

核能發電與輻射安全

許榮鈞

工科系/核工所, 國立清華大學

2018/05/31

How to Recognize When Someone Is Talking Rot

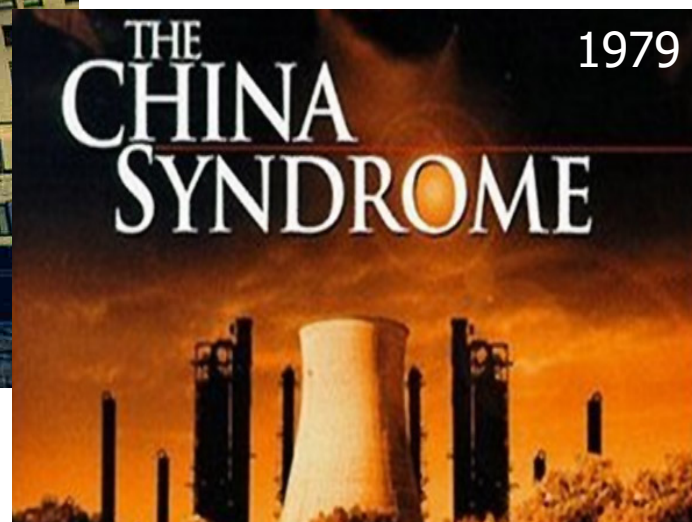


President Drew Faust
welcomes the Class of
2021 to Harvard College:
The most important goal
of higher education is to
ensure that graduates
can recognize when
“someone is talking rot.”
(Jeremy Knowles)

輻射安全

輻射

- 輻射=汙染與病變 → 恐懼？
 - 我們恐懼很大的原因是來自不正確資訊的過度渲染！



媒體誤導案例



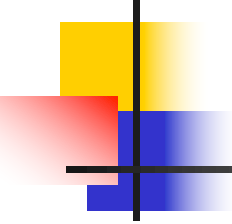
- **自由時報(2014/10/27)身在輻中不知輻！台灣輻汙嚴重：**這次使用原能會自己認證過的輻射偵檢儀，讓原能會無法狡辯儀器有問題等。結果發現台灣真的是人工輻射百貨店，人工核種無所不在，如最多的是銥192、碘131、銇137，在台北則還有銻的存在，像是在立法院中興大樓、大安森林公園、國父紀念館、中正紀念堂...
- **蘋果日報(2015/01/19)驚！哪來的劇毒人工核種**台灣環境輻射走調團日前完成人工核種分布調查，發現台鐵台北車站、台中車站、清華大學生技館及北市大安森林公園等102處，疑有不該存在的人工核種如碘-131、銻等，質疑與核電廠燒核廢料未做好防護措施有關。

台灣環境輻射地圖？



- 民間自主發起的"台灣環境輻射走調團"，2013進行全台輻射普查，第一階段完成台灣、澎湖、金門總共733個地方，測量了1959個測點，累計大約24000個測值，在好的儀器用在不適當的場合(天然輻射)並錯誤解讀數據！(> 0.3 $\mu\text{Sv/h}$)... 二階段核廢料的減容對策...
- 核一核二廠外測量...



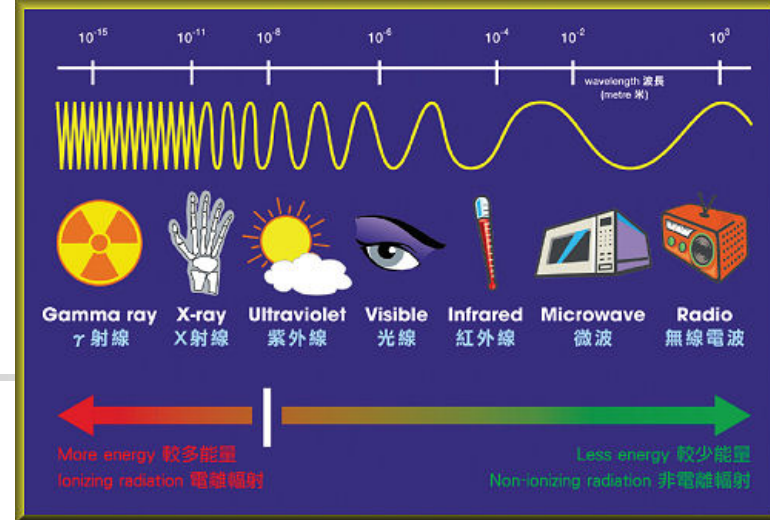


認識輻射



- 我們對輻射有多少認識呢？
 - 輻射是什麼？
 - 輻射從何而來？
 - 輻射有甚麼用途？
 - 自然背景輻射強度？
 - 可能輻射暴露的途徑？
 - 輻射對健康有什麼影響？
 - 如何度量輻射與輻射防護？

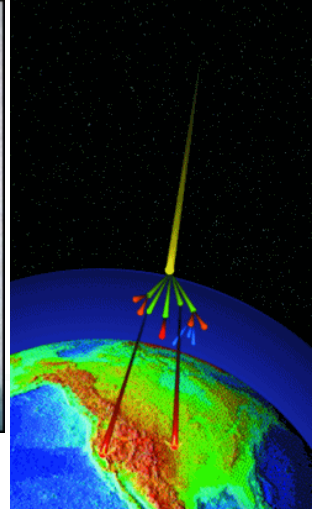
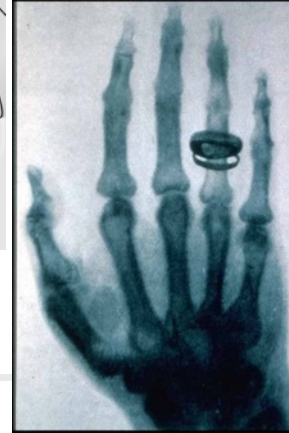
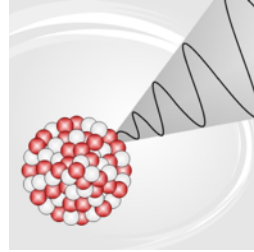
輻射是什麼？



www.hko.gov.hk

- 什麼是輻射？
一種**能量的發射和傳遞**。
- 輻射包括各種不同能量的電磁波(例如光線、無線電波、X射線及 γ 射線等)、以及由放射性核種、核反應或加速器產生的粒子(例如中子或 α 及 β 粒子等)。
- 輻射通常可分兩類：**非游離輻射**及**游離輻射**。非游離輻射(例如光線及無線電波)的能量較低，不足以改變物質的性質。相反，游離輻射有足夠的能量使原子中的電子離開束縛而產生帶電離子。這個游離過程可能會導致生物組織產生變化，因而對生物構成傷害。
- 宇宙充滿輻射。自古以來，地球上的生命便一直暴露於自然環境的輻射中。
- 輻射是無聲、無色、無臭、無味，大部份情況我們無法感覺其存在。不過，我們可以利用儀器探測和量度它們。

輻射從何而來？



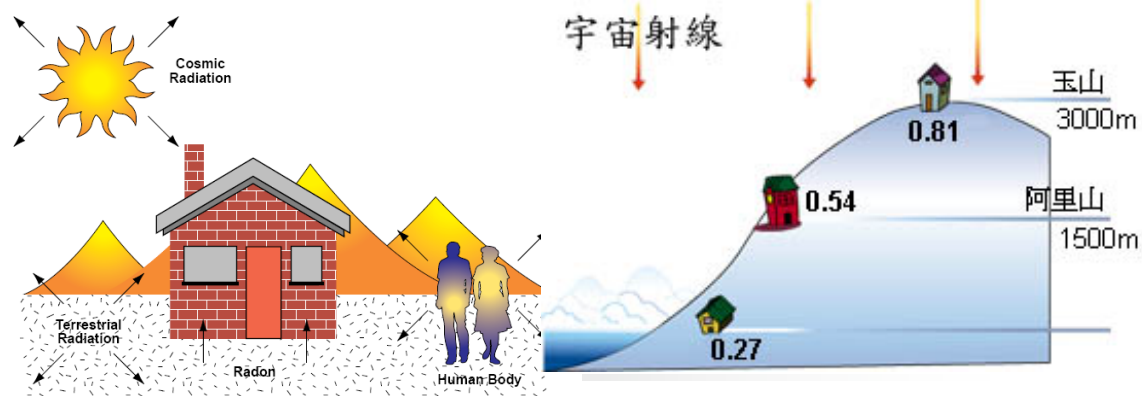
■ 輻射按其來源可以分為兩大類：

- 天然輻射：我們接觸到的天然輻射包括來自外太空的宇宙射線及存在於食物、空氣及居住環境的天然放射性物質等。地球早在46億年前，便由宇宙中各式各樣核反應產生的塵體所構成，從那時起各種放射性元素也因此存在於我們生存的地球上。其中大部分不安定、壽命短的核種很快便消失了；而半衰期長達45億年的「鈾-238」如今還剩下一半，總計至今地殼中的放射性物質估計尚有千萬億居里，但因平均分佈在世界各地，不至於對生物造成威脅。

- 人造輻射：我們接觸到的人造輻射以用於醫療診斷治療的輻射(X光、CT、PET)為最大宗，其他可能來源還有過往大氣層核試塵埃、核能發電、科學研究、工業與民生應用等。

URANIUM 238 (U238) RADIOACTIVE DECAY		
type of radiation	nuclide	half-life
α	uranium-238	4.47 billion years
β	thorium-234	24.1 days
β	protactinium-234m	1.17 minutes
α	uranium-234	245000 years
α	thorium-230	8000 years
α	radium-226	1600 years
α	radon-222	3.823 days
α	polonium-218	3.05 minutes
β	lead-214	26.8 minutes
β	bismuth-214	19.7 minutes
α	polonium-214	0.000164 seconds
β	lead-210	22.3 years
β	bismuth-210	5.01 days
α	polonium-210	138.4 days
α	lead-206	stable

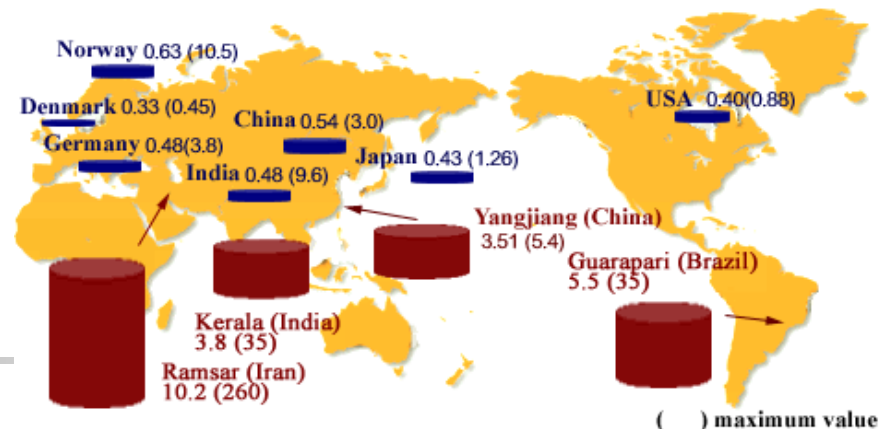
天然輻射



- **宇宙射線**：來自銀河與太陽的宇宙射線，為各種能量的電磁波和粒子所組成。在高海拔地區因為大氣較稀薄阻擋小，所以輻射會增強，一般地區每升高約1500公尺，輻射劑量即增加一倍。宇宙射線在離地表越高的位置就越強，所造成的劑量也就越高。
- **土壤或岩石**：土壤及岩石中，含有不同濃度的天然放射性核種，例如鈾-232(半衰期為140億年)、鈾-238(半衰期為45億年)、鉀-40(半衰期為13億年)，此類核種是自地球誕生以來就存在。
- **食物與人體**：最主要的天然放射性核種為鉀-40。
70kg adult: ^{14}C & $^{40}\text{K} \sim 0.2 \mu\text{Ci} = 7400 \text{ Bq}$
- **採礦與建材**：開發與使用過程會將天然放射性物質如鉀-40、鈾-232、鈾-238，自地底下開採至地面上。
- **氡氣**：地殼中之天然放射性核種鈾-238與鈾-232，在自然衰變過程中其子核之一為放射性惰性氣體氡氣(Rn)。

環境背景輻射

- 世界上有很多地方的天然背景輻射高得嚇人，甚至遠遠超過法規限值(輻射人員20 mSv/y)。



Area	mean (mGy/year)	maximum (mGy/year)
<u>Ramsar</u> , Iran ①	10.2	(260)
<u>Guarapari</u> , Brazil ②	5.5	(35)
<u>Kerala</u> , India	3.8	(35)
<u>Yangjiang</u> , China	3.51	(5.4)
Hong Kong, China	0.67	(1.00)
Norway	0.63	(10.5)
France	0.60	(2.20)
China	0.54	(3.0)
Italy	0.50	(4.38)
World average	0.50	
India	0.48	(9.6)
Germany	0.48	(3.8)
Japan	0.43	(1.26)
USA	0.40	(0.88)
Austria	0.37	(1.34)
Ireland	0.36	(1.58)

Source: UNSCEAR & Health Research Foundation, Kyoto, Japan

1



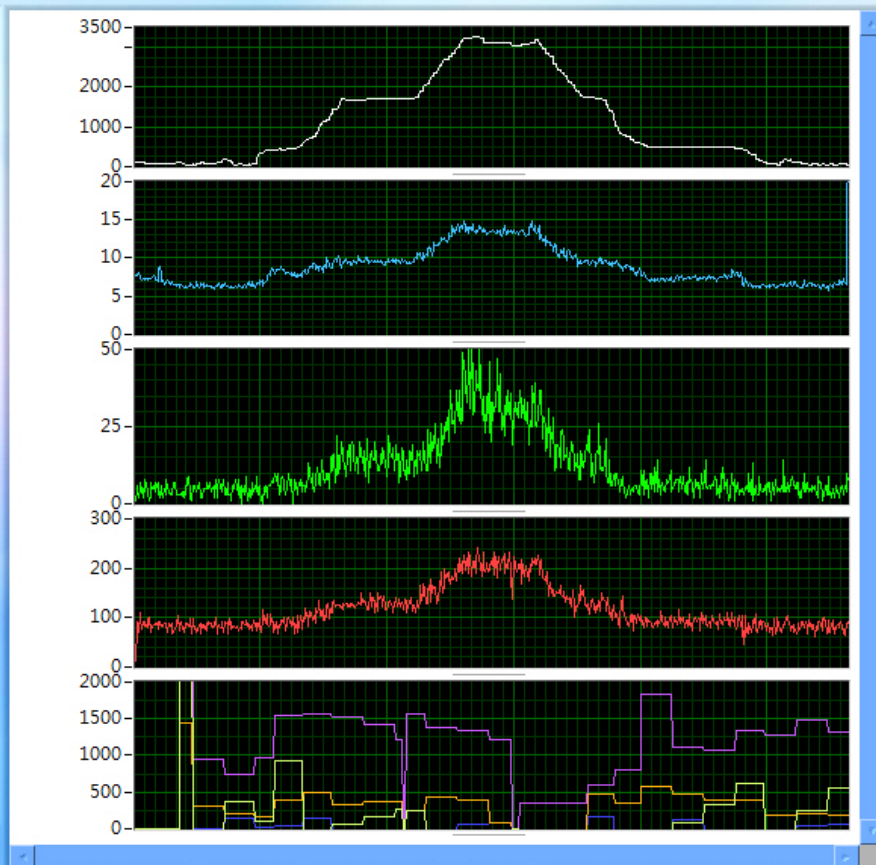
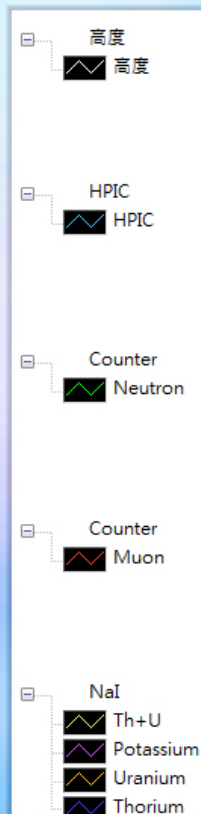
2



