

## 緊急操作程序(EOP): 一/二次圍阻體控制 及氫氣監測與控制

台電核二廠模擬中心

日期:104.7

講師:游振造

Email:u881007@taipower.com.tw

980808

1



## 課程內容

一、一次圍阻體控制。 

二、二次圍阻體控制。 

三、放射性物質釋放控制。 

四、氫氣監測與控制。 

2



2

## 一、一次圍阻體控制

3



## 一次圍阻體控制指引之目的

行動：

- 提供無法控制之分裂產物外洩的屏蔽。
- 將一次圍阻體內，經由安全釋壓閥和一次側系統破裂處所洩出之蒸汽，加以圍阻和冷凝。
- 阻擋由反應爐對人員放射出之輻射線。
- 對重要安全設備提供一個保護環境。

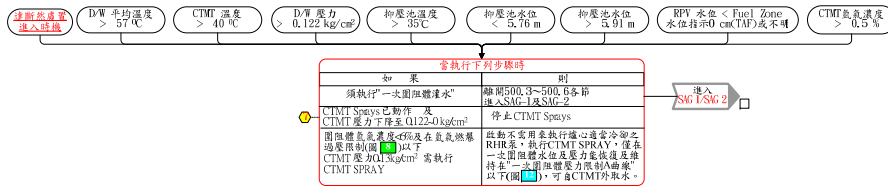
目的：

1. 維持一次圍阻體之完整性
2. 保護一次圍阻體內之設備

4



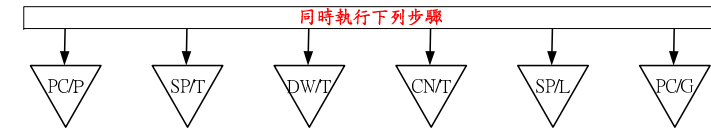
## 一次圍阻體控制之進入時機 為下列任一項：



- 抑壓池水溫高於[35℃(最嚴格抑壓池水溫 LCO 限制)]
- 乾井溫度高於[57 °C (乾井溫度 LCO)]
- 圍阻體溫度高於[40 °C (圍阻體溫度 LCO)]
- 乾井壓力高於[0.122 kg/cm<sup>2</sup>(乾井高壓力急停設定點)]
- 抑壓池水位高於[5.91 m (抑壓池高水位 LCO)]
- 抑壓池水位低於[5.76 m (抑壓池低水位 LCO)]
- 一次圍阻體氫氣濃度高於[0.5 % (氫氣警報高設定點)]
- **斷然處置進入時機**: 1. 喪失蒸汽補水系統以外之電力驅動反應爐補水能力。2. 喪失所有交流電源(包括廠外、廠內EDG、第五台 EDG、氣渦輪發電機等原固定式電源)。3. 強震急停，且海嘯警報發佈。

5

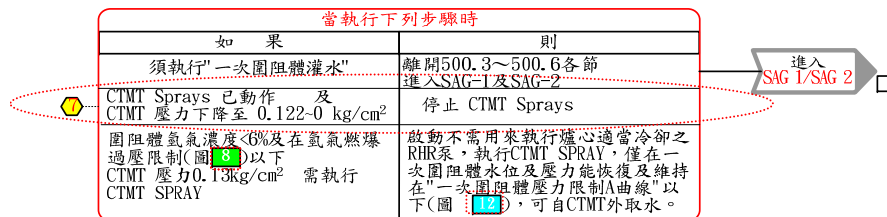
## 一次圍阻體控制 同時控制六項重要參數



1. 抑壓池水溫(SP/T)。
2. 乾井溫度(DW/T)。
3. 圍阻體溫度(CN/T)。
4. 一次圍阻體壓力(PC/P)。
5. 抑壓池水位(SP/L)。
6. 可燃氣體混合(氫氣)(PC/G)。

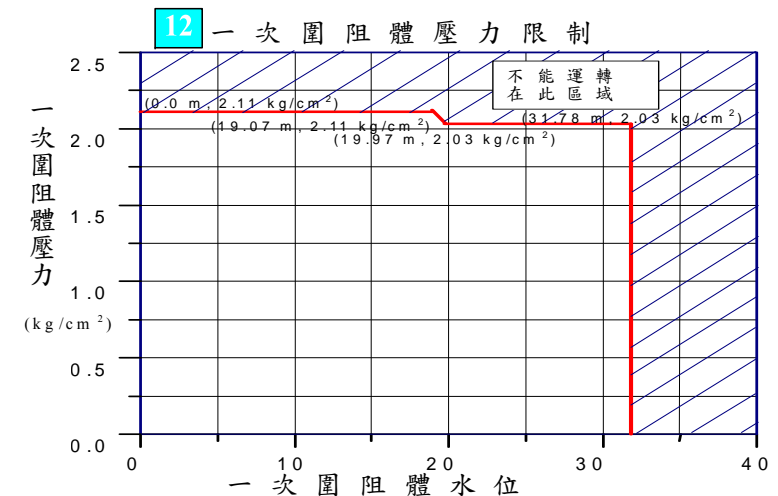
6

## 一次圍阻體控制之Override



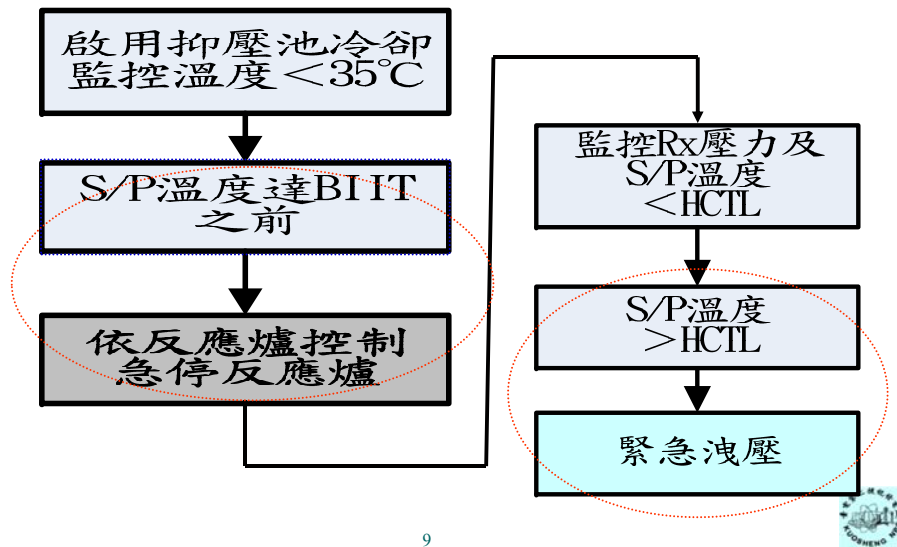
- 避免CTMT負壓。
- ECCS系NPSH受影響

7



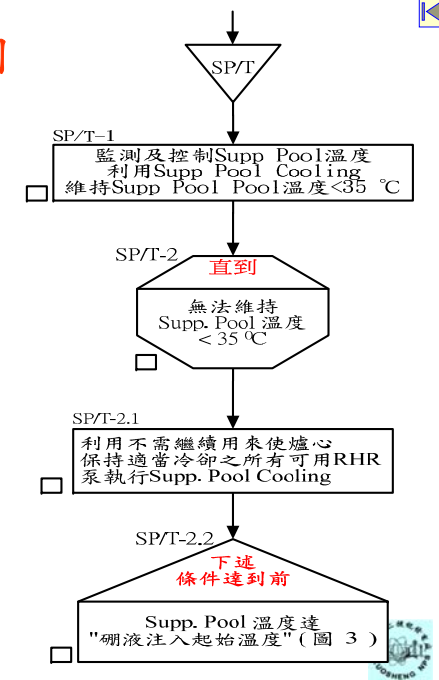
8

## 抑壓池溫度SP/T控制之策略



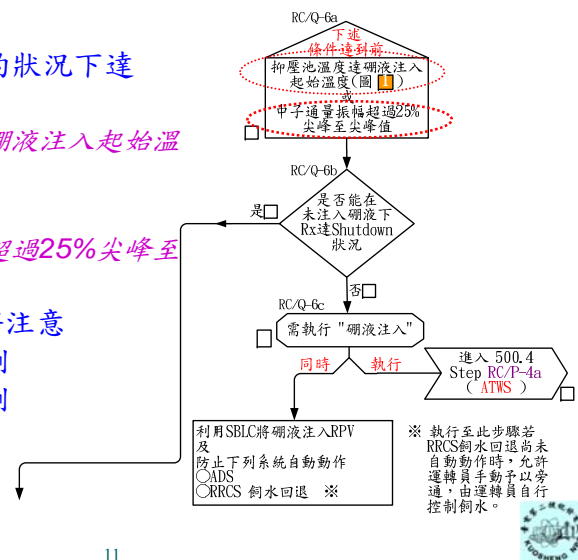
## 抑壓池溫度控制

- 運轉可用的RHR抑壓池冷卻模式。
- 需考慮適當的爐心冷卻。
- 硼液注入起始溫度(BIIT)取決於下述高值：
  - 抑壓池的溫度上升至HCTL的運轉限值之前，能將HSBW硼液注入爐心。
  - 運轉規範規定“急停”限值。



