

[**Maanshan - TRACE**]



利用TRACE 程式分析核三廠SBO與FLEX 評估

報告人：楊融華 博士 (Dr. Jung-Hua Yang)

博士後研究員 能源與環境研究中心，
顧問兼資深研究員 核能與新能源教育與研究協進會，





大綱

前言

TRACE程式介紹

核三廠分析模式介紹

假想SBO模擬與URG斷然處置分析

假想ELAP模擬與FLEX strategy分析





前言

- ◆ 2011年3月11日，日本因遭遇複合型災變，福島第一核能電廠的事故為超過設計基準的海嘯所造成的水災淹沒了廠內的緊急電源與電力輸送系統，海嘯所引起的長期喪失交流電源嚴重地傷害到爐心冷卻系統與圍阻體完整性的安全功能，最終導致三座反應爐的爐心受損。
- ◆ 壓水式(PWR)電廠在喪失交流電情況下，緊急爐心冷卻系統無電源供應，反應爐冷卻能力亦會下降，爐心溫度雖可藉由主系統至二次側的熱傳現象進行冷卻，但爐心冷卻水持續從反應器冷卻泵環封洩漏出去，造成爐心水位下降而使燃料裸露的風險產生。
- ◆ 為了因應此類事故所造成的嚴重性，電廠執行適度的降壓，有助於維持RCP軸封在低溫的完整性或降低軸封材料的劣化、降低已劣化的軸封任何洩漏率，並且有助於蓄壓槽與其他系統注水至爐心。





前言

● 國際研究發展（針對壓水式電廠PWR）

- ◆ K. Vierow 等人利用 MELCOR、MAAP4 以及 SCDAP/RELAP5 三種不同的嚴重事故程式模擬美國 Zion 電廠（西屋公司四迴路壓水式電廠）假想全黑事故，並比較彼此模擬結果的不同。
- ◆ Changwook Huh 等人使用 MELCOR 程式探討壓水式電廠發生全黑事故時的最佳 RCS 直接洩壓策略，其分別模擬開啟 1 個、2 個及 3 個調壓槽動力釋壓閥，同時探討是否可有效利用被動蓄壓注水槽之冷卻水。
- ◆ H. Esmaili 等人利用 MELCOR 程式模擬美國 Surry 電廠（西屋公司三迴路壓水式電廠）全黑事故，結果顯示：若反應器冷卻水泵軸封洩漏率分別達 21 gpm/pump 以及 500 gpm/pump 且汽機驅動輔助飼水系統（TDAFW）無法使用，則爐心裸露將會於 2.3 小時內發生。
- ◆ Andrija Volkanovski 等人利用 RELAP5 探討壓水式電廠（Krško）面對加長型全黑事故（Extended station blackout）的能力，其結果顯示，若能延長汽機驅動輔助飼水的運轉時間，則即使在發生反應器冷卻水泵軸封洩漏的情形下，亦可使爐心損毀時間延長至 72 小時以後。
- ◆ K. Vierowa, Y. Liao, J. Johnson, M. Kenton, R. Gauntt, “**Severe accident analysis of a PWR station blackout with the MELCOR, MAAP4 and SCDAP/RELAP5 codes**”, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 234, Issues 1–3, December 2004, Pages 129-145
- ◆ Changwook Huh, Namduk Suh, Goon-Cherl Park, “**Optimum RCS depressurization strategy for effective severe accident management of station black out accident**”, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 239, Issue 11, November 2009, Pages 2521-2529
- ◆ H. Esmaili, D. Helton, D. Marksberry, R. Sherry, P. Appignani, D. Dube, M. Tobin, R. Buell, T. Koonce, J. Schroeder, “**Confirmatory Thermal-Hydraulic Analysis to Support Specific Success Criteria in the Standardized Plant Analysis Risk Models – Surry and Peach Bottom (NUREG-1953)**”, USNRC NUREG Report, September 2011
- ◆ Andrija Volkanovski, Andrej Prosek, “**Extension of station blackout coping capability and implications on nuclear safety**”, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 255, February 2013, Pages 16-27





前言

- ◆ 經由現行的電廠全黑(SBO)事故分析，顯示各電廠有能力來應付SBO事故發生後2至16小時內，依靠廠內現有設備及備用電源來解除危機，以確保能移除反應爐衰變熱及維持電廠處於安全之狀態。
- ◆ 福島事故後，根據 NRC 90 day 報告以及INPO IER 11-4 的建議，有必要進行當事故超過應對時間時的分析與評估，也就是說電廠若延長全黑事故的時間超過目前的2至16小時，需評估電廠處理事故程序以及添購額外設備來因應類似長期喪失交流電源(Extended Loss of AC Power ,ELAP)的事故。
- ◆ 安全分析系統程式必須要有能力計算出電廠在發生長期喪失交流電事故下，爐心水位低於燃料高度並造成燃料裸露的時間，以期評估電廠在喪失交流電事故發生之後，需保有多少時間餘裕來復原電力設備或使用替代電源來恢復電廠情況，以確保電廠處於安全狀況之下。





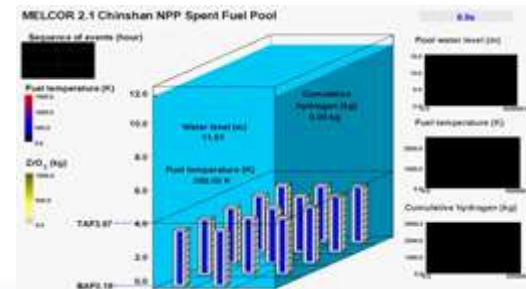
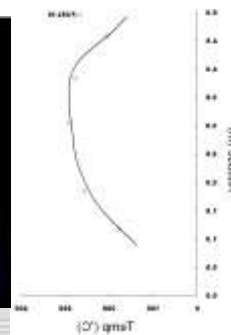
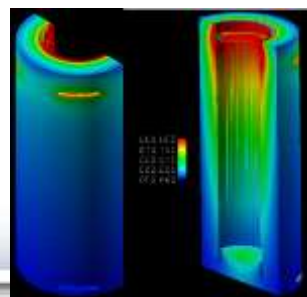
前言

◆ 本研究團隊

包含單位：核工所、工科所、原科中心、協進會

- 熱流分析：TRACE、RELAP5、PCTTRAN、CFD
- 嚴重事故分析：MELCOR2.1、MAAP5
- 程式不準度分析：DAKOTA、Uncertainty code
- 爐心中子與再臨界分析：TRACE/PARCS、TRITON
- 用過燃料池與乾貯分析：TRACE、MELCOR2.1、CFD
- 品保作業團隊：協進會

QUALITY
品保系統





大綱

前言

TRACE程式介紹

核三廠分析模式介紹

假想SBO模擬與URG斷然處置分析

假想ELAP模擬與FLEX strategy分析





TRACE 程式介紹

- TRACE (TRAC/RELAP Advanced Computational Engine) 為美國核管會所研發之最佳估算 (Best estimate) 熱水流系統程式 (Thermal-hydraulic system code)，本程式結合了四套核管會過去所研發的主要系統程式包含 TRAC-P、TRAC-B、RELAP5 以及 RAMONA。
- 本程式是被設計用於模擬輕水式反應器系統喪失冷卻水事故、運轉暫態以及其他假想事故情節。程式中包含六條基本方程式模擬蒸汽、液態水及其雙相混合物，一條質量守恒方程式模擬不可凝結氣體 (Noncondensable gas)，在三維組件 (Three-dimensional component) 中，TRACE 具備多維度計算能力。TRACE 特色之一為具備使用三維幾何模式模擬核反應器壓力槽之能力，對於核電廠安全分析會具有更強的能力與更細部的模擬結果。
- TRACE 輸入模式主要利用多個不同水力組件 (Hydraulic components) 來模擬整個反應器系統，每個組件又可依使用者或所分析之案例需求分割成若干個小體積 (Cells)。





TRACE 程式介紹

TRACE輸入模式中常見之水力組件有PIPE、CHAN、PUMP、VALVE、BREAK、FILL以及VESSEL:

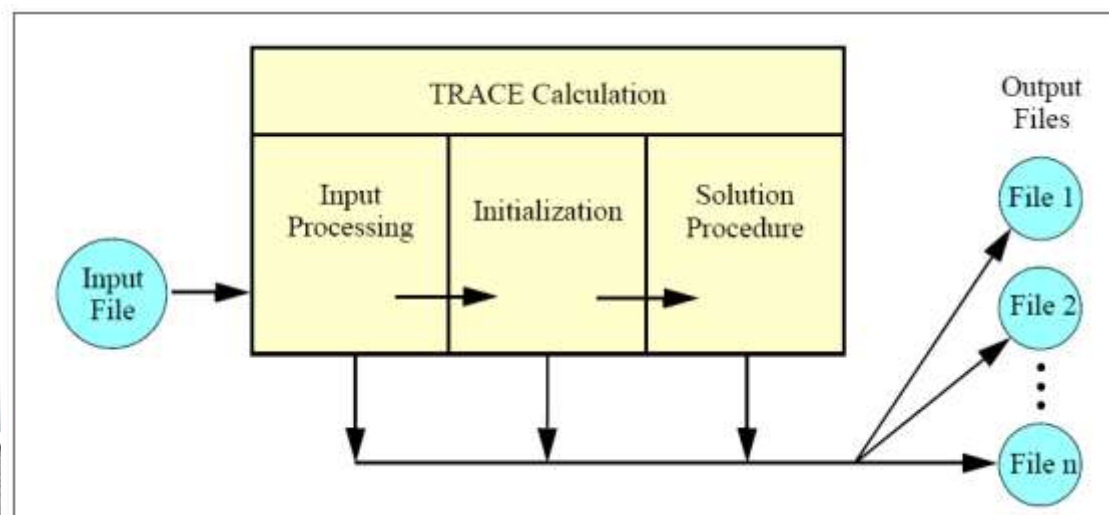
1. PIPE用於模擬反應器系統之管路，注水槽、調壓槽或蒸汽產生器等等；
2. CHAN是用於模擬沸水式反應器(Boiling water reactor, BWR)之核燃料；
3. PUMP用於模擬電廠中各種泵，例如反應器冷卻水泵(Reactor coolant pump, RCP)或反應爐再循環泵(Recirculation pump)；
4. VALVE用於模擬閥門元件，包含隔離閥、安全閥、釋壓閥、旁通閥等等；
5. BREAK以及FILL是用於提供系統之壓力邊界或是冷卻水流量等等；
6. VESSEL是用於模擬反應器壓力槽，其具備三維模擬能力，可將反應爐切割成多個環(Rings)、方位角(Azimuthal sectors)以及軸向層(Axial levels)以細部探討反應爐內部區間的熱流現象。
7. HTSTR為熱結構(Heat structure)，其用來模擬流體與壁面之間的熱傳遞，例如核燃料表面、熱交換器、管路熱散失等等。
8. POWER component用於對整個反應器系統提供熱功率，在TRACE程式中，爐心熱功率有三種計算方式可供選擇：功率時間表(Power table)、點中子動力(Point kinetic)以及與PARCS(Purdue Advanced Reactor Core Simulator)三維爐心中子動力計算程式結合計算功率。





TRACE 程式介紹

- 從使用者的角度來說，TRACE 的計算分成三個步驟：**輸入、初始化、輸出**，下圖簡略的地闡述了這三個步驟。「輸入」是計算過程的第一個步驟，TRACE 會讀取輸入檔並且確認所有必備而且合理的參數是否都存在，TRACE 也會檢查輸入檔中所有的初始條件和邊界條件皆保持一致。
- 當所有的輸入檔皆執行完畢、所有的計算皆經過初始化，那麼整個計算過程就算是初始化成功，程式可以進行結果的計算。
- 此外TRACE 支援兩種運算方式：序列運算、平行運算。序列運算，使用者可以利用一部電腦與單一TRACE 輸入檔執行一步步的運算。平行運算，是利用同時執行兩個或多個輸入、輸出步驟，並且將這些步驟的結果結合在一起，共享運算過程中所利用到的資訊。



