

南亞塑膠工業股份有限公司
化工第二事業部

密

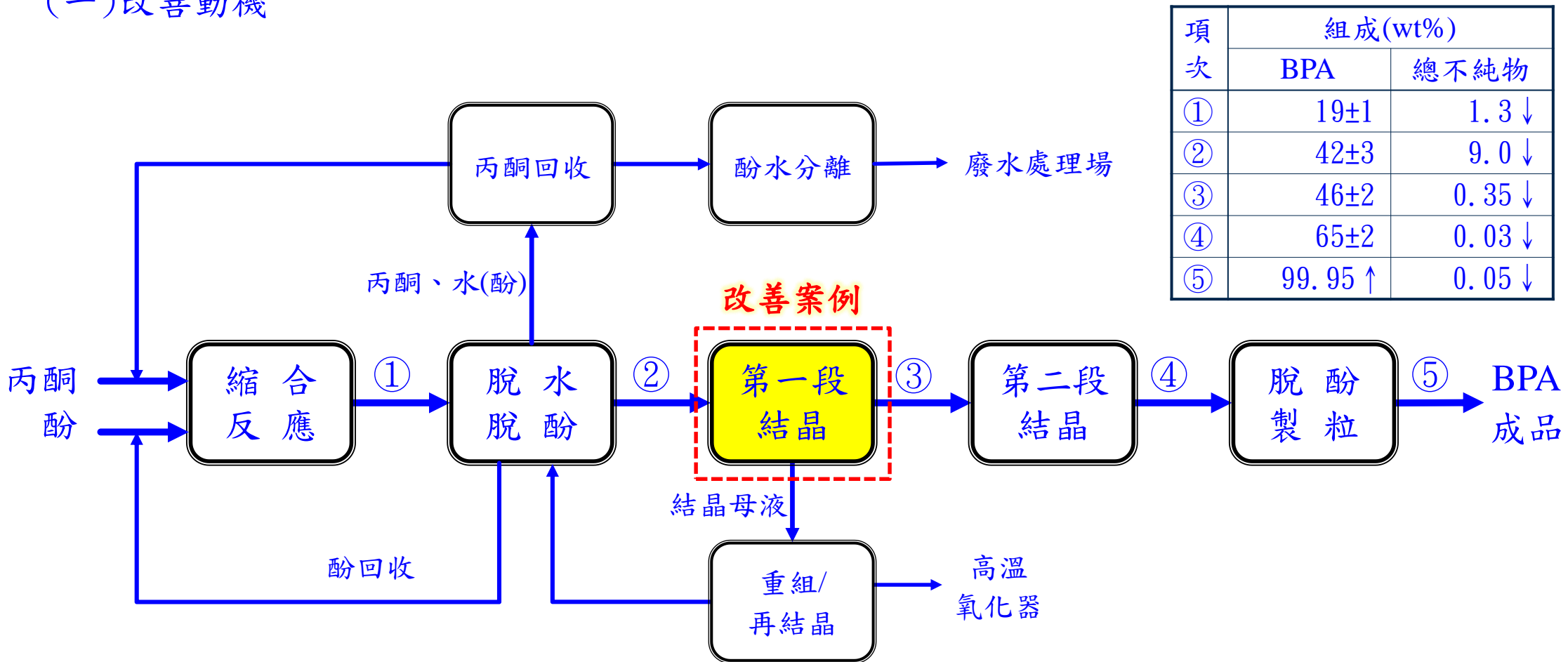
BPA產業展望與競爭力改善專案報告

日期：2020年12月15日

※會後收回

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

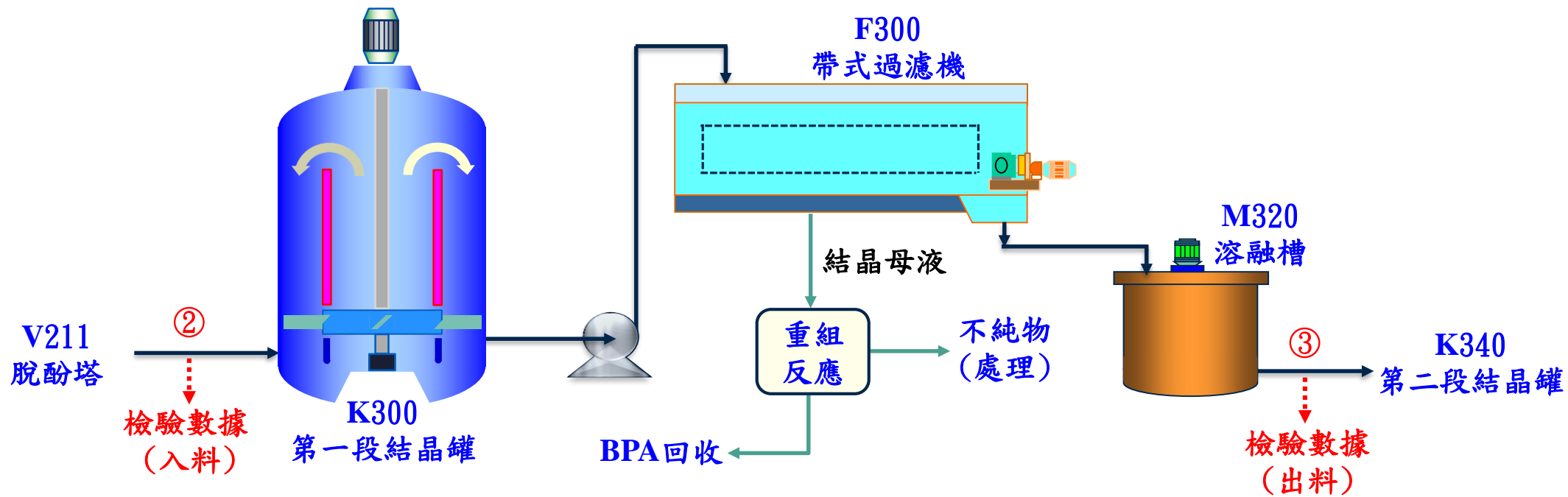
(一)改善動機



1. 結晶單元主要作用為移除製程中的不純物，提高BPA的純度。固液分離後的結晶母液含有酚、不純物及BPA，不純物須從製程中定量移除，避免於製程中累積而影響結晶分離操作。
2. 藉由過去累積的製程條件數據來建模，找出最佳的結晶操作條件，讓③的BPA越多、不純物越少，結晶純化效率得以提升。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(二)定義問題與目標



