

麥寮汽電公司

密

麥電公司鍋爐燃煤投入量優化  
改善成果報告

報告人：陳禮民  
2019年12月20日

# 簡 報 內 容

---

- 一、動機說明
- 二、未導入AI前改善歷程
- 三、AI建置流程
- 四、優化成果
- 五、結論及未來努力方向

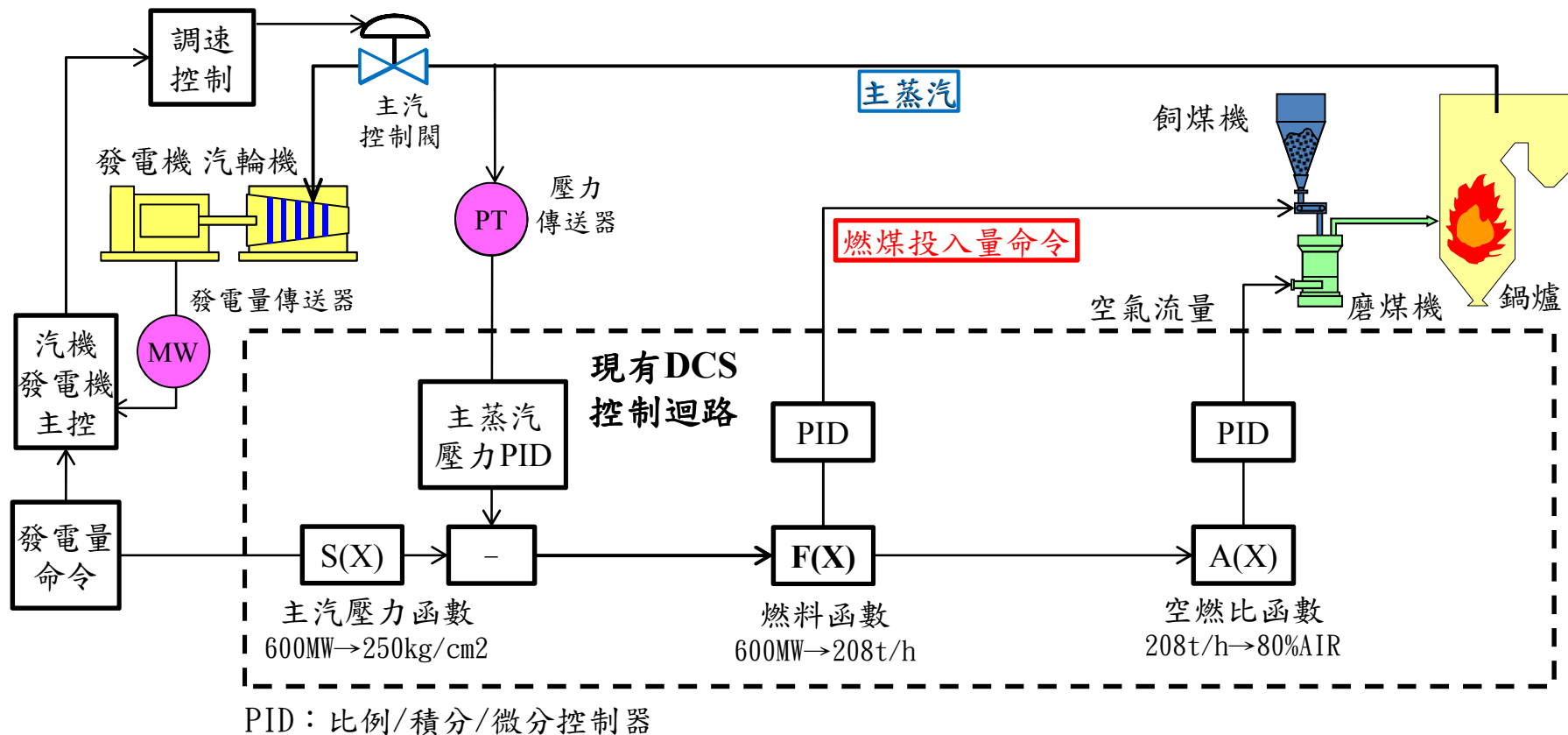


## 一、動機說明：

### 1.既設鍋爐DCS機組控制概述：

麥電600MW發電機組，以控制發電量為主。發電量命令轉換為「主蒸汽壓力設定函數 $S(X)$ 」及「燃料設定函數 $F(X)$ 」

決定鍋爐燃煤投入量。燃燒後生成主蒸汽推動汽機，經量測主蒸汽壓力實際值與設定值的偏差量，再來對燃煤投入量進行增減。

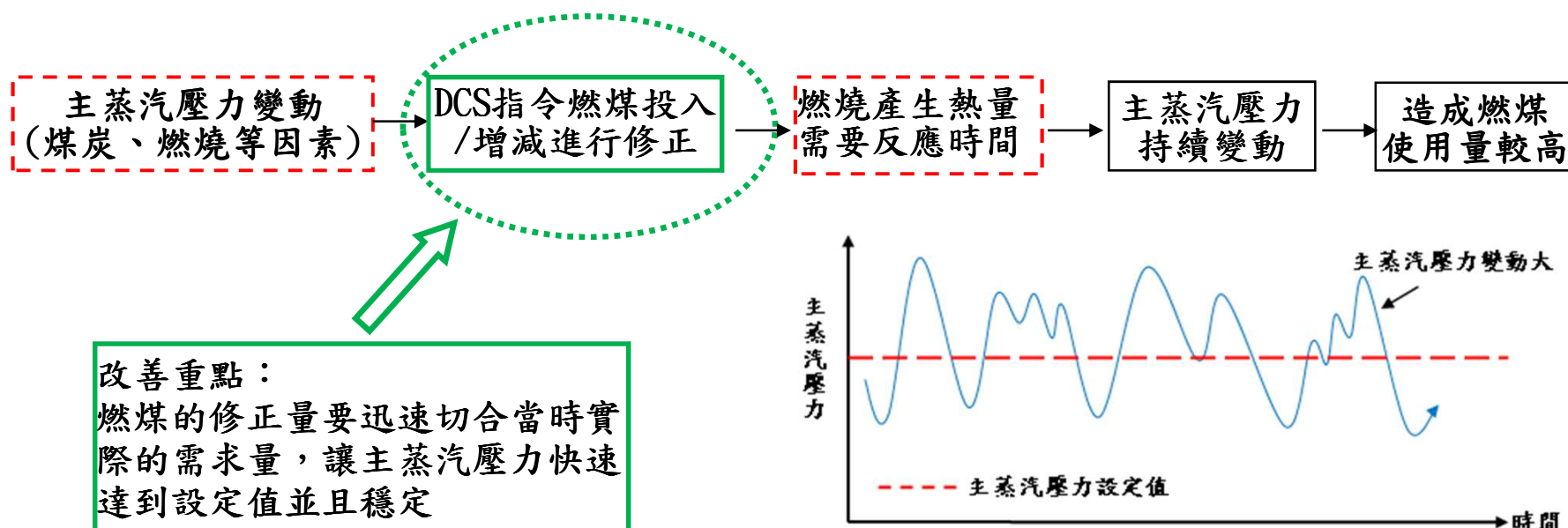


## 2 一、動機說明：

### 2.主蒸汽壓力因煤質差異持續變動，造成燃煤用量較高：

煤炭因「熱值/揮發分」及混煤等各項變動因素大，致「燃煤投入後鍋爐發熱量過大或不足」，造成主蒸汽需求量變動。

另因燃燒反應需要約2~3分鐘(燃煤投入後的熱量產生到主蒸汽壓力反應之時間)，造成燃煤量調整無法即時貼近「鍋爐發熱量實際需求」，再次引發主汽壓力持續變動，造成燃煤用量較高。