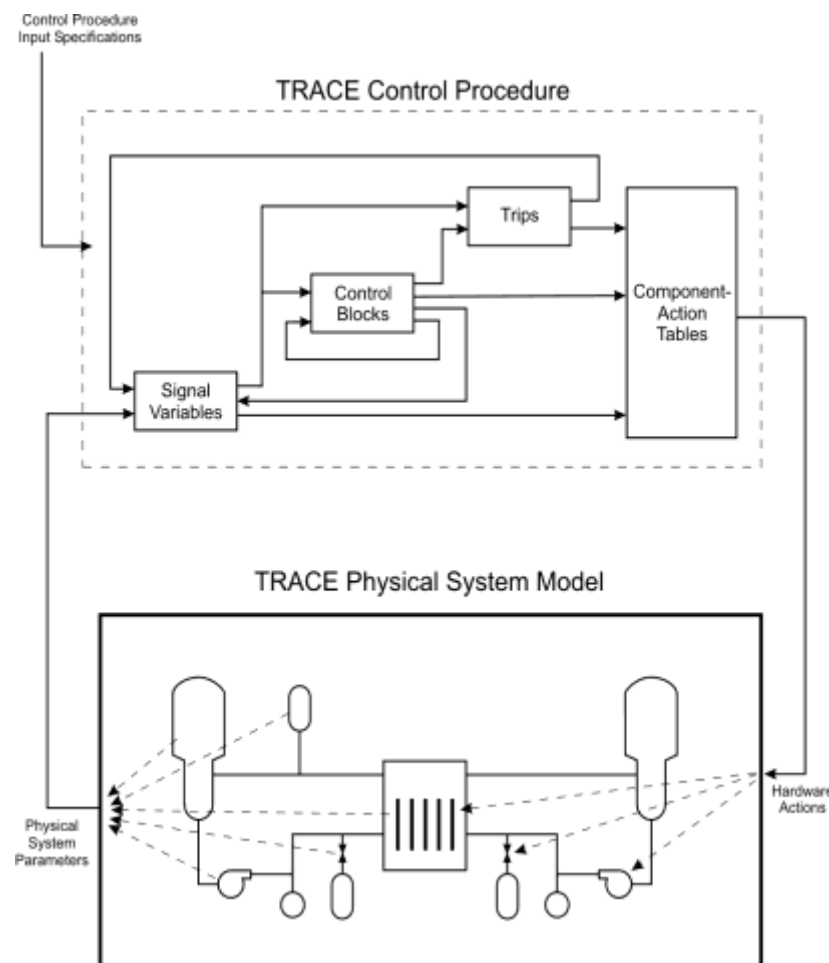


TRACE 程式介紹

TRACE plant modeling

模擬一個電廠須包含：

- ❖ 電廠的熱水流及熱交換組件的幾何結構
- ❖ 初始條件以及邊界條件。
- ❖ 控制系統與邏輯設定，與連結作動組件之關係

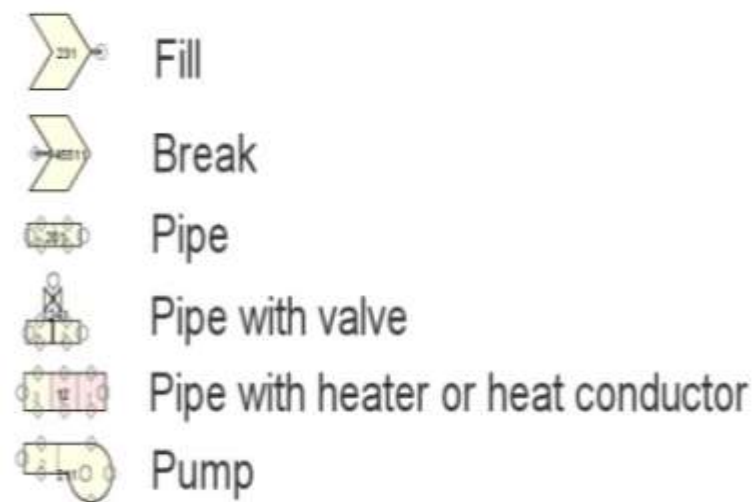




TRACE 程式介紹

TRACE modeling philosophy

- 將物理現象考慮進來
- 模擬特定物體的幾何結構
- 利用多組件來模擬複雜的幾何結構
 - npipes, nchans, nseps, nrods



Example : S/G tube

在TRACE程式中，可以利用多個pipe和熱結構組件，來模擬蒸汽產生器U-tube的幾何結構，這樣的模型可以用來模擬蒸汽產生器U型管阻塞的現象與評估。





TRACE 程式介紹

TRACE field equations

- ❖ TRACE 程式內分別考慮了針對液、氣相的質量、能量、動量守恆式來求解雙相流的場方程。也就是說 TRACE 具有計算 **質量守恆、能量守恆、及動量守恆方程式**。
- ❖ Solution variables: Void fraction, steam and non-condensable pressures, liquid and vapor velocities, liquid and vapor temperatures, boron concentration, heat structure temperatures





TRACE 程式介紹

Mass Conservation Equations

- Mean Mass

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g + (1-\alpha)\rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g \vec{V}_g + (1-\alpha)\rho_l \vec{V}_l) = 0$$

- Vapor mass

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g \vec{V}_g) = \Gamma$$

Energy Conservation Equations

- The base energy equations are:

$$\frac{\partial((1-\alpha)\rho_l e_l + \alpha\rho_g e_g)}{\partial t} + \nabla \cdot ((1-\alpha)\rho_l e_l \vec{V}_l + \alpha\rho_g e_g \vec{V}_g) =$$

$$-P\nabla \cdot (\alpha\vec{V}_g + (1-\alpha)\vec{V}_l) + q_{wi} + q_{div}$$

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g e_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g e_g \vec{V}_g) = -P\frac{\partial\alpha}{\partial t} - P\nabla \cdot (\alpha\vec{V}_g) + q_{wg} + q_{div} + \Gamma h'_v$$

- Here energy source terms are wall heating, direct heat (e.g. radiation), and interfacial heat transfer.
- Work is scheduled to convert to a fully conservative form of the energy equation

1-D Momentum Equation

- Liquid Momentum Equation:

$$\frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l = -\frac{1}{\rho_l} \nabla P + \frac{c_l}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l|$$

$$- \frac{\Gamma}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wl}}{(1-\alpha)\rho_l} \vec{V}_l |\vec{V}_l| + \vec{g}$$

- Gas Momentum Equation:

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla \vec{V}_g = -\frac{1}{\rho_g} \nabla P - \frac{c_l}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l|$$

$$- \frac{\Gamma^*}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wg}}{\alpha\rho_g} \vec{V}_g |\vec{V}_g| + \vec{g}$$

- Γ is non-zero only when net condensation occurs. Γ^* is non-zero only when net boiling occurs.

Wall Energy Sources

Heat to the fluid from the wall is in a standard form:

$$q_{wi} = h_i A_w (T_w - T_l), \quad q_{wg} = h_g A_w (T_w - T_g)$$

where wall areas are expressed as an area per unit fluid volume, and heat transfer coefficients contain information on average fraction of wall area contacting liquid.

Wall temperatures are obtained from a standard conduction equation:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T + q'''$$

Two-Dimensional conduction is permitted in Cartesian (x,y), Cylindrical (r,z), or Spherical (r, ϕ) Geometry.





TRACE 程式介紹

Simple vertical flow map

Pre-CHF correlations:

Pipe

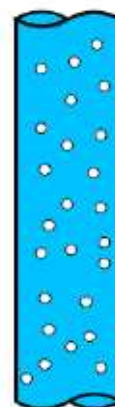
- Bubbly churn-turbulent
 - Ishii
- Slug, Taylor Cap Bubble
 - Kataoka-Ishii

Rod Bundle

- Bestion

Annular

- Wallis
- Asali and Hanratty for cocurrent downflow



Dispersed
Bubble



Slug
Flow



Taylor Cap
Bubble



Annular /
Mist

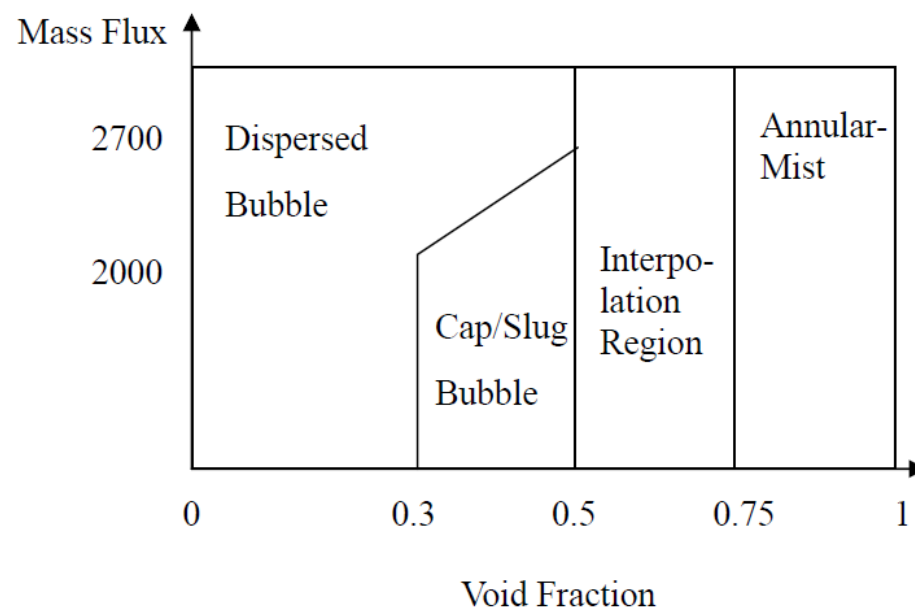




TRACE 程式介紹

Simple vertical flow map

- 依據不同的流譜來選擇不同的界面熱傳模型，流譜區分如右圖所示，適用於水平管流以及垂直管流。
- 在計算液汽界面間的熱傳率時，需先評估液態流體與汽態流體所具有的界面面積，此界面面積的估算由Kataoka 等人與Kitscha 和Kocamustafaogullari 提出之關係式獲得。



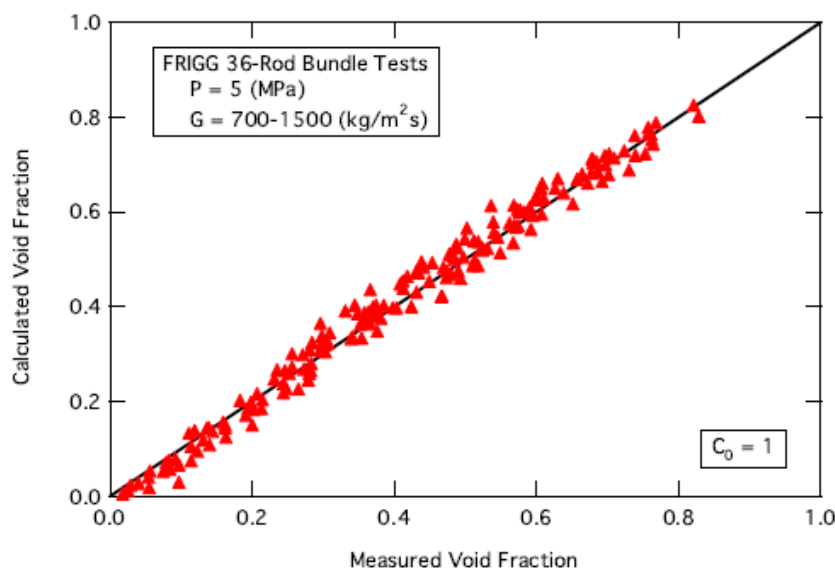
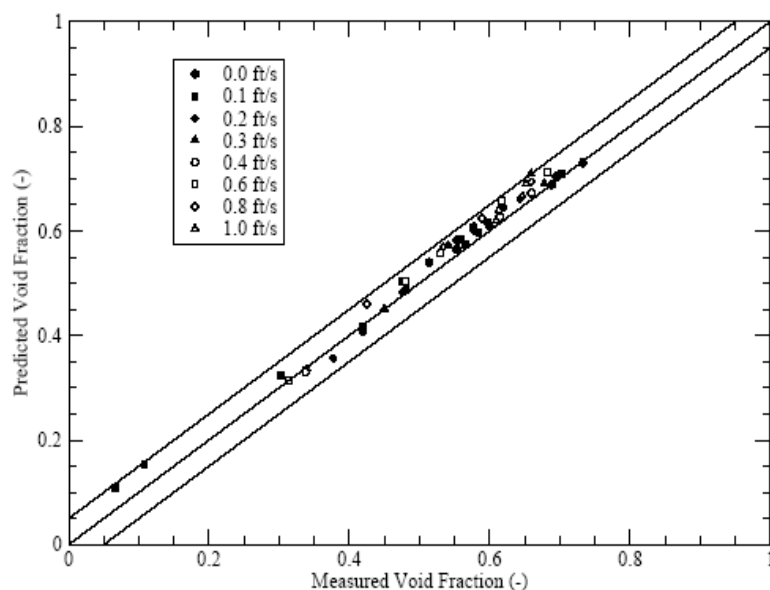


TRACE 程式介紹

Simple vertical flow map

Pre-chf void fraction predictions for pipes and rod bundles

Smissaert (ANL) Vertical Air-Water Tests





TRACE 程式介紹

Horizontal flow map

Horizontal flow regimes

- ❖ Stratified Wavy and Plug-Slug are not modeled explicitly. Treated as transition regimes.

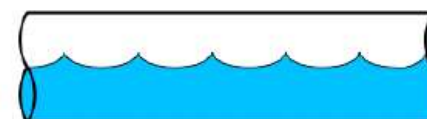
Transition criterion and weighting:

$$V_{r, crit} = \left(1 - \frac{h_l}{D}\right) \left[\frac{g \Delta \rho \cos \theta A_g}{\rho_g (dA_l / dh_l)} \right]^{1/2}$$

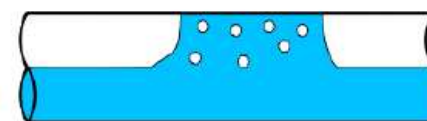
$$wf_{T-D} = \text{Max} \left[0, \text{Min} \left(1, 2 - \frac{V_r}{V_{r, crit}} \right) \right]$$



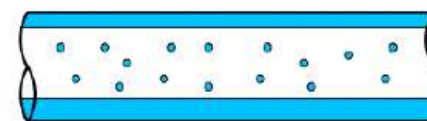
Stratified Smooth



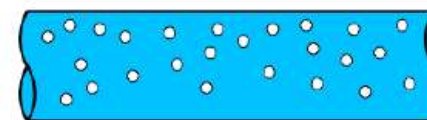
Stratified Wavy



Plug / Slug



Annular / Dispersed



Dispersed Bubble

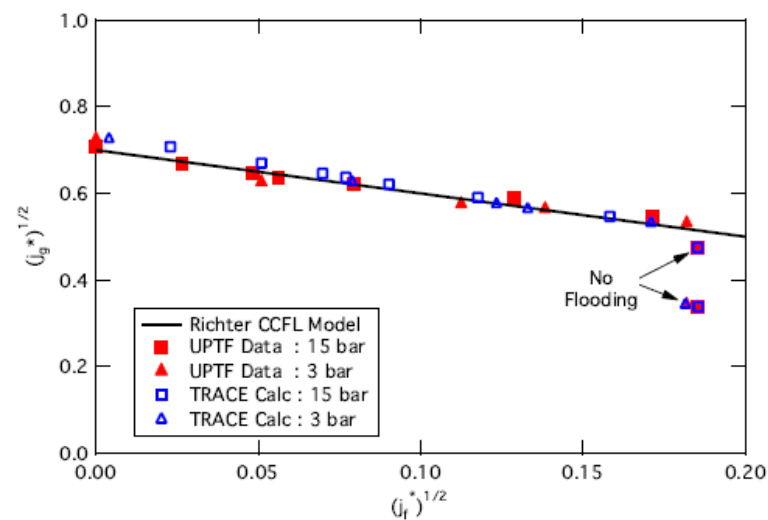
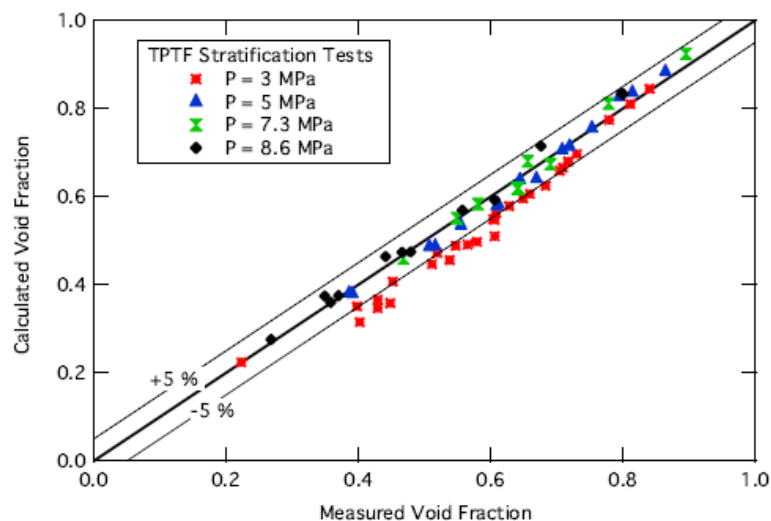




TRACE 程式介紹

Horizontal flow map

Horizontal flow map predictions of void fraction and flooding criteria.

