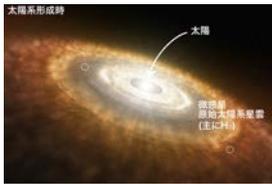


惑星地球科学 II (第六回目)

生命地球史2：表層環境と生命進化

東京大学総合文化研究科：
小宮 剛 准教授
2016/11/9

地球型惑星大気の形成過程 一次大気モデル

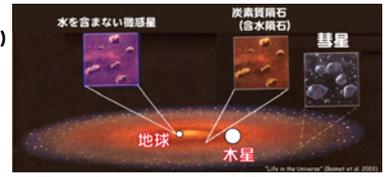


CH₄, H₂, NH₃を主体とした大気(ガス惑星)



太陽系星雲ガス(H₂)とマグマオーシャン(O)が反応してH₂Oを生じる。
H₂+O(rock)=H₂O

水(海)の起源 二次大気モデル(衝突脱ガス)

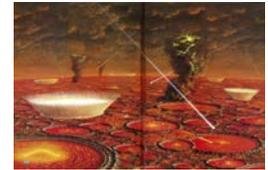


太陽-地球(1AU) 太陽-火星(1.5AU)
太陽-含水隕石(2AU) 太陽-木星(5AU)

微惑星の衝突による成長(0.4地球半径で大気の形成)

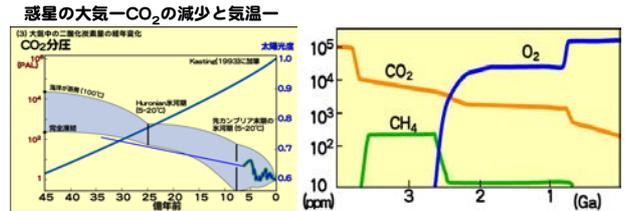


衝突した微惑星から大気成分が揮発性物質(大気成分)が放出され、大気・海洋が形成



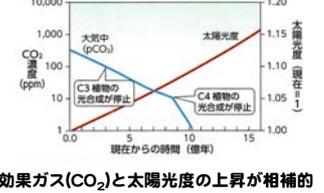
CO₂(CO), H₂O, N₂を主体とした大気

惑星の大気-CO₂の減少と気温



成分	濃度 (bars)	存在比 (%)
金星 (Venus)	CO ₂ 86.4 N ₂ 3.2 H ₂ O 0.009 Ar 0.0063	96 3.5 1x10 ⁻² 7x10 ⁻³
地球 (Earth)	N ₂ 78 O ₂ 21 H ₂ O 0.01 Ar 0.0094 CO ₂ 3.55x10 ⁻⁴	77 21 1 1 3.5x10 ⁻⁴
火星 (Mars)	CO ₂ 0.0062 N ₂ 0.00018 Ar 0.00010 H ₂ O 3.9x10 ⁻⁷ CO, O ₂ , CH ₄ <1	95 2.7 1.6 6x10 ⁻³

植物絶滅のシナリオ



なぜ水

(1) 水分子の構造

→極端な電荷の偏り→水素結合, 結合水

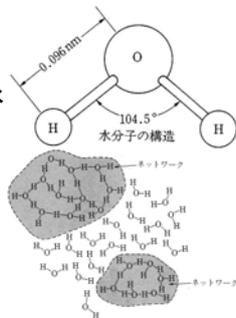
① 水素結合

→軽分子なのに常温で液体で存在：著しく高い沸点(c.f. H₂S: -60.7°C)
→比熱が大きく、大きな潜熱
外界の温度が変わっても細胞内は急激に変化しない

② 結合水の形成

→水分子は帯電しているため、溶質と静電的に結合しやすい
→融点が高い

(2) いろいろなものを溶かす→物質を拡散で移動させる媒体に。
(3) 粘性があまり高くない：ものを運ぶのに好都合
(4) 生命の高温限界：約120°C(疎水性相互作用がなくなる)
(5) 解離し、水素イオンを生成：pHの変化と膜内外で電位を生

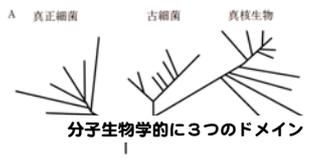


生命とは

(1)

(2)

(3)



