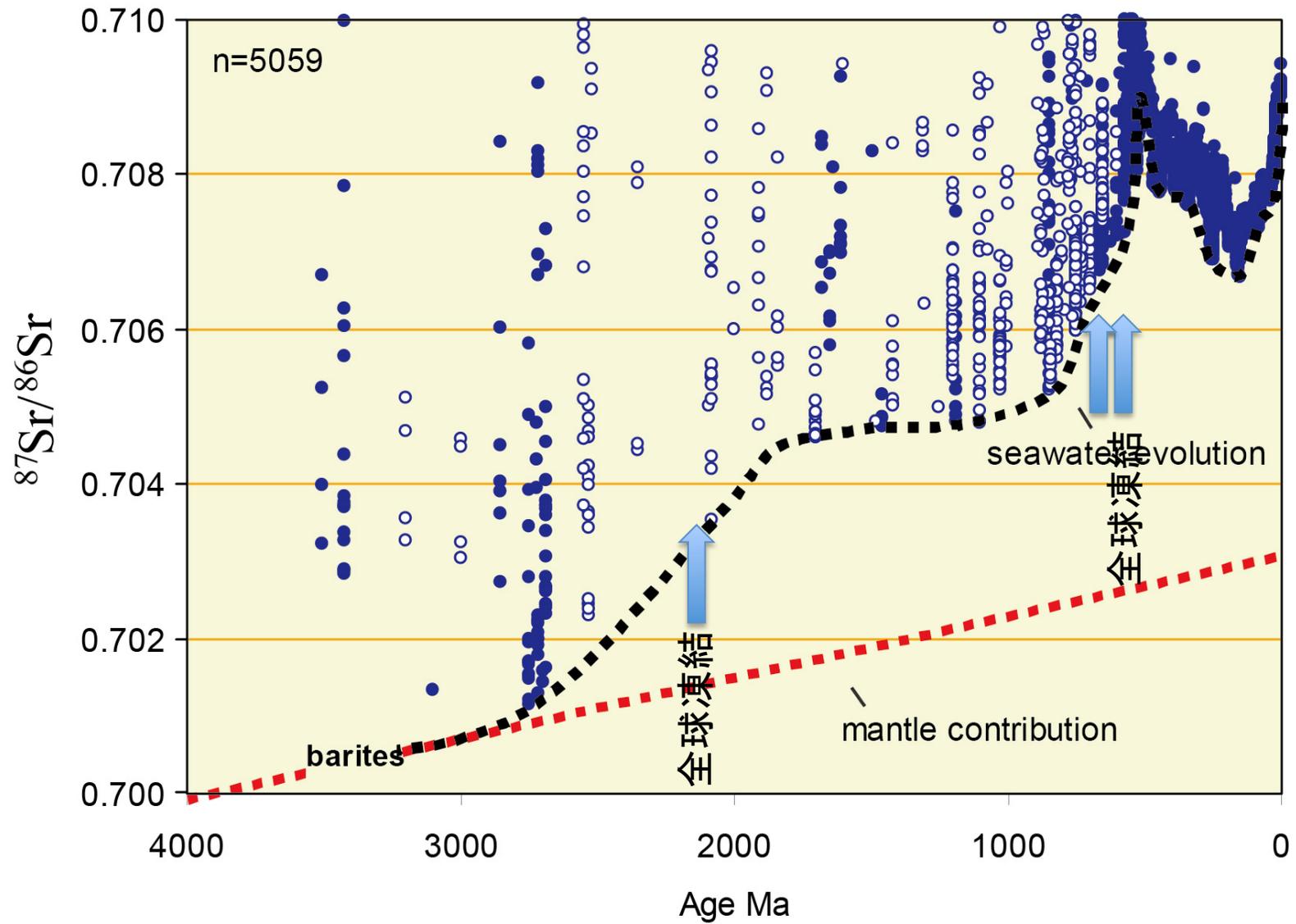
海で堆積した炭酸塩岩のSr同位体組成

$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$: 大陸地殻(花崗岩)は Rbが多いため、高い $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持つ

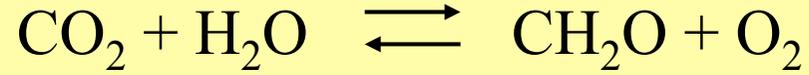


Shields & Veizer (2002)

Sr同位体：大陸物質の海への流入 (栄養塩供給)

