

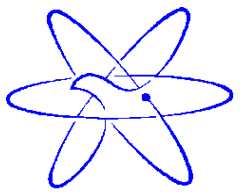
影響執行FLEX策略成效之 若干因素探討

原能會核安管制研究中心試運組

張欽柏

105年 9月 6 日





大綱

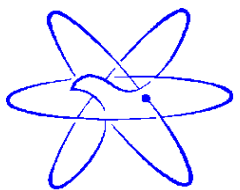
- BWR

- 抑壓池溫度超過設計限值
- 抑壓池水位不斷累積
- RCIC Pump NPSH (Net Positive Suction Head)

- PWR

- 圍阻體排氣策略
- ELAP Return to Power
- PWR FLEX策略比較：核三、Surry & North Anna
- 蓄壓槽氮氣注入RCS





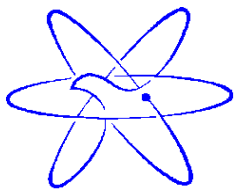
抑壓池溫度超過設計限值

➤ Grand Gulf計算結果*

Phase 1	Designed limit	Max. value (by calculation)
SP	215°F	220°F

➤ 核二廠圍阻體之設計壓力、溫度及 SBO 後 8小時的壓力、溫度(核二廠OIP)

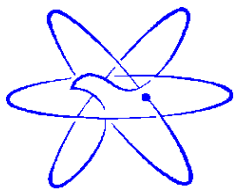
	乾井	反應器廠房	抑壓池
設計壓力	42psia	30psia	30psia
SBO後8小時的壓力	25.3psia	20.8psia	20.8psia
設計溫度	330°F	200°F	200°F
SBO後8小時的溫度	243.2°F	145.6°F	193.5°F



抑壓池水位不斷累積

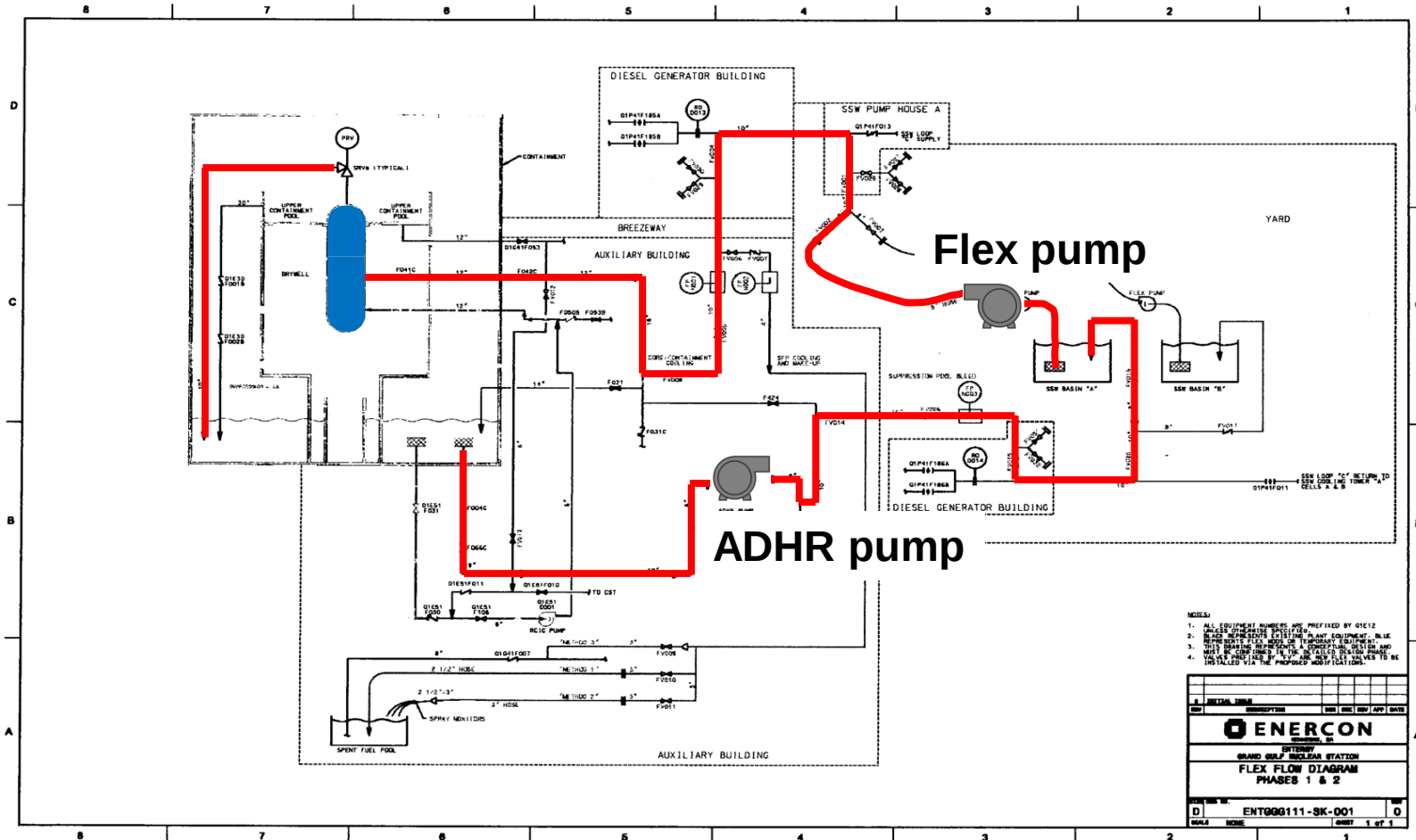
- Grand Gulf
 - NRC指出feed and vent策略使用FLEX pump持續注水到RPV，再經過ADS/SRV溢流至抑壓池，會使得抑壓池水位不斷上升，最終淹過堰牆、流入乾井。
 - Grand Gulf於回覆中說明，乾井內並無FLEX策略所需之設備，因此對於電廠執行相關策略並無影響。
- 核二廠
 - 以 FLEX 低壓注水策略將正常水源或後備水源注入爐心，同樣為feed and vent策略
- 如冷卻系統長期無法重建，Grand Gulf和核二廠均面臨抑壓池水位不斷累積議題



