

# 國立臺北大學通識教育中心

(國立交通大學、國立陽明大學、國立台北科技大學)

## 「能源概論」通識課程

(Week 12)

### 進度：核能發電與核能安全

李育明

國立臺北大學公共事務學院  
自然資源與環境管理研究所教授

May 08, 2009

## 授課大綱

- 前言
- 核能發電介紹
- 核能電廠概況
  - 台灣核能電廠概況
  - 第四核能電廠興建計畫
  - 中國核能發電規劃
- 輻射安全
  - 輻射種類
  - 核能電廠與輻射安全
  - 放射性廢棄物營運介紹
- 非核家園 vs. 低碳家園
- 結語

2

## 前言

- $E = mc^2$ ：愛因斯坦—質量與能量為一體的兩面，兩者之間是可以互換的
- 核能技術已普遍應用於醫學、農業及工業
- 核廢料：
  - 使用過燃料棒 (高階核廢料)
  - 操作人員之防護器具... (低階核廢料)
- 高階核廢料：國際管制
- 低階核廢料處理世界上已有多年經驗
  - 技術問題？政治問題？民眾接受與否？
  - 妥善的溝通是目前台灣迫切需要的

3

## 核能發電介紹

- 汽力機發電：設法產生高壓蒸氣推動渦輪機，帶動發電機切割磁場，將機械能轉變為電能
- 核能發電：目前以核分裂之能量產生蒸氣
  - 1g的質量轉化成能量，其所轉換產生的電力可讓100瓦的燈泡約點上三萬年之久(約2.5 GWh)。
  - 火力機組則以鍋爐燃燒煤、油產生蒸氣
- 核燃料：輕水式核能電廠採用鈾-235 (約佔3~4%) 濃縮的陶瓷二氧化鈾為燃料
- 核分裂反應：
  - 中子撞擊鈾原子引發核分裂時，產生兩個質量較小的原子核，放出2到3個新的中子，並釋出分裂能量
  - 新的中子若繼續撞擊鈾原子引發核分裂，稱為連鎖反應
  - 核子反應爐：中子吸收裝置=>不致產生連鎖反應

4

# 核能發電：能源密度高



3000噸的煤



1公克的鈾235

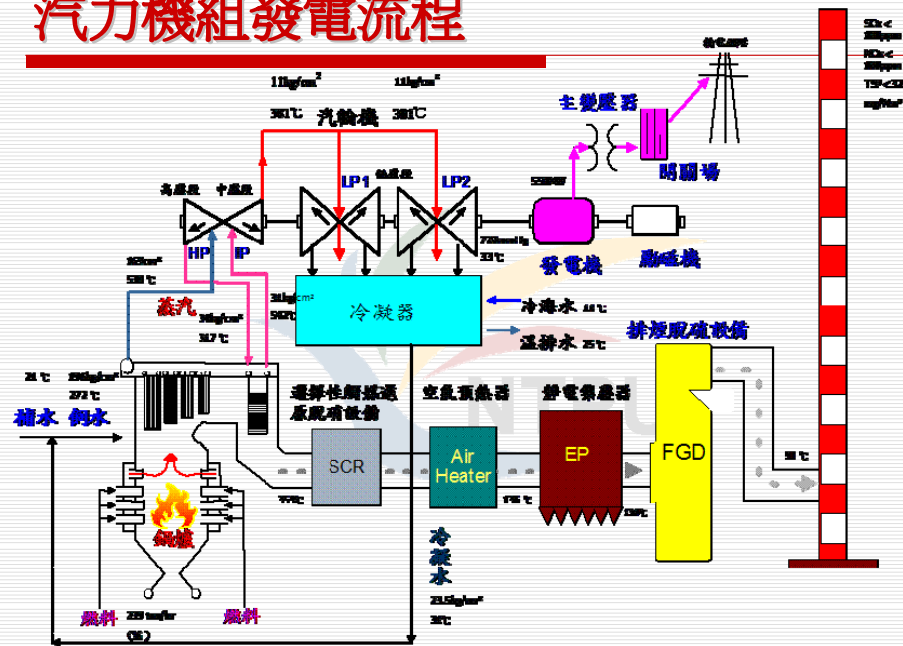


2,100噸的油

- 單位重量核燃料可產生的能量甚大
- 核燃料運輸較不易受到「封鎖」
- 「能源多元化」
- 二氧化碳排放

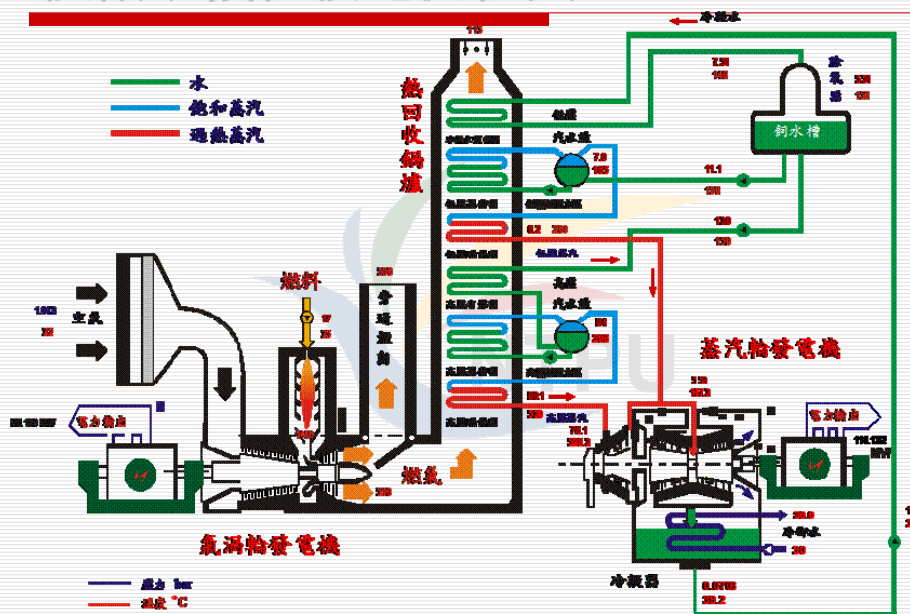
資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結果報告