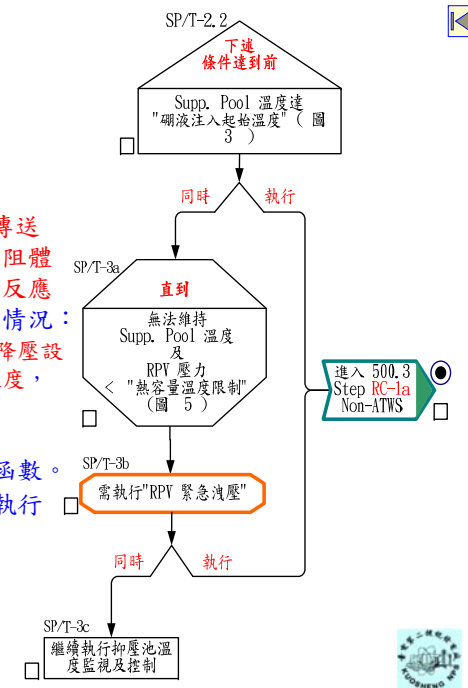
## 備用硼液注入時機：

- Rx無法在未注硼的狀況下達Shutdown：
  - 抑壓池溫度達硼液注入起始溫度(圖 1)
  - 或
  - 中子通量振幅超過25%尖峰至尖峰值
- 硼液注入時應同時注意
  - 反應爐壓力控制
  - 反應爐水位控制



## 抑壓池溫度控制 需緊急洩壓時機

- 抑壓池熱容量溫度限制：
  - 係取抑壓池最高溫度，當自RPV傳送至一次圍阻體的能率，大於圍阻體排氣容量之前，在此溫度下進行反應爐緊急洩壓，不會造成超過下列情況：
    1. "抑壓池及抑壓池內執行反應爐降壓設備" 仍可運轉時的抑壓槽最高溫度，或
    2. 一次圍阻體壓力限制曲線A。
- HCTL是反應爐壓力和抑壓池水位的函數。
- 用來防止“圍阻體”及“圍阻體內執行安全停機設備”失效。
- 反應爐降壓。



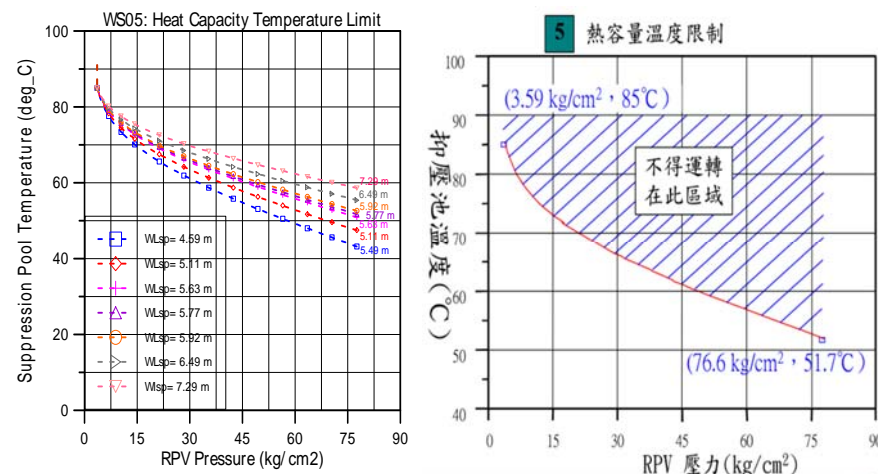
## HCTL (熱容量溫度限制) (Heat Capacity Temperature Limit)

- 係取抑壓池最高溫度，當自RPV傳送至一次圍阻體的能量率，大於圍阻體排氣容量之前，在此溫度下進行反應爐緊急洩壓，不會造成超過下列情況：
  1. ”抑壓池及抑壓池內執行反應爐降壓設備” 仍可運轉時的抑壓槽最高溫度，或
  2. 一次圍阻體壓力限制曲線A。
- HCTL是反應爐壓力和抑壓池水位的函數。
- 用來防止”圍阻體”及”圍阻體內執行安全停機設備”失效。

13



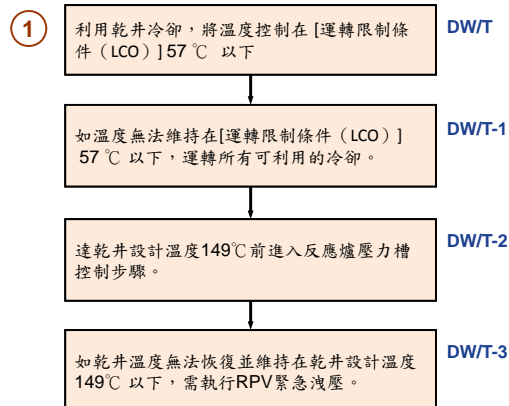
圖5 熱容量溫度限制



14



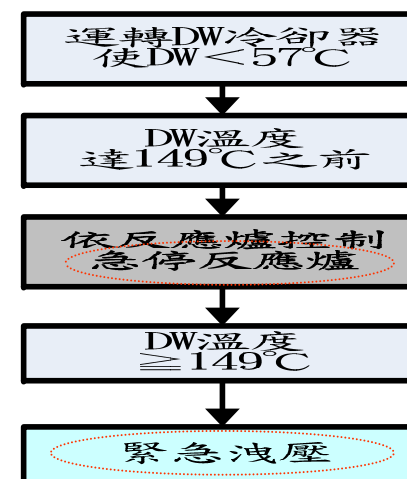
## EPG/SAG第三版乾井溫度DW/T控制之策略



2014年2月17-21日

15

## 乾井溫度DW/T控制之策略

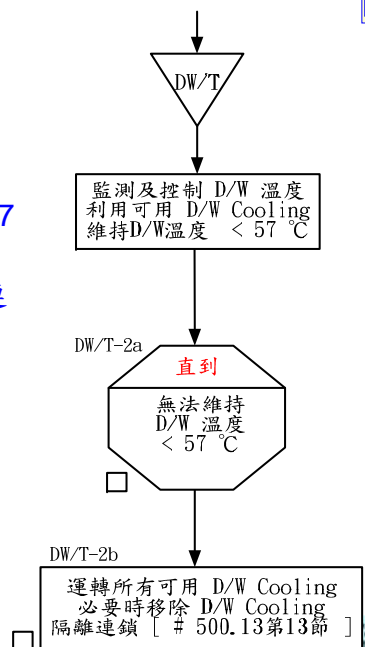


16



## 乾井溫度控制流程(1/2)

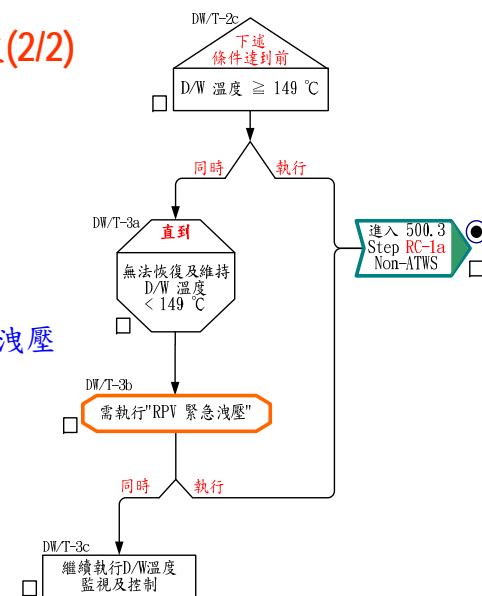
- 監測及控制 D/W 溫度：利用可用 D/W Cooling，維持 D/W 溫度  $< 57^{\circ}\text{C}$ 。
- 必要時移除 D/W Cooling，隔離連鎖 [ # 500.13 第 13 節 ]



