

出國報告（出國類別：其他）

赴德國聯邦物理技術研究院(PTB)參訪質量 等國際單位新標準實驗室出國報告

服務機關：經濟部標準檢驗局

姓名職稱：徐技士佳豪、許技士翰棕

派赴國家：德國

出國期間：中華民國 107 年 11 月 28 日
至 12 月 6 日

報告日期：108 年 2 月 25 日

摘 要

- 一、因應 2018 年國際度量衡大會(Conférence générale des poids et mesures, CGPM) 公告國際單位制(Système International d'Unités, SI)新定義，對全球計量科技與體系，以及高科技產業影響深遠，我國委請德國聯邦物理技術研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)協助製作之新質量系統核心設備「矽晶球」甫於 2018 年 10 月 24 日送抵臺灣，開啟我國計量技術發展新時代，本局除續督促受託執行單位財團法人工業技術研究院如期如質建置符合國際新定義之 SI 原級標準，亦亟須掌握前述新標準於建置完成之後續運作計畫管理事項。
- 二、另考量經濟部標準檢驗局之重要執掌，除為我國發展科學計量領域重要技術外(如 SI 新定義的實現技術等)，法定計量管理亦為本局維持全國計量準確、確保交易公平之重要任務。又德國係歐盟之重要成員國，且 PTB 組織中亦有負責其全國法定計量管理之部門，爰此行併同瞭解德國在法定計量管理之制度與概念，以做為我國未來法定計量管理制度調整與變革之參考。
- 三、綜上，爰派員赴德國 PTB 參訪 SI 質量、溫度新標準實驗室及其法定計量部門，瞭解該國在上述各重要領域之發展情況，同時藉此深化我國與德國計量相關機構在 SI 新定義等領域合作關係，並提出未來本局計畫管理之建議及參考。

目 次

	頁次
壹、目的.....	3
貳、過程.....	5
參、心得及建議.....	24
肆、參訪相關照片.....	27
伍、名片一覽.....	29
陸、中英文對照表.....	30
柒、附件.....	32

壹、目的

德國聯邦物理技術研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)成立於 1887 年，為世界上最早之計量標準機關，亦稱為德國國家度量衡標準實驗室，為全球盛名度量衡標準機構之一的計量技術先進國家。

PTB 為德國國家級計量機構，隸屬於德國聯邦經濟事務和能源部(Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, BMWi)，授權該國最高量測標準，計有 9 個分組、2 個管理部門，分組包含有力學與聲學(Mechanics and Acoustics)、電學(Electricity)、化性物理與防爆(Chemical Physics and Explosion Protection)、光學(Optics)、精密工程(Precision Engineering)、游離輻射(Ionizing Radiation)、溫度與同步輻射(Temperature and Synchrotron Radiation)、醫學物理與計量資訊科技(Medical Physics and Metrological Information Technology)、以及法定計量部門(Legal and International Metrology)，德國透過多邊協定及合作計畫，直接或間接協助超過 80 個發展中或新興國家建立計量基礎建設，包含技術諮詢，技術協助及提供訓練、協助計量基礎建設等，為計量技術之先進國，下頁圖為 PTB 組織架構。

經濟部標準檢驗局為我國標準、度量衡及商品檢驗主管機關，負責編修我國國家標準、推行品質管理系統、建立我國認驗證環境，推動國際合作及相互承認、以及劃一全國度量衡，確保計量準確性與追溯性並提供相關校正服務；其中，因應國際單位制(SI)新定義的實施，本局著手建置我國 SI 新定義標準系統，為瞭解德國在實現 SI 新定義的方式、量測標準系統、法定度量衡管理等相關業務，本局派員赴德國進行本次參訪行程，期能藉由本次參訪，提供未來 SI 新定義實施度相關業務規劃之參考。

本次出國參訪之目的說明如下：

- 一、赴德國 PTB 參訪質量、溫度等 SI 新標準實驗室，瞭解該國在 SI 新質量等領域發展情況，藉此深化我國與德國計量相關機構在 SI 單位新定義等領域合作，並提出未來本局計畫管理之建議及參考。
- 二、另考量德國係歐盟之重要成員國，且 PTB 組織中亦有負責其全國法定計量管理之部門，爰此行併同瞭解德國在法定計量管理制度，做為我國未來法定計量管理制度調整與變革參考，以利持續維持我國民生計量準確、確保交易公平。



Organization Chart

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Presidential Board President Prof. Dr. J. Ullrich	Vice-president Hon.-Prof. Dr. R. Schwartz	Member of the Presidential Board Dr. J. Stenger	Presidential Staff Office Dr. A. Cypionka	Press and Information Office Dr. Dr. J. Simon	Conformity Assessment Hon.-Prof. Dr. R. Schwartz	Head of the Berlin Institute and the President's Representative in Berlin Dr. G. Ulm	Quality Manager Dr. K. Stoll-Maile	Internal Revision T. Hohlweg	
Div. 1 – Mechanics and Acoustics Prof. h. c. Dr. F. Härtig	Div. 2 - Electricity Hon.-Prof. Dr. U. Stegner	Div. 3 - Chemical Physics and Explosion Protection Dr. B. Gübler	Div. 4 - Optics Hon.-Prof. Dr. S. Köck	Div. 5 - Precision Engineering Dr. H. Bosse	Div. 6 - Ionizing Radiation Dr. J. Stenger	Div. 7 - Temperature and Synchrontron Radiation Dr. G. Ulm	Div. 8 - Medical Physics and Metrological Information Technology Prof. Dr. T. Schöffler	Div. 9 - Legal and International Metrology Dr. P. Ulbig	Div. 10 - Cross-Sectional Services M. Gahrns
Dep. 2.1 - Direct Current and Low Frequency Dr. J. Melcher	Dep. 3.1 - General and Inorganic Chemistry Dr. R. Stosch	Dep. 4.1 - Photometry and Spectroradiometry Dr. A. Sperling	Dep. 5.1 - Surface Metrology Dr. L. Koenders	Dep. 6.1 - Radioactivity Dr. D. Arnold	Dep. 7.1 - Radiometry with Synchrontron Radiation Prof. Dr. M. Richter	Dep. 8.1 - Biomedical Magnetic Resonance Dr. B. Itermann	Dep. 9.11 - Industrial Metrology Dr. M. Wolf	Dep. 10.1 - Staff Unit for Security M. Gahrns	Sec. Z.11 - Budget and Procurement M. Wasmuß
Dep. 2.2 - High Electromagnetic Fields Dr. T. Schröder	Dep. 3.2 - Biochemistry Prof. Dr. G. O'Connor	Dep. 4.2 - Imaging and Wave Optics Dr. E. Buhr	Dep. 5.2 - Nanoscale Nanometrology Dr. J. Flügge	Dep. 6.2 - Dosimetry for Radiation Therapy and Diagnostic Radiology Dr. U. Ankenhold	Dep. 7.2 - X-Ray Synchrontron Radiation Dr. M. Krumrey	Dep. 8.2 - Biosignals Dr. P. Ulbig	Dep. 9.12 - German Calibration Service Dr. P. Ulbig	Sec. Z.12 - Personnel M. Wasmuß	Sec. Z.13 - Legal Department S. Wiemann
Dep. 2.3 - Electrical Energy Measuring Techniques Dr. M. Kahmann	Dep. 3.3 - Physical Chemistry Prof. Dr. R. Fernandès	Dep. 4.3 - Quantum Optics and Unit of Length Dr. H. Schnatz	Dep. 5.3 - Coordinate Metrology Dr. K. Kniel	Dep. 6.3 - Radiation Protection Dosimetry Dr. A. Rötger	Dep. 7.3 - Detector Radiometry and Radiation Thermometry Dr. J. Hollandt	Dep. 8.3 - Biomedical Optics Prof. Dr. R. MacDonald	Dep. 9.13 - Legal Metrology and Conformity Assessment Dr. D. Ratschko	Sec. Z.14 - Organization and Controlling Dr. J. Jaspers	Sec. Z.15 - Berlin Administration A. Lubinus
Dep. 2.4 - Quantum Electronics Dr. A. Zorin	Dep. 3.4 - Analytical Chemistry of the Gas Phase Prof. Dr. V. Ebert	Dep. 4.4 - Time and Frequency Dr. E. Peik	Dep. 5.4 - Interferometry on Material Measures Dr. R. Sobödel	Dep. 6.4 - Neutron Radiation Dr. A. Zimbal	Dep. 7.4 - Temperature Dr. S. Rudtsch	Dep. 8.4 - Mathematical Modelling and Data Analysis Prof. Dr. M. Bär	Dep. 9.14 - International Cooperation Dr. M. Stoldt	Sec. Z.16 - Internal Services B. Staab	Sec. Z.17 - Training B. Weihe
Dep. 2.5 - Semiconductor Physics and Magnetism Dr. H. W. Schumacher	Dep. 3.5 - Explosion Protection in Energy Technology Dr. D. Markus	Dep. 4.5 - Applied Radiometry Dr. S. Winter	Dep. 5.5 - Scientific Instrumentation Dr. F. Löffler	Dep. 6.5 - Radiation Effects Dr. H. Rabus	Dep. 7.5 - Heat and Vacuum Dr. K. Jousten	Dep. 8.5 - Metrological Information Technology Dr. F. Thiel	Dep. 9.15 - Occupational Safety and On-Site Security M. Fritzsche	Sec. Z.18 - Business Applications M. Baitikh	
Dep. 2.6 - Quantum Electrical Metrology Dr. F. J. Ahlers	Dep. 3.6 - Explosion Protection in Sensor Technology and Instrumentation Dr. F. Lienesch	Dep. 4.6 - Functional Nanosystems Dr. S. Kroker	Dep. 5.6 - FPM Fundamental Physics for Metrology Prof. Dr. A. Surzhytkov	Dep. 6.6 - Operational Radiation Protection Dr. R. Sinner	Dep. 7.6 - Cryosensors Dr. T. Schurig	Dep. 8.6 - Junior Research Group 8.51 - Support Systems Dr. J. Nordholz	Sec. Q.21 - Occupational Safety and On-Site Security M. Fritzsche		
Dep. 2.7 - Acoustics and Dynamics Dr. T. Bruns	Dep. 3.7 - Fundamentals of Explosion Protection Dr. M. Beyer				Dep. IB.T - Technical-scientific Infrastructure Berlin Dr. F. Melchert		Sec. Q.22 - Technical Infrastructure G. Grunberg-Damm		
Dep. 1.8 - Mass Realization of the Unit Dr. H. Bettin							Sec. Q.23 - PTB Fire Brigade D. Schütze		
							Sec. Q.24 - Information Technology Dr. M. Gutbrod		
							Sec. Q.41 - Metrology Networks Dr. M. Gutbrod		
							Sec. Q.42 - IP-Based Dissemination of Time Dr. D. Sibold		
							Sec. Q.43 - Events-IT Dr. M. Gutbrod		
							Sec. Q.44 - Support by IT Specialists K. Hube		
							Sec. Q.45 - High Performance Computing (HPC) Dr. K. H. F. Oppitz		

