

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

化學反應、光分解、能量轉移等氣動態研究與各式光譜儀在  
分析化學之應用

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2113-M-002-033-

執行期間：91年08月01日至92年10月31日

執行單位：國立臺灣大學化學系暨研究所

計畫主持人：林金全

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 20 日

# 國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式

## 一、說明

國科會基於學術公開之立場，鼓勵一般專題研究計畫主持人發表其研究成果，但主持人對於研究成果之內容應負完全責任。計畫內容及研究成果如涉及專利或其他智慧財產權、違異現行醫藥衛生規範、影響公序良俗或政治社會安定等顧慮者，應事先通知國科會不宜將所繳交之成果報告蒐錄於學門成果報告彙編或公開查詢，以免造成無謂之困擾。另外，各學門在製作成果報告彙編時，將直接使用主持人提供的成果報告，因此主持人在繳交報告之前，應對內容詳細校對，以確定其正確性。

本格式說明僅為統一成果報告之格式，以供撰寫之參考，並非限制研究成果之呈現方式。精簡報告之篇幅（不含封面之頁數）以 4 至 10 頁為原則，完整報告之篇幅則不限制頁數。

成果報告繳交之期限及種類（精簡報告、完整報告或期中報告等），應依本會補助專題研究計畫作業要點及專題研究計畫經費核定清單之規定辦理。

## 二、內容格式：依序為封面、中英文摘要、目錄（精簡報告得省略）、報告內容、參考文獻、計畫成果自評、可供推廣之研發成果資料表、附錄。

(一)報告封面：請至本會網站( <http://www.nsc.gov.tw> )下載製作( 格式如附件一 )

(二)中、英文摘要及關鍵詞(keywords)。

(三)報告內容：請包括前言、研究目的、文獻探討、研究方法、結果與討論（含結論與建議）等。若該計畫已有論文發表者，可以 A4 紙影印，作為成果報告內容或附錄，並請註明發表刊物名稱、卷期及出版日期。若有與執行本計畫相關之著作、專利、技術報告、或學生畢業論文等，請在參考文獻內註明之，俾可供進一步查考。

(四)頁碼編寫：請對摘要及目錄部分用羅馬字 I、II、III 標在每頁下方中央；報告內容至附錄部分請以阿拉伯數字 1.2.3. 順序標在每頁下方中央。

(五)附表及附圖可列在文中或參考文獻之後，各表、圖請說明內容。

(六)計畫成果自評部份，請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

(七)可供推廣之研發成果資料表：凡研究性質屬**應用研究及技術發展**之計畫，請依本會提供之表格（如附件二），每項研發成果填寫一份。

## 三、計畫中獲補助國外或大陸地區差旅費、出席國際學術會議差旅費或國際合作研究計畫差旅費者，須依規定撰寫心得報告（出席國際學術會議者須另附發表之論文），以附件方式併同成果報告繳交，並請於成果報告封面註記。

## 四、打字編印注意事項

### 1. 用紙

使用 A4 紙，即長 29.7 公分，寬 21 公分。

### 2. 格式

中文打字規格為每行繕打( 行間不另留間距 )，英文打字規格為 Single Space。

### 3. 字體

報告之正文以中英文撰寫均可。在字體之使用方面，英文使用 Times New Roman Font，中文使用標楷體，字體大小請以 12 號為主。

化學反應、光分解、能量轉移等

氣動態研究與各式光譜儀在分析化學之應用

計畫類別： 個別型計畫            整合型計畫  
計畫編號：NSC 91 - 2113 - M - 002 - 033 -  
執行期間： 91 年 08 月 01 日至 92 年 07 月 31 日

計畫主持人：林金全  
共同主持人：  
計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告      完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：  
赴國外出差或研習心得報告一份  
赴大陸地區出差或研習心得報告一份  
出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份  
國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢  
    涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學化學系

關鍵詞：雷射誘發裂解；感應耦合電漿質譜儀；富氏光譜儀；單一分子。

我們在 91 年 8 月 1 日~92 年 7 月 31 日執行國科會的計畫，化學反應、光分解、能量轉移等氣動態研究與各式光譜儀在分析化學之應用。第一年已完成的結果有：