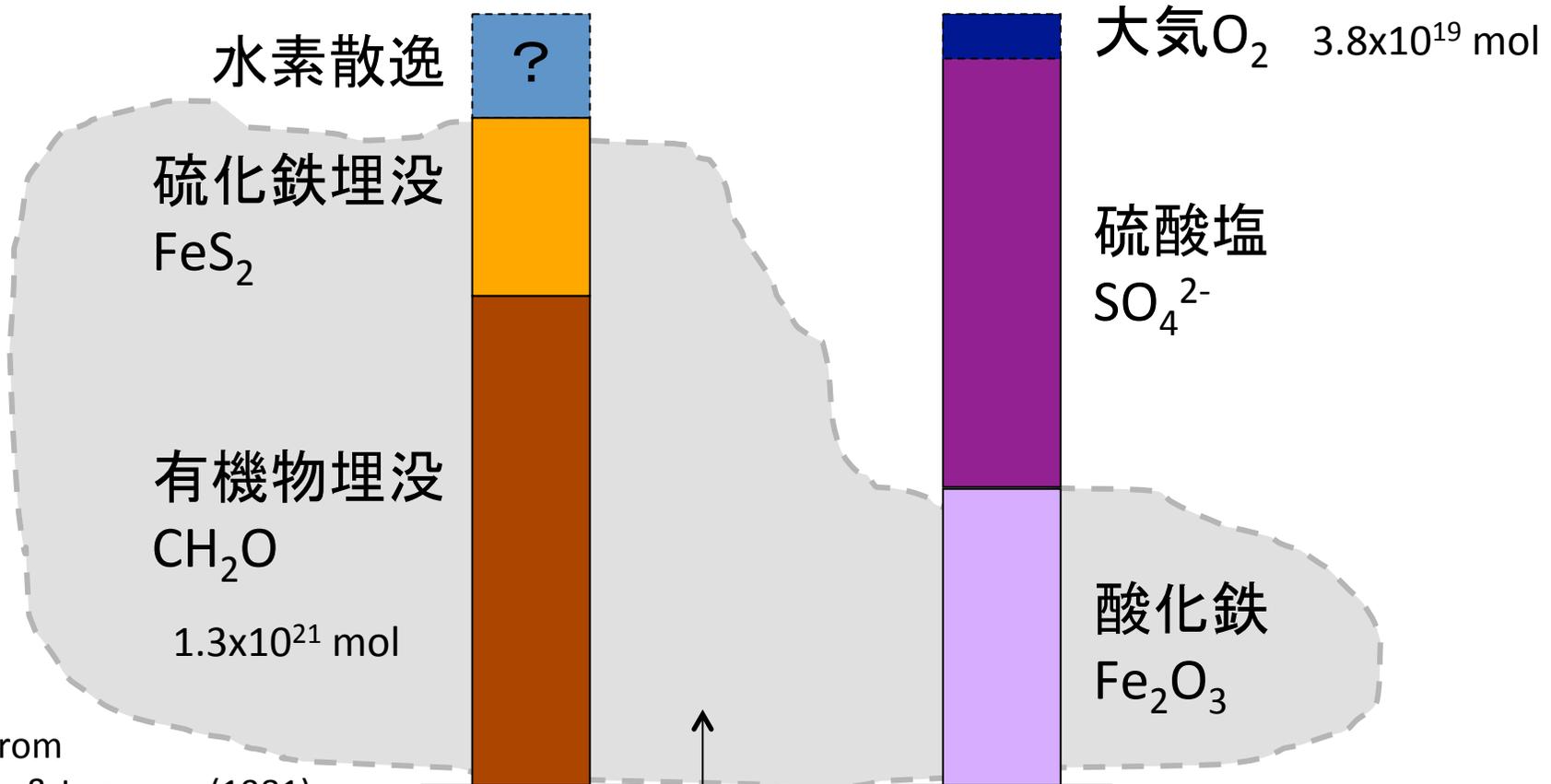


46億年間の総酸素生成・消費の収支



生成

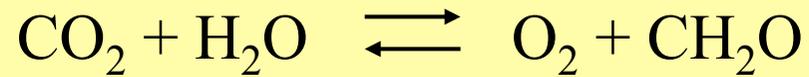
消費(行き先)



Data from
Garrels & Learman (1981)
+ 理科年表
+ 「地球化学」(松尾)

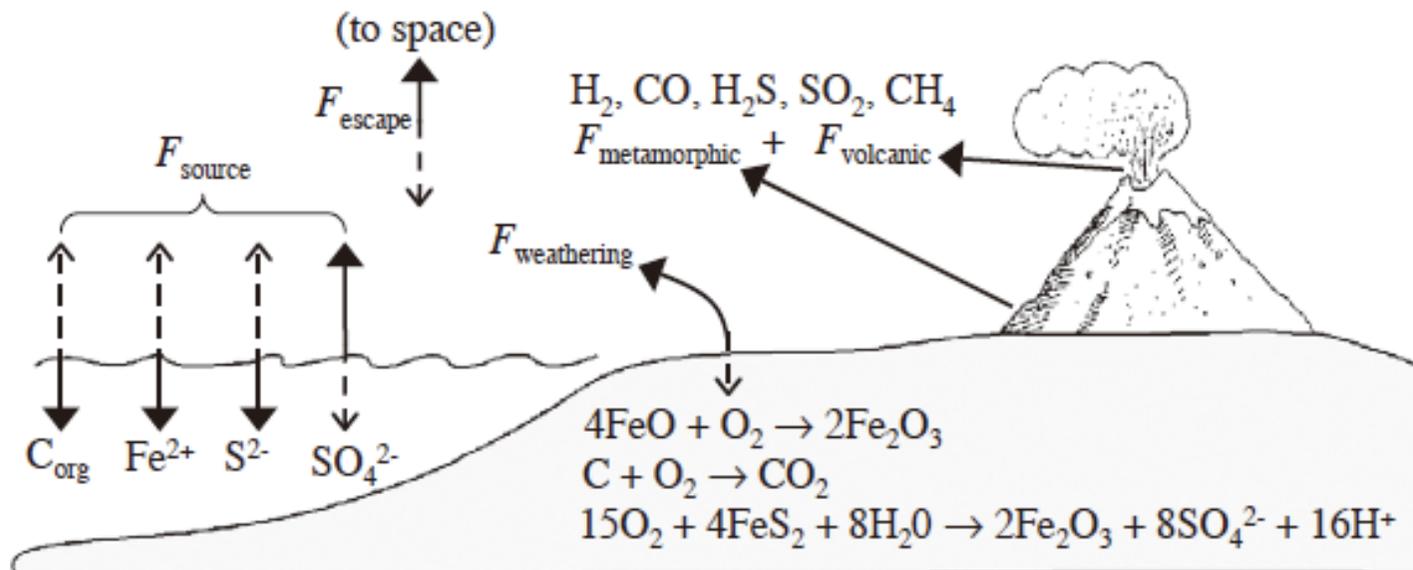
↑
成長した大陸地殻: 還元力の墓場

光合成の開始は酸素上昇の必要条件だが十分条件ではない。



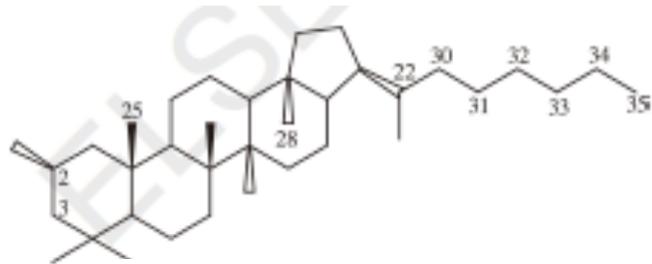
大気酸素濃度上昇の要因 (未解決)

