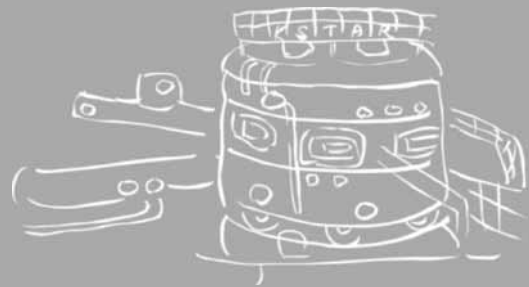


FUSION, Future Vision of Green Energy

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

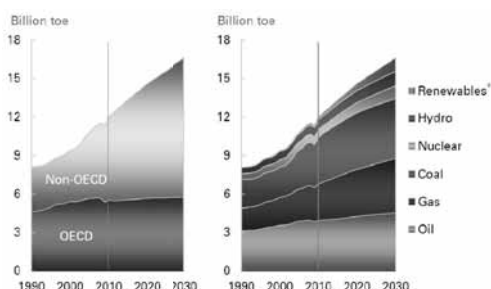
## 세계 에너지 환경의 변화

### 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)

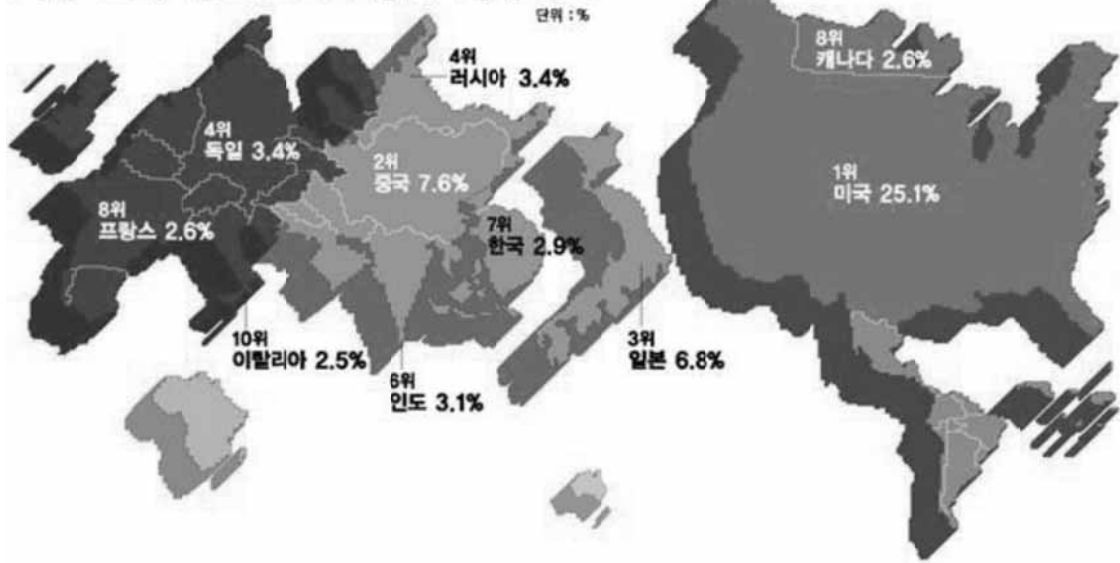
구분	1990년	1995년	2000년	2005년	2010년	2015년	2020년	2025년	2030년	2010년 대비 2030년 증가율
OECD	4,625	4,992	5,435	5,667	5,568	5,371	5,679	5,729	5,765	3.9%
비 OECD	3,484	3,586	3,947	5,134	5,434	7,789	8,948	9,905	10,867	68.9%
EU	1,648	1,643	1,720	1,838	1,733	1,692	1,706	1,707	1,707	-1.5%
유럽	1,815	1,806	1,911	2,016	1,960	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

