

出國報告審核表

出國報告名稱：參加 WANO-TC 舉辦核電廠地震安全研討會		
出國人姓名	職稱	服務單位
陳慶鐘	12 等核能工程監	台灣電力公司核能安全處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>國際會議</u> (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：98 年 1 月 12 日至 98 年 1 月 15 日		報告繳交日期：98 年 3 月 10 日
出國計畫主辦機關審核意見	<input type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input type="checkbox"/> 2. 格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input type="checkbox"/> 3. 無抄襲相關出國報告 <input type="checkbox"/> 4. 內容充實完備。 <input type="checkbox"/> 5. 建議具參考價值 <input type="checkbox"/> 6. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會 (說明會)，與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 _____ <input type="checkbox"/> 10. 其他處理意見及方式：	

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

報 告 人	審 核 人	單位	主管處	總經理
		主管	主 管	副總經理

出國報告（出國類別：開會）

參加 WANO-TC 舉辦核電廠地震安全研討會

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳慶鐘 核安處駐核一廠安全小組經理

派赴國家：日本

出國期間：98 年 1 月 12 日至 1 月 15 日

報告日期：98 年 3 月 10 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

頁數 60 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

陳慶鐘 台灣電力公司核安處 12 等駐核一廠安全小組經理

02-26383501 轉 3650

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他(開會)

出國期間：2009/01/12-2009/01/15 出國地區：日本

報告日期：2009/3/10

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

1. WANO-TC 舉辦的核電廠地震安全研討會，除邀請我國外，另有日本、韓國、大陸、印度、巴基斯坦等國，針對如何各國核電廠地震設計、防震措施及地震應變經驗交換意見，以提昇耐震能力，確保核能安全。本公司在會中簡報「我國核電廠地震設計及強化地震應變能力措施」。

2. 此次日本共有 3 篇報告：

(1) 中越沖地震對柏崎刈羽核電廠的影響及東京電力公司的改善行動

報告內容包含：中越沖地震的影響、地震經驗回饋及改善措施、中越沖地震後東京電力公司的行動計劃（地震後組件健全評估及依「地震震動新設計基準」執行整體性評估）及結構強度分析結果及補強案例。甚值得我國參考借鏡，將詳述於報告本文。其中下列兩項特別值得一提：

- 東京電力公司依「地震震動新設計基準」執行整體性評估結果，為強化機組耐震能力，東京電力公司決定將柏崎刈羽核電廠全部 7 部機組，反應爐廠房基礎 (foundation) 的安全地震震動值提升至 1,000 Gal。
- 受損最輕微的 7 號機已完成檢查，無任何安全設備受損，經完成檢修、評估與補強，準備再起動申請。目前最大的阻力來自地方政府及附近民眾，主要原因為東京電力公司於事故時，延誤通知及報導不實，民眾對電力公司的作為不信任及對其所提出的安全評估結果沒有信心。

(2) 日本濱岡核電廠強化耐震餘裕之作法

內容包含：濱岡核電廠地震評估及耐震餘裕強化改善實例。亦甚具參考價值，同時摘述於報告本文。亦有兩項特別值得一提：

- 日本中部電力公司於 2005 年 1 月為全日本首先宣布，決定自願改善相關設施，強化濱岡核電廠耐震餘裕，使反應爐廠房基礎的安全地震震動值達 1,000 Gal。(其中 3-5 號機已於 2007 年改善完成)
- 日本中部電力公司於 2008 年 12 月 22 日，決定將濱岡 1 及 2 號機永久停機，主要原因為重新起動此 2 部機所必須的工作（提升耐震能力）無法符合經濟效益，並且決定計畫在電廠廠址的東邊建造新的第 6 號機。

- (3) 日本女川核電廠介紹 2005 年 8 月 16 日宮城縣近海地震，經檢查及評估無安全有關設備受損，僅有小部份非安全有關設備受損情形。
3. 韓國介紹已運轉 30 年的 Kori 核電廠 1 號機，依該國管制單位要求，針對安全有關設備，參考 1980 年美國 NRC 發行的 USI A-46 “Seismic Qualification of Equipment in Operating Nuclear Plants” 進行耐震評估。USI A-46 主要針對較老且未能符合“現代耐震標準 (modern seismic qualification criteria)”的核電廠，確認其重要設備的耐震符合性。並且採用美國 NRC 接受，由“耐震資格公用事業集團 (seismic qualification utility group)”所制定的“一般執程序書 (Generic Implementation Procedure—GIP)”執行評估作業。評估對象包含：機械與電氣設備、槽體與熱交換器、電纜與導管溝槽、電驛等，評估結果數百件設備被須進行耐震補強。另對廠房的耐震能力重新分析。
 4. 印度主要介紹 Madras 核電廠，利用各種電腦分析模式 (mode) 進行分析，執行土木結構、一端有擋板的圓柱形組件、管路系統的一次熱交換器及其他管路系統等的耐震再評估
 5. 巴基斯坦介紹 Karachi 核電廠因早期沒有進行嚴謹的地質調查，除自行進行地震安全再評估及地質調查外，並於 1993 年邀請 IAEA 協助電廠進行設備改善，使可承受較原始地震設計值(0.1g)更高的地震(0.2g)，所依據的文件為 IAEA GUIDE NO. 50-SG-S1 (1991)。評估對象主要分為 3 類：
 - (1) 未利用錨栓固定 (unanchored) 的安全或安全有關設備。
 - (2) 有錨栓固定 (anchored) 的安全或安全有關設備，但須評估其適切性。
 - (3) 非安全有關設備，但地震時須維持在固定位置，否則會對安全設備造成影響。總共有 17 項設備進行簡單的改善(easy fixes)。相關改善內容可供本公司參考，詳如報告本文。
 6. 大陸並未針對核電廠地震安全措施提出報告，經查詢因大陸核電廠所在地區幾乎沒有地震，因地震設計安全係數非常低，此次會議中僅針對核電廠的颱風應變及緊急應變計劃提出報告。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

內 容	頁 次
壹、出國目的.....	2
貳、中越沖地震對柏崎刈羽核電廠的影響及東京電力公司的改善 行動.....	3
一、中越沖地震的影響.....	錯誤! 尚未定義書籤。
二、地震經驗回饋及改善措施.....	14
三、中越沖地震後東京電力公司的行動計劃.....	20
(一) 地震後組件健全 (component soundness) 評估	21
(二) 依地震震動新設計基準 (New Design Base Seismic Motion) 執行整體性評估.....	30
四、結構強度分析結果及補強案例.....	35
參、日本濱岡核電廠強化耐震餘裕之作法.....	38
耐震餘裕強化改善實例	44
肆、巴基斯坦 Karachi 核電廠強化地震安全.....	55
伍、心得及建議.....	60

壹、出國目的

本次出國任務為：

參加 WANO-TC 舉辦核電廠地震安全研討會，交換核電廠地震設計、防震措施與地震應變經驗，確保核能安全。

日本與我國核電廠近年來均遭遇大地震，尤其日本東京電力公司柏崎刈羽核電廠受到大於地震設計基準地震的侵襲，其地震時的應變經驗、復原工作、評估作業及補強措施等均值得參考借鏡。本公司除在研討會進行「我國核電廠地震設計及強化地震應變能力措施」簡報外，透過會中與各國的經驗交流，獲取各國核電廠地震設計、防震措施、再起動評估與地震應變經驗，藉以強化我國核電廠地震應變能力。

貳、中越沖地震對柏崎刈羽核電廠的影響及東京電力公司的改善行動

一、中越沖地震的影響

中越沖地震

時間：2007年7月16日上午10:13

震央：緯度：37°33.4' N.，經度：138°36.5' E.

深度：17公里

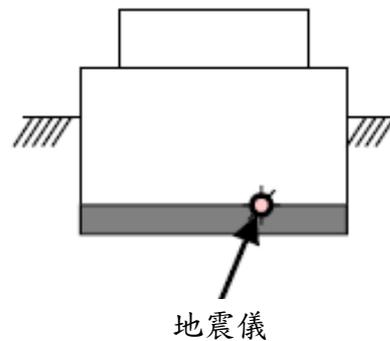
規模：芮氏6.8級

距離：震央距柏崎刈羽核電廠16公里；震源距柏崎刈羽核電廠23公里

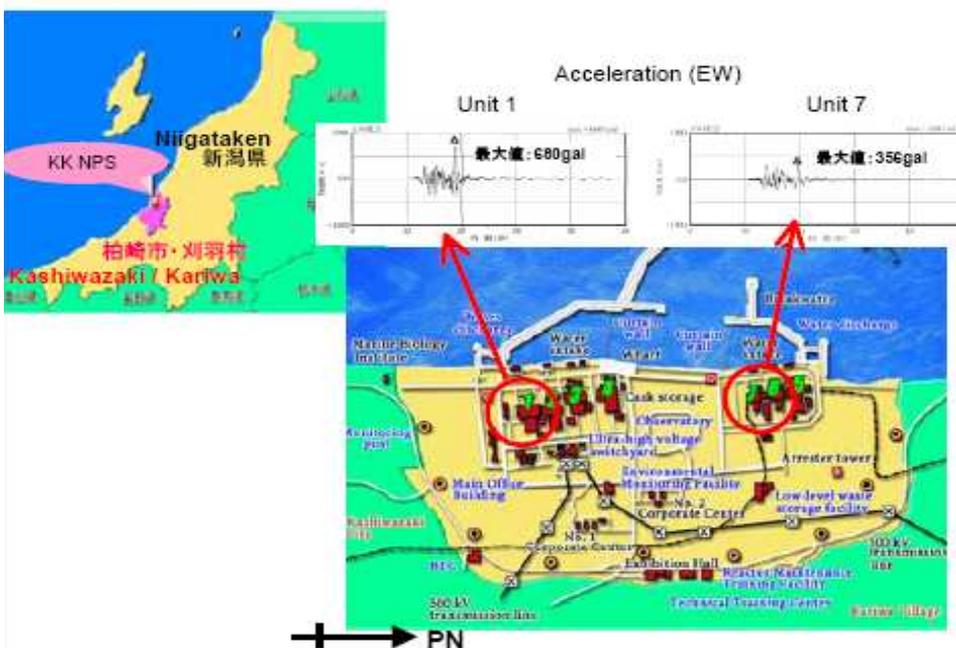
地震強度：日本新潟縣地區約6級

單位：Gal (cm/s²)， () 內為設計值

機組	水平-NS	水平-EW	垂直
1	311(274)	680(273)	408(235)
2	304(167)	606(167)	282(235)
3	308(192)	384(193)	311(235)
4	310(193)	492(194)	337(235)
5	277(249)	442(254)	205(235)
6	271(263)	322(263)	488(235)
7	267(263)	356(263)	355(235)



自動急停設定值
 水平：120Gal
 垂直：100Gal



地震時及地震後機組狀況

		1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機	6 號機	7 號機
地震時	運轉狀況	大修中	起動中	運轉中	運轉中	大修中	大修中	運轉中
	自動急停	—	是	是	是	—	—	是
	爐心內燃料	沒有燃料	爐心內有燃料					
	反應爐爐槽	開啟	關閉					
	一次圍阻體 隔離閥	開啟						
地震引起的主要事故	用過燃料池溢流	是						
	輻射外釋	無					微量排至大海	微量排至大氣
	其他	反應爐廠房積水 2000m ³	—	廠用變壓器火災	24m ³ 海水漏至汽機廠房	—	—	—

依地震設計分類相關設備受損情形

地震設計分類	相關設備舉例	受損情形
As	<ul style="list-style-type: none"> ■ 反應爐壓力槽 ■ 一次圍阻體 ■ 控制棒 	無
A	<ul style="list-style-type: none"> ■ 緊急爐心冷卻水系統 ■ 反應爐廠房 	無
B	<ul style="list-style-type: none"> ■ 汽機設備 ■ 放射性廢棄物處理系統 	輕微 (吊車萬向接頭)
C	<ul style="list-style-type: none"> ■ 主發電機 ■ 變壓器 ■ 蒸汽鍋爐 	一些 (廠用變壓器、主煙囪通風道、消防管路等)

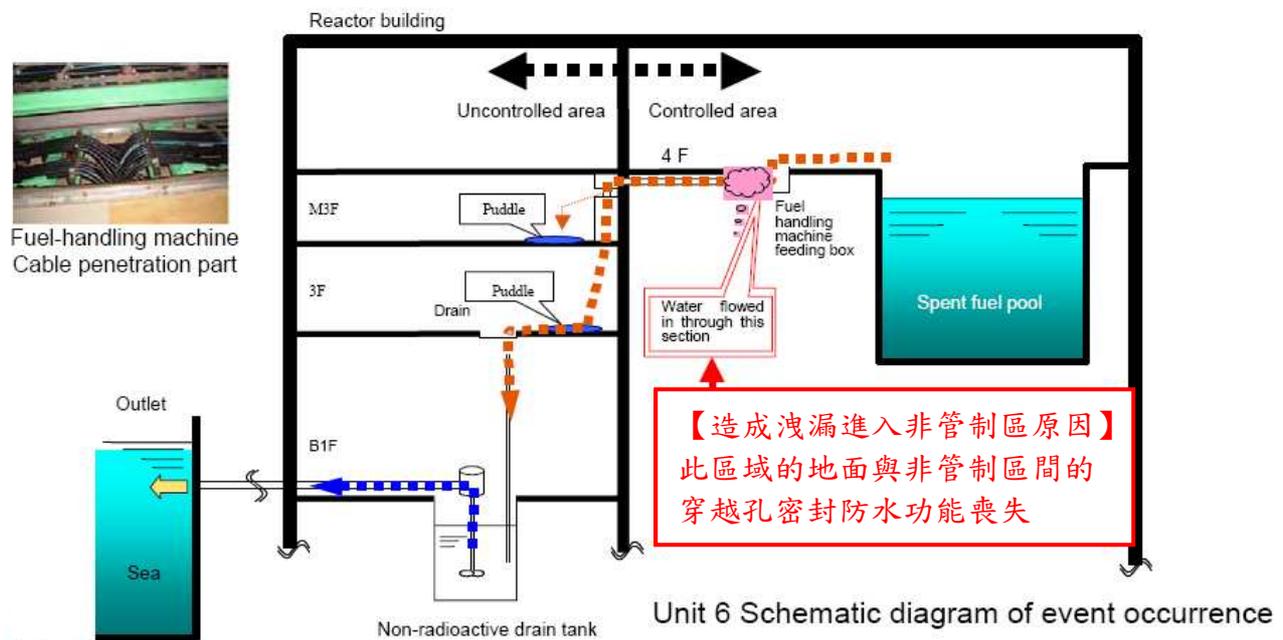
地震引起的異常狀況

1. 用過燃料池水溢出，微量放射性液體排出廠外

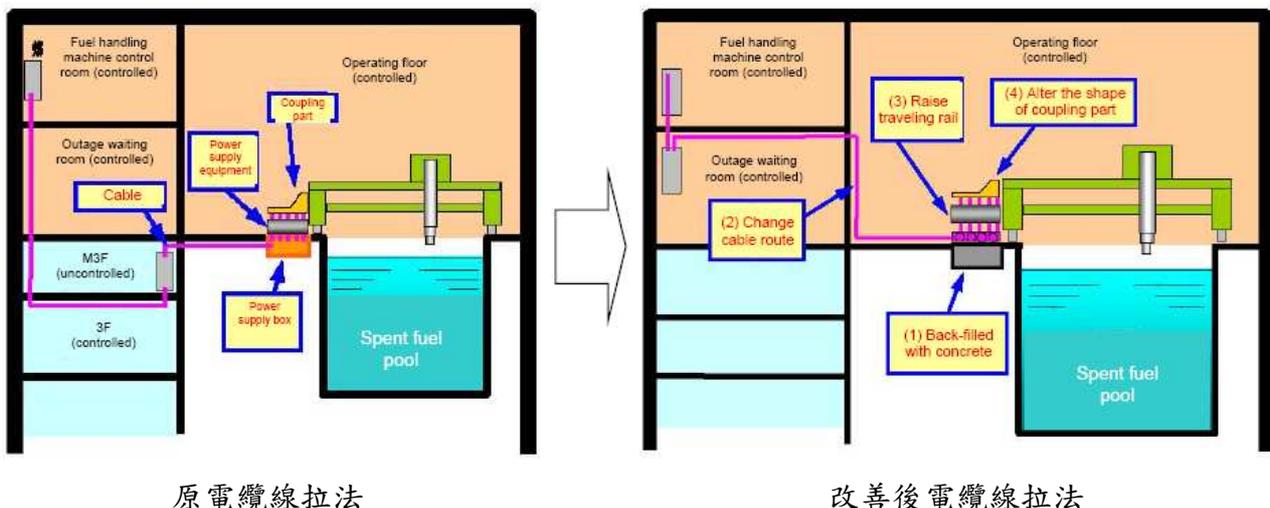
地震發生時，6 號機位於反應器廠房 4 樓「管制區」內用過燃料池的池水溢出後，先流進用過燃料池旁的「燃料更換機配電箱」，然後沿著配電箱的電纜填縫材間隙流入「導線管」。

溢出池水再沿著「導線管」流進「非管制區」的 3 樓夾層，經過 3 樓夾層上方的空調風管滴到 3 樓夾層的地板，再經過 3 樓夾層地板的開口，滴到 3 樓的地板，再由地板的排水口流入地下一樓的非放射性集水坑，最後由排水泵打出至排水渠道而進入大海。

