

能源科技與永續經營

ENERGY TECHNOLOGY AND SUSTAINABLE

DEVELOPMENT

陳洋元 蕭先雄

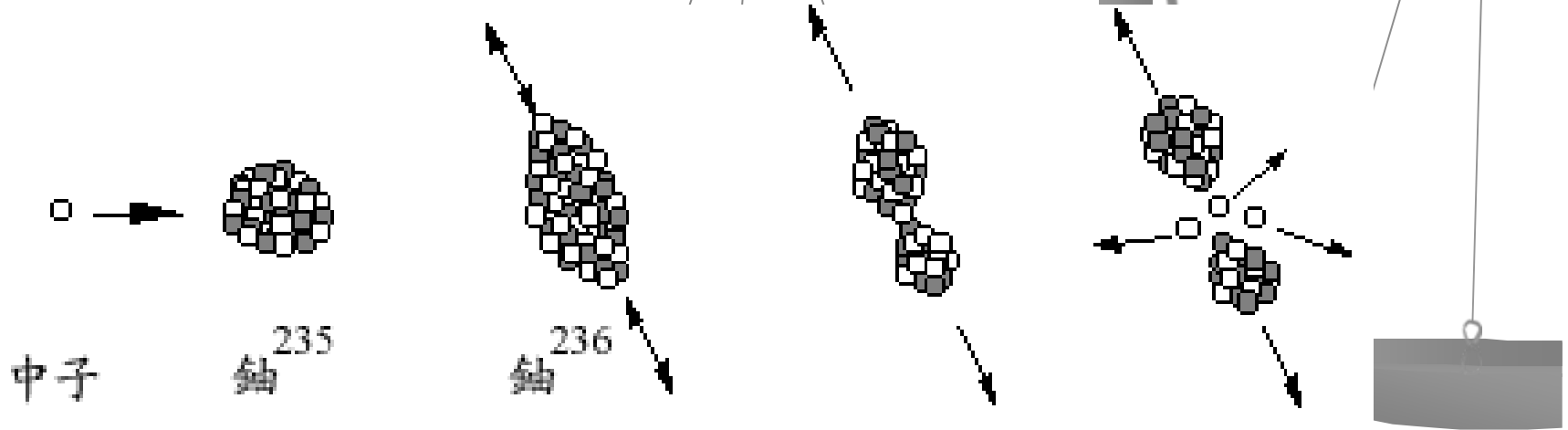
核能

核能主要來自

1. 核分裂 fission
2. 核融合 fusion

核分裂

- 謂核分裂是指鈾、鈾等元素，受到中子撞擊時分裂成為二個質量較輕約略相等的分裂產物，並釋放出大量的能量。



圖片來源：清蔚園科學館

核分裂：

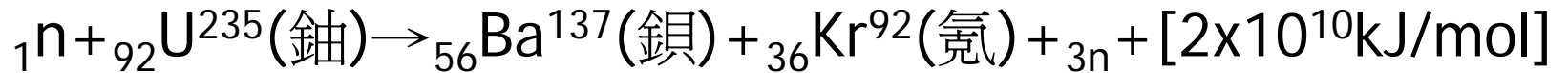
1.鈾-235原子核受到中子撞擊時，容易分裂，並且產生二個以上的中子，這些中子繼續撞擊其他的鈾-235原子核，造成連鎖反應。

2.鈾-235原子核進行核分裂連鎖反應時會產生熱能，將水加熱成高溫、高壓的水蒸汽推動汽輪機，再帶動發電機產生電能。

3天然鈾礦中含有99.3%的鈾-238和0.7%之鈾-235。鈾-238原子核不會分裂，反而會吸收中子，因而阻礙連鎖反應的進行。

核能發電廠使用的鈾燃料必須先經精煉濃縮，使鈾-235濃度達到約3.0%，才能使核分裂有效進行。

核分裂反應式



U的原子序92: 中子92, 質子143 質量數 235

Ba的原子序56: 中子56, 質子81 質量數 137

Kr的原子序36: 中子36, 質子58 質量數 94

$$E=MC^2$$

核融合技術目前仍無法商業化，故今日核子動力均源自核分裂，由核分裂產生之電力，目前約佔全世界總電力供應量之百分之十。核分裂之過程可分成數個階段，首先中子撞擊重原子核；中子被吸收而形成複核(compound nucleus)；此複核並不穩定，而繼續分裂成兩個或以上之原子核，同時並放射出數個中子；這些中子又被其他原子核所吸收，如若具有足夠之原子則可能發展形成鏈鎖反應(chain reaction)，此鏈鎖反應即構成核子反應器(nuclear reactor)運轉之基礎。

單一鈾原子之分裂，約產生**200Mev(106ev)**之能量，而一個碳原子之燃燒，僅產生**4 ev**能量。換句話說，1公噸鈾進行核分裂，其所釋放出之總能量約等於**250萬公噸煤**之燃燒熱。天然鈾(natural uranium)含有**99.3%**之 $_{92}\text{U}^{238}$ 和**0.7%**之較輕同位素 $_{92}\text{U}^{235}$ ，後者乃核子反應器中最常被利用之燃料。當反應器運轉一段時日後， $_{92}\text{U}^{235}$ 所佔之百分比會顯著地下降，同時燃料亦受到分裂產物之污染，因而鏈鎖反應無法繼續維持，此時即須更新燃料。但是舊燃料仍含有用之 $_{92}\text{U}^{235}$ 及大量之 $_{92}\text{U}^{238}$ 和少量之鈾元素，其均可再供其他型式反應器之使用。

核能發電與原子彈的比較：

核能發電	原子彈
鈾-235濃度約為3%	鈾-235濃度必須在90%以上
核分裂的連鎖反應在控制下緩慢進行	核分裂的連鎖反應無任何限制，任其快速進行
鈾-235的純度低，不致造成爆炸，而產生危險	於瞬間產生巨大的能量而爆炸

核能-2

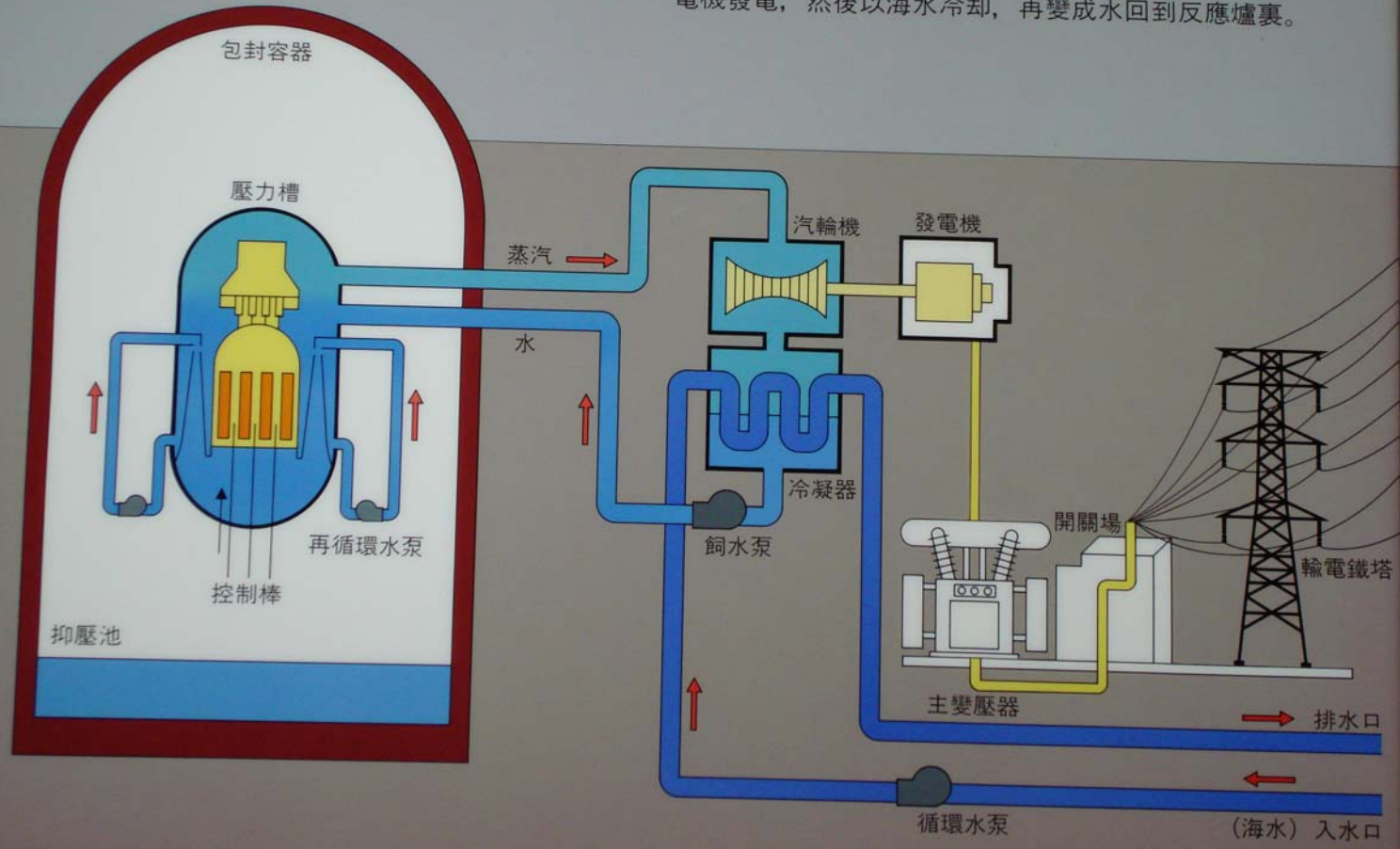
- 核能可以由很少量的燃料，生成龐大的能量，如1公克的鈾-235完全分裂後所產生的能量，大約和燃燒2000公斤的石油，或3噸重煤炭的能量，或是看23萬小時電視（100瓦特）的電能是相同的。
- 核融合要在很高的溫度下才會發生，又稱熱核反應。核融合沒有輻射、廢料、燃料來源的問題。

