

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

改善電池儲能系統溫度分布之進風口控制策略

Strategy for Improving Temperature Distribution of  
Battery Storage System through Inlet Condition Settings

陳怡紋

Yi-Wen Chen

指導教授：楊鏡堂 博士

Advisor: Yang, Jing-Tang, Ph. D.

中華民國 111 年 7 月

July, 2022



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

改善電池儲能系統溫度分布之進風口控制策略  
Strategy for Improving Temperature Distribution of Battery  
Storage System through Inlet Condition Settings

本論文係陳怡妘君（學號 R09522302）在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 111 年 6 月 28 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

楊鏡堂

（簽名）

（指導教授）

葉思沂

王榮如

呂明璋

系主任

林許群

（簽章）

## 誌謝



轉眼間兩年的研究所生涯即將邁入尾聲，感謝讓我有所蛻變的一切。這篇論文的完成受到許多人的支持以及鼓勵，非常感謝支持我的家人、師長和同儕。

這本碩士論文的完成，首先要感謝我的指導教授楊鏡堂老師，在論文撰寫期間給予的教導與發展空間，即使尋找論文題目的過程困難，仍讓我成長許多，學習到對於研究的態度與嚴謹。此外，老師也給我許多機會，參與研討會、期刊投稿的撰寫，體會到碩士論文以外的各種活動，都是碩士班期間非常可貴的經驗。

在兩年的時間裡，從修課到研究，感謝國立臺灣大學提供計畫經費(計畫編號：NTU-CC-110L891401)，感謝實驗室裡的每個人給予的陪伴、教導和幫助，很高興在我的人命當中遇見你們，陪伴我走過這段雖然辛苦卻也成長許多的時光。很感謝學長姐耐心的指導、交接，讓我學會數值模擬、流場實驗的操作；感謝學弟妹不定時的零食，在忙碌之餘被充電，獲得繼續努力研究的動力；也很感謝家人讓我不用擔心生活，關心、照顧我所需要的一切，成為我最好的後盾。特別感謝家柑，一起在必修課奮鬥的時光，討論彼此研究的日子都讓我非常難忘，同年級的你是最瞭解一切過程的酸甜苦辣，也最明白這些困境的人。

碩士班畢業是我學生生涯的終點，感謝一路走來鼓勵我、支持我的所有人，因為你們的存在讓我選擇進入碩士班，並且堅持到現在。祝福未來的我們都能夠保持初心，勇往直前！



## 摘要

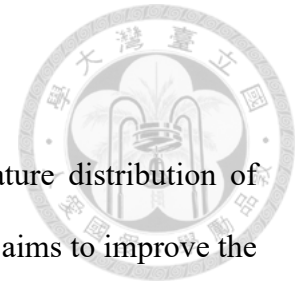
本文分為三個部分，逐步建立適用於鋰離子電池儲能系統且具應用價值的分散式進口操控策略。第一部分參考資料中心的散熱方式，創新應用於電池儲能系統，具體改善現有商用儲能系統散熱效果不佳的熱流場因素。第二部分以電池模組的最高溫度、最大溫差作為指標，提出分散式的進口操控策略，有效消除局部熱點。第三部分提出兼具安全性與商業價值的散熱策略，引入機器學習演算法，驗證影響因素，並將電池的安全溫度、散熱系統的消耗功率納入控制策略的優劣評斷。

本文以商業軟體 ANSYS Fluent 進行數值模擬與分析，設計時引入資料中心提升散熱效率的方式且調整相異之處，比較三種進出風口配置，選定散熱效果最佳的配置作為本研究的物理模型，與本文參考的現有商用儲能貨櫃車之物理模型相比，最高溫度與最大溫差改善幅度達 12.5 % 和 62.4 %。本研究解析各進口條件下的電池模組溫度，歸納出進口風量對於改善電池的最高溫度及最大溫差有最顯著效果，進口溫度僅對最高溫度改善較明顯。分析過程引入機器學習演算法協助印證兩進口條件對電池模組溫度分布的影響，建立各進口條件組合下，電池模組表面溫度是否超過安全溫度的預測。

更進一步以進口風量與進口溫度的影響為基礎，發展分散式進口控制策略，獨立設定進風口的風量或溫度。結果顯示，複合進口溫度控制策略可有效使目標機櫃的最高溫度降低 8 °C 以上，且未產生新熱點。與均勻調低進口溫度相比，此策略可省下 10.99 kW 的散熱系統消耗功率，為均勻調低進口溫度的 37.1 %，大幅降低商業營運成本。

本文參考資料中心的散熱方式，改善商用的電池儲能系統配置；引入機器學習的演算法分析影響流場的因素，並建立電池儲能系統的分散式進口控制策略，有效節省空調系統與風扇的功率消耗，同時避免電池模組的溫度高於安全溫度。

**關鍵字：**電池儲能系統 計算流體力學 熱管理 機器學習 分散式供氣



## Abstract

This study proposes a control strategy based on the temperature distribution of battery modules and power consumption of air conditioning system, aims to improve the safety of battery energy storage system and profitability of air conditioning system.

The first part of this study inspired by the cooling the solution for data center, based on the similarity between data center and battery energy storage system, this study re-designs the inlet and outlet of battery energy storage system. The second part establishes the distributed air supply strategy to avoid local hot spot, takes the maximum temperature and maximum temperature difference as the index for temperature distribution. The last part of the study deduces the strategy based on the power consumption, takes the profitability of air conditioning system into consideration.

In this study I utilize ANSYS Fluent to calculate the flow field and temperature distribution. Inspired by data center, this study rearranges the configuration of battery energy storage system, the rearrangement shows the maximum temperature and the maximum temperature difference reduce 12.5% and 62.4%, respectively. The machine learning algorithm is utilized in the analysis of this study. Results show that the inlet volume flow rate has significant impact among the maximum temperature and the maximum temperature difference of battery modules. However, only the maximum temperature decreases as the inlet temperature decreases. To verify the influence of inlet conditions among the temperature distribution, the algorithm of decision tree is utilized in this study. The algorithm of support vector machine is used to establish a model, which can predict whether the surface temperature of the battery module exceeds the safe temperature under various inlet conditions.

The distributed air supply strategy bases on the influence of inlet conditions is

proposed in this study. The inlet volume and inlet temperature of each inlet will be assigned respectively. Results show that the compound inlet temperature control, which reduce the inlet temperature of two specific inlets, can at least cool down the target cabinet 8 °C without new hot spot. Compare to reduce all inlet temperature, the power consumption of the compound inlet temperature control is 13190.7W, 53.6% less then reduce all inlet temperature.

This study rearranges the configuration of battery energy storage system with the solutions inspired by data center, and utilizes machine learning algorithm to decouple the influence factors of flow field. Moreover, this study builds up a distributed air supply strategy to maintain the module temperature within safety limit with less power consumption, reduces the cost of the ventilation system.

**Keywords: battery energy storage system, computational fluid dynamics, heat management, machine learning, distributed air supply**



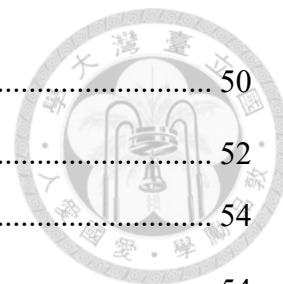
## 目錄

口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract.....	iv
目錄 .....	vi
圖目錄 .....	ix
表目錄 .....	xiv
符號表 .....	xv
第一章 前言 .....	1
1-1 研究背景 .....	1
1-2 研究動機 .....	1
第二章 文獻回顧 .....	3
2-1 電池 .....	3
2-1.1 電池的種類 .....	5
2-2 鋰離子電池熱相關議題 .....	8
2-2.1 溫度過高 .....	8
2-2.2 溫度分布不均 .....	9
2-2.3 老化過程 .....	10
2-2.4 電池組散熱 .....	10
2-3 儲能系統 .....	13
2-3.1 各儲能系統簡介 .....	14
2-3.2 電池儲能系統簡介 .....	17
2-3.3 電池儲能系統的散熱策略 .....	22



2-4	資料中心散熱 .....	26
2-4.1	冷空氣旁路 .....	27
2-4.2	熱空氣回流 .....	28
2-4.3	負壓 .....	29
2-5	計算流體力學 .....	29
2-5.1	紊流模型 .....	30
第三章	研究方法 .....	34
3-1	物理模型 .....	34
3-2	統御方程式 .....	38
3-2.1	質量守恆方程式 .....	39
3-2.2	動量守恆方程式 .....	39
3-2.3	能量守恆方程式 .....	39
3-3	邊界條件與網格設置 .....	39
3-3.1	邊界條件 .....	39
3-3.2	電池模組發熱模型 .....	40
3-3.3	網格設置 .....	42
3-4	獨立性驗證 .....	44
3-4.1	網格獨立性驗證 .....	44
3-4.2	時間步階獨立性驗證 .....	45
3-4.3	計算域獨立性驗證 .....	47
3-5	耗電功率計算與策略優劣評斷 .....	47
3-5.1	空調消耗功率計算 .....	48
3-5.2	風扇消耗功率計算 .....	49
3-5.3	優劣評斷參數 <i>Ind</i> 計算 .....	49
3-6	控制策略之方法 .....	49





3-6.1	決策樹 .....	50
3-6.2	支持向量機 .....	52
第四章	結果與討論 .....	54
4-1	物理模型設定 .....	54
4-1.1	幾何配置改善成果 .....	54
4-1.2	電池定量發熱控制 .....	61
4-2	進口條件影響的分析 .....	66
4-2.1	進口風量之影響 .....	67
4-2.2	進口溫度之影響 .....	67
4-2.3	決策樹 .....	69
4-2.4	支持向量機 .....	71
4-3	非均勻進口控制策略 .....	73
4-3.1	進口風量的獨立控制策略 .....	73
4-3.2	進口溫度的獨立控制策略 .....	77
第五章	結論與未來展望 .....	104
5-1	結論 .....	104
5-2	未來展望 .....	106
5-3	甘特圖 .....	107
	參考文獻 .....	108



## 圖目錄

圖 2-1 文獻回顧架構圖 .....	3
圖 2-2 圓柱形鋰離子電池 (重製圖, Wang <i>et al.</i> , 2017).....	4
圖 2-3 棱柱形鋰離子電池 (重製圖, Tao <i>et al.</i> , 2020).....	4
圖 2-4 正負極結合碳基材料之鉛酸電池 (Mandal <i>et al.</i> , 2021).....	5
圖 2-5 液流電池 (重製圖, Skyllas-Kazacos <i>et al.</i> , 2011).....	7
圖 2-6 鋰離子電池示意圖 (Nishi Y., 2001) .....	8
圖 2-7 電極的電壓隨溫度改變 (Feng <i>et al.</i> , 2018).....	10
圖 2-8 於圓柱狀鋰離子電池間添加鰭片 (Qin <i>et al.</i> , 2021).....	11
圖 2-9 滾筒式焊壓平板尺寸與照片 (Chen <i>et al.</i> , 2022).....	12
圖 2-10 排列方式結果比較 (a)直線排列, (b)交錯排列 (重製圖, Yang <i>et al.</i> , 2015) .....	12
圖 2-11 Z 字型、U 字型及 I 字型的通風道配置 (Zhang <i>et al.</i> , 2021) .....	13
圖 2-12 電池模組溫度分布與熱點 (Shi <i>et al.</i> , 2022).....	13
圖 2-13 水力儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).....	14
圖 2-14 壓縮空氣儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017).....	15
圖 2-15 氫儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017) .....	16
圖 2-16 超導磁性儲能器 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017) .....	17
圖 2-17 電池模組、儲能機櫃與儲能貨櫃示意圖 .....	18
圖 2-18 電動車之電池管理系統 (Łebkowski, 2017) .....	19
圖 2-19 電池儲能系統中能量消耗機制 (重製圖, Schimpe <i>et al.</i> , 2018).....	19
圖 2-20 電池儲能系統應用分類與細項 (重製圖, Li, 2019).....	21
圖 2-21 基於頻率之慣性控制的示意圖 (D'Arco & Suul, 2014) .....	21
圖 2-22 基於搖擺方程式之慣性控制的示意圖 (D'Arco & Suul, 2014).....	21



圖 2-23 被動式冷卻及主動式冷卻示意圖 (Pesaran, 2001).....	23
圖 2-24 美國杜克能源的 2 MW 儲能系統 (Larson A., 2015).....	24
圖 2-25 韓國公司 KoKam 的商用儲能系統 (Kokam Co., Ltd., n.d.).....	24
圖 2-26 加拿大 EPCOR 公用事業公司的儲能系統 (EPCOR Utilities Inc., n.d.) ....	24
圖 2-27 出風軟管幾何示意圖 (Xinlong <i>et al.</i> , 2022).....	25
圖 2-28 主要流體通道幾何示意圖 (Xinlong <i>et al.</i> , 2022).....	25
圖 2-29 於商用電池儲能系統加裝導流板的物理模型(Xu <i>et al.</i> , 2022) .....	25
圖 2-30 進出風口形式與位置配置 (Cho <i>et al.</i> , 2009).....	26
圖 2-31 四種穿透率的進風口擋板 (Abdelmaksoud <i>et al.</i> , 2010).....	27
圖 2-32 有無裝設隔板的通道示意圖(Arghode <i>et al.</i> , 2013) .....	28
圖 2-33 一部空調系統開啟 (a)無分隔板，(b)增設分隔板(Arghode <i>et al.</i> , 2013) ...	29
圖 2-34 兩部空調系統開啟 (a)無分隔板，(b)增設分隔板 (Arghode <i>et al.</i> , 2013) .	29
圖 2-35 $k-\omega$ SST 模型示意圖 .....	33
圖 3-1 研究方法架構.....	34
圖 3-2 電池儲能貨櫃右半邊的幾何配置 (a) CS-FR，(b) DS-CR，(c) FS-CR .....	35
圖 3-3 進出風口位置圖與尺寸圖 .....	36
圖 3-4 電池儲能貨櫃側視圖 .....	37
圖 3-5 電池儲能貨櫃俯視圖 .....	38
圖 3-6 電池儲能機櫃與電池模組示意圖 .....	38
圖 3-7 計算域網格.....	43
圖 3-8 電池模組間隔細部的網格劃分 .....	43
圖 3-9 網格獨立性驗證結果 .....	45
圖 3-10 時間步階獨立性驗證結果.....	47
圖 3-11 決策樹示意圖 .....	51
圖 3-12 (a) 完滿二元樹，(b) 完全二元樹，(c) 完美二元樹 .....	51



圖 3-13 完滿二元樹、完全二元樹以及完美二元樹關係圖.....	51
圖 3-14 支持向量機中之兩種超平面劃分方式.....	53
圖 4-1 結果與討論架構圖.....	54
圖 4-2 流體速度與溫度分布圖 (a) CS-FR，(b) DS-CR，(c) FS-CR.....	55
圖 4-3 CS-FR 局部速度向量圖.....	56
圖 4-4 物理模型散熱改善幅度.....	57
圖 4-5 流體主要軌跡示意圖.....	57
圖 4-6 進口幾何示意圖.....	58
圖 4-7 CS-FR 與 CS-FR larger 的流體壓力分佈圖.....	59
圖 4-8 CS-FR 與 CS-FR larger 的溫度分佈圖.....	60
圖 4-9 FS-CR 與 FS-CR smaller 的流體壓力分佈圖.....	60
圖 4-10 FS-CR 與 FS-CR smaller 的溫度分佈圖.....	61
圖 4-11 方法一之溫度分布隨時間變化圖.....	62
圖 4-12 方法二之溫度分布隨時間變化圖.....	62
圖 4-13 進口溫度 15 °C，進口風量兩方法計算結果比較.....	63
圖 4-14 進口溫度 15 °C，進口風量 10 m <sup>3</sup> /s 兩方法計算結果比較.....	64
圖 4-15 進口溫度 15 °C，風量為 6 m <sup>3</sup> /s 速度分布 (a) 方法一，(b) 方法二.....	65
圖 4-16 進口溫度 15 °C，風量為 10 m <sup>3</sup> /s 速度分布 (a) 方法一，(b) 方法二.....	66
圖 4-17 各進口溫度下，最高溫度與最大溫差分布圖.....	67
圖 4-18 各進口風量下，最高溫度與最大溫差分布圖.....	68
圖 4-19 進口風量為 10 m <sup>3</sup> /s 下，最高溫度及最大溫差分布圖.....	69
圖 4-20 依照評斷參數 <i>Ind</i> 數據回歸的決策樹.....	70
圖 4-21 依照最大溫差數據回歸的決策樹.....	70
圖 4-22 依照最高溫度數據回歸的決策樹.....	71
圖 4-23 支持向量機分類結果.....	72

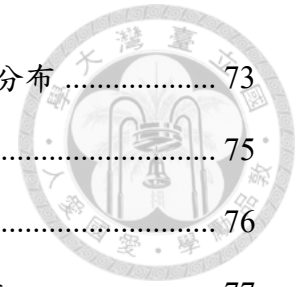


圖 4-24 進口風量總和 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情況下的溫度分布 .....	73
圖 4-25 進口風量的獨立控制策略的電池模組溫度分布 .....	75
圖 4-26 進口風量的獨立控制策略的流速分布 .....	76
圖 4-27 進口風量的獨立控制策略下，熱點周圍流速與溫度分布 .....	77
圖 4-28 條件一熱點位置與調整進風口 .....	78
圖 4-29 條件二與條件三的熱點位置與調整進風口 .....	78
圖 4-30 條件一於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	79
圖 4-31 條件二於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	80
圖 4-32 條件三於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	81
圖 4-33 單一進口溫度控制策略下，條件一與條件三的新熱點位置 .....	83
圖 4-34 單一進口控制策略於條件一的流速分布圖 .....	84
圖 4-35 單一進口控制策略於條件二的流速分布圖 .....	85
圖 4-36 單一進口控制策略於條件三的流速分布圖 .....	86
圖 4-37 單一進口控制策略於條件一的局部流速向量圖 .....	87
圖 4-38 單一進口控制策略於條件一的流體溫度分布 .....	88
圖 4-39 單一進口溫度控制策略下，依照最高溫度回歸的決策樹 .....	89
圖 4-40 條件一於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	90
圖 4-41 條件二於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	91
圖 4-42 條件三於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布 .....	92
圖 4-43 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件一的流速分布圖 .....	94
圖 4-44 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件二的流速分布圖 .....	95
圖 4-45 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件三的流速分布圖 .....	96
圖 4-46 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件一的流速分布圖 .....	97
圖 4-47 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件二的流速分布圖 .....	98
圖 4-48 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件三的流速分布圖 .....	99

圖 4-49 Inlet #1 的複合進口控制的局部向量圖 (a)條件二，(b)條件三.....	100
圖 4-50 Inlet #1 的複合進口控制策略於條件一的流體溫度分布 .....	100
圖 4-51 複合進口溫度控制策略下，依照最高溫度回歸的決策樹.....	101
圖 4-52 進口溫度獨立控制策的散熱改善幅度.....	103



## 表目錄

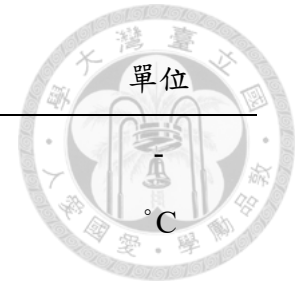
表 2-1 電池儲能系統分類表.....	20
表 2-2 氣體洩漏位置分析數據 (重製表, Tatchell-Evans <i>et al.</i> , 2017).....	27
表 3-1 邊界條件設定.....	39
表 3-2 電池模組基本資料.....	42
表 3-3 不同尺寸的網格獨立性驗證資料.....	44
表 3-4 網格獨立性驗證數據.....	45
表 3-5 時間步階獨立性驗證數據.....	46
表 3-6 不同出口壓力設定之壓力計算結果.....	47
表 4-1 三模型於進口溫度 15 °C, 進口風量為 6 m <sup>3</sup> /s 條件下的數據.....	56
表 4-2 調整進口面積前後的數據整理.....	58
表 4-3 模型驗證之進口條件與驗證結果.....	72
表 4-4 進口風量控制策略的數據.....	74
表 4-5 條件一下單一進口溫度控制策略的數據.....	82
表 4-6 條件二下單一進口溫度控制策略的數據.....	82
表 4-7 條件三下單一進口溫度控制策略的數據.....	83
表 4-8 複合進口溫度控制策略的數據 (a)條件一, (b) 條件二, (c) 條件三.....	93
表 4-9 進口風量 5 m <sup>3</sup> /s, 調整進口溫度的數據比較.....	102



## 符號表

符號	說明	單位
$AH$	絕對溼度	-
$AH_1$	室外乾空氣絕對溼度	-
$AH_2$	室內乾空氣絕對溼度	-
$C$	庫朗數 (Courant number)	-
C-rate	充放電速率	A/Ah
$E$	熱能	J
$h_{a1}$	室外乾空氣比焓	kJ/kg
$h_{a2}$	室內乾空氣比焓	kJ/kg
$h_{v1}$	室外蒸氣比焓	kJ/kg
$h_{v2}$	室內蒸氣比焓	kJ/kg
$I$	電流	A
$Ind$	評斷參數	-
$k$	紊流動能 (turbulent kinetic energy)	$m^2/s^2$
$P$	壓力	Pa
$P_g$	乾空氣壓力	Pa
$P_{in}$	進口壓力	Pa
$P_{out}$	出口壓力	Pa
$P_v$	蒸氣壓力	Pa
$\Delta P$	進出口壓力差	Pa
$\dot{Q}$	單位時間產生熱量	W
$RH$	相對溼度	-
$R_{internal}$	電池的內電阻	$\Omega$





符號	說明	單位
SOC	電量狀態	-
$T$	溫度	$^{\circ}\text{C}$
$T_{max}$	最高溫度	K
$T_{min}$	最低溫度	K
$T_{safe}$	電池安全溫度上界	K
$\Delta T$	最大溫差	K
$t$	時間	s
$u$	流體速度	m/s
$U_{ep}$	熵勢	J/K
$U_{ocv}$	開路電壓	mV
$\varepsilon$	紊流耗散率(turbulent dissipation rate)	$\text{m}^2/\text{s}^3$
$\mu$	動力黏滯係數(dynamic viscosity)	$\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$
$\rho$	流體密度	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\omega$	比紊流耗散率(specific turbulence dissipation rate)	1/s



## 第一章 前言

### 1-1 研究背景

面對再生能源之不穩定性，近年儲能系統(energy storage system, ESS)與其可靠度逐漸受到重視。隨著世界人口的成長與能源的消耗，化石燃料逐漸枯竭，各國致力於發展再生能源，臺灣政府亦規劃於 2025 年達到再生能源發電占總發電量 20% 的目標。由於太陽光與風能取之不盡的特性，使得太陽能光電與風力發電成為再生能源中最受到矚目的兩大發電方式，隨著技術發展成本降低，太陽能光電與風力發電之裝置容量亦逐年增加。然而，太陽能光電與風力發電皆有不穩定性，如在夜間與陰雨天無法透過太陽能光電提供電能；在無風及颱風等天氣狀況下，風力發電機需停機而無法運轉供電。儲能系統能夠將超過用電需求的剩餘電力儲存，達到削峰填谷的效果以彌補再生能源的不穩定性，緩解供電吃緊的壓力，而與電網連結更能夠帶來調節頻率的功能，以應對突發的電力供給問題。電池儲能系統(battery energy storage system, BESS)具有反應快速、地形限制小、便於根據空間調整其規模大小等優點，於各式儲能系統中脫穎而出。各種類之電池(battery cells)有其各自之優缺點，其中鋰離子電池(lithium-ion battery)因其能量密度高、壽命長等優點，逐漸發展為電池儲能系統之主流。2018 年底時，美國的電池儲能系統之電池容量(energy capacity)已達 1,236 MWh，最大供電功率(power capacity)來到 869 MW，超過 90% 的電池儲能系統使用鋰離子電池(Energy Information Administration, 2021)。

### 1-2 研究動機

隨著人口與用電需求的增加，電池儲能系統逐漸普及、電池容量提升，而世界各國陸續發生電池儲能系統熱失控(thermal runaway)的事件使得電池儲能系統的安全性更加受到重視。鋰離子電池的老化、壽命與其工作環境溫度有極大關係，鋰離子電池燃燒伴隨爆炸之風險，難以撲滅，因此電池儲能系統的溫度控制十分重要。

電池相關之研究眾多，包含電池材料的選擇、熱傳強化、改善電池模組管道幾何等，在實驗、計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)、數學模型都有許多學者投入研究。電池本身的熱傳強化包含計算電池內部的流場(Robinson *et al.*, 2014)、安裝鰭片(Qin *et al.*, 2021)；電池模組管道幾何包含設計進出口位置與管道、改變電池排列方式(Yang *et al.*, 2015)、調整電池間的距離(Chen *et al.*, 2017)等。然而，數量龐大的電池組合要進行實驗是困難且昂貴的，目前電池相關的實驗多著重於單一或少量的電池。電動車方面的研究雖有電池數量較為龐大的相關研究，但是電網電池儲能系統與電動車之條件與使用狀況並不相近。電動車電池的主要目標為在有限的車體空間內儲存充足電力，且車體本身會有移動、傾斜的狀況，加上為提供充足馬力，電動車電池充放電速率快、產生之熱量大，因此多採用能夠快速帶走大量熱能之液體式冷卻(liquid cooling)。而電網電池儲能系統為能夠儲存充足電力，電池數量較電動車多，空間上限制較少且產生熱量較低，因此目前商用電池儲能系統多採用氣體式冷卻(air cooling)，其技術發展成熟因此價格較低外，亦沒有液體洩漏之風險。針對電池儲能系統的研究目前著重於調整散熱流體，如氣體式冷卻、液體式冷卻及相變材料冷卻(phase change material cooling)，以及調整電池儲能系統的進出風口配置、改善物理模型等。惟電池儲能系統的幾何配置、選用的散熱流體多在設計與裝設後無法進行大幅度的調整，已建置完成的電池儲能系統若面對電池產生的熱量改變的狀況，無法提出更有效的熱管理操控策略。本文首先參考資料中心的散熱方式，用於幾何相似的電池儲能系統，接著以最高溫度、最大溫差作為指標，提出分散式的進口操控策略，最後引入機器學習演算法驗證影響流場的因素，將電池的安全溫度、散熱系統的消耗功率納入控制策略的優劣評斷，作為兼具安全性與商業價值的散熱策略。



## 第二章 文獻回顧

本文之文獻回顧之架構如圖 2-1，首先介紹電池的種類與用途，再來為電池溫度相關之議題，細項包含溫度過高、溫度分布不均(temperature maldistribution)以及老化過程(aging process)；接著是資料中心與儲能系統的相關文獻回顧，包含流場細節探討及對應的散熱策略；最後為計算流體力學之紊流模型。

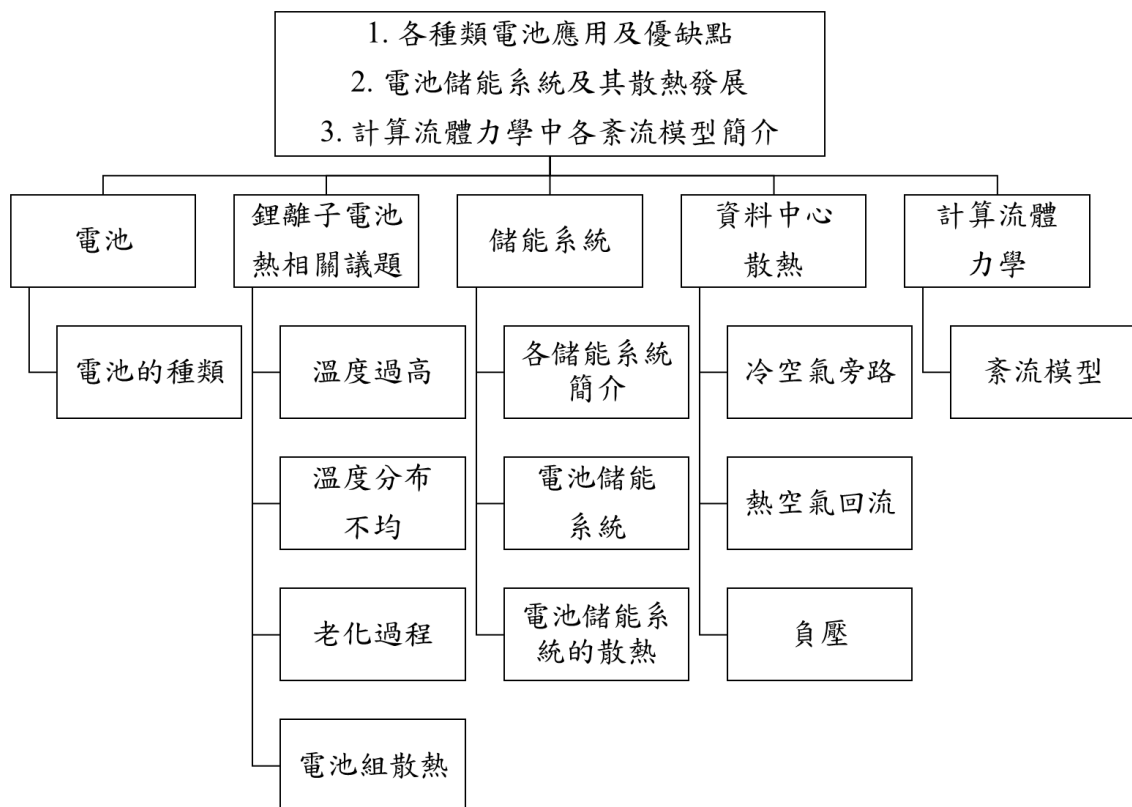


圖 2-1 文獻回顧架構圖

### 2-1 電池

廣義的電池定義為能夠將能量儲存，並且於需要時能夠以電力型式將能量輸出之裝置，狹義的電池定義為將原先儲存之化學能轉為電力且進行輸出的裝置。現今電池使用的範圍廣泛，其中，化學電池為透過氧化還原反應中電子的得失來產生電流，此種電池成為現今普遍被應用之電池裝置，電池亦為電動車、電池儲能系統之基本單位。市面上使用之電池多為棱柱形(prismatic cell)及圓柱形(cylinder cell)兩

種，棱柱型電池通常有較高的能量密度，其外型使之能夠更良好密集的堆疊(Xia *et al.*, 2017)；圓柱型電池則能夠保留更多電池間之空間，讓流體散熱效果更佳(Lu *et al.*, 2018)，兩者之示意圖如圖 2-2 及圖 2-3。根據使用之電解質、陽極材料、陰極材料的不同，電池又可以分為眾多種類，以下介紹常用於電池儲能系統之電池種類。

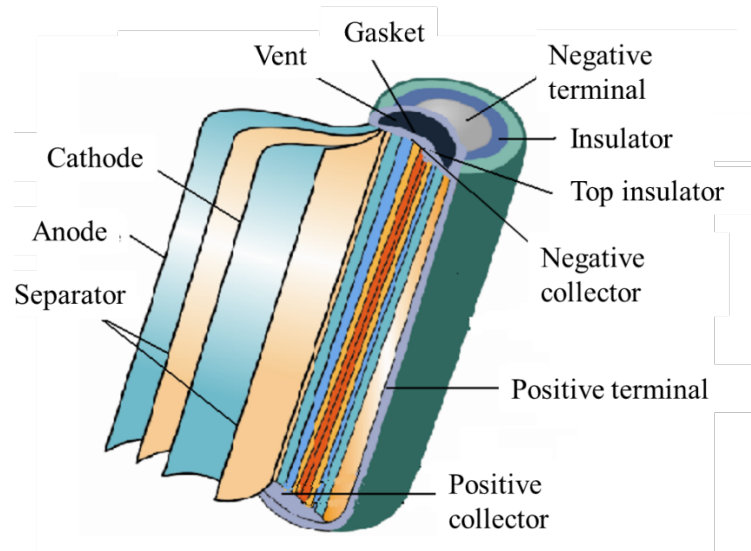


圖 2-2 圓柱形鋰離子電池 (重製圖, Wang *et al.*, 2017)

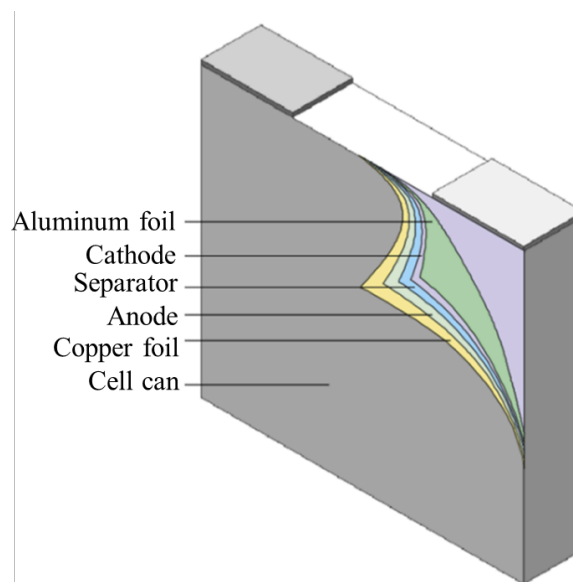


圖 2-3 棱柱形鋰離子電池 (重製圖, Tao *et al.*, 2020)



## 2-1.1 電池的種類

### 鉛酸電池(lead acid battery)

鉛酸電池相較於其他種類的電池發展較早，因此技術成熟(Perrin *et al.*, 2005)，價格相對便宜，對鉛酸電池的使用狀況亦較為瞭解，鉛酸電池、於正負極添加碳基的鉛酸電池示意圖如圖 2-4。雖然鉛酸電池之能量密度低、循環壽命短，但可輸出較大功率，因此被廣泛用為汽機車啟動系統(Energy Information Administration, 2021)。鉛酸電池不需要頻繁的保養維修、可靠度與安全性高等特性，使之成為不間斷電源系統(uninterruptible power system, UPS)的主要選擇。

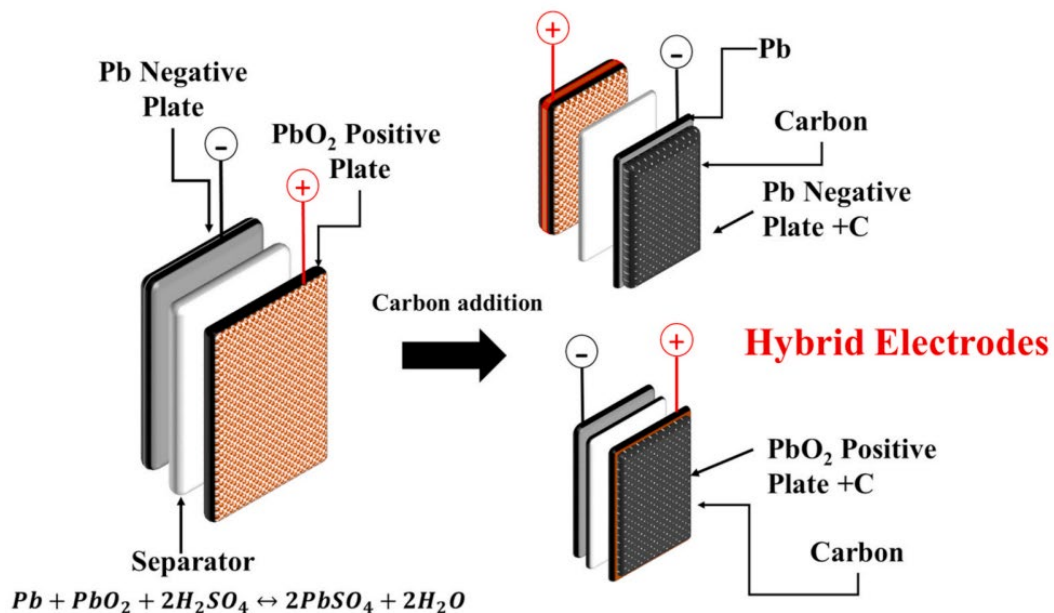


圖 2-4 正負極結合碳基材料之鉛酸電池 (Mandal *et al.*, 2021)

應用於固定式系統(stationary system)的鉛酸電池可分為兩種，閥控式密封鉛酸蓄電池(valve regulated lead-acid battery, VRLA)以及可加水式鉛酸蓄電池(vented lead-acid battery)，兩者主要的差異在對氫氣的處理方式不同。鉛酸電池無法避免產生氫反應(hydrogen evolution reaction, HER)，閥控式密封鉛酸蓄電池使氫氣與氧氣於電池內部結合，僅於內部壓力超過規定值時才會進行排氣洩壓，平時不需補水與保養，因此價格較為昂貴。可加水式鉛酸蓄電池所產生的氫氣由排氣裝置排出，需



要添加水及電解質進行電解液保養，因此價格較為低廉(Batteries Committee of the IEEE Power & Society, 2011)。

雖然鉛酸電池循環壽命較短，並不是儲能系統的主流，但近年隨著技術發展，循環效率逐漸提升，未來於儲能系統上之應用亦有可能(May *et al.*, 2018)。

### **鎳基電池(Nickel-based battery)**

鎳鐵電池(nickel-iron battery)、鎳鎘電池(nickel-cadmium battery)、鎳氫電池(nickel-hydrogen battery)及鎳鋅電池(nickel-zinc battery)皆使用氧化鎳作為電池陽極材料，因此皆屬於鎳基電池(Shukla *et al.*, 2011)。鎳基電池用於美國較早之大型電池儲能裝置，包含 2003 年應用於阿拉斯加(Energy Information Administration, 2021)，具有高能量密度、高可靠度優點，但其循環壽命較短，可以充放電的循環次數少為其限制。

### **鈉基電池(Sodium-based battery)**

鈉基電池擁有高能量密度、較長循環壽命且可以在極端溫度下也可以運作，可應用於各環境條件下，適合用於電池儲能系統，而緩慢之電化學反應速率、循環穩定性及熱循環不佳則為其限制(Li *et al.*, 2019)。在 2018 年底時，鈉基電池占美國大型電力系統中最大供電功率的 2%，占電池容量的 6% (Energy Information Administration, 2021)。

### **液流電池(flow battery)**

液流電池的電解溶液中含有單一或多種化學組成，由兩個電解液儲存槽、數個並聯電池、驅動電解液的泵組成，連接至需要電力的裝置，其結構如圖 2-5。電解液中包含電活性物(electroactive species)及高濃度的輔助電解質(supporting electrolyte)以降低溶液中的電阻，當負載連接在電極上時，電解液中各化學物質產生氧化還原反應造成電子流動而使電流產生，因此電解液儲存槽的大小決定液流電池的容量。液流電池的循環壽命長、可靠度高等為其優勢，加上鈳液流電池隨著



技術逐漸成熟，讓液流電池在再生能源市場受到更多矚目。而液流電池較低的能量密度、相較其他種類電池需要較多零組件，如泵，則為其缺點(Skylas-Kazacos *et al.*, 2011)。

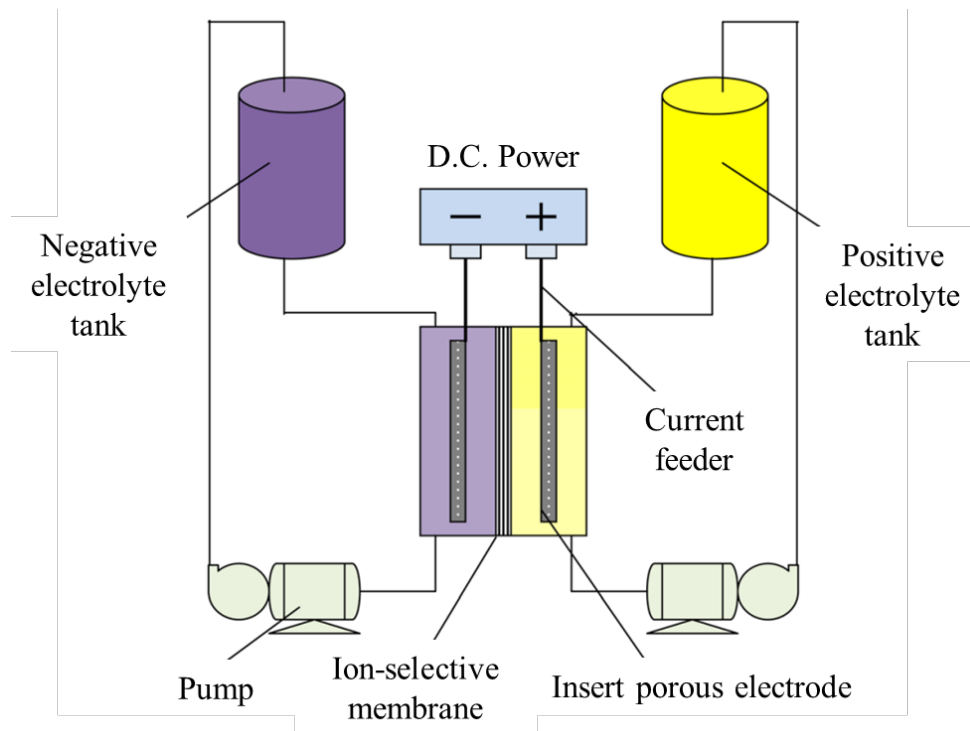


圖 2-5 液流電池 (重製圖，Skylas-Kazacos *et al.*, 2011)

### 鋰離子電池

鋰離子電池於 1991 年首度被商業化並大量製造，用於行動裝置以及各種大型電力設備中。在充電過程中，鋰離子被儲存於電池陽極，在放電過程中，鋰離子則移動到電池的陰極，因此鋰離子電池又被稱為搖椅式電池(rocking chair battery)，鋰離子電池示意圖如圖 2-6。鋰離子電池具備較高的循環效率(cycle efficiency)，每一次的充電循環中不會有太多的能量損失，加上快速的響應時間(response time)、高能量密度，讓鋰離子電池成為目前攜帶式電子產品以及電動車應用的主流，在 2019 年底時鋰離子電池占美國大型電池儲能系統超過 90 %的電池容量(Energy Information Administration, 2021)。



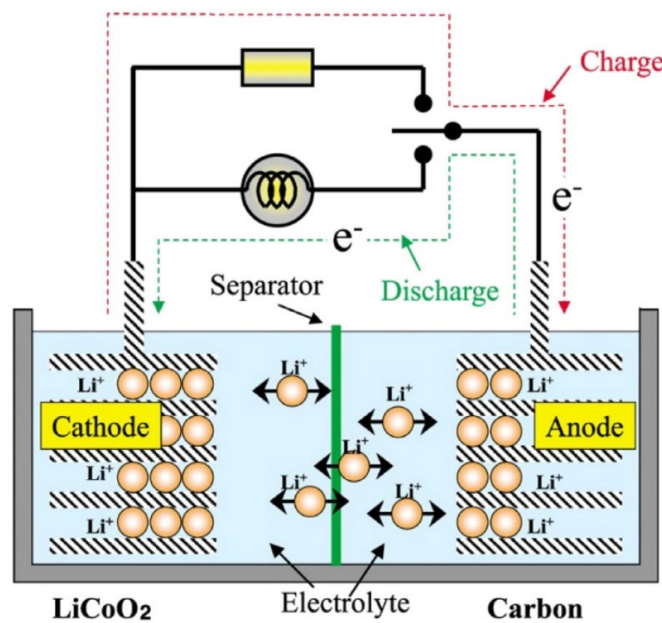


圖 2-6 鋰離子電池示意圖 (Nishi Y., 2001)

## 2-2 鋰離子電池熱相關議題

鋰離子電池容易受到溫度影響，且適合操作的溫度範圍小(Wang *et al.*, 2019)，太高或是太低的溫度、溫度分布不均都會影響鋰離子電池的充放電表現，縮短鋰離子電池的使用壽命。當電池在其適當的環境下存放與使用，仍有四千萬分之一的機會可能引發災害(Daniel *et al.*, 2012)，加上外部熱能、過量充電(overcharging)等情況，使得鋰離子電池溫度過高的情況更容易發生。以下針對鋰離子電池在溫度過高、溫度分布不均、及老化過程及電池組散熱等進行說明。

### 2-2.1 溫度過高

當鋰離子電池的溫度超過安全範圍，有可能達到引燃溫度而發生熱失控(thermal runaway)，Feng *et al.* (2014)探討棱柱形鋰離子電池於熱失控時，內部溫度可達到 870 °C。Wang *et al.* (2019)說明於熱失控的狀況下，鋰離子電池燃燒會有將粒子射出而形成噴焰(jet flame)的風險，並伴隨著大量熱與有毒氣體的產生。為釐清鋰離子電池熱失控的條件，眾多文獻(Wang *et al.*, 2017; Ye *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016)探討鋰離子電池遇到短路(short-circuit)、過充(overcharge)及粉碎(crush)等

情況，Thomas *et al.* (2003)顯示當電池被儲存在 55 °C 的環境下 22 週後，鋰離子電池的儲電量會下降；Leng *et al.* (2015)則提出電化學模型以研究鋰離子電池中不可逆的惡化現象，指出電極材料的降解現象造成電量減少。當電池在高溫中長期運作，造成電池陰極表面的薄膜與結構變化，而此變化會影響鋰離子交換的有效性，造成電量減少。

## 2-2.2 溫度分布不均

鋰離子電池近年逐漸被應用於電池儲能系統、電動車，對於大型鋰離子電池組的需求亦逐漸提升，隨著電池數量的增加，電池組難以避免溫度分布不均的問題。電池間的溫度差異會導致電源供應不一致，進而造成操作效率低落(Wu *et al.*, 2019)。電池表面散熱較為容易，熱量易累積於電池內部，使電池內部溫度高於電池表面(Liu *et al.*, 2017)，位於電池組中心處的電池溫度亦會高於位於外圍的電池。電池溫度分布不均的問題同樣發生於電池儲存與運送的過程中，Hu *et al.* (2021)指出當電池儲存數量由單一電池增加至 194 萬顆電池時，導致其自發性熱失控所需的環境溫度亦由 155°C 降至 85°C，達到熱失控所需時間亦從 40 分鐘提升至十天之久，此差異造成大量電池存放的熱失控更難以被察覺、避免。研究指出以鋰鈷氧化物作為陽極的鋰離子電池，陽極位置產生的熱量為鋰離子電池整體的四倍，說明鋰離子電池內部溫度分布不均亦為難以避免的問題(Huang *et al.*, 2006)。不論是電池內部的溫度分布不均，或是電池與電池間的溫度分布不均，最大溫差皆不應大於 5 °C(Park *et al.*, 2003)。Feng *et al.*, (2018)發現於不同的操作溫度下，電池各電極的電壓會有所差異，他們亦將溫度與電池充放電動態以方程式表示，用以描述溫度的效應。此外，他們也發現每當最大溫差增加 5 °C，電池的容量會降低 1.5 %至 2 %。

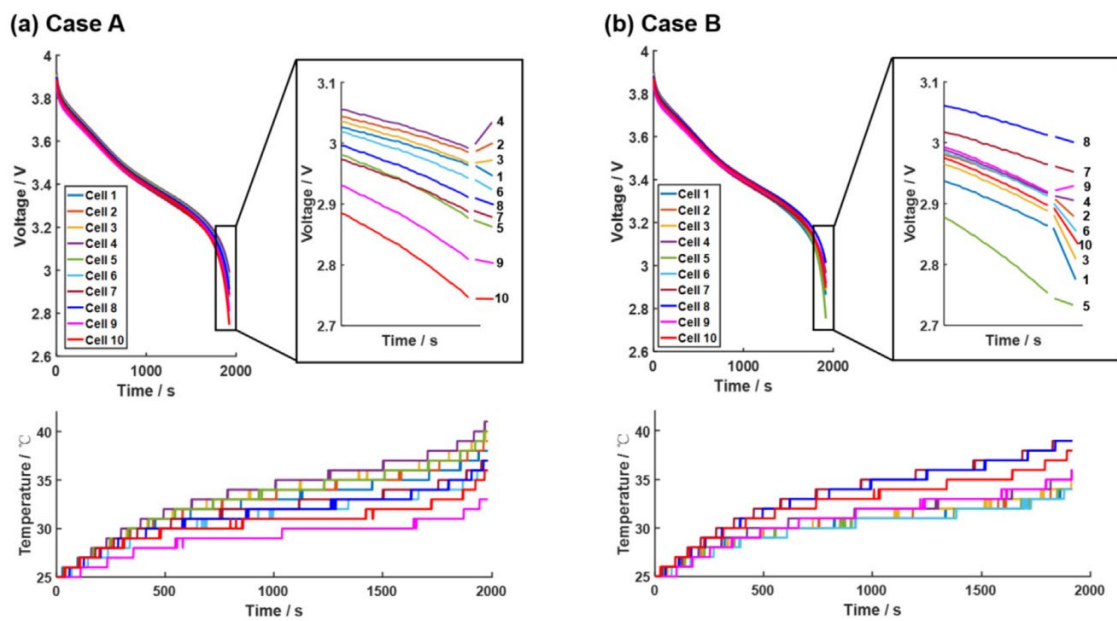


圖 2-7 電極的電壓隨溫度改變 (Feng *et al.*, 2018)