水量估算約 1200 公升，輻射強度約 90000 貝克，仍在法令限值以內，對環境未造成影響。



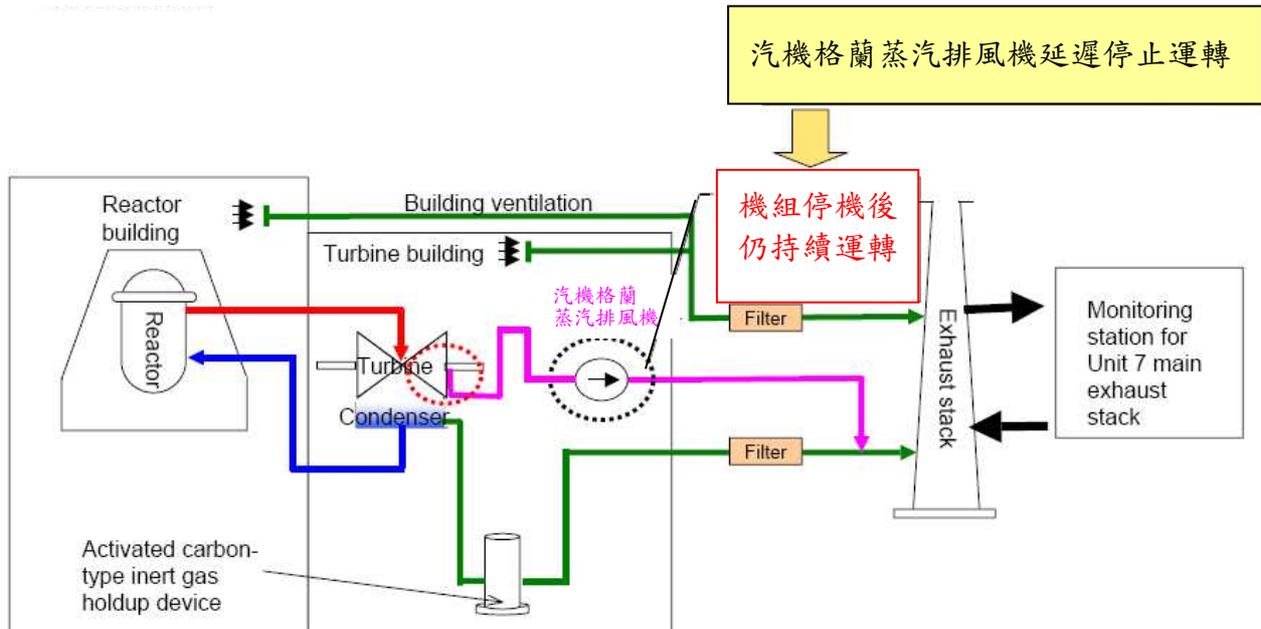
原來配電箱利用混凝土回填，並將電源箱及移動軌道墊高，同時將原來往下拉的電纜線改為往上拉，可避免受池水溢出的影響。



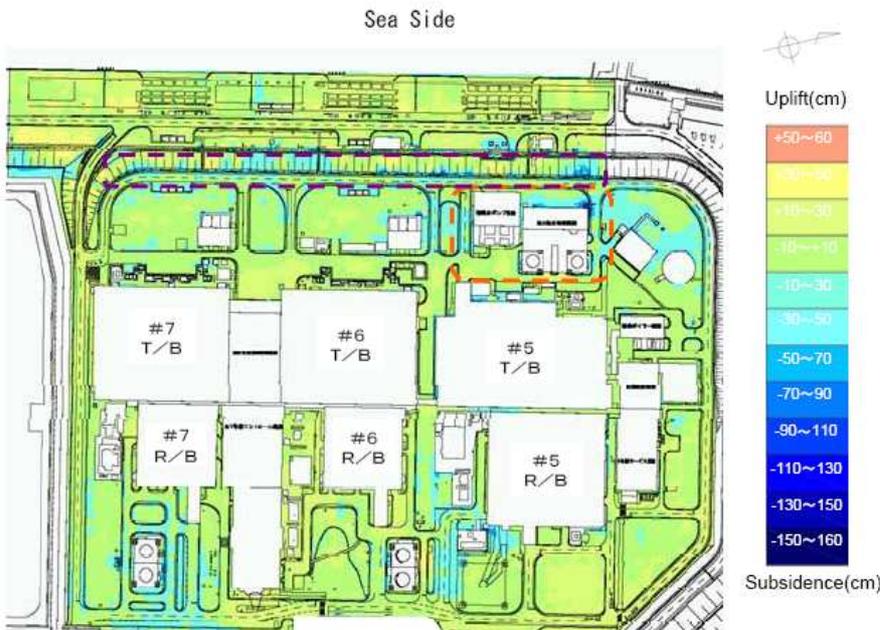
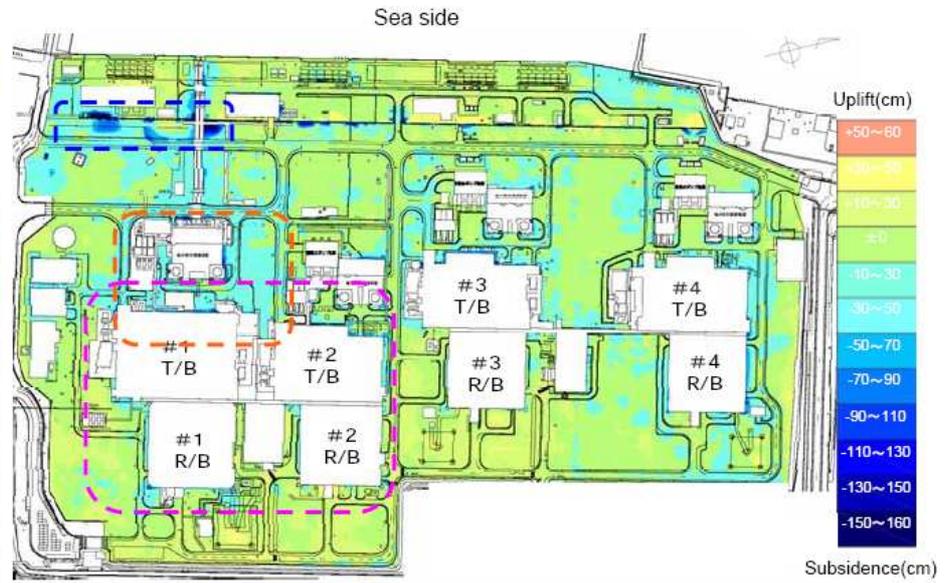
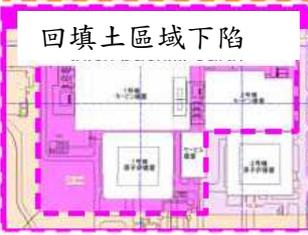
2.7 號急停後微量放射性物質自主煙囪排出

主汽機之汽封蒸汽抽氣排風扇(Gland Packing Exhauster Blower)停止較遲(至2007/7/18才停止)，將主冷凝器內殘留的分裂產物碘-131及銻-51、鈷-60等放射性微粒經主煙囪排出。

迄2007/7/19由七號機主煙囪所排出放射性核種所造成的總劑量，相當於法令規定一般民眾每人可接受年劑量1毫西弗的一千萬分之二而已，和自然背景造成年劑量的2.4毫西弗相比也是微乎其微。

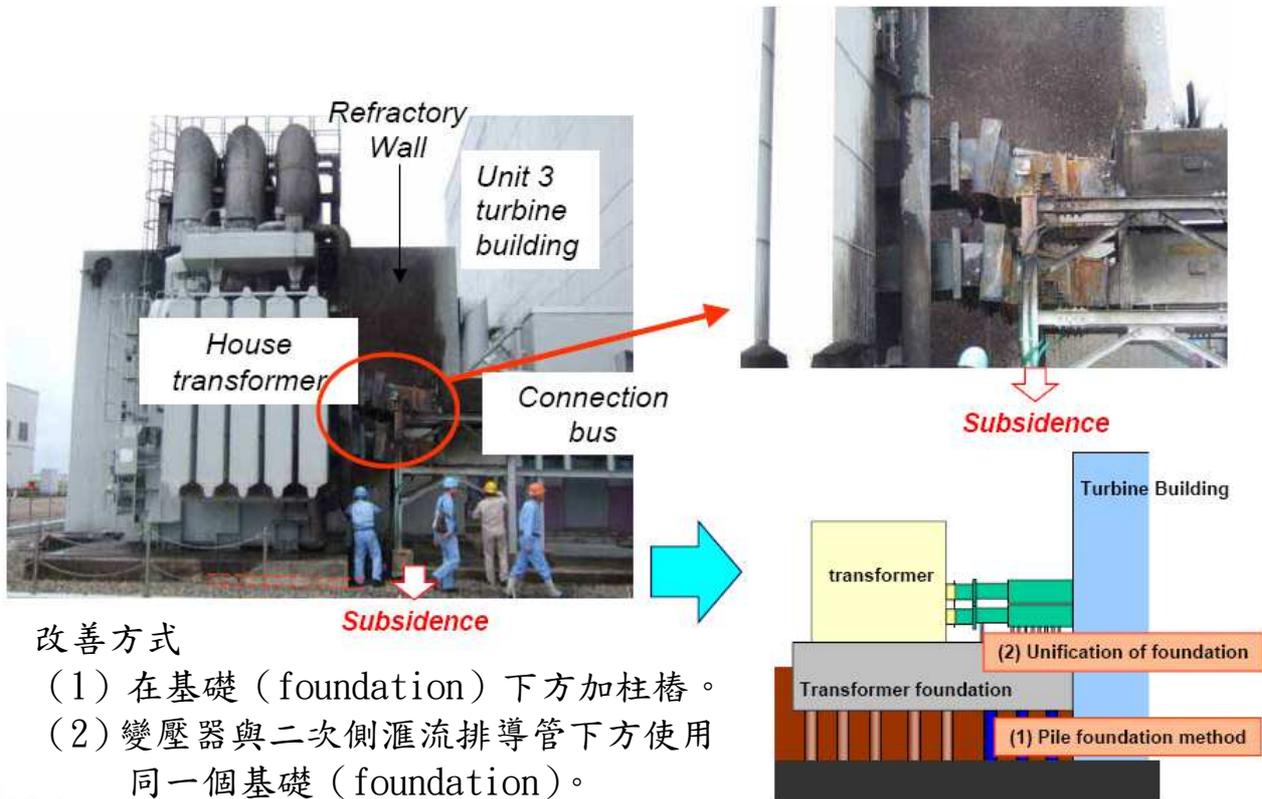


3. 廠區地面下陷



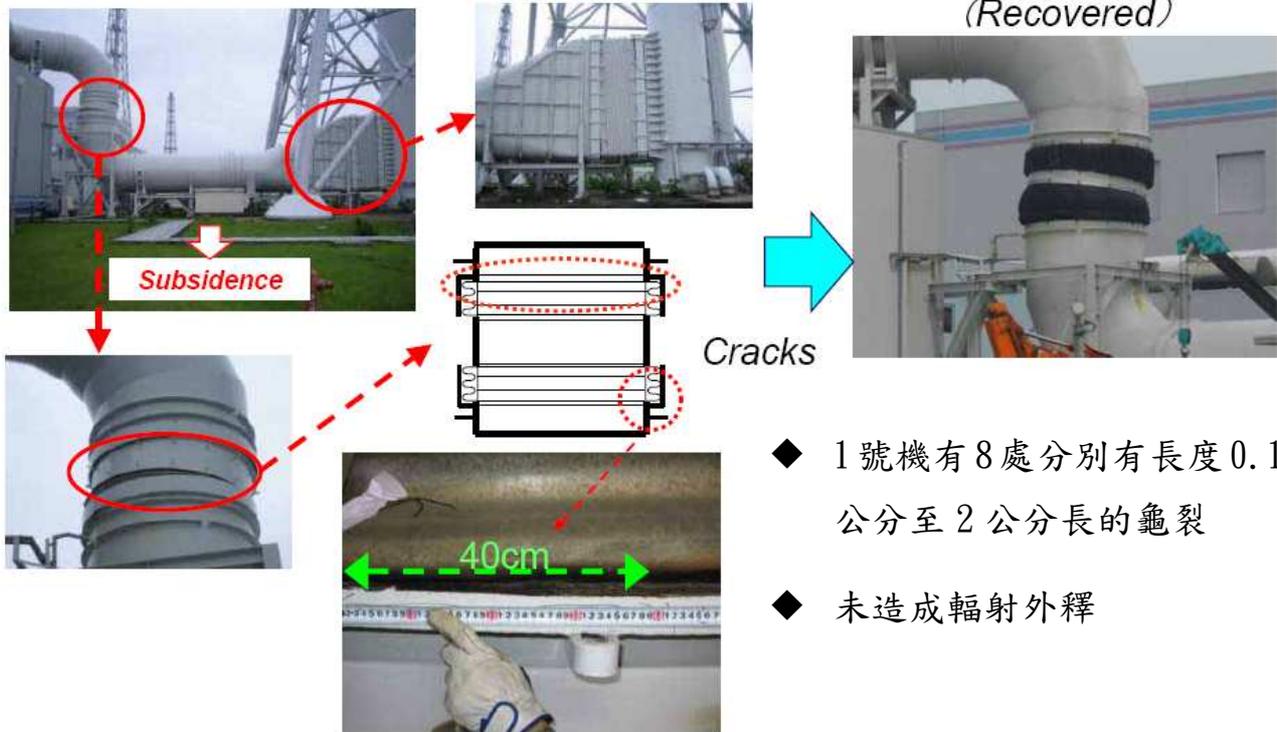
4.3 號機廠用變壓器失火

地震造成地層下陷，變壓器本體下陷1~3公分，二次側匯流排導管下陷20~25公分，二者之間出現約20公分的高低差。下陷的導管造成短路而產生火花，引發火災。



5.1 號機連接主煙囪的管路發生位移

Overview of duct at unit 1



- ◆ 1號機有8處分別有長度0.1公分至2公分長的龜裂
- ◆ 未造成輻射外釋

6. 消防管路破漏

Coupling joint



Threaded joint



Coupling joint



地震前

例 1：消防管改為地面明管



例 2：消防管放在管溝

例 3：消防管改為地面明管



地震後

7. 過濾水槽受損

過濾水槽的錨栓 (anchor bolt) 及支架 (brackets) 故障。
每部機有 2 只過濾水槽，只有 1 只過濾水槽因故障及發生洩漏而不可用。



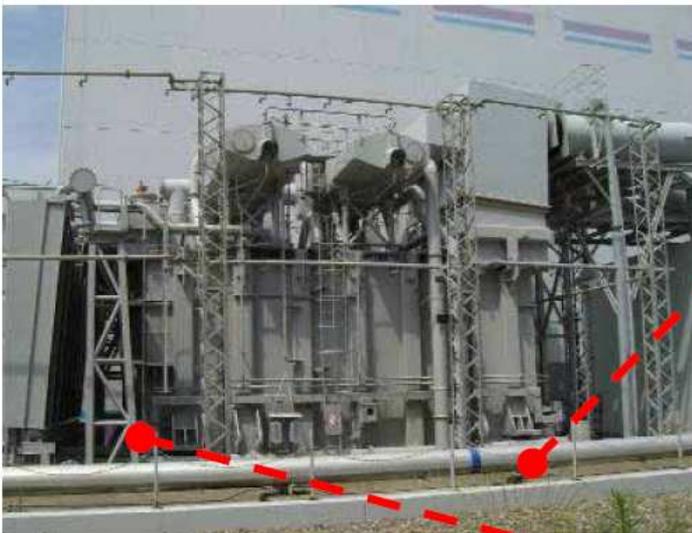
Damage to anchor bolts and brackets



(Recovered)

8. 主變壓器的基礎螺栓斷裂及管路漏油

Main Transformer (Unit 2)



Foundation Bolts



Oil Leak from piping



9. 海水排水渠道接合處發生裂縫



海水排水渠道內部接合處發生裂縫



修復後海水排水渠道內部

10. 辦公大樓內部設施受震傾倒掉落



地震後辦公大樓內部

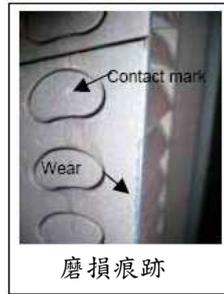
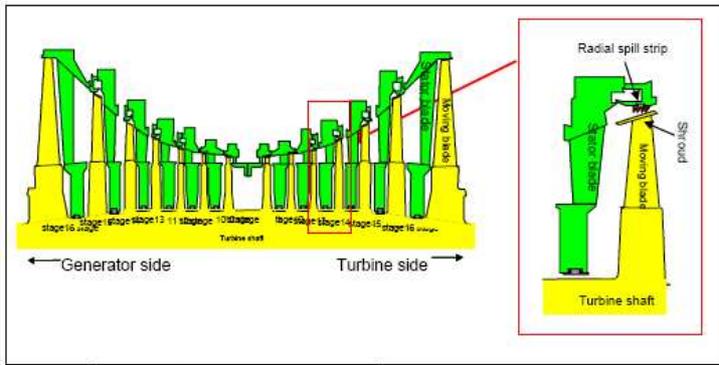


修復情形（將置物架予以固定）



將天花板強化固定

10. 汽機受損痕跡 (7 號機)



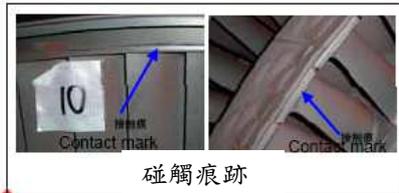
磨損痕跡



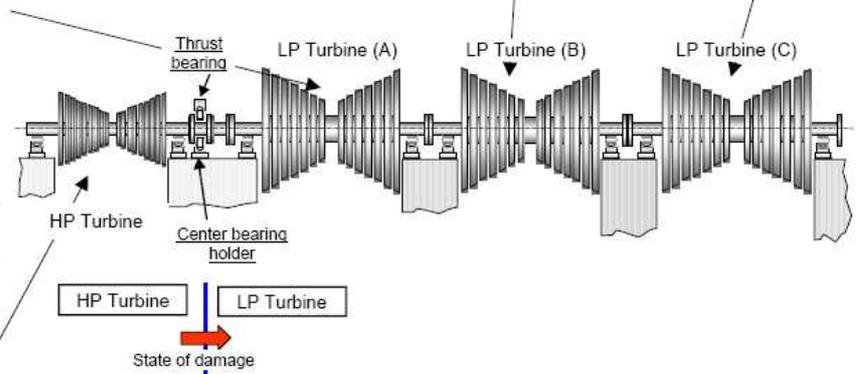
碰觸痕跡



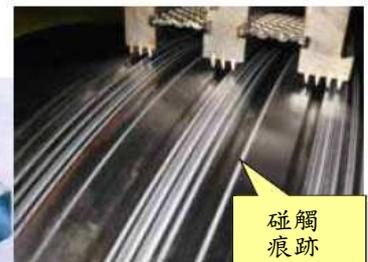
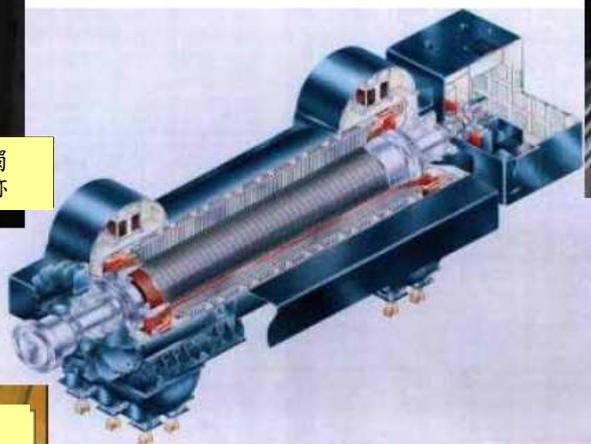
磨損痕跡



