

(出國類別：國際比對)

參加第9屆絕對重力儀國際比對 (ICAG-2013) 報告書

服務機關：內政部（地政司）

姓名職稱：江志奇 技士

派赴國家：盧森堡

出國期間：102年11月06日至102年11月12日

報告日期：103年01月13日

摘要

國際上多國諸如美國、英國、日本及澳大利亞等均已建立完整之國家重力控制系統，內政部自 92 年度起辦理「國家基本測量發展計畫」，其中為建立國家重力控制系統，已購置國內首部絕對重力儀 FG5-224、FG5-231、超導重力儀 SG48、SG49、相對重力儀 EG-1184、EG1200 及空載/船載重力儀 L&R S130 等諸多精密儀器，以推動我國重力測量相關工作。

為確保重力儀器與全球量測及公制單位標準之一致性、可追溯性，目前可行方法就是進行重力比對工作，而隨著可靠度需求的增加，參與由 IAG 之 SGCAG、BIPM、CCM WGG 等組織所合作推動的每 4 年一次國際絕對重力儀比對工作顯得格外重要，我國 2005 年首次參與「國際大地測量及地球物理學會」(IUGG) 舉辦的國際絕對重力儀器比對工作 (ICAGs-2005)；2009 年赴法國巴黎國際度量衡局 (BIPM) 參加國際絕對重力儀器比對工作 (ICAG-2009)。我國團隊已受邀參加過 2 屆國際絕對重力測量比對工作，且歷次比對報告顯示我團隊觀測成效良好。2013 年國際絕對重力儀比對工作 (ICAG-2013) 在盧森堡地下實驗室 (WULG) 舉行，我國攜帶絕對重力儀 FG5-231 前往參加比對，並與各國交流實務作業經驗。完成本次比對工作，有助於持續提昇我國國際技術地位及能力，確認儀器性能，使國家重力基準與國際重力系統接軌，做為國家重力測量依據，並供國內坐標系統、高程控制系統、衛星科技、資源探勘及地殼變動、地震等長期監測研究工作重要資訊。

目錄

壹、前言.....	1
貳、目的.....	2
參、比對工作過程及紀要.....	4
肆、心得及建議.....	14
一、心得.....	14
二、建議.....	15

壹、前言

現代化國家舉凡民生、科技、建設等皆需應用重力資料，例如民生運用方面之度量衡標準，在工程建設方面之坐標與高程系統，以及在資源探勘、地球變遷、地震預測等科學方面運用，而精確的重力資料則須仰賴國家重力網之建立。

國際上多國諸如美國、英國、日本及澳大利亞等均已建立完整之國家重力控制系統，內政部自 2003 年起辦理「國家基本測量發展計畫」，其中為建立國家重力控制系統，已購置國內首部絕對重力儀 FG5-224、FG5-231、超導重力儀 SG48、SG49、相對重力儀 EG-1184、EG1200 及空載/船載重力儀 L&R S130 等諸多精密儀器，以推動我國重力測量相關工作。

為發展絕對重力測量相關工作，內政部於 2004 年與日本京都大學竹本修三教授合作，完成臺日兩地雙邊絕對重力基準網聯測工作；於 2005 年第 1 次參與「國際大地測量及地球物理學會」(IUGG) 之 4 年一次國際絕對重力儀器比對工作 (7th International Comparison of Absolute Gravimeters, 2005, ICAGs)；2006 年開始臺法合作利用絕對重力觀測台灣造山運動；2007 年初完成國家重力基準站，並受邀赴韓國世宗大學協助完成該國首座超導重力觀測實驗室之絕對重力率定作業；2009 年赴法國巴黎國際度量衡局 (BIPM) 參加國際絕對重力儀器比對工作 (ICAG-2009)。

為確保內政部重力儀器與全球量測及公制單位標準保持一致性、可追溯性，內政部長長期委託財團法人工業技術研究院 (代管國家度量衡實驗室) 辦理重力基準維護及測量整合服務工作案，其中「協助參與國際測量事務合作」為重要工作項目，即協助內政部將內政部所屬之國內絕對重力儀，參加國際絕對重力測量比對工作，以達成內政部重力儀器與全球量測及公制單位標準保持一致性、可追溯性之目的。