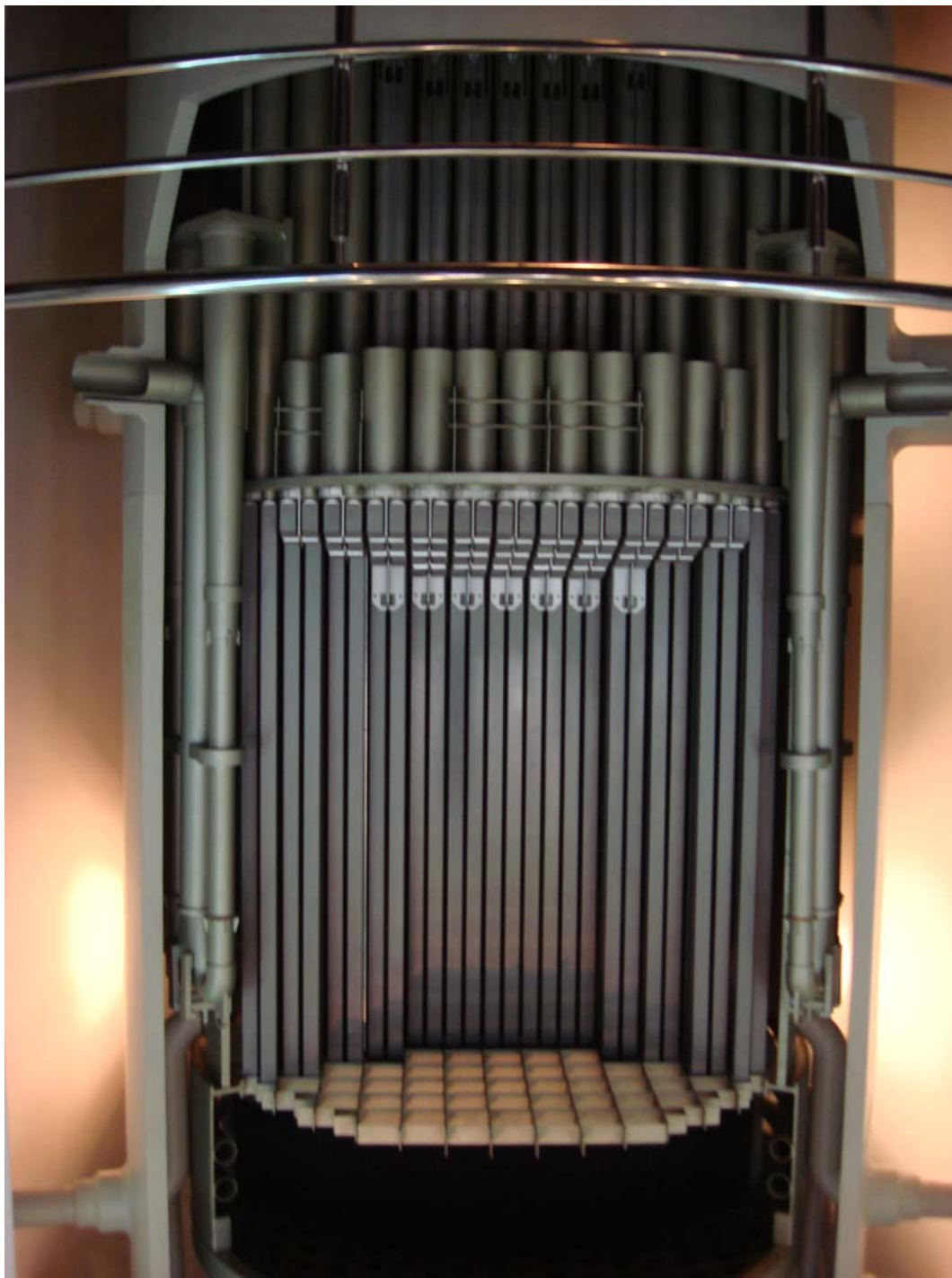


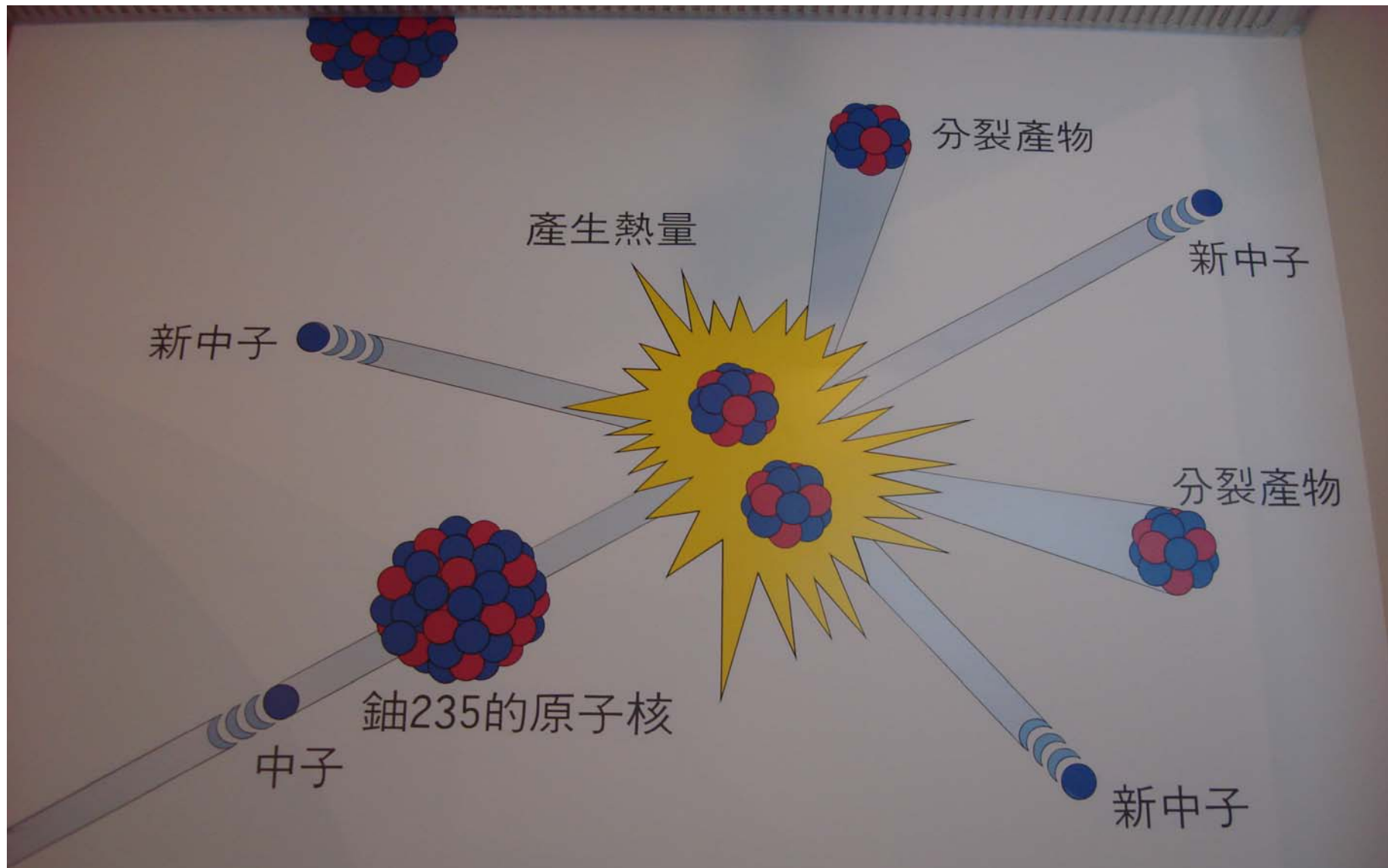
核能發電概述

NUCLEAR POWER GENERATION

核能發電與火力發電一樣是利用高溫高壓蒸汽的力量，來轉動汽輪發電機，產生電力。擔任火力發電鍋爐角色的就是核子反應器，又稱為反應爐。在反應爐裏，裝填在金屬管內燃料所產生的熱量，會把管外的水燒熱變成蒸汽。蒸汽通過管路輸送到汽輪機，轉動汽輪機帶動發電機發電，然後以海水冷卻，再變成水回到反應爐裏。







鈾的核分裂及連鎖反應



鈾礦石

比重18.8含有金屬鈾的礦石，在天然鈾的狀態下，只含有0.7%的鈾235。



油黃餅(UFO)

油類的粗煉產品呈現黃色或橘黃色,因得其名。



核燃料循環

反應爐內用過的燃料，含有剩餘的鈾和新生成的鈾，它可以經過再處理，當作新的核燃料使用，這一連串的過程稱為「核燃料循環」。對鈾燃料仰賴進口的我國來說，為促進穩定的能源供應及有效利用，核燃料循環是一個重要的課題。



核二廠三號低放射性廢棄物貯存庫



廢棄物處理

廢棄物處理

廢棄物處理





民國九十七年六月底
裝置容量 38,157 仟瓩

- 林口火力
- 林口新火力(奉准)
- 長生火力(民營)
- 大潭火力(施工中)
- 國光火力(民營)
- 石門水力(託營)
- 新桃火力(民營)
- 義興水力(託營)
- 軟橋水力
- 通霄火力
- 卓蘭(士林)水力
- 后里水力
- 天輪水力
- 台中火力
- 火力(民營 施工中)
- 馬鞍水力
- 彰工火力(民營)
- 彰工火力(奉准)
- 麥寮火力(民營)
- 澎湖火力
- 北山水力
- 濁水水力
- 嘉惠火力(民營)
- 芬園水力(施工中)
- 森霸火力(民營)
- 興達火力
- 烏山頭水力(民營)
- 曾文水力
- 南部火力
- 西口水力(施工中)
- 大林火力