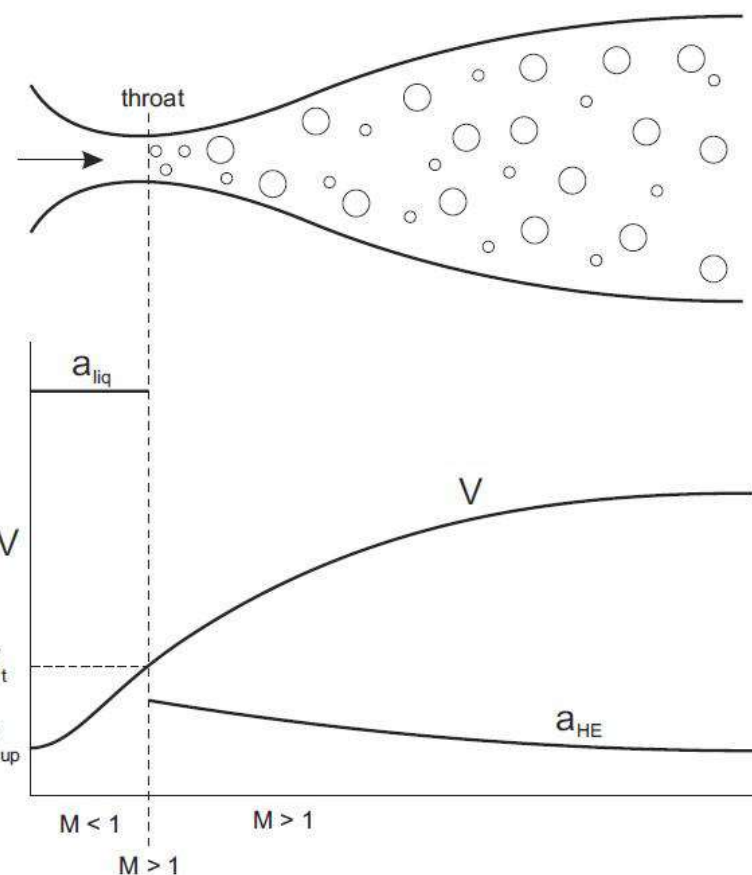




TRACE 程式介紹

Critical flow model

當發生臨界流(Critical Flow)的現象時，管內上游的質量流率與下游的狀況無關。以右圖說明，正常情況下，次冷態(Subcooled)流體的流速(V_{up})會小於音速 a_{liq} ，此時馬赫數小於1($M < 1$)。但是當流體流經喉部區(throat)時，由於流體截面積縮小，導致流速上升，並使得次冷態流體變成雙相混合流體，此時雙相混合(Two-phase)流體內的音速會下降為 a_{HE} ，可能導致馬赫數大於1($M > 1$)，此時流體流速(V)將不再上升而是以 a_{HE} 作為其最大速度($V_t = a_{HE}$)，並稱之為臨界流速。

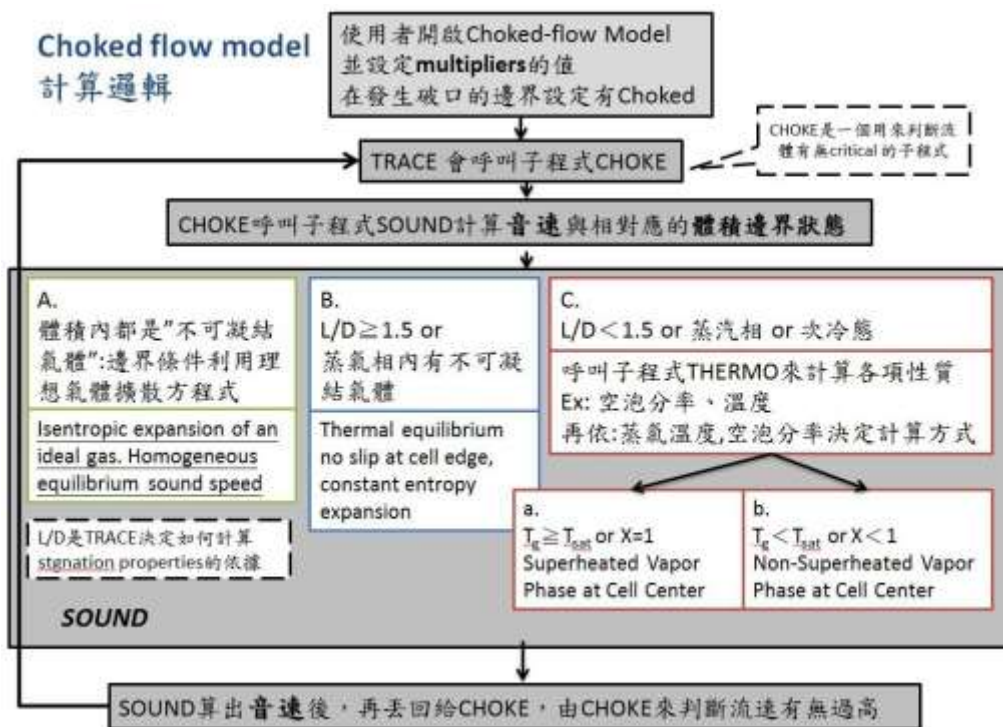




TRACE 程式介紹

Critical flow model

TRACE 程式內擁有臨界流模式的計算能力，使用者可以在任何一維的組件邊界開啟或關閉這個模式。TRACE 在計算時就會呼叫子程式CHOKE來判斷該破口邊界有無發生臨界流現象，CHOKE 亦會呼叫另一子程式SOUND 計算該位置的音速與其相對應的體積邊界狀態與各項參數，來決定計算音速的方式。





TRACE 程式介紹

Counter Current Flow Limitation (CCFL) model

- 在雙相混合的體積內，液體與氣體的流速相反時，當氣體的質量流率上升太快，導致液體受氣體的影響而造成流動停止，甚至是轉向，這個現象就稱之為逆流限制(Counter-Current Flow Limiting, CCFL)。而CCFL在眾多的假設事故時序中扮演著非常重要的角色，特別是當電廠發生大破口事故(LBLOCA)時，緊急爐心冷卻系統(ECCS)將冷卻水注進到爐心避免燃料溫度過高造成破損，然而卻由於CCFL的效應使得冷卻水無法注進爐心而是在爐心上繫板(upper tie plate)形成積水(poor formation)，因此在研究電廠發生LOCA事故時，必須要考慮到CCFL的效應，可能使得冷卻水無法有效的注入爐心且冷卻燃料棒。
- TRACE程式具有模擬CCFL現象的能力且可運用於1-D或3-D的組件裡，在程式中我們可以使用相關參數來設定使用者要的關係式，在CCFL模式中會有三個關係式，包含Bankoff形式、Kutateladze形式、以及Wallis形式，

$$J_g^{1/2} + m_w J_l^{1/2} = C_w$$

$$J_k = j_k \left[\frac{\rho_k}{g d (\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2}$$

$$K_g^{1/2} + m_K K_l^{1/2} = C_K$$

$$K_k = j_k \left[\frac{\rho_k^2}{g \sigma (\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/4}$$

* 這裡 j_k 和 ρ_k 分別為流體的速率和密度 ($k=\text{gas or liquid}$)， d 為孔洞直徑， σ 為表面張力。





大綱

前言

TRACE程式介紹

核三廠分析模式介紹

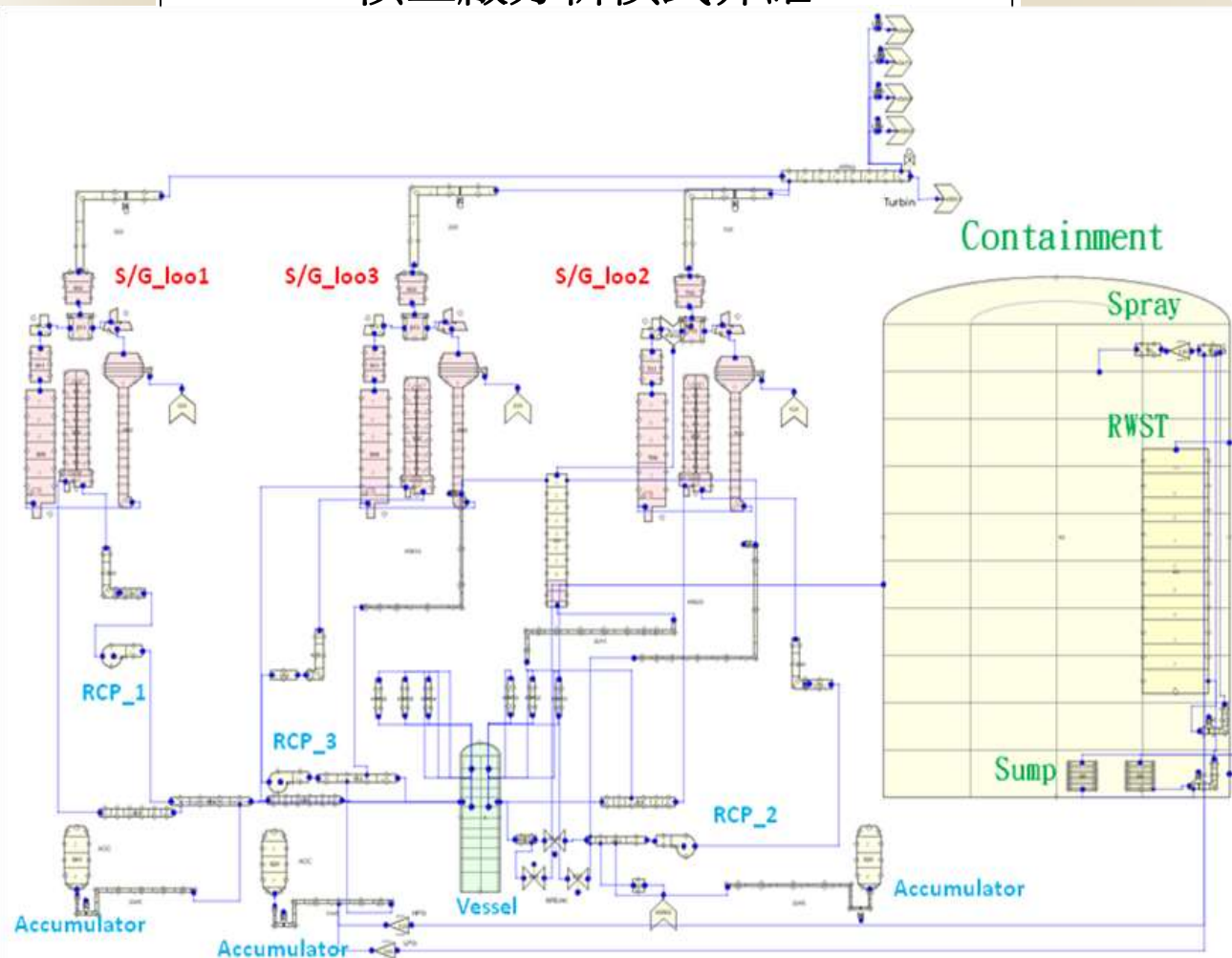
假想SBO模擬與URG斷然處置分析

假想ELAP模擬與FLEX strategy分析





核三廠分析模式介紹



- Fill
- Break
- Pipe
- Pipe with valve
- Pipe with heater or heat conductor
- Pump

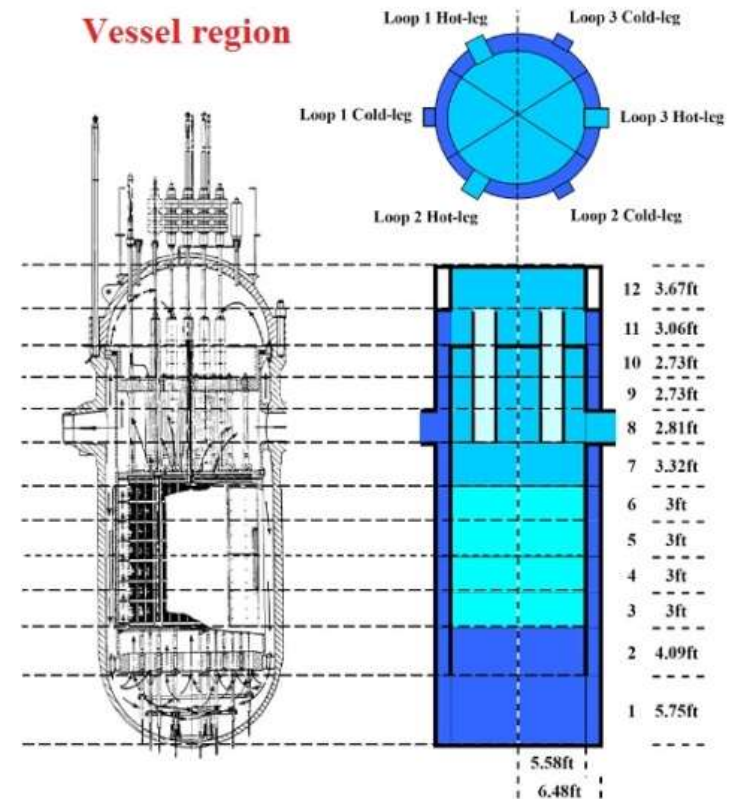
➤ 核三廠TRACE模式包含完整的一次側系統、蒸汽產生器系統、及圍阻體熱流組件。



