

台塑石化公司

烯烴部

開發「乙炔轉化器操作優化模組」 提升產值報告

報告人：郭柏興
2022年8月18日
【密】 【會後回收】

執行摘要

1. 烯烴三廠(OL-3)乙炔轉化器的功能係將不純物乙炔氫化使乙烯產品合格，但同時部份乙烯也會進一步被氫化成副產品乙烷。
2. 為減少轉化器內乙烯被反應成乙烷，開發優化模組以提高乙烯產品收率。
 - (1)以穩態模擬軟體Aspen Plus模擬乙炔轉化器，確認提高乙烯收率變數控制方向性及模組安全操作範圍。
 - (2)以AI大數據主成分分析確認54個變數權重，篩選出17個相關變數。
 - (3)導入動態線上控制軟體DMC3(Dynamic Matrix Control; AspenTech 產品)，開發操作優化模組，預測轉化器各床出料乙炔濃度變化，進而計算最適化變數操作組合，直接控制入料氫氣量及入料溫度，優化操作組合以提高乙烯收率。
3. 投資金額：12,660千元。
專案完成後，乙烯回收增加3,520噸/年，年效益27,245千元。
回收年限：0.46年。

簡 報 內 容

一、製程說明

二、動機說明

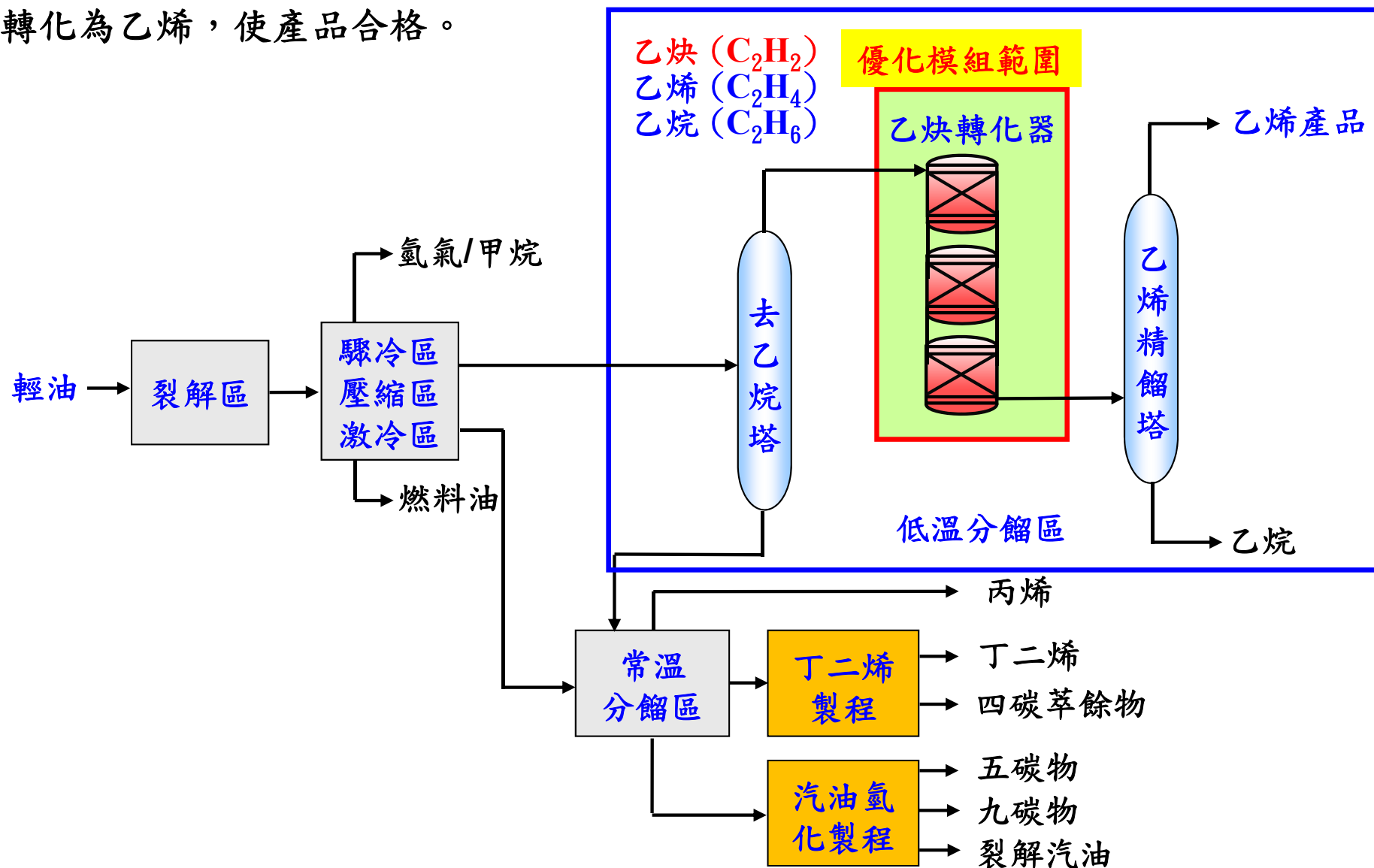
三、模組開發優化成果

四、模組開發建置流程說明

五、結論及後續推動事項

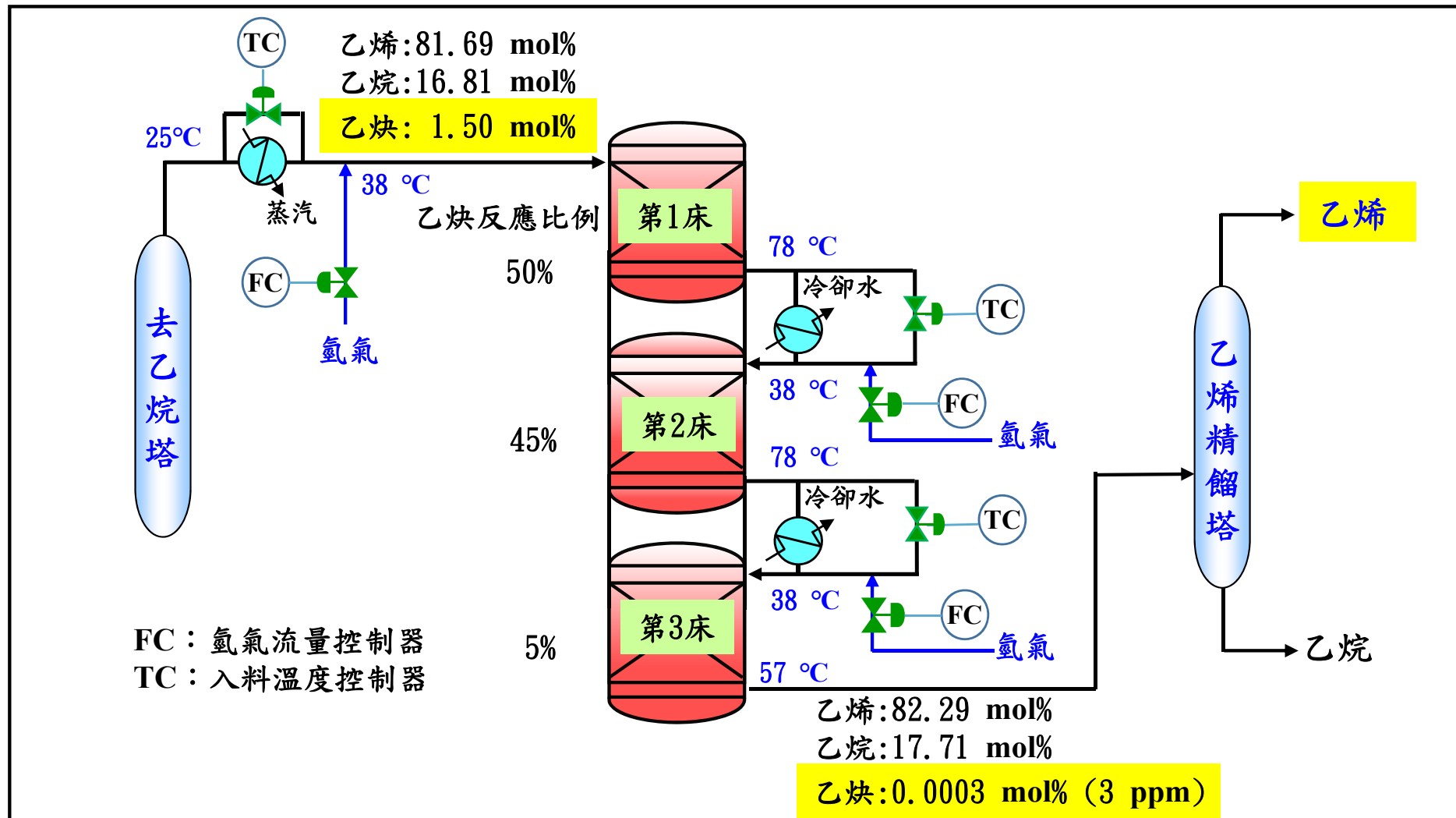
一、製程說明(1/3)

- OL-3製程是以輕油入料裂解成諸多產品後，經一系列分離過程，最後在去乙烷塔塔頂二碳餾分中包括主產品**乙烯**、副產品**乙烷**及不純物**乙炔**，乙炔轉化器係將乙炔轉化為乙烯，使產品合格。



