

雲端貨櫃式數據中心熱管理系統回顧

摘要

本文針對各家廠商的雲端貨櫃式數據中心的熱管理系統進行回顧與分析。經由雲端貨櫃內機櫃與散熱裝置的設計與擺設，熱流場的分析比較，以及自然冷源的利用，來比較不同型式雲端貨櫃的散熱原理與節能效果。

前言

近年來隨著雲端運算的興起，雲端貨櫃式數據中心也逐漸受到關注並被廣泛的討論。雲端貨櫃式數據中心擁有模組化、異地製造、可移動性、快速佈署及隨需擴容等特性，可大幅縮短機房的建置時間與成本。例如傳統式的數據中心從建築物設計到所有設備配置完成約需一年半至兩年，使用貨櫃式數據中心約可縮短為 6~8 週，同時建置成本約可降低二~三成。早期伺服器機櫃的熱負載每櫃約 3~5kW，雲端機櫃每櫃熱負載可高達 20~30kW，因此在一個雲端貨櫃內需設計 200~300kW 致冷能力的散熱系統也不足為奇。在傳統機房中，冷卻系統的耗電量幾乎占整體機房總耗電的一半甚至更多，但在如此狹小的貨櫃空間內，要處理雲端機櫃運轉時所產生的高熱負載也成為一項嚴苛的挑戰，如何設計出高效又節能的散熱系統也成為雲端貨櫃業者致力發展的一項重點。有鑑於此，本文搜尋了國內外各大雲端貨櫃式數據中心的產品型錄及相關專利來進行熱管理系統的分析比較，以期找出未來機房散熱系統的發展趨勢。

回顧與分析

Sun

Blackbox (圖 1)是 Sun 最早提出雲端貨櫃式數據中心的概念，並於 2006 年推出全球首例雲端貨櫃式數據中心產品。專利 US patent 7,854,652 B2(圖 2)顯示 Blackbox 的空調系統，冷空氣先經過第一個機櫃的伺服器後產生熱空氣，熱空氣經過風扇模組(件號 44)後吹入熱交換器模組(件號 48)進行冷卻，再將冷卻後的冷空氣送入第二個機櫃，如此相互連結成密閉的空氣迴路。每組熱交換器透過冰水將伺服器產生的熱傳遞到貨櫃外面的冰水機及冷卻水塔作散熱。此系統的優點是空氣能以最短的途徑運行，可節省風扇能耗，且冷熱空氣在機櫃與熱交換器模組間自動形成隔離，不會有混風的現象。

Google

在圖 3 的照片裡 Google 的工作人員蹲在兩旁都是伺服器機櫃的地板上，並掀開其中一塊格柵式地板，熱交換器及風扇隱藏在地板下面。由專利 US patent 7,738,251 B2(圖 4)顯示中央的冷空氣被兩旁機櫃的伺服器吸入後產生熱空氣，熱空氣向下經由熱交換器模組(件號 116)冷卻後被風扇(件號 119)吸出，再經過格柵式高架地板將冷風送到中央走道的機櫃前面。貨櫃內部的空間由機櫃的擺設方式隔離出中間的冷通道和兩旁的熱通道以防止冷熱風相混，熱交換器則透過室外的冷卻水塔作散熱。由於 Google 的伺服器為訂製品，伺服器的深度較短，可在標準的貨櫃內擺設兩排機櫃後尚有空間可留給冷熱通道，同時機櫃無前後門設計以節省空間與成本。

HP

HP 在第一代貨櫃式數據中心 POD 的空調方法則與 Google 的作法恰好相反。由圖 5 顯示 HP POD 的冰水式熱交換器模組位於機櫃上方，熱空氣由機櫃後方排出後進入熱交換器模組冷卻，再經過風扇模組將冷空氣送到機櫃前方，貨櫃內部空間由機櫃的擺設形成冷熱通道。由於整個熱通道的空間相當狹窄，所以貨櫃靠近熱通道那面牆有設計維修門。有鑑於 POD 內部空間的限制，二代 Eco POD(圖 6)則改採用模組化數據中心(Modular Data Center)的概念，各模組分別為: 1.頂蓋 2.直膨式空調模組 3.維修區模組 4.機櫃模組 5.熱通道模組 6.機櫃

模組，各模組分別拖運到現場進行組裝。值得一提的是 Eco POD 引進外氣自然冷卻(Free cooling)的概念，當外氣溫溼度在合適的範圍內則開啟外氣風門，利用空調模組的風扇直接引進外氣來散熱，再將離開機櫃的熱空氣由熱通道頂部排出模組外，如圖 8(a)所示；而當夏天外氣溫溼度過高時將外氣風門關閉，改採內循環模式，以直膨式空調系統來散熱，如圖 8(b)。由於使用外氣自然冷卻之故，此系統安裝在緯度較高的地區可長時間操作在外氣模式時，其節能效果較好，PUE 值也會較低。