核三廠TRACE model

➤ 反應器壓力槽是用VESSEL組件模擬，VESSEL為三維組件，分割成2個環、6個方位角以及12個軸向層。

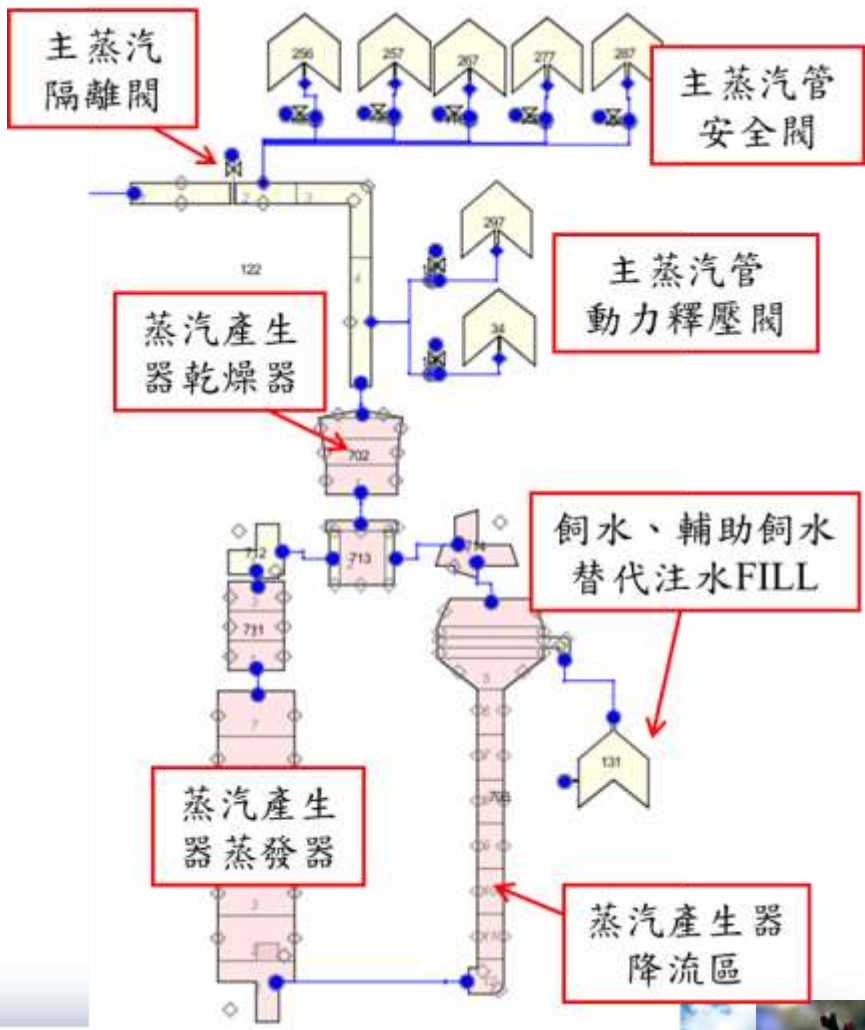
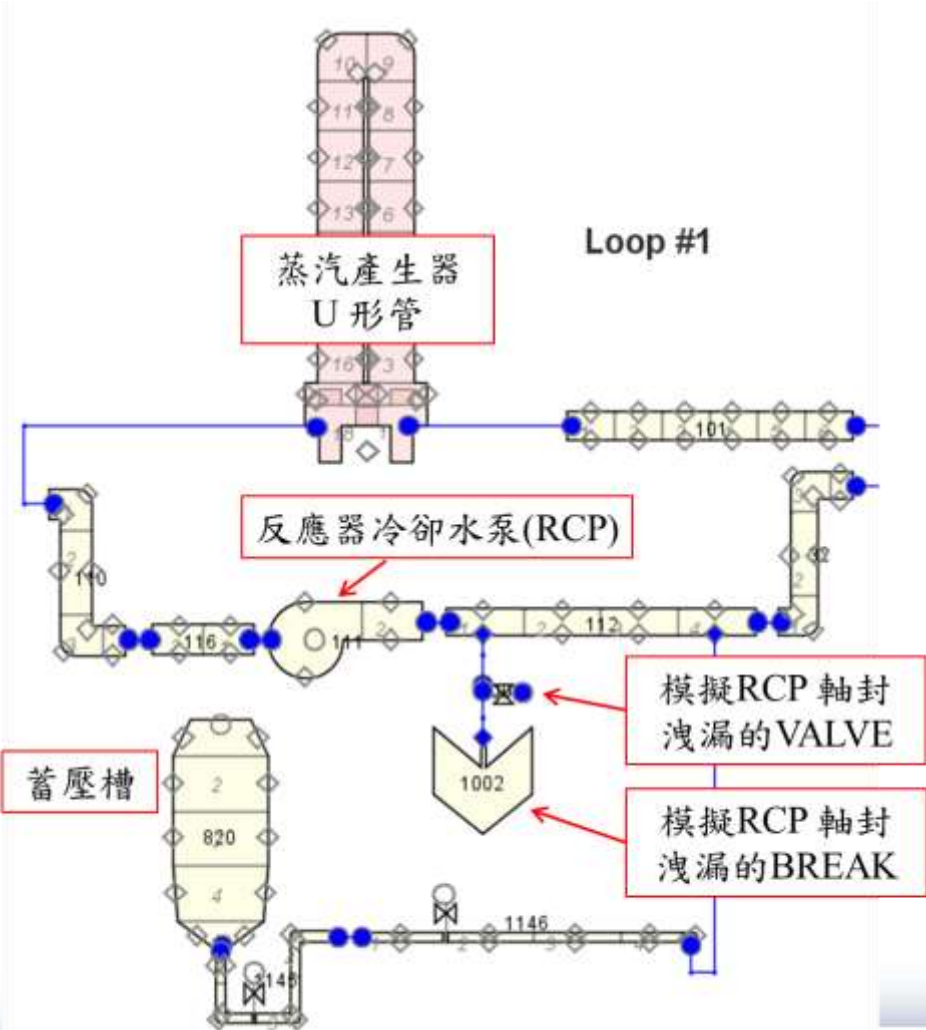
➤ 第1環模擬爐心，即爐心筒(Core Barrel)內之區域；第2環模擬反應爐降流區(Reactor downcomer)；方位角區塊平均切割成六等分，每一區塊均為 60° ，核燃料以6個熱結構模擬並平均分配於6個方位角區塊中，燃料高度約為3.65公尺，位於軸向之第3至第6層；熱端管路(Hot-leg)連接於第1環的第8層，冷端管路(Cold-leg)則連接於第2環的第8層，VESSEL組件分割如圖所示。





核三廠TRACE model

➤ 核三廠一次側環路(loop-1)及蒸汽產生器示意圖：





核三廠TRACE model

● 重要系統參數TRACE穩態計算結果與電廠數據之比較

參數	電廠資料	TRACE	相對誤差(%)
爐心熱功率 (MW)	2822	2822	0
反應器冷卻水系統壓力 (MPa)	15.513	15.52	0.05
反應器冷卻水系統總流量 (Mkg/hr)	49.59	49.57	0.04
調壓槽液體體積 (m ³)	23.79	23.77	0.084
熱端管路溫度 (K)(註1)	599.75	601.7	0.33
冷端管路溫度 (K)(註1)	565.35	566.57	0.22
蒸汽產生器壓力 (MPa)(註2)	6.74	6.91	2.5
蒸汽溫度 (K)(註2)	555.45	558.09	0.48
蒸汽產生器窄幅水位 (%) (註2)	50	50	0
註1：僅列出RCS第二迴路之資料			
註2：僅列出SG #2之資料			





大綱

前言

TRACE程式介紹

核三廠分析模式介紹

假想SBO模擬與URG斷然處置分析

假想ELAP模擬與FLEX strategy分析





馬鞍山電廠假想SBO模擬

➤ 電廠全黑(Station Blackout, SBO)在美國核管會聯邦法規10 CFR 50.2中之定義為核能電廠完全喪失供應至緊要(Essential)以及非緊要(Nonessential)電源匯流排之交流電源(Alternating current electric power)，意即喪失廠外電源(Loss of offsite electric power)、汽機跳脫，同時廠內之緊急交流電源亦無法使用(Loss of onsite emergency AC power)。

➤ TRACE程式模擬分析核三廠發生全黑事故，但不進行任何緩和處置措施，並與接續之全黑事故配合執行斷然處置的結果進行相互比較。

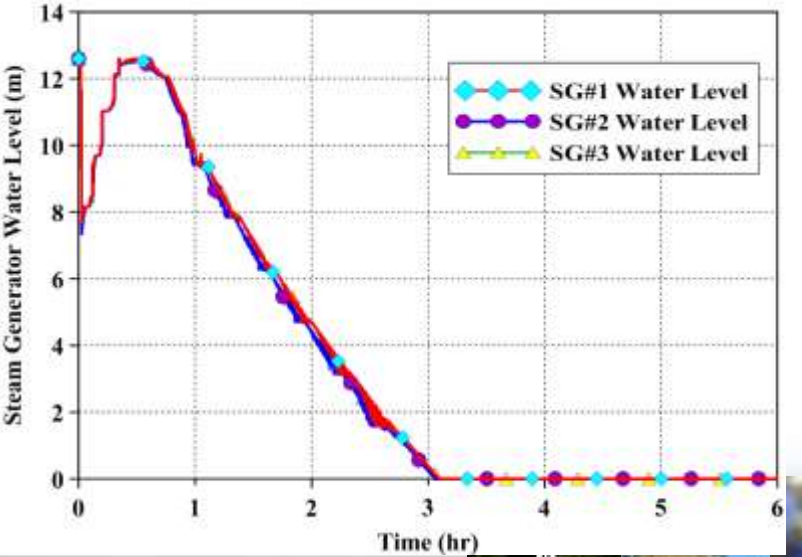
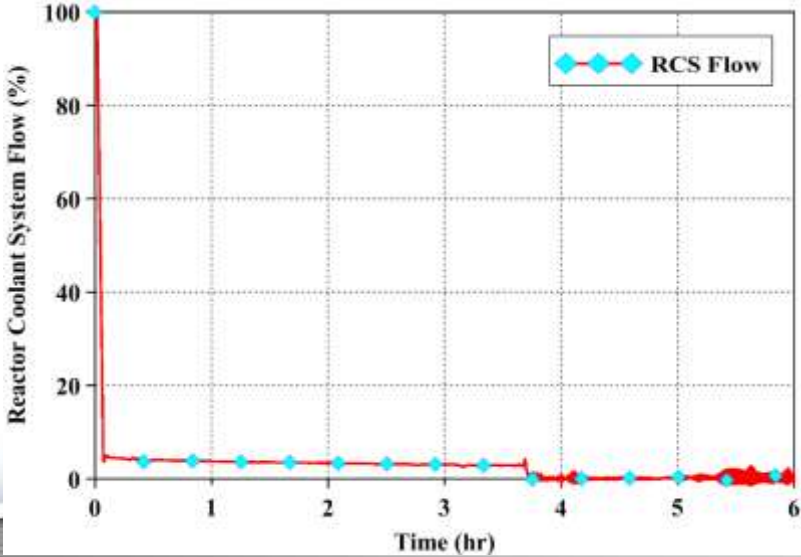
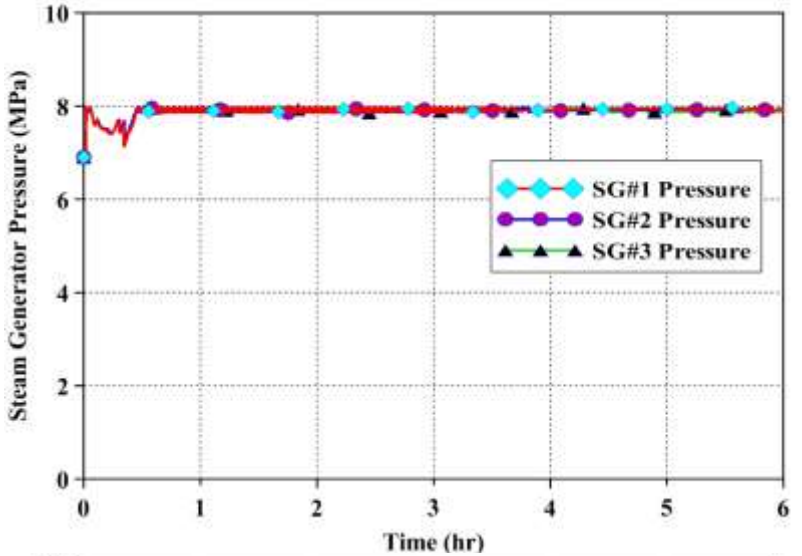
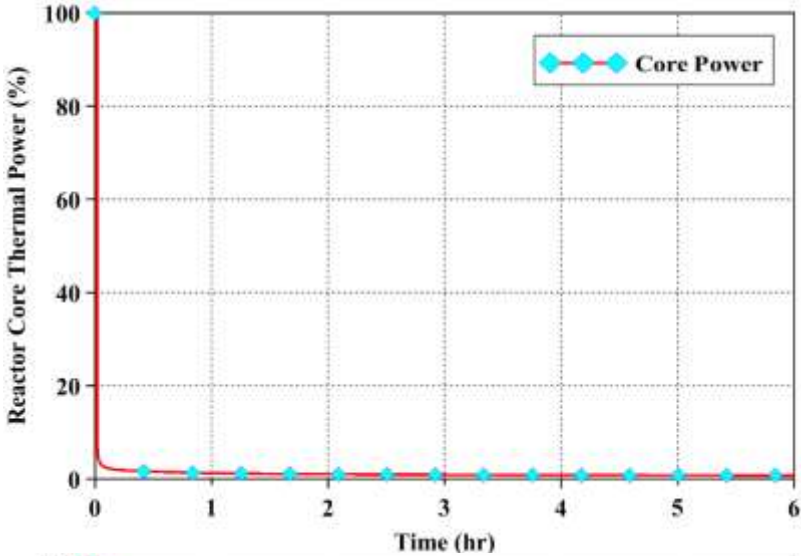
● 假想電廠全黑事故時序表

時間	事件
60s	地震發生、反應爐跳機、主飼水泵跳脫、反應器冷卻水泵跳脫、反應器冷卻水泵軸封洩漏開始
70s	主飼水流量下降至零
80s	馬達驅動輔助飼水系統啟動
260s	反應器冷卻水泵轉速下降至零
1260s	海嘯來襲、電廠全黑 馬達驅動輔助飼水泵跳脫 汽機驅動輔助飼水泵無法啟動(保守假設)