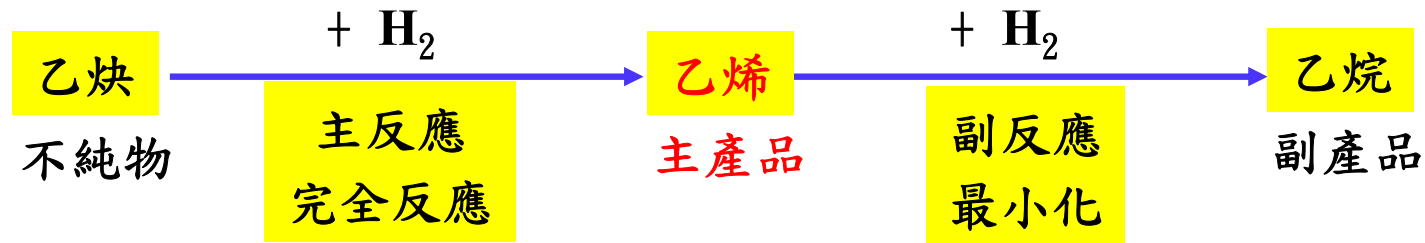
一、製程說明(2/3)

- 轉化器反應式： $\text{乙炔} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{乙烯}$ (放熱反應)
 $\text{乙烯} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{乙烷}$ (放熱反應)
- 轉化器為避免反應放熱造成高溫，設計為三床串聯式操作，各床之間有冷卻器降溫，各床有氫氣注加控制及入料溫度控制共6個操作變數。



一、製程說明(3/3)

➤轉化器主反應與副反應：



➤轉化器性能指標：

<p>轉化率：乙炔被反應掉的比例</p> <p>➤轉化率 = $\frac{\text{乙炔減少量}}{\text{乙炔入料量}} \times 100\%$</p> <p>入料乙炔 1.0 mol \longrightarrow 出料 0 mol</p> <p>$\frac{1.0-0}{1.0} \times 100\% = 100\%$</p>	<p>選擇率：乙炔氫化成為乙烯的比例</p> <p>➤選擇率 = $\frac{\text{乙烯增加量}}{\text{乙炔反應量}} \times 100\%$</p> <p>入料乙炔 1.0 mol $\begin{cases} \text{生成乙烯 } 0.5 \text{ mol} \\ \text{生成乙烷 } 0.5 \text{ mol} \end{cases}$</p> <p>$\frac{0.5}{1.0} \times 100\% = 50\%$</p>
---	--

➤控制目標：乙炔完全反應即轉化率100%，乙烯最少反應即選擇率最大化。

二、動機說明

問題點	改善對策
1. 轉化器入料的乙炔濃度因輕油原料以及裂解條件而變動，造成轉化器操作變動較大，影響控制穩定。 2. 目前操作以維持乙烯產品合格為主，則保守注加過量氫氣，即優先考量轉化率過度反應降低了乙烯產品收率。	1. 開發操作優化模組，預測各床出料乙炔濃度，由模組直接給定6個操作變數之設定值，以穩定控制。 2. 產品合格為前提下，最適化氫氣注加量及入料溫度操作組合，同時考量轉化率及選擇率，以提高乙烯產品收率。

