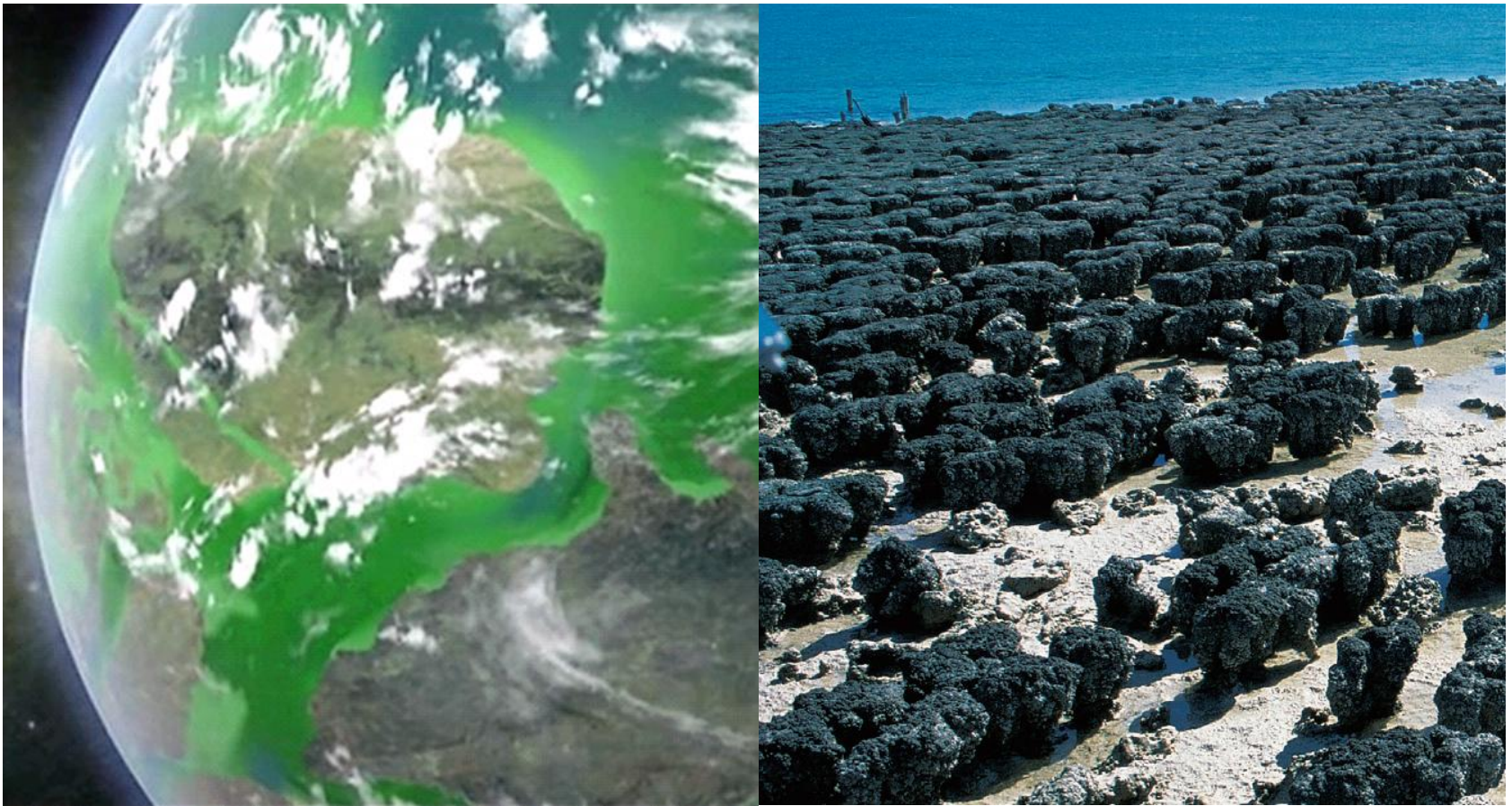


137억년 우주의 진화

제9강 광합성, 산소, 지구초기의 대기

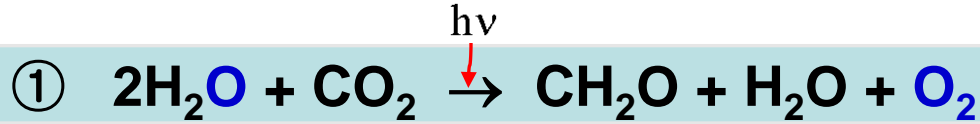


이 내용은 박문호 박사의 <137억년 우주의 진화> 9강 강의를 요약 정리한 것입니다. 여기에 인용된 자료는 대부분 박사의 강의에서 사용된 것을 중심으로 구성하였으며, 전개 내용도 가능한 강의 중 언급된 사항의 전달에 충실토록 노력하였습니다. 혹시 잘못된 내용이 있을경우 즉시 F/Back해 주시면 감사 드리겠습니다.



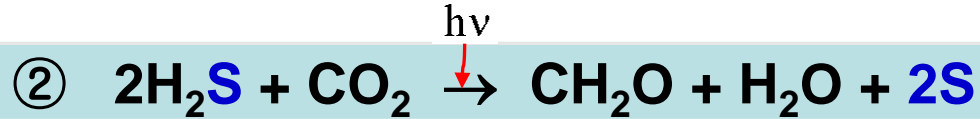
오늘은 산소, 광합성에 관한 내용을 살펴 보도록 하겠습니다.

핵심기억-#15 : 광합성의 화학식



물분해형 광합성의 방정식

식물의 뿌리에서 올라온 물, 대기 중의 이산화탄소가 결합하고 빛 에너지(Photon)가 들어가서 탄수화물(포도당의 간략식)과 물, 산소분자가 나오는 광합성의 방정식으로 시아노박테리아에 의해 광합성이 이루어 지게 됩니다.

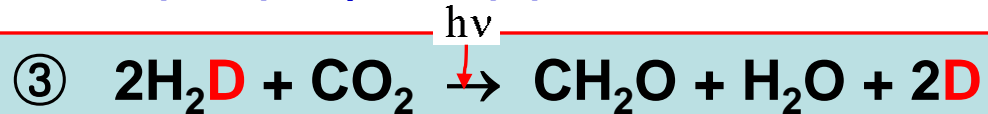


지구초기 광합성의 방정식

시아노박테리아가 나타나기 이전의 경우로, 지구 초기의 역사를 이해하는데 핵심적인 식 입니다. 물 대신 황화수소(H_2S)가 들어가서 탄소동화작용을 하게 되고 나머지는 동일합니다. 부산물로 산소분자 대신 2S가 나온다는 점만 다릅니다.

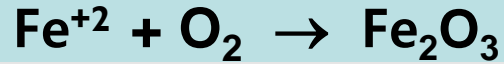
위의 두 식을 광합성의 일반식으로 표현하면 다음과 같습니다.

광합성의 일반식



이 광합성의 일반식은 무수히 많은 버전이 존재합니다. 즉 **D** 대신에 물, 황화수소, 락트산, 유기물(NADH, NADPH..) 등을 대체하여도 광합성은 이루어지게 되는데, 생명체가 이러한 여러 물질로부터 수소(H)를 탈취하게 되는 것이 핵심 내용입니다. 즉, 광합성이란 “어떤 무기물 또는 유기물에서 수소를 탈취해서 CO_2 에 갖다 붙이는 과정” 이고, 이 과정을 통해 포도당을 만들고 부산물로 O_2 , 2S 등 2**D**에 해당하는 물질을 버리게 됩니다. 광합성에서 부산물로 나오는 산소의 유독성을 아는것이 생명진화를 이해하는데 기본이 되고, 산소에 대해 얼마나 철저히 이해하느냐가 지구시스템 전체, 특히 초기 지구 생명의 역사 20억년을 이해 하는 키 워드가 됩니다.

대양속에 녹아 들어간 철과 산소가 결합하여 산화철(Fe_2O_3)을 만들어서 지금 우리가 타고 있는 자동차, 빌딩 등 오늘날의 모든 철기문화가 가능해 진 것입니다.



지구 초기 35억년전 시아노박테리아가 출현하여 햇빛이 들어오는 10m이하의 얕은 바다속에서 광합성을 하여 그 부산물로 나온 O_2 가 2가이온 철(Fe^{+2})과 만나 Fe_2O_3 가 생성되었고 바다 밑바닥에 시루떡과 같이 쌓였는데, 이런 현상이 거의 10억년 동안 지속되었습니다. 그것이 곧 호상철광산이며, 지금도 서호주 지역에 가면 초기 광합성의 주인공인 스트로마톨라이트와 호상철광산을 확인할 수 있습니다.



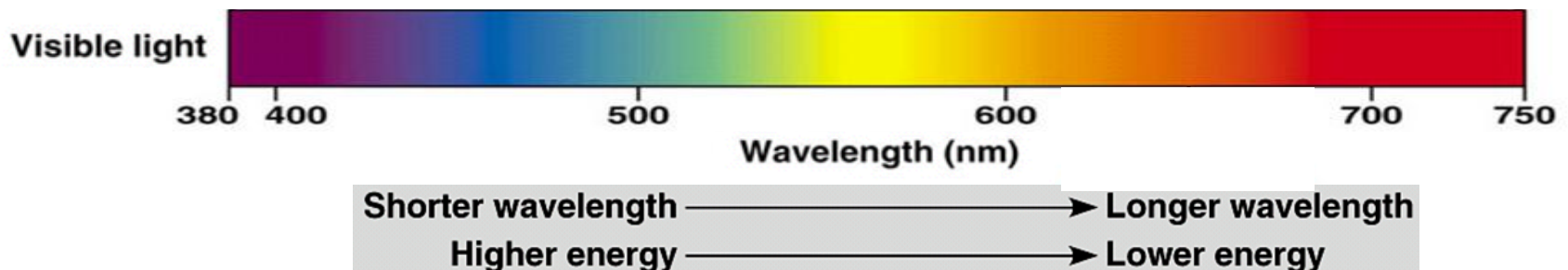
< 2009년 백복스 학습탐사여행에서의 서호주 처트에 있는 호상철광산 및 샤크베이의 스트로마톨라이트 탐사 광경 >

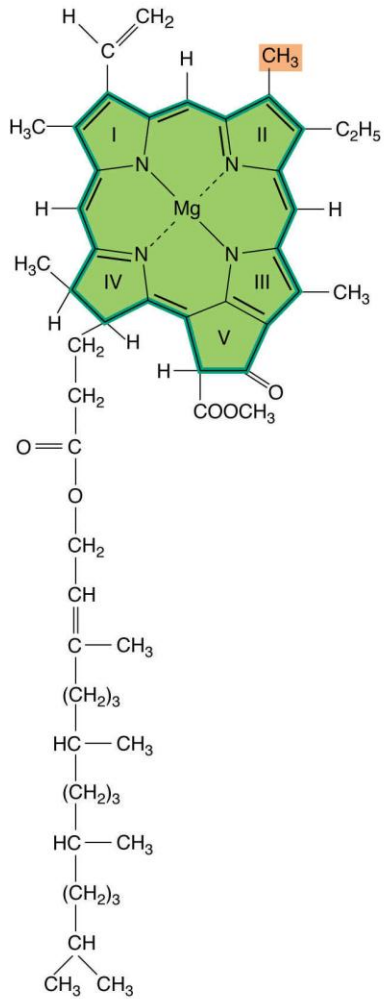
지구 초기 환경의 대기는 질소(N_2)와 이산화탄소(CO_2)로 구성되었고, 산소는 없었습니다. 산소가 생기게 된것은 10억년 이상의 오랜 기간동안 시아노박테리아의 활동이 진행되어 바닷물 속의 철이온이 산화철이 되어 모두 가라앉아 고갈된 이후부터의 광합성으로 생긴 남은 산소가 대기중으로 축적되기 시작하여 농도가 급격하게 높아지게 된 것입니다.

세 가지의 광합성 식이 갖는 의미는 지구 생명을 이해하는 키 워드라는 점입니다. ①번의 광합성을 가능하게 한 “**위대한 시아노박테리아**” - Pax-Cyano 시대가 오기 전에는 ②번의 H_2S 에 의한 탄소동화작용 시스템이 활약하였는데 여기서 어떻게 ①번의 물분해형 광합성 시스템으로 진화가 이뤄졌는가의 과정을 이해하는것이 지구전체의 생명 역사를 이해하는데 중요한 비중을 차지합니다.

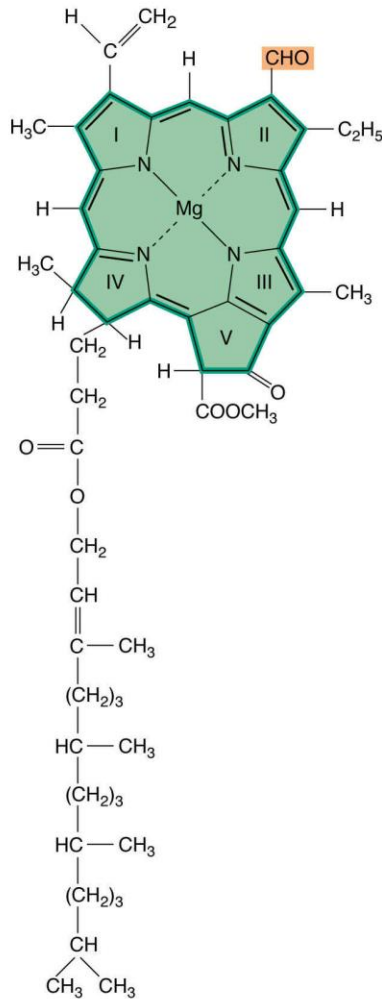
두 시스템의 차이는 흡수되는 태양에너지의 파장대가 다릅니다. ①번의 경우는 680 nm 이고, ②번은 870 nm 입니다. 파장이 클 수록 에너지가 낮고 Control하기가 쉬운데, 초기에는 에너지가 낮은 쪽의 작용에서 점차 큰쪽으로 진화된 것입니다.

지난시간에 Heme을 공부하였는데 엽록소도 Porphyrin구조의 외곽에 붙어있는 분자에 따라 흡수파장이 바뀌게 되며, 생명체가 태양에너지를 받아들이는 Step도 $870 \rightarrow 716 \rightarrow 700 \rightarrow 680$ nm 의 순으로 진화되어 왔고 현재의 **시아노박테리아는 680 nm의 빛을 흡수하는 시스템**인 것입니다. 680 nm의 파장은 약간 붉은색인데 이를 흡수하기 때문에 지구상의 식물이 그 보색인 초록색을 띄게 되는것입니다.

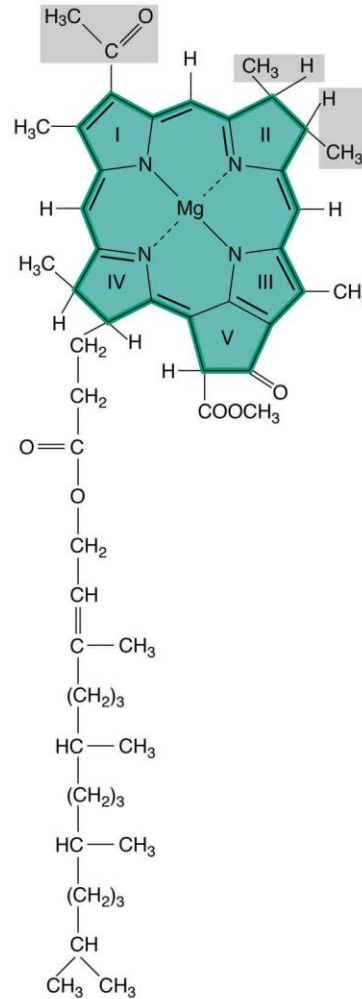




Chlorophyll *a*

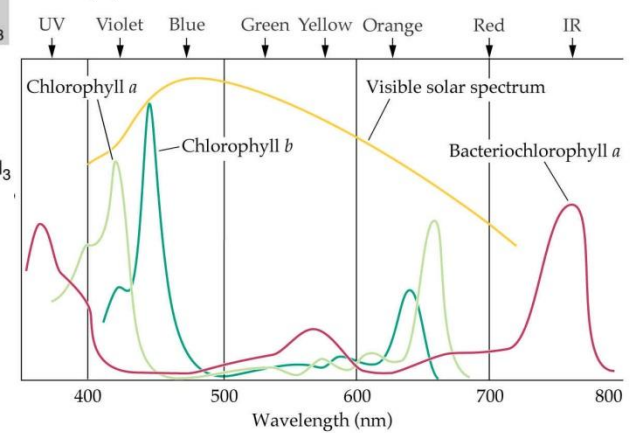


Chlorophyll *b*

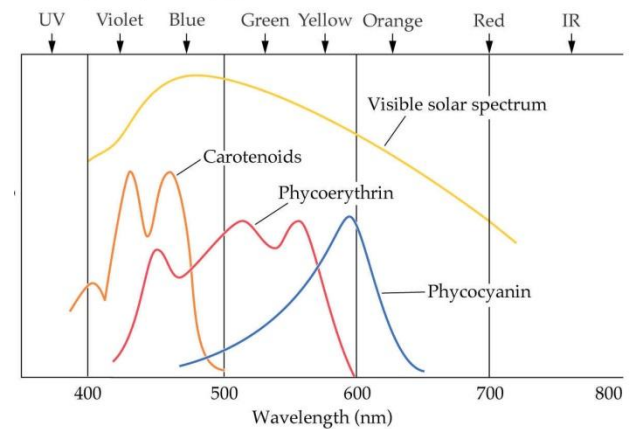


Bacteriochlorophyll *a*

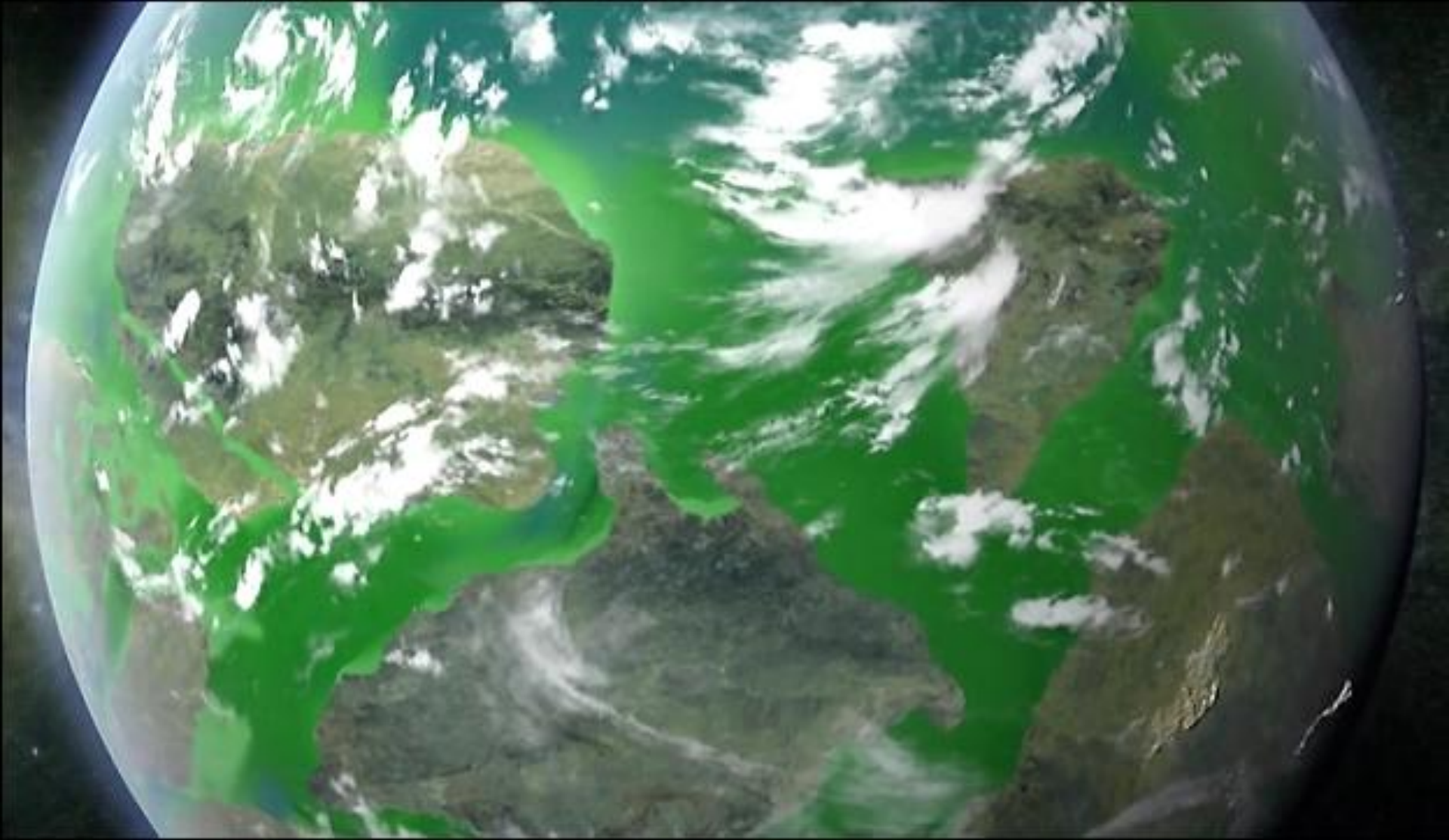
j) Chlorophylls



i) Other photosynthetic pigments



엽록소의 Porphyrin 구조의 외곽에 붙어있는 분자에 따라 빛을 흡수하는 스펙트럼대가 다르게 되며 Chlorophyll *a*, *b*, *c* 등으로 구분됩니다.

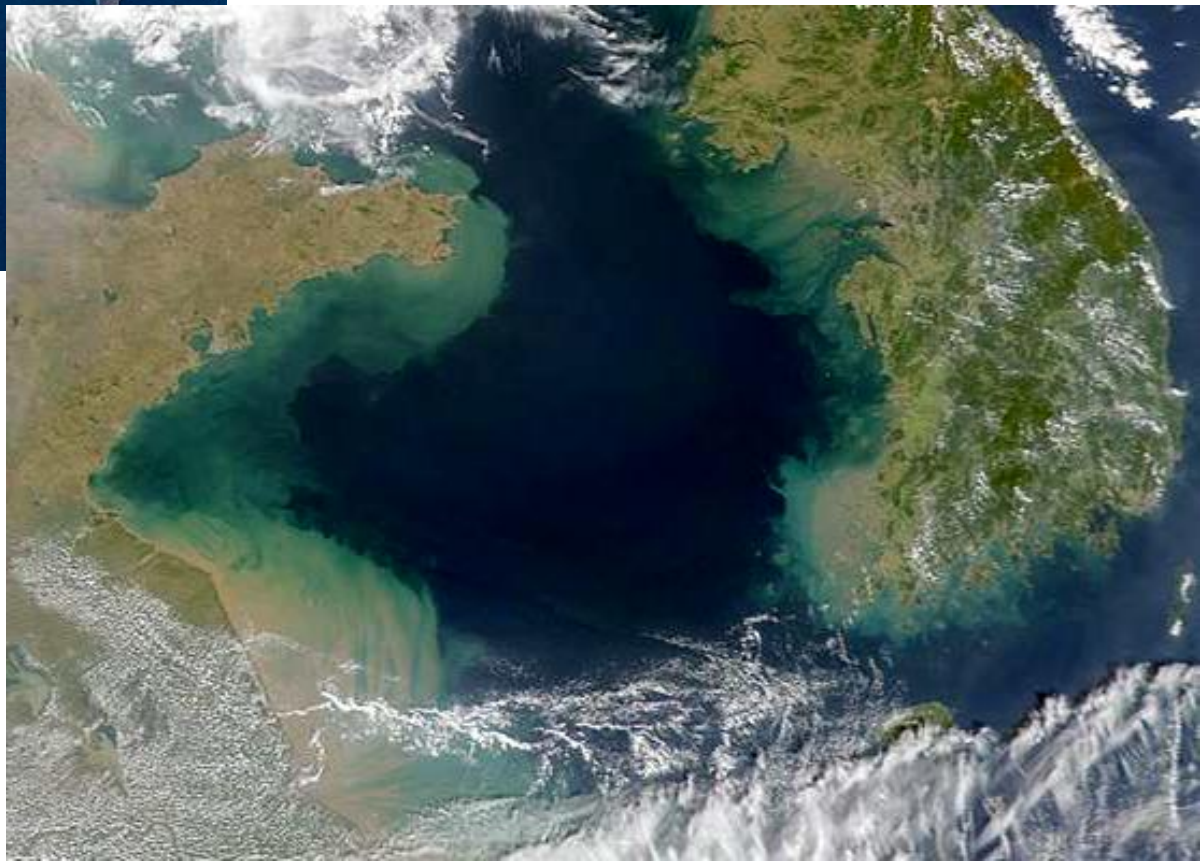


오늘날의 지구도 역시 Pax-Cyano의 시대입니다. 엽록체, 시아노박테리아에 의한 광합성으로 산소가 만들어지고 지구 환경 전체가 유지되고 있는 것입니다. 인공위성에서 본 지구의 모습을 보면 많은 부분이 초록색을 띠는 것도 이를 입증해주고 있는 것이라 볼 수 있습니다.



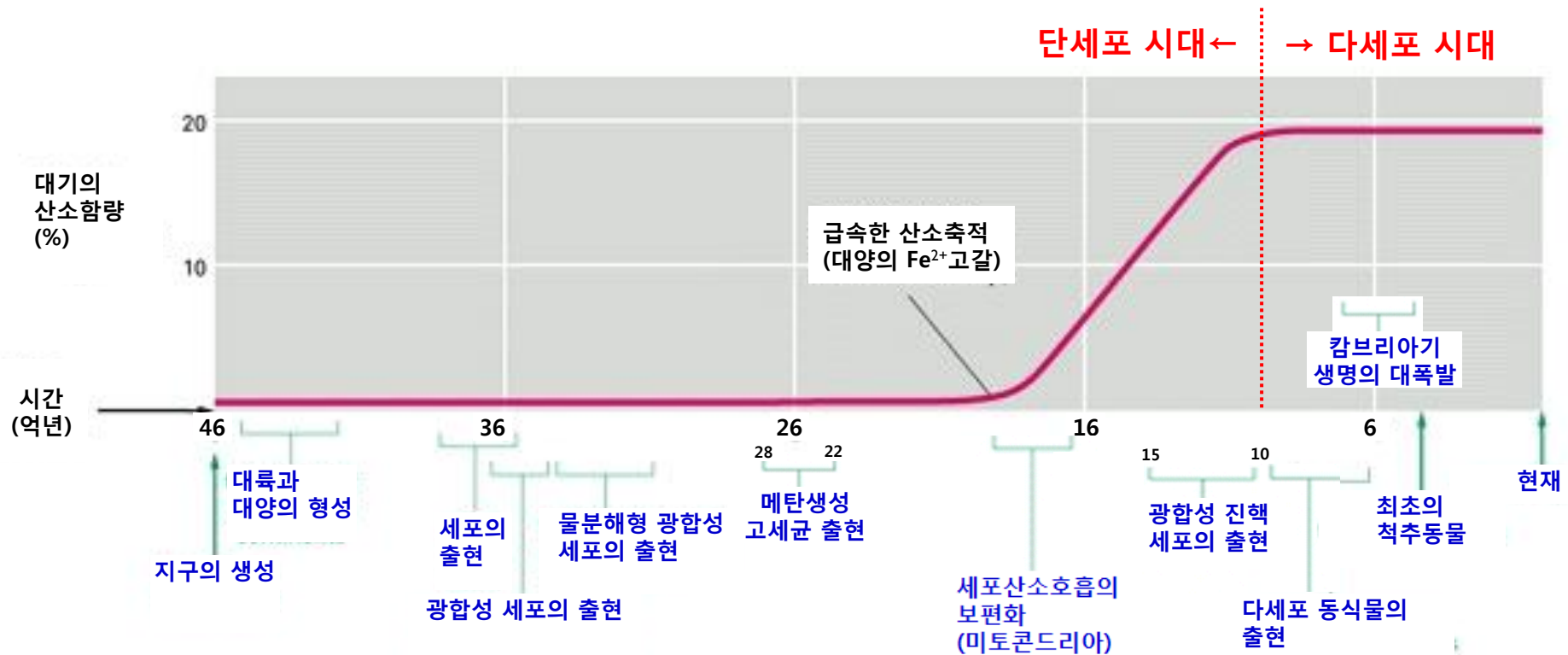
호주의 샤크베이의 인공위성 사진입니다.
만의 해안 대륙붕이 왜 파란색으로 보일까요 ?
또한 대륙은 왜 붉은색을 띄고 있을까요 ?

이것은 전 지구적 현상입니다.
바다에 있는 시아노박테리아와 붉은색의
대륙이 대조를 이루고 있습니다..모두가
광합성 현상의 결과와 부산물인 것입니다.



중국 산둥반도와 우리나라
서해안의 인공위성 사진입니다.
황해를 중심으로한 해변의
수백 Km가 시아노박테리아로
인해 푸른색을 띄고 있습니다.

핵심기억-#16 : 지구의 생명 진화과정



지구의 생명 진화 역사를 그려보겠습니다. 가로축에는 지구 나이인 46억년을 10억년 단위로 구분한 시간을, 세로축에는 대기중 산소 함량을 기준으로 연대별 주요 발생 이벤트를 표시해 보면 다음과 같습니다.

