

蒸汽產生器

1. 構造
2. 水位控制系統
3. 沖放系統

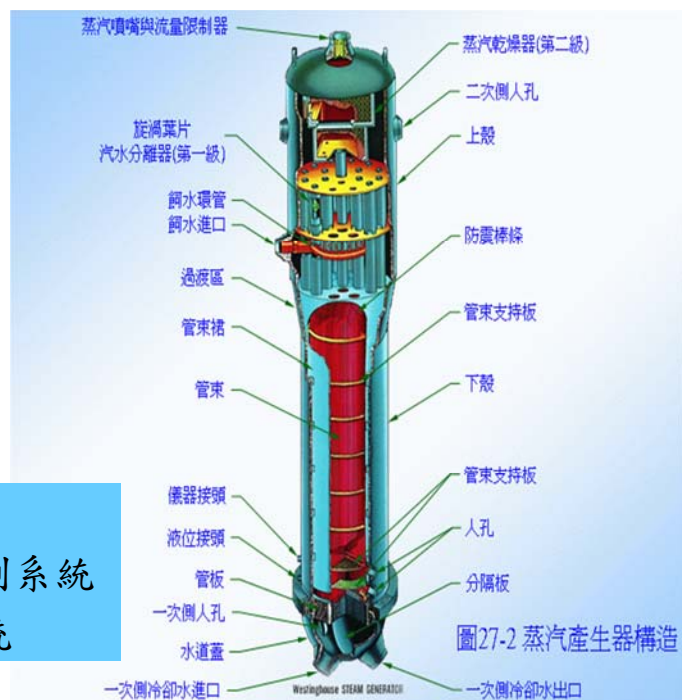


圖27-2 蒸汽產生器構造

S/G構造

- F型，直立式U型管熱交換器，重量為305噸，由反應爐爐心流出的高溫高壓水，經**進水室**（Inlet Chamber），沿著5624根U型管的管內側至**出水室**（Outlet Chamber）、RCS跨管，再以反應爐冷卻水泵打回到反應爐。
- 高溫的反應爐冷卻水流經U型管束時，熱量傳給殼側的二次側飼水。
- 飼水由頂部**飼水環管**進入，先由**潛降區**流至U型管束的底部，然後往上吸收一次系統的熱量，形成汽水混合流體，再經**汽水分離器**、**乾燥器**排除蒸汽中的濕氣後，約99.75%乾度的蒸汽經限流孔離開S/G，送往汽機做功。
- 經**汽水分離器**和**乾燥器**由蒸汽中排除的飽和水，經洩水管回流而下、與飼水混合後再流經潛降區、U型管束，繼續另一次的循環。

一次側

二次側

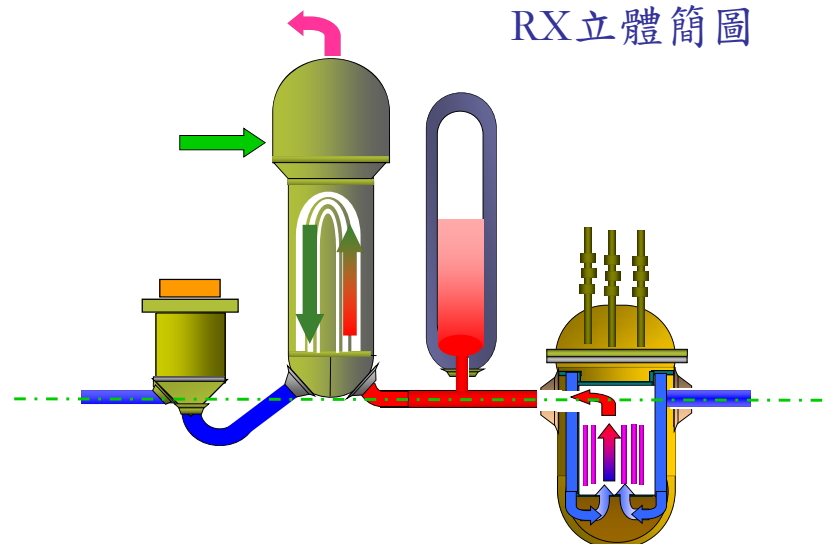
2

主要設計參數

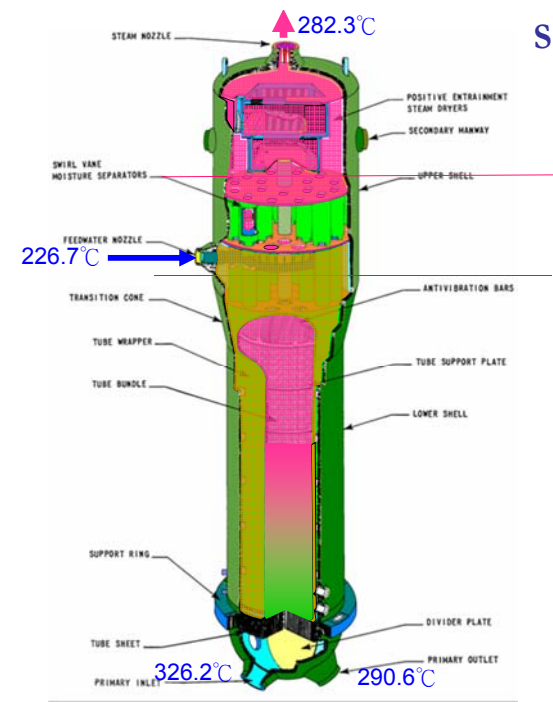
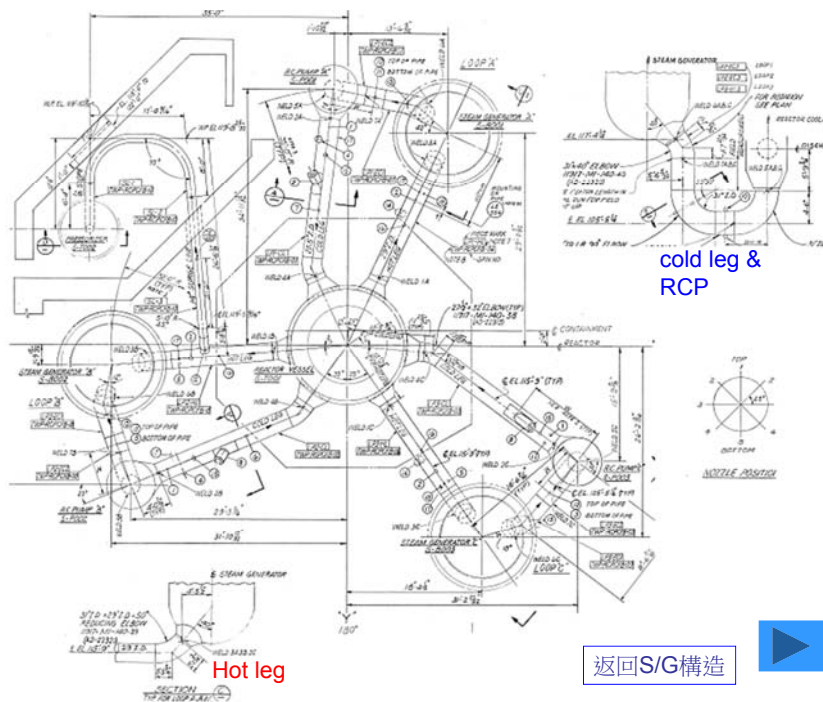
- 一次側須能承受175kg/cm²（2500psig）的壓力和343.3℃（650°F）的溫度
- 二次側則能承受83.47kg/cm²（1200psig）的壓力和315.5℃（600°F）的溫度
- 承受一、二次系統112kg/cm²的差壓。
- 每個蒸汽產生器之熱交換面積約為4953m²（55,030ft²），熱交換功率最大為982Mwt，

3

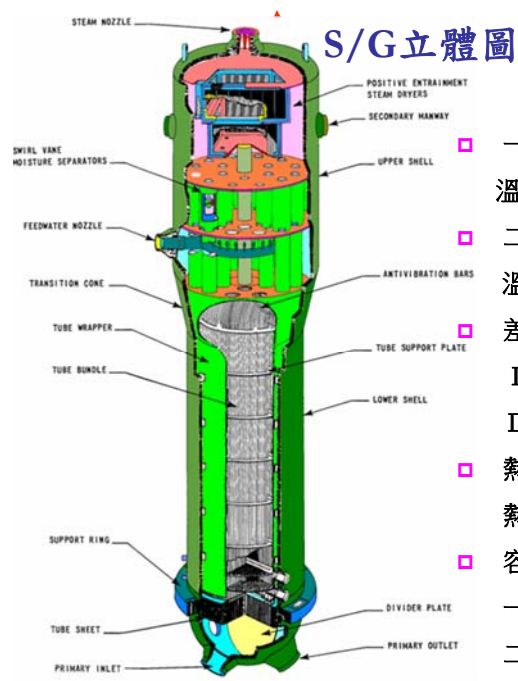
RX立體簡圖



4



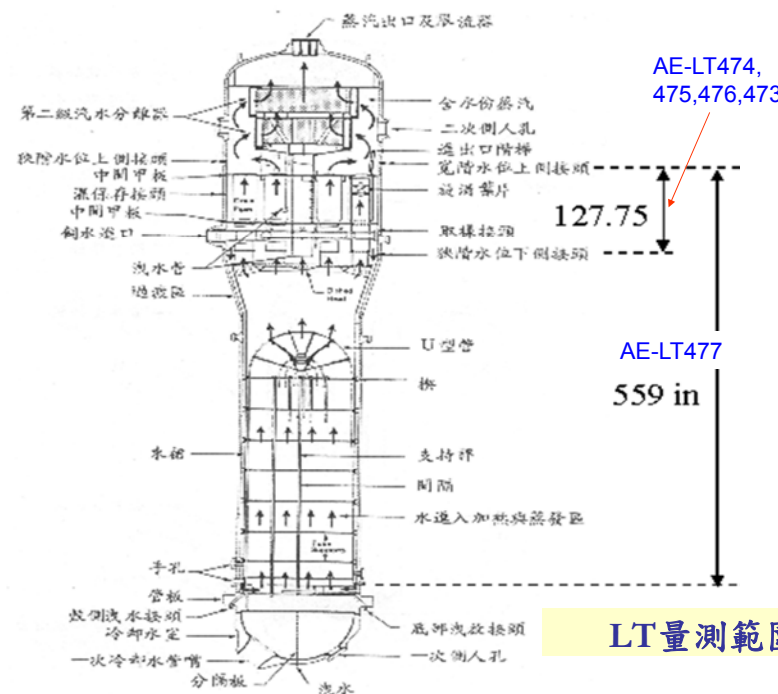
6



設計參數

- 一次側：175Kg/cm²
溫度：343°C
- 二次側：83.4Kg/cm²
溫度：316°C
- 差壓：
I - II：112.6Kg/cm²(@343°C)
II - I：47.2Kg/cm²(@316°C)
- 熱交換面積：4953m² (55,030ft²)
熱交換功率：982Mwt(Max)。
- 容積：
一次側：966 ft³
二次側：5900 ft³

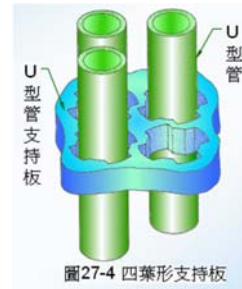
7



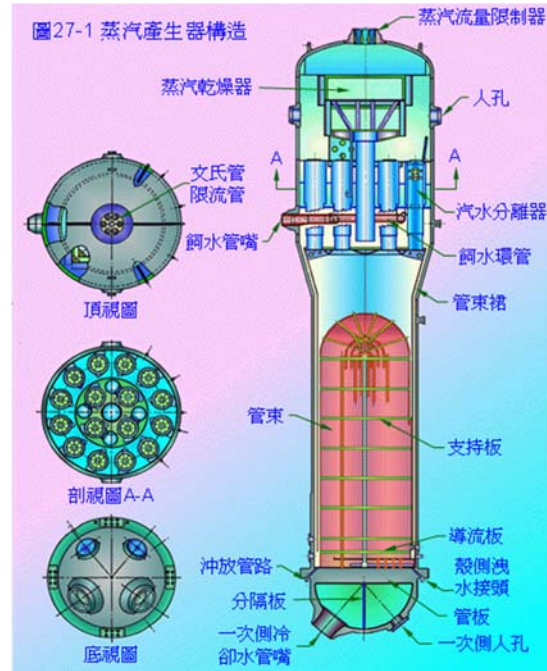
一次系統側的構造

1. 管板 (為53.3公分 (21吋) 厚的碳鋼, 內層襯以英高鎳。管板與U型管形成一次系統的壓力周界, 承受一/二次系統之差壓。
2. U形管延展性並耐高壓之英高鎳製成, 管腳於管板處擴管並銲接, 以防洩漏。
3. 管束由七個支持板所支持。支持板上有四葉形流孔以避免流量不均導致化學物質聚集而產生局部腐蝕的現象。管束彎曲處有三組防震桿組 (Anti-Vibration Bar Assembly)。

