

# 第1回 生体内のエネルギー産生

日紫喜 光良

# 暮らしの中の生化学と関連した事象

- 発酵
  - 発酵食品の製造
  - 酒造
- 代謝
  - エネルギー
  - 栄養
    - 栄養素
  - 代謝異常
    - 糖尿病
    - 肥満

# 健康についての疑問は生化学に関連

- コラーゲンをたくさんとると肌がぷりぷりになる？
- ご飯さえ食べなければ太らない(糖質ダイエット?)か？

# 教科書

- シンプル生化学(改訂第6版)

# 図表のソース

- Champe PC, Harvey RA, Ferrier DR.  
Lippincott's Illustrated Reviews  
Biochemistry 4th Edition (2008), Lippincott  
Williams & Wilkins/Wolters Kluwer Health,  
USA
- リッピンコットシリーズ イラストレイテッド生化学(原書第5版) (2011) 丸善

# 注意事項

- 関連のある章の要約と概念図をよく読み、あいまいな概念がないように本文を何回も読むこと。
- (図表ソースの)章末の学習問題を解いてみること。

# 今日のテーマ

- 生体内のエネルギー産生
  - (主にイラストレイテッド生化学 第6章)
  - シンプル生化学第15章
- ①生体内のエネルギー産生の概略
- ②電子運搬物質NADHのはたらき
- ③ミトコンドリアの構造と膜輸送システム

# エネルギー産生

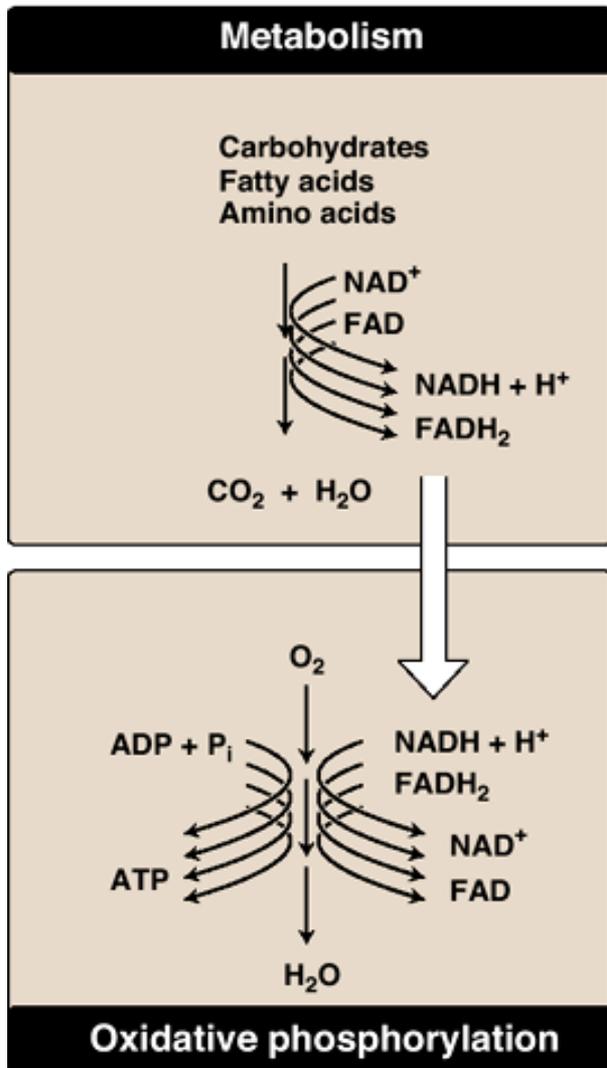
- エネルギーの物理学的定義：仕事をする能力
  - 熱、電気、光、化学、力学的（運動、位置）、etc
- 炭素と水素（と酸素）を含む化合物 + 酸素 → 二酸化炭素と水（とエネルギー）
  - 火力発電：燃焼（急激な酸化）によって高温を発生させる。
    - 高温高圧のガスそのもので、あるいは高温によって高温高圧の水蒸気を作りタービンを回して電気を作る。
  - 生体：食物として摂取した化合物の有する化学エネルギーを、
    - 化学反応によって、
    - いろいろな化学反応と「共役」できる化学物質（ATPなど）の高エネルギー化学結合に移して、
      - 必要な時に取り出せるようにする。

# 生体内のエネルギー産生の概要

- 3大栄養素:炭水化物、脂質、タンパク質
- 脂質や、窒素を含む化合物→炭素と酸素と水素から成る化合物に分解
- 炭素と酸素と水素から成る化合物→二酸化炭素を放出、電子運搬物質に余分な電子を持った水素原子(ヒドライドオン)を与える
  - ここまでが、代謝 (metabolism)
- 電子運搬物質が酸素と反応して水を生成
- その際に生じる水素イオンの濃度差による水素イオンの流れを利用して
- 高エネルギーリン酸結合を有する化合物(ATPなど) = 高エネルギー物質 を生成
  - 酸化リン酸化 (oxidative phosphorylation)

代謝:炭素などの余分な原子を捨てる反応

# 代謝→酸化リン酸化



炭水化物、脂肪酸、アミノ酸

酸化

電子運搬物質

還元

← 電子の授受

$\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$

還元された電子  
運搬物質 +  $\text{H}^+$

$\text{ADP} + \text{P}_i$

$\text{H}^+$ の  
流れ

酸素

還元された電子  
運搬物質

$\text{ATP}$

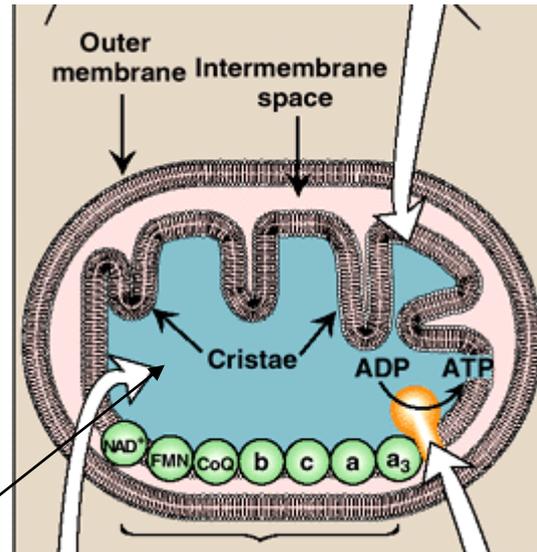
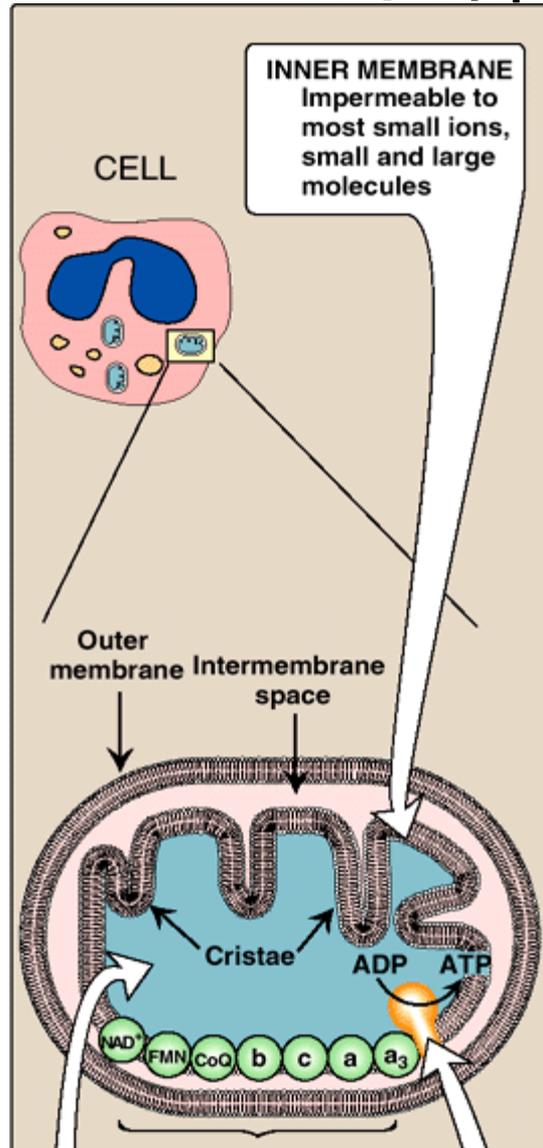
$\text{H}_2\text{O}$

