

東 海 大 學

工業工程與經營資訊學系

碩士論文

奈米碳管紙致動器製程最佳化之
離子液體效應分析

研 究 生：楊佳蕙
指 導 教 授：陳怡文 博士
 陳以文 博士

中 華 民 國 一 〇 四 年 六 月

Optimal Manufacturing of Buckypaper Actuator and Analyzing Effect of Ionic Liquid

By
Chia-Hui Yang

Advisors : Dr. Yi-Wen, Chen
Dr. I-Wen, Chen

A Thesis
Submitted to the Institute of Industrial Engineering and Enterprise
Information at Tunghai University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
in
Industrial Engineering and Enterprise Information

June 2015
Taichung , Taiwan

奈米碳管紙致動器製程最佳化之離子液體效應分析

學生：楊佳蕙

指導教授：陳怡文 博士

陳以文 博士

東海大學工業工程與經營資訊學系

摘 要

奈米碳管紙致動器 (Buckypaper actuator; BP actuator) 比起其他材料的致動器 (Actuator)，較適合用來應用於仿生機械系統上，且已經有許多團隊及學者針對其做研究及開發，而本研究的研究目的是於增加奈米碳管紙致動器之性能，以往的研究都是針對奈米碳管紙的種類或是分析奈米碳管紙致動器的製程參數，期望能增加其性能，而分析過去學者的研究，發現其材料之一：離子液體 (Ionic liquid; IL)，對奈米碳管紙致動器有極大的影響，因此，本研究分析四種不同離子液體製成奈米碳管紙致動器其性能的差異，並提出最適合製成奈米碳管紙致動器之離子液體。以此能製作出性能佳之致動器，擁有高度潛能應用於機器人或是微機電控制系統 (Micro Electro Mechanical Systems; MEMS)。在本研究中，首先先自製單壁奈米碳管 (SWCNT)：多壁奈米碳管 (MWCNT) = 9：4 之奈米碳管紙 (Buckypaper; BP)，本研究提出一製作奈米碳管紙製程，成功得到相當性能之奈米碳管紙，然後再使用自製奈米碳管紙製作奈米碳管紙致動器，並量測其輸出力及位移，從量測數據中分析四種不同的離子液體其離子種類及離子大小對於奈米碳管紙致動器性能的影響，發現離子體積較小的離子液體能得到較好的輸出力及位移，擁有陽離子 EMI^+ 和陰離子 SCN^- 的離子液體所製成之奈米碳管紙致動器能得到較大的輸出力，擁有陽離子 EMI^+ 和陰離子 Otf^- 的離子液體製成之奈米碳管紙致動器位移較佳。

關鍵字詞：單壁奈米碳管、多壁奈米碳管、奈米碳管紙、致動器、離子液體

Optimal Manufacturing of Buckypaper Actuator and Analyzing Effect of Ionic Liquid

Student : Chia-hui, Yang

Advisors : Dr. Yi-Wen, Chen
Dr. I-Wen, Chen

Department of Industrial Engineering and Enterprise Information
Tunghai University

ABSTRACT

The Buckypaper actuator (BP actuator) was more appropriate to be applied in biomimetic system than other actuators. Many researchers had demonstrated the performance of it. The goal of our research is to increase the performance of BP actuator. The previous research increased the performance of BP actuator by analyzing different types of BP or the manufacturing parameters. The ionic liquid (IL) also had a strong influence on BP actuator through the past researches. Thus, our research analyze the performance of BP actuator based on four different IL, and propose an optimal IL to manufacture BP actuator with better performance. It has a high potential to applicate in robot or micro electro mechanical systems. First, our research manufacture Buckypaper (BP) with SWCNT-to- MWCNT ratio at nine to four, and propose a process of manufacturing BP. It also has a high performance. The BP actuator is made of the Buckypaper(BP)which our team manufacture. After that, our research analyze the influence of ionic types and ionic volumes about four IL by measuring the force and the displacement. Our research find the smaller volumes of ion has a better force and displacement. The BP actuator with cation EMI^+ and anion SCN^- has a bigger force, and the Buckypaper actuator with cation EMI^+ and anion Otf^- has a better displacement. According to these result, our research find an optimal IL to manufacture BP actuator.

Keywords : Single-wall Carbon Nanotube, Multi-wall Carbon Nanotube, Buckypaper, Actuator, Ionic Liquid.

誌謝

首先，要感謝指導教授陳怡文及陳以文博士，在學生求學的這兩年，能夠孜孜不倦的指導著我；即使面對沒有任何奈米材料基礎的我，也能夠耐心且細心的指導我相關且正確的資訊，非常感謝老師兩年來的照顧及呵護。

再來，感謝在佛羅里達州立大學就讀的楊明佳準博士，感謝妳辛勤的指導我如何製作 Buckypaper，並嘗試為我解決任何我遇到的困難，沒有妳就沒有今天這篇論文，真的非常謝謝妳，希望今年能夠聽到妳順利成為博士的消息。

最後要感謝的是我研究室的夥伴們，游忠軒以及蔡政憲，從當初剛進研究室完全不認識的樣子，到現在有默契到令我想吐模樣，兩年的點點滴滴都深刻的印在我的腦海中，不論是在課業上、玩樂上甚至是在生活上，兩年的緊密相連讓我捨不得與你們分開（場面話?），希望我們都能夠有很好的未來，祝你們前程似錦。

最後的最後，謝謝 Auto 這個大家庭，大家曲曲折折吵吵鬧鬧的過了兩年，很開心大家都成功的成為學者，謝謝你們這兩年的容忍以及照顧，我受益良多，不只是在學術上，在日常生活中也受到大家許多幫助，祝福大家鵬程萬里；最後的最後的最後，謝謝雯晴和以澤，有時候姐姐有點嚴厲也是希望你們能夠有更好的表現，謝謝你們忍受姐許多無理的要求和行為，也謝謝你們像小幫手般的在我們身旁，未來要繼續加油，朝學者之路邁進喔！

再次謝謝幫助我完成這篇論文的所有人，帶著感謝你們的心，繼續往人生的下個階段邁進。最後，將所有的成果獻給我最愛的爸媽。

楊佳蕙 謹誌於
東海大學工業工程與經營資訊研究所
中華民國一百零四年八月

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	v
圖目錄.....	vi
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	2
1.3 研究目的.....	3
1.4 研究架構.....	4
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 EAP 致動器的分類與發展.....	5
2.2 EAP 致動器—三明治結構 (Sandwich structure)	9
2.3 EAP 致動器—離子液體 (Ionic Liquid; IL)	10
2.4 離子液體對三明治結構的離子式 EAP 致動器的影響.....	11
第三章 研究方法.....	13
3.1 實驗材料與儀器.....	13
3.2 實驗流程.....	28
3.3 分析流程.....	38
第四章 實驗結果與數據分析.....	40
4.1 奈米碳管紙結果分析.....	40
4.2 奈米碳管紙致動器結果分析.....	42
4.3 小結.....	52
第五章 結論與建議.....	53
5.1 結論.....	53
5.2 未來課題.....	53
參考文獻.....	55

表目錄

表 3.1 本研究使用之單壁奈米碳管	13
表 3.2 本研究使用之多壁奈米碳管	14
表 3.3 本研究使用之分散劑	15
表 3.4 不同比例的奈米碳管紙製成奈米碳管紙致動器	16
表 3.5 本研究使用之質子交換膜	17
表 3.6 本研究使用之離子液體	20
表 3.7 過濾平台	21
表 3.8 真空烘箱	21
表 3.9 熱壓成型機	22
表 3.10 超音波破碎機	23
表 3.11 雷射位移計.....	24
表 3.12 荷重計	25
表 3.13 函數波形產生器	26
表 4.1 奈米碳管紙性能	40
表 4.2 輸出力量測值（重複三次實驗）	45
表 4.3 位移量測值（重複三次實驗）	47
表 4.4 離子液體與輸出力分析結果- A 組	48
表 4.5 離子液體與輸出力分析結果- B 組	50

圖目錄

圖 1.1 仿生機械系統.....	2
圖 1.2 致動器.....	3
圖 2.1 電子式與離子式的分類.....	6
圖 2.2 電子式 EAP 致動器—介電彈性體.....	6
圖 2.3 離子式 EAP 致動器.....	7
圖 2.4 三明治結構.....	10
圖 2.5 離子式 EAP 致動器致動原理.....	11
圖 2.6 離子液體的重要性.....	12
圖 3.1 單壁奈米碳管.....	14
圖 3.2 多壁奈米碳管.....	15
圖 3.3 Triton X-100 化學結構式.....	16
圖 3.4 奈米碳管紙.....	17
圖 3.5 質子交換膜結構式.....	17
圖 3.6 離子液體.....	19
圖 3.7 過濾平台.....	21
圖 3.8 真空烘箱.....	22
圖 3.9 熱壓成型機.....	23
圖 3.10 超音波破碎機.....	24
圖 3.11 雷射位移計.....	25
圖 3.12 荷重計.....	26
圖 3.13 函數波形產生器.....	27
圖 3.14a 實驗流程.....	28
圖 3.14b 實驗流程.....	29
圖 3.15 奈米碳管懸浮液.....	30
圖 3.16 濾紙剝除情形.....	31
圖 3.17 Nafion 捲曲.....	32
圖 3.18 奈米碳管紙致動器.....	32
圖 3.19a 奈米碳管紙實驗流程.....	34
圖 3.19b 奈米碳管紙實驗流程.....	35
圖 3.20a 奈米碳管紙致動器實驗流程.....	36
圖 3.20b 奈米碳管紙致動器實驗流程.....	37

圖 3.21 研究分析流程.....	38
圖 4.1 自製之奈米碳管紙.....	41
圖 4.2 離子遷移示意圖.....	42
圖 4.3 電路裝置.....	43
圖 4.4 輸出力量測裝置.....	43
圖 4.5 樣本長度和輸出力關係圖.....	44
圖 4.6 輸入電壓和輸出力關係圖.....	45
圖 4.7 四種離子液體輸出力比較圖.....	46
圖 4.8 位移量測裝置.....	46
圖 4.9 四種離子液體位移比較圖.....	47
圖 4.10 四種離子液體之奈米碳管紙致動器示意圖：.....	49
圖 4.11 四種離子液體拉伸強度比較圖.....	51
圖 4.12 四種離子液體楊氏係數比較圖.....	51
圖 4.13 浸泡過離子液體的 Nafion：(a) BMIMBF ₄ ；(b) EMIMBF ₄ ；(c) EMIMOTf； (d) EMIMBF ₄ ；(e) 純 Nafion.....	52

第一章 緒論

1.1 研究背景

工業發展與能源消耗的議題一直都與各個國家的經濟繁榮、環境品質、及環境安全緊緊相連，因此為了兼顧經濟效益及能源問題，低能耗的機電元件已然成為一個重要的主題。隨著奈米科技的發展，因奈米材料的表體積效應、電學、磁學及力學等特性，使得許多領域朝向質量輕、體積小等方向發展，如微機電系統 (Micro Electro Mechanical Systems; MEMS) 市場從以往汽車工業，轉往進入對尺寸、價格及功耗要求嚴苛的消費性電子市場，當電子產品走向輕、薄、短、小時，其中 MEMS 結合傳統之感測器 (Sensor) 和致動器 (Actuator)，整合成微米尺度的微小單位，發展成將所有機電感測器結構與類比和數位訊號處理功能，整合到單一晶片中，成為一個包含感測、致動、訊號處理及控制等多項功能的完整之微機電系統。

在機器人的設計及發展方向中，人類一直期望由自然生物的活動及其環境適應之機制來設計仿生機械系統，例如鳥的翅膀揮動造成飛翔及魚的尾巴擺動進而移動，都是仿生機械系統欲達成的目標。致動器，一種將電能轉換成機械能的裝置，使之通電進而產生旋轉或推進等機械運動的機器，傳統的致動器因重量及複雜的傳輸機制，而產生了應用上的限制，之後便發展了更有效率的致動器，其一電活性聚合物致動器 (Electroactive polymer actuator; EAP actuator) 可應用於仿生機械系統上，如：微手術元件、人工肌肉 (如圖 1.1)、人工心臟及人工手臂等；是一種通電後可以改變形狀或大小的聚合物材料；以往都利用金屬材料複合高分子複合材料製成致動器，以金屬為兩側電極，中間為高分子複合材料，通電使離子在高分子複合材料中遷移造成位移；金屬材料可形變量大，但往往在往復的形變過程中，複合材料兩側的金屬電極會斷裂或被解離，導致致動器形變性能下降甚至無法運作，因此對於模擬仿生機械系統上有很大的限制。除此之外，當施加 EAP 致動器時離子移動速度受到高分子的阻礙導致離子無法快速地累積到某一側電極，造成薄膜產生不對稱膨脹因而造成材料的形變，使至今 EAP 做成的致動器依舊反應慢、缺乏耐久性，為了解決上述金屬材料應用於 EAP 致動器上面臨的問題，後來學者們採用奈米碳管紙 (Buckypaper; BP) 取代金屬材料做為 EAP 致動器的電極，奈米碳管紙為奈米碳管 (Carbon nanotube; CNT) 所聚集而成，奈米碳管具有優良的導電性、導熱性、機械強度等特

性，但由於尺寸太小難以應用，並發展出奈米碳管紙，BP 具有可重複彎曲的性質之外，尚有良好的導電性、高力學強度與極佳的化學穩定性，其保有奈米碳管原有的特性，且更容易與其他材料結合，因此後來學者們採用奈米碳管紙取代受金屬特性限制的金屬材料，以奈米碳管紙為電極，與高分子複合材料結合，製成的一種稱為奈米碳管紙致動器（Bucky paper actuator; BP actuator）的裝置。



圖 1.1 仿生機械系統

資料來源：機器世界 工業機器人日報, 2014、Bar-Cohen (2007)、Make: Airship controlled by electroactive polymers, 2010

1.2 研究動機

致動器的應用之一為致力於仿生機械系統上（例如：人工肌肉），以往都利用電活性聚合物致動器中的離子式高分子金屬複合材料（Ionic polymer-metal composite; IPMC）製作致動器（如圖 1.2），IPMC 是由離子聚合物薄膜和兩片電鍍金屬電極組成，通電之後，透過離子在薄膜中遷移，讓其能在低驅動電壓，造成明顯的形變，但金屬材料做成的 EAP 致動器無法快速反應、缺少耐久性且當這類的致動器接受到電場，離子會減少，電極和聚合物薄膜之間致動性能降低，又 IPMC 所使用的金屬材質材料重、不柔軟且金屬具有匱乏的特性，導致致動一段時間後，彎曲位移下降，此對仿生機械系統的應用上有很大的限制。因此有學者開發出以奈米碳管材料做成的奈米碳管致動器（Carbon nanotube actuator; CNT actuator），奈米碳管具有良好的物化特性及機械性能，可改善上述問題並製成可應用於仿生機械系統上的奈米碳管致動器。

奈米碳管致動器以材料區分為單一奈米碳管致動器（Single carbon nanotube actuator）、巴克凝膠致動器（Bucky-gel actuator）、導電聚合物致動器（Conducting polymer actuator）及奈米碳管紙致動器而當中，本研究是以奈米碳管紙致動器做為最主要的研究對象，其是由奈米碳管紙、高分子

複合材料—離子交換膜（Nafion membrane）及離子液體（Ionic Liquid; IL）所組成一種三層之三明治結構（Sandwich structure），使其可在空氣中迅速運作，且在施加於低電壓時就能得到大幅度的位移，達到比以往更好的致動性能。



圖 1.2 致動器

資料來源：美國國家航空暨太空總署；NASA

1.3 研究目的

以往有許多團隊及學者針對奈米碳管紙致動器做研究及開發，致力於能夠應用在仿生機械系統上，結合各種複合材料，以製作出高性能的奈米碳管紙致動器；其中 Chen et al. (2012) 提出用奈米碳管紙當電極，以浸泡過離子液體的離子交換膜當作電解質層，再經過熱壓的程序製成奈米碳管紙致動器，這個研究成功實現用一簡單的製程將離子液體參雜在離子交換膜中，且透過簡單的三明治結構可靠地合併離子交換膜與奈米碳管紙，此致動器在空氣中，用很低的電壓就能提高致動器的耐用性和增加彎曲位移；本研究將以此實驗流程做出奈米碳管紙致動器進而進行後續研究；而在林岳劭 (2014) 的研究中（如圖 1.3），其利用實驗設計的手法分析奈米碳管紙致動器當中會影響其性能的最重要因素為何，發現離子液體對於奈米碳管紙致動器的影響因素很高；因此，綜合上述學者得出的結論，本研究將探討以下三個層面：

- **科學層面**

1. 了解奈米碳管紙致動器如何穩定且有效的應用在仿生機械系統上。

- **工程層面**

2. 利用四種不同種的離子液體找出陽離子與陰離子對奈米碳管紙致動器的影響為何。

- **技術層面**

3. 自製導電性高、結構緊密、性能優越且成本較低的奈米碳管紙。

4. 找出最適合應用在奈米碳管紙致動器上的離子液體及陰陽離子組合。

1.4 研究架構

本研究架構共分為五個章節討論各章節之探討說明如下：

第一章 緒論

針對研究背景做細部的說明，包括奈米碳管、奈米碳管紙致動器、離子液體等等，然後從中發掘現今遇到的及期望改善的問題，以此點出本研究動機與目的，並簡單的介紹本研究之整體架構。

第二章 文獻回顧

介紹奈米碳管紙致動器的歷史與發展，整理過去學者的研究將其加以分類並一一做介紹；之後定義本研究使用的奈米碳管、奈米碳管紙、三明治結構及離子液體其結構、原理、應用方式和其重要性，並說明如何與奈米碳管紙致動器結合且如何應用在仿生機械系統領域上。

第三章 研究方法

實驗的結果會因為實驗材料甚至是設備的不同而有所差異，因此此章節將介紹本研究之實驗流程及其實驗材料和會使用到的實驗設備，包括奈米碳管紙及奈米碳管紙致動器，特別細分及詳細介紹整體實驗流程，以及如何判斷每個階段的成果是否符合預期，最後介紹本研究之研究方法，以分析實驗結果的方式判斷是否與預測吻合。

第四章 實驗結果與分析

介紹量測奈米碳管紙致動器的過程之原理及使用方法，再使用實驗數據，依照分析流程逐一進行分析，推論出實驗結果，再針對假設進行驗證實驗，將原本的數據與驗證的數據進而做比較，得出本研究之結論。

第五章 結論與建議

分析實驗結果得出結論，再提出未來課題加強本研究之結論。

第二章 文獻回顧

奈米碳管紙致動器是 EAP 致動器的一種，EAP 致動器從 1880 年開始被發展出來，廣泛的應用在仿生機械系統領域上，但是因為材料上的限制導致其在應用的過程中有許多限制，因此在 1990 年發展出奈米碳管紙致動器，利用奈米碳管紙優越的特性，使 EAP 致動器改善應用限制的問題。以下探討奈米碳管紙致動器的發展與其意義：

