

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別：國際會議)

赴美參加 SAE 春季燃料與潤滑油國際會議及 廢料熱處理技術國際研討會

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：研究員、助理研究員

姓 名：曾 錦 清、陳 孝 輝

出國地區：美 國

出國期間：91 年 5 月 5 日 至 91 年 5 月 18 日

報告日期：91 年 7 月 18

摘 要

本次出國主要在參加二個國際會議：SAE 2002 年春季燃料及潤滑油國際會議與第二十一屆 IT3 國際焚化及熱處理技術研討會。燃料及潤滑油國際會議主要在研討車輛之燃料、潤滑油、燃燒機制、廢氣排放特性、控制及分析量測、與車輛廢氣低溫電漿等相關技術專題分組討論，並藉由互相觀摩獲得最新活動污染源技術資料及瞭解國際技術現況，例如在低溫電漿技術處理柴油引擎排氣之發展趨勢為結合新觸媒研發達到省電能高效率，此類資訊皆有助於核研所低溫電漿處理廢氣技術之發展。第二十一屆 IT3 國際會議為全球研討燃燒與高溫處理廢料技術之最大會議，此會中亦就美國最新之焚化法規(簡稱 MACT)對焚化產業之衝擊多加探討；會中與海洋大學及台灣科技大學共同發表一篇論文，說明我國電漿處理廢料技術之研發成果；除了表現我國電漿處理廢料之能力外，並與各國專業人士就實務經驗技術交流。參加此二國際會議獲得之技術資料與經驗交流，對核研所相關電漿後續計畫技術能力的提昇發展，有極大之助益。

關鍵詞：低溫電漿、廢氣排放、熱電漿、廢料處理

目 次

摘 要

(頁碼)

一、目 的 1

二、過 程 3

三、心 得 25

四、建 議 27

五、附 錄

(一) 國外蒐集資料 29

(二) 發表論文 30

一、目的

這次出國主要是配合本所「低溫電漿廢氣處理技術之發展」計畫「放射性廢料電漿處理技術之發展與應用」計畫、「學術合作」計畫及業界合作計畫之執行，赴美國參加 SAE (Society of Automobile Engineering) 2002 年春季燃料及潤滑油國際會議(2002 Spring Fuels & Lubricants Meetings)與第二十一屆 IT3 (Incineration and Thermal Treatment Technology)焚化及熱處理技術國際研討會，獲取電漿處理廢氣、廢料及廢料熱處理技術等相關資料，探究廢料處理技術之發展與應用現況，以做為發展電漿環保技術之參考；並在 IT3 會中發表本所與國立海洋大學及台北科技大學共同合作之研發成果，與國際人士交流，獲得第一手資料。

2002 年美國汽車工程師協會(SAE)春季燃料及潤滑油國際會議在美國內華達州雷諾市(Reno)舉行，其會議內容主要在研討汽車燃料、潤滑油、燃燒機制、廢氣排放特性、控制及分析量測、與汽車廢氣低溫電漿等相關技術，藉由參加研討會可獲得活動污染源技術資料及瞭解國際技術現況，有利於本所低溫電漿處理廢氣技術之發展。

IT3 焚化與熱處理技術國際研討會是全球研討燃燒和高溫處理廢料技術之最大會議，今年在美國南方路易斯安那州的紐奧爾良市(New Orleans)舉行。此會議可供參予者發表其最新研發成果，互相交換廢料資源化處理方法與技術資料，並與國際專業人士交流，獲取有害事業廢棄物資源化處理經驗和心得。本次會議除了提供有關焚化處理基本知識的一天訓練課程(one-day workshop) 讓初次參加會議者熟習會議各項議題外，亦

特別增加高等訓練課程提供有關廢料熱解氣化、玻璃固化處理技術、廢氣分析管制技術等流行議題，讓與會者了解目前之發展趨勢。此次會議中與海洋大學材料工程研究所、台北科技大學材料及資源工程系共同發表「電漿玻璃化處理各類低放射性模擬廢料」研發成果論文一篇。在此國際研討會中發表論文，除可表現我國電漿處理廢料之研發能力外，並可與各國專業人士做技術經驗交流，對本所相關計畫技術能力的提昇，有重大的意義。

二、過 程

(一)行程及工作綱要

此次公差到美國的主要目的是參加二個國際會議：SAE 2002年春季燃料及潤滑油國際會議與第二十一屆IT3國際焚化及熱處理技術研討會，這一次的行程（5月5日至5月18日，共計14天）安排如下表所示。

時間	地點	內容
5/5	台北 美國雷諾	旅途
5/6	美國雷諾	參加 2002 SAE 春季燃料與潤滑油國際會議 (Non-thermal plasma A,B 議程)
5/7	美國雷諾	參加 Nonthermal plasma C/ General and Diesel emissions A 議程
5/8	美國雷諾	參加 General and Diesel emissions B,C 議程
5/9	美國雷諾	參加 General and Diesel emissions D 議程
5/10	美國雷諾 美國紐奧爾良	旅途
5/11- 5/12	美國紐奧爾良	週末
5/13	美國紐奧爾良	參加 2002 年熱處理技術國際研討會 (One-Day Workshop)
5/14	美國紐奧爾良	參加 Gasification & Pyrolysis 議程
5/15	美國紐奧爾良	參加 Thermal Treatment 議程
5/16	美國紐奧爾良	參加 Plasma Processing 議程
5/17- 5/18	美國紐奧爾良 台北	返國

在雷諾停留時間(5/5-5/9)住宿在SAE大會舉辦的場所-希爾頓旅館(Hilton Hotel)，該旅館位於雷諾機場附近1.5公里處，離雷諾市區尚有一段距離，有提供旅館與機場間的定時往返接送車。雷諾市為內華達州拉斯維加斯(Las Vegas)外另一以賭場聞名於世的城市，希爾頓旅館既然位於雷諾市也不例外，在一樓大廳即是賭場、劇場及餐廳，而大會議程

的進行則主要在旅館地下一樓的展示及會議區。在紐奧爾良停留時間(5/10-5/17) 則是住宿在Courtyard Inn on King Street , 離這次IT3大會舉辦的場所-雪爾登旅館(Sheraton Hotel) 尚有一段距離, 步行到會場時間約須25分鐘。這次大會的舉辦場所就在紐奧爾良著名的觀光勝地法國區(French Quarter)附近, 法國區以具文化氣息、畫廊匯聚的King Street與熱鬧喧華的爵士酒吧的Bourbon Street聞名於世, 在5/15由IT3大會主辦單位安排的聯席晚宴即選在法國區一個有現場五人爵士樂隊演出的餐廳舉行。

(二)、SAE 2002年春季燃料及潤滑油國際會議

這次美國汽車工程師協會(SAE) 在 2002 年春季舉辦的燃料及潤滑油國際會議在內華達州雷諾的希爾頓舉行, 日期是 5/6-5/9。這次會議原本應為 2001 年 SAE 舉辦的秋季燃料及潤滑油國際會議, 原訂日期是 9/24-9/28。但是恰好美國發生 911 恐怖攻擊事件, 此國際會議也受到影響順延到今年與春季的燃料及潤滑油會議合併舉辦。燃料及潤滑油國際會議與其他 SAE 所主辦的汽車主題國際會議之主要不同點在於其著重於汽車燃料、潤滑油、燃燒機制、廢氣排放特性、控制及分析量測、與汽車廢氣低溫電漿等相關汽車組件技術之研討。有關這次 2002 年春季舉辦的燃料及潤滑油國際會議的議程安排便涵蓋了 Non-thermal Plasma (A-C), SI Engine Performance and Fuel Effects(A-C), SI Engine Experiments (A-C), SI Engine Modeling (A,B), Direct Injection Gasoline Engine (A,B), Passenger Car Lubricants(A,B), General Emissions (A-D), Driveline Fluid (A,B), Alternative Fuels(A,B), Diesel Performance(A,B), Diesel Emissions (A-D), Diesel Engine Experiment (A,B,C), Oxygenated Diesel Fuels (A,B), Advance Diesel Emission Control Systems (A,B),

Particulate Emissions (A.B), Heavy Duty Diesel Engine Lubricant, Diesel Engine Modeling, HCCI Engine, Real-World Emissions, Advanced Concept, Miscellaneous Fuels, The SAE Clean Snowmobile Challenge 2001, Progress in Advance Vehicle Fluids and Lubricants, Rheology & Tribology of Lubricated Systems 等共 33 個主題。其中有 9 個主題是與柴油引擎及其排氣有關，共占據了 15 個半天議程時間，由此可見此次會議對柴油引擎發展趨勢的重視，而非熱電漿(亦即低溫電漿)技術應用於柴油引擎之排氣處理也有三個半天議程時間，可見大會主辦單位對此技術之重視及看好。

這是我們第一次參加 SAE 主辦的國際會議，主要緣由在於配合本所現今執行的「低溫電漿廢氣處理技術之發展」計畫與為下一階段所提出的「移動性污染源電漿廢氣處理系統之開發」計畫執行預先準備，獲取低溫電漿處理廢氣(主要在於 NO_x 去除技術)相關技術資料，與探究目前汽車排氣處理技術之發展與應用現況，以做為發展電漿環保技術之參考。在這次會議中的 Non-thermal Plasma 議程即為我們參加的主要目的，這個議程主要在討論結合放電產生電漿與觸媒來進行排氣的後處理技術，舉凡有關電漿的產生裝置、觸媒、及後處理系統皆為發表討論的內容。

