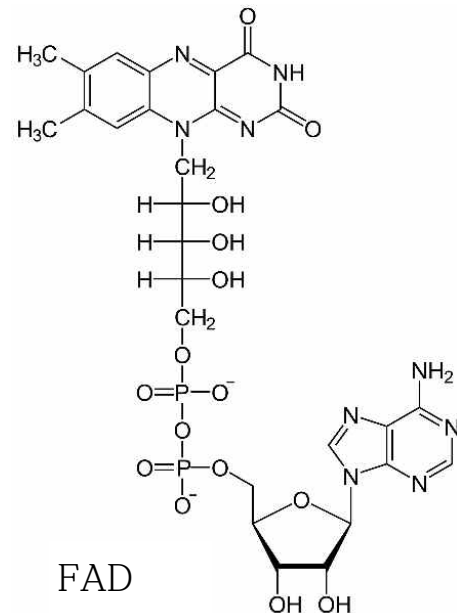
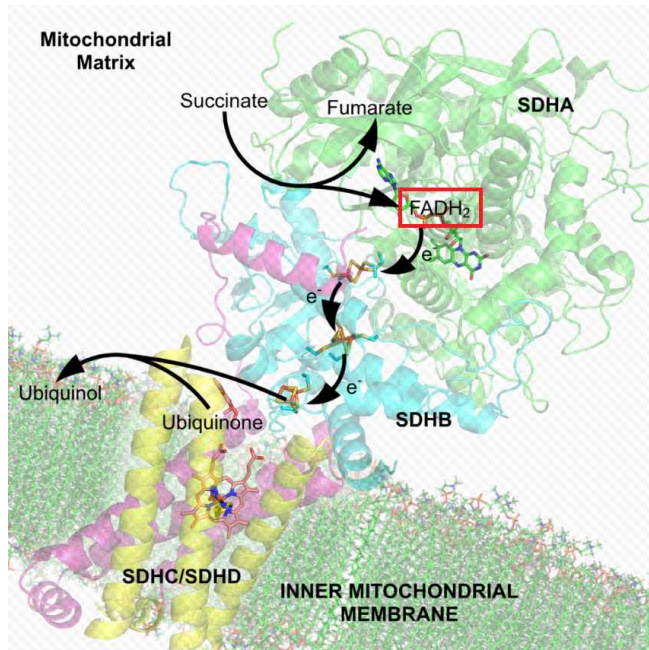


(19) FAD도 NADH처럼 세포질에 뒹뒹 떠다니면서 전자를 수송시킬 것 같지만 그렇지 않다. FAD라는 새끼는 내막에 짜져있는 놈이다.

보조 인자 중 효소로부터 분리되지 않는 것들을 보결족(Prosthetic group)이라 하는데, 그 예로는 헴, 플라빈, 레티날 등이 있다. 여기서 FAD(Flavin Adenine Dinucleotide) 또한 플라빈을 구성성분으로 가지고 있어 효소와 분리되지 않는 보결족임을 유추할 수 있다.



(전자전달계의 complex II(succinate dehydrogenase)는 보결족으로 FAD를 가진다.)

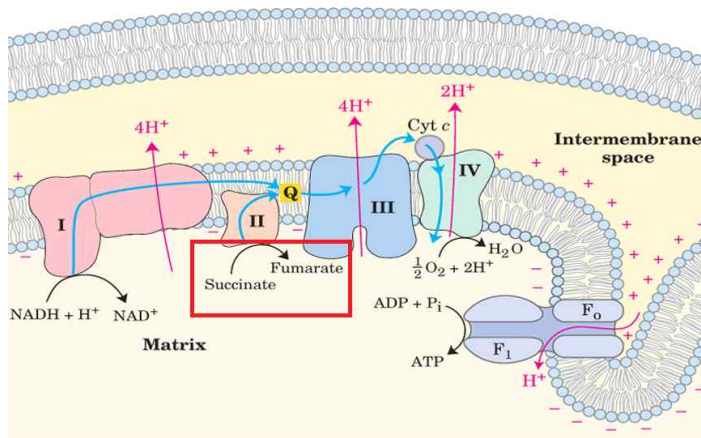
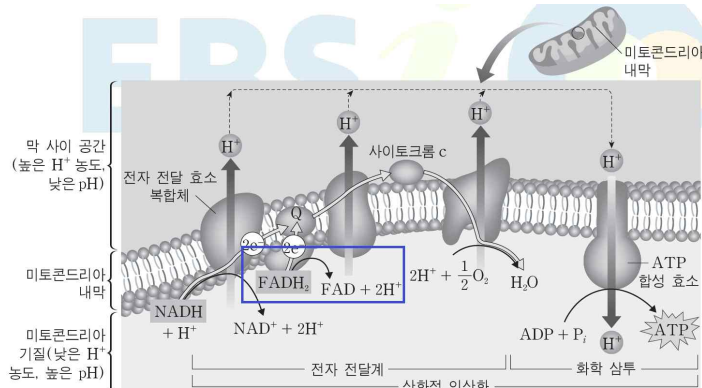
그러나 생명과학 교과서 및 EBS 책들과 이를 그대로 따라한 여러 문제집에서는 산화적 인산화 과정을 설명할 때 FAD가 마치 세포질을 자유롭게 이동하는 것처럼 묘사되어 있다. 세포호흡 과정에서 전자를 수송하는 조효소는 NAD⁺와 FAD가 있는데, NAD⁺는 탈수소효소로부터 분리되어 미토콘드리아 내막의 전자전달계에 전자를 전달해 주는 것이 맞지만, FAD는 NAD⁺와는 달리 내막에 항상 결합해 있다. 즉, NADH₂는 전자전달계에 전자를 수송하는 역할을 하는 게 맞지만 FAD는 그 자체로 전자전달계의 일부이며 숙신산으로부터 전자를 받아 제자리에서 FAD ⇌ FADH₂의 변화를 보일 뿐이다¹⁾.