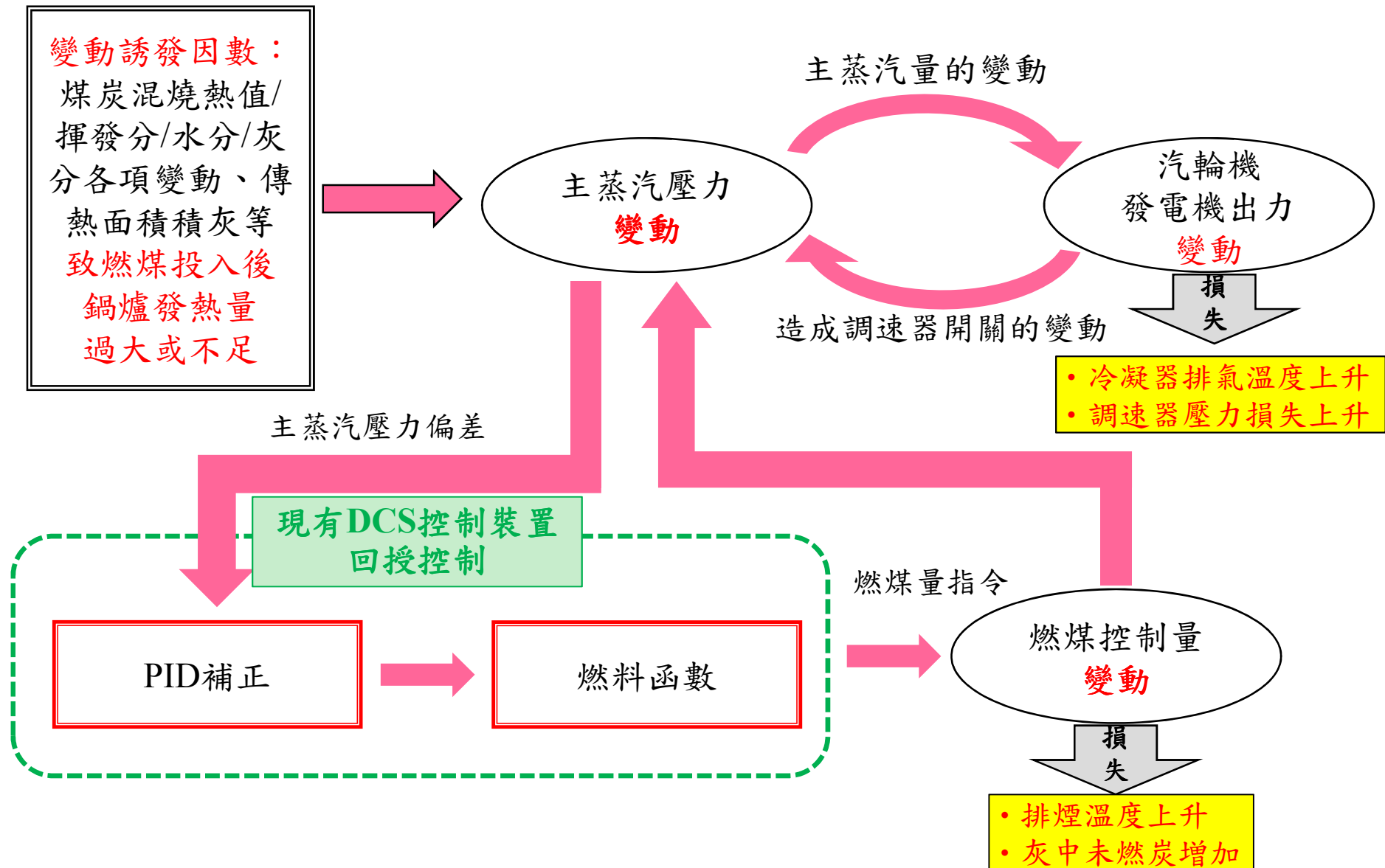


圖二：主蒸汽壓力因煤質偏差持續變動，造成煤炭浪費



# 一、動機說明：

## 3.主蒸汽壓力變動大致能量損失：

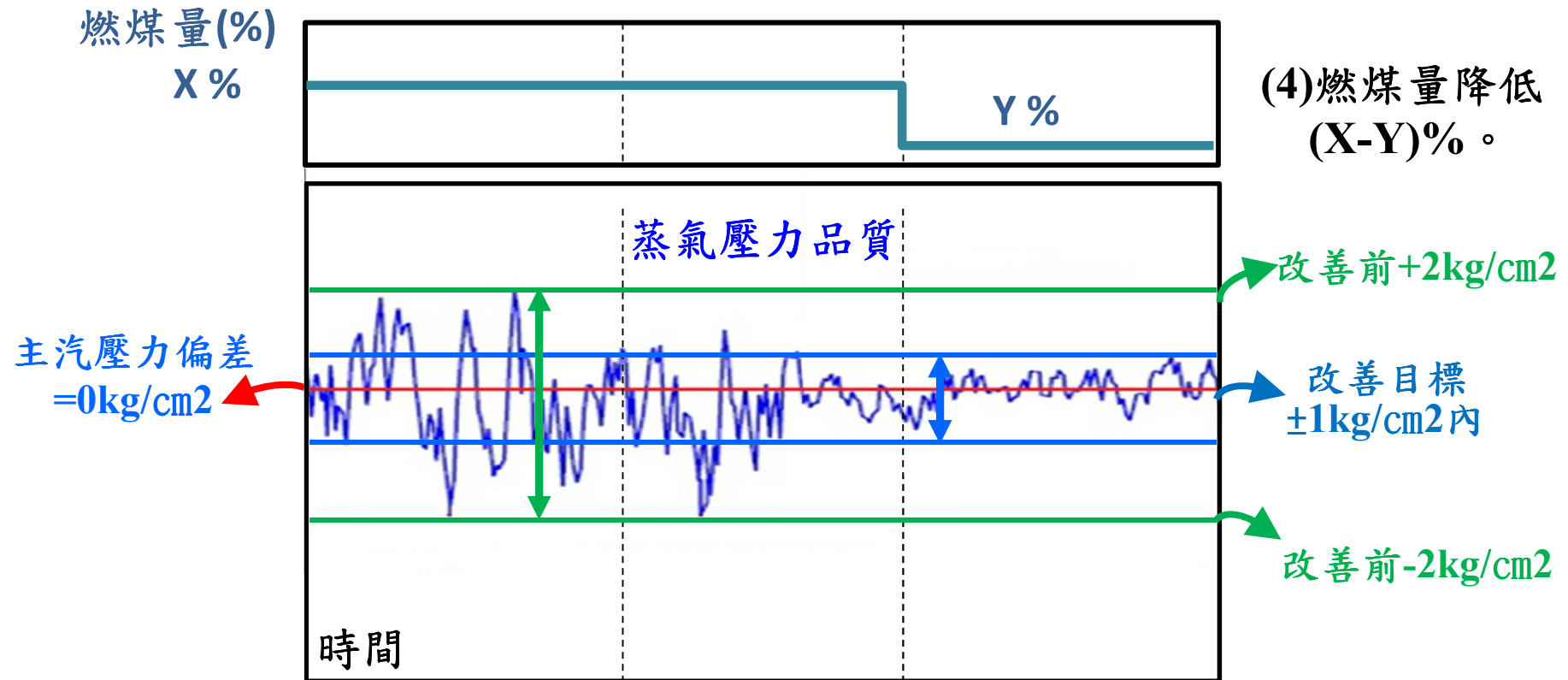




## 一、動機說明：

### 5.利用AI預定達成目標→穩定主蒸汽壓力→降低燃煤量

主蒸汽壓力品質越穩定，蒸汽耗損量降低，燃煤量才能降低。



(1)原主蒸汽壓力品質管制範圍為  $\pm 8\text{kg/cm}^2$ ，經DCS參數優化調整，目前定載時波動幅度為  $\pm 2\text{kg/cm}^2$ 。負載變動時波動幅度為  $\pm 5\text{kg/cm}^2$ 。

(2)目標利用優化模組縮小波動幅度定載至  $\pm 1\text{kg/cm}^2$  變載至  $\pm 2\text{kg/cm}^2$

(3)主蒸汽壓力波動幅度縮小後，蒸汽耗損量降低，燃煤量降低。



6

## 一、動機說明：

### 6.如汽車的經濟駕駛(Eco-drive)般的節能

- 一般駕駛以快速踩踏油門及煞車達目的地，經濟駕駛採漸進式踩踏油門及煞車達節能效果。
- 本系統AI功能如同經濟駕駛可預知未來10個路口紅綠燈的變化(目前DCS只能看到1~2個)，進而可預測未來主蒸汽壓力變化，並利用既有的慣性，再適當的加減燃料，達成穩定控制及節能目標。

■ 一般/經濟駕駛操作方式比較

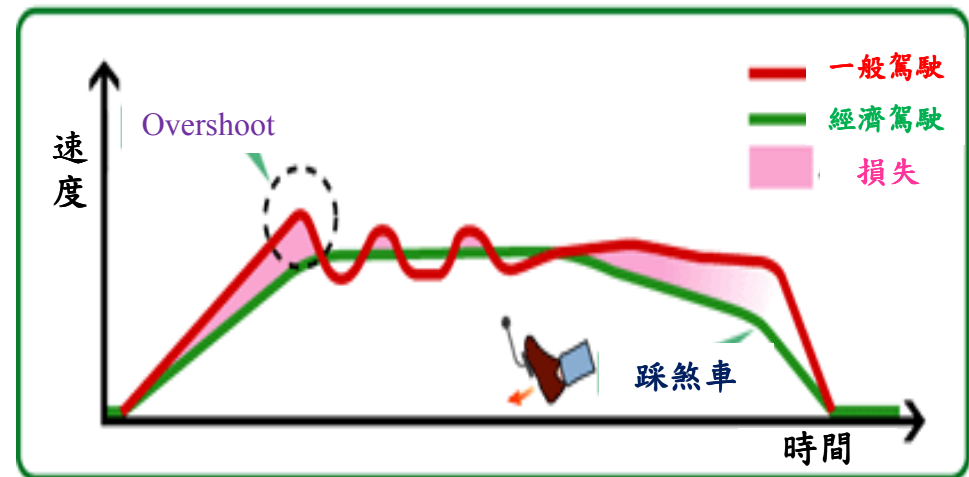


較快速踩踏油門



漸進式踩踏油門

■ 一般/經濟駕駛能耗差異比較示意圖





## 二、未導入AI前改善歷程：

未導入AI前，麥電即已思考如何解決前述問題，經分析燃煤鍋爐主蒸汽壓力品質的變數影響說明如下：

	影響變數	製程操控說明	可改善空間
1	汽機調速器閥系統(GOV)	閥開度影響壓力，但調速器以電油壓控制，快速精準。	小
2	鍋爐飼水量	飼水量變化直接影響壓力，但飼水泵利用轉速調節，可快速精準控制。	小
3	爐管積灰、結渣及吹灰	鍋爐長時間運轉後，爐壁及管排會積灰結渣，致熱吸收下降。而積灰結渣必須以吹灰器移除，吹灰器動作，將造成主蒸汽壓力溫度變化。但此為製程上不可避免的。	小
4	鍋爐發熱量(煤炭熱值變動)	煤炭因換煤及混煤不均勻致熱值變動大，難以精準控制。	大



## 8 二、未導入AI前改善歷程：

- 階段1：尋找煤質線上分析儀-以得知煤炭熱值及組成
- 6部鍋爐共5條輸送帶故需增設5套煤質線上分析儀(如圖)，但
- (1)量測處(輸煤皮帶)到鍋爐燃燒有6~8小時的時間差，實務上量測值無法直接納入DCS控制。
- (2)硬體設備太貴(五套約1億2500萬)、維護成本高。且國內尚無實績驗證及有輻射危害人員健康疑慮。故此方案未進行。



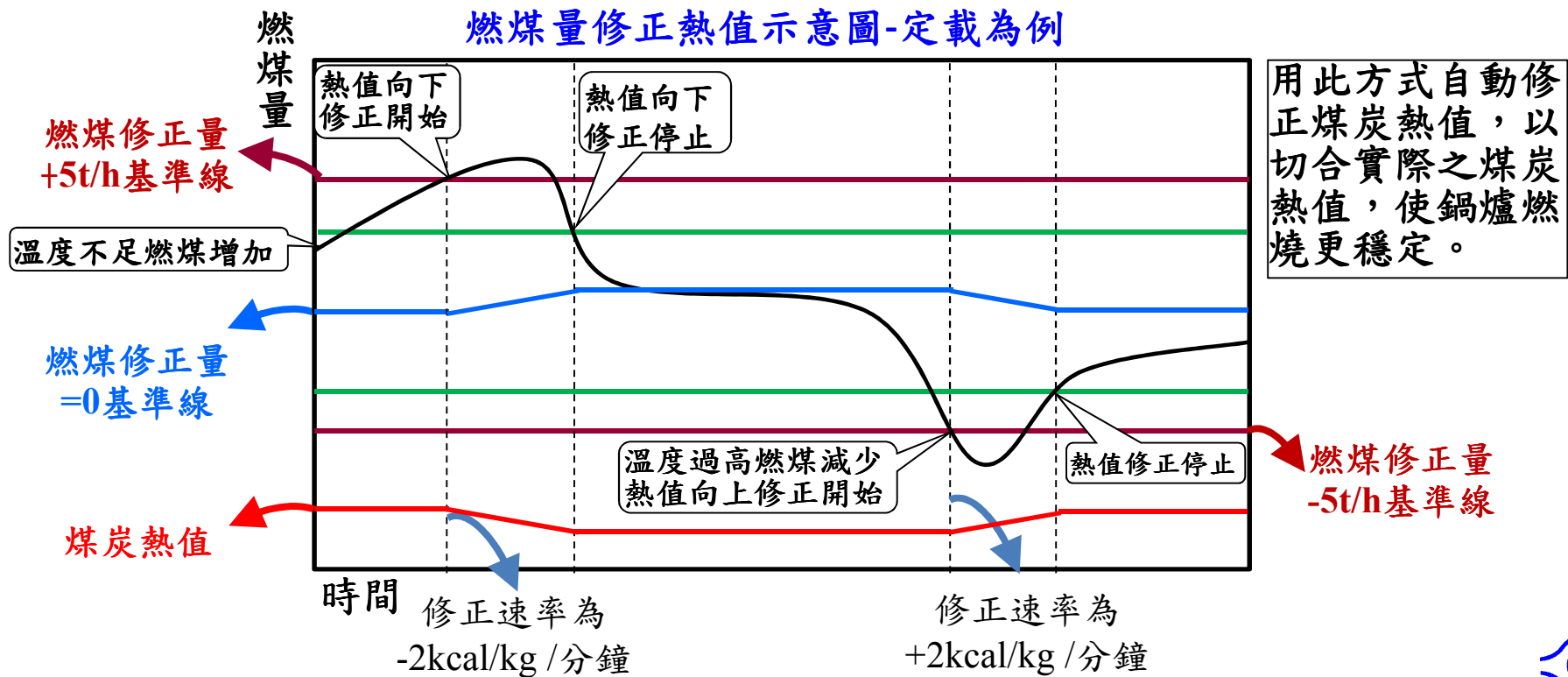
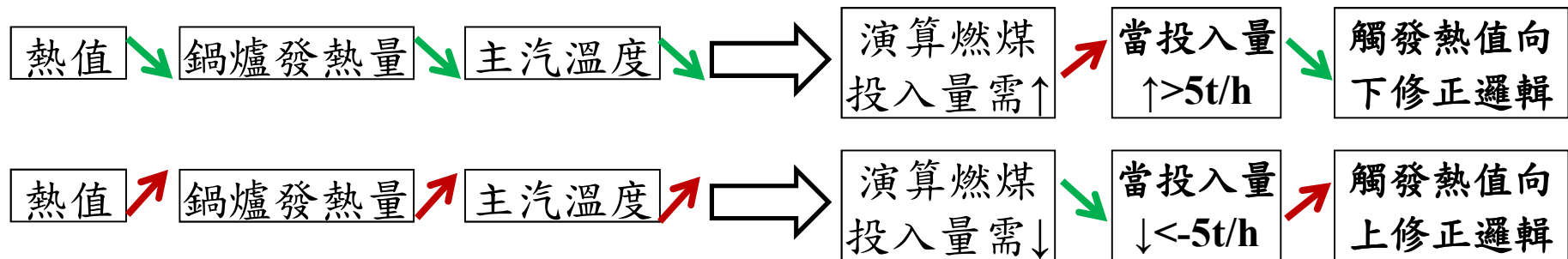
煤質線上分析儀相關設備示意圖