# 汽力機組發電流程



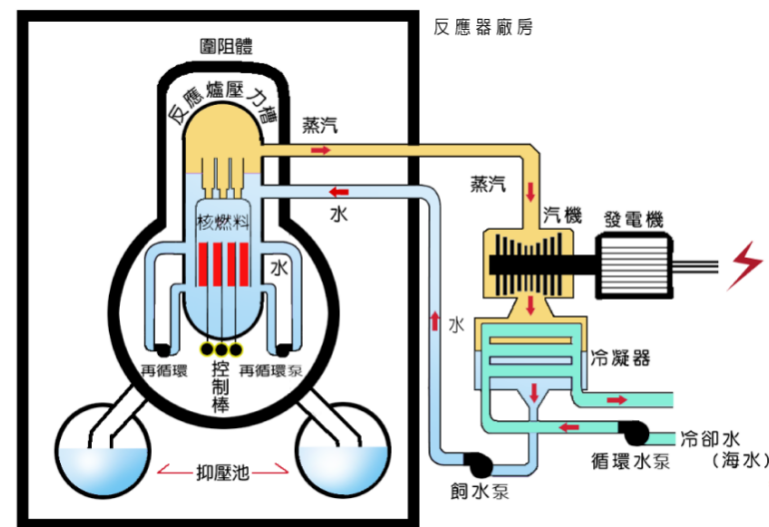
資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結果報告

# 複循環機組發電流程圖



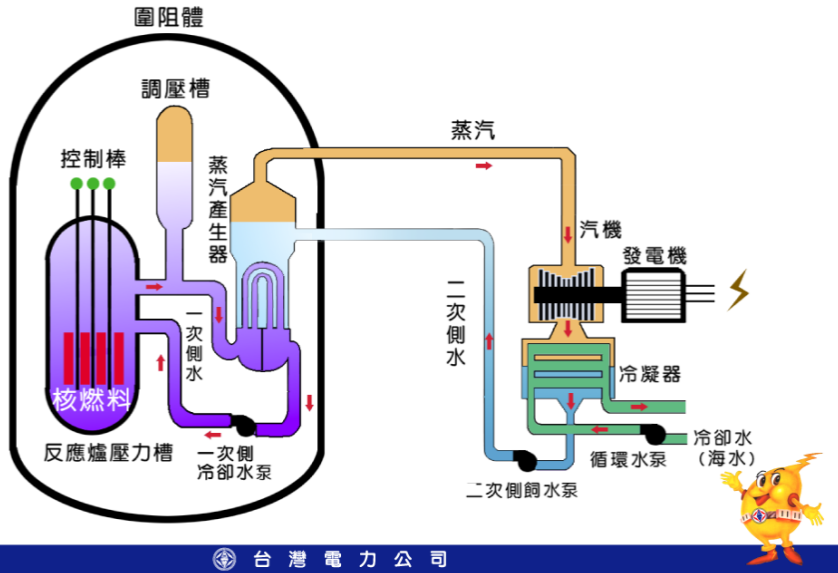
資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結果報告

# 核子反應爐：沸水式



資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結果報告

# 核子反應爐：壓水式



5-5

台灣電力公司

資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結案報告

9

# 核能發電特性

- 能源多元化、發電成本較低
  - 目前核分裂的電廠使用之鈾235約可再用100年
  - 快滋生反應器將商業化，天然含量最多的鈾238也可利用
- 避免二氧化碳排放：核能電廠幾無CO<sub>2</sub>排放
- 提高能源安全度：
  - 核燃料載運一次約可維持核能電廠2年運轉
  - 化石燃料運輸極易受颱風及戰爭阻斷
    - 天然氣，安全存量約3天
    - 油槽，安全存量30天
    - 煤場，安全存量60天

10

# 圍阻體：反應爐的保護裝置

- 多重屏障：燃料丸、燃料護套、反應爐壓力槽、鋼筋水泥圍阻體、反應器廠房



- 深度防禦：

- 天然災害防護：廠址選擇考量地震、颱風、海嘯、斷層
- 考慮「安全餘裕」：任何偏差，仍能確保電廠的安全

資料來源：「95年度大專院校能源教育通識課程推動計畫」結案報告

11

# 台灣地區核能電廠

廠別	核能一廠 	核能二廠 	核能三廠 
位置	台北縣石門鄉	台北縣萬里鄉	屏東縣恆春鎮
商業運轉日期	#1: 67年12月 #2: 68年07月	#1: 70年12月 #2: 72年03月	#1: 73年7月 #2: 74年5月
裝置容量	636千瓩 x2	985千瓩 x2	951千瓩 x2
反應器型式	輕水反應器 (沸水式)	輕水反應器 (沸水式)	輕水反應器 (壓水式)

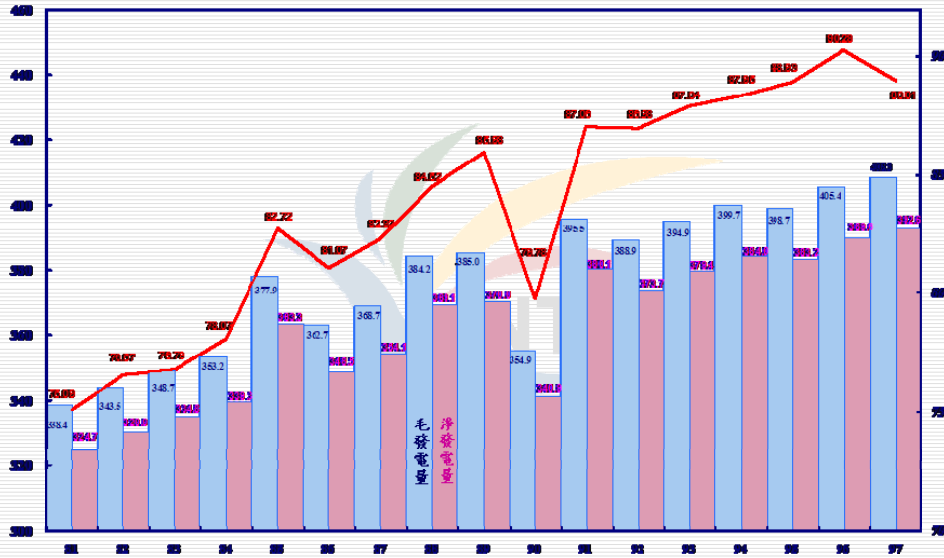
- 第四核能發電廠

- 進步型沸水式反應爐；發電機組：135萬瓩 x 2
- 行政院95年8月21日核定，第1、2號機商轉日期為98年7月15日、99年7月15日；完工日期101年7月15日
- 報載：延後二年商轉 (2011年底、2012年底)

