

静岡大学サイエンスカフェ
第162話@B-nest 2023.3.30

光合成をわかった気になる話

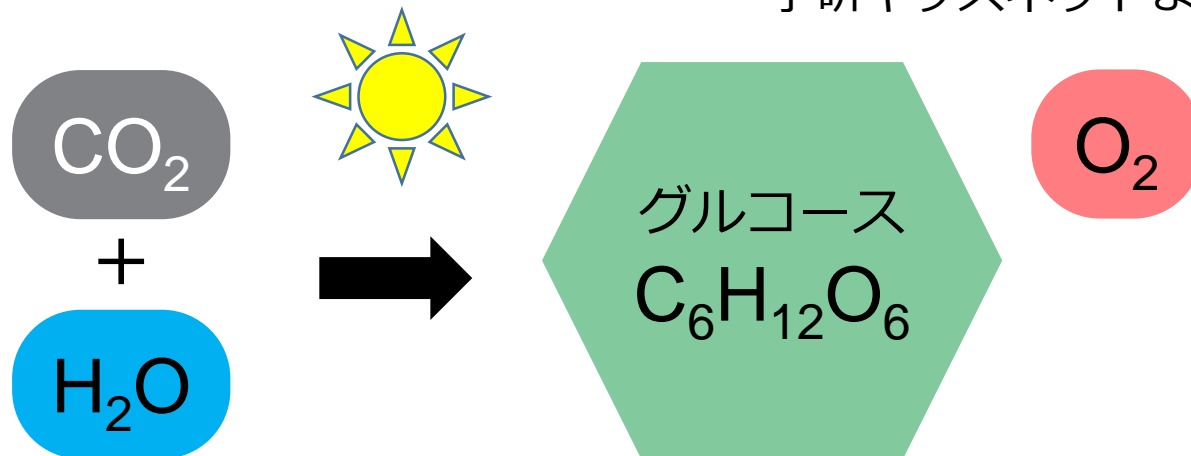
静岡大学理学部生物科学科
栗井光一郎

光合成とは？

小学校（6年生くらい）で習う光合成

緑色植物が光（太陽光）のエネルギーを用いて、二酸化炭素（ CO_2 ）と水（ H_2O ）からデンプンなどの炭水化物（グルコース $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ）を合成し、酸素（ O_2 ）を放出すること。

学研キッズネットより

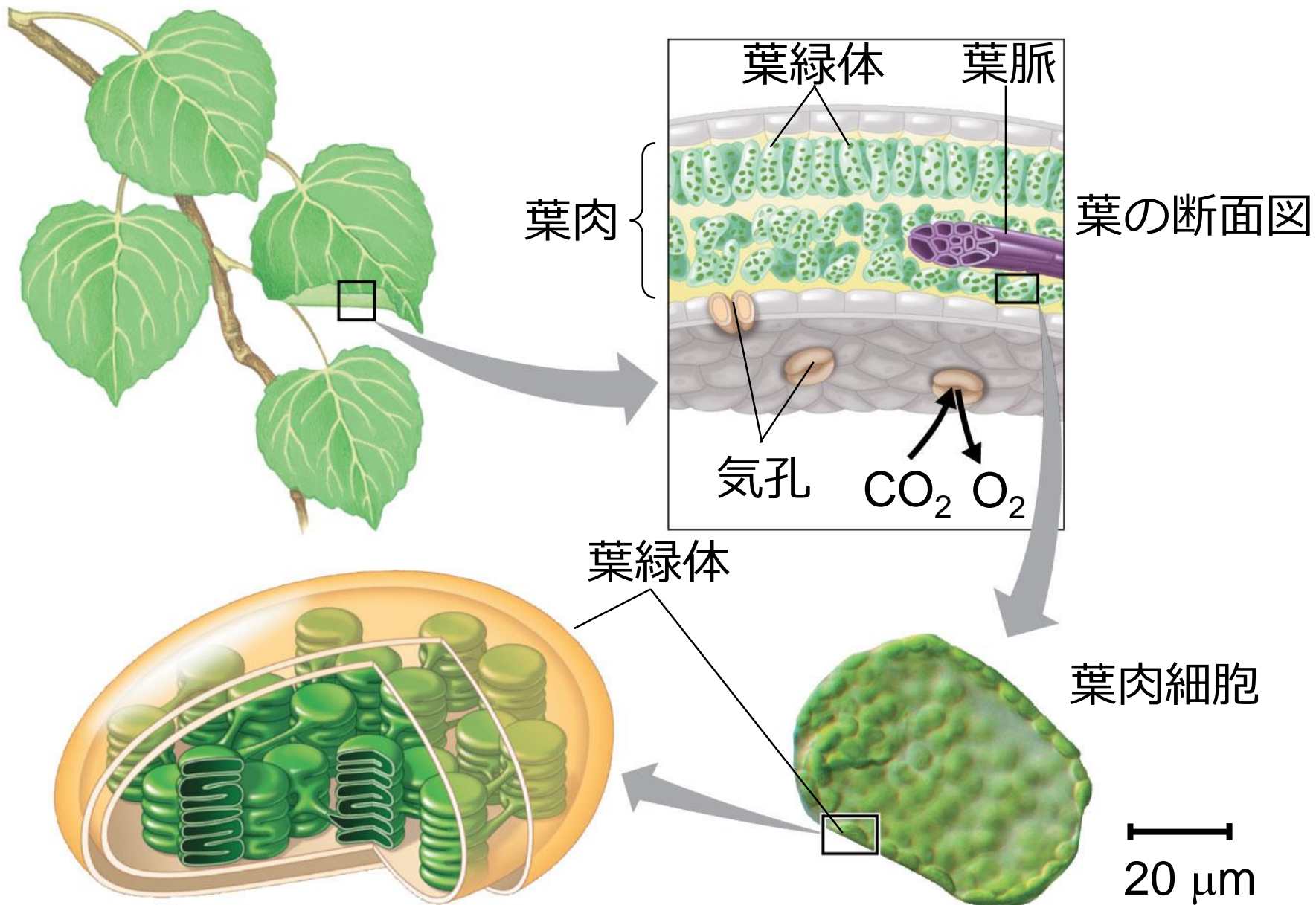


光合成とは？

中学校で習う光合成

葉の葉緑体において、太陽などの光をエネルギー源とし、根から吸収した水と、気孔を通して大気中から取り入れた二酸化炭素(CO_2)を材料として、デンプンを作り出すはたらきをいう。このとき、酸素(O_2)も作り出され、気孔から大気中に排出される。

和歌山県高校入試より



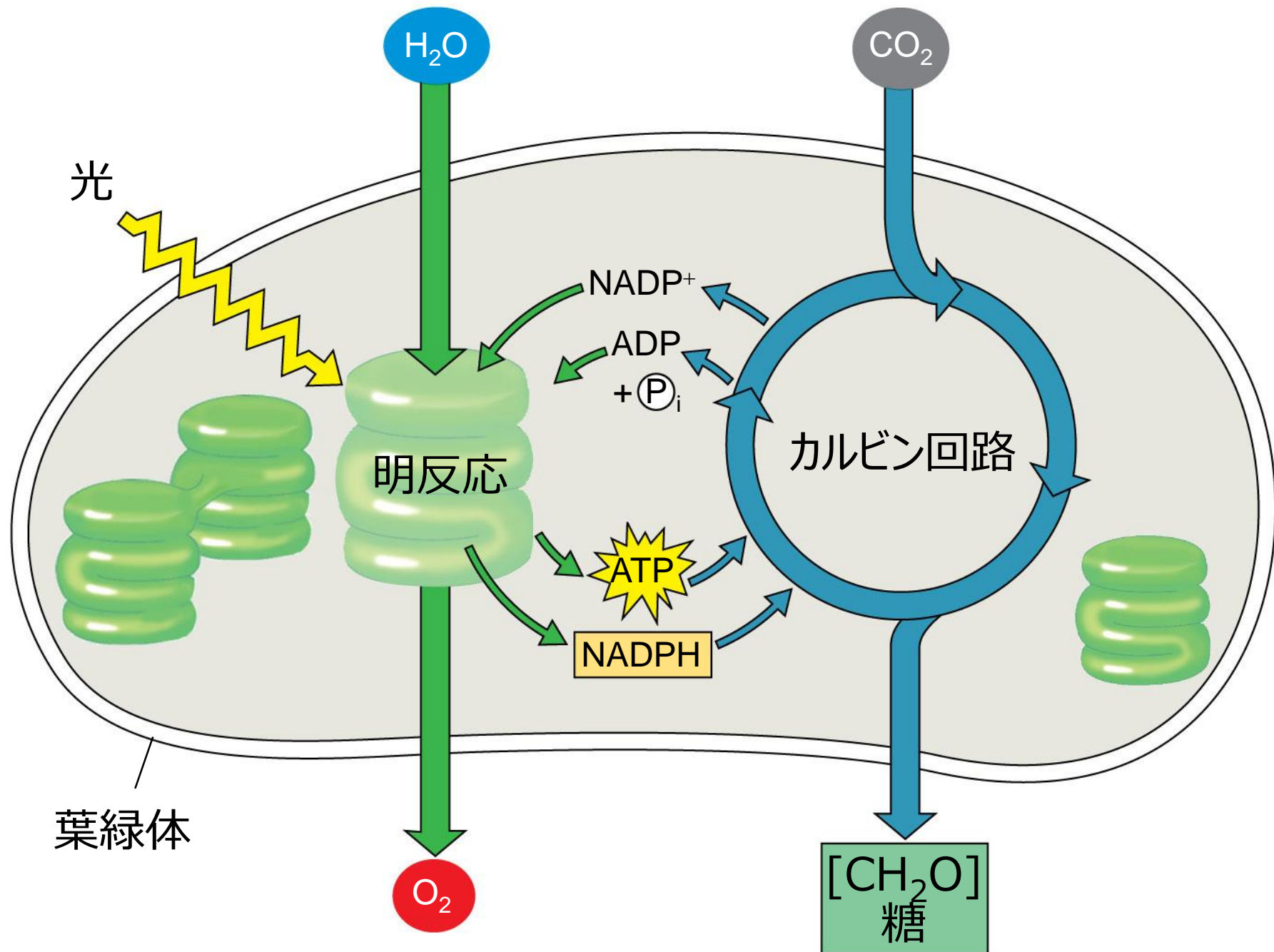
光合成とは？

高校で習う光合成

生物が光のエネルギーを利用してATPを合成し、そのATPを利用して有機物を合成するはたらきである。植物の場合、光合成は葉緑体で行われる。まず、太陽の光エネルギーを利用してATPを合成し、次に、合成したATPを利用して、外界から取り入れた二酸化炭素からデンプンなどの有機物を合成する。