2.1 EAP 致動器的分類與發展

致動器，是一種在電場作用下，能夠改變其形狀或大小的聚合物材料，其最大的特性是能夠在維持巨大受力作用的同時進行大幅度的變形。Cottinet et al. (2013) 表示應用在致動上的材料都是重的或是不柔軟的且需要大的驅動力，所以對於應用在仿生機械系統有所限制。Chen et al. (2012) 表示典型的 EAP 致動的方式，為離子經由電滲效應 (Electro-osmotic) 通過聚合物到電極層，此方式使 EAP 缺乏耐久性和快速響應；而現階段 EAP 致動器具有輕巧性、快速響應及高耐用性且只需要很低的驅動電壓就能產生大的位移。Melvin, Ni, and Natsuki (2014) 表示在近年有許多關於，受電刺激能產生反應的聚合物，被視為一種智能材料，這些聚合物被簡稱為 EAP。EAP 致動器的優點是有彈性的、輕量的、耐斷裂的、容易製作且由機械能轉換成電能，因此施加力會產生大的應力。Cottinet et al. (2012) 表示 EAP 致動器創造了一個獨特的機會讓開發設計仿生系統機器人更有彈性和自由；生物肌肉獨特的特性是產生大的應力、有適度的壓力、能夠快速反應、提高效率及很長的生命週期。EAP 致動器以致動的機制不同分為電子式和離子式，如圖 2.1。

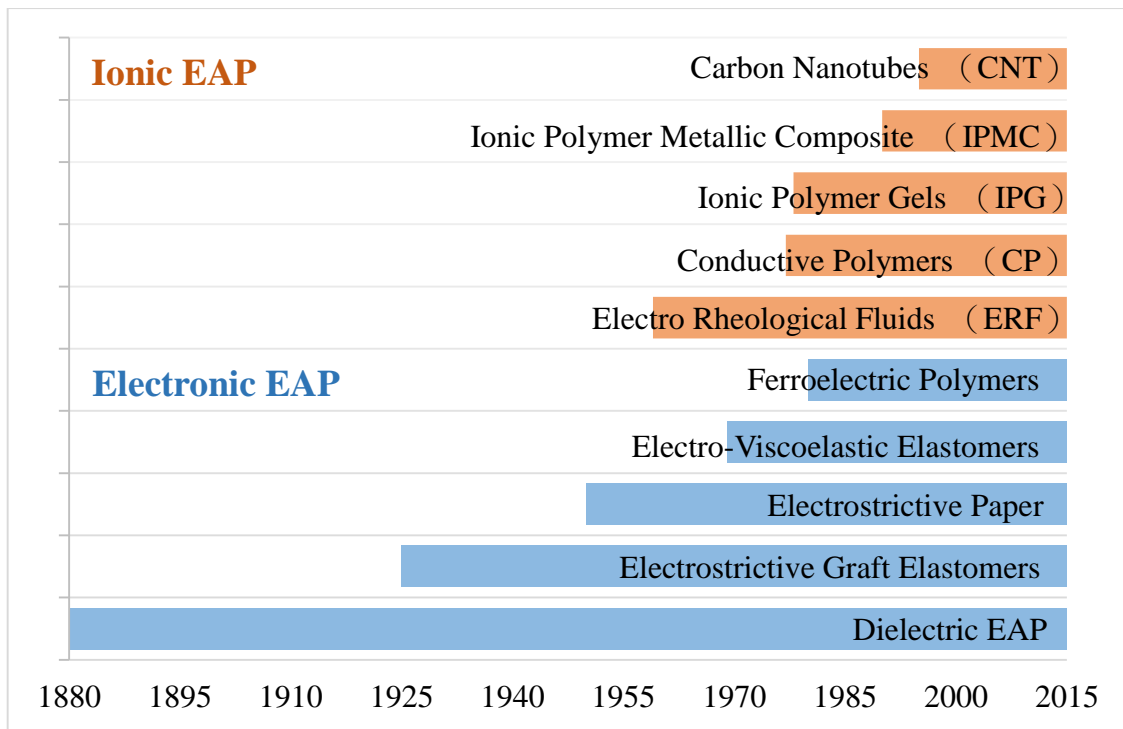


圖 2.1 電子式與離子式的分類

資料來源：本研究整理

2.1.1 電子式 EAP 致動器 (Dielectric EAPs)

電子式 EAP 致動器 (圖 2.2) 是一種可以被電場驅動的聚合物，在直流電的驅動下保持收縮或是膨脹的形變，依照致動的型式分為鐵電聚合物 (Ferroelectric Polymers)、電黏彈性材料 (Electro-Viscoelastic Elastomer)、電致伸縮薄膜 (Electrostrictive Paper)、電致伸縮連結式彈性體 (Electrostrictive Graft Polymers) 及介電彈性體 (Dielectric EAP)。電子式 EAP 致動器是將電能轉換為機械能，反應快速且能提供強大的機械力，在應用時不需要外在保護層，並可在空氣中進行，減少應用上的限制；雖然電子式 EAP 致動器可產生較大的輸出力，但是相對的它們需要很高的電壓 (1~5 kV) 來驅動，因此後來發展出離子式 EAP 致動器代替電子式 EAP 致動器應用上的不足。

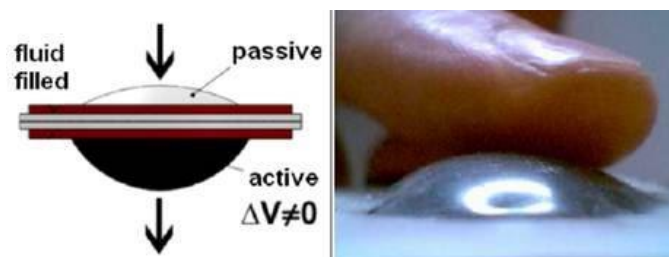


圖 2.2 電子式 EAP 致動器—介電彈性體

資料來源：WorldWide ElectroActive Polymers, 2008

2.1.2 離子式 EAP 致動器 (Ionic EAPs)

離子式 EAP 致動器 (圖 2.3) 是運用電化學的性質，利用離子的遷移及擴散的方式使致動器出現擺動產生輸出力，按照其化學特性可分為以下五種類型：離子聚合物凝膠 (IPG)、離子聚合物金屬複合材料 (IPMC)、導電聚合物 (CP)、電流變液 (ERF) 及奈米碳管 (CNT)。離子式 EAP 致動器是將化學能轉換為機械能，雖然其反應速度較電子式 EAP 致動器緩慢且輸出力較低，但離子式 EAP 致動器只需要幾伏特的電壓 (例：電池) 就能造成顯著的彎曲，相較於電子式 EAP 致動器所需極大的電壓如果應用在人體內可能會漏電而造成電擊的危險，離子式 EAP 致動器較廣泛應用在仿生機械系統上 (例：植入體內的醫療器材)，然而其發展之初，由於離子遷移的特性只適用於溶液中，在應用上有許多的限制；因此後來發展出能在空氣中執行的離子式 EAP 致動器作為仿生機械系統的材料。

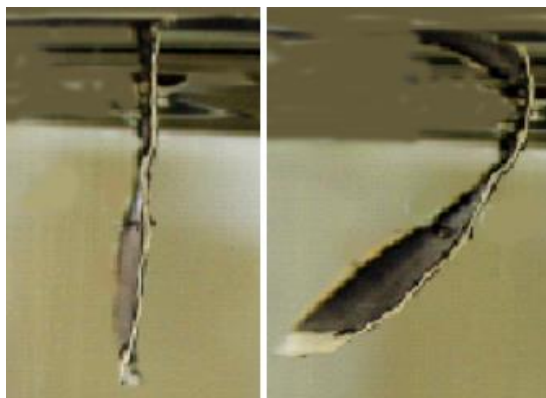


圖 2.3 離子式 EAP 致動器

資料來源：Electrochemistry Encyclopedia, 2004

電流變液 (Electro-Rheological Fluid; ERF) 是智慧型材料的一種，由具帶介電性質的微小顆粒與不帶導電性質的液體作為介質所組成，施加電場後，在數個毫秒內會由流體轉為塑性體，其反應速度快且可逆，在電場作用影響之下，ER 流體在未通電前也具備了固體的性質，但只是不發生流動的現象的固體，而在通電之後其粒子鏈結產生固化現象使流體變固體。

導電聚合物 (Conductive polymer; CP) 是一種塑膠，一般塑膠的分子就像珍珠項鍊般的重複它們自己的共軛雙鍵的結構，而導電聚合物經由移走電子 (氧化) 或插入電子 (還原) 使電子從一個位置一洞到另一個位置產生電流；其應用於二極體、抗靜電材料或是生醫器材材料。

離子式高分子金屬複合材料 (IPMC) 由離子聚合物薄膜和兩片電鍍金

屬電極組成，離子聚合物模內含有大量的陽離子和陰離子，與其他EAP致動器不同地方是加入了金屬材料，所以稱為離子式高分子金屬複合材料，此種致動器可以在較低的驅動電壓和低機械阻抗下造成明顯的形變。在過去，IPMC在濕度高的環境中操作能得到較佳的反應，丁海濤（2010）表示IPMC有兩個開發上的限制，一是輸出力較小，二是對水環境或是潮濕環境的依賴；但在經過改良後IPMC可以在空氣中操作，陳益臻 and 陳大潘（2004）表示IPMC必須在含水的情況下才能作用，因為高分子薄膜中的離子會與水分子形成水合狀態，方能在高分子薄膜中的細微孔隙間移動，受到電壓的影響，離子會在高分子薄膜中往相反極性的方向移動，當離子移動時會帶動含於高分子薄膜中的水一起移動，造成薄膜中產生壓力差而使IPMC產生變形。

奈米碳管致動器（CNT actuator）就是利用奈米碳管優越的性能實現輕量型與低電耗的致動器，分為：單一奈米碳管致動器、巴克凝膠致動器、導電聚合物致動器及奈米碳管紙致動器。以下介紹各種奈米碳管致動器在學術上的表現：Akita et al.（2001）做出了一種單一奈米碳管致動器，用單壁奈米碳管（Single-wall Carbon nanotube; SWCNT）做出奈米級的鑷子，施加大於4.5V的電壓後會產生閉合，應用於夾取奈米級的材料與分子；Takeuchi et al.（2010）利用巴克凝膠當作電極與離子交換膜複合做出一種雙壓電（Bimorph）結構，在施加於10V的電壓時，產生擺動並產生0.33%到0.44%的應力；Kwon and Ng（2014）樣使用雙壓電的結構，以石墨烯當作電極施加電壓，導電聚合物作為電解層讓離子遷移產生形變，且為了增加導電性在石墨烯電極的外層塗上銀膠，在施加4V的電壓時能產生8 mm的位移；最後是Chen et al.（2012）用奈米碳管紙作為電極解決奈米碳管不易應用的問題與離子交換膜做出雙壓電結構的奈米碳管紙致動器，由於奈米碳管紙優越的性能，使其在施加於1V的電壓就能達到5 mm的位移。

在EAP致動器的歷史演進的過程中，我們發現電子式EAP致動器與離子式EAP致動器各有利弊，電子式類型的材料具有高機械能量密度，反應速度快，但是需要很高的電壓來驅動致動器；而離子式類型的材料雖然反應速度較慢且輸出力較低，但是離子式EAP致動器擁有低驅動電壓，相較於電子式EAP致動器更能應用在仿生機械系統領域。

2.2 EAP 致動器—三明治結構 (Sandwich structure)

三明治結構是一常見的複合材料結構 (圖 2.4)，由上下面材 (Face Material) 與芯材 (Core Material) 構成。面材主要功用在承受平面內的負載及彎矩，因此面材的選擇多以高強度、高勁度為主，可以是金屬合金、纖維複合材料等；芯材的功能則是在增加上下面材的距離以及抵抗剪力。一般為了減輕整體結構的重量，芯材多採用輕質材料如木材、發泡高分子材料等，也有使用蜂巢狀結構為芯材的三明治結構 (葉孟考等人，2009)。

近年來，有許多複合材料以三明治結構的方式設計，能達到有效減輕結構重量、增加結構機械特性，因此廣泛的應用在各個領域，類似的產品有：樂器、隔音板、防火牆、航空、汽車與運動材料等等；而在仿生機械系統的應用上，離子式 EAP 致動器因為離子遷移的特性因此必須要在溶液中進行，但是此種方式導致其反應速度較慢且不易應用，因此有學者將離子式 EAP 致動器做為三明治結構：IPMC 和 CNT 致動器中的巴克凝膠致動器、導電聚合物致動器及奈米碳管紙致動器，使其能夠在空氣中進行反應；以離子交換膜作為電解質層 (芯材) 以利離子遷移和運用金屬、奈米碳管、石墨烯片或是奈米碳管紙作為電極層 (面材)，熱壓組裝成三明治結構的離子式 EAP 致動器。

Tamagawa, Lin, Kikuchi, and Sasaki(2011)先將離子交換膜做磨砂處理，再將多壁奈米碳管 (Multi-wall Carbon nanotube; MWCNT) 嵌入其中，最後大量的銀膠塗佈在離子交換膜上當作電極，形成一種三明治結構的 IPMC，以往 IPMC 的研究會使用化學電鍍的方式將金屬與聚合物 (離子交換膜) 結合，但其耗時且製程複雜，而此研究透過將離子交換膜變得脆弱且表面粗糙，再簡單的塗上銀膠，使銀膠不會從離子交換膜上脫落；此方法能增加其彎曲控制力，在施加 2~6 V 的電壓時其曲率為 $0 \sim 0.05 \text{ mm}^{-1}$ 。Cottinet et al. (2013) 用兩張塗上離子液體的奈米碳管紙作為電極，電解質層則是用離子交換膜讓離子在裡面轉換，製成奈米碳管紙致動器，運用奈米碳管優越的性能，應用於離子式 EAP 致動器上，其在施加 50 V/mm 的電壓時可產生 0.018% 的應力 (Strain)。

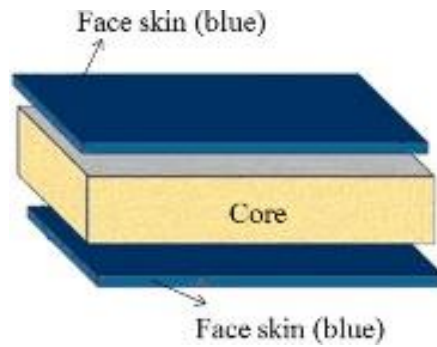


圖 2.4 三明治結構

資料來源：Konka, Wahab, and Lian (2012)

2.3 EAP 致動器—離子液體 (Ionic Liquid; IL)

離子液體於 1990 年代起可由廉價的原料製得化學安定性的離子液體溶劑 (勁信, 2014), 為一種液態的鹽類, 又稱為室溫離子液體 (Room temperature ionic liquid), 即在室溫或室溫附近溫度下呈液態, 由離子或短暫存在的離子對所構成 (沈倩宇, 2012), 目前所研究的離子液體均是由陰、陽離子組成的液態介質, 其具有一些獨特的物理化學性質: 低熔點 ($-70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$)、低蒸氣壓、結構多樣性、高熱安定性和電化學安定性的特徵; 而離子液體也被視為「綠色溶劑」, 原因在於其熔點、黏度、密度、導電性、極性、親疏水性及溶解度, 皆可藉由改變陰、陽離子結構而有所變化, 離子液體的合成具有這種靈活的特性, 使其應用性大幅提升。離子液體可能的應用主要包含化學催化、分析/分離技術、生物技術、電化學、環境應用、能源應用及材料合成等領域 (勁信, 2014)。

離子液體可作為離子式 EAP 致動器三明治結構中的電解質層, 將離子液體加入聚合物中, 其導電率及力學性能較好, 且沒有溶劑揮發和液體外漏等現象, 可提高離子式 EAP 致動器的安全性和穩定性, 又可以實現在空氣中致動, 此種與離子液體結合的離子式 EAP 致動器可作為人造肌肉; 這種人造肌肉形狀像口香糖, 長約 5 mm、寬 1 mm 及厚幾百 μm , 它由一種隨電壓變化而伸縮的高分子材料與一種不易揮發的離子液體混合製成, 可以在正常環境下長期使用, 如果在微型機器的關節和驅動部位裝上這種人造肌肉, 它可像人的關節一樣發揮作用 (人造肌肉, 2013)。

Kikuchi and Tsuchitani (2009) 利用化學電鍍將金屬 (金) 與聚合物薄膜結合並切割一小片浸泡於離子液體中, 製成運用離子液體當作電解質的三明治結構的 IPMC, 施加 1V 的電壓, 其曲率依離子液體的不同可達 0.2

到 1m^{-1} ；以往 IPMC 都使用水當溶劑，但水溶劑輸出力小且會蒸發，不易在空氣中執行，因此利用離子液體的特性做其應用。又 Chen et al. (2012) 離子交換膜浸泡在離子液體中形成聚合物凝膠，再與兩片奈米碳管紙當作電極，熱壓製成奈米碳管紙致動器，施加 1 V 的電壓可產生 5 mm 的位移和 0.4 % 的應力 (Strain)，這是利用奈米碳管紙優越的機械性能，加上離子液體低蒸氣壓及電化學安定性的特徵，實現離子式 EAP 致動器能夠在空氣中且穩定持久的執行。

2.4 離子液體對三明治結構的離子式 EAP 致動器的影響

三明治結構的離子式 EAP 致動器是由金屬或是奈米碳管做為電極，而由離子交換膜或是離子交換溶液製成的聚合物凝膠當作電解質層，通電使離子產生遷移致動離子式 EAP 致動器。施加電壓後，電極會產生陰極及陽極的電廠，而陽離子會被陰極吸引，遷移到同一側，又由於單一陽離子的體積比陰離子大，因此當陽離子都被吸引到同一側時會使致動器出現彎曲進而產生位移 (圖 2.5)。

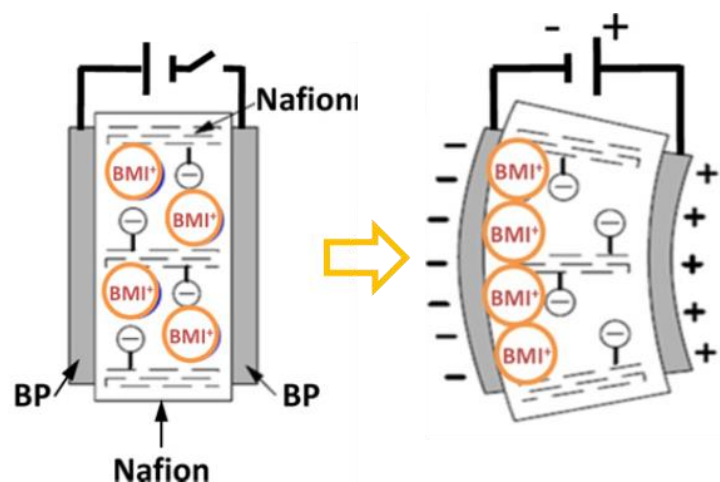


圖 2.5 離子式 EAP 致動器致動原理

資料來源：Chen et al. (2012)

