

# 核研所107年度輻防教育訓練

## 核後端技術發展與輻射防護管理



陳懿璿、林駿丞  
民國107年7月4日



行政院原子能委員會核能研究所



# 大 約

- 前言
- 用過核子燃料乾式貯存
- 核電廠除役
- 低放處置
- 高放處置
- 核後端的輻射安全
- 結語





# 前言-國家政策

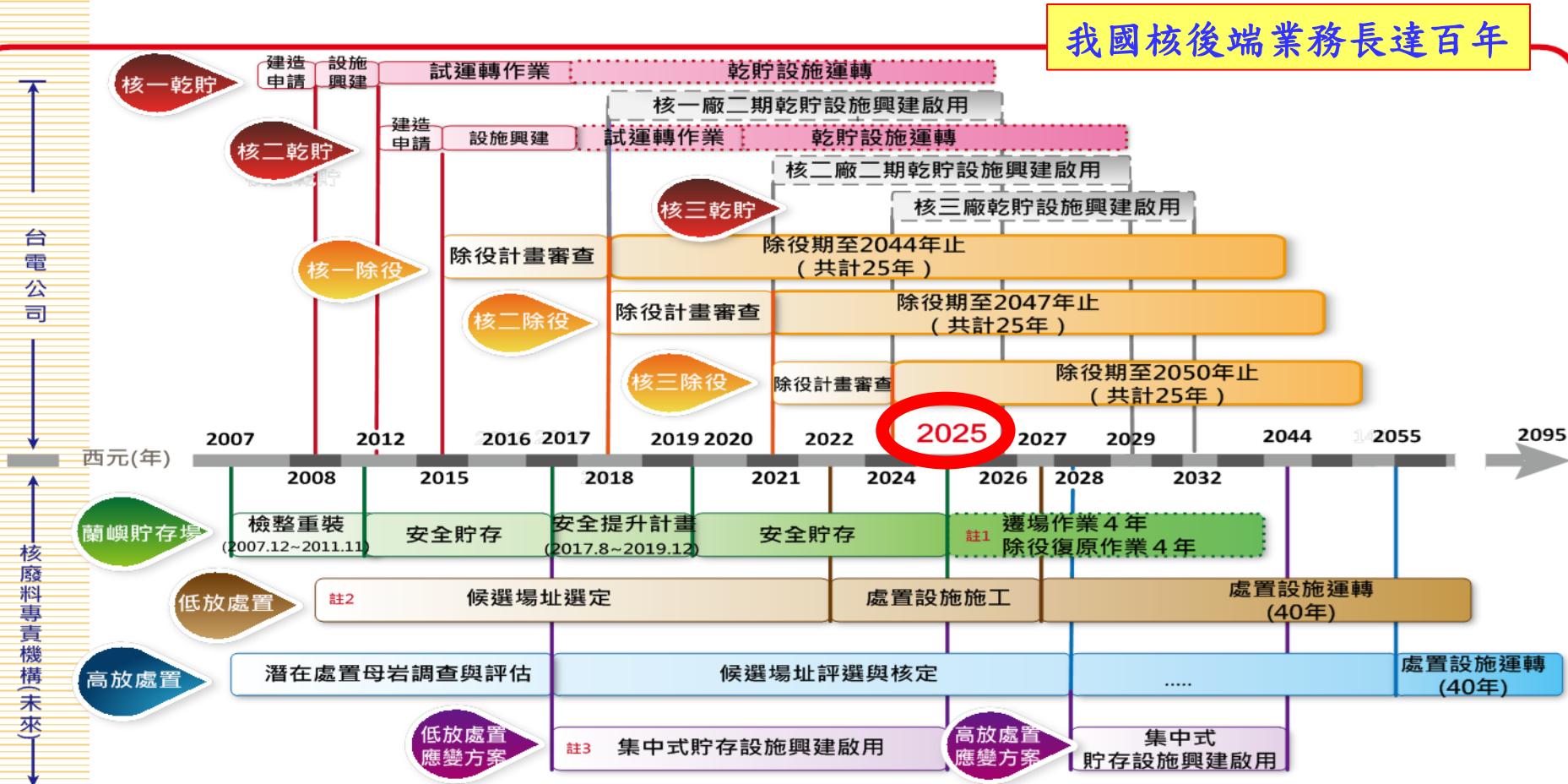




# 我國核後端營運各項工作規劃時程說明

我國放射性廢棄物管理，主要分為處理、貯存、運送及最終處置

我國核後端業務長達百年



註1：遷場時程暫與處置設施及集中式貯存設施啟用連結，未來台電公司若規劃遷回核電廠貯存，則遷場時程另計

註2：依低放射性廢棄物最終處置計畫書(105年修訂二版)審查結論，自106年3月起5年內完成場址選定。

註3：依低放射性廢棄物最終處置計畫書(105年修訂三版)審查結論，自106年3月起3年內完成場址選定及土地取得作業，8年內設施完工啟用。

行政院原子能委員會核能研究所



# 我國放射性廢棄物

## 低放射性廢棄物

- 1) 來自**核能電廠**之受污染衣物、工具及廢棄的零組件等，約占90%
- 2) 來自**醫**、**農**、**工**、**研**等放射性物質與射源，約占10%

## 高放射性廢棄物

**指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取液或產物**

用過核子燃料是指在核燃料在反應爐心中燃燒到無法再有效支持分裂鏈鎖反應的核分裂產物與超鈾元素。用過核子燃料處置後數十萬年，放射性才會降至自然環境背景值



# 我國放射性廢棄物之處理流程

## 核子燃料處理流程

海外輸入  
核燃料



核電廠



用過核  
子燃料

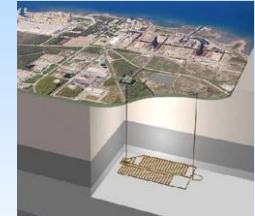
廠內濕  
式貯存



乾式  
貯存



深層地  
質處置



貯存於廠內用  
過核子燃料池

核電廠除役時  
移到乾式貯存

最終處置

## 低放廢棄物處理流程



● 可燃性 → 焚化



● 不可燃 → 壓縮



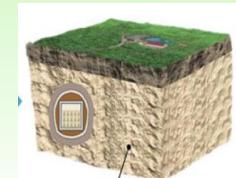
● 濕 性 → 固化



暫時  
貯存



低放最  
終處置





# 國內核設施現況

我國已具核設施除役經驗及場址釋出再利用實績

	名稱	運轉執照有效期限		除役計畫提報
核能發電廠 (3座6部機組)	核一廠	一號機：107.12.05	二號機：108.07.15	106.06除役計畫審查通過，預計107.12前通過環評，取得除役許可。
	核二廠	一號機：110.12.27	二號機：112.03.14	107.12，已開始進行調查作業及除役計畫編撰
	核三廠	一號機：113.07.26	二號機：114.05.17	110.07

	名稱	地點	狀態	備註
研究用反應器 (6部)	水鍋式反應器(WBR )	核研所	完成除役	設施再利用(核後端中心人員辦公室)
	台灣研究用反應器(TRR )		除役中	預計107提出爐體拆除計畫，109年完成作業模擬，110年開始拆除，114年完成除役
	微功率反應器(ZPRL )		除役中	
	阿岡諾反應器(THAR)	清大	完成除役	設施再利用(THAR紀念花園)
	清華移動教學反應器(THMER)		完成除役	
	水池式反應器(THOR)		運轉中	

	地點/狀態
放射性實驗設施 (10座)	皆位於核研所
	完成除役：3座
	運轉中：7座





# 核廢管理-我國放射性廢棄物貯存現況

各電廠除役廢棄物應有效管理與分類

## 低放廢棄物貯存現況

電廠/ 貯存場	貯存場/ 貯存庫 容量(桶)	運轉廢棄物 預估量(桶)(1)	除役廢棄物 預估量(桶)(2)註	廢棄物 總預估量(桶)(1)+(2)
核一廠	101,204	49,313	61,791	111,104
核二廠	91,133	63,635	96,803	160,438
核三廠	40,000	10,553	144,552	155,105
蘭嶼貯存場	100,277	100,277	11,000	111,277
核研所	25,331	16,598	10,388	26,986
總和	357,945	240,376	324,534	564,910

註：除役廢棄物預估量係依台電公司106年5月3日簡報資料

## 低放廢棄物處理貯存設施

電廠/ 貯存場	處理貯存設施數量
核一廠	處理系統共3類;貯存設施2處
核二廠	處理系統共6類;貯存設施 4座
核三廠	處理系統共5類;貯存設施 5座
蘭嶼貯存場	23 座鋼筋混凝土貯存壕溝
核研所	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 處理設施 5座 ; 貯存設施 9座</li> <li>• 1座貯存設施除役，並已再利用</li> </ul>

符合解除管制之放射性廢棄物，若無法外釋，將增加廢棄物數量，影響甚鉅。(依國外經驗，除役廢棄物約有95%為可外釋；粗估核一廠除污後可外釋之金屬約為18,223 MT(約佔金屬廢棄物64%) )

## 高放廢棄物貯存現況

	用過核子燃料貯存 池設計容量(束)	已貯存容量 (束)	因燃料池容量不足預估機組停轉日期
核一廠1號機	3,083	3,074	目前停機中；機組啟動後可運轉450天
核一廠2號機	3,083	3,076	目前停機中；106年6月輸電鐵塔倒塌(註)
核二廠1號機	4,398 + 440	4,548	因格架擴充440格；可運轉至109年底
核二廠2號機	4,398	4,388	目前停機中；機組啟動後 約可運轉390天
核三廠1號機	2,160	1,452	可使用至電廠除役(113年)
核三廠2號機	2,160	1,468	可使用至電廠除役(114年)

共貯存18,006束





# 我國核後端業務與需求

## 核後端議題

乾式貯存

核電廠除役

低放處置

高放處置

- 台電公司核後端業務

- 核一、二、三廠除役
- 用過核子燃料乾式貯存(中長期)
- 蘭嶼貯存場貯存/遷運
- 低、高放射性廢棄物處置
- 其他(境外處理)