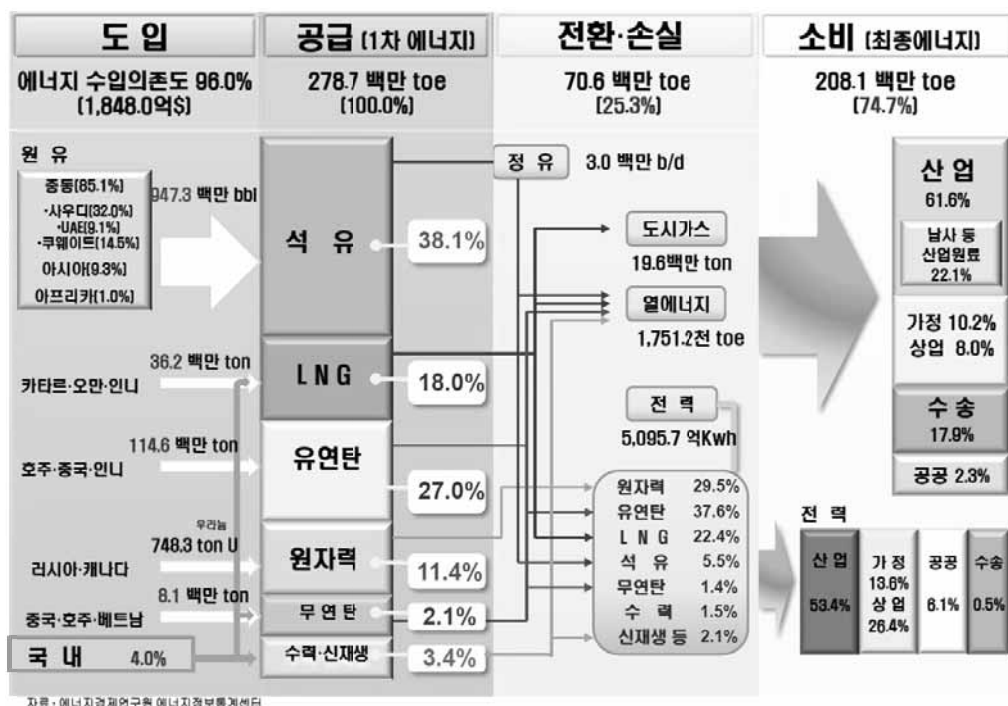
석유 소비 규모로 재구성한 세계지도



National Fusion Research Institute

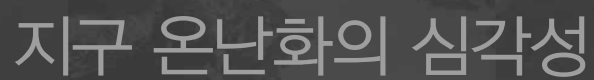
## 2012년 에너지 밸런스

NFRI



National Fusion Research Institute

## NFR/

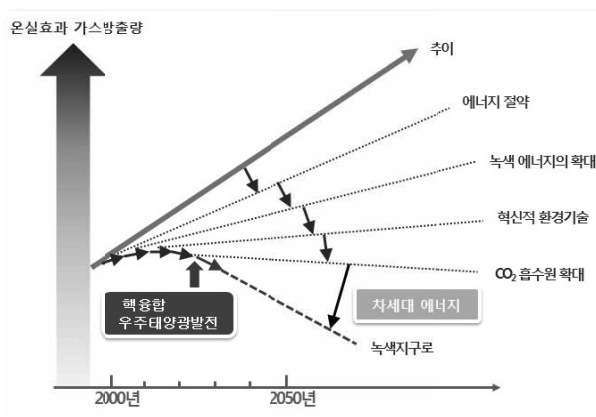


# Green Energy(기후변화)

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

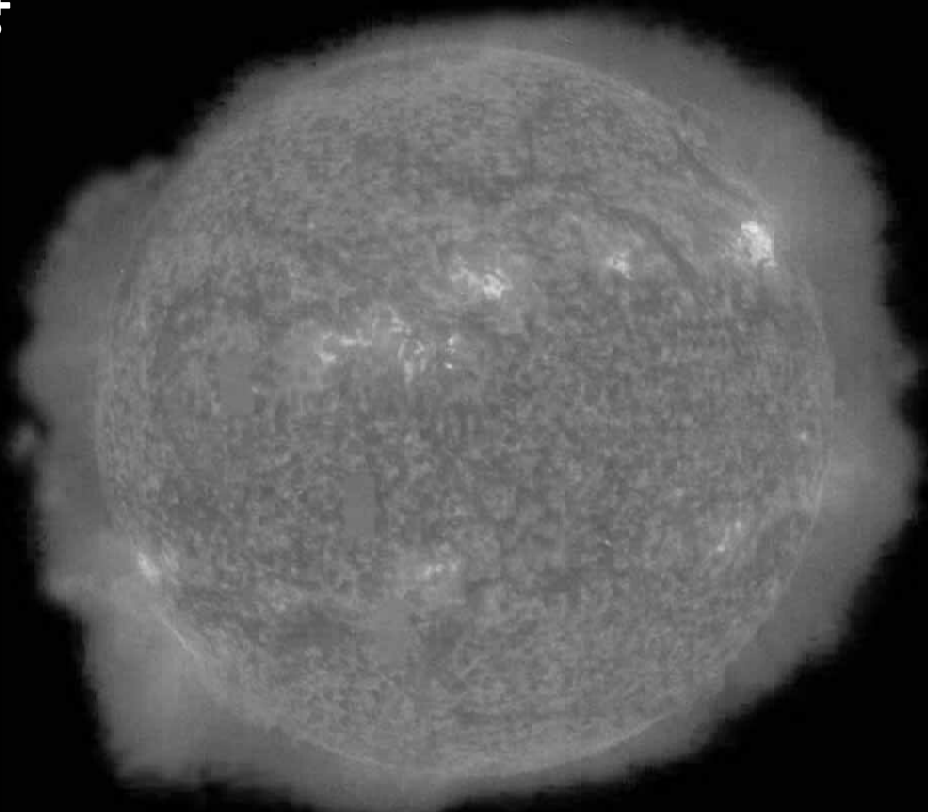
## 미래 에너지로서의 조건은?

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

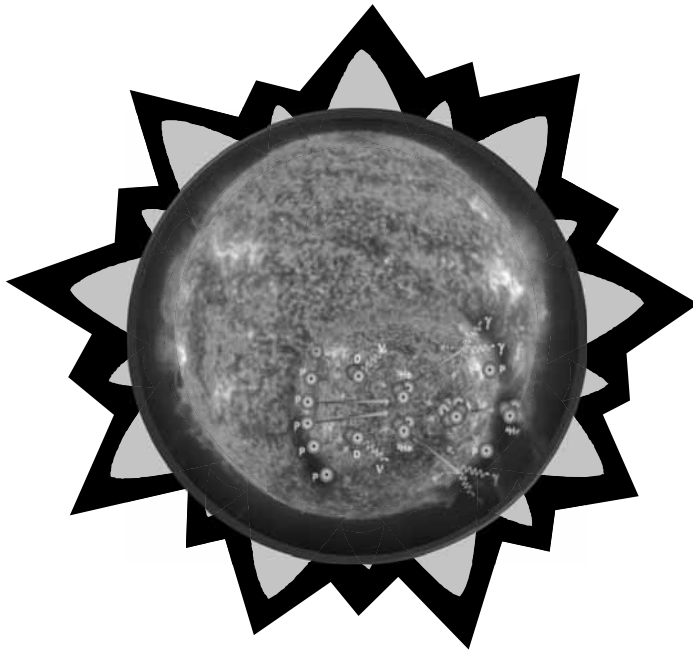
태 양



지구 생명 에너지의 근원



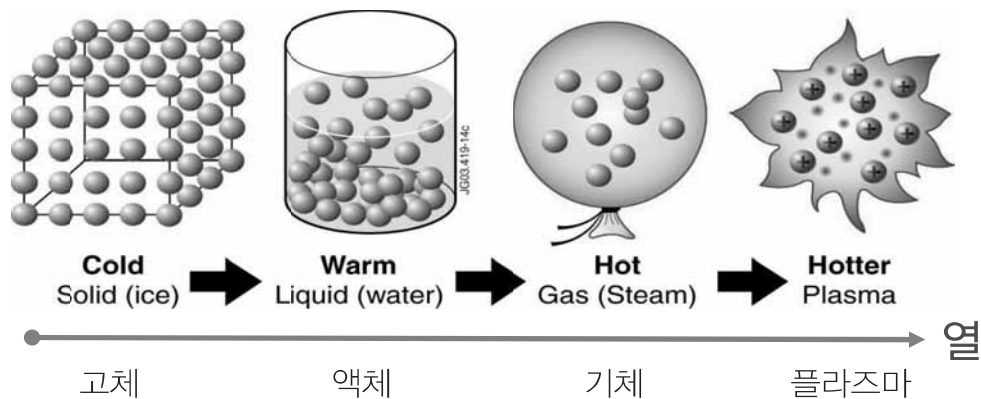
태양과 같이  
빛을 내는 별들은 모두 플라즈마 상태로 핵융합 반응 중



## 태양환경

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

## 플라스마란?



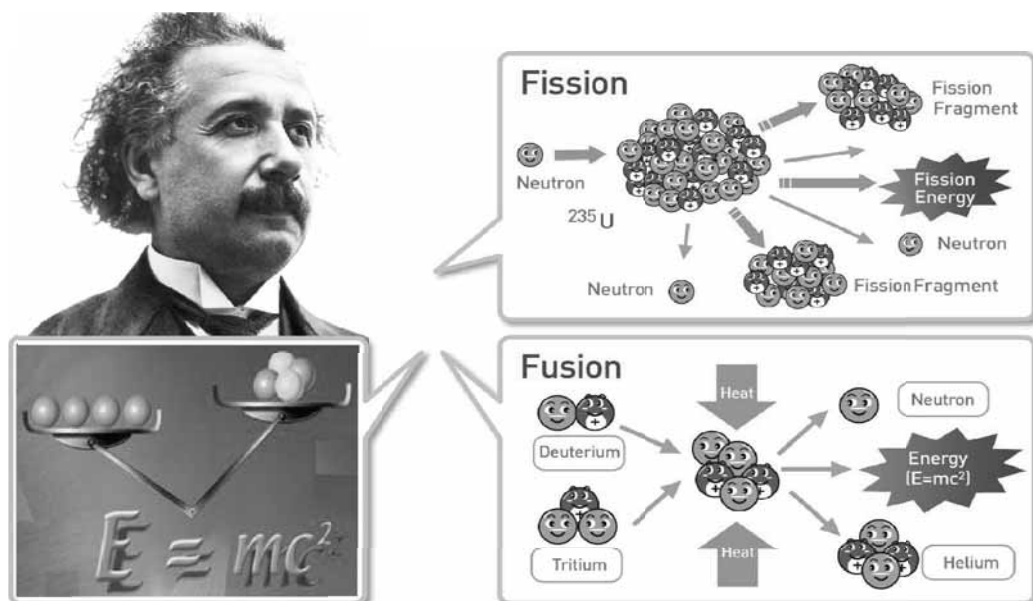
원자핵과 전자가 분리되어 자유롭게 움직이는 상태  
기체상태에 열을 가하거나 높은 전기장이나 자기장을 가해 만들 수 있다.





