

# 煤樣中微量汞砷元素 定量技術之研究

曾怡玲

國立中央大學機械系專任助理

余慶聰

核能研究所分析組副研究員

## 摘 要

汞、砷均為有害生物體的毒性元素，因此對於顯著的排放源如燃煤電廠將成為未來重要的環境指標。傳統燃煤工業的空氣污染排放物，不論 SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 或重金屬及其造成的健康與環境危害一直是大眾關注的議題，然而經濟(工業)發展必須建立於環境永續之基礎上，所以如何提升國內燃煤程序排放污染物之去除率是刻不容緩的事情。早在 1990 年美國空氣清淨法所列之 189 種有害空氣污染物中，即包含汞、硒、砷等，眾多元素中汞、砷被認為對人體及環境具有較大的衝擊。燃煤產生的汞、砷等微量極毒物排放管制標準法規，對於新設 IGCC 電廠限制最為嚴格(Hg:0.0025ng/J)，傳統電廠排放之污染物亦將逐漸立法管制。

因此本研究將建立奈克(ng)級含量元素定量鑑定技術，係利用化學分析前處理密閉式微波消化後以火焰式原子吸收光譜(AA)及原子螢光光譜法(AFS)進行奈克(ng)級汞、砷定量分析。研究結果顯示，利用 NIST、ERA 已知濃度標準品測試，可獲得汞濃度在 4.7–1557 ppb 之間相對標準偏差<5%，砷濃度在 10–352ppb 之間相對標準偏差<10%，另以原子螢光吸收光譜法定量砷元素，在 10–352ppb 之間相對標準偏差<3%。使用微波消化真實煤樣品定量汞砷等微量元素成分，回收率落在 94–99%之間。

關鍵字：汞、砷、煤、定量分析、密閉式微波消化



## 一、前 言

在工業日益發達以致於污染日益嚴重之際，微量元素與人類生活品質之間的相互關係逐漸受到重視並隱然成為下一世代之重點指標。在各種微量元素(濃度小於 100ppm)中與永續能源發展相關的議題最為密切應為淨煤技術(Clean Coal Technology, CCT)中的汞、砷元素。汞、砷等元素在大氣環境遷移散佈的宿命傳遞至水體中與人類健康將產生密不可分的關係，所以汞、砷等微量有害元素對環境的影響需要特別關注。

由於砷及汞與工業及高科技產業的發展具有密切關係，因此台灣過去二十年來快速的工業與高科技產業發展均可能對環境造成污染危害。砷與汞元素與生物之交互作用均有生物累積性(bioaccumulation)和毒性，若超過一定濃度會對生物體有害，累積在生物體中不易分解因而造成毒性，均可能影響生物生長或發生病變，嚴重甚至導致死亡。例如 50 年代在台灣西南沿海地區人人聞烏腳病(blackfoot disease)而色變 82，這是台灣常見砷中毒事件(Chiou, 1996；Liu et al., 2003)中最廣為人知的；1960 年代的水俣病(Minamata disease)則為廢水中甲基汞所引起的中樞神經中毒的案例(Harada, 1995；Nomura and Futatsuka, 1998)<sup>(10,11)</sup>。

燃煤時排放氣體內含有大量的微量元素(濃度小於 100ppm)氣體，據估算占了大氣中 80%以上的微量元素貢獻<sup>(1,2)</sup>，故使得淨煤技術中的微量元素與永續能源發展相關的議題受到重視。在各種微量元素中與永續能源發展相關的議題最為密切應為淨煤技術中的汞與砷元素。例如聯合國公約 (UN-ECE)、歐盟法規導則 (EC-Directive 2000/76/EC、2001/80/EC)與 1990 年美國 Clean Air Act Amendments (CAAA) 正式將汞、砷與硒等污染物列於電廠 HAPs 的管制名單，並於 2005 年公告燃煤電廠汞管制標準 Clean Air Mercury Rule (CAMR)，有關管制環境中有毒污染物的法規自 1970 年後逐年呈倍數成長，未來對燃煤電廠排放的空氣污染物將進行更高規格之管制措施。煤本身的含熱量高，且蘊藏量豐富，價格又低廉。在許多情況下可以代替石油用，尤其是可用做火力發電和一般工廠的燃料，是項重要的能源。本研究目的在煤樣中微量汞砷元素定量技術之研究測試，將有助於未來能源國家型計畫淨煤技術開發工作。