교과서 및 EBS에서 산화적 인산화를 설명하는 대부분의 그림에서는 FADH₂가 미토콘드리아 기질 쪽에서 움직이면서 내막에 전자를 전달하는 것처럼 묘사되어 있다. 그러나 앞서 논의한 것을 반영한다면 내막의 Complex II에 전자를 주러 오는 것은 FADH₂가 아니라 Succinate (석신산)이다.

교과서에서는 세포호흡을 해당, TCA회로, 산화적 인산화의 세 단계로 명확히 분리하고 이들

1) 이러한 관점에서 볼 때 'FAD가 미토콘드리아 전자전달계에 전자를 전달한다.'라는 표현은 다시 한 번 생각해 볼 필요가 있다. FAD는 애초에 전자전달계의 일부이기 때문에 전자전달계에 전자를 전달한다는 표현은 어색하다. 이런 상황에서처럼 문제에서 보기가 전공내용과 약간의 충돌이 있을 때, '교육과정'이 아니니 그냥 넓게 보자'라고 둘러대는 것 보다는 아예 보기로 출제하지 않는 것이 바람직하다.

위에서부터 차례로 EBS, 생화학 책에서 가져온 그림이다.



을 구분 지어 설명하고 있다. 그리고 ‘세포호흡’이라는 과정이 해당 및 TCA cycle의 여러 유기산들로부터 고에너지 전자를 떼어내어 조효소들이 그 전자를 전자전달계에 전달하는 과정을 특별히 강조하기 위해, 해당과정과 TCA회로를 산화적 인산화와 잇는 연결고리로 조효소인 NAD+와 FAD를 소개하고 있다. 이에 따라, NADH가 complex I에 전자를 전달하는 것과 같이, NADH와 역할(전자 운반)이 비슷한 물질인 FAD를 소개하여 전자를 전달하고 있는 과정을 설명하고 있는 것이다²⁾.

사실 TCA회로와 산화적 인산화는 교과서에서의 설명대로 완벽히 나뉘어 있지 않고 하나의 접점을 공유하고 있는데, 그 공유점이 바로 내막계의 complex II이다. 이곳에서 일어나는 Succinate+FAD $\Rightarrow$ Fumarate+FADH₂의 반응은 TCA회로의 일부이자 산화적 인산화 과정의 일부이기도 하다. 이를 반영한 것이 위의 두 번째 그림이다.