## 핵융합과 핵분열 반응

NFRI



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

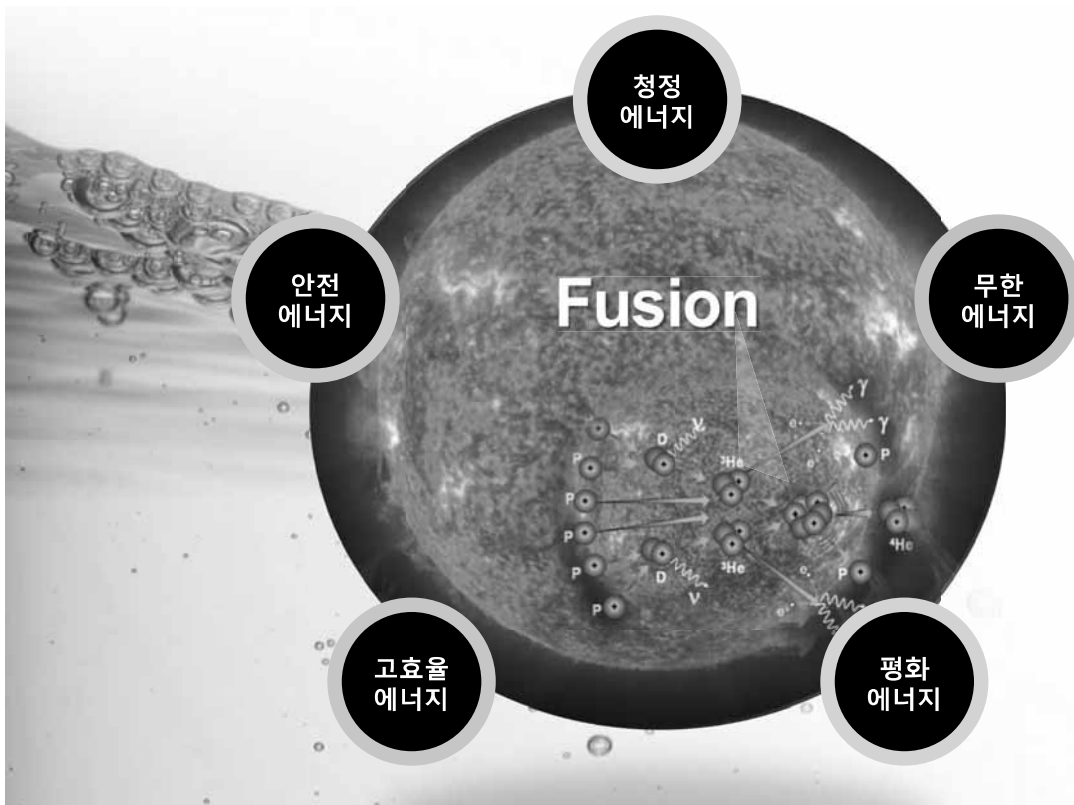
# 핵융합, 모든 에너지의 근원

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



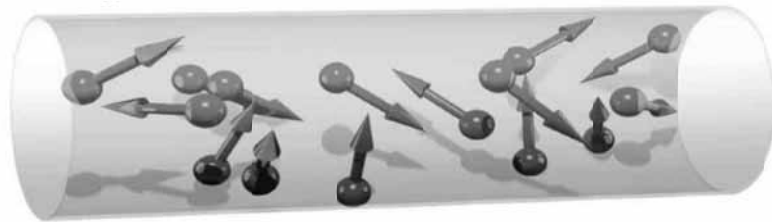
## 리튬

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

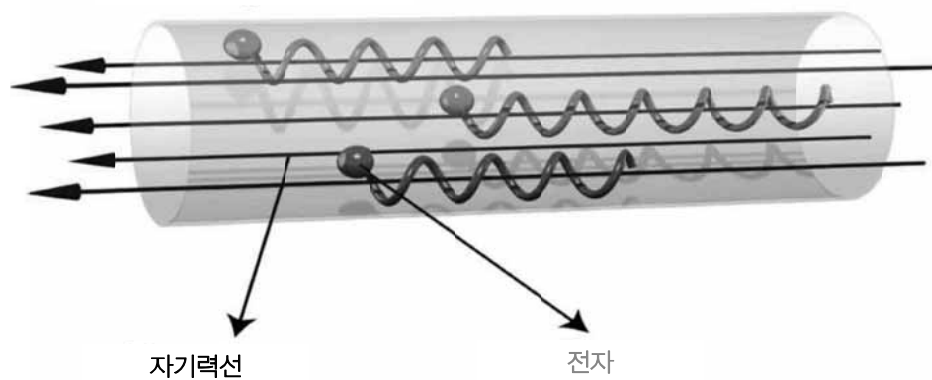


## 자기장의 이용

자기장이 없을 때



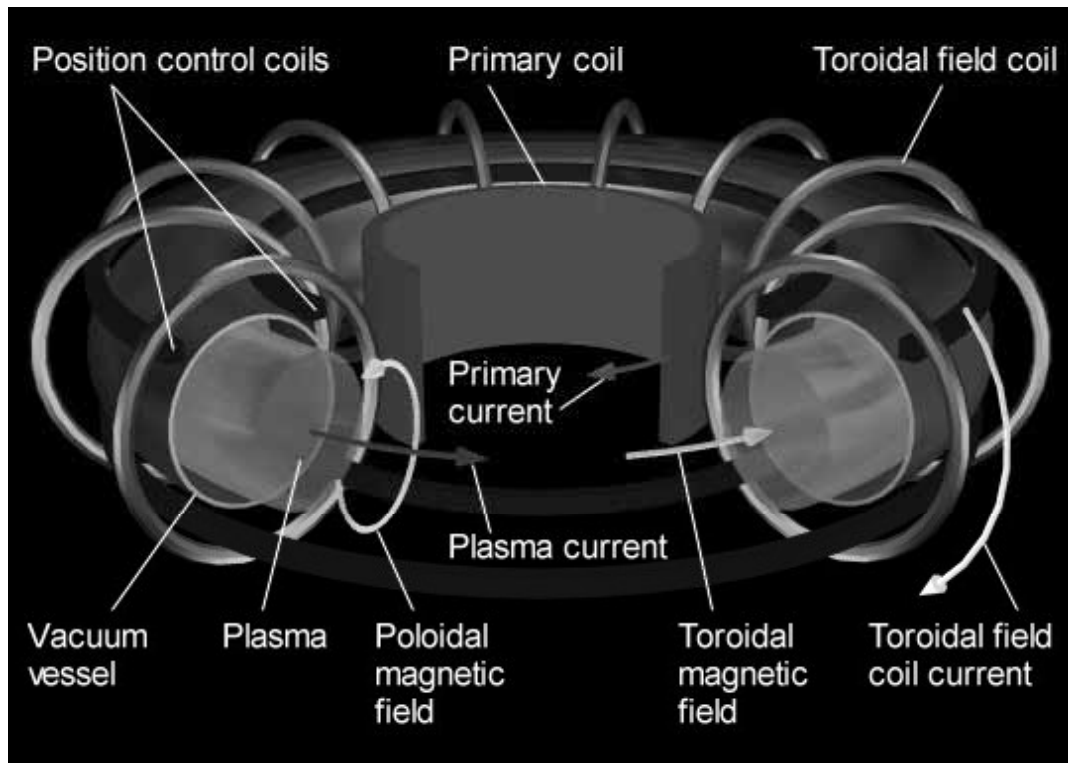
자기장이 있을 때



전하를 띤 입자들은 자기장에 의해 **회전운동**을 한다.

# 토카막(TOKAMAK)

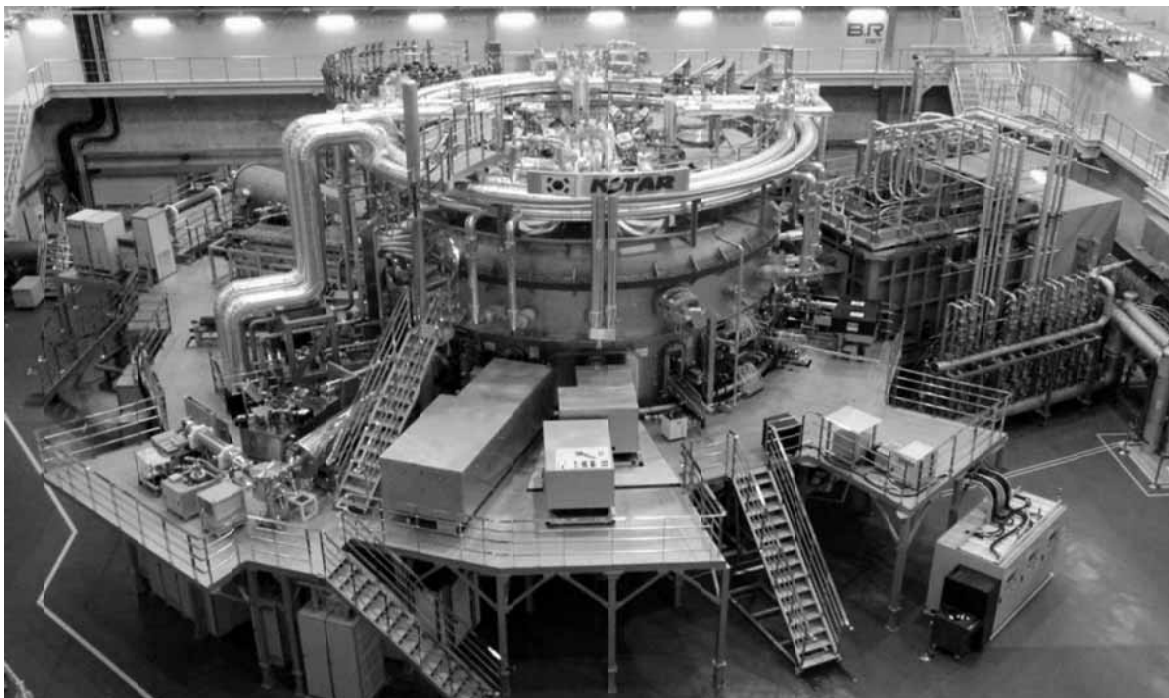
NFR/



National Fusion Research Institute

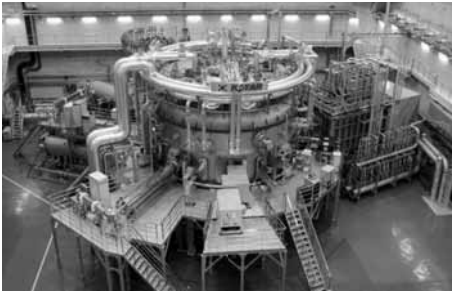
## 자기장핵융합장치 KSTAR

NFR/



National Fusion Research Institute

# KSTAR



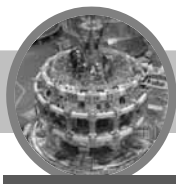
- 건설기간 : '95.12 ~ '07.8(11년8개월)/운영기간 : '07.9 ~
- 건설비용 : 4,182억(장치3,000억, 시설1,092억)/운영비 : 연간400억 수준
- ITER와 기술적으로 가장 유사한 차세대 초전도 토카막 장치의 건설 경험 축적
- ITER 건설 기간 동안 핵융합 실험 등 운영기술 및 경험 확보



