

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

燃煤鍋爐燃燒診斷技術 及氣送煤流實驗設計

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：一般工程資深研究專員

姓名：楊泰然

出國地區：美國

出國日期：106年10月19日至11月1日

報告日期：106年12月10日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：燃煤鍋爐燃燒診斷技術及氣送煤流實驗設計

頁數 41 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

楊泰然/台灣電力公司/綜合研究所/一般工程師/（02）8078-2330

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：106 年 10 月 19 日至 11 月 1 日 出國地區：美國

報告日期：106 年 12 月 10 日

分類號/目

關鍵詞：煤質評估，鍋爐效能，燃燒模擬

內容摘要：（二百至三百字）

此次實習任務主要為配合本公司各燃煤鍋爐運轉效能提昇研究之施行，分別赴 Los Angeles(USA) FERCo 及 San Francisco (USA) Air Monitor Corp. 兩家優良廠家，參訪先進研發試驗設備與各式測定評估應用測儀，並與相關專家研討，實習燃煤鍋爐燃燒診斷相關整合應用技術，掌握煤流實驗設計規劃之要點。

實習目標主要在於研討施行燃煤鍋爐燃燒診斷之實務概念，深入探討粉煤質量流率、二次風流量、個別燃燒器風量、煙道多點式氣體成分分析等量測技術議題及瞭解氣送煤流(兩相流)實驗設備設計規劃要點。

計畫緣起於本公司各燃煤鍋爐均已普遍面臨必須燒用偏離原設計煤質之狀況，導致衍生出鍋爐發電效能降低、容易超環保排放運轉、飛灰高未燃碳含量影響去化問題、破管停機事故漸趨頻繁等狀況。為力求改善與提升鍋爐燃燒效能，公司實有必要派員前往國外先進國家研習燃煤鍋爐燃燒診斷技術以及自主建立氣送煤流(兩相流)實驗設備，據此技術有助於積極釐清特定鍋爐燃燒效能不良之主要成因，及著力於燃煤鍋爐燃燒調整技術之推展應用。

計畫實施方式，主要參訪 FERCo 的鍋爐燃燒診斷試驗裝置、分析應用工具、瞭解該公司技術能力及近年來之服務實績，參訪 Air Monitor Corp.的研發試驗設備、瞭解最新發展的鍋爐燃燒診斷各項測定評估應用技術以及該公司之技術服務實績，並與相關專家研討瞭解氣送煤流(兩相流)實驗規畫要點;最後就實習任務提出此行之心得報告與建議。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網（<http://report.nat.gov.tw/reportwork>）

目 錄

出國報告書審核表

第 壹 章 行程及內容

- 一、 出國任務 ----- 4
- 二、 行程及內容 ----- 5

第 貳 章 心得與感想

- 一、 FERCo 的鍋爐燃燒效能診斷技術 ----- 6
- 二、 AMC 的鍋爐燃燒效能診斷技術 ----- 15
- 三、 氣送煤流實驗設計規畫----- 36

第 參 章 建議事項----- 41

第 壹 章 行程及內容

一、出國任務

此次實習任務主要為配合本公司各燃煤鍋爐運轉效能提昇研究之施行，分別赴 FERCo (Los Angeles, USA)及 Air Monitor Corp. (San Francisco, USA)兩家優良廠家，參訪先進研發試驗設備與各式測定評估應用測儀，並與相關專家研討，實習燃煤鍋爐燃燒診斷相關整合應用技術，掌握氣送煤流實驗設計規劃之要點。

實習目標主要在於研討施行燃煤鍋爐燃燒診斷之實務概念，深入探討粉煤質量流率、二次風流量、個別燃燒器風量、煙道多點式氣體成分分析等量測技術議題及瞭解建立氣送煤流(兩相流)實驗設備之設計規劃要點。

計畫緣起於本公司各燃煤鍋爐均已普遍面臨必須燒用偏離原設計煤質之狀況，導致衍生出鍋爐發電效能降低、容易超環保排放運轉、飛灰高未燃碳含量影響去化問題、破管停機事故漸趨頻繁等狀況。為力求改善與提升鍋爐燃燒效能，公司實有必要派員前往國外先進國家研習燃煤鍋爐燃燒診斷技術以及自主建立氣送煤流(兩相流)實驗設備，據此技術有助於積極釐清特定鍋爐燃燒效能不良之主要成因，及著力於燃煤鍋爐燃燒調整技術之推展應用。

計畫實施方式，主要參訪 FERCo 的鍋爐燃燒診斷試驗裝置、分析應用工具、瞭解該公司技術能力及近年來之服務實績，及參訪 Air Monitor Corp.的研發試驗設備、瞭解最新發展的鍋爐燃燒診斷各項測定評估應用技術以及該公司之技術服務實績，並與相關專家研討氣送煤流(兩相流)實驗設備之建置要點;最後就實習任務提出此行之心得報告與建議。

二、行程及內容

本次出國行程，期間從 106 年 10 月 19 日至 106 年 11 月 1 日，前後共計 14 天(含飛程 3 天)，前往 Los Angeles (USA)的 FERCo 參訪該公司研試設備、藉研討方式實習相關技術主題，之後繼前往 San Francisco (USA) 的 Air Monitor Corp.進行參訪公司主要研試設備、藉簡報方式與專業人員研討以掌握最新技術發展現況。

主要內容，除實習系列測定與評估技術，諸如一次風流量、粉煤質量流率、二次風流量(含燃燒器風量)、SCR 效能評估、煙道多點氣體分析、飛灰未燃炭分析等技術施行，深入研討關於燃煤鍋爐燃燒性能診斷實務概念外，亦藉機探討氣送煤流(兩相流)實驗設備之建置規劃要點。

(1) 於106年10月19日抵美國~106年10月26日期間，參訪 FERCo公司(Los Angeles，USA)與實習：

- FERCo簡介公司歷史&技術服務內容與績效.
- 研討 SCR 效能評估與軟體分析工具.
- 實習燃煤鍋爐燃燒性能診斷相關測定技術.
- 探討氣送煤流(兩相流)實驗設備之建置規劃.

(2) 於106年10月27日~106年10月31日期間，參訪 (USA)的 Air Monitor Corp.(San Francisco，USA)與實習：

- Air Monitor Corp.進行公司簡介.
- 參訪該公司的主要研試設備.
- 研討燃煤鍋爐燃燒性能診斷相關測定技術.
- 探討氣送煤流(兩相流)實驗設備之建置規劃.

(3) 於106年10月31日~106年11月1日期間，搭機由San Francisco直接返回臺北.

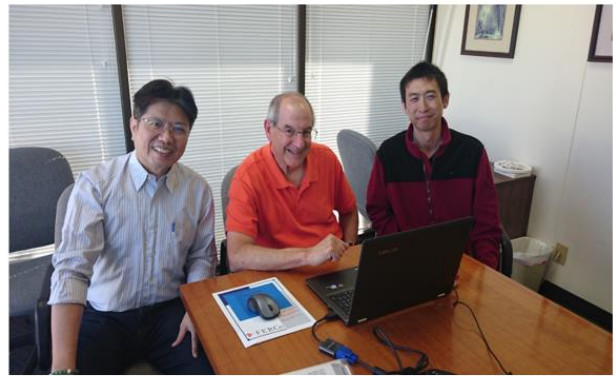
第 貳 章 心得與感想

一. FERCo 的鍋爐燃燒效能診斷技術

美國 FERCo 公司(Fossil Energy Research Corporation, USA)自 1984 年成立以來一直由總裁 Richard E. Thompson 博士帶領，多年來該公司以電廠鍋爐燃燒改善實務為走向，藉參與 EPRI 多項電廠改善實務相關計畫而發展技術與累積實績，對鍋爐設備之檢測分析與燃燒調整改善已有多年之豐富經驗與實力，該公司之組成與技術服務之特色詳如下列，服務對象除遍及全美國發電電廠之外，亦對國外提供技術服務舉如：瑞士、德國、俄羅斯、中華民國等。



FERCo公司(總裁Richard E. Thompson博士)



FERCo 公司創辦人 J. Muzio 博士 (中)

< FERCo 公司技術服務特色 >

Focus: Engineering Services in Combustion and Emissions Control, Primarily within the Utility Industry

Experience:

- Most of the senior staff has been working on NO_x control since the early 1970' s
- Hands on experience in field and laboratory studies, as well as systems evaluations
- Combustion Instrumentation

WHAT FERCo ARE

- “Hands-On” field test and laboratory/pilot-scale development engineers
- Involved in commercialization of new control technologies
- Sensitive to customer operational concerns
- Problem solvers , not problem perpetrators
- Expert in NOx control , combustion schedules

此回在該公司實習期間所安排簡報與研討，主要由 L. J. Muzio 博士簡報該公司技術服務全貌及解說近 10 年期間(2008 年~2017 年)新開發的 SCR 評估技術(主題: SCR--FERCo Experience and Capabilities)，並分別安排由專業人員 Gary H. Shiomoto 負責解說電廠環保排放控制設備與煙氣分析技術等，以及另安排時段由專人展示說明相關測儀設備軟硬體、冷流場模擬分析模型設備等。主要心得分列如下:

1. FERCo 的專案領域經驗

由該公司過去的專案工作記錄，其領域經驗內容經綜合整理可歸類為 a.燃燒最佳化; b.選擇觸媒還原設備之氮氧化物控制; c.系統性研究; d.選擇無觸媒還原設備之氮氧化物控制; e.測儀設備之設計製造; f.粉煤機效能改善等六大項，各有其專案經驗與主要工作內容，展現出該公司實務工作與研發主軸:

a.燃燒最佳化(Combustion Optimization)

(Gas Units、Oil Units、Coal Units)

b.選擇觸媒還原設備之氮氧化物控制(SCR NOx Control)

(Laboratory Research、Pilot Scale R&D、Mini SCR Reactors、Cold Flow Modeling、Process Design、Full Scale Optimization/Warranty Testing)

c.系統性研究(System-Wide Studies)方面

System-Wide NOx Strategy Models (PG&E、SDG&E、HL&P、LCRA、City of San Antonio、BASF、TXU、Entergy、Reliant Energy (California Operations)、LADWP)

d. 選擇無觸媒還原設備之氮氧化物控制(SNCR NOx Control)

(Laboratory Research、Cold Flow Modeling/CFD、Full-Scale Optimization)

e. 測儀設備之設計製造(Hardware Design-Fabrication)

(Mobile Laboratories、Multipoint Combustion Diagnostics Analyzer、Hot Foil LOI、Hot Foil Coking Index、Mini SCR Reactor Systems、Laboratory R&D Experiments)

f. 粉煤機效能改善(Pulverizer Performance Improvements)

2. FERCo 的鍋爐燃燒診斷與效能改善技術

FERCo 公司在 SCR 效能評估技術方面日益求新，努力開發新試驗設備與評估分析產品的豐碩成長;綜合此行實習心得與以往所蒐集資料，關於 FERCo 在鍋爐燃燒診斷與效能改善各項技術，可以依鍋爐爐膛燃燒流程上下游順序說明如下:

a. 一次風與粉煤系統

- 應用 GE 公司出品的髒空氣皮托管 (DAP / Reverse Impact Type)進行粉煤分管一次空氣(Clean Air Test or Dirty Air Test)流速測定分析，測定方式係在粉煤機下游各粉煤分管垂直管段的適當位置，採用 ASTM/ASME 測定法於粉煤分管截面在(單孔)直徑方向依規則取測多點，至少需為相距 90 度的兩個孔口，取測孔數目則依測定規則而預先適當規劃後進行測定。
- 應用 GE 公司出品的機械式旋轉式探測儀(RotorProbe)，同樣上項適當取樣位置並考量儘量避開粉煤分管內可能存在嚴重繩索現象處(Roping Effect)，依 ISO9931 測定規定要求進行等動量抽取粉煤，於固定單位時間(係 Snapshot 性質)240 秒內抽得之粉煤樣品重量，經校正與換算以獲得該粉煤分管之質量流率數據。
- 依上項敘述採用 ISO9931 測定規定要求進行等動量抽取得到之粉煤樣品，與以往採用 ASTM/ASME 方式進行等動量抽取得到之粉煤樣品，前者更能避開分管內繩索現象之干擾影響，而提供更具粉煤細度分佈之代表性樣品。