数研出版 改訂版生物より

ATP：アデノシン三リン酸
生物のエネルギー通貨



光合成とは？

光合成の定義

広義：光エネルギーを化学エネルギーに変換する
生化学反応

狭義：酸素発生を伴う，光エネルギーを化学エネルギーに変換する生化学反応

光合成生物とは

光合成反応



光合成する生き物



植物



多細胞性藻類



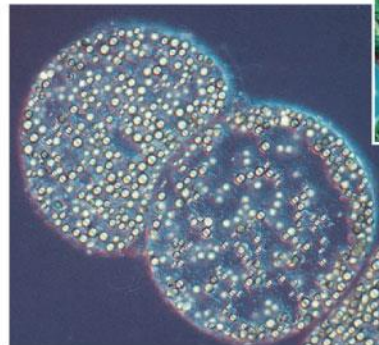
原生生物

10 μm



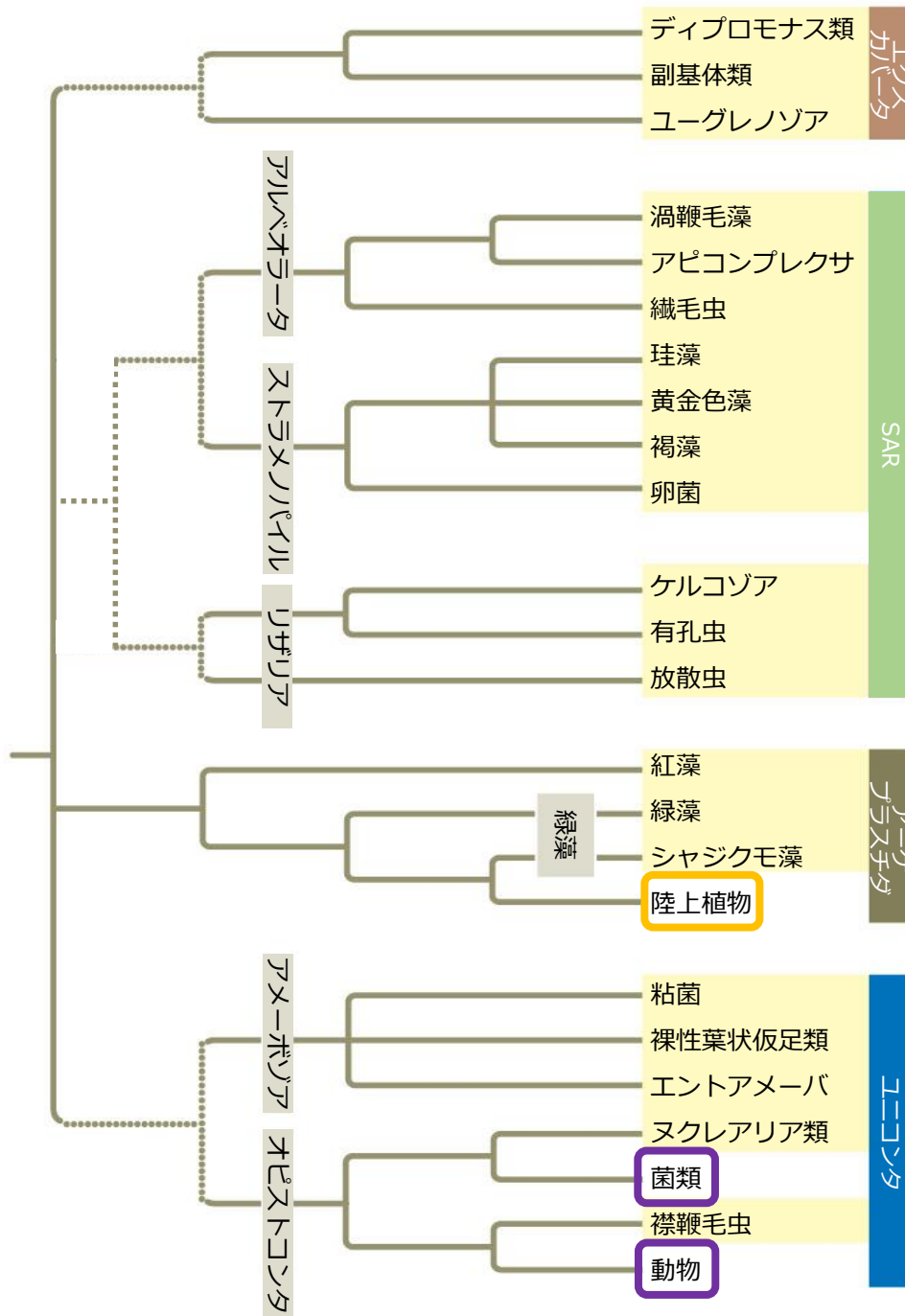
40 μm

シアノバクテリア



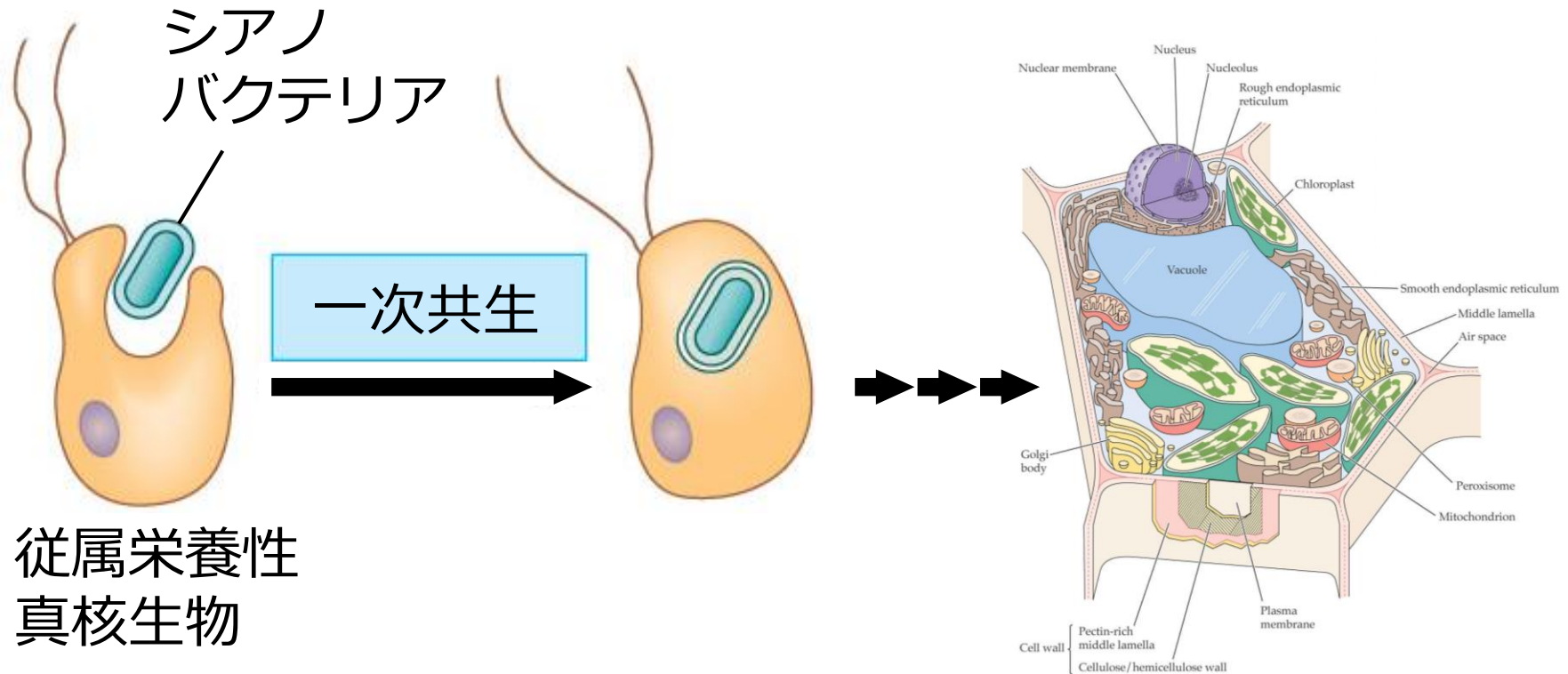
紅色硫黄細菌 1 μm

真核生物の分類¹⁰



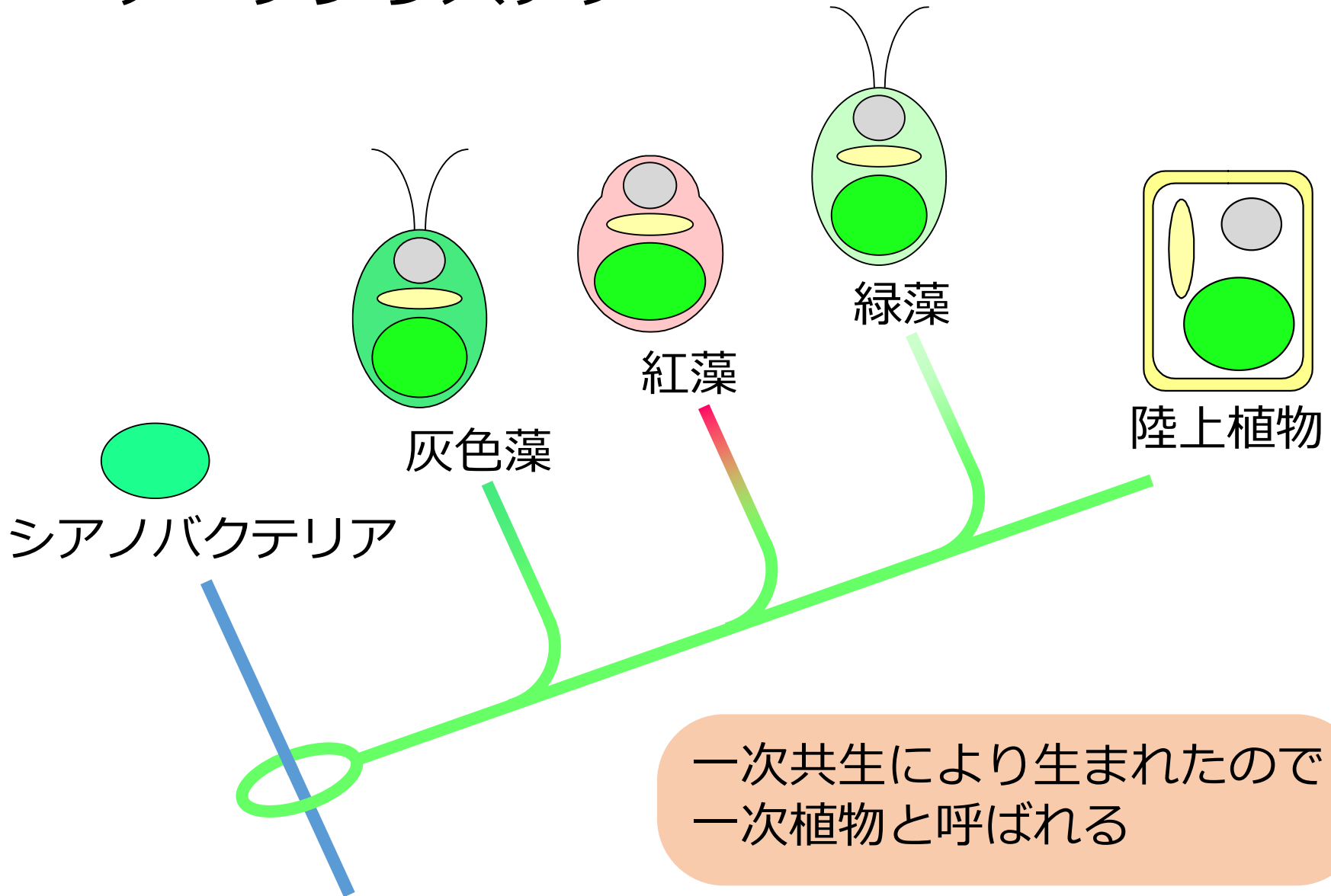
我々の身近な生き物
(動物、菌類、植物)
は、真核生物の極一部

シアノバクテリアと植物葉緑体は共通起源

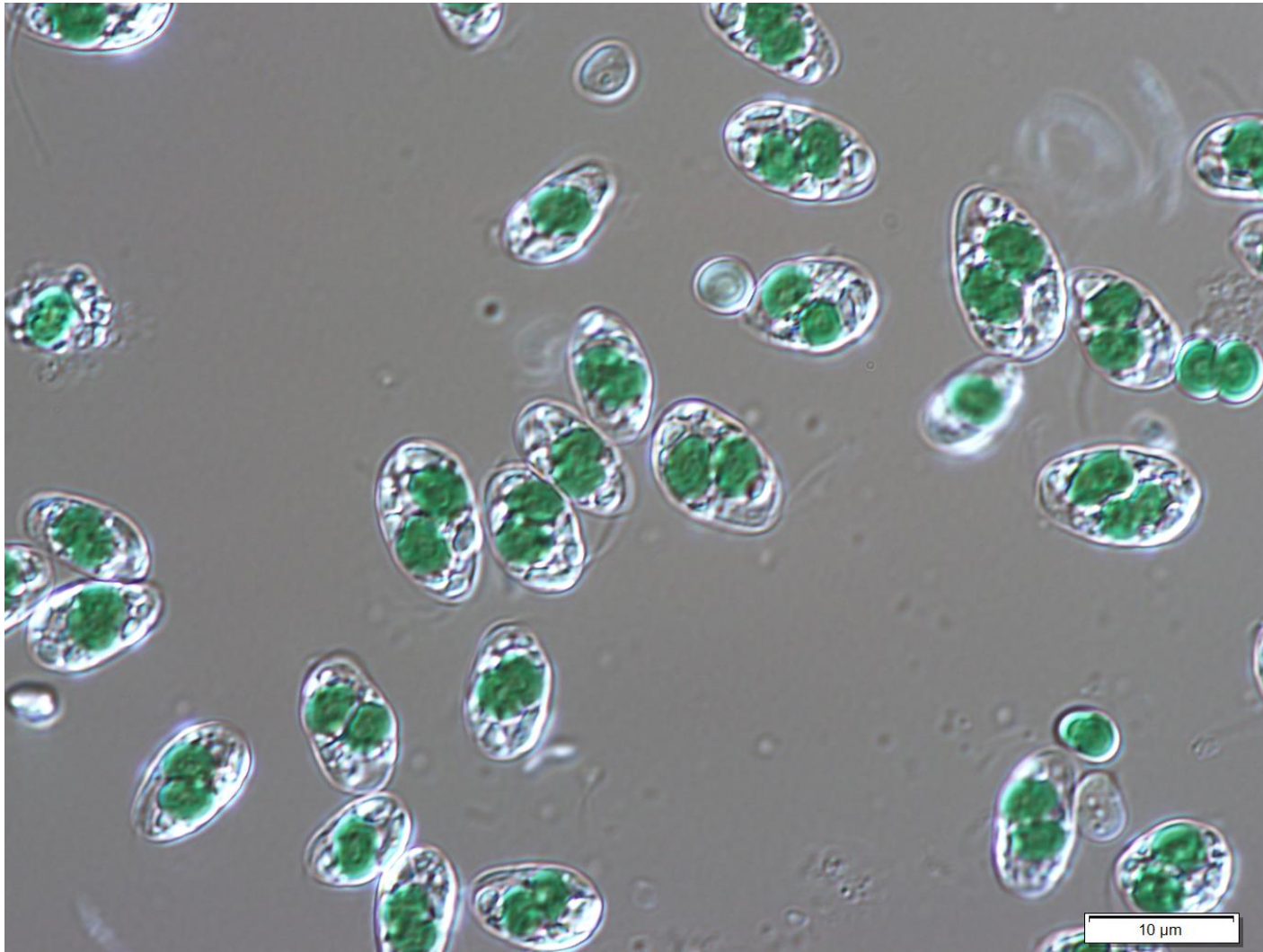


原始シアノバクテリアが取り込まれ、葉緑体へ

アーケプラスチダ



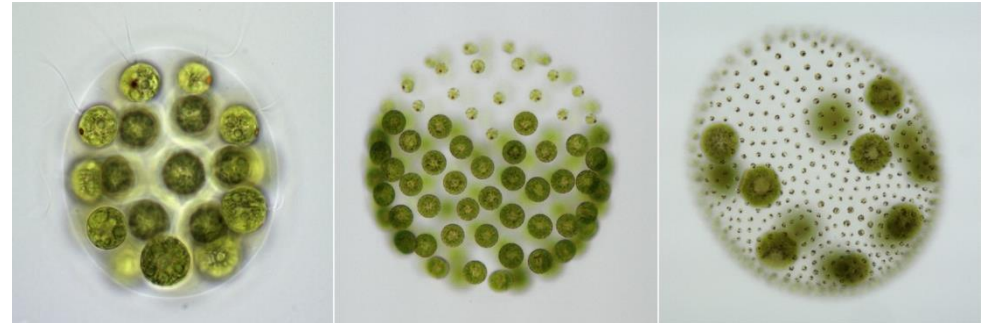
灰色藻：*Cyanophora paradoxa*



紅藻：スサビノリ, マクサ



