

出國報告(出國類別：開會)

參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵研討會 (Workshop) 報告

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張益維 核三廠機械組主辦營運測試專員

派赴國家：法國

出國期間：101年6月24日至101年6月30日

報告日期：101年7月30日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵研討會（Workshop）報告

頁數 17 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/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

張益維/台灣電力公司/核能三廠/主辦營運測試專員/08-8893470-2441

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：101 年 6 月 24 日至 101 年 6 月 30 日 出國地區：法國

報告日期：101 年 7 月 30 日

分類號 / 目：

關鍵詞：反應爐冷卻水泵、RCP、軸封、反應爐冷卻水、廠區全黑事故、SBO、PSDS

內容摘要：(二百至三百字)

1. 壓水式核電廠反應爐冷卻水泵維護為電廠重要工作項目之一。反應爐冷卻水泵一旦故障，可能使電廠無法發電，甚者釀成巨大的損失。熟悉反應爐冷卻水泵維護技術使其維持正常功能是確保反應爐冷卻水泵運轉與安全最恰當的維護方法。

2. AREVA 公司今年舉辦反應爐冷卻水泵研討會（Workshop），會中討論近年該泵在維護及運轉上之各種重要項目，包含泵內部組件、泵軸封及馬達等議題，並有日本福島事件與電廠全黑事故時之相關報告可供核三廠參考。

3. 針對此次研討會內容，本報告篩選出對核三廠較具參考價值之二項軸封設計修改措施，分別為 Hydrodynamic Seals 及 Passive ShutDown Seal(PSDS)設計，此二項設計皆可強化福島事件後電廠對意外事故之應變能力。

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

目 次

	(頁碼)
一、目 的	1
二、過 程	1
三、心 得	1
四、建 議	16

一、目的：

- (一) 壓水式核電廠反應爐冷卻水泵 (Reactor Coolant Pump, 以下簡稱 RCP) 維護為機械組重要工作項目之一。RCP 一旦故障，可能使電廠無法發電，甚者釀成巨大的損失。熟悉 RCP 維護技術使其維持正常功能是確保 RCP 運轉與安全最恰當的維護方法。
- (二) AREVA 公司今年舉辦反應爐冷卻水泵研討會 (Workshop) 以討論近年該泵在維護及運轉上之各種重要議題，藉著會議中知識與經驗交流，使核三廠在此方面能更精進，以增進核三廠對該泵之維護成效及確保機組運轉安全。

二、過程：

- 101 年 06 月 24 日~06 月 25 日 往程 (桃園—法國里爾)
- 06 月 26 日~06 月 27 日 參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵研討會 (Workshop)
- 06 月 28 日~06 月 28 日 返程 (法國里爾—法國巴黎)
- 06 月 29 日~06 月 30 日 返程 (法國巴黎—桃園)

三、心得：

(一) 核三廠設備簡介：

1. 核三廠是目前國內唯一一座壓水式 (PWR) 核能發電廠，其反應爐冷卻水系統壓力維持在 157 kg/c m^2 (2235 psig)、溫度則維持在 292 至 308 $^{\circ}\text{C}$ 左右，使反應爐冷卻水保持在過壓狀態不致沸騰 (飽和壓力 157 kg/c m^2 時，飽和溫度應為 344°C)。反應爐冷卻水流經反應爐爐心，將核分裂反應所產生的大量熱能帶走，流經熱端管路 (Hot Leg) 到蒸汽產生器 (Steam Generator, 以下簡稱 SG) 管側，以加熱殼側飼水成為蒸汽 (約 70 kg/c m^2 、 1000 psig 左右) 後用之推動汽機發電。反應爐冷卻水經過 SG 後，溫度降低，由 RCP 經冷端管路 (Cold Leg) 送回反應爐爐心重複循環。壓水式核能發電廠發電流程圖如圖 1：