Bennett and Leo (2004) 示典型運用在質子交換膜上的溶劑為水溶液，雖然它在性能上會有些限制，這是由於利用水當溶劑輸出的電壓小，又當此類致動器應用在空氣中，水很容易蒸發，導致致動器會失去致動的性能。而現今，都利用高穩定性的離子液體取代水當溶劑，離子液體的電化學性能比水的穩定性高，因此可提供很高的輸出力。而離子液體沒有揮發性，因此在空氣中執行不會像水一樣從聚合物中蒸發。

林岳劭 (2014) 實驗設計的手法分析應用離子液體的三明治結構之離子

式 EAP 致動器，此 EAP 致動器利用奈米碳管紙做為兩側電極，以充滿離子液體的質子交換膜為電解質層，分析各項材料中哪些才是影響其性能的最重要因素，其中以奈米碳管紙最為重要，其次為離子液體（圖 2.6）。

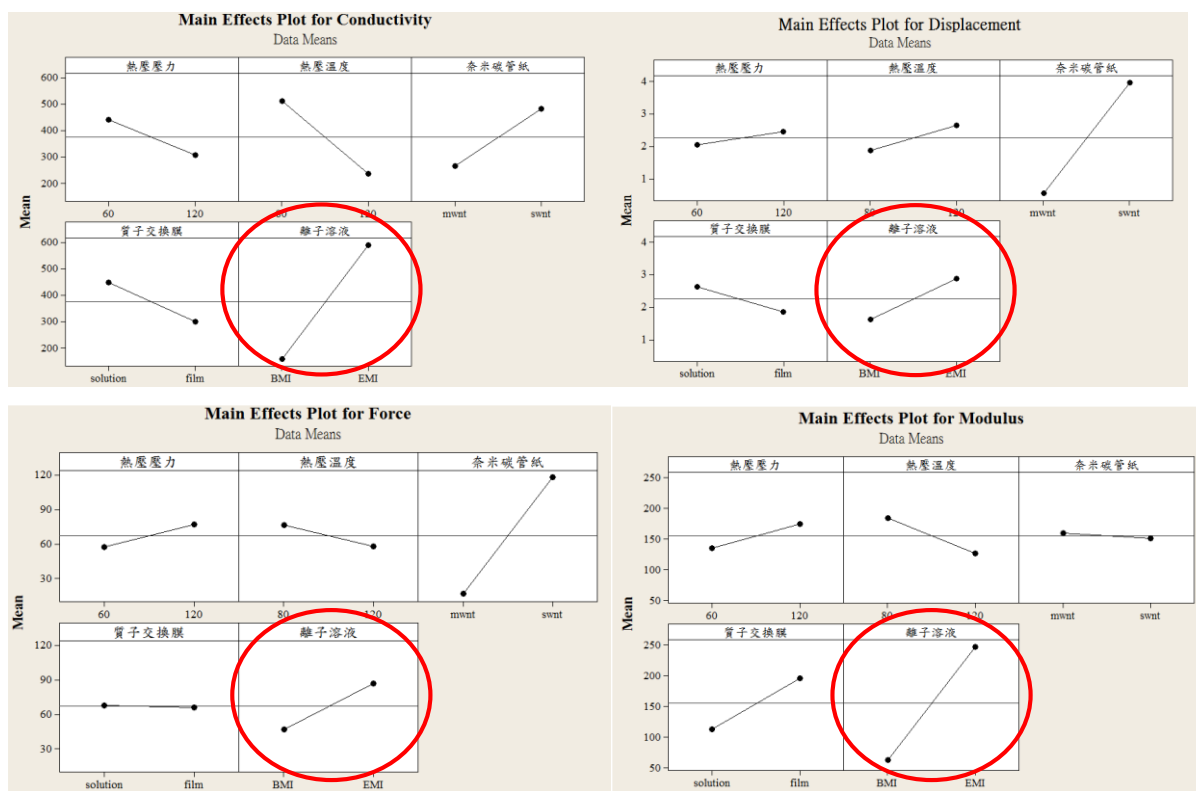


圖 2.6 離子液體的重要性

資料來源：林岳劭（2014）

離子液體的可調性（tune ability）高，能依照各種應用所需的性質來組合不同的陰離子或陽離子，故其也被稱作設計者溶劑（designer solvent）（Freemantle, 1998）。

第三章 研究方法

本章節將介紹本研究奈米碳管紙的最佳化製程與奈米碳管紙致動器的實驗流程，及其運用到的實驗材料與量測數據之儀器，並提及如何量測數據，最後介紹分析之方法且針對量測之數據進行分析，以得出結論。

3.1 實驗材料與儀器

以下介紹製作奈米碳管紙以及奈米碳管紙致動器的材料與儀器，並簡介量測位移及荷重之儀器。

3.1.1 奈米碳管紙之實驗材料

1. 奈米碳管 (Carbon nanotube; CNT)

奈米碳管是在 1991 年由日本的物理學家飯島澄男在碳纖維中發現，是由碳原子形成的石墨烯 (Graphene) 層捲成變成管狀的碳分子，管上每個碳原子為 sp^2 結構，相互之間以碳-碳鍵結合起來，形成由六邊形組成的蜂窩狀結構作為奈米碳管的骨架。管子的半徑非常小，只有奈米的寬度，而按照管子層數的不同，分為 SWCNT 和 MWCNT (Wikipedia)。奈米碳管有非常優良的機械性質，例如：非常高的楊氏係數 (Young's modulus)、很大的伸長量、極佳的韌性與質量很輕等特性，且受外力作用時會有很好的彎曲形變與恢復特性，因此很適合應用在金屬、陶瓷、高分子中做為強化複合材料或高強度結構體 (科技台灣, 2013)，但由於尺寸太小難以掌握，因此聚集製成 BP 當作應用；其中又由 SWCNT 的導電性及其性能比 MWCNT 較佳，但是價格也相對高出許多，因此本研究使用 0.35g 的 SWCNT 及 0.15g 的 MWCNT，以 9:4 的比例做為製作 BP 的材料，期望保有 SWCNT 的高性能也能達到經濟效益。

表 3.1 本研究使用之單壁奈米碳管

單壁奈米碳管 (Single-wall carbon nanotube ; SWCNT)	
品名	Conductive SWCNTs
供應商	SouthWest Nano Technologies (SWeNT)
平均直徑	0.84 nm
平均長寬比	940

單壁奈米碳管 (Single-wall carbon nanotube ; SWCNT)	
純度	95 wt%
表面積	770 m ² /g

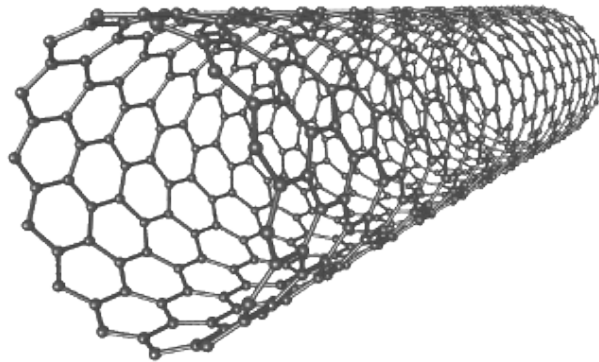


圖 3.1 單壁奈米碳管

資料來源：Tikalon, 2011

表 3.2 本研究使用之多壁奈米碳管

多壁奈米碳管 (Multi-wall carbon nanotube ; MWCNT)	
品名	AC tube-100L
供應商	高達光有限公司
平均直徑	20 nm
平均長度	100 μm
純度	> 96%

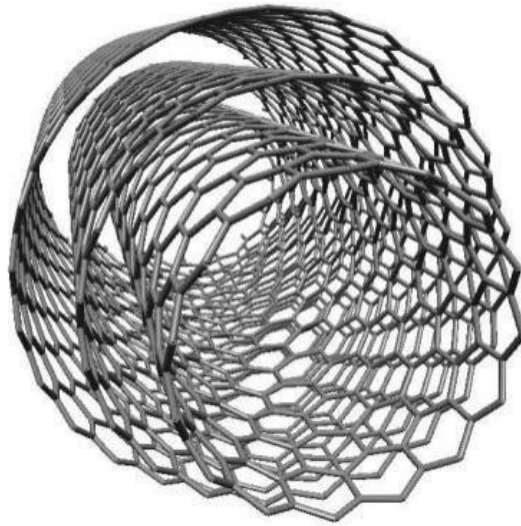


圖 3.2 多壁奈米碳管

資料來源：液晶摻雜不同維度碳奈米材料之介電研究, 2015

2. 分散劑

是一種表面活性劑 (Surfactant)，能使目標溶液表面張力顯著下降的物質，可降低兩種物質之間表面張力（液體—液體，液體—固體），可溶於有機溶液或水溶液中。本研究以 Triton X-100 做為奈米碳管的分散劑利於溶於水中 (Wikipedia)。

表 3.3 本研究使用之分散劑

奈米碳管分散助劑 (Triton X-100)	
供應商	高達光有限公司
分子式	$C_{14}H_{22}O (C_2H_4O)_n$ $n=9-10$
密度	1.07 g/cm^3
溶解性(水)	可溶於水

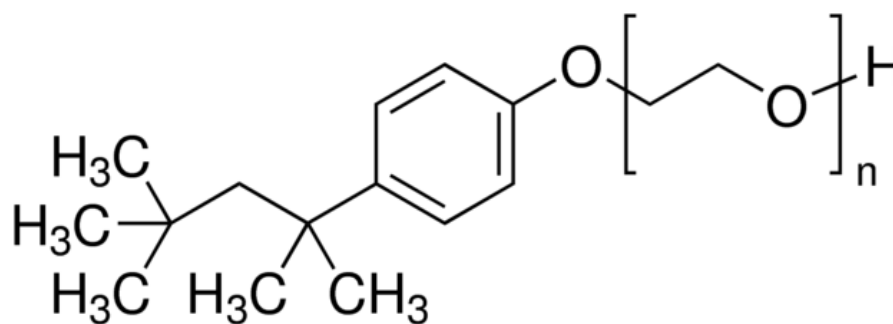


圖 3.3 Triton X-100 化學結構式

資料來源：SIGMA-ALDRICH, 2015

3.1.2 奈米碳管紙致動器之實驗材料

1. 9：4 奈米碳管紙（圖 3.4）

本研究利用不同的單壁及多壁的奈米碳管的比列製成 5 種奈米碳管紙，從實驗結果中（表 3.4），本研究發現純的單壁奈米碳管紙致動器的性能雖然比較好，但是比例 S：M = 9：4 的奈米碳管紙致動器的性能相對不差，由於單壁奈米碳管與多壁奈米碳管的價格差異相當大（單壁是多壁的 20 ~ 30 倍），因此，在考慮到成本跟性能兩個層面下，我們選擇比例 S：M = 9：4 的奈米碳管紙，做為本研究實驗材料。

表 3.4 不同比例的奈米碳管紙製成奈米碳管紙致動器

奈米碳管紙	純 S	S：M = 9：4	S：M = 1：1	S：M = 4：9	純 M
位移(mm)	>10	8.359	1.030	0.856	0.879
輸出力(mN)	930	896	890	725	515

單壁奈米碳管：0.35 g

多壁奈米碳管：0.15 g

奈米碳管分散助劑 Triton X-100：1.25 ml

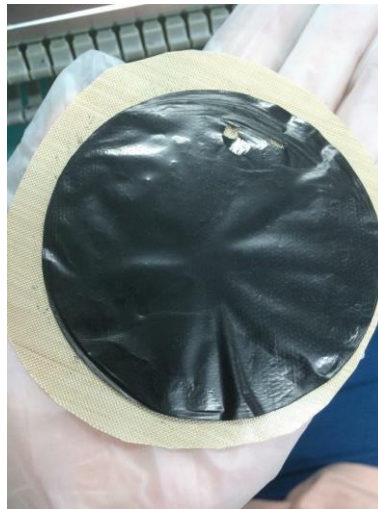


圖 3.4 奈米碳管紙

資料來源：本研究整理

2. 質子交換膜

質子交換膜是美國杜邦（Du Pont）公司的 Walther Grot 在 1960 年代發現第一個具有離子特性的合成聚合物；為一多孔狀固態，由於孔壁上的負電荷，使得只有帶正電的陽離子可以通過，而孔壁大小和交換膜含水量有關，故水分如無法順利排除，將會降低導電的效率。

表 3.5 本研究使用之質子交換膜

DuPont™ Nafion® 117	
供應商	泰新能源股份有限公司
分子式	$C_7HF_{13}O_5S \cdot C_2F_4$
規格	30 cm × 30 cm /piece

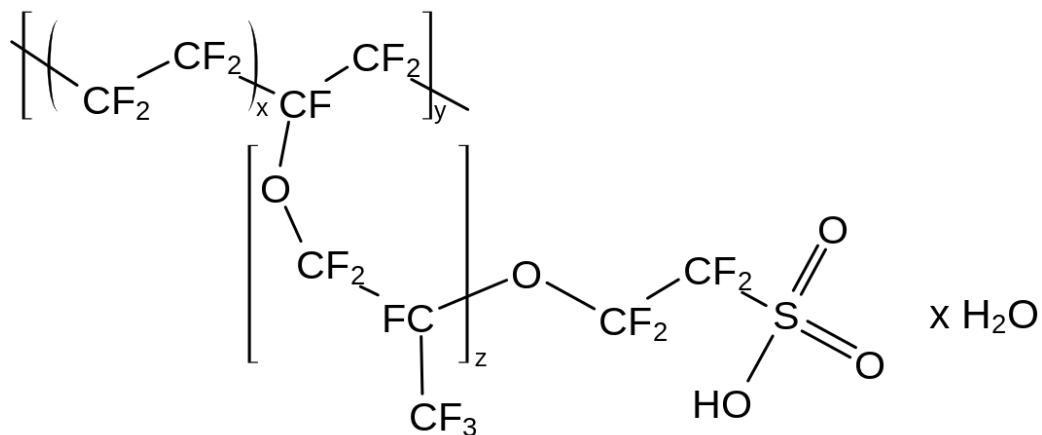


圖 3.5 質子交換膜結構式

資料來源：SIGMA-ALDRICH, 2015

3. 離子液體

離子液體是一種液態的鹽類，在 1970 年代所探討的離子液體，其範圍從鹼金族的矽酸鹽及鹵化物到四級銨鹽都有，現今的離子液體主要是指熔點低於 100°C 的鹽類物質，以便與過去所稱的高溫熔融態離子化合物做區隔。常溫常壓下的液態物質，如水或汽油等，是由分子化合物組成，而離子液體則是由離子或短暫存在的離子對所構成。其最重要的特徵有二，一是它的低蒸氣壓，相較於易揮發的有機溶劑，它對環境的危害相對較低；其二是它的比電導率 (specific conductivity) 中等，通常與水溶液態的電解質相近。我們可應用離子液體在其所處環境成液態及低蒸氣壓的特性，將其作為電池的密封劑 (Sealants) (陳昭錦, 2014)。本研究為了判斷出陽離子和陰離子分別對奈米碳管紙致動器有哪些影響，因此選擇了其中有兩個陰離子相同及三個陽離子相同的四種離子液體 (圖 3.6)，欲比較陰陽離子對奈米碳管紙致動器的影響差異為何，四種離子液體如下所示 (表 3.5)：

- 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ($\text{BMI}^+\text{BF}_4^-$) (a)
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ($\text{EMI}^+\text{BF}_4^-$) (b)
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate (EMI^+Otf^-) (c)
- 1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate (EMI^+SCN^-) (d)

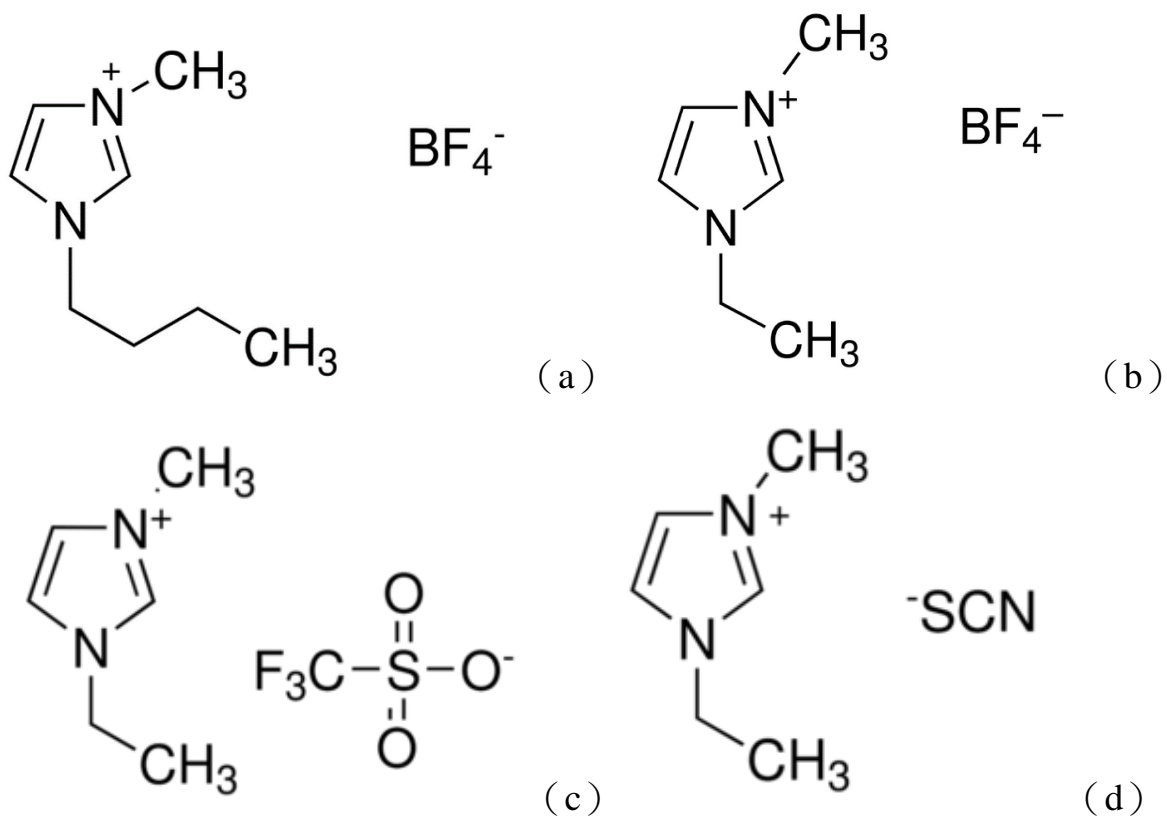


圖 3.6 離子液體

資料來源：Sigma-Aldrich, 2015

表 3.6 本研究使用之離子液體

編號	1	2	3	4
品名	BMIMBF ₄ (1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate)	EMIMBF ₄ (1-Ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate)	EMIMOTf (1-Ethyl-3-methylimidazolium trifluoromethanesulfonate)	EMIMSCN (1-Ethyl-3-methylimidazolium thiocyanate)
製造商	Sigma – Aldrich, USA			
進口商	友和貿易股份有限公司			
分子式	C ₈ H ₁₅ BF ₄ N ₂	C ₆ H ₁₁ BF ₄ N ₂	C ₇ H ₁₁ F ₃ N ₂ O ₃ S	C ₇ H ₁₁ F ₃ N ₃ S
陽離子	BMI ⁺	EMI ⁺		
陰離子	BF ₄ ⁻		Otf ⁻	SCN ⁻
導電度	4.3 mS/cm	14 mS/cm	9.2 mS/cm	20 mS/cm

