



GE 1712

能源核電與輻射

日本福島電廠事故說明與評析

李 敏

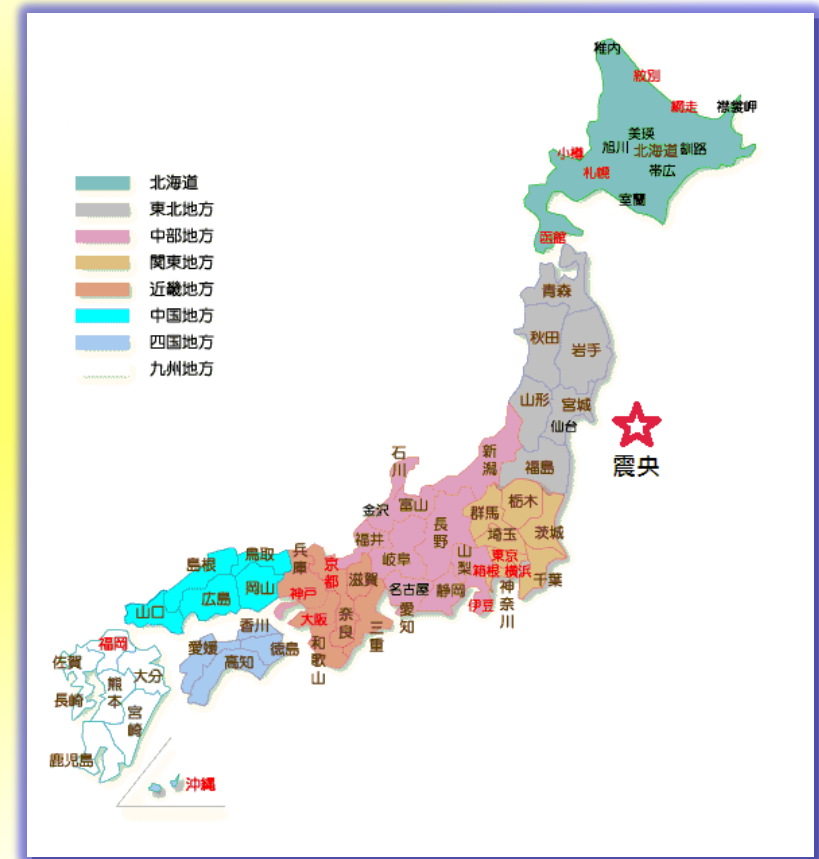
工程與系統科學系

國立清華大學



1. 大自然的力量 (1/2)

- ◆ 2011年3月11日日本台北時間下午1時46分，日本東北部地區發生規模9的強烈地震。
- ◆ 數十分鐘後，高度超過10公尺的海嘯侵襲了東北幾個主要臨海縣份。
- ◆ 原本是令人心情愉悅的週五下午，霎時間轉變成人間煉獄。



Source: <http://www.e-japannavi.com>



1. 大自然的力量 (2/2)

◆ 共伴的歷史性天然災害使得災區目前的死亡與失蹤人數超過28,000人（4月19日數據）。





日本福島核能一廠事故





- ◆ 日本福島第一核能發電廠共有6部沸水式反應器機組，屬於東京電力公司所有。





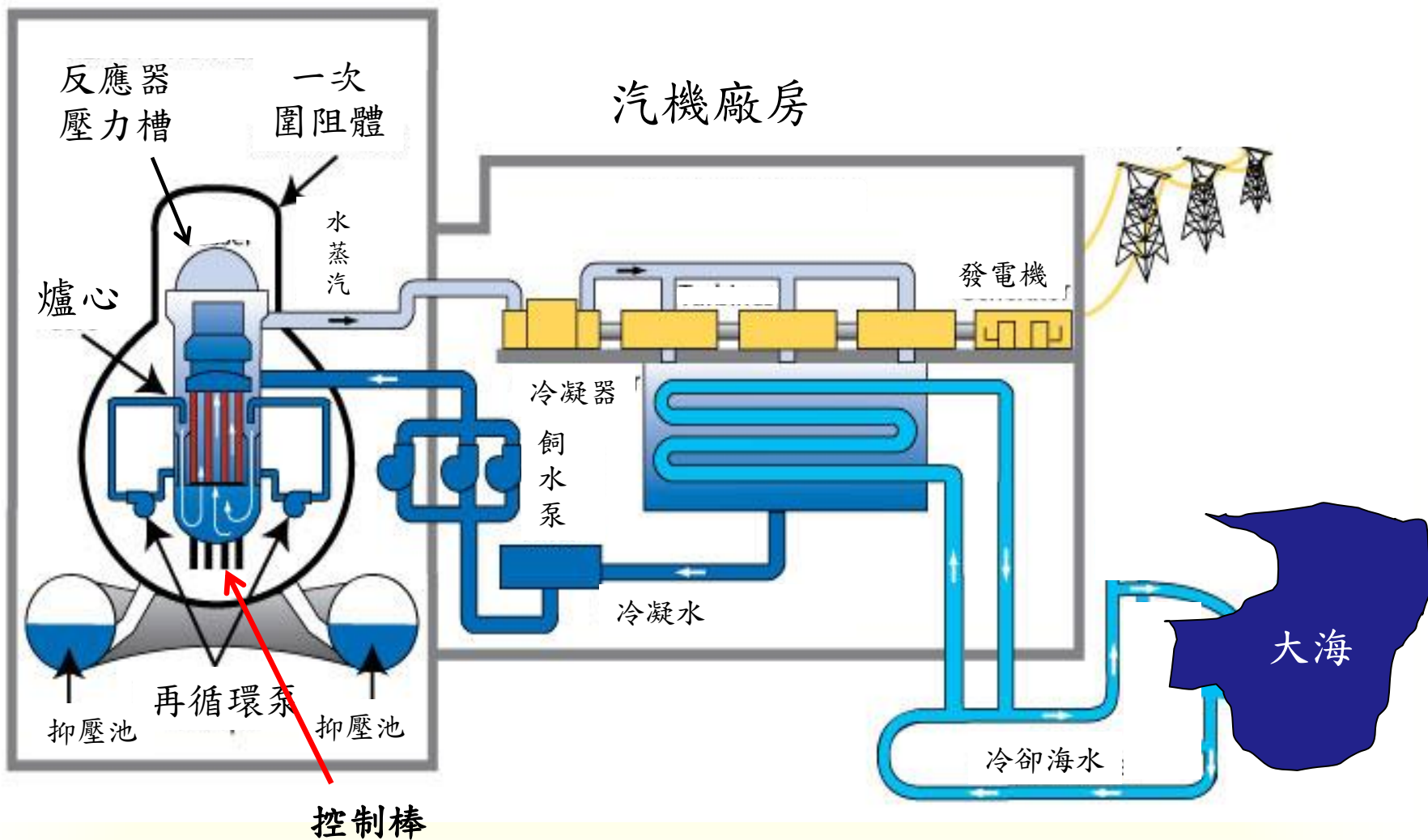
日本福島核能一廠

福島一廠						
機組	1號機	2號機	3號機	4號機	5號機	6號機
反應爐型式	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-4	BWR-5
裝置容量	46.0萬瓩	78.4萬瓩	78.4萬瓩	78.4萬瓩	78.4萬瓩	110.0萬瓩
商轉日期	1971. 3.26	1974 7.18	1976 3.27	1978 10.12	1978 4.18	1979 10.24
地震發生時 機組狀態	正常運 轉中	正常運 轉中	正常運 轉中	停機大 修中	停機大 修中	停機大 修中
所在地	福島縣雙葉郡大熊町					
所有者	東京電力公司TEPCO					