DELL

DELL 的數據中心也是採用類似 HP 模組化的概念，將整個數據中心拆成 1. IT 機櫃模組 2.蒸發冷卻模組 3.空調模組及 4.混風模組，各模組分別運送到現場進行組立。其散熱概念如圖 10 所示，當外氣溫溼度在伺服器可操作範圍時進行(a)的外氣模式，當外氣溫度過低時則採用(b)的混風模式，利用機櫃部份的熱出風和低溫外氣相混合以提高冷通道的空氣溫度，而當外氣溫溼度過高時則採(c)的蒸發冷卻模式，利用內含蒸發器的冷卻模組幫外氣作降溫及除濕。

Microsoft

Microsoft 的雲端數據中心(ITPAC)仍維持一般貨櫃的外型(圖 11)，同時也利用外氣的自然冷卻來幫伺服器散熱。與上述公司不同的是 Microsoft 使用空氣與水直接接觸的水簾來幫空氣降溫，而非使用傳統的鰭管式熱交換器。傳統的鰭管式熱交換器其冰水或冷媒走管內側，空氣走管外側，利用水和空氣在管內外的交錯流動來散熱；而水簾散熱則是讓空氣通過水簾，利用水氣蒸發帶走潛熱的方式來降溫。水簾降溫的特點是造價低廉，但水份直接蒸發會增加水的耗損，同時相對溼度也較不易控制。其操作模式分為外氣模式、水簾冷卻模式與混風模式三種(圖 12)。

Delta

Delta 的雲端貨櫃式數據中心有兩種，一種具有外氣自然冷卻功能(圖 13)，透過件號 101、102 和 107 三組風門的啟閉組合來切換外氣、內循環與混風三

種不同的操作模式，以件號 12 的風扇模組帶動整個氣流場的循環，而在內循環模式下以件號 13 的熱交換器來達到致冷效果。Delta 另一種貨櫃式數據中心則是以特製短版的機櫃搭配伺服器，在貨櫃內形成兩行的排列方式來增加伺服器的裝載量，每一行機櫃中則插入水平式空調機來進行散熱(圖 14)，由機櫃的排列方式自然形成中間的冷通道與兩旁的熱通道，空氣不會有混風的問題，致冷效率較高。

AST Modular

AST Modular 雲端貨櫃式數據中心的特點是利用熱管(Heat Pipe)的熱交換器幫助機櫃散熱。由於熱管的熱傳是藉由工作流體在熱管腔體內持續循環的液氣兩相變化，在熱管兩端自然形成吸熱與放熱的熱傳效果，本身並不需動力來驅動，因此相較於冰水式或直膨式的空調系統，可節省水泵或壓縮機的能耗。由圖 15 可看出其數據中心由兩個貨櫃堆疊而成，下貨櫃為機櫃模組，上貨櫃為熱管式熱交換器模組。專利 US patent 2013/0081784 A1 (圖 16)顯示 AST Modular 雲端貨櫃內氣流的運行方向，件號 4 熱管式熱交換器模組，分為上半部的內氣循環 4a 與下半部的內循環 4b，中間有隔板隔開，故外氣與內循環的空氣是各自獨立運行的。機櫃的熱出風經由風扇帶入熱管式熱交換器模組下半部內循環 4b，熱經由熱管傳導到上半部的內氣循環 4a，再經由內氣帶離貨櫃，而機櫃的熱出風通過 4b 後溫度下降回到機櫃前方，完成散熱循環。此空調系統僅需空氣循環的動力，因此可獲得較低的 PUE 值，適合長年處於低溫外氣的地區如北美及北歐等地。

Green Revolution Cooling (GRC)

伺服器傳統的散熱方法不外乎利用冷空氣帶走伺服器內部的熱，或利用冷板(Cold Plate)貼附於 CPU 等發熱量較高的元件表面上，再利用水路循環將熱帶走。Green Revolution Cooling (GRC)使用顛覆傳統的作法，以浸泡式冷卻(Submerged Cooling)的方式直接將整台伺服器浸泡在介電液中散熱。介電液如礦物油等由於本身不具導電性，因此不會使伺服器發生短路現象。浸泡式冷卻的優點是以液體與發熱元件直接接觸來散熱，所以熱傳效率極高，不像空氣散熱

需要很高的流量，也無冷板接觸熱阻的問題，且伺服器不再需要散熱風扇與散熱片，沒有風扇噪音的問題，因不與空氣接觸所以也沒有空氣相對濕度及灰塵的問題。GRC 雲端貨櫃式數據中心如圖 17 所示，圖 18、19 則說明整個浸泡式冷卻的循環系統，循環用的礦物油需約 30°C 的水來散熱，故只需外接冷卻水塔即可，不需冰水機提供冰水散熱，可大幅節省數據中心的能耗。