As of December 1, 2018

performed by
PSG - Project Steering Group

Dep. - Department
Sec. - Section

Div. - Division
Gp. - Group

Explanations
Div. - Division
Gp. - Group

- General Staff Council
S. Brandes
- Local Staff Council for Braunschweig
W. Krien
- Local Staff Council for Berlin
Dr. T. Sander-Thömmes
- Equality Commissioner
B. Behrens
- General Representative of Disabled Persons
R. Lütjge
- Representative of Disabled Persons in Braunschweig
R. Lütjge
- Representative of Disabled Persons in Berlin
C. Almann
- Committees
- Staff
- C-S Dr. Löffler
 - C-IV Hon.-Prof. Dr. Schwartz
 - C-IT Dr. Gutbrod
 - C-MS Hon.-Prof. Dr. Schwartz
 - C-IC Dr. Stenger
 - C-QM Dr. Stoll-Maile
 - C-RE Dr. Stenger
 - POGO Dr. Eichelstat

德國聯邦物理技術研究院組織架構圖

貳、過程

一、 本次參訪行程

本次參訪由徐技士佳豪、許技士翰棕赴德國 PTB 參訪質量、溫度等國際單位制(SI)新標準實驗室及法定計量管理單位，首先參訪德國PTB柏林(Berlin)院區新溫度實驗室；接著赴布倫瑞克(Braunschweig)院區參訪新質量實驗室及法定計量管理單位。本次參訪日程為 11 月 28 日至 12 月 6 日，完整行程如下：

參訪日期	參訪地點與機構	參訪主題及實驗室
11/28-29	11/28 搭機啟程，11/29 抵達 PTB 柏林(Berlin)院區	
11/30-12/1	德國柏林院區 溫度標準實驗室 (7.43 部門)	1. 參訪該院國際單位制(SI)實驗室 (新溫度計量標準)，並進行技術與 管理經驗交流。 2. 參訪德國科學中心及工藝博物館
12/2	移動至 PTB 布倫瑞克 (Braunschweig) 院區	
12/3	德國布倫瑞克院區 質量標準實驗室 (第 1 組)	參訪該院國際單位制(SI)實驗室(新質 量計量標準)，並進行技術與管理經驗 交流參訪。
12/4	德國布倫瑞克院區 法定計量管理單位 (9.2 部門)	參訪該院法定計量管理單位，並進行技 術與管理經驗交流。
12/5-6	12/5 搭機回程，12/6 回抵國門	

本次參訪行程表

二、 主要參訪之詳細內容

(一) PTB 國際單位制(SI)新溫度標準實驗室

1. 本次參訪第一站為 PTB 溫度標準實驗室(Grundlagen der Thermometrie)，隸屬 PTB 7.43 部門，實驗室負責人為 Dr.Christof Gaiser，亦負責本次實驗室參訪及講師的角色，Dr.Christof Gaiser 是 PTB 參與歐洲國家計量組織聯盟(European Association of National Metrology Institute, EURAMET)下之歐洲計量實現研究領域計畫(Project of Implementing the Metrology European Research Area，

iMERA)中之波茲曼常數聯盟(Consortium Boltzmann Constant)聯合研究計畫的主要負責人，該 Consortium 的主要目的係歐洲國家為了溫度單位重新定義時，必須先將波茲曼常數確定下來所設，在這個計畫中 PTB 選擇以介電常數氣體溫度系統(Dielectric-constant Gas Thermometry, DCGT)來實現，其他國家則以其他方法來實現，主要目的係為防止單一系統產生系統飄移時，能有不同系統相互參照，前揭計畫亦為國際波茲曼計畫(The International Boltzmann Project)在歐洲國家的前身。

2. 而全球性 SI 新溫度領域的研究則為國際波茲曼計畫，由英國、法國、德國、美國、中國大陸、義大利及澳洲等國家標準實驗室所組成，該計畫宗旨在於決定波茲曼常數值(Boltzmann constant)，以利溫度單位重新定義：由溫度單位克耳文(Kelvin)舊定義(單位克耳文是熱力學溫度(T)水三相點的 1/273.16)改成由波茲曼常數定義單位克耳文，定義為：1 克耳文(K)相當於熱能 kT 變化 1.380649×10^{-23} 焦耳(J)的熱力學溫度改變，並要求其相對不確定度小於一百萬分之一(1ppm)，提升單位克耳文的長期穩定度，其中 k 為波茲曼常數。
3. SI 新溫度的實施方式有很多種，包含聲學氣體溫度系統(Acoustic Gas Thermometry, AGT)、介電常數氣體溫度系統(DCGT)、都卜勒加寬溫度系統(Doppler-broadening Thermometry, DBT)、強生雜訊溫度系統(Johnson Noise Thermometry, JNT)及絕對輻射溫度系統(Absolute Radiation Thermometry, ART 或稱 RT)等，其中前三種方式實現熱力學溫度之範圍皆為 0°C 附近，而 ART 方式實現熱力學溫度之範圍為 1000°C 至 3000°C 左右；我國將採用 AGT 及 ART 方式並行實現 SI 新溫度、而本次參訪的 PTB 則用 DCGT 及 ART 方式並行實現。
4. 為實現克耳文(K)新定義的熱力學溫度量測技術，我國國家度量衡標準實驗室(National Measurement Laboratory, NML)採用 AGT 及 ART 等方式建立溫度原級標準，解決新溫度單位定義下之熱力學溫度與國際溫標 ITS-90(T_{90})的誤差問題，將熱力學溫度延伸至高於 1000°C 以上的高溫固定點；完善量測標準系統，包含輻射溫度計、熱電偶溫度計、電阻溫度計及白金電阻溫度計定點量測等系統，提供產業追溯，與國際接軌；其中 AGT 由聲速及原子平均質量決定熱力學溫度，公式如下：

$$\mu^2 = \frac{\gamma kT}{m}$$

因此可得熱力學溫度 T

$$T = \frac{m \mu^2}{\gamma k}$$

μ : 聲速 m : 原子平均質量

$\gamma = C_p/C_v$: 定壓熱容與定體積熱容之比值，其中單原子理想氣體 $\gamma = 5/3$

5. 本次參訪的 PTB 則用 DCGT 及 ART 等方式實現新溫度：

(1) DCGT 最早發展於 1970 年代，其基本原理是用介電常數(Dielectric constant)取代氣體狀態方程式中之密度，並在定溫狀態下，藉由電容的改變值去量測介電常數，假設氣體分子為理想氣體，意即氣體分子不會相互產生作用的情況下，可經由理想氣體方程式及克勞修斯-莫索提方程式(Clausius-Mossotti equation)得出 DCGT 工作方程，其方程如下：

$$p = \frac{RT}{V} \left\{ 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots \right\}$$

以及

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} = \frac{3A_\epsilon}{V} \left(1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \dots \right)$$

其中 p 為壓力， T 為熱力學溫度， R 為莫耳氣體常數， V 為莫耳體積， B 和 C 分別為二階及三階密度維里係數(Density virial coefficient)，該係數描述多個分子的交互作用下對理想氣體狀態方程的修正， A_ϵ 為莫耳極化率(Molar polarizability)， ϵ_0 為電常數(Electric constant)， ϵ_r 為相對介電常數，藉由電容器在定壓 p 下介值中及零壓力點下的電容變化值可得出 ϵ_r 值，公式如下：

$$C(p) = \epsilon_r C(0) (1 + \kappa_{\text{eff}} p)$$

其中 $C(p)$ 為定壓 p 下介值中量得的電容值； $C(0)$ 為零壓力點下量得的電容值， p 為氣體的壓力， κ_{eff} 為電容的有效壓縮率(effective compressibility of the capacitor)，描述在壓力 p 下、因電容器電極相對位移(relative displacement)或形變(deformation)導致的電容值改變量。

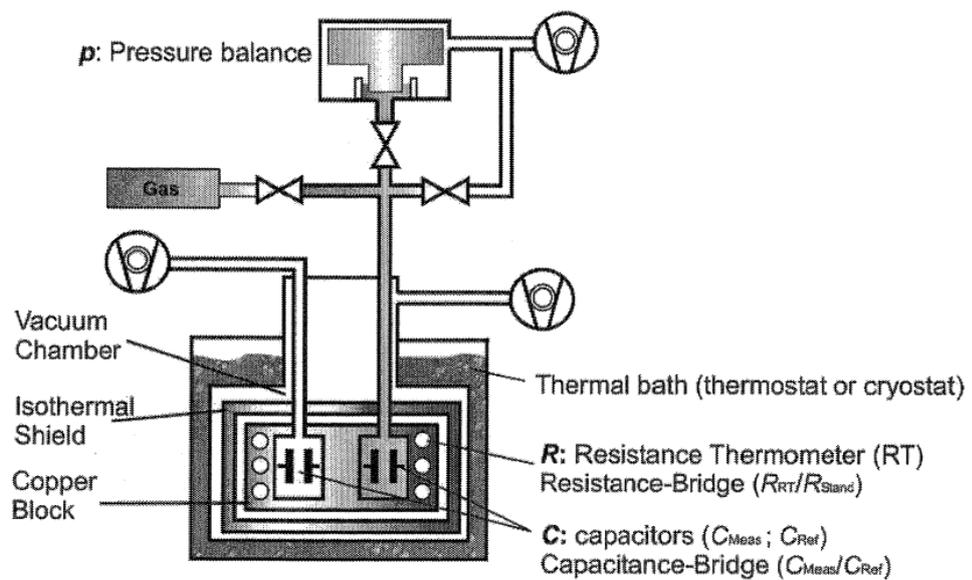
(2) 環形(圈)交叉電容器(Toroidal (ring) cross capacitors)對介電層及絕緣層有較小的敏感度，加上具有等同電極材料之等效壓縮性等優點，因此採用環形(圈)十字電容測得電容值，公式如下：

$$C = 2\pi \epsilon_0 \epsilon_r \frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

