

# 工業技術研究院

Industrial Technology  
Research Institute

經濟部工業局「低碳製程技術研討會」

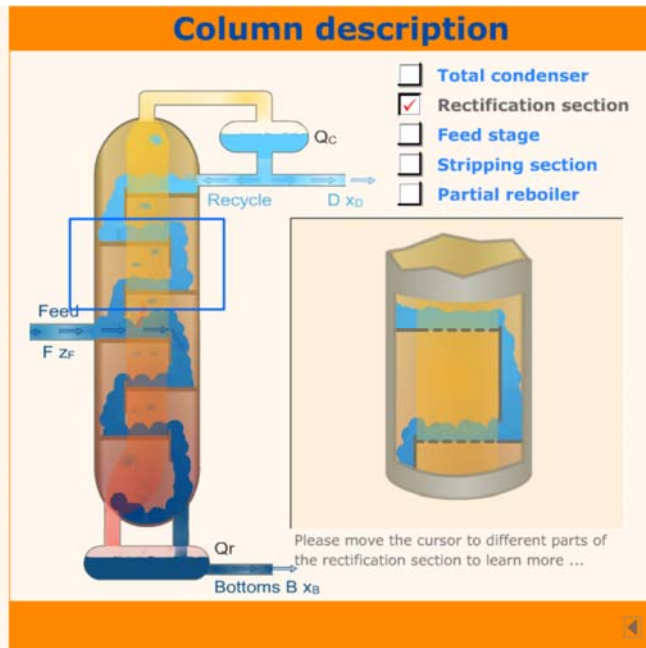
## 多效蒸餾技術

材化所/ 化工技術組 何 宗 仁  
2018.8.15(台中)/16(高雄)

### CONTENTS

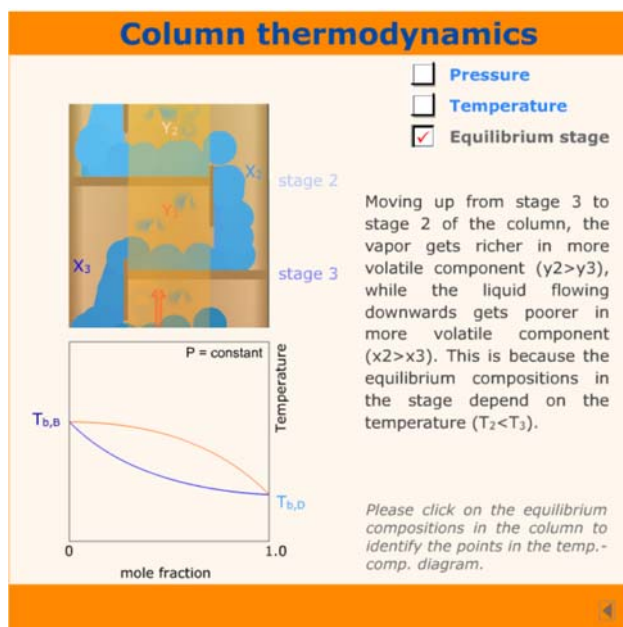
- 蒸餾技術
- 蒸餾節能技術
- 多效蒸餾技術之特徵、應用與案例
- 多效蒸發技術
- 工研院相關技術能量簡介

# 蒸餾技術原理：THE DISTILLATION COLUMN



The feed stream enters the column, dividing the column into two sections: the section of the column above the feeding point is called the **enriching** or **rectification** section; the section below is known as the **stripping section**.

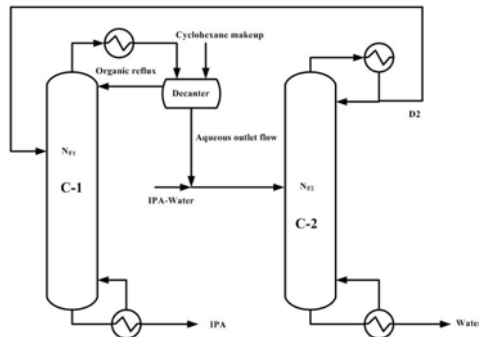
# 蒸餾技術原理：THERMODYNAMICS



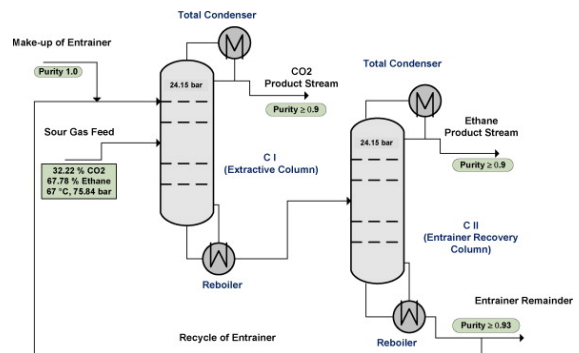
In every stage the liquid and vapor streams come in contact with each other and exchange heat. This causes on one side the vaporization of part of the liquid, and, on the other side, the condensation of some vapor.

# 典型蒸餾程序

- 一般蒸餾(雙成分~多成分)
- 破共沸蒸餾(Breaking the Azeotrope)
  - 異相共沸蒸餾(Heterogeneous Azeotropic Distillation)
  - 萃取蒸餾(Extractive Distillation)
  - 變壓蒸餾(Pressure Swing Distillation)
- 反應蒸餾(Reactive Distillation)



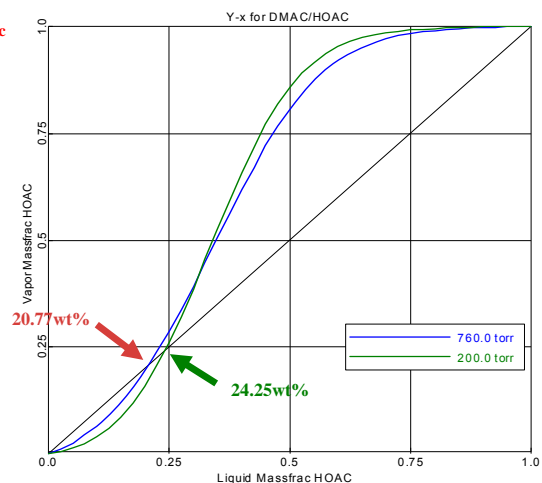
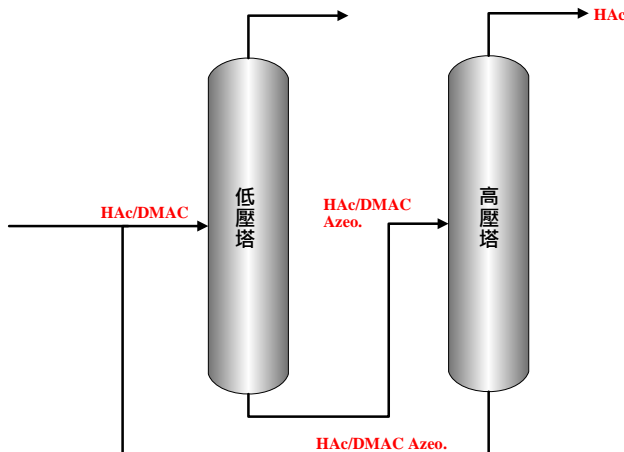
Heterogeneous Azeotropic Distillation



Extractive Distillation

# 典型蒸餾程序

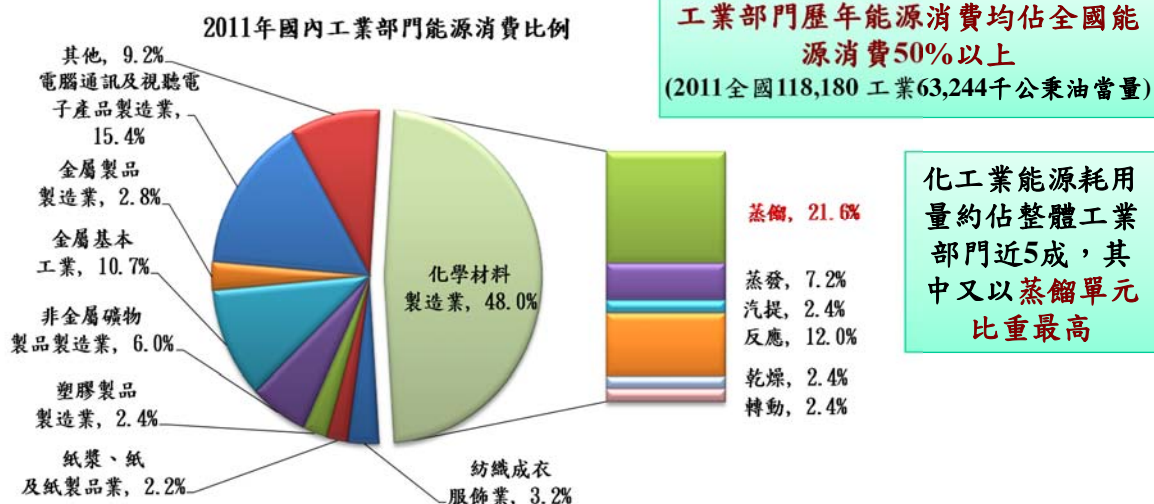
- 變壓蒸餾(Pressure Swing Distillation)