緑藻：アオサ, イワツタ



ボルボックス：群体を形成する緑藻の一種であり、ボルボックス属に属する生物種の総称。和名オオヒゲマワリ。

東工大 久堀・若林研HPより

アオサ：青のりの原料
分化した多細胞性の藻体を形成

キャンベル 生物学 第9版より

裸子植物



ベイマツ



ヨーロッパカラムツ



セコイア



セイヨウネズ



ウォレミマツ



イガゴヨウ

キャンベル 生物学 第9版より

被子植物：双子葉植物



ハナビシソウ



ヨーロッパノイバラ



ピレネーカシ



エンドウ



ズッキーニ

被子植物：単子葉植物



ラン



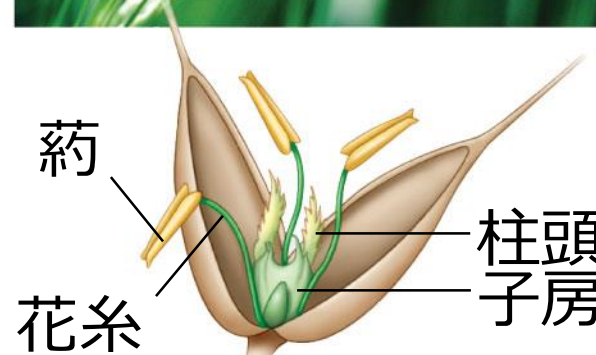
ユリ



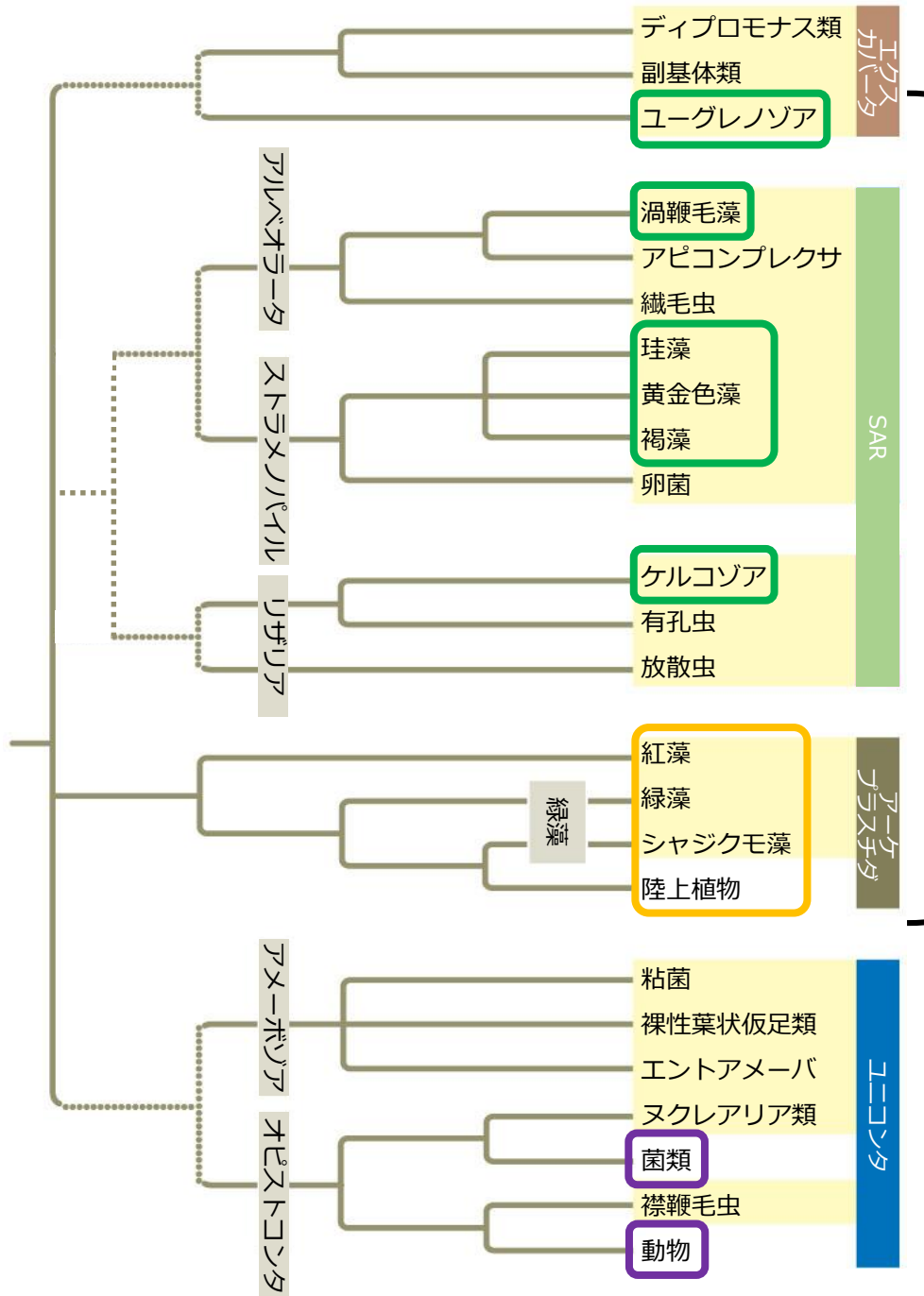
シンノウヤシ



オオムギ

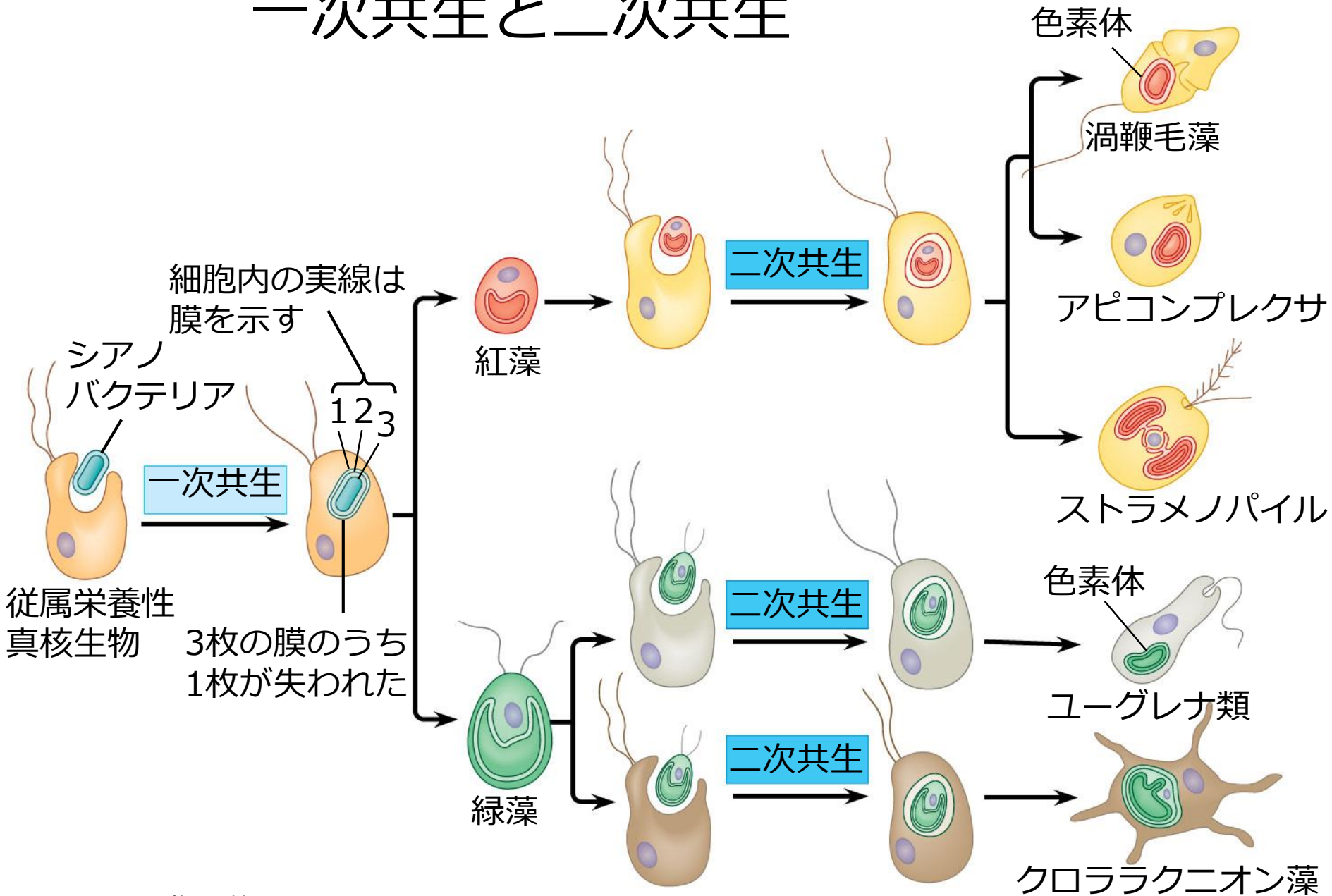


真核生物の分類¹⁹

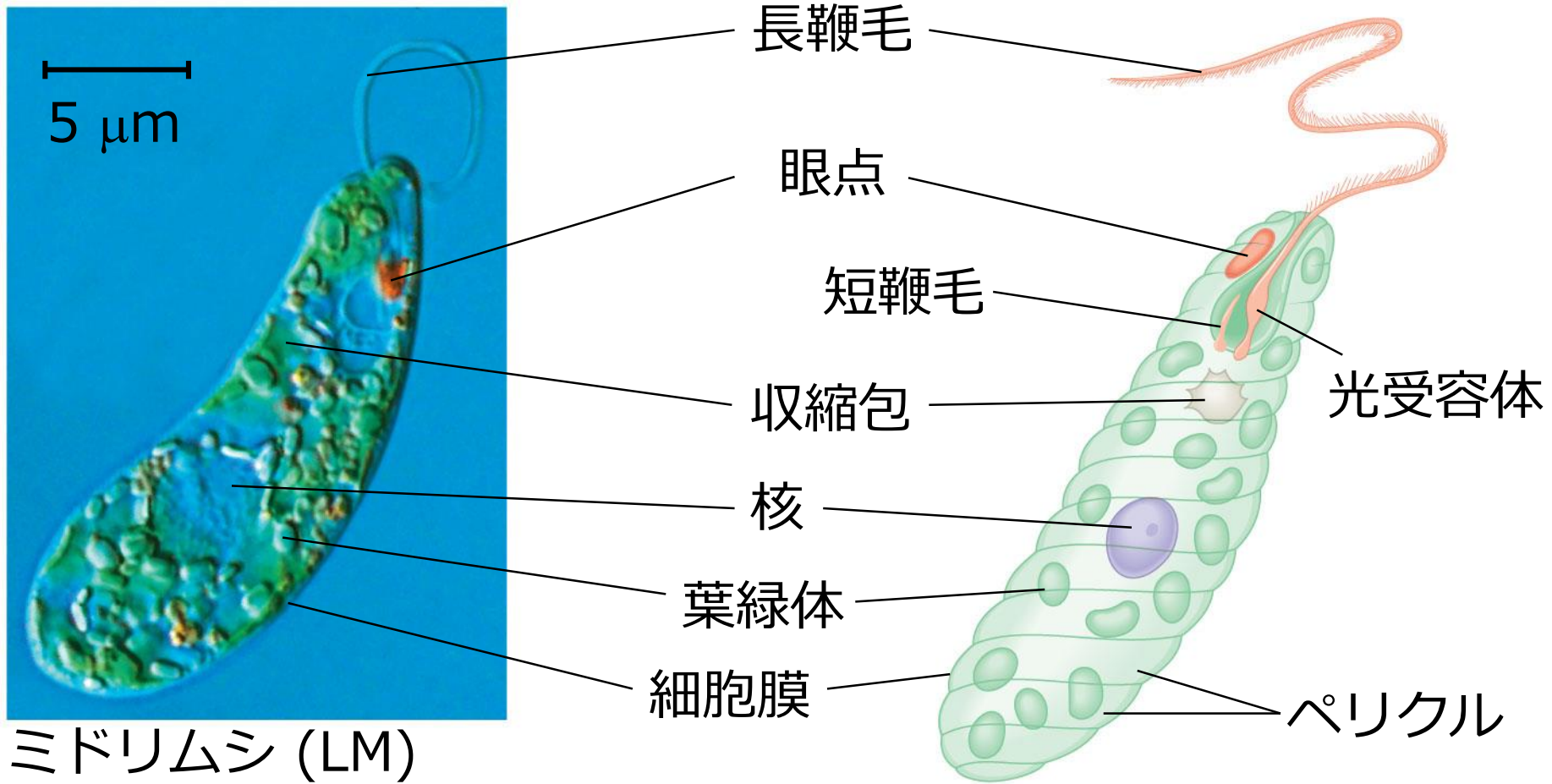


光合成をする生き物を含む分類群

一次共生と二次共生

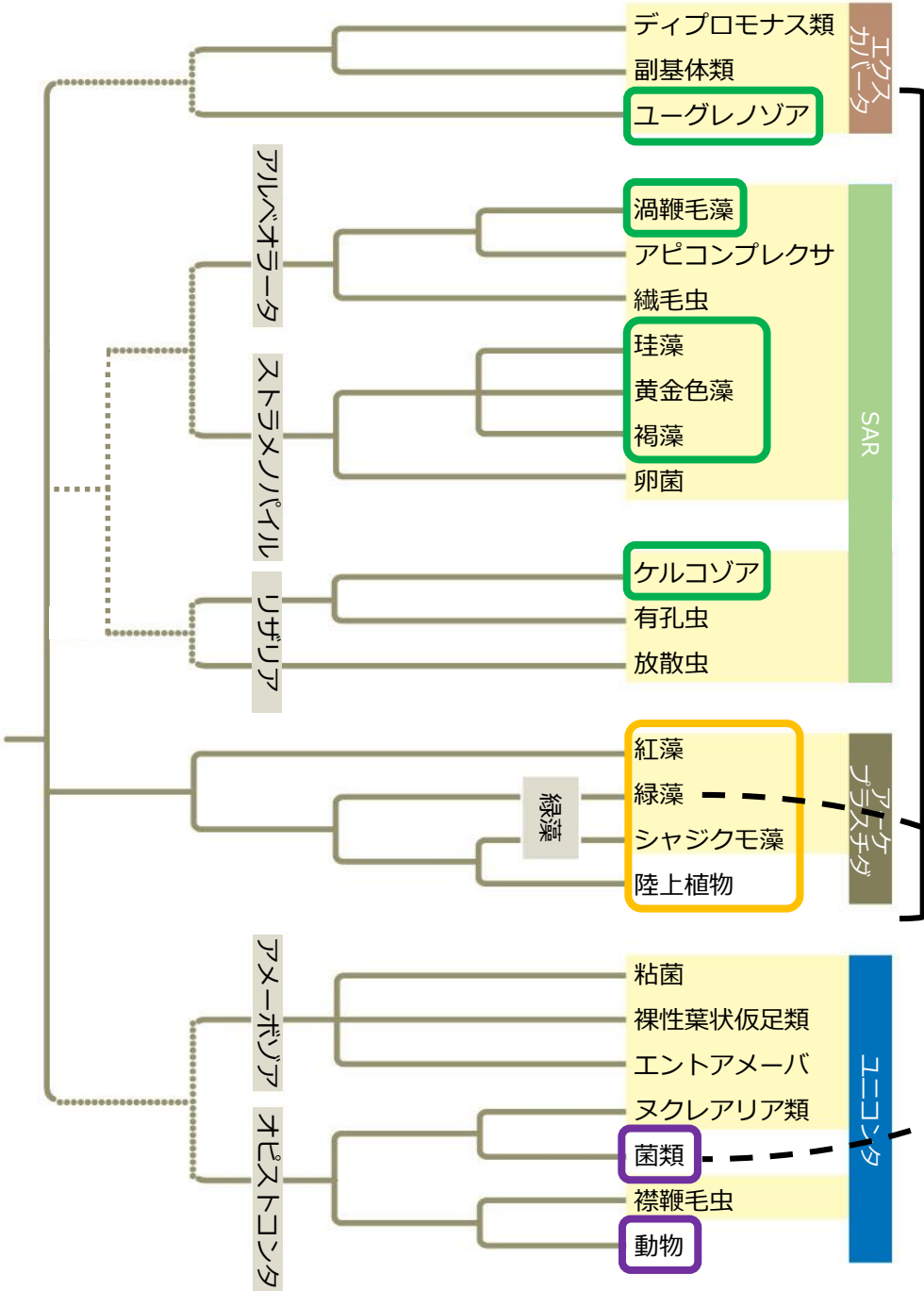


ユーグレノゾア (ユーグレナ類)



© 2011 Pearson Education, Inc.

