

出國報告（出國類別：開會）

度量衡質量領域發展趨勢

服務機關：經濟部標準檢驗局

姓名職稱：金祖永技士

派赴國家：德國

出國期間：中華民國 107 年 5 月 13 日至 5 月 19 日

報告日期：中華民國 107 年 8 月 13 日

摘要

為瞭解目前度量衡質量領域兩大重要課題—新 SI 單位的實現與工業 4.0 概念的應用之最新發展與解決方案，本局派員參與德國 ILMENAU 技術大學及德國 Sartorius Lab Instruments 公司於德國哥廷根(Goettingen)舉辦之研討會，並至德國聯邦物理技術研究院(PTB)參訪矽晶球之製造與校正系統。

研討會行程利用專題演講、實作與參訪的方式，在短短 3 天內使參與者獲得目前度量衡質量領域發展的最新資訊。在新質量定義的部分，利用矽晶球與瓦特天平推導普朗克常數的結果已無太大差異，預期 2018 下半年在國際度量衡大會上將會正式通過。而在工業 4.0 概念的部分，單一公司的研發能力已無法勝任新質量定義實現所需的各項技術，跨域整合(如光學、電學、自動控制等等)將是未來的趨勢。

目錄

摘要	i
目錄	ii
圖目錄	iii
壹、背景及目的	1
貳、出國行程內容	2
一、專題演講：Mass Metrology according to OIML R111	3
二、專題演講：自動質量比較儀的進化	4
三、專題演講：法碼磁性測試	6
四、機器手臂自動質量比較儀與磁性檢測儀器實作	7
五、專題演講：公斤重新定義與追溯體系的影響	10
六、專題演講：公斤新定義的實現	13
七、專題演講：瓦特天平與真空質量比量儀在真空下之移轉設備	14
八、天平工廠參觀	15
九、矽晶球清潔實作	17
十、真空質量比較儀參觀	19
參、心得與建議	21
肆、附件	22

圖目錄

圖 1 參考書目	3
圖 2 磁性檢測儀器	3
圖 3 自動化量測設備	3
圖 4 機器手臂自動質量比較儀	5
圖 5 真空質量比較儀	5
圖 6 磁性檢測儀器構造圖	6
圖 7 機器手臂自動質量比較儀	7
圖 8 控制模組	7
圖 9 夾取模組	7
圖 10 梳形結構	7
圖 11 存放模組	7
圖 12 質量比較儀	7
圖 13 磁性檢測儀器操作圖	8
圖 14 磁性檢測儀器細部圖	8
圖 15 島式基座設計圖	8
圖 16 島式基座細部圖	8
圖 17 島式基座施工圖	9
圖 18 天平桌	9
圖 19 空調設計圖	9
圖 20 出風口	9
圖 21 迴風口	9
圖 22 鉑銥公斤原器與其複製品之質量差異圖	10
圖 23 亞佛加厥常數進展圖	10
圖 24 瓦特天平圖	11
圖 25 普朗克常數推導差異圖	11
圖 26 新質量定義造成追溯系統的影響	12

圖目錄

圖 27 矽晶球表層圖	13
圖 28 XRF 與 XPS 示意圖	13
圖 29 瓦特天平圖	14
圖 30 真空質量比較儀與第一代移轉設備圖	14
圖 31 第二代移轉設備結構圖	14
圖 32 真空質量比較儀與第二代移轉設備圖	14
圖 33 傳感器	15
圖 34 在中庭與 Thomas Fehling 合照	16
圖 35 矽晶球保存盒	17
圖 36 矽晶球表面檢查	17
圖 37 矽晶球置於三腳架	17
圖 38 清洗劑	17
圖 39 清洗手套	17
圖 40 沖洗矽晶球	17
圖 41 擦洗表面	18
圖 42 翻轉矽晶球	18
圖 43 矽晶球表面檢查	18
圖 44 真空質量比較儀	19
圖 45 管線通道	19
圖 46 真空移轉設備	19
圖 47 真空移轉設備內部圖	19
圖 48 矽晶球載具	19
圖 49 黃金秤	20
圖 50 1 μg 不銹鋼標準法碼	20
圖 51 與 Dr. Borys 合照	20

壹、背景及目的

度量衡質量領域的發展目前面臨兩大重要課題：

(一)如何因應 2018 年實施新 SI 單位-公斤標準所帶來的改變？

公斤是目前七個度量衡基本單位中唯一用人造物定義之單位，係利用目前存放在法國國際度量衡局(BIPM)中的鉑銱公斤原器(IPK)當作國際最高質量標準。國際度量衡局為傳遞質量標準，製造很多複製品給各國的國家度量衡實驗室當作各國的最高質量標準，並定期送回國際度量衡局進行校正。但是在最近的校正結果顯示出 IPK 和它的複製品有了約 50 μg 的質量差異，且無法確認是 IPK 變重或是變輕，是 IPK 受到外界污染抑是使用磨損。這個問題於多年前就已有專家擔心未來將會發生，在 2011 年國際度量衡委員會就提出了 4 個基本單位的重新定義，包括質量(kg)、電流(A)、溫度(K)和物量(M)，並預期將會於 2018 年第 26 次國際度量衡大會上正式通過，故各國皆正為新 SI 單位的實現方式而在作準備。

(二)如何因應工業 4.0 概念所帶來的衝擊？

工業 4.0 概念最早從 2011 年的漢諾威工業展上提出，係為德國政府推動的高科技戰略，原用於製造業的資訊化、自動化與智慧化整合以提高生產競爭力，其概念具有劃時代的進步，故又被稱為第 4 次工業革命的開端。工業 4.0 的概念除用於製造業外，亦衍生發展用於各個勞動與生產領域，度量衡質量領域的相關作業流程也遭受衝擊，亟需提出因應方案以面對挑戰。

德國 ILMENAU 技術大學及德國 Sartorius Lab Instruments 公司(以下簡稱 Sartorius 公司)於 107 年 5 月 15 日至 17 日在德國哥廷根(Goettingen)舉辦「度量衡質量領域研討會」，即針對上揭課題進行理論講解與提出實際可行之解決方案，並至全球領先之計量研究單位—德國聯邦物理技術研究院(PTB)參訪矽晶球之製造與校正系統。隨著國際趨勢的發展，我國亦遭遇上揭相同課題。為使我國質量領域之技術水準趨近國際水平，本局派員參與上揭研討會以瞭解目前國際上質量領域之之最新動態與學習先進國家之研發經驗，並蒐集相關資料以作本局度政業務轉型與技術提升之準備。

貳、出國行程內容

出國日期：107 年 5 月 13 日(日)至 5 月 19 日(六)，共計 7 日。

出國行程內容簡述如下：

日期	行程	行程內容
5/13~5/14	搭機前往德國	臺灣桃園機場搭機前往德國法蘭克福機場，轉乘交通工具至哥廷根
5/15	度量衡質量領域研討會	一、專題演講：Mass Metrology according to OIML R111(Thomas Fehling) 二、專題演講：自動質量比較儀的進化(Tony Kowalski) 三、專題演講：法碼磁性測試(Thomas Fehling) 四、機器手臂自動質量比較儀與磁性檢測儀器實作(Tony Kowalski and Thomas Fehling)
5/16	度量衡質量領域研討會	五、專題演講：公斤重新定義與追溯體系的影響(Professor Froehlich) 六、專題演講：公斤新定義的實現(Ms. Sih-Chien Chen) 七、專題演講：瓦特天平與真空質量比量儀在真空下之移轉設備(Dr. Wang Jian) 八、天平工廠參觀(Ines Majewski)
5/17	PTB 參訪	九、矽晶球清潔實作(Dr. Daniela Eppers) 十、真空質量比較儀參觀(Dr. Borys)
5/18~5/19	搭機返台	德國法蘭克福機場搭機返回臺灣桃園機場

