

21. カルビンの実験

カルビン・ベンソン回路で重要な反応過程は、カルボキシ化・還元・再生の3つである。

カルボキシ化過程：CO₂濃度に依存

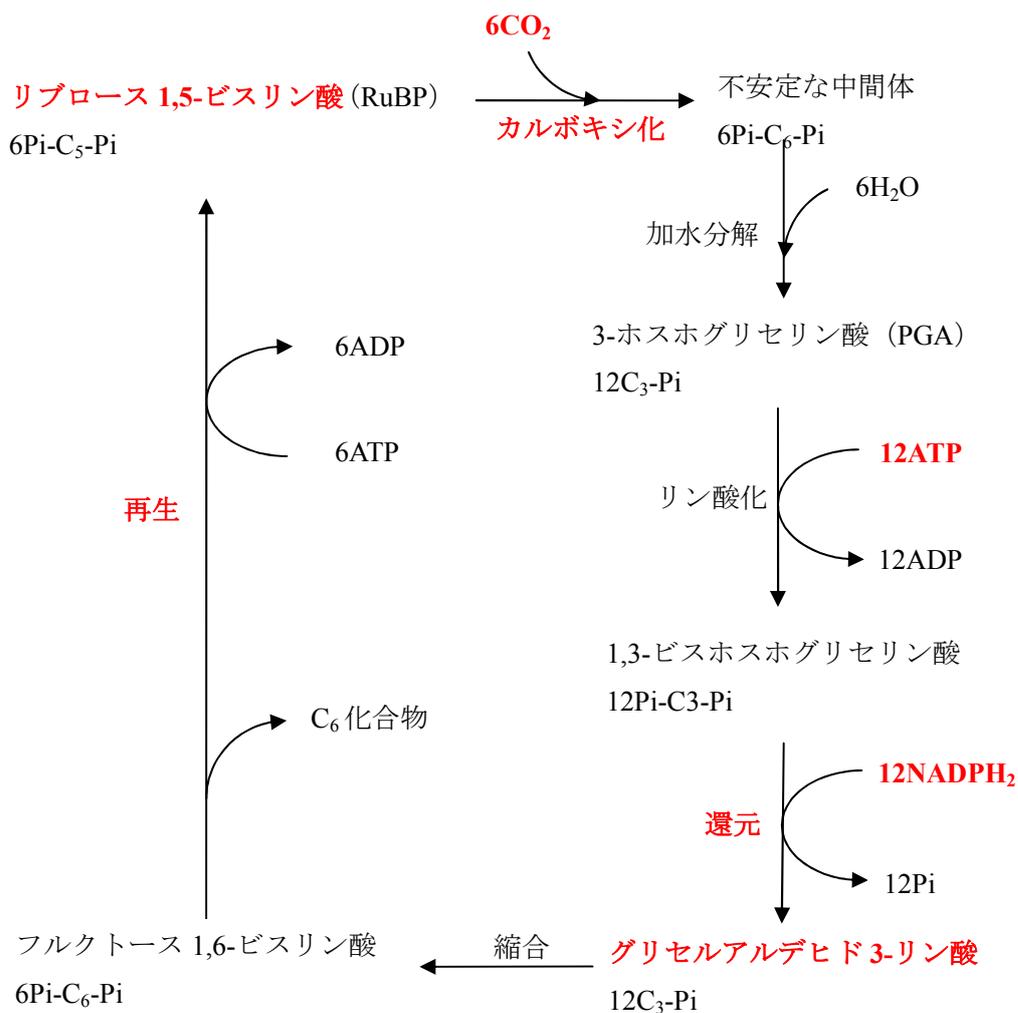
二酸化炭素 CO₂ とリブローズ 1,5-ビスリン酸 (RuBP) とが結合する反応
結合してできた C₆ 化合物は極めて不安定なので、
すぐ加水分解され 3-ホスホグリセリン酸になる。