下圖左為環形(圈)交叉電容(Toroidal (ring) cross capacitors)及系統相關設備；而圖右為 PTB 新開發之圓柱體電容器以量測電容變化值。



介電常數氣體溫度系統相關設備



介電常數氣體溫度系統示意圖

由上圖實驗裝置量測得到 $C(p)$ 、 $C(0)$ 及 p 值，忽略方程的高階項係數的情形下，經由 DCGT 工作方程可決定熱力學溫度下之 A_ϵ/R 值

(3) 取得熱力學溫度下之 A_ϵ/R 值後，由下列公式可得波茲曼常數值。

$$k = \frac{R}{3A_\epsilon} \frac{\alpha_0}{\epsilon_0}$$

其中 k 為波茲曼常數， A_ϵ 為莫耳極化率(Molar polarizability)， α_0 為穩態偶極極化。

(4) 決定波茲曼常數值後，即可決定 1 克耳文(K)的數值，得出熱力學溫度 T ，相關 DCGT 實現方法詳附件 1 之相關論文。

6. 下表為 AGT 及 DCGT 等實現新溫度方式之比較表：

種類	聲學氣體溫度系統 AGT	介電常數氣體溫度系統 DCGT
原理	藉由量測聲速求得聲學共振腔內的 T 。	透過量測交叉電容器的電容並計算氣體密度，代入氣體狀態方程式求得 T 。
範圍	90 K - 552 K	2.5 K - 36 K
不確定度(u_r)	0.6 - 2.0 ppm	1.9 ppm
採用國家	美、法、義、英、中、台	德
優點	不確定度最小	不確定度小
面臨課題	共振腔的製作與體積測定	共振器壓縮比的不確定度

7. 2018 年國際度量衡大會(CGPM)公告溫度單位克耳文重新定義，波茲曼常數值將被固定於 $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ 焦耳(J)/克耳文(K)，實為參與國際波茲曼計畫中的研究機構(包含 PTB)之重大貢獻，未來 PTB 將持續於波茲曼常數值之精進，以期降低 DCGT 實現方式與水三相點熱力學溫度的相對不確定度。

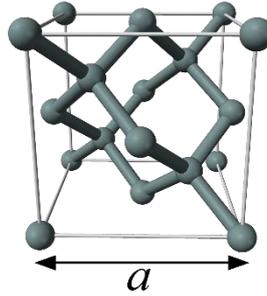
(二) PTB 國際單位制(SI)新質量標準實驗室

1. 參訪新溫度標準實驗室後，前往布倫瑞克 (Braunschweig) 參訪 PTB 質量標準實驗室，該實驗室隸屬 PTB 第一組：該組主要負責力學與聲學 (Mechanics and Acoustics) 領域的研究工作，第一組組長為 Dr. Frank Härtig，於 107 年 10 月 24 日曾陪同 PTB 院長親送質量新標準砵晶球來臺，第一組共有 8 個部門，其中由 1.1 部門：單位質量的傳遞以及 1.2 部門：固態力學 (Solid Mechanics) 的同仁負責本次質量標準實驗室參訪事宜及擔任講師。
2. 首先由隸屬 1.11 部門的 Dr. Michael Borys 為我們簡報介紹 PTB 質量標準實驗室，包含介紹德國的質量原級標準 – 編號 52 號的公斤副原器，此為國際公斤原器 (International prototype of kilogram, IPK) 的複製品，另外也參訪存放 IPK 的裝置及量測 IPK 的儀器 (Prototype Balance)，除編號 52 號的公斤副原器，另有編號 22、55 及 70 號的公斤副原器，其中 22 號為 1 公斤標準，皆負責德國 PTB 質量標準向下傳遞的角色，至於德國為何會有這麼多個公斤副原器，據 Dr. Michael 表示主要原因有二，一是因為德國發現、確認第一個公斤副原器的飄移現象後，便又向國際度量衡局 (Bureau international des poids et mesures, BIPM) 購買另一個公斤副原器以作為比對與研究之用；另一個原因則是因為東西德統一，而兩德原本皆各有 2 個公斤副原器，因此在數量上便倍增為 4 個。另有關於公斤副原器的編號，Borys 博士表示，該編號係為 BIPM 的製造序號，且序號越大的表示越晚製造，故我國的 78 號公斤副原器之製造時間看來落在德國的 4 個公斤副原器之後，另簡報內容詳如附件 2。
3. 鉑銥合金鑄造的 IPK 在 19 世紀時是高科技產品，且是目前 SI 中唯一仍使用人造物 (material artifact) 定義的基本單位。但由於人造物的穩定性有限，且事實上國際公斤原器的質量已隨著時間的推移發生變化，故 2005 年時國際度量衡委員會 (Comité international des poids et mesures, CIPM) 即建議以基本物理常數為基礎，重新對公斤進行定義，經過各國國家標準實驗室的努力，相關物理常數實現的不確定度已達到所需水準，爰於 2018 年第 26 屆 CGPM 大會宣布 SI 新質量以普朗克常數重新定義，取代由 IPK 為標準的定義，目前以普朗克常數實現公斤定義的方法有下列兩種，其一是瓦特天平法 (Watt Balance)，另一為 X 光晶體密度法 (X-ray crystal density method, XRCD)，其中 PTB 及我國採用 XRCD 方式來實現公斤定義。
(1) XRCD 是透過砵晶球來實現公斤的定義，基本的概念是計算砵晶球含有多少顆砵

原子，而矽晶球的質量 m_{sphere} 可以表示為矽晶球核的質量 m_{core} 加上矽晶球表層的質量 m_{SL} 扣除矽晶球晶體缺陷以及雜質的質量 m_{defect} ：

$$\begin{aligned} m_{sphere} &= m_{core} - m_{defect} + m_{SL} \\ &= N \times \bar{m}(Si) - m_{defect} + m_{SL} \end{aligned}$$

其中 N 指單位晶胞(Unit cell)內所含的矽原子數、 $\bar{m}(Si)$ 為矽原子的平均原子量



單位晶胞矽晶格結構圖

(2) 矽原子在矽晶球內以鑽石結構排列，而矽晶球中每個單位晶胞內含有 8 顆矽原子，如上圖所示，利用矽晶球內層體積 V_{core} 及矽晶格常數(Lattice constant) a ，可得 N 值，以下式表示：

$$N = \frac{V_{core}}{a^3} \times 8$$

其中矽晶球內層體積 V_{core} 可由球面干涉儀量出，而矽晶格常數 a 則利用整合式 X 光與光學干涉儀量出；而 $\bar{m}(Si)$ 則透過質譜儀分析可以得到。

因此矽晶球核質量 m_{core} 可透過下列公式與普朗克常數 h 的關係得出：

$$m_{core} = \left(\frac{8V_{core}}{a^3} \frac{A_r(^{28}Si)}{A_r(e)} \frac{2R_{\infty}}{c \alpha^2} \right) h$$

其中 $\frac{A_r(^{28}Si)}{A_r(e)} \frac{2hR_{\infty}}{c \alpha^2}$ 為矽的同位素質量(Mass of each isotope Si)， R_{∞} 為芮得柏常數(Rydberg constant)、 c 為真空下的光速、 α 為精細結構常數(fine-structure constant)。

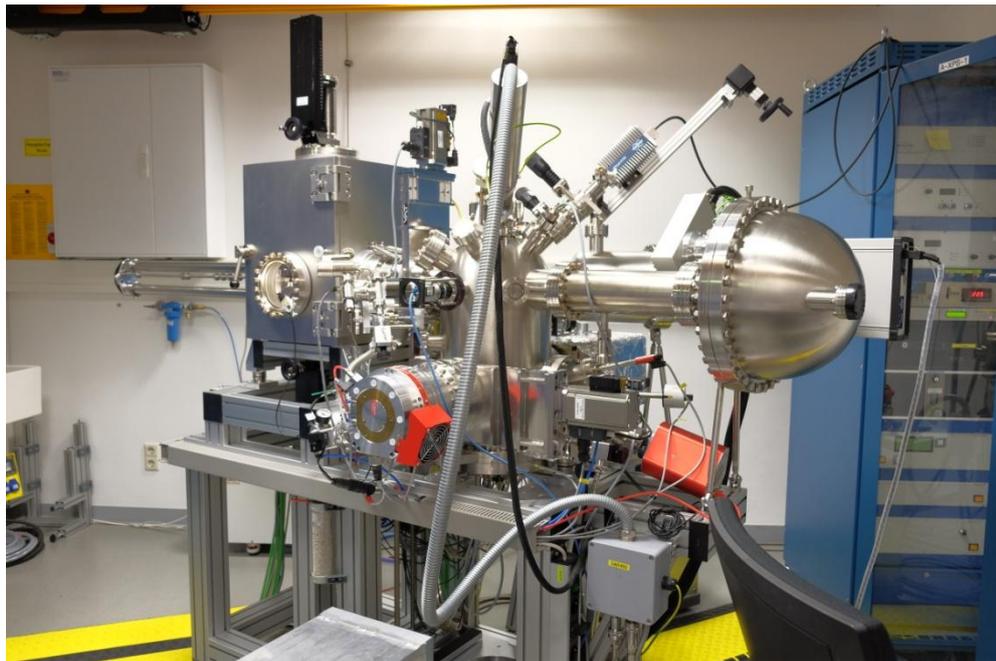
(3) 量得矽晶球核質量 m_{core} 後，接著透過 X 射線光電子頻譜技術(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)與 X 射線螢光頻譜技術(X-ray Fluorescence)

