

水素の時代はすでに到来していた!?

燃料電池と生物の仕組みの共通点

加藤 茂

現代文明は化石燃料の大量消費とともに発展してきました。その一方で資源の枯渇や地球温暖化など環境への深刻な問題が顕在化しており、その対策として化石燃料に代わる再生可能なエネルギーの利用が求められています。その候補の1つが水素です。

水素は宇宙にもっとも豊富にある元素で、太陽をはじめ宇宙の星々のほとんどが水素の核融合反応によって輝いています。地球上では質量の軽さゆえ水素が分子(H_2)の形で存在することはほとんどありませんが、水や有機化合物の構成物質として大量に存在しています。これまで水素は

主に工業原料として用いられてきたので、日常生活で水素を見かけることはほとんどありませんでした。そんな水素がにわかに注目を集めています。その1つが2014年12月にトヨタ自動車から発売された「MIRAI」です。MIRAIは水素をエネルギー源とする燃料電池自動車です。

燃料電池の中の水素

ここで水素からエネルギーを得る仕組みを紹介します。

図1に示すように、燃料電池は水素側の電極と酸素側の電極が電解質層を挟んだ構造になっています。水素側電極

内のガス拡散層に供給された水素が触媒層に触れると電子と水素イオンに分れます。電子は外部の回路を通して酸素側の電極に流れ、この時点で電気が生じます。水素イオンは電解質を渡って酸素側の電極に達します。酸素側電極のガス拡散層には酸素が供給されていて、この酸素と回路を

通ってきた電子、電解質を渡ってきた水素イオンとが出会い、反応して水ができます。これが燃料電池の基本的な仕組みです。

ここでよくよく考えてみると、生物がエネルギーを獲得する仕組みもこの燃料電池の仕組みと似ていることに気づ

きます。そこで、燃料電池と生物がエネルギーを獲得する仕組みの類似点について述べてみたいと思います。

光合成のしくみと水素の役割

緑色植物などがエネルギー

を獲得する仕組みが光合成です。緑色植物の光合成によって二酸化炭素に含まれていた炭素は糖に変換されますが、その量は地球規模では毎年100億t以上になるそうです。そして、光合成による生産物の3分の1に相当する炭素を人類は1年間のうちに消費してしまうとの報告があります。

さて、光合成ではエネルギー源として太陽光が利用されます。物質に光が当たると電子が放出されます。これを光電効果と言います。ちなみにこの研究の業績が認められてアインシュタインはノーベル賞を受賞しました。

図2に示すように、物質中の電子は普段穏やかに存在しているのですが、そこに光の光子がぶつかり、光子が持つエネルギーを吸収して活性化した状態になります。電子が穏やかに存在している時を基底状態と言います。そして、基底状態と励起状態のエネルギー準位(レベル)の差が太



陽光によってもたらされたエネルギー（光エネルギー）となります。この光エネルギーは、ほおっておくと熱と光（蛍光）になって消失します。

緑色植物では色素、（クロロフィルやカロテノイド等）が葉緑体中のチラコイド膜にぎっちり詰め込まれていて、そこに光が当たって電子が励起状態になると、それが消失する前に隣の色素に渡されます。そしてまた隣の色素に渡され、まるでバケツリレーのように色素から色素に渡された電子は、最終的に反応中心と呼ばれるクロロフィルに行き着きます（次ページ図3）。

反応中心は2タイプあります。光化学系Ⅰの P_{680} と光化学系Ⅱの P_{680} です。光化学系とはクロロフィル等の色素のほかタンパク質、脂質の仲間のプラストキノン、そしてマンガン、カルシウム、鉄といった金属から構成された色素タンパク複合体を指します。光化学系Ⅱの反応中心に集められた光エネルギーは同じ光化学系を構成するたんばく質やプラストキノンに順々に渡されてから、シトクロム複合体を経て光化学系Ⅰに渡されます（次ページ図4）。それと同時に水素イオンがチラコイド膜の内側に集められます。そして最終的に光化学系Ⅰでは補酵素 $NADP^+$ （ニコチンアミドジヌクレオチドリン酸）に電子と水素イオンが与えられて $NADPH + H^+$ が生成され、光