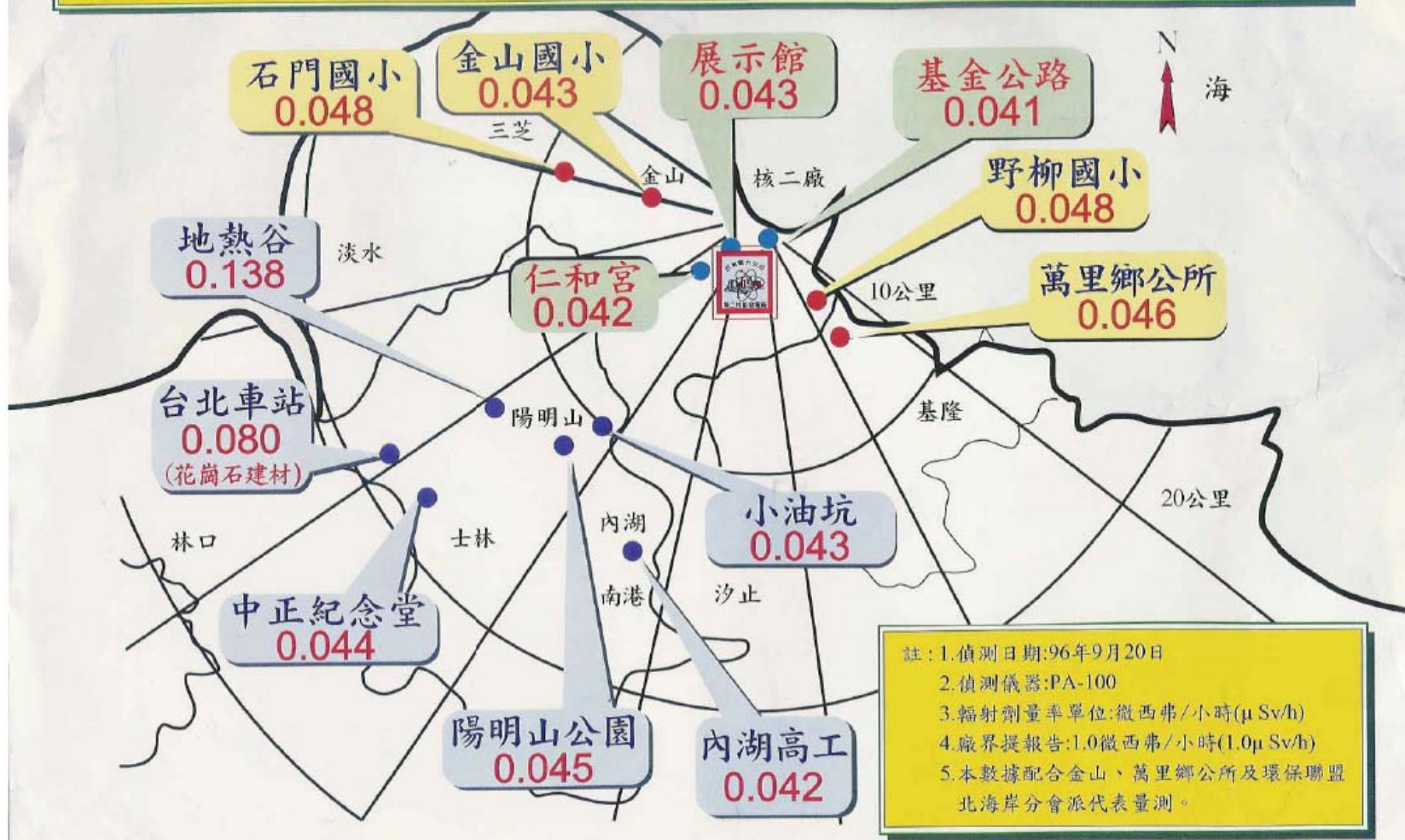


- 核能一廠
- 核能二廠
- 崑山火力
- 深澳火力
- 深澳新火力(奉准)
- 核能四廠(施工中)
- 翡翠水力(託營)
- 桂山水力
- 粗坑水力
- 烏來水力
- 蘭陽水力
- 天埤水力
- 碧海水力(施工中)
- 和平火力(民營)
- 德基水力
- 青山水力(復建中)
- 立霧水力
- 谷關水力復建(施工中)
- 初英水力
- 榕樹水力
- 銅門水力
- 水簾水力
- 清流水力
- 龍澗水力
- 清水水力
- 龍溪水力
- 西寶水力(施工中)
- 溪口水力
- 萬大擴充暨松林水力(施工中)
- 霧社水力
- 新武界隧道及
栗栖溪引水(施工中)
- 大觀抽蓄發電二廠
- 大觀水力發電一廠
- 鉅工水力
- 明潭抽蓄發電廠
- 水里水力
- 東興水力
- 高屏水力
- 竹門水力

核能發電廠		345千伏輸電線
		161千伏輸電線(節錄)



核二廠旁輻射劑量率與背景值無異

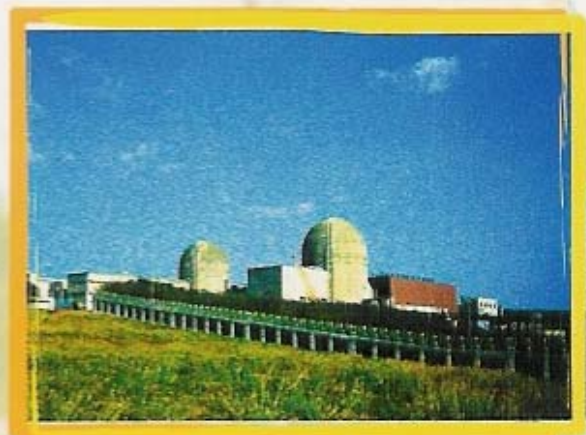


三、看不見、摸不到的輻射

輻射在自然界中無所不在，輻射的種類有：阿伐、貝他、加馬和中子。自然界中土壤、岩石、水…或多或少都含有輻射，我們稱它為背景輻射；另外電視、夜光錶、食物、X光診斷等，也會產生人為輻射。

核能電廠的原子爐中放了很多鈾燃料，因為鈾分裂產生熱能的時候，同時會釋放出輻射來，這些輻射「看不見」，也「摸不到」。當建造核能電廠時，就做了好幾層屏障，來阻止這些輻射跑到外面去。

這些屏障包括：第一層的陶磁材質的燃料丸，第二層用鉛合金做成的燃料護套，第三層用大約13~15公分厚的特殊鋼料做成原子爐壓力槽，第四層是鋼筋水泥圍阻體，厚度大約有1公尺以上，在圍阻體裡面並有不鏽鋼襯包住。當然，當電廠運轉以後，還有許多精密的儀器設備，來確保輻射會被限制在屏障內。



核三廠



四、核能電廠安全的預防措施

核能發電的構造非常複雜，內部有許多精密的設備，但是這些設備萬一發生故障，會不會產生危險呢？這一點科學家早就想到了，所以他們設計了很多安全保護的設備來預防。比如說，當電廠裡的某一個部份出問題時，原子爐會立刻自動停機，這就是大家常聽到的「跳機」。就像我們家裡電源總開關，發生故障時，總開關會自動跳開停止供電，核能電廠的道理也是這樣，所以非常安全。

既然核能電廠很安全，那麼為什麼1986年前蘇聯的車諾比爾和1979年美國的三哩島這兩個電廠會發生意外呢？根據調查，車諾比爾電廠的原子爐是由前蘇聯自己研究開發的（有軍事用途），在安全的設計上本

核二廠



來就有缺點，且又不按照運轉規定去運轉電廠；而三哩島電廠是在一連串錯誤的操作後所引起。我國核能電廠的原子爐（輕水式）因為設計上和前蘇聯的電廠（石墨式）不一樣，所以，只要按照運轉規定營運就不會有類似的事情發生。

、 世界各國核能電廠的現況

目前，世界上很多工業先進的國家，正積極發展核能發電，因為核能和煤、石油、天然氣等都是重要的能源，而且安全性和經濟性經過比較後仍有其優越性。

據統計，世界上共有31個國家442座核能機組運轉中，座正興建中。美國是世界上擁有核能發電機組最多的國家目前擁有103座機組；而法國是世界上核能發電比例最高國家，高達78.5%。日本90%以上的能源倚賴進口，因此積極的發展核能發電，至今日本的核能發電機組數已有55，高居亞洲之冠。

依2006年國際原子能總署（IAEA）統計資料，俄羅斯、國、南韓、加拿大、德國等國家，核能發電機組數目也相高。台灣目前有6部機組運轉中，另核四廠2部機組興建中。

2006年國際原子能總署(IAEA)統計表

國家	核能機組數目 (2006/11/25)	核能發電百分比 (%) (2005)
 美國	103	19.3
 法國	59	78.5
 日本	55	29.3
 俄羅斯	31	15.0
 英國	23	19.9
 南韓	20	44.7
 加拿大	18	14.6
 德國	17	31.1

十、核能電廠不是原子彈

一提到核能電廠，有人會把它和原子彈聯想在一起，其實它們之間有很大的不同。

核能電廠是使用鈾燃料，利用中子的撞擊而分裂放出能量，它們的鈾-235濃度只有3%，而原子彈卻需要90%以上的鈾-235濃度。

原子彈在發生爆炸以前，必須將這些純度極高的可分裂物質集中在一起，在很短的時間內，迅速引爆發生「鏈鎖反應」，而核能電廠的燃料是固定地分佈在反應器裡，並且用很多的控制棒來控制它的反應。

原子彈必須有引爆裝置；而核能電廠內並沒有引爆裝置，另外，還有一項不同點，就是原子彈把能量聚集在一起，目的是用在軍事上以爆炸來傷害敵人，核能電廠卻是利用核分裂產生的能量將水變為水蒸汽，推動汽輪機帶動發電機來發電，目的是作和平用途，造福人類。

所以，核能電廠根本不是原子彈，大家不必過度恐慌。



台灣電力公司

Nuclear Fusion (核融合) **s Clean Energy Source for Mankind**

陳秋榮 (C. Z. (Frank) Cheng)

國立功成大學 電漿與太空科學中心
(Plasma and Space Science Center
& Department of Physics)