真核生物の分類



光合成をする生き物を含む分類群

地衣類

地衣類：菌類と藻類の共生体

▼ 葉状地衣



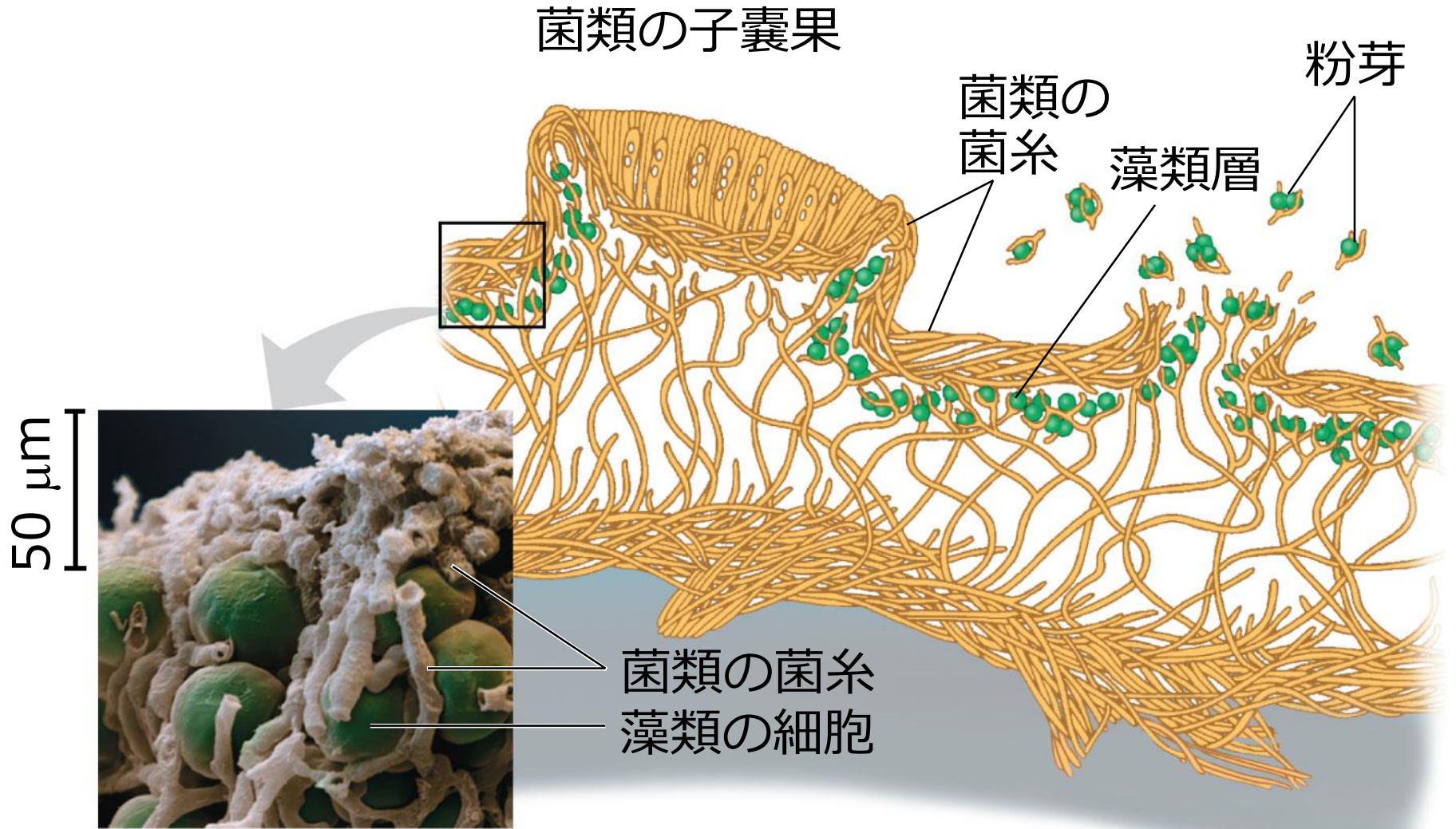
▼ 痂状地衣



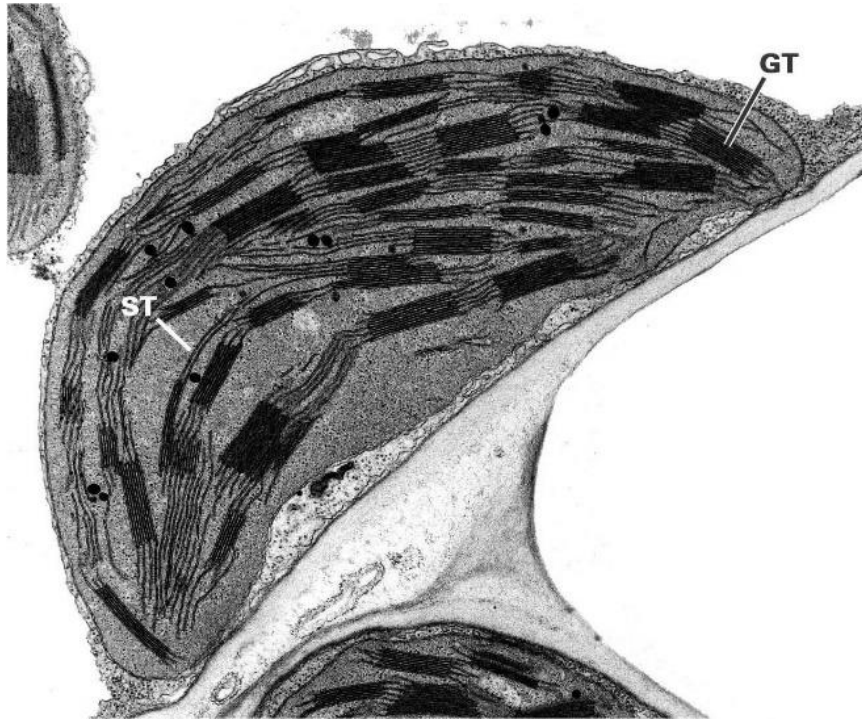
▶ 樹状地衣



地衣類：菌類と藻類の共生体

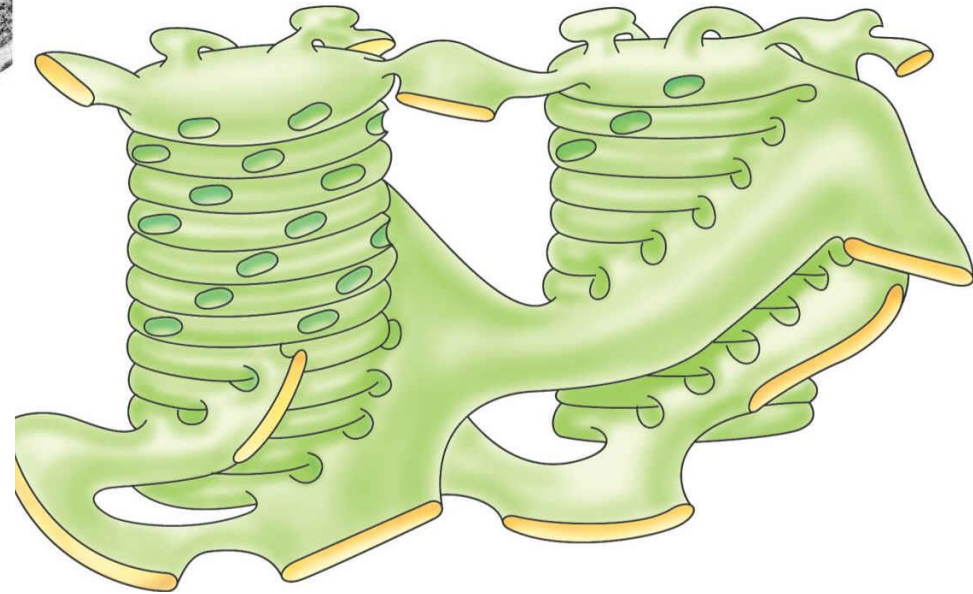


チラコイド膜の複雑な構造



葉緑体（電子顕微鏡写真）

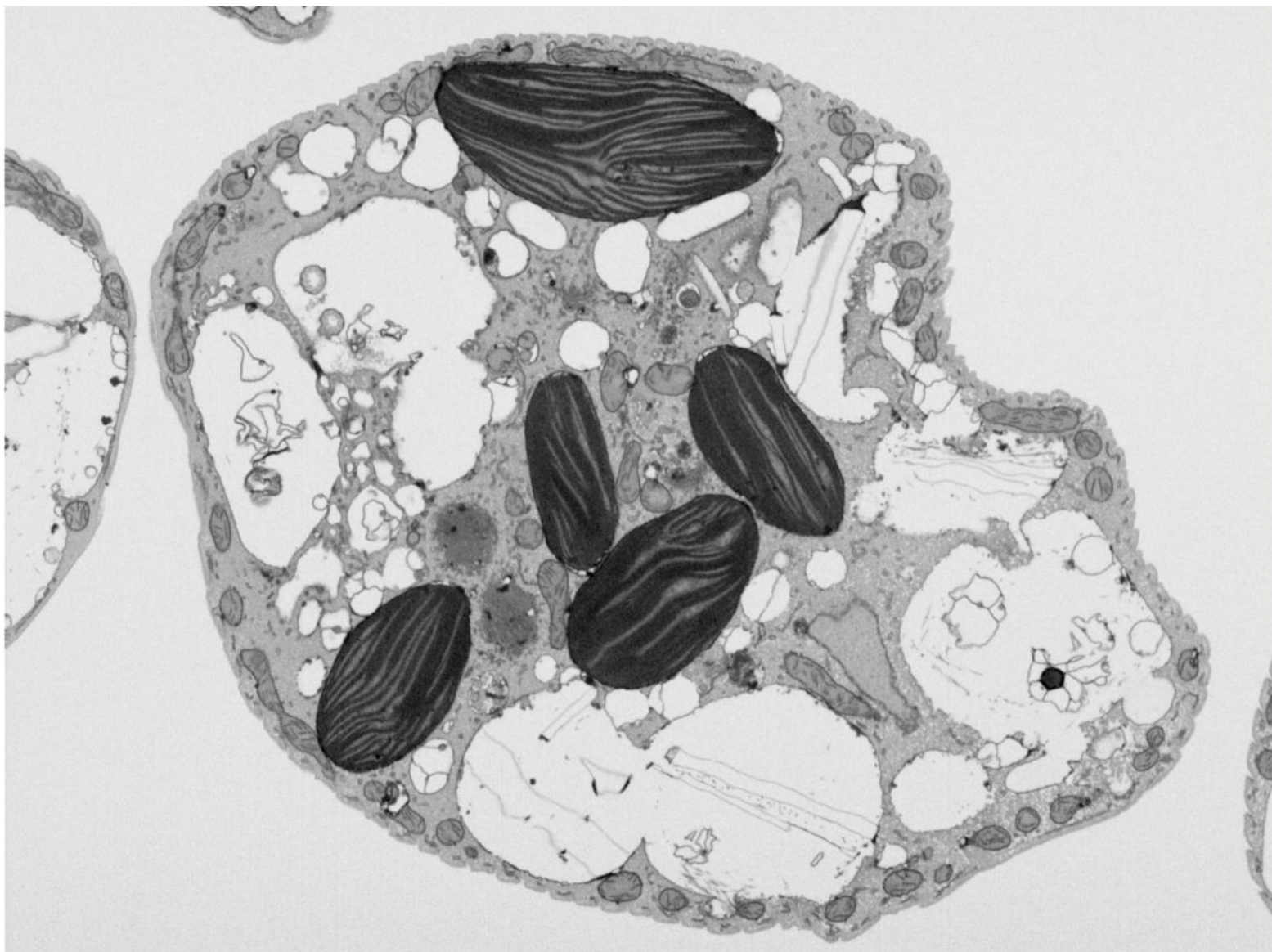
複雑に発達したチラコイド



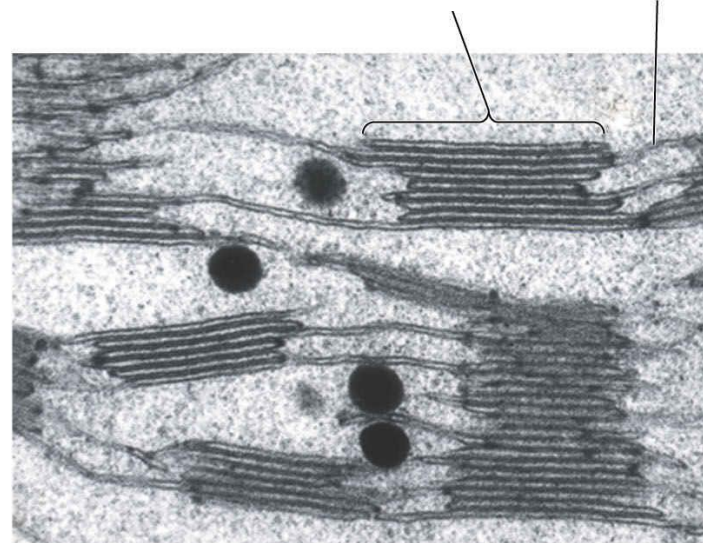
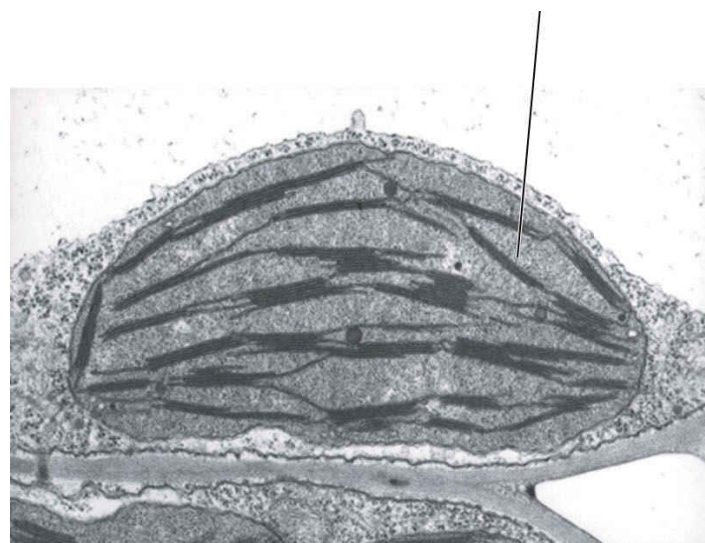
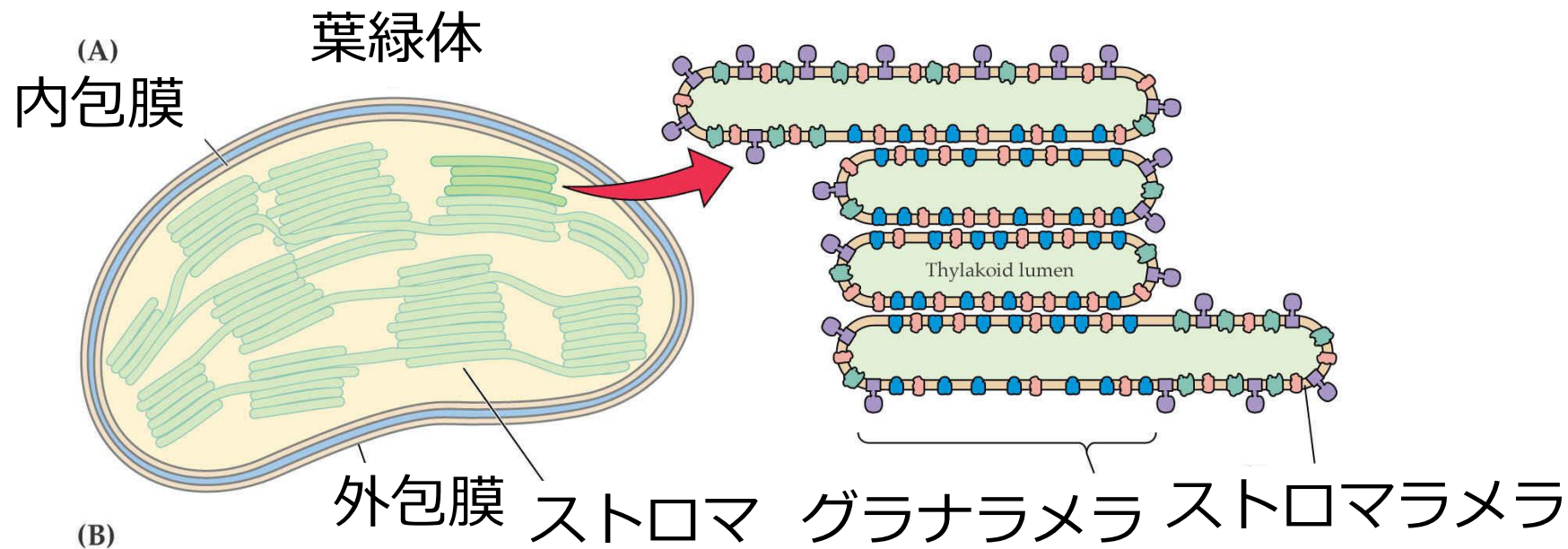
グラナスタックの構造