長期調查這些地方居民的致癌率及遺傳疾病，結果與一般正常地區的民眾並無任何差異。

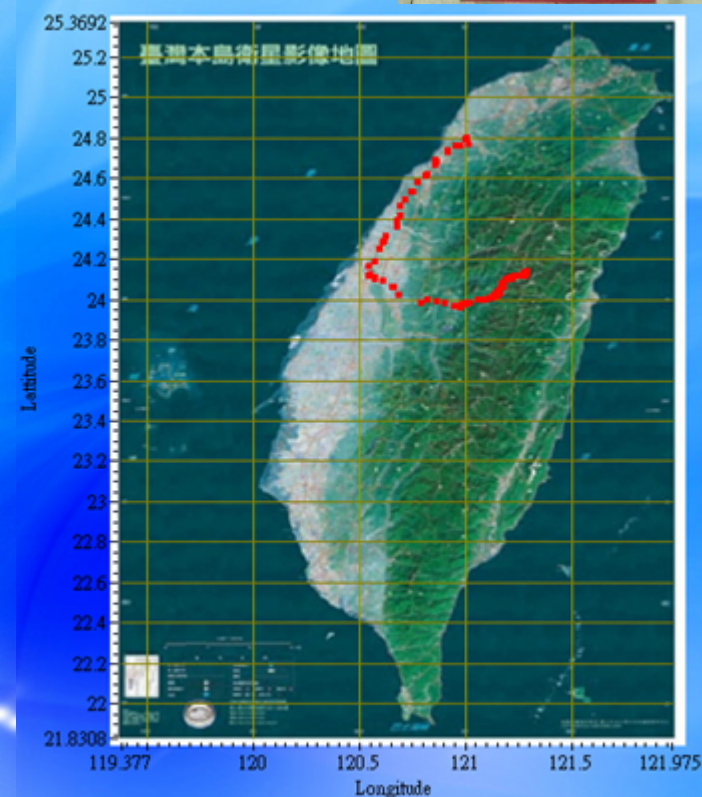
台灣天然環境輻射度量

新竹清華大學↔武嶺,合歡山(2011/09/07)

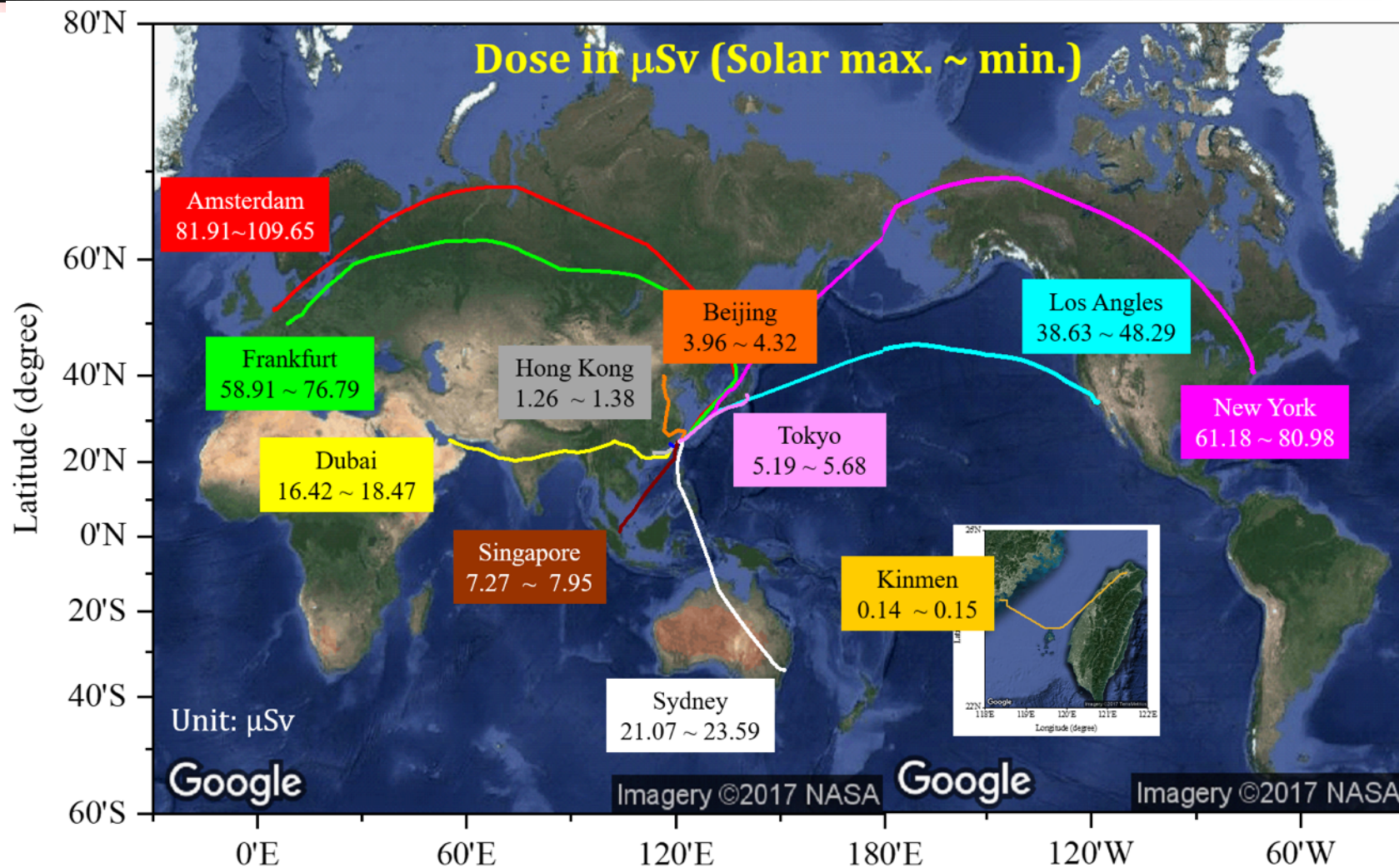
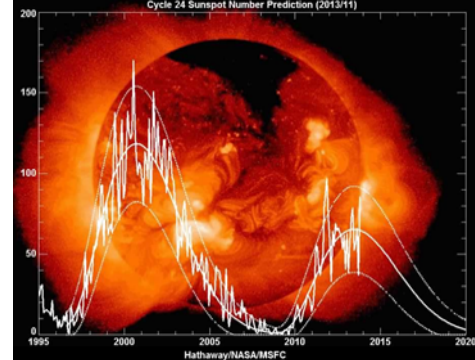


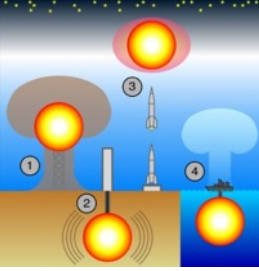
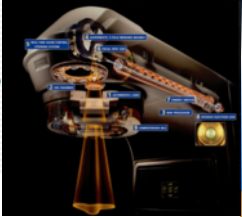
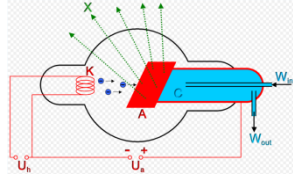
08:02 上午
09/07/11

04:45 下午
09/08/11



台灣常見航線所受劑量





人造輻射

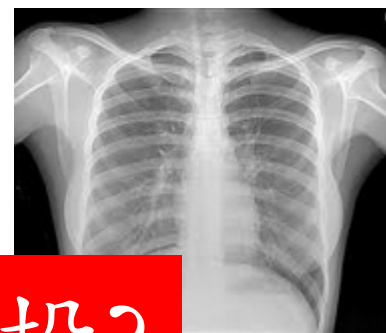
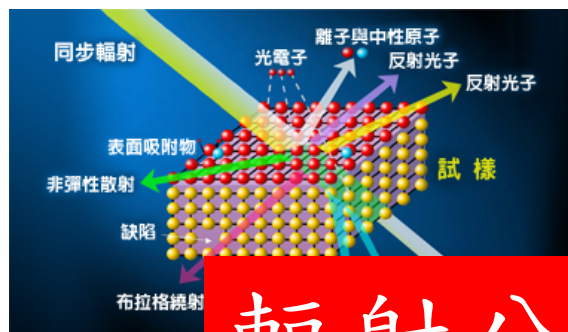
- 醫療輻射：人造輻射中，醫療輻射占最主要來源，包括X光檢查、CT電腦斷層掃描、PET正子斷層掃描及癌症放射治療等。醫療輻射帶來的好處遠遠大於可能的傷害，一般不列入輻射管制。
- 核爆落塵：核爆後飄落地面的一切細碎放射物質稱為「落塵」，炸點高度愈高，進入大氣層（對流層與平流層）的產物便愈多，散播距離越遠，落塵落地速度越慢，核爆所產生的輻射落塵會散播至人類的生存環境中。
- 核能發電：核能發電為電力主要來源之一，核能電廠採行的是「深度防禦」的輻射安全防護設計，有多重可靠的工程屏蔽設計，加上管制上應用距離平方反比與時間的控制，在鄰近廠區周邊的輻射背景值均在自然輻射背景值的變動範圍內。
- 科學與工業應用：加速器、同位素應用、非破壞檢測、消毒殺菌、警煙霧偵檢器、螢光、...

輻射用途？

核電公投！

- 現代社會是離不開輻射的，我們在日常生活中享用到輻射應用所帶來的好處，例如：發電、醫療、工農商業方面，輻射的應用多不勝數。

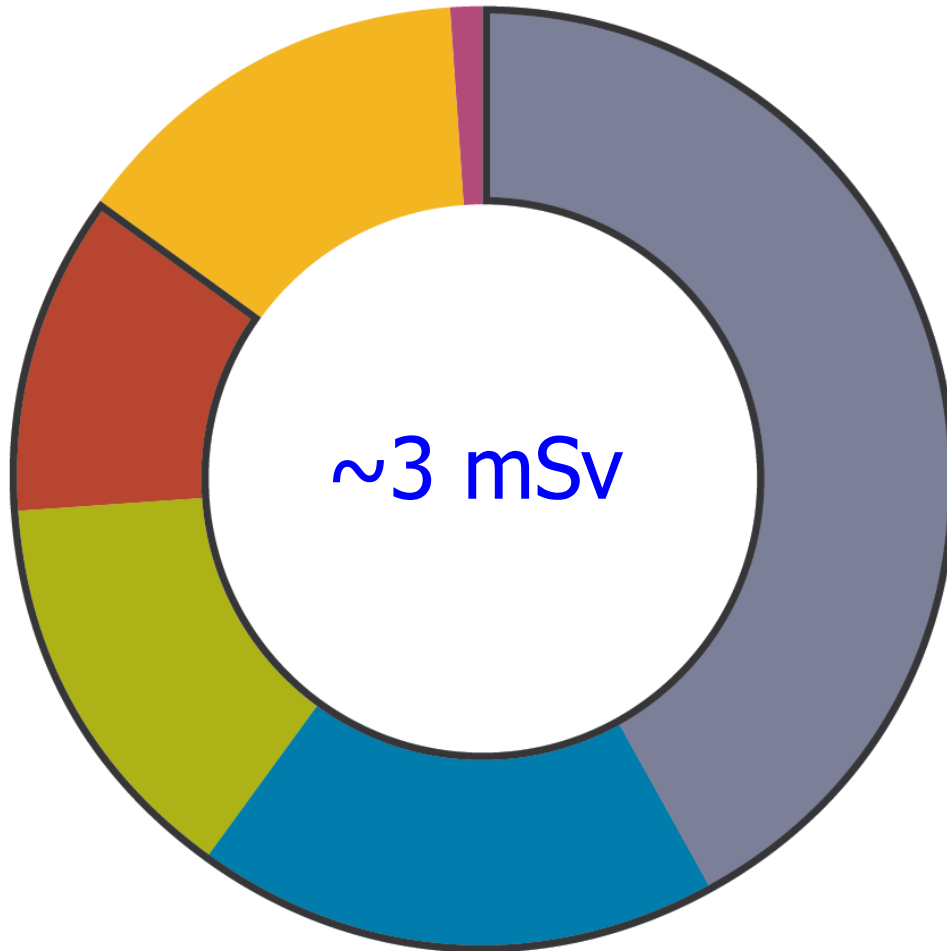
- 發電用途
- 醫學用途
- 科學用途
- 工業用途
- 農業用途
- 考古用途
- 消費品用途
- ...



輻射公投？



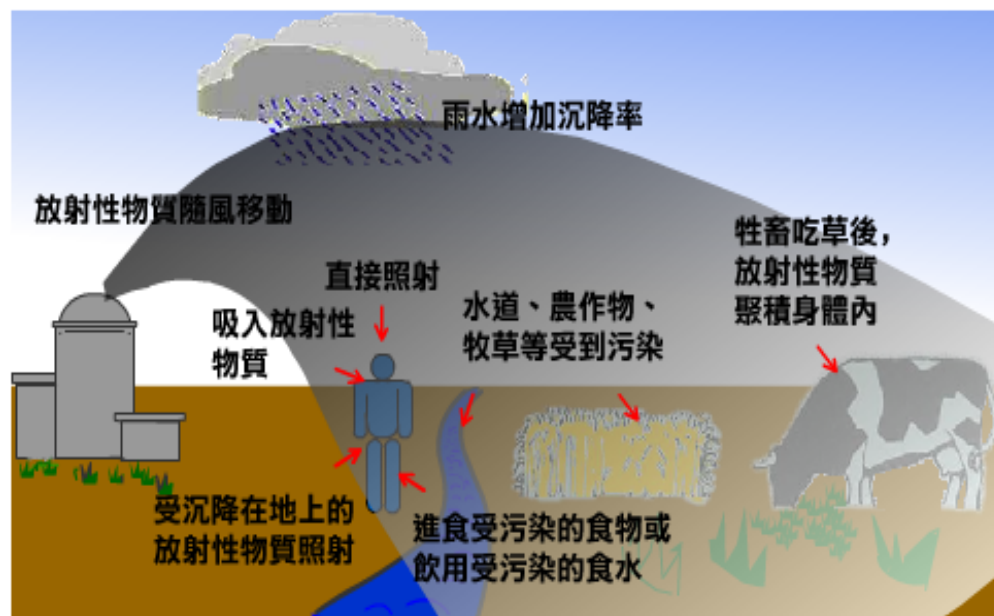
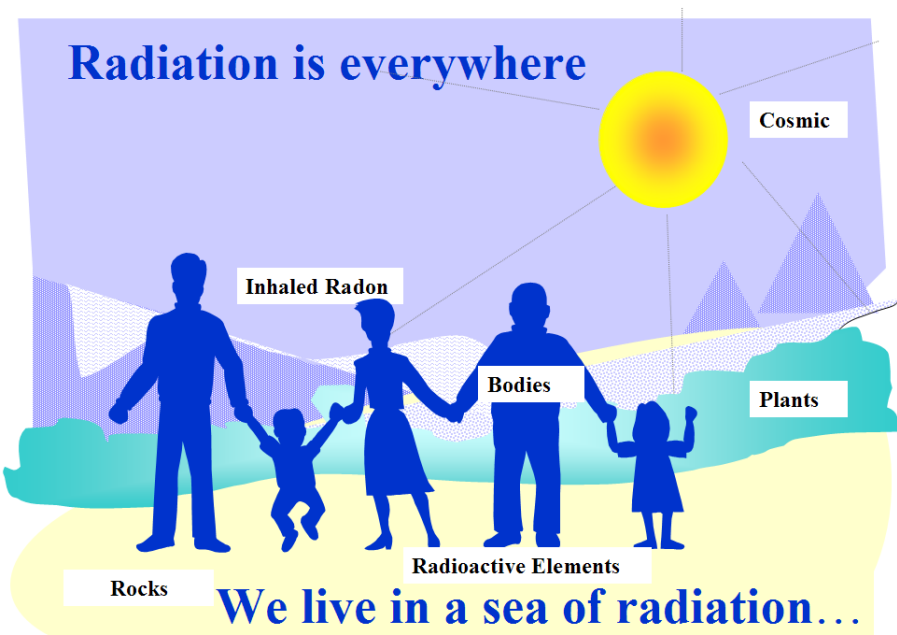
Sources of Radiation



- 14% Medicine
- 1% Nuclear Industry
- 42% Radon
- 18% Buildings/Soil
- 14% Cosmic
- 11% Food/Drinking Water
- 85% Natural Radiation

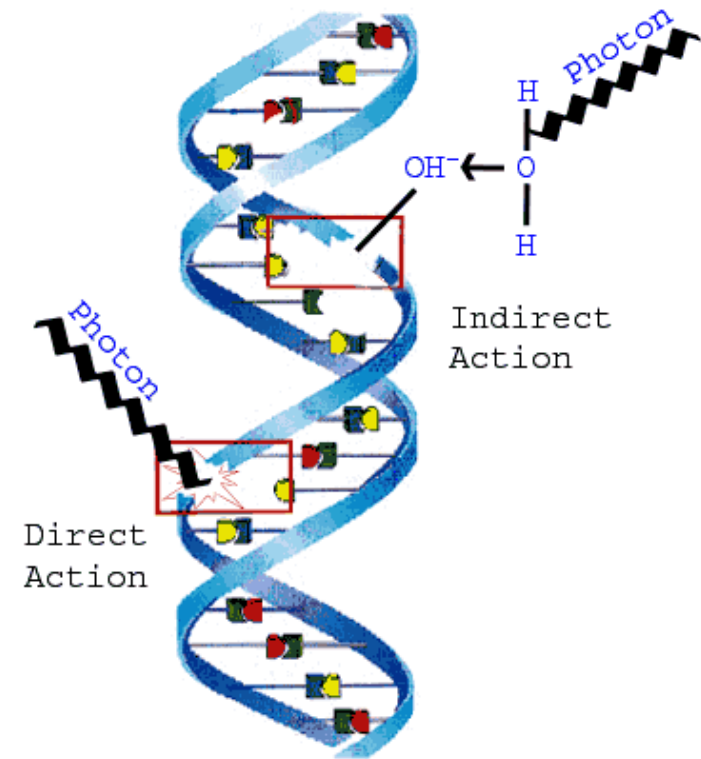
輻射會透過甚麼途徑影響我們？

- 放射性物質可以通過不同途徑影響人體。有些經由自然或人為途徑輸送到我們周遭，放射性物質的輻射可能直接照射我們，這是體外暴露(External Exposure)，亦可能隨著呼吸或進食而進入我們體內，造成體內暴露(Internal Exposure)。