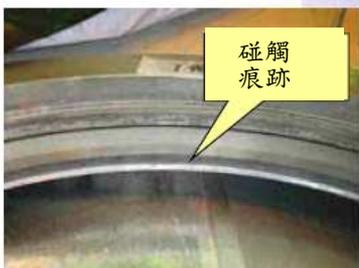
碰觸痕跡



Turbine side inner Oil Thrower



Collector side inner Oil Thrower



Turbine side Seal-ring

更換封油收油器 (oil thrower) 及封油環 (seal-ring)

二、地震經驗回饋及改善措施

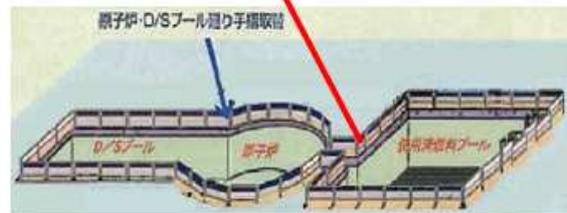
1. 用過燃料池池水因地震晃動造成溢流

During the disaster



在用過燃料池、反應爐上方及燃料處理池週邊架設屏障，可使地震時因池水晃動所造成的溢流減少為只有原來溢流量的 1/10 至 3/10

Measure



在池邊架設屏障

2. 工作人員疏散

During the disaster

因疏散引導燈外蓋損壞，造成對疏散路線的不確定，使工作人員產生無法及時疏散的恐慌。同時，因在輻射偵測站的擁擠，亦造成疏散的延遲。

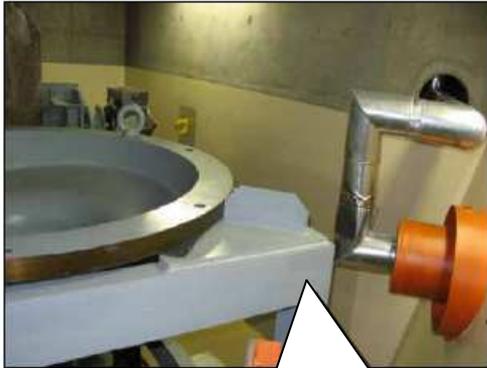
Measure (evacuation route example)



- 在地板標示疏散路線
- 將此標示反應在電廠內部的疏散手冊
- 做疏散地區的安全防護
- 疏散後測量表面污染…等

3. 臨時置放物位移

During the disaster



將物件予以固定



地震時設備移動碰撞
其他物件

在物件外建立圍籬



- 避免損及週遭的設備及人員
- 將地震時可能飛出的重物予以切除

4. 保護主控制室及技術支援中心人員

During the disaster

Measure

- 掉落的燈具可能影響機組運轉及造成人員傷害
- 地震後在前往緊急應變辦公場所採取應變措施的路徑產生障礙

避免主控制室固定物件及置物櫃掉落

(置物櫃利用L型支架予以固定)



主控制室的燈罩損壞



技術支援中心建築必須能夠耐震 (此為完工後假想圖)

主控制室：避免固定物件、置物櫃及燈俱掉落，在公告板裝置欄杆
緊急應變辦公場所：建築耐震廠房

5. 消防能力

During the disaster

由變壓火災認
知到急救人員
的不足及這些
執行最先滅火
行動人員的訓
練不夠

Measure



建立急救系統及改進人員訓練

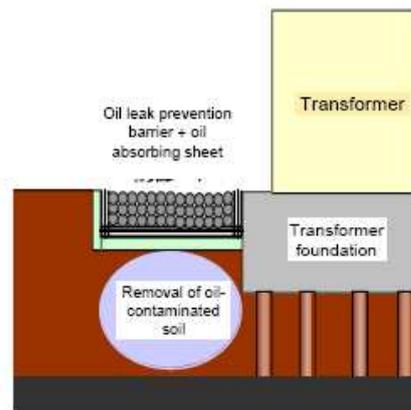
6. 環境影響（油）

During the disaster



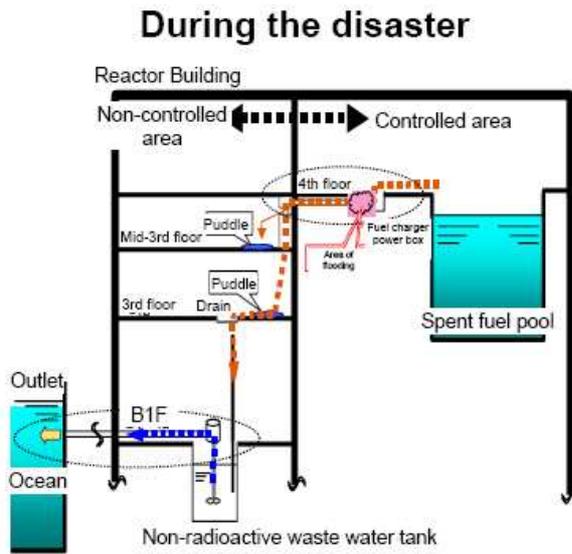
- 因變壓器受損接著引起絕緣油洩漏所造成的損害超出原先的預期。
- 當避免漏油的屏障（防油堤）故障時絕緣油因而滲透到地表。

Measure



- 在避免漏油的屏障（防油堤）內置放吸油毯
- 在內部設計標準增加：
：必須考慮如果避免漏油的屏障損壞時仍能防止油洩漏至屏障以外

7. 控制區與非控制區的邊界

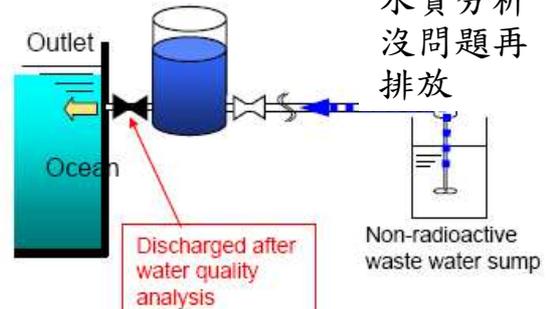


用過燃料池因地震晃動所造成溢流的池水從控制區經由電纜線未完全密封的穿越洞流至非控制區

Measure



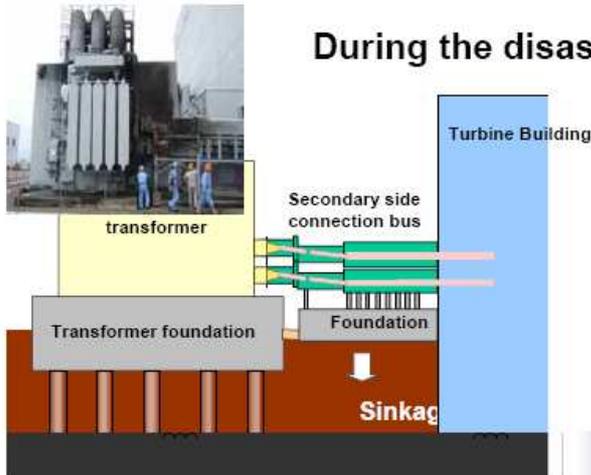
穿越洞做好密封
prevention measures (concept)



水質分析沒問題再排放

- 避免水洩漏至樓板及經由穿越洞流出（做好密封及將穿越洞設計在離樓板 20 公以上）
- 在無輻射排放支系統加裝接收槽
- 確認系統無任何造成排放至外界的可能

8. 耐震 B/C 等級設備損壞

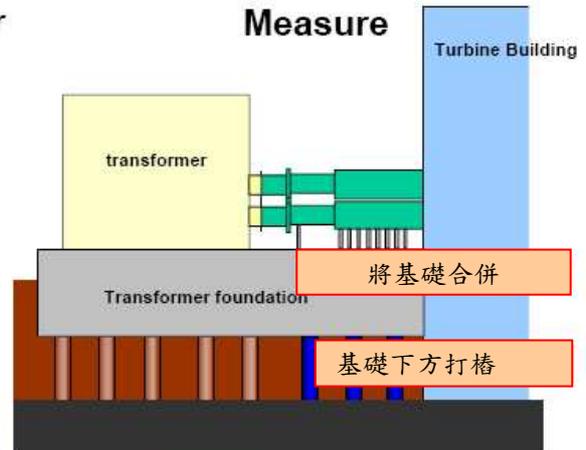


因變壓器及相關設備下陷不均勻造成火災 及 外圍消防設施的損壞造成滅火行動受阻



消防系統地下埋管受損

Measure



消防系統管路改為在地面上的明管

- 變壓器相關設備的基礎與變壓器的基礎合併為同一基礎
- 外圍消防系統管路移到地面成為明管

9. 及時提供地方相關資訊

During the disaster

未能及時提供社區民眾希望知道的安全有關資訊



Measure



廣播車

- 利用廣播巡迴車
- 緊急電台廣播

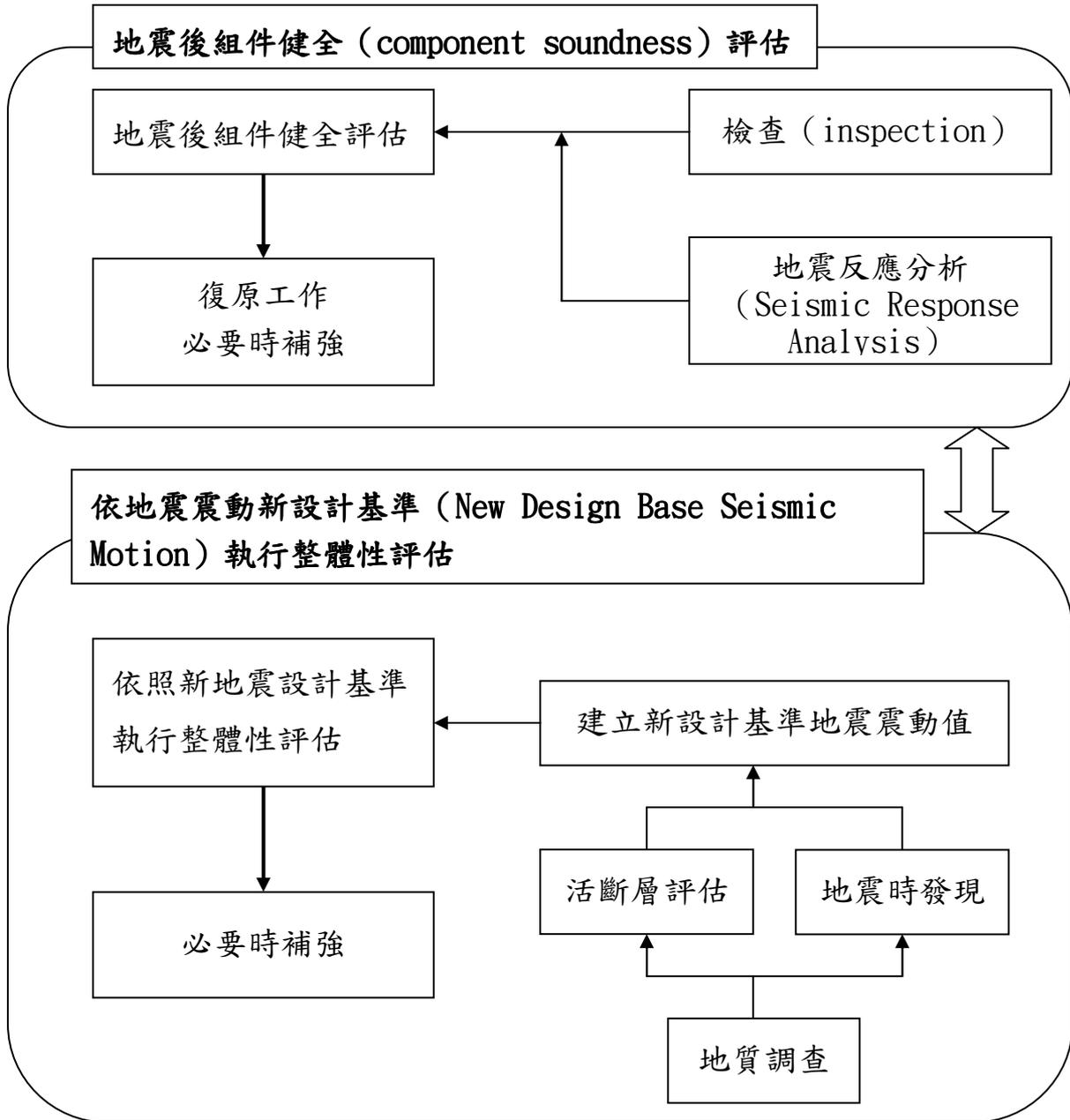
項目	改善措施
10. 輻射量測延遲 因未及時對洩漏含輻射物質的水進行分析，而意外的被排放至大海。	增加在週末、假日及晚上執行輻射量測人員的人數。
11. 運轉人員的緊急處理 運轉人員現有的訓練未涵蓋地震時同時發生有多項設備故障（multiple failure）的處理。	增修程序書及執行運轉人員處理同時有多項設備故障之訓練。
其他	
12. 廠用變壓器輸出設施因地震造成絕緣油洩漏，其中部份洩漏係因虹吸現象所造成。	相關程序書中將地震時避免產生虹吸現象的應變方法納入。
13. 運轉員於機組自動急停後延遲將汽機格蘭蒸汽排氣風扇停用，造成含輻射顆粒被沖放排氣煙囪。	修訂控制連鎖可自動將汽機格蘭蒸汽排氣風扇自動停用。
14. 靠近地板的主蒸汽管輻射偵測器的偵測組件被水噴濺產生假信號動作。	將可防水（waterproofing）的偵測組件埋設在加高的地板
15. 緊急時須進入執行試驗（examined）的區域因加鎖使得進入費時	針對緊急時須進入執行相關試驗的區域簡化加鎖管理方法

<p>16. 地震後很多訪客拜訪電廠使得相關工程師麻於接待無法專注於電廠的復原工作</p>	<p>由總公司派遣一組人員擔任接待解說工作</p>
<p>17. 不常使用的程序書（如緊急應變程序）因訓練不足，使得事故時相關資訊對全體組織人員的傳達不當，造成不當的決策（decision-making）導致輻射物質不當外釋</p>	<p>納入程序書要求加強訓練</p>

三、中越沖地震後東京電力公司的行動計劃

中越沖地震後東京電力公司的行動計劃

行動計劃內容如下列簡圖：



「地震後調查與評估 (Post-Seismic Investigation and Evaluation)」計劃檢查與評估的對象，係依 NISA' s instruction，電廠於建造承諾 (construction permission) 所列的主要組件。

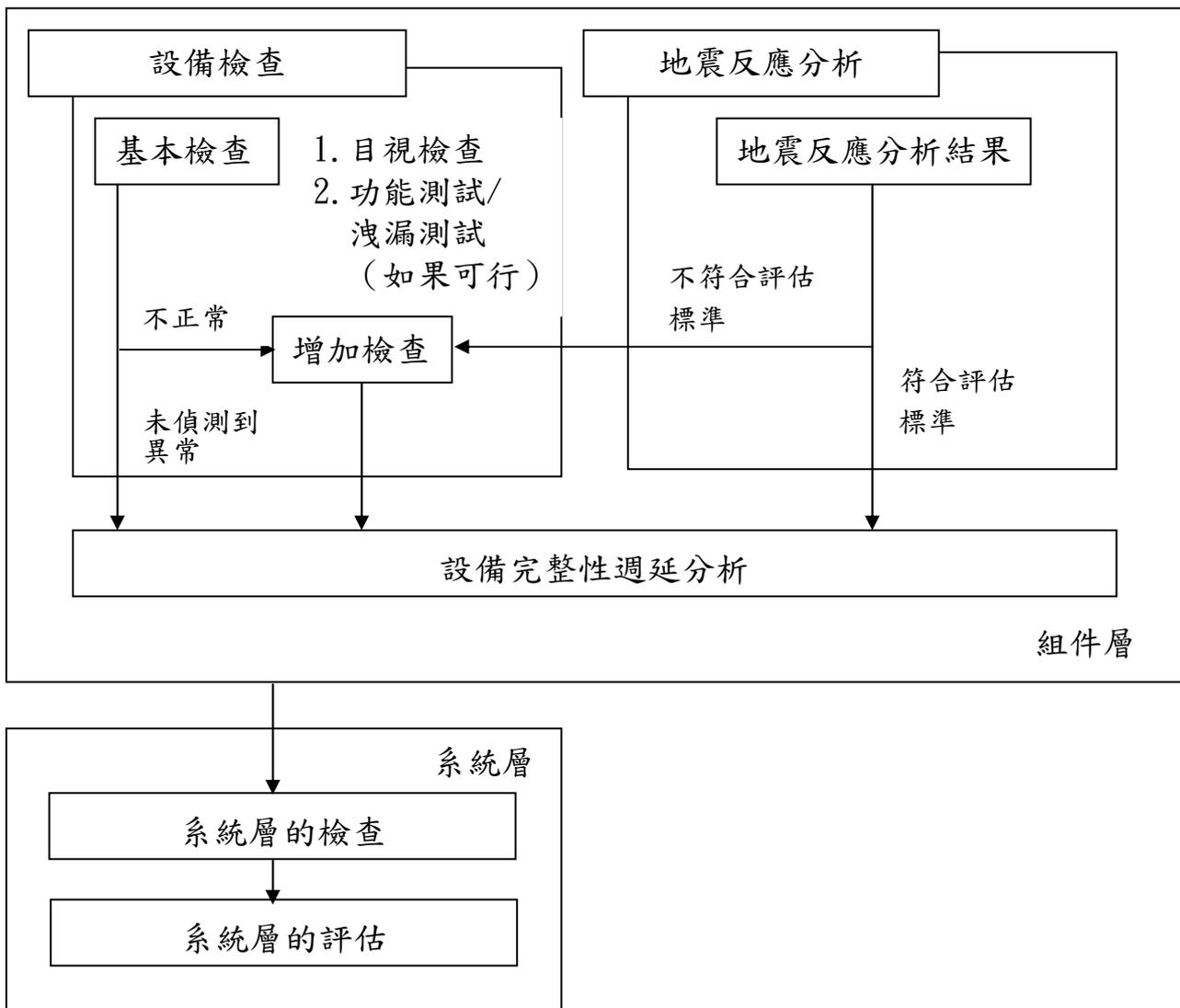
(一) 地震後組件健全 (component soundness) 評估 (7 號機為例)