參考圖



9

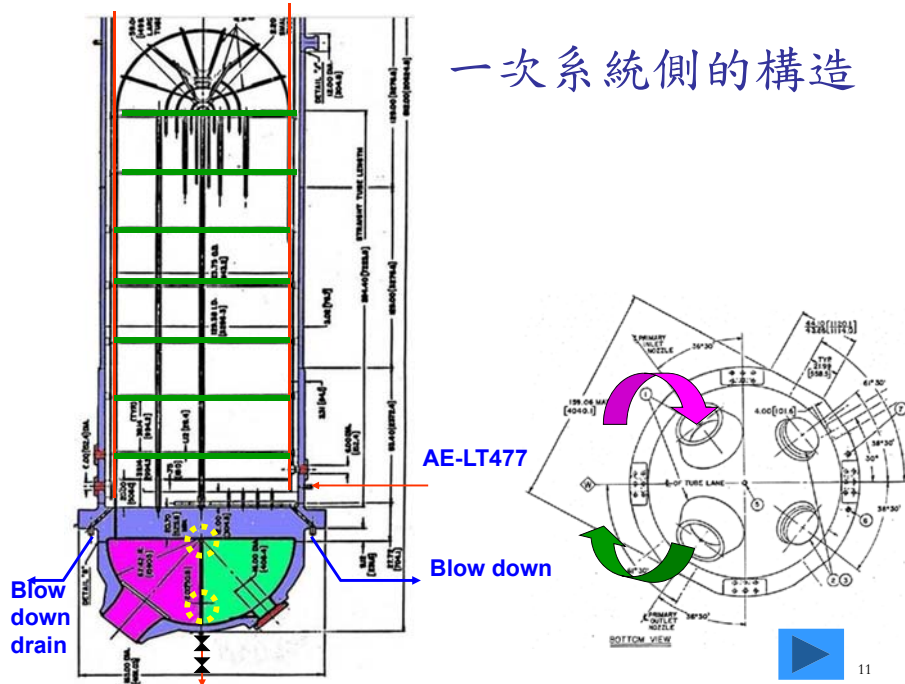


一次系統側的構造

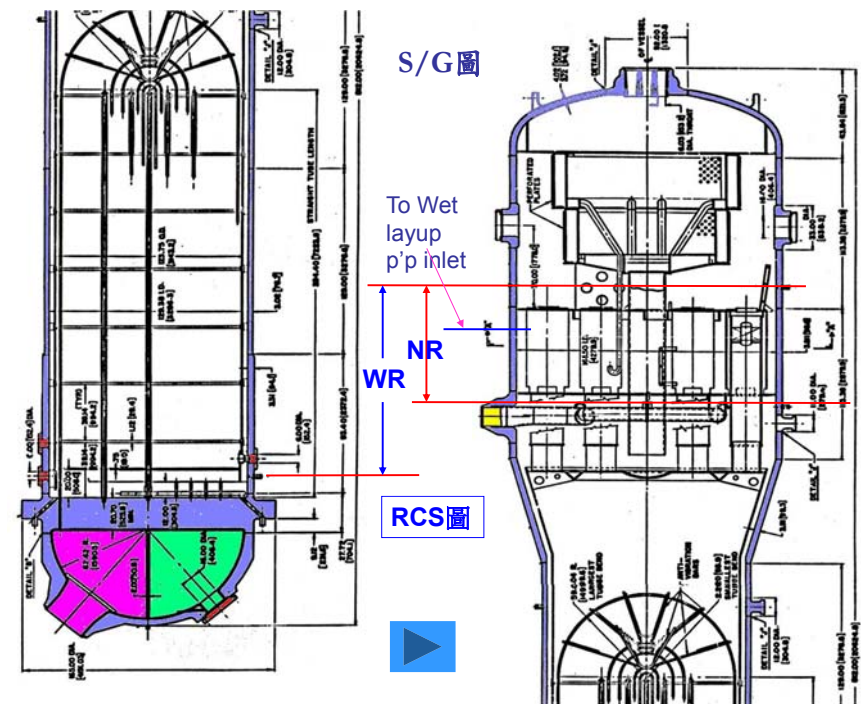
放大圖

RCS圖

10



11



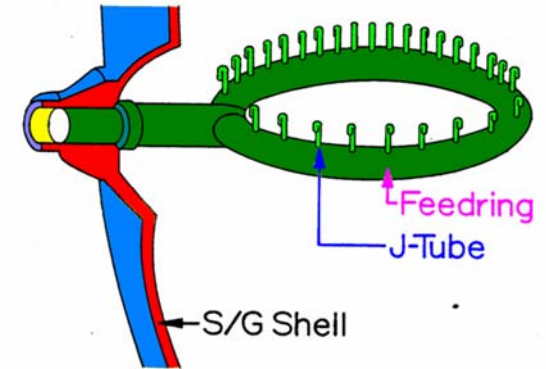
二次側的構造

- 蒸汽產生器外殼以**碳鋼**製成，由下而上分成下殼區（Lower Shell），過渡區（Transition Cone）以及蒸汽鼓（Steam Drum）。
- **下殼區**，下殼區主要為U形管束，為一、二次系統熱交換的所在。
- **過渡區**，過渡區則充滿汽水混合物。
- **蒸汽鼓**，主要有汽水分離蒸汽乾燥設備。

13

飼水環管

- 高度約與汽水分離器相當，倒“J”形噴嘴的理由，使內部經常充滿飼水，以免發生水鉗。
- 飼水自噴嘴噴出，會同由汽水分離器排出的飽和水（此稱為再循環流量），沿管束裙外側的**潛降區**流下。
- 飼水環管將大約**80%**的飼水飼入靠熱端側的管束，其餘約**20%**飼入冷端側的管束，這是為使蒸汽產量平均。



S/G圖

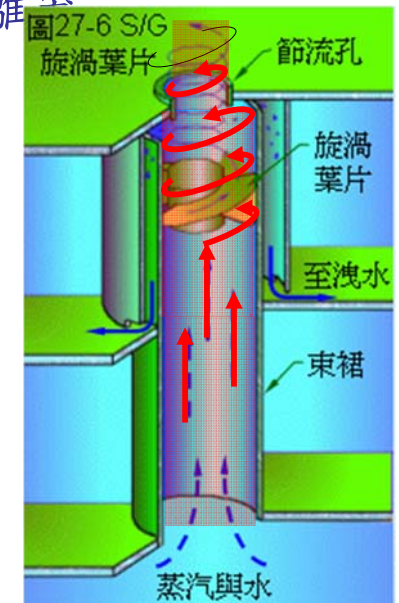
管束裙（Tube Bundle Wrapper）

- **管束裙**圍住管束，將飼水路徑與蒸汽產生路徑分開，並與外殼形成**潛降區**。飼水流經潛降區，可吸收管束發出的**輻射熱**，減少熱損失，並提高效率。
- **導流板**（Flow Distribution Baffle, FDB）飼水自管束裙底部，沿U形管向上流，導流板位於**管板與最低位置的支持板之間**，使管板附近的管子所接觸的飼水流量均勻。導流板**孔為圓形**，而不是四葉形，其中心部份完全切去，以使低流量區，也是雜質沉積區恰在沖放取水管（Blow down Intake）附近。

15

汽水分離器

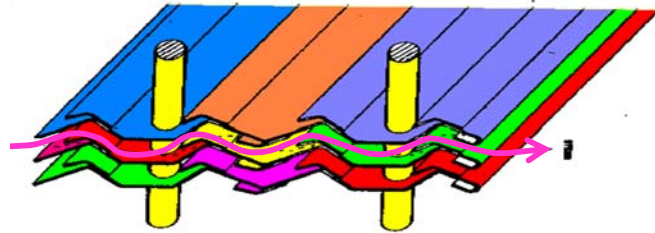
- 飼水由管束吸收熱量，轉化為飽和汽水混合體，經過渡區上升至汽水分離器。
- 汽水分離器由**16個**旋渦葉片（Swirl Vane）及豎管所組成，每個豎管高約3公尺（10呎），當汽水混合體通過豎管內之葉片時即開始旋轉，由於**水份較重**而被甩開，僅蒸汽能自由通過各豎管之中央部節流孔。



16

蒸汽乾燥器

- 汽水分離器出來的蒸汽仍含有大量水份，須通過第二階段的汽水分離器(蒸汽乾燥器)，進一步去除水份
- 蒸汽乾燥器採用許多**迷宮式迴紋狀板**，蒸汽通過時，須**突然改變方向**，才能順利通過，水份來不及改變方向而被鉤狀葉片留下來。
- 經過蒸汽乾燥器出來的蒸汽乾度已達到**99.75%以上**。(此種葉片稱做Hook And Pocket Vane)。



17

蒸汽限流孔 (Steam Flow Restrictor)

- 乾燥之飽和蒸汽由蒸汽產生器頂部蒸汽出口送至主汽機，此蒸汽出口即為文氏型之限流孔 (Venturi Flow Restrictor)。
- 正常狀態此限流孔作為**流量偵測器**並不限制蒸汽流量，但當蒸汽管路斷裂時，能防止產生器內之蒸汽瞬間閃化，並使蒸汽產生器的壓力按一定的速率降下來。

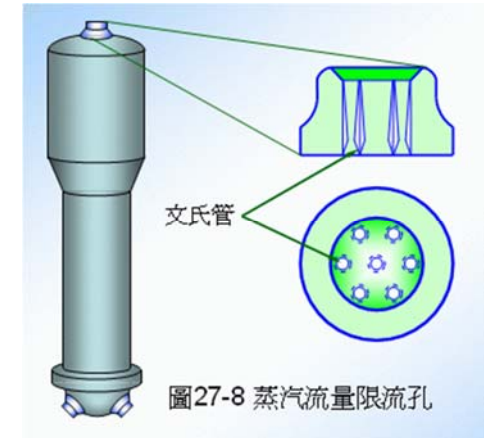


圖27-8 蒸汽流量限流孔

沖放系統 (Blowdown System)

- 二次側U型管束底部有一5公分(2吋)直徑的沖放管路，連續的將**部份**蒸汽產生器**底部低流速區**的飼水抽出，經冷卻、除礦器、過濾器淨化後，再回收至冷凝器A。
- 飼水水質雖經嚴格的管制頗為純淨，但難免仍帶有些許雜質，S/G內部持續的**蒸發**使飼水化為蒸汽排出，而這些雜質卻留下來且不斷的聚積。此效應可造成蒸汽產生器內部**水質變壞**，**沈積物**多使熱交換效率降低，長期將造成U型管的**腐蝕**。
- 沖放系統用以抽出雜質，使水質保持於良好限值內。
- 管板上另鑽有5公分(2吋)孔，作為二次系統**洩水**之用，此孔較管板之二次系統板面低數吋，所以水可完全洩光。

參考圖

19

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

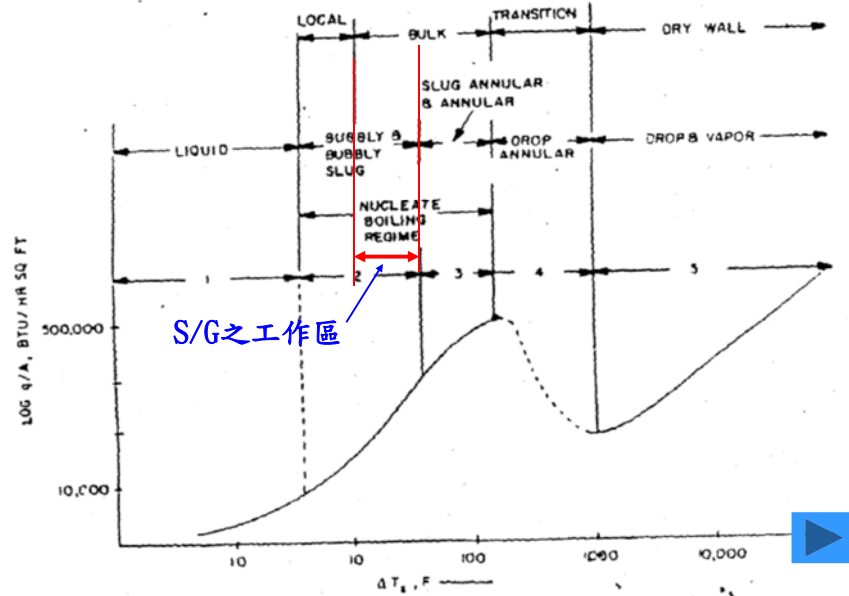
Two phase flow

參考圖

Boiling 型態	Boiling Flow type	Boiling Flow特性
Local Boiling	Bubbly Flow	熱傳面產生小汽泡，上升後會破滅
Bulk Boiling	Bubbly Slug Flow	小汽泡脫離熱傳面後，會結合成大汽泡(Slug)， ΔT 小，Void分數小。擾動可提升熱傳效率。過渡區。S/G即此形態。
	Slug Flow	ΔT 稍大，Void分數明顯增多。Flow Channel充滿大汽泡。擾動可提升熱傳效率。
	Slug Annular Flow	ΔT 大，Void分數大。Flow Channel中大汽泡結合成 局部汽柱 。過渡區。擾動尚可提升熱傳效率。
	Annular Flow	ΔT 大，Void分數大。在Flow Channel中形成 連續汽柱 ，含水滴。擾動已不能顯著的提升熱傳效率。流速加快，以保持Q為常數。Void分數約95%。
Transition Boiling	Drop Annular Flow	傳熱面儲存局部的 水膜(film) ，Flow Channel大部分為蒸汽，少部分為水滴。傳熱效率顯著下降，傳熱面溫度極高， 反覆 wet & dry 。過渡區
Dry Wall Flow	Drop Flow	傳熱面覆蓋著蒸汽，Flow Channel中存有小水滴，直接由蒸汽傳熱而沸騰， 沸騰非發生在傳熱面上 。低對流熱傳，表面高溫造成顯著的輻射熱傳。
	Vapor Flow	Flow Channel中只有純蒸汽， ΔT 極高，大部分金屬將熔化或因高熱應力而脆性破壞。

20

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

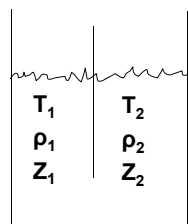


從潛降區到管束區—自然循環 AROT

- 飼水泵強制PUMP水入飼水環管。
- 而水從潛降區到管束的方式是自然循環。其驅動力
 - 潛降區流體和管束區流體的密度差
 - 兩區的有效位差
- 自然循環的阻力
 - 沿著蒸汽產生器流徑的水頭損失
- 當二次側功率上升，管束區流體混合物的乾度也上升—此增加水頭損失。從穩態到穩態隨功率上升，潛降區的水位自然增加以提供被增加了的驅動力。

22

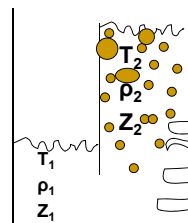
蒸汽產生器DOWNCOMER 和RISER區自然循環 AROT



$$T_1 = T_2$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$Z_1 = Z_2$$



$$T_1 < T_2$$

$$\rho_1 > \rho_2$$

$$Z_1 < Z_2$$

23

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

1. S/G 運轉主要受二次側之BOILING與Recirculation的影響。Recirculation為主要的因素。
2. Recirculation允許S/G 中Feed Water不轉換成Steam，而與剛進入S/G的Feed Water混合，重新進入U-Tube區。
3. Recirculation可使引至T/B之Steam最佳化(Optimizing)，改善S/G之熱效率，避免在S/G之Riser區，產生不必要的環狀流態(Annular Flow)情況。
4. 正常情況下，S/G為Bulk Boiling 之 Bubbly-Slug Flow。
5. 結構上，S/G二次側可分為：Lower Shell，Transition Cone，Upper Shell三區。
6. Lower Shell分為：DownComer，Riser。
7. 一/二次側之直接熱傳，發生於S/G之Riser區。此區頂部，為Bulk Boiling之Bubbly Slug Flow。