### 2-2.3 老化過程

由於電池陽極與陰極的材料性質，電池的容量會隨著使用時間增長而減短，此過程則稱為老化過程，環境溫度、充放電過程相異皆會對老化過程的速度造成影響，Marcus *et al.*, (2015)指出在電池電量狀態(state of charge, SOC)為 1 的情況下，即電池為充飽狀態，較容易縮短電池壽命；而當電池置放於高於 50°C 的環境溫度下，電池的老化效應會加速(Wu *et al.*, 2019)，失去活性物質(loss of active materials, LAM)以及失去鋰離子存量(loss of lithium inventory, LLI)的過程也會加速。

### 2-2.4 電池組散熱

鋰離子電池近年逐漸被應用於電池儲能系統、電動車，對於大型鋰離子電池組的需求逐漸提升，而目前文獻中所提到的模擬及實驗，多著重於數量較少的電池組散熱。Qin *et al.* (2021)採用數值模擬以及實驗，研究在圓柱狀的鋰離子電池組間添加鰭片的影響，其實驗裝置如圖 2-8。結果顯示，在強制對流及自然對流的情況下，添加鰭片於電池之間都可以使溫度分布更為均勻。Chen *et al.* (2022)設計兩種滾筒式壓焊板(roll bond plate)，如圖 2-9，透過液冷式冷卻降低電池模組溫度。結果顯示

此板散熱效果佳，可於充放電速率 2C 的情況下，保持電池模組溫度不超過 35°C，並且具備價格便宜、重量輕等優點。除加強電池模組本身的散熱外，亦有學者探討電池模組的擺放方式與間隔、通風管道配置等，加強電池組的散熱。Yang *et al.* (2015) 透過數值方法，探討圓柱型電池在對齊排列以及交錯排列兩情況下，縱向間隔與橫向間隔對於流體速度、溫度分布的影響，並將消耗功率亦納入評斷考量，其結果如圖 2-10。Zhang *et al.* (2021) 比較 Z 字型、U 字型及 I 字型三種通風道配置，如圖 2-11，並對此三種通風道配置提出合適的電池間距，利用不等的電池間距改善溫度分布均勻度。Shi *et al.* (2022) 將 16 個電池模組作為實驗對象，如圖 2-12，其中 A、B、C 三處為高溫點，為改善電池模組的溫度分布，Shi *et al.* (2022) 設計數種散熱流體進口大小、位置以及電池的擺放間隔，逐步找出最佳的配置作為設計建議。

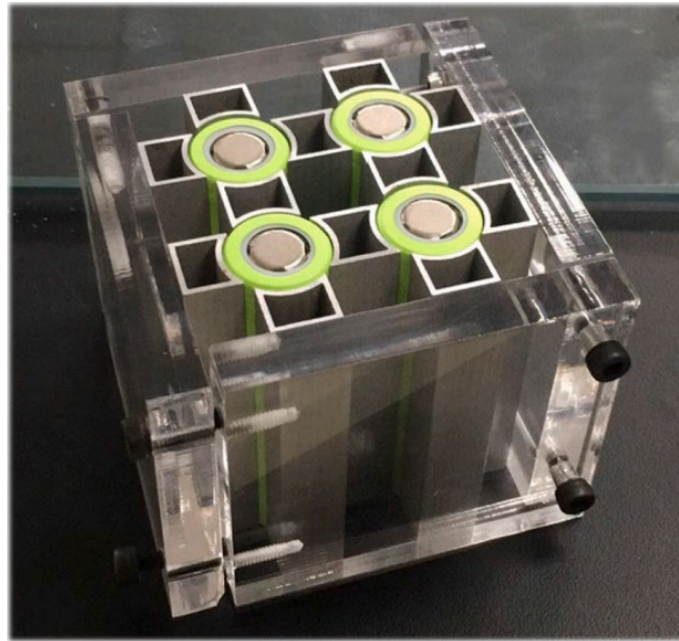


圖 2-8 於圓柱狀鋰離子電池間添加鱗片 (Qin *et al.*, 2021)

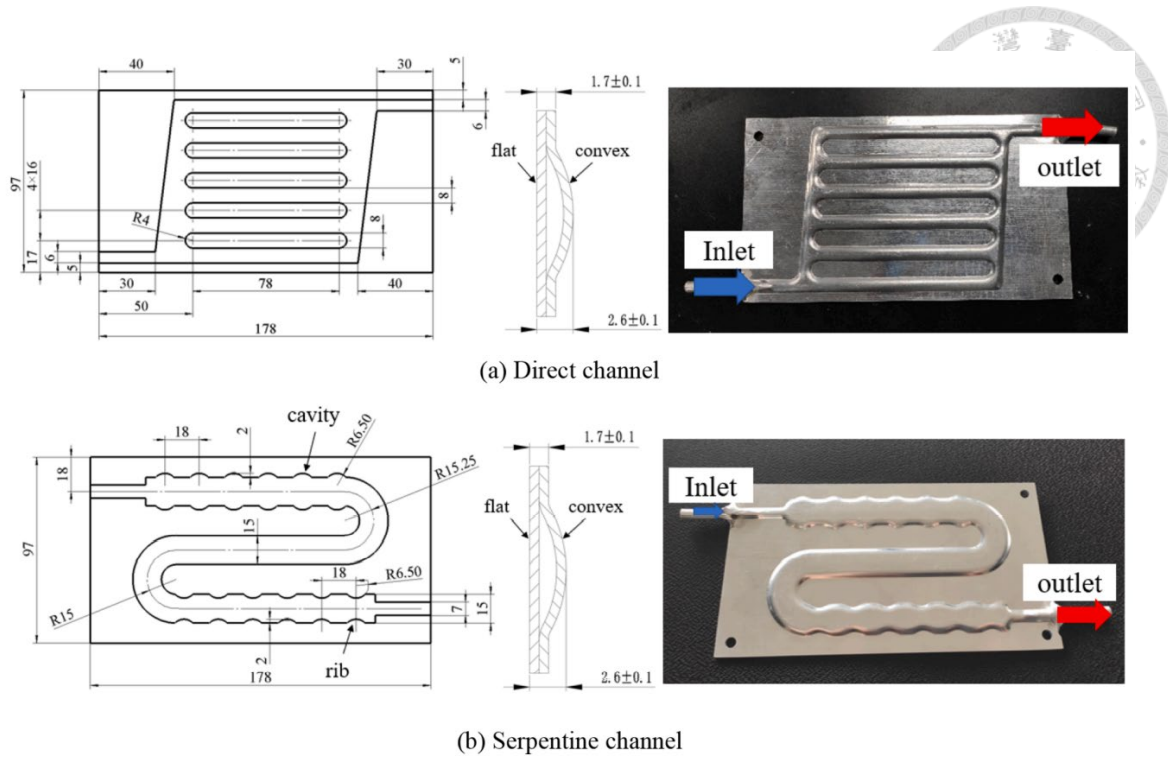


圖 2-9 滾筒式焊壓平板尺寸與照片 (Chen *et al.*, 2022)

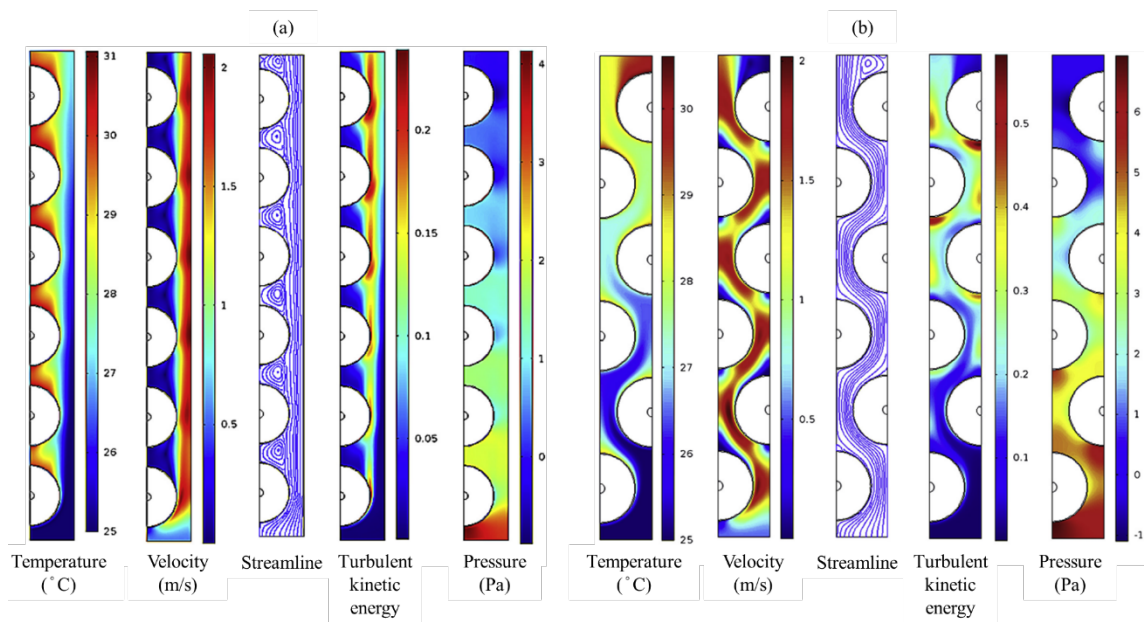


圖 2-10 排列方式結果比較 (a)直線排列，(b)交錯排列 (重製圖，Yang *et al.*, 2015)

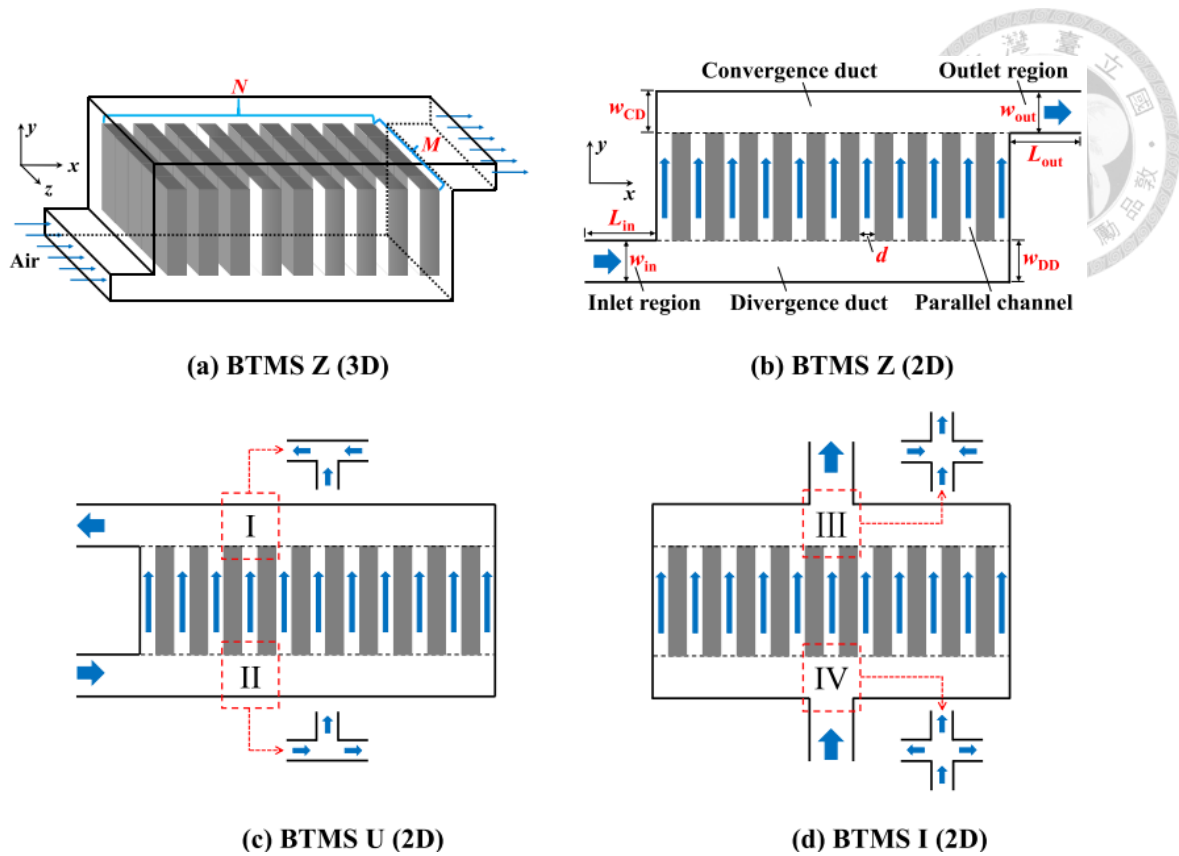


圖 2-11 Z 字型、U 字型及 I 字型的通風道配置(Zhang *et al.*, 2021)

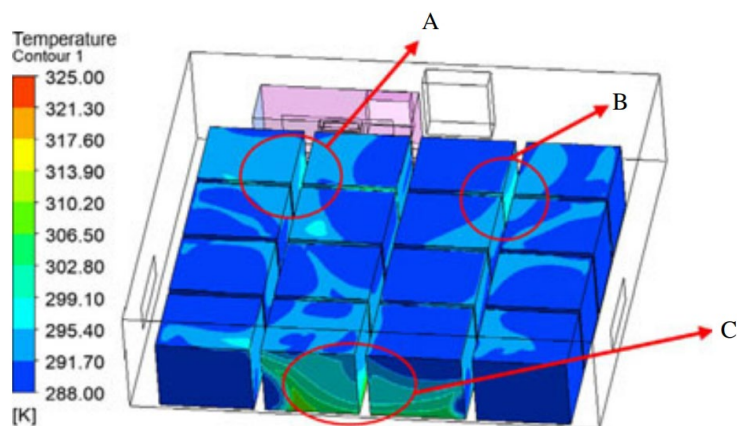


圖 2-12 電池模組溫度分布與熱點(Shi *et al.*, 2022)

### 2-3 儲能系統

儲能系統指的是可以將能量儲存，在需要使用時以各型式輸出的技術，電力儲能系統可以將電力儲存，在電力需求增加時提供電力。電力儲能系統的性能會影響電力系統的效率，大多數的電力儲能系統目標在降低發電成本及延長電力設備的壽命(Olabi *et al.*, 2021)，常見之電力儲能系統包含機械式儲能(mechanical storage



system)、熱儲能(thermal storage system)、化學儲能(chemical storage)以及電化學儲能(electrochemical systems)四種。

### 2-3.1 各儲能系統簡介

#### 機械式儲能

機械式儲能包含水力儲能、壓縮空氣、飛輪。水力儲能技術成熟且已商業化，其結構圖如圖 2-13。2018 年，水力儲能的容量占電力儲能系統 96%，共有 169,557 GW 的儲能容量(Olabi *et al.*, 2021)，然而水力儲能系統易受到地形空間與生態環保限制，能夠建置的位置有限。

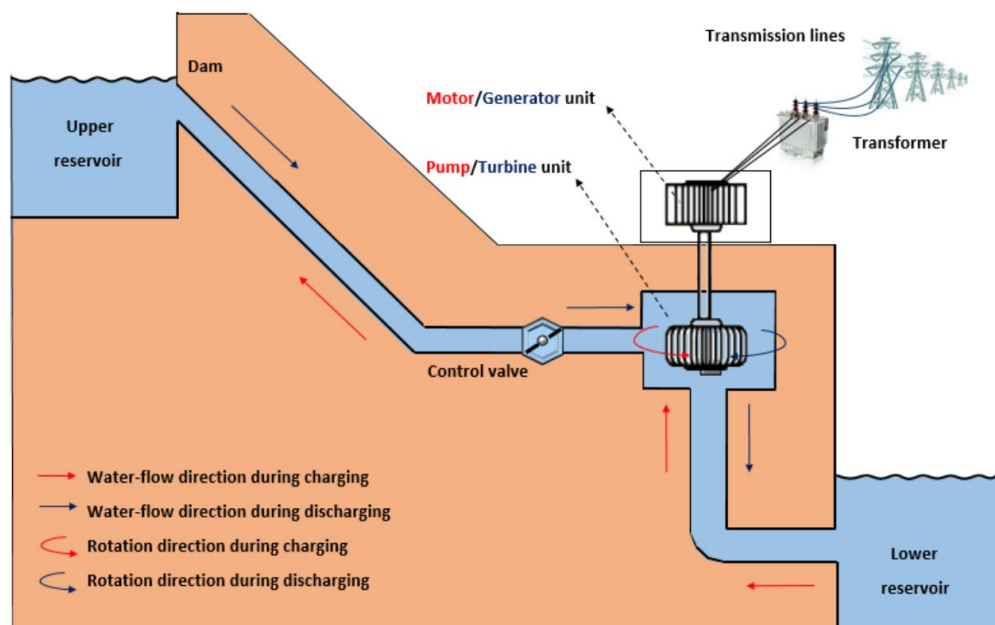
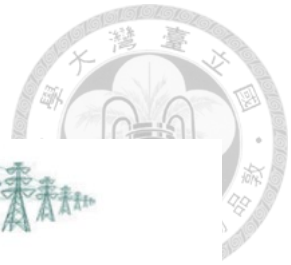


圖 2-13 水力儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

壓縮空氣儲能系統可以達到 50 MW 至 300 MW 的容量(Hadjipaschalis *et al.*, 2009)，被釋放的壓縮空氣會被用於推動高壓及低壓渦輪機組，渦輪機組將能量轉為旋轉動能使用，其組成及示意圖如圖 2-14。將壓縮空氣儲存於地底為是一個安全且有效利用空間的方式，但是地質的合適性則為挑戰。飛輪儲能系統有一快速轉動的轉子，將能量儲存於轉子的動能之中，透過調整飛輪的速度可以重複利用儲存於其中的能量。飛輪儲能系統可以操作的溫度環境範圍較大，且其循環壽命較長，



但其需於真空下操作以減少空氣阻力，導致成本較高。

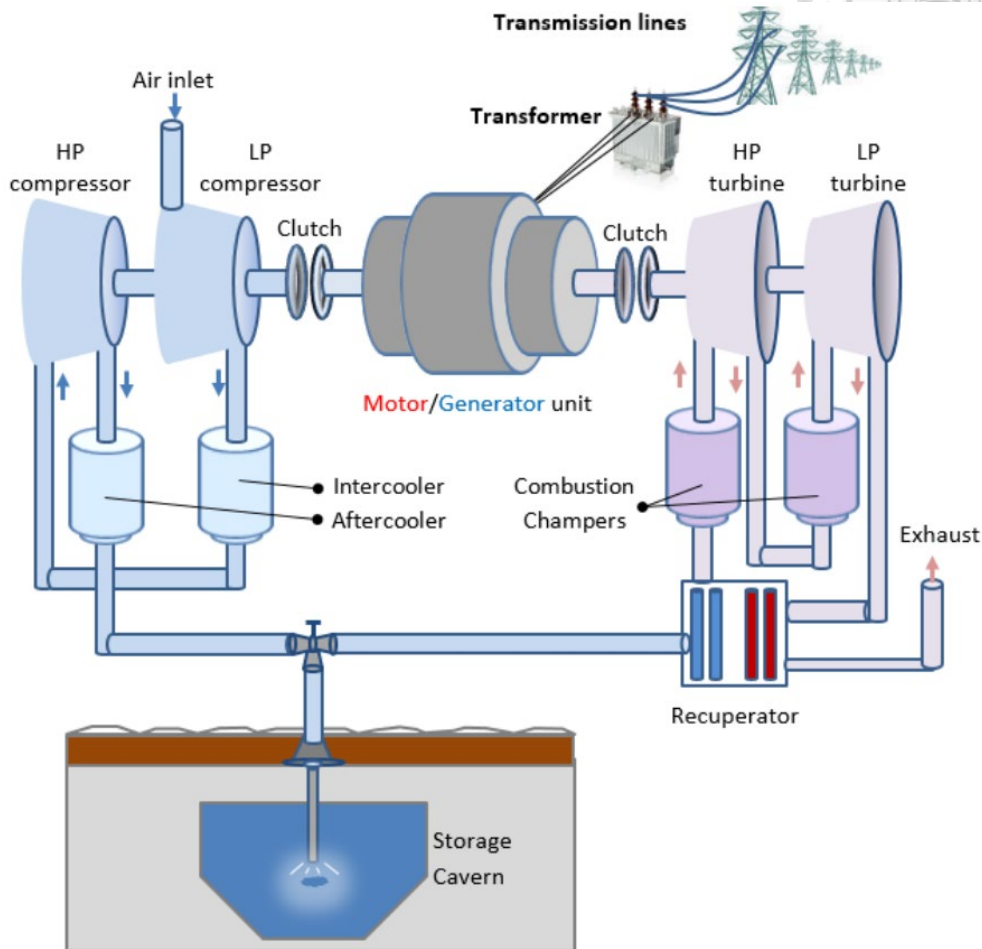


圖 2-14 壓縮空氣儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 熱儲能

熱儲能包含顯熱、潛熱、熱吸收與熱放出，最常被應用於室內的溫度調節。熱儲能通常由熱儲能槽(thermal storage tank)、控制系統及熱傳遞介質組成。熱儲能系統的整體循環效率較低，約為 30 %至 50 % (Olabi *et al.*, 2021)，且初期設置成本較高，其優點為對環境友善。

### 化學儲能

氫儲能(hydrogen)及生質能(biofuels)被歸類為化學儲能系統。氫儲能包含氫加壓(hydrogen pressurization)、金屬氫化物的吸收、碳奈米纖維上的氫吸收以及氫液



化(liquefaction of hydrogen)。氫儲能可以提供乾淨能源，但氫能的儲存壓力為其技術上的限制，其示意圖如圖 2-15。生質能為可被生物降解且具有能量之作物、排泄物，也可以藉由生質能進行發電，為乾淨的電力來源，但其產量有限。

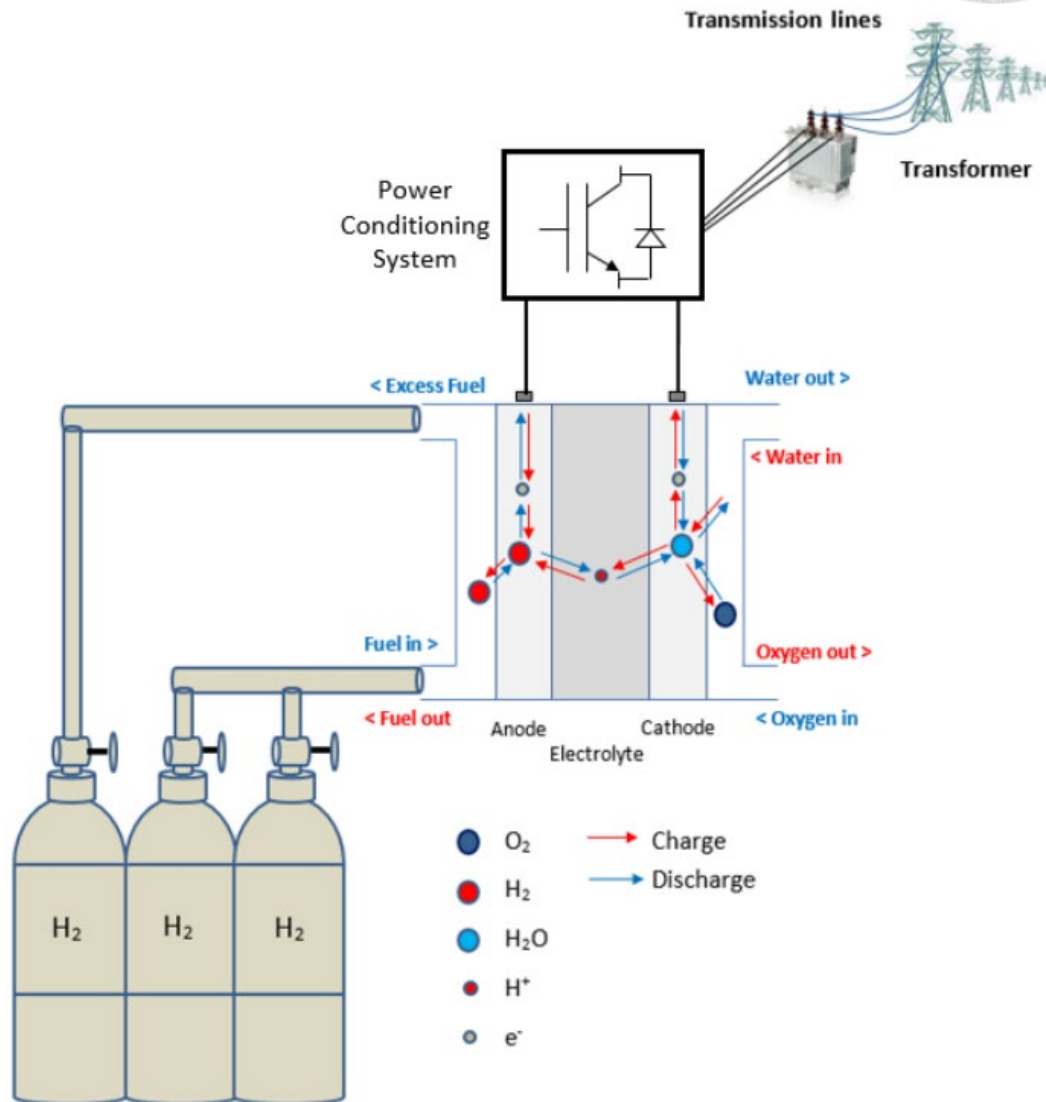


圖 2-15 氫儲能系統 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 電化學儲能

電化學儲能包含電容(capacitor)、超級電容(supercapacitor)、超導磁性儲能器(Superconducting magnetic energy storage, SME)以及電池儲能系統。電容主要用於電力儲存，兩金屬板由無傳導性的介電質(dielectric)分開，能量被儲存於金屬電極。電容的能量密度非常低，但可以接收較高電流，因此多用於極短時間的充放電。超

級電容具有分子尺度大小的薄層電解質以及活性碳結構，可以提供較大的尖峰電力輸出，且能夠重複充放電百萬次，但目前仍屬於研發階段，成本較高。超導磁性儲能器之結構圖如圖 2-16，在儲存電力的時候，線圈中的電流會建立磁場，此磁場在低溫時會降低超導性(superconductivity)；而當超導物質進行低溫冷卻，則線圈中的能量則會被釋放。

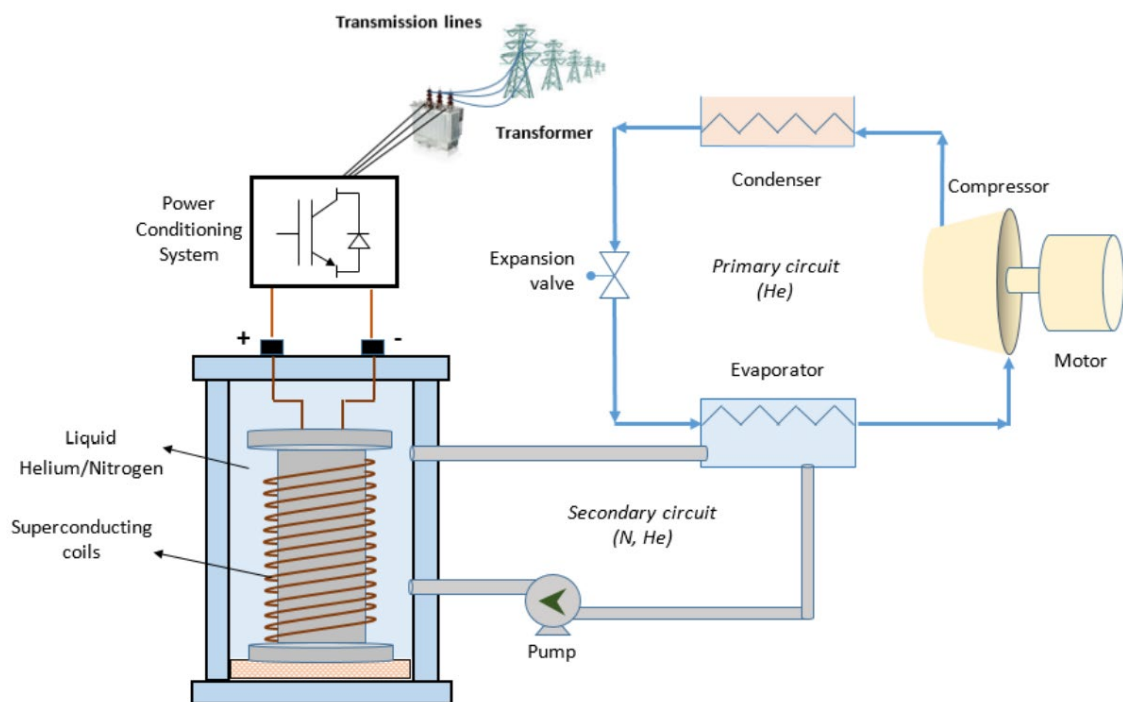


圖 2-16 超導磁性儲能器 (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

### 2-3.2 電池儲能系統簡介

電池儲能系統以化學能的方式將能量儲存於電池之中，電池儲能系統可暫存過多的發電量，在用電需求增加時將電量釋出，並可連接至電網設施進行頻率調節。由於目前仍無單一電池可以提供 1-MWh 的容量，因此電池儲能系統仍由數百，甚至數千個電池串並聯而成。電池儲能系統多由電池儲能貨櫃組成，而電池儲能貨櫃為數個電池儲能機櫃組成，而電池儲能機櫃中包含數十個電池模組，每一個電池模組為數十個電池串聯或部分並聯而成，各階層關係如圖 2-17。

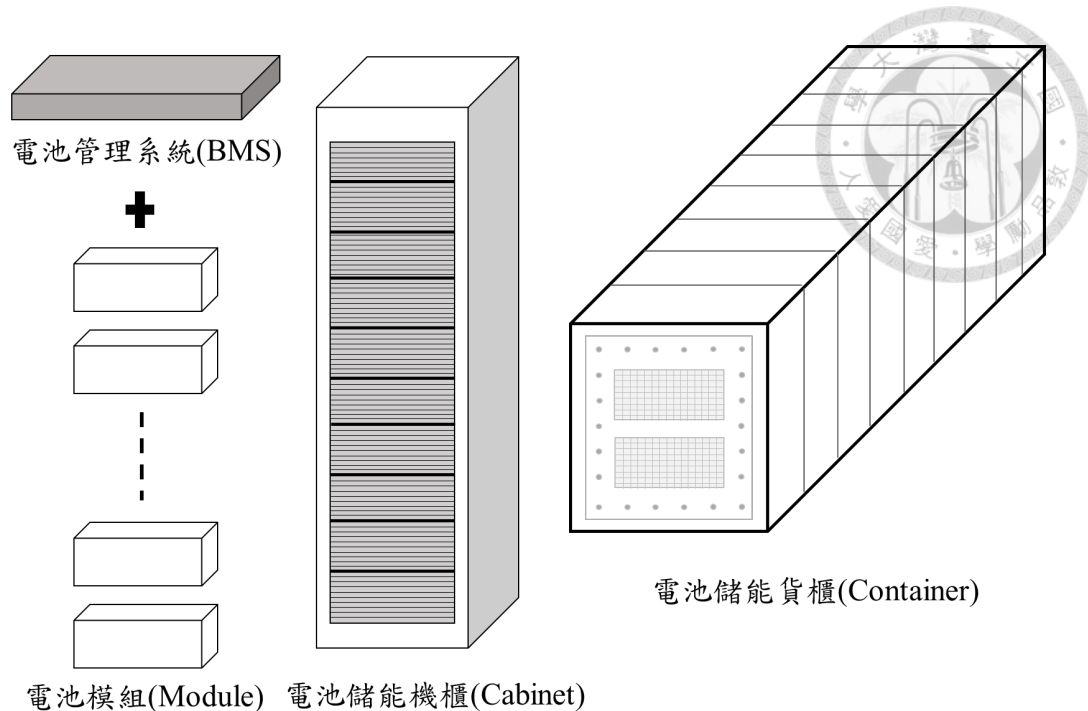


圖 2-17 電池模組、儲能機櫃與儲能貨櫃示意圖

電池模組為電池儲能系統中，可以進行監控與控制的最小單位。電池管理系統 (battery management system, BMS) 為一電池模組的控制中心，監控電池的電量狀態、溫度以及充放電電流等資訊，亦包含冷卻系統以確保電池安全，圖 2-18 為電動車的電池管理系統之照片。Liu *et al.*, (2019) 統整電動車的電池管理系統，列出相關之關鍵技術；Hu *et al.*, (2020) 則對電池管理系統控制的相關參數，包含電池電量狀態、健康狀態 (state of health, SOH)、電力狀態 (state of power, SOP) 進行統整，為更準確預期電池表現而發展其他參數。

電池儲能機櫃為組成電池儲能貨櫃的基礎，隨著電池儲能系統的需求增加，有許多關於電池儲能系統的尺寸、利益最大化及操作效率的研究。Liao *et al.* (2018) 指出電池儲能系統以及電網之交互關係，並且發展方法找出最佳的電池儲能系統尺寸；Moghaddam *et al.*, (2018) 則提出一預測及控制方法，希望能夠縮減目前電池儲能系統的大小，同時延長電池壽命。對電池儲能系統而言，效率亦為重要考量，Schimpe *et al.*, (2018) 提出一個較為完整的電熱模型 (electro-thermal model)，不僅探討電池及其子系統，也將電池儲能系統中的各項元件，如電池機櫃、熱管理系統、

空調系統以及電力電子元件等納入考量，更全面的探討電池儲能系統操作模式以及能量使用效率的關係，他們列出 18 種電池儲能系統中消耗能量機制，如圖 2-19。

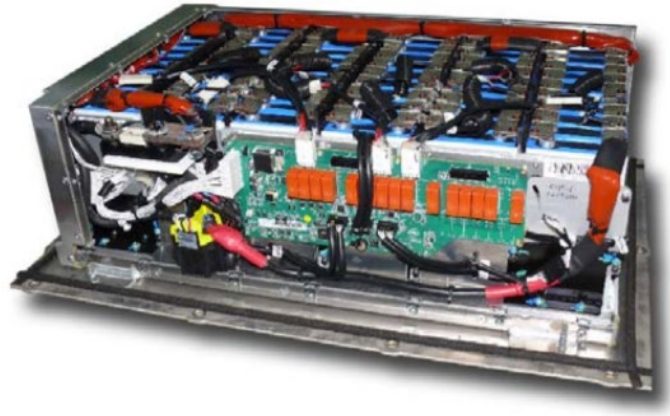


圖 2-18 電動車之電池管理系統 (Łebkowski, 2017)

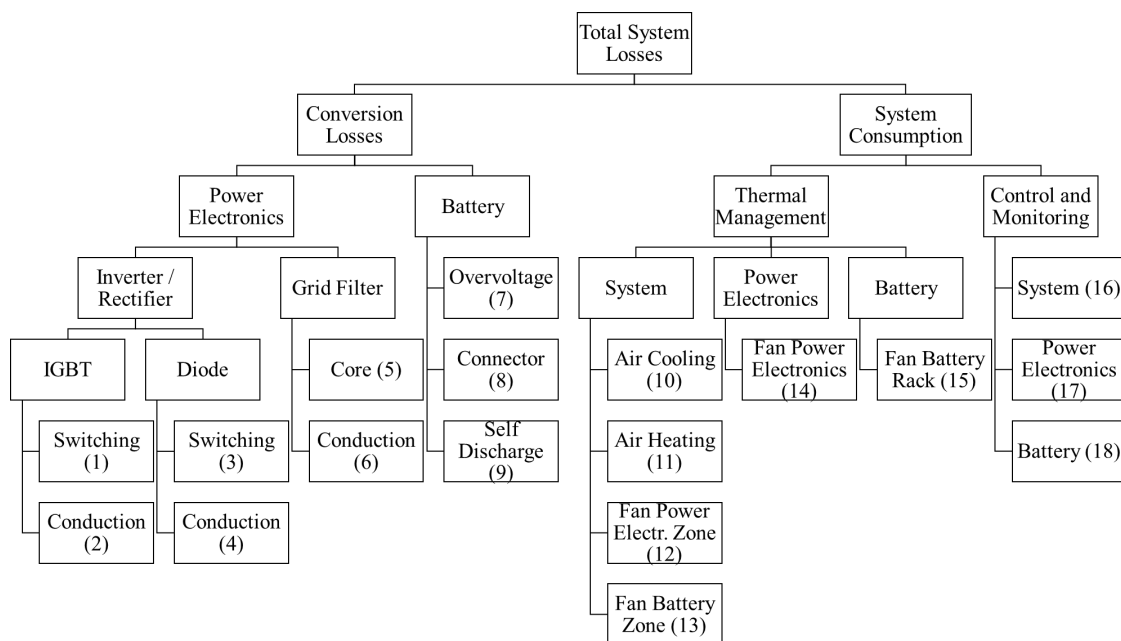


圖 2-19 電池儲能系統中能量消耗機制 (重製圖, Schimpe *et al.*, 2018)

電池儲能系統依照應用面，可分為能量型、平衡型、功率型三種，三者之比較如下表 2-1。能量型的儲能系統主要用於儲存電量，將離峰時段發電儲存並且於尖峰時段提供，為發電系統達到削峰填谷、負載轉移的功能，因此其所需電池數量較多，佔地面積也會較為龐大。功率型儲能系統主要用於應變電網突發事件，可用於

頻率調節以及作為電網緊急備用電源使用，可提供較大功率給電網，其可承受的電池充放電速率也較高，由於其充放電速率較快，其發熱量亦較大，因此為本文主要探討的對象。而平衡型電池儲能系統主要應用於電動車充電站、太陽能平滑化，其充放電時間與充放電率則介於能量型與功率型電池儲能系統之間。

表 2-1 電池儲能系統分類表

儲能系統種類	放電時間	電池單位價格	電池系統價格
能量型	大於兩小時	低	高
平衡型	一小時	中	中
功率型	小於三十分鐘	高	低

電池儲能系統主要之應用可分為三大類，電源端應用(power supply-side application)、電網端應用(grid-side application)及配電端應用(power distribution side) (Li, 2019)，各應用相關細項如圖 2-20。

發電廠提供穩定交流電至電網，再經由電網運送至用戶端，如在發電端無法正常供電的情況下，電池儲能系統能夠緩衝意外之停機(shutdown)以及供電震盪(fluctuation)帶來之問題，具備平滑供電(power smoothing)與頻率控制(frequency control)的功能(Li, 2019)，此部分為在電源端應用的部分。在電池儲能系統頻率控制的部分有兩大主流控制方式，分別為基於頻率的慣性控制(frequency-based inertial control, FBIC)以及基於搖擺方程式的慣性控制(swing-equation-based inertial control, SEBIC)，兩者之流程圖分別如圖 2-21 及圖 2-22。基於頻率的慣性控制會偵測發電機之頻率變化，並且根據頻率變化調整電力供給(Wang *et al.*, 2016)；基於搖擺方程式的慣性控制是以虛擬控制器的形式進行，而搖擺方程式亦為虛擬同步機(virtual synchronous machine, VSM)中最簡化的模型，透過模仿轉子的電機行為來達到控制電池儲能系統的效果(D'Arco & Suul, 2014)。

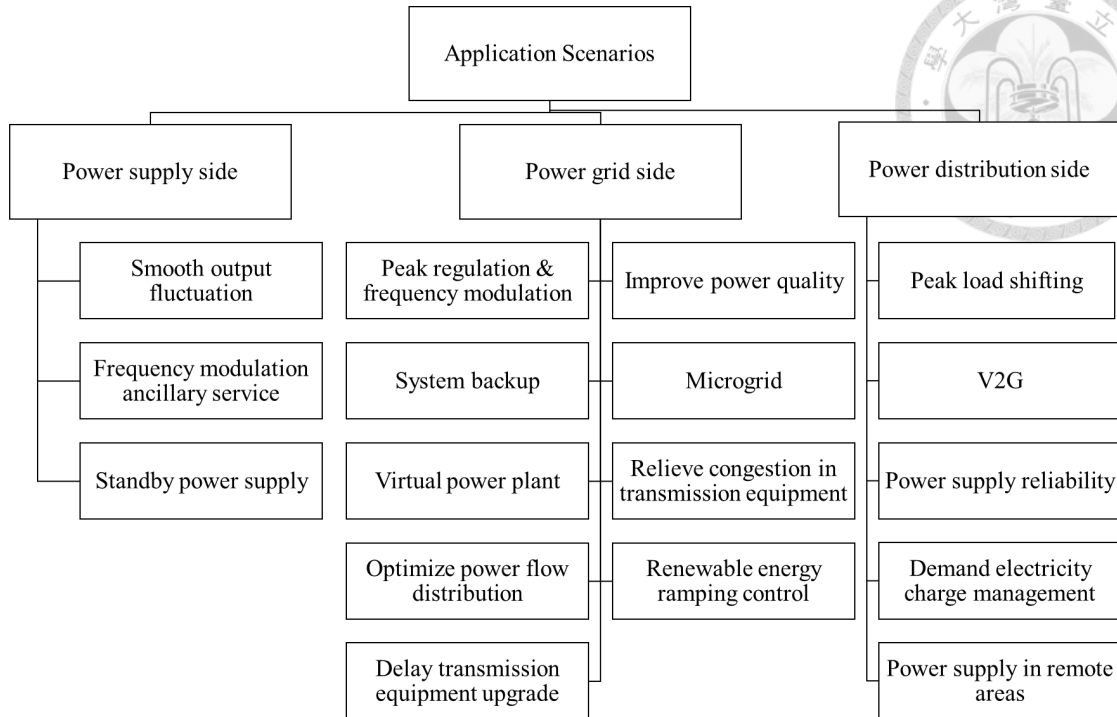


圖 2-20 電池儲能系統應用分類與細項 (重製圖, Li, 2019)

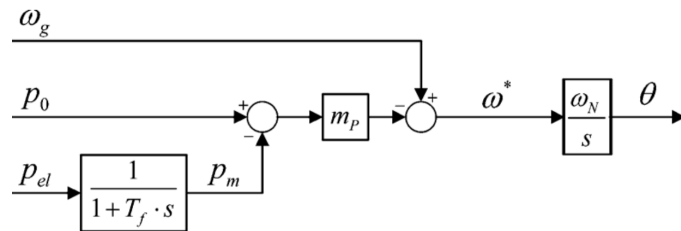


圖 2-21 基於頻率之慣性控制的示意圖(D'Arco & Suul, 2014)

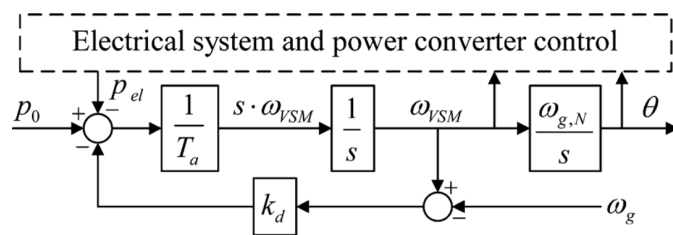


圖 2-22 基於搖擺方程式之慣性控制的示意圖(D'Arco & Suul, 2014)

電網多為動態系統且所需供電量在一天之中亦有變化，傳統的電網系統是利用電廠的基礎負載(baseload)以及尖峰負載，根據電網的電力消耗去調整電力的供給。上述調整需要全天候運作且基礎負載大的發電廠才能做到，發電廠多為燃氣或燃煤電廠且常會導致過多的電力供給造成浪費(Squalli, 2017)。電網側之電池儲能

系統可被視為一座虛擬發電廠，減少在尖峰時段電力供給與需求端的差異，且其儲存之電力可以讓電力供給更有彈性。削峰填谷以及平衡負載為電網端之電池儲能系統的主要應用，電池儲能系統儲存過剩的發電量，在電力供給不足時將儲存電量釋放，以平衡再生能源發電與民眾用電需求的時間差異。Marcus *et al.*, (2015)研究德國南部的電池儲能系統並且提出合適的電池儲能系統容量與充放電電流，以達到削峰填谷及平衡負載的目標。

### 2-3.3 電池儲能系統的散熱策略

電池儲能系統由為數眾多之電池串聯或並聯而成，電池中的部分化學反應對溫度十分敏感，過高或過低的溫度都會使電池容量大幅下降，甚至有火災發生的風險，因此監控電池溫度，適當地進行加溫或散熱以確保電池安全與其良好的效能十分重要。

電池儲能系統的散熱方式，依流體介質可以分為氣體式冷卻、液體式冷卻以及相變材料式冷卻三種。氣體式冷卻為目前商用電池儲能系統中最常使用的散熱方式，其優點為技術較成熟、設備與維修成本低、散熱均勻不易產生點熱源。此外，氣體式冷卻相較於液體式冷卻與相變材料式冷卻，氣體式冷卻沒有液體洩漏的問題，整體可靠度高，因此本文採用氣體式冷卻作為主要散熱策略發展對象。液體式冷卻相較於氣體式冷卻擁有較高的熱對流係數及熱容量，多應用於充放電快速、產生熱量較高的電動車，其缺點為價格較為昂貴、結構複雜。相變材料式冷卻利用物質相變吸熱的特性，維持電池溫度於合適範圍內，其最大優點為使用時不需額外施加能量，靠著物質本身之相變即可進行(Wilke *et al.*, 2017)，缺點為體積與重量增加，且因相變過程所需時間較長，其使用範圍亦受發熱量限制，需要輔助冷卻系統將熱量由相變材料移除。

依冷卻方式，電池儲能系統的散熱可分為被動式冷卻(*passive cooling*)及主動式冷卻(*active cooling*)。被動式冷卻使用大氣氣體進行冷卻，因此冷卻流體之溫度範

圍較小，易容易受到大氣狀況影響。主動式冷卻則將冷卻流體調整至目標溫度，多為將冷卻流體的溫度調整至低於大氣溫度後，再送入電池儲能系統進行冷卻，主動式冷卻的流體溫度範圍較廣，但調整進氣溫度亦會需要消耗較多的功率。圖 2-23 為以氣體式冷卻為例的被動式冷卻、主動式冷卻之示意圖(Pesaran, 2001)。

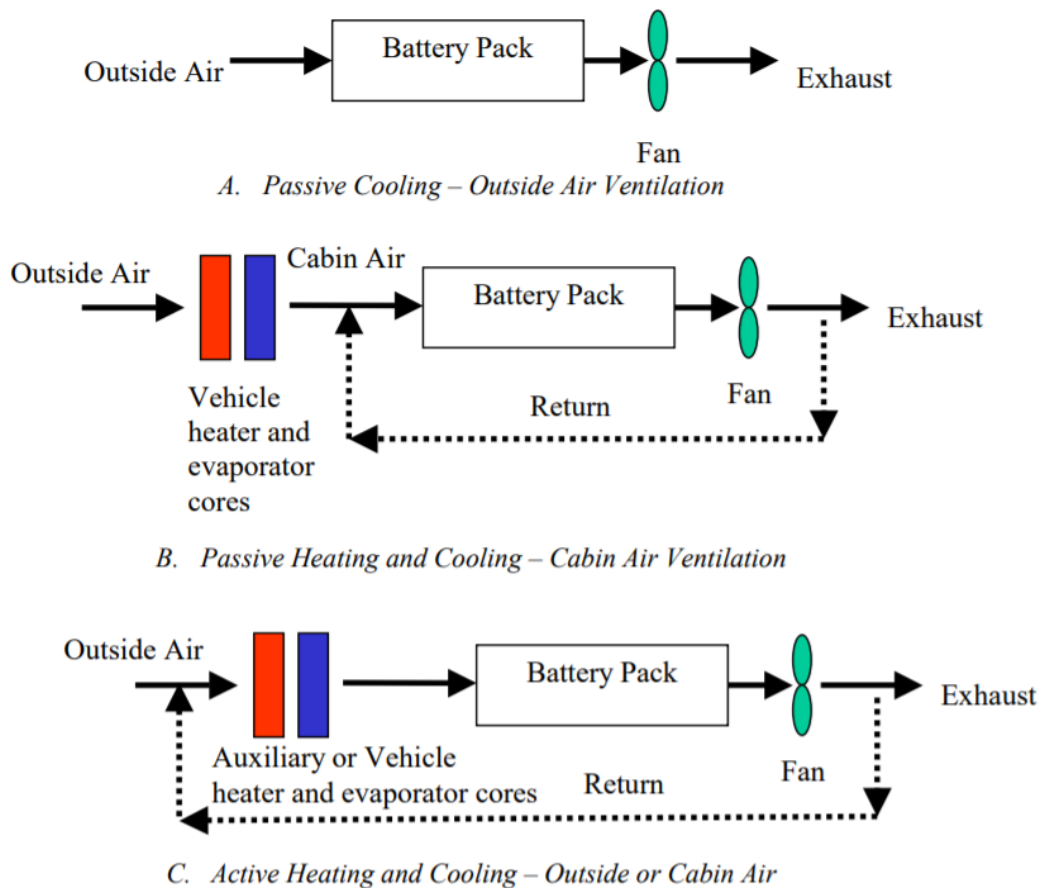


圖 2-23 被動式冷卻及主動式冷卻示意圖 (Pesaran, 2001)

現有商用電池儲能系統多由電池儲能機櫃上方進風，如圖 2-24 至圖 2-26，依序為美國杜克能源的 2 MW 儲能系統(Larson A., 2015)、韓國公司 KoKam 的儲能系統(Kokam Co., Ltd., n.d.)及加拿大 EPCOR 公用事業公司的儲能系統配置(EPCOR Utilities Inc., n.d.)。





圖 2-24 美國杜克能源的 2 MW 儲能系統 (Larson A., 2015).

