

出國報告（出國類別：洽公）

赴德國流量校正實驗室實習與參訪

服務機關：台灣中油股份有限公司煉製研究所

姓名職稱：羅仁聰 研究員

派赴國家：德國

出國期間：103 年 10 月 12 至 18 日

報告日期：103 年 12 月 25 日

摘要

本所新購 8 部 ItronS-Flow 轉子流量計，用於 B 區中小尺寸標準件使用，本次出差至德國 Itron 公司實際查驗其性能及校正結果，Itron 為國際知名流量計公司，生產各型皮膜計、渦輪流量計及轉子流量計，特別是轉子流量計，可適用於低流率，高精度要求，Itron 並提供常壓及高壓氣體流量計校正；Pigsar 係德國燃氣公司 Vier Gas 旗下公司亦屬於 Open Grid Europe 整合管路系統的一部分，被德國官方認可為國家高壓氣體流量標準設備，並於 1999 年五月起在 PTB 的監督下負責高壓天然氣及其標準單位體積量之維持與傳遞；PTB 主要負責德國計量標準傳遞，為國際 BIPM/CIPM 一員，參與國際間能量比對，其主要任務為提供國家原級標準維持、傳遞標準追溯至二級實驗室、進行量測技術的開發與改善，並提供流量計校正服務。此行透過至 Itron、Pigsar 及 PTB 的參訪與人員訪談了解轉動式氣體流量計開發狀況、並了解 PTB 及 Pigsar 校正技術及實驗室運行模式並了解國際間流量比對的方式，未來本所可與工研院流量實驗室及 PTB 合作，探討原級標準技術的開發或引進，並探討流量計之壓力效應亦可比較國內外追溯系統之差異，以確保台灣高壓氣體流量追溯系統能與國際接軌。

目錄

壹、目的	1
貳、過程	2
參、心得及建議	27
肆、附件	29

壹、目的

德國 PTB 及 Pigsar 為目前世界上發展氣體流量校正技術最先進的機構之一，氣體流量受到溫度、壓力變化屬於可壓縮流體，因此流率要追溯到原級標準單位有其難度，PTB 屬於國家級校正實驗室，其校正技術實力堅強，但在實流天然氣源取得不容易，因此與 Pigsar(屬於 Vier Gas Service 公司之校正部門)合作，由 PTB 提供技術及傳遞標準件之校正，Pigsar 則提供場地設備及工作標準件之校正，建構高壓實流追溯系統，高壓實流原級校正追溯有二套系統，其一 LDV(Laser Doppler Velocimetry)為目前正在開發的系統，但目前仍有邊界速度場問題須解決；另一套為 HPPP(High Pressure Piston Prover)系統，此系統目前擔負原級追溯的工作，此二套系統階建置於 Pigsar，由 PTB Dr. Mickan 負責與維護，追溯至長度與時間單位達成原級追溯目的，此行透過至此二間實驗室之參訪與人員訪談了解其校正技術及實驗室運行現況及了解二者間合作模式，德國的計量標準追溯系透過原級校正追溯系統校正傳遞標準件(G250 Q=450 m³/h)，最後再由傳遞標準件校正工作標準件(G250 Q=450 m³/h)，最後由數部工作標準件並聯校正大尺寸待校正，完成校正工作。其不確確定度與品質皆需控管與維持。

PTB 除了與 Pigsar 合作外，亦與國際流量計製造廠商合作，針對流場、流量量測方法等技術合作開發，例如於 Itron 公司成立高、低壓氣體流量校正部門，由 Itron 負責流量計操作與校正，PTB 提供技術支援與報告審核，報告以 PTB 名義發出。Itron 公司主要從事各型氣體流量計之設計與生產，包含皮膜計、轉子流量計及渦輪流量計，並建構二套校正系統(常壓與高壓)，可自行校正流量計，若客戶有需求並可出具 PTB 校正報告，本年度本所採購 8 部 Itron 公司生產之 S-Flow 轉子式流量計，作為煉研所未來 B 區中小尺寸校正區之標準件使用，其型式與 PTB 使用之標準件相同，本所要求 Itron 提供 PTB 校正報告，此次出國適逢 PTB 至 Itron 公司執行本所之 8 部流量計校正，參訪中亦了解其校正方法與執行過程。

貳、過程

一. 出國行程概述

表 1 為本次出國的行程表與工作內容

表 1 出國行程與工作內容

起迄日期	天數	到達地點	詳細工作內容
103.10.12	1	桃園-法蘭克福	由桃園啟程前往法蘭克福
103.10.13	1	法蘭克福-卡爾斯魯厄	參訪 Itron 流量計工廠
103.10.14	1	卡爾斯魯厄	參訪 Itron 流量計工廠
103.10.15	1	卡爾斯魯厄-多斯藤	赴 Pigsar 實習流量計校正技術
103.10.16	1	多斯藤-布朗施維格	赴 PTB 實習流量計校正技術
103.10.17	1	布朗施維格-法蘭克福	赴 PTB 實習流量計校正技術
103.10.18	1	法蘭克福-桃園	由法蘭克福返回桃園

二. Itron 參訪

Itron 位於德國中南部的卡爾斯魯厄(Karlsruhe)，為國際知名流量計公司，生產各型皮膜計、渦輪流量計及轉子流量計，特別是轉子流量計，可適用於低流率，高精度要求，連 PTB 亦採用其轉子式流量計為工作標準件。轉子流量計生產基地位於德國卡爾斯魯厄市，本次參訪由品保主任 Mr. Wolfgang 帶我參訪生產工廠，及解說各部門之任務與工作，流量計外殼由鋼鐵工廠鑄造裁切完成後，即送成 Karlsruhe 組裝，其它零組件，包成轉軸、葉片、訊號通訊等皆由 Itron 自行製造，Itron 工廠有多條產線生產各款式流量計，特別是皮膜計，為生產大宗，此款流量計特色為準確性高，製程簡單，單價便宜，故其大量應用於各行業之氣體計量中，除了皮膜計外渦輪流量計、轉子流量計亦為其主力產品，Itron 生產之各款式流量計如圖 1 所示，其尺寸自 G1.6 至 G6500，流率範圍自 4-10000 m³/h，供應於世界各國，及各行個業中。Itron 工廠內亦有兩條氣體流量校

正系統，其一為常壓校正系統，利用抽風機抽取實驗室內之氣體作為流量來源，並利用陣列式噴嘴控制流量大小；高壓校正系統可校壓力 10-25bar，標準件選用渦輪及轉子流量計採並聯方式校正待校件。本所新購 8 台轉子流量計由 PTB 派員至 Itron 工廠執行游校，校正工作由 Itron 人員操作，PTB 技術人員負責數據分析與報告出具。

(一) S-Flow 轉子流量計

Delta S-Flow 屬於標準件用轉子流量計，用於高精度計量場合，PTB 亦使用其為工作標準件用於校正、計量及研究領域中，轉子流量計由於不考慮流場要求，因此可用於低流量、不規則流場中，亦不須安裝前直管與整流片，只須於上游入口端加裝一過濾片避免流體中雜質顆粒損壞轉子，新型流量計具訊號通訊功能，可與流量電腦直接整合，此款流量計規格如圖 1 所示。

DN	20 25 32 32 40 50 65 80 100										40 50 80 100 100 150										50 80 100 150 200 250 300 400 500										50 80 100 150 200 250 300 400									
	Maximum Pressure (bar)										16 100 100 100 100 19.3										100 100 100 100 100 100 100 100										40 100 100 100 100 100 100 100									
G size	Max. flow m ³ /h																														Max. flow m ³ /h									
G1.6	2.5																														2.5									
G2.5	4																														4									
G4	6																														6									
G6	10																														10									
G10	16																														16									
G16	25																														25									
G25	40																														40									
G40	65																														65									
G65	100																														100									
G100	160																														160									
G160	250																														250									
G250	400																														400									
G400	650																														650									
G650	1000																														1000									
G1000	1600																														1600									
G1600	2500																														2500									
G2500	4000																														4000									
G4000	6500																														6500									
G6500	10000																														10000									

Type	Residential diaphragm meters	Commercial and Industrial diaphragm meters	Rotary meter type DELTA	Turbine meter type Flux 2000TZ	Quantometer type MZ
EC Rangeability	160:1	160:1	20:1	20:1	-
Max. approved rangeability	160:1	160:1	50:1 / 100:1 / 160:1 / 200:1	30:1 (50:1 in HPI)	16:1
Calibration period (Germany)	8 years	16 years (GIO 12 years)	16 years	12 years (8 years without oil pump)	No regulations
Maintenance	Maintenance free	Maintenance free	Changing of oil / 5 years	Maintenance free / Oil pump as option	Maintenance free / Oil pump as option
Mounting position	Horizontal	Horizontal	Horizontal / Vertical	Horizontal / Vertical	Horizontal / Vertical
Pressure range	PN 01 / PN 0.5	PN 01 / PN 1	PN10/PN10 - ANSI/ISO/ANSI600	PN10/PN10 - ANSI/ISO/ANSI600	PN10/PN10 - ANSI/ISO/ANSI600
High temperature loading (HTL)	PN 01	PN 01	PN5	PN5	PN5
Inlet straight pipe	0 DN	0 DN	0 DN	2 DN	3 DN
Outlet straight pipe	0 DN	0 DN	0 DN	0 DN	0 DN
LF transmitter	1 x LF (Retrofittable)	1 LF (Retrofittable)	2 LF + 1 AT (Standard) Cycle sensor (Option)	2 LF + 1 AT (Standard) Cycle sensor (Option)	2 LF + 1 AT (Option) Cycle sensor (Option)
MF transmitter	-	-	1 MF (Option)	1 MF (Option)	1 MF (Option)
HF transmitter	-	-	1 HF (Option)	3 HF (Option)	1 HF (Option)
Error tunnel Q _{max} /Q _t	+/- 1.5%	+/- 1.5%	+/- 1% (Option: +/- 0.5%)	+/- 1% (Option: +/- 0.5%)	+/- 1.5%
Error tunnel Q _t /Q _{min}	+/- 3%	+/- 3%	+/- 2% (Option: +/- 1%)	+/- 2% (Option: +/- 1%)	+/- 1.5%

圖 1、Itron 生產之各型流量計

表 2 S-Flow 規格

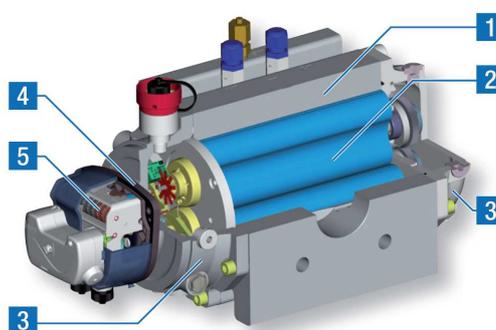
Flow rate	from 0.25 m ³ /h to 1000 m ³ /h, G10 to G650
Nominal diameters	DN 25 to DN 150 (1" to 6")
Maximum working pressure	up to 100 bar depending on the body material and flanging
Body materials	aluminium, ductile iron or steel. Compliant with the Pressure Equipment Directive 97/23/EC
Temperature range	PED: -30° C to +60° C MID: -25° C to +55° C Storage temperature: -40° C to +70° C
Metrology	In accordance with the EC and OIML, large rangeability up to 1:200, depending on the G-size Approvals EC (PTB): 1.33-3271.3-ROM-E11. Large rangeability (PTB): 1.33-3271.3-ROM-N05 Compliant with the Measuring Instrument Directive 04/22/EC
Intrinsic safety approval	L.C.I.E. 06 ATEX 6031 X - Compliant with the Directive 94/9/EC.

