

出國報告（出國類別：考察）

赴美查核「核三廠小幅度功率提升案」  
超音波流量計校驗測試

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：郭獻棠技士

派赴國家：美國

出國期間：97年3月8日至97年3月16日

報告日期：97年05月16日

## 摘 要

台電公司順應世界趨勢於今年提出核三廠小幅度功率提升申請案，將以精確度高之超音波流量計取代傳統差壓式流量計（文式管）計算反應器熱功率之方式，減少熱功率不準度之範圍進而達到小幅度提升功率增加發電量之目的。鑑於超音波流量測定儀器之不準度(uncertainty)與未來本會將核准之功率提升量有相當關聯，為順遂核三廠小幅度功率提升案之審查，因而赴美實地查核廠家 Cameron 公司於 Alden 實驗室執行之超音波流量測定儀器測試，經現場見證考察結果簡列如下，並將作為未來審查之依據：

1. 未來超音波流量計於核三廠現場執行安裝測試時，編號 EFP-61 測試程序書之執行，應列為本會或台電公司查證項目，以確認超音波流量計於現場安裝時實際所獲取資料之有效性，確保準確可靠之流量量測。
2. 測試現場管路配置與實際現場配置間之差異，包含管路配置受限於空間場地採橫管而非直管擺設及測試所使用之文氏管與核三廠現場所使用者有所不同等，並不會顯著地影響測試結果，此種差異應可接受。
3. 本次測試使用之超音波轉換器皆為 2008 年出廠，安裝於 C 迴路之超音波流量計共計 16 支超音波轉換器，卻於測試期間有 4 支出現故障問題，超音波轉換器之品質應為日後核三廠維護之重點。
4. 本次測試經現場觀察，發現各次流量計因子(meter factor, MF)值量測可視為獨立重複之量測過程，對於 MF 量測值散佈不準度 (Data Scatter Uncertainty) 之估算，測試工程師所使用之計算公式，並無不合理之處。惟初版測試報告部分數據經筆者平行驗算有所出入，尚待電廠提出澄清。
5. MF 值與流速分佈平坦度 (Velocity Profile Flatness Ratio, 簡稱 FR 值) 間之關係，並未發現有理論預測之強性線性相依關係，惟此理論模式不準度(Modeling Uncertainty)將納入整體不準度計算中。

# 目 次

摘 要 .....	i
壹、目 的 .....	1
貳、過 程 .....	2
參、心 得 .....	3
肆、建 議 .....	11

## 附 件：

附件一：ALD-1109 Rev 0, “Hydraulic Calibration Plan for Maanshan  
LEFM CheckPlus Chordal Spool pieces”。

附件二：測試結果初步資料

## 壹、目的

由於儀器量測精確度之提升，國際間核能電廠紛紛藉由裝設先進之流量測定儀器，向管制機關提出反應器功率小幅度增加申請案。台電公司順應世界趨勢於今年提出核三廠小幅度功率提升申請案，將以精確度高之超音波流量計取代傳統差壓式流量計（文式管）計算反應器熱功率之方式，減少熱功率不準度之範圍進而達到小幅度提升功率增加發電量之目的，相關報告並已送本會審查中。

鑑於超音波流量測定儀器之不準度(uncertainty)與未來本會將核准之功率提升量有相當關聯，為順遂核三廠小幅度功率提升案之審查，因而奉派赴美實地查核廠家 Cameron 公司於 Alden 實驗室執行之超音波流量測定儀器測試，以確認測試之有效性。

## 貳、過程

97年3月8日搭機赴美於3月9日下午抵達波士頓，3月10日與超音波流量計美國廠商Cameron公司在台之代理商富迪斯公司劉倩騏總經理及核三廠儀控組張梓喬課長會同前赴Alden實驗室，執行超音波流量計校驗測試查核。

本次測試計畫（如附件一）原排訂按迴路（Loop）A、B、C順序執行測試，惟實際測試順序因先將Loop C安裝上去，因而改為Loop C、B、A之順序。其中3月10日至11日執行Loop C測試，3月11日至12日執行Loop B測試，3月13日至14日執行Loop A測試。3月14日完成本次測試查核工作後，即搭機至洛杉磯轉搭華航返台，並於3月16日抵達台北。