以下針對各項行程，包括專題演講、參觀與實作內容之重點分別敘述。

一、專題演講：Mass Metrology according to OIML R111

OIML R111 Weights of classes of E_1 、 E_2 、 F_1 、 F_2 、 M_1 、 M_{1-2} 、 M_2 、 M_{2-3} and M_3 (以下簡稱 OIML R111)係在描述從 E_1 至 M_3 等級法碼之計量與技術要求，範圍從 1 mg 至 5000 kg，是目前國際上公認的法碼規範。

這份文件中開宗明義即闡明法碼的用途，係用來當作衡器校正或檢定的標準件、法碼校正或檢定的標準件與搭配衡器一起使用，並依各種用途的使用需求將法碼分為 E_1 、 E_2 、 F_1 、 F_2 、 M_1 、 M_{1-2} 、 M_2 、 M_{2-3} 、 M_3 等級與規範各級的計量與技術要求。

計量要求係指各級法碼在各標稱值所容許的最大允許誤差，亦為法碼在型式認證與檢定時使用器差來作分級的依據。技術要求則包括形狀、結構、材料、磁性、密度、表面狀況、調整與標記等部分，並依據使用時需要的準確程度來規範各項要求。

在文件的附錄中，則收錄有法碼形狀範例、法碼技術要求的測試程序、法碼計量要求的校正不確定度分析與統計管制的方法等等。另外，還有一本關於質量技術的重要參考書“Comprehensive Mass Metrology”，Wiley, New York, “Mass determination with balances” (Roman Schwartz) (2000), Cameron, J.M., Kochsiek, M., Gläser, M.(如圖 1)，內容彙整了廣泛的質量文獻資料。

在 OIML R111 中亦提到對法碼校正結果的不確定度要求，建議校正結果之擴充不確定度應小於該法碼最大允許誤差的 1/3，這對 E_1 、 E_2 等級法碼而言，要達到這個要求並使用手動量測設備似乎非常困難，必須使用自動化量測設備才易達成。這次的研討內容，將著重在磁性測試與校正不確定度要求的討論，可透過磁性檢測儀器(susceptometer, 如圖 2)與自動化量測設備來實現解決方案(如圖 3)。

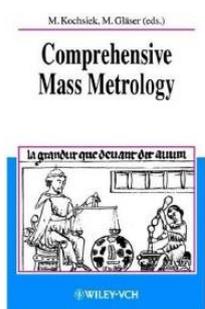


圖 1 參考書目



圖 2 磁性檢測儀器



圖 3 自動化量測設備

二、專題演講：自動質量比較儀的進化

天平(balance)是用來量測質量的儀器，通常利用直接讀取顯示值的方式來量測待測物的質量，如一般化學實驗室中使用之分析天平，而手動質量比較儀(manual mass comparator)係指比天平精密，用來量測質量差異的儀器，其原理係量測配衡法碼與待測物之間的質量差異，因此其使用範圍通常落在配衡法碼標稱值附近，主要用於 E₂、F₁ 與 F₂ 級法碼校正上。自動質量比較儀(automated mass comparator)則比手動質量比較儀少了人員操作的誤差，所以性能更加優異，多用於 E₁ 與 E₂ 級法碼校正，下列為兩者優缺點比較：

	自動質量比較儀	手動質量比較儀
解析度	較優	較差
不確定度	較優	較差
偏載引起之誤差	較優	較差
氣流引起之誤差	較優	較差
人員體熱引起之誤差	較優	較差
費用	較高	較低
待測物形狀	有要求	無要求
自動化的要求	可滿足	無法滿足
資訊化的要求	可滿足	無法滿足

隨著科技的進步，生產效率的要求日益提高，傳統自動質量比較儀的單一運作模式已不敷需求。工業 4.0 概念的興起，帶動自動質量比較儀除需滿足自動化與資訊化外，還要符合智慧化(如自動判斷待測物)與客製化(如不同的校正程序)等等新要求。此時單一公司的研發能力已無法勝任，Sartorius 公司遂尋求德國 ILMENAU 技術大學、SIOS 自動化設備公司與 Hafner 法碼公司進行跨域整合，機器手臂自動質量比較儀(如圖 4)與真空質量比較儀(如圖 5)即為整合的成果。

機器手臂自動質量比較儀可利用一隻機器手臂搭配 2 台質量比較儀執行範圍從 1 mg 至 1 kg 的法碼校正，不間斷並在短時間內完成作業，針對特殊形狀法碼與不同的校正程序亦可同時運作，不但對客製化的需求提出了解決方案，並能

滿足 OIML R111 對法碼校正的不確定度要求；而真空質量比較儀能在真空的狀態下執行質量標準傳遞的任務，以避免法碼在質量量測時因空氣浮力與表面吸附效應而產生誤差，兩者皆為需跨領域技術整合才能研發完成的設備。



圖 4 機器手臂自動質量比較儀



圖 5 真空質量比較儀

三、專題演講：法碼磁性測試

天平的原理係利用力量量測的方式進行質量估算，除了重力、空氣浮力、風力(空調氣流或因溫度梯度造成之空氣對流)外，法碼與天平間的磁力亦會影響量測結果。

依據 OIML R111 的建議，法碼磁性測試可採用磁性檢測儀器(susceptometer)進行量測，其構造如圖 6 所示，其中 A 為檢測磁鐵(test magnet)，B 為天平秤盤(weighing pan)，C 為橋式結構(bridge)，D 為塊規(gauge block)，E 為待測法碼(test weight)，其原理係透過量測法碼與檢測磁鐵間的磁力和法碼與檢測磁鐵轉向後的磁力來計算出待測法碼的磁性。

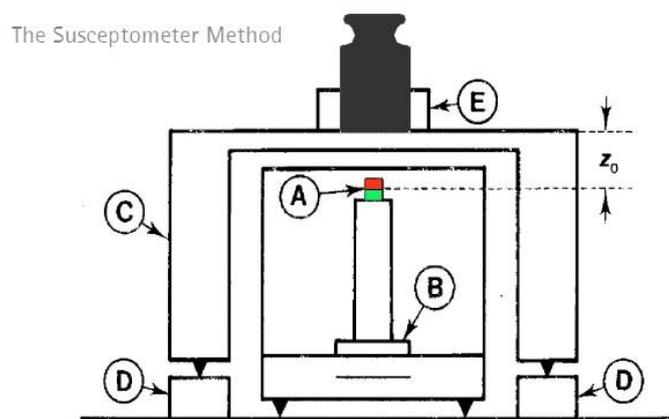


Figure from: R. Davis, "Determining the Magnetic Properties of 1 kg Mass Standards"

圖 6 磁性檢測儀器構造圖

由於法碼磁性測試的計算公式複雜，且與測試地點所在地之地球磁場強度及重力加速度有關，通常會使用磁性檢測儀器之附屬軟體來協助計算。

四、機器手臂自動質量比較儀與磁性檢測儀器實作

機器手臂自動質量比較儀(如圖 7)可分為控制模組(如圖 8)、夾取模組(如圖 9)、梳形結構(如圖 10)、存放模組(如圖 11)、質量比較儀(如圖 12)與機台基座等部分。



圖 7 機器手臂自動質量比較儀



圖 8 控制模組



圖 9 夾取模組



圖 10 梳形結構



圖 11 存放模組



圖 12 質量比較儀

機器手臂自動質量比較儀的動作原理係利用夾取模組中的線性滑軌進行移動與定位，利用梳形結構將存放模組中的法碼取出，再透過梳形結構將法碼放置於質量比較儀上進行量測。梳形結構有 4 種尺寸，當尺寸越小時，對夾取模組的定位能力要求越高。透過準確的定位，除可有效降低質量比較儀的偏載效應外，並可大幅提升量測的重複性。使用自動化設備是解決勞動力密集且高準確度作業的最佳方案，惟所需費用較高。