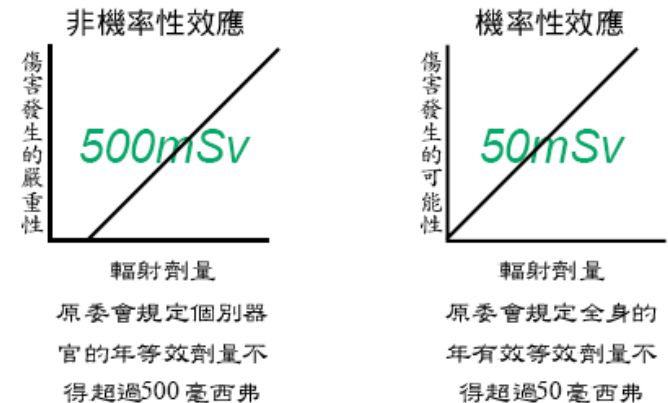


輻射對生物有什麼影響？

- 人體吸收輻射能量時，細胞組成可能被游離造成DNA單鏈或雙鏈斷裂傷害（直接傷害）。因為水佔了人體約 70 % 的重量，而水分子被游離後會產生有害的OH自由基，這些自由基會接續產生一連串化學反應，造成細胞傷害（間接傷害）。
- **細胞有自行修復的能力**，大部分細胞會恢復正常。假若細胞嚴重受損而無法修復或修復有錯誤時，則可能顯出健康受損的症狀。



輻射的生物效應

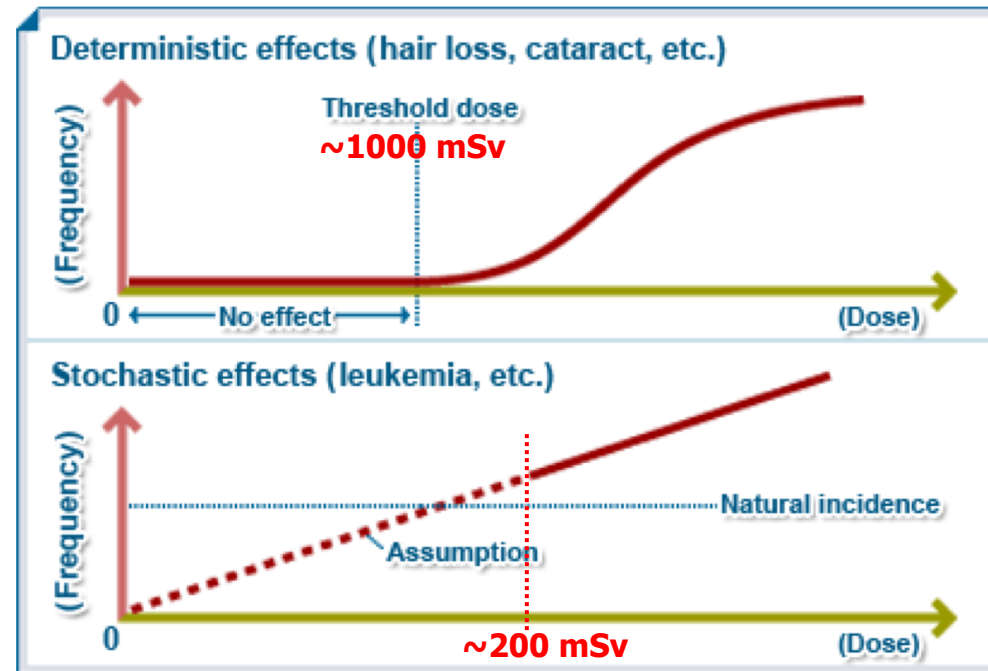


■ 確定性效應

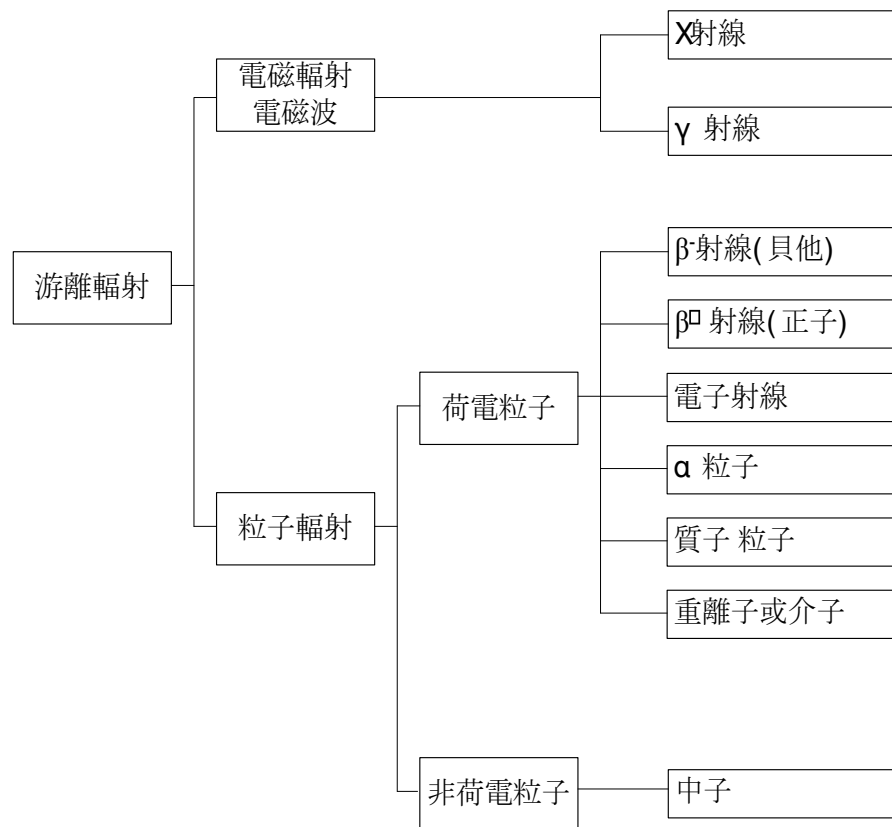
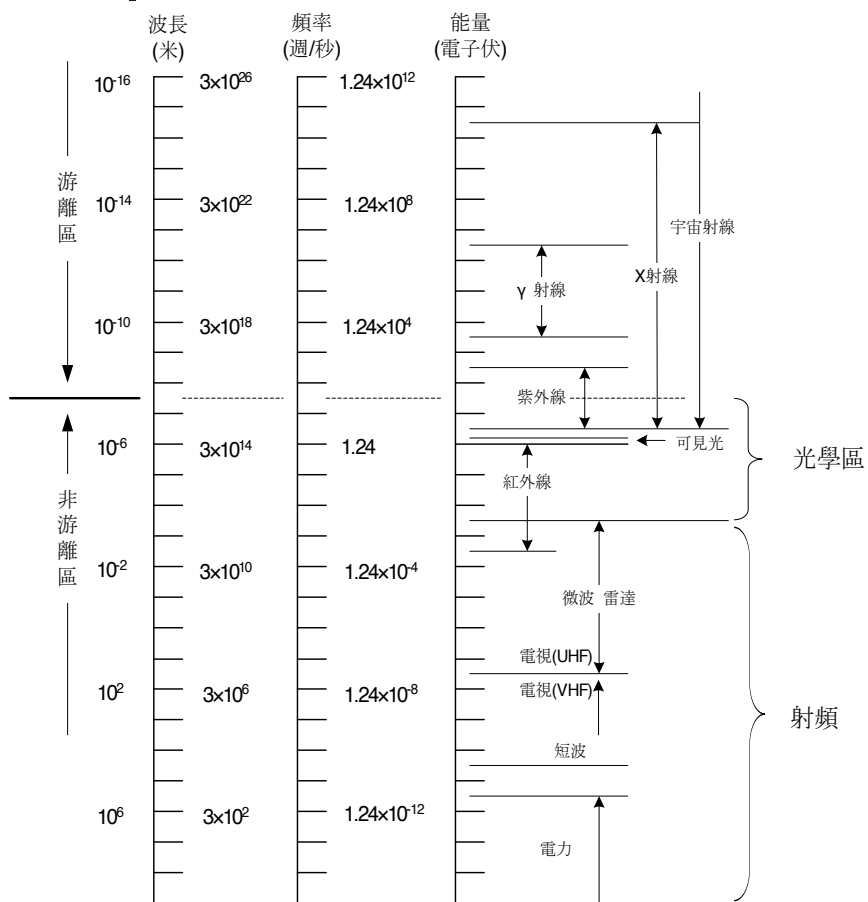
- 發生傷害的嚴重性與輻射劑量成比例，而且有低限劑量，例如噁心嘔吐、脫髮、血球變化等、細胞死亡等。

■ 機率性效應

- **保守假設** 傷害發生的可能性與輻射劑量成正比（沒有低限劑量），例如誘發癌症或遺傳疾病。目前研究結果對於 200 mSv 以內的輻射劑量，無科學證據證明有害。

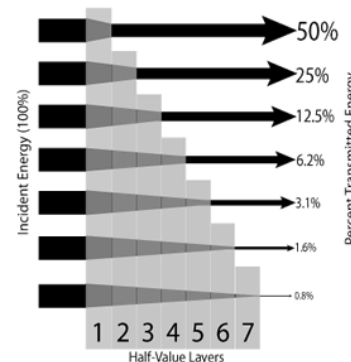
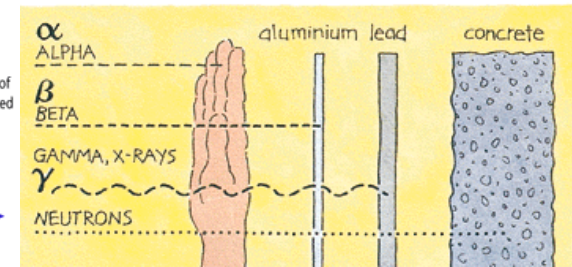
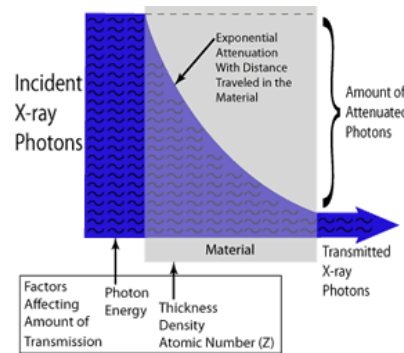
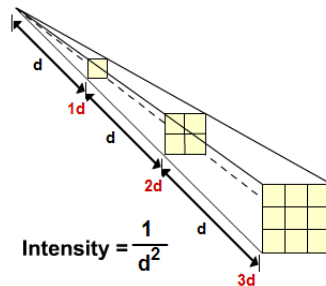
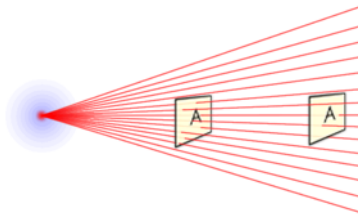
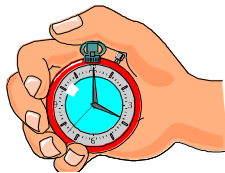


如何度量輻射？



游離輻射的分類

輻射防護三大原則： 時間、距離、屏蔽



Half-Value Layer (HVL) for γ -ray:

- 9 cm of soil
- 6 cm of concrete
- 1 cm of lead
- 0.2 cm of depleted uranium
- 150 m of air

輻射安全 管制

原子能委員會

- 許可：核發輻射源、設施與輻射作業，輻防人員、操作人員與運轉人員證照，審核輻防計畫與監測計畫。
- 管制：管制所有輻射相關的人、事、物。
- 檢查：派員檢查輻射作業及其操作。
- 罰則：不合規定者，應令限期改善，得令其停止作業；或依法進行罰則裁處。

事

物

人

輻射作業

輻射源

人員

設施經營者
自主管理與檢查

- 1、設置輻射防護管理組織或人員；
- 2、擬定輻射防護計畫；
- 3、確保輻射作業符合輻防標準：
 - 人員防護，
 - 地區管制：擬定場所劃分、管制、監測計畫及排放輻射安全評估。
- 4、執行證照管理；
- 5、申報一般與意外事項；
- 6、記錄保存

豁免

輻射源豁免管制標準、
或天然放射性物質、背景輻射

登記證

活度小於豁免管制量100倍的物質、
電壓小於150kV或粒子能量小於
150keV的設備

每五年執行輻射安全測試並換證

許可證

活度大於豁免管制量100倍的物質、
電壓大於150kV或粒子能量大於
150keV的設備

每年提報年度偵測證明、
每五年執行輻射安全測試並換證

高強度設施

活度大於一千兆貝克的物質、
加速電壓大於30MV或粒子能量
大於30MeV的設備

每年提報年度偵測證明？
每五年執行輻射安全測試並換證

輻防人員

每6年繼續教育：
輻防師：96小時
輻防員：72小時

輻射安全證書

每6年繼續教育：
操作放射性物質或
可發生游離輻射設備
之人員：36小時

運轉人員證書

每6年繼續教育：
高強度設施運轉人員：
36小時

年齡限制

(輻射工作人員認定基準)

輻射工作人員

未達輻射工作
人員認定基準
之人員 (年劑
量小於1毫西
弗者)

定期訓練
(3小時/年)

劑量監測

醫務監護

輻射管制區域

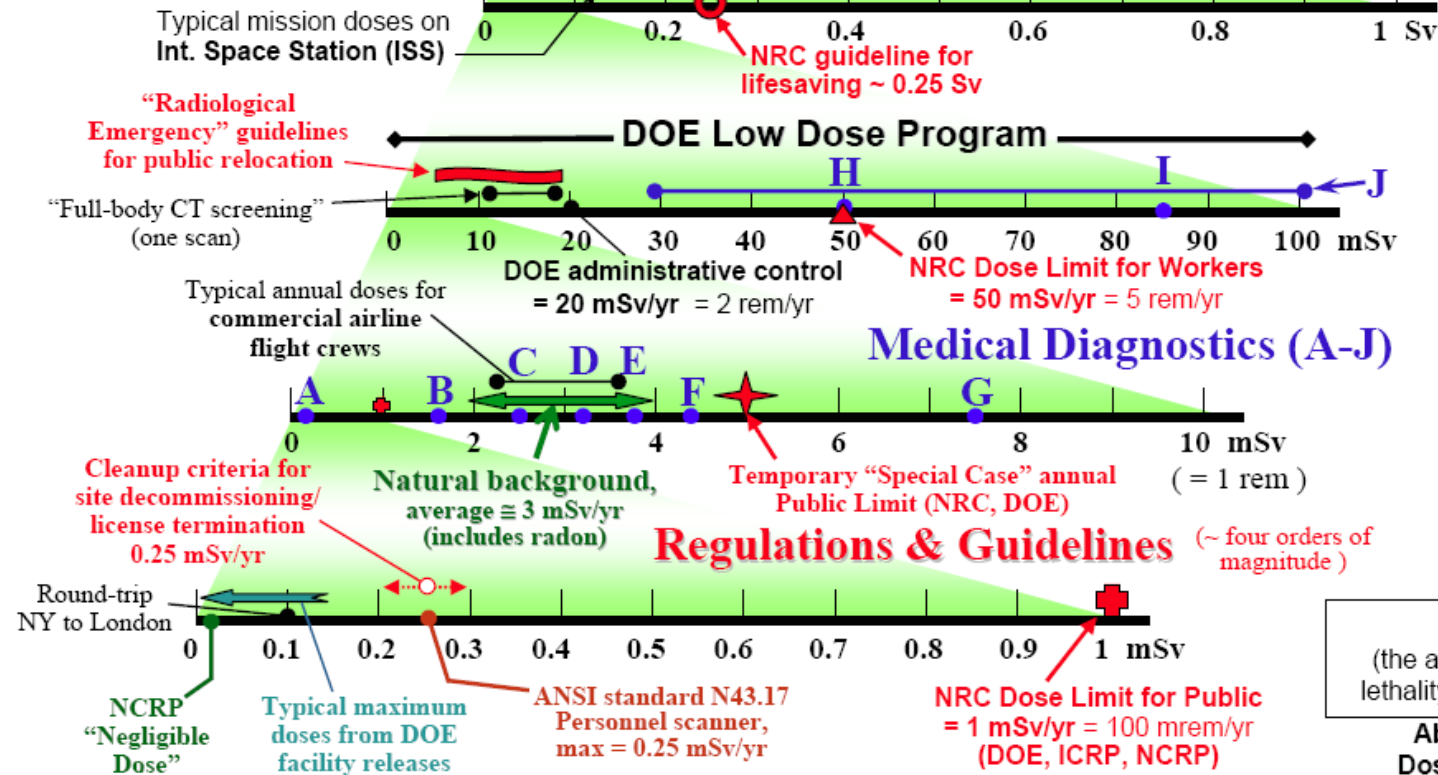
RADIATION CONTROL AREA



進入本區域前必須配戴：TLD 佩章或劑量筆
ENTER WITH TLD BADGE OR POCKET DOSIMETER

國家同步輻射研究中心 輻射及操作安全組

Ionizing Radiation Dose Ranges (Sievert)



