



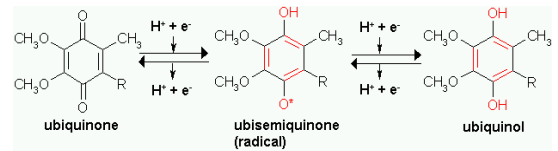
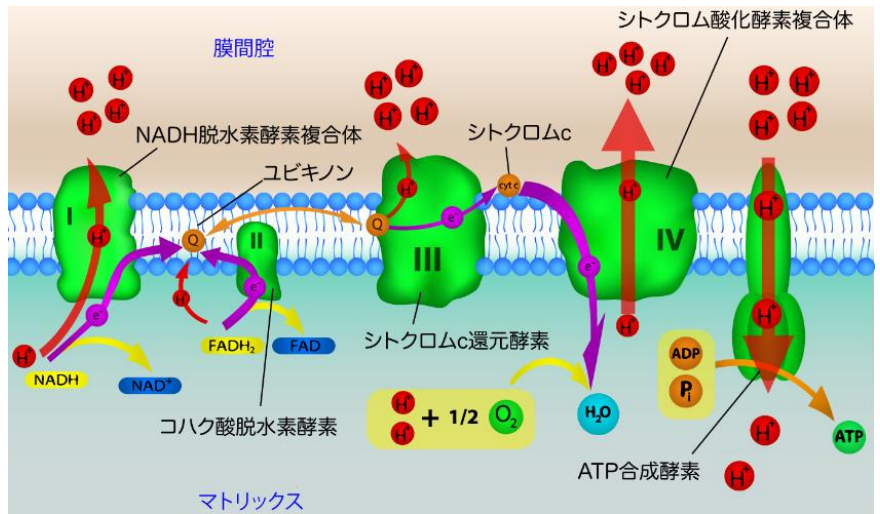
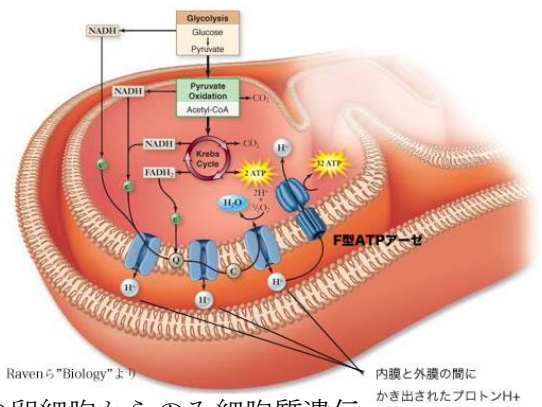
電子伝達鎖と ATP 合成酵素

複合体 I ~ IV、ユビキノン、チトクローム C

<https://l-hospitalier.github.io> 2020.4

【mtDNA】27 億年前、シアノバクテリアが出現、10 億年間大量の酸素を大気中に放出した。これでミトコンドリアを使う効率の良い好気性代謝が可能となり 5 億年前カンブリア大爆発と呼ばれる生命体の革命的な進化が起きた（「#215 バージェス動物群」参照）。ミトコンドリアはリケッチアに似た細菌の内部共生者（endosymbiont）で独自の環状 16kB（塩基）の mtDNA¹ を持ち、哺乳類では母の卵細胞からのみ細胞質遺伝（cytoplasmic inheritance）により遺伝形質を受け継ぐ。mtDNA は DNA 損傷修復を受けないため変異が年齢とともに蓄積され、老化の重要な原因と目されている。電子伝達系で重要なのは【電子伝達鎖（呼吸鎖）】と ATP 合成酵素。電子伝達鎖は右図のように複合体 I（NADH-CoQ レダクターゼ）、複合体 III（シトクローム c レダクターゼ）、複合体 IV（シトクローム c オキシダーゼ）と複合体 II（コハク酸-CoQ レダクターゼ）からなる。初めに複合体 I が NADH から電子を受け取りユビキノン（Coenzyme Q）に渡す。還元型をユビキノールと呼び、さらに電子を複合体 III に渡し、次いで電子をシトクローム c に渡す。最後にシトクローム c から複合体 IV に電子が渡され、酸素と反応して水が生成、電子伝達が終了。この間、電子の通過で複合体 I、III、IV は H⁺ を膜間腔へ汲み出す。複合体 II（コハク酸脱水素酵素）はコハク酸を酸化してフマル酸とし FADH₂ からキノンに電子を渡す。NADH の複合体 I に相当し、H⁺ 汲み出しがないので FADH₂ の H⁺ 移動は NADH の 3/4。【ATP 合成酵素】電子伝達鎖が作った H⁺ 濃度勾配の解消は ATP 合成と共役している。濃度勾配を解消しようと、H⁺ は ATP 合成酵素（F₁・F₀-ATPase、右下図）の分子内を通してマトリックスに流入。逆にこの酵素は ATP を加水分解することで H⁺ 勾配も作れる。酵素は回転子と、固定子に分かれ、H⁺ はまず膜間腔側から ATP 合成酵素の a サブユニット内に入って c サブユニットに結合し、最終的に a サブユニットからマトリックス流入。H⁺ が c サブユニットに結合すると c・ε・γ サブユニットが回転。γ サブユニットが回転すると α₃β₃ サブユニットの立体構造が変化し、それに伴って ADP から ATP が合成される。【葉緑体 Chloroplast】はミトコンドリアの相同器官と考えられる半自律性細胞小器官。色素体（プラスチド、白、紅色、シアンなど）の一種。クロロフィル（葉緑体、左図）を持ち独自 DNA、細胞質遺伝などがミトコンドリアと相同。カルビン⁴・ベンソン回路で色素体が吸収した光エネルギーで CO₂ を固定して酸素を放出、NADH や ATP 合成の起点となる。

ミトコンドリア内膜に埋め込まれた電子伝達系



膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体

シトクロムc

シトクロムc還元酵素

ATP合成酵素

ADP

P_i

ATP

H₂O

1/2 O₂

コハク酸脱水素酵素

FADH₂

FAD

ユビキノン

NADH

NAD⁺

膜間腔

マトリックス

シトクロム酸化酵素複合体