磁性檢測儀器的公式原理非常複雜，但是操作非常容易，先將待測法碼置於儀器上進行量測(如圖 13)，然後將儀器內的磁鐵轉向 180 度再量 1 次，最後將量測數據透過軟體進行計算即可求出待測法碼的磁性。打開磁性檢測儀器的外罩，其內部係利用一機械結構將磁鐵進行轉向(如圖 14)，構造十分簡單。

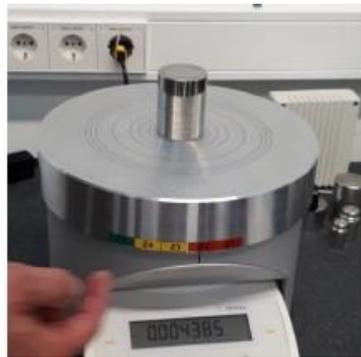


圖 13 磁性檢測儀器操作圖



圖 14 磁性檢測儀器細部圖

在實作的同時，主辦單位亦安排了實驗室的地基結構介紹(如圖 15 與圖 16)。此種構造稱之為島式基座，除利用混凝土基座提供高剛性與慣性質量達到減振的目的外，並採取獨立基座以達到隔振的效果，避免受到鄰近設施振動的影響。

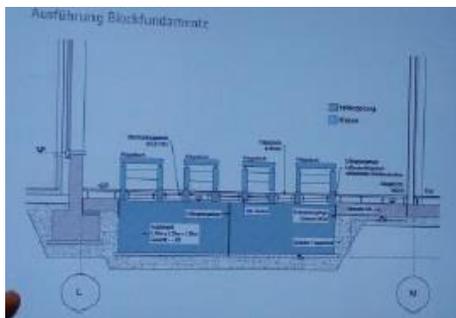


圖 15 島式基座設計圖

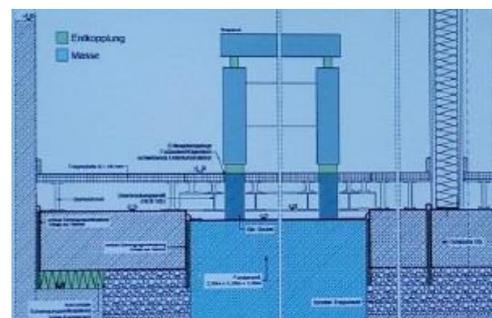


圖 16 島式基座細部圖

為了避免天平受到環境振動的影響，實驗室的天平桌基座與實驗室地板係建構在不同的地基上(如圖 17)。天平桌(如圖 18)係架構在島式基座上，並使用高密度的花崗石加強減振效果與可調式水平腳座進行水平微調。



圖 17 島式基座施工圖



圖 18 天平桌

除了考慮振動以外，實驗室的溫控也非常重要。校正實驗室環境須維持在平均攝氏 20 度，每小時溫度變化在攝氏 0.3 度內。為達到這種環境要求，Sartorius 公司實驗室特別設計一種稱之為游泳池的空調設計(如圖 19)，出風口的位置設計在角落(如圖 20)，迴風口的位置則設計在天花板上(如圖 21)。

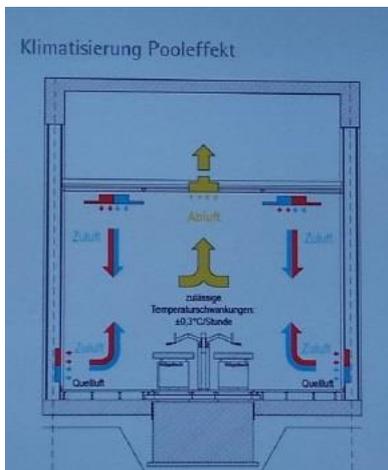


圖 19 空調設計圖



圖 20 出風口



圖 21 迴風口

五、專題演講：公斤重新定義與追溯體系的影響

公斤的重新定義係緣於鉑銱公斤原器與其複製品之間的質量差異越來越大(如圖 22)。為了解決質量會隨時間變動的問題，因此須把質量標準的定義從鉑銱公斤原器轉移到宇宙中不變的常數上，如普朗克常數(h)或是亞佛加厥常數(N_A)。

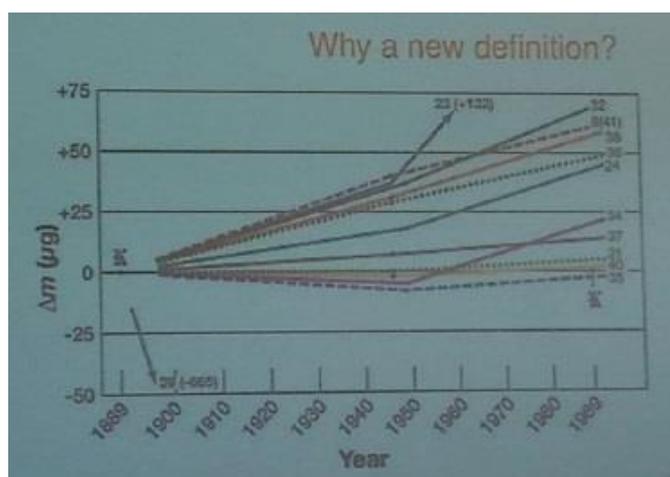


圖 22 鉑銱公斤原器與其複製品之質量差異圖

透過矽晶球可將質量與亞佛加厥常數聯繫起來，而利用瓦特天平可將質量與普朗克常數聯繫起來，這兩種常數都是可以用來定義公斤的好方法，彼此之間又可以互相推導，因此可用這兩種方法互相驗證推導結果的準確性。

從 2004 起，國際上推動亞佛加厥常數調和計畫，隨著科技的創新，矽晶體的純化與光學檢測技術已有大幅的進步，各國推導亞佛加厥常數的結果也漸趨一致(如圖 23)，其相對不確定度的量級亦小至 10^{-8} 。

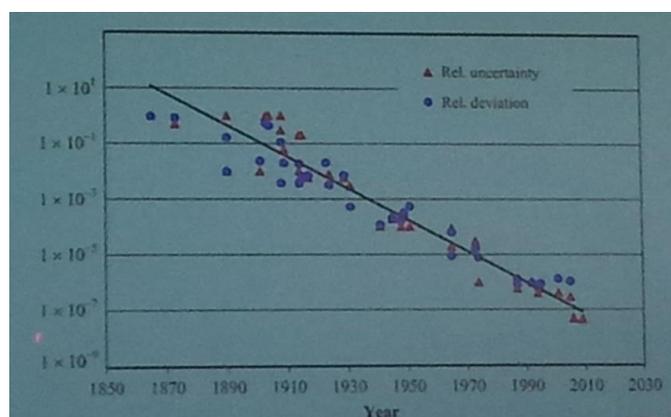


圖 23 亞佛加厥常數進展圖

瓦特天平(如圖 24)係利用重力與電磁力平衡的原理在兩種模式—秤重模式與速度模式下進行量測，並可推導出 $VI=mgv$ 的關係，等式的左邊代表電功率(電壓乘以電流)，等式的右邊代表力學功率(重力乘以速度)，因此這個天平取名為瓦特天平。再透過電磁學中的約瑟芬接面(Josephson Junction)等公式，則可導出量測方程式如下：