3.1.3 實驗操作儀器

1. 過濾平台

此裝置為製作奈米碳管紙之配備，透過正壓的原理，以氣體加壓的方式讓液體從壓力鍋內擠出到過濾平台上，使奈米碳管聚集形成奈米碳管紙。

表 3.7 過濾平台

KS 90 Large Filter Holder, 90mm, 304 Stainless Steel	
供應商	STERLITECH
材質	304 不鏽鋼
規格	直徑 90 mm、平台區域 45 cm ²
重量	4 kg

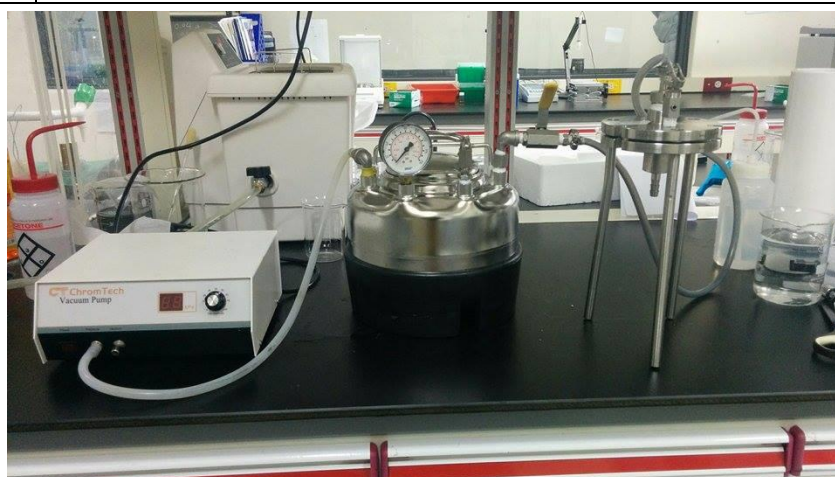


圖 3.7 過濾平台

資料來源：本研究整理

2. 真空烘箱系統

溫度最高可達 200 度，本研究使用在烘烤奈米碳管紙、離子液體以及質子交換膜。

表 3.8 真空烘箱

Vacuum Oven (真空烘箱)	
製造商	登盈儀器有限公司
供應商	雙鷹企業有限公司

Vacuum Oven (真空烘箱)	
型號	DOV-50
規格 (W×D×H)	內部：50×50×50 cm、外部：80×96×108 cm
電壓/電流	220 V / 38 A
溫度範圍	40°C ~200°C
溫度精度	± 0.5°C



圖 3.8 真空烘箱

資料來源：本研究整理

4. 熱壓成型機

表 3.9 熱壓成型機

熱壓成型機	
供應商	高鐵檢測儀器
型號	GT-7014-30C
規格	106×70×165 mm
溫度範圍	常溫~300°C
冷卻方式	水冷卻

熱壓成型機	
電熱壓縮板	上層加熱、下層冷卻



圖 3.9 熱壓成型機

資料來源：本研究整理

5. 超音波破碎機

表 3.10 超音波破碎機

超音波破碎機	
供應商	Qsonica
型號	Q700
Power	700 watts
頻率	20 kHz
伏特	120 VAC~50/60 Hz NOM

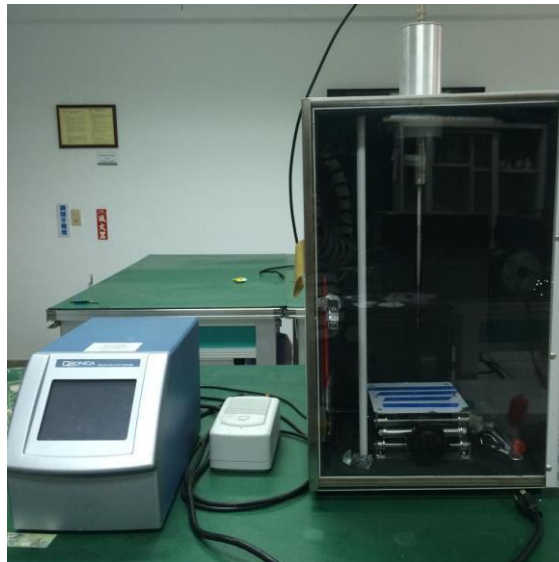


圖 3.10 超音波破碎機

資料來源：本研究整理

3.1.4 性能檢測設備

1. 雷射位移計

傳統的位移感測器由定位感度探測器（Position Sensitive Detector；PDS）上的雷射點觀測光的分布。藉由偵測反射雷射點的位置，計算出被測體的位置。但有時測體表面的偏光反射會造成雷射光不平坦的分佈，進而影響了測點的位置，造成量測值的誤差。CMOS 探測器藉由監測單一映像點陣列的接收光強度，使之能更準確的得到光點位置（麥思科技有限公司）。此位移計是用來量測奈米碳管紙致動器的偏轉位移。

表 3.11 雷射位移計

MKII-SA 雷射位移計	
供應商	麥思科技有限公司
型號	LTC-200-100-SA
規格	工作電壓 20~30VDC 電壓輸出 0~10VDC、電流輸出 4~20mA
量測範圍	200±50 mm
解析度	±9 μm
光點尺寸	100 μm

MKII-SA 雷射位移計	
雷射角度	12°



圖 3.11 雷射位移計

資料來源：本研究整理

2. 荷重計

此荷重計專門為特小容量而設計，小容量的範圍為 50 mN，主要量測為垂直的受力方向，高精準度、堅固耐用、輕巧且使用簡單，用來量測奈米碳管紙致動器能輸出的力度。

表 3.12 荷重計

微小載重用拉伸式荷重計	
製造商	KYOWA, Japan
供應商	三聯科技股份有限公司
型號	LVS-5GA
特性	非線性 $\pm 0.5\%RO$ 磁滯範圍 $\pm 0.5\%RO$ 重複性 $0.5\%RO\ max$ 安全激發電壓 6 V AC or DC 建議激發電壓 1~2 V AC or DC

微小載重用拉伸式荷重計	
	讀入電阻 $120\ \Omega \pm 10\ \Omega$ 輸出電阻 $120\ \Omega \pm 10\ \Omega$
量測範圍	50 mN (5.099 gf)



圖 3.12 荷重計

資料來源：三聯科技, 2015

3. 函數波型產生器

函數波形產生器能夠輸出五種標準波形（正弦波、方波、斜波、脈衝和雜訊），並且可任意調整頻率及伏特大小（1~10V），本研究用此儀器當作奈米碳管紙致動器的電源供應器來使用。

表 3.13 函數波形產生器

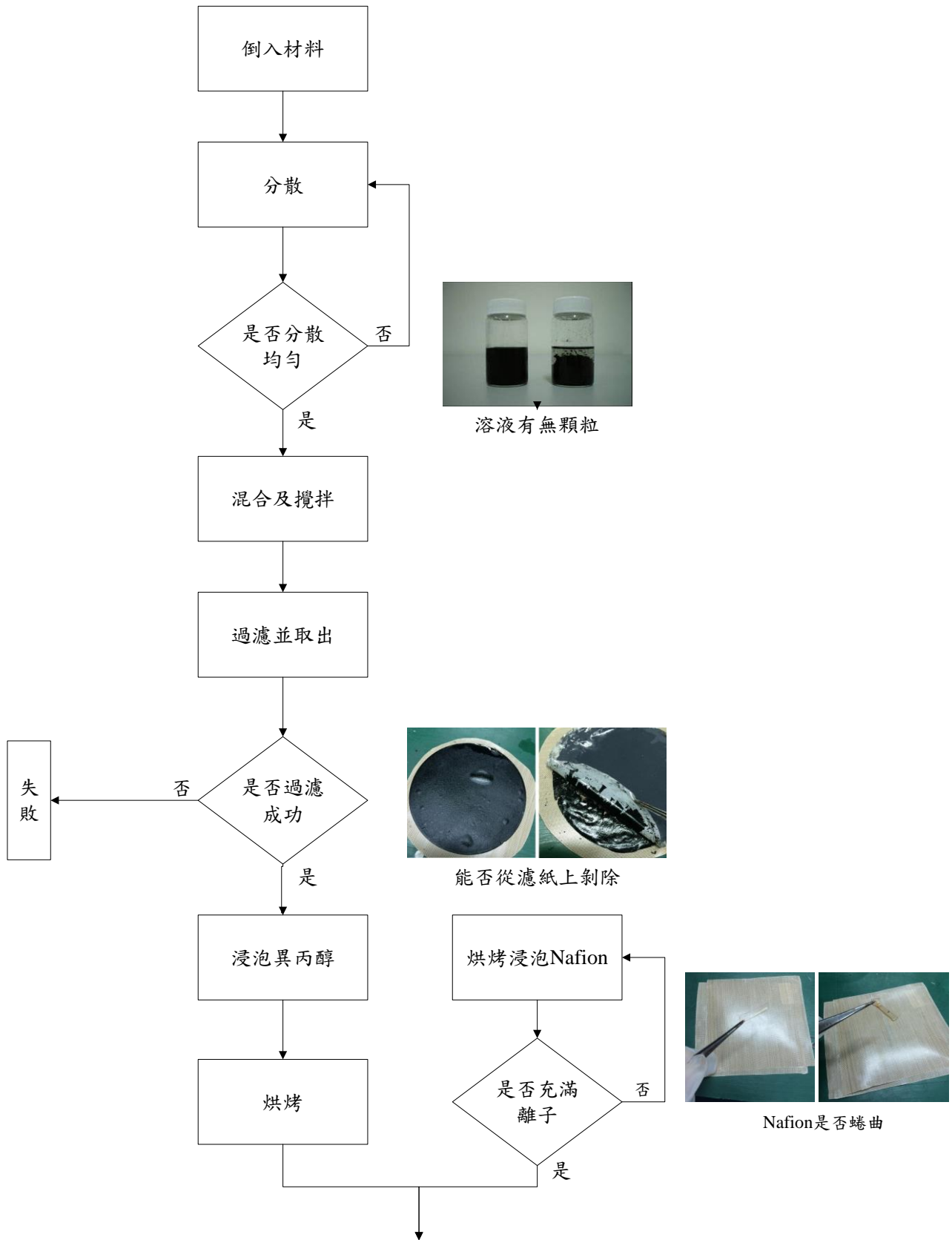
20 MHz Function / Arbitrary Waveform Generator	
製造商	Agilent Technologies
型號	33220 A
電源供應	110-240 V AC \pm 10%
尺寸	261.1 mm \times 108.8 mm \times 303.2 mm
重量	4 kg
操作環境	0°C-55°C
輸出範圍	伏特 1-10 V 頻率 1 μ Hz-20 MHz



圖 3.13 函數波形產生器

資料來源：KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2015

3.2 實驗流程



資料來源：本研究整理

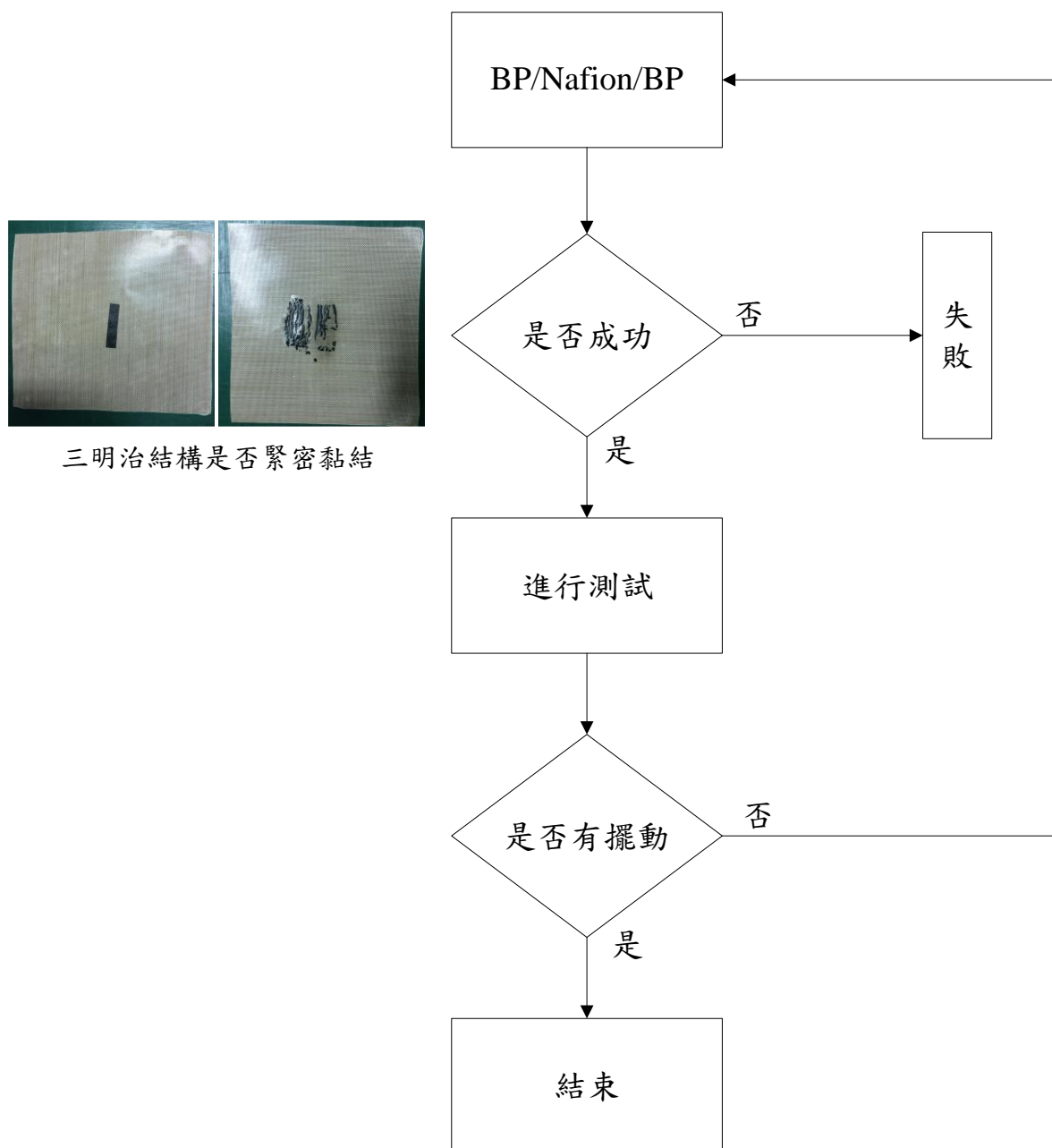


圖 3.14b 實驗流程

資料來源：本研究整理

上述為本研究之實驗流程（圖 3.13 實驗流程），本小節將詳細介紹各個實驗步驟及此步驟是否成功之判斷依據，將分為奈米碳管紙和奈米碳管紙致動器兩個部分：

3.2.1 奈米碳管紙

奈米碳管紙是將奈米碳管聚集而成形成一個薄膜的形狀，改善奈米碳管因為尺寸小而難以應用的困境，以下針對本研究使用之奈米碳管紙的製作流程做介紹（圖 3.18）。

步驟一：將 0.35 g 的單壁奈米碳管和 1.25 ml 的分散劑倒入 250 ml 的蒸餾

水中，同時也將 0.15 g 的多壁奈米碳管和 1.25 ml 的分散劑倒入另一杯蒸餾水中，兩杯皆無須攪拌。

步驟二：用超音波破碎機各別分散，單壁奈米碳管分散 5 小時，需時 10 小時；而多壁奈米碳管分散 45 分鐘，需時一個半小時，待奈米碳管完全分散至蒸餾水中，變成懸浮液。在此步驟須判斷奈米碳管是否已經分散完全，本研究利用肉眼判斷懸浮液中是否尚有奈米碳管顆粒存在，如還有顆粒則必須繼續分散，而已為全黑懸浮液（圖 3.14 奈米碳管懸浮液），即可進行步驟三。

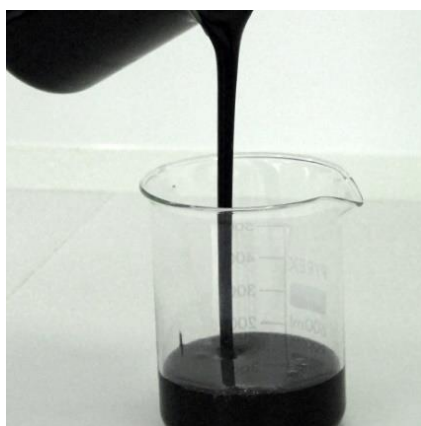


圖 3.15 奈米碳管懸浮液

資料來源：CANOE, 2015

步驟三：將單壁奈米碳管懸浮液和多壁奈米碳管懸浮液倒在一起並均勻攪拌，攪拌完須馬上進行步驟四，奈米碳管懸浮液不能存放於常溫太長的時間。

步驟四：將準備好的懸浮液倒入壓力桶中，利用正壓的原理，加壓器打出氣體至壓力桶中，壓力桶的氣壓足夠後，裡面的懸浮液會被氣壓擠出至平台，而奈米碳管則聚集在濾紙上，開始成形為奈米碳管紙，蒸餾水則通過濾紙流出平台外；因此從平台流出的液體必須為透明無色，如呈現黑色，表示平台中間的濾紙可能有破裂的狀況。

步驟五：經由三個半小時待壓力桶中的奈米碳管懸浮液全數擠出至平台中，而流出的蒸餾水容量達 500 ml，則可將奈米碳管紙從平台上取出，並將奈米碳管紙從濾紙上剝除，如過濾不成功（原因：尚未過濾結束、過濾時間過長、分散劑不足等等），即濾紙無法與奈米碳管紙分離；反之，則可成功剝除濾紙（圖 3.15）。

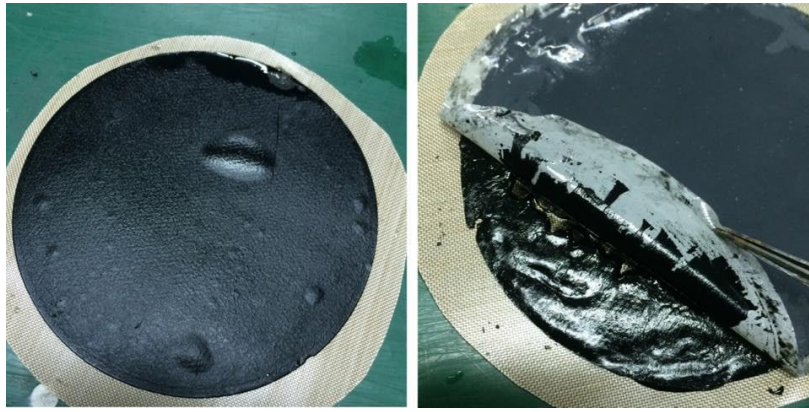


圖 3.16 濾紙剝除情形

資料來源：本研究整理

步驟六：將奈米碳管紙從濾紙上剝下來，並用兩片 Teflon 上下保護奈米碳管紙，放進異丙醇裡面泡三天，為的是將分散劑與奈米碳管紙分離，因為分散劑會影響奈米碳管紙的性能，因此要徹底的清洗乾淨。