1995  
"국가핵융합연구개발  
기본계획" 수립  
KSTAR 사업착수



1996~1997  
기본설계 및 R&D



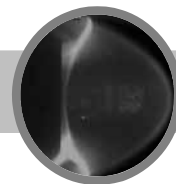
1998~2001  
인프라 구축 및  
공학설계 완성



2002~2007  
KSTAR 건설

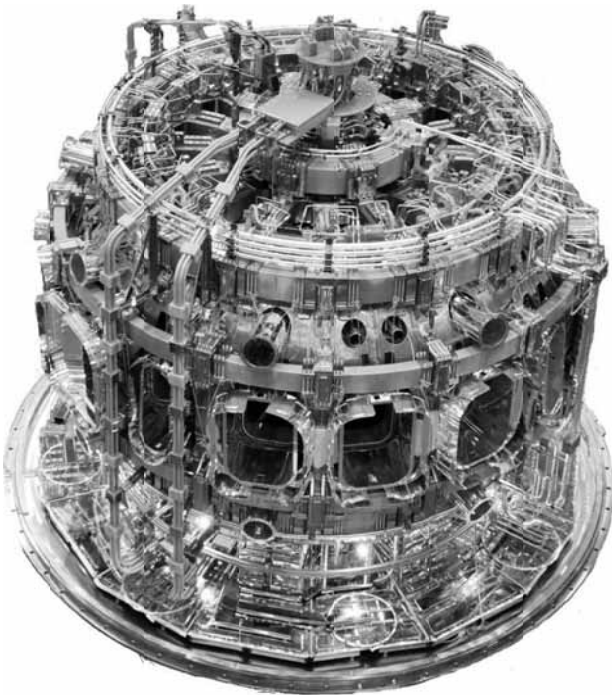


2008  
최초 플라즈마



현재  
H-MODE, ELM 등  
플라즈마 control

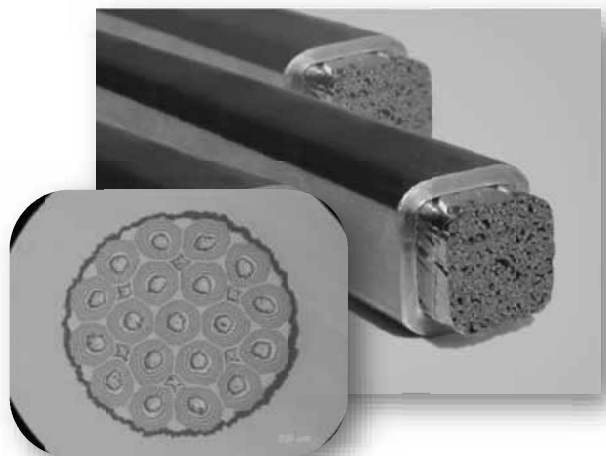
## KSTAR는 초전도자석 활용



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)