為何我們如此重視此議程？因為根據目前已收集到的低溫電漿廢氣處理技術應用於移動性污染源發表論文與技術資料顯示，基於全球暖化現象及 97 京都協議，全球各國將對溫室氣體之管制達成共識，尤其是二氧化碳(CO₂)，各國正逐步提高更加嚴苛的機動車輛廢氣排放標準環保法規，因而汽車的排放技術已被迫改弦更張。未來車輛將以環保為訴求，強調高能源效率及低二氧化碳產生率。但因燃油引擎汽車仍佔絕大

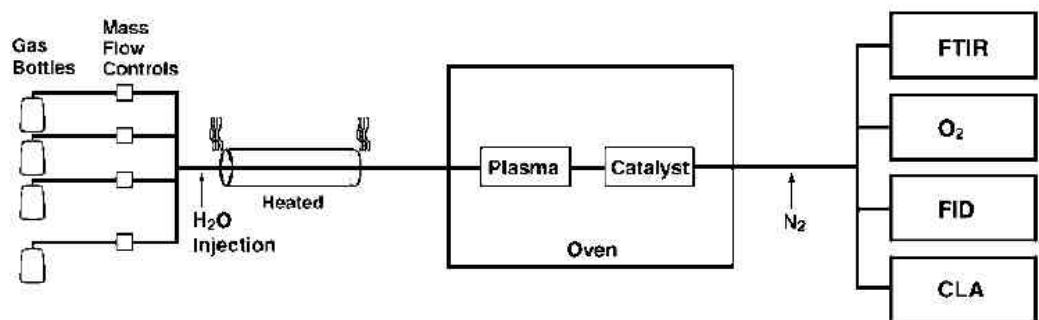
部分，此項目標唯有使用汽油稀薄燃燒引擎(lean-burn engine)或者柴油引擎才有可能達成。但對於稀薄燃燒引擎或柴油引擎而言，其氧氣含量為 5 - 13%且車輛排放之廢氣溫度降低(150 - 250 °C),在此條件下目前汽車普遍採用的三元觸媒轉換器無法正常工作。現在世界各國正研發替代方案，其中以非熱電漿廢氣處理技術搭配其它如觸媒，還原添加物等方法最受注目，而 SAE 的燃料及潤滑油國際會議則是相關研發資訊發表的一重要場合，這一點可由參予此議程發表論文的研究單位或公司為證：Ford Motor Co., General Motors R&D Center, GIE PSA Peugeot Citroen, Siemens AG, DaimlerChrysler AG, Caterpillar Inc., Automotive System Inc., 與 Pacific Northwest National Labs. 等，由上可知目前世界主要汽車公司均有投入此技術的研發。另外此議程所發表之文章 SAE 皆會收集編成一冊專刊出版，本所已有收購 1999 年及 2000 年非熱電漿汽車廢氣處理技術專刊。在這次會議展覽場地我們亦趁機向主辦單位 SAE 購買有關此會議從 1995-2001 年的所有發表論文之光碟版及其他書籍，請參照後面的收集資料。由於此次會議本應在去年(2001) 舉行，因此大部分之會議發表文章已收藏到此光碟版內，另外一些 2002 年新發表之文章則由 SAE 單篇印刷出售，每份 10 美金。SAE 大會並不免費提供此次會議之論文集，我們繳交之報名費亦未包涵此項。

接下來我們將就參加此議程的一些重要收穫說明如下：

1. 根據這近十幾年來在非熱電漿技術在處理引擎排氣中之 $\text{NO}_x(=\text{NO}+\text{NO}_2)$ 的發展趨勢，最初幾年大家還在討論非熱電漿的產生裝置 (Pulse discharge, dielectric barrier discharge, and ferroelectric packed-bed discharge) 改良，研究放電與柴油引擎排

氣中之水分、二氧化碳與未燃燒完全之碳氫化合物(H_xC_y)對氮氧化物去除率之影響，對於以非熱電漿技術搭配其它如觸媒，還原添加物等減輕電力負荷的方式只占少數。但近三年來由在此 SAE 會議上所發表的文章數量上來看，非熱電漿加觸媒技術已逐漸形成主流。今年(2002)的 SAE 會議上發表文章的內容來看，非熱電漿技術因為已成熟淪為配角，特殊觸媒技術的開發及其特性的研究成為本次會議非熱電漿議程中的主角。

2. 福特汽車公司的 Dr. John Hoard 在本次非熱電漿議程的開場演講“Products and intermediates in Plasma-Catalyst Treatment of Simulated Diesel Exhaust”便是討論不同觸媒(如 NaY、BaY、及 Pt 等)其去除效率與其氧化分解副產物之分析，且為了模擬實際開車時停停動動、加速及減速對其排氣溫度是否影響觸媒之作用，進行一熱循環測試。下圖即為此實驗的配置示意圖



圖一、Plasma/catalyst 實驗的配置示意圖

實驗氣體是由鋼瓶氣體經精密數位質量流速控制器混合不同比例調配而成，水氣則經加熱管線混入，電漿反應器與觸媒則置於一溫控烤箱內，輸出則混入氮氣後送至分析儀器如 FTIR、CLA 等量測。

實驗氣體流量為 4L/min，混入氮氣後為 20L/min。主要的實驗模擬氣體其成分則如同下表所示，分成高低不同濃度 NO_x 之以模擬不同負載下柴油引擎之排氣，其中以 C_3H_8 代表排氣中之碳氫化物。實驗結果如下：(1)在穩定態及 180 °C 下，低溫電漿轉化 NO 為 NO_2 、 CH_3ONO_2 及 HNO_3 ，轉化 C_3H_8 碳氫化物為 CO、 CO_2 、Formaldehyde、Acetaldehyde 及其它產物。NaY 觸媒可去除 Acetaldehyde、 CH_3ONO_2 及 HNO_3 但會產生 CO、HCN、Formaldehyde 及 Methanol。Pt 觸媒可去除 NO_x 但轉化為 N_2O ，Pt 觸媒可去除所有有機物及 CO。總 NO_x 去除率 75% 為 78% 及分別對應到 235 ppm 及 74 ppm NO_x 。(2) 在熱循環測試中，在 100-400 °C 間 NO_x 平均去除率為 57-60%，HC 平均去除率為 79-81%。其中觸媒有吸附與脫附現象造成量測值有磁滯曲線產生，參考圖二有關 NO_x 去除率之量測。Pt 觸媒在 100-400 °C 間可去除 HCN、CO，Pt 觸媒在 125 °C 以上即可去除所有有機物。

Table 1 Simplified gas blend used for experiments

Gas	Unit	High NO_x	Low NO_x
NO	ppm	235	74
NO_2	ppm	6	2
C_3H_8	ppmC ₁	1598	892
HC ₁ : NO_x	ratio	6.8	12.0
H_2O	%	6	5
O_2	%	8	8
N_2		Balance	Balance

表一、 主要的實驗氣體其成分

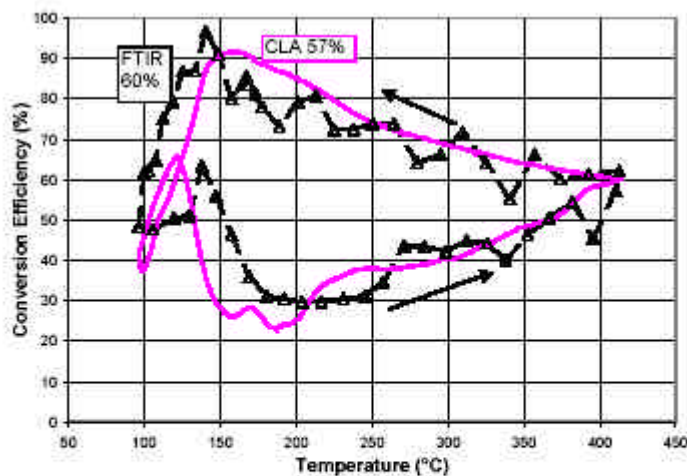


Figure 14 NO_x conversion percentages as measured by chemiluminescent NO_x analyzer (CLA) and by FTIR (FTIR, triangles), plotted against temperature. Values in boxes are averaged over one temperature cycle.