► 氫炔比例及入料溫度對乙炔轉化器性能影響：

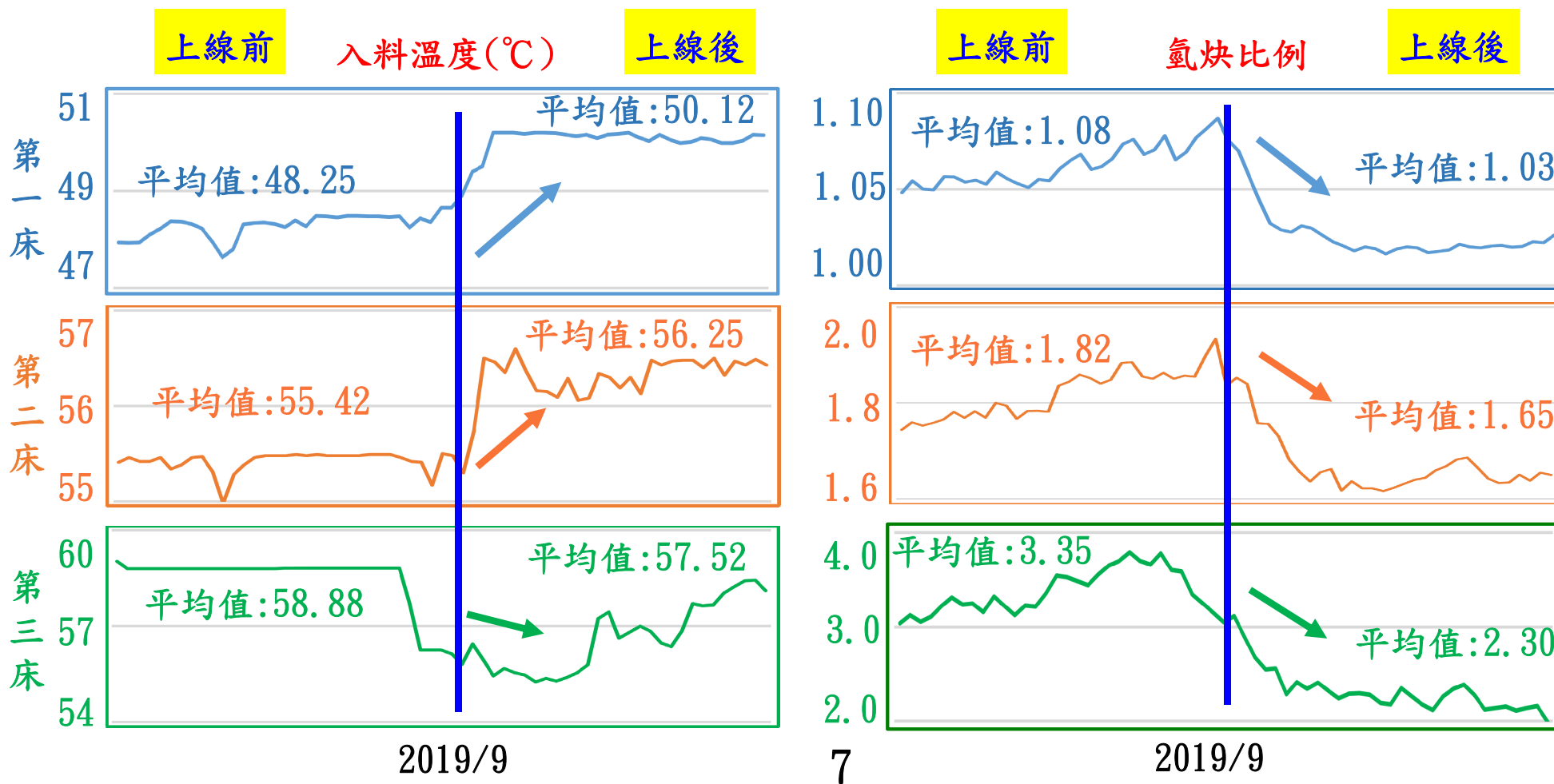
氫炔比例及入料溫度須一增一減搭配調整，才能同時確保產品合格及乙烯收率。

項目	升/降	乙炔轉化率 (產品合格)	乙烯選擇率 (乙烯收率)
1. 氫炔比例 (氫氣/乙炔)	↗	+	—
2. 入料溫度	↘	—	+

三、模組開發優化成果

1. 控制組合優化

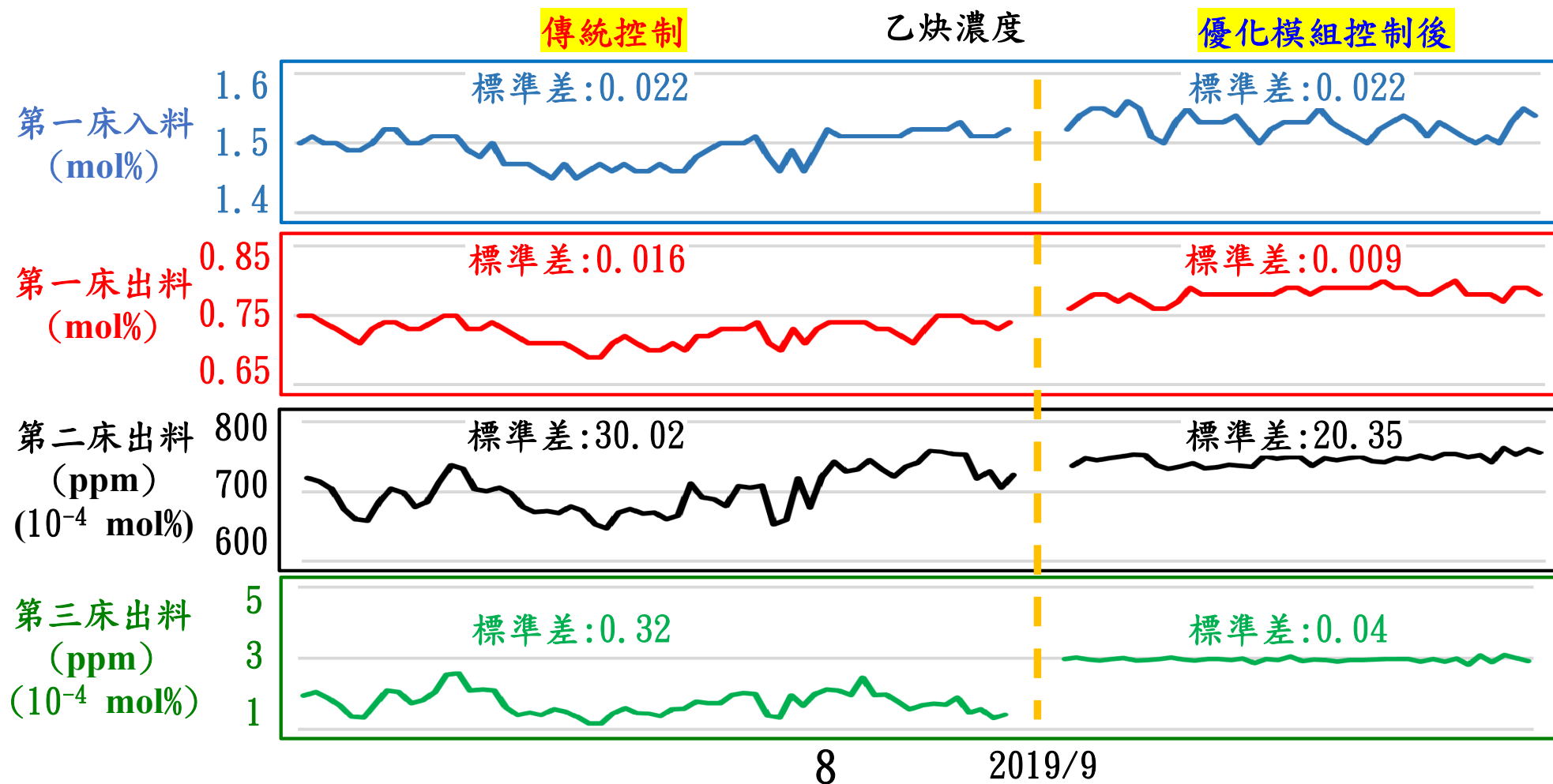
- 由Aspen Plus模擬驗證**氫炔比例對選擇率影響程度比溫度大**，故控制策略上維持產品合格下，控制組合**往提高入料溫度**，降低氫炔比例方向移動。
- 第一床及第二床**增加入料溫度**以增加轉化率，此時有空間**降低氫炔比例**。
- 第三床控制穩定後，可**同時降低入料溫度及氫炔比例**。



三、模組開發優化成果

2. 各床出料乙炔濃度控制穩定

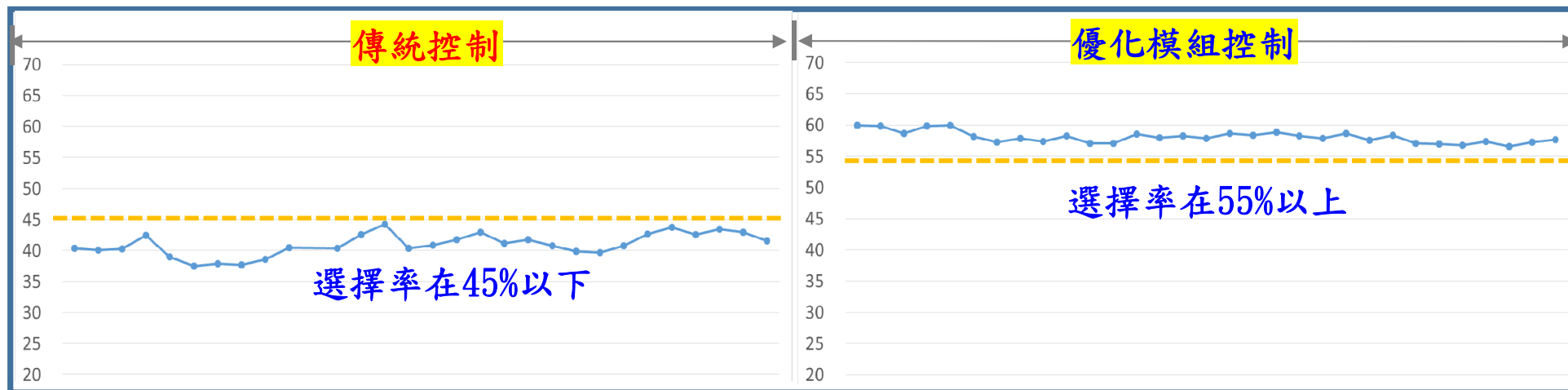
- 優化模組為動態預測各床轉化器出料乙炔濃度，適當調整相關變數以平衡變化量，保持各床出料乙炔濃度穩定。
- 導入優化模組前轉化器出料乙炔濃度變動大，導入後各床出料乙炔濃度控制穩定，第三床出料乙炔濃度趨近於目標值3.0 ppm(0.0003 mol%)。



三、模組開發優化成果

3. 乙烯產品收率提升

➤ 導入優化模組後，選擇率由改善前45%上升至55%，選擇率增加10%，換算乙烯回收增加3,520噸/年，年效益27,245千元。

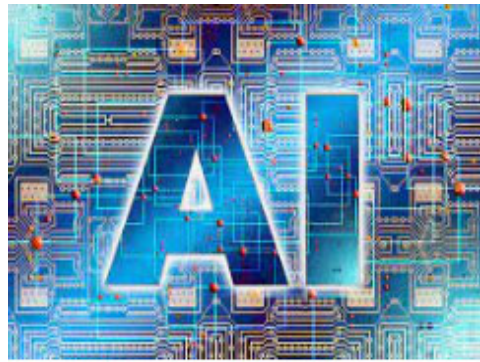


2019/9

項目	產量			單價 (美元/噸)	年效益
	優化控制前 (A)	優化控制後 (B)	差異 (B)-(A)		
轉化器選擇率	45%	55%	10%	-	-
乙烯(噸/年)	1,359,200	1,362,720	3,520	1,092	3,843,840 美元/年
乙烷(噸/年)	240,800	237,280	-3,520	834	-2,935,680 美元/年
合計年效益(美元/年)					908,160
合計年效益(新台幣,千元/年)(匯率:30)					27,245

四、模組開發建置流程說明

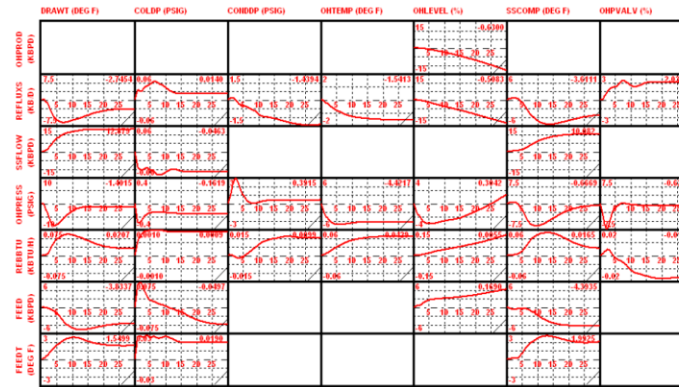
模組架構



**AI 大數據分析
(自行開發)**

- 資料盤點及清理
- 篩選特徵參數。

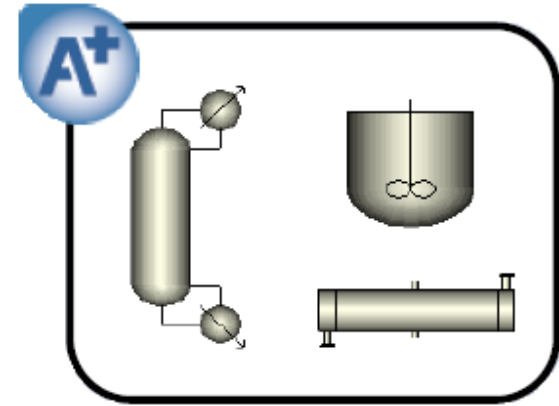
歷史
資料庫



**DMC3動態矩陣控制器
(內建AI，合作開發)**

- 建立動態預測模組。
- 最適化調整操作變數

乙炔轉化器
DCS 控制站(每分鐘)



**Aspen Plus 轉化器模擬
(自行開發)**

- 確認控制方向性。
- 確認安全操作範圍。



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

模組開發

線上應用

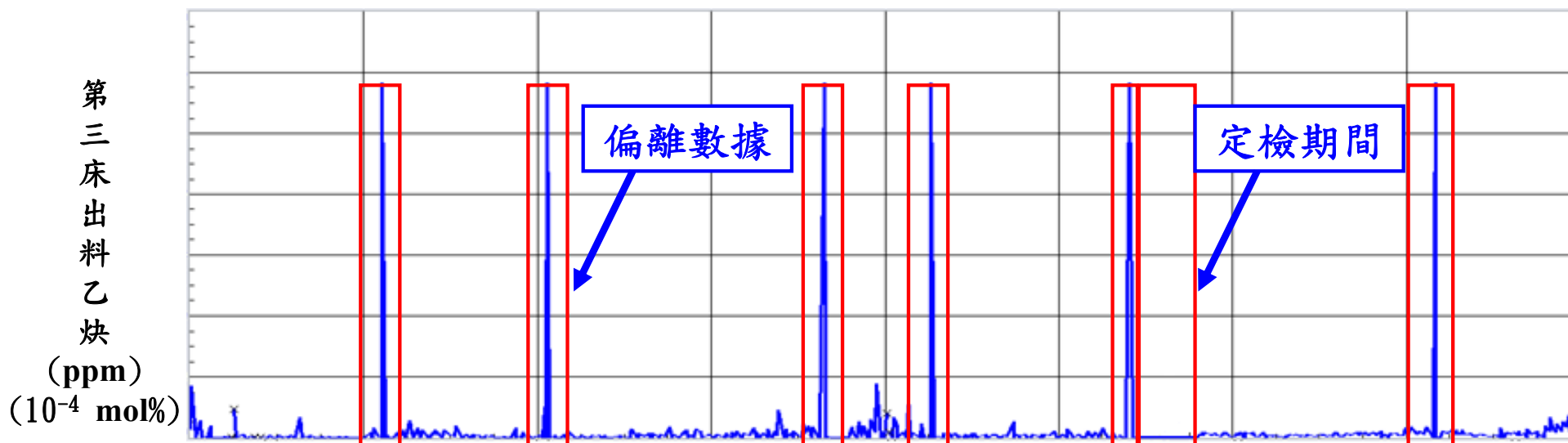
資料盤點與清理

➤ 資料盤點：

收集轉化器最近二個完整操作週期**54個**變數(2014/9~2018/12)，將近四年的DCS操作數據與線上分析儀數據約每分鐘一筆供分析。

➤ 資料清理(剔除離群值)：

- (1)離群值是指因製程開停車、異常、或儀錶異常時所產生的偏離數據。
- (2)為避免模組分析錯誤訊息，需要進行資料清理，剔除偏離數據。
- (3)資料清理後的有效數據量為**164萬**筆。