本次各Loop測試過程包含模型測試（Model Test）及參數測試（Parametric Test）二部分，並由Alden實驗室人員及Cameron公司測試工程師共同執行；其中Alden實驗室人員係以符合ASME/ANSI MFC-9M-1988 "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits by Weighing Method" 及ISO 4185-1980 "Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits - Weighing Method"二項標準之重量測定方法（Gravimetric Method），量測不同流體狀況下之流量率（flow rate），Cameron公司測試工程師則同時以超音波流量計量測相對應狀況下之流量率，二者量測數據之比值（稱之為流量計因子(meter factor, MF)或校正係數(calibration coefficient))則作為超音波流量計之校驗基礎。至於詳細測試內容及考察發現則另述如下。

## 參、心得

本次考察內容及心得簡述如下：

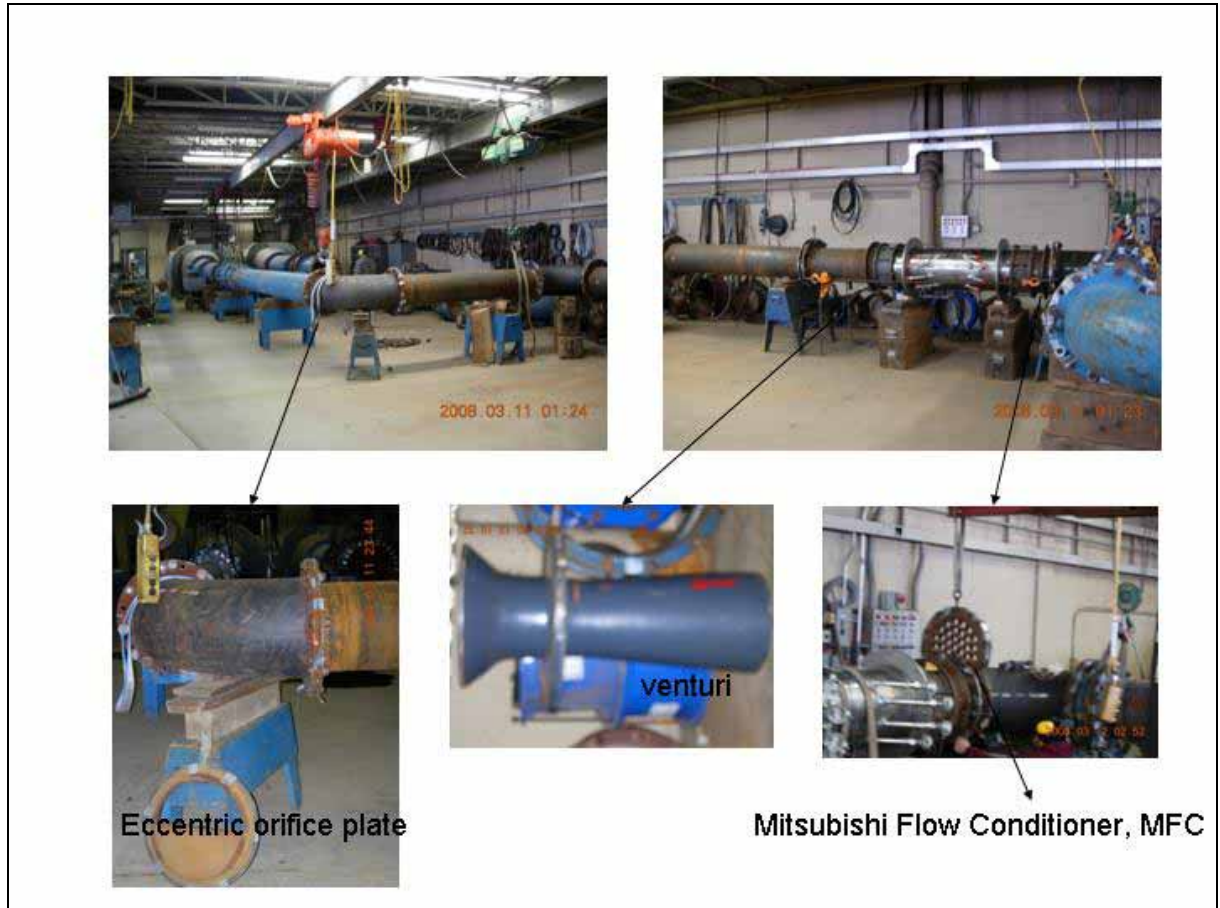
### 一、程序書查核

本次測試計畫（如附件一）之目的在模擬核三廠超音波流量計安裝現場配置，於 5 種不同流量狀況下，分別測試四種流體模式下之校正係數（calibration coefficient），意即流量計因子(meter factor, MF)。此中 MF 值係指 Alden 實驗室利用重量測定方法所量測之容積流量率（Volumetric flow rate）與超音波流量計所量測之容積流量率間之比值，本測試所測得之 MF 值並將作為未來核三廠利用超音波流量計所量得之蒸汽產生器主飼水流量之校準及不準度分析之依據，並影響到反應器熱功率計算之精確性。

經查本測試計畫內容包含測試目的、範圍、職責、依循程序書、測試程序及測試文件紀錄，其中 Cameron 公司職責部分，並要求測試所需程序書必須最近發行版本。此外，本測試計畫並說明本次各迴路測試前，將依據 EFP-61（Commission Procedure for LEFM Check and LEFM CheckPlus Systems）程序書執行相位干涉雜訊(Coherent noise)之訊號雜訊比（SNRc）及非流體部分造成之訊號傳輸時間延遲（Non-fluid delay）之量測，其中 SNRc 係用以確保訊號品質，Non-fluid delay 則用以計算超音波在流體靜止狀況下行經管內流體路徑之速率，由於對於測量結果之不準度有所影響，因此亦在本次考察項目範圍內。