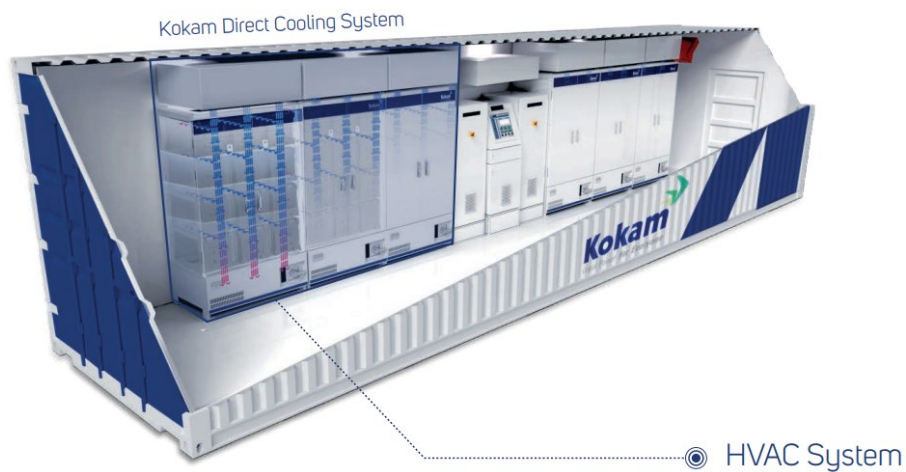


圖 2-25 韓國公司 KoKam 的商用儲能系統 (Kokam Co., Ltd., n.d.)



圖 2-26 加拿大 EPCOR 公用事業公司的儲能系統 (EPCOR Utilities Inc., n.d.)

隨電池儲能系統被廣泛應用，接連發生電池儲能系統的火災使其安全性受到矚目。近年有學者投入電池儲能貨櫃的幾何研究，Xinlong *et al.* (2022)對電池儲能機櫃的幾何進行細部設計，包含進風口位置及數量、送風管及流體通道內配置擋板

(baffle)避免流體於通道轉角處互相干擾，如圖 2-27 及圖 2-28，並將流體速度帶入不均勻度係數(nonuniformity coefficient)公式，評斷流體分布的均勻程度。Xu *et al.* (2022)則對現有商用電池儲能貨櫃進行數值模擬，加裝導流板(guide plate)以改變流體方向與分布，如圖 2-29，其研究結果顯示加裝導流板使電池模組的平均溫度、最高溫度分別降低了 4.6 °C、4.3 °C，電池模組間的最大溫差則降低 3.7 °C。

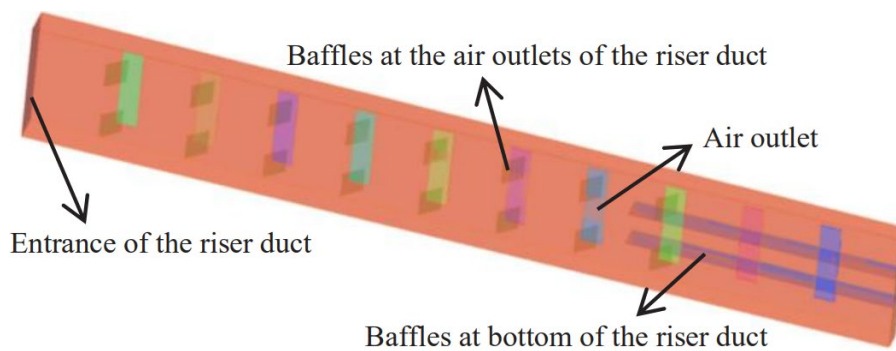


圖 2-27 出風軟管幾何示意圖 (Xinlong *et al.*, 2022)

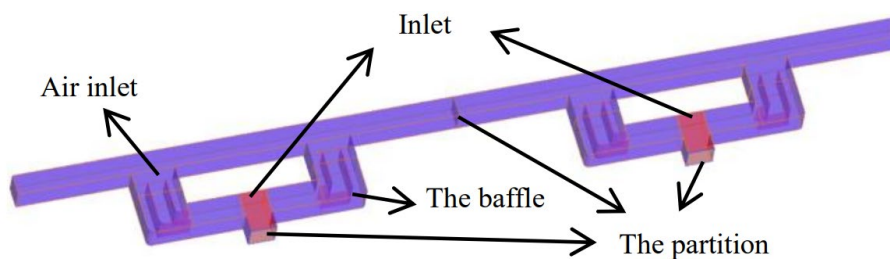


圖 2-28 主要流體通道幾何示意圖 (Xinlong *et al.*, 2022)

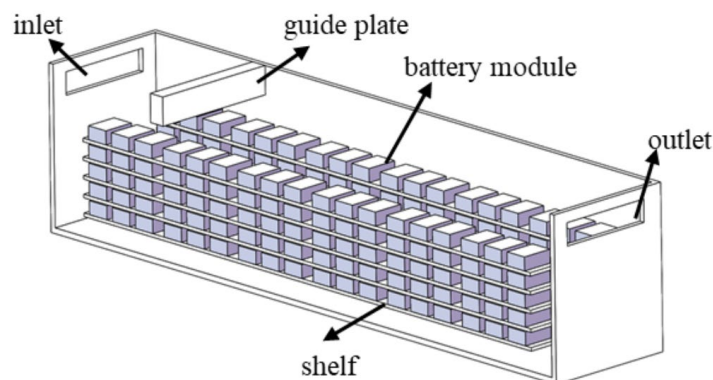


圖 2-29 於商用電池儲能系統加裝導流板的物理模型(Xu *et al.*, 2022)



## 2-4 資料中心散熱

提升散熱效率為歷時已久的議題，但電池儲能系統相關的研究數量少且改善幅度小，多為逐案探討，並未有通則性的散熱改善方式。資料中心裝設有伺服器與機櫃，並用於運算及存放重要資料，幾何擺設與電池儲能系統相似，並有眾多的研究探討資料中心的散熱效率，有研究對於伺服器、機櫃以及整個資料中心提出散熱改善策略，Cho *et al.* (2009)比較進出風口配置的散熱效果差異，如圖 2-30；Abdelmaksoud *et al.* (2010)設計不同穿透率的進風口擋板，以提高流場均勻度，如圖 2-31。更有學者歸納出三個資料中心散熱效果不佳的流場因素，即冷空氣旁路(cold air bypass)、熱空氣回流(hot air recirculation)以及負壓(negative pressure)，並對此三個因素進行研究與解決方案的探討。

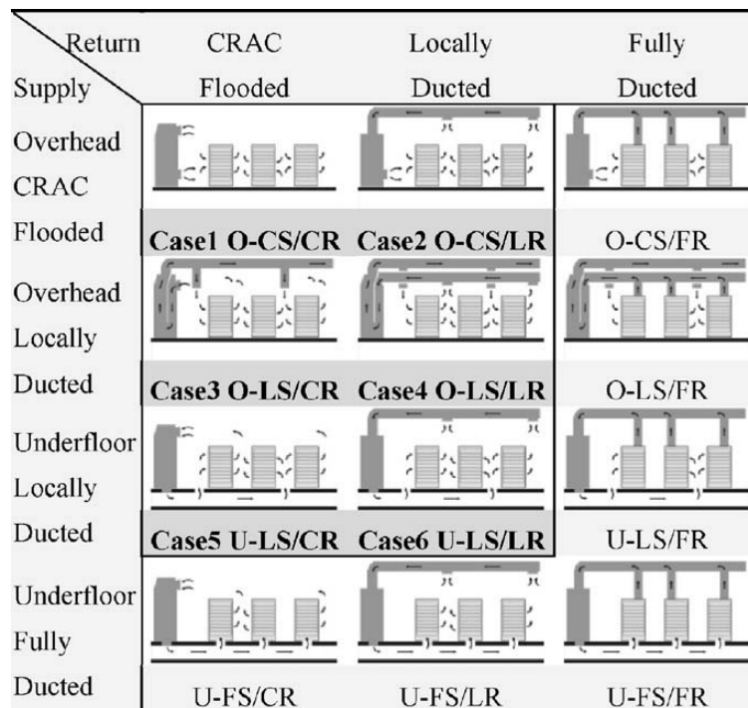


圖 2-30 進出風口形式與位置配置 (Cho *et al.*, 2009)

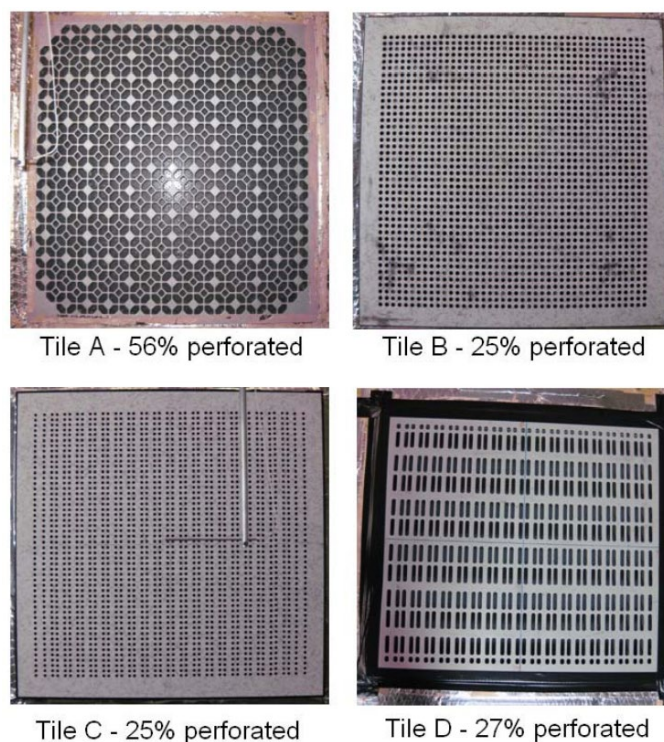


圖 2-31 四種穿透率的進風口檔板 (Abdelmaksoud *et al.*, 2010)

#### 2-4.1 冷空氣旁路

冷空氣旁路較易發生於資料中心內部的機櫃佈局(layout)不佳時，此情況表示空調系統所提供的冷空氣並未進入機櫃進行散熱，直接被空調系統回收，造成進行散熱的流體不足。Seymour *et al.* (2015)透過數值模擬探討資料中心內部各個位置的空氣洩漏，計算出機櫃與伺服器間的冷空氣旁通量為 13%至 15%，詳細數據如表 2-2；Tatchell-Evans *et al.* (2017)指出冷空氣旁通量最高可達 20%，將主要空氣洩漏處密封後，最多可節省 8.8%的能量消耗。

表 2-2 氣體洩漏位置分析數據 (重製表，Tatchell-Evans *et al.*, 2017)

氣體洩漏位置	機櫃進口最高溫度(°C)	熱空氣回流量 (%)	冷空氣旁通量 (%)
機櫃上方	32.4	10.3	14.2
機櫃下方	26.0	9.9	13.3
機櫃兩側	30.6	10.0	15.0



## 2-4.2 熱空氣回流

在冷空氣供應不足的情況下，已進行散熱的熱空氣回流至空調系統進風口，導致冷熱空氣混合使散熱效率降低。冷空氣沉降的現象使得機櫃高處較容易發生熱空氣回流的情況，亦使伺服器的溫度分布更不均勻(Wan *et al.*, 2018)。Arghode *et al.* (2013)發現未增設分隔板(containment)的機櫃配置，即使在冷空氣充足提供的情況下仍會有熱空氣回流的情形，反之增設分隔板可以有效解決此問題，裝設隔板與否的通道如圖 2-32，在一部空調系統開啟與兩部空調系統開啟的情況下，有無增設分隔板的溫度分布結果如圖 2-33 及圖 2-34。

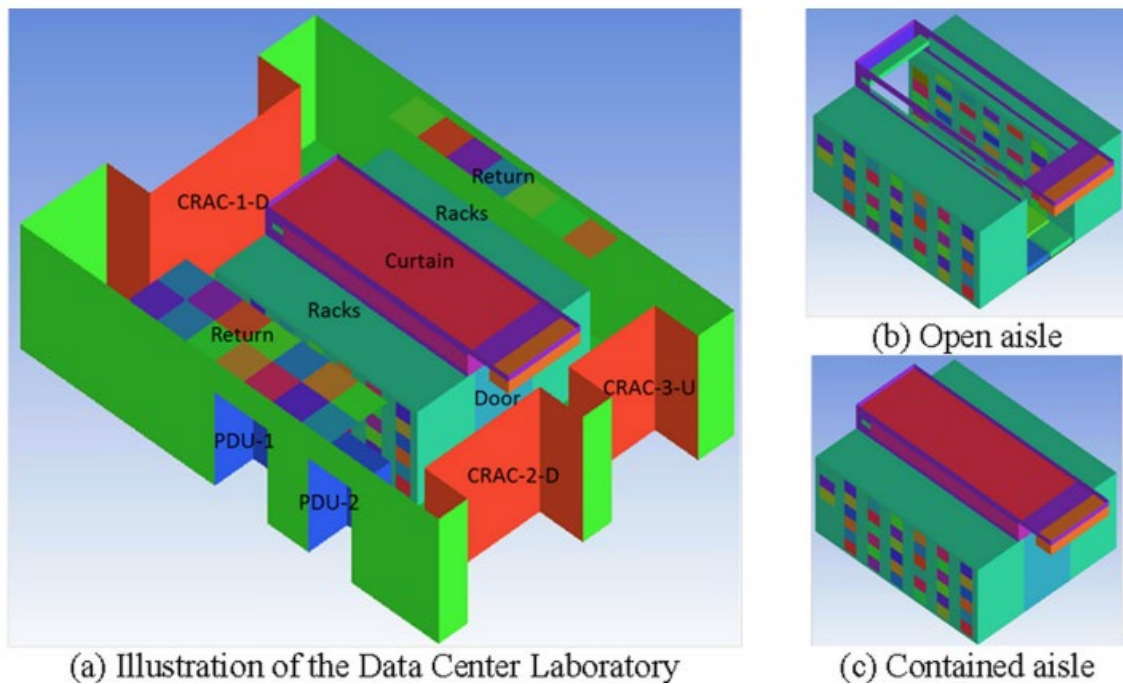


圖 2-32 有無裝設隔板的通道示意圖(Arghode *et al.*, 2013)

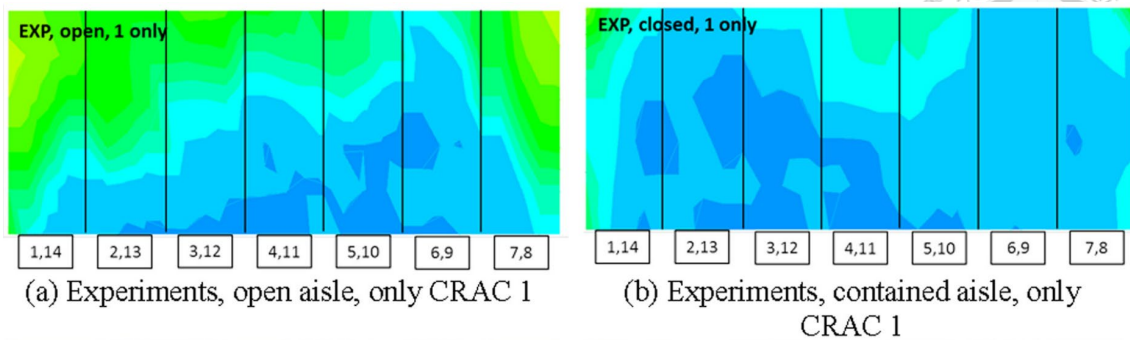


圖 2-33 一部空調系統開啟 (a)無分隔板，(b)增設分隔板(Arghode *et al.*, 2013)

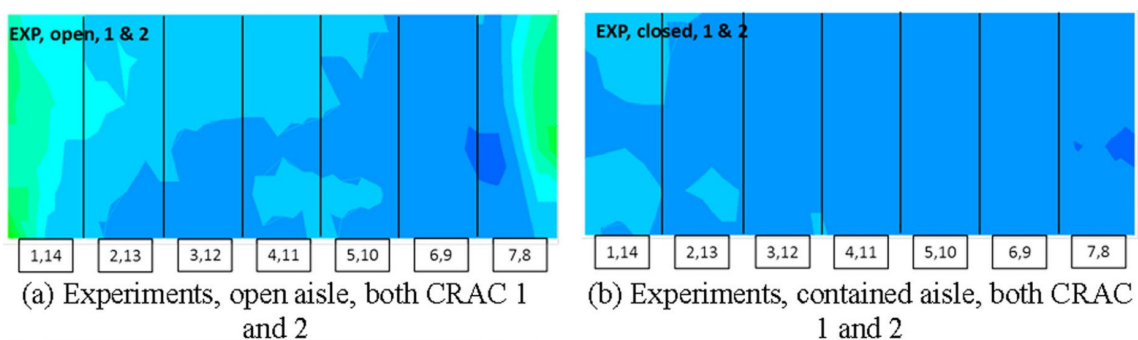


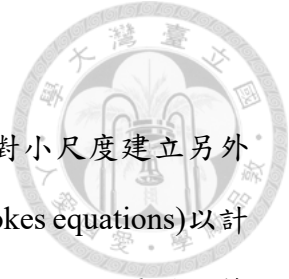
圖 2-34 兩部空調系統開啟 (a)無分隔板，(b)增設分隔板 (Arghode *et al.*, 2013)

### 2-4.3 負壓

通道內的負壓造成氣體回流，此局部氣體回流使得冷卻效果受影響。Nada & Said (2017)發現供應冷卻流體的通風道高度提升，會使冷卻流體流速下降，使機櫃溫度分布更為均勻；空調系統的風扇流率與伺服器的風扇流率若無妥善配合，亦會造成負壓的情況發生(Khalili *et al.*, 2018)。

### 2-5 計算流體力學

計算流體力學使用數值方法對流體力學的控制方程式進行求解，從而預測流場的狀況，目前有多種商業 CFD 軟體如 FLUENT、CFDRCCFX、OpenFOAM 等，在工程與研究領域被廣泛應用。計算流體力學首先需要建立欲計算之場域的物理模型，接著將流體所占的區域離散成網格(grid)與節點，再利用合適的數值方法求解。若是層流的情況，可以直接解納維爾－史托克斯方程式，預測流場的情況；若是紊流的情況，由於計算尺度大，需要先使用紊流模型簡化問題再進行求解。



## 2-5.1 紊流模型

直接數值模擬 (direct numerical simulation, DNS)並沒有針對小尺度建立另外的紊流模型，而是直接求解納維爾－史托克斯方程式(Navier–Stokes equations)以計算所有相關尺度之紊流運動。由於紊流流場中的渦旋尺度相差極大，因此需要網格數量龐大、時間步階小才能準確解出流場的特徵，需要消耗大量計算資源，面對複雜問題可能會有耗時長、無法求解的問題。

為了節省求解紊流問題所需之計算資源，發展了雷諾平均納維爾－史托克斯方程式(Reynolds-averaged Navier–Stokes equations, RANS)，用以描述紊流流場中的時均納維爾－史托克斯方程式，此方法將流場的各物理量視為時間平均以及瞬時波動的疊加，即將流場的物理量拆解為兩部分，而任一物理量 $u$ 皆會滿足式(2-1)。

$$u = \bar{u} + u' \quad (2-1)$$

將紊流流場中的變數都取時間平均，可得到時間平均納維爾－史托克斯方程式，如式(2-2)。

$$(u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 u + \nabla \cdot \tau_{ij}^t \quad (2-2)$$

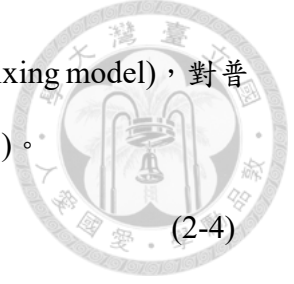
其中， $\tau_{ij}^t$ 為雷諾應力張量，雷諾應力張量為一未知數，需要建立適當的模型求解雷諾應力張量，為解出此雷諾應力張量，混合長度模型(mixing length model)、 $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型以及 SST (shear-stress transport)模型等紊流模型相繼發展。

雷諾應力張量如(2-3)。

$$\tau_{ij}^t = \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

### 混合長度模型

混合長度模型為較早發展之紊流模型，最早為路德維希·普朗特(Ludwig Prandtl)提出的普朗特混合長度模型(Prandtl mixing length model)，用以描述二維流



體中之動量傳遞，而後又有范德萊士混合長度模型(Van Driest mixing model)，對普朗特混合長度模型進行修正，兩模型的公式分別如式(2-4)及(2-5)。

$$l_p = \kappa y \quad (2-4)$$

$$l_V = \kappa y \left(1 - e^{-y^+/\Lambda^+}\right) \quad (2-5)$$

### ***k-ε* 模型**

針對紊流動能  $k$  (turbulent kinetic energy) 和紊流耗散率  $\varepsilon$  (turbulent dissipation rate) 建立模型，紊流動能  $k$  的傳遞函數(transport function)以及紊流耗散率  $\varepsilon$  的傳遞函數分別如式(2-6)及(2-7)，而紊流耗散率  $\varepsilon$  的傳遞函數中之常數  $C_1$ 、 $C_2$  及  $C_3$  會隨著不同之  $k-\varepsilon$  模型而有所差異。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k + P_b + S_k - \rho \varepsilon \quad (2-6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) \\ = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_3 P_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2-7)$$

$k-\varepsilon$  模型優點是應用範圍廣，而缺點為無法非常準確預測流動分離 (flow separation) 現象，靠近壁面處之流場預測較不準確。

### ***k-ω* 模型**

$k-\omega$  模型是由 Wilcox (1988) 提出，針對紊流動能  $k$  和比紊流耗散率  $\omega$  (specific turbulence dissipation rate) 建立模型，比紊流耗散率  $\omega$  與紊流耗散率  $\varepsilon$  間的關係如式(2-9)，兩者之間為可互換之關係，其中  $C_\mu$  為經驗常數，其值為 0.09。

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (2-8)$$

在  $k-\varepsilon$  模型之傳遞函數中，因需要計算經驗阻尼函數(empirical damping function)，





而此函數在逆向壓力梯度(adverse pressure gradient)存在時並不準確，因此不需要計算此經驗阻尼函數的  $k-\omega$  模型則較為準確，比紊流耗散率  $\omega$  之傳遞函數如式(2-10)。

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (2-9)$$

$k-\omega$  模型能較準確預測靠近壁面處之流場狀況；其缺點是在靠近壁面處需要較細之網格導致計算時間增加。

### $k-\omega$ SST 模型

$k-\omega$  SST 模型之前身為  $k-\omega$  BST 模型， $k-\omega$  BST 模型利用混合函數(blending function)來連接  $k-\omega$  模型及  $k-\varepsilon$  模型，在靠近壁面處使用  $k-\omega$  模型來準確預測壁面流場，而其他位置則使用  $k-\varepsilon$  模型，其傳遞函數如式(2-10)及(2-11)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U\omega) \\ &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega_2}}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \end{aligned} \quad (2-11)$$

其中  $\nabla k : \nabla \omega$  為一純量值，其計算如下

$$\nabla k : \nabla \omega = \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \quad (2-12)$$

$k-\omega$  BST 模型雖能夠結合兩個模型，但是在靠近壁面處之應力預測上並不準確，因此有學者提出針對  $k-\omega$  BST 模型提出黏度限制(viscosity limiter)及不同之混合函數，讓靠近壁面之應力預測更為準確，黏度限制之計算如式(2-13)。 $k-\omega$  SST 模型結合了  $k-\omega$  模型及  $k-\varepsilon$  模型之優點，因此預測準確性較高，應用範圍較廣，其中  $F_2$  為不同於  $k-\omega$  BST 模型中的混合函數，圖 2-35 為  $k-\omega$  SST 模型示意圖。

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (2-13)$$

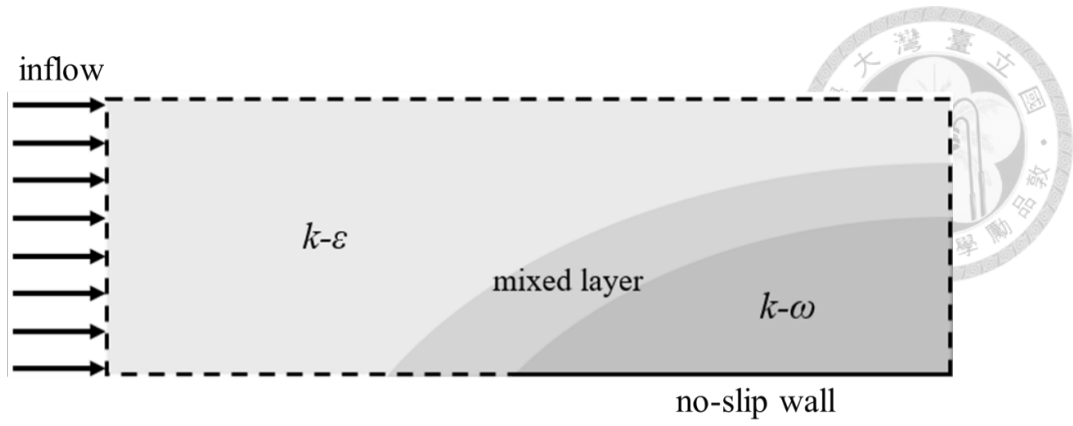


圖 2-35  $k-\omega$  SST 模型示意圖



### 第三章 研究方法

本文使用商用軟體 ANSYS Fluent 進行模擬計算，探討電池儲能系統內部的流場與電池模組溫度分布，以提出合適之進口條件控制策略。本章說明電池儲能系統的物理模型建立、模擬軟體中的各項設定與獨立性驗證，以及取得計算數據後之策略建立與優劣評斷，圖 3-1 為本章架構。

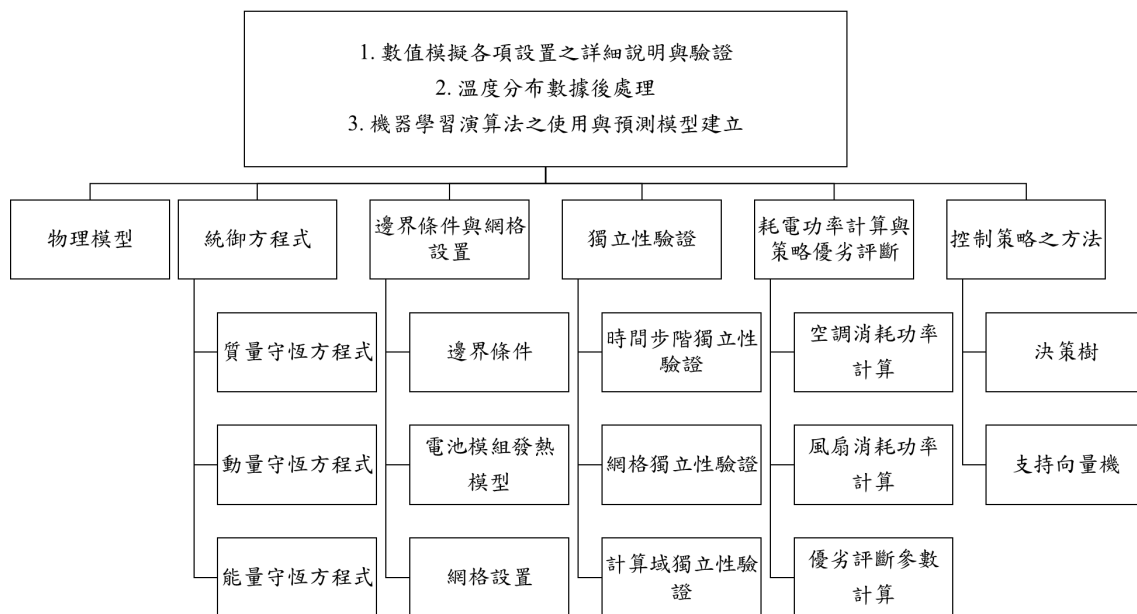


圖 3-1 研究方法架構

#### 3-1 物理模型

本文參考某電子公司的商用電池儲能貨櫃，將進風口設置於靠近天花板處，本文簡稱為 CS-FR，如圖 3-2(a)。資料中心與電池儲能系統的幾何相似，且本研究發現電池儲能系統中亦有相似的流場因素，導致散熱不佳，故本研究參考並引入資料中心的流場改善方式，調整電池儲能貨櫃的進出風口的配置，物理模型如圖 3-2 (b) 及(c)，圖 3-2 (b)的進風口為各電池機櫃上方的圓型進風管，簡稱 DS-CR；圖 3-2 (c) 的之進風口於靠近地面處，簡稱 FS-CR。於圖 3-2 中藍色表示溫度較低的進風口，紅色表示溫度較高的出風口，綠色則表對稱面。

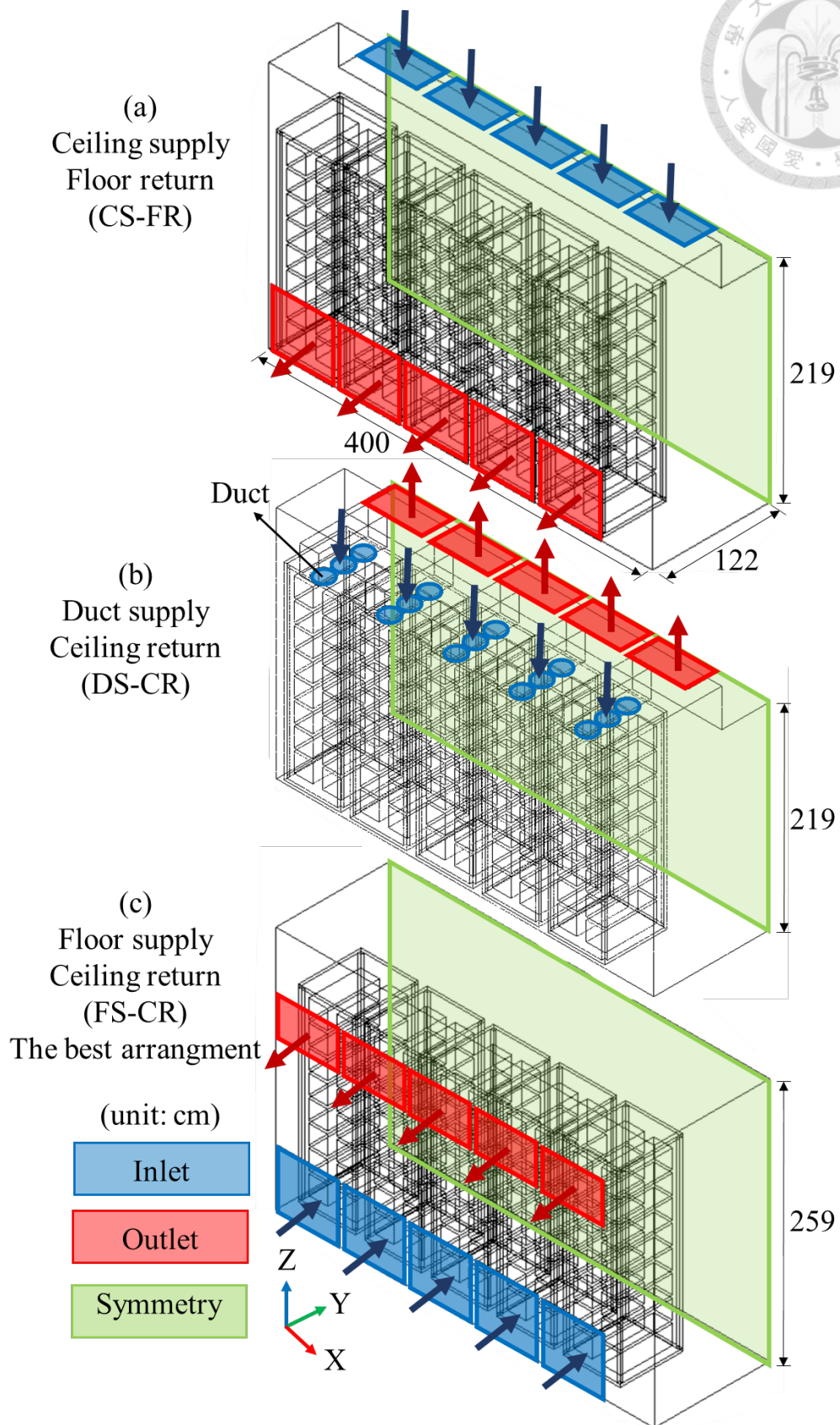


圖 3-2 電池儲能貨櫃右半邊的幾何配置 (a) CS-FR，(b) DS-CR，(c) FS-CR

此外，因電池儲能系統與資料中心的發熱量級差異與需要承受再生能源不穩定的發電，本研究並找出合適的進口條件，於相同進口條件下探討上述三個物理模型流場與溫度分布，經量化分析，FS-CR 幾何配置的散熱效果最佳，因此選用 FS-CR 配置進一步建立進口控制策略。FS-CR 的幾何配置中，進出風口位置於電池儲能貨櫃側面(即  $y = 0$  處的  $xz$  平面)，進風口設置於靠近地面處，為五個長為 65 公分，高為 60 公分之方形進風口，出風口部分位於進風口上方，為五個長為 65 公分，高為 40 公分之方形出風口，其於電池儲能貨櫃之位置如圖 3-3。

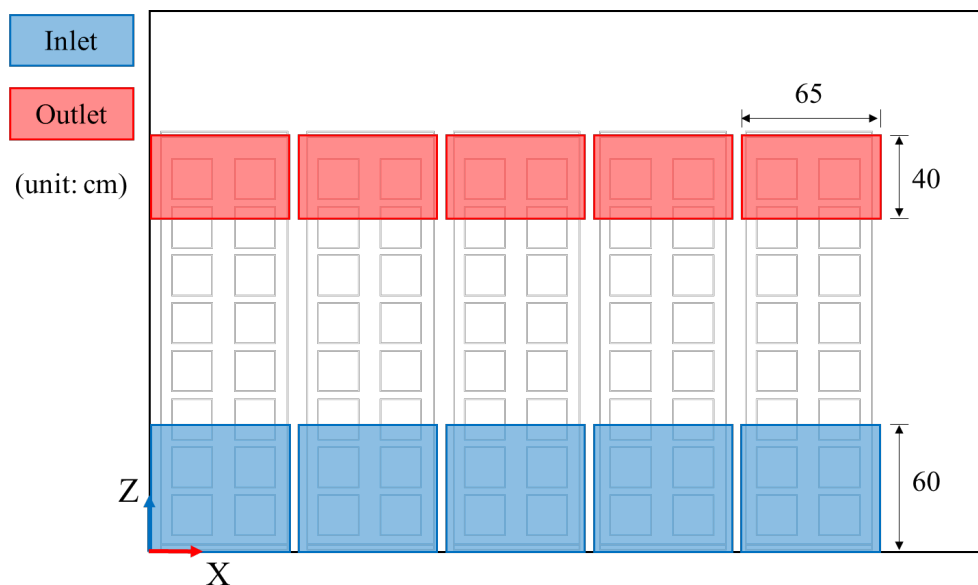


圖 3-3 進出風口位置圖與尺寸圖

電池儲能貨櫃由十個電池儲能機櫃組成，而單一電池機櫃中包含十六個電池模組，電池模組由十四個電池所串連而成，電池儲能貨櫃的側視圖如圖 3-4，由左至右將電池機櫃編號為電池機櫃 1 至 5，由下至上則為電池模組編號 1 至 8，以便後續初步結果分析。電池儲能貨櫃的俯視圖如圖 3-5，建立對稱面以節省計算資源，上半部之淺灰色部分為因對稱面建立，並未實際繪製出且進行計算的對稱流體區域，下半部則為實際繪出並且計算的流體區域。

本文計算散熱流體流經的區域，因此電池儲能貨櫃之空調系統並未繪製，而流

體區域長 400 公分，寬 122 公分，高 259 公分，長、寬、高之方向分別為  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向。而電池機櫃尺寸為長 60 公分，寬 66 公分，高度 200 公分，上下的板厚為 3 公分，四個角落以邊長為 3 公分之方形桿作為支撐並未封閉；電池模組本身的幾何參考某電池公司的商用電池模組，將幾何形狀近似為長寬高分別為 20、55、20 公分的長方體，電池機櫃與電池模組的示意圖如圖 3-6。

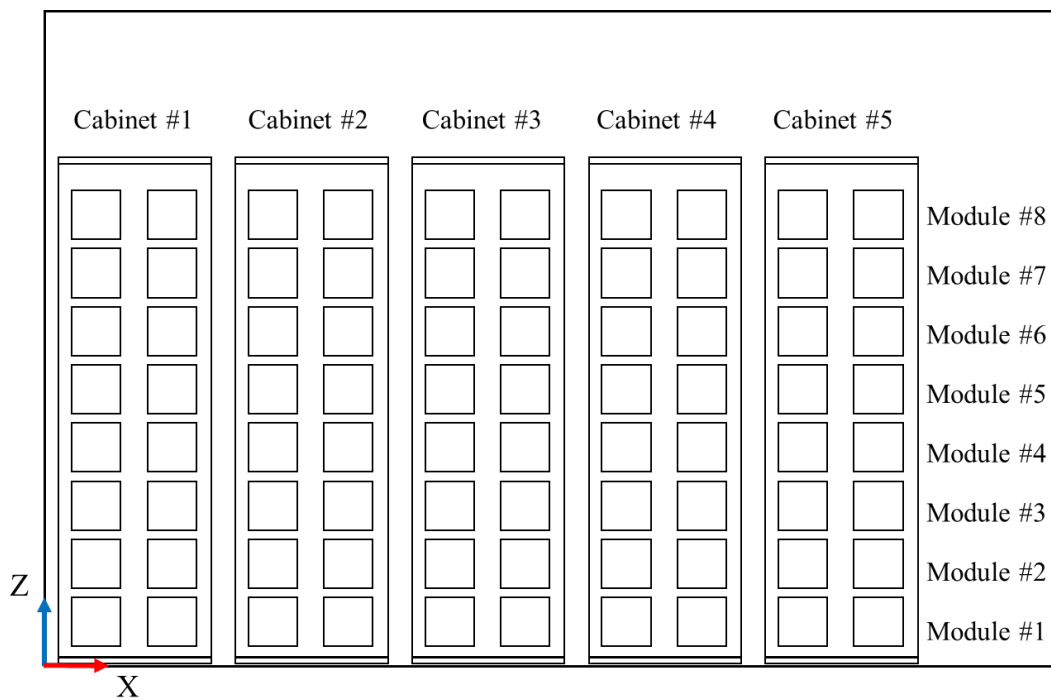


圖 3-4 電池儲能貨櫃側視圖

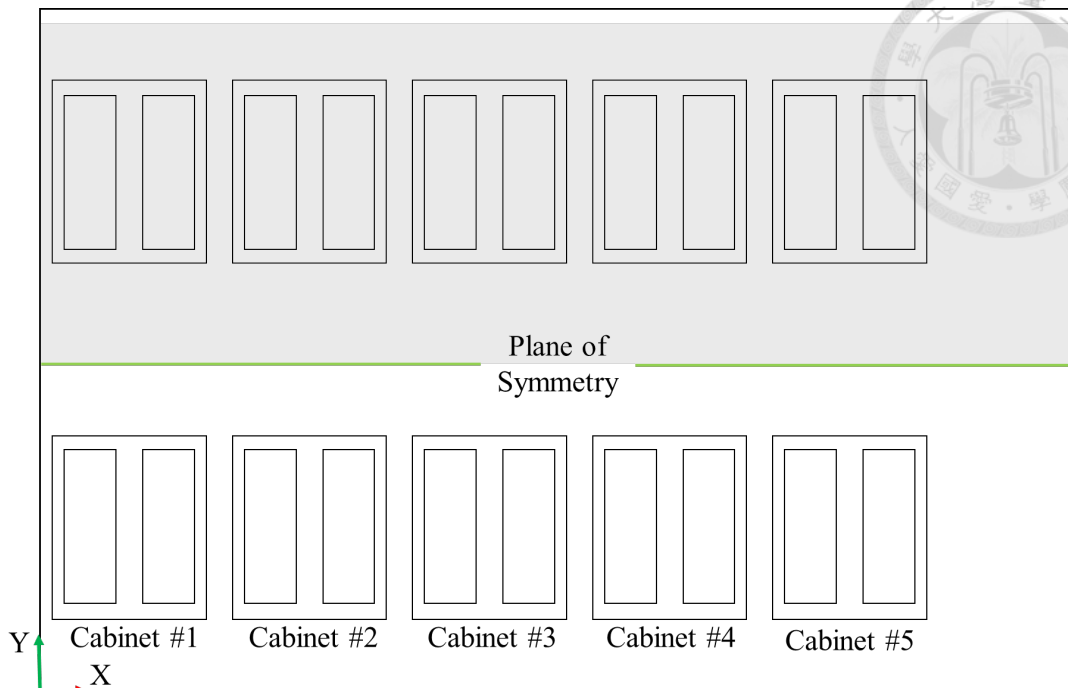


圖 3-5 電池儲能貨櫃俯視圖

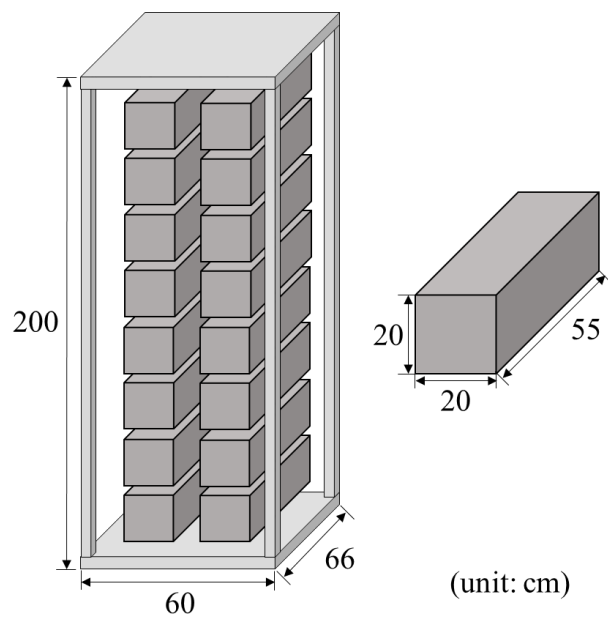


圖 3-6 電池儲能機櫃與電池模組示意圖

### 3-2 統御方程式

本文流體速度遠小於音速，故馬赫數(Mach number)遠小於 0.3，因此視為不可壓縮流。研究中使用三維、暫態的納維爾－史托克斯方程式，符合流體力學中基本方程式－質量、動量、能量守恆式。參考電池散熱之相關文獻(Chen *et al.*, 2020; Hong



*et al.*, 2018; Tao *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021), 並確認本文中的雷諾數已達紊流條件, 故本文在紊流模型上亦選擇  $k-\epsilon$  模型。

### 3-2.1 質量守恆方程式

質量守恆方程式又稱連續性方程式(continuity equation), 表示在穩態狀況下, 流體對於系統而言進入與離開之速率相等, 如(3-1)所示。本文探討之電池儲能貨櫃為穩態之開放系統, 符合質量守恆方程式。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3-1)$$

### 3-2.2 動量守恆方程式

系統中流體所受外力和為零, 流體之動量變化保持不變, 本文模擬之情況對流體無施加外力, 因此(3-2)方程式中之外力  $\mathbf{F}$  為零。

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3-2)$$

### 3-2.3 能量守恆方程式

能量無法被生成與摧毀, 因此一孤立系統中總能量保持不變, 本文模擬之情況需考量電池模組之發熱, 故須考量(3-3)方程式中之其他熱源  $S$ 。

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \mathbf{u}) \right) + S \quad (3-3)$$

## 3-3 邊界條件與網格設置

### 3-3.1 邊界條件

本文計算散熱流體流經的區域, 即電池儲能貨櫃內部的流體域, 將邊界條件劃分為進風口、出風口、對稱面、牆面以及電池模組表面, 各項邊界條件設定整理如表 3-1。

表 3-1 邊界條件設定





計算域位置	邊界條件
進風口	設定流體速度及溫度
出風口	壓力出口， 錶壓(gauge pressure)為零
對稱面	法向通量為零
牆面	無滑移
電池模組表面	無滑移，面熱通量 (surface heat flux)

將 CS-FR、DS-CR 及 FS-CR 三種幾何配置皆於進口溫度為 15 °C 的情況下進行比較，探討流場與溫度場的細節。進風口控制策略則以 FS-CR 物理模型為探討對象，設定相異的進口條件組合。在進風口條件的部分設定進口溫度以 4 °C 為間隔，設定進口溫度為 11、15、19、23、27、31 °C；進口風量為五個進風口的風量總和，以 1 m<sup>3</sup>/s 為間隔，設定進口風量為 2 至 10 m<sup>3</sup>/s 共九種進口風量。出風口處參考文獻設定為壓力出口，且設定其壓力值與大氣壓力相同，即錶壓為零。由於電池儲能貨櫃為一對稱長方體，故使用對稱面以節省計算資源，計算時對稱面為無摩擦、各個物理量的法向通量為零。牆面與電池模組表面設定為無滑移條件(no-slip)，其中，電池模組表面設定固定熱通量，以模擬電池發熱的情形。