## 二、文獻回顧

### (一)汞污染

汞原子序 80，熔點為 $-38.87^{\circ}\text{C}$ ，在常溫時是具有高揮發性的銀白色液態金屬，在室溫時即可產生蒸氣，具有毒性。金屬汞和有機汞通常用於科學儀器（溫度計、壓力計等）、電子設備（包括電池、馬達、燈管等）、牙科醫院等。自然界的主要污染來源則來是火山活動，而人為來源則分別來自電子工廠、鹼氯工廠、石化燃料及焚化爐之燃燒所排出的汞，在燃燒廢氣中主要以元素汞（ $\text{Hg}^0$ ）、氧化汞（ $\text{Hg}^{2+}$ ）跟顆粒汞（ $\text{Hg}^{\text{P}}$ ）三種形式存在，在大氣中總濃度約為  $0.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，已經遠遠超過規定汞排放之限制  $0.05\text{mg}/\text{Nm}^3$ <sup>(9,12,13)</sup>。汞在無機狀態時並不具備生物累積性，但受到周遭環境的影響，會迅速轉化成具備神經毒性的甲基汞（ $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ），此離子會隨著食物鏈傳遞慢慢被濃縮，在人體迅速累積，達到會危害人體的程度。在我國訂定的飲用水汞含量標準上限值為  $0.002\text{ppm}$ ，而放流水標準為  $0.005\text{ppm}$ ；美國環境保護局（USEPA）亦規定飲用水標準最大可容許污染程度（MCL）為  $0.002\text{ppm}$ <sup>(2)</sup>。

### (二)砷污染

砷原子序 33，砷是一種類金屬物質，具有多種同素異形體，黃色（分子結構，非金屬）和幾種黑、灰色的（類金屬）是常見的種類。自然中的砷可分為有機砷與無機砷兩大類，無機砷還可分為負三價、零價、正三價和正五價等四種形式<sup>(3)</sup>，其中以正三價砷（亞砷酸鹽）的毒性最高，至於有機砷對人體的毒性較小。砷存在於地殼、土壤、海水、河水、大氣中，它可經由火山爆發而被釋放入空氣，地殼及土壤中的砷會隨著土壤侵蝕與沖刷釋出，可產生  $2380 \times 10^8\text{g}/\text{year}$  的砷，通常以亞砷酸鹽（Trivalent arsenic, Arsenite,  $\text{AsO}_3^{3-}$ ）和砷酸鹽（Pentavalent arsenic, Arsenate,  $\text{AsO}_4^{3-}$ ）的型態存在<sup>(16,17)</sup>。砷與其化合物被運用在農藥、除草劑、殺蟲劑與多種的合金中，對一般人而言，砷的攝取多來自食物和飲水，通常砷經由飲食進入人體後，約有 60-90% 會被吸收，世界衛生組織聯合食品添加物專家委員會（WHO JECFA）暫定人體對於無機砷的每週可容許攝入量為  $15\ \mu\text{g}/\text{kg}$  體重，若攝取超過可能會導致心血管衰竭及神經病變等症狀<sup>(4)</sup>。在我國訂定的砷含量標準上限值規定飲用水為  $0.01\text{ppm}$ ，而放流水標準為  $0.5\text{ppm}$ ；USEPA 亦規定飲用水標準最大可容許污染程度（MCL）為  $0.01\text{ppm}$ <sup>(14,15)</sup>。

### (三)燃煤中的汞砷含量

煤是遠古植物於地底下經在高溫、高壓經生物及化學的變質作用逐漸炭



化而來，一直是世界上重要的能源和化石燃料，平均一年全世界要用掉 100 億 Mt 以上的煤。就煤炭而言，世界上煤炭中汞平均含量為 0.2ppm(COALQUAL database)<sup>(5)</sup>，而世界上煤炭中砷平均含量(coal Clarke of As) 在煙煤 (bituminous coals) 中為 9.0±0.8ppm，在褐煤 (lignites) 中為 7.4±1.4ppm<sup>(6)</sup>，皆依煤礦所開採地點而有含量上的差異，因煤中汞砷含量高、使用量又龐大的關係，火力發電廠燃燒煤所產生之汞砷占地球上所有汞砷排放量的最大宗。