圖二、熱循環測試中 NO_x 去除率之量測

3. Pacific Northwest National Labs. 與 Ford Motor Co. 在這次會議中提出了一個串接 Two-step discharge/catalyst reactor 的新構想，其目的在於達到 90% 以上的 NO_x 去除率目標，且能減同時少功率須求到 15 J/L，目前發表文獻中大都為 30 J/L。他們這次發表二篇研究報告：第一篇 "Cascade Processing Of NO_x by Two-Step Discharge/Catalyst Reactors" 報告為建構此串接二段式放電/觸媒反應器的一個理論模型，此模型特殊之處是它加入了"觸媒區有將少量 NO₂ 的還原成 NO"這個新發現之現象。例如下圖為達到 90% 去除率、NO 初始濃度與能量密度相對於觸媒轉化能力之計算結果。

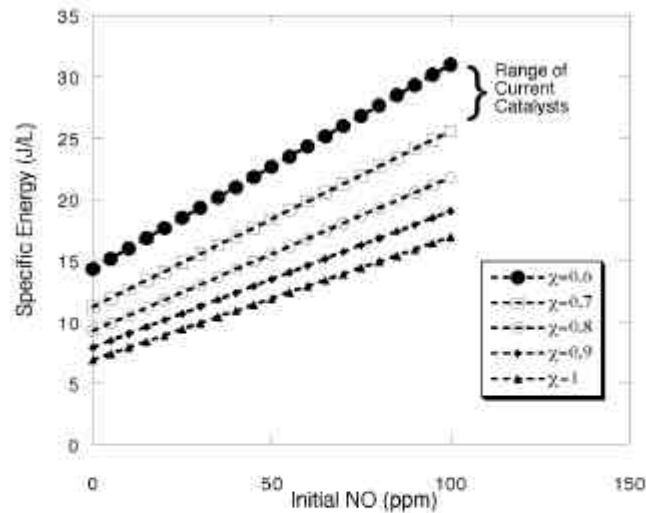


Figure 5. Effect of Initial Concentration of NO on specific energy requirements for various catalyst efficiencies. Here we chose $S=5$.

圖三、NO 初始濃度與能量密度相對於觸媒轉化能力之計算結果

上圖之計算是假設串接五級。此理論的計算並未考慮微粒及黑煙之影響，只就現有的技術水平與實驗結果作一驗證比對。第二篇”Multi-Step Discharge/Catalyst Processing of NO_x in Synthetic Diesel Exhaust”則是對串接二段式放電/觸媒柴油車反應器進行一實際的實驗證明。模擬實驗氣體成分為 2% H_2O 、6% O_2 、200 ppm NO、600ppm propene，平衡氣體為 N_2 。放電反應器為一特殊設計之雙層介質放電反應器，tube array reactor，簡稱 TAR。觸媒採用 Ba-Y、Na-Y 沸石 (zeolite)。圖四即為一初步試驗成果，展示出串接兩級二段式放電/觸媒反應器後的效率。

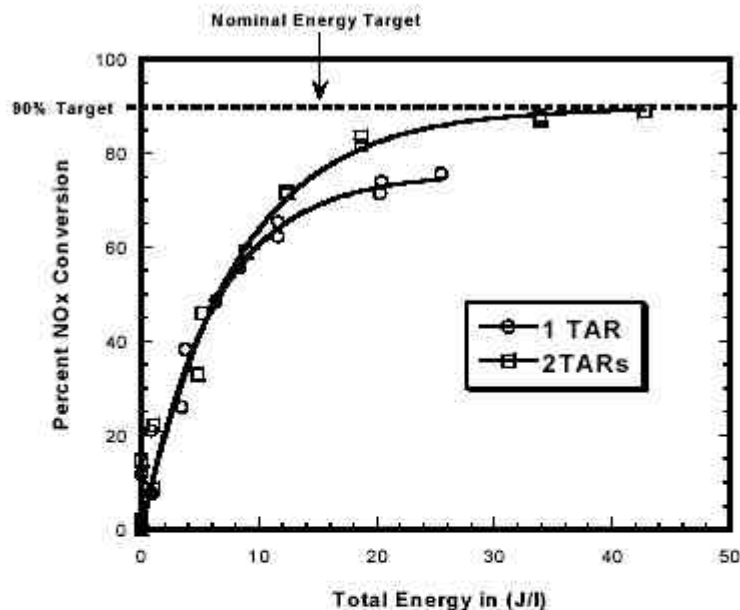


Figure 2: Data illustrating the difference in efficiency for one vs two plasma reactors. The data were taken with two 10 cm³ beds of Ba-Y, each preceded by a small TAR reactor. The total flow was 2 SLM, and the catalyst temperatures were held between 160 and 180°C. The data with 1 TAR was taken by simply unplugging the high voltage lead to the second TAR. The percent conversion includes all products not detected by a NOx analyzer.

圖四、串接兩級二段式放電/觸媒反應器後的效率

該研究亦有就固定第一級 TAR 放電能量密度但改變第二級 TAR 做一觀察，結果顯示在總能量密度為 10 J/L 以下時，加入第二級放電/觸媒反應器之效果不明顯。若以達到 80% 去除率之實驗結果來做比較，原先一級需要 18 J/L，二級為 14.4 J/L，其省能的效果有 20%。此構想之缺點文章也提及就是相應的電源也隨級數增加，而這是否符合實際柴油車狀況？不過此二篇是此次會議中唯一提及如何改善放電能量密度，其餘發表文章大都在 30 J/L 左右進行實驗。

4. 日本豐橋科技大學在此次大會亦發表一篇有關同時處理柴油引擎排出的與黑煙的報告”Oxidation of Carbon Soot Layer Using Pulsed Discharge Plasma”，該報告中採用二種不同之脈沖放電反應器，filter type、，與 packed pellet type，利用放電來過濾收集柴油引擎排氣中之黑煙，收集到某一程度或隔段時間使提高放電功率強迫氧化。其結果顯示這二種反應器都可以在加大放電功率下，將黑煙粉粒完全去除，演講中有實際反應器對照結果照片展出。此二者之功率差異為 filter type 反應器 200J/L，packed pellet type 反應器 50J/L。

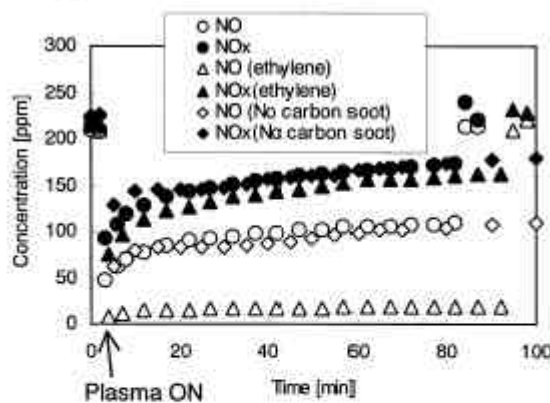


Fig.11 Concentration of NO and NO_x in the packed pellet-type plasma reactor

SIE: 50J/L, Carbon soot pre-deposition: 2%, Simulated gas 2.0L/min, With Ethylene (NO:200ppm, C₂:10%, C₂H₄:600ppm N₂ balance), Without Ethylene (NO:200ppm, O₂:10%, N₂ balance), NO carbon soot (NO:200ppm, O₂:10%, N₂ balance), 150°C

圖五、packed pellet type 反應器去除 NO/NO_x 效率曲線圖

另外此型反應器的 NO/NO_x 去除效率亦有進行相關測試，上圖代表 packed pellet type 反應器去除 NO 的效率曲線。基本上主要反應皆是將 NO 氧化成 NO₂，但是加入 ethylene 後有助於此反應的進行。

有關汽油引擎排氣處理這方面，我們亦在這次大會亦看到有幾篇特殊創意的研究報告發表，在此就我們認為是有值得留意的提出摘要說明。在汽油引擎排氣處理方面，鑑於汽車大部分之廢氣(70~80%)是在汽車起動後之 1~2 分鐘內產生，因為此時三元觸媒尚未達到工作溫度(300~350) 無法發揮廢氣去除效果。另外由於新車的排氣標準皆需通美國的聯邦測試規範 FTP-75 檢驗，此規範從汽車起動開始，模擬實際汽車駕駛加速、減速與爬坡等不同狀況下，歷時約 40min 車行 17.8km，排氣污染量之計算是以此時間內之平均值為準。此次會議中就有人針對如何在汽車起動後儘快提昇觸媒到工作溫度減少污染排放量，提出其解決之道，以求能達到未來將實施的 ULEV/SULEV 嚴謹排氣標準。在”Integration of Engine Controls, Exhaust Components and Advanced Catalytic Converters for ULEV and SULEV Applications” 這篇報告中，他們採用一新穎具良好保溫效果的觸媒轉換器 VICC(Vacuum-Insulated Catalyst Converter)，該採用一特殊的相變化材料作為吸熱、放熱用，並用真空隔熱增加保溫時效，圖六為此 VICC 觸媒轉換器的示意結構圖，圖七則為此 VICC 與典型觸媒轉換器的保溫效果比較。此篇報告將其整合至 1998 年 BMW540i 豪華汽車、引擎為 4.4L DOHC V8 的測試結果。目前此 VICC 觸媒轉換器架構已通過 50 Hrs 高溫振動測試與裝在一輛 SUV 上路測里程數已達 15,000 哩。報告指出此 1998 BMW 改裝車其排氣標準已符合 2004 年 ULEV 標準，接近 SULEV 標準。