- 以上所討論之 FERCo 使用測定技術的數據資料，經演算已足以進行更深入之燃燒診斷項目分析，提供諸如燃燒器的空燃比(Air/Fuel Ratio)、一次風風量分佈(Primary Air Distribution)、髒空氣流速狀況(Dirty Air Velocity)、粉煤細度(Coal Finess)分佈、粉煤分管質量流率(Coal Pipe Flow)分佈等等資訊，如果再加入一般的煤質元素分析與粉煤樣品細度分析等資訊，則足以達成粉煤機的效能診斷。
- FERCo 大約於 2003 年便開始引進 MIC (USA)公司研發之粉煤分管多頻道流量測儀，可同時針對單臺粉煤機各粉煤分管，同時進行粉煤動態流量分佈測定。如此對粉煤機動態效能、粉煤管線傳輸問題、粉煤平衡動態狀況皆能夠進行診斷分析)。

b. SCR 效能評估

- 為 FERCo 延伸 1997 年以前建置的 SCR 冷流場模型分析基礎，於較近期新開發應用在 SCR 現場催化劑活性測定評估(In Situ Catalyst Activity Measurements，圖示如下)技術，包含軟體分析的模組(CatalysTraK™ In Situ Test Modules，圖示如下)，應用實績已有大型複循環機組(Large Combined Cycle)與燃煤發電鍋爐(525MW Coal SCR)多起案例。



圖7. FERCo 的 In Situ Catalyst Activity Monitor,

- Stationary NEMA 4 enclosure housing multi-position sampling valves
- Portable "cart" housing gas analysis instrumentation and control system

EPRI CATREACT

Case: []

Input Buttons

- Unit Data
- SICR Data
- Catalyst Data
- Time Factors
- Economic Factors
- Planned Outages
- Capacity Factors
- Catalyst Deactivation
- Input Data
- Reset All Factors

Calculate

Check Air Changes

1 1+1 1+2
 2 2+1 2+2
 3 3+1 3+2
 4 4+1

Calculation Scenario

| | Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 | Layer 4 | Layer 5 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Startup | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 10 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 17 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 18 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 19 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Event 20 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Note: Numbers signify Catalyst Type

Worksheet: "Input Buttons"

Deactivation Rates

Default Low Arsenic
 Default High Arsenic
 Fit Vendor EOL Estimate
 User Supplied

T Values

| | Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 | Layer 4 | Layer 5 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 20000 | 40000 | 60000 | 60000 | 60000 | 60000 |
| 18000 | 23000 | 30000 | 30000 | 30000 | 30000 |
| 26291 | 37558 | 56337 | 56337 | 56337 | 56337 |
| 21319 | 34756 | 62016 | 69954 | 104506 | |

Actual Deactivation Data or Vendor Curves

| Time | Layer 1 | Layer 2 | Layer 3 | Layer 4 | Layer 5 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| K/Ka | K/Ka | K/Ka | K/Ka | K/Ka | K/Ka |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2000 | 0.86 | 0.94 | 0.93 | 0.97 | 0.97 |
| 4000 | 0.84 | 0.84 | 0.94 | 0.92 | 0.98 |
| 6000 | 0.7 | 0.84 | 0.89 | 0.92 | 0.91 |
| 8000 | 0.7 | 0.75 | 0.90 | 0.88 | 0.93 |
| 10000 | 0.6 | 0.76 | 0.82 | 0.87 | 0.88 |
| 12000 | 0.56 | 0.67 | 0.81 | 0.84 | 0.91 |
| 14000 | 0.5 | 0.68 | 0.75 | 0.82 | 0.86 |
| 16000 | 0.48 | 0.60 | 0.76 | 0.78 | 0.86 |
| 18000 | 0.39 | 0.6 | 0.72 | 0.78 | 0.83 |
| 20000 | 0.4 | 0.55 | 0.75 | 0.74 | 0.83 |

Graph: K/Ka vs Running Hours

Worksheet: "Catalyst Deactivation"

FERCo 研發的 Catalyst Management Software

c. 環保排放

- FERCo 所發展之移動式實驗室(Mobile Laboratories 如下圖) 或 多點式燃燒診斷分析儀 (MCDA/ Multipoint Combustion Diagnostics Analyzer) 詳如下文所述, 可提供迅速而有效之煙氣成份(NO、CO 與 O₂ 濃度)測定資訊, 將有助於搭配燃燒器二次風與火上風門調整, 達成鍋爐燃燒調整改善工作



FERCo 的移動式實驗室(Mobile Laboratories)

- FERCo 所發展之熱燃式未燃碳分析儀 (Hot Foil[®] LOI) , 詳見下文所述, 能在 15 分鐘以內對於所取的飛灰樣品完成未燃碳含量(LOI)離線即時測定分析, 提供鍋爐燃燒診斷中計算鍋爐效率項目時需用的飛灰燒失量數據。

3. 熱燃式未燃碳分析儀 (Hot Foil[®] LOI)

FERCo 公司所研發之飛灰未燃碳(LOI)分析儀為離線可攜式, 多年來獲得歐美國家普遍採用, 已嚴然成為鍋爐燃燒性能診斷檢測分析之標準儀器設備, 本所已於民國 95 年年中正式建置此項分析技術, 此次前往實習並藉機研討該項測儀之相關使用經驗。

本項設備與傳統檢測飛灰未燃碳均是採用批次方式操作及熱損失測定原理, 但本項設備可於現場附近(非實驗室)即時獲得飛灰樣品未燃碳數據, 主要之特色如下:

- a. 經現場取樣後, 約 10min~20min 可即時分析獲得 LOI 數據。
- b. 配合精密天秤, 操作簡便, 可準確測定飛灰樣品 LOI 值。

- c.飛灰樣品每次需要量僅 100 mg~120mg 即可測定。
- d.因操作程序簡便，短期訓練加上細心操作即可上手使用。
- e.由測定數據結果顯示出測定之再現性良好。
- f.採用與 ASTM 規範相同之 LOI 量測技術。

本設備主要為進行燃煤鍋爐煙道氣飛灰樣品之 LOI 值測定，可配合應用於鍋爐調整與燃燒診斷、氮氧化物基準測定與最佳化調整、鍋爐效能最佳化調整等，此設備將有效協助燃燒診斷與提升改善技術之整合，如下圖所示為 FERCo 之 Hot Foil[®] LOI 分析儀器外貌。



FERCo公司 Hot Foil[®] LOI

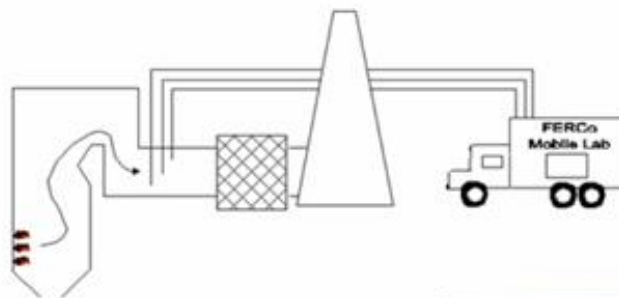
4. 多點式燃燒診斷分析儀 MCDA (Multipoint Combustion Diagnostics Analyzer)

多點式燃燒診斷分析儀 MCDA (如下圖)為 FERCo 公司另一項較有名氣之燃燒診斷分析利器，此系統與本所於 95 年底度剛建立之多點式煙道分析儀功能相類似，FERCo 的該項 MCDA 系統有其領先的優點與特性，但儀器購置成本也是以數倍計。

因為傳統煙道氣分析量測儀器(Traditional CEM Instruments)為使用單一測點於進行，取測時得採用逐點依序移動方式，2~3 人操作下每一測點最快也需要 5Min 以上，假若截面需要取測 48 點則至少約費時 4Hr 以上完成整個煙道一回合測定，鍋爐的燃燒流場可能前後已改變，因而測值最終已不再具有代表性。

FERCo 之多點式燃燒診斷分析儀 (MCDA 系統) 檢測煙道氣 NO、CO 與 O₂ 三項含量濃度，可藉由煙道中之 12 個同步取測點，約每 24Min 便可完成截面 48 點取測一回，並配合測試系統自行發展之軟體，約每 20 秒便自動將數據即時記錄和更新顯示一次，因其監測點為同步橫跨煙道截面且均勻分佈之多取樣點，對於煙道氣實際在鍋爐臚膛內之流場與各成份濃度分佈，能即時掌握較為完整且具代表性之數據，供診斷分析後藉以建議爐控人員調整可調設定，同時亦提供現場專業人員容易掌握鍋爐各調整參數之影響性(諸如 MOOS 狀況、二次風風門調整設定等)。

Real Time Multipoint NO, O₂, CO Analyzer

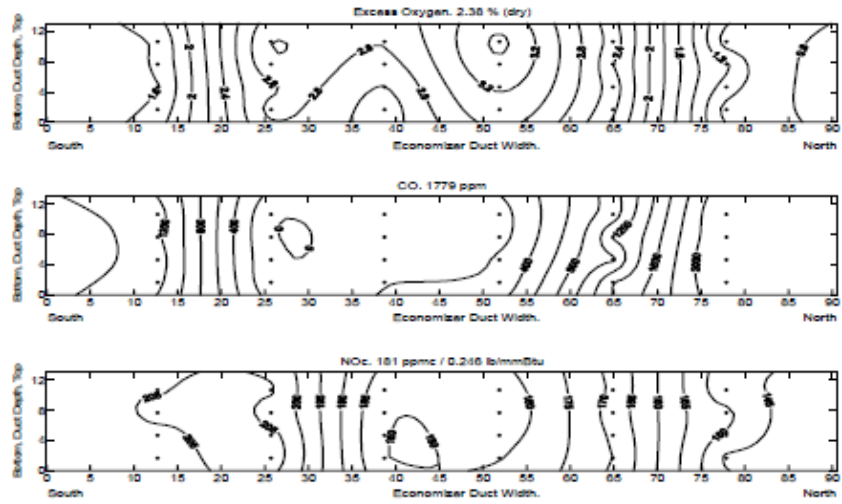


FERCo的 MCDA (Multipoint Combustion Diagnostics Analyzer)

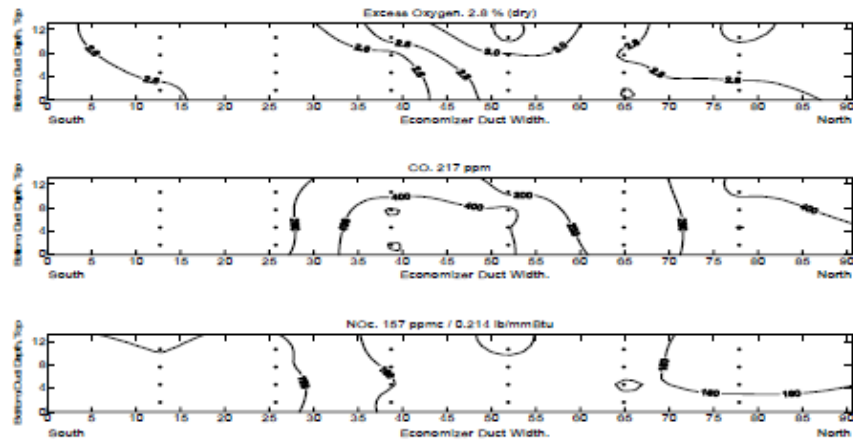
傳統逐點式量測
 Ex: 48點*6min/點
 =約4.8Hr

MCDA多頻道量測
 Ex: 48點*6min/12點
 =約24min

Test 01 - 803 MWn, H MIE OOS, As-Found Baseline
6/24/07 18:04 - 18:17



Test 32a - 831 MWn, 882 MWg, No O2 Bias, E MIE OOS
OFA = 372 kpl/oorner, OFA Swirl Max, Inner Min, Checkerboard +1R1=100%
7/06/07 17:41 - 17:59