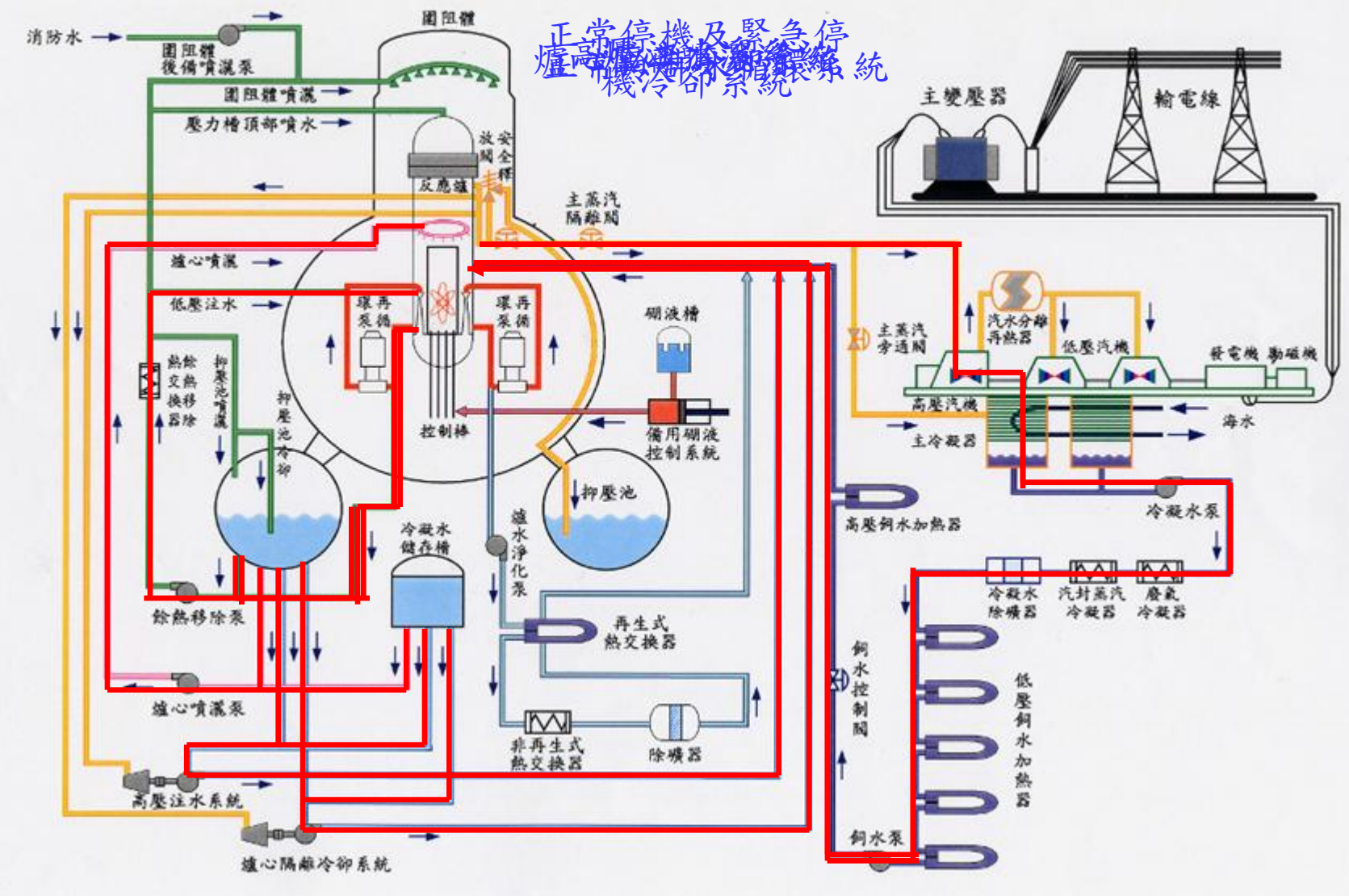
反應器廠房

第四型沸水式反應器

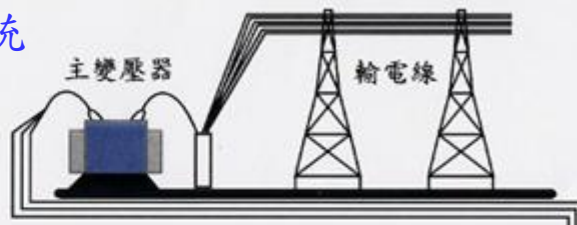




核能發電廠沸水式系統簡要流程圖



正常停機及緊急停機
爐高壓冷卻系統





日本福島核能一廠事故說明

- 地震發生後 (3月11日 14:46) ，造成四座核電廠 11部機組跳機，控制棒成功插入爐心，終止核分裂連鎖反應
 - 福島核能一廠 (三部運轉，三部停機維修)
 - 福島核能二廠 (三部機)
 - 女川核電廠 (四部機)
 - 東海核電廠 (一部機)

- 地震造成電廠喪失廠外電源

- 緊急柴油發電機正常啟動

- 高達14公尺的海嘯，沖毀福島核能一廠的緊急柴油機的供油設備，電廠喪失全部電源 (電廠全黑事故)

- 三部跳機後的機組依靠蒸汽驅動注水設備維持爐心水位



日本福島核能一廠事故說明

- 蒸汽驅動注水設備僅能補水，無法將讓排出系統；熱累積於圍阻體內，圍阻體壓力上升；為避免圍阻體因過壓喪失功能，須以圍阻體排氣釋出能量
- 電池電力耗盡後，注水功能完全喪失，冷卻水逐漸蒸發，水位下降，終致燃料不再為水淹蓋，爐心裸露
- 爐心裸露後，燃料棒護套溫度上升，鋯與水蒸汽發生劇烈反應，產生氫氣；部分揮發性較高的放射性物質 (銫-137, 碘-131, 惰性氣體) 自燃料丸釋出，進入圍阻體
- 正常運轉時，馬克一型圍阻體內部充氮氣，故沒有氫爆的顧慮
- 運轉人員為避免圍阻體因過壓喪失功能，進行圍阻體排氣