酸化

電子運搬物質

# 真核生物では酸化的リン酸化はミトコンドリアの内部(マトリクス)でおこなわれる

内膜は多くの小イオン、小分子、大分子に対して非透過的



イラストレーテッド生化学 図 6.7

マトリクス

電子伝達系 ATPシンターゼ

TCA回路の酵素

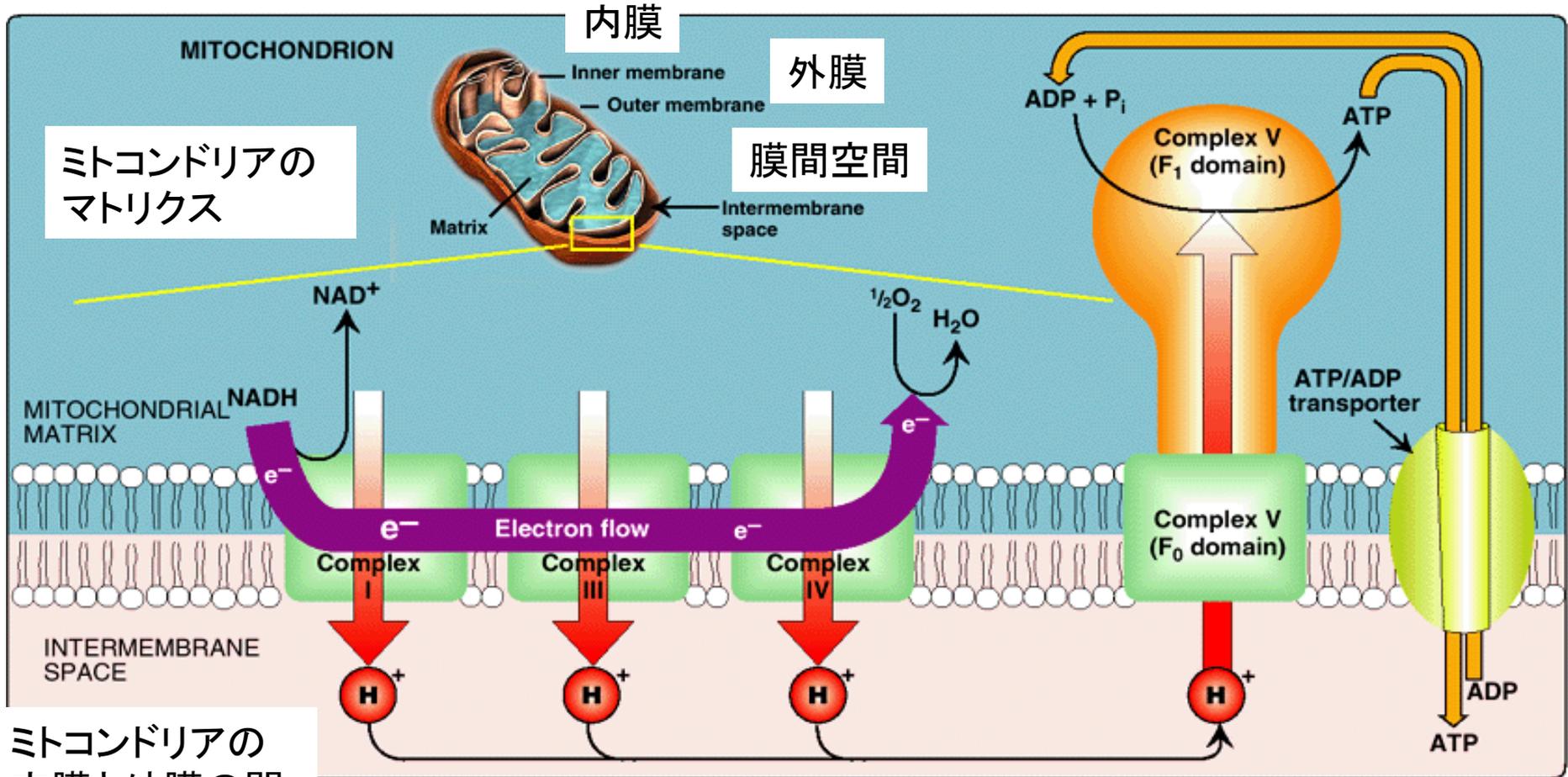
脂肪酸酸化のための酵素

ミトコンドリアDNA, ミトコンドリアRNA

ミトコンドリアリボソーム

イラストレーテッド生化学より

# プロトン(H<sup>+</sup>)ポンプとATP合成

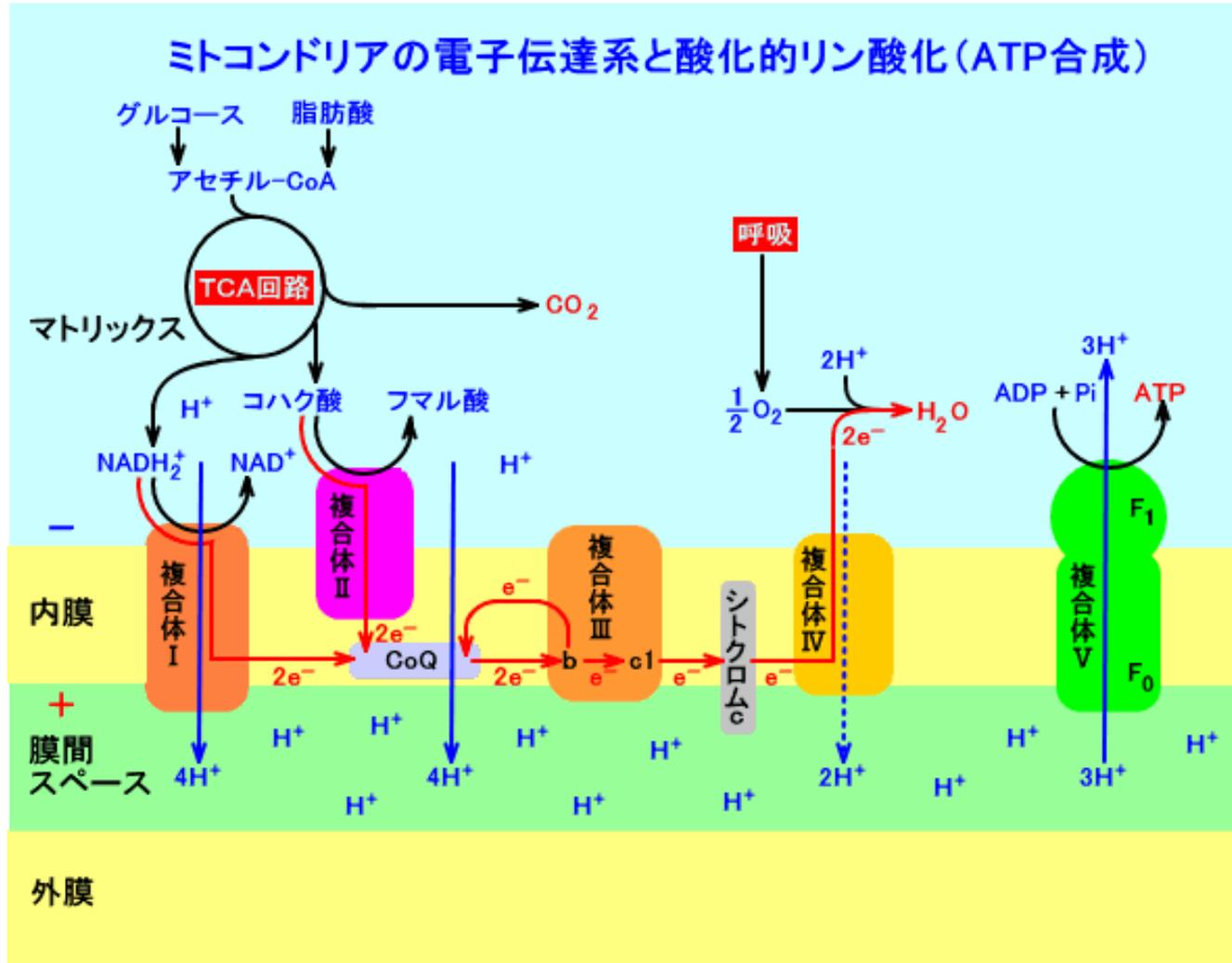


ミトコンドリアの  
内膜と外膜の間

プロトンポンプ

H<sup>+</sup>の濃度差のエ  
ネルギーでATPを  
合成

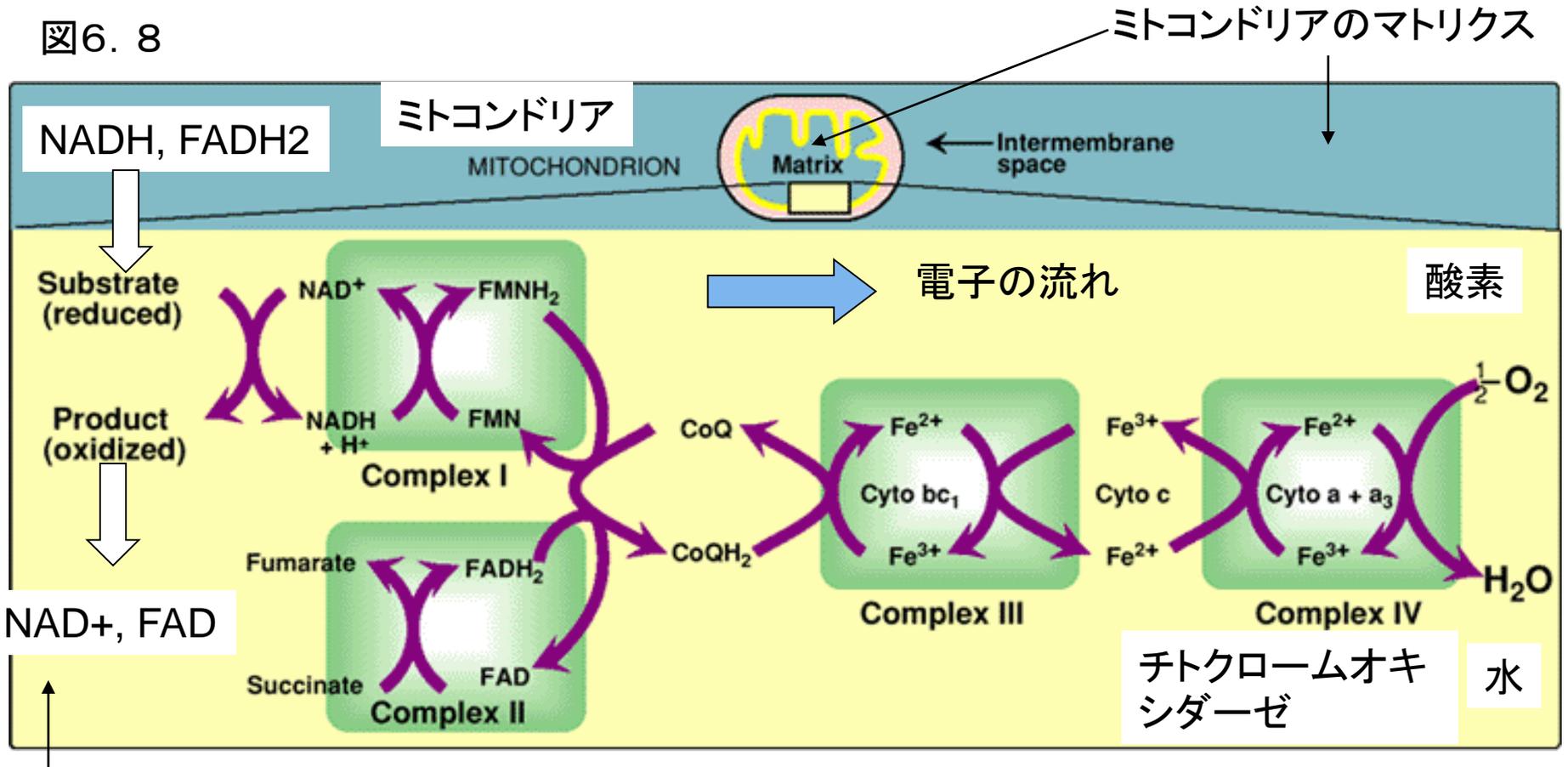