## 二、未導入AI前改善歷程：

### 階段2：以主汽溫度偏差自動修正煤炭熱值

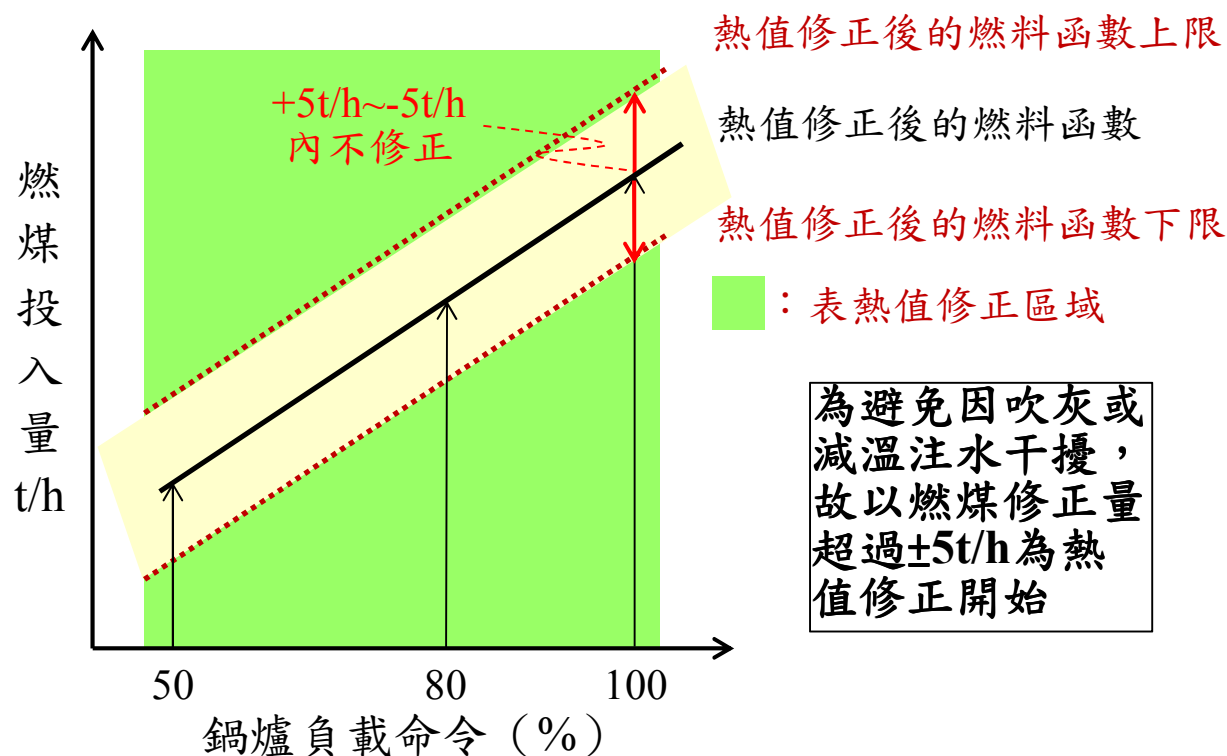
「煤炭熱值」會直接影響「主汽壓力」，亦會影響「主汽溫度」，但溫度的變化較穩定，故以溫度來修正熱值：



## 10 二、未導入AI前改善歷程：

階段2：以主汽溫度偏差自動修正煤炭熱值：定載時

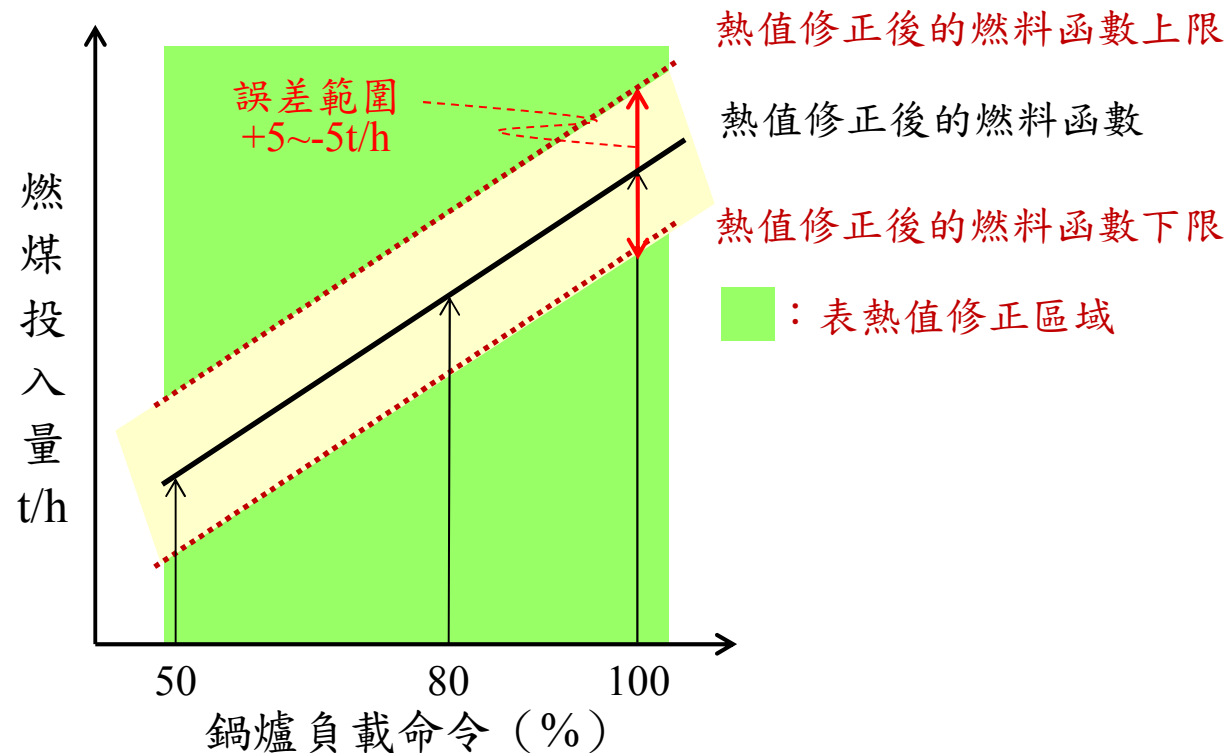
項目	熱值向下修正	熱值向上修正
1. 修正條件	煤炭需求量較預估差異 $> +5$ t/h	煤炭需求量較預估差異 $< -5$ t/h
2. 修正速率	-2kcal/kg /分鐘	+2kcal/kg /分鐘



## 二、未導入AI前改善歷程：

### 階段2：以主汽溫度偏差自動修正煤炭熱值

- 主汽溫度偏差修正熱值，可達到控制機組穩定運轉。
- 但定載時仍有約 $\pm 5$  t/h的誤差量可改善。
- 主汽溫度因熱量傳導及量測特性反應速度較主汽壓力慢。故進一步探討使用「主汽壓力偏差」（反應較溫度快速）來縮小「煤炭投入誤差量」的可行性。