還元過程：NADPH₂ と ATP に依存 (光化学系に依存)

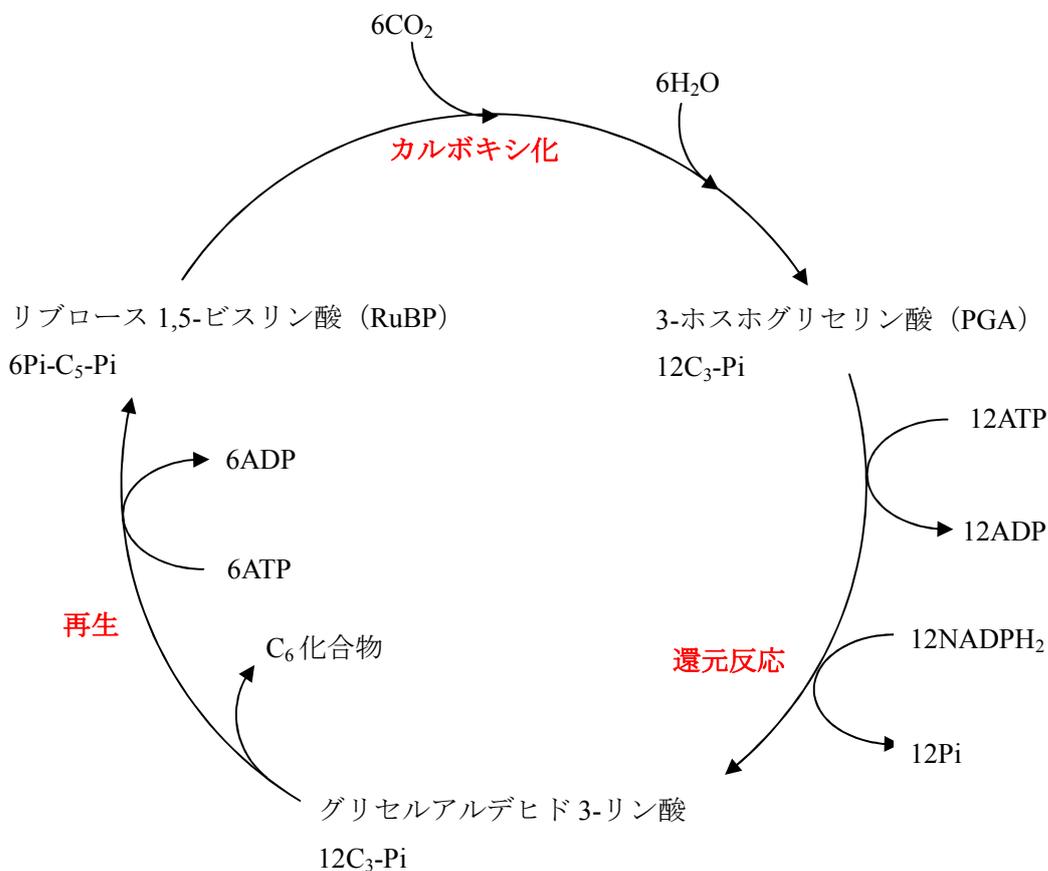
3-ホスホグリセリン酸と ATP が反応し生成した 1,3-ビスホスホグリセリン酸が還元され、
グリセルアルデヒド 3-リン酸になる。

再生過程：リブローズ 1,5-ビスリン酸 (RuBP) の再生と C₆ 化合物の生成, ATP に依存

グリセルアルデヒド 3-リン酸から複雑な過程を経て、
再び二酸化炭素受容体であるリブローズ 1,5-ビスリン酸 (RuBP) が再生する。
この過程で C₆ 化合物 (グルコースなど) が生成する。