**Key words:** LIBS; ICP-MS; FTS; single molecule.

We have accomplished the second-year task (contract no. NSC 91-2113-M-002-033 ) of a two-year term project. The results lead to several papers published. They are listed as follows:

1. J. S. Huang, C. B. Ke, L. S. Huang, K. C. Lin, "The Correlation between Ion Production and Emission Intensity in the Laser-induced Breakdown Spectroscopy of Liquid Droplets", *Spectrochim. Acta B* 57, 35 (2002).
2. E. C. C. Chuang and K. C. Lin, "Fourier Transform Near Infrared Absorption Spectroscopic Study of Catalytic Isomerization of Quadricyclane to Norbornadiene by Copper (II) and Tin (II) Salts", *J. Phys. Chem. B* 106, 132 (2002).
3. J. L. Lin, K. C. Lin, W. B. Tzeng, "Mass-analyzed Threshold Ionization Spectroscopy of o-, m-, and p-Methylaniline Cations: Vicinal Substitution Effects on Electronic Transition, Ionization, and Molecular Vibration", *J. Phys. Chem. A* 106, 6462 (2002).
4. C. B. Ke and K. C. Lin, "Matrix Effect of Alkali and Alkaline Earth Metal Halides on Fluorescence Quantum Yield of Indium in Laser-induced Fluorescence Flame Spectrometry", *J. Chin. Chem. Soc.* 49, 483 (2002).
5. K. C. Lin and R. Vetter, "Alkali-Hydrogen Reactions", *Int. Rev. Phys. Chem.* 21, 357 (2002).
6. T. L. Chin and K. C. Lin, "Two-dimensional Correlation Analysis in Application to Kinetic Model of Parallel Reactions", *Appl. Spectrosc.* 57, 168 (2003).
7. J. J. Chen, Y. W. Song, K. C. Lin, and Y. M. Hung, "Reaction Pathway and Energy Disposal of the CaH Product in the Reaction of  $\text{Ca}(4s4p^1P_1) + \text{CH}_4 \rightarrow \text{CaH}(X^2\Sigma^+) + \text{CH}_3$ ", *J. Chem. Phys.* 118, 4938 (2003).
8. N.M. Raut, L. S. Huang, S. K. Aggarwal, and K. C. Lin, "Determination of Lanthanides in Rock Samples by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry using Thorium as Oxide and Hydroxide Correction Standard", *Spectrochim. Acta B* 58, 809 (2003).
9. T. L. Chin and K. C. Lin "Two-dimensional Correlation Analysis for a Kinetic Model of Consecutive Reactions", *Appl. Spectrosc.* 57, 1070 (2003).
10. R. C. Sharma, S. N. Thakur, and K. C. Lin "A<sup>3</sup>Π<sub>1u</sub> ← X<sup>1</sup>Σ<sub>g</sub><sup>+</sup> Laser Photoacoustic Spectroscopy of Br<sub>2</sub> Vapor in the Extreme Red Wavelength Region 665-720 nm", *Spectrochim. Acta A* (in press).
11. J. J. Chen and K. C. Lin "Influence of Vibrational Excitation on the Reaction  $\text{Li}(2^2P_1) + \text{H}_2(v=1) \rightarrow \text{LiH}(X^1\Sigma^+) + \text{H}$ ", *J. Chem. Phys.* 119, 8785 (2003). (communication) (also selected as Nov. articles in *Virtual Journal of Ultrafast Science*)
12. Y. W. Song, J. J. Chen, M. K. Hsiao, K. C. Lin, and Y. M. Hung, "Reaction Pathway and Potential Barrier for the CaH Product in the Reaction of  $\text{Ca}(4s4p^1P_1) + \text{H}_2 \rightarrow \text{CaH}(X^2\Sigma^+) + \text{H}$ ", *J. Chem. Phys.* (in press).
13. J. S. Huang, C. B. Ke, and K. C. Lin, "Matrix Effect on Emission/Current Correlated Analysis in Laser-induced Breakdown Spectroscopy of Liquid Droplets", *Spectrochim. Acta. B* (in press).