$$h = \frac{4}{pn^2} \frac{gv}{f^2} m$$

所以透過量測重力加速度 g 與速度 v (方程式中 p 、 n 與 f 皆為電磁學相關係數)，即可求得普朗克常數(h)與質量(m)的關係。

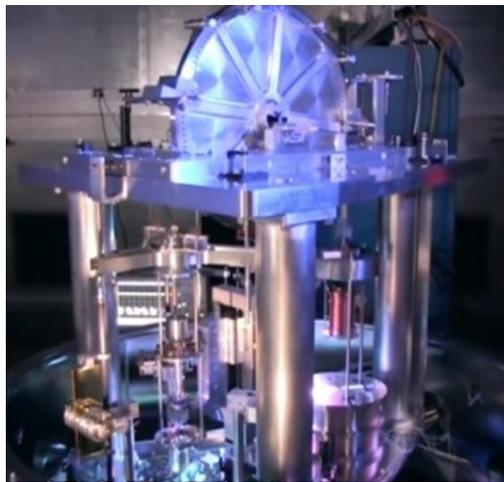


圖 24 瓦特天平圖

隨著科技的進展，現在利用矽晶球(使用 X 射線晶體密度法)與瓦特天平(又稱作 Kibble Balance)推導普朗克常數的結果已無太大差異了(如圖 25)，因此預期 2018 下半年在國際度量衡大會上將會正式通過質量的新定義，並將使用固定的普朗克常數重新定義公斤，固定的亞佛加厥常數定義莫耳。

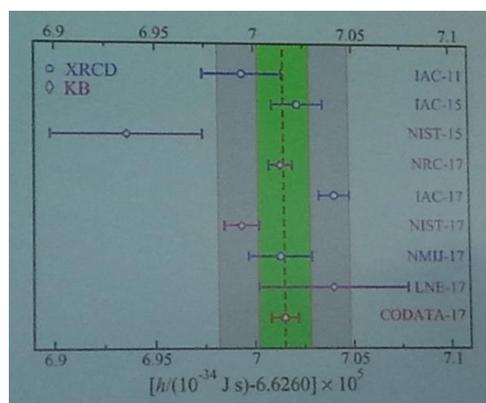


圖 25 普朗克常數推導差異圖

質量重新定義後，對質量追溯系統可能會造成影響(如圖 26)。現今的追溯體系：存放在法國國際度量衡局(BIPM)中的鉑銱公斤原器(IPK)是國際最高質量標準(人造物標準，以其為基準，故不確定度為 0 μg)，經過質量傳遞給各國的最高質量參考標準(鉑銱公斤原器的複製品，不確定度為 6 μg)，而各國國家實驗室先將質量參考標準傳遞給實驗室內的质量工作標準(不銹鋼標準法碼，不確定度為 14 μg)，再透過質量工作標準對民間校正實驗室提供法碼校正服務(不確定度為 25 μg ， E_1 級)，則民間校正實驗室可對顧客提供 E_1 級法碼校正服務(不確定度 $<83 \mu\text{g}$)。但質量重新定義後，最高質量標準可能是砷晶球或瓦特天平內使用的標準件，在質量標準的實現時已產生不確定度，並隨著各國量測技術的優劣，不確定度範圍可能從 20 μg 至 50 μg 。再經過上述的質量傳遞過程，在量測技術較差的國家，其民間校正實驗室可能會無法對顧客提供 E_1 級法碼校正服務(不確定度為 100 μg ， E_2 級)。

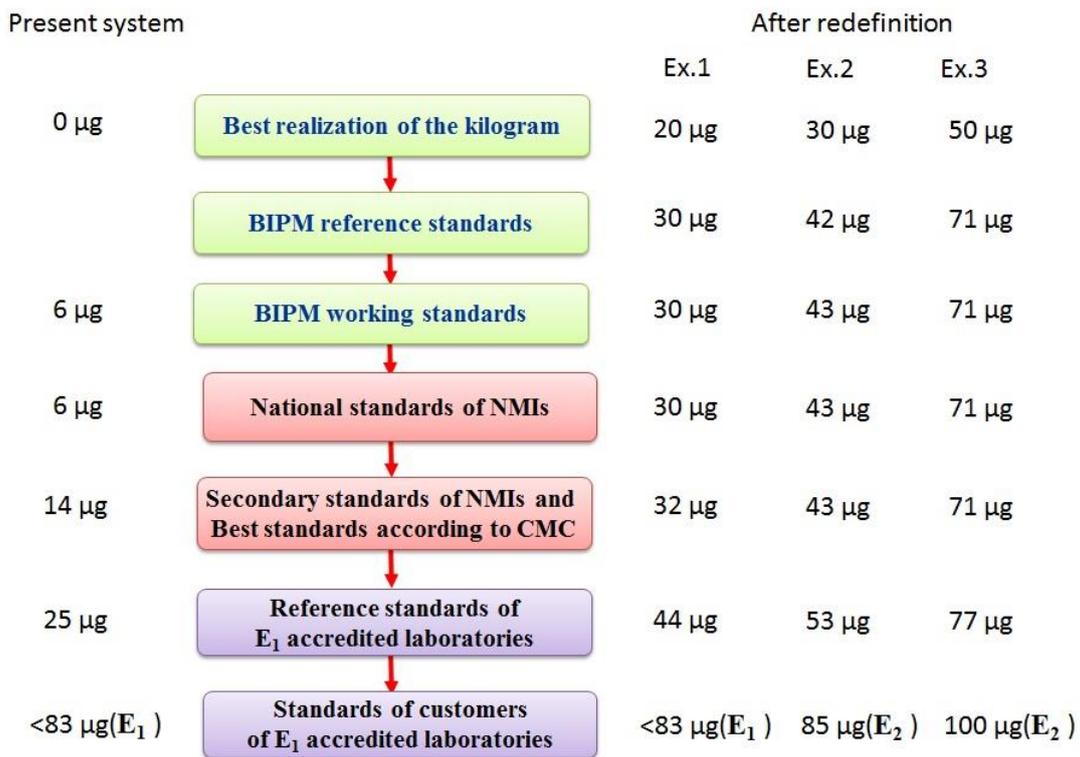


圖 26 新質量定義造成追溯系統的影響

六、專題演講：公斤新定義的實現

公斤重新定義後的實現方法主要有兩種，一種是利用 X 射線晶體密度法 (XRCD method) 量測矽晶球，使用的國家主要為德國、日本與義大利；另一種是利用瓦特天平進行質量量測，使用的國家主要為美國、法國與加拿大。由於兩種方法的研發費用都非常高昂，使得各國通常僅研發其中的一種。

台灣目前選擇的方法使用 XRCD 方法量測矽晶球，其量測方程式如下：

$$m_{sphere} = \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{\sum_i x(^iSi)A_r(^iSi)}{A_r(e)} \frac{8V_{core}}{a^3} - m_{deficit} + m_{SL}$$

其優點為等式右邊的前兩項僅需在製造時量測 1 次，在後續的正常使用中這些參數不會再改變，包括矽晶球中矽同位素的組成比例、矽晶格參數、矽晶球直徑與矽晶球缺陷；而需定期量測的是最後一項，也就是矽晶球的表層質量。

矽晶球的表層(如圖 27)，可分為二氧化矽層(OL)、含碳污染層(CL)、化性吸水層(CWL)與物性吸水層(PWL)。二氧化矽層在矽晶球製造後經過一段時間(文獻推估約 1 年)後會達到穩定的厚度，物性吸水層在真空中會解除吸附而消失，因此需要定期量測的部分只剩含碳污染層與化性吸水層，而為量測這兩層的厚度則需使用到光電領域 X 光譜相關分析技術(如圖 28，XRF 與 XPS 技術)。