步驟七：把奈米碳管紙從異丙醇裡面取出之後，用擦拭紙稍微吸乾充滿 IPA 的奈米碳管，再將奈米碳管紙放進烤箱裡面，以溫度 200 °C 烘烤 1 天，將殘餘在奈米碳管紙上的分散劑燒掉。

步驟八：將奈米碳管紙從烤箱裡面取出，就完成了 S : M = 9 : 4 的奈米碳管紙。

3.2.2 奈米碳管紙致動器

將自製的奈米碳管紙與充滿離子液體的質子交換膜結合，產生奈米碳管紙致動器，而本研究是根據林岳劭（2012）對於奈米碳管紙致動器針對其實驗參數做實驗設計分析，得出能做出在低的偏壓下得到良好且穩定的性能的奈米碳管紙致動器的實驗參數，做為本研究實驗參數的參考依據，以下為奈米碳管紙致動器的製作流程（圖 3.19）。

步驟一：將四種離子液體與 Nafion 放入烤箱裡面，用 120 °C 烘烤 1 小時，其目的是要將讓在 Nafion 上的水分子蒸發，使 Nafion 中沒有任何離子，而同時讓四種離子液體的溫度和 Nafion 一樣達到 120 °C，使 Nafion 在相同溫度下能更容易吸附離子液體。

步驟二：在步驟一烘烤 1 小時後，將水分子蒸發的 Nafion 各別浸泡在四種離子液體中，在 120 °C 的環境再烘烤一小時，使 Nafion 裡充滿離子；此步驟有可能發生 Nafion 並未成功吸附離子液體的現象，如

發現 Nafion 在浸泡過離子液體後呈現捲曲狀，表示離子並未均勻分散在 Nafion 中而導致這個現象發生（圖 3.16）。

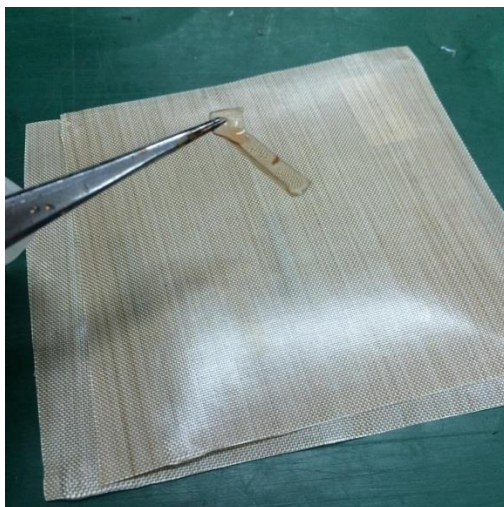


圖 3.17 Nafion 捲曲

資料來源：本研究整理

步驟三：從烤箱取出吸附離子液體的 Nafion 並且與自製的奈米碳管紙做複合，以三明治結構（BP/Nafion/BP）的形式疊放，並且用 Teflon 紙在兩側做保護的功用，避免 BP/Nafion/BP 被破壞。

步驟四：將排列整齊的 BP/Nafion/BP 以壓力 90 kg/cm^2 ，溫度 100°C 在熱壓機壓 13 分鐘，熱壓過後的 BP/Nafion/BP 上下表面顏色黝黑，不透光，方才是成功的奈米碳管紙致動器（圖 3.17 a），如取出呈現表面 BP 龜裂、透光，甚至表面 BP 會剝落（圖 3.17 b），表示此實驗失敗；其原因極可能為奈米碳管紙之機械性能問題，必須回到最前端檢視奈米碳管紙的製作流程，重新做出新的奈米碳管紙。

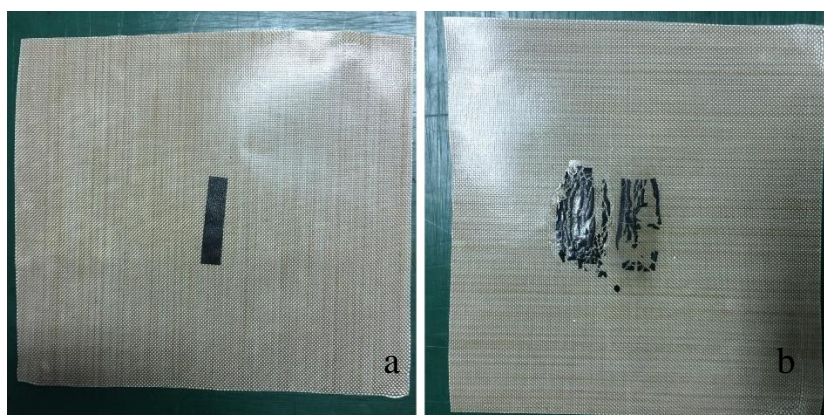


圖 3.18 奈米碳管紙致動器

資料來源：本研究整理

步驟五：熱壓過後的奈米碳管紙致動器，因為遇熱及壓力導致外觀會有延展呈現橢圓形，利用刀片將熱壓過後的 BP/Nafion/BP 切割成長×寬為 30 mm×10 mm 的大小，即為本研究使用之奈米碳管紙致動器。

步驟六：將奈米碳管紙致動器進行簡單的性能測試，確定此奈米碳管紙致動器能正常通電並產生擺動，如發生無法擺動之情形其原因有三：

1. 為 BP 並未正確貼合在 Nafion 上，使 BP 無法成功做為奈米碳管紙致動器的電極，因此必須重新進行熱壓至 BP 緊密與 Nafion 貼合在一起。
2. BP 機械性能不佳，導致導電能力降低。
3. Nafion 並未吸附到離子，通電後並沒有離子進行遷移進而使奈米碳管紙致動器產生擺動。

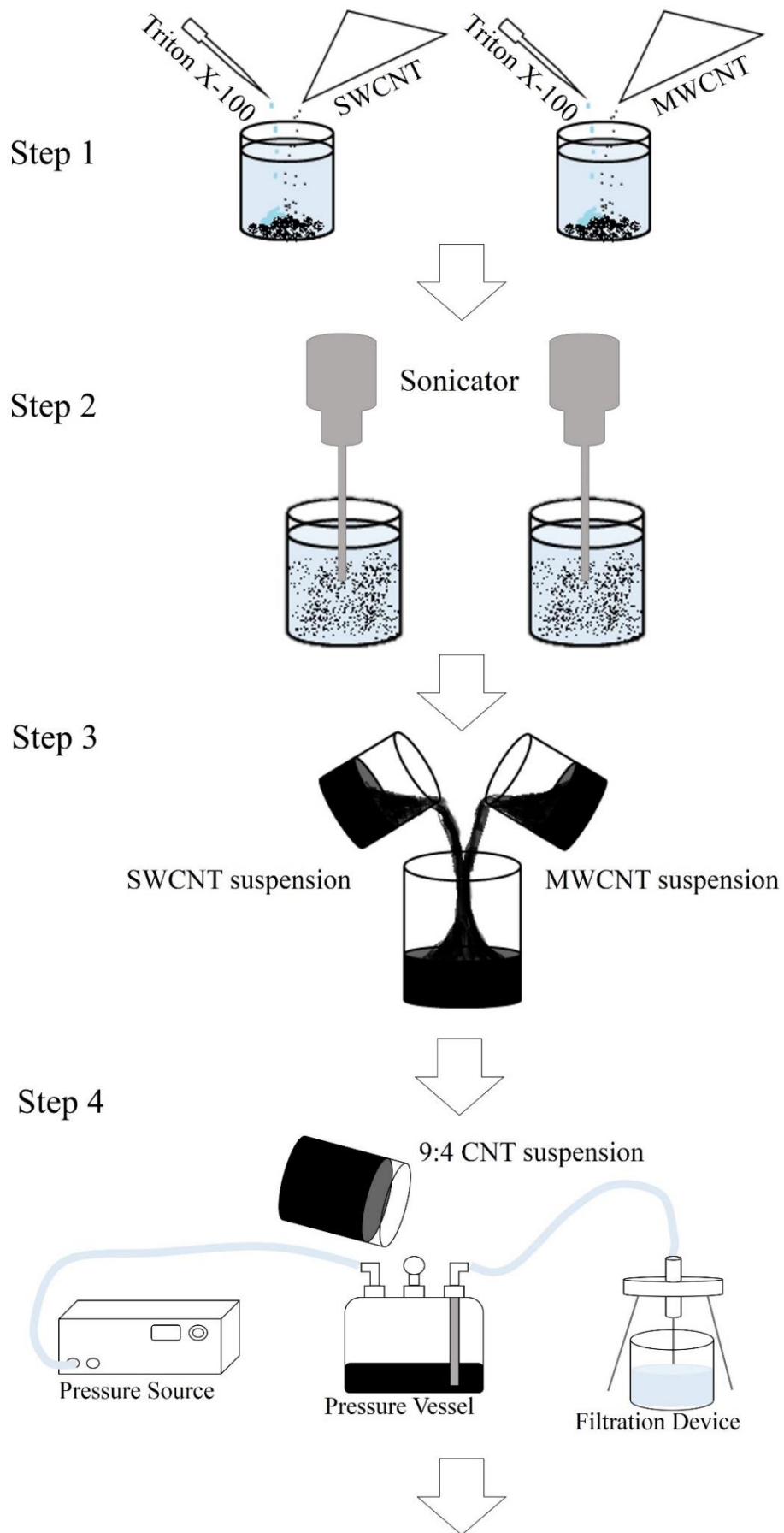


圖 3.19a 奈米碳管紙實驗流程

資料來源：本研究整理

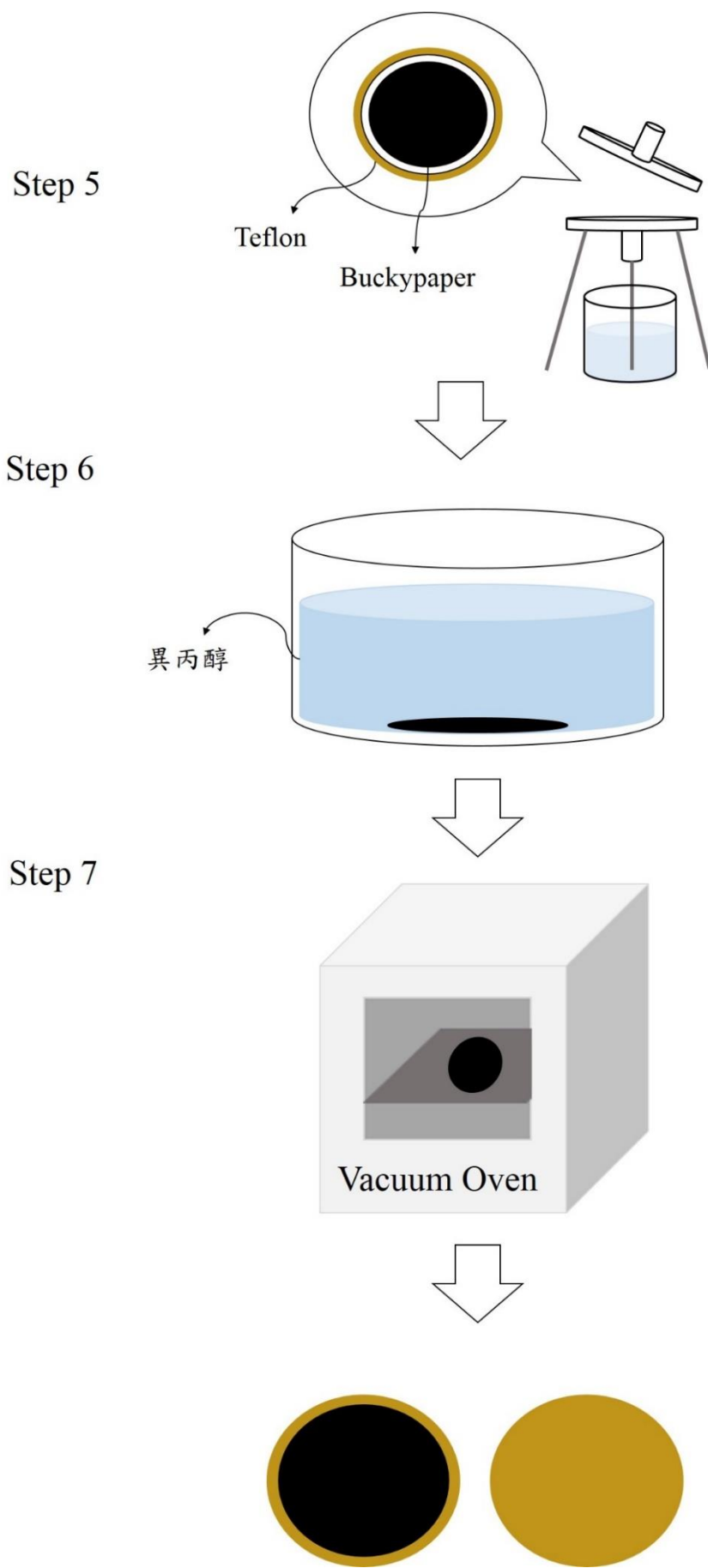


圖 3.19b 奈米碳管紙實驗流程

資料來源：本研究整理

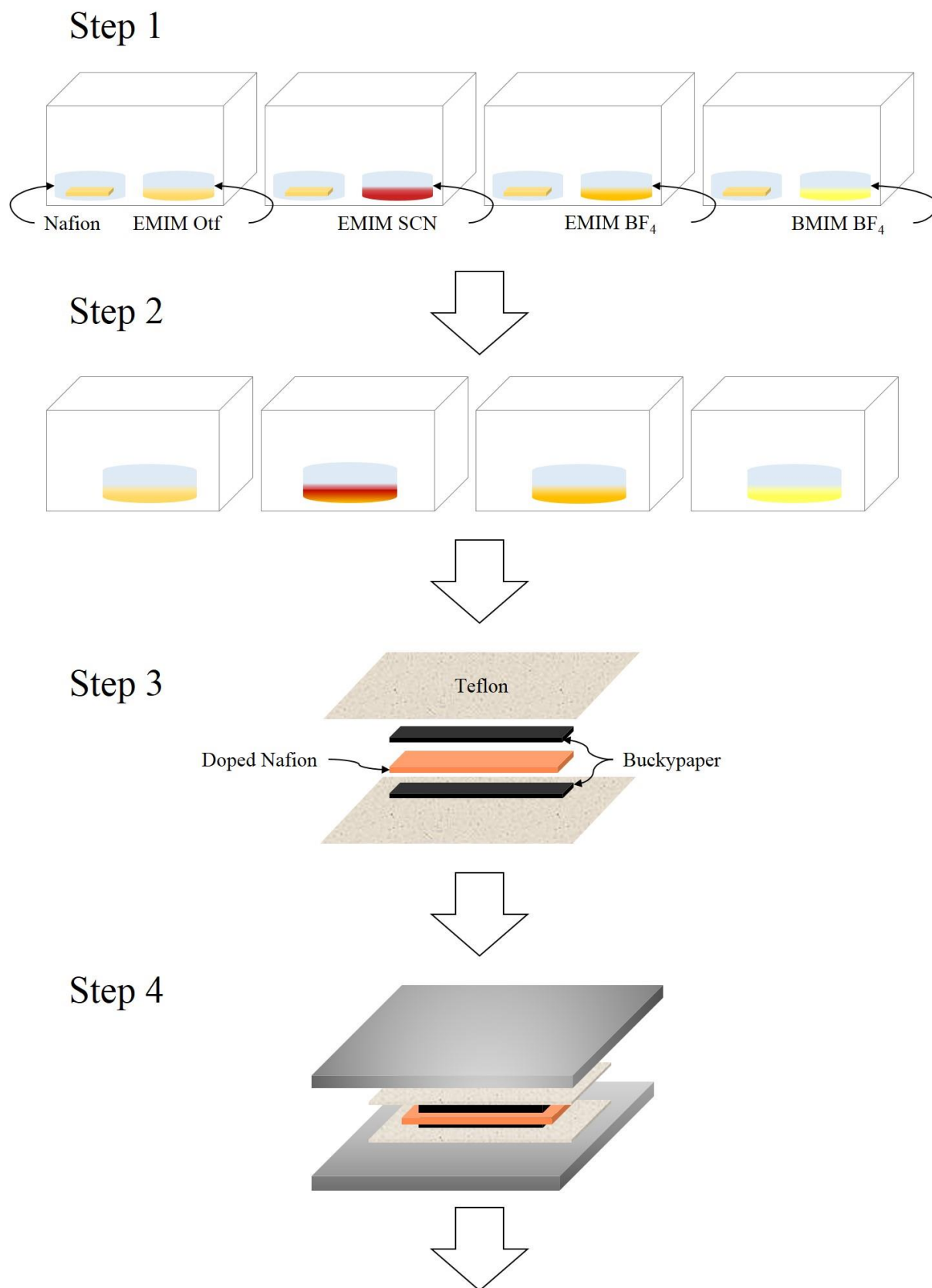
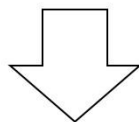
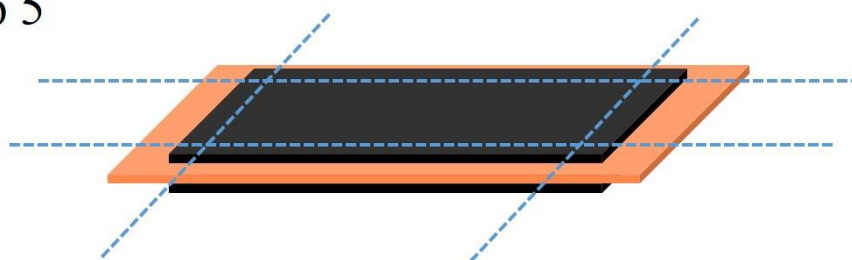