24

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

8. Upper Shell又名Steam Drum，包含二種Moisture Separator：
 1. Swirl Vane (渦漩葉片) Separator：16組 * 單Vane
 2. Chevron (迴紋結構) Separator
9. 離開S/G之飽和蒸汽，其乾度最少在99.75%以上
10. **Recirculation Flow**：由S/G Upper Shell之二組Separator，從蒸汽中分離出的水，稱之；將再次進入Riser區。
11. **Circulation Flow**：Recirculation Flow與Feed Water Flow之總和，稱之。
12. 不同的Boiling Flow type，相同的熱傳率下，熱傳面二側可能有各種不同的溫差存在，其主要的影響因素為**對流熱傳因數**。
13. S/G靠重力以維持Circulation。

25

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

14. 由S/G Upper Shell之二組Separator，從蒸汽中分離出的水，導引至Down Comer區，其量頗大，可助長Circulation之驅動力。
15. 汽機高負載時，蒸汽之需求量大，但流經S/G之Riser區的Flow Rate則接近常數。
16. **Circulation Ratio (C.R)**：為S/G特性，依S/G實體大小(包括熱傳面與濕氣分離區)、熱傳率、二次側溫度與壓力等而決定。
17. **Circulation Ratio = Circulation Flow / (Circulation Flow - Recirculation Flow)**

$$= (M \text{ recirc} + M \text{ stm}) / M \text{ stm}$$

R.R：Recirculation Ratio = $M \text{ recirc} / M \text{ stm} = M \text{ recirc} / M \text{ feed}$

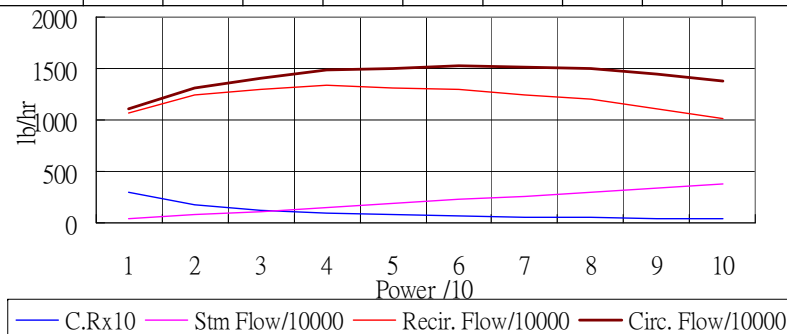
$$C.R = R.R + 1$$

26

Circulation Ratio 與功率之關係

C.R = R.R + 1 (lb/hr)

Power %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
C.R	29.6	17.6	12.6	9.9	8	6.8	5.8	5	4.3	3.7
M steam	3.75E5	7.5E5	1.12E6	1.5E6	1.88E6	2.25E6	2.62E6	3E6	3.38E6	3.75E6
M recirc	1.07E7	1.24E7	1.3E7	1.34E7	1.31E7	1.3E7	1.25E7	1.2E7	1.11E7	1.01E7



27

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

19. 0% Power時，S/G 水位(50%NR)接近Swirl Vane Separator之渦漩葉片底部，低功率時，飽和沸騰發生在管束頂部；高功率時，則發生在Riser區底部。100%功率時，Riser區充滿著多泡水、汽混合物。
20. 在40%以下，蒸汽流量造成的摩擦損失不足以減少水、汽混合物的流量。此時期，高功率因沸騰發生在Riser區較低處，濕氣雖較不易達到Separator，但因高功率時蒸汽流速大，將挾帶更多的水至Separator。**Recirculation Flow**隨著功率而增加，直到約40%後，即隨功率增加而減小。
21. **Recirculation Flow**有如下優點：
 1. 增加飼水之驅動水頭(ΔP)：驅使蒸汽離開S/G、清除不純物至BM系統以維持結構完整與熱傳效益。
 2. 提升飼水溫度，使進入Riser區之水，較接近飽和溫度，U-Tube之溫差較小且接近定溫，熱震較小。

CR與功率

28

S/G THERMODYNAMICS AROT- I -CH 6

22. 但若 **Circulation Flow** 太大，可能超出 Separator 容量，使濕氣損害 T/B。
23. **Circulation Flow** 太小，尤其在 **Bubbly-Slug** 與 **Annular Flow** 之過度區時，可造成流量的不穩定震盪，更是危險。可能造成太大的 **CARRY OVER**、S/G 內部組件高震動、與 **TUBE** 可能裸露未淹水。

29

RECIRCULATION RATIO V.S. POWER

AROT- I -CH 6

- 0% POWER：RISER 和 DOWNCOMER 區溫度和水位同一階位，非常接近 SWIRL VANE 汽水分離器。
- 提升功率即更多熱能傳到二次側水。飽和沸騰發生在接近管束頂端。隨更高的功率，在 RISER 區飽和沸騰發生愈來愈近底部，在 100% 在 RISER COLUMN 的水大部分是飽和汽和液態水的泡沫狀的混合物(流體形態是 BUBBLY OR BUBBLY SLUG FLOW)，此飽和的泡沫狀的混合物的柱頂靠近 SWIRL VANE 汽水分離器。

30

RECIRCULATION RATIO V.S. POWER

AROT- I -CH 6

- 當飽和的二次側蒸汽流經 RISER 和分離器時，由於伴隨快速沸騰和從蒸汽中機械式分離濕氣的阻力和擾流，蒸汽會經歷壓力降。另一方面更多熱能傳經 U 形管束，更多的沸騰發生且 RISER 的水密度下降。密度下降導致 $\Delta P_{\text{DRIVING HEAD}}$ 實質上隨功率而線性地上升。
- 蒸汽在蒸汽產生器遭遇的阻力 ΔP_f 必須由 $\Delta P_{\text{DRIVING HEAD}}$ 克服。阻力的壓力水頭損失是飽和混合物動能的函數 ($1/2MV^2$)。因此跨經 RISER 和分離器的壓降 (ΔP_f) 隨功率呈拋物線上升。

31

RECIRCULATION RATIO V.S. POWER

AROT- I -CH 6

- 既然兩者都隨功率上升而上升且對質量流量率有相反的作用，飽和混合物在 RISER 區的質量流量率隨功率變動仍維持相當地固定。既然 ΔP_f 和功率的關係是雙曲線，在 RISER 區的質量流量固定性在中間階位的功率最明顯。
- 另一蒸汽產生器的運轉方面會影響循環比的是蒸汽往上流至 SWIRL VANE 汽水分離器時挾帶的液態水。功率和蒸汽的速度增加，更多的液態水被蒸汽挾帶往上流至 SWIRL VANE 汽水分離器。

32

RECIRCULATION RATIO V.S. POWER

AROT- I -CH 6

- 功率剛開始增加時，上升的速度導致更多的挾帶和更多的液態水到達汽水分離器。然而在更高的功率沸騰發生在低的RISER SECTION挾帶的水就比較不可能到達汽水分離器。高功率被挾帶的小水滴比較可能或掉落回RISER或當其抵達管束區頂部時轉化成蒸汽。
- 由於這些現象的結果，再循環比在40%前隨功率上升。約40%時，更深入的沸騰和呈拋物線快速上升的阻力降低泡沫混合物的流量因此也降低了再循環流量。

33

%	CR	蒸汽f=飼水f 10 ⁶	再循環f 10 ⁷	潛降區f=上 升區f 10 ⁷
10	29.6	0.375	1.07	1.11
20	17.6	0.75	1.24	1.32
30	12.6	1.12	1.30	1.42
40	9.9	1.50	1.34	1.48
50	8.0	1.88	1.31	1.50
60	6.8	2.25	1.30	1.53
70	5.8	2.62	1.25	1.51
80	5.0	3.0	1.20	1.50
90	4.3	3.38	1.11	1.45
100	3.7	3.75	1.01	1.39

質量流量率用lbm/hr AROT- I -CH 6

34

RECIRCULATION RATIO V.S. POWER

AROT- I -CH 6

- <10%：RISER區和潛降區的密度差非常小至不存在顯著的 $\Delta P_{\text{DRIVING HEAD}}$ ，因此RISER區和潛降區會遭遇流向反轉和流體速度不穩定。

35

蒸汽產生器與運轉規範/TRM（一）

- 蒸汽產生器 帶走熱量
 - 3.4.4 三個RCS LOOP（MODE1、2）
 - 3.4.5 二個RCS LOOP（MODE 3）
 - 3.4.6 RCS LOOP（MODE 4）
 - 3.4.7 RCS LOOP（MODE 5，FILLED）
 - 以上MODE 3/4/5，所有要求可用之S/G，水位需大於19% NR
- 蒸汽產生器一、二次側邊界完整性
 - 3.4.13 U-TUBE 洩漏率，150GPD
 - 3.7.12 二次側活性 $\leq 0.10 \mu\text{Ci/gm DOSE EQUIVALENT I-131}$
 - 13.7.1 S/G PT曲線

36

蒸汽產生器與運轉規範/TRM (二)

▣ 蒸汽產生器 附屬設備

- PORV
 - 3.6.3 & 13.6.2 CIV
 - 3.7.4 SG PORV含其BLOCK VLV
 - 輔助飼水系統、CST、GJ
- PSV 3.7.1
- MSIV
 - 3.6.3 & 13.6.2 CIV
 - 3.7.2 MSIV
- 安全相關壓力、水位元件
 - 3.3.1&3.3.2 MSIS、RPS、AFS、S/G水位
 - 3.3.3 事故後儀器
 - 3.3.4 遙控停機盤儀器
- BM 系統CIV

37

相關T/S LCO

Valve No.	Function	Actuation	Iso Time (sec)
21. HV202	Steam Generator Blowdown Line B	AFS	≤ 10
22. HV203	Steam Generator Bolwdown Line B	AFS	≤ 10
23. HV302	Steam Generator Blowdown Line C	AFS	≤ 10
24. HV303	Steam Generator Blowdown Line C	AFS	≤ 10
25. HV102	Steam Generator Blowdown Line A	AFS	≤ 10
26. HV103	Steam Generator Blowdown Line A	AFS	≤ 10
27. HV108	Steam Generator Blowdown Sample Line A	AFS	≤ 5
28. HV107	Steam Generator Blowdown Sample Line A	AFS	≤ 5
29. HV208	Steam Generator Blowdown Sample Line B	AFS	≤ 5
30. HV207	Steam Generator Blowdown Sample Line B	AFS	≤ 5
31. HV308	Steam Generator Blowdown Sample Line C	AFS	≤ 5
32. HV307	Steam Generator Blowdown Sample Line C	AFS	≤ 5

38

S/G水位控制系統

▣ 參考第24章

39

S/G水位控制系統

程式水位設定之考慮因素：

- ▣ 蒸汽管路斷裂時之圍阻體壓力：水位愈高，則當蒸汽管路破裂時，閃化成蒸汽的數量愈大，圍阻體內之壓力就隨之增高。
- ▣ 蒸汽管路斷裂時，反應爐冷卻水系統過冷：水位愈高，RCS冷卻愈甚，正反應度愈大。
- ▣ 膨脹與收縮（Shrink And Swell）。
- ▣ 再循環比（Recirculation Ratio）。

40

程式水位設定之考慮因素

1. 蒸汽產生器之水位愈高，則當蒸汽管路破裂時，閃化成蒸汽的數量愈大，圍阻體內之壓力就隨之增高。
2. 蒸汽管路斷裂時，大量水閃化為蒸汽，帶走鉅額熱量，使RCS溫度急劇降低。由於負緩和劑溫度係數效應，故加入正反應度。蒸汽產生器水位愈高，RCS冷卻愈甚，正反應度愈大。

41

程式水位設定之考慮因素

3. 膨脹與收縮由於負載變化導致蒸汽壓力升降，而使蒸汽產生器之水位高漲或降低。若是程式太高，則負載升高時之膨脹可能造成騰帶，損害汽機，或高水位汽機跳脫。
4. 另一考慮則是再循環比。即是汽水混合體與蒸汽產生量之比。再循環比隨負載之增加而降低，因此雖是相同的水位，實際水量卻較低(100%功率時，Riser區充滿著多泡水、汽混合物)。故蒸汽管路斷裂事故，在低功率時效應比高功率時嚴重。
5. 本廠之程式水位：任何功率皆維持在50%

Circulation Ratio

$$\begin{aligned} &= \text{Circulation Flow} / (\text{Circulation Flow} - \text{Recirculation Flow}) \\ &= (M_{\text{recirc}} + M_{\text{stm}}) / M_{\text{stm}} \end{aligned}$$

CR與功率

42

SHRINK AROT- I -CH 6

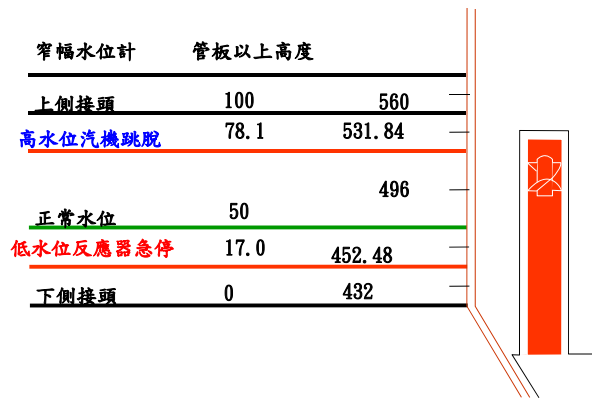
- ▣ 收縮和膨脹發生在潛降區—水位偵測的感測點—當蒸汽側(STEAM PLANT)有暫態時。
- ▣ 當汽機負載減少，蒸汽流量降低，蒸汽移除比產生少，在飽和系統將造成壓力上升。壓力迅速上升造成存在於管束區的混合流體的蒸汽泡蹋陷，水/汽質量佔據的體積突然縮小了，來自潛降區增加了的水流量移動入管束區，造成指示的水位收縮(SHRINK)。
- ▣ 此流力行為的結果使真正的水存量(蒸汽流量<飼水流量)增加卻顯示水位(假水位/APPARENT)減少

