

高科技廠房耗能分析 軟體開發

Development of a High Tech. Fab Energy
Simulation software

主講人：胡石政 教授
林迪 博士

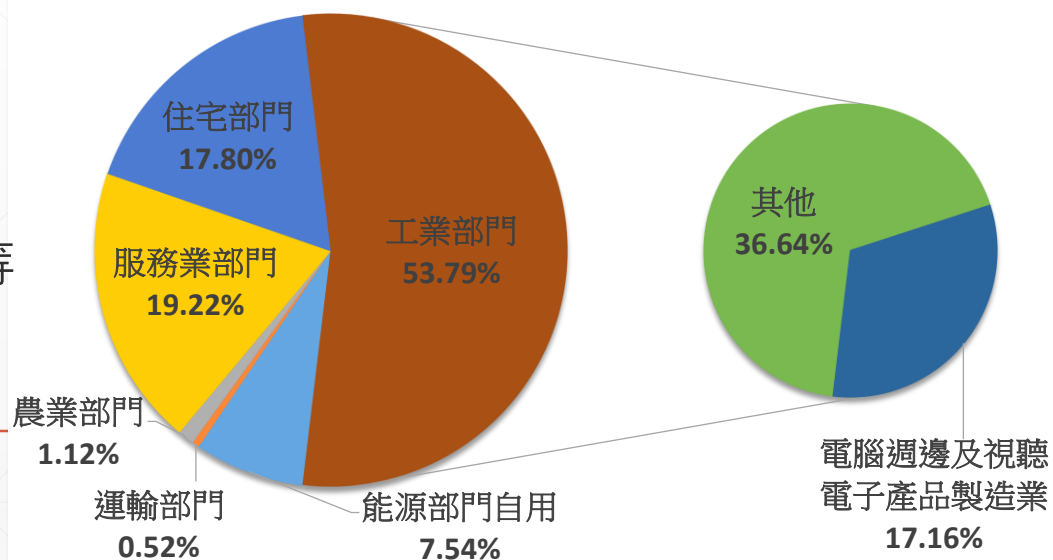
大綱

- 緒論
- 數學方法
- 案例介紹
- 結果與討論
- 軟體介紹
- 結論

緣起

- 能源局為配合經濟部「全民節電行動」,訂定產業能源大用戶節電目標,未來5年平均每年節電率為1%,節電率未達目標者,應提出報告及改善計畫予經濟部核備並執行(能源局官網www.moeaboe.gov.tw 發布日期:2014-06-19)。電腦周邊及視聽電子產品製造業(即所謂高科技產業)為高耗能產業,能源局統計資料顯示,2013年全國電力消費為2,452億度,電腦周邊及視聽電子產品製造業電力消費為421億度,佔全國的17.16%。高科技廠房(high tech fabrication plant, 簡稱 Fab) 未來勢必會被納入能源大用戶,期達節電目標。
- 一般建築耗能分析軟體,其所處理之空調系統為外氣與回風混合再經由空調箱處理之集中式空調系統,難處理需要大量外氣引入之Fab空調架構,亦沒有包含如,製程冷卻水系統、壓縮乾空氣系統、氮氣系統、真空系統、純水系統以及排氣系統等之廠務系統用電。

2013年電力消費(部門別)



緣起

- 台北科技大學潔淨技術研發中心在經濟部技術處及科技部支持下開發Fab專用之耗能模擬軟體(Fab Energy Simulation, FES)作為Fab 節能案設計及評估用。FES具以下之用途及特點:
- 用途:
 - 可使廠務工程師及ESCO廠商快速建立整廠及各廠務系統之逐月及全年之耗能資料，作為節能成效之計算基準(Baseline)。
 - 可使設備工程師了解各機台使用UTILITY之耗能狀況,並從而推估生產成本及建立各機台節能之依據
 - 可作為生產相同(或相似)產品各廠間相互比較系統耗能狀況之依據及作為未來建廠系統設計的依據。
 - 具有匯入及匯出功能，可以匯入外氣資料、廠務機台、水泵等各項參數資料，匯出功能則包含計算結果、圖表及MAU各元件出口空氣狀態表，另外也可用以分析與評估多種節能設計之成效。
 - 使用者可自行排列MAU內元件與選擇各元件的出口控制方式，更為符合實際情況。