- ☞ 지구생성 약 1억년 후 ~ 40억년 전 : 대륙과 대양의 생성, 대륙이 먼저생기고 대기 중의 수증기가 식으면서 응축되어 대양이 형성 됨
- ☞ 40억년 전 ~ 38억년 전 : 최초 세포의 출현
- ☞ 약 36억년전 내외 : 광합성 세포의 출현 (H_2S 를 이용하는 광합성을 하는 세포)

☞ 35억년 전 ~ 약 3억년 : 물분해형 광합성 세포, 즉 시아노박테리아의 출현, 이때는 광합성을 하여도 대기중의 산소는 거의 없는 상태이고 대양 속에 녹아있는 상태 (Fe_2O_3 을 만드는 상태)

☞ 약 28억 ~ 22억년 전 : 메탄생성 고세균이 지구의 주인공인 시기

※ 지구환경에 영향을 준 3가지 세균 : 황산염환원세균, 메탄생성고세균, 시아노박테리아

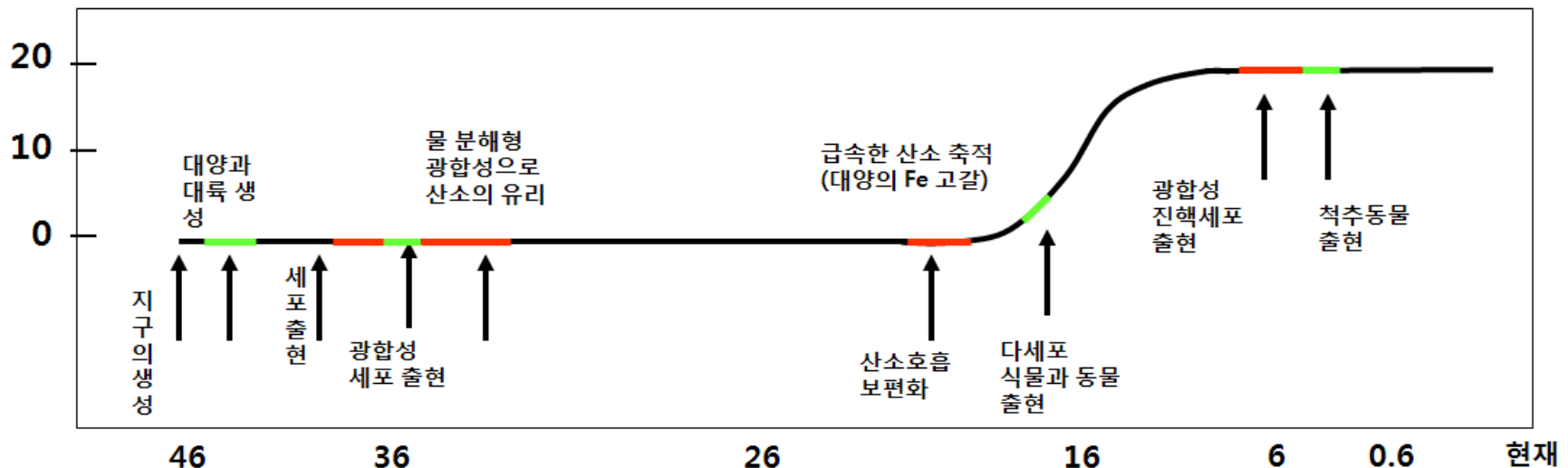
☞ 약 20억년 전 ~ 16억년 전 : 세포 산소호흡의 보편화, 미토콘드리아

☞ 약 15억년 전 ~ 10억년 전 : 광합성 진핵세포의 출현

☞ 약 10억년 전 ~ : 다세포 생물의 출현 (함께 죽는 시스템의 개발) 약 10억년전을 기준으로 그 이전을 단세포 시대, 이후를 다세포 시대로 구분

※ 지구역사의 70%기간 (36억여년) 동안은 눈에 보이지 않는 단세포의 시대였다.
다세포 생물의 출현시기는 대기중 산소농도가 약 20%로 산소와 밀접한 관련이 있다.

☞ 약 6억년전 : 캄프리아기 생명의 대폭발로 척추동물의 조상인 '피카이아'가 출현 (5억4천만년 전)





스트로마톨라이트(Stromatolite)는 시아노박테리아에 의해 만들어진 퇴적 구조로 지구생명의 근원이라 할 수 있습니다. 광합성을 할 수 있는 원핵 미생물인 시아노박테리아는 물을 분해해 대기 중에 산소를 방출, 지구를 생명이 살 수 있는 환경으로 만들었습니다.

Bacteria – Impacts on other organisms, including Human Society

Decomposition

Photosynthesis

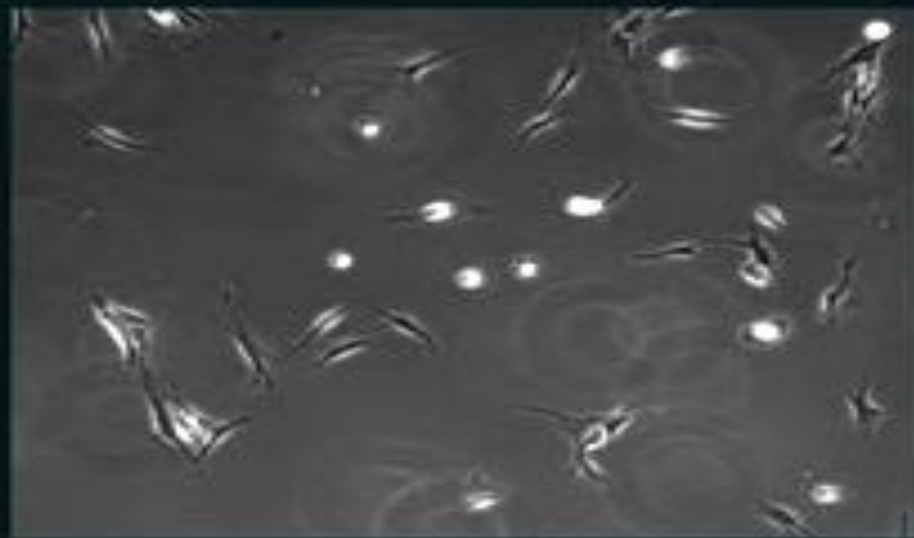
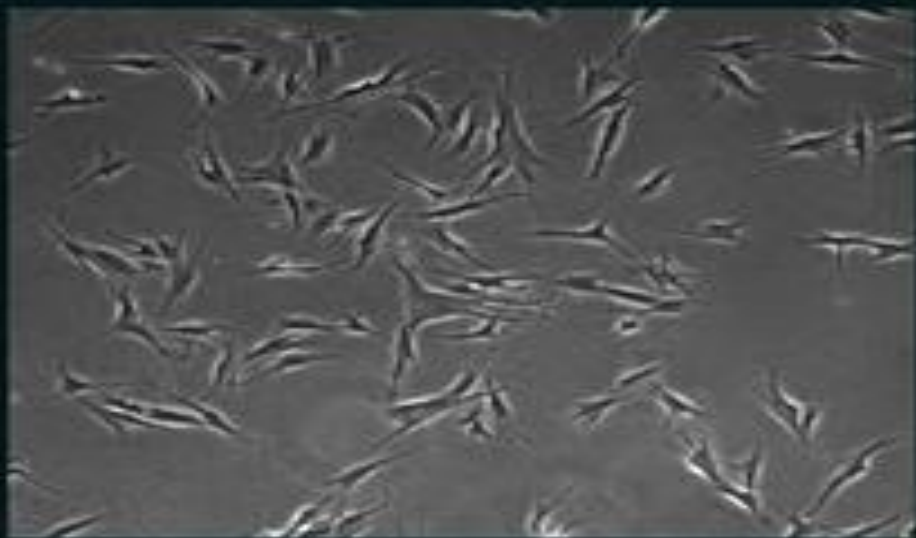
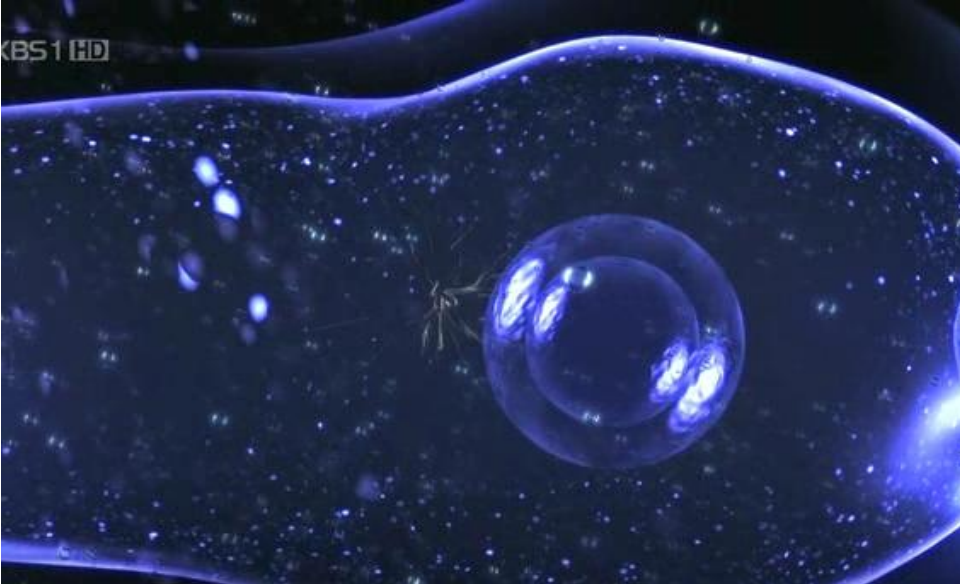
Especially common
in the
cyanobacteria



시아노박테리아는 인간사회 전체를 둘러싸고 있는 전 지구적 현상입니다. 사진의 호수에 있는 시아노박테리아나 숲의 나무에 있는 시아노박테리아나 모두가 모두 동일한 현상으로 광합성을 하면서 살아가고 있는 것입니다.

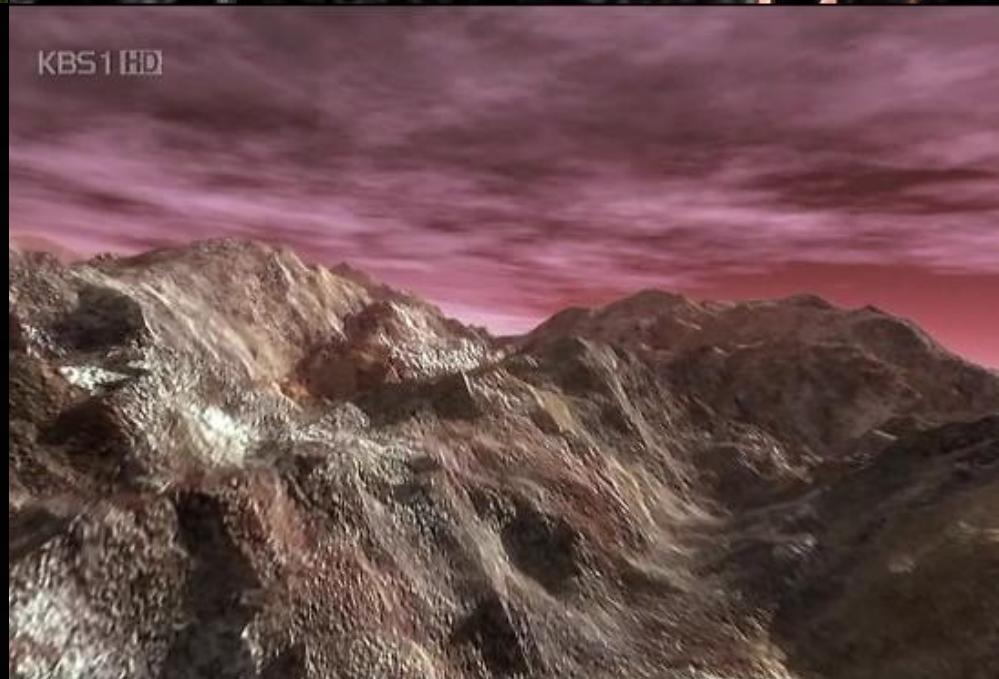
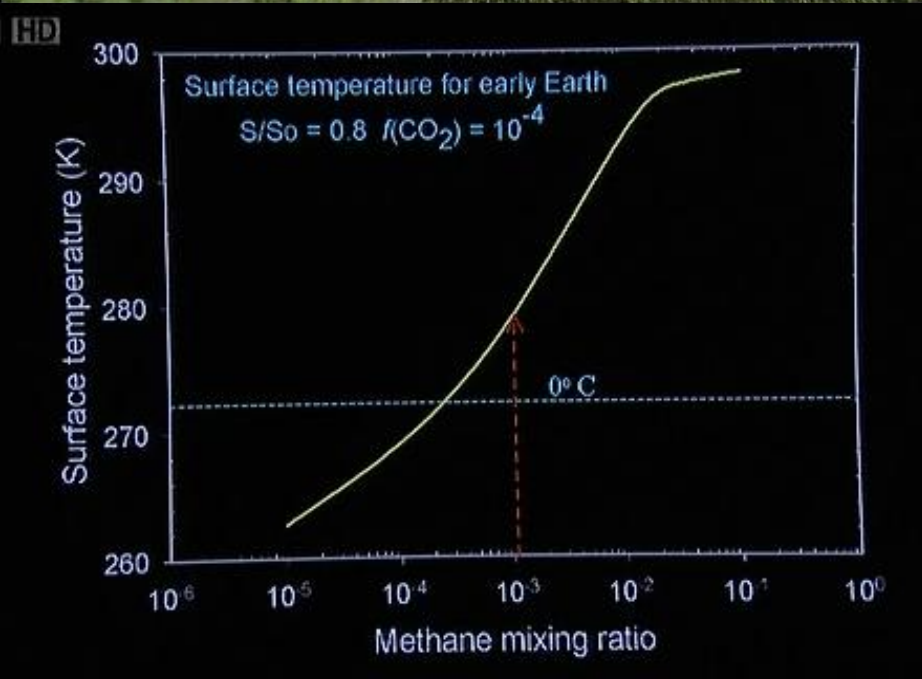


대기중 산소 농도에 따라 다세포 생물이 나타나게 된 것입니다. 산소 농도가 거의 0% 이었던 약 22억년까지는 원핵세포, 1% 대였을때인 6억년전 까지는 진핵세포, 그리고 산소농도가 급격하게 높아져 약 20% 이상이 되었을때인 약 6억년 전에 비로서 다세포 동물이 출현하고, 척추동물의 조상인 피카이아가 나타나게 됩니다.



콜라겐을 섞은 세포

다세포 동물 단백질에서 가장 많은 것이 콜라겐인데, 콜라겐은 산소농도가 아주 높은 상태에서 만 합성이 가능합니다. 괴혈병의 경우 콜라겐의 문제와 밀접한 관계가 있습니다.



메탄생성고세균은 약 28~22억년까지 지구에 퍼져있던 박테리아로서 질소가스를 아미노산과 같은 유기물 생성의 공급원으로 이용하는 질소고정반응을 하였는데, 이들의 생활사를 보면 화학삼투압 연계가 원시상태부터 있어 왔음을 알 수 있게 됩니다.

'팍스-시아노'의 시대

지구 역사 46억년 동안 어떤 일이 일어 났는지를 시간 순서대로 살펴 보도록 하겠습니다.
전체의 지구 생명의 흐름에서 보면 약 10억년 전의 다세포 생물이 출현하기 전까지 전체의 약 70% 정도가 박테리아, 곧 '팍스-시아노(PAX-Cyano) 시대' 인 것입니다.

여러분 이 그림을 보시면 지구 생명 흐름에 대해 어떤 커다란 느낌이 올 것입니다..

4600 million years ago

(4.6 billion years ago)

Formation of Earth

4500 million years ago

(4.5 billion years ago)

Accretion of Earth
Formation of the Moon

4300 million years ago

(4.3 billion years ago)

Iron Catastrophe
Earth separates into layers

4400 million years ago

(4.4 billion years ago)

Accretion of Earth

4200 million years ago

(4.2 billion years ago)

Early Atmosphere
No Life

4100 million years ago

(4.1 billion years ago)

Early Atmosphere
No Life

4000 million years ago

(4.0 billion years ago)

Oldest Rocks on Earth

3900 million years ago

(3.9 billion years ago)

**Liquid Water Present
Early Oceans Form**

3800 million years ago

(3.8 billion years ago)

**First Bacteria
(Prokaryotic)**

3700 million years ago

(3.7 billion years ago)

Bacteria

3600 million years ago

(3.6 billion years ago)

Bacteria

3500 million years ago

(3.5 billion years ago)

Stromatolites

**Cyanobacteria
(aka blue green algae)**

Photosynthesis Produces Oxygen!

3400 million years ago

(3.4 billion years ago)

Stromatolites

**Cyanobacteria
(aka blue green algae)**

Photosynthesis Produces Oxygen!

3300 million years ago

(3.3 billion years ago)

Stromatolites

**Cyanobacteria
(aka blue green algae)**

Photosynthesis Produces Oxygen!

3200 million years ago

(3.2 billion years ago)

Stromatolites

**Cyanobacteria
(aka blue green algae)**

Photosynthesis Produces Oxygen!

3100 million years ago

(3.1 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

3000 million years ago

(3.0 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

2900 million years ago

(2.9 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

2800 million years ago

(2.8 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

2700 million years ago

(2.7 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

2600 million years ago

(2.6 billion years ago)

Stromatolites

Cyanobacteria

Photosynthesis Produces Oxygen!

2500 million years ago

(2.5 billion years ago)

Stromatolites

Photosynthesis Produces Oxygen!

2400 million years ago

(2.4 billion years ago)

Stromatolites

Photosynthesis Produces Oxygen!

2300 million years ago

(2.3 billion years ago)

Stromatolites

Photosynthesis Produces Oxygen!

2200 million years ago

(2.2 billion years ago)

Stromatolites

Photosynthesis Produces Oxygen!

2100 million years ago

(2.1 billion years ago)

Stromatolites

Photosynthesis Produces Oxygen!

2000 million years ago

(2.0 billion years ago)

Beginning of Oxygenated Atmosphere

First Pollution Crisis!

Redbeds

Evidence of significant free oxygen

1900 million years ago

(1.9 billion years ago)

Oxygenated Atmosphere

Cyanobacteria still producing oxygen!

1800 million years ago

(1.8 billion years ago)

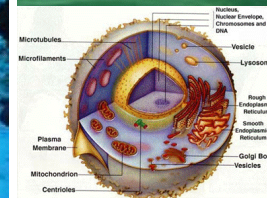
Oxygenated Atmosphere

Cyanobacteria still producing oxygen!

1700 million years ago

(1.7 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes Appear



Cells get a nucleus!

Still Present:

1600 million years ago

(1.6 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes

Still Present:

1500 million years ago

(1.5 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes

Still Present:

1400 million years ago

(1.4 billion years ago)


Single-celled Eukaryotes

Still Present:

1300 million years ago
(1.3 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes

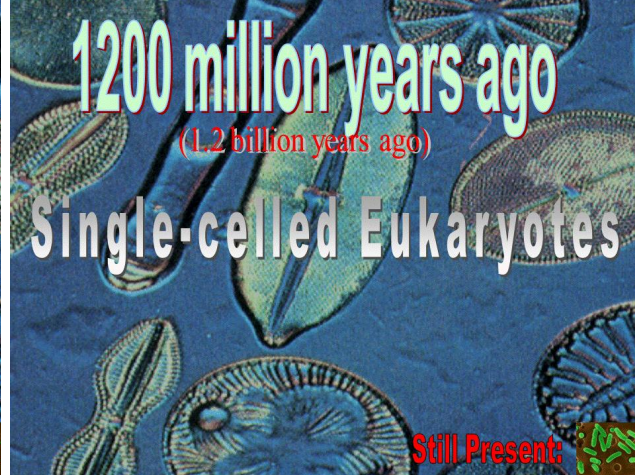
Still Present:



1200 million years ago
(1.2 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes

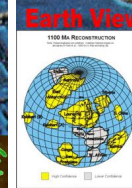
Still Present:



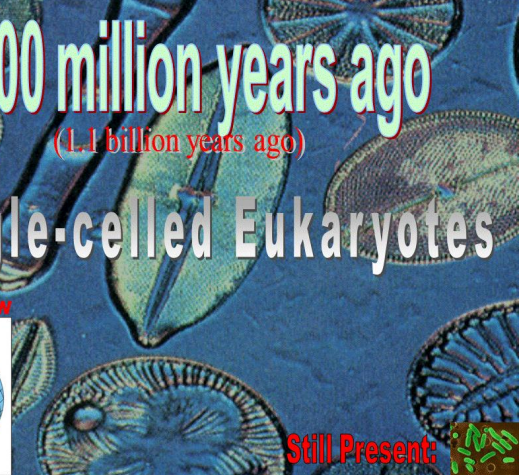
1100 million years ago
(1.1 billion years ago)

Single-celled Eukaryotes

Earth View



Still Present:



1000 million years ago
(1.0 billion years ago)

Multicellular Organisms Appear

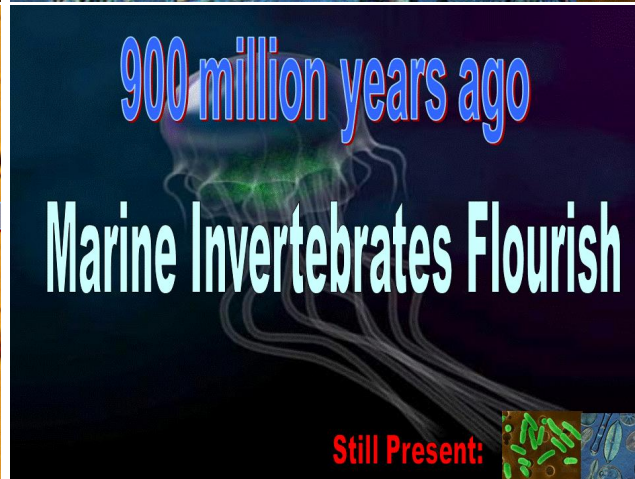
Marine Invertebrates
Soft Bodies



900 million years ago

Marine Invertebrates Flourish

Still Present:



800 million years ago

Marine Invertebrates Flourish

Earth View



Still Present:



700 million years ago

Marine Invertebrates Flourish

Earth View



Still Present:



600 million years ago

Ediacara Fauna

Earth View



Still Present:



500 million years ago

543 mya
First Hard Parts
(Shells & Bones)
First Primitive Fish

Life Migrates to Land
470 mya

Earth View




438 million years ago

Mass Extinction

400 million years ago

Most life still underwater

First Seed Plants

First Amphibians

Still Present:

367 million years ago

Mass Extinction

300 million years ago

Vast Coal Swamps on Land

Origin of Many Animals

amphibians, sharks, reptiles, insects

Earth View



245 million years ago

Mass Extinction

90 % of all species perish

Earth View



PERMIAN
225 million years ago

200 million years ago

Age of the Dinosaurs and Reptiles

Plant Life: Ferns & Gymnosperms

First mammals

Earth View



TRIASSIC
200 million years ago

Still Present:

100 million years ago

First birds

First Placental Mammals

First Flowering Plants

Still Present:

65 million years ago

Mass Extinction

Extinction of the dinosaurs and others

Earth View



CRETACEOUS
65 million years ago

65 million years ago to Present Day

(0 mya)

Dominance of
flowering plants, insects
mammals, and birds

Humans 5 mya

Earth View



PRESENT DAY

Still Present:

※ 위의 전체 파일(.ppt)을 별도로 첨부하였습니다. 감상하실 분은 다운로드 받으셔서 보시기 바랍니다.

아직도 우리는 Pax-Cyano 시대에서 한 발도 벗어나지 못했습니다. Pax-Cyano 시대의 진풍경으로 조용히 가슴에 손 얹고 감상하면서 음미해 볼 사진을 한 장 소개하겠습니다.

지난 지구 생명의 역사상 지구 전체를 대변할 수 있는 사진입니다.

Deep Blue의 하늘과 함께 유칼립스 나무, 풀 그리고 산화철의 퇴적층인 붉은색의 암석... 모두가 지구 역사의 70%를 설명할 수 있는 진면목, 시아노박테리아의 활동인 것입니다.

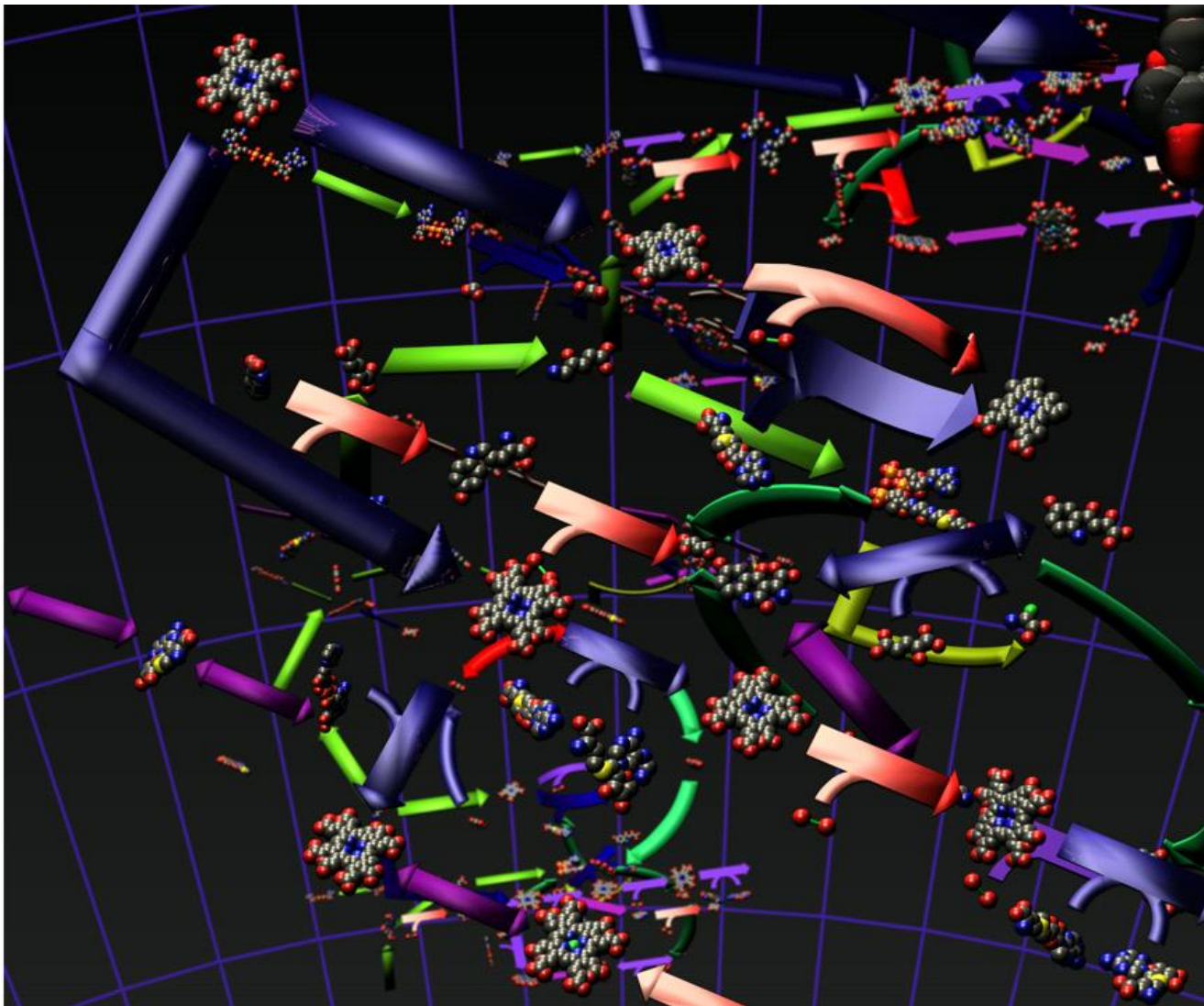
그 시아노박테리아의 활동의 결과로 다세포동물이 출현을 하였고, 그들(과학자들)이 25억 년 전의 대상(자연)이 무엇인지를 묻고있는 것입니다. 크게 보면 결국 그것이 그것인데도 말입니다...

사진 속에서 탐험을 하고 있는 과학자들이나, 이 산화철이나, 숲의 시아노박테리아나, 하늘의 구름, 수증기... 모두가 동일한 것입니다. '생명의 Unique함'... 지구상에서 생명 시스템이 무언가 하는 것을 뼈저리게 느낄 수 있는 사진입니다.



Scientists studied 2.5 billion-year-old sediments from under Australia's red-weathered hills.





이것은 Simulating biological networks, 생명시스템 본질을 그림으로 나타낸 것입니다. 그림 속에 보면 무수히 많은 Porphyrin이 존재하는 것이 보입니다. 지난 시간에 수 없이 강조했던, 전자를 실어 나르는 Porphyrin이 생체시스템의 핵심을 이루고 있는 것입니다.

6/17 일자 서울대 김희준 교수님의 컬럼입니다. 내용을 보면 우주의 기원부터 생명의 원리까지 흐름을 총체적으로 이해할 수 있는 과학 교육의 중요성과 우리나라 과학교육의 문제점을 강조하면서, 우주의 진화과정을 거대한 도미노 현상에 비유하고 있습니다.

우리가 지금 공부하고 있는 137억년 우주 진화의 흐름, 100복스가 지향하고 있는 과학 문화 운동의 필요성과 정확히 일맥 상통하는 내용이라고 아니할 수 없습니다....

[과학세상/김희준] 우리가 알아야 할 ‘우주 도미노’

오늘날 과학은 5000년의 인류문명, 500년의 근대과학, 그리고 최근 50년의 통합을 거쳐 이제 바야흐로 우주 전체의 모습을 조감하고 우주 진화의 줄거리를 파악하게 됐다. 우주의 기원부터 생명의 원리까지 자연을 총체적으로 파악하게 된, 기적과도 같은 시기에 사는 우리는 자라나는 세대에게 과학의 진면목을 제대로 전달할 책임이 있다.

내년부터 고등학교 1학년 학생은 ‘2009 개정 교육과정’에 따라 인류가 자연을 파악하고 문명을 일으킨 바의 핵심을 과학 과목에서 배운다. 전반부에서는 ‘우주와 생명’이라는 대주제 아래 빅뱅에서 오늘에 이르기까지 우주 진화의 열쇠가 되는 사건을 관련 원리와 함께 배운다. 종전에 물리 화학 생물 지구과학으로 나뉘어 가르치던 내용이 큰 틀 안에서 유기적으로 연결되어 있다는 사실을 통해 자연에 대한 호기심을 기르고 과학적 사고방식을 익히게 한다. 후반부에서는 과학과 인류문명의 긴밀한 관계를 이해하여 현대사회를 살아가는 민주시민으로서의 과학적 소양을 기르게 된다.



어떻게 하면 어려운 과학을 쉽고 재미있게 가르치고 배울 수 있을까? 비결은 한마디로 중요한 내용을 충분히 이해하도록 하는 것이다. 비교적 덜 중요한 내용은 간략히 다뤄야 한다. 그렇게 해서 번 시간을 투자해서 정말 중요한 내용을 확실히 이해하도록 하자는 말이다. 이해를 못하면 어렵고 이해를 하면 쉽게 느낀다. 게다가 이해하는 내용이 중요하다는 점을 인식하면 재미까지 느끼게 된다.

아쉽게도 과거도 그랬고 지금도 그렇고 과학을 어렵고 재미없게 가르치고 배우는 것이 현실이다. 과학을 단편적 지식의 조합으로 배우기 때문에 배우는 내용의 중요성과 의미를 제대로 파악하지 못한다. 그래서 마치 못해 암기식으로 배우고 나면 얼마 안 돼 잊어버리게 마련이다. 그렇기에 사람들 대부분이 평생 과학은 어렵고 재미없다는 인상을 지니고 산다.

우주의 진화는 하나의 거대한 도미노라고 볼 수 있다. 우주적 도미노에서 첫 번째 도미노가 쓰러지는 순간은 우주의 기원인 빅뱅에 해당한다. 빅뱅은 빛과 물질, 쿼크와 렙톤으로 이어지고, 쿼크와 렙톤은 양성자 중성자 전자로 이어진다. 그리고 노자가 삼생만물(三生萬物)이라고 말한 대로 양성자 중성자 전자의 세 가지 입자의 조합으로 우리 주위의 삼라만상이 도미노처럼 펼쳐진다.