項目	結晶純化效率(%)		
	設計	實際	目標
第一段結晶區	94.6	95.2	96.3

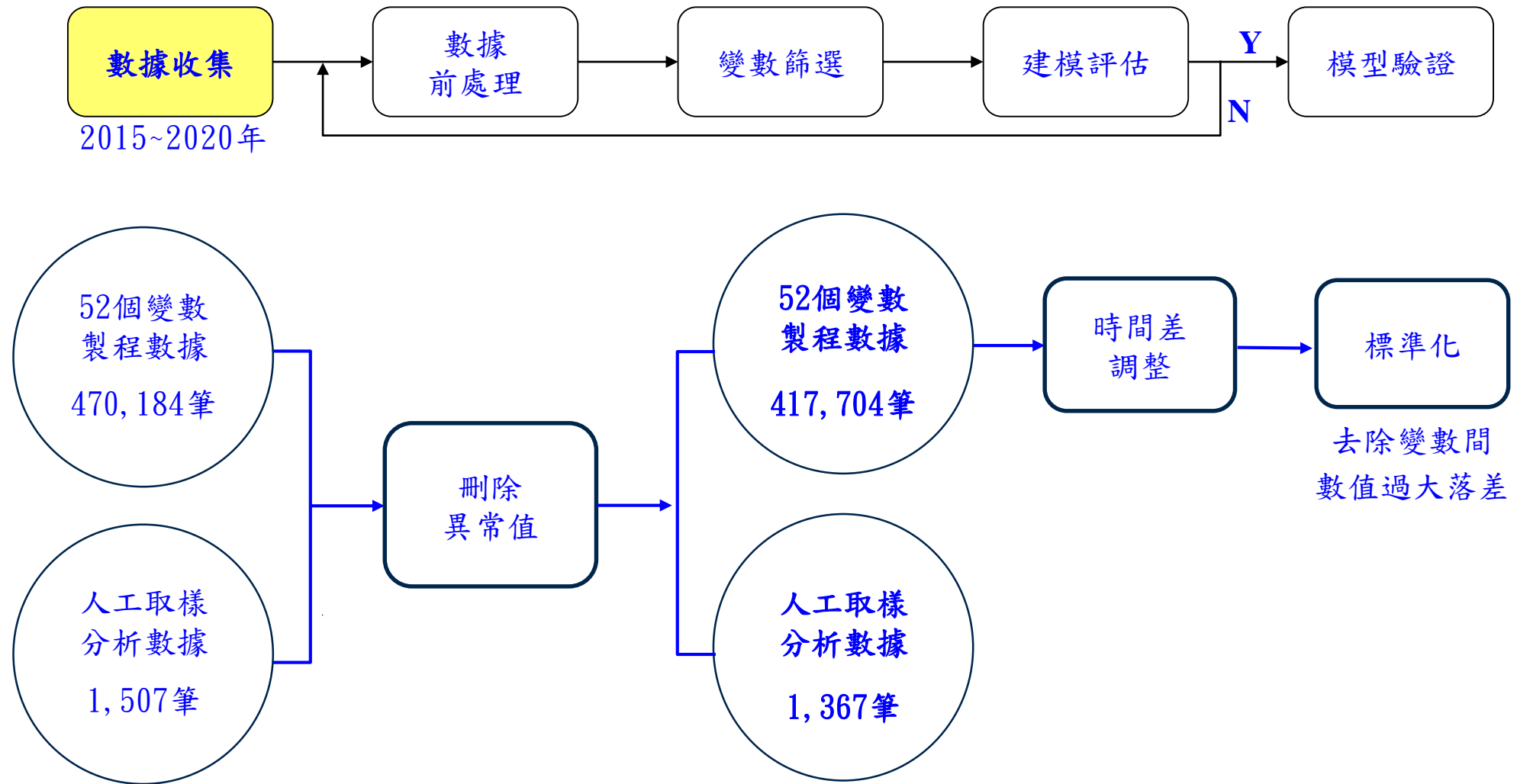
$$\text{註: 結晶純化效率} = \frac{\text{②} - \text{③}}{\text{②}} \%$$

$$\text{②} = \frac{\text{入料總不純物}}{\text{入料BPA}} \quad \text{③} = \frac{\text{出料總不純物}}{\text{出料BPA}}$$

1. 導入AI演算法建立結晶純化效率預測模型，並使用製程模擬軟體(Aspen Plus)，建立結晶段模擬模型，產出廣域且具有化工理論基礎的數據，並從中找出歷史數據以外或設備理論上的最佳操作條件。
2. 目標使結晶純化效率由95.2↗96.3%。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