共分為三大階段：

1. 設備組件檢查及評估
2. 系統檢查及功能測試
3. 整廠功能測試

1. 設備組件檢查與評估

組件檢查與評估計劃如下列簡圖：



(1) 設備組件檢查

共有 42 種設備（7 號機為例），包含主動元件（active components）、被動元件（passive components）、支撐結構（support structures）等，依其損壞條件（damage configuration）進行檢查其健全（soundness）情形。

	檢查測試項目	檢視件數
基本檢查設備數量	目視檢查	1360
	運轉及功能測試	1000
	洩漏試驗	610
重要核能安全設備檢查數量	目視檢查	640
	運轉及功能測試	450
	洩漏試驗	350
增加檢查的設備數量	-	240

7 號機檢查與評估結果

- 總共有 71 個組件被評估為「不正常」，但沒有任一安全有關的組件被發現會影響結構強度及功能的主要損壞（major damage）。
- 針對迴轉設備（rotating equipment）應用振動診斷技術進行地震前及地震後評估，並未發現任何不正常的情形。利用例行的振動量測，在地震後並未發現有逐漸上升趨勢的徵兆。
- 對管路利用硬度試驗（hardness test）進行塑性變形（plastic strain）檢查，確認無塑性變形不會影響疲勞強度。

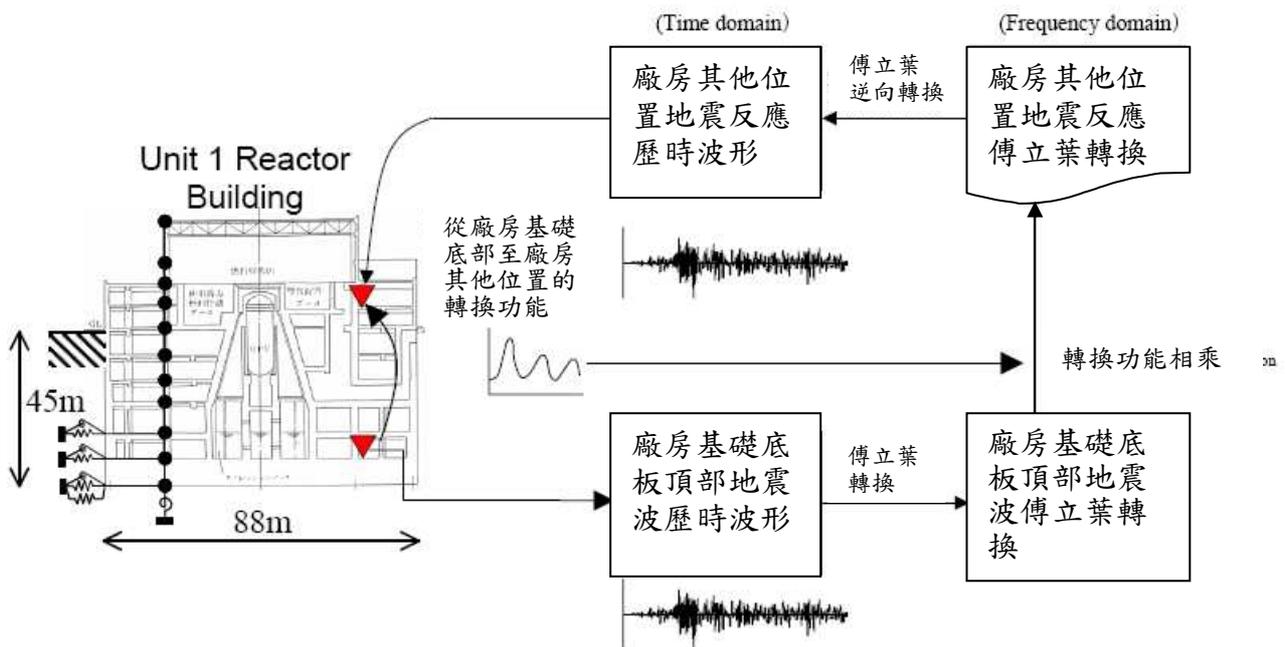
(2) 地震反應分析

由反應爐廠房基礎（或中間樓板）所獲得的地震資料，分析反應爐廠房其他位置的地震反應。

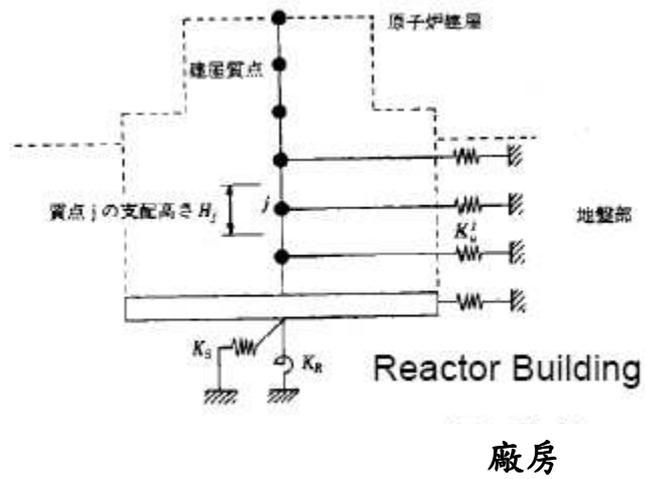
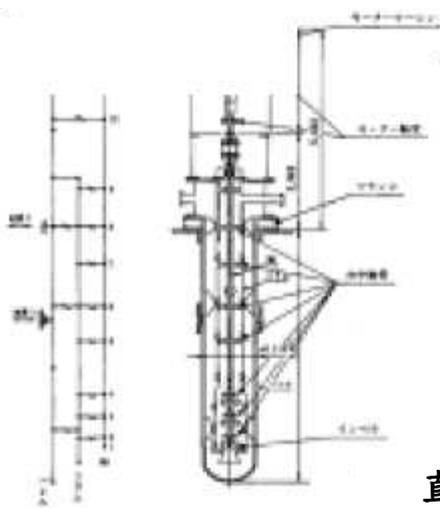
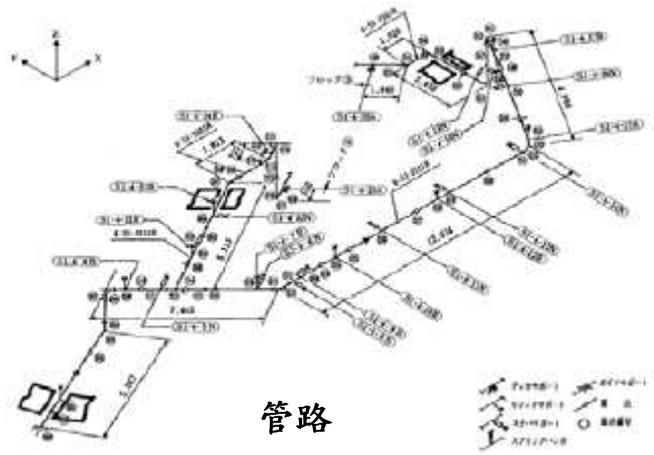
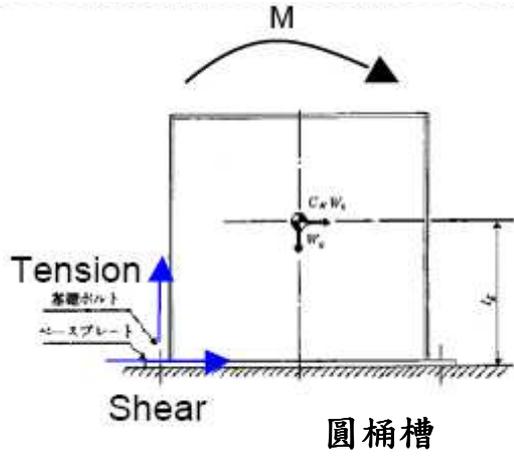
分析的模式：

- Lumped Mass model
- Soil Spring model
- Soil Properties model

地震反應分析的概要如下圖



不同的設備使用不同的分析模式



設備之地震反應分析結果（以 7 號機為例）

功能	對象	類別	計算值	標準值
反應度控制	控制棒插入	位移	7.1 (mm)	40 (mm)
爐心冷卻	主蒸汽管路	應力	136 (N/mm ²)	281 (N/mm ²)
	餘熱移除管路	應力	239 (N/mm ²)	274 (N/mm ²)
	餘熱移除泵 (基礎螺栓)	應力	5 (N/mm ²)	350 (N/mm ²)
	餘熱移除泵	加速度	0.4G (H) 0.4G (V)	10.0G (H) 1.0G (V)
圍阻體	反應爐壓力槽 (基礎螺栓)	應力	115 (N/mm ²)	499 (N/mm ²)
	反應爐壓力槽 (爐心側板支撐)	應力	32 (N/mm ²)	243 (N/mm ²)
	一次圍阻體槽	應力	27 (N/mm ²)	264 (N/mm ²)

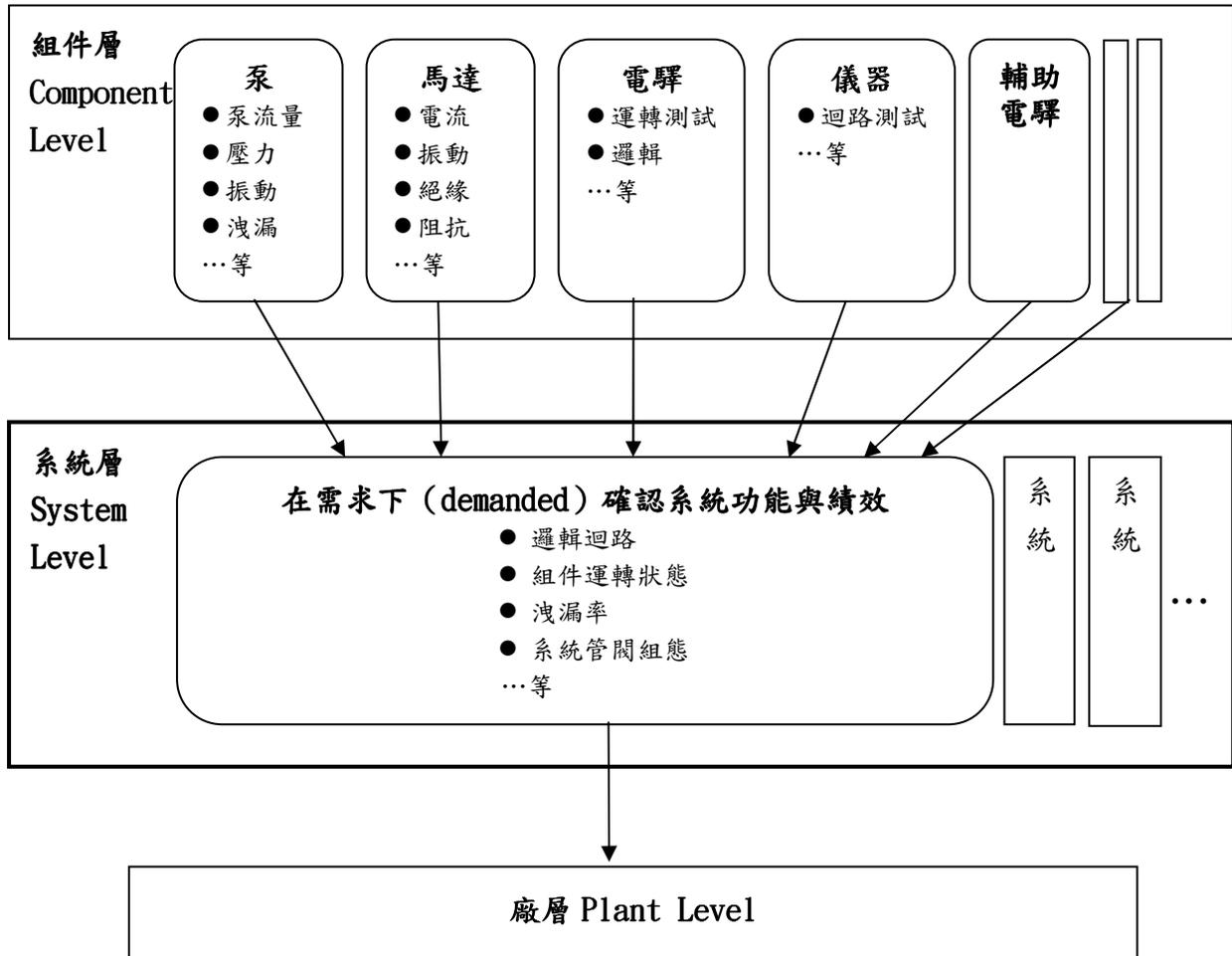
- 依結構強度評估結果，證實設備/管路系統的計算值均等於或低於標準值。
- 選出對地震時會有強烈反應的設備（包含廠房間的相對位移）進行疲勞分析，證實主震（main shock）與 40 年運轉之間疲勞累積係數（fatigue cumulative coefficient）的總和遠低於標準值。
- 證實主動元件（active components）反應加速度等於或低於證實其功能正常的加速值。

(3) 組件檢查與評估結果（7 號機為例）

- 經檢查及評估結果，反應器安全有關設備在中越沖地震後並沒有發現重大異常情形（no major abnormalities）。亦即檢查及評估後顯示，安全功能有關組件（停機、冷卻、圍阻體）在地震後仍能維持其功能。
- 7 號機不須要採取任何有關更換、檢修或補強等措施。
- 檢查及評估所獲得的知識，必要時回饋至正常維護方案。
- 明瞭反應器安全有關設備在地震僅受到輕微影響的原因為「基本設計政策」的訂定，例如設備設計時保留足夠餘裕（tolerance）的策略及平時適當維護保養的結果。

2. 系統檢查及功能測試

當完成設備組件檢查及評估，並確認其完整性均正常後，開始執行系統的完整性的檢查及評估。



系統功能測試 (unit 7 為例)

功能	運轉員檢視之系統功能測試
停機	反應爐停機餘裕測試
	控制驅動系統功能測試
	控制驅動機構功能測試
	選棒插入功能測試
	備用硼液系統功能測試
	反應爐保護系統功能測試
冷卻	汽機旁通閥功能測試
	飼水泵功能測試
	緊急柴油機額定容量確認測試
	自動釋壓系統功能測試
	緊急柴油機、高壓爐心注水、低壓爐心注水、反應爐廠房冷卻水系統功能測試
圍阻體	主蒸汽隔離閥功能測試
	圍阻體隔離閥功能測試
	一次圍阻體噴灑系統功能測試
	備用氣體處理系統功能測試
	反應爐廠房洩漏測試
	一次圍阻體整體洩漏測試
	可燃性控制系統功能測試
其他	反應爐廠頂部吊車功能測試
	主控制室緊急循環功能測試
	液體廢料貯存設施/處理設連鎖功能測試
	儀用空氣系統功能測試
	直流電源供給系統功能測試