Medical Diagnostics, mSv

A- Chest x-ray (1 film)	0.1
B- Dental oral exam	1.6
C- Mammogram	2.5
D- Lumbosacral spine	3.2
E- PET	3.7
F- Bone (Tc-99m)	4.4
G- Cardiac (Tc-99m)	7.5
H- Cranial CT (MSAD) (multiple scan average dose)	50
I- Barium contrast G-I fluoroscopy (2 min scan)	85
J- Spiral CT	30 - 100

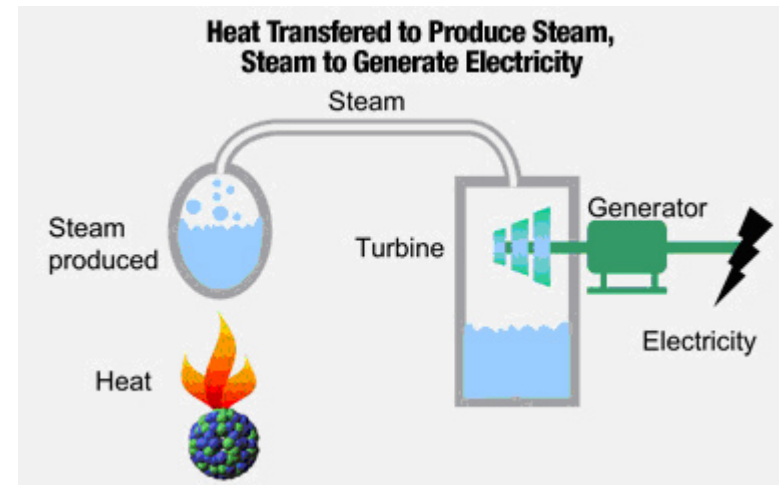
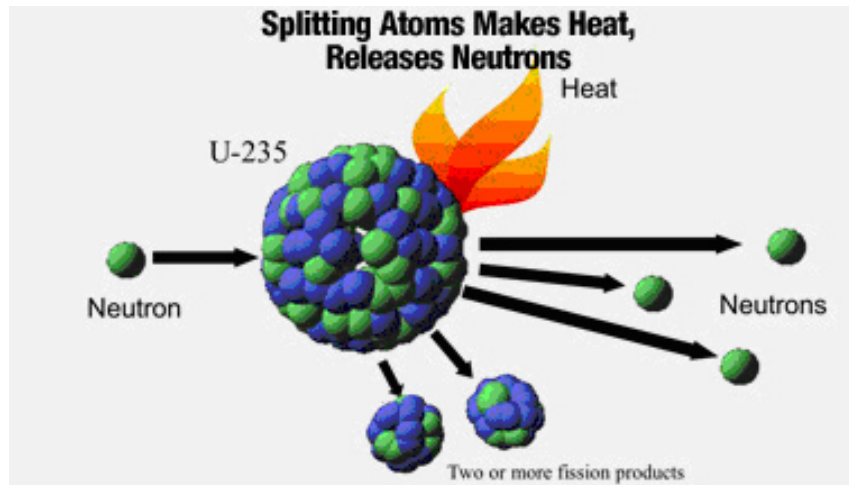
LD₅₀ = Lethal Dose to 50%
(the acute whole body dose that results in lethality to 50% of the exposed individuals)

Absorbed dose: 1 Gray = 100 rad
Dose equivalent: 1 Sievert = 100 rem

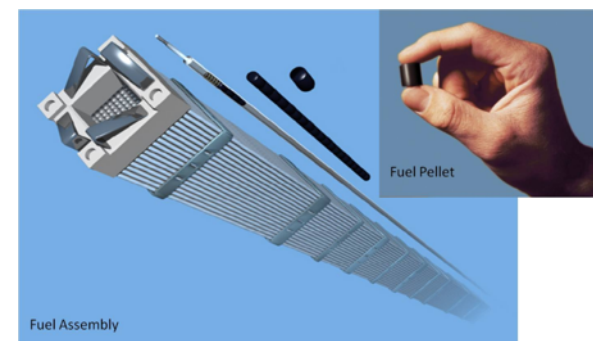
核能發電

核能發電的原理

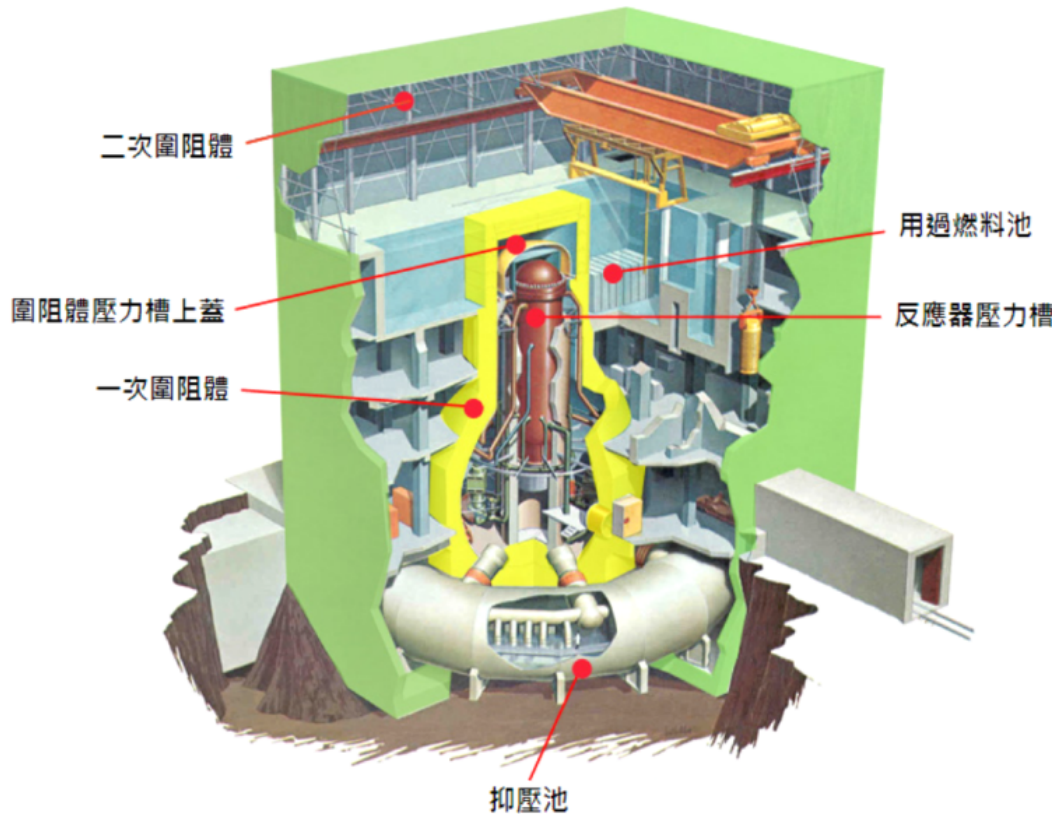
- 愛因斯坦的質能公式： **$E=mc^2$**
- 一個原子核分裂會釋放約200 MeV的能量，遠遠大於化學反應所能釋放的能量。
- 核反應所釋放的能量用來加熱水產生蒸氣，蒸氣推動渦輪旋轉發電。



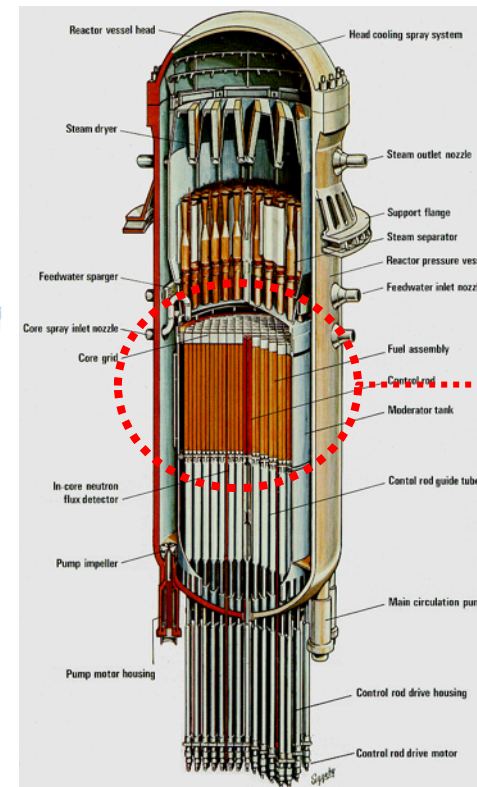
核能電廠的結構



核燃料



反應器廠房

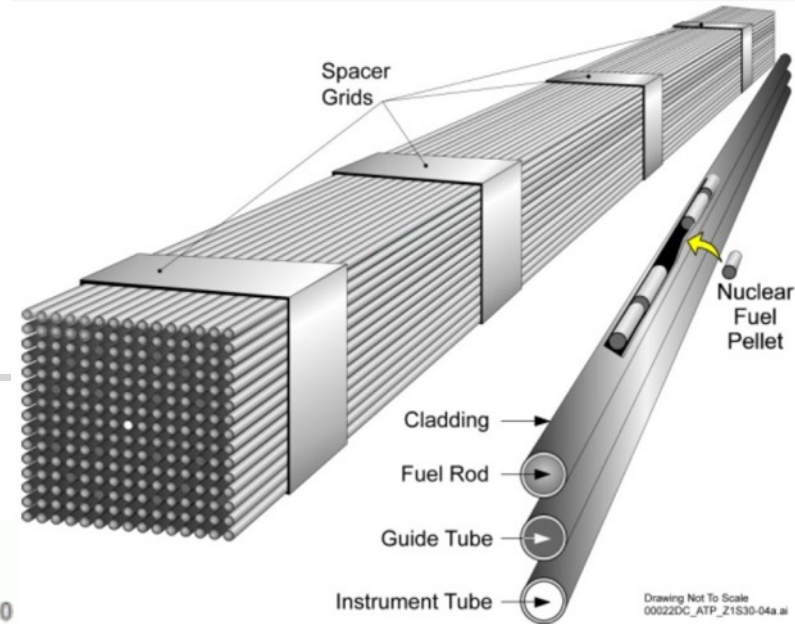


反應器爐心

核燃料束

www.nfi.co.jp & sanonofresafety.org

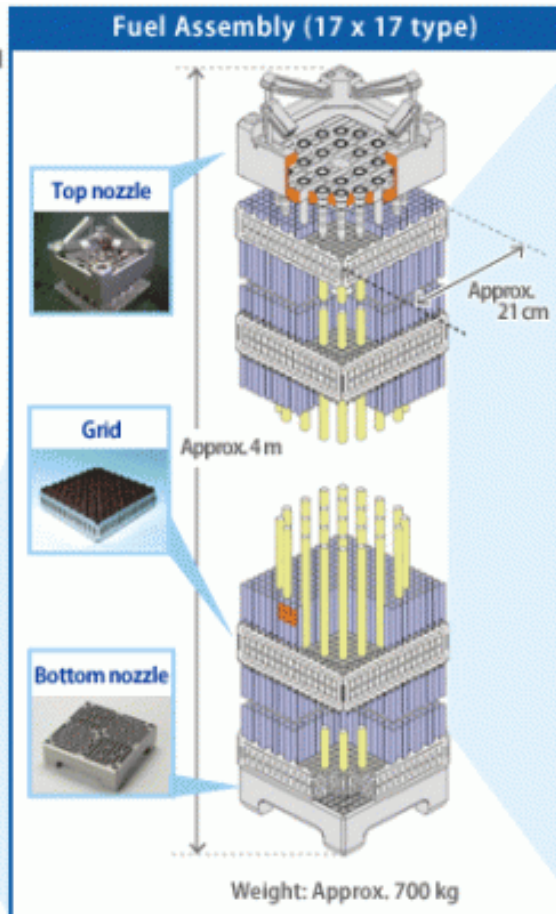
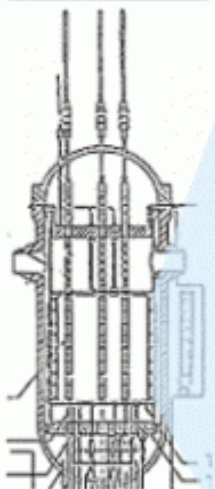
■ PWR fuel assembly



Drawing Not To Scale
000220C_ATP_Z1S30-04a.ai

The 264 fuel rods are bundled with grids, and the fuel assembly is equipped with top and bottom nozzles.

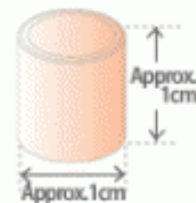
Pressurized water reactor (PWR)



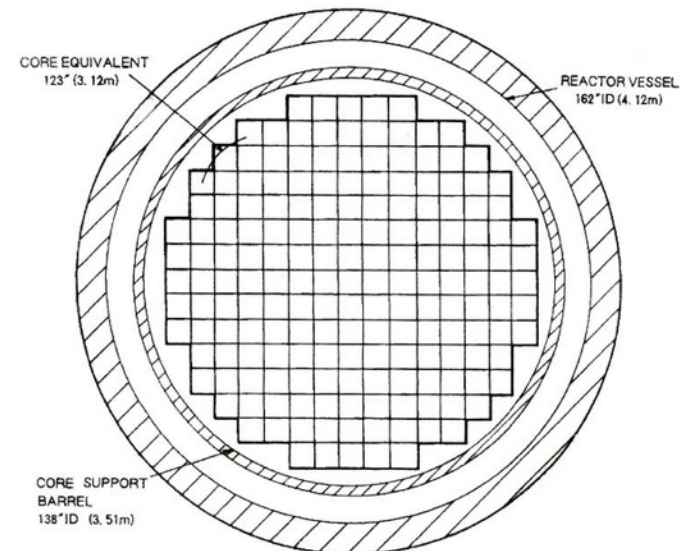
Fuel Rod

▲ A cladding tube contains about 400 pellets with both ends plugged. Those pellets are fixed with springs.

Pellet

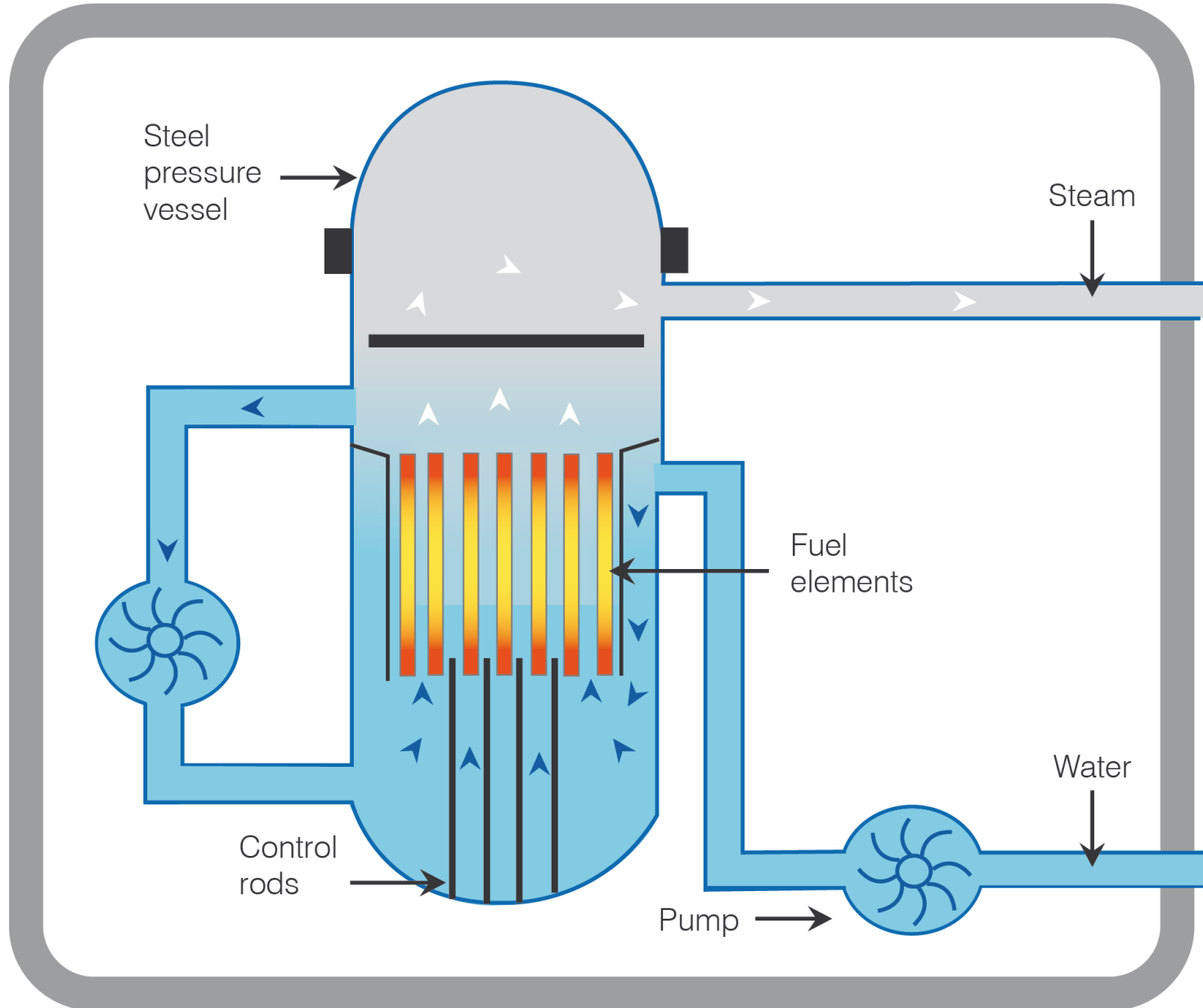


▲ Uranium powder is baked into the pellet form in a cylindrical shape. About five grams of the pellet can produce electricity that could support a normal household life for six months.