(四)汞砷分析技術簡介

水溶液中微量汞、砷之定量分析技術概分為四種，即冷蒸氣原子吸收光譜法(cold-vapor atomic absorption spectroscopy, CVAAS)、原子螢光吸收光譜法 (atomic fluorescence spectroscopy, AFS)、感應耦合電漿原子吸收光譜法 (inductively coupled plasma, ICP)與感應耦合電漿質譜法(inductively coupled plasma-mass spectroscopy, ICP-MS)。對於微量元素分析技術開發而言，至少需考慮量測原理不同、儀器對於待測元素感度、分析成本(包括時間與適用性)等因素，上述各種分析方法基本上皆能符合微量汞、砷定量之需求。ICP-MS 靈敏度高、可偵測濃度低，但價格高昂不易取得，本實驗使用偵測範圍在 ppb 至%等級的冷蒸氣原子吸收光譜法，搭配上偵測範圍在 ppm 到低濃度 ppb 等級的原子螢光吸收光譜法，便可包含幾乎任何濃度汞砷分析範圍。各分析技術適用範圍如表 1。

表 1.各種水溶液中汞、砷分析技術適用範圍比較表<sup>(7)</sup>。

| 分析技術   | 適用範圍        | 砷／汞偵測極限(IDL,ppb) |
|--------|-------------|------------------|
| CVAAS  | ppb—%       | 0.3 / 0.2        |
| AFS    | ppt—sub ppb | 0.001 / 0.0005   |
| ICP    | sub ppb—ppb | 1.2 / —          |
| ICP-MS | ppt—sub ppb | 0.02 / 0.008     |

(五)樣品前處理消化（固體）

- 1.濕式消化法-0.5g sample+王水震盪均勻冷消化過夜+再進行沸水浴加熱 2 小時待冷卻後過濾，加入 5 ml 5%  $\text{KMnO}_4$  及 0.5 ml 12%  $\text{NaCl}:\text{NH}_2\text{OH} = 1:1$  中和過量氧化劑，稀釋定量待測。
- 2.微波消化法- 0.5g sample+硝酸震盪均勻冷消化 30 分鐘+微波爐消化 30 分鐘取出冷卻，稀釋定量待測。

### 三、研究方法

(一)汞定量技術

本實驗使用 Perkin Elmer PC-5100 AA system (Norwalk, CT, USA)原子吸收光譜儀以及連接 FIAS 400 (Norwalk, CT, USA)自動化連續流動式氫化物產生裝置。水中的汞經硝酸、硫酸及高錳酸鉀及過硫酸鉀溶液氧化成為兩價汞離子後，以還原劑氯化亞錫還原成汞原子( $\text{SnCl}_2 + \text{Hg}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{SnCl}_4 + \text{Hg}^0$ )，經由氣體載送至吸收管，以原子吸收光譜儀在波長 253.7nm 處之最大吸光值定量之，如圖 1 所示<sup>(3)</sup>。

