

전자전달과
산화적 인산화반응

20

단원개요

20-1 대사과정에서 전자전달의 역할

- ATP 생성에서 미토콘드리아 구조의 중요성은 무엇인가?

20-2 전자전달사슬에서의 환원 전위

- 전자의 전달 방향을 예측하는 데 환원 전위가 어떻게 사용되는가?

20-3 전자전달 복합체의 구성

- 호흡 복합체에서는 어떤 반응이 일어나는가?
- 전자전달에서 철-함유 단백질들의 특징은 무엇인가?

20-4 전자전달과 인산화반응 간의 연결

- 산화적 인산화반응에서 동반작용 인자란 무엇인가?

20-5 산화적 인산화반응에서 동반작용의 메커니즘

- 화학삼투 동반작용이란 무엇인가?

20.1 생화학과의 접목 | 영양학

- 갈색 지방조직은 비만과 무슨 관계가 있는가?
- 입체구조 동반작용이란 무엇인가?

20-6 셔틀 메커니즘

- 셔틀 메커니즘들은 서로 어떻게 다른가?

20.2 생화학과의 접목 | 건강과 관련된 이야기 스포츠와 대사

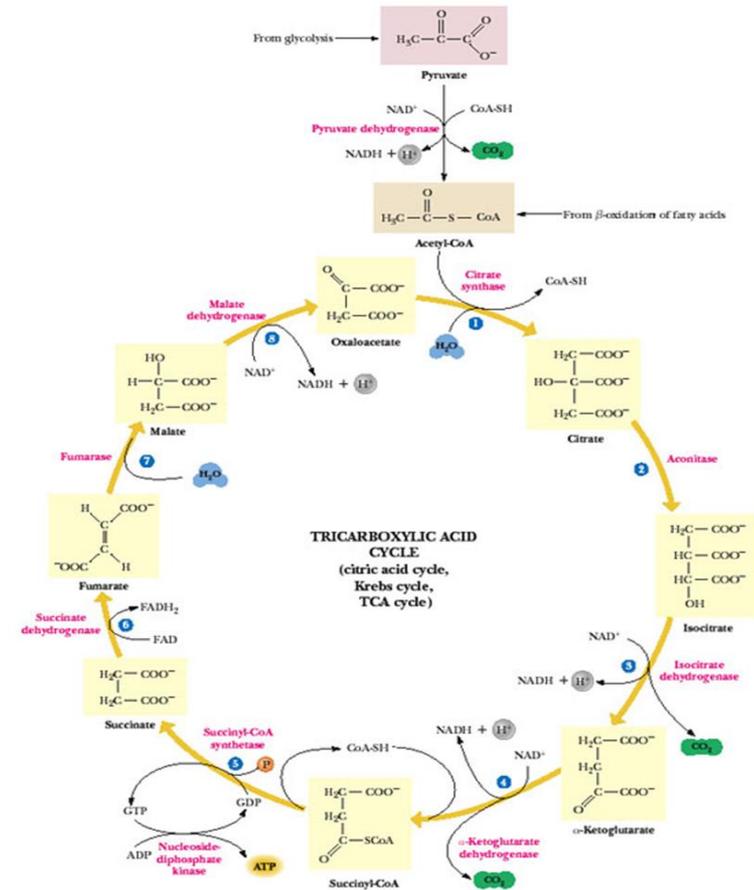
20-7 글루코오스의 완전 산화 시 생성되는 ATP 수

시트르산 회로와 산화적 인산화의 관계

시트르산 회로에서
생성된 환원력
4 NADH
1 FADH₂

산화적 인산화

ATP로 전환



산화적 인산화 (Oxidative phosphorylation)

- ① 전자 운반체에 의하여 전자들이 NADH 또는 FADH_2 로부터 O_2 로 전달될 때 ATP가 형성되는 과정
- ② 산화와 인산화 반응이 짝 (couple)지어져 있다.
- ③ 산화반응은 미토콘드리아의 내막에 있는 전자전달체를 통하여 일어난다
- ④ 산소성 생물에 있어 주된 ATP의 공급원
NADH: 3 ATP, FADH_2 : 2 ATP 생성



P/O ratio

- NADH---3 ATP 생성
- FADH_2 ---2 ATP 생성
- 소모되는 산소원자당 유기인산으로 전환되는 무기인산의 분자 수
- 소모되는 산소원자당 생성되는 ATP 분자수의 비율

왜 NADH와 FADH₂는 산소에게로 전자를 전달하는가?

- Think about which likes electron better?
- 산화 환원반응

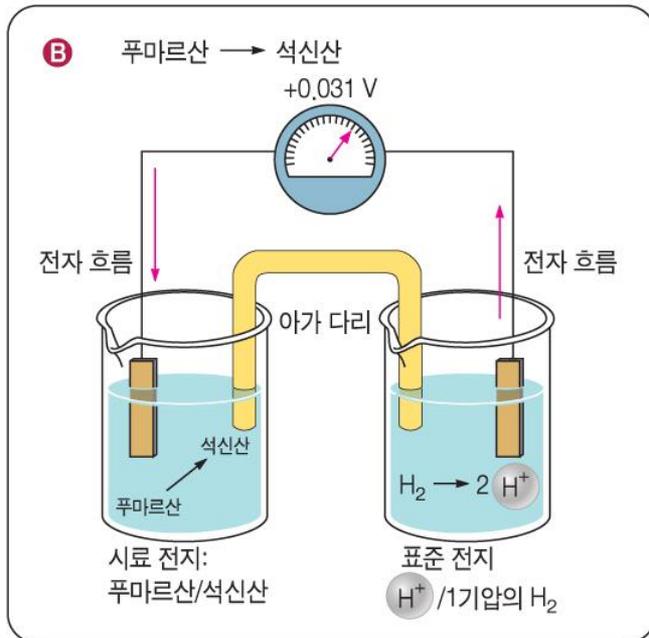
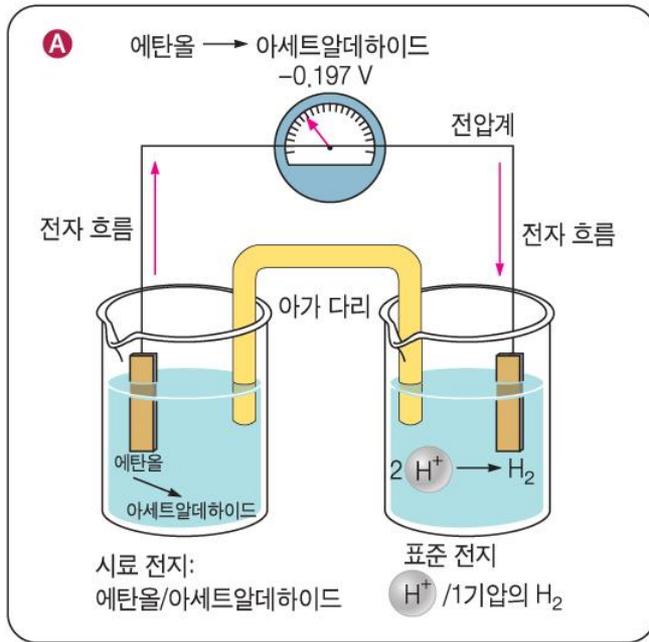
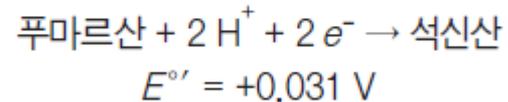
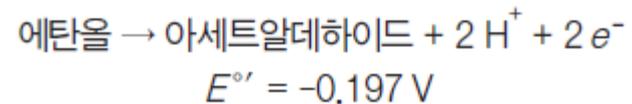


그림 20.3 예로 들은 산화환원 쌍의 표준 환원 전위를 측정하는 데 사용된 실험 기구. (A) 에탄올/아세트알데하이드 쌍, (B) 푸마르산/석신산 쌍. (A) 그림은 에탄올/아세트알데하이드 쌍의 표준 환원 전위를 측정하기 위한 시료 반쪽전지/표준 반쪽전지의 쌍을 나타낸 것이다. 전자가 시료 반쪽전지에서 표준 반쪽전지 쪽으로 흐르기 때문에 표준 환원 전위는 음의 값이며 정확하게 -0.197 V이다. 반면 푸마르산/석신산 쌍(B)은 표준 반쪽전지에서 나온 전자를 받아들인다. 즉, 이 시스템에서는 환원이 자발적으로 일어나므로, 환원 전위는 양의 값이다. 반쪽전지 반응(half-cell reaction)은 각각의 반쪽전지에서 일어나는 반응을 나타낸다. 푸마르산/석신산 반쪽전지가 H^+/H_2 의 표준 반쪽전지와 짝을 이루면(B), 일어나는 반응은 정말로 푸마르산의 환원 반응이다.



그러나 에탄올/아세트알데하이드 반쪽전지(A)에서 일어나는 반응은 에탄올의 산화반응으로서, 표 20.1에 열거된 반응의 역반응이다.



산화환원전위 (Redox potential)

- ① 한 물질의 전자에 대한 친화력이 H_2 보다 강하면 (+) 환원전위
- ② 한 물질의 전자에 대한 친화력이 H_2 보다 약하면 (-) 환원전위
- ③ 강한 환원제 (NADH)는 (-) 환원전위를 갖고 강한 산화제 (O_2)는 (+) 환원전위를 갖는다.