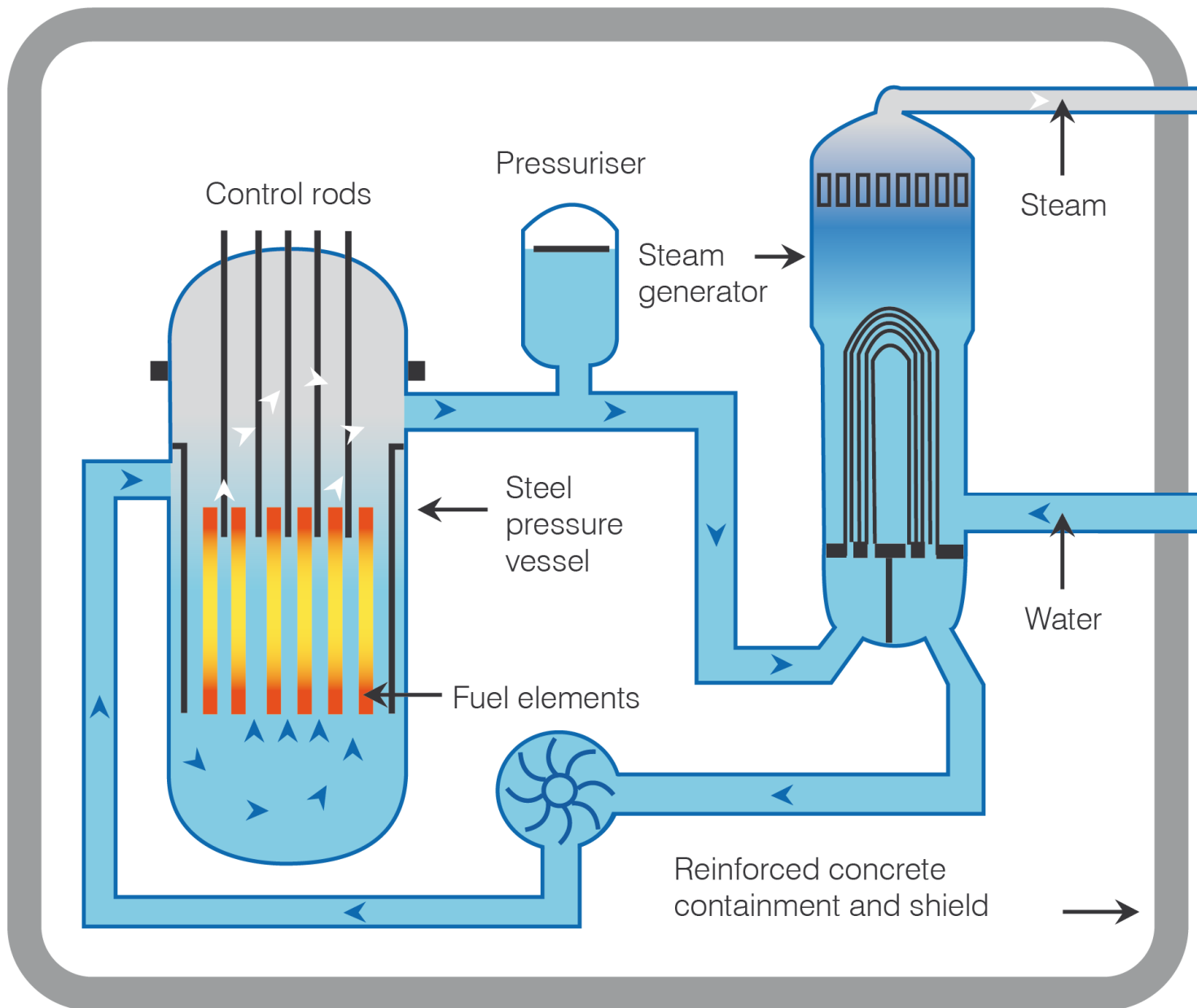


A large PWR may have 150-250 fuel assemblies with 80-100 tones of U.

A Boiling Water Reactor (BWR)



A Pressurized Water Reactor (PWR)



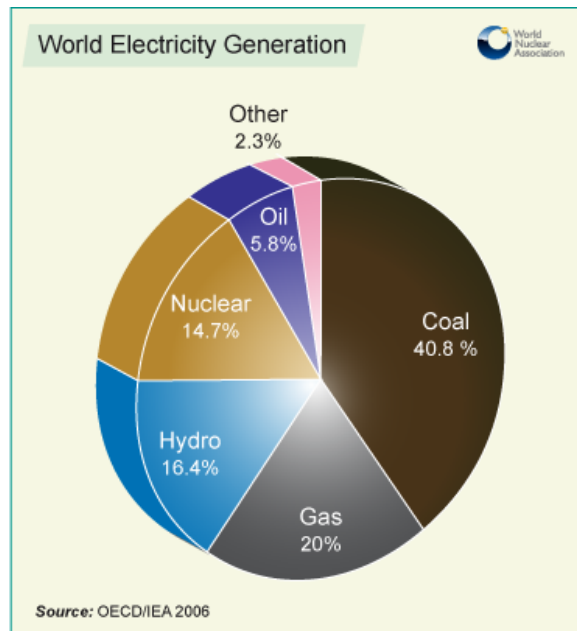
表一：核能發電燃料與傳統燃料的功率密度比較。

燃料量	產生電力
1 公噸煤礦	2070 度
1 桶原油	580 度
1 立方公尺天然氣	0.1 度
1 粒核燃料丸	2044 度

(資料來源：台電公司)

核能發電的優勢

- 煤、石油、天然氣、核能或其它能源都可以用來發電。核能發電的主要優勢在於能量密度高，燃料體積小重量輕，運輸貯存方便，可視為自產能源，而且發電過程不產生CO₂。



A typical pellet of uranium weighs about 7 grams (0.24 ounces). It can generate as much energy as...



3.5 barrels of oil, or...

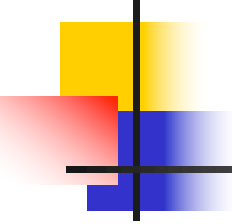


17,000 cubic feet of natural gas, or...



1,780 pounds of coal.

Source: www.cameco.com



媒體誤導案例

- 以目前科技來說，風能與太陽能或許是唯二在台灣可行的再生能源，越多越好。但是，還是需要類似容量的傳統電廠當備援(萬一老天不幫忙)。媒體常常誇大再生能源的能力，例如
- 地熱：自由時報(2016/05/23)地熱潛能：全台蘊含量可抵9.7座核四廠...聯合報(2016/10/20)首座地熱電廠通過環評，每年供電相當核二廠...
- 黑潮：蘋果日報(2016/08/31)黑潮好有力，實測發電獨步全球...聯合報(2016/09/01)黑潮發電創世界首例...
- 太陽能：自由時報(2017/09/10)自家裝設34呎太陽能板，約花費250萬，若全台有8萬戶裝設，總經費2000億，發電量就等同1座核4廠。

媒體誤導案例



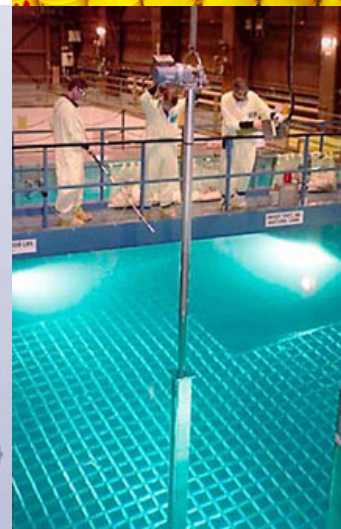
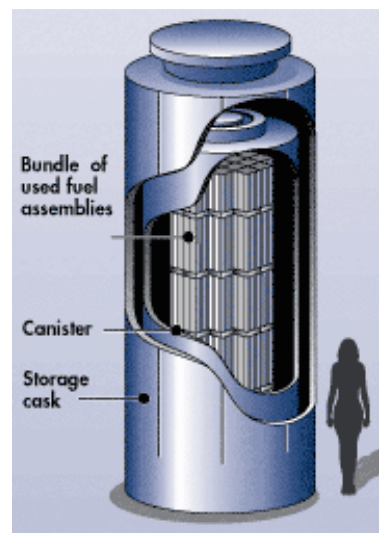
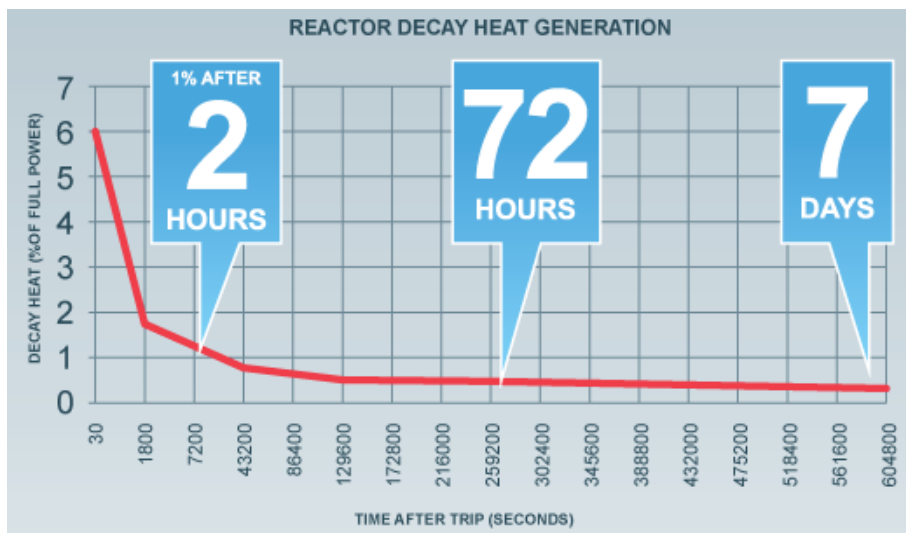
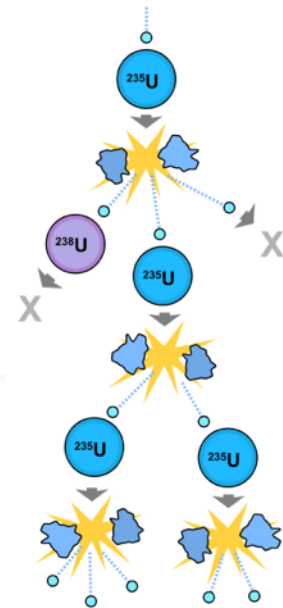
Facts:

- 容量因數：核能 $>85\%$ 、太陽光電 $\sim 13\%$ (2016)、風能 $\sim 27\%$ (2016)

- ✓ 核二廠： $2 \times 985 \text{MW}_e \times 8760 \text{h} \times 85\% \sim 147$ 億度電
- ✓ 地熱：第一口 1MW ，逐年擴大...2025每年供8億度電，相當一座核二廠
- ✓ 黑潮： 26.31kW ...若2030在台灣東岸建置20座...可取代核能發電提供全台七成用電
- ✓ 核四廠： $1350 \text{MW}_e \times 2 \times 85\% \sim 2295 \text{MW}_e$
- ✓ 太陽能： $34 \text{kW}_e \times 80,000 \times 13\% \sim 354 \text{MW}_e$

核能發電的疑慮

- 核反應器不可能像原子彈那樣爆炸，這是基於不爭的物理學事實，因為要維持連鎖反應不容易。
- 核能發電最主要安全挑戰在於衰變熱的控制與核廢料的處理。



What about nuclear waste?

<http://decarbonisesa.com/what-about-nuclear-waste/>

- The problem of nuclear waste has been solved! At least, compared to how we manage many other types of waste you are responsible for.

Annual Coal Waste: Loy Yang 2.2 GW

577,800m³ of fly ash

9,079 ML of wastewater

2,070 tons of fly ash

56,428 tons of SO₂

29,398 tons of NO_x

2,577 tons of CO

18,232,826 tCO₂e

Source: LYP 2009 Annual Report

Nuclear waste! much smaller in size



This is roughly the same process that we treat for most hazardous solid waste.



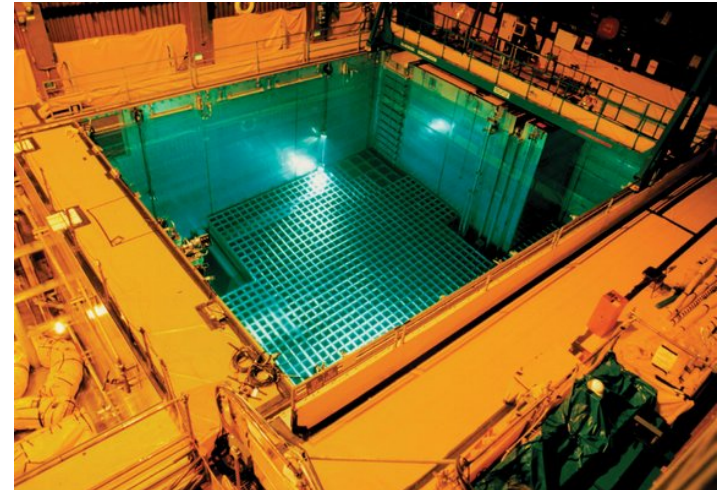
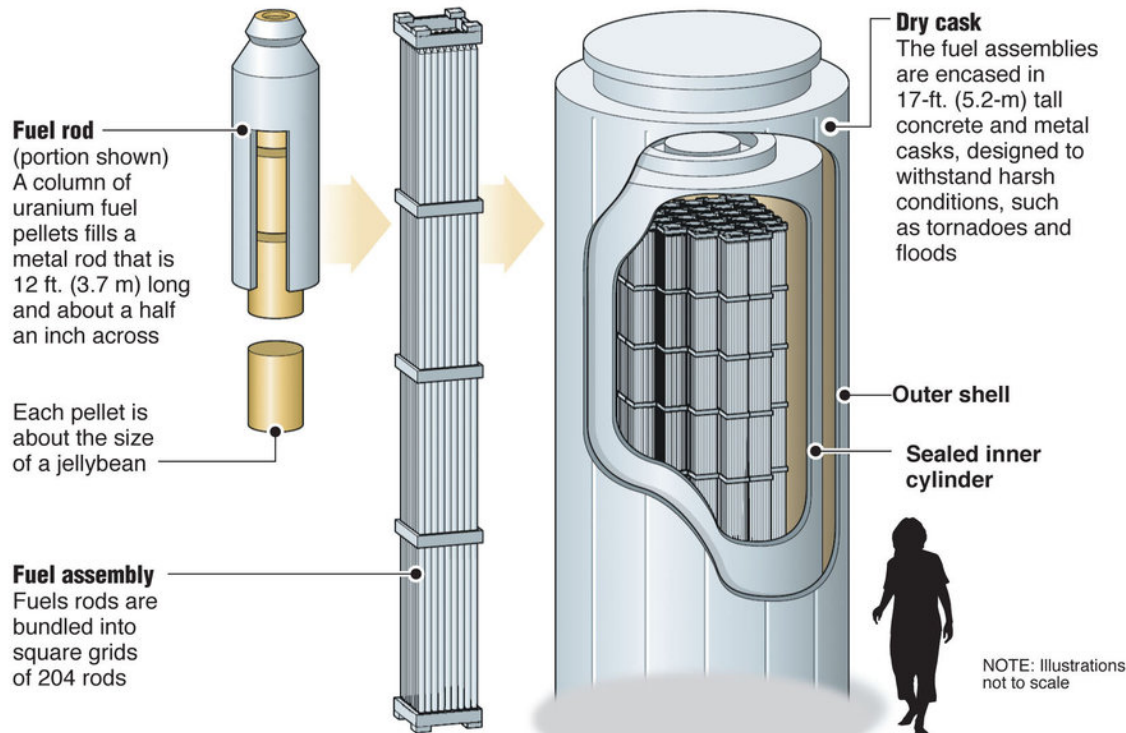
Dilute and disperse – a trade-off we are happy to accept in the case of cars