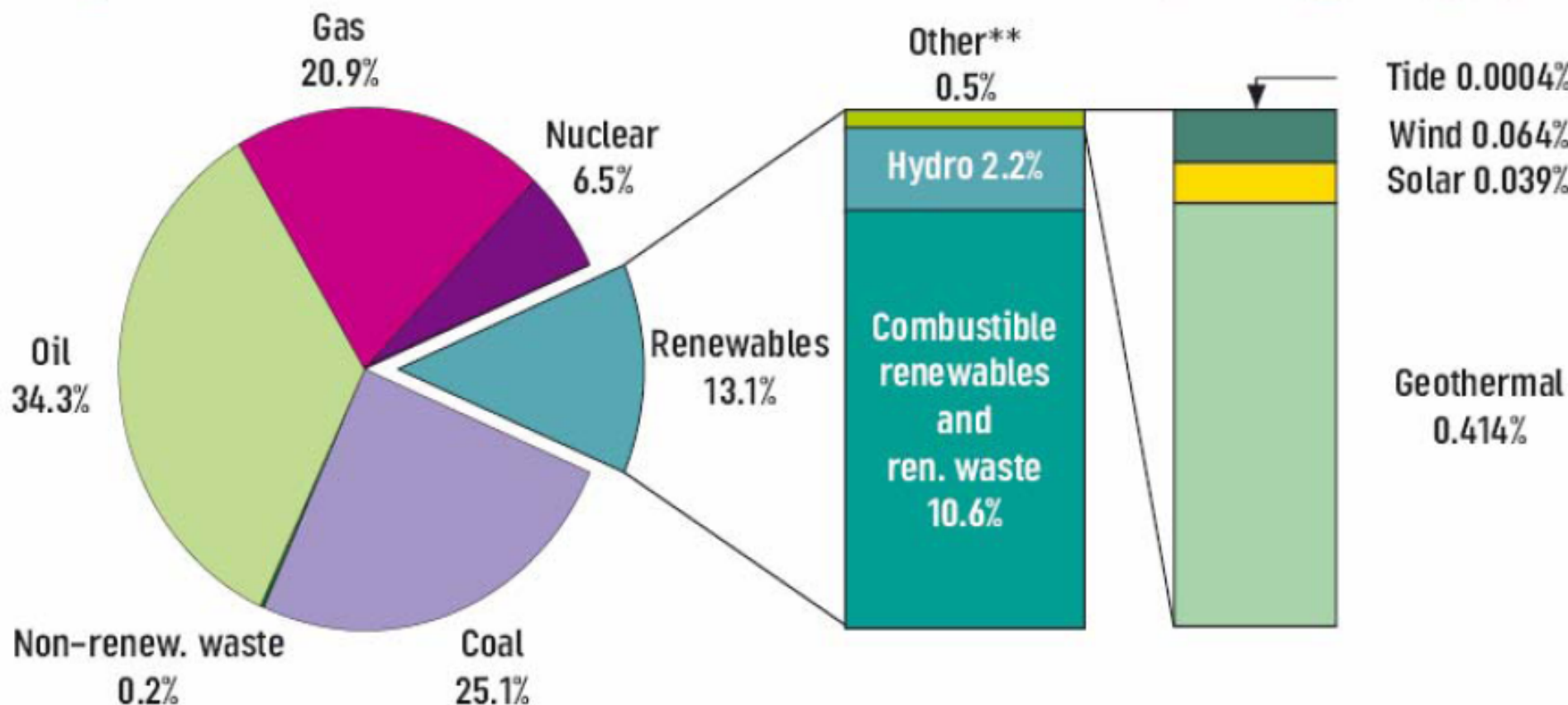
Presented at 中央研究院物理研究所

Taiwan Energy Supply & Demand

- Taiwan total oil and natural gas reserve is estimated at ~500 million Barrels of Oil Equivalent (BOE)
- Taiwan consumes ~600 million BOE energy in 2000. 98% of Taiwan energy supply is imported – almost completely relying on world energy supply.
- Taiwan electricity supply: ~75% by fossil energy resources (coal 43%, natural gas 19%, oil 6%, cogeneration 7%); ~21% by nuclear fission power
- Nuclear fusion is a climate and environment friendly option for replacing fossil fuels!

Sources: International Energy Agency Energy Statistics

Figure 1 • 2004 Fuel Shares of World Total Primary Energy Supply*



• Taiwan aims to achieve ~30% energy supply from renewables by 2050.

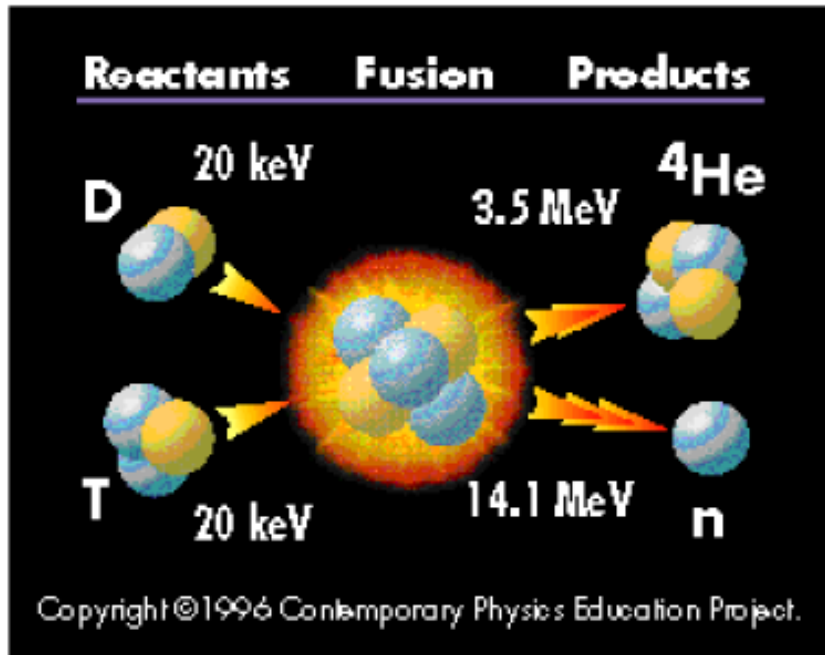
• > 70% energy must be supplied by fossil fuel and nuclear energy (fission & fusion). However, fossil fuel will run out first.

Nuclear Fusion

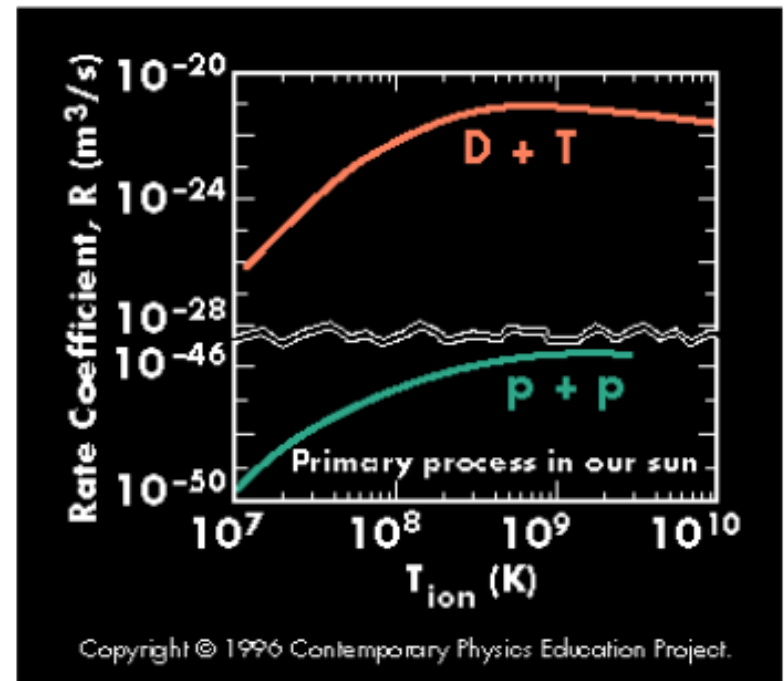
$$\begin{aligned} \text{H}_{\text{氫}} &= 1\text{P} \\ \text{D}_{\text{氘}} &= 1\text{P} + 1\text{N} \\ \text{T}_{\text{氚}} &= 1\text{P} + 2\text{N} \end{aligned}$$

Fastest fusion reaction is:

$$\text{He}_{\text{氦}} = 2\text{P} + 2\text{N}$$



For first generation fusion reactors



$$E = mc^2 \text{ (Mass lost fraction } \approx 0.38\%)$$

Energy gain ≈ 450

20% goes to sustain fusion

99% goes to sustain fusion

Needs a plasma at

$$T_{\text{ion}} \approx 10 \text{ keV} (10^8 \text{ K})$$





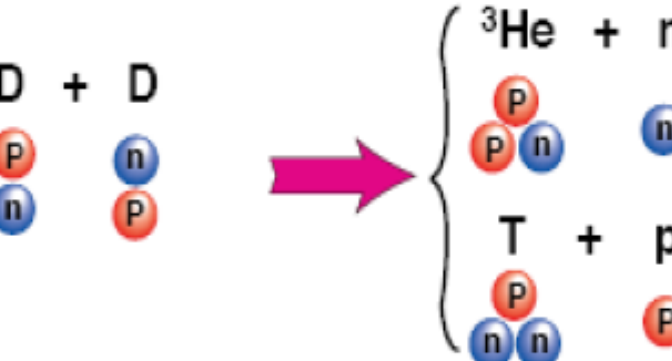


H氫(Hydrogen)= 1P

D氘 (Deuterium)=1P+1N

T氚(Tritium)=1P+2N

He氦=2P+2N

Different Fusion Reactions

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$	220	20	 17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$	350	30	 18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$	400	35	 ~4,000
	$T + p$	400	35	 ~4,000

${}^3\text{He}$ supply is very limited, but can be mined from the Moon.

ADVANTAGES OF FUSION

- **Abundant Supply of Fuel (deuterium and tritium)**
- **No Risk of Nuclear Accident**
 - No reactor meltdown possible
 - Large uncontrolled release of energy impossible
- **Minimal or No High Level Nuclear Waste**

Careful material selection should minimize waste caused by neutron activation
- **No Air Pollution of Greenhouse Gases**