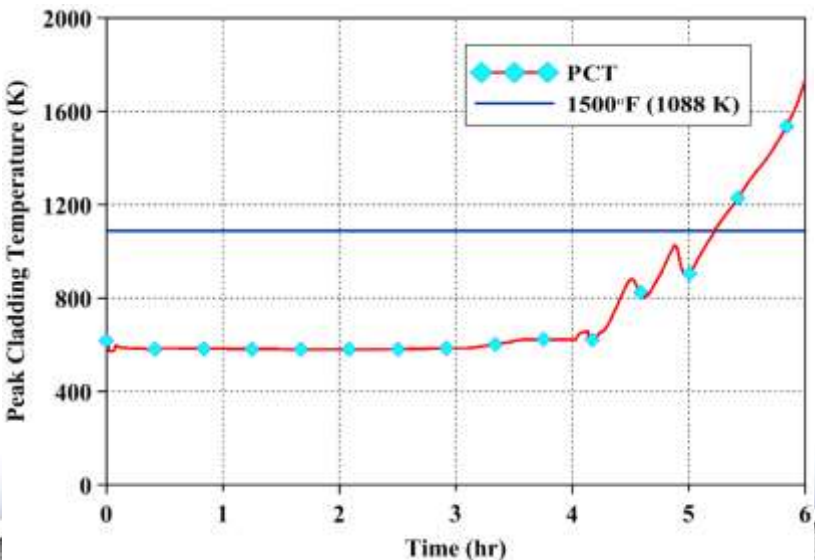
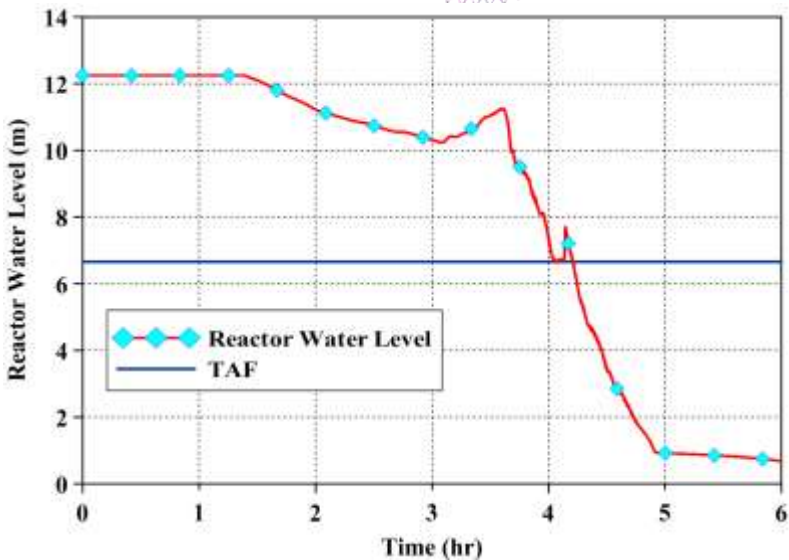
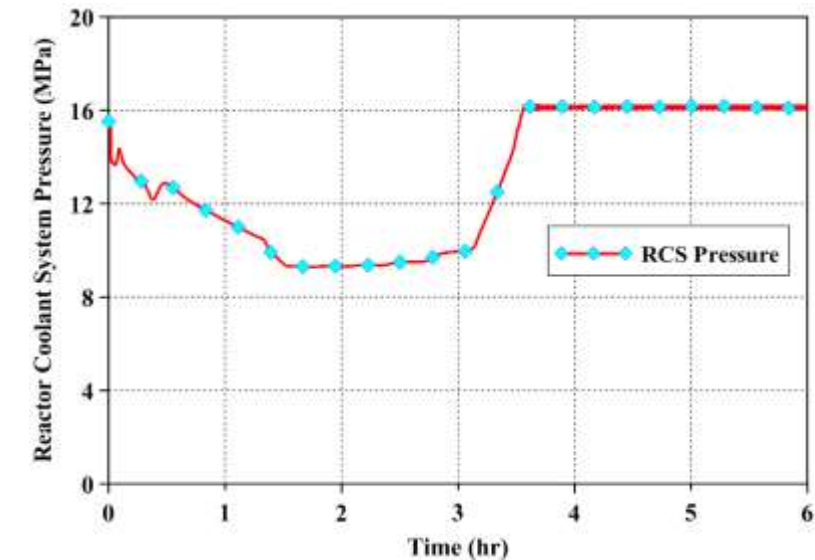


馬鞍山電廠假想SBO模擬





馬鞍山電廠假想SBO模擬





馬鞍山電廠假想SBO模擬

● 馬鞍山電廠假想電廠全黑事故模擬結果時序表

時間	事件
60s	地震發生、反應爐跳機、主飼水泵跳脫、反應器冷卻水泵跳脫、反應器冷卻水泵軸封洩漏開始
80s	馬達驅動輔助飼水系統啟動
1660 s	蒸汽產生器壓力達動力釋壓閥開啟壓力
11047 s (3 hr)	蒸汽產生器蒸乾
13104 s (3.64 hr)	反應器冷卻水系統壓力上升至調壓槽動力釋壓閥開啟壓力
13439 s (3.73 hr)	反應器冷卻水系統迴路自然循環終止
14671 s (4.07 hr)	反應爐水位下降至TAF
18795 s (5.22 hr)	尖峰護套溫度達到1500°F





馬鞍山電廠假想SBO模擬

小結

➤ 全黑事故的模擬中，結果顯示若無執行任何事故緩和措施，反應器冷卻水系統壓力將於蒸汽產生器蒸乾喪失移熱能力後0.6小時達到調壓槽動力釋壓閥開啟壓力，若一次側系統無發生喪失冷卻水事故，則調壓槽動力釋壓閥之開啟即為反應器冷卻水系統冷卻水快速喪失之重要途徑。調壓槽動力釋壓閥開啟後，反應爐水位隨即於事故發生後4小時下降至燃料頂端，核燃料裸露使護套溫度開始迅速上升並在事故後5.2小時超過1500°F(1088 K)。

➤ 燃料護套溫度升高時，其與爐心內之水蒸汽進行氧化反應並產生氫氣，又稱護套鋁水反應(Cladding metal-water reaction)，並隨溫度升高而加劇。此反應為一種放熱反應，當護套溫度超過1500°F時，此反應所產生的熱能將助長鋁水反應的進行使反應更加快速與劇烈，進而產生更多的氫氣，增加氫爆之風險。最終，燃料護套與核燃料將會破損、融化，並且釋放出具高放射性之分裂產物。





馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬

➤ 當電廠全黑發生時，反應爐運轉員依斷然處置程序執行蒸汽產生器控制降壓，開啟主蒸汽管動力釋壓閥把蒸汽壓力維持在15 kg/cm²，同時現場人員也開始引接任何可用之替代注水設備及水源準備進行蒸汽產生器替代注水。

➤ 海嘯來襲1小時後，即4860秒，蒸汽產生器替代注水準備完成且注水決策下達，反應爐運轉員執行蒸汽產生器緊急洩壓，並立刻進行蒸汽產生器注水。

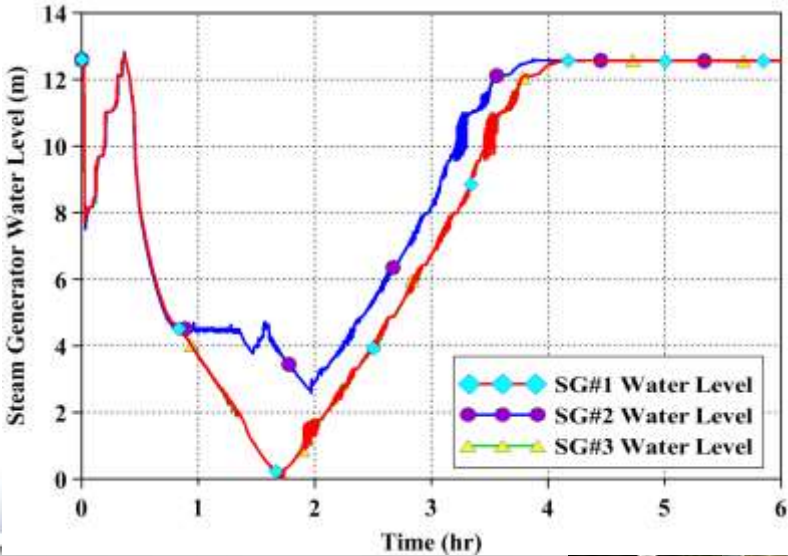
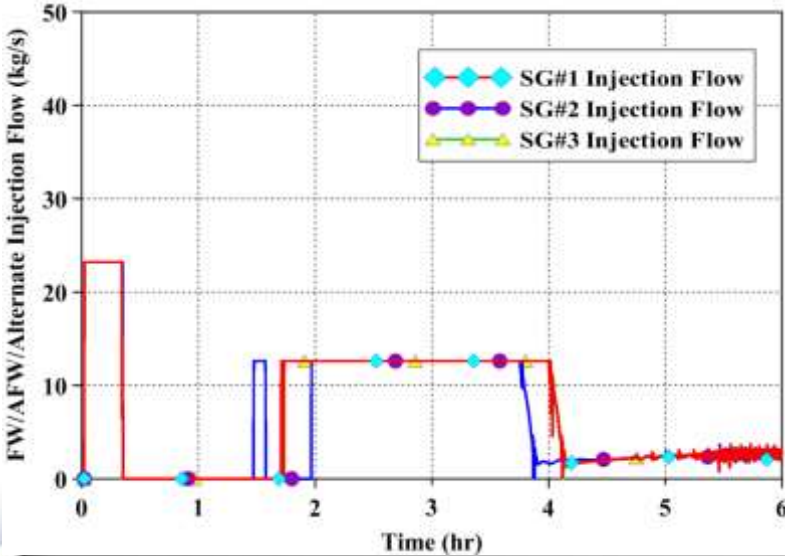
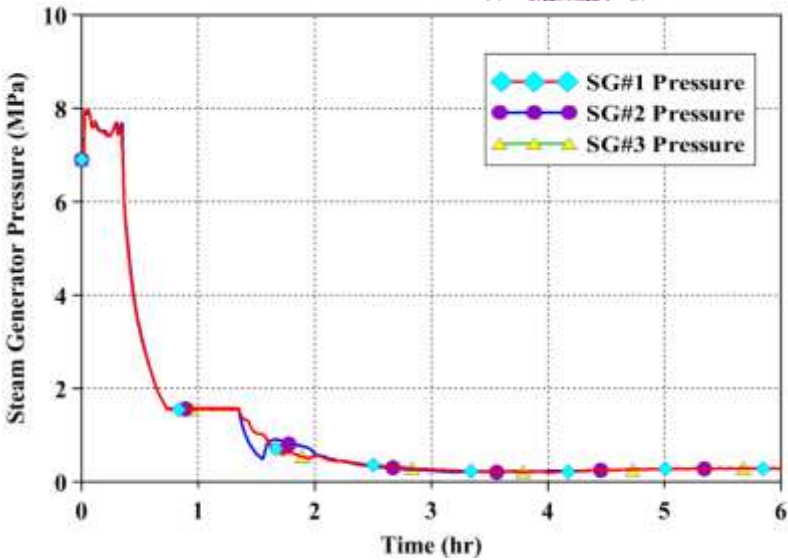
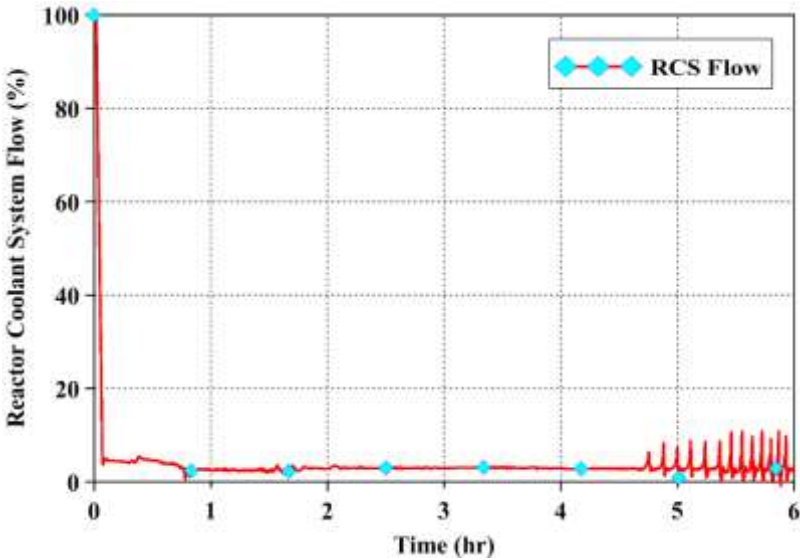
● 馬鞍山電廠全黑事故執行斷然處置時序表

時間	事件
60s	地震發生、反應爐跳機、主飼水泵跳脫、反應器冷卻水泵跳脫、反應器冷卻水泵軸封洩漏開始
70s	主飼水流量下降至零
80s	馬達驅動輔助飼水系統啟動
260s	反應器冷卻水泵轉速下降至零
1260s	海嘯來襲、電廠全黑 馬達驅動輔助飼水泵跳脫 汽機驅動輔助飼水泵無法啟動(保守假設) 蒸汽產生器控制降壓開始
4860 s	蒸汽產生器替代注水準備完成 蒸汽產生器緊急洩壓開始 (壓力低於6 kg/cm ² 時注水自動開始)