日本福島核能一廠事故說明

➤ 氫氣進入反應器廠房，與氧氣接觸，發生氫爆

1 號機:12日下午 3:36；圍阻體未喪失功能

3 號機:14日上午 3:36；圍阻體未喪失功能

2 號機於 14日下午1:25 喪失冷卻；

15日上午6:00，發生爆炸，位置與1 號機及

3 號機不同，發生於抑壓池區間的附近；

圍阻體可能喪失完整性

放射性物質開始外釋，廠區輻射快速上升

➤ 為降低爐心溫度，將海水灌入爐心

1 號機:12日下午 8:05；2 號機:15日上午 10:30；

3 號機:13日下午 1:12

➤ 壓力槽內的壓力阻礙了海水的灌入





日本福島核能一廠事故說明

- 4 號機：15日上午6:00左右，反應器廠房發生爆炸；
上午9:30，反應器廠房火災，11:00 熄滅
16日上午5:45，反應器廠房火災，6:15 熄滅
- 用過燃料儲存池存放自爐心退出之使用過的核燃料
- 用過核燃料內有大量放射性物質，須採用強制對流將衰變熱移除
- 燃料頂端的上方有6公尺深的水作為輻射屏蔽
- 即使儲存池喪失冷卻，大量的水也可以維持燃料的冷卻達一段時間，而一個位於開放空間的水池，可以非常容易的補水





日本福島核能一廠事故說明

- 若用過燃料裸露，及不再為水所覆蓋，同樣會溫度上升，護套會與水蒸汽反應產生氫氣，揮發性較高的放射性物質亦會外釋
- 若反應器廠房損壞，放射性物質會釋放到環境
- 沒有水作為屏障，自燃料棒內的放射性物質釋出的輻射，會在廠房上空與廠址，造成極高的劑量

用過燃料池喪失冷卻，且嚴重到燃料裸露，造成廠區高劑量，甚致產生氫爆與放射性物質物外釋，應該是最讓人不解與訝異的地方



日本福島核能一廠事故評析

➤ 與美國三哩島與前蘇聯車諾比災變比較

反應器類型：三哩島 -- 壓水式反應器

車諾比 -- 石墨水冷反應器

福島 -- 沸水式反應器

事故肇因：三哩島 -- 機件故障與人為誤失

車諾比 -- 嚴重設計缺陷

福島 -- 天然災害

事故特質：

三哩島：喪失冷卻，爐心熔毀，放射性物質自燃料丸釋出，
但處置適當，圍阻體保持完整

車諾比：反應器連鎖反應失去控制，造成反應器瞬間因水蒸汽與氫氣爆炸而解體，大量放射性物質外釋

福島：多機組同時發生事故，喪失冷卻，爐心熔毀，放射性物質自燃料丸釋出，一部機組的圍阻體喪失能，用過燃料儲存池中的燃料未為水覆蓋



日本福島核能一廠事故評析

➤ 與美國三哩島與前蘇聯車諾比災變比較

事故影響

三哩島：極微量的放射性物質外釋，未對電廠員工或附近民眾造成任何程度的輻射傷害；使核工業界認識到輕水式反應器的爐心會熔毀，後續的軟硬體措施的改善，全世界在過去30年中，累積超過12,000反應器-年未再發生類似事故。

車諾比：水蒸汽與輕器爆炸及後續之石墨火災造成極大量放射性物質外釋到外界環境，237名電廠員工與救災人員因劑量過高，有『急性輻射傷害症狀』，31人於三個月內死亡，但沒有民眾有此症狀；電廠附近4,300平方公里的土地被劃為禁入區，220,000居民遷移。受輻射影響居民的健康效應是許多研究的重點。外釋的輻射擴散到全歐洲。不再興建石墨水冷反應器，目前仍有11部機組運轉中。



日本福島核能一廠事故評析

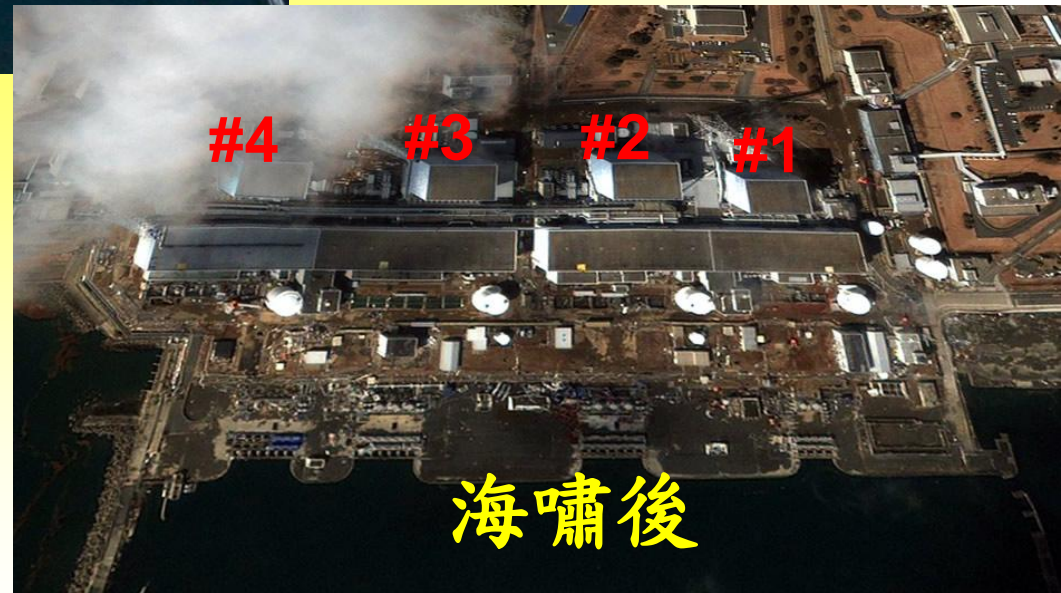
➤ 與美國三哩島與前蘇聯車諾比災變比較

事故影響

福島：大量高揮發性放射性物質外釋，依日本政府的最近之評估，外釋量已達國際原子能總署事故分類的第七級。日本政府依緊急應變規劃，在極大範圍內，採取民眾防護設施。尚未傳出有任何工作人員有『急性輻射傷害症狀』。勢必讓全球的核能使用國家檢討核電廠防震與防海嘯設計，以及廠內外緊急應變的相關程序。