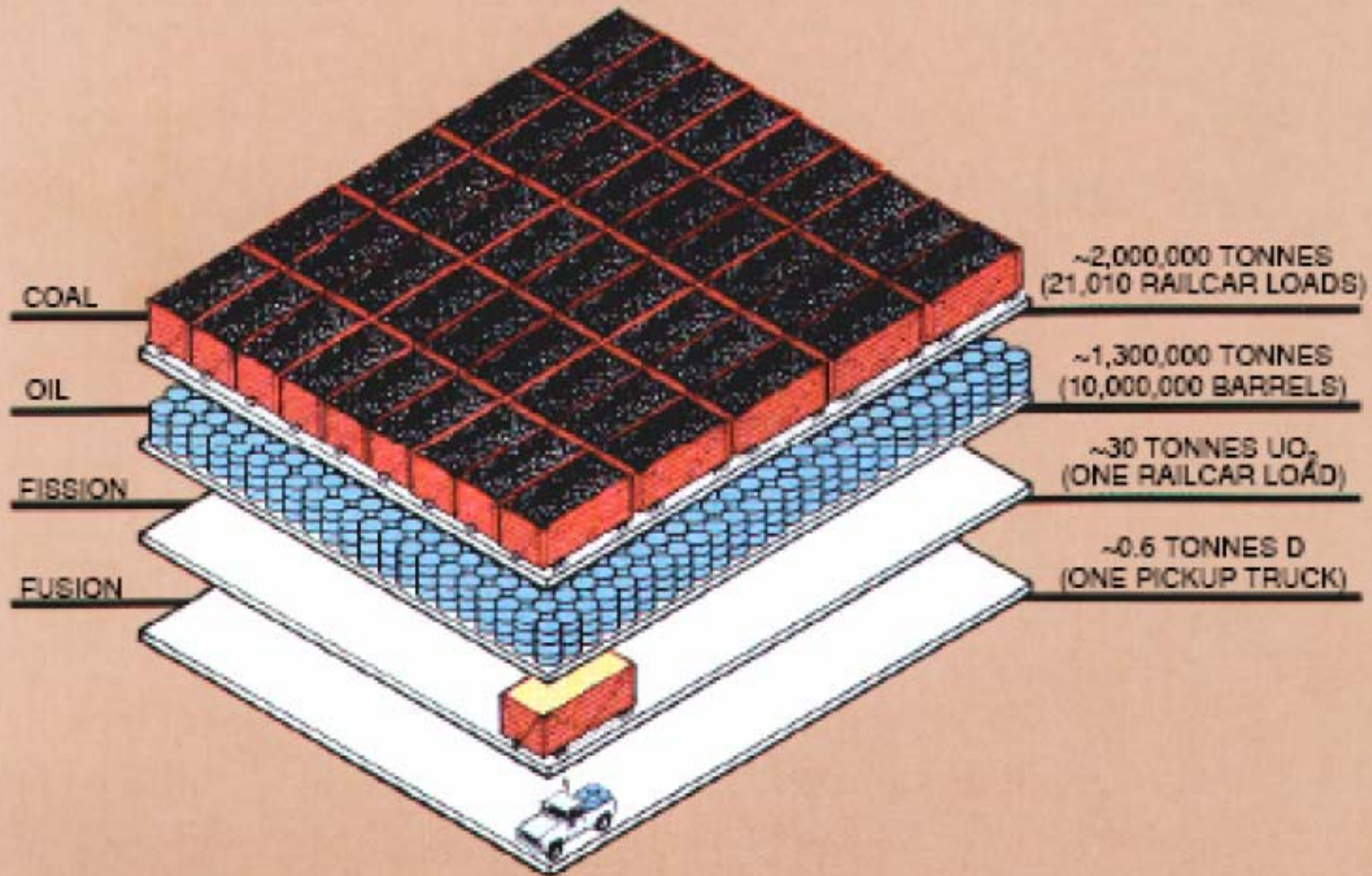
Reaction product is Helium and neutron

Abundant Supply of Fusion Fuel

- Deuterium isotope $\approx 1/7000$ of hydrogen atoms in water and can be extracted at a negligible cost ($\approx \$1/\text{gr}$)
- Deuterium in 1 gallon of water has the same energy as 300 gallons of gasoline, if burned in a fusion D-T reactor
- Tritium is not present in Nature (13 year half-life), but slightly more than 1 tritium atom can be created for each DT neutron in a lithium “breeding blanket”



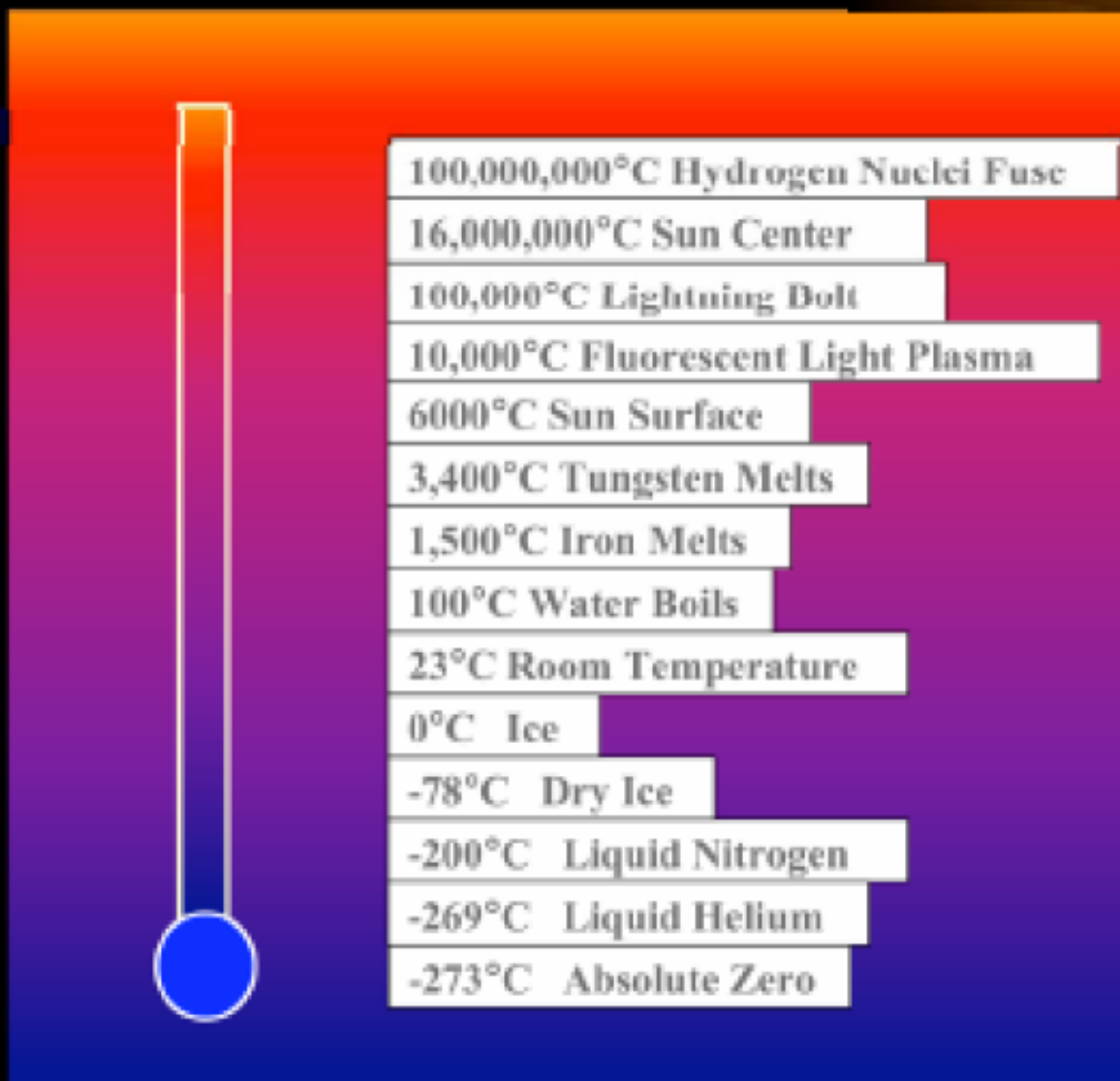
FUEL NEEDED FOR ONE YEAR OF POWER PLANT OPERATIONS (1000 MWe)



Fusion energy release from 1 gm of DT fuel equals the energy from 2400 gallons of oil.

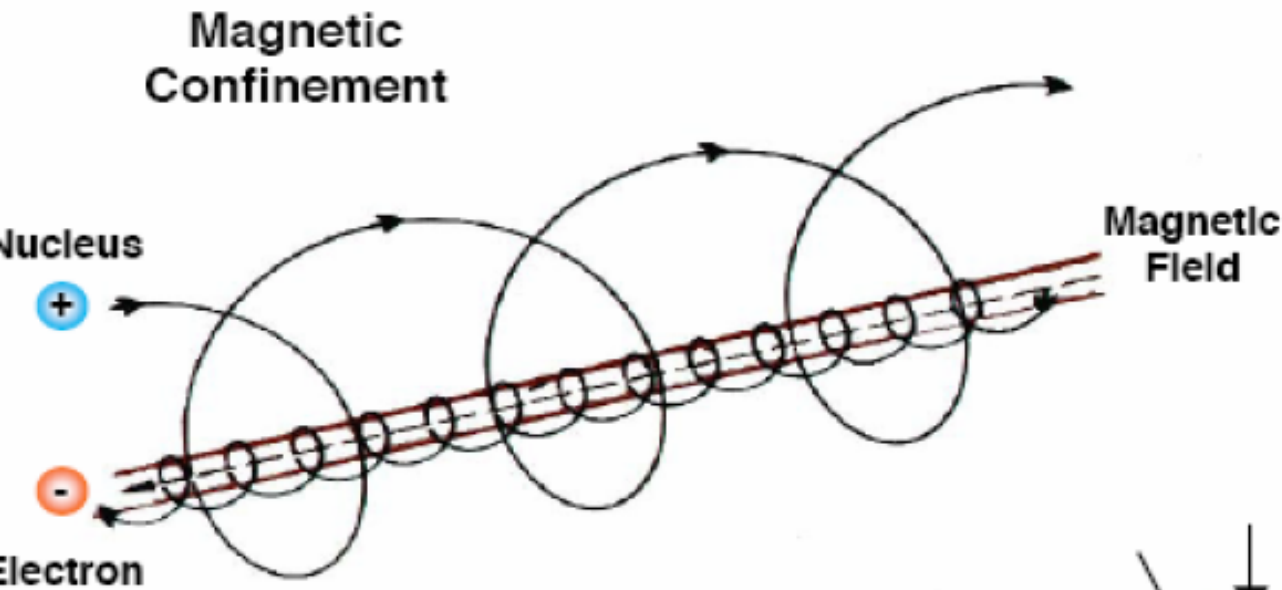
To overcome repulsive electrical force of like charged particles,

Very High Temperature is Required

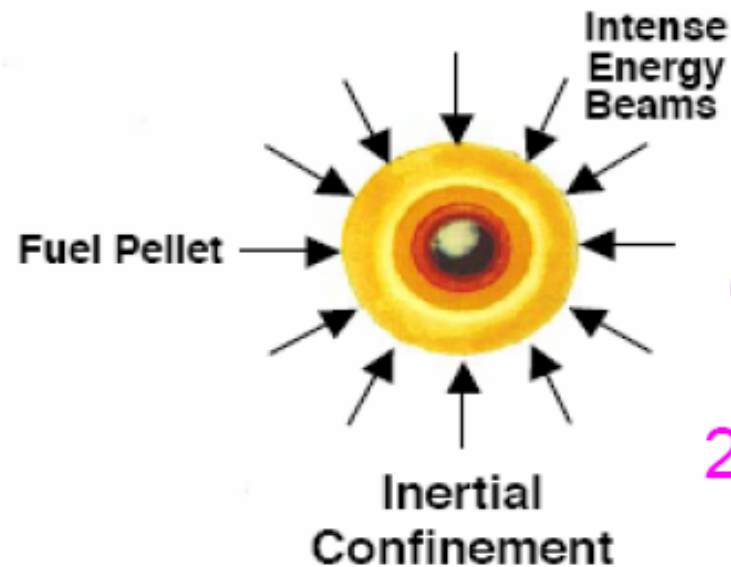


Three Basic Ways to Achieve Fusion

ion gyroradius ≈ 1 cm
 $T_i = 20$ keV, $B = 20$ kG



Gravitational Confinement



difficult to heat
D-T fuel to
20 keV in a very
small
space and short
time

Main Difficulties in Fusion Research

The fusion power created must be larger than the power required to keep the D-T fuel at high temperature

→ near-term scientific goal of a “burning plasma”

The mechanical structure of the device must be capable of withstanding damage due to plasma bombardment and radiation damage due to 14 MeV neutrons