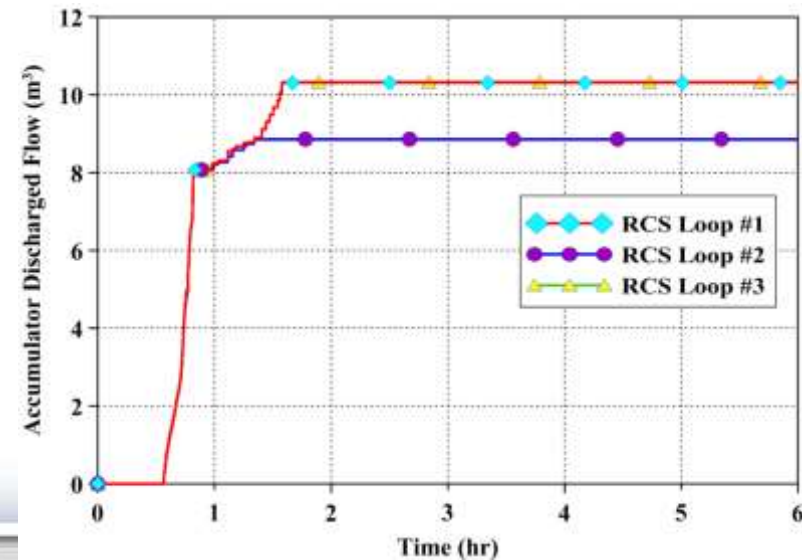
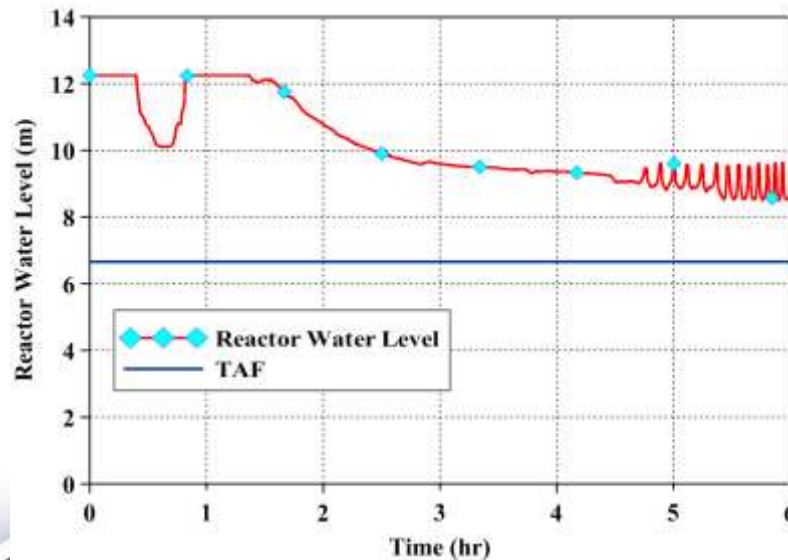
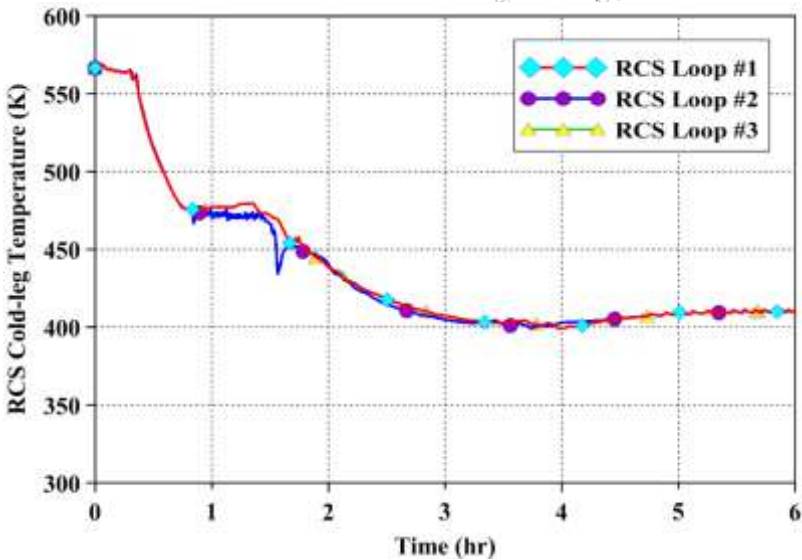
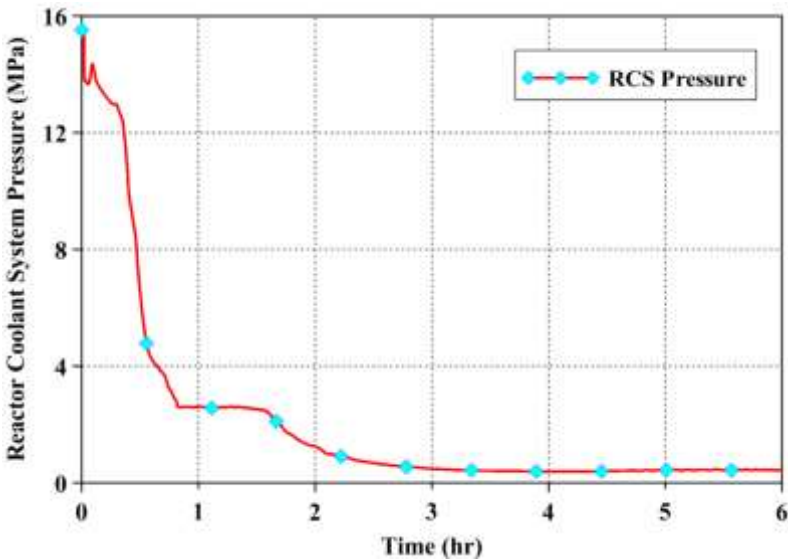


馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬



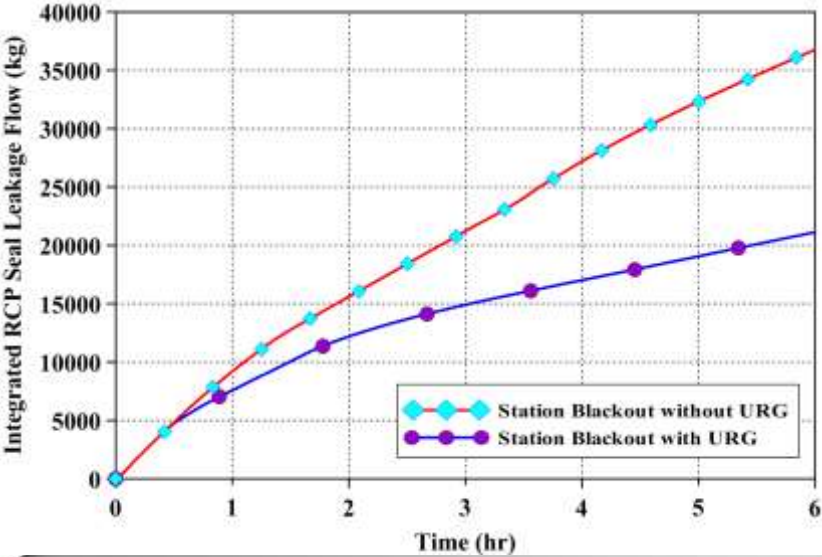
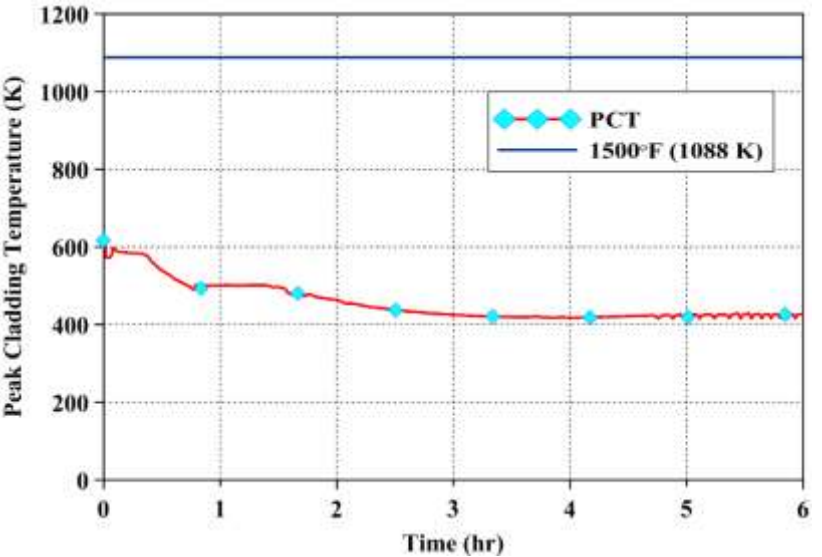


馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬





馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬



● 馬鞍山電廠執行斷然處置模擬結果時序表

時間	事件
60s	地震發生、反應爐跳機、主飼水泵跳脫、反應器冷卻水泵跳脫、反應器冷卻水泵軸封洩漏開始
80s	馬達驅動輔助飼水系統啟動
1260 s	執行蒸汽產生器 控制降壓 主蒸汽管動力釋壓閥開啟
2016 s (0.56 hr)	反應器冷卻水系統壓力低於蓄壓槽氮氣壓力 蓄壓槽注水開始
4860 s (1.35 hr)	蒸汽產生器替代注水準備完成 執行蒸汽產生器 緊急洩壓
#1：6084 s (1.69 hr) #2：-- #3：6084 s (1.69 hr)	蒸汽產生器蒸乾
#1：6156 s (1.71 hr) #2：5292 s (1.47 hr) #3：6156 s (1.71 hr)	蒸汽產生器壓力低於6 kg/cm ² 替代注水開始
14076 s (3.91 hr)	蒸汽產生器水位回復至正常水位
--	反應爐水位下降至TAF
--	尖峰護套溫度達到1500°F





馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬

小結

- 全黑事故執行斷然處置程序的模擬中，結果顯示執行斷然處置確實可以確保核燃料被水覆蓋，避免護套溫度超過1500°F。
- 由於複合式災難發生後，廠內各項系統可用與否充滿不確定性，故斷然處置的概念為在事故發生第一時間即採取行動，將蒸汽產生器及反應爐壓力降低，並且利用當時所有可用之注水設備與水源將水位補高。
- 不論是蒸汽產生器或是反應器冷卻水系統，洩壓均會使水位快速降低。相較於一次側反應器冷卻水系統，蒸汽產生器之降壓與注水相對容易，此外反應爐冷卻水系統於電廠全黑時除了蓄壓槽外無其他注水系統，因此一次側之直接洩壓應盡量避免。透過蒸汽產生器降壓來降低反應器冷卻水系統壓力的好處為可以不必直接進行一次側的洩壓而是利用蒸汽產生器進行熱移除。





馬鞍山電廠假想SBO/URG模擬

小結

- 反應器冷卻水系統壓力下降至蓄壓槽氮氣壓力以下後，蓄壓槽即可進行被動補水，將反應爐水位補高。
- 此外，若反應器冷卻水泵發生軸封洩漏事故，盡早將反應器冷卻水系統壓力及溫度降低可縮減模式中破口上下游之壓力差，使軸封洩漏率大幅降低。
- 實際上，蒸汽產生器降壓時，汽機驅動輔助飼水應可持續補充蒸汽產生器水位並避免蒸乾，但於本案例中假設輔助飼水系統於電廠全黑後失效。在事故模擬6小時期間，蒸汽產生器輔助飼水以及替代注水之總注水量約為116028加侖(439噸)，大約只用了一部機組之冷凝水儲存槽(CST)總水量之16%。
- 由全黑事故無緩和處置與執行斷然處置程序之模擬結果顯示，斷然處置程序在本模擬所假設之條件下可有效在事故初期穩定機組狀況，並防止核燃料裸露及放射性物質外釋。





大綱

前言

TRACE程式介紹

核三廠分析模式介紹

假想SBO模擬與URG斷然處置分析

假想ELAP模擬與FLEX strategy分析





案例分析與描述-ELAP案例

◆ FLEX案例分析目標：

本研究依據西屋公司報告WCAP-17601-P之電廠在長期喪失外電(ELAP, Extended Loss of AC Power)事件下，假設第五台緊急柴油機不可用，探討核三廠在長期喪失外電下爐心水位之變化，並評估廠內救援設備或FSG中高壓注水設備是否滿足救援成功準則。

◆ 分析核三廠ELAP案例，本研究針對下列重要參數進行探討。

- (1) 爐心水位
- (2) 爐心最高溫度
- (3) RCS壓力
- (4) RCP軸封洩漏率
- (5) 蓄壓槽注水量
- (6) 蒸汽產生器水位
- (7) 蒸汽產生器壓力





案例分析與描述-ELAP案例

◆ ELAP案例起始假設：

1. 事故一開始，發生全黑事故，電廠喪失所有廠外AC電，反應爐急停(TRACE設定60秒後，暫態開始)。
2. RCP初始洩漏為5 gpm/seal package (+1 gpm unidentified tech spec leakage)，RCP喪失冷卻後13分鐘RCP洩漏量增加為21 gpm/seal package。
3. 事故後60 sec TDAFWP啟動(TRACE設定：120s)
4. SG降壓並維持在300 psia。
5. 程式計算至爐心水位低於TAF以下即終止。

* TRACE前60秒模擬電廠穩態，60秒後暫態模擬開始。





案例分析與描述-ELAP案例

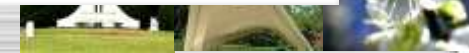
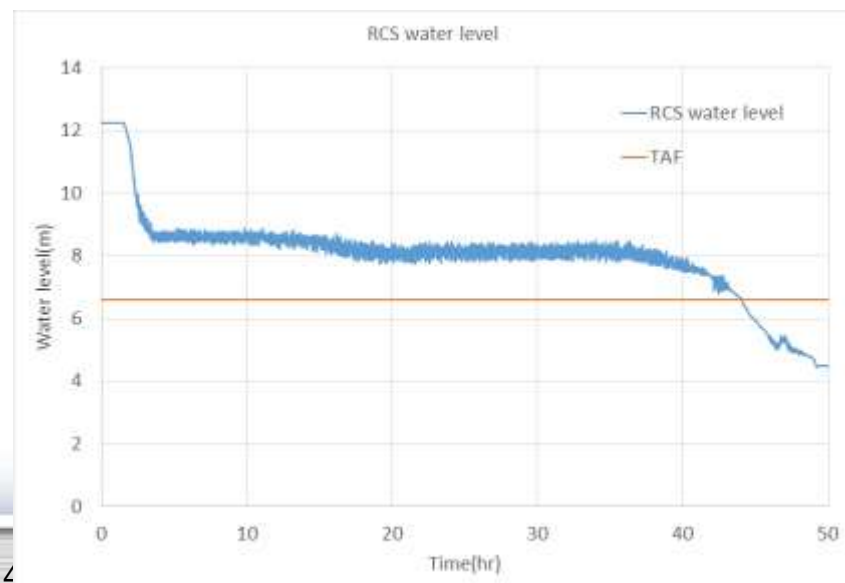
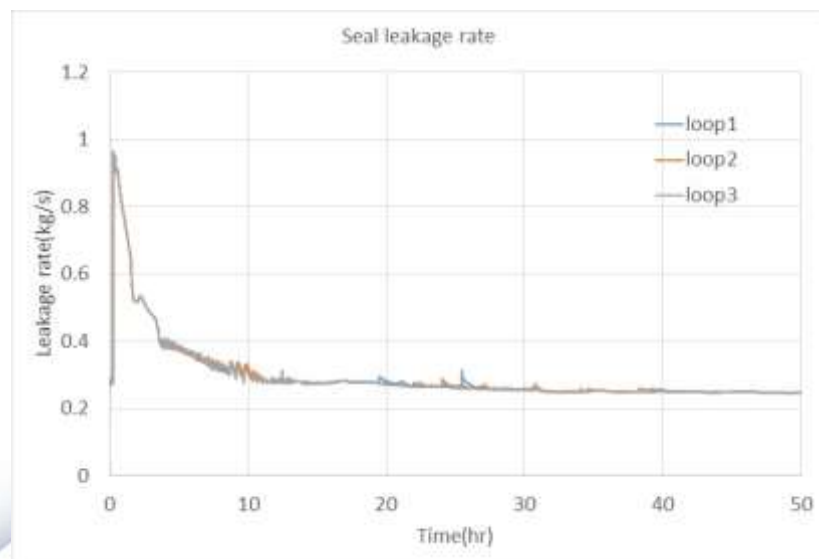
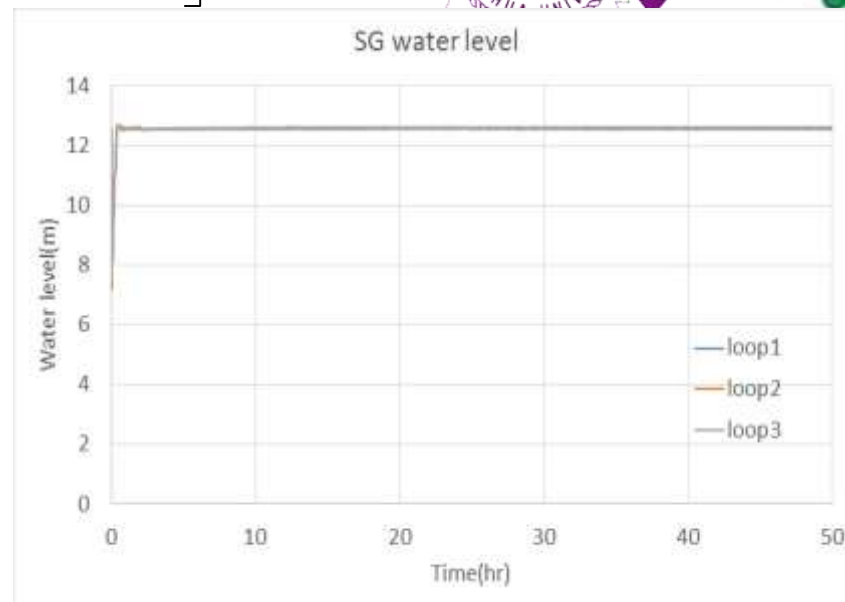
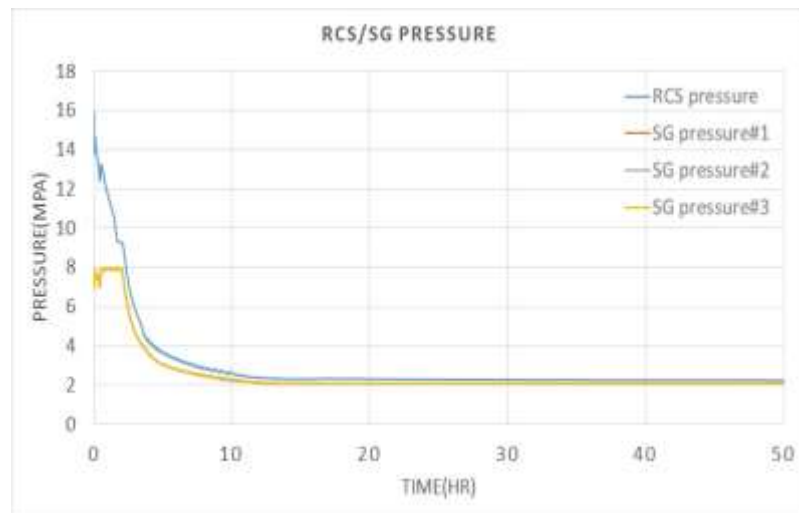
- 事故前開始為全功率運轉狀態，並維持穩態1分鐘。
- 事故一開始，電廠發生全黑事故，電廠喪失所有廠外交流電源；此時RCP軸封開始洩漏，總洩漏量為16gpm，13分鐘後提高至64gpm。
- 在事故兩小時後，二次側PORV開啟執行降壓，並在事故後13.31小時，二次側壓力降至300 psi($\sim 21 \text{ Kg/cm}^2$)。
- 汽機驅動輔助飼水泵仍維持運轉，持續補水至模擬結束
- 水位於43.87hr低於TAF