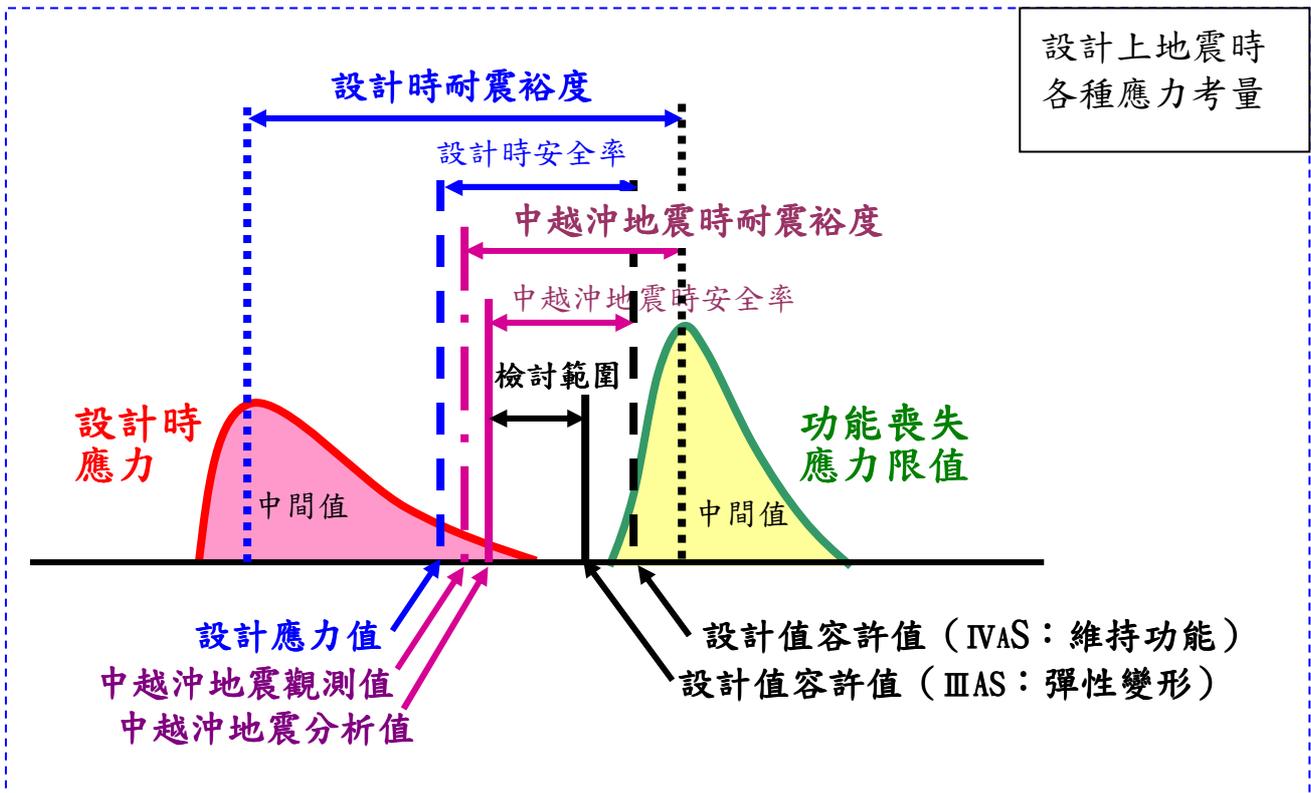
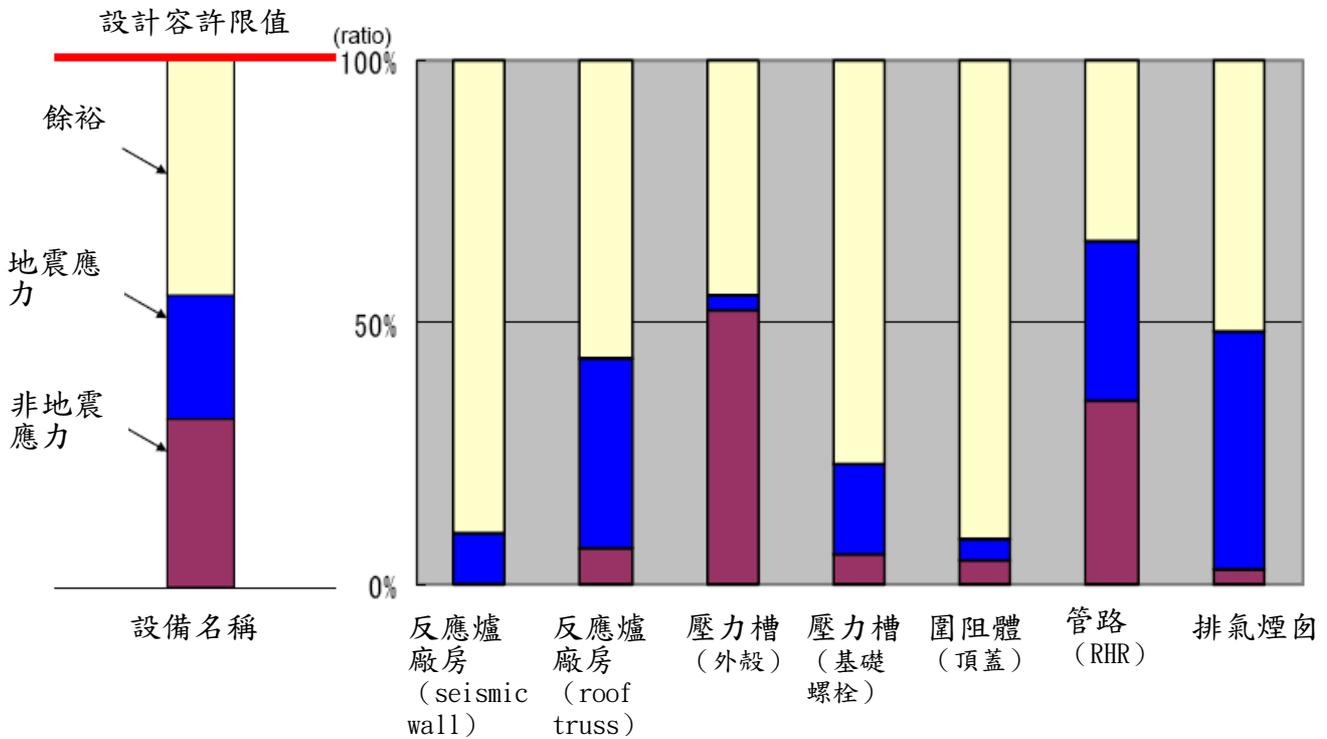
3. 整廠功能測試

逐一完成所有系統的功能測試與評估後，執行全廠健全 (soundness) 評估。

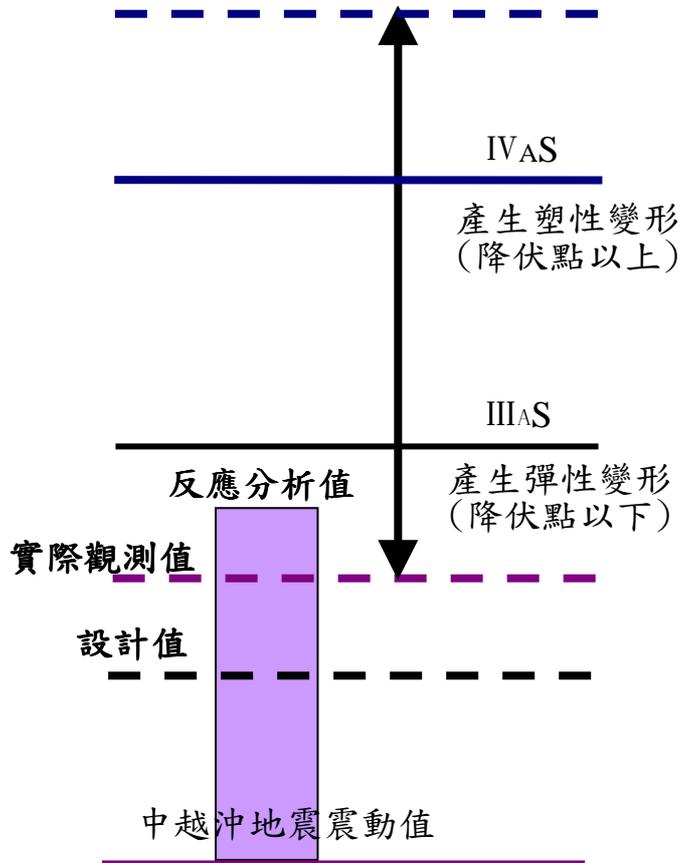
4. 設計時保守的地震分析

由上述檢查與評估結果，柏崎刈羽核電廠（以7號機為例）沒有發現重大設備異常情形，主要是設計時採取保守的地震分析。

下圖為各種設備在中越沖地震時地震應力下，尚有的餘裕情形：



真正功能喪失限值
(actual limit of functionality maintenance)



(二) 依地震震動新設計基準 (New Design Base Seismic Motion) 執行整體性評估

1. 東京電力公司由以往及此次中越沖地震瞭解地震震動的特性 (詳如下圖)

地震震動放大 (intensification) 因素

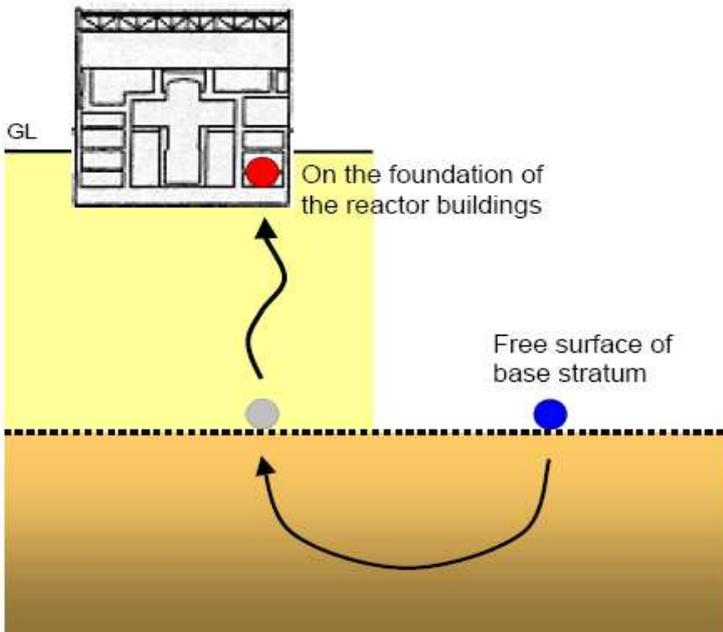
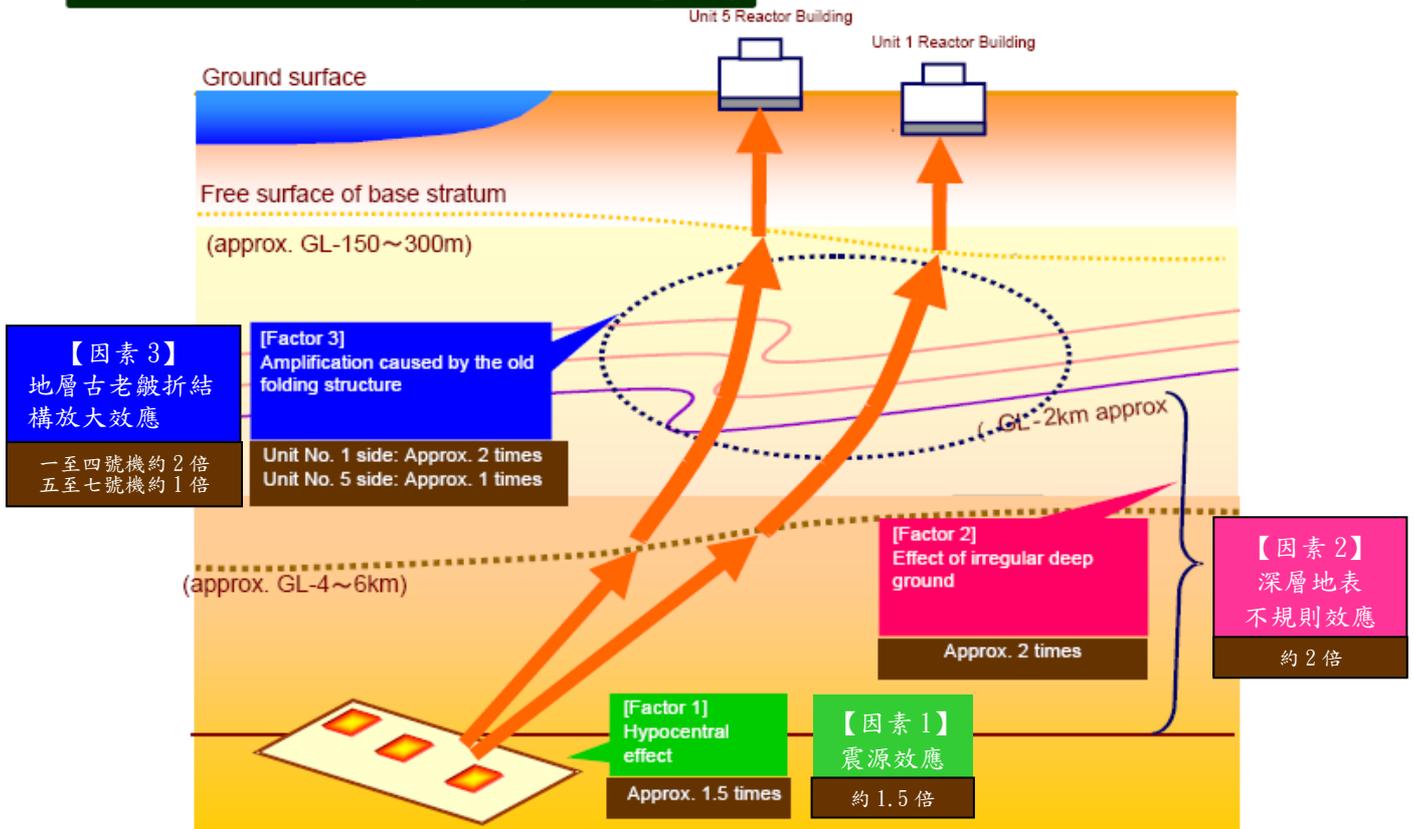
1. 震源 (Hypocenter) 效應：產生比正常地震強度約 1.5 倍的地震。
2. 深層地表 (deep ground) 不規則效應：當地震產生的震動以緩慢的增強速度 (propagation speed) 到達地面，因後面才產生的震動趕上最先的震動，造成震動被放大 (intensified)。
3. 地層古老皺折結構放大效應 (old folded structure in the ground)：地震產生的震動被扭轉 (bend) 而產生放大效應。

地震震動減弱 (weakening) 因素

1. 反應爐廠房的廠房結構植基於基礎岩盤地面以下，使得震動自基礎岩盤底部的自由表面 (free surface of base stratum) 至反應爐廠房逐漸減弱。
(一至四號機植基於基礎岩盤地面以下 45m，地震震動減弱為原強度的 0.4 倍；五至七號機植基於基礎岩盤地面以下 36m，地震震動減弱為原強度的 0.6 倍)

依此發現之地震機制決定設計基準地震的震動 (the design-basis seismic motion)

Estimation of factors (Conceptual diagram)

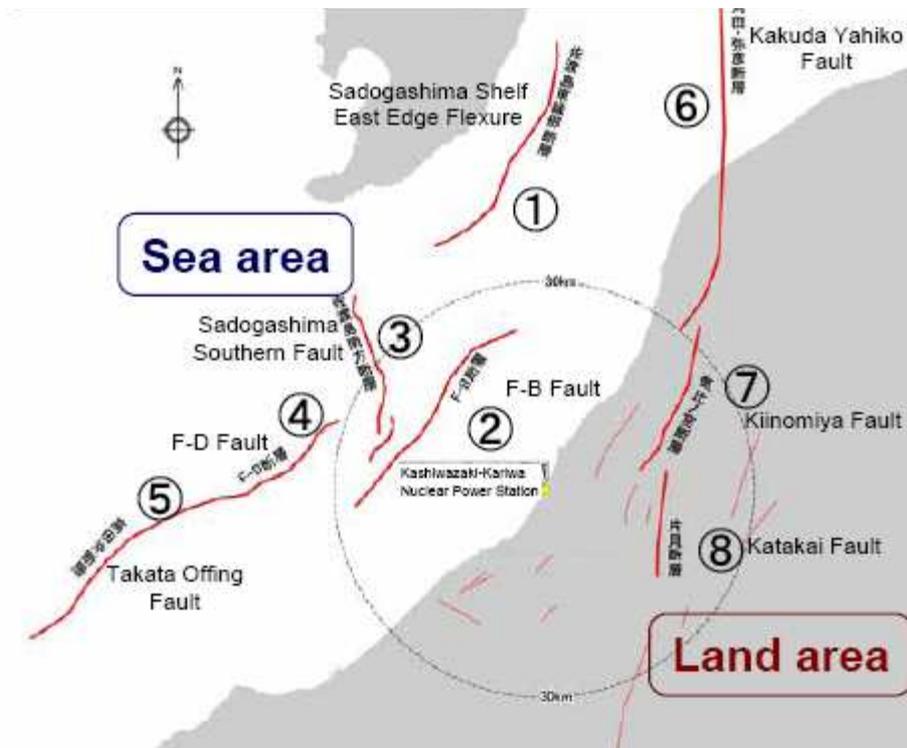


kk 電廠各機組反應廠房基礎 (foundation) 頂部至基礎岩盤底部的自由表面 (free surface of base stratum) 的距離

1~4 機: 250m 至 300m

5~7 機: 150m

2. 柏崎刈羽核電廠附近活動斷層調查



主要活動斷層

	斷層名稱	斷層長度
海域	(1) Sadogashima Shelf East Edge Flexure	約 37km
	(2) F-B Fault	約 36km
	(3) Sadogashima Southern Fault	約 29km
	(4) F-D Fault	約 30km
	(5) Takata Offing Fault	約 25km
陸上	(6) Kakuda Yahiko Fault	約 54km
	(7) Kiinomiya Fault	約 22km
	(8) Katakai Fault	約 16km

地質調查後選出可能影響核電廠的活斷層

活斷層		斷層長度	地震強度 ^{*1}		備註
F-B 斷層		約 36km ^{*2} (約 27km)	約 36km	芮氏強度 7.0	某些不確定性，以安全保守觀點評估斷層長度為 36km
Nagaoka 平原西 側邊緣 地震帶	Kakuda Yahiko 斷層	約 54km	約 91km	芮氏強度 8.1	以安全保守觀點假設此三條斷層同時活動
	Kiinomiya 斷層	約 22km			
	Katakai 斷層	約 16km			
F-D 斷層		約 30km	約 55km	芮氏強度 7.7	以安全保守觀點假設此二條斷層同時活動
Takata Offing 斷層		約 25km			

*1：F-B 斷層的地震強度是假設此次中越沖地震時，震源的斷層表面的大小來決定；其他斷層則以地表斷層長度來決定。

*2：依東電地質調查結果斷層長度約 27km，惟東電採取較安全保守觀點，假設斷層長度為 36km。

經上述地質調查後，東電選出會對電廠廠區會造成重大影響的斷層為：

陸上：Nagaoka 平原西側邊緣地震帶

海上：F-B 斷層

均對上述所選出二個斷層，分別以 (1) 反應頻譜法 (response spectrum method) 及 (2) 斷層模式法 (fault model method)

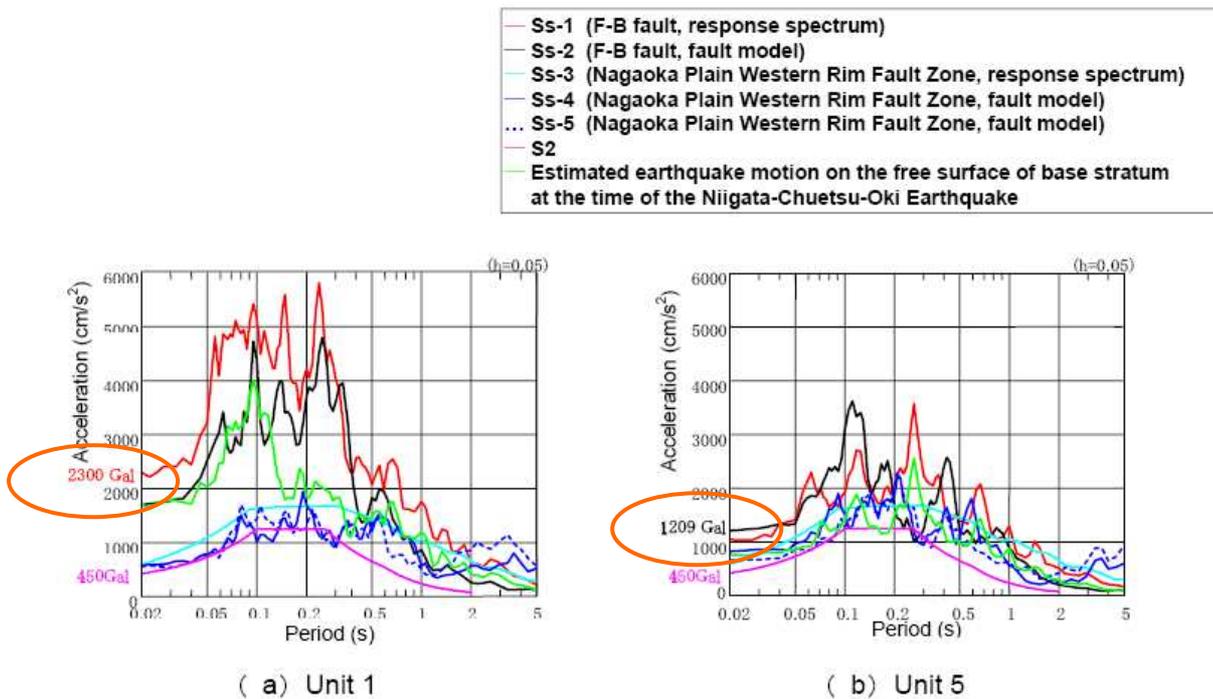
(1) 反應頻譜法 (response spectrum method)：依地震強度、與震源的距離及利用經驗公式 (empirical formula)，評估所選位置的地震震動情形。