17

## 乾井溫度控制流程(2/2)

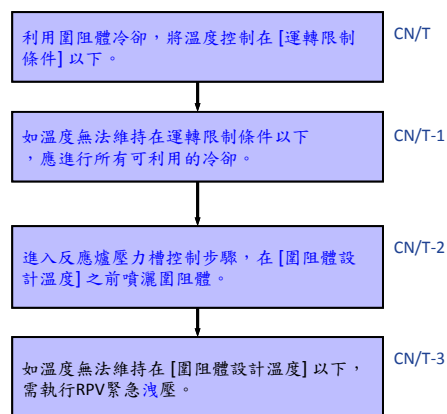
- D/W 溫度達  $149^{\circ}\text{C}$  之前：
  - RC/1a
- D/W 溫度達  $149^{\circ}\text{C}$ ：
  - RC/1a
  - 緊急措施 2 RPV 緊急洩壓



18

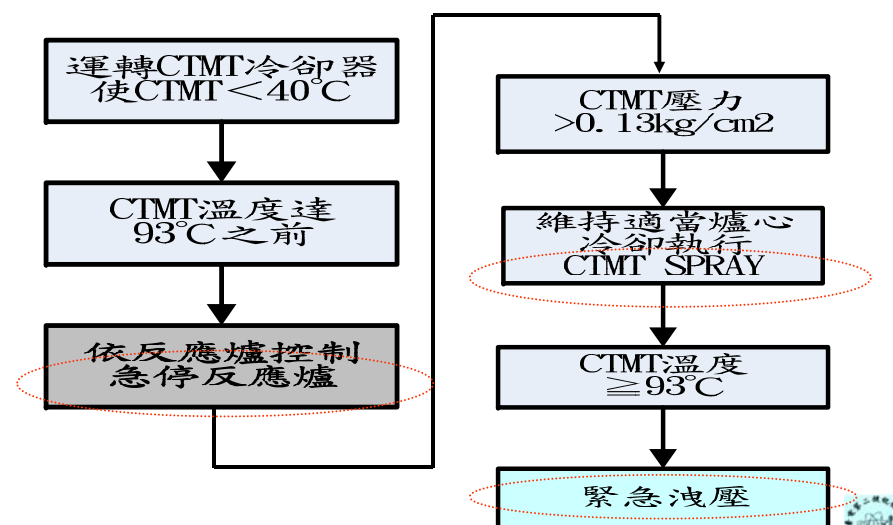
## EPG/SAG 第三版圍阻體溫度

B7



19

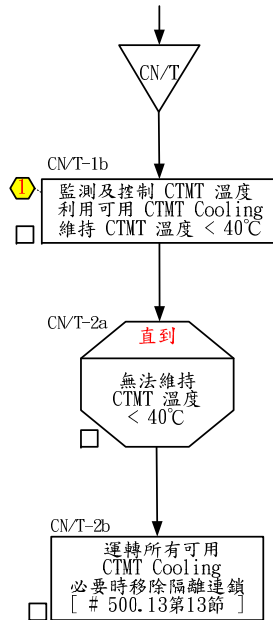
## CTMT 溫度 CN/T 控制之策略



20

## CTMT溫度控制流程(1/2)

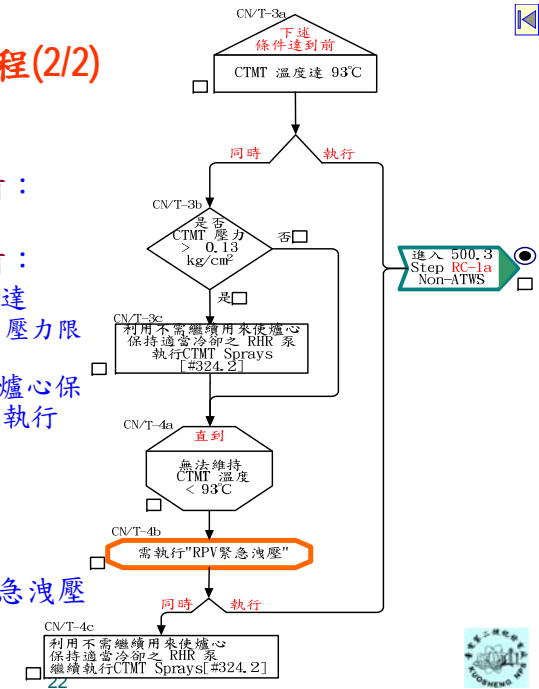
- 監測及控制 CTMT 溫度：利用可用 CTMT Cooling，維持 CTMT 溫度  $< 40^{\circ}\text{C}$ 。
- 必要時移除 CTMT Cooling，隔離連鎖 [ # 500.13第13節 ]



21

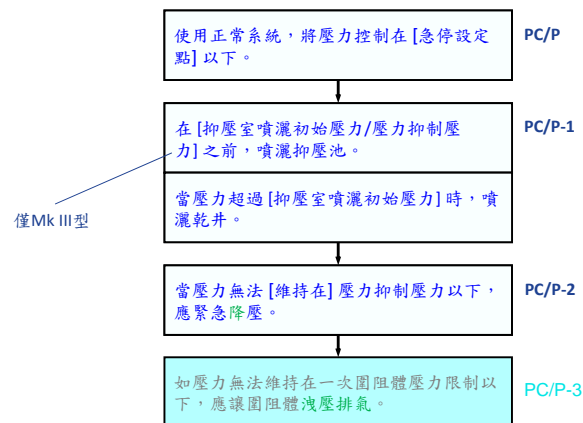
## CTMT溫度控制流程(2/2)

- CTMT溫度達 $93^{\circ}\text{C}$ 之前：
  - RC/1a
- CTMT溫度達 $93^{\circ}\text{C}$ 之前：
  - 如果 CTMT此時壓力達 CSIPL圍阻體噴灑啟用壓力限制，利用不需用來使爐心保持適當冷卻之RHR泵執行 CTMT Sprays。
- CTMT溫度達 $93^{\circ}\text{C}$ ：
  - “熱能”仍無法移除
  - RC/1a
  - 緊急措施 2 RPV緊急洩壓