# 電子とプロトンの移動



電子伝達系と酸化的リン酸化

# 電子伝達系と電子運搬物質

図6. 8



ミトコンドリアの内膜

複合体I~IV: (1)水素と酸素を反応させる(2)H<sup>+</sup>の濃度差を作る

複合体V: ATPを合成

図はイラストレーテッド生化学より

# 電子伝達系の複合体

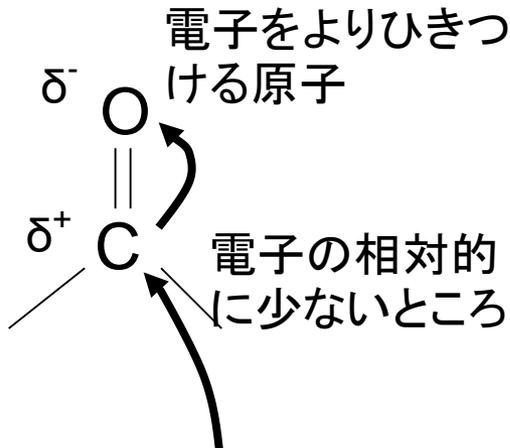
- NADH-ユビキノン酸化還元酵素(複合体-I)
- コハク酸-ユビキノン酸化還元酵素(複合体-II)
- ユビキノン-シトクロムc酸化還元酵素(複合体-III)
- シトクロムc酸化酵素(複合体-IV)
  
- ATP合成酵素(複合体-V)

I、III、IV: プロトンポンプをもつ

IV: 酸素と水素が反応して水をつくる

# 生体内で電子は何に乗って移動するか

(R=O)