Independent spent fuel storage installation (ISFSI)

<http://decarbonisesa.com/what-about-nuclear-waste/>

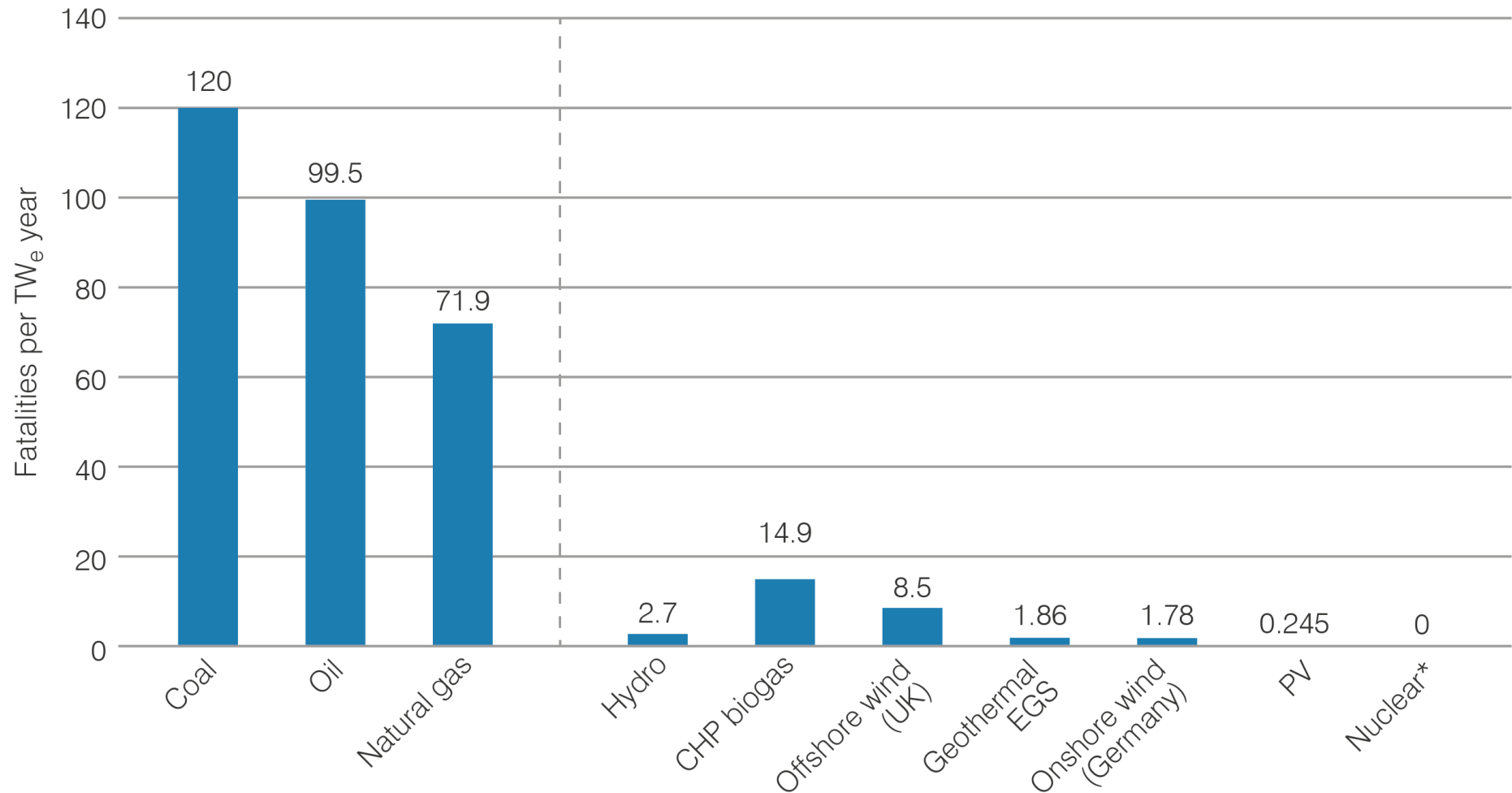
Dry cask storage

When nuclear fuel is spent or no longer useful for generating electricity, it is placed in pools of water and boric acid for at least five years until it is cool enough to be moved into long-term storage. Critics have questioned the safety of such pools and want to see more spent fuel moved into bunkerlike dry casks, which they say are safer.



Risk Comparison by Energy Sources

Energy Accident Fatalities for OECD Countries

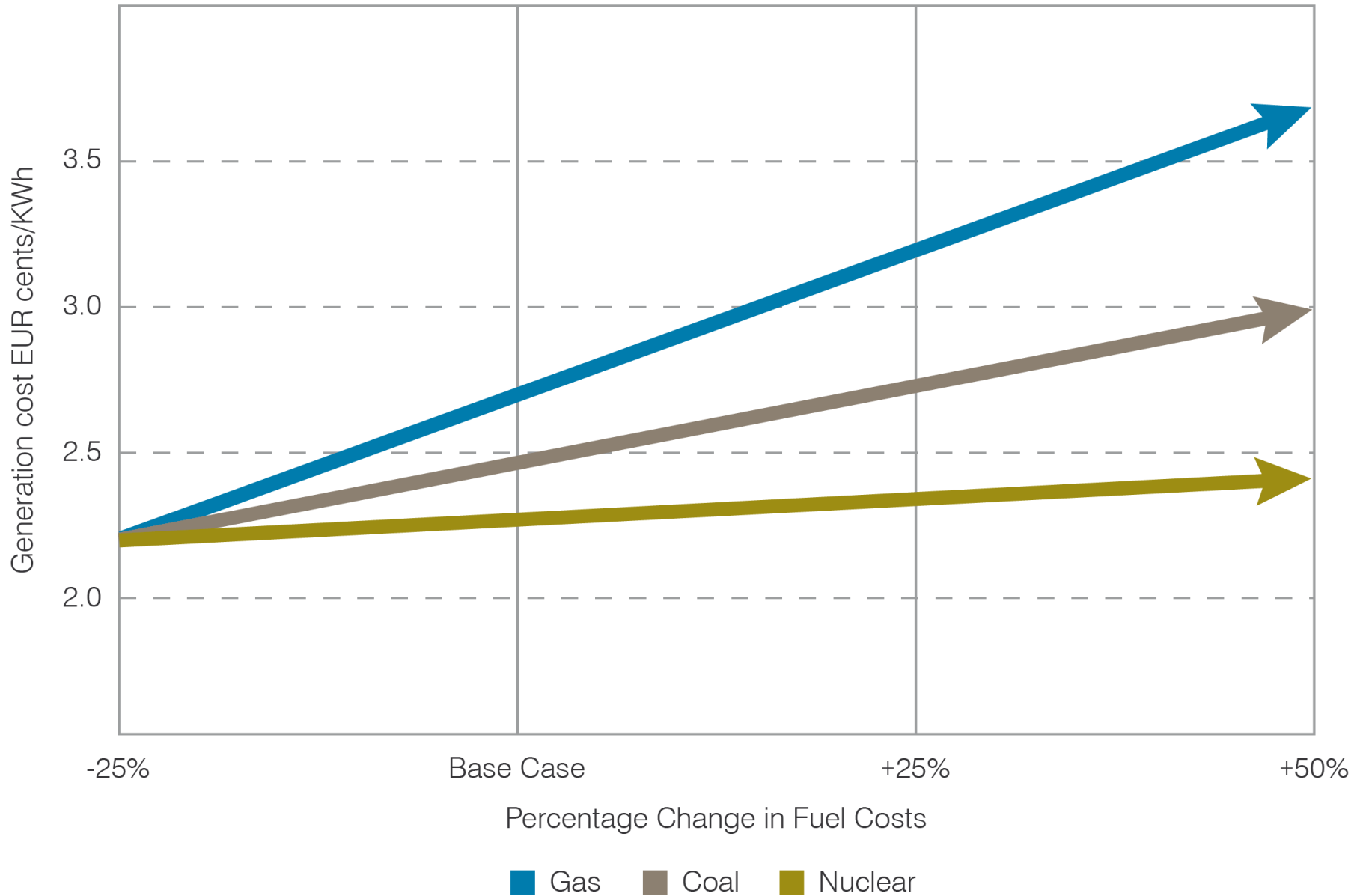


* Gen II PWR, Swiss

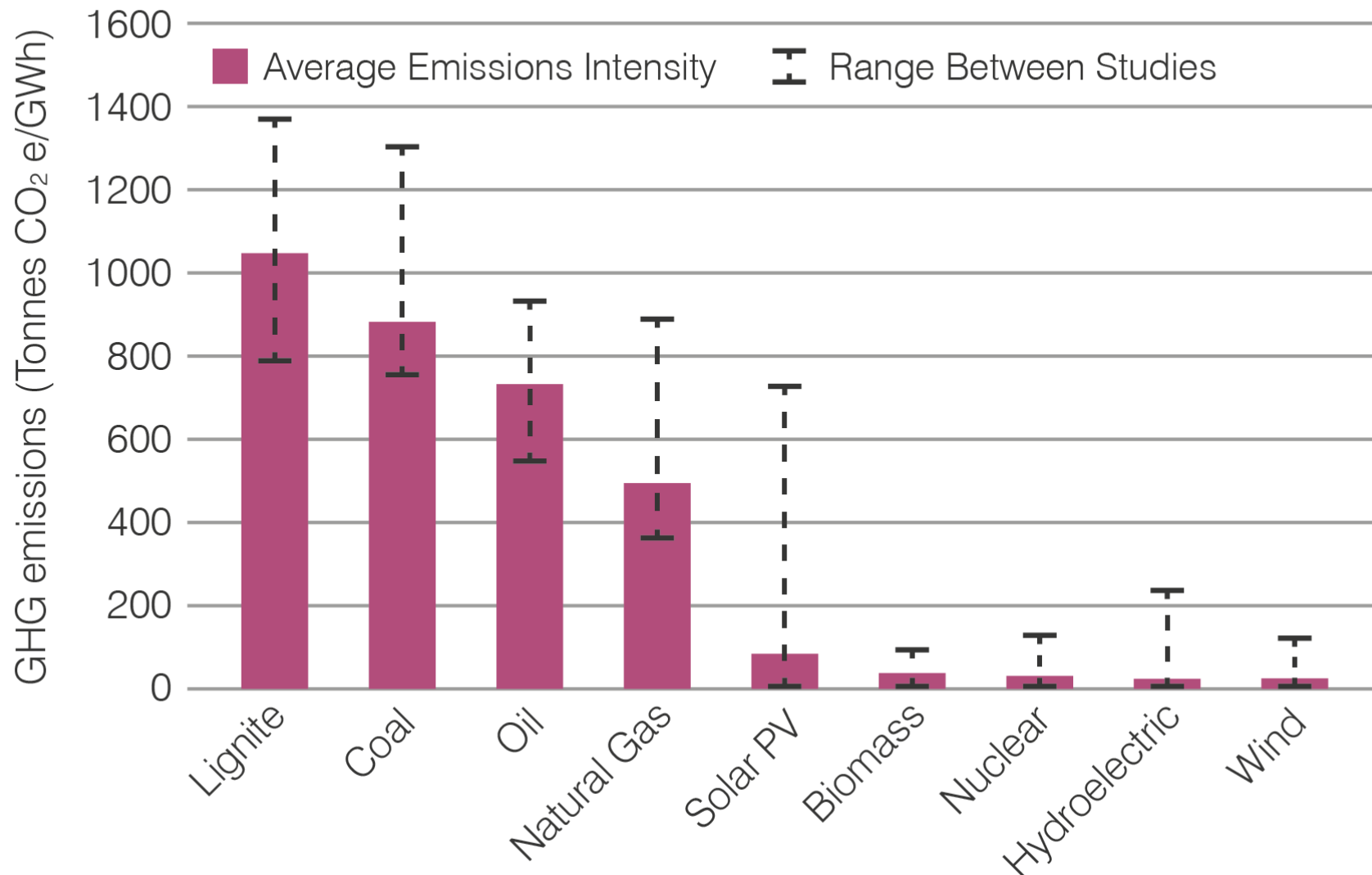
Source: Paul-Scherrer Institut. Data for nuclear accidents modified to reflect UNSCEAR findings/recommendations 2012 and NRC SOARCA study 2015

The Impact of Fuel Costs on Electricity Generation Costs

Finland early 2000

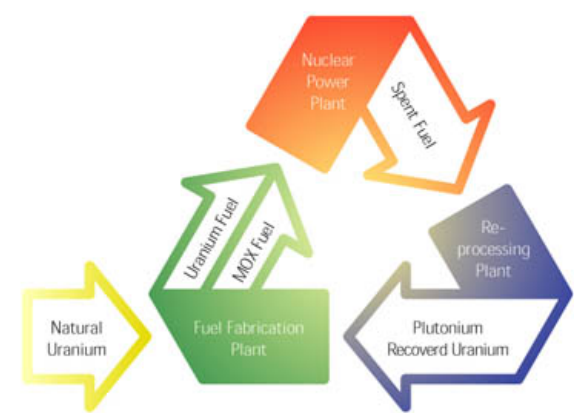


Lifecycle Greenhouse Gas Emissions Intensity of Electricity Generation Methods

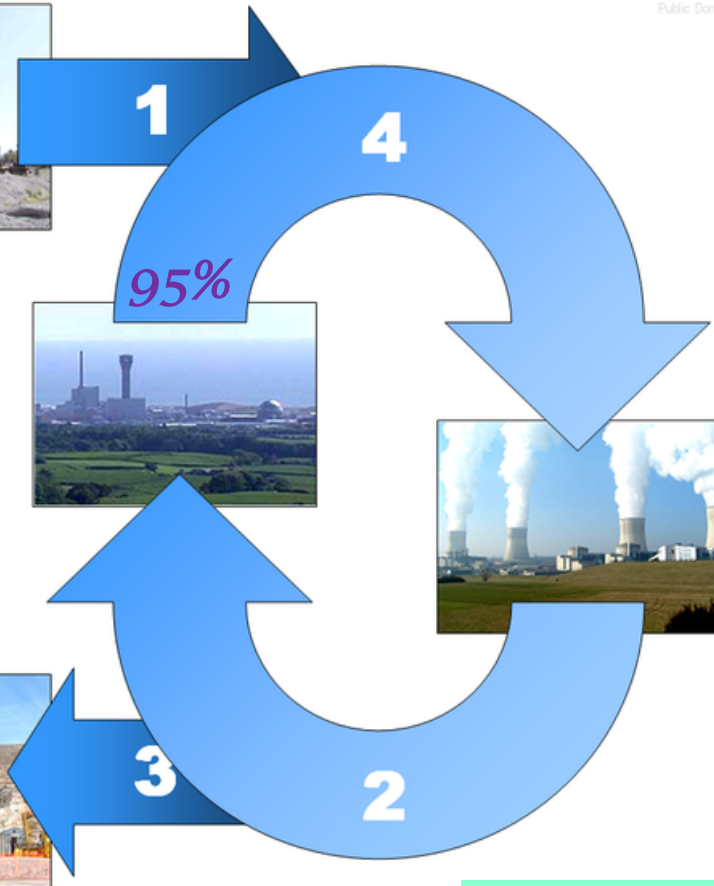


Source: World Nuclear Association meta study, incl. IPCC 2014

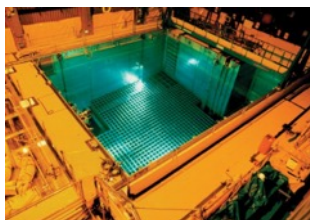
核電的生命週期



1. 鈾礦開採、濃縮、核燃料製作
2. 核能電廠使用發電
3. 短中期與最終處置
4. 或核廢料再處理

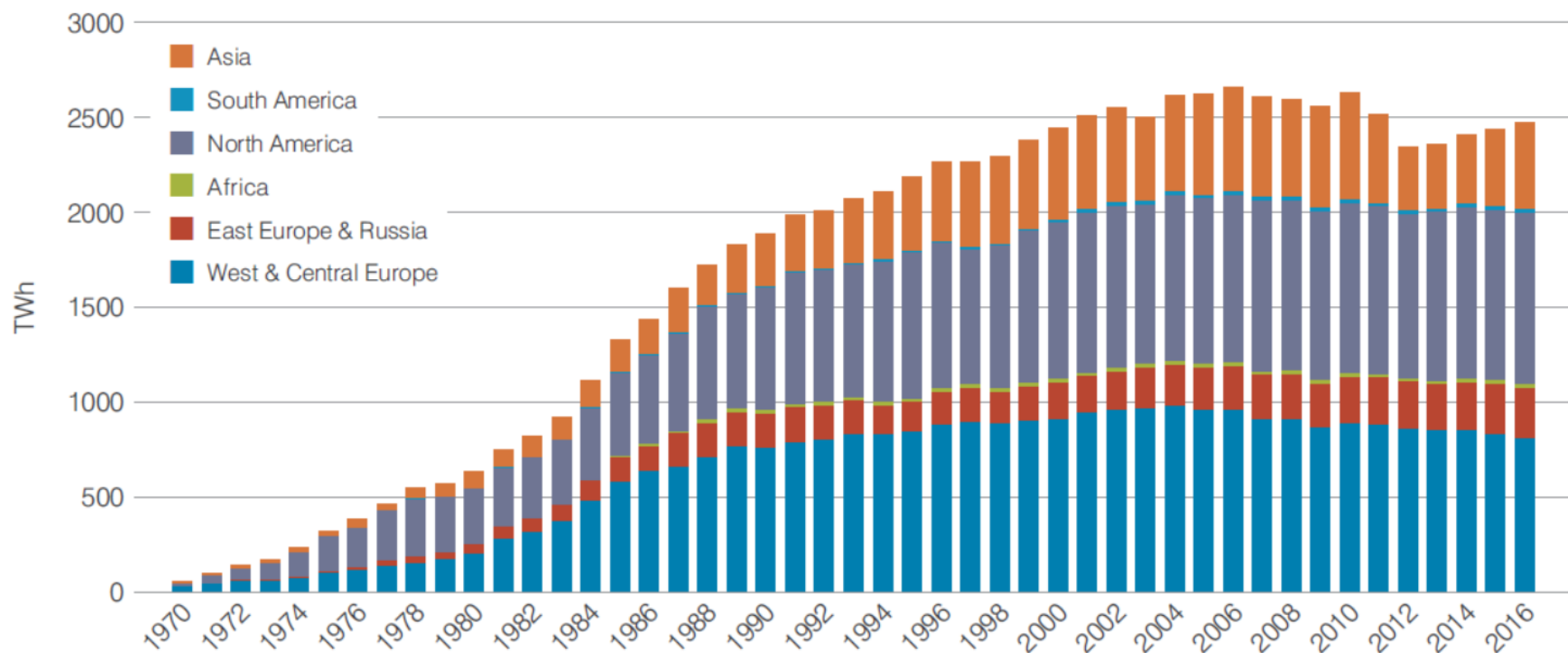


思考並客觀比較
其它發電方式的生命週期?