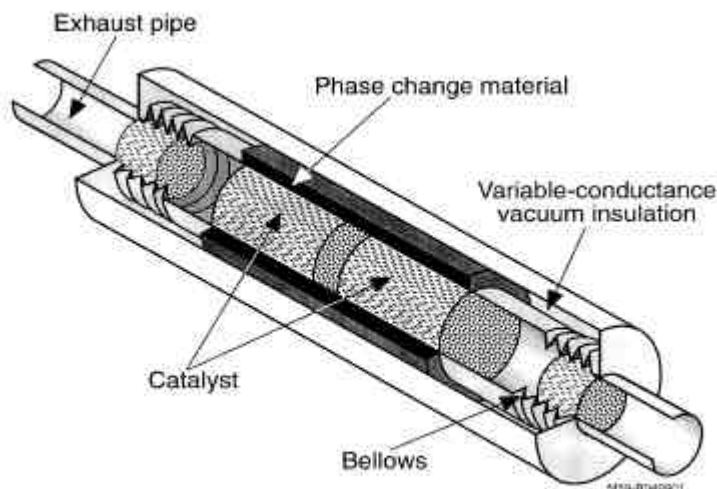


Figure 3. Cross-section of VICC

圖六、此 VICC 觸媒轉換器的示意結構圖

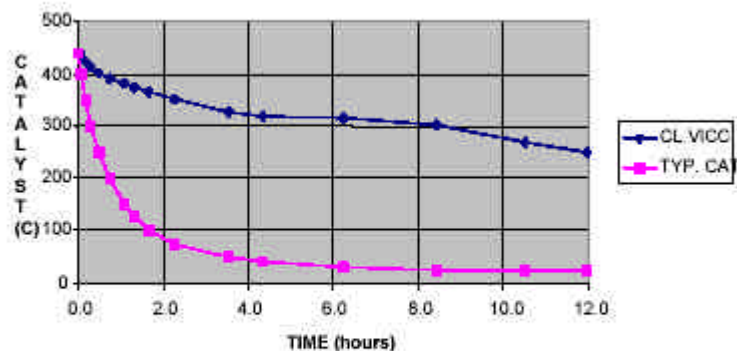
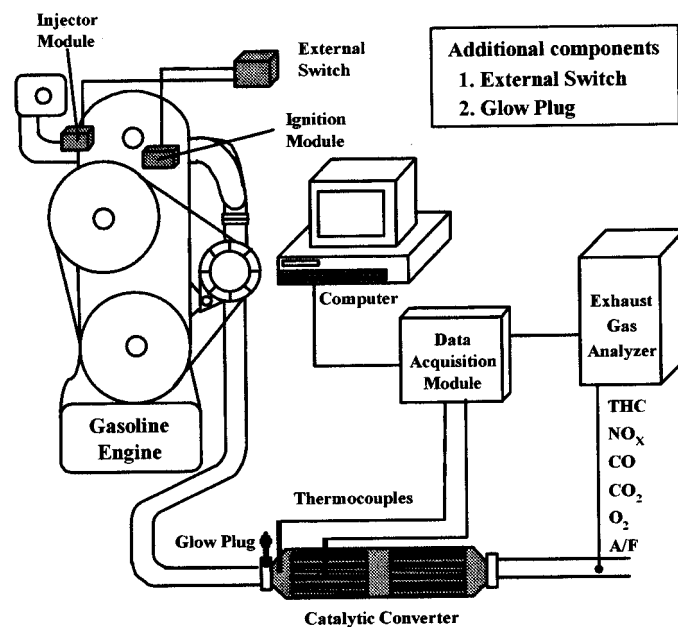


Figure 4. Cooldown of underfloor catalysts after two LA4 prep cycles.

圖七、VICC 與典型觸媒轉換器的保溫效果比較

在另外一篇由韓國 Kookmin Univ. 發表的文章中，”An Alternative Method for Fast Light-Off of Catalysts-Cranking Exhaust Gas Ignition”，其主要目標也是在在汽車起動後儘快提昇觸媒到工作溫

度減少污染排放量以符合排氣標準。但其做法為汽車起動後，引擎室先不點火，油氣則直接排出但在觸媒轉換器前裝一火星塞點火引燃 10 秒，直接加熱觸媒轉換器提昇觸媒到工作溫度。此 Cranking Exhaust Gas Ignition(CEGI)系統的實驗測試是在一配有 1341cc、4cylinder 12valve、MPI 引擎的現代小汽車上進行，見圖八。其測試結果為觸媒在 20 秒內便到達工作溫度，在 FTP-75 規範測試下，在冷暫態區其 CO 排氣減少 88.6%、THC 排氣減少 47.7%。



圖八、CEGI 系統的引擎測試實驗

(三)、第二十一屆 IT3 焚化及熱處理技術國際研討會

2002 年 IT3 研討會包含了二個一天訓練課程(one-day workshop)、20 個 Sessions 的論文發表會、MACT 研習會及 Syngenta Crop Protection 公司之焚化設施參觀等節目。二個訓練課程在同一時段(5/13)舉行，由陳孝輝博士參加 IT3 Basics 訓練課程，曾錦清博士則參與 Advanced Tutorials 研討課程：

A、Incineration & Thermal Treatment Technologies Basics

內容包括：

- (1) Thermodynamics; Mass and Energy Balances
(Instructor: Stephen Buckley, University of Maryland)
- (2) Incinerator Types
(Instructor: Fred Kuntz, Von Roll, Inc.)
- (3) Air Pollution Control
(Instructor: Jack Brady, Andersen 2000 Inc.)
- (4) Regulation and Permitting
(Instructor: Tony Eicher, Focus Environmental, Inc.)

B、Advanced Tutorials

內容包括：

- (1) Pyrolysis & Gasification of Waste
(Instructor: Kevin Whiting, Consultant, United Kingdom)
- (2) Vitrification of Waste
(Instructor: Dirk Gombert, INEEL)
- (3) Incinerator Emissions Sampling and Analysis
(Instructor: Bruce Maisel, ENSR International)
- (4) What has happened to the Hazardous Waste Combustor MACT Rule?
(Instructor: Ron Bastian, Focus Environmental, Inc.)

參加 IT3 會前的一天訓練課程，主要是針對 1)燃燒程序有關熱力學的質能平衡計算，2)焚化爐系統的最佳設計、操作及維護經驗，3)廢料特性和廢氣組成關係、氣份控制單元及廢氣處理系統的架構，4)廢棄物的熱解氣化技術，5)廢棄物的玻璃化（熔融）技術，6)焚化爐排氣的取樣與分析技術，7)符合美國 RCRA、TSCA、Clean Air Act 及 Clean Water Act 等管制法規之許可申請導引，並與世界各國相關之管制法規比較等方面加以研習。除了瞭解燃燒程序的質能平衡計算方法、各種高溫處理系統、廢棄物的熱解氣化及玻璃化技術、最新廢氣處理技術及焚化爐試燒風險評估程序方法與程序及法規要求外，並可和經驗豐富的講師及學員交換研究心得，對熱處理技術之提昇，有很大的助益。

C、第 21 屆焚化及熱處理技術國際研討會(2002 International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies)

焚化及熱處理技術國際研討會(IT3 Conference)以往每年是由加州大學 Irvine 分校(UCI) 負責舉辦，但自 2001 年起則由馬里蘭大學機械系接辦，本屆於 5 月 13-17 日在美國路易斯安那州紐奧爾良的 Sheraton Hotel 舉行，共有來自美國、日本、德國、法國、韓國、中國大陸、台灣等 17 多個國家約 310 人參加，發表論文共計 102 篇，以美國的 58 篇最多，德國 11 篇次之，法國及韓國各 6 篇，日本 3 篇，台灣、中國大陸、英國、俄羅斯、瑞典及捷克各 2 篇，瑞士、加拿大、比利時、泰國、墨西哥、及西班牙等國家各 1 篇。此外，並有 32 個廠商設立攤位展示各種焚化及熱處理設備、相關材料及環境評估軟體等技術與經驗。

研討會包括大會演講(Plenary Session)、口頭報告論文(Oral Sessions)及壁報論文(Poster Sessions)。大會演講的主題為”The Impending Regulatory Horizon for Thermal Treatment Technologies”，由美國 Arcadis-Geraghty & Miller 的 Kevin Bruce 主持，講員共有二位：

- 1) Mr. Martin Quinn, United Kingdom Environment Agency
- 2) Mr. Mike Galbraith, United States Environmental Protection Agency

主要重點在於陳述：管制法規對熱處理工業的現今與未來的衝擊，包括在目前施行法規及未來即將制定的法規 MACT 下，可能面對起訴的範疇。

口頭報告論文分為下列 19 個 Sessions 在 3 個場地同時進行討論；壁報論文 7 篇則在廠商展示會場展出：

- 1) Demonstration Compliance
- 2) Gasification & Pyrolysis
- 3) Combustion Research
- 4) Operation Issues
- 5) Risk Management and Communication
- 6) Gasification
- 7) Ash & Residues
- 8) Emission Control
- 9) Thermal Treatment of Radioactive Wastes
- 10) Demonstrated Thermal Treatment Experience
- 11) Special Issues - Part 1
- 12) Organic Waste Vapor Streams
- 13) Special Issues - Part 2
- 14) Contaminants of Concern
- 15) Hydrothermal & Plasma Processing
- 16) Alternative Thermal Technology
- 17) Combustion Research – Part 2
- 18) NOX Formation & Control
- 19) Trial Burn

這次參加第 21 屆 IT3 國際研討會的重點在於研討電漿玻璃化處理技術、電漿氣化處理技術、放射性廢棄物處理及相關應用，並在 Session 16：Hydrothermal & Plasma Processing 與海洋大學及台北科技大學共同發表一篇口頭報告論文，題目為：

“ THERMAL PLASMA VITRIFICATION OF VARIOUS LLW SURROGATES ”

，並與相關研究機構、專業公司(MSE, Phoenix Solutions、PyroGenesis, Inc.、Europlasma 等)之研究人員及工程師交換研究心得，探究電漿處理廢料技術提昇及應用於市場的發展現況。核研所目前正值進行低放射性廢料電漿處理廠之試車工作，並積極推廣以電漿技術處理我國有害廢棄物之可行性。因此，特別對這一次會議中瑞士 ZWILAG 公司報告放射性廢料電漿處理廠的冷試車結果、廢棄物的氣化與熱解技術等進行瞭解。