鍋爐調整前(上圖)與調整後(下圖)之煙氣成份分佈

二. AMC 的鍋爐燃燒效能診斷技術

此次出國行程下半段安排前往 AMC(Air Monitor Corporation)參訪(如下圖)，實習鍋爐燃燒效能診斷技術，由該公司掌控技術的靈魂人物 Matt Maragos 總經理親自引領深入解說相關產品與應用技術，另外還安排 DaveDunn 亞洲區經理、Aaron Cobly 銷售主管等一起研討，期間巧遇 Bill Hendrick 先生(現任 ONICON Incorp. 副總裁)，得知近期 AMC 已被儀器大公司 ONICON 所併購。



AMC亞洲區經理 David Dunn (右)



ONICON 副總裁Bill Hendrick(中)
及 AMC 總經理 Matt Maragos(右)



美國氣流偵測公司(Air Monitor Corporation ，簡稱 AMC)，為成立於 1967 年，專業方面針對空氣流量檢測及控制累積了 50 年的先進經驗，擁有世界級領先技術的系列產品，用於全球在發電廠、煤礦、冶煉、石油、化工、造紙、食品、煙草、製藥、醫院、暖通空調、潔淨廠房、電子企業、試驗室、政府環保部門等各行業提供一流的工程技術服務。在美國市場佔有率高達 90% 以上，國際知名工業生產企業大多是 AMC 的忠實合作夥伴，AMC 已是工業節能環保方面享譽歐美的傑出品牌。

在近期的 30 年裡，**Air Monitor** 公司集中技術能量，把 AM 的主導產品用於環境污染排放最大的燃煤火力發電廠，將電廠鍋爐“優化燃燒，節能減排”放在首要位置。研發出應用於燃煤電廠獨享專利權具有世界一流技術水準的“鍋爐低氮燃燒連續管理系統 (CCMS)”，此系列產品包括有：燃燒氣流管理系統(CAMS)、個別燃燒器風量檢

測系統(IBAM™)、煤粉流量檢測系統(Pf-FLO/Promecon)、煙氣排放連續監測系統(CEMS)、煙氣 CO/O2 含量檢測、AM3D 空氣流工業現場標定系統裝置(號稱: AM3.0)等系列配套產品,得到了美國環保局、空氣控制協會、自動化控制協會、空調暖通協會的首肯及認證,為世界各地燃煤電力企業致力於提高燃燒效率、有效地避免了環保排放,提供了先進的檢測設備和可靠有效的解決方案。

該公司的技術成就非凡,羅列如下:

- 創造和研發出首部多探測點自動平均皮託管氣流檢測儀器。
- 研發出首部核能電廠的排氣管等動量(Isokinetic)抽樣系統。
- 研發出首部工業等級的固態電子儀器,適用於氣流檢測。
- 創造和研發出本獨有的皮托-菲克亥爾摩(Pitot-Fechheimer)多探測點自動平均氣流偵測探測儀。
- 首部自動歸零(AUTO-zero)超低範圍差壓氣體流量電腦(自然量程可低於 0-12.7Pa 及高達 0-2540Pa),精度高達±0.1%。
- 研發合乎美國環保局 40FR75 號規定,適用於監測煙囪的廢氣或連續式廢氣排量的氣流檢測儀器(現已有超過 100 個發電企業和超過 50 個工業企業應用此儀器)。
- 有多年的氣流檢測工程設計經驗;可以降低氮氧化物(NO_x)和改善電廠的能源效率,監測一次風(Primary Air)、二次風(Secondary Air)、火上二次風(Overfired Air, OFA)等風量測定。
- 研發出首部個別燃燒器氣流檢測探測器(IBAM™),用來監測燃燒器的二次風。
- 首部達到國際氣體控制協會(AMCA)認證的氣流檢測產品。
- 在美國發電行業中,為首家推廣煤粉流量檢測系統(Pf-FLO)的公司。

以下就 Air Monitor 公司(電力部門)為燃煤電力業者所研發的 VOLU-probe®系列感測器、個別燃燒器氣流檢測器-IBAM™、燃燒氣流管理系統-CAMS 及風洞測試設備等提出說明,最後就 Air Monitor 在鍋爐燃燒診斷的成功應用案例提出研討。

1. VOLU-probe®系列感測器

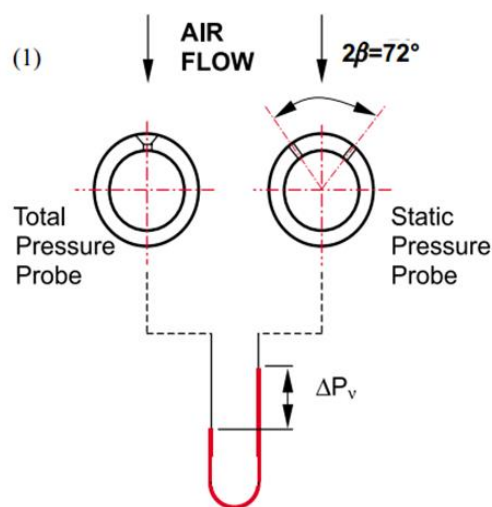
Air Monitor 公司(電力部門)所研發的 VOLU-probe®系列感測器(美國專利 4,559,835)是一種多點式、自行平均化的皮託管裝置,只需要配合少量的直管段就能夠檢測出準確的風量。VOLU-probe 系列感測器設計的凹形總壓孔可克服迎風面氣流方向不均一

的狀況，這些檢測孔位於 VOLU-probe 系列感測器的迎風面用於感應氣流衝擊總壓力 (P_t) (參下圖示意)，另外所設計靜壓檢測孔(兩孔)位於與氣流迎風方向稍偏移的兩個特定角度處，這樣可以有效減少偏斜氣流所造成的靜壓誤差，原理是當氣流偏向某一方向時，這個靜壓檢測孔會感應比較高壓(P_{s+}部分 P_t)，但另一側靜壓檢測孔則會感應比較低壓 (P_{s-} 部分 P_t)，因此便可消除干擾壓力(部分 P_t)的影響，使得兩個靜壓檢測孔所感應到的平均壓力會是準確的。即應用了設計獨特的對稱靜壓孔(1 對)及凹形總壓孔(1 個)使得 VOLU-probe®系列感測器可檢測±30° 角度俯仰/偏擺紊流，而且在不加任何調直裝置的情況下就能檢測到準確的氣流數據，檢測原理如下。

$$Q_{std} = C \cdot 1096 \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_{actual}}} \cdot \left(\frac{\rho_{actual}}{\rho_{std}} \right)$$

Where

- C : Calibration coefficient (-)
- A : Flow passage area (ft²)
- ΔP_v : Dynamic pressure head (pu²/2) (iwc)
- ρ_{std} : Air density at standard conditions in lbm/ft³ (T=68 °F and P_a=14.7 Psia)
- ρ_{actual} : Air density at actual conditions in lbm/ft³



VOLU-probe®系列感測器的檢測原理



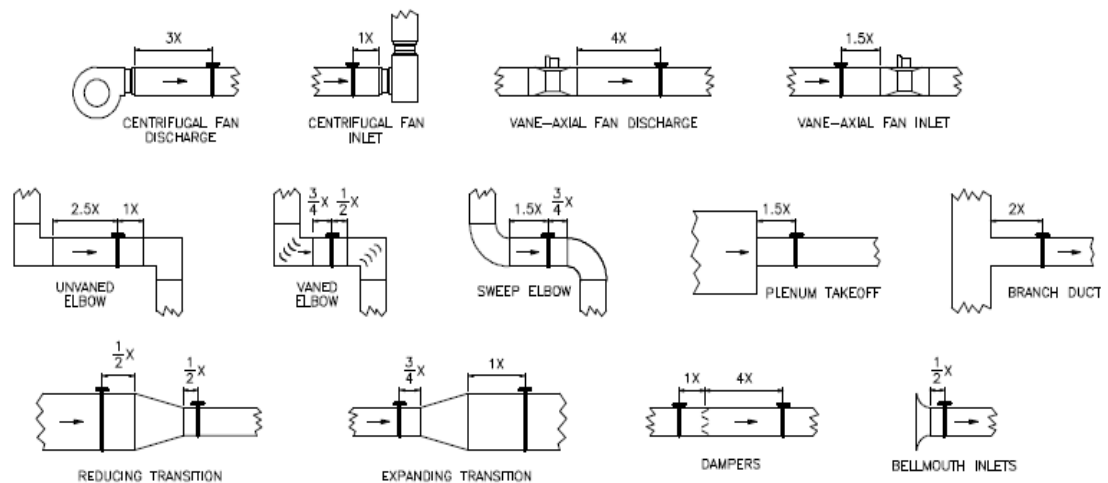
VOLU-probe®系列感測器

該 VOLU-probe 感測器針對電廠風道直管段較短、粉塵量大的情況，對取壓孔形狀、位置進行優化，通過橫截面多點測量的方式實現準確風量測量。Air Monitor 公司(電力部門)強調他們的每一個產品，都經過 AM 測試試驗中心和 AMCA(國際氣體控制協會)的風洞實驗中心檢測通過。應用經典皮託管原理，線上多點橫截面檢測感測器採用氣流方向校正設計，在最低 1.5D 的直管段要求下風量測量精度可達±2~3%。有四種安裝方式可滿足各種應用工況，感測器材質一般採用 316 不銹鋼，還可選擇由哈氏合金等特殊防腐材料製作。除了電廠行業，應用行業還涵蓋電子製造行業、鋼鐵廠、化工行業、化纖行業、空調暖通行業、生物燃料鍋爐、造紙行業、製藥行業、水泥廠、汙水處理廠、玻璃窯爐。

VOLU-probe/SS 感測器安裝時之最小距離(直徑倍數)要求: 如下列所示之感測器安裝位置並不是最理想的位置，但依據此最小距離(直徑倍數)安裝 AMC 儀器可以確保管道風量數據不被紊流影響，依 AMC 的建議如果環境條件允許則 VOLU-probe/SS 感測器應該安裝至直管段更長些的理想位置。

Minimum Installation Requirements

Note: VOLU-probe/SS locations shown are **not** ideal. The locations indicate the **minimum** clearance required from air turbulence producing sources. Wherever possible, the VOLU-probe/SS should be installed where greater runs of straight duct (or clearances) than shown below exist.