本測試計畫並規範超音波流量計完成安裝確認儀器正常後，即開始在四種流體模式下量測各種不同流量狀況下之實際容積流量率，每個迴路共進行 70 次量測，而每次量測收集數據則包含 Alden 實驗室利用重量測定方法所量測之容積流量率與超音波流量計所量測之容積流量率以及其他相關資料。至於四種流體模式係指正常模式（超音波流量計上游安裝文氏管（Venturi tube））、上游移除文氏管、上游加裝離心流孔板（Eccentric orifice plate）以及下游加裝三菱流量調節器（Mitsubishi Flow Conditioner, MFC），其實驗室現場配置則如下附圖一所示。

其中上述上游加裝離心流孔板、上游移除文氏管及下游加裝 MFC 等 3 種模式，係為驗證 MF 值對於上游進口流體狀況變動、上下游組件配置差異等狀況之敏感性，以作為未來送審不準度分析報告之依據。



附圖一：測試現場配置

另查 Cameron 公司測試工程師所使用之編號 EFP-61 程序書，係 2004 年 12 月 7 日發行，版次 16，並非現行程序書(2007 年 10 月 26 日發行，版次 20)，與測試計畫(附件一) 3.2 之要求不符。此品管方面缺失，經與 Cameron 公司負責單位主管討論，該主管表示由於測試工程師係委外包商，無法進入該公司內部網路下載現行程序書，方發生此種缺失；該主管並表示測試工程師所使用程序書內容與現行程序書內容並無重大差異，針對本項缺失，該主管將要求委外包商於執行測試時，應與程序書負責人再確認正確版本，並納入訓練。

## 二、儀器校正紀錄查核

Alden 實驗室於本次測試所使用之計時器 (Timer)，共有 2 台，其中一台為備用，經查證其每日比對(Check)紀錄，發現備用台並無比對紀錄，經訪談負責人員表示，此 2 台確有執行每日比對，然由於先前備用台故障請修，換上另一台作為備用，紀錄表之編號未因應修改而導致此品保方面缺失；事後並發現 Alden 實驗室人員已將此欠缺品保紀錄之備用台關閉不用，以免測試人員誤讀。