結語

除了上述這些公司外，世界各地尚有許多公司正積極投入此種數據中心的研發。由這些產品不難看出未來數據中心的新趨勢：外氣自然冷卻、冷熱通道隔離、更有效的空間運用、模組化設計、更高效節能的散熱方式。而在採用外氣自然冷卻的產品中仍需搭配一套致冷系統，以避免當外氣條件不適用時數據中心無法散熱的問題。傳統機房的下吹式空調機搭配高架地板的致冷方案由於所需空間較大且有混風問題，在貨櫃式數據中心已不復見。而雲端貨櫃式數據中心具有可移動性及建置成本上的優勢，未來將可能大幅取代傳統式數據機房。



圖 1 Sun 貨櫃式數據中心 BlackBox 外觀^[1]

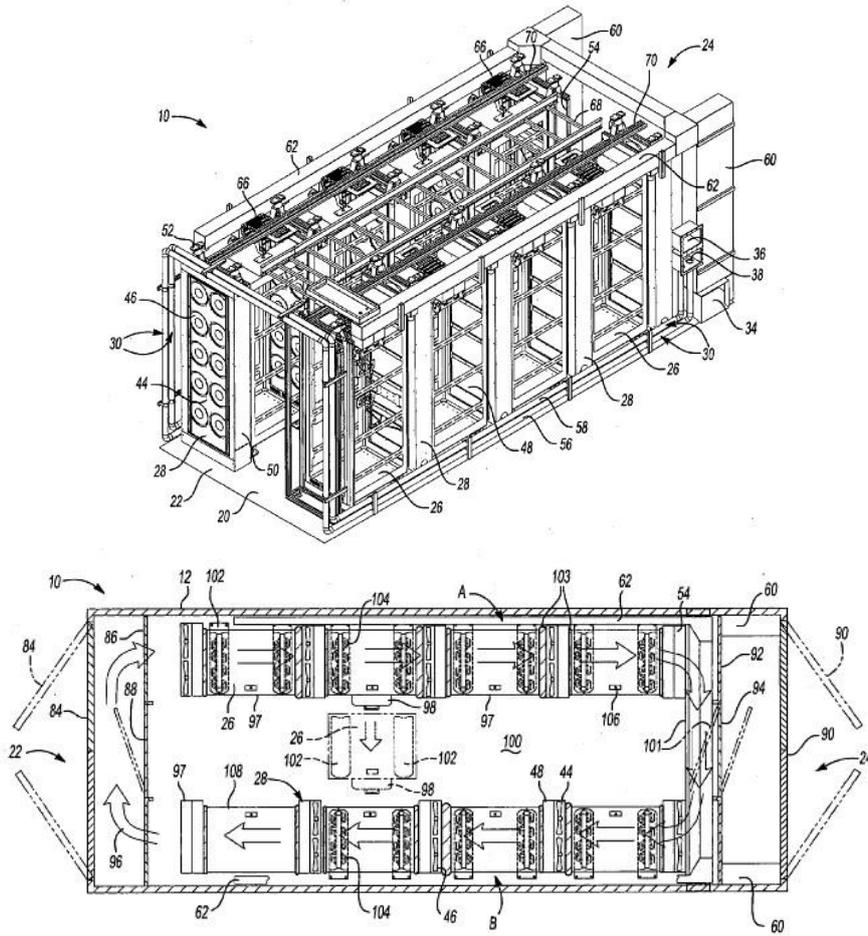


圖 2 美國專利 US 7,854,652 B2^[2]



圖 3 Google 貨櫃式數據中心的高架地板^[3]