(2) 斷層模式法 (fault model method)：利用建立的斷層表面移動及破壞模式的公式，評估所選位置的地震震動情形。

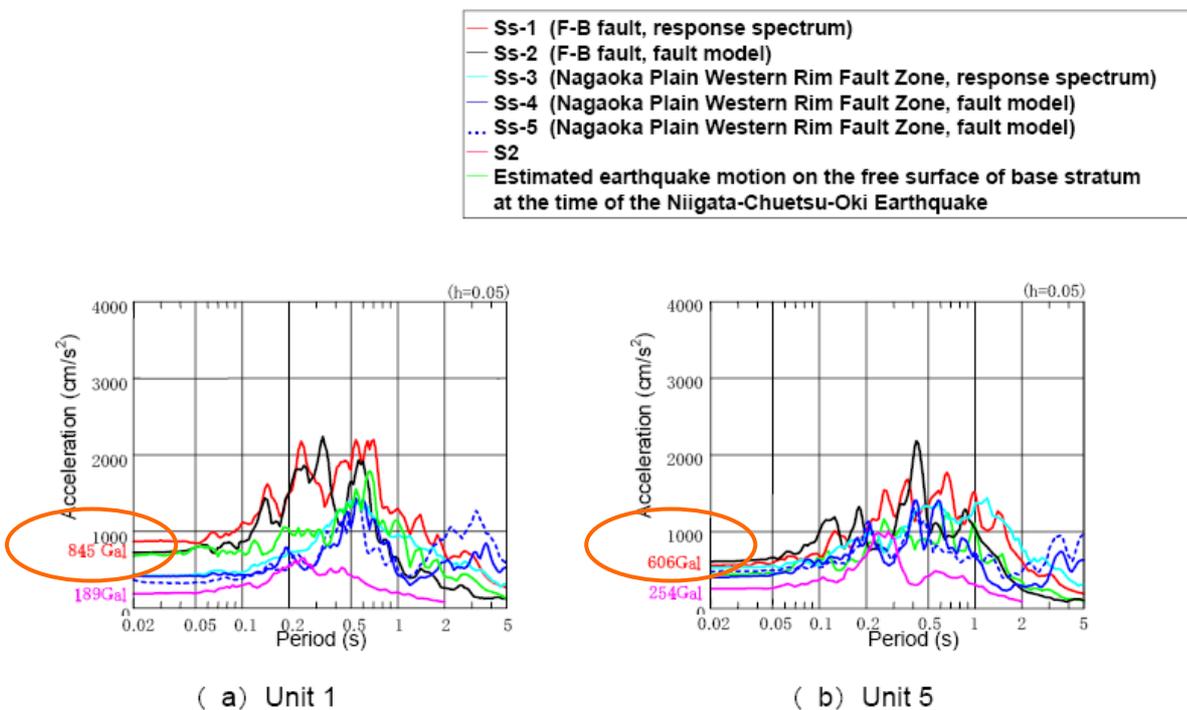
設計基準地震的震動 (the design-basis seismic motion)：在地下 150m 至 300m 所謂「基礎岩盤底部的自由表面 (free surface of base stratum)」的震動情形。

設計核電廠設施耐震能力，必須考量在反應爐廠房基礎 (base mat) 處的地震時的震動情形。

3. 依不同活動斷層發生上述強度之地震時在 Free Surface of base stratum 之地震強度



依不同活斷層發生上述強度之地震時在 Free Surface of base stratum 之地震強度，傳到反應爐廠房最底部基座 (base mats) 之地震強度



依新設計基準地震震動 (New Design Base Seismic Motion) 分析結果，1 號機及 5 號機在基礎岩盤底部的自由表面 (free surface of base stratum) 所接受到的震動分別為 845Gal 及 606Gal。

4. 依上述調查評估及分析後，決定為強化所有機組的地震安全，將反應爐廠房最底部基座之地震震動值均訂為 1,000 gals。

單位：Gal

基礎岩盤底部的自由表面	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機	6 號機	7 號機
新設計基準地震震動值	2,300				1,209		

反應爐廠房最底部基座	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機	6 號機	7 號機
中越沖地震觀察值	680	606	384	492	442	322	356
新設計基準地震震動值	845	809	761	704	606	724	738
強化地震安全地震震動值	1,000						

四、結構強度分析結果及補強案例

1. 結構強度分析結果（以 7 號機為例）

主要評估設施	評估部份	計算值 (MPa)	評估標準值 (MPa)
		Ss	
反應爐壓力槽	基礎螺栓	215	499
強化混凝土圍阻體	抑壓室通道 (suppression chamber passage)	30	164
爐心支撐結構	爐心側板支撐	51	260
餘熱移除系統泵	基礎螺栓	14	350
餘熱移除系統管路	管路	206	364
主蒸汽系統管路	管路	217	374

主要評估設施	地震時的相對位移		評估標準值 (相對位移)(mm)
	中越沖地震	Ss	
控制棒 (地震時插入能力)	7.1	15.9	40.0※

※控制棒執行插入能力測試時在一定時間全部插入時之量測值。

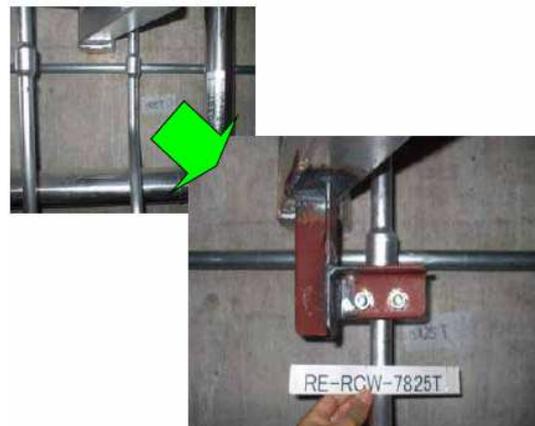
2. 改善地震安全 (seismic safety) 的相關案例

案例一

設備管路補強



改變強化支撐方式
以加強結構



增加支撐以減少
管路振動

案例二

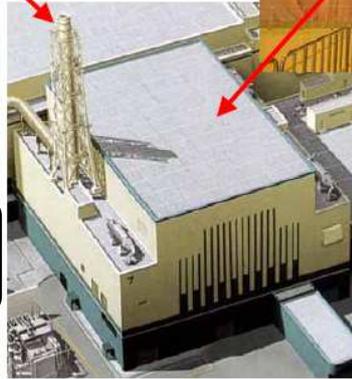
反應爐廠房屋頂樑架及煙囪強化工作



建構主排氣煙囪
新增支撐結構



強化反應爐廠房
屋頂樑架



案例二 (續)

裝置地震吸收設施



利用 Contracts 吸收地震移動

利用液壓阻力吸收排氣煙囪搖晃時的振動能量來控制排氣煙囪的移動



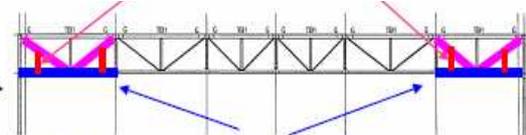
排氣煙囪

屋頂樑架 (truss)

反應爐廠房剖面圖



強化的 collar beams



強化的水平底部欄杆 (braces)

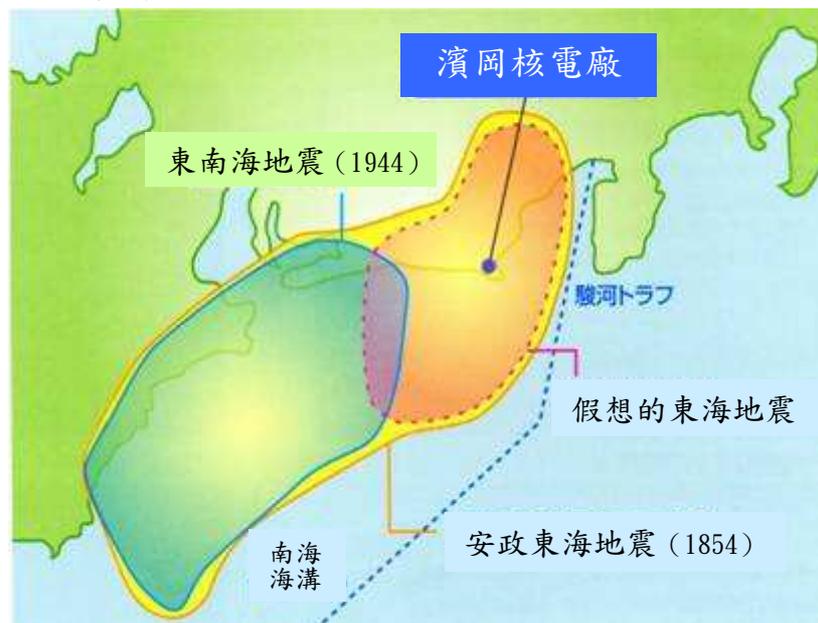


貳、日本濱岡核電廠強化耐震餘裕之作法

一、濱岡核電廠簡介

	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機
機組型式	BWR				ABWR
發電量 (10,000KW)	54	84	110	113.7	126.7
總發電量 (10,000KW)	488.4				
建造日期	1971, 3	1974, 3	1982, 11	1989, 2	1999, 3
商轉日期	1976, 3	1978, 11	1987, 8	1993, 9	2005, 1
耐震餘裕強化 改善工作情形	—	—	2007 年 完成	2007 年 完成	2007 年 完成

二、濱岡核電廠地震評估



電廠臨近沿海有一道南海海溝 (Nankai Trough)，沿著南海海溝共有三個主要地震影響區域：

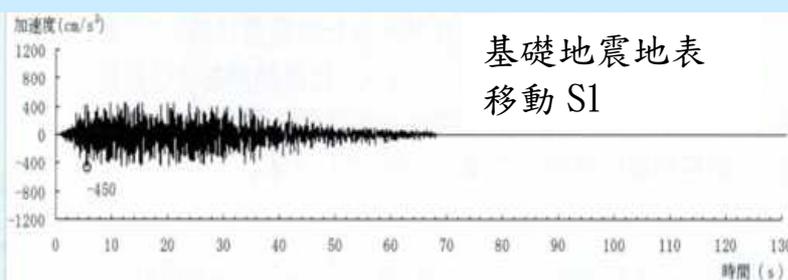
1. 假想的東海地震 (Anticipated Tokai Earthquake)
2. 安政東海地震 (Ansei Tokai Earthquake) (1854 年)
3. 東南海地震 (Tonankai Earthquake) (1944 年)

其中以 1854 年發生的安政東海地震對區域影響最大。

濱岡核電廠**安全重要設施** (facilities of safety significance) 設計上可承受假想的東海地震 (Anticipated Tokai Earthquake) 芮氏 8 級的地震地表移動 (seismic ground motions), 亦即可承受基礎地震地表移動 (basic earthquake ground motion; S1:450 gal), 約相當於安政東海地震 (Ansei Tokai Earthquake) 發生芮氏 8.4 級地震時的地表移動。

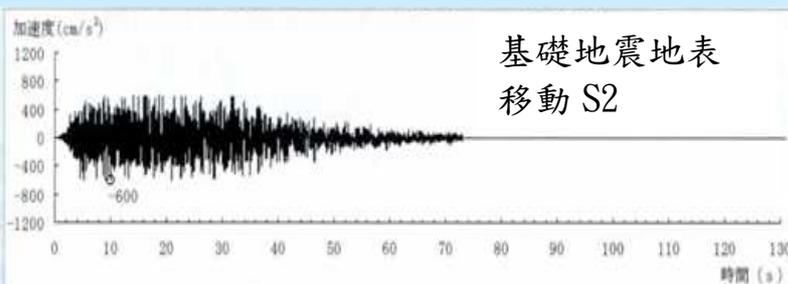
安全更重要設施 (Facilities of greater safety significance) 設計上可承受基礎地震地表移動 (basic earthquake ground motion; S2:600 gal), 約相當於發生芮氏 8.5 級地震時的地表移動, 較安政東海地震 (Ansei Tokai Earthquake) 發生芮氏 8.4 級地震更大。

地震地表移動加速度波形的最大加速度為 450gals



適用於安全重要設施

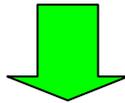
地震地表移動加速度波形的最大加速度為 600gals



適用於安全更重要設施

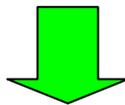
三、耐震餘裕強化改善

濱岡核電廠在設計上已確保地震安全，能夠承受相當於安政東海地震（Ansei Tokai Earthquake）的強度（較假想的東海地震（Anticipated Tokai Earthquake）為高），其距離地表移動（在岩床的水平地表移動的最大加速度為 600Gal：S2）限值有額外的餘裕



在審查更新地震安全指引（2001 年 7 月）的討論中，日本中部電力公司決定自願改善相關設施以強化濱岡核電廠耐震餘裕（2005 年 1 月正式宣布）

※指引於 2006 年 9 月 19 日再更新



計畫時程

1 及 2 號機：更新設備耐震改善於 2010 年完成

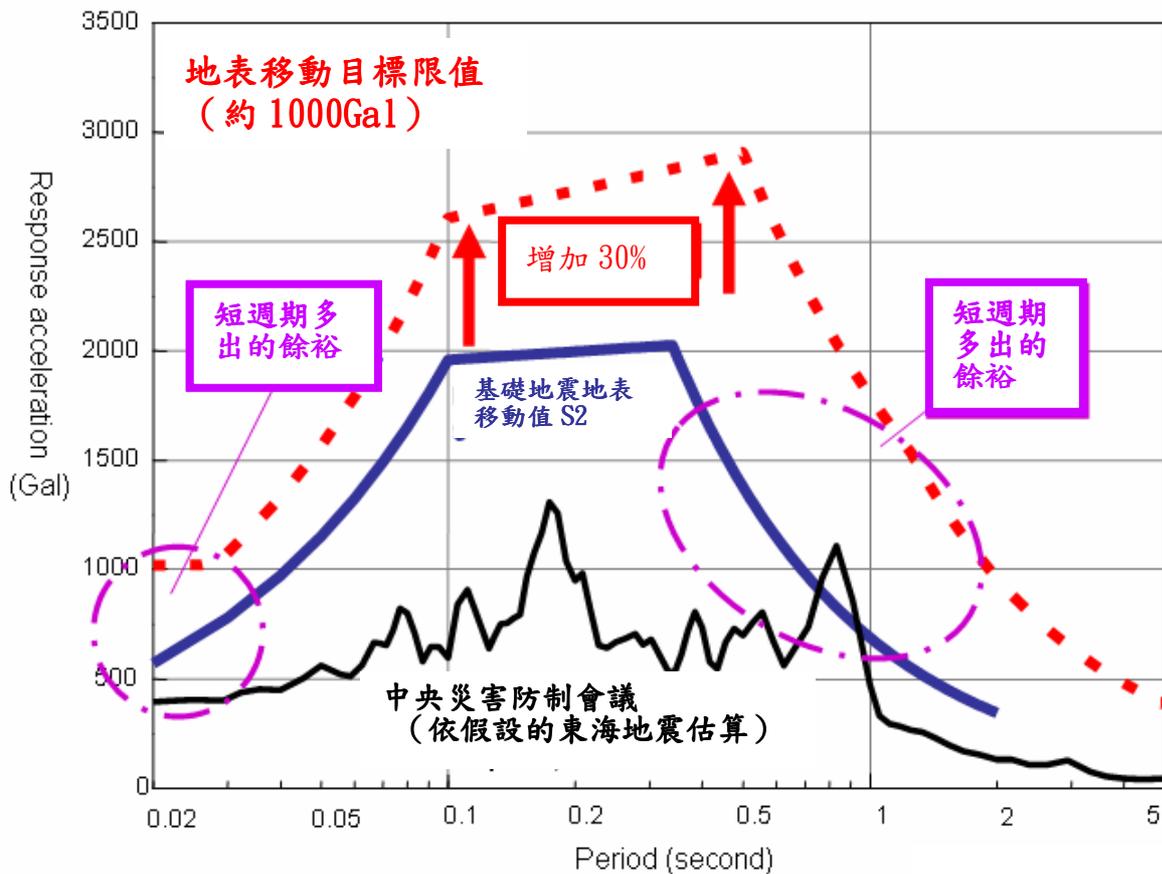
3—5 號機：已於 2007 年完成設備耐震改善

註：日本中部電力公司於 2008 年 12 月 22 日，決定將濱岡 1 及 2 號機永久停機，主要原因為重新起動此 2 部機所必須的工作（提升耐震能力）無法符合經濟效益，並且決定計畫在電廠廠址的東邊建造新的第 6 號機。

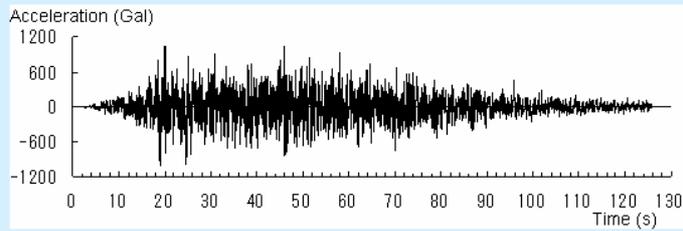
強化耐震餘裕之地表移動設定值（反應頻譜）

依中央災害防制會議（Central Disaster Prevention Council）以假設的東海地震推估的地表移動值，距離基礎地震之短及長週期的地表移動限值 S2 仍有餘裕，更進一步，自基礎地震地表移動限值 S2 再增加 30% 餘裕。