43

& SWELL AROT- I -CH 6

- ▣ 在蒸汽流量增加的情況，過量的蒸汽移除導致蒸汽產生器壓力降低，此壓降使得管束區的濕混合物的汽部分膨脹。此突然的體積增加移動水回到潛降區造成指示的水位的膨脹(SWELL)。
- ▣ 而實際的質量是減少的(飼水流量<蒸汽流量)。

44



45

水位儀器

- 每個蒸汽產生器皆有五個水位儀器，其中四個是窄幅（Narrow Range）水位計(AE-LT474、LT475、LT476、LT473)，一個是寬幅（Wide Range）水位計(AE-LT477)。（註：只列S/G A之LT）
- 各水位計均為差壓式，也就是比較潛降區的變動水柱（Variable leg）與一同溫恆高之參考柱（Reference Leg）之高低，產生差壓訊號，再轉化為水位指示。
- 每個窄幅水位計為增加其可靠性，都有各自的上下水位接頭。上接頭（Upper Tap）約位在乾燥器（Steam Dryer）下方，下接頭（Lower Tap）約位在汽水分離器下方，上下距離約128吋（325cm）。
- 各水位計均為負差壓信號，當參考柱洩漏或未滿水時，水位信號較實際偏高。

46

水位儀器

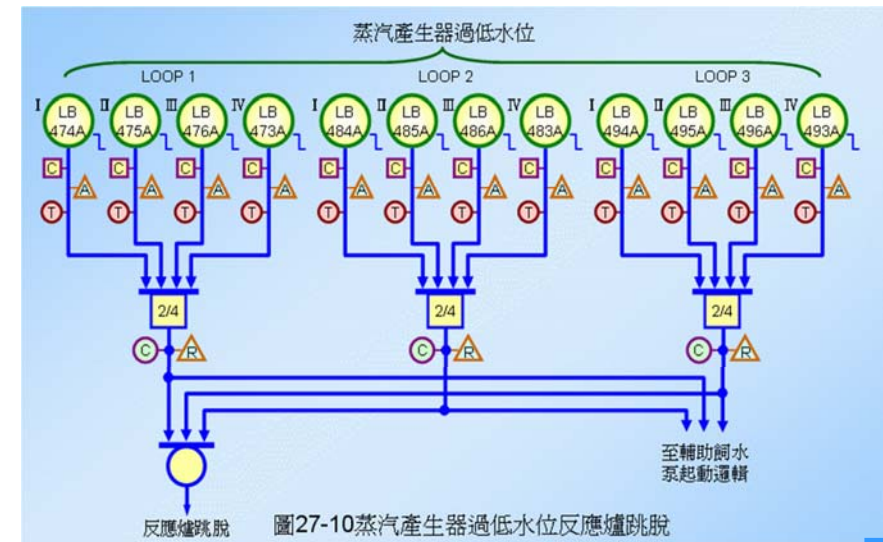
- 窄幅水位計除提供0~100%之水位指示外，並提供
 - 過低水位反應爐跳脫訊號(17.0%水位)：係保護反應爐，避免在失去熱沉（Heat Sink）狀況下運轉。 如圖27-10
 - 高水位汽機跳脫訊號（78.1%水位）：防止騰帶現象損害汽機葉片。 如圖27-11
- 寬幅水位計之上接頭與窄幅水位計相同，下接頭則位在管板上方。寬幅水位計之儀器校正溫度較低於RCS低溫情況使用。寬幅水位計也不如窄幅精確，無保護功能，但能提供二次側全部高度之指示，在緊急事故時十分有用。

因其水位變化趨勢的反應較快，機組低功率而以飼水旁通控制閥控制S/G水位時，提供水位信號至水位控制系統，以先期反應。

飼水控制流程

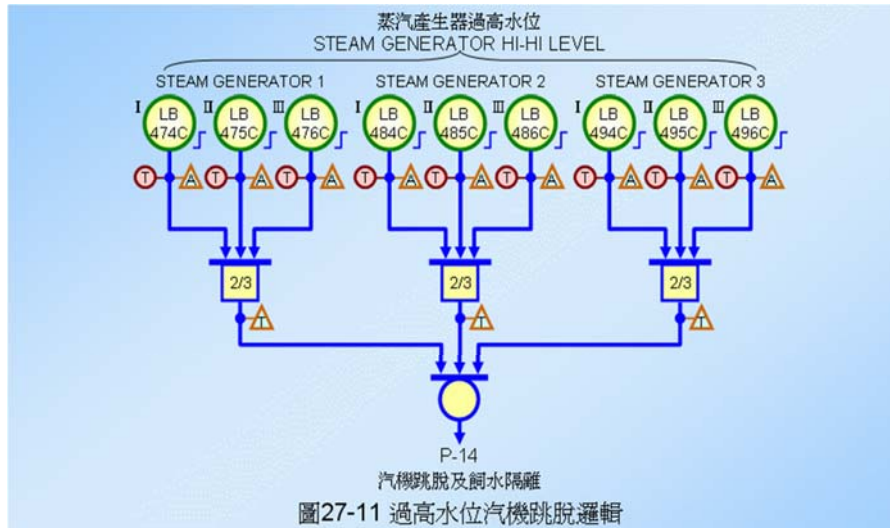
47

S/G Lo-Lo Level Rx Trip



48

S/G Hi-Hi Level



49

流量儀器

飼水流量儀器

1. 三條主飼水管路飼水控制閥下游均各有一文氏管流量測量元件與三個流量傳送器(迴路一:AE-FT476, FT477, FT478)分別測量差壓，此差壓訊號開平方即與體積流量成正比。經過飼水溫度補償後，與飼水質量流量成正比。
2. 三個流量訊號經中值選擇器自動選中值做為控制訊號。控制室有旁通開關，必要時可手動旁通任一控道。其中二支在主控制盤上有流量指示(迴路一:AE-FI476/FI477)。
3. FT486、FT487、FT488(LOOP 2) FT496、FT497、FT498(LOOP 3)
4. 此處之主飼水流量計係用於蒸汽產生器水位控制用；主飼水管路另有超音波流量計用於熱功率計算

50

流量儀器

蒸汽流量儀器

1. 各蒸汽產生器之蒸汽流量可由測量其出口流量限制器之差壓而得。此差壓訊號開平方與蒸汽體積流量成正比，經過壓力訊號補償後，與蒸汽質量流量成正比。三個流量訊號((以迴路一為例AB-FT473, FT474, FT475)經中值選擇器(Medium Selector)自動選其中第二高值(中值)做為控制訊號。
2. 在控制室有旁通開關，必要時可手動旁通任一控道。其中二支(以迴路一為例AB-FI474, FI475)在主控制盤上有流量指示。
3. FT483、FT484、FT485
4. FT493、FT494、FT495

52

- 為因應小幅度功率提升(MURPU)(提升1.69%)，原本以文氏管量測之飼水流量其精準度不足，改以超音波流量計量測飼水流量，減少誤差，以達小幅度功率提升目的。
- 此超音波流量計單純用於熱功率計算，並以此做為功率運轉之依據。
- 當其測量元件出現異常時，於控制室JP007C-W01警報出示，採限期修復、改依文氏管流量計計算之熱功率運轉等措施。
- 額定熱功率由2775MWt提升到2822MWt，目前運轉於2820MWt附近，依持照額定功率限制導則運轉(GOP204)，NAS警報設定:BBQU05(前5分鐘滾動平均):2822MWt

51

壓力儀器

- 三條蒸汽管路上圍阻體隔離閥之前各有五個壓力傳送器，測量蒸汽壓力，二個做為動力釋壓閥控制(迴路一AB-PT501,PT504,迴路二AB-PT502,PT505,迴路三AB-PT503,PT505)，另三個作為蒸汽流量補償訊號之用(以迴路一為例AB-PT474補償AB-FT473,AB-PT475補償AB-FT474, AB-PT476補償AB-FT475)。
- 蒸汽集管有三個壓力傳送器(AB-PT464, PT464A, PT464B)，其訊號經中值選擇器後，作為飼水泵轉速控制之用(亦在蒸汽排放壓力模式時做控制用)。
- 飼水集管上有三個壓力傳送器(AB-PT508, PT508A, PT508B)，其訊號經中值選擇器後，作為飼水泵轉速控制之用。

53

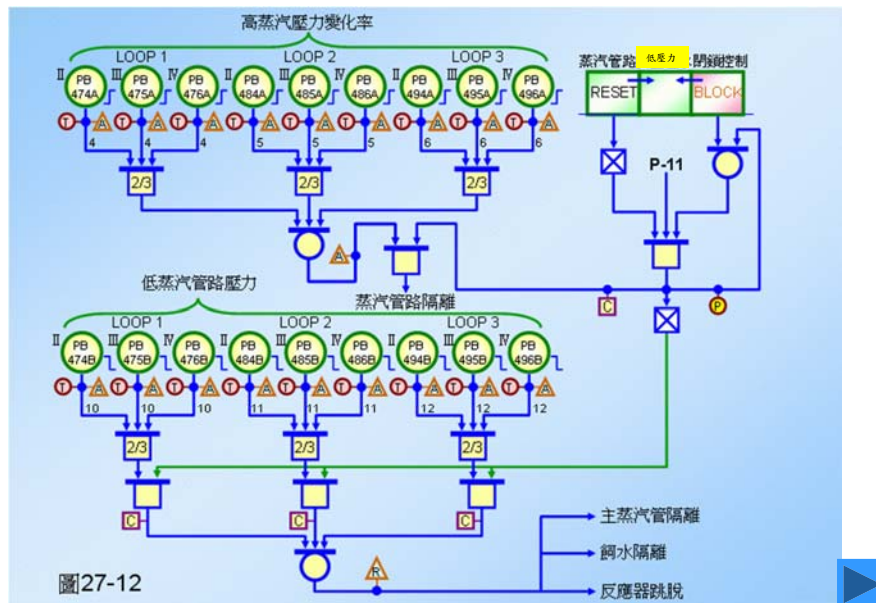
壓力儀器

- 三條蒸汽管之壓力傳送器，除作為蒸汽流量補償訊號之用外，尚提供反應器保護信號。
- 主蒸汽管路低壓力 =>MSIS、FWIS、Trip Rx、Trip T/b & MFWP、FWCV & Bypass Close：尚未BLOCK STM Line Lo press引動信號前，任一S/G LO Press (2/3 -AB-PB-474B, 475B, 476B setting：41.14(585)kg/cm² / Sec)。
- 主蒸汽管路高壓力變化率 =>MSIS信號：P-11 且BLOCK STM Line Lo press引動信號後，任一S/G Hi Press Rate(2/3 -PB474A, PB475A, PB476A setting：7kg/cm² / Sec)時。

如圖27-12

54

Main Steam Line Pressure



水位控制系統

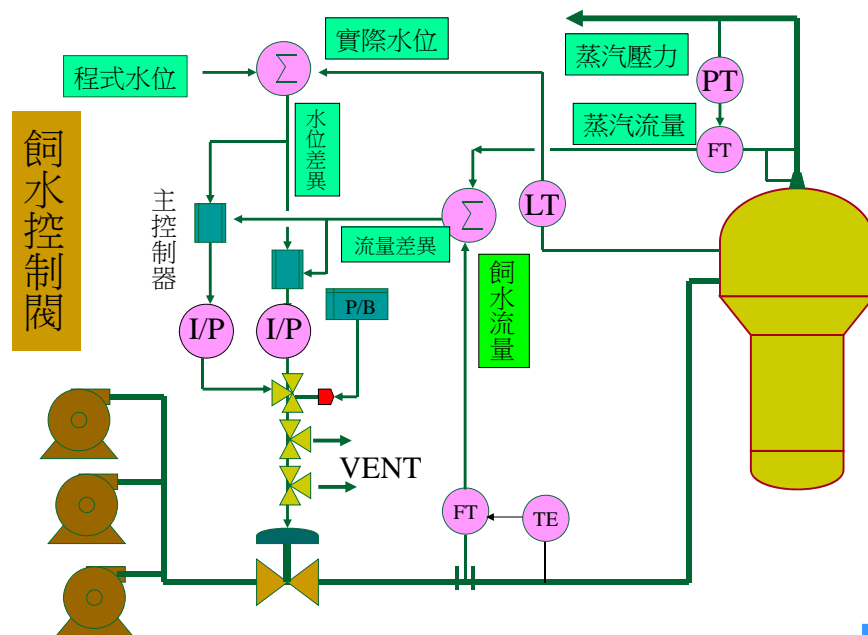
- 蒸汽產生器之水位藉調整飼水流量的大小來控制，若水位太低則增加飼水流量來補足，若水位太高，則減少飼水流量，讓水位因蒸發作用而降低。
- 飼水流量的控制，在高功率時，飼水旁通閥關閉，藉調整飼水控制閥的開度來控制流量。在低功率時，飼水控制閥關閉，藉調整飼水旁通閥的開度來控制。
- 此外並有飼水泵轉速控制系統，隨功率高低，藉調整飼水泵轉速快慢，而建立理想的飼水控制閥差壓。

56

飼水控制閥控制系統

- 水位差異訊號來自程式水位訊號減去實際水位訊號。
- 程式水位訊號由汽機衝擊室壓力產生，本廠固定訂在50%。
- 從三個窄幅水位計(以迴路一為例AE-LT473,475,476。在控制室有旁通開關，必要時可手動旁通任一控道。)經中值選擇器選出其一作為實際水位訊號，此訊號經濾波線路以除去振盪訊號。
- 此二訊號比較後產生水位差異訊號，再送去比例積分控制器（Proportional+Integral Controller）。

57



飼水控制簡圖

59

流量差異訊號

- 經過壓力補償的蒸汽流量訊號減去經溫度補償的飼水流量訊號成為流量差異訊號。這個訊號乃是預期水位將產生的變化，先行調整飼水流量以減少水位瞬態變化。
 1. 若蒸汽流量大於飼水流量（流量差異訊號為正），水位勢將下降，控制器使飼水控制閥開度加大，增加飼水流量。
 2. 若蒸汽流量小於飼水流量（流量差異訊號為負），水位勢必上升，控制器使飼水控制閥開度減小，降低飼水流量。
- 水位差異訊號和流量差異訊號相加，經由比例積分控制器送出相對的訊號，調整飼水控制閥的開度以控制蒸汽產生器的水位，