### 3-3.2 電池模組發熱模型

參考電池相關論文用以模擬電池發熱之情況，Zhang (2021)將電池本身設定為一固體區域，設定流體與電池之間為界面(interface)，以進行電池發熱與周圍流場之計算，Liu *et al.*, (2014)將電池表面設定為面熱通量，進行發熱進算。然而，本文欲探討的電池模組數量共 80 個，若將電池視為固體區域進行發熱，不僅電池固體區域的網格數量眾多，界面亦造成龐大的數據交換與計算資源需求，進而造成計算時間較長。兩方法在穩態區段之發熱量、溫度分布、速度場分布之差異並不大(將

於 4-1 詳述)，因此本文設定電池表面熱通量為一數值，模擬電池發熱的狀況進行發熱量控制。

電池模組的發熱值計算參考文獻(Liu *et al.*, 2014)，鋰離子電池的發熱如式(3-4)，式中等號右側依序為焦耳熱(Joule heat)、反應熱(reaction heat)、因電池老化作用副反應產生之熱量以及混合過程產生的熱量。

$$\begin{aligned} \dot{Q} = & I(U_{OCV} - U_t) - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} - \sum_i \Delta H_i^{avg} r_i \\ & - \int \sum_j (\bar{H}_j - H_j^{avg}) \frac{\partial c_i}{\partial t} dv \end{aligned} \quad (3-4)$$

由於鋰離子電池的老化過程(aging process)緩慢，在單一充放電循環中可以忽略(Forgez *et al.*, 2010)，因此因電池老化作用副反應產生的熱量亦可忽略。本文探討電池於固定充放電速率下的情形，混合過程產生的熱量在充放電速率動態變化的情況下較為重要，若為固定充放電速率則可忽略(Thomas & Newman, 2003)，因此上式(3-4)可省略為式(3-5)。

$$\dot{Q} = I(U_{OCV} - U_t) - IT \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (3-5)$$

由式(3-5)可知焦耳熱會由電池的電流 $I$ 、電池本身的端電壓 $U_t$  (terminal voltage)以及開路電壓 $U_{OCV}$  (open circuit voltage, OCV)決定，而電池的過電位(overpotential)，即開路電壓 $U_{OCV}$ 減去端電壓 $U_t$ ，則由電池內阻 $R_{in}$  (internal resistance)所決定，電池內阻可由式(3-6)決定。

$$R_{in} = \frac{U_{OCV} - U_t}{I} \quad (3-6)$$

將式(3-6)帶入式(3-5)，可得式(3-7)，其中 $T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T}$ 為熵勢 $U_{ep}$  (entropic potential)，熵勢與電池電量狀態有關，本文中參考文獻中(Liu *et al.*, 2014)得到的鋰離子電池熵勢與電量狀態關係圖，進而得到其關係式以計算發熱量。電池內阻參考某電子公司的商用資料，為一固定值 0.65 毫歐姆(mΩ)；電流由電池模組資料中電池蓄電量



(charge capacity)60 安培小時(Ah)及 C-rate= 2 相乘而得為 120 A，假設電池的電量狀態為 0.5，得到之發熱量為 167.35 W/m<sup>2</sup>。電池模組之基本資料如表 3-2 所示。

$$\dot{Q} = I^2 R_{in} - I(T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T}) \quad (3-7)$$

表 3-2 電池模組基本資料

參數	數值
標稱電壓(V)	51.8
標稱容量(Ah)	60
長度(mm)	537
寬度(mm)	199
高度(mm)	187
最大放電速率	C-rate= 4

### 3-3.3 網格設置

使用計算流體力學求解需要將流體域劃分以產生網格及節點，將流體區域以網格填滿，以控制體積法計算各網格位置的結果後，進而得到整個計算區域的結果。由於網格品質對於計算結果之準確性影響大，若能夠將網格切分越細，則越能夠準確計算出流場中的細節，但亦會消耗越多計算資源，因此透過網格獨立性驗證找出合適之網格尺寸與準確性足夠的計算結果非常重要。

本文所計算的流體區域及電池模組幾何皆方正，使用正方體網格可以良好填滿流體區域，整體計算域網格如圖 3-7。由於電池模組間隔的流場與電池模組直接接觸，網格密度將會大幅影響溫度分布，因此在網格設定上將此電池模組間隔的網格數量設定為 4，實際網格狀況如圖 3-8。而此電池模組的間隔寬度為 3 公分，劃分為四個網格後間隔中的網格大小為 0.75 公分，將電池模組表面則設定為 0.7 公分，以避免網格大小差異過大造成網格品質下降。

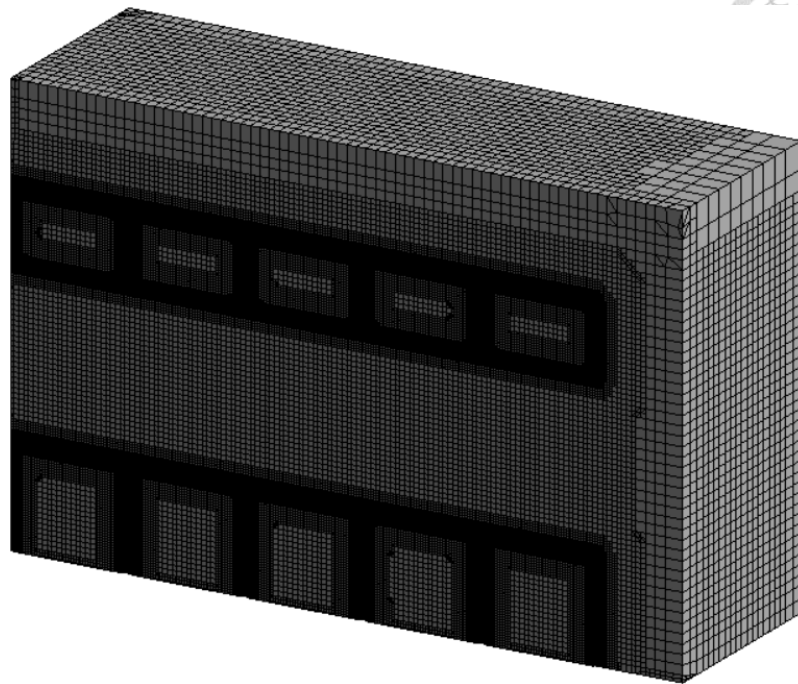


圖 3-7 計算域網格

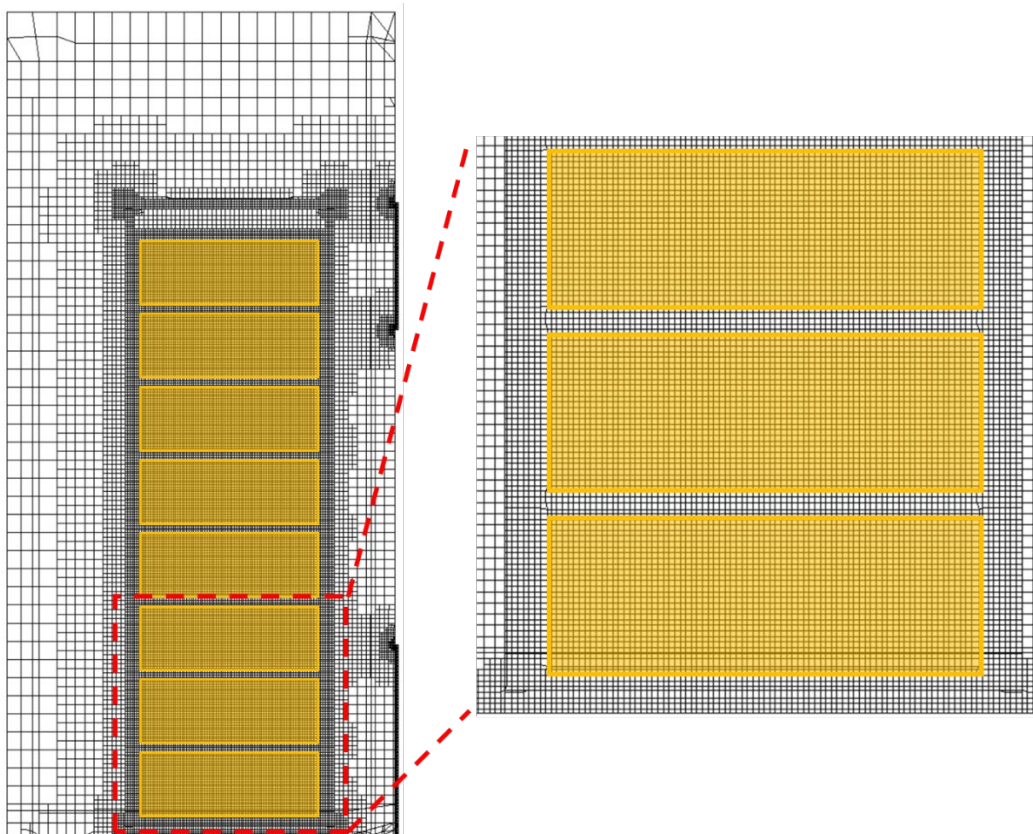


圖 3-8 電池模組間隔細部的網格劃分



### 3-4 獨立性驗證

在有限的計算資源下，考慮消耗的計算資源、時間等成本，以在收斂速度最快的情況下得到可靠的結果是重要的，因此需要求出最合適之網格解析度、時間步階大小及計算流體域之範圍，針對網格、時間步階與計算域分別進行獨立性驗證。本文為求電池模組的最高溫度以及最大溫差，因此於獨立性驗證部分針對最高溫度及最低溫度進行探討。

#### 3-4.1 網格獨立性驗證

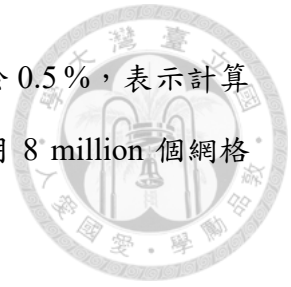
網格的品質會直接影響到計算流體力學求解，因此建立良好品質之網格，是十分重要的，有時建立網格的過程甚至會比求解本身更加費時。本文在網格獨立性驗證的部分總共進行六種網格數量的模擬，整理如表 3-3。

表 3-3 不同尺寸的網格獨立性驗證資料

Case	總網格數量	間隔中網格數量	網格成長率 (Growth rate)	最小網格尺寸 (unit: m)
1 million	1113187	2	2.5	0.8
2 million	2036803	2	1.2	0.5
4 million	4679978	3	1.2	0.3
8 million	8220880	4	1.2	0.007
10 million	10281402	5	1.13	0.007
12 million	13321196	5	1.0	0.007

網格獨立性驗證的數值結果如

表 3-4，計算結果的變化趨勢繪製如圖 3-9，由數據結果可以看到在最低溫度的部分各個組別之間誤差皆小於 0.5%，而最高溫的部分在 4 million 以及 8 million 之間之差異仍大於 0.5% 表示兩個網格設置的差異仍會對計算結果造成影響，而 8



million 和 10 million 以及 10 million 和 12 million 之間誤差皆小於 0.5%，表示計算結果收斂，增加網格數量並不會對結果造成極大差異，因此選用 8 million 個網格數量作為本文的網格設定。

表 3-4 網格獨立性驗證數據

Case	最高溫度(K)	誤差(%)	最低溫度(K)	誤差(%)
1 million	301.0		289.4	
2 million	300.5	0.166	289.3	0.035
4 million	300.2	0.100	289.0	0.104
8 million	298.5	0.566	289.0	0.000
10 million	298.0	0.168	289.0	0.000
12 million	298.6	0.201	289.0	0.000

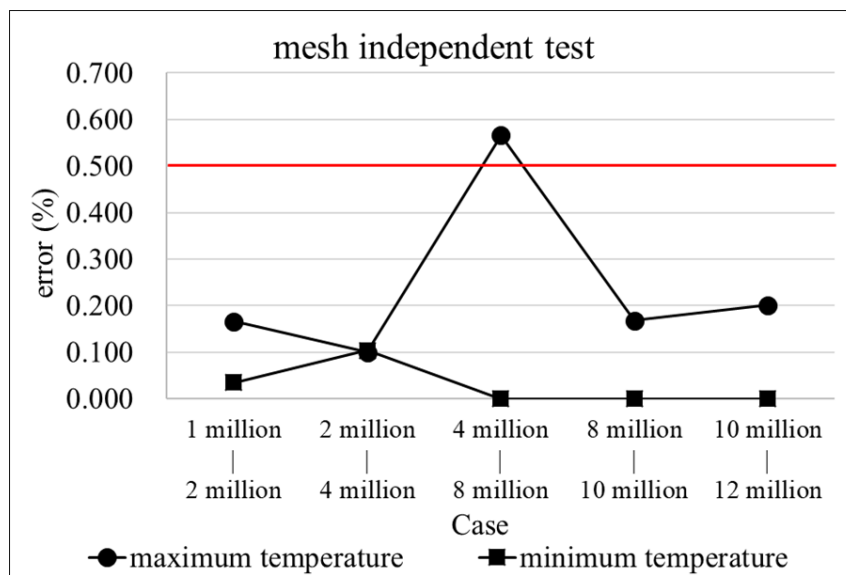


圖 3-9 網格獨立性驗證結果

### 3-4.2 時間步階獨立性驗證

庫朗-弗里德里克斯-路易條件 (Courant-Friedrichs-Lewy condition, CFL condition) 為一計算流體力學中判斷收斂的條件，CFL 條件指出任何物理現象在一個時間步階中所移動的距離，必須小於節點之間的距離，節點之間的距離即為網格的大小，而庫朗數 (Courant number) 為根據 CFL 條件所推導出的公式，如式(3-8)，



其中 $u$ 表示流體速度， $\Delta t$ 表示單一時間步階的長度， $\Delta x$ 表示網格尺寸。

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3-8)$$

庫朗數的上界會與使用的數值方法相關，而本文使用的 ANSYS Fluent 求解器為隱式時間積分法，因此庫朗數的上界可以較顯式時間積分法大。本文設定的各進口風速中，最快的流體速度為 5.13 m/s，最小的網格尺寸為 0.007 m，因此單一時間步階長度需要小於 0.001 秒才能夠滿足庫朗數小於 1 的收斂條件。本文從時間步階為 0.0005 秒開始逐漸往上增加，將各時間步階大小計算之結果與時間步階 0.0005 秒之結果進行比較，驗證結果的數據如表 3-5，趨勢如圖 3-10。由於從時間步階大小降為 0.1 秒以後，其計算結果與時間步階為 0.005 秒的結果誤差皆小於千分之五，故選用時間步階長度為 0.1 秒作為本文計算的時間步階。

表 3-5 時間步階獨立性驗證數據

時間步階大小(s)	最高溫度(K)	誤差(%)	最低溫度(K)	誤差(%)
2	297.90	0.47	289.00	0.03
0.5	297.70	0.40	289.00	0.03
0.2	298.50	0.67	289.00	0.03
0.1	297.80	0.44	289.00	0.03
0.05	297.83	0.44	289.00	0.03
0.025	297.60	0.37	289.00	0.03
0.01	296.90	0.13	289.00	0.03
0.005	297.60	0.37	289.00	0.03

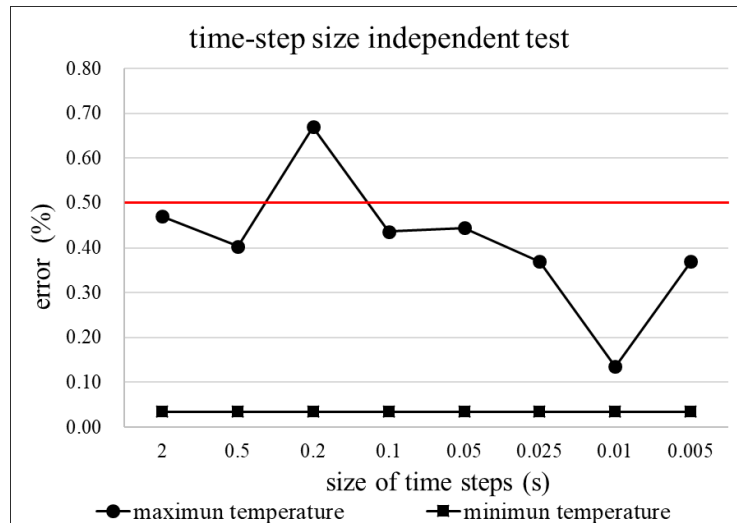


圖 3-10 時間步階獨立性驗證結果

### 3-4.3 計算域獨立性驗證

本文主要欲探討的流體區域為電池儲能貨櫃內部之流場及電池模組溫度，計算域四周皆為壁面，參考相關文獻設定及計算結果 (Cao *et al.*, 2021; Hong *et al.*, 2018; Saw *et al.*, 2017; Xu & He, 2013)於計算中將出口壓力設為錶壓為零，且本文計算域為非開放的計算域因此並未進行計算域獨立性驗證。本文亦調整出口壓力，計算的結果顯示進出口壓差不會隨出口壓力數值調整而改變，其壓差差異小於 1%，數值如下表 3-6 所示，因此判斷進出口壓力差為一定值，確認將出口壓力設為錶壓為零之合理性。

表 3-6 不同出口壓力設定之壓力計算結果

$P_{out}$ (Pa)	$P_{in}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)
-0.48	515.94	516.42
1012.50	1533.99	521.49

### 3-5 耗電功率計算與策略優劣評斷

電池儲能貨櫃主要考量為最高溫度以及最大溫差，理想狀況不僅需要最高溫



度低於安全溫度，最大溫差也需要較小以避免點熱源、電池充放電不均的狀況。目前相關的研究多以最高溫度以及最大溫差作為評斷散熱效果好壞的參數，Chen *et al.*, (2020)提出其他評斷參數，如針對混合動力車輛(hybrid electric vehicle, HEV)電池之循環成本參數  $\delta$ (index of cyclical cost)，將電池購買成本、電池壽命及電池消耗能量皆納入考量，Hosseini-rad & Khoshvaght-Aliabadi (2021)提出之參數  $PI$ ，用以評斷微管流散熱器(miniature heat sink, MHS) 的散熱效果。然而，電池儲能貨櫃散熱之情況與電動車輛以及微管流散熱器不同，此外，除了最高溫度、最大溫差外，空調與風扇的功率消耗亦為實際應用上不可忽略的成本，因此本文將空調消耗功率、風扇消耗功率納入策略優劣之考量，將消耗功率及最高溫度納入優劣的評斷，提出更全面的評斷參數  $Ind$ ，考量在各個進口條件組合於溫度分布與功率的優劣，以下詳述評斷參數  $Ind$  計算。

### 3-5.1 空調消耗功率計算

空調耗電功率  $W$  計算的部分，將氣體與氣體中的水蒸氣分開計算，計算其焓變化以及將外界大氣冷卻至供給電池儲能系統之進風溫度所需移除之熱量，如式(3-9)及(3-10)，其中下標  $a$  表示空氣，下標  $v$  表示蒸氣。

$$h_{a1} + AH_1 h_{v1} + \dot{Q} = h_{a2} + AH_2 h_{v2} \quad (3-9)$$

$$\dot{Q} = h_{a2} - h_{a1} + AH(h_{v2} - h_{v1}) = C_p(T_2 - T_1) + AH(h_{v2} - h_{v1}) \quad (3-10)$$

絕對溼度之計算參考氣象局相對濕度資料，由相對溼度、飽和蒸氣壓、蒸氣壓力與大氣壓力之關係式，如式(3-11)及(3-12)，計算出絕對溼度，代入上式(3-10)中進行計算，其中壓力  $P$  使用大氣壓力，值為 1.01 巴(bar)。

$$AH = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (3-11)$$

$$RH = \frac{P_v}{P_g} \quad (3-12)$$

最後參考經濟部能源局之資料，選定空調主機系統之 COP (coefficient of performance)，利用式(3-13)及(3-14)計算出所需消耗之功率。



$$COP = \frac{Q}{W} \quad (3-13)$$

$$Q = \dot{m} \times \dot{Q} \quad (3-14)$$

### 3-5.2 風扇消耗功率計算

風扇消耗的功率由壓降乘上體積流率所得，壓降為數值模擬中之進出風口壓力差，體積流率則為進風口所設定之體積流率，由上述數值可得風扇所需消耗功率  $W^*$ ，計算式如(3-15)。

$$W^* = \Delta P \times \dot{V} \quad (3-15)$$

### 3-5.3 優劣評斷參數 $Ind$ 計算

本文提出評斷參數  $Ind$  用以計算策略整體成效，計算方式如(3-16)。

$$Ind = \frac{(T_{safe} - T_{max}) / (T_{safe} - T_{max})_{base}}{W_{total} / (W_{total})_{base}} \quad (3-16)$$

本文中提出一評斷策略優劣的評斷參數  $Ind$ ，同時將電池最高溫度以及此策略所消耗之空調與風扇功率納入考量，如式(3-16)，以考量消耗功率等商業成本。評斷參數  $Ind$  的分子部分考量電池最高溫度與電池安全溫度的溫差，電池安全溫度  $T_{safe}$  參考文獻選用  $60^\circ\text{C}$  (Qin *et al.*, 2021)，評斷參數  $Ind$  的分母部分考量總消耗功率  $W_{total}$ 。分子及分母部分皆會除以基準策略下得到的數值，將分子分母皆化為百分比以避免因為個別數值尺度差異過大，造成最高溫度及總消耗功率的影響力不同。參考目前電池儲能系統相關的研究，多探討進口風量  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度  $15^\circ\text{C}$  的情況，因此本文亦選用進口風量  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度  $15^\circ\text{C}$  的情況作為基準策略。

### 3-6 控制策略之方法

本文中使用的兩種機器學習演算法，決策樹(decision tree)及支持向量機(support vector machine, SVM)，對各進口條件組合下的溫度分布計算結果進行分類，以最高溫度及消耗功率評斷控制策略的優劣，於以下兩小節詳述。



### 3-6.1 決策樹

決策樹為階層結構的樹狀圖，圖中包含其可能結果，用來輔助決策進行，圖 3-11 為一高度(height)為 3 的決策樹。每一棵決策樹中僅有一個根(root)，即圖 3-11 條件一；每個分叉點皆稱為節點(node)，即圖 3-11 中條件一、條件二與條件三；每個節點之上一階層即為此節點的父節點(parent)，而此節點為其上階層之子節點(child)，擁有同一個父節點的子節點為彼此的兄弟節點(siblings)；樹中沒有子節點的節點即為樹葉(leaf)，即圖 3-11 中結果 1 至結果 4；節點與節點間由邊(edge)連結。決策樹之高度即為根與葉間的邊的數量；而節點之間的邊的數量則為深度(depth)。淺灰色部分為所經路徑，即為此輸入與輸出間之路徑。

在機器學習中決策樹為一預測模型，代表各影響因素與其結果間的關係，而每個分叉點代表某一因素的判斷數值，決策樹多為二元樹(binary tree)居多，少數為多元樹(multiway tree)。為確保分類合理且其平均求解過程最佳，決策樹的演算法會盡量使每個節點兩側的結果數量相近，用最少節點數進行最有效分類。若決策樹為平衡樹狀結構(balanced tree)則表期平均求解過程最佳，平衡樹的定義為其樹中任意選擇子樹(subtree)，其深度差必定小於 1，對於一平衡二元樹(balanced binary tree)計算所需時間複雜度(time complexity)為  $O(\log n)$ ，其中  $n$  為資料個數。二元樹又可依照其樹的節點數量與排列，區分為完滿二元樹(full binary tree)、完全二元樹(complete binary tree)以及完美二元樹(perfect binary tree)，如圖 3-12。完滿二元樹除樹葉外，每個節點都有兩個子節點，如圖 3-12(a)；完全二元樹為各層節點全滿，除最後一層之最右側為空，如圖 3-12(b)；完美二元樹為各節點全滿，如圖 3-12(c)，而完滿二元樹、完全二元樹以及完美二元樹三者為相互包含之關係，如圖 3-13。

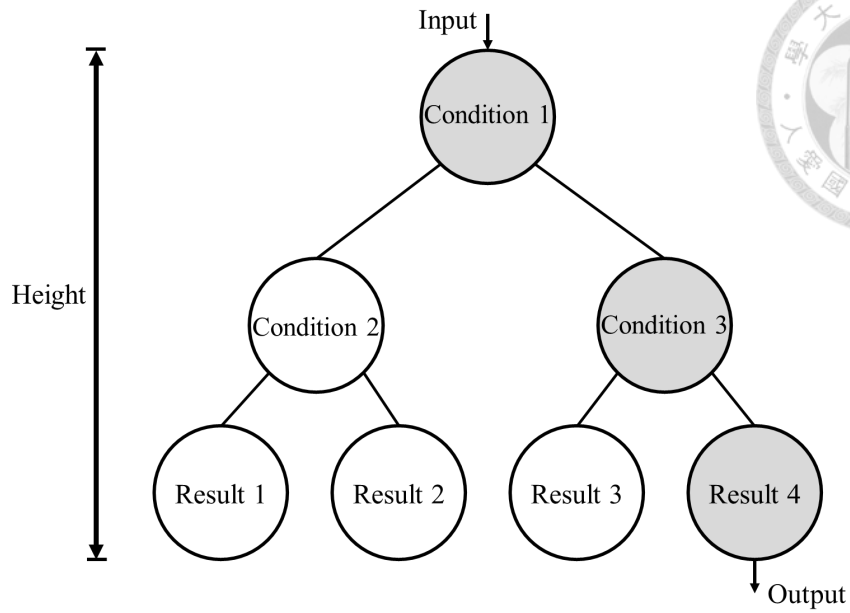


圖 3-11 決策樹示意圖

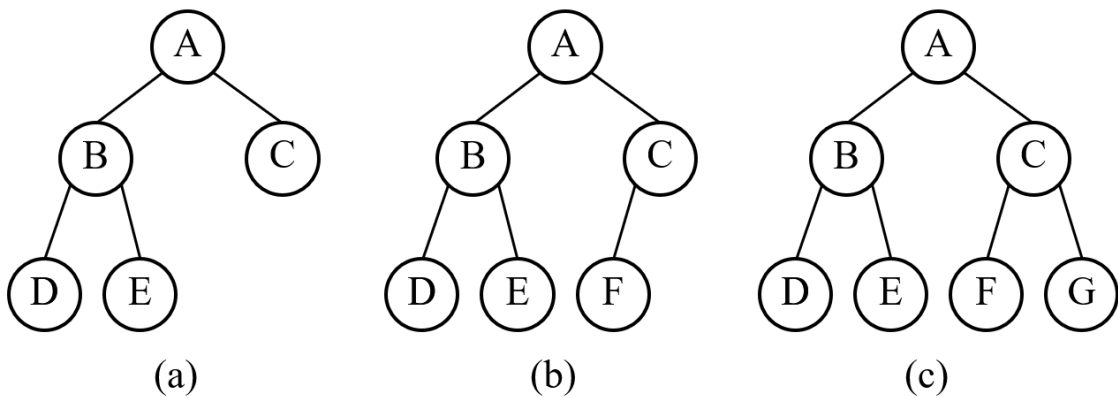


圖 3-12 (a) 完滿二元樹，(b) 完全二元樹，(c) 完美二元樹

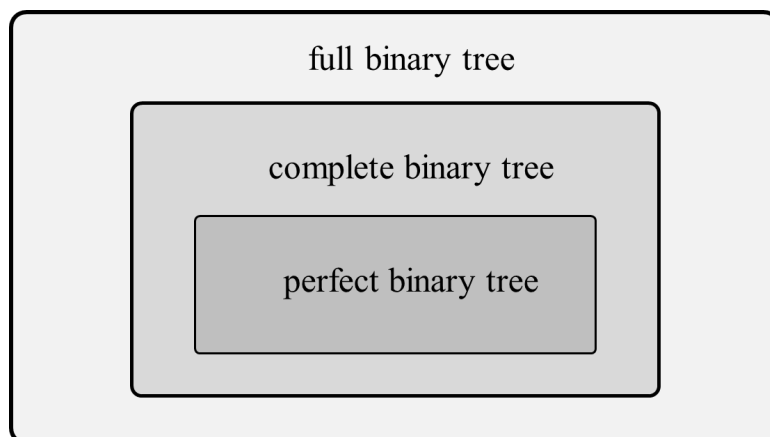


圖 3-13 完滿二元樹、完全二元樹以及完美二元樹關係圖

常見之決策樹有數個演算法，如 ID3、C4.5 以及 Classification and Regression Trees (CART)，三者差異為資料分類方法不同(Rokach & Maimon, 2005)。本文使用常見之演算法 CART，透過 Matlab 進行樹狀圖之產生。在 Matlab 中決策樹可分為分類樹(Classification Tree)以及迴歸樹(Regression Tree)，兩者最大的差別在於分類樹針對資料進行分類，其輸出結果為分類的名稱；迴歸樹由連續的資料進行分類與預測，其輸出結果為數值，兩者的演算方式皆屬於 CART。本文欲針對不同情況建立合適的散熱策略，因此選用迴歸樹進行決策規劃，以針對最高溫度及最少消耗功率設計一合適的選擇策略，其迴歸結果將於初步結果討論中詳述。

### 3-6.2 支持向量機

支持向量機為機器學習中一種監督式學習的演算法，透過超平面(hyperplane)將資料中兩種資料樣本分開，主要被應用於資料分類問題。支持向量機是透過現有樣本畫出最佳超平面，將相異類別的樣本分開，亦可用於分類未來加入的新資料點。間隔(margin)為超平面與兩側資料點的垂直距離總和，如圖 3-14 中藍線與紅線之間的垂直距離，圖 3-14 (a)與(b)則分別代表兩超平面的相異劃分結果，其所得之間隔大小亦不同。越大的間隔可以降低分類錯誤的機率，因此超平面雖有無數個，但效果最佳的超平面僅有一個，為劃分後可得最大間隔的超平面。以圖 3-14 為例，圖 3-14 (b)的超平面劃分所得間隔較圖 3-14 (a)大，因此圖 3-14 (b)的劃分較佳。而本文中使用的支持向量機計算各進風口條件組合下之電池溫度分布，以劃分出安全與不安全的進風口條件組合。

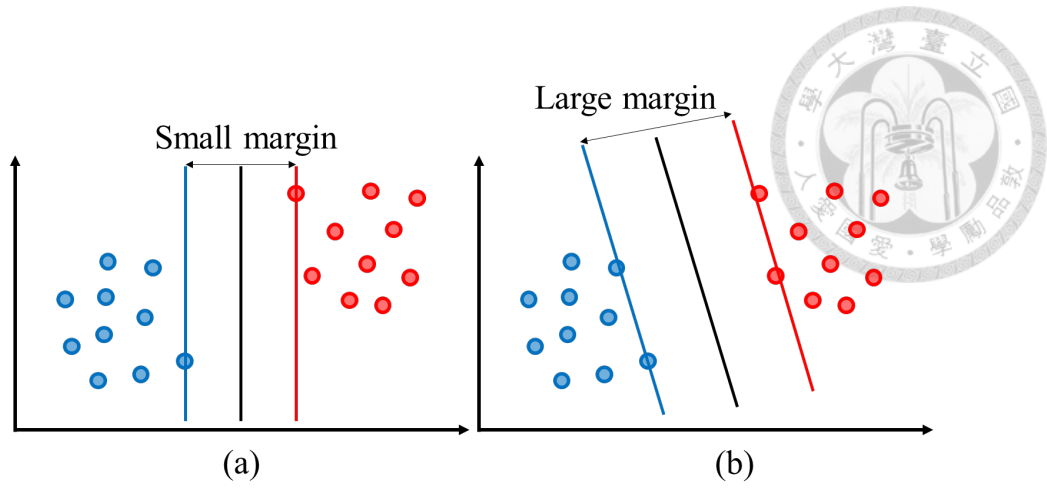


圖 3-14 支持向量機中之兩種超平面劃分方式



## 第四章 結果與討論

結果與討論架構如圖 4-1，在物理模型設定的部分包含幾何配置改善及電池模組的發熱控制，進口條件影響的分析將進口風量與進口溫度的影響力退耦，並引入機器學習作為驗證、建立預測模型，非均勻進口控制策略分別調整進口風量與進口溫度，進行五個進風口的分散式控制。

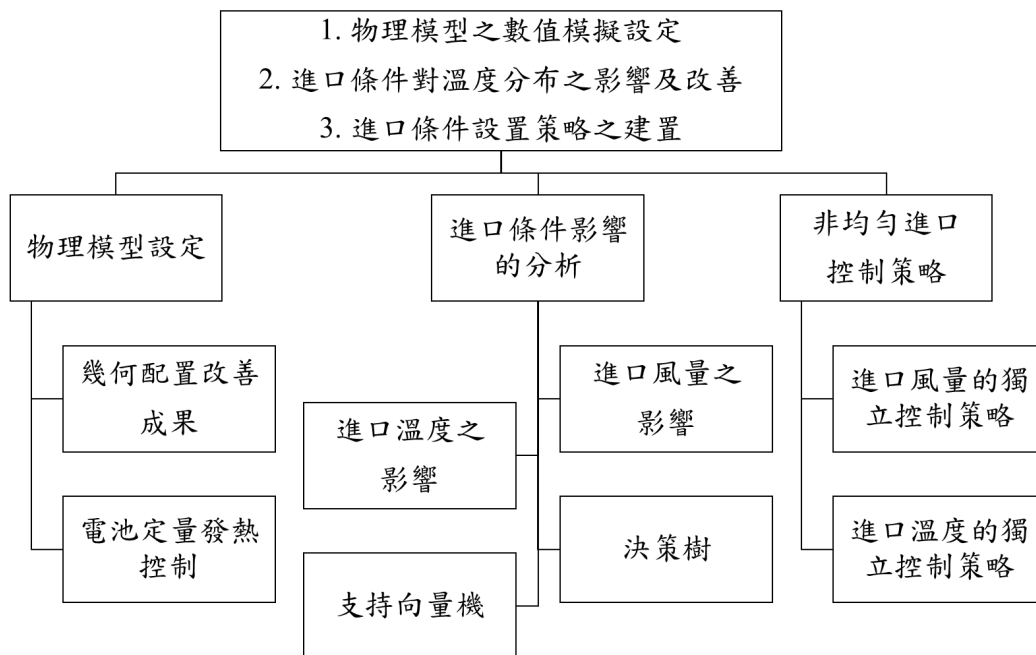


圖 4-1 結果與討論架構圖

### 4-1 物理模型設定

#### 4-1.1 幾何配置改善成果

電池儲能系統的散熱相關研究較少且改善幅度小，本研究發現因資料中心與電池儲能系統的幾何、流場相似，本研究引入資料中心散熱策略用於電池儲能系統，透過調整進出風口配置及改變進風口面積使電池模組溫度降低並分布均勻，且歸納出流場分布與散熱效果的關係，以下分別詳述。

#### 調整進出風口配置

本研究調整電池儲能系統的進出風口配置，於進口條件為進口溫度  $15^{\circ}\text{C}$ ，進

口風量為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  的情況下，比較 CS-FR、DS-CR 及 FS-CR 三種進出風口中的溫度與流場分布，圖 4-2(a)、(b)、(c) 依序為 CS-FR、FS-CR 及 DS-CR 的數值模擬結果。CS-FR 模型內部，冷卻流體於  $z$  軸方向有明顯較高的流速，如圖 4-2(a) 右側，過快的氣體流速導致流經機櫃上半部的散熱流體不足，形成冷空氣旁路的現象，圖 4-3 中黑色箭頭表流體回流現象，此流場特徵即造成上述冷空氣旁路的原因。DS-CR 的進風口設置於個別機櫃上方，此設置造成機櫃最上方的電池模組溫度較低，如圖 4-2(b)。圖 4-2(c) 中可看出 FS-CR，電池模組周圍的流體速度均勻，與 CS-FR 物理模型下的結果比較，FS-CR 物理模型中的電池模組溫度分布較低且均勻。

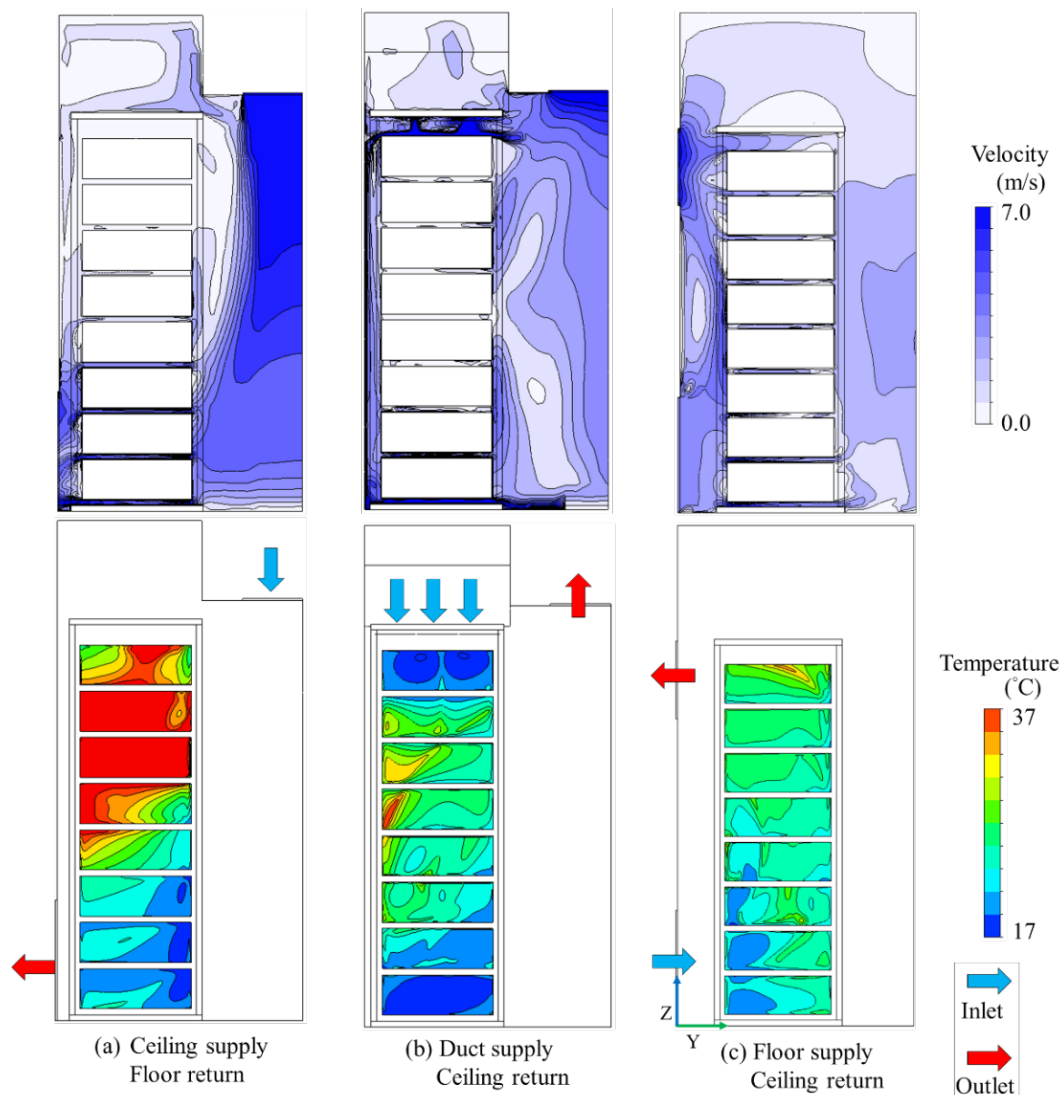


圖 4-2 流體速度與溫度分布圖 (a) CS-FR，(b) DS-CR，(c) FS-CR



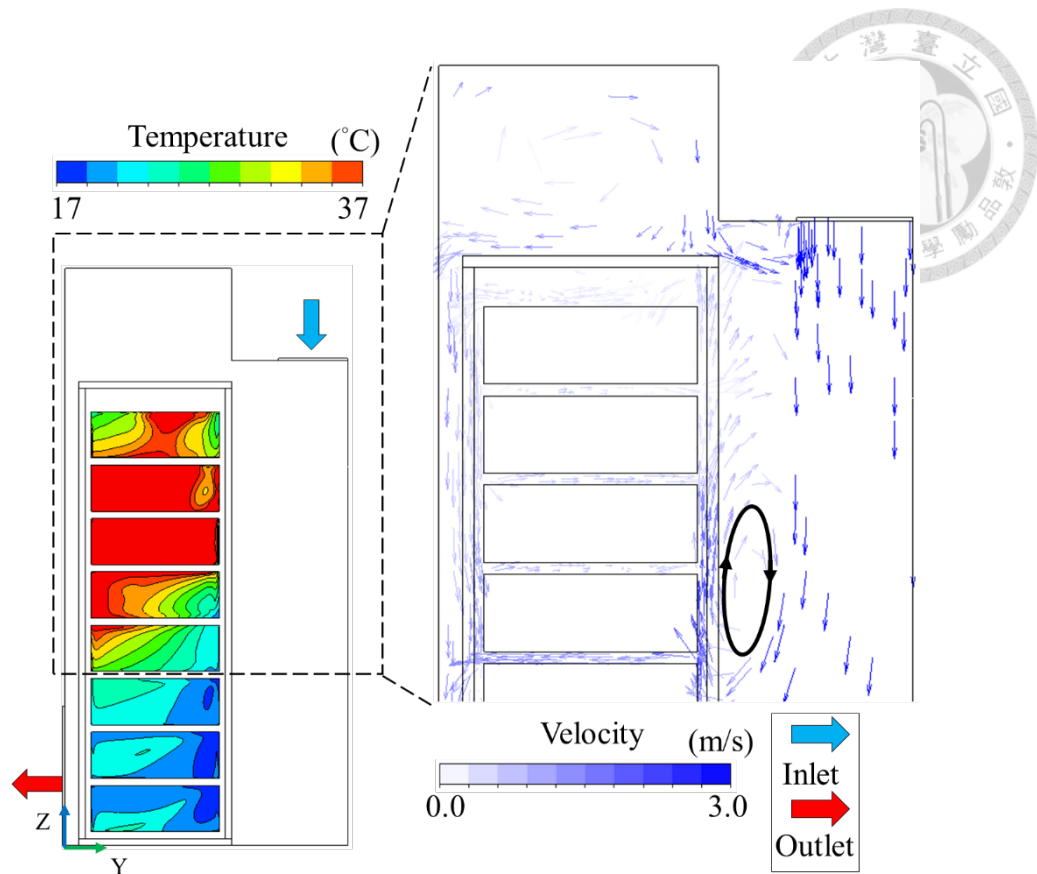


圖 4-3 CS-FR 局部速度向量圖

三種物理模型於進口溫度 15 °C，進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 情況下的數據整理如表 4-1。以 CS-FR 物理模型為基準，DS-CR 的配置可使電池模組間的最高溫度降低 32.0 °C，即 8.7%，最大溫差降低 31.7 °C，即 41.7%；FS-CR 配置可使電池模組間的最高溫度降低 46.0 °C，即 12.5%，最大溫差降低 47.4 °C，即 62.4%，各項改善幅度與物理模型如圖 4-4。FS-CR 物理模型下的最高溫度與最大溫差皆為三種模型中最低，散熱效果較佳，大幅降低熱失控風險，其次為 DS-CR。

表 4-1 三模型於進口溫度 15 °C，進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 條件下的數據

模型	平均溫度 (K)	最大溫差 (K)	最高溫度 (K)	壓差 (Pa)	Ind
CS-FR	303.3	76.0	365.7	18.03	-2.47
DS-CR	297.2	44.3	333.7	52.70	-0.05
FS-CR	297.9	28.6	319.7	32.54	1.00

模型	CS-FR	DS-CR	FS-CR
最大溫差降低 (K)	-	31.7	47.4
最大溫差降低 (%)	-	41.7	62.4
最高溫度降低 (K)	-	36.0	45.0
最高溫度降低 (%)	-	8.7	12.5
<i>Ind</i> 改善幅度	-	2.42	3.47
<i>Ind</i> 改善幅度 (%)	-	97.9	140.5

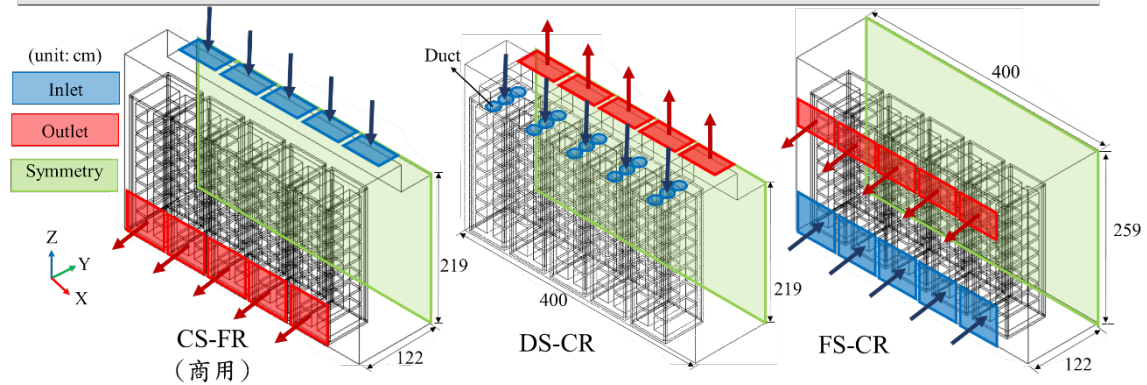


圖 4-4 物理模型散熱改善幅度

進一步統整數據與流場，平均溫度較低的兩物理模型，即 DS-CR 與 FS-CR，散熱流體於物理模型中的主要軌跡為 U 字型，如圖 4-5 (a)與(b)中的黑色虛線箭頭，相較物理模型 CS-FR，散熱流體於模型中的主要軌跡為 L 字型，如圖 4-5 (c)中的黑色實線箭頭，U 字型軌跡使散熱流體於物理模型中時間較長，有助於熱交換並降低電池模組溫度。

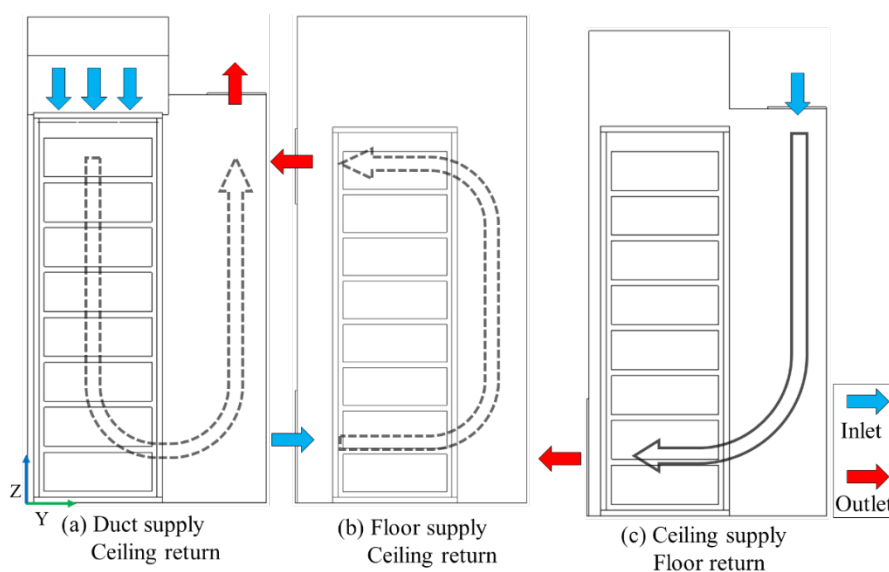


圖 4-5 流體主要軌跡示意圖



### 調整進風口面積

本研究調整 CS-FR 與 FS-CR 的進口面積，於相同進口風量下比較進口流速對散熱流體分布與電池模組溫度的影響。於進口溫度  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，進口風量為  $6\text{ m}^3/\text{s}$  的情況下，原進口與調整後的進口面積幾何如圖 4-6。CS-FR 物理模型的原進風口為長 60 公分、寬 30 公分的長方形，調整後維持長 60 公分，寬度則增加為 40 公分，簡稱為 CS-FR larger，進口流速由  $6.67\text{ m/s}$  降為  $5.00\text{ m/s}$ 。FS-CR 物理模型的原進風口為長 65 公分、高 60 公分的長方形，調整後維持長 60 公分，高度則縮小為 40 公分，簡稱為 FS-CR smaller，進口流速由  $3.08\text{ m/s}$  增加為  $4.62\text{ m/s}$ ，各物理模型流速、最高溫度與最大溫差整理如表 4-2。