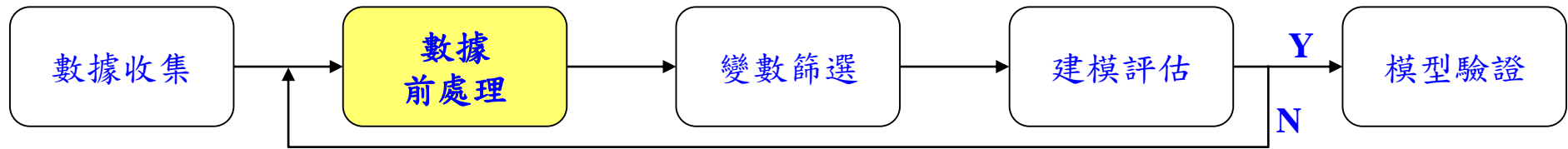
(三)AI模型開發歷程



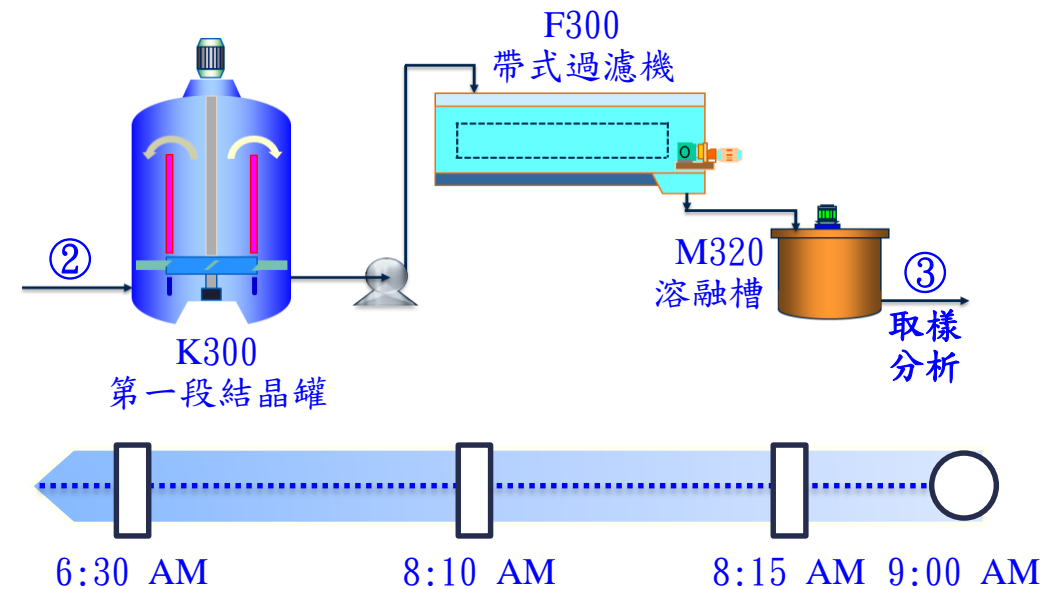
收集2015~2020年製程數據，經刪除異常值及開停車期間數據，52個製程變數數據計417,704筆、人工取樣分析數據計1,367筆，將80%數據做建模使用，20%數據做驗證使用。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(三)AI模型開發歷程(續)



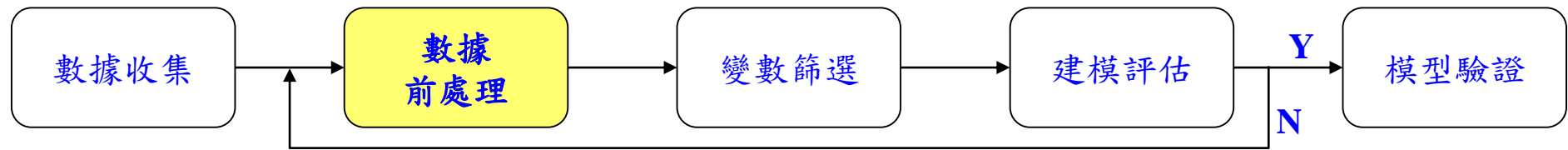
製程變數 X_i	與③取樣分析時間差
X_1 : 結晶罐K300入料流量	150 min
X_2 : 結晶罐K300操作壓力	150 min
X_3 : 結晶罐K300操作溫度	150 min
⋮	⋮
X_{21} : 結晶罐K300出料流量	50 min
X_{22} : 結晶罐K300出料泵浦電流	50 min
X_{23} : 溶融槽M320補酚流量	45 min
⋮	⋮
X_{51} : 溶融槽M320出料溫度	0 min
X_{52} : 溶融槽M320出料流量	0 min



1. 將製程變數(52個)進行時間差調整，依出料流速以及設備的體積換算滯留時間，計算製程變數與③取樣分析的時間差。
2. 經計算結晶罐K300入料流量與③取樣分析時間差，故延後150 min，其餘變數依其時間差進行適當的時間差調整。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

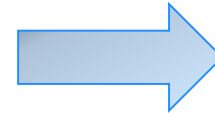
(三)AI模型開發歷程(續)



原始數據共417,704筆
(單位、數值範圍不同)