圖27-13

圖27-15

58

飼水控制簡圖

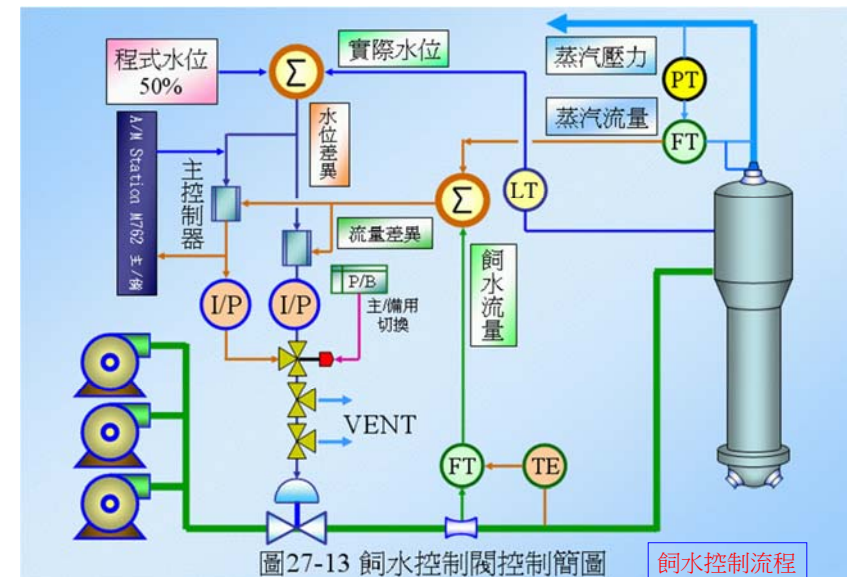
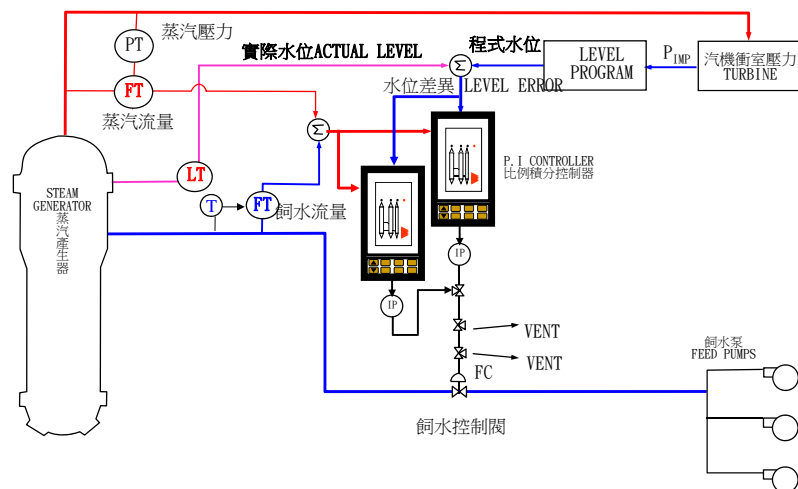


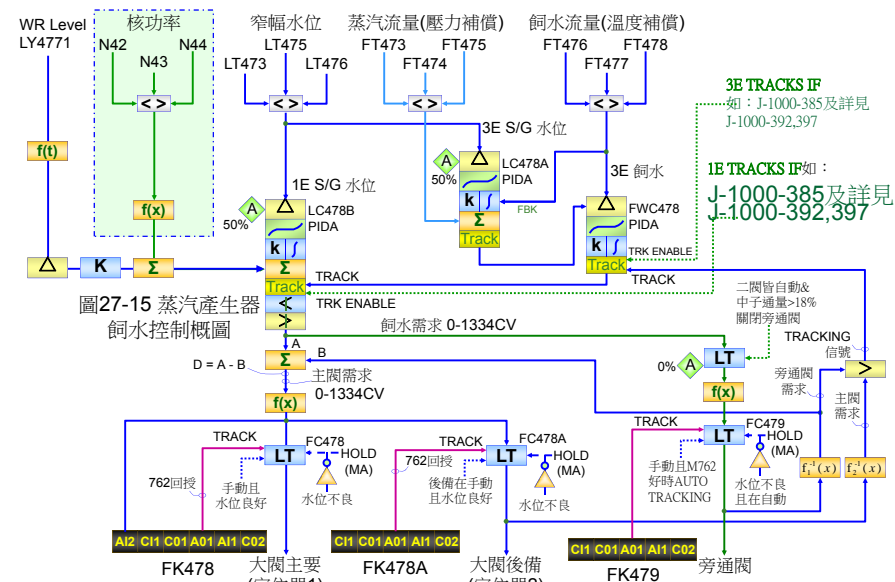
圖27-13 飼水控制閥控制簡圖

飼水控制流程

飼水流量控制

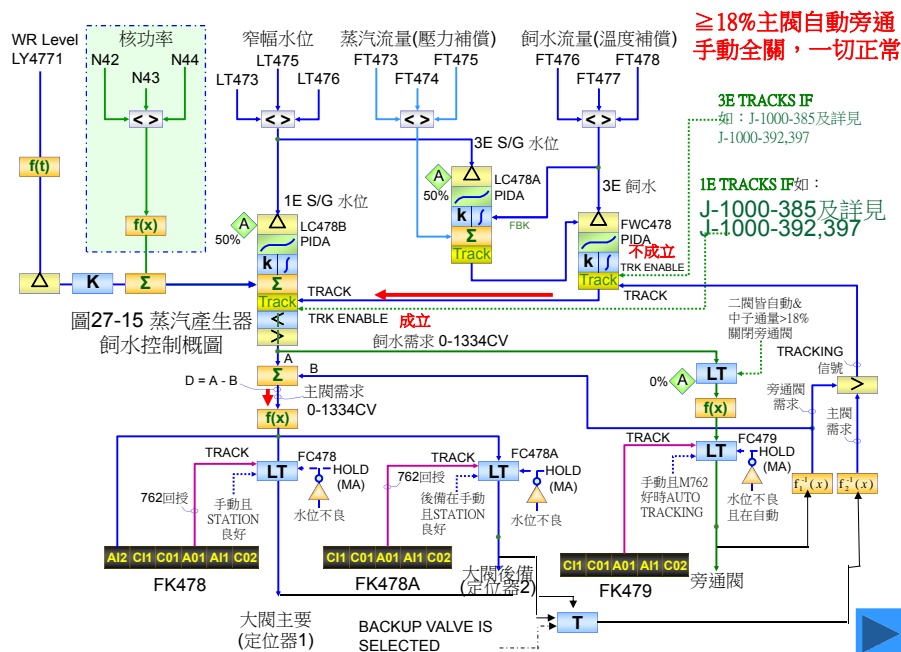


61



3E TRACKS IF, 1E TRACKS IF

假如主閥在正常使用中(RX POWER $\geq 18\%$, 旁通閥置手動關閉), 則主閥之控制路徑如:



63

STEAM FLOW MEASUREMENT BAD

- 各控道和中值比較，相差正負20%延時3 SECS, 即該控道INVALID，若2 OUT OF 3 INVALID即成立該S/G STEAM FLOW IS INVALID。(被旁通控道視同INVALID)圖J-1000-388,389。

69

Cv的定義為

- 當調節閥全開，閥兩端壓差 ΔP 為1磅/英寸²，介質為60°F清水時每分鐘流經調節閥的流量數，以加侖/分計。
- Flow Coefficient - Cv - for Liquids**
For liquids the flow coefficient - Cv - expresses the flow capacity in *gallons per minute (GPM)* of 60°F water with a pressure drop of 1 psi (lb/in²).

70

Flow expressed by volume

$$Cv = q (SG / dp)^{1/2} \quad (1)$$

where

q = water flow (US gallons per minute)

SG = specific gravity (1 for water)

dp = pressure drop (psi)

71

Flow is expressed by weight

$$Cv = w / (500 (dp SG)^{1/2}) \quad (1c)$$

where

w = water flow (lb/h)

SG = specific gravity (1 for water)

dp = pressure drop (psia)

72

閥位與容量

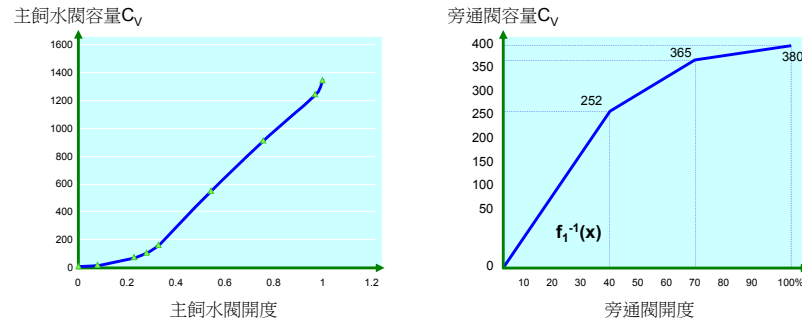


圖27-15-1 閥位與容量曲線圖

73

飼水控制閥失效

■ 飼水控制閥在下列狀況時將不可節流：

1. S/G高高水位(78.1%)，飼水控制閥全關。
2. 反應爐跳脫且低Tavg(295.6°C)，飼水控制閥全關。
3. 安全注水訊號(SIS)
4. 任一主蒸汽迴路低壓力(未BLOCK Stm Line Lo press信號，任一S/G LO Press (2/3 -AB-PB-474B, 475B, 476B setting: 41.14(585)kg/cm² / Sec))

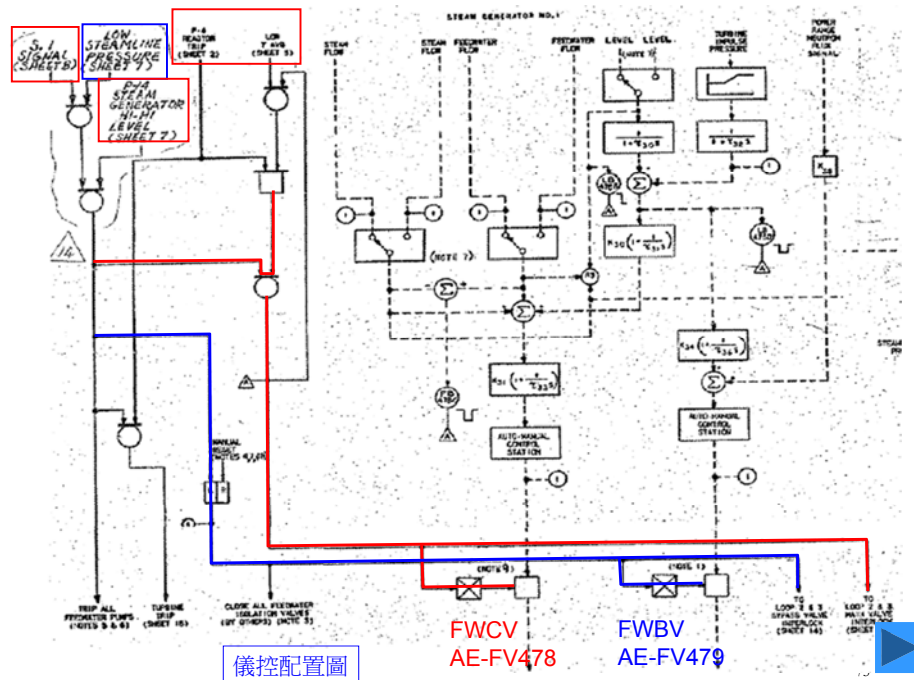
■ 水位控制系統產生下列警報：

1. 蒸汽流量與飼水流量不匹配(>10%)。
2. 程式水位和實際水位誤差達±5%。
3. 高水位汽機跳脫(78.1%)。
4. S/G低水位(25%)。
5. 過低水位反應爐跳脫(17.1%)。

儀控配置圖

Functional dia.

74



儀控配置圖

主飼水控制閥切換

■ 為增加飼水控制的可靠度，減少關鍵組件故障時造成機組嚴重暫態甚或急停的事件，每一主飼水控制閥採雙迴路控制。

1. 正常時切換開關(以loop 1為例AE-HS478)置於Primary 對應主閥的Primary AUTO/MAN 操作站(以loop 1為例AE-FK-478)。
2. 發生主迴路元件故障時，自動切換到BackUP迴路控制，對應主閥的Backup AUTO/MAN 操作站(以迴路一為例AE-FK-478A)。