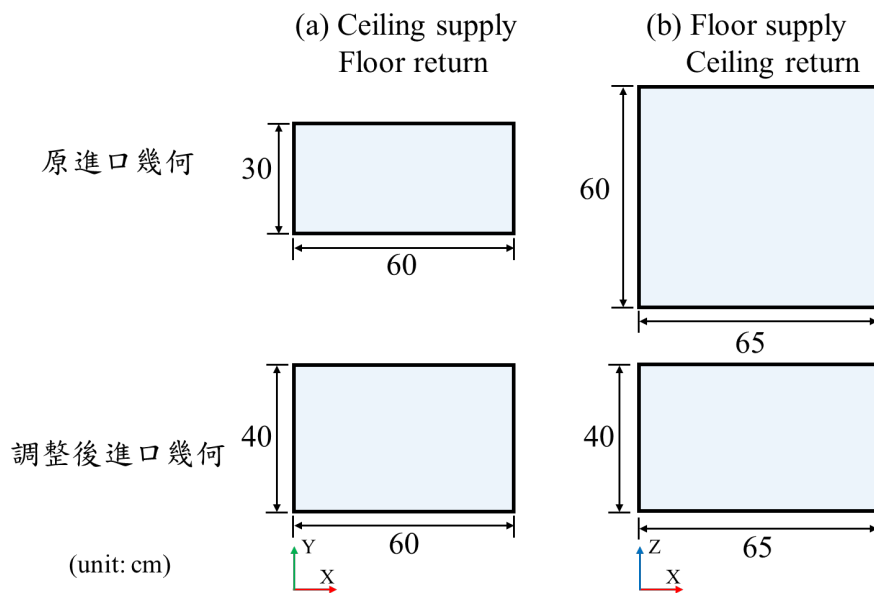


圖 4-6 進口幾何示意圖

表 4-2 調整進口面積前後的數據整理

物理模型	進口面積( $\text{cm}^2$ )	進口流速( $\text{m/s}$ )	最高溫度(K)	$\Delta T$ (K)
CS-FR	1800	6.67	365.7	76.0
CS-FR larger	2400	5.00	345.9	55.8
FS-CR	3900	3.08	319.7	28.6
FS-CR smaller	2600	4.62	324.7	34.2

圖 4-7 為 CS-FR 及擴大其進風口後的物理模型 CS-FR larger 的壓力分佈圖，比較圖 4-7(a)與(b)，CS-FR 的進口流速較大，流場內的壓力梯度亦較大，造成電池機櫃上半部區域有冷空氣旁路的情況，冷卻流體不易均勻分布於電池儲能貨櫃中，電池模組溫度分布不均，如圖 4-8(a)。物理模型 CS-FR larger 下，電池模組的溫度分布較均勻，如圖 4-8(b)。圖 4-9(a)、(b)分別為 FS-CR 及 FS-CR smaller 的壓力分布圖，較小的進口面積造成 FS-CR smaller 物理模型於靠近進風口處的壓力梯度較大，此局部壓力分布使冷卻流體無法均勻分布至電池模組，造成靠近進風口處的電池模組溫差較大，如圖 4-10 紅色虛框處。

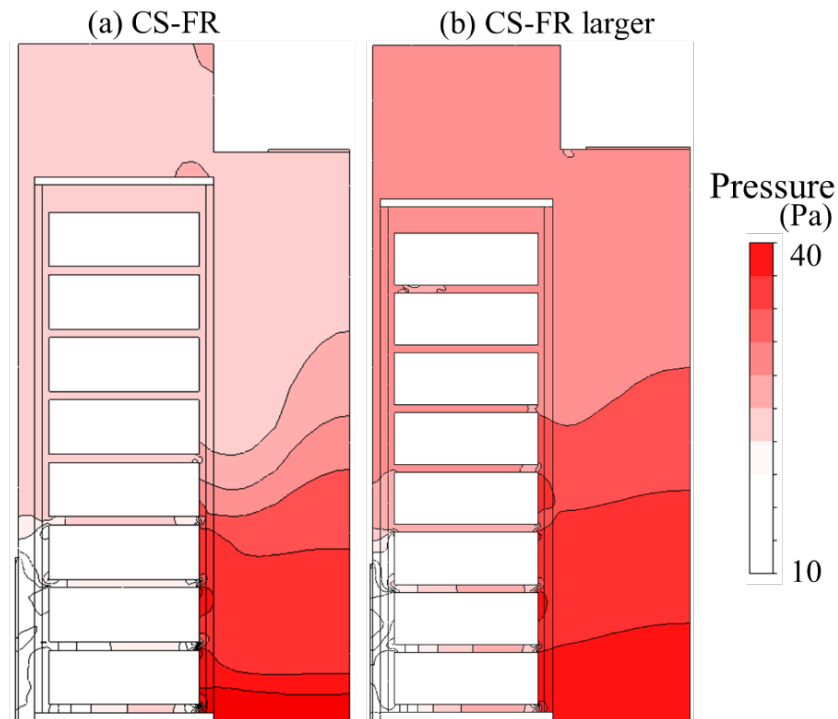


圖 4-7 CS-FR 與 CS-FR larger 的流體壓力分佈圖

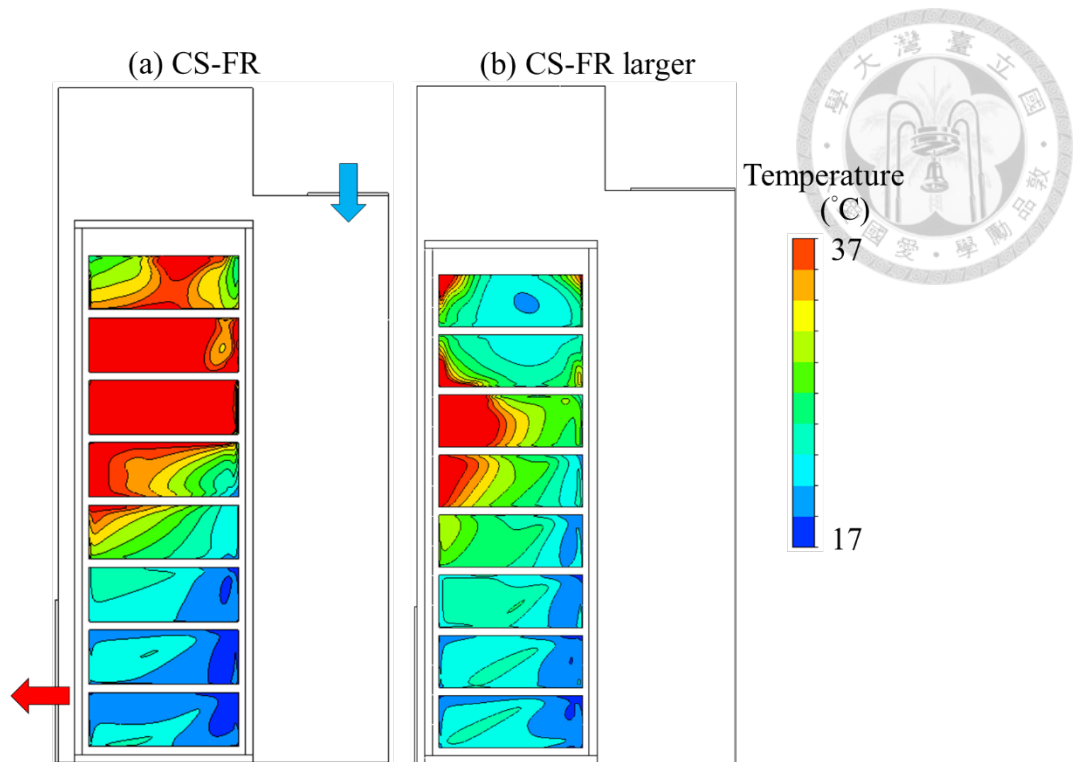


圖 4-8 CS-FR 與 CS-FR larger 的溫度分佈圖

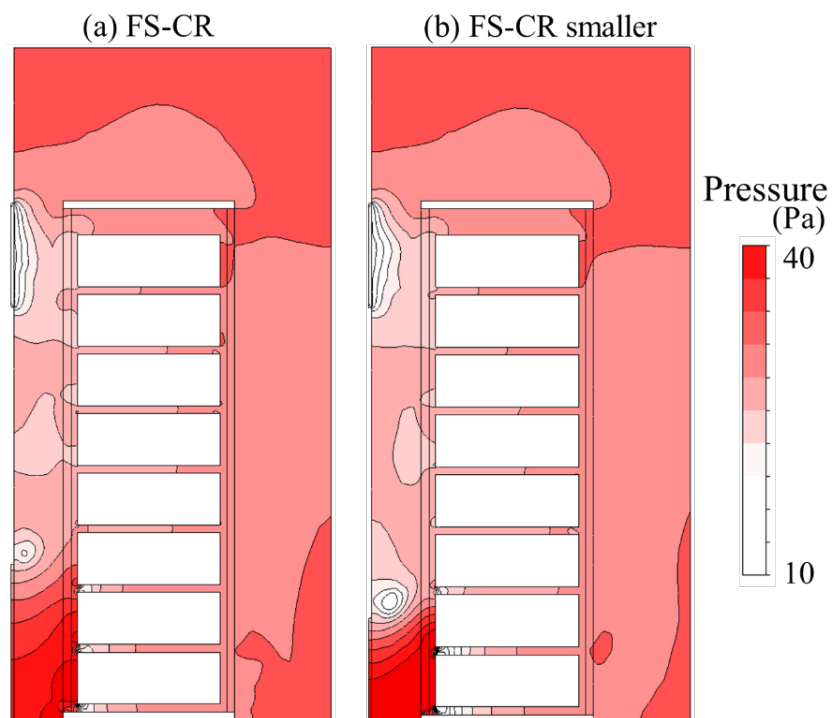


圖 4-9 FS-CR 與 FS-CR smaller 的流體壓力分佈圖

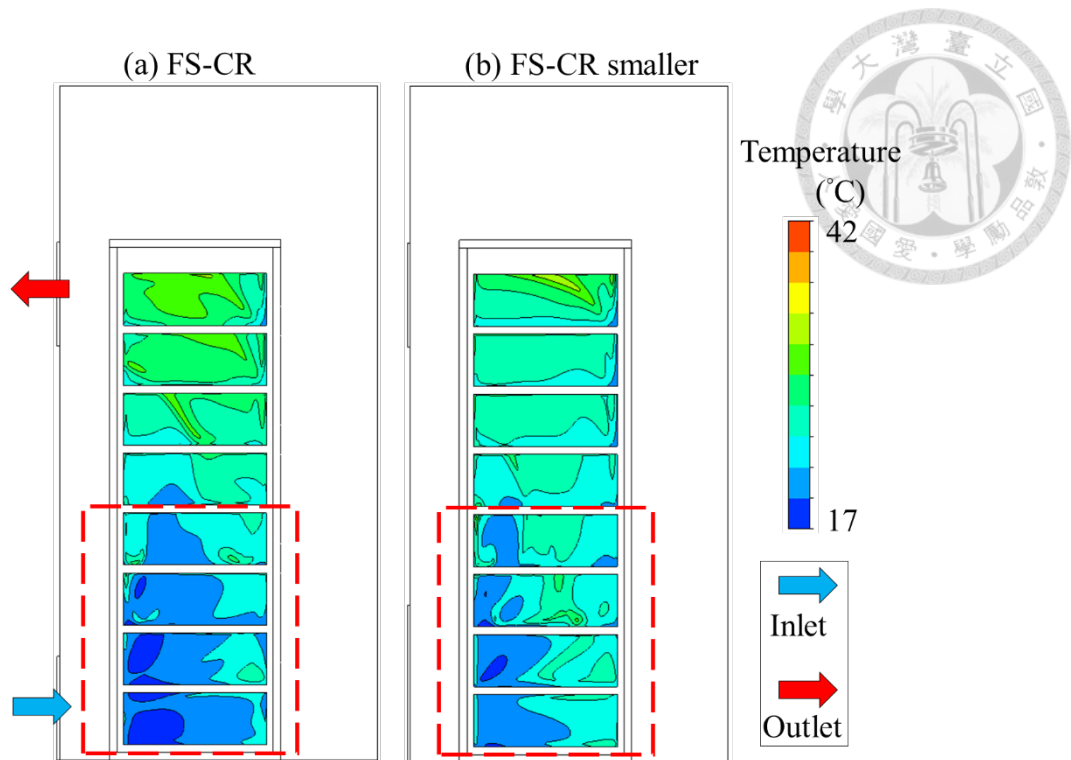


圖 4-10 FS-CR 與 FS-CR smaller 的溫度分佈圖

#### 4-1.2 電池定量發熱控制

如 3-3.2 說明，本文採用設定面熱通量的方式進行電池模組發熱狀況模擬，本節以進口溫度  $15^{\circ}\text{C}$ ，進口風量  $6\text{ m}^3/\text{s}$  及  $10\text{ m}^3/\text{s}$  為例，說明兩方法於計算時間以及計算結果的差異。方法一表示將電池模組視為固體，設定單位體積發熱量，此方法可以計算出電池緩慢溫升的過程，如圖 4-11，其所需計算時間為 67 小時；方法二表示設定電池模組的單位表面熱通量，為使面熱通量符合設定值，求解器會強制電池模組表面溫度，因此較少的計算步階數量即可計算出穩態的溫度分布，如圖 4-12，此方法不須透過固體與流體的界面進行資料交換，其所需計算時間為 5 小時。

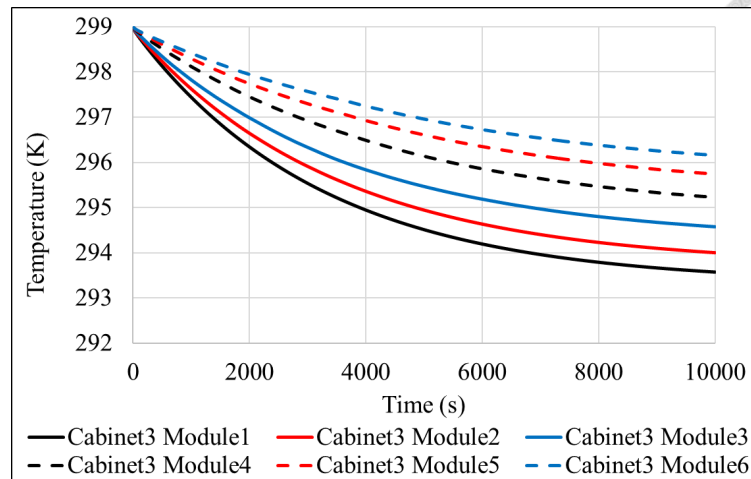


圖 4-11 方法一之溫度分布隨時間變化圖

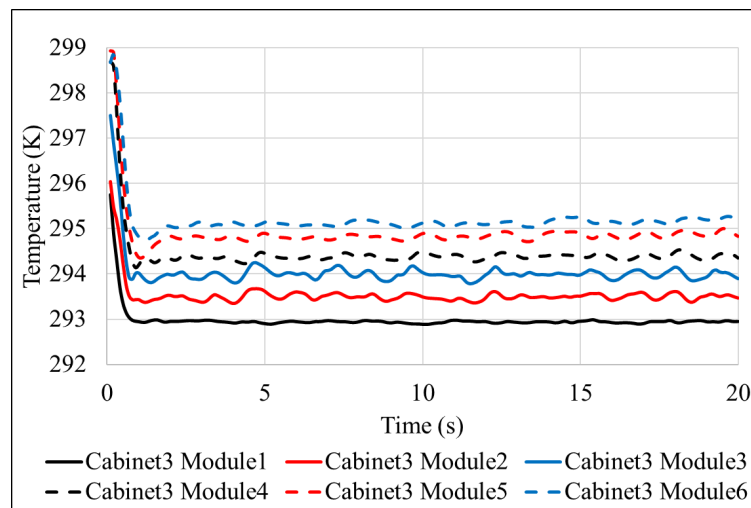


圖 4-12 方法二之溫度分布隨時間變化圖

針對兩方法穩態段計算出的電池模組表面溫度詳細比較如圖 4-13 及圖 4-14，兩圖分別表示進口溫度 15 °C，進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 及 10 m<sup>3</sup>/s 進口條件下，各電池模組表面平均溫度。由圖中可看出方法一及方法二於不同進口風量情況下，計算出之溫度分布趨勢相近，而兩方法計算出的電池模組溫度差異量，於進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 情況下為 0.16%，於進口風量為 10 m<sup>3</sup>/s 情況下為 0.24%，可看出兩方法計算結果差異不大。

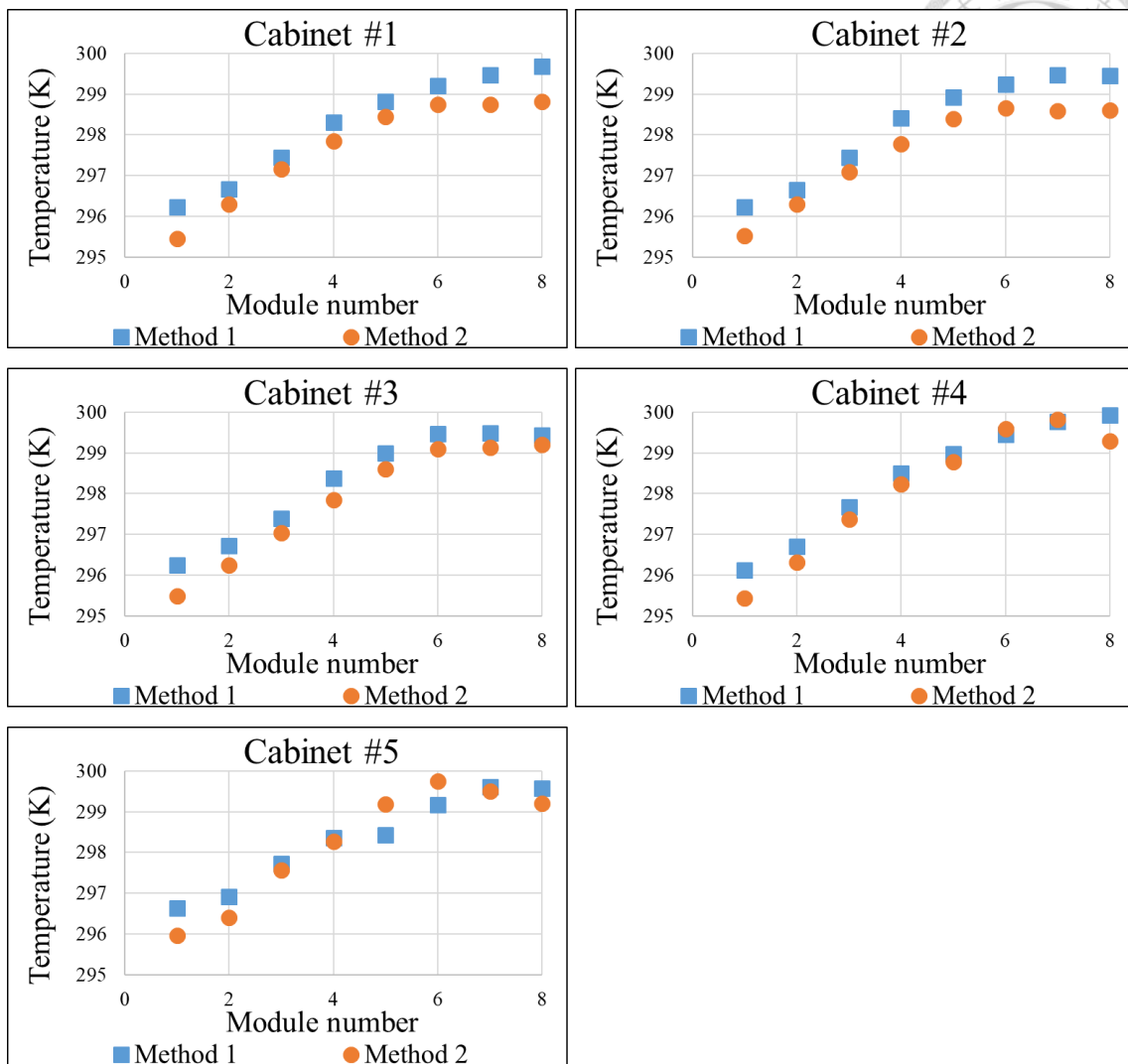


圖 4-13 進口溫度 15 °C，進口風量兩方法計算結果比較



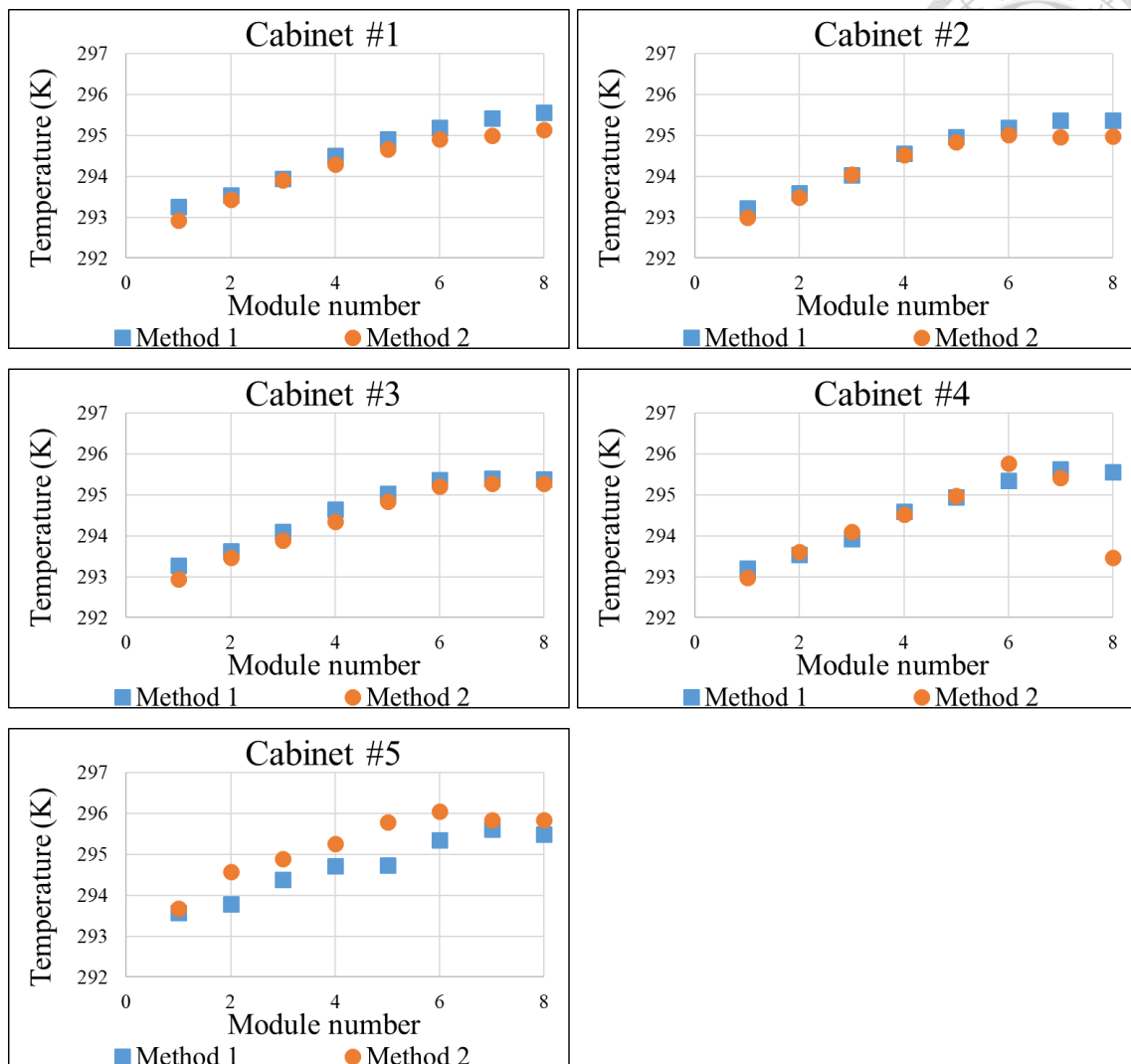


圖 4-14 進口溫度 15 °C，進口風量 10 m<sup>3</sup>/s 兩方法計算結果比較

透過方法一及方法二所計算的電池儲能系統流場分布如下，圖 4-15 及圖 4-16 分別表示進口溫度 15 °C，進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 及 10 m<sup>3</sup>/s 進口條件下的流場分布，圖 4-15 及圖 4-16 中圖(a)表示方法一計算出之流場分布，圖(b)表示方法二所計算出之流場分布。由圖中可以看出於進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 及 10 m<sup>3</sup>/s 進口條件下，兩方法計算之結果於流場分布趨勢皆相近。

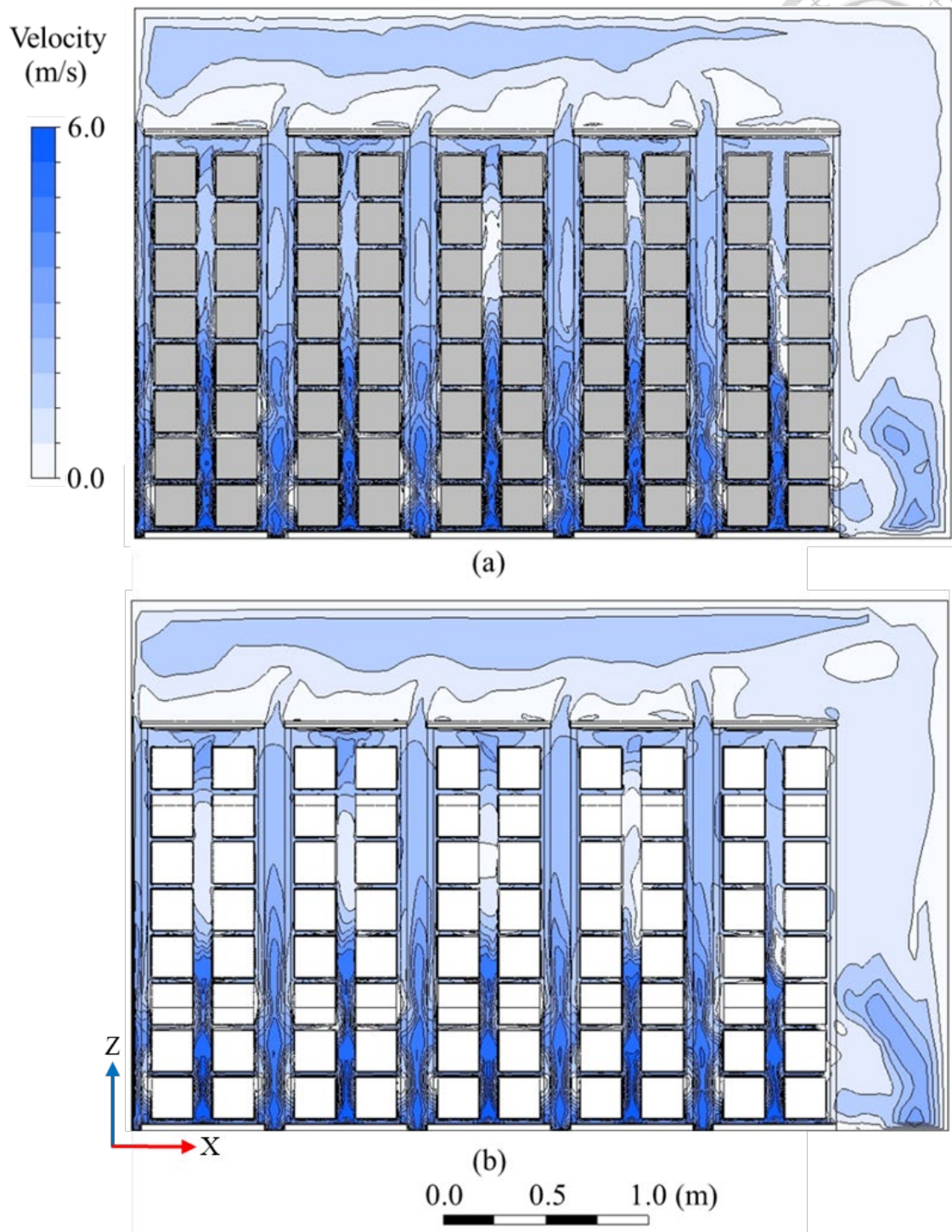


圖 4-15 進口溫度 15 °C，風量為 6 m<sup>3</sup>/s 速度分布 (a) 方法一，(b) 方法二

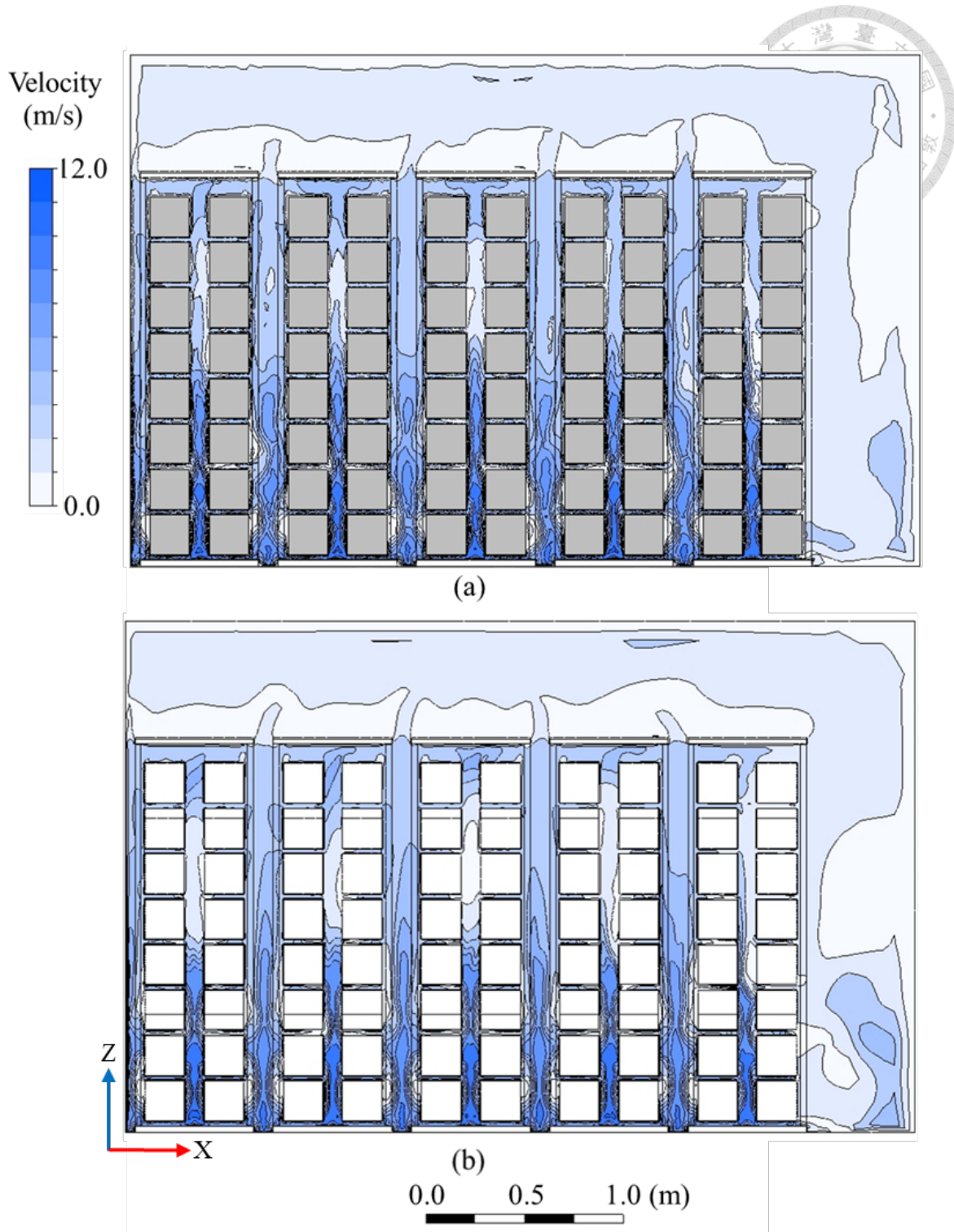


圖 4-16 進口溫度 15 °C，風量為 10 m<sup>3</sup>/s 速度分布 (a) 方法一，(b) 方法二

#### 4-2 進口條件影響的分析

本文調整 FS-CR 物理模型的進口條件，分別探討風量及進口溫度對於電池溫度分布的影響，詳述如下。



#### 4-2.1 進口風量之影響

將於各進口溫度下，各進口風量與最高溫度以及最大溫差的分布繪製成圖，其結果如圖 4-17。由圖中趨勢可以看出在六個進口溫度下，進口風量對於最高溫度及最大溫差皆有改善，隨著進口風量提升，電池模組表面的最高溫及最大溫差皆降低，而進口風量對於最高溫度的影響較為明顯，其下降幅度較大。

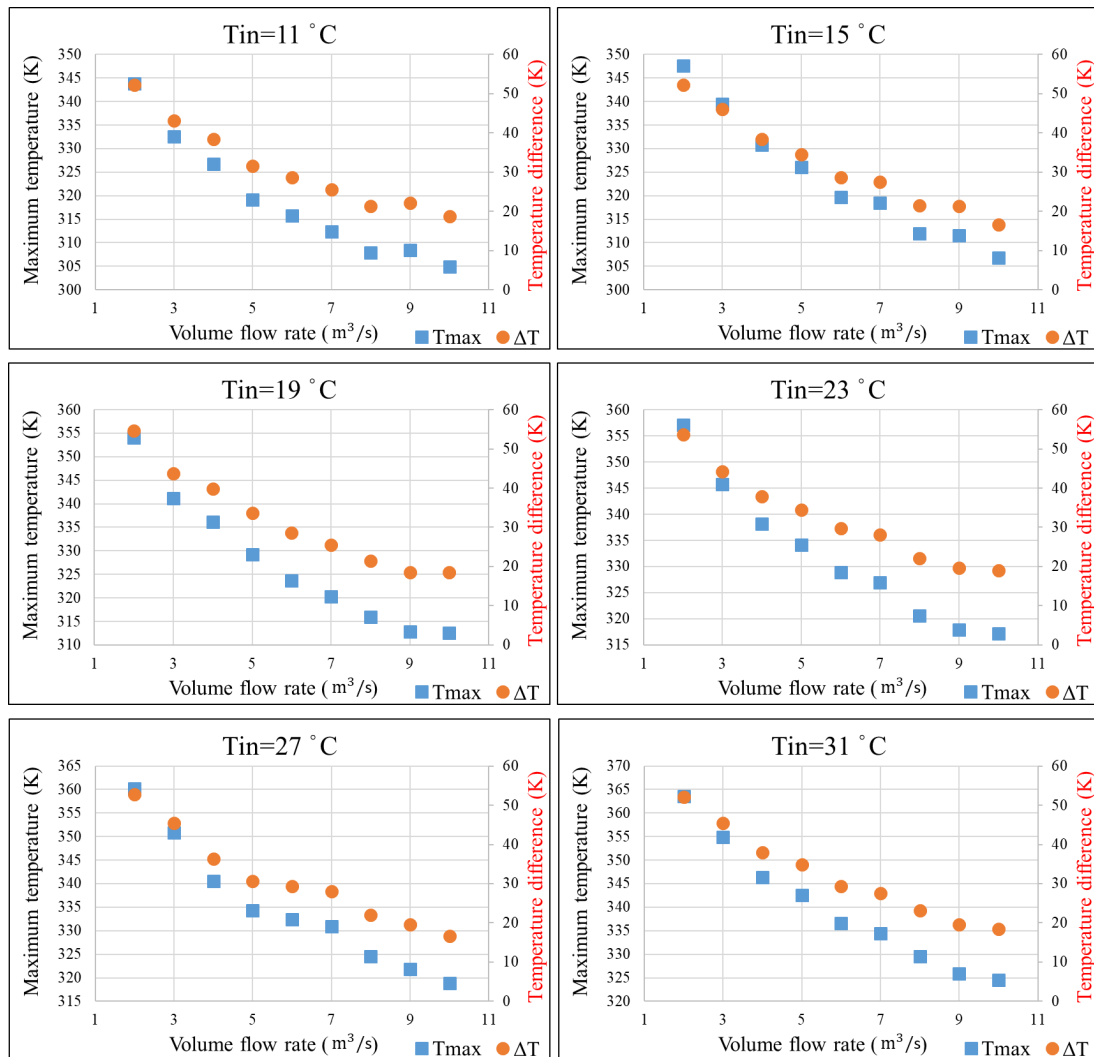


圖 4-17 各進口溫度下，最高溫度與最大溫差分布圖

#### 4-2.2 進口溫度之影響

將九種進口風量下之最高溫度以及最大溫差計算結果，以進口溫度為橫軸進行圖表繪製，其結果如圖 4-18。以進口風量為 10 m³/s 為例，如圖 4-19，可以看出



進口溫度對於改善最高溫度較為顯著，隨著進口溫度提升，電池模組表面的最高溫度亦逐步提升；進口溫度對於最大溫差的改善幅度較不顯著，於各進口風量所得趨勢皆相同，皆無看到一定上升或下降的趨勢。

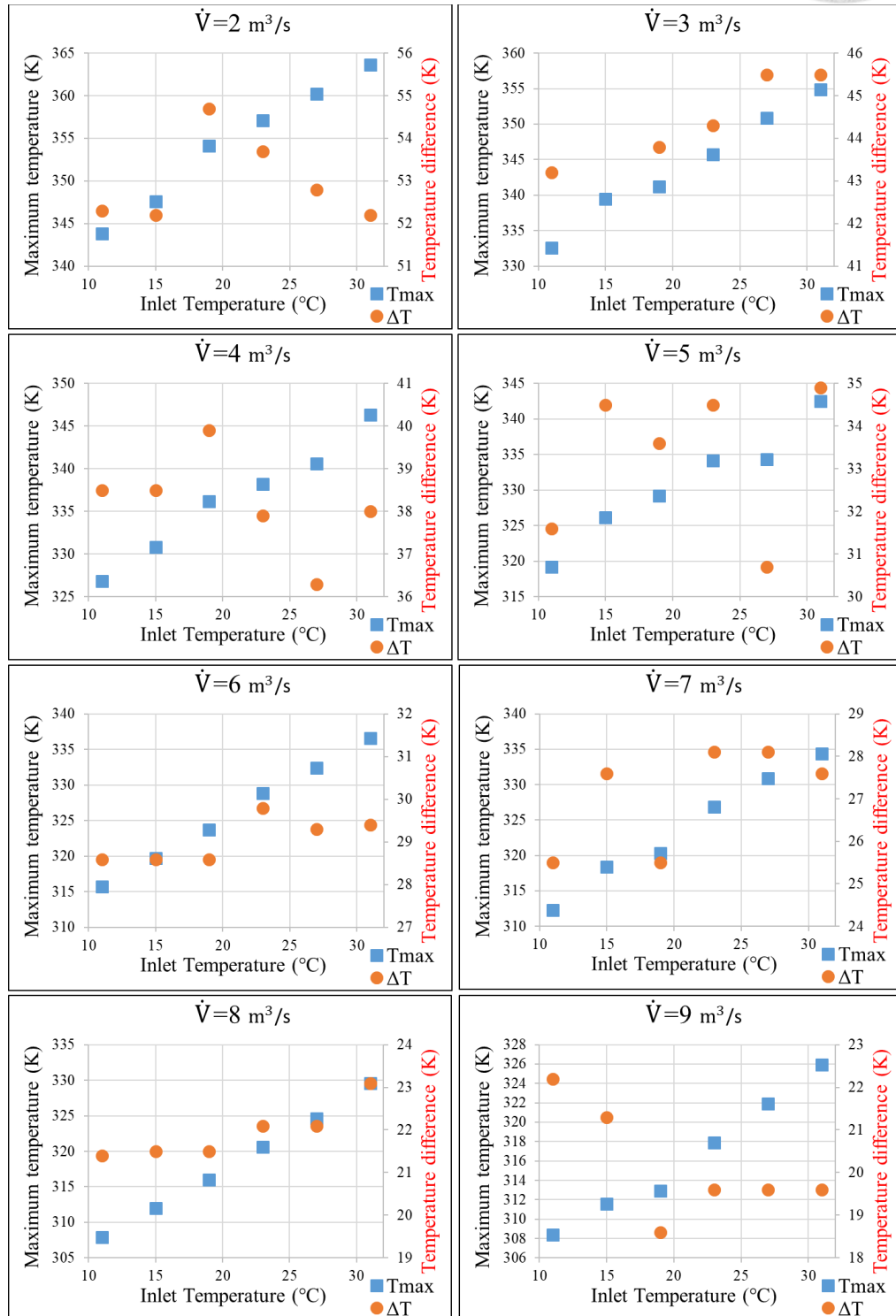


圖 4-18 各進口風量下，最高溫度與最大溫差分布圖

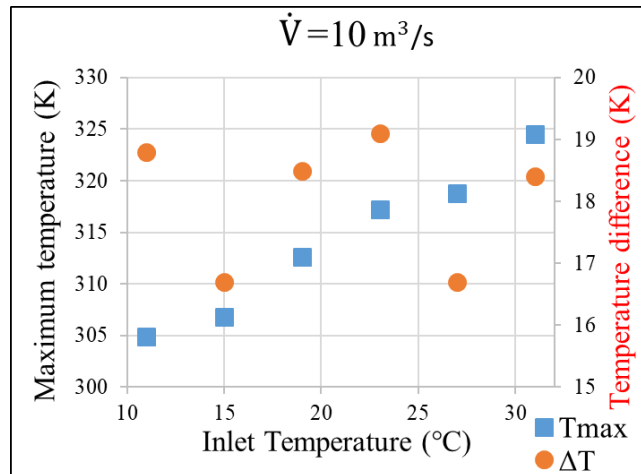


圖 4-19 進口風量為  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  下，最高溫度及最大溫差分布圖

### 4-2.3 決策樹

本文以 FS-CR 物理模型作為主要探討對象，將各進口條件下的最高溫度、最大溫差及評斷參數  $Ind$  透過機器學習的決策樹及支持向量機進行預測與分類，首先對決策樹及其演算結果進行說明。

決策樹透過演算法，將現有的計算結果進行分類，透過決策樹可以判斷特定的進口條件下的評斷參數  $Ind$ 、最高溫度及最大溫差數值，並且由決策樹中各個節點的條件可以判斷進口風量與進口溫度對評斷參數  $Ind$ 、最高溫度及最大溫差的影響力。由於本文中評斷參數  $Ind$  設計，是考量大氣溫度  $27.88^\circ\text{C}$  下的情況以計算空調耗能，進口溫度為  $31^\circ\text{C}$  會造成空調耗能為負值，不符合一般使用情況，故並未納入評斷參數  $Ind$  的決策樹迴歸，因此在評斷參數  $Ind$  的決策樹建立，使用 45 組進口風口條件組合，而在最高溫度以及最大溫差的決策樹建立則不受到大氣溫度限制，因此亦將進口溫度為  $31^\circ\text{C}$  之條件納入迴歸，分別使用 54 組進口條件組合下的計算結果， $N$  表示建立決策樹所使用的資料筆數，評斷參數  $Ind$ 、最高溫度及最大溫差三者之決策樹迴歸結果如圖 4-20、圖 4-21 及圖 4-22。圖 4-21 中各節點的判斷條件皆為進口風量的大小，表進口風量對於最大溫差的影響顯著，進口溫度對於最大溫差的影響較小；圖 4-20 及圖 4-22 中節點的判別條件包含進口風量與進口溫度，表兩因素皆對最高溫度有所影響，然第一個節點的判別條件為進口風量的大小，表進



