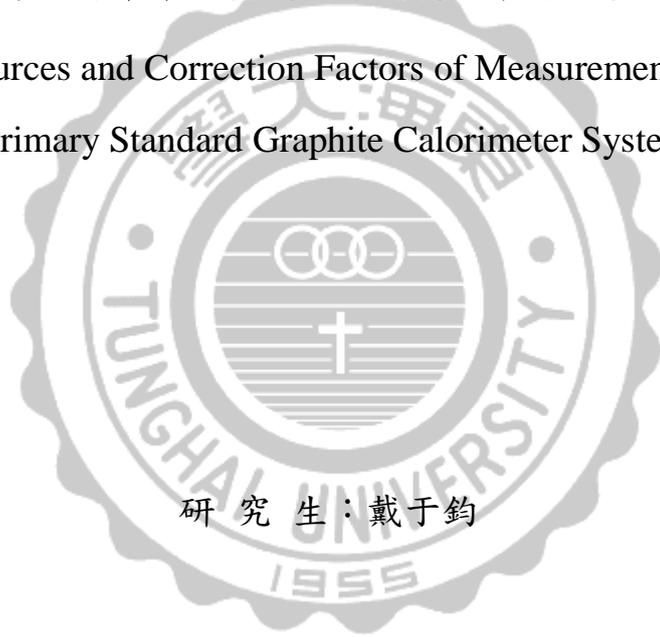


東海大學電機工程學系

碩士論文

石墨卡計原級標準系統量測不確定度之來源及修正因子研究

Study on the Sources and Correction Factors of Measurement Uncertainty for  
Primary Standard Graphite Calorimeter System



研究生：戴于鈞

指導教授：溫志宏 博士

中華民國 104 年 8 月

東海大學電機工程學系碩士學位  
考試委員審定書

電機工程學系研究所 戴于鈞 君所提之論文

石墨卡計原級標準系統量測不確定度之來源及修正因子研究

經本考試委員會審查，符合碩士資格標準。

學位考試委員會 召集人：黃永發 (簽章)

委員：溫志平  
陳興忠

黃永發

中華民國 104 年 06 月 29 日

## 誌謝

首先感謝指導教授溫志宏博士，碩士班二年來老師對於學生處事態度上的要求、學理推論嚴謹與大量的磨練機會使學生深受啟發。老師十分嚴厲心思同時也十分細膩，與老師熬夜奮戰親眼見識老師的堅持與過人的自我要求才驚覺自己仍待好好磨練。感謝老師於我研究所期間提供許多機會接觸各式各樣的學術研究與行政管理業務，以及加入核研所計畫團隊，提供學生體驗理論與現實儀器開發的機會，且過程中仍不時強化理論與學生的學理基礎。

此外要感謝楊政穎教授、黃永發教授與陳興忠教授辛勤的提供學生指導與建議促使本研究論文更加完善，以上三位教授與溫老師還有鄭佳忻教授及洪玲隆教授每周會在朝陽大學進行團隊會議，提供學生更多資源十分感謝諸多師長的扶持。系辦的淑貞姐、熊哥與嘉修哥，在行政處理上給予教學與幫助，實驗室的學長洪磊、李振輝、吳泰甫與余文琦對我的照顧以及學妹許育甄提供我許多的協助，以及核研所團隊吳柏勳、溫啟佑、蕭宇辰及李守言等人，在許多人的協助提攜之下完成碩士兩年的學業。

論文名稱：石墨卡計原級標準系統量測不確定度之來源及修正因子研究

研究生：戴于鈞

指導教授：溫志宏博士

## 論文摘要

本論文旨在探討本實驗室與行政院原子能委員會核能研究所共同開發之「石墨卡計原級標準系統」的量測不確定度來源及其修正因子。延續前期學長論文「石墨卡計原級標準系統量測不確定度評估之研究」的研究成果，本論文將該石墨卡計實際執行 Co-60 照射實驗，並針對所擷取之實驗數據進行其量測不確定度分析及修正因子校正，期能使該石墨卡計量測數據與核能研究所現有水吸收計量標準之差異小於 1%，以達國家原級標準之需求。

根據現階段之石墨卡計版本所取得之實驗數據分析，在未進行修正因子校正前，該石墨卡計量測數據與現有水吸收劑量標準之差異為 3.028%，符合 103 年度執行計畫小於 5% 之預期目標。經本論文進行真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量及導線散熱等修正因子校正後，其量測數據與現有水吸收

劑量標準之差異已降為 1.541845%，已十分接近本年度執行計畫小於 1% 之預期目標。



關鍵詞：石墨卡計原級標準系統、量測不確定度、修正因子。

Title of Thesis : Study on the Sources and Correction Factors of Measurement  
Uncertainty for Primary Standard Graphite Calorimeter System