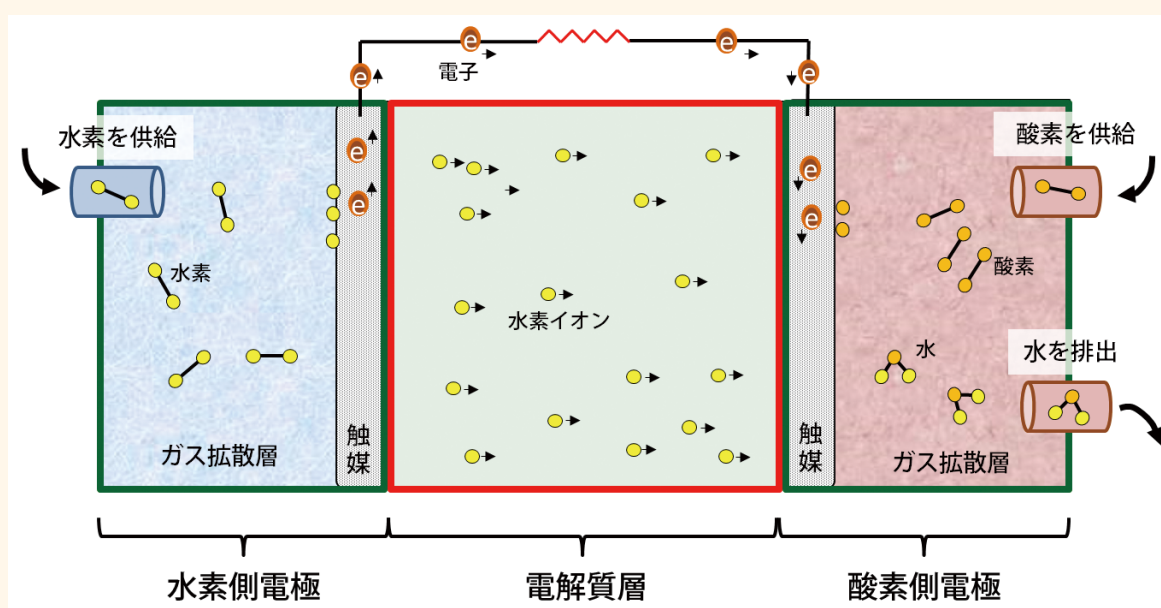


図1 燃料電池の基本的なしくみ

- ①水素側電極のガス拡散層に水素が供給される。
- ②水素側電極の触媒に水素が触れると電子と水素イオンに分かれる。
- ③電子は外部の回路を通して酸素側電極に流れ、水素イオンは電解質を渡って酸素側電極に達する。
- ④酸素側電極のガス拡散層には酸素が供給されていて、この酸素と回路を通ってきた電子、電解質を渡ってきた水素イオンが結合して水ができ、その水は排出される。

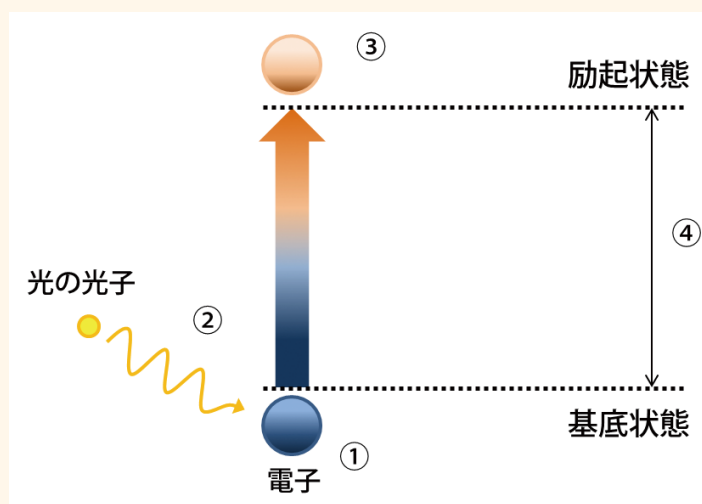
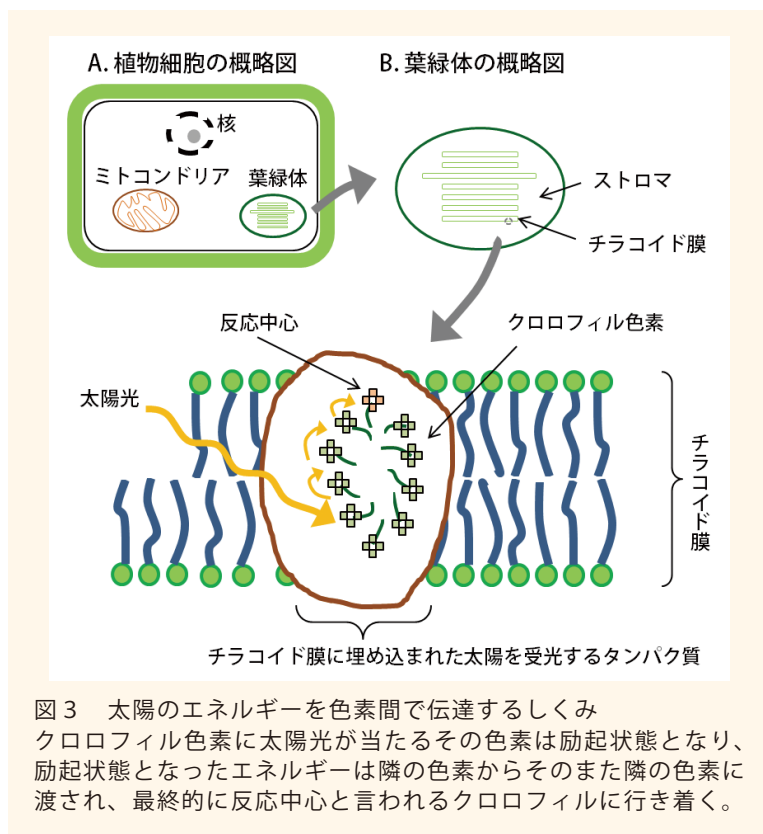