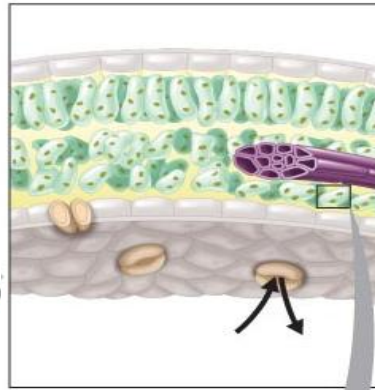
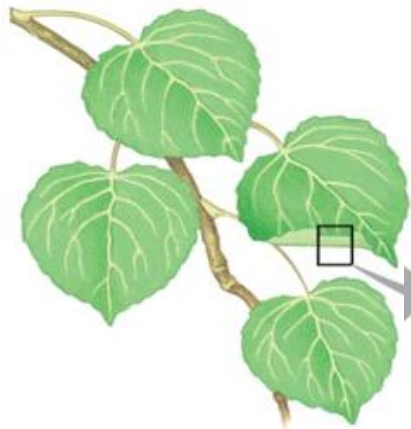
앞부분 도미노가 다음 도미노를 쓰러뜨려 주어야 다음, 다음으로 연결되어 막판에 멋진 결과가 얻어진다. 그렇다면 당연히 초기 우주에서 일어난 사건으로부터는 자연의 가장 기본적인 원리를 찾아볼 수 있고, 뒤로 갈수록 기본 원리로부터 파생되는 구체적 결과물이 나타난다. 우리 은하도, 태양계 전체도, 그리고 생명의 행성인 지구도, 우리 자신도 우주적 도미노의 결과물이다.

과학은 하나의 도미노가 다음 도미노로 이어지는 과정과 거기에 들어있는 원리를 이해하고자 하는 노력이다. 빅뱅의 첫 도미노가 다음 도미노로 이어지는 초기 우주의 과정도 중요하고 최초로 원자가 만들어지는 과정, 최초로 별과 은하가 만들어지는 과정, 그리고 최초로 생명체가 태어나는 과정 하나하나가 다 흥미롭고 빼놓을 수 없는 과정이다.

우주의 역사에서는 처음 순간에 일어나는 일이 결정적으로 중요하고 후에 일어날 사건의 향방을 결정한다. 초기 우주에서 우주가 팽창하고 온도가 급격히 떨어지면서 기본입자가 뭉치는 과정을 잘 이해하면 뒤의 일은 비교적 쉽게 풀려 나갈 것이다. 물론 초기 우주로 돌아가는 일은 물질의 가장 깊은 곳으로 찾아가는 것이므로 서툴고 어렵게 느껴질 수밖에 없다. 그렇지만 거기에 가장 심오하고 흥미로운 자연의 원리가 숨어 있을지 모른다.

김희준 서울대 화학부 교수

식물 잎사귀 세포의 구조



스트로마 - 엽록체 안의 젤라틴 상태의 기질 리보솜, DNA, 탄수화물 합성에 필요한 효소

틸라코이드 - 색소체 분자를 가지고 있는 구조물

그라나 - 10~20여개의 틸라코이드가 겹쳐져 만들어진 구조물

Chloroplasts

Vacuole

Nucleus

Cell wall

엽록체

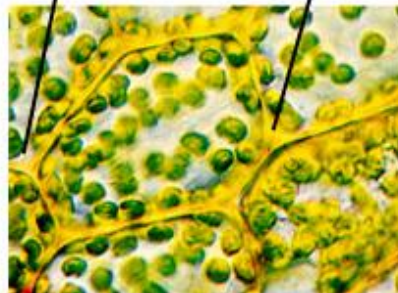
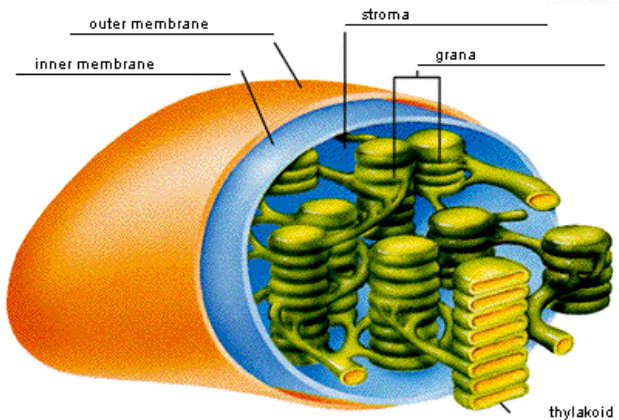
Outer membrane

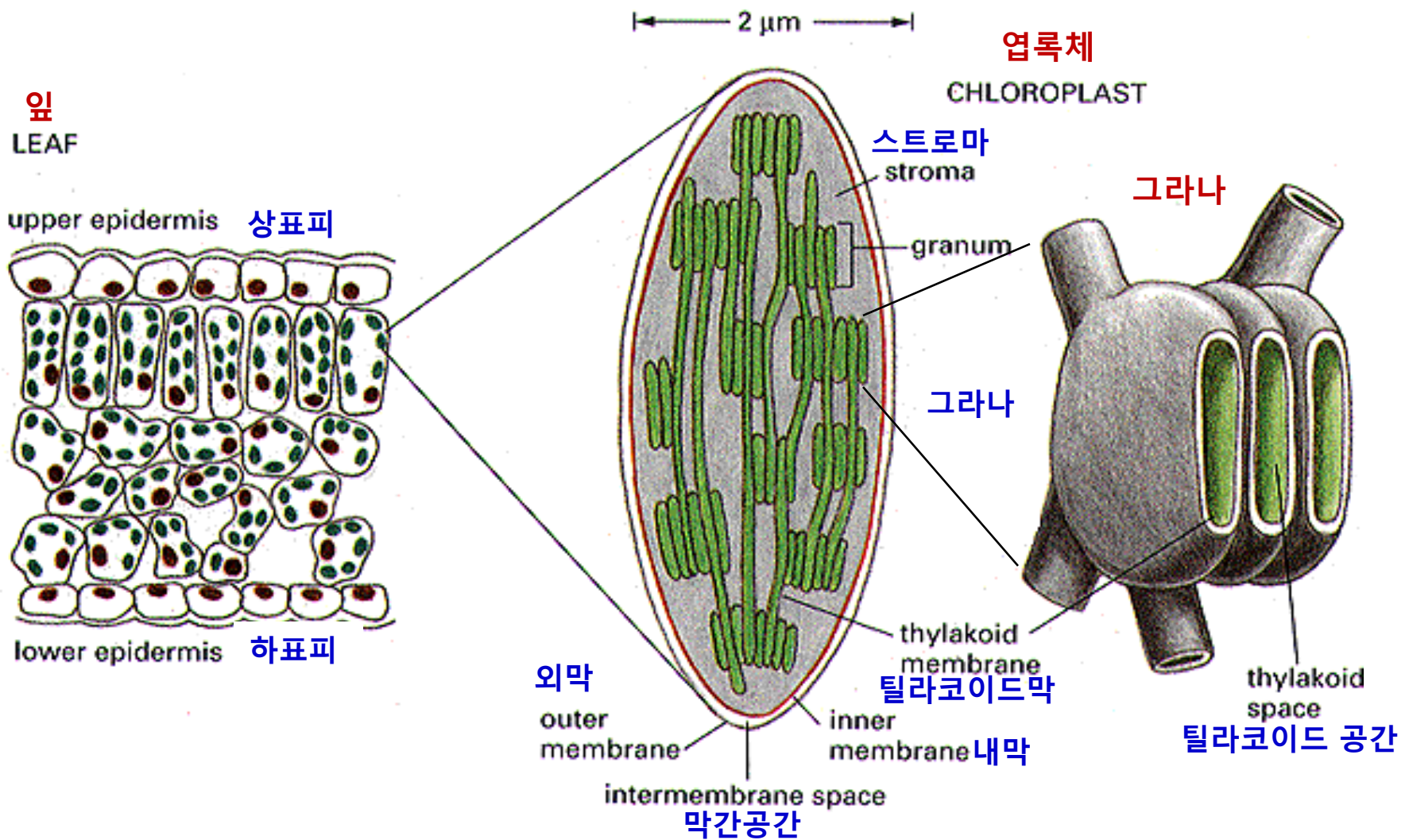
Inner membrane

Granum

Stroma

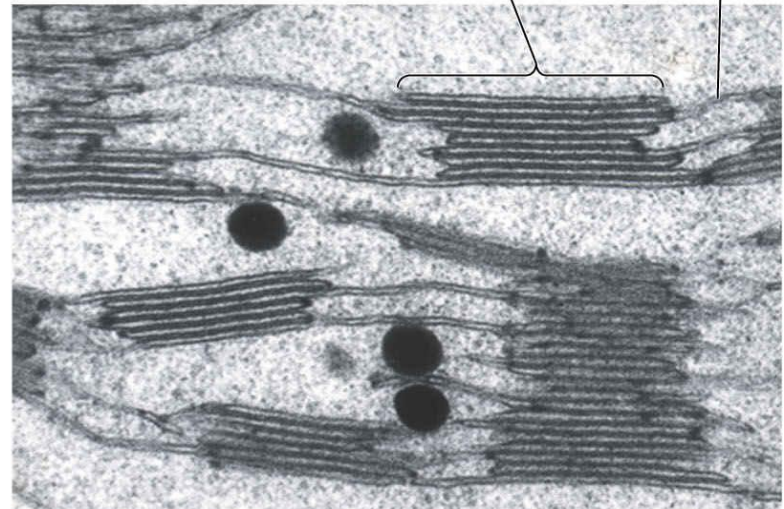
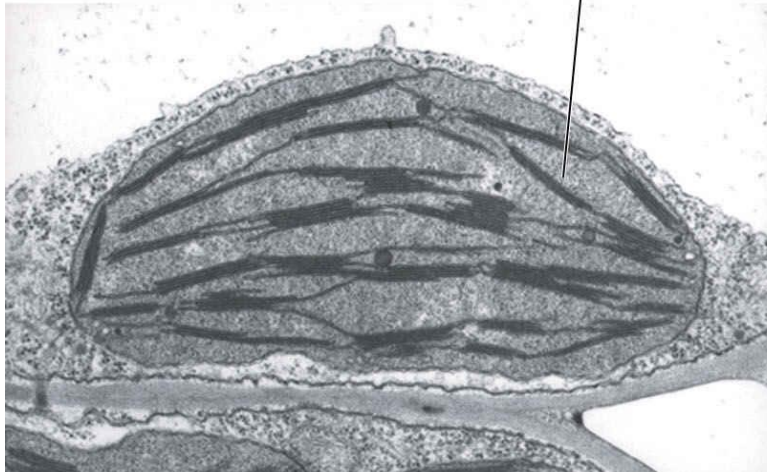
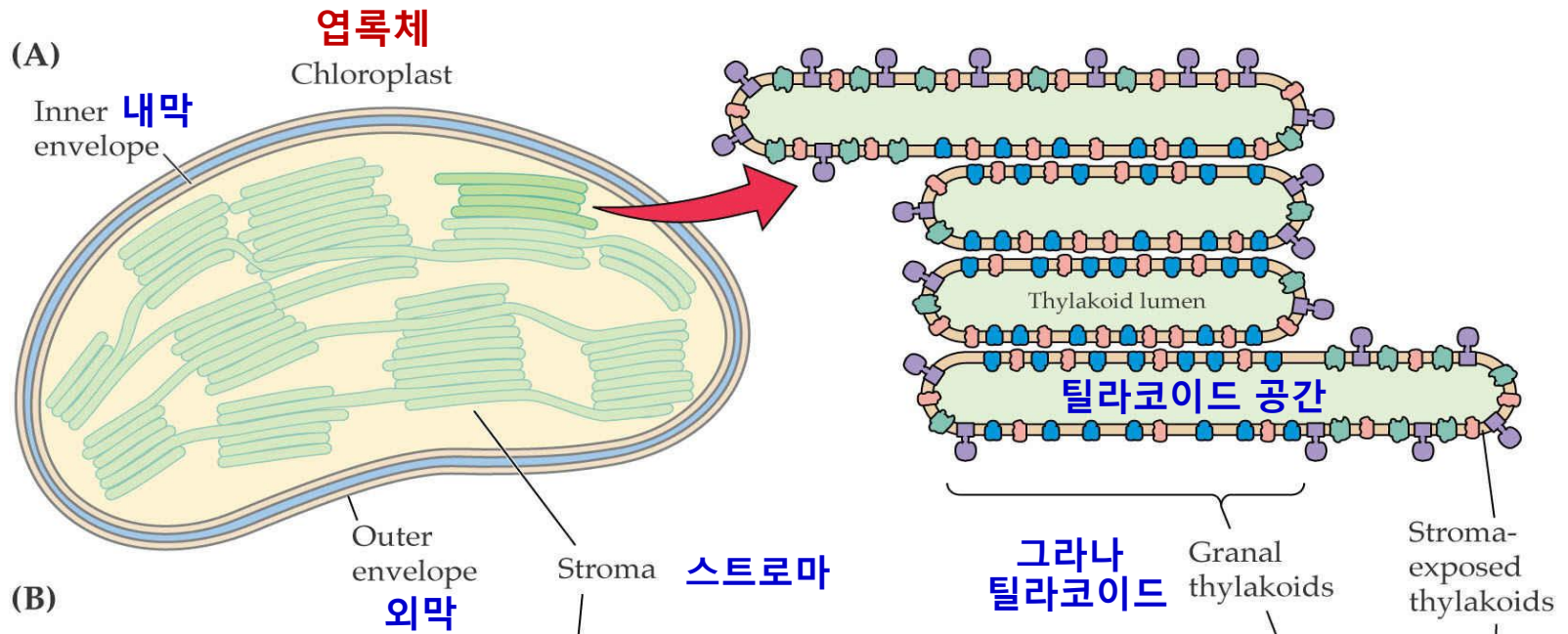
Thylakoid

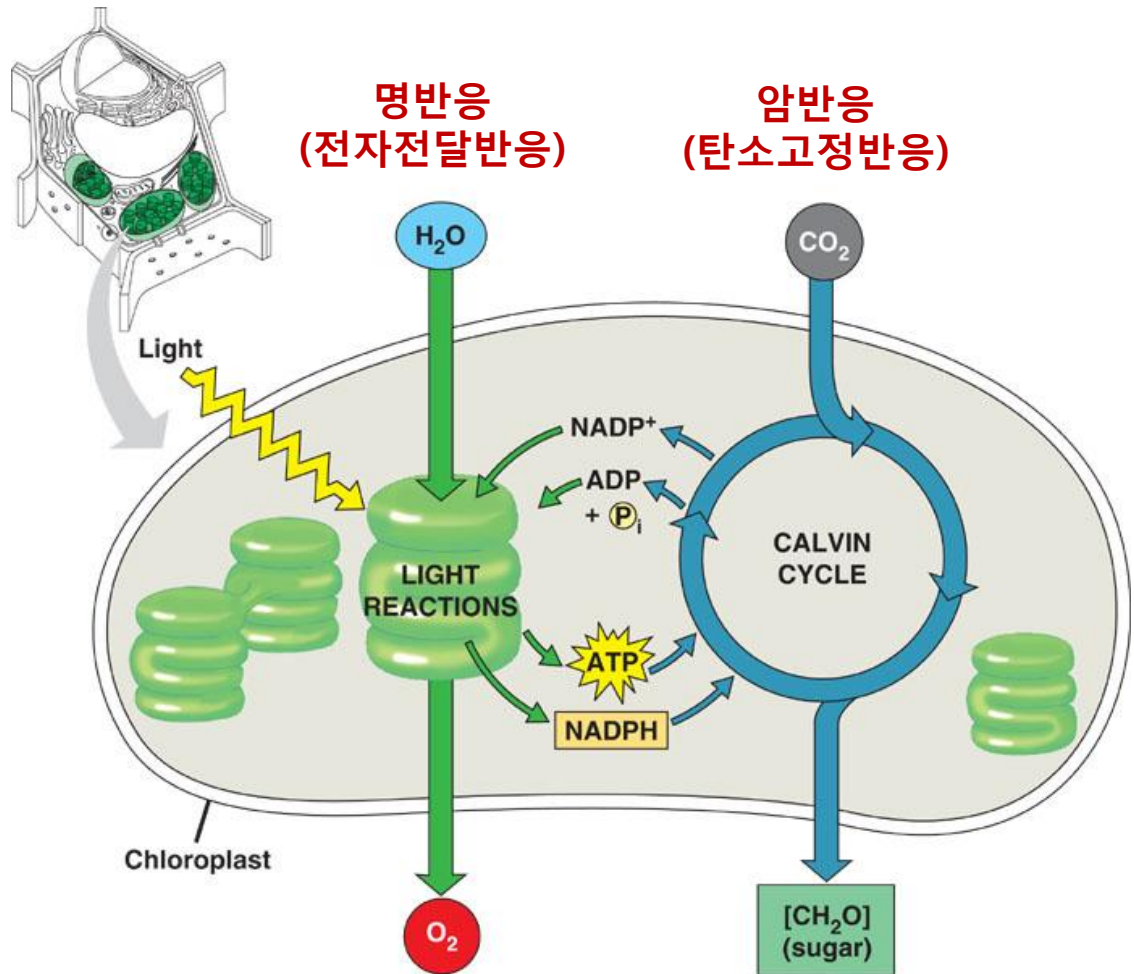
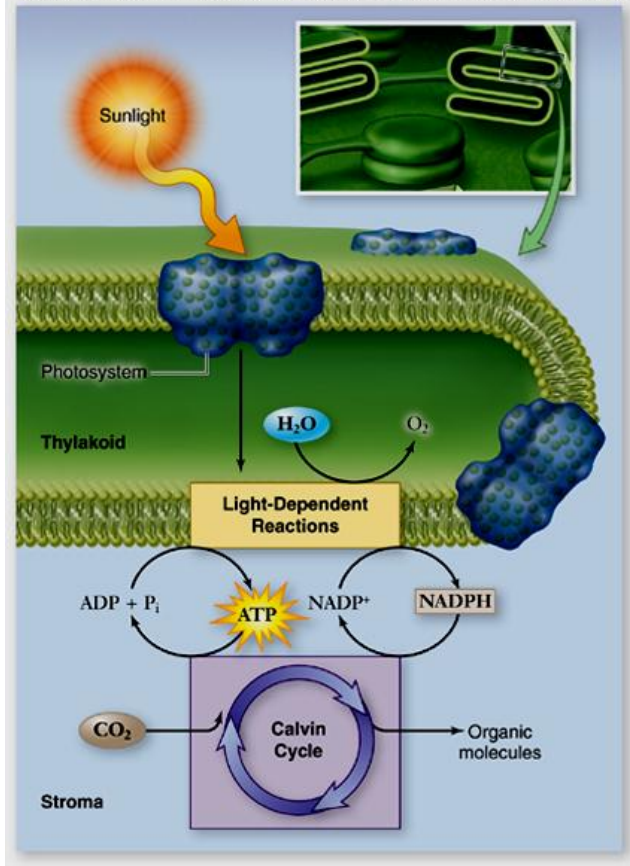




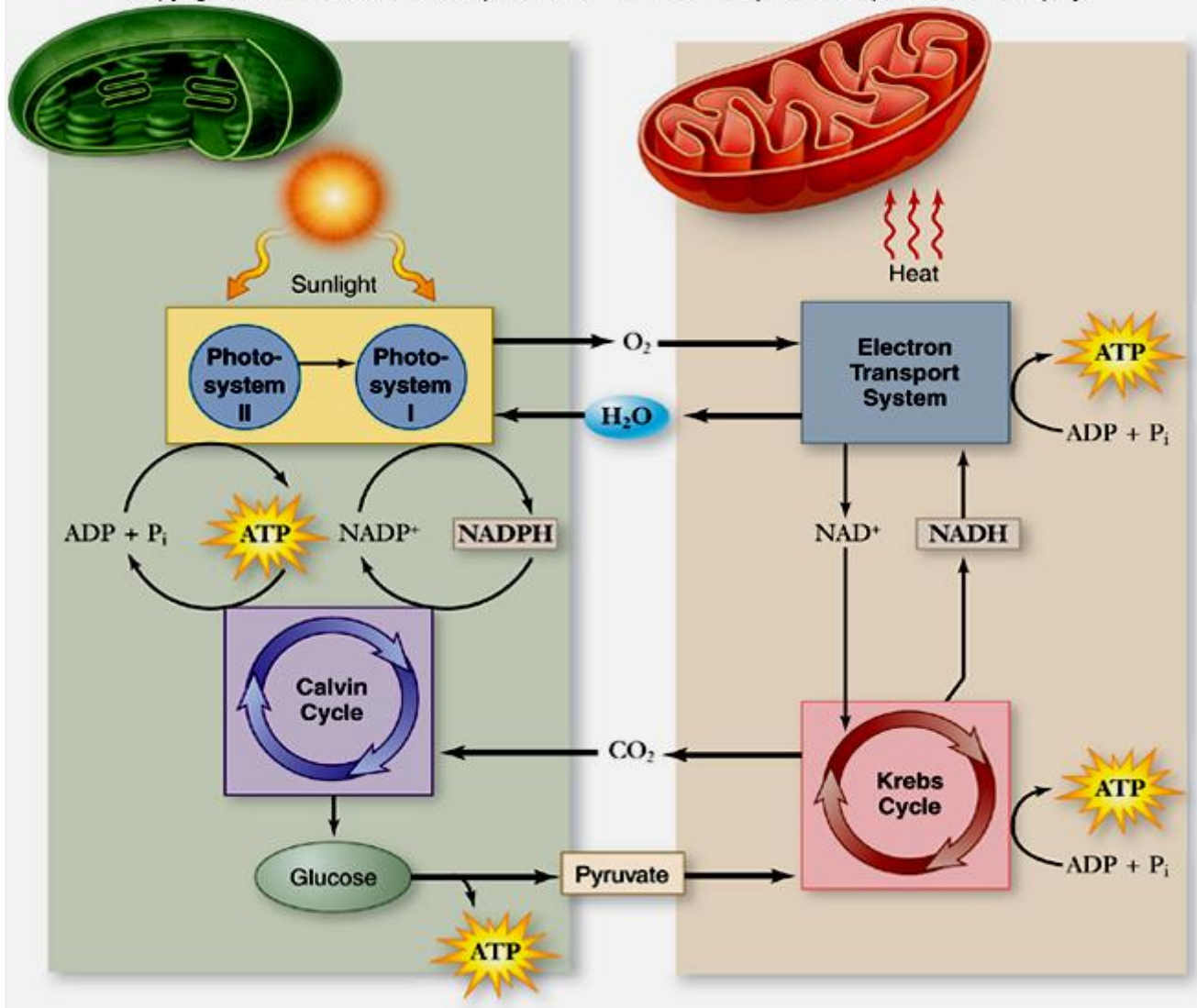
엽록체에는 세 개의 막(외막, 내막, 틸라코이드막)이 있으며, 이로 인해 세개의 구획 (막간 공간, 스트로마, 틸라코이드 공간)이 형성됩니다. 틸라코이드막은 엽록소를 포함해서 엽록체에서 에너지를 생산하는 모든 체계를 가지고 있는데, 전자현미경으로 보면 이 막들이 각각의 납작한 소낭을 싸고 있는 개별 단위들이 흩어져 있는 것처럼 보입니다.

엽록체 틸라코이드막의 세부 구조와 실제 전자현미경 사진입니다.



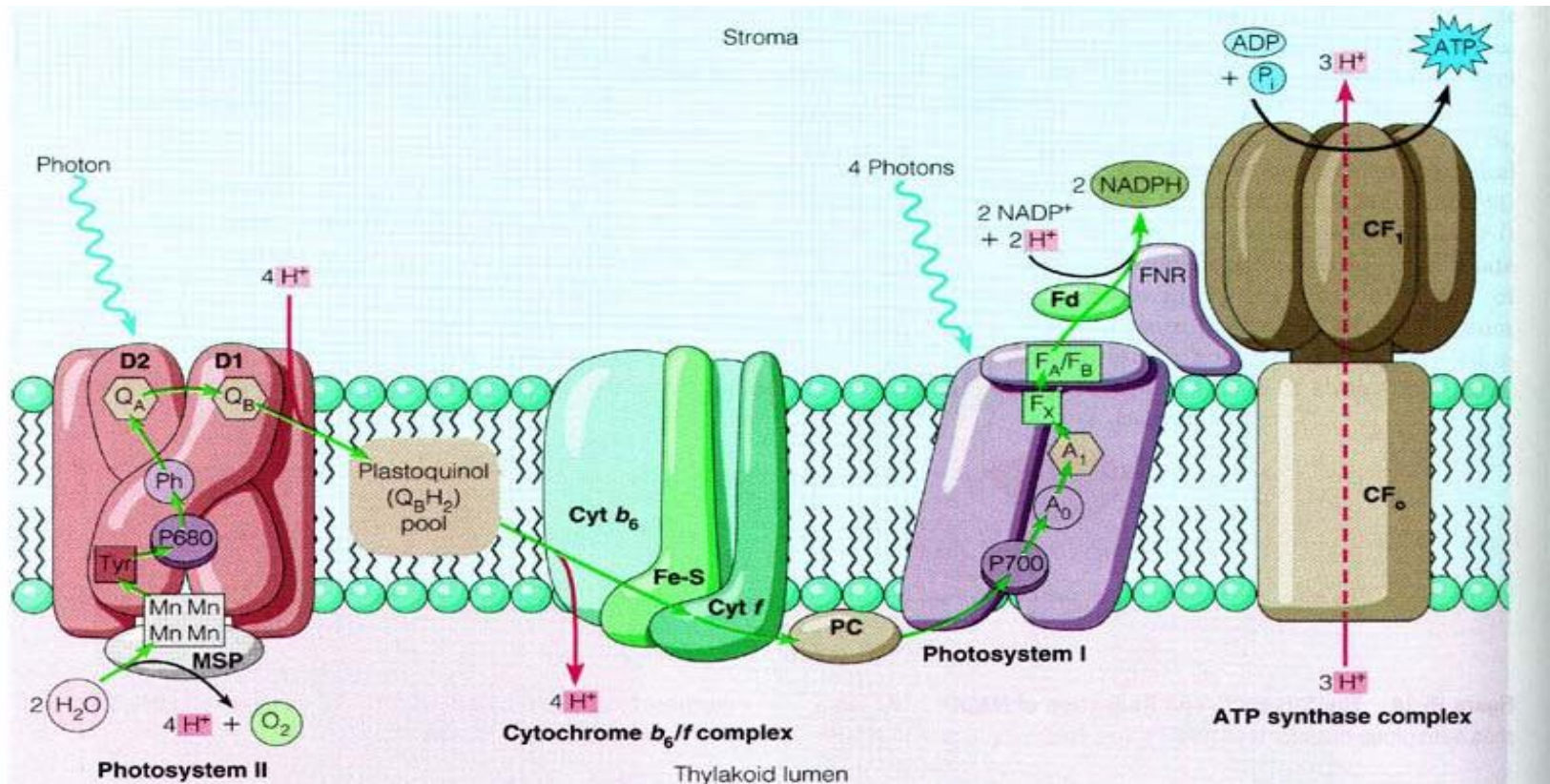


광합성의 명반응은 틸라코이드막에 H_2O 가 들어가면 흡수된 빛 에너지에 의해 물분자가 분해되면서 산소가 발생되고, 이 과정에서 나온 전자는 전자전달계를 거쳐 양성자구배를 형성하여 NADPH와 ATP를 만듭니다. 두번째 단계인 암반응 또는 탄소고정반응에서는 광합성 전자전달 반응으로 형성된 NADPH와 ATP가 각각 에너지원과 환원물질로 작용하여 CO_2 를 탄수화물 등 유기화합물을 생성하는 캘빈회로가 돌아가게 됩니다.



광합성은 엽록체에서 무기물인 이산화탄소를 빛 에너지를 이용해 유기물을 합성하는 과정이며, 세포호흡은 미토콘드리아에서 광합성의 산물인 유기물을 산소를 이용하여 산화시킴으로써 에너지를 얻는 과정입니다. 두 작용은 상호 유기적으로 연계를 이루게 되며 호흡은 밤낮 구별 없이 항상 일어 나지만 광합성은 햇빛이 있는 낮에만 이뤄지게 됩니다.

