

2016.03.17.

CNI세미나 2016-014

# 미래에너지의 탐색

- 미생물 연료전지와 핵융합에너지 -



2016 제1차 충남미래연구포럼



# 미래에너지의 탐색

## - 미생물연료전지와 핵융합에너지 -







## 미래에너지의 탐색

### - 핵융합에너지와 미생물 연료전지 -

#### □ 충남미래연구포럼 개요

- 주 제 : 미래에너지의 탐색 - 핵융합에너지 & 미생물연료전지
- 일 시 : 2016.03.17.(목) 15:00 ~
- 장 소 : 충남연구원 3층 세미나실
- 주요참석 : 외부전문가, 충남도청(에너지산업과), 충남연 등
- 주 최 : 충남연구원 미래전략연구단

#### □ 진행흐름

구분	시 간		소요	내 용	비 고
	부터	까지			
미생물 연료전지	15:00	15:05	5분	♦ 인사말씀(참석자 소개 등)	충남연구원 송두범 단장
	15:05	15:35	30분	♦ 발표. 미생물 연료전지의 현황과 발전전망	안 준 영 박사 (광주과학기술원 에너지바이오테크연구실 연구원)
	15:35	16:25	50분	♦ 질의응답 및 자유 토론	참 석 자 모 두
♦ 휴 식 (10분)					
핵융합 에너지	16:35	16:40	5분	♦ 인사말씀(참석자 소개 등)	충남연구원 송두범 단장
	16:40	17:10	30분	♦ 발표. 핵융합에너지 개발, 어디까지 왔나?	권 면 박사 (국가핵융합연구소 선임연구위원)
	17:10	17:55	45분	♦ 질의응답 및 자유 토론	참 석 자 모 두
	17:55	18:00	5분	♦ 정리 및 폐회	충남연구원 송두범 단장



CNI세미나 2016-014 | 제1차 충남미래연구포럼 | 2016.03.17. |

## 미래에너지의 탐색



**주 제 발 표**

---

## **미생물연료전지의 현황과 발전전망**

---

**안 준 영 || 광주과학기술원 에너지바이오테크연구실 연구원**

---



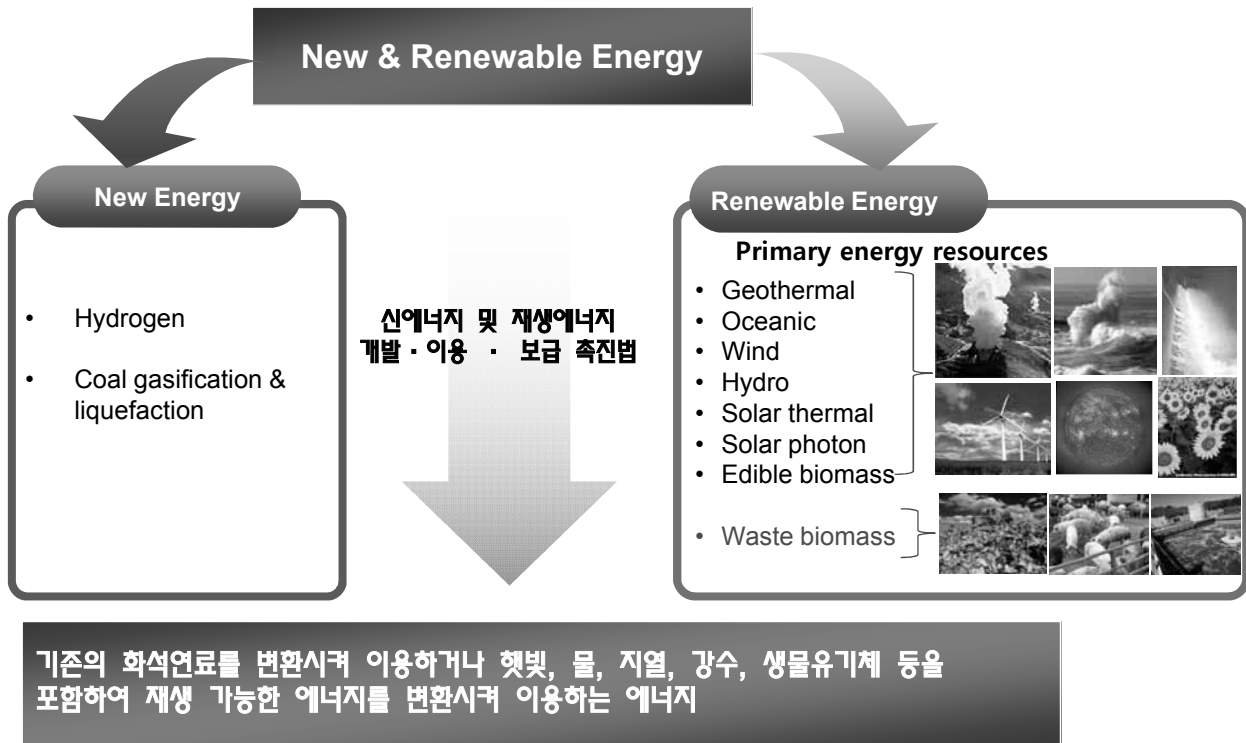
Energy and Biotechnology Laboratory (EBL), School of Environmental  
Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology  
(GIST)



## 환경에너지기술의 필요성



# 신재생에너지란?



## 자연계에 존재하는 다양한 1차 에너지와 그 변환 기술(1)



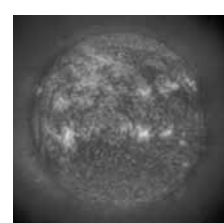
Potential energy



kinetic energy



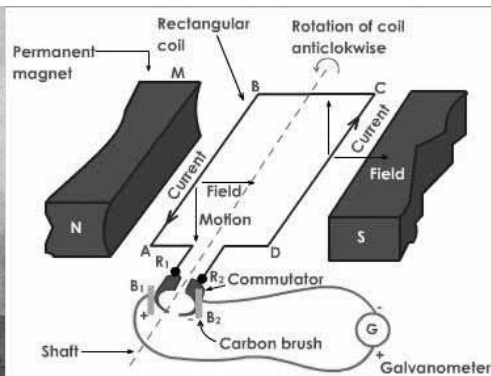
Geothermal energy



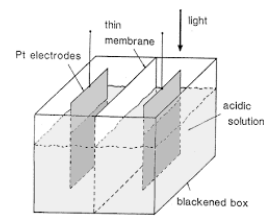
Photon



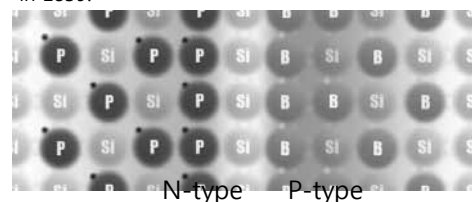
Michael Faraday (1791-1867) invented the generator in 1831.



(1820-1891)



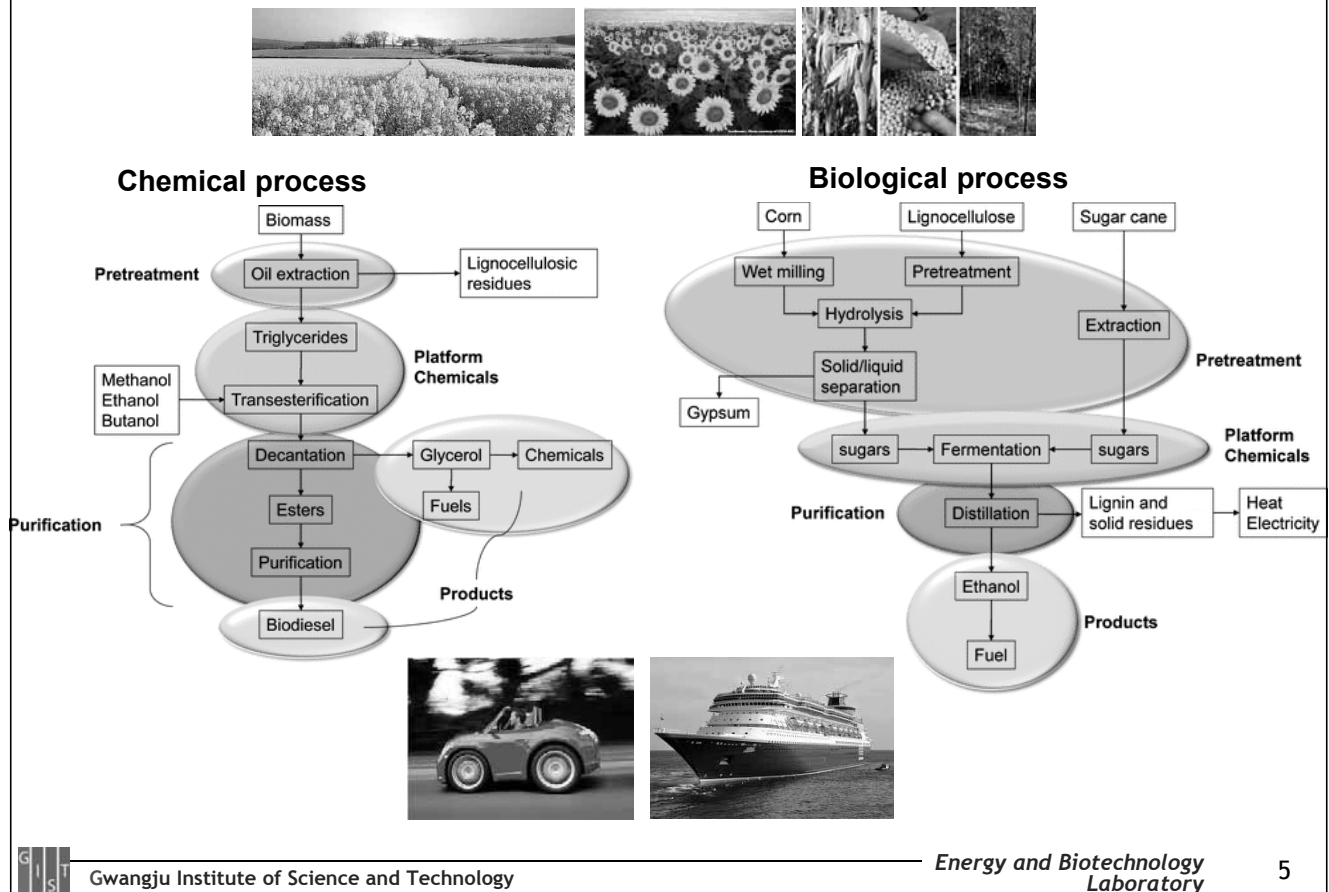
The photovoltaic effect was first observed by French physicist, Alexandre-Edmond Becquerel, in 1839.



N-type P-type



## 자연계에 존재하는 다양한 1차 에너지와 그 변환 기술(2)



## 자연계에 존재하는 다양한 1차 에너지와 그 변환 기술(3)



Source, <https://www.google.com>; keywords: forest waste, food waste, municipal waste, industrial waste, livestock waste

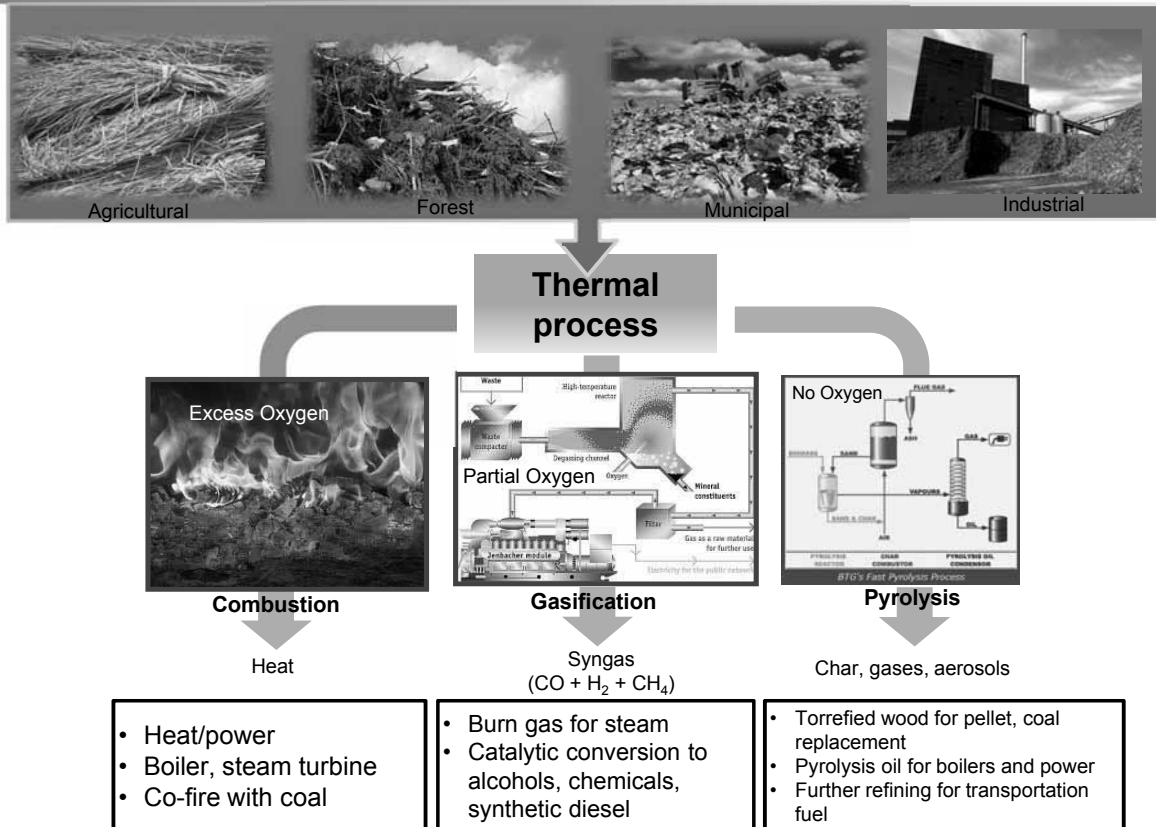
### Bioresource Technology

#### Thermal vs Biological

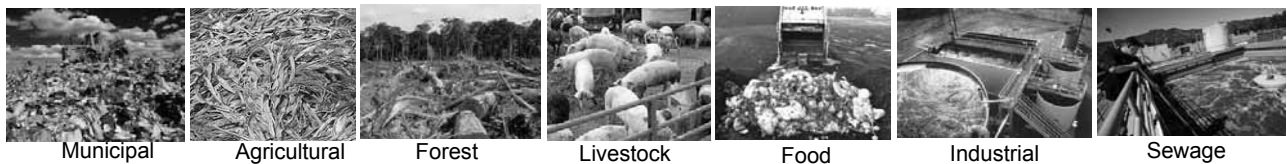


Source, <https://www.google.com>; keywords: forest waste, food waste, municipal waste, industrial waste, livestock waste

## 폐 바이오매스 에너지 전환 기술(1)



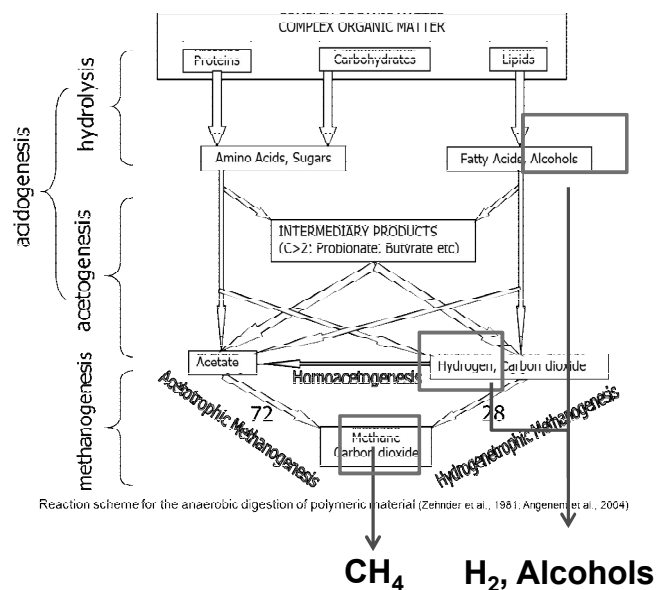
## 폐 바이오매스 에너지 전환 기술(2)



Landfill gas recovery

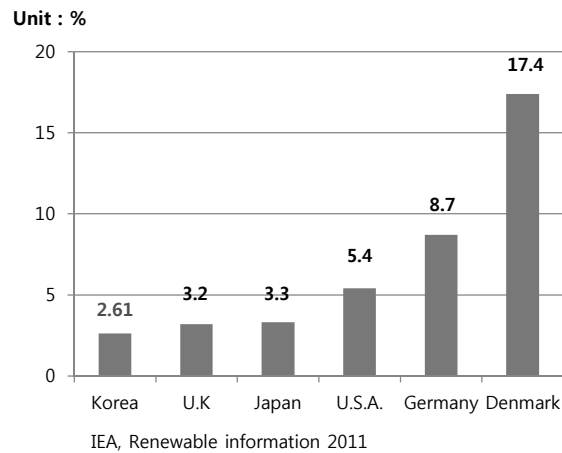


Anaerobic digester



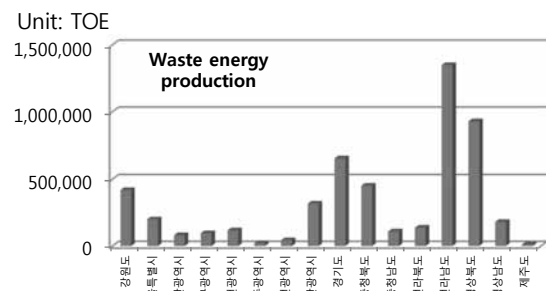
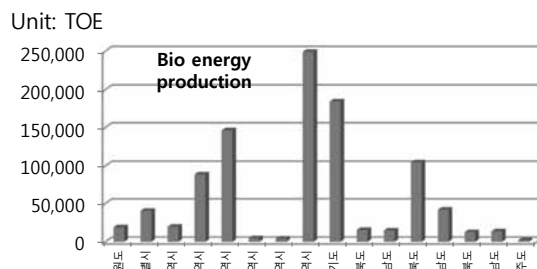
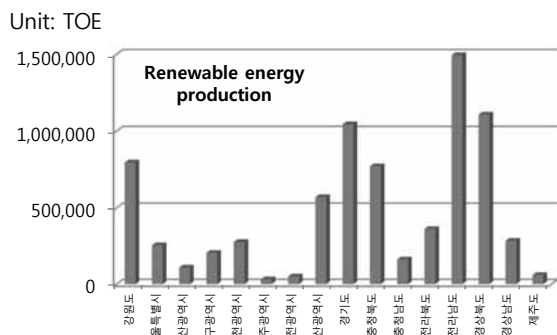
Reaction scheme for the anaerobic digestion of polymeric material (Zehnder et al., 1981; Angenent et al., 2004)

## 주요국 신재생에너지 공급비중(2010년)



➤ 2030년까지 신재생에너지 공급비중 11%까지 확대

## 국내 지역별 신재생에너지 생산량 및 비율



KOSIS (국가통계포털, 2012)

# 바이오에너지와 폐기물에너지의 기준 및 범위

구분	기준 및 범위		비고
바이오 에너지	기준	1. 생물유기체를 변환시켜 얻어지는 기체, 액체 또는 고체의 연료 2. 제2호의 연료를 연소 또는 변환시켜 얻어지는 에너지 ※ 제2호 또는 제3호의 에너지가 신·재생에너지가 아닌 석유제품 등과 혼합된 경우에는 생물유기체로부터 생산된 부분만을 바이오에너지로 본다.	'신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 시행령 제2조 관련 발표' 바이오에너지 등의 기준 및 범위
	범위	1. 생물유기체를 변환시킨 바이오가스, 바이오에탄올, 바이오액화유 및 합성가스 2. 쓰레기매립장의 유기성폐기물을 변환시킨 매립지가스 3. 동물·식물의 유기성(油脂)을 변환시킨 바이오디젤 4. 생물유기체를 변환시킨 펄프, 목재칩, 펄릿 및 목탄 등의 고체연료	
폐기물 에너지	기준	1. 각종 사업장 및 생활시설의 폐기물을 변환시켜 얻어지는 기체, 액체 또는 고체의 연료 2. 제2호의 연료를 연소 또는 변환시켜 얻어지는 에너지 3. 폐기물의 소각열을 변환시킨 에너지 ※ 제2호부터 제3호까지의 에너지가 신·재생에너지가 아닌 석유제품 등과 혼합되는 경우에는 각종 사업장 및 생활시설의 폐기물로부터 생산된 부분만을 폐기물에너지로 본다.	
	범위	없음	

자료: 법제처

현행의 법·제도에서 나타나는 바이오에너지와 폐기물에너지의 혼동문제를 개선하고, 바이오에너지를 활성화시키기 위하여 2013년 산업통상자원부에서는 바이오에너지 기준 및 범위설정에 관한 연구(김진오, 2013)를 통해 개선된 바이오에너지의 기준 및 범위를 제시하였으며, 이를 근거로 법 개정을 추진 중에 있다.