S-Flow 外觀與示意圖如圖 2 所示，主要構成有五部分：

- (1)量測本體
- (2)2 組三葉片式轉子 chamber
- (3)2 個 Lubricant 外蓋
- (4)一組 Magnetic couple 用於傳送轉子運轉一次的脈衝數給 Totaliser
- (5)一組 Totaliser 用於累加脈衝數



(a)外觀



(b)結構示意圖

圖 2、S-Flow 外觀圖與結構示意圖

因此轉子流量計特別適合用於作於傳遞或工作標準件，且其流率器差曲線呈一漂亮線性線，因此在器差迴歸線的建立有相當不錯成果，傳統型轉子流量計運作原理如圖 3 所示，轉子葉片呈” 8” 字型(雙 chambers)，二顆轉子在 0° 及 90° 時二轉子呈垂直狀，利用每一轉動周期所排出的氣體體積為一單位進行計量，其葉片運行速度並非為常數，而是接近 sinusoidal 的曲線曲線(如圖 4 所示)，但並不完全像 sinusoidal，約有 10% 的差異，傳統之” 8” 字型轉子流量計由於葉片易受到壓力變化、噪音及共

振等因素影響，會產生雜訊干擾，葉片轉動時會有壓縮及釋放效應產生，進而影響計量精度，新款的葉片屬於 3chambers 型(圖 5)，在克服雜訊干擾時有較佳效果，由測試結果觀察，其穩定性較佳，速度運算週期變為 60° 曲線線更接近 sinusoidal 形狀(如圖 6 所示)，運行過程中速度更連續，變化較 smooth，體積脈衝計量時受到外在的干擾亦更小，校正結果如圖 7 所示，在 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 流率以上曲線相當漂亮，呈現一平行曲線，變動約 $\pm 0.1\%$ 而已，透過轉子之齒輪更換，可降低器差達到客戶所要求。

轉子流量計屬於機械型流量計，因此潤滑劑添加為必須，但經詢問 Itron 工程師，若流量計只用於傳遞或工作標準件，不像工作件長時間運轉，則不須加油或僅須加少量潤滑劑即可，且流量計在拆裝運行過程中須避免潤滑劑流入轉子葉片中造成污染，影響葉片轉動效果。

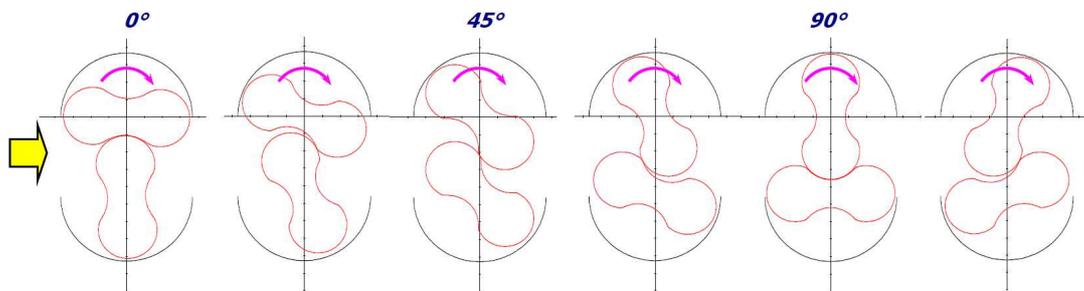


圖 3、雙轉子葉片運行示意圖

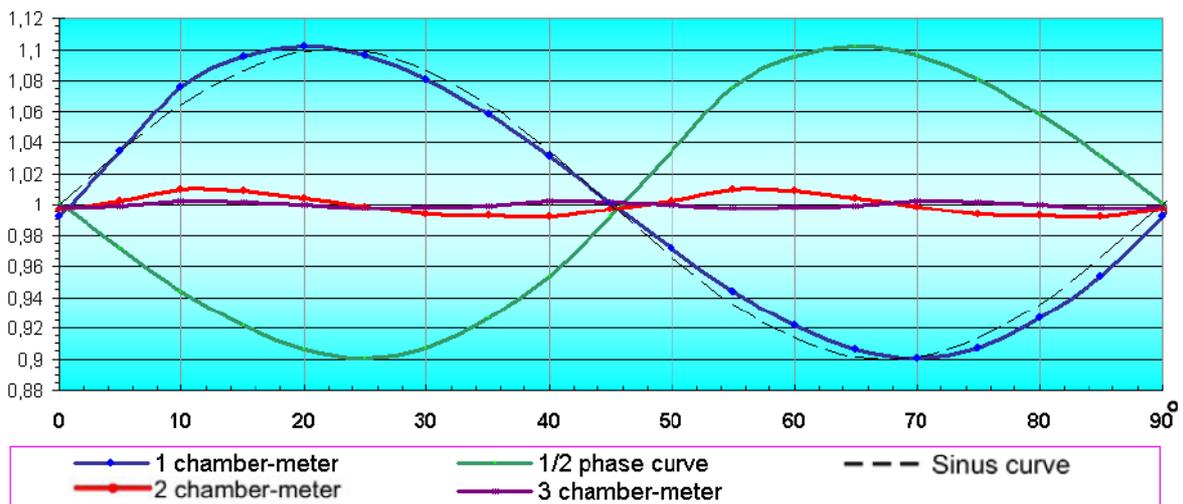


圖 4、雙轉子葉片速度分布圖

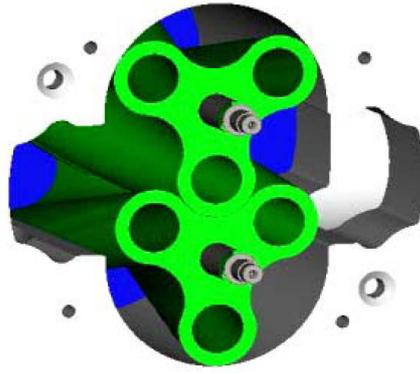


圖 5、3chamber 型轉子葉片示意圖

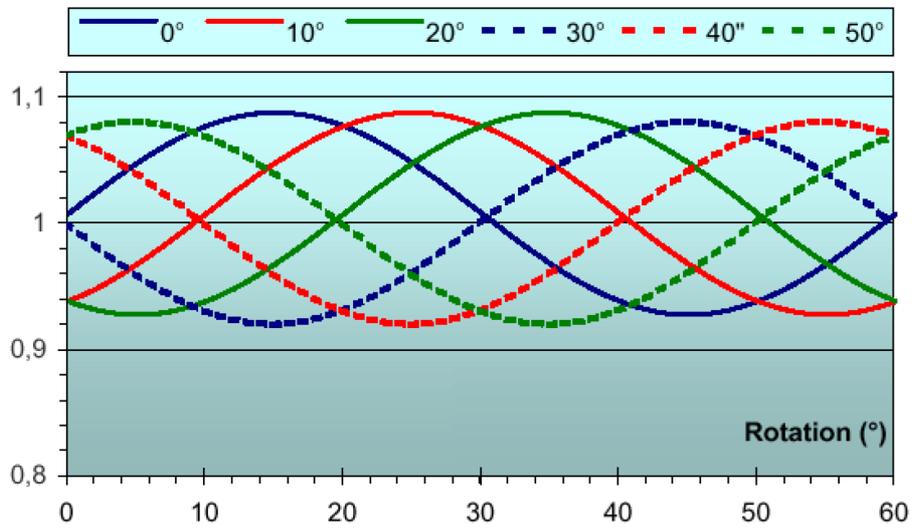


圖 6、3chamber 型轉子葉片運行速度圖

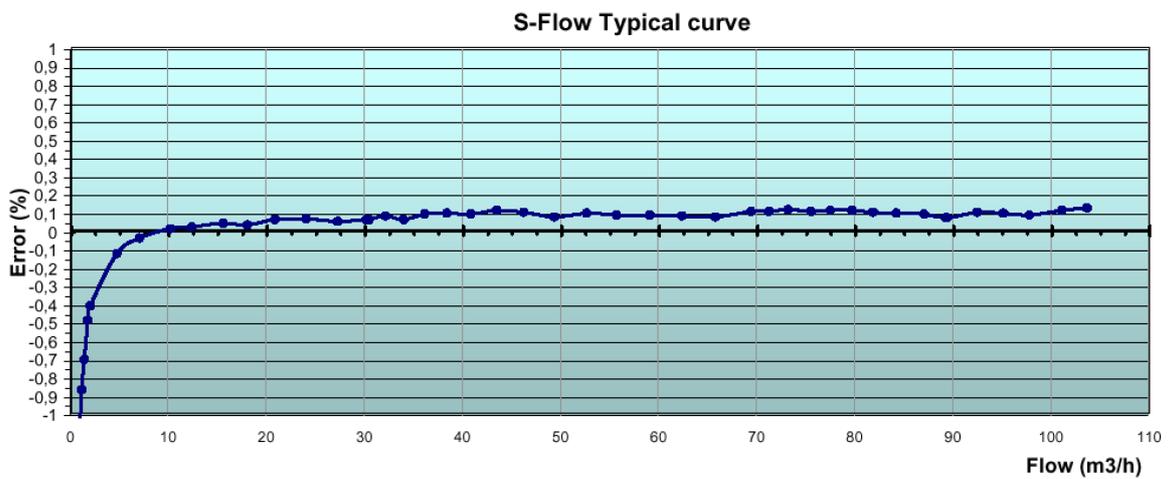


圖 7、S-Flow 流量計校正結果

(二) S-Flow 轉子流量計校正

本所向 Itron 公司採購 8 部二吋轉子式流量計，並要求出 PTB 校正報告，此次校正人員為 Itron 工程師，分析員則為 PTB Mr. Jarosch，其於 Itron 校正實驗室監督校正工作，校正壓力分別為常壓(1 atm)及高壓(10 bar)，分別於二處實驗室校正，Itron 校正實驗室經德國國家認證機構 GA 核可，其工作標準件(溫度計、壓力計、流量計)追溯至國家實驗室 PTB，量測流體為壓縮或常壓之空氣，量測不確定度為擴充不確定度(涵蓋因子)根據”Guide to the expression of uncertainty in measurement(1995)”及 ISO 5168 “Measurement of fluid flow-Procedures for the evaluation of uncertainties”，其量測可信賴度為 95%，整體量測不確定度為 base uncertainty U_{base} 及 Repeatability uncertainty U_{rep} 平方和開根號，Repeatability uncertainty 依據 ISO5168 AnnexD，利用 PTB 標準件的多次量測結果的標準差計算，各流率點利用 on-site protocols 迴歸方式採 -2~2 次方迴歸，即 $f(Q) = A/Q^2 + B/Q + C + EQ + EQ^2$ 進行迴歸。

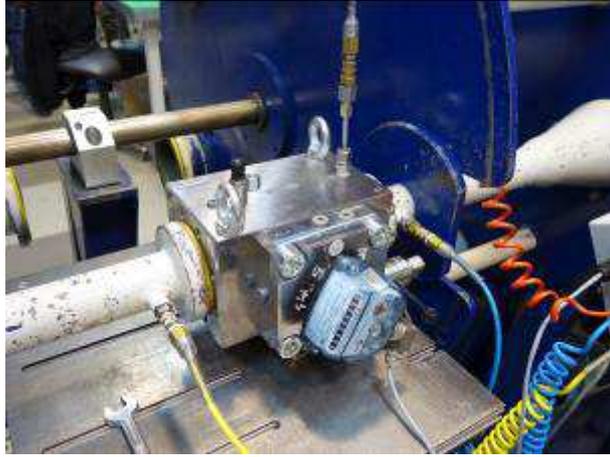
(1)Itron 常壓校正系統

常壓校正系統建置於一般實驗室中，利用抽風機抽取實驗室的空氣作為氣流源，不抽取室外之空氣，此法之優點為室內空氣溫度變化不大，且成份穩定，可提供一穩定之氣源，進氣口端有一過濾器圖 8(d)，防止空氣中異物或顆粒跑入校正管路中，待校件分為大尺寸及小尺寸區，小尺寸待校件區有一圓型轉盤圖 8(b)，可依據待校件尺寸選擇適當管徑安裝，流量計安裝時不鎖法蘭螺絲，而是以擠壓方式將待校件固定於待校位置(如圖 8(a)所示)，此方法可達到快速安裝節省安裝工時，且因屬常壓校正，故不會有氣體外洩之危險，當操作人員作完每次校正後，會根據客戶對器差的要求調整流量計，其調整方式為參考校正器差結果，更換不同公差之轉動小齒輪，接著再校正一次，並查看校正結果是否與預期一致。本所新購之二吋轉子流量計其序號為 3401596834-3401596841，常壓校正並沒有要求器差範圍，校正結果如圖 9 所示，在高流段除了 3401596835 器差較大，約 0.35%外(可改變 k 值降低其器差)，其餘各流量計之器差皆在±0.2%以內。