由於我國團隊分別於 2005 年及 2009 年已受邀參加 2 屆國際絕對重力測量比對工作，且歷次比對報告顯示我團隊觀測成效良好。本次 2013 年國際絕對重力儀比對工作 (ICAG-2013) 在盧森堡地下實驗室 (WULG) 舉行，我國以關鍵

比對（Key Comparison）名義參與第 6 分組聯測工作，證明我國技術具備相當基準網連測能力。我國團隊攜帶絕對重力儀 FG5-231 前往參加比對，並與各國交流作業經驗。本次成果將可提供內政部絕對重力儀在國際上可公認、可追溯之量測率定標準，除作為我國重力系統之依據外，更可爭取日後國際上更多合作機會，以提昇國家重力技術地位。

貳、目的

此次出國目的係至盧森堡參加第 9 屆絕對重力儀國際比對(9th International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2013)，同時也是第 2 次質量諮詢委員會 (CCM) -重力工作小組 (WGG) 之關鍵比對 (Key Comparison)，代號 CCM.G-K2，主辦單位為盧森堡大學，先導實驗室 (Pilot Laboratory) 為瑞士度量衡局 (METAS)，比對地點為盧森堡 Walferdange 地體動力地下實驗室 WULG (Walferdange Underground Laboratory of Geodynamics)。除 NMI 實驗室可參與關鍵比對外，亦邀請其他擁有絕對重力儀設備的機構一同參與先導研究 (Pilot Study，不列入關鍵比對成果)。預計參加的 NMI 實驗室有奧地利 BEV、中國大陸 NIM、台灣 CMS、捷克 VUGTK、芬蘭 FGI、法國 LNE-SYRTE、義大利 INRIM、日本 NMIJ、韓國 KRISS、俄羅斯 VNIIM、瑞士 METAS 共 11 個實驗室；另外計有 15 個非 NMI 機構亦共襄盛舉 (表 1)¹。

¹ WULG & METAS (2013) Technical Protocol: 9th International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2013.

表 1、第 9 屆絕對重力儀國際比對參加成員

Country or Province	Institution	Gravimeter	NMI or Designed Institute
Austria	Federal Office of Metrology and Surveying and Surveying (BEV)	FG5-242	YES
Belgium	Royal Observatory of Belgium	FG5-202	NO
China	National Institute of Metrology	NIM-3A	YES
China	Tsinghua University	T-2	NO
China	Institute of Seismology, China Earthquake Administration – Wuhan	FG5-232	NO
Chinese Taipei	Industrial Technology Research Institute	FG5-224	YES
Czech Republic	Geodetic Observatoru Pecný	FG5-215	YES
Finland	Finnish Geodetic Institute	FG5X-221	YES
France	Observatoire Midi-Pyrénées	A10-014	NO
France	LNE-SYRTE	CAG-01	YES
France	Institut de Physique du Globe de Strasbourg	FG5-206	NO
France	Géosciences Montpellier – CNRS - Université de Montpellier 2	FG5-228	NO
Germany	Leibniz Universität Hannover	FG5X-220	NO
Italy	INRIM-Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica	IMGC-02	YES
Italy	ASI (Agenzia Spaziale Italiana)	FG5-218	NO
Japan	National Metrology Institute of Japan	FG5-213	YES
Luxembourg	University of Luxembourg	FG5X-216	NO
Republic of Korea	Korea Research Institute of Standards and Science	FG5X-104	YES
Russian Federation	D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM)	ABG-VNIIM-1	YES
Spain	Instituto Geográfico Nacional	FG5-211 A10-006	NO
Sweden	Lantmäteriet – the Swedish mapping, cadastral and land registration authority	FG5-233	NO
Switzerland	Federal Office of Metrology - Metas	FG5X-209	YES
The Netherlands	Delft University of Technology	FG5-234	NO
United Kingdom	N.E.R.C. / Space Geodesy Facility, Herstmonceux Castle	FG5-229	NO
USA	National Geodetic Survey	FG5-102	NO
USA	Micro-gLaCoste	FG5X-111	NO