World Nuclear Report 2017

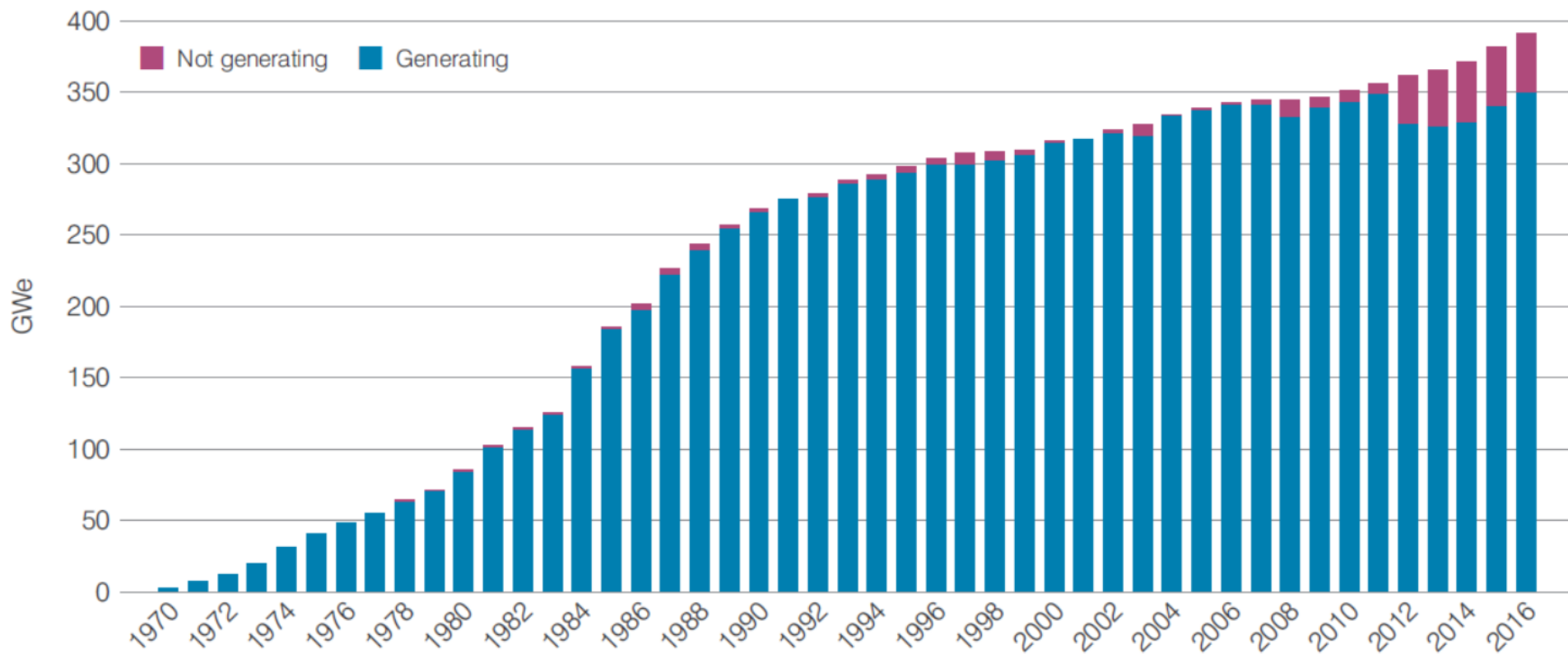
Figure 1. Nuclear electricity production



Source: World Nuclear Association, IAEA Power Reactor Information Service (PRIS)

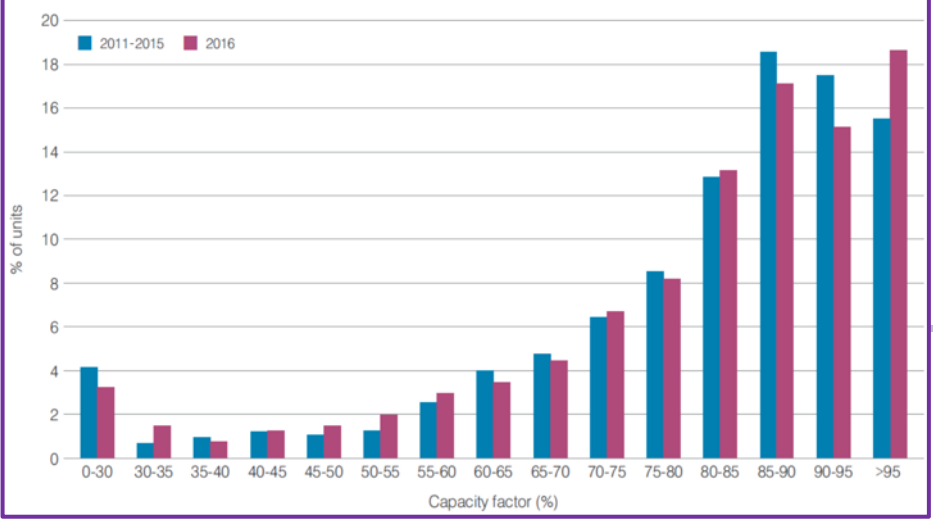
World Nuclear Report 2017

Figure 2. Nuclear generating capacity



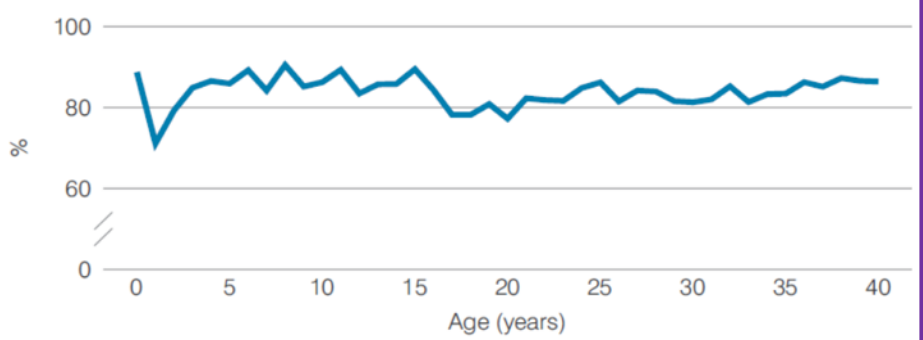
Source: World Nuclear Association, IAEA PRIS

Figure 9. Percentage of units by capacity factor



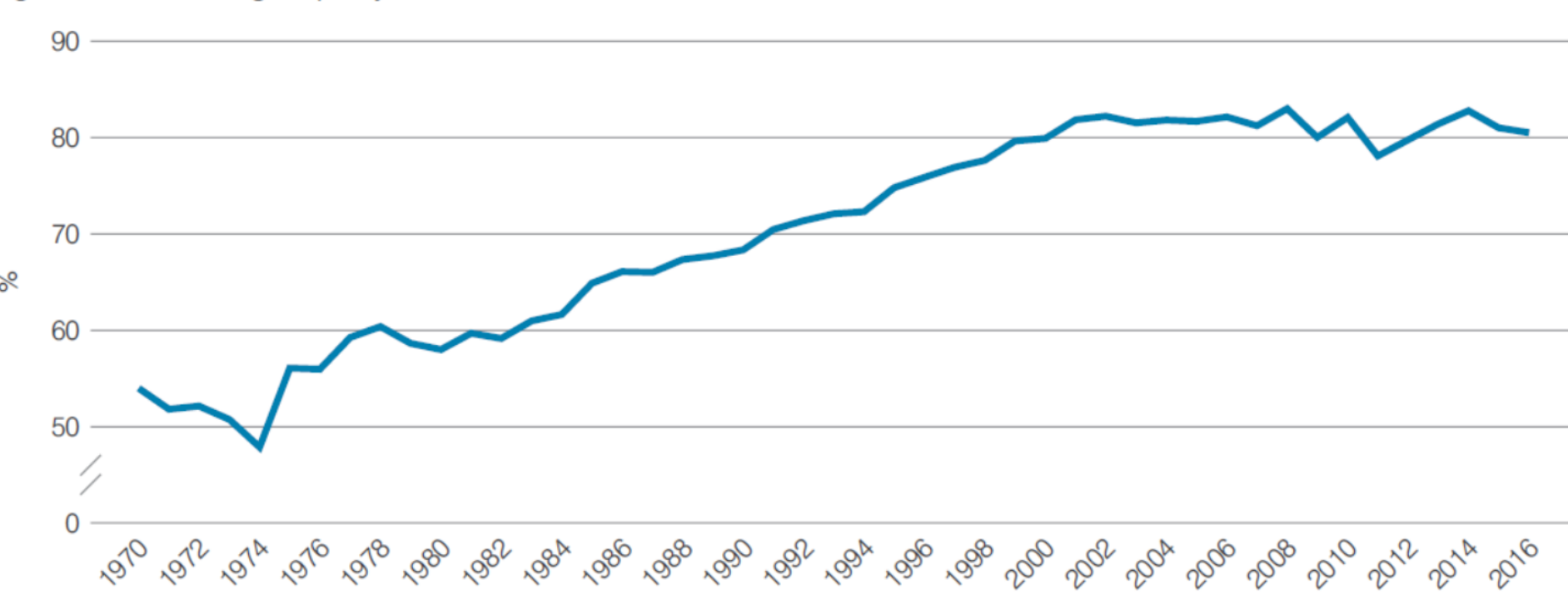
There is no significant age-related trend in nuclear reactor performance. The median capacity factor for reactors over the last ten years shows no significant age-related variation.

Figure 8. Median capacity factor 2007-2016 by age of reactor

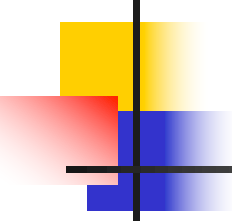


Source: World Nuclear Association, IAEA PRIS

Figure 5. Global average capacity factor



Source: World Nuclear Association, IAEA PRIS



核能發電的現況(Apr. 2018)

- ~450座反應器於30個國家運轉，總裝置容量為391 GW_e，佔世界總發電量約11%。
- ~60座反應器於15個國家興建中，150~160座反應器在規劃中。
- 從1951年開始，民用核反應器迄今已累積了17,000反應器年的運轉經驗，其安全記錄是主要工業設施中最好的。
- 嚴重核能事故：
 - Three Mile Island accident (1979)
Deaths: 0; I-131 release: 17 Ci
 - Chernobyl disaster (1986)
Deaths: 56 direct, 4000 cancer; I-131 release: 7×10^6 Ci
 - Fukushima Daiichi disaster (2011)
Deaths: 3*; I-131 release: ~10% of the Chernobyl accident
non-radiation causes!

歷史性複合天然災難

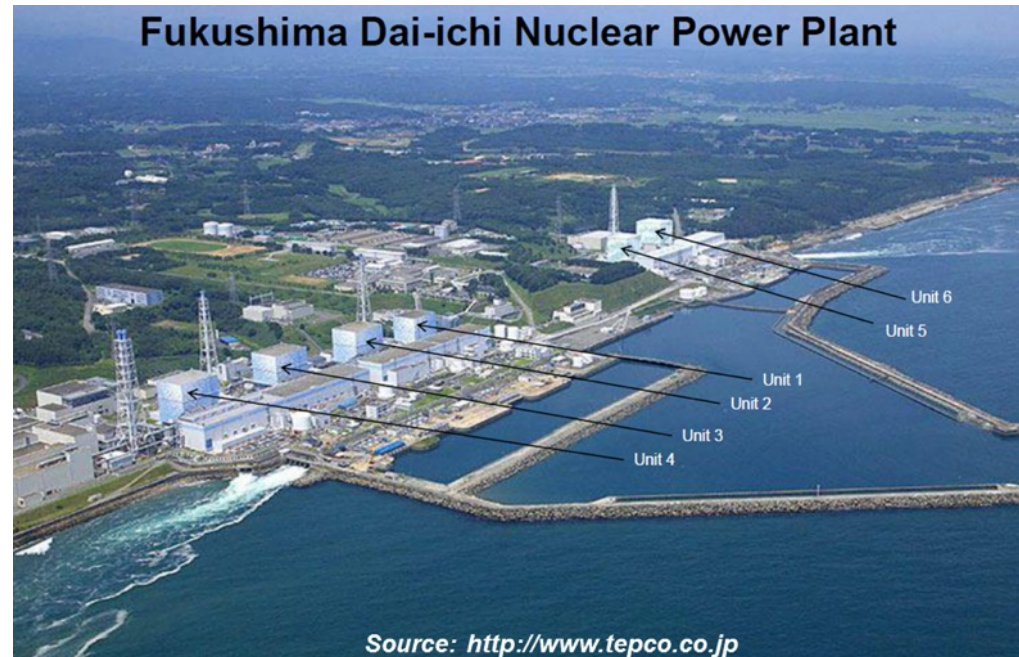
- Aftermath of the 2011 Japan earthquake and tsunami:
死亡人數~20,000人，難民超過300,000人，財損估計至少\$300 billion，後續影響...



日本福島核能意外



- 事故影響
 - 3部機組(Unit-1,2,3)爐心熔毀，輻射外洩
- 事故主因
 - 發生超過**設計基準**的天然災害+人為疏失+...