- 核研所核後端業務

- 醫、農、工、研產生低放射性廢棄物(小產源)處理/貯存/處置
- 研究用反應器除役(TRR, ZPRL, WBR)
- 核子燃料循環研究設施清理
- 其他

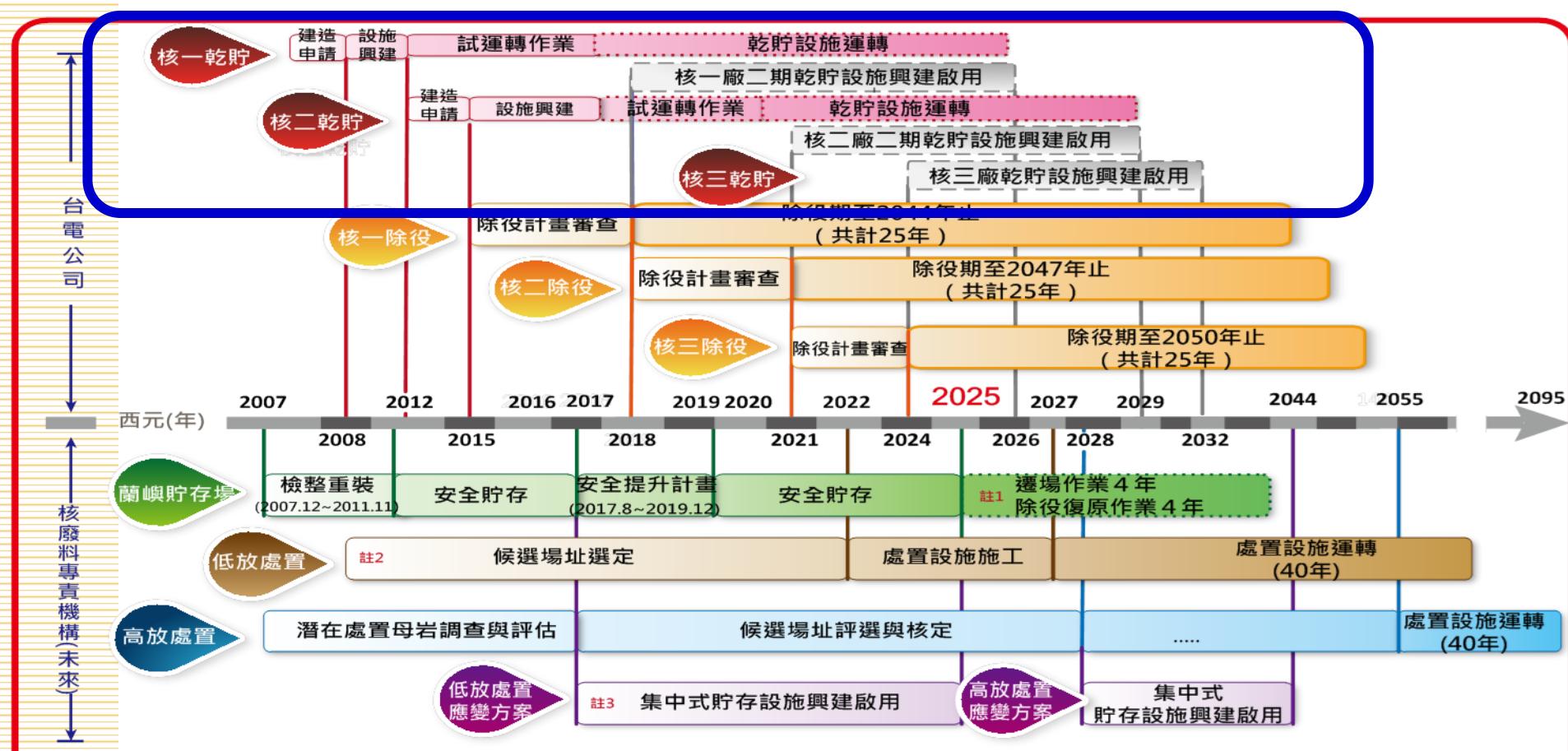
- 清華大學核後端業務

- 研究用反應器除役(THOR)





# 乾式貯存



註1：遷場時程暫與處置設施及集中式貯存設施啟用連結，未來台電公司若規劃遷回核電廠貯存，則遷場時程另計。

註2：依低放射性廢棄物最終處置計畫書(105年修訂三版)審查結論，自106年3月起5年內完成場址選定。

註3：依低放射性廢棄物最終處置計畫書(105年修訂三版)審查結論，自106年3月起3年內完成場址選定及土地取得作業，8年內設施完工啟用。





# 用過核子燃料乾式貯存

## 我國用過核子燃料營運時程圖



- **乾式貯存：**

將**用過核子燃料**置於金屬容器內並填充惰性氣體後加以密封，藉由空氣的自然對流冷卻，外部有混凝土護箱來保護金屬容器並降低輻射劑量



- **乾式貯存的特色：**

運轉維護容易、操作成本較低、燃料較不易腐蝕也不會產生二次廢棄物及發生輻射洩漏等



# 核研所在乾式貯存的歷程

- 核一廠用過核子燃料乾式貯存計畫第一期(2005.07-迄今)
- 核二廠用過核子燃料乾式貯存計畫第一期(2009.06-迄今)

核  
研  
所

- 成立乾式貯存專案中心
- 核一廠乾貯設施引進美國NAC公司乾貯技術，加以改良精進為「**INER-HPS混凝土護箱系統**」
- 核二廠乾貯設施採用美國NAC公司「NAC-MAGNASTOR系統」
- 建立乾貯系統操作程序
- 核一廠與核二廠乾貯系統之安全分析，分別於2008年與2013年獲原能會審核通過與核發建造執照
- 輔導廠商進行乾貯系統製造

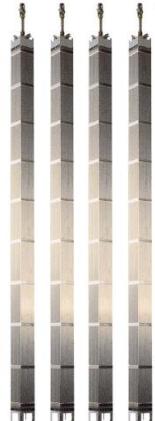




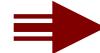
# 核一廠乾式貯存系統

乾貯  
影片

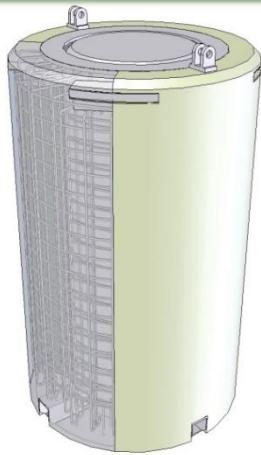
## 核一廠混凝土護箱貯存系統



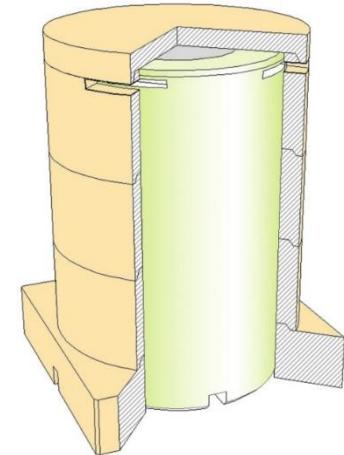
56束



密封鋼筒



混凝土護箱



外加屏蔽



預定設置30組混凝土護箱，每組護箱承裝56束用過核子燃料，共計可貯存1,680束之用過核子燃料



# 核一、二廠乾貯設施計畫現況

由於所內同仁的努力，使國內已具備乾貯產業

## 核一乾貯計畫現況：

- 2013年9月審查同意台電公司熱測試作業
- 台電公司**尚未取得水土保持設施完工證明**，尚無法進行熱測試作業



## 核二乾貯計畫現況：

- 2015年8月審查同意核發設施建照
- **營建工地逕流廢水污染削減計畫未獲核定**，仍無法動工興建



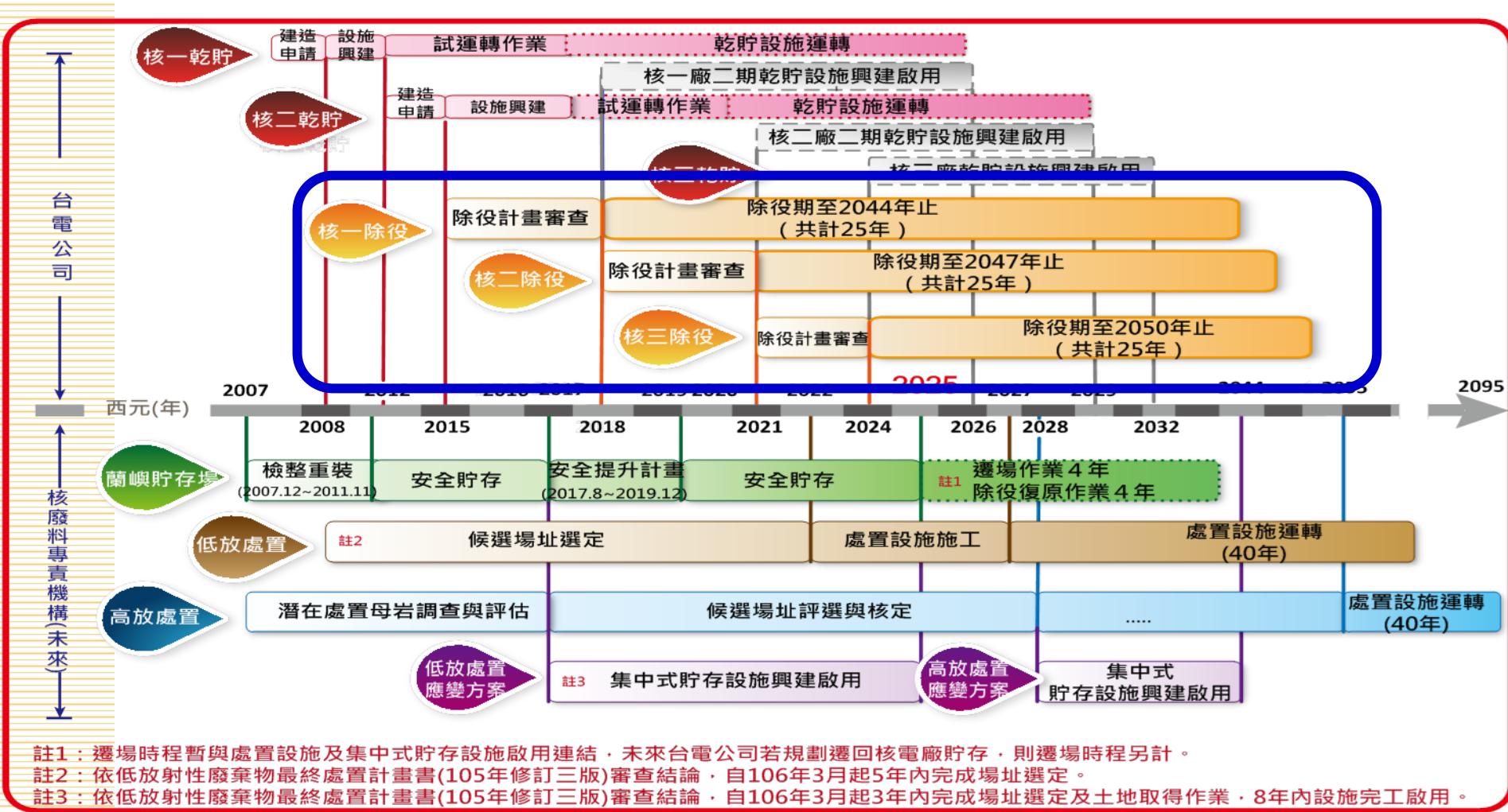
# 國內推動室內乾貯之現況

- 前行政院院長林全於2016年9月與北海岸鄉親座談會議結論：「室內乾貯不能慢，趕快做，為因應除役工作之需，露天乾貯短期使用後就要移入室內。」
- 後續物管局正式發函至台電公司。要求台電公司依照「室內貯存方式」檢討修正核一廠除役計畫內容。亦即要求台電公司將用過核子燃料乾式貯存設施由目前「露天式」變更為「室內式」
- 台電公司正進行室內乾式貯存設施之可行性評估與環境影響評估作業，本所協助於除役計畫中進行環境輻射劑量影響評估作業，以及各項關鍵技術的先期研究