図2 電子の励起

- ①初め、電子は穏やかな状態（基底状態）にある。
- ②そんな電子に光の光子がぶつかる。
- ③すると、光子のエネルギーを吸収して励起状態となる。
- ④励起状態と基底状態の差が太陽によってもたらされた光エネルギー。



を放出したり貯蔵することができ、生体内ではエネルギーの蓄電池のような役割を担っている物質です。葉緑体ではこのATPと、光化学系Ⅰで生成されたNADPHのH(水素)の還元力を利用して二酸化炭素から糖を作り出します。ATPの多くも水素によって作り出されていますので、緑色植物が二酸化炭素から糖を作り出す働きに、水素は大いに利用されていると言えるでしょう。

細胞呼吸と水素の関係

緑色植物や一部の細菌を除く多くの生物は、緑色植物などが行う光合成によって生成された糖を酸化分解することによってエネルギーを得ています。細胞がグルコースを燃やしてエネルギーを得る一連の過程を呼吸(細胞呼吸、内呼吸)と言います。一般的に呼吸と言えば空気中から肺に

酸素を取り入れて二酸化炭素として出すことですが、この呼吸は外呼吸と呼ばれて細胞が行う内呼吸とは区別されます。細胞呼吸においても水素が重要な役割を果たしています。そのことを次に述べていきます。

ある人がご飯を食べたとして、ご飯の主成分はデンプンで、デンプンは糖(グルコース)が多数結合したものです。ご飯は口の中で咀嚼され、腸を通過することによって細かく砕かれ、グルコースの状態で吸収されます。吸収されたグルコースは腸から血管に移動し、肝臓で代謝・貯蔵された後、再び血液に戻されて全身の細胞に供給されます。細胞では2分子のATPを消費し、供給された1分子のグルコースと幾つかの他の材料を使って新たに4分子のATP、2分子のNADH(ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド)、そして2分子のピルビン酸が生成されます。このプロセスを解糖系と呼びます(図6)。

解糖系で生成されたピルビ

ン酸はアセチルCoA(コエンザイムエー)という物質に変換されてからクエン酸回路(TCA回路、クレブス回路)に入ります。この回路を1周する間に3分子のNADHが生成されます。これらの物質は元々NADという形(酸化型)だったのですが、水素が結合してNADHという形(還元型)になります(図6)。この水素が結合した還元型の物質は他の物質に電子を与えることができ、次のステップである電子伝達系ではこの電子が大いに利用されることとなります。

36 ページ図7のように、ミトコンドリアには内膜がひだ状に存在します。内膜には①NADH脱水素酵素複合体、②シトクロムb/c複合体、③シトクロムc酸化酵素複合体などのタンパク質複合体が埋まっています。NADHから電子を受け取ったNADH脱水素酵素複合体は、シトクロムb/c複合体に電子を渡し、次に電子はシトクロムc酸化酵素複合体へと順々に渡され、最終的に酸素に受け渡