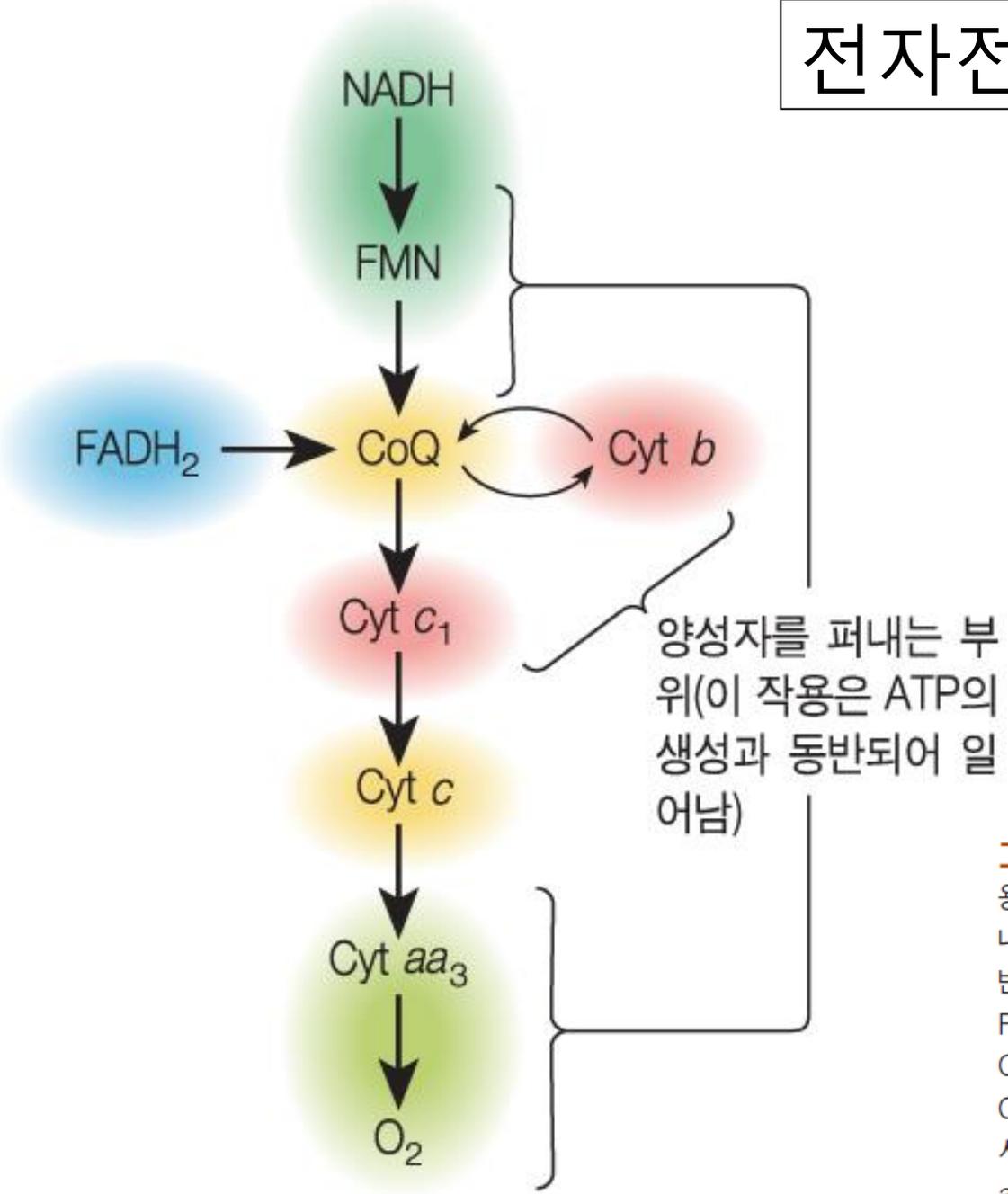
표 20.1 여러 가지 생물학적인 환원형 반쪽반응의 표준 환원 전위

환원형 반쪽반응	$E^{\circ'} (V)$
$\frac{1}{2}O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$	0.816
$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771
사이토크롬 $a_3(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $a_3(Fe^{2+})$	0.350
사이토크롬 $a(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $a(Fe^{2+})$	0.290
사이토크롬 $c(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $c(Fe^{2+})$	0.254
사이토크롬 $c_1(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $c_1(Fe^{2+})$	0.220
$CoQH^{\bullet} + H^+ + e^- \rightarrow CoQH_2$ (보조효소 Q)	0.190
$CoQ + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow CoQH_2$	0.060
사이토크롬 $b_H(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $b_H(Fe^{2+})$	0.050
푸마르산 + $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow$ 석신산	0.031
$CoQ + H^+ + e^- \rightarrow CoQH^{\bullet}$	0.030
$[FAD] + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow [FADH_2]$	0.003~0.091*
사이토크롬 $b_L(Fe^{3+}) + e^- \rightarrow$ 사이토크롬 $b_L(Fe^{2+})$	-0.100
옥살로아세트산 + $2 H^+ + e^- \rightarrow$ 말산	-0.166
피루브산 + $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow$ 젖산	-0.185
아세트알데하이드 + $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow$ 에탄올	-0.197
$FMN + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow FMNH_2$	-0.219
$FAD + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow FADH_2$	-0.219
1,3-비스포스포글리세르산 + $2 H^+ + 2 e^- \rightarrow$ 글리세르알데하이드-3-인산 + P_i	-0.290
$NAD^+ + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow NADH + H^+$	-0.320
$NADP^+ + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow NADPH + H^+$	-0.320
α -케토글루타르산 + $CO_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow$ 아이소시트르산	-0.380
석신산 + $CO_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow \alpha$ -케토글루타르산 + H_2O	-0.670

* 석신산 탈수소효소와 같은 플라보단백질에 결합된 FAD가 환원될 때의 전형적인 값.

전자전달사슬의 여러 구성성분들을 각각 따로 나타냈음에 유의하라. 이 구성성분들은 복합체의 일부로 다시 접하게 될 것이다. 또한 앞의 단원에서 배웠던 여러 반응들에 대한 값도 포함시켰다.

전자전달 복합체의 구성



양성자를 펴내는 부
위(이 작용은 ATP의
생성과 동반되어 일
어남)

그림 20.2 전자전달사슬의 개요도. 양성자를 펴내는 작용은 산화적 인산화반응과 동반되어 일어나는데, 그 일어나는 장소를 표시하였다. FMN은 플라빈 보조효소인 플라빈 모노뉴클레오타이드(flavin mononucleotide)의 약자로 FAD와는 달리 아데닌 뉴클레오타이드를 가지고 있지 않다. CoQ는 보조효소 Q(그림 20.5 참조)이다. Cyt b, Cyt c₁, Cyt c, Cyt aa₃ 등은 헴을 포함하고 있는 단백질이며, 각각 사이토크롬 b, 사이토크롬 c₁, 사이토크롬 c, 사이토크롬 aa₃를 나타낸다.

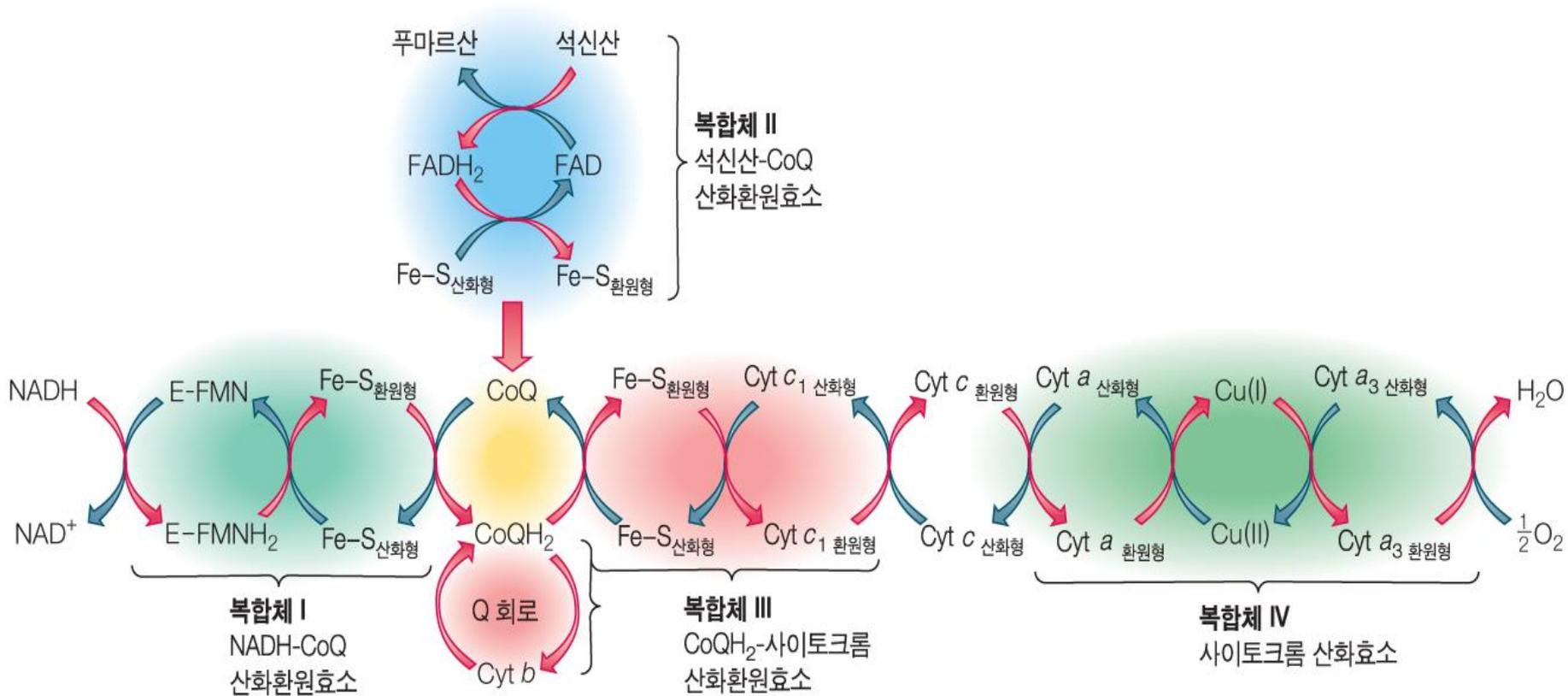


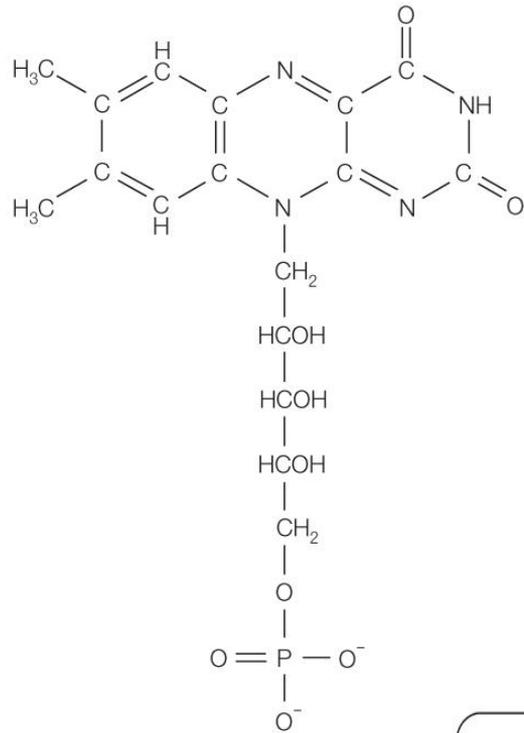
그림 20.6 호흡 복합체를 나타내고 있는 전자전달사슬. 환원형 사이토크롬에서는 철이 Fe(II)의 산화 상태이고, 산화형 사이토크롬에서는 Fe(III)의 산화 상태이다.