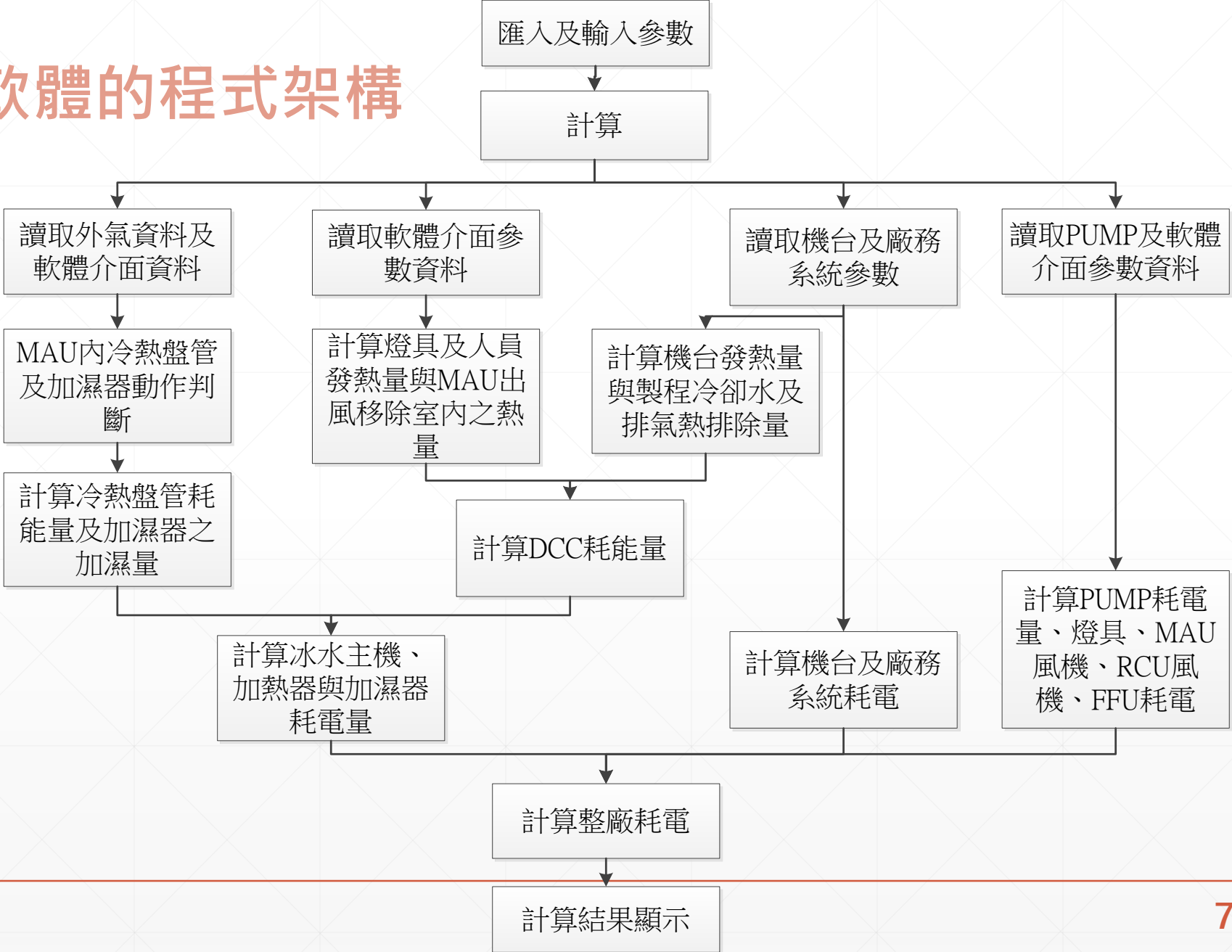
緒論-研究背景及動機

- 半導體廠的能源消耗直接影響其製造成本也間接造成環境的污染，從1996年開始SEMATECH聯盟的會員公司與設備供應商已執行許多節能專案與調查。
- 過去半導體廠的**廠務設備**消耗一直被忽視，因為其費用在生產晶圓的總成本中所佔的比例很低，但正因如此廠務設備成為節能改善工作最大的障礙。
- 高科技廠房(high tech fabrication plant, 簡稱 Fab)之空調系統配置強調穩定，有別於一般商用空調系統之變風量或變水量設計，往往需要大量外氣的引入，能源消耗有別於一般商用空調系統。
- eQUEST與DOE II等一般綠建築推行之建築耗能分析軟體，其所能處理之空調系統為外氣與回風混合再經由空調箱處理之集中式空調系統，不能處理需要大量外氣引入之高科技廠房空調架構。

緒論-研究背景及動機

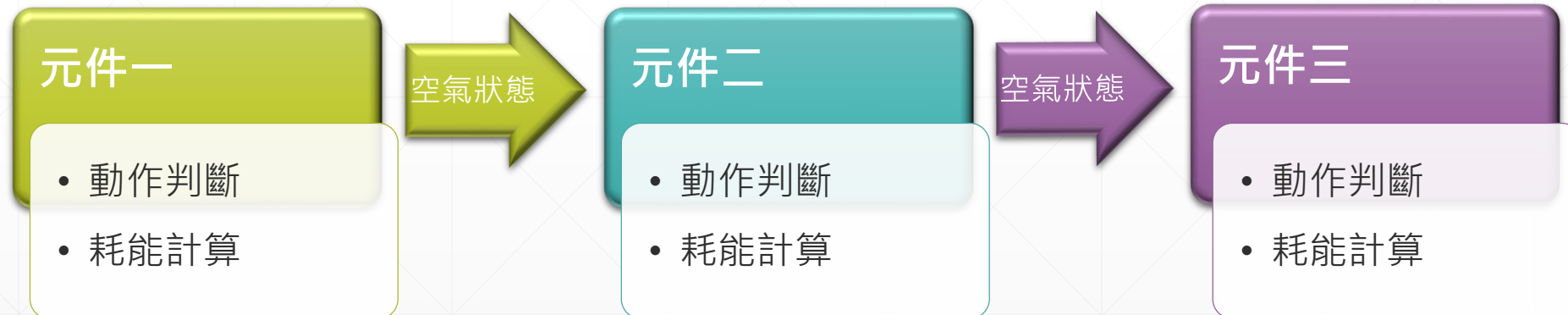
- 為了探討各種空調系統電能消耗情況，研發一具中文介面的開放式Fab耗能分析軟體。
- 具有匯入及匯出功能，可以匯入外氣資料、廠務機台、水泵等各項參數資料，匯出功能則包含計算結果、圖表及MAU各元件出口空氣狀態表，另外也可用以初步分析與評估多種節能設計
- 本文將先針對軟體的程式架構及計算方法作描述，然後對一典型8吋半導體之節能案例作說明。

數學方法-軟體的程式架構



數學方法-各設備耗能計算及說明

- 空調設備-外氣空調箱(Make-up Air Unit, MAU)
- 因各廠MAU內元件排列方式不同，所以本軟體可選擇元件排列方式，每個元件之耗能會依實際的元件入出口狀態來做計算，也就是當此元件前面有元件時，會將上一個元件的出口狀態作為此元件的入口狀態；若此元件前面並無其他元件時，則是以外氣做為此元件的入口狀態。



數學方法-各設備耗能計算及說明

- 空調設備-乾盤管(Dry Cooling Coil, DCC)
- 乾盤管冷卻量計算為將潔淨室內部之熱量平衡式做計算，先分別計算出室內的熱得量及熱移除量，熱得量包含機台、燈具和人員之發熱量；熱移除量則包含製程冷卻水(PCW)、製程排氣、乾盤管(DCC)和MAU送風移除之熱量。

- 室內發熱及熱移除量

- 機台

$$q_{tool} = W_{tool}$$

- 製程冷卻水(Process Cooling Water, PCW)

$$q_{pcw} = \dot{m}_{pcw} \times C_{P,w} \times \Delta T_{pcw}$$

W_{tool} ：機台耗電量，kW

q_{tool} ：機台發熱量，kW

q_{pcw} ：製程冷卻水移除熱量，kW

\dot{m}_{pcw} ：製程冷卻水質量流率，kg/s

$C_{P,w}$ ：水的比熱，kJ/kg-°C

ΔT_{pcw} ：製程冷卻水溫差，°C

數學方法-各設備耗能計算及說明

- 人員

$$q_{people} = \dot{q}_{unit} \times \text{人員數}$$

q_{people} : 人員發熱量, kW

\dot{q}_{unit} : 單位人員發熱量, kW/人

- MAU送風

$$q_{MAU} = \frac{\dot{Q}_{MAU}}{v_{air}} \times (h_{room} - h_{MAU})$$

- 熱量平衡方程式

$$\sum q_{heat\ gain} = \sum q_{heat\ removal}$$

$$q_{light} + q_{FFU} + q_{people} + q_{tool} = q_{exh} + q_{pcw} + q_{MAU} + q_{DCC}$$

q_{MAU} : 外氣空調箱送風移除熱量, kW

\dot{Q}_{MAU} : 外氣空調箱風量, m³/s

v_{air} : 空氣比容, m³/kg

h_{room} : 室內空氣焓值, kJ/kg

h_{MAU} : 外氣空調箱送風焓值, kJ/kg

$q_{heat\ gain}$: 室內熱獲得, kW

$q_{heat\ removal}$: 室內熱移除, kW

q_{light} : 燈具發熱量, kW

q_{FFU} : FFU 發熱量, kW

q_{people} : 人員發熱量, kW

q_{tool} : 機台發熱量, kW

q_{EA} : 排氣熱移除量, kW

q_{pcw} : 製程冷卻水熱移除量, kW

q_{DCC} : 乾盤管熱移除量, kW

q_{MAU} : 外氣空調箱送風移除熱量, kW

數學方法-各設備耗能計算及說明

- 乾盤管之冷卻量

$$q_{DCC} = q_{light} + q_{FFU} + q_{people} + q_{tool} - q_{EA} - q_{pcw} - q_{MAU}$$

- 空調設備-冰水主機(Chiller)

$$W_{chiller} = \frac{\sum q_{cooling\ load}}{COP}$$

$$W_{chiller} = \frac{q_{pre-cooling} + q_{cooling} + q_{DCC} + q_{other\ cooling\ load}}{COP}$$

q_{light} : 燈具發熱量, kW

q_{FFU} : FFU 發熱量, kW

q_{people} : 人員發熱量, kW

q_{tool} : 機台發熱量, kW

q_{EA} : 排氣熱移除量, kW

q_{pcw} : 製程冷卻水熱移除量, kW

q_{DCC} : 乾盤管熱移除量, kW

q_{MAU} : 外氣空調箱送風移除熱量, kW

$W_{chiller}$: 冰機耗電量, kW

$q_{cooling\ load}$: 冷卻負載, kW

COP : 冰機係數

$q_{pre-cooling}$: 預冷盤管冷卻負載, kW

$q_{cooling}$: 冷卻盤管冷卻負載, kW

q_{DCC} : 乾盤管冷卻負載, kW

$q_{other\ cooling\ load}$: 其他冷卻負載, kW

數學方法-各設備耗能計算及說明

- 機台耗電量

$$W_{tool} = W_{operate} \times t_{operate} + W_{standby} \times t_{standby}$$

- 排氣耗電量

$$W_{EA} = (\dot{Q}_{EA,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{EA,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

