

科發基金補助計畫成果報告

國際基本單位 SI 新標準建置計畫(II)

計畫類別: 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號: MOST 107-3111-Y-044-017

計畫經費: 90,994 千元

執行期間: 107 年 07 月 26 日至 108 年 12 月 15 日

主管機關: 經濟部標準檢驗局

執行單位: 財團法人工業技術研究院

計畫主持人: 彭國勝

中 華 民 國 109 年 1 月 編 製

目 錄

中英文摘要	I
(一) 中文摘要	I
(二) 英文摘要	VI
(三) 關鍵字	XIII
一、 前言	1
二、 四項 SI 新標準建置之總體說明	20
(一) 研究目的	20
(二) 研究目標	22
(三) 實施方法	28
(四) 四項 SI 新標準建置達成情形	40
三、 本計畫之目標與達成情形	48
(一) 新質量標準建置分項	48
(二) 新溫度標準建置分項	52
(三) 新電流標準建置分項	58
四、 計畫執行績效檢討	60
(一) 資源運用情形	60
(二) 績效指標與產業效益	63
(三) 技術擴散與重要活動	65
五、 計畫變更說明	68
六、 重要成果說明	69
(一) 新質量標準建置分項	69
(二) 新溫度標準建置分項	90
(三) 新電流標準建置分項	104
七、 附件	113
附件一、計畫購置儀器設備彙總表	113
附件二、出國暨赴陸會議人員一覽表	115
附件三、論文一覽表	116
附件四、研究報告一覽表	117
附件五、說明會一覽表	118
附件六、名詞索引表	119
附件七、委員意見回復表	121

圖 目 錄

圖 1-1、計量標準追溯之影響	3
圖 1-2、四項 SI 建置經費規劃及執行時程	7
圖 1-3、新公斤系統完成後建置情況	14
圖 1-4、新溫度系統完成後建置情況	16
圖 1-5、新電流系統完成後建置情況	17
圖 1-6、新物質量系統完成後建置情況	19
圖 2-1、鉑銱公斤 No.691 以及吸附參考法碼 D14	29
圖 2-2、原級矽晶球質量標準由真空導引至大氣所需之各種法碼	30
圖 2-3、XRF 分析系統擬合校正曲線	31
圖 2-4、矽晶球表面之光電子能譜	31
圖 2-5、Si 2p 波峰高解析光電子能譜	32
圖 2-6、靜態膨脹系統腔體配置圖	33
圖 2-7、共振腔與傳感器配置範例圖	33
圖 2-8、絕對輻射溫度量測次系統	34
圖 2-9、(a)約瑟夫森效應(Josephson effect)原理及(b)電壓-電流特性	35
圖 2-10、(a)量化霍爾效應(Quantum Hall effect)原理及(b)電阻與磁場關係	36
圖 2-11、矽同位素樣品之稀釋程序混合程序示意圖	39
圖 2-12、二氧化碳分析樣品之配製程序示意圖	40
圖 4-1、4 場說明會活動現場(1)花蓮場、(2)高雄場、(3)臺中場及(4)臺北場	68
圖 6-1、矽晶柱(編號：Si28-31Pr11)及其分析位置圖	70
圖 6-2、整合式 XPS XRF 表層質量量測系統設計	73
圖 6-3、整合式 XPS XRF 表層質量量測系統	74
圖 6-4、五軸矽晶球移動座	74
圖 6-5、加載互鎖真空腔體與分析腔體之真空系統架構	75
圖 6-6、機械幫浦(型號:ACP40)	76
圖 6-7、矽晶球表層組成	76
圖 6-8、為 Si hydroxyl 單位晶胞	79
圖 6-10、Rotation axis #1	83
圖 6-11、Linear unit #2	83
圖 6-12、5 軸座控制器(Controller for 5-axis)	83
圖 6-13、標準片載台、夾爪及基座如設計圖	83
圖 6-18、五軸矽晶球移動座出廠測試報告	84
圖 6-14、IQE 11/35 Ion Source 測試報告	85
圖 6-15、IQE 11/35 Ion Source 電源供應器(IQE 11-A)測試報告	85
圖 6-16、電子中和槍組件出廠測試報告(1)	86
圖 6-17、電子中和槍組件出廠測試報告(2)	86

圖 6-18、單位面積氧沉積量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)與 XRF O/Si 強度比值的線性擬合示意圖	88
圖 6-19、矽晶球的大範圍的 XPS 光電子頻譜量測	89
圖 6-20、聲學氣體溫度量測系統六大組構	91
圖 6-21、聲學氣體溫度量測系統實驗室空間	92
圖 6-22、整合 NML/CMS 氣體檢測次系統與聲學氣體溫度量測系統之連接示意圖	92
圖 6-23、CSPRT(capsule)和長型 SPRT(long-stem)呈現高穩定度的 AGT 與徑向熱力學溫度量測 一致性	93
圖 6-24、-60 °C 和 100 °C 溫度下，降低沒入深度之溫度變化	94
圖 6-25、相同氣壓下不同模態(除了 TM11 模態)所得之等效半徑相近	94
圖 6-26、Co-C 共晶點熔化圖	97
圖 6-27、Co-C 共晶點熔化轉折點重複性量測	97
圖 6-28、波長 650 nm 之分光響應	99
圖 6-29、波長 900 nm 之分光響應	99
圖 6-30、光源尺寸效應量測結果	101
圖 6-31、低電阻電橋系統實體照片	105
圖 6-32、直流大電流分流器(MI 9332/3000)出廠報告	107
圖 6-33、電阻表(MI 6650AF)出廠報告	107
圖 6-34、低電阻電橋量測架構	108
圖 6-35、日本 NMIJ 評審員 Dr. Nobu-hisa Kaneko 與實驗室團隊合影	110

表 目 錄

表 1-1、2019 年 5 月 20 日開始實施的 SI 新定義.....	2
表 1-2、四項 SI 建置各計畫之計畫目標與執行內容.....	8
表 1-3、四項新標準系統國際比對規劃.....	11
表 2-1、新質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費.....	23
表 2-2、新溫度標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費.....	25
表 2-3、新電流標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費.....	26
表 2-4、新物質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費.....	27
表 2-5、四項 SI 新標準建立之工作內容及於各計畫之關聯性.....	41
表 4-1、說明會與會業者之提問與回覆.....	66
表 6-1、XRF 氧沉積量相對標準不確定度來源列表.....	77
表 6-2、XPS 各元素光電子數百分比.....	77
表 6-3、碳化汙染層各 peak 之氧原子配位數比.....	78
表 6-4、各 C 1s peak 中 C 與 H 的比例.....	78
表 6-5、單位面積各元素之沉積質量與不確定度.....	79
表 6-6、矽晶球表層氧沉積量與不確定度列表.....	80
表 6-7、驗收紀錄摘要表.....	95
表 6-8、Co-C 定點融化點重複性數據表.....	98
表 6-9、偵測器絕對響應校正結果.....	100
表 6-10、低電阻電橋系統之比例量測準確度測試結果.....	105
表 6-11、大電流低電阻電橋系統驗收規格及測試結果對照一覽表.....	106
表 6-12、0.1 mΩ電阻器之 A 類相對標準不確定度評估結果.....	108
表 6-13、1 Ω標準電阻器因溫度不穩定造成之不確定度.....	109
表 6-14、0.1 mΩ電阻器因溫度不穩定造成之不確定度(量測電流 100 A 至 1000 A).....	109
表 6-15、電阻器 0.1 mΩ之相對組合標準不確定度(量測電流 100 A 至 1000 A).....	110

中英文摘要

(一) 中文摘要

國家度量衡標準實驗室(NML)的任務在維繫國家計量主權，建立、維持及傳遞國家最高計量標準。做為國內標準追溯依據，滿足國家於科技、產業、民生及安全之量測儀器追溯校正需求。並發展計量科學，提升國家整體科技水準。NML 已經建置了聲量、電磁、化學、長度、電量等 15 個領域，118 套國家量測標準系統，每年提供國內近 2,000 家廠商校正服務，並衍生超過 600 萬件次以上二級校正服務。服務範圍涵蓋科學計量、工業計量、法定計量各領域的校正服務，滿足我國在產品製程、產業貿易、安全與環境監測、以及醫療保健各方面的檢測追溯需求。藉由簽訂之國際度量衡委員會(CIPM)相互認可協議(MRA)，NML 所出具之校正報告為 100 個簽署國及 4 個國際組織承認，讓臺灣優良產品可以排除技術貿易障礙，順利外銷全球。

為提供最準確的校正服務，必須確保國家量測標準系統之標準可追溯至國際單位制(International System of Units, SI)。因為如果沒有可追溯至國際單位之儀器設備，實驗室就無法提供可靠的測試或校正結果，所以經由可追溯至國際單位制之量測標準，校正儀器設備，確保儀器設備在測試或校正過程中，能正確的以標準國際單位量測各種產品特性或技術參數。

SI 七個基本單位(長度、質量、時間、電流、溫度、物質量和光強度)中，最近一次的修訂是 1983 年「長度」，新公尺(長度)的定義是由光在真空中於 299,792,458 分之一秒時間內所行經的距離，亦即以常數(光速)定義一公尺。而在 SI 新定義實施前，基本單位當中，質量基本單位-公斤是唯一仍以特定人工實物(specific artifact)定義之基本單位。因此，國際度量衡大會於 2018 年 11 月 16 日第 26 屆大會上通過 SI 基本單位新定義，並已於 2019 年 5 月 20 日開始實施，7 個 SI 基本單位都以定值的物理常數來定義(例如，質量-公斤以普朗克常數 h 定義、電流-安培以基本電荷 e 定義、溫度-克耳文以波茲曼常數 k 定義、物質量-莫耳以亞佛加厥常數 N_A 定義...等)。為維持計量主權完整之計量基磐，自主追溯至 SI 基本單位，NML 必須及時因應，與國際同步實行 4 項 SI 單位的重新定義，建立我國最高追溯標準。為因應 4 項 SI 基本單位定義之變革，保障國內產業生產設備、儀器準確度校正及追溯，提升 Made In Taiwan (MIT) 產品品質以確保國際競爭力，NML 以經費 5.14 億元，建置 4 項 SI 新標準所需之硬體及技術，期程為 106 年 10 月至 108 年 12 月，分別以五項專案計畫完成 4 項計量標準，使我國計量標準符合 SI 新定義。

在新質量部分，建立 X 光晶體密度法，追溯至普朗克常數實現新公斤定義；並依新追溯方式，建置質量比較系統，將新質量標準傳遞至需求產業。經費規模 2 億 4,345 萬元，包含購置超純化矽晶球、X 光電子頻譜與 X 光螢光頻譜(XPS XRF)表面質量分析儀、質量比較儀及超高真空腔等關鍵設備，建置完整追溯體系，確保我國質量標準追溯不受新定義影響。規劃三項主要工作，分別是：1. 原級矽晶球質量標準建置，目標為建立高純度矽晶球質量原級標準，質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，其相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於 1

kg)。2. 矽晶球表層質量量測系統技術建立，目標是完成矽晶球表層質量量測系統，表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ ，其在 1 公斤之相對不確定度分量 $\leq 3 \times 10^{-8}$ 。3. 原級真空標準建置，目標是建立壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相對標準不確定度 (0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度為 (0.1 ~ 2.5) % 的靜態膨脹真空標準系統與技術。

在新溫度部分，建立聲學氣體溫度計及絕對輻射溫度計實現新克耳文定義，追溯至波茲曼常數。經費規模 1 億 4,478.8 萬元，包含購置聲學共振腔、熱電偶高溫校正系統設備、輻射超高溫校正系統設備，完整構建新溫度校正追溯鏈，溫度範圍涵蓋 -60 °C ~ 3000 °C。主要工作內容分別是：1. 聲學氣體溫度計量測系統建置，目標是完成建立 (213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統，量測標準不確定度： $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k=1$)。2. 絕對輻射溫度量測系統建置，擴建溫度範圍至 3000 °C，標準不確定度小於 5.0 °C。3. 熱電偶高溫校正系統建置，溫度範圍涵蓋 (0.01 ~ 1492) °C，標準不確定度為 (0.1 ~ 1) °C。

在新電流部分，提升約瑟夫森電壓及量化霍爾電阻標準之能力，以追溯至基本電荷之新安培標準。經費規模 2,753.8 萬元，包含購置免液氦量化霍爾電阻系統，搭配約瑟夫森電壓標準，建立完整符合產業需求並與新定義接軌之電流標準。亦規劃三項主要工作，分別是：1. 量化霍爾電阻系統精進，建立免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統，電阻校正之標準不確定度： $< 3 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度： $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$ 。2. 大電流標準建置，完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω ，電流量測範圍 100 A to 1000 A，電阻校正之標準不確定度： $< 25 \mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度： $< 50 \mu\Omega/\Omega$ 。3. 微電流標準建置，建立用於微電流標準之高電阻電橋系統，高電阻量測範圍 100 k Ω to 1 T Ω ，電橋之比率量測準確度 $< 5 \times 10^{-6}$ 。

在新物質量部分，建立同位素比例量測技術，實現追溯至亞佛加厥常數之新物質量標準。經費規模 9,830 萬元，包含購置多接收器感應耦合電漿質譜儀及同位素質譜儀建立新物質量標準，準確量測元素物質莫耳質量，降低標準參考物質濃度計量追溯之不確定度，建立符合 SI 新定義之物質量標準。主要工作為完成 1 套系統之新建，新增同位素標準品之服務，關鍵技術目標為建立質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術，其相對標準不確定度 $< 10^{-7}$ (相對於 ^{28}Si 莫耳質量)。

四項新標準系統之硬體建置將於 108 年 12 月以前完成，但後續各系統仍需進行系統評估、查驗及國際比對等工作後方可對外開放服務。各系統之評估及查驗時程預估時間約為 1 ~ 1.5 年，並規劃參加國際比對，確保量測系統之能力與全球量測能力一致。為配合引用新技術實現新標準及新標準之實施與校正服務的提供(至客戶端)，追溯鏈之相關系統亦規劃更新或重新評估及導引。

4 項 SI 新標準之關鍵設備建置及技術引進經費 5.14 億元，規劃於 5 項專案計畫，依每一計畫經費額度、爭取獲得的時間前後，以及 4 項 SI 新標準技術取得之完整性與可行性，依序完成新質量、新溫度、新電流、新物質量等關鍵系統之硬體建置(佔總經費 82%)

與量測技術建立。5項專案計畫分別是(1) 106年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫運作(4,000萬元),優先處理新質量矽晶球表層質量量測系統技術及自德國PTB技術移轉XPS XRF矽晶球表層質量量測技術。(2) 106年跨部會署科發基金計畫(7,880萬元),建立原級矽晶球質量標準及矽晶球表面質量量測系統。(3) 107年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫(4,362.7萬元),以新質量中原級矽晶球質量標準及矽晶球表面質量量測系統及新溫度中聲學氣體溫度計量測系統設備建構為主。(4) 107年行政院第二預備金(2億6,065.5萬),併入107年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫第五分項執行。涵蓋新質量系統的原級矽晶球質量標準、矽晶球表層質量量測系統及原級真空標準;新溫度絕對輻射溫度量測系統及熱電偶高溫校正系統;新電流系統的量化霍爾電阻系統及微電流標準;新物質質量系統的質譜法自然豐度Si同位素稀釋量測技術及光學法同位素比例量測技術;以及滿足4項SI新標準實驗室環境要求之建置。(5) 107行政院科發(9,099.4萬元),除了新質量矽晶球表層質量量測系統、新溫度聲學氣體溫度計量測系統及絕對輻射溫度量測系統關鍵設備建構,亦擴充至新電流系統。各計畫執行內容摘錄如下:

(1) 106年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫運作:

經費規模為4,000萬元,優先處理新質量矽晶球表層質量量測系統技術及自德國PTB技術移轉XPS XRF矽晶球表層質量量測技術。

(2) 106年跨部會署科發基金計畫:

經費規模為7,880萬元,旨在建立X光晶體密度法來實現新的公斤定義,包含購置高純度矽晶球,配合建置真空質量比較儀及矽晶球表面層分析儀等設備,確保我國質量標準追溯不受新定義實施的影響。計畫目標設定為建立原級矽晶球質量標準,質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ 其相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於1kg)及“矽晶球表面質量量測系統,其系統設計與各次系統規格訂定,目標表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量),即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$,其在1公斤之相對不確定度分量 $\leq 3 \times 10^{-8}$,以及完成矽晶球表層質量量測系統實驗室環境建置,其環境規格要求為溫度 $(20 \pm 0.3)^\circ\text{C}$ 、相對濕度40%至60%,並提供獨立地基之隔振基礎平台建置。

本計畫共6個查核點,皆已如期完成計畫規劃,並符合設定之目標。在“原級矽晶球質量標準建置”完成之項目包括:完成質量比較儀與矽晶球清洗實驗室環境建置委外施工採購申請,完成矽晶球清洗標準流程建置,產出技術文件一份“質量原級標準矽晶球清洗標準程序”;完成真空公斤質量比較儀建置,衡量範圍1kg,解析度 $0.1 \mu\text{g}$,重覆性 $0.5 \mu\text{g}$;以及完成高純度矽28矽晶球原級質量標準建置,矽28同位素比例為99.9985502(80)%($k=2$),不圓度為 $(25.0 \pm 2.3) \text{nm}$,表面粗糙度為 $(0.196 \pm 0.024) \text{nm}$,質量相對標準不確定度評估為 2.5×10^{-8} (相對於1kg)。而在“矽晶球表面質量量測系統技術建立”完成之項目包括:完成矽晶球表層質量量測系統設計與實驗室環境空間施工與驗收,實驗室環境建置之規格分為兩部分:質量比較儀放置區域之環境溫度: $(20.0 \pm 0.3)^\circ\text{C}$,環境濕度: $(50 \pm 10)\% \text{RH}$;矽晶球清洗區與矽晶球表面質量量測系統空間環境溫度: $(20.0 \pm 1.0)^\circ\text{C}$,環境濕度: $(50 \pm 10)\% \text{RH}$,以及完成矽晶球表層螢光頻譜擬合與分析技術建置,氧元素沉積質量相對標準不確定度 $<$

30 %。

(3) 107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫：

經費規模為 4,362.7 萬元，以新質量中原級矽晶球質量標準及矽晶球表面質量量測系統及新溫度中聲學氣體溫度計量測系統設備建構為主。

在新質量標準建置部分，如期完成計畫規劃之 4 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括：完成吸附效應量測實驗，吸附質量相對標準不確定度小於 65 % 及完成整合 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜表層分析儀之超高真空腔體採購與驗收。

在新溫度標準建置部分，如期完成計畫規劃之 4 項查核點，完成之內容包括：完成符合聲學徑向共振模式、內表面粗糙度為 nm 等級、尺寸公差 $< 3 \mu\text{m}$ 、及腔體與其安裝之聲學傳感器可承受達 373 K 之最高使用溫度且不致產生形變之規格確立。完成氣體純度檢測次系統之全金屬閥件/EP 等級管路/與轉接頭之設計、規格確認、與採購單開立，並完成與水氣分析儀/99.9997 % BIP Ar 鋼瓶氣源之連結、安裝。完成氫氣干擾源-水氣濃度之分析技術建立，水氣濃度隨流量降低而增加，於較高流量 25 sccm 時，兩回合之水氣濃度皆為 0.78 ppb；但低流量在 5 sccm 時因壓力較低，水氣分析儀之靈敏度較低，兩回合之水氣濃度有差異，但皆符合計畫目標 ($< 0.6 \text{ ppm}$)，亦即對應溫度範圍 (213 ~ 505) K 的水氣干擾源之不確定度為 (0.074 ~ 0.175) mK。

(4) 107 年行政院第二預備金：

經費規模為 2 億 6,065.5 萬元，旨在建置新質量系統的原級矽晶球質量標準、矽晶球表層質量量測系統及原級真空標準；新溫度絕對輻射溫度量測系統及熱電偶高溫校正系統；新電流系統的量化霍爾電阻系統及微電流標準；新物質量系統的質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術及光學法同位素比例量測技術；以及滿足 4 項 SI 新標準實驗室環境要求之建置。

在新質量標準建置部分，如期完成計畫規劃之 5 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括：完成十克、一百克與一公斤質量比較儀設備驗收。衡量範圍 1000 g，允收標準：解析度 1 μg ，重複性 8 μg ；衡量範圍 100 g，允收標準：解析度 0.1 μg ，重複性 1 μg ；衡量範圍 10 g，允收標準：解析度 0.1 μg ，重複性 0.6 μg ，以及在原級真空標準建置方面，完成靜態膨脹真空原級標準系統設計與硬體建置，體積膨脹比介於 100 ~ 10000 之間，目標壓力量測範圍為 0.1 mPa ~ 1 kPa。

在新溫度標準建置部分，如期完成計畫規劃之 5 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括：完成 (213 ~ 373) K 聲學共振頻率之擾動因子修正，並產出技術文件一份“聲學氣體溫度計 (213 ~ 373) K 實務架構解析與量測技術”，完成熱電偶高溫校正系統設備採購，並產出技術文件一份“熱電偶高溫系統組裝與操作程序”，完成輻射超高溫校正系統設備採購及驗收，並產出技術文件一份“高溫黑體爐組裝與操作程序”。

在新電流標準建置部分，如期完成計畫規劃之 4 項查核點，並符合設定的目標。完成

之內容包括:完成免液氦 QHR 系統規格制訂及系統請購申請，並於 12/21 完成免液氦 QHR 電阻原級標準系統的建置與驗收，且確認系統量測變異範圍小於 $\pm 0.04 \mu\Omega/\Omega$ ，以及產出技術文件一份“免液氦量化霍爾電阻系統之操作與量測技術”。並於 12/21 在高電阻電橋系統建置部分則完成高電阻電橋系統規格制訂及請購申請及完成高電阻電橋系統建置與驗收，確認高電阻量測範圍為 100 k Ω 至 1 T Ω ，電橋比例量測準確度小於 5×10^{-6} 。

在新物質量部分，如期完成計畫規劃之 5 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括: 完成多接收器感應耦合電漿質譜儀、高解析感應耦合電漿質譜儀以及同位素比例分析設備規格制訂與採購申請，並於 12/15 完成測試驗收。完成溶解矽晶體之前處理技術並產出技術文件一份“四甲基氫氧化銨溶解矽晶體之前處理技術”。完成大氣樣品採樣蒐集與分析，樣品分析濃度為 $(215.60 \pm 0.83) \mu\text{mol/mol}$ 。完成主要成分之質量法濃度配製，配製濃度為 $(399.38 \pm 0.28) \mu\text{mol/mol}$ ，相對標準不確定度小於 0.5%，即擴充不確定度小於 1%，符合計畫規格。

(5) 107 行政院科發(本計畫)：

經費規模為 9,099.4 萬元，旨在建立新質量矽晶球表層質量量測系統及新溫度聲學氣體溫度計量測系統、絕對輻射溫度量測系統關鍵設備建構，亦擴充至新電流系統。

在新質量標準建置部分，至 12 月底如期完成計畫規劃之 4 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括：完成矽晶球表層質量量測(III)請購申請以及完成整合型 XPS XRF 表層量測系統之真空次系統硬體組裝與各次模組運轉測試。

在新溫度標準建置部分，至 12 月底如期完成計畫規劃之 7 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括: 完成圓柱體共振腔體、聲學/微波量測次系統、Huber 冷卻裝置、含真空泵/壓力計之氣體處理次系統之規格討論，9/28 英國國家物理研究院(NPL)已回覆同意製作，包含兩個次系統準球型共振腔(213~373)K 與圓柱型共振腔(373~505) K。完成新購電橋線性度與準確度之評估，確立了圓柱腔體氣體聲速與無擾動共振頻率的關係式，並完成委製共振腔之規格測試驗收，在溫度範圍(373~505) K 溫度範圍的溫度穩定度： $\leq \pm 6 \text{ mK}$ ，產出系統組裝完成後之測試結果報告。另外，已完成參考新溫標定義購置高溫黑體爐與共晶點囊(共 3 組)及傳遞件(線性高溫計)規格確認與請購及完成絕對輻射溫度計幾何機構圖與委託加工製作。

在新電流標準建置部分，至 6 月底如期完成計畫規劃之 3 項查核點，並符合設定的目標。完成之內容包括：完成低電阻電橋規格制訂及採購，以及於 2018 年 12 月 25 日提前完成驗收程序並確認低電阻電橋比例量測準確度小於 6×10^{-6} 。

透過 SI 新標準之建置，以公正第三者角色提供標準量值至產業，確保國家研發與生產製造等活動之量測一致性及準確性。持續維持 CIPM MRA 之有效性，使全國認證基金會(TAF)認證之 2,000 家企業所屬實驗室每年超過 600 萬份以上的產品檢測報告得以與國際接軌，避免可能的技術性貿易障礙。此外，結合 TAF 認證資源協助產業外銷，使我國外銷產品可以一次檢測、通行全球，節省再檢之成本與風險，強化競爭力。

(二) 英文摘要

The mission of the National Measurement Laboratory (NML) of the R.O.C. is to enhance economic growth and improve quality of life through establishing a metrology framework that advances metrology science, assures measurement traceability and global conformity, and disseminates measurement standards and calibration services. With the established metrology framework, not only institutes a foundation of measurement science for the scientific and technological developments, the NML also strengthens industrial competitiveness in Taiwan.

Through years of developments, the NML has established national measurement standards in 15 fields of electricity, magnetics, microwave, luminous intensity, temperature, humidity, chemistry, vibration, acoustics, dimension, mass, force, pressure, vacuum, and flow. Based on the well-established national measurement standards, all traced to SI units (the International System of Units), primary calibration services are performed directly to over 2,000 companies or institutes in all industries. More than 6 million secondary calibration services annually are provided by certified laboratories nationwide through the traceability chain and transfer standards. With the signed “Mutual Recognition Arrangement (MRA) of the International Committee for Weights and Measures (CIPM),” the certified calibration reports issued by the NML are co-certified and recognized by the representatives of 104 institutes - from 59 Member States, 41 Associates of the CGPM (General Conference on Weights and Measures), and 4 international organizations - and covers a further 158 institutes designated by the signatory bodies. The global recognitions in measurement capability and certification services provided by the NML pave the way for the Taiwan’s products sold successfully in worldwide market without technical barriers of trade.

In the NML, the uncertainties, the sensitivities, and the range of validity associated with a measurement are studied. A central term is ‘traceability’ which means the ability to relate a measured value to a base unit definition of the SI system. Without this chain of traceability to the SI, there would be no quantitative means to assess how accurate the measured values are. Through the traceability to the SI system, it enables that only the statement of an uncertainty along with a measurement value determined using a certain method allows for the evaluation of the method in an objective way, and for comparing the results and the performance of different measurement methods.

The SI system with seven base units (second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela) was originally conceived as a system of measurement that was derivable from unchanging phenomena. Most recently in 1983, the “metre” is re-defined as the length of the path travelled by light in a vacuum in $1/299\,792\,458$ of a second, and leaves the prototype kilogram as the only artefact upon which the SI unit definitions depend.

The CIPM has proposed revised definitions of the SI base units for consideration at the 26th CGPM. It has been approved on November 16, 2018, and the new definitions have come into force on May 20, 2019. Of these seven base units, the kilogram, ampere, kelvin and mole are redefined by choosing exact numerical values. The SI system is, for the first time, wholly derivable from natural phenomena, which the kilogram for mass is redefined by the Planck

constant h , the ampere for electric current is redefined by the elementary charge e , the kelvin for temperature is redefined by the Boltzmann constant k , and the mole for amount of substance is redefined by the Avogadro constant N_A , respectively. In order to maintain the integration of the metrology framework with an unbroken traceability chain to the New SI basis units, the NML is in urgent to implement the new technologies, new measurement standards and advance measurement systems in cooperation with the progress internationally made for the re-definition of 4 new SI units.

In response to the re-definition of 4 new SI units, the NML is developing the new technologies, new measurement standards and advance measurement systems with the total budget of 514 million NTD to ensure the integration of the unbroken traceability chain and the measurement accuracy in domestic industrial production. The developments are planned in five projects to complete the critical systems and technologies in the time span from October of 2017 to the end of December in 2019.

In the kilogram for mass, redefined by the Planck constant h , the X-Ray Crystal Density method is used for realizing the redefined kilogram, so the mass is traced to the fixed value- the Planck constant. Based on the XRCD method, a new mass comparison system is built to disseminate the new mass standard to the industries. The budget of 243.45 million NTD will be spend for the acquisition of a highly enriched ^{28}Si silicon sphere primary mass standard, establishment of an integrated XPS XRF surface mass measurement system, a vacuum mass comparator, a primary vacuum standard system and other key equipments to complete the unbroken traceability chain for the new mass standards. Three major tasks are as follows: 1. Establishment of the silicon sphere primary mass standard with a target mass relative standard uncertainty of $\leq 5 \times 10^{-8}$ (with respect to 1 kg). 2. Establishment of silicon sphere surface mass measurement technique with a target surface mass relative uncertainty of technology $\leq 15\%$ (relative expanded uncertainty of technology $\leq 30\%$), which is corresponding to $\leq 3 \times 10^{-8}$ relative uncertainty contributed to the 1 kg. 3. Establishment of a primary vacuum standard using the static expansion method with a target vacuum range of 0.1 mPa to 1 kPa and a target relative uncertainty of (0.05 ~ 1.25) % (relative expanded uncertainty of (0.1 ~ 2.5) %).

In the kelvin for temperature redefined by the Boltzmann constant k , both of an acoustic gas thermometer and an absolute radiation thermometer are established to realize the new kelvin definition, that is, to be traceable to the Boltzmann constant. The budget of 144.788 NTD is for the acquisition of an acoustic gas system, a high temperature thermocouple calibration equipment, and a ultra-high temperature radiation calibration equipment to complete the unbroken traceability chain of the new kelvin standard with the temperature calibration range covering $-60\text{ }^\circ\text{C} \sim 3000\text{ }^\circ\text{C}$. The main tasks are: 1. Establishment of the acoustic gas thermometry measurement system to cover the temperature range of (213 ~ 505) K with measurement uncertainty of $u(T) \leq 2.0\text{ mK}$ (coverage factor $k = 1$). 2. Establishment of the absolute radiation temperature measurement system: the goal is to extend the temperature range to $\sim 3000\text{ }^\circ\text{C}$ with the measurement standard uncertainty less than $5.0\text{ }^\circ\text{C}$. 3. Establishment of the high temperature thermocouple calibration system to cover temperature range of (0.01 ~ 1492) $^\circ\text{C}$ with measurement standard uncertainty of (0.1 ~ 1) $^\circ\text{C}$.

In the ampere for electric current redefined by the elementary charge e , the measurement capability improvement of the Josephson voltage and quantum Hall resistance standard systems is required to ensure that the electric current standard can be traced to the new ampere standard of the elementary charge. The budget of 27.538 million NTD is planned for the acquisition of the liquid-helium-free quantum Hall resistance system in conjunction with the present high-accuracy Josephson voltage standard for the development of the electric current standard for the new SI definition. Three major tasks are as follows: 1. Establishment of the liquid-helium-free quantum Hall resistance primary system for upgrading the quantum Hall resistance system with resistance uncertainty less than $< 3 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$ (expanded uncertainty less than $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$.) 2. Establishment of the calibration procedures of low resistance bridge standard for high current standard at the resistance range from 0.1 m Ω to 1 Ω and current range from 100 A to 1000 A with resistance uncertainty less than $< 25 \mu\Omega/\Omega$ (expanded uncertainty $< 50 \mu\Omega/\Omega$). 3. Establishment of the high resistance bridge system for low current standard at the high resistance measurement range of the 100 k Ω to 1 T Ω with the accuracy of the ratio measurement of $< 5 \times 10^{-6}$.

In the mole for amount of substance redefined by the Avogadro constant N_A , the isotope ratio measurement technology is established to realize a new definition for the mole based on the Avogadro constant. The budget is 98.3 million NTD to include the acquisition of multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer and isotope mass to accurately measure the molar mass of element and reduce the uncertainty of primary reference standards to match with the new definition for the mole. The main task is to complete a new system (the inorganic elements supply and certification system based on the static gravimetric method) with the addition service for the “isotope ratio measurement on samples.” The key technical objective is to establish the molar mass measurement technology for high purity and ^{28}Si -enriched crystal with uncertainty $< 10^{-7}$.

The critical equipment and subsystems for implementing the new and re-defined SI units will be ready by December, 2019. The subsequent tasks to complete the systems for the re-defined SI units are still required, such as systematic assessments of the systems, validation and uncertainty evaluations, and inter-laboratory comparisons, before being opened to services. The assessments and uncertainty evaluations of the systems are generally required approximately 1 to 1.5 year. After the evaluations, all systems are requested to participate inter-laboratory comparisons to ensure that the measurement capabilities of the systems are consistent with global NMI’s measurement capabilities. To disseminate the new standards, based on the technology adopt for the New SI units, to the customers, calibration systems within the traceability chain are also required to perform measurement uncertainty re-evaluation.

Based on the budget of total 514 million NTD, the establishment of the critical equipment and subsystems for the re-defined SI units and the corresponding technology is conducted in 5 government projects. The establishment is started in order of ‘kilogram for mass’, ‘kelvin for temperature,’ ‘the ampere for electric current,’ and ‘the mole for amount of substance,’ based on the budget scale, approval time, and the technology readiness of the 4 new SI units. Estimated around 82 % will be spent on the critical equipment of the systems.

The 5 projects are (1) 106 National Measurement Laboratory Operation and Development Project (40 million NTD): prioritizing in the redefinition of kilogram for developing the silicon sphere surface mass measurement technology and requesting technology-transfer of XPS XRF silicon surface mass measurement from the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Germany. (2) 106 Executive Yuan's National Science and Technology Development Fund Project (78.8 million NTD): to establish the primary silicon sphere mass standard and the silicon sphere surface mass measurement system. (3) 107 National Measurement Laboratory Operation and Development Project (43.627 million NTD): to establish the primary silicon sphere mass standard, the silicon sphere surface mass measurement system, and the acoustic gas temperature measurement system. (4) 107 Secondary Reserve Fund (266.55 million NTD) is merged to the fifth sub-project of the 107 National Measurement Laboratory Operation and Development Project. This project covers all 4 new SI units, such as the primary silicon sphere mass standard, the primary vacuum standard of the new mass system, the absolute radiation temperature measurement system, the high temperature thermocouple calibration system, the quantum Hall resistance system and the low current standard system, multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer and isotope mass for the molar mass of element and reduce the uncertainty of primary reference standards to match with the new definition for the mole, as well as the establishment of laboratory environments to meet all 4 new SI units' requirements. (5) 107 Ministry of Economic Affairs Science Project (90.994 million NTD): in addition to establish the silicon sphere surface mass measurement system, the acoustic gas temperature measurement system, and the absolute radiation temperature measurement system, the project is expanded to include the critical equipment of the Josephson voltage and quantum Hall resistance standard systems for the ampere redefined by the elementary charge.

(1) 106 National Measurement Laboratory Operation and Development Project:

The budget of the project is 40 million NTD, and the main contents of the project include: prioritizing in the redefinition of kilogram for developing the silicon sphere surface mass measurement technology and requesting technology-transfer of XPS XRF silicon surface mass measurement from the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in Germany

(2) 106 Executive Yuan's National Science and Technology Development Fund Project:

In the project (2) 106 Inter-Ministerial programme, the accomplishments are summarized as below. Establishing the XRCD method for the kilogram of the mass is redefined by the Planck constant h is the primary mission with budget scale of 78.8 million NTD for the acquisition of enriched silicon sphere, high vacuumed mass comparator and the silicon sphere surface mass measurement system to ensure the integration of the measurement traceability of the redefined mass standards. The goals of the project are: 1. Establishment of the silicon sphere primary mass standard with a relative uncertainty of $\leq 5 \times 10^{-8}$. 2. Establishment of silicon sphere surface mass measurement technique with a target surface mass relative uncertainty of technology $\leq 15\%$ (relative expanded uncertainty of technology $\leq 30\%$), which is corresponding to $\leq 3 \times 10^{-8}$ under 1 kilogram. Additionally, establishment of measurement laboratory for silicon sphere primary mass standard measurements with temperature control of $(20 \pm 0.3)^\circ\text{C}$, relative humidity control of 40% to 60% and independent vibration isolation

foundation platform is also included.

The progress has met the set targets of the project and the total 6 checkpoints were completed on time. The implementation result of the project include: completions of the silicon sphere mass comparator and laboratory environment design, and procurement for both mass comparator and laboratory construction, completion of the silicon sphere cleaning process and standard procedures, Completion of the vacuum compatible kilogram mass comparator, the maximum load is 1001.5 g, the repeatability is 500 ng and the vacuum pressure 10^{-4} Pa” and in ^{28}Si highly enriched silicon sphere primary mass standard, a ^{28}Si highly enriched silicon sphere has been fabricated with the following measured mass determining parameters: the ^{28}Si isotope ratio is 99.9985502(80) % ($k = 2$), the unroundness is (25.0 ± 2.3) nm, the surface roughness is (0.196 ± 0.024) nm, and the mass relative standard uncertainty is evaluated to be 2.5×10^{-8} (with respect to 1 kg), which complies with the goal of the project. In addition, also completion of the silicon sphere surface mass measurement system and laboratory design with related engineering drawings, The specifications of the laboratory environment are divided into two parts: the area where the mass comparator is placed consists of ambient temperature for (20.0 ± 0.3) °C and ambient humidity for (50 ± 10) % RH; the area where silicon sphere is cleaned and silicon sphere surface mass measurement is performed consists of environment temperature for (20.0 ± 1.0) °C, and ambient humidity for (50 ± 10) % RH. In addition, also completed establishment of silicon sphere surface mass measurement technique with a target surface mass relative uncertainty of technology of ≤ 30 %, which is corresponding to $\leq 3 \times 10^{-8}$ under 1 kilogram.

(3) 107 National Measurement Laboratory Operation and Development Project:

The budget of the project is 43.627 million NTD, and the main contents of the project include: to establish the primary silicon sphere mass standard, the silicon sphere surface mass measurement system, and the acoustic gas temperature measurement system.

For the job items in “New mass” standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 4 planned checkpoints will be completed on time. The implementation results of the 4 checkpoints were the completions of the sorption effect experiments, and a target sorption mass relative uncertainty is $< 65\%$. Additionally, the procurement for the ultra-high vacuum system for X-ray fluorescence spectroscopy and X-Ray photoelectron spectroscopy surface mass measurement system is completed.

For the job items in “New temperature” standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 4 planned checkpoints will be completed on time. The first accomplished result was the completion of the specification confirmation and placing the order for quasi-spherical resonator (QSR). The confirmed specifications of QSR included it is used for acoustic radial resonance mode, and has internal surface roughness of nanometer’s dimension, dimensional tolerance of less than 3 μm , and inclusive of installed sensors withstand the maximum temperature of 373 K. The second accomplished result was the fulfilment of the installation of the subsystem for gas purity detection, which included the design, specification confirmation, purchase of the full-metal valves/EP-grade pipeline/adapters, and completion of the connection and installation with the moisture analyzer as well as the 99.9997

% Ar BIP cylinder gas source. The third achieved result was accomplishing the establishment of analysis technology on the moisture concentration in Ar gas, which were inclusive of completing the design and construction of pre-installed gas purity detection subsystem, studying on the relationship between moisture concentration and gas flow rate of (5 ~ 25) sccm. All the detected moisture concentrations meet the project goal (< 0.6 ppm), and that means the uncertainty is within (0.074 mK ~ 0.175 mK) when the working temperature ranges from 213 K to 505 K.

(4) 107 Secondary Reserve Fund

In the project (4) 107 Secondary Reserve Fund which the budget is 266.55 million NTD, it covers all 4 new SI units. The goals of the project are: the primary silicon sphere mass standard, the primary vacuum standard of the new mass system, the absolute radiation temperature measurement system, the high temperature thermocouple calibration system, the quantum Hall resistance system and the low current standard system, multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer and isotope mass for the molar mass of element and reduce the uncertainty of primary reference standards to match with the new definition for the mole, as well as the establishment of laboratory environments to meet all 4 new SI units' requirements.

For the job items in "New mass" standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 5 planned checkpoints will be completed on time. The implementation results of the 5 checkpoints were the completions of procurement for the 1 kg mass comparator fully automated measurement system (the repeatability is 8 μ g and the resolution is 1 μ g), the 100 g mass comparator fully automated measurement system (the repeatability is 1 μ g and the resolution is 0.1 μ g), and the 10 g mass comparator fully automated measurement system (the repeatability is 0.6 μ g and the resolution is 0.1 μ g). Additionally, in the primary vacuum standard, a static expansion vacuum standard system is designed and its hardware construction is completed. The volume expansion ratio is between 100 ~ 10000, and the target pressure measurement range is 0.1 mPa ~ 1 kPa.

For the job items in "New temperature" standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 5 planned checkpoints will be completed on time. The implementation results of the 5 checkpoints were the completions of the perturbation correction on Acoustic Resonance Frequency in temperature the range of (213 ~ 373) K, and produces a technical document entitled as "Practice architecture analysis and measurement technology on the Acoustic Gas Thermometer in temperature the range of (213 ~ 373) K". Moreover, the other implementation results were the completions of procurement for the high temperature thermocouple calibration system. The acceptance procedure of the high temperature thermocouple calibration system is expected to be completed on December 12, and produces a technical document entitled as "Installation structure and the operation procedure of the high temperature thermocouple system". Meanwhile, the other implementation results were the completions of procurement for the ultra-high temperature radiation calibration system. The acceptance procedure of the ultra-high temperature radiation calibration system is completed on December 12, and produces a technical document entitled as "Installation structure and the operation procedure of the high temperature black furnace.

For the job items in “New Electric Current” standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 4 planned checkpoints will be completed on time. The implementation results of the 4 checkpoints were the completions of specification design and procurement for the liquid helium free QHR system. The acceptance procedure of the liquid helium free QHR system is completed on December 21 as a technical document entitled as “Operation and measurement technology of the liquid helium free Quantum Hall Resistance system”, and the system measurement deviation is less than $\pm 0.04 \mu\Omega/\Omega$. Moreover, the other implementation results were the completions of specification design and procurement for the high resistance bridge system. The acceptance procedure of the high resistance bridge system is completed on December 21, and the accuracy of ratio measurement is less 5×10^{-6} in the high resistance range of 100 k Ω to 1 T Ω .

For the job items in “New amount of substance” standard, the all planned checkpoints of the sub-project of establishment the measurement technology of induced plasma mass spectrometry (ICP-MS) and the sub-project of establishment the isotope-ratio measurement technology will be completed on time. The implementation results of the above checkpoints were the completions of specification design and procurement for the multi-collector ICP-MS, high resolution ICP-MS and isotope-ratio measurement system. The acceptance procedure of the above devices and system are completed on December 15. Another implementation results were the completions of the silicon sample pre-treatment procedure establishment as a technical document entitled as “Pretreatment technology of tetramethylammonium hydroxide to dissolve silicon crystal”. The other implementation results were the completions of atmosphere sample collection and analysis, and CO₂ concentration of the collected sample is $(215.60 \pm 0.83) \mu\text{mol/mol}$. Moreover, the other implementation results were the completions of the preparation of major component standard with gravity method and the prepared standard concentration is $(399.38 \pm 0.28) \mu\text{mol/mol}$, and the relative expansion uncertainty was less than 1%, which was in accordance with the project specifications.

(5) 107 Ministry of Economic Affairs Science Project

In the project (5) 107 Ministry of Economic Affairs Science Project which budget is 90.994 million NTD, and the main contents are establishing the silicon sphere surface mass measurement system, the acoustic gas temperature measurement system, and the absolute radiation temperature measurement system, the project is expanded to include the critical equipment of the Josephson voltage and quantum Hall resistance standard systems for the ampere redefined by the elementary charge.

For the job items in “New mass” standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 4 planned checkpoints will be completed on time. The implementation results of the 4 checkpoints were the completions of procurement for the silicon sphere surface layer mass analysis instrumentation (III) and the testing of a vacuum subsystem of an integrated XPS XRF surface mass measurement system.

For the job items in “New temperature” standard, until the end of this December, the progress has met the set targets of the project that all 7 planned checkpoints will be completed

on time. The implementation results of the 7 checkpoints were the completions of the specification discussion of cylindrical resonant, acoustic/microwave measurement subsystem, cooling equipment, gas treatment subsystem with vacuum pump/pressure gauge, and NPL agreed to our order which included two subsystems (the quasi-spherical resonant (213 ~ 373) K from the cylindrical resonator (373 ~ 505) K on September 28th. As well as the the completions of the linearity and accuracy evaluations on the new electrical bridge, firming the relationship between the sound speed and non-perturbed resonant frequency in cylindrical resonator, and carrying on the stability testing on the resonator under the temperature range of (373 ~ 505) K to confirm the specification of $\leq \pm 6$ mK. In addition, the other implementation results were the completions of procurement for the high temperature black furnace and the eutectic fixed-point cells (3 sets of cells) and the transfer item (optical pyrometer) by referring the definition of the new temperature scale”, and “completions of the geometric diagram of mechanism for the absolute radiation thermometer and contracted processing and manufacturing”.

For the job items in “New Electric Current” standard, until this December, the progress has met the set targets of the project that all 3 planned checkpoints had will be completed on time. The implementation results of the 3 checkpoints were the completions of specification design and procurement for the low resistance bridge system. The acceptance procedure of the low resistance bridge system is completed on December 25, 2018, and the accuracy of ratio measurement is less than 6×10^{-6} .

Through the establishment of the re-definition 4 new SI units, the new standards and corresponding calibration services will be provided to ensure the measurement consistency and accuracy for the manufacturing processes and R&D developments in industries. Additionally, the establishment of the new SI units will maintain the effectiveness of the signed CIPM MRA continuously, so more than 6 million calibration reports in each year certified by 2000 laboratory or enterprises, which are accredited by the Taiwan Accreditation Foundation (TAF), can be recognized globally to avoid possible technical barriers of trade. With globally recognized reports in hands, the export products from Taiwan can be qualitatively and quantitatively evaluated at once locally and recognized nationally to save cost and avoid risks of re-inspection. As a result, the industry’s competitiveness is strengthened.