산화적 인산화의 전자전달체

- Flavins (FMN/FMNH₂, FAD/FADH₂)
- Iron-sulfur proteins
- 퀴논 (Coenzyme Q = 유비퀴논)
- 사이토크롬 a, a₃, b, c, c₁
- 단백질 결합 구리

* Cytochromes을 제외하고 모든 전자전달체는 미토콘드리아 내막에 결합되어있다.

* Cytochromes은 움직이는 전자운반체이다.



FMN의 구조
(플라빈 모노뉴클레오타이드)

그림 20.4 FMN의 구조(플라빈 모노뉴클레오타이드).

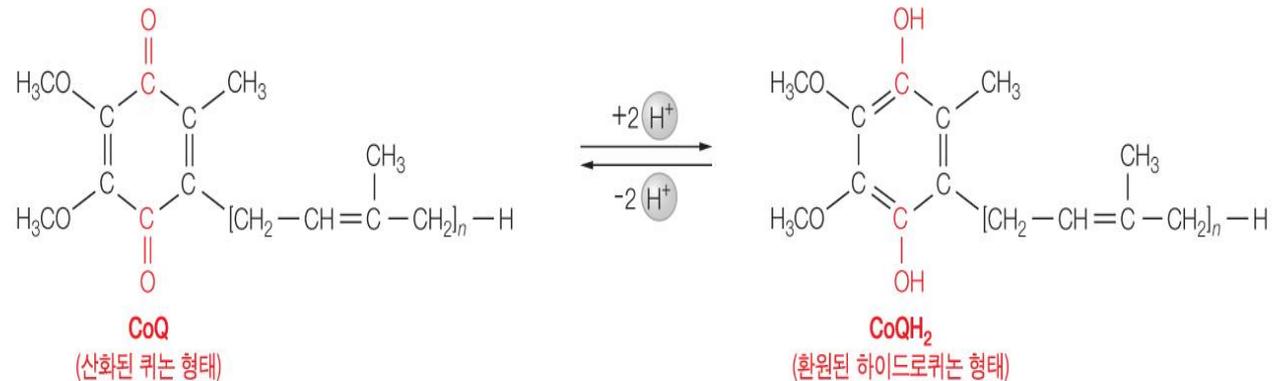
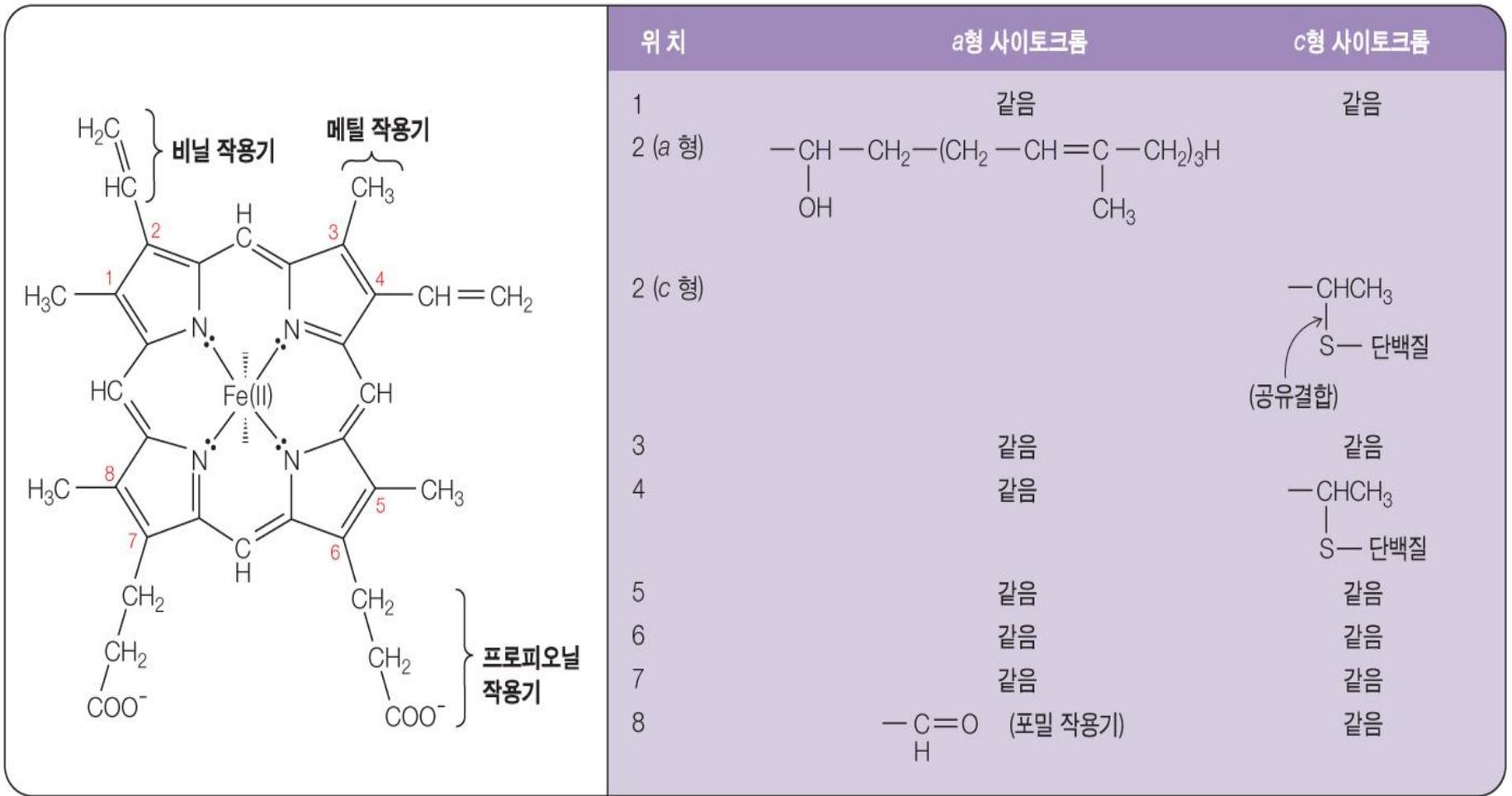


그림 20.5 보조효소 Q의 산화형과 환원형. 보조효소 Q는 유비퀴논이라고 부르기도 한다.

그림 20.10 사이토크롬의 헴 작용기.



A 모든 b형 사이토크롬과 헤모글로빈 및 마이오글로빈의 헴 구조, 쇠기 모양의 결합은 철 원자의 다섯 번째와 여섯 번째 배위결합 부위를 나타낸다.

B a형과 c형 사이토크롬의 곁사슬을 b형 사이토크롬의 곁사슬과 비교한 것.

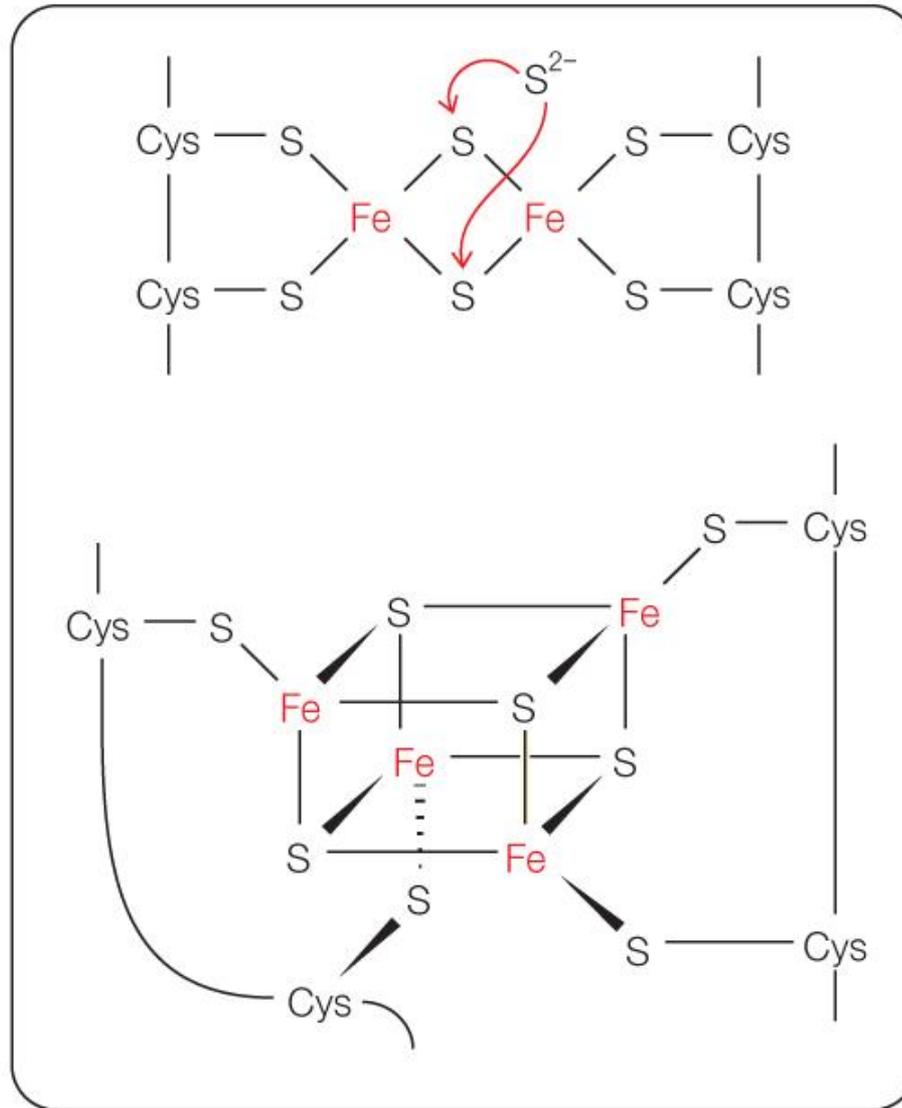
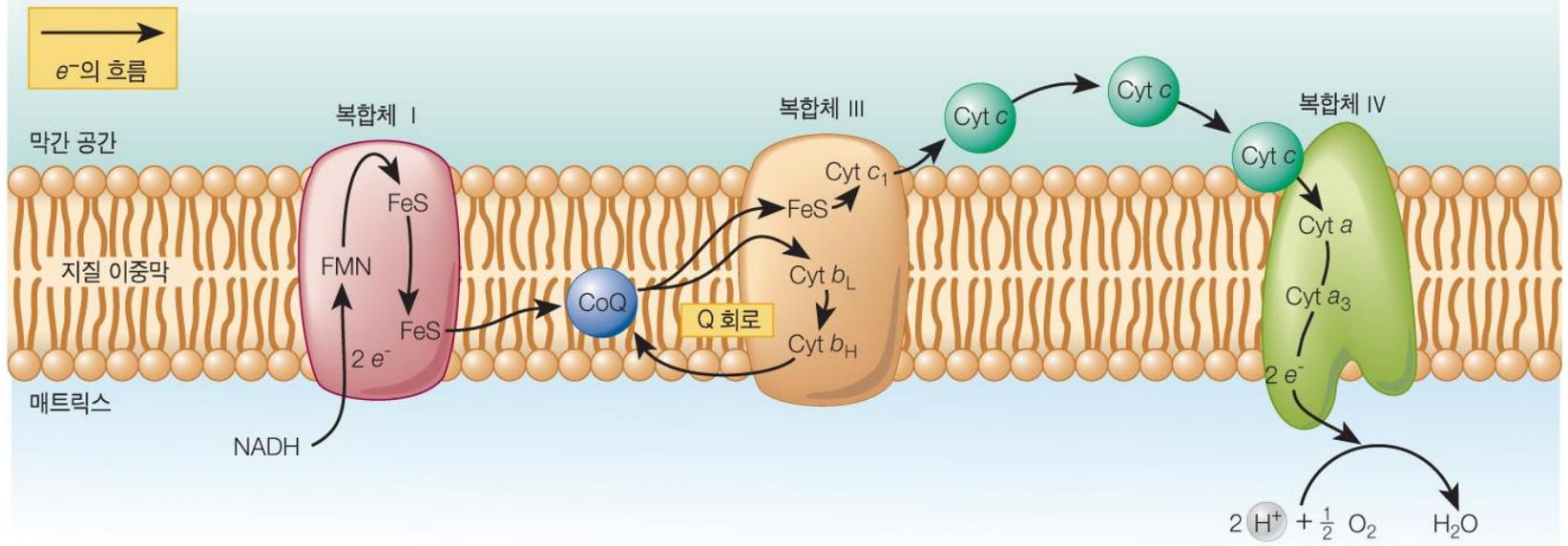