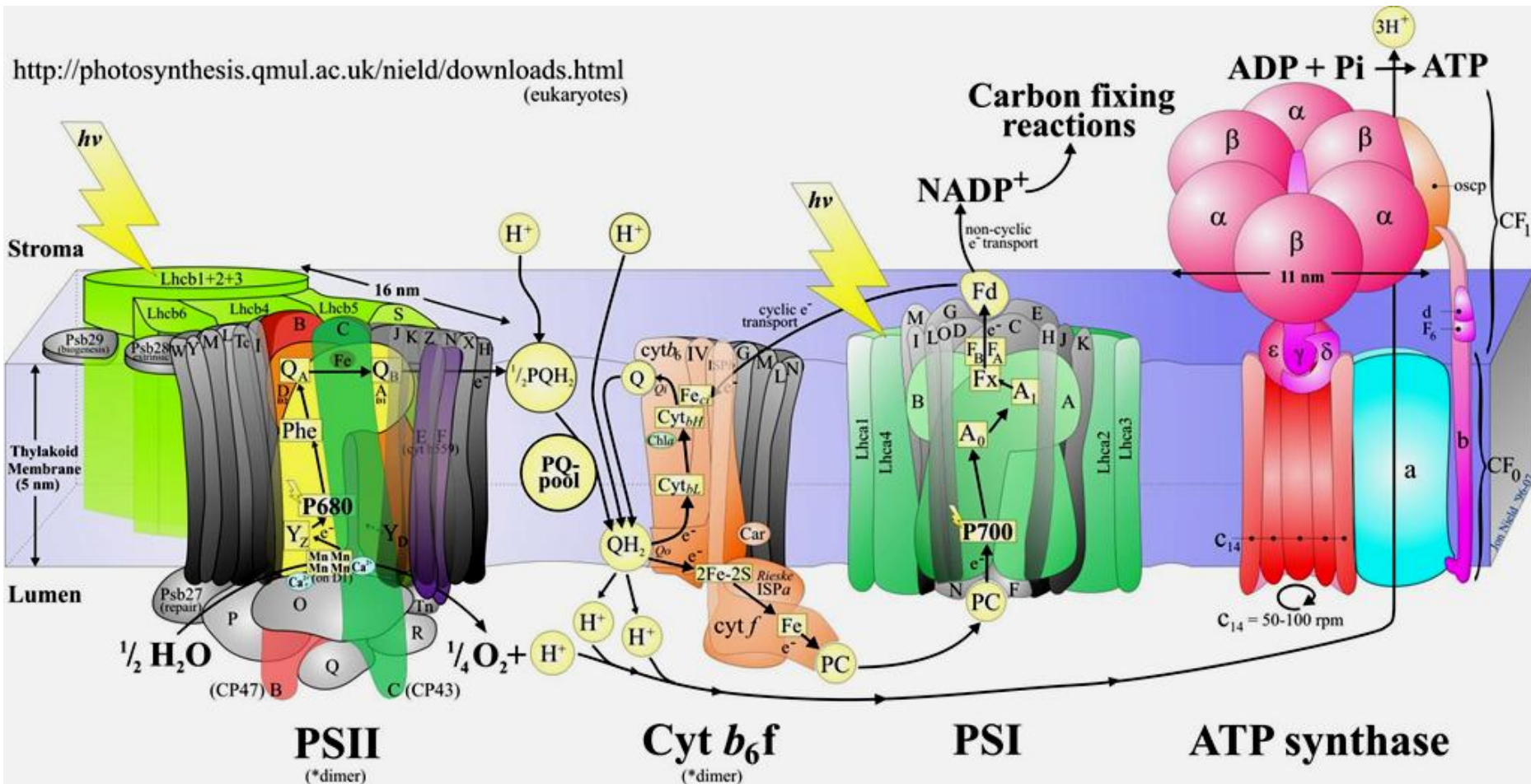
핵심기억-#17 : 광합성의 전자전달반응



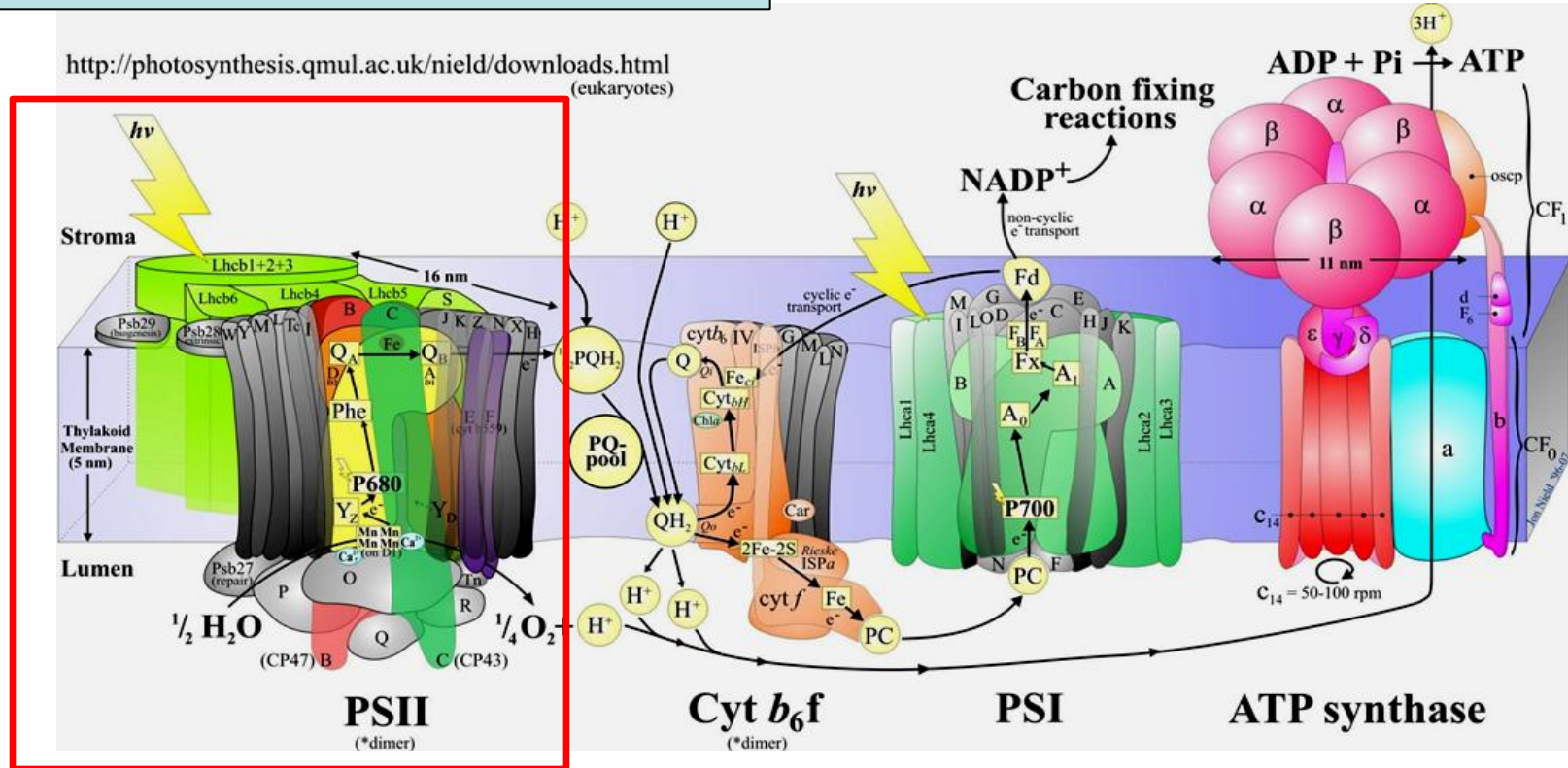
인지질이중막으로 된 틸라코이드막을 확대하면 위 그림과 같이 광계(Photosystem)Ⅱ, 시토크롬b₆f 복합체, 광계(Photosystem) I, NADP⁺ 환원효소, ATP합성효소 등의 단백질 복합체와 플라스토퀴논, 플라스토시아닌, 파라독신 등 전자운반체로 구성된 광합성 전자전달계가 작용을 하고 있습니다. 이 전자전달계는 빛 에너지를 이용하여 물을 분해하여 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- + \frac{1}{2}\text{O}_2$ 로 전환시키고 NADPH와 ATP를 생성하는 역할을 합니다.

틸라코이드막의 전자전달계 전체 과정을 나타낸 그림입니다.

크게 출력해서 잘 보이는 벽에 붙여놓고 수시로 보면서 암기하시기 바랍니다....^^

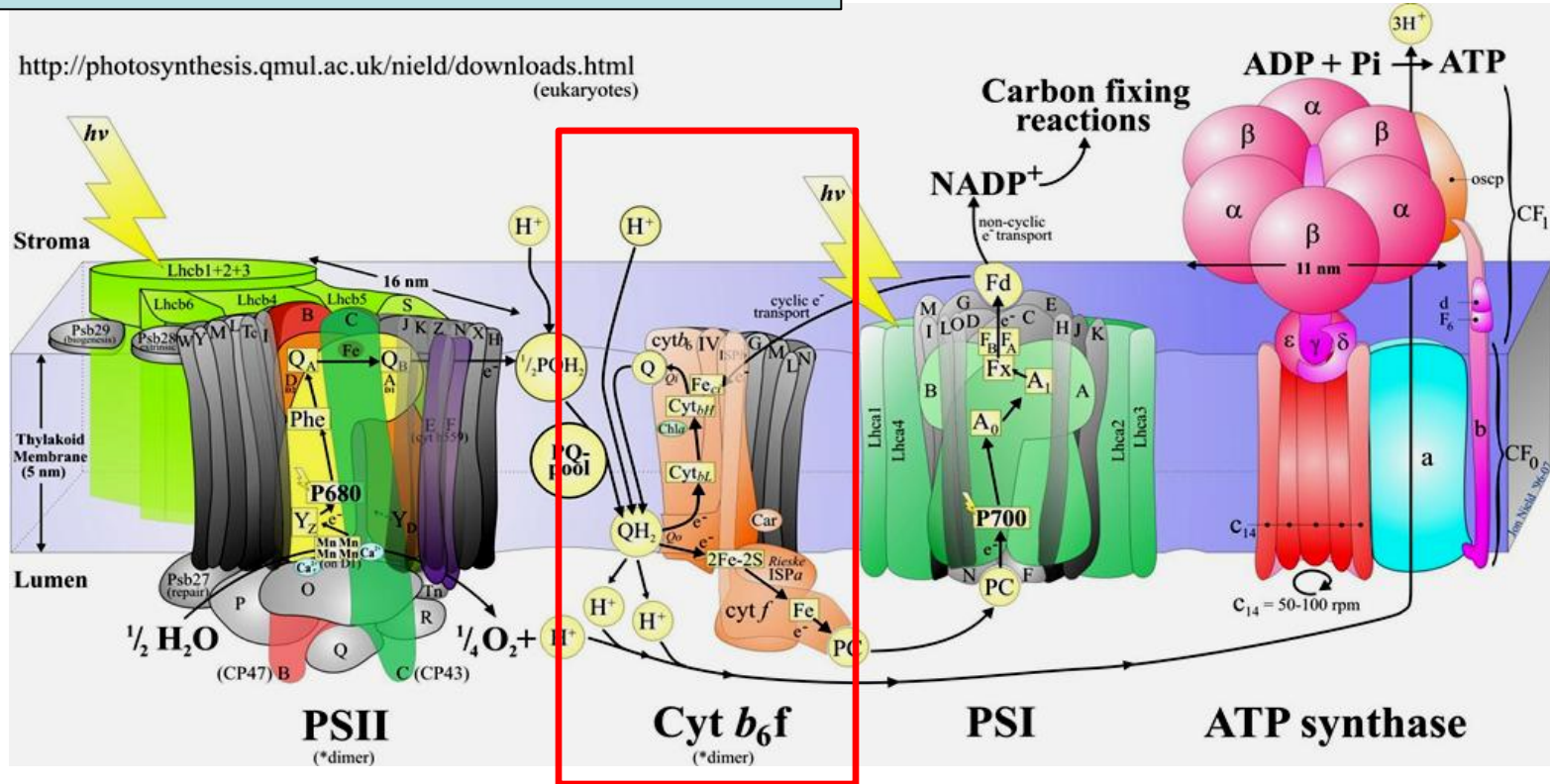


광계 II (Photosystem II)



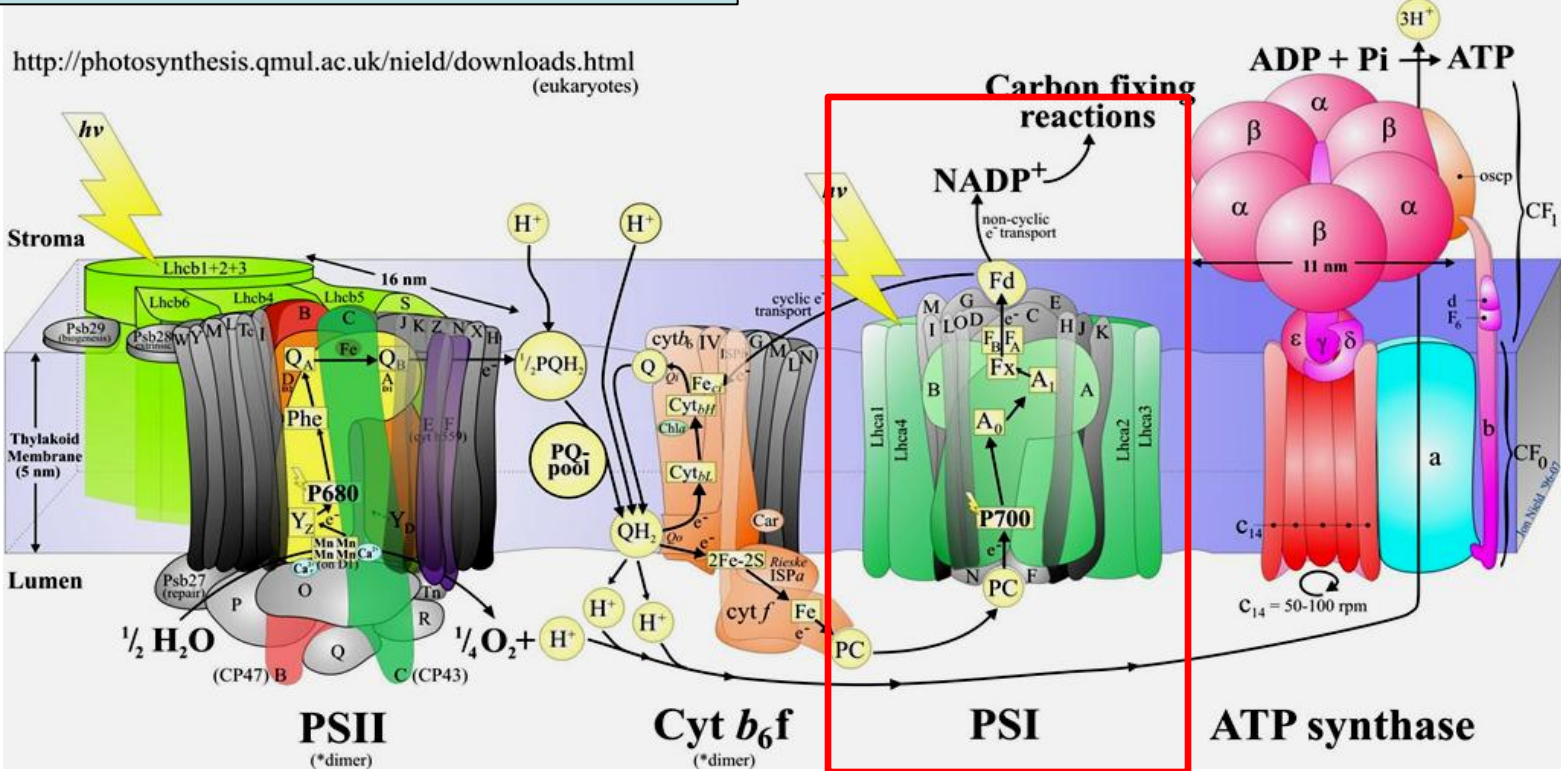
광계II 단백질복합체는 P680 엽록소에서 흡수한 빛 에너지를 이용하여 H_2O 를 O_2 와 H^+ 으로 분해하고 2개의 전자를 방출합니다. 물을 분해하는 것은 Mn을 잡고있는 Porphyrin으로 구성된 물 분해 효소에서 이뤄지며, 생성된 2개의 전자는 전자운반체인 플라스토퀴논에 전달되고 스트로마에서 받은 2H^+ 와 결합하여 PQH_2 가 되어 이동하면서 틸라코이드 안쪽 공간인 루멘 (Lumen)쪽에 2H^+ 를 내보내고 시토크롬 b_6f 에는 $2e^-$ 를 전달합니다. 이 운반과정은 미토콘드리아에서의 유비퀴논의 작용과 거의 유사합니다.

시토크롬 b_6f (Cytochrome b_6f)



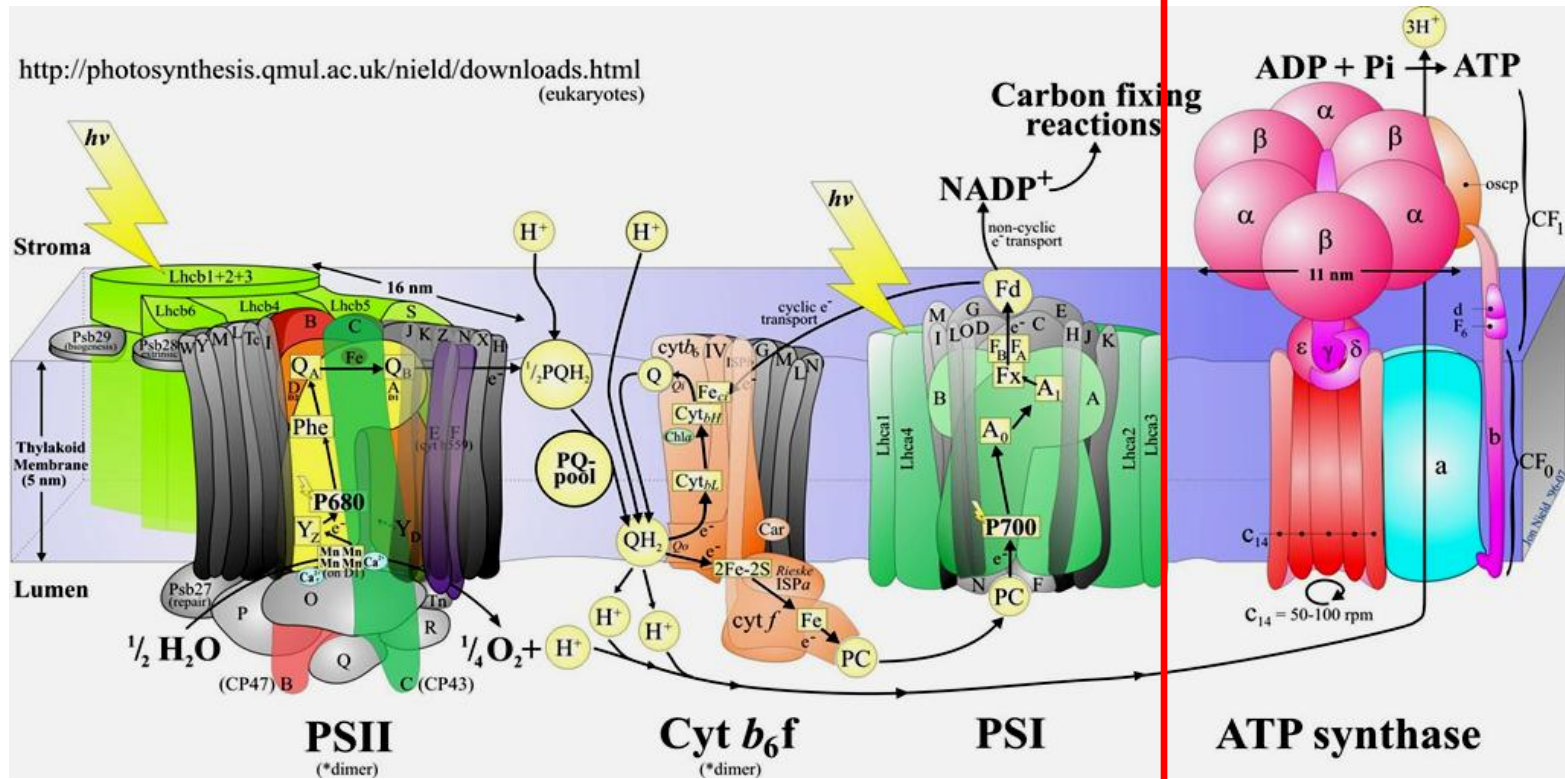
시토크롬 b_6f 는 두개의 전자를 받아 철황(Fe-S)복합체 → 시토크롬 f를 거쳐 인지질막에 있는 두번째 전자운반체인 플라스토시아닌으로 한 개의 전자(e^-)를 전달하고 나머지 하나는 시토크롬 b_L 과 b_H 를 거쳐 인지질이중막 내의 Q와 결합하여 다시 QH_2 를 만드는 Cycle을 돌게 됩니다. 이 과정 역시 미토콘드리아와 동일하며, 여기서는 구리 성분으로 구성된 플라스토시아닌 이라는 전자운반체가 다음 단계인 광계 I로 전자의 운반을 담당합니다.

광계 I (Photosystem I)



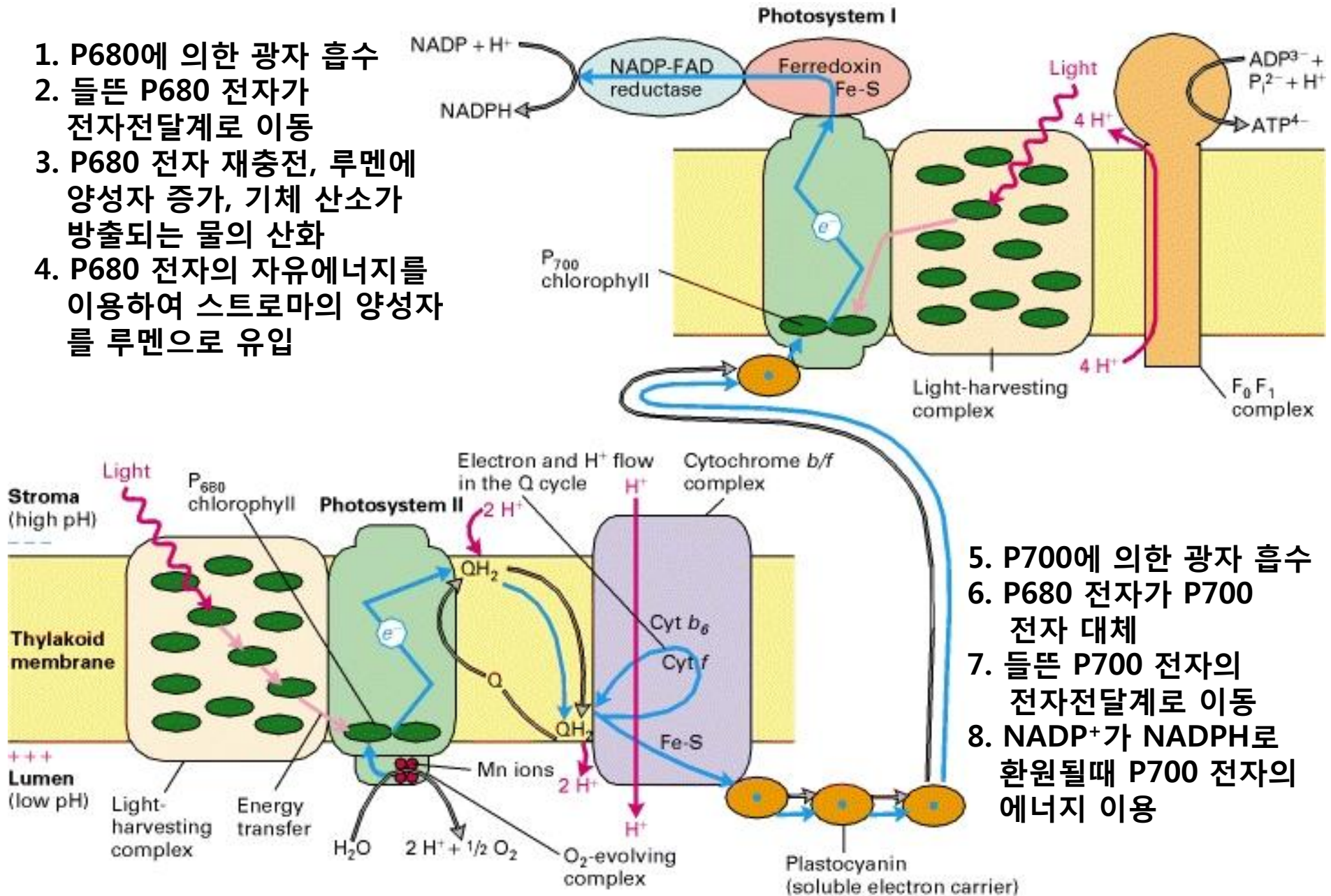
광계 I 은 엽록소가 있는 복합체로서 680 nm의 빛을 흡수하는 광계II와는 다르게 700 nm 파장의 빛을 흡수하는 P700 엽록소를 가지고 있습니다. 광계II가 물 분해형인 반면 광계 I 은 물을 분해할 수 없으며 역사적으로 시아노박테리아부터 나온 광계II 이전의 완전히 다른 시스템입니다. 광계 I 의 P700은 전달받은 전자를 빛을 이용해 흥분시켜 다음 전자수용체인 패러독신(Ferredoxine)으로 점핑을 시키고, 패러독신은 전자를 하나씩 NADP⁺환원 효소로 전달합니다. NADP⁺환원 효소는 NADP⁺를 NADPH로 환원시키는 역할을 담당합니다.

ATP 합성효소 (ATP synthesis)

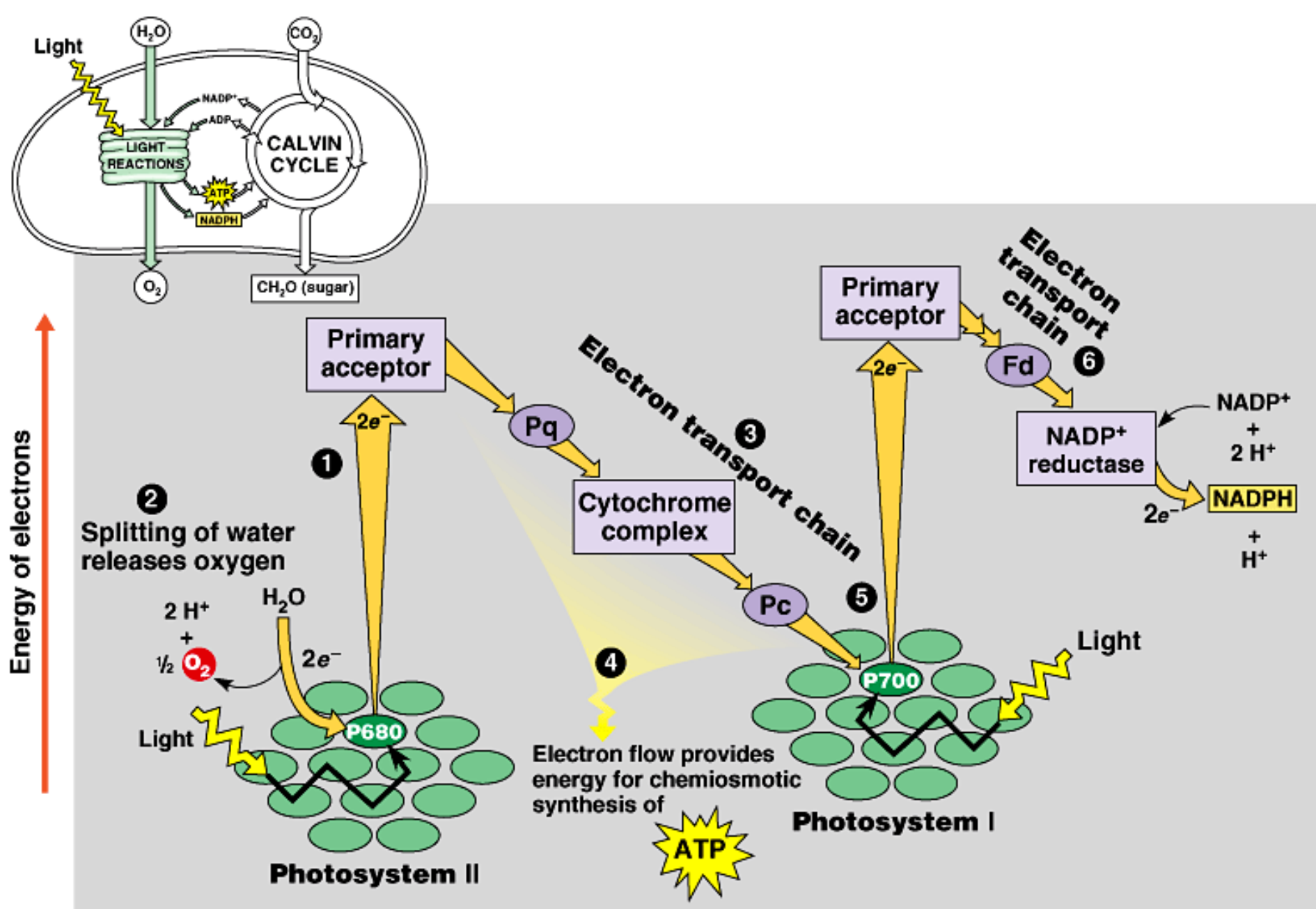


전자전달계를 거치면서 잃어지는 에너지는 H⁺를 스트로마로부터 틸라코이드 공간으로 이동시키는데 사용됩니다. 틸라코이드 공간에 축적어 양성자구배를 형성한 H⁺은 틸라코이드 막에 붙어있는 ATP합성효소에 의해 포획되어 ADP에서 ATP로 변환됩니다.