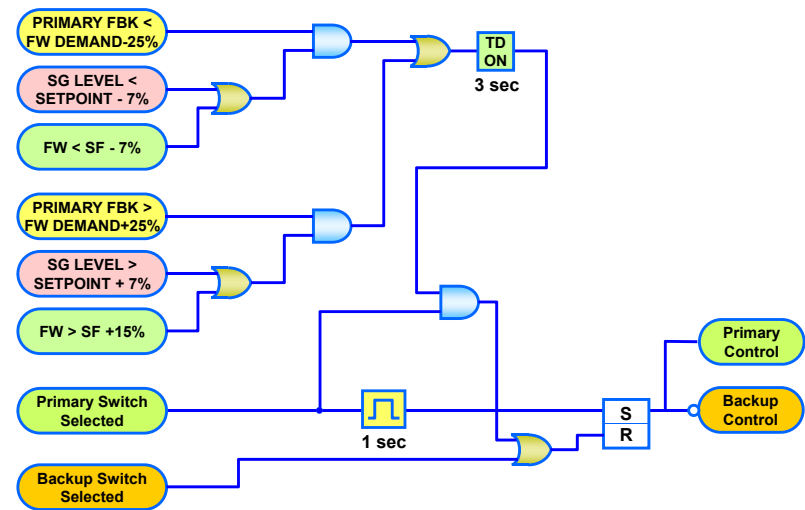
■ 其設計原則：主迴路元件故障時，必須能自動切換且機組暫態時不可誤切換。

CLD

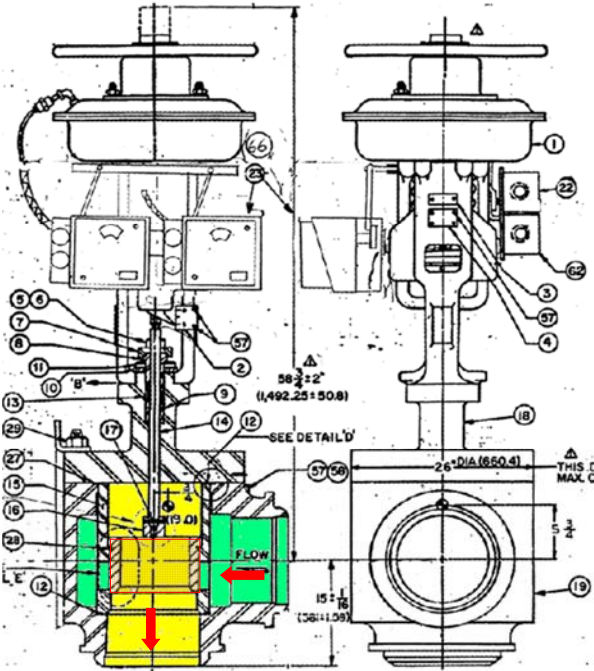
儀控配置圖

76

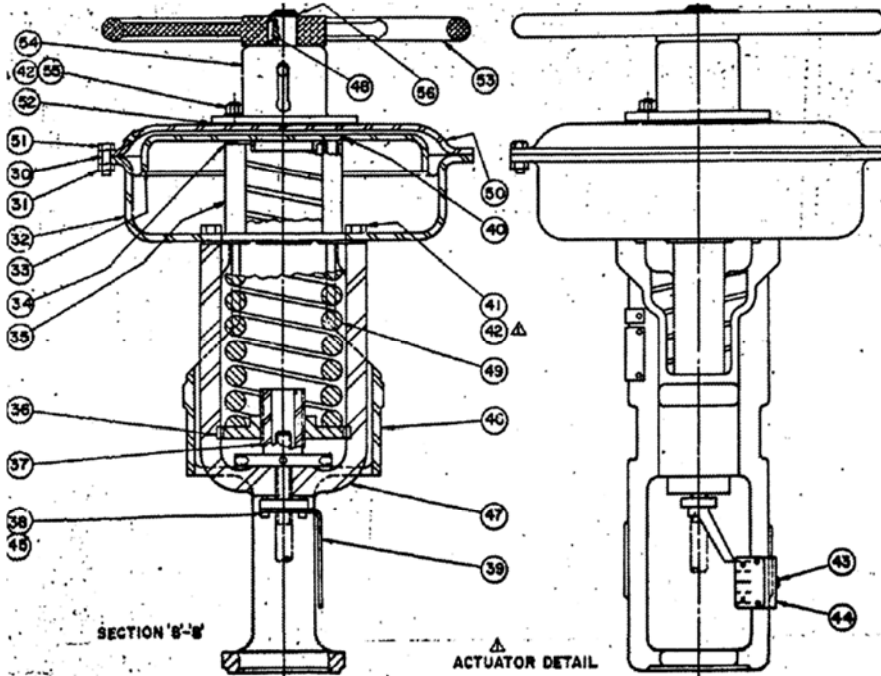
DCR M1-3218/M2-3219修改後之飼水控制閥自動切換邏輯

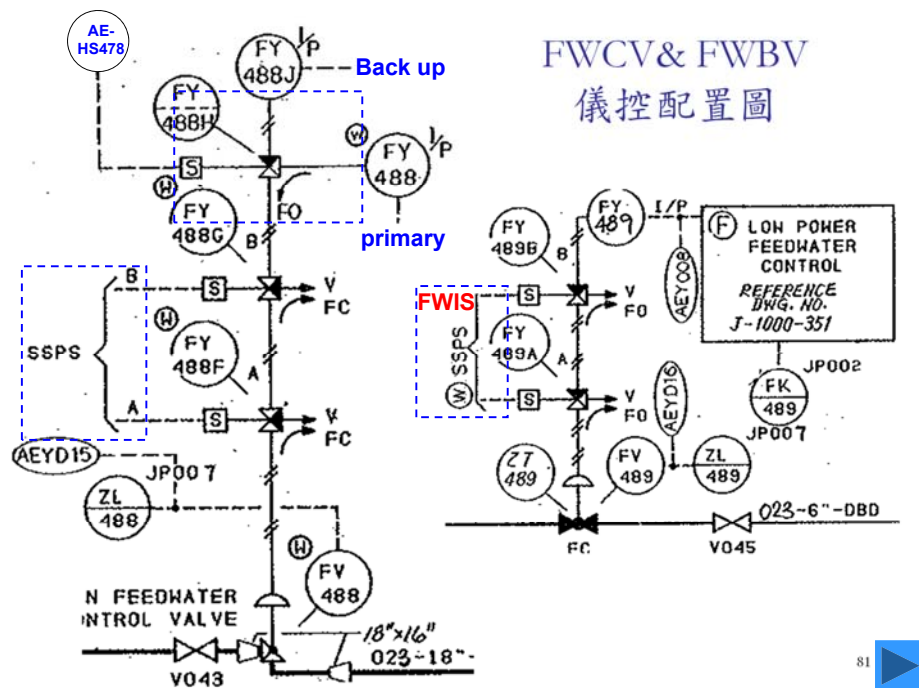


主飼水控制閥CLD



FWCV





81

飼水旁通閥控制系統

1. 低功率時，由於飼水流量甚低，飼水控制閥不能作穩定的控制，故由較小的旁通閥來控制飼水流量，且此時飼水流量與蒸汽流量不穩定，故無法用作控制訊號，故由功率階中子通量偵測系統的三個訊號控道N42、N43、N44的中值取代。飼水旁通閥控制通常只在18%功率以下使用。
2. 以中值選擇器 (Medium Selector) 選擇三個功率階訊號N42、N43、N44的中值，作為預期水位變化的訊號。當反應爐功率升高，蒸汽產生器之蒸汽量必然增加，因此必須增加飼水以因應水位的變化。若反應爐功率降低，蒸汽產生器熱傳導率降低，飼水就可相對減少。(此信號未使用，二號機EOC-14 DCR)
3. 二號機在EOC-14大修，將原來之功率階訊號改由蒸汽產生器寬幅水位訊號取代。寬幅水位訊號先經過5秒的lag，然後與無載水位訊號比較(目前暫定65%)，兩者之誤差值為寬幅水位差異訊號做為預期水位變化的訊號。
4. 窄幅水位差異訊號和寬幅水位差異訊號相加，經控制器產生旁通閥的開度訊號，以控制飼水流量。飼水旁通閥全開，僅能提供20%的飼水流量，因此功率大於18%(3% D.B)，其他切換條件符合時，會自動改用飼水控制主閥控制。

飼水控制流程

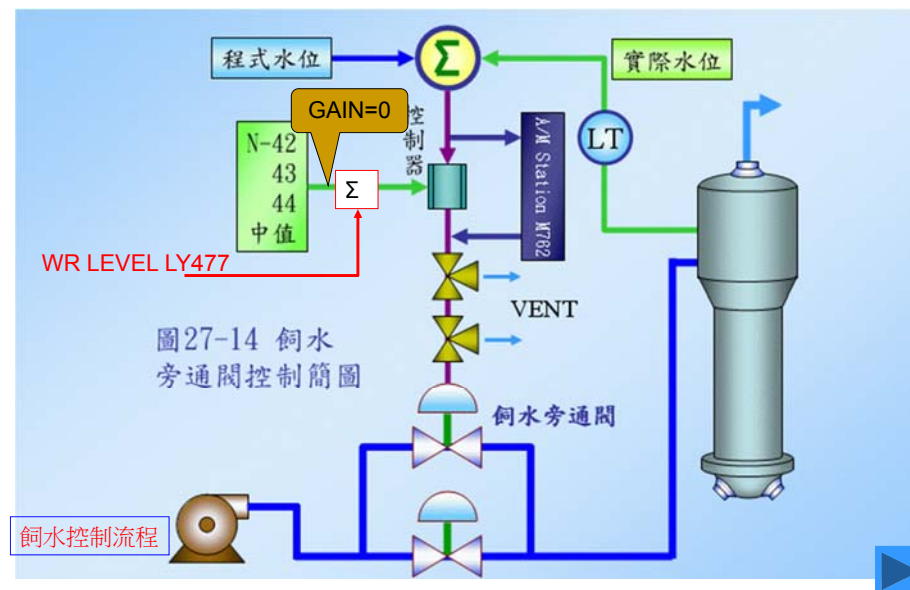
#2 控制流程

圖27-14

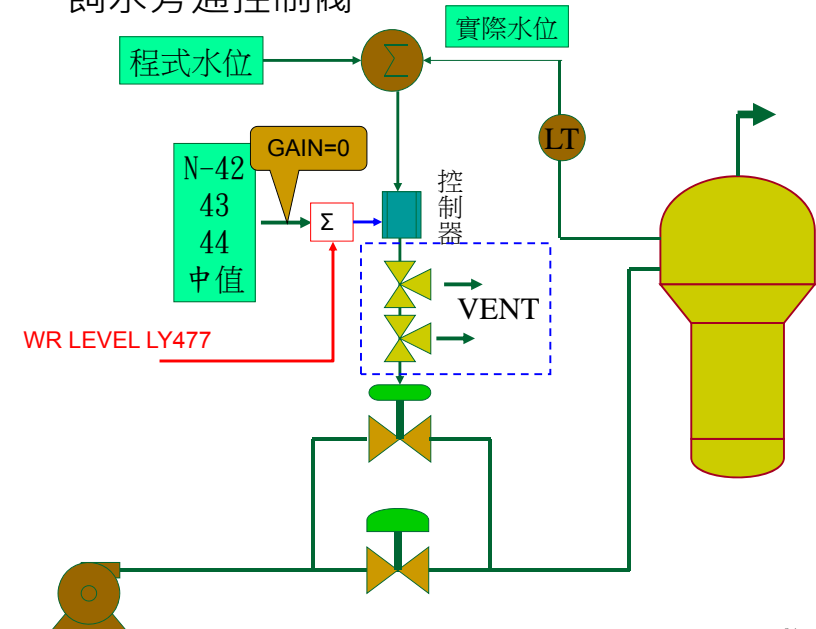
圖27-15

82

飼水旁通閥控制系統

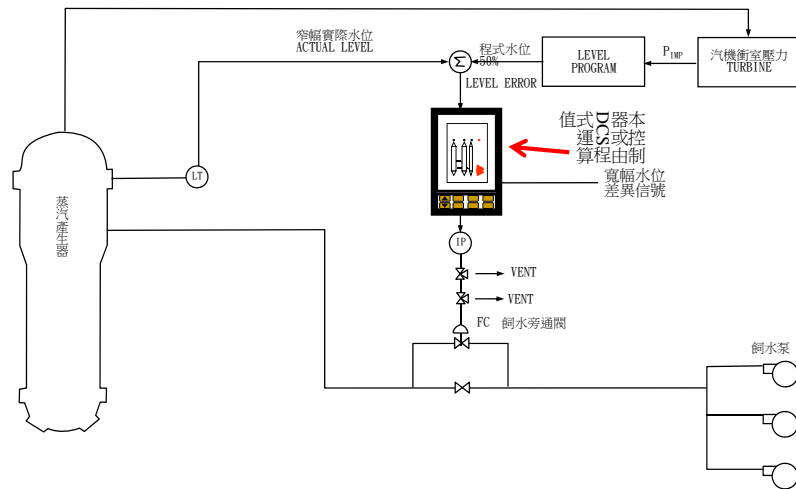


飼水旁通控制閥



84

飼水旁通閥之控制



85

飼水旁通閥關閉訊號

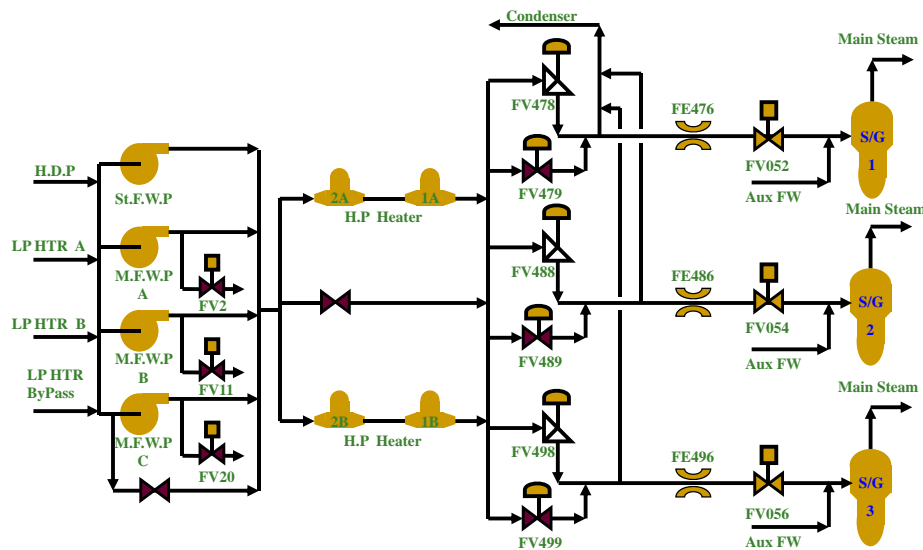
- 任一蒸汽產生器高-高水位(2/3 - 78.1%)。
- 安全注水訊號(SIS)。
- 任一主蒸汽迴路低壓力(2/3 - 41.14Kg/cm²，未BLOCK Stm Line Lo press時且任一S/G LO Press)。

儀控配置圖

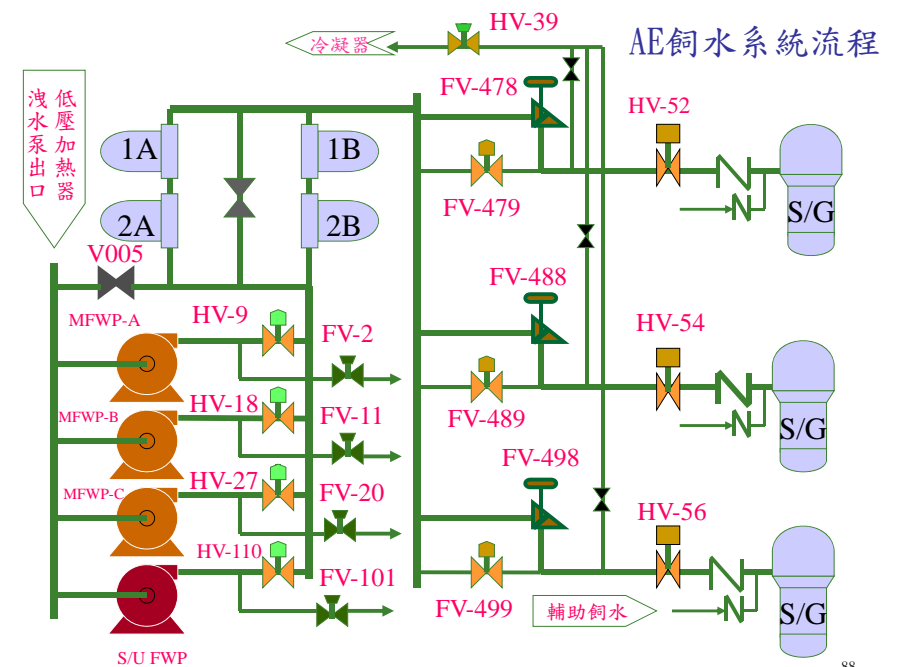
Functional dia.