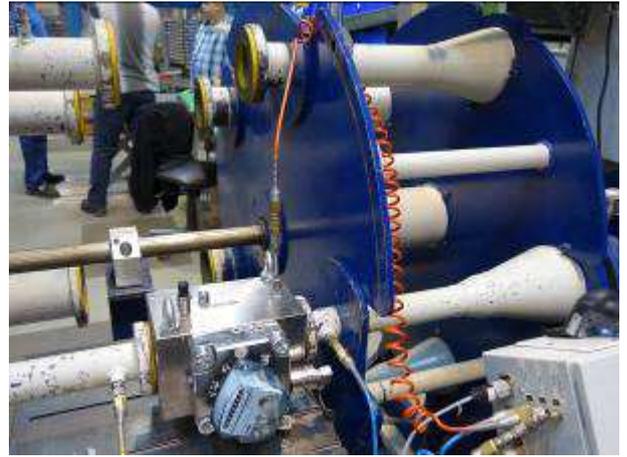
(1)Itron 高壓校正系統

高壓校正系統位於 Itron 工廠地下一樓，可校流率點為 1~2000m³/h，校正壓力可至 25bar，可校尺寸最大至 8”，現場示意圖如圖 10 所示，其標準件選用並沒有限定型式，而是依各型式流量計之特色於不同流率下

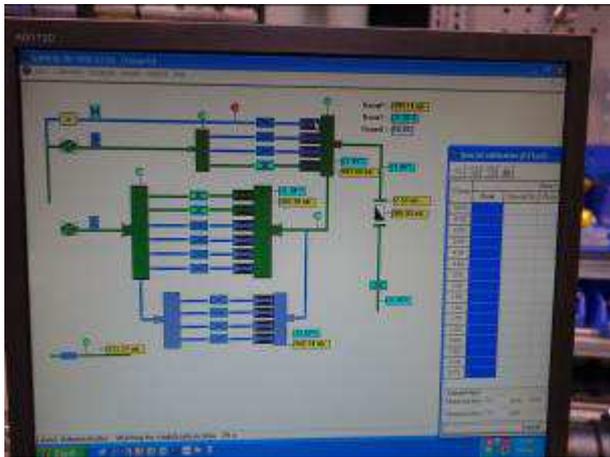
選用不同標準件如圖 10(a)所示，可為渦輪、轉子或 USM 流量計，例如轉子適用於低壓低流環境，渦輪適用於高低壓低流，而 USM 則適合於高壓高流，選用不同的標準件執行校正，除可降低量測不確定度外，亦增加校正系統穩定性及重複性。標準件的追溯則送至 PTB 校正，關於壓力效應的影響，則利用雷諾數進行修正，於 PTB 校正標準件時校正多個壓力點，再比較各壓力點於同雷諾數下，其器差值是否接近，若接近器差變動不大，則可選用其為標準件，於高壓下執行校正任務。本所 8 台轉子流量計之校正報告如附件一所示，各流率點之器差須小於 0.25%，重複性亦要小於 0.07%，經調校後，校正結果皆達到規範要求。



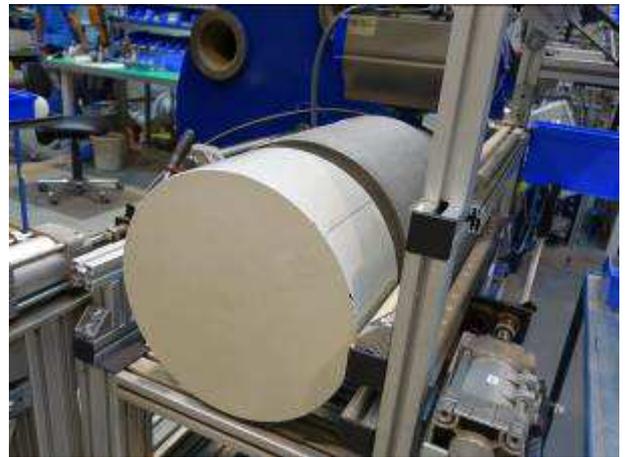
(a) 二吋轉子待校流量計



(b) 待校區管件轉盤



(c) 圖控軟體



(d) 進氣源過濾器



(d) 大尺寸流量計待校區

圖 8、常壓校正系統圖

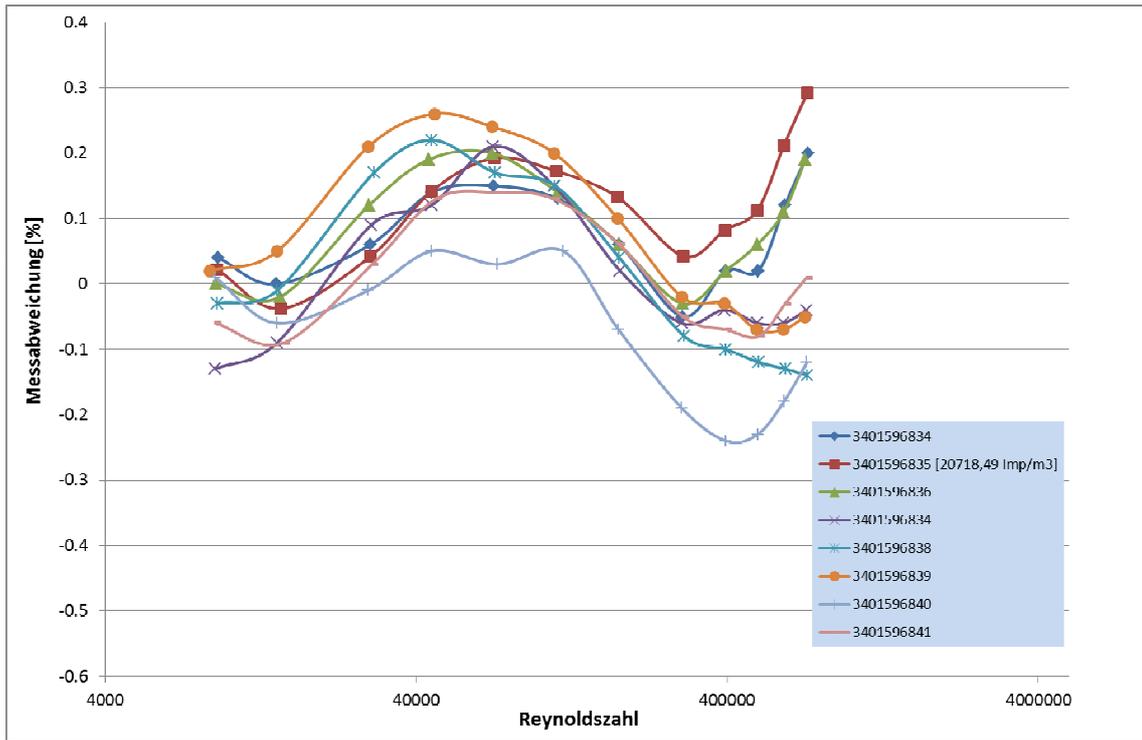


圖 9、八部轉子流量計校正結果



(a)標準件區



(b)校正管線區

圖 10、高壓校正系統圖

三. Pigsar 參訪

此次至 Pigsar 研討德國國家高壓氣體流量標準設備，係透過 Itron 公司安排得以參訪 Pigsar 校正實驗室。由現場負責人 Dr. Vieth 依規定程序讓我們閱讀廠區安全規範並簽名以示負責，同時提供進入現場所需之安全帽、護目鏡與安全鞋後，即由 Dr. Vieth 全程帶領和解說。位於 Dorsten 的 Pigsar 係德國燃氣公司 Vier Gas 旗下公司亦屬於 Open Grid Europe 整合管路系統的一部分，被德國官方認可為國家高壓氣體流量標準設備，並於 1999 年五月起在 PTB 的監督下負責流經之高壓天然氣其標準單位體積量之維持與傳遞。Pigsar 的校正業務量相當大，由 PTB 簽署其校正報告，並代表德國參與 BIPM 舉辦之高壓氣體流量標準的國際比對。當進行流量計校正時，Pigsar 的校正設備就扮演壓力調節站的角色，圖 11 為外部天然氣管線供輸至 Pigsar 校正實驗室的管線圖，經過 Pigsar 依校正需求調壓後，待校正完再將天然氣輸送給下游的配氣站。

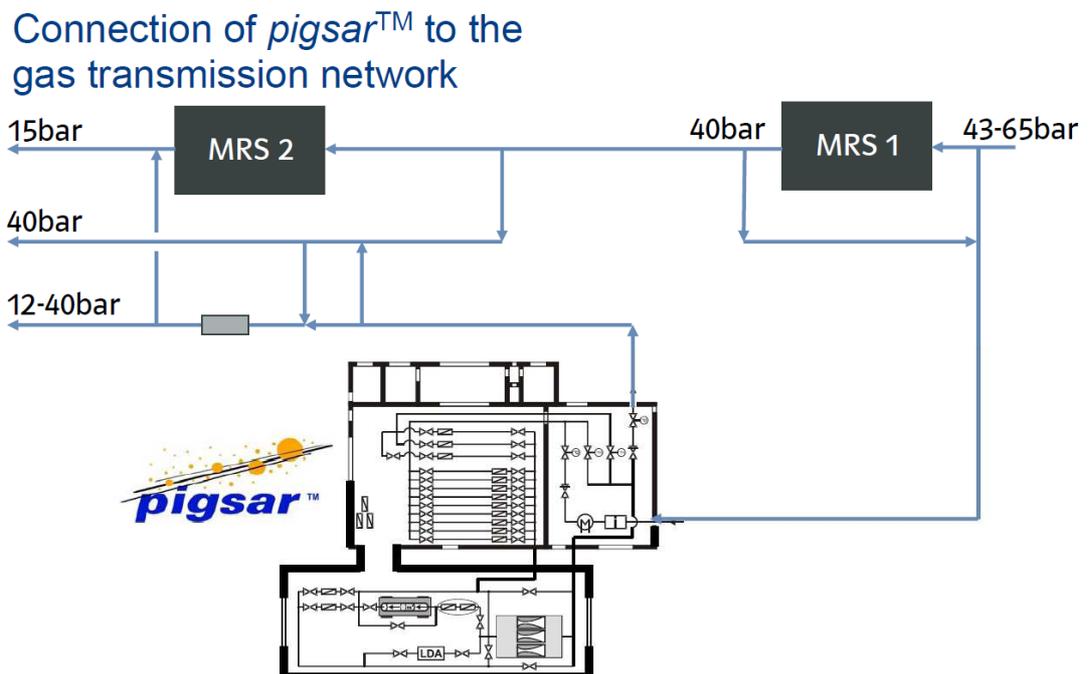


圖 11、Pigsar 之天然氣管線供輸示意圖

由於 Pigsar 位於 Ruhr 地區的北部，流經其校正設備的天然氣量相當大，是處於高壓的操作環境，相較於下游配氣站通常操作於壓力較低的條件，使得 Pigsar 在校正流量計時可允許的壓力操作範圍相當廣，為 16 bar 至 50 bar。由於 Pigsar 的校正設備處於封閉的空間，對於裝置效應及溫度/壓力的變化都有進行控制，因此具備相當理想的校正環境。校正設備由九具工作標準件組成，分別為四部 G1000 渦輪式流量計、四部 G250 渦輪式流量計與一台低脈波旋轉活塞式流量計(IRPP)，其設備環路示意圖如圖 12 所示，分為一般校正區及標準件校正區，二區皆採實流校正，實驗室經過德國 DAkkS 認證機構依 ISO/IEC 17025 認證，實驗室編號為 GH45 一年的校正量約為 900 部左右，數量相當多，校正區現場照片則參見圖 13。