# 蒸餾節能技術

## 台灣工業部門能源消費結構分析



化工製程中九成以上採塔器為主要之分離程序（國內塔器>4,000座）  
微幅分離效率提升即可帶來大幅的節能與生產效益！

參考資料：能源統計月報--伍、能源需要(2012-8-10update);

[http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web\\_book/WebReports.aspx?book=M\\_CH&menu\\_id=142&sub\\_menu\\_id=678](http://web3.moeaboe.gov.tw/ECW/populace/web_book/WebReports.aspx?book=M_CH&menu_id=142&sub_menu_id=678)

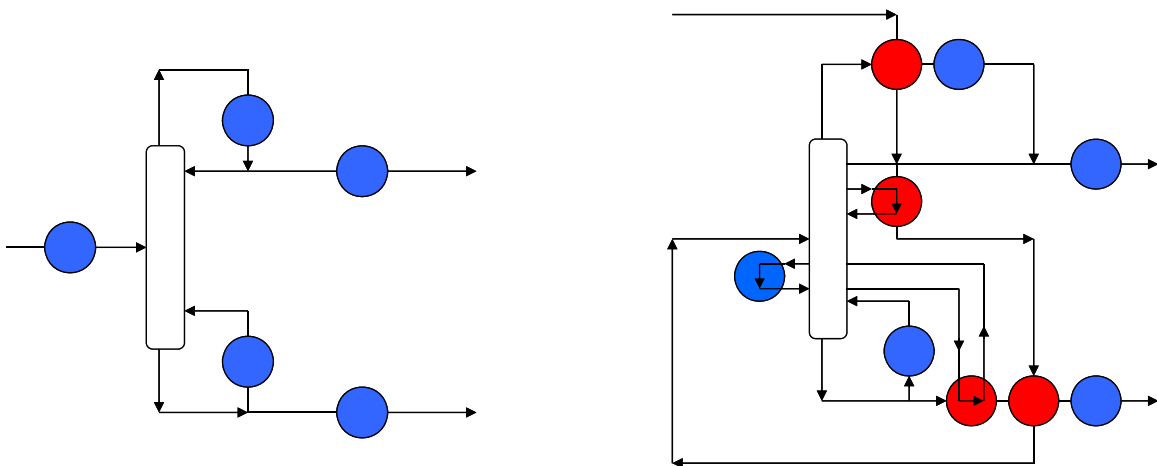
# 節能蒸餾技術

## Approaches:

1. 最佳化蒸餾塔設計與操作參數(理論板數/回流比...)
  2. 蒸餾系統相關單元進行熱整合(增設熱交換器)
  3. 改變操作壓力，突破熱傳限制(heat source → heat sink)
- 蒸餾塔外部熱交換器熱整合
  - 蒸餾塔自身熱整合
    - Thermal coupling (e.g., Petlyuk Column, DWC)
    - Vapor Recompression (e.g., MVR, TVR, Heat Pump, HIDIc)
    - **Multiple Effect Distillation (MED)**
    - **Multiple Effect Evaporation (MEE)**

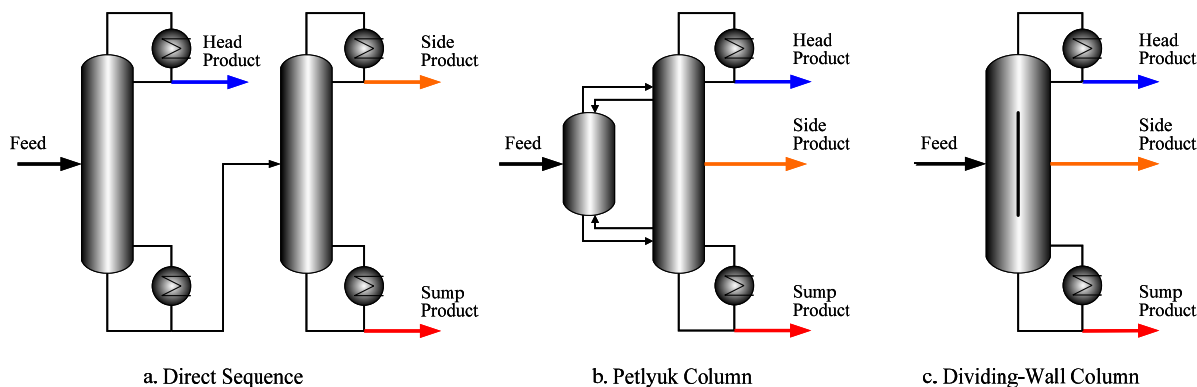
## 節能蒸餾技術：外部熱回收

- 新增熱交換器回收熱能， $\Delta T_{\min} > 5^{\circ}\text{C}$
- 熱能回收，潛熱優於顯熱
- 容易規劃設計，並與鄰近系統整合，但設備成本增加



# 節能蒸餾技術：THERMAL COUPLING

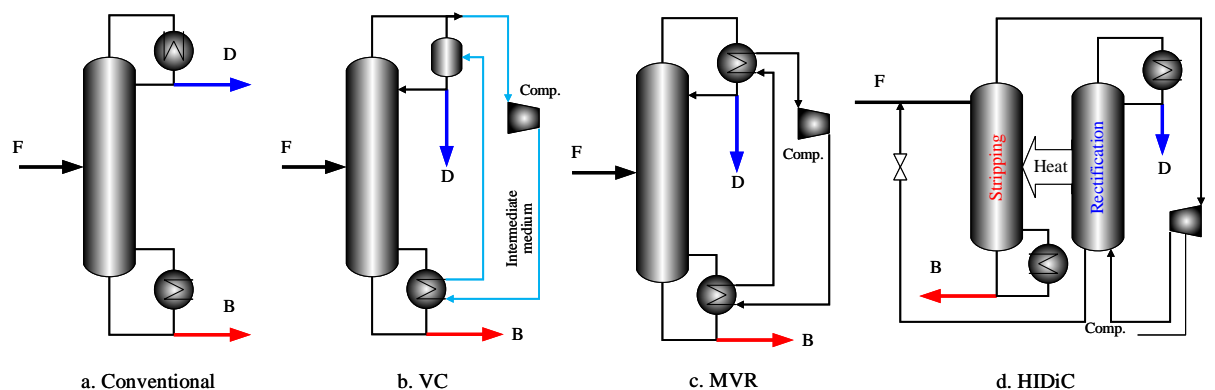
- Setting up two-way vapor/liquid flow between different columns.
- 設備與流程設計、操控精準度要求高



*3 components distillation in a variety of arrangement 1 or 2 towers*

# 節能蒸餾技術：VAPOR RECOMPRESSION

- **Internally Heat-Integrated Distillation column (HIDiC):** Heat pump assisted distillation.
- 節能效益大，機械壓縮機(MVR)成本較高



*Concept of conventional distillation, vapor recompression and HIDiC.*



# 多效蒸餾技術

## Multiple-Effect Distillation (MED)

## 多效蒸餾技術特徵

### • 技術特徵

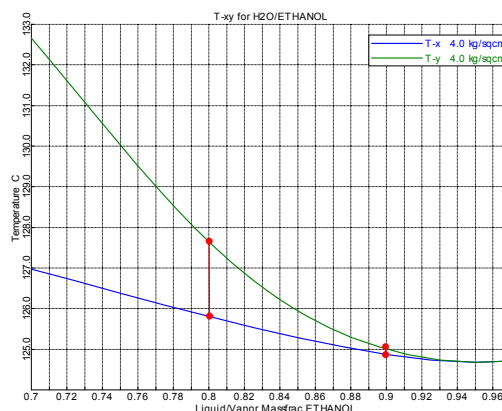
- 藉由操作壓力的改變，使塔頂冷凝過程移作另一塔的塔底加熱使用，該熱交換器同時為冷凝器與再沸器。
- 雙成份單塔→切分成操作壓力不同的雙塔，並聯操作。
- 三成份(或多成份)→調整某一塔壓力，使其塔頂蒸汽溫度大於另一塔的塔底液體溫度後進行熱交換。
- 適合相對揮發度小、分離板數多、回流比高的系統

### • 節能優勢

- 理論節能率，雙效50%，三效33%...