化学系Ⅱでは水が分解されて電子と水素イオン(H^+)と酸素(O_2)が生成されます。

ここで重要なのは、チラコイド膜の内側に集められた水素です(図5)。水素はチラコイド膜の内側ばかりにあつて外側にはあまりありません。このように物質が不均一な分布をしているときにエネルギーは生じます。例えばダムに水を集めてか

ら一気に落水させてタービンを回せば電気が生じます。ダムが水を高い位置に集めるように、チラコイド膜の内側に

集められた水素イオンはATP合成酵素を介してチラコイド膜の外側に流れ出す、そのエネルギーを利用してATP(アデノシン三リン酸)が合成されます(図5)。ATPはリン酸を離したり結合させたりすることで、エネルギー

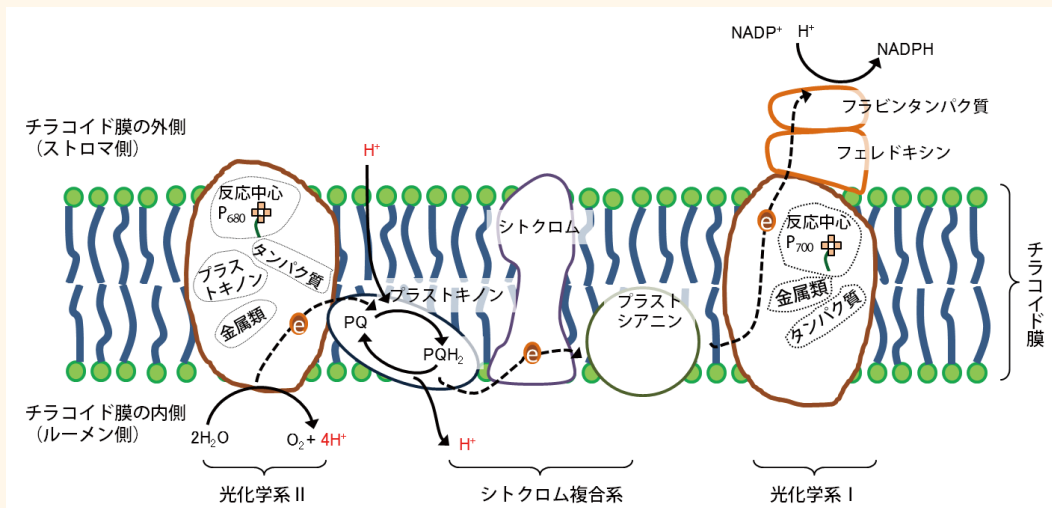


図4 光化学系ⅠとⅡを介したチラコイド膜での水素と電子の移動
光化学系Ⅱに集められた光エネルギーは、同じ光化学系Ⅱを構成するタンパク質、プラストキノン等に順々に渡された後、シトクロム複合体を経て光化学系Ⅰに渡される。光化学系Ⅱでは水が酸化されて酸素を生成し、チラコイド膜の内側に水素を放出する。光化学系ⅠではNADP+が還元されてNADPHを生成する。シトクロム複合体はチラコイド膜の外側から内側に水素を輸送する。その結果、チラコイド膜の内側では水素濃度が高まる。