事故序列	
T=0~0.0167 hr	電廠維持穩態運轉
T=0.0167 hr	長期喪失廠外電源，SBO事故 反應爐急停 汽機跳脫 引水、洩水系統喪失 調壓槽加熱器喪失 RCP跳脫且開始洩漏，洩漏量為5gpm/loop(16gpm total) 主飼水喪失
T=0.033 hr	汽機帶動輔助飼水泵(TDAFP)開啟
T=0.233 hr	洩漏量升為21gpm/loop(64gpm total)
T=0.883 hr	調壓槽槽空
T=2.00 hr	SG開始控制性降壓，符合RCS 70 F/hr降溫率
T=3.63 hr	蓄壓槽開始注水至RCS
T=13.31 hr	SG降壓至300 psi($\sim 21 \text{ Kg/cm}^2$)
T=43.87 hr	RCS水位降至TAF
T=50 hr	模擬結束





案例分析與描述-ELAP案例





案例分析與描述-ELAP案例

小結

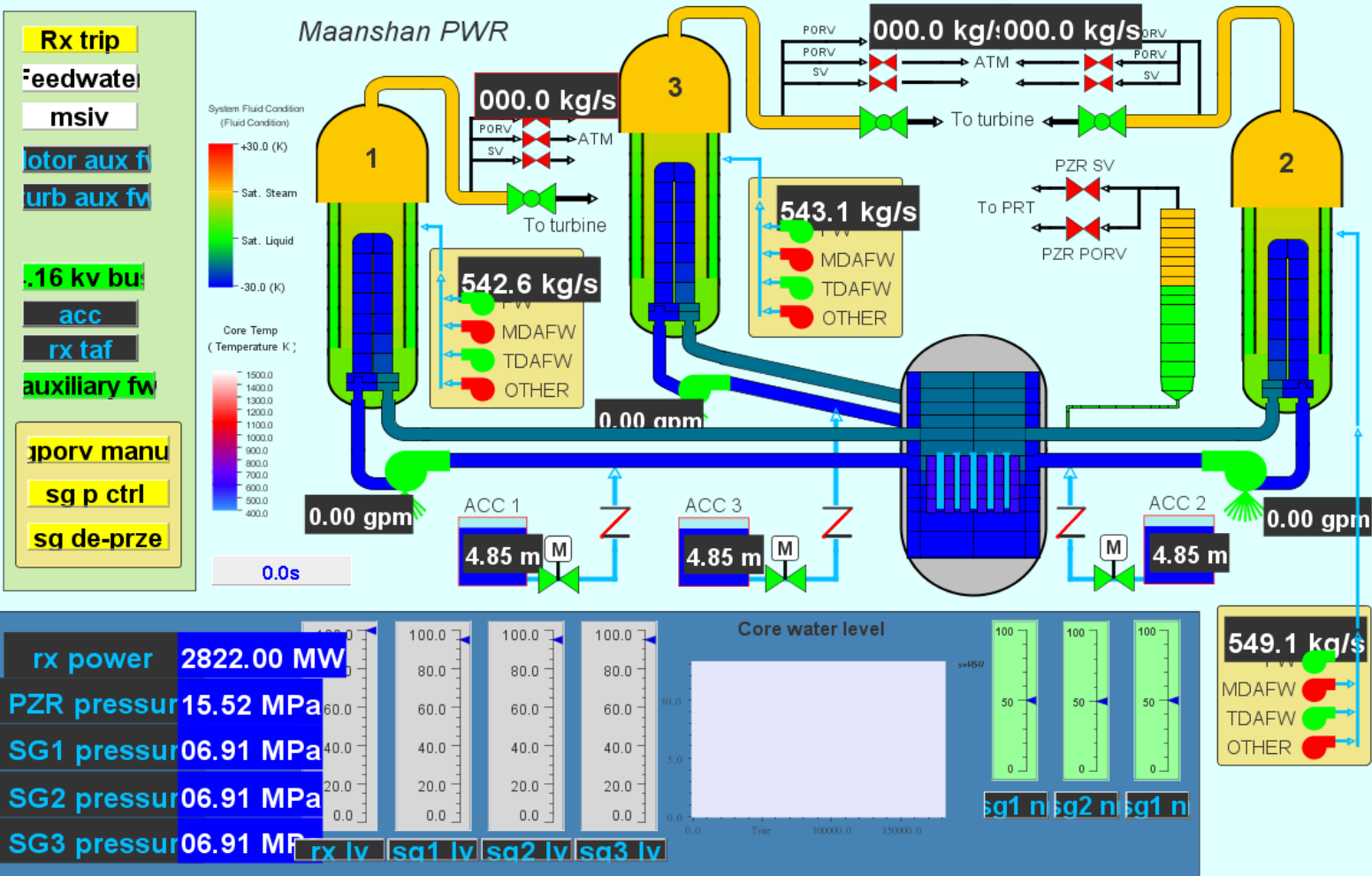
- ELAP 案例模擬中，假設核三廠在長期喪失交流電且軸封洩漏、一次側未有注水系統補水(除了蓄壓槽外)，二次側由TDAFP補水的情況下進行模擬。
- 由模擬結果可知，儘管二次側因TDAFP持續運轉長期保持水位高於50%，一次側因軸封洩漏且除蓄壓槽外無任何補水措施而導致水位持續下降，雖爐心水位下降期間因為三環路內冷卻水回流至爐心使水位維持在熱端管路高度，但在環路內冷卻水流光後水位便再度下降，最終在事故後43.87小時水位低於燃料頂部(TAF)高度。





案例分析與描述-ELAP案例

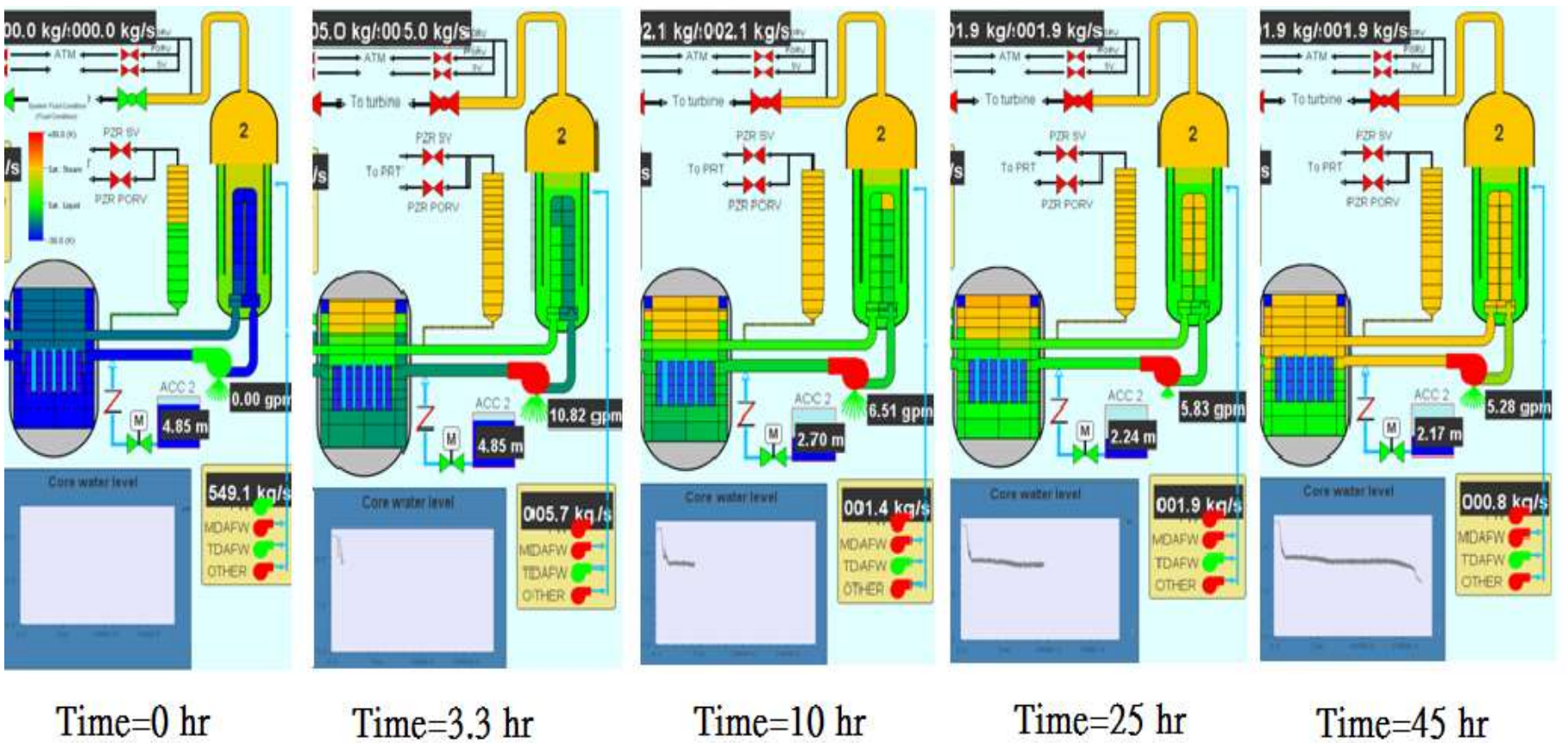
核三廠TRACE動畫模式





案例分析與描述-ELAP案例

RCS冷卻水回流現象





案例分析與描述-FLEX Strategy

◆ 兩個ELAP救援措施案例模擬:

- 廠內現有設備 (H-test pump、消防水)

- 中、高壓pump設備

Case 1	SG pressure(Kg/cm ²)	SG water level	RCS water level
Phase I (0~24 hr)	20	TDAFWP	Accumulator
Phase II	<8	Fire Pump 800gpm(35.704 Kg/s)	Hydro-Test pump 25gpm(1.14 Kg/s)
Case 2	SG pressure(Kg/cm ²)	SG water level	RCS water level
Phase I (0~24 hr)	20	TDAFWP	Accumulator
Phase II	20	215gpm(9.595 Kg/s) @800 psig	40gpm(1.79 Kg/s) @1500 psig