Spectroscopy, XRF)兩種技術結合來量測矽晶球表層的質量 m_{SL} ，需要每年定期量測已確認其變化。

(4)綜上，結合(2)、(3)可得矽晶球的質量 m_{sphere} 。

4. 接著由隸屬 PTB 第一組同仁 Dr.Edyta Beyer 帶我們參訪新質量標準的主要設備：整合式 XPS 暨 XRF 系統及超高真空(UHV)五軸調整座：

(1)該設備放置在 PTB 布倫瑞克 (Braunschweig) 院區進行各種矽晶球樣品的量測，主要分成兩大部分，其一是真空傳送腔體(Loadlock)，此為矽晶球樣品放入的裝置，並可將樣品推進真空腔體(Chamber)內；另一區塊為超高真空分析腔體，XPS、XRF、XRF 擷取訊號用的矽飄移偵測器(Silicon drift detector)及五軸調整座皆已固定於該系統上，為量測 XRF 與 XPS 光譜，腔體須維持真空度於 10^{-9} mbar，下圖為該系統照片。



整合式 XPS 暨 XRF 系統及五軸調整座

(2)XPS 與 XRF 原理

矽晶球表層質量的量測與定量工作結合了 XPS 與 XRF 的分析方法，首先利用不同厚度的 SiO_2 標準試片量測其 XRF 光譜，記錄下氧與矽的積分強度比值(O/Si ratio)，建立強度比值與單位面積氧沉積量(ng/cm^2)的關係，再藉由標準片的作為氧沉積量的參考標準，量測矽晶球的 XRF 頻譜，利用標準片的參考曲線訂定出

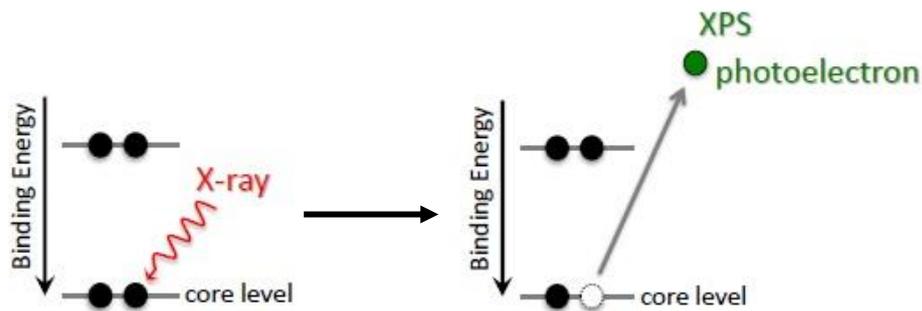
矽晶球表面的氧沉積量，而最後在進行 XPS 的量測 Si、O、C 三個元素的光電子頻譜積分強度，藉以得到此三個元素的光電子數比，利用已知的氧沉積量乘上各元素的比例，即可知道 Si 與 C 於矽晶球表層的質量。

A. XPS 原理：

以 X 光照射待測樣品，激發束縛於原子之電子，若入射 X 光光子能量 E_i 大於電子之功函數 W ，則電子可以脫離原子，稱為光電子，剩餘能量轉換成脫離的電子之動能 $E_{kinetic}$ ，此為光電效應；而 XPS 分析儀收到光電子之後，可以由已知的入射光能量與電子之動能 $E_{kinetic}$ 回推至束縛能，來推測電子所屬的原子種類與能階，公式如下所示：

$$W = E_i - E_{kinetic}$$

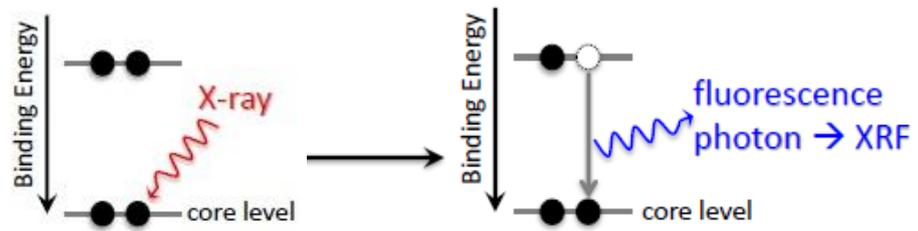
若以功函數或光電子的動能為橫座標，相對強度 (counts/s) 為縱座標可做出光電子能譜圖，從而獲得樣品的有關資訊。其示意圖如下所示，相對強度正比於光電子的數量，亦正比於該元素的原子數量。



XPS 原理示意圖

B. XRF 原理：

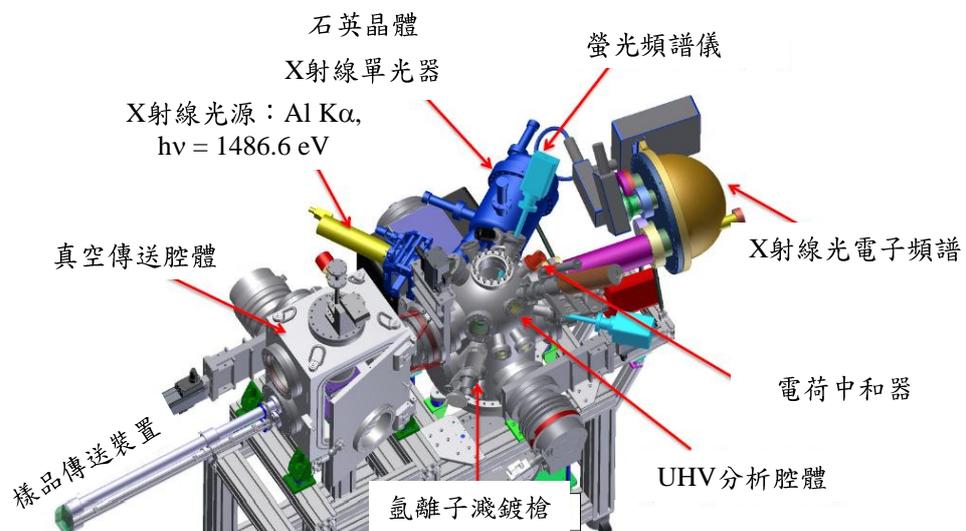
以 X 光照射待測樣品，樣品中元素的原子之內層電子吸收 X 光的能量產生躍遷的動作，外層電子會填補內層電子的空缺，並以光子形式釋放能量，這種電子能階躍遷而放出的螢光，為特定之波長，又稱為特徵 X 光譜，不同的元素於殼層間具有不同的能量或波長特性，會放射出各自的特徵 X 光，可用以分析樣品中的元素組成，其示意圖如下圖所示。由螢光頻譜的位置可以推估元素的組成，而螢光頻譜的強度與該組成物質之濃度有關。



XRF 原理示意圖

(3) 整合式 XPS 暨 XRF 系統的結構主要為：

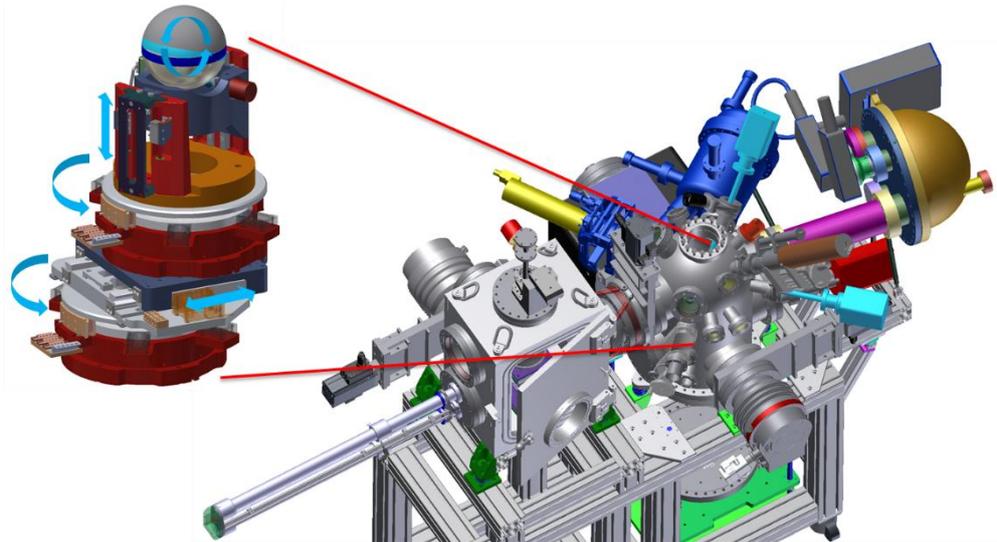
- A. X 光射源：以鋁為靶材，能量為 Al $K\alpha$ 1486.6 eV。
- B. 石英單晶 X 射線單色器：X 光由 X-ray tube 進入腔體，利用一反射鏡將 X 光反射至單色器，透過單晶布拉格反射使能量解析度提升，再入射至樣品表面。
- C. X 射線光子頻譜：用於 XPS 量測過程收集與分析光電子動能，再轉換成功函數以進行元素成分分析，與 X 射線單色器的夾角為 54.7° (magic angle)。在量測過程中可以依據需求調整入射能量值。在最初架設時，需要準備一組參考試片 (Au、Ag、Cu) 進行量測，以了解不同光電子能量對此光子頻譜的反應。
- D. 螢光頻譜分析儀：用於 XRF 訊號的測量，為高能量解析度的矽飄移偵測器，此分析儀被定位在非平面的位置，與來自石英單色器的 X 光夾 45° 以及仰角 15° 。開機後須在 -30°C 的低溫操作。
- E. 電荷中和器：在量測 XPS 光電子頻譜時所用，以補充樣品表面打出的電子。
- F. 氬離子濺鍍槍：用於 XPS 量測，其功用是透過離子濺射或團簇濺射去除表面污染，在此系統中用於一開始 XPS 量測時去除標準試片表面的雜質，但後續量測矽晶球時就不使用以免破壞矽晶球的表面。下圖為整合式 XPS/XRF 系統圖：



