

出國報告（出國類別：開會）

參加世界核能發電協會東京中心
「最佳化維護及設備可靠度
程序執行研討會」

服務機關：台灣電力公司 第二核能發電廠

姓名職稱：李明宗 / 核機儀控課長

派赴國家：日本

出國期間：97.02.18 ~ 97.02.21

報告日期：97.03.21

97-503f-8A

出國報告審核表

出國報告名稱：參加世界核能發電協會東京中心「最佳化維護及設備可靠度程序執行研討會」		
出國人姓名	職稱	服務單位
李明宗	核機儀控課長	第二核能發電廠
出國期間：97年02月18日至97年02月21日		報告繳交日期：97年03月21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. 內容充實完備。 <input type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計劃 <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 <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"/> 8. 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），與同人進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9. 其他處理意見及方式：	
	層轉機關審核意見 <input type="checkbox"/> 1. 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分 _____（填寫審核意見編號） <input type="checkbox"/> 2. 退回補正，原因： _____ <input type="checkbox"/> 3. 其他處理意見： _____	

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、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。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人  單位主管  主管處主管    總經理 副總經理：  蕭專總 出國

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加世界核能發電協會東京中心「最佳化維護及設備可靠度程序執行研討會」

頁數 57 含附件：是否

出國計劃主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司 / 陳德隆 / (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：李明宗/ 台灣電力公司/核二廠/
核機儀控課長/ 02-24985990-2651

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：97年02月18日~97年02月21日 出國地區：日本

報告日期：97年03月21日

分類號/目

關鍵詞：WANO、設備可靠度、預防保養、CBM、RCM、最佳化維護

內容摘要：

世界核能發電協會東京中心（WANO-TC：World Association of Nuclear Operators - Tokyo Centre）於97年2月19日至20日在日本東京舉辦研討會（Workshop），其主題為「最佳化維護及設備可靠度程序執行（Maintenance Optimization / Equipment Reliability Process Implementation）」，研討內容包括「關鍵性組件定義」、「移除單一弱點之設備改善經驗」、「設備性能監測」、「設備組件狀況表及預知維護作業之應用」、「預防保養作業最適化」、「設備生命週期管理」及「維護人員績效」等多項議題。

兩天的研討會由世界核能發電協會東京中心及美國電力研究協會（EPRI：Electric Power Research Institute）專家帶領引導，來自台灣、日本、韓國、中國、印度、巴基斯坦、芬蘭等國電力公司代表發表各國電力公司在核能電廠最佳化維護及設備可靠度程序執行之資訊及策略。

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

目 錄

	頁次
壹、出國行程與目的	1
貳、任務過程與內容	2
一、最佳化維護及設備可靠度執执行程序概述	2
二、日本核能電廠提昇安全性及可靠度之最佳維護 ...	7
三、目前維護績效表現及維護革新的方法	14
四、芬蘭 Loviisa 電廠最佳化維護及設備可靠度程序 ...	17
五、日本關西電力公司最佳化維護	19
六、韓國核電廠組件分類及預防保養維護樣板之執行	21
七、國聖電廠儀控關鍵性組件鑑定及維護計劃改善 ...	25
八、日本 IKATA 伊方核電廠最佳化維護	33
九、中國秦山核電廠最佳化維護	38
十、日本福島核電廠以可靠度為中心的維護計劃	39
十一、巴基斯坦 Chashma 核電廠預防保養計劃	42
十二、印度電力最佳化維護經驗	44
叁、心得與感想	47
肆、建議事項	53

壹、出國行程與目的

爲了建立可以持續維持設備可靠度之維護程序，將多種不同之維護作業整合成可用之維護計劃，並鼓勵同仁支持爲了提昇設備可靠度之維護策略變更計劃，以避免第一線同仁抗拒改變，世界核能發電協會（WANO：World Association of Nuclear Operators）期望會員開始執行最佳化設備維護，以提昇設備可靠度及維護有效性，基於電廠事件中有極大比例之肇因屬於設備失效，持續改善設備可靠度爲 WANO 會員共同之期望與任務，因此世界核能發電協會東京中心此次在日本東京舉辦之研討會（Workshop），特別將主題訂爲「最佳化維護及設備可靠度程序執行（Maintenance Optimization/Equipment Reliability Process Implementation）」，研討內容包括「關鍵性組件定義」、「移除單一弱點之設備改善經驗」、「設備性能監測」、「設備組件狀況表及預知維護作業之應用」、「預防保養作業最適化」、「設備生命週期管理」及「維護人員績效」等多項議題。

本次出國任務之目的爲前往日本參加世界核能發電協會東京中心（WANO-TC）於 97 年 2 月 19 日至 20 日舉辦之「最佳化維護及設備可靠度程序執行研討會」，並發表簡報，題目爲「核二廠儀控關鍵性組件鑑定及維護作業改善（Identification of Critical I&C Components and Improvement of Maintenance Program in KS）」；本次出國行程及工作項目詳如下表：

起迄日期	前往公司/停留城市	工作項目
97.02.18	往 程	台灣台北－日本東京
97.02.19～ 97.02.20	WANO-TC/ 日本東京	參加「最佳化維護及設備可靠度程序執行研討會」
97.02.21	返 程	日本東京－台灣台北

兩天的研討會，由世界核能發電協會東京中心及美國電力研究協會（EPRI：Electric Power Research Institute）專家帶領引導，來自台灣、日本、韓國、中國、印度、巴基斯坦、芬蘭等國電力公司代表發表各國電力公司在核能電廠最佳化維護及設備可靠度程序執行之資訊及策略。參加此次研討會之目的爲接受 WANO-TC 對於會員針對「核能電廠最佳化維護及設備可靠度程序執行」之訓練，並共享會員間各項維護資訊及觀念，對本公司核能電廠維護作業及掌握國外電廠相關營運資訊有所幫助。

貳、任務過程與內容

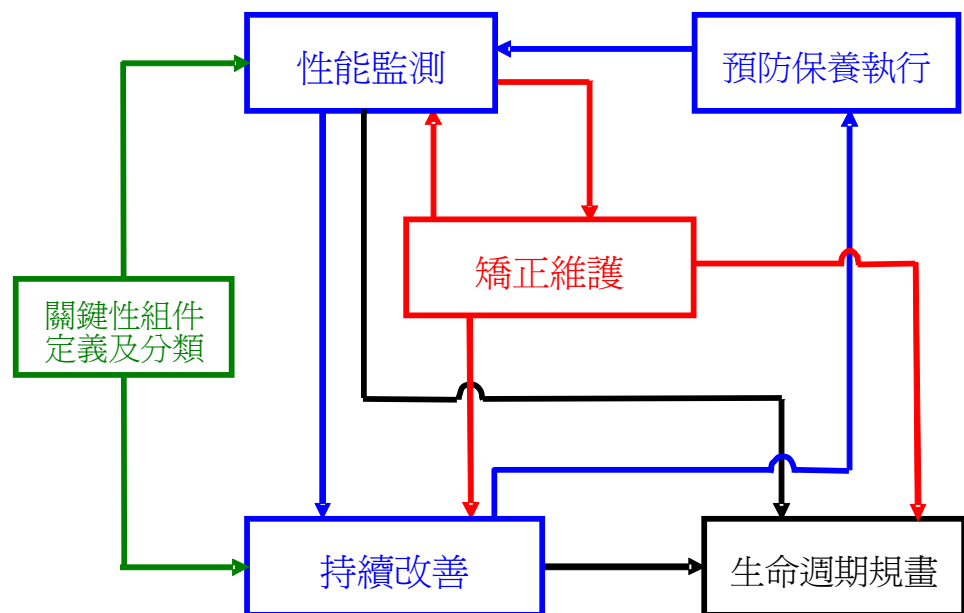
「最佳化維護及設備可靠度程序執行（Maintenance Optimization / Equipment Reliability Process Implementation）」研討會於 97 年 2 月 19 日至 20 日在日本東京舉行，研討內容包括「關鍵性組件定義」、「移除單一弱點之設備改善經驗」、「設備性能監測」、「設備組件狀況表及預知維護作業之應用」、「預防保養作業最適化」、「設備生命週期管理」及「維護人員績效」等多項議題，會中由來自台灣、日本、韓國、中國、印度、巴基斯坦、芬蘭等國電力公司代表發表各國電力公司在核能電廠最佳化維護及設備可靠度程序執行之資訊及策略，簡報題目及摘要如下：

1. Overview of Maintenance Optimization, Equipment Reliability and Implementation.
2. Maintenance Optimization for Safety and Reliability of NPPs in Japan.
3. Current Maintenance Practice at TC Stations and Approach to Maintenance Innovation.
4. Maintenance Optimization and Equipment Reliability Process Implementation.
5. KANSAI Electric's Approach to Maintenance Optimization.
6. Component Classification and PM Template Implementation in KHNP.
7. Identification of Critical I&C Components and Improvement of Maintenance Program in KS NPS.
8. The Activities for Maintenance Optimization in IKATA Nuclear Power Plant.
9. Preventive Maintenance Optimization of NPQJVC.
10. Implementation of Streamlined Reliability Centered Maintenance Program at Fukushima-Dai-ichi.
11. Preventive Maintenance Program in Chasnupp-1.
12. Maintenance Optimisation Experiences at NPCIL, India.

一、最佳化維護及設備可靠度執行程序概述（EPRI 美國電力研究協會）：

EPRI 美國電力研究協會認為最佳化的維護模式為設備可靠度加上適當的工作排程管控，因此簡報內容主要討論這兩大議題。設備可靠度程序乃將現有設備相關維護活動整合成單一程序，使電廠人員可以評估重要電廠設

備、建立長程設備健康計劃、監測現有設備之狀況及性能、並依據設備運轉經驗持續調整預防保養內容及週期等。



圖一 設備可靠度執行政序 (INPO/WANO-913)

提昇設備可靠度程序可再細分成六項程序 (詳圖一)：關鍵性組件定義及分類 (Scoping and Identification of Critical Components)、設備性能監測 (Performance Monitoring)、預防保養執行 (PM Implementation)、矯正維護措施 (Corrective Action)、可靠度持續改善 (Continuing Equipment Reliability Improvement)、設備生命週期管理 (Life Cycle Management) 等。首先須將系統/組件依其功能重要性分類，定義關鍵性系統/組件，依據組件之關鍵性不同而建立對應之預防保養，然後執行性能監測並依據監測結果調整 PM 內容以達成持續改善之效果，由預防保養→性能監測→持續改善→預防保養等程序形成一持續改善之良好循環；若設備發生故障或劣化，則執行矯正維護及回饋故障肇因，而修復後之設備仍須回到性能監測→持續改善→預防保養→性能監測等維護循環；另設備老化及生命週期管理則須長程規畫，各項維護程序說明如下：

1. 關鍵性組件定義及分類：定義電廠重要系統功能，同時辨識及分類關鍵性、非關鍵性、Run-To-Failure 等組件，其他程序則依據組件之關鍵

性類別採取不同之維護內容及策略。

2. 設備性能監測：無論是預防保養或矯正維護，執行完畢後均須驗證系統可維持正常運轉，藉由監測並記錄系統性能及重要參數，作為組件劣化之趨勢預測，早期發現非預期性的劣化，並提供給持續改善程序及設備老化管理規畫等之參考數據。
3. 預防保養執行：預防保養執行是可靠度持續改善必要之程序，需要性能監測來驗證 PM 之效果，詳細內容包括記錄維護前 As-found 及維護後 As-left 設備狀況、設備狀況回饋及分析、執行維護後測試等。
4. 矯正維護：於設備故障時執行，矯正維護後需要性能監測來驗證系統已回復至正常狀況，並執行肇因分析，然後針對肇因提出持續改善，避免故障重複發生，而老化相關原因須回饋至生命週期管理程序。
5. 設備可靠度持續改善：持續改善乃是維持設備可靠度之不二法門，首先建立並使用 PM 維護樣板，然後依據設備狀況持續調整 PM 之內容及週期，回饋包括設備 As-found 狀況紀錄、故障肇因、設備非預期劣化指標等維護資訊，採取即時的預防性程序（Living Proactive Process）以降低不可預期之故障失效，減少強迫停機，並將維護資源配置最佳化。
6. 設備生命週期管理：依據性能監測結果及設備故障肇因，建立能維持設備/組件長期狀況良好之維護策略，為電廠長程之營運策略，整合現有包括老化管理、預防保養、性能監測等維護程序；其中預防保養之功能在移除或改善老化所引發之劣化問題，確認現有之 PM 及矯正措施已足夠並有效，監測頻率與執行範圍須能及時偵測到老化之效應，重要設備功能監測可提供設備/組件劣化程度之趨勢，以便及時採取矯正措施。

一般來說，設備可靠度程序包括維護法規、偵測試驗、設備性能狀況監測、預防保養（週期性、預知性、計劃性）、以可靠度為中心之維護作業（Reliability Centered Maintenance）、生命週期管理等活動。EPRI 提供之 PM 維護樣板可做為關鍵性組件定義及分類、性能監測、預防保養執行、設備可靠度持續改善等維護程序之基礎，維護樣板之基礎資料庫文件、故障模式分析及弱點分析等有助於建立預防保養之最適化基準。

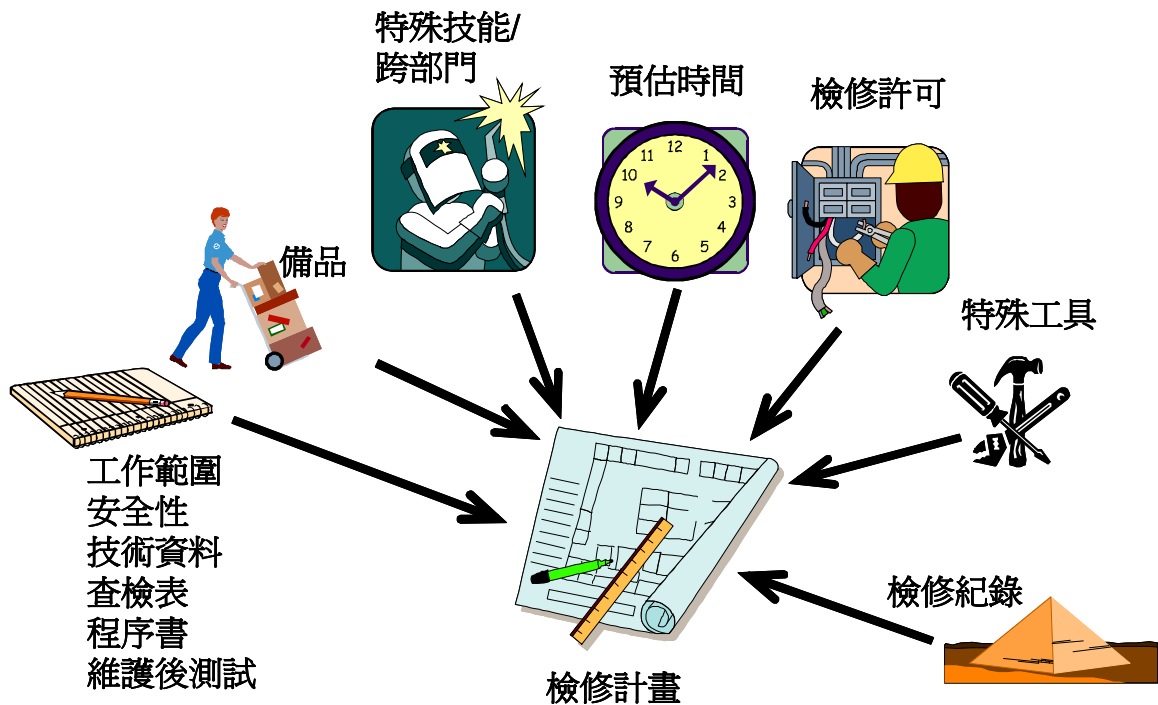
設備狀況依歸維護（CBM Condition Based Maintenance）乃依據設備/組件既有之狀況評估及監測結果執行維護作業，例如預知性保養，性能監測、預防保養、矯正維護、設備生命週期管理等程序均以設備狀況為維護原則。預防保養之種類有大修維護、TBM（Time Based）定期保養、及依狀況好壞之 CBM（Condition Based）維護，可依據設備狀況建立等級，於 PM 時記錄，累積足夠資訊以利評估判斷採取何種維護方式，下表為狀況等級的一個例子：

等級	說明	因應措施
C-1	非預期失效，與磨損及老化無關，設備有潛在性無法使用之危險	專家評估
C-2	失效但似乎與磨損及老化無關	專家評估
C-3	正常老化磨損之失效	考慮調整 PM 內容
C-4	設備堪用未失效，但誤差已超出可接受範圍	考慮調整 PM 內容
C-5	設備堪用但已元件正常老化造成可靠度降低，須檢修或更換新品	考慮調整 PM 內容
C-6	正常老化或漂移現移，誤差值仍在可接受範圍，可能須重新調整	維持現有 PM
C-7	狀況良好符合期待，無須任何調整	維持現有 PM
C-8	狀況良好超出預期，有如新品	考慮調整 PM 內容

為了提昇設備可靠度，下列各項為必要的維護程序：

1. CBM 狀況依歸維護：包括預知性保養、系統監測、定期性測試、值班巡視、系統走動管理等維護作業。
2. 系統性能指標、系統/組件性能監測計劃、系統/組件健康長程規畫。
3. 維護基礎/最佳化維護：系統/組件功能定義及分類、預知性預防保養、矯正維護作業。
4. 矯正維護措施：包括肇因分析、後續措施追蹤。
5. 經驗回饋：維護前後設備狀況資料建檔、預防保養回饋機制。
6. 維護後測試計劃、老化及備品短缺管理、工作重要性排序、單一弱點（Single Point Vulnerability）分析、OE 運轉經驗。

有效的工作排程應考慮（圖二）工作範圍、安全性、技術資料、查檢表、程序書、維護後測試、特殊工具、預估時間、跨部門的特殊技能、備品、檢修歷史紀錄、檢修許可…等，持續性改善須透過有效的經驗回饋，因此工作排程亦應注重並鼓勵工作人員的經驗回饋。



圖二 有效的工作排程

提昇設備可靠度成功的關鍵要素：

1. 不可忍受設備之非預期失效、長期存在或重複發生之設備問題須尋求解決。
2. 集焦在關鍵性設備/組件、消除設計上先天不良之弱點。
3. 預防及預知性維護、長程規畫主動性保養。
4. 應用運轉經驗及標竿優良典範。
5. 成功的工作排程管理。
6. 集焦在程序管控而非功能或技術：如何決策、如何工作以達到目標、相互交叉影響之考慮。
7. 維護管理及經營團隊。
8. 有效變更管理：文化差異考量、溝通、抗拒改變之處理、領導統御。

維護策略有效性之評估須包括人員、工作流程、技術、維護文化等四個領域：

1. 人員（People）：訓練、應用、績效、檢定。
2. 工作流程（Work Process）：分類、控制、執行、完成。
3. 技術：工作管理、維護及診斷技術、資訊整合工具等。
4. 維護工作文化：標竿典範、設定目標、溝通協調、領導統御、組織、可信度、持續改善企圖心等。

