

國際中央空調系統能效管理措施及系統能效提升設計原則

摘要

空調為建築耗能之大宗，中央空調涉及複雜系統各部件熱量傳遞，其系統綜合能效頗具整合管理潛力；本文首先追蹤新加坡、美國對於中央空調系統能效管理之最新動態；並蒐集分析國內中央空調場域水側系統能效值；訪談專家技師，彙整中央空調高能效設計原則；最終歸納國內推動中央空調水側系統能效管理制度及高能效中央空調系統設計之方向。

一、前言

現代變頻化中央空調系統涉及多種設備部件間熱量傳遞與水量、風量、冷媒量調控，即便個別設備部件效率傑出，若多種設備或部件間運轉協調不良，將出現系統虛耗效率不彰之問題，為國內外技師學者長期追蹤精進之議題；我國中大型商辦建築常採中央空調系統，空調耗電為建築夏季用電最大宗，實有必要優先關注中央空調系統節能控制與管理，以因應用電吃緊之問題。

二、國際中央空調系統能效管理制度概說

在關注大型空調系統能效時，不外乎優先切入其耗電大宗「水側系統(包含冰水主機、冰水泵、冷卻水泵、冷卻水塔)」；國內而言，水側系統約占中央空調全系統用電超過6成之譜，並涉及冰水主機、水泵、冷卻水塔之水量水溫綜合運轉匹配，對於中央空調整體性能具決定性影響。中央空調「水側系統」能效，一般以 kW/RT 或 kW/ton 表示，數值愈小效率愈佳，計算上係以中央空調機組之「冰水主機、冰水泵、冷卻水泵、冷卻水塔」之水側系統總耗電(kW)，除以由機組冰水出入水溫差及流量換算之供應冷凍噸(RT)而得，定義及計算邊界概念如圖1所示。

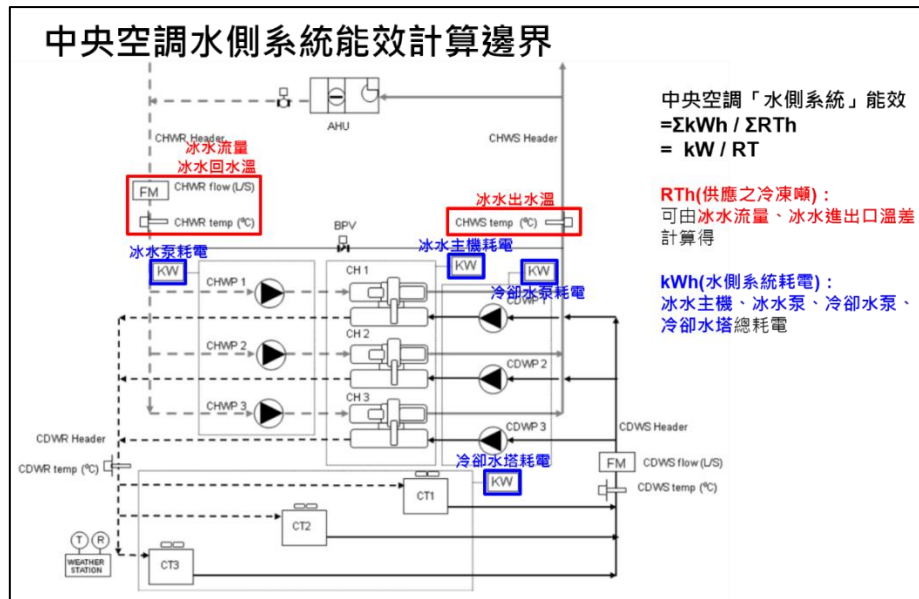


圖 1、中央空調水側系統能效計算範疇

事實上，中央空調「水側系統」能效(亦稱冰水機房系統能效)並非全新概念，多年來學術和工程界探討冰水系統低能效問題之研究文獻相當多，如美國 ASHRAE 即於 2001 年揭示各種技術情境與冰水機房系統能效之關係，如圖 2 所示[1]；然落實管理的國家仍少，值得注意的是美國、新加坡已有較積極的作為，相信會是國際節能產業的新議題。以下簡述這兩個國家的具體作法：