參、比對過程及紀要

工研院於 10 月 29 日將代管之內政部絕對重力儀 FG5-231 公證後託運送往盧森堡（圖 1），比對期間各絕對重力儀預計於 WULG 實驗室中執行 3 點位以上量測，任 2 部絕對重力儀將不於相同的 2 點位上進行量測。我方被安排的時間為 11 月 11 日至 11 月 13 日，依序於 A5、B1、A4 點位進行量測（圖 2）。



圖 1、絕對重力儀 FG5-231 公證裝箱

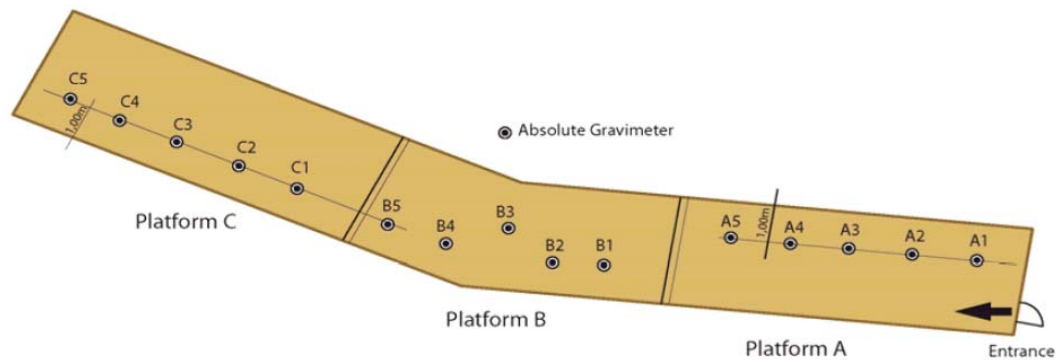


圖 2、WULG 各點位位置示意圖²

² WULG & METAS (2013) Technical Protocol: 9th International Comparison of Absolute Gravimeters, ICAG-2013, page 8.

11月6日(三)凌晨我國團隊(職與工研院量測技術發展中心謝文祺先生共2員)從臺灣出發,抵達盧森堡後,隨即聯繫 ICAG-2013 主辦人 Olivier Francis 教授,確認我國重力儀設備已運抵,並安排隔日上午至盧森堡大學 Kirchberg 校區進行前置作業。

11月7日(四)上午於盧森堡大學 Kirchberg 校區與 Remi Radinovic 工程師進行接洽,先至貨箱放置倉庫區(圖3),確認貨箱外觀正常且加速度及傾斜指示標籤均無異狀,接著開啟貨箱取出前置作業需要的落體腔、渦輪泵浦、雷射以及電子控制箱並移至實驗室。首先將落體腔連接渦輪泵浦進行真空處理作業(圖4),接著將雷射及電子控制器放置光學桌上,接上線後開啟雷射暖機, Marc Seil 工程師將協助我們量測雷射頻率,進行標準雷射(盧森堡大學儀器)與待測雷射(我國儀器)校正比對。



圖 3、貨箱放置倉庫區



圖 4、落體腔進行真空處理作業

11月8日(五)上午於盧森堡大學 Kirchberg 校區, Marc Seil 工程師仍進行雷射進行頻率量測(圖5),同時與主辦單位盧森堡大學 Olivier Francis 教授及 Gilbert Klein 工程師,還有來自美國重力儀製造商 Micro-g LaCoste, Inc.的 Derek、Ryan 與 Brian Ellis 等人進行經驗交流。真空處理部分,首先嘗試開啟離子泵浦,初時數據正常,但關閉真空閥門後電流值上升過大,與原廠人員討論

後決定先關閉離子泵浦，維持渦輪泵浦運作一段時間後再開啟離子泵浦。Marc Seil 工程師完成雷射頻率量測後，因需先將全部設備移動至 WULG 實驗室，因此先關閉渦輪泵浦，並將落體腔及雷射裝箱後，所有的儀器設備由 Gilbert Klein 工程師開車協助搬運至 WULG 地下實驗室（圖 6）。