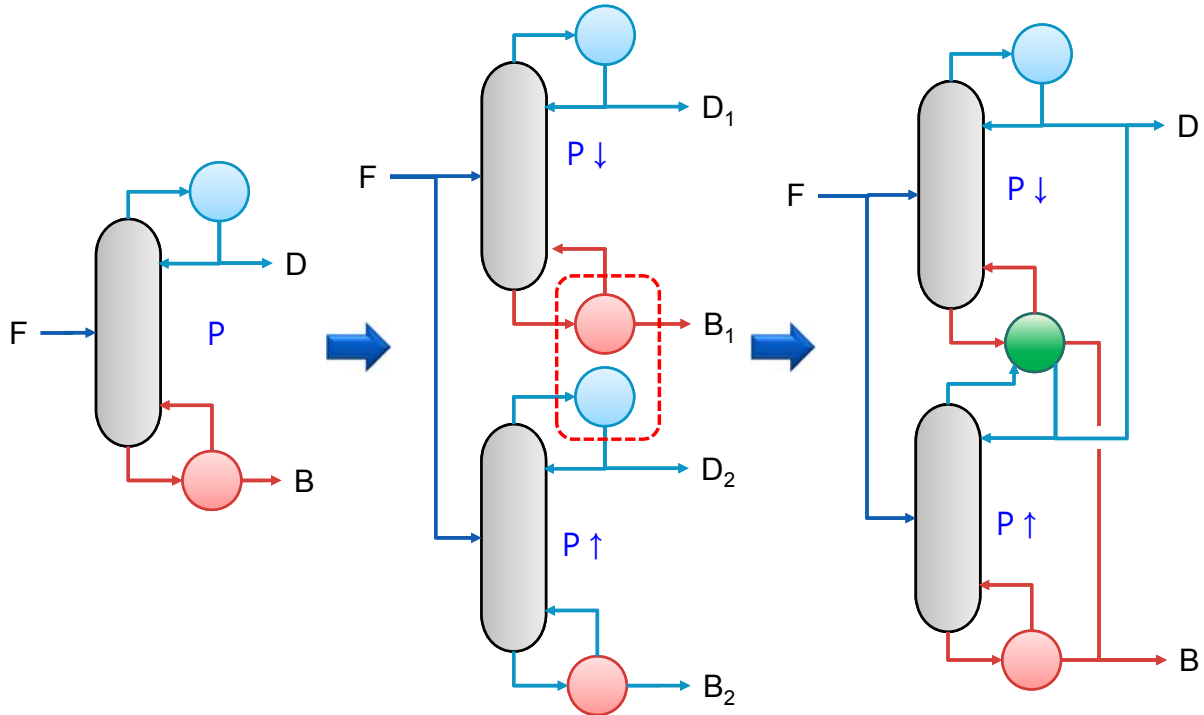
### • 設計要點(溫度壓力)

- 熱交換溫差 $\Delta t_{\min} > 5^{\circ}\text{C}$ (注意泡點與露點)
- 壓力提高後，VLE的變化(相對揮發度)
- 溫度升高對物質的影響與材質腐蝕問題



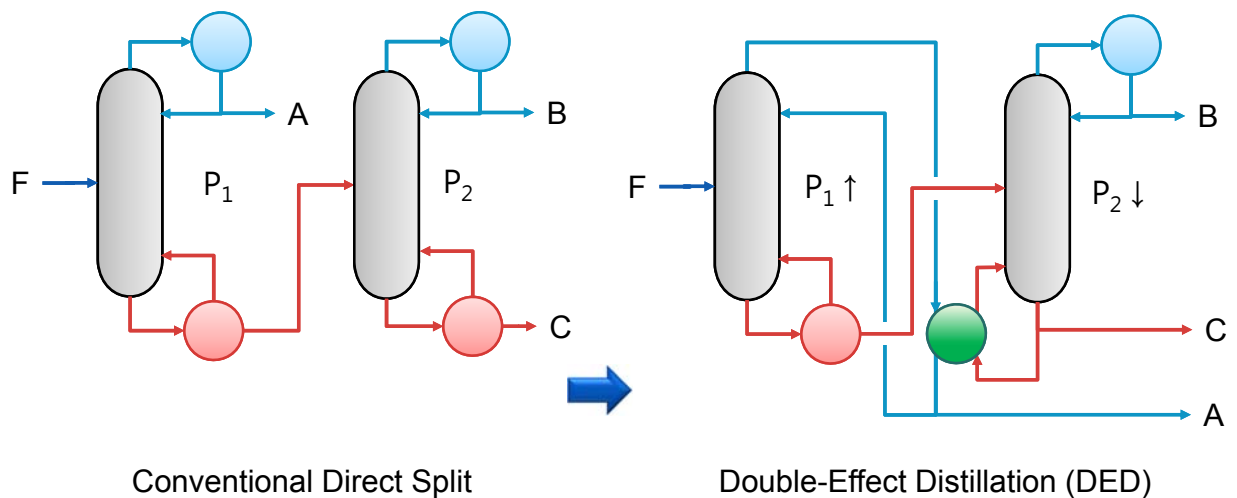
# 多效蒸餾雙成份系統(BINARY SYSTEM)

- 單塔改為操作壓力不同之雙塔並聯操作



# 多效蒸餾三成份系統(TERNARY SYSTEM)

- 兩序列塔之間的熱能整合應用

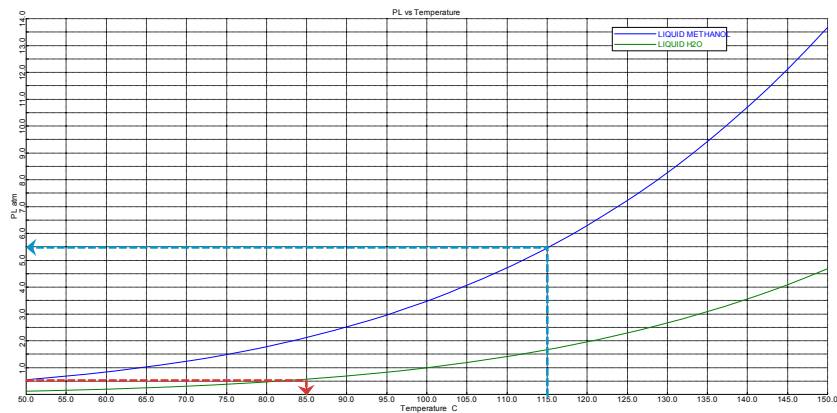
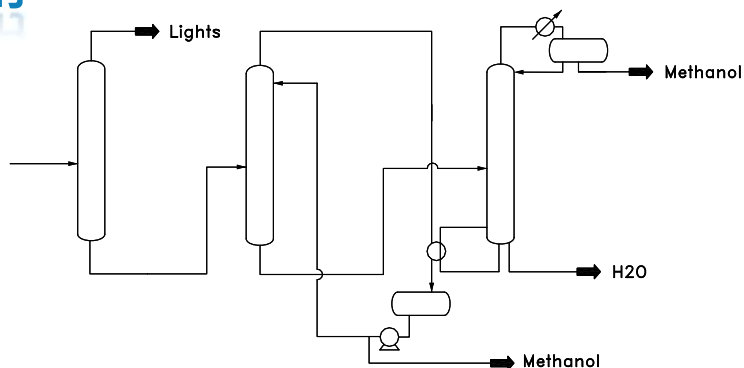




# 多效蒸餾之應用

## • 甲醇/水分離系統

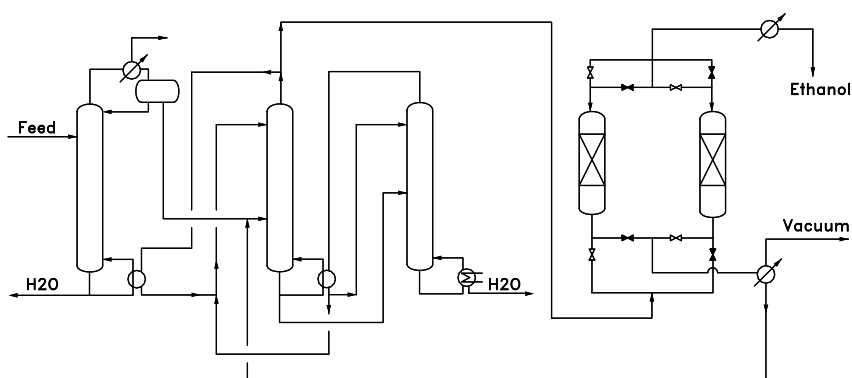
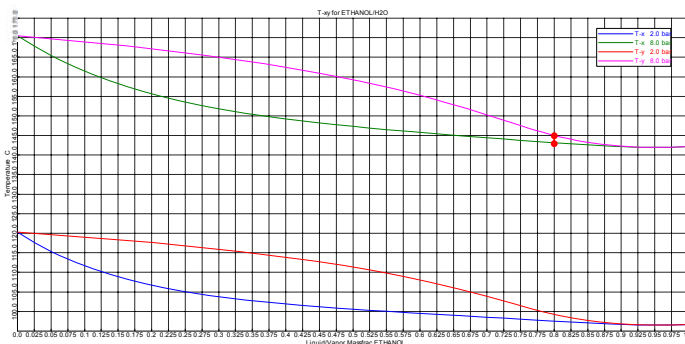
- binary system
- 甲醇潛熱大；
- 水非熱敏性物質