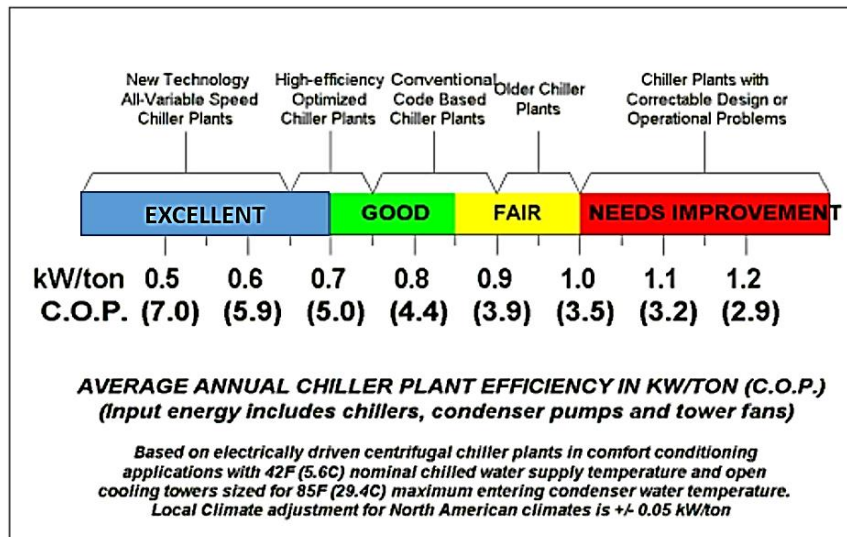


圖 2、美國 ASHRAE 針對中央空調冰水機房系統能效與技術情境關係圖 [1]

1. 美國 ASHRAE 開始要求中央空調系統能效監測

美國冷凍空調協會於 2016 年公告新版 ASHRAE Standard 90.1 [2]，已可見其

中 6.4.3.11 小節要求大於特定尖峰負載容量之新設水冷、氣冷式冰水系統設置量測儀表，量測冰水系統機房運轉之電力消耗與系統效率，雖尚未落實至冰水系統能效管理，但可見其企圖乃收集並建立冰水系統能效基線，做為未來管理之依據。

2. 新加坡中央空調能效管理已小有成就

新加坡為全球少數已訂定中央空調系統能效管理制度者，該國之建築節能主管機關建設局(Building & Construction Authority)於 2013 年起，在綠建築標章 Green Mark 中要求管理中央空調「水側系統」能效[3].[4]，並透過建築管理母法 Building Control Act，將綠建築標章提升為強制要求，進而強制要求中央空調系統能效，管理重點包含以下三項：

(1). 綠建築標章 Green Mark 強制化：

透過強制條例要求 $>2000\text{m}^2$ 之新建/增建/改建建築，以及 $>5000\text{m}^2$ 執行中央空調更新工程之既有建築，需符合 Green Mark 認證級最低分數要求及必要門檻指標。

(2). 綠建築標章 Green Mark 要求監測中央空調水側系統能效，並應符合特定能效值：

新加坡綠建築標章 Green Mark 門檻指標包含：於中央空調系統中設置特定精度之溫度計、供校驗用溫度計備用套筒、流量計、電力計以監測中央空調水側系統能效；且需符合特定中央空調水側系統能效數值要求。

(3). 三年一次建築空調系統定期能源查核：

設有中央空調系統，且因「(1).綠建築標章 Green Mark 強制化」而必須取得綠建築標章之建築業主，每三年一次應委託專業技師製作中央空調水側系統查核報告，向新加坡建設局申報一週之中央空調水側系統能效數據，並需符合特定能效數值。

2015~2017 年 Green Mark 大幅改版，除維持前述中央空調水側系統能效監測與數值要求外，亦將管理範疇擴及中央空調空氣側系統，甚至追加「中央空調全系統能效指標(kW/RT)」做為管理指標。下表 1 針對新版 Green Mark 提及 3 種中央空調能效管理指標加以說明。後續則分別針對新加坡 Green Mark 對中央空調系統能效規定之更新動態加以說明：

表 1、Green Mark 中央空調能效管理範疇概說

管理指標	管理範疇
水側系統能效 (kW/RT)	以冰水溫差與流量計算冷凍噸(RT)，另計算冰水主機、空調水泵、冷卻水塔總耗功(kW)，相除可得指標
空氣側系統能效 (kW/RT)	以冰水溫差與流量計算冷凍噸(RT)，另計算送風設備(如空調箱、小型風管機等)總耗功(kW)，相除可得指標
全系統能效 (kW/RT)	以冰水溫差與流量計算冷凍噸(RT)，另計算冰水主機、空調水泵、冷卻水塔、送風設備(如空調箱、小型風管機等)總耗功(kW)，相除可得指標