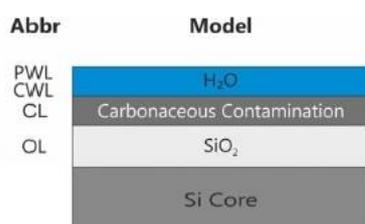


圖 27 矽晶球表層圖

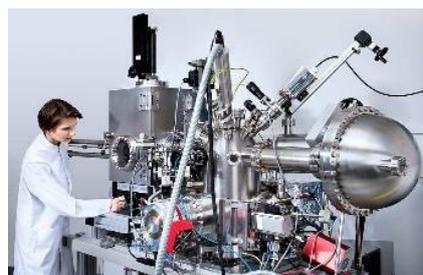


圖 28 XRF 與 XPS 示意圖

新公斤定義的實現與質量傳遞過程因此可簡化為 1.先清洗矽晶球，然後透過 XRF 與 XPS 光譜分析技術進行矽晶球表層質量評估，並帶入上述之量測方程式，即可計算出矽晶球質量。2.透過真空移轉設備可將矽晶球移轉至真空質量比較儀中。3.在真空質量比較儀中進行質量傳遞並評估不銹鋼標準法碼的吸附效應。4.在大氣中，利用 1 kg 不銹鋼標準法碼，往小質量導引至 1 mg，往大質量導引至 1000 kg。

七、專題演講：瓦特天平與真空質量比量儀在真空下之移轉設備

由於質量的重新定義，質量最高標準的實現從鉑銥公斤原器轉變為瓦特天平或砷晶球，使得質量傳遞的過程多了一層程序，也就是當使用瓦特天平或砷晶球實現質量標準後，需將質量標準移轉至真空質量比較儀中才能進行質量傳遞。

由於瓦特天平(如圖 29)與真空質量比較儀(如圖 30)都需在真空狀態下進行量測，為維持質量標準不受污染，移轉過程亦需在真空下進行，且需與瓦特天平和真空質量比較儀可相互連接，這使得移轉設備的設計變得非常複雜。

目前中國計量院(NIM)已於 2017 年完成第一代移轉設備的研發，可將移轉設備與真空質量比較儀進行連通，並在真空下透過水平機械手臂將質量標準進行水平移動。目前正研發第二代移轉設備(如圖 31 與圖 32)，透過垂直機械手臂將質量標準進行垂直移動，並嘗試與瓦特天平連通，以期完成質量標準從瓦特天平移動至真空質量比較儀的移轉過程。



圖 29 瓦特天平圖



圖 30 真空質量比較儀與第一代移轉設備圖

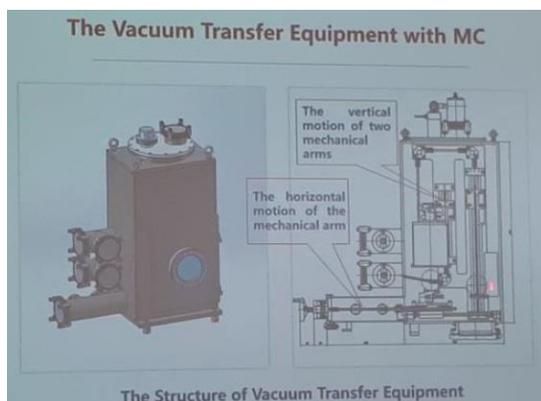


圖 31 第二代移轉設備結構圖

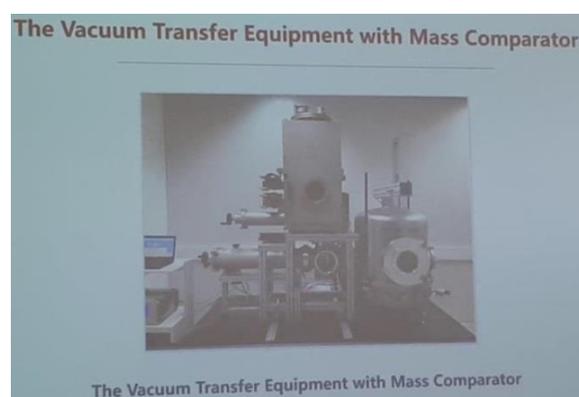


圖 32 真空質量比較儀與第二代移轉設備圖

八、天平工廠參觀

由於歐盟勞工的工資昂貴，Sartorius 公司早於 21 世紀初期即著手工廠的轉型，從轉型前約 200 名工廠員工，到轉型結束只需 50 名員工即可使工廠正常的運作。因參觀天平製造過程涉及產品機密，不允許拍照，以下簡述參觀所看到的情景。

工廠參觀分成兩部分，第一部分為參觀零件製造工廠。為了維持天平製造的品質與保護產品機密，除了無法自行生產的原料(如鋁材)或不重要的零件(如外殼)須向外界採購以外，天平的所有的零組件皆自行製造，包括印刷電路板也透過電路板蝕刻機自行生產。為了應付龐大與複雜的零組件製造，工廠的機械設備幾乎全部自動化，而且互相連線，操作員僅需向設備電腦下指令即可自動生產。操作員主要的工作為進料、選擇製程與製造結束時的品管。其中令我最感興趣的部分是傳感器(如圖 33)的製造。



圖 33 傳感器

傳感器可說是一台天平最核心的零件，負責將力量轉換成電子訊號，其原理係透過力量使傳感器產生變形，並使壓電材料產生微小電流來做力量推估。為了增加量測的靈敏度，傳感器的部分結構必須製造的非常輕薄，這使得製作程序變得非常複雜，也使得生產良率大幅降低。在參觀時我有詢問操作員關於良率如何控制的問題，操作員回答因他們的製作程序都是用電腦控制的，關於每筆製作成功與失敗的流程參數都會記錄(無論是刀具的種類、進刀的速度、角度與步驟等等)，再透過數據分析，他們可以找出最佳的製作程序，生產良率可達 8 成以上。這可說是一個工業 4.0 的成功範例，利用大數據分析，徹底研究出傳感器製造程序的特性以提高生產良率，這也使得其他天平製造同業因生產良率過低而無法進行模仿。另外，自動化的生產也可依訂單隨時調整製作程序，不但滿足客製化生產的需求，也可降低庫存與生產成本。

第二部分為參觀天平的組裝與測試。雖然零件皆已自動化生產且製造公差也控制的非常準確，但由於天平是非常高精度的儀器，組裝完畢後仍需適當的調整才能發揮天平最佳性能，因此仍須靠經驗豐富的技師進行微調的動作，而無法靠自動化設備執行。

途中導覽人員亦介紹工廠的建築風格，為了讓工廠的員工在工作時心情愉悅，工廠的屋頂採用間接自然採光的方式，使得工廠內部陽光充足但不刺眼，挑高的設計與整齊的動線，使工廠明亮通透並感覺清爽。最特別的是有 1 隻連接二樓與一樓的樓梯，據說樓梯的旋轉角度有經過特殊設計，可使上下樓梯的人因心情愉悅而加快上下樓梯的速度。另外，從工廠外的中庭(如圖 34)也可看出空間開闊的設計風格，這個空間平常亦是公司聚會與舉辦派對的場地。



圖 34 在中庭與 Thomas Fehling 合照

九、矽晶球清潔實作

矽晶球表面因容易受到污染而產生一層含碳污染層，故在量測前必須先做清潔處理，將含碳污染層的厚度降到最低。清潔的流程：

1. 將矽晶球從保存盒(如圖 35)打開，拿手電筒檢查表面有無異狀(如圖 36)。



圖 35 矽晶球保存盒



圖 36 矽晶球表面檢查

2. 取出矽晶球放置在三腳架上(如圖 37)，並配製洗劑(如圖 38，右邊為清潔劑(deconex op163)，左邊為酒精)。



圖 37 矽晶球置於三腳架



圖 38 清洗劑

3. 先將手套清洗乾淨(如圖 39)，再拿清潔劑沖洗矽晶球(如圖 40)。

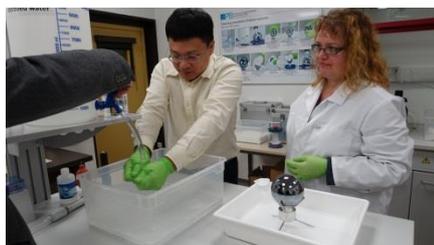


圖 39 清洗手套



圖 40 沖洗矽晶球

4. 利用微纖維布擦洗矽晶球表面(如圖 41)，並將矽晶球翻轉 180 度擦洗(如圖 42)。



圖 41 擦洗表面



圖 42 翻轉矽晶球

5. 擦洗完畢後用酒精多次沖洗矽晶球表面直至矽晶球表面無水痕。
6. 利用乾淨的微纖維布將手套擦乾，將矽晶球從三腳架移回保存盒。
7. 拿手電筒檢查矽晶球表面有無清潔乾淨(如圖 43)。