## EPG/SAG第三版一次圍阻體壓力（第一部分）

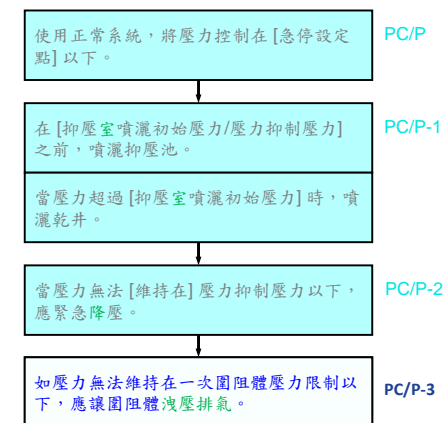
B7



23

## EPG/SAG第三版一次圍阻體壓力（第二部分）

B7



壓力降低的要求是為了恢復並維持適當爐心冷卻或降低總體廠外輻射劑量所需的讓一次圍阻體洩壓排氣

24

## EPG/SAG第三版超過設計基礎的排氣

### 爐心冷卻

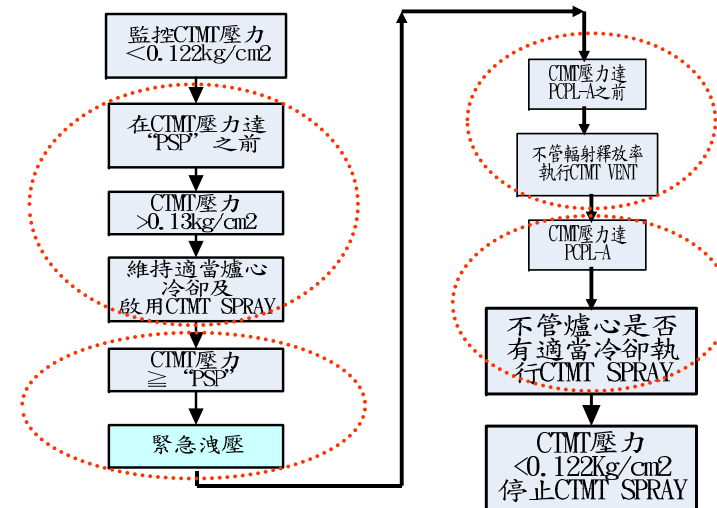
- 允許低壓注水
- 在延長電廠全黑期間移除衰變熱

### 限制輻射釋放

- 圍阻體可能破損
- 預期重大燃料損害
- 高抑壓池水位

25

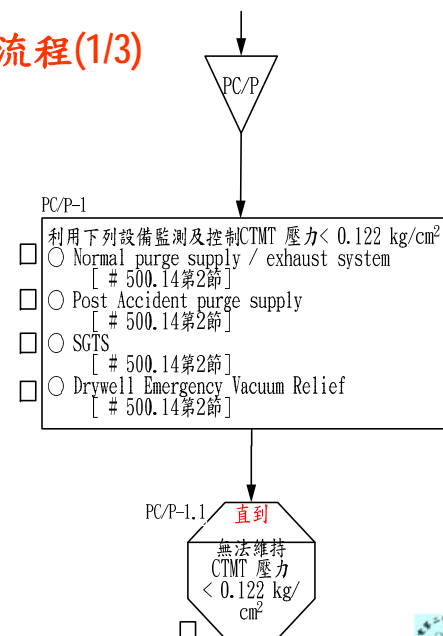
## 一次圍阻體之壓力控制(PC/P)之策略



26

## 一次圍阻體壓力控制流程(1/3)

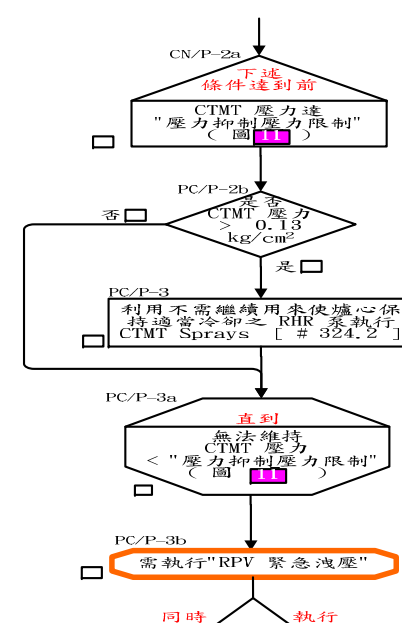
- 依PC/P-1監控CTMT壓力 < 0.122kg/cm<sup>2</sup>。
- VR3/4
- VR8A/8B
- VR9A/B
- GNHV300



27

## 一次圍阻體壓力控制流程(2/3)

- PSP在RPV受壓狀態下，確保RPV緊急降壓過程中，一次圍阻體的壓力抑制能力可被維持。
  - 一次圍阻體水位的函數。
- CSPIL啟動圍阻體噴灑，將不會造成因蒸發冷卻壓力(an evaporative cooling pressure)降至大氣壓力之下的最小圍阻體壓力。
  - CSIPL是圍阻體溫度的函數。
  - 啟動圍阻體噴灑係在避免圍阻體受損。
  - 0.13kg/cm<sup>2</sup>
- 緊急洩壓無法維持CTMT < PSP



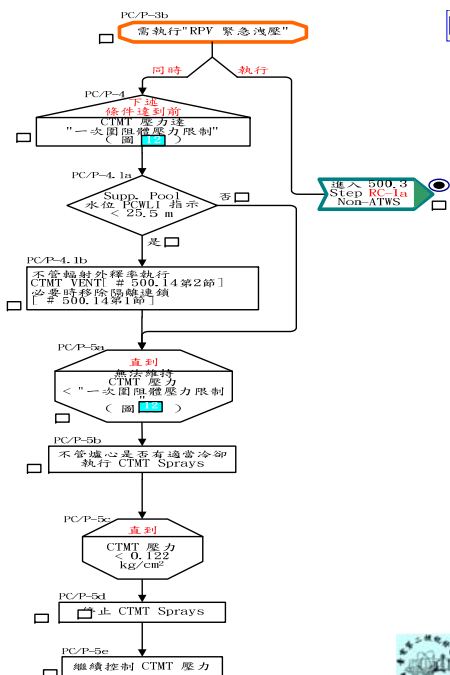
28

980808



## 一次圍阻體壓力控制 流程(3/3)

- RPV緊急洩壓後，維持CTMT < PCPL。
- 在CTMT > PCPL之前：
  - 若CTMT水位 < 25.5M，執行CTMT排氣。
- CTMT = PCPL
  - 不管爐心是否有適當冷卻執行CTMT SPRAY。



29

## 在PCPL之前 引動CTMT排氣較理想時機探討

- 啟用CTMT噴灑仍無法控制CTMT壓力
- 若CTMT內部污染，則儘可能控制CTMT壓力 < PCPL，將污染物於CTMT。
- 若可能依據氣象狀況考慮最有利的人員撤退時間、路徑、集結地點。
- 若明顯的預期燃料破損，則在CTMT尚未污染前，提早執行CTMT排氣，降低CTMT壓力，以利將分裂產物包封滯留在CTMT內，當CTMT再度排氣時，可減少對外界輻射強度。
- 若已喪失圍阻體完整，則經由適當途徑、設施的排放策略，可降低分裂產物的排放。
- 依CTMT液位的上昇趨勢，考慮排氣的時間點。

30

## 執行CTMT排氣時 需考慮因素

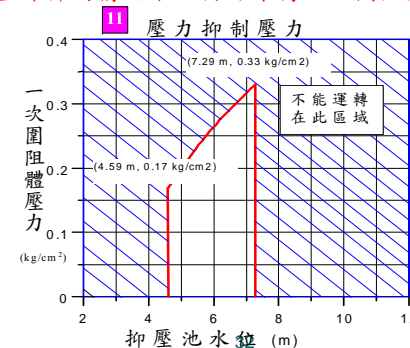
- 釋壓能力：避免VENT時，造成設備受損，造成大量放射性物質排至二次圍阻體。
- 輻射釋放率：途徑、設備、過濾。
- 排氣量
- 可控制調節能力
- 系統間的相互關係
- 排氣管路所經途徑
- 排氣過程可偵測能力
- CTMT液位

980808

31

## PSP (壓力抑制壓力) (Pressure Suppression Pressure)

- 壓力抑制壓力(Pressure suppression Pressure, PSP)為一次圍阻體水位的函數。
- 於EPGs中，它用以在RPV受壓狀態下，確保RPV緊急降壓過程中，一次圍阻體的壓力抑制能力可被維持。
- 於進入SAGs後，它用以在RPV預期會被爐心熔渣熔穿時，確保爐心熔渣於低壓外釋的情況下，仍可維持一次圍阻體之壓力抑制能力。





## MPSPCWL 最大壓力抑制一次圍阻體水位 (Maximum Pressure Suppression Primary Containment Water Level.)

- 為最高之一次圍阻體水位，在此限制高度下，於爐心熔渣造成RPV破裂後，一次圍阻體仍具有足夠的壓力抑制能力來維持其完整性。
- Mark-III圍阻體為相對應於堰牆頂端上方3英吋高度的一次圍阻體水位。
- 7.29m

33



## CSIPL 圍阻體噴灑啟動壓力限制 (Containment Spray Initiation Pressure Limit)

- 啟動圍阻體噴灑，將不會造成因蒸發冷卻壓力(an evaporative cooling pressure)降至大氣壓力之下的最小圍阻體壓力。
- CSIPL是圍阻體溫度的函數。
- 啟動圍阻體噴灑係在避免圍阻體受損。
- 0.13kg/cm<sup>2</sup>

34



## 圍阻體噴灑啟用時機 EOP部份

時機：

- PC/P-2b~
  - 在圍阻體壓力達PSP之前
- PC/P-5B CTMT壓力無法維持 <PCPL
- CN/T-3b~
  - CTMT溫度>93°C
- PC/G-5~
- PC/G-5：下列條件任一，且SAG-1所允許
  - 點火器失能，且無法確認CTMT氫氣濃度<HDOL；或
  - CTMT氫氣濃度>HDOL或未知。

條件：

- CTMT壓力>0.13kg/cm<sup>2</sup>
- 爐心無注水問題

● <PCPL，可由外部取水。

35



## 圍阻體噴灑啟用時機 SAG部份

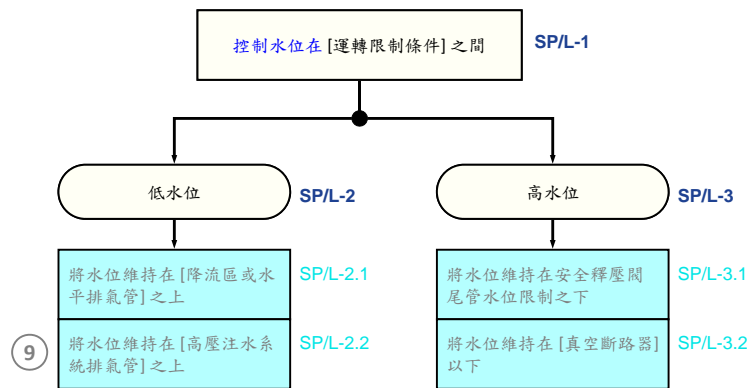
- SAG-2：運轉參數下述狀況，則依SAG-1之策略：
  - 圍阻體壓力達PSP之前
  - 圍阻體溫度達到93°C之前
  - 圍阻體輻射強度達到58 R/hr之前
- SAG-1：當[圍阻體壓力高於0.13 kg/cm<sup>2</sup>] 且
  - [RC/F-2：>TAF]
    - 可以維持RPV水位在Fuel Zone指示0 cm以上
  - [RC/F-3：>BAF]
    - 可以維持RPV水位在Fuel Zone指示-380 cm(BAF)以上
  - [RC/F-4：>MDRIR]
    - 可以維持RPV注水大於MDRIR (圖 18)
  - [RC/F-5：<PSP]
  - [RC/F-6：>PSP] 及以下任一
    - RPV注水不會減少 或
    - RPV與圍阻體之壓差至少為3.59 kg/cm<sup>2</sup> 或
    - 圍阻體噴灑能回復圍阻體壓力於壓力抑制壓力限值內 (圖 11)
  - [RC/F-1：RPV破裂，PSP不再需要]
    - RPV注水不會減少
  - [RC/F-7：RPV破裂圍阻體灌水7.29m]