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

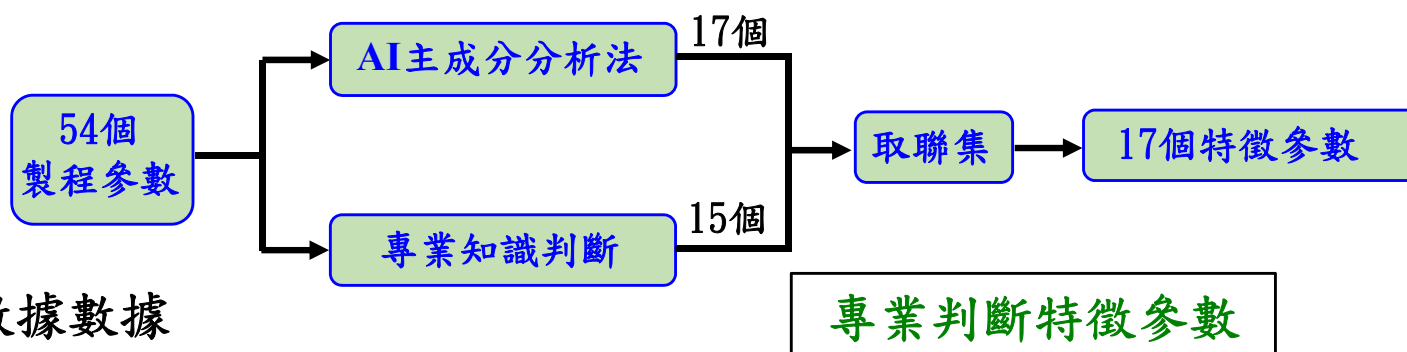
數據探索分析

模組開發

線上應用

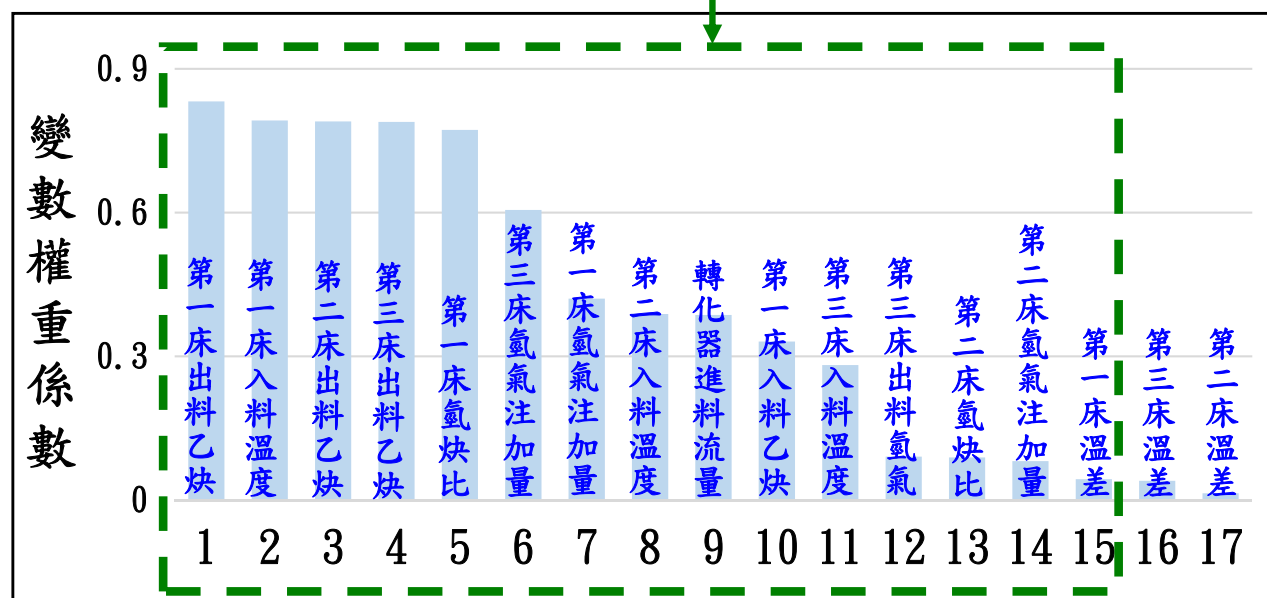
篩選特徵參數

- 歷史資料庫以統計分析的**主成分分析法(PCA)**，由**54個**變數中選出**17個**權重大的特徵參數，其數據再導入DMC3，以建立動態控制模組。



164萬筆歷史數據數據

54個製程變數		
1.	FFC4073B	第一床氫炔比
2.	FFC4075B	第二床氫炔比
3.	AI4071BL	第一床出料乙炔
4.	AI4071CL	第二床出料乙炔
5.	AI4072D	第三床出料乙炔
6.	TC4082B	第一床入料溫度
⋮	⋮	⋮
54.	TDI4112B	第三床溫差