→ long-term engineering goal of improved materials

Requirements for Fusion Burning

“Burning” means self-heating by D-T alpha particles

alpha heating rate = plasma energy loss rate

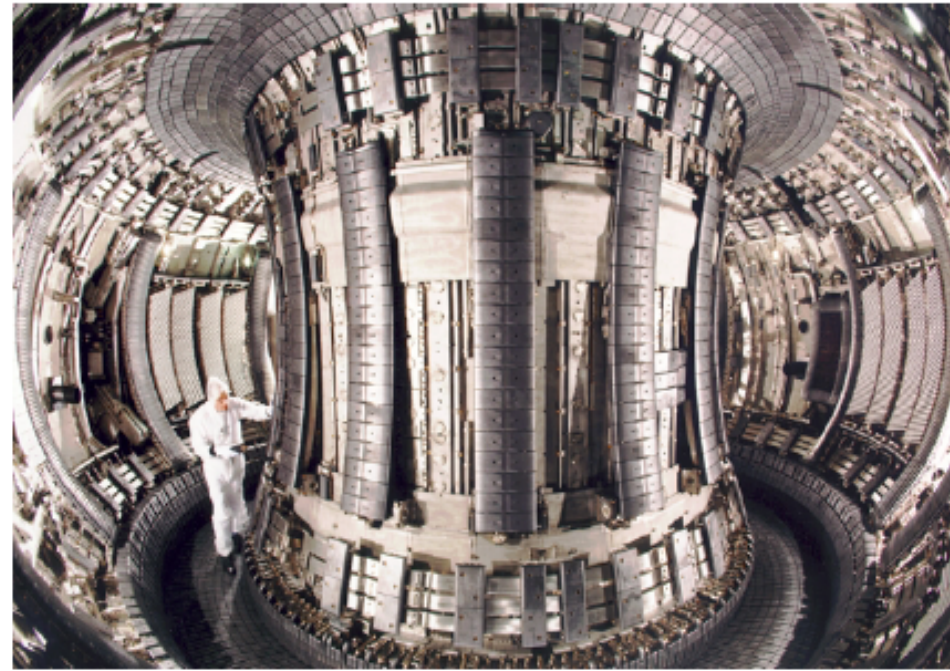
$$\text{constant} \cdot n^2 T^2 \approx 3 n T / \tau_E$$

[where τ_E is the plasma energy confinement time]

$$n \cdot T \cdot \tau_E \approx (10^{14} \text{ cm}^{-3}) \cdot (20 \text{ keV}) \cdot (5 \text{ sec}) \text{ -- MFE}$$

$$\text{or } n \cdot T \cdot \tau_E \approx (10^{24} \text{ cm}^{-3}) \cdot (20 \text{ keV}) \cdot (0.5 \text{ nsec}) \text{ -- IFE}$$

What Have We Done in Magnetic Confinement Research in Past 50 Years ?



Model A Stellarator of 1953
(with Lyman Spitzer)

$$n \approx 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$T \approx 10 \text{ eV}$$

$$\tau_E \approx 10 \text{ } \mu\text{sec}$$

JET Tokamak in 2003:

$$n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

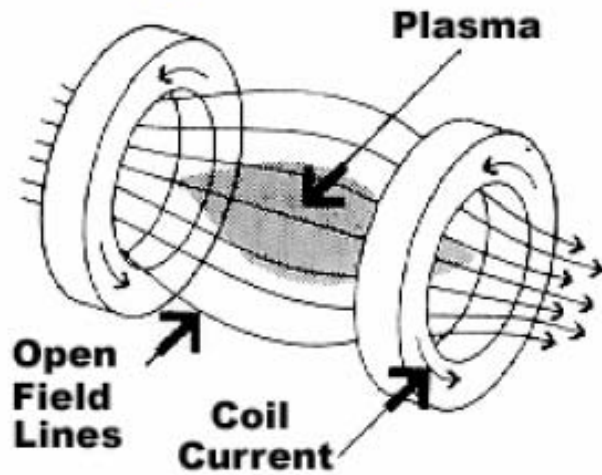
$$T \approx 20 \text{ keV}$$

$$\tau_E \approx 1 \text{ sec}$$

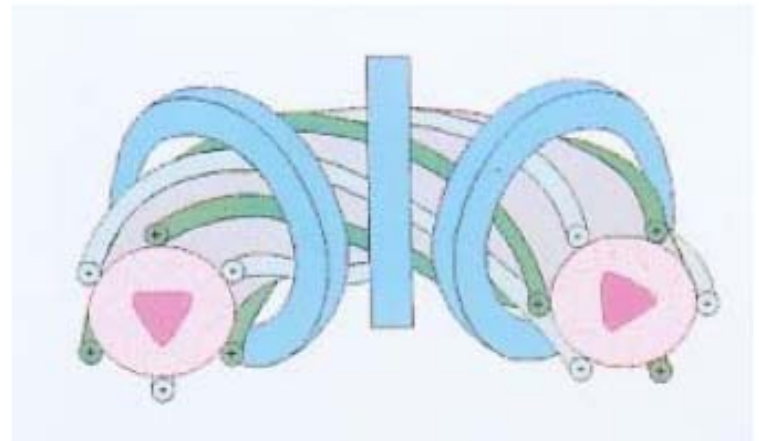
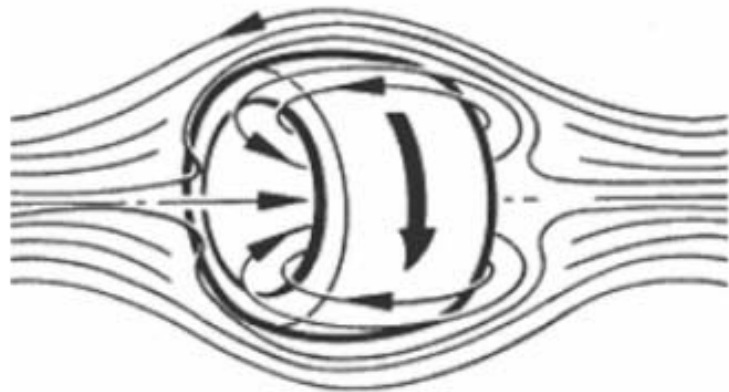
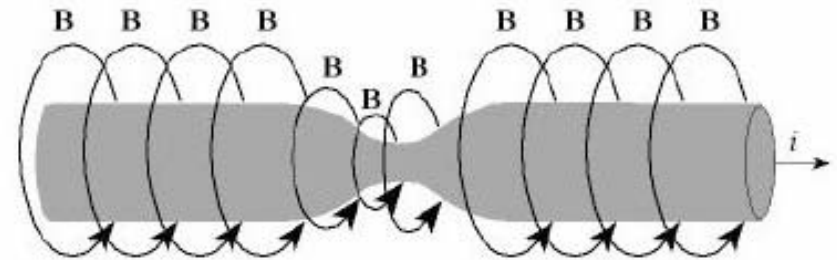
$nT\tau_E$ still needs a factor
 ≈ 5 from burning conditions

Early Ideas for Magnetic Fusion Research

magnetic mirror



linear pinch

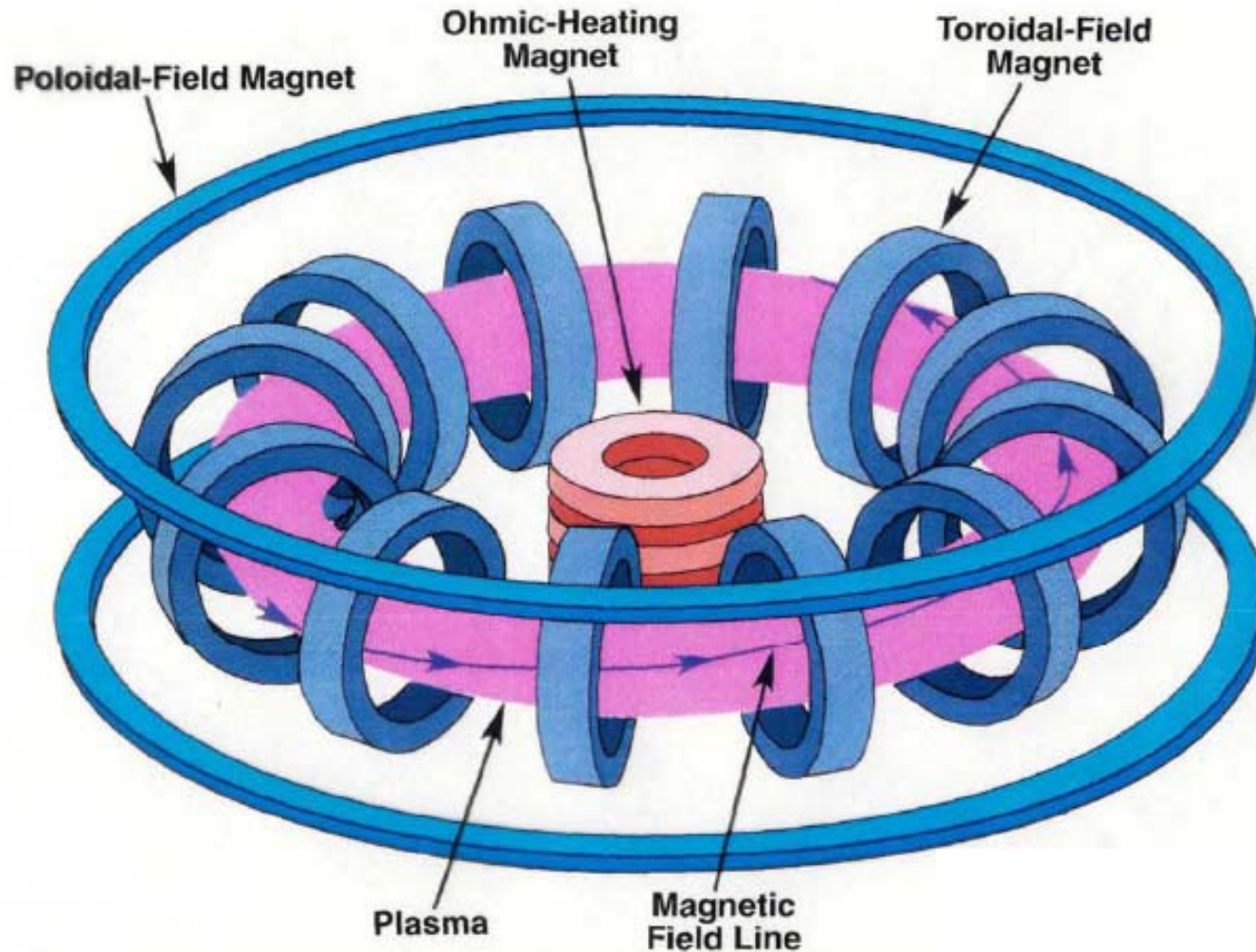


field reversed configuration

stellarator

The Winner so Far: the Tokamak

Tokamak = toroidal magnetic chamber (Russian acronym)