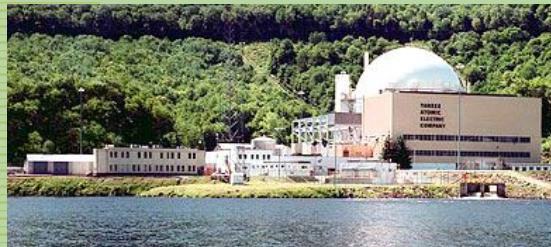
# 核電廠除役



# 核電廠除役

- 核能設施除役階段是涵蓋核能設施停止運轉並關閉開始，至廠址解除輻射防護管制並恢復無限制使用為止
- 除役不等同於馬上「拆光、搬光、全部恢復為綠地」
- 最終處置設施未啟用前，各核電廠除役前後的放射性廢棄物均將存放在廠內貯存設施內，接受監督以確保安全

美國Yankee Rowe核能電廠除役後狀況

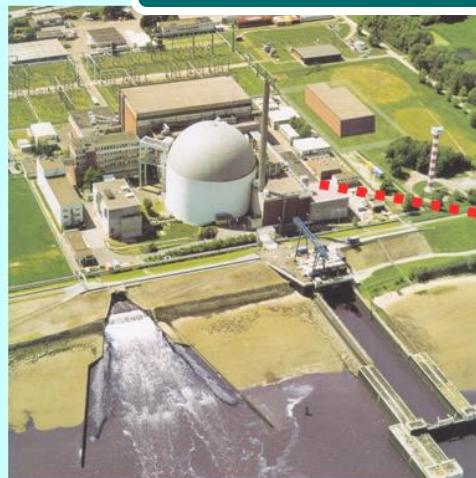


除役前

除役後



德國Stade核能電廠除役後之狀況



2008-2014之廠址

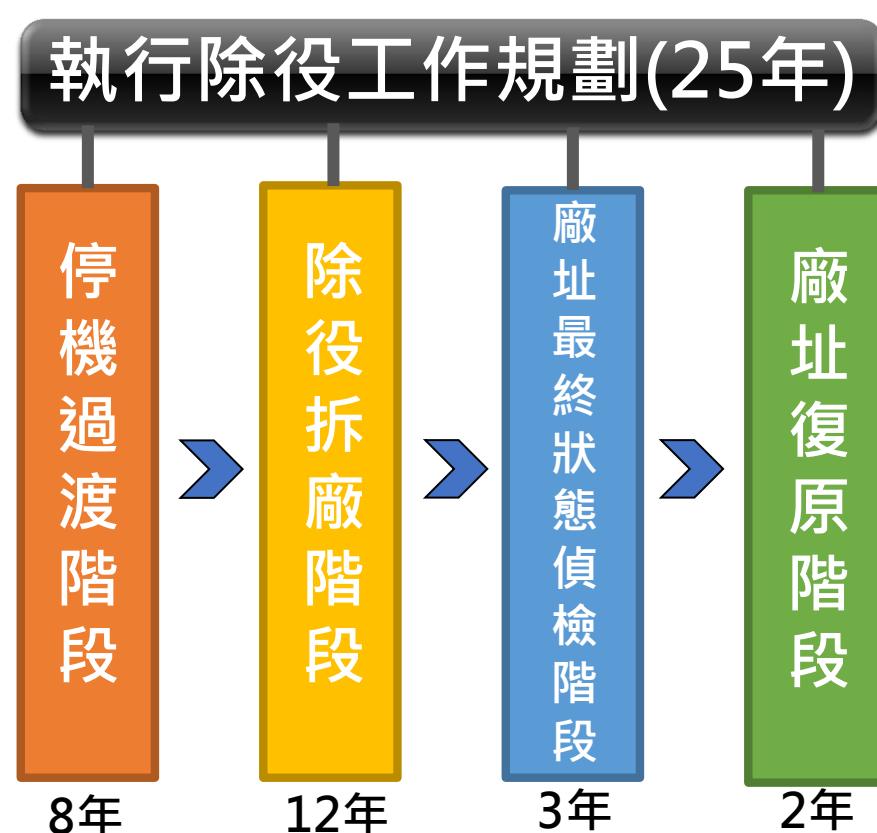
2015後之廠址





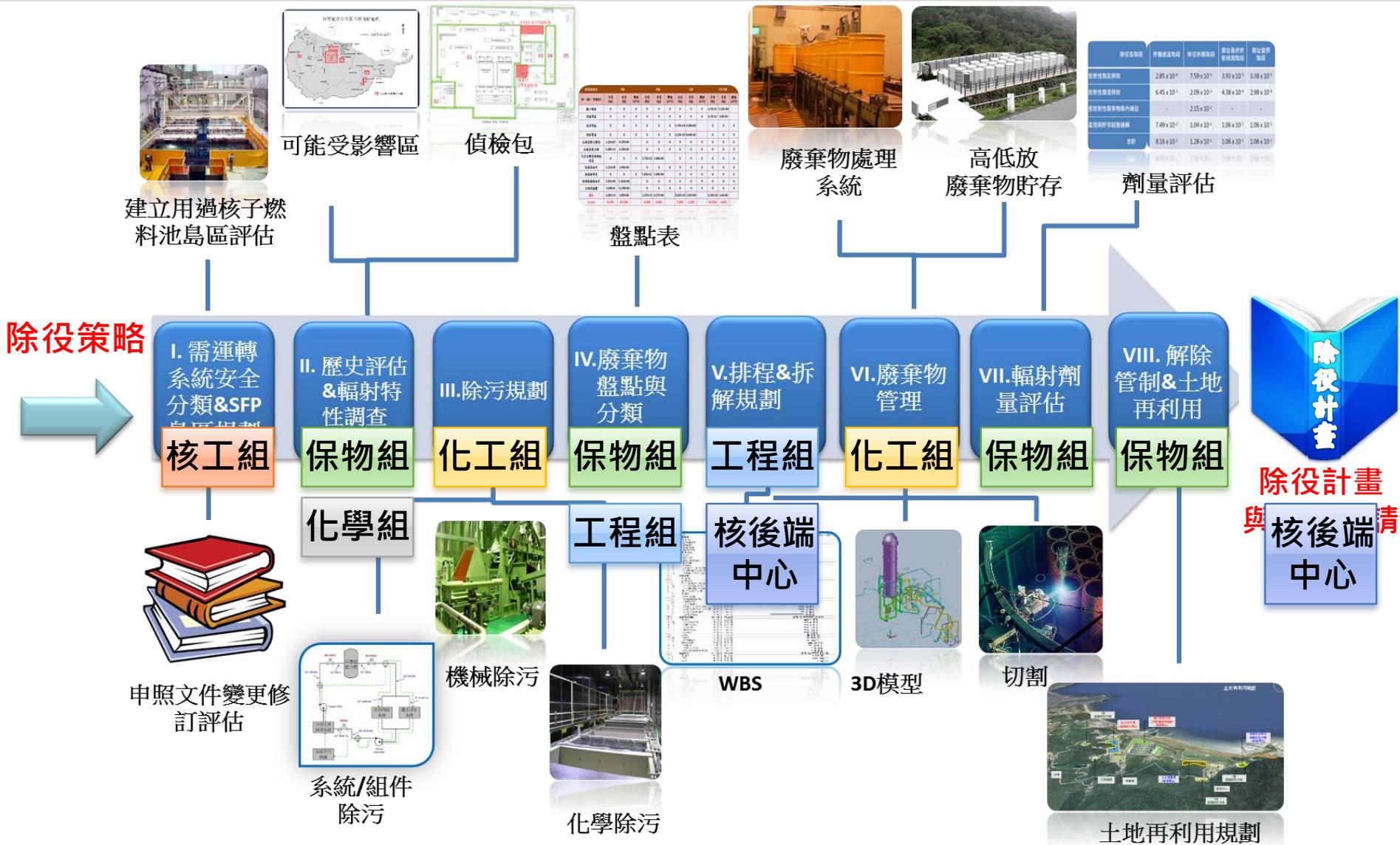
# 核電廠除役執行策略

- 國際除役策略：立即拆除、延遲拆除、原地封埋
- 我國在獲得除役許可後，在**25年**內完成除役工作
- 核研所於2013年10月承接台電公司「核一廠除役計畫」計畫，於2017年6月取得原能會審查同意
- 核研所續於2016年承接台電核二廠除役計畫，將於2018年底送原能會審查