- ・大陸増加に伴う有機物埋没 (DesMarais et al., 1994, 1996)
- ・宇宙空間への水素散逸 (Catling et al., 2001; Hoehler et al., 2001)
- ・火山ガスCO₂/H₂O比、SO₂/H₂O比の増加 (Holland, 2002, 2009)
- ・マントル酸化状態の変化と火山ガス組成変化 (Kump et al., 2001)



生命進化と地球表層の酸化

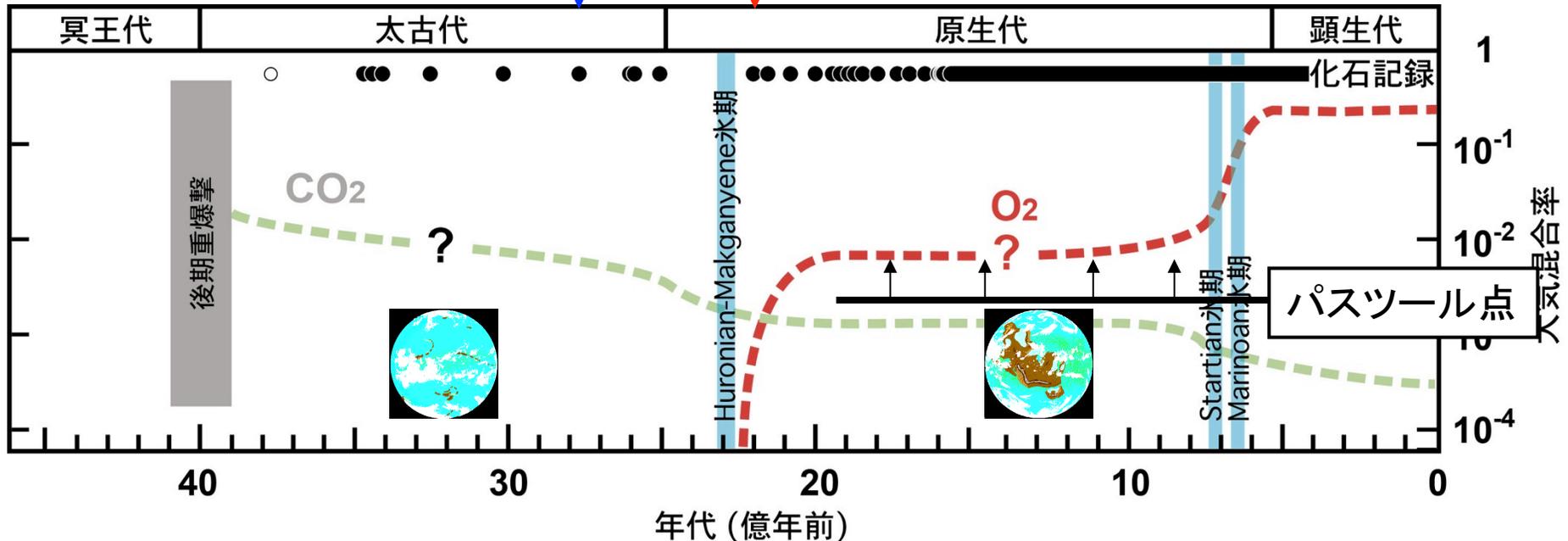
- ・地球大気の酸素濃度は遅くとも20億年前までに1%PAL以上に上昇
- ・光合成はその5億年以上前に出現していたらしい(論争中)