圖 5、雷射頻率量測



圖 6、盧森堡大學載運設備用車

WULG 實驗室位於盧森堡大學 Walferdange 校區附近，係由一處廢棄石膏礦坑改建，比對實驗室 Salle Paul Melchior 距入口處約 700 公尺³，由於礦坑狹長蜿蜒，因此需利用電動拖車來搬運設備以節省人力（圖 7~9）。經與 Olivier Francis 教授討論後認為若我方絕對重力儀狀況良好，可於 11 月 9 日提前於 A4 點位觀測（原訂 11 月 13 日），如果作業順利，除原本預定測量 3 個點位（A4、A5、B1），可再協助安排進行第 4 點位（B3）測量。由於落體腔真空度尚未達到可工作標準，仍取出落體腔及渦輪泵浦繼續真空處理作業（圖 10）。隔日雖為周末假日，但本次比對期間 WULG 實驗室全週無休開放使用，因此預計將於隔日啟動離子泵浦。

³ WULG website: <http://www.ecgs.lu/wulg/wulg-full/>



圖 7、搬運設備使用之電動拖車



圖 8、WULG 地下實驗室入口



圖 9、WULG 地下實驗室內部



圖 10、真空處理作業中

11月9日(六)進入地下實驗室，首先開啟雷射暖機，接著啟動離子泵浦後顯示落體腔真空度正常，於是便關閉渦輪泵浦並開始於 A4 點位進行絕對重力儀整置作業，檢查調整完畢便進行此行第 1 個點位的量測(圖 11)。此期間並於空檔與來自奧地利 BEV 的 Christian Ullrich 與中國大陸 NIM 的吳書清副研究員進行交流(圖 12)。



圖 11、FG5-231 於 A4 量測



圖 12、中國大陸 NIM 自製絕對重力儀

11月10日(日)確認我國絕對重力儀量測過程一切正常，並移動絕對重力儀至 A5 點位。今日奧地利 BEV 的絕對重力儀 FG5 在移站時因搬運不慎，發生落體腔摔落意外，導致離子泵浦本體變形、纜線斷裂及干涉儀受損(圖 13~14)，已無法正常進行量測，經 Olivier Francis 教授協助檢查超彈簧功能有無異常(圖 15~16)，討論後決定待隔日儀器原廠人員抵達地下實驗室後再嘗試進行檢查修復。



圖 13、BEV 離子泵浦本體變形



圖 14、BEV 離子泵浦纜線斷裂



圖 15、檢查 BEV 超彈簧功能



圖 16、檢查 BEV 超彈簧功能

11月11日(一)是表定第2梯次的觀測起始日,我國絕對重力儀FG5-231開始進行第2個點位(A5)量測,其餘國家人員及儀器也陸續抵達,包括法國Strasbourg大學、德國Hannover大學、德國BKG、義大利INRIM、義大利ASI、波蘭IGiK、西班牙IGN、荷蘭Delft理工大學、美國NGS等(圖17至圖24)。期間來自美國絕對重力儀原廠Micro-g LaCoste, Inc.人員Derek van Westrum、Ryan Billson、Brian Ellis嘗試修復奧地利BEV受損之FG5儀器(圖25),但損壞情形嚴重無法修復,決定送回原廠維修。本日下午職依排定行程先行搭機返國。



圖 17、Strasbourg 絕對重力儀 FG5 圖 18、Hannover 絕對重力儀 FG5X 圖 19、BKG 絕對重力儀 FG5



圖 20、INRIM 自製絕對重力儀

圖 21、ASI 絕對重力儀 FG5



圖 22、IGN 絕對重力儀 A10



圖 23、Delft 絕對重力儀 FG5



圖 24、NGS 絕對重力儀 FG5



圖 25、原廠人員檢視 BEV 絕對重力儀

11 月 12 日（二）完成 A5 點位量測，接續移動設備至 B1 點位，進行第 3 點位的量測（圖 26）。我方儀器於比對期間表現優異，觀測數據穩定，未遭遇需故障排除或量測中斷等問題，但仍能透過參與其他國家人員之討論過程，交流學習故障排除經驗（圖 27）。