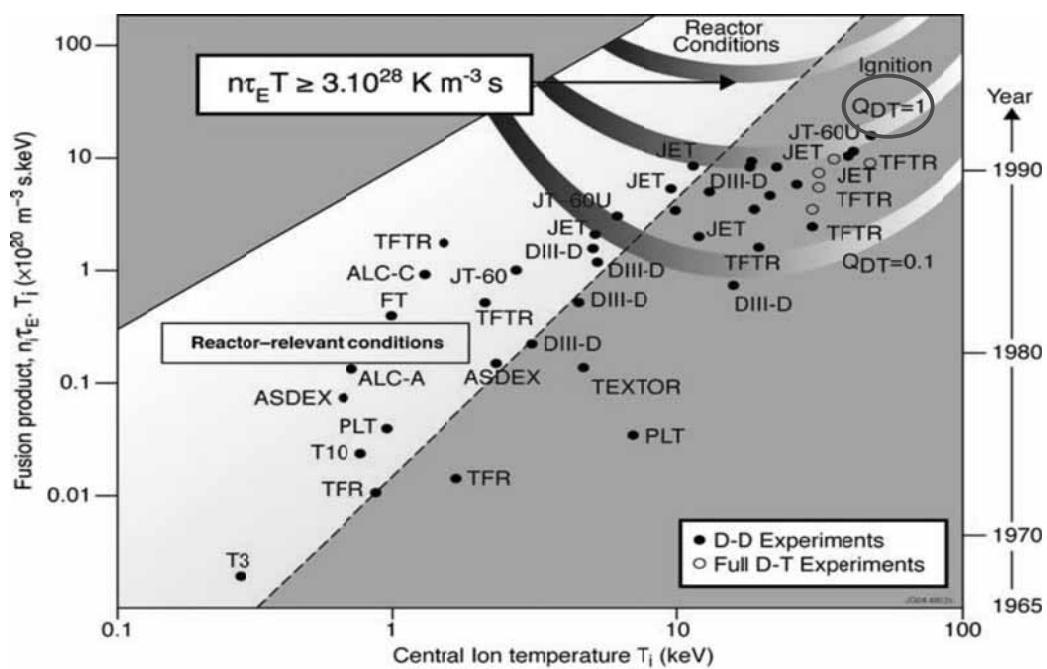
# 세계 핵융합에너지 연구개발 현황

상전도 토카막 | 초전도 토카막



## 토카막 연구개발 현황

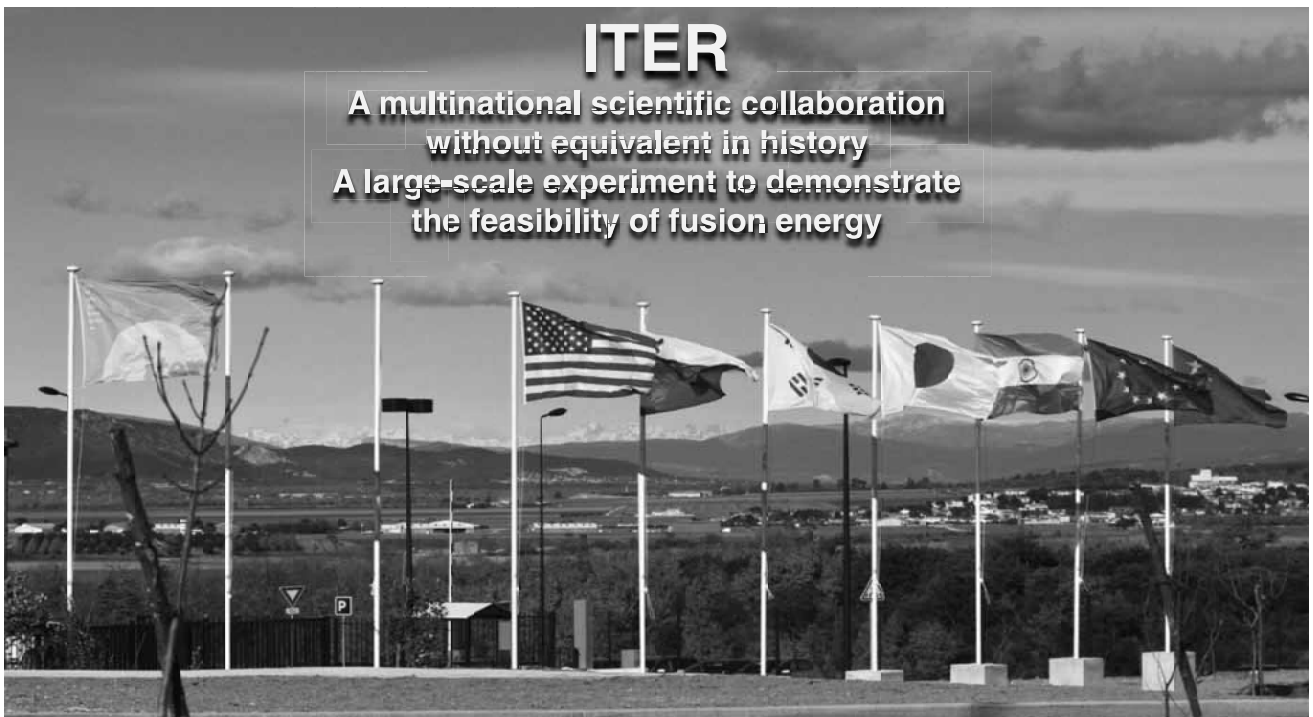
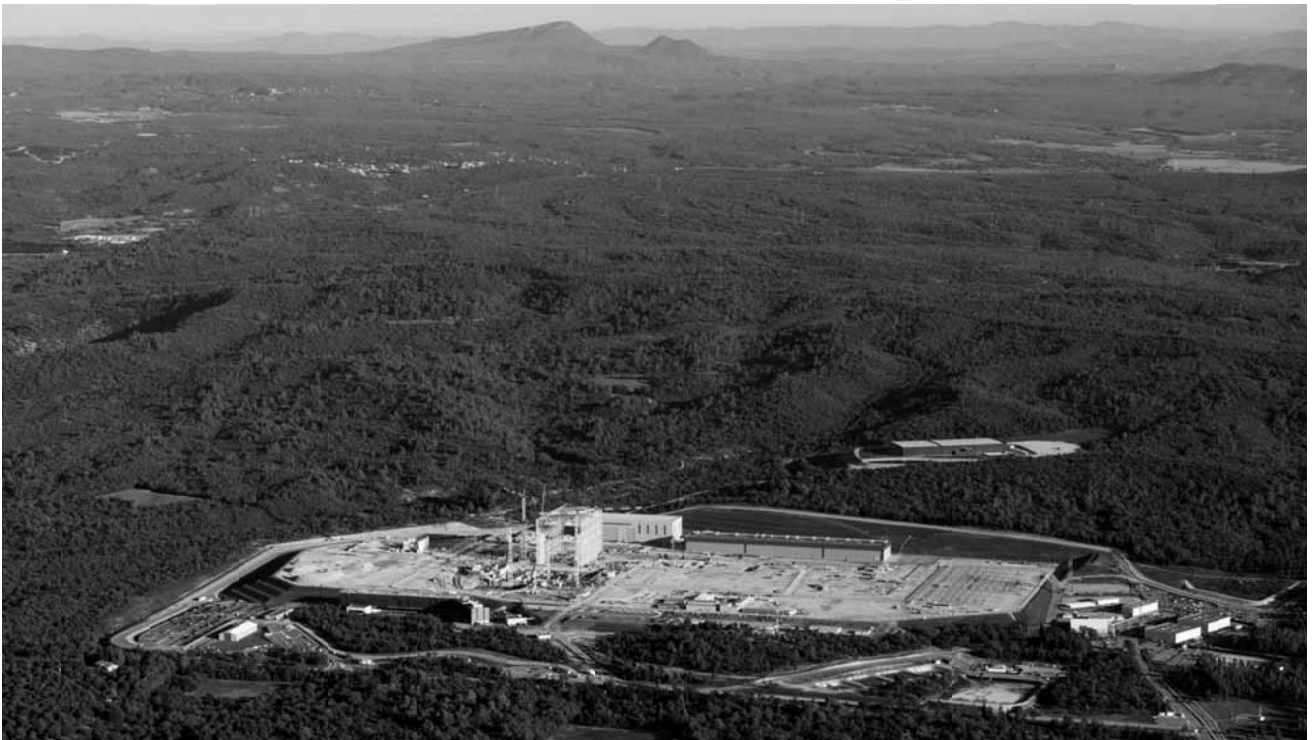
NFR/