## 三、測試方式查核

本次測試現場配置管路受限於空間場地係採橫管擺設，雖與現場直管配置不同，然由於直管與橫管配置之差異主要在於重力效應之考量，然實際現場管路長度所換算之重力效應對於雷諾數 (Reynolds number) 之影響可忽略不計，因而採橫管配置測試與直管配置測試結果間之差異並不顯著。此外，測試所使用之文氏管亦與核三廠現場所使用者有所不同，惟由於經由 MF 值參數敏感性測試（註：主要係指離心流孔板加裝及文氏管移除二種測試，由於 Cameron 公司針對 MF 值與流速分佈平坦度 (Velocity Profile Flatness Ratio, 簡稱 FR 值) 間之關係，已建立線性相依關係，在此參數敏感性測試中並在最大範圍內改變 FR 值，以與理論曲線進行比較關聯），驗證對於 MF 值影響並不顯著，因而所使用之文氏管方面差異亦不顯著。因此，測試現場管路配置與現場配置間之差異，並不會顯著地影響測試結果，此種差異應可接受。

在實際量測飼水流量率方面，係由 Alden 實驗室人員及 Cameron 公司人員分別用重量測定法及超音波流量計二種不同方式進行飼水流量率量測（如附圖二至五所示），並分別用各自儀器進行觀測紀錄，Alden 實驗室人員所紀錄之資料並交由 Cameron 公司人員進行 MF 值計算。由於重量測定法係在某流量狀況下，將水槽所收集之總水容積與花費時間相除而得到相對應之飼水流量率，因此時間量測之不準度對於飼水流量率量測之不準度應有相當程度之影響，因而特在本次考察時進行詳細觀察瞭解，並概略說明如下。由於水槽收集流體之動作係藉由轉向閥 (diverter valve) 操作來完成開始進水及完成進水動作，轉向閥動作時會藉由連桿帶動促使



所裝設之紅外線偵測器送出訊號去啓動計時開始及結束，因而得到收集時間之量測紀錄。此外，Cameron 公司人員除使用超音波流量計量測流量外，並藉由前述啓動計時開始及結束同步，紀錄水槽收集流體期間所送出之超音波脈波數目，作為流量計算備用方式。



附圖二：Alden 實驗室人員測量流量



附圖三：Cameron 公司人員測量流量



附圖四：轉向閥及相關紅外線偵測裝置



附圖五：計時器及相關接線

此外，針對非流體部分造成之超音波訊號傳輸時間延遲（Non-fluid delay）之量測，經考察發現 Cameron 公司人員係以三次彈跳量測（Triple Bounce Measurement）方式進行估測。所謂三次彈跳量測，則係指利用超音波脈波於管內反射所接收之訊號傳遞時間，估測非流體部分造成之超音波訊號傳輸時間延遲。非流體部分造成之超音波訊號傳輸時間延遲量測結果並將作為飼水流量計算之依據，因而會間接反映於反應器熱功率之不準度。本次考察經實際觀察 Cameron 公司人員以三次彈跳量測非流體部分造成之超音波訊號傳輸時間延遲，並無發現不合理

之處。

#### 四、測試異常事件處理查核

2008年3月11日下午進行 LOOP C 下游加裝 MFC 之測試時，超音波流量計之第 7 路徑之超音波轉換器(transducer)出現故障訊息，經 Cameron 公司測試工程師進行問題診斷，發現第 7 路徑之上下游超音波轉換器皆出現電路開路故障現象，另經檢查其他超音波轉換器亦有 2 只有類似問題，亦一併予以更換。經現場查證該批超音波轉換器皆為 2008 年出廠，經訪談 Cameron 公司負責單位主管表示，由於係屬實驗設備抽換較為頻繁，因而有可能造成部分線路斷路現象。

此外，Loop C 於執行高流量狀況測試時，發現量測結果有異狀，因而重新執行測試；經訪談相關人員表示，此異常係於高流量狀況受孔蝕因素影響所致，並將於測試報告中詳細說明；由於核三廠安裝現場環境係為高壓飼水壓力環境，因而並不會有類似實驗室所發生之孔蝕現象。