## 국내 바이오에너지 범위

구분	종류		바이오에너지의 범위
고체 바이오에너지	비성형 고체 바이오연료	목질계	장작, 목재칩, 호그 등
		임산부산물	톱밥, 잣껍질, 잔디예초물, 팜부산물 등
		농산부산물	벼짚, 보릿짚, 밀짚, 왕겨, 유채대, 콩대, 옥수수대, 땅콩껍질 등
		유기성폐기물	폐목재, 펄프 및 제지슬러지, 흑액, 하수슬러지 등
	성형 고체 바이오연료		펠릿, 브리켓, 성형탄 등
액체 바이오에너지	열분해 고체 바이오연료		목탄, 바이오차 등
	휘발유 대체 바이오연료		바이오에탄올, ETBE(47%이상), 바이오부탄올, 에스테르 바이오연료, F-T가솔린 등
	경유 대체 바이오연료		바이오디젤(FAME), 수첨 바이오디젤(HBO), 바이오 DME, 바이오 F-T디젤, 목질계 디젤 등
	기타 바이오연료		식물성 기름(PVO), 액화 바이오메탄, 바이오항공유 등
기체 바이오에너지	혐기소화가스	매립지가스	쓰레기매립장의 유기성 폐기물을 변환시킨 매립지 가스
		하수슬러지가스	하수슬러지를 혐기소화시켜 얻어지는 하수슬러지 가스
		기타혐기소화가스	기타 생물유기체(가축분뇨, 음식물쓰레기 등)를 혐기소화시켜 얻어지는 혐기소화 가스
	합성가스		생물유기체를 열화학적으로 변환시켜 얻어지는 합성가스

자료: 김진오 등, 2013

# 유기성 폐바이오매스로부터 전기를 생산하는 미생물연료전지

## "Waste Biomass to Energy" Technologies



Livestock waste



Food waste

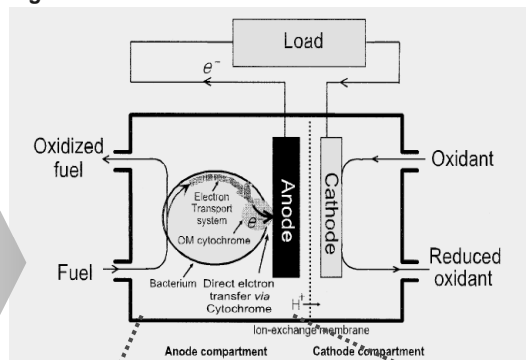


Industrial waste

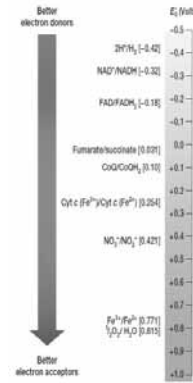


Municipal waste

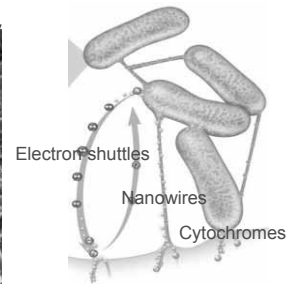
FUEL



Working principle for microbial fuel cell (left); redox tower for estimation of available voltage in MFCs (right).



Electrochemically active bacteria (EAB) producing electrons and protons on the bioanode (left); electron transfer mechanisms of EAB (right)

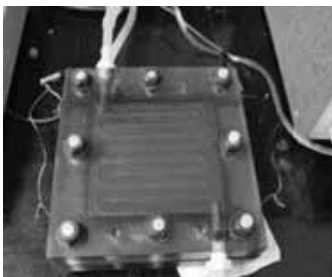


Gwangju Institute of Science and Technology

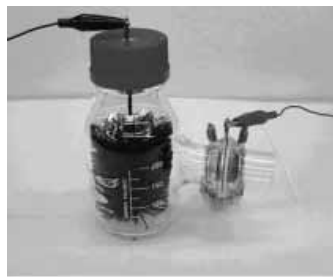
Energy and Biotechnology Laboratory

13

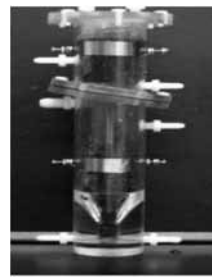
## 하·폐수 처리용 Lab-Scale 미생물연료전지와 성능



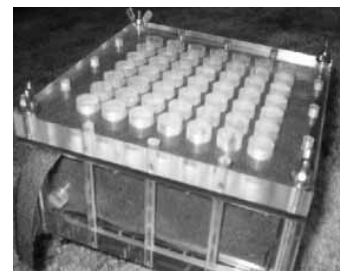
COD 제거효율 : 79%  
전력생산 :  $72 \pm 1 \text{ mW/m}^2$   
(Min et al. 2004)



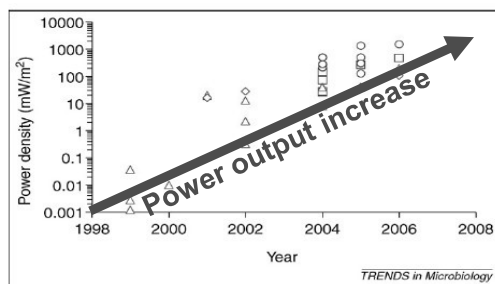
전력생산 :  $2400 \text{ mW/m}^2$   
(Logan et al. 2004)



COD 제거효율 : 90%  
전력생산 :  $170 \text{ mW/m}^2$   
(He et al. 2005)

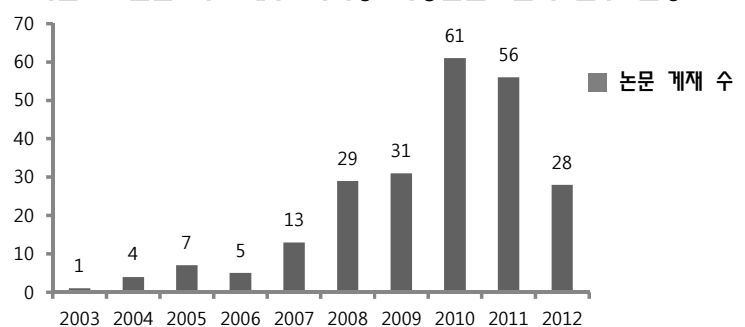


전력생산 :  $2200 \text{ mW/m}^3$   
(Liu et al. 2007)



➢ COD 처리효율: 80~90%이상의 처리효율 유지  
➢ 전력생산:  $72 \sim 2400 \text{ mW/m}^2$

### 최근 10년간 하·폐수 처리용 미생물연료전지 연구 현황



Gwangju Institute of Science and Technology

Energy and Biotechnology Laboratory

14

## 다양한 실패수를 이용한 미생물연료전지 성능 비교

Comparison in the performance of MFCs operated with different waste-water.

Types of substrates	COD (mg/L)	Types of MFCs	Max. power density (mW/m <sup>2</sup> )	Coulombic efficiency (%)	Current density (mA/cm <sup>2</sup> ) at max. power	Reference
Swine wastewater	8,320	One-chamber MFC	261	8	0.015	Min et al. (2005)
Starch	10	Two-chambered MFC with ferricyanide catholyte	n.a.	n.a.	1.3	Niessen et al. (2004)
Landfill leachate	6000	Two-chambered MFC	n.a.	n.a.	0.0004	Greenman et al. (2009)
Livestock manure	n.a.	One reactor vessel of manure	n.a.	n.a.	0.004	Scott & Murano (2007)
Domestic W.W	600	One-chamber air-cathode MFC	146	n.a.	0.06	Wang et al. (2009a)
Brewery W.W	2240	One-chamber air-cathode MFC	205	10	0.2	Feng et al. (2008)
Beer brewery W.W	600	One-chamber air-cathode MFC	669	10	0.18	Wen et al. (2009)
Chocolate industry W.W	1459	Two-chambered MFC with ferricyanide as catholyte	1500	NP	0.302	Patil et al. (2009)
Food processing W.W	1672	Two-chambered MFC	n.a.	n.a.	0.05	Oh and Logan (2005)
Protein-rich W.W	1750	Two-chambered MFC	n.a.	n.a.	0.008	Liu et al. (2009)
Real urban W.W	330	Separate anolyte (1000 cm <sup>3</sup> ) & catholyte chambers (100 cm <sup>3</sup> ) connected with a salt bridge	n.a.	n.a.	0.018	Rodrigo et al. (2007)
Starch processing W.W	4852	One-chamber air-cathode MFC	239	8	0.09	Lu et al. (2009)



Gwangju Institute of Science and Technology

Energy and Biotechnology Laboratory

15

## 미생물연료전지 Pilot-Plant



-호주의 Keller and Rabaey (2008) 등에 의해 운전된 맥주공장 발생 폐수 처리용 미생물연료전지 pilot-plant; COD 제거효율이 98%로 높은 반면 전력 생산 능력은 500 mW/m<sup>2</sup>로 아세트이트 기반 lab-scale 미생물연료전지 성능의 1/5 수준임.

### Scale-up이 실패한 이유

- 낮은 conductivity에 의한 음전극과 양전극 사이의 내부저항 증가
- 불안정한 전극반응
- 낮은 수소이온 농도구배
- 연료로 사용되는 폐수의 유기물 농도 및 유기물 입자크기

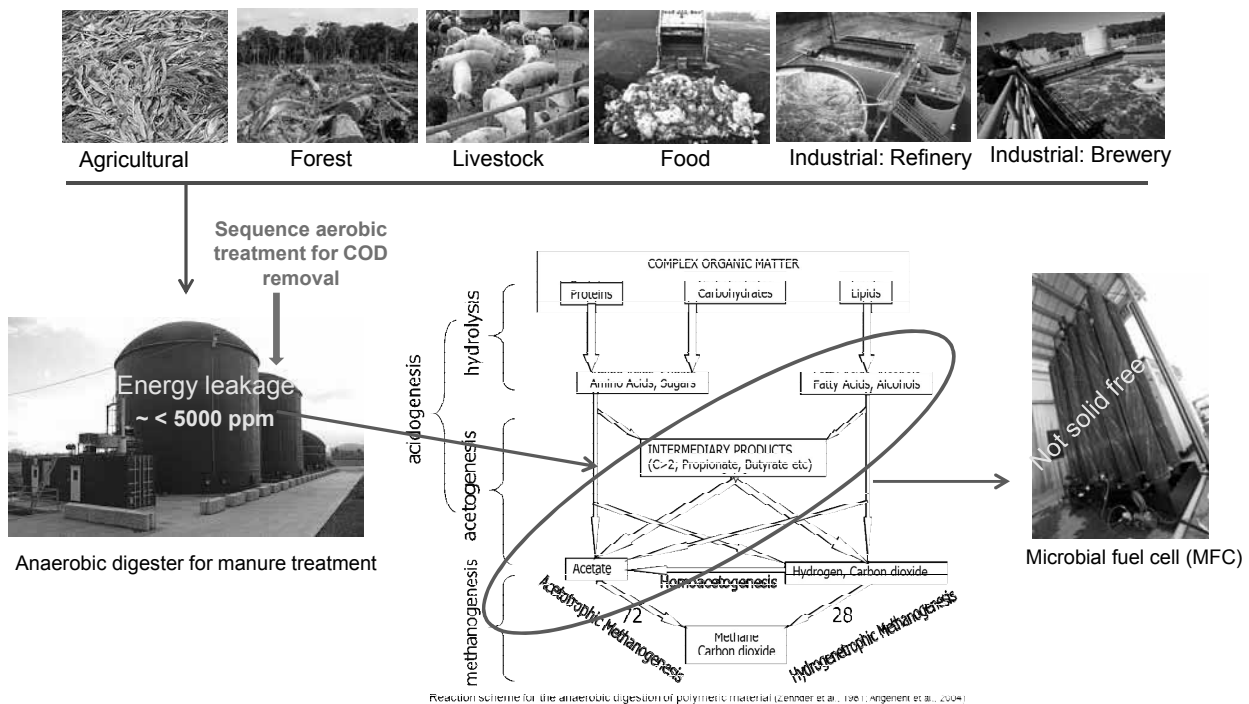


Gwangju Institute of Science and Technology

Energy and Biotechnology Laboratory

16

# 미생물연료전지 성능향상을 위한 혐기성공정 병합 전략



# 부영양화 유발 물질 회수를 위한 미생물연료전지



<http://blogs.edf.org/growingreturns/2014/08/06/lake-eris-fertilizer-problem-isnt-over-but-were-working-on-it/>

- Utilization as a fertilizer for growth of agricultural crops
- Environmental problems such as eutrophication and acidification (Arredondo et al., 2015)

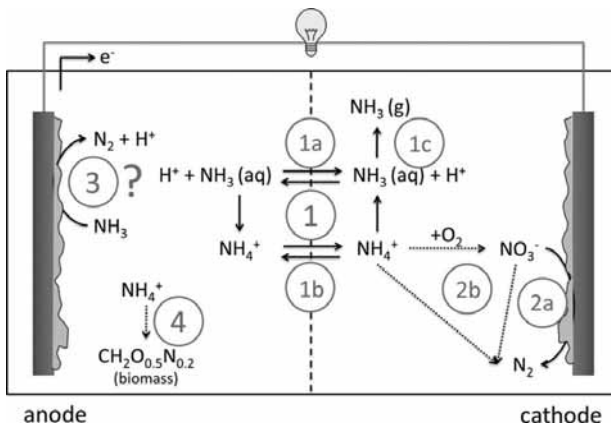
→ Need to be removed or recovered



<http://www.thewaterstour.com/prevention-learning-from-a-canadian-case-study-in-eutrophication/>

<http://www.greenpackonline.org/english/environmental-components.php?id=03-03-02>

## 미생물연료전지를 이용한 축산폐수 암모니아 회수 원리



anode

cathode

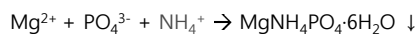
Fig. 3. Overview of the ammonia removal mechanisms in an MFC. (Kuntke et al., 2012)

- Transported through the membrane
  - Passively via diffusion of ammonia
  - or actively via migration in the form of ammonium
  - ammonia loss by evaporating into its gaseous form as a result of the elevated pH in the cathode
- Biological treatment at cathode
  - At the cathode chamber, it can be (biologically) oxidized by oxygen and denitrified by microorganisms at the cathode (denitrification)
  - or in solution – the dashed lines show processes that are independent of the electrodes.
- At the anode, it has been suggested that ammonia can be directly nitrified/denitrified to nitrogen gas by microorganisms.
- In the anode or cathode, ammonium can be incorporated in biomass for growth.



### • Struvite ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

- ✓ directly usage of slow release fertilizer
- ✓ recovery of P source



### • Ammonium sulfate ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )

- ✓ fertilizer for alkaline soils
- ✓ many applications in the chemical, wood pulp, textile, and pharmaceutical industries.



## 축산폐수 암모니아 회수를 위한 미생물연료전지 시스템



MFC-feeding ADs

Fuel supply



MFCs for ammonia recovery (Bioresource Technology, Kim et al., 2015)

Table 2. Ammonia recovery efficiency in CCM and OCM for 192 h.

	Ammonia recovery efficiency in CCM (%)	Ammonia recovery efficiency in OCM (%)
pH 7	59.4	37.3
pH 8	59.1	53.2
pH 8.6	66.8	73.1

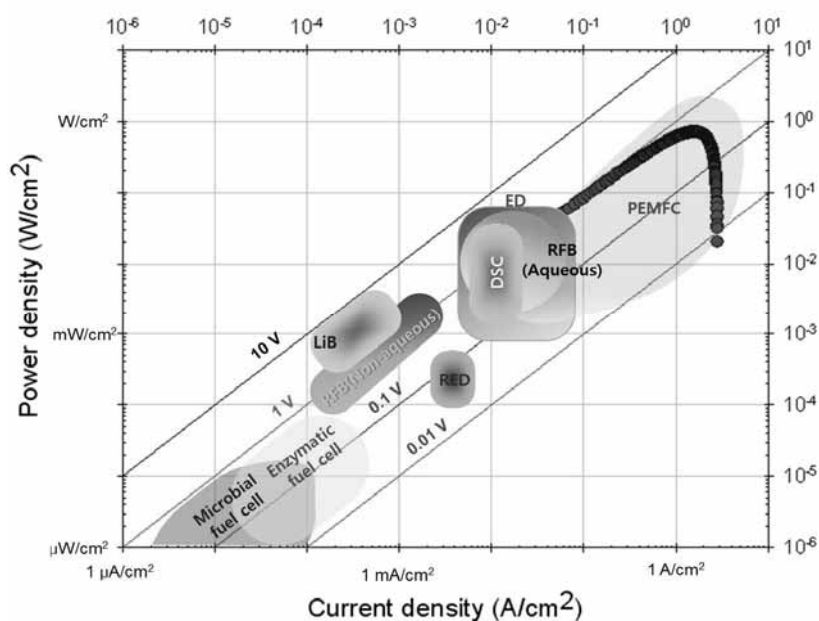
Table 3. Ammonia recovery efficiency by  $\text{NH}_4^+$  migration and energy efficiency in the MFCs for 192 h.