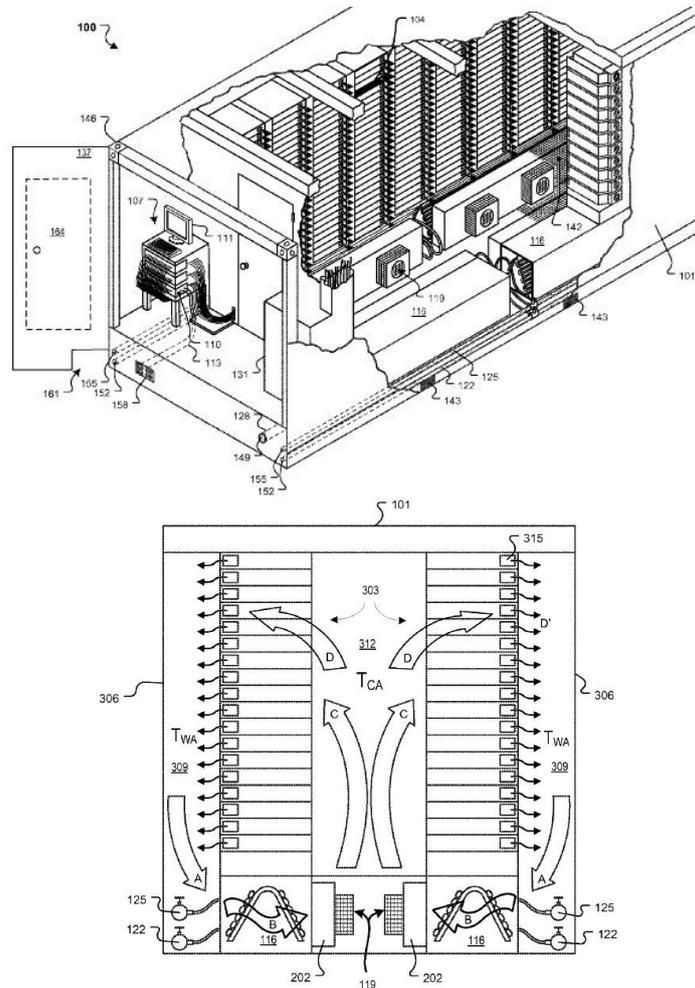


圖 4 美國專利 US 7,738,251 B2^[4]

Interior view

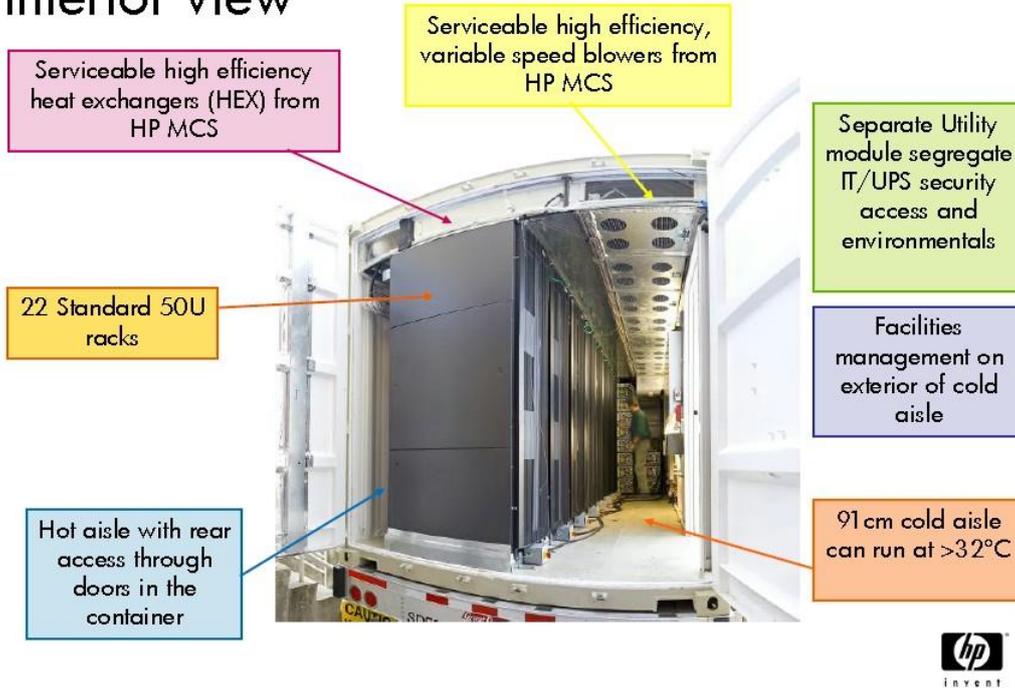


圖 5 HP POD 貨櫃式數據中心的內部構造^[5]



圖 6 HP EcoPOD 240a 數據中心外觀^[6]

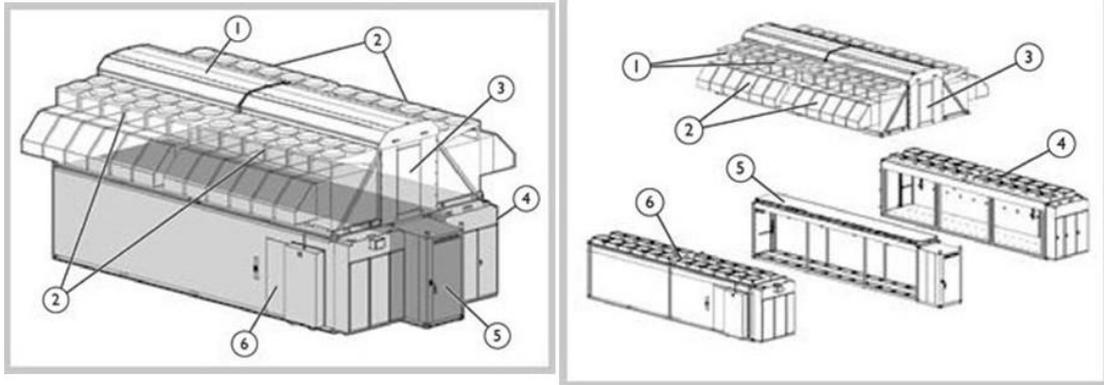
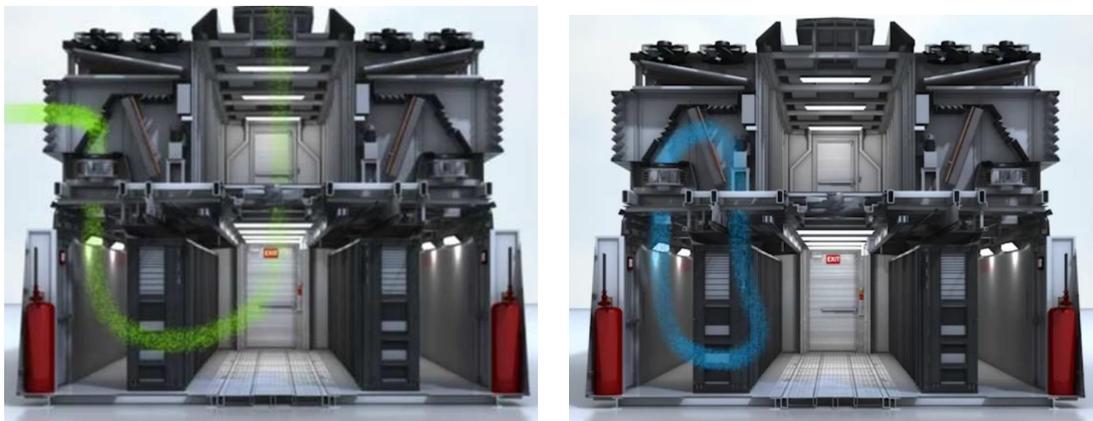