福島一廠海嘯前後空照圖





沸水式反應器第四型 馬克一號圍阻體設計

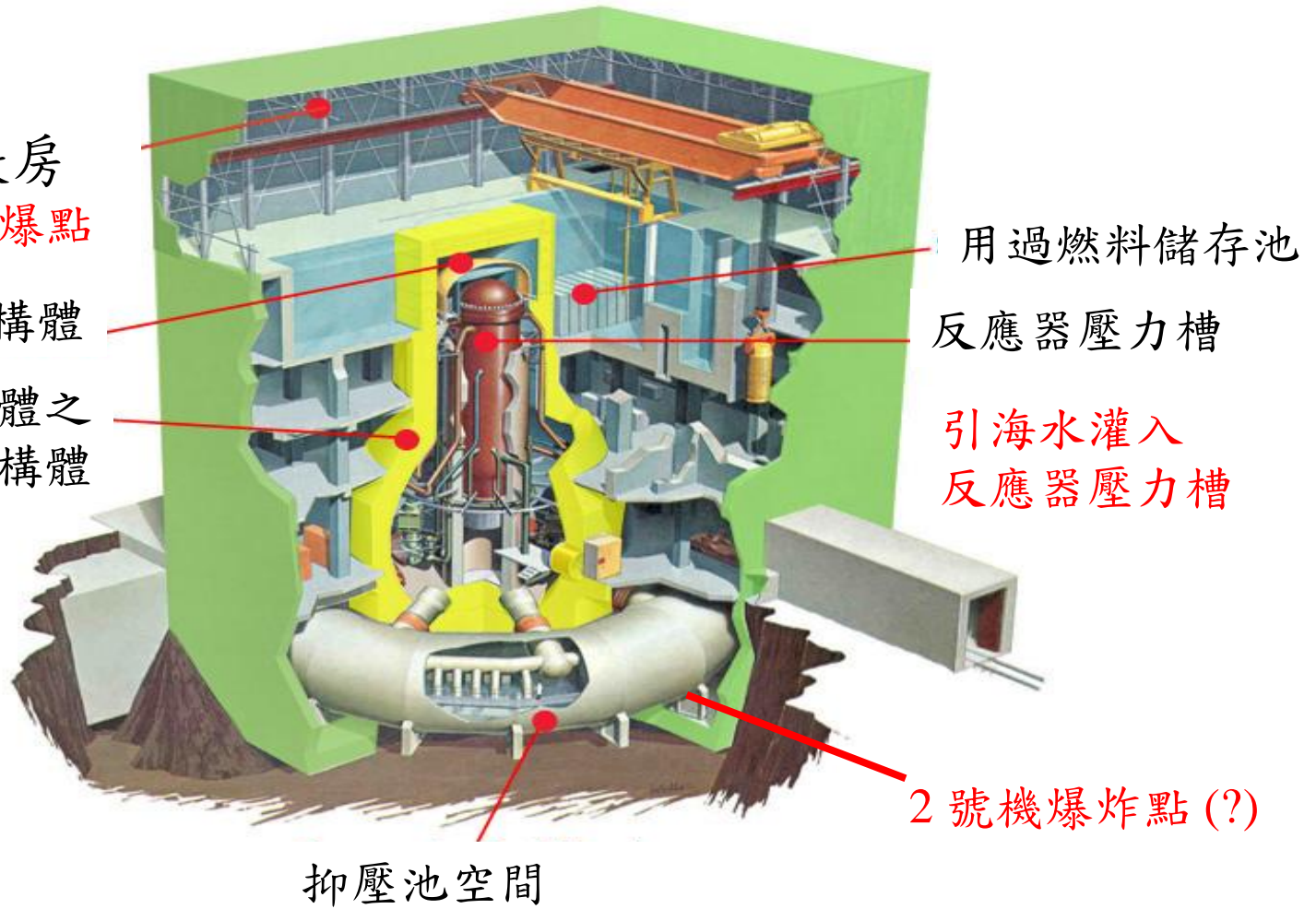


Photo taken from Nuclear Engineering Institute Webpage

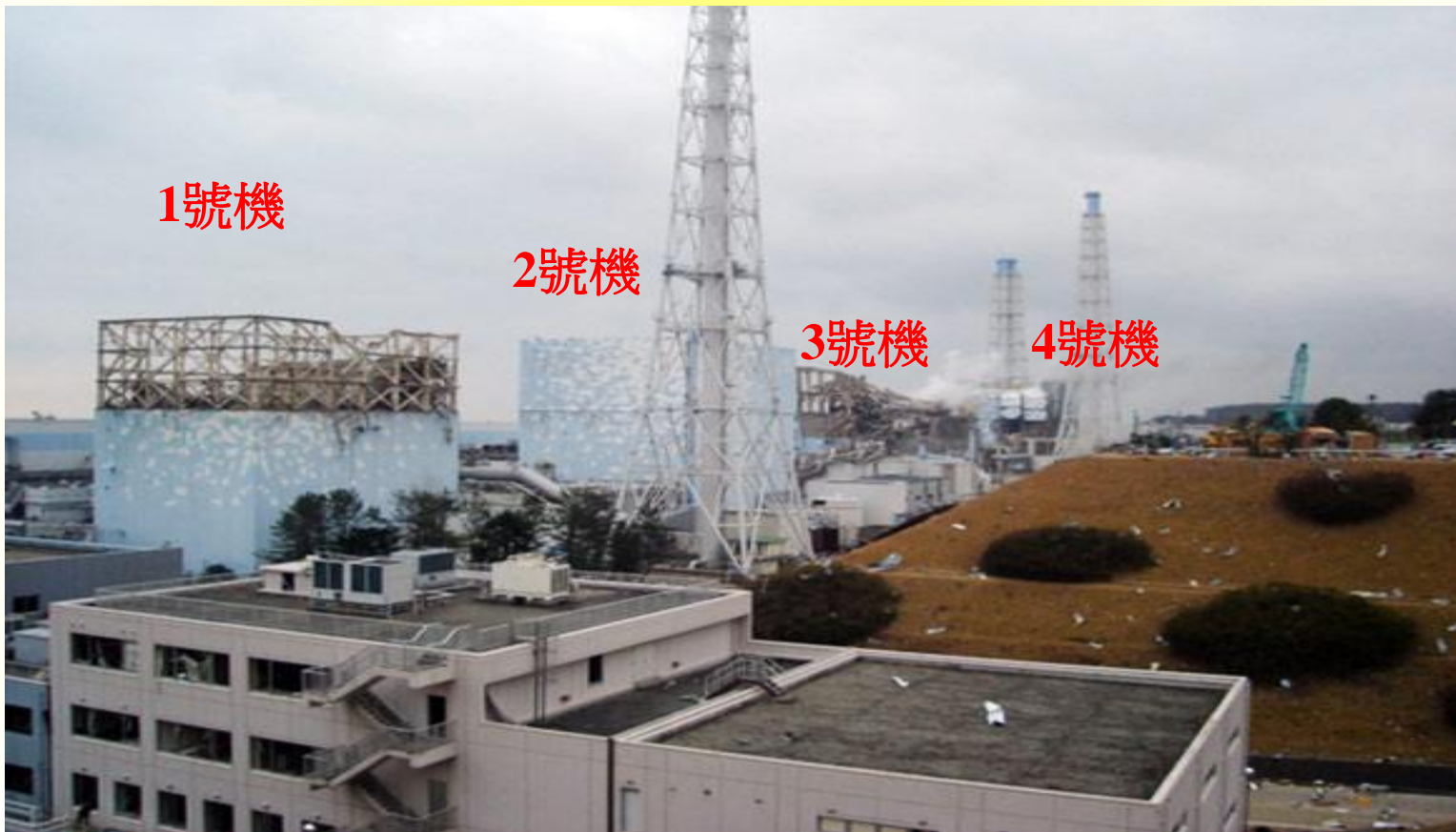