## (一)雷射離化儀在分析化學之應用

雷射離化儀(laser-enhanced ionization)發展至今已達 20 年，其技術原理均已臻成熟的階段，但是受限於基質產生電訊的干擾，該技術未曾真正應用於 real sample 當中的超微量偵測。我們曾投入相當多的時間發展一階 (one-step) 與二階 (two-step) 的雷射離化儀進行分析 (analysis) 與檢測 (diagnosis) 的工作，並且有成。在分析方面，我們首次把雷射離化儀的偵測靈敏度推至 ppt (part per trillion) 的範圍，使得雷射離化儀應用在超微量的分析變成可能。在這方面的研究中，我們首次結合流量注入法與雷射離化儀，應用流量注入法具有之分離與預濃縮的優點，實際上應用該離化儀於標準液與海水中的微量鉛的偵測。我們能夠偵測之極限(detection limit)達 3.3 ppt，靈敏度比較現行最佳之離化儀改進了 10 倍以上，並且抗拒基質干擾的能力比較現行儀器提高了 4 倍以上。當應用於海水中鉛的檢測，我們可獲得  $0.0112 \pm 0.0006$  ng/mL (ppb)，與實際值  $0.013 \pm 0.005$  ng/mL 相當符合。除了成功地發展流動注入法與雷射離化儀的連線 (FI-LEI)，利用該技術克服了基質的影響，我們也從理論方法模擬基質對雷射離化儀的干擾行為。基質在火焰中對於雷射離化儀的干擾乃是產生空間電荷 (space charge)，這些來自基質造成的離子與電子將會遮蔽置於火焰兩側電極間的電場強度，以致電場作用於離化樣品的電力減弱，造成樣品信號的強度因基質的干擾而減弱。我們首度引用 ion-sheath 的觀念配合流動注入法中之 single-tank 的理論模型，成功地預測基質產生電訊干擾的機制與使用 FI-LEI 克服干擾的信號反應等。在微量分析領域與基質對雷射離化儀干擾的研究，我們有相當完整且重要的貢獻。

應用雷射離化儀在檢測方面的研究，有火焰溫度的量測與火焰中原子化效益 (atomization efficiency) 的量測等。火焰溫度的量測是燃燒化學領域中很重要的一環，火焰中有關之熱平衡，離化，激發，化學反應等行為都與其溫度息息相關，傳統的量測方法為 two-line emission or absorption，與 line-reversal 方法，以雷射為工具的量測方法則有雷射誘發螢光(LIF), Coherent Antistokes Raman Scattering (CARS), Rayleigh Scattering 與 degenerate four wave mixing (DFWM)等，其中 CARS 方法能夠量測高空間與時間解析的火焰溫度，但缺點是欠缺靈敏度。LIF 方法則可提供較佳之偵測靈敏度，但常受到碰撞馳緩(collisional quenching)與 post filter 效應的干擾，近期所發展成功的 DFWM 方法則同時具有靈敏度的優點，並可量測高空間解析之溫度的能力，但其缺點則是須先了解散射截面積與轉動量子數的相依關係才可推導正確的溫度值。我們發展的二階雷射離化法(two-step laser-enhanced ionization)首次成功地應用於火焰溫度的量測。

該技術具有相當高之偵測靈敏度，同時可量測高空間解析之火焰溫度，其解析度至少達  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  的程度。使用該方法之實驗量測簡單可靠，以 Al 與 Ga 的偵測為例，只須記錄 Al 或 Ga 之 fine-structure doublets 所對應的雷射離化光譜強度與其使用的雷射光能量之相對比值即可，並不須要真正量測入射光的絕對能量或精確地校正偵測系統。在本研究中我們分別引用 Al 與 Ga 的量測數據作比較，所獲得之 radial 與 axial 溫度之測量值相當一致。

雷射離化儀應用在檢測研究的另一例子即是量測火焰中原子化係數。所謂原子化係數即是元素在火焰中的自由態原子與產生各種形式之化合物、離子等二者濃度的比值，該係數對於元素偵測的極限有很大的關係。係數愈大，通常該元素可獲得之偵測極限可能愈低。除了應用雷射離化儀量測火焰中的原子化係數之外，我們也探討各種不