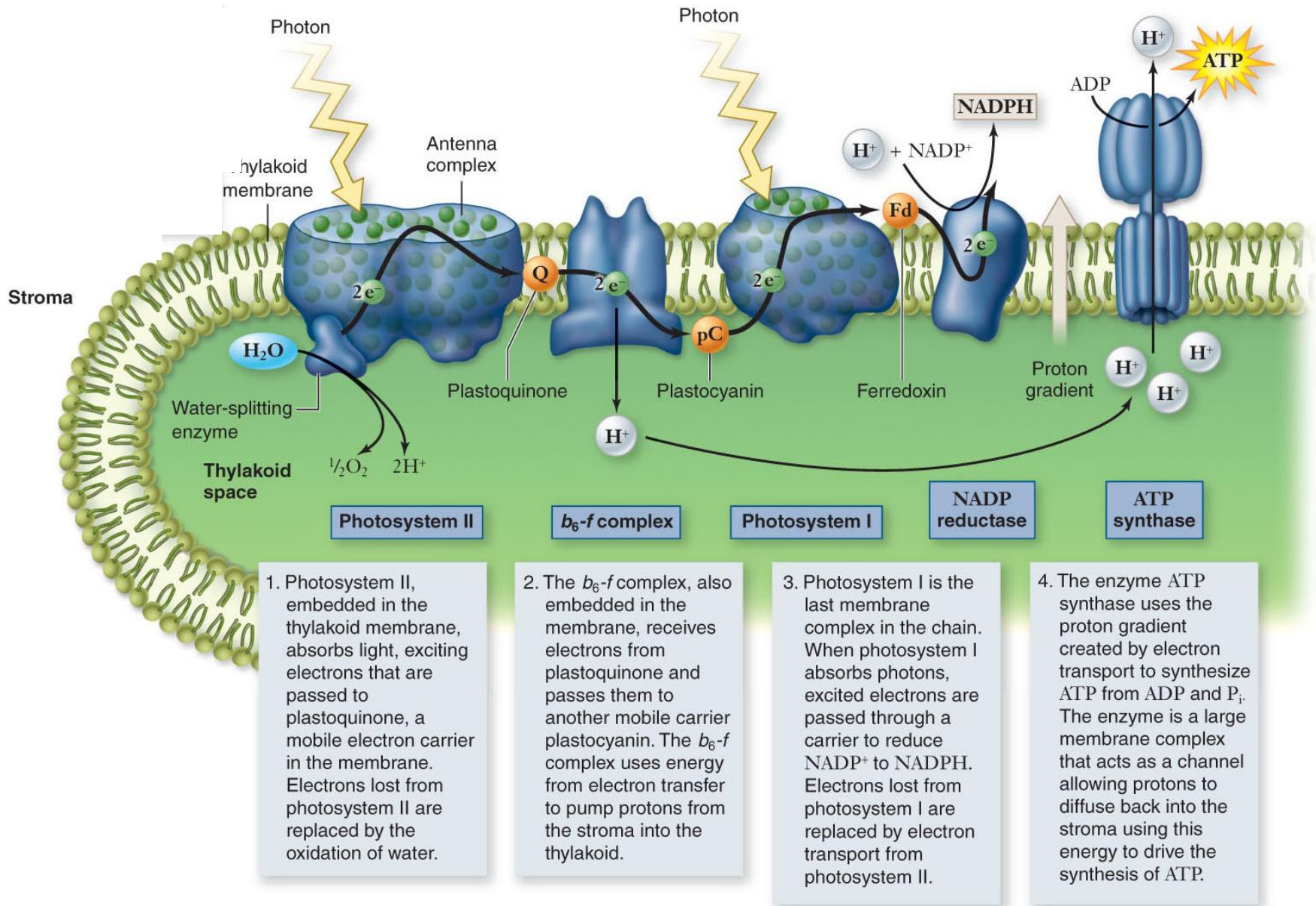
1. P680에 의한 광자 흡수
2. 들뜬 P680 전자가 전자전달계로 이동
3. P680 전자 재충전, 루멘에 양성자 증가, 기체 산소가 방출되는 물의 산화
4. P680 전자의 자유에너지를 이용하여 스트로마의 양성자를 루멘으로 유입

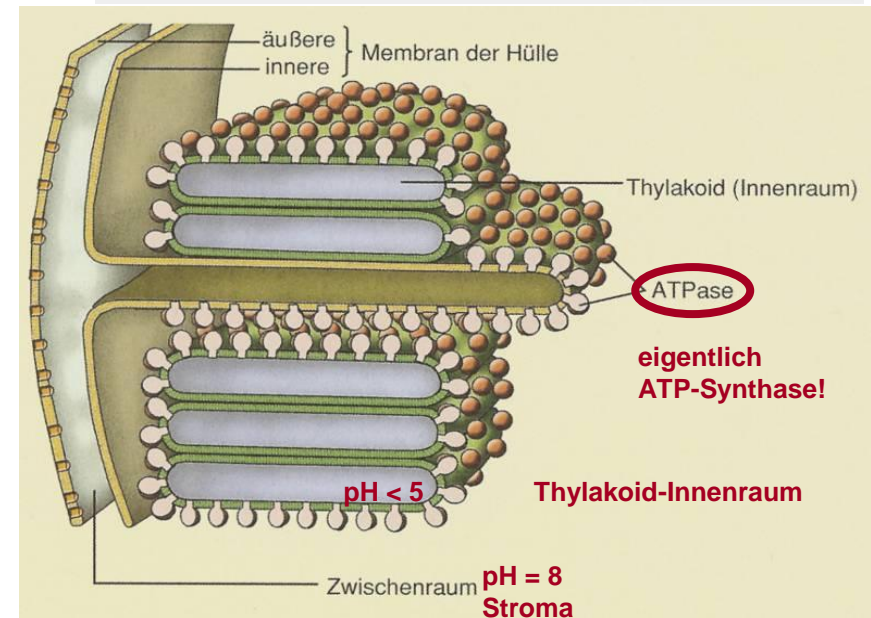
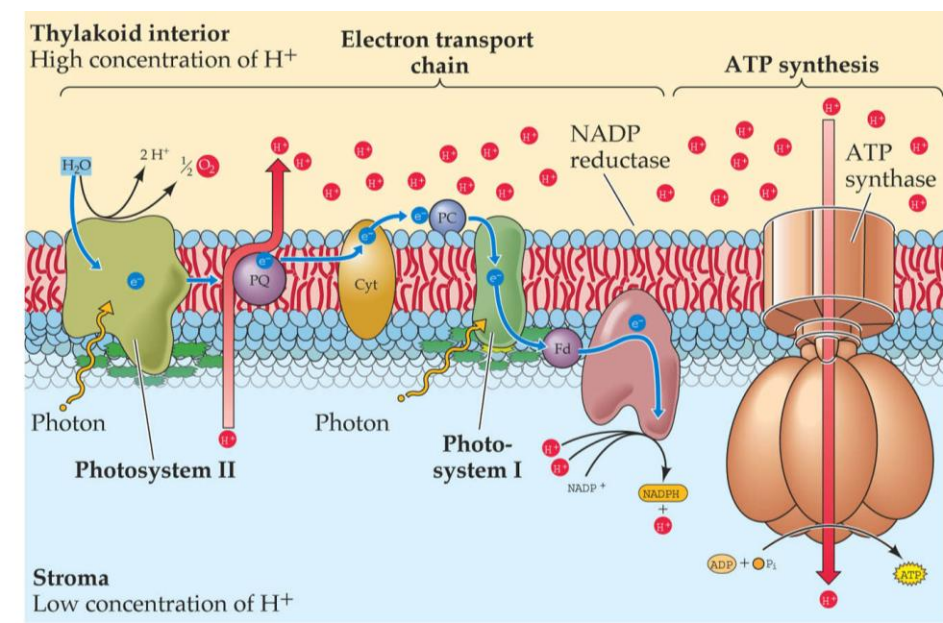
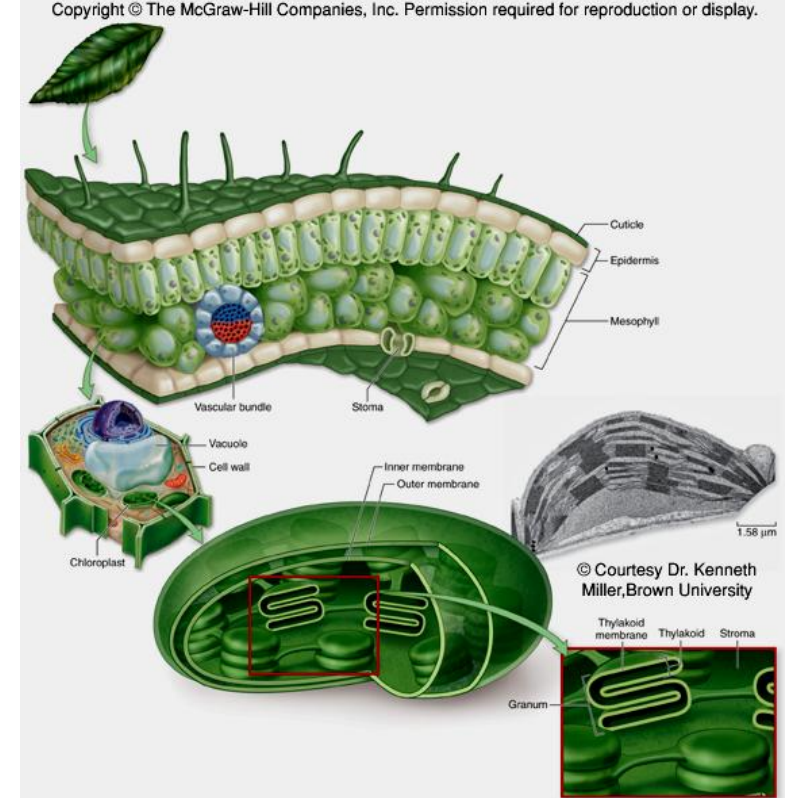
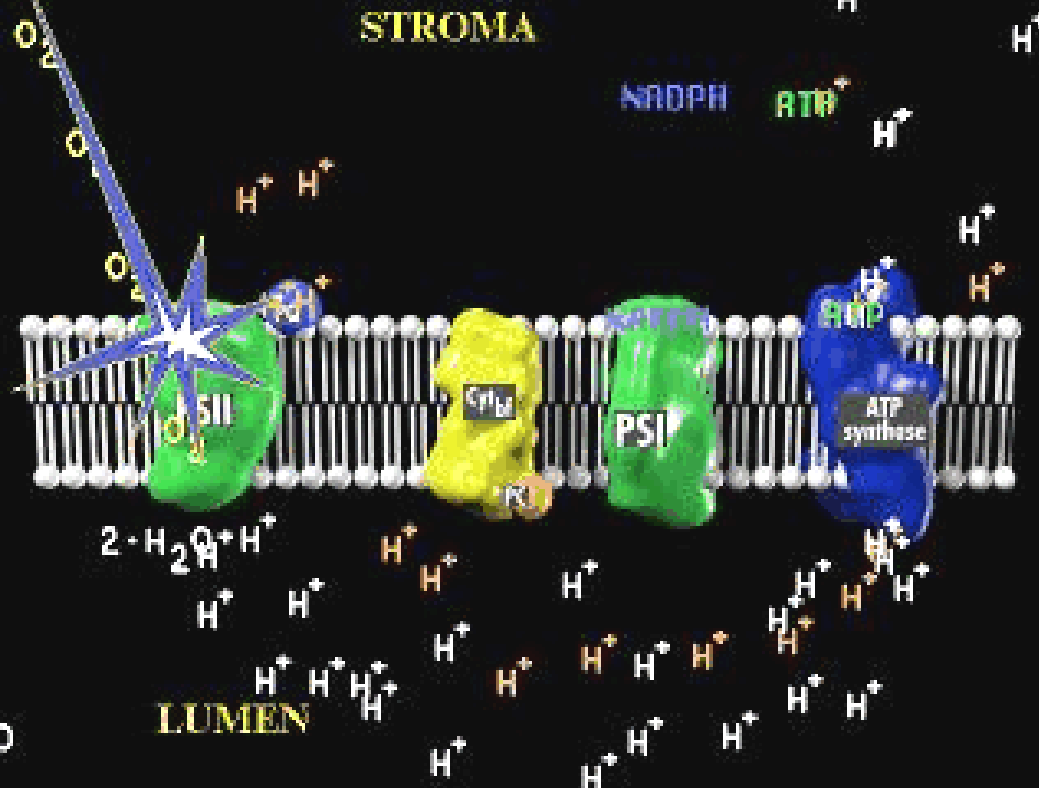


5. P700에 의한 광자 흡수
6. P680 전자가 P700 전자 대체
7. 들뜬 P700 전자의 전자전달계로 이동
8. $NADP^+$ 가 $NADPH$ 로 환원될 때 P700 전자의 에너지 이용

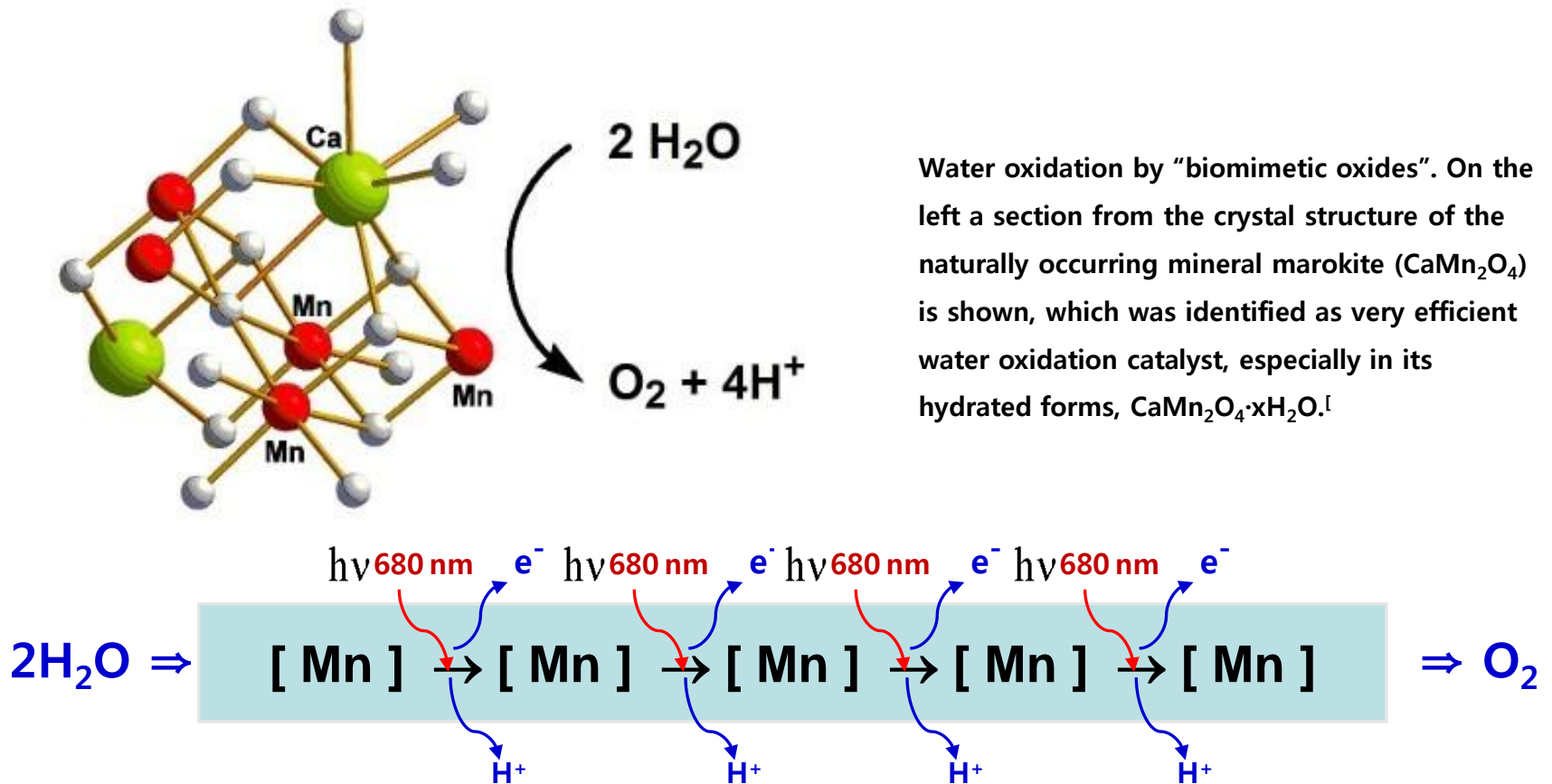


엽록체 틸라코이드막 전자전달계의 순차적 작용을 요약하여 보여주는 모식도입니다.



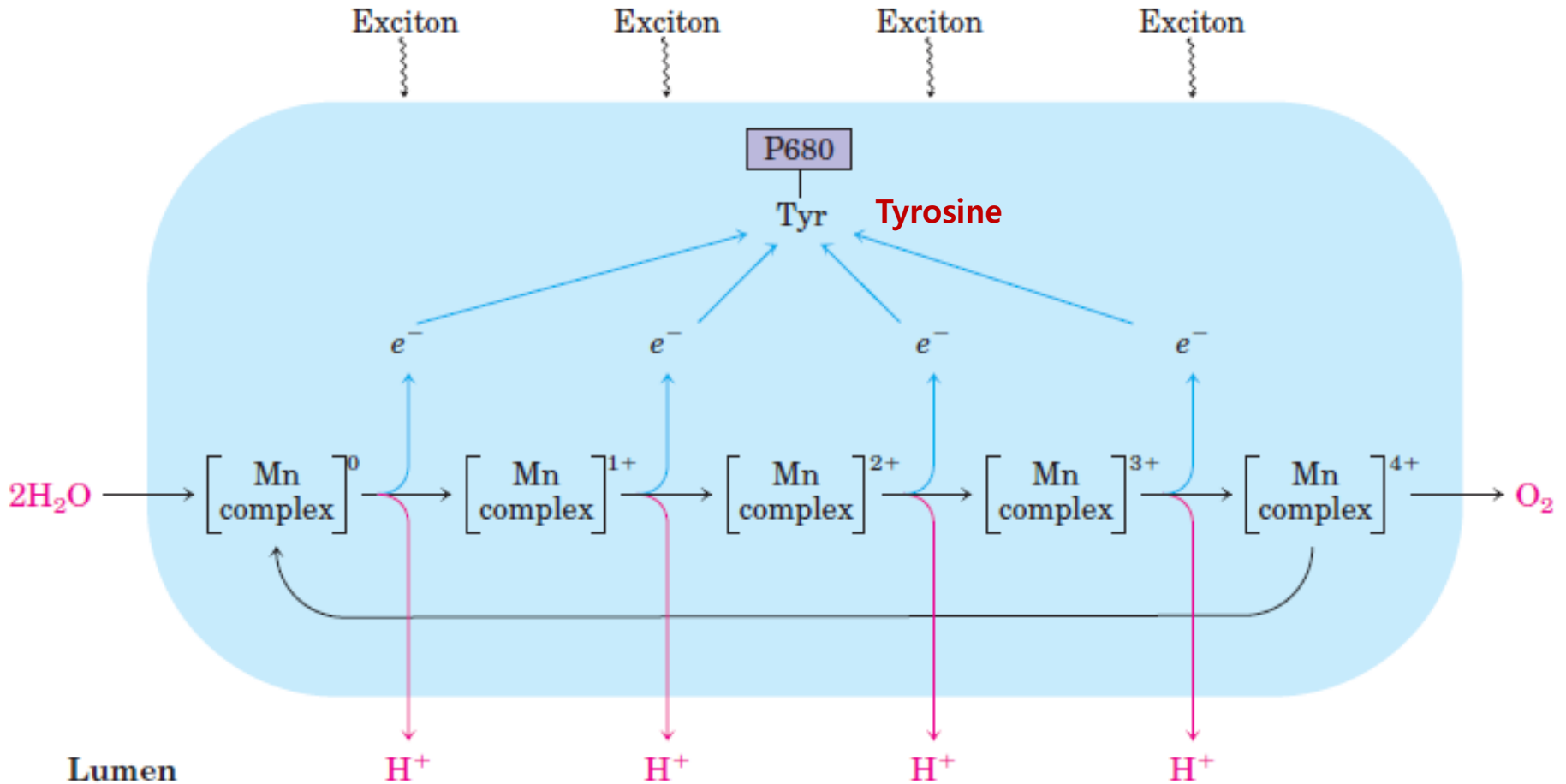


핵심기억-#18 : PS II에서의 물의 분해 과정

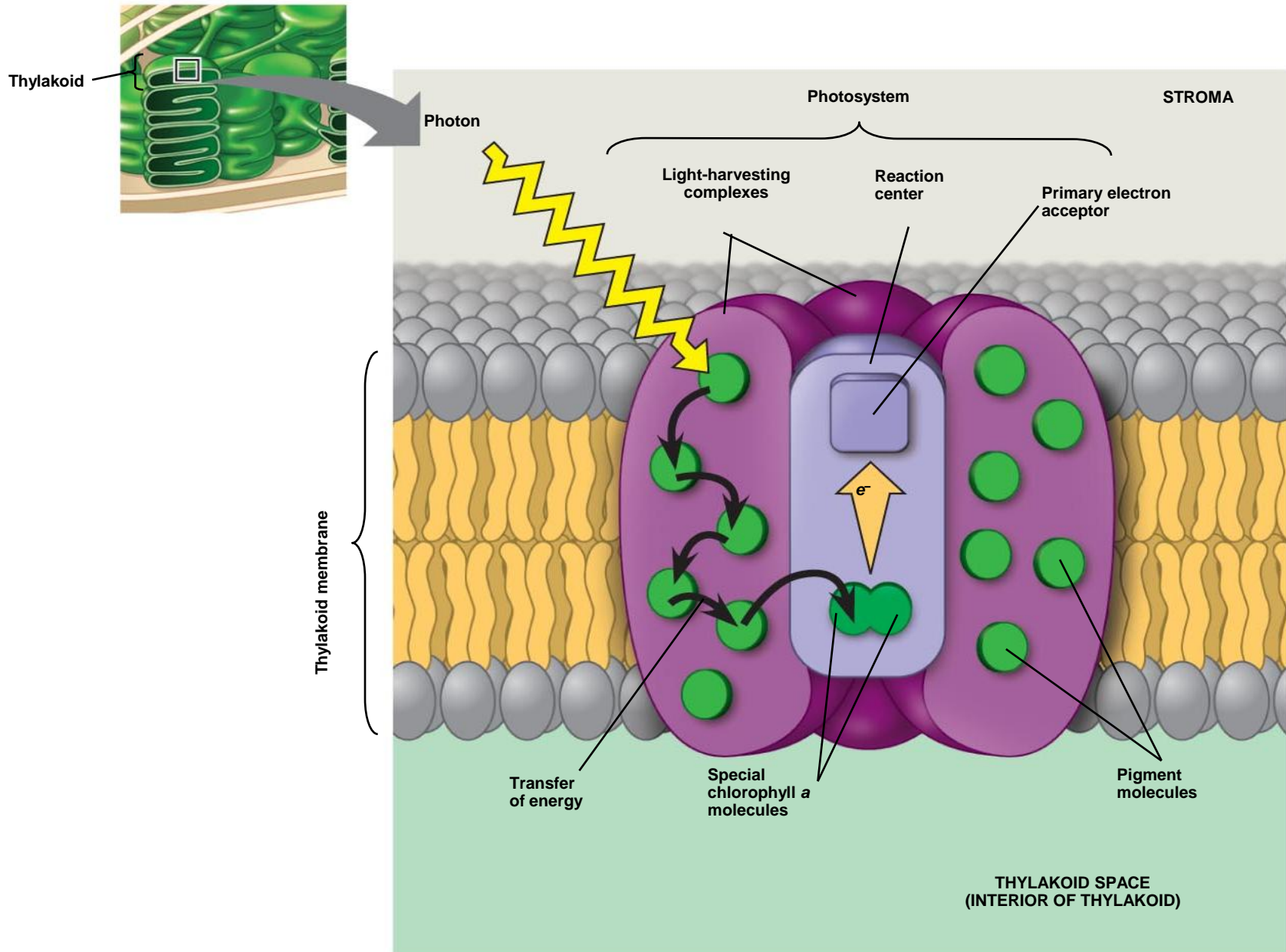


광계II의 물 분해 과정은 Mn을 잡고있는 Porphyrin 5개로 구성된 물 분해 효소에 의해 이루어 집니다. 5개의 망간시스템은 $2\text{H}_2\text{O}$ 를 받아서 단계적으로 680 nm 파장의 빛 에너지를 흡수하여 각각 4개의 전자(e^-)와 4개의 양성자 (H^+)를 빼내고 O_2 를 내보냅니다. 여기에서 나온 모든 전자(e^-)들은 티로신(Tyr)이라는 아미노산에 의해 회수되게 됩니다

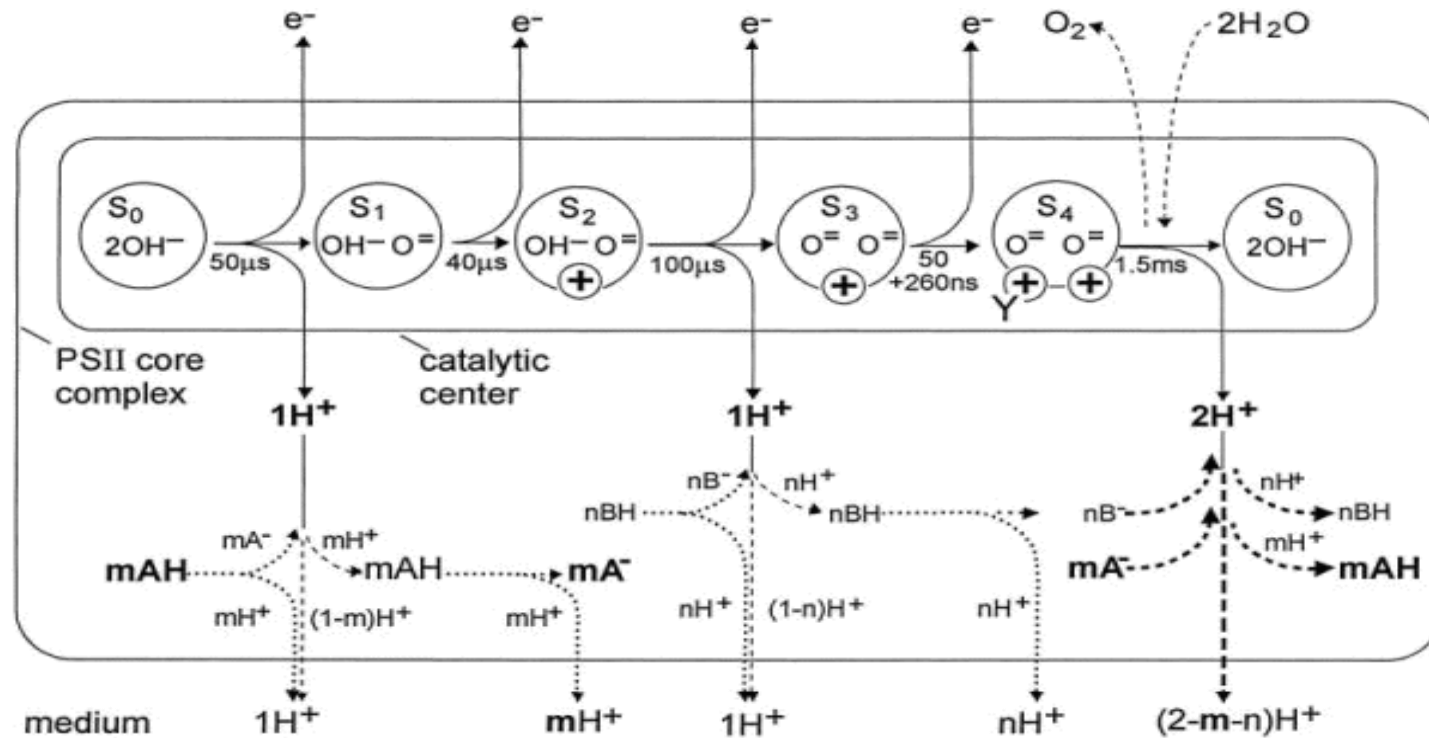
WATER-SPLITTING COMPLEX



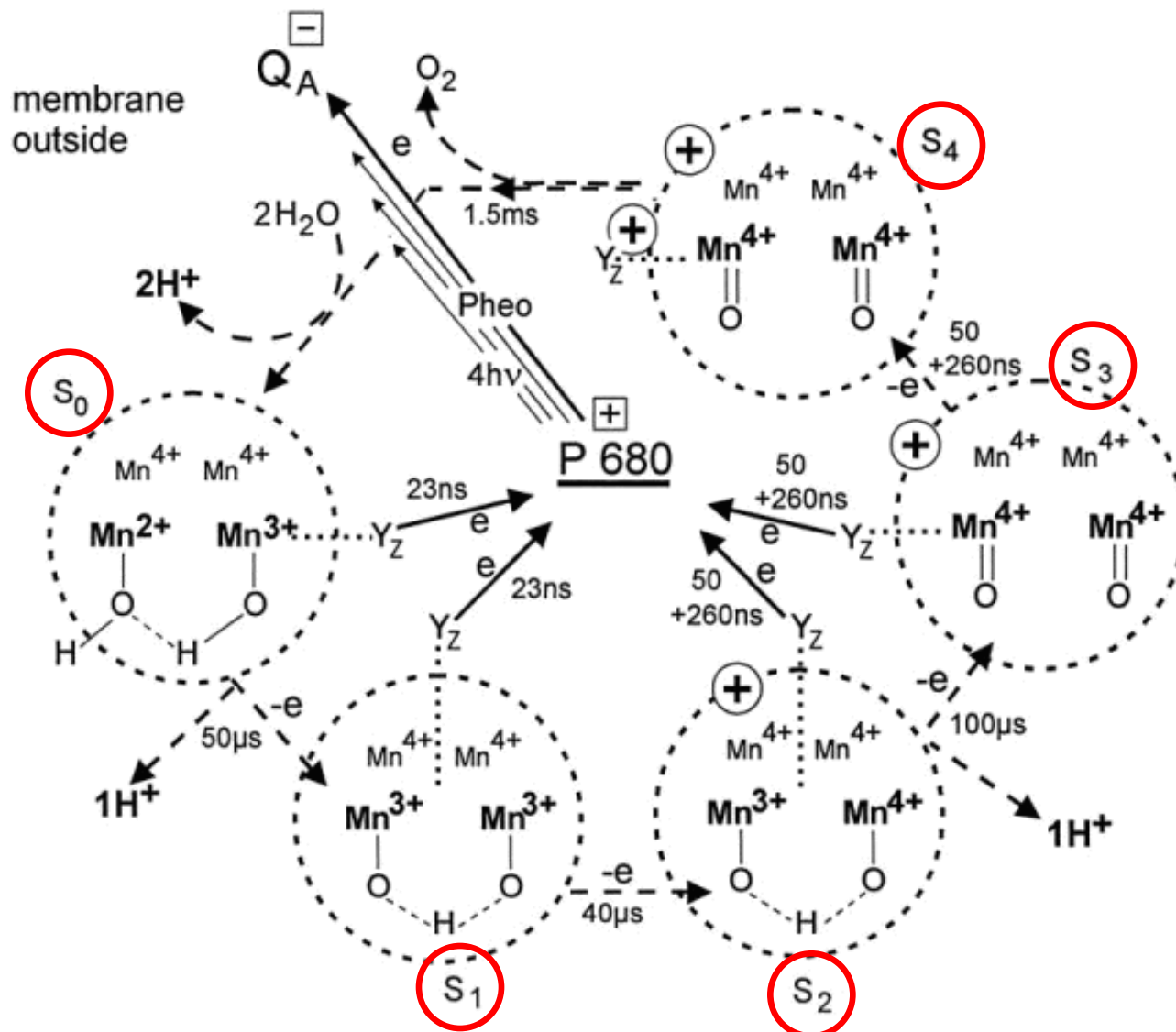
Complex associated with PS II uses several Mn ions to extract 4 electrons from 2 water molecules. P680 is rereduced by Tyrosine in the PSII reaction center. Tyrosine radical is rereduced by increasing oxidation state of a Mn cluster. When Mn cluster reaches +4 state, it can grab 4 e^- from 2 H_2O .



물분해 효소에 의한 물의 분해 절차

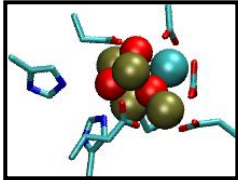


SCHEME 1. Pathway of the protons from the CC and core complex into the medium. Top, pH-independent pattern of net charges (circled plus signs) and proton releases from the CC. Possible water derivatives in the S states are indicated. Center, pH-dependent course of proton release from amino acid residues of the PS II core complex and its interaction with the net charge in the CC. The H^+ release from the CC should be as fast as the indicated times of the S state transitions (34, 35) (solid lines). However, the kinetics might be faster if mH^+ is released from mAH (pK ~ 5.7) by a pK shift through the charge of the transiently oxidized Y_Z (dotted lines). Such fast H^+ releases have been measured by Junge and co-workers in Refs. 13 and 14 (see the introduction). When Y_Z^{ox} is reduced by oxidizing S_0 , the shift is reversed and mA^- traps mH^+ from the proton released from the CC. This results in an apparent biphasic H^+ release (dashed and dotted lines). mAH can be deprotonated again by Y_Z^{ox} formation preceding $S_1 \rightarrow S_2$. However, this mH^+ release is not reversed, because the created net charge of S_2 keeps the pK shift and mA^- stable when Y_Z^{ox} is reduced by oxidizing S_1 . (It is assumed that the interaction of the charge of Y_Z^{ox} with the acids is practically the same as that of the net charge in the CC.) Thus the net charge is lastly responsible for a stable electrostatic mH^+ release into the medium. For completeness, the response of an acid group nBH with a high pK value (e.g. pK ~ 11) is noted. nBH may be deprotonatable between pH 5 and 7 only by interaction with two charges. This is realized when the net charges in S_2 and S_3 are accompanied by the charge of the transiently oxidized Y_Z . The course of the released protons would correspond in $S_2 \rightarrow S_3$ and $S_3 \rightarrow S_4$ to that outlined for mAH in $S_0 \rightarrow S_1$ and $S_1 \rightarrow S_2$, respectively. The double net charge in S_4 would keep nB^- stable. When in $S_4 \rightarrow S_0$ the net charges disappear with the 2 H^+ release from the CC, mA^- and nB^- are reprotonated by uptake of $(m + n)H^+$ (thick dotted lines). According to the results of this work, only the presence of the amino acid group mAH (pK ~ 5.7) is necessary to explain the observed pattern of H^+ release into the medium. Bottom, overall proton release into the medium.