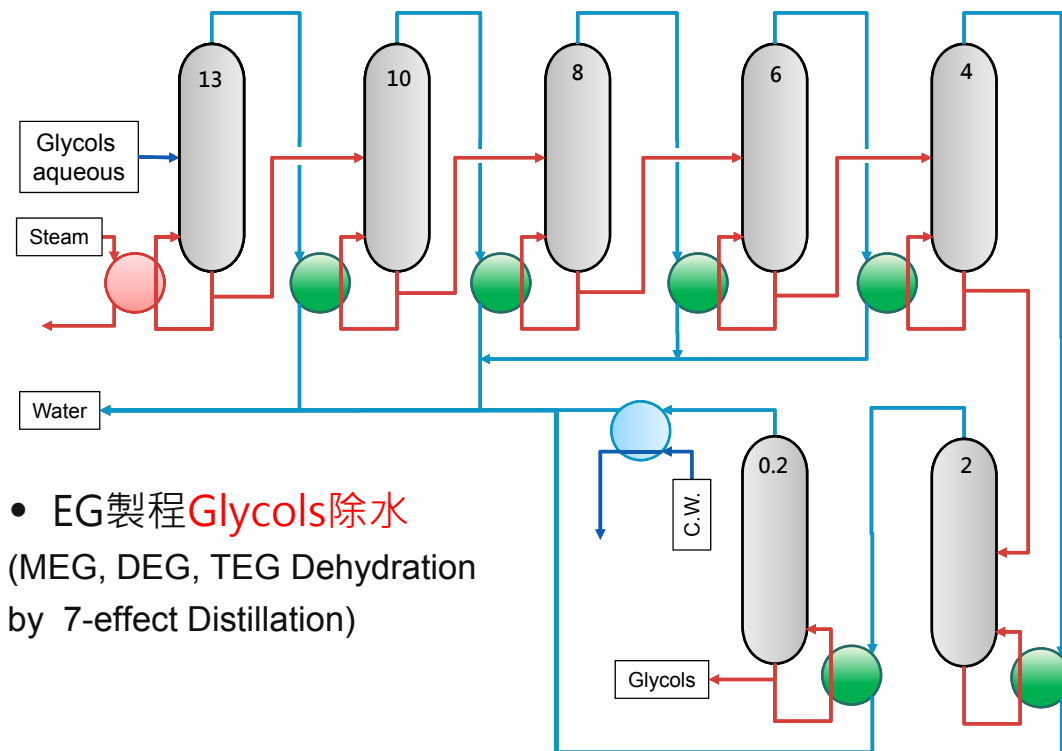
# 多效蒸餾之應用

## • 乙醇/水分離系統

- binary system
- 搭配分子篩除水破共沸
- 水非熱敏性物質



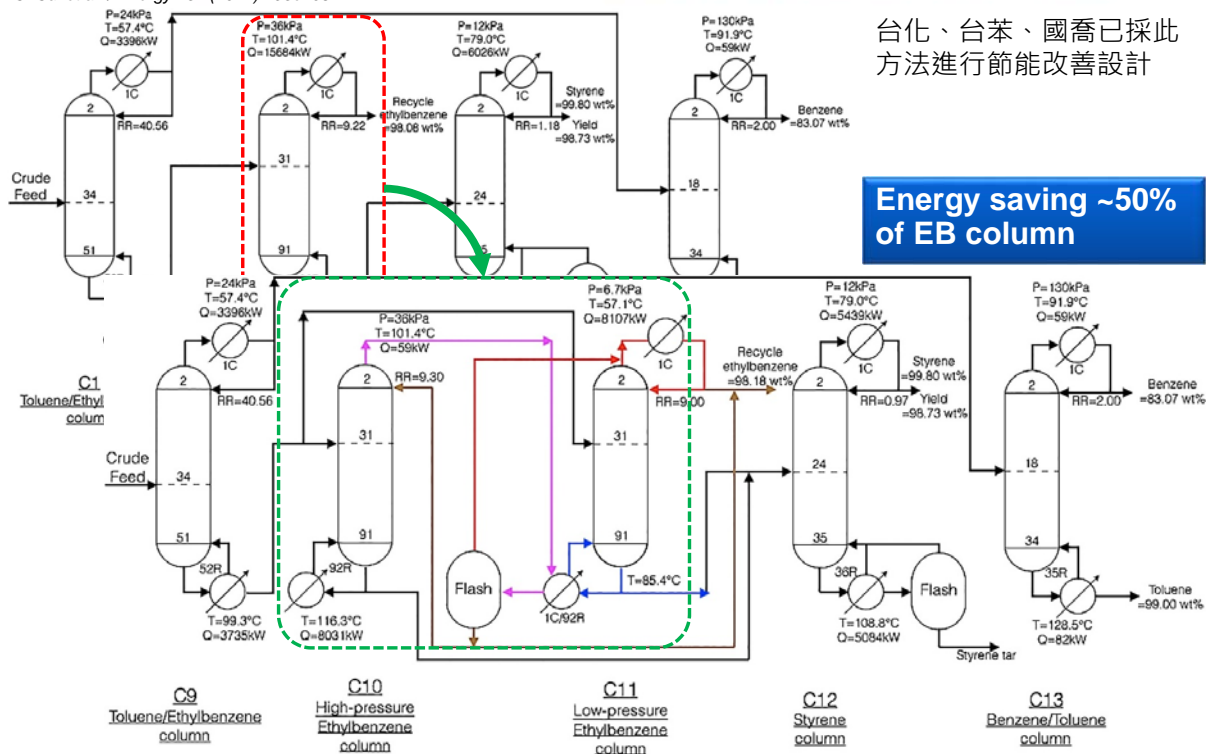
# 多效蒸餾之應用



- EG製程Glycols除水  
(MEG, DEG, TEG Dehydration  
by 7-effect Distillation)

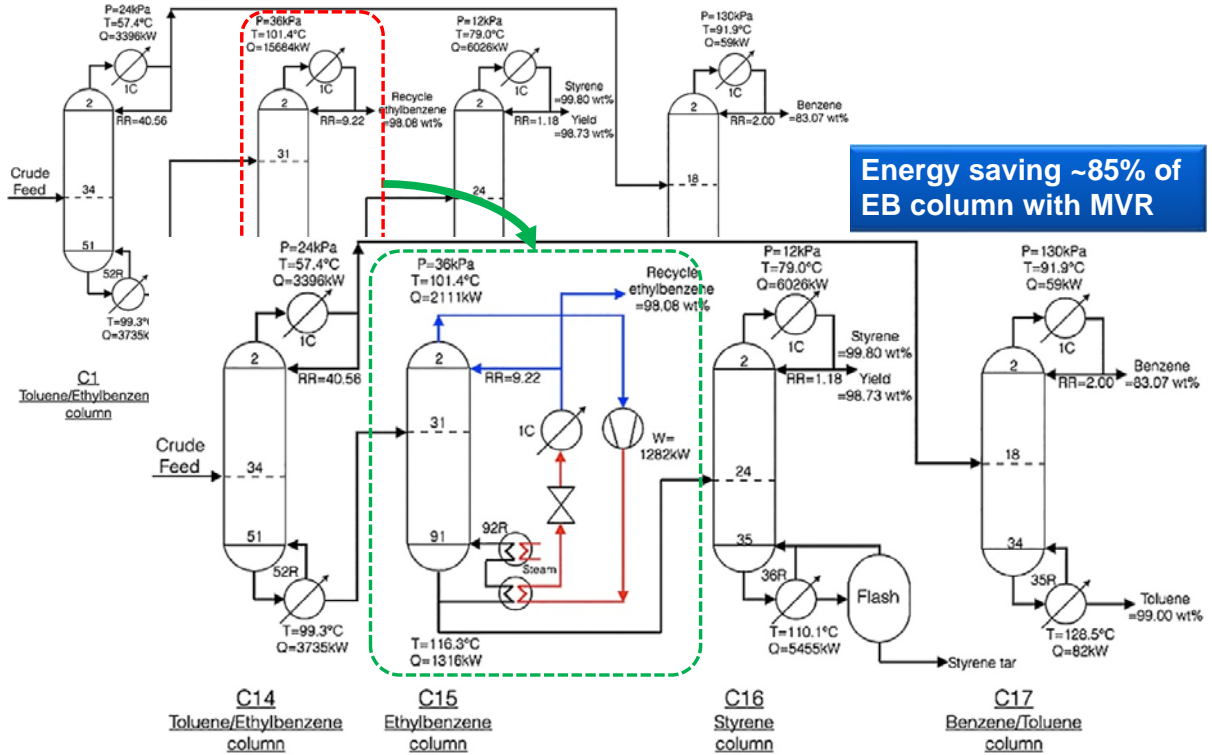
## 節能案例分析：苯乙炔製程乙苯塔多效蒸餾

C. Cui et al. / Energy 134 (2017) 193e205



# 節能案例分析：苯乙烯製程乙苯塔蒸汽再壓縮

C. Cui et al. / Energy 134 (2017) 193e205

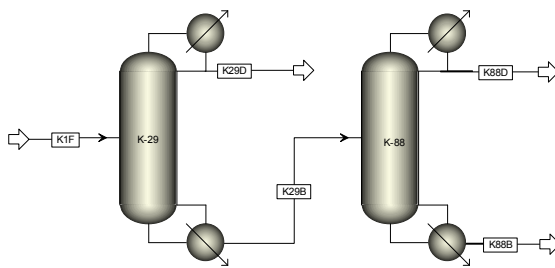


Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

21

## 多效蒸餾設計實例(1)

- 三成份系統
  - Isobutane
  - Trimethyl carbinol
  - DMD (4,4-Dimethyldioxane-1,3)