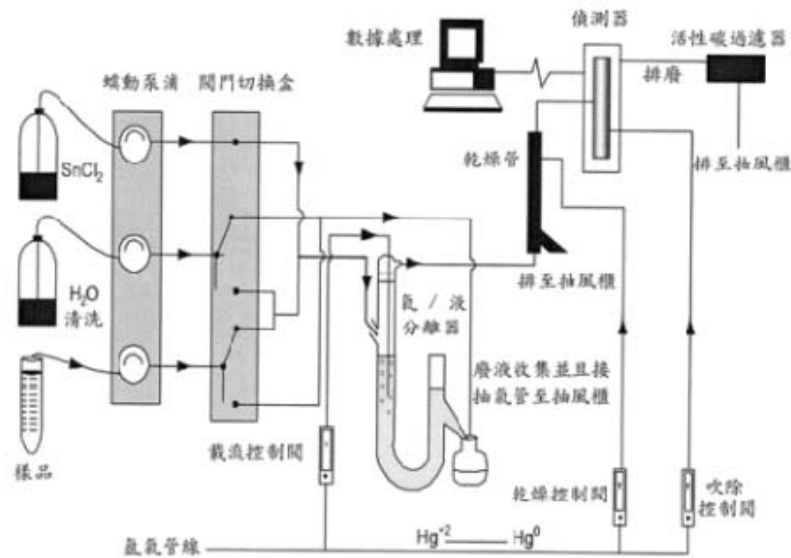


圖 1 自動化連續流動式氫化物產生裝置連接原子吸收光譜儀系統圖<sup>(15)</sup>。

(二)砷定量技術

- 1.冷蒸氣原子吸收光譜法





裝置同汞冷蒸氣原子吸收光譜法，含砷及砷化物之水樣，經硫酸及過硫酸鉀溶液消化後，使其中砷先轉變成為五價砷，續以碘化鉀試劑將其還原為三價砷。經由自動化連續流動式氫化物產生裝置，使三價砷與鹽酸及硼氫化鈉試劑進行氫化反應，生成砷化氫： $\text{As(OH)}_3 + 3\text{BH}_4^- + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{AsH}_3 + 3\text{BH}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ ，再經由氫氣載送導入原子吸收光譜儀，於 193.7nm 波長處測定其吸光值，進行定量<sup>(3)</sup>。

## 2. 原子螢光吸收光譜法

本實驗使用之氫化物生成原子螢光吸收光譜儀 **Hydride generation and atomic fluorescence spectrometry (HGAFS)**，購自英國 PS ANALYTICAL 公司，儀器型號為 **Millennium Excalibur**。當氣態的砷元素蒸氣原子自光源吸收了一定能量的輻射能，從基態被激發到高能態，之後又很快躍遷至較低能態，在躍遷途中放出與原光源相同或不同波長的光，利用偵測器偵測發射出的螢光強度，可用來進行元素定量分析。

含砷及砷化物之樣品，以碘化鉀試劑將其還原為三價砷。經由自動化連續流動式氫化物產生裝置，使三價砷與鹽酸及硼氫化鈉試劑進行氫化反應，生成砷化氫，再經由氫氣載送導入螢光原子吸收光譜儀，以進行定量，如圖 2 所示。