	Ammonia recovery efficiency by $\text{NH}_4^+$ migration (%)	Energy efficiency by $\text{NH}_4^+$ migration (%)	Ammonia removal by biological paths (%)
pH 7	23.3	27.4	36.1
pH 8	5.0	7.0	54.1
pH 8.6	< 5.0	< 7.0	> 61.8



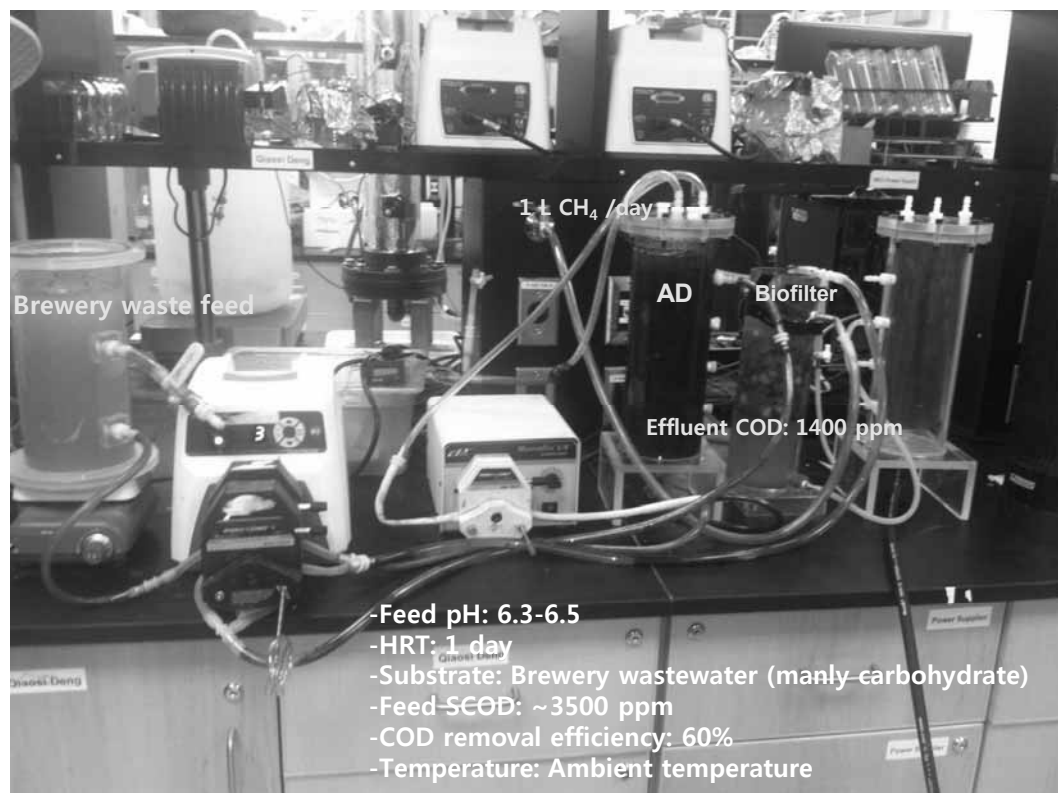
## 타 연료전지와의 전력밀도 비교 (2012년)

Courtesy of Prof. SH Moon (at GIST)

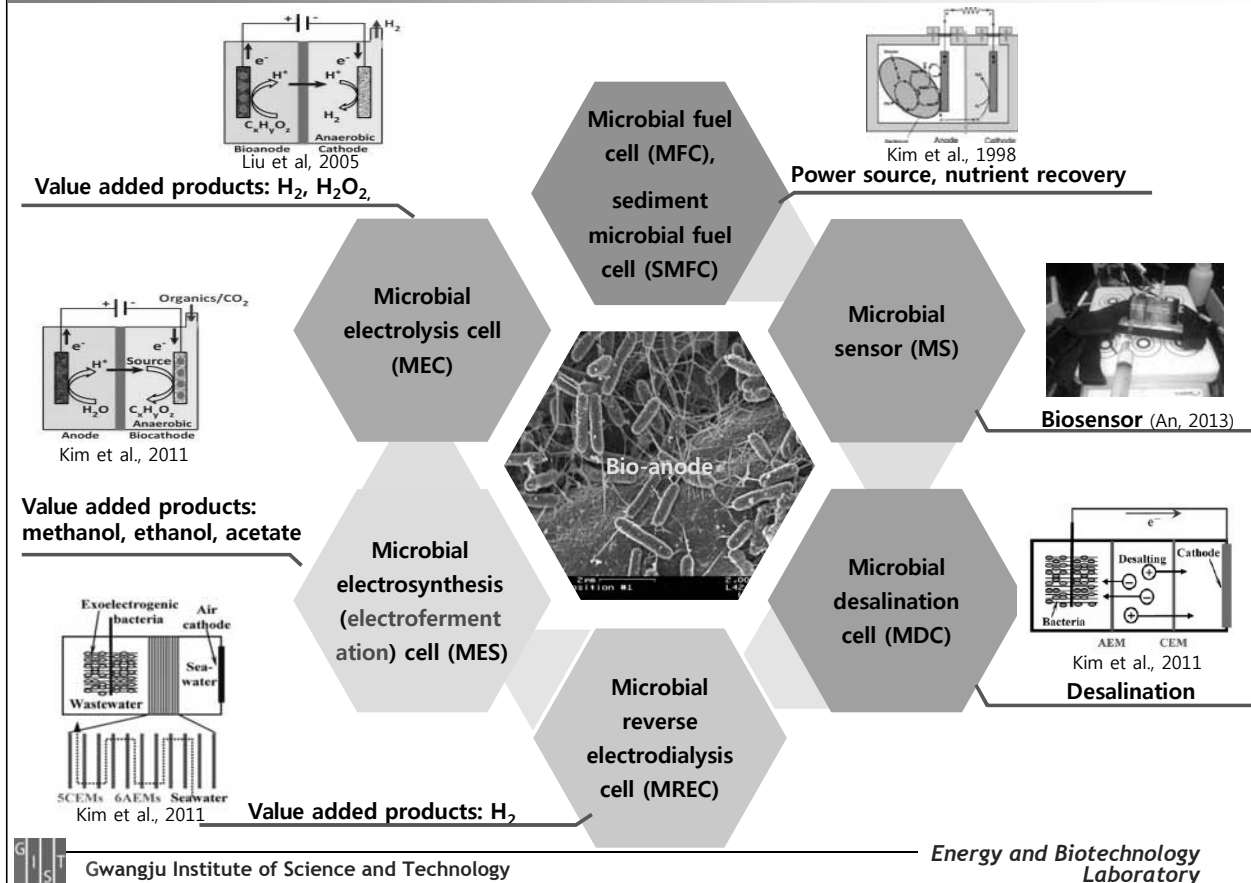


Comparison of power densities for MFCs and other chemical fuel cells

## 바이오전기화학전지 시스템과 병합을 위한 Packed-Bed Reactor



# 바이오에노드 기반 바이오전기화학전지 시스템

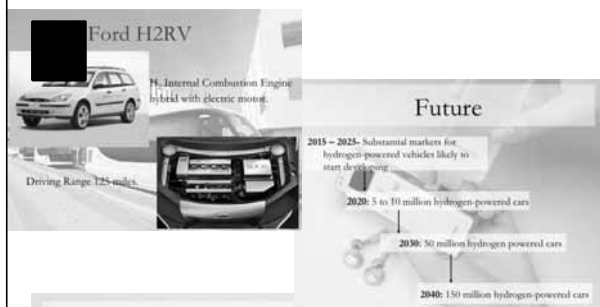


23

## 수소와 과산화수소 생산



### Hydrogen

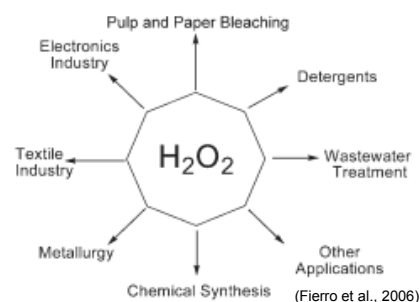


### Some Limitations

- Hydrogen:
  - Not readily available, must use other energy sources to convert
  - Infrastructure not in place
  - Difficult to store/distribute
  - High Capital Cost
  - Non-technical barriers
  - Could have dramatic impact

(Courtesy of Saxena)

### Hydrogen Peroxide



Aside from being used to disinfect wounds and lighten hair it is also used to decompose different solutions like red wine, coffee, etc.



Kill fungus with a solution of water and 3% hydrogen peroxide mixed together in equal quantities. Soak your feet fifteen minutes a day for a week and you'll get rid of fungus.



Source: <http://www.slideshare.net/>



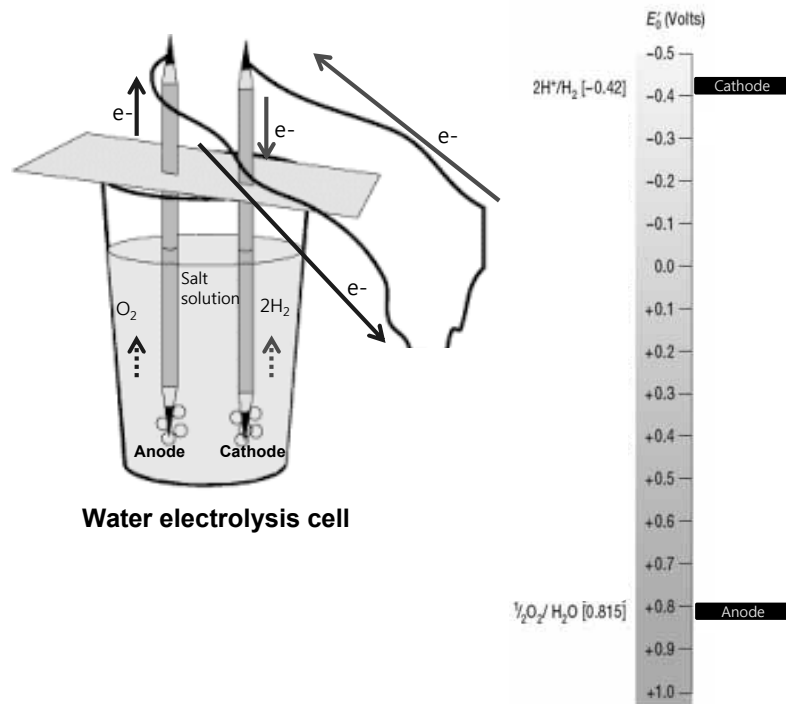
Gwangju Institute of Science and Technology

Energy and Biotechnology Laboratory

24

# Electrolysis Cells

\* Assumption: No energy loss in the cell



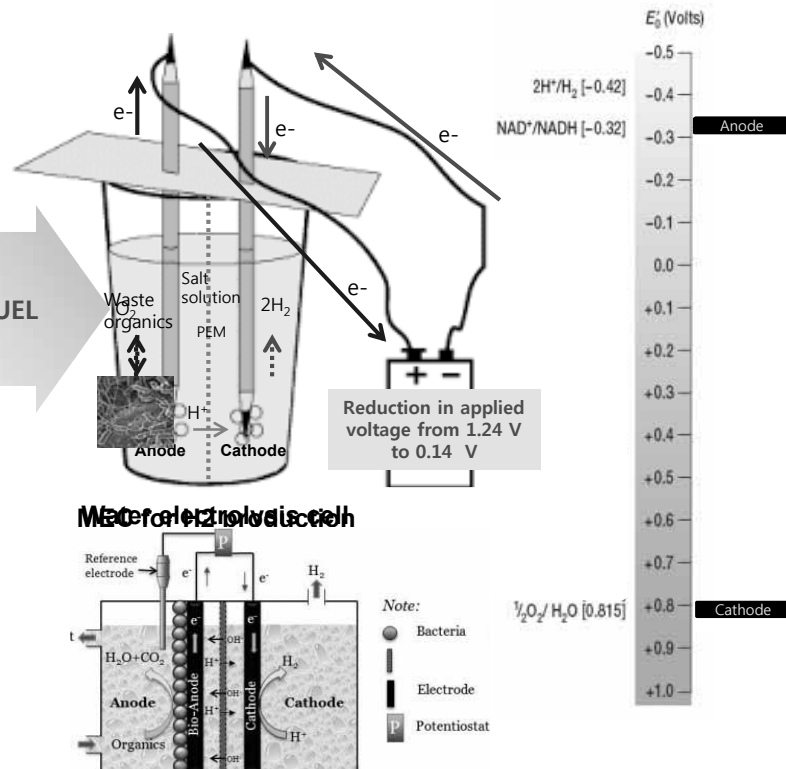
Water electrolysis cell

## Water Electrolysis Cell to MEC

\* Assumption: No energy loss in the cell

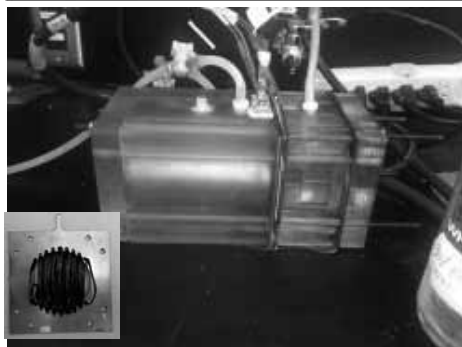
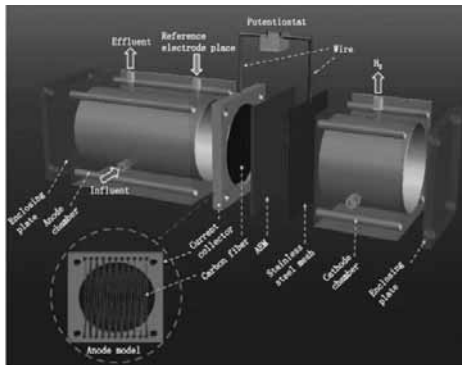


FUEL



Microbial Electrochemical Cell

# 수소 생산을 위한 MEC



MEC for H<sub>2</sub> production (RSC Advances, An et al., 2013)

Anode Chamber (289 mL):

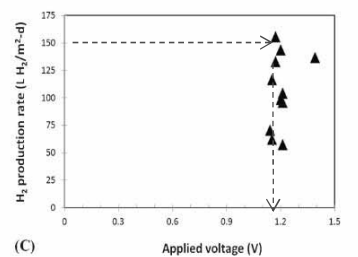
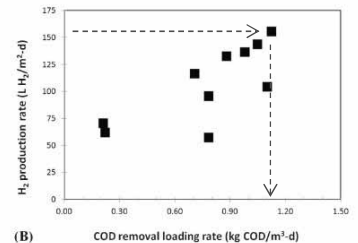
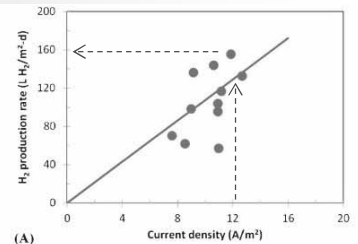
- Used anode: carbon fiber  
(per projected area of a membrane: 31.7 cm<sup>2</sup>; measured surface area: 1060 cm<sup>2</sup>)
- Fed 25 mM acetate medium
- Fixed the anode potential at -0.03 V

Cathode Chamber (120 mL):

- Used cathode: stainless steel mesh  
(per projected area of the membrane : 31.7 cm<sup>2</sup>)
- Filled with deionized water (18 mΩ-cm)
- Operated in a continuous mode with a loading rate of 6.3 kg COD/m<sup>3</sup> d

Membrane:

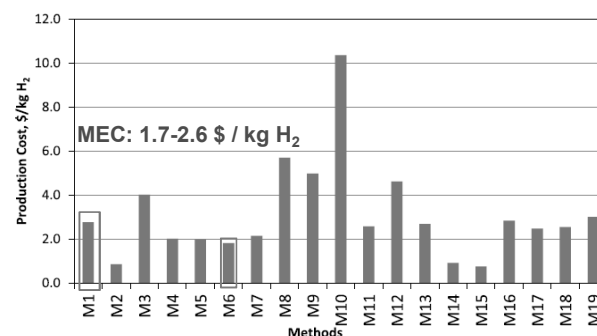
- Anion exchange
- Surface area: 33 cm<sup>2</sup>



# 타 기술과의 수소생산 단가 비교



Overall comparisons of selected hydrogen production methods (Normalized).				
Method		Energy efficiency	Exergy efficiency	Cost
M1	Electrolysis	5.30	2.50	7.34
M2	Plasma arc decomposition	7.00	3.20	9.18
M3	Thermolysis	5.00	4.00	6.12
M4	Thermochemical water splitting	4.20	3.00	8.06
M5	Biomass conversion	5.60	4.50	8.10
M6	Biomass gasification	6.50	6.00	8.25
M7	Biomass reforming	3.90	2.80	7.93
M8	PV electrolysis	1.24	0.70	4.50
M9	Photocatalysis	0.20	0.10	5.19
M10	Photoelectrochemical method	0.70	0.15	0.00
M11	Dark fermentation	1.30	1.10	7.52
M12	High temperature electrolysis	2.90	2.60	5.54
M13	Hybrid thermochemical cycles	5.30	4.80	7.41
M14	Coal gasification	6.30	4.60	9.11
M15	Fossil fuel reforming	8.30	4.60	9.28
M16	Biophotolysis	1.40	1.30	7.27
M17	Photofeimentation	1.50	1.40	7.61
M18	Artificial photosynthesis	0.90	0.80	7.54
M19	Photoelectrolysis	0.78	0.34	7.09
Ideal	(zero-emissions and cost, 100% efficiency)	10.00	10.00	10.00

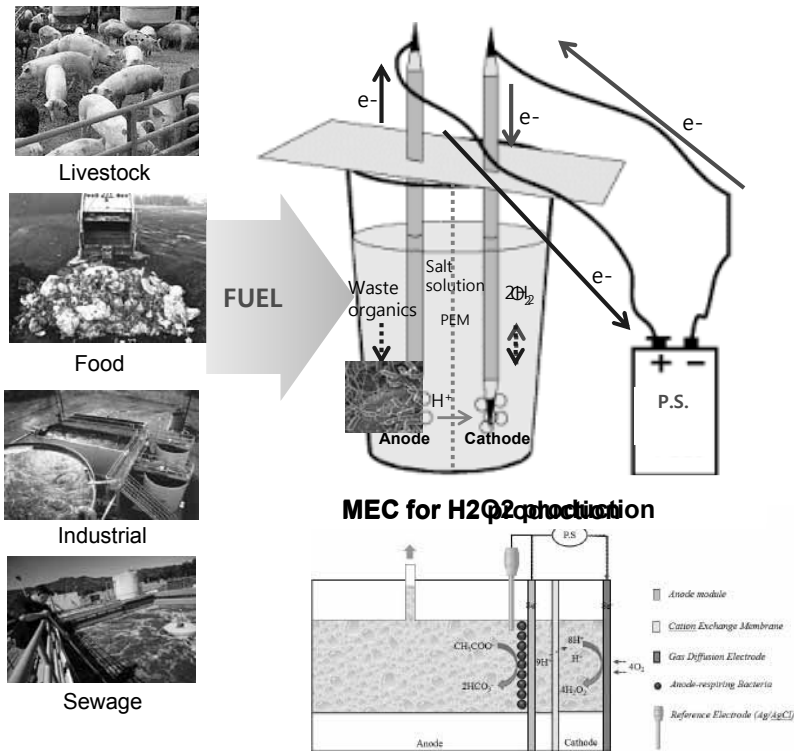


Production cost of selected hydrogen production methods (per kg of hydrogen).