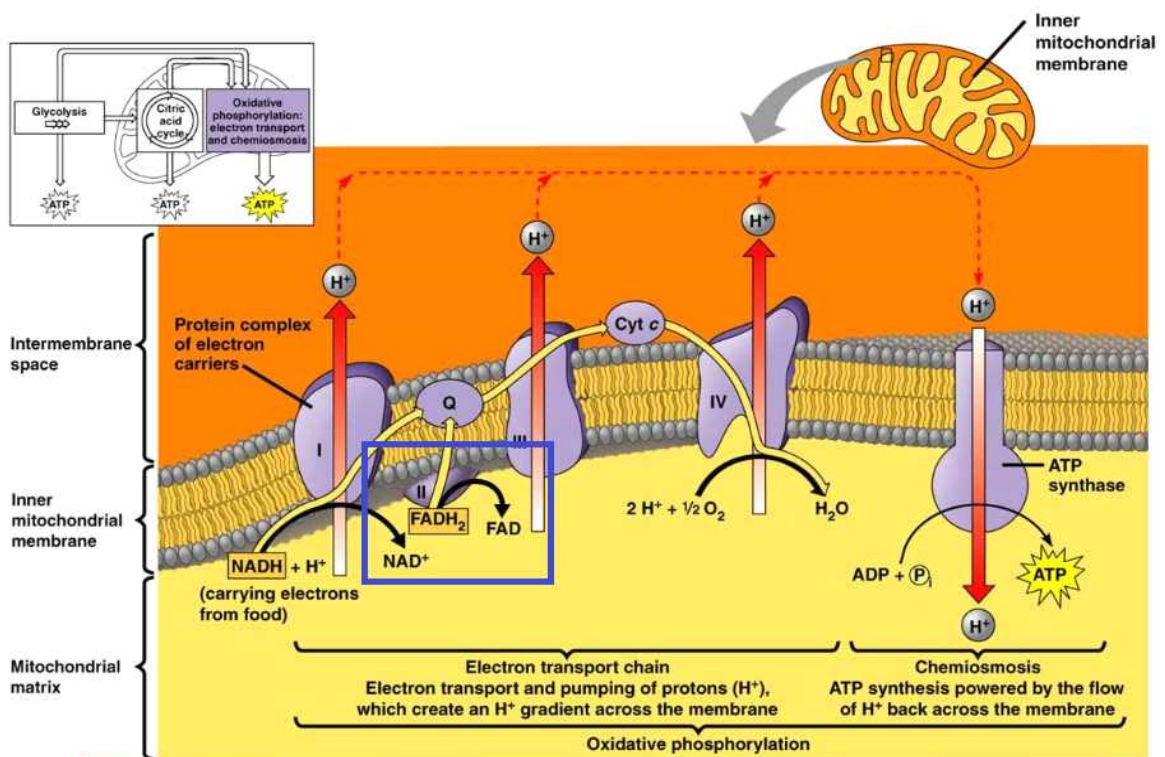
그러나 저 그림에서처럼 succinate가 complex II에 전자를 전달하는 것으로 소개하면 ‘조효소가 유기산의 고에너지 전자를 내막계로 전달하는 과정’을 보여주려는 집필자의 의도가 잘 드러나지 않기 때문에 교과서에서는 전자 전달에 관여하는 FAD를 굳이 드러낸 것으로 보인다. 즉, ‘FAD가 NADH와 함께 유기산으로부터 얻은 고에너지 전자를 전자전달계로 전달한다’

2) 사실 FAD에 대응되는 물질은 NADH가 아니라 Complex I의 FMN(Flavin Mononucleotide)이다. 이들은 모두 보결족인 Flavin 성분이기 때문이다. 그리고 NADH에 대응되는 물질은 Succinate이다. 여기서 누군가 ‘NADH는 조효소이고, Succinate는 기질인데 이들이 어떻게 대응되지?’라고 반박할 수 있다. 대답을 하자면, 앞서 설명한 대로 효소는 반응에 참여하기 위해 자기의 활성 부위에 결합하는 조효소와 기질을 구분하지 못한다. 즉, 효소는 NADH나 Succinate나 똑같이 ‘기질’ 취급한다. 교과서에서는 조효소와 기질을 명확히 구분하기 때문에 많은 학생들이 고정관념을 가지고 있는 듯하다. 이 분류는 단순히 기능상에 측면에서 구분지는 것이다. 효소는 조효소와 기질을 공평하게 대한다.

는 사실을 그림을 통해 확실히 보여주기 위한 것으로 여겨진다.

그렇다 하더라도 EBS 및 교과서의 그림은 여전히 FAD가 보결족이라는 사실을 반영하지 않고 있다. 하지만 이를 교과서에서 따로 설명하기에는 무리가 있고, 그냥 그대로 두기에는 실제 상황과는 거리가 있는 그림이 될 것이다. 'Campbell Biology'의 원서를 찾아보다가 두 가지 문제를 모두 해결할 적절한 방안을 찾았다. 밑에 제시된 그림은 모두 Campbell Biology에 있는 것인데, 서로 출판 년도가 다른 두 책에서 가져온 것이다. 8판까지는 EBS의 그림과 마찬가지로 FADH₂가 내막에 전자를 전달하는 것으로 그려져 있으나 9판부터는 FADH₂가 Complex II에 포근히 안겨 있다. 이러한 표현 방식의 차이는 일반생물학 저자분들이 FAD가 보결족이라는 사실을 중요하다고 생각하여 반영한 것임을 알 수 있다.

혹시 이렇게라도 하면 언젠가 보고 고쳐질 수도 있다는 생각에 다음 그림을 소개한다. 9판에서 가져온 두 번째 그림은 교육과정에도 부합하면서 앞서 설명한 대로 FAD가 '보결족'임을 아주 잘 보여준다.



Copyright © 2005 Pearson Education, Inc. Publishing as Pearson Benjamin Cummings. All rights reserved.