簡略化すると、



暗いと光化学系が機能せず ATP と NADPH₂ が供給されなくなるので、3-ホスホグリセリン酸 (C₃) が一時的に増加する。

CO₂ 濃度が低いとカルボキシ化が進まないの、リブローズ 1,5-ビスリン酸 (C₅) が一時的に増加する。

図1, 図2での C₃, C₅の減少は, C₃, C₅が別の代謝経路の反応で使われるためである。

24. ブラックマンの実験・ベンソンの実験

問 1

図 1 で二酸化炭素濃度が低いときの光合成速度は二酸化炭素濃度に依存しているから、このときの光合成速度を決めるのは二酸化炭素濃度が関係する反応である。
また、全体の反応速度を決めるのは遅い方の反応速度であり、これを律速段階という。光合成も例外でない。

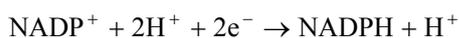
問 2

実験 2 で光合成には光と二酸化炭素が必要であることがわかる。
しかし、光を必要とする段階と二酸化炭素を必要とする段階が別々に存在するのは不明である。実験 I において (①, ②), (②, ③), (③, ④) の組み合わせで比較すると、二酸化炭素を与えてから光を与えても光合成は起こらない (②, ③) が、光を与えてから二酸化炭素を与えると光合成が起こることがわかる。
CO₂ を与える前に光を与えると光合成が起こる (③, ④) ことがわかる。

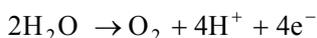
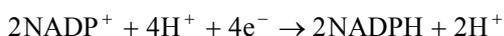
25. ヒルの実験とルーベンの実験

問 3

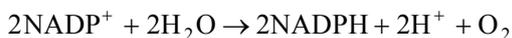
ツンベルク管の空気が抜かれてあるので、管内に二酸化炭素が存在しない。
二酸化炭素が存在しないとカルビン・ベンソン回路がまわらない。
カルビン・ベンソン回路がまわらないと光化学系でできた NADPH₂ が NADP に戻れない。
そこで NADP の代わりにシュウ酸鉄 (Ⅲ) を水素受容体に用いたわけである。
ちなみに、水素受容体である NADP は本当は NADP⁺ であり、
光化学系 I のクロロフィル a からの e⁻ およびストロマの H⁺ と反応して NADPH になる。



尚、e⁻ も H⁺ も元を正せば水の分解によって生成したものといえるので、

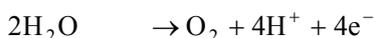
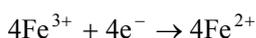


より、

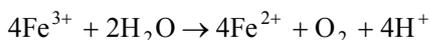


とまとめられる。

シュウ酸鉄 (Ⅲ) がこの NADP⁺ の代役をし、



より、



という反応をする。

27. 光合成色素の分離

ペーパクロマトグラフィーによる色素分離の原理

ろ紙は極性のある基（ヒドロキシ基）をもち、有機溶媒である展開液は無極性である。色素はろ紙についたり離れたりしながら展開液とともに移動していくが、その移動速度は、色素とろ紙の結合力が弱いものほど大きく、一般に、極性が小さい色素ほど移動速度が大きい。