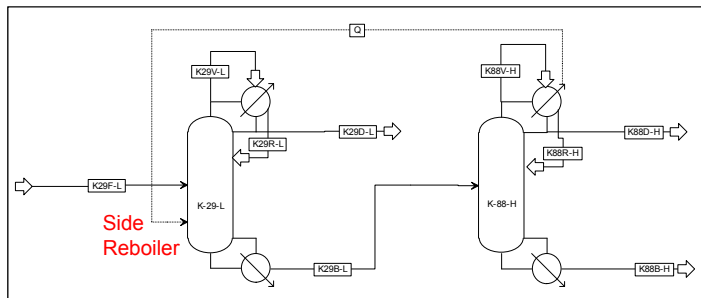
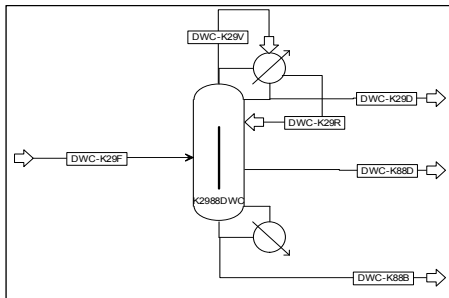
Heat and Material Balance Table						
Stream ID		K1F	K29D	K29B	K88D	K88B
Temperature	C	75.0	41.6	159.5	105.2	179.2
Pressure	bar	5.917	5.426	5.720	2.975	3.269
Vapor Frac		0.162	0.000	0.000	0.000	0.000
Mass Flow	kg/hr	60749.110	22491.186	38257.924	11400.000	26857.924
Volume Flow	cum/hr	635.309	41.913	46.032	15.815	29.911
Enthalpy	Gcal/hr	-27.818	-12.371	-14.703	-12.362	-2.496
Density	kg/cum	95.621	536.619	831.118	720.830	897.931
Mass Frac						
C3		496 PPM	0.001	trace		
ISO-C4A		0.301	0.814	29 PPB	96 PPB	trace
ISO-C4E		0.062	0.167	185 PPB	622 PPB	trace
N-C4E		0.002	0.006	11 PPB	38 PPB	trace
N-C4A		0.003	0.008	134 PPB	448 PPB	trace
13-BD		186 PPM	503 PPM	5 PPB	16 PPB	trace
1PENTENE		62 PPM	84 PPB	98 PPM	331 PPM	trace
FMDHY						
MEOH		0.001	113 PPB	0.002	0.006	3 PPB
DMD		0.355	trace	0.564	0.095	0.763
ISOPRENE		251 PPM	98 PPB	398 PPM	0.001	trace
DMVC		0.004	trace	0.007	0.010	0.005
HC-130		0.002	trace	0.003	681 PPM	0.004
METHYLAL		0.004	109 PPB	0.006	0.019	1 PPB
C6H10O		866 PPM	trace	0.001	7 PPB	0.002
MBDIOL		0.007	trace	0.012	trace	0.016
DMD-HVY		0.077	trace	0.122	trace	0.173
TMC		0.171	trace	0.272	0.827	0.037
MTBE		228 PPM	trace	362 PPM	0.001	11 PPB
WATER		0.008	0.002	0.012	0.040	1 PPB

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

22

# 多效蒸餾設計實例(1)

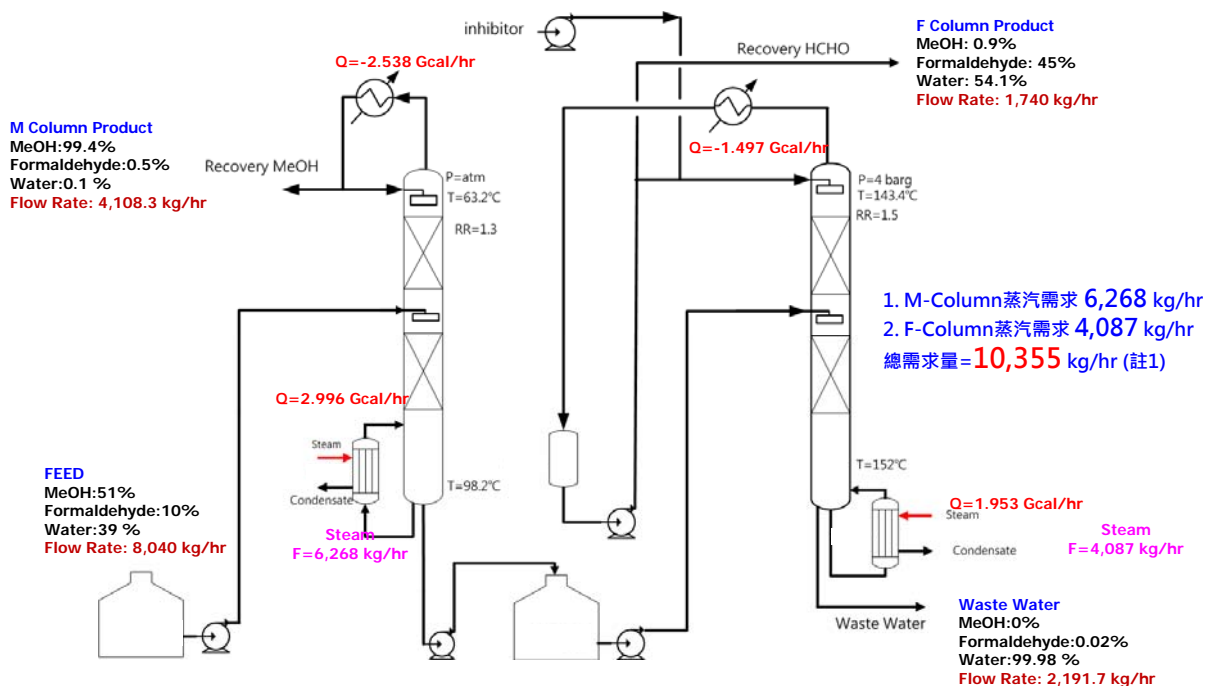
- ① DWC
- ② Multi-Effect：提高K-88塔壓，回收塔頂熱能供K-29 side reboiler使用



Utility Type	K29-K88	K29-K88 DWC	K29-K88 HI
Steam (MP)	7.46	6.50	5.71
MMkcal/hr	(100%)	(87%)	(77%)
C.W.	-6.91	-5.29	-4.63
(MMkcal/hr)	(100%)	(77%)	(67%)

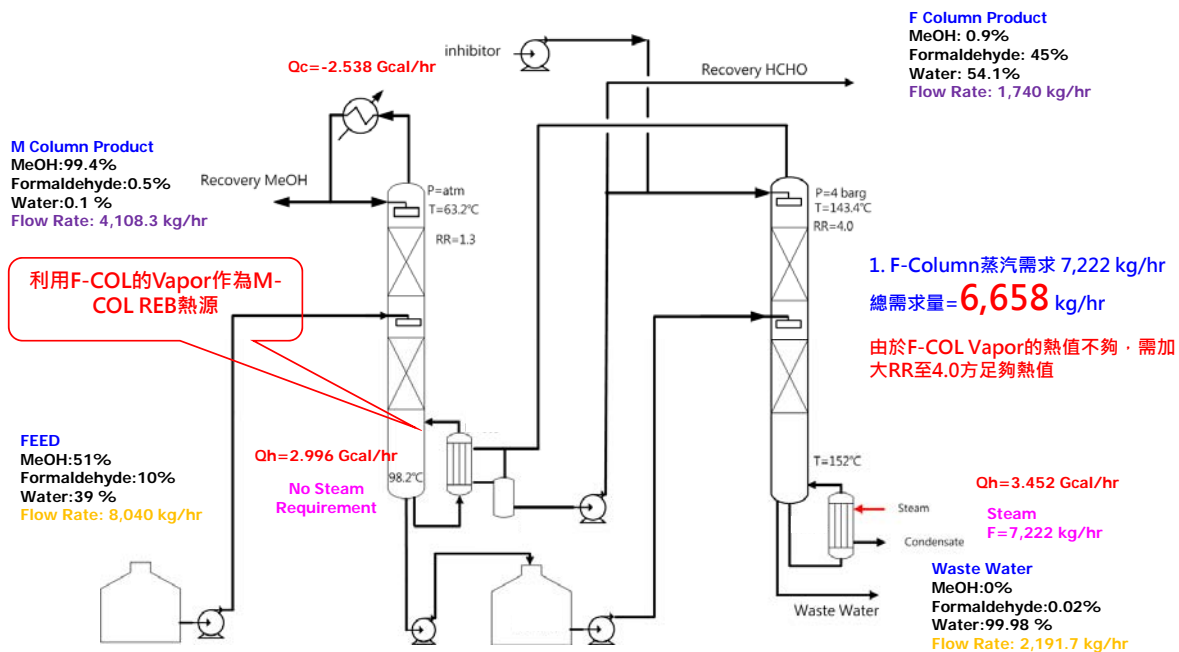
# 多效蒸餾設計實例(2)