積み重なった袋状の膜構造
独立しておらず、つながっている

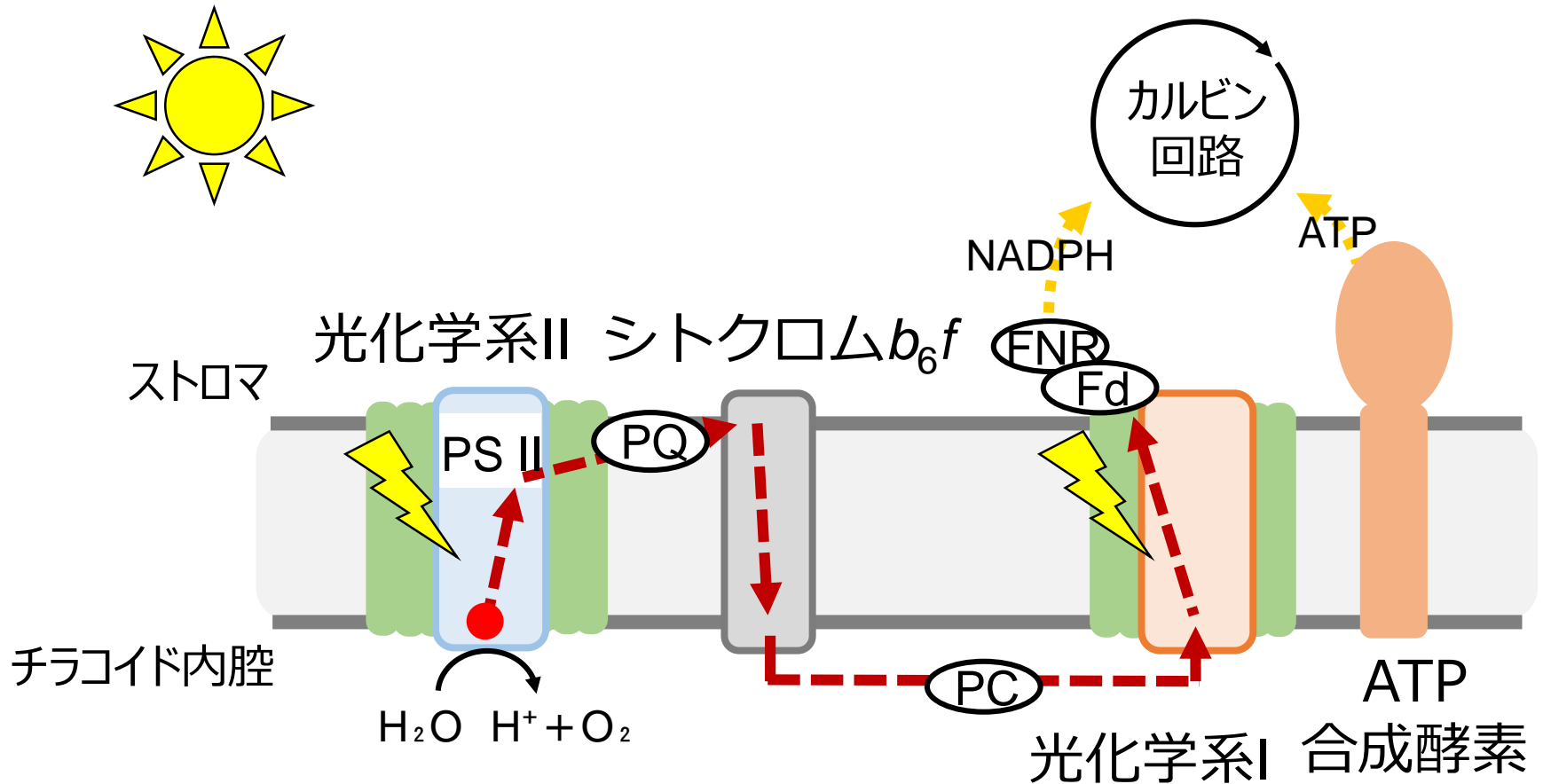
ユーグレナのチラコイド膜



チラコイド膜の立体構造



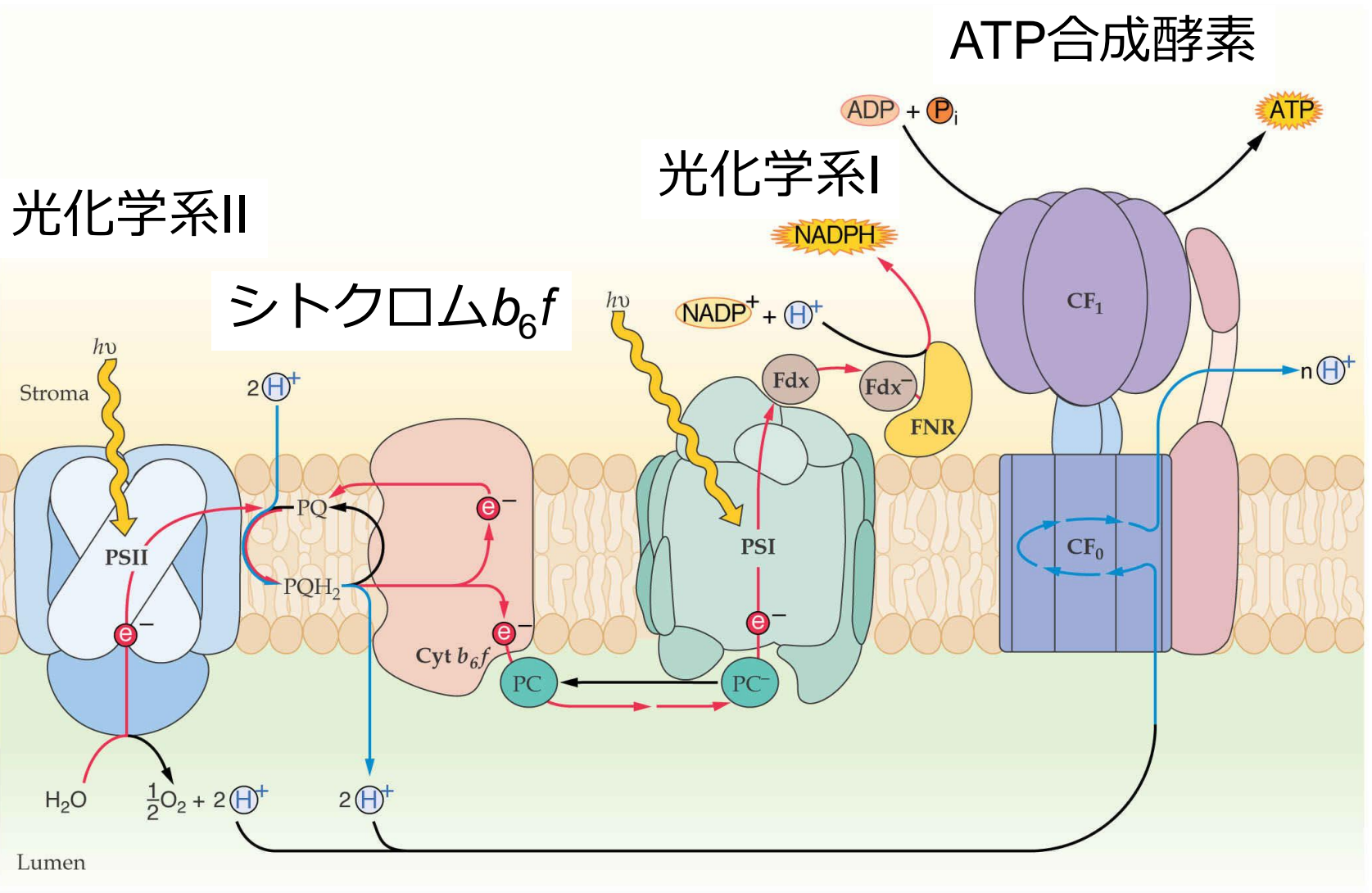
光合成電子伝達でATPとNADPHが合成される



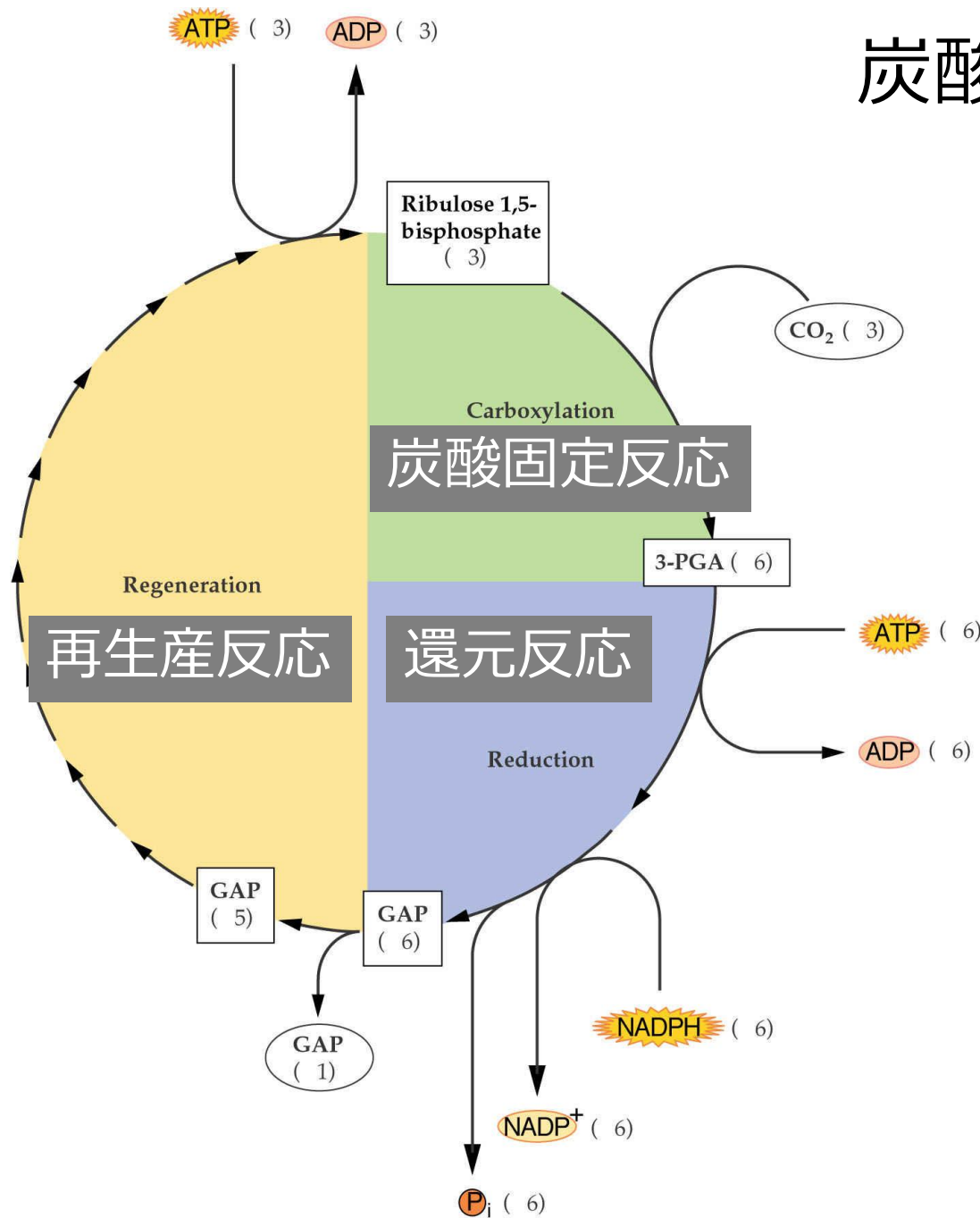
水から引き抜かれた電子が光エネルギーで励起され、還元力とエネルギーに変換される

PC : プラストシアニン
 PQ : プラストキノン
 Fd : フェレドキシン
 FNR : Fd-NADP⁺還元酵素

チラコイド膜の機能：光合成



炭酸固定反応：概要



炭酸固定反応

CO₂固定

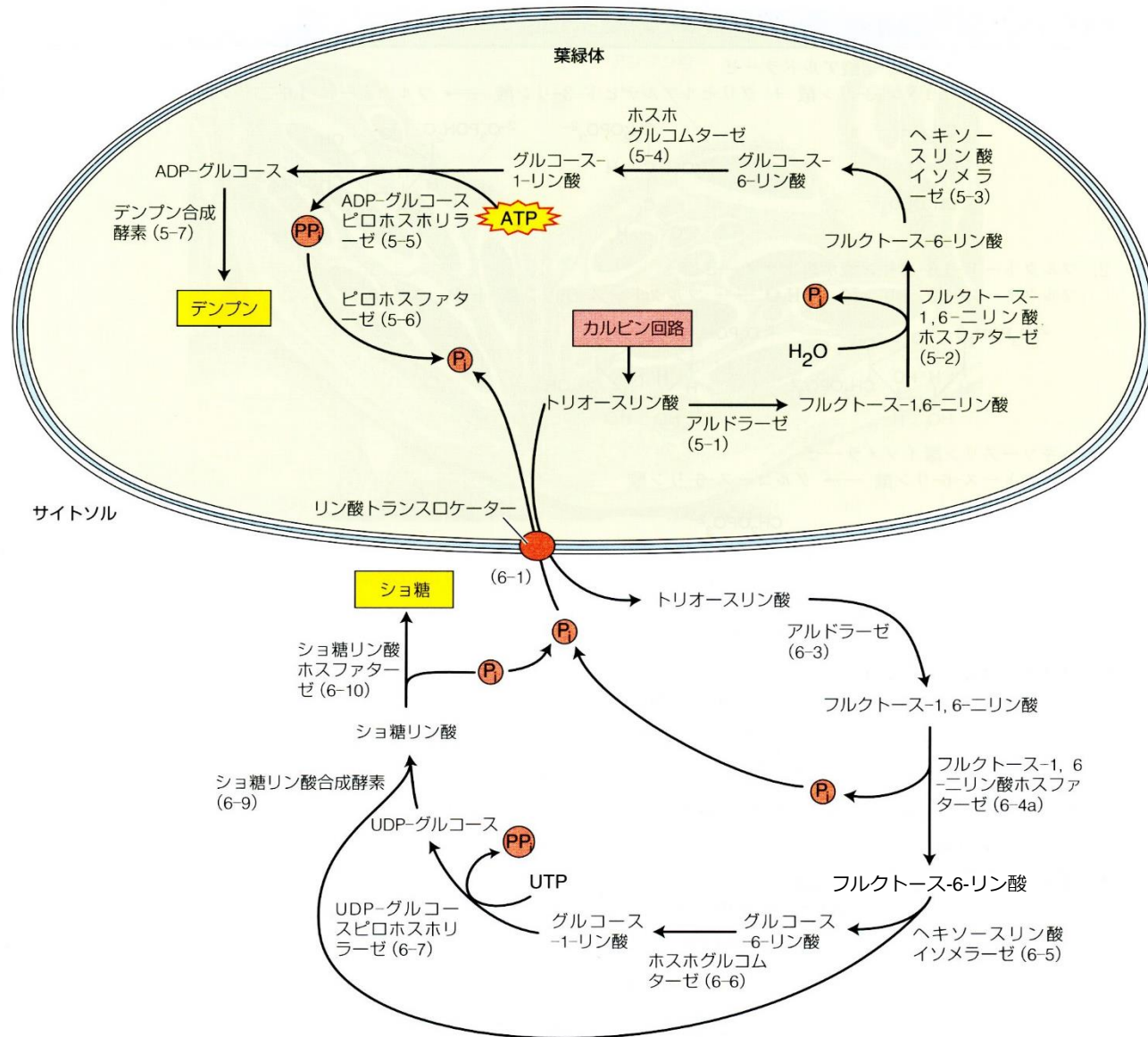
還元反応

ホスホグリセリン酸
をグリセルアルデヒド3リン酸に還元

再生産反応

リブローズニリン酸
の再生産

葉緑体で合成されたGAPが糖に変換される



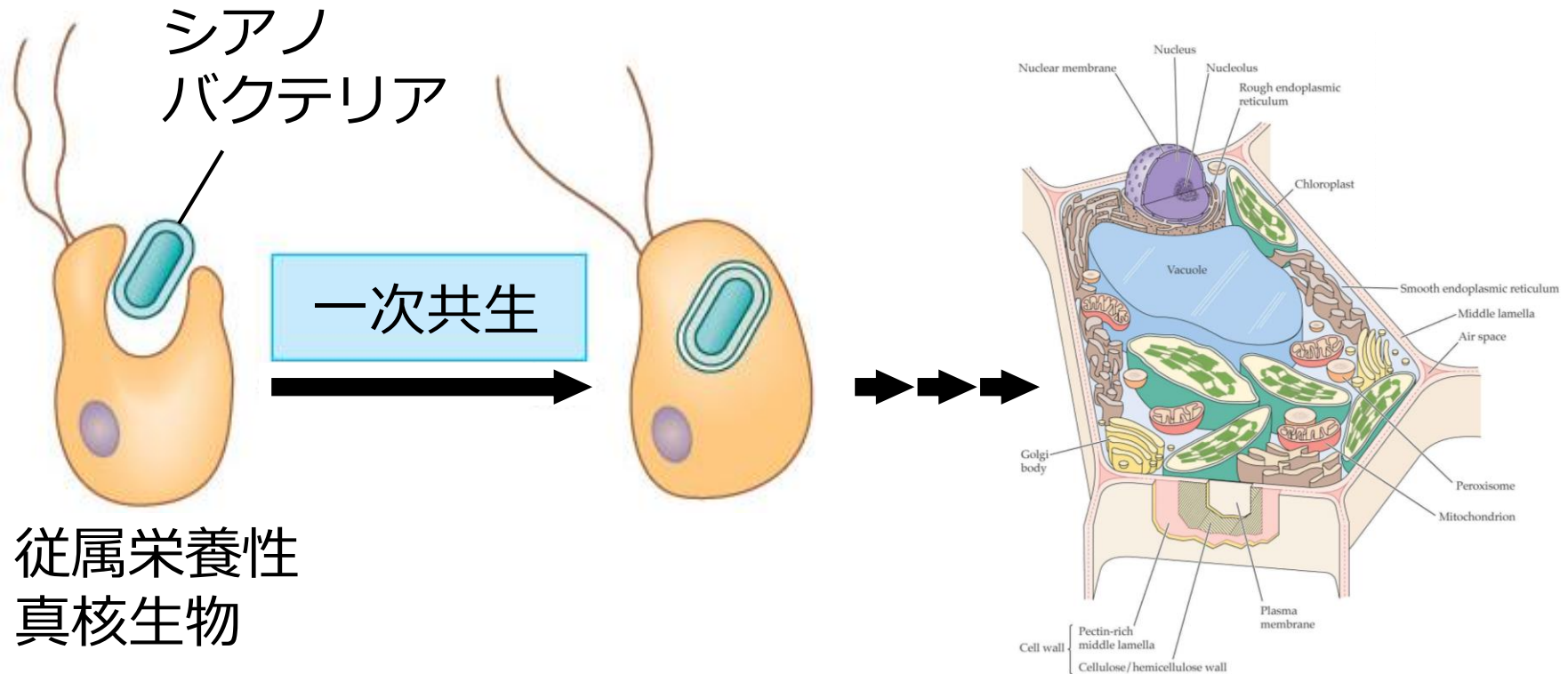
光合成とは？

光エネルギーを化学エネルギーに変換する
生化学反応

明反応（光電子伝達反応）で得たATP（エネルギー）とNADPH（還元力）を使って、
CO₂を固定

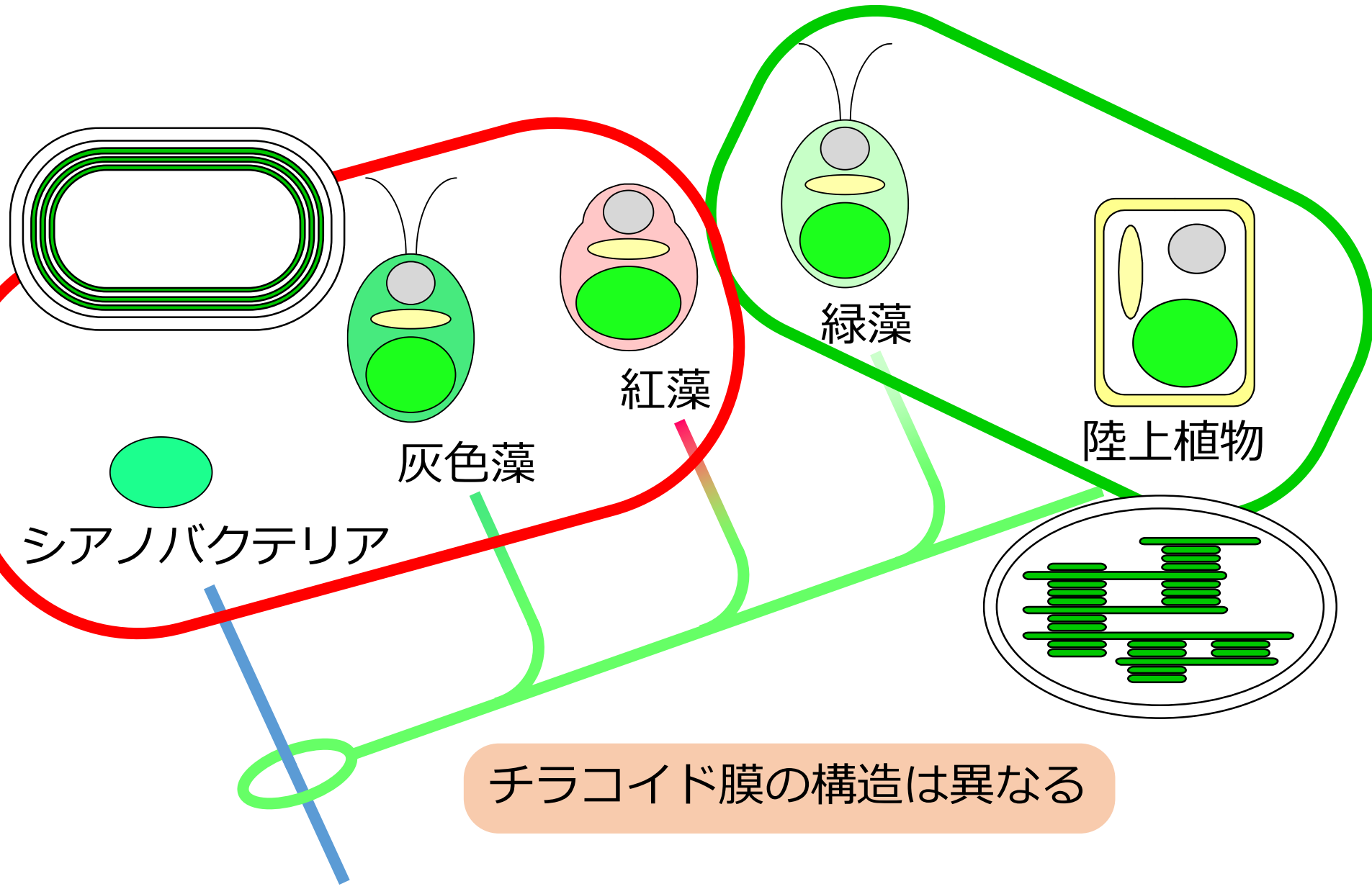
得られたGAPから糖などを合成する

シアノバクテリアと植物葉緑体は共通起源

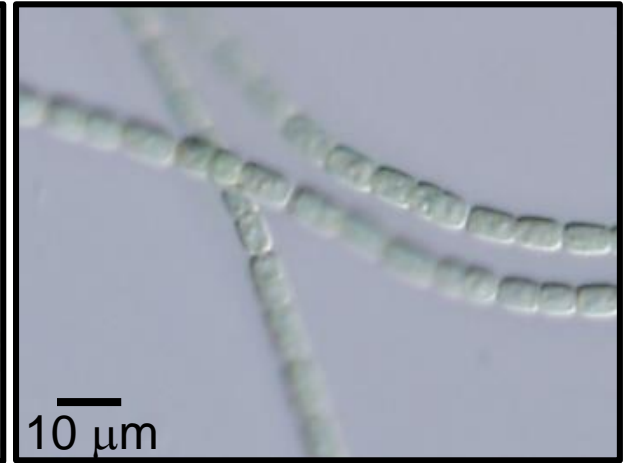
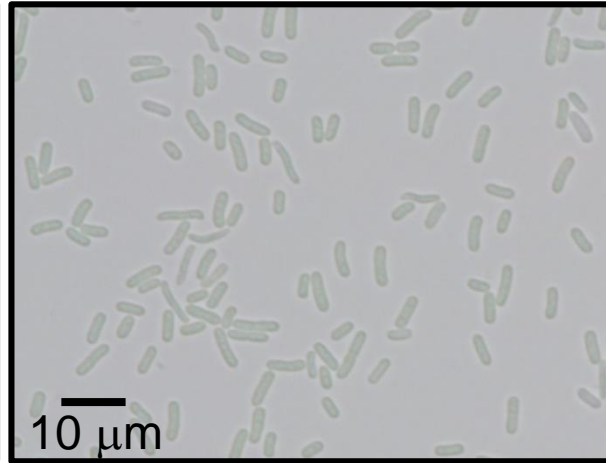
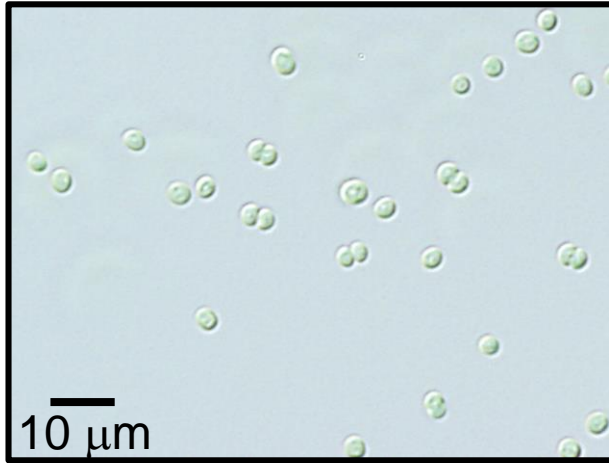


共通起源なので，チラコイド膜の構造も似ている？

光合成生物の進化とチラコイド膜の構造



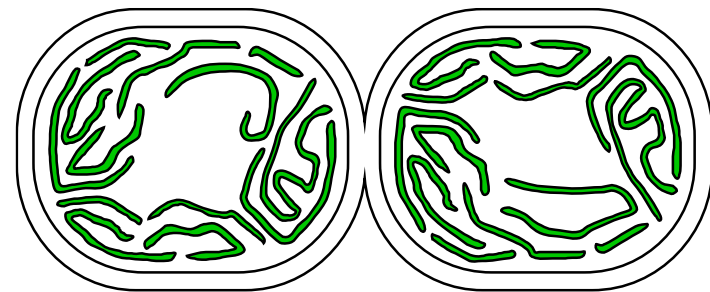
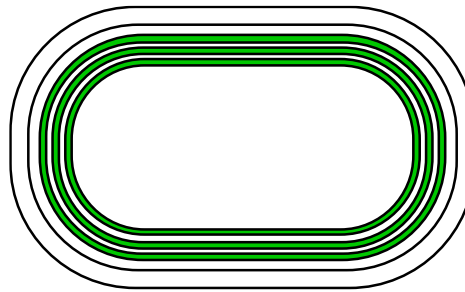
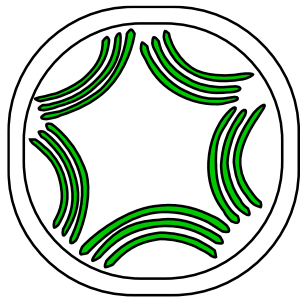
チラコイド膜の構造：シアノバクテリア