12

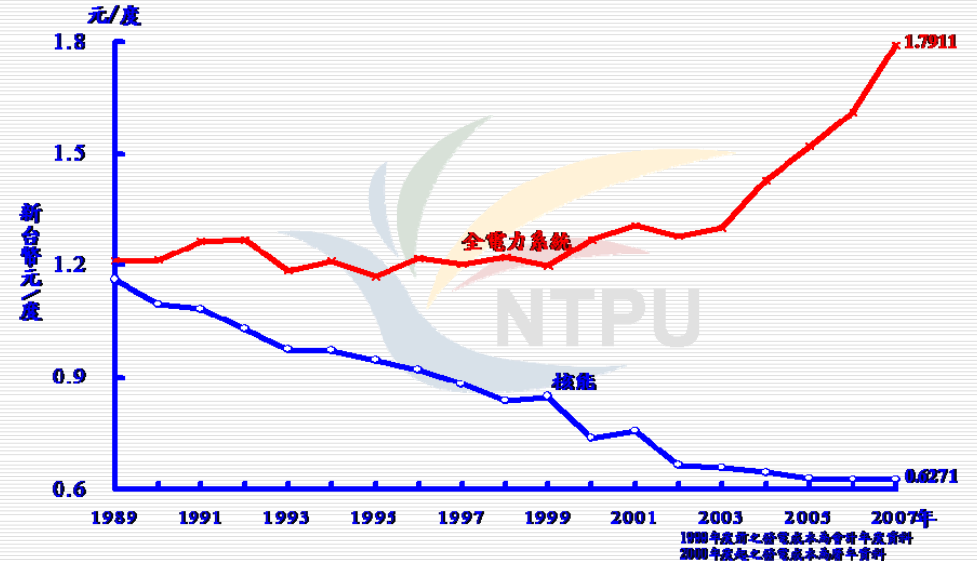


# 核電廠運轉概況



http://wapp4.taipower.com.tw/NSIS/Manage/97年核能營運績效-資訊透明化.ppt

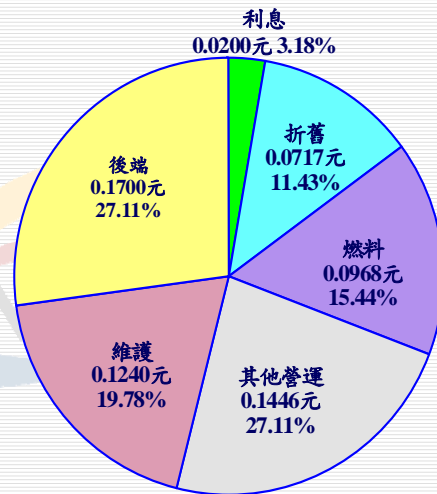
# 發電成本：核能 vs. 全電力系統



http://wapp4.taipower.com.tw/NSIS/Manage/96年核能營運績效-資訊透明化.ppt

# 核能發電成本 (2007年)

- 每度發電成本**0.6271元**，含人事費用及總處分攤費用
- 核能後端費用係指依核能發電量提撥一定比例經費，以供未來執行放射性廢棄物最終處置及核能電廠拆廠等核能後端管運作業費用
  - 自民國75年7月開始提列
  - 目前每度提列**0.17元**
- 核能發電後端管運基金**192,663,429千元** (2008年底)



http://wapp4.taipower.com.tw/NSIS/Manage/96年核能營運績效-資訊透明化.ppt

# 核四廠位置圖：龍門施工處



http://www.taipower.com.tw/left\_bar/power\_life/tw\_power\_develop/home\_1\_7/main2/p3.htm

# 核四工程大事紀

- 69.05 台電提出核四案
- 72.02 核四廠址用地徵收
- 74.05 行政院指示，核四暫緩進行加強民眾溝通
- 75.07 立法院凍結核四預算，要求須待預算委員會審查才能動支
- 80.12 通過核四「可行性研究報告」及「環境影響評估報告」
- 81.02 行政院核定恢復核四計畫
- 81.06 立法院預算委員會通過恢復動支核四預算
- 82.07 立法院通過核四計畫預算不再重審
- 83.07 立法院通過核四計畫84年度1125億元預算
- 85.05 立法院通過廢止核四計畫案
- 85.10 立法院通過行政院所提廢核覆議案
- 88.03 原能會核發核四核子反應器建廠執照
- 89.05 經濟部長林信義上任，要求核四暫停價格標，並召集核四再評估委員會檢討
- 89.09.30 林信義建議停建核四
- 89.10.03 主張續建核四的行政院長唐飛，以健康為由，向陳水扁統請辭獲准
- 89.10.27 新任行政院長張俊雄宣布停建核四
- 90.01.15 大法官會議作成核四釋憲文，說明行政院在停建核四決策過程中有瑕疵
- 90.02.13 行政院長張俊雄與立法院簽署核四復工協議

# 核四工程進度 (2009年3月)

項次	總進度	設計	採購	施工	試運轉
權重 (%)	100	19	15	58	8
預定進度 (%)	92.54	97.07	99.99	93.35	61.94
實際進度 (%)	87.59	96.52	99.97	88.61	35.70
差異 (%)	-4.95	-0.55	-0.02	-4.74	-26.24

計畫投資總額：233,551,177千元 累計預算：222,092,910千元

廠址位置：台北縣貢寮鄉 土地面積：480公頃

裝置容量：135萬瓩機組兩部機組

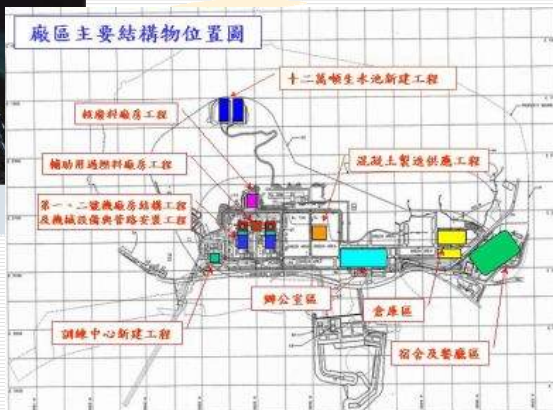
主要設備型式：進步型沸水式反應器 (ABWR)