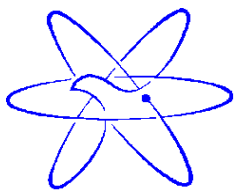


Grand Gulf 注水策略

Original :
Phase 2 core cooling & containment integrity



Feed and Bleed !! SP water level is controlled



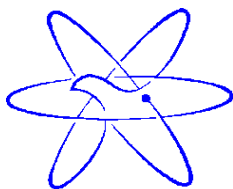
Grand Gulf – Phase Strategy

Revised :

Phase 2 & 3 core cooling & containment integrity

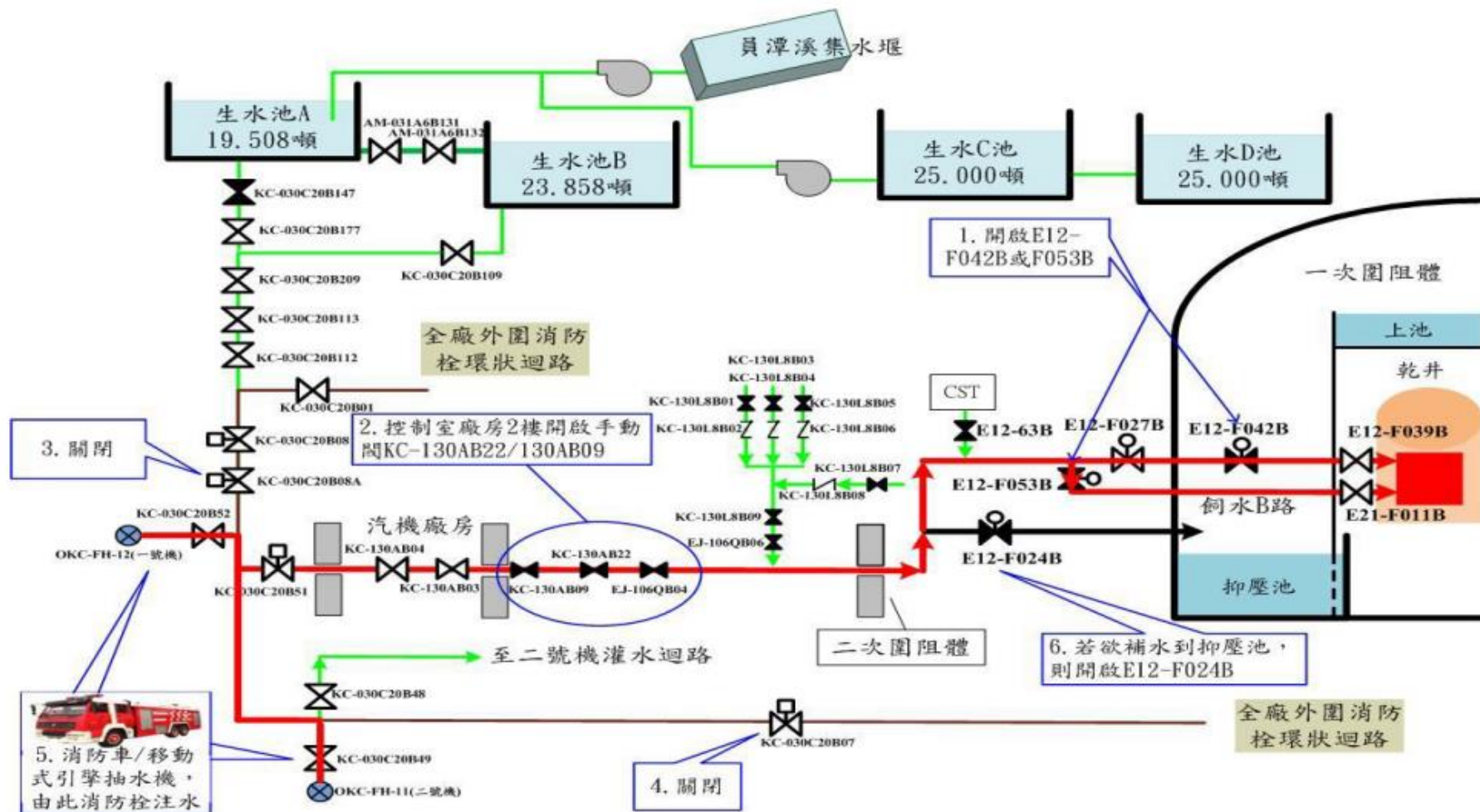
Feed and Bleed ➡ Feed and Vent

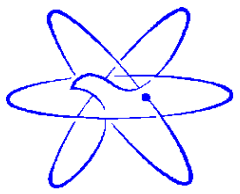




核二廠注水策略

附圖二：消防車或移動式消防泵注水進入反應爐(抑壓池)流程圖『經廠區消防栓』

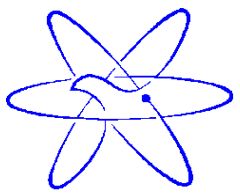




RCIC Pump NPSH

- 核二廠OIP Phase 2
 - 當CST水源耗盡，RCIC自動切換至抑壓池取水，並持續進行圍阻體排氣，以維持圍阻體各項參數在設計限值內。
 - 在RCIC切換至抑壓池取水期間，使用移動式FLEX設備從DST、ADST或消防管引接取水來補充至CST，並積極列置FLEX設備(消防抽水泵及消防車)從排洪渠道取水。待CST補水完成，RCIC可從抑壓池取水切換至CST取水模式運轉。
 - RCIC切換至抑壓池取水期間，池水溫度是否會超過RCIC NPSH限值？值得注意。





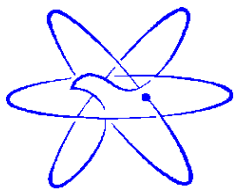
Grand Gulf – Phase Strategy

- Grand Gulf

■ 將水源從抑壓池轉換至上池，以避免NPSH不足，值得核二廠參考。

Elapsed time	Action
60sec	RCIC starts (suction from the suppression pool)
2hr ($T_s < 150^\circ\text{F}$)	Swap the RCIC suction from the suppression pool to the UCP
4hr	Depressurize the RPV (to 200~400psig) to maintain in the safe region of <u>HCTL</u> curve
4hr ($T_s < 200^\circ\text{F}$)	Initiate use of modified EOP containment vent path
24hr	Phase 1=>Phase 2, due to the water resources concern
72hr	Phase 2=>Phase 3, due to the <u>NPSH</u> concern of the FLEX pump