提昇設備可靠度參考資料：

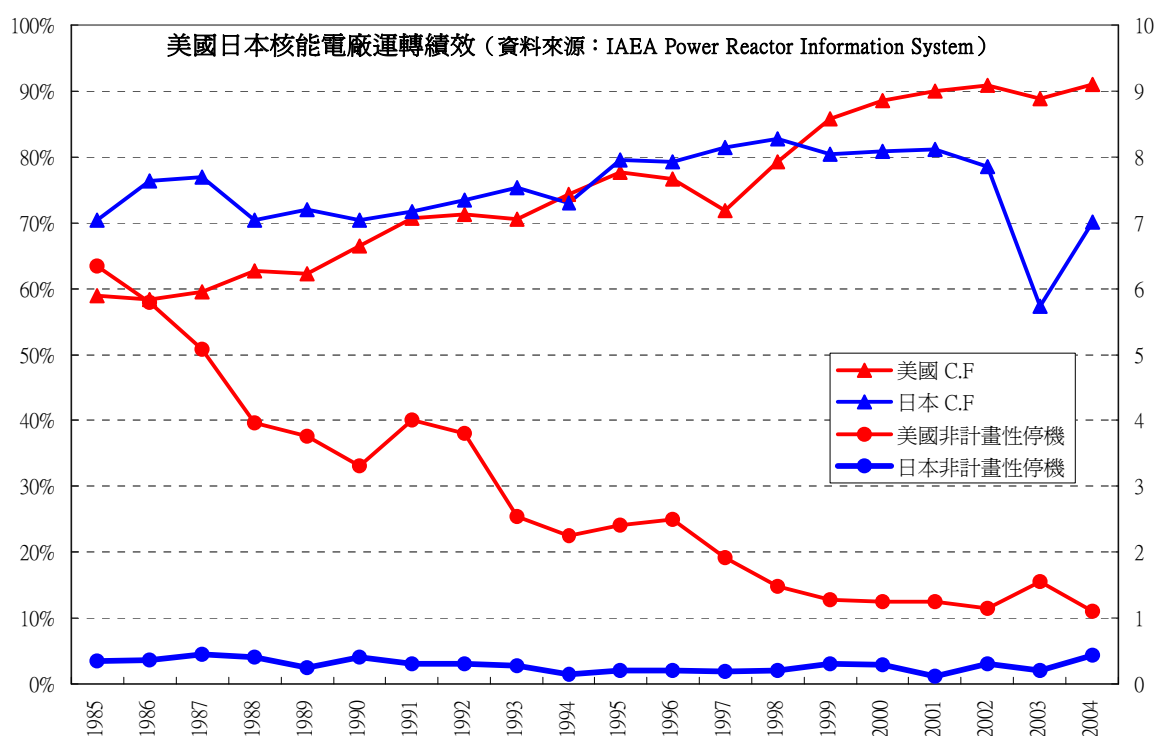
1. EPRI TR-107434, System Monitoring by System Engineers: 37 System Monitoring Plans, March 1998.
2. EPRI TR-107668, Guideline for System Monitoring by System Engineers, March 1997.
3. EPRI TR-106853, Maintenance Engineer Fundamentals Handbook, August 1996
4. EPRI TR-105365, Comprehensive Low-Cost Reliability Centered Maintenance, September 1995.
5. EPRI NP-7213, Post Maintenance Testing: A Reference Guide, April 1991.
6. EPRI TR-1000806, Demonstration of Life Cycle Management Planning for Systems, Structures, and Components, January 2001.
7. NUMARC 93-01, Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness.
8. Code of Federal Regulations, Title 10 Nuclear Regulatory Commission, Part 50.65 "Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants".
9. NUREG 1800, Standard Review Plan for Review of License Renewal.

二、日本核能電廠提昇安全性及可靠度之最佳維護（東京電力）：

1. 日本核能發電運轉績效：

目前有 17 座核能電廠，共 55 部機組商業運轉（32 部 BWR 沸水式、23 部 PWR 壓水式），裝置容量 49,580MW，分屬於十個電力事業公司，提供日本約 30% 電力，而東京電力擁有三座核能電廠共 17 部機組。正在建造中的

核能機組有兩部（2,285MW），另計劃中的有十一部機組（14,945MW）。日本核能電廠運轉績效雖維持非常高的可靠度（詳圖三），例如極低之非計劃性停機次數，然而容量因數最高頂多至約 80%，主要的原因是日本法規的檢查週期僅 13 個月，加上大修工期長（約為 40~60 天），又近年來因為電力公司不當的措施導致長時間停機，造成容量因數偏低；在 1980 年代中期，美國工程師須到日本學習日本核電廠的高可靠度，而近年來美國電廠已名列世界前茅，容量因數超過 90%，現在日本必須努力才能迎頭趕上世界前端。



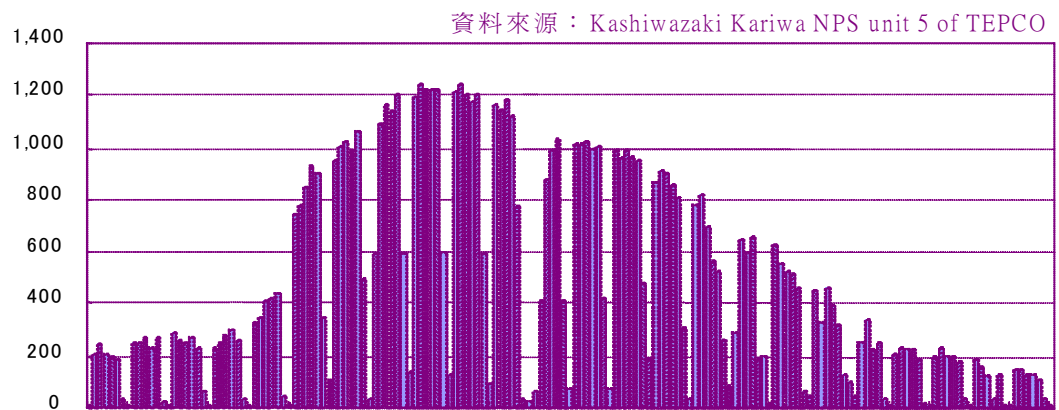
圖三 美國日本核能電廠容量因數及非計畫性停機次數

2. 核能電廠維護作業現況：

日本電力公司基本上採用定期性維護（Time Based Maintenance），對於一般的維護作業、電廠老化管理及重大設備更新改善案等的技術評估則採取預防性及計劃性方式，超過 10,000 項之維護工作安排在機組大修時執行，這樣的維護模式讓日本核能電廠保有高度的安全性及可靠度，降低非預期性停機機率；政府管制單位及電力公司已在討論如何改善維護管理策略，內容包括大修及運轉期間維護、設備狀況監測及狀況依歸維護（Condition

Based Maintenance) 、及依各廠特性建立不同之維護作業等。

目前維護作業有 TBM 定期性維護、CBM 狀況依歸維護、停機維護等三大類，依據製造家建議及配合火力電廠維護，日本核能電廠仍以定期性維護為主軸，爲了在運轉期間不會有任何功能失效，因此無論是反應器或汽機之任何設備組件均列入大修定期性維護，造成大修期間超過 10,000 項工作，及 1,000 名額外人力之需求，如此龐大的工作量導致複雜的大修工作排程與負擔尖峰（詳圖四），且由於多部機組同時大修，造成技術純熟的人力不足，工期拉長，若規劃大型設備改善，例如沸水式電廠更換爐心側板 Core Shroud 需時約 300 天，壓水式電廠更換蒸汽產生器 Steam Generator 則需時約 100 天。



圖四 日本核能電廠大修輻射區每日人力

由於大修維護人力吃緊、電廠逐漸老化、社會結構改變人口老化，爲了維持高可靠度及安全性，未來維護策略應考量下列之隱憂：

- 大修維護人力吃緊，無法聘用足夠的純熟技術人員。
- 人員輻射劑量高，仍有改善空間。
- 老化電廠數目增加，維護作業需依各廠特性考量。
- 日本出生率下降，員工老化，需及時補充人力並給予足夠的訓練。
- 日本的人因疏失比起其他國家算是低的，但仍約有 30%閥門功能不正常肇因於不洽當的維護工作，其中大部分發生在分解檢查的時間點上，雖然分解檢查可以發現非預期之劣化問題，但也導致較多的不正常功能，因此需重新考慮分解檢查之優缺點及必要性。

3. 最佳化維護基本概念

最佳化維護基本的理念乃是使用適當的方法，針對適當的組件在適當的時機執行，以達到避免過多或過少的維護；爲了達到最佳維護，一方面使用PDCA（Plan-Do-Check-Action）循環，持續改善維持設備高可靠度，另一方面各電力公司間應透過共同的工程專家平台交流彼此之維護資訊，例如分享最佳化維護策略及所有電力公司的成果。未來維護作業有三個改進重點：

- 加強大修及運轉期間維護資料蒐集，以利評估改善維護週期及內容。
- 建立性能狀況監測標準，以呈現維護效果。
- 加強評估維護工作之成效。

資訊分享可以加速改善全日本核能電廠維護工作，不久的將來將增設共同的工程基礎平台及專家網路，它負責蒐集日本各電力公司及國外之維護經驗，各電力公司則可以由這個平台得到標竿典範或其他不同之經驗，而重新評估擬定各自的維護策略。

爲了在日本實際執行最佳化維護及提昇電力公司的創新性，有必要在政府法規及電廠維護程序書之間建立一套法人層次的標準和指引，各電力公司在法規範圍內可以充分地運用各自的單獨技術，例如，核能電廠的維護規則和指引已在產業、學術界和政府間討論，此維護規則和指引符合最佳化維護的基本概念，且已經被核准並將由日本電力協會發行。

目前在日本幾乎所有的維護作業都安排在大修期間執行，僅有少量工作在運轉期間，爲了提高維護的有效性，日本電力公司計劃擴展運轉期間之監測工作，部分的維護工作將以監測資料爲依據，希望大修密集的維護負擔可部分轉移至運轉期間；同時，藉由設備狀況監測能早期發現非預期性的劣化，對提昇安全和可靠性有所貢獻。

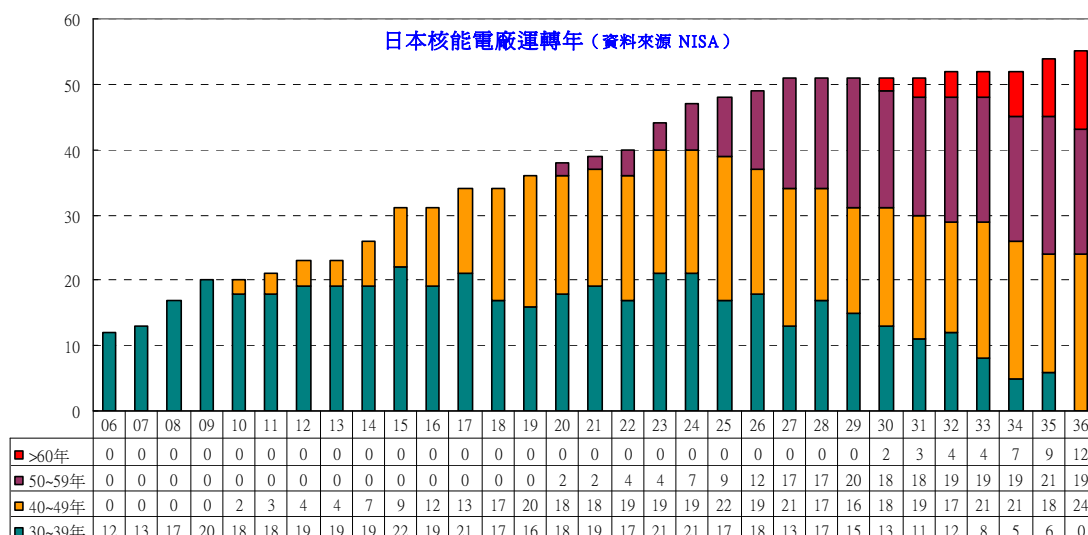
4. 最佳化維護策略

- 系統/組件維護分級：爲了執行合理的維護工作，在維修計劃階段，結構/系統/組件分級應同時考慮核能安全功能、發電能力、運轉經驗或工業安全等因素，不同等級將採用不同的維護作業，例如性能監測標準將依等級訂定，被分類在關鍵等級的設備組件必須執行定期預防維護，等級低者則以矯正維護措施即可。

- 績效指標標準：可預防之功能失效次數及系統不可用時間，最近成爲不只是電廠人員也是一般公眾觀測維護作業之績效指標，績效指標的數值標準依據電廠績效紀錄或運轉規範允許的檢修時間而定，績效結果可使用於客觀評估維護的有效性，此外，共同的績效指標將可成爲與國外電廠比較之標準。日本的基本概念和美國是一致的，維護績效的標準包含電廠和系統兩個層次，系統層次績效指標的建立集中於系統的核能安全功能，例如自動急停次數、非計劃性的負載變動、安全系統非預期動作等三項爲電廠層次績效指標；而其它功能則屬於電廠層次標準，例如可預防之功能失效次數（Maintenance Preventable Function Failure）和不可用時間（Unavailable Hours），爲系統層次的績效指標，MPFF 和 UA 兩項指標使用於大約 70 個核能安全有關係統。維護作業有效性的評估數據除了來自國內標竿電廠，還來自包括 WANO、INPO 等國外之寶貴資訊。
- 運轉期間性能狀況監測：機組運轉期間的維護作業，傳統上乃是依據經驗或工程判斷來偵測設備異常，例如聲音、氣味和發熱等現象，這些活動的重要性並未改變，但設備偵測或診斷技術已精進發展，例如振動量測、紅外線熱影像攝影、潤滑油油質分析等技術，將廣泛地被引進，期能偵測異常並儘快發現故障徵兆，以便及時採取必要的改正行動。
- 維護前 As-found 狀況資訊：目前維護前狀況僅於維護工作時作爲判斷設備是否劣化的參數，然而 As-found 資訊對於維護週期的決定是一項很重要的參數，因此最近已開始累積 As-found 狀況資料，以利評估維護作業和改進檢修週期。以閥座爲例，As-found 狀況分成 A、B、C、D 四個類別：類別 C 爲符合預期無須修改維護週期，維持嶄新狀況之類別 D 須考慮延長週期，不符合預期者則應考慮縮短週期。

類別	徵候	說明	因應措施
A	腐蝕導致閥門分離	發生故障，功能喪失	改善維護作業
B	閥門侵蝕由於特許	比預期的狀況差，需要額外的檢修或更新	考慮縮短維護週期
C	少量鐵鏽	符合預期	維持現有維護
D	如新品	優於預期	考慮延長維護週期

- 維護作業週期評估：首先依據維護前狀況資訊篩選出週期可能改變的組件（如上表類別 A 或 D），然後考慮以前劣化或故障檢修的歷史紀錄，辨識出關鍵性組件，最後依據劣化趨勢、類似組件標竿經驗、更換檢測結果及學術研究等工程評估來決定設備分解及狀況監測的新維護週期。



圖五 日本核能電廠老化趨勢

- 電廠老化知識的運用：日本運轉超過 30 年的老電廠逐年增加（詳圖五，2010 年 20 座，2015 年 31 座），老化管理變得很重要，從老化評估中獲得的經驗及知識，例如退化機制的鑑定辨識，應該適當地回饋到維護計劃，使這些老舊電廠仍能維持其完整性。日本電力公司聯盟根據老化評估的結果，針對大約 100 種類型組件，從 2006 年起開始著手準備建立一個組件劣化機制表格的早期版本，各家電力公司在建立老化管理相關的維護活動及計劃時，可參考這些表格，且為了達到持續改善，平常維護作業觀察到的劣化狀況，例如運轉中的維護前 As-found 資訊，應回饋到組件劣化機制表格中。
5. 建立共同的工程基礎平台：在電業中分享知識和經驗並加以運用是非常重要的，為了加速日本的維護改善，並迎頭趕上世界頂尖，共同的工程基礎平台及專家網路即將建立，透過這個平台和網路，期望能促進所有電業分享知識和經驗，使日本的 55 部核能機組發揮“艦隊作用”以達到最大化優點。共同的工程專家平台分成三個部分：第一個部分是電力事業、日本電

力公司聯盟（Federation of Electric Power Companies）和日本核能技術研究所（Japan Nuclear Technology Institute）成員間的指導會議，第二個部分是日本核能技術研究所的共同工程平台，第三部分則是電廠工程師專家系統網路；日本核能技術研究所的共同工程平台計劃於 2008 年建立，在 2008 年上半年開始分享例如標竿優良典範、性能狀況監測結果、劣化機制表格等資訊，同時計劃參考國外案例。

6. 電廠工程師專家網路：除了共同的工程基礎平台之外，日本計劃組織電廠工程師專家網路，內容包括機械、電機、儀控等工程領域及不同設備，透過網路活動使用知識和經驗來解決問題，網路辦公室將於 2008 年在日本核能技術研究所成立。JANTI 日本核能技術研究所於 2005 年由電力公司和相關的製造業者共同成立，成立的目的是為了建立工程基礎平台，並提昇核能安全和激發核能工業之貢獻，期待它作為日語版本的核能運轉學會（INPO The Institute of Nuclear Power Operations），2008 年 1 月 JANTI 約有 70 個職員，研究促進安全文化，支持核能資訊檔案和發展法人標準等多項議題。
7. 新法規探討：日本當前的檢查系統法規於 2003 年引進，為了持續改善現有系統，政府技術部門近兩年已開始規劃討論新系統，並持續與當地政府和公民溝通，預計於 2008 年秋天開始實施新檢查系統，期望鼓勵電業依據個別電廠的特性去改善維護計劃，新系統集焦於確保無論是在運轉或停機中安全的重要活動，並關注維護作業計劃及促進肇因分析指南之建立。
除了依據電廠特性改進維護計劃外，亦將依據工程安全限制值重新評估反應器停機檢查週期，詳細的工程評估將會考慮設備 As-found 狀況資訊、標竿經驗、燃料安全限值等，根據這些評估，未來法律訂定各電廠定期的檢查週期可為 13、18 或 24 個月，各電業則須修改運轉規範設定新的反應器燃料週期。

8. 結論：

- 維護作業改善的方向須依據工程基礎，例如可靠度為主的維護策略。
- 依據設備實際狀況來改善維護作業，使電業實現具創造性的革新。
- 必須持續重複維護管理的 PDCA 循環，才能有效提昇安全和可靠度。
- 電業努力的活動應該透過共同的工程平台分享，以加速改善腳步。

- 藉由這些努力，希望最佳化維護能實施遍及日本。

三、目前維護績效表現及維護革新的方法（WANO-TC）

1. 從 Operating Experience 運轉經驗看維護策略：

WANO 網站已蒐集超過 6,000 筆的運轉經驗案例，其中 2007 年共有 1,035 件（東京中心 181 件、亞特蘭大中心 544 件、巴黎中心 278 件、莫斯科中心 81 件）。WANO 東京中心分析 2004~2007 年間案例，肇因依序如下：屬設備性能共 133 件最多，其次是維護測試 93 件，工作人員執行 85 件，程序書 76 件，設計 63 件，製造採購規範 47 件，上下溝通 23 件，管理 12 件；而 133 件設備問題中包括 42 件屬老化組件，29 件次元件劣化，23 件已達壽命年限，12 件組件監測不足，8 件為已存在問題卻未及時改正。接下來幾個案例，均造成公司重大損失：