(1) 生命は無機物から、生じるのか? ~生命の自然発生説~

- ① 古代ギリシア時代：アリストテレス(384~322BC)
→「動物誌」~動物植物を問わず氣から誕生するもの他に、自然発生するものが存在する(昆虫やネズミ等)
- ② 17世紀：レディ(1626-1698), イタリア
→「昆虫の発生に関する実験」
→蓋をしたフラスコからはウジは発生せず、蓋の空いたフラスコからのみウジが生じた(ハエの出入りがあった)
→昆虫も自然発生しない
- c.f. 微生物の発見~1674年
- ③ スパランツァーニ(イタリア)
→フラスコにスープをいれ煮沸、密封。→微生物は発生せず(1768)。⇨空気(や生気)が入らないためとの反論
- ④ 19世紀：
全ての生物に自然発生はない。Vs 微生物ならある。

(2) 生命の自然発生説とパストゥールの実験

① ブーシェ(ルーアン自然史博物館(仏)館長)

→枯れ草を入れたフラスコを密閉し、

放置した後に結草菌が発生する。

② パストゥール(1822-1895)

→パストゥールの「自然発生説の否定」の論文(1860年)

→微生物であっても自然発生することはない



(3) ダーウィンと生物進化+生命の起源

① ダーウィン(1809-1882)

→「種の起源」(1859年11月)

→生物は単純なものから高等なものへと進化した。

→最も、単純なものにはなに? その先は(生命の起源)?

② アレニウス(1859-1927)

→「パンスペルミア説」(1908年, 「宇宙の始まり」)

→宇宙空間に微生物の微小な萌芽が広く分散していて、それが宇宙空間を移動して地球にやってきた

問題点

① その宇宙に広がっている生命はどのようにして生じたのか?

② 微生物が宇宙空間で生き続けられるのか?

(4) 生命の起源(地球上)についての科学的考察

① エングルス(1820-1895)

→1870年代~物質の進化的発展のみが生命起源を説明し得ると置く

② オパーリン(1894-1980, ロシア, 化学者)

→化学的に生命の起源を考察「生命の起源」(1924年)

→①還元的大気条件(メタン, アンモニア, 水素)で有機物が生じ、さらにそれが海洋に流れ込み、後酸化し、コアセルベートのような凝縮状の構造体が生じる。

② その中に取り込まれた

有機物は錯雑性を獲得し、

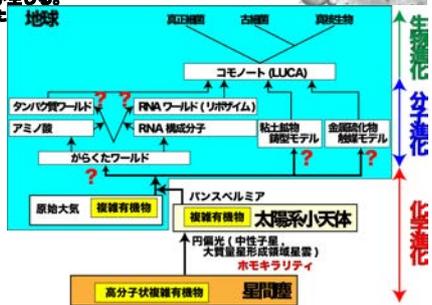
原始スープの中で、自己維持機能を、さらに成長する能力を獲得するようになる(プロトビオント)。

プロトビオントが生命へと進化する。

③ ホールドン(1892-1965, イギリス)