圖 7 HP EcoPOD 240a 的構成模組^[7]



(a) 外氣模式

(b) 內循環模式

圖 8 HP EcoPOD 240a 不同的操作模式^[8]



圖 9 DELL 數據中心的構成模組^[9]

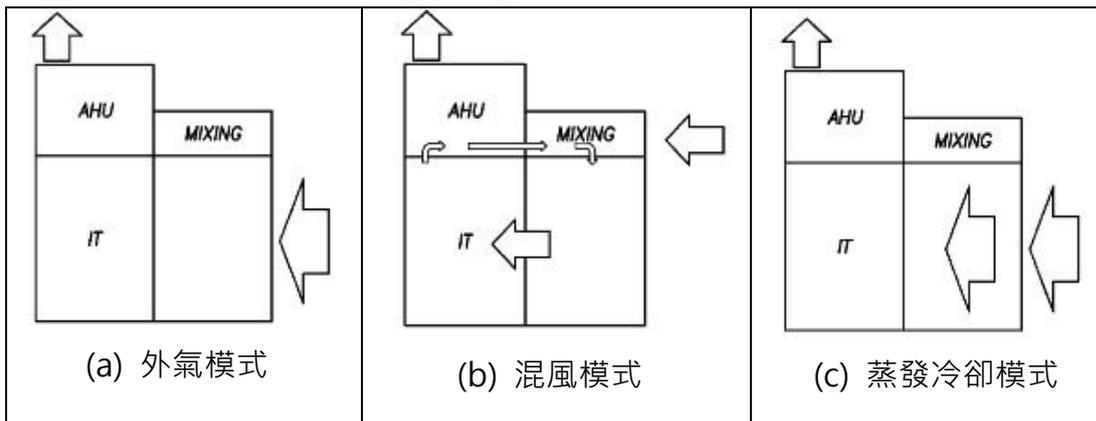
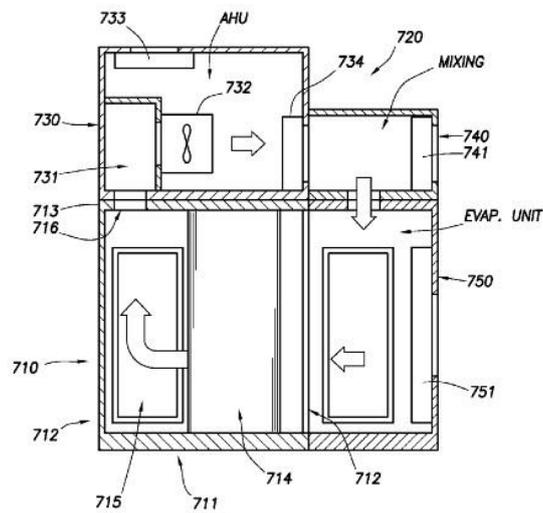


圖 10 美國專利 US 8,462,496 B2^[10]



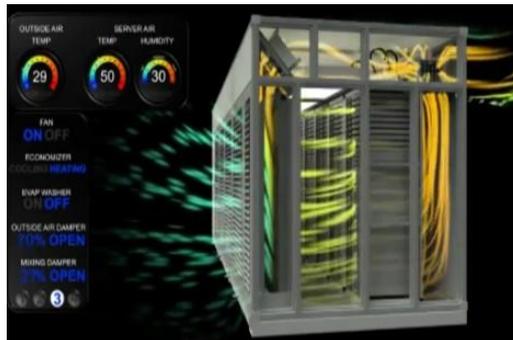
圖 11 Microsoft ITPAC 數據中心外觀^[11]