(三) 關鍵字

公斤重新定義(Kilogram Redefinition)、X 光晶體密度法(X-ray Crystal Density Method)、熱力學溫度(Thermodynamic Temperature)、聲學氣體溫度計(Acoustic Gas Thermometer)、定點囊(Fixed Point Cell)、量化霍爾電阻標準(Quantum Hall Resistance Standard)、約瑟夫森電壓標準(Josephson Voltage Standard)、歐姆定律(Ohm's Law)、電流標準(Current Standard)

一、前言

依據我國度量衡法第 4 條「度量衡專責機關得設國家度量衡標準實驗室，負責全國度量衡最高標準之研究實驗、建立、維持、保管、供應、校正及其他相關事宜。」中央政府度量衡專責機關-經濟部標準檢驗局於民國 78 年起，以委辦計畫方式，委託工研院量測中心，建立並維持國家度量衡標準實驗室(National Measurement Laboratory, NML)之運作，執行至今已 30 年。NML 透過追溯至國際單位制(International System of Units, SI)基本單位，建立計量追溯基磐，維持計量主權完整；藉由計量標準之建置，提供精準之計量標準與技術，服務國內產業。除持續建立與維持我國國家計量追溯基磐外，也積極接軌國際，強化我國計量標準的國際等同與相互承認。多年來計已達成若干重要里程碑，例如：加入國際度量衡大會(General Conference on Weights and Measures, CGPM)成為仲會員(Associate Member)，簽署國際度量衡委員會(International Committee for Weights and Measures, CIPM)主辦之國家計量標準相互認可協議(Mutual Recognition Arrangement, MRA)，使得 NML 提供給國內產業之校正報告得以通行全球。而透過國際度量衡局(Bureau international des poids et mesures, BIPM)的關鍵比對(Key comparison, KC)，除可直接證明 NML 之量測能力外，亦維持 MRA 之效力，促使國家品質基磐與國際接軌，協助產業界在邁向全球貿易之過程，減少技術貿易障礙(Technical Barriers to Trade, TBT)。NML 建立與維持之國家計量追溯基磐，提供我國生產經營服務活動所需的最高檢測依據，藉由實現準確量測，保證產品品質及安全，協助推動科技進步和技術創新，保障國家經濟社會發展。

國際度量衡大會已於 2018 年 11 月 16 日第 26 屆大會上通過 SI 基本單位新定義，並於 2019 年 5 月 20 日公告實施，從此 7 個 SI 基本單位皆以“定值”的物理常數來定義，其中秒(時間)、公尺(長度)、燭光(光強度)原已符合新定義之要求，其餘 4 項基本單位，包括公斤(質量)以普朗克常數 h 定義、安培(電流)將以基本電荷 e 定義、克耳文(溫度)以波茲曼常數 k 定義、莫耳(物質質量)以亞佛加厥常數 N_A 定義，如下表 1-1 所示。為維持計量主權完整之計量基磐，自主追溯至 SI 基本單位，NML 必須及時因應，與國際同步實行 4 項 SI 單位的重新定義，建立我國最高追溯標準。以質量標準為例，我國現有 78 號鉑銱合金國際公斤原器，將隨新定義頒布實施而降為二級標準。若未及時建立符合新定義之新質量標準，NML 將無法自主追溯至 SI 基本單位，而必須追溯至具有能力之國家計量機構(National Measurement Institute, NMI)，以維持 MRA 之有效性，例如德國 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)、美國 NIST (National Institute of Standards and Technology)、日本 NMIJ (National Metrology Institute of Japan)或是中國大陸 NIM (National Institute of Metrology)等，進而喪失國家計量主權的完整性。除影響國家權益外，業界必須將產品送至其他國家之 NMI 校正，廠商勢必額外耗費大量時間成本、校正費用等，影響產業權益至鉅。如下圖 1-1 所示，如我國計量標準降為二級標準，業者為確保準確性，尋求其他 NMI 校正服務。而先進國家校正費用高出我國甚多，如送校美國 NIST 整體費用約為送校 NML 的 30 倍，選擇德國 PTB 則是 NML 的 10 倍，選擇日本則是 NML 的 5 倍。廠商在考量成本下，選送最便宜且臨近的中國計量科學研究院(NIM)校正，則將會喪失我國計量自主性。

表 1-1、2019 年 5 月 20 日開始實施的 SI 新定義

基本單位	新舊定義對照	
second (秒), s	舊	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ 一秒等於銫 133 原子於基態之兩超精細能階間躍遷時所放出輻射之週期的 9 192 631 770 倍時間。
	新	(定義未改變)
meter (米), m	舊	c 光在真空中於 299 792 458 分之一秒時間內所行經的距離。
	新	(定義未改變)
kilogram (公斤), kg	舊	$m(\text{K})$ 一公斤等於國際公認原器之質量。唯一由人工製品所定義的基本單位。
	新	h Planck constant (普朗克常數) 將普朗克常數 h 固定為 $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J s, J s 等於 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ 。
ampere (安培), A	舊	μ_0 一安培等於二條截面積為圓形無限長且極細之導線，相距一公尺平行放置於真空中，通以同值恒定電流時，使每公尺長之導線間產生千萬分之二牛頓作用力之電流。
	新	e Elementary charge (基本電荷) 將基本電荷 e 固定為 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C, C 等於 A s。
kelvin (克耳文), K	舊	T_{TPW} 1 K 等於水在三相點熱力學溫度之 1/273.16
	新	k Boltzmann constant (波茲曼常數) 將波茲曼常數 k 固定為 $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J K ⁻¹ , J K ⁻¹ 等於 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ 。
mole (莫耳), mol	舊	$M(^{12}\text{C})$ 一莫耳為物質系統中所含之基本顆粒數等於碳十二之質量為千分之十二公斤時所含原子顆粒數之物質質量。
	新	N_{A} Avogadro constant (亞佛加厥常數) 將亞佛加厥常數 N_{A} 固定為 $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol ⁻¹ 。
candela (燭光), cd	舊	K_{cd} 一燭光等於頻率 540 太赫(THz)之光源發出之單色輻射，在一定方向每立徑之放射強度為 1/683 瓦特之發光強度。
	新	(定義未改變)

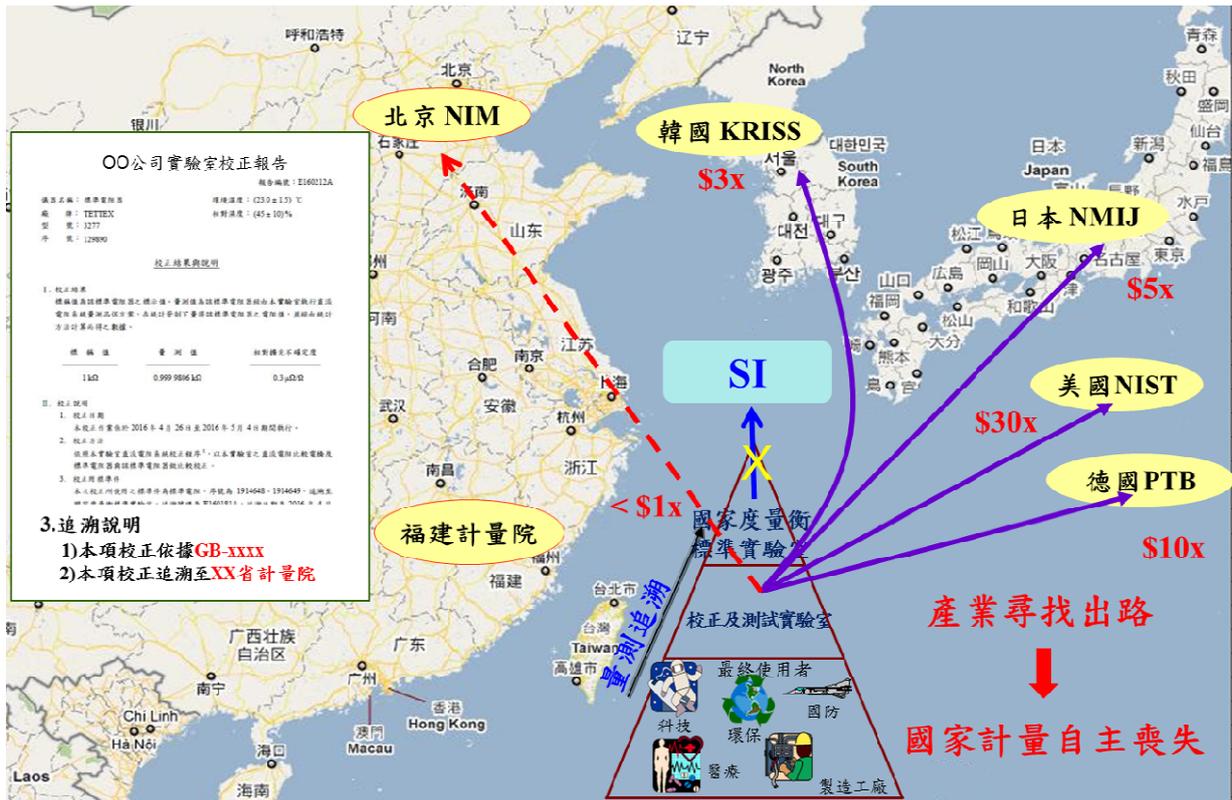


圖 1-1、計量標準追溯之影響

國際度量衡委員會對公斤(質量)、克耳文(溫度)、安培(電流)、莫耳(物質)等 4 項 SI 基本單位提出新定義，由此 4 項基本單位所推導出的導出單位(例如電阻、速度，密度、照度等)幾乎涵蓋所有計量領域，應用於我國所有產業。根據內部統計資料，NML 共累計提供我國約 2,400 家廠商符合 SI 定義之校正追溯服務，其中，舉例來說，屬電腦資訊產業約 150 家、半導體產業約 155 家、機械產業約 157 家及光電產業約 200 家。上述所統計之廠家幾乎涵蓋該產業之龍頭及所有重要廠家，即這些廠家的總產值幾乎為該產業的總產值。以相關產業調查機構所公布的資訊，我國電腦資訊業產值約新臺幣 4,500 億元、半導體業產值約新臺幣 2.4 兆元、機械業產值約新臺幣 9,900 億元、光電業產值約 2 兆元。而根據工研院 IEK (Industrial Economics and Knowledge Center)的估計，我國製造業 2018 年的總產值約為新臺幣 18 兆元。

因此，為因應 4 項 SI 基本單位定義之變革，保障國內產業生產設備、儀器準確度校正及追溯，提升 Made In Taiwan (MIT)產品品質以確保國際競爭力，國家度量衡標準實驗室(NML)規劃執行以下對應之 4 項工作，使我國計量標準符合 SI 新定義：(1) 建立 X 光晶體密度法，追溯至普朗克常數實現新公斤定義；並依新追溯方式，建置質量比較系統，將新質量標準傳遞至需求產業。經費規模 2 億 4,345 萬元，包含購置超純化矽晶球、XPS(X-Ray Photoelectron Spectroscopy) XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy)表面質量分析儀、質量比較儀及超高真空腔等關鍵設備，建置完整追溯體系，確保我國質量標準追溯不受新定義影響；(2) 建立聲學氣體溫度計及絕對輻射溫度計實現新克耳文定義，追溯至波茲曼常數。經費規模 1 億 4,478.8 萬元，包含購置聲學共振腔、熱電偶高溫校正系統設備、輻射超高溫校正系統設備，完整構建新溫度

校正追溯鏈，溫度範圍涵蓋-60 °C ~ 3000 °C；(3) 提升約瑟夫森電壓及量化霍爾電阻標準之能力，以追溯至基本電荷之新安培標準。經費規模 2,753.8 萬元，包含購置免液氦量化霍爾電阻系統，搭配約瑟夫森電壓標準，建立完整符合產業需求並與新定義接軌之電流標準。(4) 建立同位素比例量測技術，實現追溯至亞佛加厥常數之新物質量標準。經費規模 9,830 萬元，包含購置多接收器感應耦合電漿質譜儀及同位素質譜儀建立新物質量標準，準確量測元素物質莫耳質量，降低標準參考物質濃度計量追溯之不確定度，建立符合 SI 新定義之物質量標準。

4 項 SI 新標準建立之關鍵系統，硬體建置所需經費 5.14 億元，分由 5 項專案計畫執行。依每一計畫經費額度、爭取獲得的時間前後(請參照圖 1-2)，以及 4 項 SI 新標準技術取得之完整性與可行性，整體 5 項政府專案計畫及經費的規劃上，依序完成新質量、新溫度、新電流、新物質量等關鍵系統之硬體建置(佔總經費 82%)與量測技術建立。5 項專案計畫分別是(1) 106 年分攤款(4,000 萬元)-併入 106 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫運作，優先處理新質量矽晶球表層質量量測系統技術中的光電子頻譜分析儀(含 XFlash 矽漂移偵測器)設備購置(1 項)及自德國 PTB 技術移轉 XPS XRF 矽晶球表層質量量測技術。以及，新溫度系統中之氣體分析儀與溫度定點 2 項關鍵設備建構。(2) 106 年跨部會署科發基金計畫(7,880 萬元)，執行期間為 107.02~12，主要工作為建立原級矽晶球質量標準及矽晶球表面質量量測系統，以新質量系統之關鍵設備建構(2 項)為主。(3) 107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫(4,362.7 萬元)，執行期間為 107.01 ~ 12，以新質量中原級矽晶球質量標準及矽晶球表面質量量測系統的關鍵設備之 3 項關鍵設備，及新溫度中聲學氣體溫度計量測系統之 1 項關鍵設備建構為主。(4) 107 年行政院科發(9,099.4 萬元)，執行期間為 107.07 ~ 108.12。除了以新質量矽晶球表層質量量測系統(2 項)及新溫度聲學氣體溫度計量測系統、絕對輻射溫度量測系統(5 項)之關鍵設備建構，亦擴充至新電流系統之大電流標準(關鍵設備 1 項)。(5) 107 年行政院第二預備金(2 億 6,065.5 萬)，併入 107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫第五分項執行，執行期間為 107.07~12。執行內容以補足在(1)~(4)項計畫內尚缺乏之關鍵設備建構一共 17 項，涵蓋新質量系統的原級矽晶球質量標準、矽晶球表層質量量測系統及原級真空標準共 4 項；新溫度絕對輻射溫度量測系統及熱電偶高溫校正系統共 2 項；新電流系統的量化霍爾電阻系統及微電流標準共 4 項；新物質量系統的質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術及光學法同位素比例量測技術共 4 項；以及滿足 4 項 SI 新標準實驗室環境要求之建置 3 項等。

5 項政府專案計畫執行時程橫跨 106 年 10 月至 108 年 12 月，各項計畫之經費規劃與關鍵目標如下圖 1-2 及表 1-2。四項新標準系統之硬體建置將於 108 年 12 月以前完成，但後續各系統仍需進行系統評估、查驗及國際比對等工作後方可對外開放服務。各領域系統國際比對規劃如表 1-3。

在新質量部分，以 3 項工作為主，分別是：1. 原級矽晶球質量標準建置，目標為建立高純度矽晶球質量原級標準，質量標準不確定度^[**]為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，其相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於 1 kg)。2. 矽晶球表層質量量測系統技術建立，目標是完成矽晶球表層質量量測系統，表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ ，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ ，其在 1 公斤之相對不確定度分量 $\leq 3 \times 10^{-8}$ 。3. 原級真空標準建置，目標是建立壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相對標準

不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度為(0.1 ~ 2.5) %的靜態膨脹真空標準系統與技術。整體將完成 3 套系統之更新，包括公斤質量量測系統(M02)、小質量量測系統(M01)及真空比較校正系統(L01)，各系統之評估及查驗時程預估時間為 1 ~ 1.5 年，並規劃參加兩項國際比對，確保量測系統之能力與全球量測能力一致。為配合引用新技術實現新質量標準，參考新質量標準實施後之校正追溯練(至客戶端)，前述三套系統更新後之規格及系統追溯圖如圖 1-3 所示。

在新溫度部分，以 3 項工作為主，分別是：1. 聲學氣體溫度計量測系統建置，目標是完成建立(213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統，量測不確定度： ≤ 2.0 mK (涵蓋因子 $k=1$)。2. 絕對輻射溫度量測系統建置，擴建溫度範圍至 ~ 3000 °C，標準不確定度小於 5.0 °C。3. 熱電偶高溫校正系統建置，溫度範圍涵蓋(0.01 ~ 1492) °C，標準不確定度為(0.1 ~ 1) °C。整體將完成 1 套系統(白金電阻溫度計定點量測系統(T05))之更新及 2 套系統(輻射溫度計量測系統(T01)、熱電偶溫度計量測系統(T03))之擴建，各系統之評估及查驗時程預估時間為 1 ~ 1.5 年，並規劃參加 3 項國際比對，確保在量測能力擴充的範圍內與全球量測能力一致。此三套系統主要係配合新溫度標準量測方法的更新，進行系統能量之擴充，系統更新及擴充後之規格及系統追溯圖如圖 1-4 所示。

在新電流部分，以 3 項工作為主，分別是：1. 量化霍爾電阻系統精進，建立免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統，電阻校正之標準不確定度： $< 3 \times 10^{-8}$ Ω/Ω ，即擴充不確定度： $< 6 \times 10^{-8}$ Ω/Ω 。2. 大電流標準建置，完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω ，電流量測範圍 100 A to 1000 A，電阻校正之標準不確定度： < 25 $\mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度： < 50 $\mu\Omega/\Omega$ 。3. 微電流標準建置，建立用於微電流標準之高電阻電橋系統，高電阻量測範圍 100 k Ω to 1 T Ω ，電橋之比率量測準確度 $< 5 \times 10^{-6}$ 。因此，預期完成 3 套系統之更新，包括量化霍爾電阻量測系統(E24)、直流電阻量測系統(E13)及直流高電阻量測系統(E14)，並規劃參加雙邊國際比對，以確保量測系統之能力與全球量測能力一致。此三套系統主要係配合新電流標準的不確定度要求，進行相關系統及設備之更新，更新後之規格及系統追溯圖如圖 1-5 所示。

在新物質量部分，主要工作是將完成 1 套系統之新建，新增同位素標準品之服務，關鍵技術目標為建立質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術，其相對標準不確定度 $< 10^{-7}$ 。系統之評估及查驗時程預估時間為 1.5 年，並規劃於完成系統評估後，參加雙邊國際比對，擴充後之規格及系統追溯圖如圖 1-6 所示。

註：

- 標準不確定度 (standard uncertainty)：

以一倍標準差表示量測結果的不確定度，稱為「標準不確定度」。亦即，受測量會落在(量測平均值 \pm 標準不確定度)區間內的機率約為 68 %。

ISO/IEC Guide 98-3:2008

2.3.1: standard uncertainty

uncertainty of the result of a measurement expressed as a standard deviation

- 擴充不確定度 (expanded uncertainty)：

將標準不確定度擴充為可涵蓋較大機率的區間，稱之為「擴充不確定度」，擴充不確定度通常以約 95 % 的信賴水準來表示。亦即，受測量會落在(量測平均值±擴充不確定度)區間內的機率約為 95 %。

ISO/IEC Guide 98-3:2008

2.3.5: expanded uncertainty

quantity defining an interval about the result of a measurement that may be expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand

- 相對標準不確定度 (relative standard uncertainty)：
將標準不確定度除以其對應的量測值，換算為相對型態或百分比，稱之為「相對標準不確定度」。

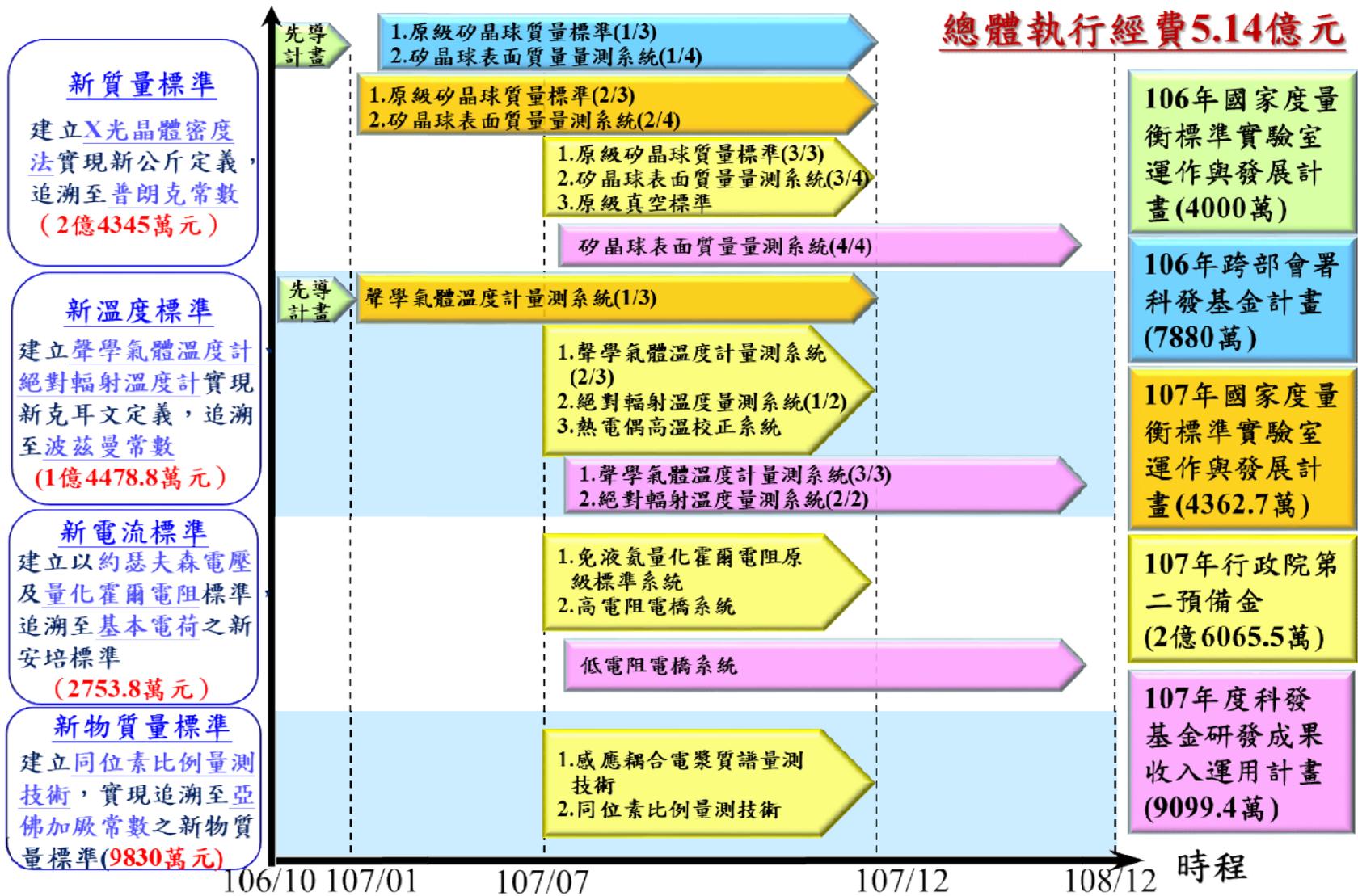


圖 1-2、四項 SI 建置經費規劃及執行時程

表 1-2、四項 SI 建置各計畫之計畫目標與執行內容

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~108.12
新 質 量 標 準	(1) 原級矽晶球質量標準建置					
	A. 高純度矽晶球質量原級標準規格制訂與採購申請，質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於 1 kg)		✓			
	B. 完成真空相容質量比較儀規格制訂與系統採購，並完成實驗室環境建置，腔體真空度可達 0.1 mPa，質量補償範圍 1.5 g，質量解析度 100 ng		✓			
	C. 建立質量標準真空至大氣導引技術，完成法碼氣體吸附效應量測流程建置		✓			
	D. 完成吸附效應量測實驗，吸附質量相對標準不確定度小於 65%			✓		
	E. 完成 1 mg 至 1 kg 質量導引系統採購與驗收				✓	
	(2) 矽晶球表層質量量測系統技術建立					
	A. 完成矽晶球表面光電子頻譜分析儀(含 XFlash 矽漂移偵測器)設備購置及自德國 PTB 技術移轉 XPS XRF 矽晶球表層質量量測技術	✓				
	B. 完成系統設計與各次系統規格訂定，目標表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ ，其在 1 公斤之相對不確定度分量 $\leq 3 \times 10^{-8}$		✓			
	C. 建立矽晶球表面水層、碳化汙染層與氧化層定量量測技術，完成螢光頻譜與電子頻譜數據分析軟體建置		✓			
	D. 完成矽晶球表層質量量測系統實驗室環境建置(溫度 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相對濕度 40% 至 60%，並提供獨立地基之隔振基礎平台)建置		✓			
	E. 完成整合 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜表層分析儀之超高真空腔體與五軸樣品移動座採購與驗收				✓	
	F. 完成整合型 XPS XRF 表層質量分析系統之真空樣品傳輸腔體測				✓	

名稱	工作項目	106年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000萬) 106.09~12	106年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880萬) 107.02~12	107年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7萬) 107.01~12	107年度行政院第二預備金 (2億6,065.5萬) 107.07~12	107年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4萬) 107.07~108.12
	試，真空度小於 10^{-5} Pa					
	G. 完成 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜技術表層分析儀系統整合					✓
	H. 完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 10 μg，相對標準不確定度 $\leq 15\%$(相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$					✓
	(3) 原級真空標準建置					
	A. 完成靜態膨脹真空標準系統與技術建立，壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相對標準不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度(0.1 ~ 2.5) %				✓	
新溫度標準	(1) 聲學氣體溫度計量測系統建置					
	A. 完成氣體分析儀(I)-H ₂ O 濃度分析與溫度定點(I)-Ag、Al、Zn、In 定點採購	✓				
	B. 完成聲學氣體溫度計共振腔體採購與組裝，溫度範圍(213 ~ 373) K，溫度穩定度 $\leq \pm 5$ mK			✓		
	C. 建立工作氣體純度分析技術，可量測水氣最小濃度 0.6 ppm			✓		
	D. 建立聲學共振頻率量測與修正技術及共振腔於(213 ~ 373) K 溫度範圍之溫度穩定性評估技術				✓	
	E. 建立(213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統，量測不確定度:$u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k = 1$)					✓
	(2) 絕對輻射溫度量測系統建置					
	A. 建立絕對輻射溫度量測技術，溫度點為銻碳合金(Re-C 2474 °C) 定點。確定高溫共晶點銻碳合金(Re-C; 2474 °C)下熱力學溫度與現行國際溫標 ITS-90 之差小於 0.5 %				✓	
	B. 完成高溫黑體爐設備(1000 ~ 3000) °C 與標準傳遞件(波長 0.65 μ m 及 0.9 μ m，溫度範圍(800 ~ 3000) °C)採購及完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C)等 3 組高溫共晶定點囊設備採購					✓

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~108.12
	C. 完成 Co-C(1324 °C)共晶定點囊短期重複性評估, 重複性≤ 20 mK					✓
	D. 完成建立絕對式輻射溫度計及相關參數追溯, 波長 650 nm 及 900 nm, 光源尺寸效應(SSE)< 0.05 %					✓
	(3) 熱電偶高溫校正系統建置					
	A. 建立熱電偶高溫校正量測技術, 溫度範圍涵蓋(0.01 ~ 1492) °C				✓	
新電流標準	(1) 量化霍爾電阻系統精進					
	A. 建立免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統, 電阻校正之標準不確定度: $< 3 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$, 即擴充不確定度: $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$				✓	
	(2) 大電流標準建置					
	A. 完成低電阻電橋標準校正程序建立, 電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω, 電流量測範圍 100 A to 1000 A, 電阻校正之標準不確定度: $< 25 \mu\Omega/\Omega$, 即擴充不確定度: $< 50 \mu\Omega/\Omega$					✓
	(3) 微電流標準建置					
	A. 建立用於微電流標準之高電阻電橋系統, 高電阻量測範圍 100 kΩ to 1 TΩ, 電橋之比率量測準確度 $< 5 \times 10^{-6}$				✓	
	B. 完成高電阻校正之重複量測變異性評估($< 80 \mu\Omega/\Omega$), 高電阻量測範圍為 100 kΩ to 1 TΩ				✓	
新物質質量標準	(1) 感應耦合電漿質譜量測技術建置					
	A. 建立高濃度四甲基氫氧化銨試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)				✓	
	B. 建立高濃度硝酸試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)				✓	
	C. 建立四甲基氫氧化銨溶解矽晶體之前處理技術				✓	
	(2) 同位素比例量測技術建置					
	A. 建立質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術				✓	
	B. 建立質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術(相對標準不確定度 $< 10^{-7}$)(相對於 ^{28}Si 莫耳質量)				✓	

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~108.12
	C. 建立光學法同位素比例量測技術				✓	

表 1-3、四項新標準系統國際比對規劃

領域	比對參數/ 比對件/ 量測系統	對象或主辦 (預定)	目標時程 (規劃啟動月份)	補充說明
電流	電阻/ 低電阻器/ E13	日本 NMIJ	2019/10 已啟動 非正式比對	<ul style="list-style-type: none"> • 由於電阻器正式國際比對(APMP.EM-K1.1 直流電阻 1 Ω、10 kΩ；主辦:泰國國家計量研究院(NIMT)時程尚未定案，故規劃非正式比對(Hybrid Comparison)。 • 9/12 已以 E13 直流電阻系統系統完成 Hybrid Comparison 標準件(10 kΩ電阻器)校正，並於 9/16 將校正報告提供給 APMP TCEM 主席。 • 10/3 APMP TCEM 主席通知 Hybrid Comparison 申請已核示，比對編號為：APMP.EM-H1.2019。 • 10/8 日本 NMIJ 收到 NML 寄出之 Hybrid Comparison 標準件，並於 11/5 完成該標準件的校正。 • 11/20 已收到日本 NMIJ 寄回之 Hybrid Comparison 標準件，待收到 NMIJ 的校正報告後，將進行比對報告撰寫。11/27 收到日本 NMIJ 提供之 Hybrid Comparison 校正報告，比對結果 E_n 值<1，顯示雙方量測結果具一致性。

領域	比對參數/ 比對件/ 量測系統	對象或主辦 (預定)	目標時程 (規劃啟動月份)	補充說明
質量	質量/ 法碼/ M02	德國 PTB、 BIPM	2020/06 (非正式比對) 2021/09 及 2023/09 (參加 BIPM 公 斤實現比對)	<ul style="list-style-type: none"> • 預計於 2020/06 前完成與 PTB 進行矽晶球表層質量雙邊比對(非正式比對)，以作為後續參加公斤實現比對之能力要求證明。 • BIPM 舉辦之第一次公斤實現國際比對(CCM.M-K8.2019)將於 2019/09 開始進行，並於 2020 年底前完成結果產出。但 NML 尚未準備好，故無法參與。 • NML 計畫於 2021/09 與 2023/09 分別參加第二次與第三次公斤實現比對。 • 公斤共識值 CV 將由前三次公斤實現比對結果計算而得。
溫度	熱力學溫度 T at 302.9146 K/ 聲學氣體溫度計 / T05	義大利 INRiM (雙邊比對)	2020/12	<ul style="list-style-type: none"> • 國際比對舉辦現況 歐洲計量組織聯盟(the European Association of National Metrology Institutes, EURAMET)舉辦之熱力學溫度國際比對(InK 1 及 InK 2)已結束，NML 不及參加。(InK: Implementing the new kelvin) • 雙邊比對規劃 與義大利 INRiM 進行熱力學溫度 302.9146 K 比對(暫定)，比對件：囊型標準白金電阻溫度計。
溫度	熱力學溫度 T/鈷 碳共晶點溫度/ T01	英國 NPL 日本 NMIJ	2020/12 (非正式比對)	<ul style="list-style-type: none"> • 國際比對舉辦現況 EURAMET 舉辦之熱力學溫度國際比對(InK 1 及 InK 2)已結束，NML 不及參加。 • 非正式比對規劃(以 NPL 校正報告值自我驗證) 以經 NPL 校正的輻射溫度計 ART 量測 NML 之 Co-C 定點溫度，確認系統準確度。 • 正式比對規劃 與日本 NMIJ 進行熱力學溫度 Co-C 定點比對(暫定)，比對件：Co-C 定點或輻射溫度計。

領域	比對參數/ 比對件/ 量測系統	對象或主辦 (預定)	目標時程 (規劃啟動月份)	補充說明
溫度	鈷碳(Co-C)共晶 點溫度/ 貴金屬熱電偶 (Pt/Pd)/ T03	英國 NPL (非正式比對) 日本 NMIJ (雙邊比對)	2020/12 (雙邊比對) 2020/08 (非正式比對)	<ul style="list-style-type: none"> 國際比對舉辦現況 高溫熱電偶溫度計 APMP.T-S16 (R-type 熱電偶溫度計校正由 1000 °C 至 1560 °C)由澳洲 NMIA 於 2017 年主辦開始比對，NML 已錯過報名。 雙邊比對規劃 NML 與日本 NMIJ 已於 2019/11 的 ITRI-AIST 共同研討會議中雙方同意執行雙邊比對的規劃，在 2020/09 通過第三者認證國際評審後，預計於 2021/12 前啟動雙邊比對，由我方提供兩支 Pt/Pd 熱電偶溫度計進行 Co-C (1324 °C)溫度點的比對。 非正式比對規劃(與 NPL 校正報告值比較) NML 將執行兩支 Pt/Pd 熱電偶溫度計在 Co-C (1324 °C)的校正。之後，將兩支 Pt/Pd 熱電偶溫度計送至 NPL 執行校正，以驗證 T03 系統達到標準。
物質質量	矽莫耳質量/ 高純度矽晶球裁 切原料/ C14	德國 PTB 加拿大 NRC(備案)	2020/10 (2020/1 PTB 來 信表示其比對 分析儀器故 障，因此相關期 程將有所延 誤，實際可行時 間依復機狀況 回覆)	<ul style="list-style-type: none"> 非正式比對規劃 PTB 已提供 2018 年 CCQM-IAWG 執行先期研究的樣品溶液，將由我們的接收器感應耦合電漿質譜儀進行量測矽同位素，由矽同位素的比例推導出矽莫耳質量，並將量測結果與 PTB 之數據做比對，以確認量測技術達到標準。 矽莫耳質量的主要量測技術為矽同位素比例量測，此技術亦為加拿大國家實驗室 NRC 之核心技術(該實驗室負責人目前為 CCQM 同位素比例量測工作小組的主席)，因此，後續實驗室將與 NRC 進行技術交流與洽談，以便透過多方合作進行矽同位素比例量測技術的確效。 雙邊比對規劃 預計於 2020/10 啟動雙邊比對，正式比對編號須由 CCQM-IAWG 主席同意後提供。比對用標準溶液由 PTB 提供。

國際基本單位制重新定義-新公斤系統完成後建置情況

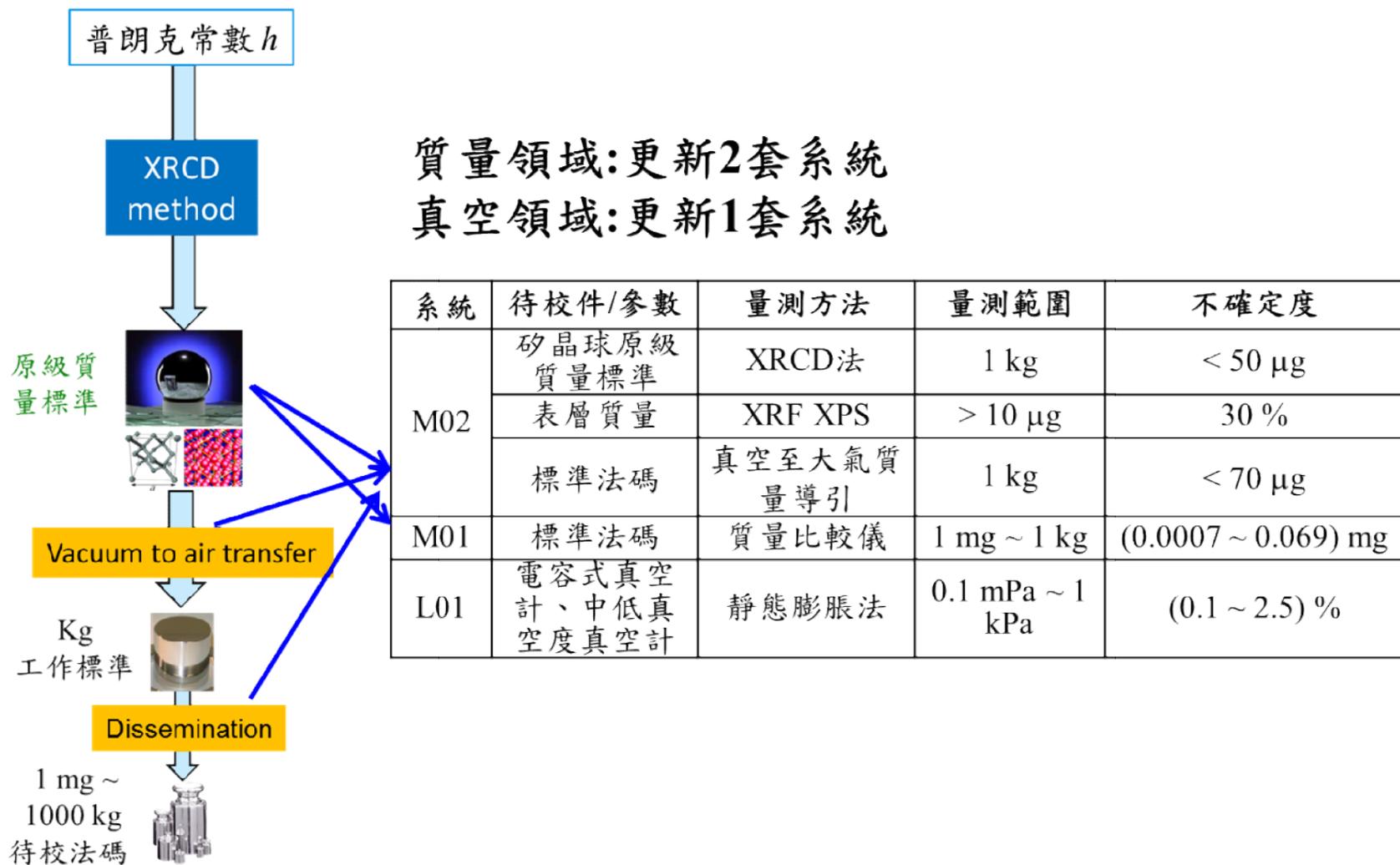


圖 1-3、新公斤系統完成後建置情況

國際基本單位制重新定義-新溫度系統完成後建置情況

波茲曼常數 k



溫度領域:更新1套系統，擴建2套

系統	待校件/參數	量測方法	量測範圍	不確定度
T05	標準白金電阻溫度計/熱力學溫度	聲學氣體溫度計	熱力學: (-60 ~ 232) °C ITS-90: (-190 ~ 962) °C	熱力學: 4 mK ITS-90: 10 mK
T01	輻射溫度計/熱力學溫度	絕對輻射溫度計	熱力學: (1085 ~ 2474) °C ITS-90: (800 ~ 3000) °C	熱力學: (0.33 ~ 2.0) °C ITS-90: (0.9 ~ 7.0) °C
T03	貴金屬型熱電偶	定點囊校正	(0 ~ 1492) °C	(0.11 ~ 1.0) °C

圖 1-4、新溫度系統完成後建置情況

國際基本單位制重新定義-新電流系統完成後建置情況

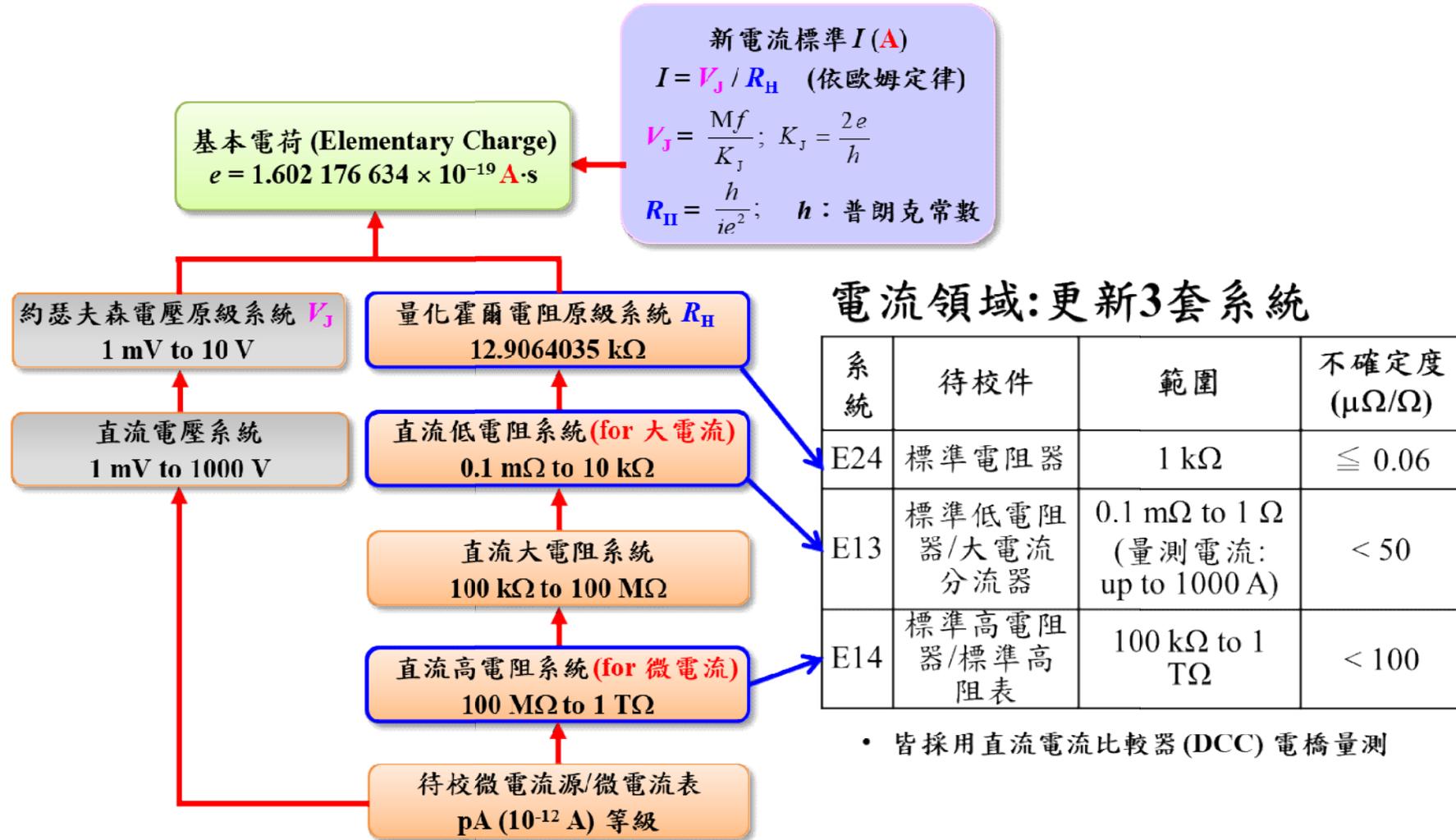


圖 1-5、新電流系統完成後建置情況

國際基本單位制重新定義-新物質質量系統完成後建置情況

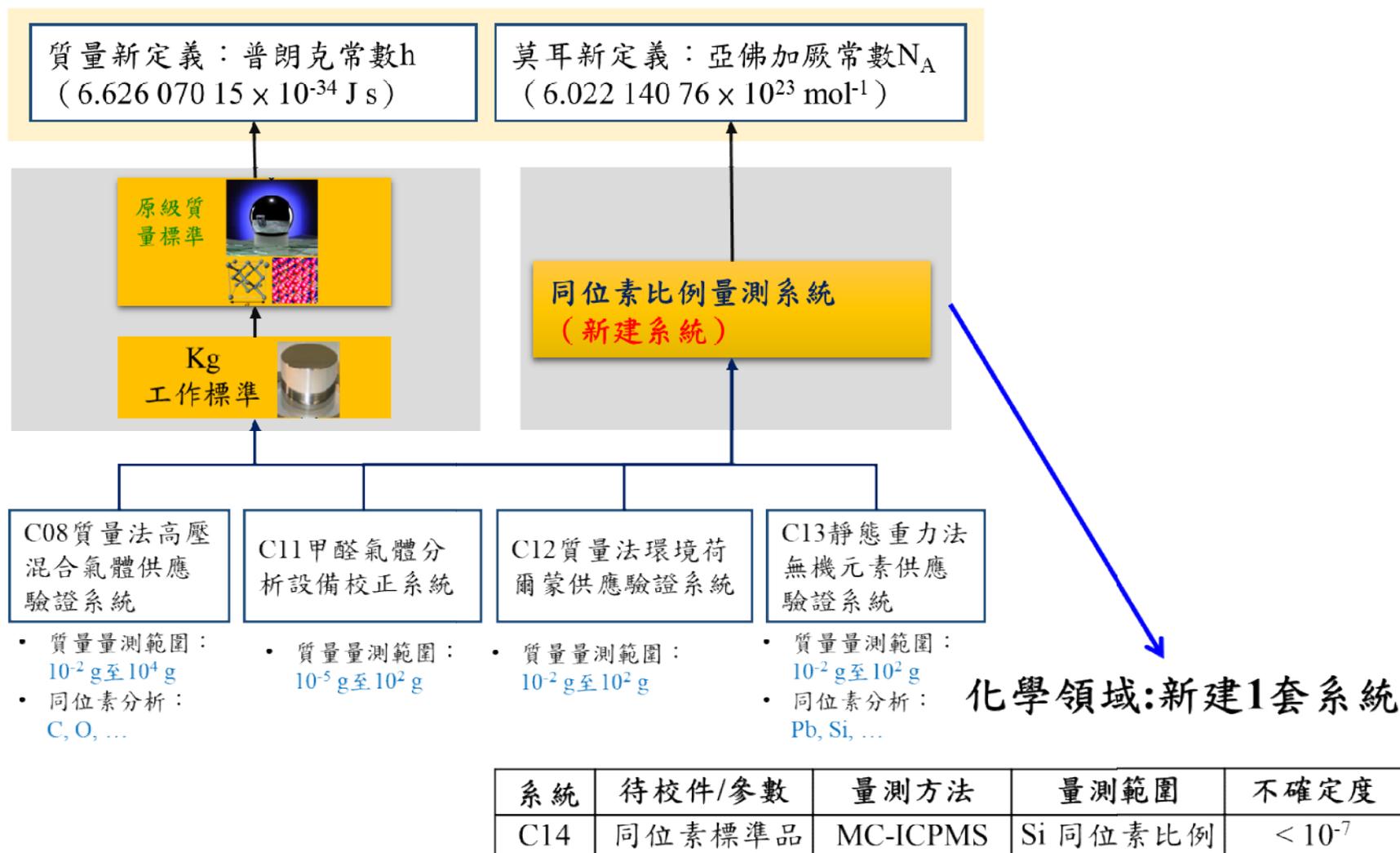


圖 1-6、新物質量系統完成後建置情況

二、四項 SI 新標準建置之總體說明

(一) 研究目的

1. 新質量標準建置

質量單位「公斤」於新 SI 實施前定義為「國際公斤原器」(International Prototype of Kilogram, IPK)之質量，我國質量最高標準，IPK 第 78 號複製品，放置於國家度量衡標準實驗室，提供產業界質量追溯校正的最高基準。近 130 年來「國際公斤原器」質量已產生約 50 微克(μg)的漂移，如我國未依新公斤標準的追溯方式(例如:矽晶球法)，建立新質量量測標準系統，將衝擊國內對高準確質量量測有需求之相關產業。

例如在半導體產業製程中，晶圓整體質量改變量為製程中重要監測參數之一，以 12 吋晶圓表面鍍製 10 nm 厚之鈦接合層為例，導致之質量改變量僅達 5 μg 左右；面對半導體前瞻製程的快速進展，基板的清洗、蝕刻與研磨須要仰賴特定化學溶液或是特殊氣體，這些溶液或氣體濃度除了須經過準確的成分配重外，量測化學溶液或氣體內不純物的成分，避免缺陷(奈克、皮克等級的不純物沉積而成)，也是前瞻製程良率關注的焦點之一，其影響產值達 12,299 億新台幣(臺灣 2017 晶圓代工預估產值)。由於不純物的成分分析(以感應耦合電漿質譜儀(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS)量測)，需要達到 ng/kg 等級的精準質量定量，因此，準確的質量量測技術建立，對於半導體前瞻製程良率的提升，扮演重要的角色。

在製藥產業中常需針對製藥所需微量(微克級)反應成分，進行微克等級之高準確質量量測，以確保藥效及生命安全，因此如食○工業研究所、台○檢驗科技等便需要極其準確之標準法碼；於航空產業中，飛機引擎的金屬合金材料、機體各設備防火材料、結構膠粘劑、各式塗層等等之性能的優劣影響到飛航安全，如飛機航行中發動機運轉與機體各部結構材料於高溫下運作時，材料之應力、化性與氧化程度皆會產生變化，變化過程中有昇華、汽化、分解出氣體或失去結晶水以及燃燒損耗、氧化、氫化和吸附等各現象，此時材料質量因而產生變化，導致其材料性能改變，影響飛航正常運作。這些因飛航所導致之材料性質變化檢測皆須仰賴熱重分析技術，即在不同高溫下進行準確之微小質量量測(解析度需達 0.1 μg)，進行材料熱重曲線量測，分析材料性能或應用於先進飛航材料之開發，進而提高材料之安全及耐用性。

質量單位「公斤」的新定義，不再依賴指定的國際公斤原器(IPK)質量，也解決現行公斤定義中未知 50 微克漂移與相關之隱藏質量不確定度，公斤定義可在任何地點、由任何實驗室依符合新定義之方法實現，確保公斤的長期穩定度及可靠度，亦可達到降低風險的效果。

2. 新溫度標準建置

於新 SI 實施前，溫度單位「克耳文(kelvin)」的定義為「1 K 等於水三相點熱力學溫度之 1/273.16」。但產生水三相點溫度之「三相點囊」受水的純度、蒸餾工藝、同位

素含量及熱流效應等影響，製作與長期保存不易。為了避免水的宏觀不穩定性影響，SI溫度新定義改用波茲曼常數來定義克耳文，將溫度回到微觀基礎上與能量聯繫起來。於實現上，目前最準確的是「聲學氣體溫度計法」。

新定義進一步可解決目前國際溫標 ITS-90 以內插法導出定點值間，溫度誤差之問題，亦能滿足低於~20 K 和高於~1300 K 的溫度需求，未來將可提供高溫及低溫範圍，比當前以 ITS-90 得到不確定度更低的熱力學溫度不確定度。同時，隨 SI 新定義的提出，實施已屆 30 年的 ITS-90 國際溫標未來將被廢除，而被醞釀已久的新溫標 ITS-20xx 取代。新溫標 ITS-20xx 欲將溫度的範圍往銅凝固點(1084.62 °C)以上的高溫範圍延伸至金屬(碳化物)-碳共晶點(3185 °C)所能達到的範圍。

面對此國際溫標的轉換，將衝擊國內產業溫度標準與國際之一致性，例如：在國防科技產業上潛艦鋼板被各國政府視為戰略物資，不允許擅自出口，鋼鐵產業如中○鋼鐵公司開發此類鋼板時之熱處理溫控條件需加熱至 1100 °C 至 1250 °C，必須準確控制方能使其微觀組織能快速再結晶和晶粒生長，以找到最適合的製程。在航太產業上，噴射發動機為了提高熱效率與推力，需提高渦輪進氣溫度，但是提高的溫度會縮短渦輪葉片與其零組件的使用壽命，所以必須採用新型合金熱處理條件來提高其耐溫與耐壓的能力，如榮○材料公司與漢○公司在渦輪葉片與零組件的熱處理溫度範圍往往需在 1300 °C 至 1400 °C。目前渦輪葉片與零組件熱處理溫度的量測不確定度在 2 °C 極限上，容易造成葉片的損壞並影響整體良率，新溫度標準建置後，能將量測不確定度控制在 1 °C 內，具有最佳的熱處理效果與良率。因此，NML 將建置聲學氣體溫度計系統以實現克耳文的新定義，並利用高溫共晶點溫度校正量測技術來建立符合新定義之溫標範圍，滿足產業高溫之校正需求。

3. 新電流標準建置

1948 年由 CGPM 決議採用之 SI 基本單位「電流」，即「安培(A)」，的定義必須採用兩條截面積可忽略之無限長極細平行導線，於現實物理世界中無法被準確地實現。SI 新標準採用「基本電荷」來定義電流，使電流定義回歸「單位時間內通過的電荷數」之基礎物理原理。實現上，除採用單電子元件控制電荷數目之方法外，另一廣為被各國國家計量機構採用之方法是以由基本電荷 e 與普朗克常數 h 推演定義之「量化霍爾電阻」及「約瑟夫森電壓」兩個電量原級標準，根據歐姆定律(電流等於電壓除以電阻)來實現新的電流定義。