- 甲醇/甲醛/水 分離系統傳統雙塔串連蒸餾系統



# 多效蒸餾設計實例(2)

- 甲醇/甲醛/水 分離系統：採用Multiple-Effect Distillation



工業技術研究院  
Industrial Technology  
Research Institute

## 多效蒸發技術 Multiple-Effect Evaporation (MEE)

# 多效蒸發概述

## • 技術原理/設計

- 與MED原理相同，利用不同壓力造成的溫差進型熱回收
- 設計時須有準確的VLE數據、鹽濃度與沸點上升程度、材質腐蝕與結垢等問題

## • 應用場合

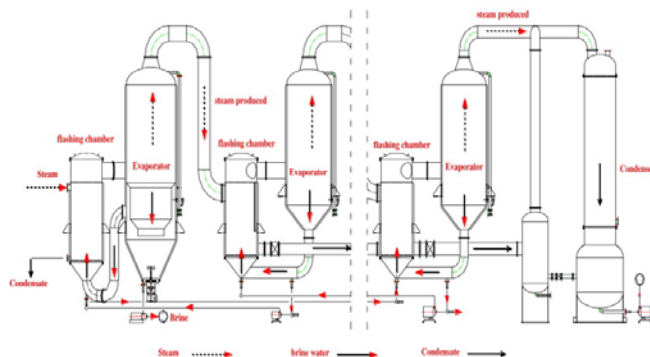
- 以高潛熱物質蒸發為主(水)
- 海水脫鹽淡化/製鹽
- 果汁濃縮
- 液體零排放

## • 流程類型

- 順相多效
- 逆向多效
- 並聯多效(parallel feed)

STEAM CONSUMPTION AND RUNNING COSTS OF EVAPORATORS

Number of effects	Steam consumption (kg steam/kg water evaporated)	Total running cost (relative to a single-effect evaporator)
One	1.1	1
Two	0.57	0.52
Three	0.40	0.37



D. Zhao et al. / Desalination 273 (2011) 292–298

# 多效蒸發設計重點

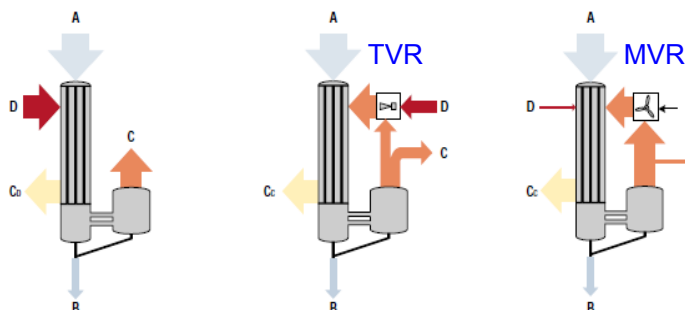
## • 多效或再壓縮或組合式

- 多效：效數
- 再壓縮搭配：蒸汽噴射式(TVR)或機械再壓縮(MVR)

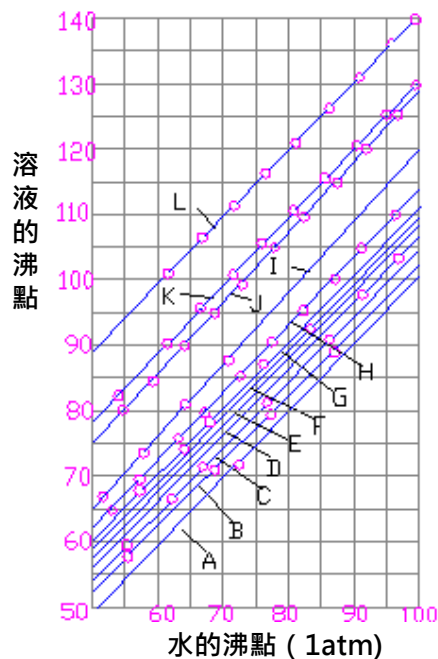
## • 蒸發器的形式選擇：低溫差，不易結垢或易清洗

- 降膜(內降膜、外降膜)、強制循環等
- 設備材料的選擇

## • 實驗量測：沸點上升、pH、黏度、結晶型態等



# 沸點上升是蒸發設計操作之關鍵



壓縮比=提昇後壓力/提昇前壓力  
經過壓縮機的溫度提昇要求：

$$Tr = Te + Tb$$

Te: 蒸發器的溫差

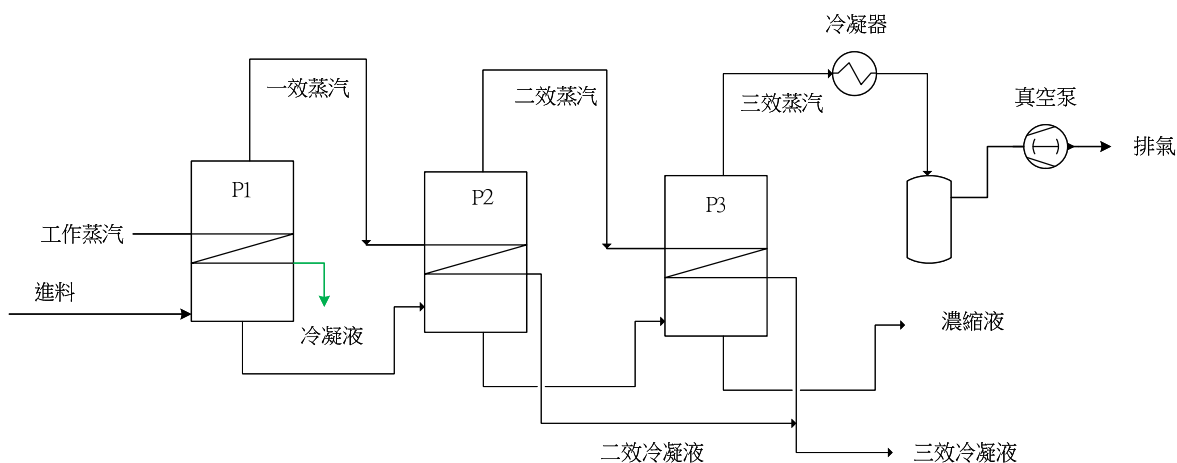
Tb: 沸點上升溫度(相對於水蒸汽)

	%质量
A---H <sub>2</sub> O	0
B---NaCl	13.79
C---CaCl <sub>2</sub>	20.58
D---NaCl	24.24
E---NaNO <sub>3</sub>	47.67
F---K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	46.2
G---MgCl <sub>2</sub>	37.96
H---H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	41.0
I---LiNO <sub>3</sub>	46.1
J---H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	54.23
K---CaCl <sub>2</sub>	50.25
L---NaOH	47.55

嚴謹的方式是進行實驗量測

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

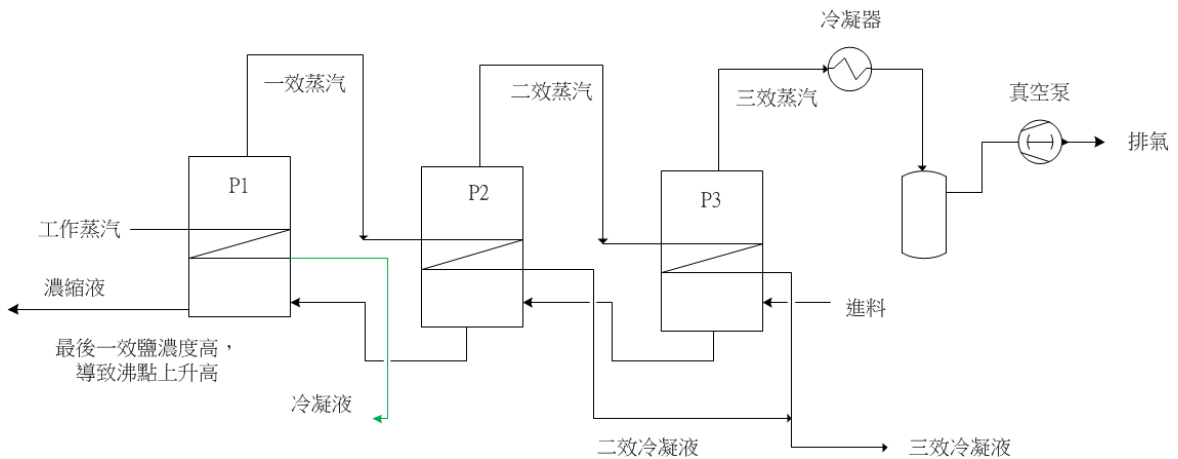
## 多效蒸發流程類型(1)順向



- 順向為進料進入第一效，通常用於稀薄溶液濃縮。
- 每一效操作壓力不同，第一效最高。除第一效外，一般蒸發器溫差設在 10~15°C 間。
- 理論上只需要提供第一效的蒸發能源。