(a) 外氣模式



(b) 水簾冷卻模式



(c) 混風模式

圖 12 Microsoft ITPAC 不同的操作模式^[12]

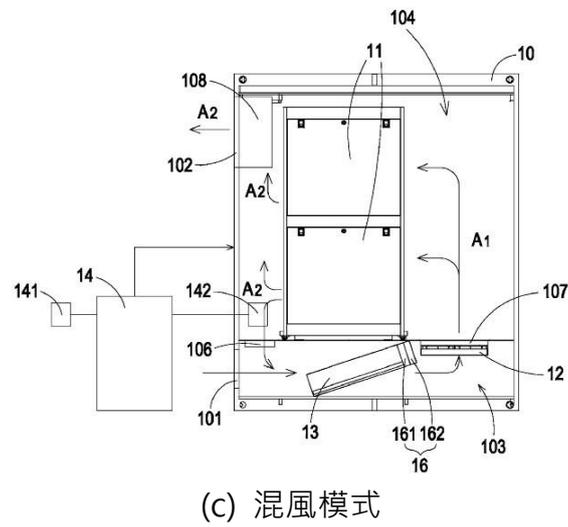
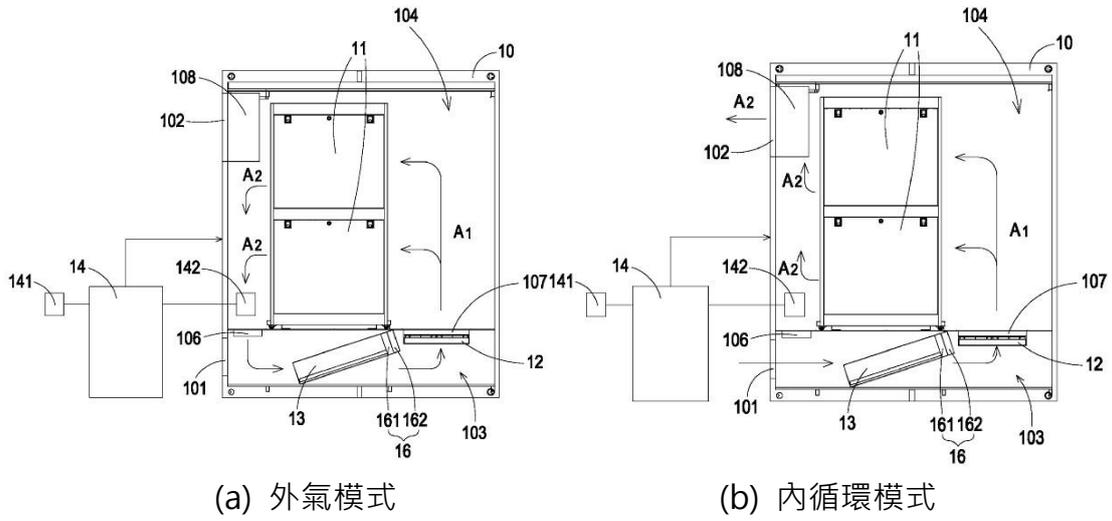


圖 13 美國專利 US 8,462,496 B2^[13]