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

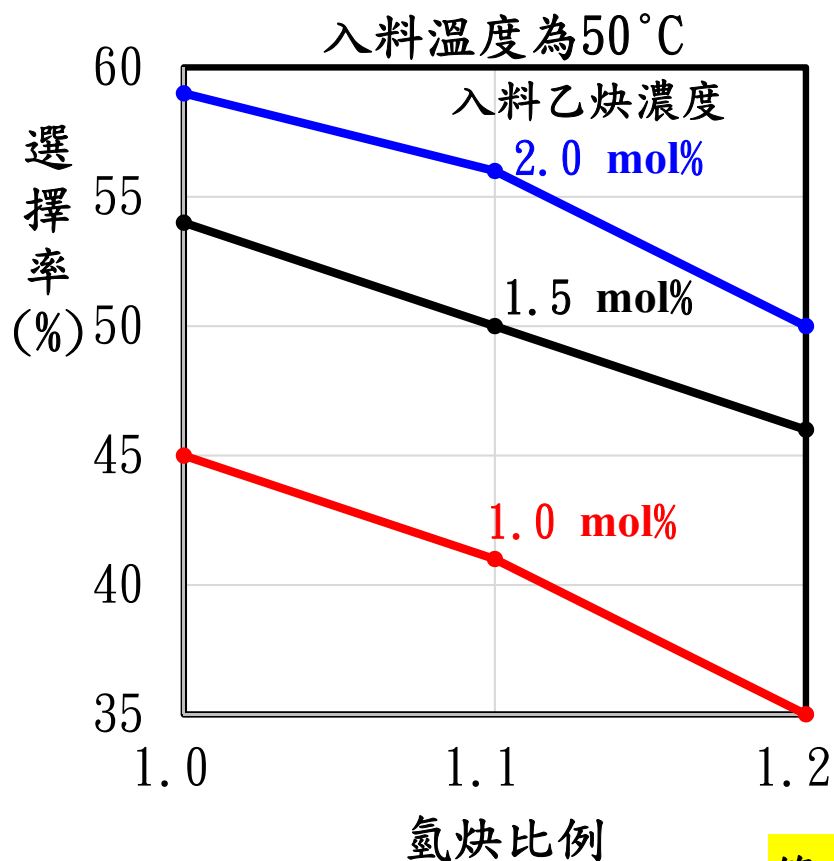
模組開發

線上應用

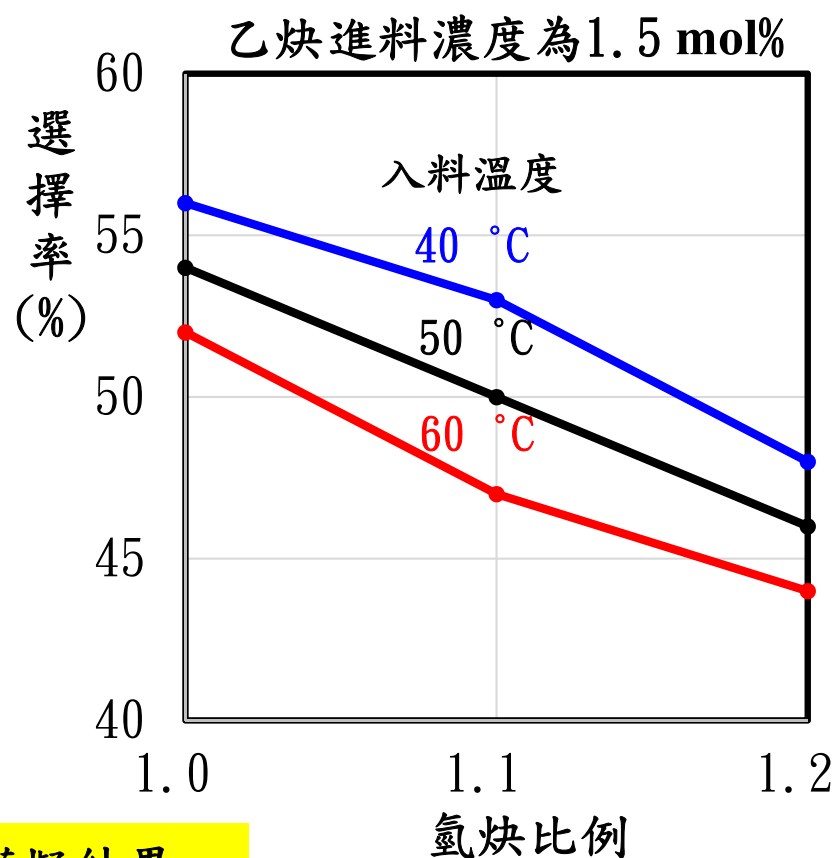
Aspen Plus理論模型應用1-確認控制方向

►根據理論基礎確認變數與選擇率的關係，用於確認DMC3模型控制方向是否正確。

(入料乙炔濃度↗，氫炔比例↘，入料溫度↘，都會使乙烯選擇率↗)



第一床模擬結果



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

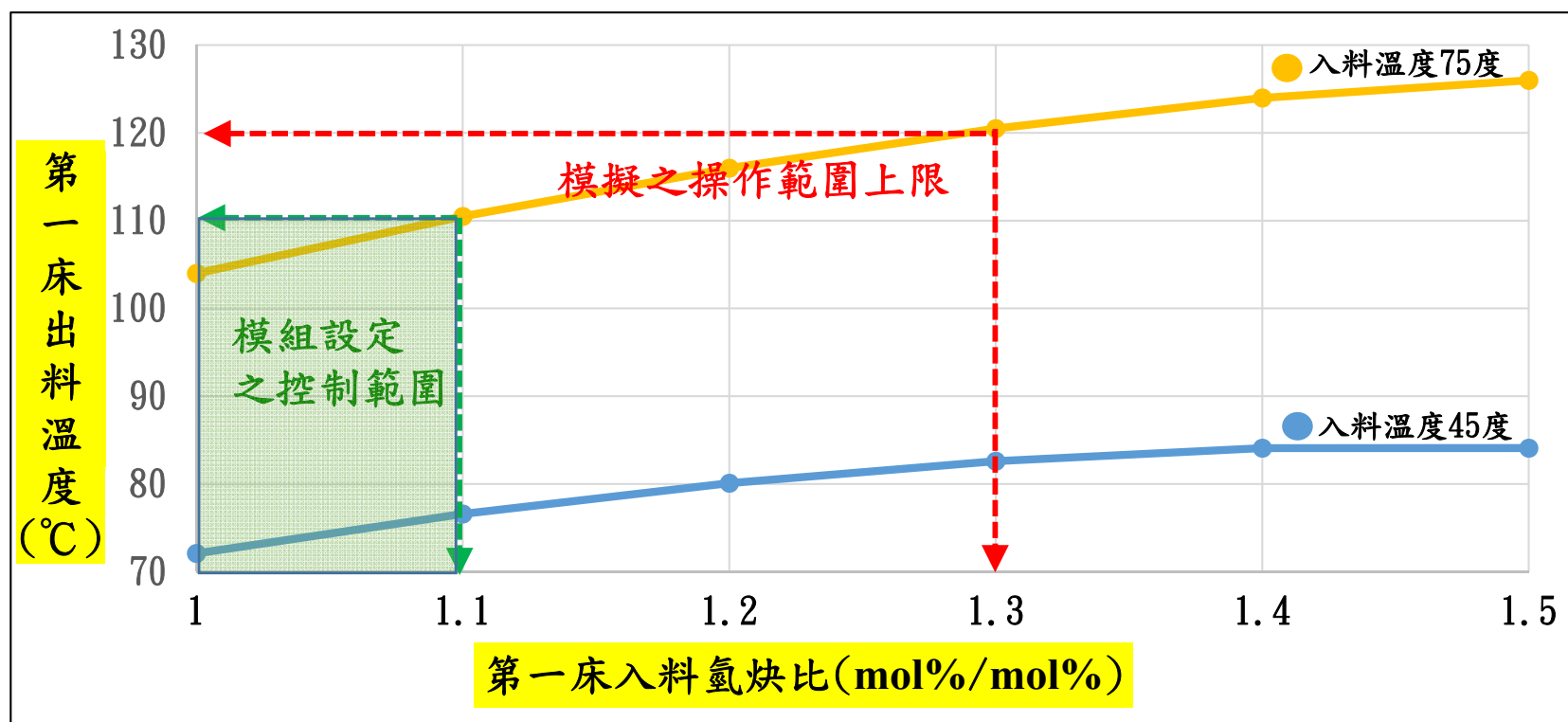
模組開發

線上應用

Aspen Plus理論模型應用2-確認安全操作範圍

- 保護系統溫度上限：連鎖跳車設定溫度為 $>160^{\circ}\text{C}$ 。
- 模擬目標：第一床出料達廠商設計觸媒反應末期最高溫度 120°C 時之操作條件。
- 模擬結果：氫炔比例為1.3且入料溫度為 75°C ，出料溫度會達 120°C ，而控制模組操作區間限定於氫炔比例1.0~1.1，入料溫度上限 75°C 以下，故可確認操作之安全性。

第一床入料氫炔比與入料溫度(入料乙炔濃度=1.8 mol%條件下)



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

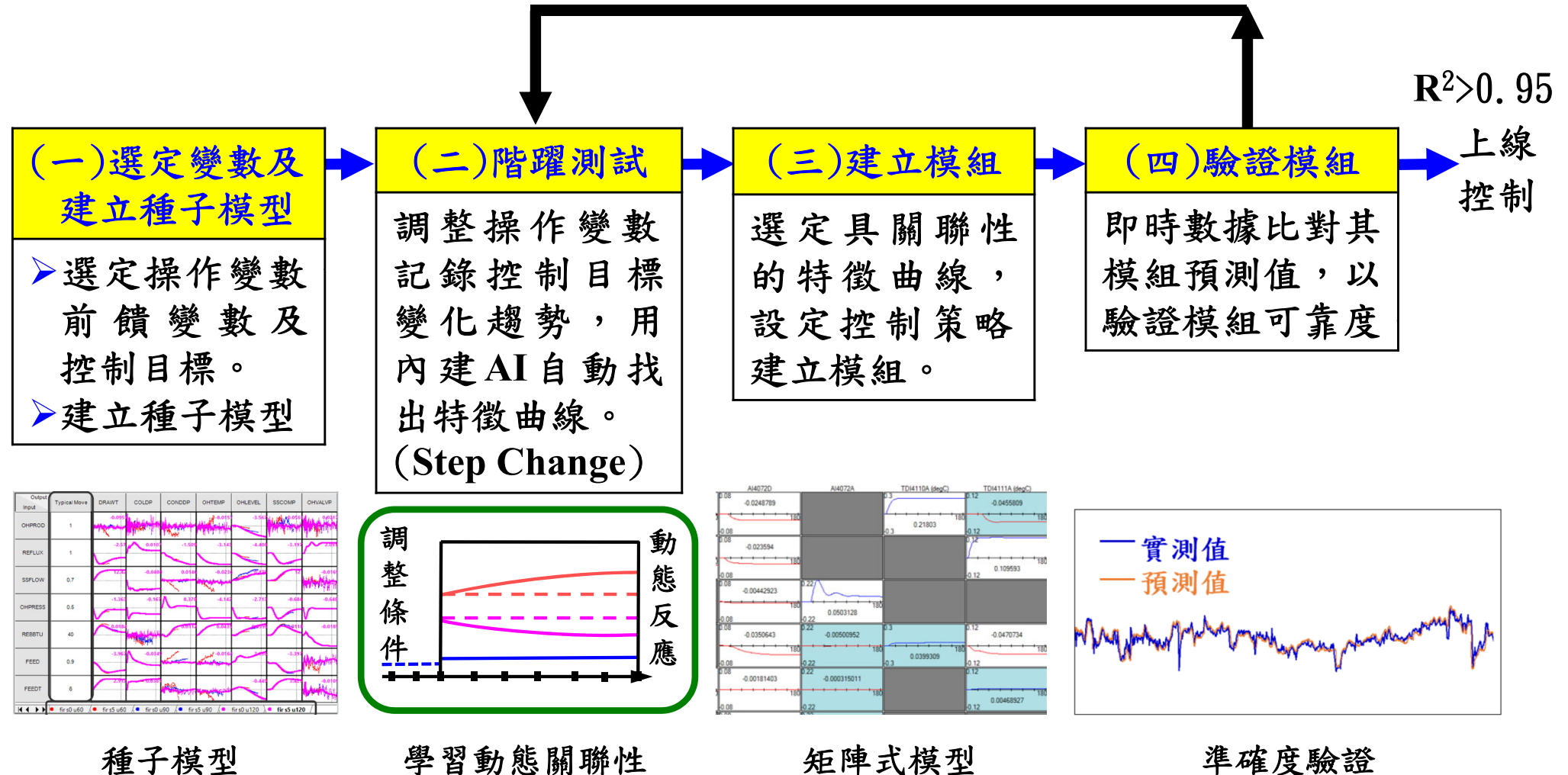
數據探索分析

模組開發

線上應用

DMC3動態控制模組建置

持續調校模組，提高預測準確度



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

模組開發

線上應用

(一)選定變數及建立種子模型-17個特徵參數再分類

- **操作變數**：可直接改變設定值的變數，依據轉化器設計，選定三個床入料氫氣注加流量及三個入料溫度為**操作變數**。
- **前饋變數**：前段製程的變化，會影響模組預測的變數，選定入料流量、入料乙炔濃度為**前饋變數**，以預測轉化器即將之變化量。
- **控制目標**：操作變數要控制的目標，選定三個床入料氫炔比例、三個出料乙炔濃度、三個床溫差為**控制目標**。