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



# 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

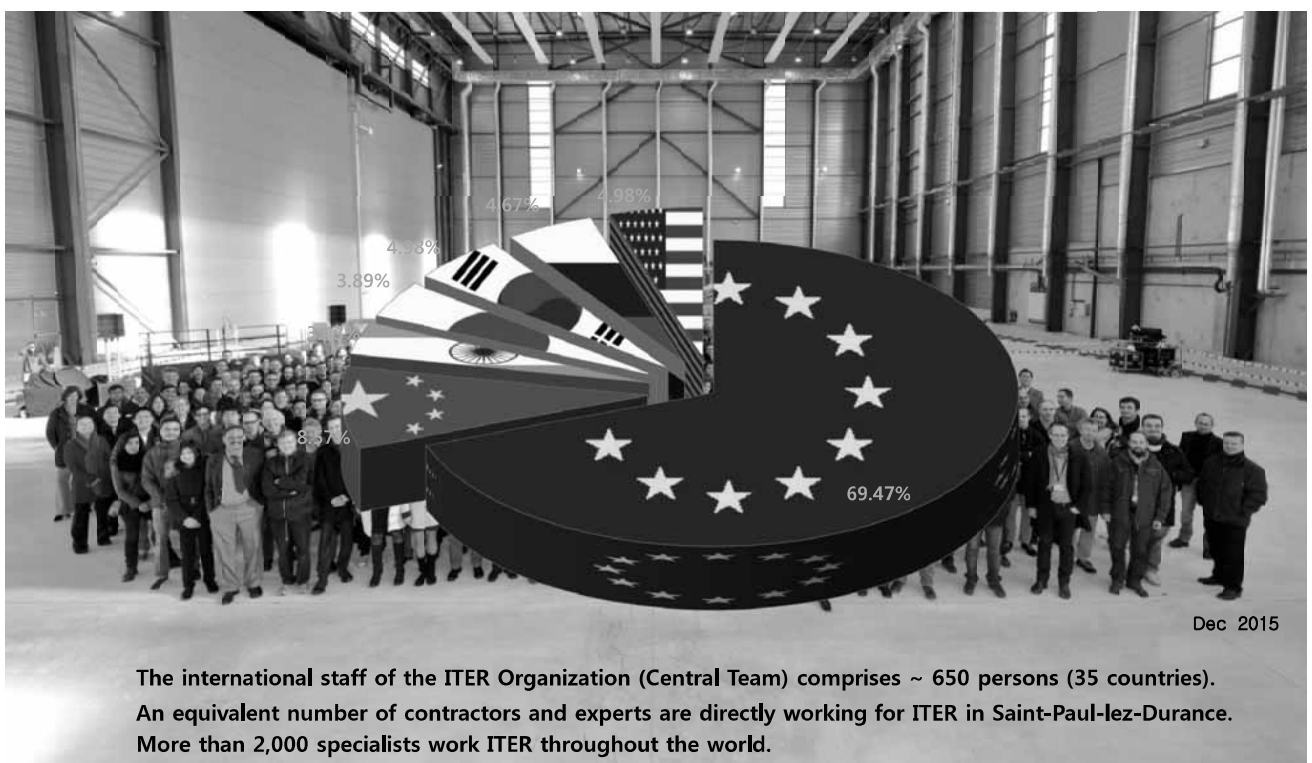


## First plant components installed

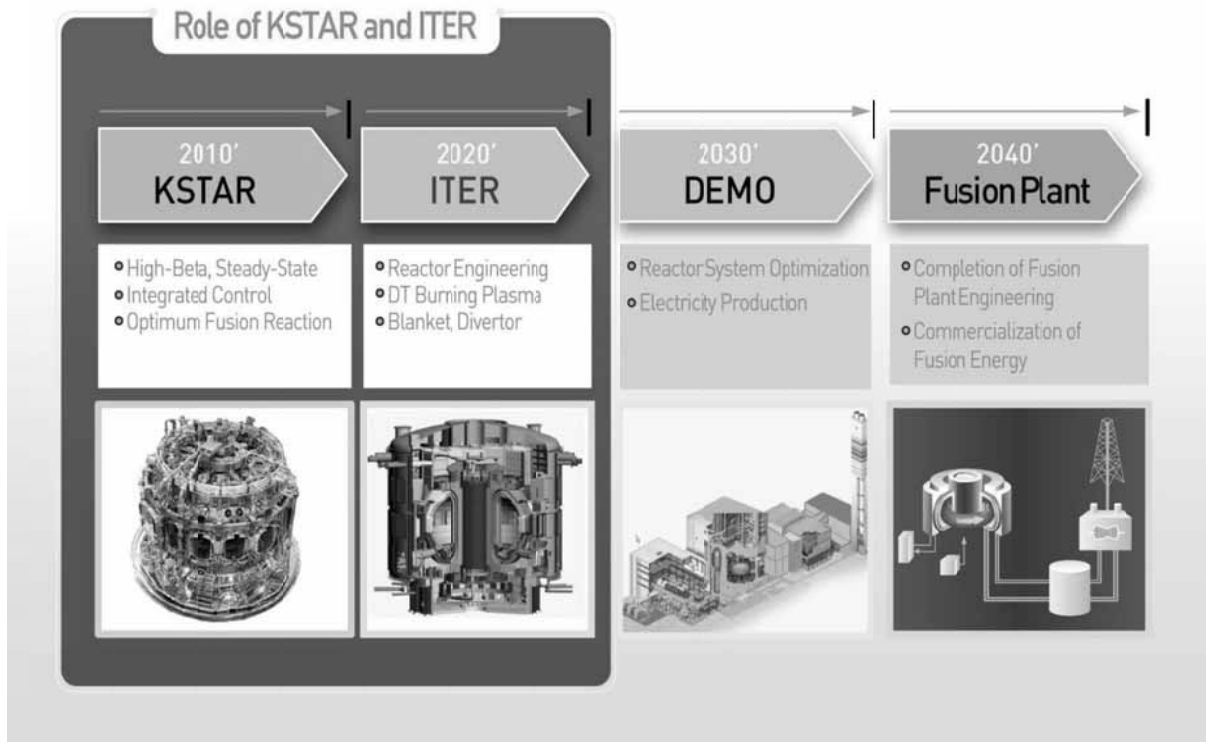


## Who works for ITER?

### IO Staff distribution by ITER Member



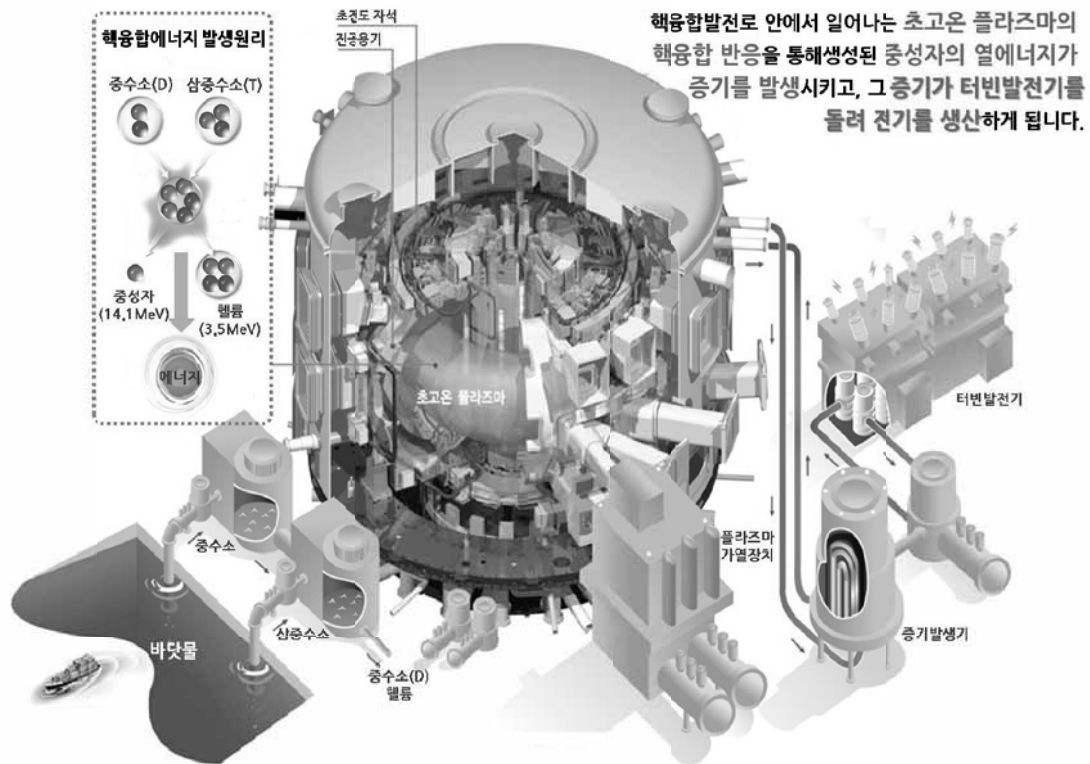
# 한국형 핵융합실증로(K-DEMO)



## 원천기술확보는 핵융합 상용화를 위한 필수 선결과제

NFRI





National Fusion Research Institute

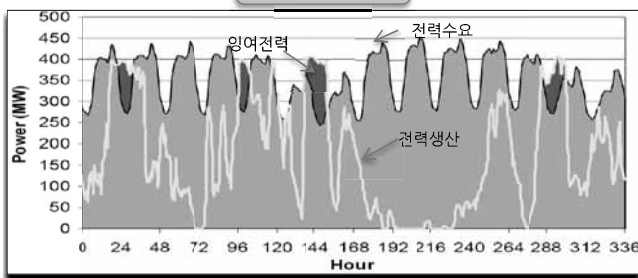
## 3 핵융합 연구의 미래



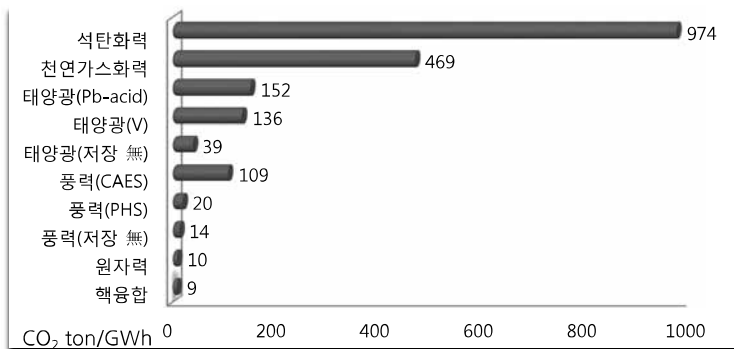
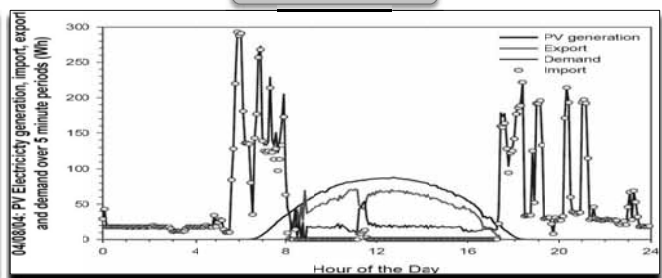
# 신재생에너지? 밀도와 빈도의 문제

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

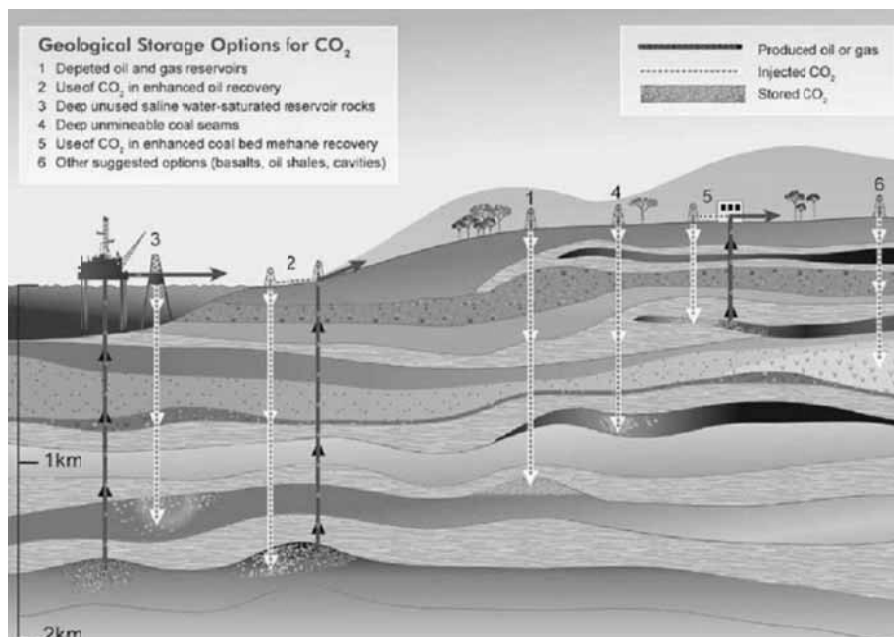
※ 출처 : Kulcinski(2005), James(2005)