圖 3.20a 奈米碳管紙致動器實驗流程

資料來源：本研究整理

Step 5



Step 6



圖 3.20b 奈米碳管紙致動器實驗流程

資料來源：本研究整理

3.3 分析流程

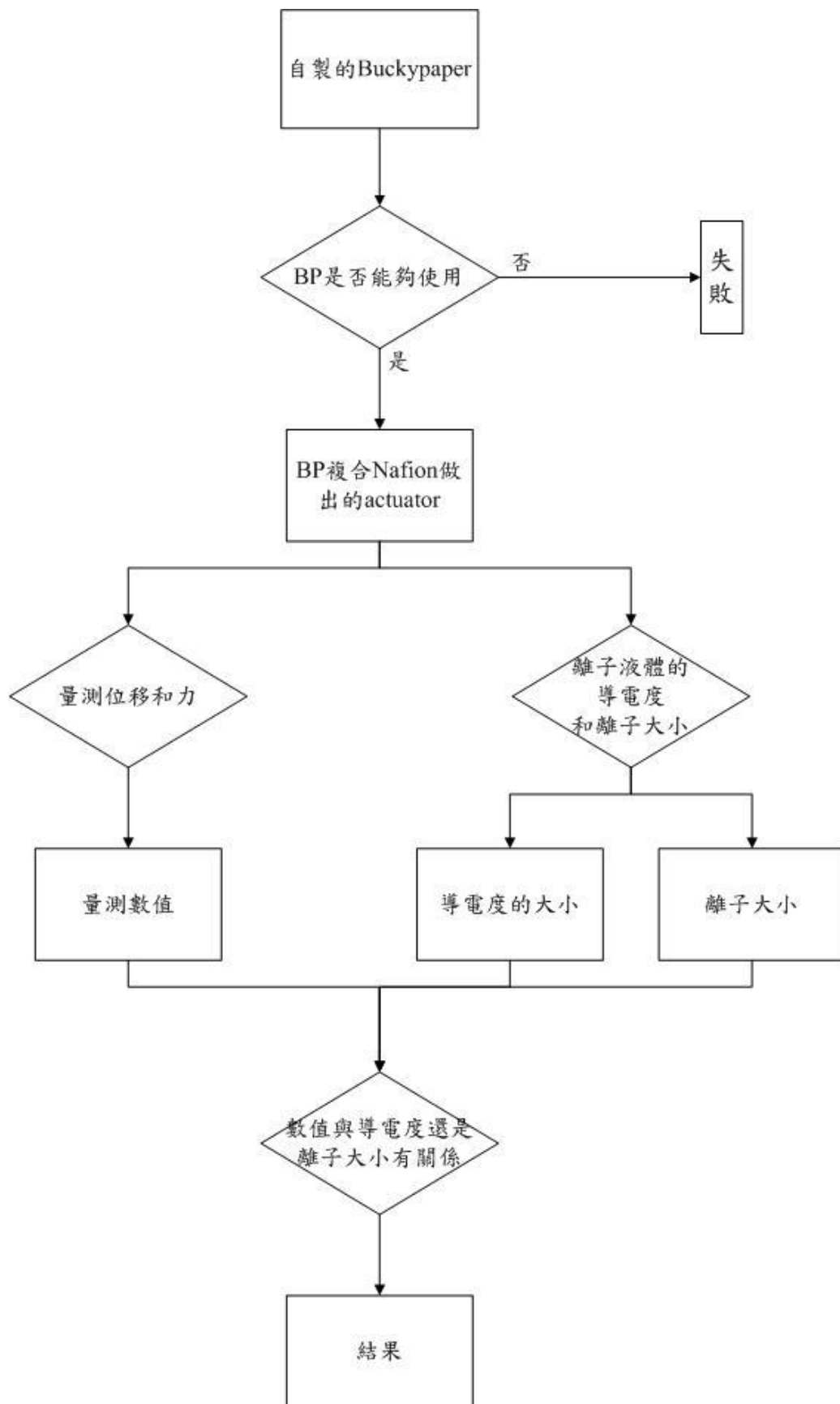


圖 3.21 研究分析流程

資料來源：本研究整理

此分析流程為本研究的研究方法（圖 3.20），利用這樣的分析方式，依據實驗步驟，循序漸進的將最後的實驗數據加以分析，進而推導出結論。從一開始自製的 BP 開始進行分析，在製作 BP 的過程中，可能會在某些步驟未達標準，導致自製的 BP 性能不佳，無法予以使用，因此一開始的時候需先判斷 BP 是否能夠應用在本研究的奈米碳管紙致動器上，依據圖 3.14 的步驟，以 BP 是否能夠與 Nafion 複合來判斷 BP 是否能夠使用；確定能夠 BP 的性能之後，將 BP 與 Nafion 複合成為奈米碳管紙致動器，並利用雷射位移計量測位移大小及使用荷重計量測力的大小，得到其兩組數據；同時確定離子液體個別的導電度及個別的其中離子的大小，將量測出來的數據與導電度和離子大小相互做比較，分析數據的趨勢與導電度還是離子大小比較有關係，推論出離子液體本身的導電度和離子大小之於奈米碳管紙致動器的影響是什麼，並提出什麼樣的離子液體最適合運用在奈米碳管紙致動器上。

得到結果之後，我們可以推導出以下結論：如果量測的數據是跟離子液體本身的導電度比較有關聯，表示離子液體導電度越高，做出來的奈米碳管紙致動器性能就越佳；而如果量測的數據是跟離子大小比較相關，則表示如果想提高奈米碳管紙致動器的性能，就必須考慮離子液體中的離子大小；然而，也是可能會發生，跟離子液體的導電度相關，且同樣也跟離子大小有關聯的狀況，如果是得到這樣的結果，就要同時考慮離子液體本身的導電度和離子的大小來得到性能佳的奈米碳管致動器。

第四章 實驗結果與數據分析

本章節將對奈米碳管紙及奈米碳管紙致動器的實驗結果進行分析，首先會先介紹奈米碳管紙的實驗成品，以能否製作成奈米碳管紙致動器為依據，判斷其優劣；確認 BP 性能後，再進行奈米碳管紙致動器的位移及輸出力量之量測，進而分析其所得之實驗數據，由此來判斷出此項數據與離子液體之趨勢與關係。

4.1 奈米碳管紙結果分析

奈米碳管紙會因為所使用之奈米碳管材料的不同，其性能及外觀會有些許的差異，本研究奈米碳管紙之結果分析，先量測其性能，並與 FSU (Florida State University) 產出之奈米碳管紙進行比較 (表 4.1)，以同樣比例 (9:4) 的狀況下，發現本研究自製奈米碳管紙擁有相當高的導電性能，而在楊氏係數與拉伸強度 (Tension force) 的部分，FSU 的奈米碳管紙相對較好；量測性能後，再使用實驗的方式做驗證，將奈米碳管紙與 Nafion 做結合，進而發現自製之奈米碳管紙所做的成品，有時候會產生龜裂或是無法貼合的情況，有性能不足的問題，從這個現象可以觀察出，導電度不是導致奈米碳管紙性能佳的唯一原因；雖然性能上還不夠完善，但其已足夠用來製成本研究所需之奈米碳管紙致動器。

表 4.1 奈米碳管紙性能

	FSU 9:4	自製 9:4
導電度 (S/cm)	46.6	326.2956
楊氏係數 (mPa)	716.56	590.05
拉伸強度 (mPa)	17.2	15.89

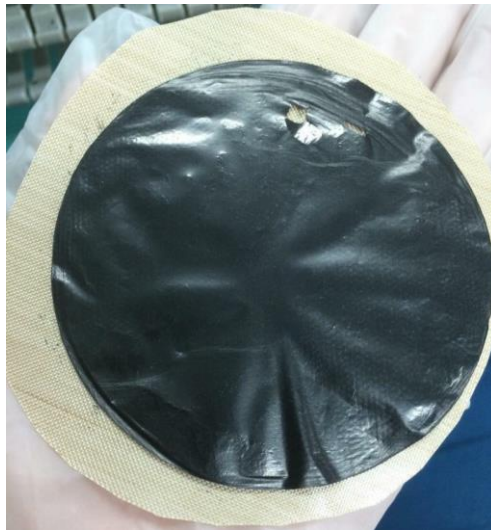


圖 4.1 自製之奈米碳管紙

資料來源：本研究整理

奈米碳管紙雖然製程簡易，但其在製作的過程中，有很多步驟可能會導致其最後成品失敗的原因，其失敗原因有三：

1. 奈米碳管懸浮液分散不完全

本研究分散奈米碳管時，由於設備上的限制，必須先分散單壁奈米碳管到完全分散，然後在分散多壁奈米碳管到完全分散的同時，必須將 SWCNT 懸浮液靜置於 0°C 的環境，至 MWCMT 懸浮液完全分散為止；在這過程中 SWCNT 可能會再度集結，導致最後懸浮液分散不完全；使用分散不完全的懸浮液做奈米碳管紙，會導致在過濾的過程中，奈米碳管相互之間聚集不易，而難以成膜，即使成功成膜也會降低其原本應有的機械性能，不利於之後與其他材料做應用。

2. 分散劑 Triton-X 添加的量

奈米碳管紙中如果有殘留 Triton-X，會影響其導電性能，但含量的多寡會影響奈米碳管分散的狀況；Triton-X 含量多，分散狀況良好，且經過一段時間不易再度聚集，反之，如果 Triton-X 含量少，在 SWCNT 懸浮液在 0°C 等待的過程中，奈米碳管可能會迅速聚集，產生沉澱，影響最後成品的生成。順帶一提，Triton-X 的含量也是影響奈米碳管紙是否能從濾紙上剝除的重點原因，Triton-X 含量多，剝除容易；反之，則導致奈米碳管紙成膜不易，不易剝除；Triton-X 量少，懸浮液可能產生肉眼無法判讀的分散不完全，導致奈米碳管聚集不易。

3. 後處理浸泡 IPA 時間長短

浸泡 IPA 之主要目的為洗淨存於奈米碳管紙的 Triton-X，Triton-X 是一種表面活性劑，也就是一種清潔劑，所以像清潔劑一樣會發泡，也具有黏性，存於奈米碳管紙中，除了影響奈米碳管紙之導電性外，也使其產生些許黏性，在烘烤的過程中會黏於 Teflon 上，無法取下，因此必須洗淨 Triton-X，而奈米碳管在低溫以及 IPA 的環境中，能穩定的存在，所以使用 IPA 來做為洗淨 Triton-X 的溶液。

4.2 奈米碳管紙致動器結果分析

4.2.1 致動原理

奈米碳管紙致動器為離子式 EAP 致動器的一種，利用離子遷移的方式使其產生形變；BP 與充滿離子液體的 Nafion 以三明治結構的方式複合，BP 層為兩側電極，Nafion 層為中間的電解質，通電後，陽離子會通過多孔性的 Nafion 往負電遷移，陰離子會往正電遷移，而由於陽離子聚集在陰極那一側，陰離子則聚集在陽極那一側，導致奈米碳管紙致動器產生形變（位移）（圖 4.2）。

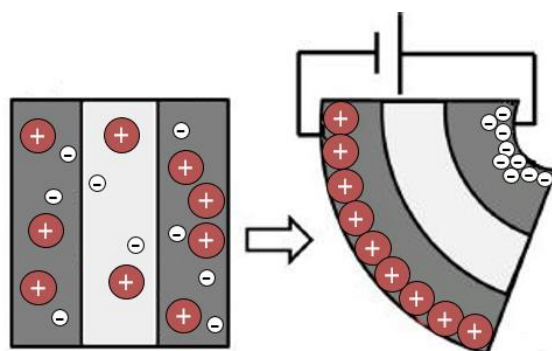


圖 4.2 離子遷移示意圖

資料來源：本研究整理

4.2.2 輸出力量測與結果

本研究之奈米碳管紙致動器輸出力量測，其量測設備為微小載重用拉伸式荷重計，首先，將銅膠黏於載玻片上形成電路，把奈米碳管紙致動器固定在載玻片上，再把正負極分別接在銅膠的兩端，然後利用函數波形產生器，輸出頻率與電壓至奈米碳管紙致動器上（圖 4.3），在其為零位移的狀態下，致動器尖端輕觸荷重計之感測輸出力探針後，通電致致動器使其產生擺動，並通過資料處理器擷取輸出力之數值（圖 4.4 輸出力量測裝置）。

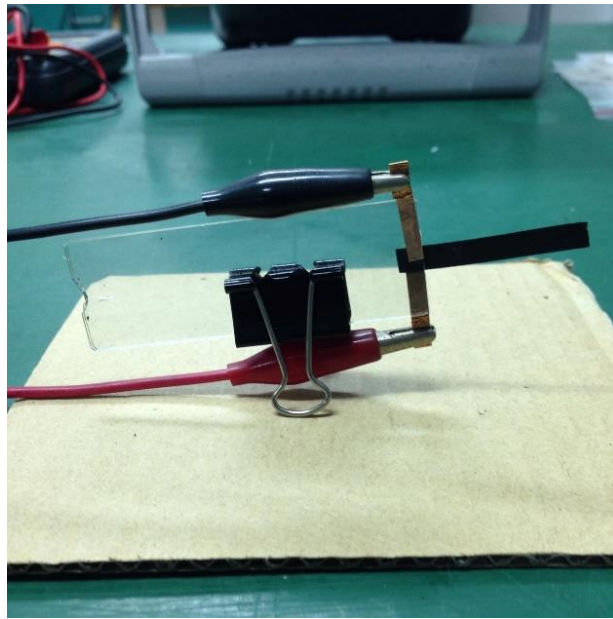


圖 4.3 電路裝置

資料來源：本研究整理

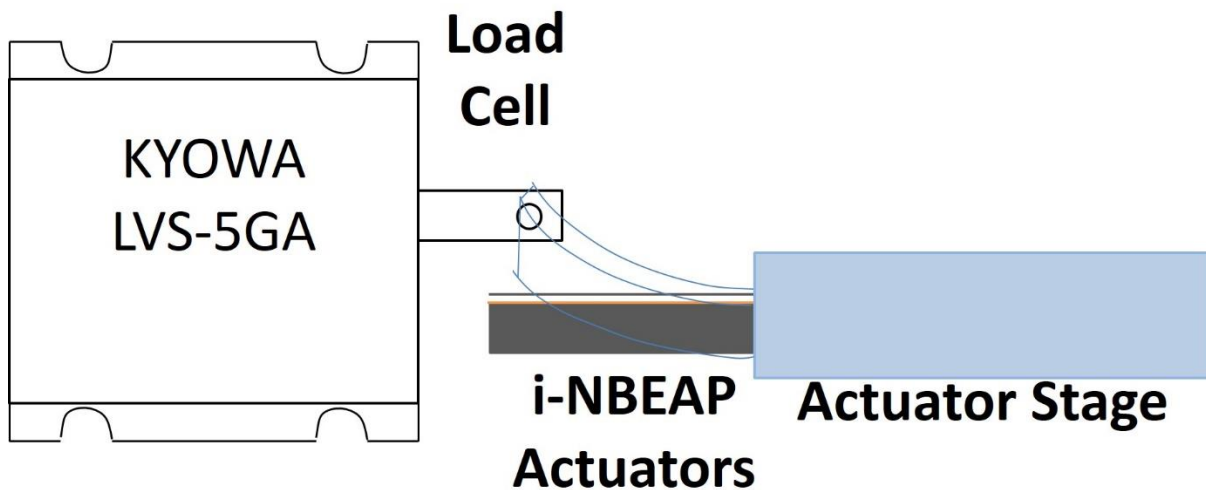


圖 4.4 輸出力量測裝置

資料來源：林岳劭（2014）

在做輸出力量測之前，我們先針對樣本長度和輸入樣本的電壓進行分析，來制訂量測輸出力所需的樣本長度和輸入樣本的電壓；在樣本長度的實驗中，發現其結果呈負相關成長，樣本長度越長，則輸出力越小(圖 4.5)，這是由於樣本長度越小，其離子堆積的能量就越大，增加輸出力，但樣本長度小於 0.5 cm 時，因為樣本太小，使之無法產生位移，因此，本研究最後以樣本長度 0.5 cm 做為量測的條件；在輸入樣本的電壓中，發現其結果呈正相關成長，輸入電壓越大，則輸出力越大(圖 4.6)，但本研究之樣本，

輸入電壓超過 7V，會毀壞樣本本身，因此，最後以輸入電壓 7V 做為量測的條件。本研究在 100 mHz、7V，樣本長度 0.5 cm 的條件下，對所有樣本進行量測，表 4.2 為四種離子液體做成奈米碳管紙致動器，並量測其輸出力，而為了確保其結果的正確性，每一種離子液體各做三次重複性實驗，並將輸出力的量測值整理成圖 4.7，從圖 4.7 中可以看出，四種離子液體製成奈米碳管紙致動器之輸出力，大小依序為：EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOTf > BMIMBF₄，EMIMSCN 離子液體製成之奈米碳管紙致動器，數據為 4.07mN，為能做出最佳輸出力的離子液體。

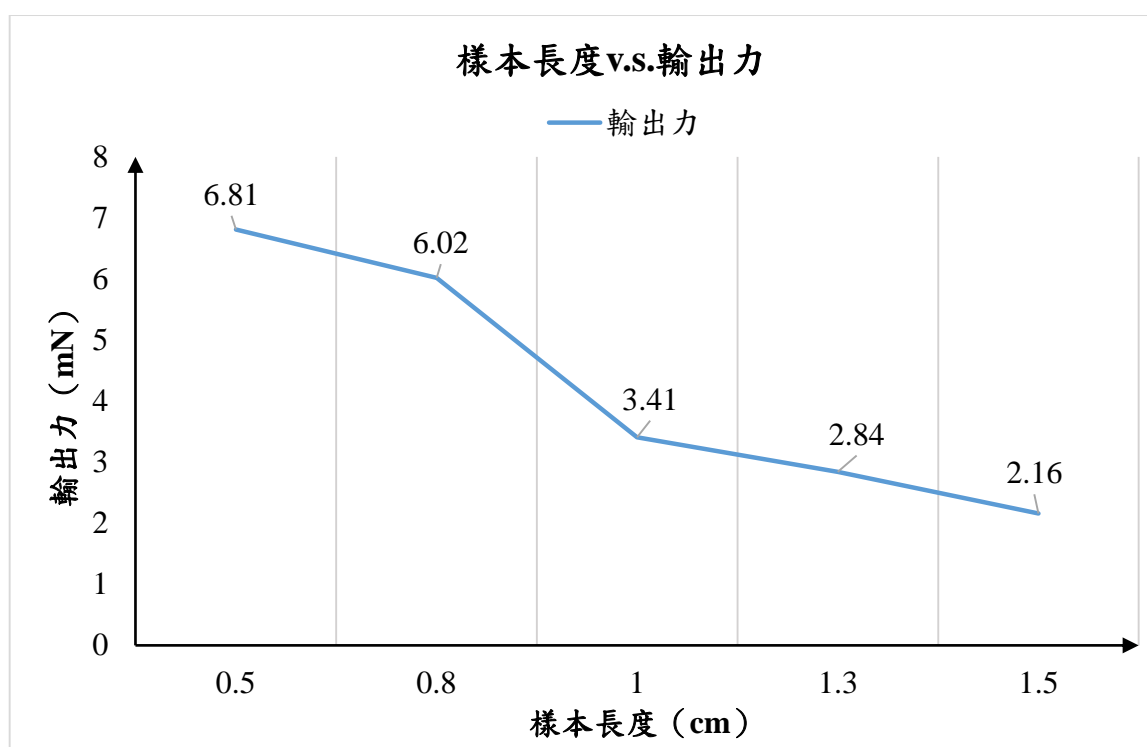


圖 4.5 樣本長度和輸出力關係圖

資料來源：本研究整理

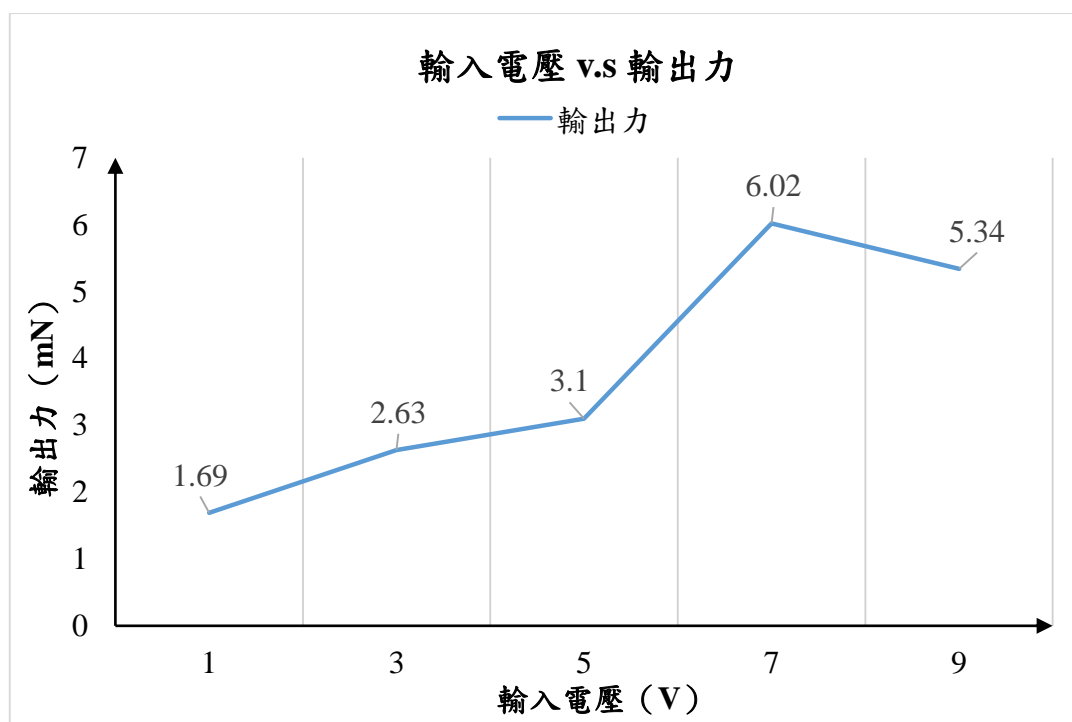


圖 4.6 輸入電壓和輸出力關係圖

資料來源：本研究整理

表 4.2 輸出力量測值（重複三次實驗）

	BMIMBF ₄	EMIMBF ₄	EMIMOf	EMIMSCN
第一次實驗 (mN)	0.88	1.49	1.19	2.68
第二次實驗 (mN)	1.92	4.70	2.60	3.88
第三次實驗 (mN)	0.61	2.86	1.63	4.07
平均 (mN)	1.14	3.02	1.81	3.54