類別	項次	項目	單位	可控範圍	最大調整間距
操作變數	1	第一床入料氫氣流量	Kg/h	180.0~254.0	4.0
	2	第一床入料溫度	°C	37.0~75.0	1.0

	6	第三床入料溫度	°C	47.4~57.0	0.5
前饋變數	1	第一床入料乙炔濃度	mol%	-	-
	2	第一床入料流量	T/h	-	-
控制目標	1	第一床氫氣/乙炔比例	-	1.00~1.10	-
	2	第二床氫氣/乙炔比例	-	1.30~1.90	
	
	8	第三床溫差	°C	0.0~5.0	
	9	第三床過剩氫氣濃度	mol% $\times 10^{-4}$	50.0~300.0	

四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

模組開發

線上應用

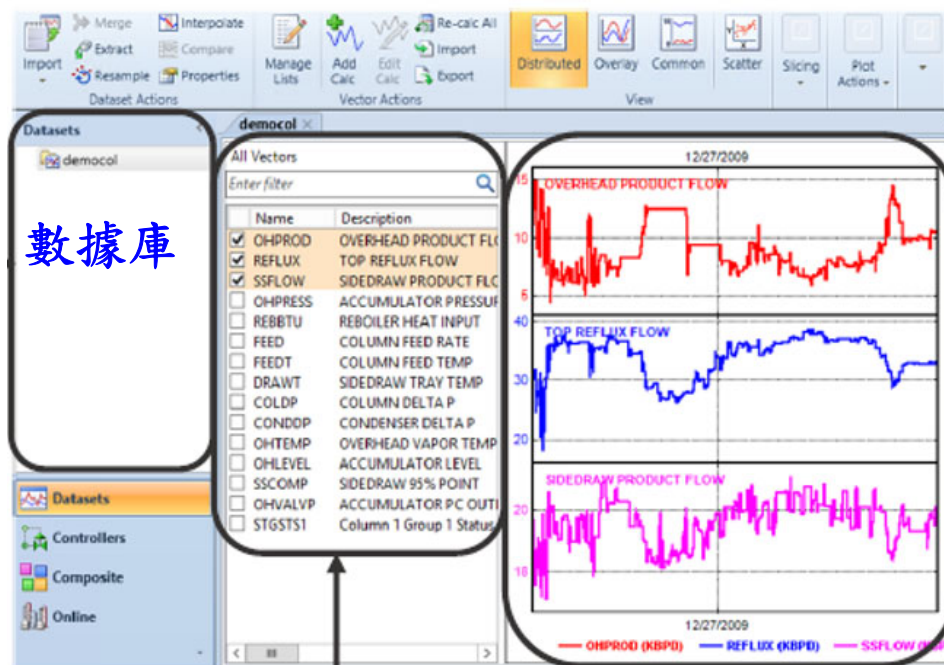
(一)選定變數及建立種子模型-DMC3建立初始模型

➤導入篩選的特徵參數之歷史數據，再次檢視合理性，DMC3軟體利用內建AI功能

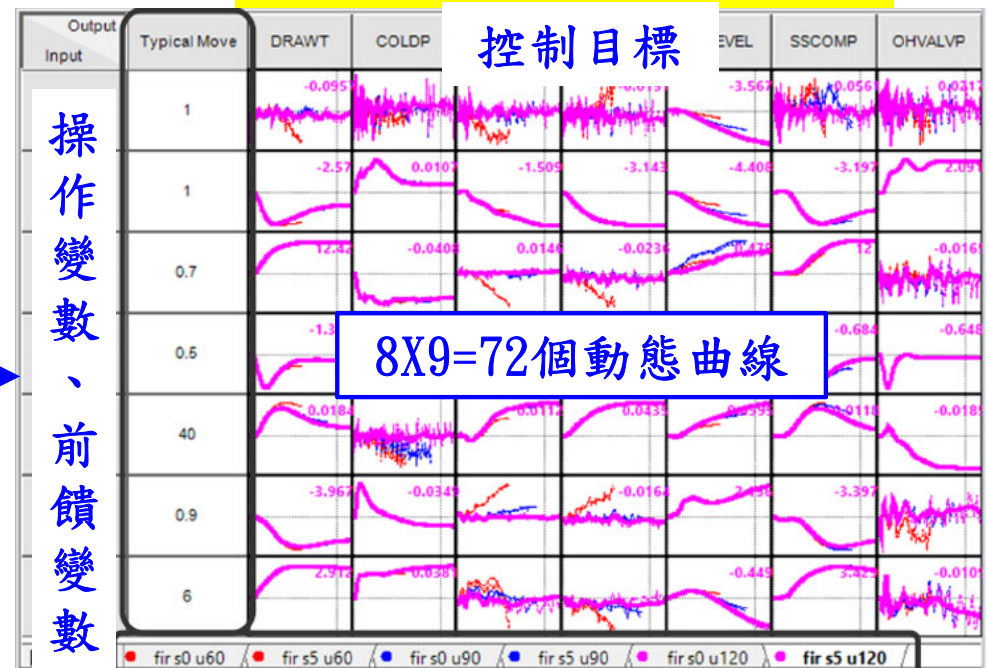
(偏最小平方迴歸；PLS)建立操作變數與控制目標之間由動態至平衡的初始種子模型。