以新建非居住類建築為對象之 Green Mark 2015 版並已於 2017 年實施，其內容除維持既有版本針對中央空調水側系統能效之管理外，亦追加「全系統能效管理」，管理方式如下表 2 [5]：

表 2、Green Mark 2015 年版中央空調能效管理指標 [5]

Green Mark 2015 版 對於中央空調能效之 要求		水側系統 kW/RT (必要門檻指標)	全系統 kW/RT (必要門檻指標)	全系統 kW/RT (得分指標)
新建系統 <500 RT	合格級	0.8	--	優於 1.08 kW/RT 每 1% 得 0.2 分， 最高得 5 分
	金級	0.75	--	
	金+級	0.7	0.95	
	白金級	0.68	0.93	
新建系統 ≥500 RT	合格級	0.7	--	優於 0.98 kW/RT 每 1% 得 0.2 分， 最高得 5 分
	金級	0.68	--	
	金+級	0.65	0.9	
	白金級	0.65	0.9	

2017 年起，新加坡建設局公告針對既有非居住類建築的 Green Mark 2017 年 先導版(公告但尚未實施)，追加「空氣側系統能效管理」，以 kW/RT 優於基準值多少百分比計算得分，如下表 3 所示[6]：

表 3、Green Mark 2017 年版中央空調能效管理指標 [6]

Green Mark 2017 版 對於中央空調能效之 要求		水側系統 kW/RT (必要指門檻標)	水側系統 kW/RT (得分指標)	空氣側系統 kW/RT (得分指標)
既有系統 改善，總	合格級	0.85	優於 0.85 kW/RT 每 1% 得 0.6 分，	優於 0.28 kW/RT 每
	金級	0.75		

容量<500 RT	金+級	0.7	最高 12 分	1%得 0.14 分，最高 4 分
	白金級	0.68		
既有系統 改善，總 容量≥500 RT	合格級	0.75	優於 0.75 kW/RT 每 1%得 0.6 分， 最高 12 分	
	金級	0.7		
	金+級	0.68		
	白金級	0.65		

三、本土場域中央空調水側系統能效量測

為掌握國內中央空調能效數值特性與落實管理之可行性，本研究於 2017 年啟動本土中央空調場域水側系統能效量測工作，完成 20 棟不同地域（含全台北、中、南場域）、空調噸數、類型建物（如：廠房、醫院、機房、展覽館及辦公大樓）及營運時間（一般 10~12 小時使用及 24 小時運轉）之長期水側系統能效（kW/RT）量測；礙於人力、場域接洽狀況，各案例量測期間約落在該年度 4~9 月間。分析數據有以下重要發現：

1. 水側系統能效分布概況：本研究 20 處本土既有中央空調場域 kW/RT 約落 0.73~2.17 kW/RT 之間，平均值約 1.2 kW/RT。
2. 個案 kW/RT 分布特性：一般空調系統低負載率(或使用噸數低)時，kW/RT 較分散且較差；高負載率(或使用噸數低)時，kW/RT 分布較集中且較佳，如圖 2 所示，此現象亦意味著冰水主機超量設計常造成 kW/RT 較差。另，場域若有良好之冰水主機台數切換控制及全系統變頻控制時，則有機會使低負載率(或使用噸數低)使用時之 kW/RT 維持與高負載使用時接近（如圖 2 右）。