年平均使用燃料：40公噸/每部機

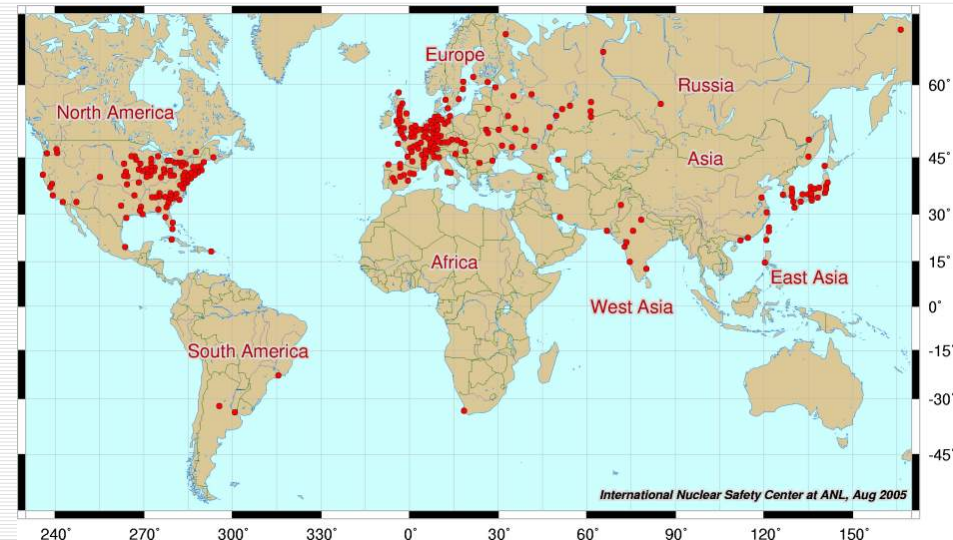
年產生低階核廢料：250桶/每部機

可靠尖峰：127萬瓩/每部機 年發電量：90億度/每部機

# 核四廠：廠區配置



# 世界核能電廠分佈圖



每一紅點表示一個核電廠 (機組由1到7部機不等)



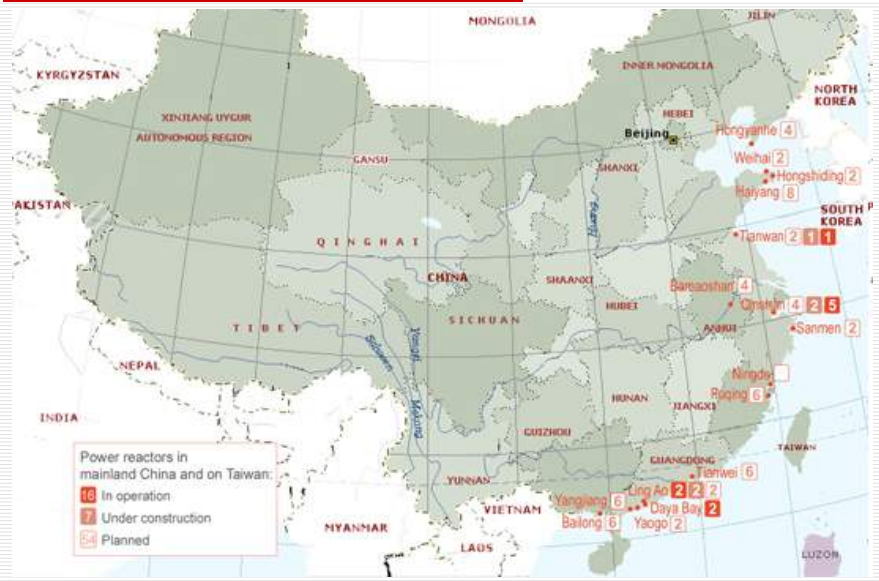
# 亞洲地區核能電廠分布圖



# 東亞地區核能電廠分布圖



# 中國核電廠：運轉、興建與規劃情形



# Operating Mainland China Nuclear Power Reactors

Units	Province	Type	Net capacity (each)	Commercial operation
Daya Bay-1&2	Guangdong	PWR	944 MWe	1994
Qinshan-1	Zhejiang	PWR	279 MWe	April 1994
Qinshan-2&3	Zhejiang	PWR	610 MWe	2002, 2004
Lingao-1&2	Guangdong	PWR	935 MWe	2002, 2003
Qinshan-4&5	Zhejiang	PHWR	665 MWe	2002, 2003
Tianwan-1&2	Jiangsu	PWR (VVER)	1000 MWe	2007
<b>total (11): 8,587 MW</b>				

## Nuclear reactors under construction and about to start construction

Plant	Province	MWegross	Startconst.	Operation
Lingao-2 (units 3&4)	Guangdong	2x1080	12/05, 5/06	12/10, 8/11
Qinshan 4 (units 6&7)	Zhejiang	2x650	4/06, 1/07	2011, 2012
Hongyanhe 1 (units 1-4)	Liaoning	4x1080	8/07, 4/08, 3/09, 7/10	10/12, 2014
Ningde 1 (units 1-2)	Fujian	2x1080	2/08, 11/08	12/12-2013
Yangjiang 1 (units 1-2)	Guangdong	2x1080	2/08, 11/08	5/13, 2015
Fuqing 1 (units 1-2)	Fujian	2x1080	11/08, 2009	10/13, 8/14
Fangjiashan (Qinshan 5)	Zhejiang	2x1000/1080	12/08, 6/09	12/13, 2014
Sanmen 1 (units 1&2)	Zhejiang	2x1100	3/09, 2010	10/13, 2014
Haiyang (units 1&2)	Shandong	2x1100	9/2009, ?	2014-15
Taishan 1	Guangdong	2x1700	9/09, 1/10	11/13, 2015
Shidaowan	Shandong	200	9/09	2013 or 2014
<b>total45: 47,420MWe</b>				

Main numbers=phase, Bold=construction started

**Nuclear capacity to at least 40 GWe by 2020 and then increase to 160 GWe by 2030**

<http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html>

25

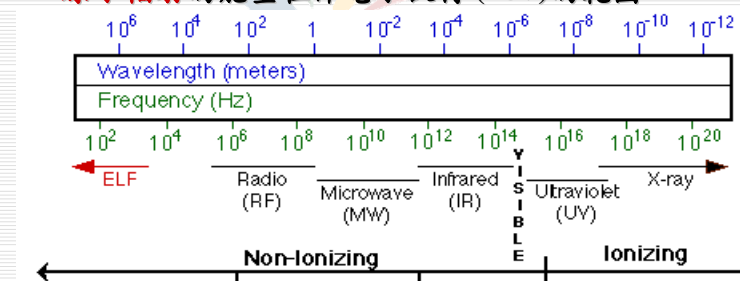
## 輻射安全：輻射污染分類

### ☐ 輻射污染

- **游離輻射**：游離輻射防護法：原子能委員會
- **非游離輻射**：非游離輻射環境建議值：環保署

### ☐ 以電子伏特 (eV) 分類

- **非游離輻射**：能量小於**10電子伏特**的電磁場
- **游離輻射**：**核輻射**的能量在百萬電子伏特 (MeV) 的範圍；**原子輻射**的能量在仟電子伏特 (keV) 的範圍。