#### 五、測試結果查核

本次共測試 3 個迴路 (Loop)，編號為 A、B、C，每個迴路各安裝一套超音波流量計，每套超音波流量計有 2 組超音波轉換器，每組超音波轉換器於量測平面上劃分 4 個路徑 (PATH)，每個路徑有 2 支傳送/接收超音波轉換器。每個路徑所量測計算之流速除作為計算流量之依據，並可作為計算流體流速 FR 值。FR 則定義為量測平面上長路徑與短路徑量測流速之比，係作為流速分佈輪廓 (velocity profile) 之量化指標。FR 值除受雷諾數之影響 (註：雷諾數隨著流速增加而增加) 外，並受流量計上游流體狀況所影響，通常漩渦 (swirl) 會造成 FR 值增加趨近於 1，因此藉由 FR 值之量測可得知流量計上游流體變動之狀況。

本次測試主要是在量測 MF 值以作為未來超音波流量計之量測流量計算校準因子，以及量測流體在不同擾流狀況下對於 MF 值不準度之影響，以作為未來超音波流量計不準度分析之依據。經蒐集測試結果初步資料如附件二 (註：正確測試結果

資料應以正式發行之測試報告為準，本報告所附僅為下述說明之用，不應作為其他用途之引用)，所附資料中每種流體模式各附 1 張流速分佈圖及 2 張 MF 值 (含 FR 值) 相對流量之分佈圖，其中縱軸為超音波流量計量測結果，橫軸則為 Alden 研究實驗室 (Alden Research Laboratory, ARL) 量測結果。

本次測試每個迴路於四種流體模式下進行測試，附件二資料測試編號部分，編號 1 係指正常模式 (超音波流量計上游安裝文氏管 (Venturi tube))，編號 2 係指上游加裝離心流孔板 (Eccentric orifice plate) 以產生最大之漩渦，編號 3 係指下游加裝 MFC，編號 4 則指上游移除文氏管，因此測試編號 a1 係指 A 迴路正常模式狀況。在不同流體模式下進行測試，會有不同之流速分佈輪廓，從附件二流速分佈圖觀之，可發現編號 1、3、4 流體模式之流速分佈輪廓差異並不大，編號 2 流體模式由於產生最大之漩渦，因此流速分佈輪廓與其他模式差異最大，從 FR 值觀之，亦有相同結論。各流體模式狀況下之測試，則分別從高流量至低流量進行 3 至 5 種不同流量測試，每種流量測試則針對 MF 值進行 5 次量測，所以每種流體模式狀況下之測試，會進行 15 至 25 次 MF 值之量測，所收集之量測資料則作為 MF 值估測及不準度分析之依據。