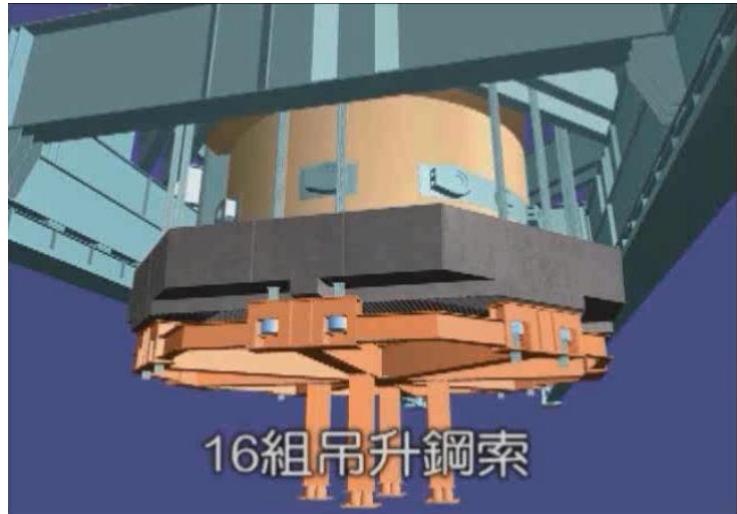


# 核電廠除役之技術需求

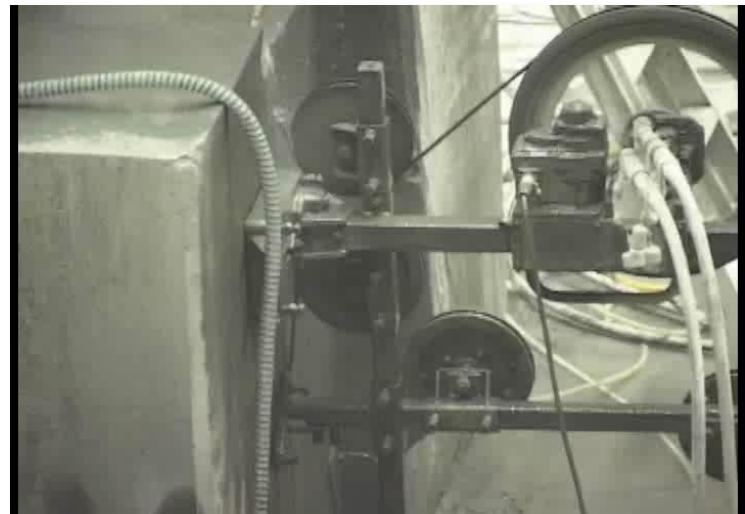


# 核能研究所核設施除役實績與經驗

## ◆ TRR爐體遷移3D工程模擬



## ◆ TRR濕貯槽拆除



## ◆ TRR爐體遷移



## ◆ TRR緊急冷卻水塔拆除





# 核研所執行「核一廠除役計畫」之經驗

核一廠3D工程模擬應用：核一廠除役之拆除與動線規劃、廢棄物盤點、特性調查規劃與輻射劑量分析、人員訓練等，亦將建置並應用於核二除役規劃工作

◆ 拆除工法模擬



◆ 動線規劃/人員訓練



◆ 特性調查規劃與輻射劑量分析

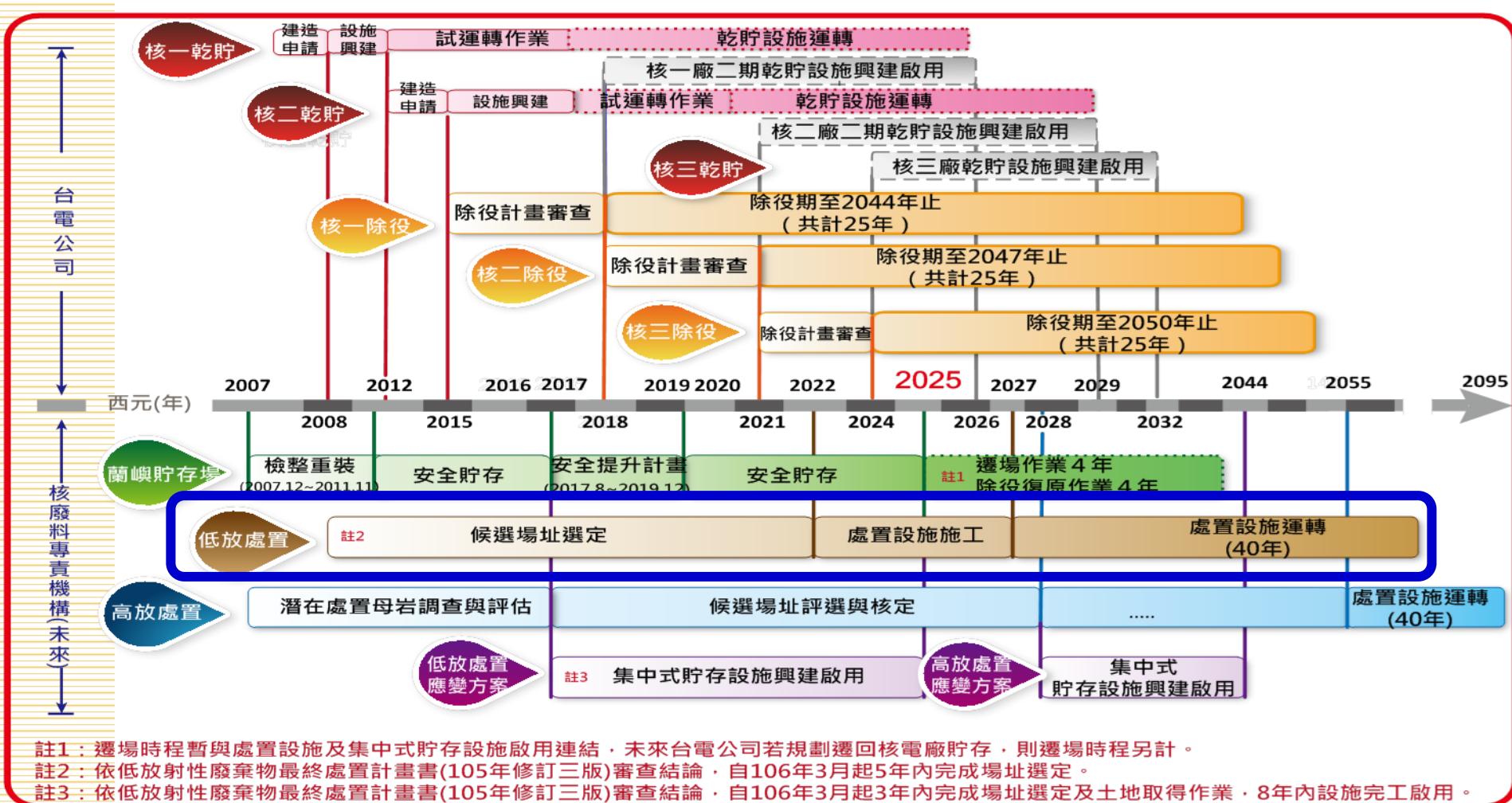


◆ 廢棄物盤點





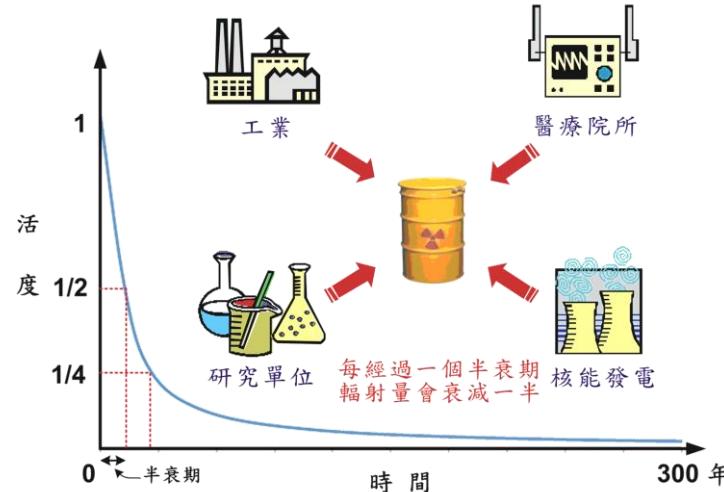
# 低放處置



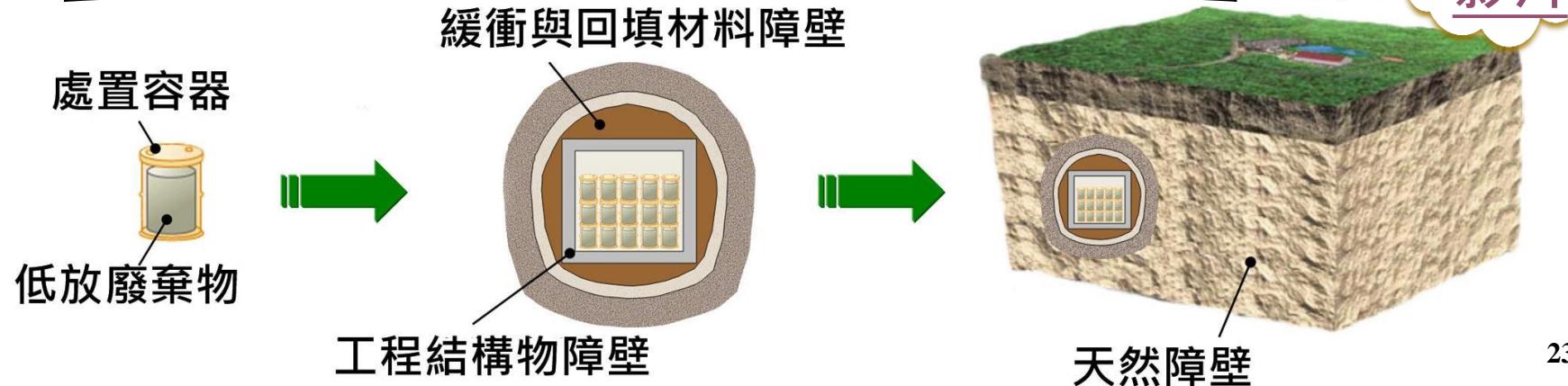
# 低放廢棄物特性與處置概念

## 組成與特性

- 主要來源：核電廠，約占90%
- 其他來源：醫、農、工、研等機構的低放廢棄物，約占10%
- 所含放射性核種以鈷-60及銫-137為主，其半化期分別為5.2年及30.2年，經數百年後放射性將與環境背景輻射值相當