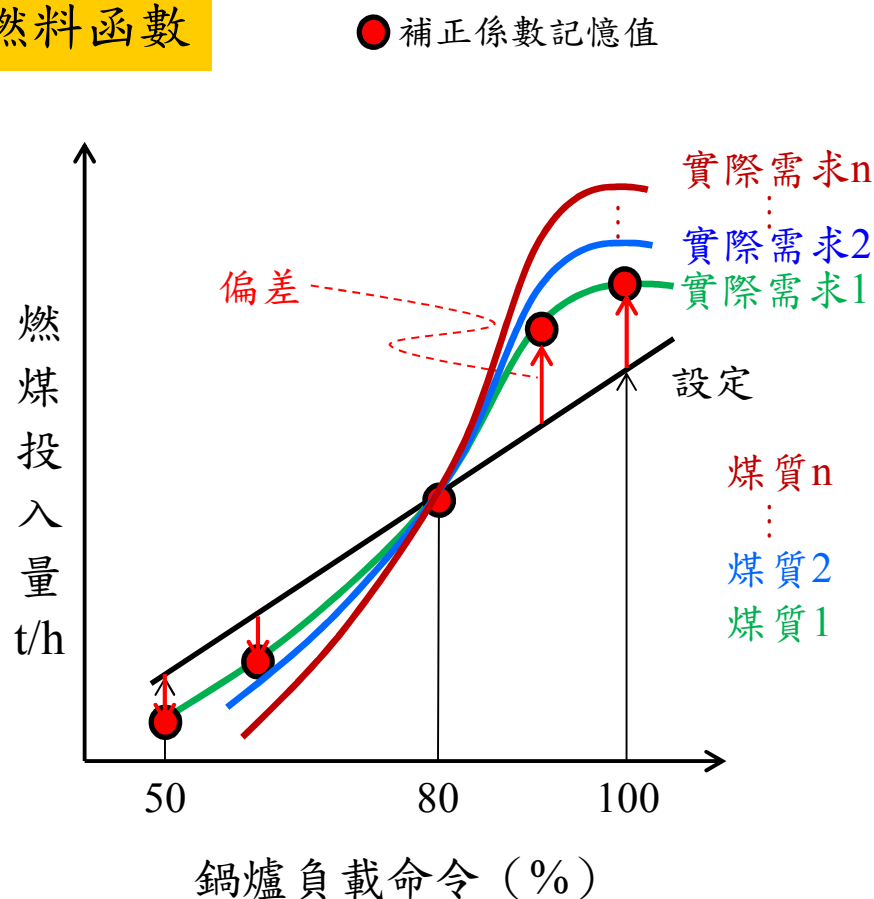
### 三、AI建置流程：

#### 1.尋找切合實際需求的可變燃料函數

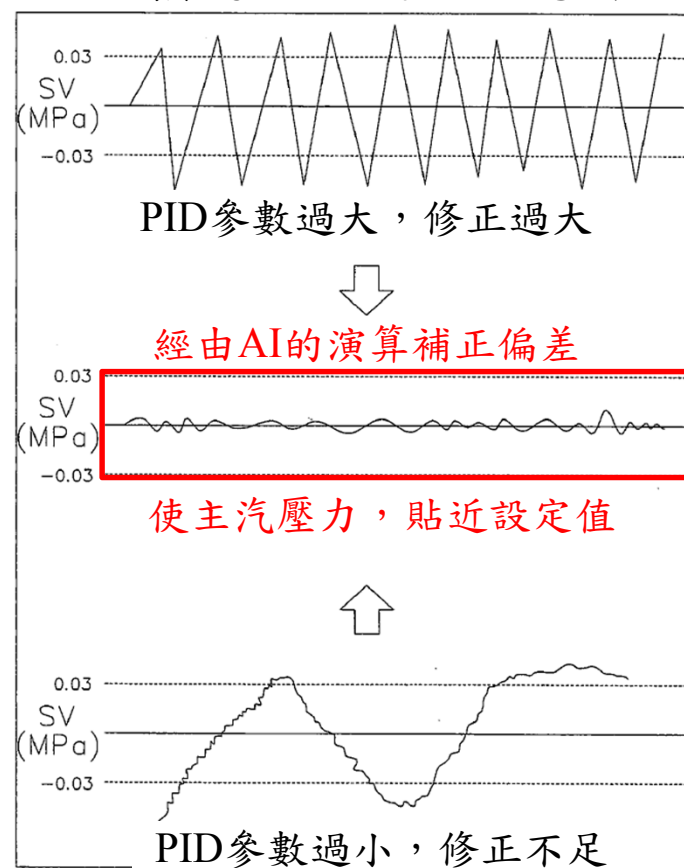
使用「AI人工智慧」，補正偏差，得到切合實際需求的燃料函數。

「使鍋爐發熱量更加穩定」，進而穩定主汽壓力，減少燃料使用量。

#### 燃料函數



#### 主蒸汽壓力的修正示意圖



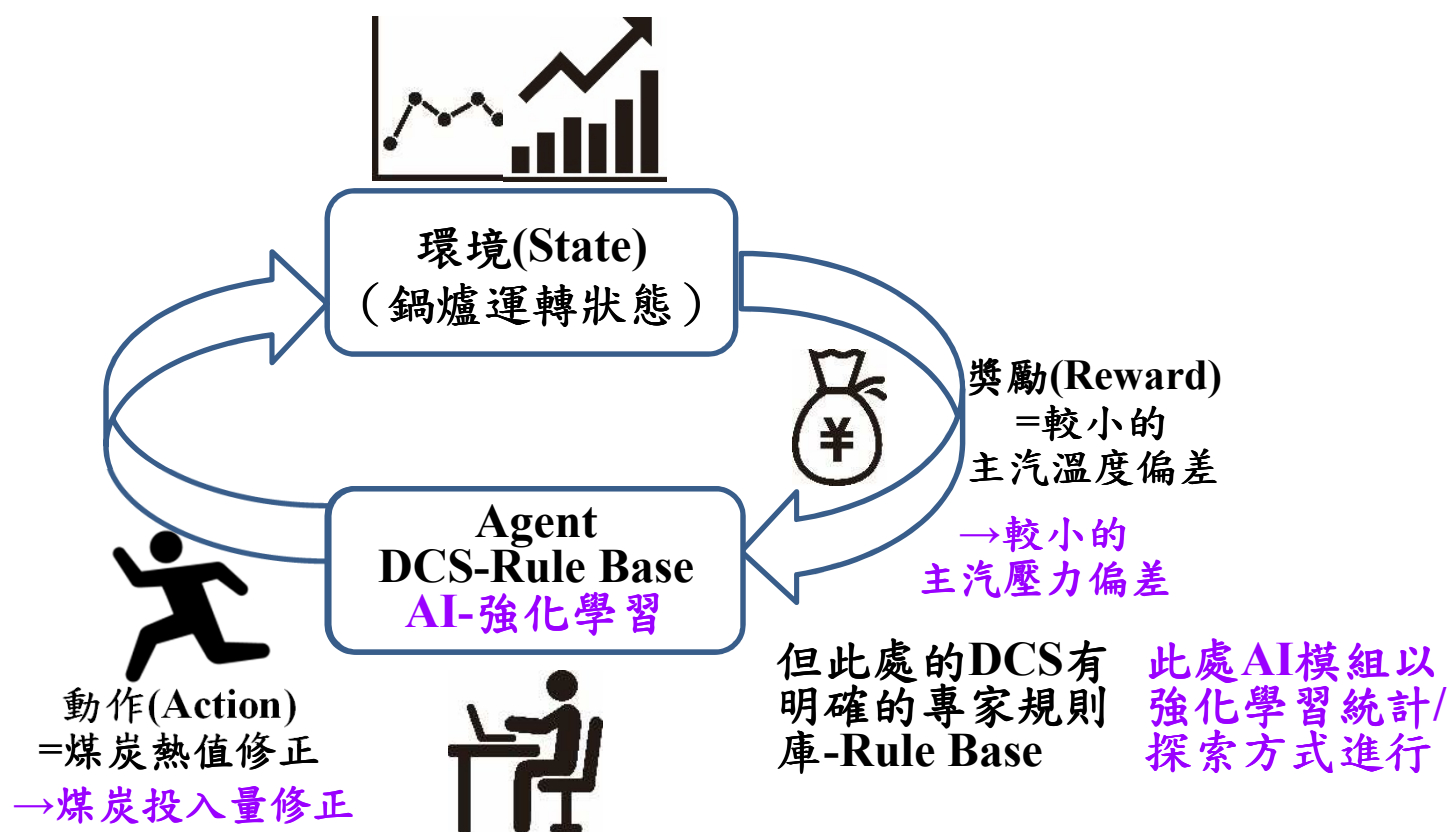
### 三、AI建置流程：

#### 2.AI技術方法選定：機器學習中的強化學習

由未導入AI前，「主汽溫度偏差」修正「煤炭熱值」成功案例啟發  
→架構類似AI方法中的「強化學習」。

故擬採用AI中的強化學習方式來進行-並以「主汽壓力偏差」來獎勵  
「燃煤投入量修正」的結果。

DCS煤炭熱值修正類比於強化學習的關係

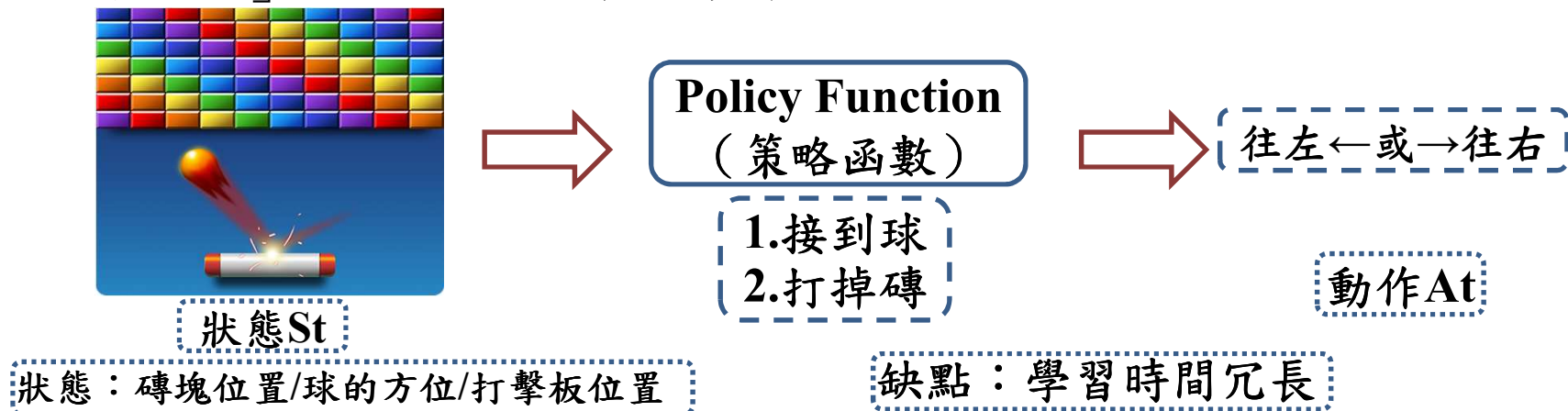




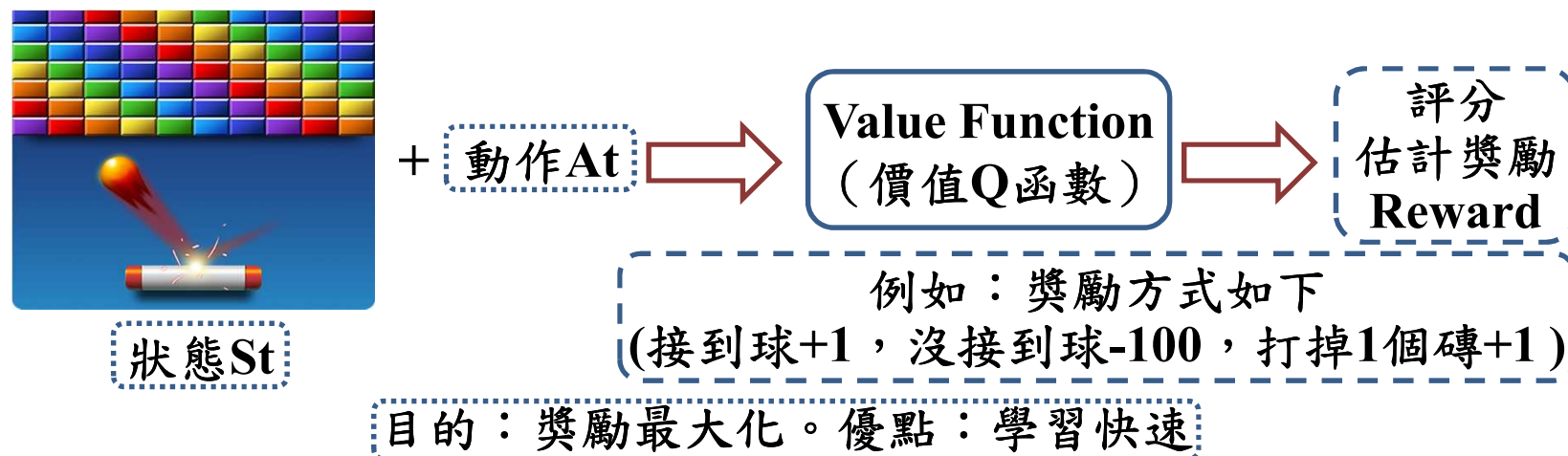
## 14 三、AI建置流程：

### 3.強化學習的基本模式說明：

(1) Policy Based(策略模式)：學習策略函數(Policy Function)，這是「動作函數」。以電玩打磚塊為例如下：



(2) Value Based(價值模式)：以策略模式再加上，預估在某個狀態(State)將做某動作會得到的獎勵(Reward)量化。以電玩為例如下：

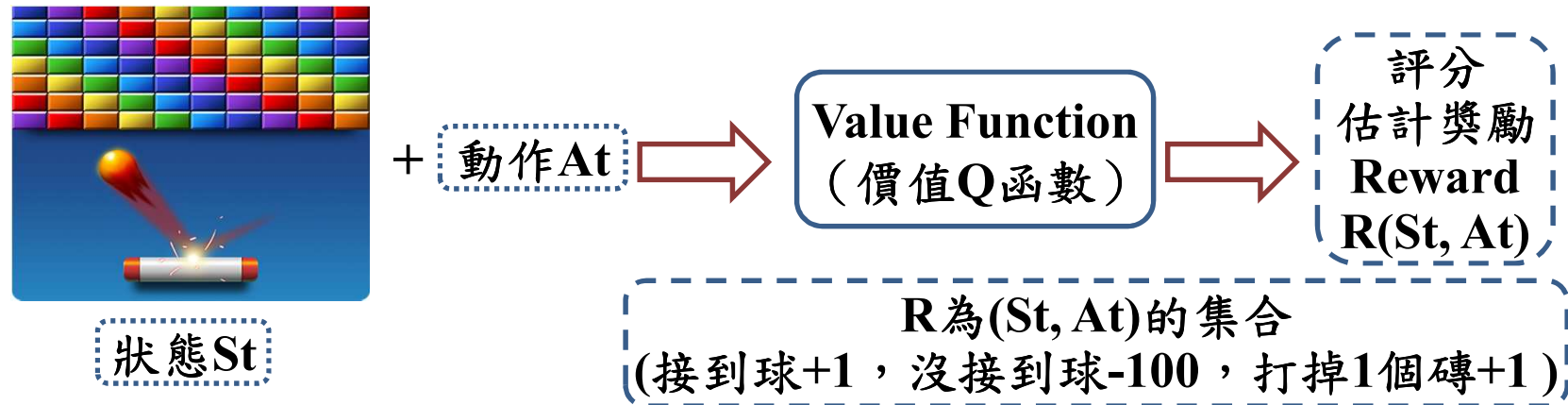




### 三、AI建置流程：

#### 4.強化學習-Q函數的進階說明：

(1) Value Based(價值模式)：學習價值函數(Q)，預估在某個狀態(State)，做某動作(Action)會得到的獎勵(Reward)。以電玩為例如下：



