

變頻螺旋式冰水機於一次側變水量系統之節能應用

The Application of Variable-Primary-Flow System with Variable Speed Screw Chiller

劉中哲 劉家宏

工業技術研究院 能源與環境研究所 研究員

摘要

本文介紹中央空調系統之節能新觀念：一次側變水量系統與變頻螺旋式冰水機之整合應用，內容包括傳統分藕合系統與一次側變水量系統之水泵與冰水機運作原理、一次側變水量系統之節能基礎、專用控制器之功能與控制策略、舊分藕合系統改裝要點等內容。在變頻螺旋式冰水機的部份包括了主機特性介紹，與變水量條件下之實測性能。此外，還針對兩者整合應用時之主機群選機要點、機群啟停原則與節能效益加以說明與分析。

關鍵字：中央空調、節能、分藕合系統、一次側變水量、變頻螺旋式冰水機

一、前言

在工業與商業用建築物中，空調系統的使用占建築物總耗能的 60%以上，在國際能源價格不斷高漲的現今，使用有效且可靠的節能方法來降低能源使用費，已成為建築物擁有者所應具備的基本觀念。中央空調系統節能新趨勢是以專用控制器將冰水機與水系統控制整合，並大量使用變頻式技術於系統之中。在美、日、歐等國家早已普遍應用變頻技術於冷凍空調系統之控制與節能上，包括壓縮機、水泵及風扇等設備。無論從成本面或效率面來看，變頻式中央空調系統都比傳統系統更具有節能優勢，值得加速發展成為新一代中央空調的標準系統。雖然使用新節能系統或是改裝舊系統皆需投入額外的成本，但是這些節能投資皆有機會在短時間之內回收。本文將介紹變頻螺旋式冰水機與一次側變水量系統的節能應用，供空調業界實施參考。

二、冰水變水量節能應用

傳統二次側變水量系統

目前大多數的空調用戶所採用的冰水系統為一次/二次水循環系統(Primary/Secondary)，又稱為分藕合系統(decouple)，如圖 1 所示，其中主機側(一次)水循環通常為定水量循環，負載側(二次)則為變水量循環。旁通管是用來自動調節冰水量，使得負載變動時一、二次側間冰水循環量不同之現象得以平衡。當二次側出現最大負載時，其冰水需求量約與一次側循環量相當，此時旁通管中之流量接近於零。當二次側負載降低時，若空氣側是以二通閥控制冰水進入熱交換器的流量，二次側總冰水量將會低於一次側；若熱交換器是以三通閥控制時，二

次側冰水總流量則可能會高於或等於一次側。此時一、二次側間冰水循環量之差異可藉由旁通管來調節，如圖 2。傳統二次側二通閥變水量之設計可藉由變頻器與變頻水泵達到節能的效果，但一次側水泵耗電量並不跟隨負載降低。

在冰水機之負載變化方面，由於冰水機前後之冰水管路皆各以集水頭(header)連接，由集水頭分配給各主機之冰水回水溫度完全相同，加上定冰水流量之設計，使得各主機會以相同的負載運轉，供應出相同的冰水出水溫度。

冰水機加卸載與效率現況

圖 3 為多台冰水機共同於傳統一次/二次水循環系統中之各機負載變化，由圖可看出，除了在建物負載點 33%、66%與 100%分別由一台、二台與三台進行全載運轉之外，於其它的負載範圍中，主機皆是以部份負載運轉。也就是說，各主機一年之中以部份負載運轉的時間居多。

由於我國與 ASHRAE 90.1 冰水機效率標準皆以滿載效率為最重要的指標，因此市售的冰水主機部份負載效率在相同的冷凝器散熱條件下(例如夏季時冷卻水入水溫度 30)，將低於滿載效率，如圖 4 之典型冰水機效率曲線。

ARI 550/590-2003[1]冰水機測試標準要求主機的性在不同的負載與條件下測試，並以不同的加權平均數計算其整合性部份負載值(Integrated Part Load Value, IPLV)。訂定 IPLV 的主要目的是考慮到外在氣候條件對主機性能的影響。如前段所言，冰水機組大多不會在全載的條件下全載運轉，在不同條件下所出現的部份負載效率相形重要，因此空調設計者依主機的 IPLV 或 NPLV (Non-standard Part Load Value)判斷冰水機組的良窳與適用性是相當實用的。