Rectangular Duct: $x = \frac{2(H \times W)}{H + W}$

Circular Duct: $x = \text{Duct Diameter}$

VOLU-probe/SS 感測器安裝時之最小距離

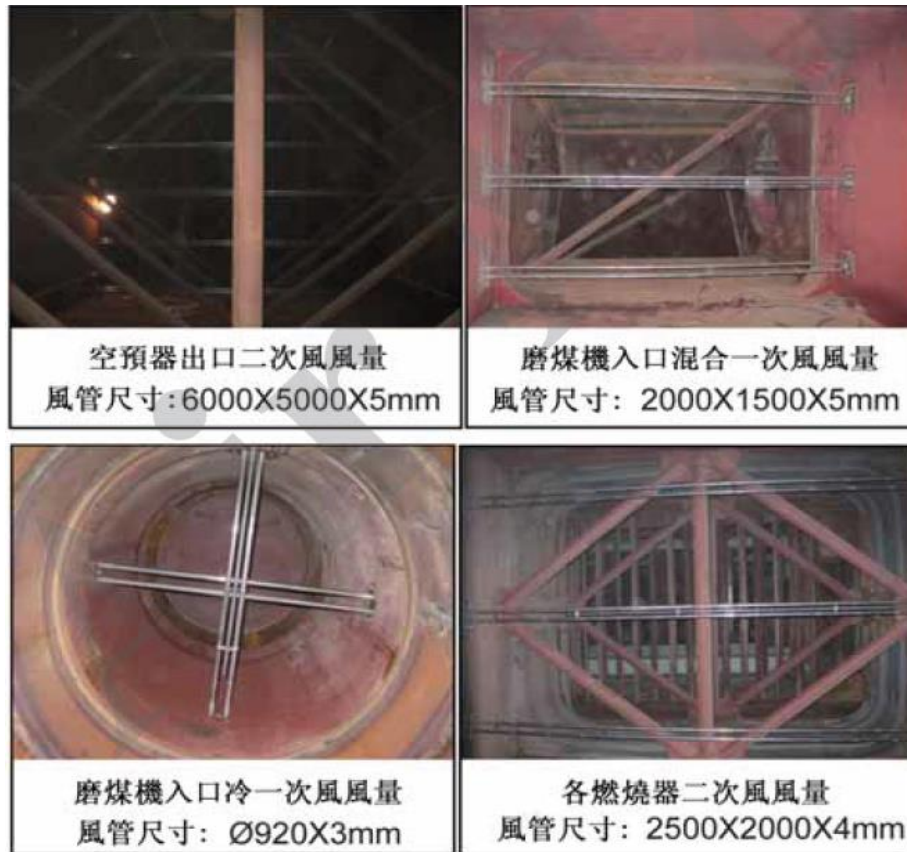
對於 VOLU-probe/SS 感測器建議的相關規格:

1. 要求在管道/煙囪的選定位置提供 VOLU-probe/SS 感測器排列，各感測器內部要含有多部總壓與靜壓感應點，這些點要與平均值歧管作內部連接(總壓管及靜壓管)。
2. 靜壓檢測孔(Frechheimer)為對稱式並且各測量點不能突出感測器表面。
3. 總壓檢測孔為凹入式設計，各氣流檢測孔不能受到大於 $\pm 30^\circ$ 俯仰/偏擺紊流而影響量測準確度。
4. 各感測器要由 316 不銹鋼材全焊接製，安裝時搭配扁形或弧線形安裝板，在特定需求時要加配連接孔和伸入式支撐裝置，使感測器方便安裝、檢查。
5. 感測器不得在 10m/s 的流速下造成超過 1.17mm 水柱壓損，而且增加的管道紊流不能達到可測程度。
6. 總壓與靜壓感應點要位於感測器總面積之中心位置(長方形管道)或等環形面積之中心位置(圓形管道)。
7. 感測器要能提供平穩、沒有波動的總壓和靜壓信號，在 2~20m/s 流速範圍不依賴流量修正係數，使測量值與實際流量能相差 2~3% 以內。

下圖所示為參訪 AMC 時於工廠內拍攝的產品，此 VOLU-probe/SS 感測器組為依長方形風道截面需求而設計的，左圖為結合使用在迎風面側之蜂巢狀整流板，右圖為經整流板後在背面側排列的 VOLU-probe/SS 感測器組。



參訪AMC 的 VOLU-Probe/SS Array 結合整流板可準確測定風道風量

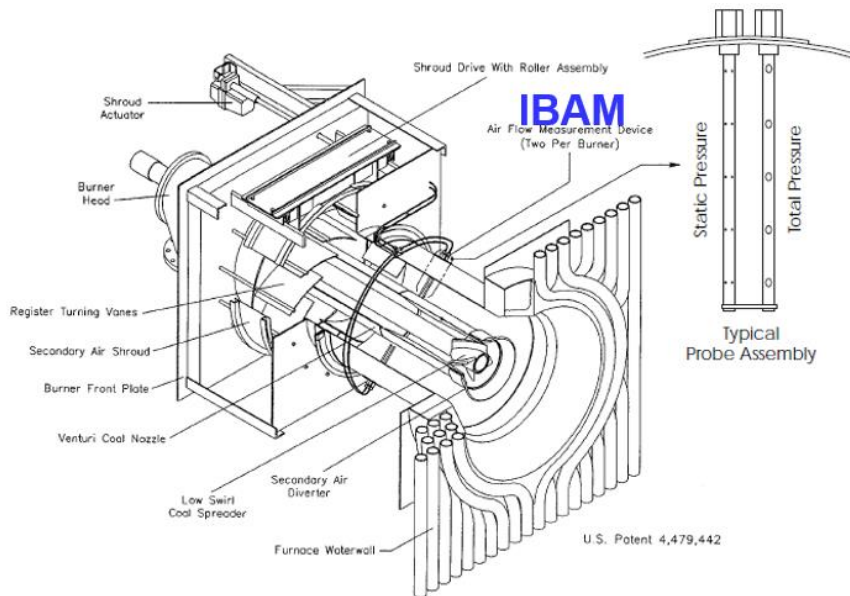
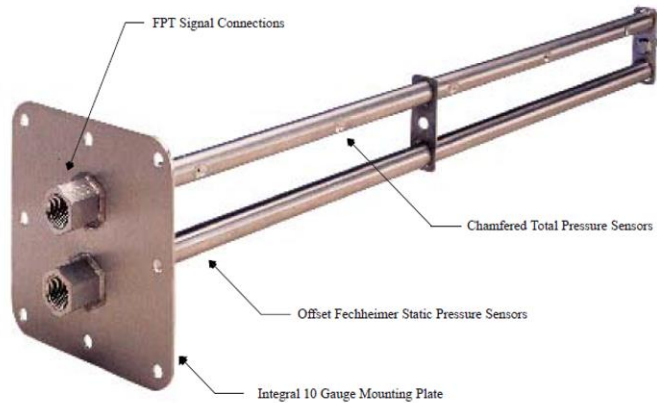


AMC VOLU-probe/SS 感測器在電廠各風道之安裝實例

2. 個別燃燒器氣流檢測器-IBAM™

Air Monitor 公司(電力部門)將上述 VOLU-probe®系列感測器成功的安裝在 DBR 的 CCV®燃燒器，此種感測器的組合產品被命名為 IBAM™ 個別燃燒器氣流檢測器（如下圖為單支的 IBAM™ 感測器）。下圖為多組 IBAM™ 感測器進行多點檢測有助於減少層流現象可減少誤差;菲克亥爾摩（Fechheimer)的皮託原理檢測方式允許實際軸線式流量檢測，並不限制氣流量方向是否為非軸線式，在這種特點傳統流量計[我們比較靜壓:前後皮托管壓力計（Piezometer rings）、熱電散布感壓器（熱式法 - thermal anemometers）等]產品都存在較大的限制，事實上由於這些產品無法分辨軸線氣流和漩渦氣流，使用這些產品可能會導致使用者更無法平衡燃燒器內的空氣。如，兩部（或以上）的燃燒器可能會出現同樣的軸線氣流，但是由於各台燃燒器接受的氣流方向不同，所感應的流量也不會相同。

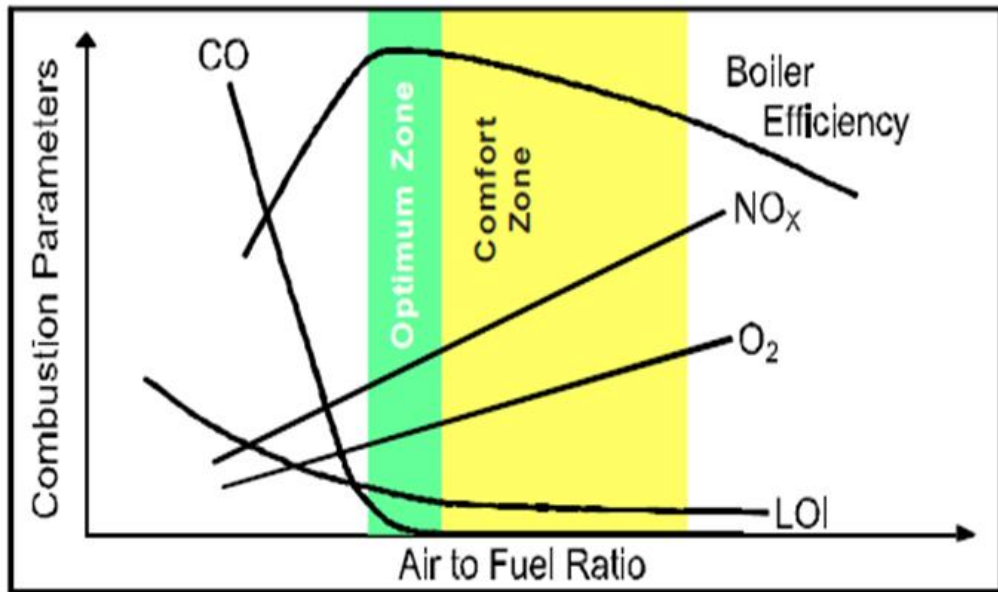
IBAM VOLU-Probe



Application of IBAM™ Probes to DB Riley CCV Single Register Burner

多組 IBAM™ 感測器安裝在 DBR 的 CCV® 燃燒器

現今的發電行業在鍋爐運轉上通常會面臨兩項難題，即同時要求降低污染排量以及又要增加電廠鍋爐燃燒效率；因此若能夠精確控制鍋爐的燃燒氣流和燃料量，就能確保正確的當量比來促使更完全更穩定的燃燒。如次頁圖中可看到一些空氣燃料比與最關鍵的燃燒參數 CO、NO_x、O₂、LOI 等，其中燃燒效率的優化區只能維持在空氣燃料比的小範圍內。

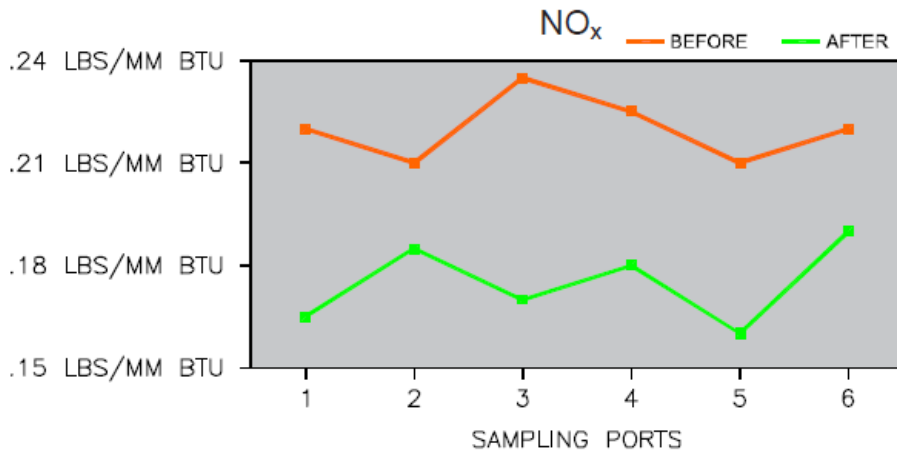
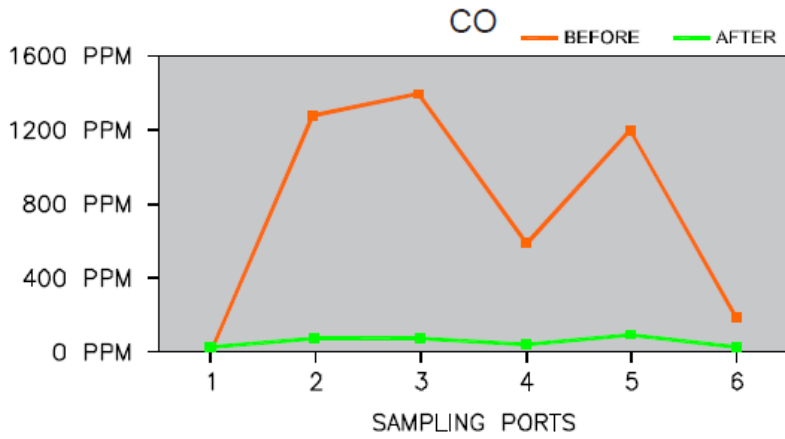
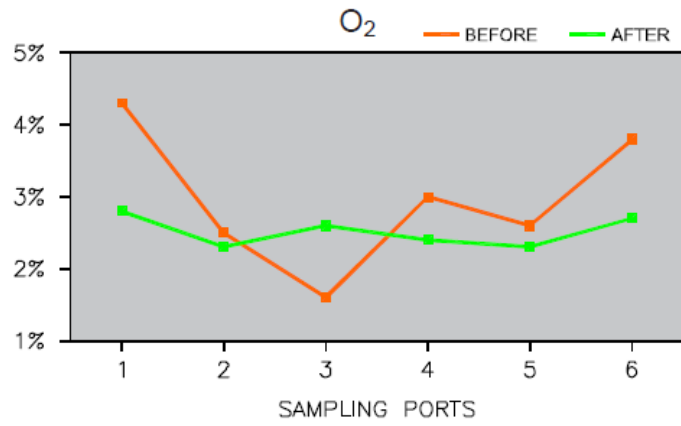