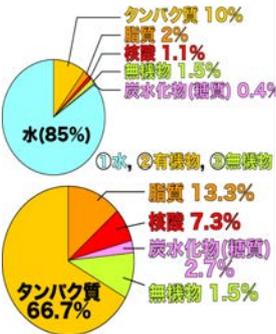
→「パンスペルミア説」

→オパーリンと同様にイギリスで同様の化学進化を唱

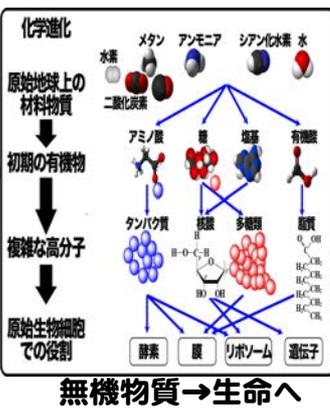


生物の組成を作る組成

- ①水 ②タンパク質(アミノ酸)
- ③脂質(細胞膜) ④核酸(DNA, RNA)
- ⑤炭水化物(糖質, DNA, RNA, エネルギー) ⑥無機物

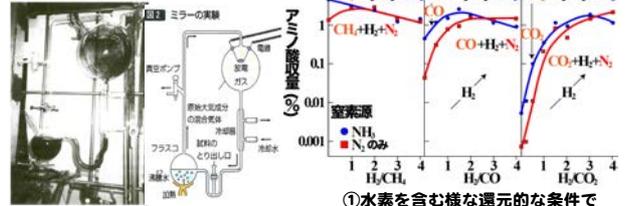


生命の起源—化学進化—

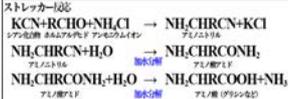
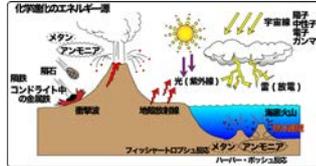


無機物質→生命へ

アミノ酸の合成



- ①水素を含む様な還元的な条件下でアミノ酸が形成される
- ②生成物を系から除く機構→非平衡(平衡だと逆反応)



生命の起源-有機物材料物質は予備的課題点は

- ①初期大気の問題
- ②加水分解の問題
- ③高度の実験
- ④最適なpHなどの条件
- ⑤阻害分子の除去

- ⑥マルコフニコフ合成とステップワイズ合成
- ⑦正しい結合を必要とする。異性体が多く生じる。
- ⑧光学異性体



パンスペルミア
マーチソン隕石

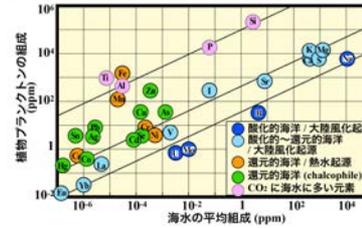
アミノ酸	マーチソン隕石	放電
グリシン	○○○○	○○○○
アラニン	○○○○	○○○○
α-アミノ-n-酪氨酸	○○○○	○○○○
α-アミノ-酪氨酸	○○○○	○○○○
バリン	○○○○	○○○○
ノルバリン	○○○○	○○○○
イソバリン	○○○○	○○○○
プロリン	○○○○	○○○○
ヒベコリン酸	○	×
アスパラギン酸	○○○○	○○○○
グルタミン酸	○○○○	○○○○
β-アラニン	○○	○
β-アミノ-n-酪氨酸	○○	○
β-アミノ-酪氨酸	○○	○
γ-アミノ-酪氨酸	○	○
サルコシン	○○○○	○○○○
N-エチルグリシン	○○	○○
N-メチルアラニン	○○	○○

生命出現の場所

- ① 深海・熱水環境
- ② 干潟・prebiotic moleculeの形成(粘土鉱物, 脱水縮合)
- ③ 陸上の熱水環境 (Yellowstone)
- ④ 初期大陸(斜長岩+KREEP)

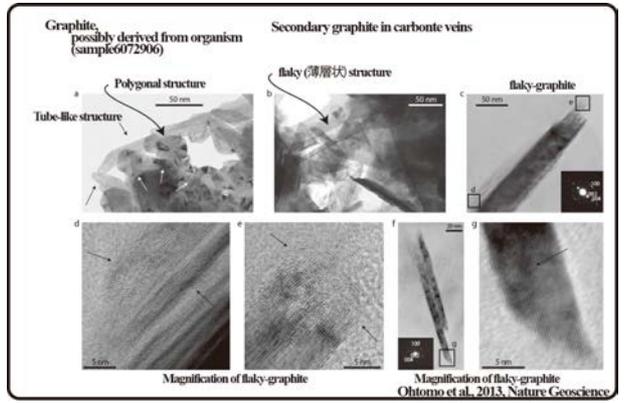
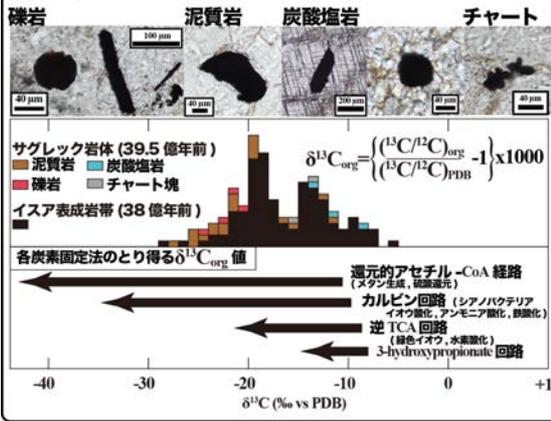
- (1) 様々な元素が含まれる。
- (2) 最初期の生命の生息場
- (3) 脱水縮合が起りにくい