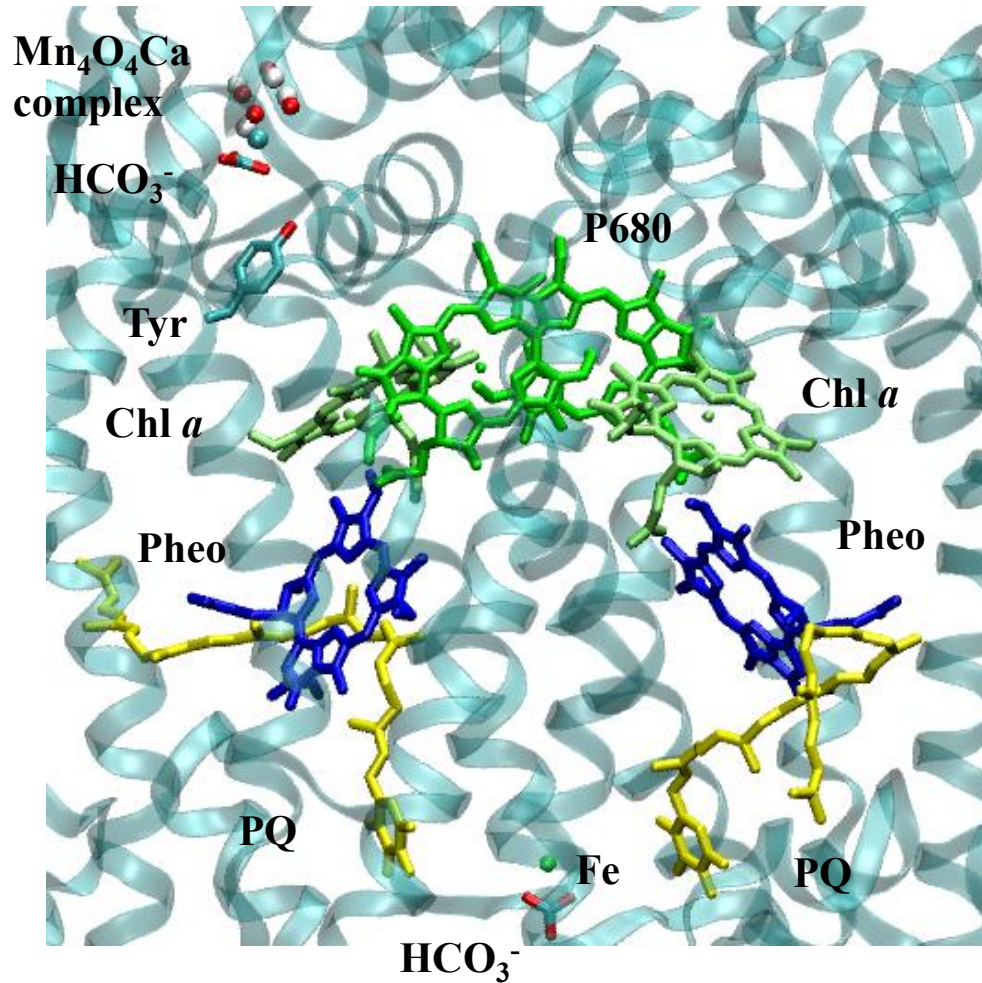
SCHEME 2. Model of the period four oscillation of manganese oxidation, net charge formation, and water de-protonation. The S state cycle S₀ ® S₄ is driven by quaternary, light-induced transmembrane electron transfers from P680 to Q_A. P680⁺ oxidizes step by step via tyrosine Y_Z, a manganese dimer up to S₃. The oxidized Y_Z has been hypothesized in Ref. 35 to be the fourth oxidizing equivalent in S₄ that triggers the electron transfer from the two oxo-atoms to the four oxidizing equivalents by its electric field. For clarity the charges of the water derivatives (Scheme 1) have been omitted.

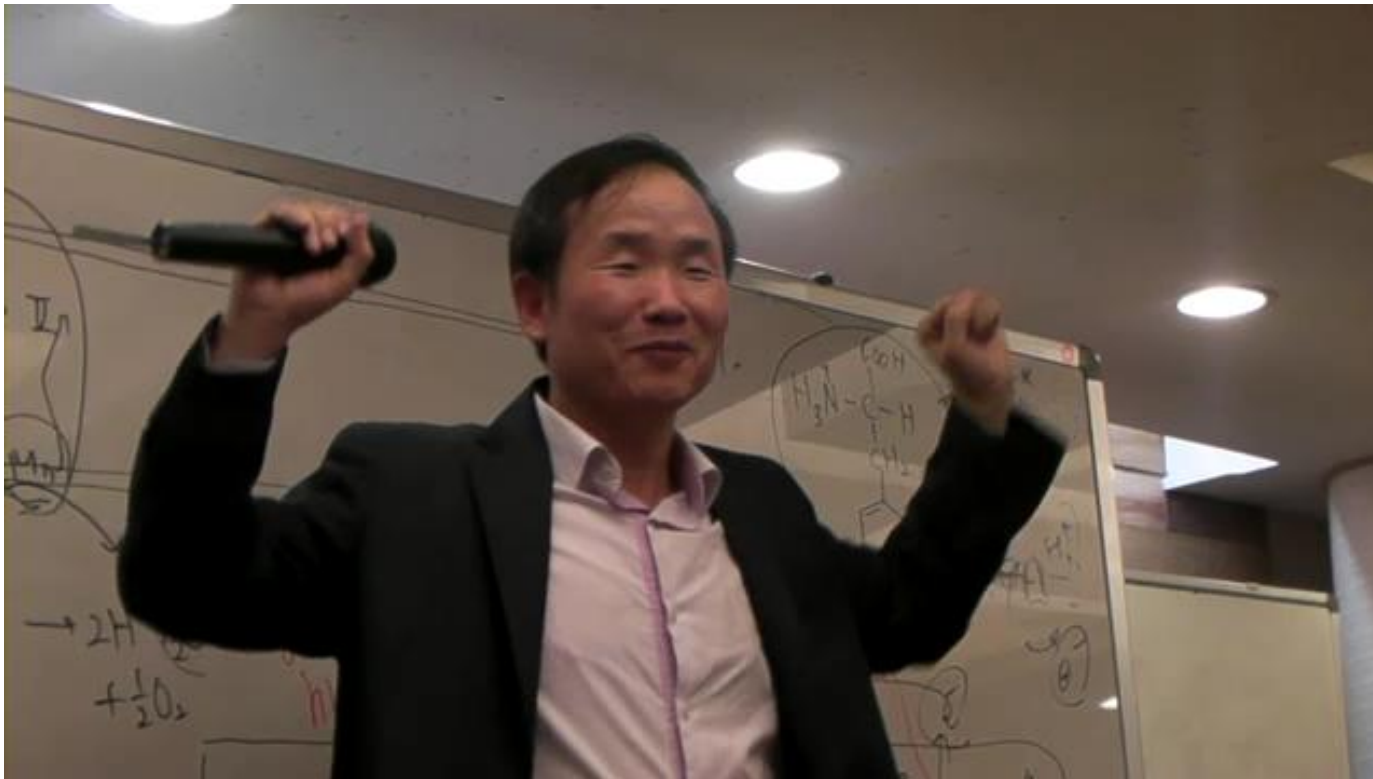
Electron carriers in the Photosystem II reaction center



Mn₄O₄Ca complex and the surrounding amino acid side chains

The cluster of 4 Mn atoms is the O₂-evolution site and is unique to PS II. Note the tyrosine residue between the Mn cluster and P680.





**“ 생화학은 간단하다. 물이 분해되면 산소가 되고, 산소가 전자를 얻으면 물이 된다.
산소에 전자 4개가 붙으면 물이 되고, 물에서 전자 4개를 빼앗으면 산소가 된다. ”**

그런데 이 과정은 한꺼번에 일어나는 것이 아니라 하나.둘.셋.넷.. 순차적으로 진행되어지며 이때 완전하게 전자 4개를 받아들이지 못한 채 탈출하는 산소가 생길수 있는데 이것이 바로 활성산소(자유라디칼)인 것입니다. 활성산소는 위험할 정도로 반응성이 좋아 아무곳에서나 전자를 빼앗는 성질이 있으므로 주변의 DNA, 단백질, 지질 분자에 심각한 상해를 유발하게 됩니다. 이러한 활성산소는 산소를 가두는 단백질, 즉 DNA의 고장에 의해 발생되는데 산화성 스트레스가 DNA의 변형을 유발시키는 주된 원인이 됩니다.

※ 산소 ↔ 물의 변환과정, 활성산소

산소가 전자를 받아 물로 바뀌는 각 단계의 분자구조를 그려본 것입니다.

“산소가 전자 4개를 얻으면 물이 되고,
물에서 전자 4개를 잃으면 산소가 된다.”

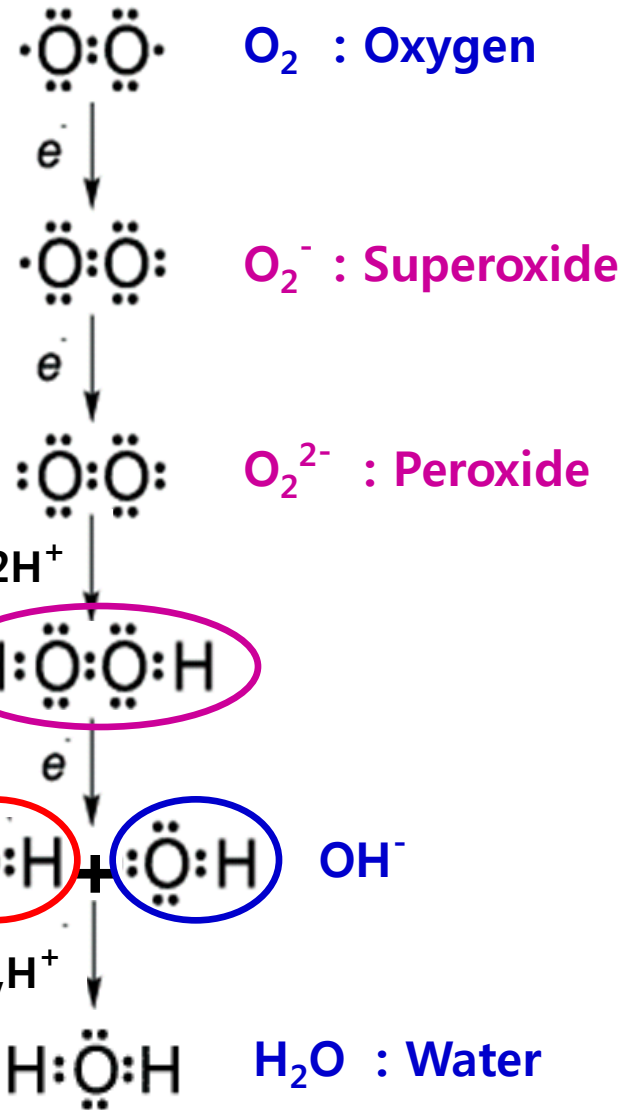
위는 미토콘드리아 내막의 시토크롬 산화효소에서 일어나는 현상이며, 아래는 엽록체 틸라코이드막의 PSII에서 일어나는 현상으로 35억년전 시아노박테리아로부터 비롯된 것입니다.

지구초기 물속에 약 5~8%의 과산화수소가 있었다는 사실이 밝혀졌습니다. H_2O_2 는 지구 생명의 출현과정에 길목을 지키고 있는 거대한 현상인 것입니다.

Hydrogen peroxide : H_2O_2
(과산화수소)

Hydroxyl radical

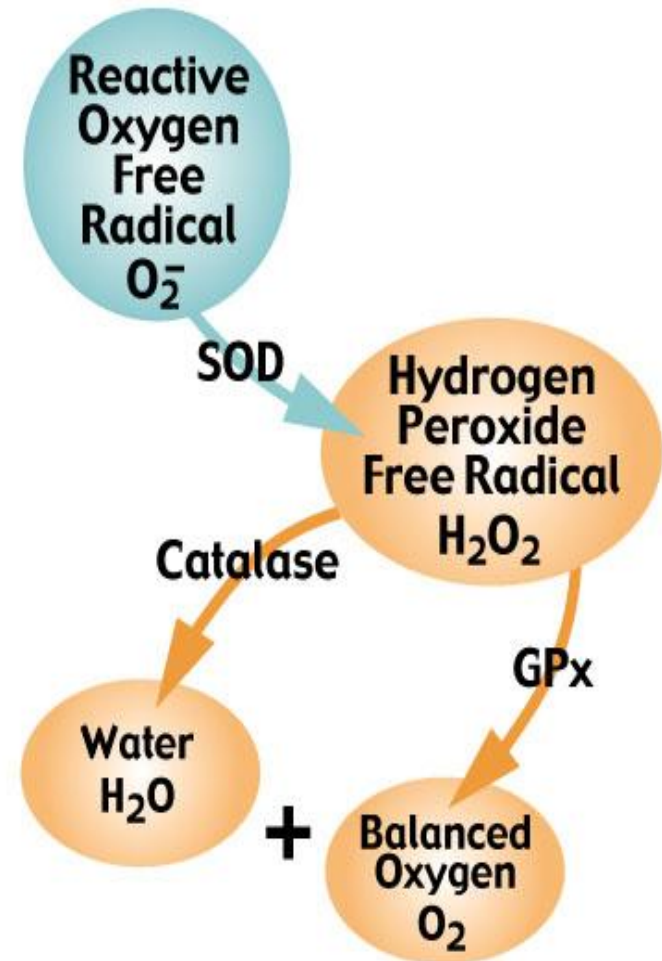
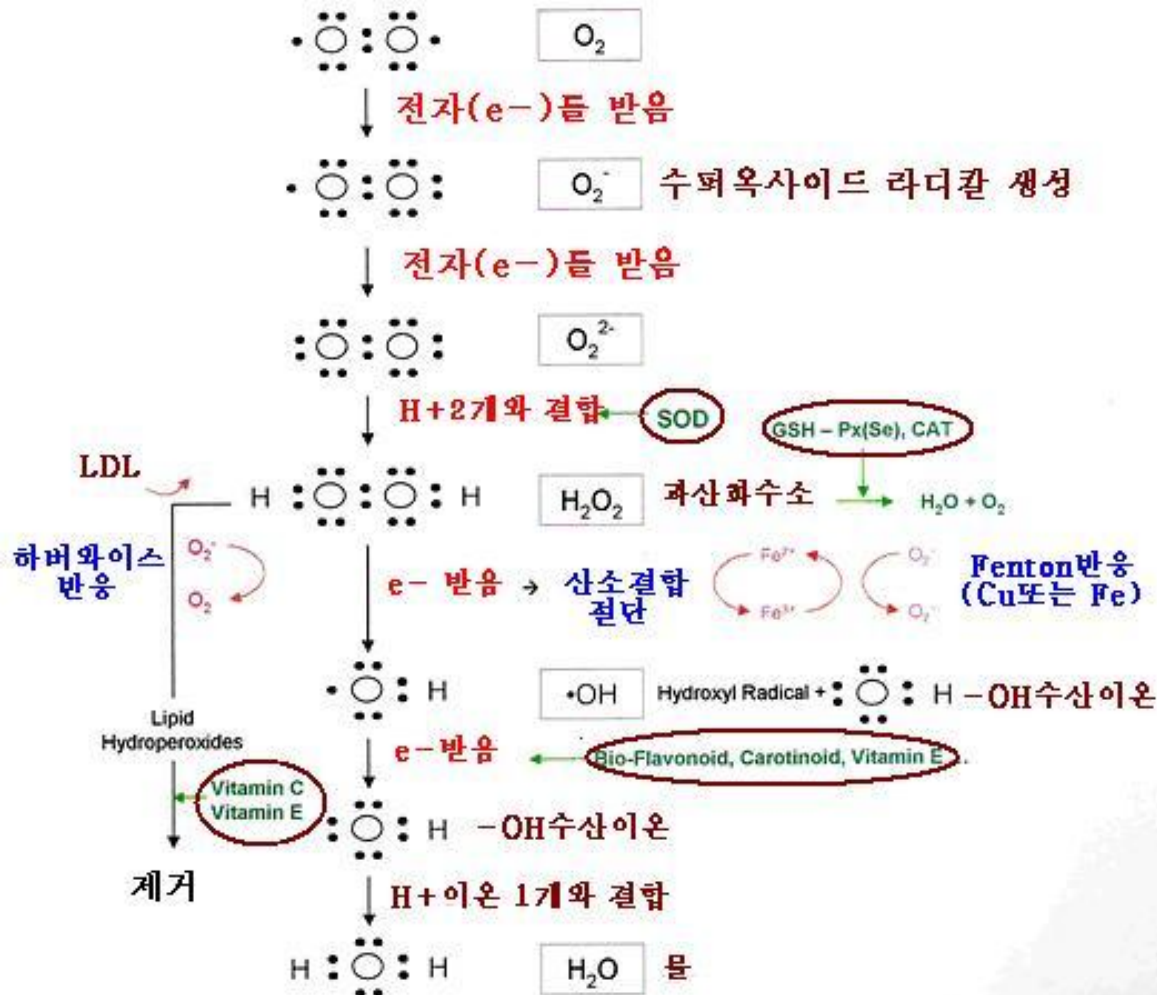
바로 노화의 주범이며, 중간에 탈출하는 물질중 가장 문제를 일으키는 놈입니다. Hydroxyl radical은 작용시간이 매우 짧아 약 10억분의 1초만에 옆의 전자를 빼앗아오게됩니다.

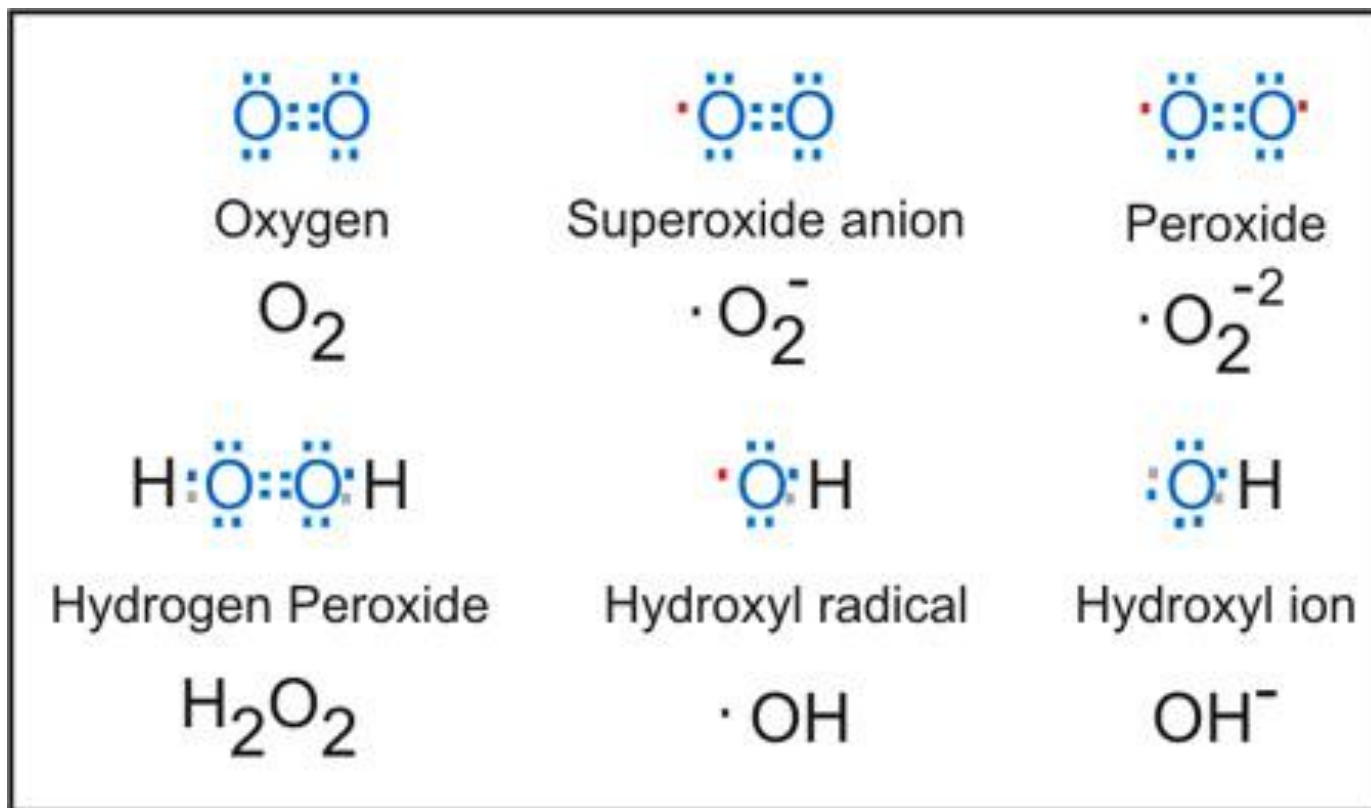


활성산소 생성 과정

1) 체내 흡입 산소(O_2)의 이상적 결합은 4개의 전자에 의한 4가 환원이다. 즉 O_2 가 4개의 전자와 결합하여 H_2O 를 생성하는 것이다

2) 그러나 1가 환원되면 활성 산소가 생긴다



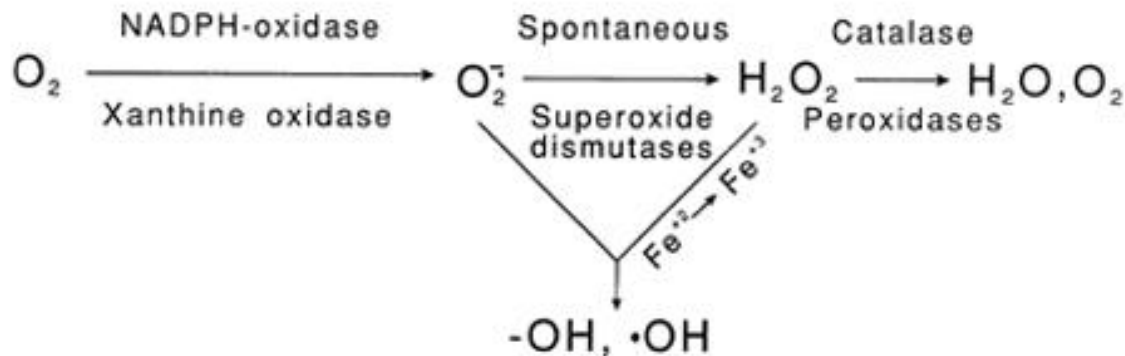
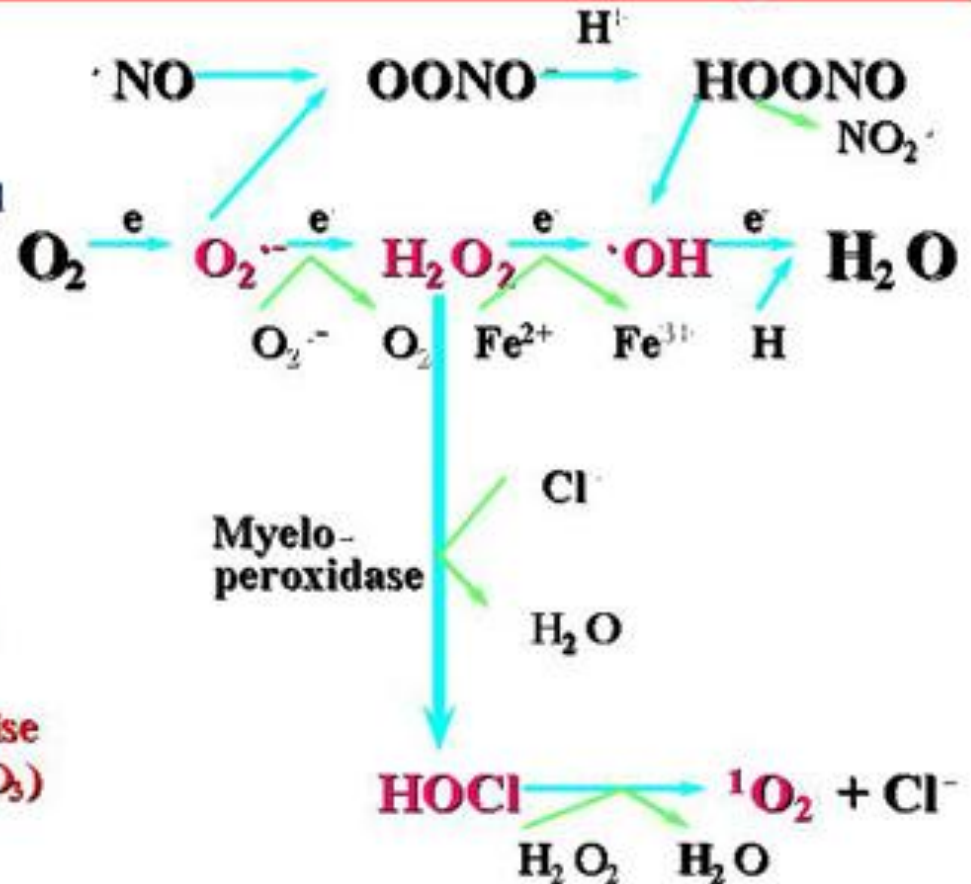


Types of Reactive Oxygen Species

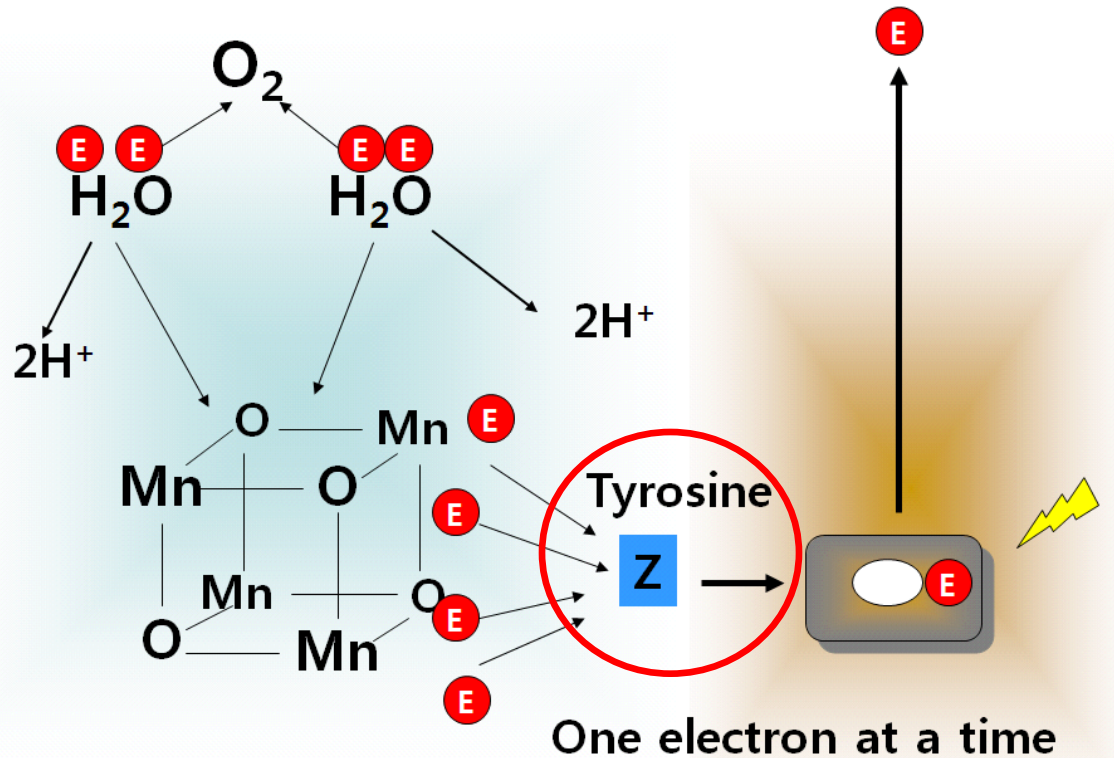
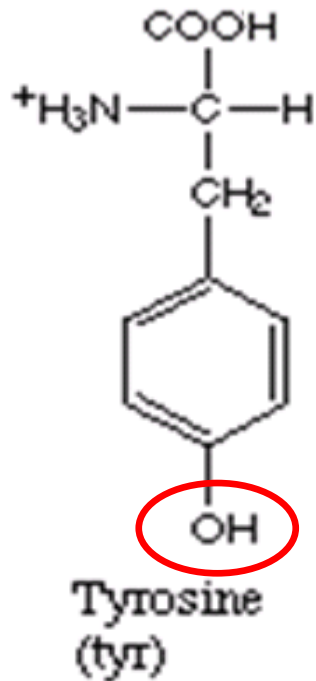
Most reactive oxygen species are generated as by-products during mitochondrial electron transport. In addition ROS are formed as necessary intermediates of metal catalyzed oxidation reactions. Atomic oxygen has two unpaired electrons in separate orbits in its outer electron shell. This electron structure makes oxygen susceptible to radical formation. The sequential reduction of oxygen through the addition of electrons leads to the formation of a number of ROS including: superoxide; hydrogen peroxide; hydroxyl radical; hydroxyl ion; and nitric oxide. (Figure 1).

Generation in mammalian organism

Sources endogenous exogenous

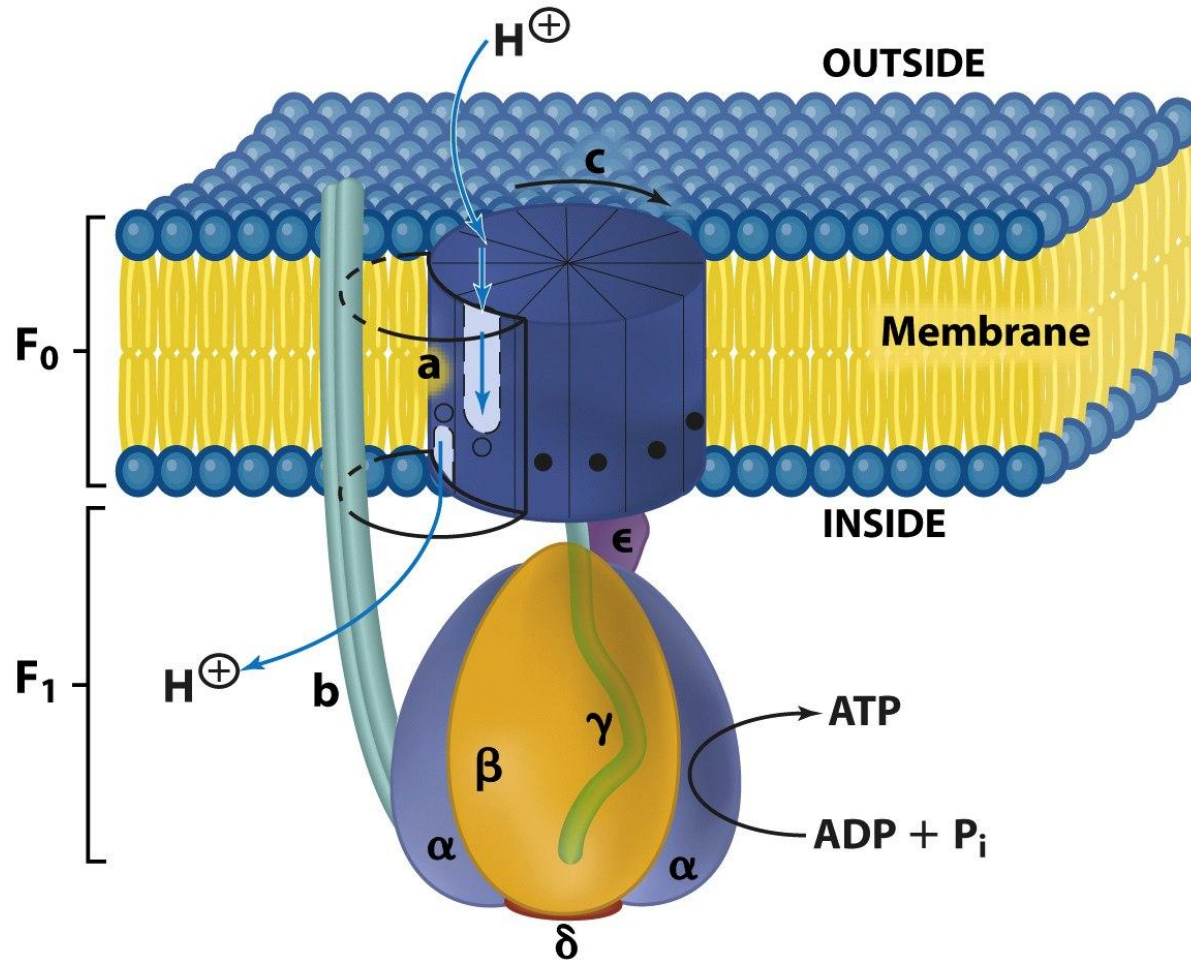


핵심기억-#19 : 티로신 아미노산 (Tyrosine)



티로신(Tyr)은 광계 II가 물을 분해할 때 발생하는 전자를 회수하는 아미노산으로서 그 분자 구조는 위 그림과 같은데, 여기서 중요한 것은 **OH기**로 전자 or 양성자를 쉽게 붙였다 떼었다 하는 기능을 합니다. Tyrosine은 P680엽록소가 활성화될 때 작용을 하게되며, 태양에너지에 의해서 엽록소가 흥분되어 전자를 잃어버렸을때 물에서 탈취한 전자 4개를 그 공간에 메꿔서 채워주는 역할을 하게 됩니다.