(2) Q函數的意義：Q函數找到了，我們在每個狀態(State)下，就很容易可以決定最好的動作(Action)。

(3) 找Q函數的方法：Q函數 =  $R(St, At) + \{(St, At)\}$ 的矩陣運算結果。可被表示如下：

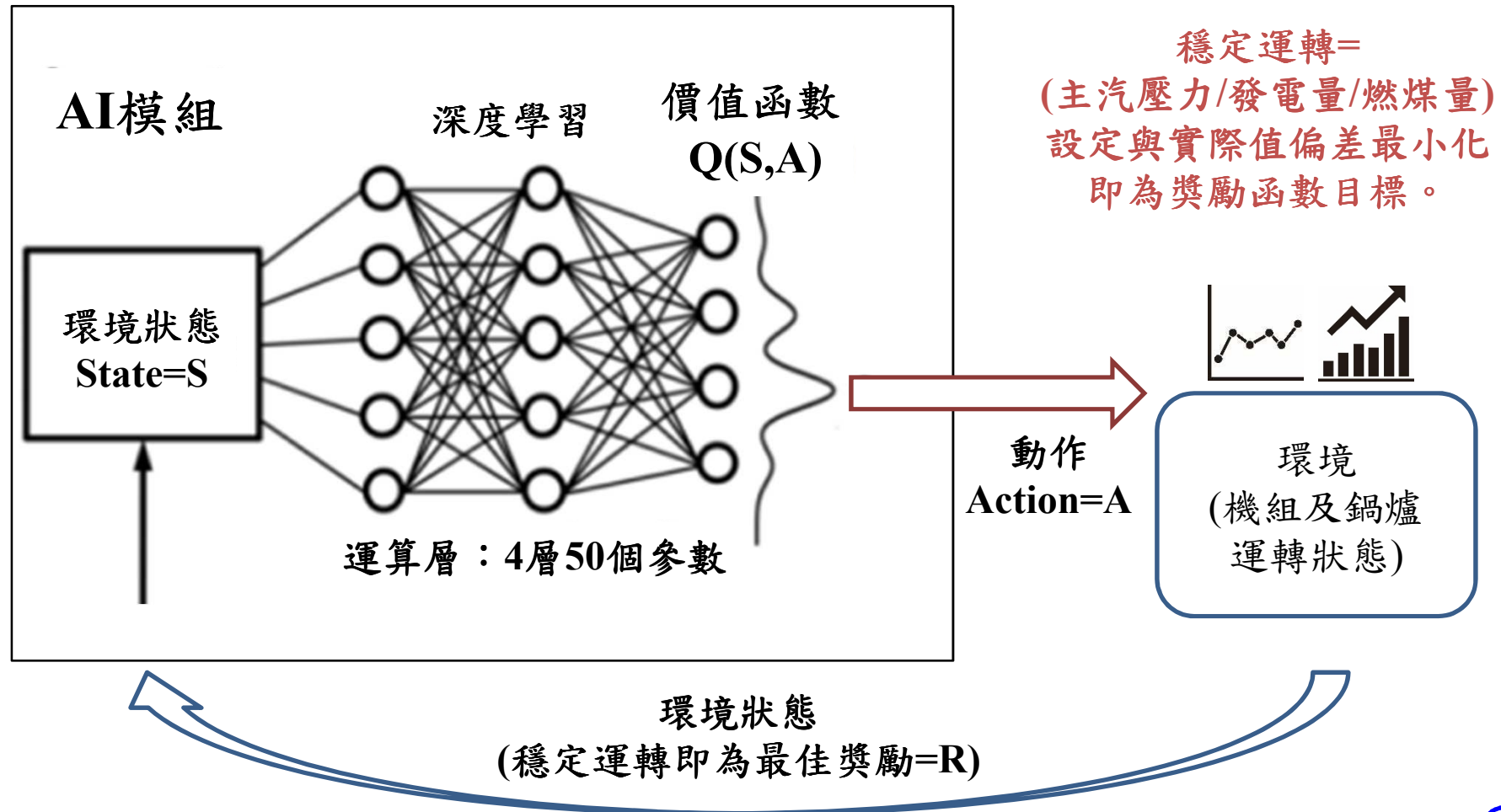
$$Q(S_{t+1}, A_{t+1}) = R(St, At) + (\text{最佳化的}) \max Q(St, At)$$



## 16 三、AI建置流程：

### 5.演算法選定：強化學習中的Deep Q-learning Network

Deep Q-learning Network：是結合「深度學習」的方式來決定獎勵函數(Reward Function)及動作函數(Action Function)。最後習得並記錄一套(環境狀態=State=S、動作=Action=A)最佳化的「價值Q函數」資料庫。



### 三、AI建置流程：

#### 6.AI技術開發商選定：日本郵船商事

經參考相關文獻與使用實績評估檢討後，決定與日本郵船商事合作開發-「主蒸汽壓力品質優化系統ULTY」(取自Ultimate的衍生字)

1.2017/5/20提供FP3鍋爐主蒸汽壓力等運轉數據(包含升降載31天共357,120筆資料)供給日本郵船商事公司進行評估。6/9依據主蒸汽壓力及用煤量的關係，模擬計算煤炭削減率為0.938%。

2.2018/3/18~23前往日本明海電廠及王子材料造紙廠參訪驗證實績。燃料削減率分別為0.723%(性能測試結論如下)及0.801%，主蒸汽壓力偏差小於1kg/cm2成效佳，決定合作。

郵船商事 優化系統	發電量 (MW)	燃煤量 (t/h)	(MW/ t/h)	煤炭削減率%
不使用	143.3644	49.8377	c=2.8766	計算式： $(d/c-1)*100\%$ 計算結果：0.723%
使用	143.3618	49.4799	d=2.8974	