## 低放處置概念-多重障壁：工程障壁+天然障壁



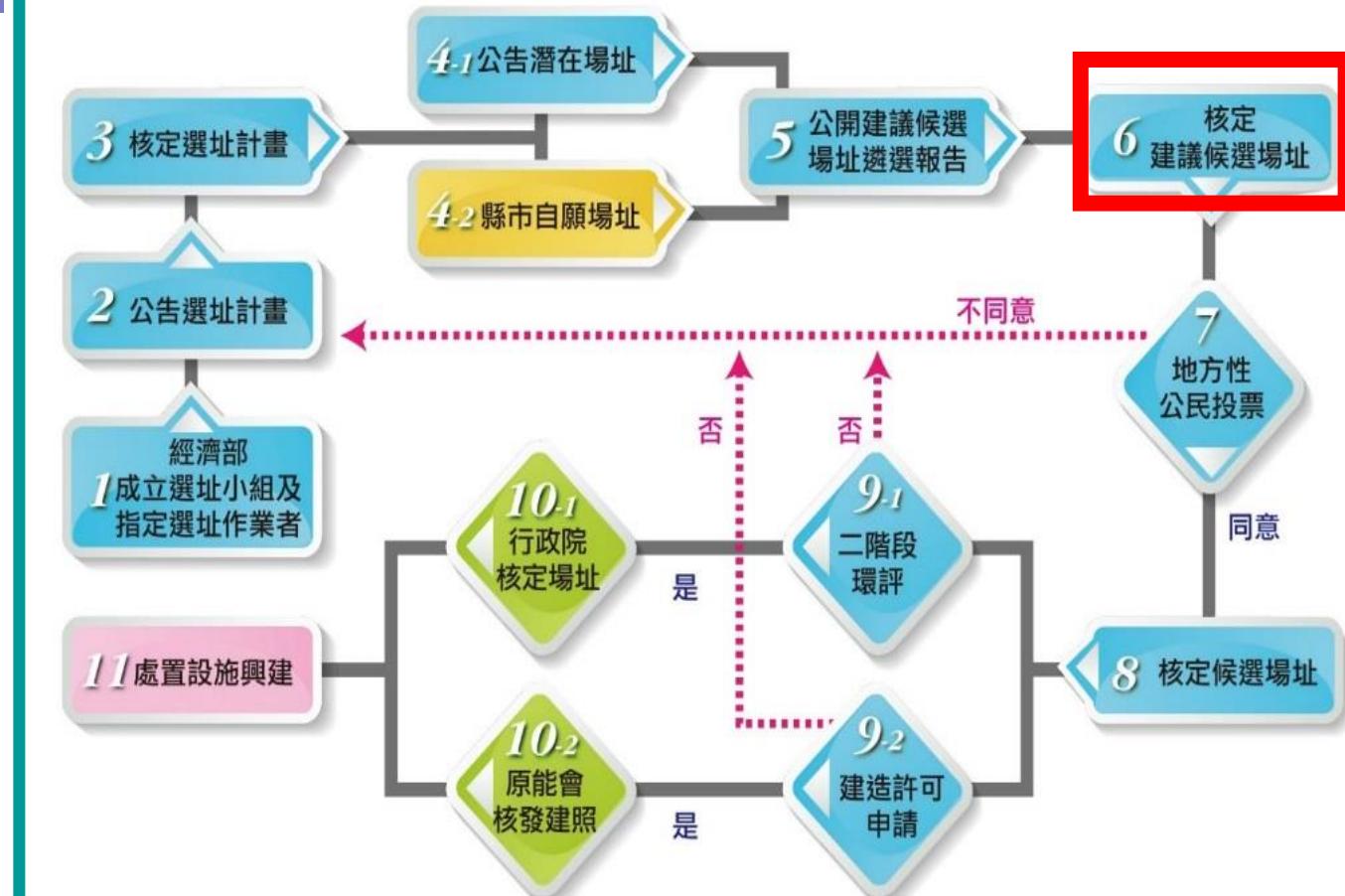


# 低放最終處置計畫執行現況

## 選址條例

- 低放射性廢棄物最終處置設施場址設置條例(選址條例)已於2006年公布施行
- 主辦機關為經濟部，成立選址小組執行選址作業
- 選址作業者為台電公司
- 選址作業分為11個步驟

## 低放最終處置選址流程



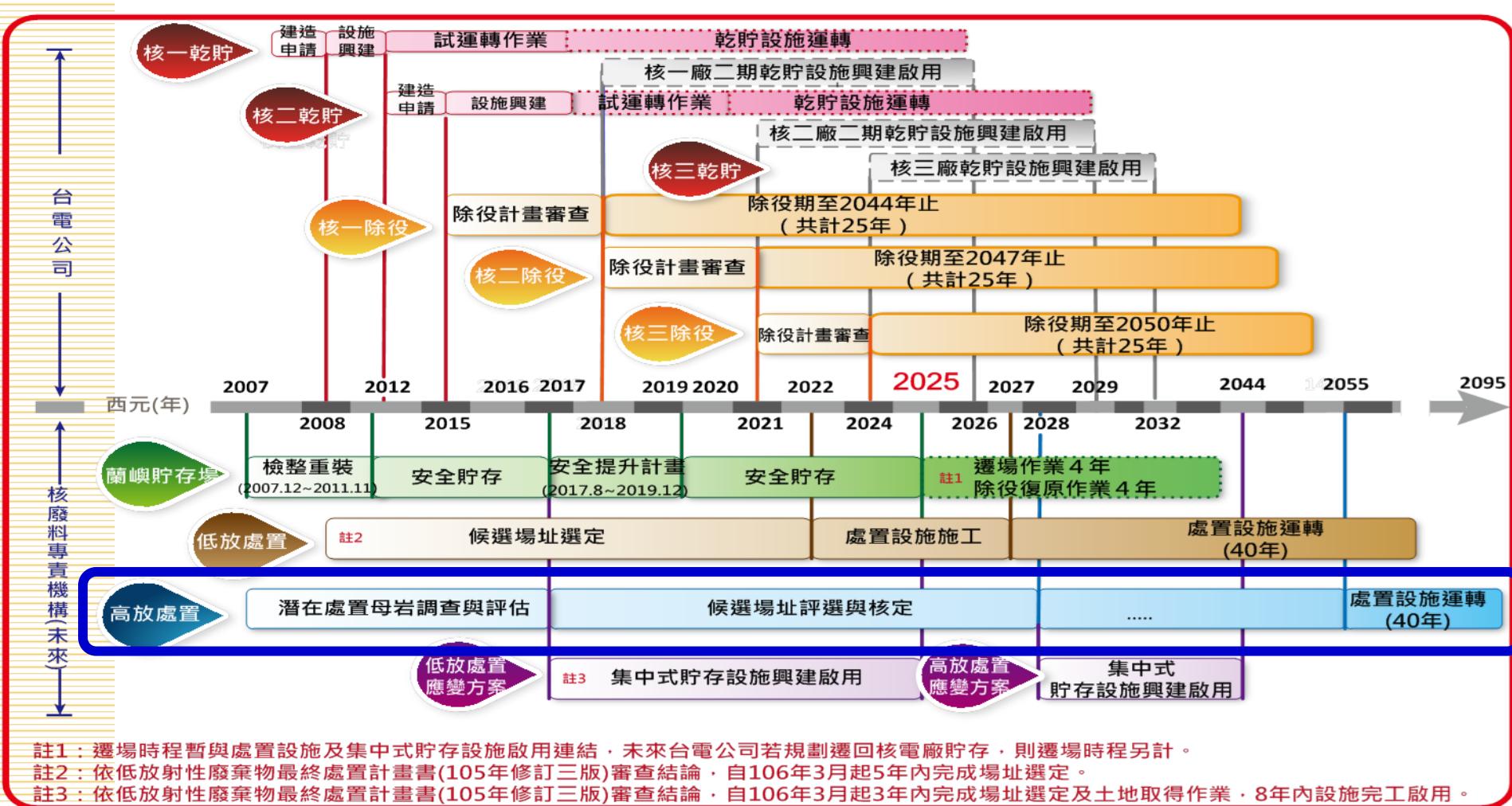
核定建議候選場址

台東縣達仁鄉及金門縣烏坵鄉

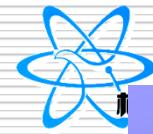




# 高放處置



# 高放射性廢棄物深層地質處置

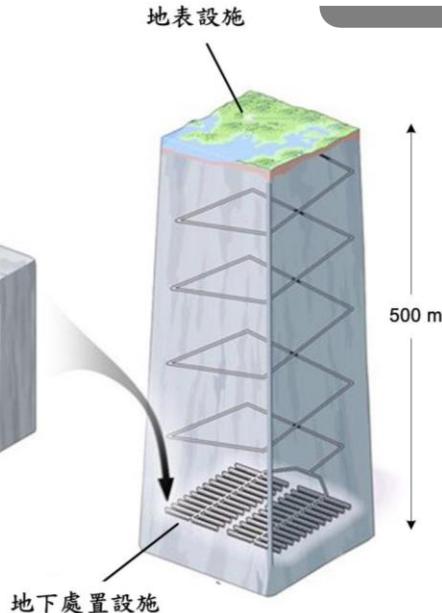
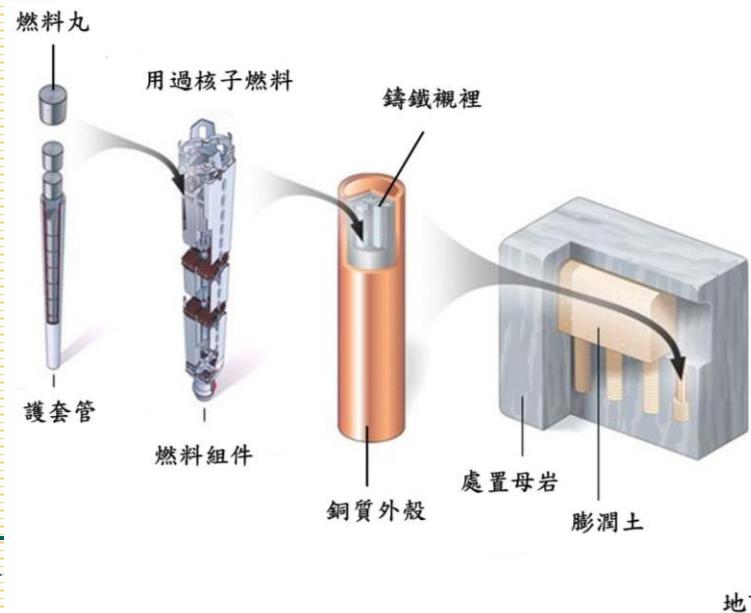


## 組成與特性

- **高放射性廢棄物**：用過核子燃料與再處理所產生之萃取殘餘物
- 1 tonne核子燃料約在25萬年後可衰減到等同8 tonnes天然鈾礦的水平，考慮殘留的殘留的7 tonnes耗乏鈾，約在100萬年後趨於與天然鈾礦相當的水平

## 深層地質處置概念

**多重障壁：工程障壁+天然障壁**



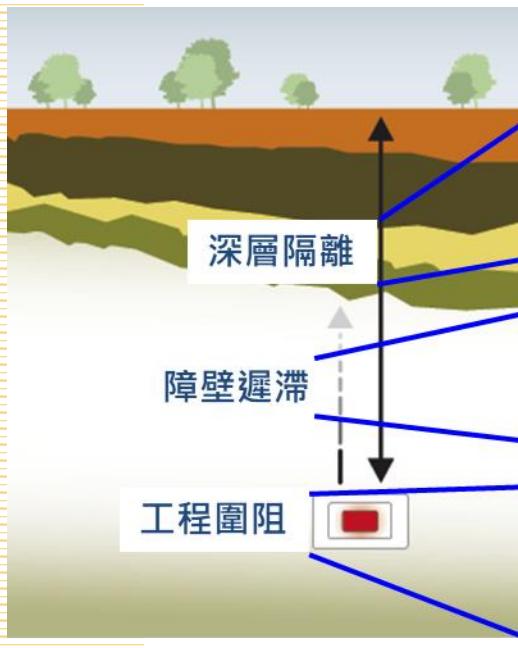
隔離



圍阻與遲滯

# 高放射性廢棄物深層地質處置

- 「地+物+時間」，可實現安全處置
- 安全評估技術，可論證深層地質處置可具備長期安全性



## 第一步曲 – 地

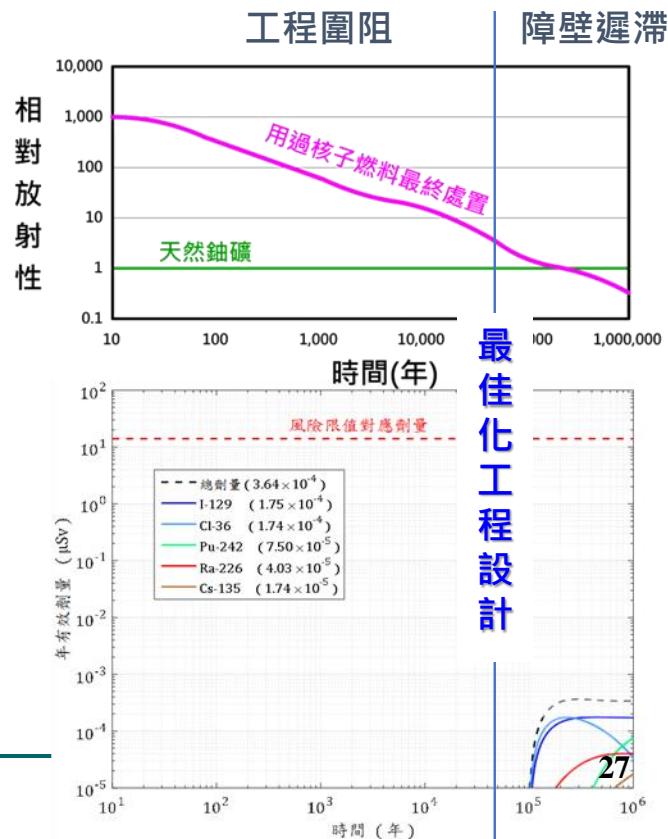
深埋於具穩定性的母岩，深度達300公尺至500公尺，避免受到地表環境的干擾，達到長期隔離。