- 製程冷卻水系統耗電量

$$W_{PCW} = (\dot{Q}_{PCW,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{PCW,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

- 氮氣系統耗電

$$W_{N_2} = (\dot{Q}_{N_2,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{N_2,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

W_{tool} : 機台耗電量, kW

$W_{operate}$: 運轉時機台耗電量, kW

$t_{operate}$: 運轉時間比, %

$W_{standby}$: 待機時機台耗電量, kW

$t_{standby}$: 待機時間比, %

$W_{exhaust}$: 排氣系統耗電量, kW

$\dot{Q}_{exhaust}$: 排氣量, CMH

ECF : 能源轉換係數, kW/CMH

W_{PCW} : 製程冷卻水系統耗電量, kW

$\dot{Q}_{PCW,operate}$: 運轉時製程冷卻水系統流量, m³/h

$\dot{Q}_{PCW,standby}$: 待機時製程冷卻水系統流量, m³/h

W_{N_2} : 氮氣系統耗電量, kW

$\dot{Q}_{N_2,operate}$: 運轉時氮氣系統流量, m³/h

$\dot{Q}_{N_2,standby}$: 待機時氮氣系統流量, m³/h

數學方法-各設備耗能計算及說明

■ 真空系統耗電量

ECF：能源轉換係數，kW/CMH

$$W_{PV} = (\dot{Q}_{PV,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{PV,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

■ 壓縮乾空氣系統耗電量

$$W_{CDA} = (\dot{Q}_{CDA,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{CDA,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

■ 超純水系統耗電量

$$W_{UPW} = (\dot{Q}_{UPW,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{UPW,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

■ 去離子水系統耗電量

$$W_{DI\ water} = (\dot{Q}_{DI\ water,operate} \times t_{operate} + \dot{Q}_{DI\ water,standby} \times t_{standby}) \times ECF$$

$t_{operate}$ ：運轉時間比，%

$t_{standby}$ ：待機時間比，%

W_{PV} ：真空系統耗電量，kW

$\dot{Q}_{PV,operate}$ ：運轉時真空系統流量，m³/h

W_{CDA} ：壓縮乾空氣系統耗電量，kW

$\dot{Q}_{CDA,operate}$ ：運轉時壓縮乾空氣系統流量，m³/h

$\dot{Q}_{CDA,standby}$ ：待機時壓縮乾空氣系統流量，m³/h

W_{UPW} ：超純水系統耗電量，kW

$\dot{Q}_{UPW,operate}$ ：運轉時超純水系統流量，m³/h

$\dot{Q}_{UPW,standby}$ ：待機時超純水系統流量，m³/h

$W_{DI\ water}$ ：去離子水系統耗電量，kW

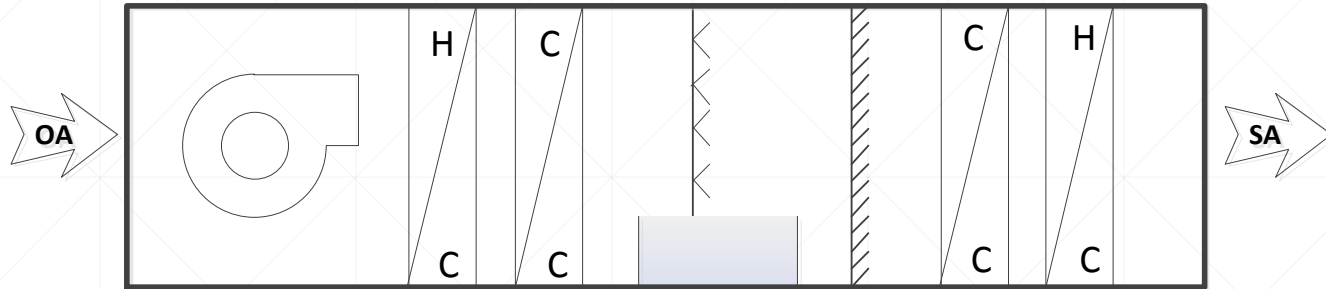
$\dot{Q}_{DI\ water,operate}$ ：運轉時去離子水系統流量，m³/h

$\dot{Q}_{DI\ water,standby}$ ：待機時去離子水系統流量，m³/h

案例介紹-計算條件

- 外氣空調箱(MAU)條件

- 室內條件



外氣空調箱條件	
外氣條件	新竹地區氣象資料
冷卻盤管出風相對溼度	100 %
MAU出風乾球	14 °C
水洗泵揚程	93.8 m
水洗泵效率	65 %
水洗泵循環水量	200 l/min

室內條件	
室內乾球溫度	23°C
室內相對溼度	45%
室內面積	13812 m ²
室內高度	3.5 m
燈具條件	
單位面積燈光耗能	0.01186 kW/m ²
負荷率	100%
人員條件	
發熱量	0.6 kW/人
人數	150人

案例介紹-計算條件

■ 風機條件

FFU1		FFU2	
面風速	0.195 m/s	面風速	0.154 m/s
靜壓	260 Pa	靜壓	215 Pa
風機效率	50%	風機效率	50%
馬達效率	85%	馬達效率	85%
單台面積	0.72 m ²	單台面積	0.72 m ²
台數	1200台	台數	4100台

MAU FAN	
MAU風量	100,000 CMH
機內靜壓	860 Pa
馬達效率	93.6%
風機效率	84%
台數	6台

■ 機台與廠務設備

	Processing	Standby	溫差 (°C)	ECF(kWh /m ³)
時間比(%)	100	0	-	-
機台功率(kW)	9300	0	-	-
一般排氣風量(CMH)	205800	0	7.2	0.000723
酸排氣風量(CMH)	238000	0	0.3	0.000723
鹼排氣風量(CMH)	49000	0	0.3	0.000723
有機排氣風量(CMH)	61200	0	5	0.000723
PCW(17-22°C)	810	0	5	0.383
PCW(20-25°C)	390	0	5	0.383
N ₂ (CMH)	3600	0	-	0
Vacuum(CMH)	2000	0	-	0.04
CDA(CMH)	5700	0	-	0.1713
HCDA(CMH)	830	0	-	0.1713
UPW(CMH)	120.563	0	-	8

案例介紹-計算條件

- 其他冷卻負荷

供應區域	供應設備	冷凍負載(RT)
CUB	AHU/FC/PCC/冰水	132.47
CUB	DI	225.20
Warehouse	AHU	134.59
SB	AHU	198.71
Sub FAB	AHU/FC	198.71
Sub FAB	DI	139.095
FAB 5F office	AHU	198.71