36



## EPG/SAG 第三版抑壓池水位（第一部分）

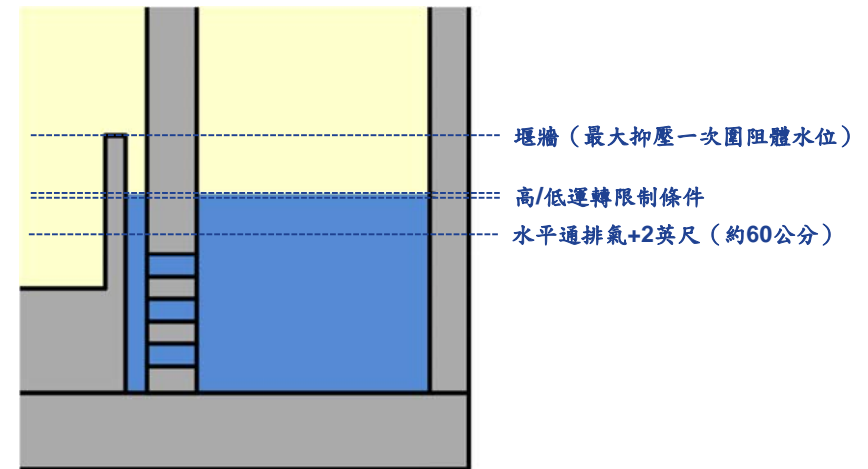
B7



37



## EPG/SAG 第三版抑壓池水位（Mk III型）



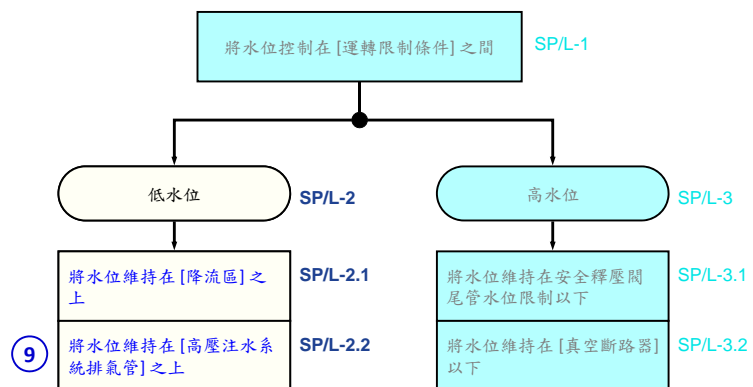
2014年2月17-21日

38



## EPG/SAG 第三版抑壓池水位（第二部分）

B7



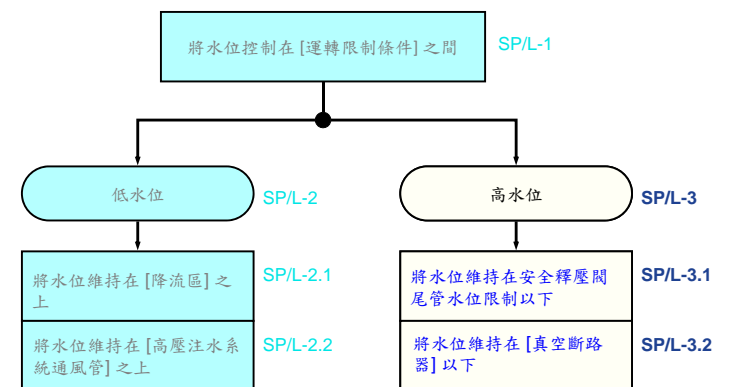
2014年2月17-21日

39



## EPG/SAG 第三版抑壓池水位（第三部分）

B7



2014年2月17-21日

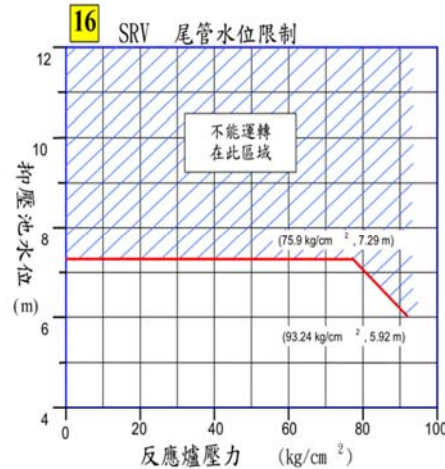
40





## STPLL (安全釋壓閥尾管水位限制) ( SRV Tail Pipe Level Limit )

- 為RPV壓力的函數。
- 下數取低值：
  - 最高壓力抑制一次圍阻體水位。
  - SRV開啟時不會造成SRV尾管、淬冷器、支架超出硬力負荷之最高抑壓池水位。
- 當抑壓池水位高於STPLL時，操作SRV會損壞SRV的排放管路，圍阻體可能因此直接受壓而失效，也可能因為尾管揮動(pipe-whip)與噴流衝擊(jet-impingement)而導致圍阻體內的設備損壞。



980808

45



## 二、二次圍阻體控制

980808

46



## 二次圍阻體控制之目的

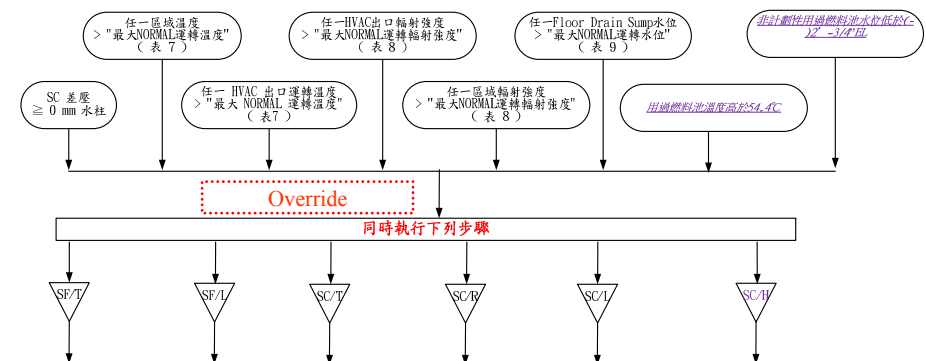
- 目的：
  - 保護二次圍阻體內部設備。
  - 限制放射性物質釋放到二次圍阻體或其他地方。
  - 維持二次圍阻體之完整性。
  - 限制二次圍阻體的放射性物質釋放。
- 四個基本功能相關：
  1. 包容從一次圍阻體洩漏出來之核分裂產物。
  2. 將空浮輻射物由高處排放點釋放出去，以使地平面之空浮程度降到最低。
  3. 將穿越一次圍阻體的輻射屏蔽住，以免人員受到輻射照射。
  4. 對核能安全有重大關係之關鍵設備，提供一個安全環境。

980808

47



## 目前二次圍阻體控制流程架構




980808

48





□	SC HVAC 排氣輻射強度 > 0.15 mSv/hr	確認 SC HVAC 隔離及 確認 SBGTS 起動 [ #345 ]	
□	SC HVAC 隔離及 SC HVAC 排氣輻射強度 < 0.15 mSv/hr	重新起動 SC HVAC 並及時解除 D/W 壓力與 RPY 低水位 隔離連鎖 [ #500.13 第 14 節 ]	
□			
□	須執行一次圍阻體灌水	離開 500.3 ~ 500.6 各節，進入 SAG-1 和 SAG-2	

- 



<input type="checkbox"/>	SC HVAC排氣輻射強度>0.15mSv/hr	確認 SC HVAC 隔離及 確認 SBGTS 起動 [ #345]	
<input type="checkbox"/>	SC HVAC隔離 及 SC HVAC排氣輻射強度 <0.15 mSv/hr	重新啟動SC HVAC 必要時移除D/W壓力與RPV低水位 隔離連鎖[ #500.13第14節]	
<input type="checkbox"/>	須執行一次阻阻體灌水	離開500.3~500.6各節，進入 SAG-1 和SAG-2	進入 SAG 1/SAG 2