그림 20.11 비헴형 철 단백질에서의 철-황 결합.

▼ **그림 20.8** 미토콘드리아 내막에 있는 호흡계 복합체의 구성과 위치. NADH에서 O₂로의 전자의 흐름을 나타내고 있음. 복합체 II는 관여되어 있지 않으므로 나타나지 않았다. NADH는 피루브산, 아이소시트르산, α-케토글루타르산, 말산 등과 같은 기질에서 전자를 받았다. NADH의 결합 부위가 막의 매트릭스 쪽에 있음을 주목하라. 보조효소 Q는 지질 이중막에 용해되어 있다. 복합체 III은 2개의 b형 사이토크롬을 가지고 있는데, 이것들은 Q 회로에 관여되어 있다. 사이토크롬 c는 막에 약하게 결합되어 있으며 막간 공간을 향하고 있다. 복합체 IV는 산소 결합부위가 매트릭스 쪽에 놓여 있다.



전자전달 복합체는 양성자 전달도 한다

1. NADH-보조효소 Q 환원효소
- 양성자 전달
2. 석신산-보조효소Q 환원효소
- 자유에너지 변화가 너무 작아 양성자전달을 추진 못함
3. 보조효소 Q-사이토크롬 c 환원효소
- 양성자 전달
4. 사이토크롬 c 산화효소 - 양성자 전달

표 20.2 전자전달 반응의 에너지론

반응	$\Delta G^{\circ'}$	
	kJ (mol NADH) ⁻¹	kcal (mol NADH) ⁻¹
$\text{NADH} + \text{H}^+ + \text{E-FMN} \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{E-FMNH}_2$	-38.6	-9.2
$\text{E-FMNH}_2 + \text{CoQ} \rightarrow \text{E-FMN} + \text{CoQH}_2$	-42.5	-10.2
$\text{CoQH}_2 + 2 \text{Cyt } b[\text{Fe(III)}] \rightarrow \text{CoQ} + 2 \text{H}^+ + 2 \text{Cyt } b[\text{Fe(II)}]$	+11.6	+2.8
$2 \text{Cyt } b[\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt } c_1[\text{Fe(III)}] \rightarrow 2 \text{Cyt } c_1[\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt } b[\text{Fe(III)}]$	-34.7	-8.3
$2 \text{Cyt } c_1[\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt } c[\text{Fe(III)}] \rightarrow 2 \text{Cyt } c[\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt } c_1[\text{Fe(III)}]$	-5.8	-1.4
$2 \text{Cyt } c[\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt}(aa_3) [\text{Fe(III)}] \rightarrow 2 \text{Cyt}(aa_3) [\text{Fe(II)}] + 2 \text{Cyt } c[\text{Fe(III)}]$	-7.7	-1.8
$2 \text{Cyt } (aa_3)[\text{Fe(II)}] + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{Cyt}(aa_3) [\text{Fe(III)}] + \text{H}_2\text{O}$	-102.3	-24.5
전체 반응: $\text{NADH} + \text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O}$	-220	-52.6

전기적 에너지를 화학적 에너지로 변환

$$\Delta G = -n \mathcal{F} \Delta \mathcal{E}$$

(n =전자수, \mathcal{F} :faraday 상수 96,485kJ/V.mol, V: 환원전위)

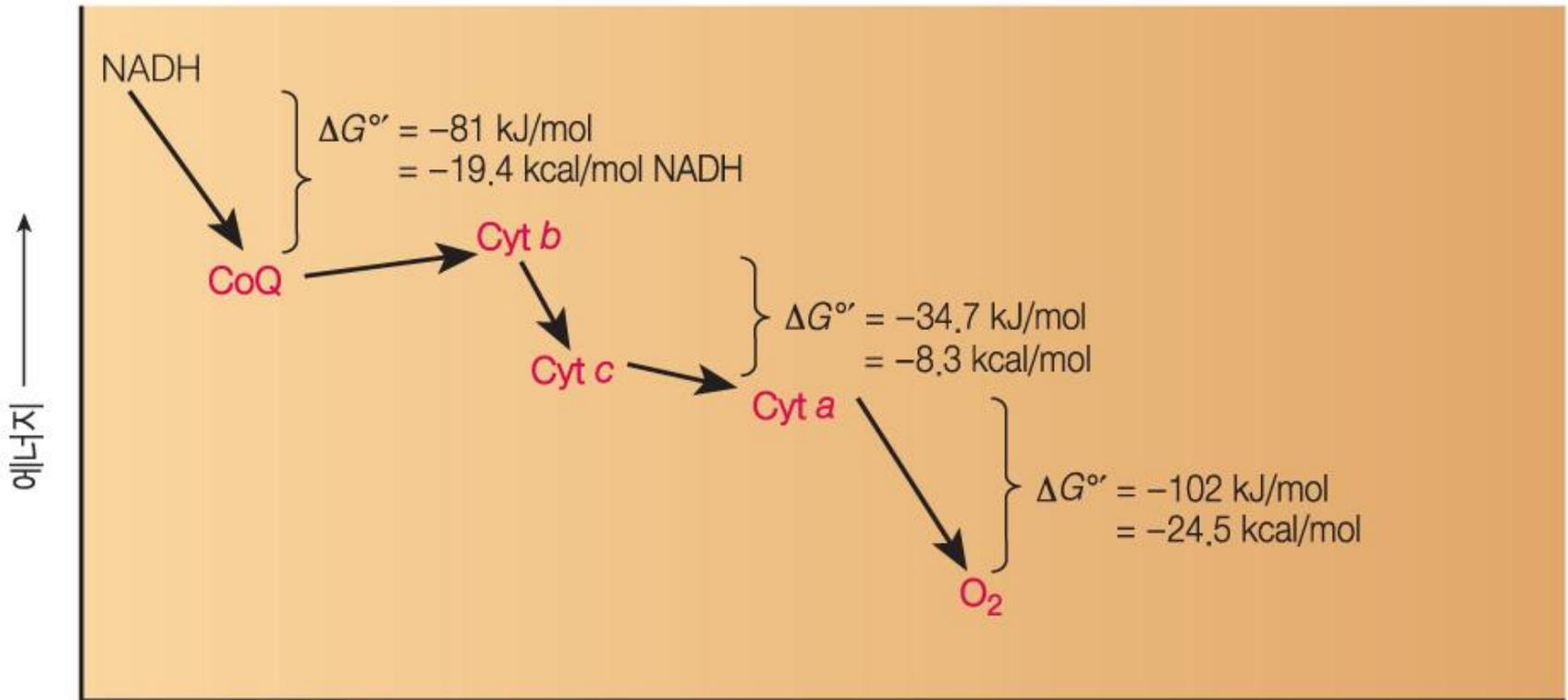


그림 20.7 전자전달의 에너지론.

NADH의 산화는 어떻게 ADP의 인산화와 연결되어 있는가 ?