➤配合Aspen Plus 模擬結果確認模型合理性，及設定變數合理安全操作範圍。

17個變數匯入數據



由歷史數據建立種子模型



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

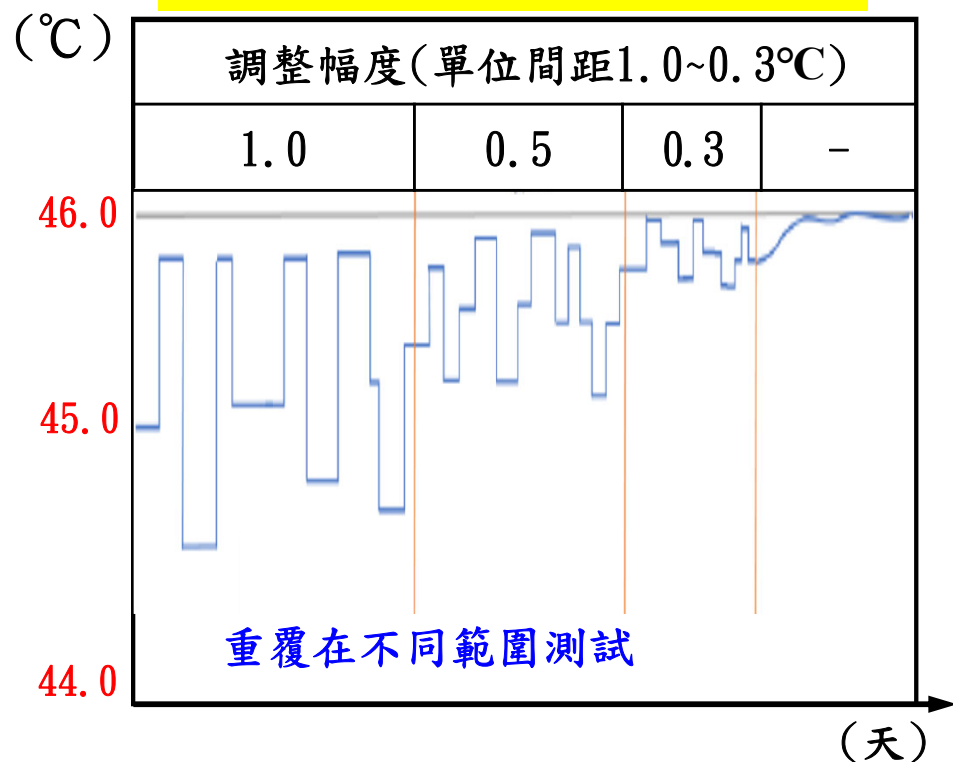
模組開發

線上應用

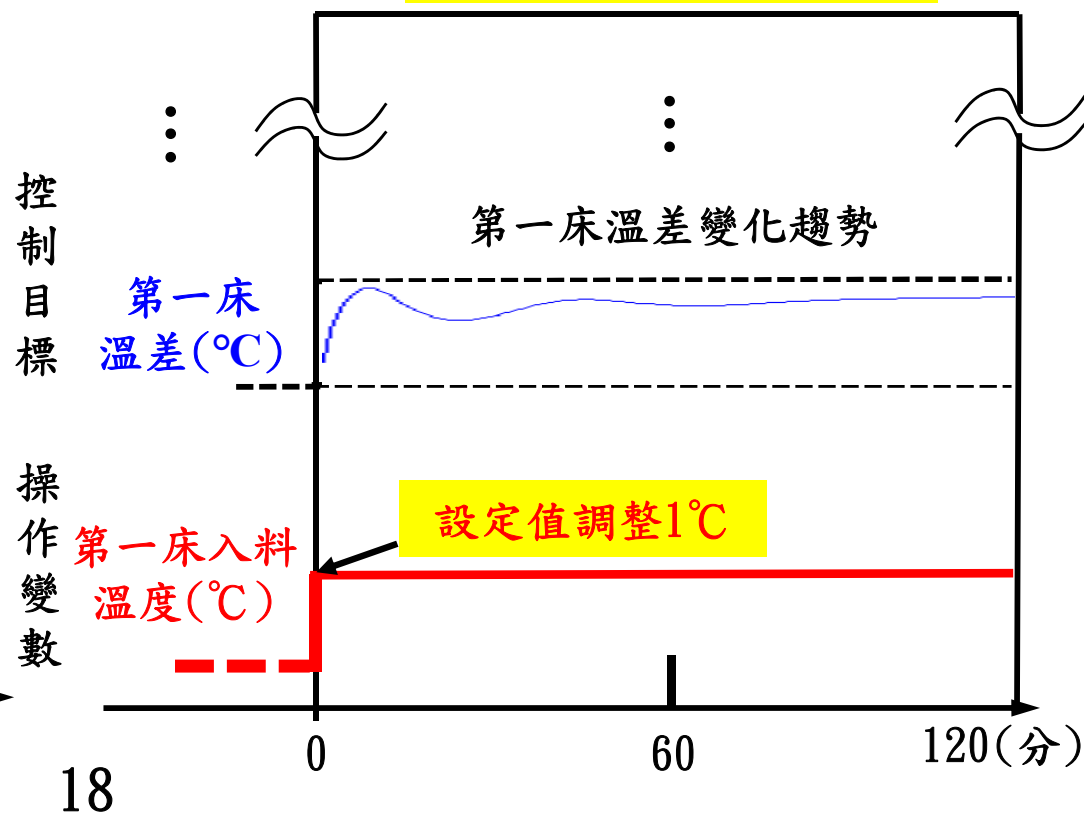
(二)階躍測試 (Step Change)

- 針對6個操作變數，依排定時間調整各種不同幅度的變化量，以提供大量有意義的數據，用於改善種子模組預測曲線，提高準確度。
- 以第一床入料溫度為例：在可控範圍內設定變動幅度，DMC3自動調整設定值，記錄控制目標的變化趨勢之**特徵曲線**，據以改善操作優化模組。

第一床入料溫度階躍測試



收集特徵曲線資料



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

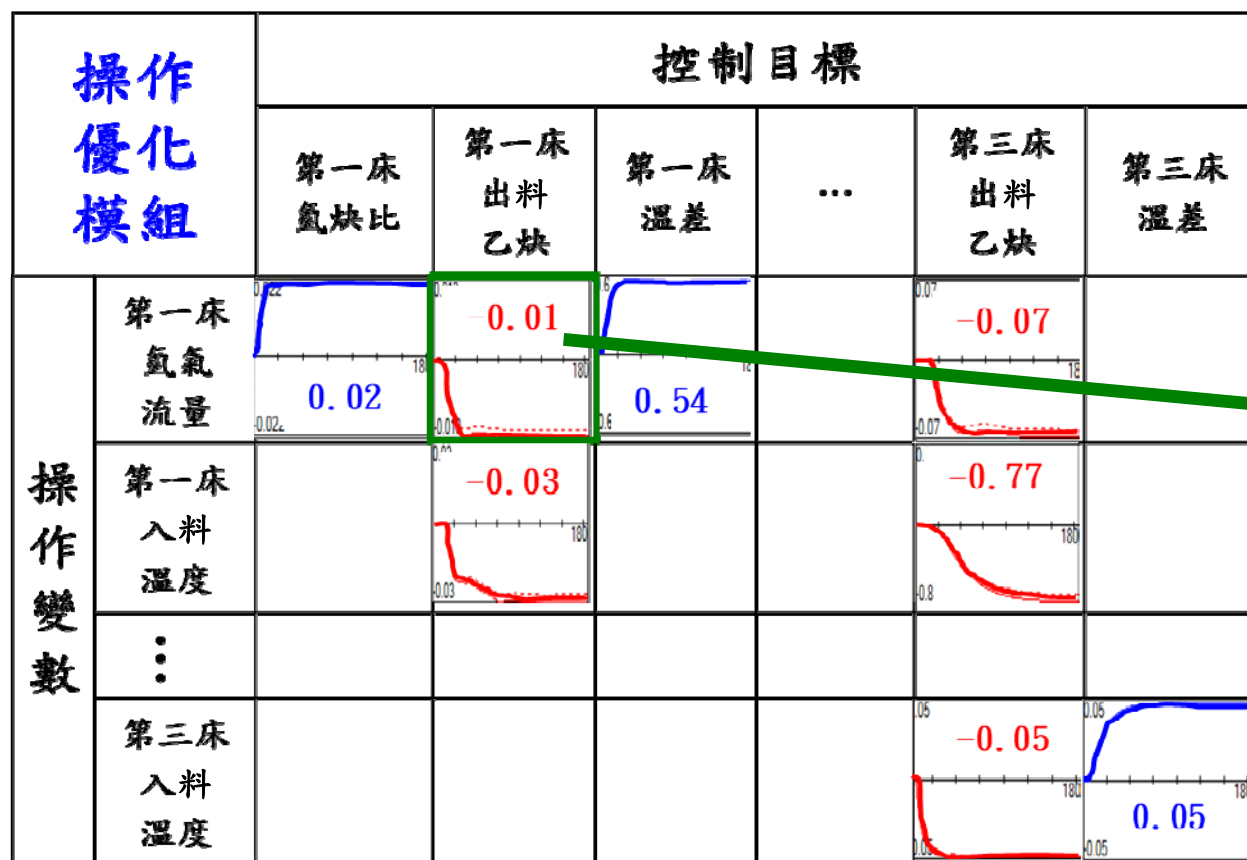
數據探索分析

模組開發

線上應用

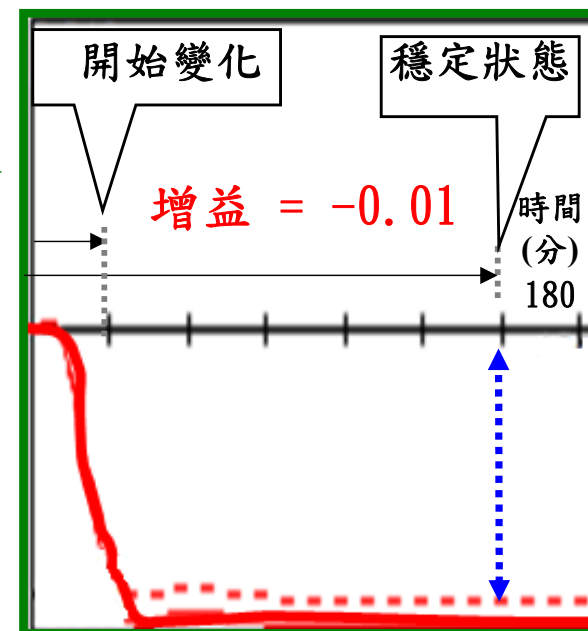
(三) 建立模組

- 所有變數完成階躍測試後，篩選具關聯性特徵曲線，建立矩陣式優化模組。
- 特徵曲線：以氫氣流量為例，提高第一床入料氫氣流量1Kg/h，會使第一床出料乙炔濃度降低0.01mol%，模組可依定量關係決定氫氣注加的時機及幅度。



特徵曲線

$$\text{增益(Gain)} = \frac{\Delta \text{控制目標}}{\Delta \text{操作變數}}$$



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

模組開發

線上應用

(三)建立模組-設定控制策略

- ▶ 當一個控制目標有多個操作變數可調整時，會依據操作經驗及Aspen Plus模擬結果朝有利於選擇率之方向，排定變數調整的優先順序。
- ▶ 以第一床出料乙炔濃度高為例：可增加氫氣量或是增加入料溫度，模組會依1→2順序，若無其他控制目標受限，優先依模組定量關係調升入料溫度。

Overview | Faceplates | Operations | Engineering | Messages | Model | Strategy | Calculations | Plots | Manage |

APC RTE: R450A (DMC3APC): Independents: Strategy

☐ Show Costs
 CV Filter None

CV1

Lo Hi

MV1

1 2

MV2

2 1

Indicators:

Positive gain

Negative gain

Ignored / Tradeoff

1 Order of MV move

Movement direction:

Solid when up/down direction favors the economic objective

Up/down movement direction

Example:

Lo 2

For low limit constraint, MV will move up, 2nd in order, with positive gain that favors the economic objective.