在一次側定水量的應用中，主機群最常於非全載能力與效率下運轉，這對於冰水機用戶而言是較不符合省能觀念的作法。

要能充分發揮系統於部份負載整體節能之效果，就是要使一次側冰水流量能隨負載變化而調整，以降低水泵於部份負載時之耗電量。在主機方面，應盡可能採用高部份負載效率的主機。一次側變流量系統搭配適當的主機配置可滿足上述節能之需求，它可節省冰水系統於部份負載時之水泵耗電量，並使部份負載主機於部份水量供應之下發揮其高效率之特性。配合多機群控使其運轉負載比例往高負載比例移動。

一次側變水量系統之作法

一次側變水量系統取消了二次側泵浦，以高揚程變頻泵浦來取代一次側定頻泵浦。並以一個額外的專用控制器進行冰水機群與水泵控制。專用控制器以溫度計與流量計對二次側(負載側)進行負載量測計算，並送出指令給予水泵變頻器使變頻水泵供給適合該負載所需之冰水流量。高揚程泵浦並不與高耗電量畫上等號，原因是一次側變流量的設計，使泵浦有較多的時間是在較低水量與低耗電下運轉。

變頻水泵的位置必須與冰水主機脫離而將其移至集水主幹管前，使全部的泵

浦皆能於部分流量時，受惠於泵浦耗電量與流量變化呈三次方正比之特性。水泵的數量不需與冰水機數量相同，藉由水泵之數量與選機最佳化可更進一步節省水泵的耗電。

由專用控制器依使用端之流量計與冰水溫差計算出即時的負載，用以決定主機之運轉(機群啟停)時機，並送出指令給予冰水機所對應的冰水電動閥，開啟或關閉冰水流量。專用控制器僅進行實際負載量測、主機負載分配、機群啟停以及各主機冰水閥開關的控制，並不直接對主機進行加卸載之控制。所有主機的加卸載仍由其各自的控制系統，依各自出水溫度自行調控負載，以維持出口水溫恆定。

圖 5 為一次側變水量於全載時之水溫與流量狀態，此時各主機之水量為全載流量，各主機冰水溫差即為全載溫差。

當系統負載下降時，如圖 6 所示，專用控制器通知變頻器調節水量，而同步降低三台主機的冰水供應量，當水量下降時，主機之出水溫度會下降，進而使主機降載，以維持設定的冰水出水溫度。各機冰水量可藉由熱交換器水側壓差的量測換算而得，或使用水量專用流量計。藉由水流量的調整，可使各機之負載與冰水溫差一致。

旁通管上裝設有比例閥，一般狀況下此閥為關閉的狀態。只有當所有主機陸續關閉，僅剩一台部份負載機運轉，且負載持續降低，冰水流量已小到不利於主機運轉的程度時，專用控制器會開啟旁通閥，使一次側之水量大於二次側之流量，以滿足冰水機最低流量之要求，維持冷氣之持續供應。

舊系統改裝要點

除了新建系統可採用一次側變水量設計之外，既設系統亦可經適當的修改，使其成為具節能效益之一次側變水量系統。改裝之要點如下：

- 1.更換空氣側熱交換器之三通控制水閥為二通閥；可保留少部份的三通閥做為前段中所述之旁通管比例閥用途，可省除旁通管比例閥之裝置費用；
- 2.原一次側水泵浦改為可含括全系統揚程變頻泵浦；
- 3.拆除二次水泵群或將其旁通(可保留供特殊高揚程迴路之水泵)；
- 4.於原二次側冰水迴路加裝流量計與出、回水溫度計；
- 5.主機加裝冰水蒸發器出入口差壓計供計算流量之用；
- 6.裝置整合專用控制器；
- 7.冰水主機控制器昇級使其能與專用控制器相容；
- 8.既設冰水機性能檢測，測試結果可供擬定機群啟停控制策略之用，並汰換效率不佳之部分負載主機。

三、變頻螺旋式冰水機

變頻螺旋式冰水機之特點

變頻螺旋式壓縮機以控制壓縮機轉速來達到調變冷媒流量的目的，並採用經特殊設計之變頻馬達，於部份負載時維持相當高之馬達效率於不墜。變頻式壓縮

機整體效率雖隨著負載比例有所不同，但比定頻式壓縮機有著既高且平緩的變化，幾乎各負載的壓縮效率都可維持在 90% 以上，這對於尖峰負載以外的使用條件而言是相當理想的。變頻螺旋式冰水機的其他特點還包括[2]：