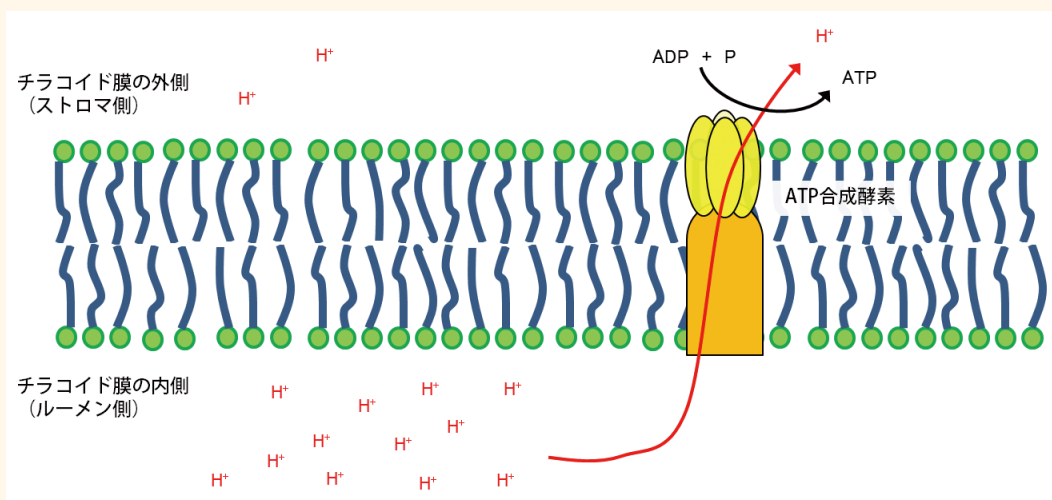
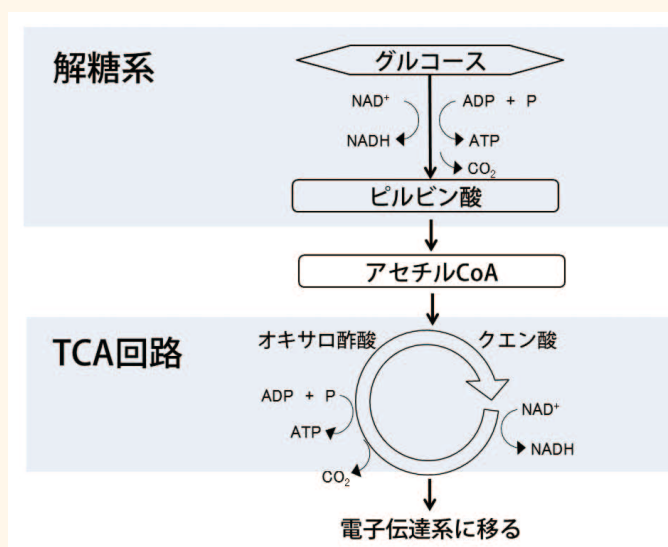


図5 チラコイド膜内側の高い水素濃度差を利用したATP合成のしくみ
チラコイド膜の内側に集められた水素は、その濃度勾配を利用して膜の外側に拡散する。その際、水素はATP合成酵素を経由し、ATPが生成される。

図6 解糖系とTCA回路

解糖系では1分子のグルコースと他の幾つかの物質を材料として実質2分子のATP、2分子のNADH、2分子のピルビン酸が生成される。ピルビン酸はアセチルCoAに変換された後、TAC回路に入り、この回路を1周する間にNADが還元されて3分子のNADHが生成される。NADHは電子や水素を供与することができ、TCA回路の次のステップである電子伝達系ではNADHから供与された電子や水素が利用される。



されます。電子を受け渡され

た酸素は水素と結びついて水になります。このNADH脱

水素酵素複合体から酸素に至

る電子の流れの中で、水素イ

オンはミトコンドリアの内膜

と外膜の間に輸送され、この

膜間腔の水素イオン濃度が高

まります(図7)。

ミトコンドリアの膜間腔に

局在した水素イオンは、内膜

に埋め込まれたATP合成酵

素を介して内膜の外側に流れ

出し、そのエネルギーを利用

してATP(アデノシン三リ

ン酸)が合成されます(図8)。

これは先ほど光合成のどこ

ろで述べた、葉緑体のチラコ

イド膜の内側に局在した水素

イオンがATP合成酵素を介

して膜の外側に流れ出す際に

ATP合成が行われたのと良

く似ています。

燃料電池と光合成と細胞呼吸の共通点

これまで、燃料電池や光

合成、細胞呼吸によってエネ

ルギーを獲得する概略を述べ

てきました。この3者に共通

して言えることをまとめてみ

ます。

① 一時的に水素が何か所に集中して存在する状態ができる。

② 水素が何か所に集中する場所とは仕切り(膜)を境とした片側である。

③ 水素がこの仕切り(膜)を越えて反対側に移行することによってエネルギーを得る。獲得したエネルギーは燃料電池では電気として消費され、細胞呼吸ではATPの形で蓄えられる。光合成ではATPとして蓄えたエネルギーとNADHの還元力を利用して二酸化炭素を糖に変換する。