Present World Magnetic Fusion Devices

JET (EU)



W-7X (Germany)



LHD (Japan)



NST (Japan)

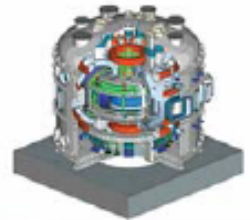
JT-60 (Japan)



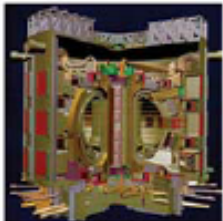
NSTX (US)



KSTAR (Korea)



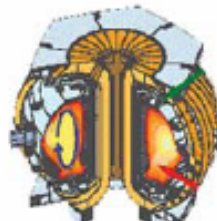
ITER



Tore-supra (France)



SST-1 (India)



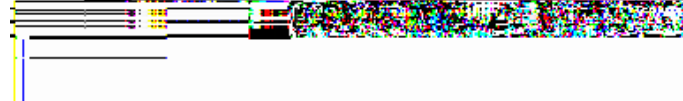
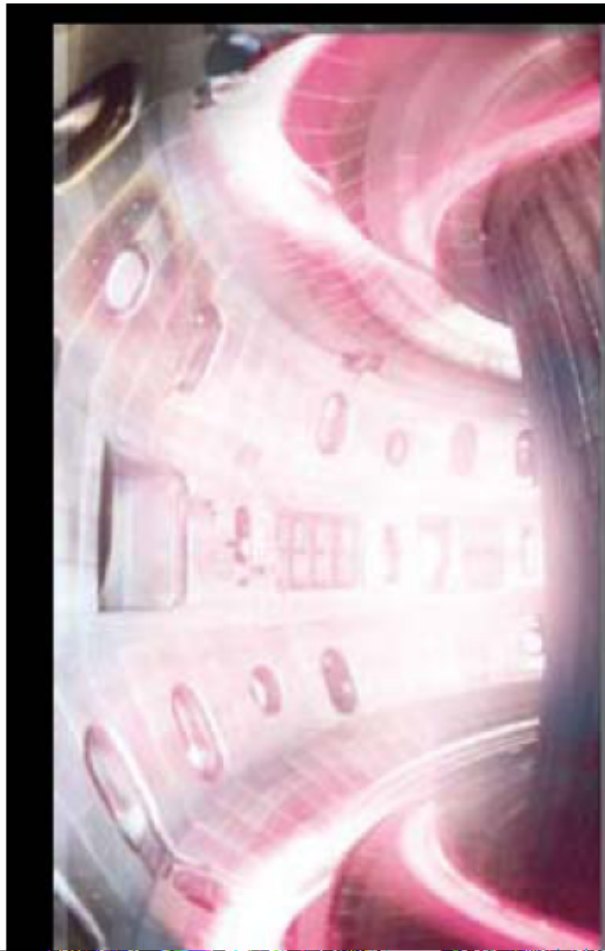
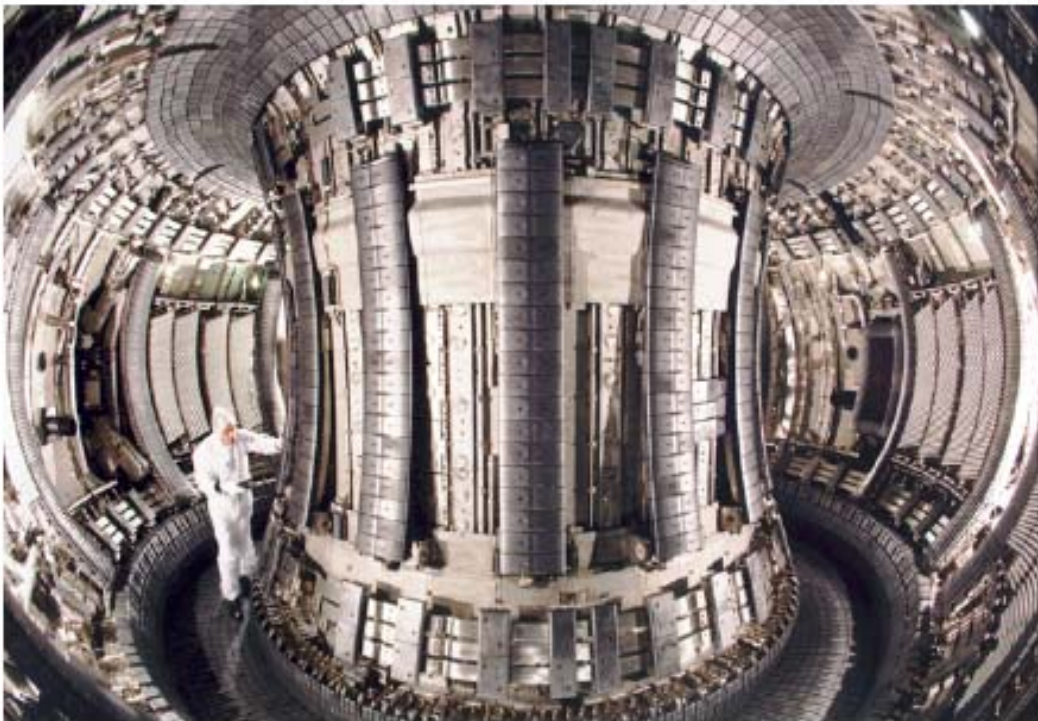
EAST (China)



DIII-D (US)



DIII-D with Plasma



World Fusion Energy R&D History and S

Fusion reactor

Comercialized fusion energy via
"FAST TRACK" in advanced countries

* Fast Track : 35 years plan for
commercial fusion reactor based on
unified version of the DEMO PROTO

Engineering demonstration of fusion reactor (ITER)

- Experimental reactor for output power of 0.5GW, energy multiplier of $Q > 10$, and sustaining time > 400 sec.
- * US priority investment on science infrastructure is ITER for next 20 years