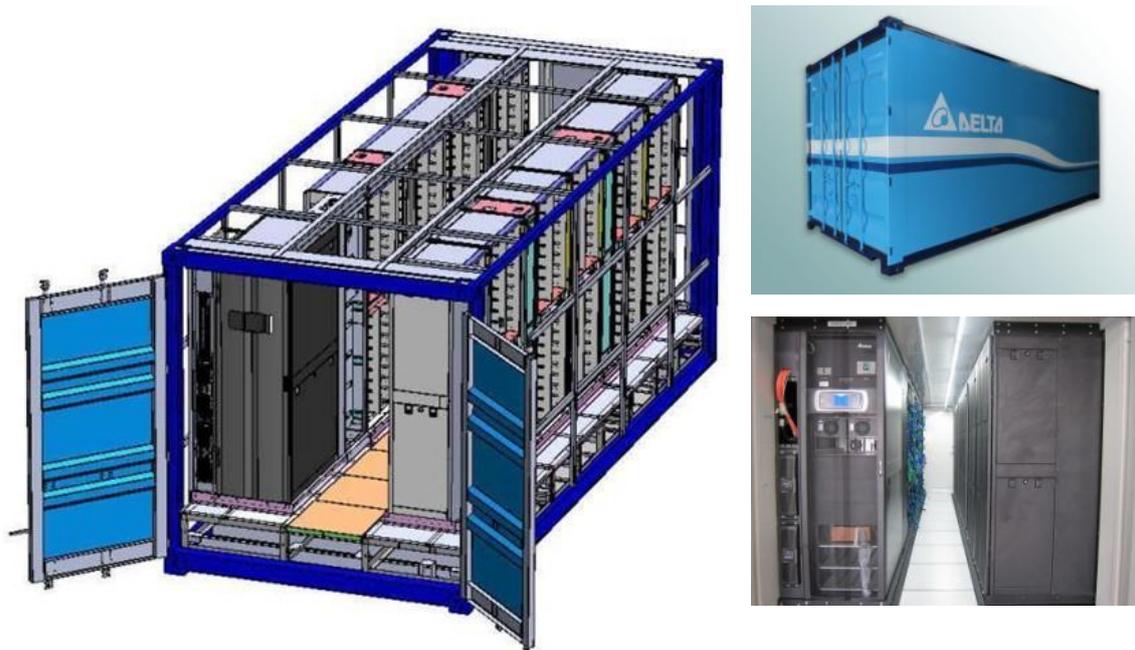


圖 14 Delta TB 數據中心外觀與內部構造



圖 15 AST Modular 數據中心外觀^[14]

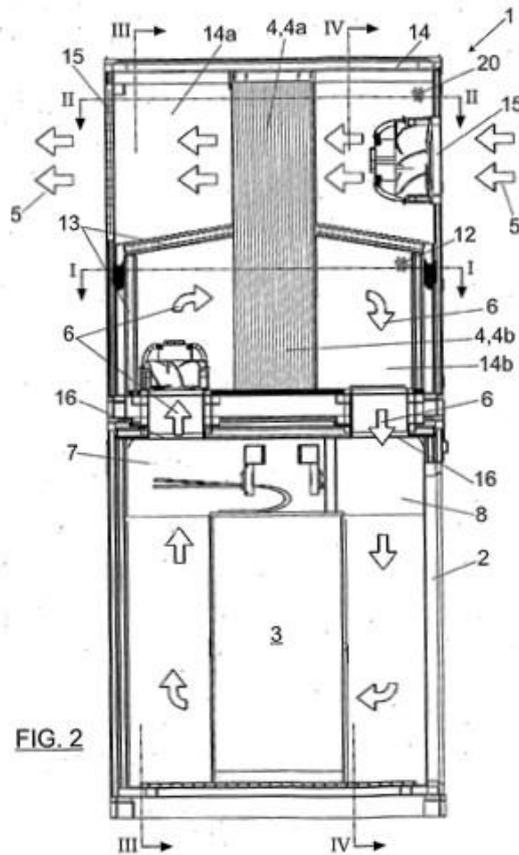


圖 16 美國專利 US 2013/0081784 A1^[15]



圖 17 Green Revolution Cooling 數據中心外觀^[16]