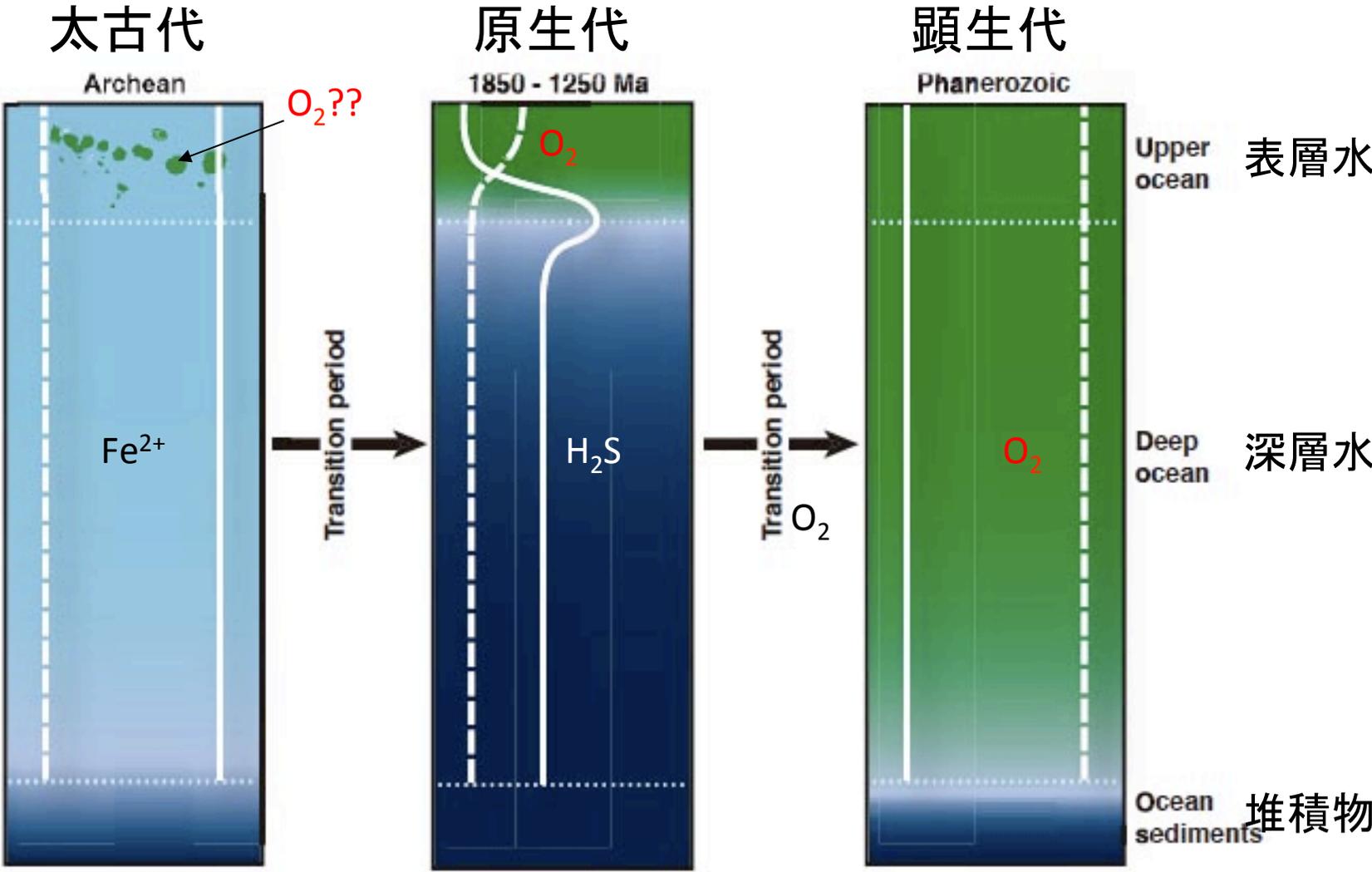
シアノバクテリア分子化石
酸素発生型光合成

硫黄MIFの消滅($O_2 > 10^{-5}$ PAL)

真核生物 ($O_2 > 1\%$ PAL)



海洋酸化状態の変遷



縞状鉄鉱層の成因と古海洋



縞状鉄鉱層 (BIF):
約20億年前までに限り堆積



縞状鉄鉱層 (Banded Iron Formation: BIF)

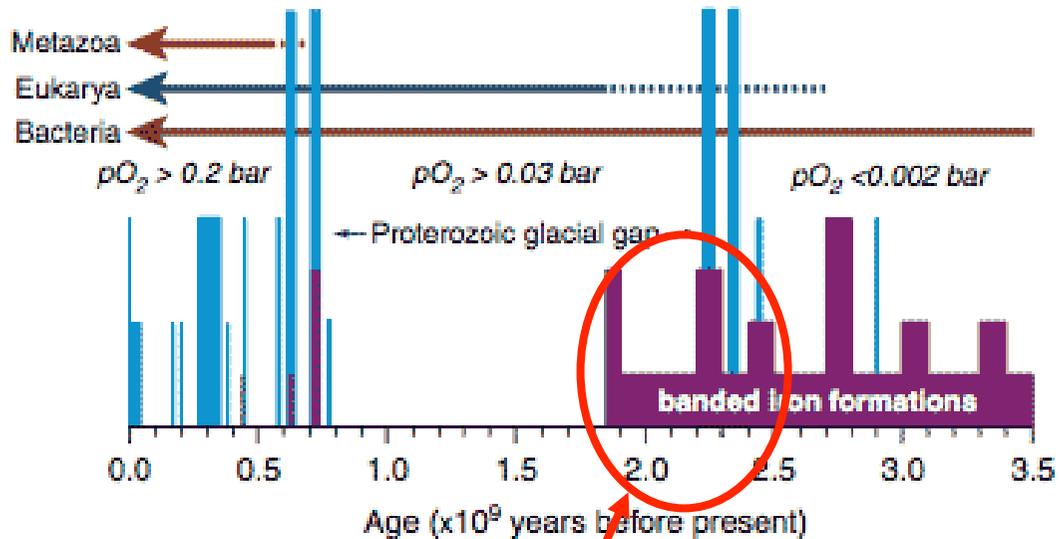
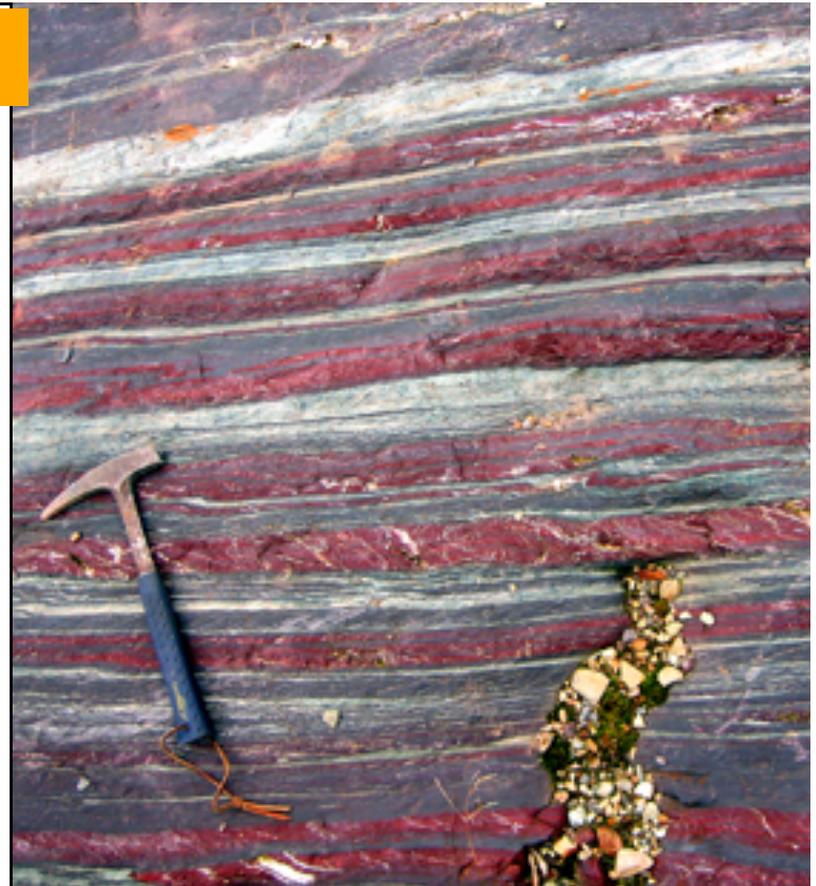