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

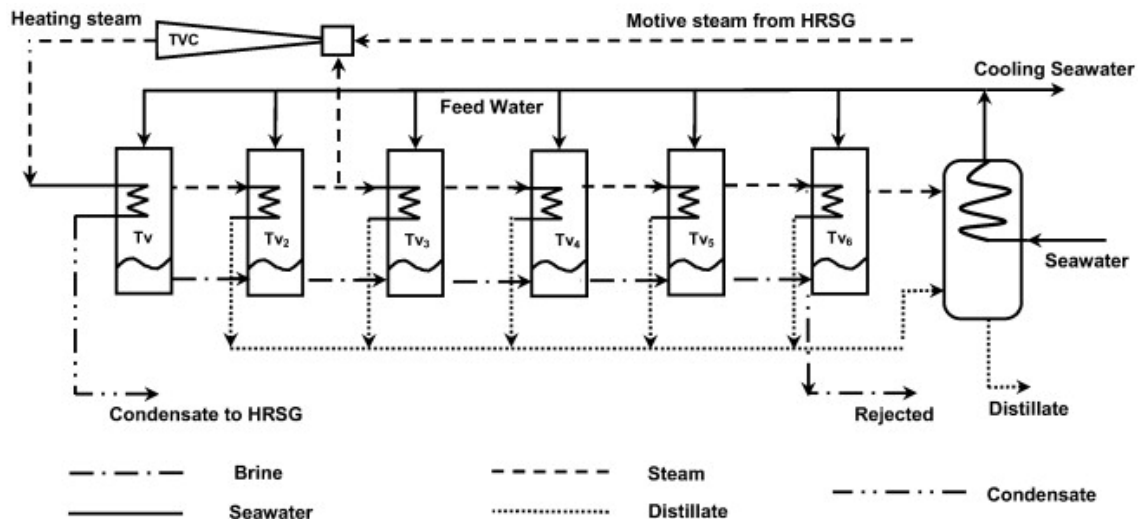
## 多效蒸發流程類型(2)逆向



- 逆向為進料進入最後一效，通常用於高濃度溶液濃縮。
- 由於鹽濃度較高，設備採用材質要特別留意。

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

## 多效蒸發流程類型(3)並聯進料



M.T. Mazini et al. / Desalination 353 (2014) 98–108

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

32



# 多效蒸發之節能整合

- 3EE + MVR + TVR(or TVC) + feed preheating

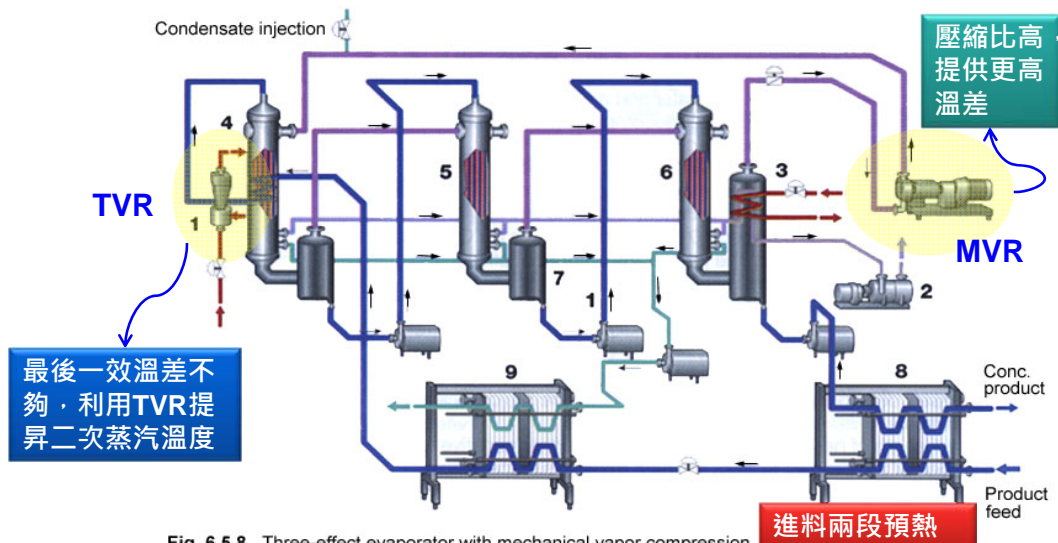
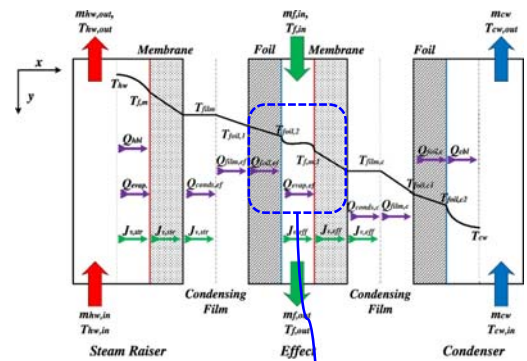
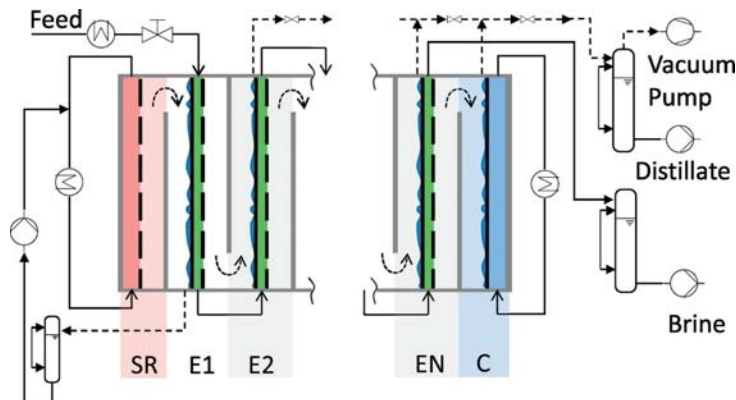


Fig. 6.5.8 Three-effect evaporator with mechanical vapor compression.

- |                  |                               |                   |
|------------------|-------------------------------|-------------------|
| — Product        | 1 Thermocompressor            | 6 3rd effect      |
| — Vapor          | 2 Vacuum pump                 | 7 Vapor separator |
| — Condensate     | 3 Mechanical vapor compressor | 8 Product heater  |
| — Heating medium | 4 1st effect                  | 9 Plate condenser |
|                  | 5 2nd effect                  |                   |

## 多效「膜蒸餾」

- Multi-Effect Vacuum Membrane Distillation (MEVMD)
- 相同於多效蒸發的原理，利用不同壓力階層，以自身流體蒸氣逐層往低壓加熱。
- 在MD的優勢基礎下，更進一步節省能耗