圖 26、我國 FG5-231 於 B1 量測

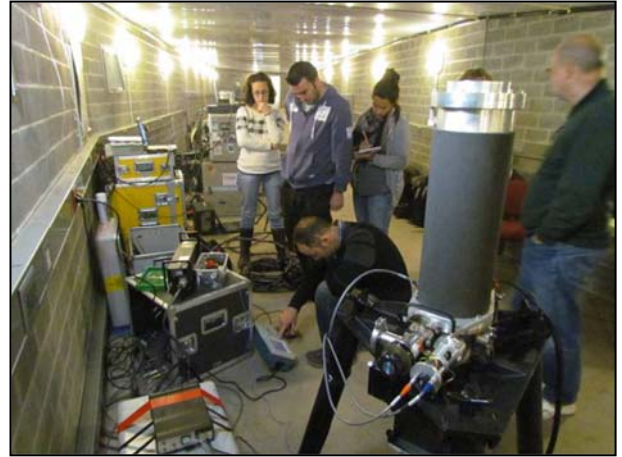


圖 27、西班牙 IGN 人員詢問原廠人員 Derek，協助檢查雷射控制器異常、落車起落異常等問題

11 月 13 日（三）完成 B1 點位量測，順利完成原預定之測量工作，接續移動設備至 B3 點位進行第 4 點位的量測（圖 28），此點位是本次比對工作額外的觀測點位，因我國設備妥善率高且量測過程順利，可額外測量 B3 點位提供主辦單位參考，且 B3 點位為 WULG 的主要絕對重力點，極有參考價值。期間我國代表利用儀器量測的空檔與義大利 Francesco Schiavone、荷蘭 René Reudink 等人討論絕對重力儀 FG5 操作細節（圖 29），德國 Reinhard Falk 也熱心的分享德國國內的重力測量現況。



圖 28、我國 FG5-231 於 B3 量測



圖 29、與義荷友人討論操作細節

11月14日(四)各國人員陸續將儀器裝箱運出地下實驗室，我國儀器亦完成裝箱作業(圖30)，將先運至盧森堡大學 Kirchberg 校區。等待期間 Olivier Francis 教授安排參觀安裝於隔壁坑道的超導重力儀 WA 站(圖31)，該站最早開始於 2002 年，期間經過硬體更新，新型的記錄始於 2007 年，迄今仍持續記錄中。



圖 30、我方 FG5 裝箱完畢



圖 31、盧森堡超導重力儀 WA 站



圖 32、WULG 門口，貼有參加絕對重力儀國際比對各國的國旗，上方為 2011 年舉辦的絕對重力儀歐洲比對 ECAG-2011；下方為本次絕對重力儀國際比對 ICAG-2013。



圖 33、使用電動拖車將我國儀器設備運出 WULG 實驗室

11月15日(五)盧森堡大學 Olivier Francis 教授協助量測我國儀器銣頻率源，使用可訓式 GPS 銣鐘系統 Kronos (圖 34)，使用 Kronos 提供 10 MHz 標準頻率值，透過示波器與我方銣鐘輸出頻率值比較(圖 35)，測得頻率為 9 999 999.9986 Hz，非常接近 2013 年 6 月工研院彭錦龍博士量測的頻率值，僅差 0.0007 Hz。