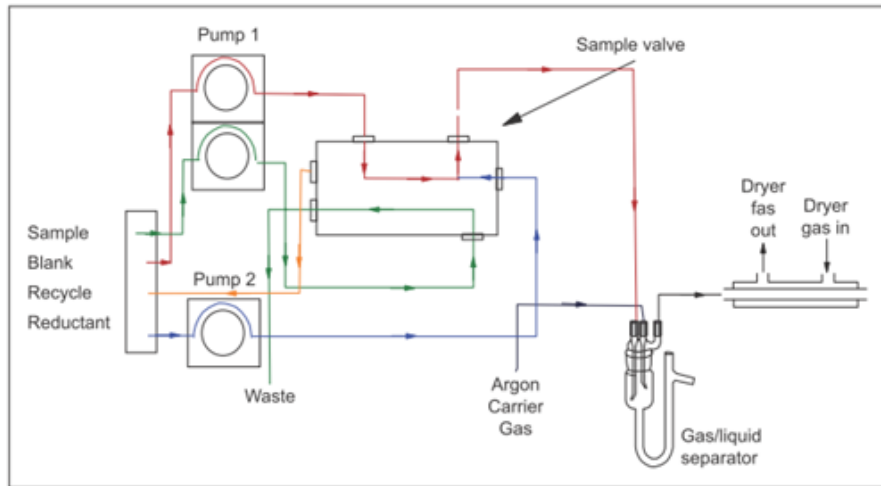


圖 2 自動化連續流動式氫化物產生裝置連接原子吸收光譜儀系統圖<sup>(8)</sup>。

### (三)真實煤樣中汞、砷分析

煤在分類上，最低級的煤炭為泥煤(Peat)，摻有大量的水分。當泥煤深埋於地底後，地下的溫度和壓力，使水分、氧、氮含量減少，碳的含量增高；泥煤轉變成各種等級的煤：依次變為褐煤(Bituminous coal)、次煙煤、煙煤(Subbituminous coal)、次無煙煤、最後形成無煙煤(Anthracite)；無煙煤含碳量在 90% 以上，幾乎沒有水分。取已知汞砷含量之真實煤樣：美國 NIST 標準品 2682 煙煤(Subbituminous coal)、2685 褐煤(Bituminous coal)，以高溫壓消化反應瓶(digestion bomb)及微波消化(microwave) 兩種消化方式，將煤樣消化成水溶液樣品，再利用原子吸收光譜儀、原子螢光吸收光譜儀進行汞砷定量。

## 四、結果與討論

### (一)水溶液中汞分析

$\text{SnCl}_2$  在  $\text{HCl}$  存在的環境下為強還原劑，與二價汞反應之方程式為  $\text{SnCl}_2 + \text{Hg}^{2+} + 2\text{Cl}^- \rightarrow \text{SnCl}_4 + \text{Hg}^0$ ，使二價汞還原成汞原子，因氯化亞錫的水溶液能夠從空氣中吸收氧氣，很容易被氧化，使用時應新鮮配製。利用兩種已知汞濃度標準品，包括 NIST SRM<sup>®</sup>1641d 水中汞查核樣品、ERA Waste WatR TMLot NO.P165-154 水中汞品管樣品，在  $\text{SnCl}_2$  0.75%(w/v)、載氣流速 100ml/min 條件下每個樣品均進行三重複分析，算出平均值與標準偏差，若水溶液中汞濃度在 4.7–1557 ppb 之間時，相對標準偏差均 <5%，如表 2 所示。

表 2 汞分析與查核樣品之相對標準偏差

| 標準液廠牌、濃度       | 樣品濃度<br>(ppb) | 平均濃度         | 與標準品差異<br>(%) | 相對標準偏差<br>(%) |
|----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Merck25ppb     | 25.0          | 25.97±0.38   | 3.88          | 1.24          |
| ERA P165-154   | 4.70          | 4.66±0.09    | 0.85          | 2.10          |
| NIST SRM 1641d | 1557          | 1608.6±27.85 | 3.31          | 1.73          |

### (二)水溶液中砷分析

#### 1.冷蒸氣原子吸收光譜法

$\text{NaBH}_4$  為強還原劑，使水樣中三價砷與硼氫化鈉試劑及鹽酸反應生成砷化氫氣體： $\text{As}(\text{OH})_3 + 3\text{BH}_4^- + 3\text{H}^+ \rightarrow \text{AsH}_3 + 3\text{BH}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ 。KI 為還原劑，



在樣品分析前一個小時需添加至樣品中與樣品充分反應，使  $As^{5+}$  轉為  $As^{3+}$ ，反應式為： $As^{5+} + 2I^- \rightarrow As^{3+} + I_2$ 。表 3 利用兩種已知砷濃度標準品，包括 NIST SRM<sup>®</sup>1643e 水中微量元素含砷、ERA WasteWatR<sup>™</sup> Lot NO.P171-500 水中微量元素品管樣品，還原劑  $NaBH_4$  3.0% (w/v)、HCl 10% (w/v)、KI 1% (w/v) 與石英管溫度 1000°C 條件下每個樣品均進行三重複分析，算出平均值與標準偏差，若水溶液中砷濃度在 10—352ppb 間時，相對標準偏差<10%。

表 3 冷蒸氣原子吸收光譜法砷分析與查核樣品之相對標準偏差

| 標準液廠牌、濃度       | 樣品濃度 (ppb) | 平均濃度         | 與標準品差異 (%) | 相對標準偏差 (%) |
|----------------|------------|--------------|------------|------------|
| Merck10ppb     | 10.0       | 10.14±0.31   | 1.4        | 3.05       |
| ERA P171-500   | 352        | 341.73±26.32 | 2.92       | 7.70       |
| NIST SRM 1643e | 58.98      | 55.02±4.20   | 6.71       | 7.64       |