- Chiller and Heater

Chiller	
高溫冰水主機COP	4.5
低溫冰水主機COP	4.5
熱回收冰水主機COP	4.5

本廠為單冰水溫度之系統設計，Chiller的COP為全年之平均值，利用全廠冷卻負載的總和與冰水主機總耗電量作為計算依據。

案例介紹-案例介紹

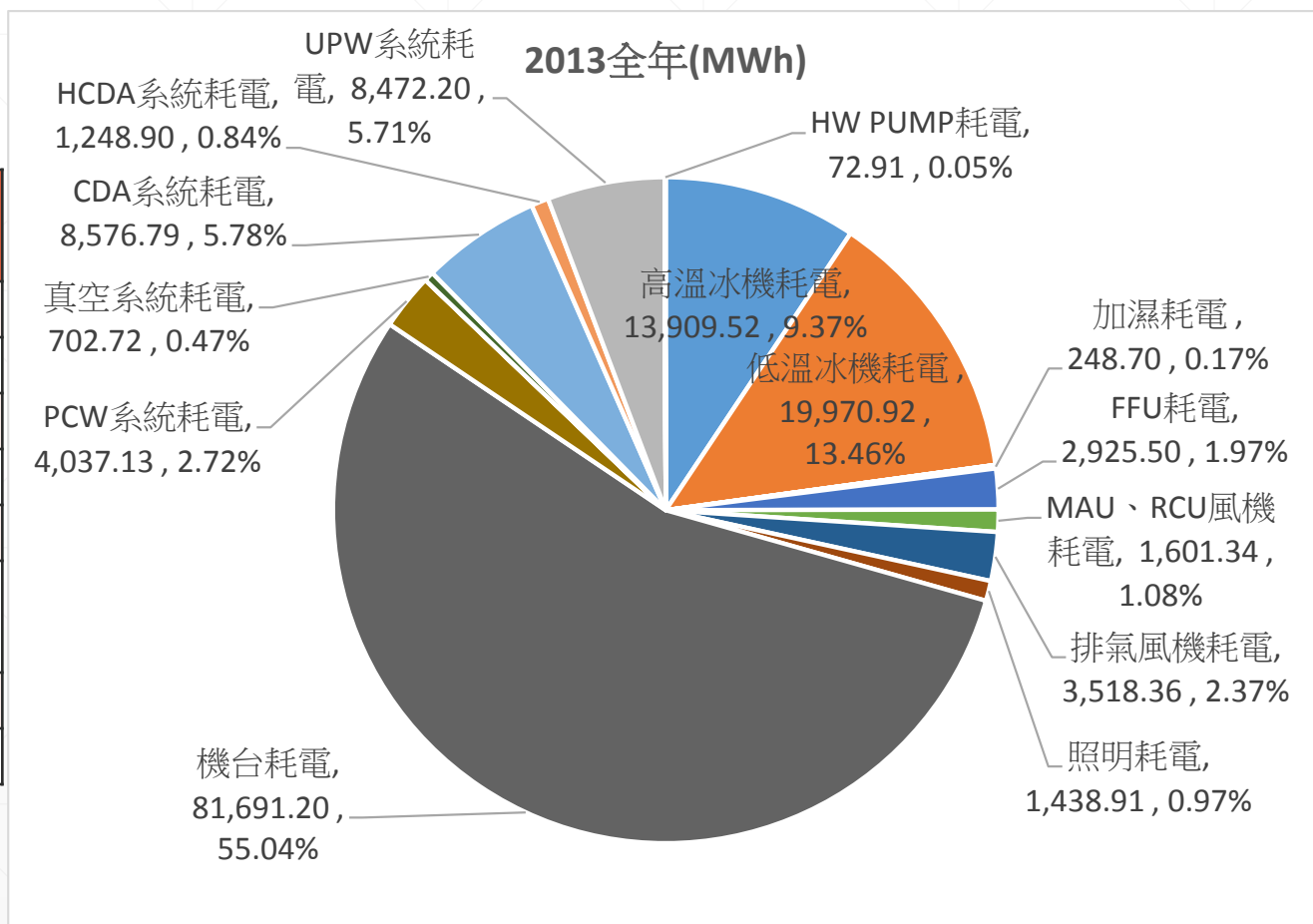
- 外氣空調箱(MAU)條件

案例名稱	案例描述	原始參數	更改參數
Case 1A	探討更改製程冷卻水溫差所造成的效益	冷卻水溫差=5°C	冷卻水溫差=3°C
Case 1B			冷卻水溫差=7°C
Case 2	探討提昇冰機COP值所造成的效益	COP=4.5	COP=8
Case 3	探討更改排氣量所造成的效益	一般排氣量=205800 CMH 外氣量=600000 CMH	一般排氣量減少10% , 降為185220 m ³ /h 總排氣減少20580 m ³ /h , 所以外氣量也隨之減少 20580 m ³ /h , 降為96570 m ³ /h
Case 4	探討降低機台消耗電量所造成的效益	機台耗電=9300 kW	機台耗電量減少10% , 降為8370 kW
Case 5A	探討在不同地區耗電上的差異	新竹地區氣象資料	使用台中地區之氣象資料
Case 5B			使用台南地區之氣象資料
Case 6	探討將MAU出風溫度降低所造成的效益及影響	MAU出風溫度=14°C	MAU出風溫度=11°C

結果與討論-基準結果

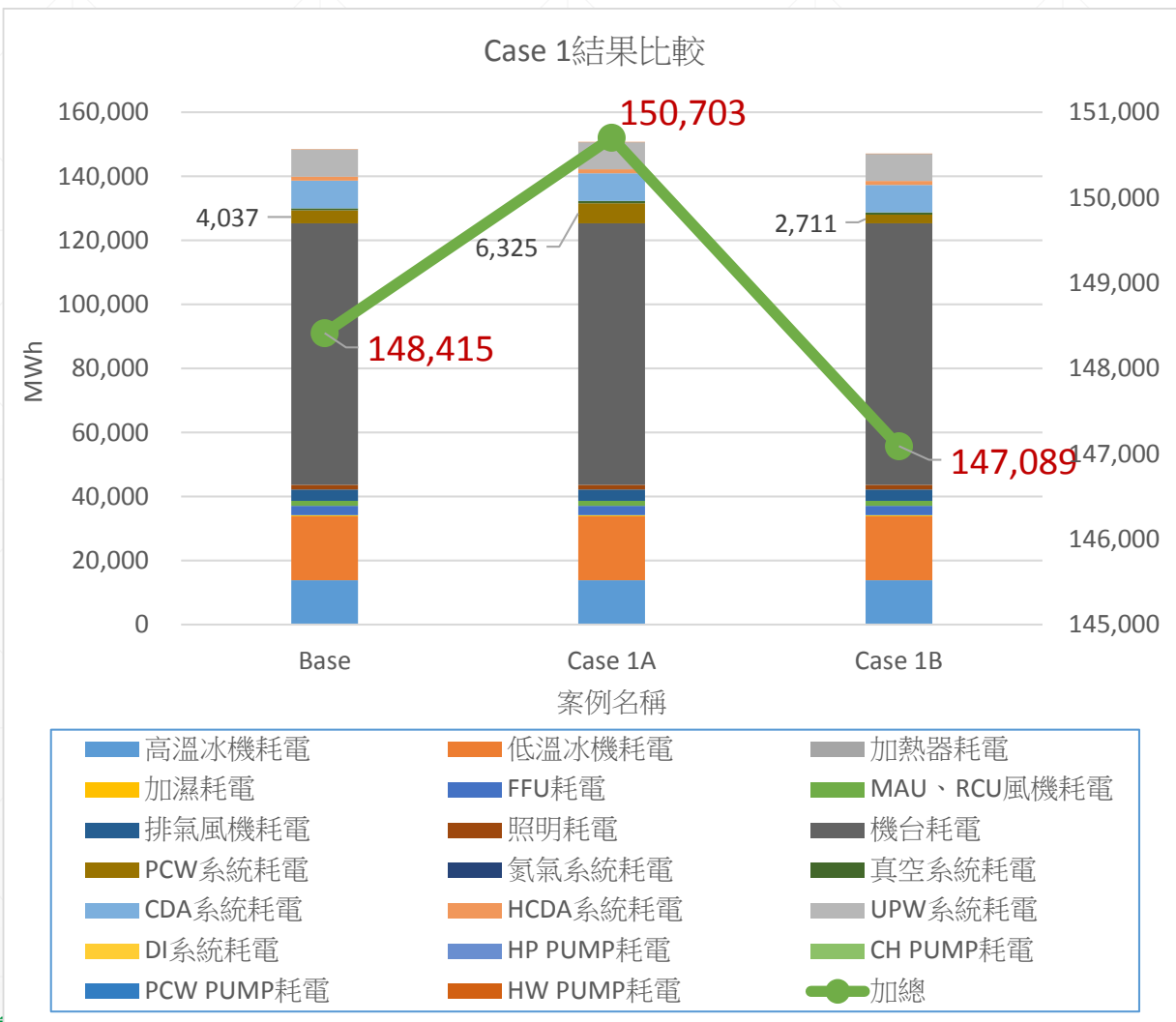
項目	耗電量 (kWh)	項目	耗電量 (kWh)
高溫冰機耗電	13,909,521	機台耗電	81,691,200
低溫冰機耗電	19,970,921	PCW系統耗電 ²	4,037,126
加熱器耗電 ¹	0	氮氣系統耗電	0
加濕耗電	248,703	真空系統耗電	702,720
FFU耗電	2,925,496	CDA系統耗電	8,576,785
MAU、RCU風機耗電	1,601,343	HCDA系統耗電	1,248,900
排氣風機耗電	3,518,361	UPW系統耗電 ³	8,472,203
照明耗電	1,438,910	HW PUMP耗電	72,907