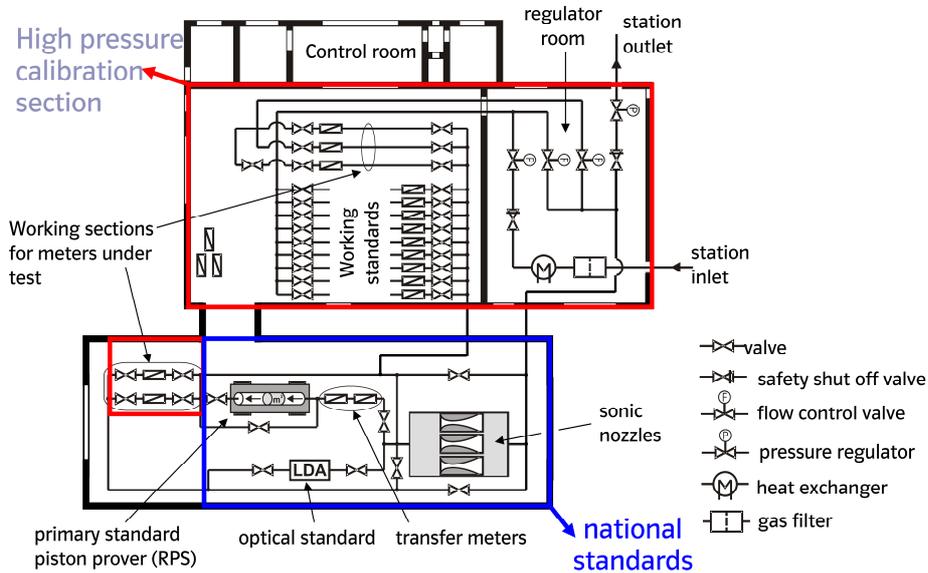


圖 12、Pigsar 設備環路示意圖

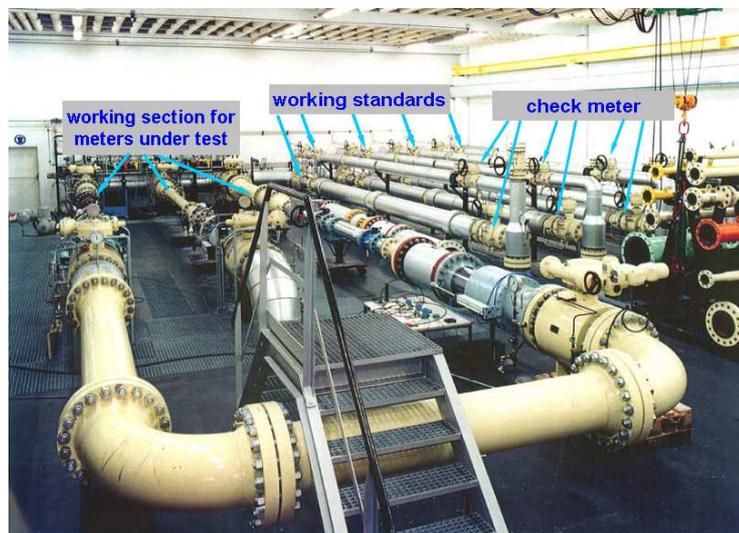


圖 13、Pigsar 現場設備環路圖

(一)一般校正

Pigsar 的設備與能量校正能量如下：

- 原級標準：高壓活塞式校正器 (High Pressure Piston Prover, HPPP)；
- 參考標準件：1 部 DN100 渦輪式流量計(G250)
- 傳遞標準件：1 部 DN150 渦輪式流量計(G1000)
- 工作標準件：並聯之 4 部 DN100 渦輪式流量計(G250)與 4 部 DN150 渦輪式流量計 G1000)以及低流量使用之 1 部旋轉活塞式流量計(Rotary Piston Meter, G100)；
 - pressure range: 15 bar 至 50 bar;
 - temperature range: 8 °C 至 20 °C，通常控制於 15 °C；
 - flow range: 8 m³/h 至 6500 m³/h;
 - uncertainty (k = 2): 0.13~0.16 % (after harmonisation);
 - uncertainty of density: 0.1 %;
 - size of meters under test: DN80 至 DN400 (法蘭規格為 ANSI 600 lb)；

校正設備使用之天然氣係直接排放至下游管線，壓力約為 16 bar，因此設備之最低工作壓力約為 16 bar，但配合特殊研究狀況可降至 5 bar 操作，不過僅限於小流量，此時係將低壓天然氣排放至緩衝管線，在輸入高壓天然氣以增壓至 16 bar 以上，然後再排放至下游管線。校正設備雖然限定於穩定之壓力、溫度和流量下進行流量校正，但為能即時量測管線流體之壓力、溫度和流量，其傳訊器仍使用類比訊號(4 mA 至 20 mA 之電流訊號) 傳輸至訊號擷取組件，經轉換後再傳至監控電腦，而非使用傳輸速度較慢之 HART 或 Modbus 等等數位資料封包傳輸方式。一般校正區設備之流量計工作件及查核件分布如圖 16 所示，標準件為 9 部 DN100 及 DN200 渦輪流量計，在各工作標準件上游端增設查核件，其中 7 部為 SICK 公司之 4 音軌型超音波式流量計，型號為 FLOWSIC600；另外 1 部 DN100 渦輪式流量計則使用 Itron 公司之旋轉式流量計(Rotary Meter)，型號為 Delta 但為特製品，此一流量計不會產生脈動流，而且於低流率仍具有良好之量測性能。旋轉活塞式流量計則使用並聯之 2 部 Itron 公司轉子式流量計作為查核件，型號為 Delta 但為特製品，口徑較小，可於更低流率操作(圖 14)，轉子式流量計使用狀況良好，除了流量計本身特性計會產生輕微脈動流外，至今並未出現嚴重故障情況。圖 15 為 DN150 及 DN400 傳遞標準件長期器差曲線，流量計的器差變動皆在±0.2%左右，可說維護的相當良好。



圖 14、轉子式流量計(Rotary Meter)

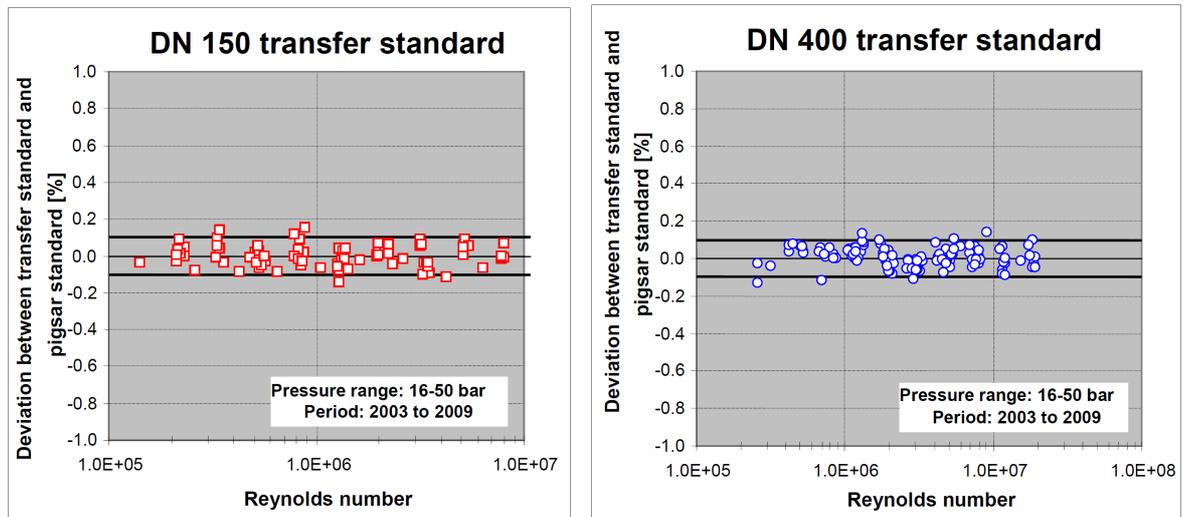


圖 15、傳遞標準件長期穩定性

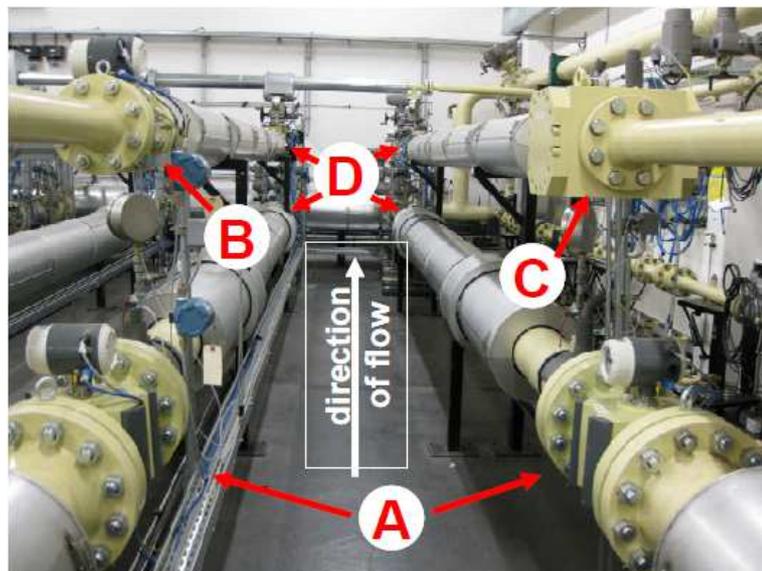


圖 16、標準件及查核件安置圖，A、4 部 DN200USM(查核件)；B、3 部 DN100USM(查核件)；C、1 部 DN100RPM(查核件)；D、9 部 DN100+DN200 GTM(標準件)

校正設備之監控電腦連線至 PTB，PTB 藉由遠端監控程式得以全程監控 Pigsar 之流量計校正數據。Pigsar 執行流量校正係於同一流率重複執行 3 次，然後再變更工作流率，使用此一方式係考量操作費用較為節省。單次流量校正之數據擷取時間為 60 秒以上，渦輪式流量計因重複性較佳而可採用較短之數據擷取時間，超音波式流量計則因重複性稍差而通常會要求為 120 秒以上。Pigsar 目前每年之校正服務量約為 800 部，最多可達 1000 部，主要為渦輪式流量計和超音波式流量計，大口徑流量計則以超音波式流量計佔多數。經查詢 Pigsar 所提供資料得知，Pigsar 自 1993 年開始提供校正服務至今，完成校正並由 PTB 具名發出之報告數量已達 10000 份。

(二)標準件追溯

Pigsar 目前標的追溯採 high pressure piston prover (HPPP)系統，可追溯至長度單位，透過 HPPP 校正傳遞標準件(G250)，再擴大至工作標準件(G1000)，傳遞鍊如圖 17 所示。Pigsar 之原級標準 (HPPP)以及新建光學式原級流量標準皆屬於 PTB 之財產，限定須由 PTB 使用和維護，PTB 於 Pigsar 設置其自有的監控室，進行資料擷取與電腦連線，PTB 藉由遠端監控程式得以全程監控原級標準之量測數據，可無須至 Pigsar 工作。圖 18 為 Pigsar 之 HPPP，圖 19 為其工作原理示意圖。

PTB 為降低較大口徑流量計因追溯鏈較長所導致之不確定度，於 Pigsar 建置一套全新光學式原級流量標準，係藉由雷射都卜勒風速量測儀 (Laser Doppler Anemometry, LDA)量測一只數位最佳化設計之噴嘴的出口斷面風速，可直接追溯至 SI 單位制的長度和時間標準。此一標準件設定最大工作流率可達 1600 m³/h，花費 2 年時間完成研製，持續測試至今達 6 年，遭遇之主要問題在於 LDA 於邊界層所測得速度，因受到邊界紊流 (厚度約噴嘴喉部半徑的 0.5 %)的影響而與理論值相差過大，目前在 PTB 所進行之研究已經到了將問題排除的最後階段。