- 2004 年八月，西班牙 Vandellos-2 電廠海水管路斷裂，造成機組停機。
- 2007 年二月，日本福島二廠爐心噴灑系統電動閥故障失效，造成大修工期增加。
- 2007 年二月，韓國靈光（Yonggwang）電廠發電機接地故障，導致 38 天發電損失。
- 2007 年六月，日本福島一廠低壓爐心注水系統可測試逆止閥極限開關故障，造成機組起動延遲六小時。
- 2001~2005 年間大型泵浦（飼水泵、冷凝水泵…等）異常共 67 件，造成九次跳機、24 次強迫停機、34 件大修工期增加或延遲升載。
- 2000~2005 年間大型馬達（循環水泵馬達、冷凝水泵馬達…等）異常共 71 件，造成 19 次跳機、4 次強迫停機、5 次降載、5 件大修工期增加或延遲升載。

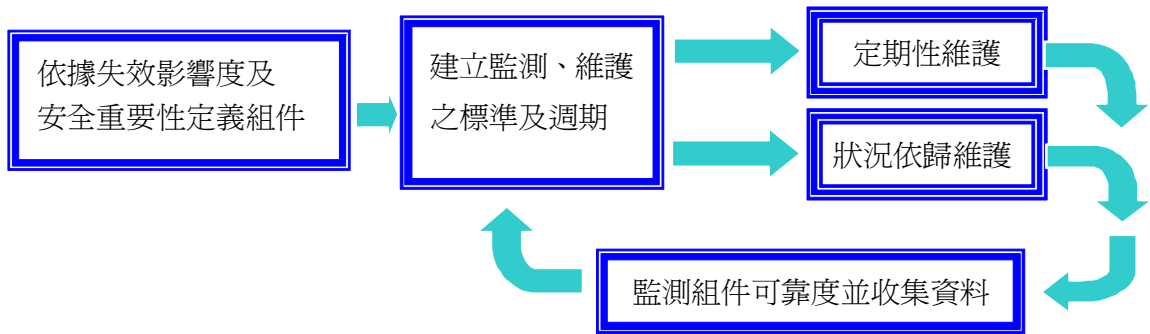
從上述的 OE 運轉經驗案例，我們可以學到：

- 準備維修計劃必須考慮組件的重要性及後果的嚴重性。
- 維修計劃的執行必須具體。
- 更新維修計劃必須依據全世界的運轉經驗。
- 維護前 As-found 設備狀況必須建檔、文件化，並執行趨勢分析。

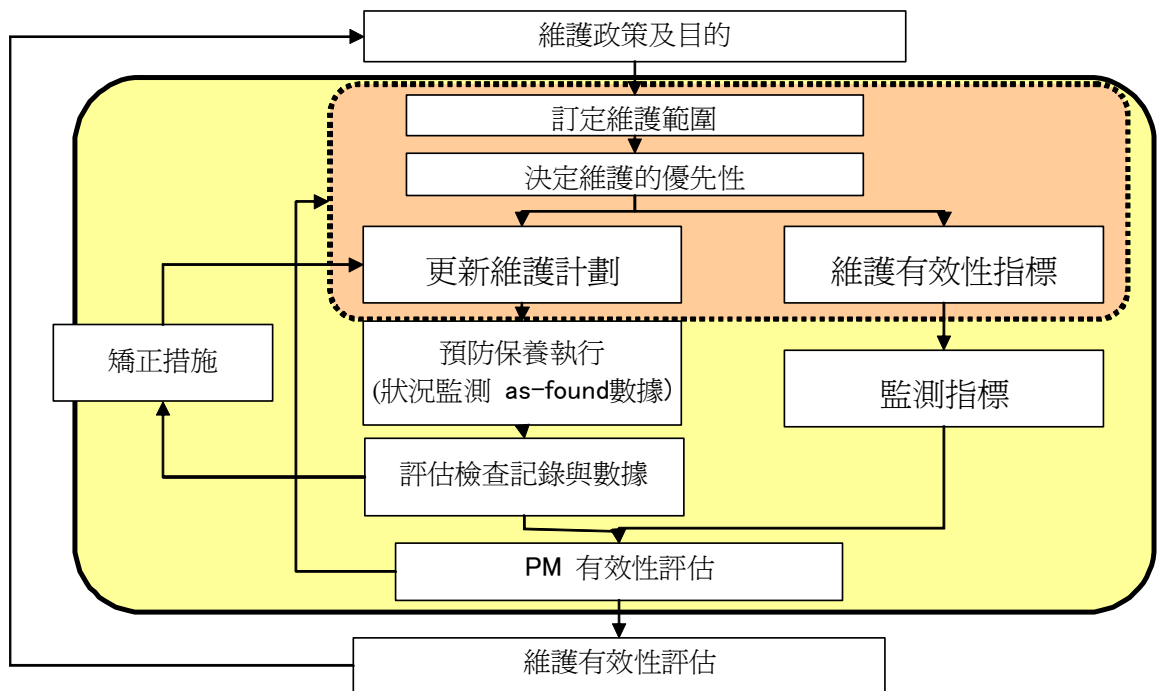
- 維護頻率太高可能導致較高的失誤，因此維護週期應考慮維護失誤的風險。
2. 從同業評估（Peer Review）結果談維護領域的待改善項目（Areas for Improvement）：
 - (1) 預防維護範圍不全：未全面性辨識關鍵性組件，導致維護作業未涵蓋關鍵性組件，待異常事件發生後才納入。
 - (2) 設備監測功能不足：缺乏設備性能監測之回饋資訊，關鍵性組件未執行適當的維護作業及狀況監測，造成預防保養無法有效預防組件失效。
 - (3) 運轉員容忍過多異常狀況，例如警報太多、長期存在設備不良、頻繁的電力網干擾，運轉員未強烈要求設備改善及減少操作，矯正維護措施亦未能排定檢修之優先順序。
 - (4) 關鍵性設備監測不足以發現問題，例如未能定期執行系統化巡視，導致洩漏、腐蝕等設備性能劣化，有些設備不良的狀況由同業評估團隊發現，電廠卻從未知覺，而故障失效紀錄未能電子化造成很難追蹤及分析趨勢。
 - (5) 設備狀況監測不採用高標準，資訊無法有系統地分析及分享給電廠維護管理：雖執行設備狀況監測，但維護前未預期結果或劣化等 As-found 資訊未被記錄、分析及分享，另外電廠或包商的監測工作均高度倚賴少數個別專家。
 3. 維護革新的方法：

最佳化維護的目的包含減少大修工期、降低維護費用、工作負擔扁平化、縮短檢修時間、強化設備性能監測、強化維護品質、防止設備故障、預防電廠跳機及縮短大修工期，其中減少大修工期、降低維護費用、工作負擔扁平化、縮短檢修時間等由工作管理來達成；縮短檢修時間、強化設備性能監測、強化維護品質、防止設備故障、預防電廠跳機及縮短大修工期則依賴設備可靠度的提昇，維護革新須改變思維，從以工作為中心（Job Centered）的維護，轉變成以可靠度為重點（Reliability Centered）的最佳化維護，整個維護流程由定義關鍵性組件、建立標準、執行維護、蒐集數據等程序，形成持續改善的良性循環（圖六）。

4. 比較美國日本核能電廠的維護程序（圖一、圖七），基本上兩國作業程序是相類似的，第一階段先將組件分級，定義關鍵性組件，以訂定維護之優先性；第二階段執行預防保養，矯正維護措施，並依據狀況監測 As-found 資訊持續改善；第三階段則規劃長程生命週期管理。



圖六 RCM 持續改善流程



圖七 日本設備可靠度執行程序 (JEAC42193)

5. 結論：總之，設備可靠度是一個活的程序，一方面吸收現場工作人員/運轉員之回饋，與學習故障失效之經驗；一方面蒐集例如生鏽、磨損、漂移等不重要劣化狀況，或蒐集小失誤及虛驚事件，加以分析趨勢並善用這些矯

正維護結果，提供工作標準及維護有效性的指標，以達到包括修改工作內容、週期，或新增項目等 PM 計劃持續改善的目的。

四、芬蘭 Loviisa 電廠最佳化維護及設備可靠度程序 (Fortum 能源公司 Loviisa 電廠)

1. Loviisa 電廠簡介：位於芬蘭 Hästholmen 島，兩部 VVER-440 PWR 反應器機組，各裝填 313 束燃料，發電量 488 MWe，分別於 1977 年和 1980 商轉，2007 年之運轉績效如下：

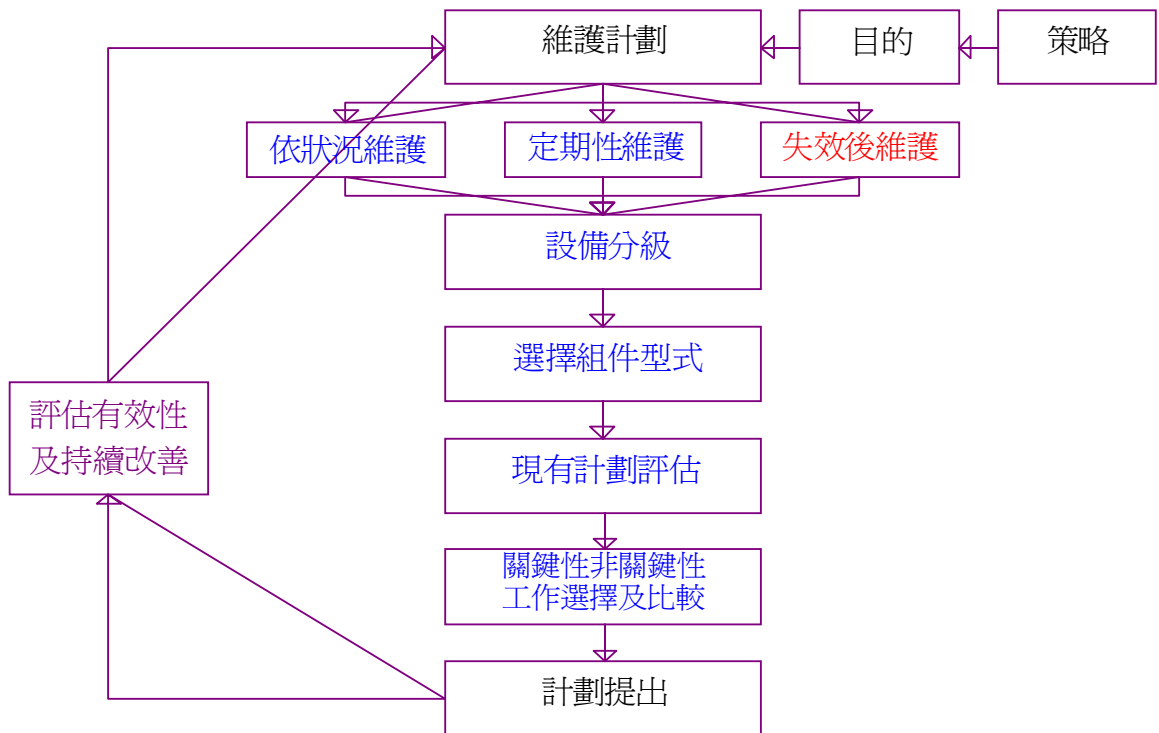
機組	淨發電量	負載因數	效率	大修工期	人員劑量
Loviisa-1	40.3 億度	94.6%	34.4%	19.833 天	0.373 人西弗
Loviisa-1	40.9 億度	96.1%	34.4%	14.875 時	0.283 人西弗

2. 電廠設備分類：依據電廠關鍵性及安全性建立設備的優先次序，Loviisa 電廠已依據運轉維護經驗、系統弱點風險分析執行設備關鍵性分類，共分成四級：例如，若失效會造成發電損失大於 50GWh 者屬第一級，發電損失介於 6~50GWh 者為第二級，發電損失小於 6GWh 且失效不超過三天者為第三級，無發電損失且失效後之維護費用不高亦非法規需要者屬第四級。目前 Loviisa 電廠第一級設備僅佔 0.52%，第二級佔 3.44%，第三級 29.03%，第四級 67.01%。

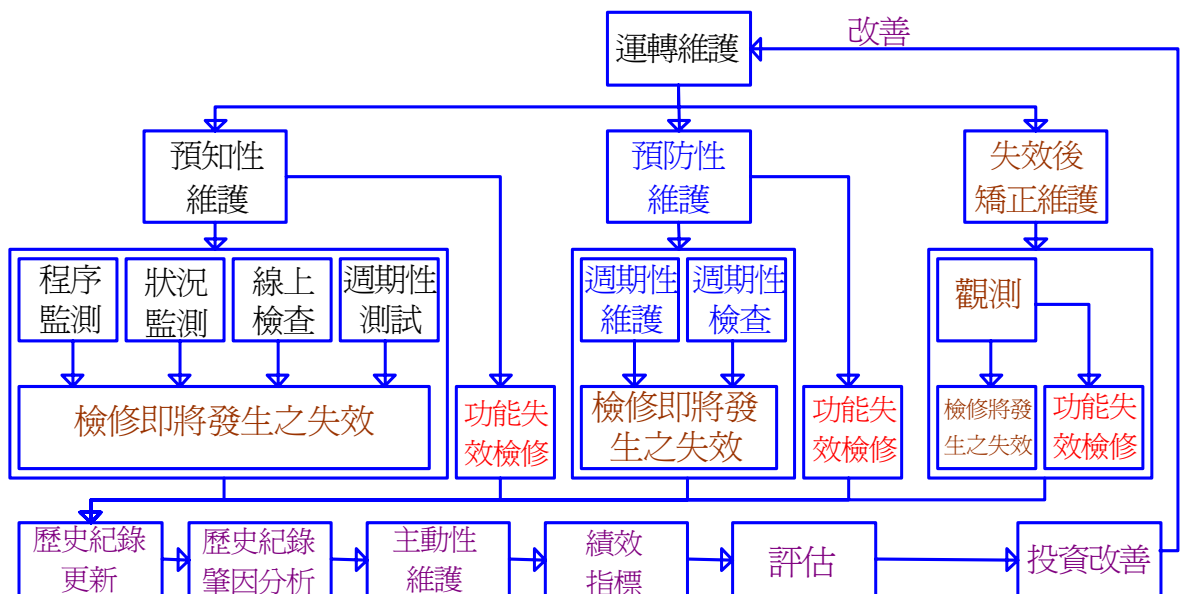
設備經分類後，則依據設備的型式、類別、使用頻度 (Duty cycle)，運轉狀況，再加上運轉維護經驗等來決定維護工作的內容。

3. Loviisa 電廠最佳化維護流程及內容：
 - 維護策略及設備關鍵性分級評估，並評價現有維護作業。
 - 利用可靠度為主的維護策略，選擇最適當的維護工作。
 - 比較維護計劃的風險與成本，評估計劃之有效性，並持續改善。
 - 最佳化維護之益處：改進結構/系統/組件之可靠度，降低維護成本，改進結構/系統/組件之維護能力，提昇維護績效，改善安全。
 - 資訊回饋持續改善：回饋的範圍包括觀測到的徵候、失效組件、失效說明與分類、失效肇因、工作說明、設備狀況分類、備品、檢查文件、

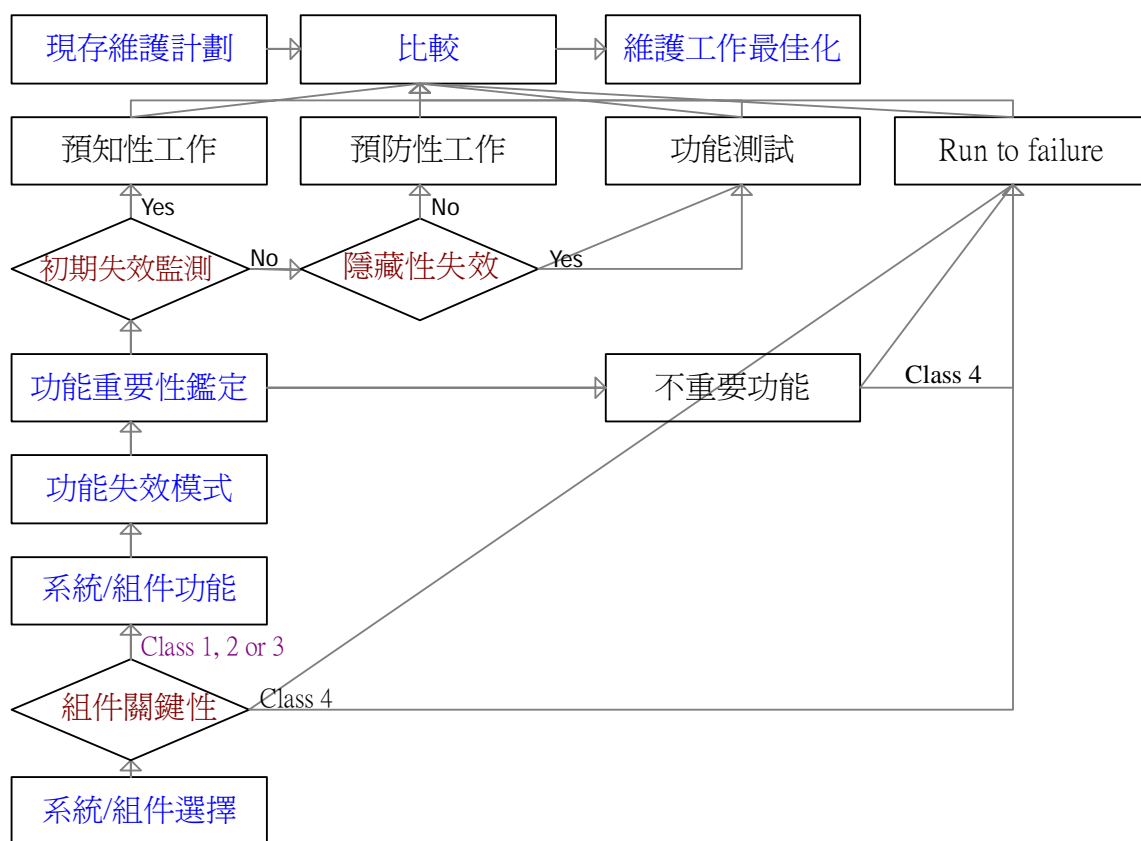
員工報告、成本、流程與狀況參數及其趨勢、改善建議…等，依據回饋的內容撰寫報告，執行資訊分析及改進評估，最後提出改善計劃。



圖八 Loviisa 電廠維護計劃形成流程



圖九 Loviisa 電廠維護策略及工作內容



圖十 Loviisa 電廠維護工作內容最佳化評估

五、關西電力公司最佳化維護（關西電力）

1. 關西（KANSAI）電力公司簡介：2006 年裝置容量共 34.86 GW，其中水力發電佔 23%、火力 49%、核能 28%，發電量共 119,600 GWh，水力佔 13%、火力 32%、核能 55%，旗下擁有美濱、大飯、高濱三座核電廠共 11 部核能機組：

高濱（Takahama）			大飯（Ohi）			美濱（Mihama）		
Unit	容量 (MW)	商轉日期	Unit	容量 (MW)	商轉日期	Unit	容量 (MW)	商轉日期
1	826	1974/11	1	117.5	1979/03	1	34	1970/11
2	826	1975/11	2	117.5	1979/12	2	50	1972/07
3	870	1985/01	3	118	1991/12	3	82.6	1976/12
4	870	1985/06	4	118	1993/02			