④ 燃料電池ではエネルギーを獲得した後、水素は酸素と結合して水になる。光合成ではチラコイド膜、細胞呼吸ではミトコンドリアの内

膜に埋め込まれたタンパク

複合体間を電子は順々に移

行し、最終的に酸素に受け

渡されて、それが水素と結

びついて水となる。

このように、燃料電池、細胞呼吸そして光合成がエネ

ルギーを獲得する仕組みは良

く似ていて、そのイメージは

水を汲み上げてからその水を

落とす力を利用して電気を

得る揚水式発電と重なります。

揚水式発電では水を利用して

いますが、燃料電池、細胞呼

吸そして光合成が利用する物

質は水素です。光合成や細胞

呼吸では、エネルギーの貯蔵

庫であるATPを効率よく生成

するためには水素イオンの高

濃度化が図られます。

一方、燃料電池では水素を

高压にしてタンクに閉じ込め

る方式が取られています。先

述のMIRRAに搭載される

水素タンクは最高700気圧

まで加圧できるそうです。ま

た、燃料電池では水素から取

り出された電子が直接電力と

して利用されます。これに対

して光合成では、光化学系を

構成するたんぱく質やプラス

トキノンに電子が順々に渡さ

れ、エネルギーが効率よくN

ADPHの生成に使われま

す。そしてNADPHの還元

力が次のステップであるチラ

コイド膜での水素イオンの高

濃度化に利用されます。

細胞呼吸でも、グルコース

を酸化することによって得ら

れた電子が解糖系やTCA回

路を構成する物質に順々に渡

されることによって、グル

コースに内在していた化学エ

ネルギーが少しずつ取り出さ

れて効率よくNADHの生成

に使われます。そしてNAD

Hに移行したエネルギー(還

元力)を利用して、次のステッ

プであるミトコンドリアの膜

間腔での水素イオンの高濃度

化に利用されます。

生物は反応のステップを細

かく分けることによって反応

時に放出されるエネルギーを

少しずつ利用可能な状態に保

存しています。

ほぼ全てのエネルギーの根源は太陽光

光合成と呼吸の化学式を図9に書きます。

化学式の左側が反応物で右

側が生成物です。この2つの

式を見ると、光合成の生成物

が呼吸の反応物になってい

て、呼吸の生成物は光合成の

反応物になっています。だか

ら光合成と呼吸がバランスよ

く行われている限り、基本的

に物質は円滑に循環するはず

です。その間に地球上に降り

注ぐ太陽の光エネルギーはA

TPの高エネルギーリン酸結

合という化学エネルギーに変

換され、それはやがて糖にな

り、デンプンとなり、最終的

には複雑な構造をもつ物質に

まで合成されて太陽のエネル

ギーは地球に蓄積されていき

ます。太陽光による光エネル

ギーを効率よく圃場に蓄積さ

せて、その蓄積物を再生可能

な範囲で作物として収穫す

る。そういう自然の摂理をう

まく活かした仕組みが自然農

法なのだと思います。現時点

で燃料電池に使われる水素は

化石燃料から生産されている

そうです。光触媒の技術も急

速に進歩していると聞きます。

太陽の光エネルギーのみ

から生産された水素をエネル

ギー源とした燃料電池自動車

がガソリン車にとって代わる

日も、そう遠くない未来なの

かもしれません。

(研究部 研究課)