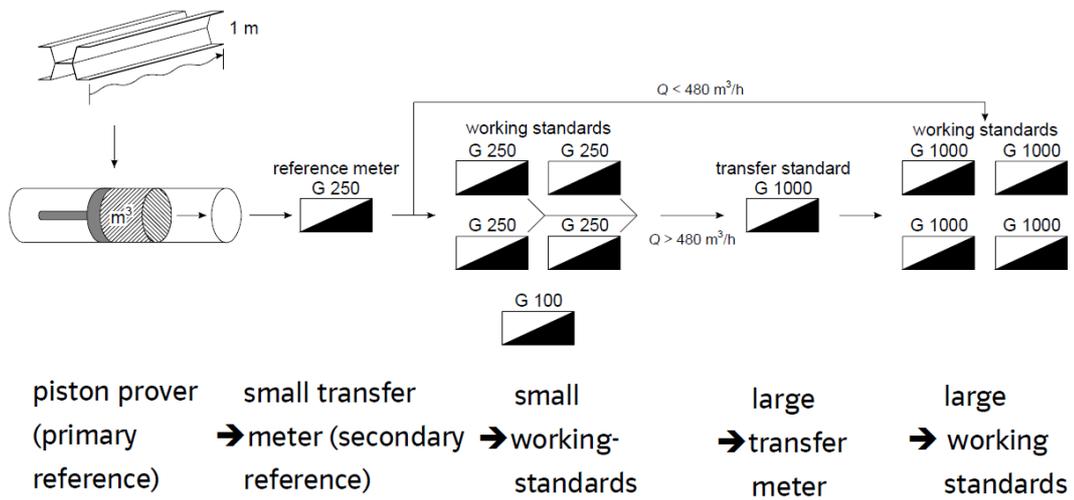


圖 17、Pigsar 標準追溯傳遞鍊



圖 18、high pressure piston prover (HPPP) with reference

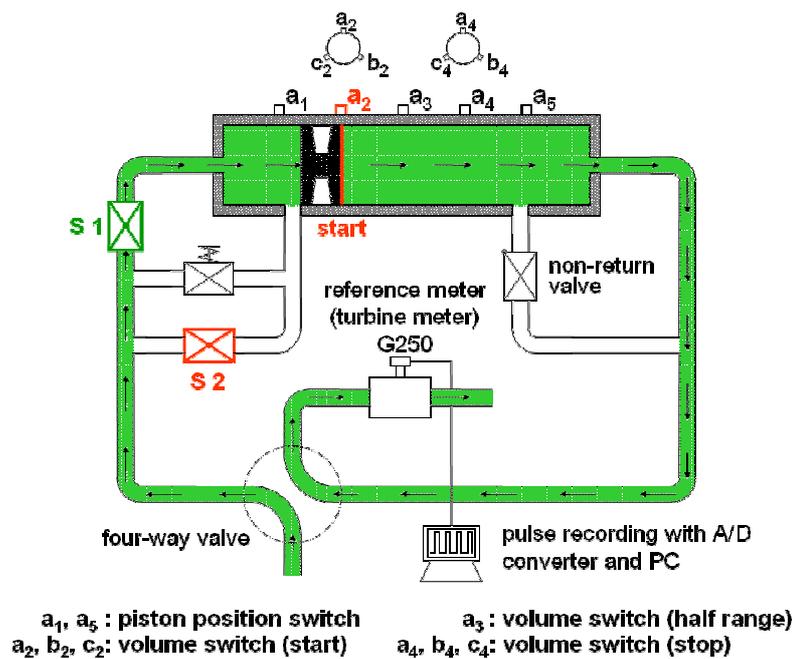


圖 19、HPPP 工作原理示意圖

荷蘭 VSL 沿襲 PTB 的 HPPP 技術原理，並在相關廠商的協助下，於其 EuroLoop 實驗室也建置一套更大口徑的 HPPP，然而因為活塞運行阻力過大之問題無法克服而一直無法順利使用。目前藉由廠商的技術協助，改使用外部油壓推動活塞方式解決活塞運行阻力過大問題，此一 HPPP 已經可以提供校正服務。目前 PTB 和 Pigsar 具有 gentle relationship，雙方合作而互不收費，PTB 協助 Pigsar 的氣體流量校正設備得以追溯至原級標準，Pigsar 協助 PTB 執行國家所需之高壓氣體流量校正工作。

四. PTB 參訪

PTB 位於德國東北部布朗斯維格(Braunschweig)市，其氣體計量單位主要負責德國計量標準傳遞，為國際 BIPM/CIPM 一員，參與國際間能量比對，其主要任為提供國家原級校正標準維持、傳遞追溯至二級實驗室、進行量測技術的開發與改善，尤其於標準件設備的開發，依據 legal metrology 進行 Performing type 氣體流量計的驗證，提供流量計校正服務 (Deutscher Kalibrierdienst DKD)，此行由氣體流量部門 Dr. Mickan 及 Dr. Schmidt 的安排，帶領我參訪常壓氣體流量標準和風速標準，亦參訪 PTB 常壓氣體流量標準、雷射都卜勒風速標準與量測研究設備、水流量標準，並詳細解說 PTB 常壓氣體流量標準的各項設備以及工作執行狀況，也特別提供 PTB 歷年來於常壓氣體流量量測研究的論文電子檔供我參考。在流量校正追溯過程中，原級的追溯並不容易達成，由於流量不屬於七個基本單位，由長度及時間所組合而成，且氣體流量受到溫度、壓力及流體本身特性影響，直接量測到流率不容易達成，須以間接方法量測(如超音波法、體積法等)當流率愈大越難量測，大尺寸流量計的校正，須透過小尺寸傳遞件追溯，將數台並聯才能量測大尺寸流量計，目前國際上有四款原級方式的追溯，分別為體積標準型(如 bell provers, piston provers)；direct gravimetrics(weight tank)；constant volume (pVTt)法，及 indirect gravimetric standards(weighing of liquids displaced by the flowing gas volume)四款，此四種方法其不確定度值(u)介於 0.05~0.1%間，大流率時 u 會增加，早期 PTB 從事體積標準型追溯法，追溯備「長度」單位近年來從事利用光學方法量測流體流率，可直接追溯至「長度」原級單位。以下針對 PTB 的 Piston Bell-Piston Prover 及高壓 LDV 量測方法介紹。

(一) 常壓校正系統 Bell-Piston Prover

PTB 的常壓氣體流量標準係以鐘型校正器(Bell Prover)與活塞管式校正器(Piston Prover)為原級標準，追溯至長度標準，而非採用稱重法並追溯

至質量標準。1m³ bell prover 置放於控制極為良好的房間內，如圖 20 所示。操作時只允許一人在房間內並限制照明，以盡量避免房間溫度因人體和燈具散熱而不穩定。此一鐘型校正器剛於去年完成重製，本體並未更換，主要是更新底部儲油部位，可預防異常漏油而可能造成之房間污染狀況。Bell 之容積是透過量測其不同高度不同垂直面上的內徑值，總共進行 1860 次的量測而計算得到，其不確定度可達到 0.005 % 甚至更低。Bell 的高度則是透過兩支玻璃尺來決定，解析度為 0.01 mm。圖 20 左手邊中浸置於密封油中的補償塊(Counterbalance)其截面積與 bell 表面積相同，以避免液位於量測過程中發生變動，此補償塊可使 bell 於操作過程中其內部壓力變動維持在±1 Pa。另一個補償塊則是用於 bell 的浮力補償。此 bell prover 之擴充不確定度低於 0.06 %，並具有優於 0.03 % 之再現性。

PTB 的 1m³ bell prover 內部頂端安裝風扇，以外部馬達吸磁帶動。於低流率操作時，由於校正時間長，有時會到達 5 分鐘之久，必須啟動風扇以降低校正器內部氣體溫度的分層問題，目前確認溫度差異可在 0.05 °C 以內，於高流率操作時由於校正時間短，通常為 60 秒左右，則無須啟動風扇。Dr. Mickan 認為風扇所造成的校正器液位擾動對於校正結果的影響可因低流率操作的校正時間甚長而忽略。

PTB 於 2012 年完成複製一套相同的鐘型校正器給上海市計量測試研究院(SIMT)，擴充不確定度為 0.06 %，並完成相關比對測試，兩者約有 0.1 % 的差異，Dr. Mickan 研判是鐘型校正器液位調整偏差所導致。使用音速噴嘴作為工作標準件之常壓氣體流量標準設備，如圖 21 所示，原先使用 16 只音速噴嘴，目前增設 5 只小流率範圍之噴嘴，如圖 22 所示，設備之校正流率範圍為 0.03 m³/h 至 2100 m³/h。各音速噴嘴分別安裝於不同管路，其前後安裝開關閥以供選用控制之用，並可作為噴嘴管件滲漏偵測時之管路阻斷。測試時必須注意噴嘴密封之滲漏檢測；除此之外，將流率差異不大之噴嘴安裝於同一艙體較無問題，其未量測體積(inventory volume)的評估誤差會較小，若噴嘴流率差異過大，則可能導致較大的未量測體積評估誤差。常壓氣體流量標準設備目前使用不少 Itron 公司特製的旋轉式流量計作為工作標準件，型號為 Delta，此型流量計亦使用於 Pigsar，使用時不會導致脈動流，Dr. Mickan 對此一流量計評價甚高，亦推薦本所購買此款流量計。

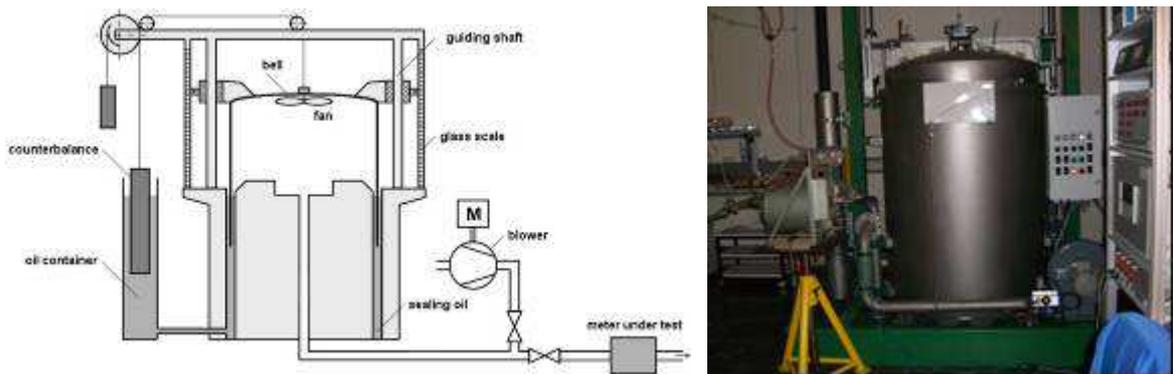


圖 20、PTB 的 bell prover



圖 21、PTB 之 gas meter test rig with critical nozzles



圖 22、PTB 增設之 5 只小流率範圍噴嘴



圖 23、恆溫測試箱

常壓氣體流量標準設備負責執行氣量計型式認證之測試工作，因此建置一套恆溫測試箱，溫控範圍為 -40°C 至 80°C ，氣體導管以金屬管內層抽真空包覆的方式進行絕熱，如圖 23 所示。氣量計環境溫度測試係採實流測試(我國現行之技術規範並不要求實流測試)，配合低溫測試而須將供應之空氣露點降至 -60°C 。常壓氣體流量標準設備目前配合空壓業界需求，建置一套壓縮氣體流量校正設備，工作壓力為 8 bar 以下，使用 Itron 公司特製的旋轉式流量計作為工作標準件。受測件置於校正設備之上游管路並輸入壓縮空氣，經由減壓閥降壓至常壓，再與工作標準件串聯，然後將空氣排放至大氣。常壓氣體流量標準設備目前建置一套高溫氣體流量校正設備，通過被校件的空氣溫度可達 500°C ，係配合燃燒塔煙道氣體流量量測之超音波式流量計的校正需求，使用 Itron 公司型號為 Delta 的旋轉式流量計作為工作標準件。工作標準件置於上游管路並輸入室溫空氣，經由高溫加熱器增溫至 500°C ，再與受測件串聯，然後將空氣排放至室外。