2. 關西電力公司於 1990 年開始發展設備可靠度程序，其基本概念為：首先應定義組件之故障模式，然後建立各組件之維護點及維護週期，而週期之訂

定乃依據維護指引及決定樣板，目前共有 27 份機械設備樣板，四份電機及四份儀控樣板。接下來將以 RHR 系統為案例說明設備可靠度程序之執行：

- (1) 定義 RHR 系統功能，例如熱交換、壓力控制、體積控制…等。
- (2) 定義組件功能，每個系統包括多個組件，組件功能須對應於系統，例如 RHR 泵浦出口閥有閥門開關、流量控制、狀態指示等組件功能。
- (3) 定義故障模式，例如 RHR 泵浦出口閥的故障可能有：失效開啓、失效關閉、流量控制失效、洩漏、無狀態指示等。
- (4) 依據故障失效對於安全性、設備可用率、電廠可靠度、人員劑量等之影響程度，將故障模式及零組件分成 A、B、C、D 四級。
- (5) 依據零組件之重要性，檢視異常歷史、現行維護的有效性、定期性保養的週期，依據狀況維護的有效性等，選用適當的維護措施。

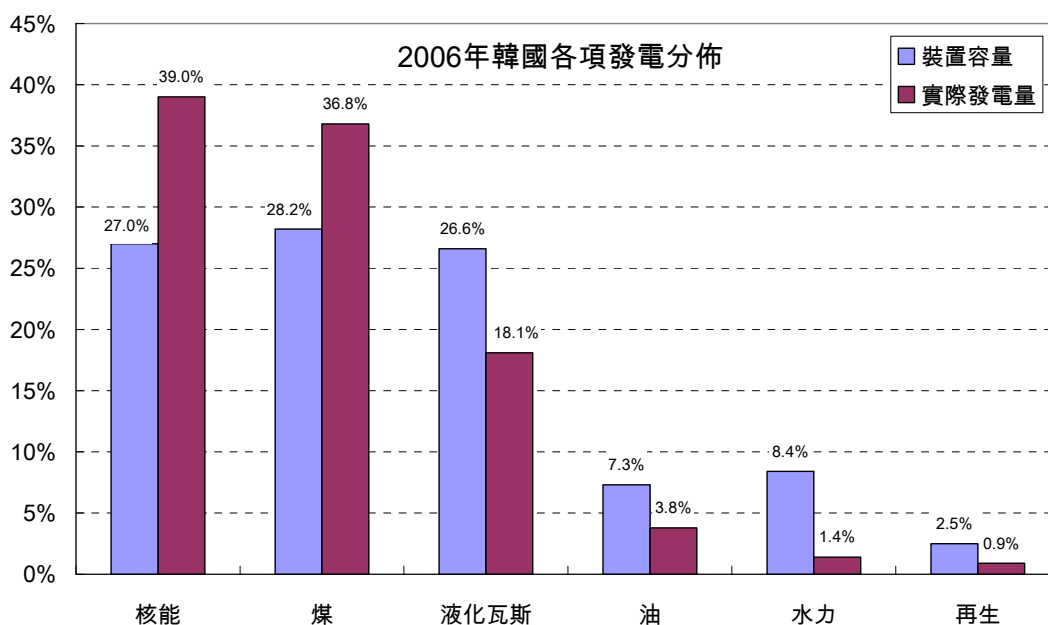
3. 設備可靠度程序待改進事項：

- (1) 必須依據系統功能、安全影響度及維護措施之重要性，提出分級式維護作業：關西電力已建立系統功能分級表，評估組件對系統功能的影響度；考慮系統安全功能及風險等資訊，訂定每個組件維護之重要性，並決定電廠重要系統之維護範圍。
- (2) 必須消除維護指引在不同核能電廠間的差異：應發展一套標準化指引，例如類似組件之故障模式、劣化機制表、維護工作內容等在日本各核電廠間應達成一致性，已成立一組專家檢視各電廠間維護指引之差異性。

4. 結論：

- (1) RCM 設備可靠度程序從 1990 年開始發展，顯示這個程序在發展核能電廠維護計劃是適當的，但仍必須使維護方式具簡便性又有效率。
- (2) 利用故障模式與樣板之定義分級，關西電力針對設備可靠度的發展程序已改進為簡便又有效率。
- (3) 自 1999 年已開始全方位應用維護指引。
- (4) 透過 RCM 設備可靠度程序的應用，提出分級式維護及整合各電廠的維護指引是有必要的。

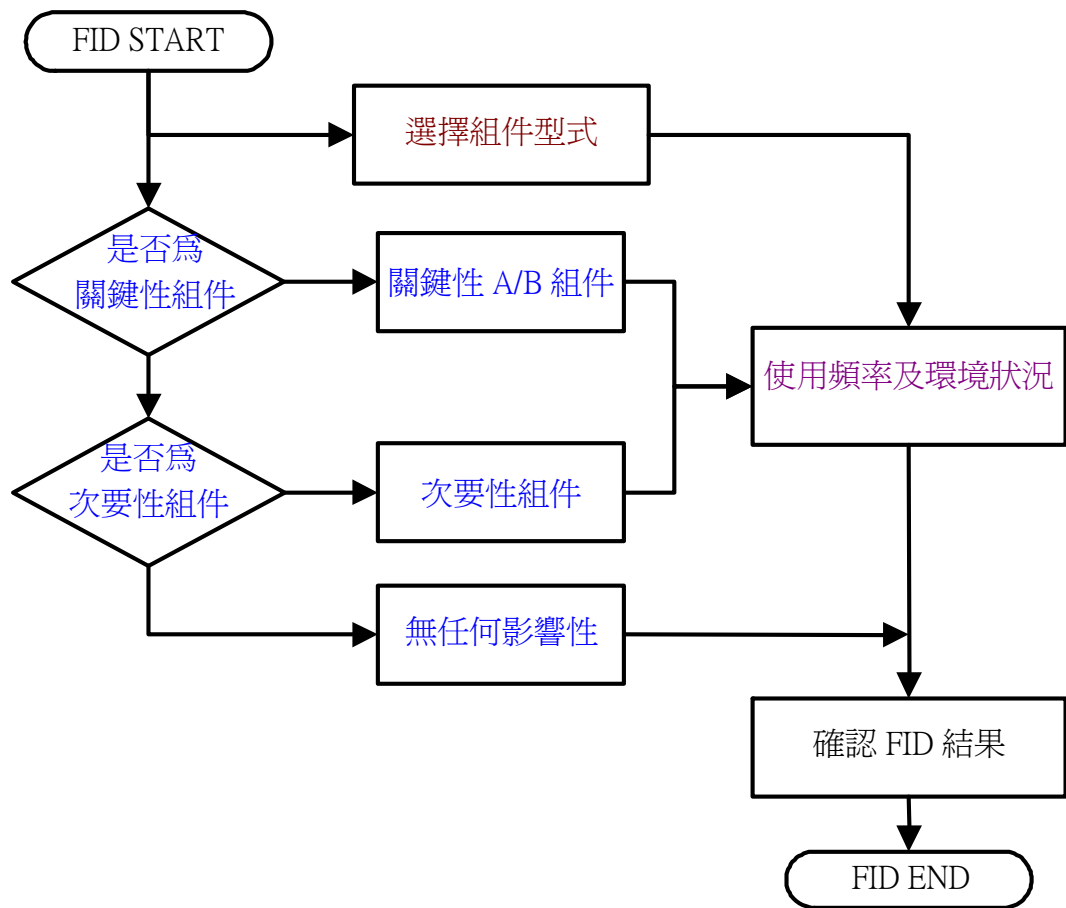
六、核能電廠組件分類及預防保養維護樣板之執行（韓國水力核能電力公司）



圖十一 2006年韓國各項發電分佈

1. 韓國水力核能電力公司（KHNP, Korea Hydro&Nuclear Power）簡介：旗下擁有月城（Wolsong）、古里（Kori）、靈光（Yonggwang）、蔚珍（Ulchin）四座核電廠共 20 部核能機組（17,716MW），建造中之機組 6 部（6,800MW），另外有 27 部水力機組；2006 年韓國裝置容量總共 62,260 MW，其中核能佔 27%（17,716 MW）、煤 28.2%（18,465 MW）、LNG 26.6%（17,436 MW），發電量共 381.2 TWh，核能佔 39%（148.8 TWh）、煤 36.8%（140.4 TWh）、LNG 18.1%（69.1 TWh）。
2. 設備可靠度程序執行現況：韓國 KHNP 電力公司的設備可靠度程序包含關鍵性組件定義及分類、性能監測、預防保養、矯正維護措施、可靠度持續改善、生命週期規劃等六套標準計劃；其中矯正維護措施已完成，正在執行中的有預防保養、持續改善、生命週期規劃；待改進的則有關鍵性組件分類及性能監測。KHNP 完成或正在執行的工作如下：
 - 已完成矯正措施 CAP（Corrective Action Program）系統；
 - 將所有組件依據 FID（Functional Importance Determination，圖十二）功能重要性程序分類，並與維護法規的分類方式一致；
 - 已完成 63 項 PM 維護樣板，並繼續發展其餘的樣板；

- 定義 PM 維護前 As-found 狀況代碼；
- 將依據維護法規中的風險程度建立性能監測接受標準；
- 發展生命週期評估程序。

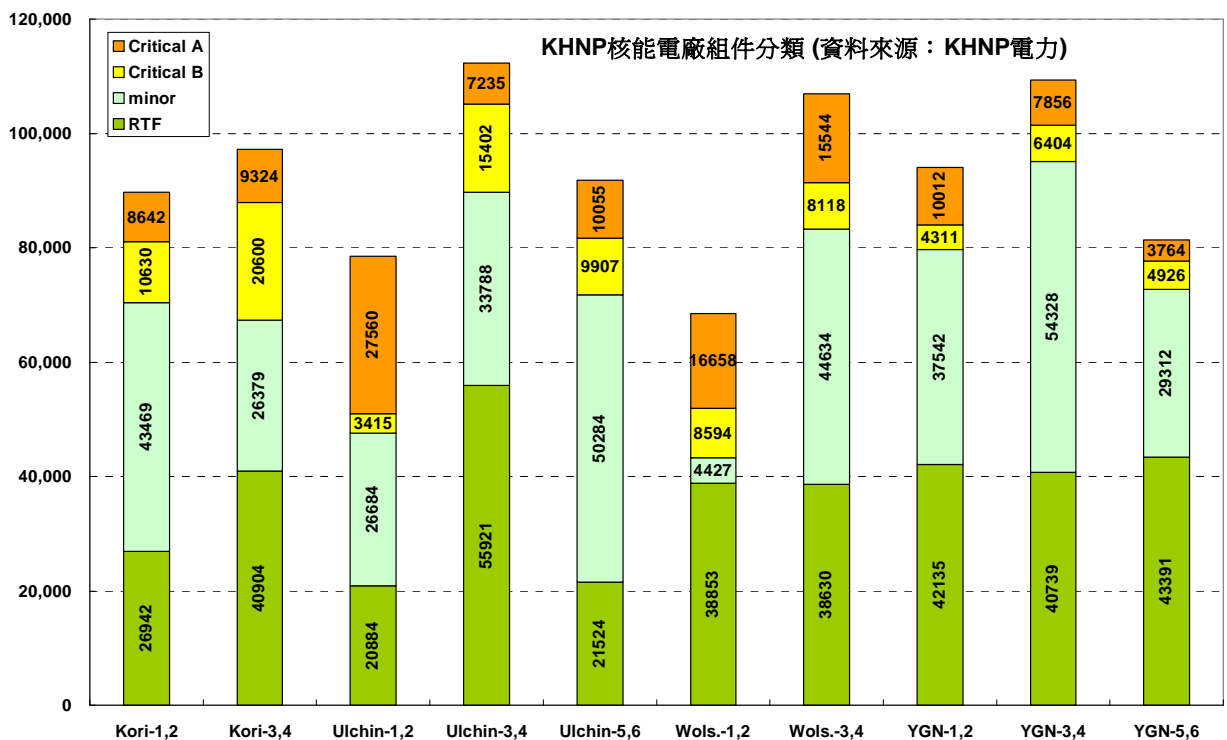


圖十二 FID 功能重要性程序

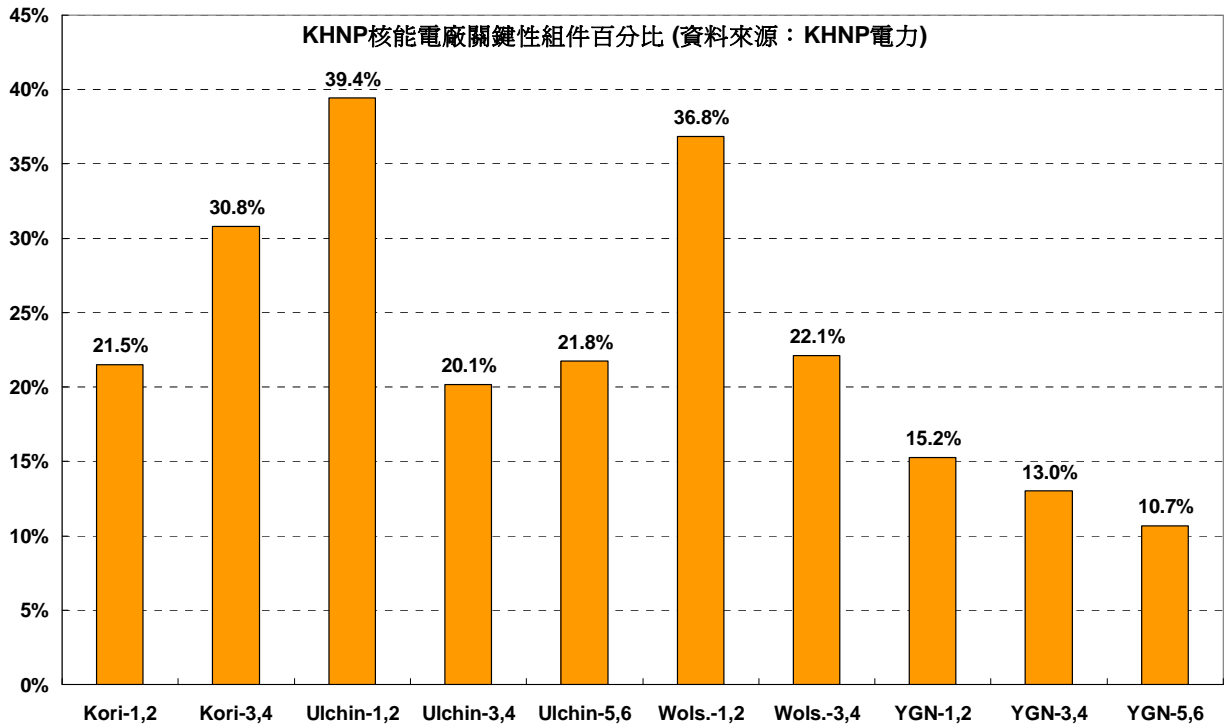
3. 組件分類：為了達成分級維護之策略，將所有組件依據 FID 功能重要性程序分類，FID 程序乃依據每個組件的功能重要性、組件型式、使用頻率（Duty cycle）、環境狀況（Service condition）等特性來決定分類等級。
 - 功能重要性：依據 19 個問題的答案來決定，這些問題考慮組件失效時對核能安全、發電損失、法規及環境的影響效應。功能重要性分成關鍵性（Critical）A 或 B，次要性的（Minor），及無任何影響性的使用至失效（Run to failure），在沒有任何預知性及重複性的維護工作下，Run to failure 組件失效的風險與結果是可以接受的。
 - 依據組件型式使用 PM 維護樣板，總共有 244 種組件型式。

- 使用頻率有高低兩種，環境狀況則有嚴峻的及溫和的。
- 各電廠 FID 功能重要性程序分類結果如圖十三、圖十四，關鍵性組件的數量均超過上萬，關鍵性組件比例各廠不同，最低為 10.7%，最高 39.4%，差異甚大。這些結果可應用於發展 PM 維護樣板、決定性能監測標準、工作排程的優先性、支援矯正措施 CAP 系統、長程設備健康規劃及備品策略等相關維護工作。

Code	狀況	關鍵性
C-1a	機組降載幅度大於或等於 50%	A
C-1b	機組降載幅度小於 50%	B
C-2a	運轉規範允許檢修時間小於或等於 72 小時	A
C-2b	運轉規範允許檢修時間介於 72 小於至 14 天間	B
C-3a	反應器停機	A
C-3b	反應器半急停	B
C-4	安全系統動作	A
C-5	喪失關鍵性安全功能的控制能力	A
C-6	喪失反應器跳脫功能	A
C-7	喪失緊急操作程序的執行能力	A
C-8	一般民眾輻射劑量超出限制值	A
C-9	喪失高度安全 (High Safety Significant) MR 功能	A

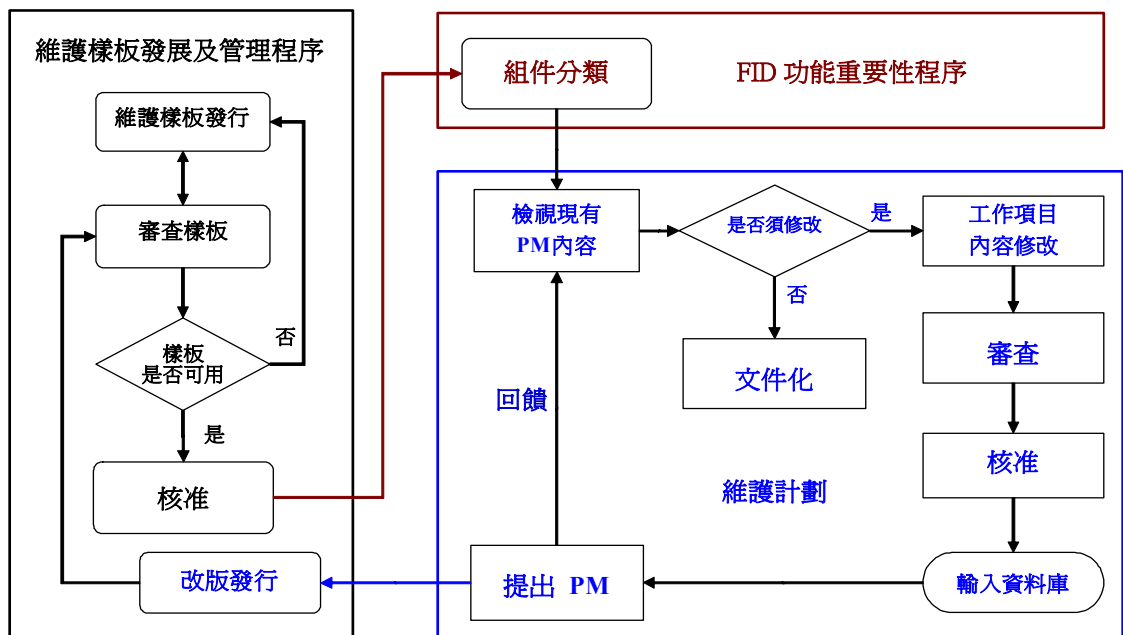


圖十三 KHNP 核能電廠組件分類



圖十四 KHNP 核能電廠關鍵性組件百分比

4. PM 維護樣板之執行 (圖十五) :



資料來源：韓國KHNP電力

圖十五 KHNP 電力 PM 維護樣板發展程序

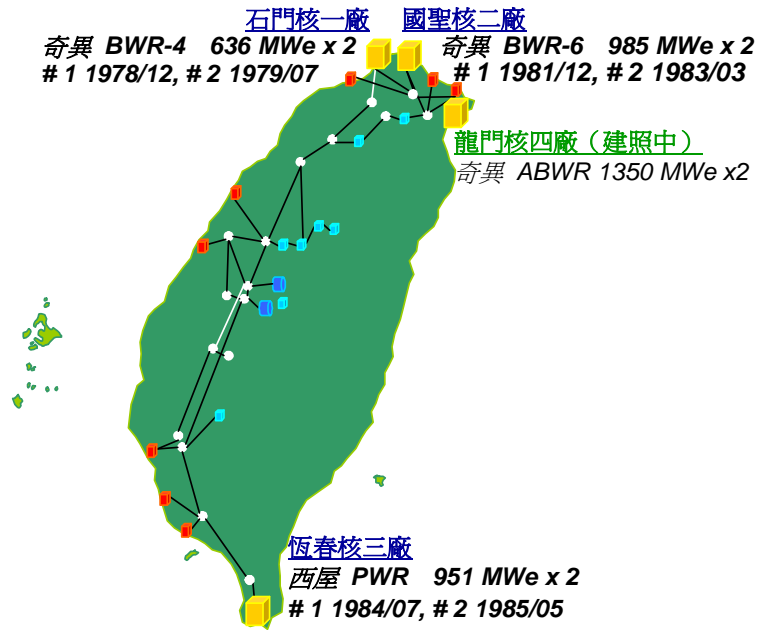
- 爲了標準化 KHNP 公司內部的 PM 計劃以利持續地最佳化，利用設備可靠度程序與預知性維護技術來改進預防保養計劃，將被動式的 PM 策略轉爲主動式，加強維護之有效性，降低因組件故障之電廠風險。
- 第一階段由核能工程技術研究院（NETEC - Nuclear Engineering and Technology institute）參考 EPRI 維護樣板，已完成 63 項維護樣板，其中 PM 工作之週期均經專家們充分討論後而決定。
- 第二階段將完成另外 137 種組件樣板，已建立參考維護樣板之資料庫。
- KHNP 維護樣板乃參考 EPRI 的 PM 維護樣板，其結構包含組件類別、使用狀況、工作項目、週期等，另有樣板的背景基礎說明，包括工作目的、工作敘述，失效機制，評估劣化機制原因等。