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

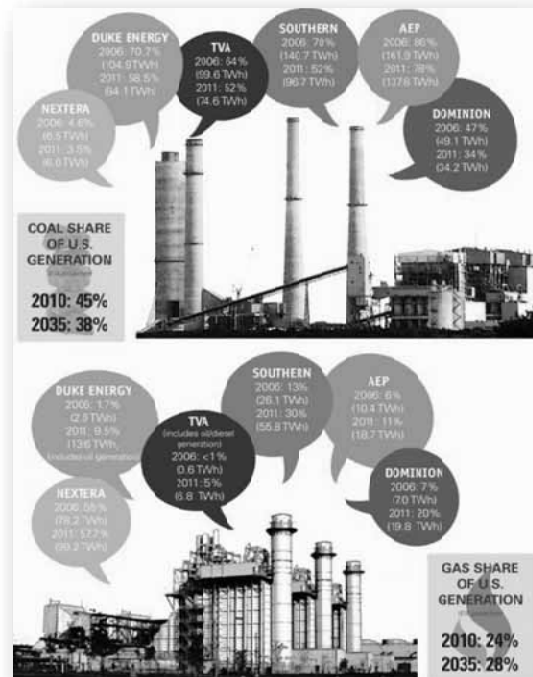


National Fusion Research Institute

# Shale gas

NFRI

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



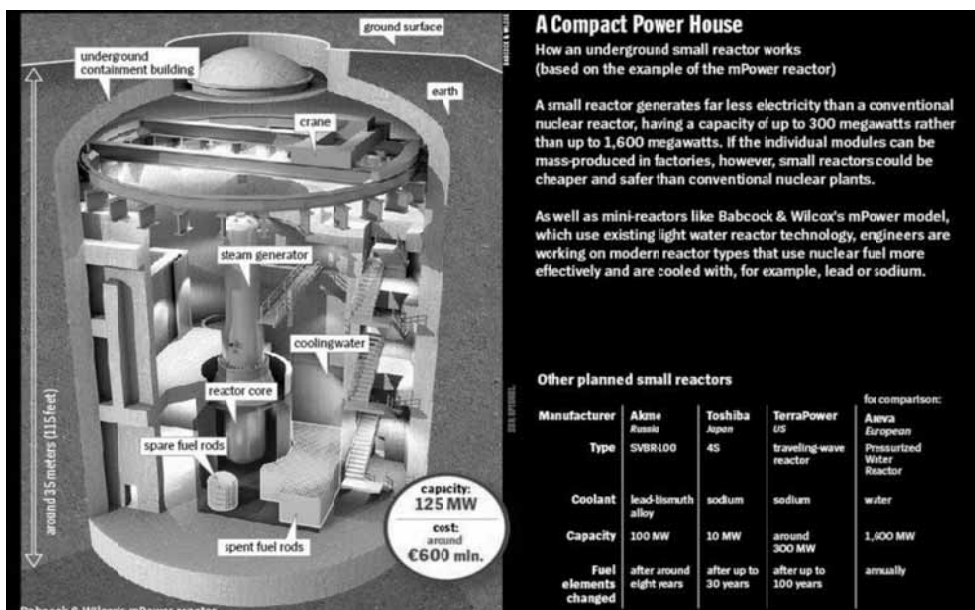
출처: POWER지 12.9.1 기사

National Fusion Research Institute

# 소형원전

NFRI

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



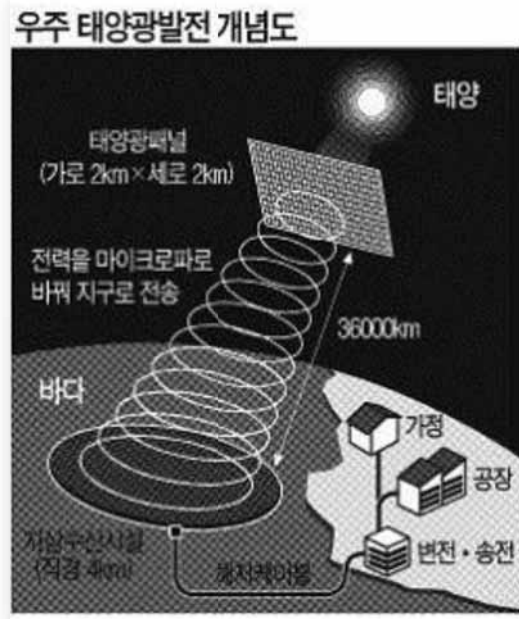
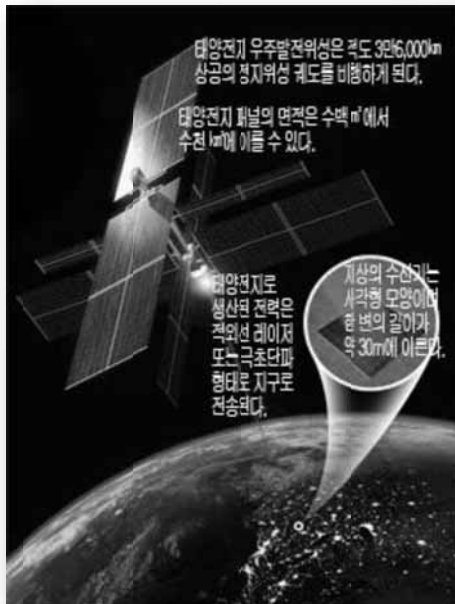
National Fusion Research Institute