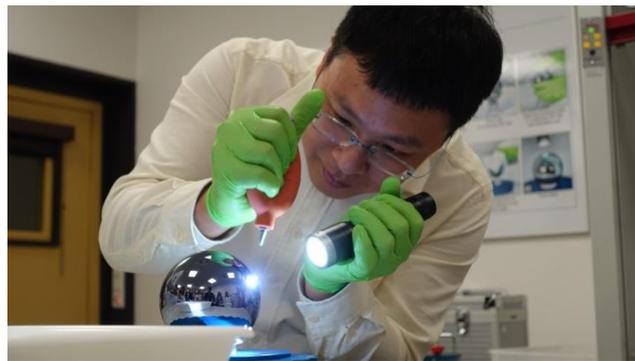


圖 43 矽晶球表面檢查

十、真空質量比較儀參觀

真空質量比較儀(如圖 44)係為執行質量傳遞中具有最高準確度的校正平台，其任務為在真空中將質量標準從矽晶球或鉑銱公斤原器的複製品傳遞給 1 kg 不銹鋼標準法碼，與評估不銹鋼標準法碼的吸附效應，其解析度為 0.1 μg ，量測重複性小於 0.4 μg 。為了達到上述性能，真空質量比較儀需架設在堅固的花崗石天平桌上，內部幾乎沒有發熱裝置，外部再包覆一層壓克力外殼，而實驗室內所有會產生熱量或振動之裝置皆需移至隔壁房間，牆上則留有管線通道(如圖 45)。



圖 44 真空質量比較儀



圖 45 管線通道

真空移轉設備(如圖 46)係為質量定義實現設備(如瓦特天平)與質量傳遞設備(如真空質量比較儀)間移轉的媒介。因移轉對象可能是矽晶球，真空移轉設備內部(如圖 47)有專為矽晶球(圓球狀)特別設計的三腳架載具(如圖 48)。



圖 46 真空移轉設備



圖 47 真空移轉設備內部圖

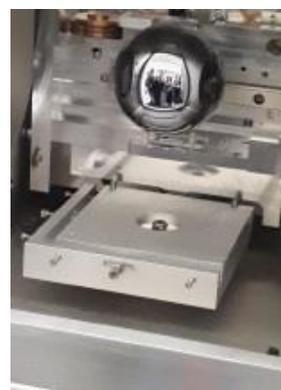


圖 48 矽晶球載具

在參觀完真空質量比較儀後，於展示室內看到了傳說中的黃金秤(如圖 49)與需要用放大鏡才看的到的 1 μg 不銹鋼標準法碼(如圖 50)，並趁空暇時間與 Dr. Borys 一起合照(如圖 51)，而原先計畫要參觀矽晶球的製造過程則因設備整修而取消。



圖 49 黃金秤



圖 50 1 μg 不銹鋼標準法碼



圖 51 與 Dr. Borys 合照

叁、心得與建議

參加這次度量衡質量領域研討會與德國聯邦物理技術研究院(PTB)的參訪，深感獲益良多，整個行程利用專題演講、實作與參訪的方式，在短短 3 天內使參與者獲得目前度量衡質量領域發展的最新資訊。在新質量定義的部分，利用矽晶球(使用 XRCD method)與瓦特天平(又稱作 Kibble Balance)推導普朗克常數的結果已無太大差異，因此預期 2018 下半年在國際度量衡大會上將會正式通過，且各國會因新質量定義實現技術的優劣，而造成質量校正能力分歧的現象。而在工業 4.0 概念的部分，單一公司的研發能力已無法勝任新質量定義實現所需的各項技術，跨域整合(如光學、電學、自動控制等等)將是未來的趨勢。

心得與建議簡述如下：

1. 為使我國質量量測能力與世界先進國家一致，本局積極協助國家度量衡標準實驗室推動新質量發展計畫，並與德國聯邦物理技術研究院(PTB)簽訂技術合作，建置矽晶球質量校正系統，不但可繼續維持不亞於先進國家的質量追溯能量，並可提供產業界優質的研發支援。
2. 工業 4.0 概念的興起，產業升級的契機已經來臨。建議將工業 4.0 的概念運用在度政領域的檢定設備中，以跨域整合的技術提升度政業務的工作效率。
3. 智慧化已是世界趨勢，而智慧化的重點在於建立回饋控制，必須發展關鍵的感測器。建議國內度量衡器廠商開發智慧化的關鍵零組件，朝生產智慧化度量衡器的方向發展。
4. 本局負有度量衡器管理的職責，為提升服務品質與保護消費權益，並配合國發會推動智慧政府計畫，未來可朝度量衡器智慧化管理技術發展。
5. 藉由參加國際研討會除可瞭解國際最新趨勢，並可蒐集相關最新資訊，對業務創新發展具有正面的助益。未來可朝國際研討會或論文發表會(如 NCSLI conference)的方向積極參與，以增加對度政業務的研發與創新能力。

肆、附件

Mass Metrology according to OIML R111 投影片



Mass Metrology according to OIML R 111

Thomas Fehling, Mass Metrology Conference

Göttingen, May 15, 2018

Contents

- Introduction to OIML R 111-1
- Technical and metrological requirements for weights
- Calibration of a weight or weight set
 - Environmental conditions
 - Uncertainty calculations

INTERNATIONAL RECOMMENDATION	OIML R 111-1 Edition 2004 (E)
<hr/>	
Weights of classes $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ and M_3	
Part 1: Metrological and technical requirements	
Poids des classes $E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ et M_3	
Partie 1: Exigences métrologiques et techniques	
	ORGANISATION INTERNATIONALE DE METROLOGIE LEGALE INTERNATIONAL ORGANIZATION OF LEGAL METROLOGY

Introduction

The International Organization of Legal Metrology (OIML) is a worldwide, intergovernmental organization whose primary aim is to harmonize the regulations and metrological controls applied by the national metrological services, or related organizations, of its Member States.

Recommendation 111-1 Weights of Classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3, and M3

- Contains technical and metrological requirements for weights
- Describes the calibration of a weight or weight set
- applies to weights with nominal values of mass from 1mg to 5000 kg in the E, F and M accuracy classes.