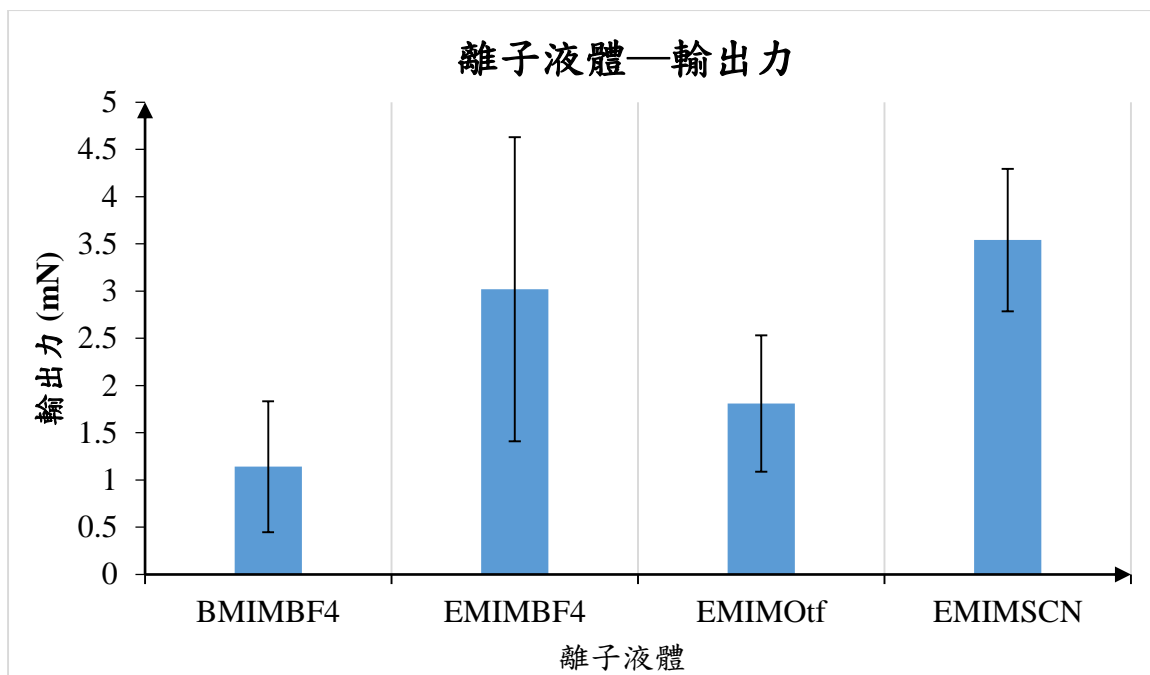


圖 4.7 四種離子液體輸出力比較圖

資料來源：本研究整理

4.2.3 位移量測與結果

本實驗之位移量測，是使用函數波形產生器輸出電壓至奈米碳管紙致動器，並用 MKII-SA 雷射位移計發出之雷射光量測其偏轉位移。先使用銅膠黏於玻璃載玻片上形成電路，對其施加電壓與頻率，再透過資料截取器取得利用雷射光所得之位移數據（圖 4.8）。

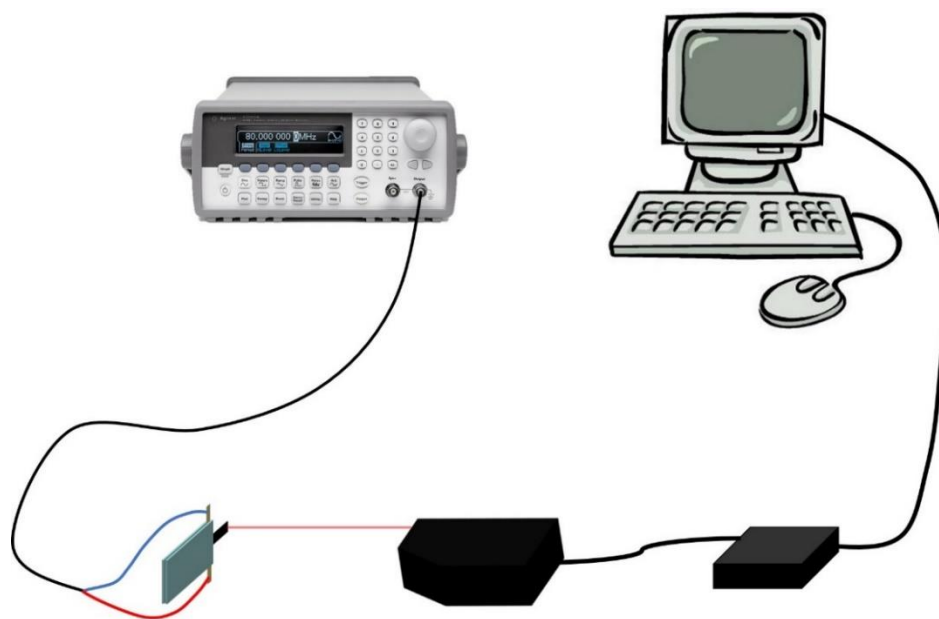


圖 4.8 位移量測裝置

資料來源：本研究整理

本研究在頻率為 100 mHz，輸入電壓為 5 V，量測樣本長度為 20 mm 的條件下，對所有樣本進行位移的量測，表 4.3 為四種離子液體做成奈米碳管紙致動器，並量測其位移，且為了確保其結果的正確性，每一種離子液體各做三次重複性實驗，並將位移的量測值整理成圖 4.9，從圖 4.9 中可以看出，四種離子液體製成奈米碳管紙致動器之位移，大小依序為：EMIMOtF > EMIMBF₄ > BMIMBF₄ > EMIMSCN，離子液體 EMIMOtF 製成之奈米碳管紙致動器，其位移為 3.98 m，為能做出最佳位移之離子液體。

表 4.3 位移量測值（重複三次實驗）

	BMIMBF ₄	EMIMBF ₄	EMIMOtF	EMIMSCN
第一次實驗 (mm)	3.27	3.23	3.79	3.09
第二次實驗 (mm)	2.53	3.31	4.02	3.52
第三次實驗 (mm)	2.74	4.00	4.13	2.53
平均 (mm)	2.85	3.51	3.98	3.05

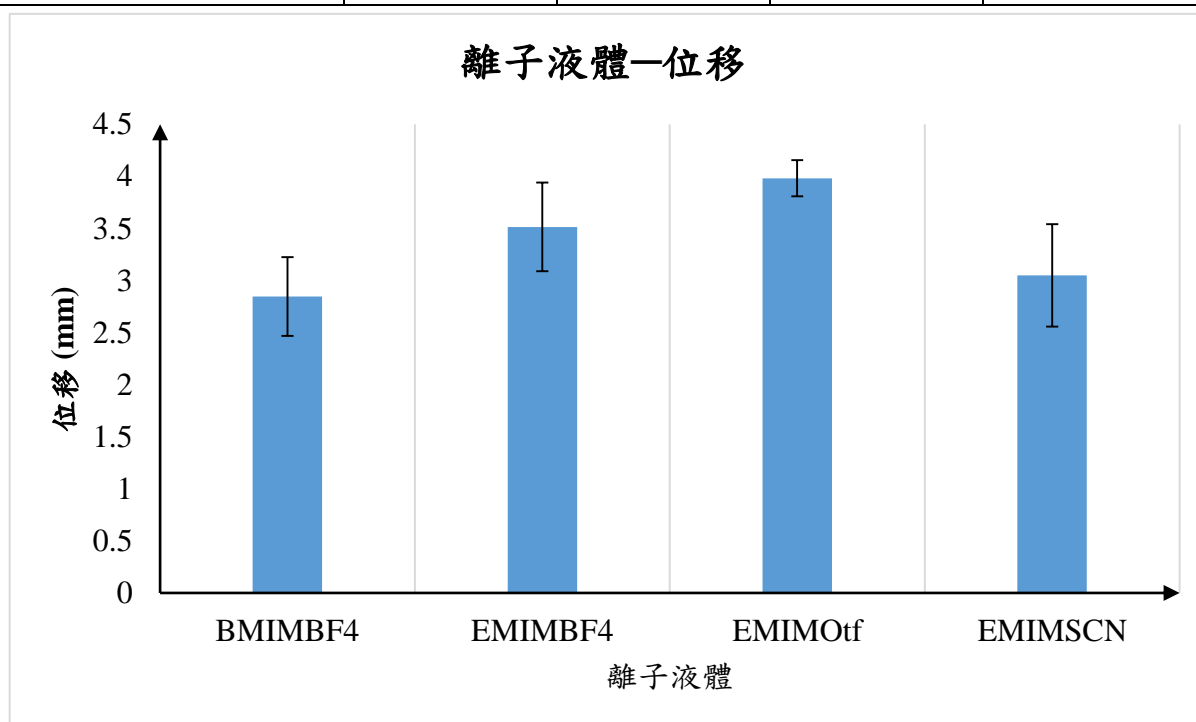


圖 4.9 四種離子液體位移比較圖

資料來源：本研究整理

綜合量測輸出力和位移的結果，我們可以得到離子液體 EMIMSCN 所製成之奈米碳管紙致動器能得到最佳之輸出力，離子液體 EMIMOtF 所製成之奈米碳管紙致動器能得到最佳之位移，在初步得到實驗結果後，以下將

分析四種離子液體的差異，並與上述得到之實驗數據進行分析與比較，進而判斷出能得到此實驗結果的原因為何，並整理出四種離子液體中，哪種離子液體最適合製成奈米碳管紙致動器。

4.2.4 數據分析

依離子種類分為兩組：A 組—陽離子不同之離子液體 (EMIMBF₄、BMIMBF₄)、B 組—陰離子不同之離子液體 (EMIMOTf、EMIMSCN、EMIMBF₄)。A 組離子液體之奈米碳管紙致動器 (如表 4.4)，輸出力大小為：EMIMBF₄ > BMIMBF₄，位移大小為：EMIMBF₄ > BMIMBF₄；A 組離子液體導電度大小為：EMIMBF₄ > BMIMBF₄，而陽離子大小為：BMI⁺ > EMI⁺；在輸出力的部分，觀察 A 組的離子液體中，以 EMIMBF₄ 之奈米碳管紙致動器，能得到較大的輸出力，而在位移的部分，同樣地，以 EMIMBF₄ 之奈米碳管紙致動器，能得到較大的位移，這是由於在相同陰離子 BF₄⁻ 的條件下，編號 1、2 離子液體當中，陽離子 BMI⁺ 體積較 EMI⁺ 大，使離子之間較容易聚合，導致移動較為困難 (圖 4.10)，所以 EMI⁺ 離子液體比 BMI⁺ 的離子液體更適合製作成奈米碳管紙致動器，輸出力與位移的結果與離子大小的結果相符合。

表 4.4 離子液體與輸出力分析結果-A 組

分組	A	
編號	1	2
品名	BMIMBF ₄	EMIMBF ₄
陽離子	BMI ⁺	EMI ⁺
陰離子	BF ₄ ⁻	
陽離子大小	大	小
導電度大小	4.3	14.0
輸出力大小	1.14	3.02
位移大小	2.85	3.51

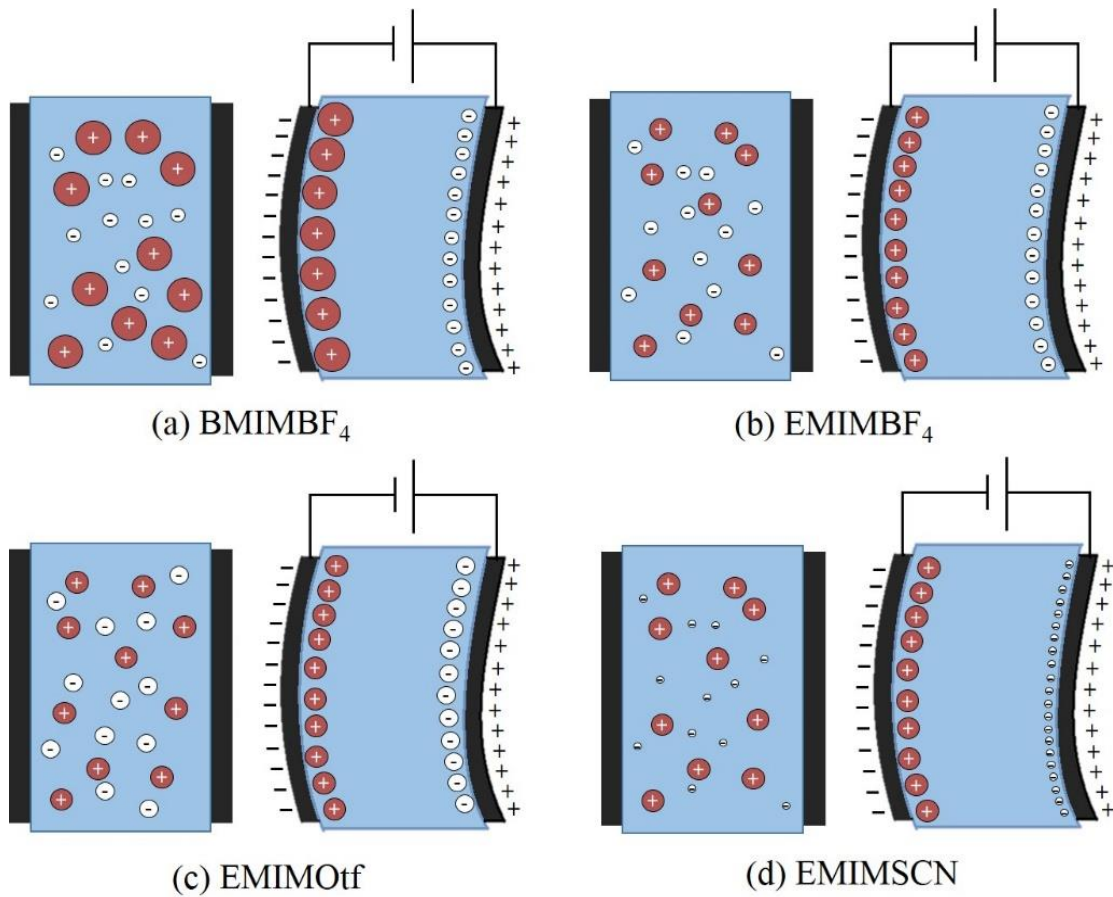


圖 4.10 四種離子液體之奈米碳管紙致動器示意圖：

(a) BMIMBF₄；(b) EMIMBF₄；(c) EMIMOtF；(d) EMIMSCN

資料來源：本研究整理

B 組離子液體之奈米碳管紙致動器（如表 4.7），輸出力大小依序為：EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOtF，位移大小依序為：EMIMOtF > EMIMBF₄ > EMIMSCN；B 組離子液體導電度大小依序為：EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOtF，而陰離子大小依序為：OtF⁻ > BF₄⁻ > SCN⁻；在輸出力的部分，觀察 B 組的離子液體中，以 EMIMSCN 之奈米碳管紙致動器，能得到最大輸出力，這是由於在相同陽離子 EMI⁺ 的條件下，編號 2、3、4 離子液體當中，以陰離子 SCN⁻ 體積最小，其單位面積能堆積到正極的離子數量最多（圖 4.12），其次為陰離子 BF₄⁻ 的 EMIMBF₄，然後是陰離子為 OtF⁻ 的 EMIMOtF，與輸出力為 EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOtF 的結果吻合，但在位移的部分，從實驗數據發現，陰離子為 SCN⁻ 的離子液體其位移結果為三種離子液體中最小，其次為陰離子 BF₄⁻ 的 EMIMBF₄，然後是陰離子為 OtF⁻ 的 EMIMOtF，其結果正好與離子大小和輸出力結果相反，並在實驗過程中發現，位移越小的樣本（EMIMSCN），其樣本觸感越硬，推測位