光合成色素の分類

クロロフィル：Mgをもつ

クロロフィル a

光合成細菌以外のすべての光合成植物がもつ色素
青緑色

クロロフィル b

緑藻類・緑色植物がもつ色素
黄緑色

クロロフィル c

ケイ藻類・褐藻類がもつ色素

バクテリオクロロフィル

光合成細菌（シアノバクテリア）の色素

カロテノイド：不飽和の長い鎖状炭化水素

カロチン

光合成細菌以外のすべての光合成植物がもつ色素
橙黄色

キサントフィル

ルテイン

紅藻類・緑藻類・緑色植物がもつ色素
黄色

フコキサンチン

ケイ藻類・褐藻類がもつ色素
褐色

フィコビリリン

フィコシアニン

ラン藻類・紅藻類がもつ色素（含量は、ラン藻類＞紅藻類）
青色

フィコエリトリン

ラン藻類・紅藻類がもつ色素（含量は、ラン藻類＞紅藻類）
赤色

28. 光合成の計算**問 1**

見かけの光合成速度 = 光合成速度 - 呼吸速度

温度が 30°C のとき

光合成速度 = 20.0

見かけの光合成速度 = 20.0 - 10.0 = 10.0

問 2

光合成産物の一部は呼吸基質として消費されるので、

見かけの光合成速度は光合成産物が蓄積される速度を意味する。

表について、

見かけの光合成速度 = 光合成速度 - 呼吸速度

を計算すると、

温度が 20°C のとき見かけの光合成速度が最大だから、

葉中に蓄積される光合成産物の量が最も大きくなる温度は 20°C である。

問 3

見かけの光合成速度 = $\frac{15.0\text{mgCO}_2}{100\text{cm}^2 \times \text{時間}}$ より、

葉面積 200cm² の葉が 5 時間に吸収した CO₂ = $\frac{15.0\text{mgCO}_2}{100\text{cm}^2 \times \text{時間}} \times 5\text{時間} \times 200\text{cm}^2 = 150\text{mgCO}_2$

ここで、光合成の式 $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{H}_2\text{O} + 6\text{O}_2$ より、

6 モルの CO₂ (6 × 44 = 264g) から 1 モルのグルコース (180g) が合成されるから、

150mg の CO₂ からは $150\text{mg} \times \frac{180}{264} \approx 102.2 \text{ mg}$ のグルコースが合成される。

よって、蓄積されるグルコースは 102mg

問 4

暗黒にすると呼吸のみが行われる。

呼吸速度 = $\frac{5.0\text{mgCO}_2}{100\text{cm}^2 \times \text{時間}}$ より、

葉面積 200cm² の葉が 5 時間に排出した CO₂ = $\frac{5.0\text{mgCO}_2}{100\text{cm}^2 \times \text{時間}} \times 5\text{時間} \times 200\text{cm}^2 = 50\text{mgCO}_2$

5 時間の照射で 150mg の CO₂ が吸収され、

その後の 5 時間の暗黒で 50mg の CO₂ が排出されたわけだから、

全体を通して 100mg の CO₂ が吸収されたことになる。

よって、グルコースの蓄積量 = $100\text{mg} \times \frac{180}{264} \approx 68.1 \text{ mg}$

ゆえに、68mg

問 5

光の強さが 0 のときの縦軸の値、つまり縦軸の切片は呼吸速度を表している。

表より、10°C のときの呼吸速度 (CO₂ 排出速度) の方が小さいから、

選択肢は C と F に絞られる。

また、表の光合成速度は十分な強さの光を与えたときのものだから、

光の強さはいずれの温度の光飽和点より強いとみなしてよい。

よって、光合成速度の大きさから選択肢は F である。

問 8

見かけの光合成量が 0 だから、溶存酸素量が一定になる。

問 9

5 分間は呼吸のみになる。

グラフの 0 から 5 分にかけての減少量は呼吸のみのときの溶存酸素の減少量を表しており、
グラフから 5 分で 1×10^{-7} モル/L 減少している。

よって、 $(12 - 1) \times 10^{-7} = 11 \times 10^{-7}$ モル/L

29. 光合成と細胞分画法

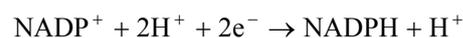
光が照射されると光化学系 I と光化学系 II のクロロフィル a が活性化され、