A/F Ratio調整與鍋爐效率 (O₂, NO_x 及 CO 煙氣分析)

AMC 可以針對於某部燃燒器而研發出獨一無二的 IBAMTM 燃燒器內部風量檢測系統系列，達成根據實際應用時面對的高難度挑戰來進行設計，而這些存在的高難度燃燒器風量檢測的主要挑戰包括有：無直管段通道、安裝在調解盤進氣口的下游、風門或檔板的下游、高粉塵、高達 650°C 的高溫環境中，以及對於壁式鍋爐的可調整的旋風葉片所造成的高度俯仰和偏擺的紊流等。

IBAMTM 燃燒器內部風量檢測產品都是經過 AMC 研發中心依據用戶各種類型的燃燒器進行獨立設計，然後通過在 AMC 風洞測試中心的精密測試，以確保能夠實際地成功應用在工況現場，回顧其應用實績，到目前為止 AMC 已經為 9 家知名燃燒器公司 (Riley(BPI)、B&W、ABT、RJM、Progress Energy、Alliant Energy、Mitsui-Babcock、Foster Wheeler、American Power Company 等) 研發出 30 餘種 IBAMTM 燃燒器的內部風量檢測產品。美國最大的電力公司 AEP 有效地使用 AMC 的 IBAMTM 在該公司的 600 多部燃燒器上來增強燃燒控制。

在性能優勢方面，當 IBAMTM 精確的二次風檢測能力被納入 DCS 的燃燒器控制系統時便可大幅度的降低氮氧化物。AMC 的 IBAMTM 搭配 Pf-Flo/Promecon 煤流量測系統時可維持各燃燒器的當量比，穩定降低 NO_x、降低過剩氧氣並減少產生高 CO 區而造成結渣和水牆管的磨損(如次頁圖示)。



IBAM™ 搭配 Pf-Flo/Promecon 煤流量測系統時調整前後的 O₂/CO/NO_x 變化

應用 IBAM™ 的性能優勢，經條列如下:

- 可將各燃燒器之間相對二次風誤差精確控制在 5 %;
- 有利於獨立控制各燃燒器當量比和空氣對燃料的比率;
- 提高燃燒器降燃控制範圍降低飛灰含碳量;
- 提高各燃燒器之間二次風平衡、燃燒器空氣偏置、火上風門二次風分段燃燒;
- 減少 CO 和爐膛底部腐蝕;
- 減少過剩空氣而降低 NO 排放;
- 減少燃燒器噴口結渣;
- 維持安全降低過剩 O₂。

3. 燃燒氣流管理系統-CAMS

鍋爐燃燒氣流管理系統(CAMS)由 AM 系列感測器、AM 系列智慧流量電腦和自動反吹掃裝置所構成如下圖所示，能為電廠提供準確、穩定、免維護的風量測量服務。徹底解決電廠運行中長期存在的風量測量之直管段不足、測量不準確、粉塵堵塞等問題。

鍋爐主要可配合應用的場合，如：

- (1)冷熱一、二、三次風風量測量；
- (2)送風機入口或出口總風量測量；
- (3)增壓風風量測量；
- (4)粉煤機入口風量測量；
- (5)迴圈硫化床所有風量測量；
- (6)脫硫脫硝煙氣風量測量。

CAMS 的產品規範，主要技術指標如下：

- 測量精度：系統測量精度±1%；
- 最低流速：1 米/秒；
- 感測器尺寸：0.1~6m(根據風道尺寸確定)
- 最短直管段：AM-VP:1.5D；AM-CA：0.5D
- 測量介質：空氣或其他低濕度、含塵氣體；
- 工作溫度：-50°C~450°C；

- 反吹掃時間：30~120 秒；
- 反吹掃氣體壓力：550~860KPa；

CAMS 產品可應用的行業除了發電業，還可以是鋼鐵行業、造紙行業、煉油行業、生物燃料鍋爐行業等。

參訪 AMC 儀器測試廠區



參訪 AMC 的 CAMS 裝置



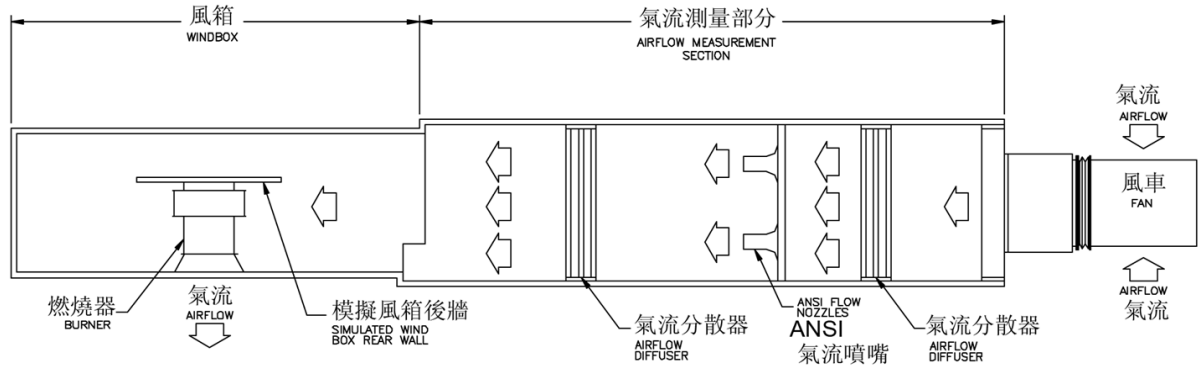
(上圖右) AMC 的 CAMS(Combustion Air Manage System)裝置

4.AMC 的風洞測試中心

AMC 在美國加州風洞測試中心所進行的實際尺寸規模的燃燒器和風箱氣流測量測試(參見下列圖示)，為了這個測試，AMC 按實際規模建造了 100 MMBtu/hr (105.5 GJ) CCV®雙空氣區域低氮燃燒器模擬樣機。為了避免高漩渦氣流對風量測量精準度的影響，該模擬機的 IBAM™ 感測器位於二次風和三次風旋片的上游，模型燃燒器安裝在一個大風箱內。根據 ASME 技術參數設計，噴嘴式流量測量器排列作為測試的參考儀器，該儀器的誤差度： $\pm 1.2\%$ 。

測試案例的目標是：了解感測器上所需要的感應孔數量、感測器數量、燃燒器內感測器軸向和角度位置等。IBAM™ 感測器分別針對二次風和三次風進行單獨校準。

在這些測試中，為了比較主氣流儀表數據（ASME 噴嘴排列）與 IBAM™ 感測器數據，將其中一條氣道進行完全密封，為了確認 IBAM™ 感測器的可重複性、對二次風和三次風流量感應能力的準確性，還進行了額外的燃燒器設定測試（例如：氣流罩和二次風擋板開度、三次風葉片角度設定等）。



AMC 的風洞測試中心示意圖



參訪 AMC 的風洞設備：
以實際尺寸 BNR 進行 IBAM 的系列
校準測試



5. IBAM™ 準確檢測之發展與驗證

本段參考資料由 AMC 所提供，為 DB Riley 公司的學術報告(低氮燃燒器準確燃燒器風量檢測)曾在第八屆國際聯合 POWID/EPRI 控制和儀器儀表學術會議中公開發表。

背景為源自 1990 年美國國會頒布“潔淨空氣法案”(Clean Air Act)修正案後，根據該修正案美國各火力發電廠為了降低 NO_x 的排放，被要求必須開始使用低氮燃燒器(DeNO_x Burner)。對於多數發電廠來說，原本的燃燒設備係高紊流燃燒器，對爐內火焰會造成相互擾動，因此對於應用個別燃燒器的風量檢測和控制之需求並不高。但對於低氮系統(DeNO_x Burner System)：為了要降低氮化物排放以及盡量減少飛灰中的未燃碳含量，這兩個要求都必須仰賴於各個燃燒器能夠控制相對空燃比(Air/Fuel Ratio)及其混合率，特別是在燃燒器區域更形重要。

有了上述狀況，為了同時在多部燃燒器提供更好的燃燒空氣風量控制以及最佳的燃燒當量比，AMC -Power (美國氣流偵測公司電力部門-簡稱 AMC) 聯合 DB Riley (簡稱 DBR)和美國中西部一家大型電力公司合作，研發出一款能準確檢測燃燒空氣的獨特感測器，這種感測器被稱為個別燃燒器氣流檢測器 (IBAM™)，目前也應用在 DBR 低氮燃燒器。好的風量檢測能夠提供低氮燃燒器，降低氮化物排放以及減少飛灰中的未燃碳含量 (UBC)，改進結果不僅可以優化燃燒器，還能提供即時、連續、平衡的空氣量及控制個別燃燒器的當量比。這些結果被應用在牆式低氮燃燒系統，在共同風箱內平衡個別燃燒器氣流來達成分層燃燒，並且經由風洞測試中心的標定測試，確認了安裝在 DBR CCV®低氮燃燒器的個別燃燒器內部氣流檢測儀器 (IBAM™)其風量檢測的重複性和連續流量測量精確度可以在±5%內。

多年來 DBR 一直採用 CCV®燃燒器降低燃煤火力發電廠氮化物排放，以下先說明 DB Riley 的 CCV®燃燒器技術概況;自 1990 年開始 DBR 已經為電力行業製造出 1500 部以上的低氮燃燒器，而其 CCV®燃燒器技術已成為一個產品系列包括：CCV®單個空氣調節器型(single register)燃燒器、雙重空氣區域燃燒器 (dual air zone)和小室燃燒器 (cell burner)。在 CCV®燃燒器的眾多設計中，顧客可根據特定的氮化物排放要求、鍋爐配置和預算等靈活的選擇所需要的燃燒器設計。