時間	F300馬達 電流(Amp) II-F300. PV	暫存槽V305 出料流量 (L/h) FI-3052. PV	結晶罐K300 操作液位(%) LIC-3004. PV
2015-1-1 09:00:00	3.8	701	85.24
2015-1-2 09:00:00	3.8	724	85.54
2015-1-3 09:00:00	3.8	718	85.82
⋮	⋮	⋮	⋮
2020-2-4 09:00:00	4.4	804	84.41
2020-2-5 09:00:00	4.3	821	84.10

標準化
轉換



$$X^* = \frac{X - \min}{\max - \min}$$

X: 製程變數
max: 最大值
min: 最小差

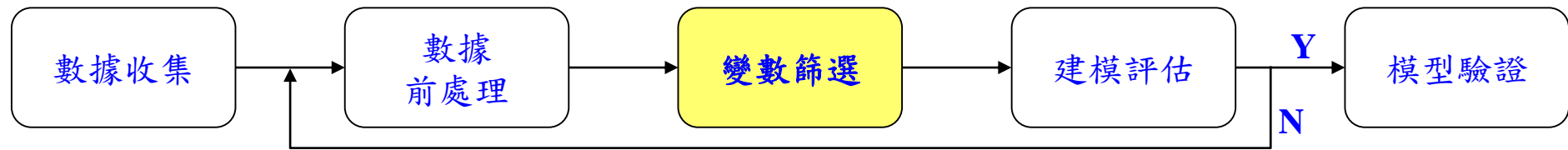
數據標準化共417,704筆
(無單位，且分布在0到1之間)

時間	F300馬達 電流 II-F300. PV	暫存槽V305 出料流量 FI-3052. PV	結晶罐K300 操作液位 LIC-3004. PV
2015-1-1 09:00:00	0.2660	0.0077	0.8105
2015-1-2 09:00:00	0.2085	0.1634	0.8864
2015-1-3 09:00:00	0.2252	0.1217	0.9558
⋮	⋮	⋮	⋮
2020-2-4 09:00:00	0.8885	0.6960	0.6039
2020-2-5 09:00:00	0.7766	0.8087	0.5265

3. 每個變數的單位、數值大小不同，使用極小極大手法(MinMax scaler)進行標準化轉換，將數據轉換在同一基準下(最大值變為1，最小值變為0)，可避免數值大小差異影響模型準確度，有助於接續使用Lasso線性模型進行變數篩選。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(三)AI模型開發歷程(續)



$$\text{結晶純化效率} = a_1X_1 + \cdots + a_{41}X_{41} + a_{42}X_{42} + \cdots + a_{52}X_{52} + b$$

排名	製程變數(X_i)	模型係數(a_i)
1	FIC-3001.PV	-2.510
2	PIC-3003.PV	2.441
3	TIC-3005.PV	1.834
⋮	⋮	⋮
40	TI-3202. PV	-0.024
41	LIC-3201A.PV	-0.011
42	II-B312.PV	0.000
⋮	⋮	⋮
51	FI-3052.PV	0.000
52	LIC-3131.PV	0.000

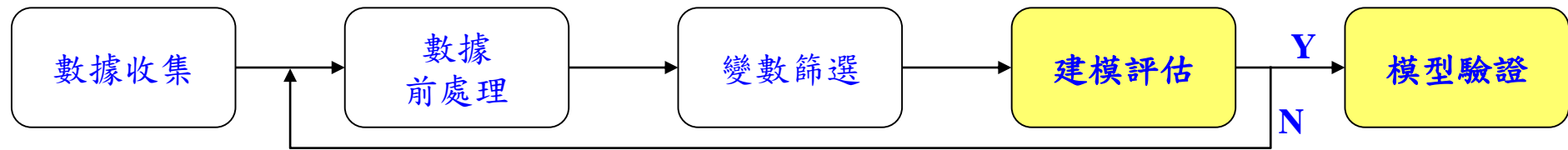
表示變數對結晶純化效率影響程度
正值：與結晶純化效率為正相關
負值：與結晶純化效率為負相關
係數絕對值大：影響程度高
係數絕對值小：影響程度低

模型係數為0之變數，經製程人員檢討確認，對於結晶純化效率影響程度低，故予以剔除。

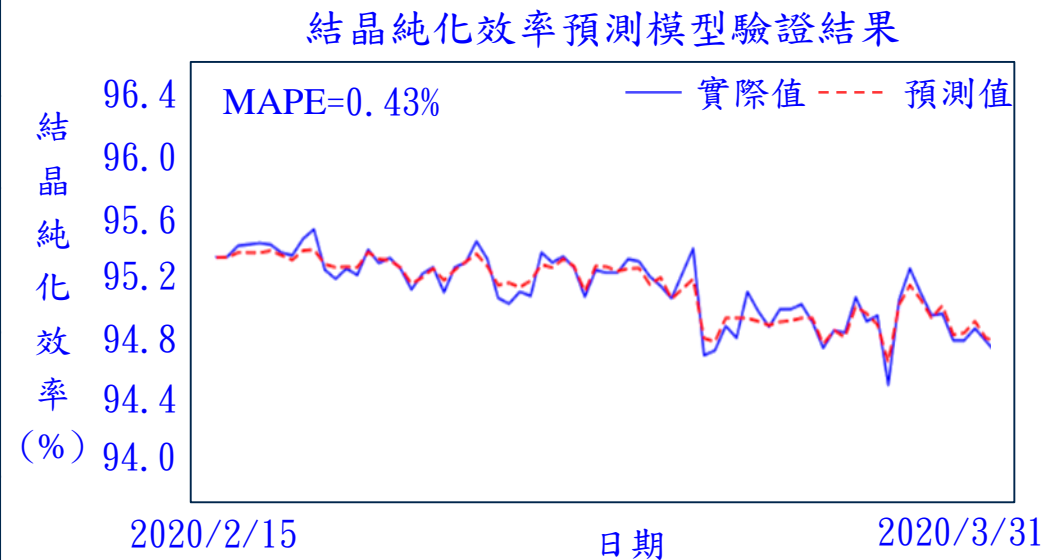
第一段結晶單元製程變數多達52個，利用Lasso演算法計算出的模型係數，判斷變數對結晶純化效率的影響程度，將不顯著之變數(模型係數為0)予以剔除，篩選出41個變數作為後續建模依據。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(三)AI模型開發歷程(續)