1. 壓縮效率提昇：對變頻螺旋式壓縮機而言，當提高轉速時，轉子間洩漏變小，使得壓縮效率提高，進而提昇系統效率。
2. 運轉最佳化：由於建築物的負載會依室內（人員、電器、機械等之熱負荷）與室外（太陽熱輻射、外氣滲透熱、換氣之外氣負荷等）的條件而變化，運用變頻系統可以穩定維持在最佳狀態下運轉。
3. 控制性能提昇：將電子機械、數位控制等融入冰水機系統中，配合電力電子、人因智慧等技術提高馬達效率與負載控制精度。
4. 彈性使用與低運轉成本：變頻式冰水機具有增加製冷能力、應用範圍廣及高 IPLV 效率的特點。可同時滿足用戶最大負載能力、高負載效率需求，並保有用戶未來負載擴充的彈性。兩部相同尺寸規格的冰水機，因使用場合的差異，經由控制策略的設定，可使其性能與效率完全不同。選購冰水機時，不再單是以尖峰最大熱負載作為選機準則。
5. 降低成本：整合馬達與主機控制系統，降低了控制設備的成本。

變頻螺旋式主機變水量實測性能

圖 7 為工研院所開發的變頻螺旋直膨式冰水機於冰水變水量以維持冰水入口 12 、出口 7 ，以及冷卻水入口 30 之條件下所得之測試結果。壓縮機頻率變化範圍為 30~80 Hz，對應能力為 45~115 RT。單位能力耗電量由全載之 0.78 kW/RT，隨著負載降低逐漸下降至 0.69 kW/RT，最低點 0.67 kW/RT 出現在 46% 負載比例附近。部份負載之高效率特性相當之明顯。

圖 8 為工研院所開發的變頻螺旋滿液式冰水機之變水量性能測試結果。使用與前述直膨式冰水機同款壓縮機，並採用熱交換效率更高之滿液式蒸發器，使系統得到了更高的製冷能力與全載效率。冰水與冷卻水皆進行水量變化維持冰水入口 12 、出口 7 ，以及冷卻水入口 30 、出口 35 之條件。壓縮機頻率變化範圍為 30~90 Hz，對應能力為 34~139 RT。單位能力耗電量由最高負載之 0.65 kW/RT，下降至負載 75.5% 的 0.63 kW/RT(最低值)，再逐漸上升至負載 27% 的 0.87 kW/RT。其中，60~100% 負載之效率表現相當的好，非常適合用於一次側變水量系統之中，作為部份負載專用機。

四、變頻螺旋式冰水機於一次側變水量系統之應用

選機原則

一次側變水量系統主機之選機原則為：

1. 選用部份負載效率高之主機，尤其是在變水量(固定冰水溫差)與固定冷卻水入水溫度條件下能有高效率的部份負載性能表現。由前文的分析可得知，變頻螺旋式冰水機是部份負載主機相當好的選擇。

2. 主機對於冰水流量之變動適應力要強，特別是在因機群啟停使得冰水流量大幅變化的時候，負載調整速度要夠快以維持穩定的冰水出水溫度。

主機啟停控制

於系統建立前，必須先以運轉成本分析軟體[3]，依主機群各主機之詳細性能，套用用戶全年負載以及當地氣候進行不同啟動先後順序所得之電費結果，以最低電費之組合作為最佳運轉順序。

系統啟用後，專用控制器根據實際負載的量測結果依預設好的運轉順序進行機群個別起停控制，主機啟動之時機是以運轉中之主機已達最大負載，或已達最大運轉電流來判斷。

以三台主機的系統為例，當建物負載小於 35% 時，由第一台變頻式冰水機運轉，冰水流量隨建築物負載調整。若負載持續降低，冰水流量降至安全值以下時，必須開啟系統旁通管閥。當建物負載超過 35% 時，第一台冰水機之能力將不足以將冰水降溫至設定溫度，此即為啟動第二台冰水機與加大冰水流量之時機。此時，第一、二台冰水機將進行同步的加卸載運轉。當建物負載超過 70% 時，再開啟第三台冰水機與再加大冰水流量。