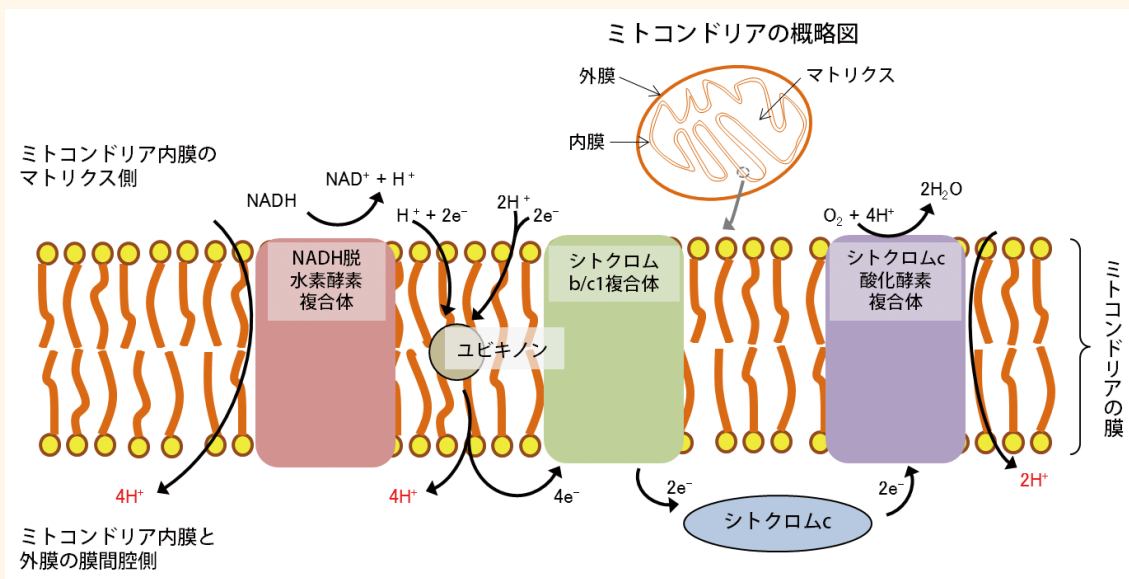


図7 ミトコンドリア内膜での電子伝達
TCA 回路で生成された NADH から電子を受け取った NADH 脱水素酵素複合体は、シトクロム b/c1 複合体に電子を渡し、次に電子はシトクロム c 酸化酵素複合体へと順々に渡され、最終的に酸素に受け渡され、酸素は水素と結合して水になる。この過程において、水素はミトコンドリアの内膜と外膜の間の膜間腔に輸送され、膜間腔の水素濃度が高まる。

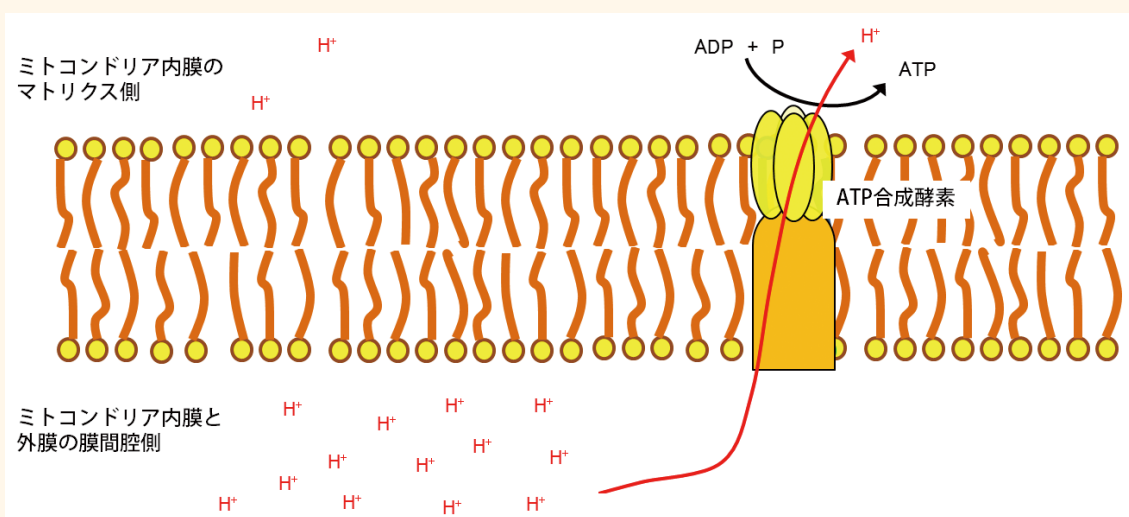


図8 ミトコンドリアの膜間腔側の高い水素濃度を利用した ATP 合成のしくみ
ミトコンドリアの膜間腔に集められた水素は、その濃度勾配を利用してマトリクス側に拡散する。その際、水素は ATP 合成酵素を経由し、ATP が生成される。

参考文献

- ・ロジャー・G・ニュートン「エネルギーとは何か」(講談社 2015)
- ・園池公毅「光合成とは何か」(講談社 2008)
- ・D. サダヴァ他「細胞生物学」(講談社 2010)
- ・奈良信雄監修「人体大図鑑」(宝島社 2015)
- ・L. デイツ, E. ザイガー編集「植物生理学」(培風館 2004)
- ・「水素社会の到来」(ニュートン 2015 年 2 月号)
- ・「NEDO 水素エネルギー白書」(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 2015)

光合成



呼吸



図9 光合成と呼吸の化学式