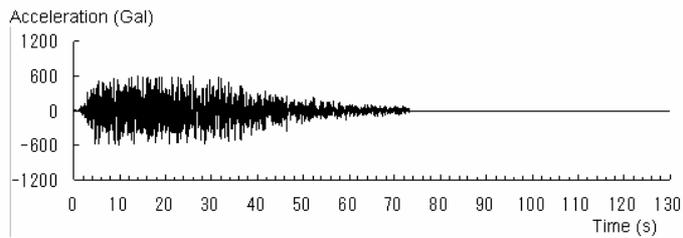
此地表移動目標限值，在岩床（bedrock）的水平地表移動之最大加速度約 1,000Gal，為中央災害防制會議以假設的東海地震推估的地表移動值的 2 至 3 倍。



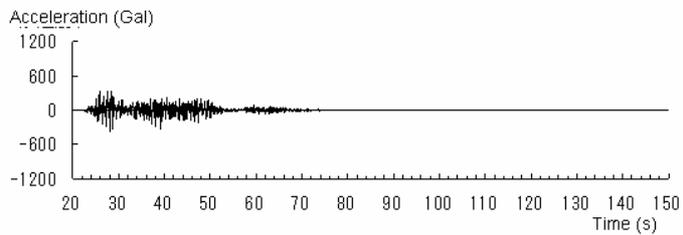
強化耐震餘裕之地表移動設定值 (加速度波)



地表移動設定值
(最大加速度約 1,000Gal)



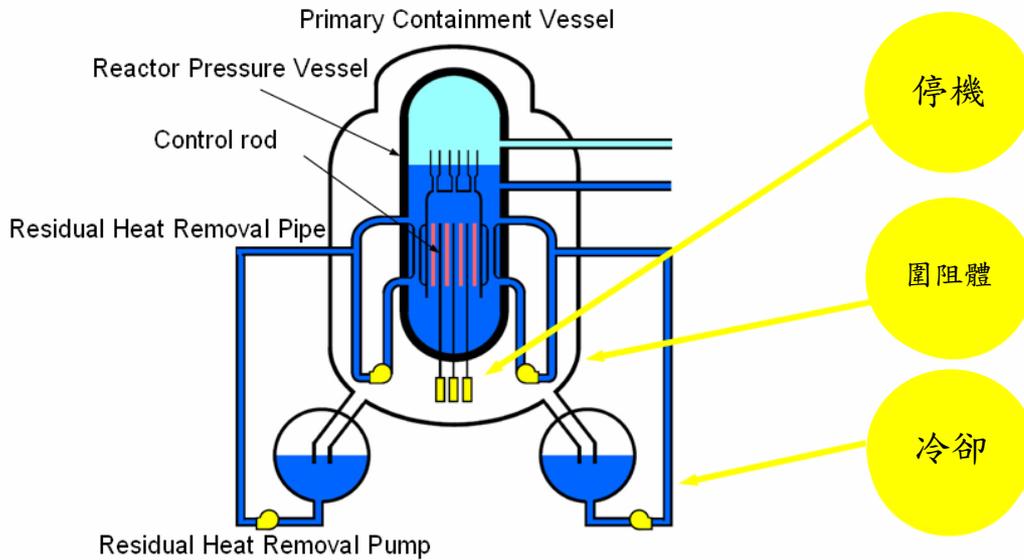
基礎地震地表移動 S2
(最大加速度 600Gal)



中央災害防制會議 (Central
Disaster Prevention Council) 以
假設的東海地震推估的地表移動值
(最大加速度 395Gal)

評估的主要設備

評估的主要設備
…耐震安全設計有關的重要設備



耐震安全設計有關的重要設備 (Important facilities in terms of seismic safety design) 包含反應爐及其有關的管路；使反應爐停止運轉的設施；使反應爐冷卻停機的設施；限制輻射外釋的設施；燃料有關設施；與電源及電力有關的設備。

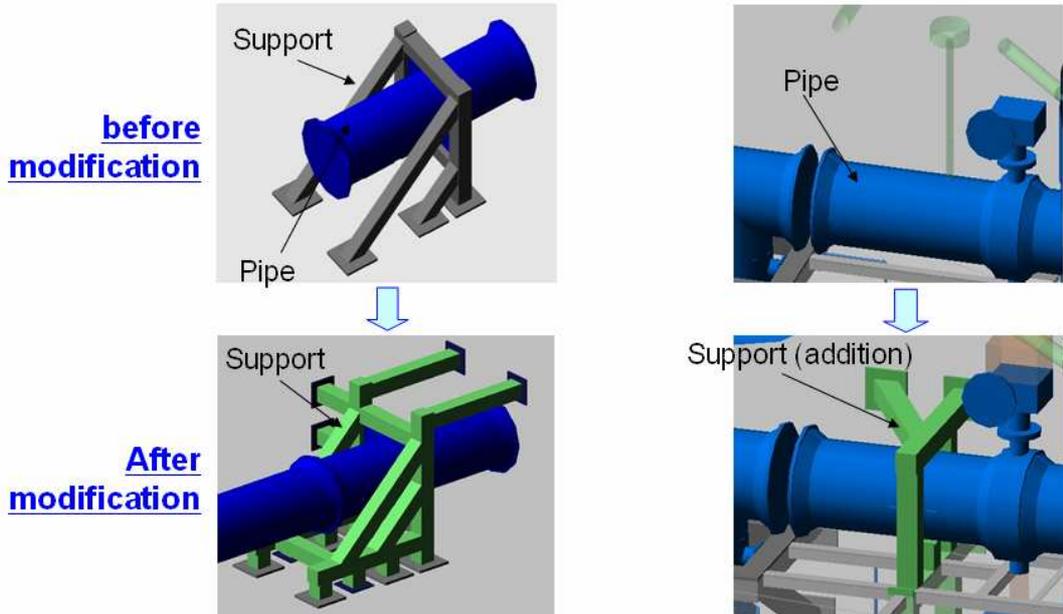
四、耐震餘裕強化改善實例（4 號機為例）

種類	評估的總數	更新說明
管路	管路總長度共須 6,461 支 管路支撐	1. 改善管路支撐（共 194 處）
電氣導架	cable tray 總長度共須 6,461 支支撐	2-1. 改善 cable tray 支撐（共 647 處）
	Conduit tube 總長度共須 3,402 支支撐	2-2. 改善 Conduit tube 支撐（共 612 處）
機械設備	700	3. 改善燃料吊車軌道導引（rail guides）
		4. 改善反應器廠房屋頂大吊車（overhead crane）支撐
廠房、結構及戶外建築	6 個建築（反應器廠房、海水熱交換器廠房、管路通道、煙囪、海水進口渠道、油槽）	5. 改善油槽
		6. 改善擋土牆後面地基
		7. 改善管路通道周圍地基
		8. 改善煙囪

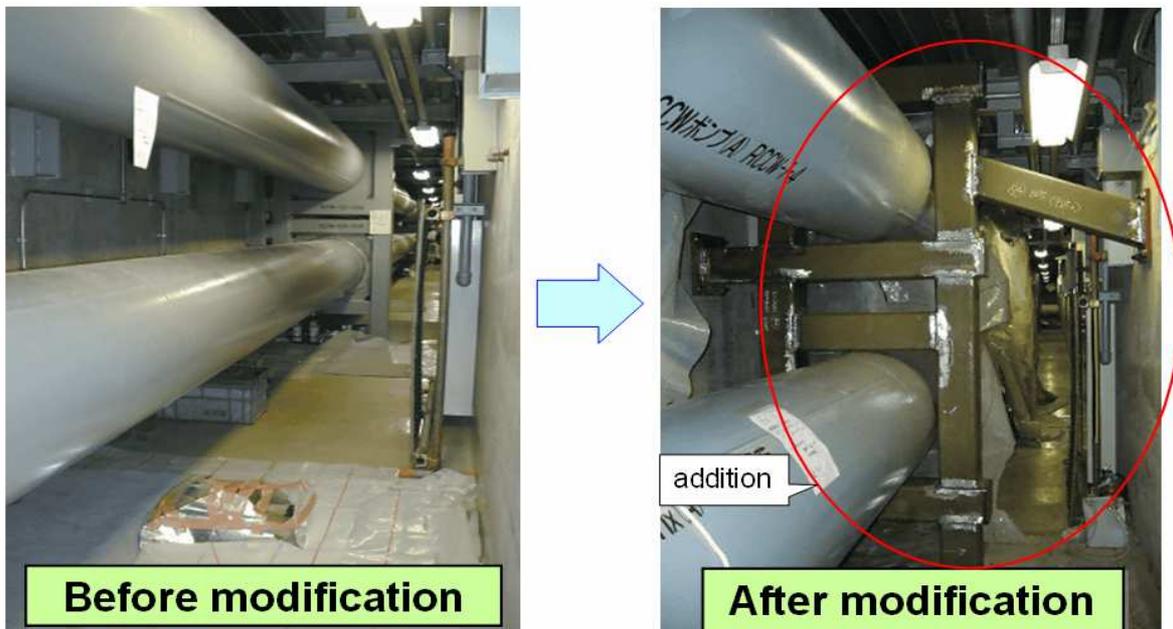
1. 改善管路支撐

管路的支撐結構予以強化或增設，以加強耐震餘裕。

例一

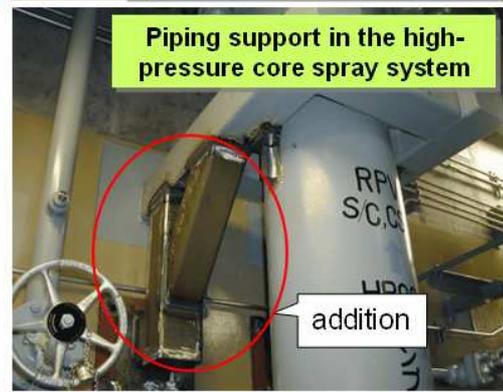
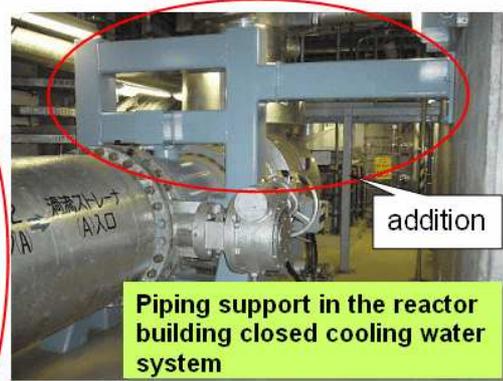


例二



Example: Addition of piping supports in the reactor building closed cooling water system

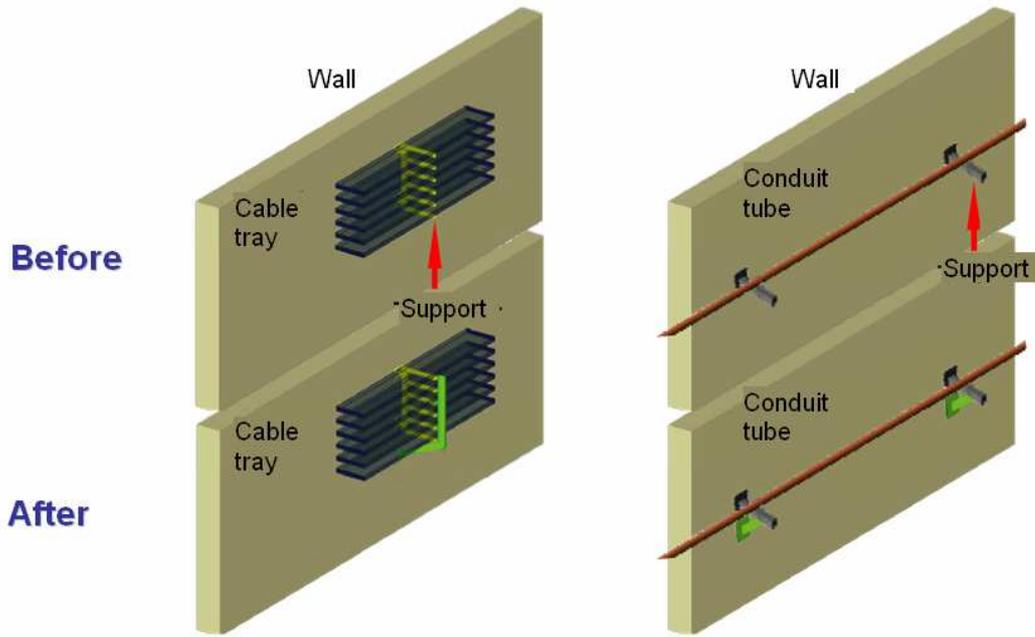
例三



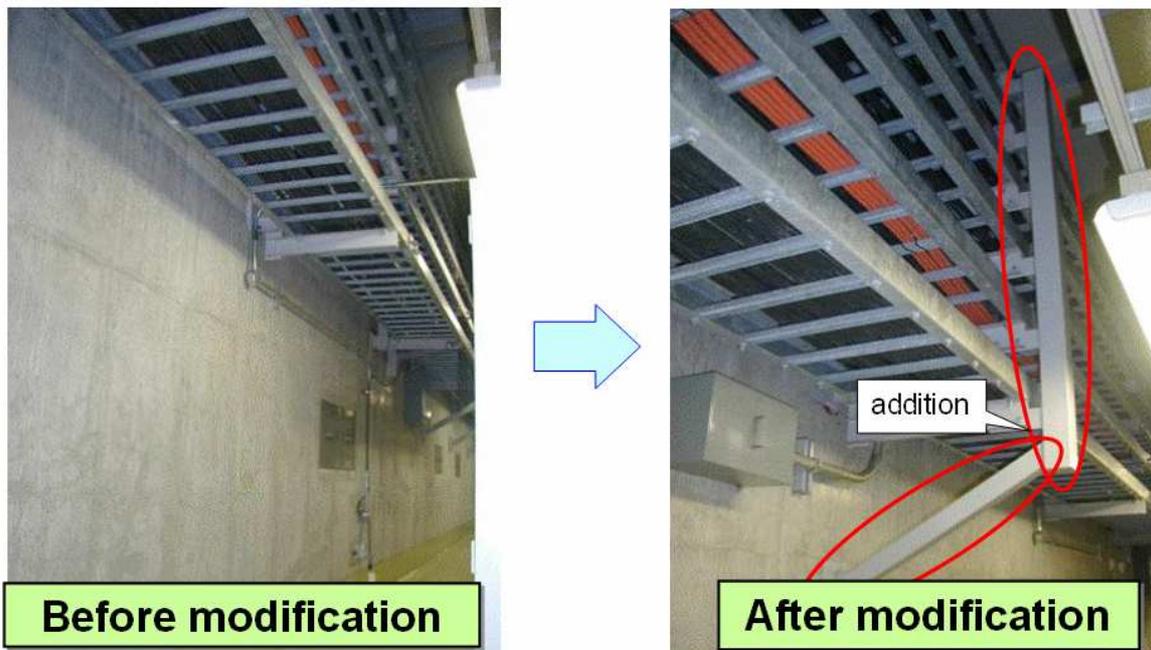
2. 改善 cable tray 及 conduit tubes 支撐

cable tray 及 conduit tubes 的支撐結構予以強化或新增，以加強耐震餘裕。

例一

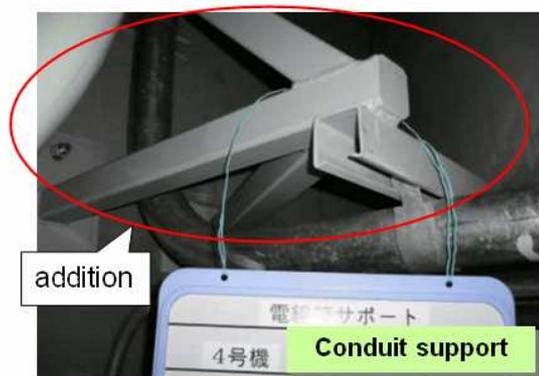


例二



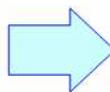
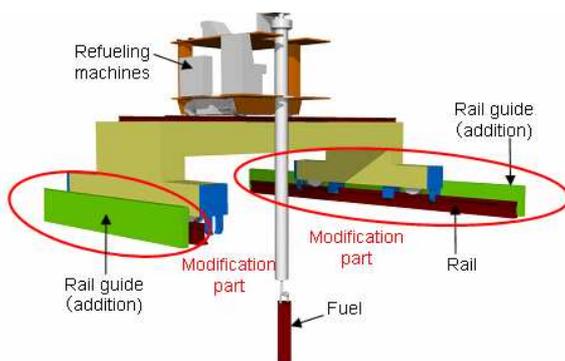
增加 cable tray 支撐

例三



3. 改善燃料吊車軌道導引 (rail guides)

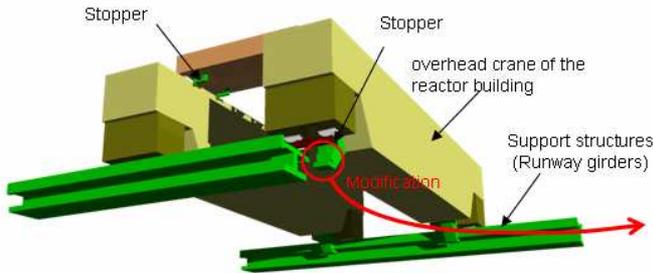
燃料吊車新增軌道導引 (rail guides) 以提昇耐震能力避免脫軌。



4. 改善反應器廠房屋頂大吊車（overhead crane）支撐

改善 overhead crane 的支撐部份，強化耐震安全餘裕，避免吊車可能掉落。

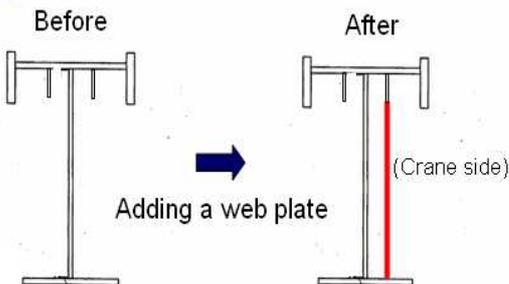
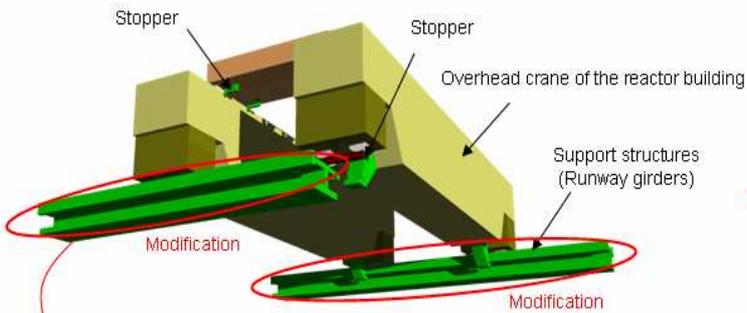
Falling prevention lug for the overhead crane