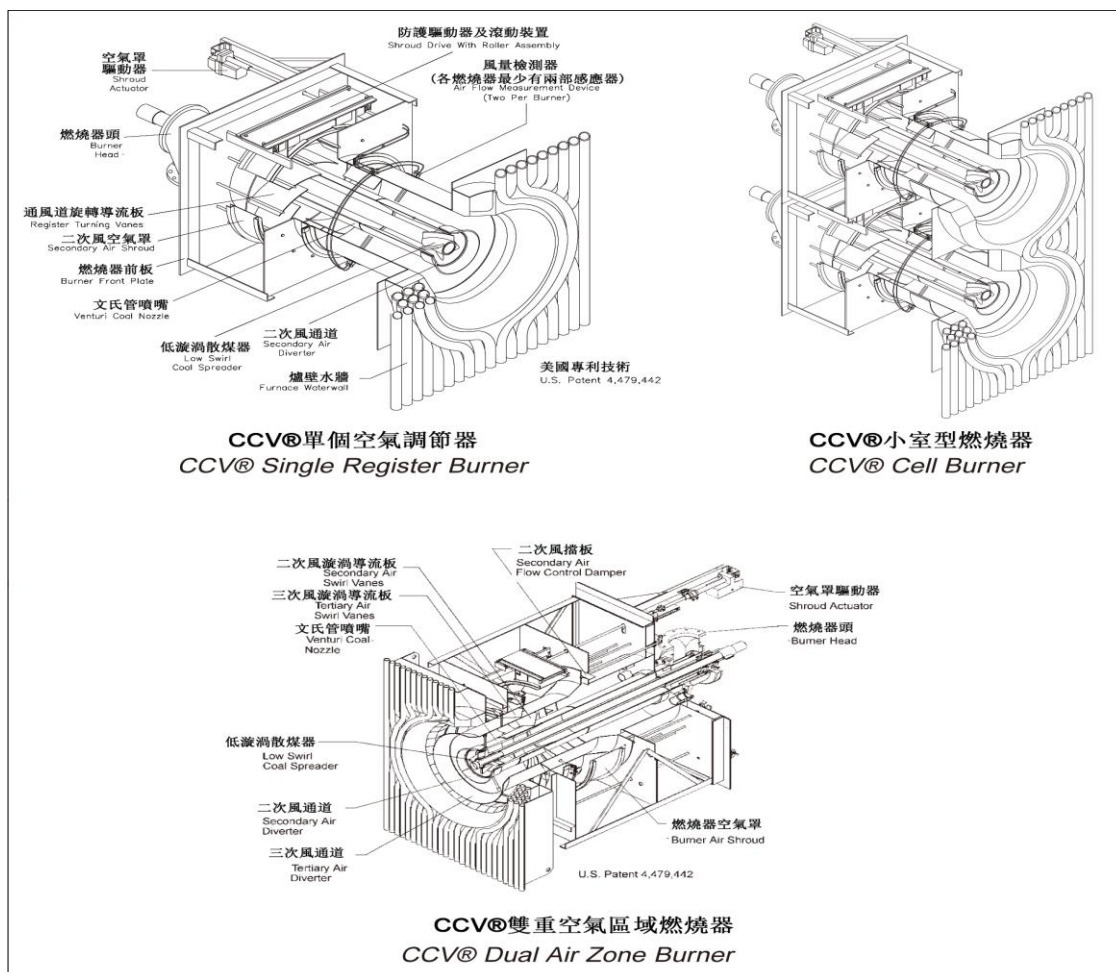
如次頁之圖示，為三種低氮燃燒器的設計原理圖，這些設計的共同點是一個獨特專利技術--文氏管粉煤噴嘴技術 (美國 4,479,442 號專利)，在 1980 年初為了降低煤粉電廠氮化物研發了文氏管噴嘴、低漩渦播煤器和二次空氣旁路器裝置，所有這些設計的應用

構成了可使燃料聚集在火焰核心、盡量減少燃料和熱式 NOx 所必備的基本條件。

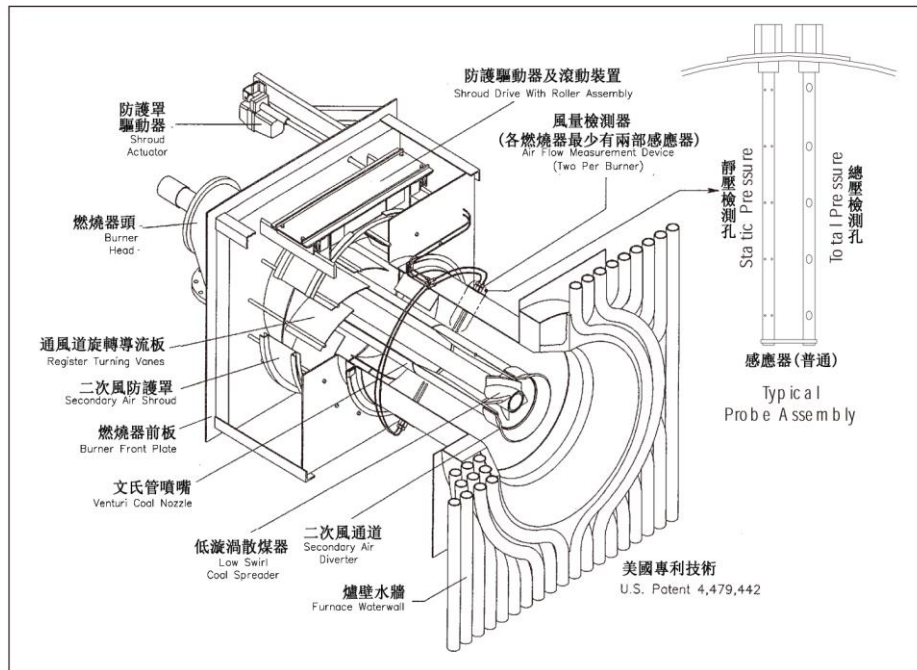
CCV®單個空氣調節器型燃燒器的設計(single register)類似於小室型燃燒器 (cell burner)。其二次風先通過空氣調節器並生成漩渦，接下來經過燃燒器內的桶形裝置(barrel)再到二次風分流器 (diverter)，二次風會在初級燃燒區內散開從而加強文氏管噴嘴的力度，使燃料聚集在火焰核心，起到對氮化物的進一步控制。

示意圖中顯示，AMC 風量檢測儀器 (IBAM™ 感測器) 被製成弧形裝入燃燒器的桶形裝置內，用來檢測各燃燒器的二次風，獨有的感測器設計安裝在燃燒器最理想位置，這樣便使如同小室型燃燒器 (cell burner)的單個空氣調節器型燃燒器在高度紊流、漩渦、不均勻的空氣流量界面都可以得到準確的風量測試數據。

至於 CCV®雙重空氣區域燃燒器(dual air zone)的空氣調節器包含：安裝在燃燒器二次和三次空氣通道的軸形漩渦導流板，各組 IBAM™ 感測器裝在接近軸形漩渦導流板的上游位置，在此界面的空氣更均勻、更軸形、沒有漩渦，各燃燒器分別檢測二次風和三次風，對於確保正確二、三次風比率起了很大作用，又足以降低氮化物。



接著說明 DBR 的 CCV®燃燒器搭配 IBAM™ 感測器與測試:如下圖顯示以 AM 公司的 IBAM™ 感測器安裝在 CCV®單個空氣調節器型燃燒器上為例，將兩組合總壓和靜壓歧管的不銹鋼感測器，經組合後各垂直安裝於桶形裝置，再將感測器用適當的導壓管連接，最後連接到壓力儀表(或 AMC 風量計算機上)，感測器的感應孔角度（如前文所述具有獨特設計）適合檢測不均勻、有漩渦的二次風氣流。



DBR 的 CCV®燃燒器搭配 IBAM™ 感測器

於 1995 年底首先在 600Mw 發電廠，以 IBAM™ 感測器搭配 DBR 的 CCV®單個空氣調節器型燃燒器，進行感測器檢測測試用以確認最佳感測器數量，作為流量指示或檢測數據的標準。在測試當中收集了 2, 3, 4 個感測器組的數據，數據結果表明將 2、3 組感測器組合安裝在遠離風量干擾裝置或導致紊流點火器的地方(掃描器或噴嘴支撐裝置)時，能避免風量檢測難題。由於 IBAM™ 感測器只安裝在幾部燃燒器上，因此仍無法評估感測器的實際準確性，然而隨後幾個月的測試結果亦證實有些數據具有重覆性。

其次 1995 年年中在 DBR 公司的瑞利研究中心 (DB Riley Research, Worcester, Massachusetts) 開始對安裝有 IBAM™ 感測器的 100MMBTU/h(29MW) CCV®雙重空氣區域燃燒器進行測試評估，針對 IBAM™ 感測器的安裝位置: 找尋燃燒器桶形裝置中最佳位置，二次風環面中軸線漩渦導流板下游位置感測器角度或相對於燃燒器主軸方向)。DBR 燃燒測試中心，可控制在廣泛燃燒狀態下測試一部實際規模燃煤燃燒器，受測感

測器組合分別安裝在 CCW 的偏正中間 0° ， 120° 或 240° 位置，在測試中發現各位置流量數據結果差異性並不大，這個測試結果表明整個二次風環面周圍空氣分佈良好，然而，由於感測器感應空氣角度時會受到漩渦導流板的影響，這也許會對準確風量檢測有一定的影響，但隨著我們在檢測各種感測器角度後，最終找出感測器最理想的安裝位置，能在漩渦導流板角度和位置受到最少影響；結果安裝在最佳角度和位置時，IBAM™ 感測器與 ASME 文氏管流量檢測設備相比較，IBAM™ 感測器只有 2% 的誤差。

之後，在美國加州 AMC 公司的風洞測試中心更進一步進行了測試，的目是根據原來現場和實驗室測試結果，將裝在 CCV® 單個空氣調節器型燃燒器的 IBAM™ 感測器進行實際標定，確定其檢測精準度、最佳角度與方向位置，然後再應用到美國中西部 260 MW 發電廠。

AMC 風洞測試中心有多部 ASME 流量噴嘴用於確保檢測精確流量，如下圖示意為 CCV® 燃燒器安裝在 AM 風洞試驗中心的照片。IBAM™ 感測器分別安裝在照片中 1:30 和 6:00 的時鐘位置，有機玻璃管是用於模擬點油器，而硬紙筒是用於模擬粉煤噴嘴。測試結果表明 ASME 噴嘴在廣泛燃燒器設定範圍內，IBAM™ 感測器風量檢測安裝不適合或設定錯誤時，其誤差通常為：-1% 至 13%（此為普通空氣調節器、漩渦導流板和氣罩設定引起的誤差值）；而在測試正確燃燒器設定時，誤差範圍可降到：+5% 至 +10%。

通常在使用多部燃燒器的廠家，其空氣調節器和漩渦導流板都會設定在同一個開合角度，僅僅通過調整燃燒器的氣罩來平衡各燃燒器之間的空氣流量，因此，在空氣調節器設定為 25 時誤差範圍會更少。測試結果證實根據以往的現場和試驗室測試結果，感測器角度和方向仍然有效，而感測器相對於空氣調節器的軸線位置也很重要，所觀察到的數據重覆性非常高。之後的測試計劃，是將裝有 IBAM™ 感測器的 CCV® 單個空氣調節器型燃燒器先進行 AM 公司風洞標定後再裝在 1300MW 電廠鍋爐。



IBAM™ Probe Calibration Testing in AMC's Wind Tunnel Facility

最後獲得的結論是:單獨燃燒器氣流測量可以應用 2 個 IBAM™ 感測器安裝在 DBR CCV®雙空氣區域低氮燃燒器中，分別針對二次風和三次風氣流進行測量並將氣流軸線截面誤差度維持在 3.5%，流量測量的精度大、小，可結合調整燃燒器氣流罩和擋板，使之實現更準確、更均勻的燃燒器二次風流量分佈。

二次風與三次風的測量精度分別為： $\pm 5.0\%$ ，而二、三次風流量比率準確度為 6.6%。IBAM™ 感測器已成為 DBR CCV®雙空氣區域低氮燃燒器檢測燃燒器之間二次風分佈的一個重要組成裝置。

6.在鍋爐燃燒診斷的成功應用案例

面對降低氮化物排放措施的高成本投入，多數的電廠都渴望尋找到可替換原脫硝技術（SCR）的措施，而許多不佳的減排計劃並不利於鍋爐運轉效能，這也是促使各個廠家不斷尋找在減排的同時仍可以實際提高鍋爐性能和效率的其它解決方法。

前進能源公司（Progress Energy 於 2010 年已被杜克能源公司收購）為了達到所需的 NO_x 排放標準，已在李氏電廠（Lee Stations）及薩頓電廠（Sutton Stations）引進線上燃燒優化/調校系統，除了降低環保排放外，前進能源公司的目標是想要改進總體燃燒成效；此優化項目應用了單獨燃燒器氣流測量（IBAM™）和連續燃燒器煤粉流率測量（Pf-Flo/Promecon），也從 DCS 調整控制各個火上風（OFA）出口處的空气質量流率，以便在每部燃燒器進行控制/調校空氣燃料比值，改進應用燃燒器二次風碟片擋板、控制燃燒空氣和粉煤用量，粉煤用量通過粉炭分流擋板（diverters）與下游的格槽裝置（riffle elements）進行調節。