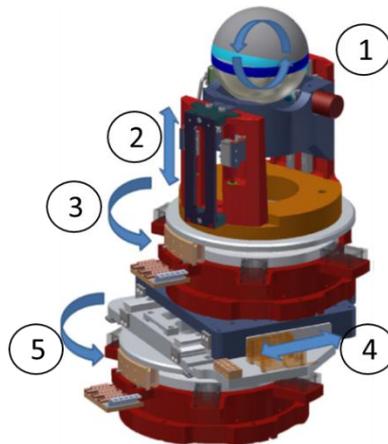
整合式 XPS 暨 XRF 系統各單元示意圖

(4) 超高真空五軸調整座

UHV 分析槍體內有五軸調整座，用於樣品於真空腔內的位置與入射角度調整，以進行樣品表面組成與氧化物之比對及分析(mapping)，如下圖所示，由兩個平移軸與三個旋轉軸所組成。



7



超高真空五軸調整座示意圖

上圖為超高真空五軸調整座的可動範圍。編號 1 和編號 3 可繞著樣品中心旋轉；編號 2 和編號 4 的作用是垂直及水平移動軸，將樣品調整至腔體中心的位置；編號 5 是繞著腔體中心旋轉，可調整 X 光入射樣品的角度。

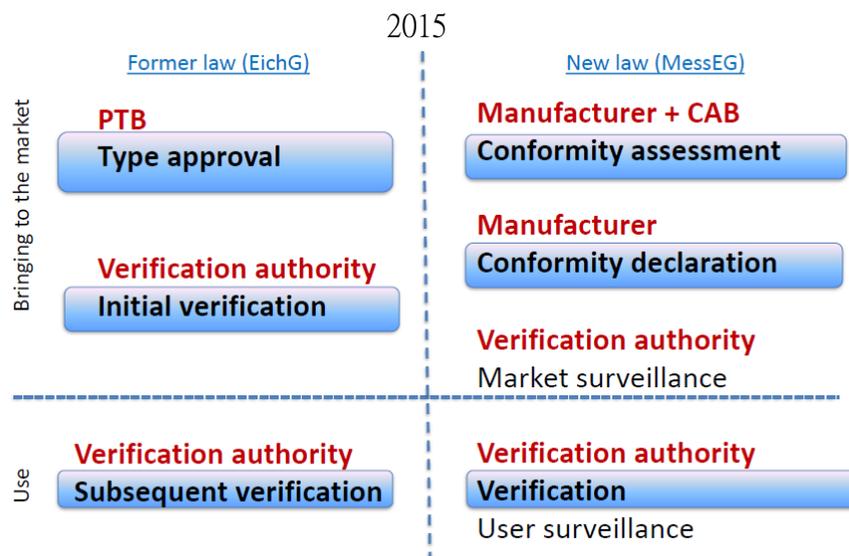
(三) PTB 法定計量管理單位

最後的行程是參訪 PTB 法定計量部門，部門主管 Dirk Ratschko 博士主要就德國目前的法定計量管理架構進行介紹。為因應歐盟欲使各國間的度量衡器流通更為順暢、管理方式簡化並趨於一致，德國的法定計量管理制度在 2015 年以後有重大變革，傳統法定度量衡器取得合格資格之型式認可(Type approval)、初次檢定(Initial verification)等重要管理措施，在新的管理制度中已被隱藏於品質系統監督中，且上述兩項措施亦非度量衡器合格之唯一選項，以下就德國新舊法定計量管理基本架構與其新管理制度進行介紹，簡報內容詳如附件 3。

1. 德國新舊法定計量管理基本架構介紹

在 2015 年以前德國的法定計量管理制度架構，主要包含度量衡器進入市場前的型式認可(Type approval)、初次檢定(Initial verification)以及進入市場(或說使用中)後的重新檢定(Subsequent verification)等階段與重要工作(如下圖 Former law 部分)，以確保度量衡器之準確性，此架構與我國目前的管理制度相當類似。

然而在 2015 年以後，其管理制度架構有了重大的轉變，如下圖新法(New law)的部分，有關型式認可、初次檢定等管理度量衡器的重要概念皆已在新的管理制度中消失，取而代之的是前市場的符合性評鑑(Conformity assessment, CA)、符合性聲明(Conformity declaration)與市場監督(Market surveillance)，以及後市場(或說使用中)的使用者監督(User surveillance)等重要管理措施。



2015 年前後法定計量管理基本架構比較

此外，我們可以看到在新的管理制度架構下，度量衡器的符合性評鑑與符合性聲明工作主要由製造商搭配符合性評鑑機構來完成，政府的在前市場的角色淡化，而檢定機關(構)(Verification authority)的主要工作負擔亦得由過去器具數量密集與人力需求密集的初次檢定工作中釋放出來，而改以市場監督及使用者監督等，人力投入少但偵知問題可能性大之監督工作為主。可見度量衡器(即廠商產品)生產品質的良窳不再僅由初次檢定工作把關，新管理系統改由評估廠商製造能力(即其品質系統)的方式來完成，主要有符合性評鑑(由製造者與符合性評鑑機構把關)、符合性聲明(製造者自行把關)及市場監督(由檢定機關(構)把關)等措施。

2. 德國新法定計量管理制度介紹

由於歐盟各國為了要讓商品(包含度量衡器)的流通更為順暢，因此制訂了度量衡器相關的指令供各會員國遵循，希望能盡可能地消除不必要的技術性貿易障礙。爰此，為了落實歐盟的共通性法規，德國於 2015 年以後已將其國內度量衡相關法規與歐盟的兩個重要的度量衡器指令進行調和，因此 2015 年也是德國實行度量衡器新管理制度的起點。

德國的新度量衡器管理制度主要係基於上開所述兩個重要的歐盟指令，分別為歐盟量測儀器指令(2014/32/EU Measuring Instruments Directive, MID)與歐盟非自動衡器指令(2014/31/EU Non Automatic Weighing Instruments Directive, NAWID)。這兩個指令的基本邏輯，係依據各器具與製造商的特性，針對度量衡器製造商的品質系統，以不同的手法(或說模組及模組組合)，進行符合性評鑑與市場監督。通過符合性評鑑的度量衡廠商，即可取得歐盟 CE 認證標章，在德國此一新制度已取代了原管理系統的形式認可與初次檢定等管理措施。至於各符合性評鑑模組的基本內容分別介紹如下：

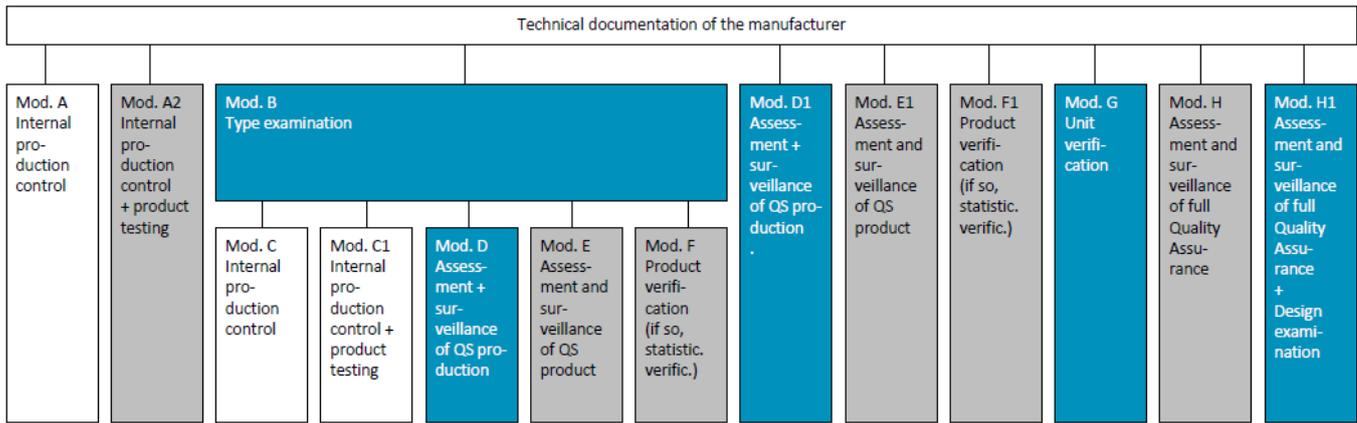
新計量管理制度符合性評鑑模組

符合性評鑑模組	說明
模組 A(內部生產控制)	由製造商自行確保其產品符合法規要求(符合性評鑑)，包含設計與製造階段；在設計階段辨識應符合之法規、實施風險分析與評鑑，在製造階段則為生產過程中，採取所有必要的措施確保所製造產品符合法規要求，即實施測試與控制、監控產品符合性；這個模組係由製造者自行實施符合性評鑑步驟(first-party conformity assessment)，毋需第三方認證機構(Notified Body, NB)介入。