節能效益

儘管主機之耗電量遠大於水泵，一次側變水量系統最主要的節能是來自於水泵的耗電量節省，其次為主機於部份負載的效率表現，兩者共同搭配下可節省大量的運轉電費。

表 1 為 750 RT 負載場所於 600 RT 部份負載時的用電量分析結果。分別比較一次/二次側定水量、一次側變水量搭配定頻機以及一次側變水量搭配變頻機之冰水機與水泵耗電量。分析結果為，使用一次側變水量系統約比傳統一次/二次水循環系統降低 5.9 % 之耗電，此節省量全部是由泵浦耗電量降低所達成，定頻冰水機之效率因冰水量下降影響熱傳效率因而些微下降，反而抵消了一些水泵的節能。若再將其中定頻機更換為同能力之變頻式冰水機，則耗電量可再降低 3.9 %，達到 9.8% 之最佳節能效益。從初置成本來看，一次側變水量系統減少了二次側水泵的配置，但需增加負載能力量測設備(冰水流量、溫度)、冰水機冰水關斷閥與專用控制器之成本，預估回收年限為 5 年。

五、其它節能應用

除了前述冰水主機與冰水泵的節能應用外，中央空調系統中的其它元件也有進一步節能的機會，例如冷卻水泵、冷卻水塔風扇、空調箱、換氣設備等。

以冷卻水系統為例，可以搭配變水量冷卻水泵系統，並採用多轉速或變轉速的風扇。當空調負載需求仍在，但外氣溫度已降低至不利於主機運轉之程度時，可以調降冷卻水流量，或降低冷卻水塔的風扇運轉數量或轉速，以降低冷卻水側的耗電量，並使冰水主機免除異常停機而持續運轉。必須留意的是，冰水與冷卻

水側的流量變化、冷卻水塔風扇及冰水主機能力控制是相互影響的，要有最省能的系統與穩定的冰水水溫控制尚須有豐富的主機與工程經驗來配合才能完成。

除此之外，在中央空調系統中可利用各式的感測元件，如感溫器、二氧化碳濃度感測器等分置於送風系統的主要位置，透過中央監控系統，可以依照各區域的室內溫度變化、使用人數、二氧化碳濃度進行空氣調節，包括各區域外氣換氣量、室內溫度調整、循環風量等室內側的精密控制，使中央空調系統的調節能達到全系統節能的目的。

六、結論

變頻螺旋式冰水機具有高部份負載效率之特性，配合負載管理策略進行主機之熱交換器設計，可使主機於變水量的條件下維持相當好的部份負載性能。同時，一次側變水量可大量節省冰水泵浦於部分負載時之耗電量，若再搭配變頻螺旋式冰水機的使用，可進一步節省冰水機群之總耗電量。在控制上，藉由專用控制器與主機個別冰水管路電動關斷閥之設置，可做到主機群之個別起停控制。但須注意冰水主機之冰水最小及最大流量限制，以及機群啟停時流量變化對於冰水出水溫度所造成的影響。一次側變水量所增加的設備成本可於合理的年限中回收。

誌謝

本文為經濟部能源局能源研究發展基金贊助下完成，特此誌謝。

參考文獻

1. ARI Standard 550/590-2003, Performance Rating of Water – Chilling Packages Using the Vapor Compression Cycle
2. 劉中哲，劉家宏，鄭錫聰，「冰水機節能新趨勢—變頻螺旋式冰水機」，冷凍與空調雜誌，第 35 期，52-57 頁，2005。
3. 劉中哲，廖建順，劉家宏，「客製化冰水機設計軟體與運轉成本分析軟體介紹」，冷凍與空調雜誌，第 41 期，53-58 頁，2006。

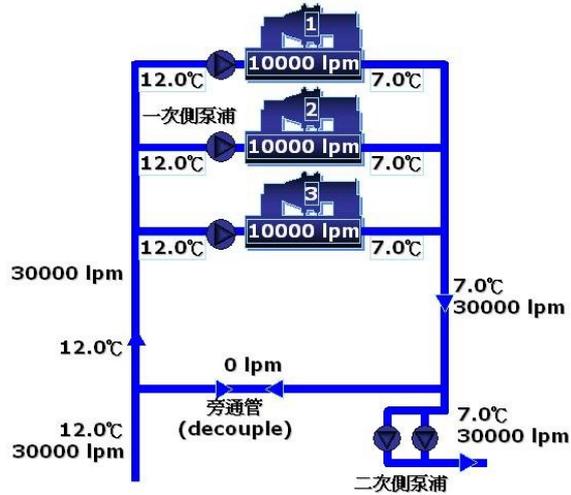


圖 1、一次/二次水循環系統溫度與流量狀態(全載)