Synechocystis sp.
PCC 6803

Synechococcus
elongatus PCC 7942

Anabaena sp.
PCC 7120



チラコイド膜の構成要素

<タンパク質>

光化学系II

シトクロム b_6f

光化学系I

ATP合成酵素

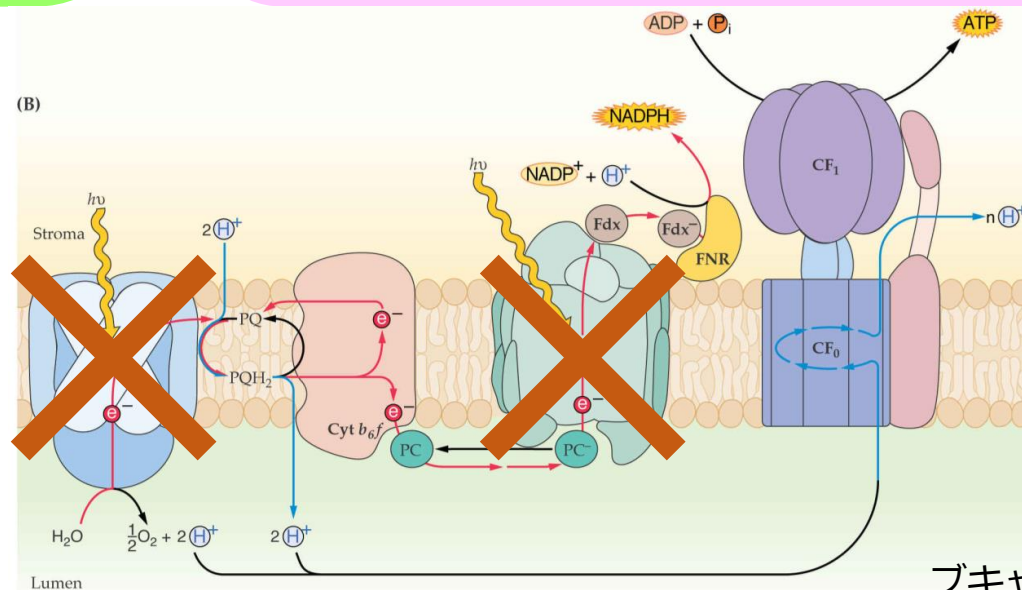
<膜脂質>

モノガラクトシルジアシルグリセロール

ジガラクトシルジアシルグリセロール

スルホキノボシルジアシルグリセロール

ホスファチジルグリセロール

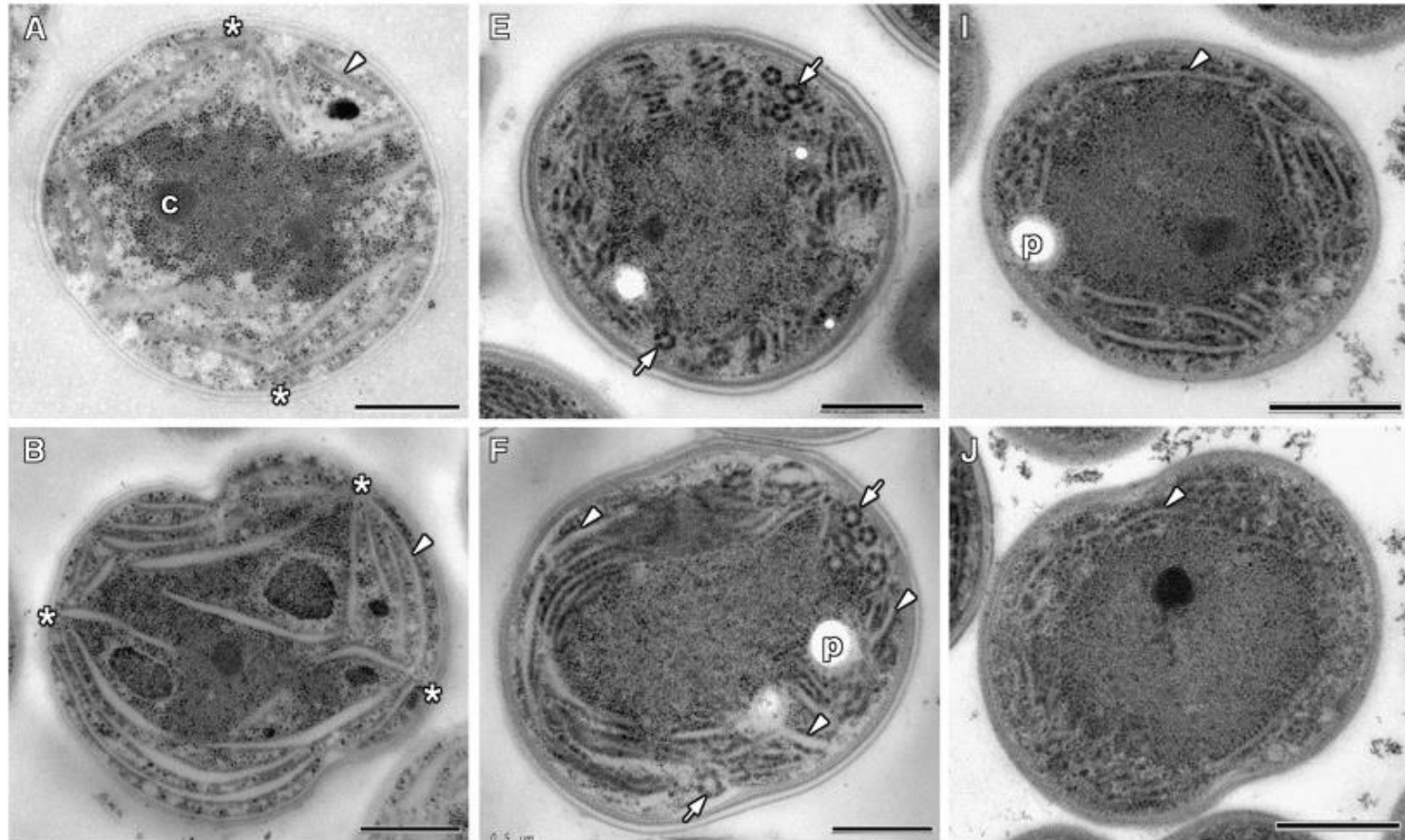


チラコイド膜の構築：光化学系複合体は必要ない

野生株

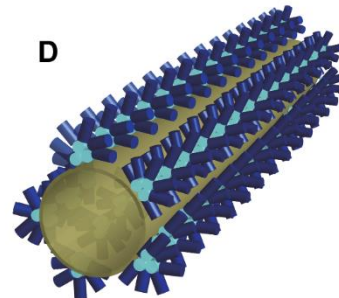
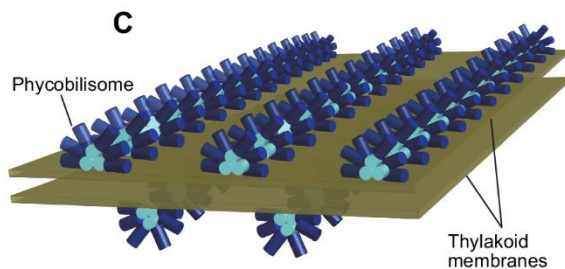
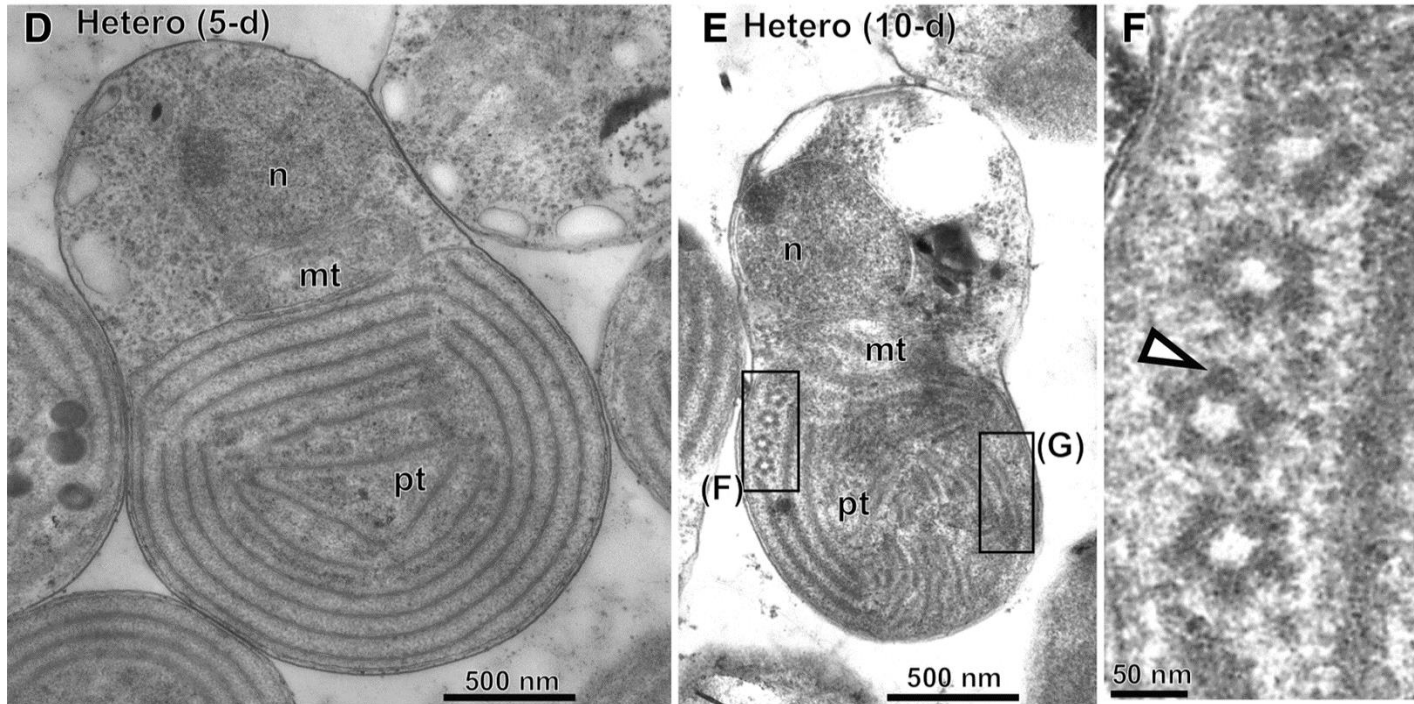
Δ PSI株