同鹵化物對於鹼金族的原子化係數的影響為何，其結果為在低濃度的環境下，鹼金族的原子化係數決定在鹼金族元素，而與所鍵結的鹵素原子無關。我們同時應用理論模型計算，也獲得與實驗相符之計算結果。

除了分析與檢測的應用之外，我們也發展儀器連線，我們成功地發展雷射離化儀 (LEI) 與雷射螢光儀 (LIAF) 與氣相層析儀 (GC) 連線，作為靈敏之偵測器。我們應用該連線儀器分析有機錫。我們使用兩種型式的 LEI，其一為 two-step LEI (TLEI)，另一為 single-step LEI (SLEI)。使用 0.1  $\mu$ L 的注入量，GC-TLEI 的偵測極限為 3.9 mg/L，絕對量為 390 pg，而 GC-LIAF 的偵測極限為 5.0 mg/L，絕對量為 500 pg。這些偵測方法比較傳統的火焰離化偵測器更靈敏。特別是應用 GC-TLEI，偵測極限提高約 50-100 倍。

## (二)雷射誘發裂解光譜儀在微量分析之應用

雷射誘發裂解光譜儀 (LIBS) 可應用於環境中的快速樣品分析，無論樣品成分為固體、液體或是氣體皆可應用。由於該儀器具備高靈敏度，noninvasive 分析，可 remote 控制分析，以及不太須要前處理的步驟即可應用，促使該儀器的廣受重視。

LIBS 用於偵測液態樣品的缺點，在於 shot-to-shot 信號的變化 (signal variation) 而降低了偵測的極限。傳統的解決方法即是平均化多次的取樣光譜，但由於信號 / 雜訊比值受制於非線性光剝離的效應 (nonlinear optical ablation effect) 而無法隨  $N^{1/2}$  的值改進，其中  $N$  為雷射的脈衝數。另一方法即使用內在標準法 (internal standard method)，即量測樣品與其中之參考元素之強度的比值，藉此消除信號躍動之干擾，該參考元素須假定其成份不變，且與樣品信號躍動之樣式一致。

我們實驗室首次發展電灑法 (electrospray) 結合 LIBS 的技術。電灑法常被應用於質譜儀中作為大分子，非揮發性生物分子產生脫附離子 (desorption ion) 的一種方法。液體樣品透過一高電壓之毛細金屬針管噴灑出來，產生之帶電荷小液滴隨著溶劑的揮發，促使電荷密度提高到臨界點，因受制於斥力而裂解成更細小的液珠。當電灑法與 LIBS 技術結合，因產生之 micro-droplets，與雷射光作用時可加速氣化，使得在低能量的條件下即可達到原子化並激發到激發態而放射 LIBS 光譜。但由於 micro-droplets 噴出的位置不定，與雷射光作用的樣品量變得不同，獲得之 LIBS 信號有嚴重的躍動，因此信號 / 雜訊比很低。

我們發展 correlation 方法大幅改進信號的品質。我們所使用的 correlation 方法即同時收集兩種信號，其一來自 LIBS 放射信號，另一則是 laser induced plasma 所產生之電流信號。兩種信號之間呈良好之線性關係，其斜率與樣品濃度有關，樣品濃度愈高，斜率愈大。因此，利用斜率隨濃度之關係即可建立分析校正曲線，由此可獲得樣品之偵測極限。我們使用 Na, K, Al 來測試本方法，其偵測極限分別為 0.63, 1.2, 43 mg/L，而絕對的測量值可達 0.3, 0.5, 21 pg。應用電灑法，可促使裂解的光能量降低，甚至使用可調頻的染料雷射皆可產生裂解，未來可應用共振光源，預濃縮方法，進一步改進本方法的靈敏度。

## (三)感應耦合電漿質譜儀在微量分析的應用

感應耦合電漿質譜儀 (ICP-MS) 具有許多優點，例如：具有多元素同時偵測 (multielemental detection) 的便利，對大多數元素有相當低的偵測極限 (小於 0.1ng/mL)，質譜圖比較吸收或放射光譜簡單許多，較少的光譜干擾，可直接對同位素進行定性與