PTB 目前有兩套活塞管式校正器，校正流率範圍為 $0.015\text{ m}^3/\text{h}$ 至 $3.5\text{ m}^3/\text{h}$ ，體積量分別為 20 dm^3 與 60 dm^3 ，標準量測不確定度低於 0.05% 。一套是傳統常見的活塞管式校正器，如圖 24 所示，另一套則是新的雙活塞管式校正器，其結構示意圖如圖 25 所示。前者使用三支直徑分別為 19 mm 、 44 mm 與 144 mm ，而長度皆為 930 mm 的玻璃管。玻璃管內徑的擴充不確定度為 $3\text{ }\mu\text{m}$ ，活塞與玻璃管間以水銀作為密封，每一支玻璃管上方各架設一台 Interferometer optics 來量測活塞的位移行程。使用 Interferometer 的優點為活塞位移行程之量測不確定度為 $3\text{ }\mu\text{m}$ ($k=2$)，而且可自行決定校正時的起點與終點位置。量測時間依流率的不同最短為 0.5 分鐘，最長則可達到 10 分鐘之久，可量測的流率範圍為 $0.2\text{ m}^3/\text{h}$ 至 $200\text{ m}^3/\text{h}$ 。



圖 24、Interferometric piston prover system at PTB

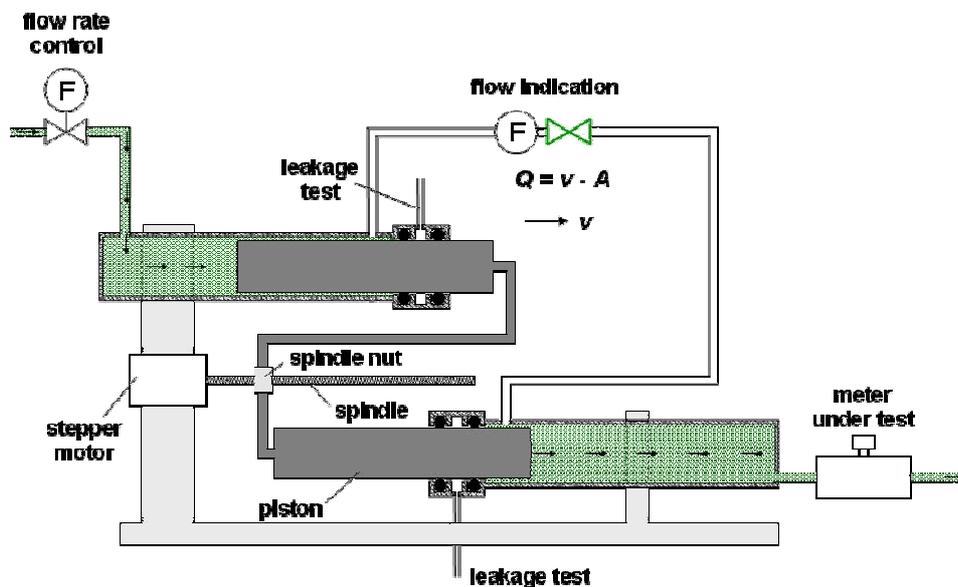


圖 25、PTB 之雙活塞管式校正器結構示意圖

因應活塞管式校正器於氣體流入之際會有流率不穩定之狀況，就反應時間較長之流量計的校正而言，會因此導致量測誤差。PTB 目前已經完成雙活塞管式校正器的研製，可校正的流量計包括層流式流量計(LFE)、噴嘴、皂膜式流量計(soap film devices)、熱質式流量計(MFC)與轉子式流量計(rotameter)等。雙活塞管式校正器的工作原理如下：

- (1) 兩顆活塞以機械結構連接以即時反應正向與逆向流動的流體行為，當流體正向流動時，圓柱/活塞管內的氣體體積會持續降低，而逆向流動時圓柱/活塞內的氣體體積則會持續增加，通過圓柱/活塞管的氣體體積量即可透過活塞的位移量與進出圓柱管的活塞之外徑來求得。

- (2) 活塞直徑小於圓柱管。
- (3) at both ends of the cylinders flow connection are foreseen in order to scavenge the cylinder before calibration and to avoid temperature layers
- (4) 兩支圓柱管的末端與活塞完全密合，並以洩漏測試確認密封良好。
- (5) 活塞的移動是透過 micro step stepping motor 與 precision spindle 來執行，確保其移動是以相當等速的方式進行。
- (6) 兩隻圓柱/活塞管的管線間插入一台 flow detector。
- (7) 雙活塞管式校正器可作為 flow comparator，藉由控制上游活塞的移動速度，而下游活塞亦會以相同速度移動，再透過偵測兩支圓柱/活塞管管線間的 zero flow 來達到。

雙活塞管式校正器的詳細規格如下：

- flow range: $Q_{\min} = 5\text{ml/h}$, $Q_{\max} = 5\text{ l/h}$
- Uncertainty of flow rate: $U < 0.05\%$ ($k = 2$)
- piston diameter: $d = 16\text{ mm}$
- Maximum displaced Volume: $V = 44\text{ ml}$
- Uncertainty of piston diameter: $U = 0.5\ \mu\text{ m}$ ($k = 2$)
- usable piston length: $l = 220\text{ mm}$
- measuring time: $t > 25\text{ s}$
- spindle rise: 1 mm/rotation
- steps per rotation of stepping motor: 10000
- no change of flow rate and the thermodynamic condition at the meter under test happened during the whole calibration
- direct calibration of nozzles and flow stabilizing devices possible

常壓氣體流量標準設備的電腦監控裝置的自動化並程度不高，監控電腦透過資料擷取組件進行訊號轉換和傳輸，相關動力設備與閥件之控制則藉由機械按鈕操作。Dr. Mickan 表示其設備之校正與測試種類相當多，自動化操作之需求不高，因此對自動化並不要求。

(二) 雷射都卜勒風速標準與量測研究設備研討

PTB 在 LDA 的量測研究上有極為堅實的基礎，其於 8 年前開始發展全新光學式原級流量標準，係藉由 LDA 量測一只數位最佳化設計之噴嘴的出口斷面風速，其外觀如圖 26 所示，可直接追溯至 SI 單位制的長度和時間標準。PTB 亦於實驗室建置一套常壓光學式原級流量標準，在於取代現有之鐘型校正器與活塞管式校正器，因為 LDA 相較於鐘型校正器與活塞管式校正器藉由尺寸量測達成追溯，具有較為簡易的標準追溯操作性，圖 27 為光學式原級流量標準系統示意圖，溫度計及壓力計由 Pigsar 提供校正，利用 Diffuser 及標準噴嘴控制氣源量，其

標準噴嘴詳細示意圖如圖 28 所示，可量測流率為 $100-1600 \text{ m}^3/\text{h}(c=18)$ ，LDV 亦置於噴嘴旁量測流速，其外殼以高壓透明玻璃保護，內部填充氮氣避免光學系統受氣體成份變動干擾(圖 29)，圖 31 為利用光學系統觀測高壓玻璃之視覺光學干涉現象。另外還在 Pigsar 建置一套高壓的光學式原級流量標準，以期作為較大口徑高壓氣體流量計的原級流量標準。然而光學式原級流量標準目前評估所得的擴充不確定度為 0.2%，遠大於目標值 0.1%，遭遇之主要問題在於 LDA 於邊界層所測得速度，因受到邊界紊流(厚度約噴嘴喉部半徑的 0.5%)的影響而與理論值相差過大，圖 30 為管內體速度分布曲線，透過光學型雷射都普勒系統可量測出其速度分布。

PTB 目前應用其研發之雙光束 LDA 量測技術，其工作原理如圖 32 所示，可在不移動 LDA 的情況下，量測 3 mm 間距內的流速，對於邊界層的流速可更為準確，已經到了將問題排除的最後階段。PTB 對此設備原寄以厚望，期望能建立高準確度的新標準，對於目前投入之經費與時間所獲致之量測結果相當不滿意。

PTB 的雷射都卜勒風速標準設備採用循環式設計，如圖 33 所示，可避免排放式設備排放含油空氣所造成的環境污染問題。標準設備的 LDA 校正採用新研發的圓點轉盤，圓點由極小到大而且都經過精確尺寸量測。PTB 提供外界 LDV 校正服務，其校正量約為每 2 個月 1 件。

EUROMET 第二次的風速標準關鍵比對(KC)係由 PTB 負責，已經改用 LDA 作為傳遞標準件，由各國實驗室所得比對數據之分佈約在 0.5% 以內，其一致性較第一次 KC (使用超音波式風速計，數據分佈約 2%) 大幅提昇，顯示比對件之選用對於 KC 的成效具有絕對影響力。