Δ PSI/PSII株



チラコイド膜の構築：変な構造が紅藻でも

野生株：従属栄養成長



チラコイド膜脂質の合成経路

シアノバクテリアの糖脂質合成経路

DAG → GlcDG ~~→~~ MGDG → DGDG

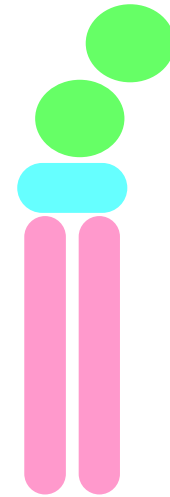


グルコース



ガラクトース

X 1



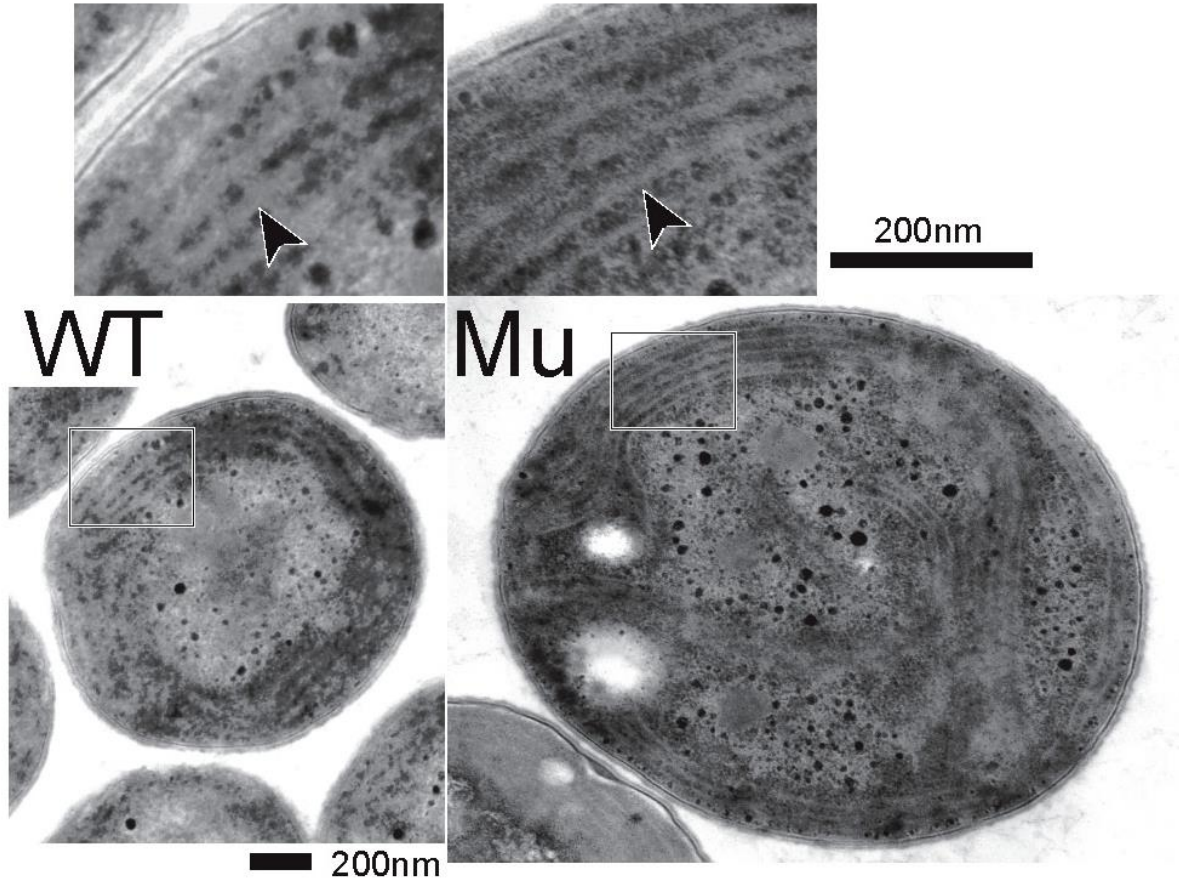
ガラクトース

X 2

チラコイド膜の構築：ガラクト脂質も必要ない

野生株

ガラクト脂質欠損株



チラコイド膜の構築過程

<植物葉緑体>

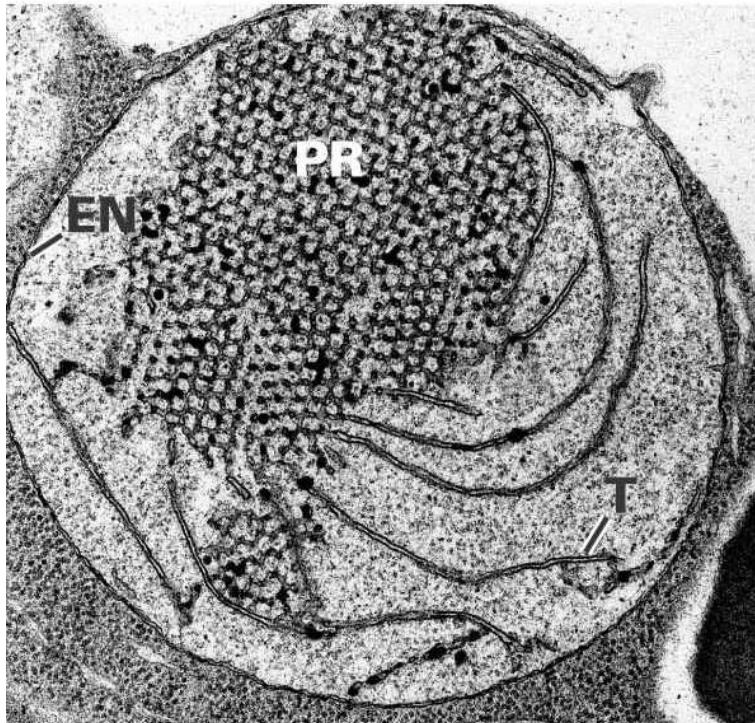
明所：葉緑体が分裂（チラコイド膜を分配）

暗所：モヤシ

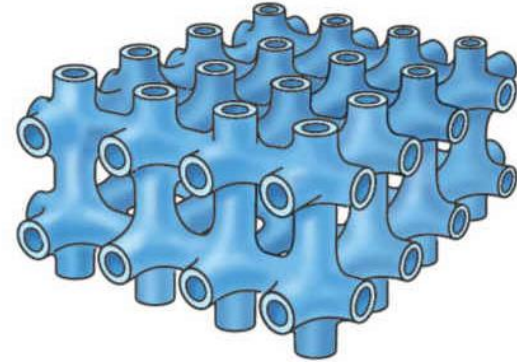
エチオプラスト内にプロラメラボディを形成

新規のチラコイド膜構築はみられない

モヤシではプロラメラボディを形成



エチオプラスト



光照射でラメラ構造を形成

チラコイド膜の構築過程

<シアノバクテリア>

明所で生育

暗所では生育しない

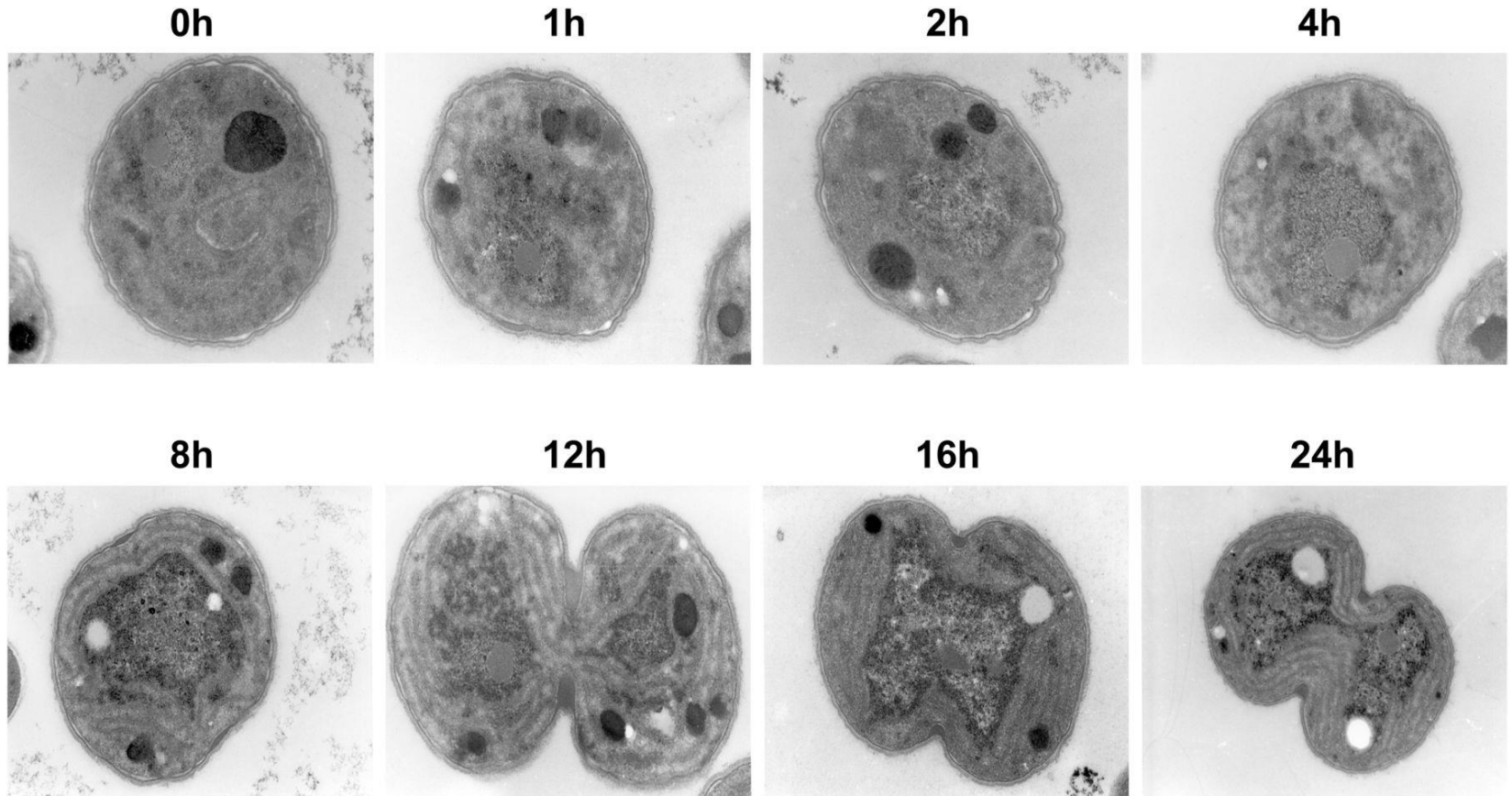
新規のチラコイド膜構築はみられない

特殊な条件では暗所生育

<特殊な条件>

5 min光照射, 5 mM グルコース

光照射によるチラコイドの構築



チラコイド膜の構築過程

<シアノバクテリア>

明所で生育

暗所では生育しない

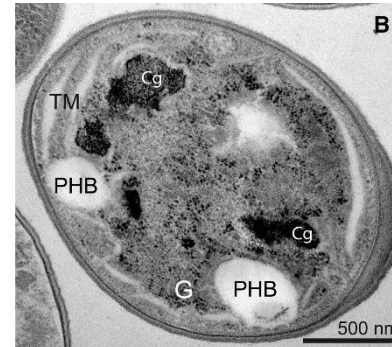
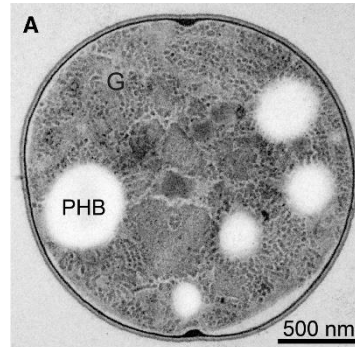
新規のチラコイド膜構築はみられない

窒素欠乏環境への適応

窒素欠乏環境に長期間置くと、チラコイド膜が減衰
窒素再添加によってチラコイド膜が再構築

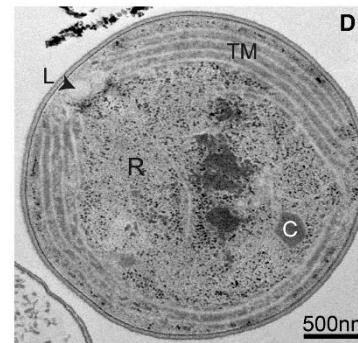
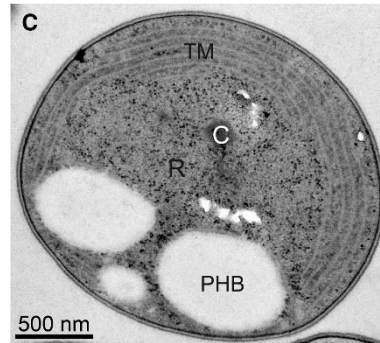
窒素源制御によるチラコイド膜の構築

窒素欠乏
1カ月



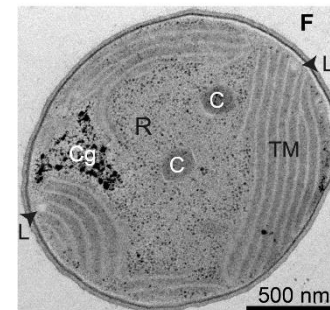
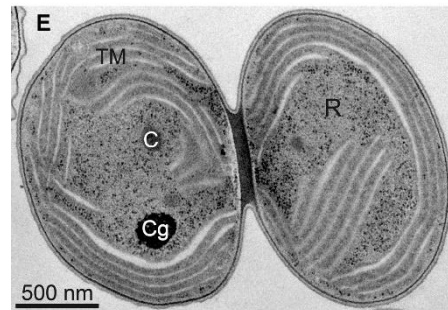
窒素添加
24時間

窒素添加
36時間



窒素添加
48時間

窒素添加
66時間



対数増殖期

窒素源制御によるチラコイド膜の構築

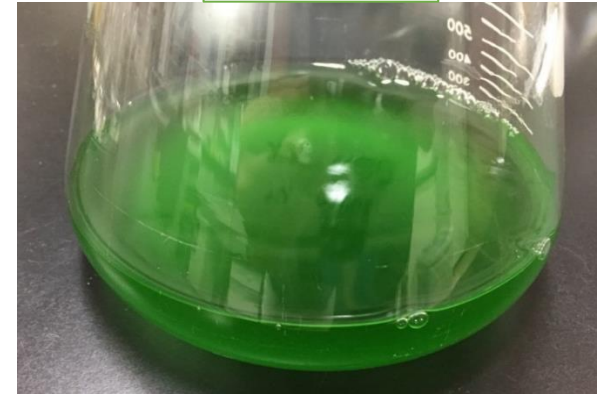
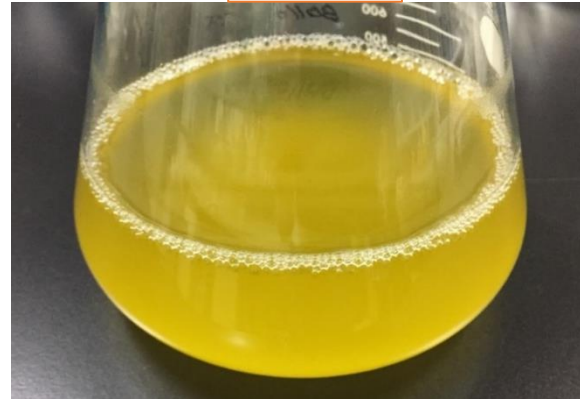
窒素欠乏培地に移行

窒素源の添加

通常培養

減衰

再構築



7日間

2日間

- ・光合成活性
- ・タンパク質量
- ・クロロフィル量
- ・膜脂質量
- ・細胞形態

チラコイド膜の再構築過程における
各要素の変化を解析

チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

24h

36h

48h

呼吸



光合成
タンパク質



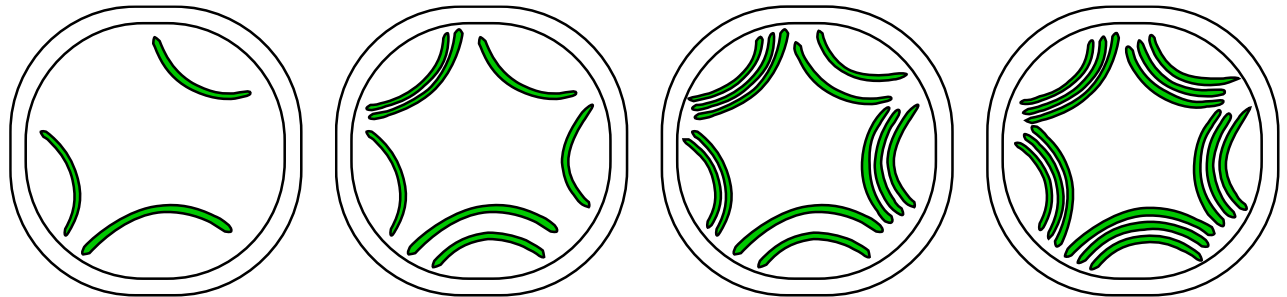
脂質



生育



チラコイド



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

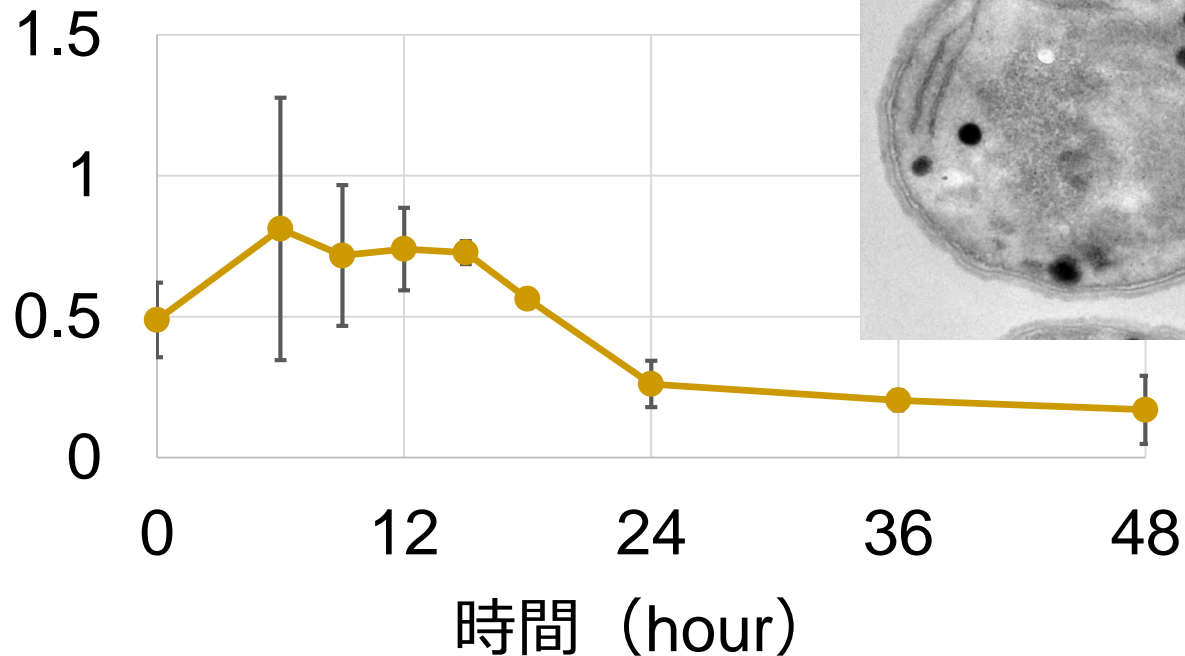
24h

36h

48h

呼吸

酸素消費量
($\mu\text{mol O}_2/\text{mg Chl}/\text{min}$)