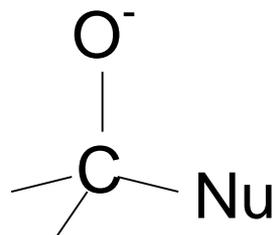
• 例:カルボニル基への求核付加反応

– アルコール(水酸基をもつ炭水化物)を生成, etc

Nu (電子を供与するもの) ただし、Nu = H<sup>-</sup>

H<sup>-</sup>:ヒドリドイオン

電子運搬物質に結合



アルコール  
R-OH

水素原子が電子を1個余分に引きつけたもの

相手に2個の電子を与えて水素イオン(水素の原子核=プロトン, H<sup>+</sup>)になる。<sup>16</sup>

RO<sup>-</sup>: アルコキシドイオンを生成

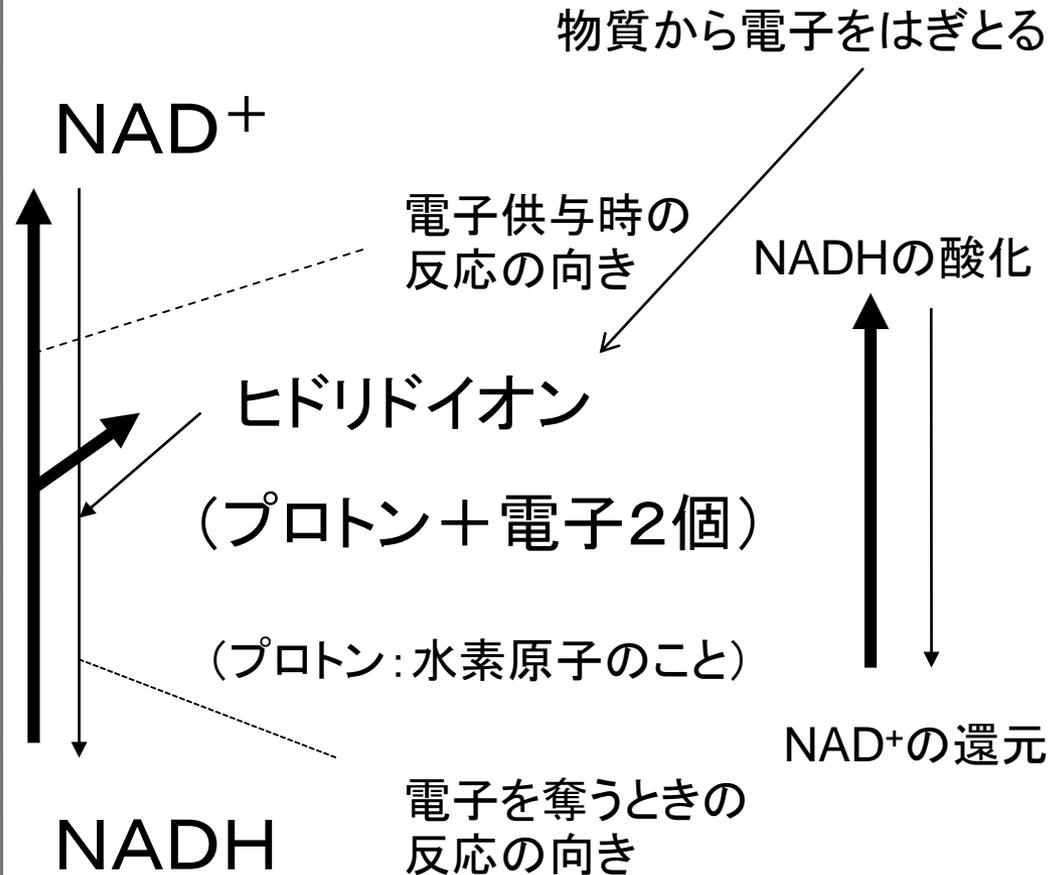
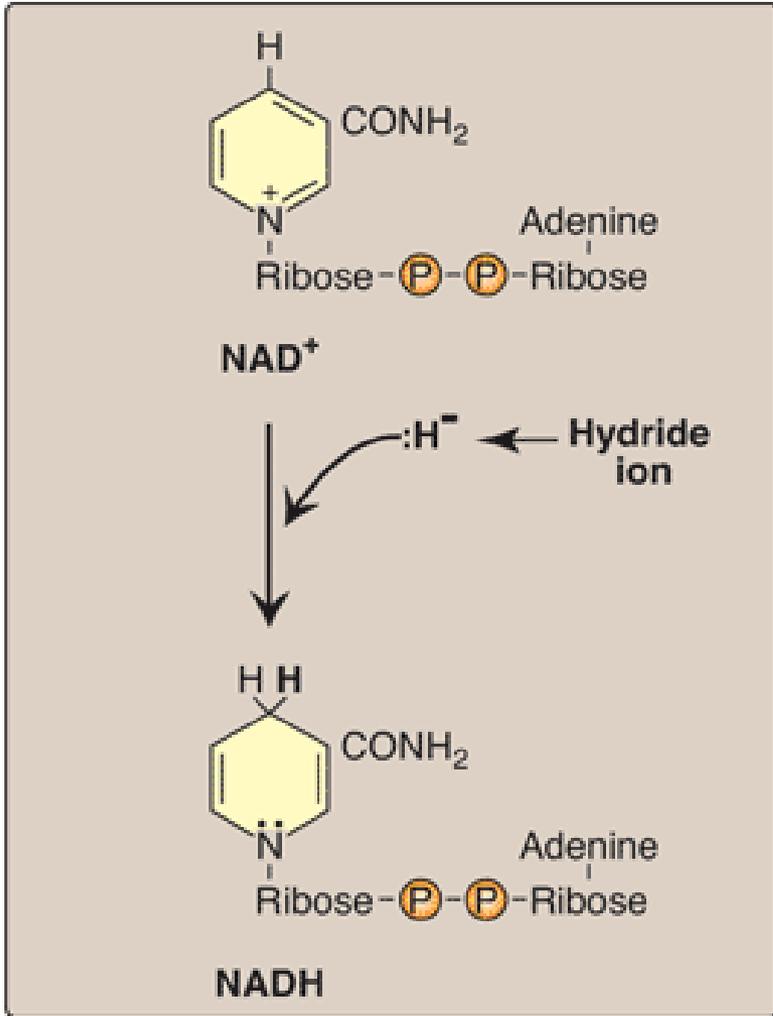
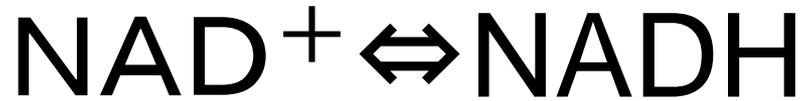
# 生体内のヒドリドイオン供与体