# 우주 태양광

NFRI

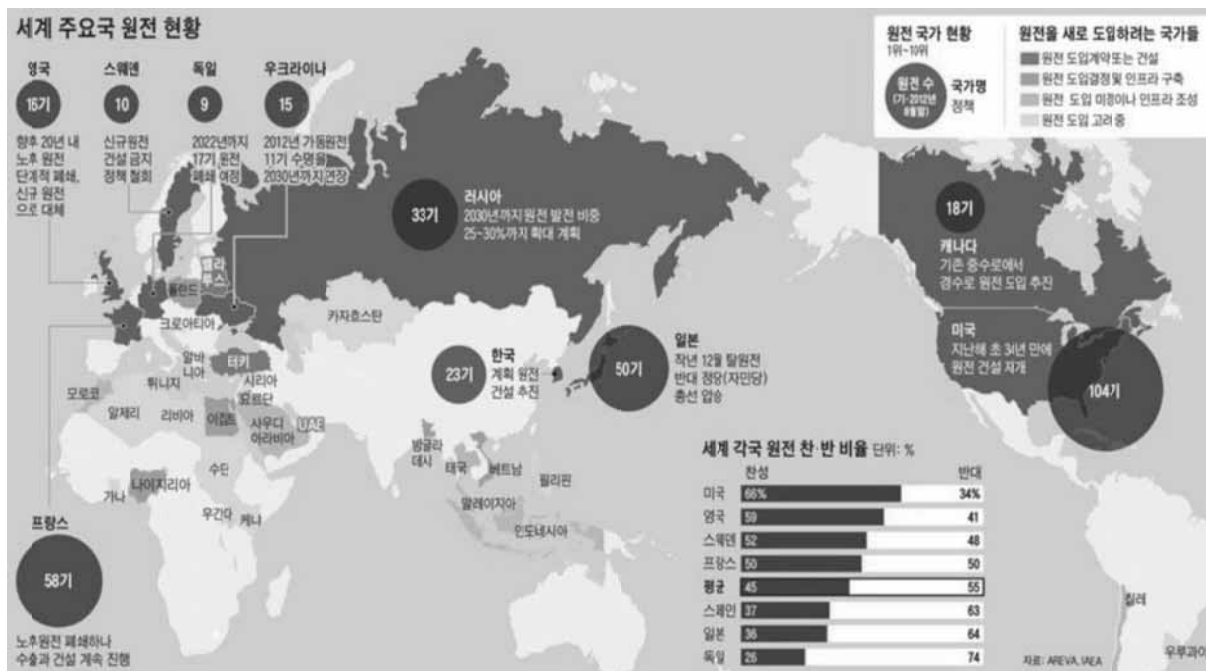
- 2040년대의 전력기술은 현재 상상할 수 있는 극단까지 고려할 필요



National Fusion Research Institute

# 세계 주요국 원전 현황

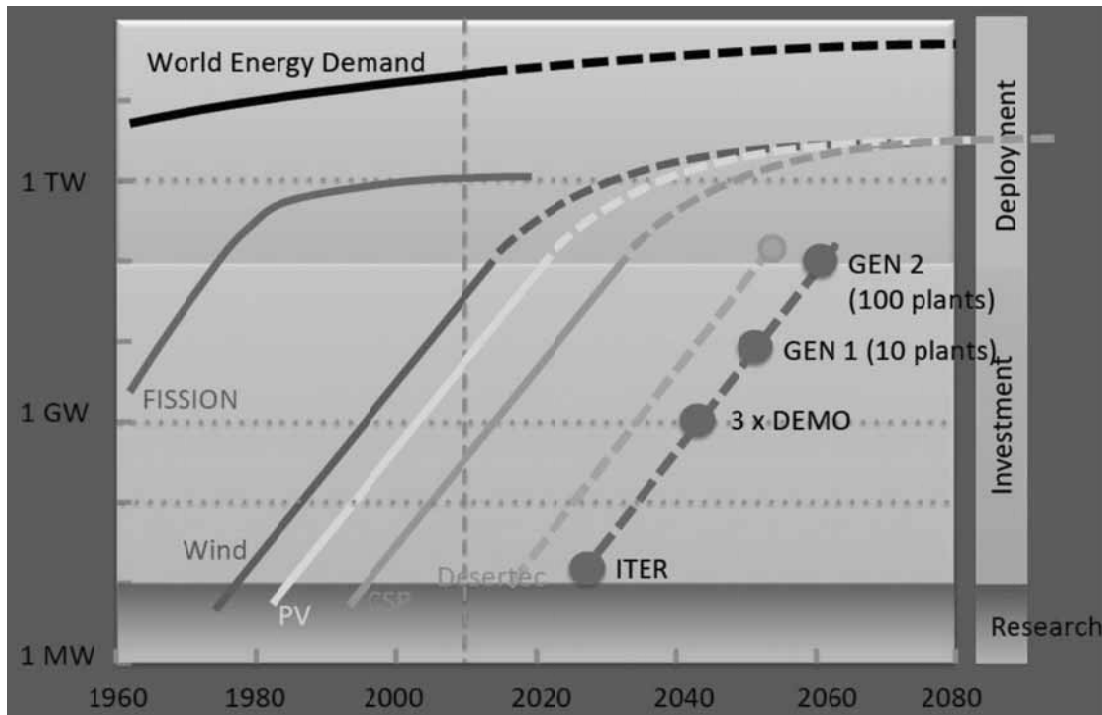
NFRI



National Fusion Research Institute

# 핵융합에너지 시장진입 시나리오

NERI



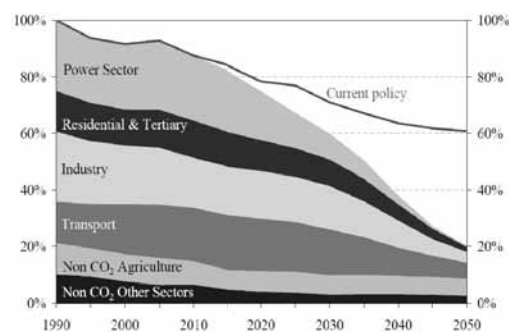
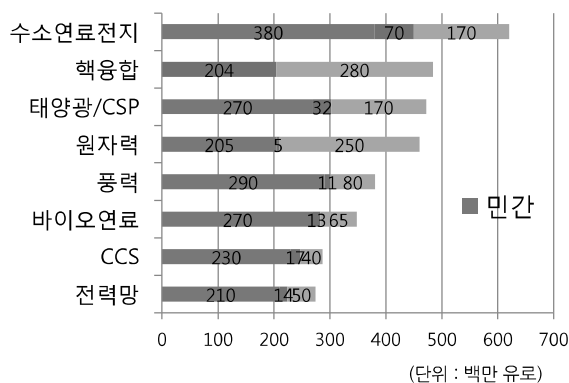
[네덜란드 Eindhoven 공대, Niek Lopes-Cardozo 교수]

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

NFRI

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



National Fusion Research Institute

## 민간 기업체 핵융합 투자 증대

NFRI

### 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

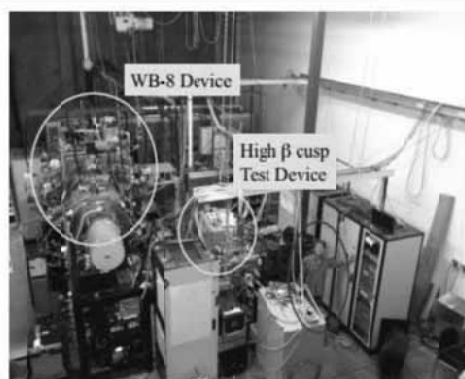
[energy](#) [fusion](#) [future](#) [nuclear](#)

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)



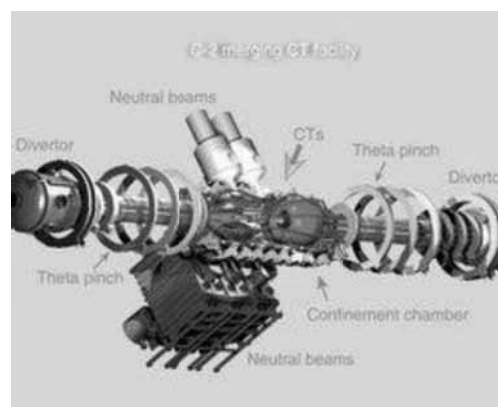
June 14, 2015

## 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](#)

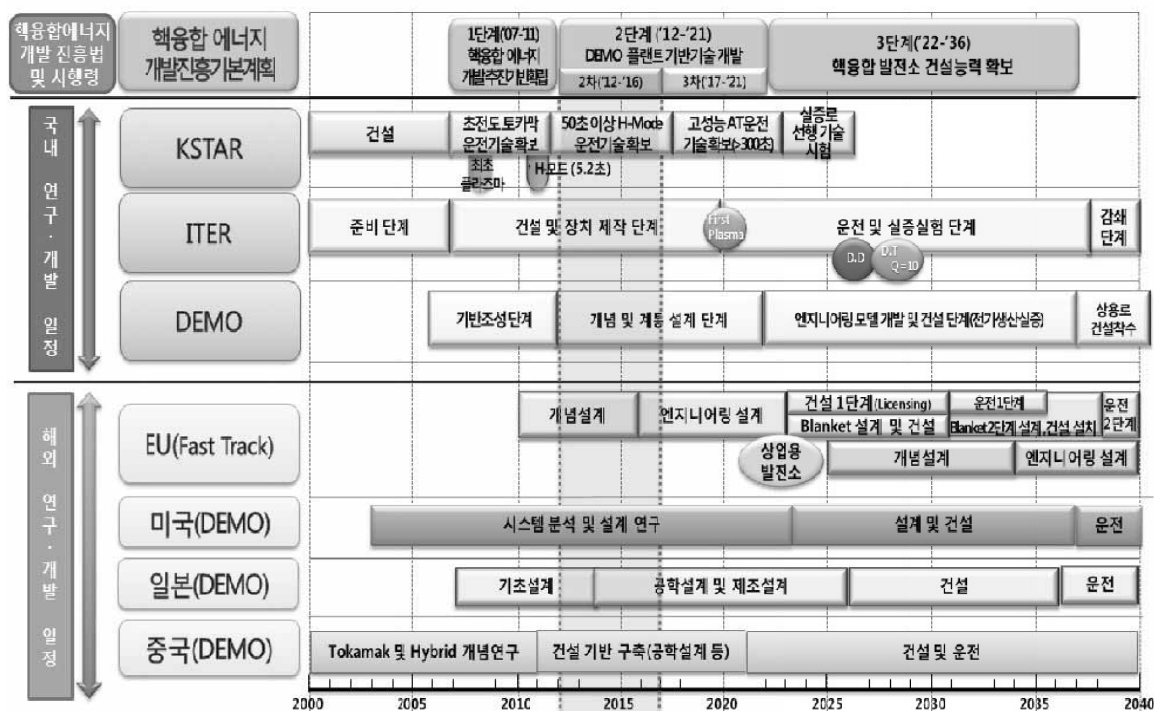
Tri Alpha team has revealed how fast ions, edge biasing, and other improvements have enabled them to produce FRCs (Field Reverse Configuration plasmas) lasting **5 milliseconds**, a more than 10-fold improvement in lifetime, and reduced heat loss. "They're employing all known techniques on a big, good-quality 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