為因應新的電流定義，NML 將建立採用免液氦低溫裝置之量化霍爾電阻標準系統(標準不確定度: $< 3 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度 $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$)，與約瑟夫森電壓標準系統搭配，導出符合新定義之電流標準。而為了提供半導體、材料、通訊等產業於製程或產品特性檢測常用的微電流標準(10^{-12} A 等級)，以及能源、電機產業之大電流(100 A 以上)標準等需求，必須將量化霍爾電阻標準傳遞至低電阻與高電阻標準。電流量測是工業上用來監控制程的主要方法之一，例如在半導體產業製程中，隨著半導體前瞻製程技術進展至 10 奈米以下，例如台○電所研發之新世代 10 nm FinFET 製程結構，其

漏電流(即微電流)檢測(10^{-12} A 等級)將扮演重要的角色，也代表微電流量測準確度將是影響前瞻製程良率的關鍵因素之一。

但我國目前低電阻標準的電流量測範圍不足，最大量測電流僅能提供至 100 A 的服務能量，且高電阻標準之量測準確度為 $0.5 \text{ m}\Omega/\Omega$ 與先進國家的差距在數 10 倍以上。因此，NML 亦將建置新的低電阻標準系統(標準不確定度: $< 25 \mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度 $< 50 \mu\Omega/\Omega$)，最大量測電流可提升至 1000 A，以及高電阻標準系統(標準不確定度: $< 50 \mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度 $< 100 \mu\Omega/\Omega$)，最小量測電流在搭配微電流系統精進後可達 1 pA，以全面滿足產業需求，使我國電流標準之準確度及量測範圍於新定義實施後與國際一致。

4. 新物質量標準建置

為了確保 SI 新單位制中物質量「莫耳」的定義可完整實現，規劃建置發展同位素比例量測能力，以準確量測物質莫耳質量，除可銜接 X 射線晶體密度法(X-ray Crystal Density method, XRCD method)進行亞佛加厥常數的量測，亦可擴充執行關鍵元素的莫耳質量量測，將莫耳質量之不確定度納入原級標準物質之濃度計算，完備驗證參考物質之追溯鏈。

穩定同位素比例量測系統主要為進行物料鑑識，除莫耳質量或俗稱分子量的量測應用外，主要的應用是科學鑑識(Forensic Science)，如地質研究、刑事鑑識、物質來源與農牧產品產地追蹤。其產業應用必須搭配其他相關樣品前處理技術與物質濃度定量技術。也因此，於 SI 計畫因同位素樣品處理所建立的旁支技術：氣體純度分析技術與溶劑純度分析技術，將是未來對於臺灣產業發展重要的關鍵技術。

以半導體產業而言，所使用的電子級材料與特殊氣體均需要進行 ppb 至 ppt 等級的不純物分析，並同時包含氣狀不純物(如 H_2O , O_2 , HC)及粒狀物金屬元素(如鉛、銅、鈉、鎂、鈣等)的分析。此類技術目前已有多家氣體廠(如：夫翔氣體、林德聯華等)與電子級試劑廠(如：宏廣新技、臺灣德亞瑪等)與 NML 洽談技術運用，並以合作意向書或技術衍生應用等方式啟動技術合作工作。包含環境保護署在進行執行的新世代空氣品質監測設備汰換更新計畫中，均使用 NML 所建置之純度鑑識技術進行儀器的性能驗證規劃。由此可見，在 SI 計畫中進行技術的持續深化，將可強化且拓展計量標準與產業及政策的連結。

(二) 研究目標

1. 新質量標準建置

符合新定義之新質量系統建立，以 X 光晶體密度法為基礎，追溯至普朗克常數，實現新公斤定義。並依新追溯方式，建置質量比較系統，將新質量標準傳遞至需求產業。

新質量系統的建立，分為三個主要項目，分別是：

- (1) 原級矽晶球質量標準建置，質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，即相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於 1 kg)；
- (2) 矽晶球表層質量量測系統技術建立，相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ ；
- (3) 原級真空標準建置，相對標準不確定度 (0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度 (0.1 ~ 2.5) %。

在有限的時間及經費規模 2 億 4345 萬元的條件下，先以關鍵設備的建置與技術的建立為主。關鍵設備的建置與技術的引進，佔總經費的 82%，包含購置超純化矽晶球、XPS XRF 表面質量分析儀、質量比較儀及超高真空腔等關鍵設備，以建置完整追溯體系，確保我國質量標準追溯不受新定義影響。下表 2-1 為新質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費。

表 2-1、新質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費

計畫名稱	採購設備	技術研發
106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫	共 2,600 萬元 矽晶球表層質量分析儀 (I)-XFlash 矽漂移偵測器、X 射線光電子頻譜分析儀(2,600 萬元)	共 720 萬元 自德國 PTB 技術移轉 XPS XRF 矽晶球表層質量量測技術。
106 年度行政院跨部會署科發基金計畫	共 6,400 萬元 1.矽晶球(3,600 萬元) 2.真空相容質量比較儀(2,800 萬元)	共 1,480 萬元 1.建立質量標準真空至大氣導引技術 2.法碼氣體吸附效應量測流程建置 3.建立矽晶球表面水層、碳化汙染層與氧化層定量量測技術 4.完成螢光頻譜與電子頻譜數據分析軟體建置
107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫	共 1,600 萬元 1.超高真空系統及載台(1,150 萬元) 2.吸附效應參考法碼組(450 萬元)	共 730.5 萬元 1.完成吸附效應量測實驗 2.整合 X 射線光電子頻譜與 X 射線螢光頻譜表層分析儀系統
107 年度行政院第二預備金	共 8,823.5 萬元 1.一公斤質量比較儀全自動量測系統(1,500 萬元) 2.一百克質量比較儀全自	共 915.8 萬元 1.完成 1 mg 至 1 kg 質量導引系統採購與驗收 2.完成整合型 XPS XRF 表層質量分析系

計畫名稱	採購設備	技術研發
	動量測系統(2,983.5 萬元) 3.十克質量比較儀全自動 量測系統(1,590 萬元) 4.新質量實驗室空調系統 (原實驗室環境溫濕度改 善)(250 萬元) 5.靜態膨脹真空標準系統 (2,500 萬元)	統之真空樣品傳輸腔體測試，真空度小 於 10^{-5} Pa 3.完成靜態膨脹真空標準系統與技術建 立，壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相 對標準不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對 擴充不確定度(0.1 ~ 2.5) %
107 年度科發 基金研發成果 收入運用計畫	共 500 萬元 超高真空相容五軸矽晶 球調整座(II)	共 575.2 萬元 1.完成 X 射線光電子頻譜與 X 射線螢光 頻譜技術表層分析儀系統整合 2.完成矽晶球表層質量量測評估
合計經費	19,923.5 萬元	4,421.5 萬元
	2 億 4,345 萬	

2. 新溫度標準建置

新溫度標準以波茲曼常數為基準，重新定義克耳文，取代原以水三相點定義之方式。NML 為因應 SI 克耳文(溫度)新定義，建立聲學氣體溫度計技術與絕對輻射溫度量測技術，重新定義與修正水三相點以及各式定點囊的熱力學溫度與不確定度，並傳遞至接觸式熱電偶溫度計量測系統與非接觸式輻射溫度計量測系統，以實現符合新定義要求之溫度標準，並與未來國際新溫標 ITS-20xx 接軌。

新溫度系統的建立，分為三個主要項目，分別是：

- (1) 聲學氣體溫度計量測系統建置，溫度範圍(213 ~ 505) K；
- (2) 絕對輻射溫度量測系統建置；
- (3) 熱電偶高溫校正系統建置，溫度範圍(0.01 ~ 1492) °C。

在有限的時間及經費規模 1 億 4,478.8 萬元的條件下，先以關鍵設備的建置與技術的建立為主。關鍵設備的建置與技術的引進，佔總經費的 79 %，包含購置準球型聲學共振腔、熱電偶高溫校正系統設備及輻射超高溫校正系統設備等關鍵設備，以建置完整追溯體系，確保我國溫度標準追溯不受新定義影響。下表 2-2 為新溫度標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費。

表 2-2、新溫度標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費

計畫名稱	採購設備	技術研發
106 年度國家 度量衡標準實 驗室運作與發 展計畫	共 680 萬元 1.氣體分析儀(I)-H ₂ O 濃 度分析(320 萬元) 2.溫度定點(I)-Ag、Al、 Zn、In 定點(360 萬元)	-
107 年度國家 度量衡標準實 驗室運作與發 展計畫	共 690 萬元 準球型聲學共振腔	共 1,342.2 萬元 1.完成聲學氣體溫度計共振腔體採購與 組裝 2.建立工作氣體純度分析技術
107 年度行政 院第二預備金	共 3,430 萬元 1.熱電偶高溫校正系統設 備(2,080 萬元) 2.輻射超高溫校正系統設 備 (1,350 萬元)	共 927 萬元 1.建立聲學共振頻率量測與修正技術與 共振腔於(213 ~ 373) K 溫度範圍之溫度 穩定性評估技術:180 分鐘內 $\leq \pm 3$ mK 2.建立熱電偶高溫校正量測技術,溫度範 圍涵蓋(0.01 ~ 1492) °C 3.建立絕對輻射溫度量測技術
107 年度科發 基金研發成果 收入運用計畫	共 6,630 萬元 1.圓柱型聲學共振腔及相 關感測、聲學、微波、真 空組件(3,300 萬元) 2.氣體分析儀 II(280 萬 元) 3.溫度定點裝備 II-Sn、 In、Ga 定點(200 萬元) 4.精密電阻電橋(550 萬 元) 5.輻射超高溫校正系統設 備(I)-Co-C、Pd-C 等定點 及高溫定點黑體爐、傳遞 用高溫計(2,300 萬元)	共 779.6 萬元 1.建立(213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量 測系統 2.完成高溫黑體爐設備(1000 ~ 3000) °C 與標準傳遞件採購及完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C)等 高溫共晶定點囊設備採購 3.完成 Co-C(1324 °C)共晶定點囊短期重 複性評估 4.完成建立絕對式輻射溫度計及相關參 數追溯
合計經費	11,430 萬元	3,048.8 萬元
	1 億 4,478.8 萬	

3. 新電流標準建置

新電流標準以量化霍爾電阻(Quantum Hall Resistance, QHR)原級標準搭配約瑟夫森電壓原級標準,根據歐姆定律來間接實現新的電流定義。NML為因應SI電流新定義,將建置高準確度之免液氦 QHR 原級系統以搭配約瑟夫森電壓原級系統,以歐姆定律導出電流標準。此外,根據歐姆定律,當電壓值固定,電流值與電阻值成反比,因此,為了導出符合產業界需求之大電流標準(100 A 以上)以及微電流標準(10^{-12} A 等級),需藉由大電流電阻電橋量測技術與精密高阻電橋量測技術的建立,將量化霍爾電阻標準傳遞至低電阻與高電阻標準,建立與新定義接軌之電流標準。

新電流系統的建立,分為三個主要項目,分別是:

- (1) 免液氦量化霍爾電阻系統(量測標準不確定度: $< 3 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$, 即擴充不確定度 $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$);
- (2) 用於大電流標準之低電阻電橋系統(低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω , 大電流量測範圍 100 A to 1000 A, 電阻校正之標準不確定度: $< 25 \mu\Omega/\Omega$, 即擴充不確定度 $< 50 \mu\Omega/\Omega$);
- (3) 用於微電流標準之高電阻電橋系統(高電阻量測範圍:100 k Ω to 1 T Ω , 電阻校正之標準不確定度: $< 50 \mu\Omega/\Omega$, 即擴充不確定度 $< 100 \mu\Omega/\Omega$), 未來搭配微電流系統量測技術與相關設備精進後,微電流量測範圍最小可達 1 pA。

在有限的時間及經費規模 2,753.8 萬元的條件下,先以關鍵設備的建置與技術的建立為主。關鍵設備的建置與技術的引進,佔總經費的 82%, 包含購置免液氦量化霍爾電阻系統、高精密多通道高阻電橋及低電阻電橋設備等關鍵設備,以建置完整追溯體系,確保我國電流標準追溯不受新定義影響。下表 2-3 為新電流標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費。

表 2-3、新電流標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費

計畫名稱	採購設備	技術研發
107 年度行政院第二預備金	<p>共 1,842 萬元</p> <p>1.免液氦量化霍爾電阻系統(800 萬元)</p> <p>2.高精密多通道高阻電橋(450 萬元)</p> <p>3.精密標準電阻器及其恆溫儲存槽(242 萬元)</p> <p>4.新電流標準建置之精密電阻校正器(350 萬元)</p>	<p>共 297.2 萬元</p> <p>1.建立免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統</p> <p>2.建立用於微電流標準之高電阻電橋系統,高電阻量測範圍 100 kΩ to 1 TΩ, 電橋之比率量測準確度$< 5 \times 10^{-6}$</p> <p>3.完成高電阻校正之重複量測變異性評估($< 80 \mu\Omega/\Omega$), 高電阻量測範圍為 100 kΩ to 1 TΩ</p>

計畫名稱	採購設備	技術研發
107 年度科發基金研發成果收入運用計畫	共 420 萬元 低電阻電橋	共 194.6 萬元 完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，電流量測範圍 100 A to 1000 A
合計經費	2,262 萬元	491.8 萬元
	2,753.8 萬	

4. 新物質量標準建置

莫耳是一個特定基本實體的物質量單位，該實體可以是一個原子、分子、離子、電子、任何其他粒子，或是該等粒子的特定群組。其大小將藉由固定亞佛加厥常數之數值等於 $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ ，以 SI 單位表示為 mol^{-1} 。莫耳質量在莫耳新定義實現(亦即亞佛加厥常數量測)上為四大量測參數之一，莫耳質量透過元素同位素比例量測技術得以估算，進而運用於進行參考物質的莫耳濃度量測，也因此影響各類參考物質之原級追溯標準。為了確保 SI 新單位制中物質量「莫耳」的定義可完整實現，將建置一新物質量標準系統，發展同位素比例量測能力，以準確量測物質莫耳質量，除可銜接 XRCDF 法進行亞佛加厥常數的量測，亦可擴充執行關鍵元素的莫耳質量量測，將莫耳質量之不確定度納入原級標準物質之濃度計算，完備驗證參考物質之追溯鏈。

新物質量系統的建立，分為二個主要項目，分別是：

- (1) 感應耦合電漿質譜量測技術建置；
- (2) 同位素比例量測技術建置。

在有限的時間及經費規模 9,830 萬元的條件下，先以關鍵設備的建置與技術的建立為主。關鍵設備的建置與技術的引進，佔總經費的 87%，包含購置多接收器感應耦合電漿質譜、同位素比例量測設備及高解析感應耦合電漿質譜等關鍵設備，以建置完整追溯體系，確保我國新物質量標準追溯不受新定義影響。下表 2-4 為新物質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費。

表 2-4、新物質量標準建置於各計畫之計畫目標與投入經費

計畫名稱	採購設備	技術研發
107 年度行政院第二預備金	共 8,565.2 萬元 1.多接收器感應耦合電漿質譜(3,100 萬元) 2.同位素比例量測設備(2,000 萬元)	共 1,264.8 萬元 1.建立高濃度四甲基氫氧化銨試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements) 2.建立高濃度硝酸試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)

計畫名稱	採購設備	技術研發
	3.高解析感應耦合電漿質譜(1,800 萬元) 4.新物質量無塵實驗室(原高潔淨度環境設施)(200 萬元) 5.新物質量實驗室全自動滅火系統(原實驗室消防設施建置)(385.2 萬元) 6.新物質量實驗室空調系統(原實驗室恆溫恆濕環境建置)(1,080 萬元)	3.建立四甲基氫氧化銨溶解矽晶體之前處理技術 4.建立質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術 5.建立質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術(相對不確定度 $<10^{-7}$) 6.建立光學法同位素比例量測技術
合計經費	8,565.2 萬元	1,264.8 萬元
	9,830 萬	

(三) 實施方法

1. 新質量標準建置

(1) 原級矽晶球質量標準建置

NML 之真空相容質量比較儀，量測腔體真空度可達 10^{-4} Pa，質量補償範圍 1.5 g，質量解析度 100 ng。此質量比較儀將用於矽晶球原級質量標準，與二級質量標準之間的質量導引工作，以及法碼對氣體吸附效應量測之評估，完成矽晶球質量由真空至大氣環境質量傳遞量測。此外，也將建置矽晶球清洗工作站，完成清洗標準流程文件化，並評估清洗流程對矽晶球質量重覆性之影響。

法碼之氣體吸附效應(Sorption Effect)，可透過在不同環境參數下(壓力與相對濕度)，比較吸附參考法碼與一般法碼之質量差異而得。吸附效應是利用一般法碼及多個不同表面積的吸附參考法碼做量測，來探討法碼在真空中與大氣環境下表面水氣吸附的質量變化，當中吸附參考法碼需與一般法碼有相同的質量、體積及表面粗糙度，一般是使用數個圓盤堆疊而成，如圖 2-1 及圖 2-2，將這類法碼於真空及大氣環境中來回測量，而推估一般法碼的表面吸附率。

假設每一個法碼的單位表面積吸附率是相同的，則法碼質量變化為公式(2-1)。

$$m_{air} = m_{vac} + A \times s \quad (2-1)$$

其中 s 為法碼的表面吸附率。若考慮一般法碼及吸附參考法碼的質量，可以將公式(2-1)整理如下

$$S = \frac{(m_{stk(vac)} - m_{int(vac)}) - (m_{stk(air)} - m_{int(air)})}{A_{stk} - A_{int}} \quad (2-2)$$

其中 $m_{int(vac)}$ 是一般法碼於真空中所測得的質量， $m_{int(air)}$ 是一般法碼於大氣環境中所測得的質量， $m_{stk(vac)}$ 是吸附參考法碼於真空中所測得的質量， $m_{stk(air)}$ 是吸附參考法碼於大氣環境中所測得的質量， A_{int} 為一般法碼的表面積， A_{stk} 為吸附參考法碼的表面積。經過整理可以得知，只要知道法碼間於不同環境的質量差，就能得知法碼的吸附率，如公式(2-3)。

$$S = \frac{\Delta m_{vac} - \Delta m_{air}}{A_{stk} - A_{int}} \quad (2-3)$$

實際上 Δm_{vac} 及 Δm_{air} 可視為質量比較儀量測這兩法碼所測得的讀值。



圖 2-1、鉑銥公斤 No.691 以及吸附參考法碼 D14，兩法碼的表面積差為 $\Delta S = 78 \text{ cm}^2$

吸附參考法碼之體積與一般法碼相同，但其表面積較一般法碼大，所以可以藉由準確質量比較評估此效應。本工作項目將建置相關軟硬體技術，滿足質量由真空導引至大氣之需求，完成吸附效應的評估，相對標準不確定度 $\leq 65\%$ ，將真空中矽晶球的質量傳遞至大氣中的不鏽鋼法碼。另完成 1 kg、100 g 及 10 g 之質量比較儀自動量測系統採購與驗收作業，以實現完備質量傳遞。

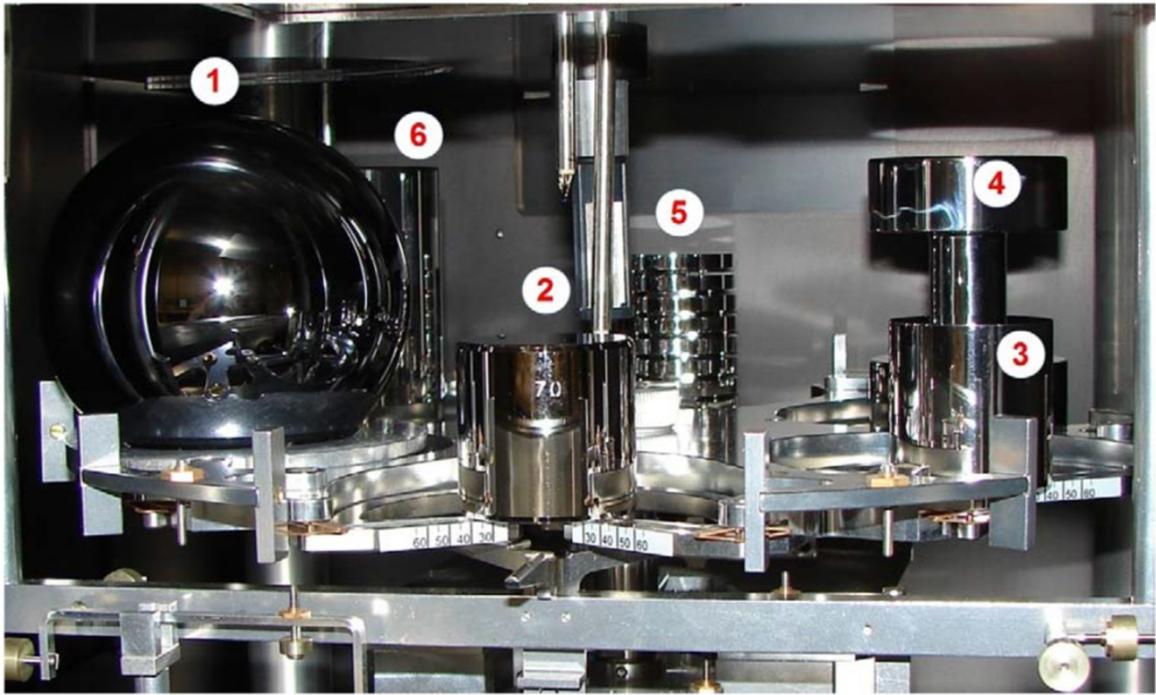


圖 2-2、原級矽晶球質量標準由真空導引至大氣所需之各種法碼，包含(1)矽晶球質量標準、(2)鉑鈱公斤原器、(3)不鏽鋼標準法碼、(4)空氣浮力啞鈴型法碼、(5)及(6)吸附效應圓盤法碼

(2) 矽晶球表層質量量測系統技術建立

本工作項目將建置相關軟硬體技術，完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 $10 \mu\text{g}$ ，相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ 。整合型 XPS XRF 量測系統對矽晶球表面進行各元素質量沉積量(單位： $\mu\text{g cm}^{-2}$)量測，為 PTB 為矽晶球表層質量量測新設計開發之儀器，此方法不受矽晶球表面拋光方法或後續實驗中使用之標準試片製程所影響。在 XRF 分析方面，系統採用以 Sherman's Equation 為基礎之參考試片定量方法，此方法可定出單位面積質量沉積量與螢光輻射強度之間之相關性。參考試片為厚度不同之二氧化矽，標稱值介於 2 nm 至 10 nm 之間，參考試片之均勻性與質量沉積量皆需另外透過無參考標準 XRF 分析方法定量。此外，為了降低 X-Ray 光源本身穩定度的影響，系統將以螢光光譜中氧與矽之訊號比例(O/Si ratios)為主要量測值。由此 O/Si ratio 以及前述質量沉積參考試片，則可定出 XRF 分析系統之擬合校正曲線，如圖 2-3 所示。

在矽晶球的表面分析中，XPS 直接針對矽晶球在超高真空環境下工作(壓力約 $5 \times 10^{-9} \text{ mbar}$)進行表面分析，以降低物理性吸附水氣層(Physical Absorbed Water Layer, PWL)影響。與 XRF 系統相較，XPS 將不需使用任何參考標準試片，XPS 將用來測定矽晶球表層各元素與氧元素之間之比例，包含碳與不同氧化態之矽與氧元素之比例，再由這些比例與 XRF 之氧質量沉積量定量量測，即可定出矽晶球之表層質量。圖 2-4 為矽晶球表面之光電子能譜，涵蓋之元素有碳、氧與矽，若進一步使用高解析度電子分析頻譜分析 Si 2p 之波峰，則可得到不同氧化態的矽原子所產生之頻譜(如圖 2-5)，

並據此決定矽晶球表層矽次氧化物如 SiO_2 , SiO 與 Si_2O_3 。

上述這些分析，已足以涵蓋矽表層模型中之污染物層、二氧化矽層與矽次氧化物層，但 XPS XRF 技術無法對污染物層中的化學吸收水層與二氧化矽層之間，可能產生之氫氧化矽成分進行定量分析，目前 PTB 對此成分參考其他文獻結果，採用理論模型計算方式，給出此部分之表層質量修正項。雖然此修正項之相對不確定度相當高(介於 78 %至 91 %之間)，但對整體表層質量不確定度的貢獻卻相當低。本工作項目將整合型 XPS XRF 表層質量分析系統之真空樣品傳輸腔體測試，真空度小於 10^{-5} Pa。

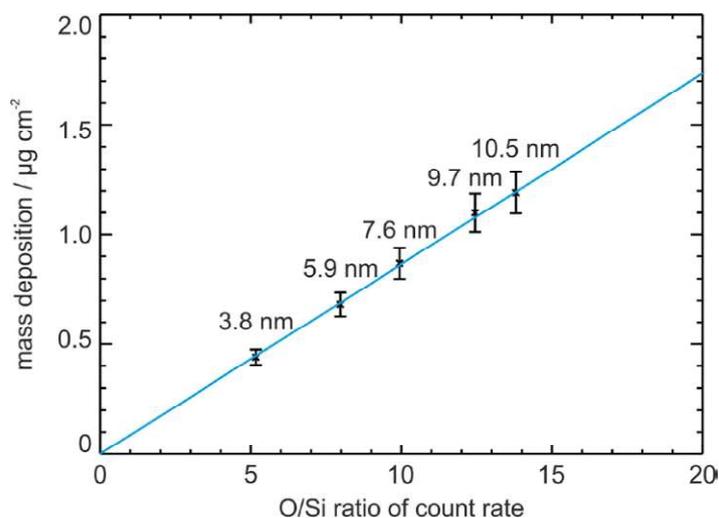


圖 2-3、XRF 分析系統擬合校正曲線

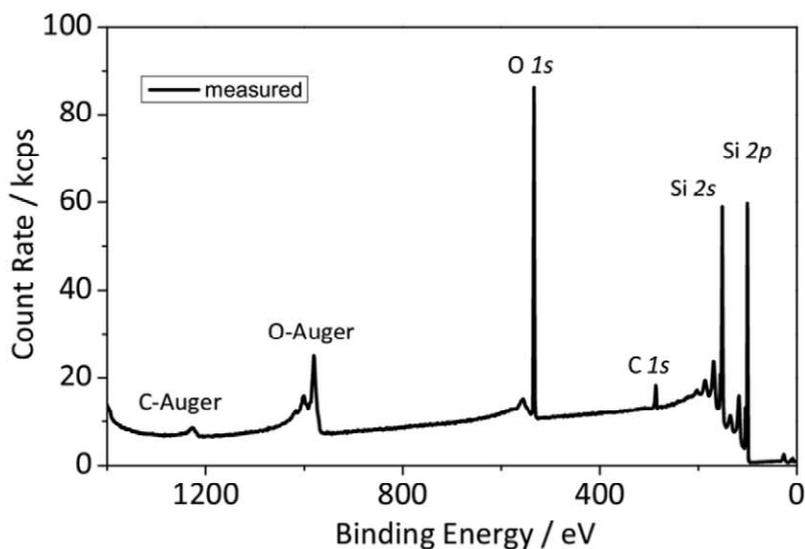


圖 2-4、矽晶球表面之光電子能譜

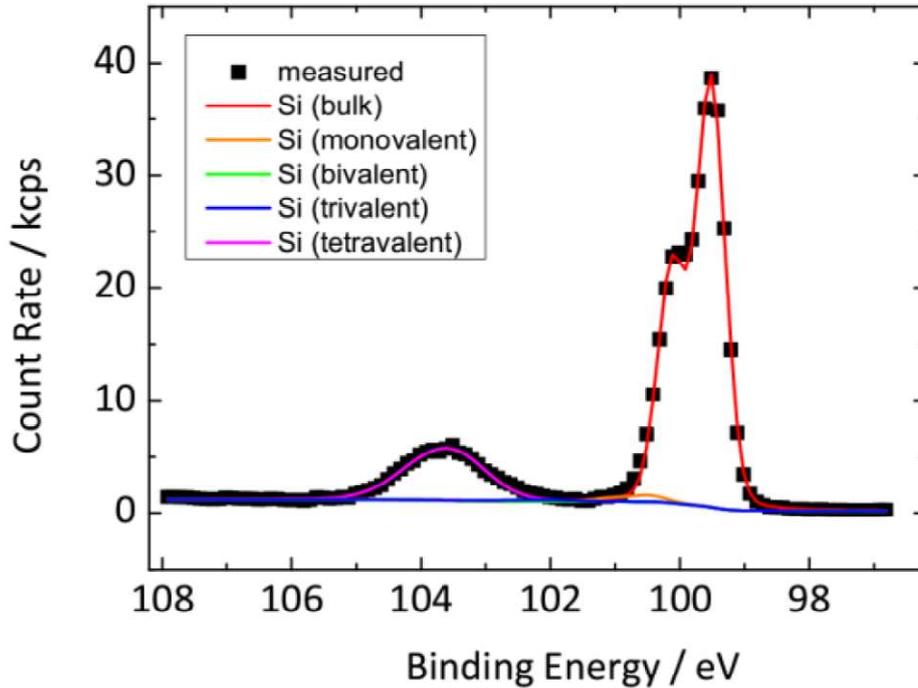


圖 2-5、Si 2p 波峰高解析光電子能譜

(3) 原級真空標準建置

為了將真空環境中原級公斤質量標準導引至提供校正服務的大氣環境中工作標準法碼，法碼在真空至大氣或大氣至真空轉換過程中，表面吸附之質量必須被準確的量測出，並加入法碼整體質量評估中。此吸附效應與環境中大氣壓力極為相關，但目前國家度量衡實驗室在吸附效應量測所需的壓力範圍中，並無對應之真空原級標準，壓力之追溯仍須仰賴他國國家實驗室完成。為此，計畫也將建置以靜態膨脹法為基礎的真空原級標準系統，壓力量測範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，以提供法碼吸附效應量測與矽晶球質量導引所需之壓力原級標準。

靜態膨脹系統主要五個真空腔體構成，腔體體積分別為 0.1 公升(V_2)、1 公升(V_1 與 V_5)與 100 公升(V_4 與 V_6)，主要配置圖如圖 2-6 所示。本工作項目將完成之系統主要硬體建置，包含壓力標準器、初始腔體、膨脹腔體與真空幫浦系統，腔體及系統，以及系統之測試與評估。

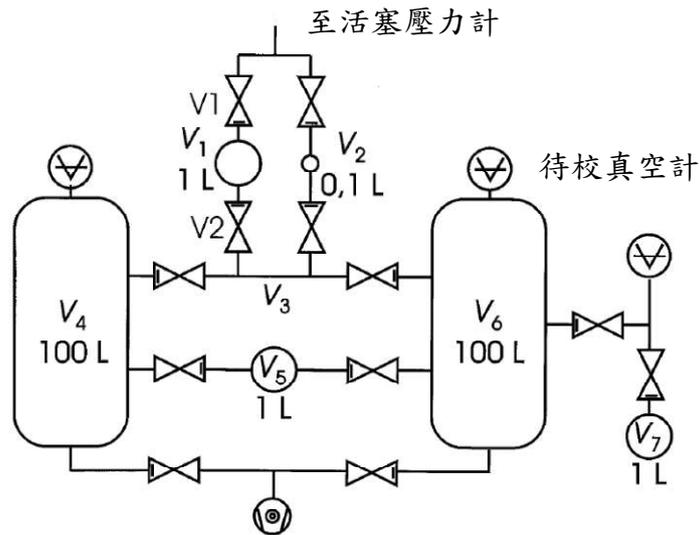


圖 2-6、靜態膨脹系統腔體配置圖

2. 新溫度標準建置

(1) 聲學氣體溫度計量測系統建置

聲學氣體溫度計之原理是利用稀薄氣體聲速和熱力學溫度的關係，藉由共振頻率的量測來決定熱力學溫度。本計畫將向英國國家物理實驗室(NPL)技術移轉聲學氣體溫度計系統技術，包括聲學氣體共振腔本體及其周邊之聲學、微波、溫度傳感器與連結壓力艙之管路配置設計及整合等技術。聲學氣體共振腔及其感測器配置範例，如圖 2-7。

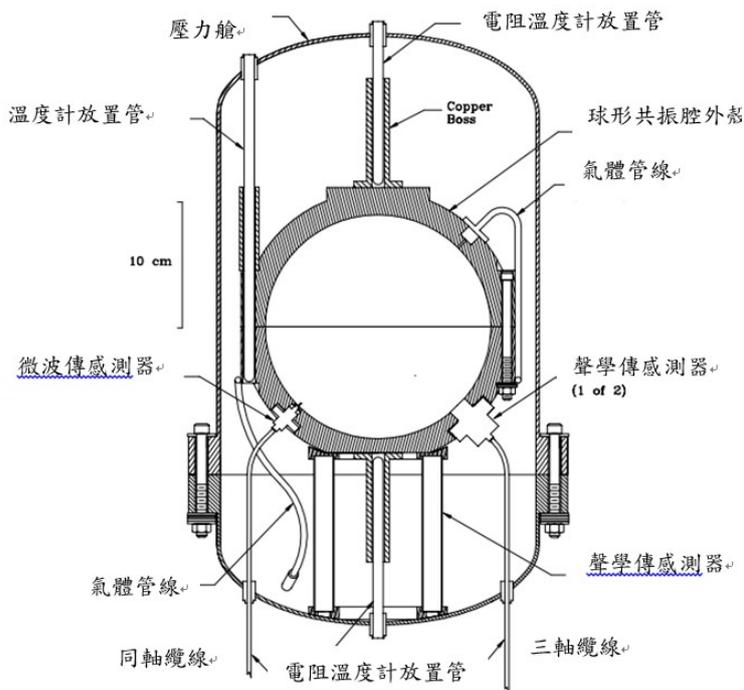


圖 2-7、共振腔與傳感器配置範例圖

本工作項目將建立聲學氣體溫度計之聲學/微波共振法參數量測與擬合技術，以及建立影響共振頻率量測結果的效應修正技術(非理想因素修正)，最後綜整所有建立之技術項目，完成實現克耳文新定義之熱力學溫度量測。另外，也將於 213 K 和 373 K 溫度下，建立 ITS-90 溫度 T_{90} 相對於熱力學溫度 T 的比較量測技術，準確決定克耳文新定義下的 T_{90} 修正值。

(2) 輻射超高溫校正次系統建置

因新克耳文以波茲曼常數定義溫度，取代原先人造物定義點-水三相點，因此建立符合新溫度定義之絕對熱力學輻射測溫法，用以決定金屬-碳高溫固定點(鈷-碳 Co-C: 1324 °C、鈮-碳 Pd-C: 1492 °C、銻-碳 Re-C: 2474 °C)等熱力學溫度，再將此定義好之國際溫標，傳遞至高穩定性之標準線性高溫計。最後，將導出輻射溫度標準，做為 NML 輻射溫度之最高標準依據。

絕對輻射溫度量測系統如圖 2-8 所示，經由絕對輻射計量測定點黑體所產生之輻射熱，經正確的立體角量測、光學穿透率、濾波片光譜響應量測以及偵測器光譜響應量測，並適當修正，再依計算公式可計算得黑體輻射的熱力學溫度。

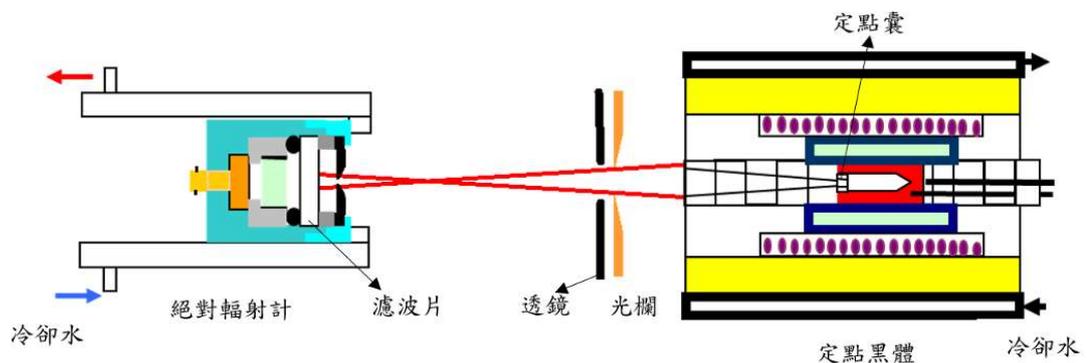


圖 2-8、絕對輻射溫度量測次系統

本工作項目將採購輻射超高溫校正系統設備 Re-C 等定點及高溫變溫黑體爐，建立絕對輻射溫度量測技術，溫度點為銻碳合金(Re-C；2474 °C)定點，並確定高溫共晶點銻碳合金(Re-C；2474 °C)下熱力學溫度與現行國際溫標 ITS-90 之差。

(3) 熱電偶高溫校正系統建置

隨著 SI 溫度新定義改用波茲曼常數來定義克耳文，以往水的三相點囊將產生一定的不確定度，此改變會衝擊 ITS-90 下所有以定點囊為標準件的量測系統，因此需重新評估與修正各定點囊的不確定度研究。另外，長期以來，在航空航太、國防武器、冶金、燒結等領域對銅凝固點(1084.62 °C)以上高準確度的溫度量測有著迫切的需求，但現行 ITS-90 高溫段固定點只有銀、金、銅三個定義凝固點。ITS-90 規定銀凝固點(961.78 °C)以上的溫度，從定義固定點外推獲得，這導致隨著溫度升高，國際溫標再現性和高

溫測量的不確定度將顯著增大。為了降低高溫量測的不確定度與高溫溫標的實現難度，日本 NMIJ 的 Yamada 在 1999 年發現金屬-碳共晶點(Metal-carbon eutectic points)作為高溫固定點，再現性可滿足國際度量衡局溫度諮詢委員會(Comitè Consultatif de Thermométrie, CCT)的建議要求(< 100 mK)，並使不確定度比當前國際溫標(ITS-90)低 5 至 10 倍，至此國際間展開一系列金屬-碳共晶點的研究。隨 SI 新定義的提出，實施已屆 30 年的 ITS-90 未來將被新溫標 ITS-20xx 取代，ITS-20xx 將可從銅凝固點(1084.62 °C)以上的高溫範圍延伸至金屬-碳(碳化物)共晶點(1492 °C)所能達到的範圍。本工作項目將採購熱電偶高溫校正系統設備，並建立熱電偶高溫校正量測技術，完成熱電偶高溫校正系統之量測程序與重複性評估，溫度範圍涵蓋 0.01 °C 至 1492 °C。

3. 新電流標準建置

SI 單位安培之新定義乃依據電流的基本物理原理，將安培定義為「安培(A)是 SI 電流單位，它是將基本電荷 e 的值固定為 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ 庫倫(C)，庫倫等於 A·s，s 為秒」，此新定義將安培由電荷及時間導出。目前，廣被各個國家計量院用來實現安培新定義的方法，是藉由以基本電荷及普朗克常數所定義之約瑟夫森電壓標準與量化霍爾電阻標準，經歐姆定律而導出電流。

約瑟夫森電壓標準是將頻率 f 的微波訊號，入射至由超導體及絕緣材料製成的約瑟夫森晶片，如圖 2-9(a)，此時於晶片兩端施加電流，則可於晶片兩端得到電壓(V)，電流與電壓之關係成量化現象(Quantized)，如圖 2-9(b)之不連續曲線，此稱為約瑟夫森效應(Josephson effect)，其所產生之約瑟夫森電壓 V_J 如下式：

$$V_J = \left(\frac{h}{2e}\right) \times n \times f \quad (2-4)$$

其中， h 為普朗克常數， e 為基本電荷， n 為整數， f 為微波頻率。

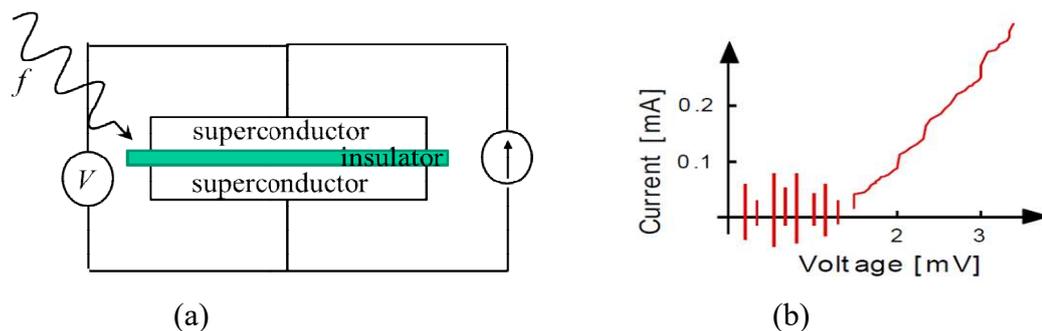


圖 2-9、(a)約瑟夫森效應(Josephson effect)原理及(b)電壓-電流特性

量化霍爾效應是將由 GaAs (砷化鎵)半導體製作的具二維電子氣(2-D Electron Gas)結構的霍爾元件，如圖 2-10(a)，置於低溫(液態氮溫度，約 4 K)、高磁場(B)下，並通以縱向電流(I)，則其磁場與橫向電壓(V_H)之關係成量化現象(古典霍爾效應是一連續正比關係)。將橫向電壓(V_H)除以電流(I)可得到電阻，此稱為量化霍爾電阻(R_H)，其與磁

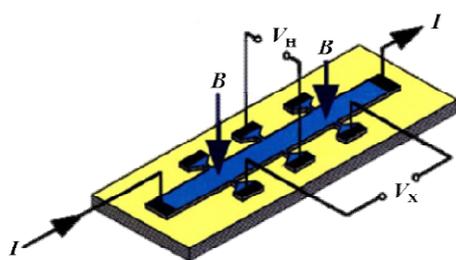
場關係如圖 2-10(b)。當磁場增加，量化霍爾電阻值呈階梯狀不連續增加。根據量子力學，量化霍爾電阻 R_H 為：

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{h}{ie^2} \quad (2-5)$$

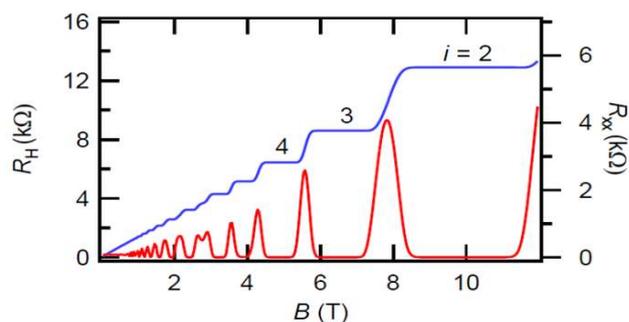
其中， V_H 為不同磁場下之橫向電壓， h 為普朗克常數， e 為基本電荷， i 為整數。因此，根據歐姆定律(電流等於電壓除以電阻)，可藉由約瑟夫森電壓標準及量化霍爾電阻標準導出電流標準，即將(2-4)式除以(2-5)式，所得到的安培為：

$$A = \frac{V_J}{R_H} = \frac{[\frac{h}{2e} \times n \times I]}{[\frac{h}{ie^2}]} = \frac{(inef)}{2} \quad (2-6)$$

由(2-6)式可導出追溯至基本電荷 e 之電流標準。



(a)



(b)

圖 2-10、(a)量化霍爾效應(Quantum Hall effect)原理及(b)電阻與磁場關係

於實際電流標準的實現上，由於科學研究及產業應用需要的電流量測範圍很廣，可從小於 10^{-12} A 到大於數千 A，若以(2-6)式直接從量化霍爾電阻及約瑟夫森電壓來導出如此大範圍的電流，則必須用非常低的微波頻率使約瑟夫森電壓輸出低電壓，或以很高的微波頻率使約瑟夫森電壓輸出高電壓，此有其限制及困難。因此，變通的方法是將量化霍爾電阻標準傳遞至高電阻，以導出微電流(電壓不變，電阻愈高，通過之電流愈小)，及傳遞至低電阻，以導出大電流(電壓不變，電阻愈低，通過之電流愈大)。

綜合以上，本項工作項目如下：

(1) 免液氦量化霍爾電阻(Quantum Hall Resistance, QHR)原級標準系統建置

- 進行免液氦 QHR 系統規格制訂及系統採購。
- 針對建立免液氦 QHR 系統所需搭配之實驗室空間與相關設施進行重新佈局與改裝，例如需加裝冰水循環管路，以供執行免液氦 QHR 系統冷卻之水冷式空

壓機運作所需。

- 免液氦 QHR 系統運抵實驗室後，與原廠工程師共同執行實機組裝，並進行系統操作訓練，以建立系統標準操作程序及後續的保養程序。
- 執行 QHR 元件特性檢測，在不同磁場下進行 QHR 元件的縱向電阻及橫向電阻量測，藉此分析 QHR 元件所產生的量化電阻平台寬度。另外，亦需進行標準電阻的傳值實驗，將 QHR 原級電阻標準(12.9064 035 k Ω)傳遞給 1 k Ω 的標準電阻器，並確認系統量測變異範圍小於 $\pm 0.04 \mu\Omega/\Omega$ 。同時，與往年的傳遞值作比對，進一步確認各項量測結果是否皆符合規格要求，以完成免液氦 QHR 系統查驗程序。
- 建立免液氦 QHR 系統標準校正技術，我們規劃系統在以 1 k Ω 電阻標準器為待校件及量化霍爾電阻($R_H = 12.9064\ 035\ \text{k}\Omega$)為標準件的情況下，以精密電橋量測待校電阻 R_x 與量化霍爾電阻 R_H 間的比值 r ，以此方式執行標準電阻的傳值實驗與待校電阻值的校正($R_x = R_H \times r$)。
- 建立免液氦 QHR 標準系統之量測不確定度因子，並進行系統量測變異性評估。

(2) 低電阻電橋建置系統建置

- 進行低電阻電橋的規格制訂及採購。
- 進行低電阻電橋等相關設備的功能檢測，以新購的電橋對系統的精密標準電阻器作 A 類不確定度評估，並確認各項量測結果是否符合規格要求。其中，低電阻電橋之比率量測準確度須小於 6×10^{-6} ，以完成各系統驗收程序。
- 建立高精密低電阻電橋之大電流標準校正程序，我們規劃低電阻在執行校正時，使用兩個標準電阻器與一個待校電阻器以比較式量測法(Comparison Method)作電阻值校正，重覆量測次數規劃為 25 次。
- 針對低電阻電橋執行標準電阻器量測時所衍生之量測變異性作深入分析與評估，以完成低電阻電橋 (低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω ，電流量測範圍 100 A to 1000 A)之標準校正程序。

(3) 高電阻電橋系統電橋系統建置

- 進行高電阻電橋系統的規格制訂及系統採購。
- 進行精密標準電阻器及其恆溫儲存槽的規格制訂及設備採購。
- 進行高電阻電橋系統等相關設備的功能檢測，以新購的電橋對系統的精密標準電阻器作量測，並確認各項量測結果是否符合規格要求。其中，高電阻電橋系統之比率量測準確度須小於 5×10^{-6} ，以完成系統查驗程序。
- 建立搭配高精密高阻電橋之高電阻系統標準校正技術，我們規劃高電阻系統在執行校正時，使用兩個標準電阻器與一個待校電阻器以比較式量測法(Comparison Method)作電阻值校正，重覆量測次數規劃為 25 次。
- 針對高電阻電橋系統執行標準電阻器量測時所衍生之量測變異性作深入分析

與評估，高電阻量測範圍 100 kΩ to 1 TΩ。

4. 新物質量標準建置

SI 新單位制中的亞佛加厥常數在質量及莫耳兩個部分均扮演了極為重要的角色。對於即將出現的公斤新定義中，將利用普朗克常數 h 作為基礎，由方程式(2-7)可了解 $N_A h$ 為定值，其中除了 N_A 與 h 外，其餘四個參數(R_∞ , α , $M(e^-)$, c)均為常數，也因此，若能確定 N_A 後即可推算出普朗克常數 h 。

$$R_\infty = \alpha^2 M(e^-) c / (2 N_A h) \quad (2-7)$$

其中

N_A 為亞佛加厥常數(Avogadro Constant)

h 為普朗克常數(Planck Constant)

R_∞ 為雷德堡常數(Rydberg Constant)

α 為索末非常數(Sommerfeld Constant)

$M(e^-)$ 為電子之莫耳質量

c 為光速

亞佛加厥常數可經由精密的量測而決定，必須量測 Si 晶體中包含莫耳質量，晶格參數和密度等參數，其中莫耳質量的量測包含相同元素的同位素比例量測，當同一元素具有不同中子數時，即會具有不同的質量數，衍生相同的莫耳數之分子或原子有不同質量的可能性。過去 10 年間，數個國家實驗室使用具有天然同位素豐度的 Si 晶體進行了亞佛加厥常數的量測，然而該常數的相對不確定度僅能達到約 10^{-7} ，其中最主要不確定度是源自於 Si 莫耳質量的測定(相對標準不確定度為 2.4×10^{-7})。這也說明了同位素比例量測技術對於建立新物質量定義與執行新物質量標準傳遞的重要性。

本工作項目建立之技術包含 Si 的同位素比例與二氧化碳中碳的同位素比例，在化學計量標準的傳遞上，分屬無機分析與氣體分析，為目前國內在化學計量技術發展上頗為成熟且與產業有高度連結的專業領域。內容分別說明如下：