# 18 三、AI建置流程：

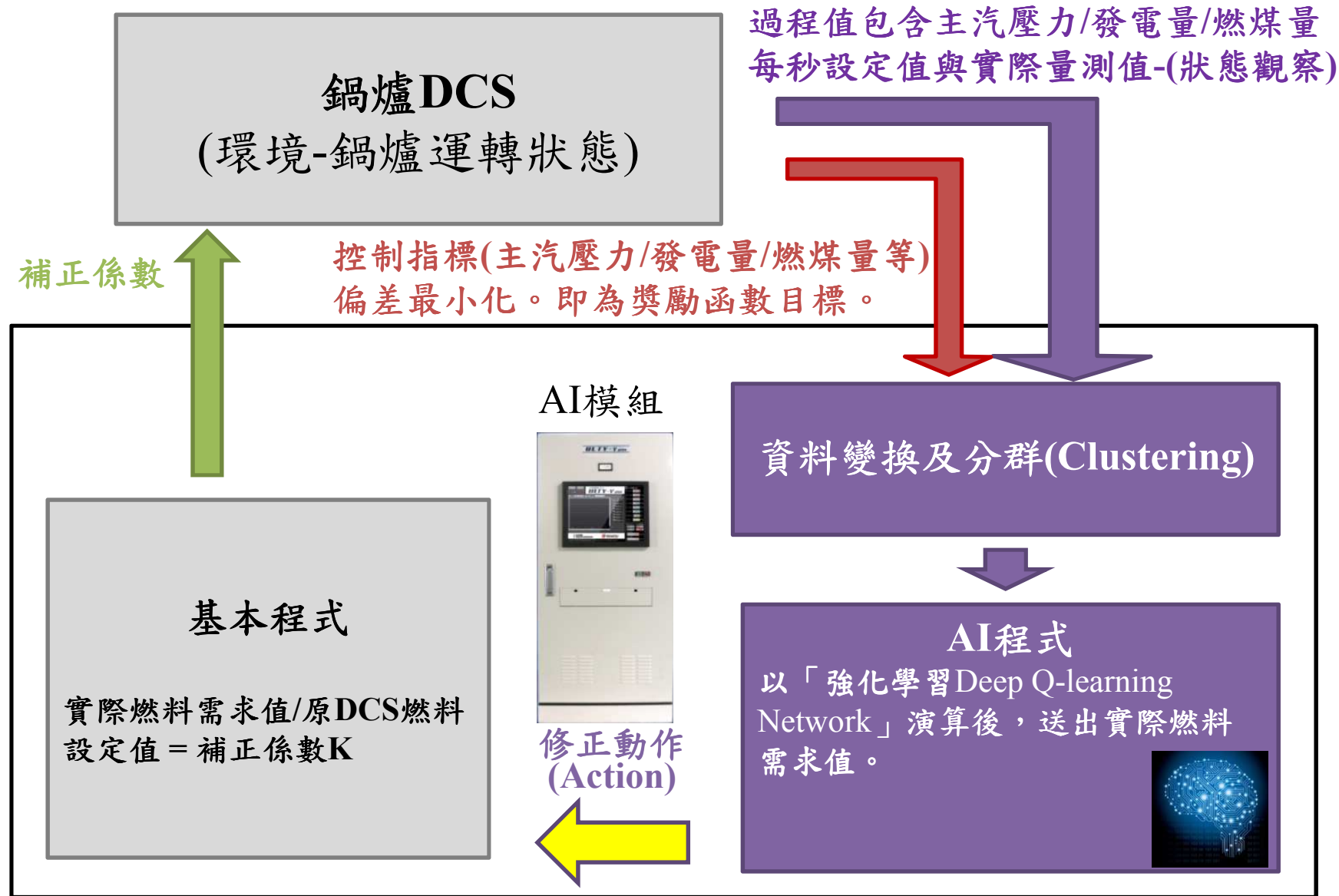
## 7.變數篩選：統計關聯性分析選定6個變數

項目	主要變數	變數供控制可用性
1.到港後煤質檢驗	熱值/水分/揮發分/灰分/含硫率	各混煤的比例與基本組成-但非即時，不可用
2.燃燒後飛灰取樣分析	未燃炭%	非即時，不可用
3. DCS與煤炭相關運轉數據	1.發電量設定與實際 2.主汽壓力設定與實際 3.燃煤量設定與實際 4.各磨煤機出口溫度/流量/冷風擋板開度/熱風擋板開度 5.磨煤機電流/旋轉分離器轉速 6.ECO及煙囪出口氧氣/NOx等濃度	經統計關聯性分析R選定前3大項(6個變數) 1.發電量設定與實際 2.主汽壓力設定與實際 3.燃煤量設定與實際 並以上述3大項[設定與實際]的[偏差最小化]=為獎勵函數目標



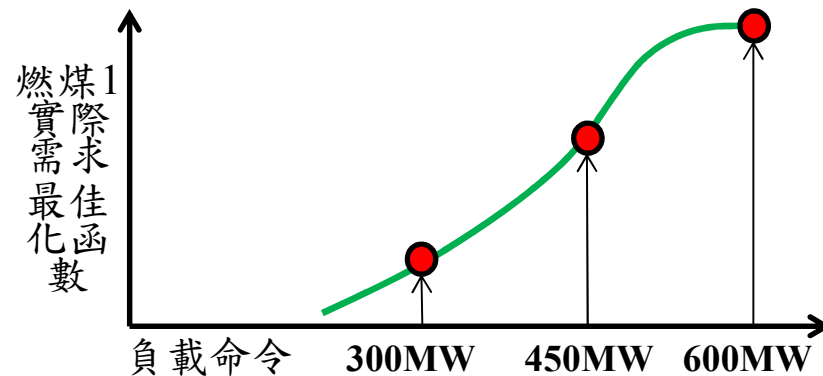
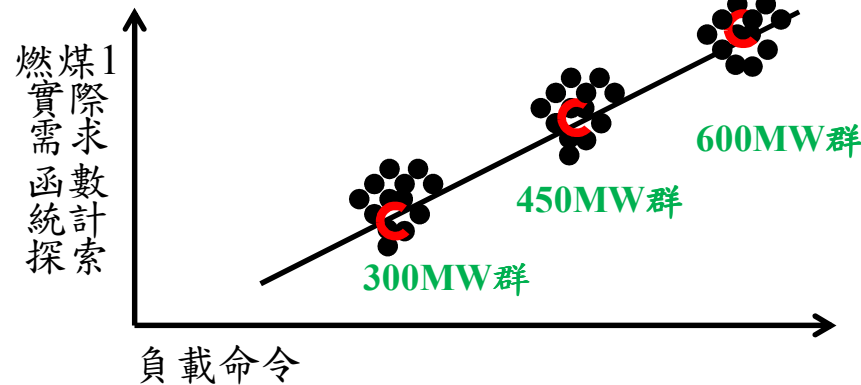
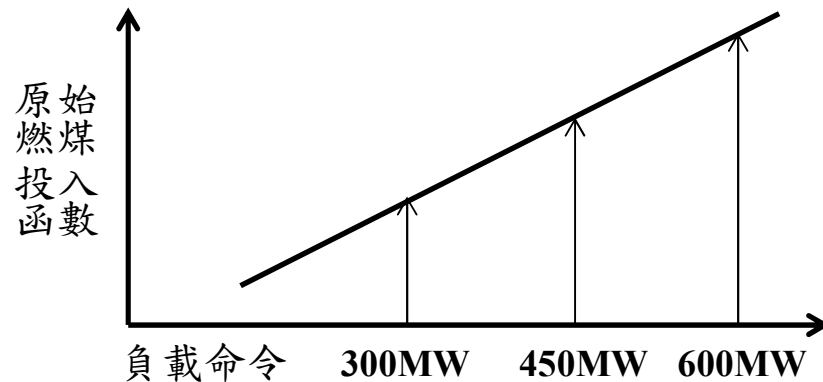
### 三、AI建置流程：

#### 8.DCS與本案強化學習程式關聯示意圖



### 三、AI建置流程：

#### 9.將資料「分群及最佳化記憶示意圖」

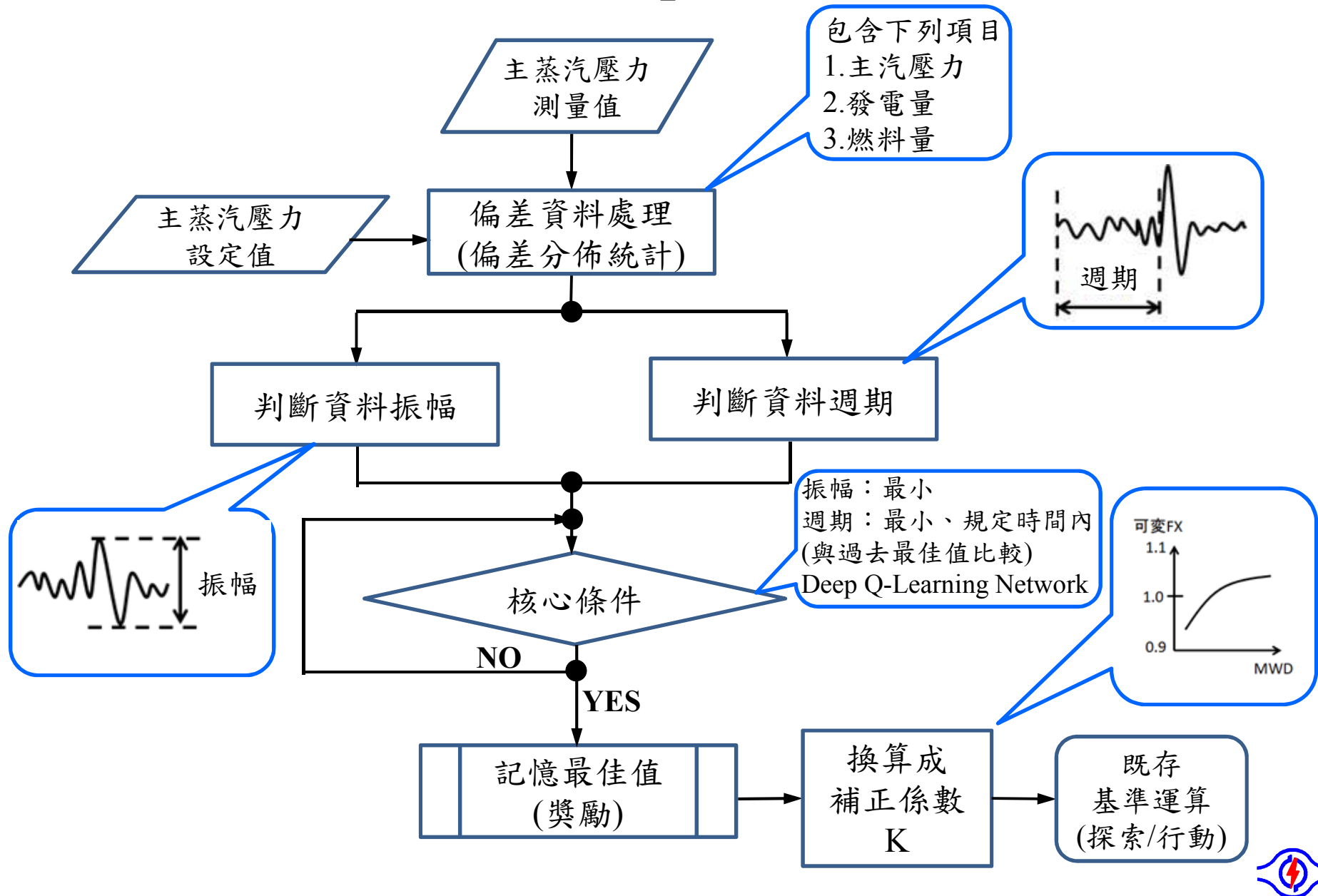


- 分群(Clustering)：在不同負載區間內，逐秒紀錄「主汽壓力/發電量/燃料量」及「補正係數」識別運轉狀態，按類似資料分群。
- 以強化學習找出最佳值：透過強化學習/修正動作收斂至最佳值並記錄(逐漸收斂於紅色區域內)，在這過程中加速鍋爐控制穩定。
- 將各分群最佳值連結後即形成可變FX燃料函數(因實際鍋爐/汽機效率曲線非線性)，形成「運轉資料庫字典」。爾後負載/煤質變動時便可如查字典般快速找到最佳燃料指令，將主汽壓力變動降低。