## 2. 原子螢光吸收光譜法

同冷蒸氣光譜法作還原劑  $NaBH_4$  濃度測試，在  $NaBH_4$  0.2%(w/v)條件下，產生之氫氣量不足，無法點燃火焰，故無法偵測；在  $NaBH_4$  1.0% (w/v) 條件下，有最低標準品差異率 2.75%，得知在砷氫化物生成螢光原子分析光譜實驗中， $NaBH_4$  最適濃度為 1.0%(w/v)。

在  $NaBH_4$  1.0%(w/v)、氫氣載氣流速 300ml/min、 $NaBH_4$  流速為 4.5ml/min、HCl 流速為 9.0ml/min 的條件下，KI 1%(w/v)時有最低標準品差異率 3.08%，可知在砷氫化物生成原子螢光吸收光譜法實驗中，KI 最適濃度為 1.0%(w/v)。

表 4 是利用兩種已知砷濃度標準品，包括 NIST SRM<sup>®</sup> 1643 水中微量元素、ERA WasteWatR<sup>™</sup> Lot NO.P171-500，在還原劑  $NaBH_4$  1.0% (w/v)、流速 4.5 ml/min，HCl 10% (w/v)、流速為 9.0ml/min，KI 1%(w/v)，氫氣載氣流量 300ml/min 條件下，對每個樣品進行三重複分析，得到之測試結果，砷濃度在 7.5—352 ppb 之間，相對標準偏差<3%。



表 4 原子螢光吸收光譜法砷分析與查核樣品之相對標準偏差

| 標準液廠牌、濃度       | 樣品濃度<br>(ppb) | 平均濃度         | 與標準品差異<br>(%) | 相對標準偏差<br>(%) |
|----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Merck7.5ppb    | 7.5           | 7.54±0.21    | 0.48          | 2.76          |
| ERA P171-500   | 352           | 340.67±10.12 | 3.22          | 2.97          |
| NIST SRM 1643e | 58.98         | 62.63±0.19   | 6.19          | 0.31          |

## (三)真實煤樣中汞、砷分析

使用高溫壓消化反應瓶消化過程為，分別取 2682 及 2685 煤樣 0.5g 置入高溫壓消化反應瓶中，加入 4ml HNO<sub>3</sub> 與 12 ml HCl 經隔水加熱沸騰 2 小時，待冷卻至室溫進行過濾後，加入 5ml 5% KMnO<sub>4</sub> 及 0.5ml 12% NaCl : NH<sub>2</sub>OH = 1 : 1 中和過量氧化劑，最後定量至 25ml。

實驗使用之微波消化系統為美國 CEM 公司生產之 MARS 微波反應器，在微波消化過程中，取 2682 及 2685 煤樣 0.5g 置入消化反應瓶中，另加入 HNO<sub>3</sub> 15 ml，以 400W、溫度 220°C 恆溫 30 分鐘反應，待冷卻至室溫，加水定量至 25ml。如表 5 所示，以微波消化得到之樣品回收率在 93.6—99.2% 之間，高於以高溫壓消化瓶消化之回收率 54.5—82.0%，是由於微波加熱時，物體各部位受熱平均，反應較能均勻，實驗回收率等於實際量測值除以標準含量值。以微波消化得到之回收率均能在 97% 以上，將以此消化條件去分析後續未知煤樣。

表 5 以不同消化方法獲得固體煤 Hg,As 定量回收率。

| 消化方法     | 標準品/元素      | 標準含量<br>(ng) | 實際量測含量<br>(ng) | 回收率<br>(%) |
|----------|-------------|--------------|----------------|------------|
| 高溫壓消化反應瓶 | NIST2682/Hg | 108.8        | 89.2           | 82.0       |
|          | NIST2682/As | 1,000        | 545            | 54.5       |
|          | NIST2685/Hg | 146.2        | 100.1          | 68.5       |
|          | NIST2685/As | 12,000       | 9612           | 80.1       |
| 微波消化     | NIST2682/Hg | 108.8        | 106.9          | 98.2       |
|          | NIST2682/As | 1,000        | 985            | 98.5       |
|          | NIST2685/Hg | 146.2        | 136.9          | 93.6       |
|          | NIST2685/As | 12,000       | 11,900         | 99.2       |