口風量為主要影響因素，進口溫度則為較次要的影響因素。決策樹及結點判別條件的結果符合 4-2.1 及 4-2.2 所述。

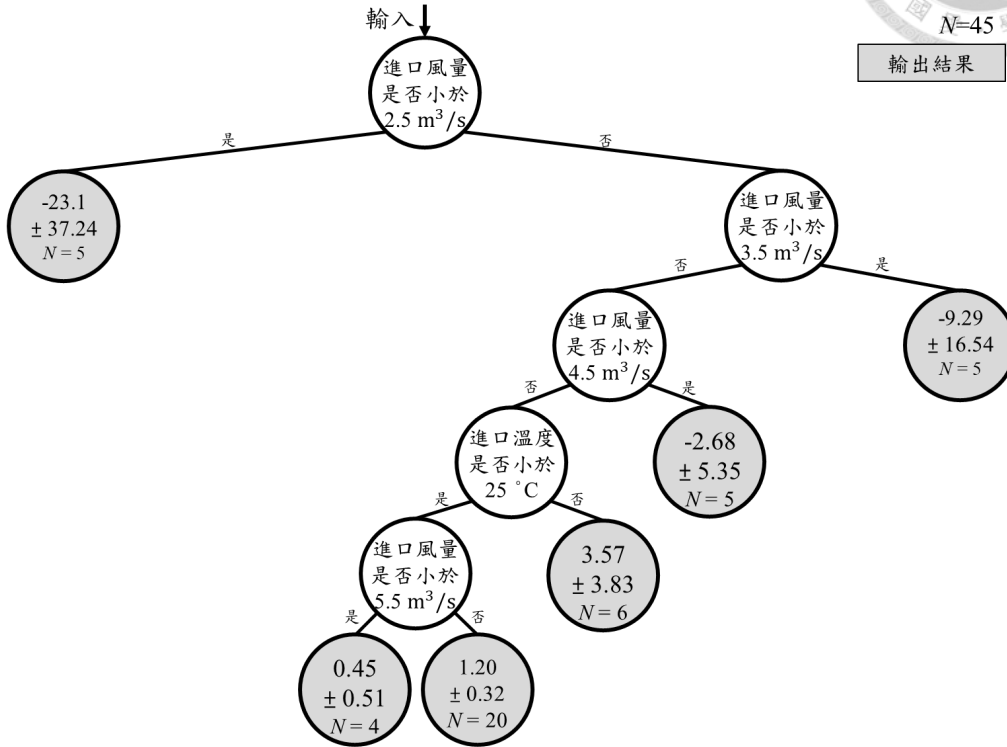


圖 4-20 依照評斷參數 *Ind* 數據回歸的決策樹

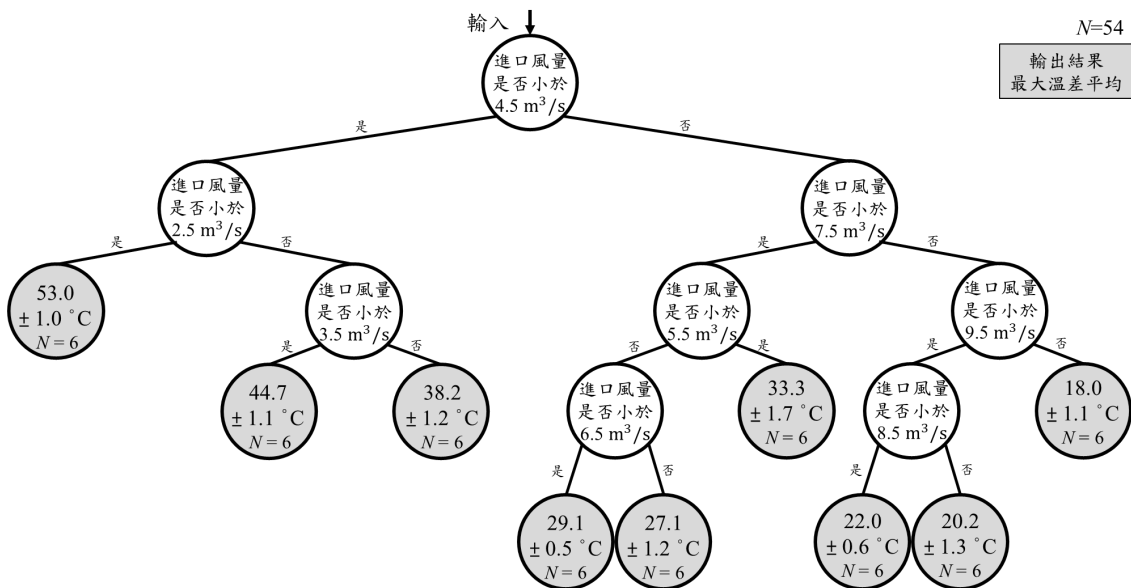


圖 4-21 依照最大溫差數據回歸的決策樹

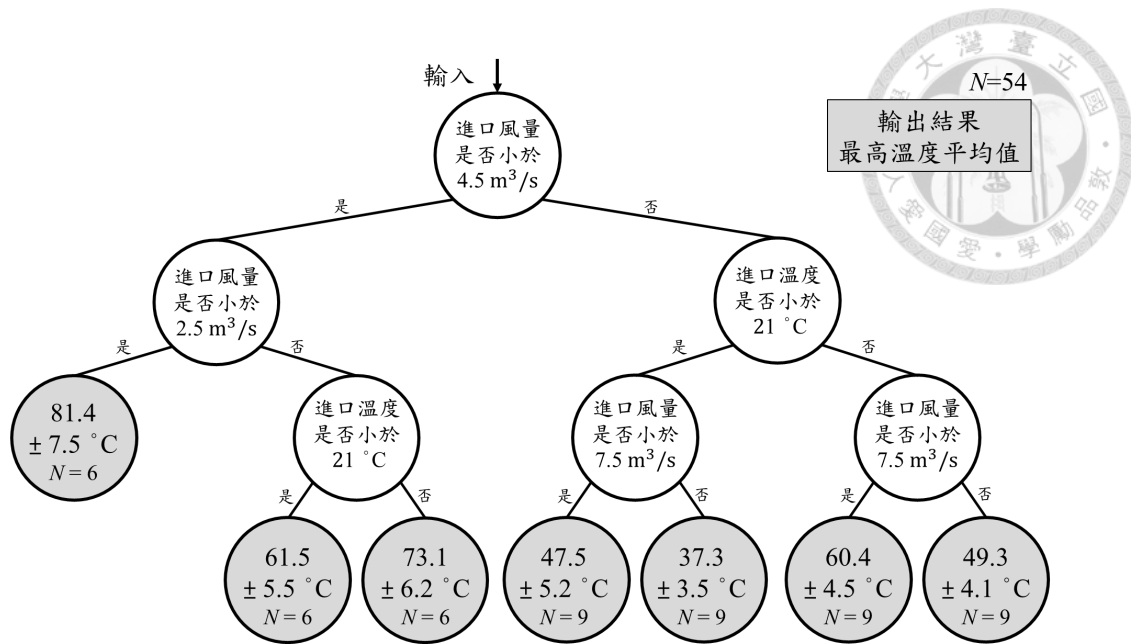


圖 4-22 依照最高溫度數據回歸的決策樹

#### 4-2.4 支持向量機

本研究使用支持向量機進行各進風口條件組合下的 45 組數據，進行各進風口條件下電池模組是否安全的預估模型建立，初步分類結果如圖 4-23。藍色方點及紅色圓點皆表示有實際進行模擬之進出口條件，而藍色方點表示此條件下電池模組表面最高溫度不會超過 60 °C，紅色圓點則表電池模組表面最高溫度將超過 60 °C，使電池模組有燃燒及熱失控的危險。藍線及紅線圍出區域皆由模型預測，並未進行各進口條件下的計算，而藍線所圍出區域，表示此區域內各進口條件組合下電池模組皆為安全，可確保電池模組表面最高溫度不會超過 60 °C，紅線所圍出之區域表示此區域內各進口條件組合下，會導致電池模組表面最高溫度將超過 60 °C，而有電池熱失控的風險。圖 4-23 中可以看到進口溫度 27 °C，進口風量為 6 m³/s 之條件下，雖其評斷參數 *Ind* 數值計算為藍色方點，表示此進口條件下電池模組的表面最高溫度並未超過 60 °C，而此點位置卻屬於紅線所圍出的範圍。此差異來自於機器學習在建立預測模型時，演算法將此點數據捨棄後所造成的結果，而程式中可求得演算法捨棄資料量為 2.2 %，即 45 分之 1，表示原進行預測模型建立的 45 組數據並未全部被使用，而在模型建立的過程有數據捨棄的情況，被捨棄之數據即為



進口溫度 27°C，進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s 條件下的計算結果。除建立模型之 45 組以外，本文亦透過靠近分類邊界的 8 組進風口條件組合進行預測模型驗證，驗證用的 8 組進風口條件於圖 4-23 中以黑色三角形表示，其進口條件以及預測結果整理如下表 4-3。電池模組表面溫度是否超過安全溫度的預測模型為將 45 組進風口條件組合的計算結果，先進行安全與否之二分法分類，再建立預測模型。而由表 4-3 數據可知，8 組驗證模型中，安全與否預測結果與 *Ind* 正負值皆相符，表電池模組表面溫度是否超過安全溫度的預測可達到 100% 正確率。

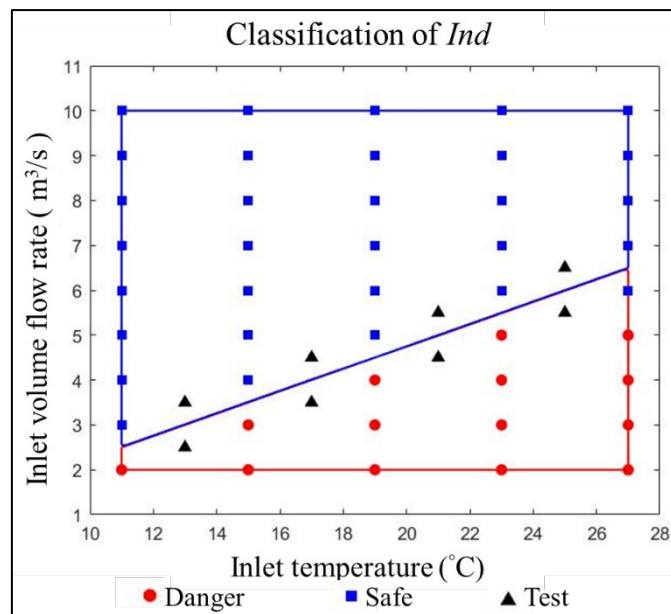


圖 4-23 支持向量機分類結果

表 4-3 模型驗證之進口條件與驗證結果

進口溫度(°C)	進口風量(m <sup>3</sup> /s)	<i>Ind</i>	安全與否預測
13	2.5	-1.48	不安全
13	3.5	0.22	安全
17	3.5	-0.49	不安全
17	4.5	0.19	安全
21	4.5	-0.92	不安全
21	5.5	0.20	安全
25	5.5	-2.35	不安全
25	6.5	2.27	安全



### 4-3 非均勻進口控制策略

電池儲能系統中的電池模組數量龐大，溫度分布難以均勻一致，易有熱點產生。本文調整部分進口條件，消除原有熱點並避免產生新熱點，使電池模組整體皆於安全溫度範圍內。調整進口風量與進口溫度皆會對電池模組的最高溫度、最大溫差與溫度分布產生影響，為將兩者影響退耦，因此獨立調整部分進口風量及部分進口溫度，以下分別詳述。

#### 4-3.1 進口風量的獨立控制策略

本文以進口風量為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  的情況作為主要探討對象，找出進口風量為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  情況下的熱點，將熱點發生的機櫃視為目標機櫃，調整最靠近目標機櫃的進風口，期望透過提高進口風量來消除熱點。當進口風量總和為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $11$ 、 $15$ 、 $19$ 、 $23$  及  $27^\circ\text{C}$  的情況下，於 Cabinet #5 上半部皆會有電池模組溫度較高的情形，如圖 4-24。

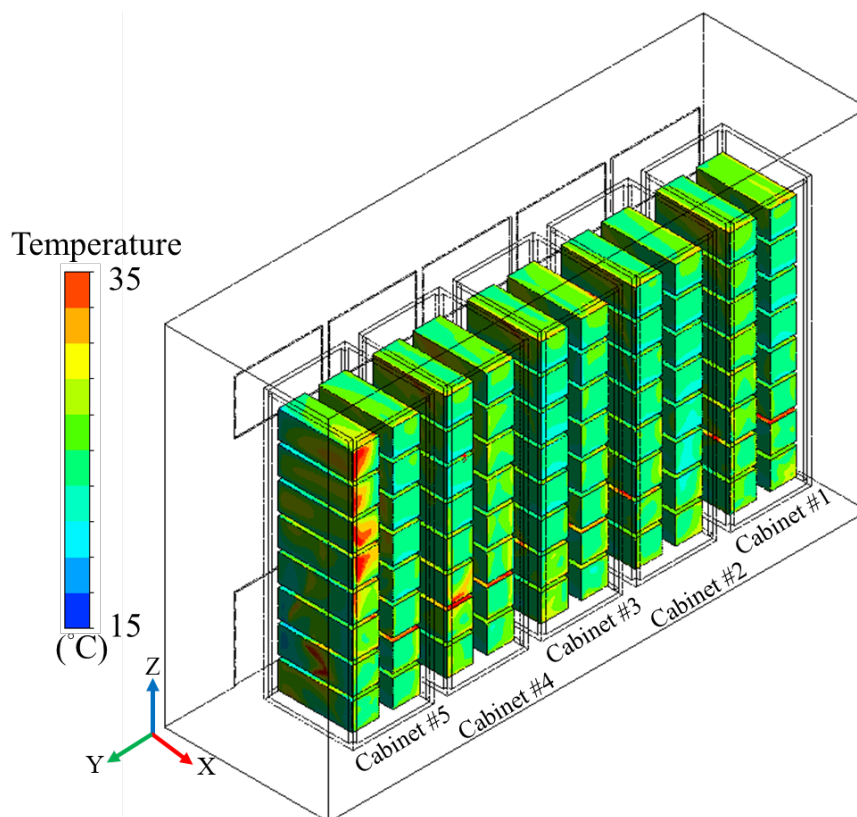


圖 4-24 進口風量總和  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度  $15^\circ\text{C}$  的情況下的溫度分布

為改善此情況，本文於進口溫度 11、15、19、23 及 27 °C 的情況下，提高最靠近目標機櫃的 Inlet #5 的進口流速，分別提高至總風量為 8 m<sup>3</sup>/s 及 10 m<sup>3</sup>/s 下的流速，進口風量控制策略的最高溫度及最大溫差整理如表 4-4。提高熱點發生位置的進口風量可降低目標機櫃的電池模組溫度，如圖 4-25 (b) 中的 Cabinet #5。然不均勻的進口風量造成整體流速分布不均，如圖 4-26，使散熱流體無法均勻分布至各電池模組，造成部分電池模組周圍發生冷空氣旁路並產生熱點，此情況於目標機櫃中的 Module #1 最為顯著。圖 4-27 為當進口風量總和為 6 m<sup>3</sup>/s，進口溫度為 15 °C 的情況下，將 Inlet #5 的進口流速提高至總風量為 10 m<sup>3</sup>/s 下的流速後，Cabinet #5 的流速與溫度分布圖，Module #1 下方冷空氣旁路，產生熱點使散熱效果不佳。

表 4-4 進口風量控制策略的數據

進口溫度 (°C)	11			15			19		
Inlet #5 進口風量(m <sup>3</sup> /s)	6	8	10	6	8	10	6	8	10
T <sub>max</sub> (°C)	42.7	61.4	61.4	46.7	59.1	66.1	50.7	67.2	69.4
ΔT(°C)	28.6	48	48.4	28.6	41.6	48.6	28.6	46.1	48.2
進口溫度 (°C)	23			27					
Inlet #5 進口風量(m <sup>3</sup> /s)	6	8	10	6	8	10			
T <sub>max</sub> (°C)	55.9	71.2	73.4	59.4	77.5	79.6			
ΔT(°C)	29.8	46.1	48.4	29.3	48.2	50.2			

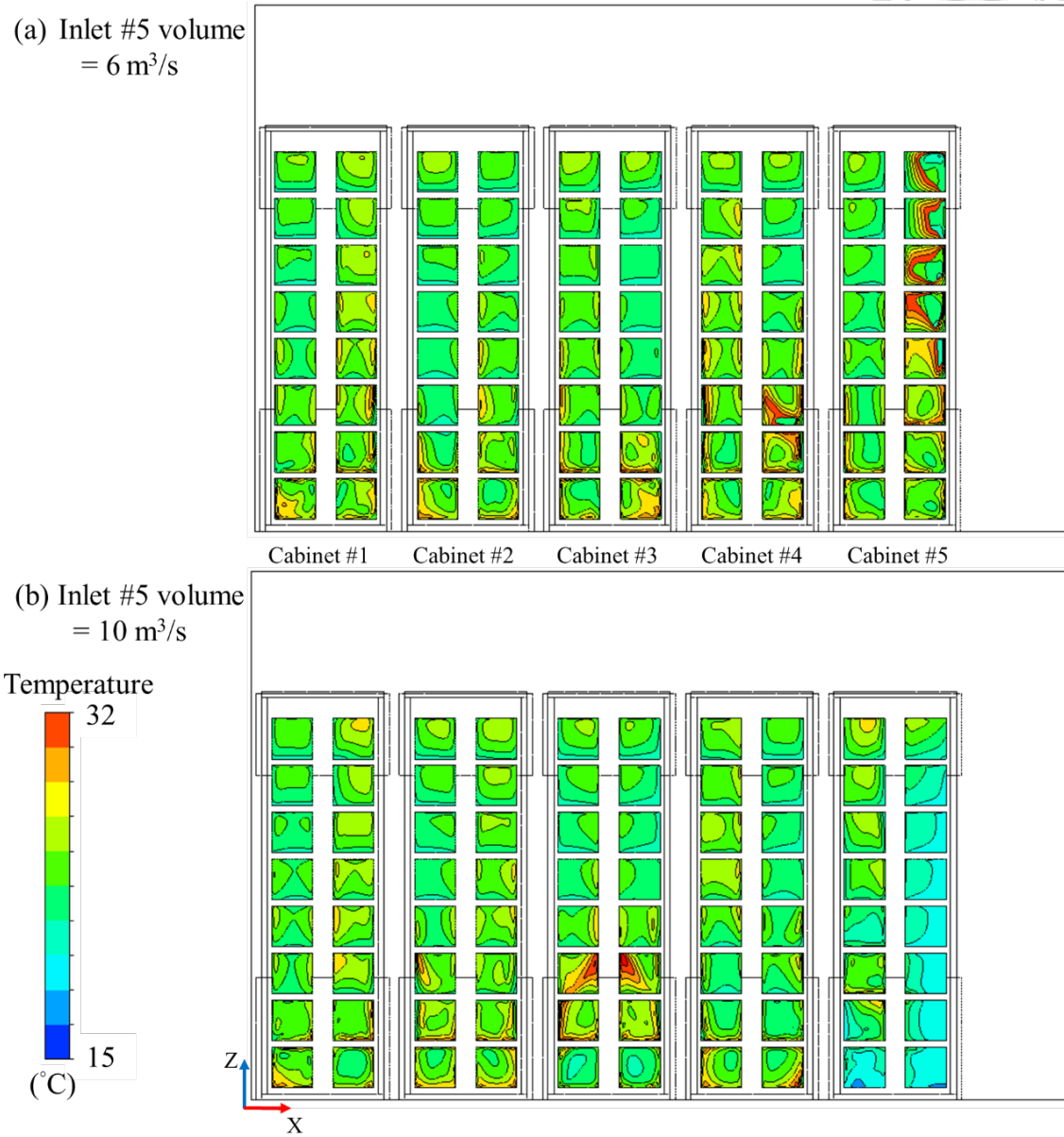
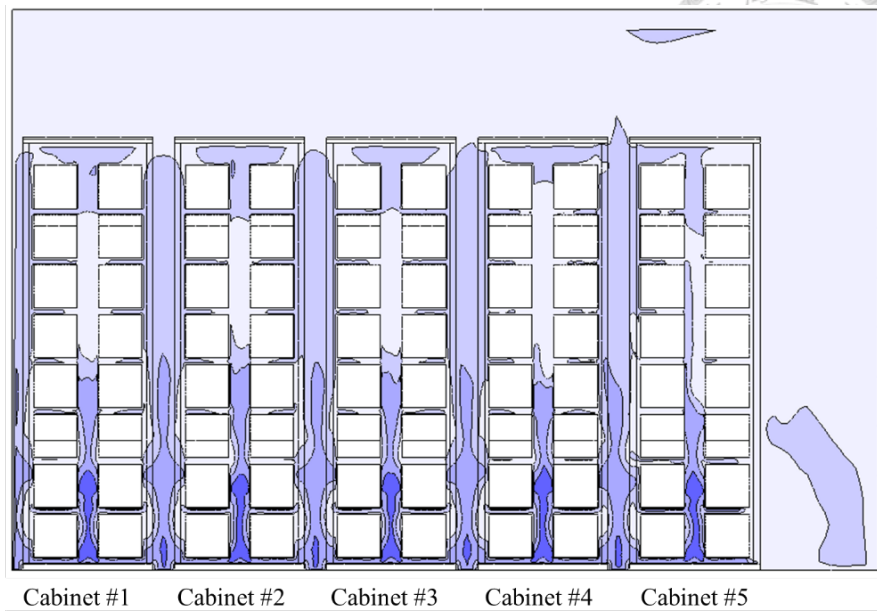


圖 4-25 進口風量的獨立控制策略的電池模組溫度分布

(a) Inlet #5 volume  
=  $6 \text{ m}^3/\text{s}$



(b) Inlet #5 volume  
=  $10 \text{ m}^3/\text{s}$

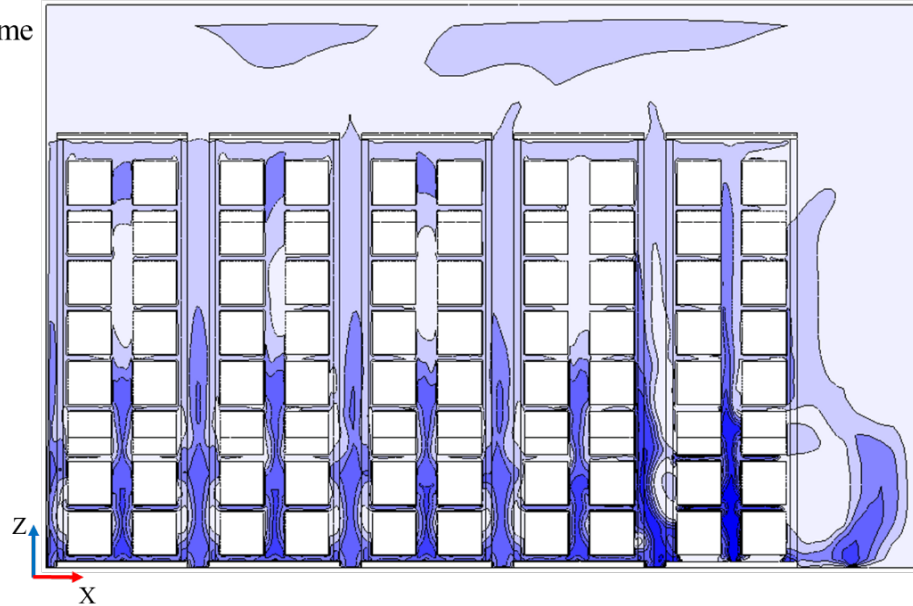
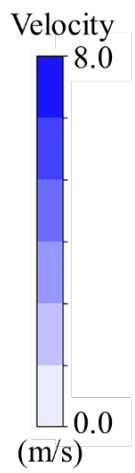


圖 4-26 進口風量的獨立控制策略的流速分布

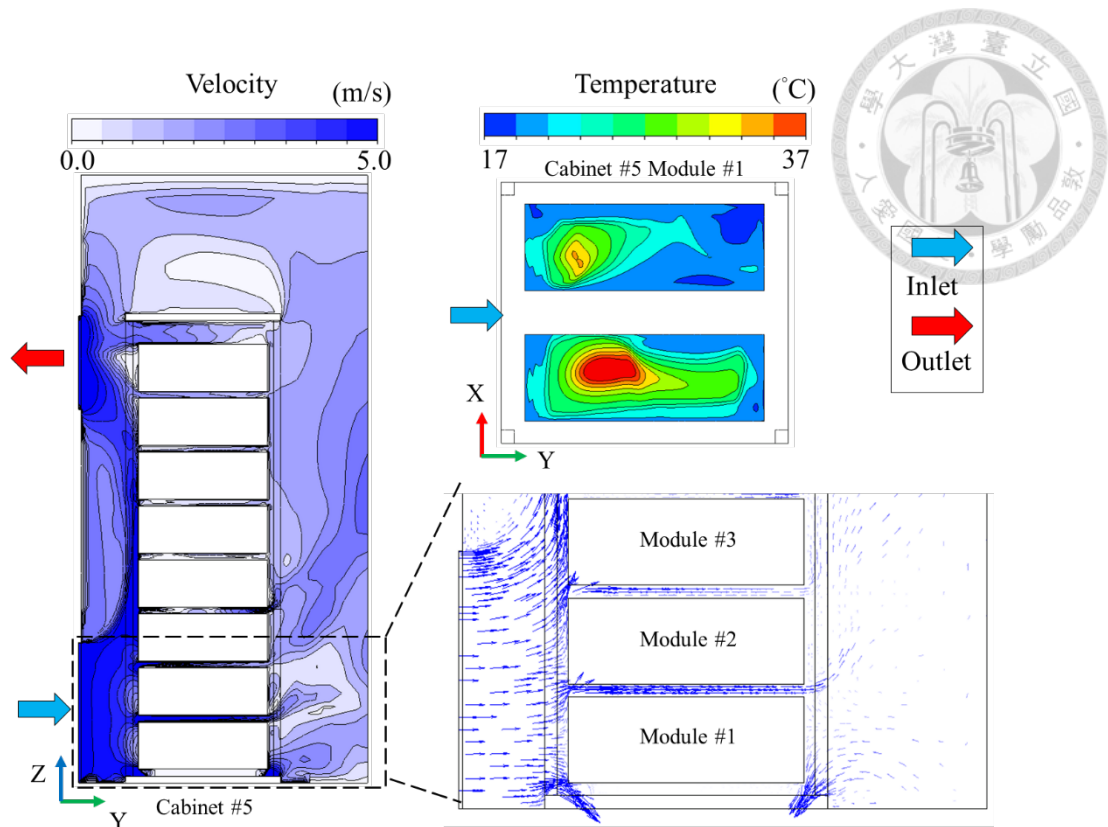


圖 4-27 進口風量的獨立控制策略下，熱點周圍流速與溫度分布

#### 4-3.2 進口溫度的獨立控制策略

本文以三個均勻設定的進口條件作為探討對象，對此三個情況下探討進口溫度的獨立控制策略的效果，分別為進口風量為  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $31 \text{ }^\circ\text{C}$ ，本文簡稱為條件一；進口風量為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ，本文簡稱為條件二；進口風量為  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ，本文簡稱為條件三。本文逐步調整進口溫度的獨立控制策略，以降低目標機櫃溫度並避免產生新熱點，包含單一進口溫度控制與複合進口溫度控制兩部分。單一進口溫度控制選擇最靠近目標機櫃或最兩側的進風口，獨立調低單一個進風口的溫度；複合進口溫度控制選擇最靠近目標機櫃或最兩側的進風口，以兩個進風口為上限，獨立調低兩個進風口的溫度，以下分別詳述。

##### 單一進口溫度控制

條件一於均勻進口條件的情況下，即進口總風量為  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ，各進口溫度皆為  $31 \text{ }^\circ\text{C}$  時，最高溫度發生位置位於 Cabinet #2 中的 Module #2 位置，即 C2M2 的位置，

如圖 4-28。條件二均勻設定進口條件的情況下，即進口總風量為  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $27^\circ\text{C}$  時；條件三均勻設定進口條件的情況下，即進口總風量為  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，進口溫度為  $23^\circ\text{C}$  時，條件二及條件三在均勻設定進口條件的情況下，最高溫度發生位置位於 Cabinet #3 中的 Module #3 位置，即 C3 M3 的位置，如圖 4-29。

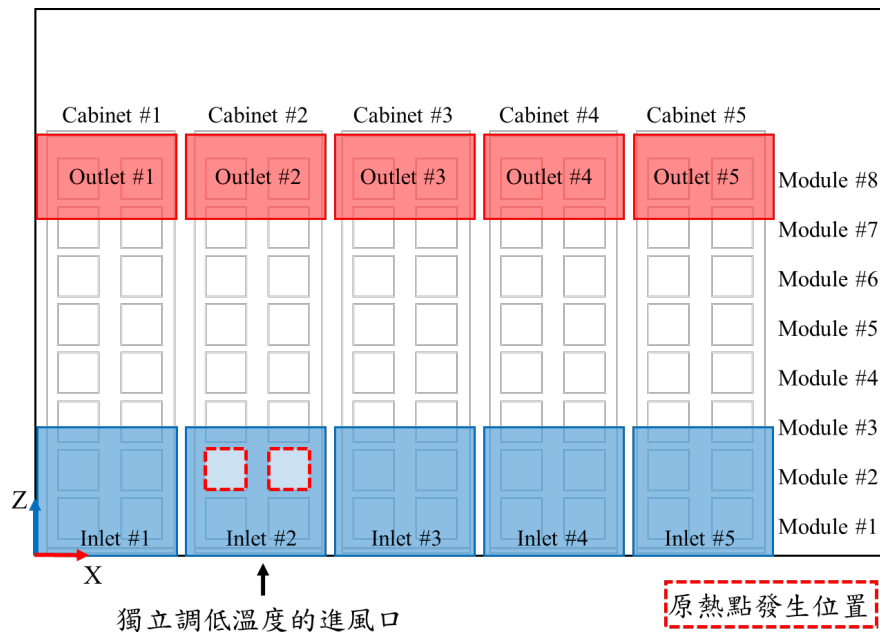


圖 4-28 條件一熱點位置與調整進風口

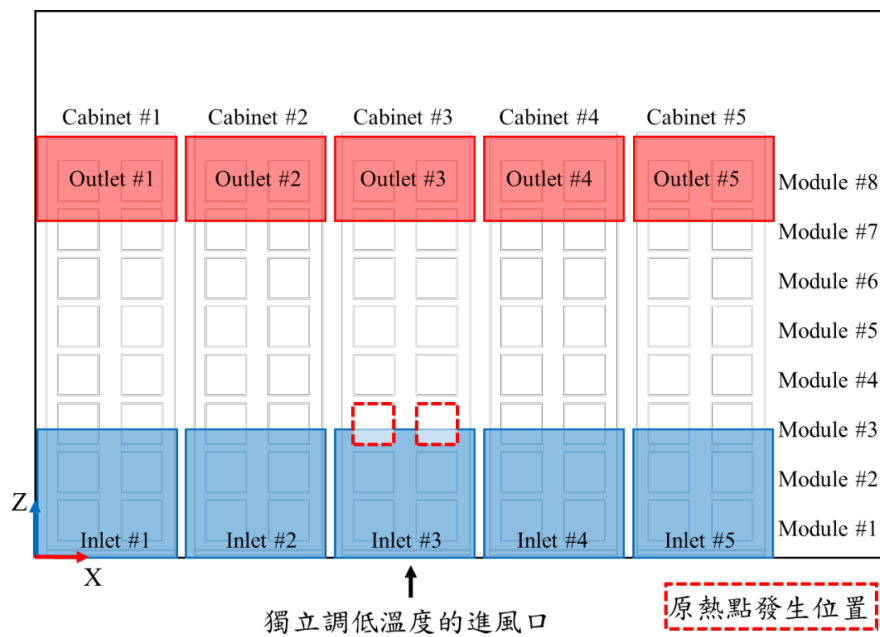


圖 4-29 條件二與條件三的熱點位置與調整進風口

單一進口溫度控制選擇最靠近目標機櫃或最兩側的進風口，調低進口溫度，提供較低溫的散熱流體，對條件一、條件二及條件三皆設定比其餘進風口低  $8^{\circ}\text{C}$  的進口溫度。單一進口溫度控制在條件一、條件二及條件三下，電池模組的溫度分布如圖 4-30 至圖 4-32，調低進風口溫度後，最靠近低溫進風口的機櫃中，電池模組的溫度皆較低。

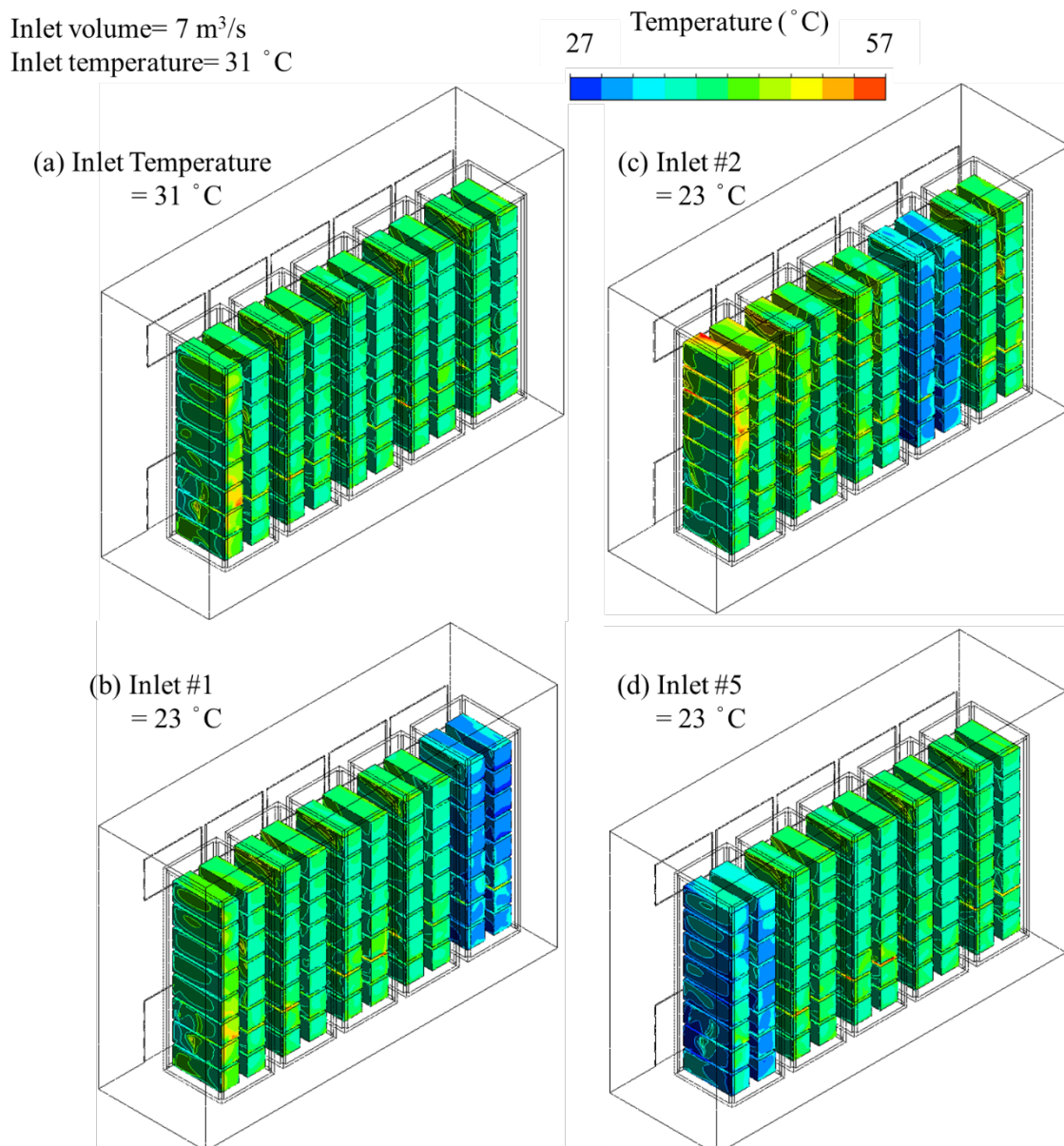
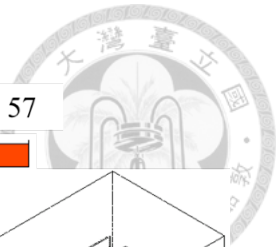


圖 4-30 條件一於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布





Inlet volume=  $6 \text{ m}^3/\text{s}$   
Inlet temperature=  $27^\circ\text{C}$

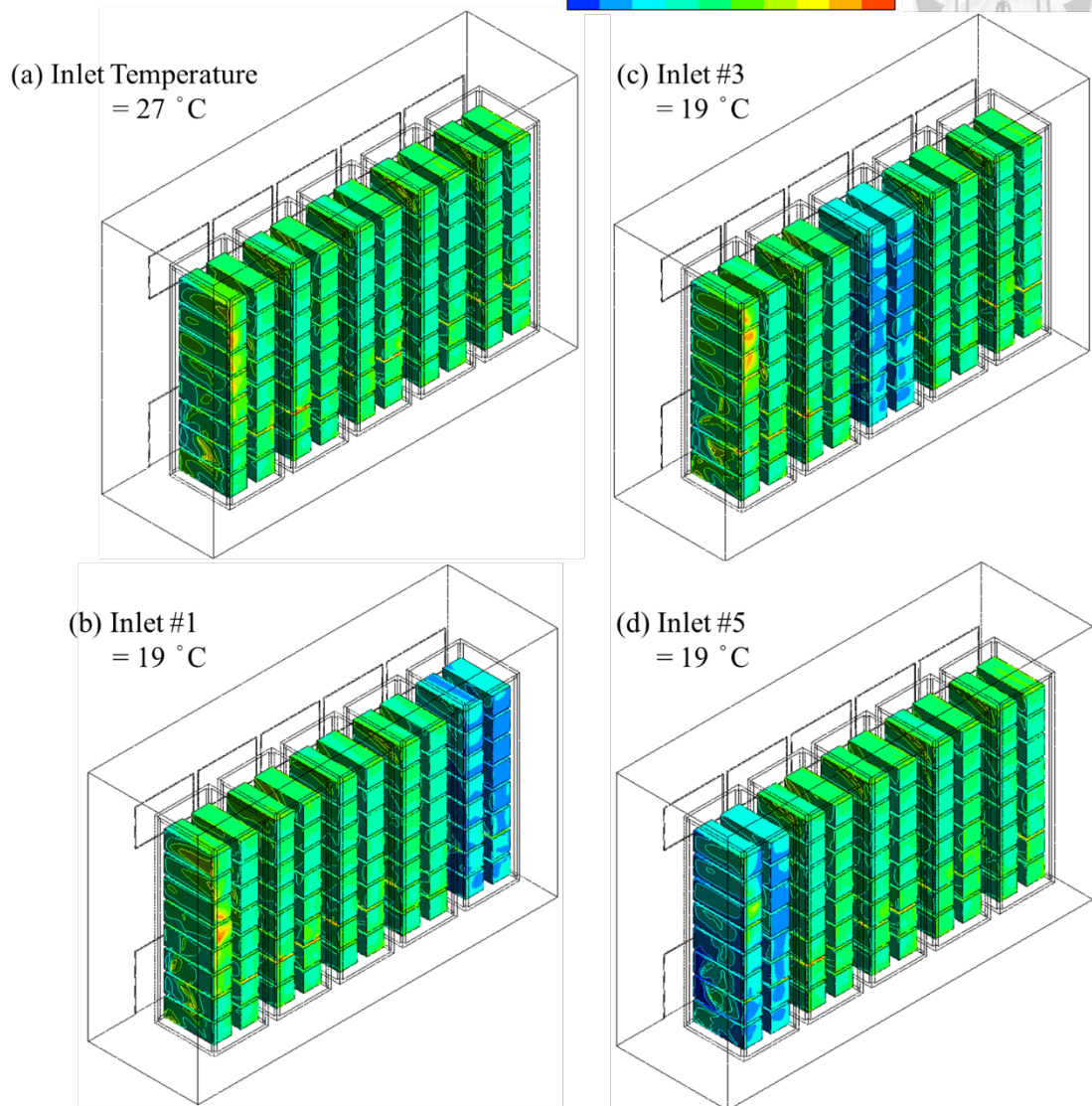
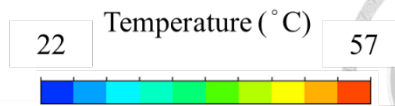


圖 4-31 條件二於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布



Inlet volume= 5 m<sup>3</sup>/s  
Inlet temperature= 23 °C

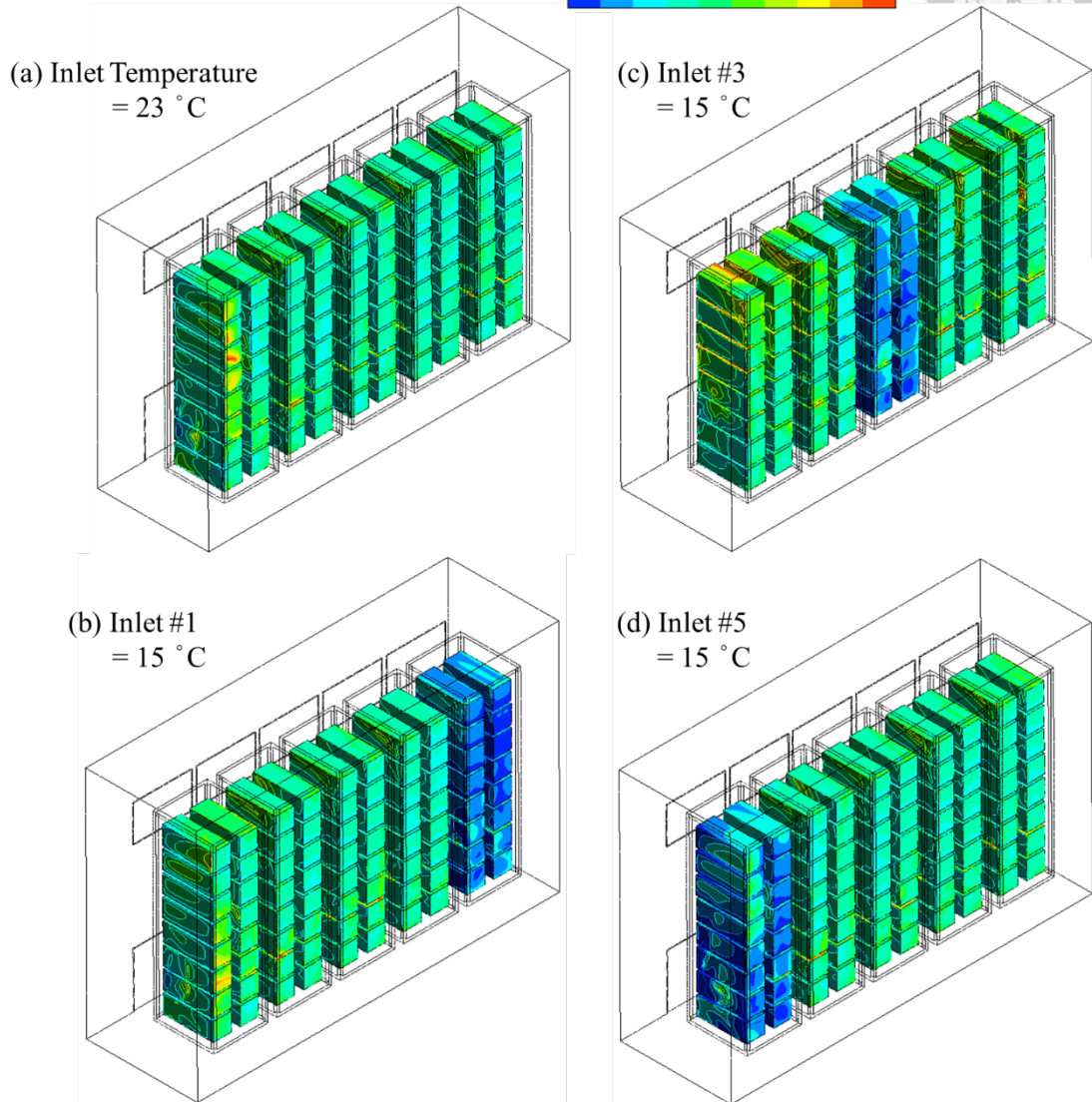
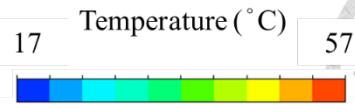


圖 4-32 條件三於均勻進口與單一進口溫度控制的電池模組溫度分布

進一步比較模擬數據，條件一、條件二及條件三的模擬結果分別如表 4-5 至表 4-7，灰底部分為調低最靠近目標機櫃的進風口溫度。於條件一、條件二及條件三下，調低最靠近目標機櫃的進風口的溫度，皆有效使目標機櫃的熱點溫度降至安全溫度內，改善幅度可達 4 至 11 °C。

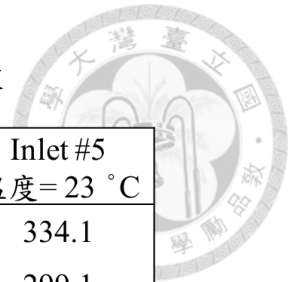


表 4-5 條件一下單一進口溫度控制策略的數據

Geometry	均勻進口條件	Inlet #1 溫度= 23 °C	Inlet #2 溫度= 23 °C	Inlet #5 溫度= 23 °C
T <sub>max</sub> (K)	334.4	336.3	353.0	334.1
T <sub>min</sub> (K)	306.8	298.8	298.7	299.1
ΔT(K)	27.6	37.5	54.3	35.0
T <sub>avg</sub> (K)	312.7	311.2	312.6	311.2
T <sub>max</sub> location	C2 M2	C3 M3	C5 M7	C4 M7
T <sub>min</sub> location	C2 M3	C1 M1	C2 M3	C5 M1
Cabinet 2 最高溫度(K)	-	328.7	323	325.2
Cabinet 2 改善幅度(K)	-	5.7	11.4	9.2

表 4-6 條件二下單一進口溫度控制策略的數據

Geometry	均勻進口條件	Inlet #1 溫度= 19 °C	Inlet #3 溫度= 19 °C	Inlet #5 溫度= 19 °C
T <sub>max</sub> (K)	332.4	330.3	335.2	329.7
T <sub>min</sub> (K)	303.1	295.2	295.2	295.4
ΔT(K)	29.3	35.1	40.0	34.3
T <sub>avg</sub> (K)	309.9	308.3	308.4	308.4
T <sub>max</sub> location	C3 M3	C4 M2	C1 M3	C4 M2
T <sub>min</sub> location	C2 M3	C1 M3	C3 M3	C5 M3
Cabinet 3 最高溫度(K)	-	324.2	327.8	328.4
Cabinet 3 改善幅度(K)	-	8.2	4.6	4.0

表 4-7 條件三下單一進口溫度控制策略的數據

Geometry	均勻進口條件	Inlet #1 溫度= 15 °C	Inlet #3 溫度= 15 °C	Inlet #5 溫度= 15 °C
T <sub>max</sub> (K)	334.1	334.5	345.3	339.0
T <sub>min</sub> (K)	299.6	291.8	291.7	292.0
ΔT(K)	34.5	42.7	53.6	47.0
T <sub>avg</sub> (K)	307.5	306.2	307.9	305.9
T <sub>max</sub> location	C3 M3	C3 M3	C5 M7	C1 M1
T <sub>min</sub> location	C2 M3	C1 M3	C3 M3	C5 M1
Cabinet 3 最高溫度(K)	-	334.5	328.4	326.6
Cabinet 3 改善幅度(K)	-	-0.4	5.7	7.5

雖調低最靠近目標機櫃的進口溫度可有效降低目標機櫃的最高溫度，但此策略下的最高溫度會比原均勻設定更高。於條件一下獨立設定 Inlet #2 及條件三下獨立設定 Inlet #3 兩個情況中，最高溫度皆發生於 Cabinet #5 Module7，如圖 4-33，且此熱點溫度比均勻設定下的最高溫度更高 10 °C 以上。將單一進口溫度控制策略下的流場分布繪製如圖 4-34 至圖 4-36，整理兩者流場的共通點。