### 三、AI建置流程：

#### 10. 「強化學習統計/探索演算法」流程示意圖





## 22 三、AI建置流程：

### 11.各階段里程碑

2016

#### 發想階段

- 評估煤質線上分析儀
- 導入以主汽溫度變化修正煤炭熱值，有初步改善，但仍可再精進。

2018

#### 設計規劃立案

- 資料收集/建模，邏輯架構規劃
- 鍋爐DCS程式及圖控配合增修檢討
- 獎勵函數目標篩選、演算法套用檢討

2017

#### AI技術尋求階段

- 機器學習中的強化學習
- AI技術開發商選定，確認實績與預估成效
- 變數篩選：統計關聯性分析

2019

#### 性能測試驗證

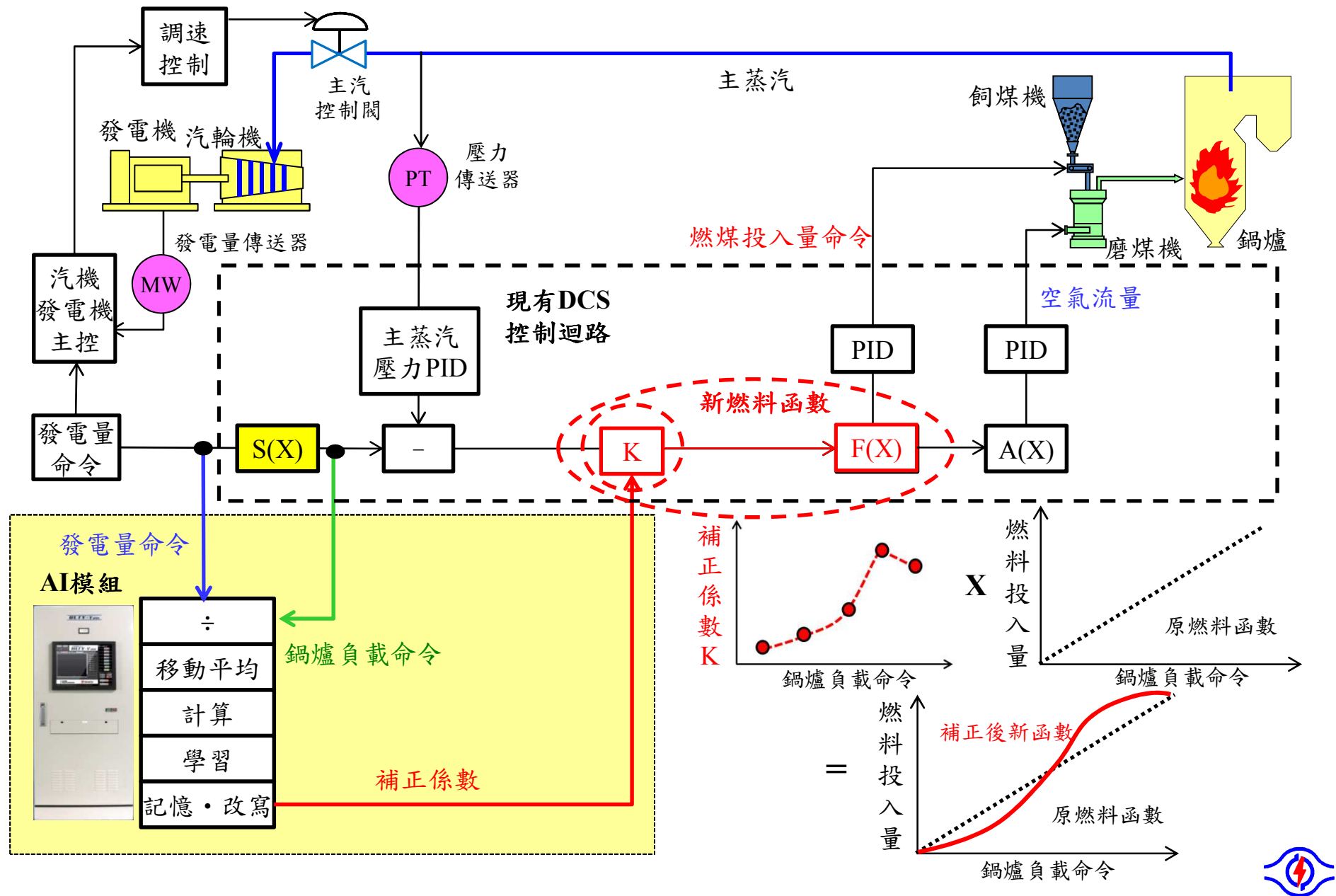
- 參數調整以符合機組運轉特性
- 性能測試確認主汽壓力波動縮小程度及驗算實際減煤成效





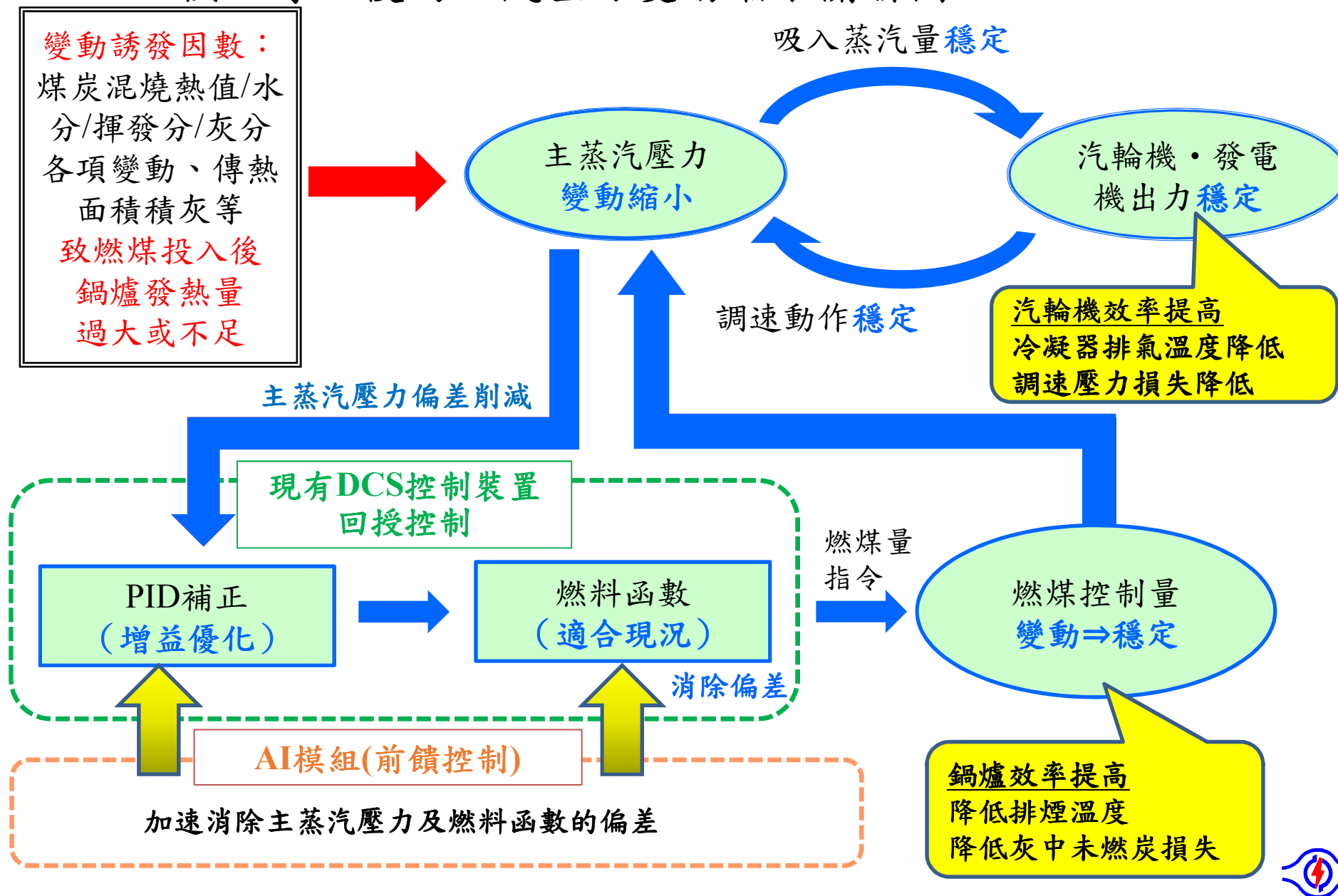
## 四、優化成果：

### 1.AI模組導入後的鍋爐DCS燃料控制迴路



## 24 四、優化成果：

### 2.AI模組導入後的主汽壓力變動縮小關聯圖

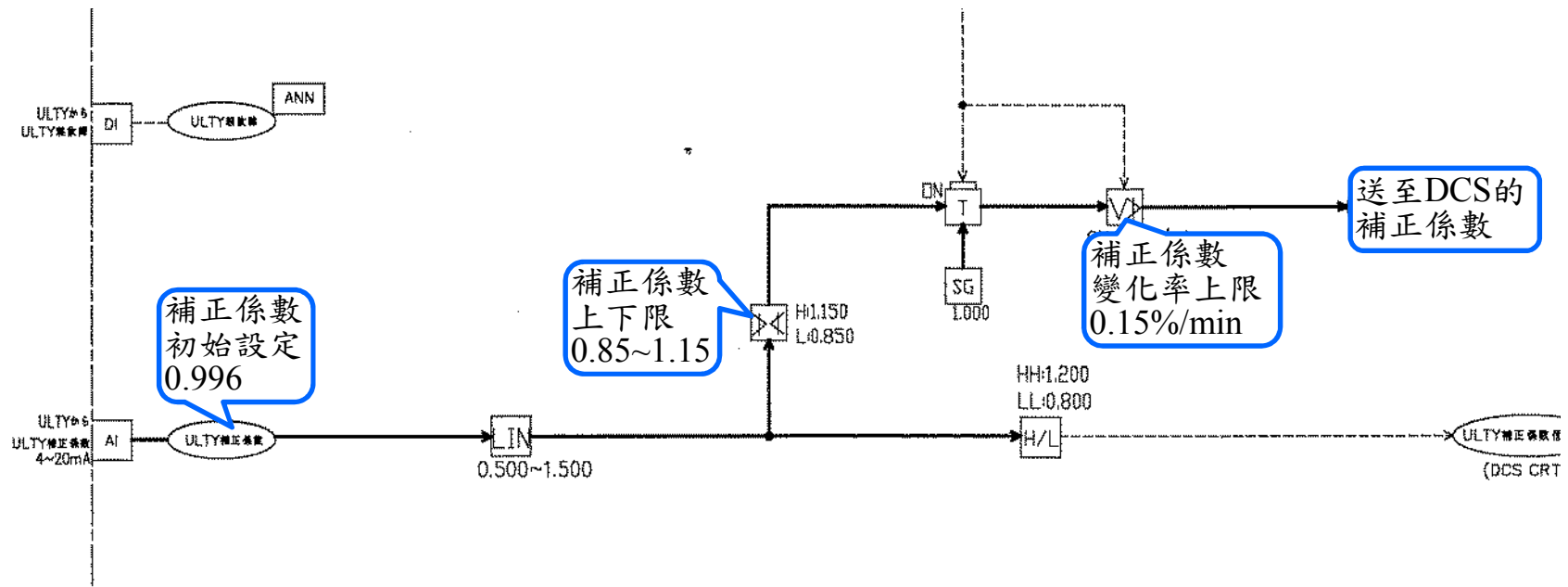


## 四、優化成果：

### 3.FP3機組AI模組測試過程

- 2/28~3/2初期調整：調整程式內參數以符合機組運轉特性。
- 例：補正係數主要參數及簡易邏輯如下：

設定項目	設定值	說明
1.變化率上限	0.150%/min	配合FP3機組特性，避免修正過快造成反效果。
2.上下限設定	0.850~1.150	配合FP3機組特性，避免修正過多造成鍋爐控制失控。
3.起始值設定	0.996	之後隨AI強化學習功能不斷更新。



## 四、優化成果：

### 3.FP3機組AI模組測試過程 (OFF：不使用 ON：使用)

- 5/2~12進行性能測試：用同一批混煤，據以驗算實際減煤成效

5/2	5/3	5/4	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9	5/10	5/11	5/12
10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00	10:00
OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	ON

負載變動  
測試

- 性能測試：驗證說明

- 1.定載OFF/ON的比對：5/2起每日切換，5日不使用/5日使用計10日進行比對，驗算減煤成效。
- 2.負載變動的穩定度確認：5/12 進行550~500MW間負載變動測試。

測試結果：

效能驗證正式報告，削煤率0.837%可符合保證效率0.5%以上。

主汽壓力	AI模組 OFF	AI模組ON	振幅縮小
固定負載	最大變動2 kg/cm <sup>2</sup>	最大變動1 kg/cm <sup>2</sup>	50%
負載變動期間	最大變動5 kg/cm <sup>2</sup>	最大變動2 kg/cm <sup>2</sup>	60%