The "chemiosmotic theory" (화학삼투이론)

**by Peter Mitchell
(1978, 노벨 화학상)**

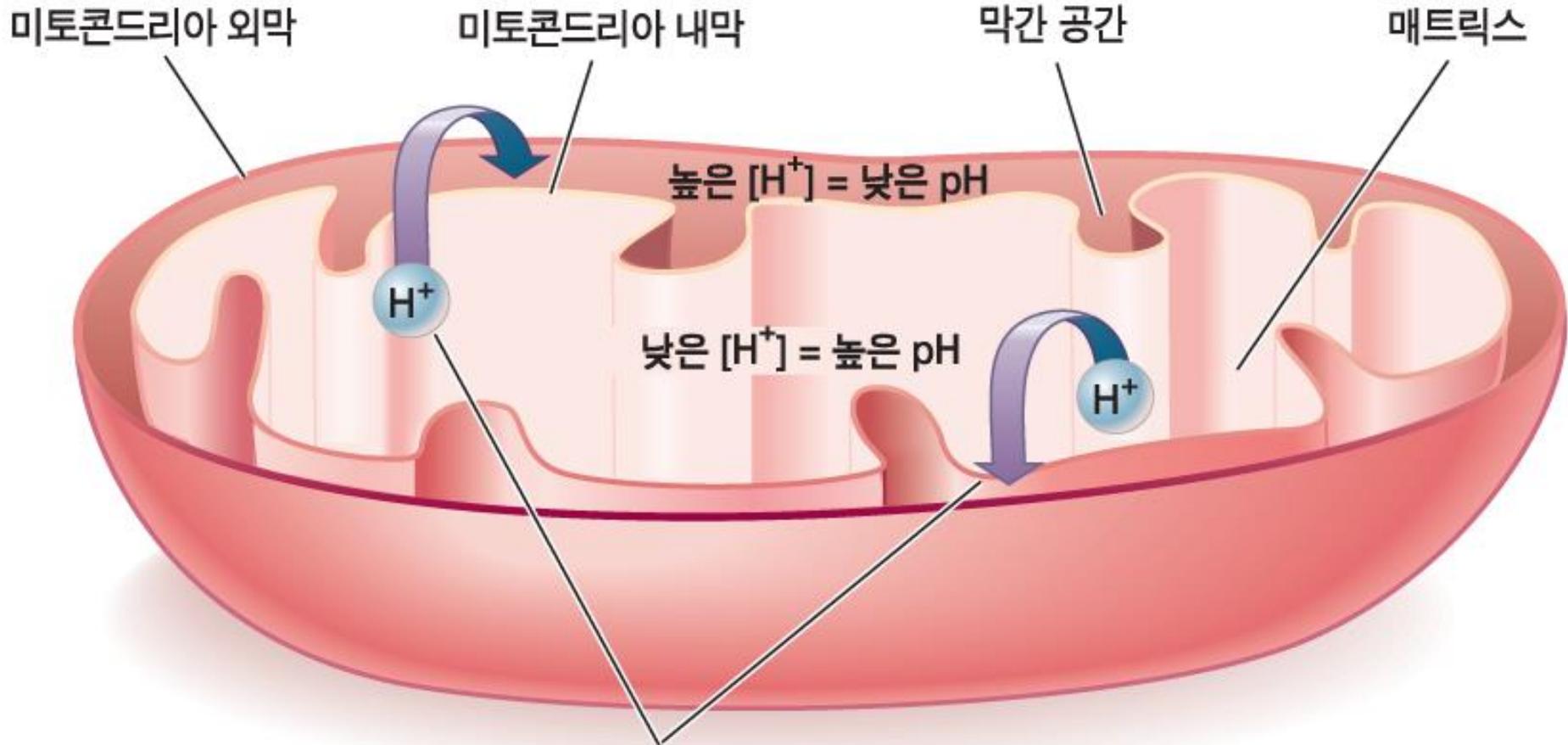
<핵심용어>

proton gradient (양성자 농도경사)

pH gradient (pH 농도경사)

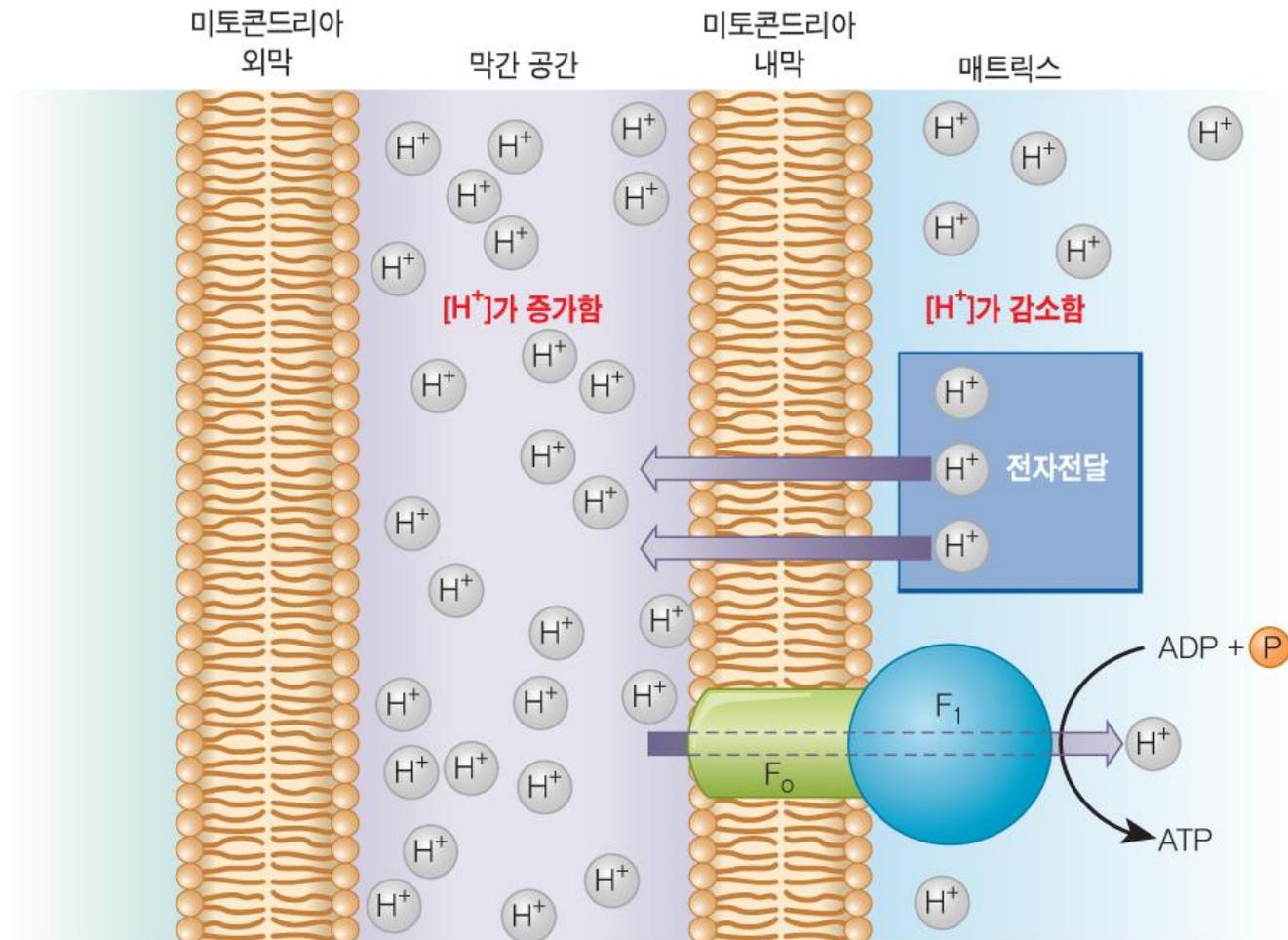
proton motive force: 양성자의 흐름

막간 공간으로의 양성자의 전달



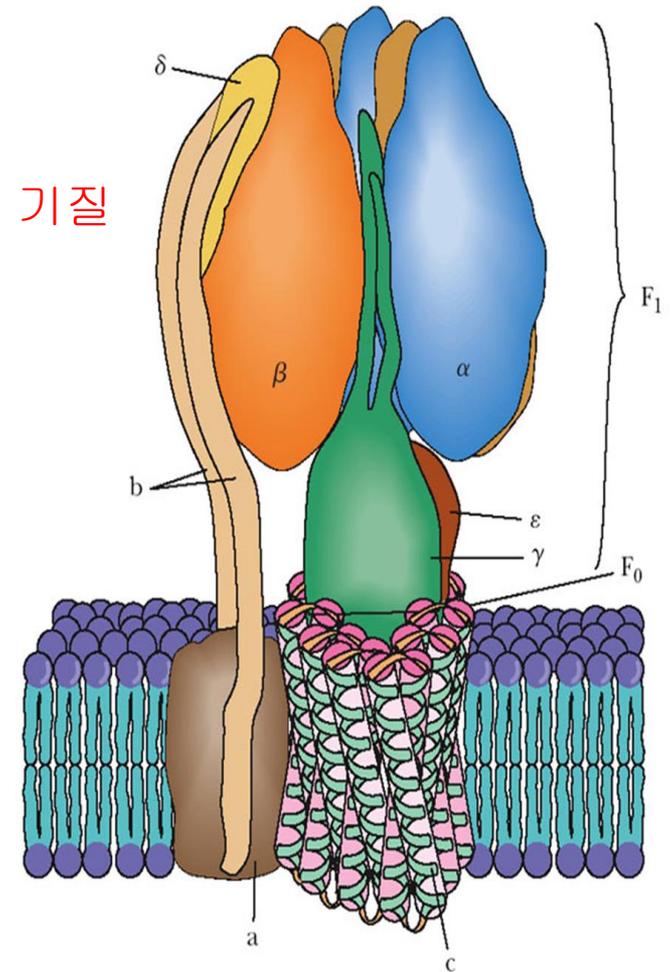
전자전달은 미토콘드리아 내막을 가로질러 양성자를 펴내는 작용으로 이어진다.

- NADH로부터 두 개의 전자가 산소로 전달되는 과정에서 전달되는 양성자의 수는 10개로 추정되고 있다.
- 내막을 사이에 두고 양성자 농도 경사(기울기)가 발생한다.
- 기울기를 해소하려는 힘이 발생한다 → proton motive force → ATP 합성효소를 통해 소멸된다 → ATP가 합성된다
- 양성자 3개가 전달될 때마다 ATP 한 분자가 생긴다.



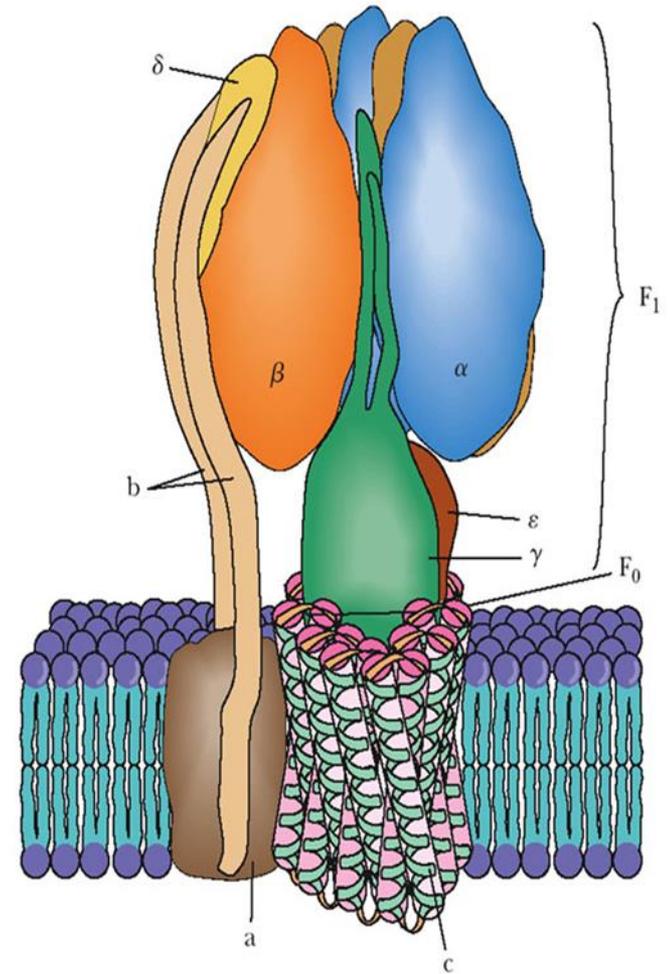
ATP 합성효소에서 양성자 흐름에 의한 ATP 생성은 어떻게 일어나는가 ?