それぞれのクロロフィル a から高エネルギー電子が放出される。

補足：最適波長は光化学系 I では 680nm、光化学系 II では 650nm である。

光化学系 I のクロロフィル a が放出した高エネルギー電子

チラコイド膜のストロマ側で H⁺ とともに NADP⁺ に受け取られる。



補足：教科書などで NADPH₂ と表現されているが、本当は NADPH + H⁺ である。

光化学系 I のクロロフィル a は電子を放出後、光化学系 II のクロロフィル a からの電子を受け取る。

光化学系 II のクロロフィル a が放出した高エネルギー電子

電子伝達系でエネルギーを失った後、光化学系 I のクロロフィル a に受け取られる。

このとき失ったエネルギーは、チラコイド膜のストロマ側での ATP 合成のほか

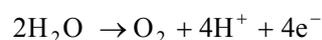
H⁺ のストロマからチラコイド内腔への能動輸送の仕事に使われ、

チラコイド内腔とストロマの間に H⁺ の濃度勾配が生じる。

チラコイド内腔の H⁺ はその濃度勾配に従いチラコイドの ATP 合成酵素を通過してストロマへ運ばれる。

ATP 合成酵素はこのとき放出されるエネルギーを使ってストロマ側で ATP を合成する。

また、クロロフィル a は電子を放出後、チラコイド内腔側で H₂O から電子を奪う。



以上より、

ATP 合成酵素により ATP が合成されるまでには、

光を必要とする過程：チラコイド内腔とストロマの間に H^+ の濃度勾配が生じる過程

光を必要としない過程：ATP 合成酵素による ATP 合成過程

を経ることがわかる。

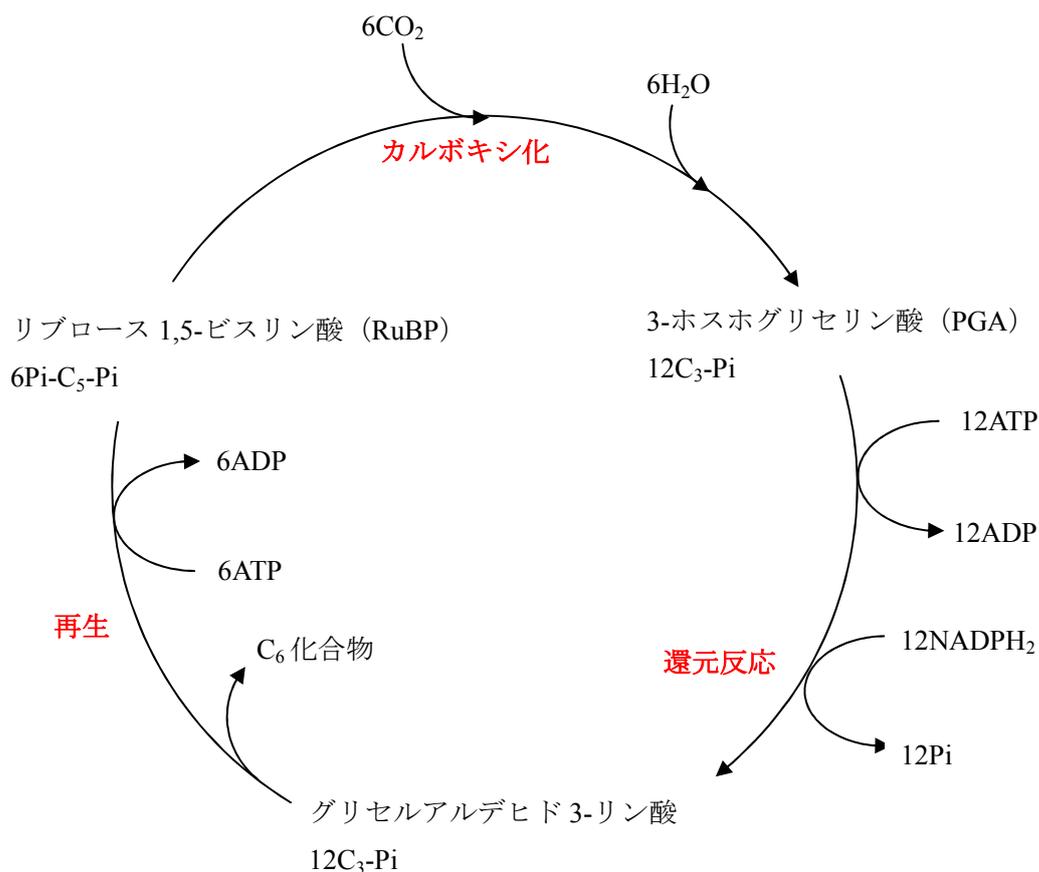
30. C_3 植物・ C_4 植物・CAM 植物

問 1

光合成の光飽和点、最適温度が高いことと、二酸化炭素濃度が低くても光合成速度が大きいことから、熱帯など日射が強く高温の気候や植物が密生して二酸化炭素が少ない環境での生育に適している。

光呼吸と C_4 植物

カルビンベンソン回路図



カルビン・ベンソン回路のカルボキシ化の過程を触媒する酵素リブロース-1,5-ビスホスフェートカルボキシラーゼ（「ルビスコ」と呼ばれる）はオキシゲナーゼ（酸素添加酵素）活性ももつ。したがって、二酸化炭素と酸素はルビスコの基質として拮抗しあう関係にある。

↓

光合成が活発になればなるほど葉緑体では酸素もたくさんできる。