模組 A1(內部生產控制+產品測試監督)	模組 A1 為模組 A 的變形，故基本要求相同，額外需求為產品測試監督。產品測試監督可循目前做法，由製造商選定第三方認證機構實施，亦可由製造商內部經認證通過的內部認證組織來實施。
模組 A2(內部生產控制+隨機產品測試監督)	亦為模組 A 的變形，且要求類似模組 A1；差別在於並非全數生產的產品都需測試，而是不定期的抽樣送至第三方認證機構檢驗。
模組 B(EC 型式認證)	符合性評鑑程序的一部分，通常不會單獨存在(需與其他模組搭配)，由製造商向第三方認證機構提出一次性產品試驗或設計概念申請；以判斷該產品或設計概念是否符合相關法規規定，屬設計階段之符合性評鑑。 由 NB 對產品樣品或設計概念進行相關測試或審查，分為兩種類型。1. 生產與設計結合型(combination of production type and design type)：包含技術文件、相關支持證據與樣品測試(產品的一個或多個重要部件(屬既有概念)；2. 設計型(design type)：僅審查技術文件與相關支持證據(新選項)測試或審查合格後由 NB 發出合格證書 (EC Type examination certificate)。
模組 C(依據內部生產控制來確定符合型式)	模組 C 僅包含生產階段，且伴隨於模組 B 之後(意即原製造商所生產的產品為已經取得 EC Type examination certificate 的產品；如甲公司取得證書後由乙公司進行量產，此時乙公司為生產者)。由生產者自行確認(first-party conformity assessment)其產品符合其 EC Type examination certificate 之內容且合乎相關法規之要求。另模組 C 與模組 A 在自行確認的部分雖然相似，但模組 C 的符合性作業是根據在模組 B 所得之型式認證結果而來。
模組 C1(透過內部生產控制加上第三方監督產品測試來確定符合型式)	此模組之要求基本上與模組 C 相同；惟全數生產的產品尚必須經由歐盟指定認證單位(NB)進行監督測試。
模組 C2(透過內部生產控制加上不定期第三方監督產品測試來確定符合型式)	此模組要求類似模組 C1；差別在於並非全數生產的產品都需測試，而是不定期的抽樣送至 NB 檢驗。
模組 D(透過製程品質保證來確定符合型式)	製造商邀請 NB 定期來針對製程進行品質稽核(基本上與 ISO9001 類似)；通常這個模組會搭配模組 B 一同進行，也就是說產品本身也必須通過產品驗證(型式認證)；
模組 D1(製程品質保證)	要求類似模組 D；差別在於產品本身不需要額外通過產品型試認可驗證；取得製程品質稽核證書後由製造商於未來生產的產品上標示 CE 及 NB 代號；
模組 E(透過產品品質保證來確定符合型式)	跟模組 D 類似，但差別主要在於模組 D 注重製作過程，而模組 E 則把重點放在最終量產產品的品檢跟驗收；本模組仍由製造商邀請 NB 定期來進行品質稽核；這個模組也會搭配模

	組 B 一同進行，也就是說產品本身必須先通過產品驗證(型式認證)。
模組 E1(最終產品檢驗與測試的品質保證)	由製造商邀請 NB 定期來針對最終產品檢驗的部分來進行品質稽核；取得證書後由製造商於未來生產的產品上標示 CE 代號。
模組 F(透過產品檢驗來確定符合型式)	這個模組也會搭配模組 B 一同進行，也就是說產品本身必須先通過產品驗證(型式認證)；後續於出貨時由 NB 依出貨數量抽取一定比例的量產品進行評估；確認無誤後由 NB 針對該次出貨產品發證。
模組 F1(產品檢驗)	製造商為產品準備技術文件；並於出貨時由 NB 依出貨數量抽取一定比例的量產產品進行評估；確認無誤後由 NB 針對該次出貨產品發證。
模組 G(產品全數檢驗)	製造商為產品準備技術文件；並於出貨時由 NB 對全數量產品進行評估；通常此模式會用於數量少且高風險的產品。
模組 H(全程品質保證)	即製程品質保證(D1)再加上最終產品檢驗與測試的品質保證(E1)。
模組 H1(全程品質保證加上 EC 型式認證)	即全程品質保證 H 再加上 EC 型式認證 B；故若再將 H 拆解，亦可視為製程品質保證(D1)加上最終產品檢驗與測試的品質保證(E1) 再加上 EC 型式認證(B)。

歐盟量測儀器指令(2014/32/EU MID)中，主要包含模組 A、模組 A2、模組 B、模組 C、模組 C1、模組 D、模組 D1、模組 E、模組 E1、模組 F、模組 F1、模組 G、模組 H 以及模組 H1，且該指令主要係對 10 種度量衡器製造者應達到之符合性評鑑進行規定，這些器具分別為水量計、氣量計、電度表、熱度計、水以外的液體體積量測系統、自動衡器、計程車計費表、物質量具、度器及車輛排氣分析儀等，而德國國內的計量法規(Mess- Und Eichgesetz 與 Mess- und Eichverordnung)在這些器具的管理上，必須與歐盟量測儀器指令(MID)調和一致。至於每種器具的符合性評鑑與市場監督方式則因器具類別、製造特性等而有所不同。如水量計、氣量計等器具可適用 B+D、B+F 與 H1 等管理方式；而水以外的液體體積量測系統則可適用 B+D、B+F、G 與 H1 等管理方式。各器具所適用之管理模組如下頁圖所示，而 PTB 則提供了模組 B、D、D1、G 及 H1 的符合性評鑑服務，其中 H1 只適用水量計與熱度計。



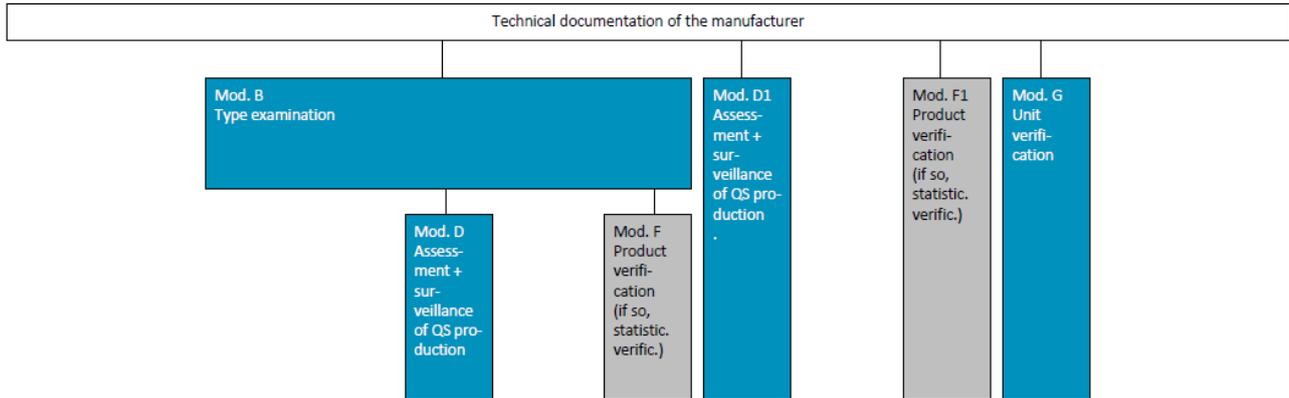
- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> •MI-001, Water meters: •MI-002, Gas meters and volume conversion devices •MI-003, Active electrical energy meters •MI-004, Heat meters •MI-005, Measuring systems for the continuous and dynamic measurement of quantities of liquids other than water •MI-006, Automatic weighing instruments
 •MI-007, Taximeters •MI-008, Material measures
 •MI-009, Dimensional measuring instruments
 •MI-010, Exhaust gas analysers | <p>mechanical systems:
electromechanical systems:
electronic systems or systems containing AWI:</p> <p>I – Material measure of length
II – Capacity serving measures</p> <p>mechanical or electromechanical:
electronic or with SW:</p> | <p>B+D, B+F, H1
B+D, B+F, H1
B+D, B+F, H1
B+D, B+F, H1
B+D, B+F, G, H1
B+D, B+E, B+F, D1, F1, G, H1
B+D, B+E, B+F, G, H1
B+D, B+F, G, H1
B+D, B+F, H1
B+D, D1, F1, G, H
A2, B+D, B+E, D1, E1, F1, H
B+D, B+E, B+F, D1, E1, F1, G, H, H1
B+D, B+F, G, H1
B+D, B+F, H1</p> |
|--|---|--|



PTB-Offer:
Modules
 B, D, D1, G, H1*
 * H1 only for Mi-001 and MI-004

德國量測儀器符合性評鑑模式示意圖

歐盟非自動衡器指令(2014/31/EU NAWID)中，主要包含模組 B、模組 D、模組 D1、模組 F、模組 F1 以及模組 G，該指令主要係對非自動衡器製造者應達到之符合性評鑑進行規定，而德國國內的計量法規(Mess- Und Eichgesetz 與 Mess- und Eichverordnung)在非自動衡器的管理上，亦必須與歐盟非自動衡器指令(NAWID)調和一致。各類非自動衡器所適用之管理模組如下頁圖所示，而 PTB 則提供了模組 B、D、D1 及 G 的符合性評鑑服務。



possible:

- Nonautomatic weighing instruments: B+D, B+F, G
- Nonautomatic weighing instruments, which do not use electronic devices and the load-measuring device of which does not use a spring to balance the load: B+D, B+F, D1, F1, G
- If the instrument's performance is sensitive to gravity variations, the conformity assessment according to module D, D1, F, F1 or G may be carried out in two stages, with the second stage carried out at the place of use of the instrument.