為了量測高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量，本研究將應用高純度的 ^{28}Si 富集晶體作為樣品，其中矽同位素元素包含高濃度的 ^{28}Si ，以及極微量的 ^{29}Si 和 ^{30}Si ，由於待測物 ^{28}Si 和 ^{30}Si 之濃度差距超過 10^6 倍，因此必須選用配備有多個不同線性範圍之偵測器(法拉第杯及訊號放大偵測器)之質譜儀。

(1) 感應耦合電漿質譜量測技術建置

- 矽晶體溶解試劑純度分析

由於矽為環境中常見之元素，為了避免清洗及溶解矽晶體之溶劑內貢獻之矽同位素污染，在研究初期將建立純度分析技術，針對高濃度超純四甲基氫氧化銨試劑進行純度分析，確認其中含有之污染矽元素濃度。

- 矽晶體溶解前處理技術

由於多接收器感應耦合電漿質譜儀(Multi-collector Inductively-coupled Plasma

Mass Spectrometer, MC-ICP-MS)目前主要應用於分析液態樣品，參考過去 PTB 發表之研究內容顯示，可利用強鹼(氫氧化鈉, NaOH)溶解矽晶圓，然而高濃度含量的鈉離子會影響電漿之能量穩定性，而對後續量測的 Si 信號產生顯著的抑制效應，進一步造成矽同位素比例之量測偏差。參考 NMIJ 發表之技術內容，後續將利用四甲基氫氧化銨試劑做為溶劑，完成矽晶體溶解前處理技術之最佳化程序。

- 建立自然豐度矽晶體同位素比例量測技術

為了量測高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量，本研究中需使用到自然豐度的矽同位素樣品作為標準品，因此規劃在第一期計畫期間採購多接收器感應耦合電漿質譜儀，並利用質譜儀針對自然豐度矽標準品內之同位素比例進行量測(圖 2-11)。

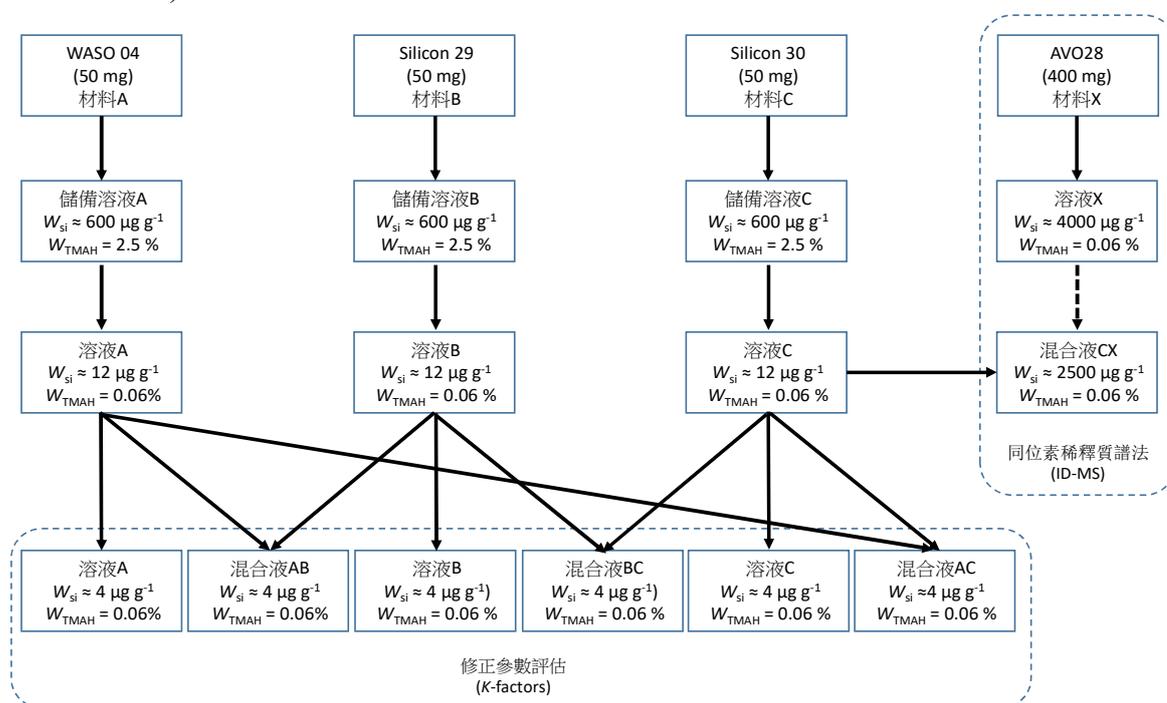


圖 2-11、矽同位素樣品之稀釋程序混合程序示意圖

(2) 同位素比例量測技術建置

二氧化碳之碳同位素比例量測主要應用於二氧化碳來源鑑識。空氣中二氧化碳濃度的準確量測牽涉到全球環境變遷肇因分析與碳稅徵收等國際環保議題的研究。也因此，在國際化學計量委員會中，包含日本、韓國、英國、美國與中國等都積極投入大氣濃度等級(400 $\mu\text{mol/mol}$ 至 800 $\mu\text{mol/mol}$)二氧化碳濃度標準的建置，不確定度的要求則是達到 0.1 至 0.2 $\mu\text{mol/mol}$ ，在相對擴充不確定度的要求達 0.05% 的情況下，二氧化碳中碳的同位素比例就可能影響所取得之二氧化碳的分子量，進而影響所配製與供應之標準氣體的濃度驗證值與不確定度。因此，本計畫參考目前在國際上已完成之關鍵比對(CCQM-K120)作法，進行如下技術建立：

- 二氧化碳混合氣體配製與量測技術建立
 二氧化碳標準氣體配製流程圖參考日本 NMIJ 之設計依照 ISO 6142 方法進行 (詳圖 2-12)，常用以量測二氧化碳之分析技術包含氣相層析火焰離子法(Gas Chromatography-Flame Ionization Detection, GC-FID)、傅立葉紅外光譜法 (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)與光衰振盪光譜法。在 0.05 % 的相對擴充不確定度要求下，儀器量測重複性與再現性的標準不確定度至少應小於 0.01 %。本工作目標為主要組成分之質量法濃度配製的不確定度 < 1 %。

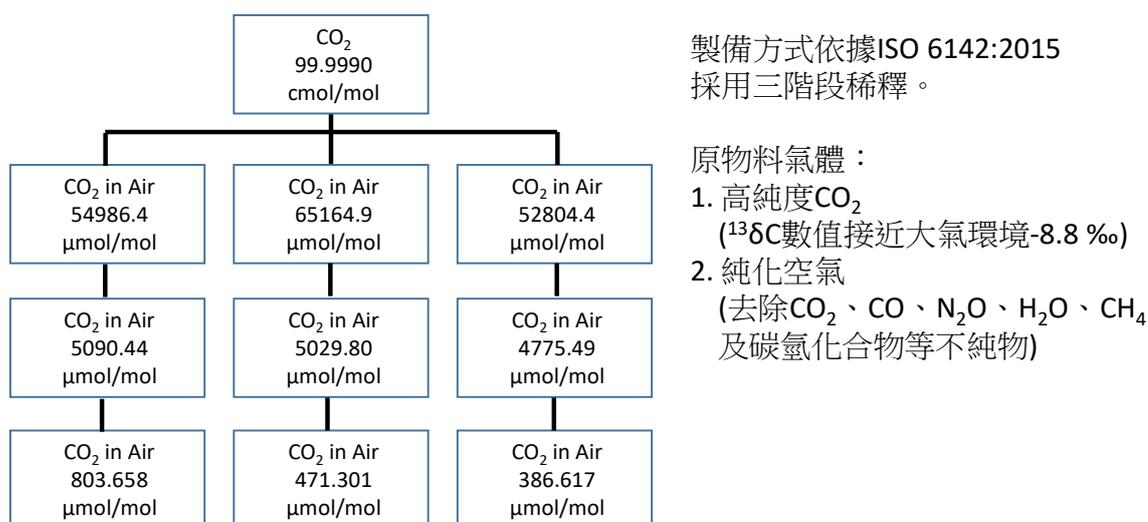


圖 2-12、二氧化碳分析樣品之配製程序示意圖
 (資料來源:日本 NMIJ 於 2018 年 CCQM-GAWG 會議發表內容)

- 標準氣體配製用原物料純度分析技術建立
 包含二氧化碳純氣與空氣之純度分析所需定量的化學物種多達 10 種以上(H₂, O₂, N₂, H₂O, Ar, CH₄, C₃H₈, CO₂, N₂O)，量測濃度範圍主要為數十 ppb 至數十 ppm。此工作目標可於設備採購期間，利用國家度量衡標準實驗室既有技術能量與設備執行完成。
- 大氣二氧化碳採集技術建立
 為有效評估與瞭解不同區域二氧化碳之來源，本技術項目將參考環境保護署之空氣品質監測站設置地點，前往工業測站區域與背景測站區域進行大氣二氧化碳採集，瞭解不同區域二氧化碳同位素比例分布的差異性。同位素比例量測目標為 δ¹³C 量測不確定度 < 2 %。

(四) 四項 SI 新標準建置達成情形

四項 SI 新標準建置於 5 項專案計畫之達成情形摘錄說明如下，後續章節則為針對本計畫(107 年度行政院科發基金計畫)之詳細報告。

表 2-5、四項 SI 新標準建立之工作內容及於各計畫之關聯性

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
新質量標準	(1) 原級矽晶球質量標準建置					
	A. 高純度矽晶球質量原級標準規格制訂與採購申請，質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$ (相對於 1 kg)		完成高純度矽晶球質量原級標準，質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ ，相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$			
	B. 完成真空相容質量比較儀規格制訂與系統採購，並完成實驗室環境建置，腔體真空度可達 0.1 mPa，質量補償範圍 1.5 g，質量解析度 100 ng		完成真空相容質量比較儀採購，腔體真空度可達 0.1 mPa，質量補償範圍 1.5 g，質量解析度 100 ng。			
	C. 建立質量標準真空至大氣導引技術，完成法碼氣體吸附效應量測流程建置		完成法碼氣體吸附效應量測流程建置及技術報告一篇(技資編號: 07-3-A7-0083-01)。			
	D. 完成吸附效應量測實驗，吸附質量相對標準不確定度小於 65%			完成吸附效應量測實驗，吸附質量相對標準不確定度小於 65%。		
	E. 完成 1 mg 至 1 kg 質量導引系統採購與驗收				完成 1 mg 至 1 kg 質量導引系統採購與驗收。	
	(2) 矽晶球表層質量量測系統技術建立					
	A. 完成矽晶球表面光電子頻譜分析儀(含 XFlash 矽漂移偵測器)設備購置及自德國 PTB 技術移轉 XPS XRF 矽晶球表層質量量測技術	完成矽晶球表面光電子頻譜分析儀(含 XFlash 矽漂移偵測器)設備購置及自德				

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
		國 PTB 技術移轉 XPS XRF 矽晶球表層質量量測技術。				
	B. 完成系統設計與各次系統規格訂定，目標表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ ，其在 1 公斤之相對不確定度分量 $\leq 3 \times 10^{-8}$		完成系統設計與各次系統規格訂定，目標表層質量相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ 。			
	C. 建立矽晶球表面水層、碳化汙染層與氧化層定量量測技術，完成螢光頻譜與電子頻譜數據分析軟體建置		完成螢光頻譜與電子頻譜數據分析軟體建置。			
	D. 完成矽晶球表層質量量測系統實驗室環境建置(溫度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度 40% 至 60% ，並提供獨立地基之隔振基礎平台)建置		完成矽晶球表層質量量測系統實驗室環境建置(溫度 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度 40% 至 60% ，並提供獨立地基之隔振基礎平台)建置，及技術報告一篇(技資編號:07-3-A7-0174-01)。			
	E. 完成整合 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜表層分析儀之超高真空腔體與五軸樣品移動座採購與驗收			完成整合 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜表層分析儀之超高真空腔體與五軸樣品移動座購置。		
	F. 完成整合型 XPS XRF 表層質量分析系統之真空樣品傳輸腔體測試，真空度小於 10^{-5} Pa				完成整合型 XPS XRF 表層質量分析系統之真空樣品傳輸腔體測試，真空度小於	

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
					10^{-5} Pa。	
	G. 完成 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜技術表層分析儀系統整合					完成 X 光光電子頻譜與 X 光螢光頻譜技術表層分析儀系統整合
	H. 完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 10 μg ，相對標準不確定度 $\leq 15\%$ ，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$					完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 10 μg ，相對標準不確定度 $\leq 15\%$ ，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$
	(3) 原級真空標準建置					
	A. 完成靜態膨脹真空標準系統與技術建立，壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相對標準不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度(0.1 ~ 2.5) %				完成靜態膨脹真空標準系統與技術建立，壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，相對標準不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度(0.1 ~ 2.5) %	
新溫度標準	(1) 聲學氣體溫度計量測系統建置					
	A. 完成氣體分析儀(I)-H ₂ O 濃度分析與溫度定點(I)-Ag、Al、Zn、In 定點採購	完成氣體分析儀(I)-H ₂ O 濃度分析與溫度定點(I)-Ag、Al、Zn、In 定點採購。				
	B. 完成聲學氣體溫度計共振腔體採購與組裝，溫度範圍(213 ~ 373) K，溫度穩定度 $\leq \pm 5$ mK			完成聲學氣體溫度計共振腔體採購與組裝，溫度範		

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
				圍(213~373) K, 溫度穩定度 $\leq \pm 5$ mK。		
	C. 建立工作氣體純度分析技術, 可量測水氣最小濃度 0.6 ppm			建立工作氣體純度分析技術, 可量測水氣最小濃度 0.6 ppm。		
	D. 建立聲學共振頻率量測與修正技術及共振腔於(213 ~ 373) K 溫度範圍之溫度穩定性評估技術				完成聲學共振頻率量測與修正技術及共振腔於(213 ~ 373) K 溫度範圍之溫度穩定性評估技術。	
	E. 建立(213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統, 量測不確定度: $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k=1$)					完成聲學氣體溫度計(213 ~ 505) K 量測系統, 量測不確定度: $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k=1$)
	(2) 絕對輻射溫度量測系統建置					
	A. 建立絕對輻射溫度量測技術, 溫度點為銻碳合金(Re-C 2474 °C)定點。確定高溫共晶點銻碳合金(Re-C; 2474 °C)下熱力學溫度與現行國際溫標 ITS-90 之差小於 0.5 %				建立絕對輻射溫度量測技術, 溫度點為銻碳合金 (Re-C 2474 °C)定點。	
	B. 完成高溫黑體爐設備(1000 ~ 3000) °C 與標準傳遞件(波長 0.65 μm 及 0.9 μm , 溫度範圍(800 ~ 3000) °C)採購及完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C)高溫共晶定點囊設備採購					完成高溫黑體爐設備(1000 ~ 3000) °C 與標準傳遞件(波長 0.65 μm 及 0.9 μm , 溫度範圍(800 ~ 3000) °C)採購及完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
						Re-C(2474 °C)高溫共晶定點囊設備採購。
	C. 完成 Co-C(1324 °C)共晶定點囊短期重複性評估，重複性≤20 mK					完成 Co-C(1324 °C)共晶定點囊短期重複性評估，重複性15 mK。
	D. 完成建立絕對式輻射溫度計及相關參數追溯，波長 650 nm 及 900 nm，光源尺寸效應(SSE)< 0.05 %					完成 1.絕對式輻射溫度計發包製作，偵測器響應與有效波長追溯。2 光源尺寸效應(SSE)=0.032 %
	(3) 熱電偶高溫校正系統建置					
	A. 建立熱電偶高溫校正量測技術，溫度範圍涵蓋(0.01 ~ 1492) °C				完成熱電偶高溫校正量測技術，溫度範圍涵蓋 (0.01 ~ 1492) °C。	
新電流標準	(1) 量化霍爾電阻系統精進					
	A. 建立免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統，電阻校正之標準不確定度: < 3 × 10 ⁻⁸ Ω/Ω，即擴充度:< 6×10 ⁻⁸ Ω/Ω				完成免液氦量化霍爾電阻系統原級標準系統，電阻校正之標準不確定度: < 3 × 10 ⁻⁸ Ω/Ω，即擴充不確定度:< 6×10 ⁻⁸ Ω/Ω。	
	(2) 大電流標準建置					
	A. 完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，電流量測範圍 100 A to 1000 A，電阻校正之標準不確定					完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，電流量

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
	度: < 25 $\mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度:< 50 $\mu\Omega/\Omega$					測範圍 100 A to 1000 A，電阻校正之標準不確定度: 17.5 $\mu\Omega/\Omega$ ，即擴充不確定度: 35 $\mu\Omega/\Omega$
	(3) 微電流標準建置					
	A. 建立用於微電流標準之高電阻電橋系統，高電阻量測範圍 100 k Ω to 1 T Ω ，電橋之比率量測準確度 < 5×10^{-6}				完成微電流標準之高電阻電橋系統，高電阻量測範圍 100 k Ω to 1 T Ω ，電橋之比率量測準確度 < 5×10^{-6} 。	
	B. 完成高電阻校正之重複量測變異性評估 (< 80 $\mu\Omega/\Omega$)，高電阻量測範圍為 100 k Ω to 1 T Ω				完成高電阻校正之重複量測變異性評估 (< 80 $\mu\Omega/\Omega$)，高電阻量測範圍為 100 k Ω to 1 T Ω 。	
	(1) 感應耦合電漿質譜量測技術建置					
新物質 質量 標準	A. 建立高濃度四甲基氫氧化銨試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)				完成高濃度四甲基氫氧化銨試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)。	
	B. 建立高濃度硝酸試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)				完成高濃度硝酸試劑純度分析技術(LOD < 50 ppt, 20 elements)。	
	C. 建立四甲基氫氧化銨溶解矽晶體之前處理技術				完成四甲基氫氧化銨溶解矽晶體之前處理技術。	

名稱	工作項目	106 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,000 萬) 106.09~12	106 年度跨部會署科發基金計畫 (本計畫) (7,880 萬) 107.02~12	107 年度國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫 (4,362.7 萬) 107.01~12	107 年度行政院第二預備金 (2 億 6,065.5 萬) 107.07~12	107 年度科發基金研發成果收入運用計畫 (9,099.4 萬) 107.07~10812
	(2) 同位素比例量測技術建置					
	A. 建立質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術				完成質譜法自然豐度 Si 同位素稀釋量測技術。	
	B. 建立質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術(相對標準不確定度 $< 10^{-7}$) (相對於 ^{28}Si 莫耳質量)				完成質譜法高純度 ^{28}Si 富集晶體之莫耳質量量測技術(相對不確定度 $< 10^{-7}$)。	
	C. 建立光學法同位素比例量測技術				完成光學法同位素比例量測技術。	

三、本計畫之目標與達成情形

(一) 新質量標準建置分項

1. 計畫目標

整體新質量標準建置之目標為建立以 X 光晶體密度法實現矽晶球原級質量標準，相對不確定度小於 5×10^{-8} 。向下展開訂定三個工作項目與目標，分別是：

- (1) 原級矽晶球質量標準建置：質量標準不確定度為 $\leq 50 \mu\text{g}$ (相對於 1 kg)，其相對標準不確定度 $\leq 5 \times 10^{-8}$
- (2) 矽晶球表層質量量測系統技術建立：相對標準不確定度 $\leq 15\%$ (相對於表層質量)，即相對擴充不確定度 $\leq 30\%$
- (3) 原級真空標準建置：相對標準不確定度(0.05 ~ 1.25) %，即相對擴充不確定度(0.1 ~ 2.5) %

本計畫(107 年度行政院科發基金計畫)之計畫目標，延續 106 年度跨部會署科發基金計畫，針對矽晶球表層質量量測系統技術建立(第二階段)，設定更詳細之細部規劃，如下所述：

矽晶球表層質量量測系統技術建立(第二階段)

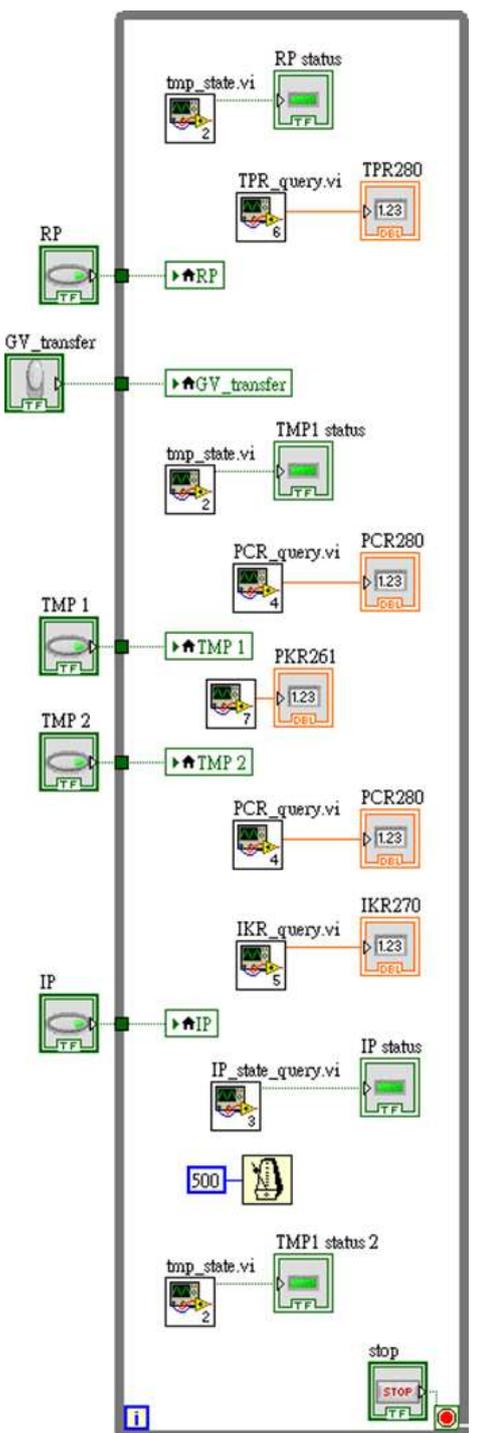
- (1) 完成整合型 X 射線光電子頻譜技術(X-ray Photoelectron Spectroscopy)與 X 射線螢光頻譜技術(X-ray Fluoresce Spectroscopy)表層分析儀之系統整合。
- (2) 完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 10 g，相對擴充不確定度 30 %。

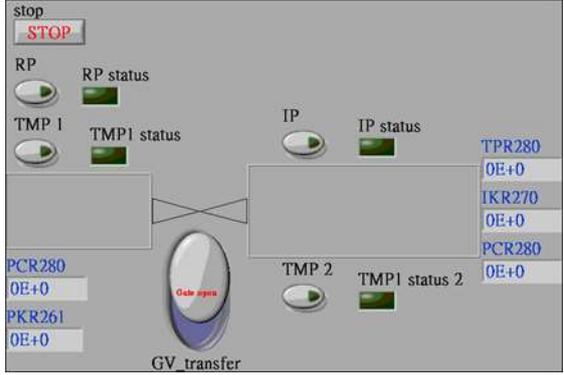
2. 計畫達成情形

本計畫如期完成計畫規劃之 4 項查核點，並符合設定之目標。執行情形摘錄說明如下，進一步之工作成果說明，則詳列於“重要成果說明”。

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
矽晶球表面質量量測系統技術建立	107 年 9 月 完成矽晶球表層質量量測(III)請購申請	<ul style="list-style-type: none"> • 已於 8/2 完成矽晶球表層質量量測(III)設備請購，本設備可提供矽晶球於超高真空環境進行 XPS XRF 表層質量分析所需之表面掃描移動與轉動，以對球面進行完整取樣。設備相關規格如下說明： <ol style="list-style-type: none"> (1) 超高真空與低磁性相容五軸矽晶球調整座，需相容於壓力 10⁻⁹ mbar 之真空環境 (2) 兩軸平移(範圍 27 mm，解析度 61 nm;範圍 60 mm，解析度 100 nm)。 三軸旋轉自由度(範圍 100 度，解析度 0.0001

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
		度；範圍 370 度，解析度 0.0001 度；無轉動角度範圍，解析度 0.0006 度) (3) 相容於與德國聯邦物理技術研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 之 XPS XRF 表層質量量測系統
	107 年 12 月 完成整合型 XPS XRF 表層量測系統之真空次系統硬體組裝與各次模組運轉測試	<ul style="list-style-type: none"> • 整合式 XPS XRF 表層質量量測系統由 X 光光源($Al K\alpha$)、X 光單光器、螢光偵測器(矽漂移偵測器 SDD)、電子頻譜儀 (Electron Spectrometer)、超高真空五軸矽晶球移動座、樣品傳送真空腔體(Loadlock Chamber)與低磁性超高真空分析腔體等模組所構成。 • 完成所有模組之 CAD 3D 模型繪製與組裝模擬，確認各模組之間無干涉情形。 • 完成超高真空系統架設及系統主要兩項主要次模組組裝與測試，分別為(1)超高真空樣品傳送腔體總成，背景壓力 10^{-5} Pa，用途為提供一般大氣環境與真空環境，安裝與傳送矽晶球至超高真空五軸移動座上，與(2)超高真空抽氣系統總成，包含各式真空泵、真空計、氣源與真空閥門等，用途在於產生量測所需之真空環境。各模組儀器之廠牌型號選用與採購則依照德國 PTB 之設計與建議。真空樣品傳送腔體、超高真空抽氣系統與腔體內之三軸真空線性傳輸模組皆完成整合與測試，腔體背景壓力經驗證可達 1×10^{-5} Pa。 • 完成將 SDD 送 PTB 校正，並依據校正報告之響應函數半寬修正 XRF 數據，並與 PTB 專家確認擬合結果。

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
	<p>108年09月</p> <p>完成整合型XPS XRF表層量測系統之真空次系統儀控軟體開發</p>	<ul style="list-style-type: none"> 完成 XPS XRF 表層量測系統之真空次系統組裝，包含樣品傳送腔體之渦輪分子泵、超高真空腔體之渦輪分子泵、離子泵，以及前級魯式真空泵與相關真空計之安裝。完成真空泵起閉控制與真空數值取樣監測儀控軟體開發，主程式面板與接線圖如下所示：  <p style="text-align: center;">接線圖</p>

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容															
		 <p style="text-align: center;">主程式面板</p>															
	<p>108 年 11 月</p> <ul style="list-style-type: none"> • 完成矽晶球表層質量測不確定度評估模式建立，表層質量量測範圍大於 10 μg，相對擴充不確定度 ≤ 30 % • 完成矽晶球原級質量標準整體質量評估，質量相對不確定度小於 5×10^{-8}。 	<ul style="list-style-type: none"> • 以 PTB 提供之矽晶球(編號 Si-28-02a)螢光頻譜與光電子頻譜量測數據進行表層質量評估，評估結果: <table border="1" data-bbox="810 846 1442 1128"> <thead> <tr> <th>矽晶球表層</th> <th>質量(μg)</th> <th>標準不確定度(μg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>矽氧化層</td> <td>44.07</td> <td>5.46</td> </tr> <tr> <td>碳化汙染層</td> <td>10.96</td> <td>3.51</td> </tr> <tr> <td>水層</td> <td>10.73</td> <td>2.66</td> </tr> <tr> <td>表層總質量</td> <td>65.77</td> <td>7.01</td> </tr> </tbody> </table> <p>總質量為 65.77 μg，相對擴充不確定度(k=2)為 21.3%。</p> • 矽晶球總質量不確定度來源有 5 項，經 PTB 提供之相關報告，每一項的值與標準不確定度為： <ul style="list-style-type: none"> • 不純物的缺陷質量 $m_{\text{defects}} = (1.74 \pm 0.398) \times 10^{-9} \text{ kg}$ • 莫耳質量 $M_{\text{Si}} = (2.7977 \pm 8.4 \times 10^{-9}) \times 10^{-2} \text{ kg}$ • 晶格常數 $a = (5.431 \pm 1.46 \times 10^{-8}) \times 10^{-10} \text{ m}$ • 表層質量 $m_{\text{SL}} = (43.90 \pm 0.445) \times 10^{-9} \text{ kg}$ • 矽晶球球核體積 $V_{\text{core}} = (4.3106 \pm 9.4 \times 10^8) \times 10^{-4} \text{ m}^3$ <p>將此結果帶入矽晶球質量與普朗克常數關係式，得矽晶球質量與標準不確定度為</p> $m_{\text{sphere}} = (1 \text{ kg} + 78.3734 \text{ mg}) \pm 0.0241 \text{ mg}$ <p>相對標準不確定度為 2.41×10^{-8}。</p> 	矽晶球表層	質量(μg)	標準不確定度(μg)	矽氧化層	44.07	5.46	碳化汙染層	10.96	3.51	水層	10.73	2.66	表層總質量	65.77	7.01
矽晶球表層	質量(μg)	標準不確定度(μg)															
矽氧化層	44.07	5.46															
碳化汙染層	10.96	3.51															
水層	10.73	2.66															
表層總質量	65.77	7.01															

(二) 新溫度標準建置分項

1. 計畫目標

整體新溫度標準建置之目標為建立聲學氣體溫度計技術與絕對輻射溫度量測技術，重新定義與修正水三相點以及其他定點囊的熱力學溫度與不確定度，並傳遞給接觸式熱電偶溫度計量測系統與非接觸式輻射溫度計量測系統，以實現符合新定義要求之溫度標準，並因應未來國際新溫標 ITS-20xx 之實行。

本計畫(107 年度行政院科發基金計畫)之計畫目標，延續「106 年經濟部科技計畫分攤款」及「107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫」之工作，進行第二階段聲學氣體溫度計及絕對輻射溫度量測次系統建立，如下所述：

(1) 聲學氣體溫度計量測次系統建置(II)

發展建立聲學氣體溫度計，並藉助定點量測系統的水三相點溫度為參考溫度，決定 T_{90} (fixed-point)、 T_{90} (interpolation) 相對應熱力學溫度之修正值，以使 ITS-90 連結至新定義。

- 溫度範圍：213 K ~ 505 K
- 量測不確定度： $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k=1$)

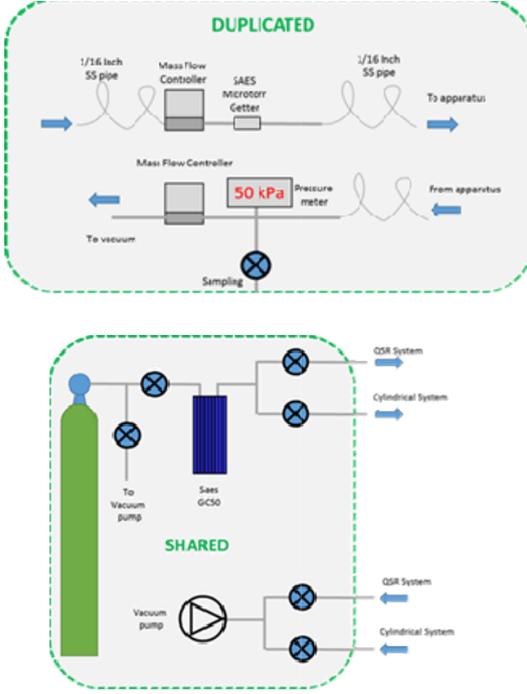
(2) 絕對輻射溫度量測次系統建置

建置絕對輻射溫度量測次系統，確定高溫共晶點溫度下，我國熱力學溫度 T 與現行國際溫標 ITS-90(T_{90}) 之差，實現金屬-碳高溫共晶點熱力學溫度標準。整體絕對輻射溫度標準將建立溫度範圍 800 °C 至 3000 °C 之鈷碳(Co-C, 1324 °C)、鈀碳(Pd-C, 1492 °C)、銻碳(Re-C, 2474 °C) 等金屬-碳共晶點標準，本計畫期程之目標如下：

- 完成高溫黑體爐設備與標準傳遞件(線性高溫計)採購：
 - a. 高溫黑體爐溫度範圍(1000 ~ 3000) °C
 - b. 標準傳遞件(線性高溫計)波長 0.65 μm 及 0.9 μm ，溫度範圍(800 ~ 3000) °C
- 完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C) 及 Re-C(2474 °C) 高溫共晶定點囊設備採購。
- 依 CCT-WG5 (國際度量衡局溫度諮詢委員會第 5 工作組) 要求，完成 Co-C(1324 °C) 共晶定點囊短期重複性評估，重複性 ≤ 20 mK
- 完成建立絕對式輻射溫度計及相關參數追溯：
 - a. 波長 650 nm 及 900 nm
 - b. 光源尺寸效應(SSE) $< 0.05\%$ (於光源尺寸 3 mm 至 25 mm)

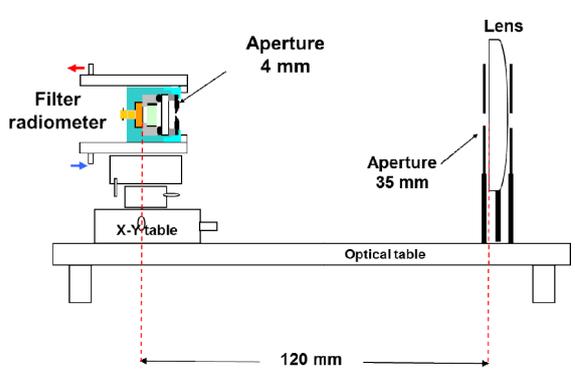
2. 計畫達成情形

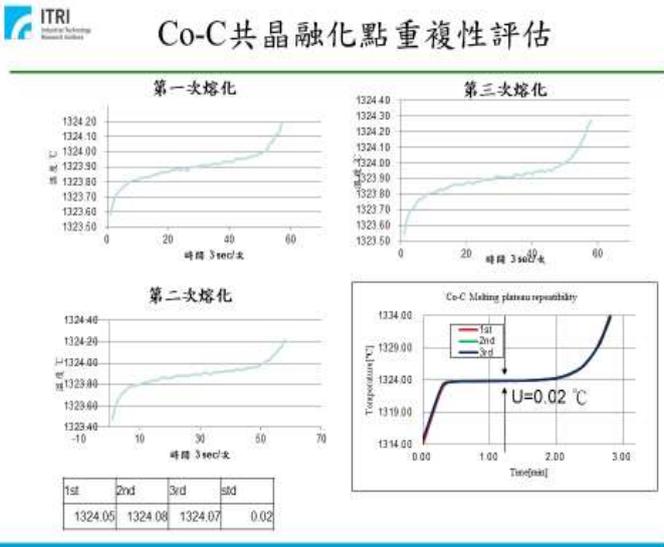
本計畫如期完成計畫規劃之 7 項查核點，並符合設定之目標。執行情形摘錄說明如下，進一步之工作成果說明，則詳列於“重要成果說明”。

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
聲學氣體溫度計量測次系統建置	<p>107 年 10 月</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成共振腔體、聲學/微波量測次系統、Huber 冷卻裝置、含真空泵/壓力計之氣體處理次系統之規格討論與確立 完成委託英國 NPL 製作之採購單開立。其中圓柱體共振腔體可承受最高 573 K 之溫度 	<ul style="list-style-type: none"> 完成共振腔體、聲學/微波量測次系統、Huber 冷卻裝置、含真空泵/壓力計之氣體處理次系統之規格討論，9/28 英國國家物理研究院(NPL) 已回覆同意修改設計，將兩個次系統(準球型共振腔(213~373)K 與圓柱型共振腔(373~505) K) 分開，但進氣端和排氣端仍共用。 <div style="text-align: center;">  </div> <ul style="list-style-type: none"> 有關 Huber 冷卻裝置，將以 single phase/three-phase 的 Julabo 冷卻裝置為主。 <ul style="list-style-type: none"> Julabo 冷卻裝置：$\pm 10 \text{ mK} \sim \pm 50 \text{ mK}$ 微波源穩定度：$\pm 7 \text{ ppm}$ 溫度監控元件漂移：$< 3 \text{ mK/年}@0.01 \text{ }^\circ\text{C}$。 完成圓柱體共振腔之設計，目標是盡可能保持準球型共振腔系統設計的許多功能，溫度計套管將位於腔外部並連接通過頂部和底部端板的圓柱延伸兩端上。並考慮使用不銹鋼以外的材料，例如銅合金，以在高溫提昇機械性能前提

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
		<p>下保留銅的較佳導熱與導電性。</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成委託英國 NPL 製作之採購單開立。其中圓柱體共振腔體可承受最高 573 K 之溫度。
	<p>108 年 02 月</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成新購電橋線性度、準確度評估 完成圓柱腔體氣體聲速與無擾動共振頻率關係式確立 	<ul style="list-style-type: none"> 當電阻電橋校正器置於±5 mK 溫控環境、每 1 組電阻組合取樣 600 次，以 35 組電阻組合評估電橋線性度結果為 1.754×10^{-8}。 條件同上，以 70 組電阻組合(含反接)評估電橋準確度結果為 5.621×10^{-8}。 維里方程式(Virial equation) 即使在低壓下，也不能將單原子氣體看作是理想氣體，必須考慮其分子間的相互作用： 聲速平方 $u^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right) = \frac{\gamma kT}{m} + A_1(T)p + A_2(T)p^2 + \dots$ 無擾動共振頻率 $f_{lmn} = \frac{u}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{\chi_{mn}}{a}\right)^2}$ $f_l = \frac{lu}{2L} \rightarrow f_l^0 = \frac{l}{2L} \sqrt{\frac{\gamma kT}{m}}$ 純軸向模態(l, 0, 0) f_l、f_l^0：實際、理想氣體未受擾動聲學共振頻率 L：圓柱腔體長度，l：模數指數
	<p>108 年 11 月</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成委製共振腔之規格測試驗收。溫度範圍：373 K ~ 505 K，溫度穩定度：$\leq \pm 6$ mK 產出系統組裝完成後之測試報告 	<ul style="list-style-type: none"> 聲學氣體溫度計設備於 2019/10/25 完成英國 NPL 出貨前的組裝與測試，穩定度符合規格要求，測試報告包括穩定度、等效半徑、熱力學溫度...等之測試結果。 聲學氣體溫度計設備 2019/11/14 抵達 CMS，11/21 完成拆箱與定位，11/22 委託支援安衛部進行 Chiller 和 Pump 管路鑽孔(貫穿隔間牆)，11/25-11/26 聲學氣體溫度量測系統在 CMS 組裝完成，11/26-11/29 和英國 NPL 人員一起執行系統完成組裝後之測試。

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
		
絕對輻射溫度量測次系統建置	107年09月完成參考新溫標定義購置高溫黑體爐與共晶點囊(共3組)及傳遞件(線性高溫計)規格確認與請購	<ul style="list-style-type: none"> • 已於 8/3 完成高溫黑體爐設備、標準傳遞件(線性高溫計)及高溫共晶定點囊設備請購，於 8/24 完成開標會議並向廠商訂購，已於 2019/4/30 交貨，設備相關規格如下說明： <ul style="list-style-type: none"> (1) 共晶點囊規格確認：Co-C、Pd-C 與 Re-C <ul style="list-style-type: none"> • Co-C(1324 °C)、Pd-C(1738 °C)與 Re-C(2474 °C) • 尺寸：黑體開孔 3 mm，外徑 24 mm，長度 45 mm • 黑體放射率：≥ 0.9996 • 融化點重複性：≤ 0.01 °C (2) 高溫定點黑體爐規格：放射率：> 0.999，T_{max}：2800 °C <ul style="list-style-type: none"> • 黑體熱源開口尺寸：$\phi 30$ mm • 溫度範圍：1000 °C to 2800 °C • 黑體放射率：≥ 0.9996 (3) 線性高溫計：波長 650 nm、900 nm <ul style="list-style-type: none"> • 偵測器：Si-Detector • 量測範圍：(650 – 3000) °C • 光電流線性度< 100 ppm (Si detector) • 2 interference filters ($\lambda \pm$ HWB): (650 \pm 10) nm，(900 \pm 10) nm

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
	<p>107年12月 完成絕對輻射溫度計幾何機構圖與委託加工製作</p>	<ul style="list-style-type: none"> 完成輻射超高溫校正系統-絕對輻射溫度計光路設計與委託製作，如下圖，D1: 偵測器 to lens ≤ 1200 mm、D2: lens to 黑體($f=1.3$ mm) ≤ 400 mm  <ul style="list-style-type: none"> 完成輻射超高溫校正系統-絕對輻射溫度計光路模擬。
	<p>108年05月 完成參考新溫標定義購置高溫黑體爐與共晶點囊及傳遞件到貨並完成新機訓練</p>	<ul style="list-style-type: none"> 完成參考新溫標定義購置高溫黑體爐與共晶點囊及傳遞件到貨並完成新機訓練：2019/5/15 於 NML 完成組裝，5/14~5/30 完成新機相關訓練。 

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容																																																																																				
	<p>108年06月 完成絕對輻射溫度計 相關參數追溯與定點 黑體短期重複性之不 確定度：$< 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> 完成定點黑體(鈷碳)短期重複性之不確定度量測：$< 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$，數據如下圖：  <p>Co-C共晶融化點重複性評估</p> <p>第一次熔化</p> <p>第三次熔化</p> <p>第二次熔化</p> <p>Co-C Melting plateau repeatability</p> <table border="1" data-bbox="821 840 1034 891"> <thead> <tr> <th>1st</th> <th>2nd</th> <th>3rd</th> <th>std</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1324.05</td> <td>1324.08</td> <td>1324.07</td> <td>0.02</td> </tr> </tbody> </table> <p>Copyright 2018 ITRI 10</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成絕對輻射溫度計相關參數追溯：偵測器之光譜分光響應追溯結果如下(NML 校正編號 O190100A)： <table border="1" data-bbox="762 1086 1407 1995"> <thead> <tr> <th>波長 (nm)</th> <th>分光響應 (A/W)</th> <th>波長(nm)</th> <th>分光響應 (A/W)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>600</td><td>0.4865</td><td>780</td><td>0.6283</td></tr> <tr><td>610</td><td>0.4923</td><td>790</td><td>0.6356</td></tr> <tr><td>620</td><td>0.4986</td><td>800</td><td>0.6449</td></tr> <tr><td>630</td><td>0.5089</td><td>810</td><td>0.6528</td></tr> <tr><td>640</td><td>0.5164</td><td>820</td><td>0.6615</td></tr> <tr><td>650</td><td>0.5246</td><td>830</td><td>0.6781</td></tr> <tr><td>660</td><td>0.5331</td><td>840</td><td>0.6828</td></tr> <tr><td>670</td><td>0.5391</td><td>850</td><td>0.6837</td></tr> <tr><td>680</td><td>0.5476</td><td>860</td><td>0.6969</td></tr> <tr><td>690</td><td>0.5574</td><td>870</td><td>0.7001</td></tr> <tr><td>700</td><td>0.5648</td><td>880</td><td>0.7103</td></tr> <tr><td>710</td><td>0.5750</td><td>890</td><td>0.7184</td></tr> <tr><td>720</td><td>0.5794</td><td>900</td><td>0.7233</td></tr> <tr><td>730</td><td>0.5887</td><td>910</td><td>0.7297</td></tr> <tr><td>740</td><td>0.5969</td><td>920</td><td>0.7383</td></tr> <tr><td>750</td><td>0.6065</td><td>930</td><td>0.7469</td></tr> <tr><td>760</td><td>0.6116</td><td>940</td><td>0.7558</td></tr> <tr><td>770</td><td>0.6202</td><td>950</td><td>0.7571</td></tr> </tbody> </table>	1st	2nd	3rd	std	1324.05	1324.08	1324.07	0.02	波長 (nm)	分光響應 (A/W)	波長(nm)	分光響應 (A/W)	600	0.4865	780	0.6283	610	0.4923	790	0.6356	620	0.4986	800	0.6449	630	0.5089	810	0.6528	640	0.5164	820	0.6615	650	0.5246	830	0.6781	660	0.5331	840	0.6828	670	0.5391	850	0.6837	680	0.5476	860	0.6969	690	0.5574	870	0.7001	700	0.5648	880	0.7103	710	0.5750	890	0.7184	720	0.5794	900	0.7233	730	0.5887	910	0.7297	740	0.5969	920	0.7383	750	0.6065	930	0.7469	760	0.6116	940	0.7558	770	0.6202	950	0.7571
1st	2nd	3rd	std																																																																																			
1324.05	1324.08	1324.07	0.02																																																																																			
波長 (nm)	分光響應 (A/W)	波長(nm)	分光響應 (A/W)																																																																																			
600	0.4865	780	0.6283																																																																																			
610	0.4923	790	0.6356																																																																																			
620	0.4986	800	0.6449																																																																																			
630	0.5089	810	0.6528																																																																																			
640	0.5164	820	0.6615																																																																																			
650	0.5246	830	0.6781																																																																																			
660	0.5331	840	0.6828																																																																																			
670	0.5391	850	0.6837																																																																																			
680	0.5476	860	0.6969																																																																																			
690	0.5574	870	0.7001																																																																																			
700	0.5648	880	0.7103																																																																																			
710	0.5750	890	0.7184																																																																																			
720	0.5794	900	0.7233																																																																																			
730	0.5887	910	0.7297																																																																																			
740	0.5969	920	0.7383																																																																																			
750	0.6065	930	0.7469																																																																																			
760	0.6116	940	0.7558																																																																																			
770	0.6202	950	0.7571																																																																																			

(三) 新電流標準建置分項

1. 計畫目標

整體新電流標準擬建置(1)免液氦量化霍爾電阻系統(QHR)(量測不確定度 $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$), (2)用於微電流標準之高電阻電橋系統(高電阻量測範圍: 100 k Ω to 1 T Ω , 電阻校正不確定度 $< 100 \mu\Omega/\Omega$), (3)用於大電流標準之低電阻電橋系統(低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω , 電流量測範圍 100 A to 1000 A, 電阻校正不確定度 $< 50 \mu\Omega/\Omega$), 以搭配約瑟夫森電壓標準, 建立符合產業需求並與新定義接軌之電流標準。

本計畫(107 年度行政院科發基金計畫)規畫建置可於大電流下量測之低電阻電橋系統, 以搭配約瑟夫森電壓標準, 導出大電流標準。目標如下:

低電阻電橋建置

- (1) 完成應用於大電流標準之低電阻電橋系統採購及驗收, 低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω , 電流量測範圍 100 A to 1000 A, 電橋之比率準確度 $< 6 \times 10^{-6}$ 。
- (2) 完成低電阻電橋系統之大電流校正程序建立。

2. 計畫達成情形

本計畫如期完成計畫規劃之 3 項查核點, 並符合設定之目標。執行情形摘錄說明如下, 進一步之工作成果說明, 則詳列於“重要成果說明”。

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
低電阻電橋建置	107 年 8 月 完成低電阻電橋規格制訂及採購	<ul style="list-style-type: none">• 大電流低電阻電橋系統於 7 月 26 日完成採購規範書之規格制訂及系統請購, 並於 8 月 13 日完成系統訂購。該系統已於 12 月 14 日到貨, 並實機測試確認系統皆符合相關規格要求, 包含:(1)電阻電橋量測範圍為 1 $\mu\Omega$ to 1 Ω、(2)最大量測電流為 1000 A、(3)電橋比例量測準確度小於 6×10^{-6}。系統主要新購設備包含: 直流電流源、範圍擴充器(Range Extender)、反向開關(Reversing Switch)、直流大電流分流器。
	108 年 3 月 完成低電阻電橋建置與驗收, 電橋比率量測準確度小於 6×10^{-6}	<ul style="list-style-type: none">• 完成低電阻電橋建置與驗收系統最大量測電流可達 1000 A、恆電流輸出電壓(Compliance Voltage)最高為 DC 3.3 V, 電阻電橋量測範圍為 1 $\mu\Omega$ to 1 Ω, 符合規格要求。另外, 我們以實驗室之標稱值為 0.1 mΩ 之直流大電流分流器(廠牌型號為: H.TINSLEY/4638)作為待

工作項目	計畫內容(查核點)	實際執行內容
		<p>校件，量測電流為 300 A，每組數據之重覆量測次數為 25 次，共取 4 組實驗數據作平均，得到電阻量測值為 0.0999575 mΩ。該電阻量測值再與其校正值 0.0999570 mΩ 作比較，可得電橋比率量測準確度為 5×10^{-6}，符合採購規格($< 6 \times 10^{-6}$)。</p>
	<p>108 年 6 月 完成低電阻電橋標準校正程序建立，電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，電流量測範圍 100 A to 1000 A</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 完成低電阻電橋系統之量測不確定度評估，電阻校正(0.1 mΩ)於大電流 100 A 至 1000 A 之相對擴充不確定度為 35 μΩ/Ω ($k=1.96$)，符合計畫目標：$< 50 \mu\Omega/\Omega$。該系統量測不確定度源主要包含：(1)DCC 電橋比率不確定度、(2)標準電阻器之漂移不確定度、(3)溫度不穩定造成之不確定度、以及(4)追溯標準電阻器電阻值的不確定度。 • 完成低電阻電橋系統之校正程序與評估報告共 2 份技術文件產出。(技資編號：073840042、073840073) • 6/24~6/26 完成低電阻電橋系統之第三者延展認證，經現場評鑑後，無不符合事項。 • 10/1 完成低電阻電橋系統查驗會議，委員們一致通過審查，系統可正式對外提供校正服務。

四、計畫執行績效檢討

(一) 資源運用情形

1. 人力運用情形

(1) 人力配置

主持人	分項計畫	預計人年	實際人年
計畫主持人： 彭國勝 協同計畫主持人： 許俊明	(1)新質量標準建置(II)分項	2.0	1.8
	(2)新溫度標準建置分項	3.1	2.8
	(3)新電流標準建置分項	1.4	1.3
合 計		6.5	5.9