핵심기억-#20 : ATP 합성효소의 구조



Knob-and-stalk structure of ATP synthase

Average of 3 protons transported supports 1 ATP synthesis

Figure 14-14a Principles of Biochemistry, 4/e
© 2006 Pearson Prentice Hall, Inc.

ATP 합성효소의 구조를 보면 머리부분인 F₁ ATP분해효소와 F₀라 불리는 막관통 H⁺ 운반체로 구성되어 있는데, F₀와 F₁은 다시 여러 개의 소단위체로 구성되어 있습니다. 즉 F₁은 α₃, β₃, γ, δ, ε 소단위체, F₀는 a, b₂, c_{9~14}의 소단위체로 구성됩니다.

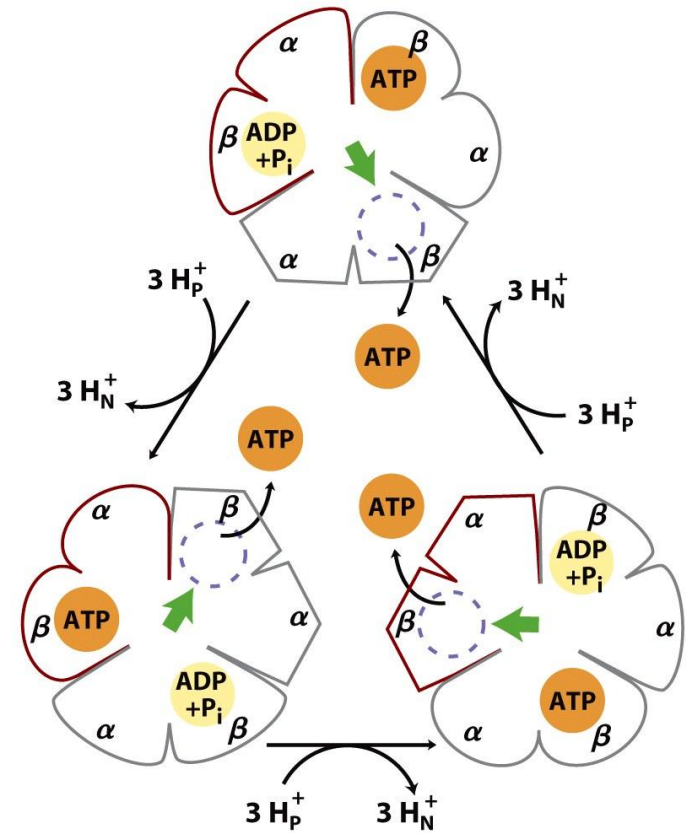
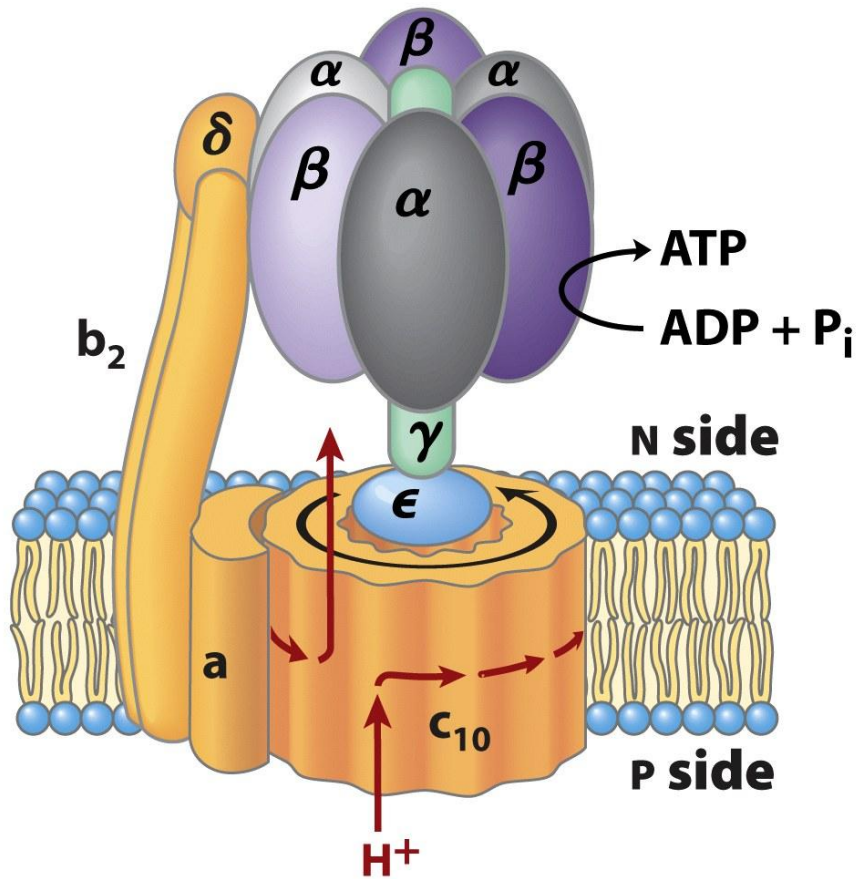
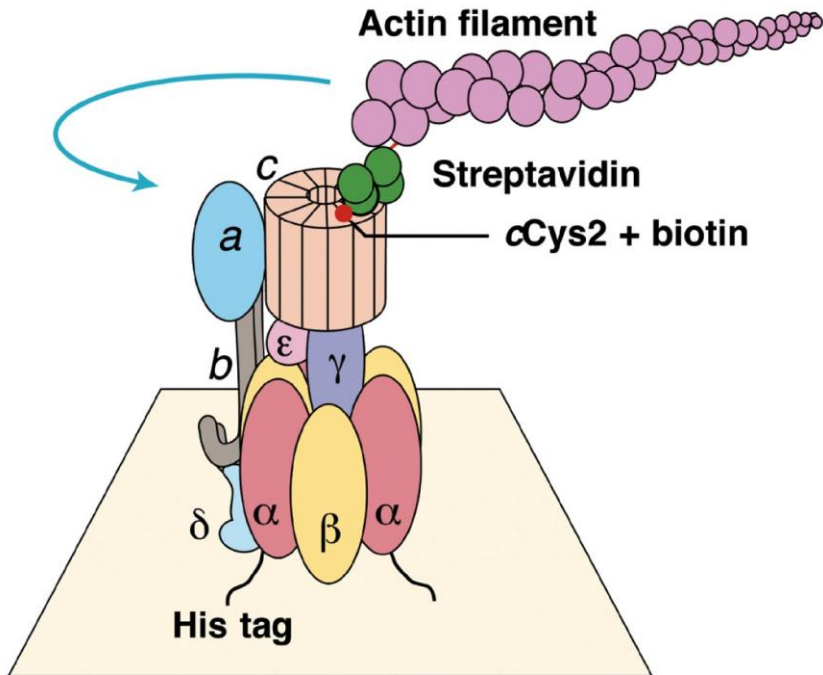


Figure 19-26
Lehninger Principles of Biochemistry, Fifth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

ATP 합성효소의 움직이는 부분은 c, γ, ε 부분이며 α, β 소단위체는 회전하는 것이 아니라 단백질의 구조가 변하면서 벌렁벌렁 움직임을 통해 ATP를 튕겨내는 역할을 합니다.



The rotation of the c-ring

ATP 합성효소의 C 소단위체의 움직임을 촬영한 사진입니다

Figure 17-27a Fundamentals of Biochemistry, 2/e

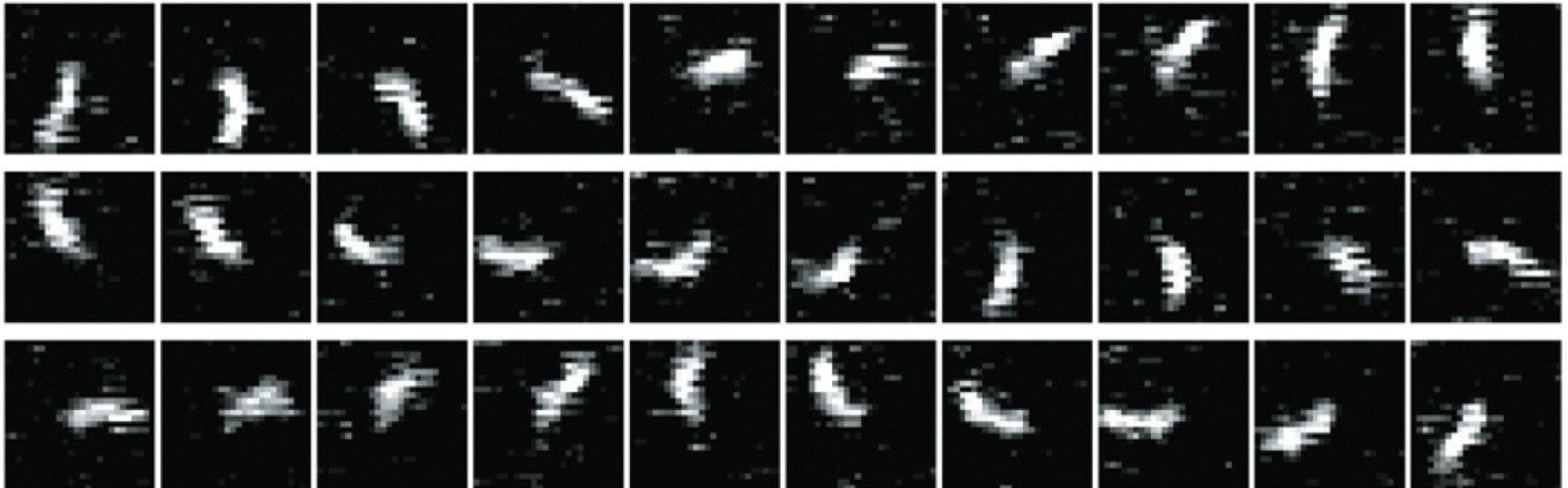
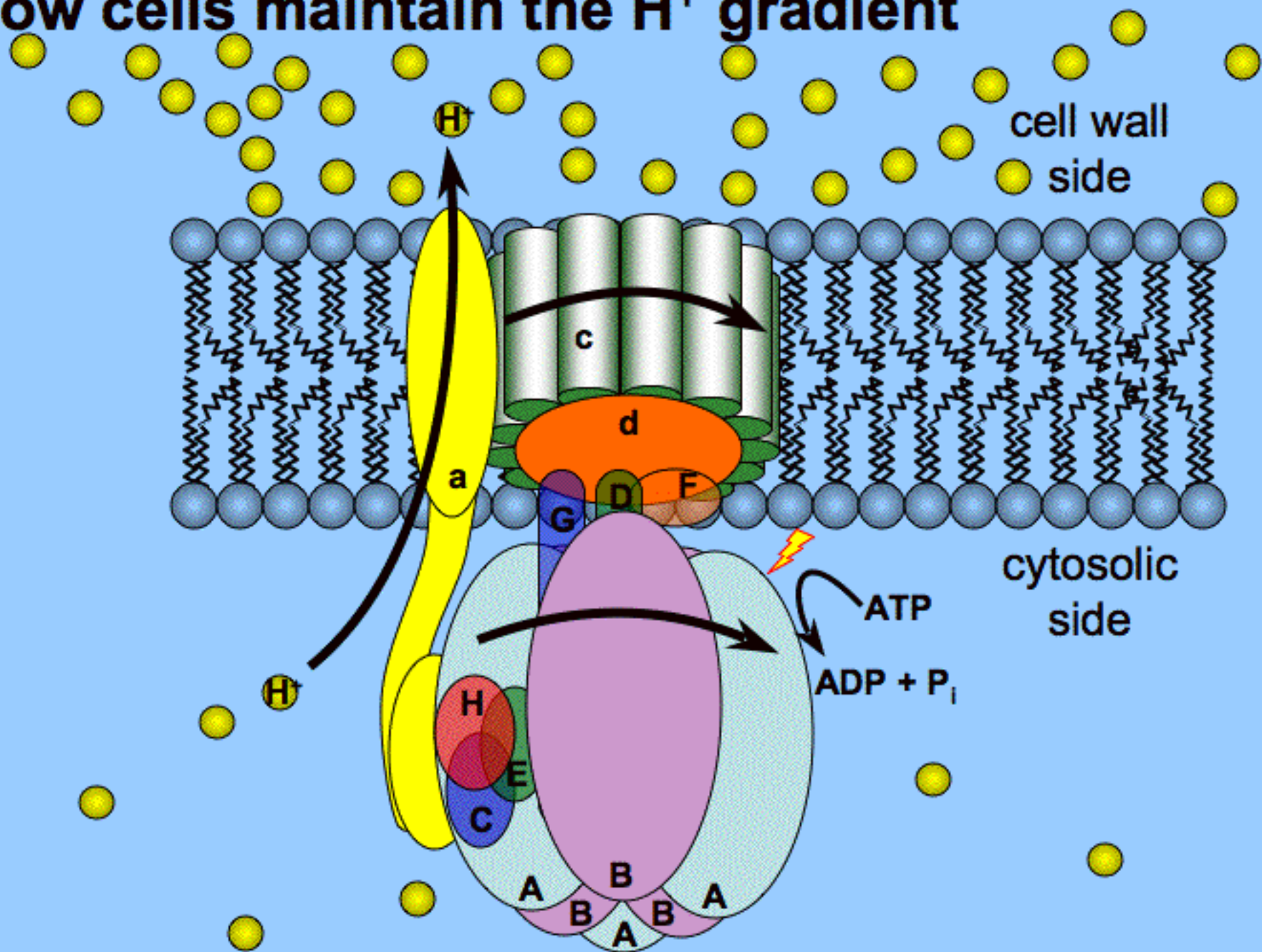
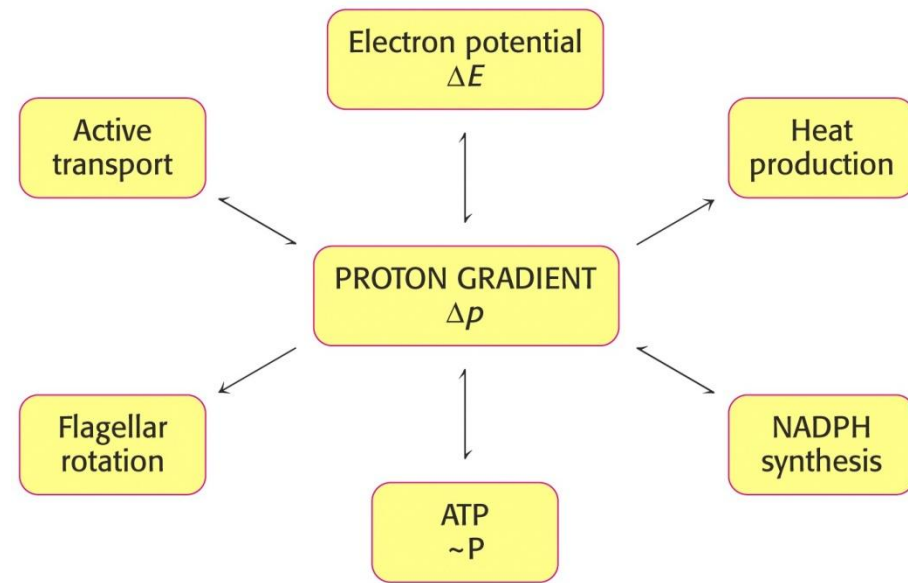
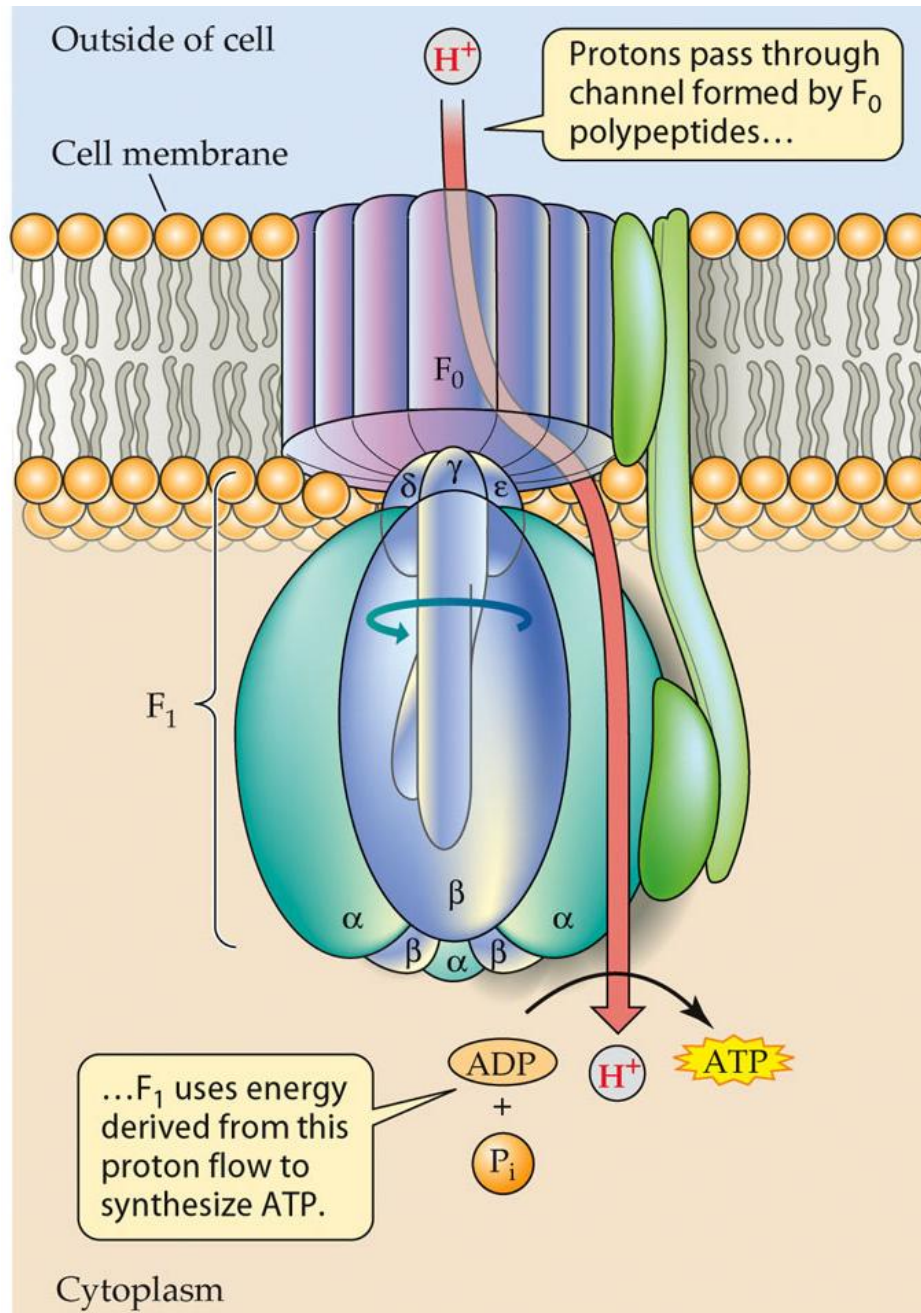
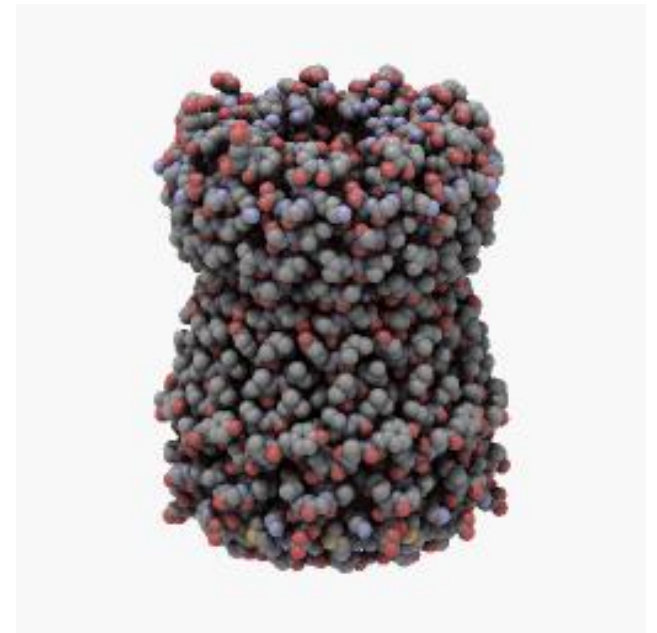
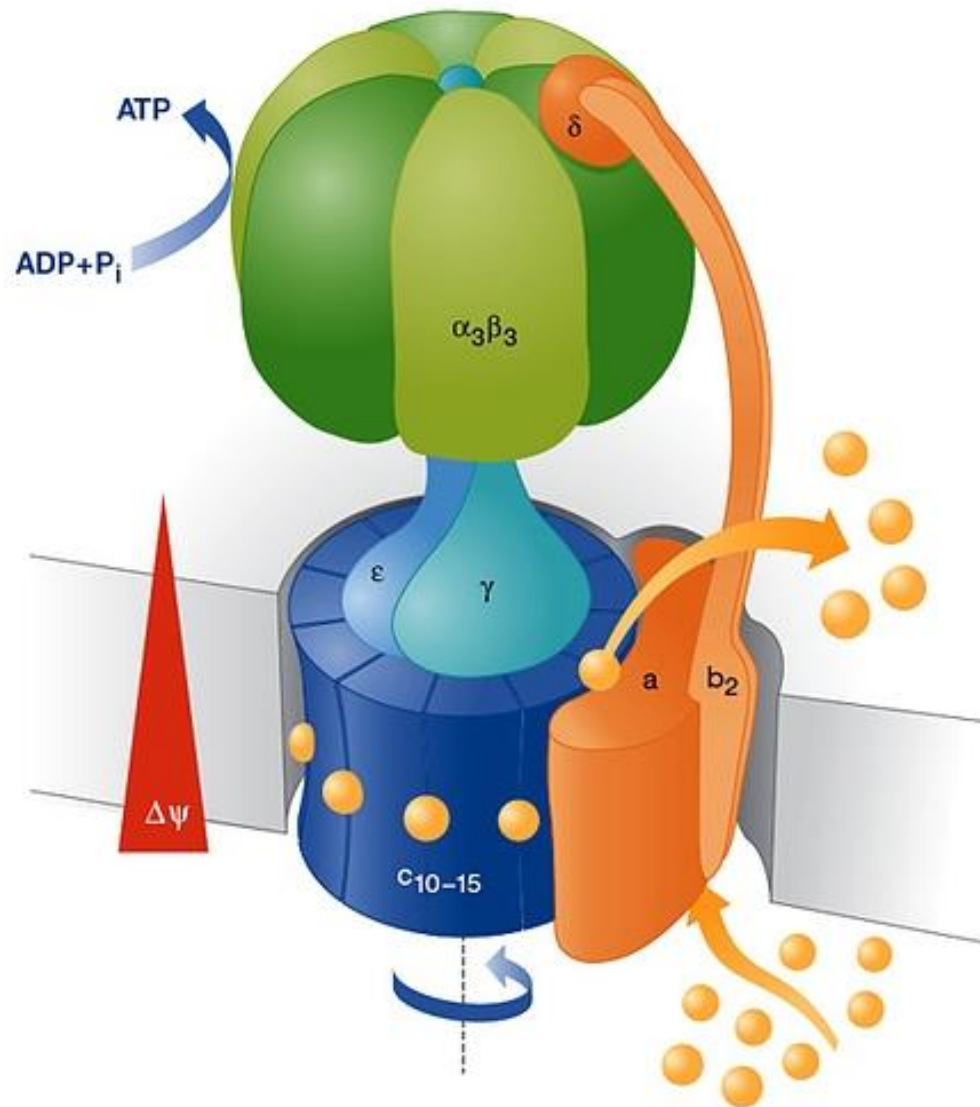


Figure 17-27b Fundamentals of Biochemistry, 2/e

How cells maintain the H^+ gradient

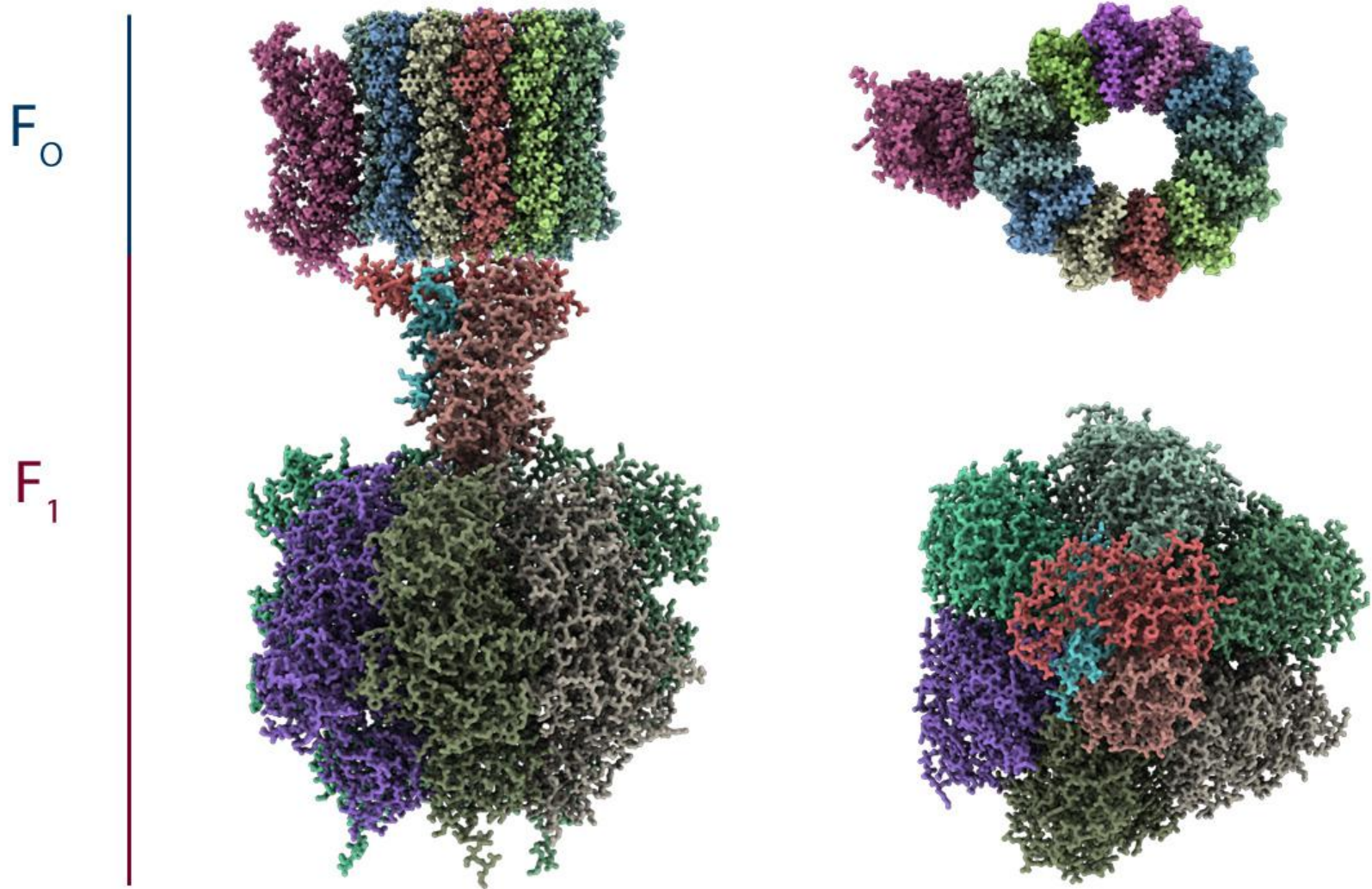




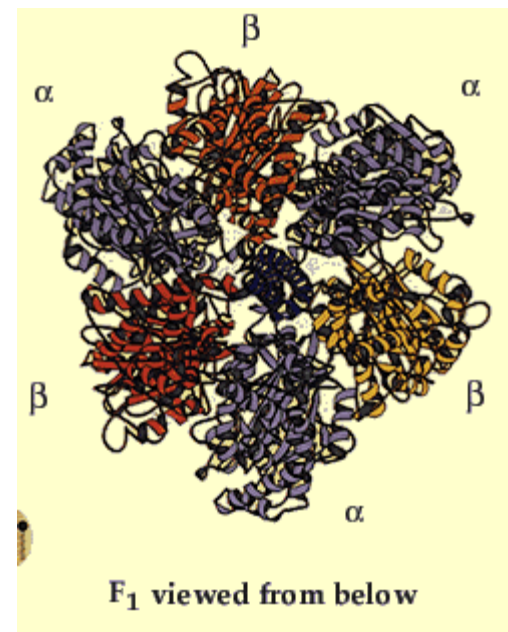
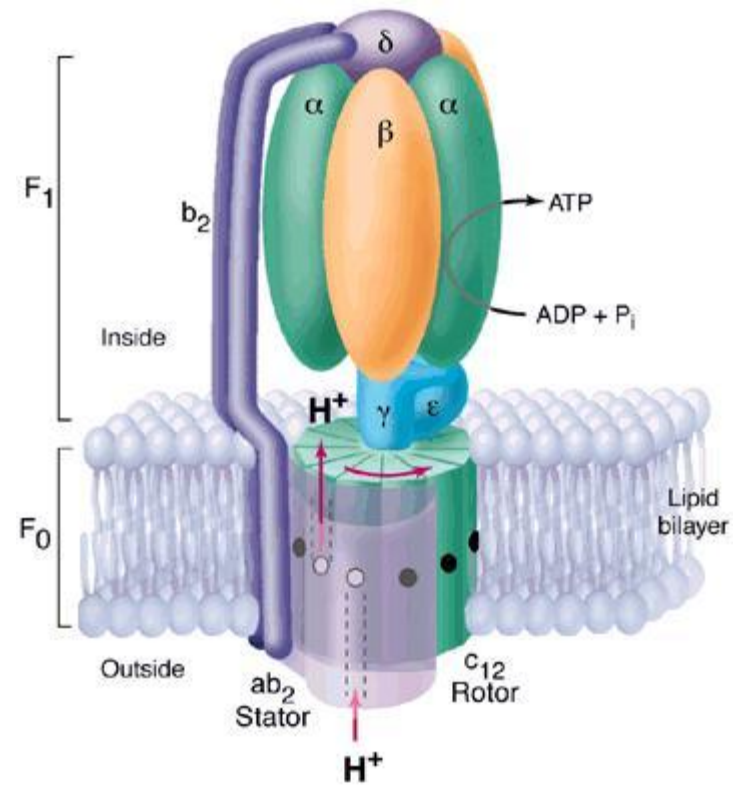
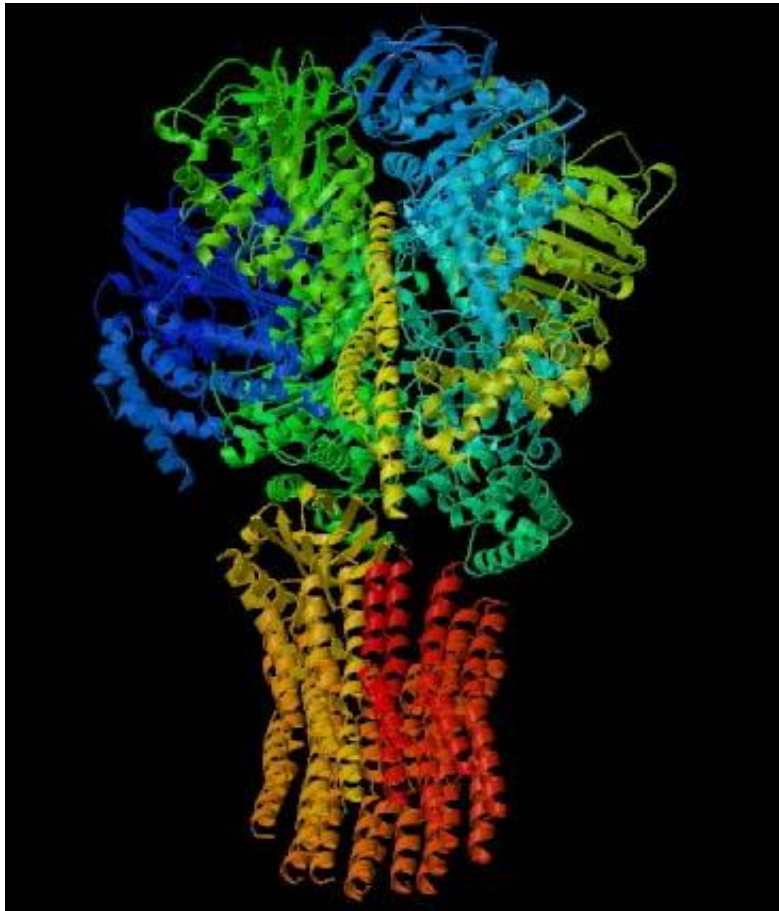