1. 瑞士 ZWILAG 公司、比利時 Belgoprocess 公司及美國 Retech 公司共同發表一篇有關 ZWILAG 公司放射性廢料電漿處理廠的測試報告，題目為：Radwaste Treatment System Using Thermal Plasma。該廠的建造時程為：1990 至 1995 年間進行電漿爐建廠申請之行政程序作業，並獲得瑞士當局之興建許可；1996 至 2000 年間進行工程設計及電漿爐建造工作，電漿爐為美國 Retech 公司製造的 PACT-8 電漿離心爐，可燃性廢料的設計處理量為 200 公斤/小時，而不可燃廢料的設計處理量為 300 公斤/小時，漿用以處理瑞士每年產生的 150 公噸可燃性低放射性廢料和 50 公噸非燃性低放射性廢料（合計 200 公噸）。2000 年 3 月瑞士當局簽發操作許可；2000 年 4 月電漿爐系統供應商 Retech 公司、ZWILAG

公司和比利時 Belgoprocess 工程公司合作，進行第一次全功能系統測試，並試驗處理可燃與不可燃混合模擬廢料（包含混合有機廢棄物、離子交換樹脂、不銹鋼 鍍鋅鐵等，其中可燃物質的熱值為 40MJ/kg），不銹鋼及離子交換樹脂的進料率分別為 2,500 公斤/小時與 350 公斤/小時。電漿爐可成功地處理掉廢料桶，但是有機含量高及熱值高的廢料桶，則造成在二燃室後 CO 的排放量超出法規標準，也因而造成進料機及廢棄熱交換器堆積煙塵（Soot），更使電漿爐及二燃室形成正壓造成廢氣外洩。因此，二燃室的結構進行修改，以增加空氣與裂解氣體的混合效果，及氣體的駐留時間；此外，油空氣燃燒機更改為丙烷氧氣燃燒機，以使熱及燃燒管理得到最適化。

2001 年 1 月進行系統改善後之驗證測試，共處理 49 桶含水泥、鐵桶和有機物之模擬廢料，廢料的組成如表二所示。

表二、模擬廢料桶組成（公斤/桶）

Test Series	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Textile	4.0	8	15.5	31.0	13.7	9.7	12.9	13.4	14.9
Plastic Polypropylene Pellets or film	6.0	12	16.0	32.0	27.0	27.0	32.0	32.0	32.0
PVC	0.7	1.4	1.4	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Paper	3.0	6.0	3.3	6.5	13.0	13.0	6.5	6.5	6.5
Rubber	2.0	4.0	1.9	3.8	7.5	7.5	3.8	3.8	3.8
Concrete	0	0	20.2	37.4	0	0	0	0	0
Drum weight	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Total organic load	15.7	31.4	38.7	76.1	64.0	60.0	58.0	58.5	60.0
Total weight	35.7	51.4	78.9	133.5	84.0	80.0	78.0	78.5	80.0

驗證測試的基本目的為：

- 1) 研究 CO 排放量和主燃室（即電漿爐）氧氣供應量及二燃室氧氣與空氣供應量的關係，以決定何種組合的氧氣與空氣供應量，可以減低 CO 產量至接近零，並避免 CO 瞬間大量產生和煙塵的形成。
- 2) 比較有裂解階段及無裂解階段直接切割廢料桶，以決定最適當的桶裝廢料處理方式。
- 3) 控制火炬輸入主燃室的功率、廢料桶進料程序、起始進料的主燃室溫度，和提供主燃室低於燃燒所須之氧氣當量，以限制有機氣體的衍生量。

測試結果顯示：2000 年 4 月的 CO 過量問題已成功地消除，並獲得供應最少氧氣量與最多空氣量並足以消除 CO 產生的最佳操作條件。

2001 年第二季進料機的部分機構進行修正，以提昇系統的可操作性及易於維護的條件。2002 年 4 月完成全系統的冷試車工作，系統性能符合合約及管制法規的要求，共測試處理 150 桶模擬廢料。系統經最後檢修後，預計於 2003 年開始熱試車工作。

2. AMEC Earth and Environmental 公司發表一篇有關含氯有機廢料批次玻璃化處理技術應用研究論文”Batch Vitrification Treatment of Chlorinated Organic Wastes“，該公司使用 GeoMelt 公司發展的玻離化程序技術 (Vitrification Process)，已在美國、澳洲、日本商業化處理 Dioxins 、

Furans 、 PCBs 、 氯苯及農業化學廢棄物等含氯有機廢棄物（泥土最高濃度 33%）。在澳洲 GeoMelt 被選定為替代焚化處理含氯有機廢棄物

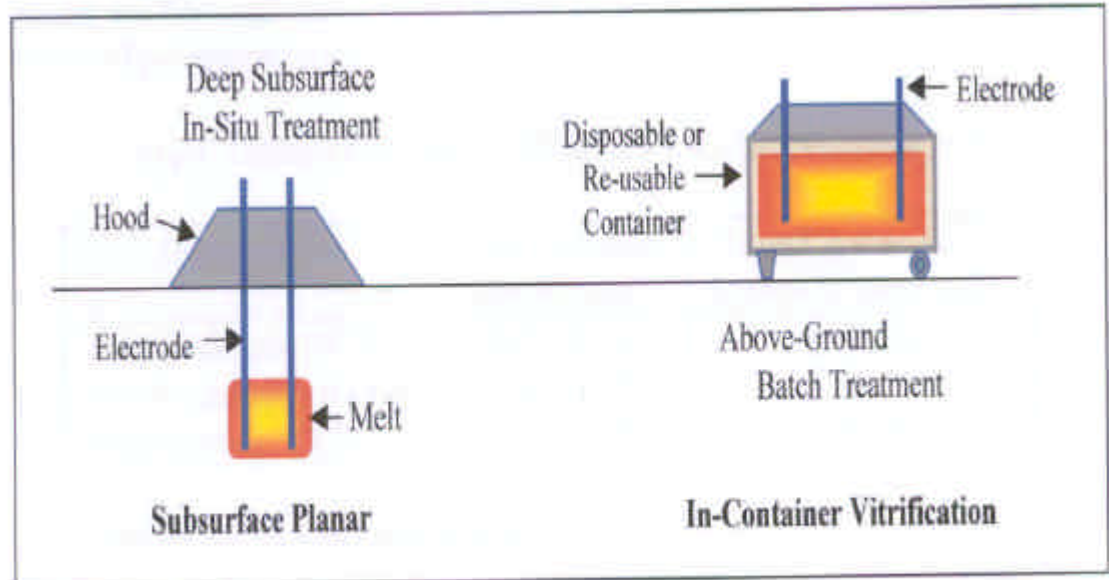


Fig. 1. Diagram showing primary GeoMelt treatment configurations.

圖九、GeoMelt 玻璃化程序方法示意圖

圖九為 GeoMelt 玻璃化程序方法示意圖，左圖為污染淺地現場玻璃化處理架構示意圖，可用以整治掩埋場、局部重金屬污染泥土等土地；右圖為地表上容器內玻璃化處理方法示意圖，可用以批次處理各類廢棄物。圖十為 GeoMelt 玻璃化處理示範系統，主要由熔融室、廢氣處理系統、熱氧化器及柴油發電機等系統構成，每批次可處理 6 公噸事業廢棄物。表三為 GeoMelt 玻璃化處理示範系統處理 HCB、HCBd 及 HCE 等含氯有機物的測試結果，熔融處理本身的 DRE 值為 98.09-99.99%，但全系統的 DRE 值則大於 99.9999%，符合有毒廢棄物處理

的標準。



圖十、GeoMelt 每批次 6 公噸玻璃化處理示範系統

表三、GeoMelt 玻璃化處理示範系統測試結果

Organo-chlorine	Melt Destruction Efficiency (DE)	Overall Destruction and Removal Efficiency (DRE)
Hexachlorobenzene (HCB)	99.52-99.73%	>99.9999%*
Hexachlorobutadiene (HCBd)	98.09-99.65%	>99.9999%*
Hexachloroethane (HCE)	99.78-99.99%	>99.9999%*

* Species not detected in the treated off-gases at the stack

- 3、有關熱電漿處理廢料相關研發與應用的論文有 11 篇(瑞士 ZWILAG 公司、法國 Europlasma 公司、加拿大 Pyrogenesis 公司、韓國核能環境技術研究所(NETEC) 、法國 CEA、中國科學院力學研究所、台灣海洋大

學等)。法國 Europlasma 公司為具 26 名員工的小型公司，主要發展非傳輸型直流電漿火炬，可製作 5KW 至 5MW 的電漿火炬，電及使用壽命約 1,000-1,500 小時。其中以彈匣式 25KW 電漿火炬（如手掌大小）最具特色。加拿大 Pyrogenesis 公司發表其承接美國海軍船艦廢棄物電漿處理計畫的執行成果，該公司設計一種名為 Plasma-fired Eductor 的處理器，可將絞碎的廢棄物快速分解處理，而且系統佔用空間較小，系統處理量為 164 公斤/小時。中國科學院力學研究所則利用交流電漿火炬進行各類廢棄物熔融處理的程序發展。會中 Phoenix Solutions 公司宣稱其傳輸型電漿火炬後電極使用壽命已達 2,300 小時，對全世界電漿熔融技術的應用有重大的意義。