5. 結論：

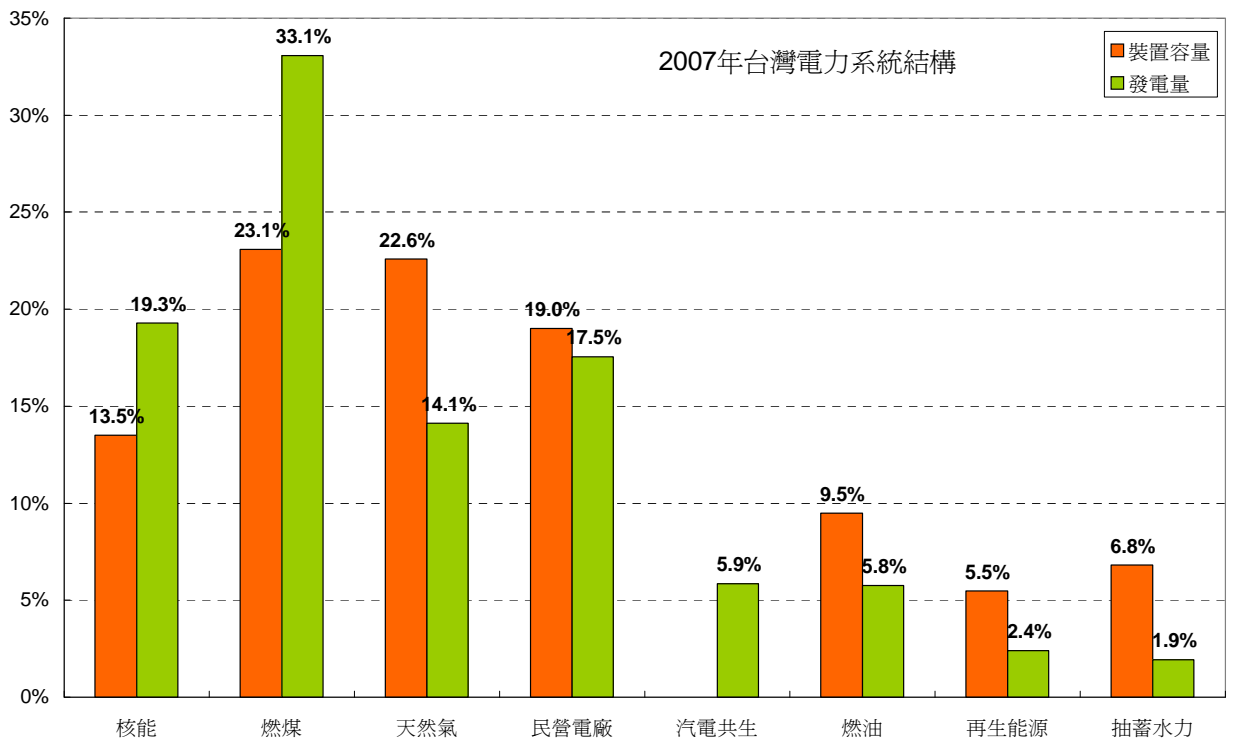
- 分級維護爲設備可靠度程序的優點之一，將有限資源應用於較多重要資產有價值的工作上。
- 維護工作由被動式轉爲主動式：非預期性的故障失效可能導致電廠高風險或高運轉維護成本，針對主動式維護，KHNP 提出 PM 維護樣板，及包括振動分析、超音波分析、熱影像攝影、油質分析、馬達測試等預知性技術。
- 長程策略：分析投資計劃之優先性，爲應付可能發生的風險作好準備。
- 設備可靠度程序的目的是在整合及標準化，所有相關程序將被連結，使彼此可以互相溝通分享資訊，以利透過回饋機制將這些程序簡單且持續地達到最佳化。

七、國聖電廠儀控關鍵性組件鑑定及維護計劃改善（台灣電力公司）

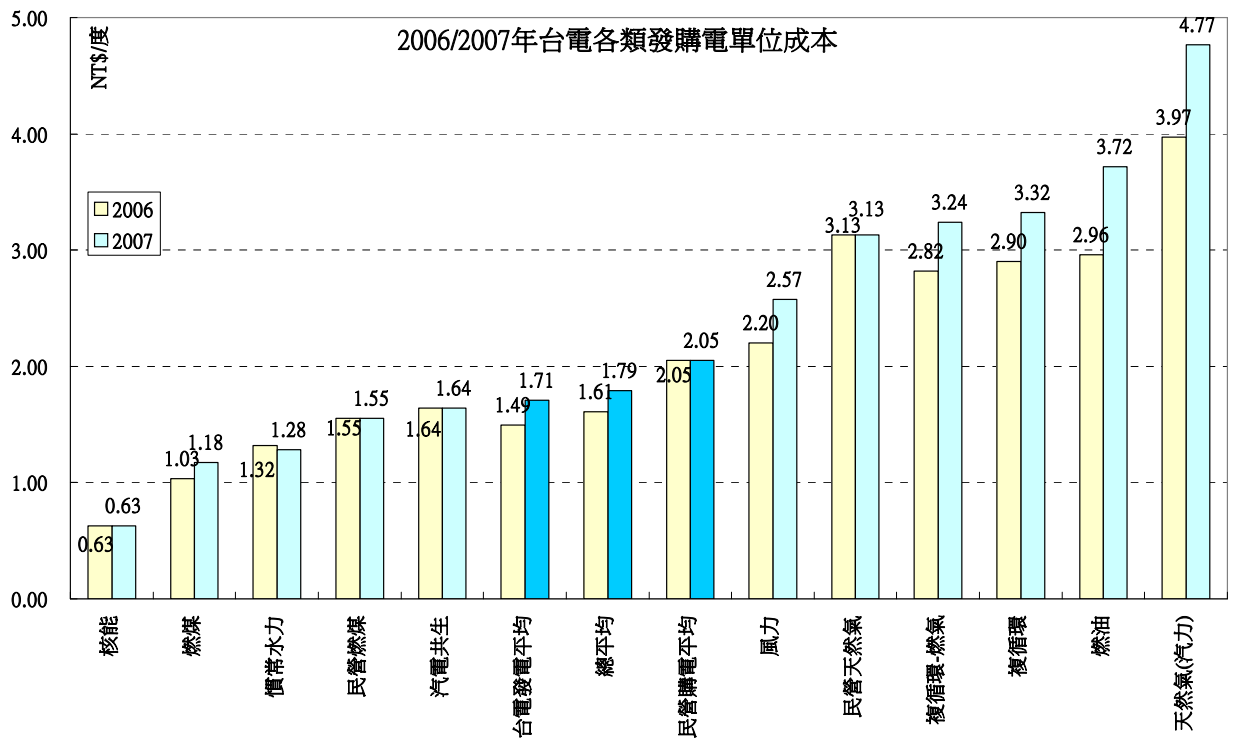
1. 台電核能發電現況：2007 年台電裝置容量共 38.06 GW，其中核能發電佔 13.5%、燃煤 23.1%、天然氣 22.6%、IPP 民營電廠 19%，2007 年發購電量共 2018.56 億度，核能佔 19.3%、燃煤 33.1%、天然氣 14.1%、IPP 民營電廠 17.5%，台電旗下擁有三座核能電廠共 6 部核能機組（容量 5,144 MW），另有兩部核能機組（容量 2,700 MW）正在建造中（圖十六、圖十七）。



圖十六 台灣電力公司核能電廠分佈



圖十七 2007 年台灣電力系統結構

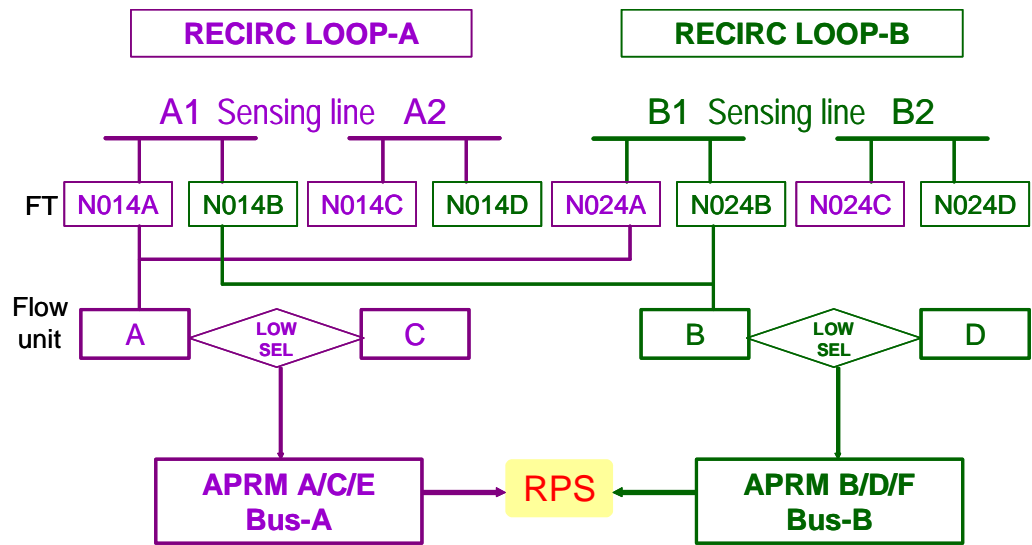


圖十八 台電各類發購電成本

- 2007年發電成本每度電平均1.7911元（上升），其中台電自發電力每度1.7063元（上升），購入電力每度2.0484元（合約價），各類發電成本中以天然氣每度4.77元最貴，核能為每度0.6271元，風力則為2.5748元（圖十八）。
- 2007年台電公司核能機組發電量共389.61億度，容量因數平均為90.28%，低放射性固化廢棄物產量259桶，均創歷年來最佳紀錄；六部機組共發生二次急停及14件異常事件，而大修工期，核一廠一號機EOC-22大修37.88天，核二廠二號機EOC-18大修36.60天，核三廠一號機EOC-17大修31.62天（創台電公司核能機組最佳紀錄）。

2. 關鍵性組件的定義：與安全功能或發電有關之零組件，例如若組件失效會讓機組進入 LCO 運轉限制狀況 (Limited Condition of Operation)，或引起反應器急停、負載降低、功率暫態，或喪失安全功能或喪失安全系統重複二選一的一串邏輯，或輻射外洩等事故，而在核二廠關鍵性組件的定義為任何單一故障會引發反應器急停或主汽機跳脫，或以 PRA (Probability Risk Analysis) 風險度分析得到高風險的爐心融毀機率。
3. 關鍵性組件單一故障引發跳機危險性評估：藉由分析核反應器及汽機支援系統，檢視所有跳脫相關邏輯、P&ID 管線圖、儀器組件索引、單線圖等，評估組件單一故障引發跳機之風險，進而找到並移除系統設計上的弱點。分析方法首先列出所有反應器及主汽機跳脫信號，凡直接或間接導致反應器或主汽機跳脫之組件均必須列入分析，包含核反應器及 BOP 汽機支援系統及其介面之設備。
 - (1) 核反應器跳脫訊號：中子高通量、反應器 L-8 高水位、反應器 L-3 低水位、反應器高壓力、主蒸汽隔離閥關閉、汽機控制閥快速關閉、汽機關斷閥關閉、乾井高壓力、急停洩放容器高水位、強震急停、反應器模式關關及手動急停。
 - (2) 汽機跳脫訊號：冷凝器低真空、四台 CWP 循環水泵跳脫、反應器 L-8 高水位、主蒸汽隔離閥關閉、EHC 控制油壓低、止推軸承磨損、軸承油壓低、汽機超速、手動跳脫、無蒸汽流量、發電機氫氣高溫、發電機保護電驛動作。
 - (3) 分析步驟：檢視所有儀電設備及控制系統之相關邏輯、P&ID 管線圖、儀器組件索引、單線圖等，並確認下列問題：
 - 單一控道、電源故障是否會導致跳機？
 - 多重控道設備之電源、氣源、油源是否為多重性？
 - 多重控道設備之電源、氣源、油源故障時是否有預警？
 - 由 P&ID 管線圖檢視閥、泵、馬達、管路等，若設備不良或故障時是否會導致跳機？

(4) 案例研討：

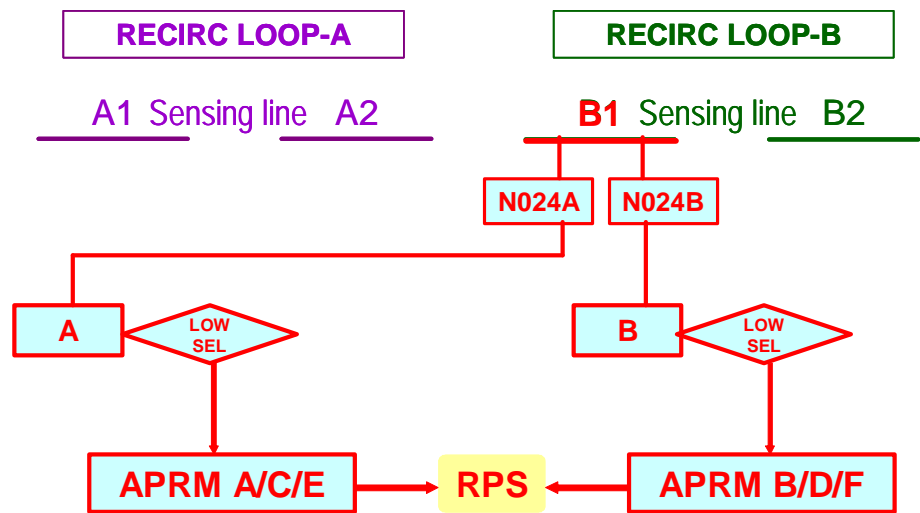


圖十九 APRM 流量單元系統結構

- 流量單元結構如圖十九，四條感測管供給八個流量傳送器（每條感測管供給兩個傳送器），每兩個傳送器加總合成一只流量單元，流量單元 A/C 經過低值選擇將訊號送給 APRM-A/C/E 作為設定點跳脫之計算基準，流量單元 B/D 訊號則送給 APRM-B/D/F。單一故障模式如下表：

單一故障模式	RPS 邏輯	故障影響
感測管低失效	四選一	A/B 迴路各有一只流量單元低訊號，造成六只 APRM 高中子動作，反應器急停。
喪失電源	重複二選一	喪失其中一迴路訊號，反應器半急停，另一迴路訊號則維持正常。
傳送器低失效	重複四選一	一只流量單元低訊號，造成三只 APRM 高中子動作，反應器半急停。
傳送器高失效	不會跳機	流量單元另有一只正常傳送器，因低值選擇輸出不受影響。
感測管高失效	不會跳機	A/B 迴路各有一只流量單元訊號高，因低值選擇 RPS 不受影響。

- APRM 流量單元單一故障的模式可能有傳送器失效高流量、傳送器失效低流量、喪失單邊電源、感測管失效高差壓、感測管失效低差壓；經分析發現任一感測管低失效均會引發反應器急停，例如，圖二十中 B1 感測管低訊號造成傳送器 N024A/B 低訊號，流量單元 A/B 同時低流量，六只 APRM 高中子通量動作反應器急停，故流量單元之感測管為非常關鍵性之組件。



圖二十 APRM 流量單元感測管 B1 低失效造成反應器急停

- 造成感測管低訊號之原因可能有感測管洩漏、感測管內含有氣泡、或人員誤操作，針對這些可能因素採取應對的措施：例如，將傳送器之時間常數調整為稍長之 750 毫秒以延緩暫態反應；機組第一次加壓起動須將感測管排氣；運轉中任何檢修工作均應列入潛在性危險評估。