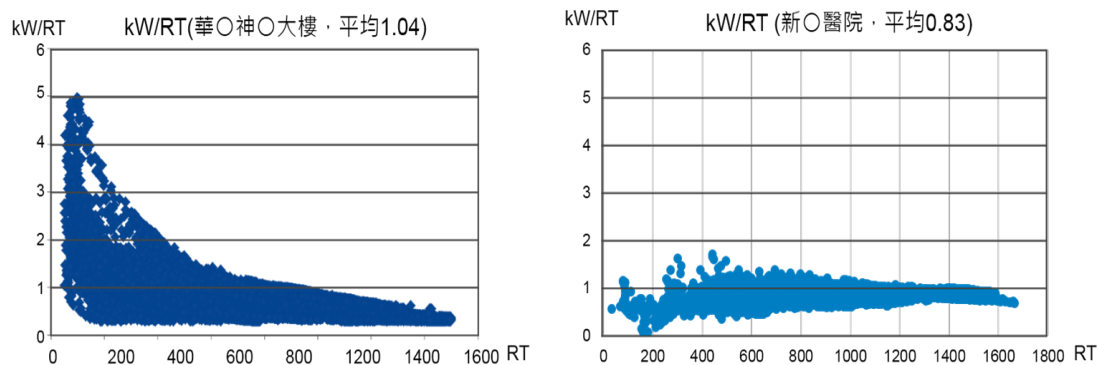


圖 2、典型無變頻案例(左)與全變頻優良控制案例(右)kW/RT 數值分布差異

3. 不同案例相較下，空調主機額定 COP 並非水側系統 kW/RT 優劣之最關鍵因素：圖 3、圖 4 數據顯示，主機額定 COP 佳，kW/RT 不見得佳。初步研判，低負載率(低噸數)運轉控制可能是影響 kW/RT 之重要因素之一。

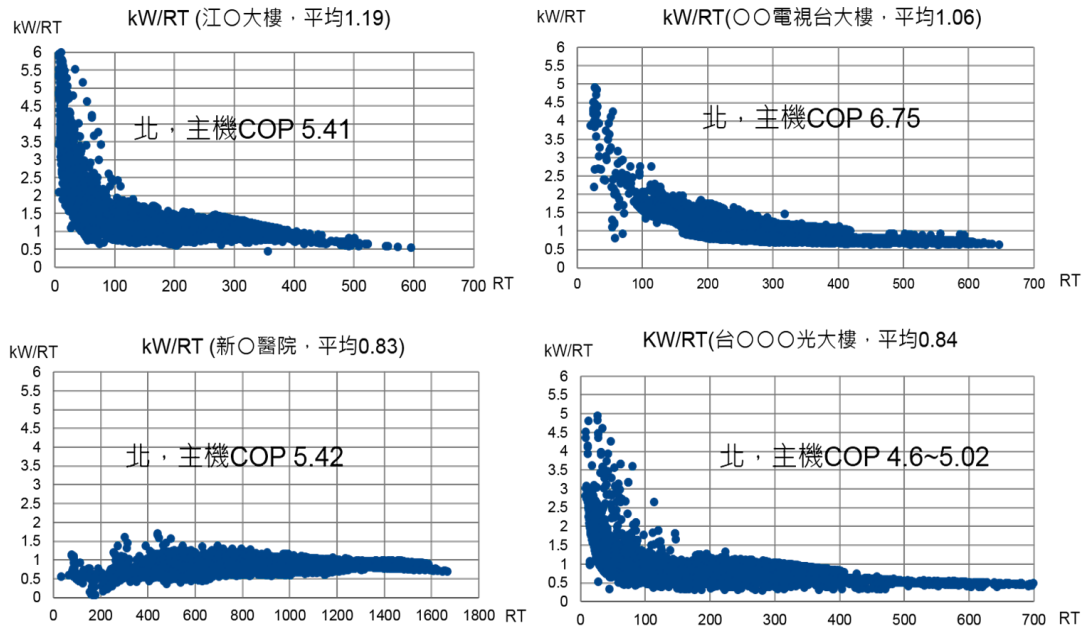


圖 3 北區 4 案例可顯示主機額定 COP 非影響系統 kW/RT 之關鍵因素

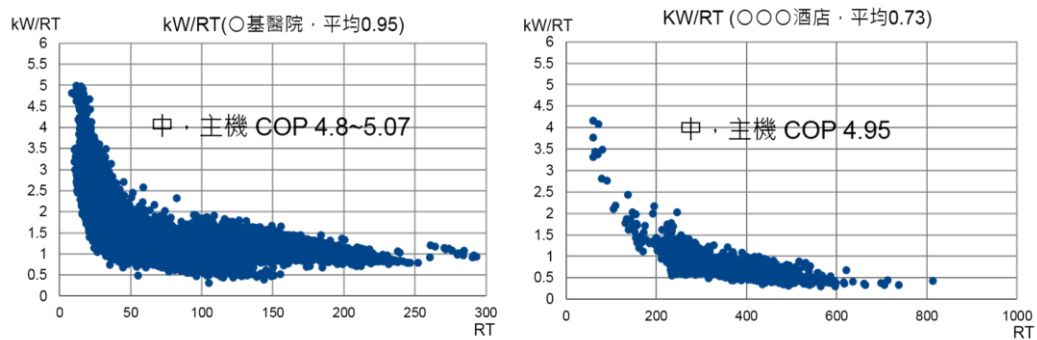


圖 4 中區 2 案例可顯示主機額定 COP 非影響系統 kW/RT 之關鍵因素

4. 地區氣候差異、季節氣候差異、建築營運時間差異暫無明顯影響 kW/RT 之情形：整體而言，本研究量測各地案例逐月 kW/RT 雖有變動，但暫無法明確指出地區氣候、季節氣候、建築營運對於 kW/RT 之影響。