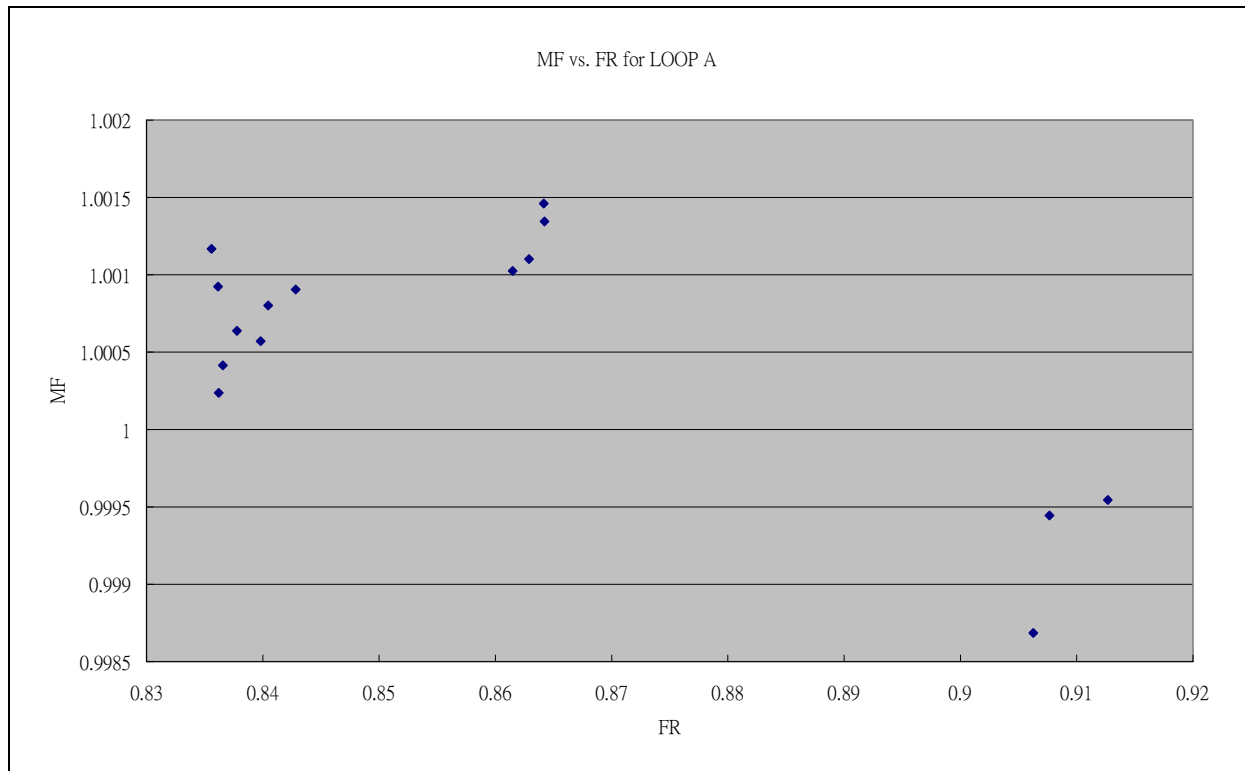
每次 MF 值量測皆依相同程序分別進行，由於每次量測開始進行前，皆會將收集水槽之存水洩空後，再藉由轉向閥將水導入收集水槽重新開始進行飼水流量之量測，彼此之間應可視為互不影響，各次 MF 值量測可視為獨立重複之量測過程。因此，對於 MF 量測值散佈不準度 (Data Scatter Uncertainty) 之估算，可以 Student 氏機率分佈 (Student' s t-distribution) 之 t 值、取樣標準差及量測次數而計算得之 (註：假設各次量測變數之機率分佈係為相同獨立高斯分佈，則在取樣平均值及取樣標準差為可得已知之狀況下，經由數學推理可證明待測參數之期望值在所要求之信心水準 (Confidence Level) 相對應之待測參數分佈範圍，可以 Student 氏機率分佈之 t 參數乘上取樣標準差再除以量測次數之平方值而計算求得，並進而得知取樣平均值數據分散之不準度)。經查測試工程師所使用之數據分散不準度計算公式，與上述方式相符，並無不合理之處。另抽查 LOOP C 之 MF 值並計算平均值及

不準度(取 95%信心水準(Confidence Level))如下表所示，經與 Cameron 公司編號 ER-669 Rev 0 測試報告比對，發現測試編號 C-1 之 MF 平均值及資料散佈不準度，以及測試編號 C-3 之 MF 平均值與下表核算結果有異，惟測試報告中有關 LOOP C 測試結果之 MF 平均值 (1.0004) 及資料散佈不準度 (0.03%)，經與下表核算結果並無出入，已先行請核三廠進行澄清。此外，測試報告中對於編號 C-1 之測試，只取 20 組數據，由於實際測試共計 30 組數據，其中 5 組數據受孔蝕影響而重新測試應可予以不納入統計，惟仍應將測試有效之 25 組數據納入統計分析，而非只取低於每分鐘 9200 加侖流量之 20 組數據，由於測試報告尚未正式送本會審查，惟為提升審查效率，已先行告知核三廠負責單位進行澄清。

測試編號	MF 平均值	資料散佈不準度
C-1	1.0003	0.07%
C-2	0.9993	0.07%
C-3	1.0005	0.08%
C-4	1.0015	0.02%
全部數據	1.0004	0.03%