(5) 分析結果：

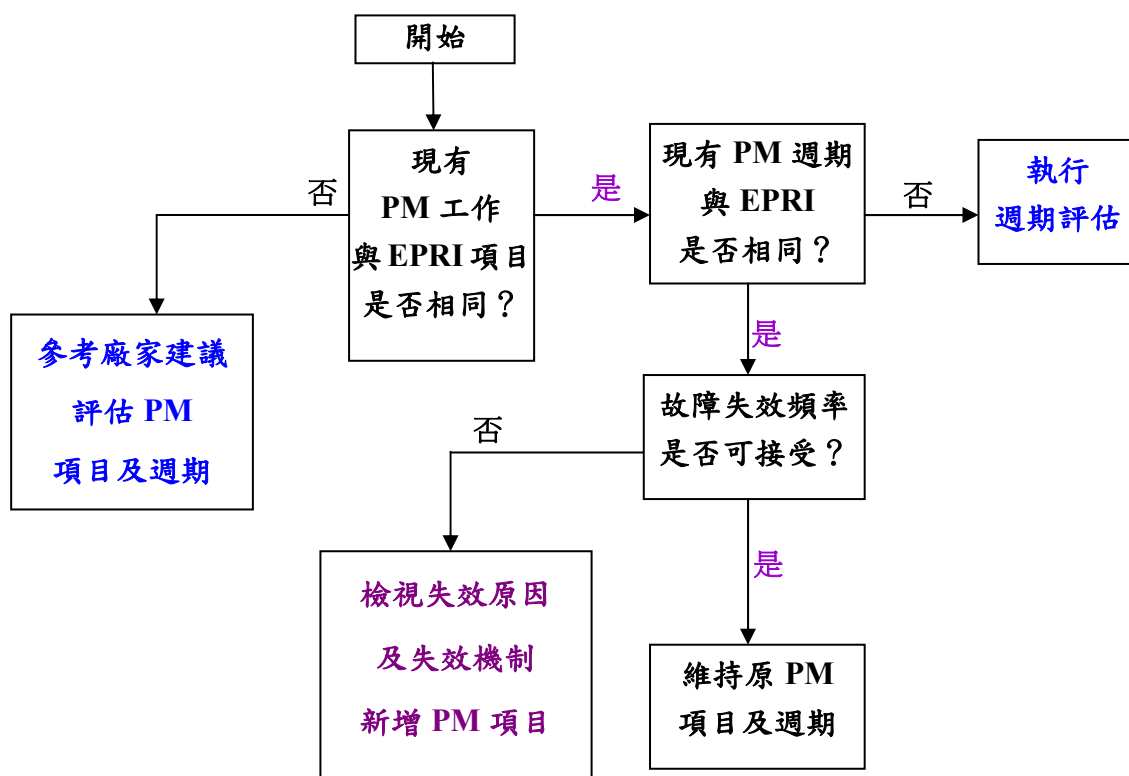
- 第一階段共分析 589 項組件，其中 356 項被定義為關鍵性，為了避免單一故障造成機組跳脫，32 項需要設備改善，287 項修改預防保養內容或程序書。例如 DCR-1637 將主汽機緊急跳脫由單一邏輯改為三選二；DCR-2038 將原集中於單一監測器的發電機氫氣偵測儀器分開成四只記錄器。
- 對非多重電源、氣源、油源或故障無預警之跳機設備一併評估可行的改善措施或列入加強維護。
- 第二階段評估找出 48 項儀控及 56 項電氣弱點，並訂定一些重要儀器設備的更換週期，例如儀用空氣供給閥 KA-HV-203/227/228 失效關閉，會導致儀用空氣喪失，所有控制棒插入，為了避免單一故障，DCR-3718 新增另一迴路的電磁閥，將單一控制邏輯改為重複二選一，並訂定每十年更換氣控閥零組件，以提昇氣控閥之可靠度。

4. PRA 風險度分析：

系統	CDF/年	Δ CDF/年	CDP	測試週期
儀用空氣	1.92E-03	1.90E-03	1.42E-03	18M
機械真空泵	1.87E-04	1.69E-04	2.12E-05	3M
1VA2A	1.54E-04	1.36E-04	1.71E-05	3M
ECW-B	1.49E-04	1.31E-04	1.64E-05	3M
ECW-A	1.33E-04	1.16E-04	1.44E-05	3M
RHR-A	1.17E-04	9.96E-05	1.24E-05	3M
ECHW-B	9.48E-05	7.75E-05	9.69E-06	3M
1VA2B	8.38E-05	6.65E-05	8.32E-06	3M
ECHW-A	7.97E-05	6.24E-05	7.79E-06	3M

- 系統不可用時之反應爐爐心融毀頻率（CDF Core Damage Frequency）基礎值為每年 1.73E-05，風險評估時須先計算差值（ Δ CDF 等於 CDF 減去基礎值），再計算爐心融毀機率（CDP 等於 Δ CDF 乘上測試週期的一半），爐心融毀機率越高代表風險度越高，縮短設備測試週期可降低爐心融毀機率。依據 PRA 結果，針對高風險的各項系統設備，須訂定適當的 PM 維護計劃，例如定期更換備品，以確保設備可靠度。

5. 使用 EPRI PM 維護樣板，決定預防保養項目及維護週期（詳圖二十一），核二廠儀控部份共評估膜片式氣控閥、活塞式氣控閥、氣控式控制器、電磁閥、壓力調壓器、AOV 定位器、溫度開關、壓力開關、儀用壓力元件及傳送器、延時控制電驛、類比電子式控制器、直流電源供給器、電容器等儀控組件。PM 項目參考廠家建議及 EPRI 維護樣板，週期的決定乃依據弱點分析得到的年故障率，須小於 Run To Failure 的年故障率及 1.25 倍的 EPRI BASELINE 基礎故障率。本廠 PM 項目依據 EPRI 維護樣板延長或縮短維護週期案例如下：



圖二十一 核二廠 PM 項目及週期評估流程

- 核二廠維護樣板週期延長案例

Component Type : Solenoid Operated Valve (SOV)

設備名稱 : MSIV Template Category : CHS

Stressors : ●Heat ●High Humidity ●Vibration ○Contamination ○Fluid Quality

說明 \ 維護週期	EPRI 基礎樣板	電廠 原維護週期	電廠 新維護週期
Functional Test – Operability	AR	1M	1M
Functional Test – Timed Stroke Test	1Y	3M	3M
Functional Test – Leak Tests	1Y	1.5Y	1.5Y
Valve Body Bonnet – Elastomer Replacement	5Y	1.5Y	3Y
Annual failure rate (λ)	0.034	0.0182	0.0182
Run-To-Failure rate (λ_{RTF})	0.2319	0.2319	0.2319
評估結果	原更換週期為 18 個月，經弱點分析年故障率為 0.0182，小於 EPRI 基礎樣板年故障率 0.034，將更換週期延長為三年，年故障率仍維持 0.0182，仍小於 EPRI 基礎樣板年故障率。		

- 核二廠維護樣板週期縮短案例

Component Type : RHR Pressure Switch

Template Category : CHM (Critical Components, High Duty Cycle, Mild Service Condition)

說明	維護週期	EPRI 基礎樣板	電廠 原維護週期	電廠 新維護週期
Operator Rounds		1S	1S	1S
Calibration		3Y	18M	18M
Scheduled Replacement		12Y	As Required	15Y
Annual failure rate (λ)		0.0051	0.0096	0.0053
Run-To-Failure rate (λ_{RTF})		0.1641	0.1641	0.1641
評估結果		原更換週期為視需要，經弱點分析年故障率為 0.0096，大於 EPRI 基礎樣板年故障率 0.0051，將更換週期定為 15 年，年故障率降為 0.0053。		

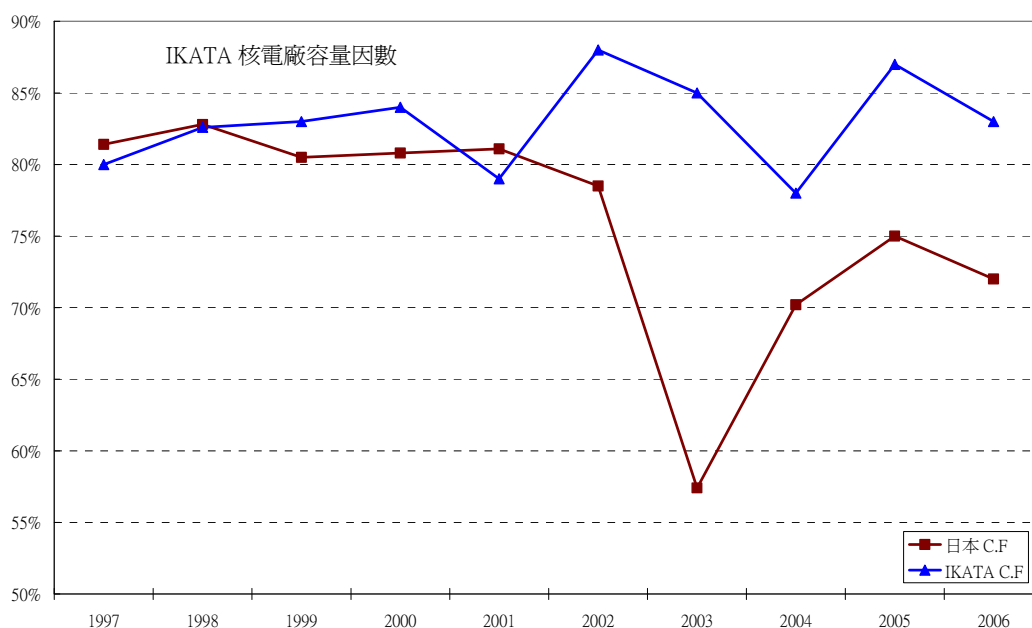
八、IKATA 伊方核電廠最佳化維護（四国電力）

- 伊方核電廠簡介：位於日本四国，擁有三座壓水式核能機組，商轉日期分別為 1977.09.30、1982.03.19、1994.12.15，其中一、二號機為雙迴路 PWR，容量 566 MW，121 束燃料，三號機為三迴路 PWR，容量 890 MW，157 束燃料。2006 年日本四国地區發電量分佈，核能佔 38%，火力 53%，水力 9%，近年來，伊方電廠之容量因數表現優於日本平均值，如圖二十二，幾項重大之設備更新如下表：

項目	UNIT-1	UNIT-2
低壓汽機更新	1998 年大修約 110 天	2000 年大修約 76 天
蒸汽產生器更新	1998 年大修約 110 天	2001 年大修約 120 天
反應爐上蓋更新	2000 年大修約 118 天	2001 年大修約 120 天
開關站更新	2004 年大修約 152 天	2004 年大修約 83 天
爐心內部組件更新	2004 年大修約 152 天	2005 年大修約 150 天
主控制盤更新	2009 年 (1EOC-26)	2009 年 (2EOC-21)

- 伊方電廠最佳化維護：於 2005 年特別成立最佳化維護辦公室，組織上包括設備診斷、預知性維護、可靠度為中心等工作隊。基於以往的維護均為定

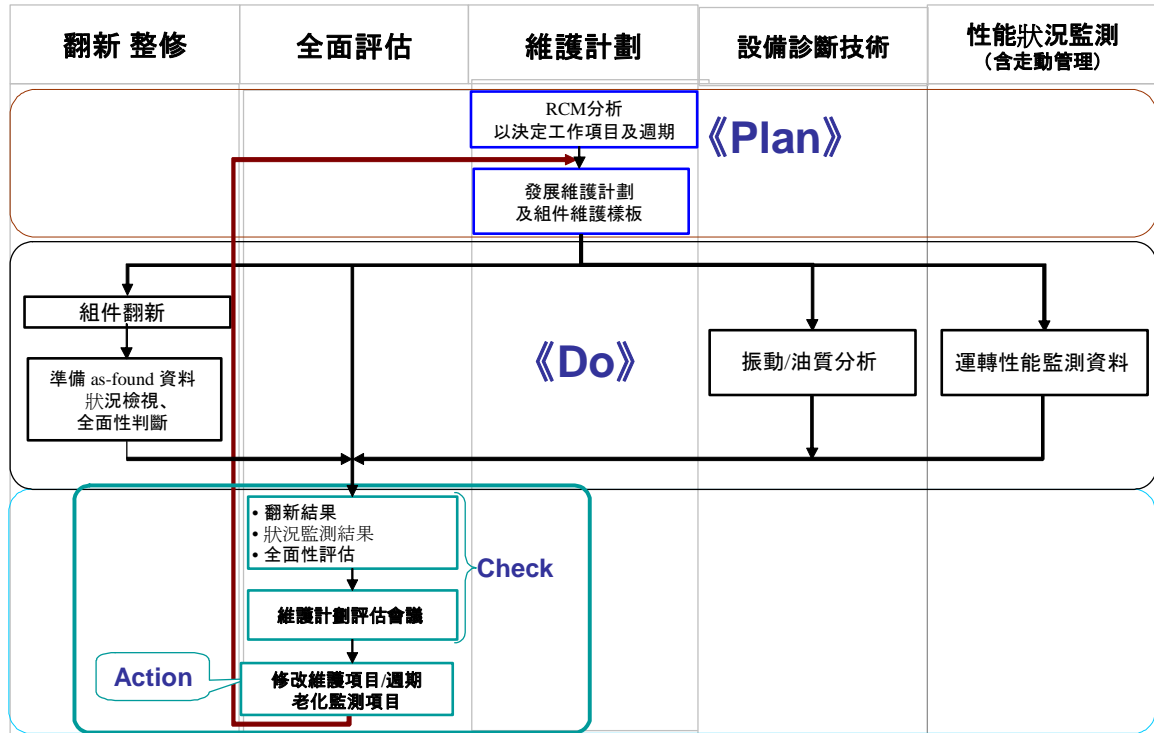
期性，尤其是大修工作非常多，提出以可靠度為中心（Reliability Centered Maintenance）及狀況依歸（Condition Based Maintenance）之維護策略，並導向線上維護，期望將大修部份的工作轉移至功率運轉期間，減少大修工作量，另外持續檢視維護前 As-found 數據、設備診斷結果等維護資訊，並評估現有維護作業的有效性，進而能持續改善。



圖二十二 伊方核能電廠容量因數

- 基本方式（圖二十三）：翻新整修、全面評估、維護計劃、設備診斷技術、性能監測等維護作業五個環節，利用診斷技術監測設備性能並蒐集相關參數，再利用這些維護資訊全面評估維護計劃的有效性，持續改善，形成 PDCA 良性循環；基本上維護工作的項目及週期是以可靠度為考量，並強化在 PDCA 循環中 Check 及 Action 階段之成果。
- 依據系統安全功能將組件細分成 G1 特別組件、G2 關鍵性、G3 次關鍵性、G4 非關鍵性、G5 無關緊要等五類（圖二十四），並以可靠度為中心發展分級的維護計劃，計劃發展作業流程產生系統組件表、系統組件關鍵性評估表、維護結果審查表、組件劣化機制表，維護工作審查表等。
- 依據系統安全功能將組件細分成 G1 特別組件、G2 關鍵性、G3 次關鍵性、G4 非關鍵性、G5 無關緊要等五類，並以可靠度為中心發展分級的

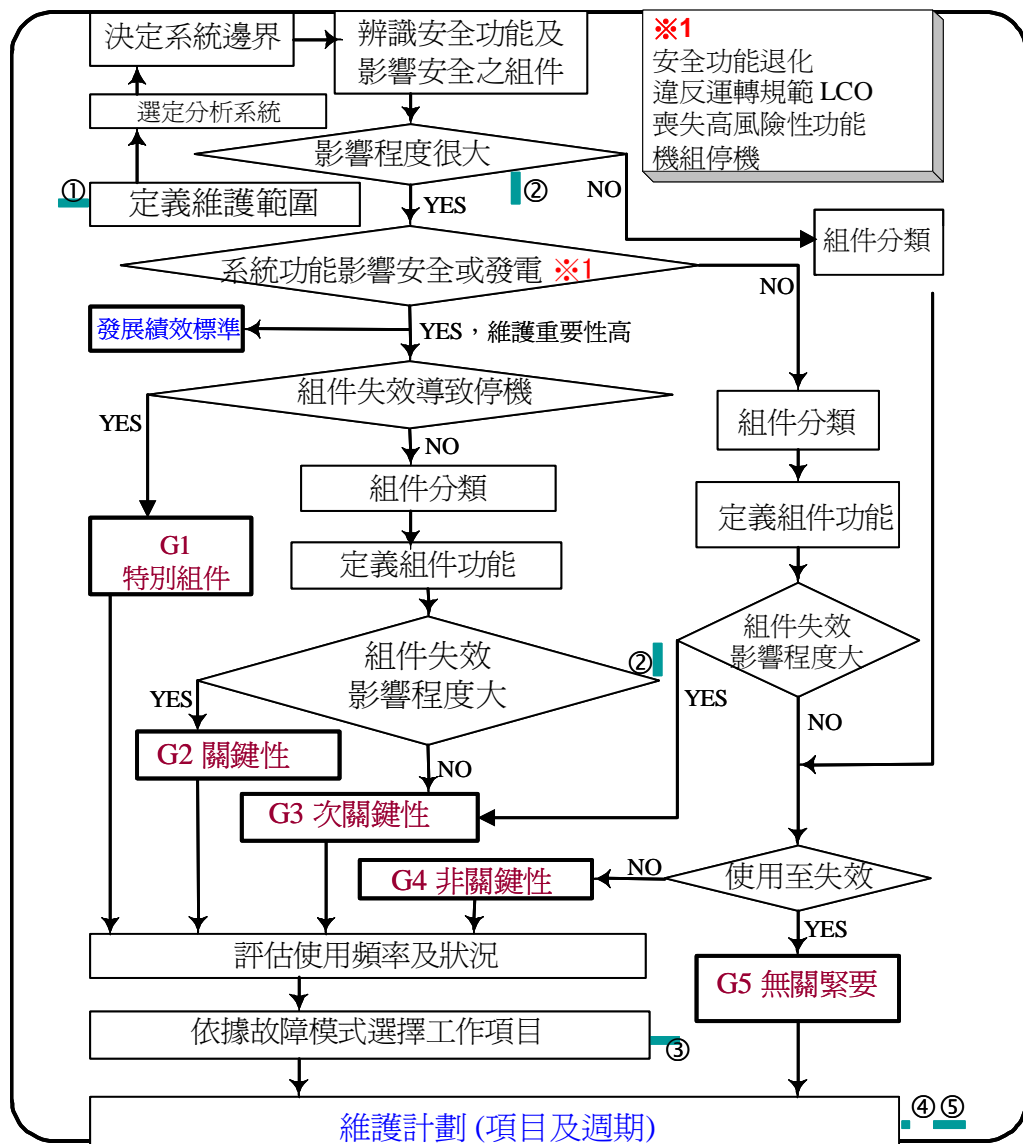
維護計劃，計劃發展作業流程產生①系統組件表、②系統組件關鍵性評估表、③維護結果審查表、④組件劣化機制表、⑤維護工作審查表等輸出報表。



圖二十三 伊方核電廠最佳化維護策略

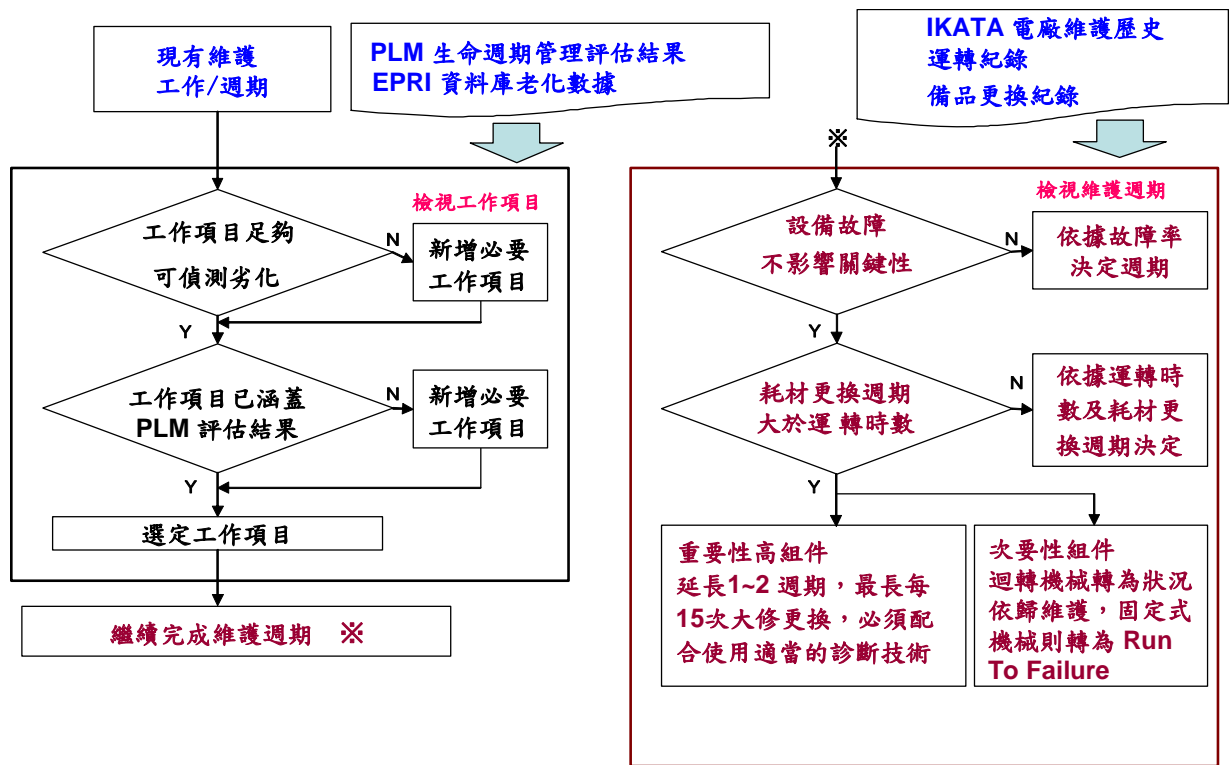
- 自 2005 年開始檢討維護計劃，建立工作項目及週期訂定流程（圖二十五），迄今已完成多項維護作業之修改，例如由定期性改為依狀況維護者佔 3%，可改為失效才維護者佔 2.3%，週期修改佔 66%，未作任何變動者佔 28.1%，詳如下表：