5. 既有中央空調系統溫度、水量不易量準：流量計常因既有空調機房狹小，無長

直管適合安裝之位置，影響準度；系統維護不佳，水管壁結垢恐影響超音波流量計準度；安裝溫度探頭(套筒)之角度及深入水管之位置影響溫度量測準度。溫度量測點須鑽孔，至少停水停機 1 天，不易獲建築業者接受；貼片式溫度計未接觸水體，雖不需鑽孔，但準確性低。

四、國際中央空調水側系統能效提升經驗

國內目前對本土中央空調能效落點、如何優化空調設計與控制等議題了解有限，不易判斷新加坡訂定之能效要求達成難易度如何，該要求於我國實施之可行性如何；因此，除調查國內場域能效外，本研究亦與新加坡曾執行中央空調設計符合 Green Mark 要求之專業空調技師有所接觸，初步了解冰水系統各部件設備效率、系統水路設計(揚程、阻抗、流量)、變頻調控、主機台數控制、冰水溫差設計及熱交換效率等皆會影響整體水側系統能效；新加坡經驗技師建議參考 ASHRAE Green Guide [8]以落實高能效設計，該指引提供一份冰水機房追求高效率的節能目標如表 4，與新加坡執行經驗之高能效成績吻合，顯見其節能技術具可行性。

表 4、高效率機房設計預期的節能目標 [8]

設備	典型 kW/RT (kW/kWR)	高效 kW/RT (kW/kWR)	差異 (節電潛力)	% 節電比例
主機	0.62 (0.1763)	0.485 (0.1379)	0.135 (0.0384)	22%
冷卻水塔	0.045 (0.0128)	0.012 (0.0034)	0.033 (0.0094)	73%
冷卻水泵	0.0589 (0.0167)	0.022 (0.0063)	0.0369 (0.0104)	63%
冰水泵	0.0765 (0.0218)	0.026 (0.0074)	0.0505 (0.0144)	66%
總水側系統	0.8004 (0.2276)	0.545 (0.155)	0.2554 (0.0726)	32%

觀察機房內主要設備在單位冷凍噸(RT)下的耗電量(kW)，冰水主機乃是主要耗電設備，其能源效率各國多有高標要求，然而，提高單一設備的能效並不保證主機於冰水系統高效運轉，所存在之差異性均已鑑諸於國內許多場域的性能實測資料。造成主機運轉時能效低落之因素甚多，然最大因素應是主機負載率低或不

足，緩解此問題的方法或可在機房配置時作「非對稱機房設計」之考量，包括有：

- 採用不同的機組容量搭配
- 不同的機組效率
- 小機組需配置較小的附屬設備(水泵等)
- 優先開較少和更小的機組
- 小噸數變頻機組搭配高效率定頻機組

設計空調系統宜配合建築空調負載模擬，以獲得全年逐月逐時的空調負載分布，再依該負載分布並參酌「非對稱機房設計」理念最佳化搭配冰水主機容量，盡量避免低負載率運轉。

當冰水主機已做到優化配置後，進一步節能則必須倚賴水側系統附屬設備(冷卻水塔、冷卻水泵及冰水泵)之效率提升，表 4 顯示該些設備在高效率機房機房設計仍有 63~73%的節能空間。若計算冰水主機和附屬設備總耗電之相對占比，可以發現典型機房為 77.5%：22.5%，而高效率機房則為 90%：10%，這也呼應著好的水側系統設計，附屬設備必須相當省電，使其耗電占比降低。然這些節能設計觀念與國內普遍設計方法不甚相同，以下摘錄重要原則如表 5 所示：