양성자흐름에 의한 에너지는 ATP 합성효소의 구조적 변화를 야기시켜 ATP의 방출에 관여한다.



ATP synthetase = F_1F_0 ATPase

- **F1 복합체**는 $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon$ 의 다섯가지 단위체로 구성되며, $\alpha\beta$ 는 3개씩 돌기부분을 형성하고, $\gamma\delta\varepsilon$ 는 줄기부분을 형성한다. $\delta\varepsilon$ 는 F1과 F0의 상호작용을 조절하고, γ 는 양성자출입을 조절하는 문으로 작용한다.
→ ATP 합성되어 미토콘드리아 기질에 있다.
- **F0 복합체**는 a b c의 3가지 단위체로 구성되며 (ab_2c), 막에 파묻혀 있고 c는 통로를 형성하는 역할을 맡고 있다.
→ 양성자 이동



ADP와 ATP의 이동

- ADP와 ATP는 미토콘드리아 내막을 자유롭게 통과하는 것이 아니라 ATP-ADP translocase라는 운반단백질을 통해 이동한다.
- ATP와 ADP의 이동은 반대방향으로 일어난다. (antiport)
- 이 단백질은 내막 단백질의 약 14%를 차지하고 있다.

산화적인산화의 조절

- 산화적 인산화에 필요한 것들은 NADH, O₂, ADP, Pi 인데, 그 중에서도 ADP가 가장 중요하다.
- 따라서 **ADP**를 주어야만 산소 소모가 진행된다.
- 그런데 ADP의 농도 증가는 ATP 소모로부터 비롯되므로 ATP가 사용되지 않는 한 산화적 인산화는 진행되지 않는다

산화적 인산화를 방해하는 물질

1. 짝풀림제 (uncoupler)
동반작용 억제제
2. 전자전달 방해제

짜풀림제의 작용기전

- ① NADH로부터 산소로의 전자전달은 계속되나 ATP합성 정지
- ② proton-motive force가 ATP 합성이 아닌 다른 것에 소모됨
- ③ 산화반응은 계속 일어난다(산소 소모, NADH의 산화 증가)

썩살림제

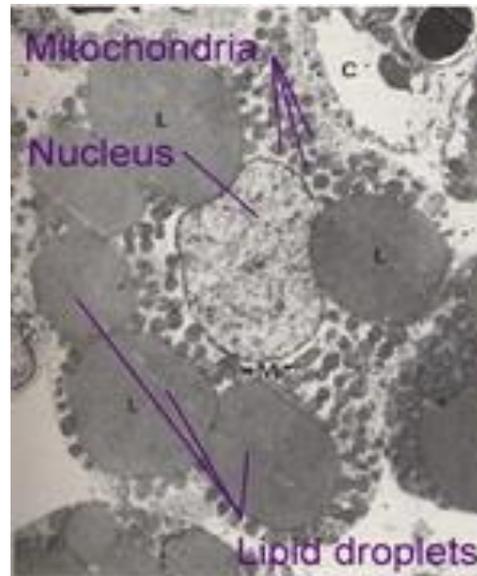
① Thermogenin= uncoupling protein-1 (UCP-1)

열생산 단백질, 체온 유지와 관련된 단백질

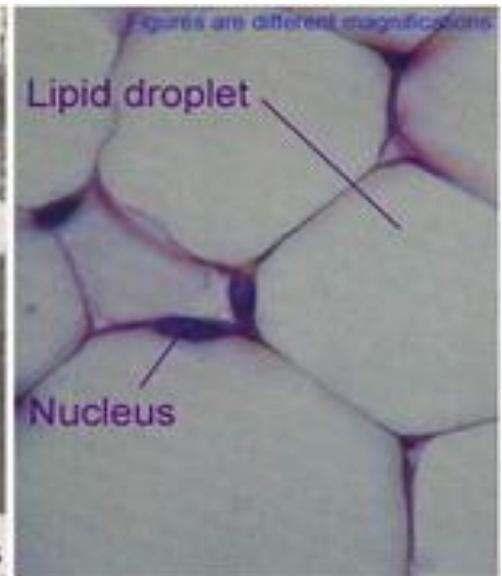
갈색지방조직의 미토콘드리아에 존재

동면하는 동물의 체온 조절 단백질

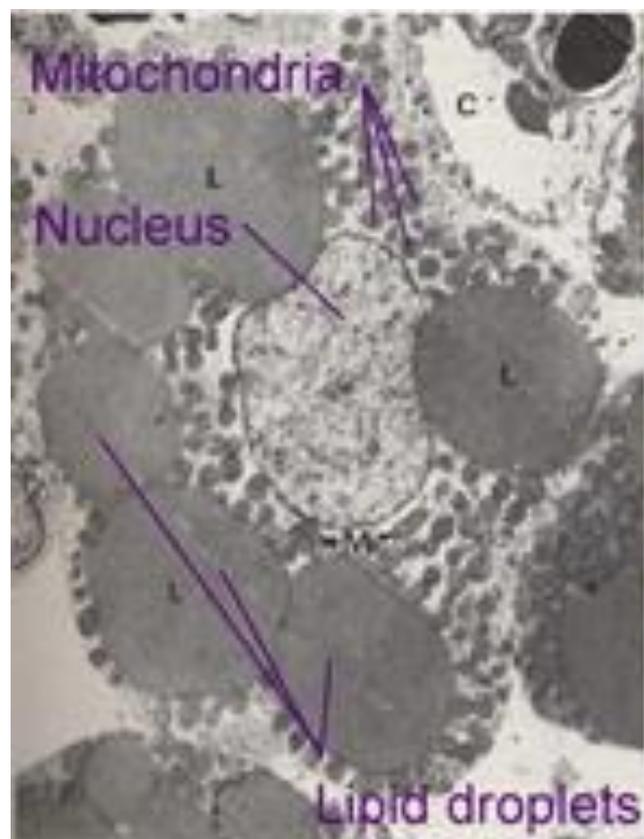
사람에게서 이 단백질 발현이 되지 않으면 비만 가능성



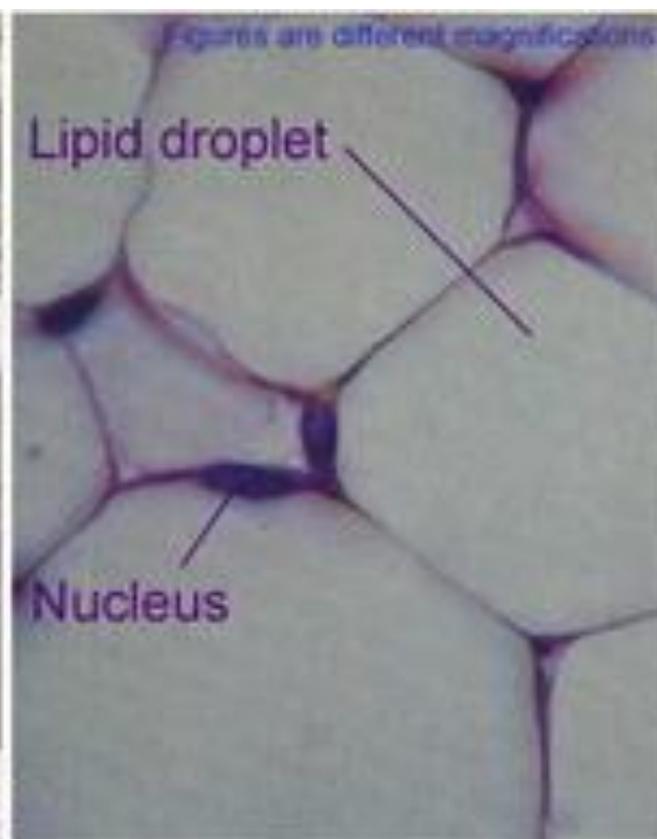
Brown Fat



White Fat



Brown Fat

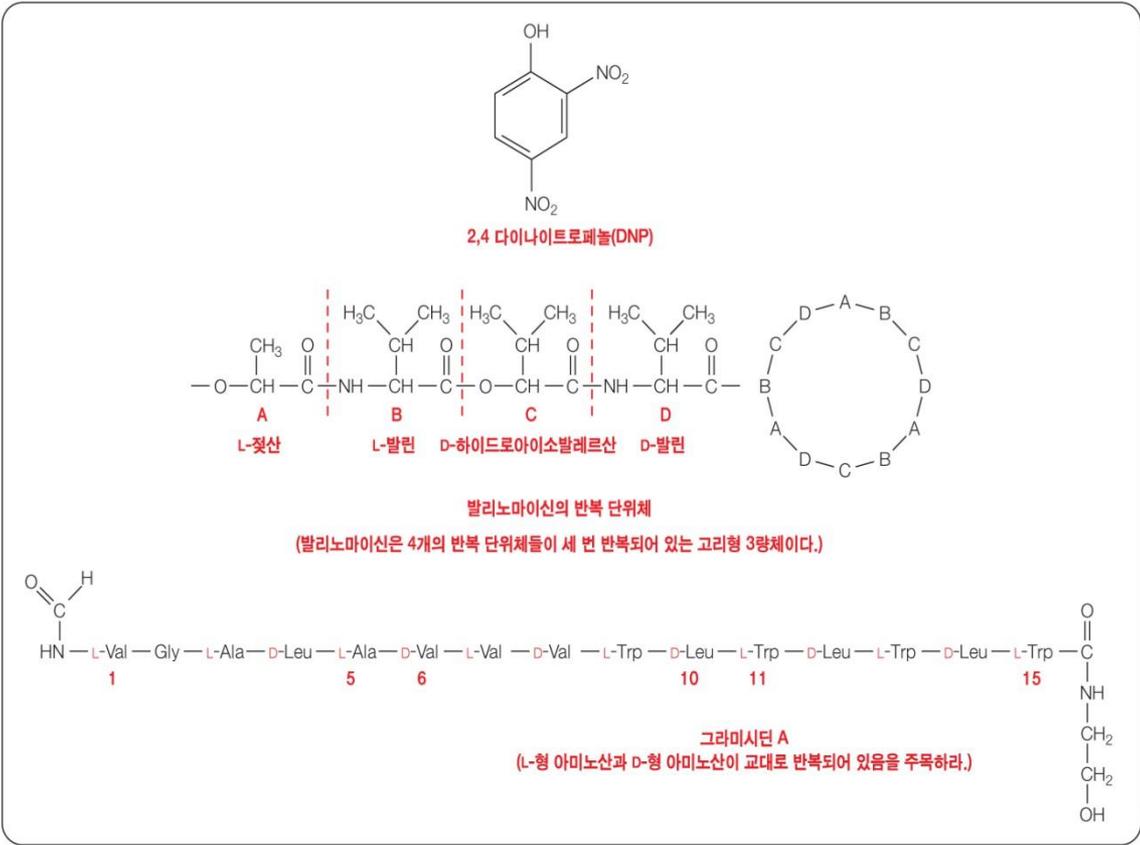


White Fat

짜꿀림제

② 2,4-dinitrophenol (2,4-DNP):

proton을 내막을 건너 기질 쪽으로 이동시킨다.