Phase I :
0~24hr ELAP事故

Phase II :
24hr 後進行補水





案例分析- case 1

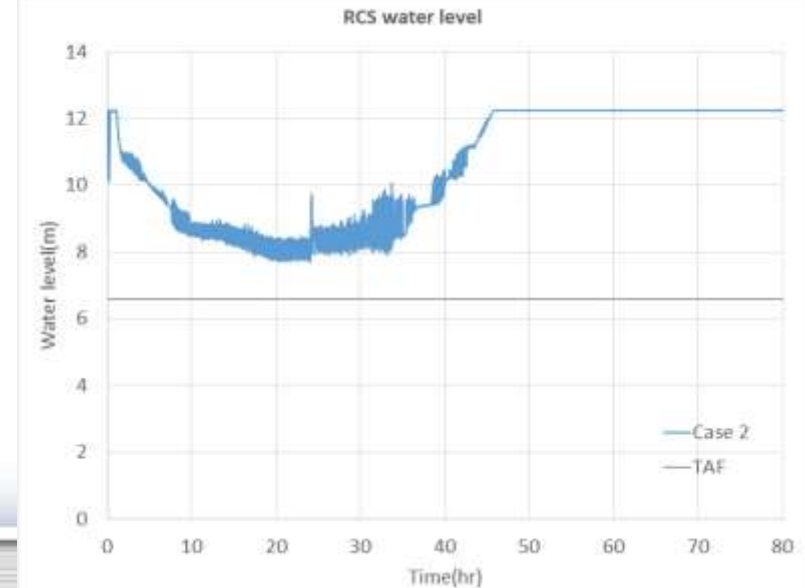
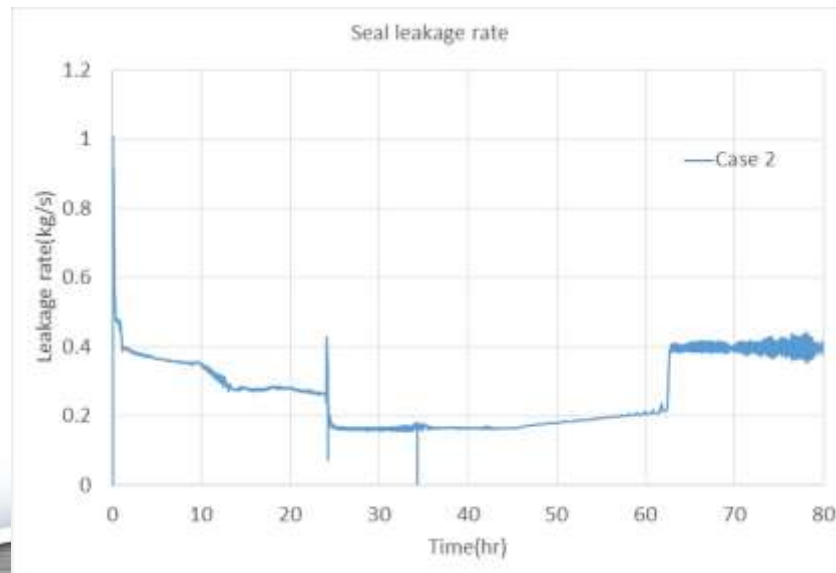
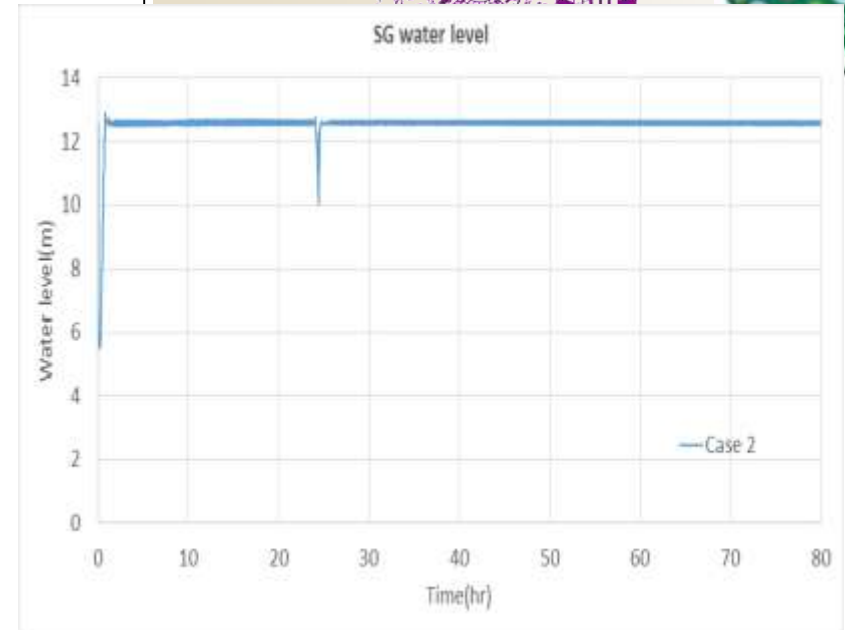
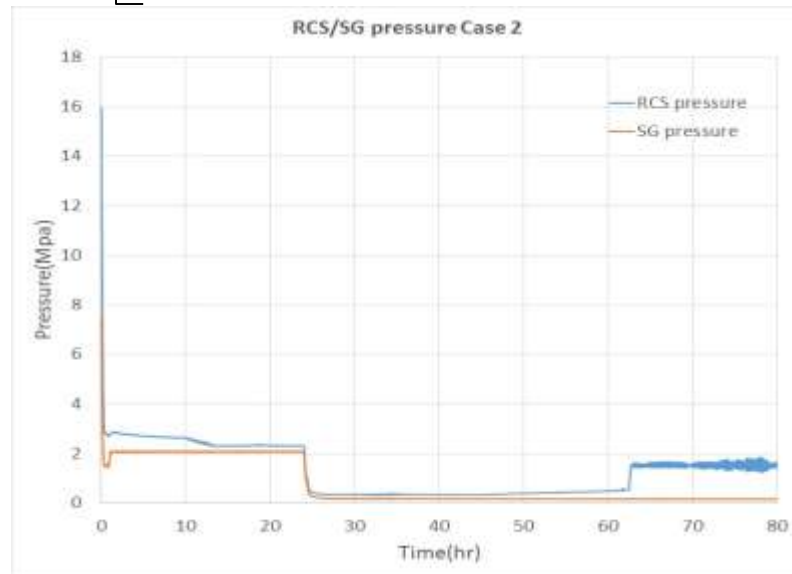
- 事故前開始為全功率運轉狀態，並維持穩態1分鐘。
- 事故一開始，電廠發生全黑事故 (station blackout, SBO)，電廠喪失所有廠外交流電源；此時RCP軸封開始洩漏，洩漏量為21gpm。
- Phase1(0~24hr)二次側由SG PORV 執行緊急洩壓至20 Kg/cm²，並由TDAFW 泵維持SG水位；Phase2(24~80hr)後洩壓低於8 Kg/cm²由低壓消防泵維持SG水位
- 進入Phase2(24~80hr)後，高壓水壓測試泵可提供RCS注水(25gpm~1.115 Kg/sec)。消防水系統可提供SG注水(800gpm~35.704 Kg/s)。

事故序列	
T=0~0.0167 hr	電廠維持穩態運轉
T=0.0167 hr	長期喪失廠外電源，SBO事故 反應爐急停 汽機跳脫 引水、洩水系統喪失 調壓槽加熱器喪失 RCP跳脫且開始洩漏，洩漏量為21gpm/loop 主飼水泵跳脫 汽機帶動輔助飼水泵開啟 開啟PORV進行二次側洩壓，並維持在20 Kg/cm ²
T=0.216 hr	蓄壓槽開始注水至RCS
T=12.47 hr	蓄壓槽停止注水至RCS
T=24.00hr	將二次側壓力降壓至低於8 Kg/cm ² 高壓水壓測試泵開始注水至RCS 消防泵開始注水至S/G
NA	爐心裸露
T=80.00 hr	模擬結束





案例分析- case 1



案例分析- case 2



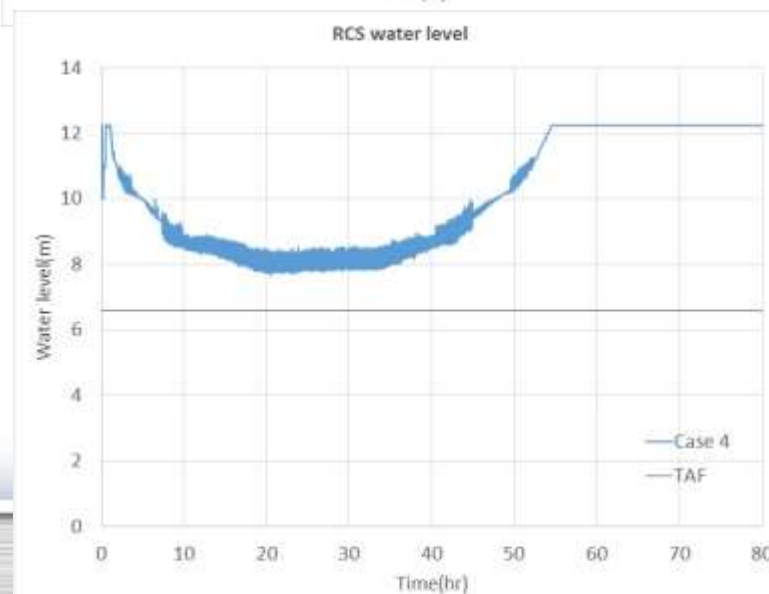
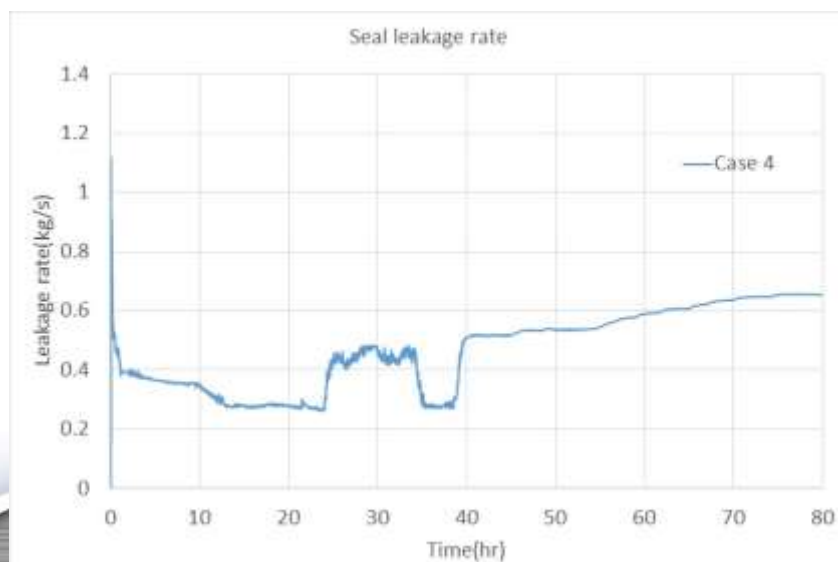
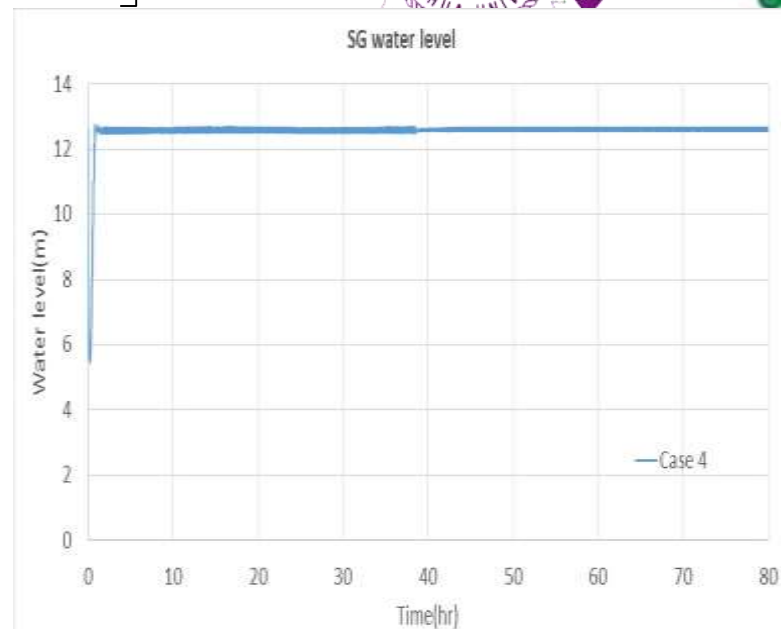
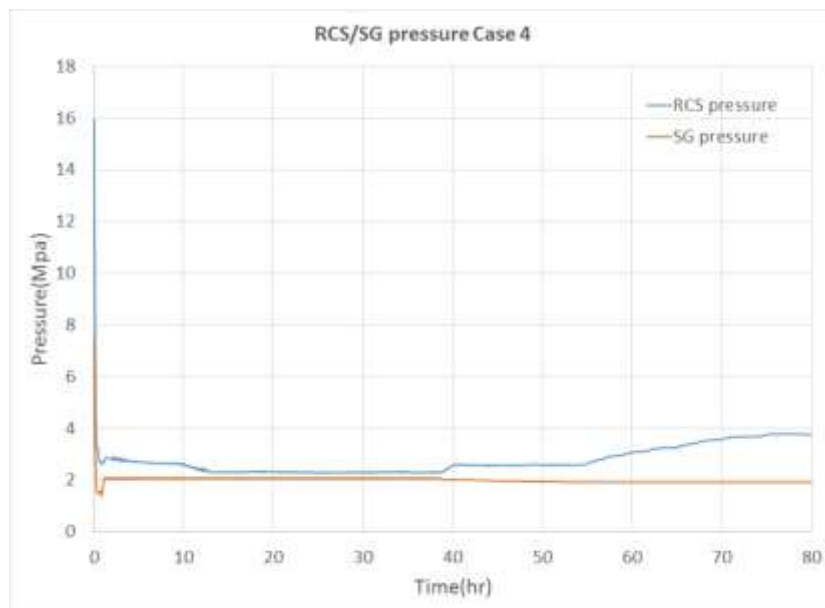
- 事故前開始為全功率運轉狀態，並維持穩態1分鐘。
- 事故一開始，電廠發生全黑事故 (station blackout, SBO)，電廠喪失所有廠外交流電源；此時RCP軸封開始洩漏，總洩漏量為21gpm。
- Phase1(0~24hr) 二次側由SG PORV 執行緊急洩壓至20 Kg/cm²，並由TDAFW 泵維持SG水位；Phase2(24~80hr)後持續維持壓力在20 Kg/cm²。
- 進入Phase2(24~80hr)後，高壓注水設備可提供RCS注水(40gpm~1.7852Kg/sec)，中壓注水設備可提供SG注水(215gpm~9.595 Kg/sec)

事故序列	
T=0~0.0167 hr	電廠維持穩態運轉
T=0.0167 hr	長期喪失廠外電源，SBO事故 反應爐急停 汽機跳脫 引水、洩水系統喪失 調壓槽加熱器喪失 RCP跳脫且開始洩漏，洩漏量為21gpm/loop 主飼水泵跳脫 汽機帶動輔助飼水泵開啟 開啟PORV進行二次側洩壓，並維持在20 Kg/cm ²
T=0.218 hr	蓄壓槽開始注水至RCS
T=8.33 hr	蓄壓槽停止注水至RCS
T=24.00hr	FLEX高壓注水泵開始注水至RCS 汽機帶動輔助飼水泵關閉 FLEX中壓注水泵開始注水至S/G
NA	爐心裸露
T=80.00 hr	模擬結束





案例分析- case 2





案例分析與描述-FLEX案例

小結

- 在分別比對利用廠內現有設備進行外部注水(CASE 1)，以及假設具有FSG中高壓注水系統依循FLEX程序進行外部注水(CASE 2)，其RCS水位皆可維持在TAF以上。
- 廠內現有設備：fire pump 800gpm，H-test pump 25gpm 皆能將一、二次側水位補滿，讓電廠維持在安全狀況下。
- 中高壓注水系統：中壓pump(800psig) 215gpm，高壓pump(1500psig) 皆能將一、二次側水位補滿，讓電廠維持在安全狀況下。



[**Maanshan - TRACE**]



謝謝聆聽！