Introduction

Metrological requirements

- Maximum permissible errors on verification

Technical requirements

- Shape, Construction, Material
- Magnetism
- Density
- Surface conditions
- Adjustment
- Marking
- Presentation

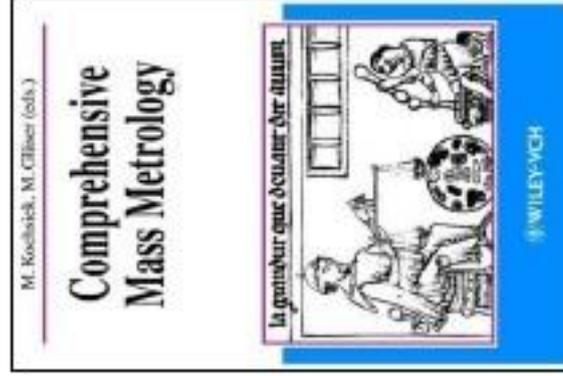
Introduction

Other references:

Kochsiek/Gläser (eds.), *Comprehensive Mass Metrology*, Wiley-VCH, 2000

Schwartz R., *Guide to mass determination with high accuracy*, PTB-Bericht MA-40, Braunschweig, 1995

Gläser, M., *Advices for the calibration of mass standards*, PTB-Bericht MA-52, Braunschweig, 1997



Technical and metrological requirements for weights

- **Maximum permissible errors on verification**
- Shape, Construction, Material
- Magnetism
- Density
- Surface conditions
- Adjustment
- Marking
- Presentation
- Submission to metrological controls, Control marking

The OIML weight classes

Class E_1 : weights intended to ensure traceability between national mass standards and weights of class E_2 and lower

Class E_2 : weights intended for use in the verification of class F_1 weights and for use with weighing instruments of accuracy class I.

Class F_1 : weights intended for use in the verification of class F_2 weights and for use with weighing instruments of accuracy class I and class II.

Class F_2 : weights intended for use in the verification of class M_1 and possibly class M_2 weights. Also intended for use in important commercial transactions (e.g., precious metals and stones) on weighing instruments of accuracy class II.

The OIML weight classes

Class M_1 : weights intended for use in the verification of class M_2 weights, and for use with weighing instruments of accuracy class III.

Class M_2 : weights intended for use in the verification of class M_3 weights and for use in general commercial transactions and with weighing instruments of accuracy class III.

Class M_3 : weights intended for use with weighing instruments of accuracy class III.

Classes M_{1-2} and M_{2-3} : weights from 50 kg to 5 000 kg of lower accuracy intended for use with weighing instruments of accuracy class III.

The OIML weight classes

Maximum permissible errors on

- initial and
- subsequent verification or
- in-service inspection

are given in Table 1 and relate to conventional mass.

For each weight, the expanded uncertainty U , for $k=2$, of the conventional mass, shall be less than or equal to one third of the Maximum Permissible Error in Table 1

$$U \leq 1/3 MPE$$

$$U = k \cdot u_c$$

u_c = combined standard uncertainty

Table 1 Maximum permissible errors for weights (in mg)

Nominal value ^a	Class E ₁	Class E ₂	Class F ₁	Class F ₂	Class M ₁	Class M _{1,2}	Class M ₂	Class M _{2,3}	Class M ₃
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5,0	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2,5	8,0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1,0	3,0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0,5	1,6	5,0	16	50		160		500
500 g	0,25	0,8	2,5	8,0	25		80		250
200 g	0,10	0,3	1,0	3,0	10		30		100
100 g	0,05	0,16	0,5	1,6	5,0		16		50
50 g	0,03	0,10	0,3	1,0	3,0		10		30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5		8,0		25
10 g	0,020	0,06	0,20	0,6	2,0		6,0		20
5 g	0,016	0,05	0,16	0,5	1,6		5,0		16
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2		4,0		12
1 g	0,010	0,03	0,10	0,3	1,0		3,0		10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8		2,5		
200 mg	0,006	0,020	0,06	0,20	0,6		2,0		
100 mg	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5		1,6		
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4				
20 mg	0,003	0,010	0,03	0,10	0,3				
10 mg	0,003	0,008	0,025	0,08	0,25				
5 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
2 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				
1 mg	0,003	0,006	0,020	0,06	0,20				

The OIML weight classes

Maximum permissible errors on

- initial and
- subsequent verification or
- in-service inspection

are given in Table 1 and relate to conventional mass.

Conventional mass:

for a weight taken at 20°C the mass of a hypothetical reference standard weight of density 8.000 kg/m³ which it balances in air of density 1.2 kg/m³

If the maximum permissible error is greater than given in Table 1 the weight cannot be declared as belonging to the corresponding OIML class.

Technical and metrological requirements for weights

- Maximum permissible errors on verification
- Shape, Construction, Material
- **Magnetism**
- Density
- Surface conditions
- Adjustment
- Marking
- Presentation
- Submission to metrological controls, Control marking

Magnetism

9 MAGNETISM

9.1 Limits of polarization

The magnetization, M , expressed in terms of the polarization, $\mu_0 M$, should not exceed the values given in Table 3.

Table 3 Maximum polarization, $\mu_0 M$, (μT)

Weight class	E_1	E_2	F_1	F_2	M_{1+2}	M_2	M_{2+3}	M_3
Maximum polarization, $\mu_0 M$, (μT)	2.5	8	25	80	500	800	1 600	2 500

9.2 Limits of magnetic susceptibility

The susceptibility of a weight should not exceed the values given in Table 4.

Table 4 Maximum susceptibility, χ

Weight class	E_1	E_2	F_1	F_2
$m \leq 1 \text{ g}$	0.25	0.9	10	-
$2 \text{ g} \leq m \leq 10 \text{ g}$	0.06	0.18	0.7	4
$20 \text{ g} \leq m$	0.02	0.07	0.2	0.8

Recommended methods regarding the OIML R111

How to measure the Magnetic Properties ?

- Maximum polarization (permanent magnetization):
Susceptometer method (S); Hall sensor, fluxgate magnetometer (F)
- Magnetic susceptibility:
Susceptometer method (S); Attracting method (A)

Recommended methods regarding the OIML R111

Table B.14b) Susceptibility

Weight size	Class E ₁	Class E ₂	Class F ₁	Class F ₂
5 000 kg				
2 000 kg			F	F
1 000 kg		F	A	A
500 kg		A	S*	S*
200 kg				
100 kg				
50 kg				
20 kg				
10 kg				
5 kg	S	F	F	F
2 kg	F	A	A	A
1 kg		S	S	S
500 g				
200 g				
100 g				
50 g			A	A
20 g			S	S
10 g	S	S		
5 g				
2 g				
1 g				
500 mg				
200 mg				
100 mg				
50 mg				
20 mg				
10 mg				
5 mg				
2 mg				
1 mg				

Sp Material Specification

S Susceptometer for weights without adjusting cavity (B.6.4)

A Attracting method (B.6.5)

F Fluxgate + permanent Magnet (B.6.6)

S* Methods F and A are preferred for class E2 weights from 100 kg to 1 000 kg.

Recommended methods regarding the OIML R111

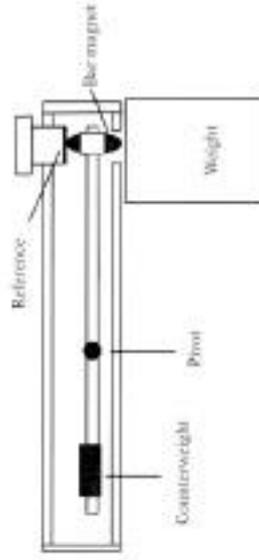
Method F

Gauss meter



Method A

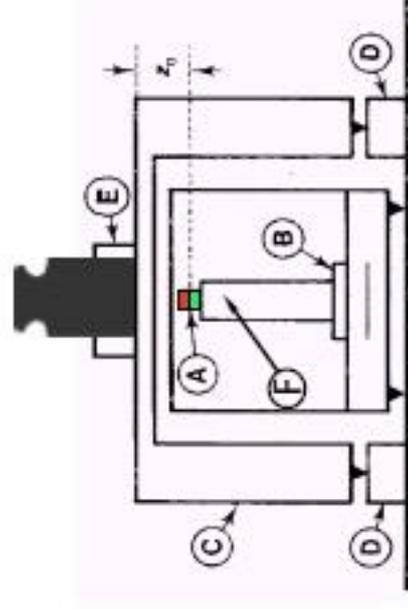
Permeability Indicator



Recommended methods regarding the OIML R111

Method S: The Susceptometer

- A) Magnet
- B) Weighing Pan
- C) Bridge
- D) Gauge blocks
- E) Test weight
- F) Pedestal