一方、葉緑体に入る二酸化炭素は一定のままである。

そのため、葉緑体中の二酸化炭素に対する酸素の割合が高くなり、

ルビスコへの酸素の結合が二酸化炭素のそれより優勢になる結果、

二酸化炭素の取り込み、すなわちカルボキシ化が進みにくくなる。

つまり、光合成が活発になるとそれだけ光合成を妨げる作用も強くなるのである。

そのため、光合成の最適温度が実験的に確かめられた光合成に関与する酵素の最適温度より低かったり、光飽和点が低かったりするわけである。

光合成が活発であればあるほど酸素発生量も多くなることは避けられないから、

酸素が高濃度でもカルビン・ベンソン回路が効率よく回転するには、

酸素に対する二酸化炭素の割合を高くするしかない。

熱帯のように気温が高く光が強い地域の植物の多くは、

葉肉細胞の葉緑体で CO_2 との親和性が高い PEP カルボキシラーゼによりホスホエノールピルビン酸（略号 PEP, C_3 ）と CO_2 からオキサロ酢酸（ C_4 ）がどんどんつくられ、

さらにリンゴ酸酵素により、リンゴ酸（ C_4 ）に還元される。

リンゴ酸は維管束鞘細胞の葉緑体に運ばれ、ピルビン酸（ C_3 ）と CO_2 に分解される。

こうして、維管束鞘細胞の葉緑体に CO_2 がどんどん送り込まれるので、

酸素に対する二酸化炭素の割合が高く保たれ、カルビン・ベンソン回路が効率よく動く。

また、ピルビン酸（ C_3 ）は葉肉細胞の葉緑体に運ばれ PEP となり再び CO_2 と結合する。

この回路を C_4 回路といい、 C_4 回路をもつ植物を C_4 植物という。

これに対し、通常の植物を C_3 植物という。

尚、 C_4 植物のみが維管束鞘細胞に葉緑体をもつ。

補足

ルビスコのオキシゲナーゼ活性に始まる代謝経路により、

RuBP からホスホグリコール酸（ C_2 ）と 3-ホスホグリセリン酸（ C_3 ）が 1 分子ずつ生成し、3-ホスホグリセリン酸は、カルビン・ベンソン回路に入る。

ホスホグリコール酸についても 2 分子（C の合計 4）から複雑な過程を経て 3-ホスホグリセリン酸が再生され、再びカルビン・ベンソン回路に入るのであるが、

その過程で光合成に必要な ATP と NADPH_2 を消費し CO_2 を放出する。

そのため、カルビン・ベンソン回路の効率が悪くなる。

CAM 植物

乾燥地帯では日中に気孔を開くと植物体から水分が急激に失われるので、気孔を開くわけにはいかない。とはいえ気孔を開かないと CO_2 を取り込めないで光合成ができない。