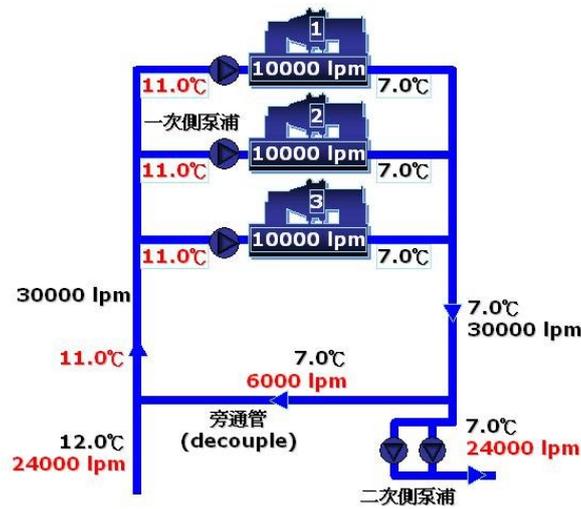


圖 2、一次/二次水循環系統溫度與流量狀態(部份負載)

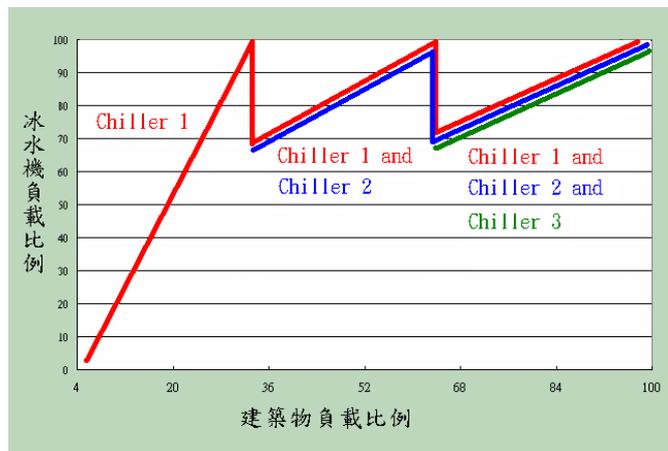


圖 3、三台冰水機於一次/二次水循環系統中之各機負載變化

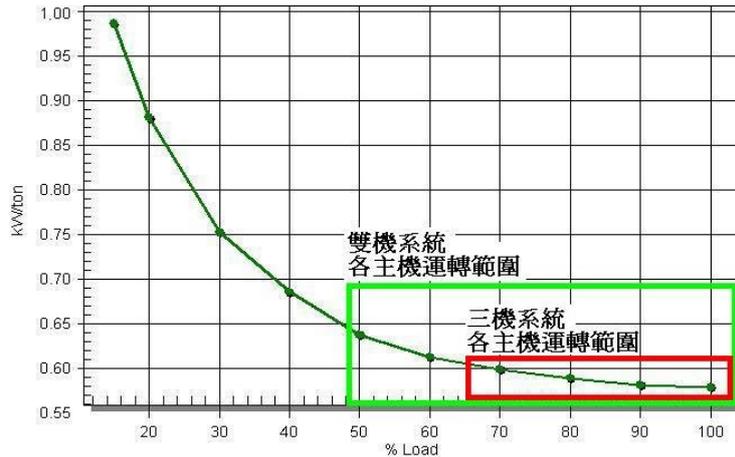


圖 4、典型之固定冷卻水入水溫度之冰水機最常運轉範圍與效率

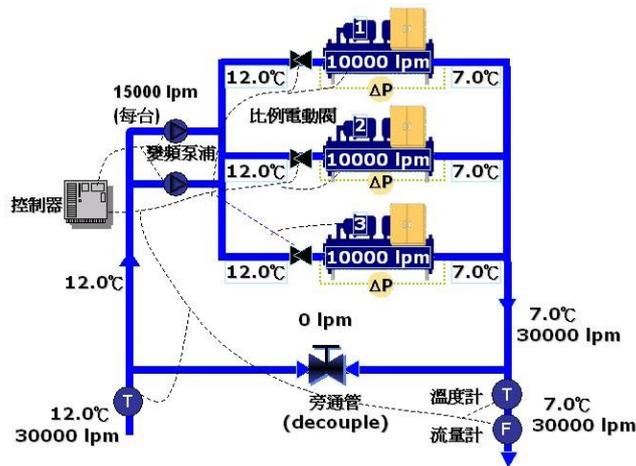


圖 5、一次側變水量系統全載溫度與流量狀態(30000 lpm)