干潟: 干上がる→脱水縮合. 粘土鉱物. 元素を吸着+型枠となる
 陸上温泉: 干上がる→脱水縮合. 高PO₄³⁻, 高K/Na比



- (1) リンの問題
- (2) カリウム

炭質物 (ラブラドル, 39.5 億年前)



HyperSLIME & エネルギー代謝

超好熱性メタン生成
 $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \text{organics}$

超好熱性一酸化炭素酸化性菌
 $CO + H_2 \rightarrow CH_4 + \text{organics}$

超好熱性イオウ還元
 $H_2 + S + CO_2 \rightarrow H_2S + \text{organics}$

地球化学プロセス
 熱水 + 遊離硫化物
 $4FeS + 2H_2O \rightarrow 4Fe + Fe_3O_4 + 6S$

熱水 + 遊離硫化物
 $6FeS_2 + 12H_2O \rightarrow 6Fe_3Si_2O_7(OH)_2 + 6Fe_3O_4 + 6H_2$

無機物の代謝
 $H_2, CO, CH_4, H_2S, CO_2, SO_2$

メタン(遊離)と混入した熱水の反応
 $3Fe_3C_2O_7 + 12H_2O \rightarrow 3Fe_3O_4 + 6CO_2 + 6H_2$
 $4Fe_3C_2O_7 \rightarrow 4Fe_3O_4 + 2CO + 2H_2$

有機物の微生物による分解

還元
 $C_2H_5OH + NH_4^+ + H_2PO_4^- + 424e^- + 6H^+ + 756CO_2 \rightarrow 862HCO_3^- + 16NH_4^+ + HPO_4^{2-} + 424Fe^{2+} + 304H_2O$

メタン生成 (異化還元)
 $C_2H_5OH + NH_4^+ + H_2PO_4^- + 14H_2O \rightarrow 39CO_2 + 14HCO_3^- + 53CH_4 + 16NH_4^+ + HPO_4^{2-}$

発酵
 $12C_2H_5OH + NH_4^+ + H_2PO_4^- \rightarrow 106CH_3CH_2COOH + 106CH_3COOH + 212CH_3CH_2OH + 318CO_2 + 102H_2 + 192NH_3 + 12H_2PO_4^-$

イオウを含む代謝
 $2HS + H_2O \rightarrow 2H_2S + SO_2 + 2H^+$

メタンを含む代謝
 $CH_3COO + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^-$

微生物による有機物の固定

光合成 (Fe²⁺) 酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

4Fe²⁺ + CO₂ + H₂O
 $\Rightarrow 4Fe^{3+} + 2CO + H_2$

イオウを含む代謝
 $2HS + CO_2 \Rightarrow CH_4 + H_2O + 2S^0$

HS + 2CO₂ + H₂O
 $\Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

2S⁰ + 3CO₂ + 5H₂O
 $\Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

メタンを含む代謝
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + H_2O \rightarrow CH_4 + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

有機物の微生物による分解

嫌気的光合成
 $C_2H_5OH + NH_4^+ + H_2PO_4^- + 284e^- \Rightarrow 106CO_2 + 16NH_4^+ + HPO_4^{2-} + 160H_2O$

嫌気的光合成
 $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O + \text{organics}$

嫌気的光合成
 $CO + H_2 \rightarrow CH_4 + \text{organics}$

嫌気的光合成
 $H_2 + S + CO_2 \rightarrow H_2S + \text{organics}$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $CO_2 + 4H_2 \Rightarrow CH_4 + 2H_2O$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $4Fe^{2+} + HCO_3^- + H_2O \Rightarrow 4Fe^{3+} + 4e^- + OH^- + H_2$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + CO_2 + H_2O \Rightarrow 2CH_4 + SO_4^{2-} + 2H^+$

嫌気的光合成-鉄酸化
 $2S^0 + 3CO_2 + 5H_2O \Rightarrow 3CH_4 + 2SO_4^{2-} +$