三、心得

參加 2002 年 SAE 春季燃料及潤滑油國際會議與第 21 屆焚化及熱處理技術國際研討會所獲之心得說明如下：

- 1、此次低溫電漿技術議程主要在談論柴油引擎之廢氣處理，此時大家的共識皆為此排氣處理技術應採二段式反應器設計，第一段為低溫電漿反應器其主要作用是將 NO 轉化成 NO_2 ，而第二段的特殊觸媒(仍在研發中)則是將 NO_2 及碳氫化物 H_xC_y 轉化成 N_2 、 CO_2 及 H_2O 。只是此時發表論文之重點已不再侷限於氮氧化物(NO_x)之去除效率，主要轉移到此特殊觸媒處理所有廢氣效率之探討，尤其在柴油排氣中某些碳氫化物(例如 Formaldehyde、Acetaldehyde)對觸媒還原氮氧化物是否有某些副作用產生。另外此次論文中發表的實驗氣體流量在 4~30 L/min，皆為實驗室等級，尚未看到一完整實用型的汽車排氣處理器發表。
- 2、另外在有關汽油引擎汽車之排氣處理發展上，目前還是在如何利用與提高三元觸媒的轉化效率。鑑於汽車大部分之廢氣(70~80%)是在汽車起動後之 1~2 分鐘內產生，因為此時三元觸媒尚未達到工作溫度(300~350)。此次會議中就有人針對如何在汽車起動後儘快提昇觸媒到工作溫度提出其解決之道，例如在前一節報告中提及之保溫、預熱法。但由此可見三元觸媒為一非常成熟且成功的排氣處理裝置，針對日益嚴苛的汽車排氣標準，大部分之研發仍採用此技術。
- 3、瑞士 ZWILAG 公司放射性廢料電漿處理廠完成冷試車任務，已提高電漿處理放射性廢料運用之技術成熟度。

- 4、瑞士 ZWILAG 公司放射性廢料電漿處理廠使用美國 Retech 公司商業化電漿爐系統，但是冷試車週期長達一年半，可見放射性廢料電漿處理程序技術開發的高難度。
- 5、GeoMelt 玻璃化技術可有效處理 Dioxins 、 Furans 、 PCBs 、 氯苯及農業化學廢棄物等含氯有機廢棄物，破壞去除率(DRE 值)大於 99.9999% ，可提供核研所應用電漿火炬技術處理有害廢棄物的參考。
- 6、Phoenix Solutions 公司之傳輸型電漿火炬電極使用壽命已達 2300 小時，有助於電漿處理系統可靠度的提昇，減少維修週週期降低成本。

四、建議

此次公差到美國參加二個國際會議(SAE 2002 年春季燃料及潤滑油國際會議與第二十一屆 IT3 國際焚化及熱處理技術研討會)後，根據會議中所獲得之資料及個人的心得，提出下列建議：

- 1、考慮到本所現今執行的「低溫電漿廢氣處理技術之發展」計畫與配合下一階段所提出的「移動性污染源電漿廢氣處理系統之開發」計畫，尤其是針對機動車輛引擎排氣處理技術之發展，由此次會議中可確知必須要針對觸媒方面的研發加以重視。特別是目前本所(核研所)物理組目前缺乏相關化工領域之研發人員，日後計畫的推動將有賴於獲得外界人力(本所化工組與化學組、產學界)之支援，才可得到具體之成效。
- 2、Phoenix Solutions 公司的傳輸型電漿火炬後電極使用壽命已達 2,300 小時，可提昇電漿處理系統的可靠度，減少維修週期降低成本。核研所已建立高功率直流電漿火炬系統設計與系統整合技術，將以 Phoenix Solutions 公司電漿火炬的優異成果為目標，不斷地精進各項技術提昇電漿火炬電極壽命，發展電漿處理廢料相關技術以有效處理我國數量龐大之有害廢棄物(如感染性醫療廢棄物及焚化爐灰渣等)。
- 3、有機廢棄物熱解氣化技術(Pyrolysis & Gasification)的研究與應用相當活躍，並且可與燃料電池、氣電共生發電系統串聯，形成高效率（70-80%）能源回收系統；我國屬能源短缺國家，應積極發展此類高效率能源轉換系統，提昇能源使用效率，減低發電成本。核能研究所可利用已建立之電漿火炬技術，發展有機廢棄物電漿氣化技

術，配合 92 年度即將開發之 SOFC 燃料電池技術，持續發展生質能/有機廢棄物高效率能源回收系統，建立我國替代能源使用的基礎。

五、附 錄

一、國外蒐集資料(存放在核研所圖書館)

1. SAE Fuels & Lubricants Conference Papers 1995-2001 光碟版。
2. Peter Eastwood, “Critical Topics in Exhaust Gas Aftertreatment”,
Published by Research Studies Press Ltd., Dist. By SAE B-825,
2000.
3. “General Emissions and Gasoline Emission Control Systems”, from
SAE 2001 International Fall Fuels & Lubricants Meetings, SAE SP-
1644, 2001.
4. “Diesel Emissions Control Systems”, from SAE 2001 International
Fall Fuels & Lubricants Meeting, SAE SP-1641, 2001.
5. “Two-Stroke Engines; Technology and Emissions”, SAE PT-66, 1998.

二、2002 年 IT3 研討會口頭發表論文

THERMAL PLASMA VITRIFICATION OF VARIOUS LLRW SURROGATES

J. P. Chu, K. S. Chen

Inst. of Materials Engineering, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, R.O.C.

C. C. Tzeng, Y. Y. Kuo and Y. J. Yu

Physics Division, Institute of Nuclear Energy Research, Lung-Tan, Taiwan, R.O.C.

T. W. Cheng

Dept. of Mat. & Mineral Resources Eng., National Taipei Univ. of Tech., Taipei, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

Vitrified slag of various low-level radioactive waste (LLRW) surrogates have been characterized. Waste surrogates including HEPA, contaminated soil, and used thermal lagging materials (perlite and rock wool) have been treated using a thermal plasma heating source. Slag with large volume/weight reductions have been obtained, with Vickers hardness (Hv) ranging between 500 and 650. The hardness appears to increase with the slag density. Numerous metal-bearing dispersed particles embedded in the slag matrix are observed, confirming the presence of mixing state during the vitrification. Except for HEPA samples, the vitrified slag consists of mostly amorphous state of SiO₂, which in turn dissolves other minor constituents from waste feeds. Thus, perlite and soil are likely the glass-forming materials. In order to form a glassy structure, the amount of HEPA should be less than 33% of the feed in weight.

INTRODUCTION

Nuclear power plants generate thousand tons of low-level radioactive wastes (LLRWs) annually in Taiwan. Conventional incineration and compaction techniques are being used to treat some of LLRWs. Yet, non-combustible and cement-solidified LLRWs need further treatments in order to dispose properly. It has been shown that the vitrified form is one of preferred types for treating hazardous and radioactive wastes [1-14]. For vitrification, our study used the plasma as a heating source which treated wastes containing metals and/or organic at temperatures in a range of 1400 to 1600 °C. Metal-bearing solids were melted by the process, organic contaminants were thermally destroyed. The molten material formed a hard, glass-like, leach-resistant monolithic mass after cooling, which could then be disposed accordingly without any further treatments. In this study, the Taiwan first plasma system built at Institute of Nuclear Energy Research (INER) exclusively for the treatment of hazardous/radioactive wastes was used. The study was directed toward characterization of slag generated from plasma vitrification treatment, in order to establish a better understanding of the feasibility of the plasma system in treating various LLRW surrogates. Surrogates selected were combustible/non-combustible such as HEPA, spent resin, contaminated soil and used thermal lagging materials (perlite, rock wool). Post-treatment slag characterizations included scanning electron microscopy (SEM) for microstructure/morphology

observation, X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) for elemental microanalysis, X-ray diffractometry (XRD) for crystallography determination, and corrosivity evaluation of the waste.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

A 100 kW non-transferred arc-generated plasma torch is used as the heat source. Temperatures at the hot spot of plasma could be in excess of 10,000 °C. For ignition, Argon is the plasma gas while nitrogen is used as the carrier gas during the treatment. Surrogates are placed in a crucible located in the center of chamber so that a uniform temperature distribution can be achieved. The vitrification treatment lasts 15 min at 1550 °C.

To alleviate thermal shock damages, the heating and cooling rates less than 10 °C/min are maintained. Details of the INER plasma system and operation conditions are described elsewhere (6, 7, 13, 14). Major constituents in the feeds along with the sample designation are listed in Table I. For SEM and EDS examinations, a Hitachi S-4100 scanning electron microscope is used, while XRD is done with a Siemens D5000 diffractometer with monochromatic CuK α radiation. To evaluate the corrosivity toward steel, the slag is also subjected to TCLP, followed by US EPA 1110 method. This method exposes coupons of SAE 1022 steel to the liquid to be evaluated and, by measuring the degree to which the coupon has been dissolved, determines the corrosivity of wastes. (15)

TABLE I
List of feeds treated in this study (in weight percentage).