福島核能一廠1號機反應器廠房





福島核能一廠 (2011-3-16)





沸水式反應器第四型 馬克一號圍阻體設計

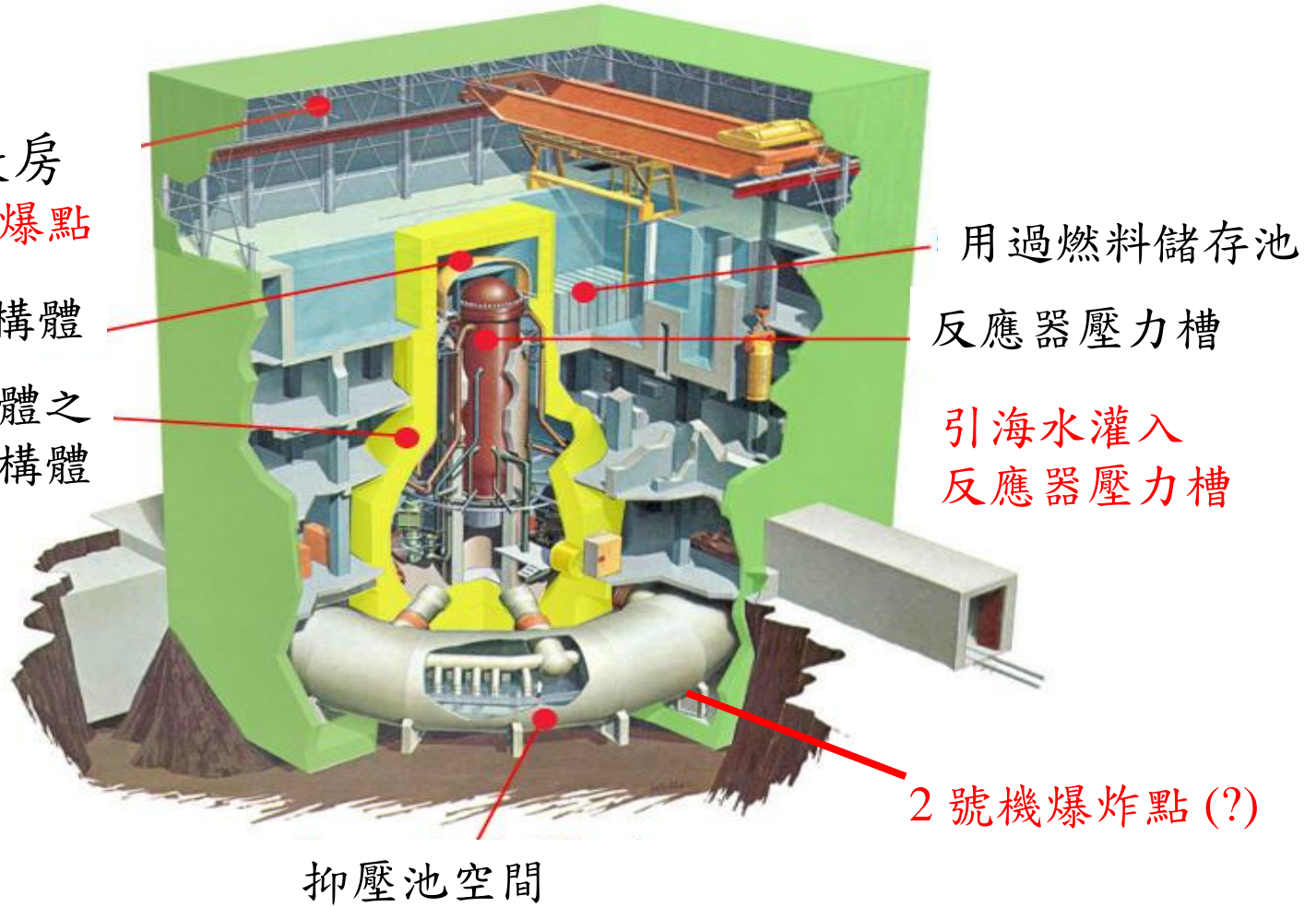
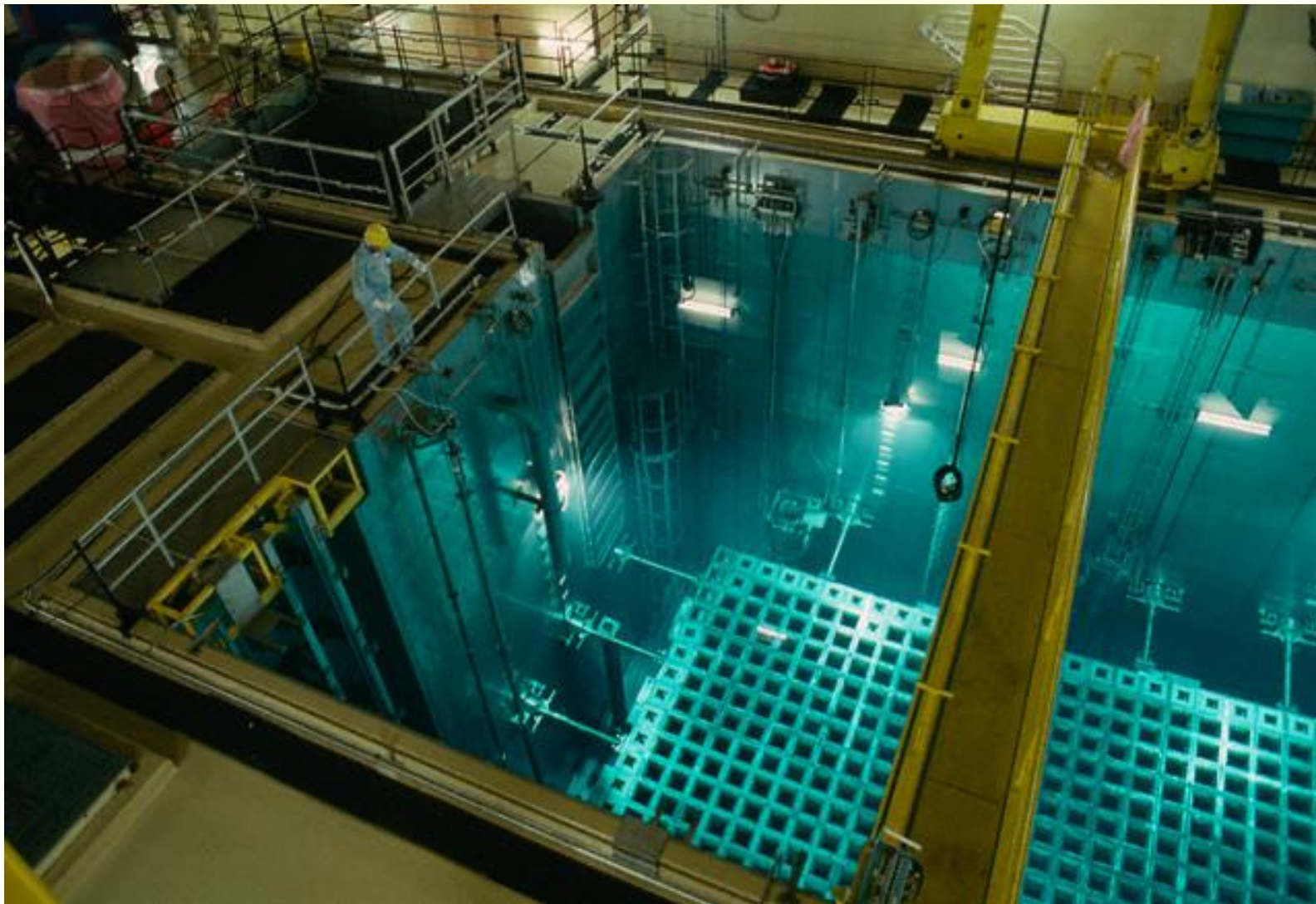