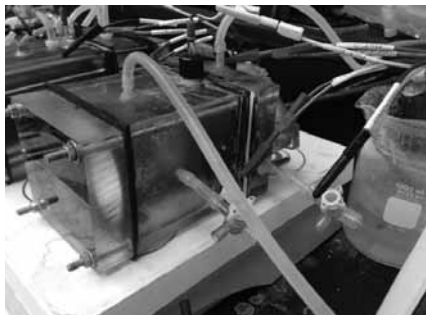


# Conversion of $H_2$ MEC to $H_2O_2$ MEC

\* Assumption: No energy loss in the cell



## 과산화수소 생산을 위한 MEC



Lab-scale MEC for  $H_2O_2$  production (Sim et al., 2015)

Anode Chamber (289 mL):

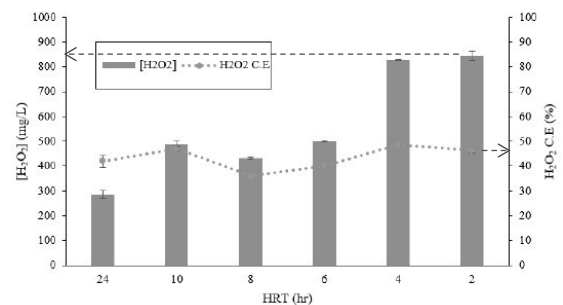
- Used carbon fibre as anode
- Fed 5 mM acetate medium at HRT 2 h, 6 h, and 10 h
- Fixed the anode potential at -0.4 V

Cathode Chamber (70 mL):

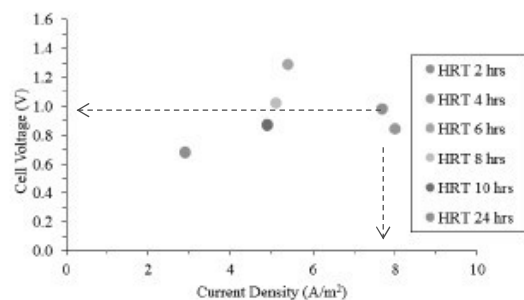
- Used gas diffusion cathode (surface area: 33 cm<sup>2</sup>)
- Filled with deionized water (18 mΩ-cm)
- Operated in a batch mode for 24h

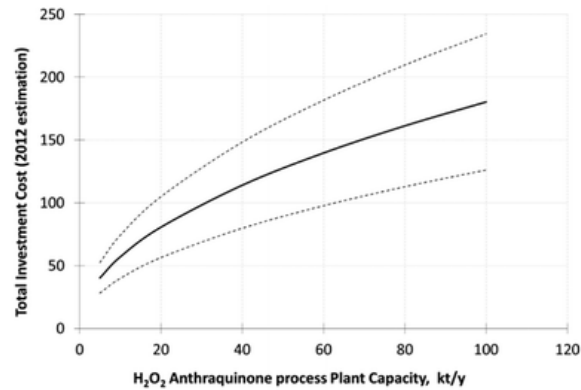
Cation exchange membrane

- Surface area: 33 cm<sup>2</sup>



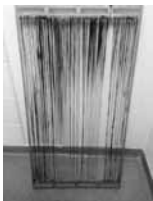
Cumulative  $H_2O_2$  concentration and  $H_2O_2$  conversion efficiency at 6 hr of cathode operation in the acetate-fed MEC at different HRTs (bars represent standard deviation).





- Price estimation of a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> plant via traditional auto-oxidation process (2012 price basis).
  - 141 \$ / ton (large scale) ~ 376 \$ / ton (small scale)
- MEC: 315 \$ / ton

## 수소 및 과산화수소 생산을 위한 Pilot-Scale MEC



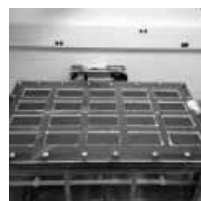
Anode module  
with carbon fiber



Five anodes in  
the anode chamber



Membrane  
installation



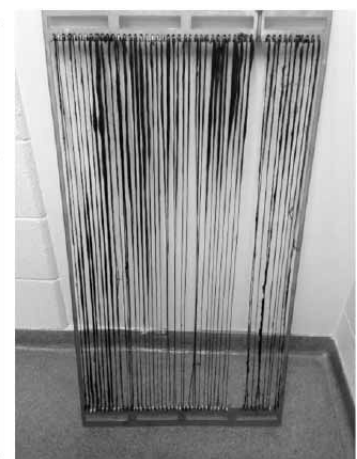
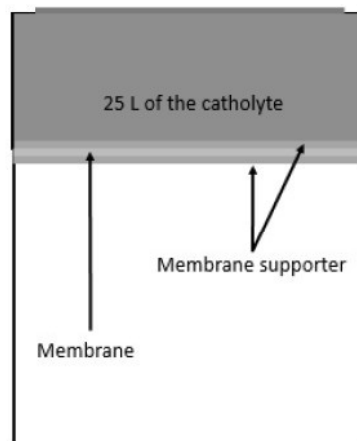
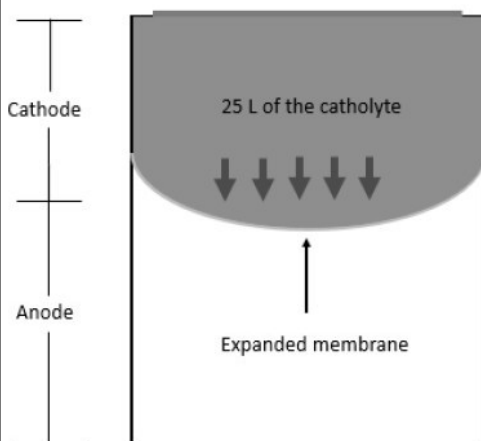
Air-cathode  
installation



Leakage  
checking



Colleagues

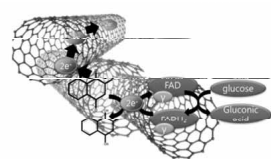


# Nano/Micro/Macro Bioelectronics Platform

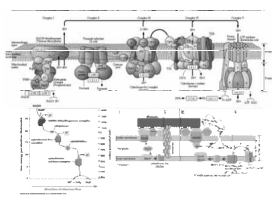
## Nano-scale Bioelectronics Platform

Determination of the electron transfer system in microorganism & Finding the main mechanism of potential drop

Determination of the electron transfer system in the electrode & Search the main mechanism of potential drop



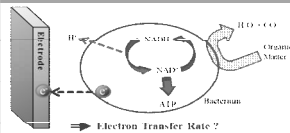
< Electron Transport System in Electrode >



## Micro-scale Bioelectronics Platform

Confirmation of the electron transfer system and the theoretical maximum current density

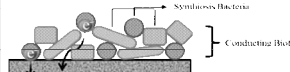
Confirmation of the electron transfer system in the biofilm (singly, multi, symbiosis)



<Single Layered Biofilm>

<Multi-Layered Biofilm>

<Multi-Layered Biofilm with Symbiosis Bacteria>



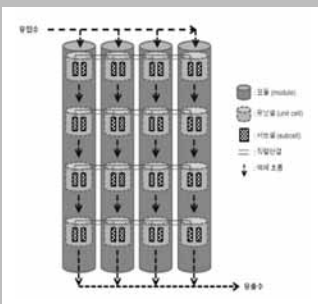
## Macro-scale Bioelectronics Platform

Operation of scaling-up system as pilot plant

Specialized electrode material of bio-electronics

Specialized current collector of bio-electronics

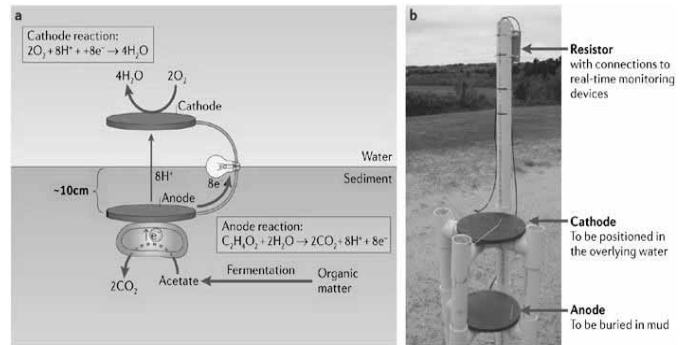
Specialized separator of bio-electronics



Gwangju Institute of Science and Technology

Energy and Biotechnology Laboratory 33

## 퇴적토로부터 전기를 생산하는 미생물연료전지



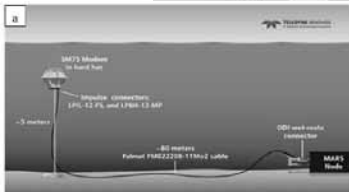
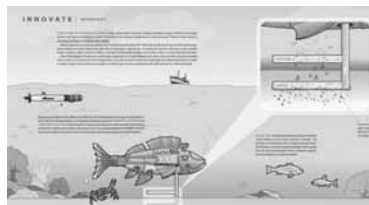
Working principle of SMFCs (left) and a real SMFC (right)



Center for Biological and Molecular Science and Engineering  
Naval Research Laboratory, USA



Ocean Ecology and Biogeochemistry, USA



Aquatic sensors being driven with SMFCs (for the detection of a torpedo (upper); for temperature monitoring (lower))

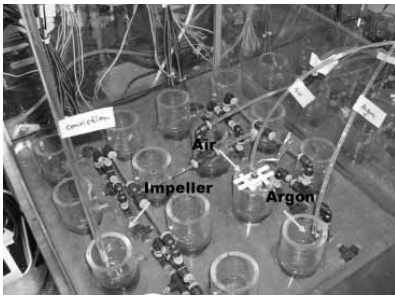


Gwangju Institute of Science and Technology

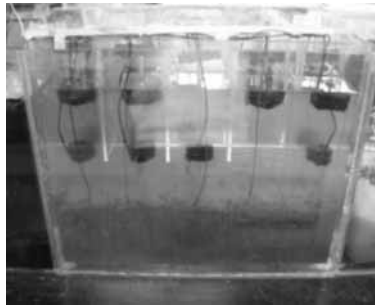
Energy and Biotechnology Laboratory

34

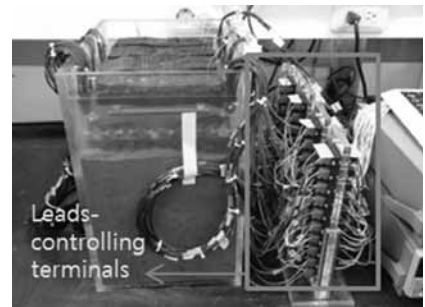
## 국내외 퇴적토 미생물연료전지 성능 비교



Marine mud batteries (JEM, 2010)  
Marine mud battery: 28-20 mA/m<sup>2</sup>, 0.4-0.5 V



Multi-phase MFC (ES&T, 2010)  
Multi-phase MFC system: 60-30 mA/m<sup>2</sup>, 0.3-0.4V



Sediment MFCs (Bioresource Technology, 2014)  
Sediment MFC: 40-30 mA/m<sup>2</sup>, 0.4-0.5 V

Comparison in the performance of other SMFCs that were applied to natural water systems as a power source for various sensors (An, 2012)

Year	Operation Site	Voltage and current Produced from SMFC (V, mA)	Sensor Type	Voltage and current Requirement (V, mA)
2011 (Zhang et al.)	Lake Michigan	0.4 V, 5.4 mA	Wireless temperature sensor	3.3 V, 15 mA
2011 (Donovan et al.)	Palouse River	0.35 V, 9 mA	Remote temperature sensors	5 V, 500 mA
2011 (Gong et al.)	Yaquina Bay	0.35 V, 11 mA	Oxygen & temperature sensors	5 V, 50 mA
2008 (Donovan et al.)	Palouse River	0.48 V, 5 mA	Wireless temperature sensor	3.3 V, 15 mA
2005 (Shantaram et al.)	Roskie Creek	0.4 V, 14 mA	Wireless temperature sensor	3.3 V, 15 mA



# 감사합니다.





주 제 발 표

그린에너지기후변화 시대의 도전:

핵융합에너지 개발, 어디까지 왔나?

권 면 || 국가핵융합연구소 선임연구위원

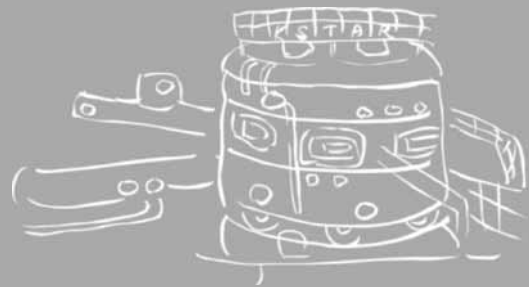


FUSION, Future Vision of Green Energy

그린에너지·기후변화 시대의 도전 :

# 핵융합에너지 개발, 어디까지 왔나?

**권 면** (kwonm@nfri.re.kr)  
국가핵융합연구소 (www.nfri.re.kr)



## Contents

- 01. 세계 에너지 환경 변화
- 02. 미래에너지원, 핵융합에너지
- 03. 핵융합 연구의 미래
- 04. 결론

# 1

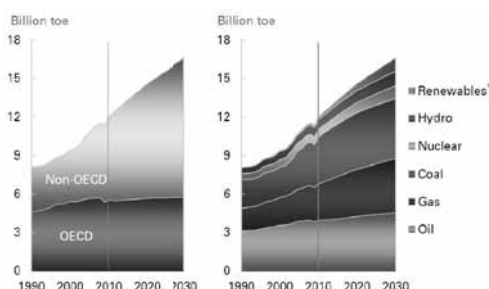
## 세계 에너지 환경의 변화

### 세계 에너지 환경 변화

NFRI

#### ● 세계 각국의 자원민족주의에 따른 새로운 대체에너지원 개발 필요

- 전세계적으로 확산되고 있는 세계경제 위기에도 불구하고, 에너지 소비가 크게 증가됨.  
(개발도상국의 에너지 수요가 폭발적으로 증가됨. 특히 같은 기간 동안 82.2%의 에너지 소비 증가율을 보일 것으로 예상되는 중국을 포함해 BRICs 국가의 급속한 경제 성장은 세계 에너지 소비 증가를 지속적으로 이끌 것으로 예상됨)
- 현재의 소비량을 고려할 때 석유 및 천연가스는 40~60년 후에, 석탄은 150년 후에 고갈될 것으로 예상(국가의 경제적 이익을 축적하기 위해 자원을 무기화)
- 세계 각국은 에너지자원 확보 문제를 해결하기 위해 에너지 안보를 최우선 고려



세계 에너지 소비변화 추이

(단위: Million tonnes oil equivalent)

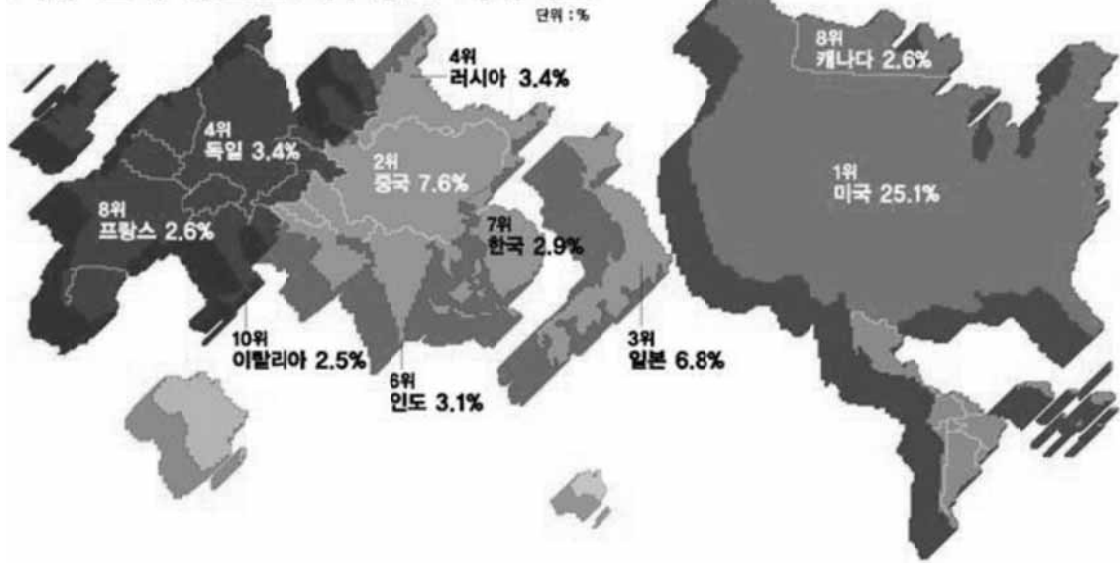
구분	1990년	1995년	2000년	2005년	2010년	2015년	2020년	2025년	2030년	2010년 대비 2030년 증가율
OECD	4,625	4,992	5,435	5,667	5,568	5,371	5,679	5,729	5,765	3.9%
비 OECD	3,484	3,586	3,947	5,134	5,434	7,789	8,948	9,905	10,867	68.9%
EU	1,648	1,643	1,720	1,838	1,733	1,692	1,706	1,707	1,707	-1.5%
유럽	1,815	1,806	1,911	2,016	1,960	1,941	1,982	2,011	2,033	3.7%
미국	1,968	2,122	2,314	2,351	2,286	2,258	2,270	2,263	2,241	-2.0%
중국	681	913	1,038	1,691	2,432	3,118	3,688	4,091	4,431	82.2%