## 第三步曲 – 時間

萬一失效，工程障壁與天然障壁亦可發揮遲滯放射性核種的功能，延緩核種影響生物圈的時間。

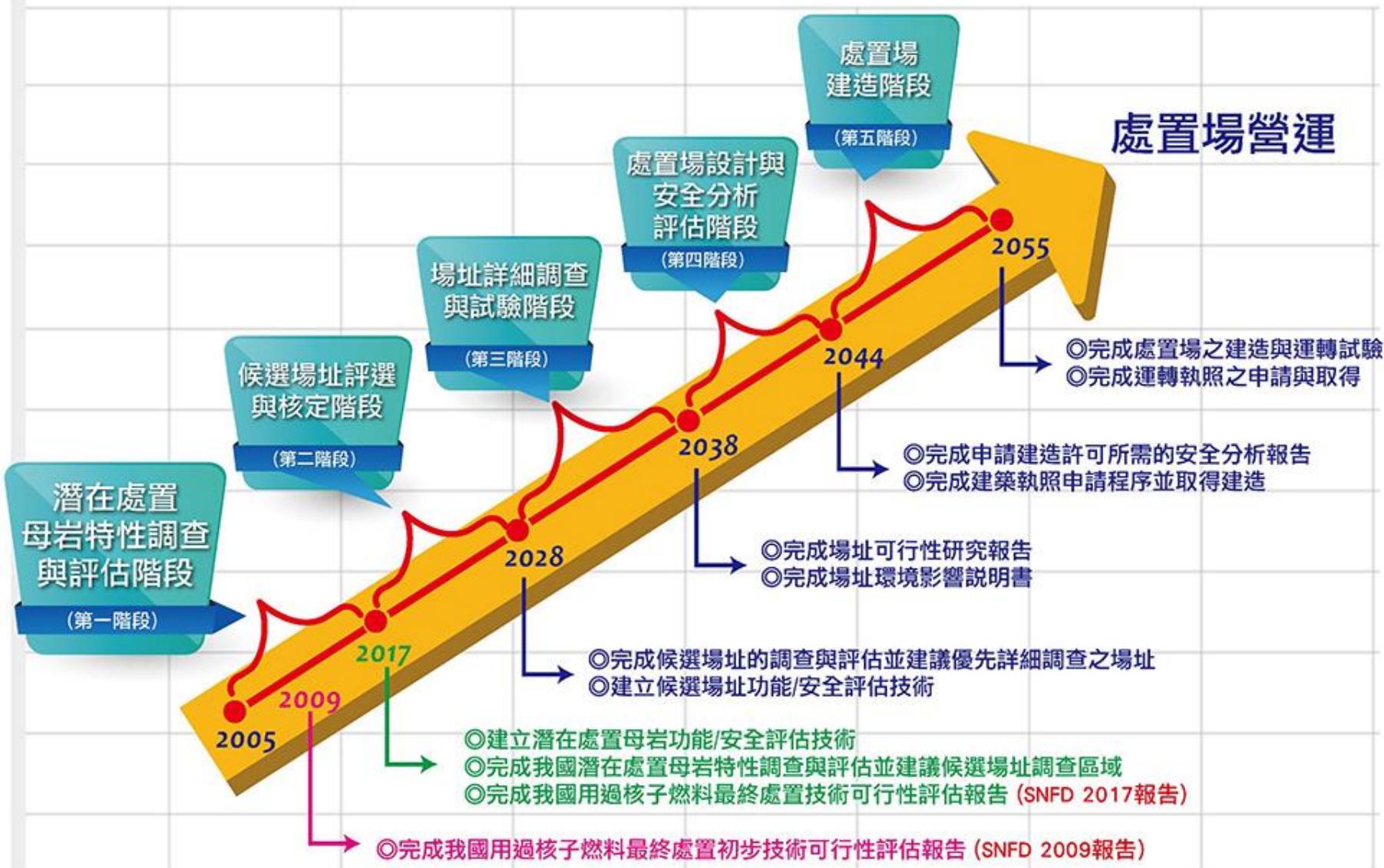
## 第二步曲 – 物

發展「多重障壁」與「深度防禦」的工程設計，達到最佳化的圍阻技術，盡可能延長障壁失效的時間。





# 高放處置計畫之時程規劃

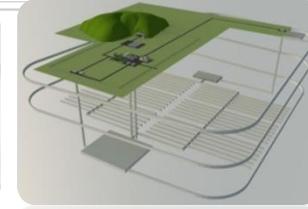




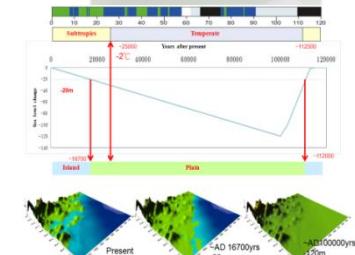
# 管理架構與專業分工



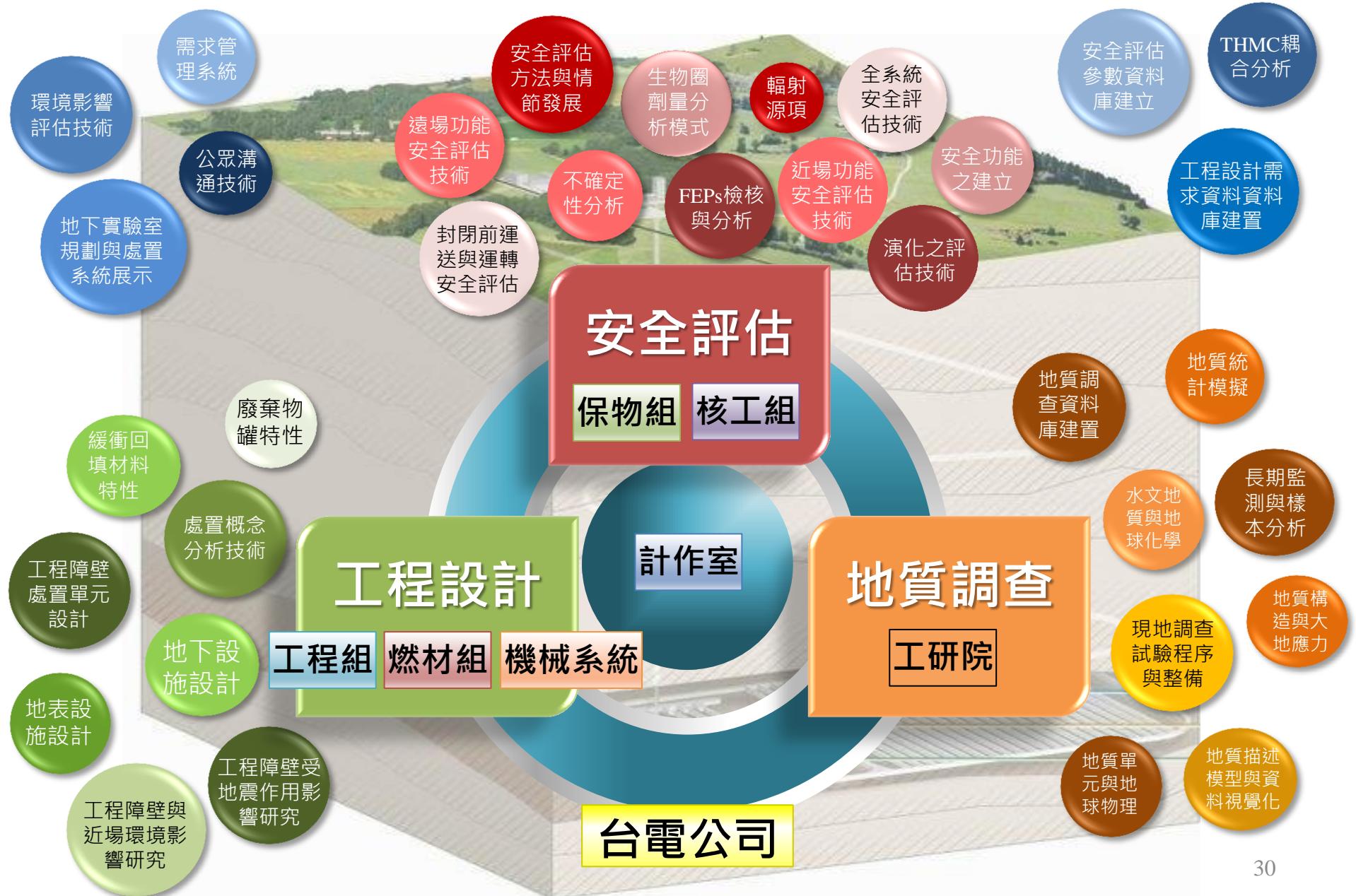
- 處置設計與工程技術
- 安全評估
- THMC耦合分析
- 核種遷移實驗

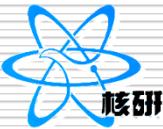


- 區域環境地質
- 深層地質特性
- 地質處置合適性研究



# 高放處置之技術需求





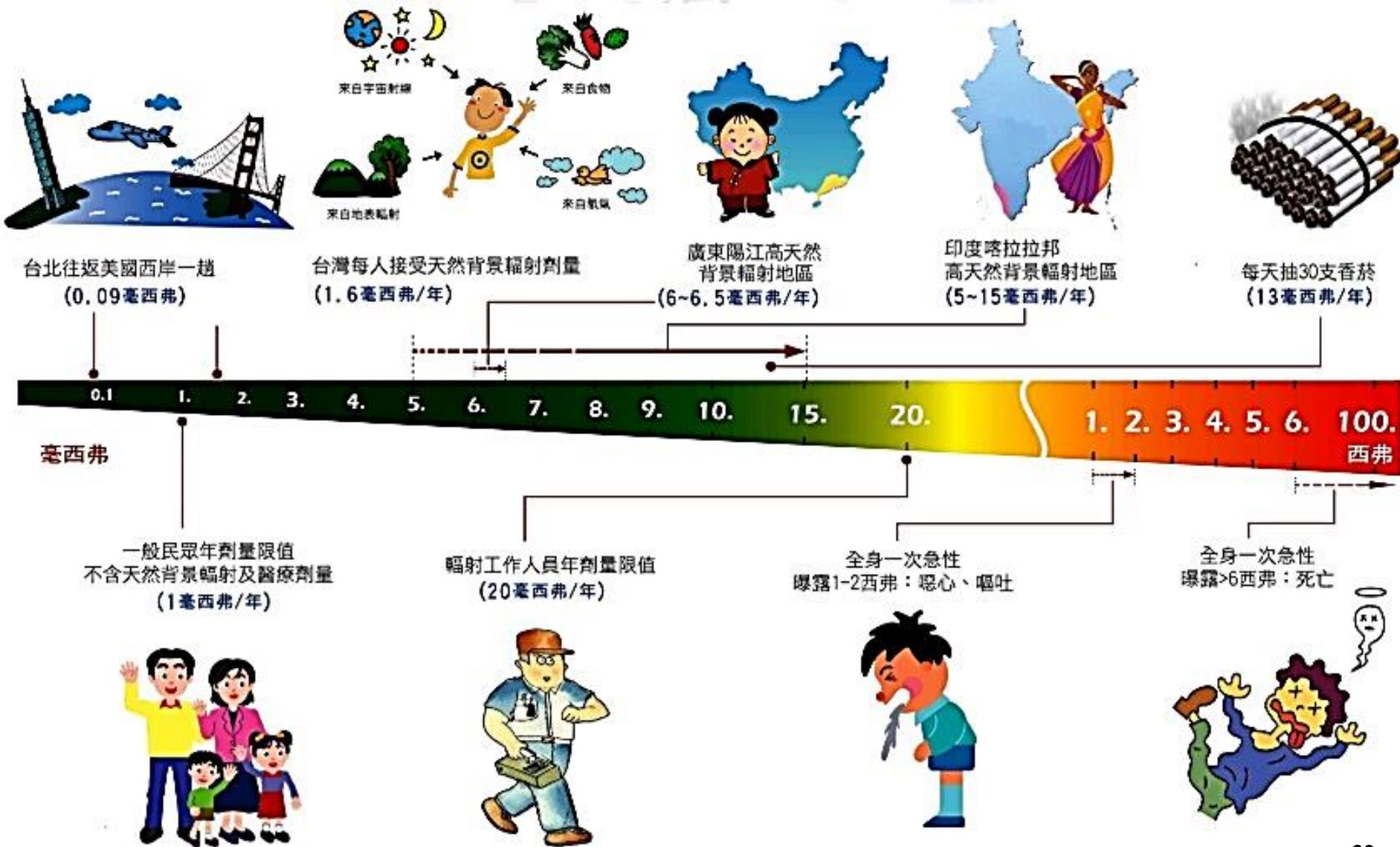
# 核研所執行高放處置計畫成果

- 協助台電公司，與工研院共同完成**第一階段SNFD2017主報告**，另完成工程設計與安全評估兩份技術支援報告
- 規劃執行**OECD/NEA國際同儕審查**，成立國際審查小組，於2017年3月至10月進行審查工作，針對SNFD2017報告進行評估並完成審查發現與建議
- 與**瑞典專責機構SKB**專家進行國際合作交流，從2014年迄今共舉辦14場技術研討會議，核研所同仁也多次赴瑞典進行實地參訪與SKB專家進行技術交流
- 參加日本**NUMO**召開之「高放處置技術國際交流年會」，並辦理「台日高放射性廢棄物最終處置技術研討會」，藉此建立深層地質處置技術合作管道





# 輻射安全



資料來源：原能會網站，輻射劑量比較圖



# 輻射安全

- 輻射的單位
  - 國際輻射單位與度量委員會(ICRU) 建議應以S.I.單位來取代
- **貝克(Bq)**：放射性活度的單位。活度是指放射性物質在單位時間內的衰變數，故活度單位是以秒的倒數表示，即 $s^{-1}$ ，類似頻率