圖 34、可訓式 GPS 銣鐘系統 Kronos

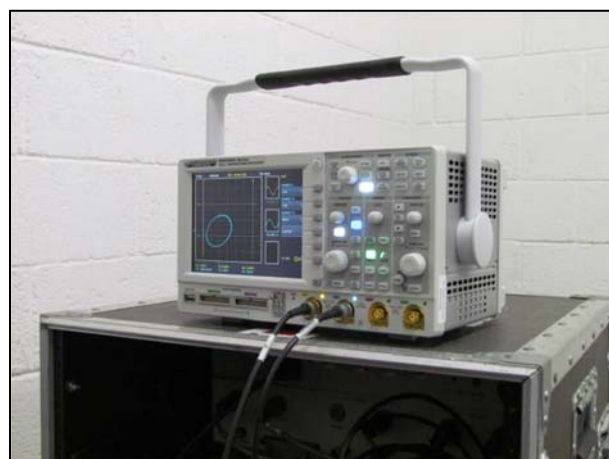


圖 35、利用示波器量測頻率差值

此行我方總依序完成 A4、A5、B1、B3 共計 4 點位的量測，並由主辦單位盧森堡大學協助完成雷射及銣鐘的頻率量測，初步成果與 2011 年絕對重力儀歐洲比對 ECAG 成果⁴比較如表 2(此結果僅是初步計算結果，我們仍待國際度量衡〔BIPM〕進一步公佈第 9 屆國際絕對重力測量比對工作成果報告，提供內政部絕對重力儀〔FG5-231〕量測率定標準)，差值介於-7.0 μGal 至-11.1 μGal 之間。依 ICAG-2013 技術協議 (Technical Protocol)。

⁴ Francis O. et al. (2013) The European Comparison of Absolute Gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg: results and recommendations, Metrologia, 50, 257-268.

表 2、初步成果比較表

點位	2011 成果	2013 初步成果	差值
A4	4200.1	4189.0	-11.1
A5	4188.5	4180.5	-8.0
B1	4083.9	4073.9	-10.0
B3	4075.1	4068.1	-7.0
備註：表中數值為量測重力值減去 980 960 000.0 μGal ，差值為 2013 初步成果減去 2011 成果，單位 μGal 。			

肆、心得及建議

一、心得

此次 CCM.G-K2 關鍵比對共有 11 計量單位參加，APMP 有 4 個單位：日本 NMIJ/AIST、韓國 KRISS、中國大陸 NIM 及我國 CMS/ITRI。本次比對工作全程均順利完成，未發生儀器故障或意外問題，測量結果經初步計算分析，成果品質相當理想。除行前準備妥適，多次參與國際比對及聯測工作經驗之累積，以及操作人員作業態度謹慎應為順利完成主因。此次比對作業中，奧地利絕對重力儀設備因人為疏失導致搬移時墜地毀損，給了我們很大的警惕。雖然我國團隊人員已熟稔絕對重力儀操作步驟，但仍應不斷精進且保持謹慎態度，以避免類似情事發生。

內政部絕對重力儀於 92 年底購置，多年來絕對重力儀器除於實驗室並進行野外量測，除耗材需定期更換外，儀器本身的機件老化與疲乏是可預期的，因此在充分使用儀器發揮儀器功能之外，應重視儀器之定期維護調校，以維護該機器的正常運作。

本次絕對重力比對作業之參與者均為國際上實際從事絕對重力測量之各國團隊，參與本次比對作業，除藉此與其他參與團隊進行專業交流，亦大大拓展了國際視野，無形中獲益良多。

二、建議

- (一) 下屆 ICAG-2017 將由中國大陸 NIM 舉辦，另 NIM 規劃 2 年後舉辦亞洲區絕對重力儀比對「暖身」，本次比對 NIM 副研究員已口頭表示希望邀請我方參與。建議持續積極參與各項國際重力活動，以利拓展視野、累積經驗、提升國家重力科學水平，並爭取更多合作研究計畫。
- (二) 此次與外國團隊進行技術交流討論，原廠建議之 5 年標準維護應有其必要性，義大利太空總署 ASI 每 2 年、荷蘭代爾夫特理工大學每 3 年即送原廠進行標準維護。我國絕對重力儀 2 部皆已超出 5 年之建議年限，因此建議可規劃進行標準維護，以提升儀器妥善率。
- (三) 絕對重力儀 FG5 已有更新款 FG5X，玻璃製的落體腔更有利真空的維持並提升量測精度，建議未來可規劃設備升級（目前德國 Hannover 大學即業將 FG5 升級為 FG5X、另中國大陸 NIM 已購置新款 FG5X）。



圖 36、前往 WULG 實驗室之地下坑道