設備種類	組件型式	組件數量	TBM → CBM	TBM → RTF	修改週期	未改變
機械設備	迴轉機	650	111	27	347	165
	固定式機械	858	54	29	327	448
電氣設備	電源	2,905	0	0	2,354	551
	馬達	728	124	2	245	357
	其他	49	0	1	6	42
儀控	儀器	3,780	0	160	2,500	1,120
	氣控閥	585	0	0	580	5
	總計	9555	289(3%)	219(2.3%)	6359(66%)	2688(28.1%)



圖二十四 伊方核電廠維護計劃發展

- 維護前 As-found 資料為維護基礎數據，使用於評估現有維護計劃之有效性，蒐集在大修期間翻新或內部檢測所發現之組件劣化現象，範圍包括泵浦、馬達、熱交換器、容器、水/油槽、電動/氣控/手動閥、液位開關及其他儀器等設備。為了方便維護人員記錄、分析與檢討，將設備狀況分為 C1~C5 五級，另為了 JEAC 4209 進版，須擴大資料之蒐集範圍。



圖二十五 伊方核電廠維護工作項目及週期決定流程

Code	組件狀況	維護計劃
C1	非預期性失效（需設計變更）	立即改進措施，例如設備改善
C2	需要檢修或更新	需要討論改善措施
C3	超出接受標準，需要檢修或更換劣化零組件	週期須縮短
C4	符合標準，可能需要微調	維持原週期
C5	很好	週期可延長

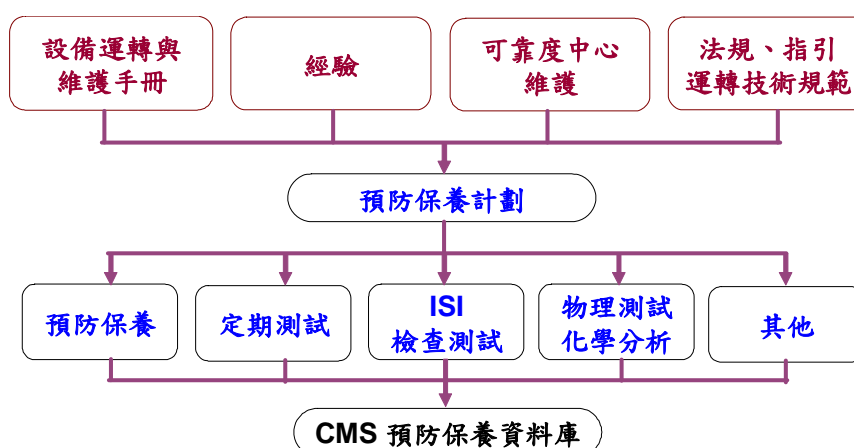
- 現有維護計劃有效性評估：於大修結束後，依據組件管理資料表的狀態監測結果、分解檢查結果，檢視 As-found 資料、振動分析/油質分析結果，由系統工程師執行評估，並於組件管理資料表上填寫綜合評價。
3. 待解決問題：最佳化維護計劃目前已執行或即將執行的，包括設備診斷、性能監測標準、設備可靠度中心、法規發行等多項作業，而最急迫的是提

出新檢查法規系統，並期望能於 2008 年開始執行。

- 新檢查法規系統應變措施：首先必須對維護工作項目及週期能提供簡明的判斷準則，因此須發展劣化機制數據，並與現有維護作業比較，以確認這些數據合用，另外須擴大維護作業有效性評估的範圍。
- 改善組織結構及人力，提昇技術層次：須告知維護人員開始改變原有的維護思維轉向新檢查系統，並強化設備診斷技術的組織結構和人員技術能力，例如必須快速地訓練維護作業之核心人物系統工程師。

九、秦山核電廠最佳化維護（中國核電秦山聯營公司）

1. 秦山核能電廠簡介：位於中國浙江省海鹽縣，擁有兩座壓水式核能機組，容量 650 MW，為中國自行設計、建造、管理、運轉的核能電廠，三、四號機（容量 650 MW）正在建造中。



圖二十六 秦山核電廠預防保養結構

2. 秦山核電廠維護策略：執行預防保養及矯正維護，安全與品質優先，維護作業最佳化以提昇設備可靠度及可用率，並降低維護費用，透過最佳化將預防保養工作合理化，例如，不具重要功能的設備且其 PM 維護費用高，若設備失效是可控制或可接受的，則傾向採矯正維護措施；預防保養的結構如圖二十六，其中 CMS PM 資料庫包含每次大修、每十年、每年、每月及每週之維護項目，共 40,400 筆資料，其中預防保養共 29,200 件（72.3%），定期測試 1,700 件（4.2%），ISI（In Service Inspection）檢測 800 件（1.9%），

物理測試與化學分析 500 件（1.2%），其他 8,200 件（20.4%）。秦山電廠最佳化維護計劃中，目前需要執行的工作有建立故障模式、將 PM 工作與週期合理化、及設備修改等。

3. 膜片閥維護案例研討：膜片失效為主要的故障模式，問題點為膜片閥之數量繁多（共 3255 只），更換成本高，更換週期如下表；由於缺乏最佳維護作業的標準與指引，最佳化維護在秦山核電廠是不容易的工作。

等級	運轉中是否可更換	是否造成不可用	重要性	更換週期
Class 1	否	是		5 年
Class 2	是	是		6 年
Class 3	否	否	高	5 年
Class 4	否	否	中	6 年
Class 5	否	否	低	7 年
Class 6	是	否	高	7 年
Class 7	是	否	中/低	8 年

十、福島核能一廠以可靠度為中心的維護計劃（東京電力）

1. 發展時程：RCM 可靠度為中心之維護計劃開始於 2003 年，發展階段著重於研習 RCM 及如何將 RCM 理念在公司內部傳播，由於東京電力共有十部奇異公司 BWR-5 型核能機組，福島一廠六號機同屬 BWR-5 機組，故在發展階段以六號機之汽機設備為試辦對象，建立為執行階段作準備之初級程序書；2005 年進入執行階段，首先，建立一些基礎文件，內容包括計劃、目的、人員責任、各部門角色及執行時程，另外建立了所謂的溝通文件，為了在其他部門，例如運轉或工程部門之相關人員間，傳播可靠度為中心的觀念；在執行階段，針對三號機汽機設備（福島一廠二、三、四、五號機同屬 BWR-4）來改善，藉由發展工作流程及設備狀況監測程序書，已能具體執行 CBM 狀況依歸監測，同時，福島電廠已開始建立關鍵性組件維護樣板，完成數量如下表：

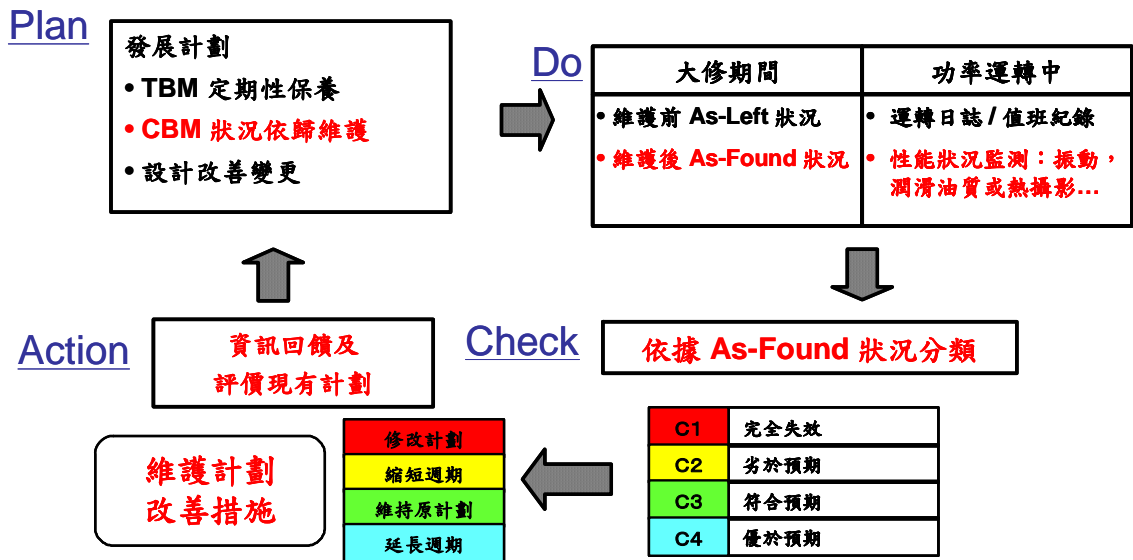
機組	容量	系統數量	完成/總數量
1	BWR3 460MW	約 90	1,200/30,000
2	BWR4 784MW	約 90	1,500/35,000
3	BWR4 784MW	約 90	1,500/35,000
4	BWR4 784MW	約 90	1,500/35,000
5	BWR4 784MW	約 90	1,500/35,000
6	BWR5 1,100MW	約 90	2,500/45,000

2. 面臨之挑戰：

- 由於有些設備組件缺乏必要的原始設計文件，無法取得組件規範或容量值，使得設備故障之影響性評估無法進行。
- 以往的維護紀錄並非依設備儲存，與現有之設備維護計劃比對有困難。
- 一、二、六號機之設計文件為英文版本，對日本團隊須花費較多之時間研讀。
- 擬採取之應變措施：將從原設備供應廠家獲得文件，或從現場設備本身取得相關設計資料，預計於 2009 年 3 月補齊；將建立電子式維護資料系統，已持續蒐集十次大修之維護資料，並利用組件編號簡化搜尋，將於 2009 年 3 月開始使用。

3. 下階段維護策略的重點在於持續改善，詳圖二十七，尤其是圖上紅字部份為未來需要集中心力去努力執行的：

- 在 DO 的階段，未來應集中於維護前 As-found 狀況的監測與蒐集，而非維護後 As-left 數據，故須增加設備在運轉中的性能監測。
- 在 CHECK 階段的重點，將蒐集每一設備的 As-found 資料，並依狀況好壞分成 C1~C4 四級。
- ACTION 階段則依據 As-found 之類別提出相對應之改善措施，並將設備狀況好壞回饋至現有的維護計劃，以評估維護作業的有效性及其改進設備可靠度。
- 為了達到持續改善的目的，未來維護計劃的擬定將搭配定期性及依狀況維護兩種方式。



圖二十七 持續改善之維護策略

- As-found 資料蒐集的挑戰：設備維護前 As-found 狀況分成 C-1~C-4 四級，以福島一廠二號機反應器廠房機械設備組件為例，執行定期性預防保養所得到的結果，狀況 C-1 佔 2%，C-2 佔 4%，C-3 及 C-4 各佔 47%，只有 6% 的狀況是比預期差的，47% 符合預期，而 47% 優於預期，利用這些累積數據分析評估，可以延長或縮短部份 PM 的週期，以達維護最佳化。然而過去的維護作業 As-found 狀況是不需要被記錄的，因此也沒有狀況分類及代碼，採取新的作業方式，現場包商人員不熟悉狀況代碼，對於新的維護作業流程也不熟悉，故一開始包商勉強配合或托延作業時間，面對這些挑戰，首先建立樣品與工作程序書，並使用資料管理系統，訓練包商人員熟悉設備狀況的判定程序及標準。
- 設備診斷技術：目前現場使用的診斷技術有振動測量、熱影像攝影、潤滑油質分析等。
 - 振動測量於 2005 年開始執行，從建立程序書、訓練人員、購買設備、訂定測量範圍等，迄今已經測量每部機組超過 500 台迴轉機，同時分析並蒐集這些寶貴的數據，曾因此發現軸承缺乏潤滑油及軸承已損壞的案例；於 2006 年全日本核能界定期舉辦振動測量技術交流會，2007 年亦代表電廠參加 EPRI 的可靠度維護研討會。

- 熱影像攝影從 2006 年開始，目前已經診斷每部機組約 450 台設備，但於開關廠無法使用，曾經成功地發現迴轉機軸承過熱、電纜接線不良、閥座洩漏等案例。
 - 潤滑油油質分析於 2006 年開始購買分析儀，建立分析實驗室，並在大型迴轉機安裝潤滑油取樣口，期望能簡便又快速地分析診斷油質，預計 2008 年實驗室將開始使用。
6. 結論：可靠度為中心之維護計劃於 2007 年在福島一廠已完成多項工作，例如，定義及辨識關鍵性組件、建立設備監測例行工作、訓練工程人員參與 CBM 擬定計劃；而未來工作的重點則集中在與其他例如運轉或工程部門溝通，清楚定位各部的角色與責任，使 CBM 維護更為有效；另外改善知識管理系統，訓練新進年輕員工，以達到核心技術傳承的目的；並將發展成本效益平衡的評估模式，以達到長程持續改善的目的。

十一、巴基斯坦 Chashma 核電廠預防保養計劃（巴基斯坦原子能委員會）

1. 巴基斯坦核能電廠簡介：巴基斯坦有兩座核能機組在運轉中，Karachi（PHWR，137 MW）及 Chashma 一號機，其中 Chashma 電廠為中國協助建照，一號機屬雙迴路 PWR，裝置容量 300 MW，於 2000 年九月商業運轉，二號機（PWR，340 MW）正在建造中，而計劃中的三、四號機，容量各為 350 MW，預計 2030 年巴基斯坦的核能機組裝置容量將達到 8800 MW。
2. Chashma 一號機的預防維護：PM 主要是定期性的，包括迴轉機械的振動分析及潤滑油油質分析，電氣設備的熱影像攝影，現場巡視等。
 - 所有的定期性工作，包括預防保養、偵測試驗均已列入 Callup 維護卡，Callup 維護卡內容包括維護項目、程序書、工作完成日期、查證日期等；維護卡的內容由工程、維護跨部門依據設備性能狀況定期審查。
 - 2007 年在正常機組運轉中執行的預防保養佔 42%，在大修期間執行的工作佔 58%，針對重複發生故障或造成設備劣化者，應於大修期間排在最優先次序執行預知性維護。
 - 矯正維護與預防保養之比例：2005 年是 1.8333 倍（9294/5070），2006 年是 2.78 倍（8842/3175，無大修工作，故 PM 較少），2007 年 1.77 倍

(9949/5617) ，矯正維護工作大都為次要的檢修。

- 個別設備的維護樣板正在審查中，關鍵性/非關鍵性/Run To Failure 組件正在分類中，關鍵性組件失效會使安全功能不可用或造成負功率變動負載降低；廠家建議的執行週期及預防保養範圍正依據運轉經驗修改中，另外依據狀況依歸的理念，PM 頻率正在調整中。
- 預防保養的範圍包含泵浦/閥/馬達/斷路器分解檢查，再潤滑，機械水封，鎖緊螺絲/螺帽，電驛/模組/開關/指示儀表校正，檢查等。
- 設備狀況監測包括機械設備振動分析、電氣設備熱影像攝影，潤滑油分析。從 1999 年開始執行振動分析，已監測超過 150 個迴轉機械，針對核能級泵浦須於機組功率運轉中偵測，主蒸汽機及主冷卻泵裝有線上振動偵測設備。

CHASHMA NUCLEAR POWER PLANT-1

CALL-UP CARD

MODE 5,6

CATG: Preventive

ACTIVITY: **COMPLETE OVERHAULING OF EH OIL PUMP-MOTOR SET-B**

CC No. 2120098	Follow the Maintenance Procedure MP-CI-108			
SYS : J051	1. Dismantle the pump completely and take out all parts.			
EQPT: J051-01BPO	2. Clean and inspect all dismantled parts of the pump.			
LOC: TX + 7.2 M	3. Check shaft and pistons condition for scoring, pitting and scratches.			
FREQ: 260 Week	4. Check shaft run-out.			
RESP SEC: TG/ CI Maintenance Section	5. Replace bearings, oil seals.			
Schedule	6. Replace all " O" rings			
	7. Check pressure adjusting spring			
	8. Inspect coupling and coupling pad replace if required			
	9. Replace motor bearing and perform greasing with shell Alvania-3.			
	10. Perform alignment and then couple it.			
	Note: After Execution, Route the Card to System Engineering Section	Prepared by	Iftikhar Ahmed , SE	Sajid Hussain, JE
		Reviewed by	Imtiaz Hussain, DCE	M. Tariq Aziz, SE
	REV. 00	Date: 15-12-2006	Approved by	Yusuf Raza, CE

Chashma 一號機 Callup 維護卡

十二、印度電力最佳化維護經驗（印度電力）

1. 印度電力公司介紹：印度擁有七座核能電廠，由印度電力公司負責設計、建造、執行及運轉維護，目前有十六部核能機組運轉中，裝置容量 4080 MW，五部機組建造中。印度電力曾創下 PHWR 連續 529 天之運轉紀錄，Rajasthan-2、Madras-1/2、Narora-1 等機組已完成延壽及安全升級計劃。

廠名	型式	容量 MW	運轉日期
Tarapur-1/2	BWR	160×2	1969.10
Tarapur-3/4	PHWR	540×2	2005.09，2006.08
Rajasthan-2/3/4	PHWR	220×3	1981.04，2000.06，2000.12
Madras-1/2	PHWR	220×2	1984.01，1986.03
Narora-1/2	PHWR	220×2	1991.01，1992.07
Kakrapar-1/2	PHWR	220×2	1993.05，1995.09
Kaiga-1/2/3	PHWR	220×3	2000.03，2000.11，2007.03
Rajasthan-5/6	PHWR	220×2	建造中
Kaiga-4	PHWR	220	建造中
Koodankulam-1/2	VVER	1000×2	建造中

2. 維護策略沿革：

- 1940~1950 年：故障失效才檢修。
- 1960~1970 年：定期性分解檢查、維護計劃、引進電腦化管理、生命週期成本分析、傷害風險研究。
- 1980~2000 年：狀況監測、設計時加入可靠度及未來維護難易度之考量、線上診斷、故障模式及故障效應分析、維護管理軟體，可靠度為中心維護、多專長與團隊工作、總成效維護、風險告知維護等。
- 機組運轉中維護之挑戰：(1)須徹底審查維護工作均已完成相關之故障模式與效應分析；(2)須嚴格遵守程序書以避免人員作業疏失；(3)須準備很多測試過可用之備品，以備臨時偶發之需求。