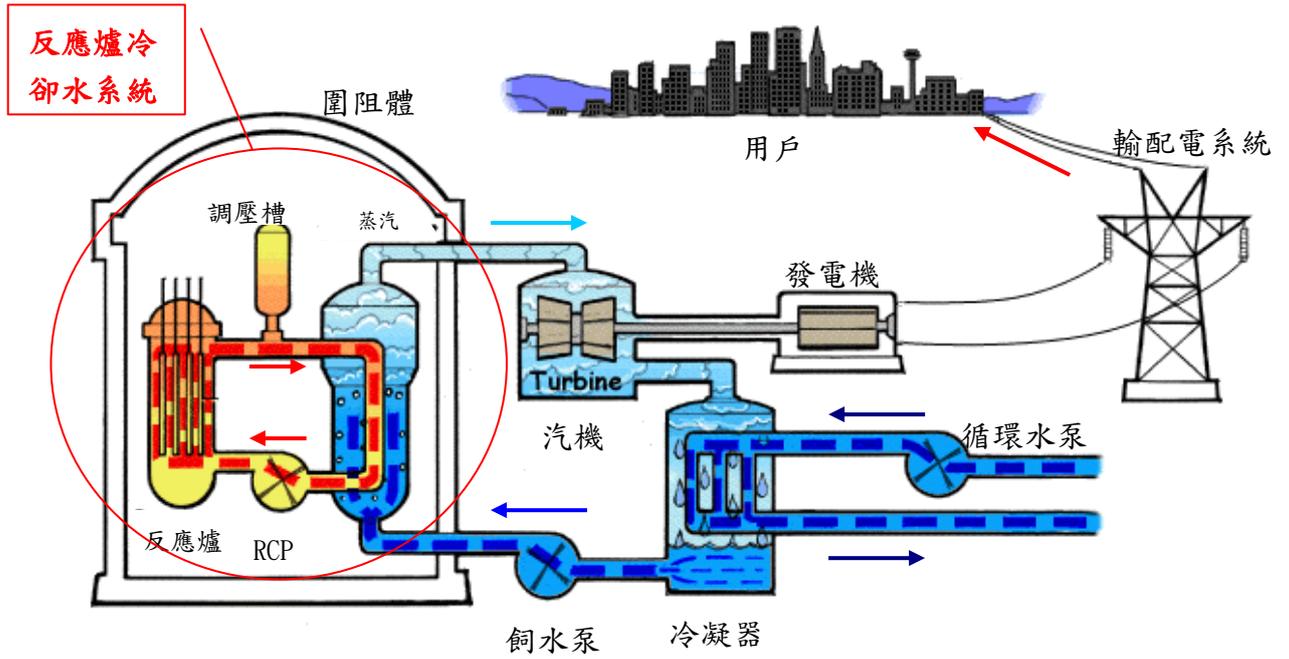


圖 1、壓水式核能發電廠發電流程圖

2. RCP 構造，如圖 2：

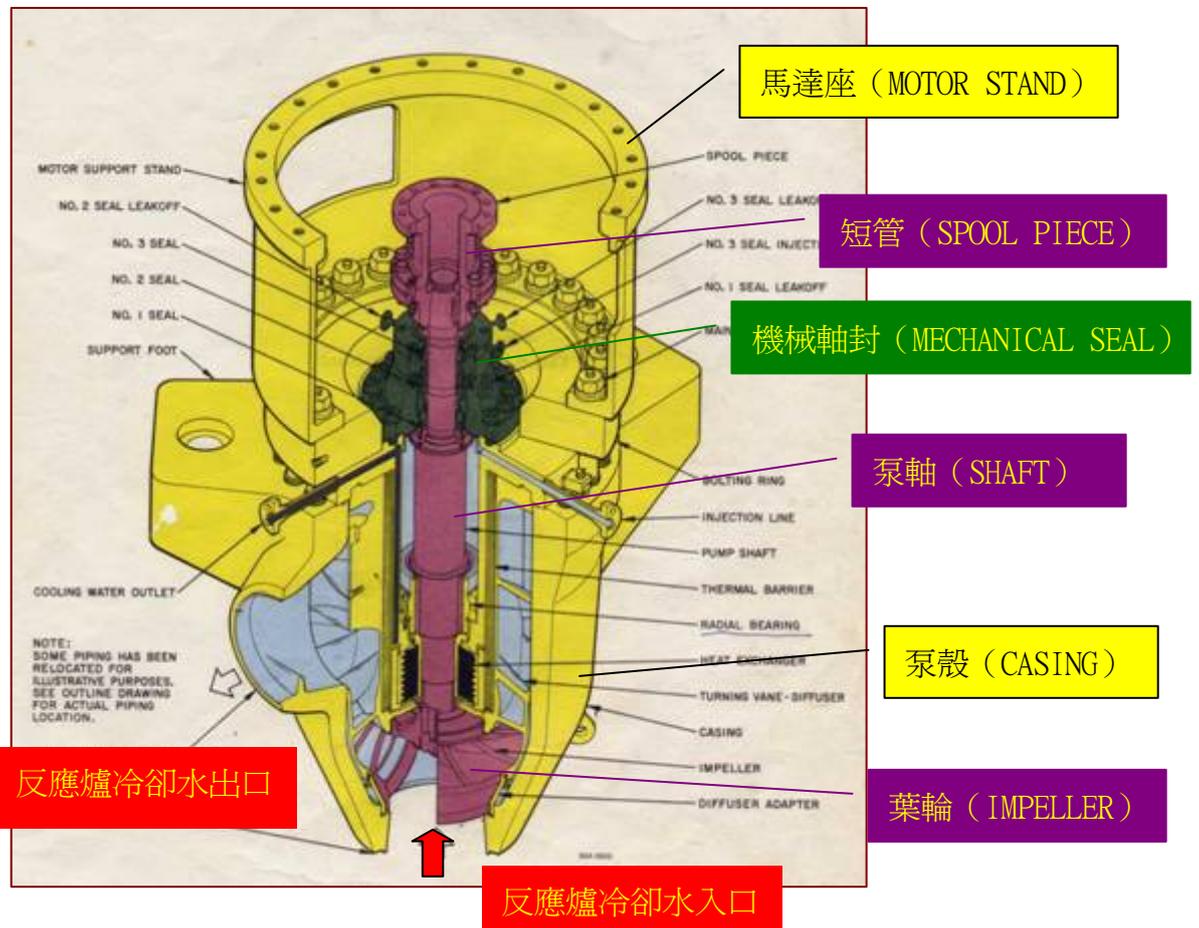


圖 2、RCP 構造

製造廠家：西屋公司（WESTINGHOUSE）

廠家型號：93A-1

型式：單級直立式離心泵

馬達功率：7000HP

轉速：1186RPM

3. RCP 機械軸封構造：

(1). 本廠 RCP 機械軸封屬於控制洩漏式軸封，其主要構造可分為三大部分，分別為一號軸封、二號軸封及三號軸封，其中二、三號軸封因為考慮現場裝配的便利性及維修等因素而組合在一起，合稱為彈筒狀軸封（CARTRIDGE SEAL）。此三道軸封構造詳如圖 3、4：

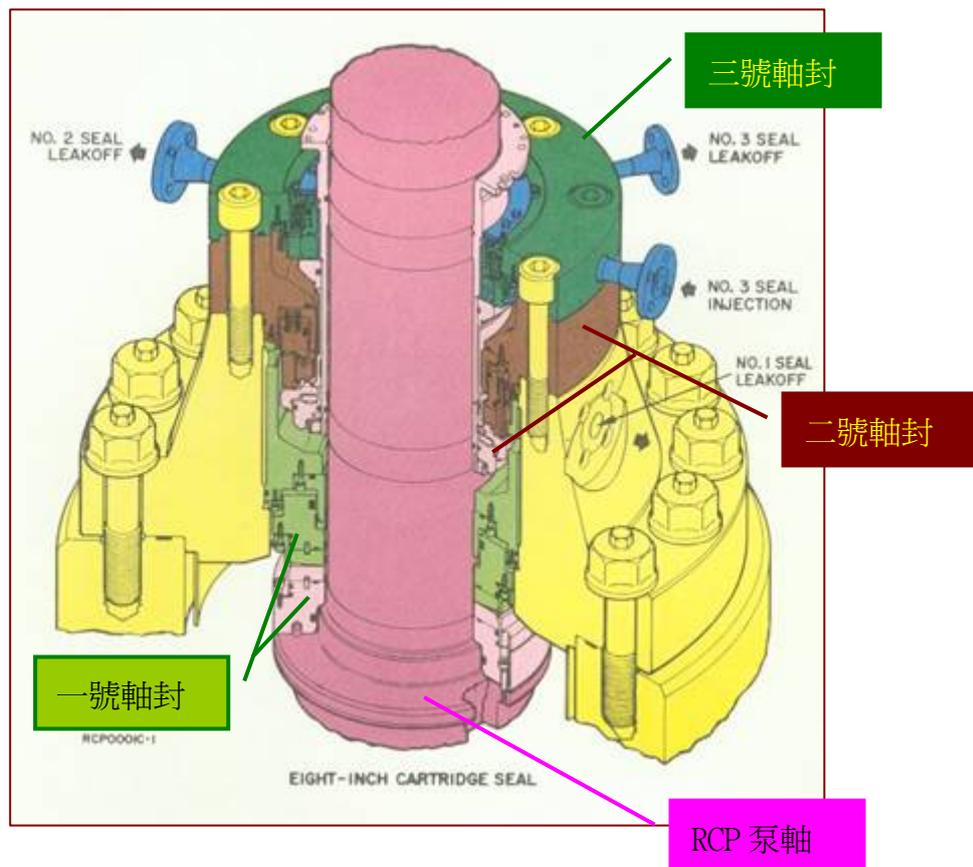


圖 3、RCP 機械軸封構造圖

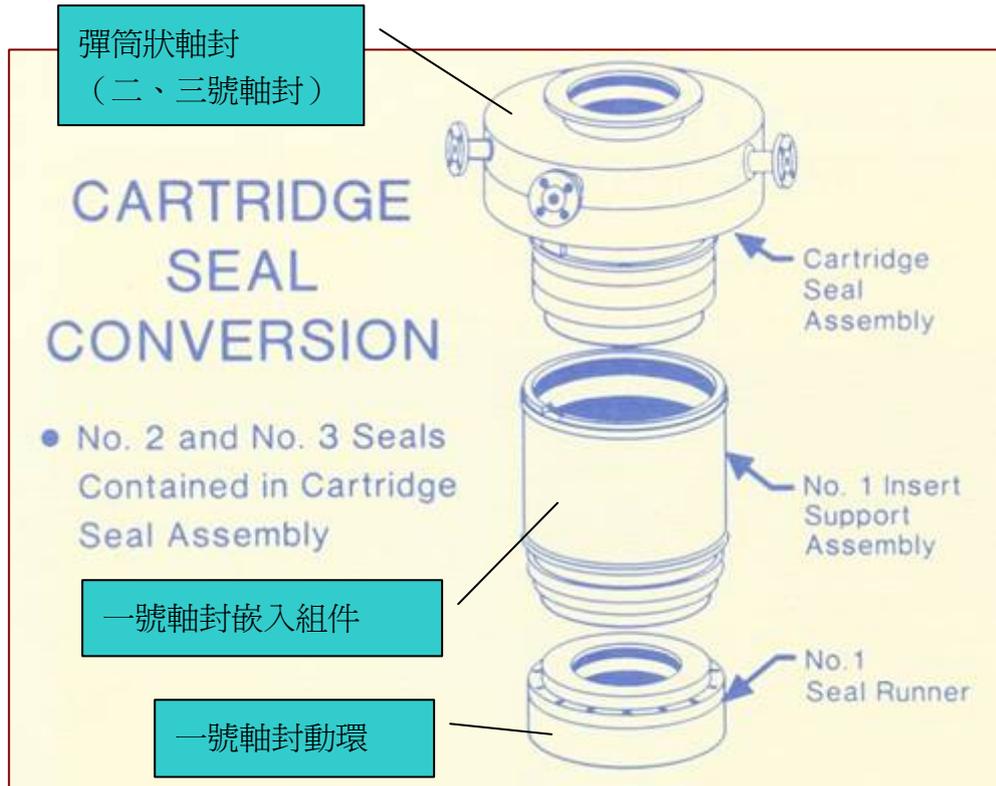


圖 4、RCP 機械軸封構造圖

(2).RCP 機械軸封如上所述共分為三道軸封，其中一號軸封承受大部分的軸封注水差壓，其組成可大致分為動環 (RUNNER)、封環 (SEAL RING) 及嵌入件 (INSERT)；而二號軸封和三號軸封亦有動環、封環及嵌入件的設計。詳細剖面構造如圖 5：