註：1. 熱源為熱回收冰水主機供應，故加熱器並無耗電量。
 2. 氮氣系統耗電為直接與廠商購買鋼瓶，故並無耗電值。
 3. DI系統耗電歸算於UPW系統耗電中。



結果與討論-案例結果及比較

Case 1 調整製程冷卻水溫差



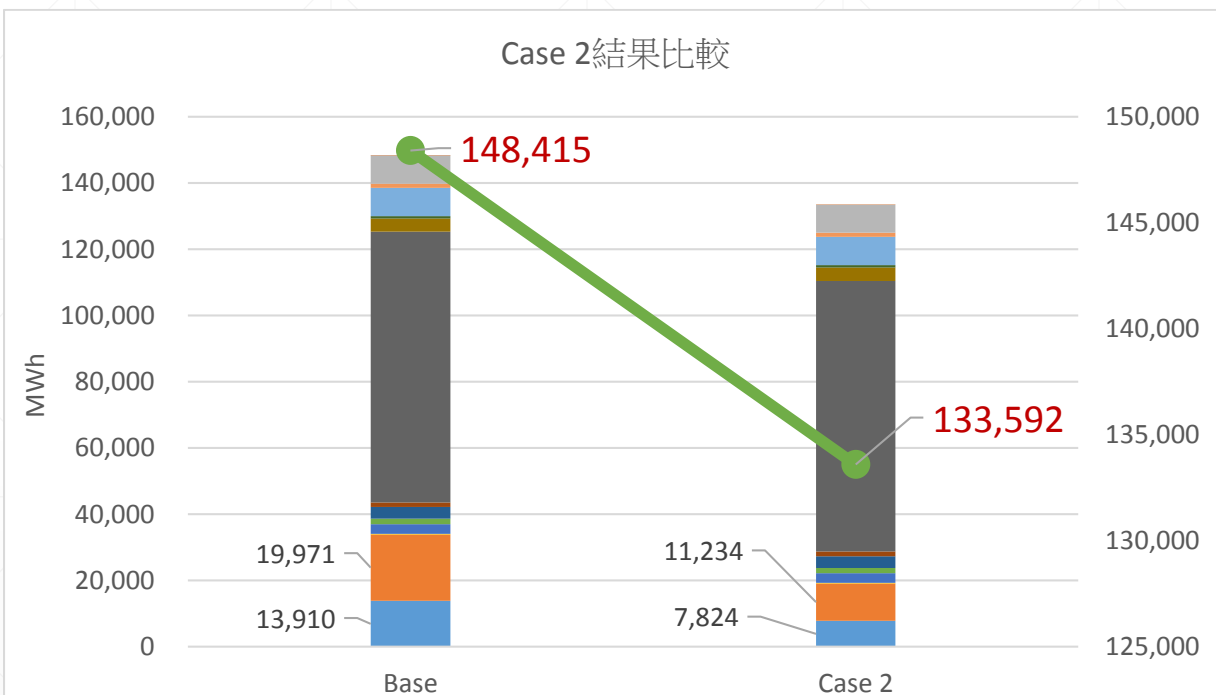
更改項目	Base	Case 1A	Case 1B
製程冷卻水溫差(°C)	5	3	7

差異項目	耗電量(kWh)		
	Base	Case 1A	Case 1B
PCW系統耗電	4,037,126	6,324,831	2,710,641

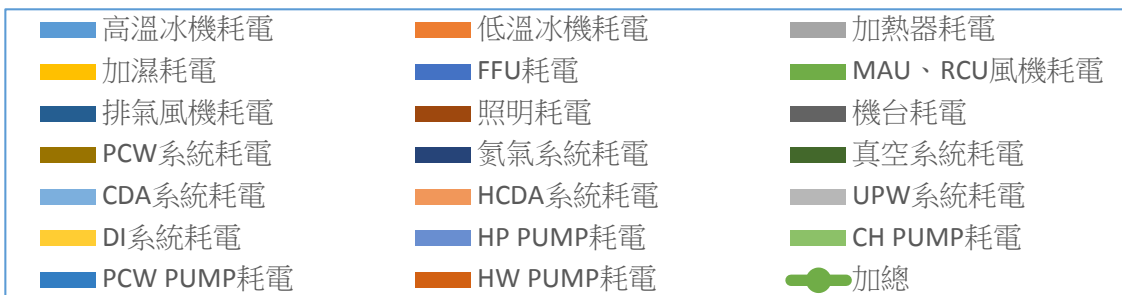
	全年總耗電量 (kWh)	節省率(%)
Case 1A	150,702,802	-1.54
Case 1B	147,088,612	0.89