지역별 세계 에너지소비 변화 추이

# 세계 에너지 소비의 강자들

NFRI

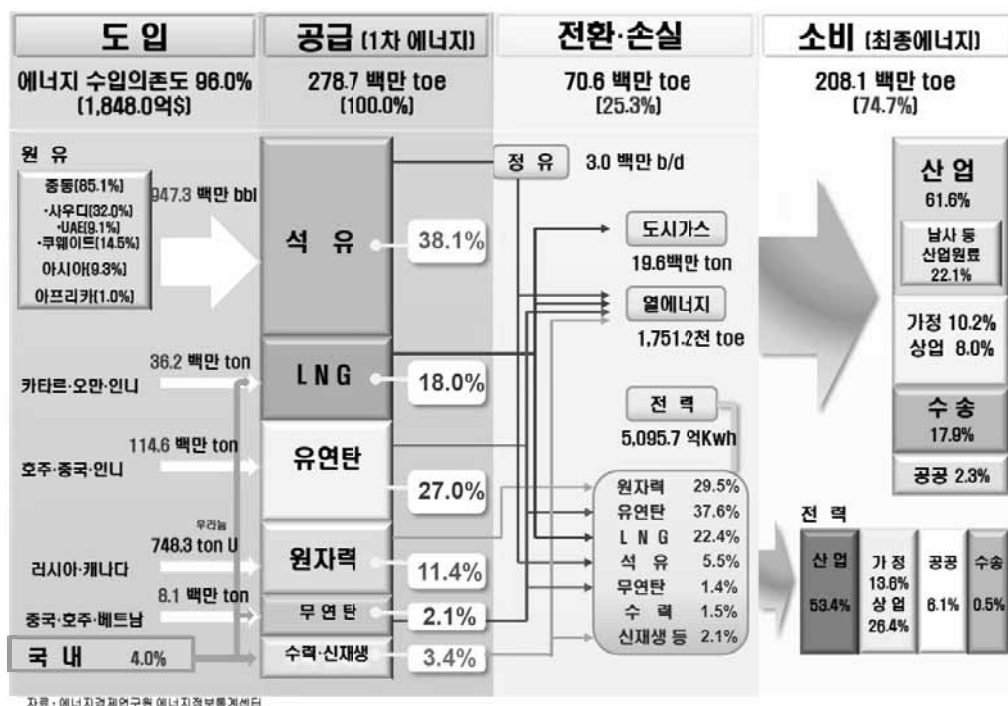
석유 소비 규모로 재구성한 세계지도



National Fusion Research Institute

## 2012년 에너지 밸런스

NFRI



National Fusion Research Institute

## NFER/

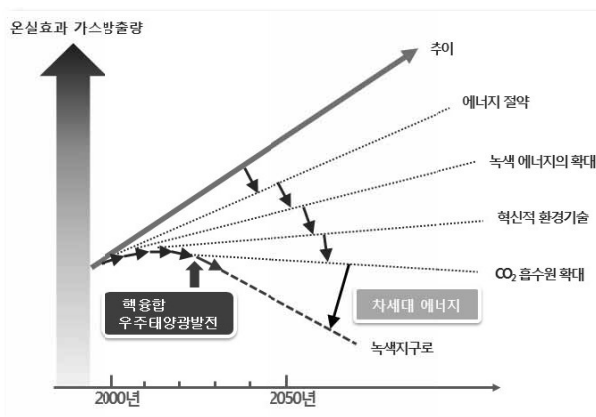


# Green Energy(기후변화)

NERI

## ● 온실가스 배출로 인한 온난화로 뜨거워 지는 지구

- 정부간기후변화위원회(IPCC)는 금세기 말까지 지구의 온도가 1.8~4.0℃ 상승전망  
(1℃ 상승 : 킬리만자로 만년설, 2℃ 상승 : 그린랜드 얼음이 녹아 수면 7m 상승, 4℃ 상승 : 빙산이 모두 사라짐)
- 영국 환경운동가 마크 라이너스 [6도의 악몽] 지구 온난화와 환경 대재앙 시나리오  
(2℃ 상승 : 전세계 생물 15~40% 멸종, 3℃ 상승 : 전세계 2억명이 생활터전 상실, 4℃ 상승 : 전세계 인구 절반 물부족)
- 지난 100년간 세계 기온변화는 0.6℃ 상승(북극 지역 온도 3~4℃ 상승)  
(한국 : 한반도 기후변화평가보고서(2010년, 국립환경과학원) 1991~2000년까지 10년간 1.5℃ 상승)



National Fusion Research Institute



사용후 핵연료 언제 포화되나 (단위:t)

원전	저장 용량	저장량 (6월 현재)	예상 포화 연도	
			현 용량 기준	저장 용량을 최대한 늘리면
고리	1737	1447	2008	2016
영광	1696	1193	2008	2021
울진	1563	868	2007	2018
월성	4807	4097	2006	2017
한계	9803	7605		

자료:한국수력원자력(주)

고준위 방사능 폐기물 (최소 만 년 이상 저장)



사고 시 방사능 유출

## 미래 에너지로서의 조건은?

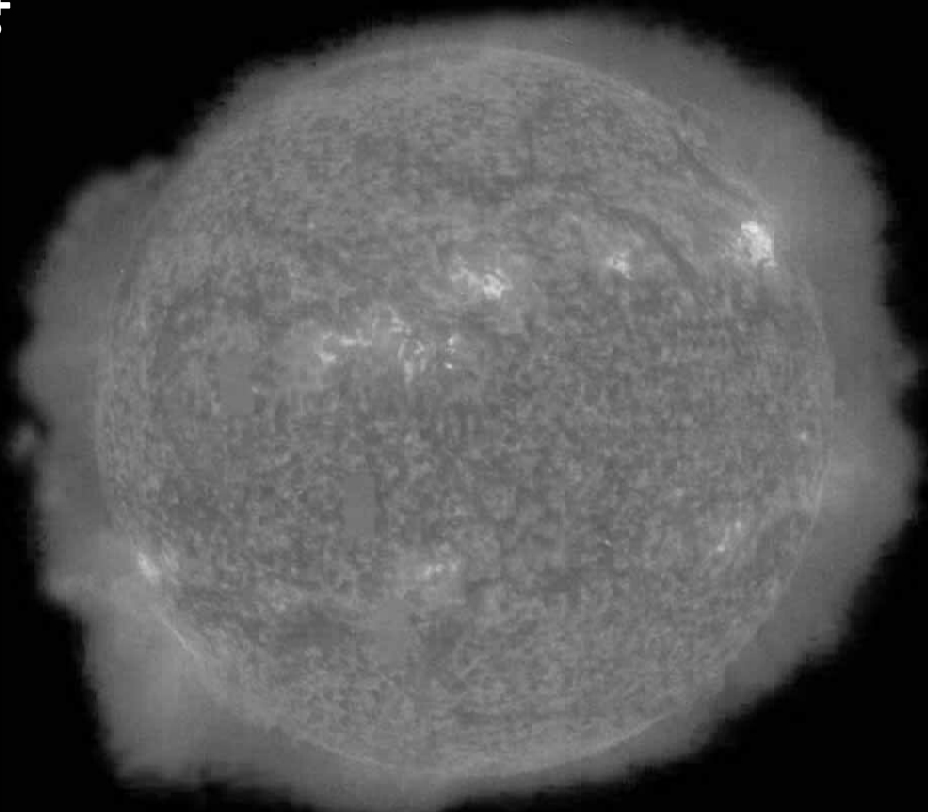
1. 자원량이 풍부하고 어디서나 획득 가능
2. 저 환경 파괴 및 저 폐기물량
3. 에너지 가격이 합리적 범위
4. 충분한 에너지량을 안정적으로 공급
5. 최적의 안전성 요구

모든 조건을 동시에 만족시킬 에너지원은 없음  
그러나 어느 에너지원에도 나름의 장단점이 있음  
각각의 특징을 살린 사용방법을 고려하지 않으면 안됨

## 미래에너지원, 핵융합에너지



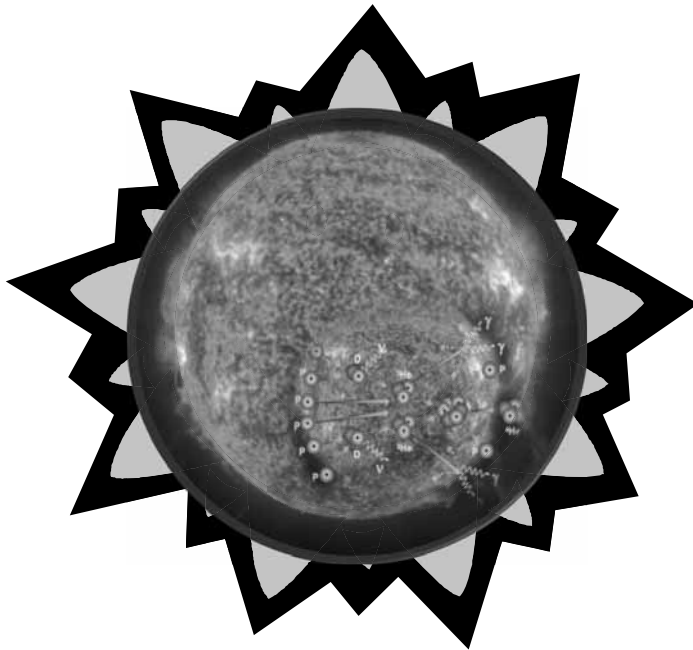
태 양



지구 생명 에너지의 근원



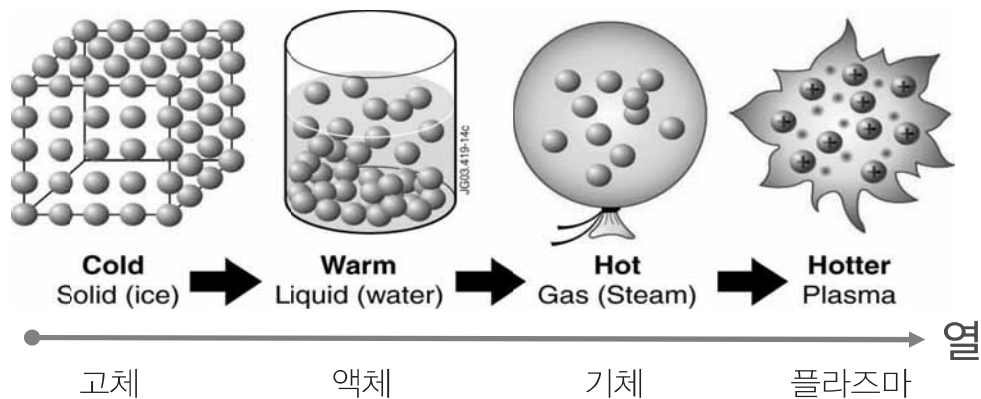
태양과 같이  
빛을 내는 별들은 모두 플라즈마 상태로 핵융합 반응 중



## 태양환경

- 높은 온도
- 높은 압력
- 플라스마 상태
- 수소 핵융합 반응
- 질량 결손 발생
- 핵융합에너지 발생

## 플라스마란?

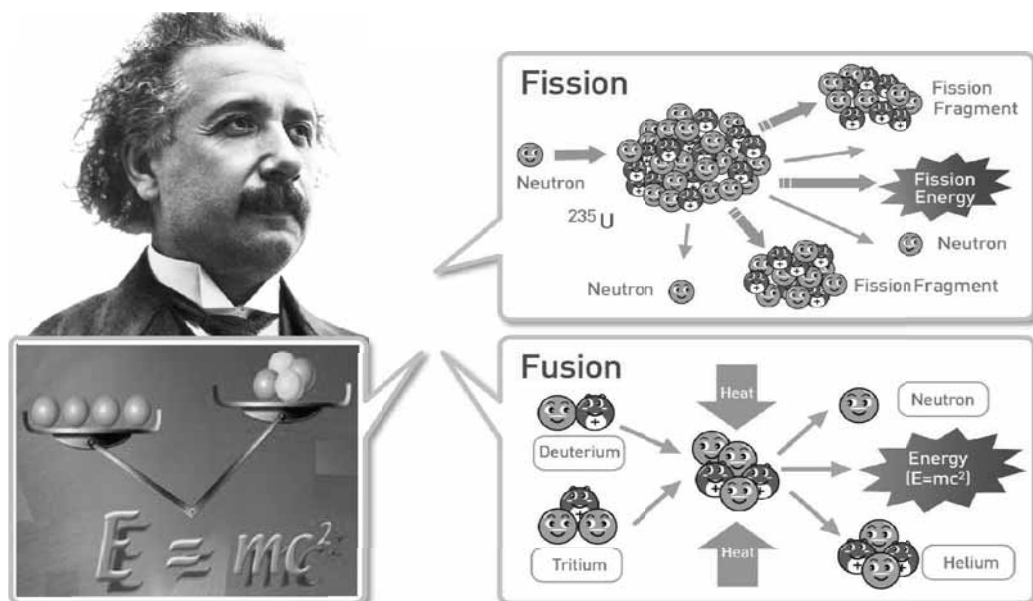


원자핵과 전자가 분리되어 자유롭게 움직이는 상태  
기체상태에 열을 가하거나 높은 전기장이나 자기장을 가해 만들 수 있다.



## 핵융합과 핵분열 반응

NFRI



핵융합에너지는 가벼운 원자핵들이 융합하여 무거운 원자핵으로 바뀌는 과정에서 발생  
에너지 걱정 없는 대한민국의 미래! 핵융합에너지가 만들어갑니다.

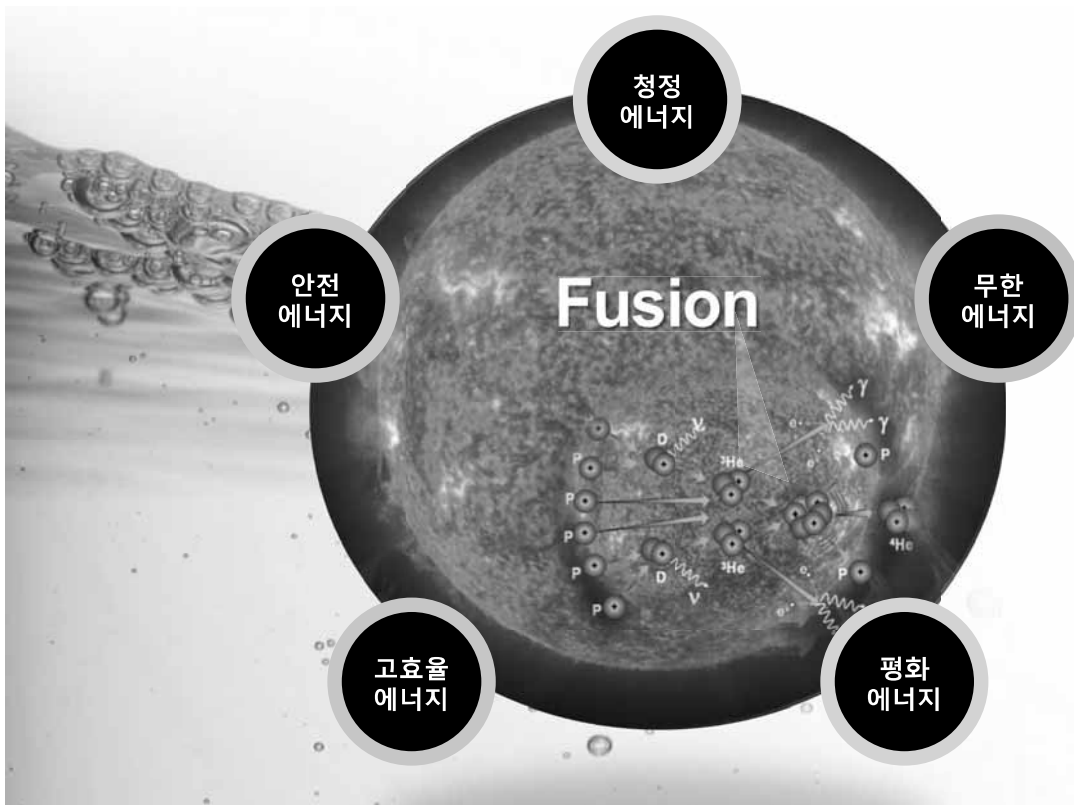
# 핵융합, 모든 에너지의 근원

NERI



National Fusion Research Institute

21세기가 원하는 에너지원의 조건, 핵융합 속에 모두 있습니다.





## 중수소

바닷물  $1\text{ m}^3$  당  $33\text{ g}$ 의 중수소 채취 가능  
사실상 무한한 양의 연료



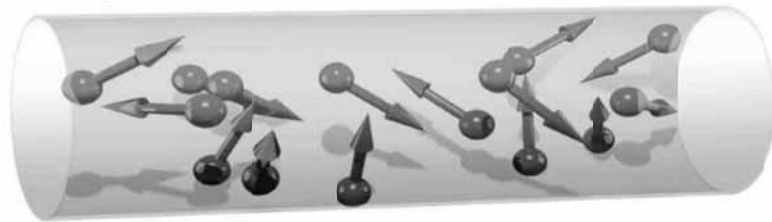
## 리튬

중성자와 반응하여 삼중수소 발생  
현재 채취 가능한 양만으로도 1000년 분량  
바닷물로부터 채취하는 기술 발달 시 수백만년 분량

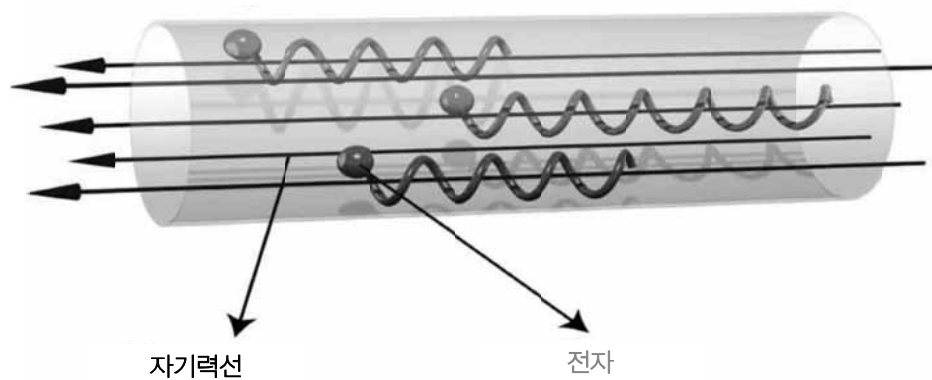


## 자기장의 이용

자기장이 없을 때



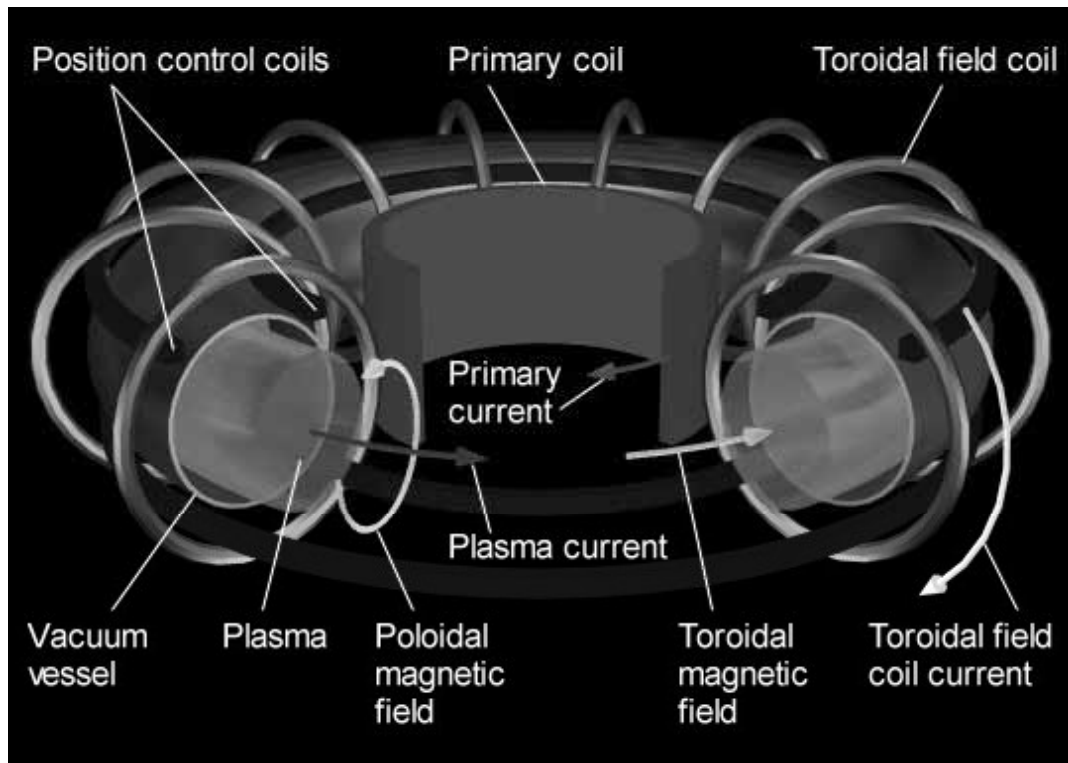
자기장이 있을 때



전하를 띤 입자들은 자기장에 의해 **회전운동**을 한다.