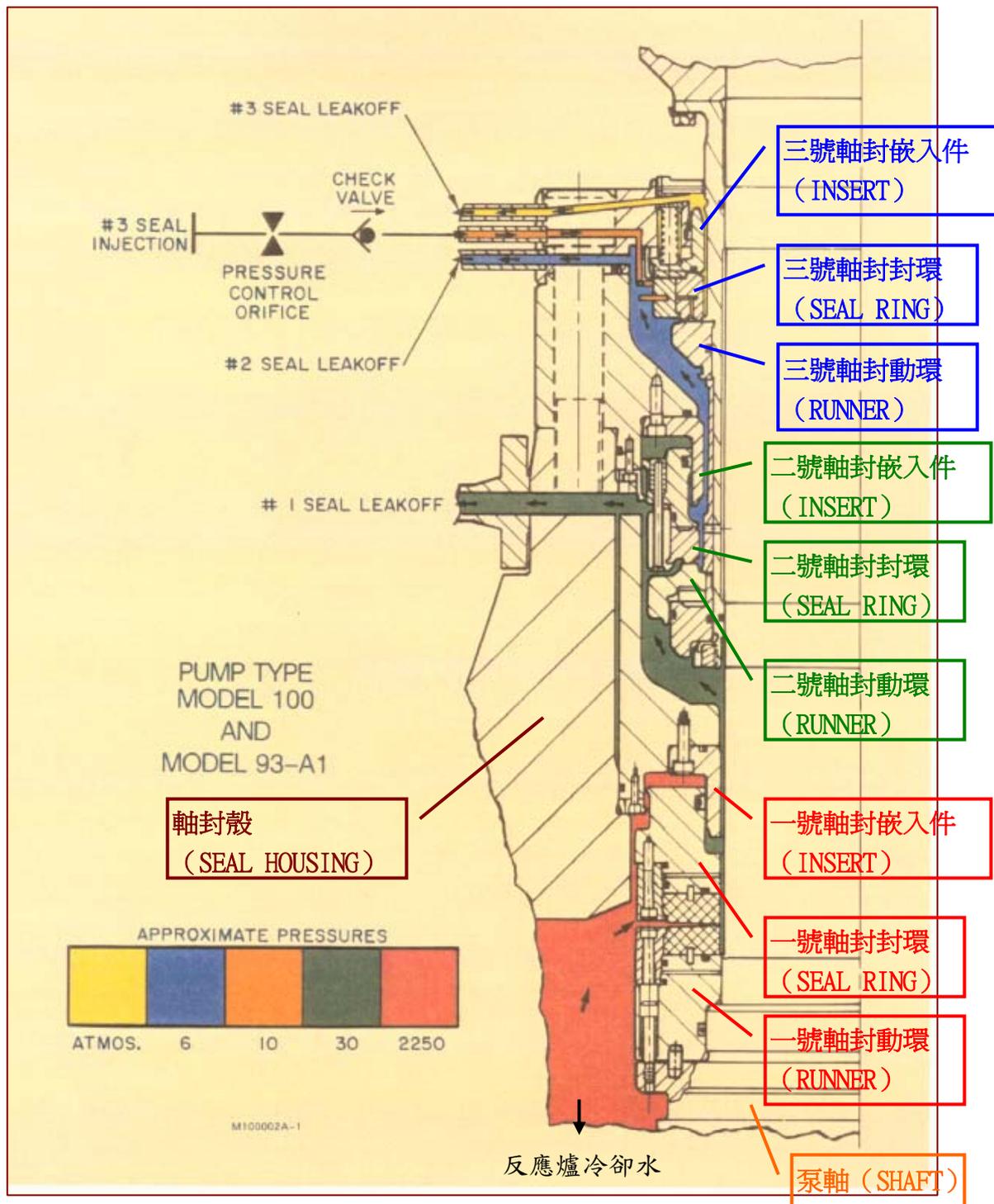


圖 5、RCP 機械軸封詳細剖面構造圖

- (3). 當 RCP 正常運轉時，一、二、三號軸封之動環隨泵軸轉動而轉動，而封環不隨泵軸轉動，但可配合嵌入件上下移動。動環及封環間有軸封注水 (SEAL INJECTION) 注入，其功用除潤滑及冷卻軸封之外，並在動、封環間形成一層水膜將封環頂起。各道軸封注水流量及洩