定量分析等。因此，在短短的十餘年內，ICP-MS 已經快速地發展成為微量無機元素分析領域（分析物濃度多在 ppb 等級以下）中最重要的技術之一。

我們發展冷電漿（cold plasma）在感應耦合電漿質譜儀（ICP-MS）的應用。當 ICP 的溫度高時，固然樣品的離化率增加，可促進偵測的靈敏度，但相對地 polyatomic ion 的基質濃度也增加。例如  $^{56}\text{Fe}$  ( $^{54}\text{Fe}$ ) 離子可能受到  $\text{ArO}^+$  ( $\text{ArN}^+$ ) 的同質量（isobaric）干擾。當我們應用冷電漿的條件，即把無線電頻率（radio frequency）的能量由正常的 1000-1200 W 降到 600W，並加速樣品的氣體流速到 1.25-1.35 L/min，則我們可測得  $^{56}\text{Fe}$  的極限達 16ppt，比較正常 rf 能量之量測值低 60 倍。這種冷電漿的技術可應用於低游離能的元素分析，鐵離子即是一例。這方面的開發應用的論文尚不多見，但卻是拓展 ICP-MS 微量分析的另一有潛力的領域。

我們也發展流動注入法(FI)與感應耦合電漿質譜儀（ICP-MS）連線應用，在微量分析偵測水溶液與海水中的鉛離子。首先 Pb 與 DDPA 形成鉗合物，在 FI 中的  $\text{C}_{18}$  管柱吸附，再由甲醇溶劑沖提進入 ICP。但甲醇有機溶劑進入 ICP 中，易造成熄火與產生 C 粒污染 MS 系統。在本研究中，我們應用超音波（ultrasonic）霧化器，先行去除 66% 的甲醇，再應用去溶劑薄膜去除 50% 的甲醇，才由氫氣將樣品溶液帶入 ICP-MS 偵測。由此，若我們 load 樣品在  $\text{C}_{18}$  管柱 60 秒時，可獲得鉛的偵測極限達到 0.028 ppt，比較現有的文獻偵測值低 1 到 2 個級數。本方法應用於海水中鉛濃度的量測，可得  $0.013 \pm 0.001$  ppb，與 certified 的值  $0.013 \pm 0.005$  ppb 相符合。

#### (四)富氏光譜儀在分析化學的應用

在 90 年代，Fourier transform spectrometer (FTS) 的功能除了 rapid-scan mode 之外，也發展 step-scan mode。二者的主要結構都有一 Michaelson interferometer 配合一 beam splitter 與兩片鏡片，其一為固定，另一則可移動。rapid-scan mode 的操作即高速移動可移鏡片，每一週期即可獲得一張 interferogram，透過富氏轉換即可得一光譜圖，由於譜線位置由 He-Ne 雷射的頻譜決定，因此其譜線位置的再現性相當高。以 rapid-scan mode 操作，一秒內可獲得上百張相同的光譜圖，經過疊加平均之後，信號 / 雜訊比增進不少。相對於 rapid-scan mode，近年內發展成功的 step-scan mode 的操作方法，則控制可移鏡片依 He-Ne 雷射的半波長的整數倍移動到定位即靜止不動，若系統內有化學反應，則反應的時序即可紀錄下來，之後鏡片再移到下一步並靜止，反應事件再重複紀錄，可移鏡片完成一週期之後，經過富氏轉換，即可獲得一光譜全圖，若沿著時序軸切出另一 interferogram，經轉換即可獲得在不同 delay time 之下的光譜全圖。因此，step-scan mode 的 FTS 可獲得時間解析之光譜全圖，解析度可達 5ns，在物理化學與分析化學的應用很廣泛。

我們發展 step-scan FTS 在分析化學的應用。近年，我們成功地改造了 step-scan FTS，能夠外接一 Lecroy 9450 瞬間紀錄器，時間解析在 5ns，但靈敏度比較 Bruker 原廠提供的紀錄器靈敏 25 倍以上。現行 step-scan 富氏光譜儀(Bruker IFS 88FTS)雖擁有 5ns 的時間解析，但受制於瞬間數位化控制器(transient digitizer)，其信號偵測的靈敏度並不高，並且產生的干涉譜一旦轉換成富氏光譜圖之後，即自動清除，無法再利用做其他方面的處理。我們自製一控制卡能夠將擷取之信號同步地由使用者自備的瞬間紀錄器來分析，藉此提高該儀器的靈敏度，我們將此設計應用在 CH (A)能階放射光譜的偵測以及腔內空氣吸收光譜的偵測，証實我們應用之偵測系統比較原來之儀器優良。