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

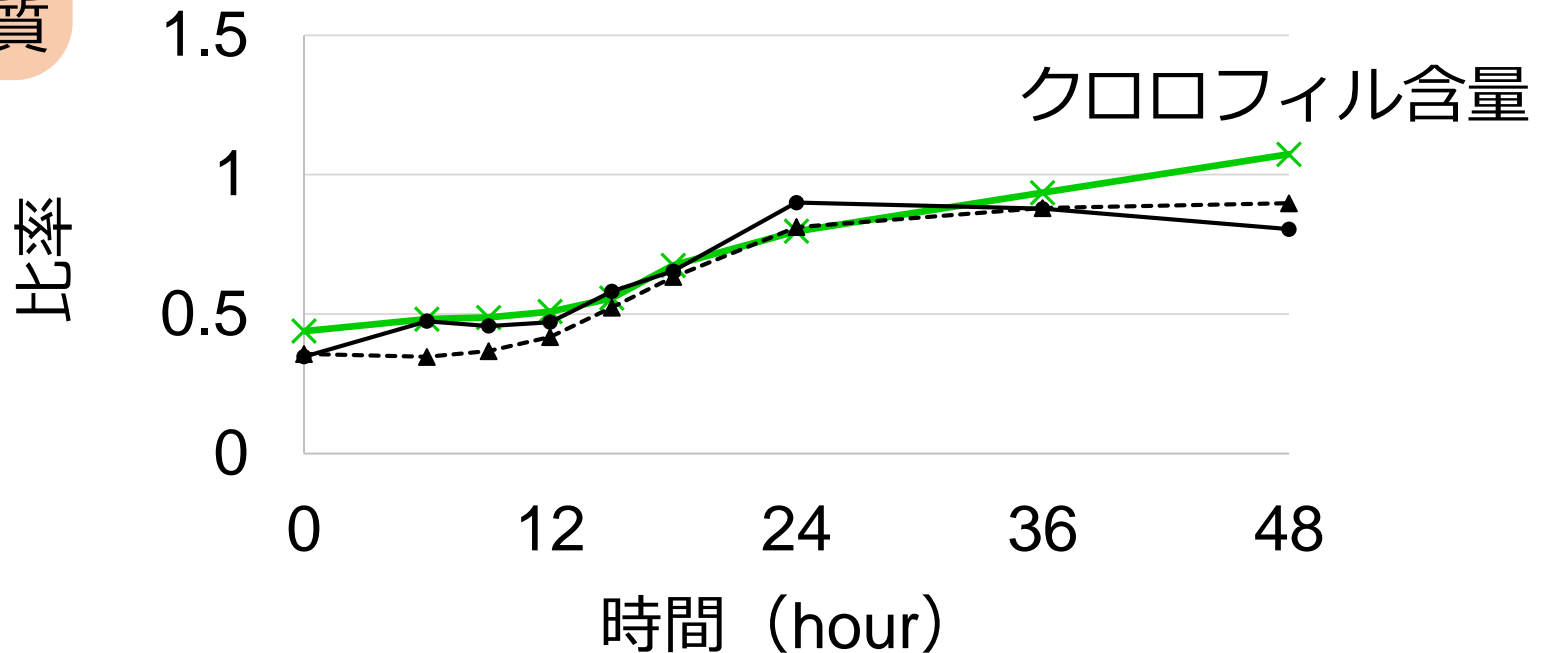
12h

24h

36h

48h

光合成
タンパク質



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

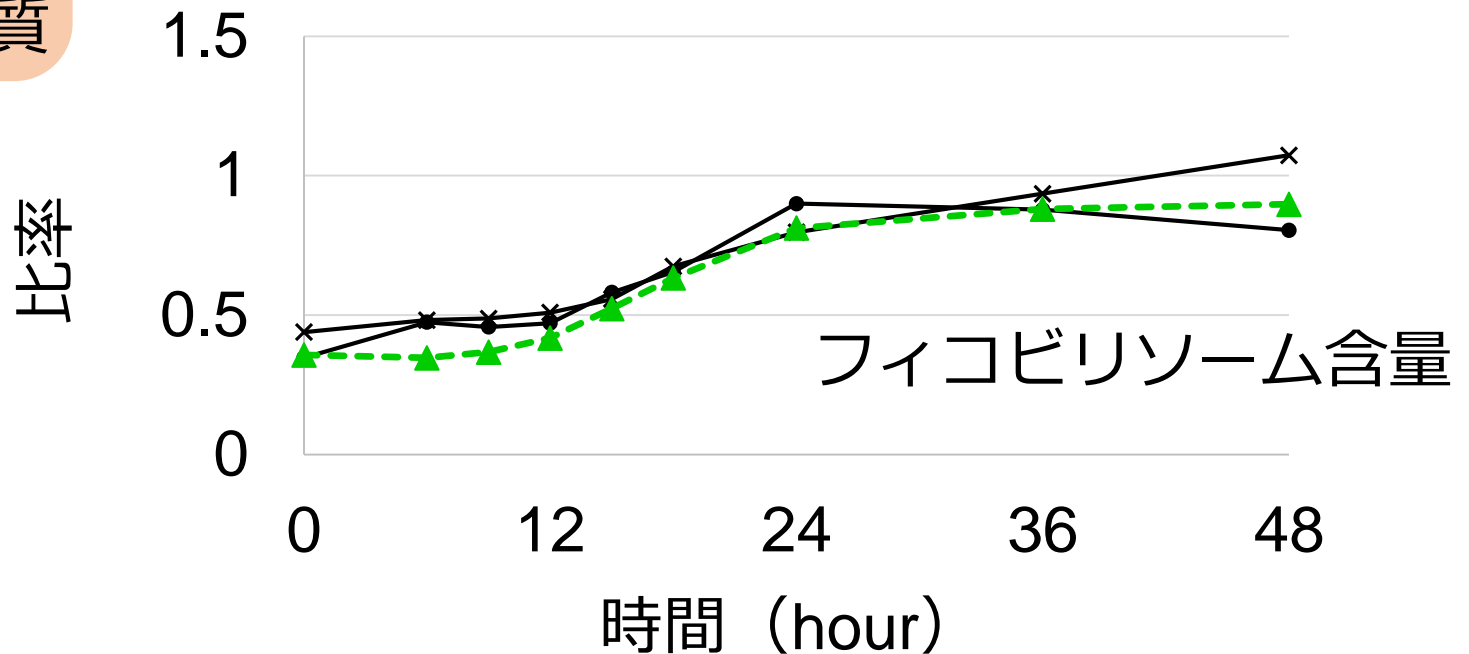
12h

24h

36h

48h

光合成
タンパク質



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

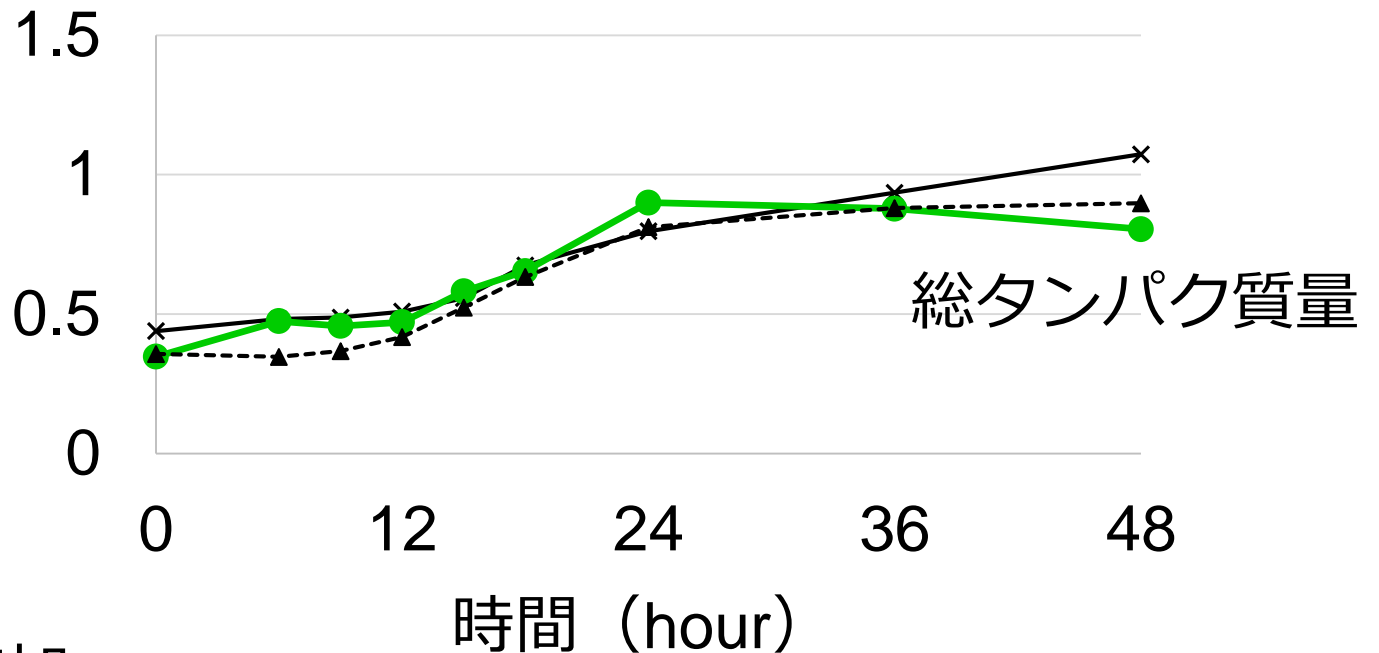
24h

36h

48h

光合成
タンパク質

比率



総タンパク質量

系I：変わらず
系II：減少→増加

チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

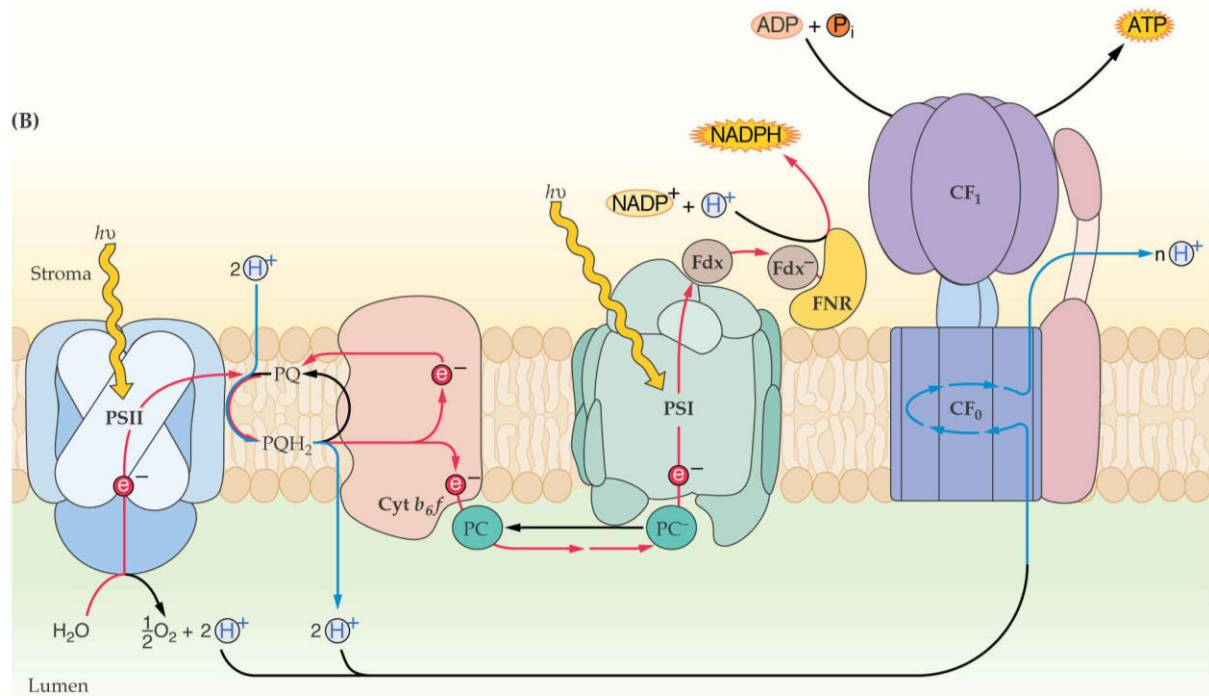
24h

36h

48h

光合成
タンパク質

光化学系IIの再構築



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

24h

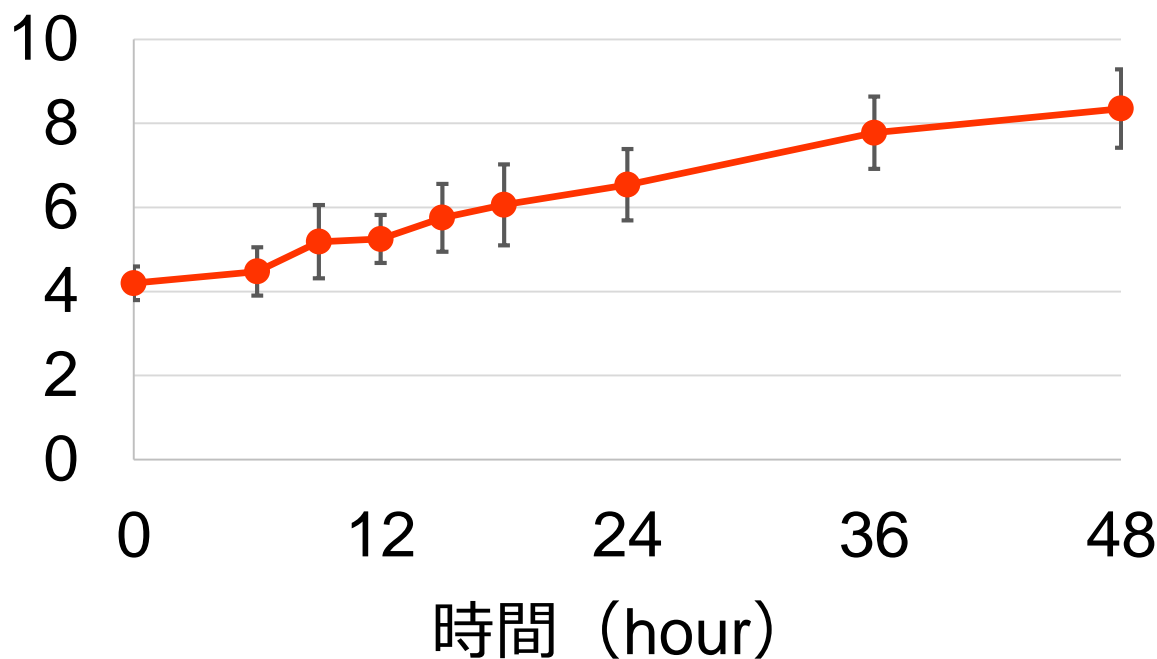
36h

48h



脂質

総脂質量
(nmol/ml/OD₇₃₀)



チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

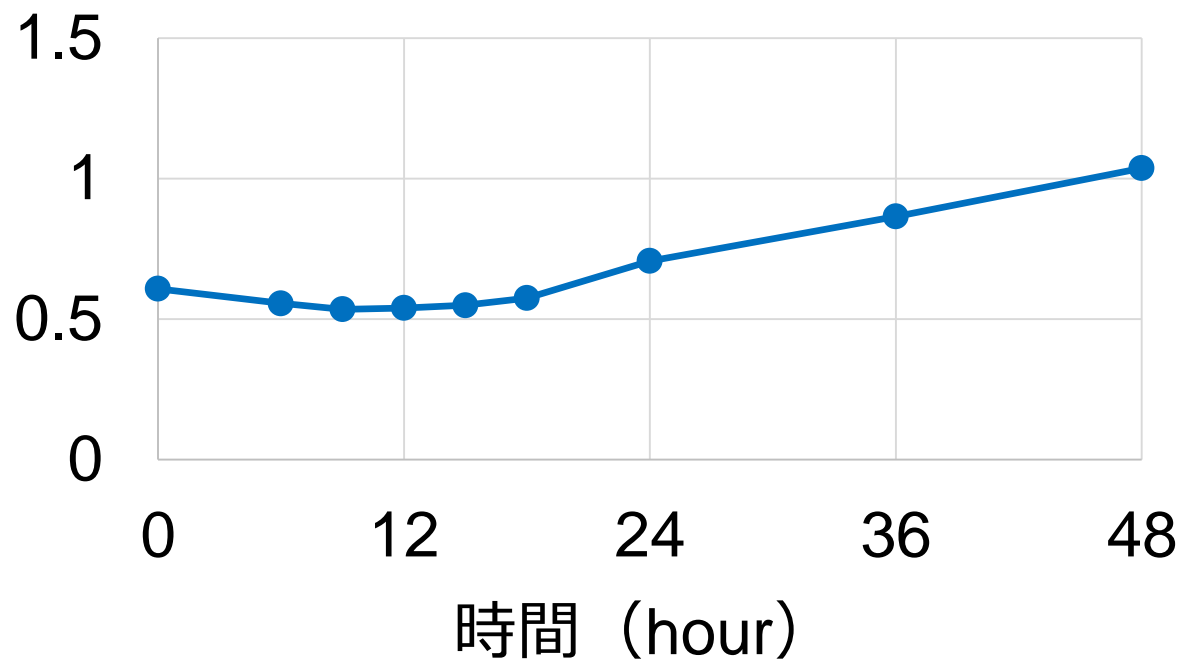
24h

36h

48h



細胞濁度 (OD₇₃₀)



生育

チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

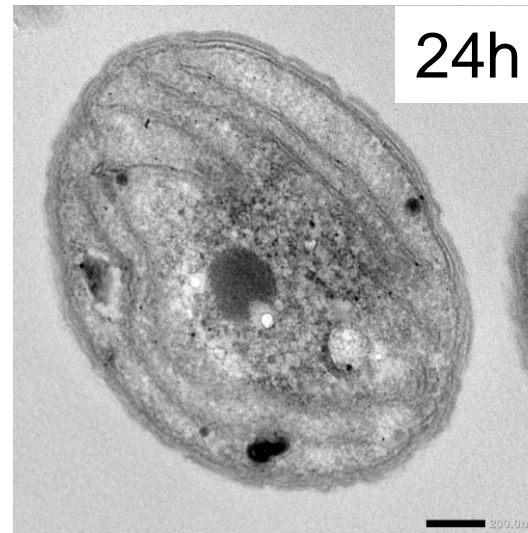
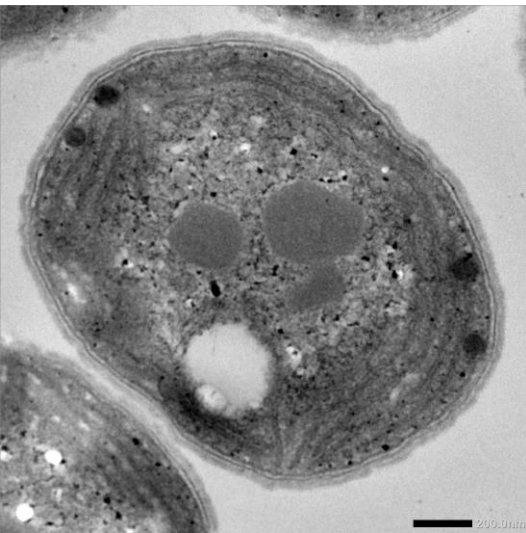
0h

12h

24h

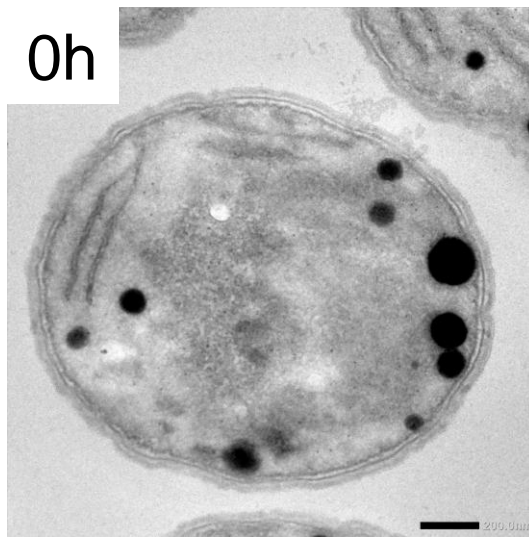
36h

48h

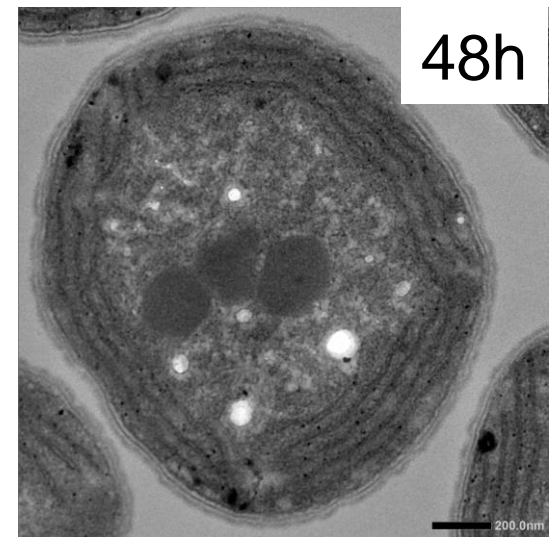


Bar = 200 nm

0h



48h



チラコイド

Kobayashi and
Osawa et al, (2020)
Front Plant Sci

チラコイド膜再構築過程の各パラメータ変化

窒素添加

0h

12h

24h

36h

48h

呼吸



光合成
タンパク質



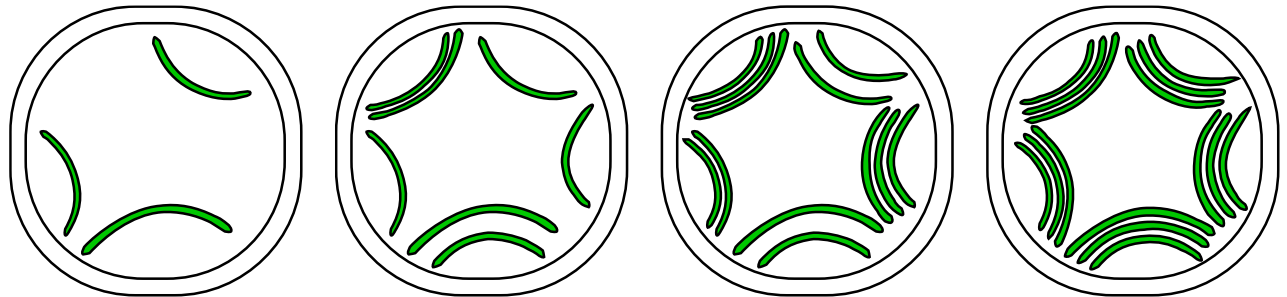
脂質



生育



チラコイド



チラコイド膜の構築

ゼロから構築される様子を観察するのは難しい

条件によっては、チラコイド膜がほとんどない状態にできる

再構築過程を観察、解析することで、チラコイド膜の構築機構の解明を目指す