Photo taken from Nuclear Engineering Institute Webpage

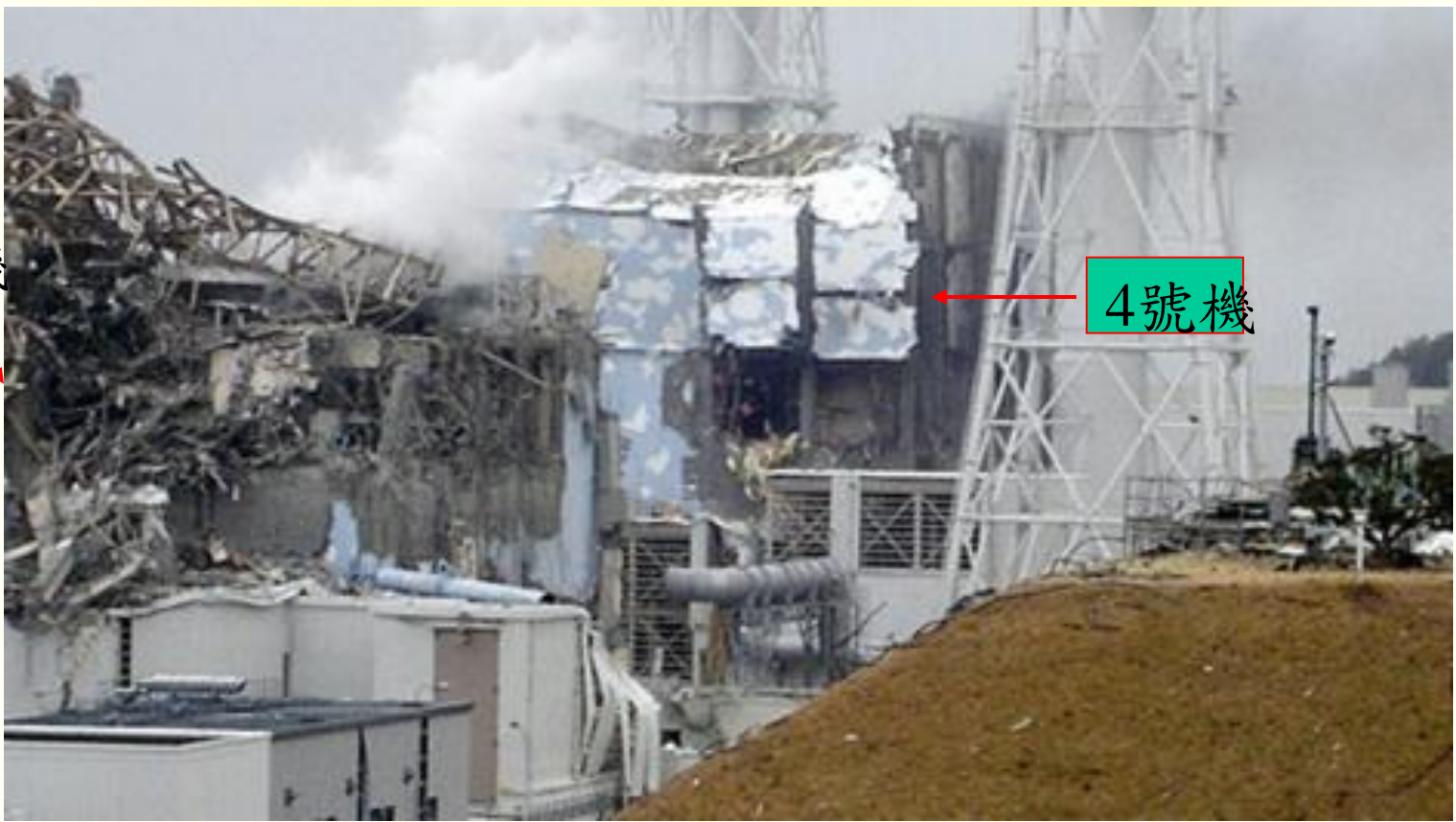


用過燃料儲存池





福島核能一廠 (2011-3-16)