- **戈雷(Gy)**：吸收劑量的單位。定義為每公斤物質因游離輻射照射所吸收的能量，以焦耳·公斤 $^{-1}$  ( $J \cdot kg^{-1}$ ) 表示
- **西弗(Sv)**：不同類型的輻射( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、中子等)，在相同的吸收劑量下所造成的生物效應不同，以西弗表示生物組織受游離輻射危害的影響程度， $1\text{ Sv}=1\text{ J/kg}$



# 輻射安全

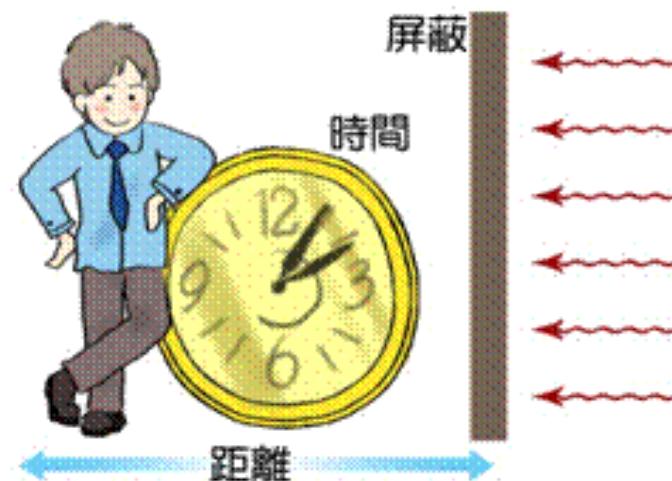
- 游離輻射照射人體的過程稱為**輻射曝露**，輻射曝露有**體外曝露**與**體內曝露**二種
  - 體外曝露**：  
指游離輻射由體外照射身體的曝露，例如健康檢查的胸部x光檢查
  - 體內曝露**：  
指由攝入體內的放射性物質所造成的曝露，例如吃入含有天然放射性物質或受放射性物質污染的食物
- 我們在採行輻射防護措施時也將從**體外曝露**與**體內曝露**分別考慮



# 體外曝露防護原則

- **TSD原則**交互運用，是體外曝露防護非常實用的方法
  - T指的是**時間**(Time)，意指縮短曝露時間
  - S指的是**屏蔽**(Shielding)，使用適當屏蔽物質阻擋輻射
  - D指的是**距離**(Distance)，儘量遠離輻射源

## 體外曝露防護原則



# 體內曝露防護原則

- 避免攝入**：應儘量避免攝入放射性物質。
- 減少吸收**：一經攝入或有攝入之可能時，應大量服用不含放射性的同類物質，事先造成飽和或沖淡其濃度。
- 增加排泄**：使用瀉藥、發汗劑、催吐劑或利尿劑。
- 防止滯留**：使用藥劑，包封輻射物質，以免為組織吸收。



## 體內曝露 防護法則

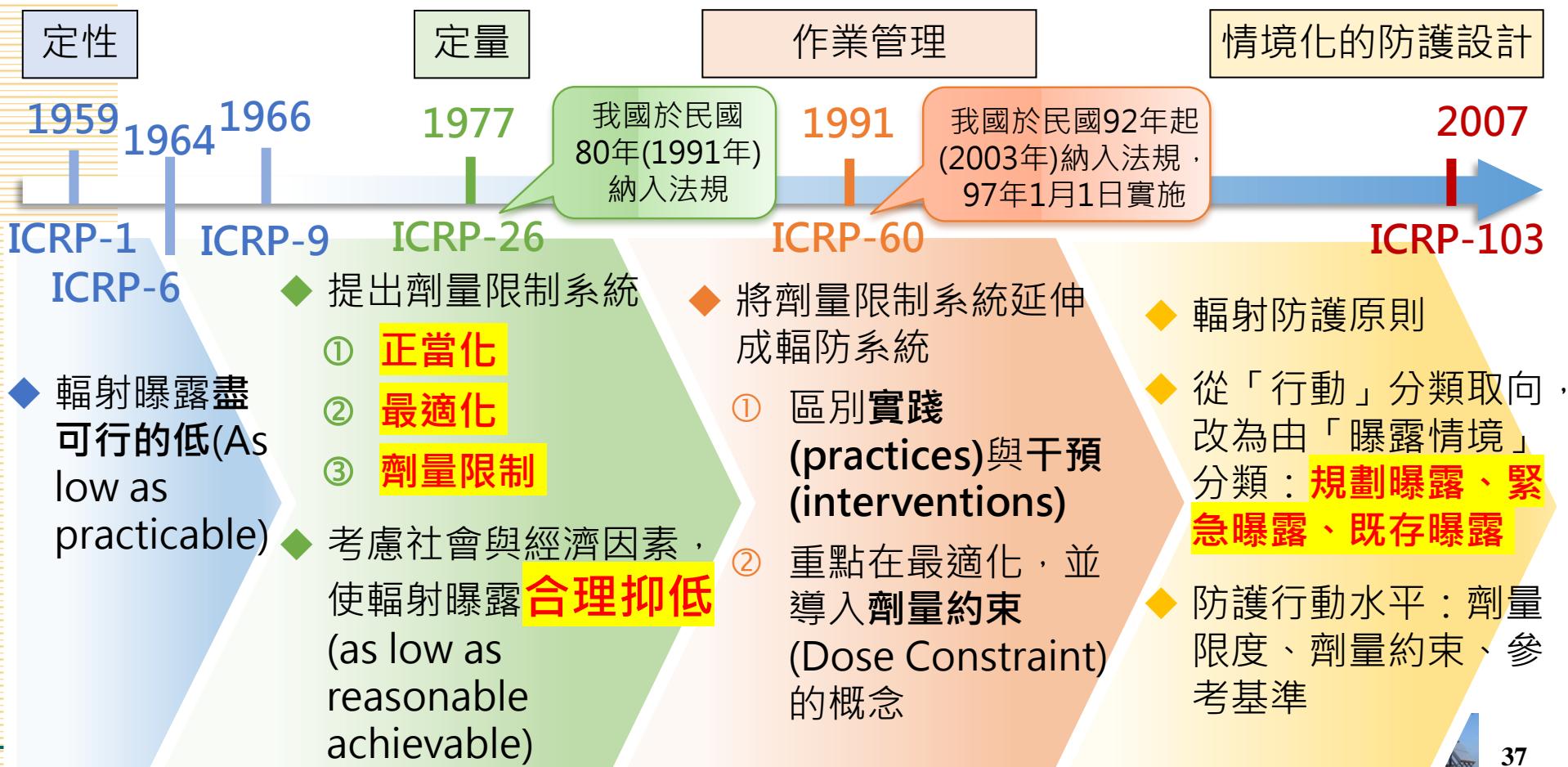




# 國際輻射防護理念

## □ 國際輻射防護委員會(ICRP)

## □ 國際輻射防護的演變





# 國際輻射防護理念(續)

- ICRP-103建議書(ICRP, 2007)