ATP Synthase (Incomplete structure)

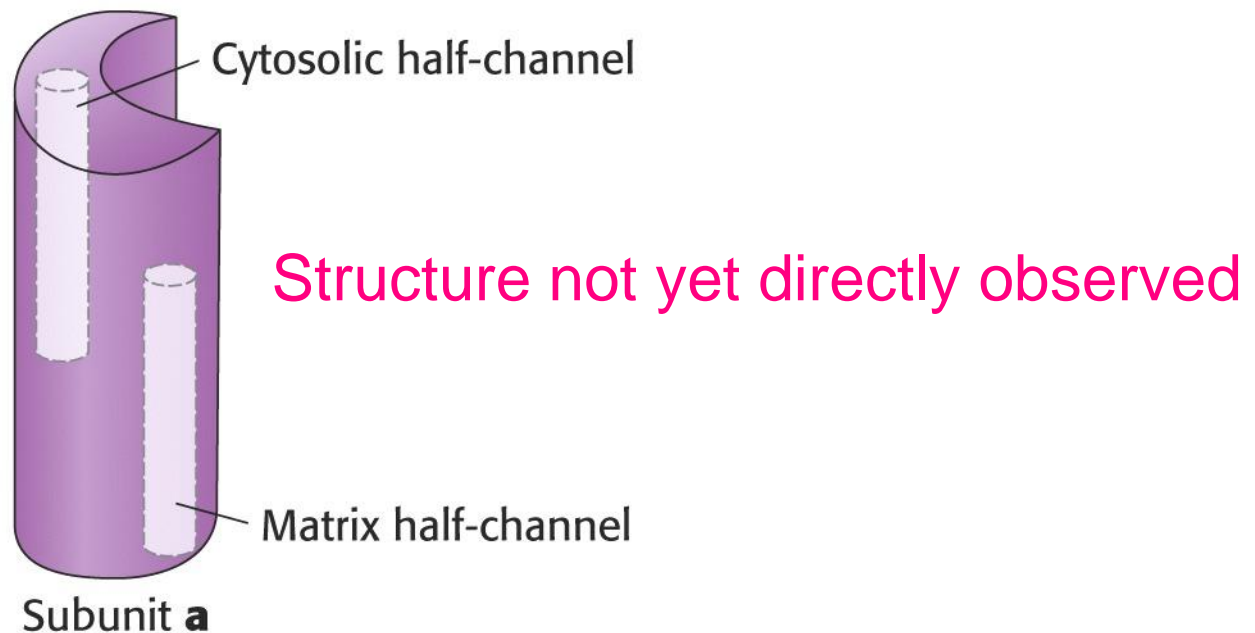
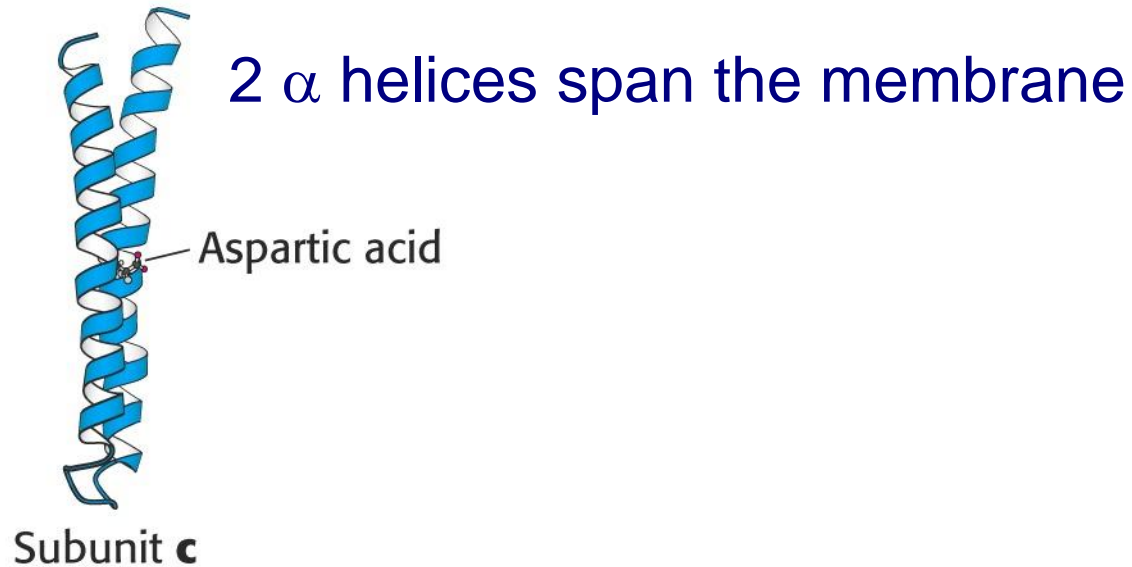
Illustrated by: Amin Mahpour



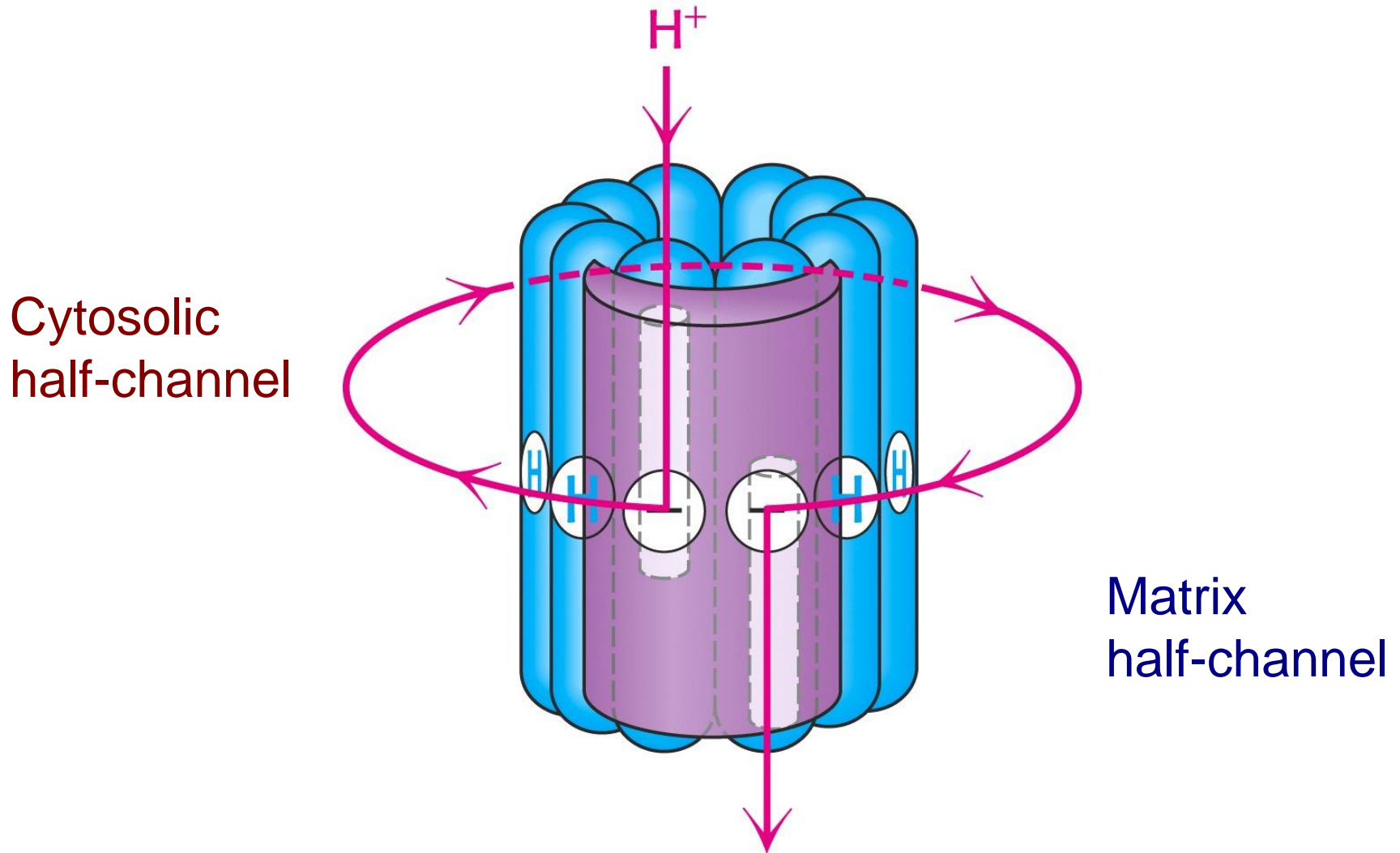
ATP 합성효소의 본질적인 모습입니다. 모두 단백질로 구성된 복합체로서 꼬불꼬불하게 꼬여져 있는 수많은 아미노산 사슬로 이루어져 있는 것입니다.



Components of the proton-conducting unit

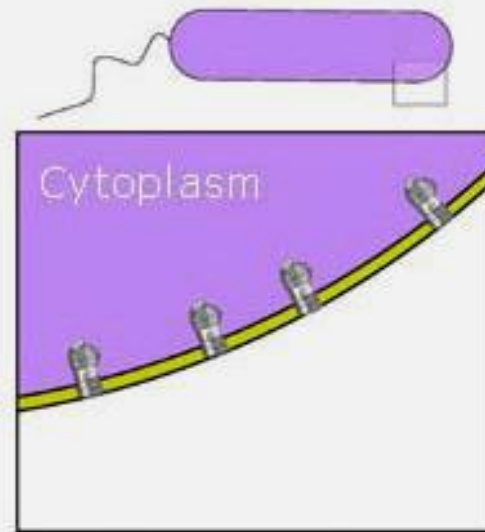
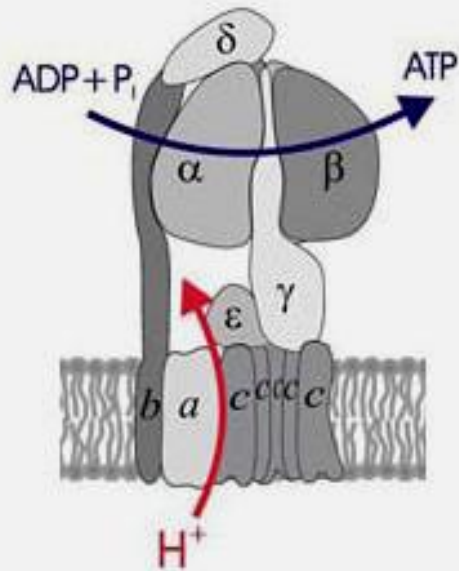


Proton path through the membrane



ATP 합성효소의 a 소단위체에 엇갈려 뚫려있는 두 개의 구멍을 통해 양성자가 막을 통과하는 경로를 표시한 그림입니다.

Bacteria



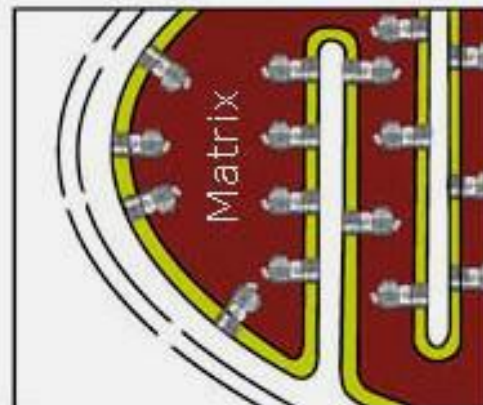
ATP합성효소는 박테리아, 엽록체, 미토콘드리아에 모두 존재하는데,

미토콘드리아의 기질내막, 엽록체의 틸라코이드막, 박테리아의 크리스탈막에 붙어있습니다.

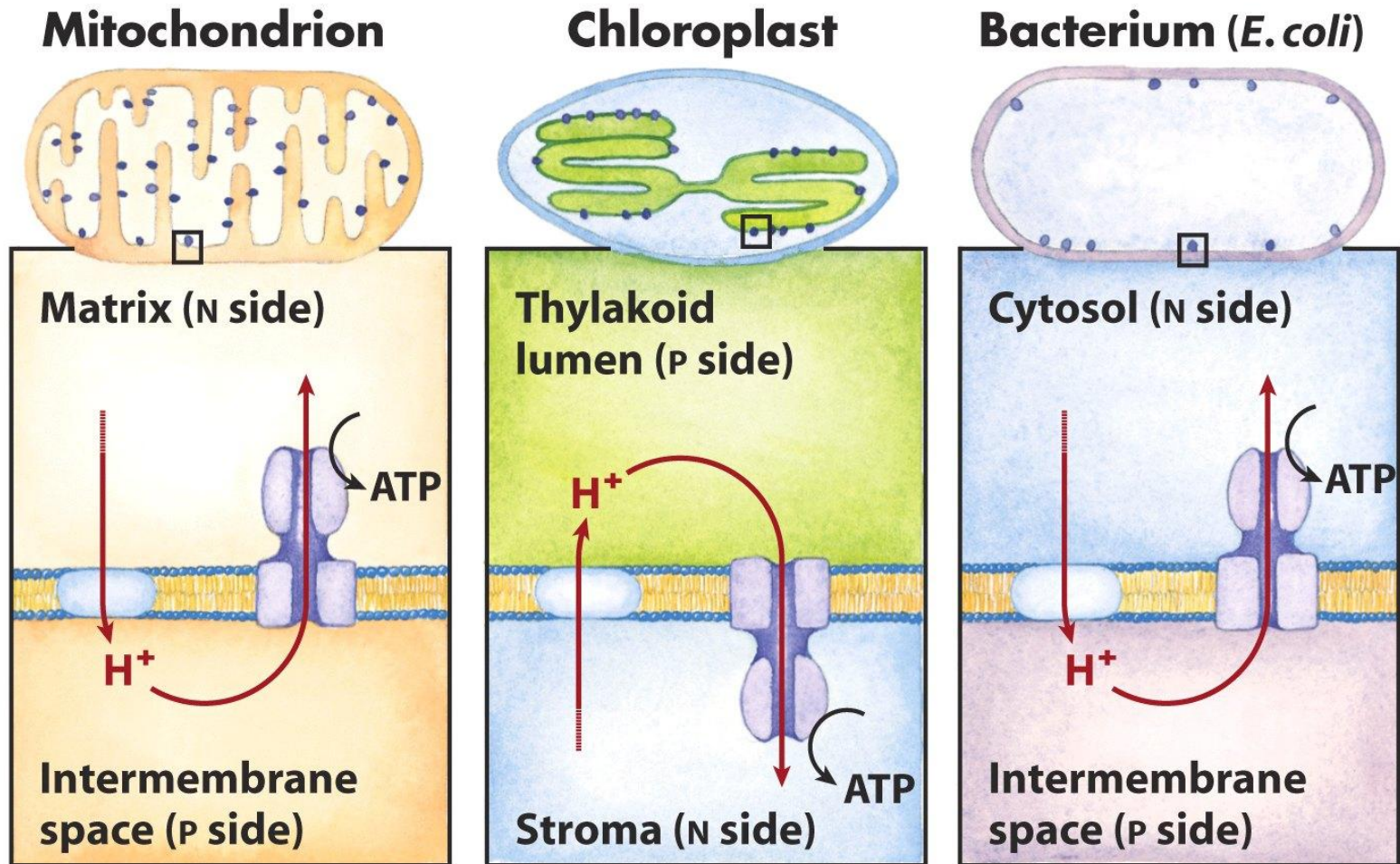
Chloroplasts

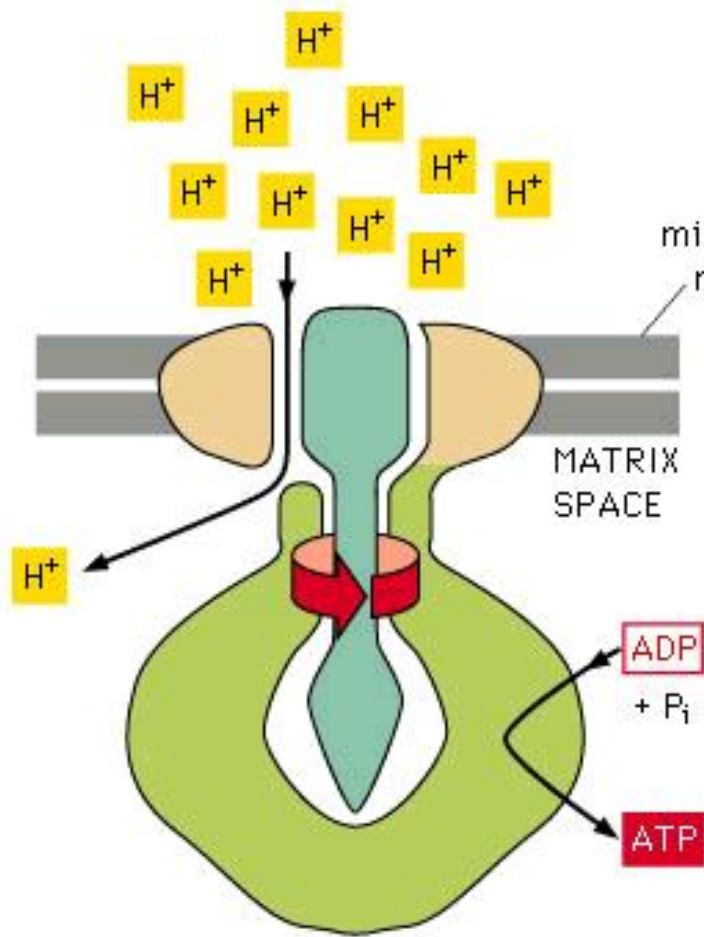


Mitochondria

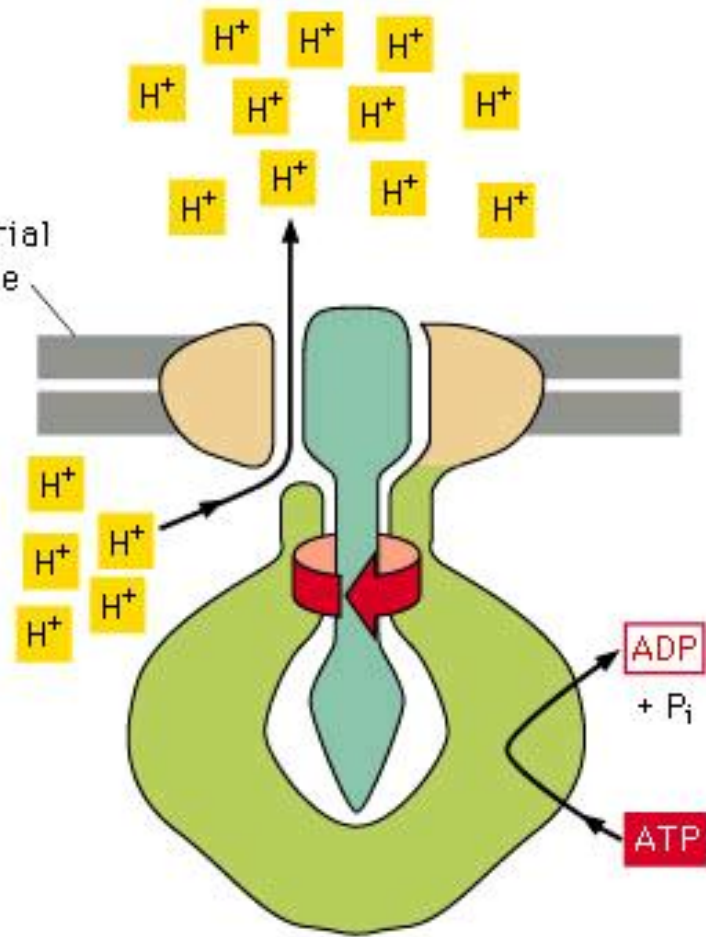


3 Similar Cases Where Proton Movement Drives ATP Synthesis





(A) ATP SYNTHESIS



(B) ATP HYDROLYSIS

©1998 GARLAND PUBLISHING

ATP합성효소는 양성자 구배를 이용하여 ATP를 합성하기도 하고, 반대로 ATP를 가수분해하여 전기화학적 구배에 반하여 양성자를 이동시키기도 합니다. 막을 통한 양성자의 이동이나 $ADP + P_i$ 에 의해 ATP를 합성하는 과정은 상호 연계되어 있으며, 이들의 작용 방향은 각 상황에서의 자유에너지 변화에 따라 결정되게 됩니다.

Science

14 January 2005

Vol. 307 No. 5707
Pages 165-300 \$10

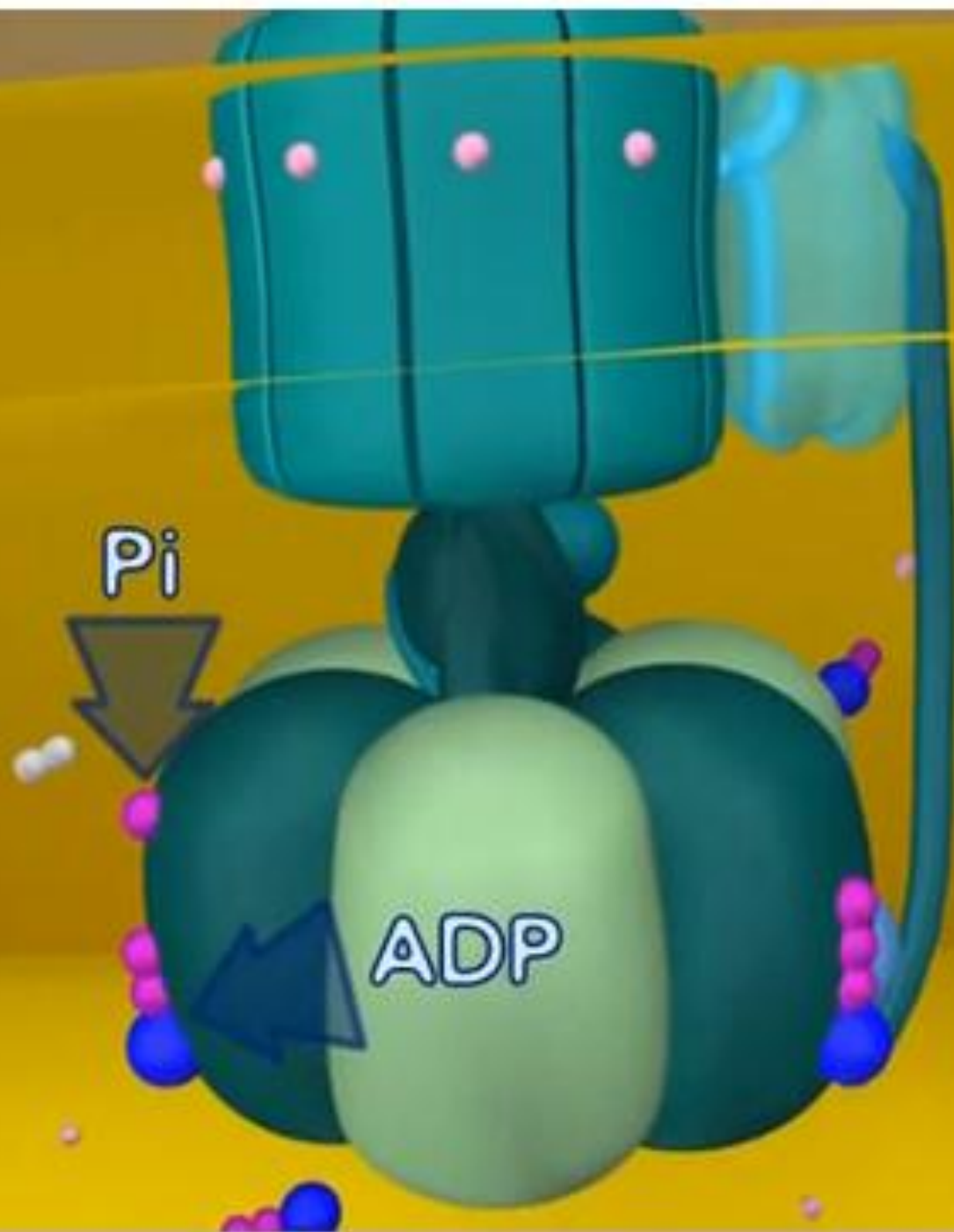


2005년 1월의 Science지의 표지 모델로 ATP 합성효소의 사진이 실려 있습니다.

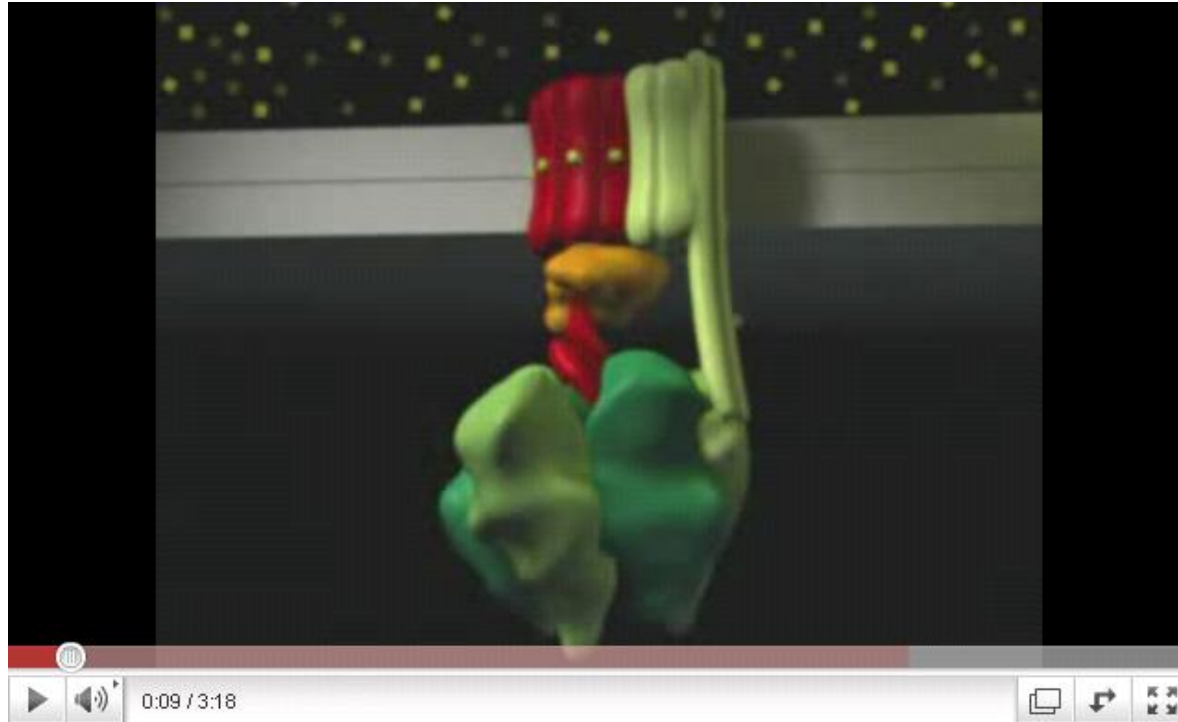
ATP 합성효소는 100여년 동안 지속적으로 연구되어 왔으며, 2 번의 노벨상이 여기에서 나오기도 하였습니다

ATP 합성효소의 구조와 동작을 동영상 통해 정리해 보도록 하겠습니다.





이제까지 설명한 미토콘드리아 내막의 전자전달계 (Electron transport chain)의 전체 과정을 동영상 통해 정리해 보도록 하겠습니다.



```
<object width="480" height="385"><param name="movie"
value="http://www.youtube.com/v/uOoHKCMAUMc&hl=ko_KR&fs=1"></param><param
name="allowFullScreen" value="true"></param><param name="allowsriptaccess"
value="always"></param><embed src="http://www.youtube.com/v/uOoHKCMAUMc&hl=ko_KR&fs=1&"
type="application/x-shockwave-flash" allowsriptaccess="always" allowfullscreen="true" width="480"
height="385"></embed></object>
```