演算法	Lasso (套索迴歸)	Ridge (脊迴歸)	XGBoost (極限梯度提升)
模型類別	線性	線性	非線性
MAPE (平均絕對誤差)	0.72%	0.79%	0.42%
RMSE (均方根誤差)	1.14	1.18	1.03
R ² (決定係數)	0.54	0.51	0.84

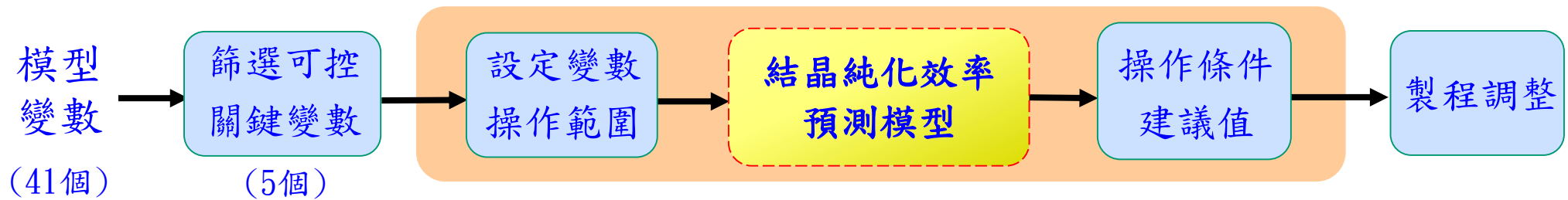


1. 以3種演算法進行建模評估，經評估XGBoost模型 MAPE為0.42%最低，R²為0.84最高。
2. 經以2020年2、3月的數據進行驗證，MAPE為0.43%，與建模時誤差0.42%相當。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(三)AI模型開發歷程(續)

開發操作條件指引程式



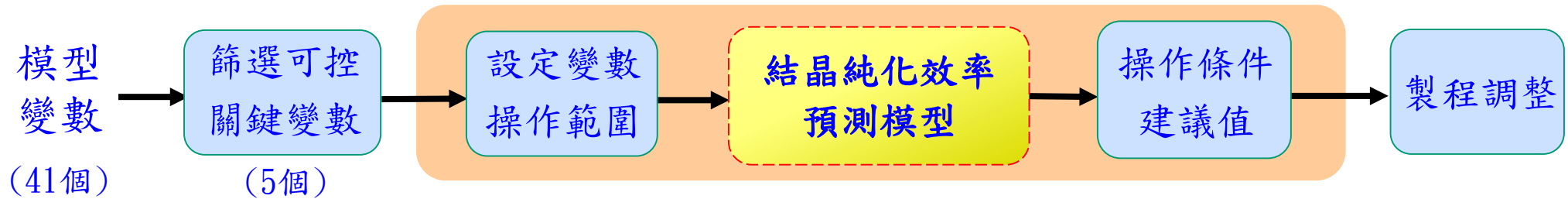
項次	模型重要性	TAG編號	中文說明
1	0.1831	FIC-3001.PV	結晶罐K300入料流量
2	0.1739	PIC-3003.PV	結晶罐K300操作壓力
3	0.1611	TIC-3005.PV	結晶罐K300操作溫度
4	0.1501	TIC-3971.PV	結晶罐K300夾套溫度
5	0.1409	TIC-3011.PV	結晶罐K300入料溫度
6	0.1373	LIC-3004.PV	結晶罐K300操作液位
7	0.0978	FIC-3002.PV	結晶罐K300酚水入料流量
8	0.0675	FIC-3006.PV	結晶罐K300出料流量
⋮	⋮	⋮	⋮
22	0.0531	LIC-3201A.PV	溶融槽M320液位A

1. 經變數篩選的41個變數中，可控變數共有22個，為避免一次調整過多變數影響製程穩定度，以XGBoost演算法的模型重要性排序，篩選可控關鍵變數，作為上線優化調整。
2. 考量流量相關變數(入料、出料流量等)影響產量，及部分變數影響後段製程，皆不列入選擇，檢討後選擇項次2-6作為可控關鍵變數，進行優化調整。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(三)AI模型開發歷程(續)