## — 輻射防護原則

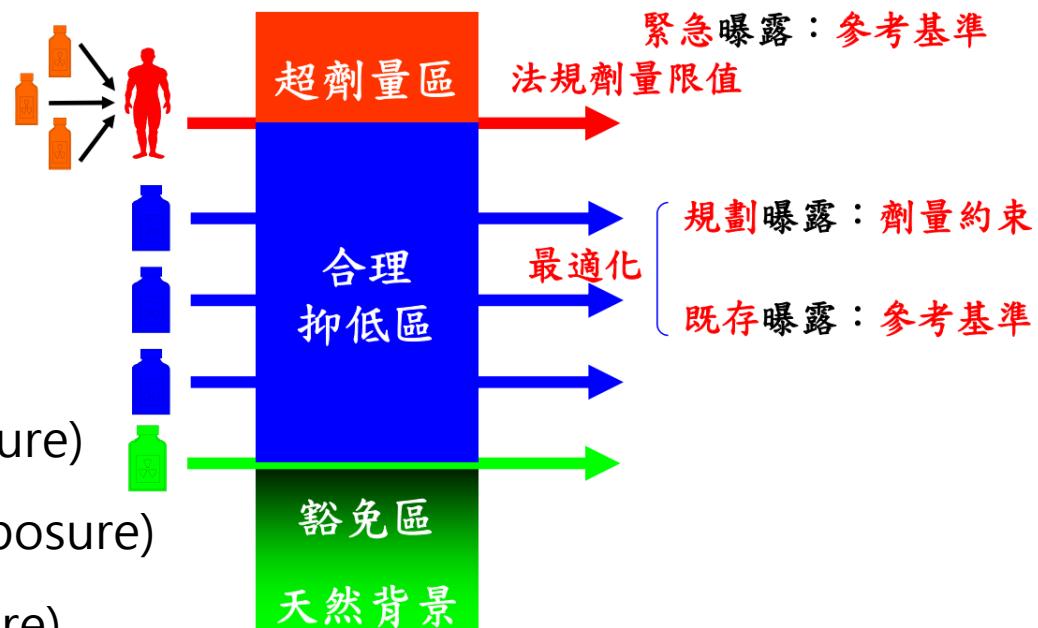
- 正當化(Justification)
- 最適化(Optimization)
- 劑量限制(Limitation)

## — 曝露情境 分為

- 規劃曝露(Planned exposure)
- 緊急曝露(Emergency exposure)
- 既存曝露(Existing exposure)

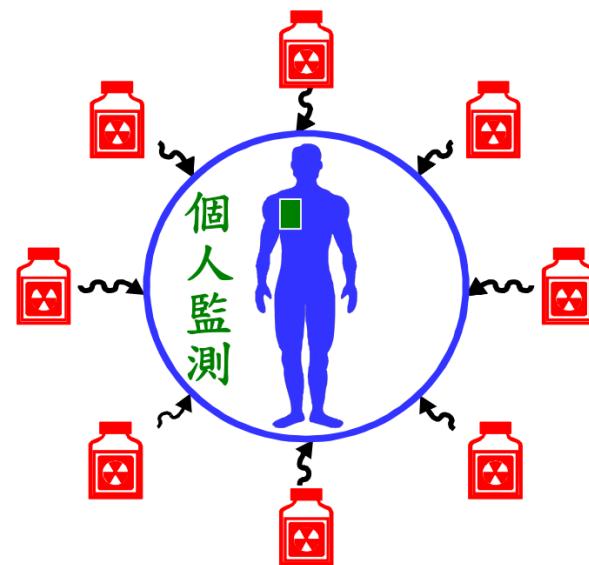
## — 劑量標準分為

- 劑量限度(Dose Limits)
- 劑量約束(Dose Constraints)
- 參考基準(Reference Levels)

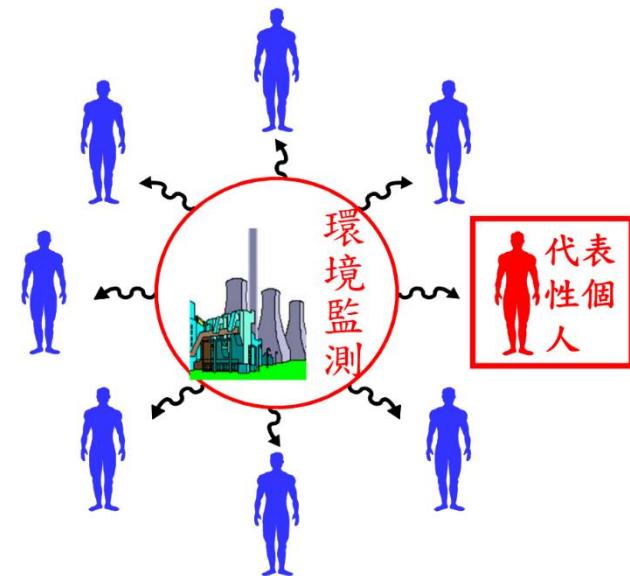


# 劑量限度與劑量約束

## 個人關聯



## 射源關聯



一般人

$1 \text{ mSv/y}$

5年不超過 $100 \text{ mSv}$

每年最大不超過 $50 \text{ mSv}$

工作人員

設 施

$0.25 \text{ mSv/y}$

# 用過核子燃料乾式貯存的輻射安全

## 放射性廢棄物貯存及設施安全管理規則

0.25 mSv/y

### 乾式貯存設施與一般游離輻射劑量比較圖



為達輻射防護最適化與自我要求，台電公司承諾乾貯設施對於廠界之輻射劑量設計限值為每年不超過 0.05 毫西弗，為一般民眾年劑量限值 1/20



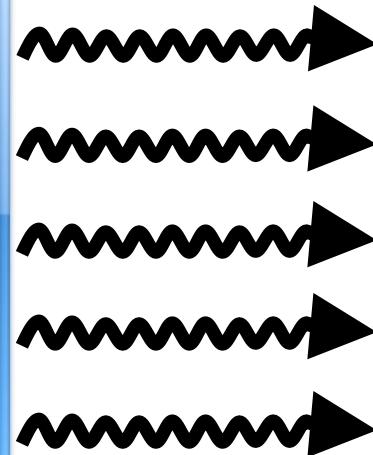


# 核電廠除役之輻射安全

核電廠內的處理與貯存設施

設施  $< 0.25 \text{ mSv/y}$

整座核電廠



廠界外任一民眾年有效劑量總和不得超過 $0.5 \text{ mSv/廠址}$



# 核電廠除役之輻射安全(續)

## 輻射作業

- 依據「游離輻射防護安全標準」之規範
- 設施經營者於規劃、設計及進行輻射作業時

### 一般人

- ◆ 造成之年有效劑量不得超過 1mSv
- ◆ 眼球水晶體之等價劑量不得超過 15 mSv
- ◆ 皮膚之等價劑量不得超過 50 mSv

### 輻射工作人員

- ◆ 有效劑量限值為每連續五年週期內不得超過 100 mSv，且期間任何單一年內不得超過 50 mSv
- ◆ 眼球水晶體之等價劑量不得超過 150 mSv
- ◆ 皮膚之等價劑量不得超過 500 mSv





# 核電廠除役之輻射安全(續)



解除管制&土地釋出

對一般人造成之年有效劑量不得超過 $0.25 \text{ mSv}$

持續監督

對一般人造成之年有效劑量不得超過 $1 \text{ mSv}$





# 放射性廢棄物最終處置階段之輻射安全

## ● ICRP-122建議書

(Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, 2013)

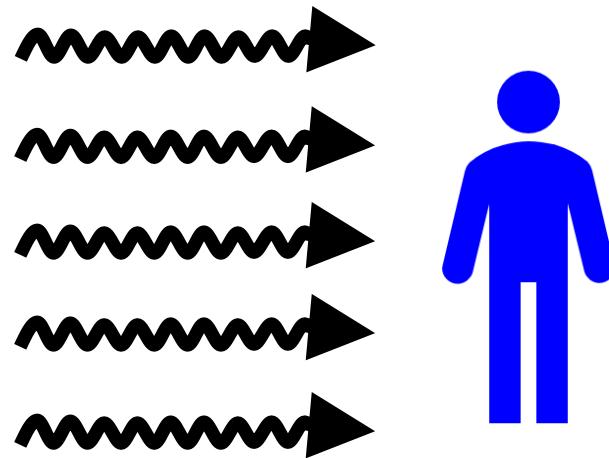
### ● 長期安全尺度下分**3個階段**

- **直接監督期**：相當於運轉階段，可提供主動式管理
- **間接監督期**：封閉後初期，可透過法規監督的階段
- **不可監督期**：長時間封閉後，已喪失法規監督、管制資訊與作為



# 我國高低放廢棄物的安全指標

低放最終處置  
或  
高放最終處置



設施外一般人之個人年有效劑量不得超過**0.25 mSv**



# 核後端各主要議題之輻射安全

## 乾式貯存

- ◆ 時間尺度：貯存執照20年。
- ◆ 法規限值：對於廠界之輻射劑量設計限值為每年不超過0.25 mSv

## 低放處置

- ◆ 時間尺度：數百至數千年
- ◆ 法規限值：對設施外一般人之個人年有效劑量，不得超過0.25 mSv

## 核電廠除役

- ◆ 時間尺度：25年內完成除役工作
- ◆ 法規限值：限制性使用者，其對一般人造成之年有效劑量不得超過1mSv；非限制性使用者，不得超過0.25 mSv

## 高放處置

- ◆ 時間尺度：數十萬年至百萬年
- ◆ 法規限值：對設施外一般人之個人年有效劑量不得超過0.25 mSv；對關鍵群體中個人之個人年風險，不得超過一百萬分之一



# 結語

- 核研所對核後端業務的推動具有舉足輕重的地位
- 輻射安全為全民迫切關心之議題，**良善的管理放射性廢棄物**可降低民眾對於輻射安全之疑慮
- 參考ICRP-122建議，**最適化的最終處置**，即是採用最佳可行技術，確保潛在曝露可以做到合理抑低，並透過良好的體系、利害關係人的參與，以透明的方式達成
- **放射性廢棄物的存在是既成事實**，最終處置設施的安全要求相當於自然範圍(劑量或是風險)，當代人義務不僅是確保未來世代的安全與保護，更須負起知識與資源的傳承





謝謝聆聽  
敬請指教