漏 (LEAK OFF) 流量如圖 6。

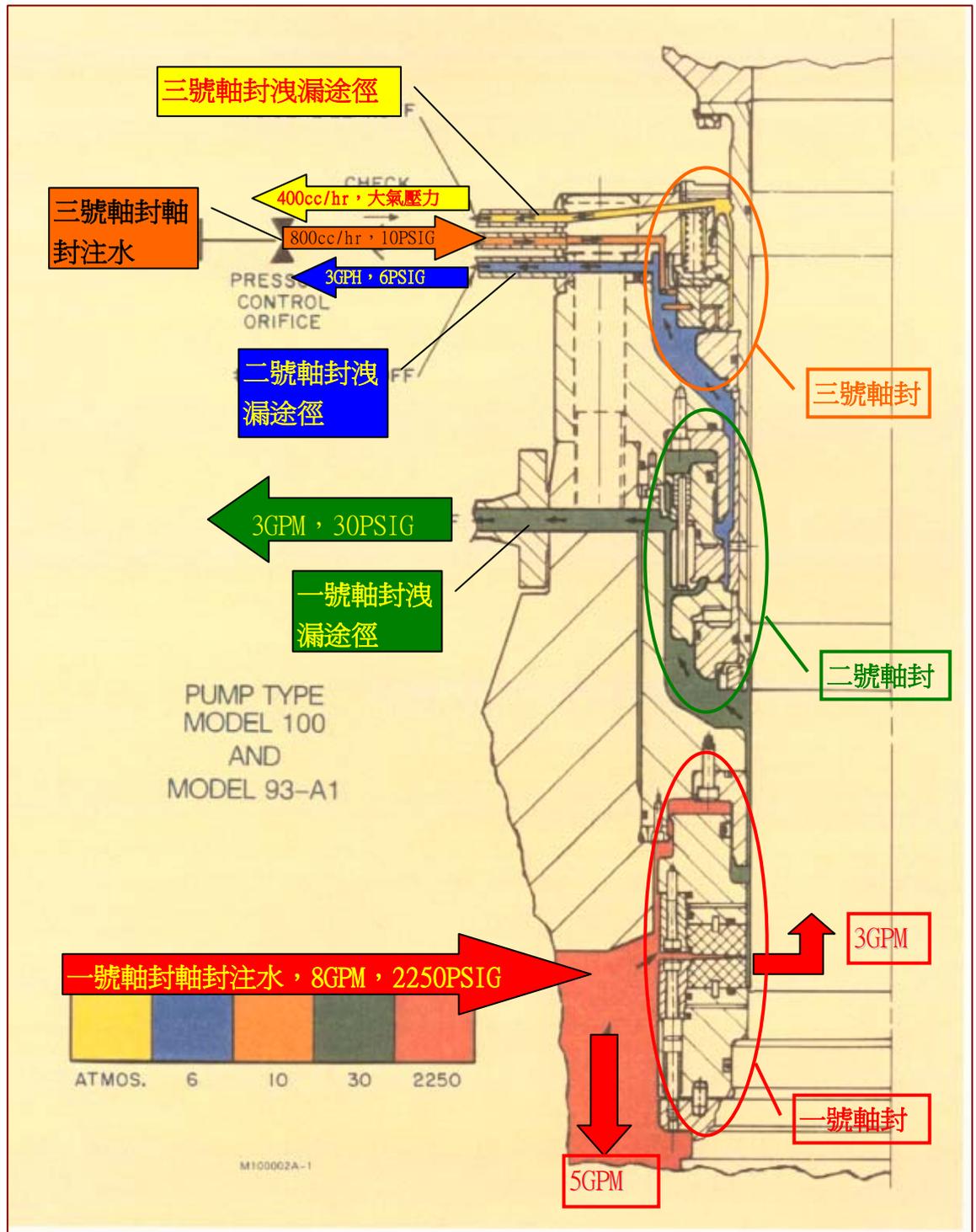


圖 6、RCP 機械軸封軸封注水流量及洩漏流量圖

- (4). 機組正常運轉時，因為一號軸封必須承受大部分的軸封注水差壓，故在整組 RCP 機械軸封中就屬一號軸封最為關鍵，也是整組 RCP

機械軸封維護的重點。一號軸封的詳細構造及相片如圖 7。

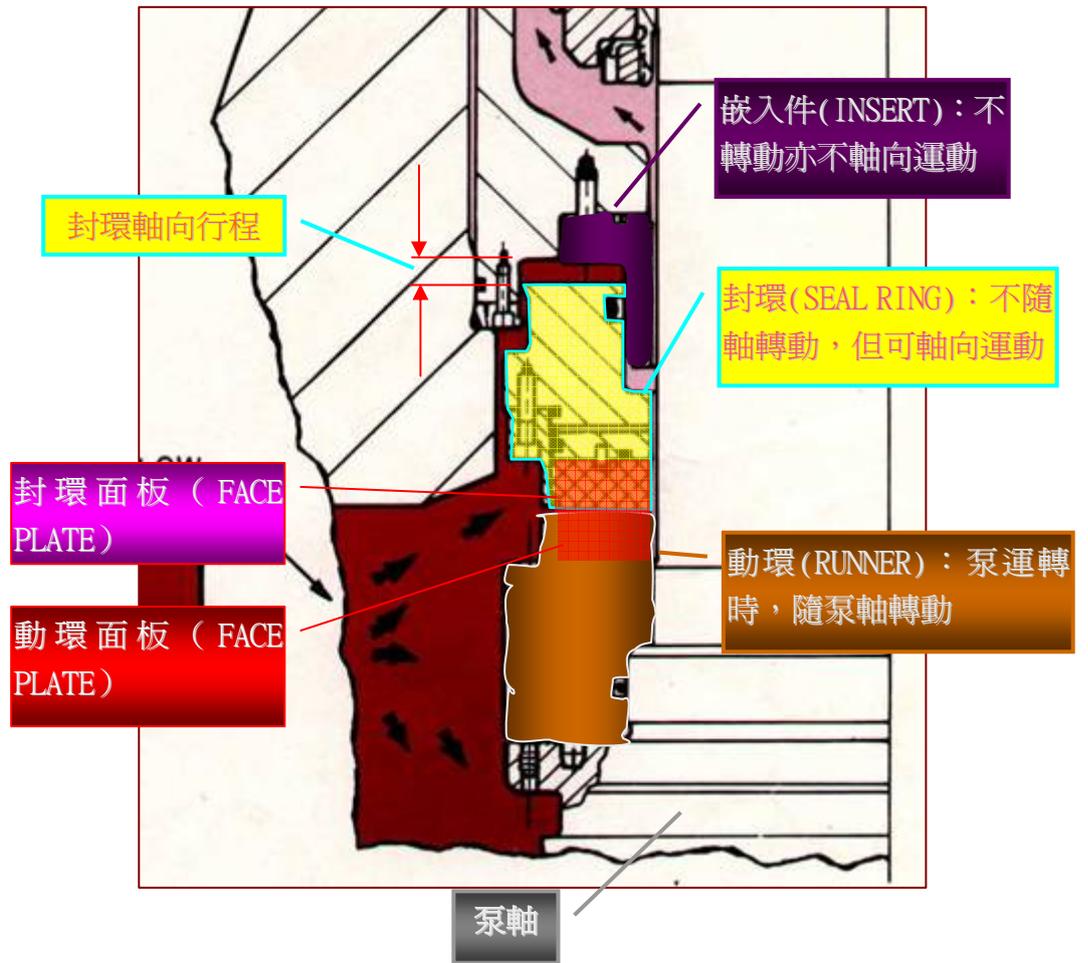


圖 7、一號軸封詳細構造圖及相片 1/3

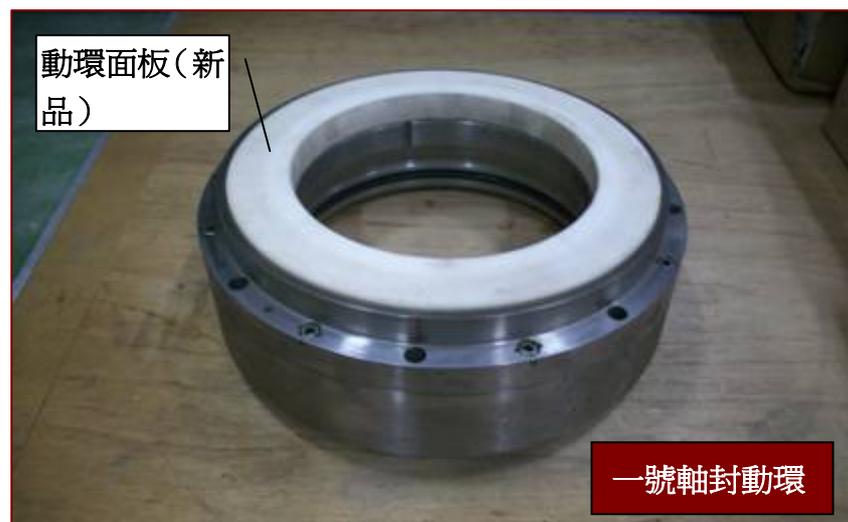


圖 7、一號軸封詳細構造圖及相片 2/3

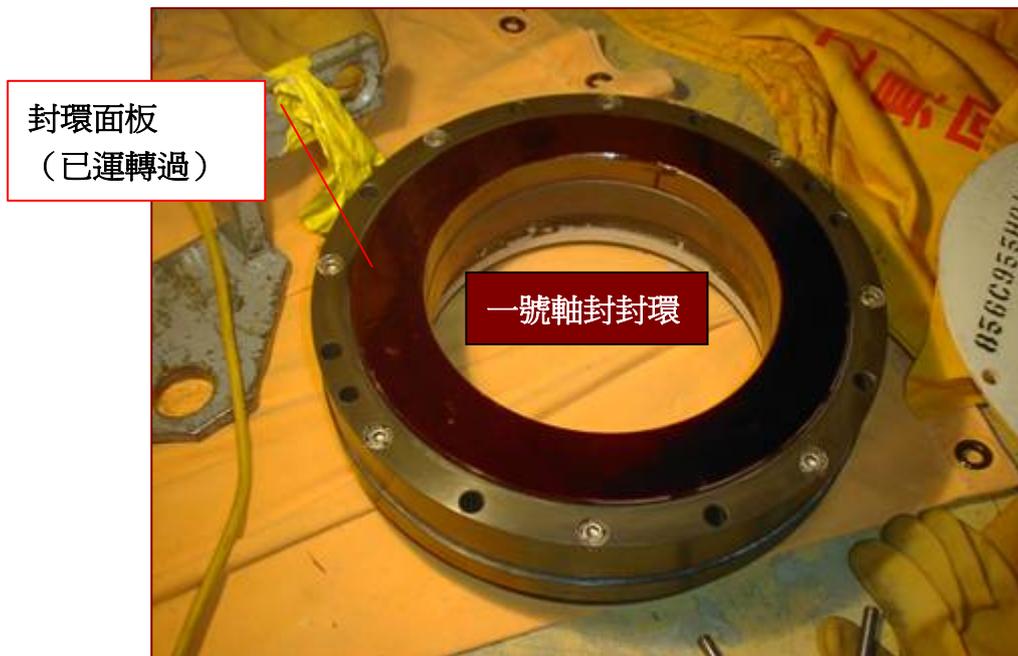
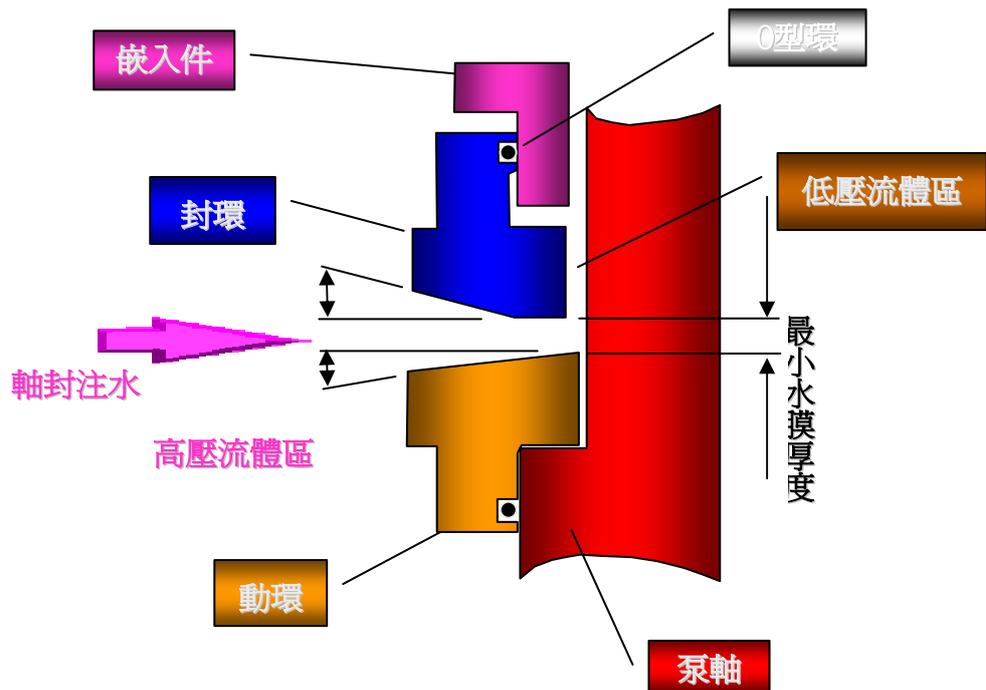