(<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/powerlines-cancer->

<http://web.ypu.edu.tw/allstuff/11%20非游離輻射.ppt>)

26

## 核能電廠事故

- ☐ **三哩島事故**：1979年3月28日，美國賓州哈里斯堡附近三哩島核電廠第二號機發生核子事故。一連串的機械與人為失誤使反應爐水降低，冷卻系統失效，而使**反應爐心燃料熔毀**將近一半。主要的機械故障為**釋壓閥卡死**在開的位置上而使反應爐冷卻水大量流失，加上運轉員誤判冷卻水流失事故的信號。雖然緊急爐心冷卻系統自動開啟，運轉員卻降低爐心冷卻的水流達數小時之久，直至發現真實情況作爐心補水時，反應爐已損壞至不可修補的地步。總之，三哩島事故為人為失誤及設計未儘妥善，但以前者為主因。
- ☐ **車諾比事故概述**：1986年4月26日凌晨，前蘇聯車諾比核電廠第四號機發生**燃料棒破裂**而導致爐心熔毀之事故，熔融之燃料碎片與沸騰之水因快速之化學反應而產生**水蒸汽爆炸**，熱碎片及火焰由反應器廠房頂部竄出，造成廠房附近多處失火；反應器內之輻射物質外洩至大氣中，隨風飄散。此事故發生後數個月內造成30餘人死亡，可謂核能發電史上最嚴重而慘痛之事故。

<http://www.taiwanwatch.org.tw/issue/nuclear/accid-01.htm>

27

## 三哩島 (Three Mile Island) 核電廠

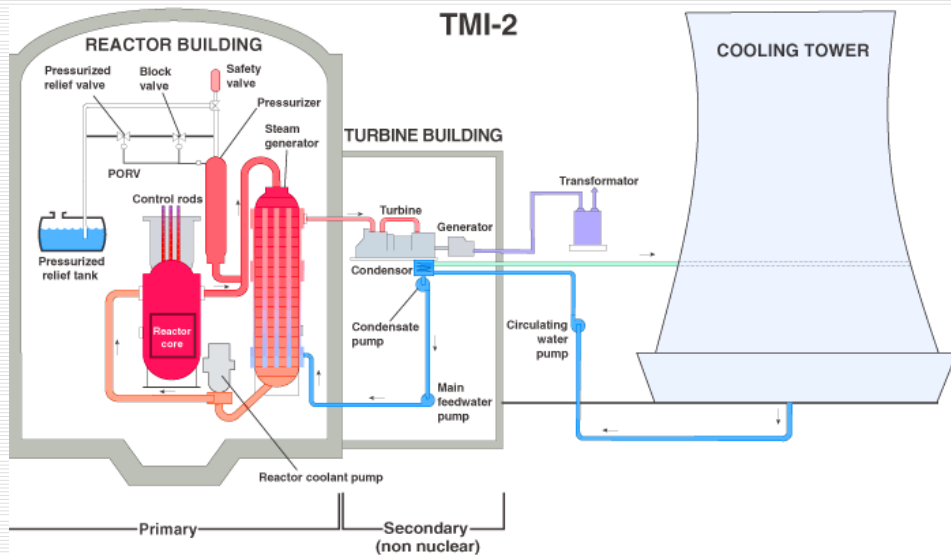


<http://www.nukeworker.com/pictures/thumbnails-92.html>

28



# 三哩島核電廠二號反應爐



<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>

29

# 車諾比 (Chernobyl) 核電廠

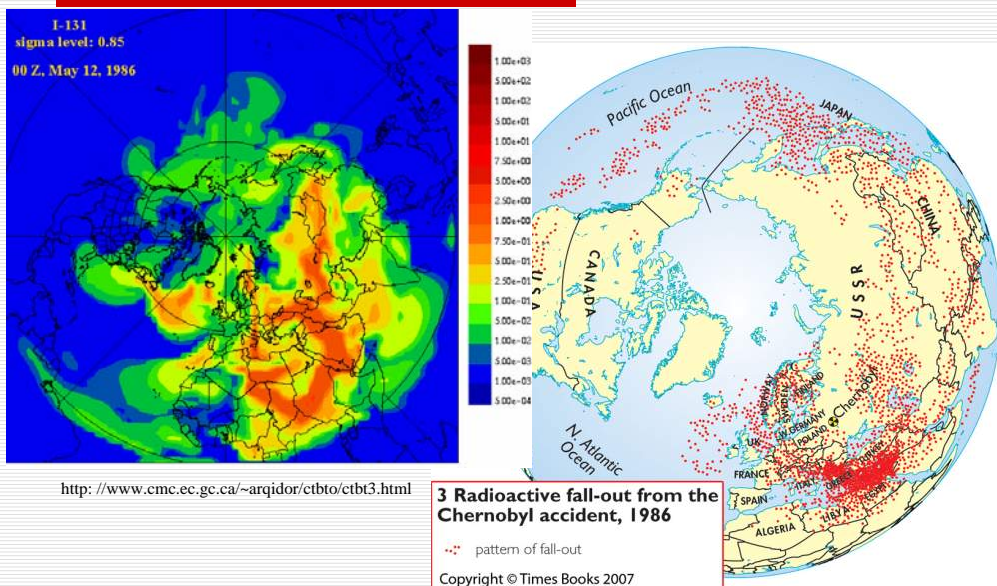


<http://library.thinkquest.org/20331/images/chernsite.jpg>

[http://www.ukrainianweb.com/images/chernobyl/chernobyl\\_reactor.jpg](http://www.ukrainianweb.com/images/chernobyl/chernobyl_reactor.jpg)

30

# 放射性落塵 (Radioactive fallout)



<http://www.cmc.ec.gc.ca/~arqidor/ctbto/ctbt3.html>

[https://qed.princeton.edu/images/f/fc/Radioactive\\_fall-out\\_from\\_the\\_Chernobyl\\_accident.jpg](https://qed.princeton.edu/images/f/fc/Radioactive_fall-out_from_the_Chernobyl_accident.jpg)