そこで乾燥地帯で生育する植物（サボテン・ベンケイソウなど）は気温の低い夜に気孔を開いて CO_2 を葉肉細胞に取り込み C_4 回路と似た CAM 回路と呼ばれる経路でリンゴ酸 (C_4) を生成し、液胞に蓄えておく。そして、昼間は気孔を閉じてリンゴ酸からの CO_2 を利用してカルビン・ベンソン回路が機能する。

33. 代謝の化学反応式

ア.

ピルビン酸 CH_3COCOOH が還元されて乳酸 $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$ が生成する過程だから、

- ・乳酸発酵の過程(3)
- ・骨格筋での解糖の過程

イ.

ピルビン酸 CH_3COCOOH が還元されてエタノール $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ が生成する過程だから、

- ・アルコール発酵の過程(7)

ウ.

ピルビン酸 CH_3COCOOH が酸化・分解されて二酸化炭素 CO_2 と水 H_2O になる過程だから、

- ・クエン酸回路(1)

エ.

アンモニア NH_3 が酸素で O_2 で酸化されて亜硝酸 HNO_2 になる過程だから、

- ・亜硝酸菌による化学合成（硝化作用）のためのエネルギー生産過程(4)

オ.

二酸化炭素 CO_2 が水素 H で還元されてグルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ になる過程だから、

- ・光合成のカルビン・ベンソン回路(2)(5)
- ・化学合成のカルビン・ベンソン回路相当過程(4)(6)

カ.

グルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ が酸化されてピルビン酸になる過程だから、

- ・発酵や解糖の過程(3)(7)
- ・解糖系(1)

キ.

亜硝酸 HNO_2 が O_2 で酸化されて硝酸 HNO_3 になる過程だから、

- ・硝酸菌による化学合成（硝化作用）のためのエネルギー生産過程

ク.

水 H_2O から水素 H が供給される過程だから、

植物の光合成の過程（光化学系Ⅱ）(2)

ケ.

硫化水素 H_2S が O_2 で酸化されて硫黄 S になる過程だから、

- ・硫黄細菌による化学合成（硝化作用）のためのエネルギー生産過程(6)

コ.

硫化水素 H_2S から水素 H が供給される過程だから、

- ・光合成細菌（紅色硫黄細菌・緑色硫黄細菌）の光合成の過程（光化学系Ⅱに相当）(5)

光合成と化学合成の区別

光合成では光をエネルギー源に ATP を生成する。

化学合成では無機物を O_2 で酸化したとき発生するエネルギーを使って ATP を生成する。

植物の光合成と光合成細菌（紅色硫黄細菌・緑色硫黄細菌）の区別

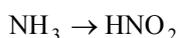
水素源が植物では水 H_2O であるのに対し、

光合成細菌（紅色硫黄細菌・緑色硫黄細菌）では硫化水素 H_2S である。

尚、光合成細菌（紅色硫黄細菌・緑色硫黄細菌）は地球上にまだ酸素がなかった頃からの生物だから、呼吸は嫌気呼吸である。

亜硝酸菌の硝化の反応式（反応式エ）のつくり方（化学の酸化還元の復習）

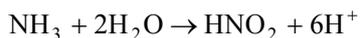
アンモニアの半反応式



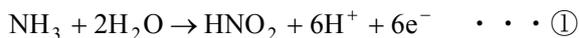
↓



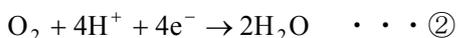
↓



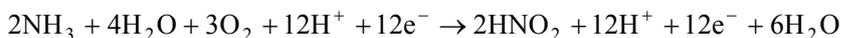
↓



酸素の半反応式（水の電気分解の陰極または燃料電池の正極の反応と同じ）



①×2+②×3 より、



よって、