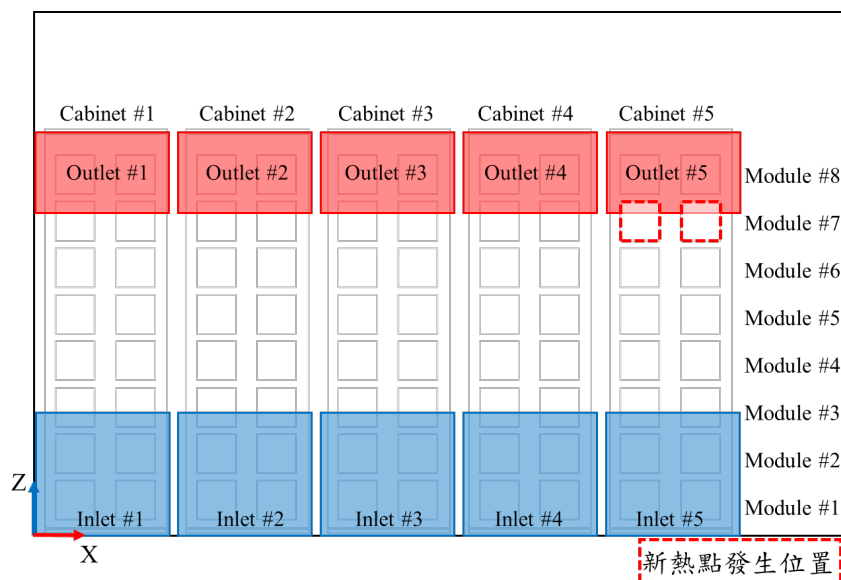


圖 4-33 單一進口溫度控制策略下，條件一與條件三的新熱點位置

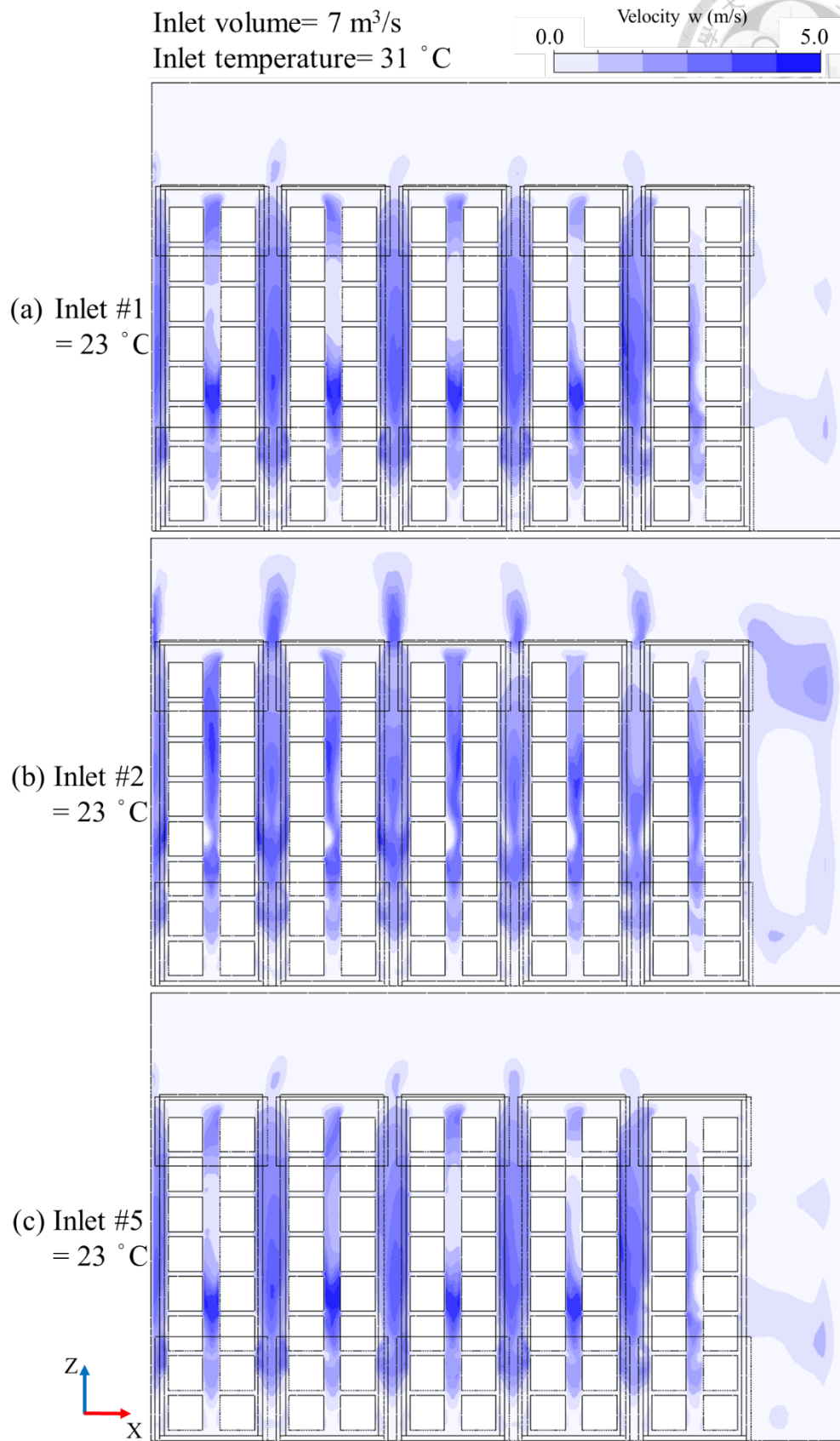


圖 4-34 單一進口控制策略於條件一的流速分布圖

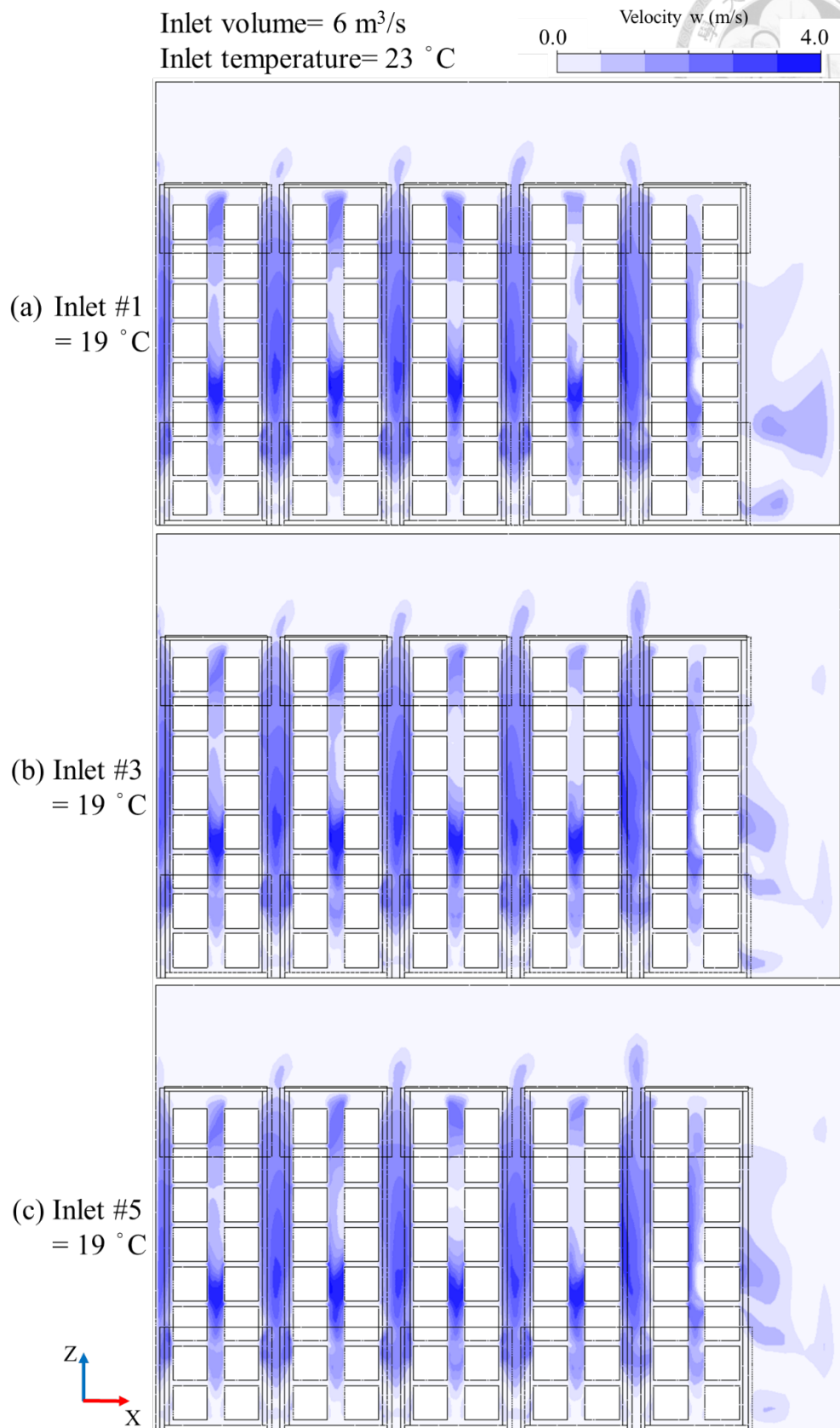


圖 4-35 單一進口控制策略於條件二的流速分布圖

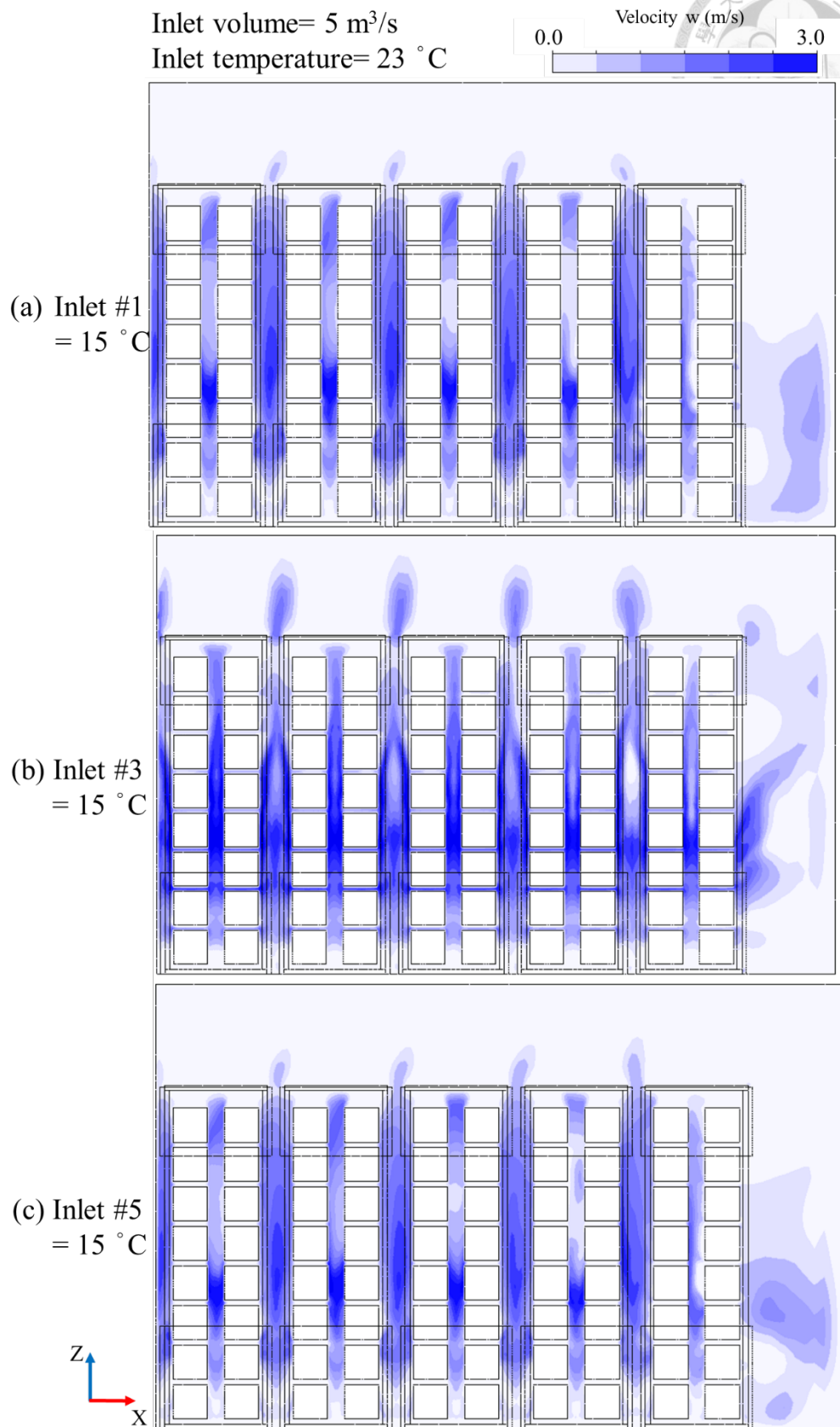


圖 4-36 單一進口控制策略於條件三的流速分布圖

當獨立設定的進風口位置並非位於最兩側，如圖 4-34(b)、圖 4-35(b)及圖 4-36(b)，電池機櫃間上方具一顯著的  $z$  軸向流速(velocity  $w$ )，此情況於條件一及條件三下較為顯著。以條件一為例，進一步探討熱點周圍流場細節，如圖 4-37。電池機櫃間上方較高的  $z$  軸向流速導致機櫃上方產生回流區，如圖 4-37(a)中黑色虛圈處，引發機櫃右側也產生一個上升氣流，造成此 Cabinet #5 Module 7 下方的冷空氣旁路情況顯著，使此處產生更高溫的新熱點；當獨立設定的進風口位置位於兩側，冷空氣旁路的情況並未發生，如圖 4-37(b)、(c)。獨立設定的進風口帶來較低溫的散熱流體，流體密度較高而往其他機櫃流動，若獨立設定的進風口位於最兩側，冷卻流體僅會往單一方向散布，此流向造成流體橫向移動較垂向移動顯著，如圖 4-38(a)，若獨立進風口設定非兩側，冷卻流體在垂向移動較橫向移動顯著，產生局部回流使特定機櫃與電池模組溫度升高，如圖 4-38(b)。

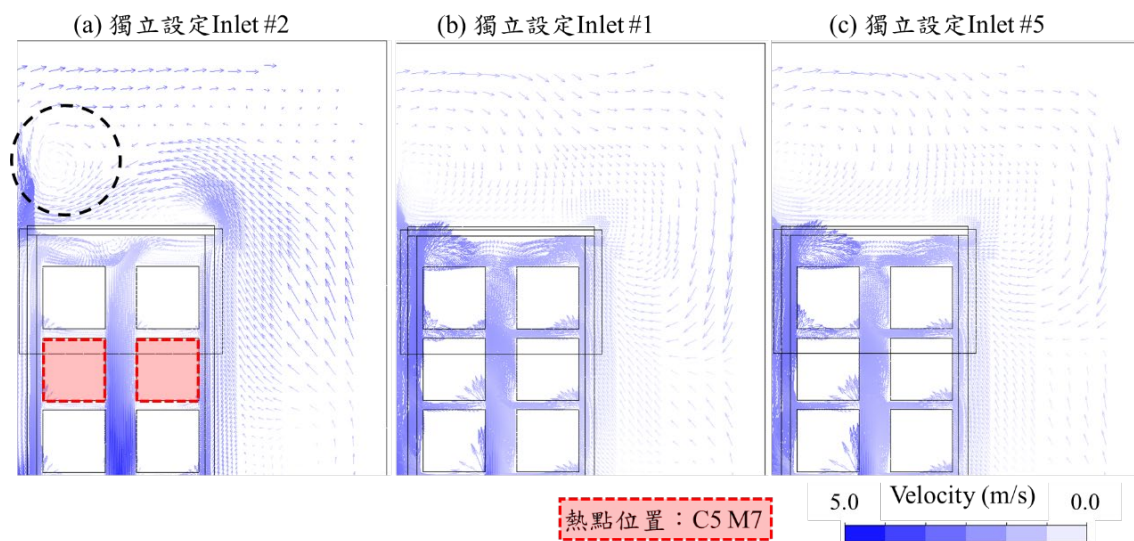


圖 4-37 單一進口控制策略於條件一的局部流速向量圖



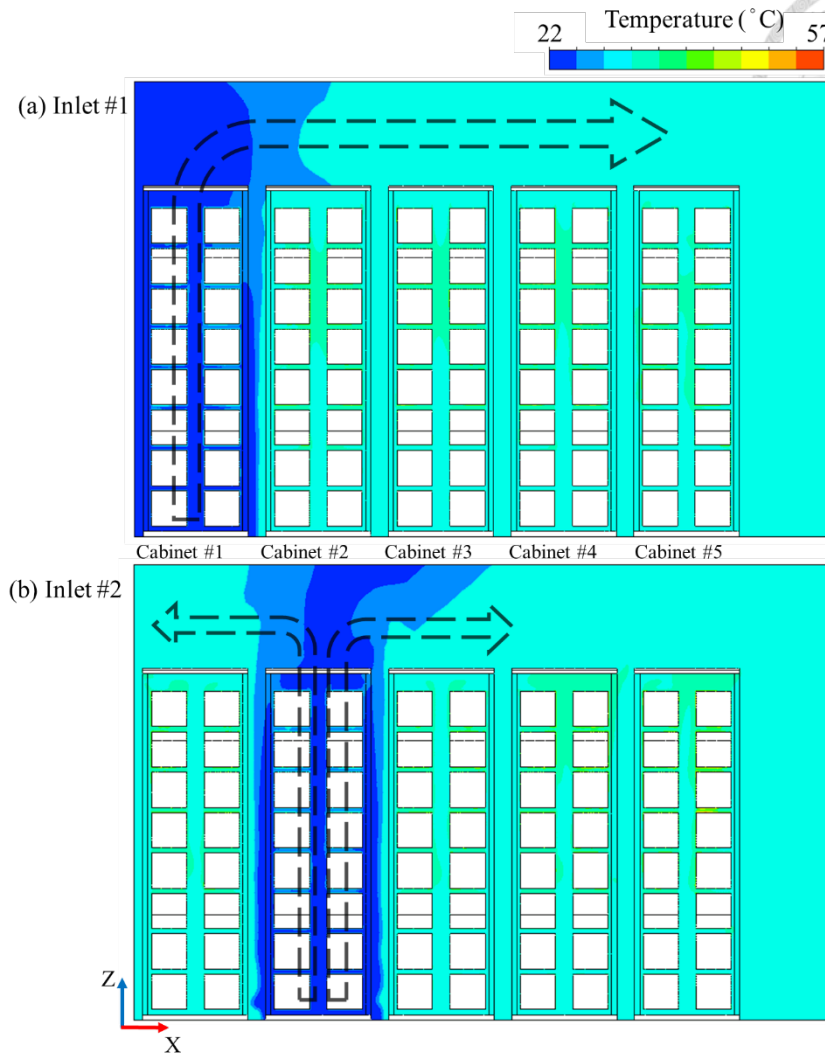


圖 4-38 單一進口控制策略於條件一的流體溫度分布

單一進口溫度控制策略對於溫度與流場分布的影響因素增多，包含獨立設定的進口溫度、獨立設定的進風口位置、進口風量、進口平均溫度等，故本文透過決策樹協助分析及驗證較具影響力的因素，結果如圖 4-39。圖 4-39 中第一個節點的判別條件為獨立設定的進風口位置是否位於兩側，即 Inlet #1 和 Inlet #5，表示獨立設定的進風口位置是否位於兩側為主要影響因素。此結果亦符合前段所述，當獨立設定 Inlet #3 溫度時，其  $z$  軸向流速較快，與獨立設定 Inlet #1 和 Inlet #5 的情況下有顯著差異。決策樹中的第二個判別條件為獨立設定的進風口溫度，表示條件一、條件二及條件三之間的差異仍會改變最高溫度，其中獨立設定的進風口溫度較具影響力。

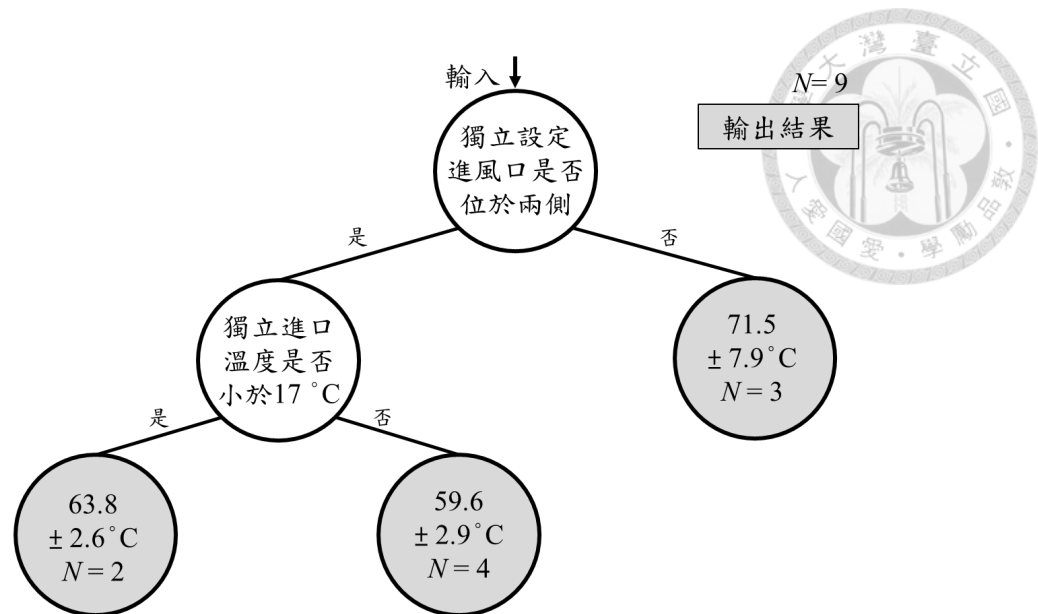


圖 4-39 單一進口溫度控制策略下，依照最高溫度回歸的決策樹

### 複合進口溫度控制

複合進口溫度控制策略同時調整兩進風口的進口溫度，改善單一進口溫度控制策略，以避免新熱點產生且有效降低目標機櫃的溫度。複合進口溫度控制策略中，兩進風口的組合共有三種，分別為最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #1、最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #5、Inlet #1 及 Inlet #5，在條件一、條件二及條件三下電池模組的溫度分布模擬結果如圖 4-40 至圖 4-42。與單一進口控制策略相似，最靠近低溫進風口的機櫃中，電池模組具有較低的溫度。複合進口控制的詳細模擬結果如表 4-8 (a)至(c)。複合進口溫度控制策略中，同時降低最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #5 的進口溫度，即表 4-8 (a)至(c)中灰底部分，於條件一、條件二及條件三的情況下皆可使目標機櫃的最高溫度降低，且改善幅度達 8 °C 以上，且未有新的高溫熱點產生。

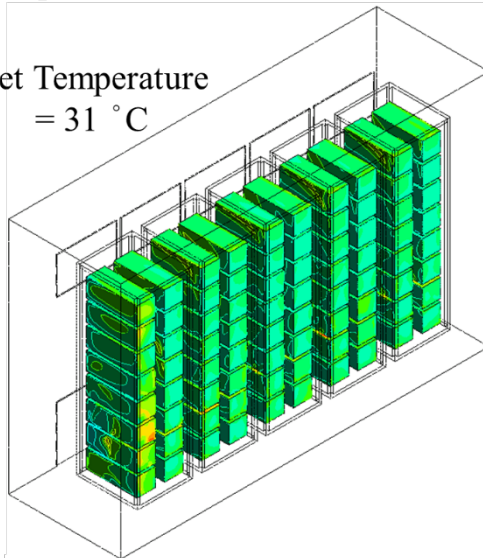


Inlet volume= 7 m<sup>3</sup>/s  
Inlet temperature= 31 °C

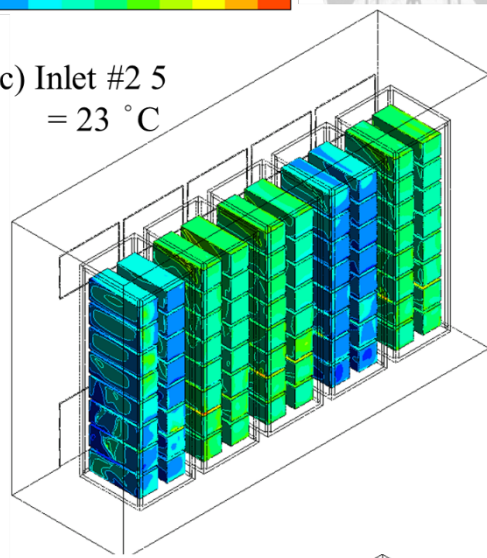
27 Temperature (°C) 57



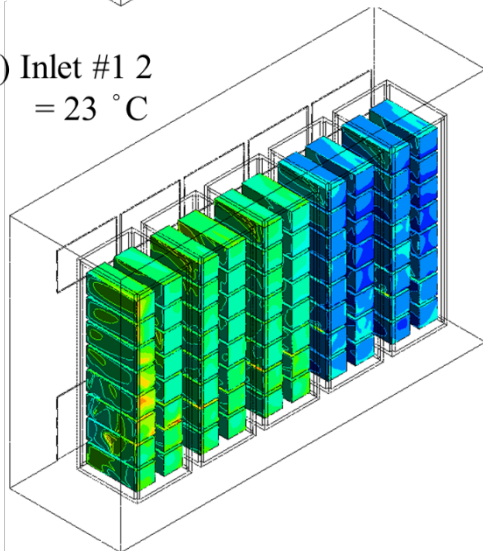
(a) Inlet Temperature  
= 31 °C



(c) Inlet #2 5  
= 23 °C



(b) Inlet #1 2  
= 23 °C



(d) Inlet #1 5  
= 23 °C

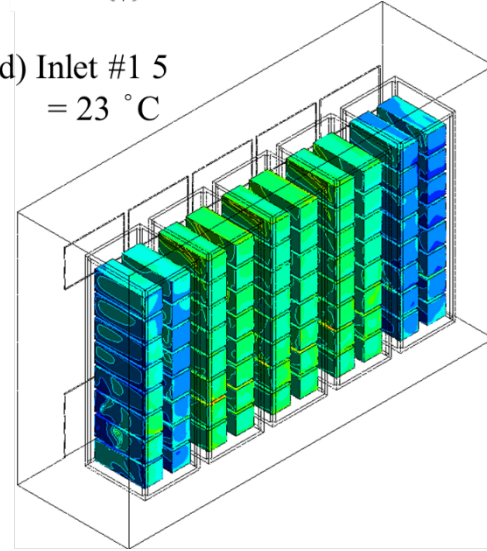


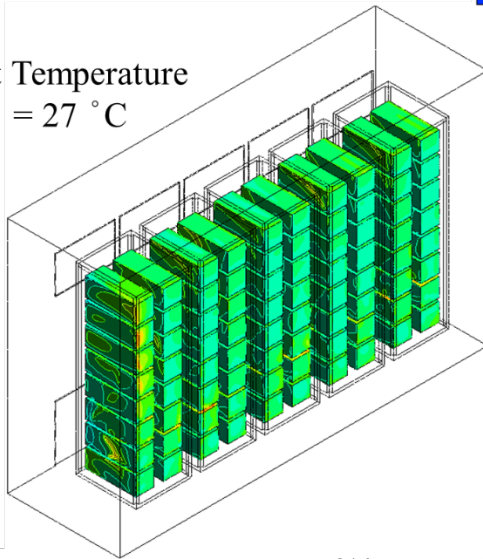
圖 4-40 條件一於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布

Inlet volume= 6 m<sup>3</sup>/s  
Inlet temperature= 27 °C

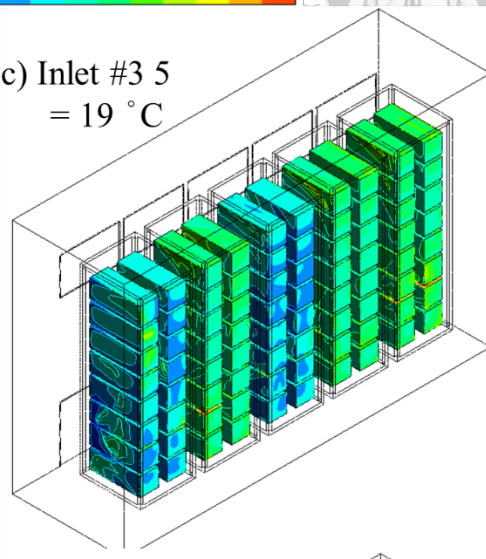
Temperature (°C)  
22 57



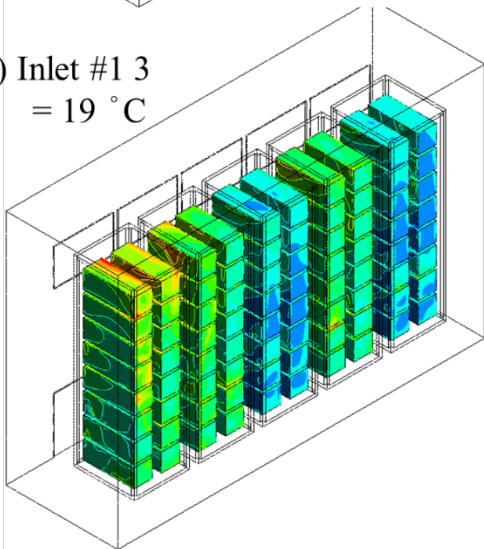
(a) Inlet Temperature  
= 27 °C



(c) Inlet #3 5  
= 19 °C



(b) Inlet #1 3  
= 19 °C



(d) Inlet #1 5  
= 19 °C

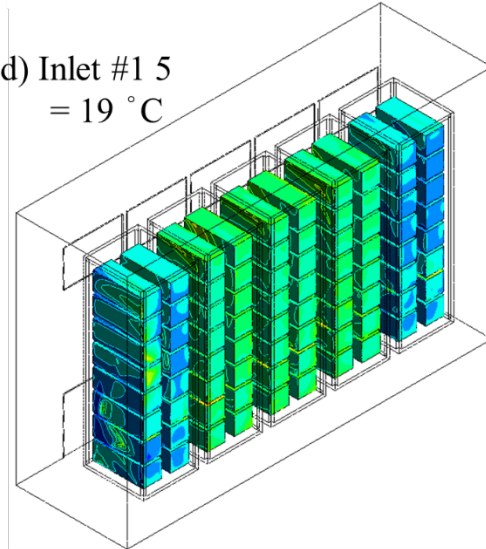


圖 4-41 條件二於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布

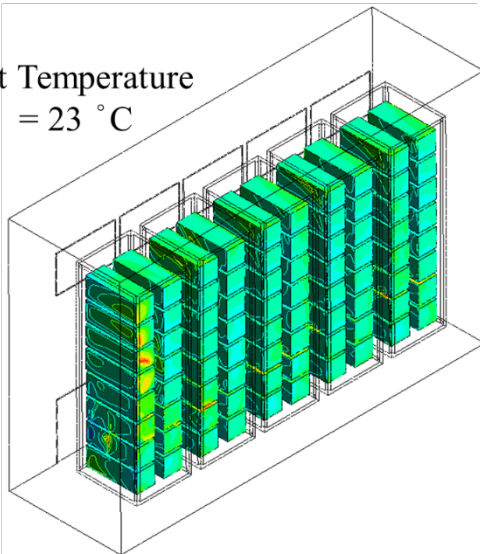


Inlet volume= 5 m<sup>3</sup>/s  
Inlet temperature= 23 °C

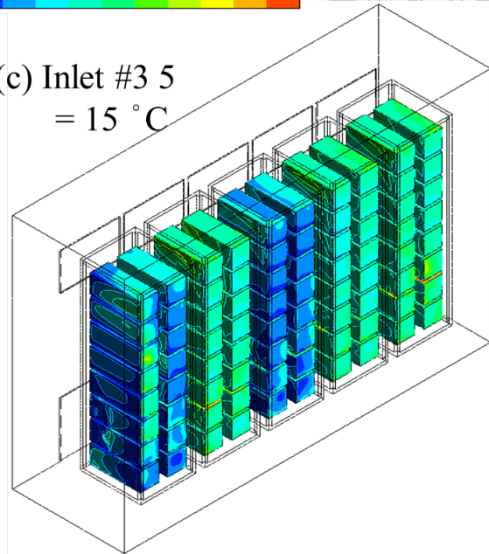
Temperature (°C) 22 57



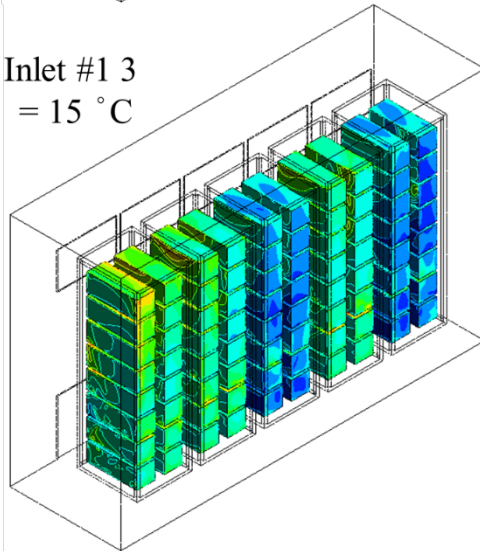
(a) Inlet Temperature = 23 °C



(c) Inlet #3 5 = 15 °C



(b) Inlet #1 3 = 15 °C



(d) Inlet #1 5 = 15 °C

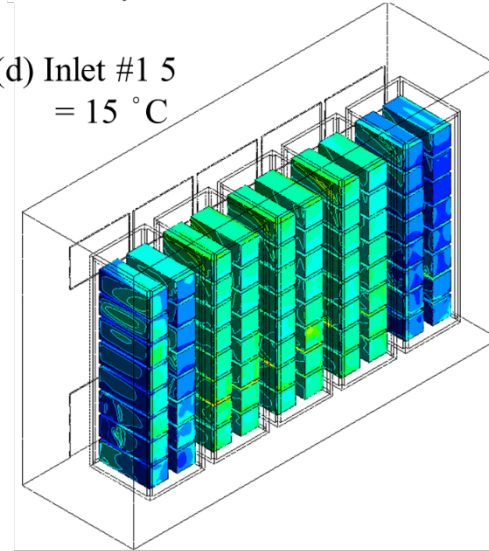


圖 4-42 條件三於均勻進口與複合進口溫度控制的電池模組溫度分布

表 4-8 複合進口溫度控制策略的數據 (a)條件一，(b) 條件二，(c) 條件三

(a) Inlet volume= 7 m <sup>3</sup> /s Inlet temperature= 31 °C	Geometry 均勻進口條件	Inlet #1 #2 溫度= 23 °C	Inlet #2 #5 溫度= 23 °C	Inlet #1 #5 溫度= 23 °C
	T <sub>max</sub> (K)	334.4	332.1	337.5
	T <sub>min</sub> (K)	306.8	298.8	298.8
	ΔT(K)	27.6	33.3	38.7
	T <sub>avg</sub> (K)	312.7	309.5	309.6
	T <sub>max</sub> location	C2 M2	C5 M7	C2 M3
	T <sub>min</sub> location	C2 M3	C1 M3	C1 M3
	Cabinet 2 最高溫度(K)	-	329.8	337.5
	Cabinet 2 改善幅度(K)	-	4.6	-3.1
	(b) Inlet volume= 6 m <sup>3</sup> /s Inlet temperature= 23 °C	Geometry 均勻進口條件	Inlet #1 #3 溫度= 19 °C	Inlet #3 #5 溫度= 19 °C
T <sub>max</sub> (K)		332.4	343.2	331.5
T <sub>min</sub> (K)		303.1	295.2	295.2
ΔT(K)		29.3	48	36.3
T <sub>avg</sub> (K)		309.9	308.4	306.8
T <sub>max</sub> location		C3 M3	C5 M8	C4 M6
T <sub>min</sub> location		C2 M3	C1 M3	C1 M3
Cabinet 3 最高溫度(K)		-	331.1	326.1
Cabinet 3 改善幅度(K)		-	1.3	6.3
(c) Inlet volume= 5 m <sup>3</sup> /s Inlet temperature= 23 °C		Geometry 均勻進口條件	Inlet #1 #3 溫度= 15 °C	Inlet #3 #5 溫度= 15 °C
	T <sub>max</sub> (K)	334.1	339.8	332.3
	T <sub>min</sub> (K)	299.6	291.6	291.7
	ΔT(K)	34.5	48.2	40.6
	T <sub>avg</sub> (K)	307.5	306.1	304.4
	T <sub>max</sub> location	C3 M3	C4 M7	C1 M3
	T <sub>min</sub> location	C2 M3	C3 M3	C5 M1
	Cabinet 3 最高溫度(K)	-	328.2	331.6
	Cabinet 3 改善幅度(K)	-	5.9	2.5

進一步比較此策略與單一進口控制策略於條件一、條件二及條件三下的流場，如圖 4-43 至圖 4-45。條件一及條件三下，單一進口溫度控制策略會產生新的高溫點，比較圖 4-43 及圖 4-45 的(a)、(b)可看出，透過複合進口溫度控制策略可有效降低  $z$  軸向流速，並未產生新的高溫點。由圖 4-44(a)可知，單一進口溫度控制策略於條件二下沒有明顯的  $z$  軸向流速，複合進口溫度控制策略的改善空間有限，於圖 4-44 (b)中  $z$  軸向流速並未顯著降低，此條件下亦沒有新的高溫熱點產生。

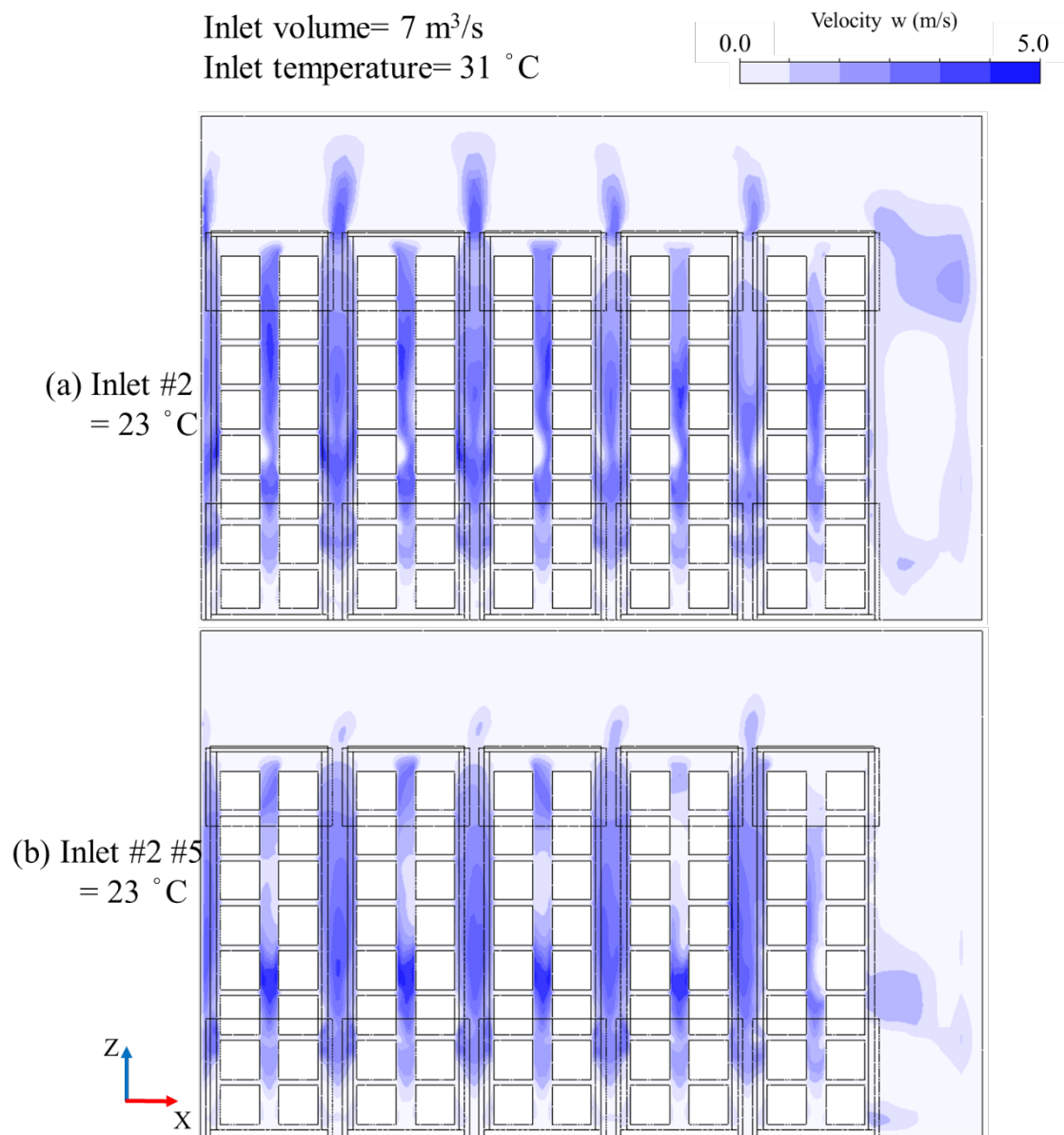


圖 4-43 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件一的流速分布圖

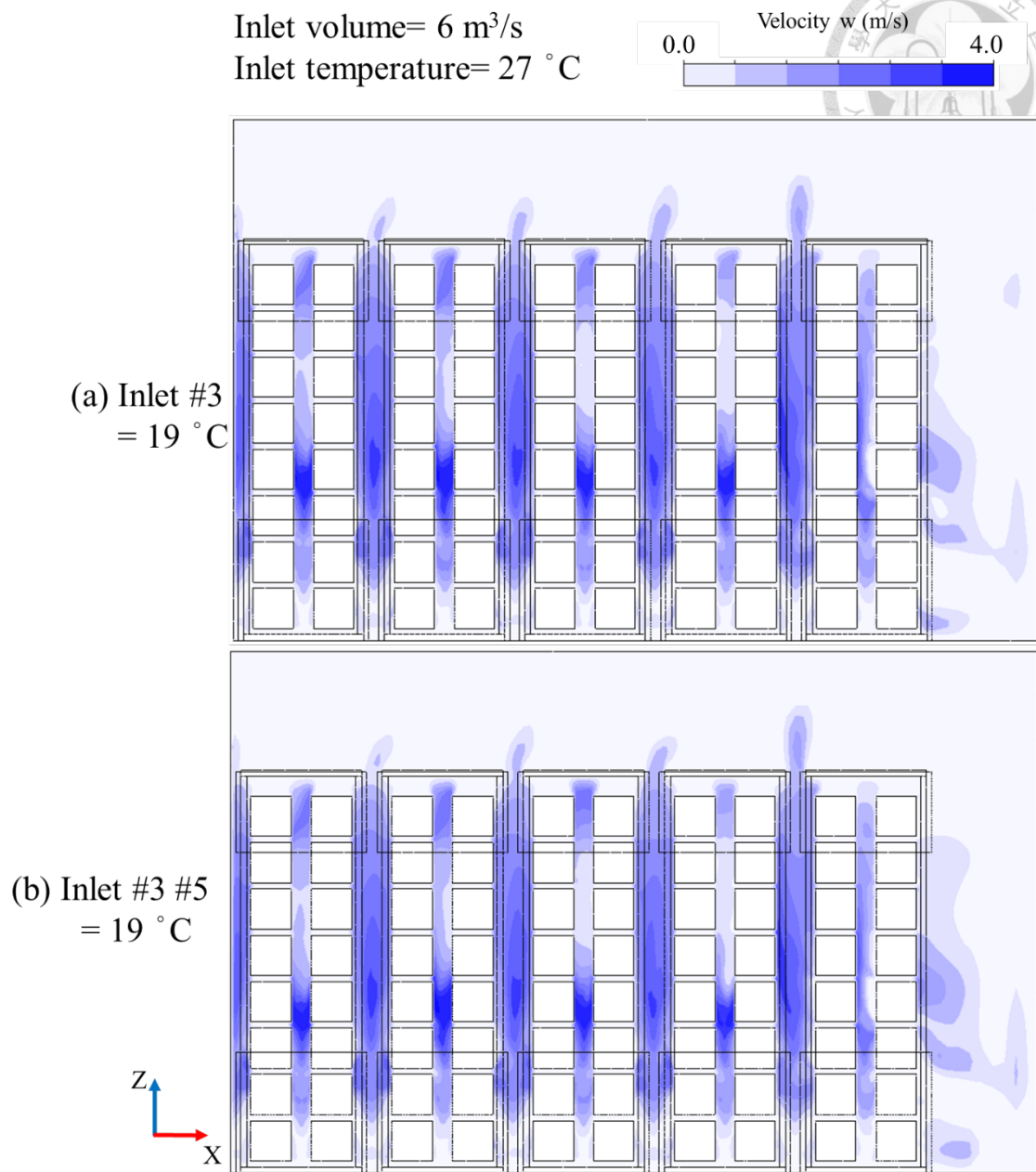


圖 4-44 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件二的流速分布圖



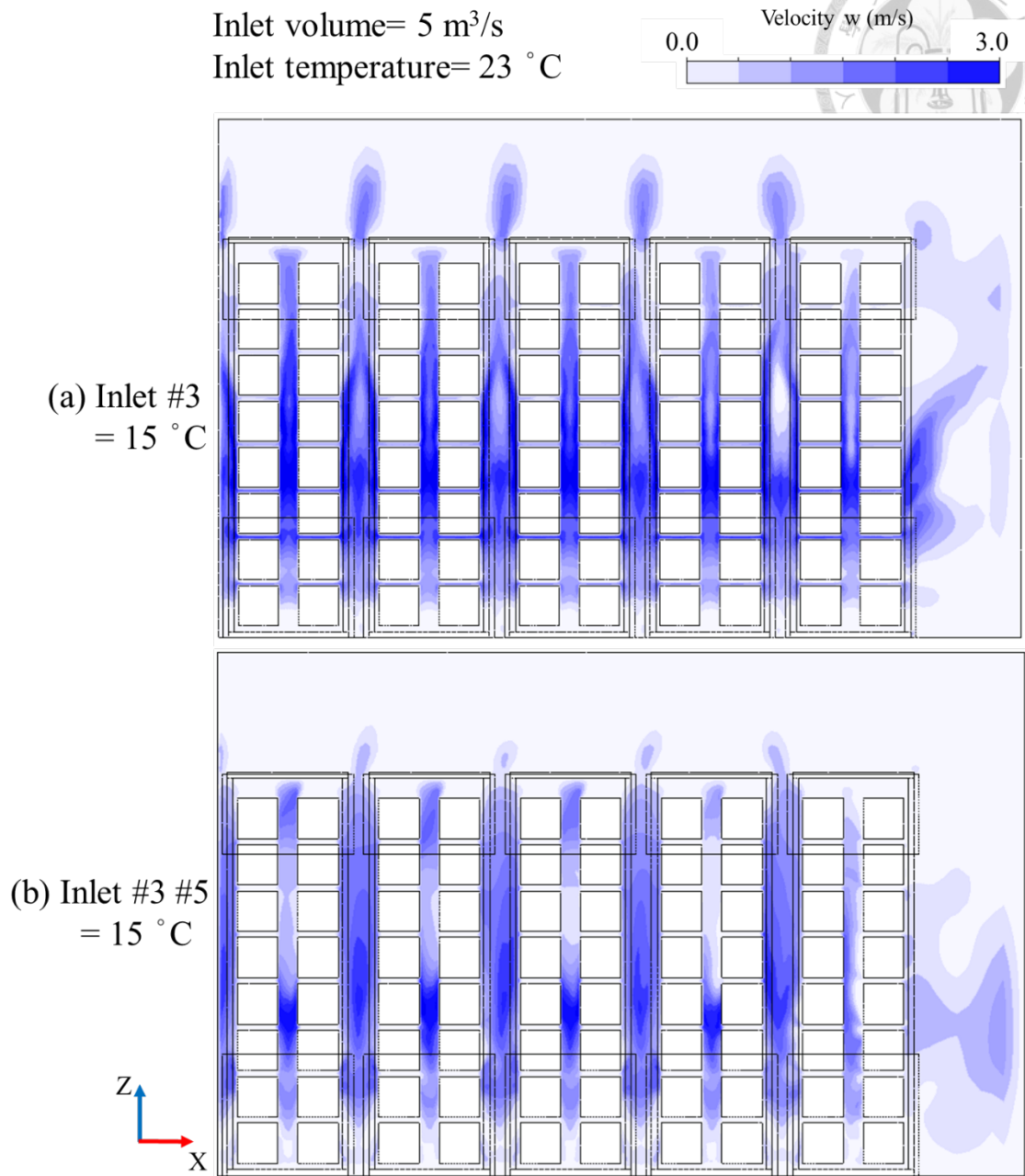


圖 4-45 單一進口控制與 Inlet #5 的複合進口控制於條件三的流速分布圖

於複合進口控制策略下，同時降低最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #1 的進口溫度，於條件二及條件三的情況下，會產生高於均勻設定的策略 5 °C 的新熱點，如表 4-8(b)至(c)，於條件一下則並未產生新熱點，如表 4-8(a)。比較此策略與單一進口控制策略於條件一、條件二及條件三下的流場，流場分布如圖 4-46 至圖 4-48。由圖 4-47(b)及圖 4-48(b)可以看出，於條件二與條件三的情況下，降低最靠近目標

機櫃之進風口及 Inlet #1 的進口溫度，此複合進口控制策略造成  $z$  軸向流速較快，並引發冷空氣旁路，如圖 4-49 的熱點位置周圍。條件一於此複合進口控制策略中，最靠近目標機櫃之進風口為 Inlet #2，與搭配調整的 Inlet #1 相鄰，冷卻流體僅會往單一方向散布，如圖 4-50 的黑色虛線箭頭，冷卻流體橫向移動比  $z$  軸向移動顯著，因此未發生  $z$  軸向流速高並引發冷空氣旁路的情況。