雖然該項目的主要目標是降 NO_x 排放，但是它伴隨的其它成效還包括有：降低不透明度（opacity）、減少飛灰燒失率（LOI）、提高熱效率及減少鍋爐結渣，通過燃燒調整所得到的 NO_x 降幅在 10-20%（此數值係取決電廠應用低氮燃燒器的年代）。

前進能源公司（Progress Energy）曾經在其他鍋爐安裝過 AM 公司（美國氣流偵測公司）的煤流和風量測量系統，於 2006 年在美國北卡羅萊納州哥茲波羅市（Goldsboro）的李氏電廠三號爐安裝 Pf-FLO/Promecon（線上煤粉流量測量儀器）和 IBAM™（個別燃燒器風量檢測器）等；李氏電廠三號機發電量 265MW，配置有對火式 Riley 鍋爐、5 台 Riley Atrita 粉煤機和 20 個 B&W 低氮燃燒器、11 個火上風口（OFA 前壁 6 個、後壁 5 個），此外為了平衡雙向粉煤機（Duplex）兩面各粉煤機（共 5 台）的粒煤入口，還加裝了煤炭

分流擋板。

過去曾在 2004 年，前進能源在旗下的薩頓電廠三號爐（Sutton Unit3/ 420 MW）也安裝過 Pf-FLO/Promecon（線上煤粉流量測量儀器）和 IBAM™（個別燃燒器風量檢測器）等燃調設備，該爐在同一爐壁上有 28 個燃燒器。通過這些優化燃調措施 NO_x 排放降低了 20%，燒失率也有顯著降低；而在李氏電廠三號爐，NO_x 排放降低了 15% 左右，即使是在鍋爐進行自控時，也可得到重複的排放降幅。由於這兩部鍋爐都成功地降低了 NO_x 排放量，因此前進能源公司（Progress Energy）在他旗下的其他鍋爐也採取這些措施，並為其取名為 CCM(Continuous Combustion Management)。

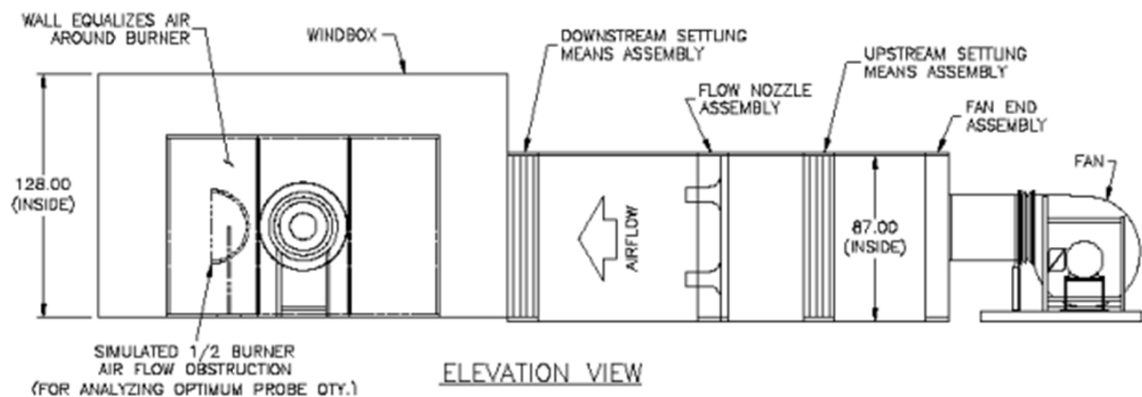
隨後 CCM 連續燃燒管理系統，也被應用在阿什維爾廠二號爐（Asheville unit 2）200MW 的 B&W 牆式鍋爐上，該爐在單個爐壁裝有 16 個 XCL 型燃燒器，前進能源公司（Progress Energy）在所有 16 個燃燒器安裝 IBAM™（個別燃燒器氣流測量）和 6 個火上風口，並在煤粉傳送管上安裝了 AM 公司的 Pf-FLO/Promecon（線上煤粉流量測量儀器）和可調節煤粉擴散閥門，並且 4 台 EL76 型粉煤機的一次風入口也安裝上了 AM 公司的風量測量儀器；此外，為了驗證燃燒調整效能，前進能源公司（Progress Energy）還在 ECO 出口煙道增加 O₂ 和 CO 等測量儀器。

CCM 連續燃燒管理系統也曾被安裝在魯濱遜電廠一號爐（Robinson Unit 1）一部 185 MW 8-角切線型鍋爐內（8-Corner T-Fired，Aston CE 公司），在八個角落的各位置都已加裝風量測量裝置及改進過的擋板驅動控制。此外，在各燃燒器傳動管都有煤粉測量裝置，而煤粉流量調節則通過手動可調節裝置進行分流控制。

前進能源公司(Progress Energy)在所有改善計劃項目內皆應用了 AM 公司的 IBAM™（個別燃燒器氣流測量）技術於 B&W 公司出產的 XCL 燃燒器（參見下圖）；此技術也可應用於任何一部燃燒器內，為了確保其風量能夠準確測量，各案例的燃燒器（即實際尺寸模型）會在 AM 公司美國加州的風洞測試中心（參見下圖）進行檢測。檢測中為了確保各燃燒器可傳輸連續質量流量數據，AM 進行風量感測器的校正和為 DCS 研發了相關公式:即為了確保 DCS 在應用中可提供準確風量數據，特研發出校正計算係數；而流量數據會受到旋風角度、感測器壓差和二次風擋板的影響。



AM 公司的 IBAM™ 加裝在 B&W 的 XCL 燃燒器



AM 公司在美國加州的風洞測試中心

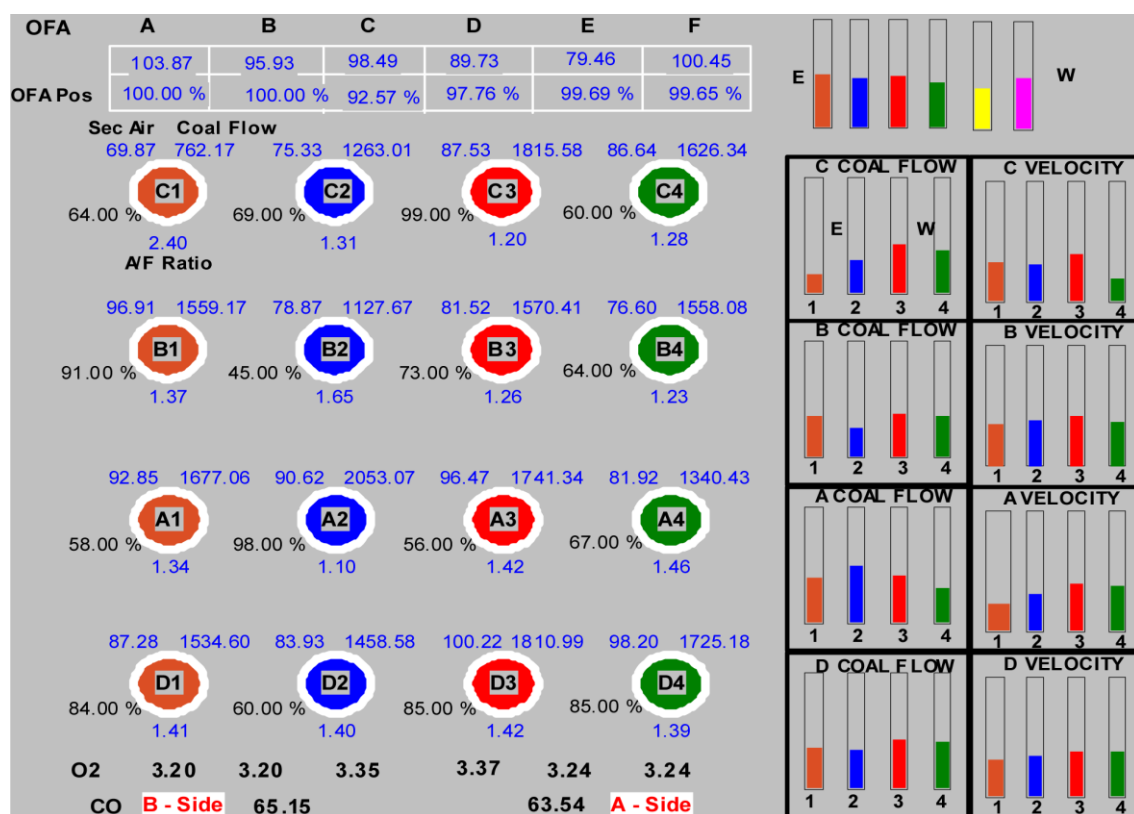
基於在薩頓電廠 (Sutton Stations) 和李氏電廠 (Lee Stations) 調降 NO_x 的工作經驗，研發出對於二次風(燃燒空氣)的控制措施，通過這些頗具靈活性的措施，我們便可了解負載變化(即粉煤機運轉台數狀態)、鍋爐總風量變化和其他操作的變化狀況。

關於空氣/燃料比 (A/F Ratio) 控制的基本考量方式，是每部燃燒器最少有一個可編程的設定點，系統會評估各燃燒器的空氣量質量和煤粉量質量；如果這個實際空氣/燃料比與空氣/燃料設定點並不相等時，燃燒器的二次風碟片擋板會根據設定點來調整開啟/關閉的程度。

但在不斷變化的負載量與總空氣流量 (不同 O₂ 設定點) 情況下，應用固定的空氣/燃料設定點是不切合實際的，O₂ 控制取決於鍋爐的總二次風流量，CCM 系統會輸入並計算正在運轉中的燃燒器總風量 (同時會忽略未運轉的粉煤機下游燃燒器)，系統會如

此統計總空氣/燃料比率(不分 O2 設定點)後再用這個數據除以燃燒器數量，便能計算出平均的燃燒器空氣/燃料比率值，而這個比率值會作為 DCS 的設定點；如果所有燃燒器能調整到此設定點，則依理論而言應該可以達到最佳程度的均勻燃燒。

下圖中顯示所有獲得的燃燒空氣、火上風、燃料、CO 和 O2 等數據結果。在這種運轉狀況下，燃燒器煤粉管閥門和燃燒器二次風處於自動控制模式，將所有燃燒器設法達到平均的空氣/燃料設定點；此處請注意，由於發生控制故障使得燃燒器 C1 是置於手動控制，某些燃燒器並未在設定點是因為他們受其他限制而使設定閥門全開/關閉所致。在最下方，我們可以看到控制調整的最終結果是：各 O2 均勻分布、CO 排放量也非常低，此外啓用系統後飛灰燒失率（LOI）也跟著降低了 2%。



結合 IBAM™ 進行 CCM 連續燃燒管理系統應用

除了提高煤流平衡之外，一次風量和燃燒器空氣/燃料比對於改善燃燒都有著至關重要的作用，還有其他比如煤粉細度、煤質種類等也是影響燃燒的因素；為了能夠更了解總燃燒狀態，於是 CCM 措施還包含增加 O2 感測器與鄰近的 CO 測量器。CO 測量器為萃取型測量器，此儀器有獨特的過濾系統用於維持連續操作及避免堵塞，還能在紅外

測試台直接進行 CO 測試。應用 CO 測量器測試，使 O₂ 可得到更嚴緊的控制，達到降低 NO_x 排量的目的、可降低 O₂、同時在維持低 CO 量情況下，提高燃燒效率。

最後獲得的結論是，在前進能源公司（Progress Energy）的幾部鍋爐中我們已經確認了線上粉煤流率測定和其風量流率測量對於降低 CO、NO_x 和 LOI 的貢獻度；而這些新措施證明在所有負載比時，鍋爐都能夠平衡粉煤和空氣，還可以自動進行連續式改善，這些改善讓前進能源公司的電廠運轉人員、技術顧問和北卡-蘿莉市（Raleigh）中央工程部獲得一種新的方法來達到他們的燃調目標，感受到 CCM 系統提供了更大的燃料彈性，而且能維持高度的可靠性。