86

AE飼水系統流程及重要設備簡介



87



88

飼水泵速率控制

1. 飼水泵汽機速率控制器藉著速率的變化，來維持飼水泵出口壓力和至蒸汽集管間壓力差於程式差壓範圍。
2. 此程式差壓值是機組負載(也相當於蒸汽流量)的函數，此程式差壓值經一延遲單元減少大蒸汽流量的暫態變動影響，再加上飼水在無載時的靜水頭偏壓信號，然後和實際差壓(飼水集管壓力—蒸汽集管壓力)比較，得一誤差信號送至P/I控制器做為水泵速率控制信號。
3. 飼水集管壓力由PT508, PT508A, PT508B取中間值作為控制信號，蒸汽集管壓力由PT464, PT464A, PT464B取中間值作為控制信號。

程式差壓

89

低功率時之泵速控制SK-509A

1. (1) 當SK-509A置於Local(顯示L)時：差壓之設定由運轉員自行設定。運轉員可由SK-509A最左邊之BAR及DISPLAY知道目前設定的差壓值。

SK-509A中間BAR所顯示的是Remote時之程式差壓設定值。

當運轉員由Local切至Remote時，若兩個設定值有誤差存在，則會有20 sec之平衡時間，而不會直接step change。

2. Remote時；SK-509A上會顯示R：差壓由程式差壓控制。

此程式差壓曲線由兩條曲線組合而成，一條是由以PR(0~20%)作為X軸建置而成，另一條則是修改舊曲線(0~16.67%)，使其與新曲線match，兩條曲線切換時機為PR大於18%時，從新曲線切至舊曲線。

當PR小於15%時，則從舊曲線切回新曲線，新舊曲線切換過程設定20 sec之切換時間，PR之信號有經過120 sec之lag，所以不會因PR之輕微晃動而影響程式差壓，

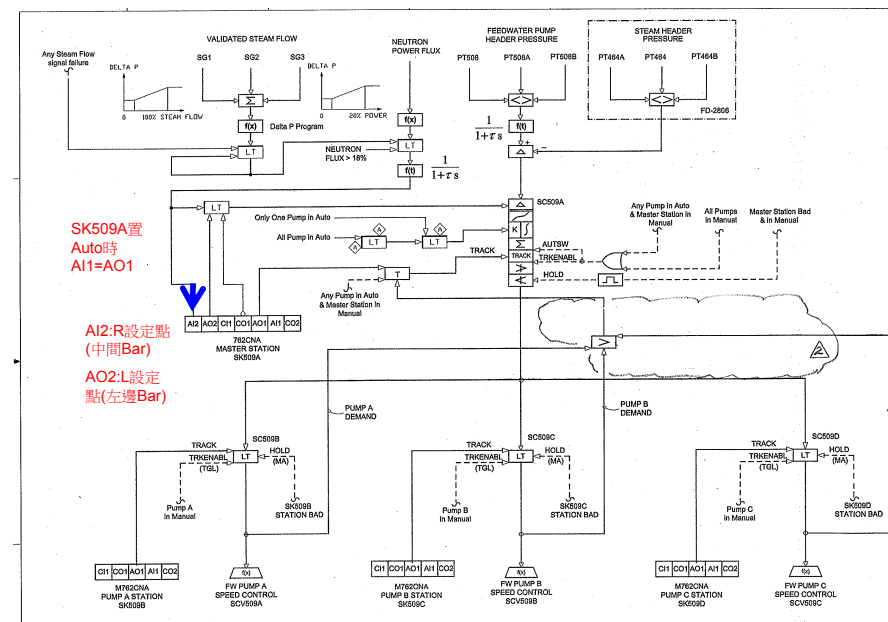
90

低功率時之泵速控制SK-509A

當SK-509A在Remote時，Local之設定點會自動追隨Remote設定點，所以當從Remote切至Local時不會bump。

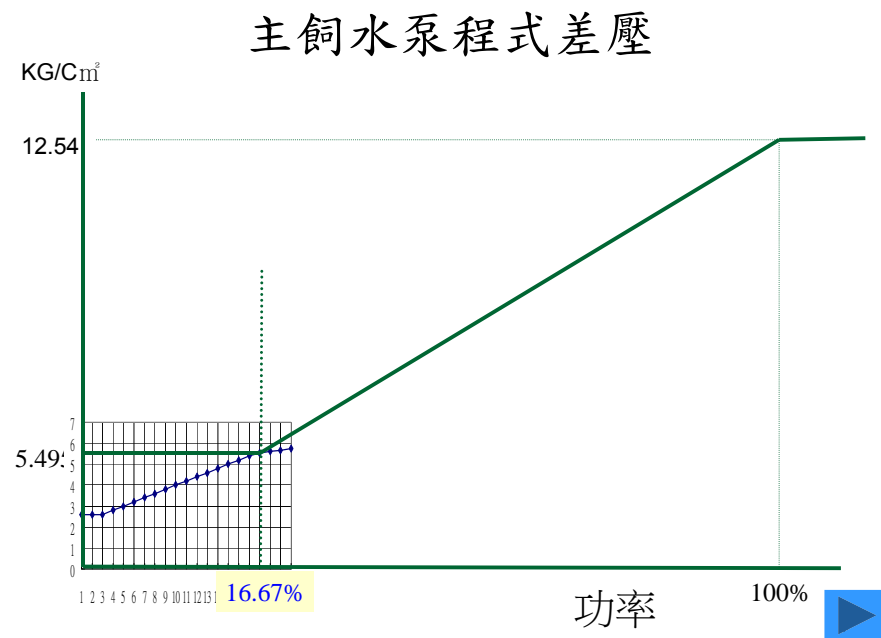
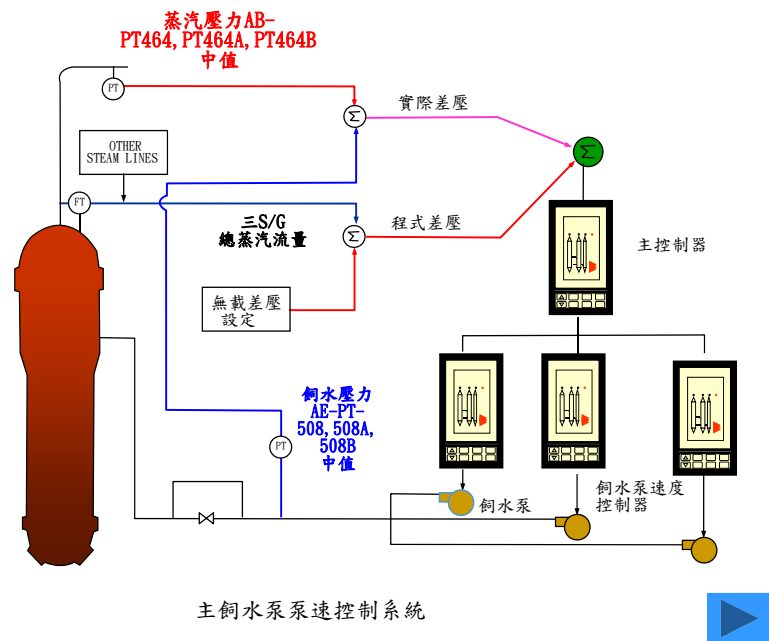
3. Remote/Local 之操作與兩條曲線間之切換是完全獨立。

91

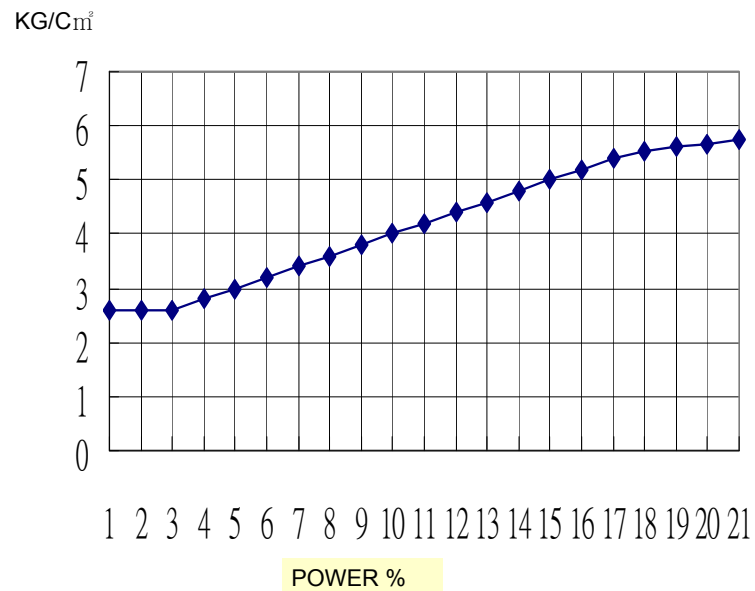


新版

92



主飼水泵程式差壓(低功率)



沖放系統

沖放系統

設計基準：

1. 本系統自蒸汽產生器至圍阻體隔離閥，須能承受設計基準地震。
2. 沖放系統，協同冷凝水除礦器，化學加藥系統(Chemical Injection System)等，須能維持蒸汽產生器殼側水質于限值內。
3. 當一次系統爐水自U型管束洩漏至二次系統時，沖放系統須能移除二次系統水中之放射性物質，維持輻射強度于運轉規範限值下。
4. 沖放系統須能回收部份熱量，所排放的水須能全部回到冷凝器。

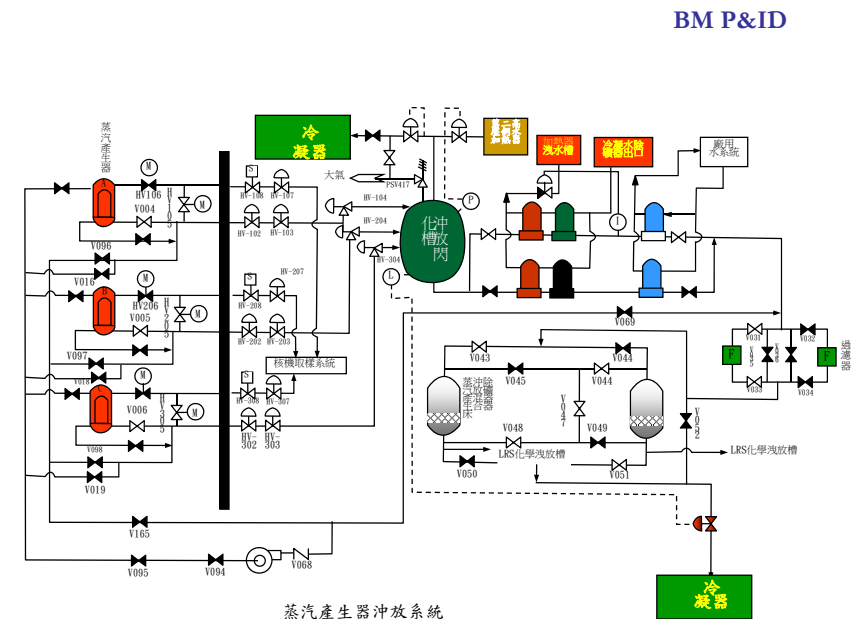
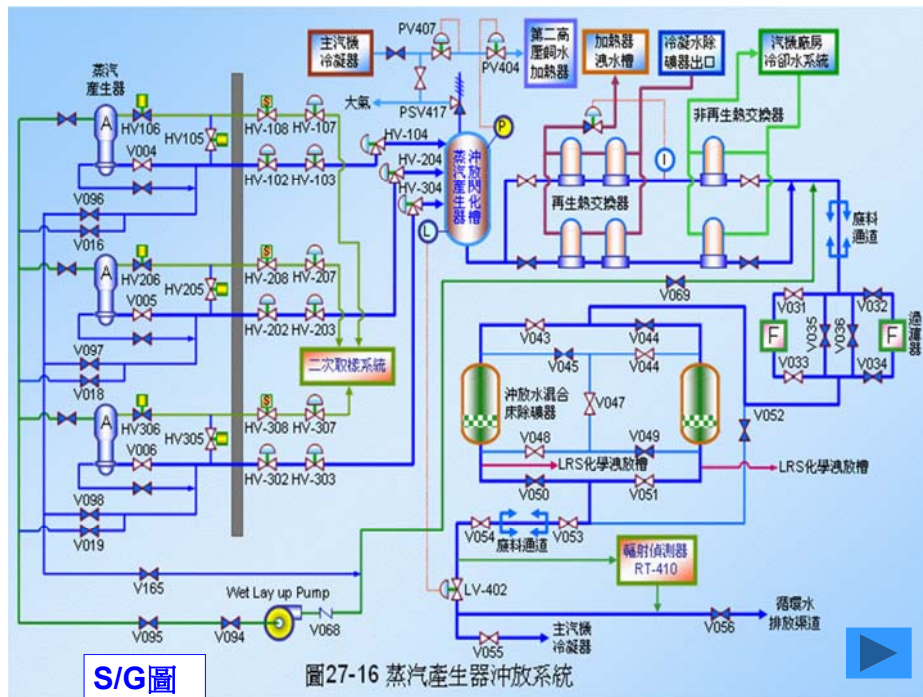
97

系統概述

- 自飼水帶進蒸汽產生器的雜質，因蒸騰作用，濃度逐漸的增加。若不加以控制，勢將引起腐蝕作用，不僅增加管束洩漏的機會；也會減少蒸汽產生器的使用壽命。控制的方法；
 - 加入化學藥品，
 - 沖放，也就是將沈積的雜質自蒸汽產生器底部排出。
- 三個蒸汽產生器的沖放水匯於閃化槽（Flash Tank），由於閃化槽壓力較低，故一部份沖放水閃化為蒸汽，引入第二高壓飼水加熱器，剩下來的沖放水經過再生熱交換器，將熱量交給冷凝水，再經非再生熱交換器，進一步的降低溫度，然後流經過濾器及除礦器除去雜質後再回流進入冷凝器A。
- 非再生熱交換器以汽機廠房冷卻水系統(TBCCW)來冷卻，以免沖放水溫度太高，損壞除礦器內之樹脂。