# 토카막(TOKAMAK)

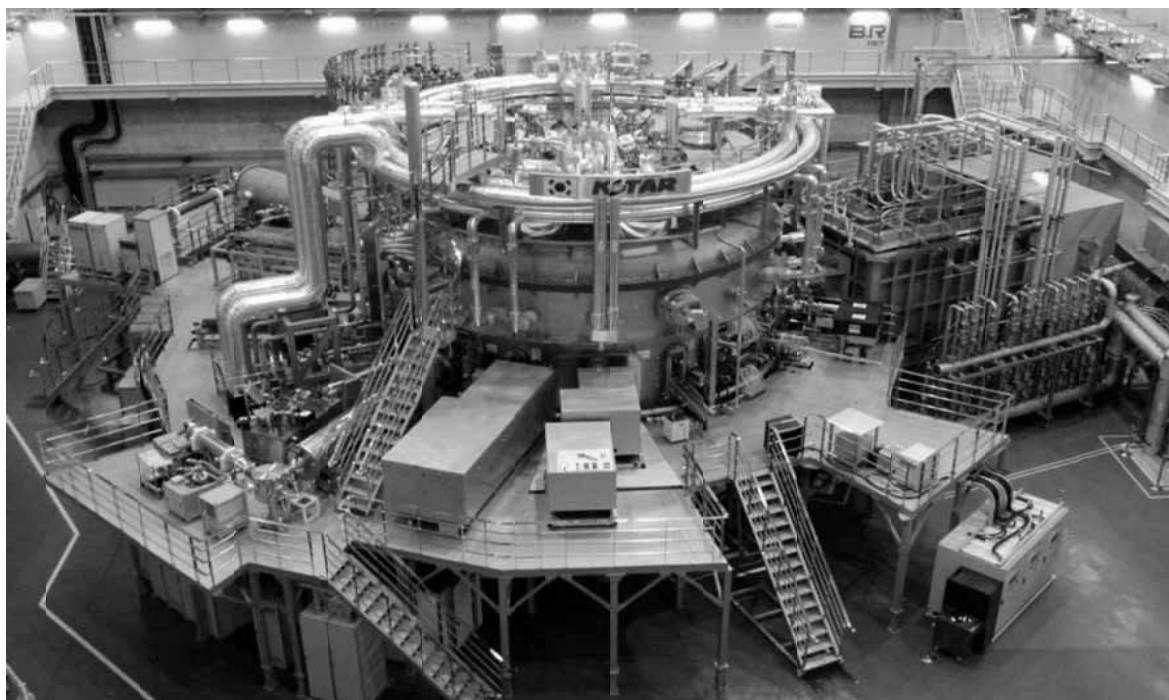
NFR/



National Fusion Research Institute

## 자기장핵융합장치 KSTAR

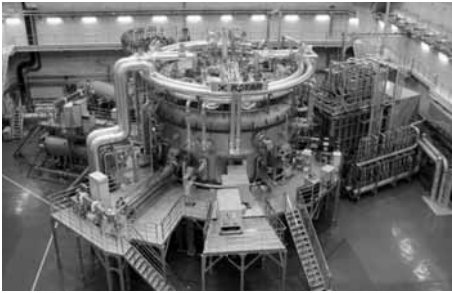
NFR/



National Fusion Research Institute



# KSTAR



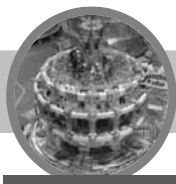
- 건설기간 : '95.12 ~ '07.8(11년8개월)/운영기간 : '07.9 ~
- 건설비용 : 4,182억(장치 3,000억, 시설 1,092억)/운영비 : 연간 400억 수준
- ITER와 기술적으로 가장 유사한 차세대 초전도 토카막 장치의 건설 경험 축
- ITER 건설 기간 동안 핵융합 실험 등 운영기술 및 경험 확보



1995  
"국가핵융합연구개발  
기본계획" 수립  
KSTAR 사업착수



1996~1997  
기본설계 및 R&D



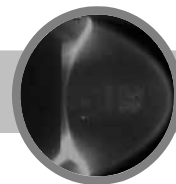
1998~2001  
인프라 구축 및  
공학설계 완성



2002~2007  
KSTAR 건설

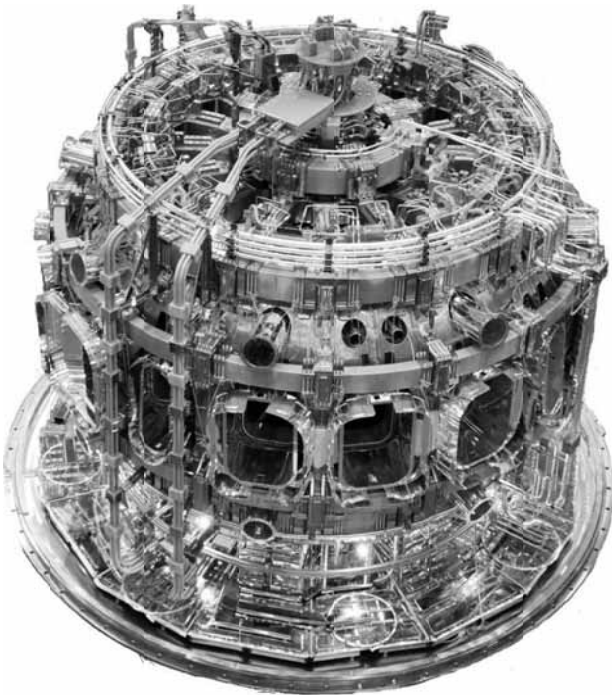


2008  
최초 플라즈마



현재  
H-MODE, ELM 등  
플라즈마 control

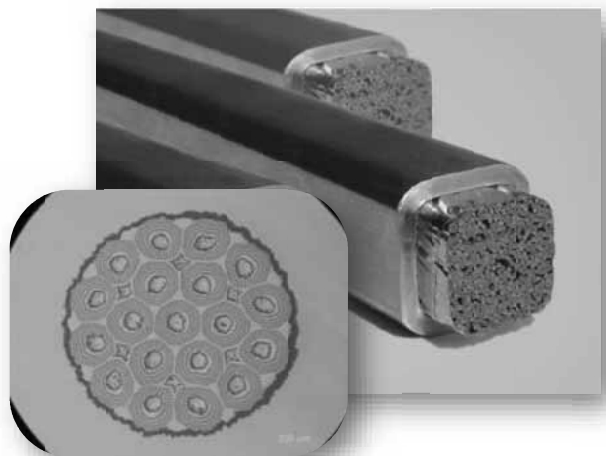
## KSTAR는 초전도자석 활용



KSTAR 저온용기 설치 전 모습

초전도 자석은 저항이 없으므로 전류가 흘러도  
열이 발생하지 않음

영하 268도로 이하로 유지하기 위해 극저온  
액체 헬륨 사용



Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재 (ITER와 같은 선재)



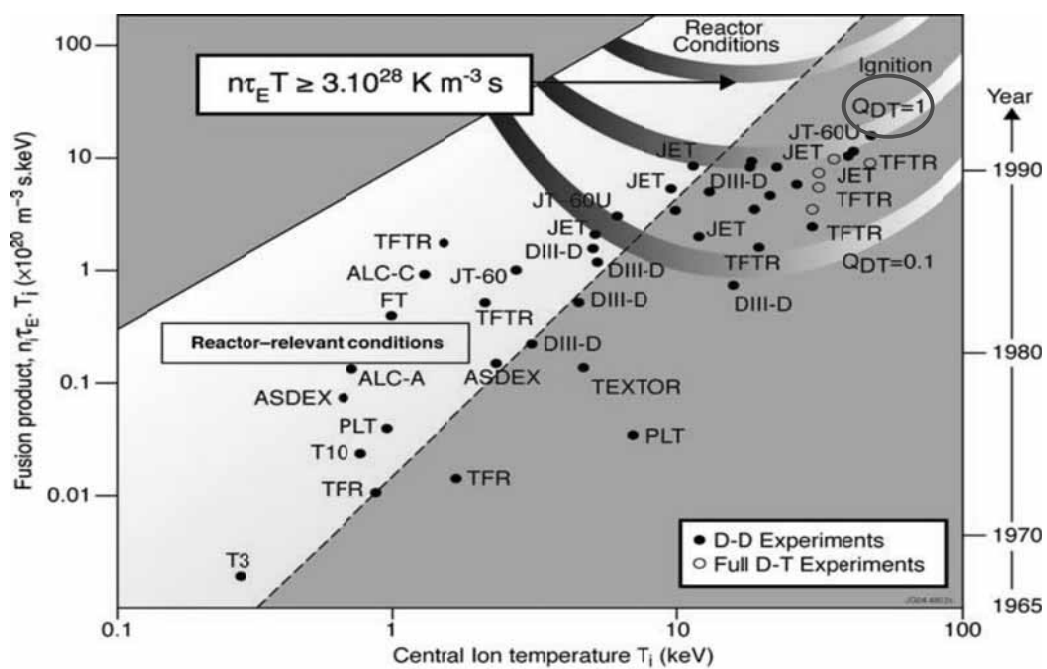
# 세계 핵융합에너지 연구개발 현황

상전도 토카막 | 초전도 토카막



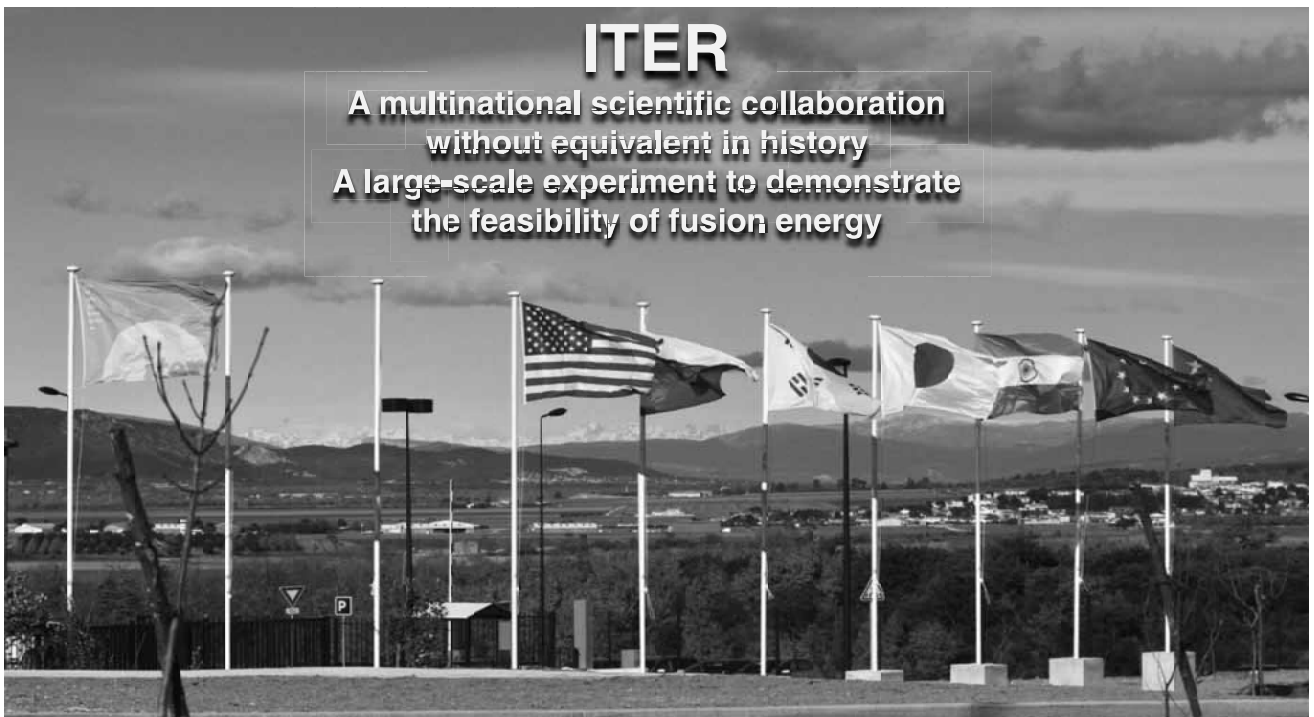
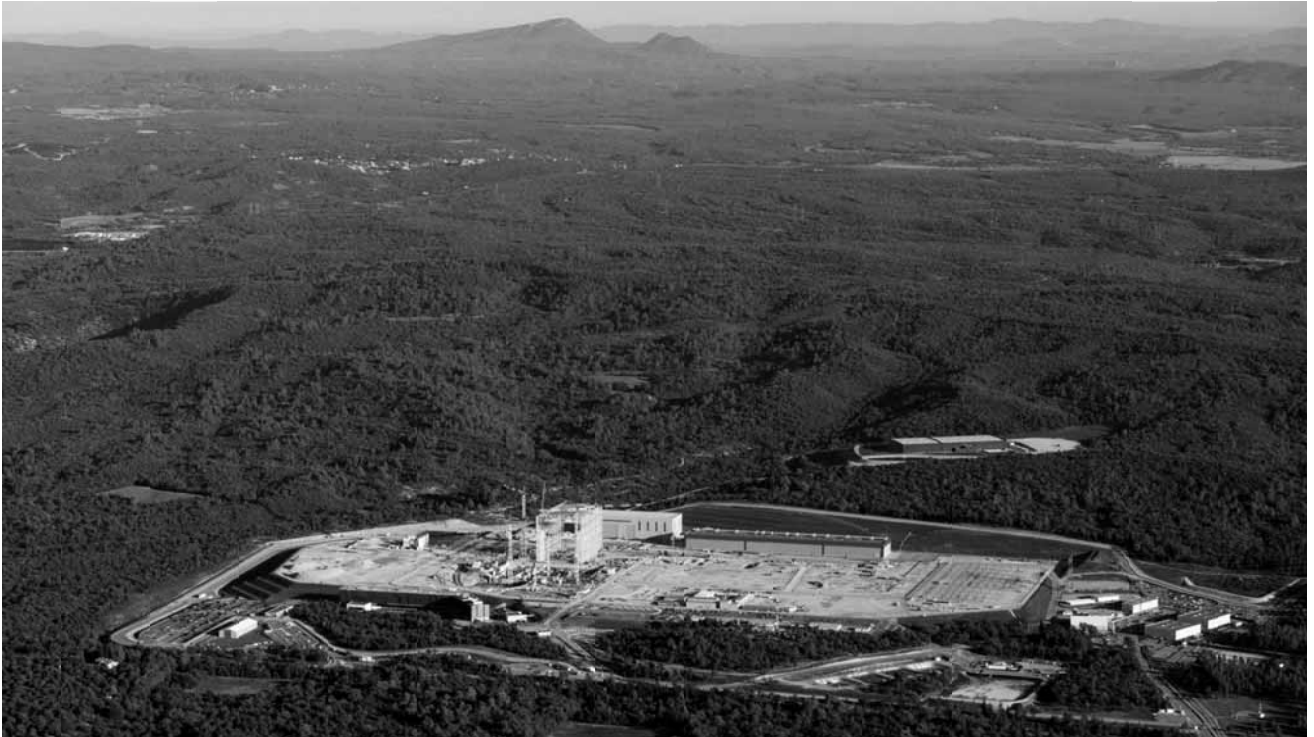
## 토카막 연구개발 현황

NFR/



$$Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}}$$

# The ITER Project



# 상상에서 사실이 되기까지



1950's  
Fusion research begins in earnest in the US, Europe and Japan.



November 1985  
At the Geneva Summit P<sup>dt</sup> Reagan and Secretary G<sup>ral</sup> Gorbachev give a decisive political push to an international collaboration on fusion "for the benefit of all mankind"..



June 2005  
The ITER Members unanimously agree to build ITER on the site proposed by Europe in southern France.



August 2010  
Construction work begins on the 42-hectare ITER Platform.



December 2011  
The Poloidal Coils Winding Facility is the first building to be completed.