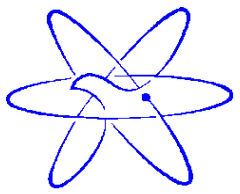




PWR討論大綱

- 圍阻體排氣策略
- ELAP Return to Power
- PWR FLEX策略比較：核三、Surry & North Anna
- 蓄壓槽氮氣注入RCS

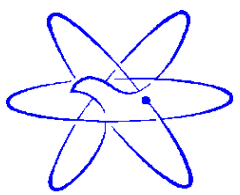




圍阻體排氣策略

- 超越設計基準事故發生時，如先執行圍阻體排氣，再進行圍阻體噴灑，可能會造成圍阻體毀損。
- SBO發生時，URG採用提早排氣之策略，西屋進行FCVS分析時則採用圍阻體盡可能不要排氣之策略(排氣越晚越好)
- URG所採用提早排氣之策略:將限縮了允許使用圍阻體噴灑系統之時間，同時也增加了圍阻體毀損機率

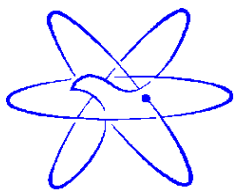




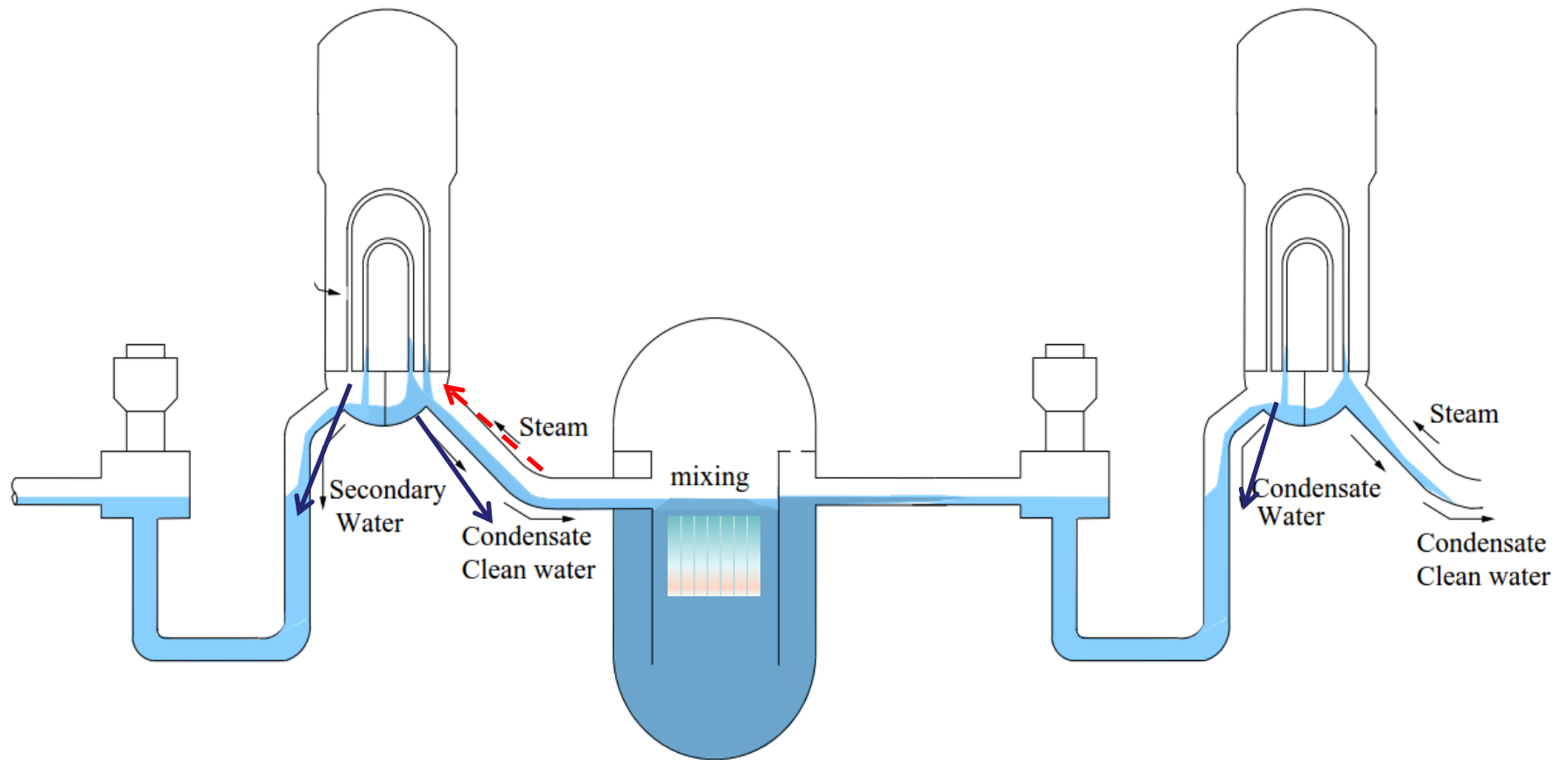
ELAP Return to Power

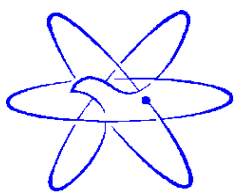
- 由於RPV inventory loss，使RPV內由自然對流模式轉成reflux cooling，蒸氣冷凝後形成deborated water可能在RCP suction leg等處聚集，RCS再循環後可能流進爐心加入正反應度。
- NRC FLEX審查補充導則(ML14161A643, July 1, 2014)
 - 自然對流停止&反應爐沸騰條件下，蒸氣在SG tubes冷凝，去硼酸水可能會聚集，RCS補水後使去硼酸水流進爐心而發生re-criticality。
 - 業界避免上述問題的建議作法，係恢復RCS的補水使自然對流得以維持。





Reflux Cooling-Boron stratification

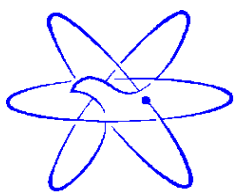