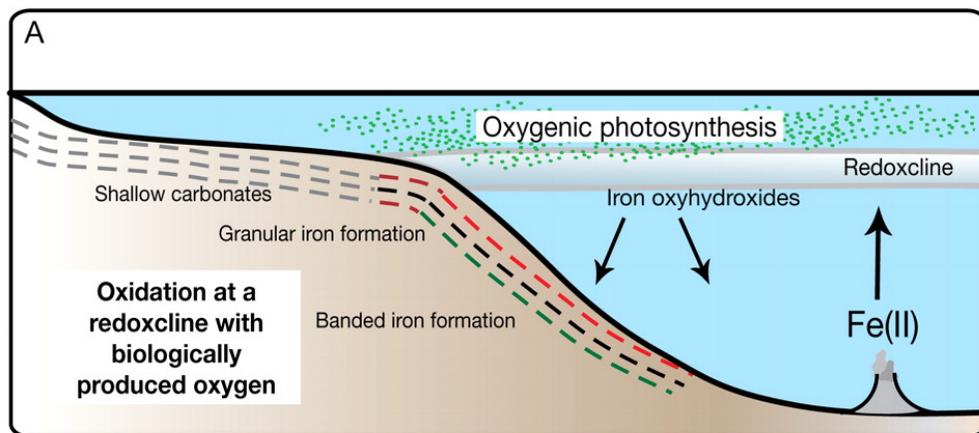
Fig. 12 Frequency of occurrence of iron formations (purple) (modified from Isley and Abbott, 1999), major glacial periods (blue) (Crowell, 1999), constraints on atmospheric oxygen levels (Rye and Holland, 1998), and steps in the history of life. Note the two eras of snowball events separated by a 1.5 billion year gap when evidence is lacking for glaciation at any latitude.



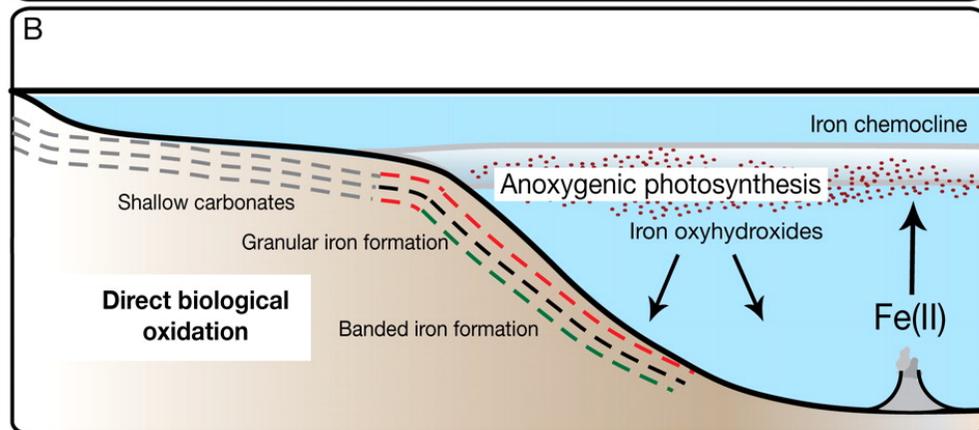
スペリオール型BIF(火成岩を伴わない)は25~20億年前に集中して堆積した。酸化鉄とシリカの細互層が側方連続性良く長期間堆積。

大量のFeを広範囲一様に堆積させるには溶存二価鉄に富む海洋が存在していなければほとんど不可能
(還元的海洋の表層で鉄は酸化し沈殿した)