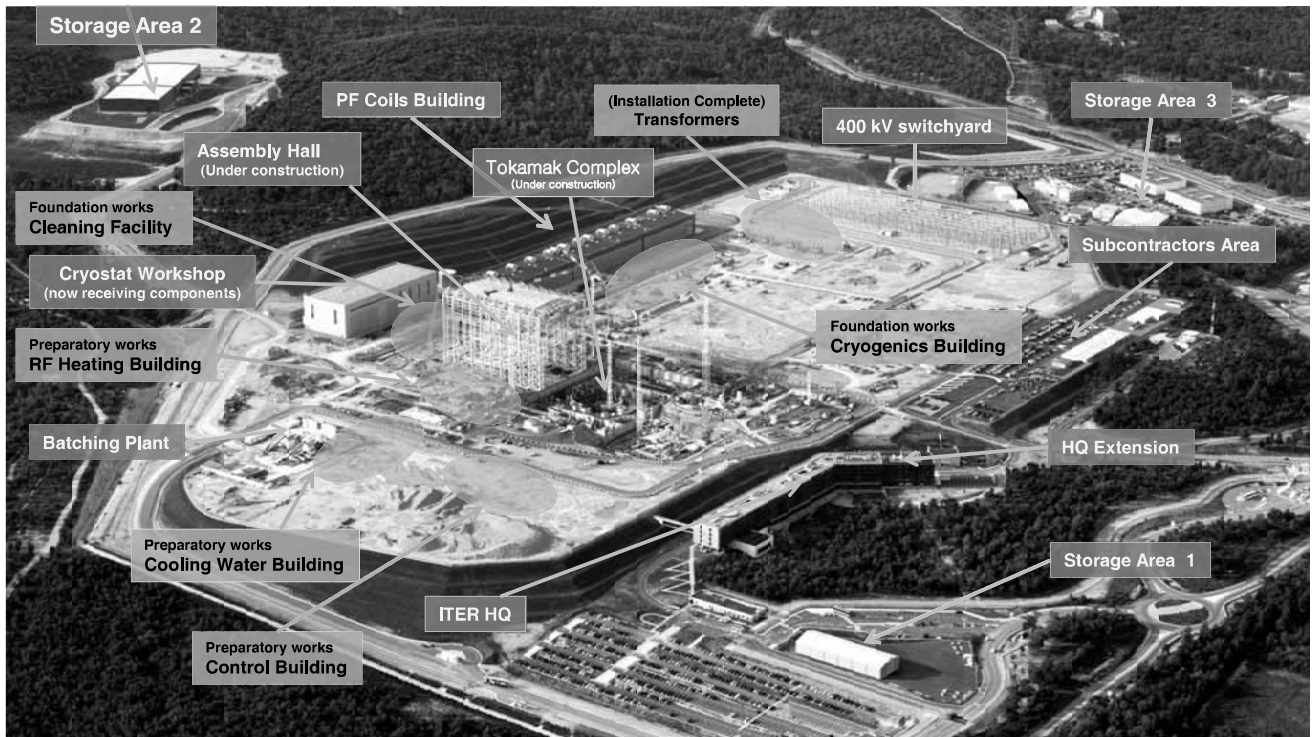


Today  
16 buildings at various stages of construction; first plant components installed; first machine components delivered.

## ITER 이사회



# 건설진행현황



## The Tokamak Complex



# The Assembly Hall



# The Poloidal Field Coils Facility



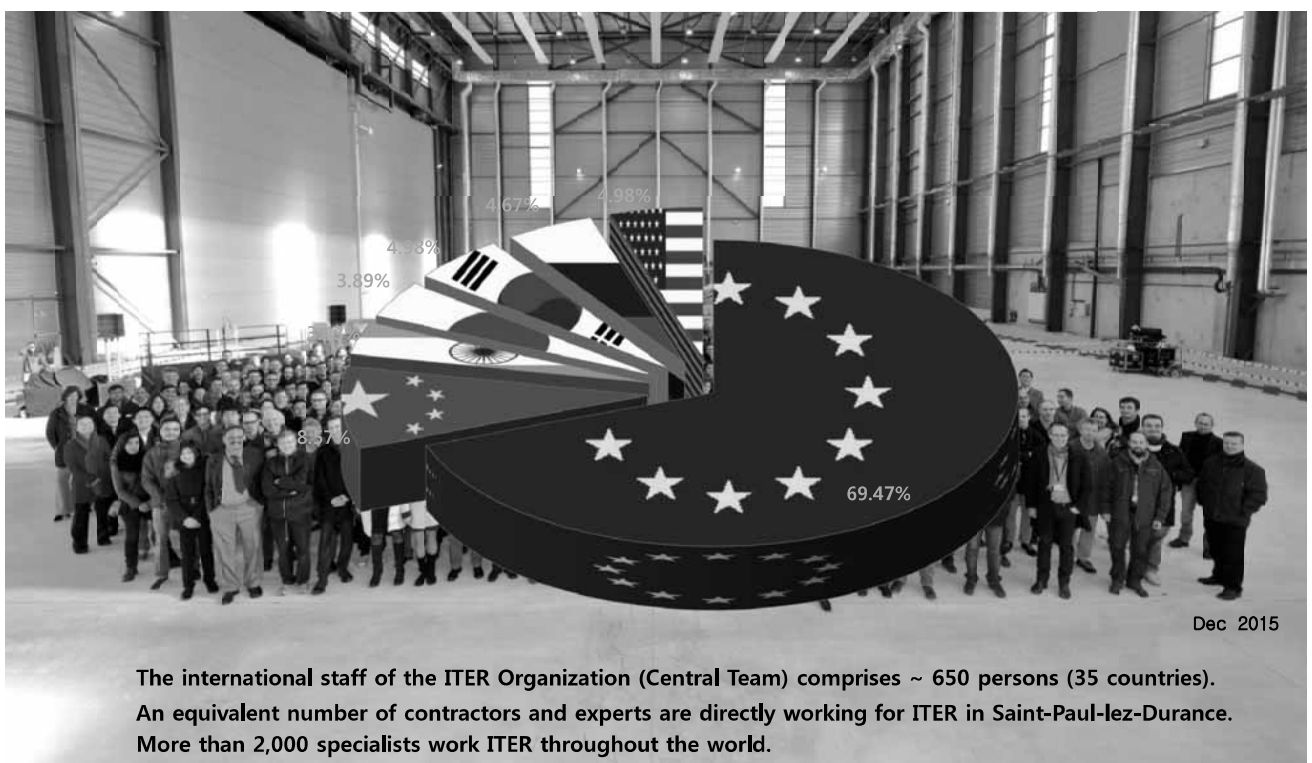


## First plant components installed

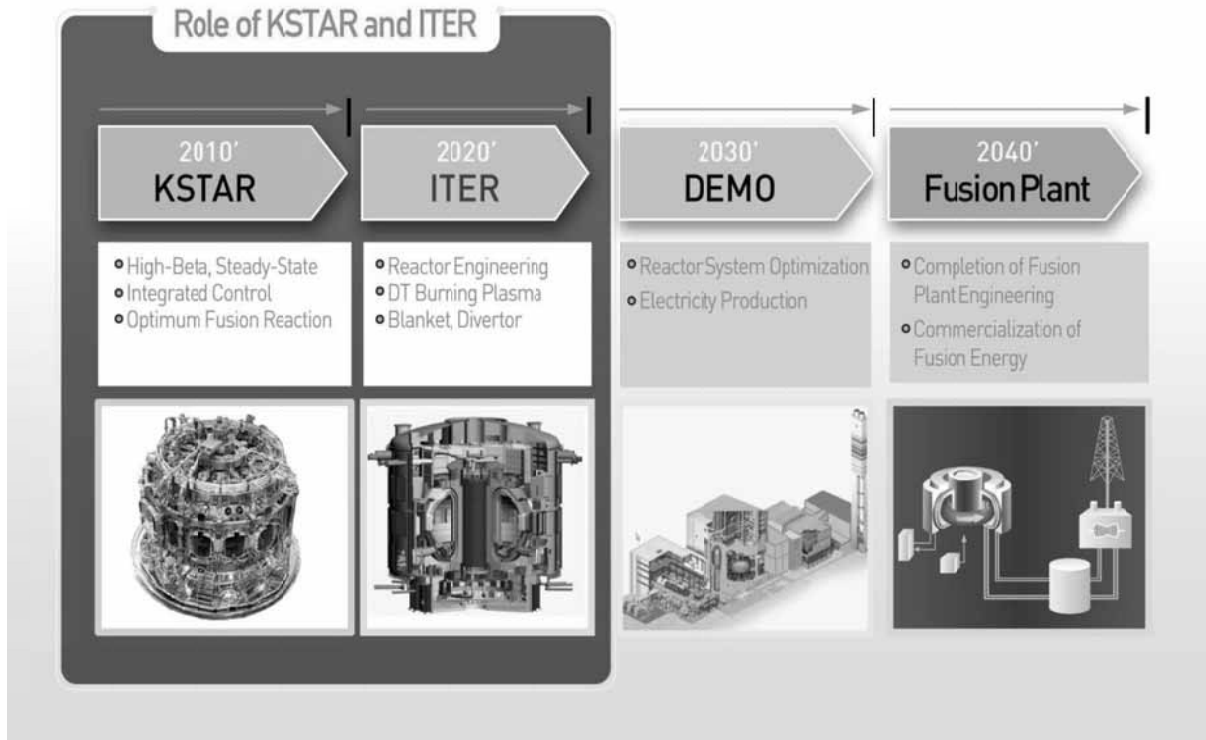


## Who works for ITER?

### IO Staff distribution by ITER Member



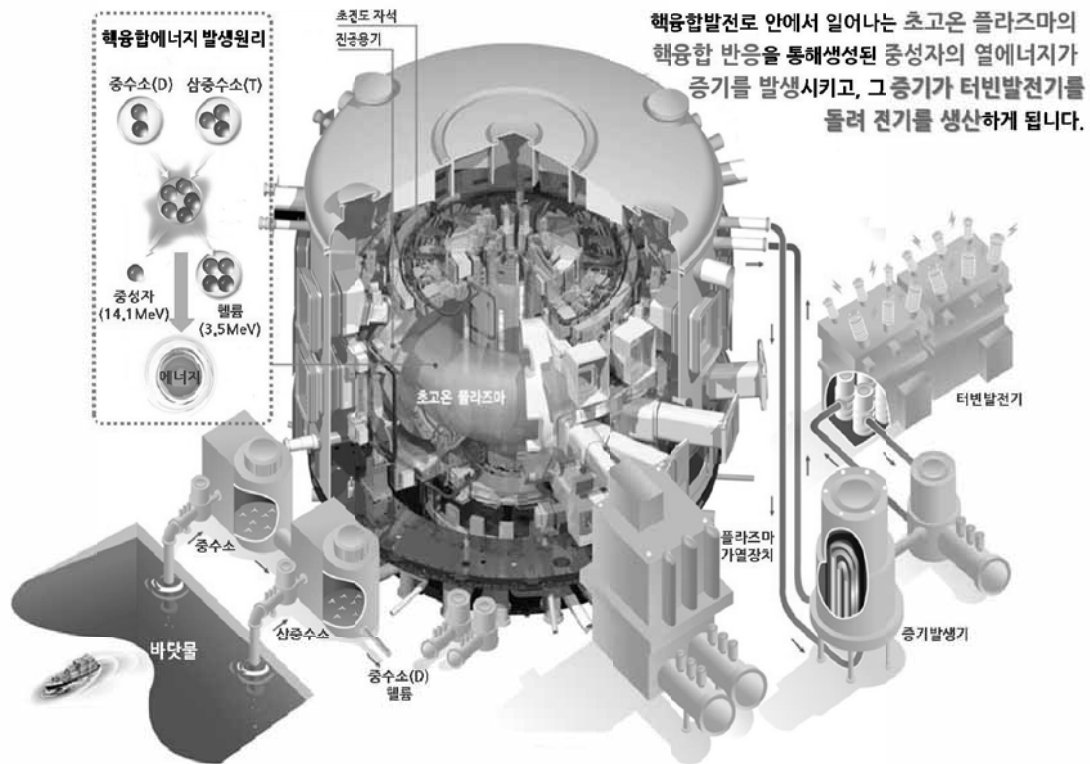
# 한국형 핵융합실증로(K-DEMO)



## 원천기술확보는 핵융합 상용화를 위한 필수 선결과제

NFRI





National Fusion Research Institute

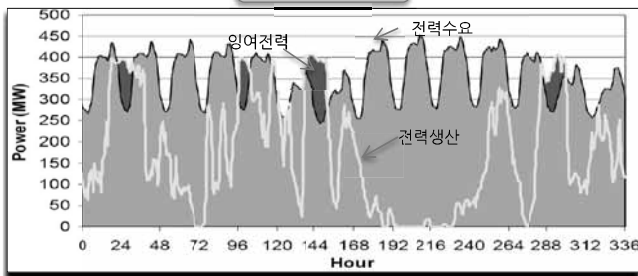
## 3 핵융합 연구의 미래



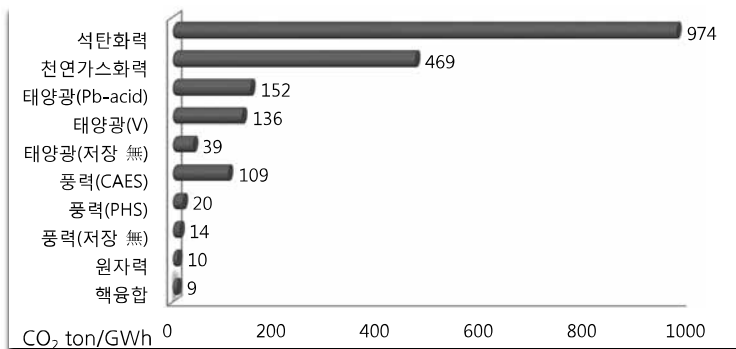
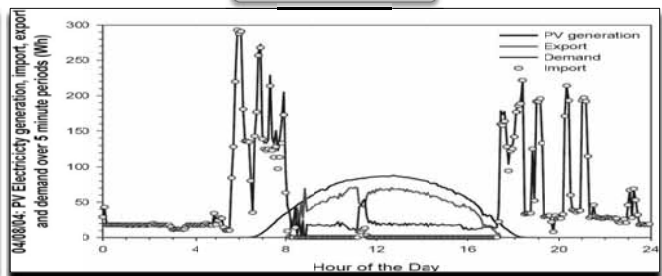
# 신재생에너지? 밀도와 빈도의 문제

NFRI

풍력



태양광



※저장 無: 에너지 저장장치가 없는 설비  
 Pb-acid: Pb를 사용한 축전지  
 V: 바나듐을 사용한 축전지  
 CAES(Compressed Air Energy Storage): 생산된 에너지를 압축공기로 전환하여 저장하는 장치  
 PHS(Pumped Hydro Storage): 양수발전

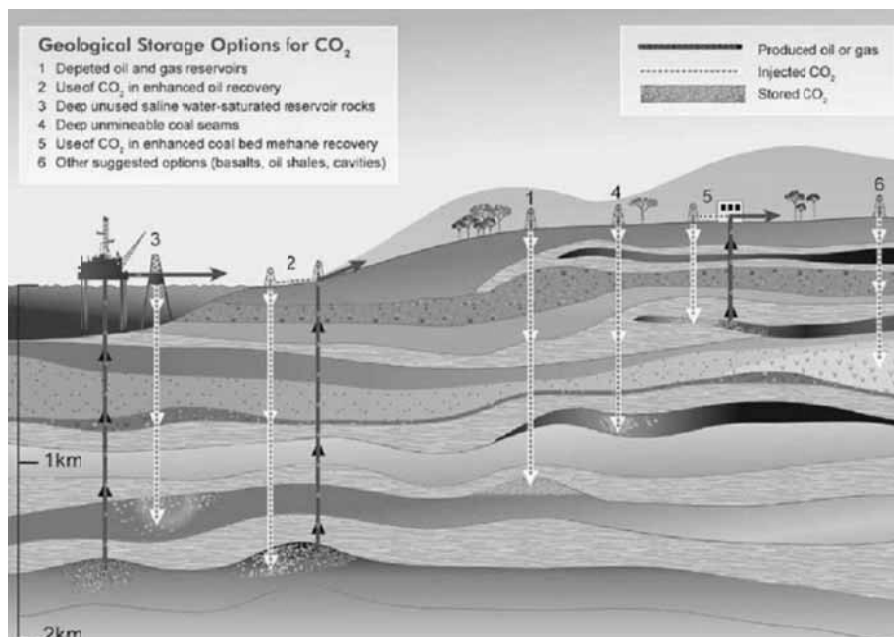
※ 출처 : Kulcinski(2005), James(2005)

National Fusion Research Institute

## CCS

NFRI

- 발전기술은 아니나, 산업 공정의 사후적 처리로 CO<sub>2</sub>를 제거 및 처분
  - 원자력, 신재생, 핵융합 등 대규모 비화석 전력기술을 일시에 제압

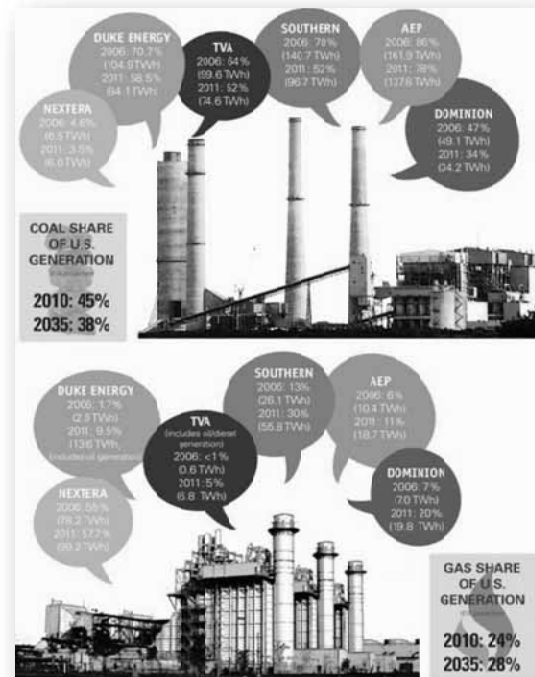


National Fusion Research Institute

# Shale gas

NFRI

- 미국 발전회사 발전량 비교
  - 석탄(위) vs. 천연가스(아래)
  - 2006 vs. 2011
- 회사마다 다소 차이는 있으나 천연가스 비율이 증가하는 추세