- NADH (還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド)
- NADPH (還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリニン酸)

実験室では、 $\text{NaBH}_4$ を用いる

水溶液は強い塩基性を示し、  
酸性にすると分解して水素を  
発生する。

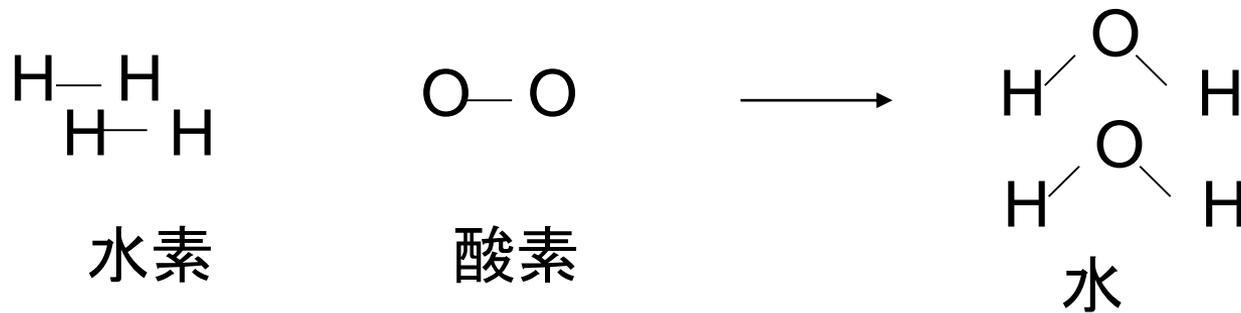
# 電子運搬物質(1)



別の物質に電子を与えると同時に、水素イオンを放出し、  
NAD<sup>+</sup>にもどる

# (補) 化学反応とは

- 原子間の結合のしかたの変化

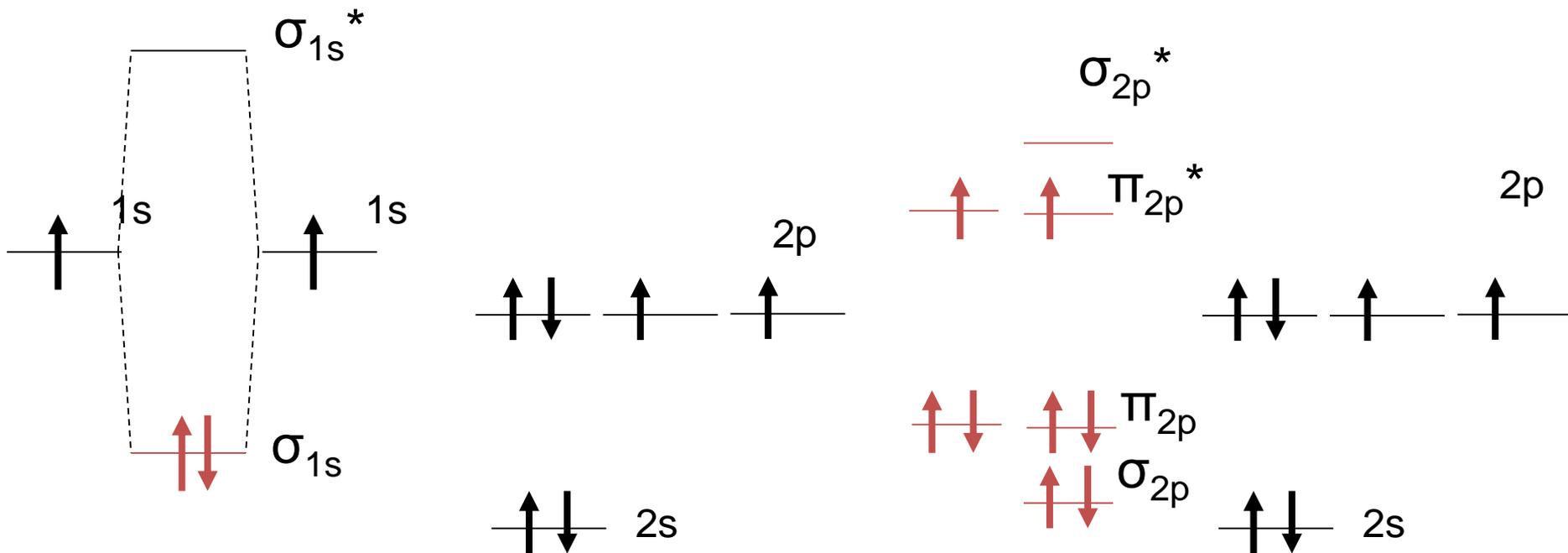


結合を切ったり生成したりするために、

- エネルギーが必要
- 電子がやりとりされる

# (補) 原子どうしが結合→安定化

(エネルギー準位の低下)