結果與討論-案例結果及比較

Case 2 調整冰水主機COP



案例名稱



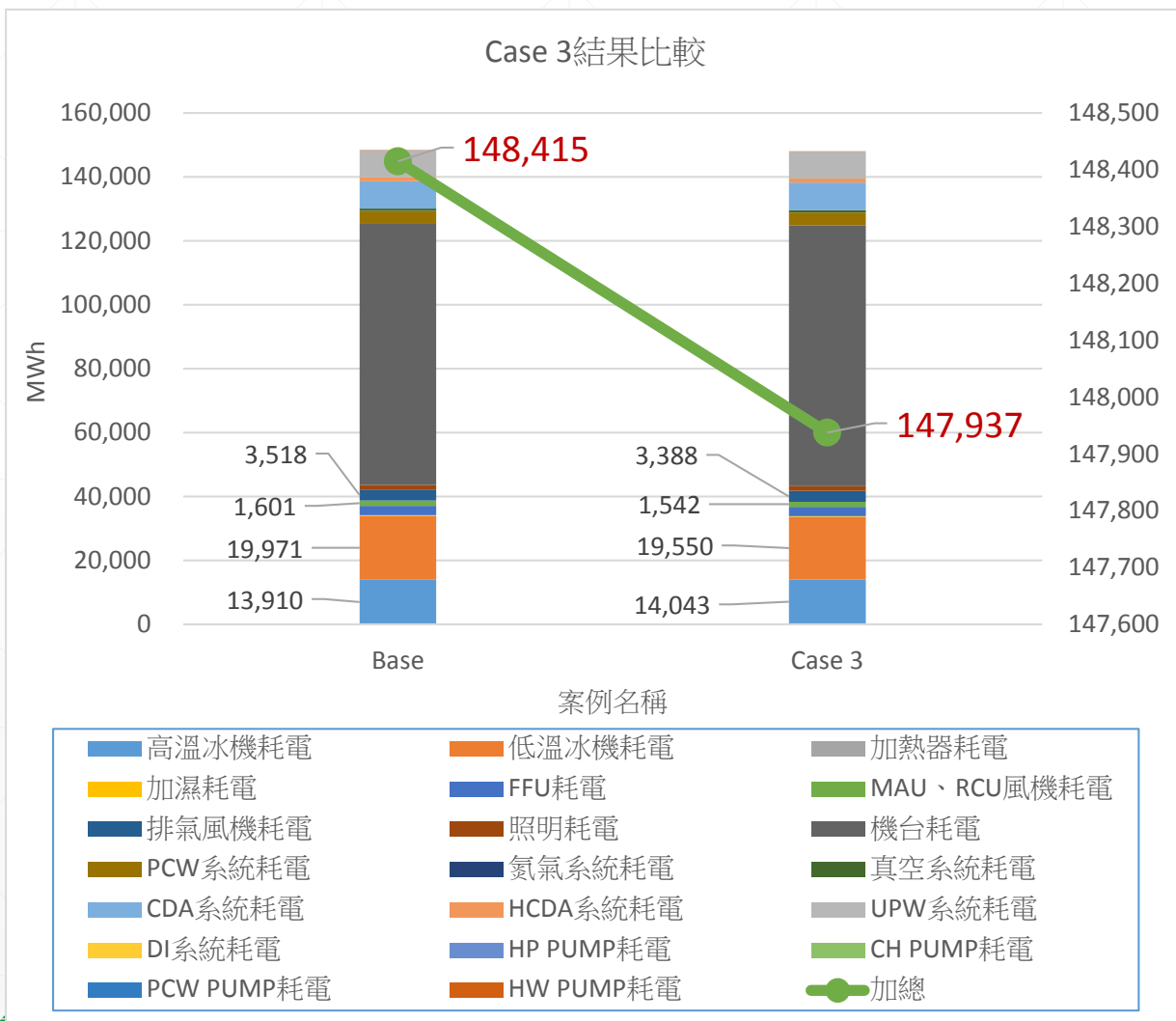
更改項目	Base	Case 2
冰水主機COP	4.5	8

差異項目	耗電量(kWh)	
	Base	Case 2
高溫冰機耗電	13,909,521	7,824,105
低溫冰機耗電	19,970,921	11,233,643

	全年總耗電量(kWh)	節省率(%)
Case 2	133,592,404	9.99

結果與討論-案例結果及比較

Case 3減少排氣風量



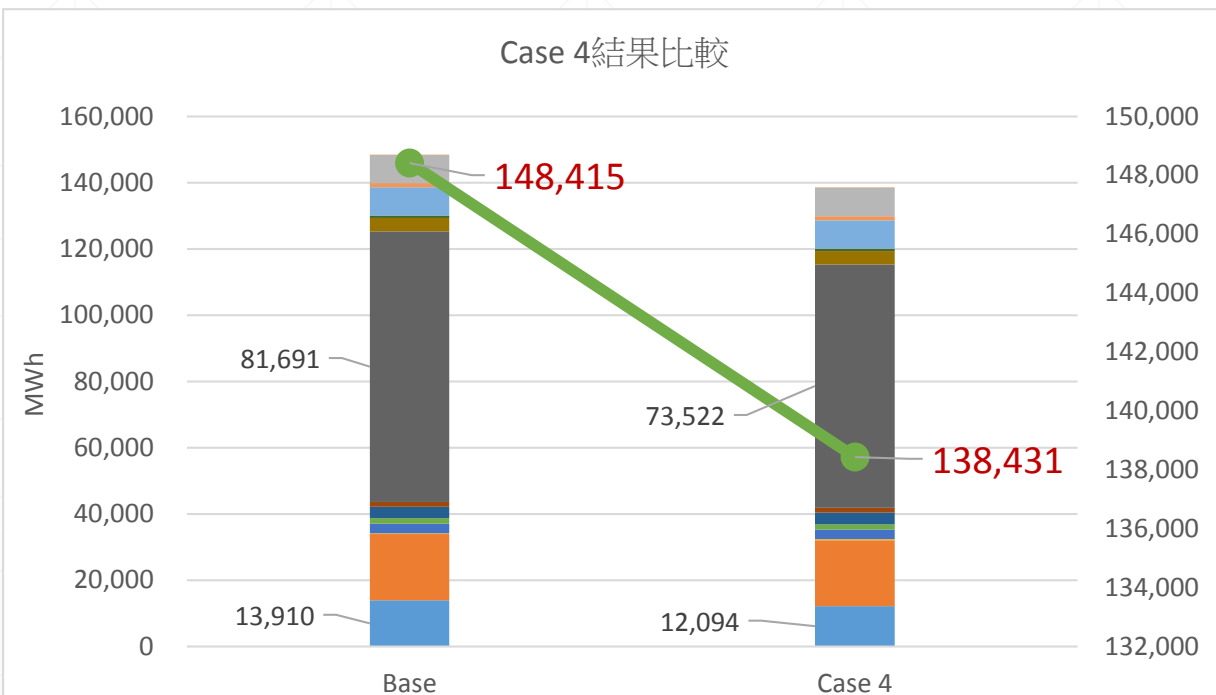
更改項目	Base	Case 3
一般排氣量(CMH)	205800	185220
外氣量(CMH)	600000	96285.2

差異項目	耗電量(kWh)	
	Base	Case 3
高溫冰機耗電	13,909,521	14,042,746
低溫冰機耗電	19,970,921	19,550,034
MAU、RCU風機耗電	1,601,343	1,541,856
排氣風機耗電	3,518,361	3,387,661

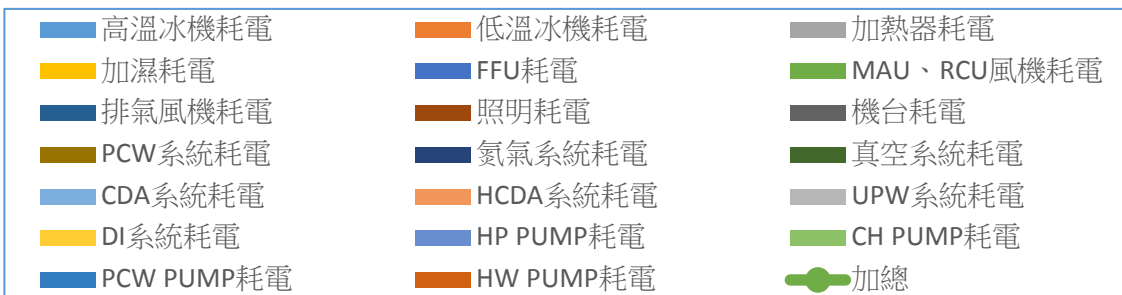
	全年總耗電量(kWh)	節省率(%)
Case 3	147,937,248	0.32