圖 7、一號軸封詳細構造圖及相片 3/3

(二) 運轉中 RCP 機械軸封相關事項：

1. 一號軸封於軸封注水建立後，其封環會被頂起使之不與動環接觸並允許洩漏流量通過，其壓力平衡圖如圖 8。



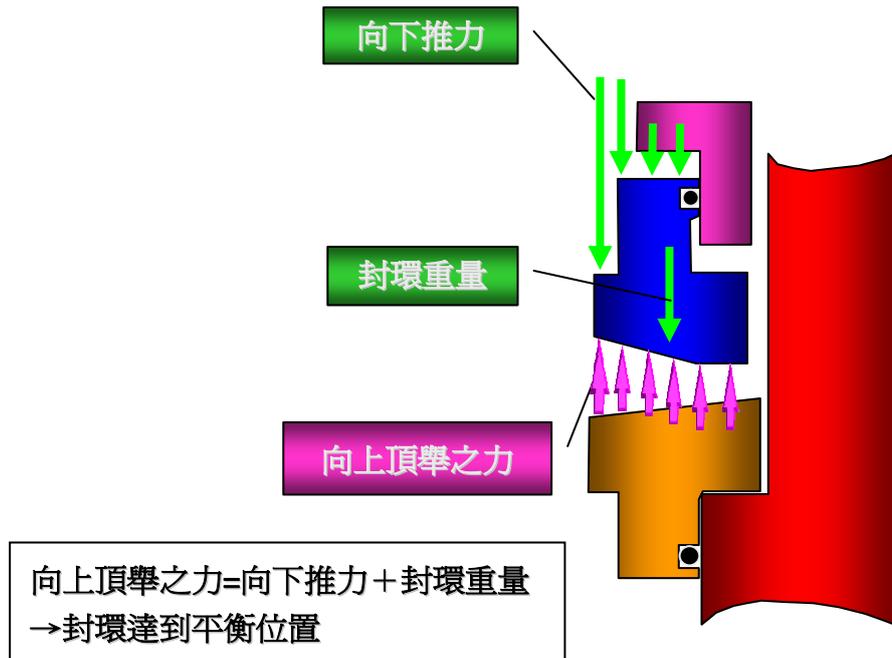


圖 8、一號軸封壓力平衡圖

2. 正常運轉時，一號軸封洩漏流量會隨著一號軸封差壓而變化，若洩漏流量落在廠家所提供之運轉範圍內，則此洩漏流量為可接受值；反之，若洩漏流量落在廠家所提供之運轉範圍外，則代表 RCP 機械軸封性能並不符合接受標準，電廠必須依現場狀況採取因應措施。一號軸封洩漏流量運轉範圍如圖 9：

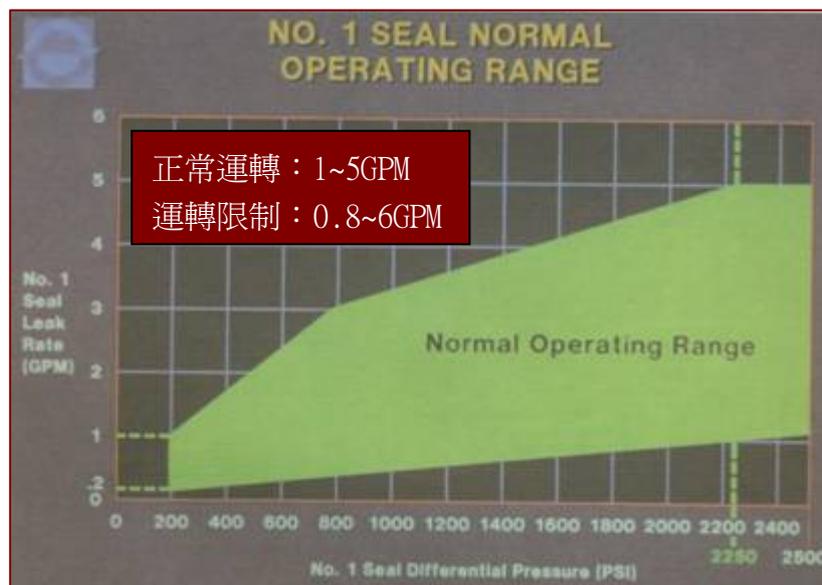


圖 9、一號軸封洩漏流量運轉範圍

3. 核三廠正常運轉時，RCP 一號軸封承受約 2200Psig 之差壓，二號軸封承受約 24Psig 之差壓，三號軸封承受約 10Psig 之差壓，故一號軸封運轉條件最為嚴苛，一旦一號軸封功能失效，依規定機組必須立即停機。
4. 核三廠運轉至今發生數次 RCP 一號軸封洩漏率異常情形，給運轉維護人員帶來困擾，其中二號機曾在 95 年 2 月因 RCP B 台一號軸封洩漏率低於運轉限值而停機檢修，造成公司極大損失，所以如何維持 RCP 一號軸封洩漏率保持於正常範圍內是電廠人員十分重要之課題。另外核三廠曾於 90 年 3 月發生廠區全黑事故(Station Blackout, 以下簡稱 SBO)，當時經過評估及實際拆解一號機 RCP A 台機械軸封後，證實一號機 3 台 RCP 雖然因全黑事故曾喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)一段時間，但機械軸封密封功能仍維持良好，反應爐冷卻水並未經由 RCP 機械軸封洩漏至外界。