## 五、結論與建議

本研究已成功地建立奈克(ng)級含量元素定量鑑定技術，以冷蒸氣原子吸收光譜法、原子螢光吸收光譜法於水溶液中微量汞、砷元素之定量，利用 NIST、ERA 兩項已知濃度品管查核樣品分析測試各條件下與確定值之間相對標準偏差，可獲得量測值與已知濃度差異，以冷蒸氣原子吸收光譜對汞元素分析之差異 <5%(濃度範圍 4.7 – 1557ppb)；對砷元素分析之差異 <10%(濃度範圍 10 – 352ppb)；以螢光原子吸收光譜儀定量砷可得對砷元素分析之差異 <3%(濃度範圍 10 – 352 ppb)。利用微波消化方法消化真實煤樣回收率為 94 – 99%，較高溫壓消化反應瓶 55 – 82%有良好的微量元素回收率。針對固體煤樣可利用微波有效消化的結果，顯示可成為煤樣中汞砷的定量技術，未來工作將著重於建立中高溫燃煤微量有害物汞、砷定量與去除技術之研究。

## 六、誌謝

本文承蒙國科會研究計畫編號：NSC101-3113-E-008-004 經費支持，以及核能研究所提供相關技術以及儀器支援，特此感謝。

## 參考文獻

- 1.F. Vejahati and Z. Xu, A review Fuel, 89, 904 ,2010。
- 2.Guo Xin, Pengfei Zhao, Chuguang Zheng, Theoretical study of different speciation of mercury adsorption on CaO (001) surface, Proceedings of the Combustion Institute, Volume 32, Issue 2, P.2693-2699, 2009。
- 3.Method For Chemical Analysis of Water and Waste Method 2184,EPA-600/4-79-020, 1983。
- 4.Gregg S. J., Sing, K. S. W., Adsorption, Surface Area and Porosity, Second Edition, London: Academic Press, pp. 41-72, 1982。
- 5.Ya.E. Yudovich, M.P. Ketris, Arsenic in coal: a review, International Journal of Coal Geology 61, 141– 196, 2004。
- 6.H.E. Eguez, E.H. Cho, Adsorption of arsenic on activated charcoal, J.Metals39, 38–41, 1987。
- 7.Atomic Spectroscopy: A Guide to Selecting the Appropriate Technique and

- System, PerkinElmer, Inc. ,2008 。
- 8.PSA 10.055 Millennium Excalibur User Manual, PS Analytical, UK ,2006 。
  - 9.Mercury Study Report to Congress: Volume V: Health Effects of Mercury and Mercury Compounds, EPA-452/R-97-007, 2007 。
  - 10.Dinesh Mohan, Charles U. Pittman Jr., Arsenic removal from water / wastewater using adsorbents - A critical review, Journal of Hazardous Materials, Volume 142, Issues 1-2, 2 April 2007 。
  - 11.B.K. Mandal, K.T. Suzuki, Arsenic round the world: a review, Talanta (58) 201, 2002 。
  - 12.F.S. Zhang, J.O. Nriagu, H. Itoh, Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge, Water Research 39 ,2005 389–395 。
  - 13.W. Chen, R. Parette, J. Zou, Fred S. Cannon, B.A. Dempsey, Arsenic removal by iron-modified activated carbon, Department of Civil and Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, 212 Sackett Building, University Park, PA 16802, USA 。
  - 14.R. O. Sterling, J. J. Helble, Reaction of arsenic vapor species with fly ash compounds: kinetics and speciation of the reaction with calcium silicates, Chemosphere, Volume 51, Issue 10, Pages 1111-1119, June 2003 。
  - 15.水中汞檢測方法—冷蒸氣原子吸收光譜法, 中華民國 94 年 11 月 30 日環署檢字第 0940097080 號公告 (2006) 。
  - 16.鄭涵文、謝德輝、余慶聰, 建立水溶液中微量汞砷原子吸收光譜定量分析技術 INER-7390H, 核能研究所(2010) 。
  - 17.林明炤、陳英成, 「利用蝦殼移除水中砷污染質之研究」, 中華民國環境保護學刊 (2004) 。