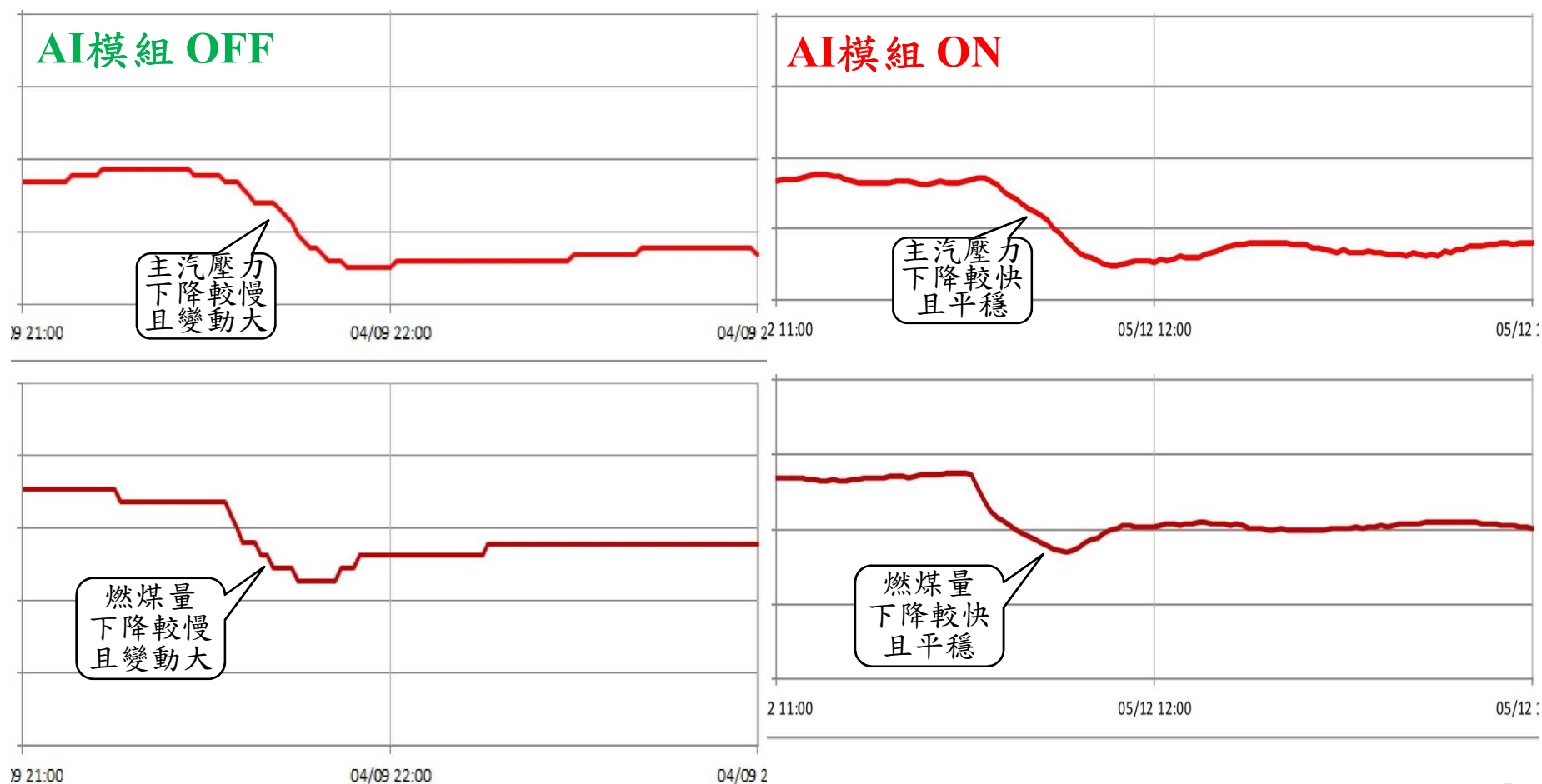


## 四、優化成果：

27

### 4.機組降載為例

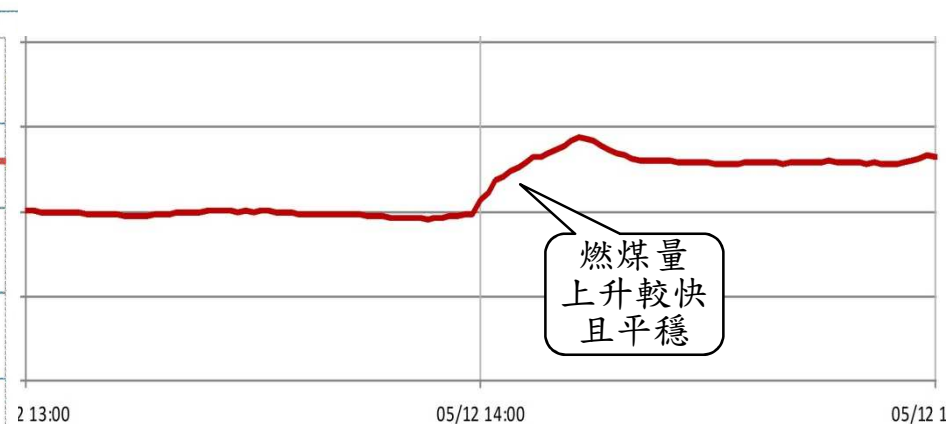
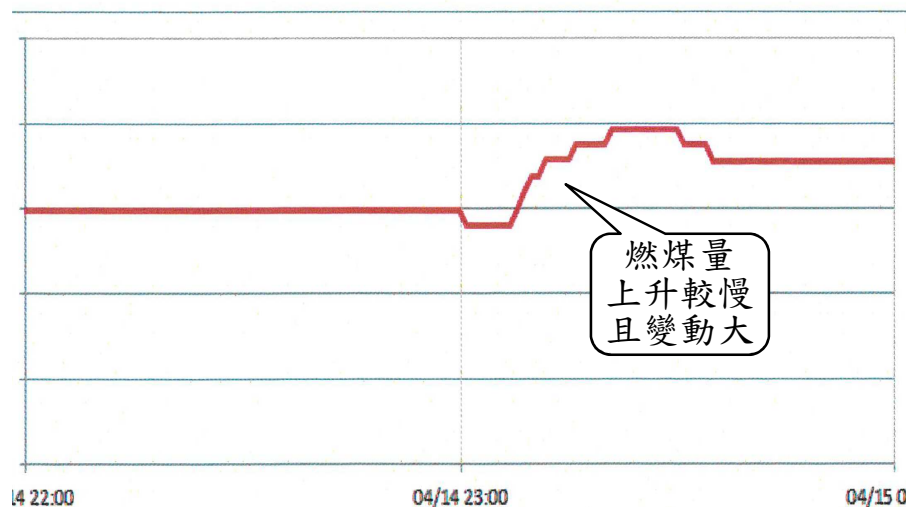
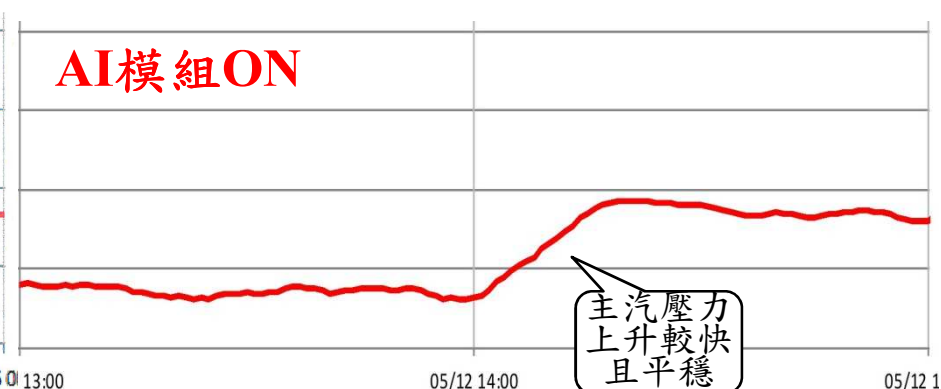
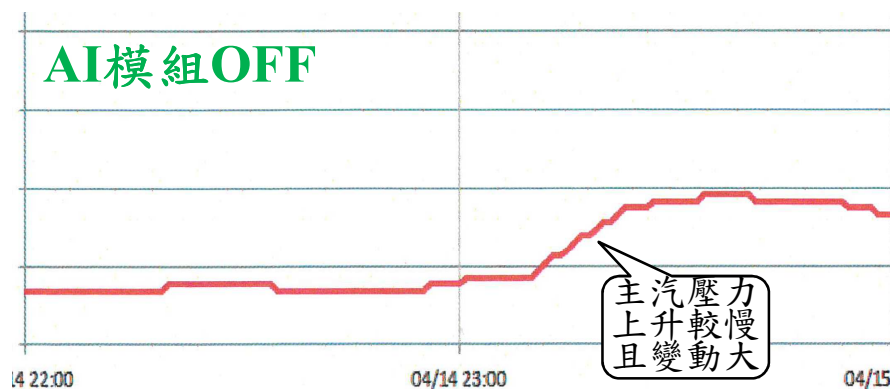
550→500MW降載	AI模組OFF (4/9)	AI模組ON (5/12)
主汽壓力下降趨勢	較緩慢且變動大	較快速且平穩
煤炭流量下降趨勢	較緩慢且變動大	較快速且平穩



## 28 四、優化成果：

### 5.機組升載為例

500→550MW升載	AI模組OFF (4/14)	AI模組ON (5/12)
主汽壓力上升趨勢	較緩慢且變動大	較快速且平穩
煤炭流量上升趨勢	較緩慢且變動大	較快速且平穩





## 四、優化成果：

### 6.效益分析

投資25,457仟元(軟體11,839仟元+硬體工程11,250仟元+技術服務費2,368仟元)，概估年效益37,564仟元，回收年限0.68年/每部機。

	節省用煤量(噸/年)	節省用煤量費用(仟元/年)	回收年限(年)
保證削減率 (0.500%)	220 t/h * 0.500% * 8,000 hr =8,800	8,800噸* 85 美元 * 30 台幣=22,440	1.13
實測削減率 (0.837%)	220 t/h * 0.837% * 8,000 hr =14,731	14,731噸* 85 美元 * 30 台幣=37,564	0.68

說明：目前機組滿載用煤量約220 t/h，煤價以CFR：85美元估算



ULTY盤內照片-IO卡片



ULTY盤：外觀照



盤內照-內部端子台



## 五、結論及未來努力方向：

- 1.本案是以追蹤鍋爐燃燒狀況所產生之微小變化建立大數據，再「使用AI人工智慧強化學習中之統計/探索模式」，演算後「送出最佳燃料修正係數」至DCS，提高燃料修正量準確度，以縮小主蒸汽壓力變動量，降低煤炭使用量。
- 2.因無論煤炭種類、負載固定或變動升/降載時，均能抑制主蒸汽壓力變動，帶來節能效果，提高鍋爐效率和CO<sub>2</sub>減排。且無需人員操作及調整，即可持續保持良好的節能效果，回收年限0.68年。擬推廣至其他5部600MW燃煤鍋爐。
- 3.因有本案之建模與參數調整經驗，及本公司人員積極參與其他5部軟體建置後，費用將可再降低約21%(每部機由前購25,457仟元降價至20,111仟元)，縮短回收年限。





報告完畢  
恭請訓示