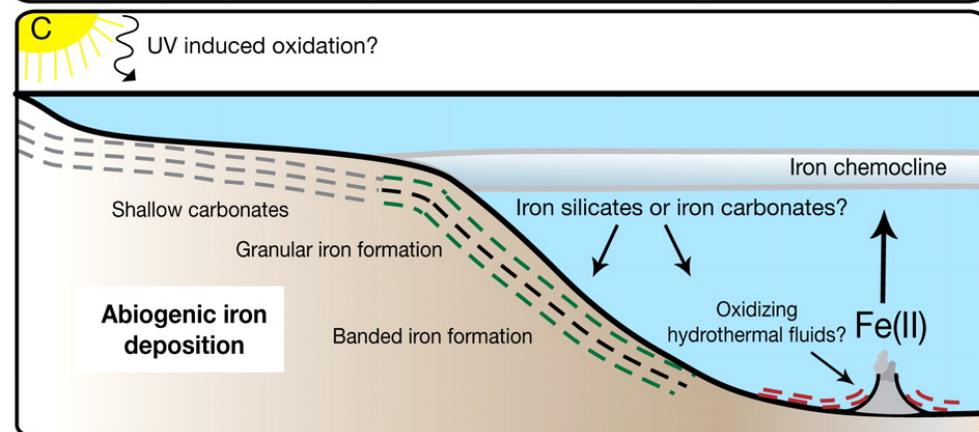
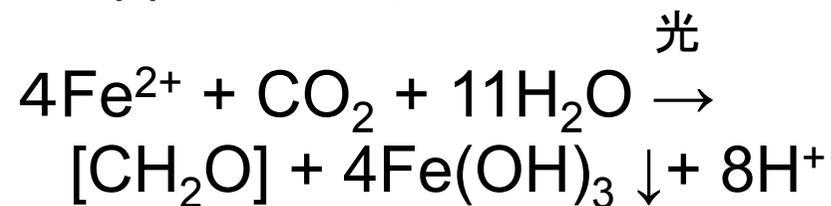
鉄に富む太古代海洋とBIFの成因



A) 酸素発生型光合成

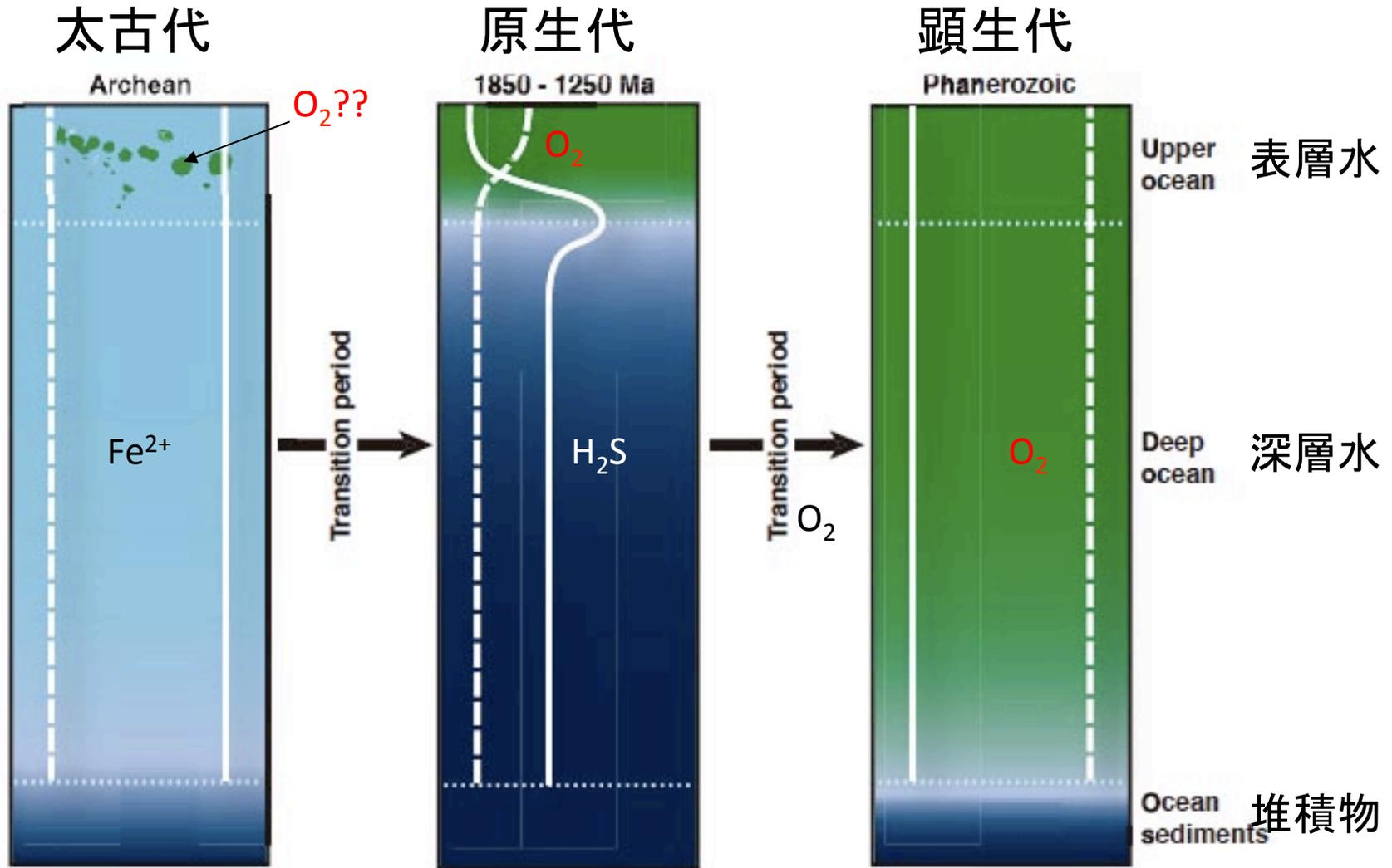


B) 嫌気光合成による鉄酸化
(Kappler et al., 2005)