Boron Mixing Model

- August 15, 2013 Westinghouse提交Boron Mixing的position paper (ML13235A135)給NRC審查。
- January 8, 2014 NRC endorsed這份文件 (ML13276A183)並作註解。
- 補充RCS boron的Timing分析，需考慮0洩漏率與可能的最高洩漏率兩種。
- 所有案例中因為新加入的硼酸水與RCS混和需要時間，因此延遲一小時才採計其濃度的增加。
- NRC staff：採行該模式計算的FLEX策略可以接受。

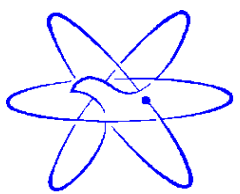




偵測Reflux cooling發生

- ✓ 運轉員無法直接偵側 reflux cooling 是否發生，必須採取間接的偵側方法。
- ✓ Westinghouse發展出利用Reactor Vessel Level Instrumentation System (RVLIS) 去推測 reflux transition time。
- ✓ 欲推測 reflux transition time 需要知道三個資訊：RVLIS 何時到達 setpoint，RCS壓力，以及何時 RCS開始進行 cooldown。

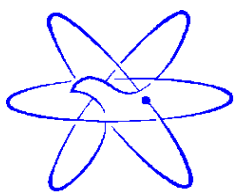




萬一Reflux Cooling已經發生

- WCAP-17792-P, R. 0, P. 3-9說明:如果Reflux Cooling已發生, 即使有return to power的可能, 仍然高度建議operator refill RCS as soon as possible。
- 另在同一頁說明分析結果, 最有機會避免return to power的做法是由單一loop cold leg緩緩refill RCS(plant specific)。