移與樣本本身強度有關係，因此，本研究針對奈米碳管紙致動器其拉伸強度與楊氏係數進行量測（表 4.5），得到其拉伸強度大小依序為：EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOf⁻（圖 4.11），楊氏係數大小依序為：EMIMSCN > EMIMBF₄ > EMIMOf⁻（圖 4.12），推論其拉伸強度越大，奈米碳管紙致動器能產生的位移就越小，這是由於樣本本身強度大，使其產生偏轉時受阻，而導致位移較小；其奈米碳管紙致動器在製作的過程中，Nafion 在浸泡於離子液體後，Nafion 本身硬度就已出現明顯的差異（圖 4.13），所以所做出來的奈米碳管紙致動器拉伸強度也相對不同；從實驗結果與數據得知，擁有陰離子 SCN⁻的離子液體，會使樣本變硬，增加強度，其次是陰離子為 BF₄⁻的離子液體，最後是陰離子為 Of⁻的離子液體。依據上面所述，整理如下：陰離子 SCN⁻的離子液體能做出輸出力大的奈米碳管紙致動器，而陰離子 Of⁻的離子液體能做出位移大的奈米碳管紙致動器。

表 4.5 離子液體與輸出力分析結果-B 組

分組	B		
編號	2	3	4
品名	EMIMBF ₄	EMIMOf ⁻	EMIMSCN
陽離子	EMI ⁺		
陰離子	BF ₄ ⁻	Of ⁻	SCN ⁻
陰離子大小	中	大	小
導電度大小	14.0	9.2	20.2
輸出力大小	3.02	1.81	3.54
位移大小	3.51	3.98	3.05
拉伸強度大小	17.62	11.95	21.02
楊氏係數大小	13.27	8.76	14.68

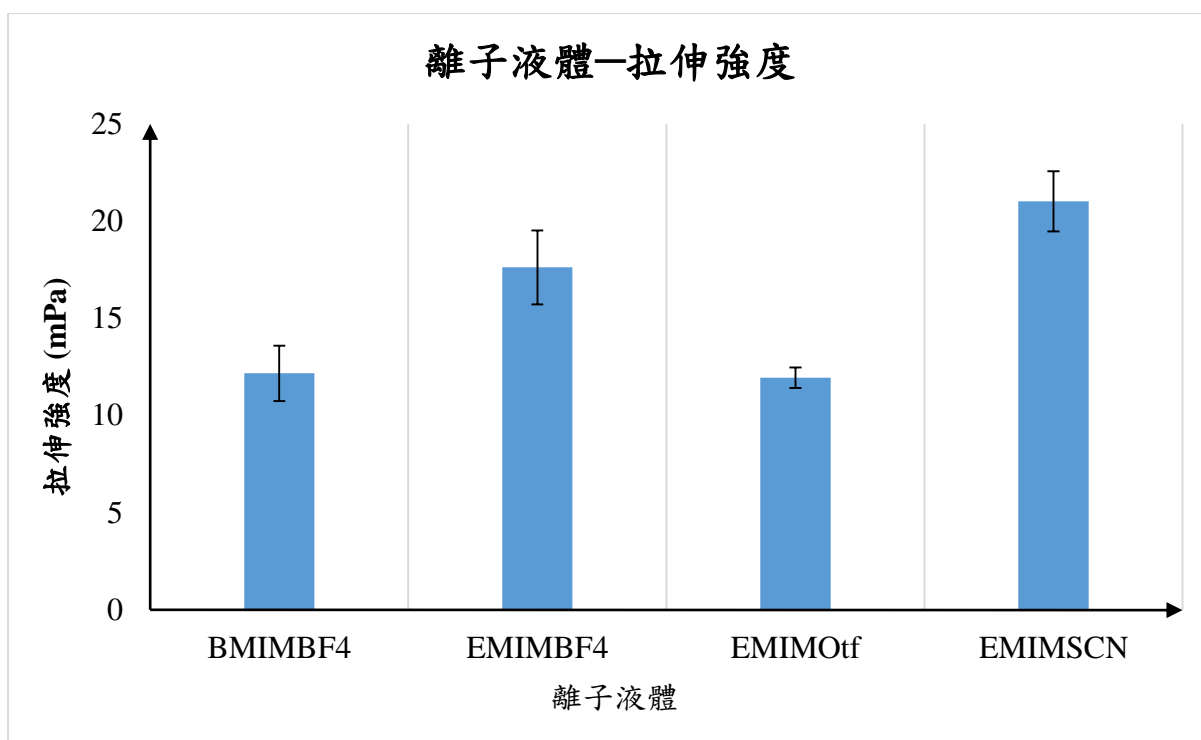


圖 4.11 四種離子液體拉伸強度比較圖

資料來源：本研究整理

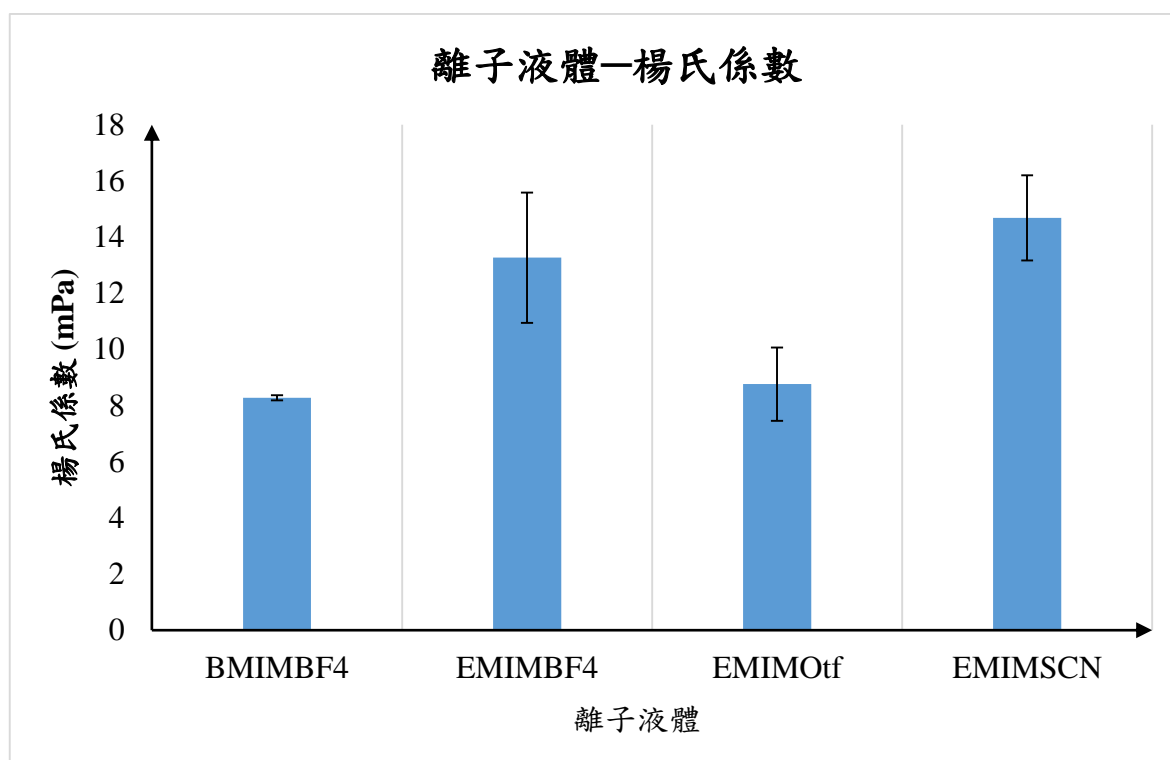


圖 4.12 四種離子液體楊氏係數比較圖

資料來源：本研究整理

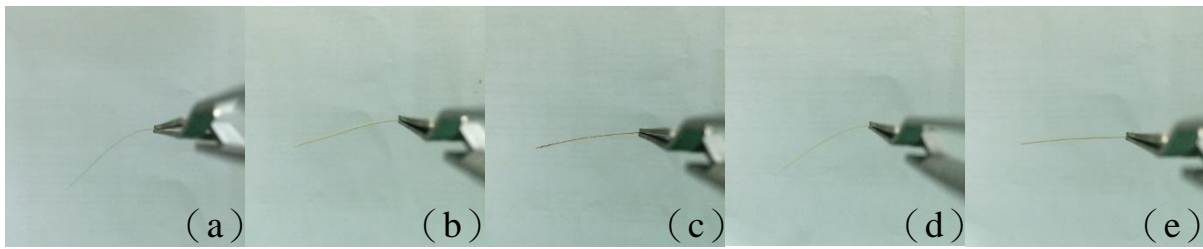


圖 4.13 浸泡過離子液體的 Nafion：(a) BMIMBF_4 ；(b) EMIMBF_4 ；(c) EMIMOTf ；(d) EMIMBF_4 ；(e) 純 Nafion

資料來源：本研究整理

4.3 小結

在奈米碳管紙的部分，本研究使用 $\text{SWCNT}:\text{MWCNT} = 9:4$ 自製奈米碳管紙，並提出一個有效的奈米碳管紙實驗流程，而實驗結果發現，其擁有相當好的導電性能，但在機械性能的部分，還不及 FSU 產出之奈米碳管紙，雖然性能上還不夠完善，但其已足夠用來製成奈米碳管紙致動器，因此本研究採用自製奈米碳管紙來製成奈米碳管紙致動器。

而在奈米碳管紙致動器的部分，上述針對陰離子相同而陽離子不同的離子液體製成的奈米碳管紙致動器（A 組），與陽離子相同而陰離子不同的離子液體製成的奈米碳管紙致動器（B 組），分別做位移及輸出力的分析，得到的結果為：A 組輸出力： $\text{EMIMBF}_4 > \text{BMIMBF}_4$ 、位移為： $\text{EMIMBF}_4 > \text{BMIMBF}_4$ ；B 組輸出力： $\text{EMIMSCN} > \text{EMIMBF}_4 > \text{EMIMOTf}$ 、位移為： $\text{EMIMOTf} > \text{EMIMBF}_4 > \text{EMIMSCN}$ ；而經由上述分析可得知，在分析陽離子的 A 組離子液體當中，擁有陽離子 EMI^+ 的離子液體所製成的奈米碳管紙致動器，其產生之輸出力與位移較佳，因此判斷其離子液體較適合用來製成奈米碳管紙致動器；而分析陰離子的 B 組離子液體當中，擁有陰離子 SCN^- 的離子液體所製成的奈米碳管紙致動器，其產生輸出力較佳，其次為離子液體 EMIMBF_4 ，而擁有陰離子 Otf^- 的離子液體所做出來的奈米碳管紙致動器，其能產生較大的位移，其次為離子液體 EMIMBF_4 。綜合 A、B 組的結果，本研究推論出，如果想要製作輸出力大的奈米碳管紙致動器，即選擇離子液體 EMIMSCN ，製作位移較佳的奈米碳管紙致動器，則選擇離子液體 EMIMOTf ，而如果要同時擁有好的輸出力及位移，即可選擇離子液體 EMIMBF_4 製作奈米碳管紙致動器最為適當。

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究期望能自製出性能優越的奈米碳管紙，以及透過實驗結果分析不同的離子液體對於製成奈米碳管紙致動器，會有何不同的性能與結果。

在奈米碳管紙的部分，本研究成功的自製出直徑 10cm，導電性高的奈米碳管紙，但由於技術不夠純熟，因此其結構以及機械性能的部分還需要加強，期望之後能透過製程的改善或是材料的改變，來補強其目前性能不足的問題。

在奈米碳管紙致動器的部分，本研究分析四種不同的離子液體製成奈米碳管紙致動器會有什麼不同的性能跟結果，經由實驗結果得知，不同的離子液體會因為其離子種類及離子體積大小，而影響奈米碳管紙致動器的性能，實驗結果顯示：陽離子 EMI^+ 的體積較小，單位面積能堆積到電極的離子數量最多，所以其離子液體所做出來的奈米碳管紙致動器能得到最大的輸出力及位移；而在陽離子同為 EMI^+ 卻擁有不同陰離子的三種離子液體中，以陰離子 SCN^- 體積最小，其離子液體能得到最大之輸出力，其次為陰離子 BF_4^- 的離子液體，最後為體積最大之陰離子 Otf^- 的離子液體，但陰離子為 SCN^- 的離子液體得到的位移卻是三種離子液體中最小，本研究進而進行拉伸強度和楊氏係數的量測，歸納出，離子液體 $EMIMSCN$ 使拉伸強度增加，其次為 $EMIMBF_4$ ，最後為 $EMIMOf$ ，而實驗數據得知，其拉伸強度及楊氏係數的值越大，使奈米碳管紙致動器在偏轉的過程中受到阻礙，所以擁有 SCN^- 的離子液體所做之奈米碳管紙致動器其位移最小，其次為陰離子 BF_4^- 的離子液體，最後為陰離子 Otf^- 的離子液體。因此，本研究推論出，如果想要製作輸出力大的奈米碳管紙致動器，即選擇離子液體 $EMIMSCN$ ，製作位移較佳的奈米碳管紙致動器，則選擇離子液體 $EMIMOf$ ，而如果要同時擁有好的輸出力及位移，即可選擇離子液體 $EMIMBF_4$ 製作奈米碳管紙致動器最為適當。

5.2 未來課題

奈米碳管紙製作技術已趨近成熟，但要製作出性能優越的奈米碳管紙，需要在技術上進行微調，且選擇適當的材料。期望未來能針對本研究提出之奈米碳管紙製作流程，製作出導電性高、結構緊密且性能優越的奈米碳

管紙。

奈米碳管紙致動器是能產生極佳性能，且較低功耗的微機電系統，許多研究致力於提升其性能，而本研究針對離子液體，其製作材料之一，以離子液體對奈米碳管紙致動器的影響做分析，期望未來能夠依據本研究提出的論點，找出更適合製成奈米碳管紙致動器的離子液體，使其性能達到最佳。

參考文獻

中文部分

1. 丁海濤 (2010)。IPMC 人工肌肉材料的製備 理論模型與分析。南京航空航天大學，南京市。
2. 三聯科技 (2015)。荷重計。取自：<http://www.sanlien.com/web/homepage.nsf/main3?OpenForm&View=19&start=31&count=10>
3. 中原大學電機工程學系 專題成果 (2014)。液晶摻雜不同維度碳奈米材料之介電研究。取自：http://www.ee.cycu.edu.tw/topic_page.php?id=103&page=3&year
4. 沈倩宇 (2012)。基於離子液體凝膠的電致動膜材料研究。上海師範大學，上海市。
5. 林岳劭 (2014)。利用實驗設計法最佳化 奈米碳管紙致動器性能之研究。東海大學工業工程與經營資訊所碩士論文，台中市。
6. 邵信 (2014)。離子液體在環境領域之應用。工研院材料與化工研究所，新竹縣。
7. 陳益臻, & 陳大潘 (2004)。離子高分子金屬複合材料制動器之電壓與位移關係之研究。國立交通大學，新竹市。
8. 葉孟考、黃婉萱、宋棋舜和呂俊麟 (2009)。複合材料力學近況簡介。國立清華大學動力機械工程學系，新竹市。
9. 機器世界 工業機器人日報 (2014)。上市公司爭相聯姻工業機器人華昌達收購德梅柯備受矚目。取自：<http://www.jiqishijie.com/p/186>

英文部分

1. Akita, S., Nakayama, Y., Mizooka, S., Takano, Y., Okawa, T., Miyatake, Y., . . . Nosaka, T. (2001). Nanotweezers consisting of carbon nanotubes operating in an atomic force microscope. *Applied Physics Letters*, 79 (11), 1691-1693.
2. Bar-Cohen, Y. (2007). Focus issue on biomimetics using electroactive polymers as artificial muscles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2 (2) , null.
3. Bennett, M. D., & Leo, D. J. (2004). *Ionic liquids as novel solvents for ionic polymer transducers*. Paper presented at the Smart Structures and Materials.
4. Chen, I.-W. P., Cottinet, P.-J., Tsai, S.-Y., Foster, B., Liang, R., Wang, B., & Zhang, C. (2012). Improved performance of carbon nanotube buckypaper and ionic-liquid-in-Nafion actuators for rapid response and high durability in the open air. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 171, 515-521.
5. Cottinet, P.-J., Le, M.-Q., Degraff, J., Souders, C., Liang, Z., Wang, B., & Zhang, C. (2013). Strain phenomenon in carbon nanotube buckypaper actuator: Experiments and modeling. *Sensors and Actuators A: Physical*, 194, 252-258.
6. Cottinet, P.-J., Souders, C., Tsai, S.-Y., Liang, R., Wang, B., & Zhang, C. (2012). Electromechanical actuation of buckypaper actuator: Material properties and performance relationships. *Physics Letters A*, 376 (12), 1132-1136.

7. CANOE (2015). Aqueous dispersion of carbon nanotubes Retrieved from <http://www.platorme-canoe.com/product/aqueous-dispersion-of-carbon-nanotubes/>
8. Electrochemistry Encyclopedia (2004). Electroactive Polymer (EAP) Retrieved from <http://knowledge.electrochem.org/encycl/art-p02-elact-pol.htm>
9. Freemantle, M. (1998). Designer solvents-Ionic liquids may boost clean technology development. *Chemical & engineering news*, 76 (13), 32-37.
10. Kikuchi, K., & Tsuchitani, S. (2009). Nafion® -based polymer actuators with ionic liquids as solvent incorporated at room temperature. *Journal of Applied Physics*, 106 (5), 053519.
11. Konka, H. P., Wahab, M., & Lian, K. (2012). On mechanical properties of composite sandwich structures with embedded piezoelectric fiber composite sensors. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 134 (1), 011010.
12. Kwon, K.-S., & Ng, T. N. (2014). Improving electroactive polymer actuator by tuning ionic liquid concentration. *Organic Electronics*, 15 (1), 294-298.
13. KEYSIGHT TECHNOLOGIES (2015). Function generator Retrieved from <http://www.keysight.com/main/techSupport.jsp?nid=-536902257.536883183&pageMode=PL&lc=cht&cc=TW>
14. Melvin, G. J. H., Ni, Q.-Q., & Natsuki, T. (2014). Fabrication and characterization of polymer-based electroactive nanocomposite actuator. *Microelectronic Engineering*, 126, 9-12.
15. Make (2010). Airship controlled by electroactive polymers Retrieved from <http://makezine.com/2010/04/18/airship-controlled-by-electroactive/>
16. SIGMA-ALDRICH (2015). Ionic Liquid Retrieved from <https://www.sigmaaldrich.com/taiwan.html>
17. SIGMA-ALDRICH (2015). Nafion® perfluorinated membrane Retrieved from <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/274674?lang=en®ion=TW>
18. SIGMA-ALDRICH (2015). Triton-X Retrieved from <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/fluka/93420?lang=en®ion=TW>
19. Takeuchi, I., Asaka, K., Kiyohara, K., Sugino, T., Mukai, K., & Randriamahazaka, H. (2010). Electrochemical impedance spectroscopy and electromechanical behavior of bucky-gel actuators containing ionic liquids. *The Journal of Physical Chemistry C*, 114 (34), 14627-14634.
20. Tamagawa, H., Lin, W., Kikuchi, K., & Sasaki, M. (2011). Bending control of Nafion-based electroactive polymer actuator coated with multi-walled carbon nanotubes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156 (1), 375-382.
21. Tikalon (2011). Transparent and Conductive Retrieved from <http://tikalon.com/blog/blog.php?article=2011/ITO>
22. WorldWide ElectroActive Polymers (2008). Artificial Muscles Newsletter Retrieved from http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP_Newsletter10-2.pdf