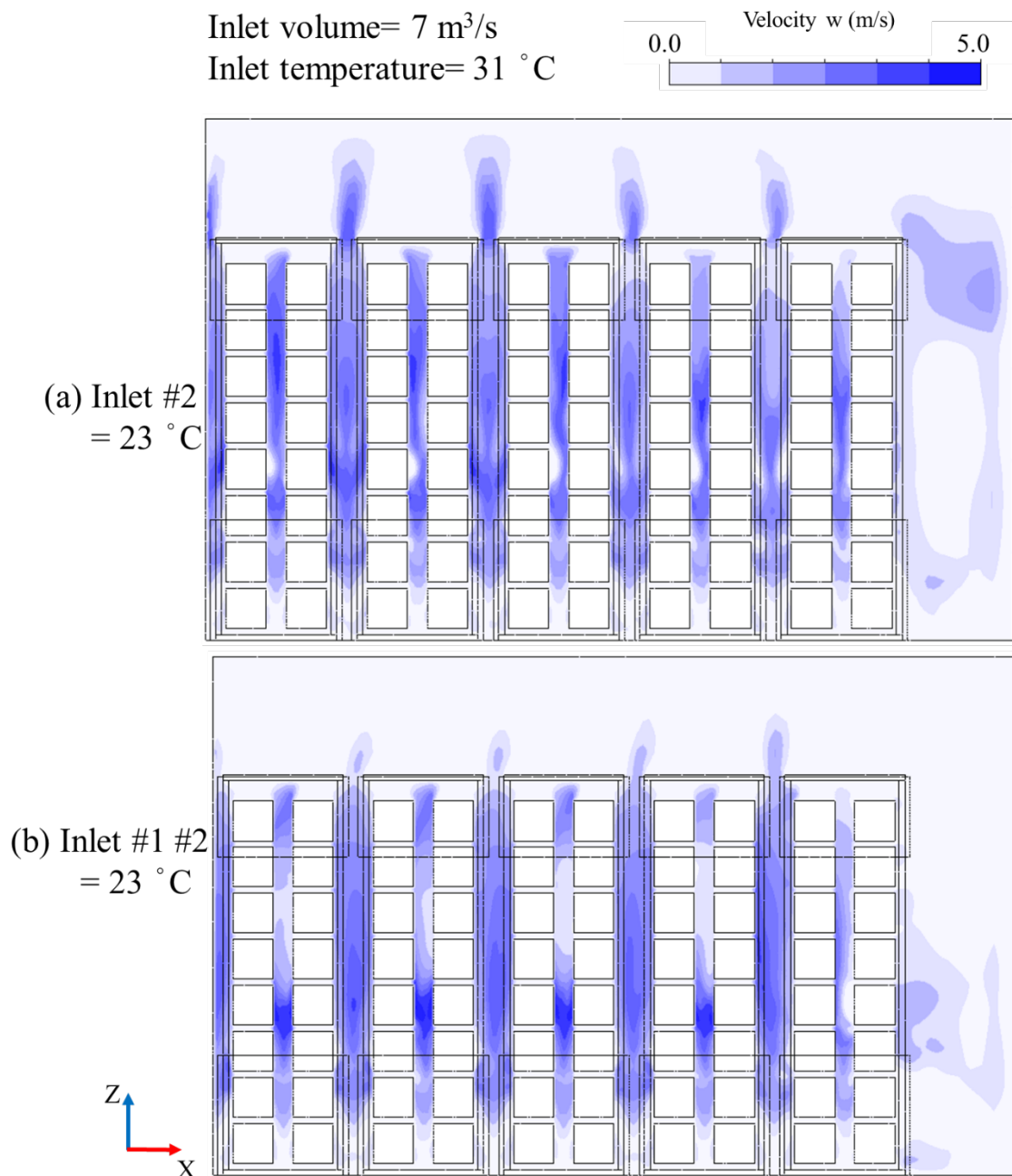


圖 4-46 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件一的流速分布圖

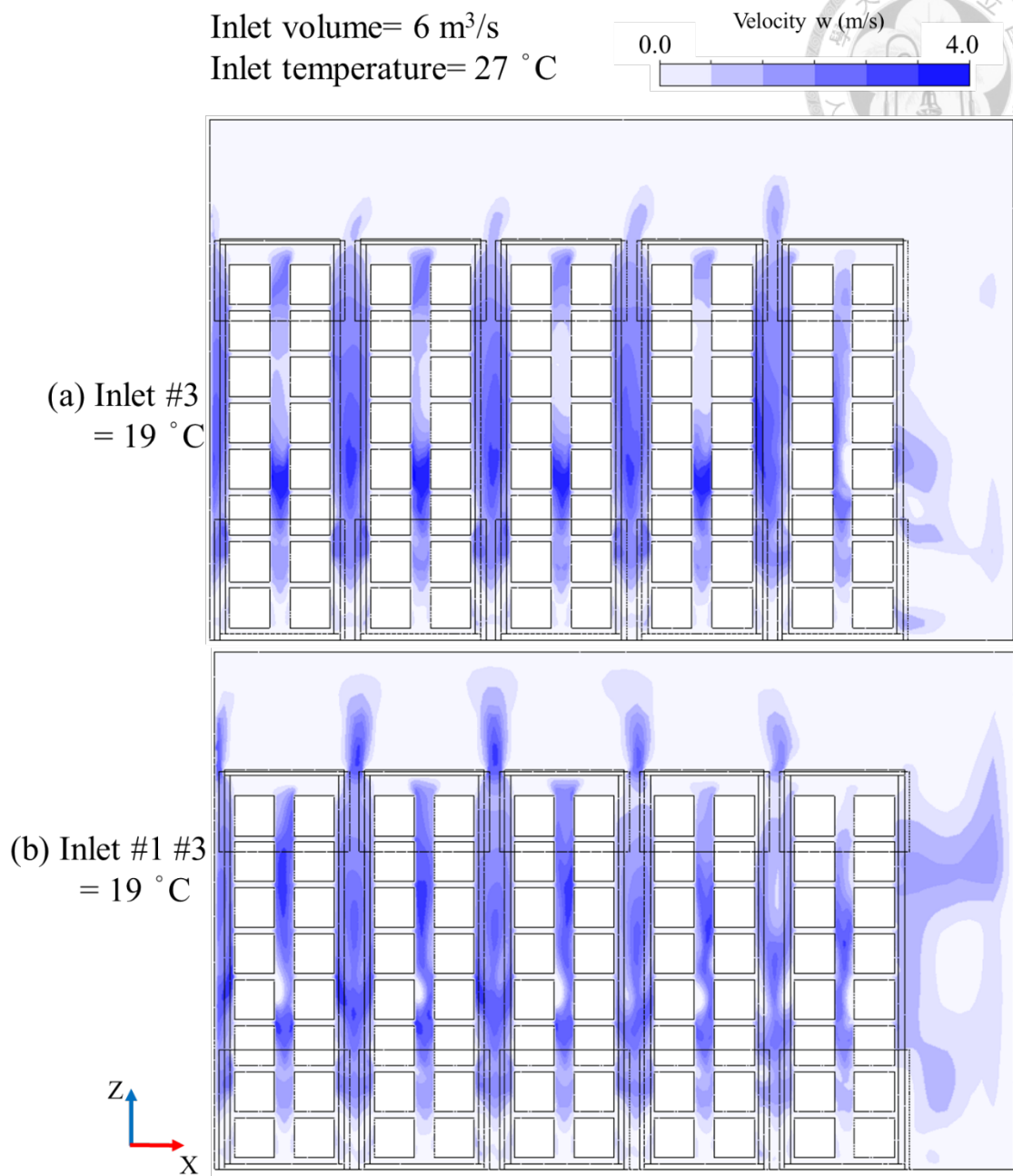


圖 4-47 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件二的流速分布圖

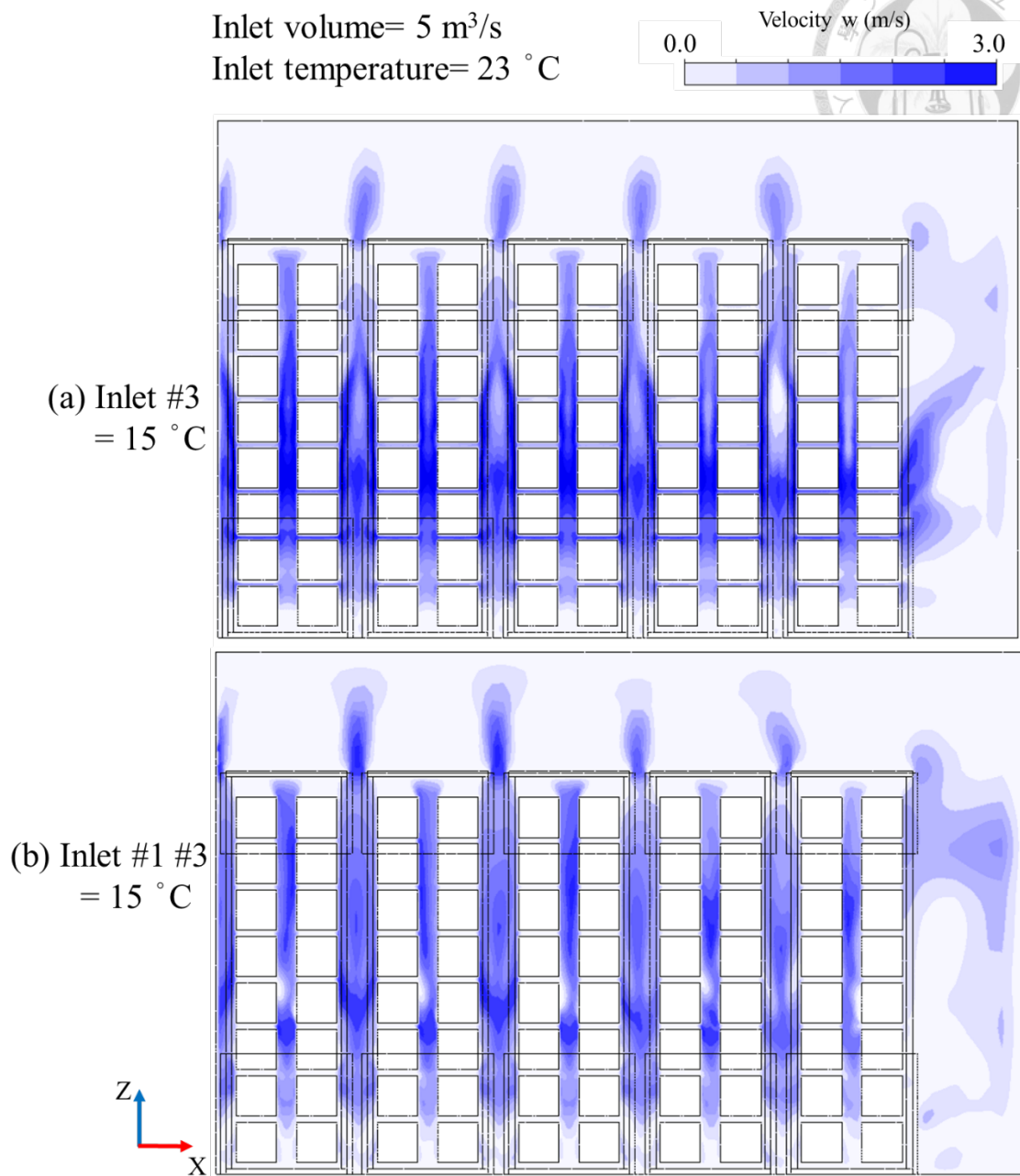


圖 4-48 單一進口控制與 Inlet #1 的複合進口控制於條件三的流速分布圖

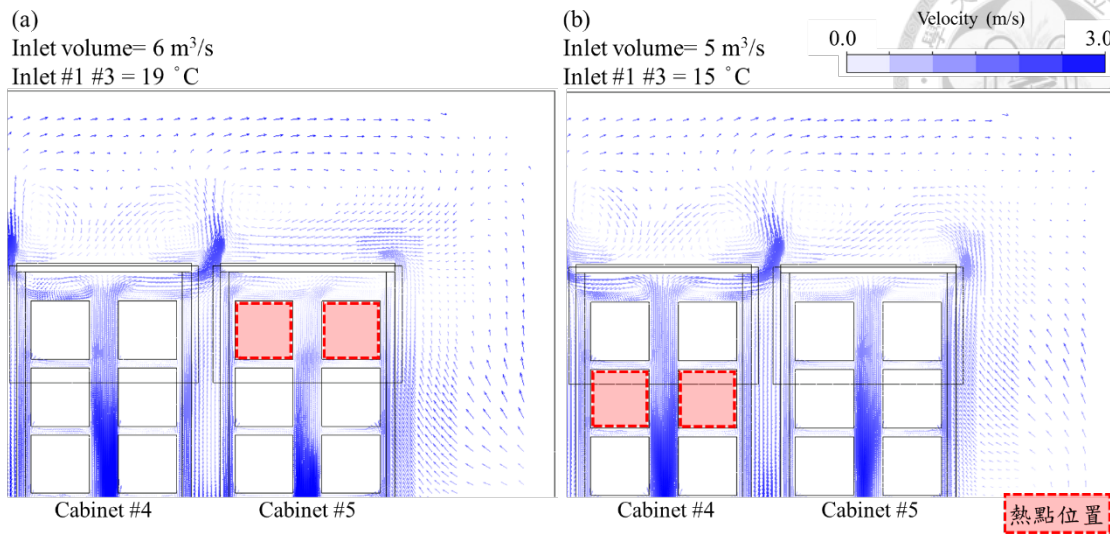


圖 4-49 Inlet #1 的複合進口控制的局部向量圖 (a)條件二，(b)條件三

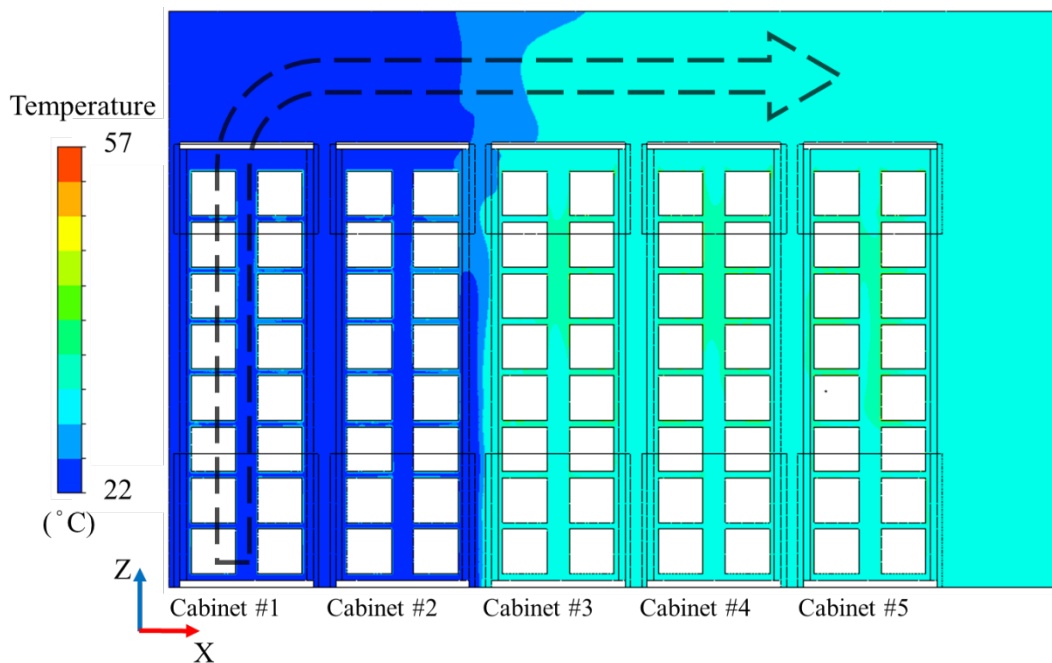


圖 4-50 Inlet #1 的複合進口控制策略於條件一的流體溫度分布

複合進口溫度控制調整的進風口數量增加，相較於均勻設定的情況，對於溫度與流場分布的影響因素亦多，亦透過決策樹協助分析較具影響力的因素，結果如圖 4- 51。於複合進口溫度控制的決策樹中，第一及第二個節點的判別條件為相異的獨立設定的進風口位置搭配，分別為獨立設定進風口為最靠近目標機櫃之進風口與 Inlet #1 及獨立設定進風口為最靠近目標機櫃之進風口與 Inlet #5，表決策樹於

分類過程中將獨立設定的進風口位置為主要影響因素。此結果亦符合前段所述，當相異的獨立設定進風口組合於條件一、條件二及條件三的情況下，其流場呈現相近特徵，如獨立設定進風口為最靠近目標機櫃之進風口與 Inlet #5 時其改善幅度最佳、獨立設定進風口為最靠近目標機櫃之進風口與 Inlet #1 易產生局部熱點。決策樹中的第三個判別條件為獨立設定的進風口溫度，表示條件一、條件二及條件三的溫度差異仍會影響最高溫度，且三個條件間的差異之中，獨立設定的進風口溫度最具影響力。

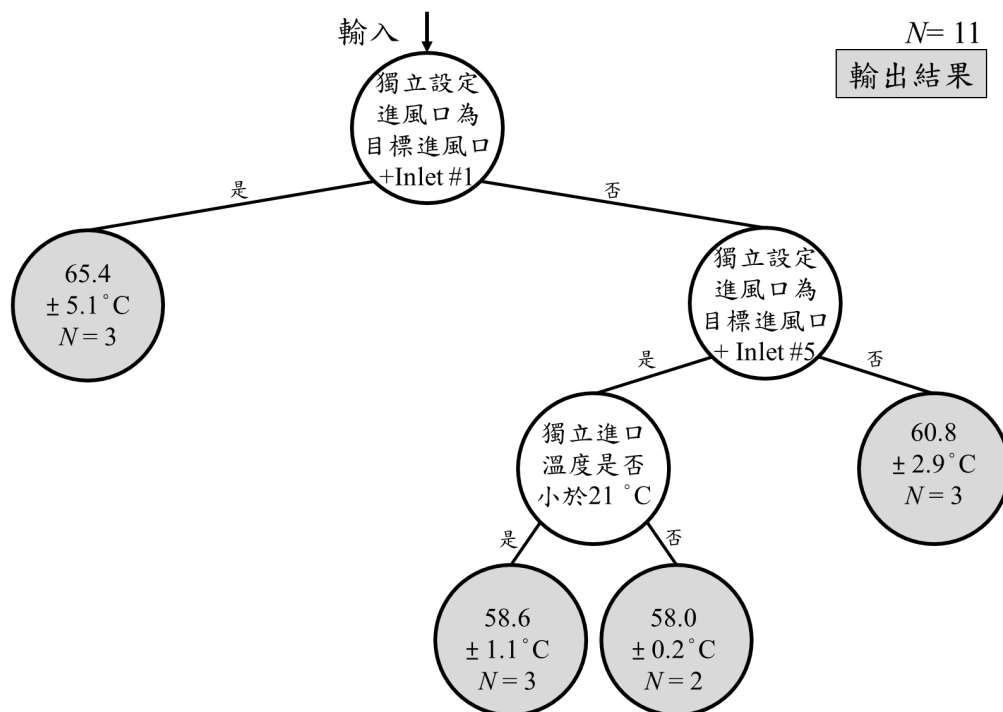


圖 4-51 複合進口溫度控制策略下，依照最高溫度回歸的決策樹

空調與風扇耗能为商業上不可忽略的成本，持續降低進口溫度並且提升進口風量未必為最佳策略，本研究考量大氣溫度 27.88 °C 的情況下計算空調耗能。條件一的進口溫度 31 °C 會造成空調耗能为負值，不符合一般使用情況，條件二於原均匀設定下的最高溫度並未超過電池的安全溫度，沒有非均匀進口控制的必要性，故並未將條件一與條件二納入消耗功率的計算。在條件三下，計算單一進口控制與複合進口控制策略的空調系統耗能與風扇耗能，與均匀進口控制策略進行比較，計

算結果如表 4-9。於條件三的情況下為避免電池模組溫度高於安全溫度，將五個進風口的進口溫度都調低至 15 °C，所需要消耗的功率則增加為 29.6 kW。若採用單一進口溫度控制，只將單一個進口溫度調低至 15 °C，所需要消耗的功率為 14.9 kW，兩者間的差異約為 14.7 kW，省下的消耗功率為 49.7 %。若採用複合進口溫度控制，調低兩個進風口溫度至 15 °C，所需要消耗的功率為 18.6 kW，與均勻條低進口溫度相比可省下 11.0 kW 的消耗功率，即 37.1 %。

表 4-9 進口風量 5 m<sup>3</sup>/s，調整進口溫度的數據比較

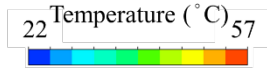
控制策略	均勻進口溫度 = 23 °C	均勻進口溫度 = 15 °C	Inlet #3 溫度= 15 °C	Inlet #3 #5 溫度= 15 °C
T <sub>max</sub> (K)	334.1	329.7	345.3	331.9
T <sub>min</sub> (K)	299.6	291.6	291.7	291.8
ΔT (K)	34.5	38.1	53.6	40.1
T <sub>avg</sub> (K)	307.5	299.6	307.9	304.4
<i>Ind</i>	-0.26	0.62	-2.21	0.16
Cabinet 3 最高溫度(K)	-	-	328.4	319.2
Cabinet 3 改善幅度(K)	-	-	5.7	14.9
Power (kW)	11.3	29.6	14.9	18.6

將單一進口溫度控制與複合進口溫度控制的改善幅度整理如圖 4-52，圖中可看出調低溫度的進風口可以有效的冷卻目標機櫃，目標機櫃中的電池模組溫度明顯較低，降低的幅度為 1.7 %至 4.5 %。條件三下的單一進口溫度控制策略具有負數的 *Ind* 數值，表示此控制策略有高於電池模組安全溫度的熱點與造成電池模組熱失控的風險，且最高溫度相較於均勻進口控制策略更高，使 *Ind* 數值更低，整體策略不佳。複合進口溫度控制成功使最高溫度降低 2.2 °C，即 0.7%，成功使電池模組的最高溫度降至安全溫度內，使 *Ind* 數值由負轉正，降低電池模組熱失控的風險。均勻調低進口溫度的控制策略擁有較高的 *Ind* 數值，但是散熱系統消耗功率高出許多，且複合進口溫度控制的策略成功消除局部熱點，降低電池模組溫度與燃燒



風險，因此本研究判斷適合用於消除局部熱點的進口控制策略為複合進口溫度控制，其中，同時調低最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #5 的進口溫度對目標機櫃改善幅度最大，效果最佳。

Inlet volume= 5 m<sup>3</sup>/s  
Inlet temperature= 23 °C



進口控制策略	均勻進口溫度 = 23 °C	Inlet #3 溫度= 15 °C	Inlet #3 #5 溫度= 15 °C
最高溫度降低 (K)	-	-11.2	2.2
最高溫度降低 (%)	-	- 3.4	0.7
目標機櫃 改善幅度 (K)	-	5.7	14.9
目標機櫃 改善幅度 (%)	-	1.7	4.5
Ind 改善幅度	-	-1.95	0.42
Ind 改善幅度 (%)	-	-750	162

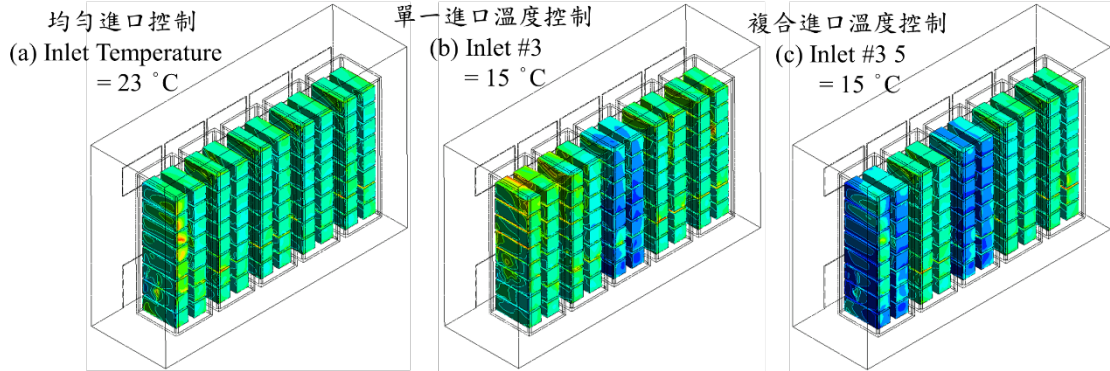


圖 4-52 進口溫度獨立控制策的散熱改善幅度





## 第五章 結論與未來展望

### 5-1 結論

本文透過調整進風口的溫度與風量，建立鋰離子電池儲能系統的進風口控制策略，期應用在已建立的電池儲能貨櫃。在數值模擬部分，使用商用軟體 ANSYS Fluent，計算電池儲能貨櫃中的流場分布以及電池模組表面溫度。本文比較面熱通量與體發熱量兩種設定所計算出的電池溫度分布，結果顯示兩方式計算結果差異皆小於 0.24%，面熱通量與體發熱量的計算時間分別為 5 及 67 小時，故採用設定面熱通量的方式進行電池模組發熱狀況模擬，節省 92.5% 的計算時間。

本文第一部份參考某電子公司的商用電池儲能貨櫃的幾何模型，重新設計電池儲能貨櫃的進出風口配置，使電池模組間的最高溫度降低 46.0 °C，達 12.5%，最大溫差則降低 47.4 °C，達 62.4%。透過本研究提出的評斷參數 *Ind* 比較散熱效果，調整進出風口配置後使評斷參數 *Ind* 由負值提升為正值，表示改善後電池模組未超過安全溫度，大幅降低熱失控的風險。從中選出最高溫度、最大溫差皆最低的 FS-CR 物理模型，將進風口設置於機櫃下方，由天花板處出風，進一步設計進口控制策略。

本文第二部分分析均勻進口條件下，進口溫度與進口風量對電池模組溫度分布的影響力。利用數值模擬計算出 54 組進口條件下，電池模組的最高溫度及最大溫差，透過圖表判斷進口條件對於電池模組溫度分布的影響，並以決策樹演算法進行印證。結果顯示，進口風量對於電池模組的最高溫度以及最大溫差的影響較為明顯，提高進口風量可有效使最高溫度以及最大溫差降低；而進口溫度則對最高溫度的影響較顯著，且圖表與決策樹兩者的結果相符。扣除進口溫度 31 °C 下的 9 組數據，將其餘 45 組進口條件組合下的溫度分布用於支持向量機，進行模型建立，預測於各進口條件下電池模組表面溫度是否超過 60 °C。透過 8 組未用於建立模型的進口條件組合進行驗證，於 8 組驗證的進口條件下皆可正確判斷，預測模型的準



確率達 100 %。

本文第三部份分別調整個別進口的風量與溫度，並引入決策樹演算法協助分析具影響力的因素，快速減少控制策略的變因，建立非均勻的進口控制策略。在進口風量的獨立控制策略部分，提高最靠近目標機櫃的進口風量可降低目標機櫃的最高溫度，然不均勻的進口風量造成整體流速分布不均，使散熱流體無法均勻分布至各電池模組，進而產生冷空氣旁路的情況導致更高溫的熱點。因此本研究判斷進口風量的獨立控制並非理想的非均勻的進口控制策略。

在進口溫度的獨立控制策略包含單一進口溫度控制與複合進口溫度控制。單一進口溫度控制策略可有效降低原熱點的最高溫度至安全溫度內，改善幅度達 4 °C 至 11 °C。單一進口溫度控制策略中，獨立設定的進風口位置並非位於兩側的控制策略導致高溫熱點產生的情況下，電池機櫃上方會有較明顯的 z 軸向流速，進而產生回流區使部份電池模組周圍發生冷空氣旁路。為改善上述情況，本研究提出複合進口溫度控制策略，同時調整兩個進風口的進口溫度以有效降低目標機櫃的溫度，並避免新熱點產生。三種進風口組合中，同時調低最靠近目標機櫃之進風口及 Inlet #5 的進口溫度對目標機櫃改善幅度最大，於進口風量為 7 m<sup>3</sup>/s，進口溫度為 31 °C；進口風量為 6 m<sup>3</sup>/s，進口溫度為 27 °C；進口風量為 5 m<sup>3</sup>/s，進口溫度為 23 °C 下皆未使電池模組的最高溫度超過安全溫度。進一步探討此控制策略功率消耗，於進口風量為 5 m<sup>3</sup>/s，進口溫度為 23 °C 下，與均勻調低進口溫度相比，複合進口控制策略可省下的消耗功率為 37.1 %，本研究認為複合進口溫度控制策略適合用於消除熱點，且散熱系統省下的消耗功率也十分可觀。

本文改善商用的電池儲能系統配置，比較三種進出風口配置，從中找出最佳的物理模型；引入機器學習的演算法分析影響流場的因素，將眾多對流場具影響力的因素退耦，有助於找出影響流場的關鍵並進一步探討。另一項創新為建立電池儲能系統的分散式進口控制策略，調整最靠近目標機櫃的風進口條件，可有效降低目標機櫃的最高溫度，並節省空調系統消耗的功率。



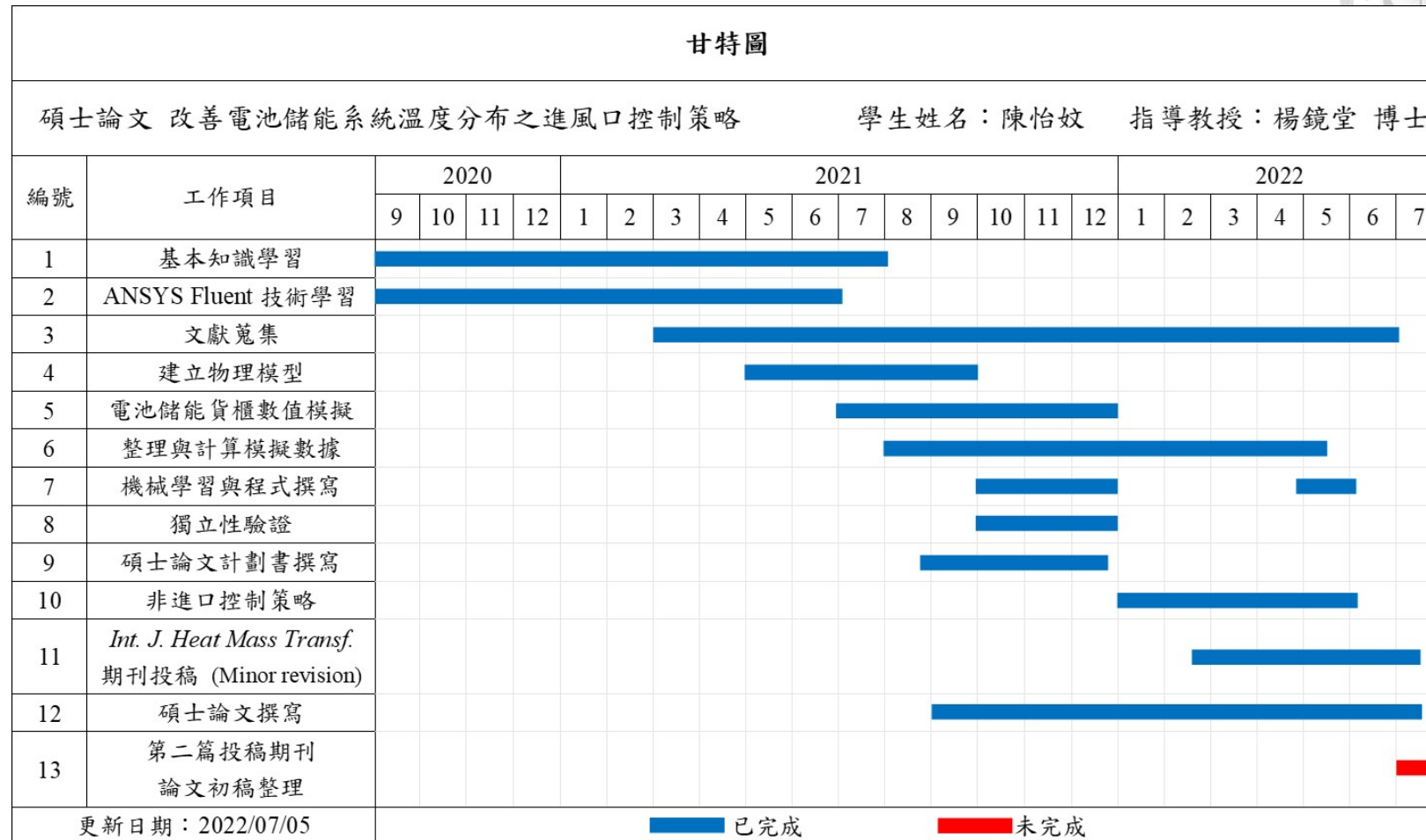
## 5-2 未來展望

本文目前以對電池儲能系統進行初步的配置改良，並且對進口條件的影響力進行探討與驗證，利用數值方法計算出各個進口條件下，電池模組的溫度分布情形。因計算資源有限，目前僅計算出於穩定供氣下的溫度分布，電池模組的溫升與溫降過程未完整計算，未來可以計算此變化過程，對於電池模組的溫度變化進行預測，即可提早選定合適的進口控制策略改善溫度分布與預防火災。

本文提出的評斷參數 *Ind* 亦可在未來拓展至散熱相關領域，如電動車、資料中心等領域，使評斷參數 *Ind* 的應用範圍更加廣泛。



5-3 甘特圖



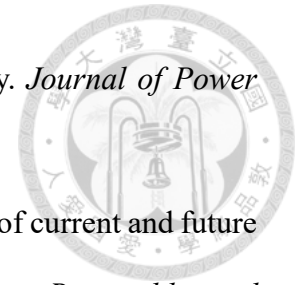


## 參考文獻

- Abdelmaksoud, W. A., Khalifa, H. E., Dang, T. Q., Elhadidi, B., Schmidt, R. R., & Iyengar, M. (2010). Experimental and computational study of perforated floor tile in data centers. *12th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2010*, 1-10.
- Arghode, V. K., Sundaralingam, V., Joshi, Y., & Phelps, W. (2013). Thermal characteristics of open and contained data center cold aisle. *Journal of Heat Transfer*, 135(6).
- Batteries Committee of the IEEE Power, S., & Society, E. (2014). IEEE recommended practice for installation design and installation of valve-regulated lead-acid batteries for stationary applications, *Stationary Batteries Committee IEEE Power and Energy Society*.
- Batteries Committee of the IEEE Power, S., & Society, E. (2011). IEEE recommended practice for maintenance, testing, and replacement of vented lead-acid batteries for stationary applications, *Stationary Batteries Committee IEEE Power & Energy Society*.
- Cao, W., Qiu, Y., Peng, P., & Jiang, F. (2021). A full-scale electrical-thermal-fluidic coupling model for li-ion battery energy storage systems. *Applied Thermal Engineering*, 185, 116360.
- Chen, F., Huang, R., Wang, C., Yu, X., Liu, H., Wu, Q., Qian, K., & Bhagat, R. (2020). Air and PCM cooling for battery thermal management considering battery cycle life. *Applied Thermal Engineering*, 173, 115154.
- Chen, K., Wang, S., Song, M., & Chen, L. (2017). Configuration optimization of battery pack in parallel air-cooled battery thermal management system using an



- optimization strategy. *Applied Thermal Engineering*, 123, 177–186.
- Chen, Z., Yang, S., Pan, M., & Xu, J. (2022). Experimental investigation on thermal management of lithium-ion battery with roll bond liquid cooling plate. *Applied Thermal Engineering*, 206, 118106.
- Cho, J., Lim, T., & Kim, B. S. (2009). Measurements and predictions of the air distribution systems in high compute density (Internet) data centers. *Energy and Buildings*, 41(10), 1107–1115.
- Daniel H. Doughty, & E. Peter Roth (2012) A general discussion of li-ion battery safety. *Electrochem. Soc. Interface*, 21(37).
- D'Arco, S., & Suul, J. A. (2014). Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 394–395.
- Energy Information Administration, U. (2021). *Battery Storage in the United States: An update on market trends*.
- EPCOR Utilities Inc. (n.d.) *Creating a Smart Grid System* Retrieved March 29, 2022, from <https://www.epcor.com/products-services/infrastructure/construction-projects/el-smith-solar-farm/Pages/creating-a-smart-grid-system.aspx>.
- Feng, X., Fang, M., He, X., Ouyang, M., Lu, L., Wang, H., & Zhang, M. (2014). Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry. *Journal of Power Sources*, 255, 294–301.
- Feng, X., Xu, C., He, X., Wang, L., Zhang, G., & Ouyang, M. (2018). Mechanisms for the evolution of cell variations within a  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ /graphite lithium-ion battery pack caused by temperature non-uniformity. *Journal of Cleaner Production*, 205, 447–462.
- Forgez, C., Vinh Do, D., Friedrich, G., Morcrette, M., & Delacourt, C. (2010). Thermal

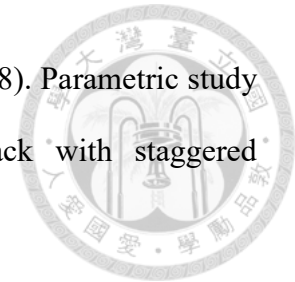


- modeling of a cylindrical LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2961–2968.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1513–1522.
- Hong, S., Zhang, X., Chen, K., & Wang, S. (2018). Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1204–1212.
- Hosseini-rad, E., & Khoshvaght-Aliabadi, M. (2021). Proximity effects of straight and wavy fins and their interruptions on performance of heat sinks utilized in battery thermal management. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 173, 121259.
- Huang, Q., Yan, M., & Jiang, Z. (2006). Thermal study on single electrodes in lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 156(2), 541–546.
- Hu, X., Jiang, H., Feng, F., & Liu, B. (2020). An enhanced multi-state estimation hierarchy for advanced lithium-ion battery management. *Applied Energy*, 257, 114019.
- Hu, Z., He, X., Restuccia, F., Yuan, H., & Rein, G. (2021). Numerical study of scale effects on self-heating ignition of lithium-ion batteries stored in boxes, shelves and racks. *Applied Thermal Engineering*, 190, 116780.
- Khalili, S., Tradat, M. I., Nemati, K., Seymour, M., & Sammakia, B. (2018). Impact of Tile Design on the Thermal Performance of Open and Enclosed Aisles. *Journal of Electronic Packaging*, 140(1).
- Kokam Co., Ltd. (n.d.) *Completely Integrated Battery Solution* Retrieved March 29, 2022, from [https://irp.cdn-ebsite.com/fb2dee65/files/uploaded/ess\\_solution\\_brochure.pdf](https://irp.cdn-ebsite.com/fb2dee65/files/uploaded/ess_solution_brochure.pdf).
- Larson A. (2015). *Duke Energy Adds More Battery-Based Energy Storage Capacity*.

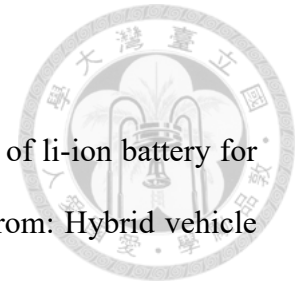


- Retrieved from <https://www.powermag.com/duke-energy-adds-more-battery-based-energy-storage-capacity/>.
- Łebkowski, A. (2017). Electric vehicle fire extinguishing system. *Przegląd Elektrotechniczny*, 93(1), 329–332.
- Leng, F., Tan, C. M., & Pecht, M. (2015). Effect of temperature on the aging rate of li-ion battery operating above room temperature. *Scientific Reports*, 5, 12967.
- Liao, J. T., Chuang, Y. S., Yang, H. T., & Tsai, M. S. (2018). BESS-sizing optimization for solar PV system integration in distribution grid. *IFAC-PapersOnLine*, 51(28), 85–90.
- Li, F., Wei, Z., Manthiram, A., Feng, Y., Ma, J., & Mai, L. (2019). Sodium-based batteries: from critical materials to battery systems. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(16), 9406–9431.
- Liu, G., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Han, X. (2014). Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 116(2), 1001–1010.
- Liu, H., Wei, Z., He, W., & Zhao, J. (2017). Thermal issues about li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 150, 304–330.
- Liu, K., Li, K., Peng, Q., & Zhang, C. (2019). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 47–64.
- Li, X. (2019). A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(5), 1–15.



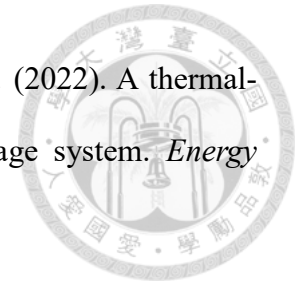


- Lu, Z., Yu, X., Wei, L., Qiu, Y., Zhang, L., Meng, X., & Jin, L. (2018). Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement. *Applied Thermal Engineering*, 136, 28–40.
- Mandal, S., Thangarasu, S., Thong, P. T., Kim, S. C., Shim, J. Y., & Jung, H. Y. (2021). Positive electrode active material development opportunities through carbon addition in the lead-acid batteries: A recent progress. *Journal of Power Sources*, 485, 229336.
- Marcus, M., Alexander, Z., Stephan, R., Schuster, S. F., Christian, C., Holger, H., Rolf, W., Markus, L., & Andreas, J. (2015). Evaluation of the aging behaviour of stationary lithium-ion battery storage systems for different photovoltaic-driven applications in low voltage grids, *30st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 10, 13140.
- May, G. J., Davidson, A., & Monahov, B. (2018). Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, 15, 145–157.
- Moghaddam, I. N., Chowdhury, B. H., & Mohajeryami, S. (2018). Predictive operation and optimal sizing of battery energy storage with high wind energy penetration. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(8), 6686–6695.
- Nada, S. A., & Said, M. A. (2017). Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers. *International Journal of Thermal Sciences*, 122, 302–312.
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative review of electrical energy storage systems for better sustainability, *Journal of Power Technologies*, 97 (3), 220-245.
- Olabi, A. G., Onumaegbu, C., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A., & al – Alami, A. H. (2021). Critical review of energy storage systems. *Energy*, 214,



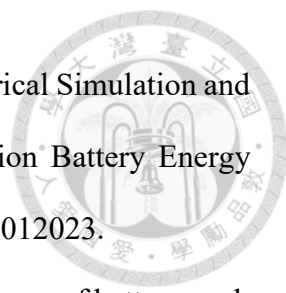
118987.

- Park, C., Jaura, A. K., & Mesa, C. (2003). Dynamic thermal model of li-ion battery for predictive behavior in hybrid and fuel cell vehicles reprinted from: Hybrid vehicle and energy storage technologies, *SAE Technical Paper*, 1, 2286.
- Perrin, M., Saint-Drenan, Y. M., Mattera, F., & Malbranche, P. (2005). Lead-acid batteries in stationary applications: Competitors and new markets for large penetration of renewable energies. *Journal of Power Sources*, 144(2), 402–410.
- Pesaran, A. A. (2001). Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and solutions, *Battery Man*, 43(5), 34-49.
- Qin, P., Liao, M., Mei, W., Sun, J., & Wang, Q. (2021). The experimental and numerical investigation on a hybrid battery thermal management system based on forced-air convection and internal finned structure. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117212.
- Robinson, J. B., Darr, J. A., Eastwood, D. S., Hinds, G., Lee, P. D., Shearing, P. R., Taiwo, O. O., & Brett, D. J. L. (2014). Non-uniform temperature distribution in li-ion batteries during discharge -A combined thermal imaging, X-ray micro-tomography and electrochemical impedance approach. *Journal of Power Sources*, 252, 51–57.
- Rokach, L., & Maimon, O. (2005). Decision trees. In: Maimon O., Rokach L. (eds) *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Springer, Boston, MA,165–192.
- Saw, L. H., Ye, Y., Yew, M. C., Chong, W. T., Yew, M. K., & Ng, T. C. (2017). Computational fluid dynamics simulation on open cell aluminium foams for Li-ion battery cooling system. *Applied Energy*, 204, 1489–1499.
- Schimpe, M., Naumann, M., Truong, N., Hesse, H. C., Santhanagopalan, S., Saxon, A., & Jossen, A. (2018). Energy efficiency evaluation of a stationary lithium-ion battery container storage system via electro-thermal modeling and detailed component analysis. *Applied Energy*, 210, 211–229.



- Shi, H., Xu, W., Zhu, X., Wang, J., Yang, K., Zou, Y., & Chen, Z. (2022). A thermal-optimal design of lithium-ion battery for the container storage system. *Energy Science and Engineering*, *10*(3), 951–961.
- Shukla, A. K., Venugopalan, S., & Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries, *Journal of Power Sources*, *100*, 125–148.
- Skyllas-Kazacos, M., Chakrabarti, M. H., Hajimolana, S. A., Mjalli, F. S., & Saleem, M. (2011). Progress in flow battery research and development. *Journal of The Electrochemical Society*, *158*(8), 3599565.
- Squalli, J. (2017). Renewable energy, coal as a baseload power source, and greenhouse gas emissions: Evidence from U.S. state-level data. *Energy*, *127*, 479–488.
- Seymour, M. (2015). Aisle containment-just how important is it to worry about by-pass and leakage paths?. *ASHRAE Transactions*, *121*, 1J.
- Tao, F., Zhang, W., Guo, D., Cao, W., Sun, L., & Jiang, F. (2020). Thermofluidic modeling and temperature monitoring of li-ion battery energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, *181*, 116026.
- Tatchell-Evans, M., Kapur, N., Summers, J., Thompson, H., & Oldham, D. (2017). An experimental and theoretical investigation of the extent of bypass air within data centres employing aisle containment, and its impact on power consumption. *Applied Energy*, *186*, 457–469.
- Thomas, K. E., & Newman, J. (2003). Thermal modeling of porous insertion electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, *150*(2), 1531194.
- Thomas, E. v., Case, H. L., Doughty, D. H., Jungst, R. G., Nagasubramanian, G., & Roth, E. P. (2003). Accelerated power degradation of li-ion cells. *Journal of Power Sources*, *124*(1), 254–260.
- Wang, H., Kumar, A., Simunovic, S., Allu, S., Kalnaus, S., Turner, J. A., Helmers, J. C.,

- Rules, E. T., Winchester, C. S., & Gorney, P. (2017). Progressive mechanical indentation of large-format li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 341, 156–164.
- Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131.
- Wang, X., Gao, W., Wang, J., Yan, S., Wu, Z., Yan, W., Gevorgian, V., Muljadi, E., Kang, M., Hwang, M., & Kang, Y. C. (2016). Inertial response of wind power plants: A comparison of frequency-based inertial control and stepwise inertial control. *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, 1-6.
- Wang, Z., Ma, J., & Zhang, L. (2017). Finite element thermal model and simulation for a cylindrical li-ion battery. *IEEE Access*, 5, 15372–15379.
- Wan, J., Gui, X., Kasahara, S., Zhang, Y., & Zhang, R. (2018). Air Flow Measurement and Management for Improving Cooling and Energy Efficiency in Raised-Floor Data Centers: A Survey. *IEEE Access*, 6, 48867–48901.
- Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51–59.
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. *Energy Conversion and Management*, 182, 262–281.
- Xia, G., Cao, L., & Bi, G. (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of Power Sources*, 367, 90–105.
- Xinlong, Z., Shi, H., Wenbing, X., Jiashuang, P., Tong, Z., & Yansong, W. (2022). An improved air supply scheme for battery energy storage systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 70(2).

- 
- Xu, S., Wan, T., Zha, F., He, Z., Huang, H., & Zhou, T. (2022). Numerical Simulation and Optimal Design of Air Cooling Heat Dissipation of Lithium-ion Battery Energy Storage Cabin. *Journal of Physics: Conference Series*, 2166(1), 012023.
- Xu, X. M., & He, R. (2013). Research on the heat dissipation performance of battery pack based on forced air cooling. *Journal of Power Sources*, 240, 33–41.
- Yang, N., Zhang, X., Li, G., & Hua, D. (2015). Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*, 80, 55–65.
- Ye, J., Chen, H., Wang, Q., Huang, P., Sun, J., & Lo, S. (2016). Thermal behavior and failure mechanism of lithium ion cells during overcharge under adiabatic conditions. *Applied Energy*, 182, 464–474.
- Zhang, J., Wu, X., Chen, K., Zhou, D., & Song, M. (2021). Experimental and numerical studies on an efficient transient heat transfer model for air-cooled battery thermal management systems. *Journal of Power Sources*, 490, 229539.
- Zhao, R., Liu, J., & Gu, J. (2016). Simulation and experimental study on lithium ion battery short circuit. *Applied Energy*, 173, 29–39.