C) 紫外線による鉄酸化

海洋酸化状態の変遷



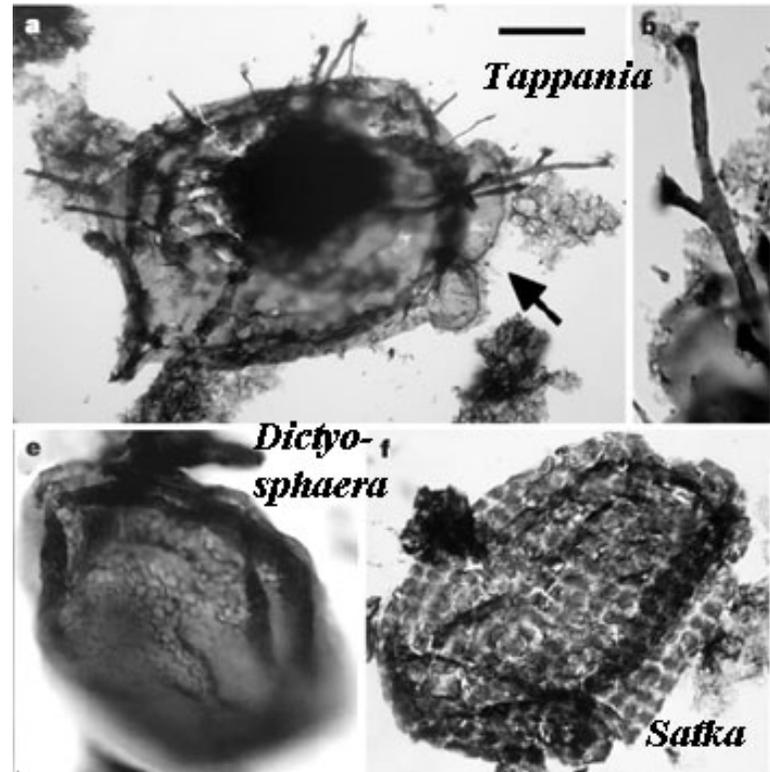
* H_2S に富む原生代深層海洋説 (Canfield Ocean): 光合成開始により大気酸素濃度は増えるが、同時に有機物生産も増え深層水は無酸素化。

原生代海洋に生息した真核生物

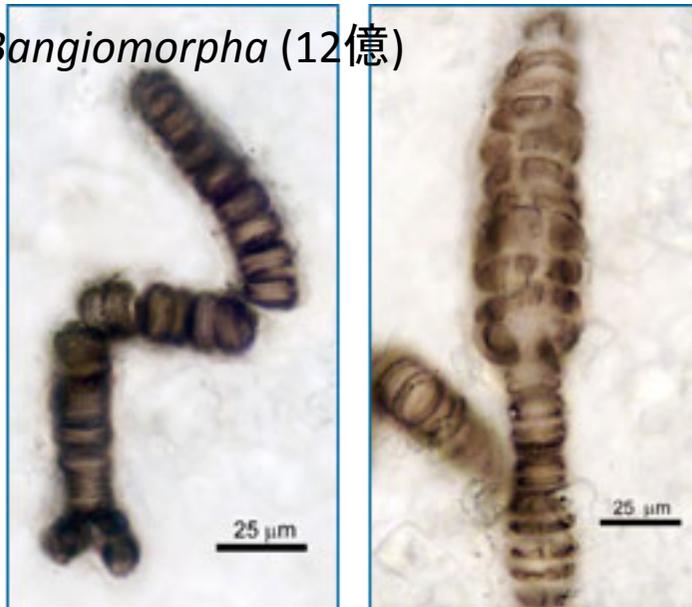


真核生物化石(真核藻類)
は遅くとも18億年前から
出現する

Tappania (15億)



Bangiomorpha (12億)



Butterfield, 2000

Acritarchs from the Mesoproterozoic Roper Group. Javaux et al. (2001). Bar = 35, 10, 15 & 40 μ. Javaux et al., 2002

パスツール点: 1%PAL (Present Atmospheric Level)

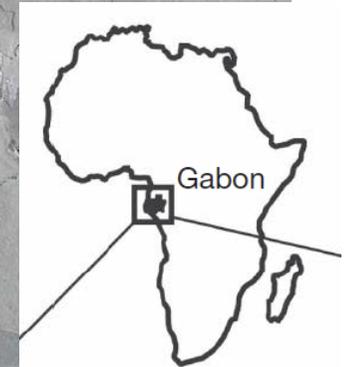
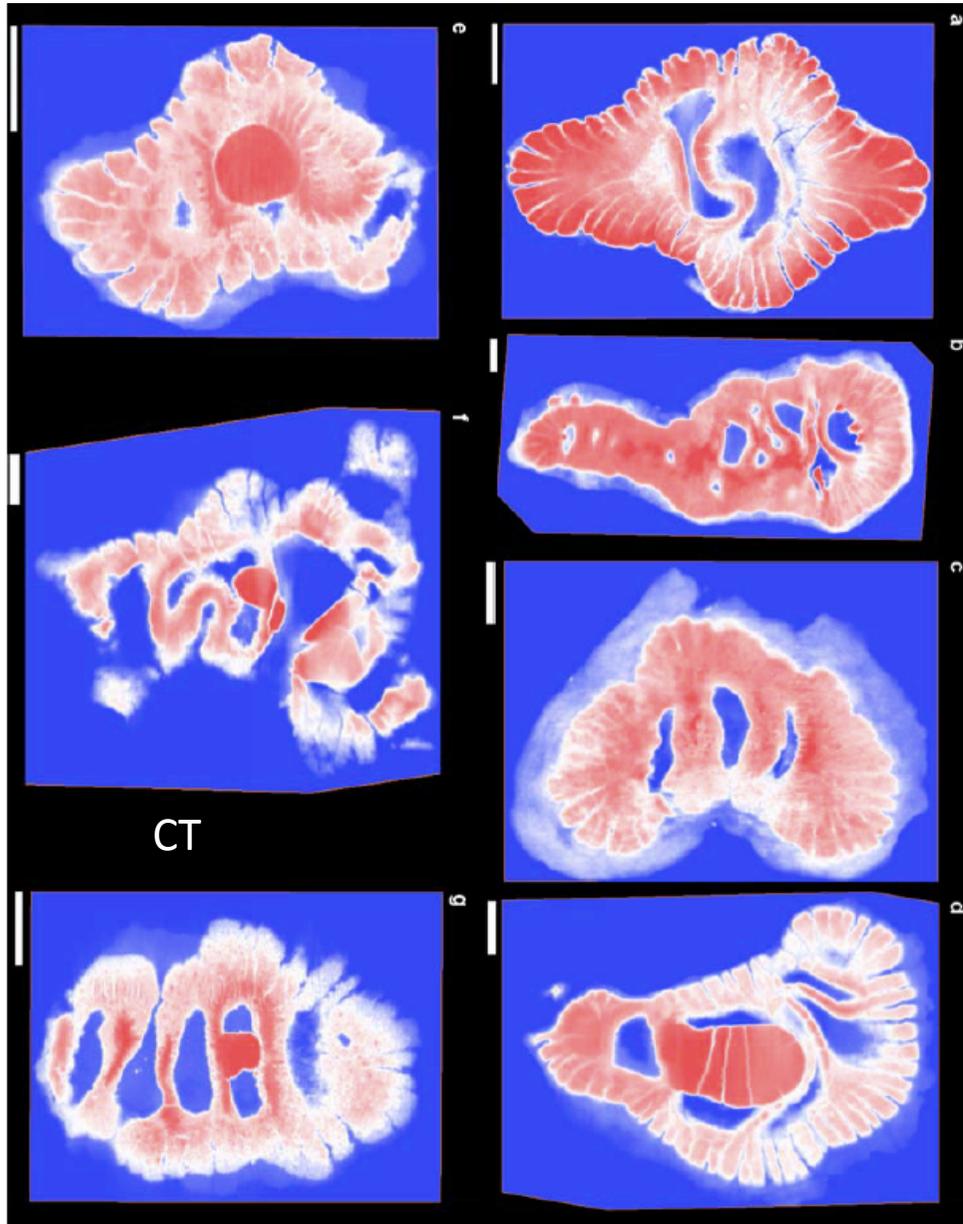
通性嫌気性生物は1%PALの酸素濃度を境に
発酵から好気呼吸に切り替わる