(三) 研討會中較具參考價值之軸封設計修改措施：

1. Hydrodynamic Seals：

- (1).核三廠現行 RCP 一號軸封屬於 Hydrostatic 設計，其意義代表在靜態狀況下，亦即泵軸並未旋轉時，一號軸封便存在洩漏量。
- (2).核三廠現行 RCP 二、三號軸封屬於 Hydrodynamic 設計，其意義代表在動態狀況下，亦即泵軸要旋轉，二、三號軸封才會有洩漏量。
- (3).核三廠現行運轉條件設計下，RCP 一號軸封承受最高之差壓，一旦一號軸封功能失效，機組便必須立即停機。此次會議中，AREVA 公司提出 Hydrodynamic Seals 設計，將軸封注水與洩漏路徑間之差壓均分為 3 等份，由三道軸封分別承受，故即使一號軸封失效，其二號、三號軸封仍可發揮功用，舒緩現行單靠一號軸封承受極高差壓的設計，以下為 Hydrodynamic Seals 設計摘要：

a. Hydrodynamic Seals 組合圖如圖 10：

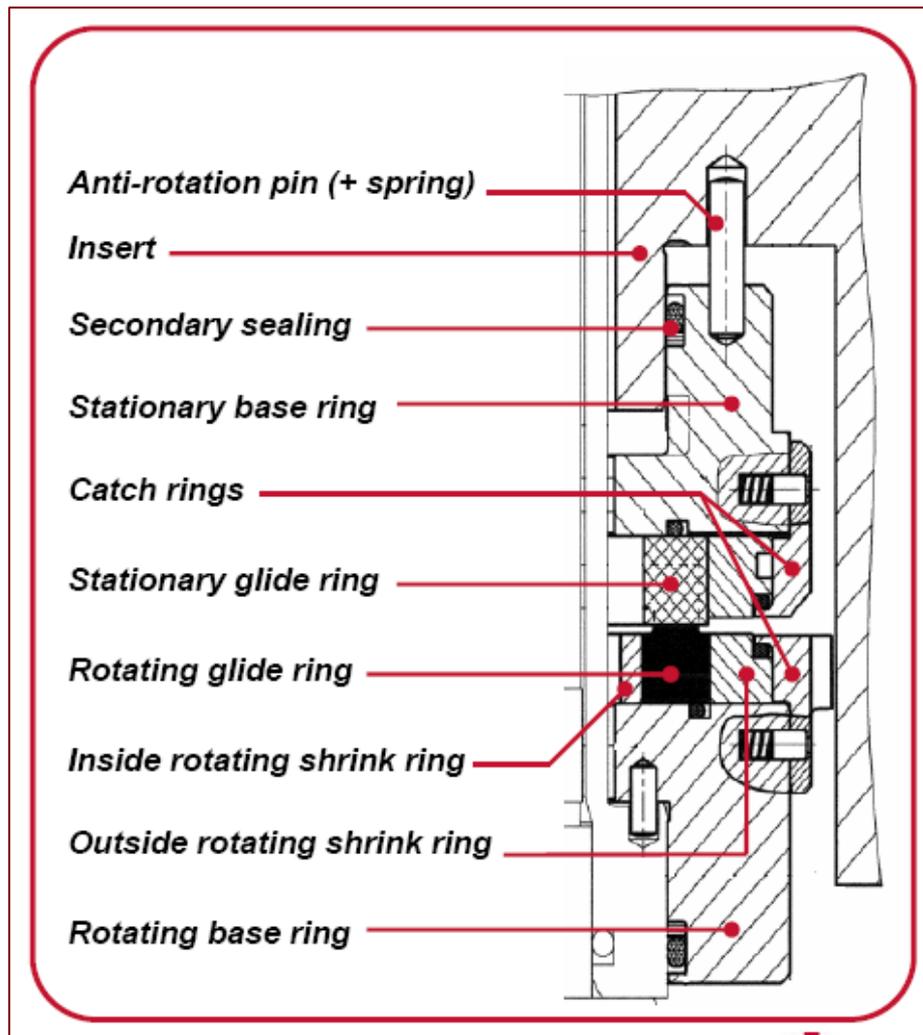


圖 10、Hydrodynamic Seals 組合圖

- b. Rotating ring 材質：石墨(carbon graphite)。
- c. Stationary ring 材質：碳化鎢。
- d. RCP 未運轉時，Rotating glide ring 與 Stationary glide ring 會接觸，此時二者間不會有洩漏流量；RCP 運轉後，Rotating glide ring 與 Stationary glide ring 不會接觸，二者會有 $< 5\mu\text{m}$ 之間隙，此時會有洩漏流量。
- e. 新增 Staging coil leak off line，正常運轉時此管路亦有流量。
- f. 已經有 150000 小時以上實際運轉經驗。
- g. Hydrodynamic Seals 示意圖如圖 11：

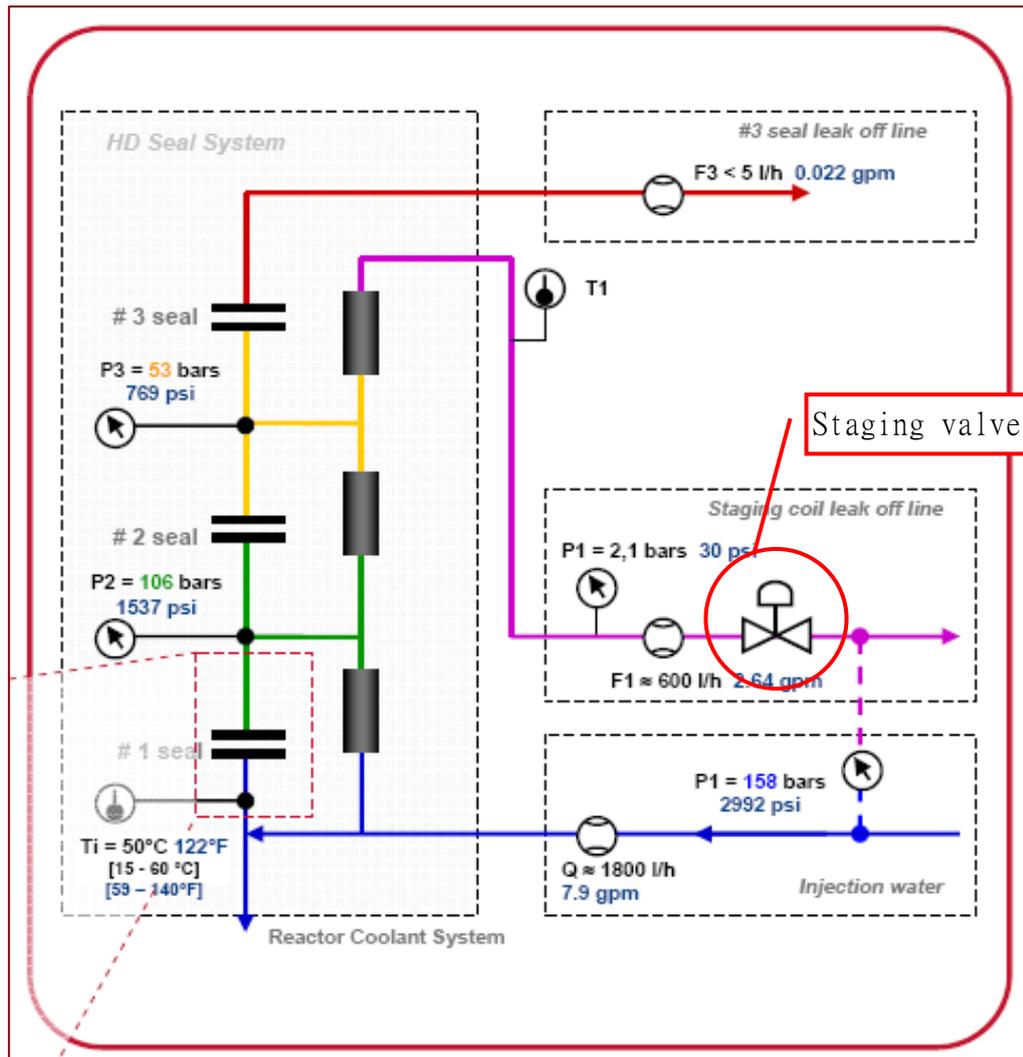


圖 11、Hydrodynamic Seals 示意圖

- h. 在 SBO 狀況下，可以關閉 Staging valve，隔離過多軸封洩漏流量，也可減緩軸封進口之熱效應。
- i. 因為每道軸封在設計上可承受全部約 2300Psig 差壓，即使一道或二道軸封喪失功能，RCP 仍有可能允許運轉。
- j. 因可減少反應爐冷卻水自 RCP 軸封處洩漏，可降低爐心曝露風險。
- k. 設計目標為 10 年維護 1 次。
- l. 經測試結果發現，在嚴苛環境下，至少 120 小時可保持無大量洩漏。

m. 93A-1 型式 RCP 之 Hydrodynamic Seals 仍在設計階段，尚未實際生產及應用，故無運轉實績。

2. Passive ShutDown Seal(PSDS)：

(1).核三廠現行 RCP 一號軸封嵌入件如圖 12 所示，一旦發生 SBO 事故，或喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)一段時間，反應爐冷卻水會從一號軸封動環及封環間空隙循著嵌入件洩漏出去。