表 5、Green Guide 高效率空調設計原則

達成 ASHRAE Green Guide 優化空調系統之設計建議	我國或新加坡一般設計
1. 建議採低揚程(<20m)設計	1. 高揚程(常>40m)設計
2. 建議採一次側變流量設計、全變頻設計	2. 常採一二次側(二次變流量)設計
3. 建議採低流量(盡量縮減水泵容量)、低阻力(減少 90 度彎管、大管徑)設計	3. 水泵(流量)控制不佳、常有 90 度彎管
4.建議採大溫差冰水出回水設計(溫差>7°C)	4. 運轉時常有低出回水溫差問題(此為綜合性系統問題，非單一原因導致此現象)
5.冷卻水塔建議採風扇變頻、大溫差出回水設計(溫差>7°C)	5. 非採用變頻水塔
6. 以 AHU 為主設計	6. 常為 Fan Coil 設計 (不易做到大溫差)
	7. 水路依賴平衡閥(會增加阻力)

要降低流體輸送設備(冷卻水塔、冷卻水泵和冰水泵)的耗電，必須了解影響耗電之參數。如以下公式：

$$\text{單位冷凍噸水泵功耗} \left(\frac{\text{kW}}{\text{RT}} \right) = \frac{\text{流量}(\text{lps})/\text{RT} \times \text{揚程}(\text{m})}{100 \times \eta_P \times \eta_M}$$

公式中的 η_P 和 η_M 分別為水泵和馬達的效率，該效率跟設備和元件設計有關。而每冷凍噸(RT)之水流量(lps)及揚程(m)，則跟水側系統設計良窳關係密切。例如表 5 中建議出回水大溫差(5°C 提高為 7°C)設計，即可降低約 40% 水流量，連帶降低水泵揚程，約可節省 70% 耗電。

管路規格也可以進一步降低水泵運轉耗電，因為管路壓損主要來自兩種阻力，

$$\text{摩擦壓損} = \zeta \times (L/D) \times V^2/2g$$

$$\text{管件壓損} = \kappa \times \rho \times V^2/2g$$

前者乃水流動過程中與管壁的摩擦壓損，此壓損約正比於水流速度平方；後者乃水流管件和閥件的迴流壓損，也是約正比於水流速度平方。另外，在相同流量下，水流速度反比於管徑平方。前述推論，管路壓損的降低比例約反比於管徑比的五次方， $(D2/D1)^5$ ，故大管徑、少彎管和少平衡閥均可減少壓損並提高水泵輸送效率。

冰水系統經常出現「低出回水溫差(Low delta T)」現象[9]，也是造成水泵耗電居高不下的因素之一，因為溫差小造成水流量需求大，導致與前述優化空調水路設計之方向背道而馳。Low delta T 常非肇因於單一原因，例如，主機與負載的匹配不當、熱交換器效率低、供水溫度調整、閥件控制不當或失靈、非變流量控制和管路有旁通、短循環等均為可能因素，需深入檢討該現象成因；然由提升系統能效之觀點而言，避免 Low delta T 亦是重點努力方向。

五、未來推動方向探討

為確認中央空調系統能效管理於國內推動之可能方向與挑戰，本研究透過量測中央空調案例能效、訪談中央空調水側系統管理制度之相關利害關係人、邀集產官學專家舉辦諮詢會徵詢意見等方式，初步分析並歸納各界對於中央空調水側系統能效管理制度之共通意見，可分為管理制度、量測技術、空調能效提升三面向論述：

1. 管理制度面向

(1). 中央空調水側系統能效管理之合理性與重要性：據本研究調查數據佐證，

管理中央空調水側系統能效確實有別於管理空調設備出廠能效，各界亦認同推動中央空調水側系統能效管理制度更能綜合掌握系統實際運狀況與能效，有助於國內中央空調節能及高效率化。

- (2). **利害關係人關注議題分析：**訪談發現，空調主機廠商、空調控制廠商、冷凍空調技師、量測儀器廠商、ESCO 協會等皆認推動中央空調水側系統能效管理之重點在於統一並明確化「量測方法」、「查驗機制」、「主管機關」；建築用戶端則在意「增量成本(包含設備與人事)」與「推動期程」。
- (3). **增量成本障礙、節能效益誘因不足為中央空調水側系統能效管理制度之隱憂：**整體制度預期以「先要求監測能效，後逐步要求符合能效數值」方式推動，推動初期預期有儀表增量成本及無節能效益之障礙；且國內節能受惠者與節能工程投資者常為不同對象，恐造成節能投資誘因不足，為國內推動高效率中央空調系統及長期節能監控之隱憂。