(2) 計畫人力

單位：人年

分類		職稱					學歷					合 計
年度	狀況	研究員級以上	副研究員級	助理研究員級	研究助理員級	研究助理員級以下	博士	碩士	學士	專科	其他	
107	預計	4.6	0.6	1.3	-	-	2.0	3.6	0.6	0.3	-	6.5
	實際	4.1	1.0	0.8	-	-	1.1	4.2	0.5	0.1	-	5.9

註：本表採用國科會職級計算。

2. 經費運用情形

(1) 歲出預算執行情形

單位：元

會計科目	預算數		實際數	
	金額(B)	佔預算數總計 %(C=B/A)	金額(D)	佔實際數總計 %(E=D/A)
(一)經常支出				
1.直接費用				
(1) 直接薪資	7,694,000	8.46	7,694,000	8.46
(2) 管理費	1,807,000	1.99	1,807,000	1.99
(3) 其它直接費用	5,901,000	6.48	5,881,805	6.46
2.公費	92,000	0.10	92,000	0.10
經常支出小計	15,494,000	17.03	15,474,805	17.01
(二)資本支出				
1.土地				
2.房屋建築及設備				
3.機械設備	75,500,000	82.97	75,500,000	82.97
4.交通運輸設備				
5.資訊設備				
6.雜項設備				
7.其他權利				
資本支出小計	75,500,000	82.97	75,500,000	82.97
合 計(A)	90,994,000	100.00	90,974,805	99.98

(2) 歲入繳庫情形

單位：新台幣元

科 目	本年度預算數	實際繳庫數	差異說明
財產收入			
不動產租金			
動產租金			
廢舊物資售價			
權 利 售 價	專利授權金 ^註		
	權利金		
	技術授權金 ^註		
	製程使用		
	其他－專戶利息 收入		
罰金罰鍰收入			
罰金罰鍰	0	483,059	矽晶球表層質量分析儀 _ \$424,439(Technische Beratung_127 天)
審查費(校正服務費)			
供應收入－ 資料書刊費			
服務收入－ 教育學術服務 技術服務			
業界合作廠商配合款			
收回以前年度歲出			
其他雜項			
合 計	0	483,059	

(3) 設備購置與利用情形

本計畫經費購置儀器設備 8 件，請參閱附件一之儀器設備清單。

(二) 績效指標與產業效益

1. 量化成果說明

績效指標類別	績效指標項目	預定目標值	目前達成值	說明
A 論文	國內論文發表(篇)	6	6	完成 6 篇，請參考附件三。
B 合作團隊養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數	4	4	完成 4 個研究團隊養成，計畫執行至今已建立各技術相對應之執行團隊，包含真空質量導引技術團隊、表層質量量測技術團隊、聲學氣體溫度計量測團隊、絕對輻射溫度量測團隊。
C 培育及延攬人才	博碩士培育	6	6	完成 6 位博碩士培育，其中包含： <ul style="list-style-type: none"> 一博士級與 4 碩士級實習生協助 XPS XRF 表層質量量測技術建置之相關工作執行，包含無參考 XRF 量測技術、SDD 頻率響應函數模擬、矽晶球 XRF 頻譜分析與擬合等量測原理文獻研讀、硬體架構設計與繪圖，以及真空控制邏輯電路分析等。 一碩士級實習生協助聲學氣體溫度計量測系統建置。
H 技術報告	技術報告(含 ICT/ MSVP 撰寫修訂)	10	11	完成 11 篇，請參考附件四。
I1 辦理技術活動	辦理學術活動	1	4	完成 4 場 SI 成果說明會，分別於北、中、南及東部各辦理一場，請參考附件五。
S2 科研建置及服務	標準系統擴建(項)	1	3	完成 3 套系統查驗，包含直流電阻量測系統(E13)、直流高電阻量測系統(E14)及量化霍爾電阻量測系統(E24)。

2. 產業效益說明

為維持計量主權完整之計量基磐，確保我國計量標準自主追溯至 SI 基本單位，NML 及時因應建立符合 SI 基本單位新定義之質量標準，與國際同步實行 4 項 SI 單位重新定義，建立我國最高追溯標準，以維持國家標準與國際一致，維護產業權益。完成自主原級矽晶球質量標準建置後，公斤標準可直接透過基本物理常數實現，確保國內質量與其相關量量測之國際等同性。藉由質量新定義所建立之高解析、高精確度之質量量測技術，提供尖端科技產業，如半導體奈米前瞻製程中之微粒、不純物量測校正所需之參考標準。此外，矽晶球表層質量量測技術建立，亦可應用半導體製程各層薄膜表面品質監控(例如，不同原子的表面摻雜)，其檢測技術之發展，亦可協助我國

檢測產業提升表面品質檢測設備之製作能力。

透過 SI 新標準之建置，以公正第三者角色提供標準量值至產業，確保國家研發與生產製造等活動之量測一致性及準確性。持續維持 CIPM MRA 之有效性，使全國認證基金會(TAF)認證之 2000 家企業所屬實驗室每年超過 600 萬份以上的產品檢測報告得以與國際接軌，避免可能的技術性貿易障礙。此外，結合 TAF 認證資源協助產業外銷，使我國外銷產品可以一次檢測、通行全球，節省再檢之成本與風險，強化競爭力。

新質量標準之及時建置，將可持續維持我國已登錄於國際度量衡局校正與量測能量(CMC)資料庫中 28 項與質量相關之國家量測標準有效性，確保國家自主計量標準。

完成 SI 新溫度標準之建置後，不但可解決目前國際溫標 ITS-90 以內插法導出定點值間溫度之誤差問題，更能進一步降低銅凝固點(1084.62 °C)以上溫度的量測不確定度之使用需求，使不確定度比當前國際溫標低 5 至 10 倍，滿足長期以來在半導體矽晶圓 1415 °C 的重要加熱製程校正、智慧型手機藍寶石螢幕所需的 2100 °C 長晶良率關鍵溫度生產、航空零組件產業高溫真空爐溫控與渦輪葉片新型合金熱處理良率在 1300 °C 至 1400 °C 之低不確定度 1 °C 內之要求，以及工具機產業中成型刀具的 2100 °C 高溫燒結之品質控制等。實現和傳播高溫下的接觸式/非接觸式溫度標準，提供國內產業追溯並與國際接軌。同時，新溫度標準之建置亦能維持溫度相關之國際度量衡局校正與量測能量(CMC)資料庫中 40 項標準的有效性，確保國家計量標準的最高追溯標準、協助強化產業的競爭力並降地產業外銷的貿易障礙。

透過 NML 建立免液氬量化霍爾電阻原級標準系統及其應用於微電流與大電流標準之高電阻電橋系統與低電阻電橋系統的相關校正技術並完成系統不確定度評估，搭配高準確度之約瑟夫森電壓原級標準，可建立完整且符合半導體、材料、通訊、能源、電機等產業於製程或產品特性檢測需求並與新定義接軌之電流標準，使我國電流標準之準確度及量測範圍於新定義實施後與國際一致。

3. 技術創新說明

(1) 發展 X 光晶體密度法(矽晶球法)技術，實現以普朗克常數定義之公斤

發展整合式 X 光電子頻譜與光螢光頻譜(XPS XRF)表層質量分析技術，目前完成系統整體設計與個別次系統規格訂定與採購。XPS XRF 表層質量分析技術乃針對膜厚在 2、3 nm 之薄膜之成份與含量分析，以 XRF 頻譜所得氧元素沉積量作為參考標準，再以 XPS 頻譜評估其它元素之含量，進而計算整體表層之質量，為表層質量分析之最新發展技術。此系統完成建置後，NML 將成為亞太地區唯一具備此技術之國家計量實驗室，相關技術亦有機會應用至半導體製程之超薄膜厚量測方面。

(2) 因應國際基本單位 SI 之定義改變，建構我國新溫度計量標準技術自主能量

發展以微波共振頻率決定即時尺寸量測技術、結合微波及聲學共振頻率之聲速量測技術、因應干擾效應之共振頻率修正技術，及發展最終熱力學溫度計量技術。實現

以波茲曼常數聯繫原子/量子尺度的熱能量測與巨觀尺度的熱力學溫度量測，裨以自然規則提供長期的穩定性，鞏固持續精進提升準確度之可行性。

新溫度計量標準建置主要由聲學氣體溫度計量測系統、絕對輻射溫度計量測系統、熱電偶高溫校正系統組成，前兩套系統主要依據 MeP-K 文件建議，建立不同溫度範圍的熱力學測溫法，以修正目前 ITS-90 測溫法下所定義的不確定度，後一套系統在於實現銀凝固點(961.78 °C)溫度以上的接觸式高溫範圍的校正。在聲學氣體溫度計量測系統方面，溫度量測範圍由-60 °C 到 232 °C，量測不確定度控制於 4 mK 以內。在絕對輻射溫度計量測系統方面，溫度量測範圍由 1085 °C 到 2748 °C，量測不確定度控制於 0.33 °C 到 2 °C 之間。在熱電偶高溫校正系統方面，溫度量測範圍由原本 961.78 °C 擴充至 1492 °C，量測不確定度控制於 1.0 °C 以內。總體而言，不但可解決目前國際溫標 ITS-90 以內插法導出定點值間溫度之誤差問題，更能進一步降低銀凝固點(961.78 °C)以上溫度的量測不確定度之使用需求，使不確定度比當前國際溫標低 5 至 10 倍。滿足半導體矽晶圓高溫的重要加熱製程校正、智慧型手機藍寶石長晶良率的關鍵溫度生產、航空零組件產業高溫熱處理良率等，實現和傳播高溫下的接觸式/非接觸式溫度標準，提供國內產業追溯並與國際接軌。

(3) 精進新電流標準計量技術，滿足半導體、材料、能源及電機產業校正與追溯需求

NML 採用新世代免液氦量化霍爾電阻原級標準系統(不確定度 $< 6 \times 10^{-8} \mu\Omega/\Omega$)，並將量化霍爾電阻標準傳遞至低電阻與高電阻標準，再搭配高準確度之約瑟夫森電壓標準系統，以導出符合新定義之電流標準。不但能滿足半導體、材料、通訊等產業於製程或產品特性檢測常用的微電流標準(10^{-12} A 等級)，以及能源、電機產業之大電流(100 A 以上)標準等需求，更可使我國電流標準之準確度及量測範圍(最大量測電流可提升至 1000 A)於新定義實施後與國際一致。

(三) 技術擴散與重要活動

1. 辦理北、中、南、東部之國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會

本計畫分別於 108/7/30(二)、108/9/2(一)、108/10/2(三)及 108/10/22(二)四天，在花蓮、高雄、臺中及臺北辦理 108 年度國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會(圖 4-1)，為擴大廣宣，本次特邀請產業界(工協會)、法人機構、公營機構、學校等，4 場說明會共 333 位業界先進，192 家廠商共同與會。本說明會分別針對國際 SI 發展趨勢、我國因應方式與做法、產業可能產生之影響，使各界進一步瞭解國家度量衡標準實驗室建置 SI 新標準系統成果及提供服務內容進行說明。會中業者相當關心 NML 新標準建置完成時程，及新標準建置完成後對目前業務影響、校正方式與評估等問題，講師於現場一一回覆，回覆說明如下表 4-1。同時，廠商也對國家度量衡實驗室在 SI 新標準與國際接軌之努力給予正面支持與評價。

表 4-1、說明會與會業者之提問與回覆

問題	回覆
新質量	
<ul style="list-style-type: none"> • 新公斤定義會不會造成,新舊定義之間存有偏差量,如有這個偏差量(或是修正量)會是多少? 	<ul style="list-style-type: none"> • 新舊公斤定義之間不會有偏差量(修正量),因為在各組實驗團隊決定普朗克常數數值時,所有質量量測結果皆已重新追溯至國際公斤原器(International Prototype of Kilogram, IPK),所以可以確保以普朗克常數所實現之公斤標準與 IPK 相同。
<ul style="list-style-type: none"> • 一般公司行號是否可以申請國家度量衡標準實驗室參觀? 	<ul style="list-style-type: none"> • 考量國家度量衡標準實驗室目前的任務與規模,較難支應個別公司行號的參觀申請,建議可透過公會或其他組織組隊申請參觀。
<ul style="list-style-type: none"> • NML 在進行 1000 公斤標準法碼導引時會用到哪些其他量值之標準法碼,共有幾顆? 	<ul style="list-style-type: none"> • NML 採用國際慣用的 1,2,2,5 方法來進行其他量值的質量導引,以最佳化(降低)量測次數與統計不確定度。以 1000 公斤為例,會使用以下質量總合 1000 公斤之標準法碼:100 公斤一顆、200 公斤兩顆與 500 公斤一顆。100 公斤標準法碼之導引亦採用類似的設計(10 公斤一顆、20 公斤兩顆與 50 公斤一顆),進行導引,10 公斤標準法碼導引亦同。
<ul style="list-style-type: none"> • NML 在進行法碼校正時之環境溫濕度與客戶使用時的環境溫濕度不同,校正結果正確性是否有疑慮? 溫濕度差異造成客戶法碼表面產生凝結水珠,影響客戶法碼準確性。 	<ul style="list-style-type: none"> • NML 無法針對不同客戶使用環境進行實驗室環境調整,如此將造成 NML 參考標準法碼本身之不穩定,進而影響實驗結果。NML 採用較為嚴格之國際標準建議環境,已確保參考標準法碼之穩定性。關於法碼表面水珠凝結,建議客戶應將法碼表面擦拭清潔所導入之不確定度納入法碼質量評估項目。
<ul style="list-style-type: none"> • NML 矽晶球大概多大? 直徑是多少? 	<ul style="list-style-type: none"> • NML 矽晶球直徑約為 9.37 cm,比坊間算命所用之水晶球(直徑約 10 cm)再小一些。
新溫度	
<ul style="list-style-type: none"> • 高溫熱電偶是否只做固定點校正服務,服務內容的校正結果如何呈現? 	<ul style="list-style-type: none"> • 只針對 R type、S type 及 B type 等貴金屬熱電偶進行固定點校正,可服務範圍 0 至 Pd-C 共晶點(0 ~ 1492) °C,校正結果提供電壓-溫度對應表以及校正係數(可供廠商自行帶入公式產出標準溫度)
<ul style="list-style-type: none"> • 熱電偶校正時,如何知道何種狀況為平衡 	<ul style="list-style-type: none"> • 考慮比較校正的狀況下,校正單位須自行評估單位使用的爐子狀況,根據達到目標設定溫度後之變化,自行定義可接受之量化穩定指標。
<ul style="list-style-type: none"> • 新溫度單位實施後對儀器設備的影響? 	<ul style="list-style-type: none"> • 原定意是水三相點,新定義是以波茲曼常數為定義基礎,因此原水三相點的不確定度增加約 0.1 mK,影響程度很小,未來溫度領域擴充新的定點,溫度將以內差為實現展開,預期不確定度會優於原本以外差展現的狀態。

新電流	
<ul style="list-style-type: none"> • 新電流標準正式實施後，國家度量衡標準實驗室之電量系統校正費用是否有提高？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 國家度量衡標準實驗室為因應新電流標準的實施，已完成電量相關系統的設備購置與量測技術改良，但校正費用並未因此而作調整，請廠商知悉與放心。
<ul style="list-style-type: none"> • 採用新定義之原級電壓與電阻標準值分別提升 0.1 $\mu\text{V}/\text{V}$ 與 0.02 $\mu\Omega/\Omega$，此變異量對於校正實驗室的校正業務執行有無影響？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 原級電壓與電阻標準值因採用新定義而產生的變異量遠小於一般商用標準儀器的規格要求，故廠商無須疑慮送校問題與其校正業務的執行。
新物質量	
<ul style="list-style-type: none"> • 新物質量的定義有何影響？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 新定義乃是基於舊有定義量測所得結果，取一公認值作為新定義的定值，並不會造成影響，不會有"以前認知的一莫耳變成兩莫耳"這樣的情況發生
<ul style="list-style-type: none"> • 量測微量元素之質譜儀的量測範圍與偵測極限？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 各元素的量測範圍為 1 ppm-1 ppt，偵測極限為 ppt 等級
<ul style="list-style-type: none"> • 量測同位素之質譜儀的自動進樣裝置細節？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 自動進樣裝置可依指令至指定樣品瓶中抽取樣品，且配有過濾網以過濾外界灰塵
<ul style="list-style-type: none"> • 量測同位素之質譜儀的自動進樣裝置的製造廠商訊息？ 	<ul style="list-style-type: none"> • 會後將原廠名片寄予發問者

(1)



(2)



(3)



(4)



圖 4-1、4 場說明會活動現場(1)花蓮場、(2)高雄場、(3)臺中場及(4)臺北場

五、計畫變更說明

年度辦理計畫變更情形如下：

項次	變更內容	申請變更文號	標檢局回覆同意備查文號
1	出國計畫變更	中華民國 107 年 10 月 05 日 工研量字第 1070017939 號	中華民國 107 年 10 月 16 日經 標四字第 10700601160 號
2	為大幅提升光電子量測之準確度，進而降低矽晶球表層質量之量測不確定度，故變更計畫增購氬離子濺鍍槍與電子中和槍組件。	中華民國 107 年 10 月 16 日 工研量字第 1070018704 號	中華民國 107 年 12 月 3 日 經標四字第 10740007930 號
3	出國計畫變更	中華民國 107 年 12 月 14 日 工研量字第 1070023209 號	中華民國 108 年 1 月 17 日 經標四字第 10740008810 號
4	出國計畫變更	中華民國 108 年 01 月 24 日 工研量字第 1080001615 號	中華民國 108 年 2 月 1 日 經標四字第 10800508290 號
5	惟礙於儀器設備運送到貨時間較晚，並須進行多項檢測整合程序，辦理履約期限展延及計畫內容變更。	中華民國 108 年 3 月 15 日 工研量字第 1080004239 號	中華民國 108 年 4 月 24 日 經標四字第 10840003250 號
6	出國計畫變更	中華民國 108 年 5 月 8 日 工研量字第 1080007894 號	中華民國 108 年 5 月 21 日 經標四字第 10800538450 號

註：有關出國事宜經濟部 102 年 10 月起授於各局處管理，如出國任務、地點、時間、天數、項次之預算增加及配合調減勻支給該項次之項目，均需向局辦理變更報准同意。

六、重要成果說明

(一)新質量標準建置分項

【本年度目標】

整體新質量標準建置之目標為建立以 X 光晶體密度法實現矽晶球原級質量標準，相對不確定度小於 5×10^{-8} 。

本計畫擬進行第二階段矽晶球表層質量量測系統技術建立，目標如下：

- 完成矽晶球原級質量標準整體質量評估，質量相對不確定度小於 5×10^{-8} 。
- 完成整合型 X 射線光電子頻譜技術(X-ray Photoelectron Spectroscopy)與 X 射線螢光頻譜技術(X-ray Fluorescence Spectroscopy)表層分析儀之系統整合。
- 完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 $10 \mu\text{g}$ ，相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ 。

【執行成果】

1. 完成矽晶球原級質量標準整體質量評估，質量相對不確定度小於 5×10^{-8}

X 光晶體密度法又稱為矽晶球法，矽晶球內部之矽原子以鑽石結構排列，每一個單位晶胞 (unit cell) 由八顆矽原子組成，為晶格常數 a 的正立方體，若矽晶球的體積為 V ，則球體的矽原子數量為 N 。矽原子質量表示為 $m_a({}^i\text{Si})$ ， i 為考慮 ${}^{28}\text{Si}$ 、 ${}^{29}\text{Si}$ 、 ${}^{30}\text{Si}$ 之矽的同位素，矽原子質量與電子質量 $m_e = \frac{2R_\infty}{c\alpha^2} \cdot h$ 的相對比值，使矽晶球的質量連結至普朗克常數 h ，計算出矽晶球核的質量為：

$$m_{core} = \frac{8V_{core}}{a^3} \cdot \frac{\sum_i x({}^i\text{Si})A_r({}^i\text{Si})}{A_r(e)} \cdot \frac{2R_\infty}{c\alpha^2} h \quad (6-1)$$

矽晶球的總質量(m_{sphere})還需考慮球內部的不純物質量($m_{defects}$)與表面氧化層質量(m_{SL})。矽晶球的內部結構相當穩定，可設定內部的參數只需作一次量測，而矽晶球表面氧化層會隨著時間、環境產生變化，矽晶球表面氧化層模型，其成份及質量的改變需以 X 光量測技術作定期追蹤。

$$m_{sphere} = \frac{2hR_\infty}{c\alpha^2} \cdot \frac{\sum_{i=28}^{30} x({}^i\text{Si})A_r({}^{28}\text{Si})}{A_r(e)} \cdot \frac{8V_{core}}{a^3} - m_{defect} + m_{SL} \quad (6-2)$$

矽晶球總質量(m_{sphere})之公式當中普朗克常數與光速皆為已知常數，其餘的值分別為參考 CODATA 2018 之數據與校正報告推算得知。由校正報告計算可得的量分別為：不純物的缺陷質量 $m_{defects}$ 、莫耳質量 M_{Si} 、晶格常數 a 、表層質量 m_{SL} 、矽晶球核體積 V_{core} 。其中不純物的缺陷質量 $m_{defects}$ 與莫耳質量 M_{Si} 是取矽晶球前後樣本作量測。圖 6-1 為矽晶柱(編號：Si28-31Pr11)，位置 P 為我國的矽晶球(編號：Si28kg_03_a)。

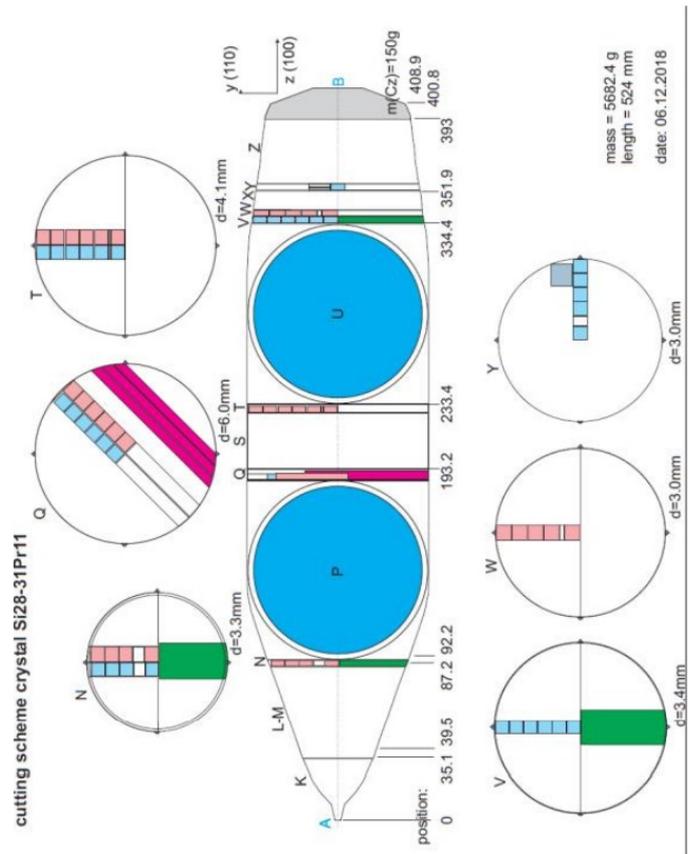
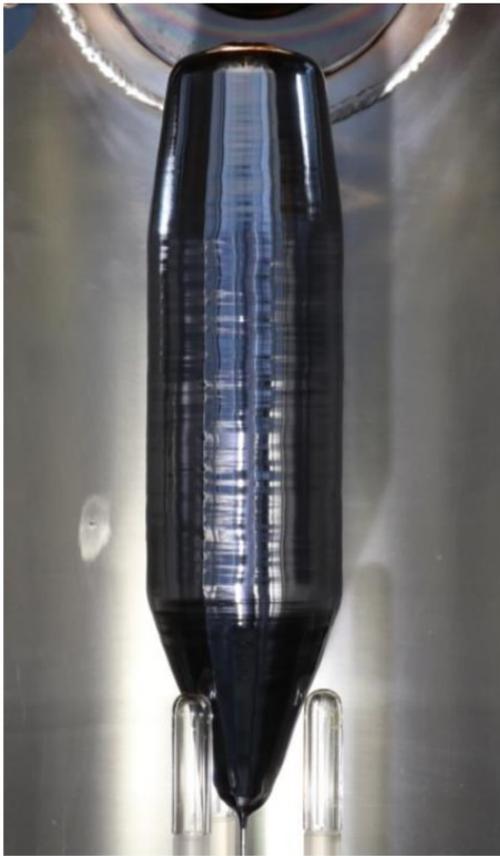


圖 6-1、矽晶柱(編號：Si28-31Pr11)及其分析位置圖

(1) 不純物的缺陷質量 m_{defects} :

以同一晶柱之前後塊材做傅立葉轉換紅外光譜(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR)量測，得其中碳原子(C)、氧原子(O)、硼原子(B)與磷原子(P)於塊材中的含量如下圖，再以線性內差法得球心位置之非矽原子含量(N_C 、 N_O 、 N_B 、 N_P)。

Sample SIS-Code	N_C	N_O	N_B
Si28-31Pr11	10^{15} cm^{-3}	10^{15} cm^{-3}	10^{12} cm^{-3}
Part.N.2.1	(0.39 ± 0.25)	(0.14 ± 0.07)	(5.56 ± 0.6)
Part.N.2.2	(0.33 ± 0.23)	≤ 0.14	(5.26 ± 0.5)
Part.N.2.3	(0.35 ± 0.20)	≤ 0.14	(4.81 ± 0.5)
Part.N.2.4	(0.30 ± 0.25)	(0.14 ± 0.08)	(5.41 ± 0.6)
Part.Q.5.1	(1.79 ± 0.27)	(0.19 ± 0.07)	(4.81 ± 0.8)
Part.Q.5.2	(2.82 ± 0.34)	(0.20 ± 0.07)	(4.81 ± 0.4)

經由線性內差可得知當中每一不純物於矽晶球中所佔的質量如下表

X_i	x_i		$u(x_i)$	
m_{dB}	6.134×10^{-11}	κg	5.65×10^{-12}	κg
m_{dC}	1.227×10^{-8}	κg	3.16×10^{-9}	κg
m_{dO}	-1.537×10^{-9}	κg	7.78×10^{-10}	κg
m_{dP}	-3.478×10^{-12}	κg	1.16×10^{-14}	κg
m_{dN}	0.0	κg	6.10×10^{-10}	κg
m_{dV}	6.610×10^{-9}	κg	2.20×10^{-9}	κg

將每一項相加統整後可得 m_{defect} 質量與不確定度為

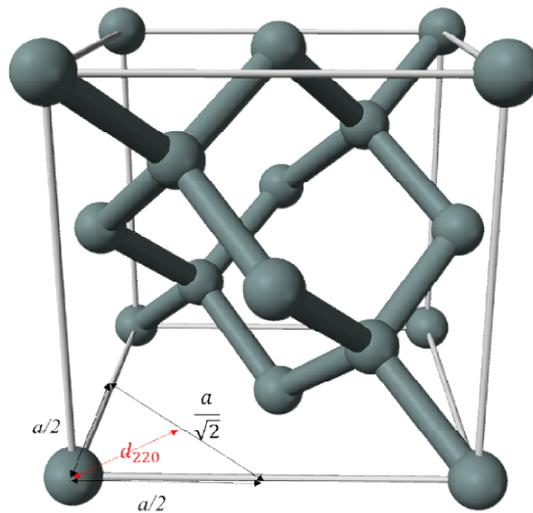
$$m_{\text{defect}} = (1.74 \pm 0.398) \times 10^{-9} \text{ kg} \quad (6-3)$$

(2) 莫耳質量 M_{Si}

取同一晶柱之 Q.4 部分做同位素稀釋質譜(Isotope dilution mass spectrometry, IDMS)量測，取得該位置之同位素比例如下圖：

sample	M	$x(^{28}\text{Si})$	$x(^{29}\text{Si})$	$x(^{30}\text{Si})$
	g/mol	mol/mol	mol/mol	mol/mol
Si28-31Pr11Q.4	27.976941260(84)	0.999985502(80)	0.000014264(78)	2.34(20)E-07

(3) 晶格常數 a



以矽晶柱之中間部分做切割，樣品編號為 XINT，以 x 光與光學合併之干涉儀量測 $\{220\}$ 晶格面之間距 (d_{220})， d_{220} 與晶格常數 a 之間之關係式為 $a = \sqrt{8} \cdot d_{220}$ 。XINT 與此晶柱之矽晶球內晶格常數之間還需考慮純度 (δd_{en}) 與不純物之質量 (δd_{PD}) 的影響量，故 d_{220} 與 d_{XINT} 之間的關係式與計算的參數為下：

$$d_{220} = (1 + \delta d_{en} + \delta d_{PD}) \times d_{XINT} \quad (6-4)$$

X_i	x_i	$u(x_i)$
δd_{PD}	-1.4×10^{-9}	2.06×10^{-9}
δd_{en}	-7.012×10^{-10}	6.55×10^{-12}
d_{XINT}	1.9201×10^{-10} m	3.3×10^{-19} m

經過整理可得晶格常數 a 的值與不確定度為：

$$a = \sqrt{8} \cdot d_{220} = (5.431 \pm 1.46 \times 10^{-8}) \times 10^{-10} \text{ m} \quad (6-5)$$

(4) 表層質量 m_{SL}

使用 XPS XRF 表層質量量測技術之校正數據，包含矽氧化層、碳化汙染層及水層之質量，校正報告內容如下：

矽晶球表層	符號	質量(μg)	標準不確定度(μg)
矽氧化層	m_{OL}	28.10	3.40
碳化汙染層	m_{CL}	6.60	2.25
水層	m_{CWL}	9.20	1.80

依據表格內容可得表層質量與標準不確定度為：

$$m_{SL} = (43.90 \pm 4.45) \mu\text{g} \quad (6-6)$$

(5) 矽晶球球核體積 V_{core}

利用斐索干涉儀(Fizeau interferometer)量測球體於真空中且溫度為 20 °C 的體積，由於需要修正為球核體積，故需要將表層厚度(t_{SL})與光學相位($\Delta\phi_0$)修正。表層厚度是以表層質量校正報告之單位面積質量與密度之比值，計算結果如下表：

矽晶球表層	符號	厚度(nm)	標準不確定度(nm)
矽氧化層	d_{OL}	0.46	0.06
碳化汙染層	d_{CL}	0.24	0.09
水層	d_{CWL}	0.33	0.07
表層總質量	d_{SL}	1.04	0.13

考慮每一層之間折射路與吸收率，計算光干涉相位差修正，修正量為 $2\Delta\phi_0 = 0.10532 \pm 0.21065 \text{ nm}$ ，則球體的平均直徑將修正為：

$$D_{core} = D_{app} + 2\Delta\phi_0 = 93.7227151 \pm 0.000002 \text{ mm} \quad (6-7)$$

利用球體機公式可計算出矽晶球球核之體積與其標準不確定度：

$$V_{\text{core}} = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_{\text{core}}}{2}\right)^3 = 431.0555157 \pm 0.0000182 \text{ cm}^3 \quad (6-8)$$

綜合以上各項參數，得各分量的值與標準不確定度以及比例如下表：

X_i	x_i	$u(x_i)$	$c_i(y_j)$	$u_i(y_j)$	$h_i(y_j)$
h	6.6261×10^{-34}	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	0	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
c	2.9979×10^8	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	
α	7.2974×10^{-3}		1.10×10^{-12}		270
R_∞	1.0974×10^7	m^{-1}	2.10×10^{-5}	m^{-1}	9.1000×10^{-8}
D_{app}	9.3723×10^7	nm	0.650	nm	3.2000×10^{-8}
$2\Delta\phi_0$	1.0500×10^{-1}	nm	0.211	nm	3.2000×10^{-8}
D_{core}	9.3723×10^7	nm	0.683	nm	6.70×10^{-9}
π	3.14159265359		0		
V_{core}	4.3106×10^{-4}	m^3	9.43×10^{-12}	m^3	
a	5.4310×10^{-10}	m	1.46×10^{-18}	m	5500000000
M	2.7977×10^{-2}	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	8.40×10^{-11}	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	36
m_{defect}	1.7400×10^{-8}	kg	2.98×10^{-9}	kg	1
m_{SL}	4.3900×10^{-8}	kg	4.45×10^{-9}	kg	1

經表格之參數計算得矽晶球之質量與不確定度為：

$$m_{\text{sph}} = (1 \text{ kg} + 78.3734 \text{ mg}) \pm 0.0241 \text{ mg}, \text{ 矽晶球質量的相對不確定度為 } 2.41 \times 10^{-8}.$$

2. 完成整合型 X 射線光電子頻譜技術(X-ray Photoelectron Spectroscopy)與 X 射線螢光頻譜技術(X-ray Fluorescence Spectroscopy)表層分析儀之系統整合。

整合式 XPS XRF 表層質量量測系統由 X 光光源(Al K α)、X 光單光器、螢光偵測器(矽漂移偵測器(Silicon Drift Detector, SDD))、電子頻譜儀(Electron Spectrometer)、超高真空五軸矽晶球移動座、樣品傳送真空腔體(Load Lock Chamber)與低磁性超高真空分析腔體等模組所構成，如圖 6-2 所示。

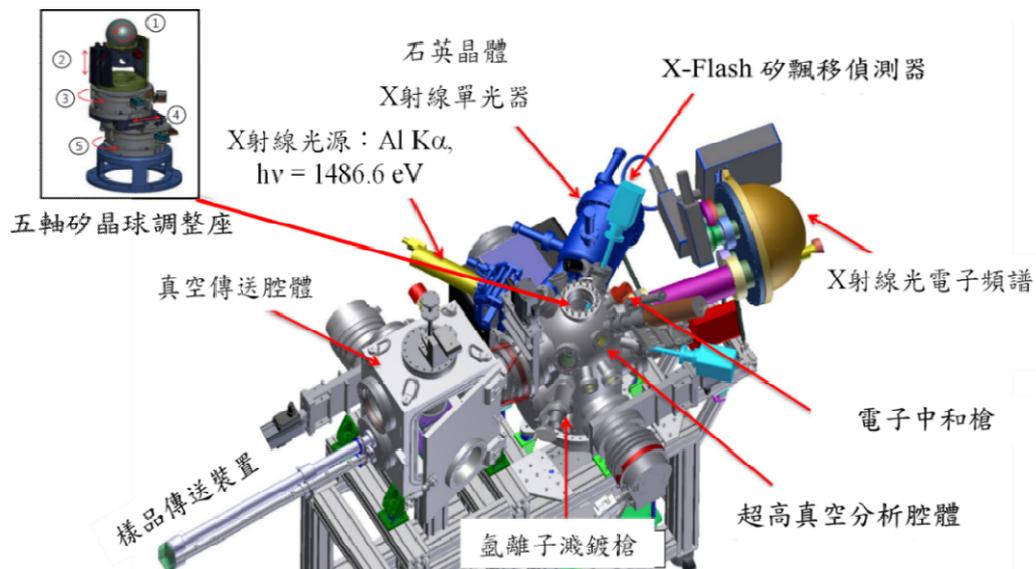


圖 6-2、整合式 XPS XRF 表層質量量測系統設計

XPS XRF 表層質量量測系統硬體部分已完成架設，矽晶球表層質量量測系統主要包含兩部分加載互鎖真空腔體(Loadlock Chamber)以及分析腔體(UHV analysis chamber)，如圖 6-3 所示。



圖 6-3、整合式 XPS XRF 表層質量量測系統

加載互鎖真空腔體做為真空傳遞腔體，主要功能為透過傳遞導桿將待測樣品送入分析腔體前的前置區，也可在腔體內先抽至真空避免分析腔體破大氣以及環境變化過大，主要包含傳遞導桿、矽晶球升降座、開啟矽晶球傳遞容器之單軸升降機構、真空系統、量測用之試片以及試片治具放置處。而 XPS 與 XRF 光譜於分析腔體量測，其真空度需長時間維持於超高真空狀態，X 光射源、X 射線光電子頻譜分析儀以及 XRF 擷取訊號用的矽飄移偵測器(Silicon Drift Detector)皆以固定角度位置安裝於超高真空腔體之上，分析腔體主要包含 X 光射源、石英單晶 X 射線單色器 X 射線、光電子頻譜儀、螢光頻譜分析儀、電荷中和器以及氬離子濺鍍槍皆已安裝完成。此外，超高真空五軸矽晶球移動座已於 11 月運送至台灣，如圖 6-4 所示，並進行各軸馬達與控制器依實際量測狀況進行控制程式設定與測試，完成後已安裝至分析腔體內。

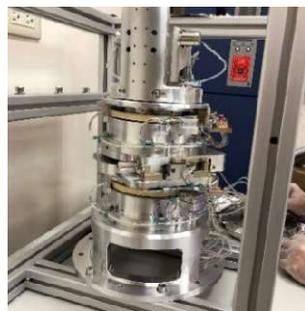


圖 6-4、五軸矽晶球移動座

加載互鎖真空腔體與分析腔體之真空系統架構如圖 6-5 所示，目前真空系統之控制主要透過手動操作，待前期測試完成後將全數改為軟體遠端操作及自動化控制，真

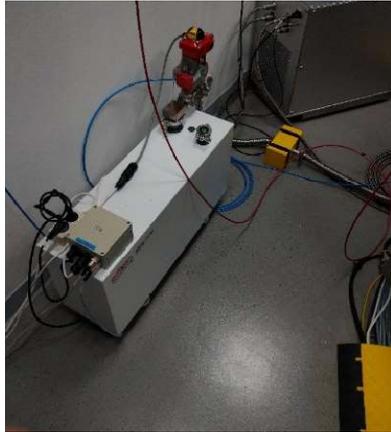


圖 6-6、機械幫浦(型號:ACP40)

3. 完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於 10 μg ，相對擴充不確定度 $\leq 30\%$ 。

目前整合式 XPS XRF 表層質量量測系統已完成硬體架設與抽氣測試，尚未開始進行矽晶球表層質量量測，因此以 PTB 提供之矽晶球(編號 Si-28-02a)螢光頻譜與光電子頻譜量測數據進行表層質量評估，以確認表層質量評估方法之正確性。矽晶球表層氧化物之組成如圖 6-7，表層質量 m_{SL} 主要由水層(CWL)、碳化汙染層(CL)、二氧化矽與矽的次級氧化物(OL)所組成，需透過 X 射線光電子頻譜技術(XPS)與 X 射線螢光頻譜技術(XRF)兩種技術結合來量測表層氧化物之組成與質量。

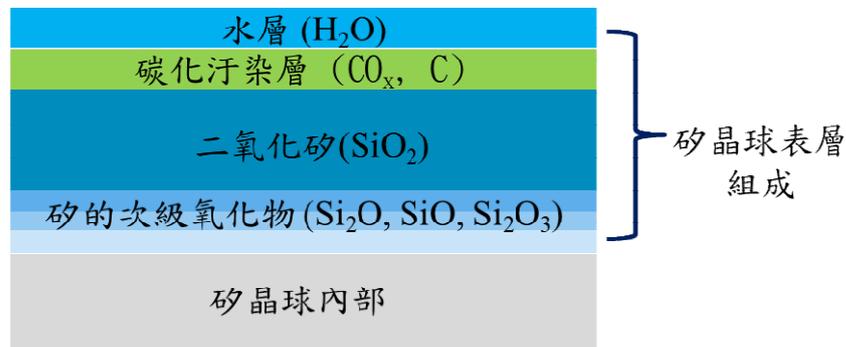


圖 6-7、矽晶球表層組成

表層質量最主要組成元素為 O、Si、C 以及 H，表層量測主要是藉由 X 射線螢光頻譜技術(XRF)技術來決定矽晶球表層每單位面積之氧沉積量(ng/cm^2)，包含表面水層、碳化汙染層以及氧化層皆含有氧元素的存在，因此透過 XRF 技術可以推估矽晶球表層每單位面積的總氧沉積量，再依據 XPS 光電子頻譜技術擷取 O、Si、C 三者之原子數比值，便可推估有多少比例的氧元素分屬於碳化汙染層、水層與氧化層，並再依據 XPS 頻譜分析各元素所屬之電子態，於碳化汙染層與水層補上氫的質量。

由 PTB 矽晶球(編號 Si-28-02a)之螢光頻譜量測數據，並以 Sherman's equation 為參考所建立之 SiO_2 標準試片與螢光頻譜參考曲線，擬合出矽晶球上每單位面積之氧

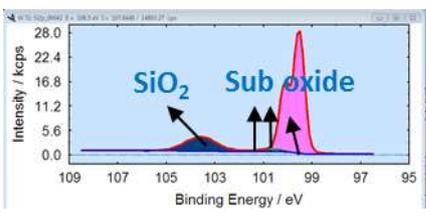
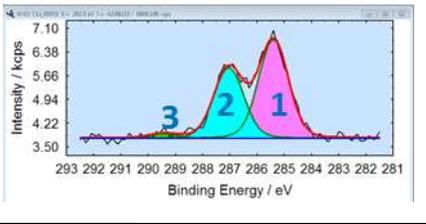
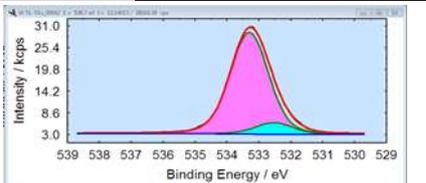
沉積量為 110.01 ng/cm²，其相對標準不確定度為 8.96%，不確定度來源如表 6-1。

表 6-1、XRF 氧沉積量相對標準不確定度來源列表

不確定度來源	相對標準不確定度 u	說明
Reproducibility	2.00 %	系統量測再現性。
Calibraion sample	8.00 %	PTB 同步輻射量測 SiO ₂ 參考試片之氧沉積量不確定度。
Spectrum unfolding	3.50 %	擬合 XRF O K α 與 Si K α 兩項積分強度的比值，擬合結果與量測結果之間的不確定度。
Total relative unvertainty	8.96 %	

由相對標準不確定度可換算，單位面積氧沉積量之標準不確定度為 9.86 ng/cm²。接著依據 XPS 光電子頻譜量測 O 1s、Si 2p、C 1s 之積分強度，計算 C、Si、O 三者之原子數百分比，結果如表 6-2 所示：

表 6-2、XPS 各元素光電子數百分比

元素	光電子數百分比 $c_x(\%)$	不確定度(%)	XPS 頻譜
Si _{suboxide}	0.810	2.00	
Si _{SiO2}	18.910	2.00	
Si _{total}	19.720	2.00	
C _{peak1}	18.939	8.00	
C _{peak2}	4.49	8.00	
C _{peak3}	0.00	8.00	
C _{total}	23.429	8.00	
O	56.850	2.00	

定量方式如下：

- (1) 首先將 XRF 定量的單位面積 O 沉積質量換算成單位面積氧原子數量，再依照各元素相對於氧原子數之比例 C_x/C_O 計算出單位面積 Si 與 C 之原子數量 $N(x)$ ，公式如下

$$N(x) = \frac{m(O)}{M(O)} \times Avo \times \frac{c_x}{c_o} \quad (6-9)$$

其中

$m(O)$:單位面積氧沉積質量；

$M(O)$:氧原子量 15.999 g；

Avo :亞佛加厥數 $6.02214076 \times 10^{23}$ 。

(2) 以化學計量方式計算 O 原子在矽氧化層(OL)與碳化汙染層(CL)之分配：

A. 矽氧化層(OL)

Si_{SiO_2} 的積分強度比值為 18.91 %，則氧原子消耗了 $18.91 \% \times 2$ ，此為 SiO_2 的氧原子數。 $Si_{suboxide}$ 的積分強度比值為 0.81 %，則氧原子消耗了 0.81 %，此為 SiO 的氧子數。

B. 碳化汙染層(CL)

C 的含量依據化合物組成不同，C 與 O 的比例依 Peak 1-3 分別定量(表 6-3)，各 Peak 所含氧原子數量依其平均配位數的 O/C 估計：

表 6-3、碳化汙染層各 peak 之氧原子配位數比

O/C ratio	Peak 1	Peak 2	Peak 3
O content min	0.00	0.50	0.33
O content max	0.00	1.00	0.50
O/C average	0.00	0.75	0.42

其中 Peak 1 不含氧，Peak 2 的積分強度佔 4.49 %，Peak 3 佔 0 %，則碳化層所消耗的 O 原子為 $4.49 \% \times 0.75 + 0 \% \times 0.42$ 。

(3) 以化學計量方式估計 H 原子在碳化汙染層(CL)與水層(CWL)的原子數：

A. 碳化汙染層(CL)

C 的含量依據化合物組成不同，C 與 H 的比例依 Peak 1-3 分別定量(表 6-4)，各 Peak 所含氧原子數量依其平均配位數的 H/C 估計：

表 6-4、各 C 1s peak 中 C 與 H 的比例

H/C ratio	Peak 1	Peak 2	Peak 3
H-content min	0.50	0.00	0.00
H-content max	3.00	6.00	1.00
mean H-content	1.75	3.00	0.50

由 C 的三個 peak 來計算 H 的原子數，peak 1 佔 18.939 %，peak 2 佔 4.49 %，

peak 3 佔 0 %，則碳氫化合物中 H 的含量等於 $18.939 \% \times 1.75 + 4.49 \% \times 3 + 0 \% \times 0.5$ 。

B. 水層(CWL)

氧原子數總和扣除矽氧化層(OL)之含氧量與碳化污染層(CL)之含氧量，即為水層之氧原子數。

$$N(O_{H_2O}) = N(O_{total}) - N(O_{OL}) - N(O_{CL}) \quad (6-10)$$

而 H 原子的數量為(6-10)式所計算之 $N(O_{H_2O})$ 的兩倍。

$$N(H_{H_2O}) = N(O_{H_2O}) \times 2 \quad (6-11)$$

(4) 估計 Si hydroxyl 中 Si 的含量

矽的氧化物在表面會與水結合成為單層的 hydroxyl，根據文獻(Mizushima S 2004 *Metrologia* 41 137-44)，hydroxyl 的晶格常數(Lattice constant)為 0.714 nm，可計算出每單位面積含有的 hydroxyl 數量，又每個 hydroxyl 含有二個矽原子，可計算出 hydroxyl 中矽原子的修正量。圖 6-8 為 Si hydroxyl 的結構。

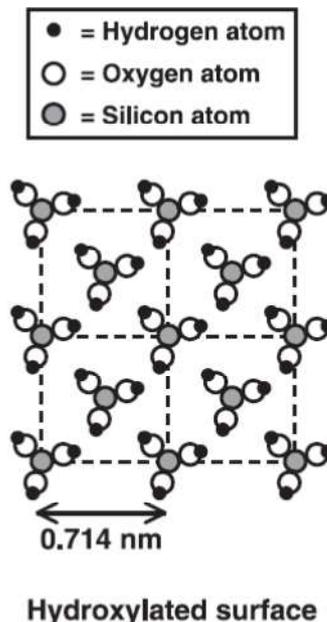


圖 6-8、為 Si hydroxyl 單位晶胞

各元素於單位面積所含質量即為原子數含量與原子量 $M(x)$ 之沉積，其中 $M(Si)=27.977$ 、 $M(H)=1.008$ 、 $M(C)=12.011$ ，參考表 6-5 為單位面積各元素之沉積量與不確定度：

表 6-5、單位面積各元素之沉積質量與不確定度

單位面積元素含量	符號	值(ng/cm^2)	標準不確定度(ng/cm^2)
矽	$m(\text{Si})$	66.73	9.33
氧	$m(\text{O})$	110.01	9.86
碳	$m(\text{C})$	34.00	12.50
氫(屬碳化層)	$m(\text{H-CL})$	5.68	2.61
氫(屬水層)	$m(\text{H-CWL})$	3.62	0.33
矽-hydroxyl	$m(\text{Si-hydroxyl})$	18.22	6.12

矽晶球的半徑為 9.37 cm，可計算出矽晶球的表面積為 $4\pi r^2 = 275.96 \text{ cm}^2$ 。單位面積各元素含量與矽晶球表面積之乘積即為表層質量，

表 6-6 列出氧化層(OL)、碳化汙染層(CL)、水層(CWL)之沉積量與不確定度。矽氧化層質量為 44.07 μg ，碳化汙染層 10.96 μg ，水層 10.73 μg ，矽晶球表層氧化物 65.77 μg ，標準不確定度為 7.01 μg ，相對擴充不確定度($k=2$)為 21.3 % ($\leq 30\%$)，符合預定目標。

表 6-6、矽晶球表層氧沉積量與不確定度列表

矽晶球表層	符號	質量(μg)	標準不確定度(μg)
氧+矽	$m_{\text{Si+O}}$	48.77	4.80
矽-hydroxyl	$m_{\text{Si-hydroxyl}}$	5.03	1.69
碳	m_{C}	9.39	3.44
氫(屬碳化層)	$m_{\text{H-CL}}$	1.57	0.72
氫(屬水層)	$m_{\text{H-CWL}}$	1.00	0.09
矽氧化層	m_{OL}	44.07	5.46
碳化汙染層	m_{CL}	10.96	3.51
水層	m_{CWL}	10.73	2.66
表層總質量	m_{SL}	65.77	7.01