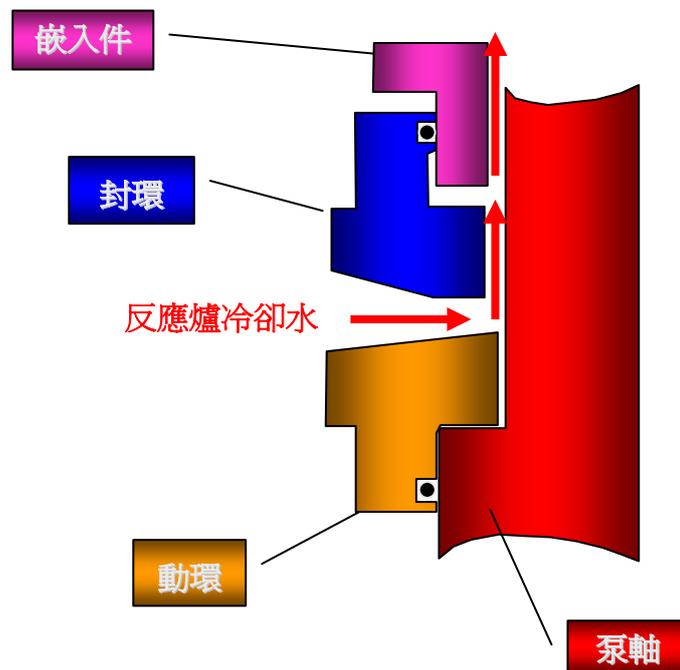


圖 12、RCP 一號軸封嵌入件

(2). 福島事件後，針對 SBO 事故，或電廠發生喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)事件，AREVA 公司提出 Passive ShutDown Seal (以下簡稱 PSDS) 設計，以下為 PSDS 設計摘要：

a. 發生 SBO 事故後，約 6 分鐘後 RCP 會全停，其轉速、時間與一號軸封溫度關係如圖 13。

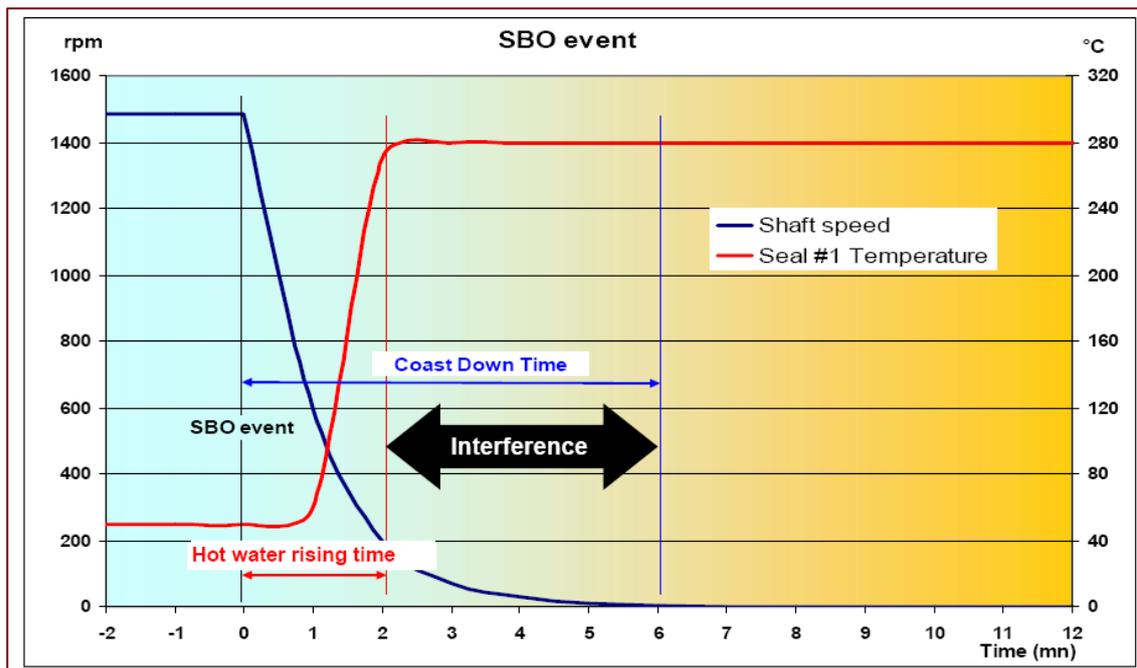


圖 13、SBO 事故後，RCP 轉速、時間與一號軸封溫度關係圖

b. PSDS 組合圖如圖 14：

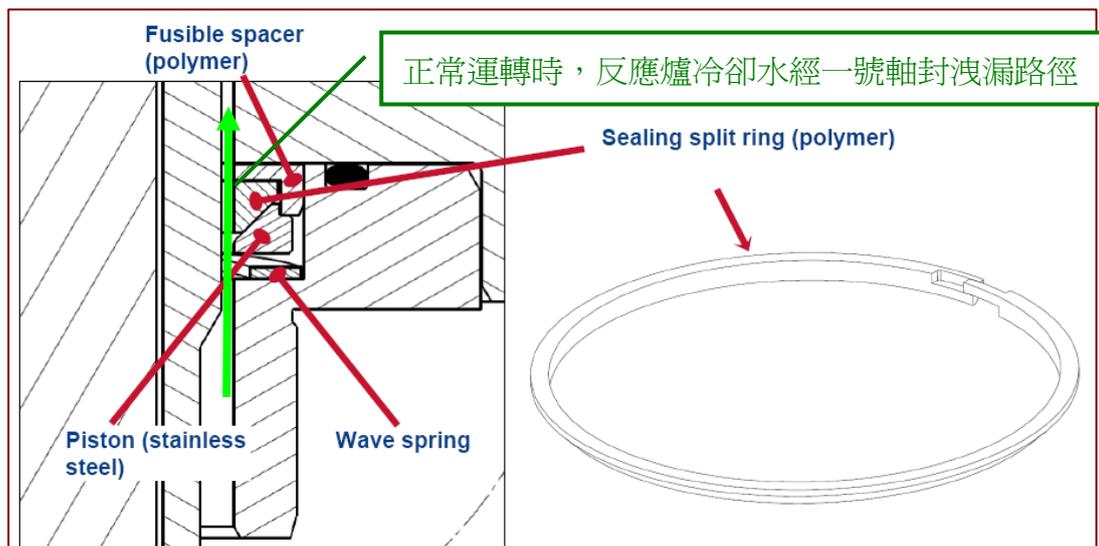


圖 14、PSDS 組合圖

c. 當電廠發生 SBO 事故，或喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)事件後，RCP 一號軸封溫度會隨之上升而將 Fusible spacer 熔解，此時 Sealing split ring 及 Piston 因 Wave spring 彈力作用而與泵軸外徑接觸，使反應爐冷卻水不會自該間隙洩漏，如圖 15。