- 

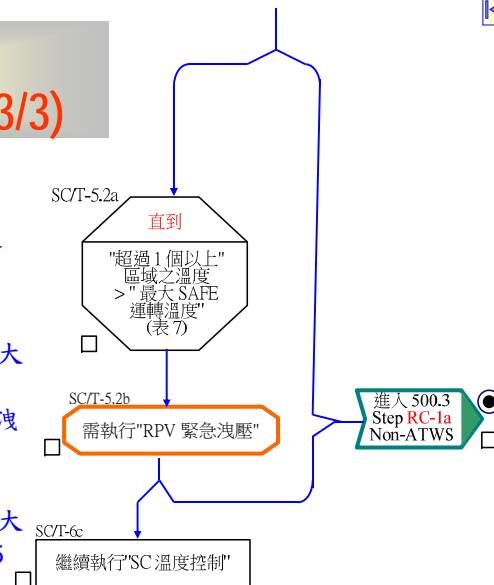


- 

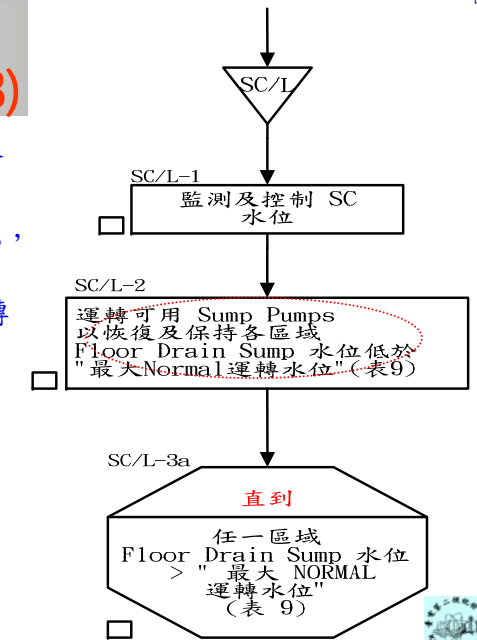


- 

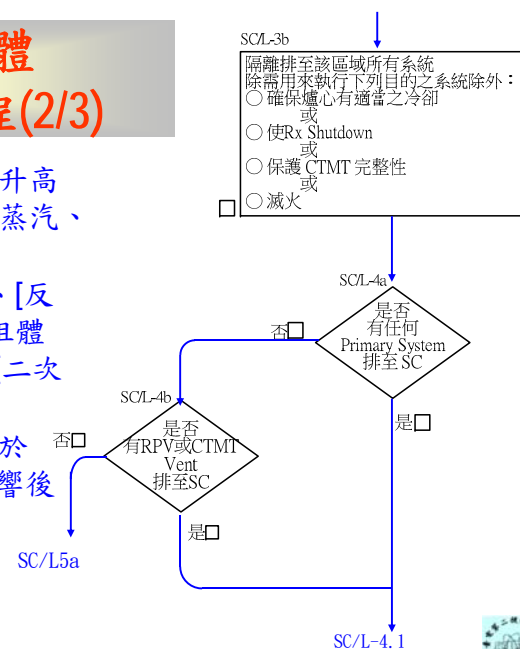
- 來自RPV/一次系統之洩漏~
  - 任一個區域達“最大安全運轉溫度”之前：
    - [RC/1a]急停、停機。
  - 超過一個以上區域達“最大安全運轉溫度”：  
[Contingency 2 RPV緊急洩壓]
- 非來自RPV/一次系統之洩漏~
  - 超過一個以上區域達“最大安全運轉溫度” OP-245  
停機



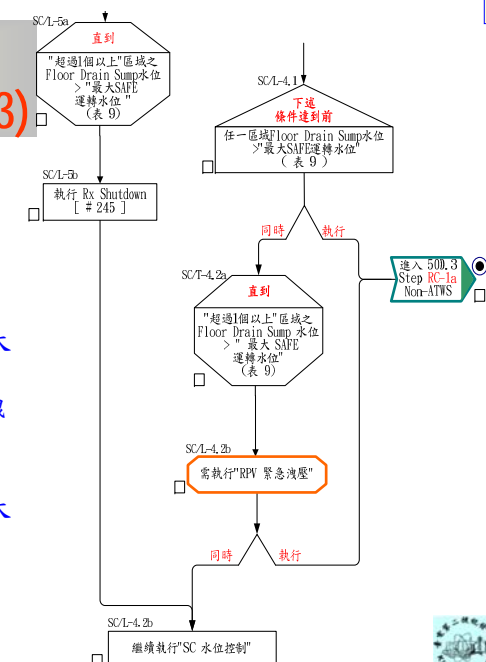
- 監控二次圍阻體如[表9]所列各區域水位於限值內。
- 啟用可用的Sump Pumps，以維持維持二次圍阻體區域之水位在[最大正常運轉水位]內。
- Q&A：
  - SUMP PUMP容量？



- 二次圍阻體區域水位升高通常是因火災、高能蒸汽、液體之熱源所造成。
- 維持[適當爐心冷卻]、[反應爐停機]、[一次圍阻體完整]及[滅火]優先於[二次圍阻體控制]。
- 區域高水位是否來自於[RPV/一次系統]，影響後續之行動。



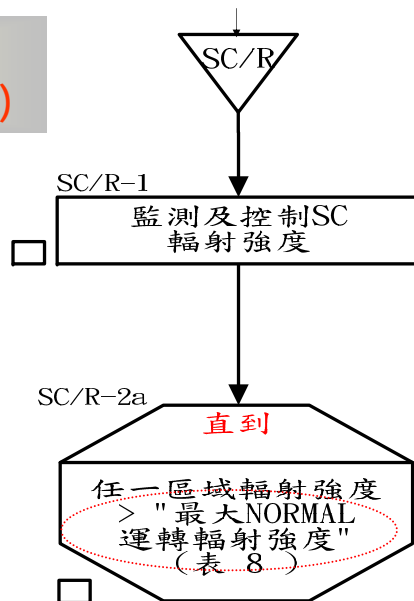
- 來自 RPV/一次系統之洩漏~
  - 任一個區域達”最大安全運轉水位”之前：
    - ✧ [RC/1a]急停、停機。
  - 超過一個以上區域達”最大安全運轉水位”：  
[Contingency 2 RPV緊急洩壓]
- 非來自 RPV/一次系統之洩漏~
  - 超過一個以上區域達”最大安全運轉水位” OP-245 停機





## 二次圍阻體 輻射強度控制流程(1/3)

- 監控二次圍阻體如[表8]所列各區域輻射強度於限值內。
- 查漏、止漏，以維持二次圍阻體區域之輻射強度在[最大正常運轉輻射強度]內。

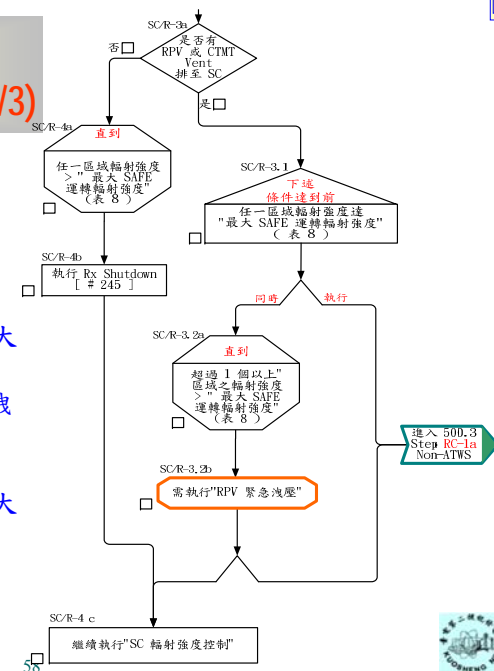


980808

57

## 二次圍阻體 輻射強度控制流程(3/3)

- 來自RPV/一次系統之洩漏~
  - 任一個區域達"最大安全輻射強度"之前：
    - [RC/1a]急停、停機。
  - 超過一個以上區域達"最大安全輻射強度"：
    - [Contingency 2 RPV緊急洩壓]
- 非來自RPV/一次系統之洩漏~
  - 超過一個以上區域達"最大安全輻射強度" OP-245 停機



980808

## 三、放射性物質釋放控制

## 放射性物質釋放控制

- 目的：
  - 限制經由一次圍阻體及二次圍阻體放射性物質的排放。
- 策略：
  - 隔離一次系統之排放。
  - 降低反應爐壓力。
- 進入時機：
  - 廠界輻射釋放率 > 0.02 mSv/hr