開發操作條件指引程式



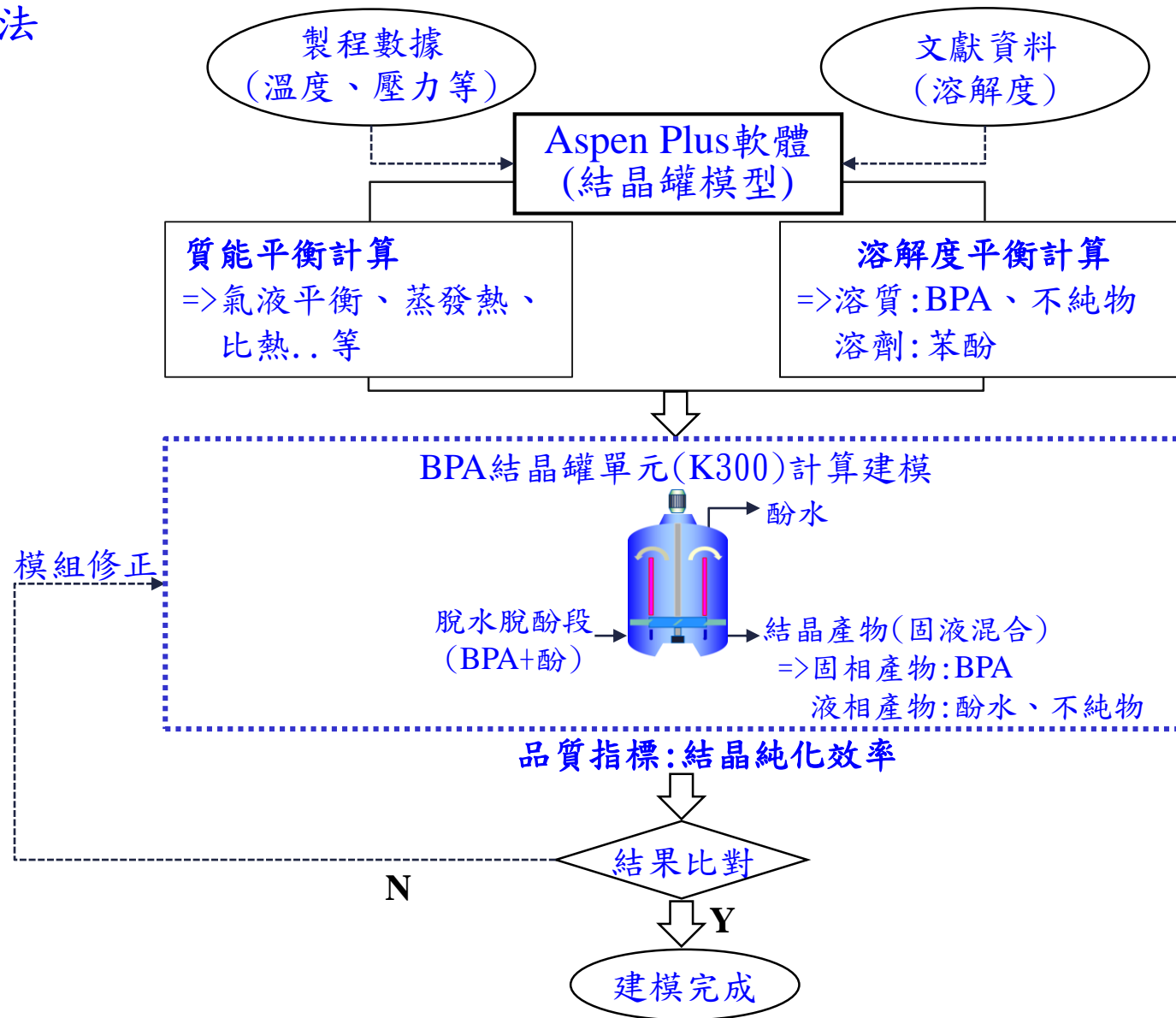
控制變數			條件設定			模型計算 較佳條件
			操作範圍	間距	操作點	
X ₁	結晶罐K300操作壓力	Torr	23.0 ~ 28.0	0.5	11個	25.5 ↗ 28.0
X ₂	結晶罐K300操作溫度	℃	42.0 ~ 48.0	0.5	13個	46.0 ↗ 46.5
X ₃	結晶罐K300夾套溫度	℃	44.0 ~ 52.0	0.5	17個	48.0 ↗ 50.0
X ₄	結晶罐K300入料溫度	℃	73.0 ~ 77.0	0.5	9個	75.0 ↗ 75.5
X ₅	結晶罐K300操作液位	%	82.0 ~ 86.0	0.5	9個	84.0 ↘ 83.0
目標	結晶純化效率	%	極大化(望大)			95.2 ↗ 95.9

1. 設定5個可控關鍵變數操作範圍及調整區間，共196,911種操作條件組合。
2. 以Python程式語言開發操作條件指引程式，將不同操作條件組合的數據，自動帶入預測模型計算，找出最佳的結晶純化效率及對應的可控關鍵變數建議值，並呈現在DCS及RTPMS畫面中，供調整參考。
3. 最終模型計算出一組結晶純化效率最大值(95.2↗95.9%)及其操作條件建議值。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(四)模擬模型(Aspen Plus)開發歷程