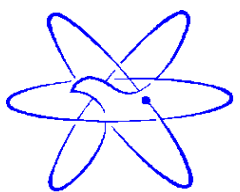


U. S. North Anna FLEX Strategy

RCS

- $T < 2\text{hr}$, RCS開始cooldown。
- $T < 1\text{hr}$, 非緊要電源開始卸載。
- RCS Max. cooldown rate 100°F/hr 。
- SG Min. pressure 290 psig。
- $T < 16\text{hr}$ RCS 開始 makeup，保守估計17hr會發生 reflux cooling。
- Shutdown margin分析 $T < 37\text{hr}$, $K_{\text{eff}} < 0.99$ 。
- NRC確認電廠符合PWROG boric mixing position paper的情況。
- 可避免Reflux cooling的發生。
- NRC希望業者每次燃料裝填, 確認FLEX策略在事故時的次臨界。



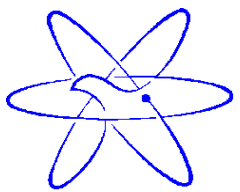


U. S. North Anna FLEX Strategy

Containment

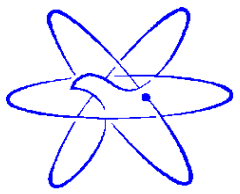
- ELAP發生7天內溫度壓力遠低於圍阻體的限值(假設64gpm的seal洩漏量, GOTHIC 7.2a分析), 但最後仍需作圍阻體移熱避免影響關鍵儀器的功能
- 降溫降壓策略(供電及建立循環海水):
 - 1. 主要策略: 啟動設備冷卻水系統, 循環海水系統, 儀用空壓機, 並啟動圍阻體空氣循環扇或控制棒驅動機構風扇。
 - 2. 次要策略: 將圍阻體sump水量補足後, 作圍阻體再循環噴灑, sump收集的熱量經圍阻體再循環噴灑系統熱交換器給循環海水系統帶走。





比較核三的OIP, RCS

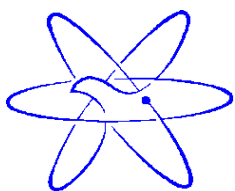
Item\NPP	MS	Surry	North Anna
Initiate RCS Cooldown	<1hr	<2hr	<2hr
RCS Max. cooldown rate	unlimited	100°F/hr	100°F/hr
SG Min. pressure	213.3 Psig	300 psig	290 psig
The DC bus load stripping	<30min	<45min	<1hr
Onset of reflux cooling	unknown	17hr	17hr
Initiate RCS makeup	1.3hr	<16hr	<16hr
Shutdown margin analysis	unknown	Keff < 0.99 throughout the ELAP event.	Keff < 0.99 throughout the ELAP event.
SG/RCS pump Makeup capability analysis	unknown	complete hydraulic analysis	complete hydraulic analysis
Analysis Code	RELAP/GOTRHIC	NOTRUMP/GOTHIC	NOTRUMP/GOTHIC