2. 量測技術面向

- (1). **宜參考新加坡經驗，訂定中央空調水側系統量測規範，統一量測方法：**新加坡針對中央空調水側系統能效相關量測儀表之項目/類型/數量/安裝位置/精度、儀表校驗方式與頻率、資料紀錄與保存等，訂有「SS 591：中央空調水側系統能效長期量測規範」[10]；國內刻正由產官學單位共同參考新加坡之規範架構，並擬以國內「CNS 12575 蒸氣壓縮式冰水機組」所要求之溫度計、流量計、電力計精度為主，逐步建立國內中央空調水側系統量測規範，以利推動制度。

3. 空調能效提升面向

- (1). **抑制超量設計，鼓勵依負荷採「非對稱機房設計」搭配冰水主機台數控制技術：**冰水主機超量設計及多主機系統之台數與容量匹配為影響中央空調水側系統能效優劣之重要因素，故宜加強落實冰水主機適量設計及容量與台數匹配控制。
- (2). **透過教育訓練推廣高能效空調設計概念：**據國外經驗，大溫差、低流量、低揚程、低阻抗、全變頻化為中央空調系統高能效設計原則，建議透過教育訓練和推廣活動，逐步普及節能理念，落實高能效系統設計。

六、結論

空調為建築耗能之大宗，中央空調涉及系統各部件間熱量傳遞，其系統綜合能效優化將可催生整合設計和管理之新產業需求；本文盤點新加坡、美國對於中央空調水側系統能效管理之具體作為，並循其經驗，蒐集分析國內中央空調場域現況及水側系統能效值，訪談相關專家和技師，初步有以下結論：

1. 中央空調水側系統能效管理不同於現行冰水主機能效管理，更具掌握系統實際運轉效果之功能，具推動之合理性與重要性。
2. 建立中央空調水側系統能效量測規範，統一量測方法為國內推動管理制度之基礎。
3. 中央空調水側系統能效優劣影響因素複雜，與系統中局部部件設備效率、整體水路設計、設備容量批配與調控皆有關聯；除採用高效率部件設備外，建議採適量設計，鼓勵依負荷採「非對稱機房設計」搭配冰水主機台數控制技術，並採大溫差、低流量、低揚程、低阻抗、全變頻化等原則執行空調設計，以提升系統能效。

七、參考文獻

- [1]. Thomas Hartman, "All-Variable Speed Centrifugal Chiller Plants", ASHRAE Journal, 2001:
<https://www.ashrae.org/File%20Library/docLib/eNewsletters/Hartman--0614--12082016feature.pdf>
- [2]. ASHRAE, "ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings", 2016
- [3]. BCA Code on Environmental Sustainability Measures for Existing Buildings (1st Edition) :
https://www.bca.gov.sg/EnvSusLegislation/others/Code_Env_Sus_Measures_Existing_Building.pdf
- [4]. BCA Code on Periodic Energy Audit of Building Cooling System (1st Edition) :
https://www.bca.gov.sg/EnvSusLegislation/others/Code_Periodic_Energy_Audit_Bldg_Cool_Sys.pdf

- [5]. GM NRB:2015-BCA Green Mark for Non-Residential Buildings:
https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/Green_Mark_NRB_2015_Criteria.pdf
- [6]. GM ENRB:2017-BCA Green Mark for Existing Non-Residential Buildings:
https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/GM_ENRB_2017_full_criteria.pdf
- [7]. BCA Building Energy Benchmarking Report 2016 :
https://www.bca.gov.sg/GreenMark/others/BCA_BEER_Abridged_FA_2016.pdf
- [8]. John M. Swift, Jr., *etc.* , “ASHRAE GreenGuide: The Design, Construction, And Operation Of Sustainable Buildings”, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2010
- [9]. Steven T. Taylor, “Degrading Chilled Water Plant Delta-T: Causes and Mitigation”, ASHRAE Transactions Vol. 108, 2002: http://www.taylor-engineering.com/Websites/taylor-engineering/articles/ASHRAE_Symposium_AC-02-6-1_Degrading_Delta-T.pdf
- [10]. Singapore Building and Construction Standards Committee, “SS 591: Singapore Standard - Code of Practice for Long Term Measurement of Central Chilled Water System Energy Efficiency”, 2013