Sample Number	HEPA (H)	Spent resin (Ir)	Perlite (P)	Rock wool (R)	Soil (S)
HrR111	33	33		33	
HrR311	60	20		20	
HrR131	20	60		20	
HrR113	20	20		60	
HRS111	33			33	33
HRS311	60			20	20
HRS131	20			60	20
HRS113	20			20	60
IrPR111		33	33	33	
IrPR311		60	20	20	
IrPR131		20	60	20	
IrPR113		20	20	60	
IrPS111		33	33		33
IrPS311		60	20		20
IrPS131		20	60		20
IrPS113		20	20		60
HPS111	33		33		33
HPS311	60		20		20
HPS131	20		60		20
HPS113	20		20		60

RESULTS AND DISCUSSION

Macroscopic Examinations: Slag Density, Hardness, Volume and Weight Reductions

Table II shows a list of volume and weight reduction of feeds, density and hardness of slag. Generally, the weight reduction was between 1 and 2 except those of feeds

containing large amounts of spent resin. Feeds with large quantity of spent resin are presumably incinerated completely during plasma treatment, resulting in increases in both weight and volume reductions. The volume reduction also increases with the rock wool content. Thus, when combining both rock wool and spent resin, the volume reduction becomes relatively high. On the other hand, due to the lack of combustible constituents in the soil feeds the slag yield low volume and weight reductions. Slag densities are in the range of 2 to 3 g/cm³. There is no apparent correlation between slag density and volume/weight reductions. Yet, the slag density appears to increase with HEPA, rock wool and soil, whereas the reverse situation is observed for the spent resin. Hardness of slag are between Hv 500 and 650, showing an increasing trend with the slag density. That is the slag of HEPA, rock wool and soil have relatively high values of hardness.

TABLE II
List of volume and weight reduction of feeds, density and hardness of slag.

Sample Number	Weight reduction	Volume reduction	Slag density g/cm^3	Hardness Hv
HfR111	1.47	29	2.88 ± 0.01	587.0 ± 4.8
HfR113	1.21	30	3.07 ± 0.05	647.0 ± 4.0
HfR131				
HfR311	1.38	24	2.91 ± 0.03	610.0 ± 6.7
HRS111	1.13	19	2.68 ± 0.05	586.4 ± 7.1
HRS113	1.09	12	2.73 ± 0.01	600.4 ± 5.0
HRS131	1.04	25	2.93 ± 0.01	630.0 ± 8.2
HRS311	1.05	18	2.80 ± 0.03	624.4 ± 6.7
IrPR111	1.45	22	2.57 ± 0.05	585.6 ± 2.9
IrPR113	1.60	30	2.86 ± 0.03	608.8 ± 7.0
IrPR131	1.18	16	2.59 ± 0.04	589.6 ± 8.5
IrPR311	2.78	31	2.47 ± 0.02	482.6 ± 13.6
IrPS111	2.02	9.6	2.33 ± 0.03	592.0 ± 5.6
IrPS113	1.28	4.2	2.40 ± 0.01	621.0 ± 7.2
IrPS131	1.10	7.0	2.37 ± 0.26	603.2 ± 4.2
IrPS311	2.23	9.1	2.31 ± 0.05	573.0 ± 7.5

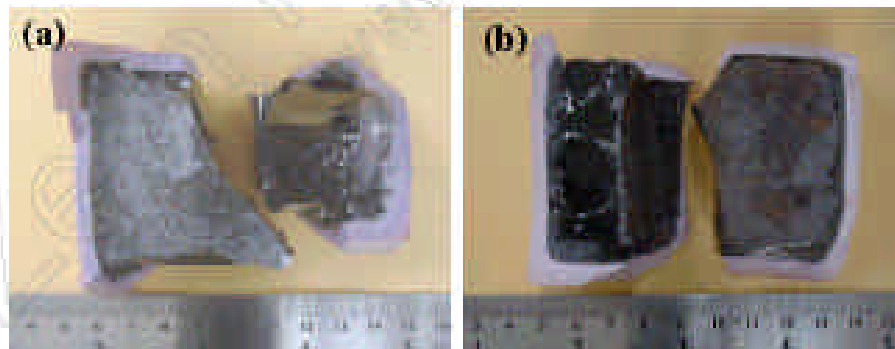


Fig. 1 Photographs of plasma-treated products from samples: (a) HRS131 and (b) IrPR111.

The photographs in Fig. 1 show the typical plasma-treated products from samples HRS131 and IrPR111. Both of the slag are vitrified, revealing a type of synthetic rock with a dark-colored appearance, attached to the crucible. The slag structure of IrPR111 appears not as dense as that of HRS131, consistent with slag density evaluation results. In this figure, the slag is rather uniform and no distinct, macroscopic segregation (such as metal pellets) is observed in the vitrified product. Metal pellets are often found present at the bottom of vitrified slag. Metal pellets tend to increase in quantity with HEPA content in the feed. Metal pellets are formed because the feed stock contains some metallic constituents, which are melted during the plasma treatment and aggregate to form pellets after solidification. As a result of the difference in their specific gravities, vitrified slag

and metal pellets are separated, suggesting a possible way for the metal recovery (7).

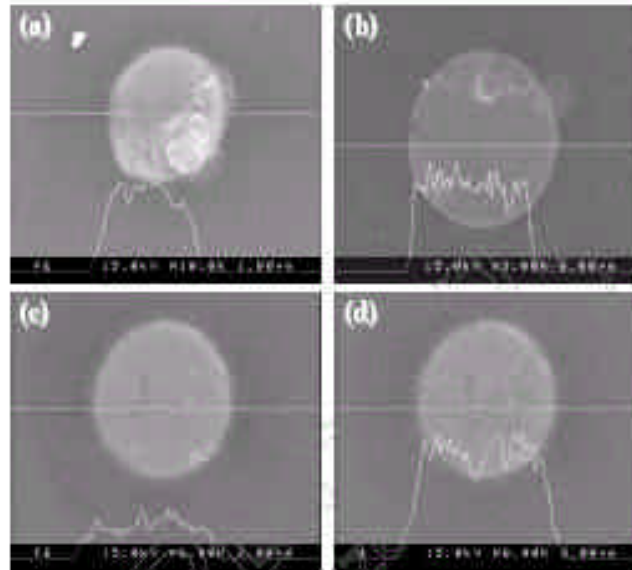


Fig. 2 SEM micrographs of plasma vitrified slag with X-ray microanalytical line-scans at the center of dispersed particles. (a) HRS111, Fe line scan, (b) IrPS111, Ca line scan, (c) IrPR131, Fe and (d) S line scans.

Slag Examinations: SEM, EDS, and XRD Analyses

SEM examinations unveil numerous dispersed particles embedded in the slag matrix. The chemical compositions of many particles have been analyzed with EDS, and indicate the majority of particles examined are Fe-rich. Fig. 2(a) shows an example of SEM micrograph taken from HRS111 slag with a line scan of Fe element at the bottom of the micrograph confirms this particle is enriched with Fe. In addition to Fe, Ca is also found in the particles, as shown in Fig. 2(b) taken from IrPS111 slag. For feeds containing rock wool and spent resin, particles enriched with Fe and S constituents are frequently observed, as revealed in line-scan results of Fig. 2(c) and (d). These fine particles are dispersed uniformly in the slag and are likely precipitated out from the slag during the solidification. According to our previous study (7, 14), the formation of these second phases appeared to be affected essentially by the feed composition. The metal constituents are melted and solidified during plasma treatment becoming spherical phases. As evidenced by second phases in Fig. 2, mixing state of the elements from waste feeds within the vitrified slag has been achieved during the treatment, as a result of high-temperature driven diffusion effects. These elements form alloys or compounds that are not soluble or with a limited solubility with the solid slag at room temperature, resulting in spheroids in the slag matrix. Spherical shape of Fe- and Ca-rich phases is attributed to the reduction of surface free energy during solidification. Formation of these phases or particles is presumably a result of reshuffling and the mixing processes that occur between metals and molten slag during the vitrification (7). This provides a clear evidence of the mixing state of thermal vitrification achieved by the thermal plasma.

EDS has been conducted to analyze elemental compositions of slag. Table III is a list of EDS resulted from plasma-treated products of LLRW surrogates. O, Si and Al are major constituents in most slag samples examined. This suggests the slag samples are determined as mostly SiO_2 and Al_2O_3 . In particular, perlite and soil are likely the glass-forming materials that are beneficial for the vitrification. The presence of SiO_2 and Al_2O_3 is confirmed by the XRD result described subsequently. For the HRS group samples, Al content increases with HEPA content whereas Ca increases with rock wool. High HEPA content (such as HRS311) results in high Al content in slag and thus formation of Al_2O_3 as a major phase, as evidenced by XRD. For high soil contents, such as HRS113 and IrPS113, Si in the form of SiO_2 is high in the slag. For the IrPR group slag, Ca is high and compound formations of Ca, Al and Si with O are expected.