三. 氣送煤流實驗設計規畫

此行亦特別與參訪廠家的多位專家共同研討，設法瞭解 EPRI 的“Coal Flow Loop 研發計畫”(Program 71—Combustion performance and NOx Control 內含的子計畫)，探討與蒐集關於氣送煤流實驗設計相關資料，心得整理說明如下：

1. 關於 EPRI 的 Coal Flow Loop 專案

此項 EPRI 的研究專案，其編號與名稱為” P71.004:Measurement and Control of Coal and Air Flow”，計畫研究目標係將建置的粉煤管管流(Coal Flow Loop)試驗室，提供來自不同測定原理(或不同廠家)的各項測定儀器在此標準平台進行多項試驗，藉測定結果之比較，評估分析關於粉煤量測應用技術、粉煤流量控制應用技術以及空氣流量量測評估測定技術等之實測能力。

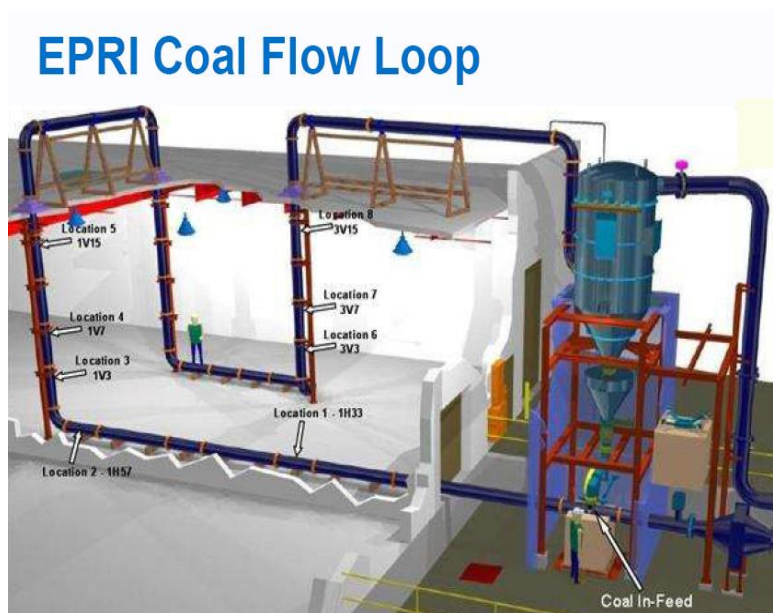
此項研究計畫之源起，係瞭解到個別的粉煤分管其空燃比(Air/Fuel Ratio)之變化會衝擊影響到燃煤鍋爐之鍋爐效率(Boiler Efficiency)、飛灰未燃碳(LOI)含量、氮氧化物(NOx)排放濃度、粉煤分管堵塞(Coal Pipe Plugging)等等，因而體認及發展可靠之”粉煤管流量測與控制技術”確有其重要性。

然而針對粉煤管管流，若是利用燃煤電廠現場進行測試研究，則將會面臨到許多困難的挑戰，諸如：電廠現場粉煤流量無法維持恆定並且加上範圍大的流體狀況會形成持續變動的雙相流、必須設計使用大量的管路組合、具磨蝕性之環境、標準量測法受到許多限制、現場密集測試計畫的人力要求、難以建立量測誤差等等的諸多因素。

基於上述考量因素，因此 EPRI 在美國密西根州的利沃尼亞(Livonia, Michigan, USA)建立實驗裝置，該項研究(EPRI Coal Flow Loop)裝置如示意圖所示，提供了”全尺寸真實粉煤管流操作及精準控制空氣與粉煤流率”，同時具備可控制與已知的實驗狀況。該項研究截至目前曾完成兩階段之計畫。

兩階段計畫之規劃內容值得參考，「階段一：為粉煤量測」(Phase 1: Measurement of Pulverized Coal)，係針對目前個別管段的量測法，其中一項為外抽取樣法(包含 ASME、Rotorprobe 等)，另一項為線上測定方法(包含微波、靜電荷、超音波、光學等測定方法)，需要配合外抽取式測試作現場校準，也受到諸如安裝位置、粉煤承載量、水份含量等的局部狀況影響。另外「階段二：粉煤流量控制」(Phase 2: Coal Flow Control)目標在於達成對一次空氣及粉煤等兩者的即時平衡，因為節流器對空氣流速、粉煤承載量兩者之影響性並非經常一致，並且粉煤承載量仍會影響粉煤流量分佈，對於分流器(Splitters)及格槽

器(Rifflers)效能會受到進口處粉煤濃度狀態之影響性仍缺乏充份瞭解、許多經工業界提出之粉煤流量控制裝置，經安裝在電廠現場使用之後其效能經常會難以驗證。



2. 氣送煤流實驗設計規劃

考慮與本所業務相接合，本項氣送煤流實驗設備，可應用研究內容應包含髒空氣流速量測技術評估、煤流流率量測技術評估、各種量測不準度因素評估、均流機制與調控技術評估、相關測儀之量測操作訓練等。

為瞭解該實驗設備的可調控變數與設計範圍，以下為 EPRI Coal Flow Loop 的系統設計規格要求，是很具體的參考資訊：

- (1) 12inch ID Sch. 40 pipe for Test Sections
- (2) 10ft/sec ~ 120ft/sec in-pipe Velocity
 - 1400 ~ 5600CFM
- (3) 1~4 Air/Coal Ratio
 - 2,000 to 20,000 lbs/hr Coal Flow
- (4) Ambient to 180°F Air/Coal Temperature
- (5) Precise Control & Measurement of Air and Coal
 - < 0.5% air flow measurement
 - < 1.0% coal flow measurement
- (6) Use pulverized coal or similar materials as test particulate

依據 EPRI Coal Flow Loop，其軟體/硬體設計需考慮的系統主要組成應包含:

- (1) 風機/氣體流量量測及控制
- (2) 載送氣體溫控與熱交換
- (3) 粉煤的分離，計量及飼入
- (4) 測試管段配置
- (5) 儀器及控制
- (6) 粉煤材料的載入/卸載

該計畫曾提供來自不同測定原理(或不同廠家)的各項測定儀器在 Coal Flow Loop 標準平台進行多項試驗，主要測試儀器(如下表所示)可區分為兩大群:

| Instrument | Principle | Number of Sensors/Pipe | Number of Cables/Pipe | Relative or Absolute | Extractive or In-situ (I), In-situ/Instrusive (II) |
|------------------------|---|------------------------|-----------------------|----------------------|--|
| Rotorprobe | Isokinetic sampling from multiple ports | 1 | - | A | E |
| ASME Head | Isokinetic sampling at multiple locations | 1 | - | A | E |
| ASC Head | Isokinetic sampling at multiple locations | 1 | - | A | E |
| Air Monitor/Promecon | Microwave | 2-4 | 3-5 | A | II |
| SWR | Microwave | 3 | 3 | R | I |
| MIC | Microwave | 3 | 3 | R | I |
| ABB Instruments | Electrostatic | 1 Spool | 1 | R | I |
| Foster Wheeler/TR-Tech | Electrostatic | 3-6 | 1-2 | R | II |
| Triple5 | Acoustic | 1 | 1 | R | I |
| EPRI/Foster Miller | Acoustic | 1 | 1 | R | I |
| University of Shanghai | Optical | 1 | 1 | R | II |
| M&W Asketeknik | Automated Extractive | 1 | 1 | A | E |

一群為外抽取式測儀，皆為粉煤取樣測儀直接從粉煤管徑向多點以等動量方式抽取粉煤，由粉煤樣品淨重獲得絕對值數據，這些儀器依兩類標準而設計，共 4 種如 ASME Head、ASC Head 為依 ASME 標準設計，GE Rotorprobe (手動式)、M&W Asketeknik Rotorprobe (半自動式) 為依 ISO9931 標準設計。

另一群測儀提供粉煤流率測定，共 8 種皆為線上式測定，包含微波、靜電荷、超音波、光學等測定方法，有些屬入侵式感測器係申入粉煤管內與煤流相沖刷，其它為感測器係申入只與粉煤管管壁貼齊，除 AMC/Promecon 測儀可以獲得絕對值數據外，其餘多數測儀提供的測試數據皆為相對數值。

在實驗測試安排方面，一群為外抽取式測儀所規劃的內容如下表所示(Extractive Test Matrix)，組合項目由流速(60/ 100)，A/F 比值(1/ 2/ 4)，取測位置(2D/ 10D/ 16D)及環外圍之各種角度取樣孔口點:

| Vel | A/F | Distance | Traverse Angle | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|----------|----------------|----|----|----|----|----|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | 90 | 75 | 60 | 45 | 30 | 15 | 0 | -15 | -30 | -45 | -60 | -75 |
| 60 | 4 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 2 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 100 | 4 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 2 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1 | 2D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 10D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | | 16D | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

Extractive Test Matrix

另一群為線上粉煤流率測測儀所規劃的內容如下表所示(On-Line Flow Measurement Screening Matrix)，組合項目由流速(60/ 90/ 120)，A/F 比值(1/ 1.5/ 2/ 3/ 4)，取測位置(2D/ 10D /16D)及 4 種設計的流動方向:

| | | Flow Direction | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|----------------------|----|-----|-----------------------|----|-----|---------------|----|-----|------------|----|-----|-----|
| Coal Pipe Velocity (ft/sec) | A/F | Vertical Up (1 Bend) | | | Vertical Up (2 Bends) | | | Vertical Down | | | Horizontal | | | |
| | | Distance from Bend | 2D | 10D | 16D | 2D | 10D | 16D | 2D | 10D | 16D | 2D | 10D | 16D |
| 60 | 4 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 3 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1.5 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 90 | 4 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 3 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1.5 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 120 | 4 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 3 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1.5 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| | 1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

On-Line Flow Measurement Screening Matrix

第 參 章 建 議 事 項

- 一. 所參訪的兩家廠家，為歷史悠久 (FERCo 自 1984 年成立，而 AMC 自 1967 年成立)並且技術能力卓越的公司，在業界皆為一時之選，前者已多年提供粉煤機效能測定服務、專研 SCR 效能改善研發相關軟硬體分析裝置、開發 MCDA(Multipoint Combustion Diagnostics Analyzer)煙道氣體檢測儀，後者專研於風道流率測定、研製 IBAM™ 與 CAMS，他們在歐美甚至亞洲地區各發電電廠所延伸累積的改善經驗與研發的測定技術，皆值得本公司多借鏡與跟進，朝自主技術來推昇公司各燃煤鍋爐的燃燒效能。
- 二. FERCo 公司甚有名氣的多點式燃燒診斷分析儀 MCDA 具有 12 個頻道的煙氣成分快速同步測定技術，提供發電鍋爐燃燒診斷分析，遠超過一般檢測廠家所提供兩頻道的檢測技術能力，建議本所評估建立類似設備，一來可強化公司環保形象，再者也是建立自主性燃調能力所不可或缺的重要利器。
- 三. 在應用實績上 AMC 已經為 9 家知名燃燒器公司(Riley(BPI)、B&W、ABT、RJM、Progress Energy、Alliant Energy、Mitsui-Babcock、Foster Wheeler、American Power Company 等)開發 30 餘種 IBAM™ 燃燒器的內部風量檢測產品，並且美國最大的電力公司 AEP 有效地使用 IBAM™ 在該公司 600 多部燃燒器作為增強燃燒控制用。依此應用實績，建議本所應對於該公司相關燃燒診斷技術與 IBAM™ 與 CAMS 應用等多關注與深入學習。
- 四. 依據 AMC 的解說，其 IBAM™ 燃燒器內部風量檢測器產品，都是經過 AMC 研發中心依據用戶的燃燒器類型進行客制化設計，然後通過在 AMC 風洞測試中心的精密測試驗證，以確保能夠成功的應用到工況現場，建議本所應優先評估建置類似的 AMCA 風洞校準設施，並配合進行個別燃燒器空氣流量感測器可用性之校準驗證，可以確實掌握個別燃燒器空燃比的調整(係燃調的關鍵)，則公司內各燃煤鍋爐的燃調改善將大有機會施展。