原子軌道

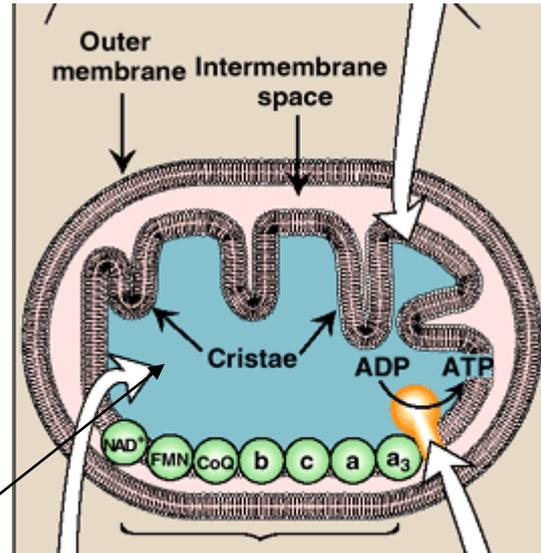
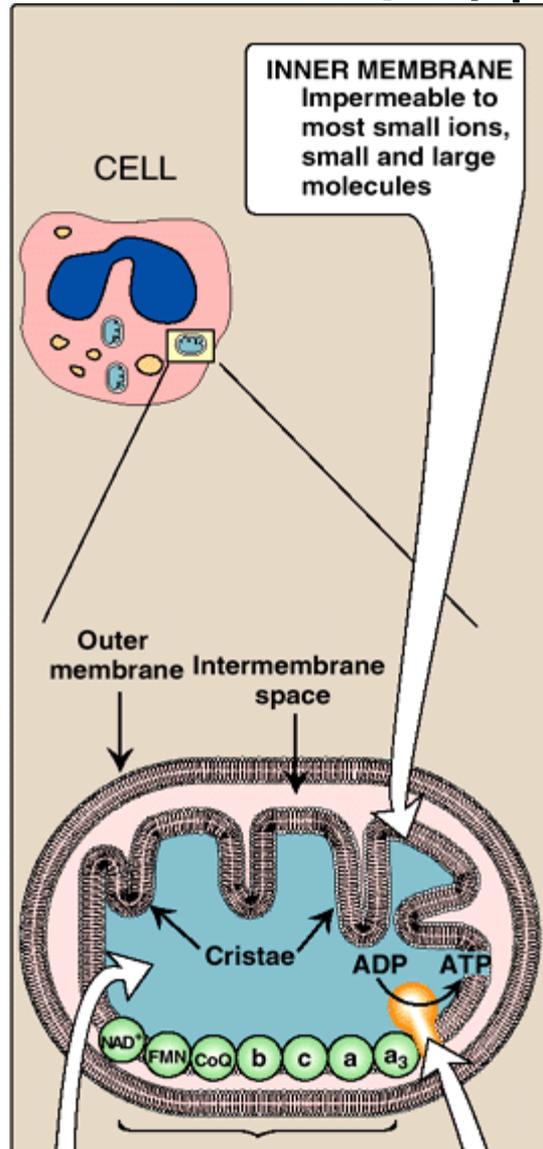
分子軌道

# (補)原子間の結合が変化する時は

- 原子と原子との間をとりもっている電子が移動する
  - 電子がある原子間の結合から別の原子間の結合へ移動
- エネルギーの吸収または放出がおきる
  - 原子間の結合のエネルギーは、結合する原子や結合の種類によって違う