Miracle diet pill: 2,4-DNP

Drugs used to change the structure or functions of the body do not come within the scope of the Food and Drugs Act. Recent articles in newspapers and medical journals show many cases of injury and death from slenderizing preparations containing dinitrophenol.

BLINDED BY DRUG TO REDUCE WEIGHT
Camden Woman Loses Sight Due to Cataracts and Fates Operation
U. S. ISSUED WARNING

'Anti-Fat' Drug Tested In Blinding of 12 Women
All Victims in San Francisco Had Taken Dinitrophenol
SAN FRANCISCO, July 8.—Research workers of Stanford University Medical School here today were endeavoring to learn whether dinitrophenol, newly developed "anti-fat" drug, was responsible for the temporary blindness of twelve San Francisco women.

One Lincoln Woman Blinded By Dinitrophenol Flesh Reducing Preparation; Another Affected
Blindness from an "anti-fat" drug has come to Lincoln, doctors here reported Thursday.
REPEATED instances of blindness, critical illness and sometimes death result and sometimes death result so far failed to stop the use of dinitrophenol as a means of reducing weight in the United States. Dinitrophenol attacks the liver, kidneys, heart and frequently causes malignant changes, as in the recent cases of some of the beautiful models.

DINITROPHENOL HELD POISON BY N. J. BOARD
State Pharmacy Body Rules Fat Reducer Can't Be Sold Unless Product Is Labeled As Toxic
Trenton, N. J.—The Board of Pharmacy of the State of New Jersey has another warning appearance in the daily press of California recently of another case of temporary blindness and the dangers of this drug published.

Anti-Fat Drug May Cause Blindness
Twelve San Francisco Women Reported To Be Afflicted.
SAN FRANCISCO, July 8.—Stanford here to learn

Drug Bill Backers Point to Evils of Fat Reducing
Blindness of Women on Pacific Coast Blamed on Dinitrophenol; Not Covered by Present Law
Sudden Death From Dinitrophenol
12 on Coast, Barred Here

WOMEN USING DRUG TO REDUCE BLINDED
Medical School Reveals Optical Plague Among Anti-Fat Patrons.

Sale of Dinitrophenol, Fat-Reducing Remedy, 12 on Coast, Barred Here
nated that probably invent were using the drug

April 7, 1938
ed for Weight Reduction
overdose of nitrophenol, t
sted in a previous letter,
to take action to prevent
ain such drugs so easily.

REPORT OF A
FENN E.
ROBERT B.
In an article in July

100 CAPSULES
DINITRISO
TRADE MARK
(ALPHA DINITROPHENOL SODIUM)
EACH CAPSULE CONTAINS
1/10 GR. OF ALPHA DINITROPHENOL SODIUM

100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
Each Tablet contains 100 Milligrams (1/10 gr.)
Midwest Medical Supply Company
124 N. La Salle St. CHICAGO

100 TABLETS
NITROMET
Alpha dinitrophenol
1/2 grain each
Suggested dosage:
Begin with three tablets

100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
100 mg. (1/10 gr.)
Initial dose: One capsule daily. Dispense only in address of physician

Capsules 12
Dinitrenal
Reg. U.S. Pat. Off.
Alpha Dinitrophenol Sodium

Alpha Dinitrophenol
1/2 Gr. (1/10 gr.)
Said only to Physicians, to be used only under their exclusive supervision.
Dose: One, three times a day.
Ryan
Pharmaceutical Company
Philadelphia

100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
Each Tablet contains 100 Milligrams (1/10 gr.)
Midwest Medical Supply Company
124 N. La Salle St. CHICAGO

100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
100 mg. (1/10 gr.)
Initial dose: One capsule daily. Dispense only in address of physician

100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
100 mg. (1/10 gr.)
Initial dose: One capsule daily. Dispense only in address of physician

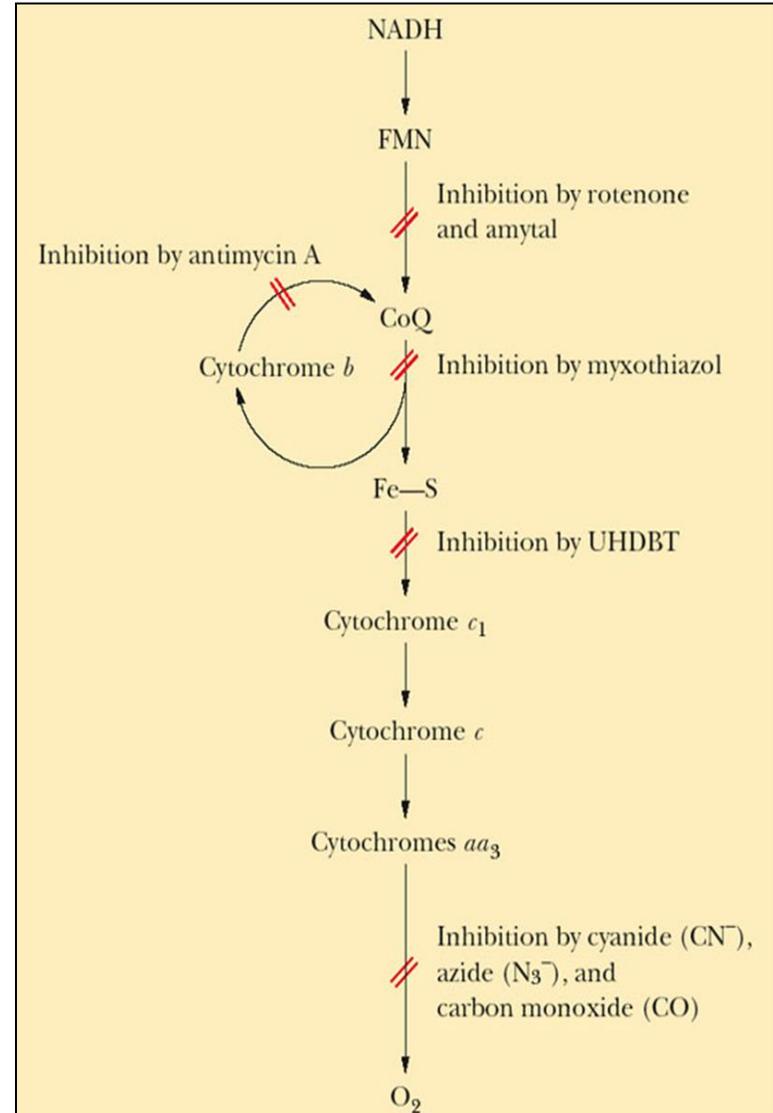
100 TABLETS
DINITROPHENOL
(Alpha Dinitrophenol-Sodium Salt)
100 mg. (1/10 gr.)
Initial dose: One capsule daily. Dispense only in address of physician

- 체중조절 효과
- 230 g 감량 /8일
- 작용기전
- 산소소모 증가
- ATP 생산 대신 열 발생

전자 전달 방해 물질

- ① **Cyanide** :
cytochrome oxidase-oxygen
- ② **Azide**:
cytochrome oxidase-oxygen
- ③ **Antimycin A**:
cytochrome b-cytochrome C1

전자전달이 방해되어
인산화반응은 일어나지 않는다



ATP 합성효소 방해제

④ Oligomycin, DCCD:

ATP 합성효소 방해제.

F_0 를 통한 양성자의 이동을 막는다

미토콘드리아 내막과 외막의 차이점

- 외막-- 대부분의 작은 분자들과 이온을 투과한다
Why: porin이라는 막단백질을 많이 함유하기 때문
지방 60%, 단백질 40%
- 내막-- 거의 모든 극성 분자와 이온에 대하여 투과성이 없다. 그러므로 운반 단백질이 필요하다.
내막의 80%가 단백질, 지질 20%

미토콘드리아의 transport system

- ① **Dicarboxylate** carrier --- exchange diffusion of malate, succinate, fumarate and Pi
- ② **pyruvate** carrier -- exchange pyruvate for OH-
- ③ **glutamate** carrier -- exchange glutamate and aspartate for OH-
- ④ tricarboxylate carrier -- citrate diffusion
- ⑤ Pi transport system : transport pi with H+ symport