NIR (near ir) 區段的開發，這是近年很熱門的研究領域。其優點除了免於水氣的

干擾之外，譜線亦變得單純，因為只有 overtone 與 combination bands 才發生在此區間。相反地，其缺點即是信號的強度比較弱，且重疊性相當高，因此數值分析例如 partial least squares fit 等應用在此區間變得頗為重要。我們在此區間探討太陽能相關材料之反應速率，獲得頗成功之結果。這部分已在（五）中敘述。

2D IR 技術首由 Noda 在 90 年代初期即發展，利用一簡諧性的微擾變化物質的 IR 吸收光譜，透過數學運算，可以獲得各譜線之間的 synchronous 與 asynchronous 的關係，根據同諧性與非同諧性的 2D 圖譜，我們可以判斷各譜線是否有同一來源，且各譜線的解析度可以大為提高。因此，近年來，2D IR 的研究頗為熱門，特別集中在聚合物、生物分子與液晶的 2D 研究。我們首次應用 2D 技術在 kinetics 的問題，把平行反應方程式  $A \rightarrow B$  與  $A \rightarrow C$ ，與 2D FTIR 結合一起。假設 A, B, C 各有一吸收度，二反應式各有一反應速率常數，則應用 Noda 的 2D FTIR 法則，我們可以獲得這些吸收度之間的同諧性（synchronous）與非同諧性（asynchronous）的 2D 關係圖。根據推導之模型，我們可以獲知這些吸收度相互的關係，例如那些來自反應物，那些來自產物。該模型的推導須大量使用數值分析。藉 2D FT 的技術，我們可以協助解決 kinetics 領域的一些問題，諸如：反應型態的辨視、譜線辨視率的增強、譜線來源的確認與反應的機制等。這方面的研究在 2D FTIR 領域是首創。

## (五)近紅外光富氏光譜儀在太陽能材料的轉換速率量測

Norbornadiene (N) 為常見之太陽能材料，吸收太陽能之後，轉換為 quadricyclane (Q) 的共價異構物 (valence isomer)。若使用金屬粉當催化劑，在有機溶劑中，可促使 Q 再轉變成 N，如此太陽能材料可一再使用。因此，量測 Q  $\rightarrow$  N 的速率變得很重要，可幫助我們選擇合適，穩定之催化劑與溶劑，甚至測試不同的太陽能材料。我們首次應用近紅外光 (NIR) 的吸收方法，在非均相溶液當中，量測 Q  $\rightarrow$  N 的轉換速率。由於吸收法易受非均相系統的散射影響，因此，本實驗乃採用靜置方式，避免散射光。同時，我們考慮擴散效應，修正速率方程式，獲得一可應用於本系統之模型。我們使用  $\text{CuSO}_4$  當催化劑在 chloroform 溶劑，或使用  $\text{SnCl}_2$  當催化劑在苯溶劑當中，量測 Q  $\rightarrow$  N 隨時間之光譜變化。由於 Q、N 之光譜重疊，且有溶劑吸收光譜的干擾，如何在微小變化的光譜圖中，解析出 Q 與 N 的濃度為一大挑戰。我們利用多變數分析法 (multivariate analysis) 中的部分回歸法 (partial least squares fit)，解析了光譜並獲得在反應過程中的 Q 與 N 的濃度，藉用我們發展之速率方程式模型，獲得了可靠的 Q  $\rightarrow$  N 速率常數為  $(1.38 \pm 0.04) \times 10^{-3}$  ( $\text{CuSO}_4$  當催化劑) 與  $(4.62 \pm 0.09) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1} \text{ g}^{-1}$  ( $\text{SnCl}_2$  當催化劑)，且在我們的系統中，Q 與催化劑之間先形成 one-site 的配位，再轉換成 N。該方法獲得的數據與利用 Raman 方法的結果相符合。

計畫成果自評：

本計畫完成時，各分項內容均已有論文發表於國際期刊，執行程度尚佳。