Overhead crane's main unit stoppers

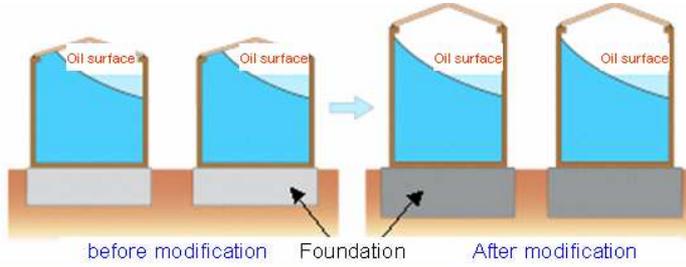


Runway girders modification



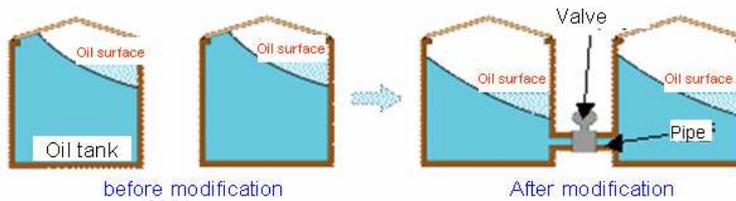
5. 改善油槽 (重建)

強化油槽基礎 (foundation) 及重建加高，以強化耐震餘裕，避免晃動後溢出。



Unit 3

油位較低的油槽利用管路連接相通，使能互相補償，以強化耐震餘裕，避免晃動後溢出。



Unit 4 and 5

30

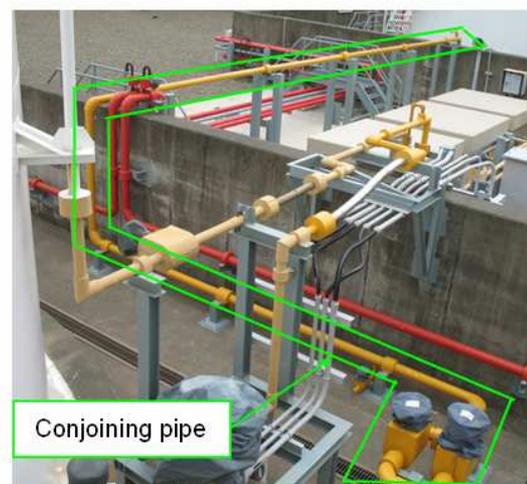
© 2006 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

○Unit 3



重建加高

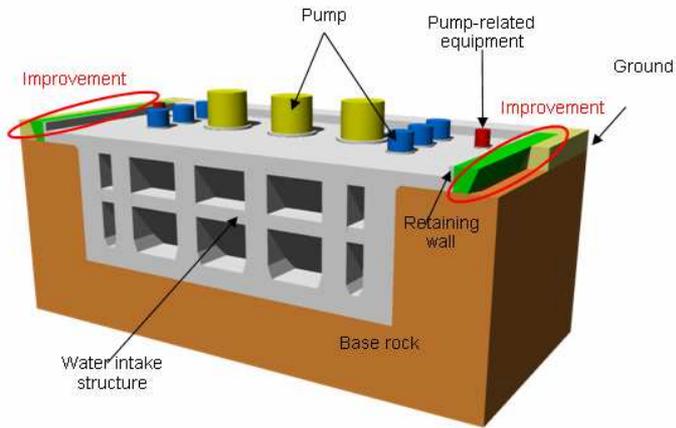
○Unit 4



增加連通管路

6. 改善擋土牆後面地基

靠近海水進口渠道擋土牆後面地基更換為混凝土，使泵有關的設備受到地震的衝擊降至最低。

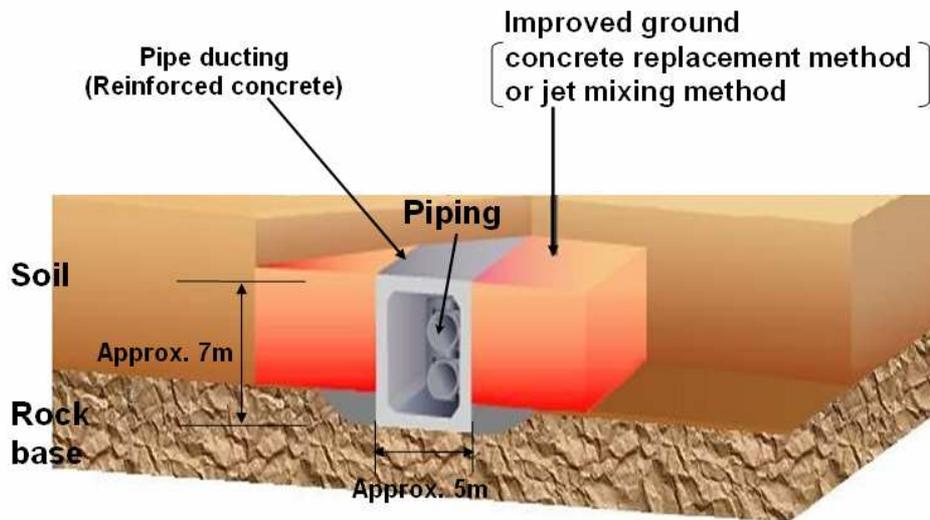


Example of Unit 3

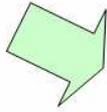


7. 改善管路通道 (pipe ducting) 周圍地基

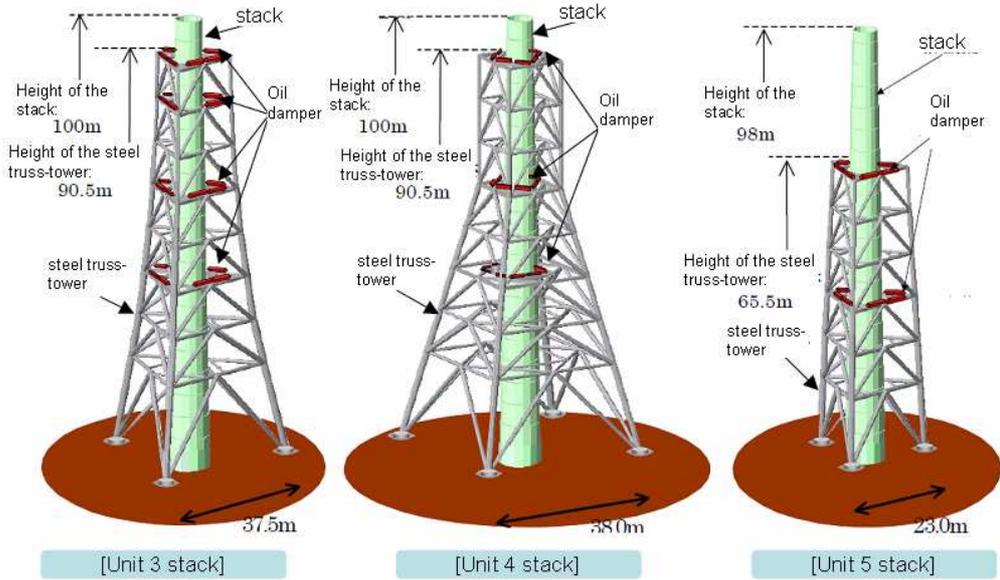
為使管路通道 (強化混凝土) 從周圍地基所接受的地震力降至最低，挖除管路通道周圍的土壤，更換為混凝土 (concrete replacement method)，或將周圍的地基予以打孔 (perforated) 後灌入水泥與土壤混合使其固化 (jet mixing method)。



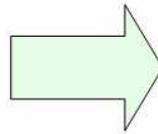
8. 改善煙囪



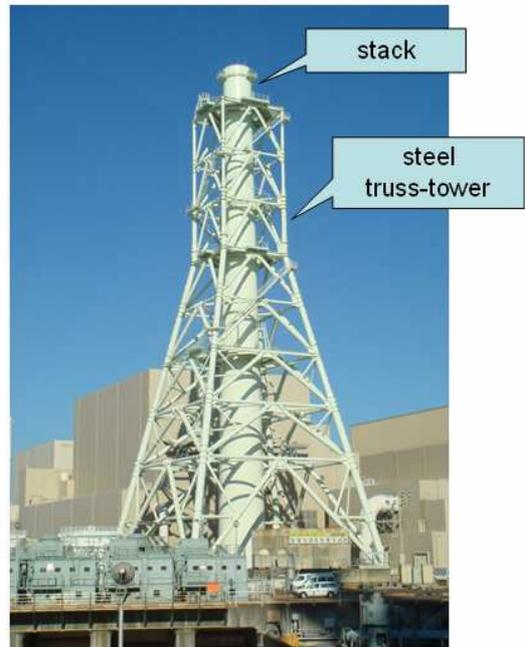
在現有的煙囪周圍增加鋼構樑架塔
(steel truss-towers)



<Before modification>

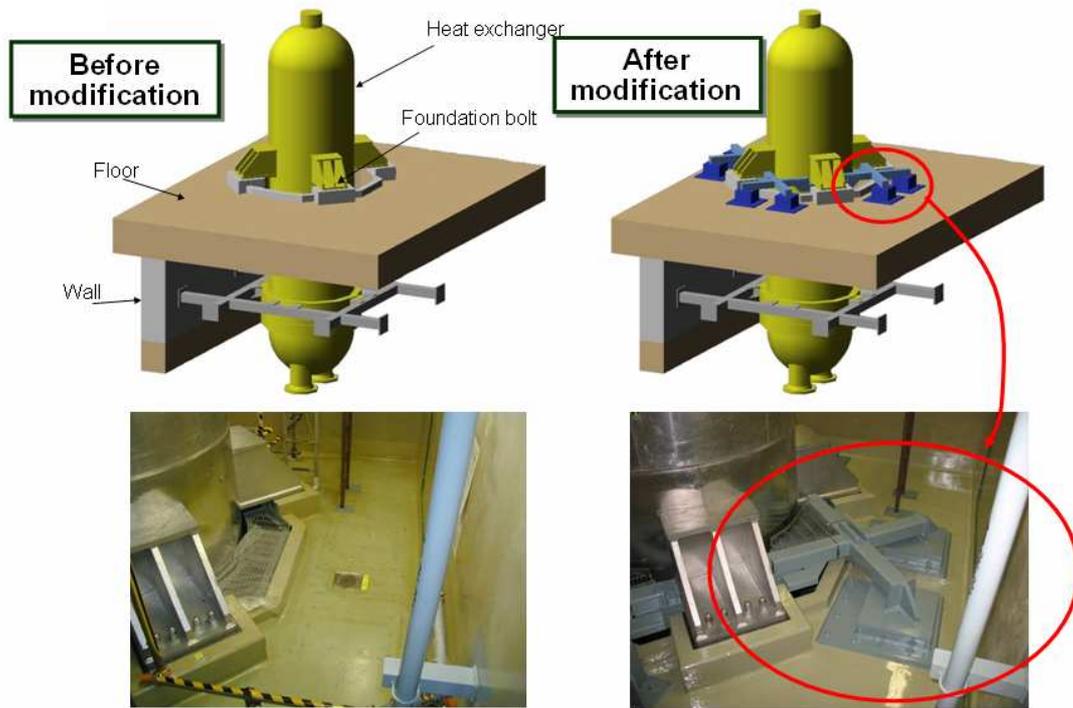


<After modification>



9. RHR 熱交換器支撐改善工作

熱交換器加裝支撐予以強化提升耐震餘裕。



肆、巴基斯坦 Karachi 核電廠強化地震安全

巴基斯坦介紹 Karachi 核電廠因早期沒有進行嚴謹的地質調查，除自行進行地震安全再評估及地質調查外，並於 1993 年邀請 IAEA 協助電廠進行設備改善，使可承受較原始地震設計值（0.1g）更高的地震（0.2g），所依據的文件為 IAEA GUIDE NO. 50-SG-S1（1991）。評估對象主要分為 3 類：

1. 未利用錨栓固定（unanchored）的安全或安全有關設備。
2. 有錨栓固定（anchored）的安全或安全有關設備，須評估其適切性。
3. 非安全有關設備，但地震時須維持在固定位置，否則會對安全設備造成影響。

總共有 17 項設備進行簡單的改善（easy fixes）：

- （1）直流電池的固定架及利用錨栓固定（ANCHORING）
- （2）控制室盤面利用錨栓固定
- （3）一號及二號柴油機移動限制（LIMIT STOPS）
- （4）一號及二號柴油機燃油日用槽及內部冷卻器槽加裝支架（BRACING）及支撐（SUPPORT）
- （5）馬達控制中心（MCC）及配電室（DISTRIBUTION ROOM）內變流器盤（INVERTER PANELS）利用錨栓固定
- （6）主變壓器（MAIN TRANSFORMER）利用錨栓固定
- （7）起動變壓器（STARTING TRANSFORMER）利用錨栓固定
- （8）運轉變壓器（RUNNING TRANSFORMER）利用錨栓固定
- （9）流程水流室（PROCESS WATER ROOM）冷卻器利用錨栓固定
- （10）改善汽機廠房主吊車（MAIN BRIDGE CRANE）
- （11）改善反應爐廠房 10 噸大吊車（10 TON BRIDGE CRANE）
- （12）配電室內 4160/400 伏特變壓器利用錨栓固定
- （13）改善配電室內的 SBVs 設備
- （14）改善反應爐廠房內的 RBVs 設備
- （15）補強廠房砌牆（MBWs）
- （16）將 3 號柴油機匯流排導管（BUS DUCT）支撐的位置從廠房砌牆（MBWs）移至由 RCC 樑柱
- （17）EFM 系統柴油發電機加裝地震限制器（SEISMIC RESTRAINTS）



一號及二號柴油機移動限制 (LIMIT STOPS)



馬達控制中心 (MCC) 加裝固定器



馬達控制中心利用錨栓固定



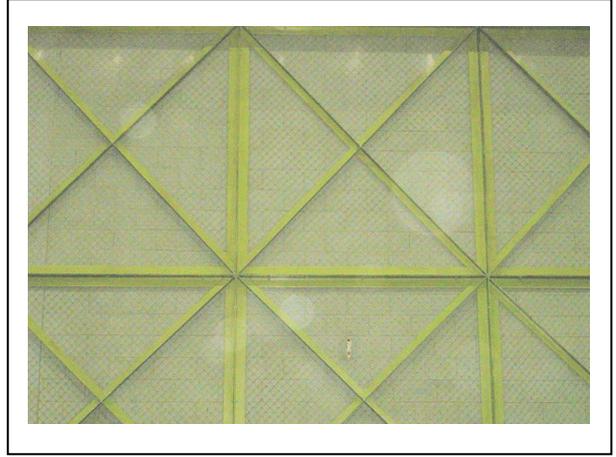
EFM 系統柴油發電機加裝地震限制器 (SEISMIC RESTRAINTS)



4160/400V 變壓器利用錨栓固定



變流器盤 (INVERTER PANELS) 利用錨栓固定



補強廠房砌牆 (MBWs)



3 號柴油機匯流排導管 (BUS DUCT) 支撐位置從廠房砌牆移至由 RCC 樑柱



主變壓器 (MAIN TRANSFORMER) 增加支撐



控制室盤面利用錨栓固定



MH 泵增加支撐

伍、心得及建議

1. 本次會中包含日本、韓國及巴基斯坦等國，均報告相關核電廠為提升地震安全進行耐震補強工作，其中東京電力公司柏崎刈羽核電廠主要因為 2007 年 7 月 16 日中越沖地震強度已超出其地震設計值，而其他日本中部電力公司濱岡核電廠、韓國 Kori 核電廠及巴基斯坦 Karachi 核電廠等，則是自主性決定進行耐震補強工作，其評估方式及補強作法甚具參考價值，可供我國學習借鏡。
2. 東京電力公司柏崎刈羽核電廠在中越沖地震後的再起動申請前的各項設備檢查、評估及整體性評估作業等，屬於地震應變程序書中的長期評估(long term evaluation)部份，目前本公司擬參考 EPRI NP-6695 指引建立中，惟該指引僅原則性說明，因此柏崎刈羽核電廠的作法可供我國參考使用。其中建議本公司須預做準備的事項：
 - (1) 建立本公司核電廠在強震後，計算設備、結構在地震時實際所承受的力量的地震反應分析能力。必要時應與國內地震專家或研究機構簽訂合作計劃，以及時提供地震應力分析。
 - (2) 電廠各項設備、結構的設計資料應蒐集彙總，以供執行應力比較時使用。
3. 會中各國紛紛訊問東京電力公司有關柏崎刈羽核電廠受損最輕微的 7 號機何時可再起動。東京電力公司代表表示，雖然 7 號機已經完成檢修、評估與補強，並向政府提出再起動申請應可獲得通過(2 月 13 日日本「經濟產業大臣」及「原子力安全・保安院(NISA)」已同意再起動申請)，但目前最大的阻力來自地方政府及附近民眾，主要原因為東京電力公司於事故時，延誤通知及報導不實，民眾對電力公司的作為不信任及對其所提出的安全評估結果沒有信心。此經驗再次提醒各國萬一核電廠發生事故時，對中央與地方通報的及時性及事故狀況發布的正確性的重要性與影響，尤其對民眾最為關心的是否有輻射外釋，應在再短時間內完成實際量測，再將真實情況向大眾說明，方可驅除民眾疑慮，對電廠後續恢復工作能夠信任。
4. 柏崎刈羽核電廠在中越沖地震之經驗回饋及改善措施，本公司大部份已完成評估與採取必要改善，惟本次新增項目中有 2 項值得參考：
 - (1) 在用過燃料池、反應爐上方及燃料處理池週邊架設屏障，可使地震時因池水晃動所造成的溢流減少為只有原來溢流量的 1/10 至 3/10。
 - (2) 地震時現場工作人員疏散，在輻射偵測站造成擁擠，使得疏散因而延遲的經驗，此經驗可供本公司研究事先預防。