Sartorius YSZ01C/02C

Calibration of a weight or weight set

Annex A Examples of different shapes and dimensions

Annex B Test procedures for weights

Annex C Calibration of a weight or weight set

- General Requirements
 - Environmental conditions
 - Weighing instrument
 - Reference weight
- Weighing designs
 - Direct comparison
 - Subdivision
- Weighing Cycles
- Data analysis
- Uncertainty calculations

General Requirements

	E1	E2	F1
Room	Basement only	Basement or ground	
Windows	not allowed	(North side only) allowed	
Illumination (lighting)	with a thermal effect as low as possible on weighing machines and weights		
Floor	antistatic, smooth (no carpets)		
Ambient air	dust free and no air currents		
Room temperature	according to the operating requirements of the mass comparator usually between 15 and 25 °C For hydrostatic density determination: 20 °C ± 1 °C		
Relative Humidity	rH = 40 – 60 %		

General Requirements

C.2.1 Environmental conditions

The calibration of weights should be performed at stable ambient conditions under ambient atmospheric pressure at temperatures close to room temperature ⁽¹⁾. Typical recommended values are given in Table C.1.

Table C.1 Ambient conditions during calibration (Typical values recommended for obtaining successful results)

Weight class	Temperature change during calibration ⁽²⁾
E ₁	± 0.3 °C per hour with a maximum of ± 0.5 °C per 12 hours
E ₂	± 0.7 °C per hour with a maximum of ± 1 °C per 12 hours
F ₁	± 1.5 °C per hour with a maximum of ± 2 °C per 12 hours
F ₂	± 2 °C per hour with a maximum of ± 3.5 °C per 12 hours
M ₁	± 3 °C per hour with a maximum of ± 5 °C per 12 hours

Weight class	Range of relative humidity (<i>hr</i>) of the air ⁽³⁾
E ₁	40 % to 60 % with a maximum of ± 5 % per 4 hours
E ₂	40 % to 60 % with a maximum of ± 10 % per 4 hours
F	40 % to 60 % with a maximum of ± 15 % per 4 hours

Calibration of a weight or weight set

Annex A Examples of different shapes and dimensions

Annex B Test procedures for weights

Annex C Calibration of a weight or weight set

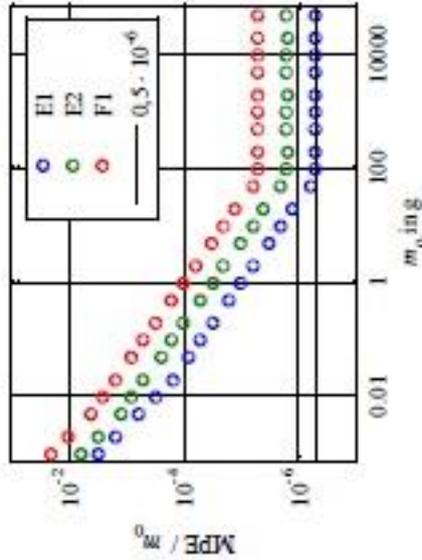
- General Requirements
 - Environmental conditions
 - Weighing instrument
 - Reference weight
- Weighing designs
 - Direct comparison
 - Subdivision
- Weighing Cycles
- Data analysis
- **Uncertainty calculations**

Uncertainty calculation

$$U(m_{ct}) \leq \frac{1}{3} \text{MPE} \quad [1, \text{Eq 5.2-1}]$$

$$U(m_{ct}) = k \times u_c(m_{ct}) \quad [1, \text{Eq C.6.5-3}]$$

$$k = 2$$



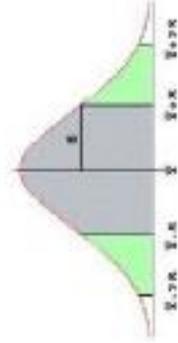
Relative MPE [1, Tab 1]

- $U(m_{ct})$ expanded uncertainty
- MPE Maximum Permissible Error
- k coverage factor
- $u_c(m_{ct})$ combined standard uncertainty of the conventional mass of the test weight
- m_0 nominal mass

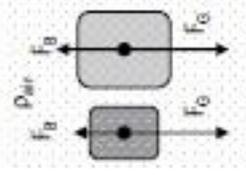
Combined standard uncertainty, [1, Eq. C.6.5-1]

Type A) based on statistical analysis of a series of measurements Type B) evaluation based on other knowledge

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\Delta m_c) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2}$$



reference weight



air buoyancy correction

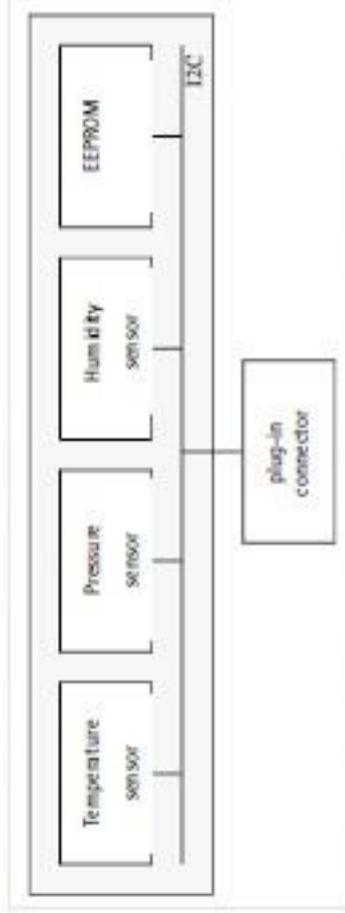


balance

Standard uncertainty of the...
weighing process

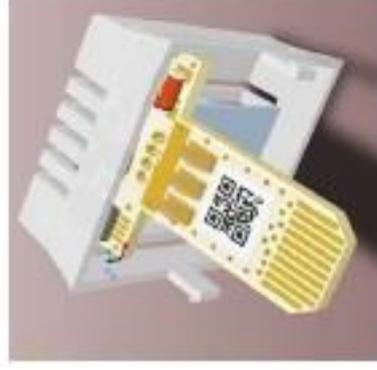
Sartorius climate module

- automatic recording of traceable climate data including their uncertainty values - chronological synchronised to the mass dissemination procedure
- automated air buoyancy correction



Specified standard uncertainty for a calibrated climate modul:

- Temperature: $u_t = 0,15 \text{ K}$, in the range $t = (18 \dots 24) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Air pressure: $u_p = 1 \text{ hPa}$, in the range $p = (800 \dots 1100) \text{ hPa}$
- rel. Humidity: $u_{hr} = 1 \%$, in the range $hr = (30 \dots 70) \%$



Result

with the given formula for uncertainty of the air density

$$u^2(\rho_a) = (2 \times 10^{-4})^2 + (10^{-5}/\text{Pa} \times u_p)^2 + (-4 \times 10^{-3}/\text{K} \times u_T)^2 + (-9 \times 10^{-3} \times u_{hr})^2$$

the whole uncertainty budget for the mass determination can be calculated.

In addition to the conventional mass of a test weight the combined standard uncertainty $u_c(m_{ct})$ of the test weight can be calculated and given as expanded uncertainty $U(m_{ct})$ as a complete result of a mass comparison.

For example:

result of a 10kg test weight determined by a mass comparison according to OIML R 111:

$$m_{ct} = 10 \text{ kg} + 12 \text{ mg} \quad \text{with} \quad U(m_{ct}) = 3.05 \text{ mg}$$



Thank you for your attention!



Mass Metrology according to OIMLR 111

Thomas Fehling, Mass Metrology Conference

Göttingen, May 15, 2018