TABLE III
A list of major elements in slag samples by EDS analyses, (in wt.%)

	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	K	Fe	Total
HrR111	43.8	0.4	2.6	20.5	12.7	20.0	--	--	100.0
HrR113	36.3	0.4	2.8	21.5	15.7	23.3	--	--	100.0
HrR131									100.0
HrR311	37.0	1.1	1.7	27.6	11.0	9.1	--	12.5	100.0
HRS111	41.3	0.7	1.9	18.2	22.3	13.0	0.8	1.8	100.0
HRS113	42.3	0.8	1.6	12.9	28.7	9.3	1.3	3.1	100.0
HRS131	38.7	0.5	1.4	18.2	23.1	15.8	0.5	1.8	100.0
HRS311	37.9	0.9	1.5	29.1	18.9	11.0	0.7	--	100.0
IrPR111	37.7	3.0	2.2	8.6	31.2	15.4	1.9	--	100.0
IrPR113	39.6	1.2	1.7	16.6	23.8	16.2	0.9	--	100.0
IrPR131	41.0	3.1	1.0	13.8	29.9	7.6	2.4	1.2	100.0
IrPR311	36.7	2.1	2.4	13.7	27.6	16.1	1.4	--	100.0
IrPS111	41.2	2.8	1.2	9.0	36.4	7.2	2.2	--	100.0
IrPS113	42.2	2.1	0.6	7.8	40.8	2.6	2.7	1.2	100.0
IrPS131	42.7	4.4	0.4	8.6	38.7	1.9	3.3	--	100.0
IrPS311	41.0	2.9	1.9	10.7	29.7	11.2	1.8	0.8	100.0

For XRD analyses, bulk slag samples are pulverized to minimize segregation effects. The results are shown in Fig. 3. Except for HEPA samples, most of slag samples examined in this study are of the amorphous structure, further confirming the glassy slag of SiO_2 . For amorphous slag, some samples exhibit crystalline structures as minor phases. These minor phases include Al_2O_3 and $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, consistent with SEM results. While observed in SEM, FeS-like phases are not found in XRD patterns, suggesting the minority of these phases. Thus, in general, the second phases observed constitute as the minor phases and the glassy slag of SiO_2 still the major phase. For HEPA feeds to form a glassy structure, HEPA content is limited to 33% of feed in weight. In our study on the leachability evaluation of these slag samples by the toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) (16), the result shows insignificant leachability characteristics for metallic elements such as Fe, Ca, and Al. Therefore, insoluble metal-bearing second phases are effectively encapsulated by the slag matrix from leaching out.

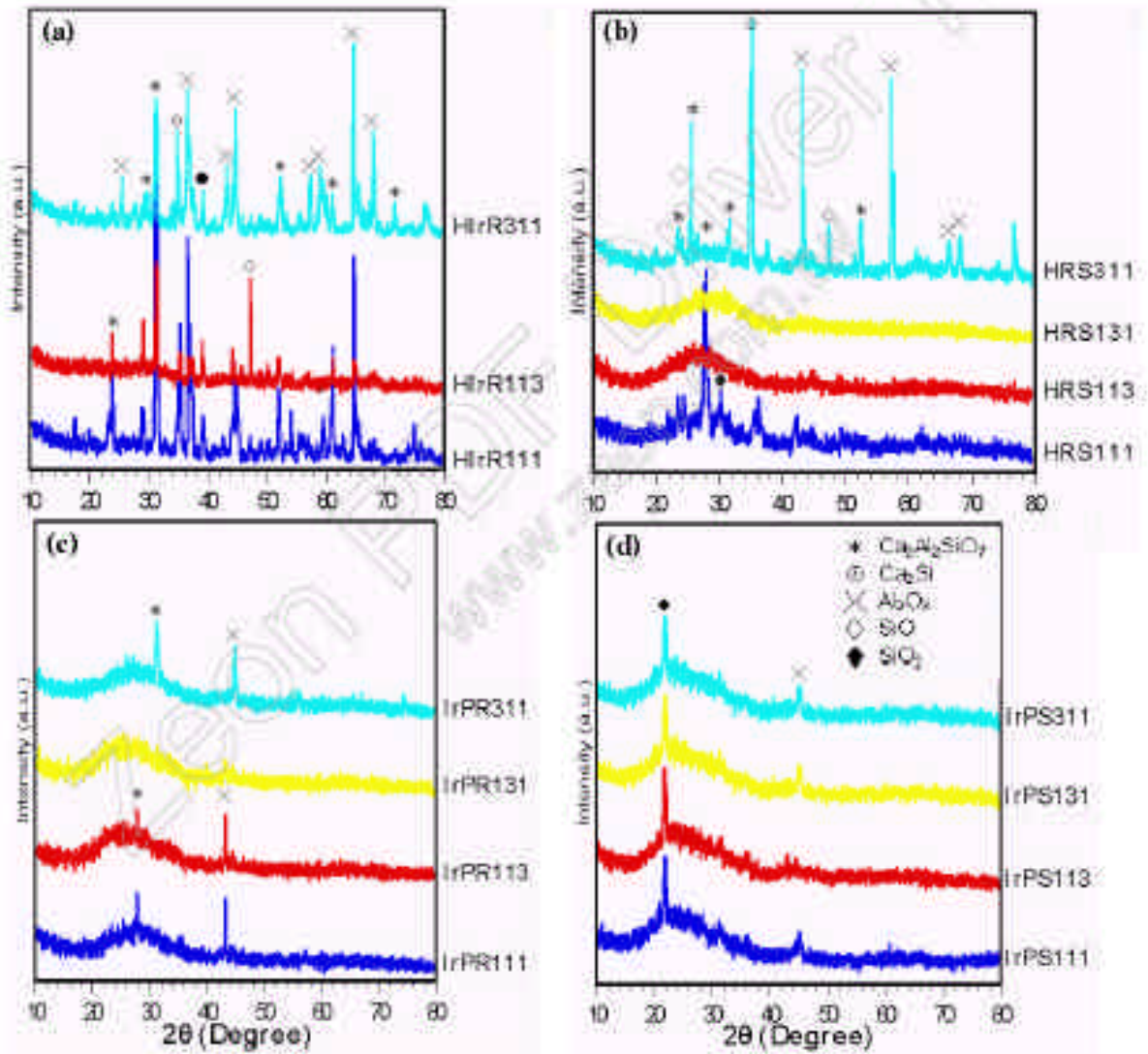


Fig. 3 XRD patterns obtained from (a) HIR, (b) HRS, (c) IrPR and (d) IrPS slag samples.

SUMMARY

A feasibility study on a 100kW- thermal plasma system at INER has been carried out to examine the vitrification of various LLRW surrogates. LLRW surrogates selected include HEPA, spent resin, contaminated soil and used thermal lagging materials (perlite and rock wool). The wastes have been vitrified with satisfactory results of volume and weight reduction. The slag density tends to increase with HEPA, rock wool and soil content in the feed. Except for HEPA-bearing samples, the amorphous vitrified slag is mostly SiO₂ and dissolves constituents from the waste feed. Metal-bearing second phases embedded in the slag matrix are found and their presence provides evidence of a mixing state achieved by the plasma. For HEPA sample to form a glassy structure, HEPA content is limited to 33% of feed in weight.

ACKNOWLEDGMENTS

National Science Council of Republic of China is gratefully acknowledged for the support, under a contract No. NSC-90-2623-7-019-005-NU.

REFERENCES

- 1.L. J. STALEY, "Technology Evaluation Report; SITE Program Demonstration Test; Retech, Inc. Plasma Centrifugal Furnace; Butte, MT," US EPA Report, EPA/540/S5-91/007, August 1992.
- 2.R. C. ESCHENBACH and J. P. CHU, Proc. 9th Conf. on Waste Management Technology, the Republic of China, November 1994, p. 103-110.
- 3."Proceedings of the International Symposium on Environmental Technologies: Plasma Systems and Applications," Vol. I and II, Georgia Tech Research Corporation, Atlanta, Georgia, USA, October 1995.
- 4.R. C. ESCHENBACH, J. of Mining, Metals and Materials, 48 (1996) 49.
- 5.G. COLLINS and D. J. REJ, Materials Research Society Bulletin, 21 (1996) 26.
- 6.C. C. TZENG, Y. Y. KUO, Y. J. YU, et al., INER Report, INER-1461 (in Chinese), April 1996.
7. J. P. CHU, I. J. HWANG, C. C. TZENG, Y. Y. KUO and Y. J. YU, J. of Hazardous Materials, 58, (1998) 179.
- 8.R. N. SZENTE, O. W. BENDER, R. A. SCHROETER and M. G. GARCIA, J. of Mining, Metals and Materials, 50 (1998) 32.
- 9.P. R. TAYLOR and G. M. BUNCE, J. of Mining, Metals and Materials, 51 (1999) 13.
- 10.R. K. WOMACK, J. of Mining, Metals and Materials, 51 (1999) 14.
- 11.T. L. EDDY, J. of Mining, Metals and Materials, 51 (1999) 20.
- 12.G. M. BUNCE, P. R. TAYLOR and S. G. RODEN, J. of Mining, Metals and Materials, 51 (1999) 22.
- 13.C. C. TZENG, Y. Y. KUO, T. F. HUANG, D. L. LIN and Y. J. YU, J. of Hazardous Materials, 58, (1998) 207.
- 14.J. P. CHU, W. H. CHUANG AND W. Y. SUNG, C. C. TZENG, Y. Y. KUO and Y. J. YU, 1999 IT3 Conference, Orlando, FL, USA, in CD-ROM.
15. US EPA Test Method 1110, "Corrosivity toward Steel," September 1986.
16. J.P. CHU, C. C. TZENG, Y. Y. KUO and Y. J. YU, to be published.