# 真核生物では酸化的リン酸化はミトコンドリアの内部(マトリクス)でおこなわれる

内膜は多くの小イオン、小分子、大分子に対して非透過的



イラストレーテッド生化学 図 6.7

マトリクス

電子伝達系 ATPシンターゼ

TCA回路の酵素

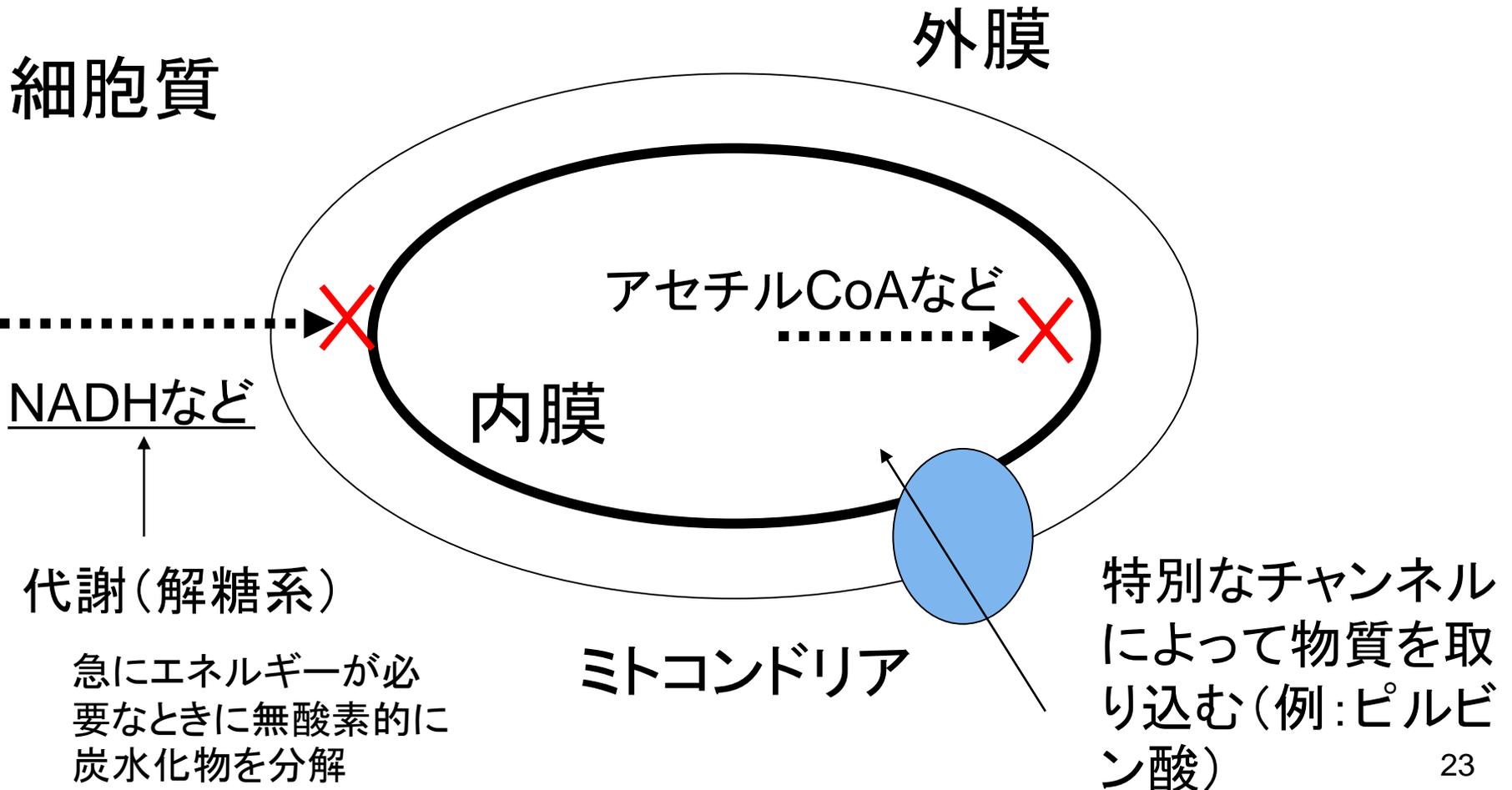
脂肪酸酸化のための酵素

ミトコンドリアDNA, ミトコンドリアRNA

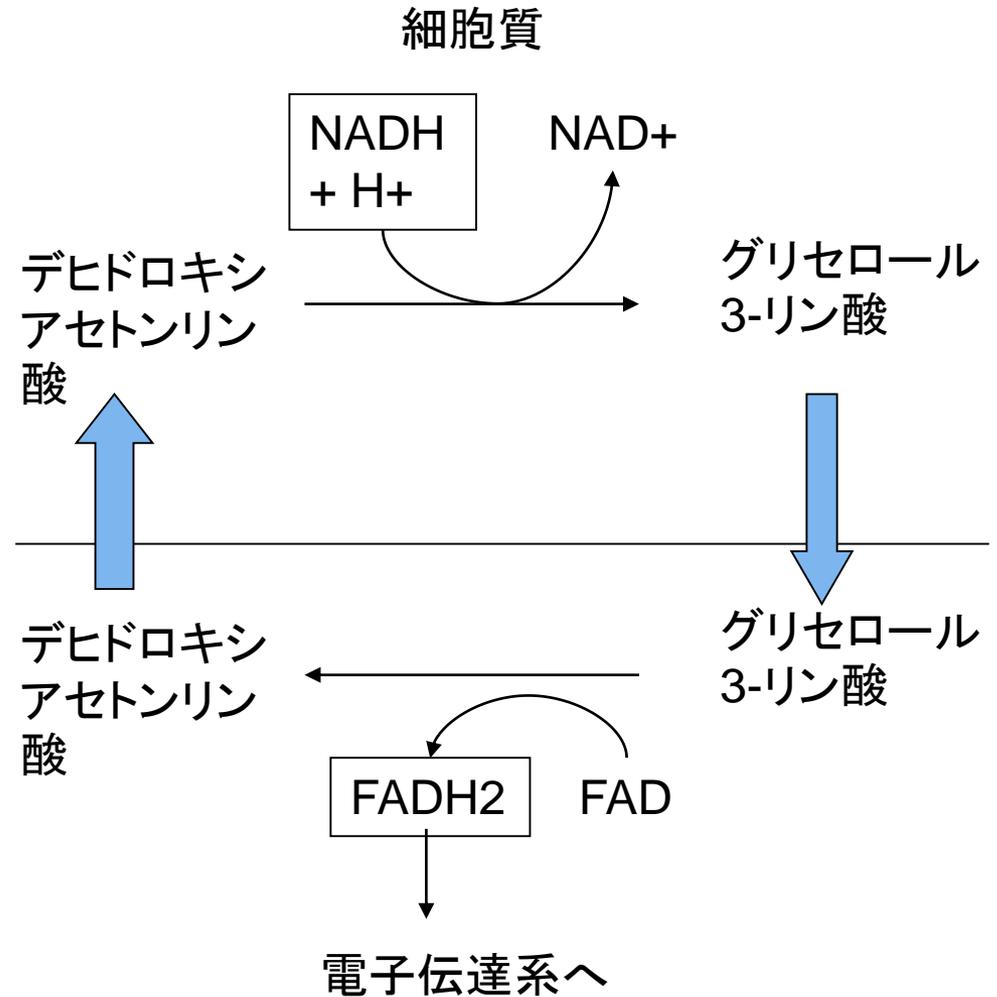
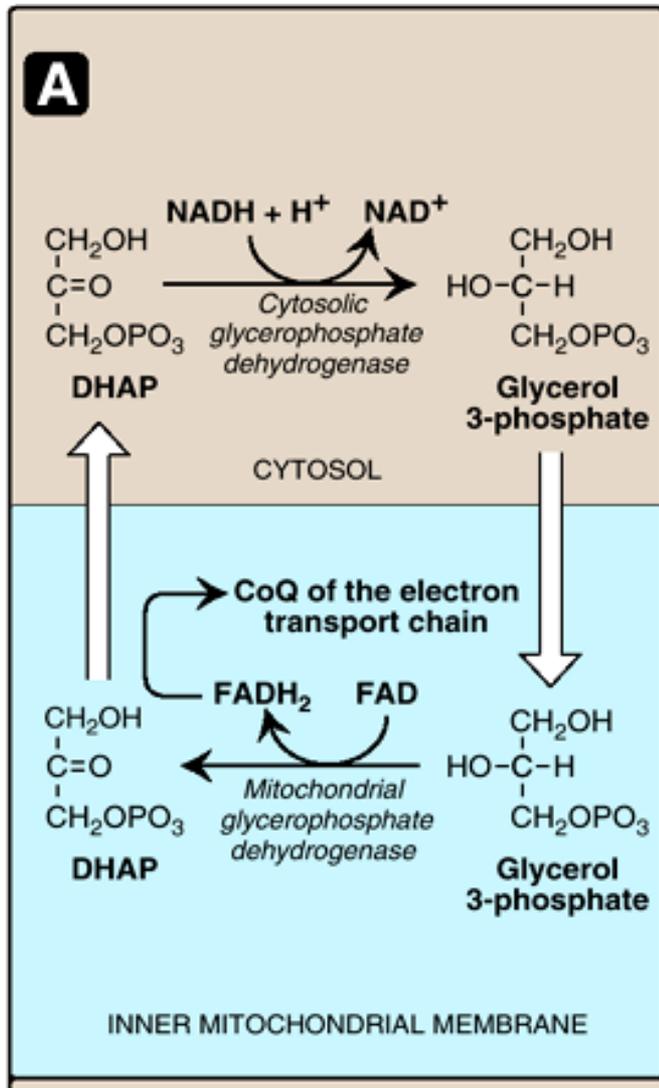
ミトコンドリアリボソーム