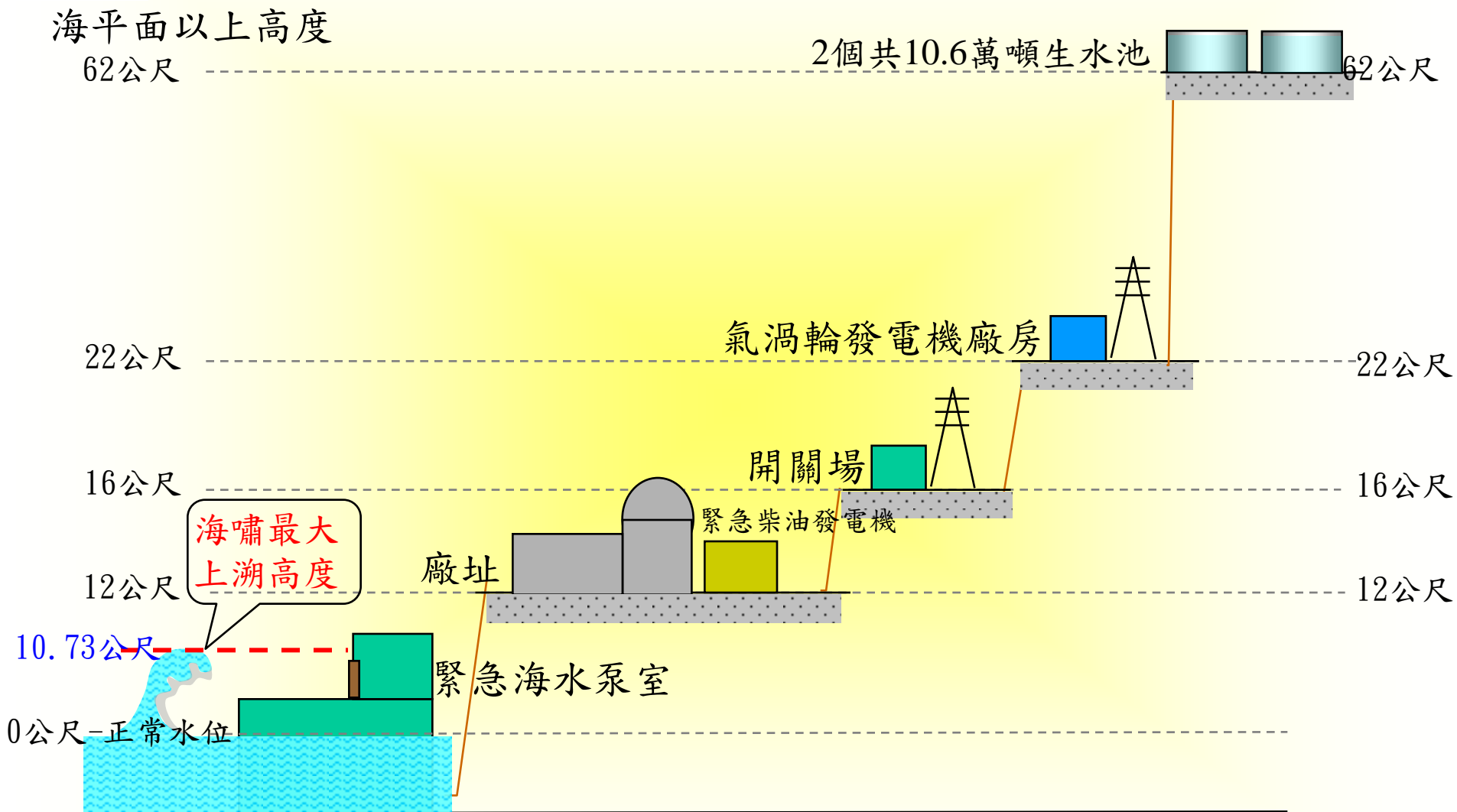
3號機

4號機





核一廠各廠房設施高程示意圖





核一廠氣渦輪發電機廠房





核一廠生水池





緊急操作程序書 (Emergency Operating Procedure)

嚴重事故處理導則 (Severe Accident Management Guidance, SAMG)

- 防止爐心熔毀程度的惡化
- 避免圍阻體喪失功能
- 降低放射性物質外釋量



NUREG-1465 壓水式反應器 排放至圍阻體之輻射源項

	Gap Release ¹	Early In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Duration (hours)	0.5	1.3	2.0	10.0
Noble gases	0.05	0.95	0	0
Halogens	0.05	0.35	0.25	0.1
Alkali Metals	0.05	0.25	0.35	0.1
Tellurium Group	0	0.05	0.25	0.005
Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Cerium Group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0
1. Gap Release is 3% if long term fuel cooling is maintained				

護套burst溫度(1400 到 2000 °F間)



NUREG-1465沸水式反應器 排放至圍阻體之輻射源項

	Gap Release ¹	Early In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Duration (hours)	0.5	1.3	3.0	10.0
Noble gases	0.05	0.95	0	0
Halogens	0.05	0.35	0.30	0.01
Alkali Metals	0.05	0.25	0.35	0.01
Tellurium Group	0	0.05	0.25	0.005
Barium, Strontium	0	0.02	0.1	0
Noble Metals	0	0.0025	0.0025	0
Cerium Group	0	0.0005	0.005	0
Lanthanides	0	0.0002	0.005	0

1. Gap Release is 3% if long term fuel cooling is maintained

護套burst溫度(1400 到 2000 °F間)