【設備採購說明】

單位：千元

設備名稱	預算金額	採購金額	驗收規格	驗收結果
矽晶球表層質量分析儀 (III)	3,546	3,544	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation axis #1 1. Step resolution : 0.0006 ° 2. Repeat accuracy better than 10*resolution. 3. with Piezo Motors, non-magnetic UHV 4. The table design should be as compact as possible, with a high rigidity and minimal angular deviation of the Z-axis are provided in the construction. 5. UHV-compatible design, the final parameters of which are defined in the Design Review between the client and the contractor. • Linear unit #2 1. Step resolution : 0.000061mm 2. Repeat accuracy better than 10*resolution. 3. Range:27mm 4. Ultra high vacuum compatible (10-9mbar), 5. with Piezo Motors, non-magnetic UHV • Controller for 5-axis 1. EtherCAT master controller with 8 EtherCAT nodes, system can be extended externally 2. EtherCAT slave analog drive interface 3. Nanomotion engines amplifier 4. Faulhaber PDA3.1 amplifier for PiezoMotors motors. 5. All relevant power supplies, connection 230Vac 6. One digital encoder per axis 7. Safety inputs for all axes 8. 8/8 General Purpose digital 1 / 0s (almost 1/0 # s) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation axis #1 測試以下項目皆為合格，如圖 6-9。 1. Step resolution : 0.0006 ° 2. Repeat accuracy better than 10*resolution. 3. with Piezo Motors, non-magnetic UHV 4. The table design should be as compact as possible, with a high rigidity and minimal angular deviation of the Z-axis are provided in the construction. 5. UHV-compatible design, the final parameters of which are defined in the Design Review between the client and the contractor. • Linear unit #2 測試以下項目皆為合格，如圖 6-10。 1. Step resolution : 0.000061mm 2. Repeat accuracy better than 10*resolution. 3. Range:27mm 4. Ultra high vacuum compatible (10-9mbar), 5. with Piezo Motors, non-magnetic UHV • Controller for 5-axis 測試以下項目皆為合格，如圖 6-11。 1. EtherCAT master controller with 8 EtherCAT nodes, system can be extended externally 2. EtherCAT slave analog drive interface 3. Nanomotion engines amplifier 4. Faulhaber PDA3.1 amplifier for PiezoMotors motors. 5. All relevant power supplies, connection 230Vac

設備名稱	預算金額	採購金額	驗收規格	驗收結果
			9. 9All interfaces on the front panel as Sub-D-connectors 10. Controller software 11. Host communication: Ethernet and RS232 • 標準片載台、夾爪及基座如設計圖。 • 廠商須提供：出廠前測試報告英文版操作手冊或使用說明紙本及電子檔各一份	6. One digital encoder per axis 7. Safety inputs for all axes 8. 8/8 General Purpose digital I/Os (almost I/O #s) 9. 9All interfaces on the front panel as Sub-D-connectors 10. Controller software 11. Host communication: Ethernet and RS232 • 標準片載台、夾爪及基座如設計圖，如圖 6-12。 • 廠商提供測試報告(圖 6-13)、英文版操作手冊紙本及電子檔各 1 份。
氫離子濺鍍槍與電子中和槍組件	2,355	2,339	• 氫離子濺鍍槍組件 1. IQE 11/35 Ion Source (1) Variable insertion length: 62.5 mm, 120 mm, 190 mm or 250 mm (2) Beam currents up to 20 micro-ampere (Argon) 2. Power supply for ion source IQE 11/35 (1) Ion energy range up to 3 keV (2) Emission current selectable 3 mA, 6 mA or 10 mA • 電子中和槍組件 1. Flood Gun FG 22/35 (1) Energy range: 1 eV – 500 eV (2) Beam current: up to 1 mA	• 氫離子濺鍍槍組件，測試以下項目皆為合格，如圖 6-14 及圖 6-15。 1. IQE 11/35 Ion Source (1) Variable insertion length: 62.5 mm, 120 mm, 190 mm or 250 mm (2) Beam currents up to 20 micro-ampere (Argon) 2. Power supply for ion source IQE 11/35 (1) Ion energy range up to 3 keV (2) Emission current selectable 3 mA, 6 mA or 10 mA • 電子中和槍組件測試以下項目皆為合格，如圖 6-16 及圖 6-17。 1. Flood Gun FG 22/35 (1) Energy range: 1 eV – 500 eV (2) Beam current: up to 1 mA

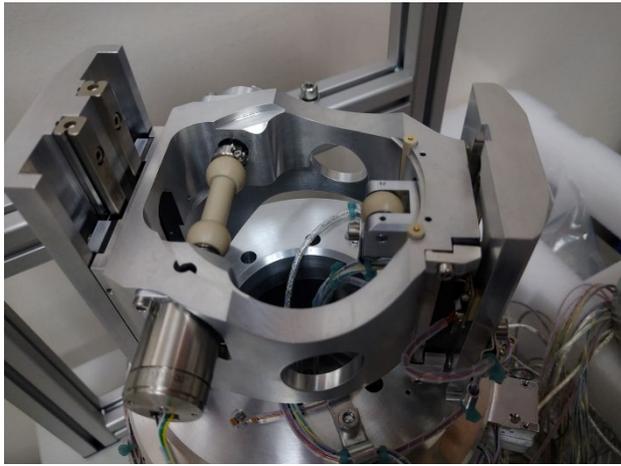


圖 6-9、Rotation axis #1

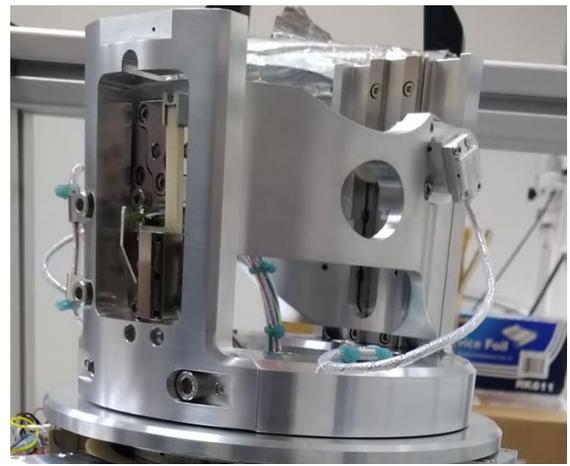


圖 6-10、Linear unit #2



圖 6-11、5 軸座控制器(Controller for 5-axis)



圖 6-12、標準片載台、夾爪及基座如設計圖

ITRI 5-axes UHV manipulator

Factory Acceptance Test

performed at Heason Technology Ltd. / Slinfold UK

Date: 23.10.2019

ITRI 5- axes UHV Non-Magnetic Manipulator

Number in ITRI Spec.	Axis index	Type	Range	Step Resolution *	Spec Repeatability	Repeatability measured		abs. U <= in units
						average *	maximal *	
#1	5	Rotation	Infinite	0.0006°	0.006°	2 counts	2 counts	0.000282°
#2	4	Linear (vertical)	27 mm	0.000061 mm	0.00061 mm	2 counts	2 counts	0.000122 mm
#3	2	Rotation	370°	0.0001°	0.001°	2.2 counts	4 counts	0.0004°
#4	1	Linear (horizontal)	60 mm	0.0001 mm	0.001 mm	2 counts	2 counts	0.0002 mm
#5	0	Rotation	100°	0.0001°	0.001°	3.4 counts	7 counts	0.0007°

Note: Step Resolution definition is the encoder Resolution - see chart below

Specification of position Repeatability U: $U <= 10 * Resolution / (10 counts)$

System loaded with Silicon Sphere of mass =1 kg

Number in ITRI Spec.	Axis index	Type	Range	Step Resolution **	actual Encoder Resolution
#1	5	Rotation	Infinite	0.000140625 °	Sin-Cos type, 2500 lines / rev. X 1024
#2	4	Linear (vertical)	27 mm	0.000061 mm	digital, 2 lines / mm, x 8.192
#3	2	Rotation	370°	0.0001°	digital, 18000 lines / revolution, x 4 x50
#4	1	Linear (horizontal)	60 mm	0.0001 mm	digital, 50 lines / mm , x 4 x50
#5	0	Rotation	100°	0.0001°	digital, 18000 lines / revolution, x 4 x50

** as given by encoder resolut.

Repeatability test performed by moving a certain distance: L = +/- 30° for rotary axes, (#0, #2, #5)

Moving L = +/-10mm on Z-Axis (#2) and L= +/-20 mm for X-axis (#1)

Taking average of 10 movements, and taking the absolute maximal deviation

All axes passed Repeatability Specifications.

Test of Homing procedure

Number in ITRI Spec.	Axis index	passed
#1	5	o.k
#2	4	o.k
#3	2	o.k
#4	1	o.k
#5	0	o.k

Test of Limit switches

Number in ITRI Spec.	Axis index	passed
#1	5	no Limit Switches
#2	4	no limit Switches
#3	2	left-right Lim. Swit.
#4	1	left-right Lim. Swit.
#5	0	left-right Lim. Swit.

Numbering of axes: # 1-5

Signed: Giora Baum

Date: 23.10.2019

Technische Beratung Dr.-Ing. Giora Baum

Location: Heason Technology Ltd. Slinfold, UK

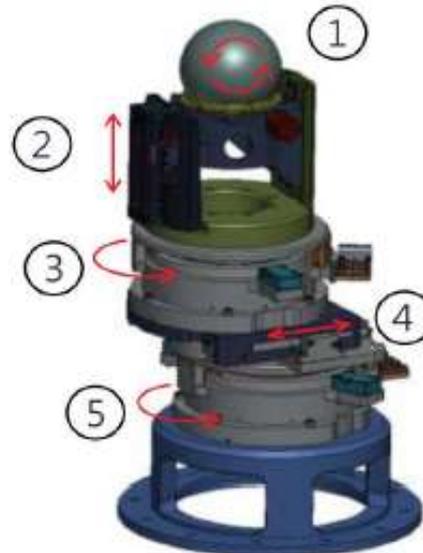



圖 6-13、五軸矽晶球移動座出廠測試報告

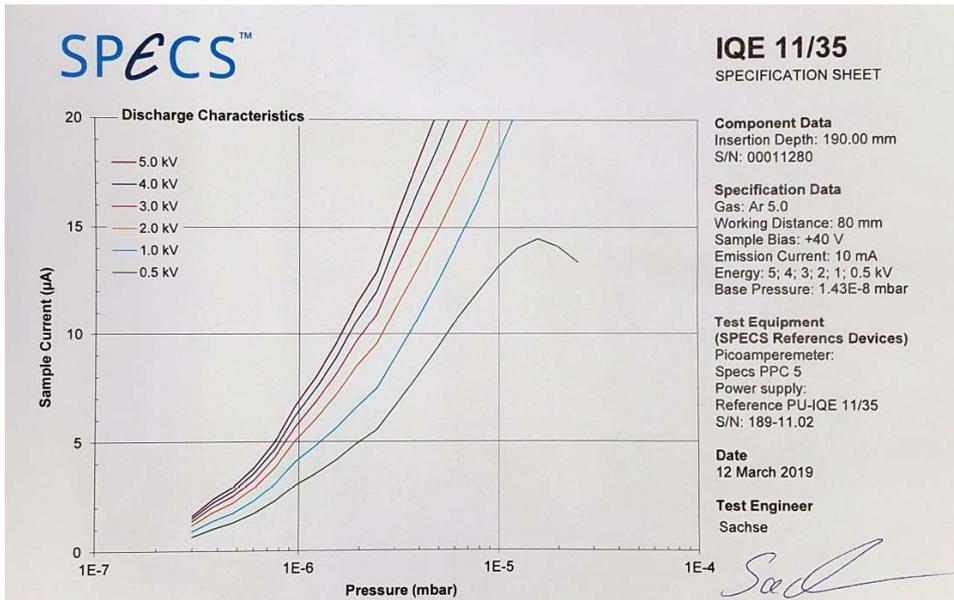


圖 6-14、IQE 11/35 Ion Source 測試報告

PS IQE 11-A
Test Report

SPECS™

IQE 11-A Serial number: 869-18.04

Reference IQE 11/35 Serial Number: 00016262 (not shipped)

Functional Tests Passed?

Standby

Degas

Performance Tests

Max. Ion Currents Reached?

Above 10µA @ 500 eV

Above 30µA @ 3 keV

Emission Regulation Passed?

3 mA, 6 mA, 10 mA

All tests were performed using an IQE 11/35 ion source and a faraday cup.

Additional remarks: _____

Date: 16.04.2019 Test Engineer: Sachse

Rev.: 1.0 Page 1 of 1

圖 6-15、IQE 11/35 Ion Source 電源供應器(IQE 11-A)測試報告

Flood Gun FG 22/35

Component Data

Flood Gun S/N: 00015742

Test Equipment (SPECS Reference Devices)

Power Supply FG 500-A S/N: 023-18.01

Picoammeter Specs PPC-5

Specification Data

Sample Area: 4 cm²
 Working Distance: 40 mm
 Base Pressure: 8.2E-9mbar

Working Test

Table 1 lists the sample current for several electron energy settings, together with the other dependent parameters.

Electron Energy [eV]	Extractor Voltage [V]	Filament Current [A]	Emission Current [μA]	Sample Current [μA]	
				Grounded	Biased (+9V)
2.0	31	2.30	100	-5.80	-25.0
5.0	79	2.16	100	-13.0	-35.3
10	158	2.14	100	-10.1	-23.4
10	699	2.13	100	-14.5	-31.4
10	699	2.32	1000	-28.0	-81.6
50	699	2.32	1000	-196	-258
100	699	2.32	1000	-191	-345
200	699	2.31	1000	-204	-390
300	699	2.31	1000	-215	-402
400	699	2.31	1000	-228	-411
500	699	2.31	1000	-239	-415

Table 1: Sample current for various electron energies

Date: 19.03.2019

Test Engineer: Sachse

Signature



圖 6-16、電子中和槍組件出廠測試報告(1)

Flood Gun Power Supply FG-500-A

Component Data

Power Supply S/N 023-18.01

Power Supply Firmware Version V:04.03

Test Equipment (Reference Devices)

Reference Flood Gun FG 22 S/N 00015742

Remote connection via RS232/HyperTerminal

Power supply equipped with
 remote control interface?

Operational Test

Working parameters (Extractor Voltage, Filament Current, Emission Current, Sample Current) are compared with typical values from a reference PS.

@ 10 eV electron energy @ 500 eV electron energy Max. sample current (@ E = 500 eV, I_{em} = 5000μA): >2000 μA

Remote Interface Test (RS232 and CAN)

Device info (INFO ?) V:04.03 07/04/11 11:15:55

Serial number (SERNO ?) 000009DC1D5828

SET and QUERY commands working DAC calibrated

Date: 19.03.2019

Test Engineer: Sachse

Signature:



圖 6-17、電子中和槍組件出廠測試報告(2)

【國際技術比較】

技術或量測系統名稱	技術領先國家/單位現況	計畫執行完成狀況	市場需求狀況
矽晶球表層質量量測技術	德國PTB表層質量量測不確定度小於10 µg	完成矽晶球表層質量量測評估，表層質量量測範圍大於10 µg，相對擴充不確定度≤30%。	此技術為全新之晶圓表面成分分析技術，後續可應用於半導體相關產業。

【後續工作重點】

後續將繼續完成新質量系統相關技術建置，包含：

- 完成二氧化矽標準試片氧沉積量校正曲線量測，二氧化矽標稱厚度為2 nm至10 nm之間。
- 完成矽晶球表層各元素(C、Si、O)比例分布量測。
- 完成矽晶球表層質量量測與不確定度評估，相對標準不確定度≤15%。

1. 完成二氧化矽標準試片氧沉積量校正曲線量測，二氧化矽標稱厚度為2 nm至10 nm之間。

以 X-ray 射源量測 SiO₂ 標準試片螢光頻譜以建立“單位面積氧沉積質量(ng/cm²)”與“螢光頻譜強度”的擬合曲線，作為以“矽晶球”螢光頻譜訊號取得矽晶球表層單位面積氧沉積質量之參考。其方法為量測五個不同厚度的 SiO₂ 標準試片(2 nm、4 nm、6 nm、8 nm、10 nm)之螢光頻譜 Si K_α 與 O K_α 的積分強度，並結合 PTB 之關於標準試片之氧沉積量校正報告，利用 Sherman's equation 擬合氧沉積量與強度比值的線性關係：

$$md_o = -\frac{G}{\mu_{tot}} \ln(1 - C_0 R_{Osi} \mu_{tot}) \quad (6-12)$$

其中

md_o : 單位面積的氧沉積量(ng/cm²)，以 PTB 校正報告為參考；

G : 幾何參數，與入射角與出射角相關，在此種入射幾何下=1；

R_{Osi} : Si K_α 與 O K_α 的積分強度比值；

μ_{tot} : 吸收係數(Total Mass Attenuation Coefficient)，此樣品為 7292 cm²/g。

利用擬合軟體解出校正因子(Calibration Factor C_0)，再以此擬合曲線作為矽晶球表層氧質量的參考。矽晶球 XRF 之量測頻譜訊號擷取後，會與前述 SiO₂ 標準試片之擬合曲線進行比對(外插)，定出矽晶球表層單位面積之氧沉積量(圖 6-18)。

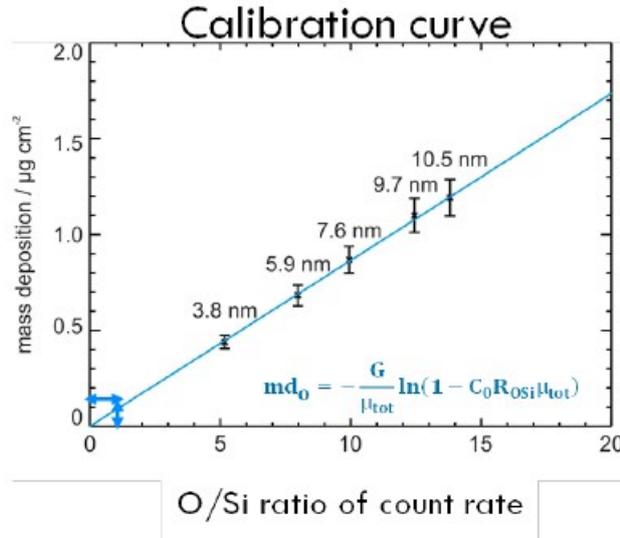


圖 6-18、單位面積氧沉積量(µg/cm²)與 XRF O/Si 強度比值的線性擬合示意圖

2. 完成矽晶球表層各元素(C、Si、O)比例分布量測

XPS 光電子頻譜技術是一種用於測定材料中元素的組成，以及其中所含元素化學態和電子態的量測技術。分析材料中被激發之光電子所具有之動能可以回推電子所屬的原子種類與能階公式如下所示：

$$E_{binding} = E_{photo} - (E_{kinetic} + \varphi) \quad (6-13)$$

其中 $E_{binding}$ 為電子之束縛能、 E_{photo} 為入射光能量、 $E_{kinetic}$ 為光電子動能、 φ 為功函數。量測矽晶球表層光電子頻譜，可得矽晶球表層之元素組成，如圖 6-19 所示：矽晶球表層質量之分析，所關注的是 O 1s、C 1s 以及 Si 2p 三種元素的光電子頻譜細部掃描，O 1s、C 1s 以及 Si 2p 之光電子積分強度經過歸一化之後可與原子數目做連結，進而得到矽晶球各元素(C、Si、O)比例分布情形，公式如下所示：

$$I'_{jA} = \frac{I_{jA}}{\sigma_{jA} \cdot \lambda(KE) \cdot T(KE)} \quad (6-14)$$

其中 I_{jA} : 元素 A，第 j 個光電子的積分強度

σ : 原子吸收截面(Cross-Section)

λ : 光電子非彈性平均自由徑(Inelastic Mean Free Path of the Photoelectron)

T : 透射函數(Transmission Function)

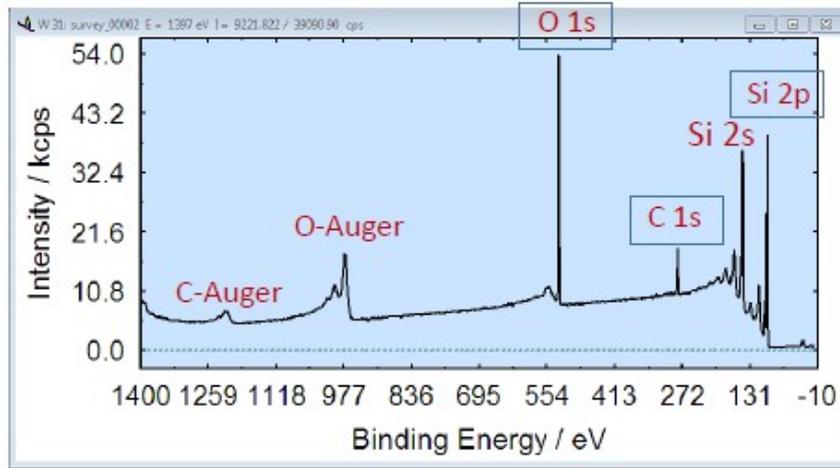


圖 6-19、矽晶球的大範圍的 XPS 光電子頻譜量測

3. 完成矽晶球表層質量量測與不確定度評估，表層質量相對標準不確定度 $\leq 15\%$ 。
 - (1) 完成矽晶球表層質量量測與不確定度評估，每次量測皆使樣品回復至大氣環境，再度抽真空擷取 XRF 數據後分析 O/Si 強度比之變化情形。矽晶球表層質量不確定度評估主要由 XRF 的不確定度為基礎，XPS 各元素質量的不確定度由 XRF 衍生而來，其中 XRF 螢光頻譜量測再現性評估方式為數周內多次使用整合式 XRF XPS 系統量測矽晶球表層質量，包含重新放置樣品以及抽真空的流程，並依據量測結果計算再現性之不確定度。
 - (2) 矽晶球表層不確定度評估模式已建立，後續將以矽晶球於整合式 XPS XRF 表層量測系統之量測結果帶入進行評估。

【結論與建議】

新質量標準建置已於今年度完成整合型 X 射線光電子頻譜技術(X-ray Photoelectron Spectroscopy)與 X 射線螢光頻譜技術(X-ray Fluorescence Spectroscopy)表層分析儀之系統整合、矽晶球表層質量之評估模式的建立，並且以不純物的缺陷質量、莫耳質量、晶格常數、表層質量與矽晶球球核體積評估矽晶球整體質量與其不確定度，評估結果 ($m_{sphere} = (1 \text{ kg} + 78.3734 \text{ mg}) \pm 0.0241 \text{ mg}$) 與 PTB 的質量校正報告非常接近 ($1 \text{ kg} + 78.41 \text{ mg}$ ，擴充不確定度 0.05 mg)，顯示了我們評估模式之正確性。

下一年度的工作著重於以整合式 XPS XRF 表層質量量測系統完成矽 28 矽晶球與二級矽晶球質量標準之表層質量量測，由於整體表層質量分析需擷取矽晶球表面 240 個不同位置之 XPS 與 XRF 頻譜再進行後續分析，且需重複多次量測才能進行再現性評估，因此為縮短量測時程，設計出一套最有效率的量測模式並且將各模組調整至最佳是接下來的挑戰。另外，公斤共識值(CV)將透過前三次公斤實現比對結果計算而得，屆時我們須重新建立質量追溯鏈，在此之前我們須整合矽清球清洗、量測矽晶球表層質量、矽晶球與不鏽鋼標準件於真空環境中進行質量比較，以及真空至大氣吸附效應量測之整體流程，以利後續質量之導引與傳遞。

(二) 新溫度標準建置分項

【本年度目標】

整體新溫度標準建置之目標為建立聲學氣體溫度計技術與絕對輻射溫度量測技術，重新定義與修正水三相點以及其他定點囊的熱力學溫度與不確定度，並傳遞給接觸式熱電偶溫度計量測系統與非接觸式輻射溫度計量測系統，以實現符合新定義要求之溫度標準，並因應未來國際新溫標 ITS-20xx 之實行。

本計畫擬進行第二階段聲學氣體溫度計及絕對輻射溫度量測次系統建立，目標如下：

1. 聲學氣體溫度計量測次系統建置(II)

將延續「106 年經濟部科技計畫分攤款」及「107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫」之工作，繼續發展建立聲學氣體溫度計，並藉助定點量測系統的水三相點溫度為參考溫度，決定 T_{90} (fixed-point)、 T_{90} (interpolation) 相對應熱力學溫度之修正值，以使 ITS-90 連結至新定義。

- 溫度範圍：213 K ~ 505 K
- 量測不確定度： $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k = 1$)

2. 絕對輻射溫度量測次系統建置

建置絕對輻射溫度量測次系統，確定高溫共晶點溫度下，我國熱力學溫度 T 與現行國際溫標 ITS-90(T_{90}) 之差，實現金屬-碳高溫共晶點熱力學溫度標準。整體絕對輻射溫度標準將建立溫度範圍 800 °C 至 3000 °C 之鈷碳(Co-C, 1324 °C)、鈀碳(Pd-C, 1492 °C)、銻碳(Re-C, 2474 °C) 等 3 組金屬-碳共晶點標準，本計畫期程之目標如下：

- 完成高溫黑體爐設備與標準傳遞件(線性高溫計)採購：
 - a. 高溫黑體爐溫度範圍(1000 ~ 3000) °C
 - b. 標準傳遞件(線性高溫計)波長 0.65 μm 及 0.9 μm ，溫度範圍(800 ~ 3000) °C
- 完成 Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C) 高溫共晶定點囊設備採購
- 依 CCT-WG5 (國際度量衡局溫度諮詢委員會第 5 工作組) 要求，完成 Co-C(1324 °C) 共晶定點囊短期重複性評估，重複性 ≤ 20 mK
- 完成建立絕對式輻射溫度計及相關參數追溯：
 - a. 波長 650 nm 及 900 nm
 - b. 光源尺寸效應(SSE) < 0.05 % (於光源尺寸 3 mm 至 25 mm)

【執行成果】

1. 聲學氣體溫度計量測次系統建置(II)

(1) 系統組構與整合

聲學氣體溫度量測系統由主架構、儀表放置架、局部放置架、氣體處理系統、管路系統、溫度計六大部分所組構。詳如圖 6-20 其中主架構包括核心共振腔、壓力艙、與真空腔；儀表主放置架安裝了除微波分析儀、壓力儀錶以外之所有儀表；局部放置

架只安裝微波分析儀和壓力儀錶；氣體處理系統主要處理工作氣體的純化與壓力控制、流量控制，還有真空腔抽氣；管路系統則包括低溫使用之 Julabo 冷卻裝置與將工作氣體排出之排氣幫浦；溫度計包括安裝在共振腔體的囊型白金電阻溫度計(Capsule Standard Platinum Resistance Thermometer, CSPRT)與模擬待校溫度計之長型標準白金電阻溫度計(Long-Stem Standard Platinum Resistance Thermometer, Long-Stem SPRT)。

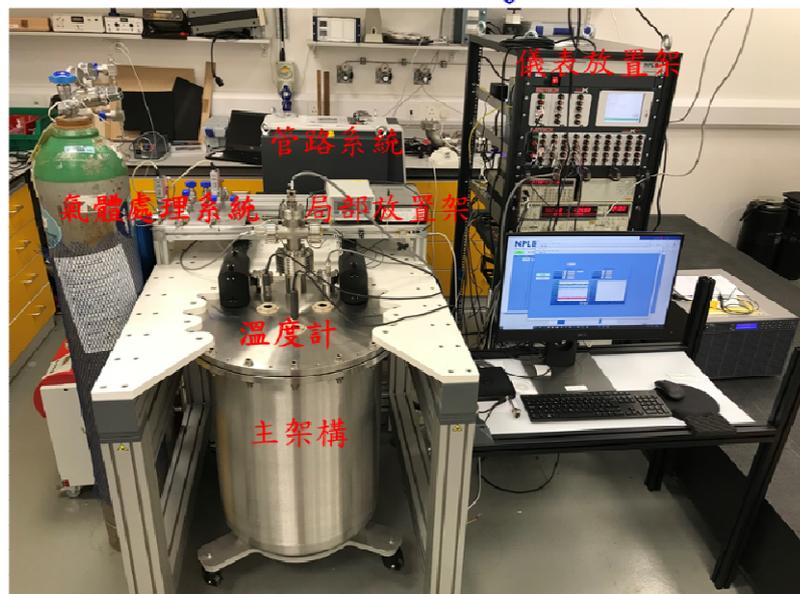
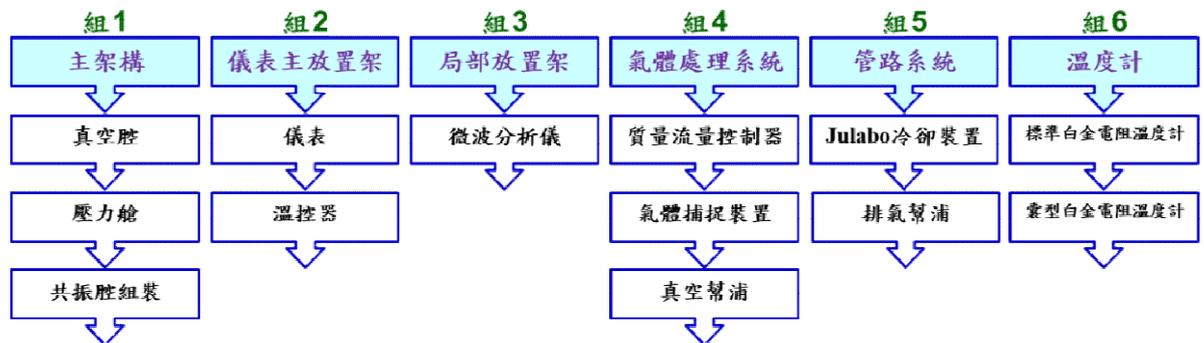


圖 6-20、聲學氣體溫度量測系統六大組構

考量實驗室空間，規劃聲學氣體溫度量測系統如圖 6-21，隔間牆內將放置 Julabo 冷卻裝置、真空幫浦、和排氣幫浦，除了考慮隔絕噪音，也方便將幫浦排出的氫氣接管連接到後方的排氣管路(未顯示於圖 6-21)。然後利用冷卻裝置的冷卻管和 2 個幫浦的 bellow 管，穿過隔間牆之孔洞(內襯塑膠內管防止損害牆面)，分別連接到隔間牆外側的主架構、真空腔、與管路系統上。NML/CMS 氣體檢測次系統與聲學氣體溫度量測系統之整合則藉由雙方之前討論後設計預留的 port 互相連結如圖 6-22。設計前就和 NPL 研究員 Robin 取得共識，且在 NPL 方之聲學氣體溫度量測設備的連接 port，係選擇在氣體純化之後進入共振腔之前，以確保所分析的氣體與進入共振腔的氣體是相同的。

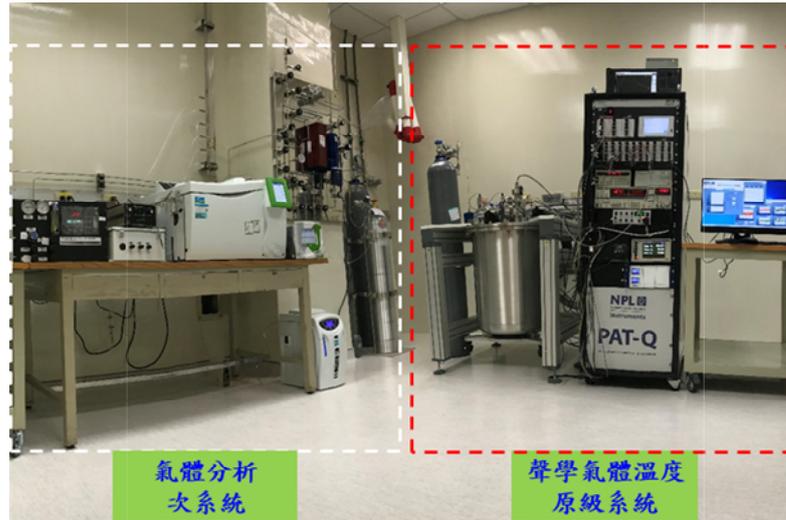


圖 6-21、聲學氣體溫度量測系統實驗室空間

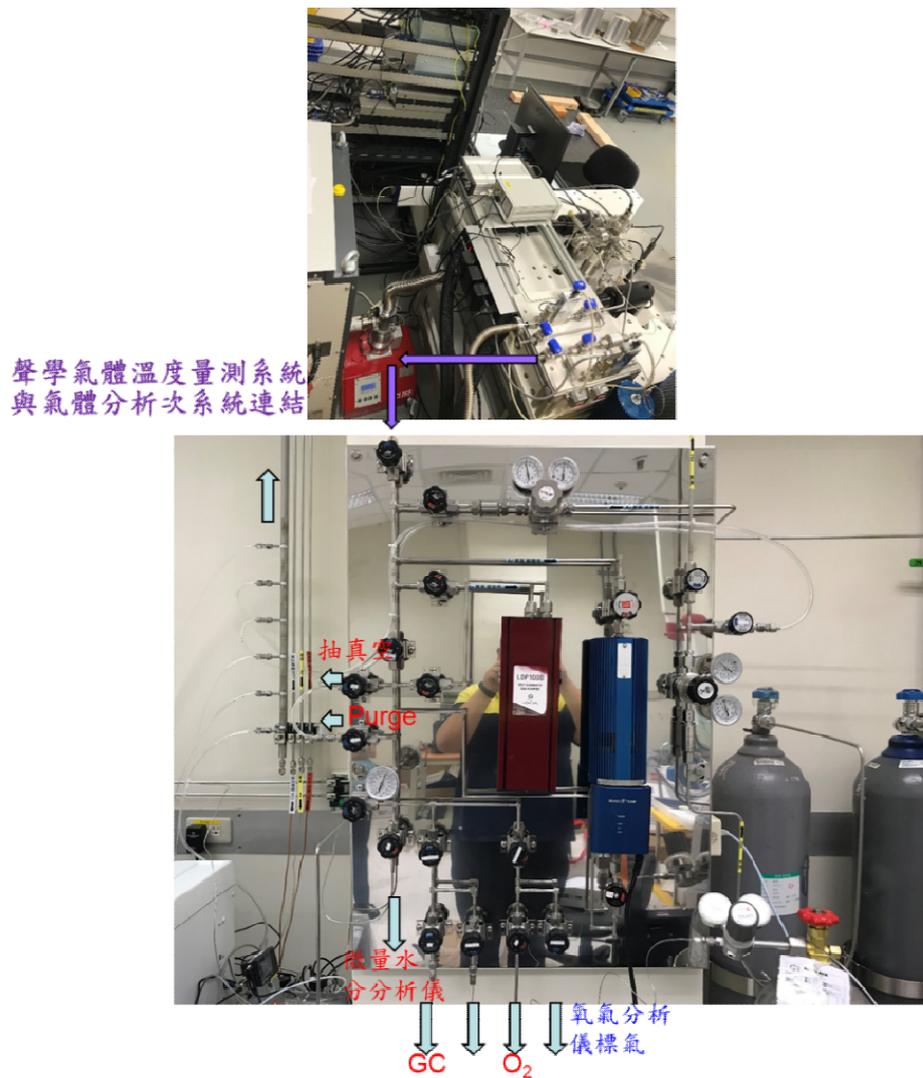


圖 6-22、整合 NML/CMS 氣體檢測次系統與聲學氣體溫度量測系統之連接示意圖

(2) 測試結果

A. 溫度穩定度

利用各 2 支囊型白金電阻溫度計與長型白金電阻溫度計，進行溫度穩定度之測試，其中囊型白金電阻溫度計係置於共振腔的殼體中，長型白金電阻溫度計放置在溫度計套管(Thermowell)內，量測過程係控制在恆定壓力下進行。前者的溫度穩定度影響微波共振頻率與聲學共振頻率之量測結果，亦即將影響熱力學溫度之量測結果；後者可視為是待校溫度計量測熱力學溫度之穩定測試。

囊型白金電阻溫度計和長型白金電阻溫度計的自熱效應各約 0.3 mK 和 2 mK，圖 6-23 顯示已修正自熱效應的溫度穩定性量測結果，不僅囊型白金電阻溫度計 sub-mm 的溫度穩定性顯示聲學氣體測溫法(Acoustic Gas Thermometry, AGT)呈現相當高的穩定度，且 2 支長型白金電阻溫度計彼此間具良好的一致性說明了不同位置所量熱力學溫度之一致性。

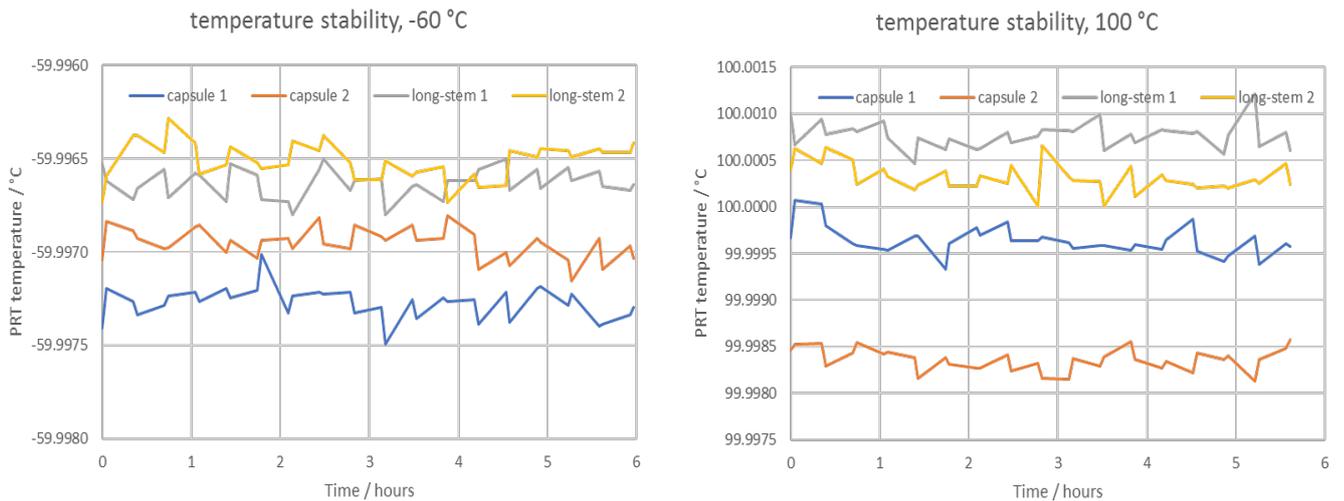


圖 6-23、CSPRT(capsule)和長型 SPRT(long-stem)呈現高穩定度的 AGT 與徑向熱力學溫度量測一致性

B. 溫度計沒入深度測試

全長 150 mm 的 Thermowell，改變長型 SPRT 之沒入深度，量測沒入深度改變所對應之溫度變化，以測試沒入深度效應。圖 6-24 顯示 -60 °C 和 100 °C 溫度下，降低 90 mm 和 80 mm 範圍內的沒入深度，溫度的變化不超過 1 mK。

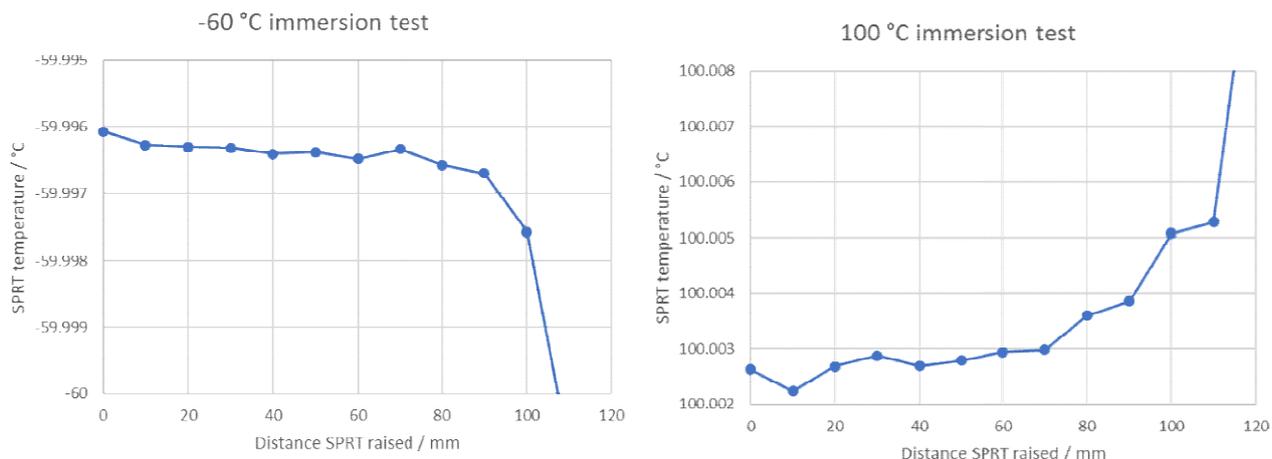


圖 6-24、-60 °C 和 100 °C 溫度下，降低沒入深度之溫度變化

C. 微波共振頻率決定半徑結果

微波共振頻率法量測共振腔的等效半徑 $a_{eq} = \frac{c/n\xi_m}{2\pi f_m}$ (f_m :微波共振頻率, c :光速, n :折射率, ξ_m :本徵值), 等效半徑隨不同氣壓的線性斜率是共振腔材料可壓縮性(compressibility)的結果; 外插到 0 氣壓的等效半徑才是共振腔的真實等效半徑。TM11 模態受表面擾動效應影響較其他模態強烈, 等效半徑因此較其他模態高了約 12 nm, 故予以忽略不計, 其他模態所得之等效半徑則有很高之一致性。

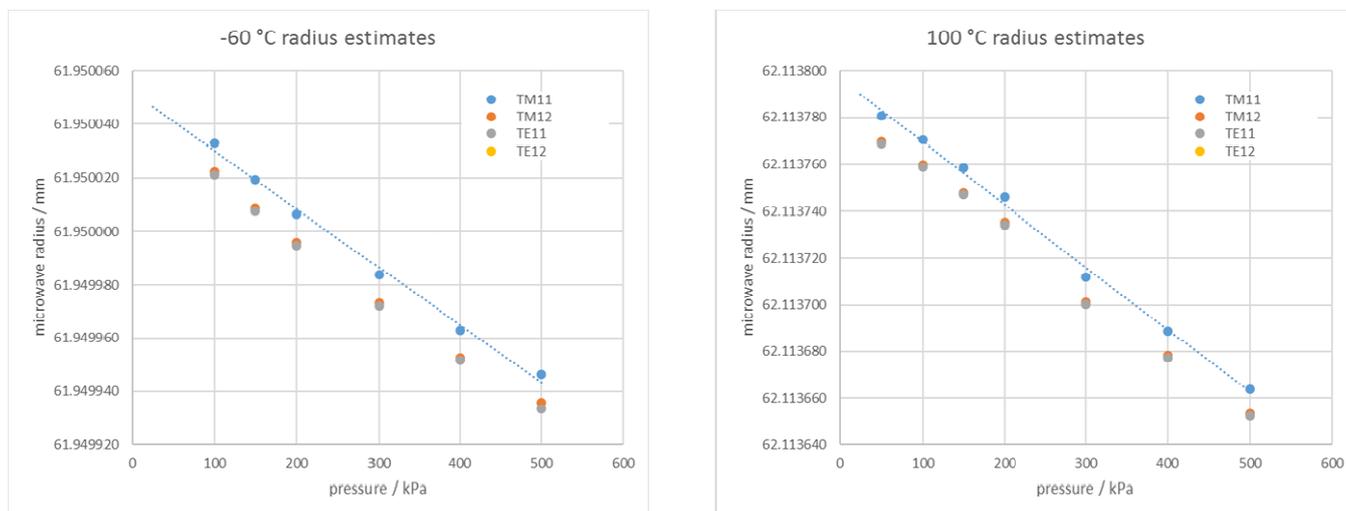


圖 6-25、相同氣壓下不同模態(除了 TM11 模態)所得之等效半徑相近

D. 聲速測試與熱力學溫度量測結果

為了得到精確之結果, 通常必須考慮到 Third order term, 因為聲速係溫度與壓力的函數, 若根據 Gillis and Moldover Model, 則 $u^2(T, p) - A_3p^3 = u_0^2 + A_1p +$

$A_2 p^2$ ，其中 u_0 為擬合到零氣體壓力 p 之聲速，且 A_1 、 A_2 亦由擬合所得， A_3 則根據氫維里係數(Virial Coefficients)計算所得，最後由零氣體壓力之聲速 u_0 推導出熱力學溫度 T ，如下表所示

$u_0^2/(m/s)^2$	Stdev u_0^2 (n modes)	$u_0^2(T)/u_0^2(TPW)$	T/K relative	T/K absolute
94756.09	0.24 (6)	1	273.16	273.15934
73938.38	0.06 (5)	0.7803021	213.14932	213.14682
129442.99	0.13 (6)	1.3660651	373.1543	373.15345

2. 絕對輻射溫度量測次系統建置

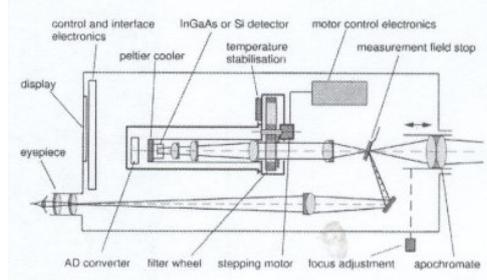
(1) 完成高溫黑體爐設備與標準傳遞件(線性高溫計)採購：

- A. 高溫黑體爐溫度範圍(1000 ~ 3000) °C
- B. 標準傳遞件(線性高溫計)波長 0.65 μm 及 0.9 μm ，溫度範圍(800 ~ 3000) °C

完成高溫共晶點黑體爐(1000 ~ 3000) °C、Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C)等 3 組高溫共晶定點囊設備採購。黑體爐廠牌/型號為 CHINO/IR-R80，共晶定點囊廠牌/型號分別為 CHINO/IR-R80CO, CHINO/IR-R80PT, CHINO/IR-R80RE 驗收紀錄摘要如表 6-7，其中高溫黑體爐最大工作溫度為 3000 °C。該爐體測試溫度範圍係以銻碳(Re-C, 2474 °C)高溫共晶定點囊之熔化溫度條件為依據作為驗機測試條件。

表 6-7、驗收紀錄摘要表

項目內容	契約驗收規格	實測值/測試結果
超高溫定點黑體爐		
1	廠牌/型號: CHINO/IR-R80 或同規格品	實點超高溫定點黑體爐 1 台 廠牌 CHINO 型號 IR-R80，日製
	黑體熱源開口尺寸: $\phi 30$ mm	實測開口尺寸: $\phi 30$ mm
	溫度範圍: 1000 °C~2800 °C	實測溫度可達 2800 °C
	溫控感測器: 熱電偶(Wre5-26)@ $T \leq 800$ °C，光纖溫度計 (CHINO/IR-FASNNN)@ $T \geq 800$ °C 以上	參考交付手冊 其中以光纖溫度計 (CHINO/IR-FASNNN)取代熱電偶 @ $T \geq 800$ °C，優點為該光纖溫度計 可量測溫度超過 800 °C之範圍

	溫度再現性: $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	溫度再現性: $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 參考爐體測試報告 (FSS12-18147-9)
	昇/降溫時間: $800\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 約 1 小時; 冷卻 $670\text{ }^{\circ}\text{C/h}$	實測升溫至 $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 約 1 小時; 冷卻 $670\text{ }^{\circ}\text{C/h}$
2	共晶點黑體定點組	
(1)	鈷碳合金: $1324\text{ }^{\circ}\text{C}$ 廠牌/型號 CHINO/IR-R80CO 或同規格品 尺寸: 黑體開孔 3 mm, 外徑(24 ± 1) mm, 長度(45 ± 1) mm 檢附原廠校正/測試報告乙份	實點定點金屬鈷碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80CO 黑體開孔 3 mm, 外徑 24 mm, 長度 45 mm 已提供原廠測試報告乙份
(2)	鉑碳合金: $1738\text{ }^{\circ}\text{C}$ 廠牌/型號 CHINO/IR-R80PT 或同規格品 尺寸: 黑體開孔 3 mm, 外徑(24 ± 1) mm, 長度(45 ± 1) mm 檢附原廠校正/測試報告乙份	實點定點金屬鉑碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80PT 黑體開孔 3 mm, 外徑 24 mm, 長度 45 mm 已提供原廠測試報告乙份
(3)	銻碳合金: $2474\text{ }^{\circ}\text{C}$ 廠牌/型號 CHINO/IR-R80RE 或同規格品 尺寸: 黑體開孔 3 mm, 外徑(24 ± 1) mm, 長度(45 ± 1) mm 檢附原廠校正/測試報告乙份	實點定點金屬銻碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80RE 黑體開孔 3 mm, 外徑 24 mm, 長度 45 mm 已提供原廠測試報告乙份
線性高溫計(LP4)		
1	廠牌/型號: KE/LP4 或同規格品	實點線性高溫計 1 套 廠牌 KE 型號 LP4 序號 80-94
2	其他配件: Filter(1/HEB) for Si detector: 650/10 nm; 750/15 nm; 850/10 nm; 900/20 nm ND filter: 650 nm 800 nm 900 nm(hard coated IAD technology manufactured) target filed stop: 0.17 mm/0.3 mm/0.42 mm diameter. lamp: check the position analogue output: 0 V to 10 rise time to 90% change approximately 500 ms. 出具原廠報告(須含主要規格)	如原廠報告 Filter (1/HWB) for Si detector, ND filter, target field stop 在設備內部如下圖, 另一 target filed stop 如附件 