1. 計算方法

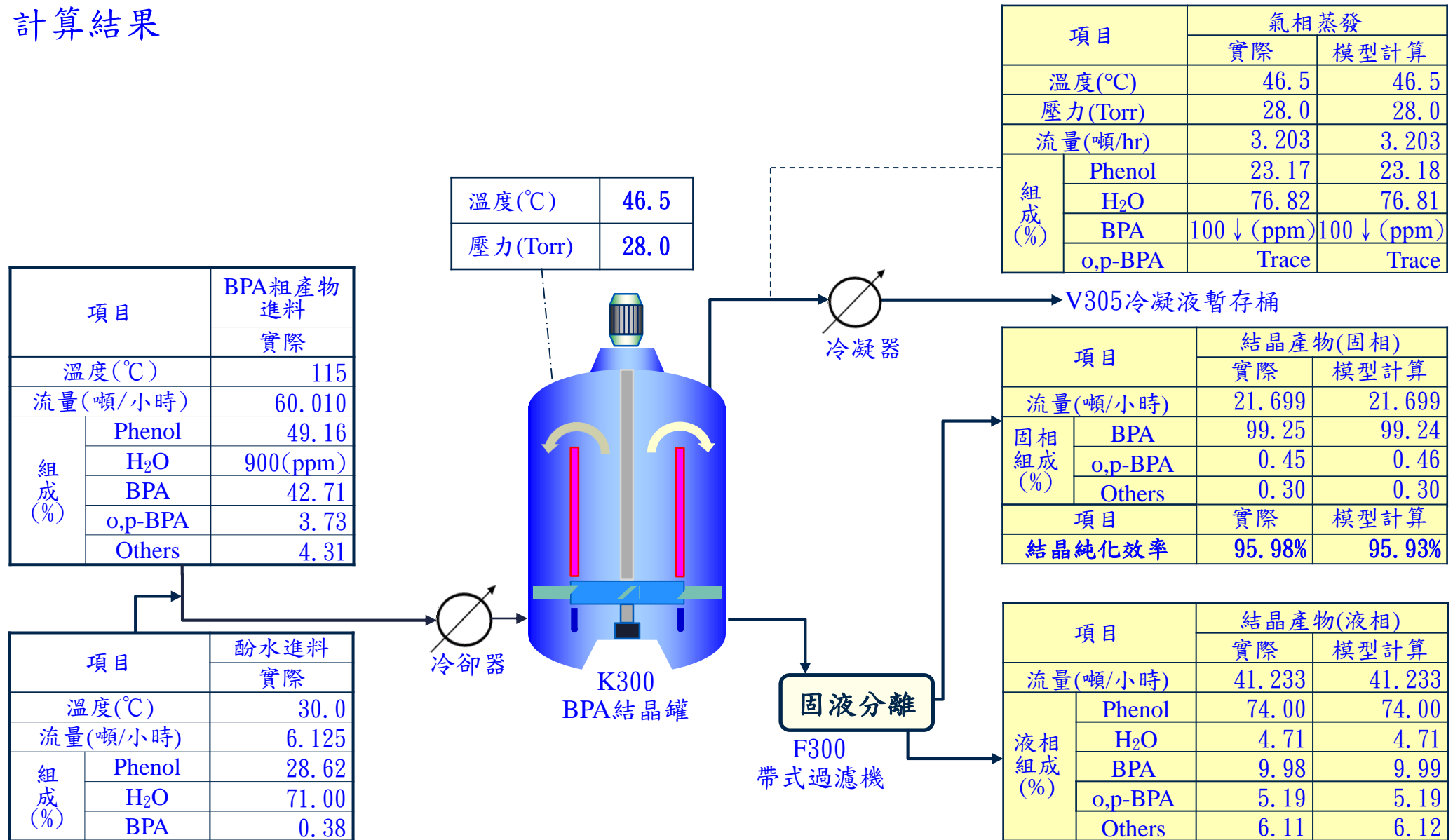


使用結晶罐模型，輸入溫度、壓力等製程數據，搭配Aspen Plus資料庫可計算出蒸發的氣相(酚水)組成，再由溶解度數據計算，高於溶解度的成分會過飽和析出(BPA)結晶，其餘則為液相(酚水及不純物)。透過建立結晶系統的模擬模型，加以確認製程數據之準確性，並找尋較適操作條件。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(四)模擬模型(Aspen Plus)開發歷程(續)

2. 計算結果



將實際的進料數據帶入Aspen Plus的結晶罐模型進行驗證，於不同操作溫度及壓力的條件下，模型可計算得到出料組成與結晶純化效率預測值，經比對模型計算與實際出料組成、結晶純化效率數據，結果兩者相符，確認模型具適用性，且發現兩股入料的流量比，AI建模時未發現亦屬影響效率的關鍵變數。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

(四)模擬模型(Aspen Plus)開發歷程(續)

3. 模擬最佳操作條件

管制點	PIC-3003	TIC-3005	FIC-3002/FIC-3001	-
描述	結晶罐操作壓力 (Torr)	結晶罐操作溫度 (°C)	酚水進料比 (噸/噸)	結晶純化效率 (%)
原始操作範圍	23.0 ~ 28.0	42.0 ~ 48.0	-	86.5以上
產生廣域 數據上下限	20.0 ~ 30.0	40.0 ~ 50.0	0.090 ~ 0.130	
1	20.0	40.0	0.090	86.5
2	20.0	40.0	0.091	86.6
3	20.0	40.0	0.092	86.7
:	:	:	:	:
15233	28.5	47.0	0.111	96.2
15234	28.5	47.0	0.112	96.3
15235	28.5	47.0	0.113	96.1
:	:	:	:	:
18079	30.0	50.0	0.128	95.5
18080	30.0	50.0	0.129	95.5
18081	30.0	50.0	0.130	95.6
最佳條件	28.5	47.0	0.112	96.3

依學理判斷影響結晶純化效率關鍵因子為BPA與不純物的平衡溶解度變數，故選出3個關鍵因子(X)，並將操作條件範圍放寬，超出歷史數據的上下限，藉Aspen Plus模擬模型在合理操作範圍內產出具有化工理論基礎的數據，於結晶罐操作壓力28.5Torr、結晶罐操作溫度47.0°C及酚水進料比0.112噸/噸，結晶純化效率最佳為96.3%。因未有實際操作經驗，經變更管理(MOC)研討後進一步線上測試。