31

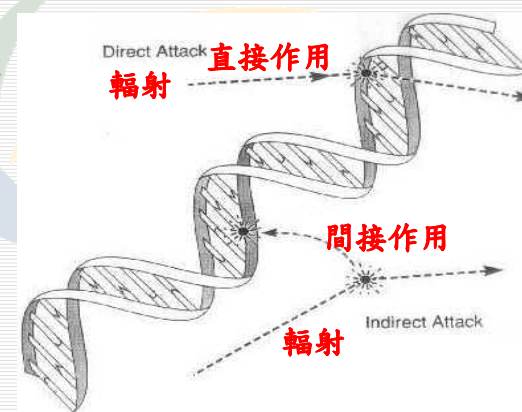
# 輻射的影響

## ☐ 游離輻射：

- 輻射能游離物質之分子，產生正負離子對，故稱游離輻射。
- 游離輻射照射人體，與細胞中的重要分子(如DNA)作用，可使分子鍵斷裂，引起生物效應。

## ☐ 非游離輻射：

- 主要為「熱」的影響
- 尚未有充足證據證明對人體有害
- 主要為電磁波：
  - ☐ 紫外線
  - ☐ 可見光
  - ☐ 紅外線
  - ☐ 微波與射頻輻射
  - ☐ 極低頻電磁場
  - ☐ 靜電場



[http://staffweb.ncu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射\(final\).ppt](http://staffweb.ncu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射(final).ppt)

32



## 非職業場所之一般民眾於環境中暴露各頻段非游離輻射之建議值

頻段	電場強度 (V/m)	磁場強度 (A/m)	磁通量密度 ( $\mu\text{T}$ )	功率密度 $\text{Seq}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
<1Hz	-	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	-
1-8Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25Hz	10,000	$4,000/f$	$5,000/f$	-
0.025-0.8KHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0.8-3KHz	$250/f$	5	6.25	-
3-150KHz	87	5	6.25	-
0.15-1MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	-
1-10MHz	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$0.92/f$	-
10-400MHz	28	0.073	0.092	2
400-2000MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$0.0046f^{1/2}$	$f/200$
2-300GHz	61	0.16	0.2	10

註：f為頻率，其單位為規範頻段的頻率單位，

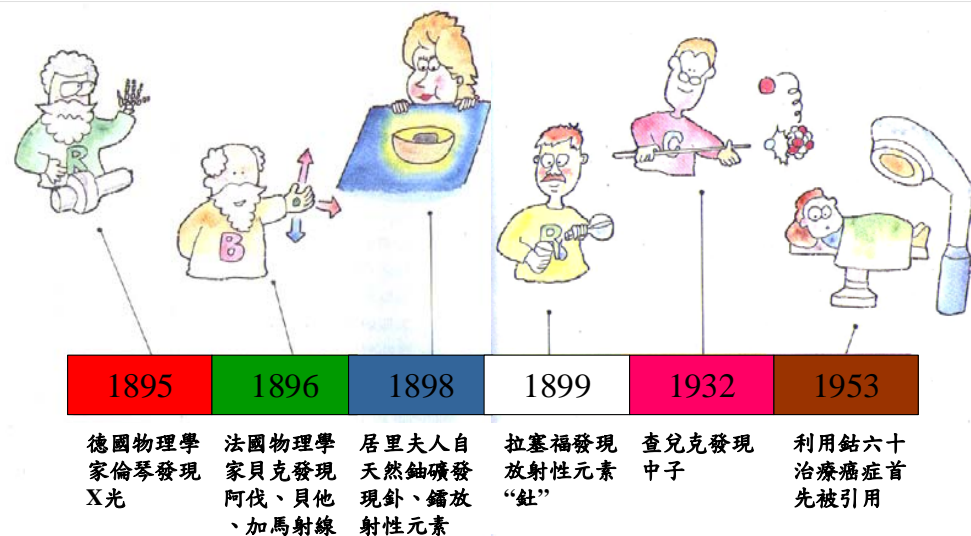
(註1)規範頻段為1-8Hz，f單位為Hz。(註2)規範頻段為0.025-0.8kHz，f單位為kHz，以此類推。

(註3)其中f2、f1/2，中之2及1/2為指數，f2=fxf以此類推

[http://ivy1.epa.gov.tw/nonionized\\_net/EME/safety.aspx](http://ivy1.epa.gov.tw/nonionized_net/EME/safety.aspx)

33

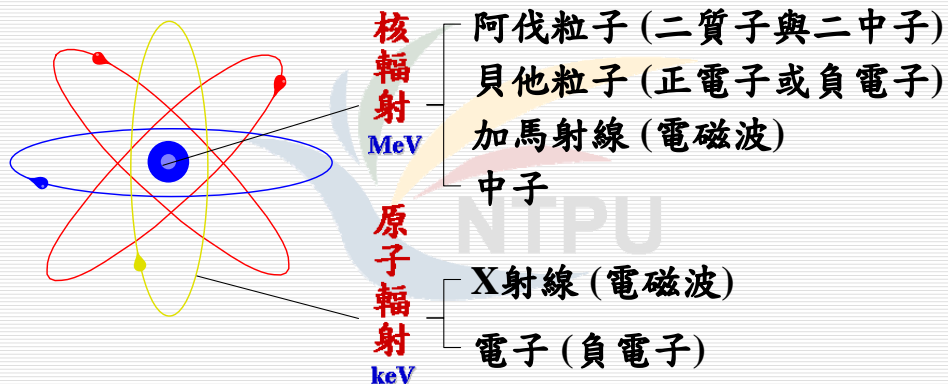
## 輻射(放射線)發現史



[http://staffweb.ncnu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射\(final\).ppt](http://staffweb.ncnu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射(final).ppt)

34

## 游離輻射：原子輻射與核輻射



[http://staffweb.ncnu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射\(final\).ppt](http://staffweb.ncnu.edu.tw/hyshin/class/she/chapter2/05游離性輻射(final).ppt)