P&ID

98



100

系統重要組件

- 沖放管路隔離閥 (BM-HV103、HV102、HV203、HV202、HV303和HV302)：屬圍阻體隔離閥，AFS、Room Temp Hi或高輻射時關閉。
- 沖放流量調節閥(BM-HV104、HV204和HV304)。
- 取樣管路隔離閥 (BM-HV107、HV108、HV207、HV208、HV307和HV308)：屬圍阻體隔離閥，AFS、或高輻射時關閉。
- 輻射偵測器BM-RT410(受BM-RV410控制)和BM-RT417。
- S/G濕式儲存與洩水傳送迴路：BM-P165。
- S/G沖放閃化槽冷凝水注水閥：BM-LV427。

BM-HV103 CLD

BM-HV102 CLD

BM-HV107/108 CLD

BM-LV427

P&ID

101

系統重要組件

- 閃化槽:直立式碳鋼壓力槽，有一水位控制器，當槽內水位太高時，即將通往冷凝器的控制閥LV402成比例打開，以加大沖放流量。
- 再生熱交換器:共有四個(N-X032A/B, N-X033A/B)殼管式熱交換器，分為二串，正常使用一串。高溫沖放水流經U形管管側，額定流量20.3L/S。來自冷凝水泵出口集管的冷卻水則經殼側以回收熱量。
- 每串再生熱交換器各有一溫度控制器，控制殼側冷凝水出口閥(BM-TV503、TV603)之開度。
- BM-TV503,TV603 已加裝定位器，開度下限定位於10%，無法全關，若開度大於50%時，會造成閥體及管路晃動。
- 流出再生熱交換器的冷凝水則進入加熱器洩水槽，再經加熱器洩水泵打回飼水系統。

P&ID

102

系統重要組件

- 非再生式熱交換器：共2個(N-X034及N-X035)殼管式熱交換器沖放水通過不銹鋼製造的U形管，TBCCW流過，碳鋼製造的殼側。
- 沖放過濾器 (N-Z020及N-Z021)：可抽換之匣式型，其額定壓力在設計溫度200°F時為300 PSIG，額定流量161100 Lb/hr (20.3L/S)，能過濾25微米以上粒子達98%。
- 除礦器:兩個各有100%容量的混床式除礦器，外槽直立式不銹鋼壓力槽。此兩除礦器可串聯或並聯使用。設計流量為40.6L/S，每一除礦器樹脂體積100ft³。

P&ID

103

正常運轉

- 沖放水依水質情況以決定適當的流量率，自蒸汽產生器連續的流向閃化槽。每一蒸汽產生器沖放流量通常在7L/sec (105 GPM)，三個蒸汽產生器共21 L/sec (315 GPM)。
- 若冷凝器殼側漏入海水時，沖放流量可大於23.4 L/sec(當排放到大海時)(SOP326.2:除礦器並聯時，流量須小於46.8 L/sec)(若蒸汽產生器U形管洩漏時)。
- 每個蒸汽產生器之沖放量均由一控制閥(HV104, HV204, HV304)加以控制。這三個控制閥越接近閃化槽越好，蓋此閥下游之管路極易因液體閃化而受損。
- 使用BM-HV104/HV204/HV304之前，需先降低BM-PIK404設定壓力。調整BM-HV104/HV204/HV304開度，待確認動作正常，再緩慢將BM-PIK404設定壓力提升。

104

異常運轉

1. 沖放水圍阻體隔離閥HV103、HV203、HV303在下列三種狀況時關閉：

- ①閃化槽過高水位（Hi-Hi Water Level）。
- ②沖放水高輻射(RB410或RB417)，避免輻射外洩。
- ③輔助飼水泵起動信號（AFAS，MD串A），避免飼水自沖放管路流失。
- ④輔助廠房RM266、RM232、RM188高溫度。

HV-103 CLD

105

異常運轉

- 2. 蒸汽產生器洩漏：在蒸汽產生器中由於一次側反應爐水洩漏至二次側經過除礦器後，沖放水仍不合限值時，放射偵檢器（RT410）會動作，使控制室產生警報且關閉沖放及取樣系統的隔離閥。
- 沖放取樣隔離閥RV410在接受RT410高輻射訊號或閃化槽低壓力（PS404）時會自動關閉。
- 沖放閃化槽冷凝水注入閥LV427當閃化槽高水位信號（LS403），低水位信號（LS420）及低壓力信號（PS404）都不存在時會自動開啟；當沖放閃化槽低壓力信號（PS404）；高高水位信號（LS424）及低水位信號（LS420）三個信號中任一個信號出現時，LV427將會自動關閉。

BM-LV427

106

異常運轉

3. 主冷凝器洩漏：此時流經除礦器的沖放水中的鈉成份增加，當被偵檢出來時，在控制室會有警報產生。此時應增加沖放。

參考冷凝器洩漏程序書AOP513.1及807:二次側水質改正動作／動作階段

107

蒸汽產生器濕式儲存運轉

Wet Layup Operation)

- 當長期的冷爐停機期間，蒸汽產生器要置於濕式儲存運轉，以防止U形管遭氧化腐蝕，此時S/G保持高水位以淹蓋U形管束，且飼水水質維持較高的PH值，並混合均勻。
- 當蒸汽產生器在濕式儲存時，操作員須時常察看寬幅水位計指示，以確保蒸汽產生器的水位在濕式儲存噴嘴之上(92%)，濕式儲存時，濕式儲存泵可用來保持U形管束外側之飼水的循環。
- 當蒸汽產生器在濕式保存期間，運轉員可以用寬幅或窄幅水位計連續監視水位，以確定水位是在濕式保存噴嘴之上。運轉員也應確定有氮氣正壓供應，且於濕式保存時維持其水質良好。

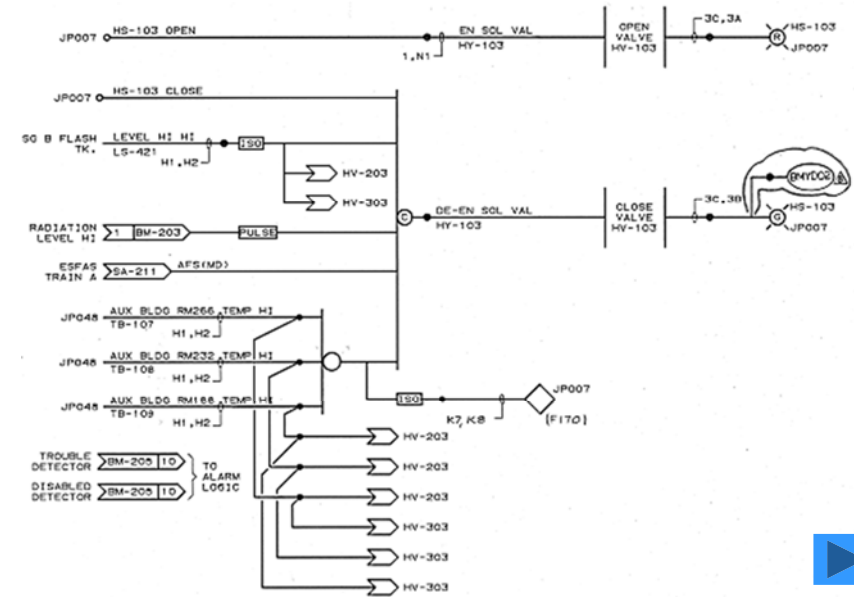
108

蒸汽產生器之洩水

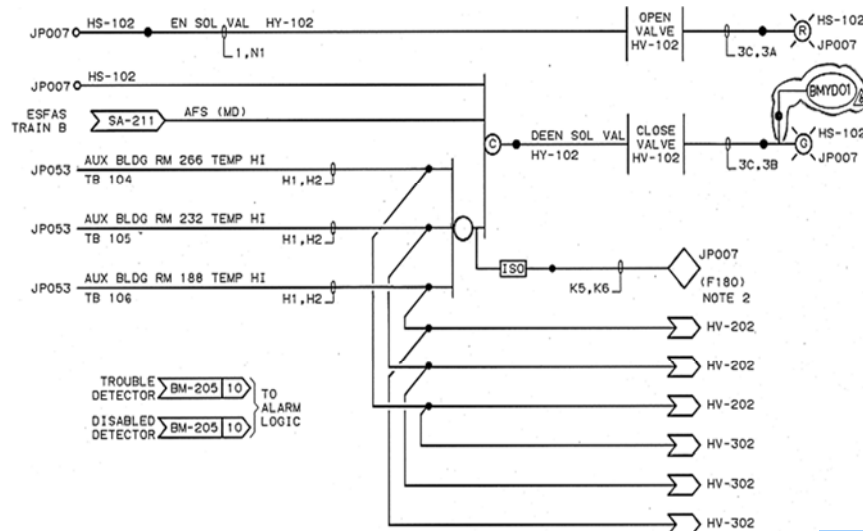
- .當要從蒸汽產生器內移走多餘的水時，也需利用濕保存循環泵。在此情況下，水流從蒸汽產生器流經沖放管路及閥V016(S/G 1)/V018(S/G 2)/V019(S/G3)，進入濕保存循環泵，再泵送經正常沖放系統非再生熱交換器下游至蒸汽產生器沖放系統過濾器上游。視排放水質化學水質，流經過濾器及除礦器再排入循環水出口渠道中，或收回熱井。

109

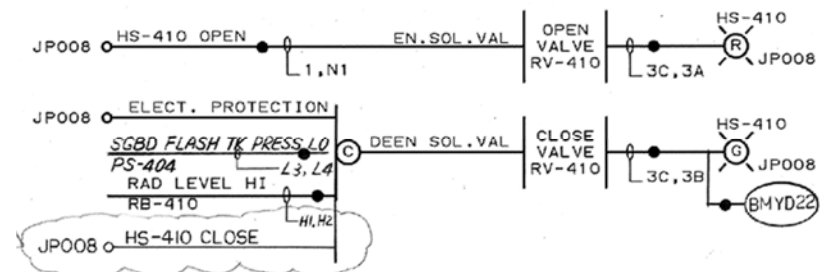
HV103 CLD



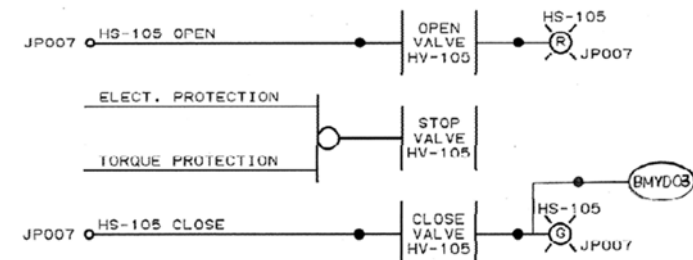
HV102 CLD



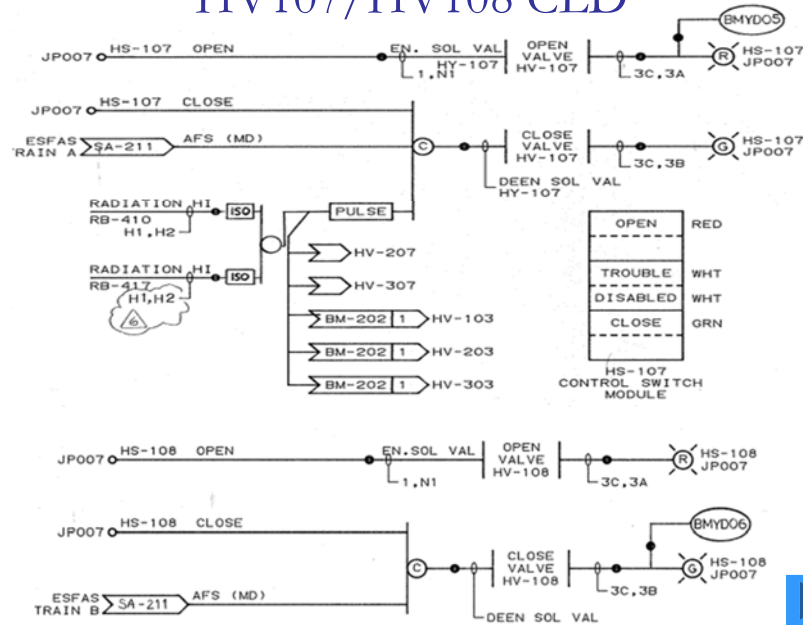
RV410 CLD



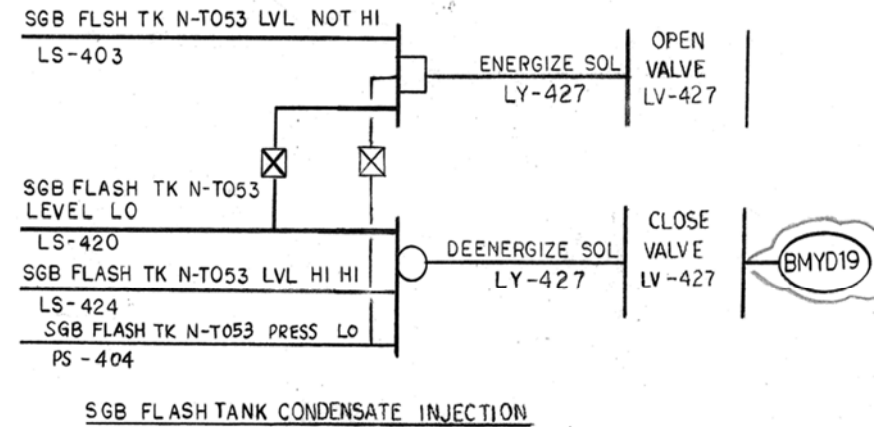
HV105/HV106 CLD



HV107/HV108 CLD



LV427 CLD



114

課程討論

1. 說明飼水在S/G之流程?何謂再循環流量?
2. 滿載與低功率運轉時，S/G內部之流動狀態有何差異?
3. 飼水控制閥在那些狀況時將自動關閉不可被節流?
4. 所謂FWIS信號來源為何?
5. 長期的冷爐停機期間，蒸汽產生器在要置於濕式儲存運轉之目的為何? 此運轉模式之特徵。