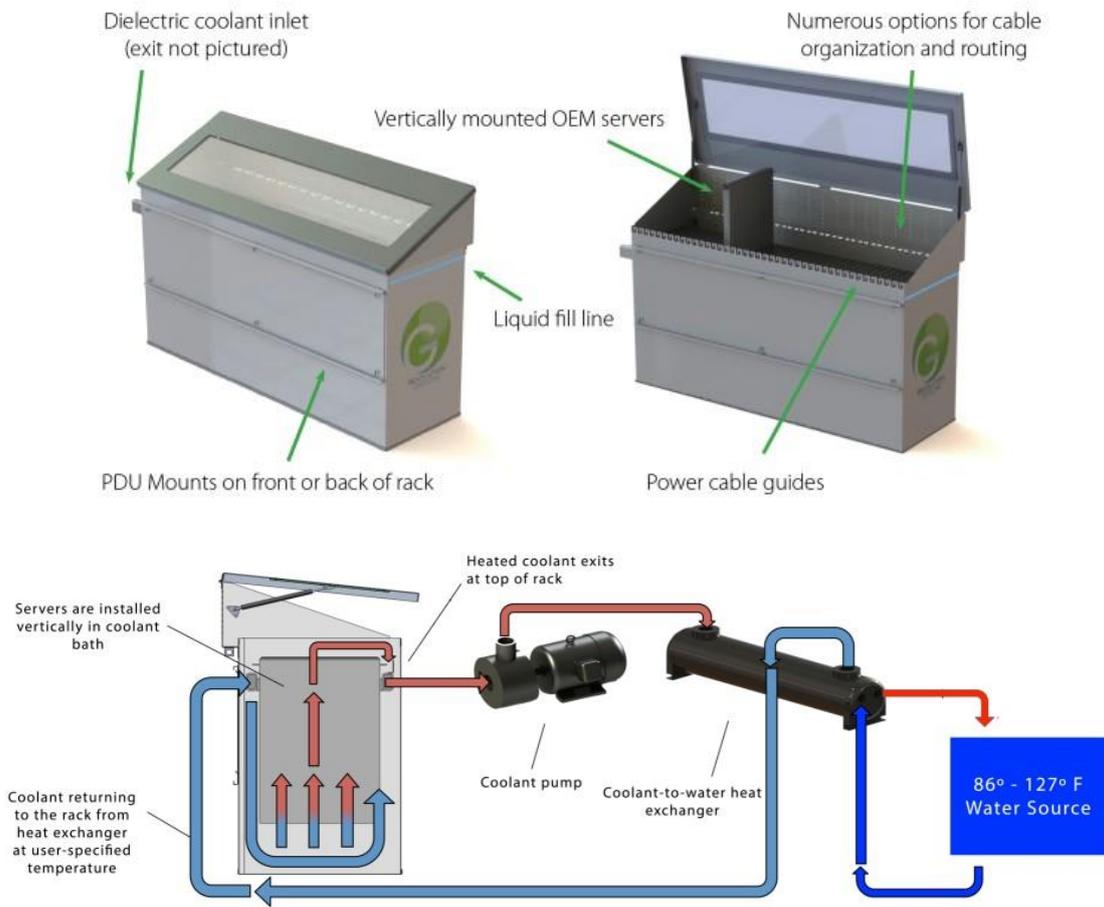


圖 18 Green Revolution Cooling 浸泡式冷卻循環示意圖^[17]

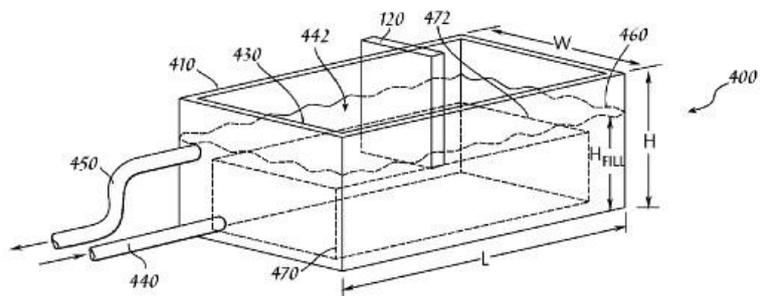


圖 19 美國專利 US 2011/0132579 A1^[18]

參考資料

1. A. Smith, "Photo: Sun's Project Blackbox",
<http://www.zdnet.com/photos/photo-suns-project-blackbox/34515>, October 16, 2006.
2. R. A. Yates, B. Ferren, W. D. Hills, L. W. Khanlian, K. D. Salter, "Server Rack Service Utilities for a Data Center in a Shipping Container," US patent 7,854,652 B2
3. S. Shankland, "Google uncloaks once-secret server",
http://news.cnet.com/8301-1001_3-10209580-92.html, April 1, 2009.
4. J. Clidas, W. Whitted, W. Hamburg, M. Skyora, W. Leung, G. Aigner, D. L. Beaty, "Modular Computing Environments," US patent 7,738,251 B2
5. E. Beck, "Delivering the data center of the future",
http://datacenter.eco.de/files/2011/04/081203_Beck_HP2.pdf, 2008.
6. HP, "Data Center on Demand: HP Performance Optimized Datacenters for the New Style of IT",
<http://h20195.www2.hp.com/V2/GetDocument.aspx?docname=4AA2-9292ENW&cc=us&lc=en>.
7. HP, "Quick Specs: HP Performance Optimized Datacenter (POD) 240a",
http://h18004.www1.hp.com/products/quickspecs/14088_div/14088_div.pdf
8. Data Center Knowledge, "Closer Look: HP's EcoPOD Modular Data Center",
<http://www.datacenterknowledge.com/closer-look-hps-ecopod-modular-data-center/>

9. Youtube, "Tour of One of Dell's Modular Data Centers",
http://www.youtube.com/watch?v=edxGchBp0_E
10. T. Schmitt, M. M. Bailey, T. Duncan, "System and Method for a Modular Fluid Handling System with Modes in a Modular Data Center," US patent 8,462,496 B2
11. Computer Science & Engineering, "UW CSE News",
<https://news.cs.washington.edu/2010/03/02/microsofts-steve-ballmer-at-uw-thursday-march-4/>
12. Youtube, "Microsoft IT Pre-Assembled Components (ITPAC)",
<http://www.youtube.com/watch?v=S3jd3qrhh8U>
13. P.Y. Chen, W.Z. Lin, M.F. Kang, " Operating Condition Adjusting System and Method of Portable Data Center," US patent 2011/0151765 A1
14. AST MODULAR, "AST MODULAR NFC",
<http://www.astmodular.com/dform/cooling.pdf>
15. M. F. Palomer, "System for Air-Conditioning the Interior of a Data Processing Center," US patent 2013/0081784 A1
16. Green Revolution Cooling, "CarnotJet Submersion Cooling Container",
<http://www.grcooling.com/docs/CarnotJet-CNJ-C3-Container-Data-Sheet.pdf>
17. Green Revolution Cooling, "Liquid Submersion Cooling Configuration",
<http://www.grcooling.com/liquid-submersion-cooling-configuration/>
18. C. S. Best, M. Garnett, "Liquid Submerged, Horizontal Computer Server Rack and Systems and Method of Cooling such a Server Rack," US patent 2011/0132579 A1