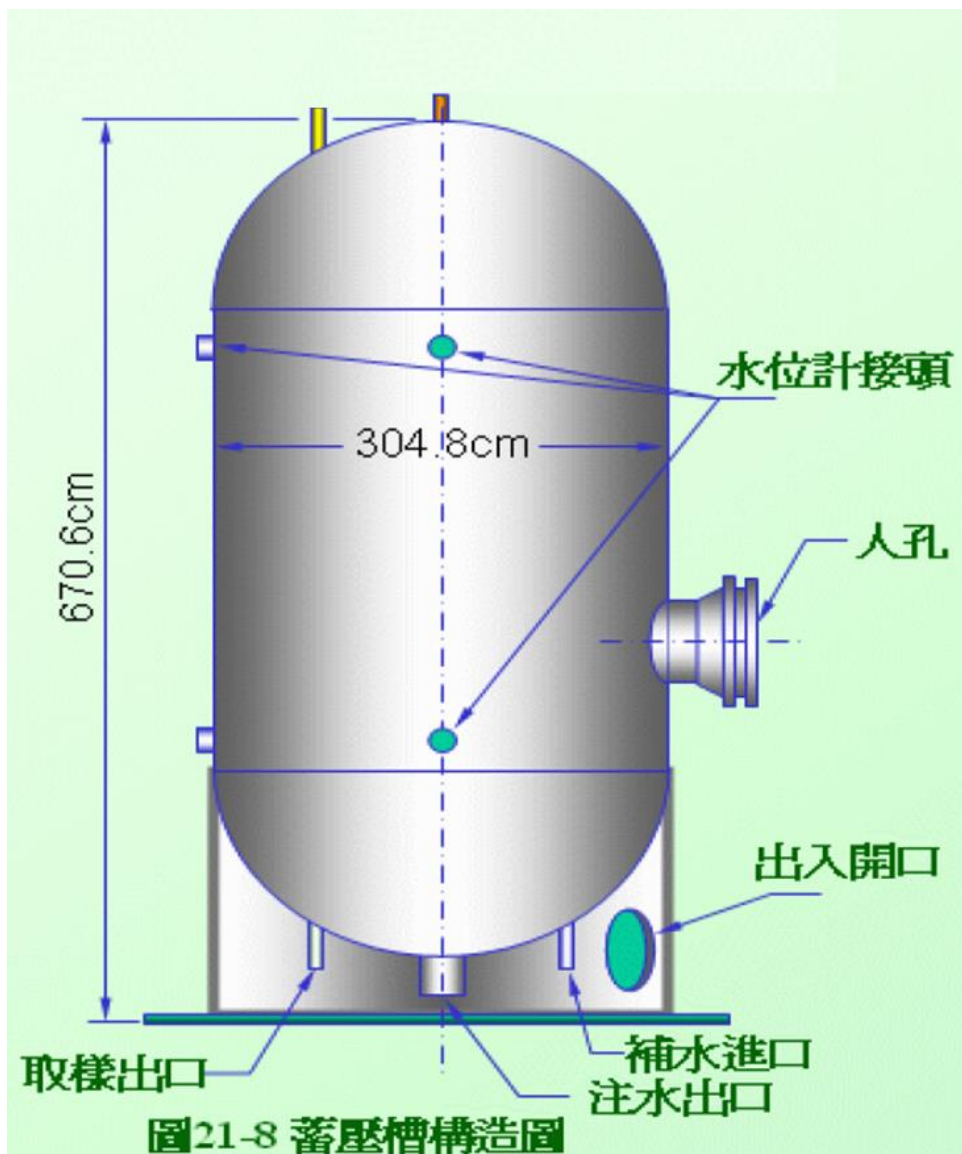
蓄壓槽氮氣注入RCS

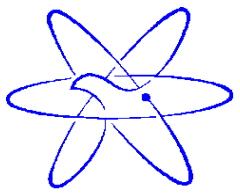
- 蓄壓槽中的氮氣可能在RCS壓力過低時伴隨冷卻水一起進入RCS，使自然對流循環效果下降。
- 核三廠EOP中規定，發生SBO時
 - 將 SG 洩壓至 15 kg/cm^2 以減少一次側的 RCP 洩漏率。
 - 設立 SG 壓力值下限(8.5 kg/cm^2)，以避免一次側蓄壓槽的氮氣注入。
- WCAP-17792-P指出，由於RCP seal leakage的作用，一次側水位及壓力會持續下降，導致氮氣注入RCS。





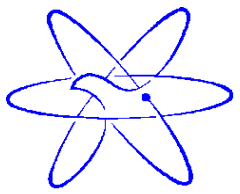
蓄壓槽構造





Thanks for your attention





Reference

- 台電公司，“NTTF建議事項4.2－強化NEI 06-12所涵蓋設備對廠外危害的防護”報告。
- Overall Integrated Plan in Response to March 12, 2012 Commission Order Modifying Licenses with Regard to Requirements for Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events (Order Number EA-12-049)
- Six-Month Status Report of the Implementation of the Requirements of the Commission Order with Regard to Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events (EA-12-049) (1st~5th)
- NRC - Interim Staff Evaluation and Audit Report by the Office of Nuclear Reactor Regulation Related to Order EA-12-049 Modifying Licenses with Regard to Requirements for Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events