980808

59

980808

60



## 放射性物質釋放控制 OVERRIDE

RR-1a

當執行下列步驟時	
如 果	則
須執行一次圍阻體灌水	離開500.3~500.6 各節，進入 SAG-1 和SAG-2
汽機廠房(或其它可能增加放射性外釋的廠房)HVAC 停用中	如需要，重新啟動該廠房 HVAC，必要時移除隔離連鎖。

- 二次圍阻體外之之廠房，並 非完全氣密。
  - 放射性物質之滲入，反而限制了人員之進出。
  - HVAC運轉經廠房高點排放。
  - 經由這些廠房排放出去的放射性物質可受到監測。

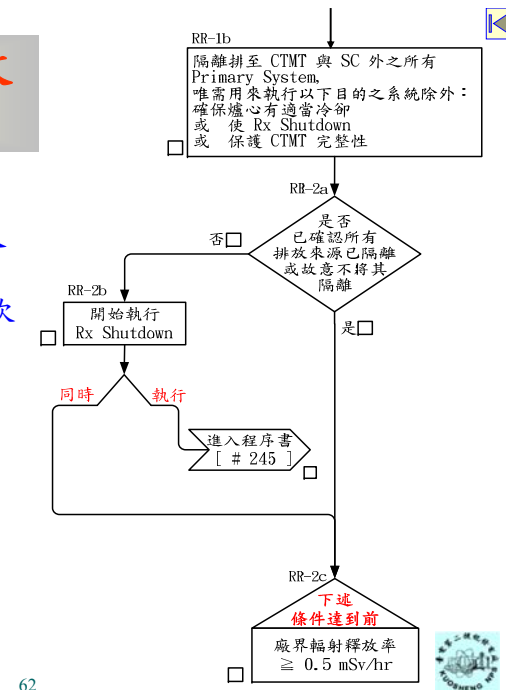
980808

61

## 放射性物質釋放 控制流程(1/2)

- 查漏隔離。
- 維持[適當爐心冷卻]、[反應爐停機]、[一次圍阻體完整]及[滅火]優先於[二次圍阻體控制]。
- 停機時間點？

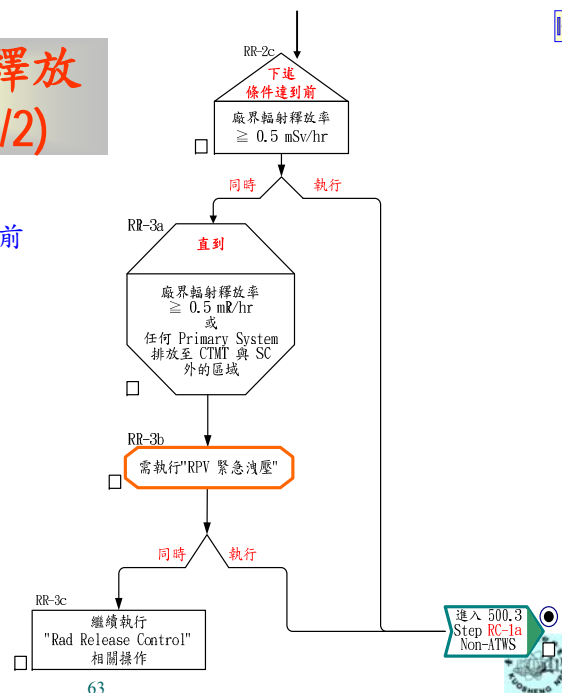
980808



62

## 放射性物質釋放 控制流程(2/2)

- 反應爐急停：
  - 達 $\geq 0.5\text{mSv/hr}$ 之前
- 緊急洩壓：
  - $\geq 0.5\text{mSv/hr}$



980808

63

## 四、氫氣監測與控制

980808

64

## 氫氣監測與控制內容

- 1、氫氣產生的問題。
- 2、氫氣產生的來源。
- 3、氫氣進入圍阻體途徑與威脅。
- 4、氫氣的燃燒。
- 5、氫氣的監測與處理設備。
- 6、EOP氫氣控制策略。

65

65



## 1、氫氣產生的問題

### 被低估的氫氣問題

- 在三哩島事故之前，核能界的事務分析中只假設0.72%的鋁會參與鋁水反應。
  - 420磅的鋁，產生3,318立方呎的氫氣
- 然而在三哩島事件中，爐心內有40%的鋁參與了反應
  - 對於Mark-I型核電廠而言，相當於24,000磅的鋁，產生190,000立方呎的氫氣→對策：CTMT內灌氫氣。

66



## 1、氫氣產生的問題

### 氫氣的問題

- 發生嚴重事故後，氫氣如何在反應器裡及一次圍阻體內產生？
- 氫氣產生後如何在廠房內游走及和圍阻體內的大氣混合，進而發生爆炸或燃燒？
- 對於氫氣，電廠的因應之道為何？

67



## 2、氫氣產生的來源

### 氫氣的產生

- 在發生嚴重事故時，氫氣主要有下列幾項來源
  1. 水蒸汽與鋁的反應
  2. 水蒸汽與鋼的反應
  3. 熔毀爐心與水泥的反應
  4. 鍍鋅鋼的腐蝕
  5. 輻射線與水作用
  6. 鋁的腐蝕

68



## 2、氫氣產生的來源

### 水蒸汽與鋯的反應

- 水蒸氣中： $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$  2800 Btu /lbm 鋯
- 當鋯的溫度超過 1600 °F 後，上述反應速率才會顯著，即反應器爐心有部分或全部未被水覆蓋的情況下，這反應才值得重視。
- 在核子事故時，燃料護套的溫度並非常數，每磅鋯金屬氧化，釋放 2800 Btu 的能量，這些能量會促使鋯的溫度升高且加速其氧化速率。例當溫度從 2000 °F 增加至 4000 °F，反應速率會增加近 1000 倍。

69



## 2、氫氣產生的來源

### 水蒸汽與鋼的反應

- 反應器爐心裡有大部分的結構體是鋼，當爐心未被水覆蓋一段時間後，鋼本身溫度會大於 1832 °F，鋼和水蒸汽會反應而氧化成四氧化二鐵，產生氫氣並放出 278 Btu/lbm 鐵。當鋼的溫度達 2498 ~ 2732 °F 時，鋼開始熔化，並產生遠比鋯-水反應還要多的氫氣量。

70



## 2、氫氣產生的來源

### 熔毀爐心與水泥的反應(CCI)

- 燃料熔化後，掉落到反應器壓力槽底部，高溫的燃料融化體繼續熔穿壓力槽而掉入水泥底座。水泥因熱分解產生氣體，氣體往上升通過融化體時產生進一步的化學反應而產生氫氣。

### 氫氣其他來源

- 漆鋅、鍍鋅表面和鋁表面會和水作用產生氫氣，另外有機物質（如電纜線之聚乙烯）經輻射線照射也會產生氫氣。

71



## 3、氫氣進入圍阻體途徑與威脅

### 氫氣流程與混合過程

1. 氫氣由破管處逸出
  - 發生LOCA時，只要ECCS系統及時起動，就會有足夠的冷卻水進入爐心，並保證爐心有2/3高度被水淹沒。如果爐心沒有得到適當的冷卻，氫氣產生後會從破管處逸出進入乾井。
2. 氫氣從乾井進入一次圍阻體
  - 發生LOCA時，若有洩漏蒸氣及氫氣產生，與一次圍阻體有足夠的壓差，就會經水平通洩口至抑壓池冷卻，氫氣進入一次圍阻體。

72



### 3、氫氣進入圍阻體途徑與威脅

#### 氫氣流程與混合過程

##### 3. 安全釋壓閥開啟

- 四條主蒸汽管上共有16只安全釋壓閥，當不適當的爐心冷卻情況發生，氫氣就會產生，而氫氣的產生使受損爐心的壓力增加，一旦達到安全釋壓閥開啟設定，氫氣就會洩放至一次圍阻體。

##### 4. 一次圍阻體乾井/一次圍阻體過壓

- 當LOCA發生時，一次圍阻體在設計上，必須能夠維持完整性，並配合其他能減輕嚴重性的設備避免放射性物質外洩超過10CFR100的規定。
- 乾井/一次圍阻體內之氫氣若濃度過高造成爆炸，會造成高壓力震波，可能損傷乾井/一次圍阻體內之設備/系統/結構