イラストレーテッド生化学より

# ミトコンドリアの膜はさまざまな物質に対して非透過的

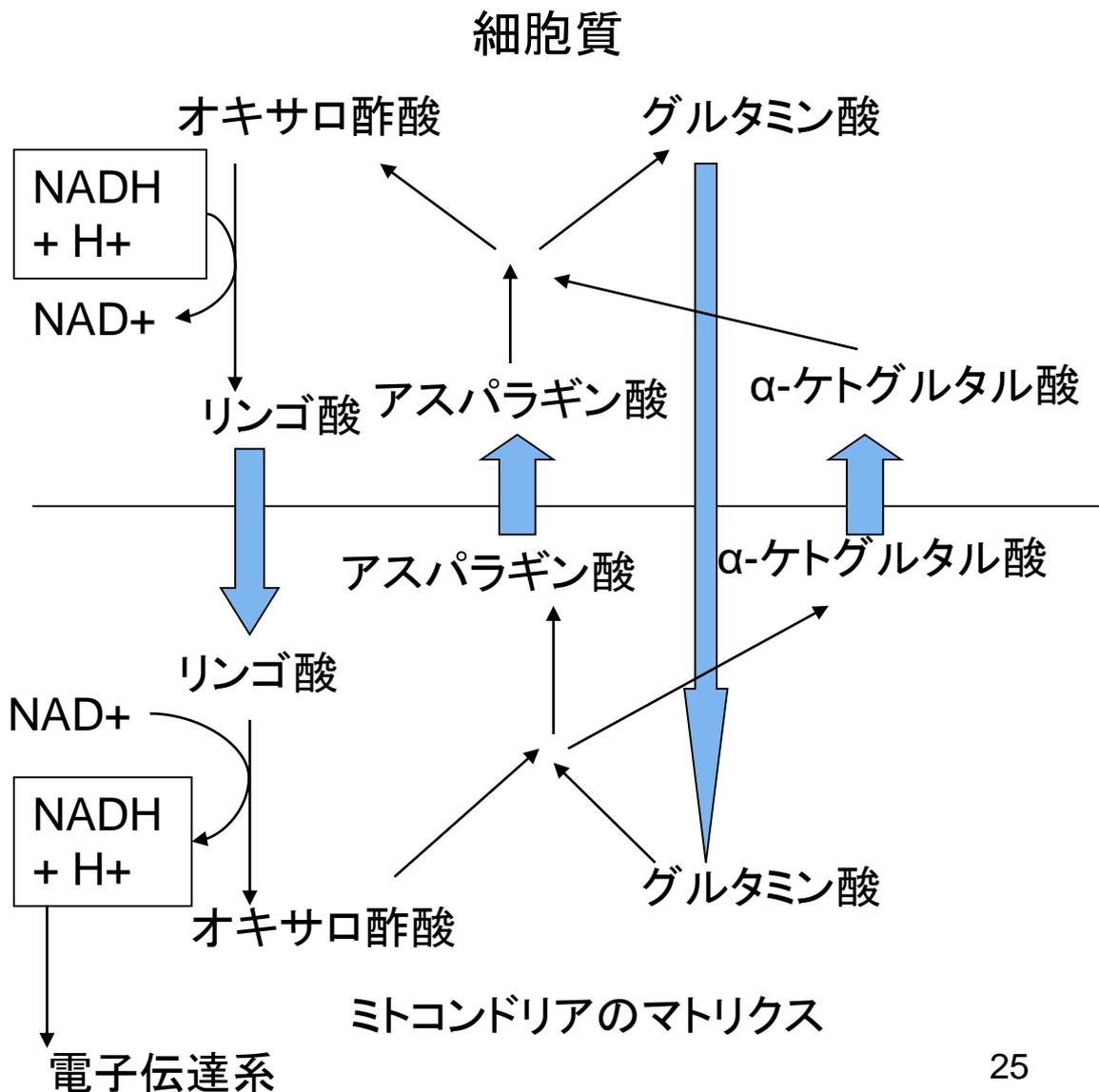
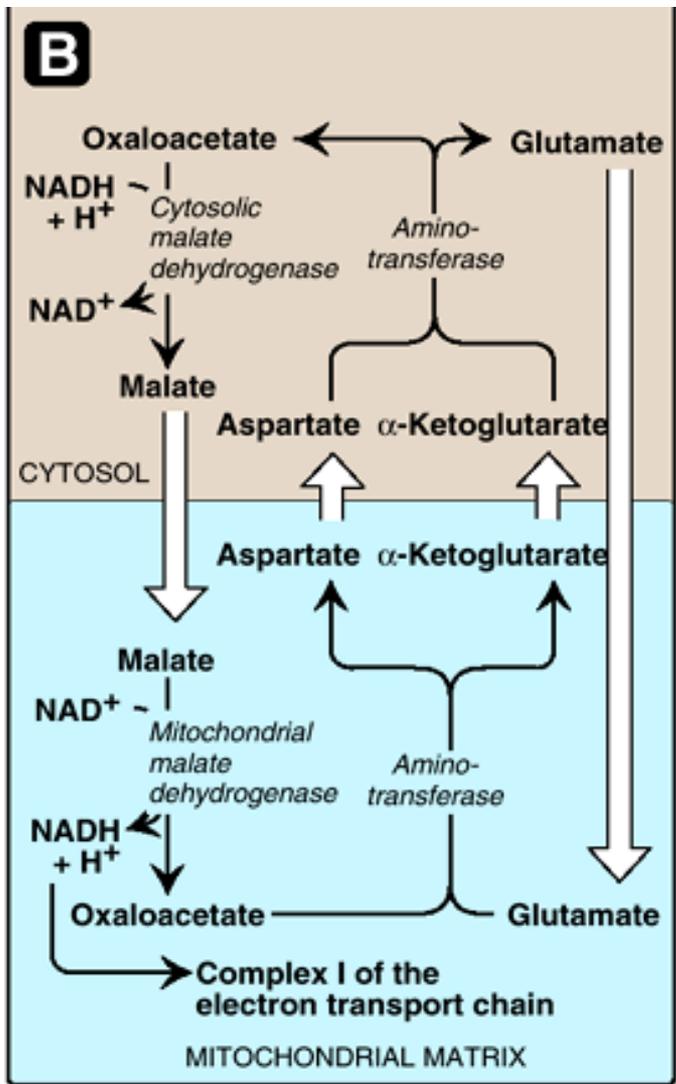


# ミトコンドリア・細胞質間の輸送システム(1)

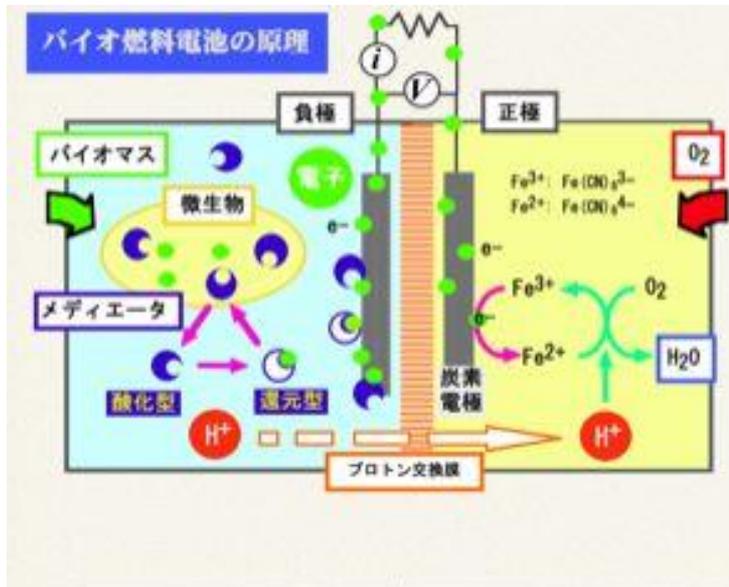


ミトコンドリア内膜

# ミトコンドリア・細胞質間の輸送システム(2)



# (補) 微生物燃料電池



酸化または還元状態をもち、かつ細胞膜透過性を有する電子伝達剤(メディエータ)を添加→電子収奪

負極槽・正極槽の間のプロトン交換膜

微生物の選択

電極の高活性化