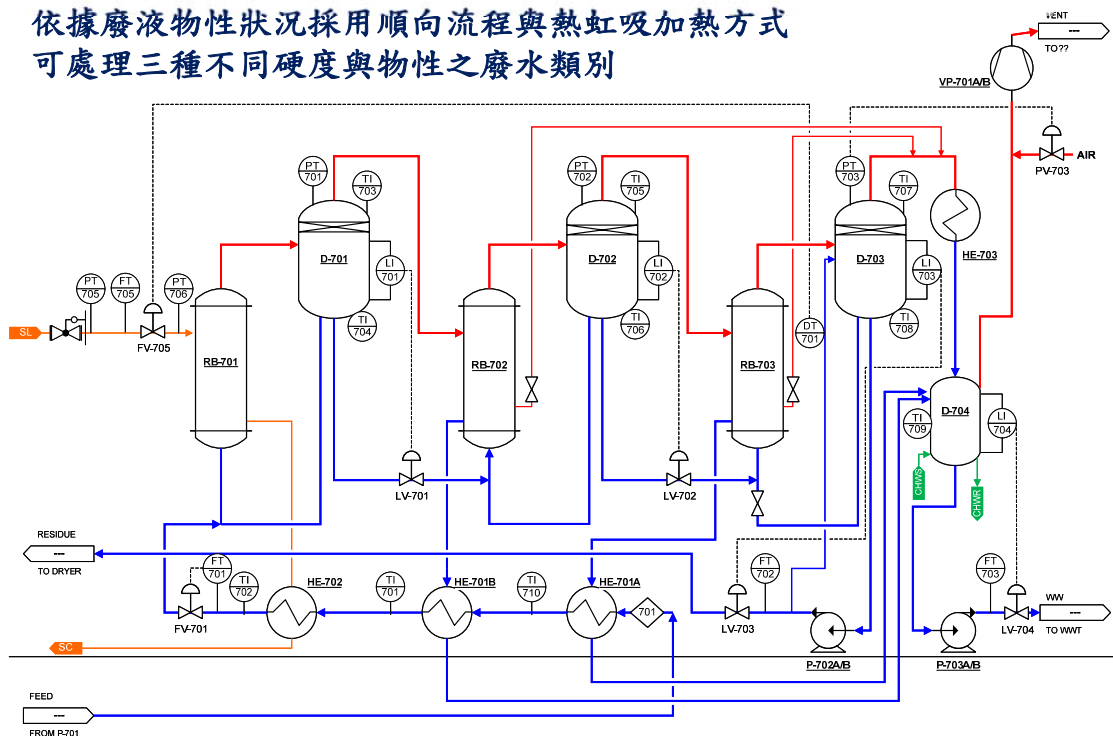


P. Boutikos et al. Desalination 422 (2017) 25–41

F. Kiefer et al. Desalination 438 (2018) 97–111

# 多效蒸發設計實例—高鹽廢水零排放

依據廢液物性狀況採用順向流程與熱虹吸加熱方式  
可處理三種不同硬度與物性之廢水類別



Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

## 多效蒸發設計實例—高鹽廢水零排放

### • 3-EE vs. MRV之簡易經濟性分析

	多效蒸發+加熱乾燥	多效蒸發+加熱乾燥(無廢熱蒸汽)	MVR+離心乾燥
進料量, kg/h	1,000	1,000	1,000
濃縮後返液量, kg/h	0	0	240
固含量, %	6	6	6
處理後固體廢棄物·含水率, %	20	20	50
濃縮段			
蒸汽, Kg/h	0	342	24
電力, kw	5	5	83
冷卻水, ton	20	20	0
操作費用小計, NTD/h	56	523	269
乾燥段			
蒸汽, Kg/h	288	288	0
電力, kw	5	5	14
冷卻水, ton	21	21	0
操作費用小計, NTD/h	452	452	41
委外處理			
固體廢棄物量, Kg	75	75	120
委外費用小計, NTD/h	675	675	1,080
設備成本			
投資額, NTD	17,000,000	17,000,000	35,000,000
折舊年限, Y	15	15	15
維護費/設備投資%	5	5	5
設備運轉費用小計, NTD/h	248	248	510
人力成本			
工時率, NTD/h	150	150	150
總計系統操作費用, NTD/h	1,581	2,048	2,050
年操作費用, NTD/Y	12,646,597	16,383,973	16,396,261
單廢水處理成本, NTD/kg	1.6	2.0	2.0
廢液全委外處理費用, NTD/Y	72,000,000	72,000,000	72,000,000
投資效益, NTD/Y	59,353,403	55,616,027	55,603,739
pay back, Month	3.4	3.7	7.6

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

# 多效蒸餾/蒸發技術—討論與建議

- 雖屬成熟技術，但確實掌握物系之**物性**與**熱力學特性**等基礎數據為設計操作成功的重要關鍵，故實驗測試是必要的。
- 蒸發器(殼管式)，一般有「垂直/水平降膜」、「虹吸式」、強制循環等形式，需依實際狀況需求選擇。
- 系統熱整合度高，節能效率高，但是除了投資增加外，**操控困難度也會提高**。
- 若是MEE處理量的系統，可再進一步與**ORC**或**吸收式冷凍機**結合，以便回收MEE排出較低階的熱能。
- MVR節能效率遠高於MEE或TVR，但投資與維護成本亦較高，選用時須經過詳細的**經濟分析**。
- 工研院可提供完整製程評估、工程設計與操控等技術服務



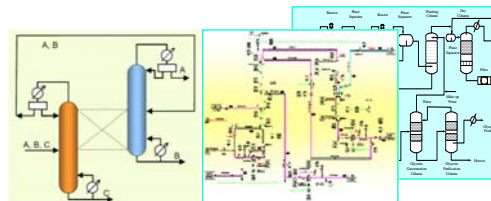
## 工研院相關技術能量簡介

材化所-化工技術組-先導製程與應用研究室

# 重點技術與核心設施

## 製程&流場模擬設計

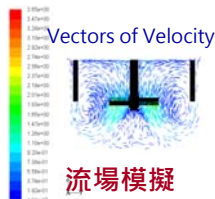
- ✓ 化工製程模擬 Aspen Plus® & ChemCAD ; 熱交換器設計 Aspen TASC+TM ; 製程經濟評估 Aspen Process Economic Analyzer (APEA)
- ✓ 流場 Computational fluid dynamics (CFD) 模擬
- ✓ 製程整合與基本設計



製程模擬&基本設計

## 製程節能技術

- ✓ 真空系統：蒸氣/有機蒸汽噴射真空、多段式/可調式噴嘴噴射真空
- ✓ 製程單元：反應器、塔器、蒸發、熱交換節能診斷與熱整合



流場模擬



高階蒸餾系統

## 高效能塔器技術

- ✓ 內件設計：結構填充物/塔盤/液體分佈器等質傳元件
- ✓ 高階蒸餾：共沸/萃取/壓敏/反應蒸餾、分子蒸餾、隔板蒸餾

## 放大工程技術

- ✓ 特定產品製程放大驗證或試量產
- ✓ Pilot驗證設施：各式反應與分離單元



高粘薄膜反應器



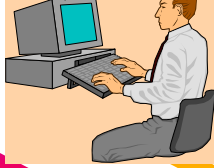
高黏脫揮系統

# 工業分離製程技術能量深度

批次、連續式蒸餾測試



蒸餾塔模擬設計技術



蒸餾塔去瓶頸研究/改善工程



商業化蒸餾工廠設計/責任試車



國內外  
200座以上蒸餾塔  
設計工業案例

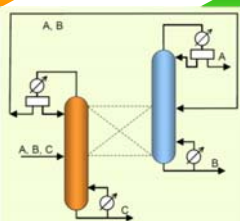
- ◎ 石化產品分離純化
- ◎ 醫特化中間體純化
- ◎ 電子化學品純化
- ◎ 溶劑回收、純化
- ◎ 國內蒸餾人才培訓



相平衡VLE、LLE實驗



Pilot plant 批次、連續式蒸餾試驗



特殊蒸餾技術：  
• 共沸萃取反應敏壓蒸餾  
• 高純度電子化學品蒸餾



蒸餾塔內件設計與製造：

- 高效率結構填充物
- 噴射塔盤
- 液體分佈器

百餘次產業  
服務案例



團隊榮獲第四屆工業基礎技術深耕獎



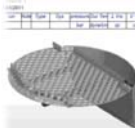
# 工業分離製程技術發展與實績

提供可靠、精準之分離製程設計與診斷改善技術服務



## 重點工業分離基礎技術：

- 製程強化技術：DWC
- 質傳效率模型建立



FRI-Databank



## Intelligent Inside



基礎技術、設施/軟體

工程經驗/資料庫

技術&經驗模型化

## 特化廠・藥廠(百~千噸級)

- 批次或小型連續式蒸餾系統
- 高分子、樹脂工作溶劑回收
- 代工廠電子級溶劑回收純化

(數十家次，百餘座蒸餾塔設計案例，工程設計精度 $\pm 20\%$ )

信賴度、可靠度100%

設計精度 $\pm 10\%$

操控精度 $\pm 5\%$

## 石化廠(萬~數十萬噸級)

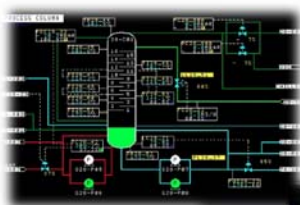
- 連續式多塔串連
- 擴產去瓶頸 (李長榮/信昌/遠東新...)
- 新廠設計建造(台聚/亞聚)

## 科技廠(超高純度)：

- 含水 $< 100\text{ppm}$ ，金屬離子 $< 100\text{ppt}$
- 循環再利用環保減排(達邁/台虹)

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院

# 工業分離技術持續深耕與應用



分離塔動態  
效率模型建立



蒸餾工廠智能  
導航操作技術

先進DWC隔板節  
能蒸餾技術

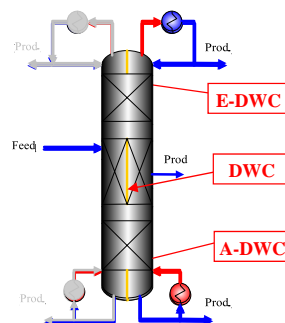
Process  
Design

Separation  
Core-Tech.

Intelligent  
Operation

Efficient  
Equipment

應用場域



單塔具備雙塔功能

- 三成份分離
- 共沸蒸餾
- 萃取蒸餾

▶ 石化、特化產品純化或廢液回收  
分離製程最佳化操控

▶ 製造業環保處理系統”洗滌塔”

▶ 精細純化製程：電子級化學品  
純化

▶ 石化、特化高耗能產品純化

綠色製程、環保零排

Copyright 2018 ITRI 工業技術研究院



工業技術研究院  
Industrial Technology  
Research Institute

***THANK YOU !***

何 宗 仁  
stand\_ho@itri.org.tw  
03-5732427