미토콘드리아의 transport system

⑦ **Glycerol phosphate shuttle**

⑧ **Malate-aspartate shuttle**

세포질에서 (해당과정을 통해) 생성된 NADH를
미토콘드리아로 이동하는 운반체

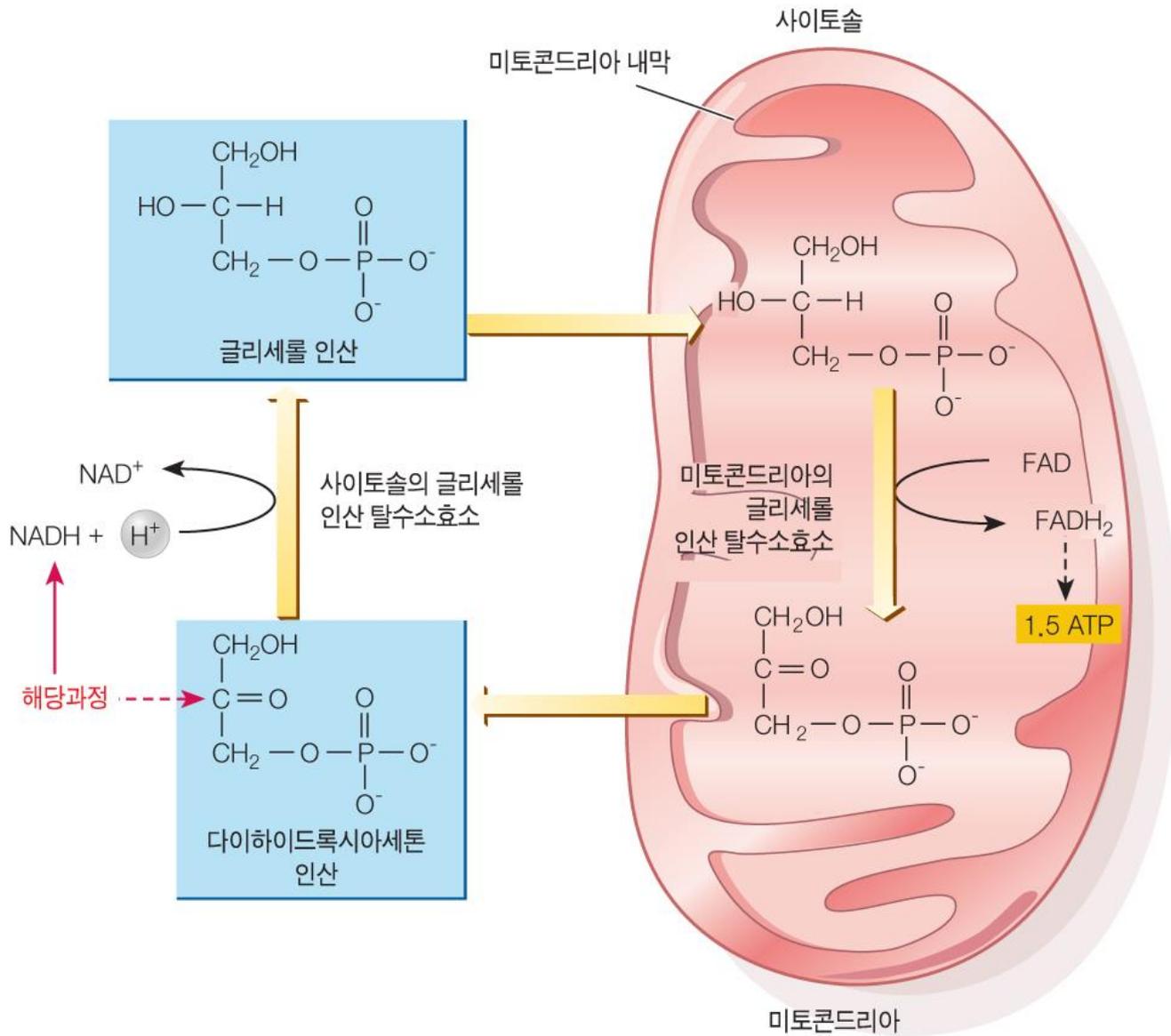


그림 20.20 글리세롤-인산 셔틀.

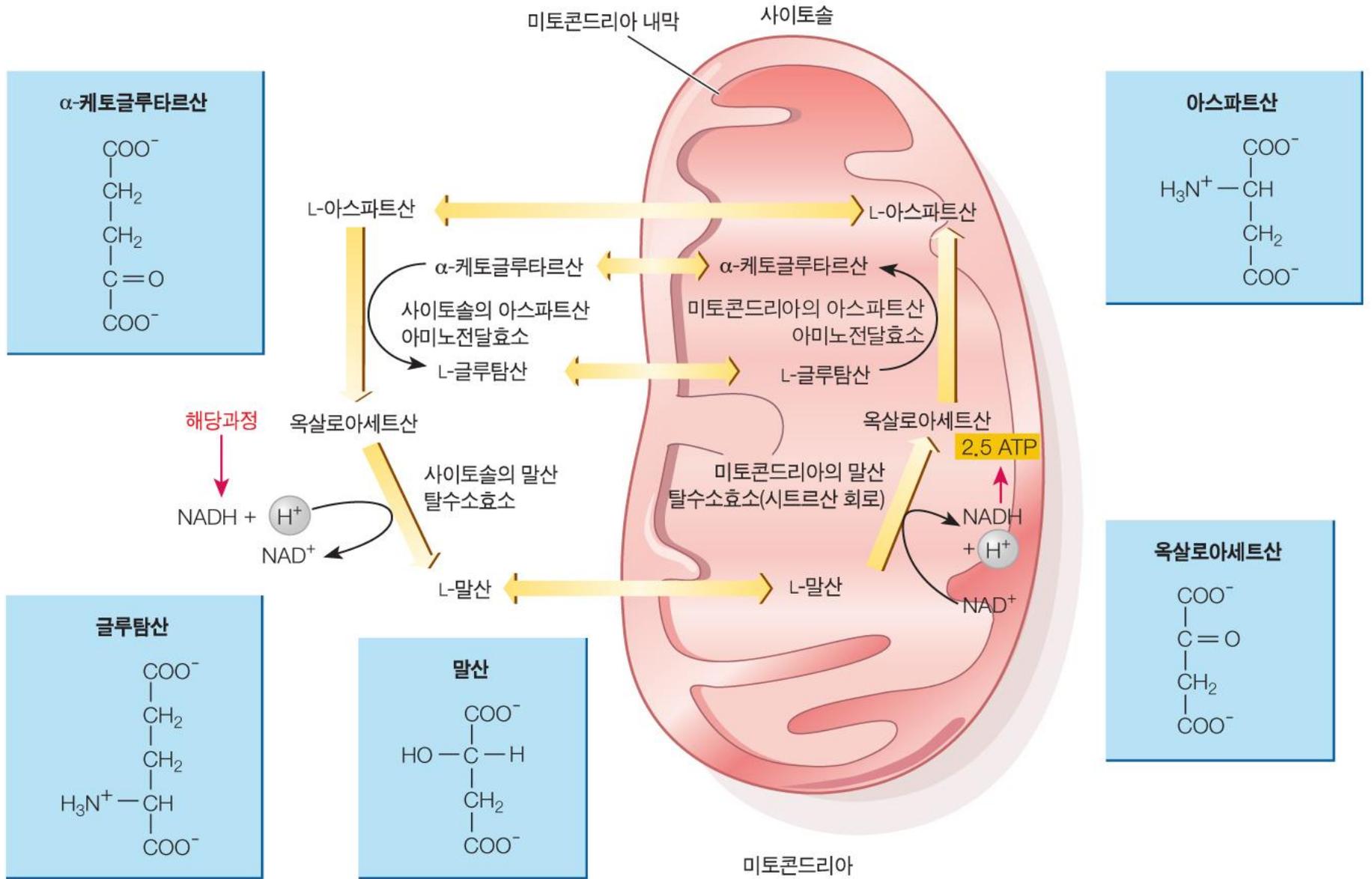


그림 20.21 말산-아스파르트산 셔틀.

운동의 종류에 따라 사용하는 에너지 형태가 다르다



운동의 지속성에 따라 사용하는 에너지 형태가 다르다

1. **크레아틴 인산**, which reacts directly with ADP in substrate-level phosphorylation to produce ATP
2. **근육에 저장된 글리코겐으로부터 분해된 글루코오즈**, initially consumed by anaerobic metabolism
3. **간의 글루코오즈**, both from glycogen stores and gluconeogenesis from lactic acid in the muscle, initially consumed by anaerobic metabolism
4. **근육 미토콘드리아의 호기적 산화**

미토콘드리아성 근장애



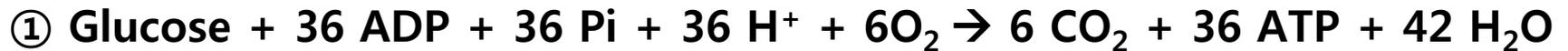
- 그레그 르몽드
- 자전거 경주 선수
- 미토콘드리아 장애로 비효율적인 에너지 생산으로 운동 포기
- 심한 운동을 하면 미토콘드리아가 줄어들어 질병

표 20.3 글루코오스 산화에서의 ATP 생산량

경로	글루코오스 1분자당 ATP 생산량			
	글리세롤-인산 셔틀	말산-아스파르트산 셔틀	NADH	FADH ₂
해당과정: 글루코오스 → 피루브산(사이토솔)				
글루코오스의 인산화	-1	-1		
프락토오스-6-인산의 인산화	-1	-1		
1,3-BPG 두 분자의 탈인산화	+2	+2		
PEP 두 분자의 탈인산화	+2	+2		
글리세르알데하이드-3-인산 두 분자가 산화되면 2 NADH가 생긴다.			+2	
피루브산 → 아세틸-CoA로의 전환(미토콘드리아)				
2 NADH가 생성됨			+2	
시트르산 회로(미토콘드리아)				
석시닐-CoA 두 분자에서 2 GTP 생성됨	+2	+2		
아이소시트르산, α-케토글루타르산, 말산이 각각 두 분자씩 산화되면 6 NADH가 생성됨			+6	
석신산 두 분자가 산화되면 2 FADH ₂ 가 생성됨				+2
산화적 인산화반응(미토콘드리아)				
해당과정에서 생긴 2 NADH는, 글리세롤-인산 셔틀로 산화되면 각각 1.5 ATP가 생성되고, 말산-아스파르트산 셔틀로 산화되면 각각 2.5 ATP가 생성됨	+3	+5	-2	
2 피루브산 → 2 아세틸-CoA로의 산화적 탈카복실화반응: 2 NADH는 각각 2.5 ATP를 생성함	+5	+5	-2	
시트르산 회로가 한 번 돌 때 생긴 2 FADH ₂ 는 각각 1.5 ATP를 생성함	+3	+3		-2
시트르산 회로에서 생긴 6 NADH는 각각 2.5 ATP를 생성함	+15	+15	-6	
순 생산량	+30	+32	0	0

(유의사항: 미토콘드리아에서의 NADH와 FADH₂의 산화반응에 대한 P/O 비는 2.5와 1.5인데, 이 값은 '합의된 값'이다. 이것이 실제 값을 나타내지 못할 수도 있고 대사 조건에 따라 달라질 수도 있기 때문에, 글루코오스 산화에서 생성되는 ATP 추정치는 근사치이다.)

Energetics of oxidation of glucose



② 사용되는 운반계 종류에 따라 포도당의 에너지 생산량은 다르다.
36 or 38 ATP

③ 열역학적 효율 = $\frac{263}{686} \times 100 = 38\%$

④ 호흡상 Respiratory quotient (RQ) = $\frac{\text{moles of CO}_2 \text{ produced}}{\text{moles of O}_2 \text{ consumed}}$

RQ for glucose = 1, RQ for protein = 0.80, RQ for fat = 0.71