控制目標

操作變數

Manipulated Variables	Original New Priority	Priority	FC4073A	FC4075A	AI4071BD	AI4071CD	AI4072D	AI4072A	TDI4110A	TDI4111A	TDI4112A
All Variables			Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi	Lo Hi
<input type="checkbox"/> FC4073AOP	2	<input type="text" value="2"/>	1 1	1 2	2 2	5	1 1				
<input type="checkbox"/> FC4075AOP	1	<input type="text" value="1"/>	1 1	1 3			2 1				
<input type="checkbox"/> FC4077AOP	5	<input type="text" value="5"/>				2 1				3 1	
<input type="checkbox"/> TC4081SP	4	<input type="text" value="4"/>		2 1		3			1 2		
<input type="checkbox"/> TC4072ASP	3	<input type="text" value="3"/>			3 1	4					1 3
<input type="checkbox"/> TC4073ASP	6	<input type="text" value="6"/>				1					2 2

		控制目標	
控制策略 (第一床)		第一床出料 乙炔濃度	
		Lo	Hi
操作變數	氫氣 流量	1 ▼	2 ▲
	入料 溫度	2 ▼	1 ▲

操作順序:1→2→3

▲ 實心有利方向 ▲ 空心不利方向

四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

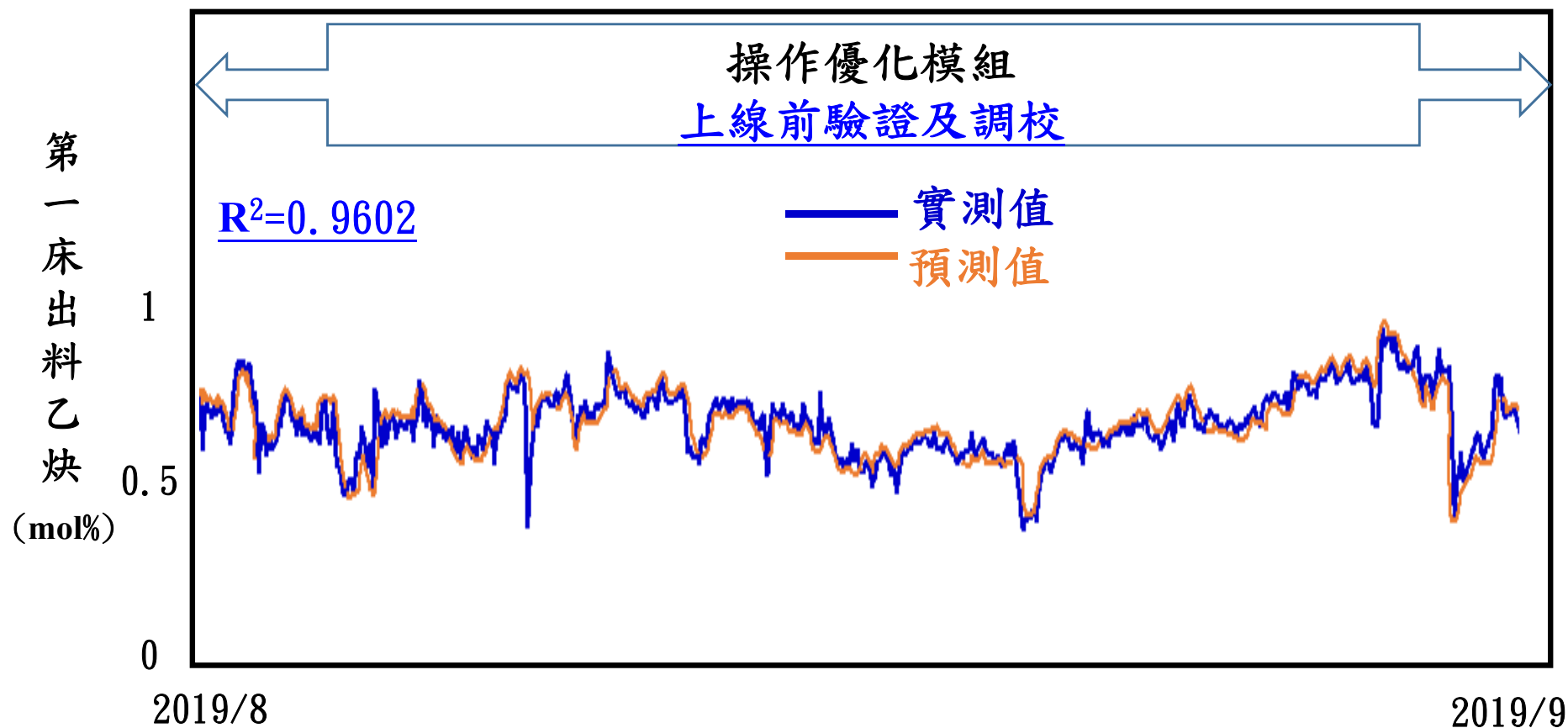
數據探索分析

模組開發

線上應用

(四)驗證可行性

- 操作優化模組上線前須經反覆階躍測試及調校模型，直到確認模型各控制目標預測值與實際工廠測量值相當接近($R^2 > 0.95$)，再上線實際做控制。



四、模組開發建置流程說明

資料盤點與清理

數據探索分析

模組開發

線上應用

上線自動調控(自動執行人機界面)

DMC3上線控制後，操作優化模組會依據特徵曲線及控制策略所定優先順序，調控操作變數，使控制目標在上下限卡邊操作，以穩定各床出料乙炔濃度。

操作變數					操作下限	目標值	操作上限	
Description	Combined Status	Service Request	Measurement	Operator Low Limit	Steady State Value	Operator High Limit	Unit	
FC4073BPV 第一床氫氣	Normal	On	127.630	110.000	128.090	180.000	Kg/h	
FC4075BPV 第二床氫氣	Normal	On	102.788	6.300	99.077	153.000	Kg/h	
FC4077BPV 第三床氫氣	Normal	On	3.033	0.000	3.050	5.000	Kg/h	
TC4082SP 第一床入料溫度	Normal	On	53.021	44.000	54.200	54.500	°C	
第二床入料溫度	Normal	On	58.459	50.000	58.350	58.500	°C	
第三床入料溫度	Normal	On	55.000	47.400	55.000	55.000	°C	
AI4071ADPV 第一床入料乙炔	Normal	On	1.425		1.425		mol%	
FC4066SP 轉化器進料流量	Normal	On						

第一/二床使出料乙炔濃度控制在上限值

控制目標					下限	目標值	上限	
Description	Combined Status	Service Request	Measurement	Operator Low Limit	Steady State Value	Operator High Limit	Unit	
FFC4073B 第一床氫炔比	Normal	On	1.024	1.000	1.023	1.100	-	
FFC4075B 第二床氫炔比	Normal	On	1.652	1.500	1.651	1.900	-	
AI4071BL 第一床出料乙炔	Hi Limit	On	0.748	0.600	0.750	0.750	mol%	
AI4071CL 第二床出料乙炔	Hi Limit	On	579.265	400.000	580.000	580.000	mol% × 10 ⁻⁴	
AI4072D 第三床出料乙炔	Hi Limit	On	2.980	0.100	3.000	3.000	mol% × 10 ⁻⁴	
AI4072A 第三床出料氫氣	Normal	On	295.381	50.000	296.724	300.000	mol% × 10 ⁻⁴	
TDI4110B 第一床入出料溫差	Normal	On	20.141	14.000	18.223	23.000	°C	
TDI4111B 第二床入出料溫差	Normal	On	17.042	14.000	15.294	22.000	°C	
TDI4112B 第三床入出料溫差	Normal	On	1.422	0.000	1.437	3.000	°C	

第三床乙炔出料維持在上限值 3 mol% × 10⁻⁴

五、結論與後續推動事項

1. 烯烴三廠乙炔轉化器優化模組上線後，模組自動調控轉化器三個床六個操作變數，達到穩定控制與操作變數優化操作。
2. 將理論基礎及設備安全操作範圍納入優化模組，確認優化模組方向正確及在安全範圍內操作。
3. 選擇率由45%提升至55%，增加10%，乙烯回收增加3,520噸/年，年效益27,245 千元。
4. 後續擬比照烯烴三廠導入新版軟體DMC3經驗，升級烯烴一廠(2022/7~2023/6)與烯烴二廠(預定2023/1~2023/12)現有舊軟體至DMC3，使烯烴部獲取最大利益。

報 告 完 畢
恭 請 指 導

附錄 專有名詞中英文對照表

英文縮寫	英文全名	中文名稱	說明
AI	Artificial Intelligence	人工智慧	機器能夠從經驗中學習、配合新的輸入訊息做調整並執行仿人類的工作。
-	Aspen Plus	化工製程模擬軟體	內建大量化學物性數據庫，可執行化工製程模擬。
-	AspenTech	艾斯本技術公司(美)	為提供化工製程模擬的技術服務公司。
CV	Controlled Variable	受控變數(調控目標)	DMC3模型受到控制的觀察目標。
DCS	Distributed Control System	分散式控制系統	為目前化工廠控制系統，控制器分散且有備容，以避免單一故障影響工廠操作。
DMC3	Dynamic Matrix Control	動態矩陣控制	為機器學習中的多變數反饋控制模型，以矩陣運算達到優化操作目標。
-	Gain	增益值	DMC3建模的一個步驟，特徵曲線上操作變數做單位變化時，控制目標隨之變化量。
MV	Manipulated Variable	操作變數	DMC3模型直接操作調整的變數。
PLS	Partial Least Squares Regression	偏最小平方迴歸	為機器學習中線性模型。
PCA	Principal Component Analysis	主成分分析法	可用於分析各變數權重之方法。
R²	R square, Coefficient of determination	判定係數	用以評估模型準確度，1.0表示完全準確，一般須高於0.9才可應用於模擬。
-	Step Change	階躍測試	DMC3建模重要程序，改變MV觀察CV變化量。