35

## 輻射單位

- **能量**：電子伏特 (eV)， $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- **放射性活度 Radioactivity (A)**：
  - 居里 Curie (Ci)：1克鐳226每秒的蛻變數= $3.7 \times 10^{10}$ 次
  - 貝克 Becquerel (Bq)：1 Bq = 1蛻變數/秒
- **曝露 Exposure (X)**：
  - 倫琴 Roentgen (R)， $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ 庫倫/kg}$
- **吸收劑量 Absorbed Dose (D)**：
  - 單位質量物質接受輻射之平均能量
  - 戈雷 Gray (Gy)： $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$
- **等效劑量 Dose Equivalent (H)**：
  - 指人體組織之吸收劑量與射質因數之乘積
  - 西弗 Sievert (Sv)， $H = DQ$
- **有效等效劑量 Effective Dose Equivalent (He)**：
  - 人體受照射器官或組織平均等效劑量與其加權因數乘積之和

36

# 輻射劑量限值

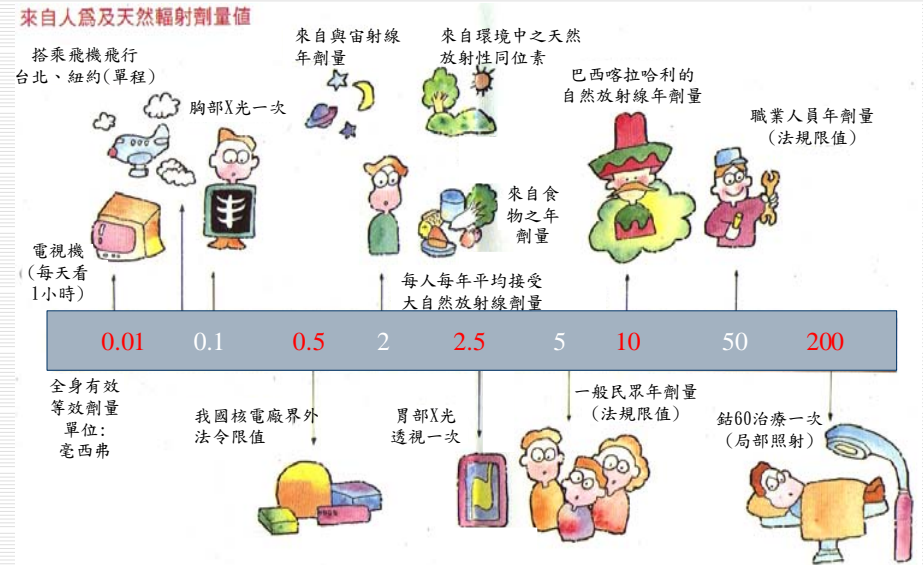
## 西弗、戈雷 vs. 侖目、雷得

- 1985年改用之單位
- 1 Sv = 100 rem; 1 Gy = 100 rad
- 西弗：人體每公斤接受加馬射線的能量為1 J時其劑量定為1 Sv。

## 法規限值

- 游離輻射防護安全標準
- 搭飛機由台灣至美西：0.04 mSv
- 核能電廠界外限值：0.5 mSv
- 一般民眾年劑量限值：5 mSv
- 輻射工作人員年劑量限值：50 mSv

# 輻射劑量及限值



# 核能電廠輻射安全

## 廠界居民：

- 核能電廠對廠界民眾造成的最大劑量低於0.01 mSv

## 工作人員管制：管制區及監測區

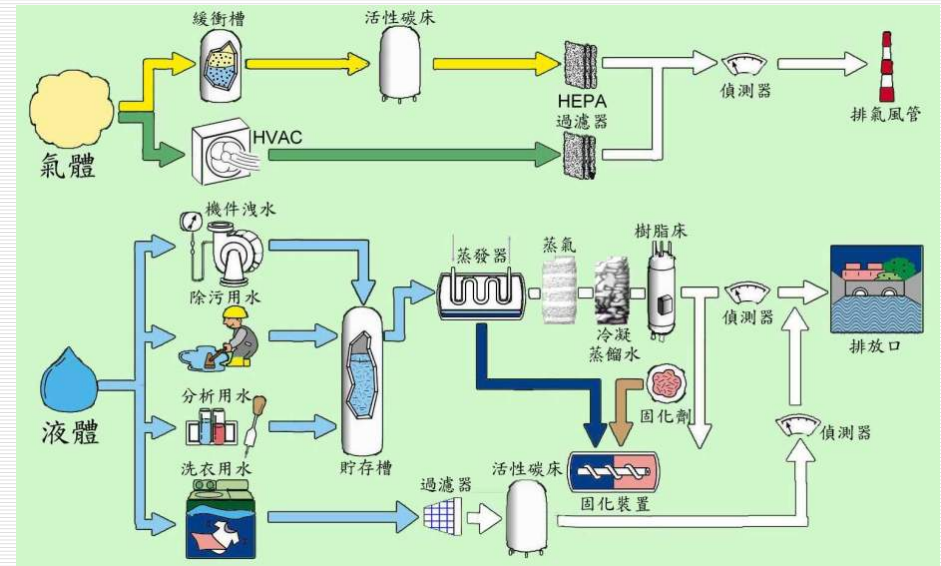
- 進入管制區工作須配戴人員劑量計、登錄進出時間及所接受的劑量
- 事先申請輻射工作許可證，作好輻射防護準備後方可進入工作。工作完畢後須經偵測確保清潔後方可離去

## 廢氣、廢液處理：

- 廢氣經活性碳床吸附、高效率過濾器過濾後再經輻射偵檢後外釋
- 廢液以回收利用為原則，少量無法回收者經除礦器淨化及過濾器處理後，經分析確認放射性濃度符合安全標準方可在輻射監測器監測下外釋

## 核能電廠環境輻射監測

# 放射性廢氣及廢液處理





# 核能安全：電廠營運管理

## □ 爐心核燃料營運：

- 每18個月進行一次爐心核燃料裝填
- 占全燃料25~40%以提供運轉期間有足夠能量
- 經由爐心燃料佈局設計及安全分析

## □ 核能發電的國際組織：

- 核能安全是跨越國界
- 世界核能發電協會 (WANO) 組織，進行經驗交流、同業評估、技術支援及交換訪問。

## □ 非計劃性自動急停：

- 急停：反應器保護系統動作，致使控制棒快速全部插入反應器爐心，稱為「急停」。急停次數愈少，表示機組的供電穩定度愈高
- 異常事件件數：可作為核能機組穩定運轉及核能安全的衡量指標

41

# 放射性廢棄物營運

## □ 放射性廢棄物分類

- 高放射性廢棄物：供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生的萃取殘餘物
- 低放射性廢棄物：其他具放射性廢棄物  
低放射性廢棄物90%來自核能發電，其它是來自醫學、農業、工業、學術及研究單位