結果與討論-案例結果及比較

Case 4減少機台耗電量



案例名稱



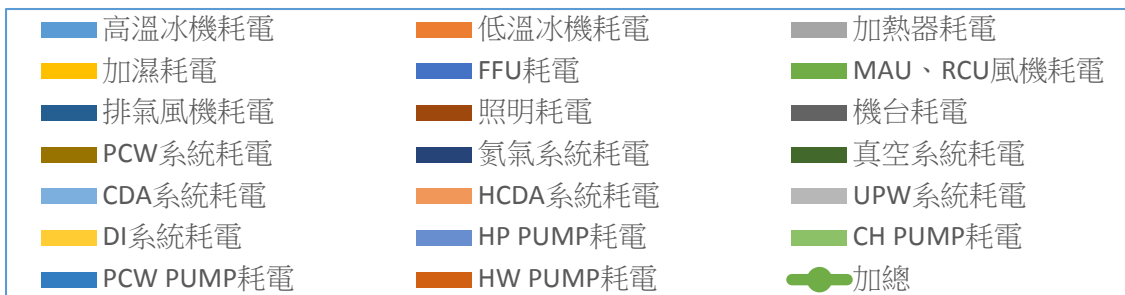
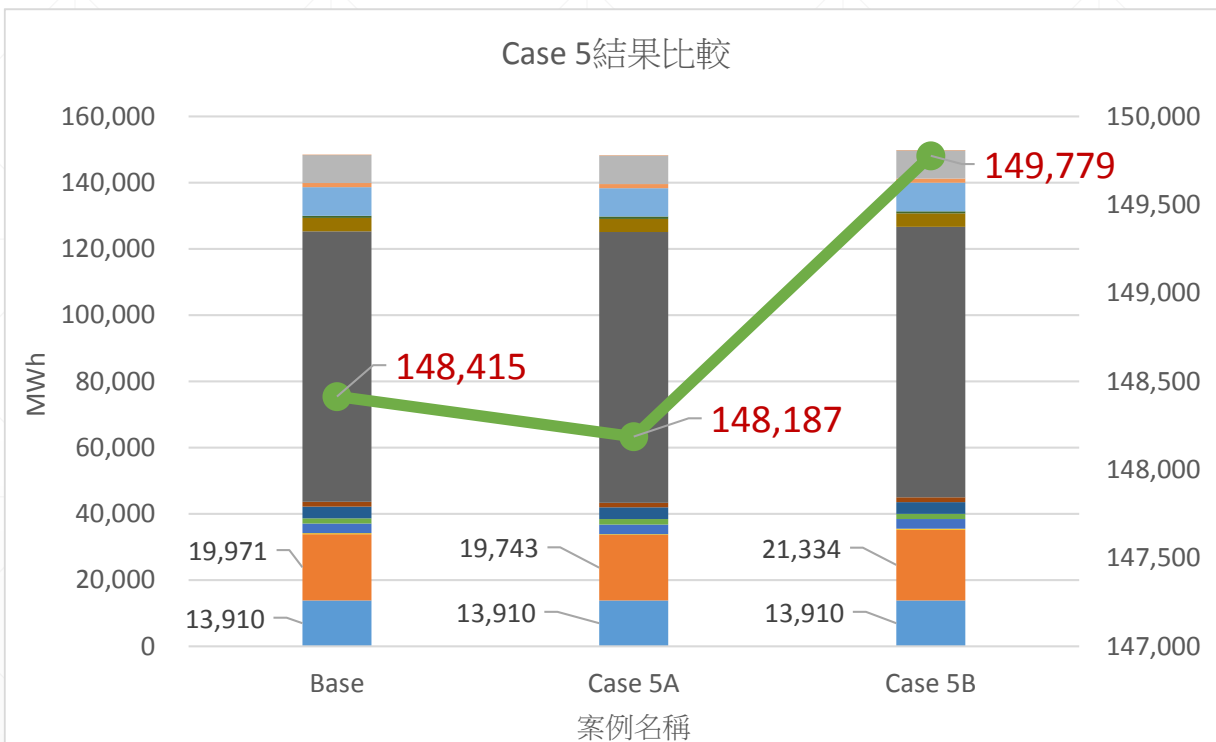
更改項目	Base	Case 4
機台耗電(kW)	9300	8370

差異項目	耗電量(kWh)	
	Base	Case 4
高溫冰機耗電	13,909,521	12,094,161
機台耗電	81,691,200	73,522,080

	全年總耗電量(kWh)	節省率(%)
Case 4	138,430,617	6.73

結果與討論-案例結果及比較

- Case 5討論不同地區之外氣條件對整場耗電的影響



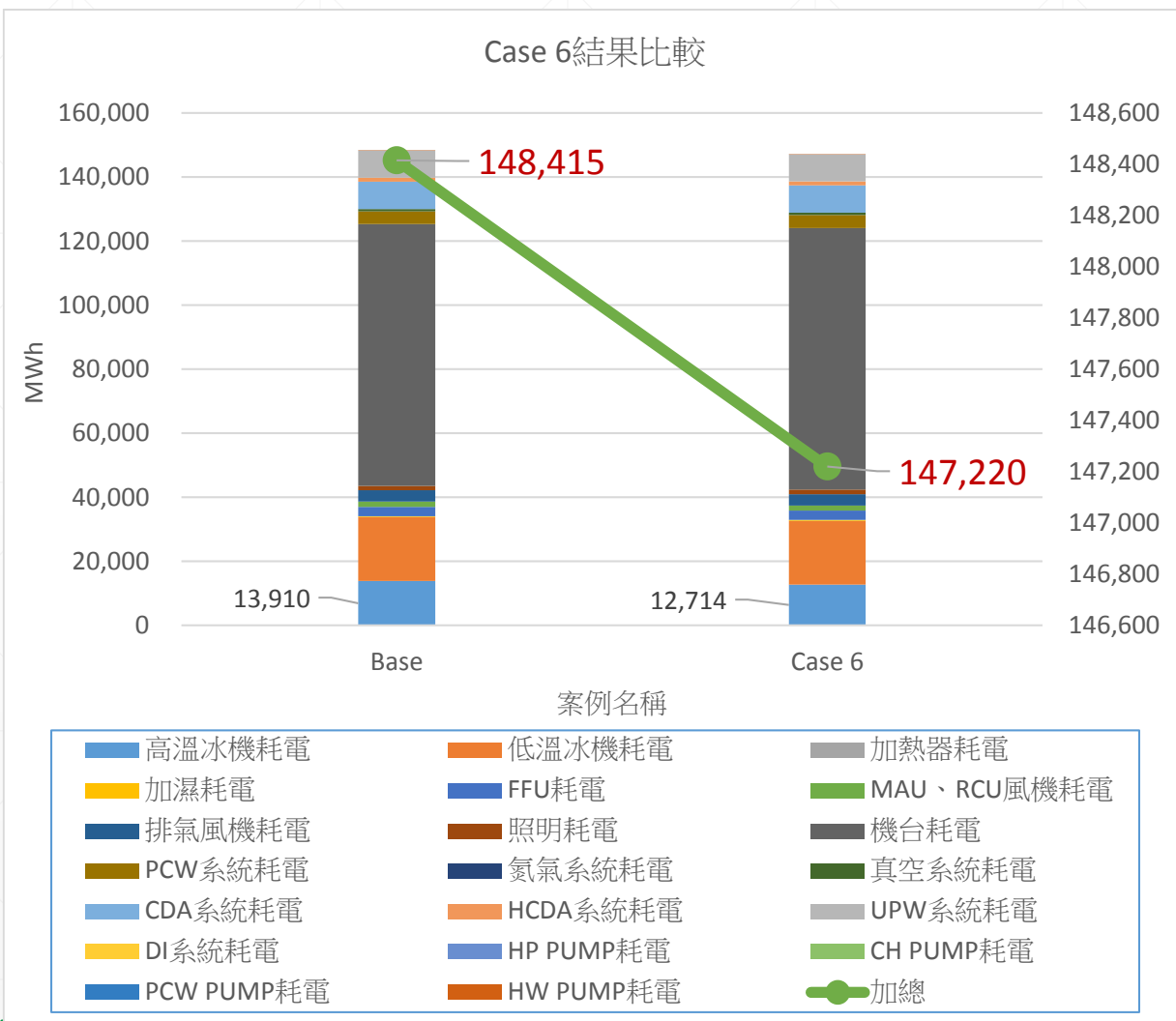
更改項目	Base	Case 5A	Case 5B
外氣條件	新竹	台中	台南

差異項目	耗電量(kWh)		
	Base	Case 5A	Case 5B
高溫冰機耗電	13,909,521	13,909,521	13,909,521
低溫冰機耗電	19,970,921	19,743,286	21,334,351