3. 印度電力最佳化維護的目的：改善安全設備或系統之可靠度與安全性，提昇負載因數，降低維護成本，建立最佳化維護的步驟如下：

- 建立設備劣化、失效成本與風險、故障結果及影響效應、維護成本等模式。
- 維護策略：矯正維護、預防保養、分解檢查、更新，及決定各項作業之維護頻率。
- 維護合作：整合運轉、計劃及不同的維護部門。
- 電廠績效改進：定期性績效審查、故障歷史編輯、移除缺陷、強化維護技巧、備品存量最適化等。
- 接受以狀況為依歸之維護理念，強化系統可靠度，並將不同部門之作業最適化，以達成最佳化維護的目的。
- 最佳化維護的條件須具備足夠的資訊、系統/設備專業知識及判斷能力、發展團隊工作、及管理階層能接受新技術及維護政策；而所需蒐集的資訊為設計理念、生命週期、藉由趨勢分析鑑定重要設備與關鍵性組件的劣化機制、與為了設計性能達成原設備廠家建議之維護作業等。

4. 印度電力公司現有之維護作業

- (1) 設備分成四類：與安全有關者為 A 類、故障失效會影響機組啟動運轉者為 B 類、故障會影響電廠效率者為 C 類、其他為 D 類。
- (2) 從低可用率邁向高可用率：
 - 增加注意力在與電廠績效有關的非安全有關設備上，以提昇其可靠度，增加電廠可用率及容量因數；
 - 在未來印度電力設計新機組時，須強化可維護性及多重設備的理念；
 - 以狀況依歸為維護策略的重點；
 - 在系統設備分類時，多一些邏輯或實際上的案例；
 - 提昇維護歷史資料電腦化系統的重要性；
 - 使用最新的矯正維護技術及接受最先進的監測設備；
 - 應注意電力網失效事件，並解決電力傳送問題；
 - 發展故障模式效應分析、可靠度維護等技術，並訓練相關工程人員；
 - 不同電廠間應互相支援，分享印度電力之維護資源以達成大修工期。
- (3) CBM 狀況依歸維護重要的監測項目：
 - 機械設備維護作業：振動監測與訊號分析、油質分析、超音波洩漏

分析…等。

- 電氣設備維護作業：熱影像攝影、電路器動態接點電阻、變壓器分解性氣體分析、電池放電測試與線上充電平衡…等。
- 儀器設備維護作業：溫濕度測量、電源供給器漣波值、接地故障偵測…等。

(4) 印度電力的強項工作：

- 將持續維持安全有關係統之可靠度列為最重要的維護工作，盡力提昇維護作業，以確保非安全有關但與電廠績效有關係統之可靠度。
- 執行故障模式與效應分析，以鑑定較弱組件及維護重點區域；蒐集故障趨勢及定期檢視失效模式；針對重複發生故障或系統失效，採取肇因分析及重新變更工程設計等對策。
- 堅持使用原設備廠家產品而不使用替代定製品。
- 將發展或熟悉狀況監測技術列為最重要，關鍵性系統組件執行使用中檢測，訓練維護工程人員熟悉最新維護技術。
- 確實執行 FME 異物入侵防範措施。
- 建立一套系統，針對小規模事件能加以辨識原因、趨勢分析，以期能夠在大事故發生前解決問題。
- 印度電力各核能電廠間相互交流各項原設備廠家之相關經驗。
- 高級工程人員實際現場作業觀察，並提出多項有效建議。
- 發展細膩計畫，例如針對所有關鍵性作業必須逐步執行的方式。
- 運用合約系統採購備品，以達到存量最適化。
- 將備品測試加壓並確認可用，以達到可立即更換並儘可能減少設備不可用時間。
- 發展測試用設備及校正儀器盤，以執行關鍵性備品安裝前之測試與校正，例如 6.6 KV 馬達測試設施、控制 UPS 卡片測試、控制棒驅動機械調節器測試、PLC 可程式邏輯控制器測試盤、控制閥測試…等。

叁、心得與感想

維護策略經過多年的沿革，從初期設備故障失效才檢修（結果設備可靠度不佳），改採定期性維護，但大修工作量超多，維護成本居高，且維護頻率太高可能導致較高的失誤。未來將以設備可靠度為中心，引進電腦化管理、生命週期成本分析等，逐漸轉向狀況依歸之最佳化維護。最佳化的維護模式為設備可靠度加上適當的工作排程管控，可靠度程序乃將現有相關維護作業整合成單一程序，使電廠人員可以監測現有設備之狀況、並依據運轉經驗持續調整預防保養內容及週期。

一、目前維護領域的待改善項目：

1. 目前大部份的維護作業都安排在大修期間執行，僅有少量工作在運轉期間，造成大修密集的維護負擔，部分的工作應轉移至運轉期間。
2. 預防維護範圍不全：維修計劃必須考慮組件的重要性及後果的嚴重性，未全面性辨識關鍵性組件，導致維護作業未能涵蓋重要組件，待發生異常事件後才納入。
3. 設備監測功能不足：關鍵性組件未能執行適當的維護作業及狀況監測，並缺乏性能監測之回饋資訊，例如未能定期執行系統化巡視，導致洩漏、腐蝕等設備性能劣化，有些設備不良的狀況由同業評估團隊發現，電廠卻從未知覺，而故障失效紀錄未能電子化造成很難追蹤及分析趨勢。
4. 應加強大修及運轉期間維護資料之蒐集，以利評估改善維護週期及內容，並建立性能狀況監測標準，以呈現維護效果及評估維護工作之成效。
5. 維護前 As-found 狀況必須文件化與建檔，並執行趨勢分析：執行設備狀況監測，但維護前未預期結果或劣化等 As-found 資訊未被詳細記錄與分析，As-found 資訊無法有系統地分析與分享給電廠維護管理。
6. 運轉員容忍過多異常狀況，例如警報太多、長期存在設備不良、頻繁的電力網干擾，運轉員未強烈要求設備改善及減少操作，矯正維護措施亦未能排定檢修之優先順序。
7. 人力老化及核心技術無法普及：電廠或包商的監測工作均高度倚賴少

數個別人員。

二、最佳化維護基本概念

最佳化維護基本的理念乃是使用適當的方法針對適當組件在適當時機執行，以達到避免過多或過少的維護，為了達到最佳化維護，一方面使用 PDCA 循環持續改善，維持設備高可靠度，另一方面透過共同的專家平台交流彼此之維護資訊，加速最佳化維護策略的應用及分享所有電力公司的成果。

最佳化維護的目的包含減少大修工期、降低維護費用、工作負擔扁平化、縮短檢修時間、強化設備性能監測、強化維護品質、防止設備故障、預防電廠跳機及縮短大修工期等，其中減少大修工期、降低維護費用、工作負擔扁平化、縮短檢修時間由工作管理來達成；縮短檢修時間、強化設備性能監測、強化維護品質、防止設備故障、預防電廠跳機及縮短大修工期則依賴設備可靠度的提昇。維護革新須改變思維：從以工作為中心的維護，轉變成以可靠度為重點的最佳化維護，整個維護流程由定義關鍵性組件、建立標準、執行維護、蒐集數據等程序，形成持續改善的良性循環。

三、設備可靠度程序：

設備可靠度程序的目的是在整合及標準化，所有相關作業將被連結，使彼此可以溝通分享資訊，以利透過回饋機制將這些作業簡單且持續地達到最適化。最佳化的維護模式為設備可靠度加上適當的工作排程管控，設備可靠度程序乃將現有設備相關維護活動整合成單一程序，使電廠人員可以評估重要電廠設備、建立長程設備健康計劃、監測現有設備之性能及狀況、並依據設備運轉經驗持續調整預防保養內容及週期。

一般來說，設備可靠度程序包括維護法規、偵測試驗、設備性能狀況監測、預防保養（週期性、預知性、計劃性）、以可靠度為中心之維護作業、生命週期管理等活動。PM 維護樣板可做為關鍵性組件定義及分類、性能監測、預防保養執行、設備可靠度持續改善等維護程序之基礎，維護樣板之基礎資料庫文件、故障模式分析及弱點分析等則有助於建立預防保養之最適化基準。

提昇設備可靠度程序可再細分成關鍵性組件定義及分類、設備性能監測、預防保養執行、矯正維護措施、可靠度持續改善、設備生命週期管理等六項程序；首先須將系統/組件依其功能重要性分類，定義關鍵性系統/組件，依據組件之

關鍵性不同而建立對應之預防保養，然後執行性能監測並依據監測結果調整 PM 內容以達成持續改善之效果，由預防保養→性能監測→持續改善→預防保養等程序形成一持續改善之良好循環；若設備發生故障或劣化，則執行矯正維護及回饋故障肇因，而修復後之設備仍須回到性能監測→持續改善→預防保養→性能監測等維護循環；另設備老化及生命週期管理則須長程規畫，各項程序說明如下：

1. 關鍵性組件定義及分類：爲了執行合理的維護工作，在維修計劃階段，結構/系統/組件分類應同時考慮核能安全的功能、發電能力、運轉經驗或工業安全等因素，定義電廠重要系統功能，同時辨識及分類關鍵性、非關鍵性、Run-To-Failure 等組件，依據組件類別採取不同之維護策略，不同等級將採用不同的維護作業，例如性能監測標準將依等級訂定，被分類在關鍵性等級的設備組件必須執行定期預防維護，等級低者則以矯正維護措施即可。
2. 設備性能監測：傳統上乃是依據經驗或工程判斷來偵測設備異常，例如聲音、氣味和發熱等現象，這些活動的重要性並未改變，但設備偵測或診斷技術已精進發展，例如振動測量、紅外線熱影像攝影、油質分析等技術，將廣泛地被引進，期能偵測異常並儘快發現故障徵兆，以便及時採取必要的改正行動。無論是預防保養或矯正維護，執行完畢後均須驗證系統可維持正常運轉，藉由監測並記錄系統性能及重要參數，作爲組件劣化之趨勢預測，早期發現非預期性的劣化，並提供給持續改善程序及設備老化管理規畫等之參考數據。
3. 預防保養執行：預防保養是可靠度持續改善必要之程序，需要性能監測來驗證 PM 之效果，包括記錄設備維護前 As-found 及維護後 As-left 狀況、設備狀況回饋及分析、執行維護後測試等，As-found 狀況不但是作爲判斷設備是否劣化的參數，同時對於維護週期的決定亦是一項重要的參數，爲了分析方便，As-found 可依據設備狀況好壞分級，以利評估維護作業與檢修週期。
4. 矯正維護：於設備故障時執行，矯正維護後需要性能監測來驗證系統已回復至正常狀況，且須執行肇因分析，針對肇因提出持續改善，後續改

- 正措施追蹤，避免重複發生，並回饋老化相關原因至生命週期管理程序。
5. 設備可靠度持續改善乃是維持設備可靠度之不二法門，首先建立並使用維護樣板，然後依據設備狀況持續調整 PM 之內容與週期，注重工作回饋機制，回饋包括設備 As-found 狀況紀錄、故障肇因、設備非預期劣化指標等維護資訊，採取即時的預防性程序以降低不可預期之故障失效，減少強迫停機，並將維護資源配置最佳化。
 6. 設備生命週期管理：為電廠長程之營運策略，依據性能監測結果及設備故障肇因，建立能維持設備/組件長期狀況良好之維護策略，整合現有包括老化管理、預防保養、性能監測等維護程序；其中預防保養之功能在移除或改善老化所引發之劣化問題，確認現有之 PM 及矯正措施已足夠並有效；設備重要功能監測可提供設備/組件劣化程度之趨勢，以便及時採取矯正措施，監測頻率與執行範圍須能及時偵測到老化之效應。
 7. 維護作業程序，基本上，第一階段先將組件分級，定義關鍵性組件，以訂定維護之優先性；第二階段執行預防保養，矯正維護措施，並依據狀況監測 As-found 資訊持續改善；第三階段則規劃長程生命週期管理。總之，設備可靠度是一個活的程序，一方面吸收現場工作人員/運轉員之回饋，與學習故障失效之經驗；一方面蒐集例如生鏽、磨損、漂移等不重要劣化狀況，或蒐集小失誤及虛驚事件，加以分析趨勢並善用這些矯正維護結果，提供工作標準及維護有效性的指標，以達到包括修改工作內容、週期，或新增項目等 PM 計劃持續改善的目的。

四、提昇設備可靠度成功的關鍵要素：

1. 不可忍受設備之非預期失效、長期存在或重複發生之設備問題須尋求解決。
2. 聚焦在關鍵性設備/組件、消除設計上先天不良之弱點。
3. 預防及預知性維護、長程規畫主動性保養。
4. 運轉經驗及標竿典範之應用。
5. 成功的工作排程管理。
6. 聚焦在程序管控而非功能或技術：如何決策、如何工作以達到目標、相互交叉影響之考慮。

7. 維護管理及經營團隊。
8. 有效變更管理：文化差異考量、溝通、抗拒改變之處理、領導統御。

五、設備狀況依歸維護：

CBM 乃依據設備/組件既有之狀況評估及監測結果執行維護作業，例如預知性保養，性能監測、預防保養、矯正維護、設備生命週期管理等程序均以設備狀況為維護原則。預防保養之種類有大修維護、TBM（Time Based）定期保養、及依狀況好壞之 CBM（Condition Based）維護，可依據設備狀況建立等級，於 PM 時記錄，累積足夠資訊以利評估判斷採取何種維護方式。

重要的設備診斷技術及監測項目包括振動監測與訊號分析、潤滑油油質分析、超音波洩漏分析、熱影像攝影、電路器動態接點電阻、變壓器分解性氣體分析、電池放電測試與線上充電平衡、溫濕度測量、電源供給器漣波值、接地故障偵測等。

六、有效的工作排程：

有效的工作排程應考慮工作範圍、安全性、技術資料、查檢表、程序書、維護後測試、特殊工具、預估時間、跨部門的特殊技能、備品、檢修歷史紀錄、檢修許可…等，持續性改善須透過有效的經驗回饋，因此工作排程亦應注重並鼓勵工作人員的經驗回饋。

七、結論：

基於設備故障失效是電廠事故的最大根源，持續改善設備可靠度為 WANO 會員共同之期望與任務，因此世界核能發電協會東京中心此次在日本東京舉辦之研討會，特別將主題訂為「最佳化維護及設備可靠度程序執行」，期望會員往最佳化維護邁進，以達到更高的設備可靠度及更有效率的維護程序。兩天的研討會，由世界核能發電協會東京中心及美國電力研究協會專家帶領引導，來自台灣、日本、韓國、中國、印度、巴基斯坦、芬蘭等國電力公司代表發表及討論核能電廠最佳化維護的策略，最後大家得到以下的共識：

1. 最佳化維護的目的，為建立並提出可確保設備可靠度持續改善的程序，其行動須統合多項維護作業成爲一項有效的程序，爲了避免執行過程中引發員工抗拒，須執行變更管理，鼓勵員工支持提昇設備可靠度的計劃。

2. 定義關鍵性組件範圍：分級維護為設備可靠度程序的優點之一，將有限資源應用於較多重要資產有價值的工作上。依據系統與組件功能清楚地定義關鍵性組件，評估關鍵性組件失效的風險，依據影響性採取設計變更、維護變更、或接受風險等措施，並接受低階功能層次組件可以運轉至失效 Run-to-failure。第一次關鍵組件的分類通常還不夠仔細，故須定期性審查分類範圍的品質及有效性。
3. 持續改善：必須持續重複維護管理的 PDCA 循環，才能有效提昇安全和可靠度。基於維護的有效性，將被動式維護轉向主動維護，試著消除真正肇因而不是單純地檢修明顯的故障；須平衡學術研究數據與電廠實務，並重視維護團隊的聲音，建立團隊內外經驗分享與回饋的網路，電業努力的活動應該透過共同的平台分享以加速改善腳步。
4. 預防維護的執行：要求電廠所有人員不可容忍設備非預期性的故障，由於許多設備故障是來自不洽當的維護作業，故藉由提供有效的訓練、完善的程序書與監督，以達到零缺失及高品質的維護作業。
5. 設備性能監測：依據組件分類的範圍與結果，執行有效的性能監測，須使用先進的狀況監測技術支援肇因分析；蒐集設備狀況數據、建檔、執行趨勢分析，並須將分析結果傳達出去，以確保採取必要的措施。依據設備實際狀況來改善維護作業，使電業實現具創造性的革新。非預期性的故障失效可能導致電廠高風險或高運轉維護成本，故維護工作由被動式轉為主動式，針對主動式維護，以 PM 維護樣板，及包括振動分析、熱影像攝影、潤滑油油質分析…等預知性技術。
6. 生命週期管理：使用維護前 As-found 資料，預測大型設備劣化趨勢與壽命，發展長程大型設備更換與翻新計劃，以應付延長運轉壽命；分析投資計劃之優先性，並為應付可能發生的風險作好準備，另須規劃長程人力訓練。

肆、建議事項

- 一、美國電力研究協會認為最佳化維護為設備可靠度加上適當的排程管控，台電核能單位已於 2008 年開始適用維護法規，並使用維護整體風險工具（MIRU Maintenance Integrated Risk Utility）執行工作排程與風險評估，因目前 MIRU 系統正在測試，尙未能完全發揮功能，建議各單位應重視，並加強檢測功能是否符合需求。
- 二、設備可靠度程序乃將現有設備相關維護作業整合成單一程序，而目前台電核能單位相關之維護策略，包括矯正維護、肇因分析、趨勢分析、系統討論會、預防保養、維護樣板、整體改正行動方案 CAP 系統、知識管理 KM 系統、MMCS 維護管理電腦化系統、MIRU、OE 運轉經驗…等多項系統，彼此之間欠缺有力的連結與溝通，待整合成以可靠度為中心，並形成 PDCA 良性循環，及可達到持續改善目的之維護程序。
- 三、基於運轉規範之條文規定及 MMCS 程式結構，核二廠大部份的 PM 週期均為定期性，為了達到持續改善及維護最佳化，未來維護計劃的擬定應搭配定期性及依狀況為依歸兩種維護方式。
- 四、維護前 As-found 資料蒐集的挑戰：以狀況為依歸的維護，執行設備運轉中性能監測及記錄維護前 As-found 數據是必要的，若能將設備狀況分級，以區分設備狀況符合預期或優於預期或劣於預期，待累積足夠資訊，可據以評估現有 PM 之有效性，針對 PM 內容及週期依設備狀況好壞提出相對應之改善措施，例如延長或縮短 PM 的週期，以達維護最佳化。
- 五、分級維護可將有限資源應用於較多有價值的工作上，依據系統與組件功能清楚地定義關鍵性組件，評估關鍵性組件失效的風險，然後依據影響性採取例如設計變更、維護內容變更、接受風險或 Run-to-failure 等不同等級的維護策略，台電已依系統功能分為 Q、R1、R2、R3 等級，若要套用維護樣板，這樣的分級是否足夠區分關鍵性或 Run-to-failure，建議定期審查分類範圍的有效性，以決定電廠重要系統之維護範圍。
- 六、電廠設備及台電公司人力逐漸老化，為了維持高可靠度及安全性，未來維護策略應考量下列之隱憂：大修維護人力吃緊，無法聘用足夠的純熟技術人員，員工老化，技術斷層，需及時補充人力並給予足夠的訓練。