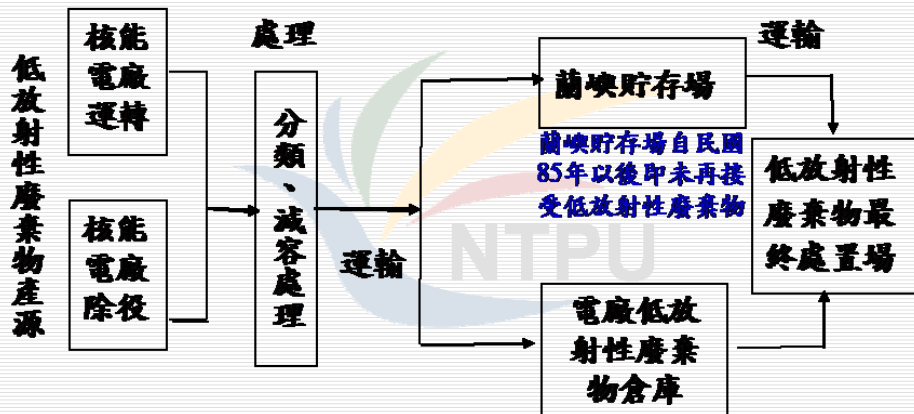
## □ 低放射性廢棄物處理與貯存：

- 經過焚化、壓縮或固化處理後，再以鍍鋅鋼桶盛裝，暫時貯存於電廠內貯存庫內，未來再送至最終處置場處置
- 1972年依國際間處置趨勢，採離島暫時貯存：  
聯合國1972年制定「倫敦公約」—  
「防止傾倒廢物等物質污染海洋公約」
- 1975年在蘭嶼島東南方三面環山一面向海，且5公里範圍內無居民的龍門地區，興建蘭嶼貯存場
- 環境監測：輻射值都在自然背景變動範圍內

42

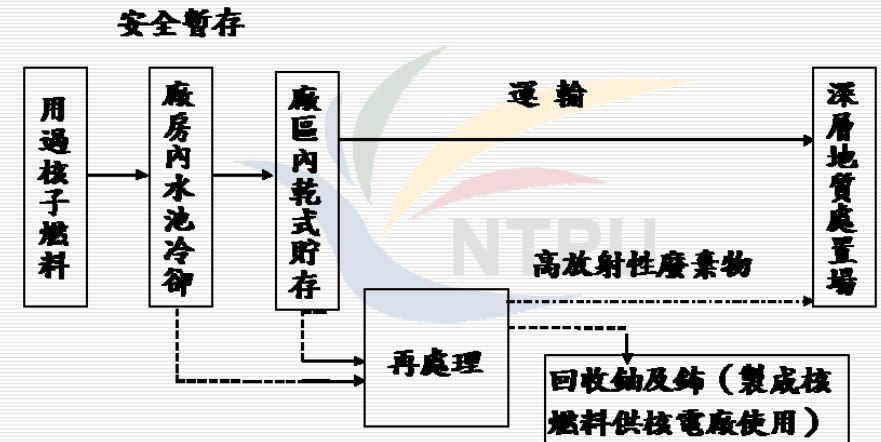
# 低放射性廢棄物營運流程圖

## 廢棄物產生



# 用過核子燃料營運流程

## □ 採取水池冷卻、中期乾式貯存、最終處置三階段處理



## 用過核子燃料處理、處置

### □ 水池冷卻

- 燃料退出時尚有殘餘的衰變熱及放射性，必須先存在**水池**中一段時間
- 每年用過核子燃料：核一廠約**40公噸**，核二廠約**50公噸**，核三廠約**45公噸**

### □ 中期貯存

- 多年冷卻後，殘熱及輻射已大幅降低
- 另興建貯存設施以進行中期貯存，**可隨時取出進行再處理**以回收鈾與鈾等可利用的物質

### □ 最終處置

- 用過核子燃料含有半衰期較長的放射性核種，國際均採**深層地質處置**，掩埋於距地表**500~1000公尺**深之岩層，以與人類的的生活圈隔絕

45

## 核能電廠除役

- **立即拆除**：短時期內，將所有含放射性物質之設備、結構及部份設施除污後拆除，移至低放射性廢棄物處置場，以達到廠址非限制使用之條件。估計實際拆除一座核能電廠所需的時間約**5到10年**。
- **延遲拆除**：廠內放射性之物質先經一段時間(約**30-60年**)衰變後，再進行除污及拆除。
- **固封除役**：先將廠內用過核子燃料及流體廢料移出，再將所有殘留的較高放射性或高污染性組件密封在混凝土的屏蔽內，讓其放射性衰減至法令所要求之標準後，再全面拆除，這段封存期間可**長達100年**。

46

## 非核家園、低碳家園

### □ 「非核家園」「非核害家園」「低碳家園」

#### □ 非核家園

- **環境基本法**的法制基礎
- 此一願景勾勒，至少標誌了以下三層意義：
  - 創造經濟發展奇蹟後，臺灣要追求人本、永續的發展
  - 結束威權時代後，臺灣公民社會逐漸壯大
  - 迎接全球化世界，臺灣的世界公民角色需要重新界定
- 「終止核武威脅」「檢討核能和平用途」「強化再生能源」「人道關懷與族群平等」「拒絕核子污染」

#### □ 如何追求非核害家園

- 做好核能安全管制措施、妥善處理核廢料
- 強化民眾參與核能相關議題討論之機制

#### □ 核能作為台灣邁向低碳家園的過渡選項

47

## 結語

- 美國三哩島及前蘇聯車諾比核電廠發生意外後，引起民眾普遍對核能發電安全性的懷疑。但核能業界不斷研究發展新技術、運用新科技精進管理方式，努力提升核能電廠的**安全性與可靠度**。
- 台灣地區**自產能源不足**，98%的能源需仰賴進口，核能發電能源密度高，可**提升能源安全度**。此外，在化石燃料貯存量日漸枯竭、使用後**排放溫室氣體**造成全球暖化，適度發展核能發電應也是一種**選項**
- 尚待釐清問題
  - 發電成本、二氧化碳排放、核能安全疑慮...
  - 如何取捨或權衡？
  - 技術？信仰？政治？經濟？還是意識型態？
  - 擁核、反核=>關乎道德?!有條件vs.無條件

48