案例二：麥寮BPA2 結晶段結晶純化效率提升

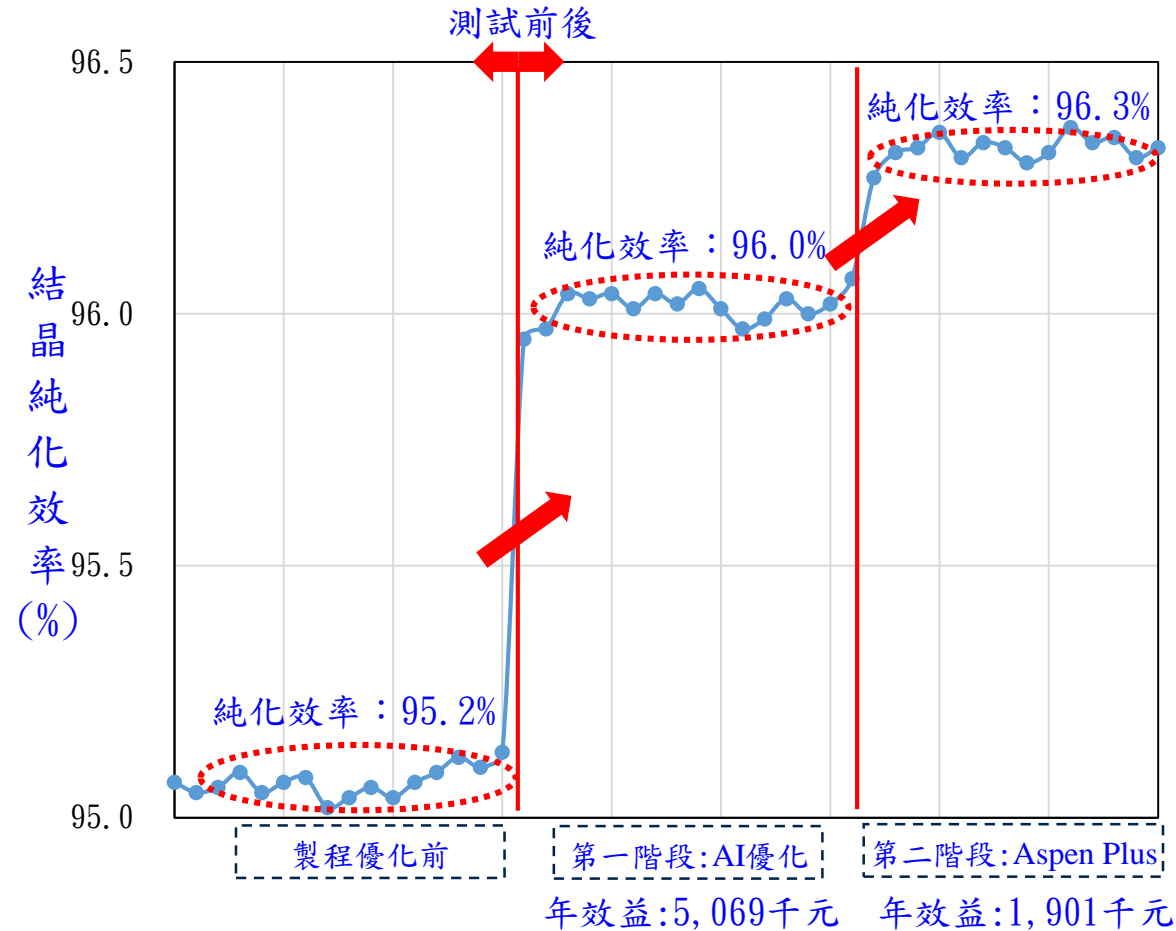
(五)製程調整與效益

第一階段測試(AI)

項次	可控 關鍵變數	單位	調整後	調整前	差異
X ₁	結晶罐操作壓力	Torr	28.0	25.5	2.5
X ₂	結晶罐操作溫度	°C	46.5	46.0	0.5
X ₃	結晶罐入水溫度	°C	50.0	48.0	2.0
X ₄	結晶罐入料溫度	°C	75.5	75.0	0.5
X ₅	結晶罐操作液位	%	83.0	84.0	-1.0
結晶純化效率(%)		目標	改善後	改善前	差異
		95.9	96.0	95.2	0.8

第二階段測試(Aspen Plus)

項次	可控 關鍵變數	單位	調整後	調整前	差異
X ₁	結晶罐操作壓力	Torr	28.5	28.0	0.5
X ₂	結晶罐操作溫度	°C	47.0	46.5	0.5
結晶純化效率(%)		目標	改善後	改善前	差異
		96.3	96.3	96.0	0.3



1. 依AI模型計算的建議值，於2020.4.11~2020.5.4進行線上測試，結晶純化效率由95.2%↗96.0%。
2. 依Aspen Plus軟體計算的建議值，於2020.10.12~2020.10.17進行線上測試，結晶純化效率進一步由96.0%↗96.3%，後續將續評估酚水入料比測試。
3. 純化效率提升，增加BPA收率，可節省原料酚1.9公斤/噸BPA；丙酮0.6公斤/噸BPA，降低原料單位成本0.6美元/噸BPA，年效益新台幣6,970千元。
4. 橫向展開至BPA3/4執行，年效益新台幣16,450千元。BPA2/3/4合計改善年效益新台幣23,420千元。