日本福島核能意外

■ 檢討與改進

- 全球的核能使用國家均立即檢討核能電廠防震與防海嘯的設計基準，確保緊急應變相關設備與程序的可靠，以防止類似的事件再次發生。以台灣為例，

台電核能電廠較日本福島一廠深度防禦多5項防護縱深

設備高程51~116公尺

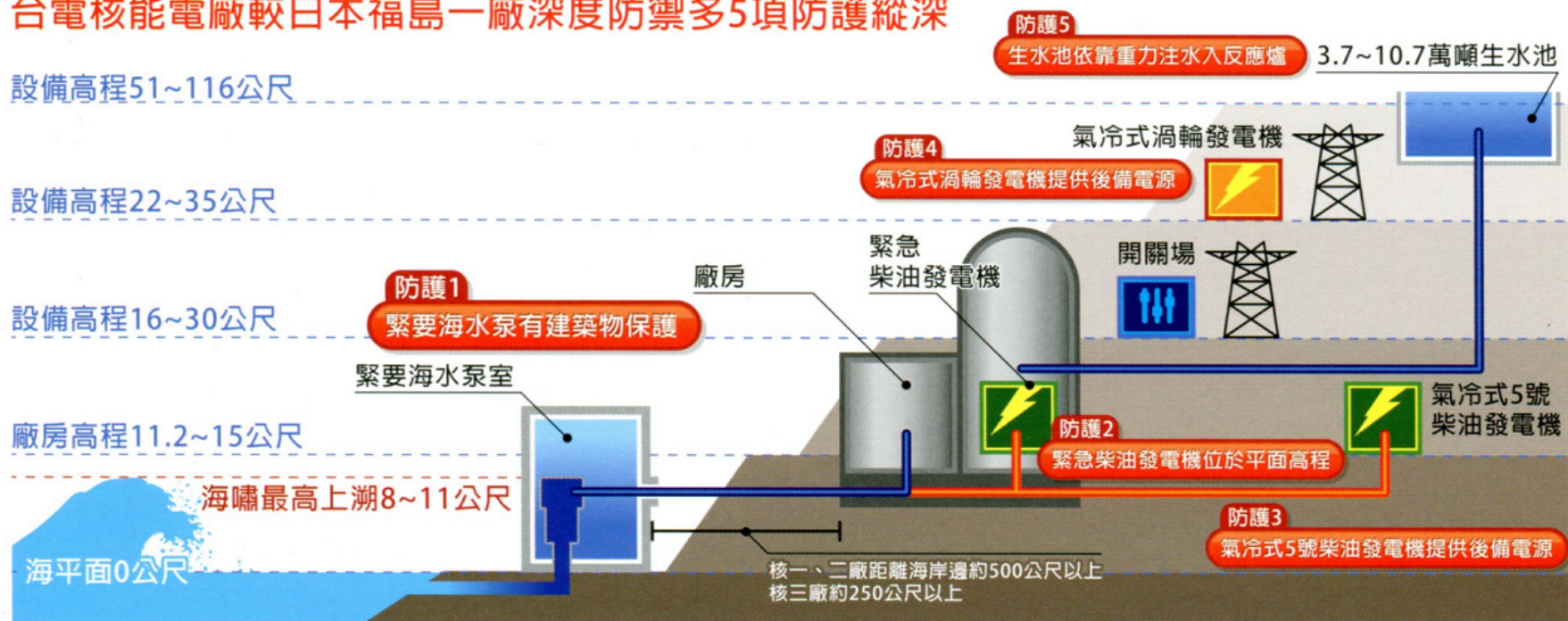
設備高程22~35公尺

設備高程16~30公尺

廠房高程11.2~15公尺

海嘯最高上溯8~11公尺

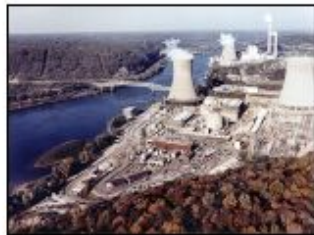
海平面0公尺



核能電廠設計的演進

Generation I

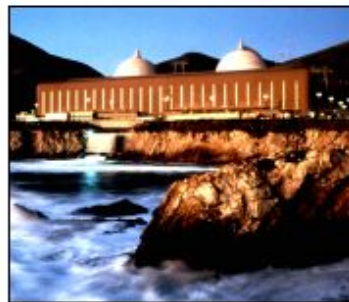
Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III

Advanced LWRs



- ABWR
- System 80+
- AP600
- EPR

Near-Term Deployment

Generation III+ Evolutionary Designs Offering Improved Economics

Generation IV

- Highly Economical
- Enhanced Safety
- Minimal Waste
- Proliferation Resistant

Gen I

Gen II

Gen III

Gen III+

Gen IV

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

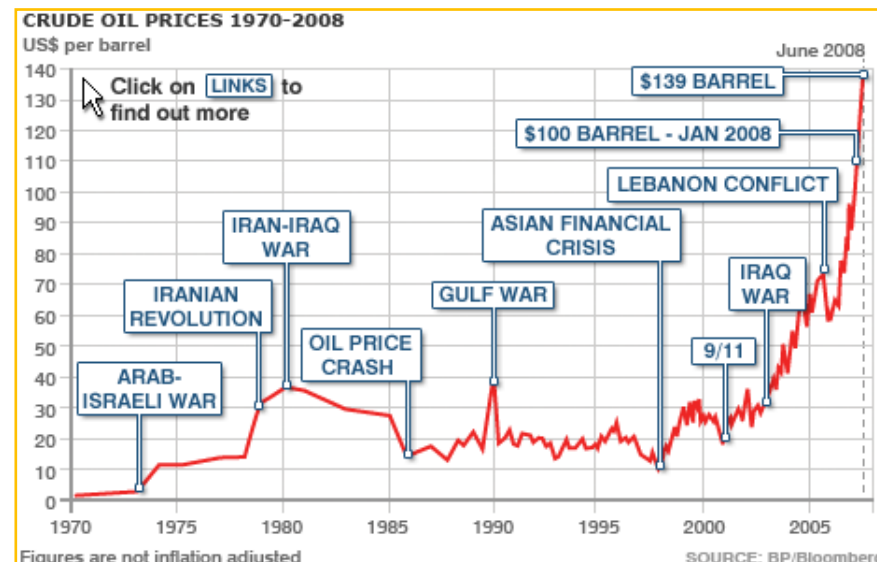
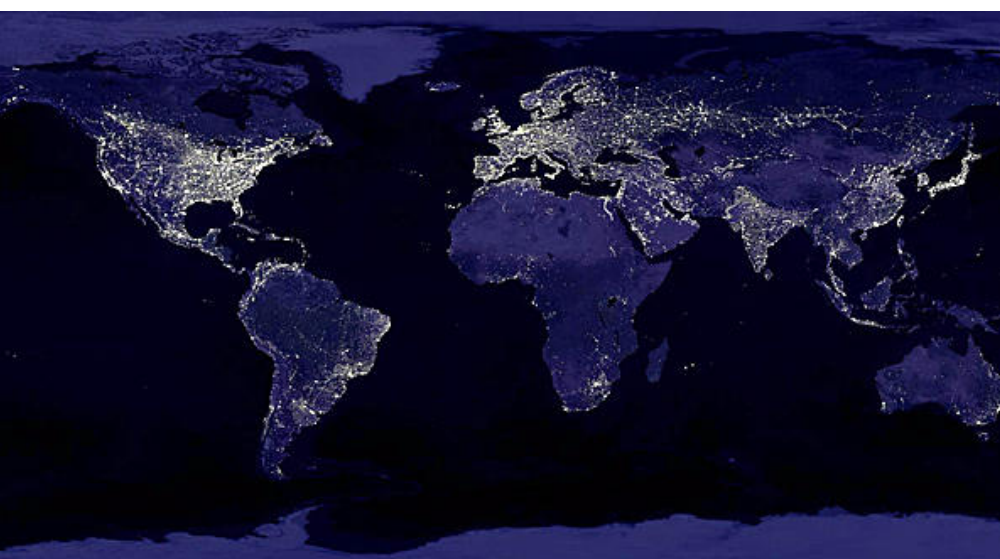
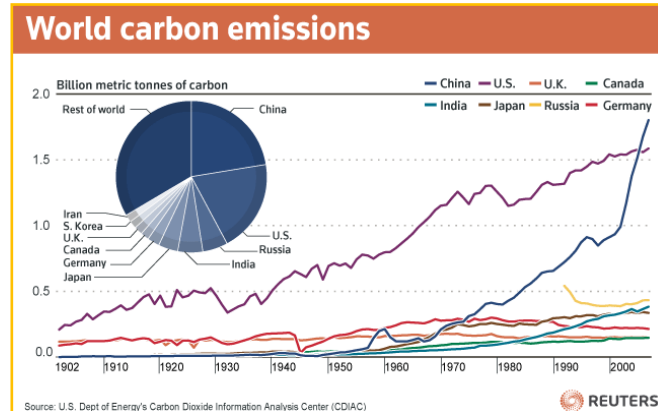
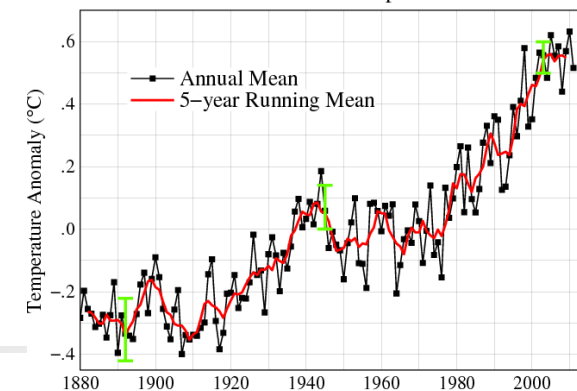
2030

全球能源與環境危機

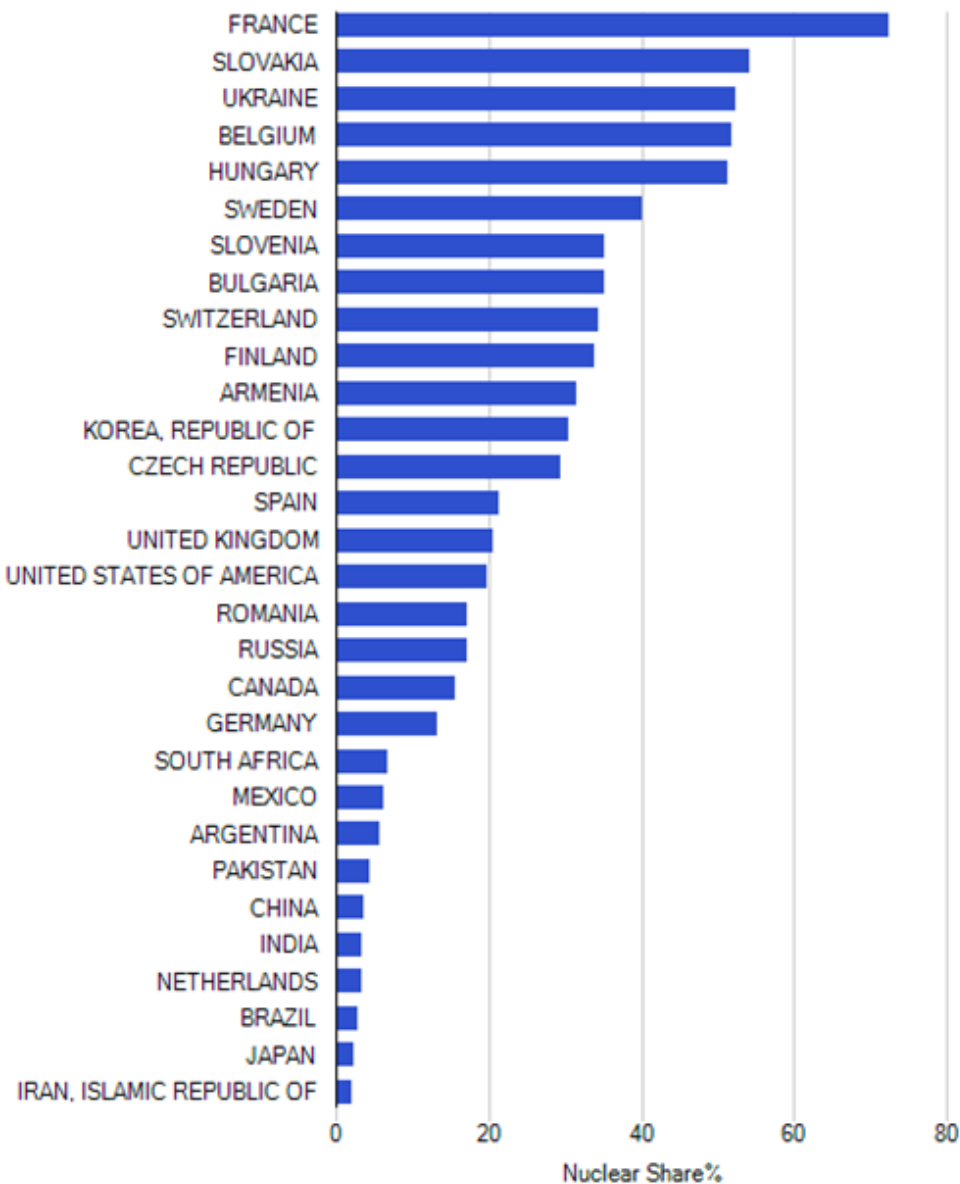
- 能源需求與供給安全
- 氣候變遷與節能減碳
- 再生能源有其侷限性

整體多元考量!

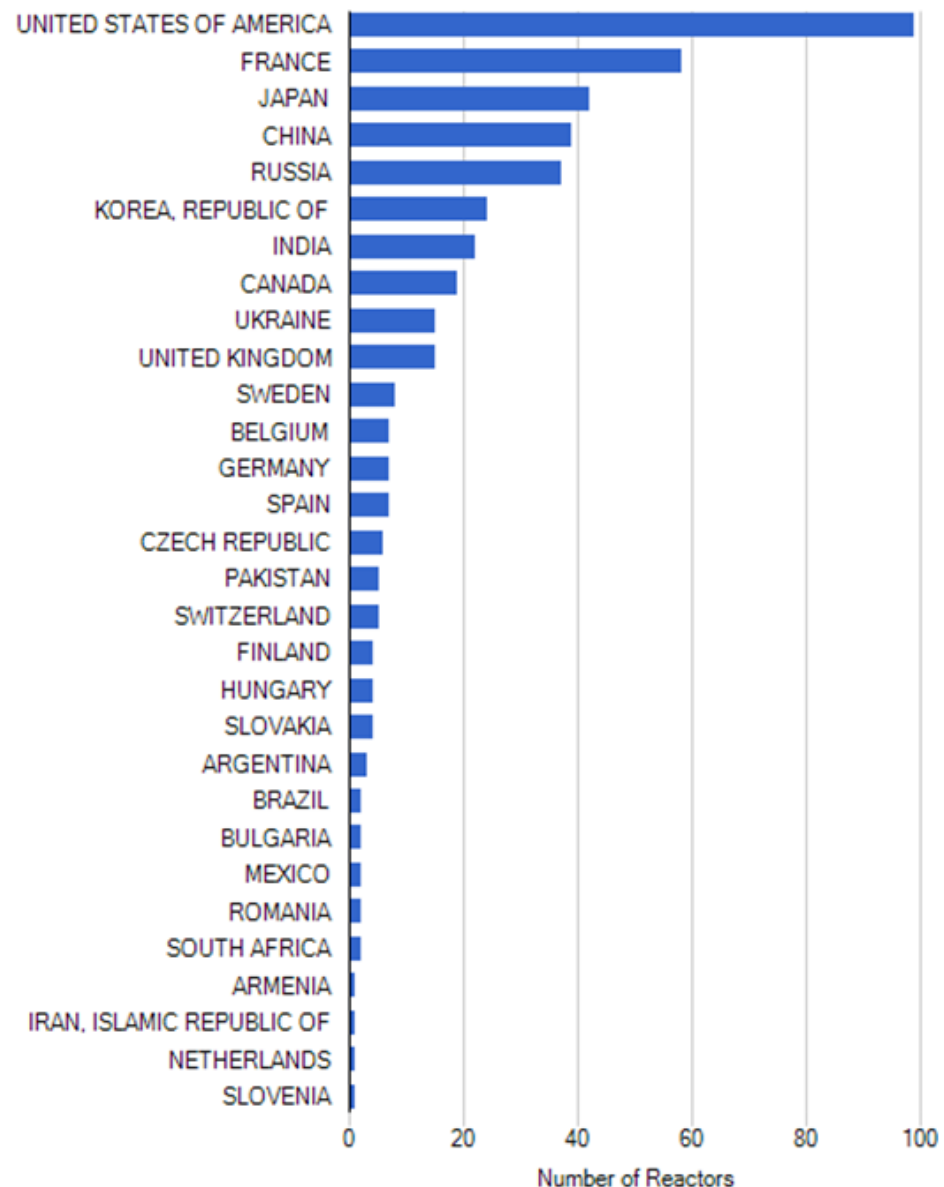
核能，不能輕言放棄的選擇

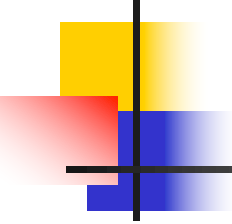


NUCLEAR SHARE OF ELECTRICITY GENERATION



Total Number of Reactors: 450



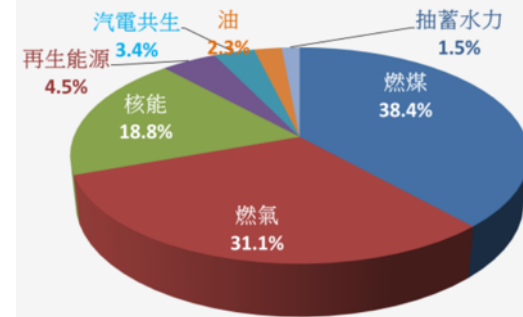


Nuclear Power in Japan

(Updated October 2017)

- Nuclear energy has been a national strategic priority since 1973. This came under review following the 2011 Fukushima accident but has been confirmed.
- In June 2015 the government's Plan for Electricity Generation to 2030 was approved: **nuclear 20-22%**, renewables 22-24%, LNG 27% and coal 26%.
- Currently 42 reactors are operable and potentially able to restart. Five reactors have restarted to date, with the first two back online in August and October 2015. A further 21 reactors are in the process of restart approval.

臺灣102年電力系統發電量結構



各種能源優缺點

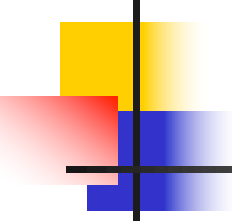
經濟部能源局

如果你善用**優點**
才會有無限可能



如果只看到**缺點**
最終將一事無成

敬請指教



Pandora's Promise



- A documentary film about nuclear power debate (2013)



Is everything you know
about nuclear energy wrong?

#PandorasPromise

CNN FILMS

WATCH PANDORA'S PROMISE ON CNN
NOVEMBER 7 | 9:00 P.M. EST