(2) 依 CCT-WG5 (國際度量衡局溫度諮詢委員會第 5 工作組)要求，完成 Co-C(1324 °C)共晶定點囊短期重複性評估，重複性 ≤ 20 mK

本計畫首先對進行 Co-C 定點之短期重複性評估：以高溫黑體爐(以下內文中簡稱 IR-R80)：廠牌/型號(CHINO/IR-R80)作為加熱爐，對共晶點囊進行加熱。量測 Co-C(1324 °C)定點時，以線性高溫計(LP4)作為溫度量測工具，直接對 IR-R80 進行對位讀取爐內共晶點囊之溫度。依據國際建議經驗值，IR-R80 爐溫設定的條件大都落在共晶點熔化溫度的正負 30 °C 上下。本計畫設定 1340 °C 作為熔化時之爐體溫度條件，1262 °C 作為囊共晶達成凝固點之爐體溫度條件。完整之 Co-C 熔化點曲線圖如圖 6-26 所示。圖中可明顯看到當完成熔化後再次降溫時，共晶點必須出現一個明顯的超冷點，依據經驗法則，若此點不出現，表示本次實驗失敗，無法取得有效的熔化點溫度作為溫度實現。在不確定度評估中，重複性量測結果如圖 6-27 所示。熔化轉折點計算採用 3 次回歸曲線，微分 2 次為零的點作為轉折點，如圖 6-27 中標示▲處。

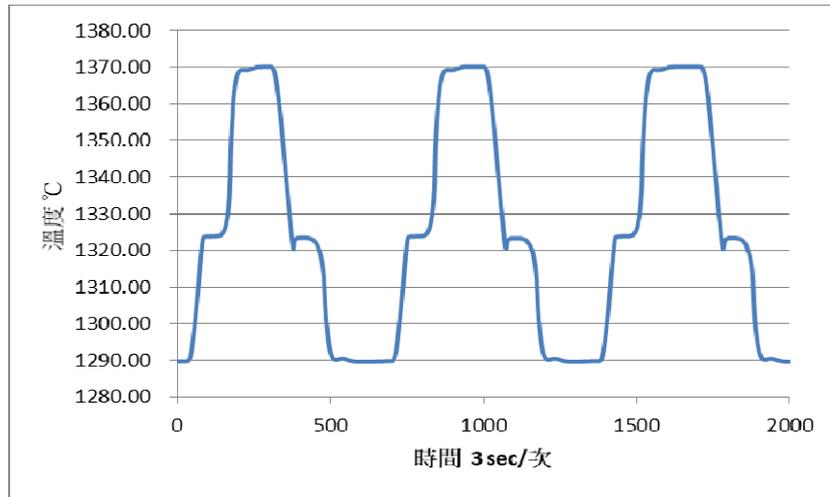


圖 6-26、Co-C 共晶點熔化圖

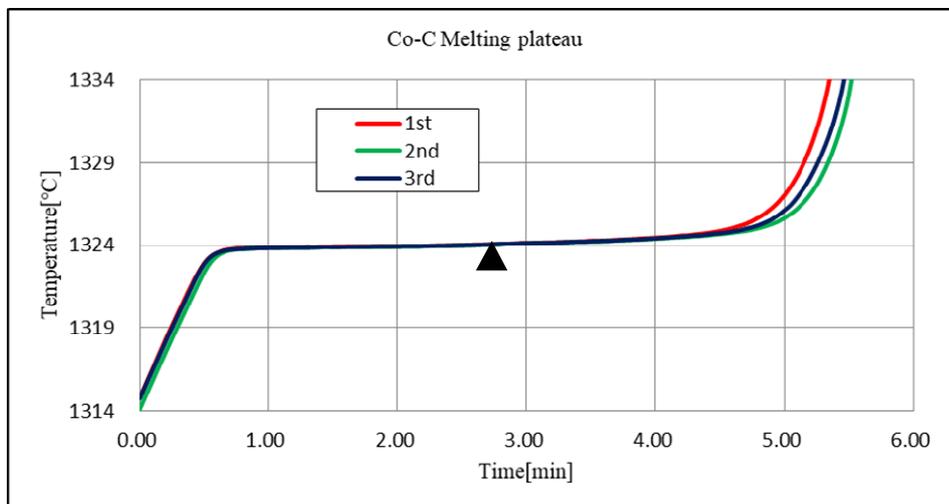


圖 6-27、Co-C 共晶點熔化轉折點重複性量測

Co-C 共晶點 3 次熔化點數據計算如表 6-8 所示。每次取約 330 秒之數據進行平台平均值與標準差計算。利用 3 次平台平均值作為當次重複性的標準不確定度。共晶定點囊短期重複性評估，重複性為 15 mK(≤ 20 mK)，達成計畫目標。

表 6-8、Co-C 定點熔化點重複性數據表

Co-C	第一次熔化	第二次熔化	第三次熔化	平均
熔化區間	324 secs	333 secs	330 secs	329 secs
轉折點(POI) T(°C)	1324.10	1324.13	1324.11	1324.11
標準差(°C)				0.015

(3) 完成建立絕對式輻射溫度計及相關參數追溯：

- A. 波長 650 nm 及 900 nm
- B. 光源尺寸效應(SSE)< 0.05 % (於光源尺寸 3 mm 至 30 mm)

絕對輻射溫度係指黑體輻射亮度需透過絕對法量測後再進行計算，本計畫首先針對黑體表面輻射亮度之相關參數進行說明，輻射亮度之定義如下：

$$L_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{\partial^3 \Phi(\lambda; \theta, \phi)}{\partial A \cdot \cos \theta \cdot \partial \omega \cdot \partial \lambda} \quad (6-15)$$

其中 $\Phi(\lambda, \theta, \phi)$ 為該黑體表面所發出之電磁輻射通量

A 為該黑體表面積

θ 為該黑體表面法線與該線連接到表面中心所張之角度

ω 為該黑體輻射通量所涵蓋之立體角

λ 為該黑體輻射之波長

由直流光電線性高溫計(Linear Pyrometer)量測黑體輻射所得之訊號可表示為：

$$\partial^3 S = R(\lambda) \cdot d^3 \Phi = R(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot L_{\lambda} \cdot \partial A \cdot \cos \theta \cdot \partial \omega \cdot \partial \lambda \quad (6-16)$$

其中 $R(\lambda)$ 為該直流光電線性高溫計內偵測器之頻譜響應(Spectral Response)

$\tau(\lambda)$ 為該直流光電線性高溫計內干涉式濾波片(Interference Filter)之頻譜穿透率(Spectral Transmittance)

由於該直流光電線性高溫計內干涉式濾波片之穿透率頻譜寬度會直接影響絕對法測量之結果，因此本計畫分別針對關鍵參數：波長響應 $\tau(\lambda)$ 以及偵測器之頻譜響應 $R(\lambda)$ 進行追溯校正。

絕對式輻射溫度計之頻譜穿透率，係利用經汞燈校正之雙光柵光譜儀，進行波長校正。校正結果波長 650 nm 之分光響應如圖 6-28，波長 900 nm 之分光響應圖 6-29。直流光電線性高溫計內偵測器之頻譜響應則是利用冷凍輻射計進行絕對偵測器響應校正。校正結果如表 6-9。

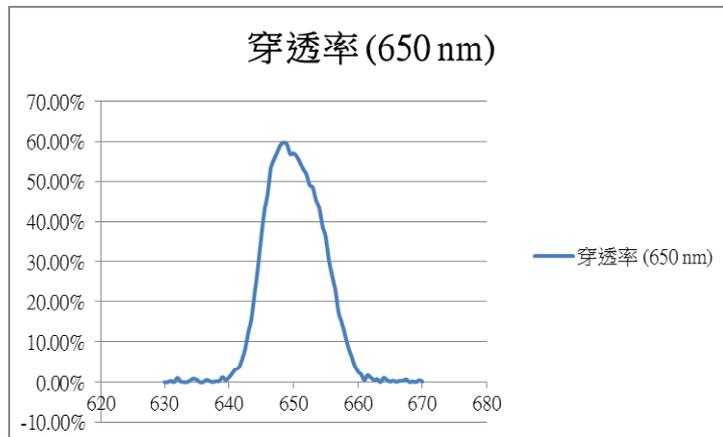


圖 6-28、波長 650 nm 之分光響應

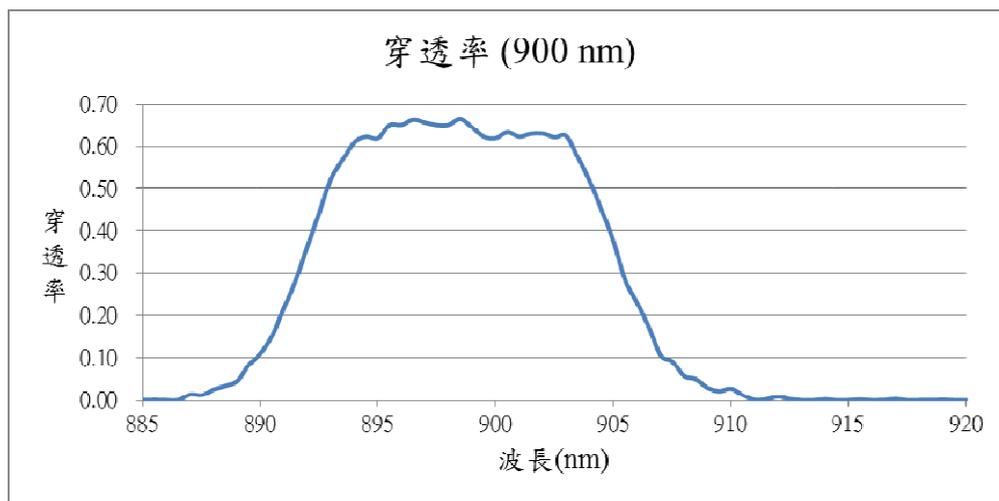


圖 6-29、波長 900 nm 之分光響應

表 6-9、偵測器絕對響應校正結果

波長 (nm)	分光響應 (A/W)	波長(nm)	分光響應 (A/W)
600	0.4865	780	0.6283
610	0.4923	790	0.6356
620	0.4986	800	0.6449
630	0.5089	810	0.6528
640	0.5164	820	0.6615
650	0.5246	830	0.6781
660	0.5331	840	0.6828
670	0.5391	850	0.6837
680	0.5476	860	0.6969
690	0.5574	870	0.7001
700	0.5648	880	0.7103
710	0.5750	890	0.7184
720	0.5794	900	0.7233
730	0.5887	910	0.7297
740	0.5969	920	0.7383
750	0.6065	930	0.7469
760	0.6116	940	0.7558
770	0.6202	950	0.7571

由於直流光電線性高溫計可能將具有較大輻射面積之黑體，判定為具有較高之熱力學溫度，雖然該輻射面積不同之黑體，實際位於相同之熱力學溫度下，此現象稱為光源尺寸效應(Size of Source Effect, SSE)以下簡稱 SSE。造成光源尺寸效應之主要原因，係由不必要之輻射通量進入直流光電線性高溫計內。當輻射光源之尺寸較大時，會有較多不必要之輻射通量進入直流光電線性高溫計內，因而造成線性高溫計之誤判。進行絕對量測時，必須對此光源尺寸效應進行修正。由於本計畫所使用的黑體輻射源直徑為 3 mm，未來傳遞時所使用的輻射源最大不超過 25 mm，因此本研究僅進行 SSE 效應評估至最大尺寸 30 mm。式 6-17 為 SSE 計算量測之公式。

$$\sigma(d, d_0) = \frac{v(L, d) - (L, d_0)}{v(L)} \quad (6-17)$$

其中 d 為黑體光源尺寸

d_0 為光源中間黑點暗影的直徑

L 為輻射亮度

$v(L, d)$ 為 LP4 測量中心遮蓋輻射源直徑時的信號

$v(L, d_0)$ 為 LP4 測量直徑中心遮擋處(可變孔徑)的信號

量測計算後得到 SSE 如圖 6-30 所示。圖中橫座標代表所評估的光源尺寸，縱座標代表計算後的 SSE 效應。評估結果，SSE 於 30 mm 時為 0.032 %，符合計畫目標 SSE < 0.05 %。

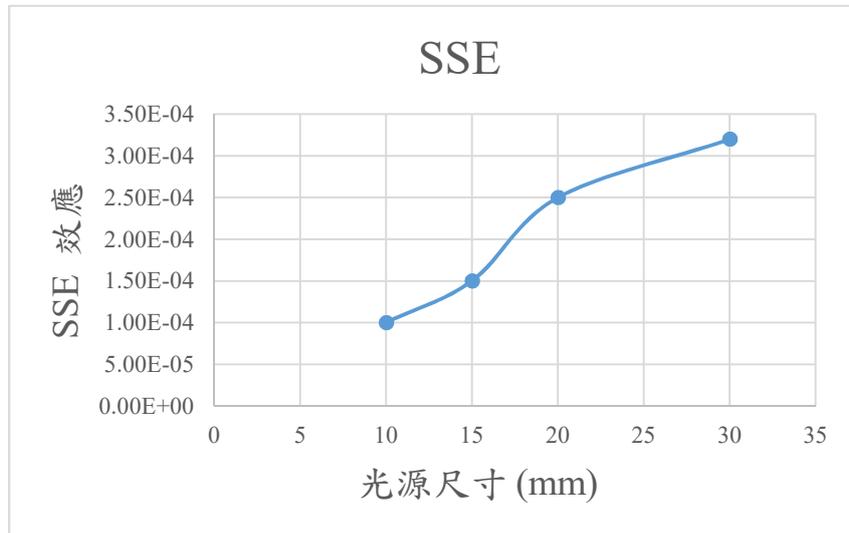


圖 6-30、光源尺寸效應量測結果

【設備採購說明】

單位：千元

設備名稱	預算金額	採購金額	驗收規格	驗收結果																										
聲學氣體溫度計設備	33,000	33,015	<ul style="list-style-type: none"> • (213-373) K 穩定度 ≤ ±3 mK • (373-505) K 穩定度 ≤ ±6 mK 	<ul style="list-style-type: none"> • (213-373) K 穩定度 ≤ ±1 mK • (373-505) K 穩定度 ≤ ±6 mK 量測不確定度： $u(T) \leq 2.0$ mK (涵蓋因子 $k=1$) 註：(穩定度×靈敏係數)影響共振頻率、壓力的量測不確定度，整體影響了熱力學溫度的量測不確定度。其中各別靈敏係數皆 < 1，故貢獻到熱力學溫度的量測不確定度之比重皆小於 1 倍，才能達到 2.0 mK 之不確定度。																										
氣體分析儀(II)	2,748	2,748	<ul style="list-style-type: none"> • 氫氣之不純物分析須能保證達到規格如下： <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Compound</th> <th>Min ppb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H₂</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>O₂</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Kr</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>Xe</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td>N₂</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>	Compound	Min ppb	H ₂	50	O ₂	50	Kr	50	Xe	50	N ₂	50	<ul style="list-style-type: none"> • 偵測極限達規範要求如下： <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Compound</th> <th>Min ppb</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H₂</td> <td><9.8</td> </tr> <tr> <td>O₂</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Kr</td> <td><6.7</td> </tr> <tr> <td>Xe</td> <td><10.8</td> </tr> <tr> <td>N₂</td> <td><10.0</td> </tr> <tr> <td>CO₂</td> <td><23.5</td> </tr> </tbody> </table>	Compound	Min ppb	H ₂	<9.8	O ₂	20	Kr	<6.7	Xe	<10.8	N ₂	<10.0	CO ₂	<23.5
Compound	Min ppb																													
H ₂	50																													
O ₂	50																													
Kr	50																													
Xe	50																													
N ₂	50																													
Compound	Min ppb																													
H ₂	<9.8																													
O ₂	20																													
Kr	<6.7																													
Xe	<10.8																													
N ₂	<10.0																													
CO ₂	<23.5																													

設備名稱	預算金額	採購金額	驗收規格		驗收結果	
			CO ₂	50	CO	<6.8
溫度定點裝備(II)	2,000	1,998	<ul style="list-style-type: none"> The metals inside all of the following cells shall have the purities of not less than 99.9999% and should be inclusive of the Certificate of Conformity provided by the manufacturer. 		<ul style="list-style-type: none"> Certification: Ga: 99.99999 % Sn: 99.9999 % Ag: 99.9999 % 	
精密電阻電橋	5,351	5,351	<ul style="list-style-type: none"> Guarantee the 30 ppb performance and provide evidence by calibrating the micro K with an Automatic Ratio Bridge Calibrator 		<ul style="list-style-type: none"> Linearity: 17.54 ppb 	
輻射超高溫校正系統設備(I)	22,300	22,300	<ul style="list-style-type: none"> 超高溫定點黑體爐 廠牌/型號:CHINO/IR-R80 或同規格品 共晶點黑體定點組 鈷碳合金:1324 °C 鉑碳合金:1738 °C 銻碳合金:2474 °C 線性高溫計(LP4) 廠牌/型號:KE/LP4 或同規格品 650 °C/10 nm, 900 °C/20 nm 		<ul style="list-style-type: none"> 實點超高溫定點黑體爐 1 台 廠牌 CHINO 型號 IR-R80, 日製 實點定點金屬鈷碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80CO 實點定點金屬鉑碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80PT 實點定點金屬銻碳合金 1 組 廠牌 CHINO 型號 IR-R80RE 實點線性高溫計 1 套 廠牌 KE 型號 LP4 序號 80-94 溫度規格檢附原廠測試報告符合驗收規格。 	

【國際技術比較】

技術或量測系統名稱	技術領先國家/單位現況	計畫執行完成狀況	市場需求狀況
聲學氣體溫度計量測系統	<ul style="list-style-type: none"> 美國 NIST 已建立 (273.15 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統 量測不確定度： $u(T) \leq 1.8 \text{ mK}$ (涵蓋因子 $k=1$) 英國 NPL 已建立 (120 ~ 573) K 聲學氣體溫度計量測系統 量測不確定度： $u(T) \leq 2.0 \text{ mK}$ 	<ul style="list-style-type: none"> 建立 (213 ~ 505) K 聲學氣體溫度計量測系統 量測不確定度： $u(T) \leq 2 \text{ mK}$ (涵蓋因子 $k=1$) 	<ul style="list-style-type: none"> 提供 kelvin 新定義之熱力學溫度標準，確保符合國際相互認可體系之要求

	(涵蓋因子 $k=1$)		
絕對輻射溫度量測系統	<ul style="list-style-type: none"> •日本 NMIJ 高溫共晶點系統，量測不確定度： Co-C, $u(T)=0.23\text{ }^{\circ}\text{C}(k=2)$ Pt-C, $u(T)=0.33\text{ }^{\circ}\text{C}(k=2)$ •英國 NPL 高溫共晶點系統，量測不確定度： Co-C, $u(T)=0.22\text{ }^{\circ}\text{C}(k=2)$ Pt-C, $u(T)=0.32\text{ }^{\circ}\text{C}(k=2)$ 	<ul style="list-style-type: none"> •建立(800~3000) $^{\circ}\text{C}$ 高溫輻射溫度計定點量測系統 •量測不確定度： Co-C(1324$^{\circ}\text{C}$), $u(T)\leq 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}^{\#}$ (涵蓋因子 $k=1.94$) 註：由於今年評估不確定度時間有限，部分數據參考原廠的保守資料(數值較大)，未來將這些不確定度源進行重新評估後，將縮小量測不確定度。 	<ul style="list-style-type: none"> •提供 kelvin 新定義之高溫熱力學溫度標準(銀定點以上)，確保符合國際相互認可體系之要求

【後續工作重點】

新溫度已完成設備採購及實驗室環境改善，後續重點工作包含

聲學氣體溫度計

- 氫氣寄送到其他專門機構(例如 KRISS)進行同位素分析，得到工作氣體平均莫耳質量，以完整建立聲學氣體溫度絕對式原級測溫技術。
- 與其他 NMI(例如義大利 INRiM)進行熱力學溫度雙邊比對。
- 聲學氣體溫度量測系統不確定度評估。

絕對輻射溫度計

- 完成鈷碳 Co-C、鉑碳 Pt-C 及銻碳 Re-C 等高溫輻射共晶點之定點評估，確保符合國際相互認可體系之要求。
- 將標準向下傳遞至溫度(800-3000) $^{\circ}\text{C}$ 之業界使用的高溫輻射範圍，並提供國內產業所需之服務。

【結論與建議】

採取高溫共晶點之溫度實現，可滿足與國際標準達成一致，我國已踏出成功的第一步，不會與歐美各大國之設備相差太懸殊。接下來維持與提供國內業界標準為長期抗戰，因為高溫定點的實現需有高水準的技術，高成本的投入與成熟經驗始能為之。

(三)新電流標準建置分項

【本年度目標】

整體新電流標準擬建置(1)免液氦量化霍爾電阻系統(QHR)(量測不確定度 $< 6 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$)，(2)用於微電流標準之高電阻電橋系統(高電阻量測範圍：100 k Ω to 1 T Ω ，電阻校正不確定度 $< 100 \mu\Omega/\Omega$)，(3)用於大電流標準之低電阻電橋系統(低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω ，電流量測範圍 100 A to 1000 A，電阻校正不確定度 $< 50 \mu\Omega/\Omega$)，以搭配約瑟夫森電壓標準，建立符合產業需求並與新定義接軌之電流標準。

由於本科發基金計畫經費配比以「新質量」及「新溫度」標準建置為優先，在考量經費額度下，於新電流標準項目，規畫建置可於大電流下量測之低電阻電橋系統，以搭配約瑟夫森電壓標準，導出大電流標準。目標如下：

- 完成應用於大電流標準之低電阻電橋系統採購及驗收，低電阻量測範圍 0.1 m Ω to 1 Ω ，電流量測範圍 100 A to 1000 A，電橋之比率準確度 $< 6 \times 10^{-6}$ 。
- 完成低電阻電橋系統之大電流校正程序建立。

【執行成果】

1. 完成應用於大電流標準之低電阻電橋系統採購及驗收

應用於大電流標準之低電阻電橋系統於 107 年 7 月 26 日完成採購規範書之規格制訂及系統請購，並於 107 年 8 月 13 日完成系統訂購。該系統已於 107 年 12 月 14 日到貨，並實機測試確認系統皆符合相關規格要求，包含：(1)電阻電橋量測範圍為 1 $\mu\Omega$ to 1 Ω 、(2)最大量測電流為 1000 A、(3)電橋比例量測準確度小於 6×10^{-6} 。低電阻電橋系統實體照片如圖 6-31 所示，系統主要新購設備包含：直流電流源、範圍擴充器(Range Extender)、反向開關(Reversing Switch)、直流大電流分流器。依據實驗室實測結果確認該等新購設備可搭配 NML 現有之直流電流比較器電橋(MI 6010D)、掃描切換器(MI 4220A)及其量測軟體使用，符合大電流精密量測需求。

依據出廠報告確認，系統電流量測範圍為 100 A 至 1000 A，恆電流輸出電壓(Compliance Voltage)最高為 DC 3.3 V，電阻電橋量測範圍為 1 $\mu\Omega$ to 1 Ω ，符合規格與量測需求。另外，依據實測結果可知，如表 6-10，我們以直流大電流分流器(廠牌型號為:H.TINSLEY/4638)作為待校件，其電阻標稱值為 0.1 m Ω 。當系統量測電流為 300 A，量測比例為 1：10 時，每組實驗數據之重覆量測次數設定為 25 次，共取 4 組實驗數據作平均而得到電阻量測值為 0.0999575 m Ω 。該電阻量測值再與其電阻校正值(0.0999570 m Ω)作比較與估算，可得電橋比例量測準確度為 5×10^{-6} ，優於規格需求(須小於 6×10^{-6})。



圖 6-31、低電阻電橋系統實體照片

表 6-10、低電阻電橋系統之比例量測準確度測試結果

項目	規格
廠牌/型號	H.TINSLEY/4638
序號	249728A
電阻標稱值	0.1 mΩ
測試電流	300 A
比例 (Ratio)	1:10
量測結果 1	0.09994323
量測結果 2	0.09994267
量測結果 3	0.09994338
量測結果 4	0.09994353
Ratio 平均值	0.09994320
電阻標準值(1 mΩ)	0.001000143
電阻量測值(0.1 mΩ)	0.0999575 mΩ
電阻原廠報告值	0.0999570 mΩ
電橋比率準確度	5×10^{-6}

此外，MI 原廠工程師於 107 年 12 月 20 日至 22 日提供本實驗室 3 人操作維護訓練共 3 天，符合需求。低電阻電橋系統亦於 107 年 12 月 25 日完成驗收，驗收時現場確認控制介面符合 IEEE 488.2 標準 GPIB 介面，符合規格需求。各項參數之驗收結果列於表 6-11 驗收規格及測試結果對照一覽表。

表 6-11、大電流低電阻電橋系統驗收規格及測試結果對照一覽表

項目內容 (依序詳列採購規範書項次及其名稱)	契約驗收規格 (依序詳列該項次契約規格內容)	實測值/測試結果 (填寫實際測試/樣品分析/丈量/清點數量/ 檢驗報告等方式獲得的數值)	合格/ 不合格 (判定 是否合 格)	備 考 (附註說 明)
1.	廠牌：Measurement International (MI) 大電流電阻電橋，包含：	實點廠牌 Measurement International (MI)之大電流電阻電橋，包含：	合格	
(1)	6014M (Range Extender, Ratio 1000:1) (1 Set) 搭配 keysight 6680A (1000 A Power Supply) (2 Set)	6014M (Range Extender, Ratio 1000:1) 一台 搭配 keysight 6680A (1000 A Power Supply)兩台	合格	
(2)	6027M (Reversing Switch) (1 Set)	6027M (Reversing Switch)一台	合格	
(3)	9332/3000 (Standard DC Current Shunt) (2 Set)	9332/3000 (Standard DC Current Shunt) 兩台	合格	出廠報告 (圖 6-32)
(4)	6650AF (High Resistance Meter) (1 Set)	6650AF (High Resistance Meter)一台	合格	出廠報告 (圖 6-33)
2.	須可搭配直流電流比較器電橋 (MI 6010D)及其量測軟體使用	實測確認可搭配直流電流比較器電橋 (MI 6010D)及其量測軟體使用	合格	
3.	Compliance Voltage：DC 3.3 V	實測 Compliance Voltage：DC 3.3 V	合格	
4.	電阻電橋量測範圍：1 $\mu\Omega$ to 1 Ω	實測電阻電橋量測範圍：1 $\mu\Omega$ to 1 Ω	合格	
5.	電流量測範圍 100 A ~ 1000 A	實測電流量測範圍：100 A ~ 1000 A	合格	
6.	比例量測準確度： $< 6 \times 10^{-6}$	實測比例量測準確度： 5×10^{-6}	合格	實驗室測 試結果 (表 6-10)
7.	控制介面：符合 IEEE 488.2 標準 GPIB 介面	現場確認控制介面符合 IEEE 488.2 標準 GPIB 介面	合格	
文件	廠商應提供： 1.試車報告 2.使用手冊 3.儀器出廠報告	廠商已提供： 1.試車報告 2.使用手冊 3.儀器出廠報告	合格	
訓練	廠商應提供本院 3 人操作維護訓練至少 3 天	廠商已於 107 年 12 月 20 日至 22 日提供 3 人操作維護訓練 3 天	合格	訓練紀錄

Hydro Québec
Institut de recherche

CLAS
ACCREDITED
CLAS 95-01

Certificate / Calibration report

Customer: WRIGHT SARAH MEASUREMENTS INTERNATIONAL 118, COMMERCE DRIVE PRESCOTT, ON K0E1T0	Certificate / Report # 1833004-18337 Instrument: SHUNT Manufacturer: MEASUREMENTS INT. Model: 9332/3000 Sérial # 1104282 Asset # 1833004
--	---

Condition As Received <input checked="" type="checkbox"/> In Good Condition <input type="checkbox"/> Damaged <input type="checkbox"/> Defective	As Returned <input checked="" type="checkbox"/> Without adjustment <input type="checkbox"/> With adjustment <input type="checkbox"/> With restriction(s) <input type="checkbox"/> Repaired <input type="checkbox"/> Other (see note)
---	--

Calibration Date: 2018-12-03 Due Date: 2019-12 <small>Due date is calculated based on customer's interval</small>	Temperature: (23 ± 1) °C Relative Humidity: (40 ± 10) % Calibration Site: L.E.R. Main Laboratory
---	---

The Calibration Laboratory Assessment Service (CLAS) of the National Research Council of Canada (NRC) has assessed and certified specific calibration capabilities of this laboratory and traceability to the International System of Units (SI) up to standards acceptable to the CLAS program. This certificate of calibration is issued in accordance to the CLAS conditions of certification granted by CLAS and the conditions of accreditation granted by the Standards Council of Canada (SCC). Neither CLAS nor SCC guarantee the accuracy of individual calibrations by accredited laboratories.

The uncertainties are expanded using a coverage factor k= 2 for a level of confidence of approximately 95%, assuming a normal distribution.

Note: This calibration certificate applies only to the item described. The value and the associated uncertainties apply to the measurements made at the time and under conditions specified and should not be interpreted as indicators of long term stability.

Standard used	Procedure used:	LER-PE-100-042A	Rev. 2	
IREQ#	Manufacturer	Model	Description	Due Date
1009801A	MEASUREMENTS INT.	8010D	PONT DE RESISTANCE	2019-05
1009801C	MEASUREMENTS INT.	8011D	100A RANGE EXTENDER	2019-05
1009801H	MEASUREMENTS INT.	8014M	3000A RANGE EXTENDER	2019-05
1518302	FLUKE	1525-T	THERMOMETRE	2020-12
36A108	L & N	4025-B	RESISTANCE ETALON 10 ohms	2019-08
36P0062	L & N	4210	RESISTANCE ETALON 1 ohm	2019-01

Calibrated by: Sylvain Desjardins	Date issued: 2018-12-04
Approved by: [Signature]	Technical supervisor

Copyright of this report is owned by the issuing laboratory and may not be reproduced other than in full except with the prior written approval of the issuing laboratory and the client. The delivery of this report does not imply in any manner whatsoever the endorsement by the calibration laboratory of the client's products or laboratory.

Laboratoire d'étalonnage de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec, 1800 Boul. Lionel-Boulet, Varmeres, QC, J3X 1S1
 Téléphone: 450-652-8100 Fax: 450-652-8041 Courriel: ler@iroq.ca

Page 1 of 2

Hydro Québec

Laboratoire d'étalonnage
Institut de recherche

Report#
1833004-18337

Shunt Calibration

Description: SHUNT, Measurements International 9332/3000
Calibration Conditions: (23 ± 1) °C

Test description

For the 300 A measurement, the result is an average of 3 series of measurements of 40 samples where the last 30 samples were kept for statistics.

For the 2250 A measurement, the result is an average of 3 series of measurements of 100 samples where the last 30 samples were kept when thermal equilibrium was obtain 40 minutes after the current was applied. A pause of 45 minutes between each of the 3 measurement series was also part of the test.

Current	Measured Value	Resistance Measurement Uncertainty	Temperature	Temperature Measurement Uncertainty
300 A	9.99731 µΩ	±15 µΩ/Ω	22.80 °C	±0.50 °C
2250 A	10.01173 µΩ	±30 µΩ/Ω	45.78 °C	±0.50 °C

-- END OF REPORT --

Institut de recherche d'Hydro-Québec, 1800 Boul. Lionel-Boulet, Varmeres, J3X 1S1
 Téléphone: 450-652-8100 Fax: 450-652-8041
 Courriel: ler@iroq.ca

Page 2 de 2

圖 6-32、直流大電流分流器(MI 9332/3000)出廠報告

Measurements International
Standards Calibration Laboratory

CERTIFICATE NO.:
C1181105

Certificate of Calibration

CUSTOMER NAME WAVETronic International Co., Ltd.	
CUSTOMER ADDRESS 10F.-2, No. 80, Sec. 1, Chengong Rd., Yonghe Dist., New Taipei City 234 Taiwan	
MEASURAND	MODEL NO.: 6650AF S/N.: 1104030
	MFG.: Measurements International DESCRIPTION: High Resistance Meter
CALIBRATION RANGE(S) OR POINTS COVERED BY THIS CERTIFICATE	CALIBRATION PROCEDURE
1M Ohm to 100T Ohm	6650AF,TR
REFERENCE STANDARD:	MODEL NO.: 6600A S/N.: 1101532
	MFG.: Measurements International DESCRIPTION: Dual Source High Resistance Ratio Bridge
CALIBRATED DATE: November 1, 2017	CERTIFICATE NO.: C1171191
ENVIRONMENTAL CONDITIONS:	
AMBIENT:	OF MEASURAND:
TEMPERATURE: 23 °C ± 2 °C	TEMPERATURE: 23 °C ± 0.05 °C
HUMIDITY: 24 % ± 10 %	HUMIDITY: 24 % ± 10 %
BAROMETRIC PRESSURE: 101 kPa	
UNCERTAINTY OF MEASUREMENT	
THE UNCERTAINTY OF MEASUREMENT IS ESTIMATED TO BE:	
The reported uncertainty of measurements presented in this certificate is based on the expanded uncertainty (k=2) of the measurand. The uncertainty is expressed as a percentage of the measurand value. The uncertainty is based on the measurement uncertainty budget (MUB) of the measurand. The uncertainty is based on the measurement uncertainty budget (MUB) of the measurand. The uncertainty is based on the measurement uncertainty budget (MUB) of the measurand.	
CALIBRATED BY (SIGNATURE): [Signature]	DATE OF CALIBRATION: November 1-10, 2018
	AUTHORIZING SIGNATURE: [Signature] DATE OF ISSUE: Nov. 21, 2018

The reported measurements are traceable to national standards and thus to the SI units.

© This certificate is copyright and may not be reproduced other than in full except with the prior written approval of Measurements International.
 Form: CAL-02-020-04 118 Commerce Drive, Prescott, Ontario K0E 1T0 Page 1 of 2

Measurements International
Standards Calibration Laboratory

CERTIFICATE NO.:
C1181105

Certificate of Calibration

TEST RESULTS				
Test Equipment				
9331 1MΩ sn 1101535, 9331 100MΩ sn 1101536, 9331G/100MΩ sn 1100821, 9331G/1G sn 1101372, 9331G/10GΩ sn 990806, 9331G/100GΩ sn 970411, 9331G/1TΩ sn 1102445, 9331G/10TΩ sn 1000806, 9331G/100TΩ sn 1102302				
This procedure is used to verify the performance of the 6650AF ranges. Test conditions for each range are indicated in Table 1 below.				
Before calibration was performed the 6650AF was allowed to stabilize for 24 hours to lab temperature. The standard resistors used were placed in their ideal environment to limit the effects of temperature. The 1M thru 100T standard resistors were placed in an air bath with a temperature of 23C ±0.1C throughout the measurement period.				
Table 1: Test Conditions (Settings)				
Value	Settle Time (Seconds)	Time between readings (Seconds)	Number of Readings per Measurement	Number of Readings for Statistics
1M	30	20	100	25
10M	30	20	100	25
100M	30	20	100	25
1G	30	20	100	25
10G	90	20	100	25
100G	120	20	100	25
1T	200	20	100	25
10T	1200	20	100	25
100T	2000	20	100	25
Table 2:				
Test Voltage (V)	Nominal Resistance	Measured Offset (%)	Uncertainty (%)	1 Year Uncertainty (%)
100	1M	-0.008	0.0001	0.125
100	10M	-0.002	0.0003	0.07
100	100M	-0.007	0.0002	0.1
100	1G	-0.003	0.0003	0.1
500	10G	0.017	0.0007	0.1
500	100G	-0.016	0.0002	0.35
500	1T	0.066	0.0008	0.35
500	10T	0.000	0.0027	1.025
750	100T	-0.139	0.0158	1.15
Measured Offset= Calibrated resistance value – Measured resistance value. The measurements are traceable to NIST.				
MEAN DATE OF MEASUREMENT: November 6, 2018				

© This certificate is copyright and may not be reproduced other than in full except with the prior written approval of Measurements International.
 Form: CAL-02-020-04 118 Commerce Drive, Prescott, Ontario K0E 1T0 Page 2 of 2

圖 6-33、電阻表(MI 6650AF)出廠報告

2. 完成低電阻電橋系統之大電流校正程序建立

本計畫所完成之低電阻電橋系統校正程序(技資編號:073840042)的低電阻電橋量測架構設計,乃以直流電流源搭配直流大電流範圍擴充器(比率有 1:10、1:100、1:1000 三組固定比率)提供校正所需之大電流,電流量測範圍為 100 A to 1000 A,並以直流電流比較器(DCC)電橋進行電阻量測,電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω,重覆量測次數則規劃為 25 次。低電阻電橋量測架構如圖 6-34 所示。

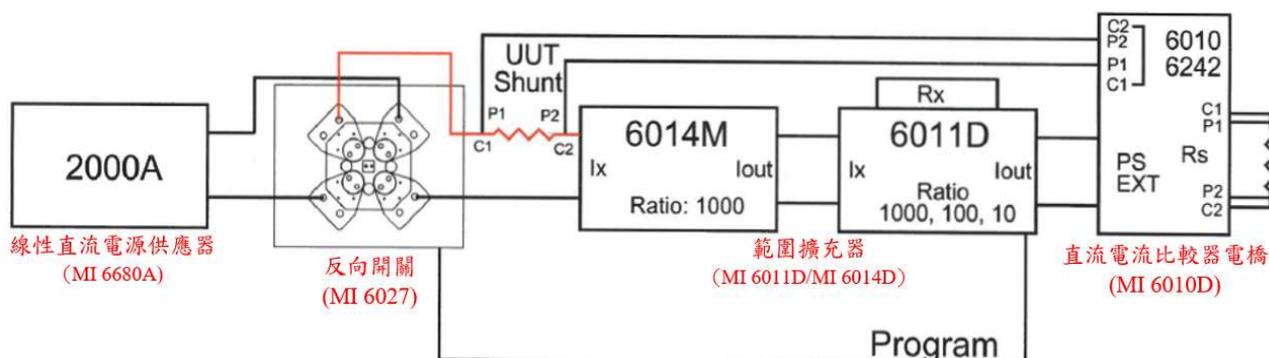


圖 6-34、低電阻電橋量測架構

另外,本計畫亦完成低電阻電橋系統之量測不確定度評估(技資編號:073840073),電阻器校正(0.1 mΩ)於大電流 100 A 至 1000 A 量測條件下之相對擴充不確定度為 35 $\mu\Omega/\Omega$ ($k=1.96$),符合計畫目標: $< 50 \mu\Omega/\Omega$ 。其中,以標稱值為 0.1 mΩ之電阻器為例,其 A 類相對標準不確定度 $u_r(A)$ 評估結果如表 6-12,大電流量測次數為 5 次。

表 6-12、0.1 mΩ電阻器之 A 類相對標準不確定度評估結果

電 流 值	100 A	300 A	500 A	700 A	1000 A
A 類相對標準 不確定度 $u_r(A)$ ($\mu\Omega/\Omega$)	0.2	0.4	0.4	0.8	1.5
自 由 度	4	4	4	4	4

至於低電阻電橋系統之 B 類相對標準不確定度源則包含:(1)直流電流比較器電橋比率不確定度、(2)標準電阻器之漂移不確定度、(3)溫度不穩定造成之不確定度、以及(4)追溯標準電阻器電阻值的不確定度。各評估結果分別說明如下:

(1) 直流電流比較器電橋比率不確定度 $u_r(r)$

標準值傳遞之電橋量測比率誤差 $u_r(r)$ 經實驗室評估為(0.1 至 0.5) $\mu\Omega/\Omega$,該值小於原廠規格。因此, $u_r(r)$ 乃依據原廠規格作保守估計,在量測 0.1 mΩ至 0.1 Ω時,直流電流比較器電橋加範圍擴充器之電橋比率量測不確定度在 0.1 mΩ至 0.001 Ω為 0.4

$\mu\Omega/\Omega$ 、 $0.01\ \Omega$ 至 $0.1\ \Omega$ 為 $0.3\ \mu\Omega/\Omega$ 。

經矩形分布計算可得相對標準不確定度 $0.1\ \text{m}\Omega$ 至 $0.001\ \Omega$ 為 $0.23\ \mu\Omega/\Omega$ 、 $0.01\ \Omega$ 至 $0.1\ \Omega$ 為 $0.18\ \mu\Omega/\Omega$ 。

(2) 標準電阻器之漂移率不確定度 $u_r(R_{s1})$

電阻校正範圍 $0.1\ \text{m}\Omega$ 至 $1\ \Omega$ 所採用之 $1\ \Omega$ 標準電阻器的年漂移率為 $0.1\ \mu\Omega/\Omega$ ，且每年由量化霍爾電阻標準系統校正兩次。因此，標準電阻器漂移造成之相對標準不確定度 $u_r(R_{s1})$ 為 $(0.1\ \mu\Omega/\Omega)/2=0.05\ \mu\Omega/\Omega$ ，自由度為 ∞ 。

(3) 溫度不穩定造成之不確定度 $u_r(R_{s2})$

標準電阻器須置於恆溫油槽中以減少環境溫度變化對標準電阻器電阻值之影響。恆溫油槽之溫度穩定度為 $\pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ ，此溫度變化極小，但乘以標準電阻器之溫度係數仍會造成標準電阻器電阻值一定程度變化，而偏離校正值。 $1\ \Omega$ 標準電阻器之電阻值溫度係數為 $2\ (\mu\Omega/\Omega)/^\circ\text{C}$ ，故恆溫油槽溫度變化不穩定度造成之不確定度計算結果如表 6-13。

此外，依據 NIST 提供之 $0.1\ \text{m}\Omega$ 電阻器溫度係數量測曲線，評估時所採用之 $0.1\ \text{m}\Omega$ 待校電阻器在量測電流範圍為 $100\ \text{A}$ 至 $1000\ \text{A}$ 的電阻值溫度係數為 $20\ (\mu\Omega/\Omega)/^\circ\text{C}$ ，而本實驗室環境溫度變化範圍為 $\pm 1.5\ ^\circ\text{C}$ ，故其造成 $0.1\ \text{m}\Omega$ 待校電阻器之溫度不穩定度不確定度計算結果如表 6-14。

表 6-13、 $1\ \Omega$ 標準電阻器因溫度不穩定造成之不確定度

標準電阻器 標稱值	電阻值溫度 係數($^\circ\text{C}$)	油槽溫度變化造成之不確定度 (矩形分布半寬) a	自由度	相對標準不確定度 $u_r(R_{s2}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$
$1\ \Omega$	$2\ \mu\Omega/\Omega$	$0.01 \times 2\ \mu\Omega/\Omega = 0.02\ \mu\Omega/\Omega$	∞	$0.012\ \mu\Omega/\Omega$

表 6-14、 $0.1\ \text{m}\Omega$ 電阻器因溫度不穩定造成之不確定度(量測電流 $100\ \text{A}$ 至 $1000\ \text{A}$)

標準電阻器 標稱值	電阻值溫度 係數($^\circ\text{C}$)	實驗室溫度變化造成之不確定度 (矩形分布半寬) a	自由度	相對標準不確定度 $u_r(R_{s2}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$
$0.1\ \Omega$	$20\ \mu\Omega/\Omega$	$1.5 \times 20\ \mu\Omega/\Omega = 30\ \mu\Omega/\Omega$	∞	$17.32\ \mu\Omega/\Omega$

(4) 追溯標準電阻器電阻值的不確定度 $u_r(R_{s3})$

1 Ω 標準電阻器之相對擴充不確定度經本實驗室評估為 $0.11 \mu\Omega/\Omega$ ($k=1.96$)，故系統追溯標準電阻器電阻值的相對標準不確定度 $u_r(R_{s3}) = (0.11/1.96) \mu\Omega/\Omega = 0.0556 \mu\Omega/\Omega$ 。

因此，綜合以上各項 A 類與 B 類量測不確定度評估結果，可得電阻器校正(0.1 m Ω)於大電流 100 A 至 1000 A 量測條件下之相對組合標準不確定度 $u_{r,c}$ 約為 $17.4 \mu\Omega/\Omega$ (詳如表 6-15)。最終，可得低電阻電橋系統之相對擴充不確定度 $U_r = u_{r,c} \times k = 35 \mu\Omega/\Omega$ ($k=1.96$)，確實符合計畫目標： $< 50 \mu\Omega/\Omega$ 。

表 6-15、電阻器 0.1 m Ω 之相對組合標準不確定度(量測電流 100 A 至 1000 A)

R_x	$u_r(A)$ ($\mu\Omega/\Omega$)		$u_r(r)$ ($\mu\Omega/\Omega$)	$u_r(R_{s1})$ ($\mu\Omega/\Omega$)	$u_r(R_{s2})$ ($\mu\Omega/\Omega$)	$u_r(R_{s2'})$ ($\mu\Omega/\Omega$)	$u_r(R_{s3})$ ($\mu\Omega/\Omega$)	相對組合標準 不確定度 $u_{r,c}$
0.1 m Ω	100 A	0.2	0.23	0.05	0.012	17.32	0.0556	17.33 $\mu\Omega/\Omega$
	300 A	0.4						17.33 $\mu\Omega/\Omega$
	500 A	0.4						17.33 $\mu\Omega/\Omega$
	700 A	0.8						17.34 $\mu\Omega/\Omega$
	1000 A	1.5						17.39 $\mu\Omega/\Omega$

值得一提的是，本計畫已於 108 年 6 月 24 日至 26 日完成低電阻電橋系統之第三者延展認證，經現場評鑑後，無不符合事項。同時，電量實驗室亦於 108 年 10 月 1 日取得全國認證基金會(TAF)核發之延展證書(編號：LN0688-190827)。圖 6-35 則為日本 NMIJ 評審員 Dr. Nobu-hisa Kaneko 與實驗室團隊之合影。

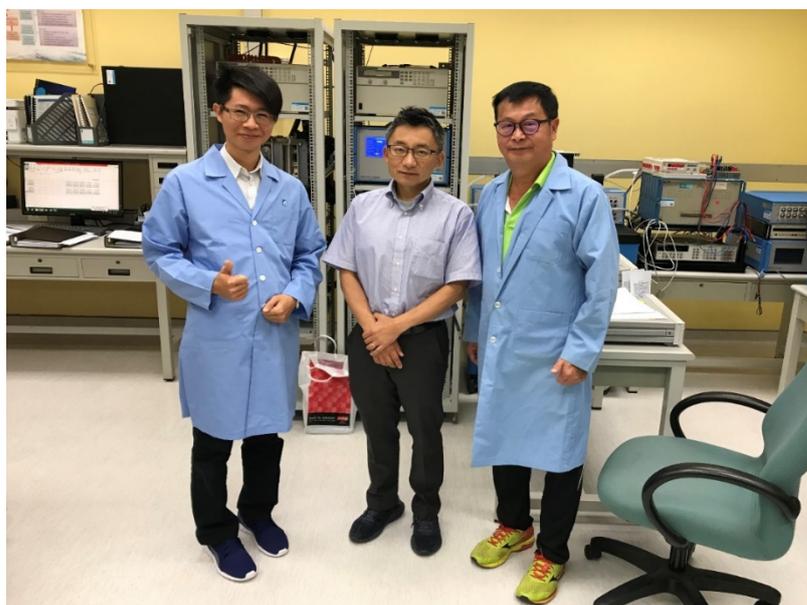


圖 6-35、日本 NMIJ 評審員 Dr. Nobu-hisa Kaneko 與實驗室團隊合影

另外，108 年 10 月 1 日亦完成低電阻電橋系統查驗會議，查驗委員共 3 位，分別為交大鄭晃忠教授(兼會議主席)、台科大吳瑞南教授以及台電綜合所蒲冠志副所長。系統查驗時委員們一致通過審查，系統可正式對外提供校正服務。

【設備採購說明】

單位：千元

設備名稱	預算金額	採購金額	驗收規格	驗收結果
大電流電阻電橋	4,200	4,180	<ol style="list-style-type: none"> 廠牌：Measurement International (MI)大電流電阻電橋，包含： <ol style="list-style-type: none"> 6014M (2000 A Range Extender, Ratio 1000:1) (1 Set) 搭配 keysight 6680A (1000 A Power Supply) (2 Set) 6027M (Reversing Switch) (1 Set) 9332/3000 (Standard DC Current Shunt) (2 Set) 6650AF (High Resistance Meter) (1 Set) 須可搭配直流電流比較器電橋(MI 6010D)及其量測軟體使用 Compliance Voltage：DC 3.3 V 電阻電橋量測範圍：1 mΩ to 1 Ω 電流量測範圍 100 A ~ 1000 A 比例量測準確度：$< 6 \times 10^{-6}$ 控制介面：符合 IEEE 488.2 標準 GPIB 介面 廠商應提供本院 3 人操作維護訓練至少 3 天 	<p>各項規格皆驗收合格，分別說明如下：</p> <ol style="list-style-type: none"> 實點廠牌 Measurement International (MI)之大電流電阻電橋，包含： <ol style="list-style-type: none"> 6014M (Range Extender, Ratio 1000:1)一台 搭配 keysight 6680A (1000 A Power Supply)兩台 6027M (Reversing Switch)一台 9332/3000 (Standard DC Current Shunt) 兩台 6650AF (High Resistance Meter) 一台 實測確認可搭配直流電流比較器電橋(MI 6010D)及其量測軟體使用 實測 Compliance Voltage: DC 3.3 V 實測電阻電橋量測範圍：1 μΩ to 1 Ω 實測電流量測範圍：100 A ~ 1000 A 實測比例量測準確度：5×10^{-6} 現場確認控制介面符合 IEEE 488.2 標準 GPIB 介面 廠商已於 107 年 12 月 20 日至 22 日提供 3 人操作維護訓練 3 天