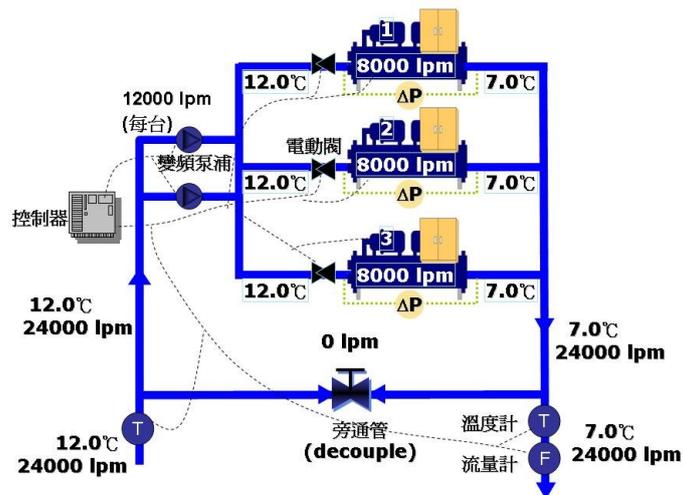


圖 6、一次側變水量系統部份負載溫度與流量狀態(24000 lpm)

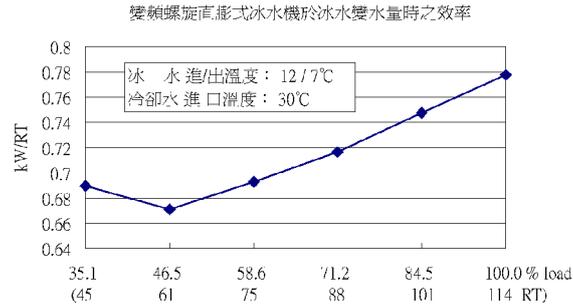


圖 7、變頻螺旋直膨式冰水機於冰水變水量時之效率

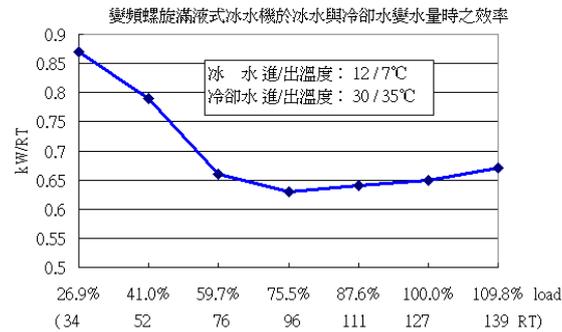


圖 8、變頻螺旋滿液式冰水機於冰水與冷卻水變水量時之效率

表 1、各式水循環系統部份負載耗能分析(全載 750 RT 於 600 RT 負載時)

系統名稱	一次/二次側定水量	一次側變水量搭配定頻機	一次側變水量搭配變頻機
主機配置	250 RT 定頻機三台	250 RT 定頻機三台	250 RT 變頻機三台
泵浦配置	一般揚程 2500 l/min (13 kW) 定頻六台(一次、二次各三台)	高揚程 2500 l/min (20 kW)變 頻三台	同左
電動閥需求	不需	需要(機群啟停關斷用)	同左
各主機水量變化	定水量	變化量相同	同左
於 600 RT 負載時主機能力、效率與總耗電量	三台皆為 200 RT、 <u>0.65</u> kW/RT，總耗電量為 <u>390 kW</u>	三台皆為 200 RT、 <u>0.66</u> kW/RT，總耗電量為 <u>396 kW</u>	三台皆為 200 RT、 <u>0.63</u> kW/RT，總耗電量為 <u>378 kW</u>
於 600 RT 負載時泵浦耗電量	一次側 39 kW，二次側 30 kW (二次側流量下降)，共 <u>69 kW</u>	2000 l/min 耗電量為 12 kW， 三台共 <u>36 kW</u>	同左，共 <u>36 kW</u>
主機加泵浦耗電量	<u>459 kW</u>	<u>432 kW</u> (-5.9%)	<u>414 kW</u> (-9.8%)