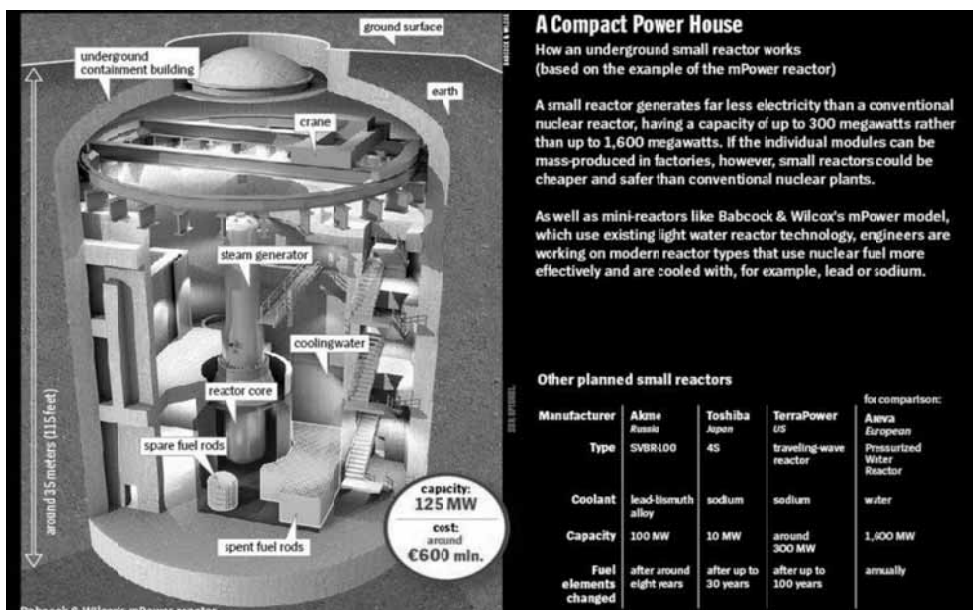
출처: POWER지 12.9.1 기사

National Fusion Research Institute

# 소형원전

NFRI

- 수백 MW 이하의 소형 원전도 중요한 전력기술 (한국의 SMART도 가세)
  - 2022년 완성 목표 B&W사의 mPower

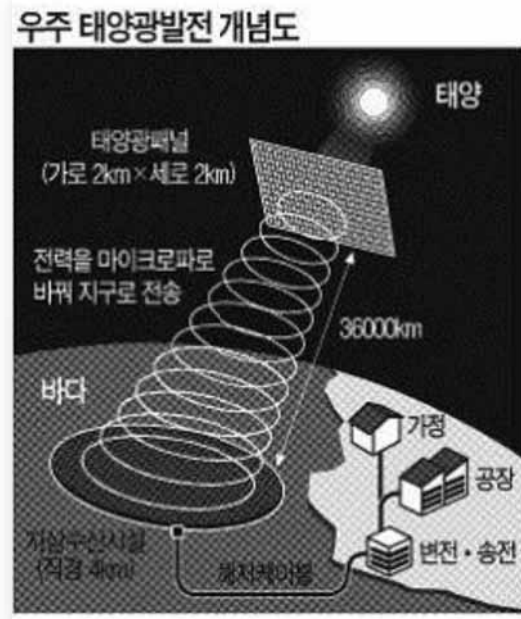
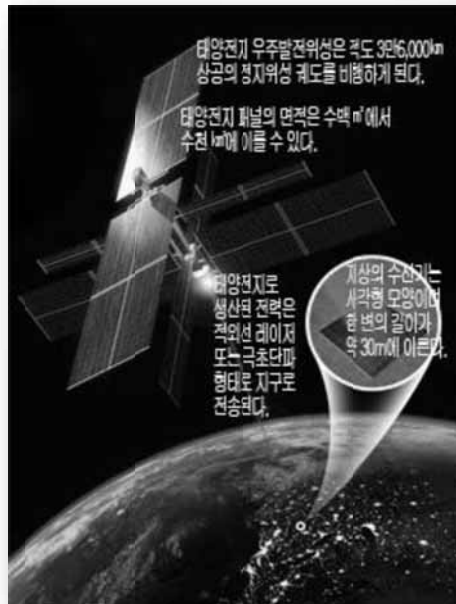


National Fusion Research Institute

# 우주 태양광

NFRI

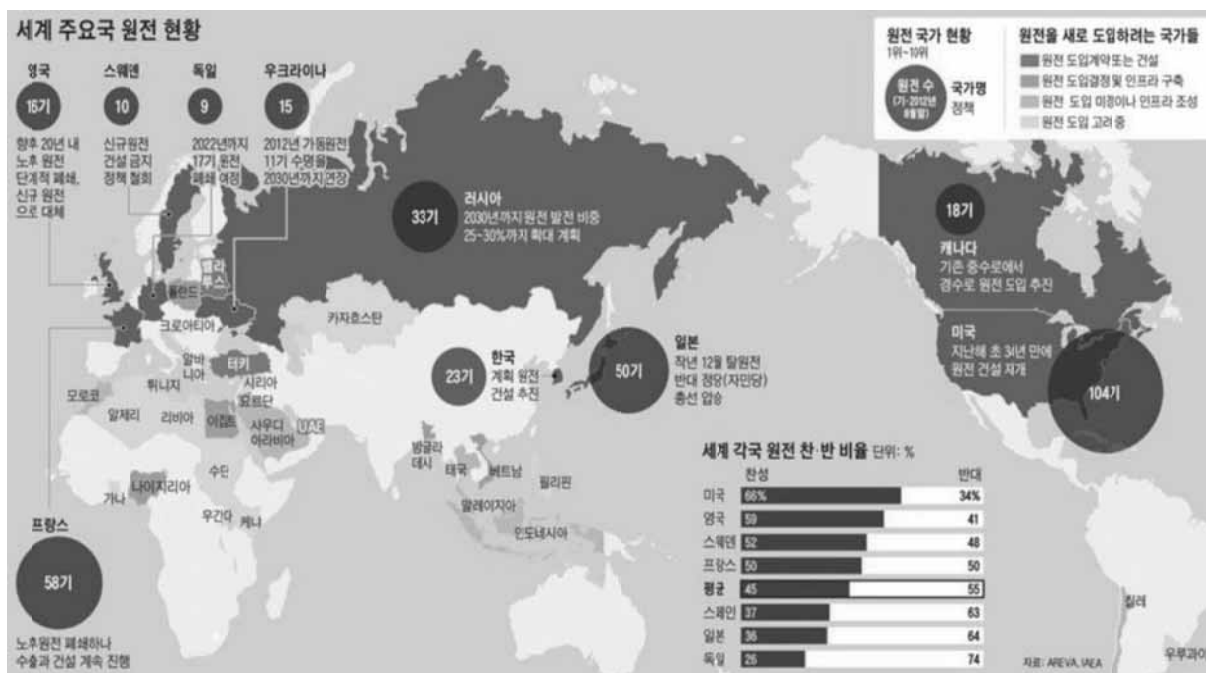
- 2040년대의 전력기술은 현재 상상할 수 있는 극단까지 고려할 필요



National Fusion Research Institute

# 세계 주요국 원전 현황

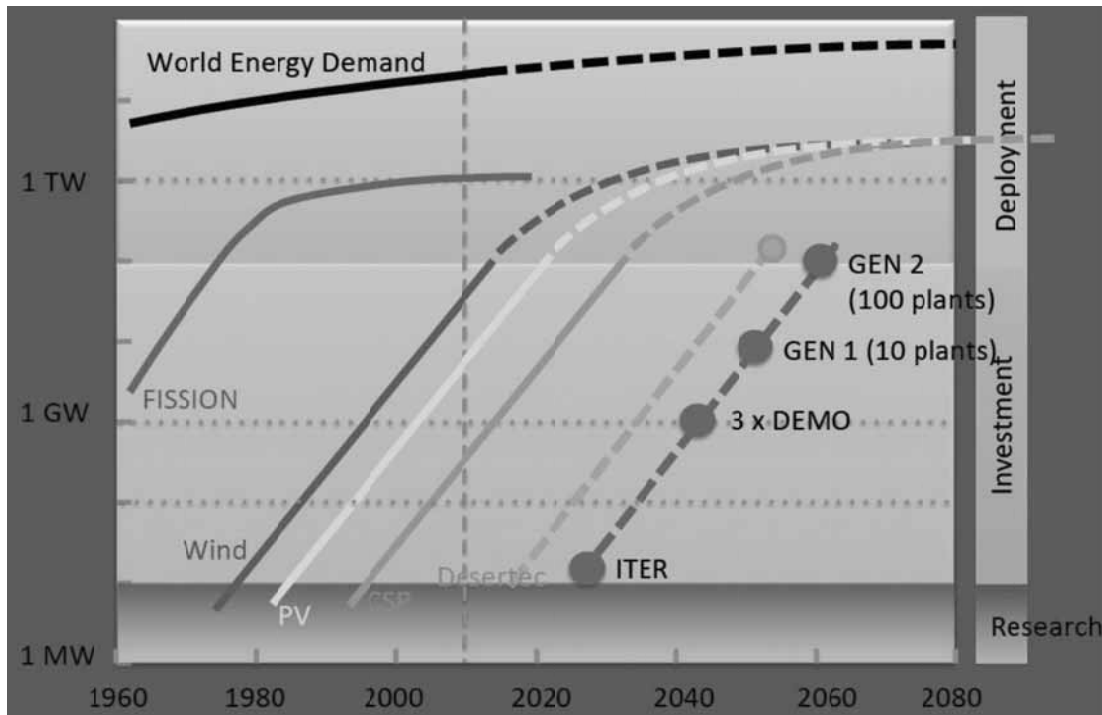
NFRI



National Fusion Research Institute

# 핵융합에너지 시장진입 시나리오

NERI



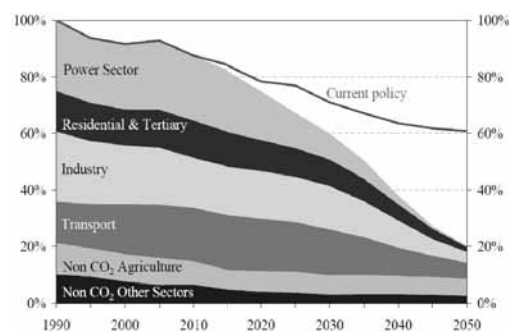
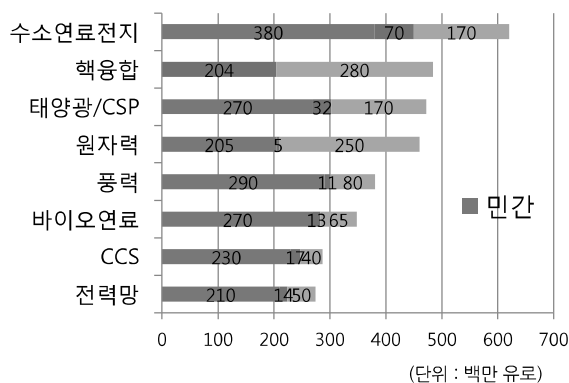
[네덜란드 Eindhoven 공대, Niek Lopes-Cardozo 교수]

National Fusion Research Institute

## EU의 R&D 민간 투자 계획

NERI

- '11년 1월 EU Framework Program 7의 지원을 받는 THINK 프로젝트에서 EU 전체의 에너지 기술에 대한 투자 현황('07)을 조사  
("Public Support for the Financing of RD&D Activities in new Clean Energy Technologies" 보고서)



- '11년 3월 50년대에 전 산업부문의 온실가스 배출을 90년대의 20% 감축 결정  
발전부문은 90% 이상 감축 →

National Fusion Research Institute

# 아마존 핵융합에 투자

NFR/

- 2011년 5월 아마존 CEO 핵융합에 투자
  - 캐나다의 General Fusion사에(magnetic target fusion) 220억원 투자



National Fusion Research Institute

## 민간 기업체 핵융합 투자 증대

NFR/

### Helion Energy takes in \$10.6M for fusion energy

Originally published July 7, 2015 at 9:44 pm

**Redmond-based Helion Energy has raised \$10.6 million, according to a filing, to build a fusion engine that would create power.**

SECTION SPONSOR

By Rachel Lerman

*Seattle Times business reporter*

Helion Energy has raised \$10.6 million in a new funding round to develop technology that aims to create a fusion reactor to generate power.

The company disclosed the funds in [a filing](#) with the Securities and Exchange Commission (SEC). Helion plans to raise more than \$21 million total in the continuing round.

Redmond-based Helion had previously received \$5 million from the U.S. Department of Energy and raised a \$1.5 million round in August 2014 from Y Combinator and Mithril Capital Management.

The company declined to comment on the latest funding round.

National Fusion Research Institute

54

October 16, 2014

## EMC2 Park Presented on Polywell Fusion

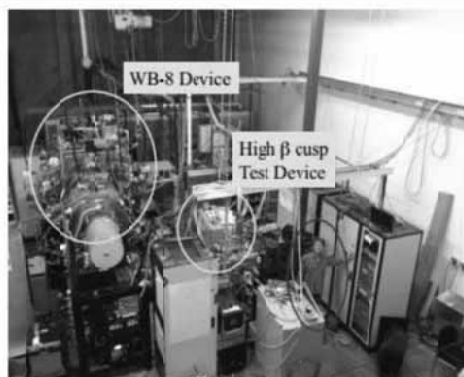
[energy](#) [fusion](#) [future](#) [nuclear](#)

Talk Polywell has the slides for Jaeyoung Park talk on Energy Matter Conversion Corporation (EMC2) [research results](#) Bussard developed this EMC2 fusion design before his death.

- Time resolved hard x-ray measurement provide the first ever direct and definitive confirmation of enhanced plasma confinement in high  $\beta$  cusp, a theoretical conjecture made by Grad and his team in 1950s.
- The enhanced electron confinement in high  $\beta$  cusp allows the Polywell fusion concept to move forward to complete the proof-of-principle test.
- If proven, Polywell device may become an attractive fusion reactor due to the following attributes
  - stable high pressure operation from cusp
  - good electron confinement by high  $\beta$  cusp
  - ion acceleration and confinement by electric fusion

Polywell will not work with a charged Magrid. This was proven by Dr. Park and is currently being overlooked by analysts. The actual key to viability is in the start-up cycle and having the ability to drive the potential well. WB proof was the key to considering adequate well depth. The next phase of testing would pursue investigation of adequate well depth.

## Recent Experiments at EMC2 (EMC2 San Diego Facility)



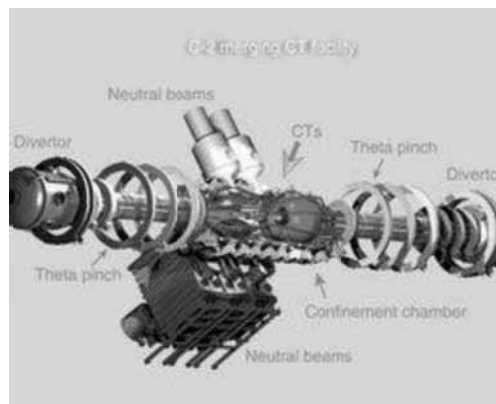
June 14, 2015

## Tri Alpha Energy Enables Field Reversed Plasma lasts for 5 milliseconds instead of 0.3 milliseconds and C3 prototype is operating

[energy](#) [fusion](#) [future](#) [nuclear](#) [physics](#) [science](#) [technology](#) [trialpha energy](#)

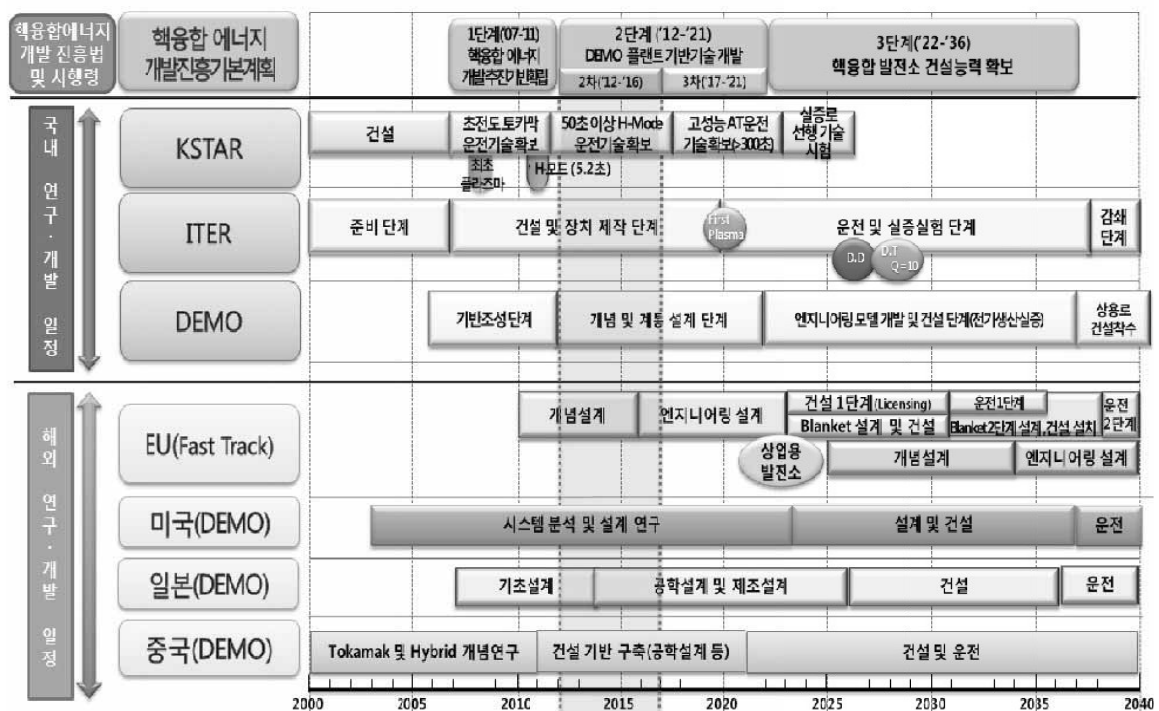
Tri Alpha team has revealed how fast ions, edge biasing, and other improvements have enabled them to produce FRCs (Field Reverse Configuration plasmas) lasting **5 milliseconds**, a more than 10-fold improvement in lifetime, and reduced heat loss. "They're employing all known techniques on a big, good-quality plasma," Wurden says. "It shows what you can do with several hundred million dollars."

To achieve **fusion gain**—more energy out than heating pumped in—researchers will **have to make FRCs last for at least a second**. Although that feat seems a long way off, Santarius says Tri Alpha has shown a way forward. "If they scale up size, energy confinement should go up," he says. Tri Alpha researchers are already working with an upgraded device, which has differently oriented ion beams and more beam power. TAE Chief Experimental Strategist Pr. Houyang Guo revealed during a plasma physics seminar held at the University of Wisconsin—Madison College of Engineering on April 29, 2013 that C-3 will be increased in size and heating power, in order to achieve 100 milliseconds to 1 second confinement times. He also confirmed the company has a staff of 150 people





## 핵융합에너지개발 로드맵



# 언제 핵융합발전이 가능한가요?

우리 사회가 원할 때 (레브 아치모비치)



**NFRI**  
국가핵융합연구소  
National Fusion Research Institute

에너지강국  
청정 에너지가 있습니다

바닷물로 만드는 해  
핵융합에너지가 에너지 문제 해결의 답입니다

태양에너지와 달리 핵융합은 바닷물을 연료로 하는 안전한 대량에너지원입니다.  
국가핵융합연구소는 핵융합에너지 개발로 에너지문제의 궁극적인 답을 찾습니다

온실가스(CO<sub>2</sub>) 배출이 없는 청정 에너지  
연료의 지역편재와 고갈 걱정이 없는 무한 에너지  
고준위 폐기물(연료봉)과 사고걱정이 없는 안전 에너지  
자원 분쟁과 군사적 이용의 우려가 없는 평화 에너지  
에너지 밀도가 높은 대용량의 고효율 에너지



# MEMO

---

# MEMO

# MEMO

---

# MEMO

# MEMO

---

# MEMO