【國際技術比較】

技術或量測系統名稱	技術領先國家/單位現況	計畫執行完成狀況	市場需求狀況
大電流低電阻電橋系統	美國NIST： 電流量測範圍(10 to 1200) A， 量測不確定度(20 to 50) μ A/A	最大量測電流為 1000 A， 量測不確定度 35 μ A/A	NML新建置之低電阻電橋系統，其最大量測電流可達1000 A，此量測範圍可使我國大電流標準於新定義實施後與國際同步。同時，亦能符合國內能源與電機產業的計量追溯需求(100 A 以上)
	中國NIM： 電流量測範圍(5 to 5000) A， 量測不確定度50 μ A/A		

【後續工作重點】

本計畫團隊未來仍將持續針對低電阻電橋系統作精進與改良，透過接線重新設計並搭配新的直流電流源，以期將目前系統最大校正電流從 1000 A 提昇至 2000 A。同時，團隊亦將針對系統在更大電流量測條件下(> 1000 A)，重新建立電阻器之溫度係數量測曲線，並研析電阻器因溫度不穩定而造成之不確定度，以完成最大校正電流可達 2000 A 之低電阻電橋系統的量測不確定度評估，藉此更加滿足國內能源與電機產業的計量追溯需求。

【結論與建議】

透過量化霍爾電阻原級標準所傳遞之低電阻標準，將直接影響大電流標準系統的追溯，其服務對象涵蓋國內半導體、材料、通訊、能源、電力、電機等產業。目前 NML 新建立之低電阻電橋系統，其最大量測電流可達 1000 A，此量測範圍不但可使我國大電流標準於新定義實施後與國際同步，更能符合國內能源與電機產業的計量追溯需求(100 A 以上)，對於國內產業有極大的貢獻。

七、 附件

附件一、計畫購置儀器設備彙總表

機關(學校)名稱：經濟部標準檢驗局

單位：新臺幣元

編號	儀器名稱 (英文名稱)	使用 單位	單位	數量	單 價	優先 順序	儀器廠牌及型號
1	矽晶球表層質量分析儀(III) (Silicon sphere surface layer mass analysis instrumentation(III))	工研院量 測中心	1	1	3,544,394	1	PTB/組裝
2	聲學氣體溫度計設備 (Acoustic Gas Thermometry (AGT) equipment)	工研院量 測中心	1	1	33,015,069	1	NPL/組裝
3	氣體分析儀(II) (Gas analyzer (II))	工研院量 測中心	1	1	2,748,000	1	PerkinElmer/Clarus 590GC
4	溫度定點裝備(II) (Fixed-point equipments (II))	工研院量 測中心	1	1	1,998,000	1	(1)鎂 Fluke/5943 (2)錫 Fluke/5905 (3)銀 Fluke/5908
5	精密電阻電橋 (Precision resistance bridge)	工研院量 測中心	1	1	5,351,000	1	(1)廠牌 GUILDLINE，包 含 3210T (Thermometry pre-heat auto-switch)及 6640T(Temperature bridge) (2)ISOTECH/MicroK GOLD
6	輻射超高溫校正系統設備 (I) (Ultra High-temperature Calibration System of Radiation Thermometers (I))	工研院量 測中心	1	1	22,300,000	1	(1)超高溫定點黑體 爐 CHINO/IR-R80 (2)定點金屬鈷碳合 金 CHINO/IR-R80C O (3)定點金屬鉑碳合 金 CHINO/IR-R80PT (4)定點金屬銻碳合 金 CHINO/IR-R80RE (5)線性高溫計 KE/LP4

編號	儀器名稱 (英文名稱)	使用 單位	單位	數量	單 價	優先 順序	儀器廠牌及型號
7	大電流電阻電橋 (High-current resistance bridge)	工研院量 測中心	1	1	4,180,000	1	廠牌：Measurement International (MI)包 含： (1)6014M (2000 A Range Extender, Ratio 1000:1) (1 Set) 搭配 keysight 6680A (1000 A Power Supply) (2 Set) (2)6027M (Reversing Switch) (1 Set) (3)9332/3000 (Standard DC Current Shunt) (2 Set) (4)6650AF (High Resistance Meter) (1 Set)
8	氬離子濺鍍槍與電子中和 槍組件 (Argon Ion Sputter Gun and Flood Gun Package)	工研院量 測中心	1	1	2,339,400	1	廠牌 Specs，包含 (1)IQE 11/35(氬離子 濺鍍槍) (2)FG 22/35(電子中 和槍)

填表說明：

1.本表中儀器名稱以中文為主，英文為輔。

附件二、出國暨赴陸會議人員一覽表

計畫書 項次	主要內容	出差機構/ 國家	期間	參加人 員姓名	在本計畫 擔任之工作	對本計畫 之助益
1	進行矽晶球表層質量 量測技術之國際合作 研究	德國聯邦物 理技術研究 院/德國柏 林	2019.3.2-2 019.3.31/ 30天	劉軍廷	SI 新質量研究	學習矽晶球表面質量 量測系統建置技術內容，內 容針對矽晶球表面污染 物以及元素定量研究，協 助我國建立新質量標準 系統。
2(1)	進行「靜態膨脹真空 原級標準技術」之技 術合作討論	德國聯邦物 理技術研究 院/德國柏 林	2019.1.18- 2019.2.3/ 17天	邱正宇	SI 新質量研究	瞭解並熟悉靜態膨脹整 體系統設計及操作維護 流程，並完成不確定度之 計算與評估工作。
2(2)	進行矽晶球表層質量 量測技術之國際合作 研究	德國聯邦物 理技術研究 院/德國布 倫瑞克、柏 林	2019.5.25- 2019.7.14/ 51天	邱正宇	SI 新質量研究	學習矽晶球表層質量 量測系統之建置技術、系統 整合及軟硬體設計原 理，及靜態膨脹系統建立 設計與軟、硬體系統整合 技術，以協助我國建立新 質量標準系統。
3	進行絕對輻射溫度計 熱力學溫標技術建立 之國際合作研究	•日本計量 研究院/日 本筑波 •CHINO/日 本東京	2019.2.13- 2019.3.14/ 30天	柯心怡	SI 新溫度研究	瞭解並熟悉絕對輻射溫 度計熱力學溫標技術，實 現高溫共晶點的熱力學 溫度標準，確定高溫共晶 點溫度下我國熱力學溫 度之實現，使我國進入國 際溫度計量的前瞻領域。

附件三、論文一覽表

期刊論文 5 篇、研討會論文 1 篇，總計 6 篇

項次	名稱	作者	會議/期刊名稱	發表日	頁數	國別	類別	資料編號	SCI IF 值
1	絕對溫度計之量測方法介紹-混合法 (hybrid method)	劉玟君,柯心怡	量測資訊雙月刊	20190301	4	中華民國	期刊	075A70146	0
2	NML 矽晶球原級質量標準簡介	曹琳,吳玉忻	量測資訊雙月刊	20190501	7	中華民國	期刊	075A80026	0
3	質量量測環境要求與新質量實驗室簡介	陳思絜,曹琳,吳忠霖	量測資訊雙月刊	20190501	7	中華民國	期刊	075A80027	0
4	低溫範圍下黑體紅外輻射特徵參數的測定	廖淑君,柯心怡,陳政憲,葉建志	TEMPMEKO	20190613	1	中國大陸	研討會	075A80039	0
5	熱電偶高溫共晶點的技術介紹	劉俊亨	量測資訊雙月刊	20190701	5	中華民國	期刊	075A80054	0
6	以聲學氣體溫度計實現克耳文重新定義後的原級溫度量測	蔡淑妃,徐瑋宏,何炳林	量測資訊雙月刊	20190701	6	中華民國	期刊	075A80056	0

附件四、研究報告一覽表

評估報告(MSVP)1份、校正報告(ICT)1份、技術報告9份，總計11份研究報告

項次	名稱	作者	產出日期	頁數	語言	機密等級	資料編號
1	直流電阻系統校正程序	韓宙勳	20190510	23	中文	非機密	073840042
2	直流電阻系統評估報告	韓宙勳	20190510	28	中文	非機密	073840073
3	日本國家計量院 / 產總研之客座研究報告	柯心怡	20190403	41	中文	非機密	073A80047
4	高溫定點黑體爐訓練紀錄	劉俊亨	20190807	41	中文	機密	073A80083
5	共振腔結構與元件組構之國際合作研究報告	蔡淑妃,徐瑋宏	20190802	31	中文	非機密	073A80118
6	聲學氣體溫度量測系統的氣體分析與管路盤面整合構建	徐瑋宏	20191204	13	中文	機密	073A80133
7	絕對/相對輻射溫度計之熱力學溫標研究	柯心怡,劉俊亨,廖淑君	20191204	32	中文	機密	073A80179
8	共晶點黑體操作程序書	廖淑君,柯心怡	20190814	21	中文	機密	073A80111
9	靜態膨脹法真空標準系統設計與初步測試結果	邱正宇,陳生瑞,潘小晞	20190102	12	中文	非機密	073A70229
10	矽漂移偵測器響應函數量測報告	吳玉忻	20191030	21	中文	非機密	073A80188
11	以無參考螢光頻譜技術量測二氧化矽標準試片氧沉積量之量測報告	吳玉忻	20191125	9	中文	非機密	073A80233

附件五、說明會一覽表

項次	名稱	舉辦期間 (起~迄)	舉辦地點	廠商家數	參加人數
1	108 年國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會	108.07.30-108.07.30	花蓮	21	60
2	108 年國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會	108.08.02-108.08.02	高雄	47	81
3	108 年國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會	108.10.02-108.10.02	臺中	50	75
4	108 年國際單位 SI 新標準建置成果及服務說明會	108.10.22-108.10.22	臺北	74	117
總計				192	333

附件六、名詞索引表

簡 稱	全 名	中文譯稱
AGT	Acoustic Gas Thermometry	聲學氣體測溫法
APMP	Asia-Pacific Metrology Programme	亞太計量組織
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures 《International Bureau of Weights and Measures》	國際度量衡局
CC	Consultative Committee	諮詢委員會
CCM	Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées	質量及相關量諮詢委員會
CCQM	Comité Consultatif pour la Quantité de Matière Consultative Committee for Amount of Substance – Metrology in Chemistry	物量諮詢委員會
CCT	Comité Consultatif de Thermométrie 《Consultative Committee on Thermometry》	溫度諮詢委員會
CGPM	Conférence Général des Poids et Mesures 《General Conference of Weights & Measures》	國際度量衡大會
CIPM	Comittee International des Poids et Mesures 《International Committee of Weights & Measures》	國際度量衡委員會
CIPM MRA	CIPM Mutual Recognition Arrangement	國際度量衡委員會相互認可協議
CMC	Calibration and Measurement Capabilities	校正與量測能量
CSPRT	Capsule Standard Platinum Resistance Thermometer	囊型白金電阻溫度計
EURAMET	the European Association of National Metrology Institutes	歐洲計量組織聯盟
FinFET	Fin Field-Effect transistor	鰭式場效電晶體
FTIR	Fourier-Transform Infrared Spectroscopy	傅立葉紅外光譜法
GAWG	Working Group on Gas Analysis	氣體分析工作小組
GaAs	Gallium Arsenide	砷化鎵
GC-FID	Gas Chromatography-Flame Ionization Detection	氣相層析火焰離子法
GPIB	general purpose interface bus	通用介面匯流排
IAWG	Working Group on Inorganic Analysis	無機分析工作小組
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer	感應耦合電漿質譜儀
ICT	Instrument Calibration Technics	校正程序
IDMS	Isotope dilution mass spectrometry	同位素稀釋質譜
IEC	International Electrotechnical Commission	國際電工委員會
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.	美國電機與電子工程師協會
IEK	Industrial Economics and Knowledge Center	產業經濟與趨勢研究中心
INRiM	Istituto Nazionale per La Ricerca Metrologica	義大利國家實驗室
ISO	International Organization for Standardization	國際標準組織
IPK	International Prototype of Kilogram	國際公斤原器

簡 稱	全 名	中文譯稱
AGT	Acoustic Gas Thermometry	聲學氣體測溫法
KC	Key comparison	關鍵比對
KRISS	Korea Research Institute of Standards and Science	韓國標準與科學研究院
LNE	Laboratoire national de métrologie et d'essais,	法國國家計量標準實驗室
LOD	Limit of Detection	偵測極限
MC-ICP-MS	Multi-collector Inductively-coupled Plasma Mass Spectrometer	多接收器感應耦合電漿質譜儀
MRA	Mutual Recognition Arrangement	相互承認協定
MSVP	Measurement System Validation Procedures	量測系統評估報告
NIM	National Institute of Metrology	中國計量科學研究院
NIMT	National Institute of Metrology(Tailand)	泰國國家計量研究院
NIST	National Institute of Standards and Technology	美國國家標準與技術研究院
NMI	National Metrology Institute	國家計量機構
NMIA	National Measurement Institute Australian	澳洲國家計量研究院
NMIJ	National Metrology Institute of Japan	日本國家計量研究院
NML	National Measurement Laboratory	國家度量衡標準實驗室
NPL	National Physical Laboratory	英國國家物理實驗室
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt 《Physikalisch Technische Reichsanstalt》	德國聯邦物理技術研究院
PWL	Physical Absorbed Water Layer	物理性吸附水氣層
QHR	Quantum Hall Resistance	量化霍爾電阻
SDD	Silicon Drift Detector	矽漂移偵測器
SI	International System of Units; Système International d'Unités	國際單位制
SPRT	Standard Platinum Resistance Thermometer	標準白金電阻溫度計
SSE	Size of Source Effect	光源尺寸效應
TAF	Taiwan Accreditation Foundation	財團法人全國認證基金會
TCEM	Technical Committee on Electricity and Magnetism	電磁技術委員會
TBT	Technical Barriers to Trade	技術貿易障礙
WG	Working Group	工作小組
XPS	X-Ray Photoelectron Spectroscopy	X 光光電子頻譜
XRCD	X-ray Crystal Density	X 射線晶體密度
XRF	X-Ray Fluorescence Spectroscopy	X 光螢光光頻譜

附件七、委員意見回復表

審查意見表

計畫名稱:國際基本單位 SI 新標準建置計畫(II)

107 年度 細審報告

期中報告

期末報告

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
A 委員：	
1. 本計畫對我國工業、科技發展、民生等各領域影響甚大，且具急迫性，是相當重要的一項計畫。	謝謝委員的支持與肯定。
2. 建議於計畫申請書中扼要說明 106 年度「國際基本單位 SI 新標準建置計畫(I)」重要結果產出，並與 107 年度「國際基本單位 SI 新標準建置計畫(II)」延續性。	謝謝委員建議。106 年度「國際基本單位 SI 新標準建置計畫(I)-新質量標準建置」優先執行新質量標準建置的部分，其重點目標為完成高純度矽晶球質量原級標準規格制訂與採購申請、完成矽晶球表層質量量測系統實驗室環境建置與建立矽晶球表面水層(Water Layer)、碳化汙染層(Carbonaceous Contamination Layer)與氧化層(SiO ₂)定量量測技術等工作。而本計畫則規劃執行「新質量(II)」、「新溫度」及「新電流」新標準建置及系統整合、組裝、測試等工作。其中新質量標準建置為接續 106 年計畫，整合 XRF XPS 表層質量量測系統建置，完成矽晶球表層質量量測系統建置。
3. 計畫 p.11 編列 2 項出國計畫各 90 天，建議詳細說明其與本計畫必要性與關聯性。	謝謝委員建議。第一項出國計畫為矽晶球表層質量量測技術國際合作研究，合作對象為日本 NMIJ，矽晶球表層質量為決定矽晶球質量之關鍵參數，且是唯一需定期量測之參數。日本 NMIJ 採用 XPS 方法，與德國 PTB 之整合式 XRF XPS 技術不同，本計畫雖採用德國 PTB 之設計，但亦可相容於 NMIJ 所開發之 XPS 方法，可提供額外之量測結果，故擬派員至日本 NMIJ 學習。第二項出國計畫為真空原級標準技術國際合作研究，在新質量中法碼氣體吸附效應量測與壓力參數相關，故規劃建構一套靜態膨脹真空原級標準系統，並派員至德國 PTB 真空部門(位於柏林)學習相關技術。
4. 新質量標準技術部分，建議扼要說明欲購置儀器設備與國外如德國等國家差異性，未來技術層面發展 XRCD 方法，實現普朗克常數所定義之公斤，公斤相對不確定度能否進一步達到介於 2×10^{-8}	謝謝委員建議。新質量標準分項計畫中欲購置之儀器為矽晶球表層質量分析儀(III)，為客製化之產品，設計與規格與德國 PTB 所使用之儀器一致，並無差異，加上 PTB 專家的技術支援，完成之表層質量量測系統應可與 PTB 所使用之系統相當。在新公斤定義後，以 XRCD 法實現之原級公斤標準，最大的兩項不確定度

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
至 5×10^{-8} 與國際等同。	來源為矽晶球體積與表層質量，相對不確定度貢獻分別為 2×10^{-8} 與 1.3×10^{-8} ，皆小於 5×10^{-8} ，應可達成目標相對不確定度。
5. 新溫度標準建置分項部分，規劃建置聲學氣體溫度計量測系統及絕對輻射溫度量測系統，建議可邀請國外專家學者來我國進行技術交流，提升我國量測技術。	謝謝委員建議。誠如委員所說，聲學氣體溫度計量測系統建置，將藉由國外專家協助，因此首先將派員至英國 NPL 進行研習(經費編列於「107 年國家度量衡標準實驗室運作與發展計畫」)，並引進設備及技術；待於聲學氣體溫度計量測系統初步建置完成後，將依委員建議再邀請國外專家學者來台進行技術交流，俾以提昇我國量測技術。
B 委員：	
1. 針對國際 SI 新標準建置計畫所需經費之分攤，本計畫延續新標準建置計畫(1)規劃執行”新質量”，“新溫度”及”新電流”標準之建置及系統整合、組裝、測試，這些工作的成果攸關著所建置標準的最終不確定度，其重要性不言而喻。	謝謝委員的支持與肯定。
2. 計畫預算編列，八成以上用於購買必要的儀器設備—矽晶球表層質量分析儀、聲學氣體溫度計設備、輻射超高溫校正系統設備、電阻電橋,...等，都是建置上述新標準亟需的設備。	謝謝委員的支持與肯定。
3. 第 93 頁所列儀器規格：溫度範圍”(373~505)K”是否應該改為”(213~505)K”?	謝謝委員指正，此為誤植，已修正溫度範圍為(213~505)K。
4. 矽晶球表層質量的測定，其不確定度要達到小於 30%，才能達成最終的”公斤標準相對不確定度需求”。	謝謝委員提問。與矽晶球其他量測技術相較，表層質量量測技術尚處於初期開發階段，根據日本 NMIJ 與德國 PTB 近期的發表結果[Metrologia 53 (2016) A19-A45]，矽晶球表層質量介於(60-92.2) μg 之間，標準不確定度介於(10-17.7) μg 之間，相對標準不確定度介於(11-27) %之間。但此不確定度來源貢獻至矽晶球整體質量(假設為 1 kg)，此來源之相對標準不確定度介於 1×10^{-8} 至 1.77×10^{-8} 之間。假設表層質量小於 100 μg ，30 %對應之表層質量不確定度亦小於 30 μg ，相對於公斤之相對不確定度為 3×10^{-8} ，符合計畫目標相對

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
	不確定度 5×10^{-8} 之要求。
<p>5. 頻率是所有物理量中可最精準計量的，借助其精準性用於聲學氣體共振之溫度計量，有其道理在，但是共振頻率會受到很多因素影響，整體系統之組合與測試都要很用心，才能確保最終要達成的精確度。</p>	<p>謝謝委員提醒與建議。本計畫會由品質因子較高之準球型共振腔開始著手，也會控制影響腔體共振頻率的腔體尺寸、表粗、與工作氣體溫度，以提升聲學共振頻率的精確度。例如委製機構的製作公差達微米等級可使共振頻率接近預期值；表粗達奈米等級可降低 phase noise；且共振腔內工作氣體將置於溫度穩定度高之溫度控制裝置內提高量測頻率之穩定度。</p>
C 委員：	
<p>1. P.13 所示「清潔費 5 元」，應為筆誤。</p>	<p>謝謝委員指正，此為誤植，已修正清潔費為 5 千元。</p>
<p>2. P.27 所示「預計申請展延至 108 年 12 月底」，將否影響各項原列費用？另亦請敘明申請展延之具體理由。</p>	<p>謝謝委員提問。本計畫預計申請展延至 108 年 12 月底，將不影響各項原列費用。申請展延之原因為，本計畫相關設備均自國外購置，且為客製化產品，採購時程需耗費較長時間，一年的計畫時間僅可完成設備購置、系統整合、組裝、測試等工作，但後續系統仍需進行不確定度評估等工作，故希冀可申請展延，以利後續工作完成，請委員知悉。</p>
<p>3. 請將 P.75 上之查核點編號，分別加註標示於 P.42、P.62、P.72 之工作流程圖，使更形清晰。</p>	<p>謝謝委員建議。將在審查後修訂稿中將各工作項目之查核點加註於工作流程圖中。</p>
<p>4. P.76 所示三分項之績效指標，相互之間宜力求均衡。</p>	<p>謝謝委員建議。三個分項之績效指標乃參考各分項之經費比例訂定，本計畫工作重點為新溫度標準建置與新質量標準建置，故績效指標將著重於這兩個分項上。</p>
D 委員：	
<p>1. 本計畫購置矽晶球表面層分析儀設備，建立 X 光晶體密度法來實現新的公斤定義，確保產業質量追溯不受新定義影響；建立聲學氣體溫度計及高溫輻射溫度量測技術，並購置定點系統及搭配現有水三相點系統，實現符合新定義之溫度標準；及購置低電阻電橋系統，搭配量化霍爾電阻及約瑟夫森電壓標準，建立完整符合產業需求並與新定義接軌之電流標準。故計畫具有迫切性。</p>	<p>謝謝委員的支持與肯定。</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
<p>2. 請說明國外領先國家如德國、美國、日本在表層質量量測之相對擴充不確定度為何?</p>	<p>謝謝委員提問。與矽晶球其他量測技術相較，表層質量量測技術尚處於初期開發階段，根據日本 NMIJ 與德國 PTB 近期的發表結果 [Metrologia 53 (2016) A19–A45]，矽晶球表層質量介於(60-92.2) μg 之間，標準不確定度介於(10-17.7) μg 之間，相對標準不確定度介於(11-27) %之間。但此不確定度來源貢獻至矽晶球整體質量(假設為 1 kg)，此來源之相對標準不確定度介於 1×10^{-8} 至 1.77×10^{-8} 之間。假設表層質量小於 100 μg，30 %對應之表層質量不確定度亦小於 30 μg，相對於公斤之相對不確定度為 3×10^{-8}，符合計畫目標相對不確定度 5×10^{-8} 之要求。</p>
<p>3. 本計畫建立搭配高精密低電阻電橋系統之大電流標準校正程序(低電阻量測範圍:0.1 mΩ to 1 Ω; 電流量測範圍:100 A to 1000A)，請說明國外領先國家如德國、美國、日本之量測範圍為何</p>	<p>謝謝委員提問。關於國外領先國家之低電阻系統的大電流量測範圍說明如下： 德國 PTB 低電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，最大量測電流 1000 A。 美國 NIST 低電阻量測範圍 0.01 mΩ to 1 Ω，最大量測電流 2000 A。 加拿大 NRC 低電阻量測範圍 0.01 mΩ to 1 Ω，最大量測電流 400 A。 日本 JEMIC 低電阻量測範圍 0.1 mΩ to 1 Ω，最大電流 5000 A。</p>
<p>4. 本計畫所擬購買之大電流低電阻電橋可量測之電阻量測範圍為 1 $\mu\Omega$ to 1 Ω，請說明為何本計畫電阻量測範圍僅為 0.1 mΩ to 1 Ω?</p>	<p>謝謝委員提問。本計畫擬購買之大電流低電阻電橋是用來將量化霍爾電阻標準(電阻值約為 12.9 kΩ)傳遞至低電阻標準器(< 1 Ω)。低電阻標準器則用來以歐姆定律校正大電流源(量測電流通過電阻所產生的電壓除以電阻值)，以提供產業界可追溯至新 SI 安培定義之電流標準。由於電壓之量測於 0.1V 至 1V 有最佳準確度，因此，為了使電阻產生之跨電壓介於 0.1 V 至 1 V 間，會根據擬校正之電流值選擇適當的電阻值，電流愈大，電阻愈小，當最大電流為 1000 A 時，選擇之最小電阻為 0.1 mΩ，產生的跨電壓為 0.1 V。因此，本計畫訂定之電阻量測範圍最小為 0.1 mΩ。</p>
E 委員：	
<p>1. 本計畫旨在維持國家最高量測標準，提高量測品質與儀器系統的準確度，保障全國量測之準確性與國際一致性，為國內標準追溯</p>	<p>謝謝委員的肯定與支持。</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
<p>依據，以計量科學的發展，提升國家整體科技水準。</p>	
<p>2. 本計畫在建置新質量標準系統之高純度矽晶球之製作，因從原料到單晶矽生長完成過程費時，為及時因應國內產業需要，若供應方未能如期交貨，是否有相關備案，請補充說明之。</p>	<p>謝謝委員提醒。目前矽晶球僅德國 PTB 可製作，將提供數個國家，非僅提供給我國，目前所知 PTB 已開始進行製作。</p>
<p>3. 計畫書中之主要績效指標並未包含「新物量」分項，請補充說明之；另應增加各分項之技術報告，以提升我國技術能量。</p>	<p>謝謝委員提醒。本計畫並未包含新物量標準之建置，故無相對應之績效指標。另技術報告之目的為記錄研發過程，以做為技術傳承依據，目前技術報告的數量為依據工作內容預估，將涵蓋所有重要的研究內容。</p>
<p>4. 計畫之設備採購多僅為單一廠商，請補充說明其相關應變方案。</p>	<p>謝謝委員提醒。本計畫採購之設備多為客製化產品，為求符合需要之規格及時程，故為指定廠商；若屬非客製化設備將會採公開招標之形式採購。</p>
<p>5. 新購儀器規格如何能符合國際相互認可體系之要求，宜補充說明之。</p>	<p>謝謝委員提醒。系統建置完成評估後將會參加國際比對，以確保系統規格達成國際等同。</p>

審查意見表

計畫名稱：國際基本單位 SI 新標準建置計畫(II)

107 年度 細審報告

期中報告

期末報告

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
A 委員：	
1. 本計畫是 107 年度科發基金計畫 (9,099.4 萬);或是第 8 頁所指的 106 年度跨部會科發基金計畫? 經費規模為 9,099.4 萬元;或是報告書封面的金額?	謝謝委員指正。本計畫為 107 年度科發基金研發成果收入運用計畫，計畫申請經費為 9,200 萬元，核決之經費為 9,099.4 萬元，將於修正版之報告書更修封面之金額。
2. 除了聲學氣體溫度計外,其他各項的硬體建置與系統組裝預計於今年 6 月前皆可完成。	謝謝委員意見。聲學氣體共振腔因委託英國 NPL 製作，設備預計 7 月底到貨，11 月底前完成系統組裝及測試，故本計畫將於 3 月底前辦理展延，將計畫時程展延至年底。
3. 有些項目的系統查驗與評估時間排得很長，是否可以提早一些進行國際比對?	<p>謝謝委員建議。</p> <p>在新質量部分:</p> <p>按國際度量衡委員會質量技術諮詢委員會(CIPM CCM)之規劃，在 2019/05/20 新公斤定義正式施行後，國際質量標準追溯將分以下三個連續階段進行：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Present traceability (taking into account the additional uncertainty coming from the new definition), 2. Dissemination of the consensus value, 3. Dissemination of individual realizations. <p>其中第一階段為持續使用目前 IPK 作為國際質量標準，但 IPK 會導入額外之質量不確定度；第二階段為使用共識值(Consensus value)，共識值之決定需由 CCM 所舉辦的國際比對結果決定；第三階段才是使用由各個 NMI 所獨立實現之質量標準。按照 CIPM CCM 之規劃，2019/05/20 後我國仍將使用現有之鉑銥公斤原器一段時間。在矽晶球原級質量標準標準方面，團隊已規劃參加第二階段之共識值國際比對，CCM 初步規劃於 2020 年第一季開始進行此國際比對工作。</p> <p>在新溫度部分:</p> <p>由於聲學氣體共振腔需至 108 年年底方可完成系統組裝及驗收，預計經半年評估後進行國際比對；</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
	<p>而絕對輻射溫度計系統之高溫共晶點主要爐體於今年4月到貨，到貨後保守估計約需1年時間進行組裝及驗收、爐體評估、定點囊評估、國際比對邀約等，將儘量縮短時程以提早進行國際比對。</p> <p>在新電流部分： 新電流標準建置之各系統規劃於108年12月前完成系統評估，並於109年6月前完成系統查驗。若系統查驗時程提前，則可提早進行國際比對。</p> <p>在新物質量部分： 同位素量測技術系統之環構基礎雖已於107年12月底建立，後續須精進樣品製備與微污染控制環境評估，並與德國聯邦物理技術研究院(PTB)進行分析技術國際合作，以及配合其舉辦國際比對之時間表，因此規劃如報告書之系統查驗評估與國際比對時程，將依委員意見儘量縮短時程，提早進行國際比對。</p>
4. 論文與技術報告目前達成率偏低，希望在6月以前都能順利達成。	謝謝委員意見。計畫上半年度之執行重點為設備購置，論文及技術報告雖未產出但皆已有規劃，將會於6月底前完成預定目標。
5. 圖 5-8 黑體腔爆炸圖名稱有點令人聳動。	謝謝委員意見。圖標題名稱將修改為黑體腔組件圖(圖 5-9)。
B 委員：	
1. 本計畫整體執行進度達 42%，與原先規劃一致，經費使用率為 41.5%，經費均按原先規劃動支使用，績效良好。	謝謝委員肯定。
2. P.18，第二段，文字行距不一致；最後一段，量化霍爾電阻標準系統擴充不確定度缺漏單位 Ω/Ω ，請補正。	謝謝委員指正。將於修正版之報告書補正。
3. P.19，第二段，低電阻與高電阻標準系統擴充不確定度缺漏單位 $\mu\Omega/\Omega$ ，請補正。	謝謝委員指正。將於修正版之報告書補正。
4. P.47，低電阻電橋量測範圍應為 0.1m Ω 到 1 Ω 。請補正	謝謝委員指正。將於修正版之報告書補正。
5. P.90，第一段文字似乎不完整，請釐清	謝謝委員指正。p.90 第一段完整文字應為“為配合引用新技術實現新質量標準，及新標準之實施與校正服務的提供(至客戶端)，此三套系統主要係配合

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
	新質量標準量測方法的更新，進行系統能量之擴充。”將於修正版之報告書補正。
6. 氣體分析儀應於 2018/12/21 完成採購程序，惟本報告中顯示並未完成付款，請說明最新進度。	謝謝委員意見。氣體分析儀 II 已完成到貨、組裝、訓練，目前驗收文件已遞送工研院行政單位完成修訂，並已安排 2/26 上午召開驗收會議，驗收完成後方可完成付款。
7. 對於後續系統查驗與國際比對時程的規劃，尚屬合理，惟請預估何時可通過 BIPM 的認可，完成新公斤質量的原級追溯體系，將新質量標準傳遞至需求產業，以銜接並正式取代原本的鉑銱公斤原器質量的追溯系統。	<p>謝謝委員意見。關於“正式取代目前鉑銱公斤原器質量的追溯系統”，需按國際度量衡委員會質量技術諮詢委員會(CIPM CCM)所規劃之時程進行，在 2019/05/20 新公斤定義正式施行後，國際質量標準追溯將分以下三個連續階段進行：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Present traceability (taking into account the additional uncertainty coming from the new definition), 2. Dissemination of the consensus value, 3. Dissemination of individual realizations. <p>其中第一階段為持續使用目前鉑銱公斤原器(IPK)作為國際質量標準，但 IPK 會導入額外之質量不確定度；第二階段為使用共識值(Consensus value)，共識值之決定需由 CCM 所舉辦之新質量標準國際比對結果決定；第三階段才是使用由各個 NMI 所獨立實現之質量標準。按照 CIPM CCM 之規劃，2019/05/20 後我國仍將使用現有之鉑銱公斤原器一段時間。在矽晶球原級質量標準標準方面，團隊已規劃參加第二階段之共識值國際比對，CCM 初步規劃於 2020 第一季開始進行此國際比對工作。待比對結束由結果決定共識值後，原本的鉑銱公斤原器質量標準將被取代。</p>
C 委員：	
1. 第 15 頁之基本電荷、第 16 頁之普朗克常數及亞佛加厥常數，與第 2 頁所示，其值略有不同，宜予統一。	謝謝委員指正。基本電荷、普朗克常數及亞佛加厥常數將於修正版之報告書將數值統一。
2. 績效指標之論文篇數，宜予爭取如期發表。另，培育及延攬人才之預定目標值，仍需積極達成。	謝謝委員意見。計畫上半年度之執行重點為設備購置，論文及技術報告雖未產出但皆已有規劃，將會於 6 月底前完成預定目標，培育及延攬人才之預定目標值也會積極達成。
3. 計畫在新質量、新溫度及新電流標準	謝謝委員肯定。

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
<p>建置上，均能達成原定目標，在經費運用上亦稱合理，執行情況值得肯定。</p>	
D 委員：	
1. 計畫執行進度與原計畫無差異。	謝謝委員肯定。
2. 計畫預算支用大致與原計畫無差異。	謝謝委員肯定。
3. 計畫書第 25 頁所載之公式(2)中之 A 應註明為法碼之表面積。	謝謝委員意見。將於修正版之報告書補充。
4. 計畫書第 31 頁所載之公式(2-4)及第 32 頁所載之公式(2-6)中之 n 為整數，請說明 n 之數值係如何決定。	<p>謝謝委員意見。公式中的 n 為整數，代表約瑟夫森節點(Josephson Junction)的總合數量。對於約瑟夫森電壓標準系統而言，每個約瑟夫森節點約可產生 $40 \mu\text{V}$ 的電壓，故 n 可依據約瑟夫森電壓晶片所需輸出的標準電壓，透過軟體作組合編輯並搭配系統偏壓源作控制輸出。例如，當系統需輸出 10 V 的標準電壓時，則需在晶片上串接 26 萬個約瑟夫森節點，此時 $n = 260,000$。</p>
5. 計畫書第 81 頁之績效指標表中之標準系統擴建其說明欄為空白，請填入預期擴建之項目。	謝謝委員意見。預期擴建之標準系統為「公斤質量量測系統」。
E 委員：	
<p>1. 在新質量部分，規劃 3 項主要工作，均已完成建置(1)原級矽晶球質量標準建置(2)矽晶球表層質量量測系統技術建立，目標是完成矽晶球表層質量量測系統(3)原級真空標準建置，目標是建立壓力校正範圍 0.1 mPa 至 1 kPa，以上項目建立相對擴充不確定度，是否合於國際標準，請補充說明。</p>	<p>謝謝委員意見。</p> <p>(1) 原級矽晶球質量標準方面，達成之相對標準不確定度為 2.5×10^{-8}，與 CCM 訂定新公斤定義實施所要求之相對標準不確定度 5×10^{-8} (一致性要求)與 2.0×10^{-8} 相當，符合國際標準。</p> <p>(2) 表層質量量測之目標相對標準不確定度為 30 %，與 PTB 完成系統後所達成之結果相當；矽晶球表層質量約為 50 微克以下，若以相對標準不確定度 30 % 計算，表層質量之標準不確定度在 15 微克以下，貢獻至 1 公斤之相對標準不確定度在 1.5×10^{-8} 以下，亦符合國際標準。</p> <p>(3) 原級真空標準之目標相對擴充不確定度為 (0.1-2.5) %，範圍為 0.1 mPa 至 1 kPa，與目前各國於 BIPM 登錄之 CMC 能力相當，符合國際標準。</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
<p>2. 依報告所述,為了將真空環境中原級公斤質量標準導引至提供校正服務的大氣環境中工作標準法碼,表面吸附之質量必須量測出。吸附效應與環境大氣壓力極為相關,但對應之真空原級標準,壓力之追溯仍須仰賴他國家實驗室,未來將如何確實進行。</p>	<p>謝謝委員意見。已於新質量相關計畫中規劃建置靜態膨脹原級真空標準系統,並將於本年度完成之系統不確定度評估。屆時,壓力之追溯將可於 NML 內部自行完成,將不需仰賴其他國家實驗室之校正服務。</p>
<p>3. 依據報告(p86)所述,矽晶球表面的 O/Si 比值為 1.0563,藉由內插法代入利用標準試片的 Sherman' equation,可以得到矽晶球每單位面積的氧沉積量為 (110.9 +/-9.9) ng/cm²,相對標準不確定度為 8.96%,相對標準不確定度 < 30%;雖然查核點已達標,但應有更精進的空間。</p>	<p>謝謝委員意見。目前雖已使用 PTB 提供之螢光頻譜與光電子頻譜數據,完成頻譜之擬合、分析與不確定度評估,並達成 8.96%之相對標準不確定度。後續在 XRF XPS 量測系統整合完成後,仍會以 30%之相對標準不確定度作為目標,並逐步改善至 PTB 目前所達成之量測水準(相對標準不確定度約為 10.1%)。</p>
<p>4. 關於新溫度標準建置,完成熱電偶高溫校正系統之量測程序,溫度範圍涵蓋 0.01 °C 至 1492 °C;另外亦完成 (a)高溫黑體爐設備(1000 ~ 3000) °C (b)Co-C(1324 °C)、Pd-C(1492 °C)、Re-C(2474 °C)及鎢碳(WC-C,2747 °C)高溫共晶定點囊設備採購等的設備採購,請說明其溫度量測誤差範圍。</p>	<p>謝謝委員意見。</p> <p>在熱電偶高溫校正系統部分: 熱電偶高溫校正系統建置完成後,溫度範圍涵蓋 (0.01 ~ 1492) °C,標準不確定度範圍為(0.1 ~ 1) °C。</p> <p>在絕對輻射溫度量測系統部分: 絕對輻射溫度計量測系統建置完成後,量測不確定度範圍如下: (a)(1000 ~ 3000) °C,標準不確定度 (0.9 ~ 5.0) °C (b)鈷碳(Co-C, 1324 °C),標準不確定度= 0.9 °C 鈀碳(Pd-C, 1492 °C),標準不確定度= 1.0 °C 銻碳(Re-C, 2474 °C),標準不確定度= 1.7 °C 鎢碳(WC-C, 2747 °C),標準不確定度= 2.0 °C</p>
<p>5. 關於精進新電流標準計量技術,可滿足半導體、材料及能源、電機產業之校正與需求;另外針對半導體、材料、通訊等產業於製程或產品特性檢測常用的微電流(10⁻¹² A 等級),以及能源、電機產業之大電流(100 A 以上)標準等需求,未來有無長期的規劃請說明。</p>	<p>謝謝委員意見。未來在新電流標準計量之微電流標準部份,將規劃建置小於 1 pA 的校正能量;而在大電流標準部份,將規劃建置大於 1000 A 以上的校正能量,以更符合產業界的校正與追溯能量需求。</p>

審查意見表

計畫名稱：國際基本單位 SI 新標準建置計畫(II)

107 年度 細審報告

期中報告

期末報告

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
A 委員：	
1. 計畫執行進度大致符合原先規劃:各項設備皆已完成建置,對應的技術研發也已開展中。後續的系統評估、國際比對、標準傳遞等工作有待繼續努力。	謝謝委員意見。四項新 SI 後續將依照規劃完成系統評估、國際比對、標準傳遞等工作，以確保量測系統之能力並完備追溯體系。
2. 本期歲出預算執行之實際數不及預算數之六成,請予補充說明。	謝謝委員意見。本計畫 83 % 為資本門支出，共採購 8 項設備，其中矽晶球表層質量分析儀(III)及聲學氣體溫度計設備，分別於 12/12 及 12/11 完成驗收付款，因此不及計算於期末報告實際數。最終計畫結算實支數已達預算數 99.98%，將於期末報告修正。
3. 各項驗收結果、出國會議、論文發表數量符合預期;廠商說明會比預期多出兩場。	謝謝委員肯定。
4. 第 28 頁，第 5 行：10 g 應為 10 microgram.	謝謝委員指正。將於修正版期末報告修正。
B 委員：	
1. 計畫書第 II、5、19、20、24、43 頁(紙本頁碼)中所載「不確定:」應修正為「不確定度:」。	謝謝委員指正。將於修正版期末報告重新檢視修正。
2. 本年度標準系統擴建完成 3 套系統查驗，包含直流電阻量測系統、直流高電阻量測系統及量化霍爾電阻量測系統，請說明其預期之具體績效為何。	<p>SI 電流新定義可藉由電壓標準及電阻標準以歐姆定律(電流等於電壓除以電阻)推導實施。NML 在過去幾年已建立約瑟夫森電壓原級標準，因此本計畫之重點在於擴建 3 套既有電阻標準，擴充量測範圍並降低不確定度，以能提供更符合產業界需求之新定義電流標準校正服務。</p> <p>於直流電阻量測系統，擴建後可提供最大量測電流達 1000 A 之低電阻標準，此量測範圍使我國大電流標準的不確定度可大幅降低，更滿足國內能源與電機產業的計量追溯需求。</p> <p>於直流高電阻量測系統，NML 原有系統因設備老舊且不足，不確定度不佳(100 to 5000) $\mu\Omega/\Omega$，執行本計畫後，不確定度為(9 to 73) $\mu\Omega/\Omega$，已迎頭趕上日、韓等先</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
	<p>進國家計量院的水平，可有效降低國內電子電機產業之標準儀器的追溯不確定度。</p> <p>於量化霍爾電阻系統，更新設備後，其不確定度為 $0.56 \times 10^{-8} \Omega/\Omega$，搭配已建立之不確定度達 10^{-8} 等級之約瑟夫森電壓標準，可使我國電流標準符合 SI 電流新定義要求。</p>
<p>3. 計畫預期將目前系統最大校正電流從 1000 A 提昇至 2000 A。請說明量測電流 1000 A 以上之市場需求狀況為何。</p>	<p>依據於 2019 年底甫完成之 NML 產業問卷調查與分析結案報告指出，國內電子電機產業需量測電流 1000 A 以上之校正追溯管道。其中包括國內最大量測儀器製造商致茂電子，多次表達希望 NML 能早日建置校正電流可達 1000 A 以上的服務能量。</p>
C 委員：	
<p>4. 第 110 頁「三、本計畫之目標與達成情形」中，似欠缺新物質量標準建置之敘述？</p>	<p>謝謝委員意見。整體 SI 新標準建置計畫因經費需求達 5.14 億元，經費來自 5 個專案計畫，請參考 p7。本計畫經費 9099.4 萬元，執行新質量、新溫度及新電流等三項 SI 新標準建置，未包含新物質量標準。新物質量標準建置乃規劃於行政院第二預備金經費中執行。</p>
<p>5. 第 122 頁「因、計畫執行績效檢討」中，資源與經費運用之內容似與計畫涵蓋範圍不相襯？請說明。</p>	<p>謝謝委員意見。同第 1 題之說明，整體 SI 新標準建置計畫因經費需求達 5.14 億元，經費來自 5 個專案計畫，請參考 p7。本計畫經費 9099.4 萬元，執行新質量、新溫度及新電流等三項 SI 新標準建置。</p>
<p>6. 第 133 頁「六、重要成果說明」中，似亦欠缺新物質量標準建置分項？</p>	<p>謝謝委員意見。同第 1 題之說明，整體 SI 新標準建置計畫因經費需求達 5.14 億元，經費來自 5 個專案計畫，請參考 p7。本計畫經費 9099.4 萬元，執行新質量、新溫度及新電流等三項 SI 新標準建置，未包含新物質量標準。新物質量標準建置乃規劃於行政院第二預備金經費中執行。</p>
<p>7. 除新電流標準外，其餘可對外提供服務之預計時間為何？</p>	<p>謝謝委員意見。目前規劃各系統完成系統查驗時間為，新質量 2020/9、新溫度 2020/10、新物質量 2020/5，系統查驗完成後，將正式對外提供服務。</p>
<p>8. 本計畫之執行，均與原規劃內容相符，成果完善，值得肯定。</p>	<p>謝謝委員肯定。</p>
D 委員：	
<p>1. 該計畫執行進度大致與原計畫相同，執行進度皆有達成既定目標。</p>	<p>謝謝委員肯定。</p>
<p>2. 該計畫預算支用與原計畫無差異。</p>	<p>謝謝委員肯定。</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
<p>3. 本計畫項目之一為新質量標準建置已在本年度完成既定目標，後續工作重點為完成矽晶球表層質量量測與不確定度評估，相對標準不確定度$\leq 15\%$，此項工作項目為全新晶圓表面成分分析，可應用於半導體相關產業，建議單位應多向業界推廣，以利產業成長及培養更多國內相關專業人才。</p>	<p>謝謝委員意見。 誠如委員意見所述，矽晶球表層質量量測可應用於半導體產業，NML 之工業計量分項已投入半導體相關奈米粒子及薄膜量測技術之研究多年，成果亦推廣至半導體重要廠商，未來會持續與廠商保持合作，將表層質量量測技術推廣應用。NML 後續也會持續技術廣宣，辦理各領域說明會與訓練課程，培養相關技術專業人才。</p>
<p>4. 本計畫項目之一為新溫度標準建置已在本年度完成既定目標。其結果可滿足與國際標準達成一次。惟本計畫建置需高溫定點，所以需投入高成本，且技術水準高，需有豐富經驗才能為之。建議單位在追求技術同時，也能培養更多國內相關專業人才技術。</p>	<p>謝謝委員的意見。國家度量衡標準實驗室後續會持續技術廣宣，辦理各領域說明會與訓練課程，以培養國內專業技術人才。</p>
<p>5. 本計畫項目之一為新電流標準建置已在本年度完成既定目標。但計畫執行狀況只列最大量測電流，建議參考其他國家所列之電流量測範圍。</p>	<p>謝謝委員意見。 由 SI 新定義，電流標準可由電壓標準及電阻標準推導，因此，整體 SI 新電流標準計畫針對 NML 已有之電阻標準進行擴充及改良，包括量化霍爾電阻量測系統、高電阻量測系統及低電阻量測系統。前兩者用於中低電流($<100\text{A}$)標準的實施，由 107 年行政院第二預備金經費支應執行，後者用於大電流(100A 至 1000A)標準的實施，於本計畫執行，故計畫成果僅包含大電流量測範圍。 目前，低電阻大電流系統已完成 TAF 認證的校正範圍為 100A 至 1000A，此範圍之量測不確定度皆為 $35\ \mu\Omega/\Omega$。於電流$<100\text{A}$ 的量測不確定度估計為$(0.15$ 至 $0.7)\ \mu\Omega/\Omega$。請委員知悉。</p>
<p>6. 建議單位應多做技術推廣方面宣傳，以培養國內之相關專業人才知識。</p>	<p>謝謝委員意見。國家度量衡標準實驗室後續會持續技術廣宣，辦理各領域說明會與訓練課程，並與業界溝通需求。</p>
E 委員：	
<p>6. 矽晶球表面量測系統技術已完成，是否已與德國 PTB 或其他機構進行比較的結果為何？</p>	<p>目前表層質量量測系統還在作一些調整與軟硬體整合的工作，以提高量測的穩定性，將於今年與 PTB 進行表層質量量測比對，並於 2021 年與 2023 年參加</p>

綜合意見理由說明	委辦單位回復說明
	BIPM 舉辦的公斤共識值(CV)比對。除矽晶球的比對外，還會進行矽吸附效應的共同研究與比對。
7. 未來實驗室在導引大於 1000 公斤等或以上，將如何進行?	謝謝委員意見。目前 NML 質量之服務最大能量為 1000 公斤法碼校正。請委員知悉。
8. 部分文獻記載，溫度範圍 600-1358K 為國際溫度計量界的熱門方向；目前執行單位的聲學氣體溫度計範圍為 213-505K；另外絕對輻射溫度量測系統大致在 800-3000C，是否已完整請說明。	<p>謝謝委員的意見。</p> <p>目前國際上有成功發表成果的聲學氣體溫度計最高溫為 550 K，更高的溫度則須克服材料、理論模式等技術問題，尚待各國努力中。因此，另一選擇是將用於高溫標準的絕對輻射溫度標準向低的溫度範圍擴展。</p> <p>目前 NML 輻射溫度系統溫度範圍於(800-3000) °C 之硬體設施已建立完備，接下來將進行該溫度區間的標準件及量測不確定度評估，預估於 2020 年 9 月進行國際同儕評鑑。國際輻射溫度的發展趨勢係根據 MePK 以及 CCT WG5 所提出的報告進行，本期因應新溫標進行高溫共晶點建置，未來會朝向中低溫輻射溫度區間發展。</p>
9. 絕對輻射溫度量測系統建立 Co-C(1324C)、Pd-C(1492)、(2474C) 等共晶體標準，在 800 °C 以下的量測，執行單位是否有其他方法? 不同方法在相同溫度範圍量測其誤差為何?	<p>謝謝委員意見。在 800 °C 以下的量測，NML 採用 ITS-90 所指定之定點作為溫度標準，如銦、錫、鋅與鋁等定點黑體。</p> <p>目前採用 ITS-90 溫標以及熱力學溫標所展開的溫度，以銅定點(1084.62 °C)而言，根據國際發表文獻，差值在數十 mK 間，遠小於該定點的不確定度，因此目前 2 種溫標被 CCT 建議可並行使用</p>