此外，為瞭解 MF 值與 FR 值間之關係，是否如 Cameron 公司人員所稱可發現二者之間存在線性相依關係（註：此種線性相依關係若經由後續測試數據分析，驗證與理論預測之間差異於可接受範圍之內，則不同流體狀態配置 (hydraulic configurations) 對於流量量測不準度之影響，將為可預測掌控；因此，若得知核三廠實際現場流體狀態之 FR 值，則經由此種 MF 值與 FR 值之線性相依關係，可以內插或外插數據分析方式，得知其相對應之現場 MF 值，並精確量測實際現場流體狀態配置下之飼水流量)，特於本次 LOOP A 測試資料中，將不同流體模式下各流量相對應之 MF 量測平均值作為縱軸，FR 量測平均值作為橫軸，共計 15 點，以 Microsoft Excel 軟體進行繪圖如附圖六所示，並未發現 Cameron 公司人員所稱存在有理論預

測之強性線性相依關係，惟此理論模式不準度(Modeling Uncertainty)將納入整體不準度計算中。



附圖六：LOOP A MF 值與 PR 值對照分佈圖

## 肆、建議

本次測試考察結論及建議整理如下，並無有影響測試有效性之重大問題存在，因而本測試應為有效：

1. Cameron 公司測試工程師於測試時所使用之編號 EFP-61 程序書，雖非最新版本，然經現場觀察及訪談主管人員，其執行方式未有不合理之處，因而並不影響本次測試之有效性。惟未來超音波流量計於核三廠現場執行安裝測試時，EFP-61 程序書之執行，建議應列為本會或台電公司查證項目，以確認超音波流量計於現場安裝時實際所獲取資料之有效性，確保準確可靠之流量量測。
2. 測試現場管路配置與實際現場配置間之差異，包含管路配置受限於空間場地採橫管而非直管擺設及測試所使用之文氏管與核三廠現場所使用者有所不同等，並不會顯著地影響測試結果，此種差異應可接受。

3. Alden 實驗室於本次測試所使用之計時器（共二台），雖有一台（備用台）每日檢查紀錄無法證實其確有執行，然經筆者於現場提出質疑後，該台已停止不用，且經現場觀察二台計時器讀值並無明顯差異，因而並不影響本次測試之有效性。雖然 Alden 實驗室已為美國認證之標準實驗室，惟仍有品管瑕疵為筆者執行考察時發現；因此，經認證之標準實驗室，仍需管制機關持續進行查核，方能確保品質。
4. Alden 實驗室以紅外線偵測送出訊號去啟動計時開始及結束，而量得飼水流量率，可提升量測精確性，值得作為未來國內建立類似實驗室之參考。Cameron 公司人員除使用超音波流量計量測流量外，並藉由紀錄水槽收集流體期間所送出之超音波脈波數目，作為流量計算之雙重核對，值得肯定。
5. 超音波轉換器皆為 2008 年出廠，安裝於 C 迴路之超音波流量計共計 16 支超音波轉換器(transducer)，卻於測試期間有 4 支出現故障問題，雖然係屬實驗設備抽換較為頻繁，因而有可能造成部分線路斷路現象，然超音波轉換器之品質應為日後核三廠超音波流量計維護之重點，核三廠對於新購之超音波轉換器應嚴格把關，避免日後因更換超音波轉換器增添不必要之維護作業負荷。
6. 本次測試經現場觀察，發現各次流量計因子(meter factor, MF)值量測可視為獨立重複之量測過程，對於 MF 量測值散佈不準度 (Data Scatter Uncertainty) 之估算，可以 Student 氏機率分佈 (Student' s t-distribution) 之 t 值、取樣標準差及量測次數而計算得之。經查測試工程師所使用之數據分散不準度計算公式，與上述方式相符，並無不合理之處。惟 ER-669 Rev 0 測試報告 LOOP C 計算結果經筆者平行驗算，雖總結果一致，然仍有部分數據有所出入，已先行請核三廠負責單位進行澄清確認，未來並將作為審查之依據。至於 MF 值與 FR 值間之關係，並未發現 Cameron 公司人員所稱存在有理論預測之強性線性相依關係，惟此理論模式不準度(Modeling Uncertainty)將納入整體不準度計算中。