(真核生物が生存可能な酸素濃度の下限)



Louis Pasteur

最古の多細胞真核生物化石 (約21億年前、分類不明)



El Albani et al., 2010 Nature

Large colonial organisms with coordinated growth in oxygenated environments 2.1 Gyr ago

GOE前後の生物進化： 原核生物から真核生物へ

原核生物： 環状DNA バクテリア+アーキア

真核生物： DNAが核膜で覆われている。

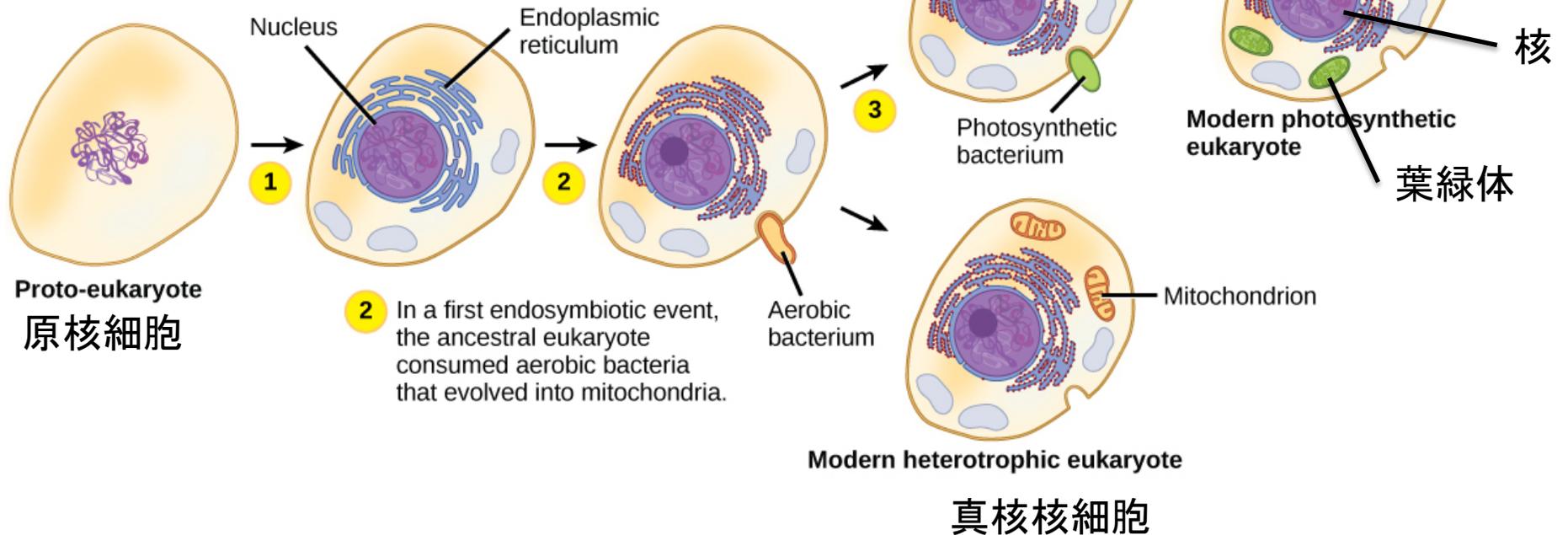
細胞小器官(ミトコンドリア・葉緑体etc) – 複膜・独自のDNA持つ

Endosymbiosis (細胞内共生)

The ENDOSYMBIOTIC THEORY

1 Infoldings in the plasma membrane of an ancestral prokaryote gave rise to endomembrane components, including a nucleus and endoplasmic reticulum.

3 In a second endosymbiotic event, the early eukaryote consumed photosynthetic bacteria that evolved into chloroplasts.



エネルギー:

光と酸素を使わずに、なるべく大きいエネルギーを得るにはH₂との反応が大切