design

constructio

operation

Scientific demonstration of fusion plasmas

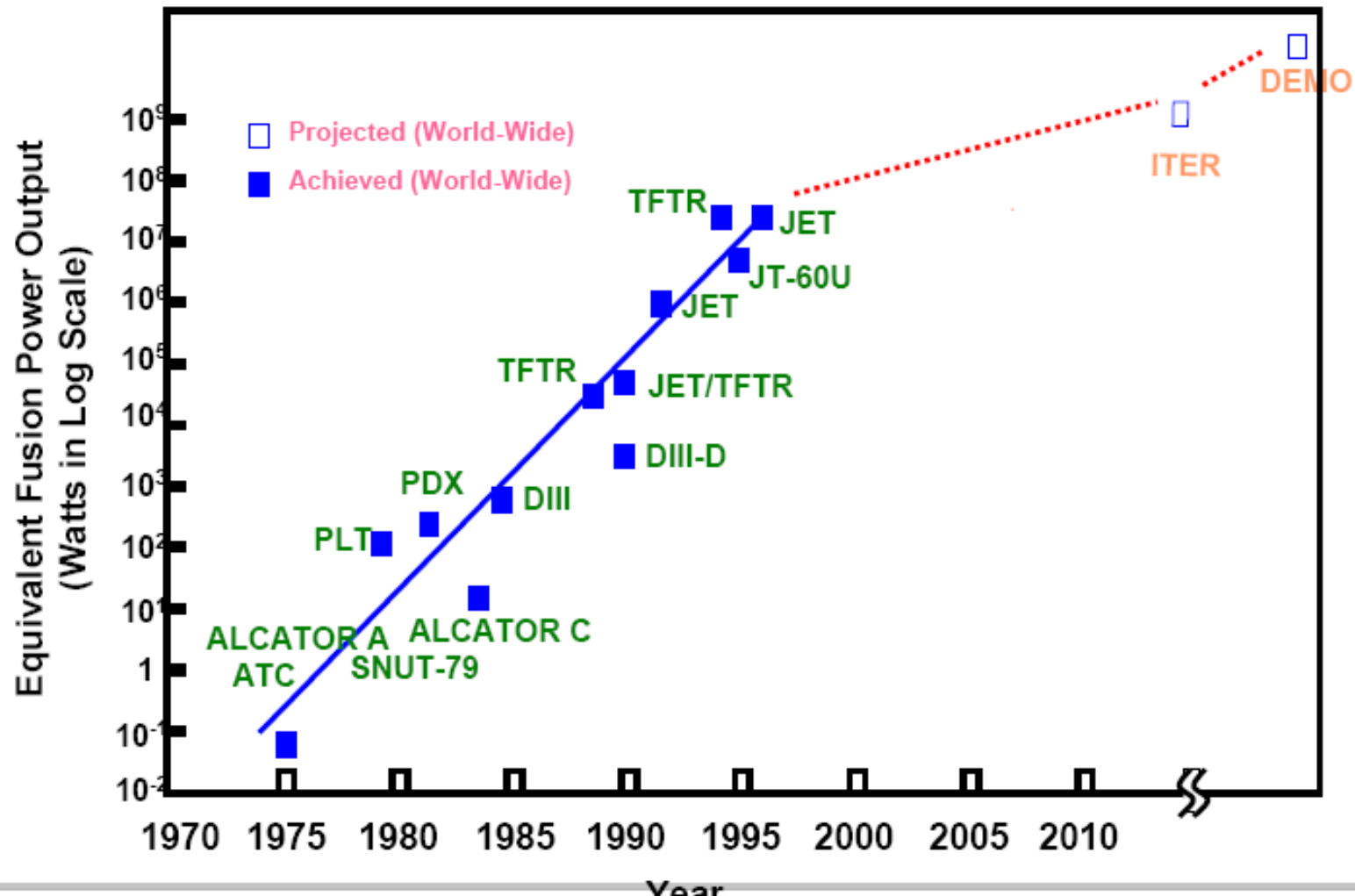
- Plasma conditions close to break-even

Japan, EU, and US devices

Basic science

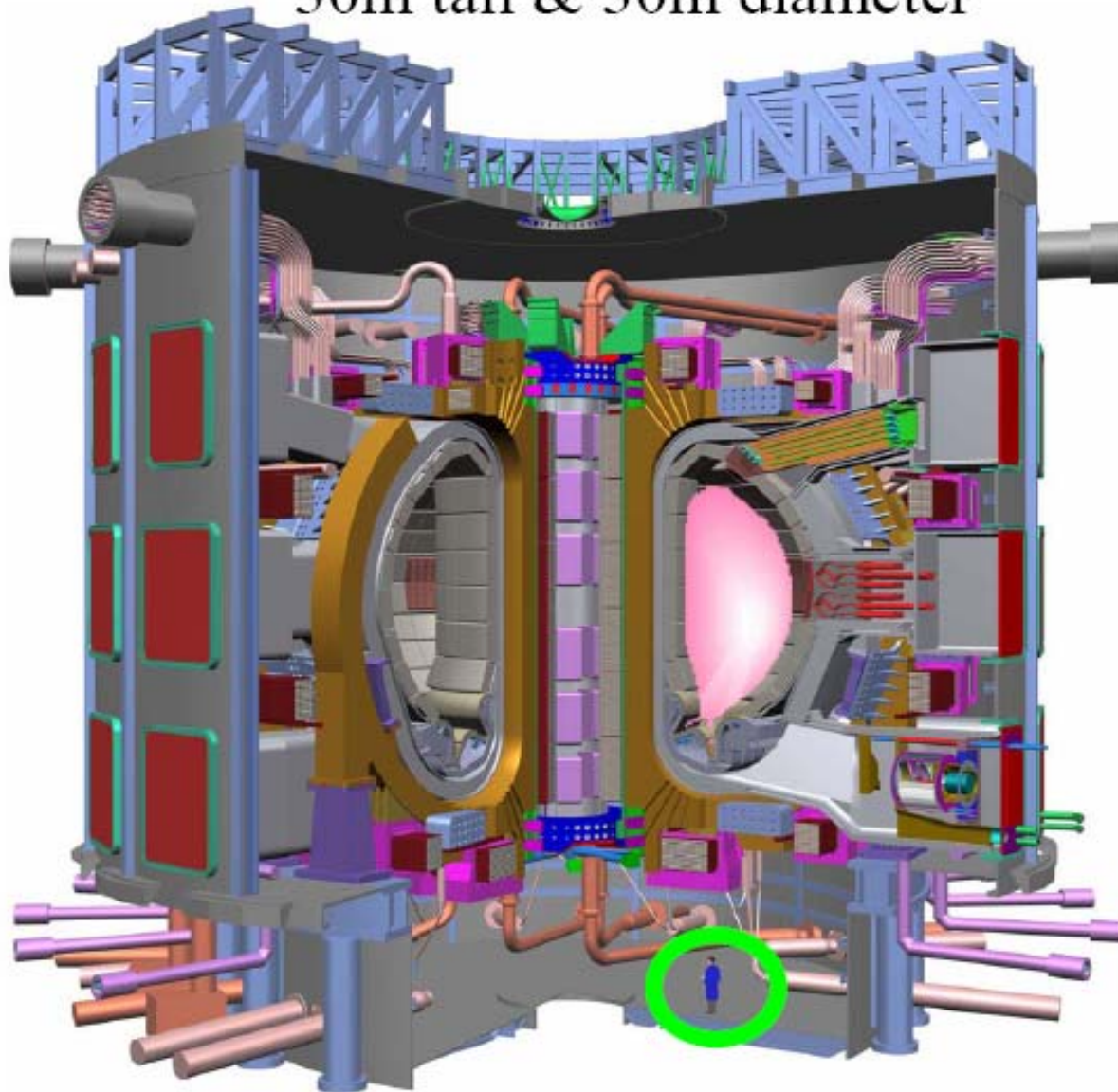
- Study of magnetically

World Fusion Program Progress



ITER – A Burning Plasma Fusion Reactor (~2015)

30m tall & 30m diameter



Design Goals:

- $Q \approx 10$
(burning plasma)
- 0.5 GW fusion power
- 500 sec long pulse
- no electricity output

10B Euro ITER agreement was signed by 7 parties in 2005.

Trillion 4th Nuclear Power Plant cost \$20B for 0.7 GW

Major Fusion Technology Challenges

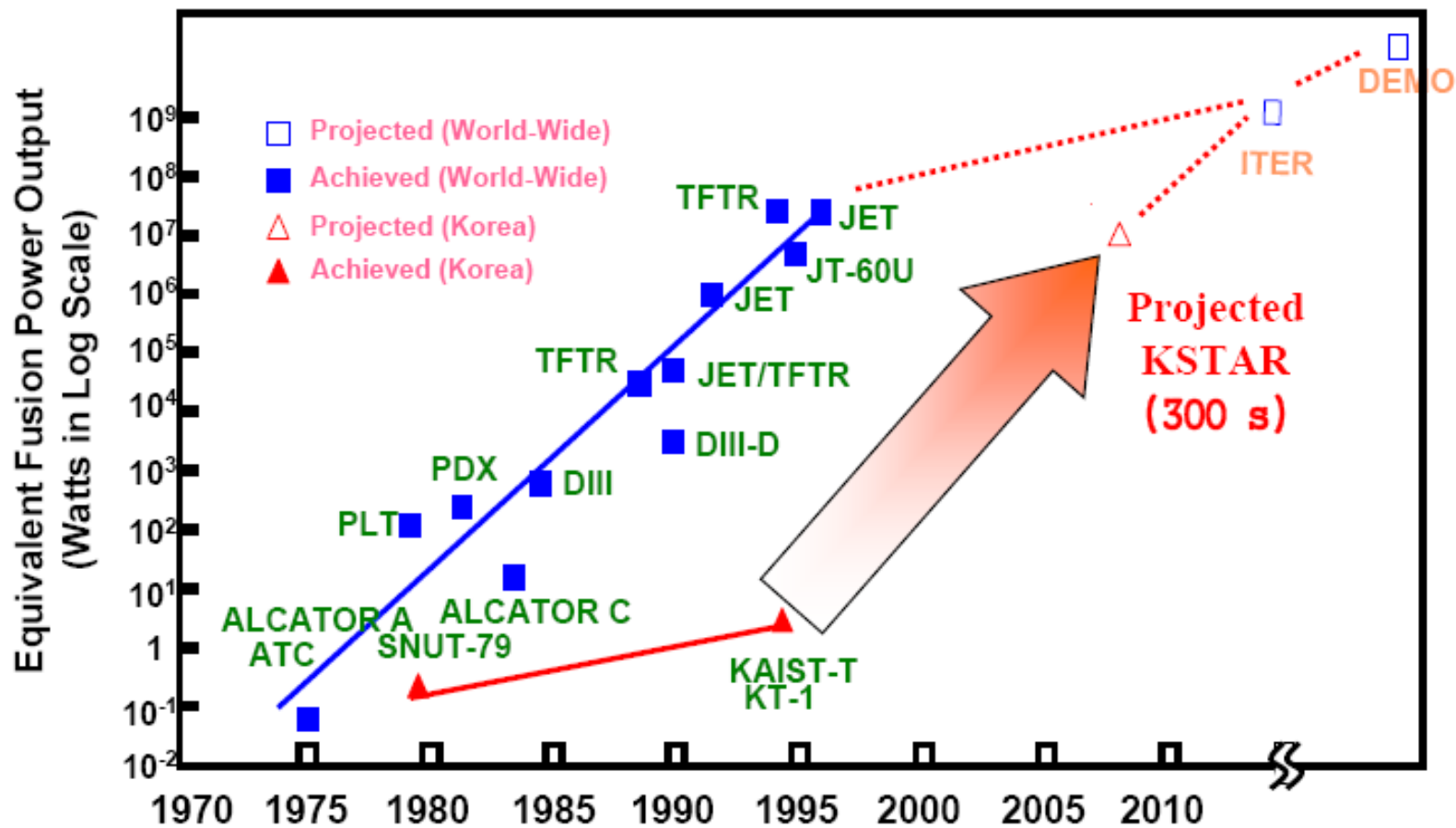
- **Materials development**
 - Survive high heat flux (10 MW/m²)
 - Retain strength despite neutron activation
 - Minimize production of activated wastes
- **Develop safe and efficient Tritium handling techniques**
 - Develop breeding technologies for Tritium from Lithium blankets
 - Minimize Tritium inventory for improved safety
- **Reduce size, cost, and complexity to make competitive with other energy sources**

Fusion Research Spending

- ITER
 - Agreement signed in June 2005 with construction cost ~\$13B over 10 yrs, to be built in France
 - Participants: EU(40%) , Japan(10%), US(10%), Korea (10%), Russia(10%), China(10%), India(10%) representing ~ 3/4 of world population
- 2006 US annual magnetic fusion budget ~ \$300M
 - One space shuttle launch costs ~\$500M
 - Japan & EU each spends more than US
 - Developing nations increase fusion funding greatly since 2000
- Korea's fusion investment
 - K-STAR tokamak built mainly by Korean industries. Total investment ~ \$ 1B during 1995-2005 including industry investment
- Taiwan's fusion & plasma science investment: none or negligible now! Now is the time for

Korea Jump-Starts Fusion Program in 1995

- Approval of the KSTAR project in 1995
- Mid-entry strategy



托克馬克(tokamak)的磁約束裝置工作原理

- 1 甜甜圈的環行管外加上電流線圈(toroidal field coil)，以產生水平面 (toroidal)方向的磁場；
- 2.帶電粒子沿著水平面磁場方向做迴旋運動，產生水平面電漿電流，水平面電漿電流進而造成垂直面(poloidal)上之感應磁場；
- 3.所以總磁場為此兩種磁場的疊加，其磁力線以螺旋方式環繞裝置內部。電漿粒子會沿磁力線快速地做螺旋式環繞運動，所以電漿就這樣被約束在這種環形的容器中。
- 4.托克馬克中，有幾個主要的參數決定了核融合反應的效率，其中一個是 β 值， $\beta = 2P / B^2$ (P 為電漿壓力， $B^2 / 2$ 為磁場壓力， B 為磁場強度)
- 5.目前托克馬克實驗裝置能得到的 β 大多在3%以下，而一個具有經濟效益的反應器其 β 值需要5 %以上。

Modern version of Lawson's criterion''

- $n^2 T^2 > 5 \times 10^{21} \times nT/tE$,
- $nT \tau_E > 5 \times 10^{21} \text{ (m}^{-3}\text{-keV-s)}$
- 1.單位體積的電漿能量為 $3 nT$
- 2.能量耗散率正比於 nT/ τ_E
- 3. α 粒子的產生速率正比於 $n^2 T^2$ (n 為粒子密度， T 為正離子溫度)
- 4.能量束縛時間為 τ_E
- 5. 目前 $nT \tau_E = 10^{21} \text{ (m}^{-3}\text{-keV-s)}$, $\tau_E = 1$ 秒

- **ITER**的技術目標 ($Q = \text{產生的功率} / \text{輸入的功率} = 10$)。核融合反應保持至少**500**秒的運轉。
- 因此**ITER**本身並不發電，其主要目的是演示利用核融合
- 輸入功率（**5**千萬瓦）
- 產生**5**億瓦的功率