圖 26、PTB 光學式原級流量標準

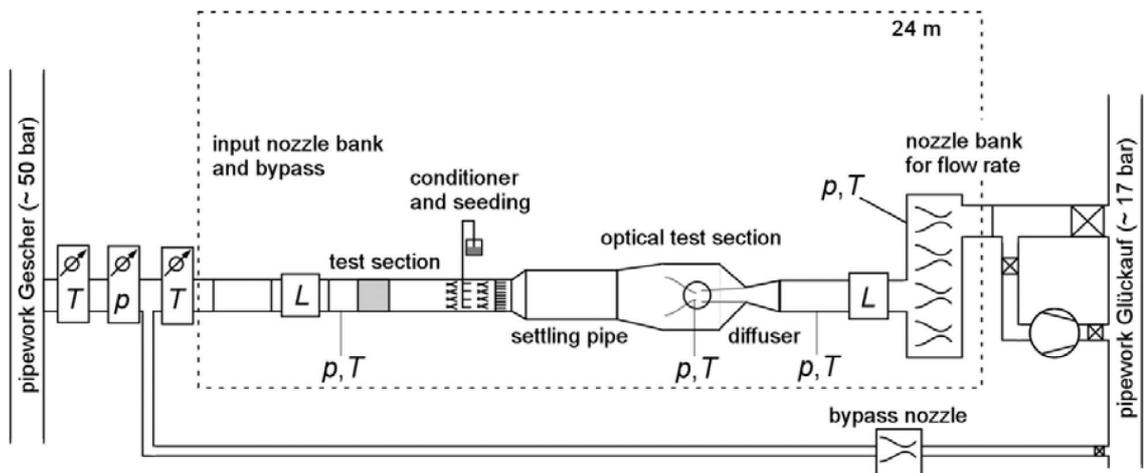


圖 27、PTB 光學式原級流量標準系統示意圖

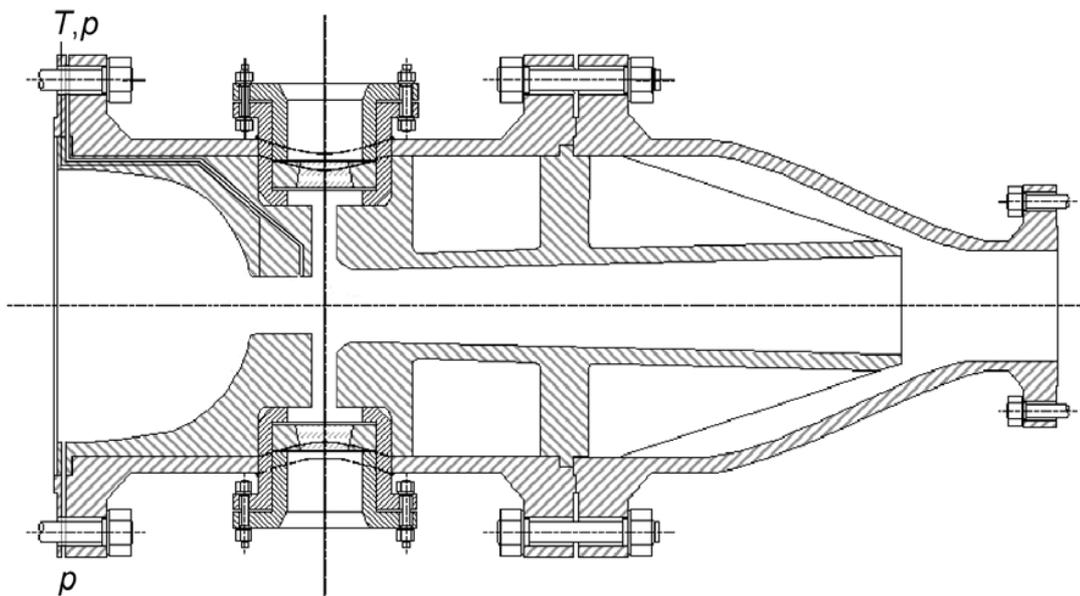


圖 28、LDV 噴嘴標準件

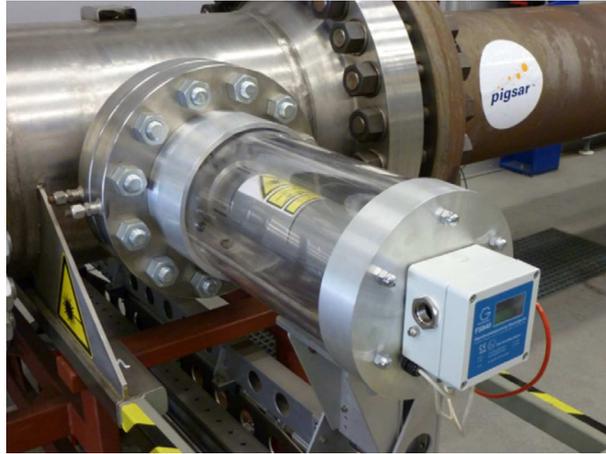


圖 29、噴嘴旁之 LDV 量測系統

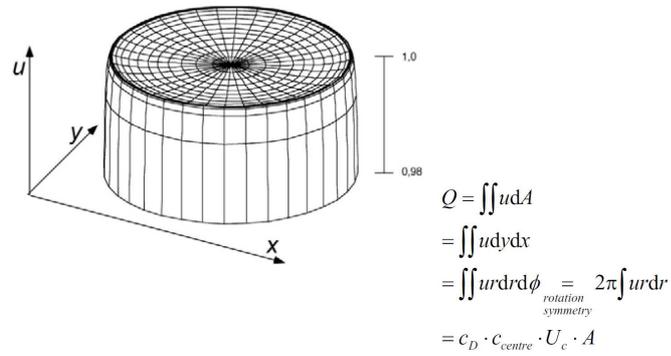


圖 30、管內流體速度分布曲線

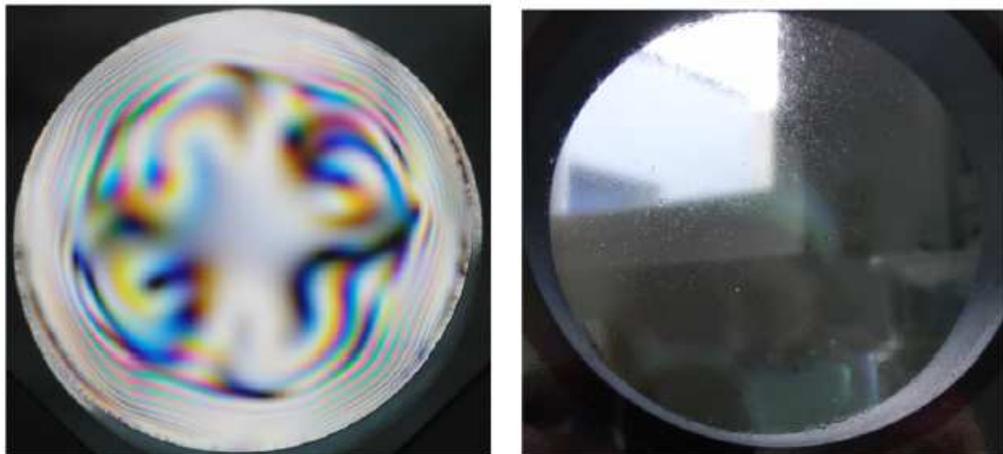


圖 31、透過高壓玻璃以光學監視系統觀得玻璃視覺變化

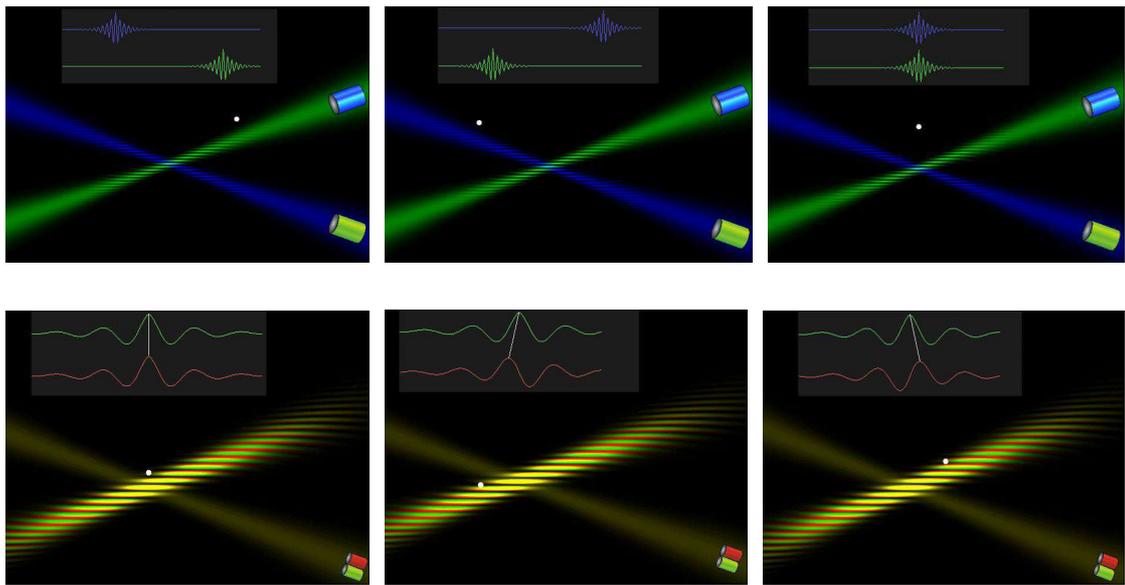


圖 32、PTB 研發之雙光束 LDA 量測技術



圖 33、PTB 循環式雷射都卜勒風速標準設備

參、心得及建議

- 1、本所新購 8 部 Itron 轉子流量計，用於 B 區中小尺寸標準件使用，本次出差至德國 Itron 公司實際查驗其性能及校正結果，證實此款流量計性能極佳，除了噪音較大外，其餘各性能如精度、穩定重複性等皆有不錯表現，且 PTB 亦大力稱讚此款流量計，於 PTB 實驗室中大量使用，用於流場研究及標準件使用，有大量測試數據可供參考，未來在本所亦可進行多方面測試與研究。
- 2、PTB 開發與研究各款原級追溯流量校正系統，如 Bell prover、Piston Prover、LDV 等，尤其 HPPP 屬於原級追溯系統，直接追溯至長度單位，未來本所可與工研院及 PTB 合作，探討技術引進可行性，或寄送傳遞標準件至 PTB 以其原級校正系統(HPPP)校正傳遞標準件，除了可維持傳遞件之精度與準確性外，並探討流量計之壓力效應亦可比較國內外追溯系統之差異，以確保台灣高壓氣體流量追溯系統能與國際接軌，維持計量準確性。
- 3、目前氣體流量校正技術發展日新月異，流量計的開發亦是百家爭鳴，尤其在超音波流量計的發展，多聲道超音波探頭能準確管內流之速度剖面分布，不受渦輪影響，或雜流干擾，加以電腦計算速度剖面分布，進而準確計算出體積流率。目前中油為國內獨家天然氣進口商，未來天然氣供應量將逐年增加，計量準確性益形重要，目前仍有許多流量計為傳統型流孔板流量計，此款流量計無法校正，且器差達到 3-5%，氣損的損失非常嚴重，故應擇期汰換此款流量計，而新型流量計應定期校正，以確保交易公平性。
- 4、國外流量計廠商在氣體流量計開發上有進步之技術，本公司可設法邀請國外專家學者或廠商至台灣演講，傳授流量計發展現況、應用領域及設備維護與操作等專業技術，期使本公司從業同仁有專業計量技術，增加視野觀，並使本公司線上流量計皆能維持於良好狀況，運作正常。
- 5、流量的原級追溯系統極為重要，在台灣，國家級流量標準追溯系統由工研院流量實驗室負責，目前並採用 Bell Prover 稱重系統，校正能量為 100-1000 m³/h，但最大壓力僅能校正至 10bar，目前中油天然氣計量壓力皆大於此值，對於壓力效應的疑慮雖然國際研究尚無一定論，但許多研究資料及本所實際測試結果顯示壓力效應似乎存在，特別對於轉動型流量計(如渦輪或轉子等)在同流率不同壓力點校正，其器差仍有變動，故工研院流量實驗室發展循環校正系統，期望校正能量能

達到 50bar，但流率受限於鼓風機尺寸，最大僅能達到 560 m³/h，本單位為國內最大高壓氣體流量校正實驗室，硬體設施完善，但標準追溯仍須依靠工研院流量實驗室提供原級追溯，故應與工研院流量實驗室密切合作，共同為高壓高流校正追溯盡一份心力，其合作關係可如 PTB 與 Pigsar 般，發揮各自專長與資源，共同為氣體流量校正技術進步而努力。

肆、附件

8 部轉子流量計校正結果與重複性

(a)序號：34015496834

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{\text{base,rig}}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	-0,10	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	-0,05	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	-0,01	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,01	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	-0,01	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,08	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,08	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,11	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,14	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,15	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,24	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,33	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,54	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-0,58	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-0,79	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
161,8	7,27E+05	0,20	0,102	0,049	0,22
136,6	6,12E+05	0,12	0,102	0,032	0,21
112,3	5,03E+05	0,02	0,102	0,032	0,21
88,3	3,95E+05	0,02	0,102	0,028	0,21
64,2	2,87E+05	-0,05	0,102	0,046	0,22
40,3	1,80E+05	0,06	0,102	0,045	0,22
25,4	1,14E+05	0,13	0,102	0,038	0,21
15,9	7,09E+04	0,15	0,102	0,042	0,22
10,1	4,49E+04	0,14	0,128	0,036	0,26
6,4	2,85E+04	0,06	0,128	0,047	0,27
3,2	1,42E+04	0,00	0,128	0,057	0,27
2,07	9,25E+03	0,04	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q_{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007	
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,07	
f_{P1}	%	-0,11	-0,05	-0,01	0,01	-0,01	-0,09	-0,08	-0,10	-0,13	-0,13	-0,22	-0,33	-0,55	-0,60	-0,74
f_{P2}	%	-0,09	-0,05	-0,01	0,01	-0,01	-0,07	-0,08	-0,12	-0,14	-0,16	-0,25	-0,33	-0,52	-0,56	-0,83
f_{PMW}	%	-0,10	-0,05	-0,01	0,01	-0,01	-0,08	-0,08	-0,11	-0,14	-0,15	-0,24	-0,33	-0,54	-0,58	-0,79

(b) 序號：34015496835

Impulswert: 20779,06 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty <i>u</i> _{base,rig} [%], <i>k</i> = 1	Repeatability <i>u</i> _{rep} [%], <i>k</i> = 1	Total uncertainty <i>U</i> _{total} [%], <i>k</i> = 2
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	-0,33	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	-0,31	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	-0,28	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	-0,25	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	-0,30	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,37	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,37	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,40	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,43	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,45	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,56	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,70	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,85	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-1,10	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-1,13	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
161,9	7,23E+05	0,00	0,102	0,049	0,22
136,7	6,09E+05	-0,08	0,102	0,032	0,21
112,1	4,99E+05	-0,18	0,102	0,032	0,21
88,2	3,93E+05	-0,21	0,102	0,028	0,21
64,6	2,89E+05	-0,25	0,102	0,046	0,22
40	1,78E+05	-0,16	0,102	0,045	0,22
25,3	1,13E+05	-0,12	0,102	0,038	0,21
16	7,12E+04	-0,10	0,102	0,042	0,22
10,1	4,50E+04	-0,15	0,128	0,036	0,26
6,4	2,86E+04	-0,25	0,128	0,047	0,27
3,3	1,47E+04	-0,33	0,128	0,057	0,27
2,07	9,15E+03	-0,27	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q _{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007	
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,07	
<i>f</i> _{P1}	%	-0,33	-0,30	-0,28	-0,25	-0,30	-0,37	-0,37	-0,40	-0,43	-0,44	-0,54	-0,70	-0,82	-1,08	-1,15
<i>f</i> _{P2}	%	-0,33	-0,31	-0,28	-0,25	-0,30	-0,36	-0,37	-0,40	-0,42	-0,45	-0,58	-0,69	-0,88	-1,12	-1,11
<i>f</i> _{PMW}	%	-0,33	-0,31	-0,28	-0,25	-0,30	-0,37	-0,37	-0,40	-0,43	-0,45	-0,56	-0,70	-0,85	-1,10	-1,13