73



### 3、氫氣進入圍阻體途徑與威脅

#### 混合於圍阻體內的大氣

- 由於從浮力上的考慮，氫氣似乎存在圍阻體的上層，但實驗上顯示氫氣頗均勻的存在圍阻體內，這是因為擴散與對流情況存在的關係，尤其是強制對流存在，氫氣不可能以氫氣層存在圍阻體內
- 由於水蒸汽及氫氣都是從圍阻體底部逸出，故底部的氫氣濃度在事故發生之初最高，所以氫氣燃燒可能在底部發生，但因有水蒸汽存在，會影響單位體積內氫氣和氧氣的混合比。由於事故之初，水蒸汽大量存在，使得氫、氧混合比無法達到燃燒的要求，等到水蒸汽被移除後，燃燒就可能發生。所以運轉員在移除水蒸汽的同時，也要隨時判斷氫氣燃燒的可能性。

74



### 4、氫氣的燃燒

#### 氫氣燃燒的特性

- 每一磅的氫氣燃燒可釋放出  $1.05 \times 10^4$  Btu，由於氫氣燃燒產生高壓，可能導致圍阻體破裂，使放射性物質外洩；另因產生高溫及高壓，會破壞重要安全設備。
- 所謂的濃度限制並非絕對的，有時候氫氣混合濃度在可燃性範圍之外，也會發生短暫距離的火焰傳遞，所以定義燃燒濃度限制只是指導原則，而非基本原則。

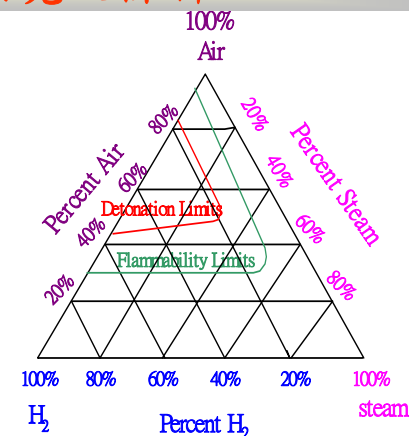
75



### 4、氫氣的燃燒

#### 氫氣的燃燒及條件

- 氫氣燃燒的三種模式
  - 快速燃燒(Deflagration)
  - 爆炸(Detonation)
  - 快速燃燒至爆炸的暫態(Deflagration-to-Detonation Transition, DDT)
- 「滿足條件」：
  - 空氣中的氧氣是燃燒的必要條件。
  - 可燃性氣體在圍阻體中爆炸或快速燃燒的條件，最低的氫氣及氧氣的濃度分別為4%和5%。
  - 水蒸汽可沖淡可燃性氣體的濃度，同時有減緩燃燒的作用。
  - 若水蒸汽濃度高於55%，水蒸汽-空氣-氫氣的混合物無法燃燒。



980808

76



## 5、氫氣的監測與處理設備

### 本廠氫氣相關安全系統

- ◆ CTMT Atmosphere Monitoring System (CAMS)
  - LOCA發生後可偵測乾井及CTMT內氫氣濃度。
- ◆ Combustible Gas Control System (CGCS)
  - 本系統包含1.氫氣偵測系統。2.氫氣沖淡系統。3.氫氣再結合系統。4.氫氣點火系統
- 對於圍阻體內所累積氫氣的處理原則：
  - 稀釋
  - 消耗（燃燒、提早引爆）

77



### 氫氣的監測

- D/W 偵測系統
- CTMT偵測系統
- 取樣系統：取樣及分析

980808

78



### CAMS事故後偵測

#### 2.CAMS：事故後偵測

##### (1) H<sub>2</sub>偵測器

- 偵測乾井及包封容器內H<sub>2</sub>含量。
- 系統啟用後，連續偵測。
- 偵測範圍0~20%氫氣濃度

##### (2) CAMS偵測控制盤

有關控制、指示器和記錄器，均在控制室CAMS盤上。

P-79-



氫氣監測開關







## 氫氣再結合系統 (Hydrogen Recombiner System)

1. 將LOCA時滲入包封容器之 $H_2$ ，在再結合器(Recombiner)中再與 $O_2$ 結合成水，避免 $H_2$ 超過爆炸濃度。
2. 備用氣體處理系統(SGTS)與事故後充氣系統(Post-Accident Purge Supply System)聯合，做為本系統之後備。
3. 本系統為可移動式，一、二號機可互換使用。

P-85-



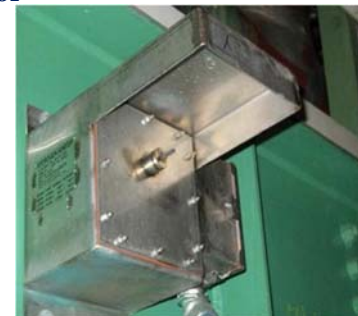
## 氫氣點火系統 (Hydrogen Ignition System, HIS)

- 減少因爐心事故時水與金屬反應所產生之氫氣釋放至乾井及圍阻體的氫氣濃度。
- 本系統必須在事故後至少能連續運轉**168小時(7天)**

P-87-



Ignitor



控制開關

氫氣點火系統(Hydrogen Ignition System HIS)



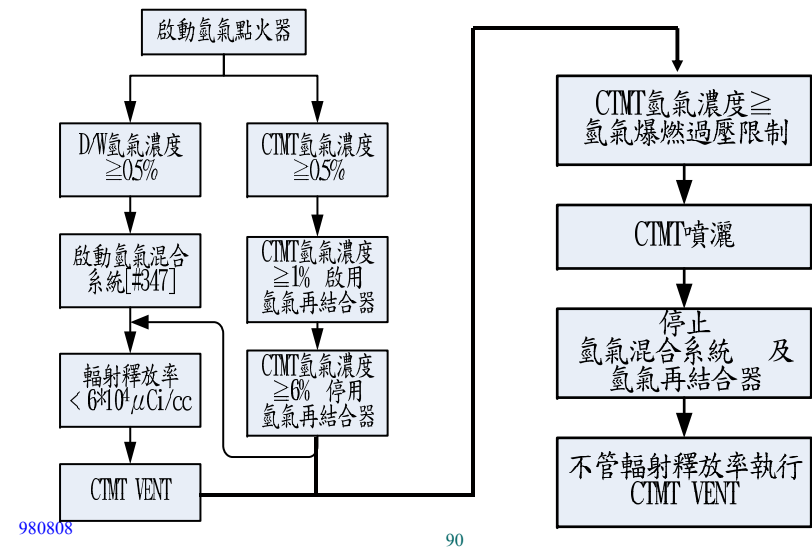
P-88-







## 6、EOP氫氣控制策略



### 氫氣點火器啟動條件與限制

- 以局部點火燃燒之方式，防止氫氣累積。
- 使用時機：
  - CTMT 氫氣濃度 < HDOL 且
  - D/W 氫氣濃度 < 9%
- 下列情況禁止使用：
  - 無法確認 CTMT 氫氣濃度 < HDOL 且
  - 無法確認 D/W 氫氣濃度 < 9%

### 氫氣混合系統啟動條件與限制

- 使用時機：
  - D/W 氫氣濃度達到 0.5% 且
  - CTMT 氫氣濃度 < HDOL
- 停用時機：
  - 執行“圍阻體噴灑”時。



## 氫氣再結合器啟動條件與限制

- 使用時機：
  - 圍阻體氫氣濃度達到1%。
- 停用時機：
  - 圍阻體氫氣濃度達到6%。
  - >HDOL

980808

93



## 氫氣控制流程需執行圍阻體噴灑時機

- 進入時機：
  - 下列條件任一：
    - ☞ 點火器失能，且無法確認CTMT氫氣濃度<HDOL；  
或
    - ☞ CTMT氫氣濃度>HDOL或未知。
  - 且
  - 為SAG-1所允許。

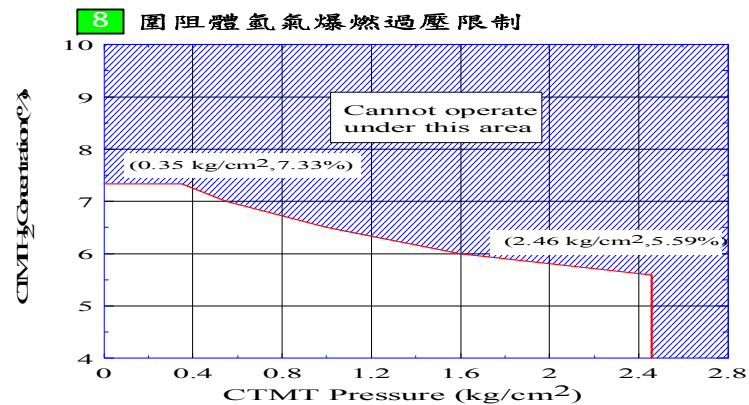
980808

94



## HDOL 氫氣燃爆過壓限制 (Hydrogen Deflagration Overpressure Limit)

- 氫氣燃爆時超過圍阻體結構能力之氫氣濃度限值



980808

95