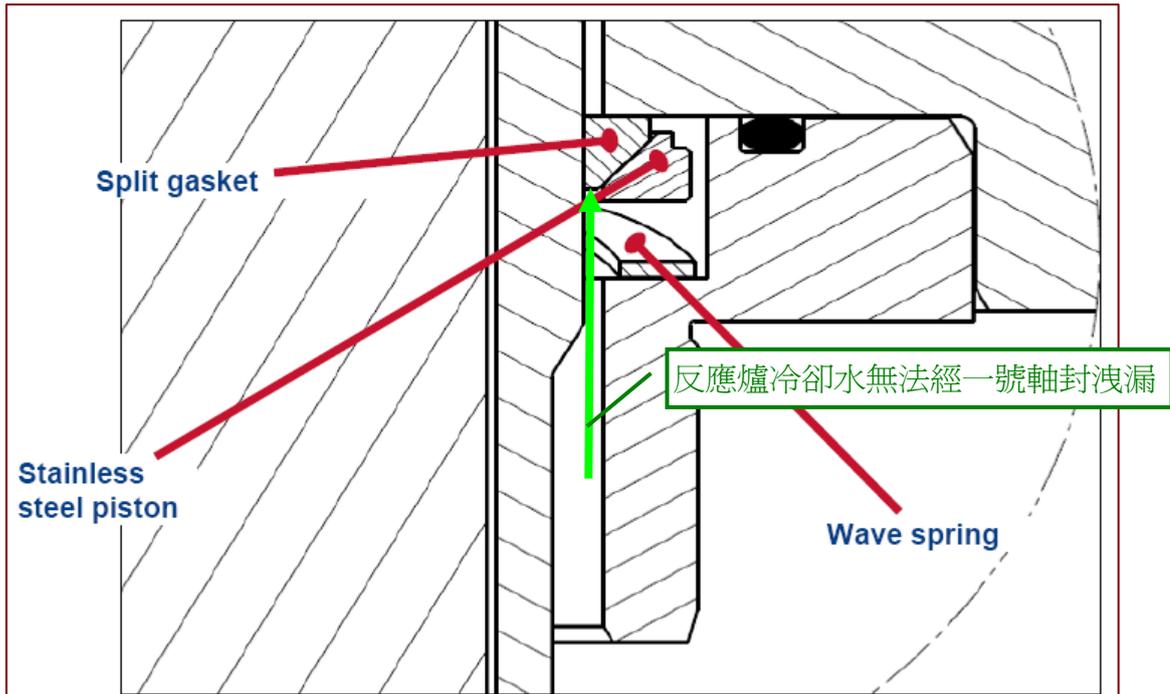


圖 15、Fusible spacer 熔解後之 PSDS 圖

d. PSDS 相片如圖 16：

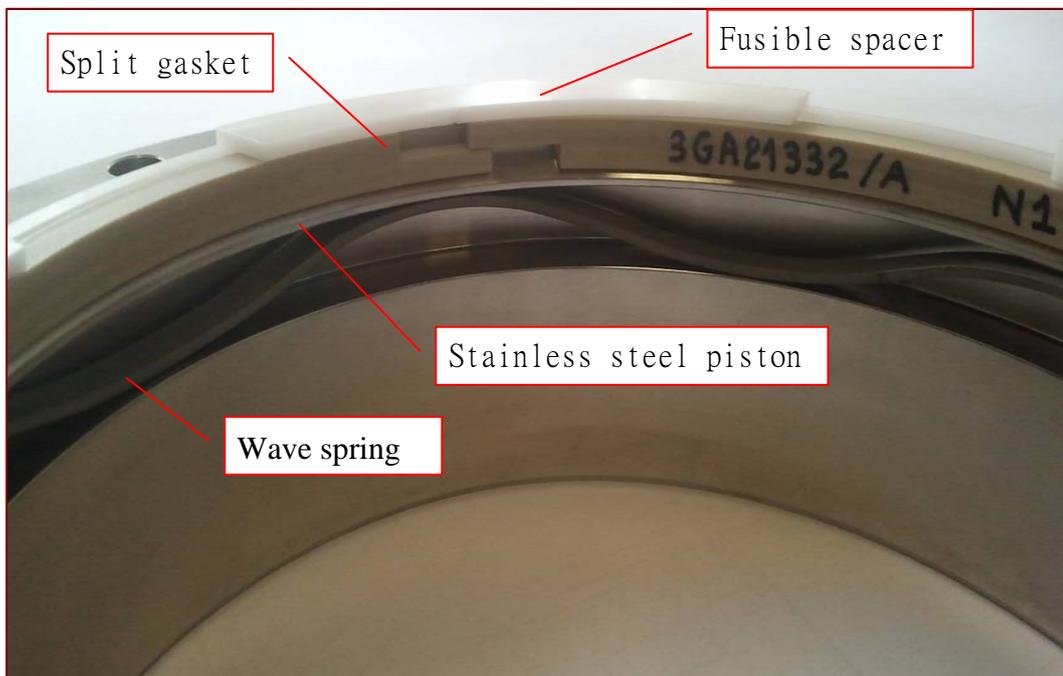


圖 16、PSDS 相片

e. AREVA 公司測試結果顯示，在 PSDS 動作後，持續維持 2250Psig 及 280°C 環境 1 小時，其洩漏率為 0.09gpm。

f. AREVA 公司並執行 20 次 SBO 暫態模擬測試，PSDS 在此 20 次測試當中皆成功動作。配置中溫材質 Fusible spacer 之 PSDS 在 SBO 發生後約 9 分鐘會動作，如圖 17。

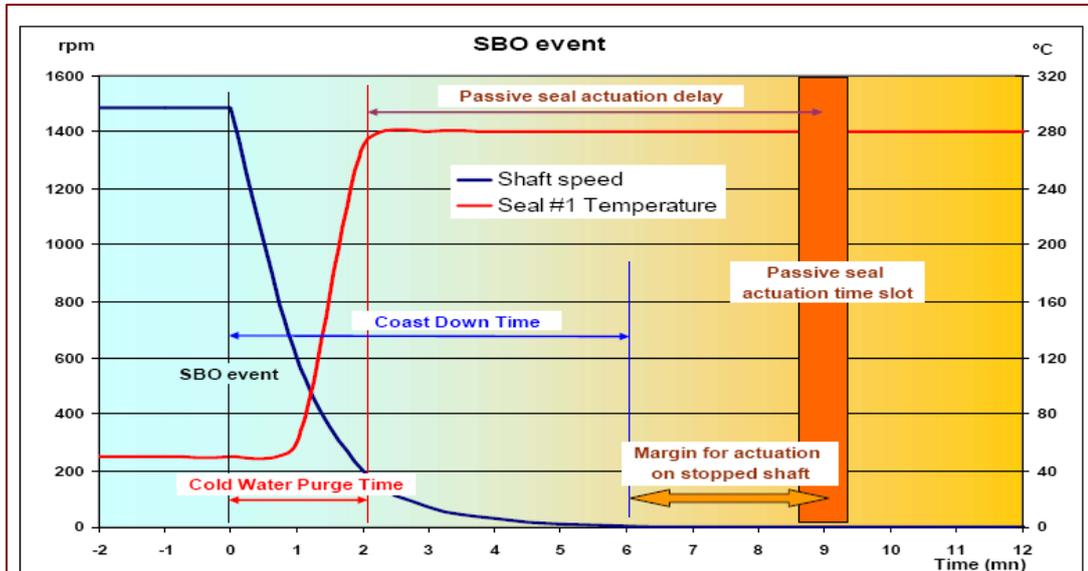


圖 17、配置中溫材質 Fusible spacer 之 PSDS 動作時序圖

g. PSDS 產品有許多測試尚未完成，目前並無實際應用。

四、建議：

- (一) Hydrodynamic Seals 及 Passive ShutDown Seal(PSDS)均為近期 RCP 機械軸封上新型設計。Hydrodynamic Seals 設計較為複雜，除可減緩電廠遭遇 SBO 事故，或發生喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)事件時，反應爐冷卻水經由 RCP 機械軸封洩漏之量，其將軸封注水與洩漏路徑間之差壓均分為 3 等份，由三道軸封分別承受，即使一道或二道軸封喪失功能，RCP 仍有可能允許運轉，可舒緩現行單靠一號軸封承受極高差壓的設計。
- (二) Passive ShutDown Seal(PSDS)設計較為單純，僅修改一號軸封嵌入件，其功能亦為電廠遭遇 SBO 事故，或發生喪失軸封注水及熱屏蔽冷卻水(CCW)事件時，可減少反應爐冷卻水經由 RCP 機械軸封洩漏之量。
- (三) 核三廠 RCP 屬西屋公司 93A-1 型式，上述二項設計目前尚未生產出能應用於核三廠 RCP 之產品，核三廠可密切注意其後續發展狀況，以強化福

島事件後電廠對意外事故之應變能力。

- (四) 赴國外開會可增廣見聞，加強自身對專業技術涉入的深度及廣度，不但對個人職場生涯增添一番歷練，藉著出國前後行程規劃及食宿的安排，加上開會時與國外人士的互動，可讓開會人員在公務上及待人接物方面都成長不少。建議公司內能擬訂獎勵辦法，鼓勵公司同仁踴躍參加英文或其他外文檢定進而取得公務出國資格，如此可增加公司高層選派適當同仁執行公務出國計畫之彈性，也可藉著公務出國之機會，替公司培養更多優秀之同仁。
- (五) 本次出國參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵研討會（Workshop），承蒙各級長官支持及國外機構協助配合，希望所獲得之相關資料及經驗，日後可做為本公司強化意外事故發生時，RCP 應變能力之參考。