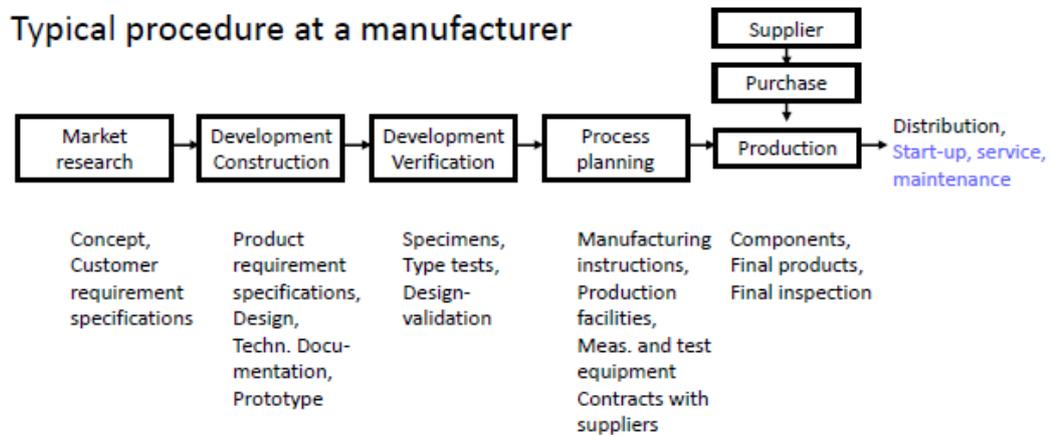


PTB-Offer:
Modules
B, D, D1, G

德國非自動衡器符合性評鑑模式示意圖

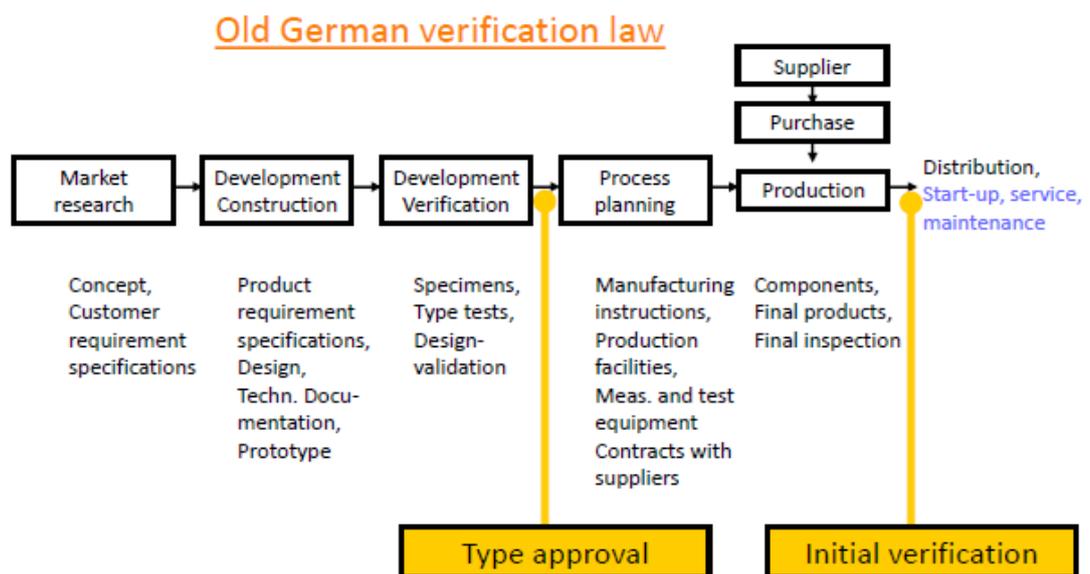
3. 從生產流程看德國新舊管理制度

典型的度量衡器生產流程可以展開如下圖所示，主要包含市場研究調查(Market Research)、原型產品建構開發階段(Development Construction)、產品驗證階段(Construction Verification)、生產計畫階段(Process Planning)及正式量產階段(Production)等各階段。



典型的製造商生產流程圖

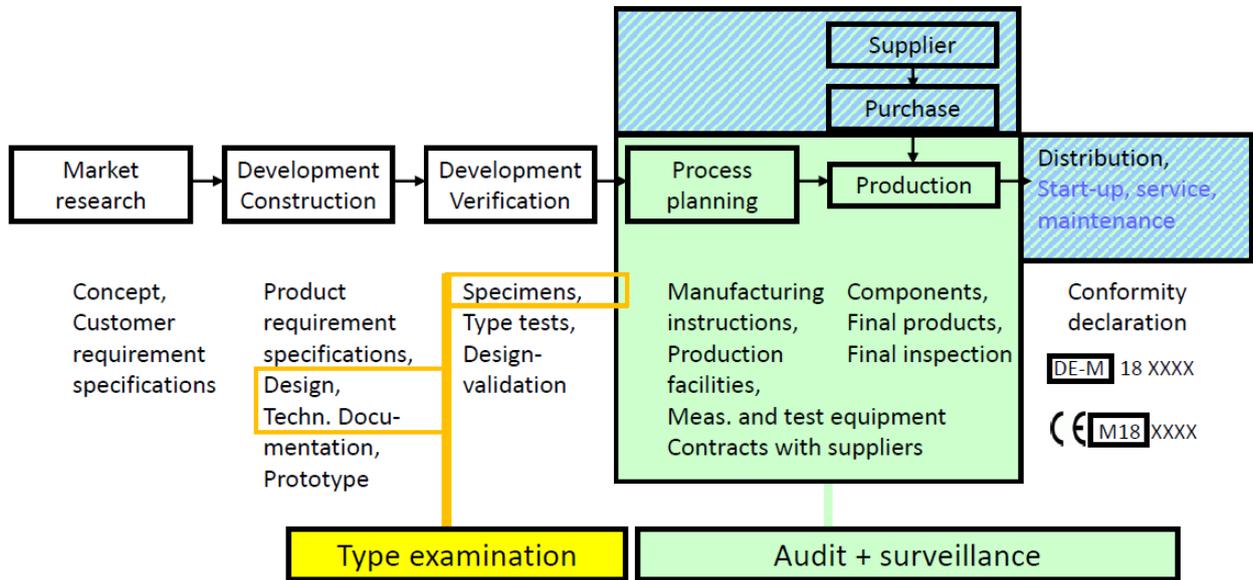
如果將度量衡器管理舊制中的重要措施，型式認可與初次檢定，放入製造業者的生產流程圖中，可以清楚看見過去由德國官方公權力介入之兩項管理措施，前者的介入時點在業者開發產品完成後之產品驗證階段，後者的介入時點則在產品正式量產完成後的品質管理檢驗階段。對於度量衡器製造廠商而言，這兩項由官方介入的管理措施，對於自身注重產品品質的製造者而言，事實上皆屬於其生產流程中的工作項目。以型式認證觀之原本就屬其內部用來驗證其產品設計概念達到要求(自身的規格要求或標準的要求或強制性法規的要求)之工作項目；至於初次檢定則屬於生產線量產後的產品出廠前之品質確保工作，且採用全數檢驗的極端做法(而非採用抽樣檢驗)，雖可將風險降到最低，但付出的卻是不容小覷的人力與時間成本。



舊管理制度在生產流程的位置

另如果將度量衡器新管理制度(如模組 B+模組 D) 放入製造業者的生產流程圖中，可以發現新管理制度已非如舊制度由點介入來確保生產品質。新管理制度是一個面的介入(如在 D 模組中涵蓋的範圍是生產階段的所有活動)，由第三方認證機構根據製造者取得模組 B 型式認證的相關技術文件，來對其生產流程進行稽核與監督，以確認其生產計畫階段(Process Planning)及正式量產階段(Production)的各項活動結果確實能生產出符合型式之產品，亦即該產品符合製造商於模組 B 取得型式認可的各項要求。這樣的管理制度追求的是製造者的生產能力確實持續能產出符合型式的產品，不同於舊制度存在僅有送型式認證的黃金樣品符合型式的風險；另新制度將管理的重點移往品質系統的監督與稽核，取代舊制度對最終產品的逐一檢定，這樣的好處是在當代製造者量產能力越來越強、且可能須列管的度量衡器越來越多

元的同時，檢定人力很容易便會有不足的狀況，而新制度則讓管理機關有彈性選擇，避免產生這類問題。當然，若是對於小批量、多樣化生產且風險程度高的器具亦可採模式 G，對產品進行全數檢驗。故新的管理系統相較於舊系統是相當有彈性的。



新管理制度在生產流程的位置(以 B+D 為例)

參、心得及建議

- 一、 PTB 為德國政府部門，每年挹注經費研發及維持各項科學計量標準，並參與多個國際間科學計量合作計畫(包含國際波茲曼計畫及亞佛加厥計畫)，制定各項原級標準；另提供各領域量測系統校正服務，也提供德國國內二級實驗室之參考追溯源，創造更大的產業服務效益，可作為我國 NML 之參考，主要任務為建立科學計量原級標準與國際等同，並向下傳遞原級標準，扶植國內二級實驗室有自主能力對外提供各項量測系統校正服務。
- 二、 為了使 SI 單位擁有長期的穩定度及可實現性，CIPM 自 20 世紀初以來結合歐洲各國實驗室的能力致力於 SI 重新定義及實現，包含公斤、安培、克耳文及莫耳等單位，PTB 亦參與其中，由本次參訪所見，PTB 除專注於 SI 單位實現方法的研究與開發，亦成為實現方法的輸出國，例如將研發所獲之質量單位實現方法(XRCD)輸出給我國 NML，包含矽晶球、XRF/XPS 整合量測系統及 UHV 五軸基座等設備，並在相關重要物理常數值之研究與發展持續累積能量。
 1. 我國 NML 目前透過科發計畫向 PTB 購置相關設備以實現質量新定義，亦派員到 PTB 學習相關知識與設備操作，雖購置了設備也培訓了人員，惟似無實質的研究發展，爰建議未來 NML 應多參與國際間大型科學計量研發計畫(例如國際波茲曼計畫及亞佛加厥計畫)，將角色定位由學習者轉換為計畫參與者，與先進國家標準實驗室共同甚或自行研發，從而累積 SI 實現方法之自主實力(其中包含物理常數的量測方法及研發)，進而推升我國成為科學計量量測技術的輸出國。
 2. 有關溫度標準部分，早在 1988 年，美國國家標準與技術研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)以聲學氣體球型共振腔進行波茲曼常數值 k 之量測，當時的相對不確定度便已達到 1.7 ppm，經過美、法、義、英、中等各國的努力下，截至 2017 年 7 月，英、法兩國已可達到 0.7、0.6 ppm 之水準)；而 DCGT 在 PTB 的持續努力下，目前所能達到之相對不確定度則為 1.9 ppm，惟技術移轉的能量尚未成熟。爰我國 NML 選擇向英國國家標準實驗室(National Physical