(c) 序號：34015496836

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{\text{base,rig}}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	0,02	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	0,08	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	0,11	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,12	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	0,11	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,01	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,02	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,10	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,15	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,22	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,39	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,48	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,73	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-0,93	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-0,94	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
159,9	7,12E+05	0,19	0,102	0,049	0,22
136,5	6,07E+05	0,11	0,102	0,032	0,21
112,3	4,99E+05	0,06	0,102	0,032	0,21
88,9	3,95E+05	0,02	0,102	0,028	0,21
64,5	2,87E+05	-0,03	0,102	0,046	0,22
40,5	1,80E+05	0,06	0,102	0,045	0,22
25,7	1,14E+05	0,14	0,102	0,038	0,21
15,8	7,02E+04	0,20	0,102	0,042	0,22
9,9	4,39E+04	0,19	0,128	0,036	0,26
6,4	2,82E+04	0,12	0,128	0,047	0,27
3,3	1,46E+04	-0,02	0,128	0,057	0,27
2,05	9,07E+03	0,00	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q_{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007	
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,26	1,07
f_{P1}	%	0,00	0,08	0,11	0,12	0,10	-0,01	-0,02	-0,09	-0,14	-0,20	-0,40	-0,45	-0,69	-0,92	-0,94
f_{P2}	%	0,03	0,08	0,11	0,12	0,11	-0,01	-0,02	-0,10	-0,15	-0,23	-0,38	-0,50	-0,76	-0,94	-0,94
f_{PMW}	%	0,02	0,08	0,11	0,12	0,11	-0,01	-0,02	-0,10	-0,15	-0,22	-0,39	-0,48	-0,73	-0,93	-0,94

(d) 序號：34015496837

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{\text{base,rig}}$ [%], k = 1	Repeatability u_{rep} [%], k = 1	Total uncertainty U_{total} [%], k = 2
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	0,00	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	0,08	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	0,12	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,11	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	0,11	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,01	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,07	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,16	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,24	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,30	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,49	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,67	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,89	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-1,29	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-1,40	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
161,9	7,19E+05	-0,04	0,102	0,049	0,22
136,4	6,05E+05	-0,06	0,102	0,032	0,21
112,6	5,00E+05	-0,06	0,102	0,032	0,21
88,1	3,91E+05	-0,04	0,102	0,028	0,21
64,3	2,86E+05	-0,06	0,102	0,046	0,22
40,7	1,81E+05	0,02	0,102	0,045	0,22
25,2	1,11E+05	0,15	0,102	0,038	0,21
15,9	7,05E+04	0,21	0,102	0,042	0,22
10,1	4,48E+04	0,12	0,128	0,036	0,26
6,5	2,87E+04	0,09	0,128	0,047	0,27
3,2	1,43E+04	-0,09	0,128	0,057	0,27
2,05	9,05E+03	-0,13	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q _{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,07
f _{P1}	%	-0,01	0,08	0,11	0,11	0,11	0,01	-0,06	-0,16	-0,24	-0,30	-0,50	-0,65	-0,86	-1,39
f _{P2}	%	0,01	0,08	0,12	0,11	0,11	-0,02	-0,07	-0,16	-0,23	-0,30	-0,47	-0,69	-0,91	-1,41
f _{P MW}	%	0,00	0,08	0,12	0,11	0,11	-0,01	-0,07	-0,16	-0,24	-0,30	-0,49	-0,67	-0,89	-1,40

(e) 序號：34015496838

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
 Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{base,rig}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	0,04	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	0,10	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	0,15	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,14	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	0,12	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	0,01	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,04	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,13	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,18	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,26	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,41	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,52	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,86	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-1,03	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-1,19	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
160,1	7,23E+05	-0,14	0,102	0,049	0,22
136,7	6,16E+05	-0,13	0,102	0,032	0,21
112,4	5,06E+05	-0,12	0,102	0,032	0,21
88,1	3,96E+05	-0,10	0,102	0,028	0,21
64,8	2,91E+05	-0,08	0,102	0,046	0,22
40,1	1,80E+05	0,04	0,102	0,045	0,22
25	1,12E+05	0,15	0,102	0,038	0,21
16,1	7,18E+04	0,17	0,102	0,042	0,22
10,1	4,50E+04	0,22	0,128	0,036	0,26
6,6	2,93E+04	0,17	0,128	0,047	0,27
3,2	1,43E+04	-0,01	0,128	0,057	0,27
2,06	9,20E+03	-0,03	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q_{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007	
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,07	
f_{P1}	%	0,03	0,10	0,14	0,14	0,12	0,01	-0,04	-0,12	-0,18	-0,26	-0,40	-0,51	-0,85	-1,02	-1,17
f_{P2}	%	0,05	0,10	0,15	0,14	0,12	0,00	-0,04	-0,13	-0,18	-0,26	-0,42	-0,52	-0,86	-1,04	-1,21
f_{PMW}	%	0,04	0,10	0,15	0,14	0,12	0,01	-0,04	-0,13	-0,18	-0,26	-0,41	-0,52	-0,86	-1,03	-1,19

(f) 序號：34015496839

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{\text{base,rig}}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	0,16	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	0,21	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	0,26	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,24	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	0,22	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	0,10	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	0,06	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,04	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,10	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,18	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,38	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,52	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,83	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-1,04	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-1,16	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
159,6	7,10E+05	-0,05	0,102	0,049	0,22
136,2	6,05E+05	-0,07	0,102	0,032	0,21
112,2	4,97E+05	-0,07	0,102	0,032	0,21
88,5	3,92E+05	-0,03	0,102	0,028	0,21
64,6	2,86E+05	-0,02	0,102	0,046	0,22
40,3	1,78E+05	0,10	0,102	0,045	0,22
25,2	1,11E+05	0,20	0,102	0,038	0,21
15,9	7,04E+04	0,24	0,102	0,042	0,22
10,4	4,58E+04	0,26	0,128	0,036	0,26
6,4	2,81E+04	0,21	0,128	0,047	0,27
3,2	1,43E+04	0,05	0,128	0,057	0,27
1,97	8,67E+03	0,02	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q_{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,63	1,07
f_{P1}	%	0,15	0,21	0,26	0,24	0,22	0,10	0,06	-0,04	-0,10	-0,18	-0,38	-0,52	-0,83	-1,05
f_{P2}	%	0,16	0,21	0,25	0,23	0,22	0,09	0,06	-0,04	-0,10	-0,18	-0,38	-0,52	-0,82	-1,03
f_{PMW}	%	0,16	0,21	0,26	0,24	0,22	0,10	0,06	-0,04	-0,10	-0,18	-0,38	-0,52	-0,83	-1,04

(g) 序號：34015496840

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{\text{base,rig}}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	-0,08	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	-0,06	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	-0,03	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	-0,02	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	-0,04	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,12	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,10	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,13	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,15	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,17	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,26	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,37	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,57	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-0,78	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-0,82	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
161,2	7,21E+05	-0,12	0,102	0,049	0,22
136,2	6,08E+05	-0,18	0,102	0,032	0,21
112,5	5,01E+05	-0,23	0,102	0,032	0,21
88,5	3,96E+05	-0,24	0,102	0,028	0,21
64,1	2,86E+05	-0,19	0,102	0,046	0,22
40,3	1,79E+05	-0,07	0,102	0,045	0,22
25,1	1,19E+05	0,05	0,102	0,038	0,21
16,4	7,29E+04	0,03	0,102	0,042	0,22
10	4,48E+04	0,05	0,128	0,036	0,26
6,3	2,80E+04	-0,01	0,128	0,047	0,27
3,2	1,43E+04	-0,06	0,128	0,057	0,27
2,03	9,04E+03	0,01	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q _{max}	1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,07
f_{P1}	%	-0,08	-0,06	-0,02	-0,01	-0,04	-0,12	-0,10	-0,13	-0,15	-0,18	-0,25	-0,37	-0,55	-0,76
f_{P2}	%	-0,08	-0,05	-0,03	-0,02	-0,04	-0,12	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,26	-0,36	-0,58	-0,79
f_{PMW}	%	-0,08	-0,06	-0,03	-0,02	-0,04	-0,12	-0,10	-0,13	-0,15	-0,17	-0,26	-0,37	-0,57	-0,78

(h) 序號：34015496841

Impulswert: 20718,49 Impulse/m³
Impulse value:

2. Test results

Flow rate Q [m ³ /h]	Reynolds number Re [-]	Meter deviation f [%]	Base uncertainty $u_{base,rig}$ [%], $k = 1$	Repeatability u_{rep} [%], $k = 1$	Total uncertainty U_{total} [%], $k = 2$
Test with atmospheric air					
160	7,27E+04	-0,03	0,102	0,065	0,24
136	6,18E+04	0,00	0,102	0,014	0,20
112	5,09E+04	0,02	0,102	0,036	0,21
88,1	4,00E+04	0,04	0,102	0,014	0,20
64,2	2,92E+04	0,00	0,102	0,009	0,20
40,1	1,82E+04	-0,08	0,102	0,056	0,23
25,6	1,16E+04	-0,10	0,102	0,009	0,20
16,1	7,32E+03	-0,14	0,102	0,030	0,21
10,4	4,73E+03	-0,17	0,128	0,036	0,26
6,4	2,91E+03	-0,22	0,128	0,050	0,27
3,2	1,45E+03	-0,39	0,128	0,084	0,30
2,55	1,16E+03	-0,48	0,128	0,055	0,27
1,64	7,45E+02	-0,76	0,128	0,107	0,34
1,26	5,73E+02	-0,95	0,128	0,089	0,31
1,07	4,86E+02	-0,99	0,128	0,103	0,33
Test with compressed air					
159,8	7,20E+05	0,01	0,102	0,049	0,22
136,5	6,14E+05	-0,03	0,102	0,032	0,21
112,7	5,06E+05	-0,08	0,102	0,032	0,21
88,5	3,97E+05	-0,07	0,102	0,028	0,21
64,2	2,88E+05	-0,05	0,102	0,046	0,22
40,1	1,80E+05	0,06	0,102	0,045	0,22
24,8	1,11E+05	0,13	0,102	0,038	0,21
16,1	7,17E+04	0,14	0,102	0,042	0,22
10,3	4,63E+04	0,13	0,128	0,036	0,26
6,4	2,89E+04	0,03	0,128	0,047	0,27
3,3	1,50E+04	-0,09	0,128	0,057	0,27
2,03	9,04E+03	-0,06	0,128	0,050	0,27

Messergebnisse:

Q / Q _{max}		1,00	0,85	0,70	0,55	0,40	0,25	0,16	0,10	0,07	0,04	0,02	0,016	0,010	0,008	0,007
Q	m ³ /h	160	136	112	88,1	64,2	40,1	25,6	16,1	10,4	6,4	3,2	2,55	1,64	1,26	1,07
f_{P1}	%	-0,04	0,00	0,02	0,04	0,00	-0,08	-0,10	-0,14	-0,17	-0,21	-0,38	-0,48	-0,76	-0,94	-0,98
f_{P2}	%	-0,02	0,00	0,01	0,04	0,00	-0,07	-0,10	-0,14	-0,17	-0,22	-0,39	-0,48	-0,76	-0,95	-0,99
f_{PMW}	%	-0,03	0,00	0,02	0,04	0,00	-0,08	-0,10	-0,14	-0,17	-0,22	-0,39	-0,48	-0,76	-0,95	-0,99