斷然處置措施

因應『超過設計基準事故』策略的一環

發生『超過設計基準事故』，且判斷爐心熔毀不可避免時；

及時的運用非常態的設施或系統，利用**任何可用**之水源，
將水注入爐心，防止放射性物質的外釋量造成**廠界劑量超過**
全面緊急事故的基準

做不做的到，如何做，誰來做，甚麼時候做

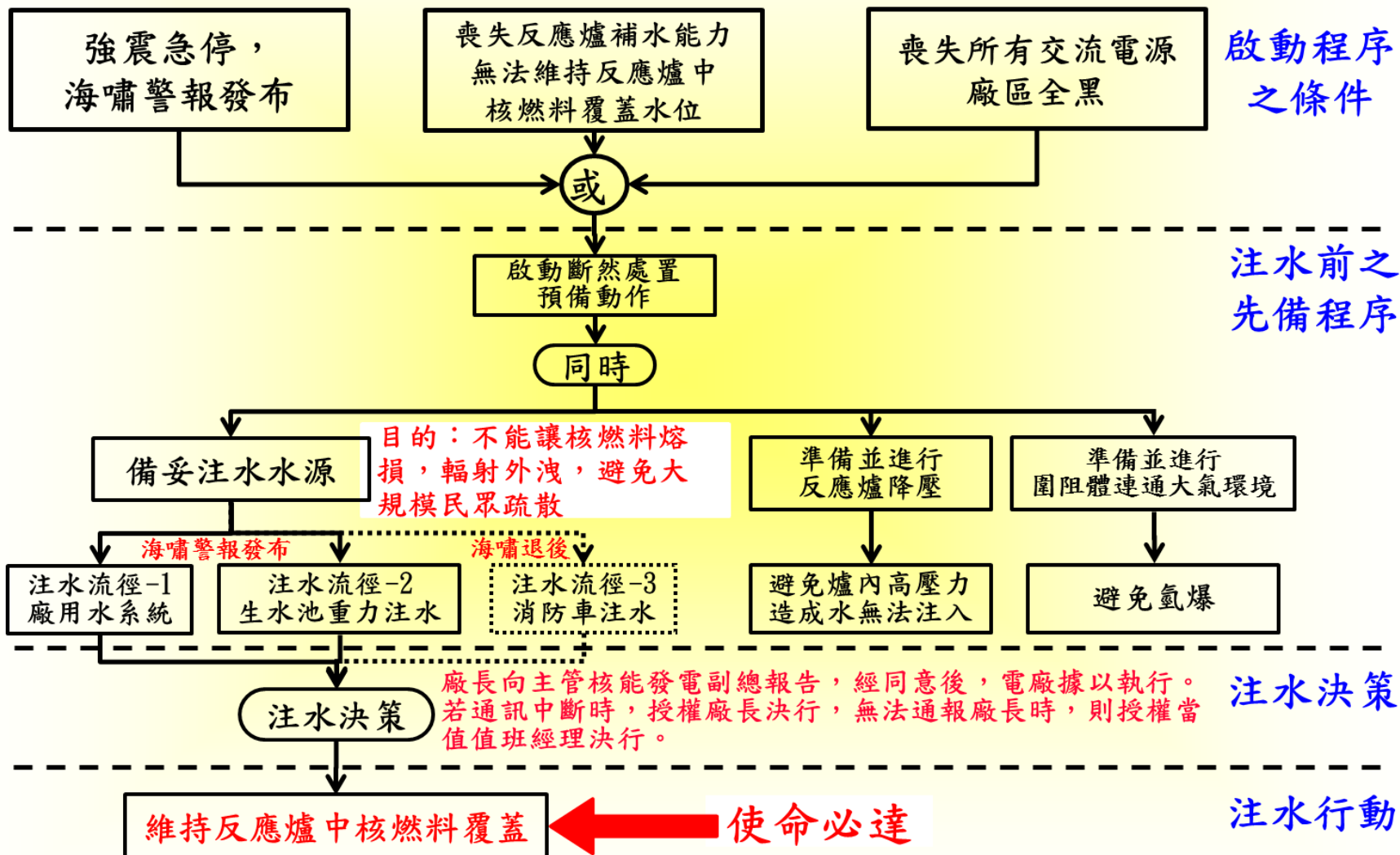


規劃機組斷然處置

1. 建置「機組斷然處置程序指引」程序書
 - (1) 啟動程序的條件
 - (2) 注水前的先備程序與操作
 - (3) 通報程序與注水決策機制
2. 建置機組斷然處置各行動策略點檢文件(以表格形式應用於實際救援作為上，包括各項資源容量、流量、列置時間、供應時間、工具、人力、注意與回報事項，並附加行動策略操作流程圖(100年12月31日前完成)
3. 依據爐心熱流分析(RELAP)程式模擬機組斷然處置各行動策略的結果，提供3階段(減緩、長期電力及冷卻復原)人力及時限擬定參考(100年12月31日前完成)
4. 機組斷然處置相關程序書整併與團隊演練(101年6月30日前完成)



規劃機組斷然處置

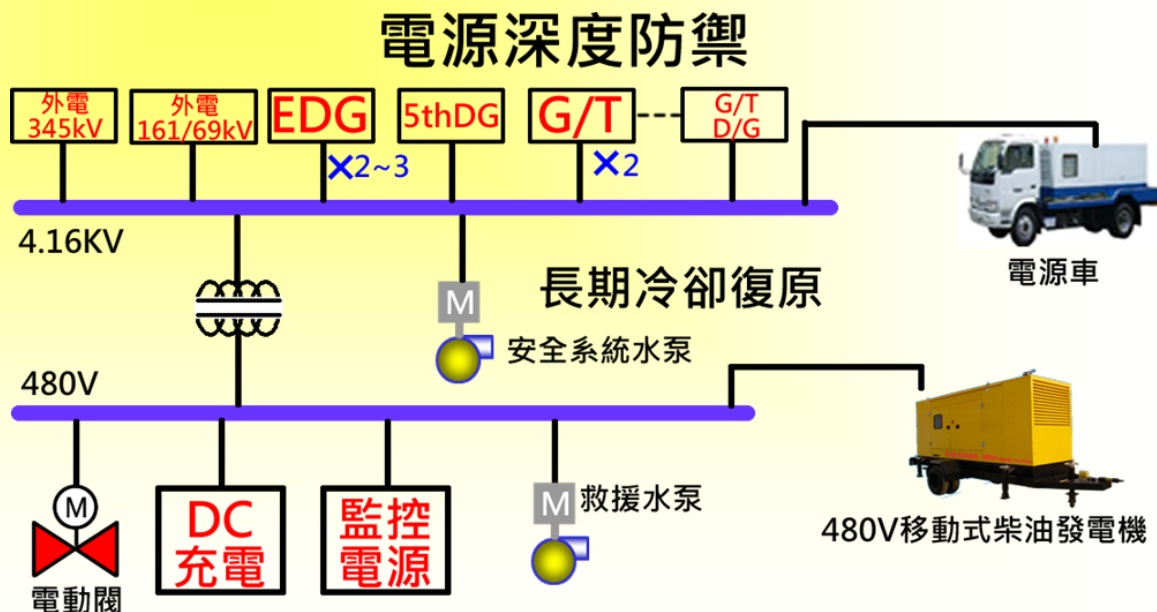




提升救援能力

後備及救援電源

- (1) 完成第5台氣冷式柴油發電機擴充至可提供兩部機電源
- (2) 利用氣渦輪機全黑啟動柴油發電機提供廠內4.16kV電源(100年12月31日前引接電纜採購驗收完成)
- (3) 購置6台 1500kW /4.16kV電源車(101年6月31日前採購驗收完成)
- (4) 購置29台100~500kW/480V移動式柴油發電機(100年12月31日前採購驗收完成)
- (5) 延長廠區全黑 電源供應能力由設計之8小時至24小時





提升救援能力

2. 後備及救援水源

- (1) 清查廠內水源容量，規劃注水流徑與動力來源
- (2) 廠外水源現勘，規劃運送途徑與注水流徑
- (3) 廠內與地方消防車及水車數量、容量、注水揚程清查，增購消防車 (101年6月31日前採購驗收完成)
- (4) 完成長期冷卻復原規劃與點檢，加購緊要海水泵馬達備品(100年12月31日前採購驗收完成)

核三廠蒸汽產生器及反應爐後備補水對策