Laboratory, NPL)採購 AGT 等相關設備實現 SI 新溫度原級標準，應屬現階段較適之選擇。惟建議我國 NML 後續仍應與主導 DCGT 實現方式的 PTB 保持良好關係，建立科學研究技術交流與合作，並與不同實現方式之實驗室(例如 PTB)進行實驗室間比對，以最小資源達成預防與偵知單一實現方式之系統飄移現象等目的。

三、德國在 2015 年以後的新法定計量管理制度有多項特色，包含其思維由品質是檢驗出來的轉化為品質是製造與設計出來的、針對不同生產特性與風險程度之生產者有更彈性的管理措施，另新的制度也讓管理範疇的可擴充性變大，值得我國參考與借鏡。

1. 管理思維：德國對於度量衡器的管理思維，已由「品質是檢驗出來的」往生產流程的更前端移動，轉變為「品質是製造與設計出來的」。這與品質管理理論的發展趨勢相同，畢竟產品經生產後，最後才透過全數檢驗來確認品質良窳，成本高、錯誤已造成且根本原因難以發現，是相對不效率的做法；故若能往生產流程的前端(製造甚或設計端)移動，進行控制與管理，則有可能在不良品產生前偵知、瞭解與修正根本原因，而且相對須投入之人力(成本)較低。因此傳統的逐一檢定管理思維是否可改由製造系統能力之評估，值得思量。
2. 彈性措施：德國的新法定計量管理制度提供了多樣的品質系統能力評估模組，以利選擇合理適用於不同生產特性(批量大小、樣式多少)、不同生產方式(自製或代工、連續或批次)以及不同風險程度之器具製造者，相較於傳統的形式認可搭配初次檢定的齊頭式管理模式，新的管理制度有更多的彈性，這樣的彈性也讓公私部門的資源分配更有彈性也有機會更加合理。
3. 可擴充性：德國的新管理制度在前市場的管理面，主要藉由符合性評鑑機構的能量，並讓政府的大幅退場，僅扮演稽核的角色，這樣的好處是讓整個計量管理系統的可擴充性大幅提升。由於政府的預算與人力等逐漸面臨短絀的局勢，然而必須管理的度量衡器種類卻隨著科技與產業的進步，不降反升，試想如果所有的形式認證與初次檢定之測試設備、系統、知識、技術、規範、程序、表單等的建立都仍由資源逐漸短缺的政府來負責，其實可行性不高，且更有可能的情況是政府

囿於資源考量，僅能就部分器具納檢，導致整個系統的可擴充性降低。而德國的新管理制度則是將權力外放，讓有資源、技術與知識的機構來進行符合性評鑑的工作，政府則是扮演監督的角色，對這些執行者進行查核，不僅舒緩了政府人力與資源的窘境，也同時強化了計量管理系統的可擴充性。

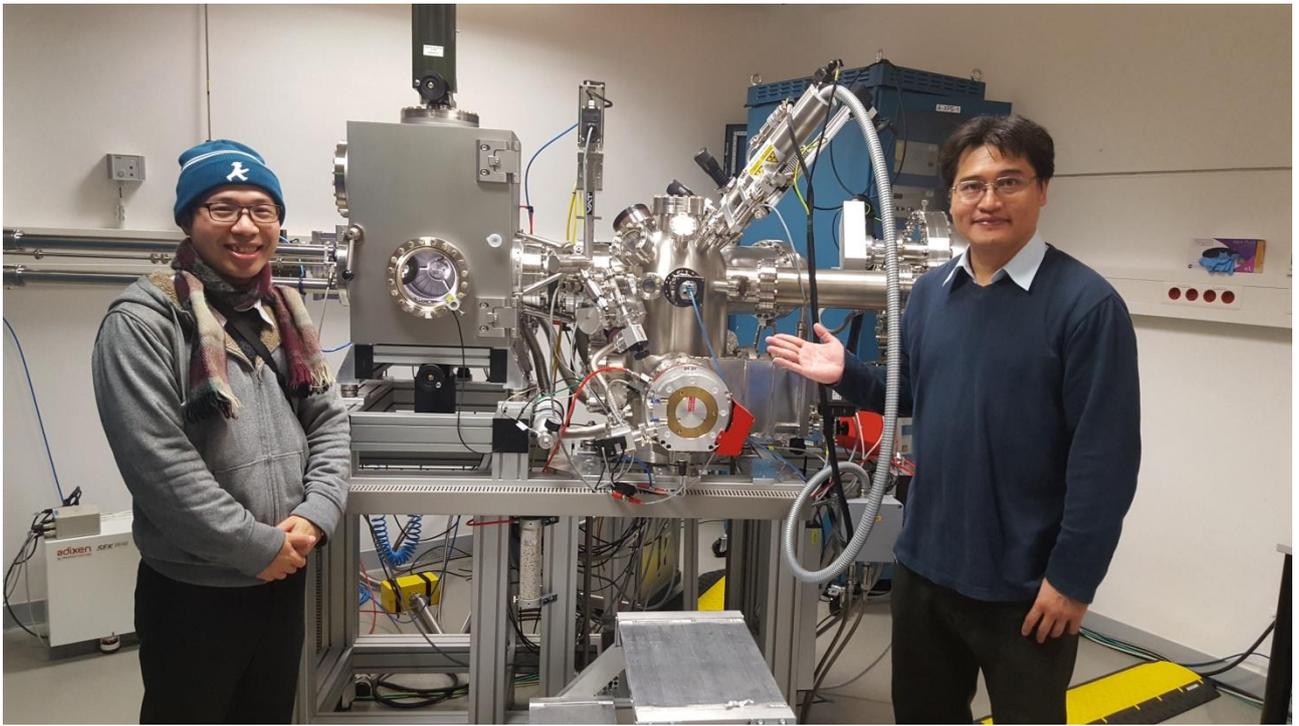
肆、參訪相關照片



照片一、與溫度實驗室負責人 Dr.Christof Gaiser 留影合念



照片二、與質量實驗室第一組組長 Dr.Frank Härtig(右一)及 1.2 部門 Dr.Rolf Kumme(左一)留影合念



照片三、參訪質量實驗室設備



照片四、與法定計量及符合性評鑑負責人 Dr.Dirk Ratschko 留影合念

伍、名片一覽

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin, Nationales Metrologieinstitut 

Dr. rer. nat.
Christof Gaiser
Arbeitsgruppe 7.43
"Grundlagen der Thermometrie"

Abbestraße 2-12, 10587 Berlin
Telefon: 030 3481-7349
Telefax: 030 3481-7490

E-Mail: christof.gaiser@ptb.de
Web: http://www.ptb.de



 **Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Dr.-Ing. Rolf Kümme
Direktor und Professor

Fachbereichsleiter 1.2
Festkörpermechanik
Head of Department 1.2
Solid Mechanics

Telefon: +49 531 592-1200
Fax: +49 531 592-69 1200
rolf.kumme@ptb.de



 **Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Dr.-Ing. Prof. h. c. Frank Härtig
Direktor und Professor

Abteilungsleiter 1
Mechanik und Akustik
Head of Division 1
Mechanics and Acoustics

Telefon: +49 531 592-1010
Mobil: +49 174 3149822
Fax: +49 531 592-691010
frank.haertig@ptb.de



 **Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Dr. rer. nat. Siegfried Hackel
Direktor und Professor

Area 1.01
Digitalization in Division 1

phone: +49 531 592-1017
mobile: +49 172 5430843
fax: +49 531 592-69 1017
siegfried.hackel@ptb.de



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin, Nationales Metrologieinstitut 

Regierungsdirektor
Dr.-Ing.
Michael Borys
Leiter der Arbeitsgruppe 1.11 Darstellung Masse

Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
Telefon: 0531 592 1110
Telefax: 0531 592 691110

E-Mail: michael.borys@ptb.de
Web: http://www.ptb.de



 **Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Dr. Dirk Ratschko
Direktor und Professor

Fachbereichsleiter 9.2
Gesetzliches Messwesen
und Konformitätsbewertung
Head of Department 9.2
Legal Metrology and
Conformity Assessment

Telefon: +49 531 592-8300
dirk.ratschko@ptb.de



陸、中英文對照表

英文縮寫	英文全稱	中文翻譯
AGT	Acoustic Gas Thermometry	聲學氣體溫度系統
ART	Absolute Radiation Thermometry	絕對輻射溫度系統
BIPM	Bureau international des poids et mesures (法文)	國際度量衡局
BMWi	Federal Ministry for Economic Affairs and Energy	德國聯邦經濟事務和能源部
CA	Conformity assessment	符合性評鑑
CAB	Conformity Assessment Body	符合性評鑑組織
CIPM	Comité international des poids et mesures (法文)	國際度量衡委員會
CGPM	Conférence générale des poids et mesures (法文)	國際度量衡大會
DBT	Doppler-broadening Thermometry	都卜勒加寬溫度系統
DCGT	Dielectric-constant Gas Thermometry	介電常數氣體溫度系統
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes	歐洲國家計量組織聯盟
iMERA	Project of Implementing the Metrology European Research Area	歐洲計量實現研究領域計畫
IPK	International prototype of kilogram	國際公斤原器
ISO	International Organization for Standardization	國際標準化組織
JNT	Johnson Noise Thermometry	強生雜訊溫度系統
MID	Measuring Instruments Directive 2014/32/EU	歐盟量測儀器指令
NAWID	Non-Automatic Weighing Instruments Directive 2014/31/EU	歐盟非自動衡器指令
NIST	National Institute of Standards and Technology	美國國家標準與技術研究院
NML	National Measurement Laboratory	國家度量衡標準實驗室
NPL	National Physical Laboratory	英國國家標準實驗室
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	德國聯邦物理技術研

		究院
SI	Système International d'Unités (法文)	國際單位制
UHV	Ultra-high Vacuum	超高真空
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	X 射線光電子頻譜技術
XRCD	X-ray crystal density method	X 光晶體密度法
XRF	X-ray Fluoresce Spectroscopy	X 射線螢光頻譜技術

柒、附件