	全年總耗電量 (kWh)	比率(%)
Case 5A	148,187,462	0.15
Case 5B	149,778,527	-0.92

結果與討論-案例結果及比較

- Case 6探討降低MAU出風溫度所造成的效益及影響



更改項目	Base	Case 6
MAU出風溫度(°C)	14	11

差異項目	耗電量(kWh)	
	Base	Case 6
高溫冰機耗電	13,909,521	12,714,077

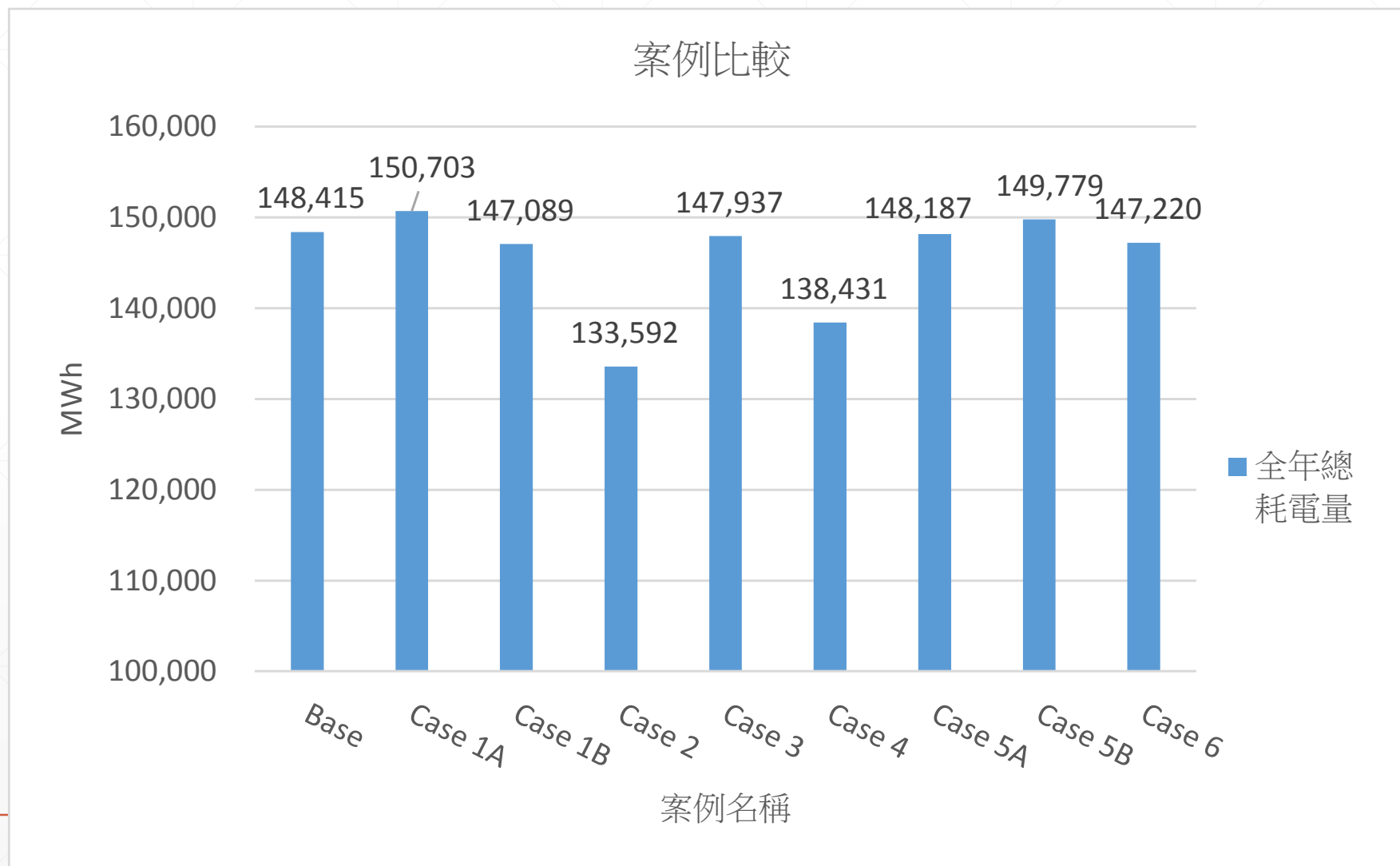
	全年總耗電量 (kWh)	節省率(%)
Case 6	147,219,653	0.81

結果與討論-小結

- Case 2的節能效益最好，可節省9.99%的耗電量，因空調耗電占整廠耗電量的大部分，所以直接提高冰機效率，就可節省大量的耗電
- 最差的為Case 1A將製程冷卻水溫差調為3°C，會增加1.54%全年耗電量，為維持相同製程冷卻水的熱移除量，流量需增加，又假設在ECF不變動的情況下，所以電量會增加。

	說明	全年總耗電量(kWh)	節省率(%)
Base	-	148,415,097	
Case 1A	更改製程冷卻水溫差 提升冰水主機COP	150,702,802	-1.54
Case 1B		147,088,612	0.89
Case 2	提升冰水主機COP	133,592,404	9.99
Case 3	減少排氣量	147,937,248	0.32
Case 4	減少機台耗電	138,430,617	6.73
Case 5A	不同地區外氣	148,187,462	0.15
Case 5B		149,778,527	-0.92
Case 6	降低MAU出風乾球溫度	147,219,653	0.81

結果與討論-小結



軟體介紹-軟體介紹

- 介面



軟體介紹-軟體介紹

- 實際廠房全年耗電驗證與比較，誤差皆在4%內

耗電項目	實際耗電量	軟體計算值	誤差
冰機耗電 (kWh)	35,136,151.00	33,880,441.80	-3.57
加熱器耗電 (kWh)	-	-	-
加濕耗電 (kWh)	1,917,398.00	248,702.88	-3.51
MAU、RCU風機耗電 (kWh)		1,601,343.10	
FFU耗電 (kWh)	2,914,014.00	2,925,496.11	0.39
排氣風機耗電 (kWh)			
照明耗電 (kWh)	3,506,546.00	3,518,360.93	0.34
機台耗電 (kWh)	1,435,084.00	1,438,909.85	0.27
PCW系統耗電 (kWh)	81,533,340.00	81,691,200.00	0.19
真空系統耗電 (kWh)	4,026,875.00	4,037,126.40	0.25
氮氣系統耗電 (kWh)	-	-	-
CDA/HCDA系統耗電 (kWh)	712,154.00	702,720.00	-1.32
UPW系統耗電 (kWh)	8,449,073.00	8,472,203.14	0.27
HW PUMP耗電 (kWh)	72,907.20	72,907.14	-0.00
加總	149,506,819.20	148,415,097.13	-0.73

結論

- 得知直接從設備上進行節能改善，如Case 2及Case 4從提升冰水主機COP及減少製程機台耗能下手，可獲得較高的節能效益，節能率分別為9.99%及6.73%；反之，若直接在末端元件或空氣側進行節能改善，所獲得的節能效益相較之下較低，節能率在1%以下。
- 本篇所探討的各項案例，軟體計算為初步評估，評估方向主要為空調耗電方面的影響，還有許多實際運轉上會遇到的問題尚未探討，需再與實際廠房持續調查分析後續問題。

Q & A

FES software website:

<http://www.ntut.edu.tw/~fes/>