Student Name : Yu-Chun Tai

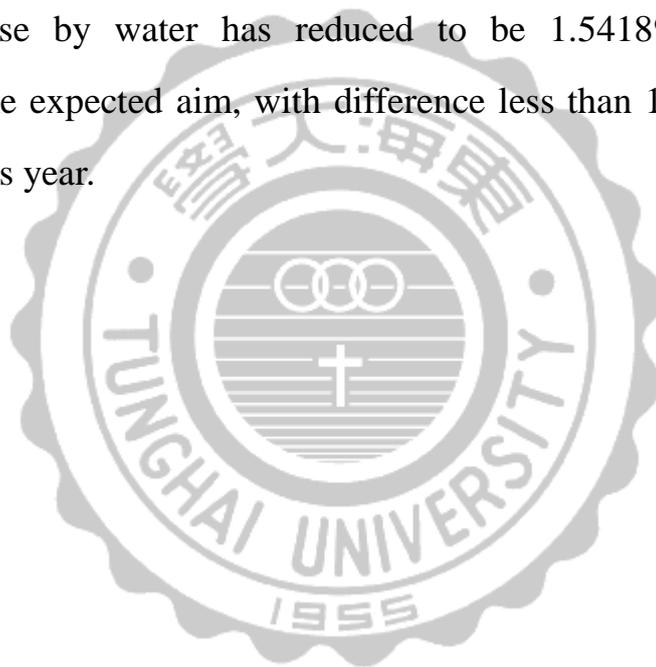
Advisor Name: Dr. Jyh-Horng Wen

### **Abstract**

The main aim of this thesis is to investigate the sources of measurement uncertainty and the correction factors of the primary standard graphite calorimeter, which is co-developed by Institute of Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council, Executive Yuan and our research lab. To extend the research works of previous thesis entitled “A study on the estimation of measurement uncertainty of primary standard graphite calorimeter system”, we perform the experiment about Co-60 absorbed dose by the primary standard graphite calorimeter, analyze the measurement uncertainty of the experiment data, and then calibrate the measurement dose rate with some correction factors. It is expected that the difference between the calibrated measurement data and the current standard of absorbed dose by water would be less than 1% so that the graphite calorimeter could meet the requirement of national primary standard.

According to the analyses of the measurement data obtained from the current graphite calorimeter version, the difference between the original measurement data and the current standard of absorbed dose by water is

3.028%. The result has met the expected aim, with difference less than 5%, of the project performed by 2014. In this thesis, we further calibrate the measurement data with the correction factors, including vacuum gaps, core impurity, axial nonuniformity, radial nonuniformity, heat defect, conversion from graphite to water, and power consumption on the leading wires. The difference between the calibrated measurement data and the current standard of absorbed dose by water has reduced to be 1.5418%. Obviously, it approaches to the expected aim, with difference less than 1%, of the project performed by this year.



Keywords : Primary Standard Graphite Calorimeter System, Measurement Uncertainty, Correction Factor.

# 目錄

誌謝.....	I
論文摘要.....	II
Abstract.....	IV
目錄.....	VI
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	3
1.2 論文組織.....	5
第二章 石墨卡計原級標準系統架構及其運作原理.....	6
2.1 機架各設備.....	8
2.2 量測電路板.....	11
2.3 石墨卡計.....	15
2.4 系統軟體.....	16

第三章	石墨卡計原級標準系統量測不確定度評估及其	
	修正因子探討.....	22
3.1	標準量測不確定度.....	23
3.2	標準量測不確定度應用於卡計實驗數據.....	26
3.3	修正因子.....	31
3.4	探討導線修正因子.....	33
3.5	石墨卡計原級標準系統之現有量測數據	
	量測不確定度分析.....	39
第四章	實驗數據分析.....	40
4.1	石墨卡計量測數據.....	40
4.2	石墨卡計數據之不確定度.....	46
4.3	現階段該石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度 ...	55
第五章	結論與未來展望.....	64
	參考文獻.....	65

## 表目錄

表(3-1)	不確定因子參數表 .....	27
表(3-2)	修正因子與其所對應之不確定度 .....	32
表(3-3)	公式使用之參數與意義 .....	36
表(4-1)	石墨卡計量測系統之量測結果 .....	41
表(4-2)	第一次實驗量測原始數據 .....	47
表(4-3)	第一次實驗之量測不確定度 .....	48
表(4-4)	第二次實驗量測原始數據 .....	50
表(4-5)	第二次實驗之量測不確定度 .....	50
表(4-6)	第三次實驗量測原始數據 .....	52
表(4-7)	第三次實驗之量測不確定度 .....	53
表(4-8)	量測不確定度因子數值 .....	55
表(4-9)	導線修正因子量測不確定度 .....	56
表(4-10)	現階段石墨卡計量測不確定度 .....	60
表(4-11)	石墨卡計量測系統之量測修正後結果 .....	62
表(4-12)	石墨卡計量測系統之現階段量測結果與不確定度 .....	63

## 圖目錄

圖(2-1)	石墨卡計原級標準系統示意圖 .....	7
圖(2-2)	石墨卡計三層示意圖 .....	8
圖(2-3)	PC(嵌入式控制器) .....	9
圖(2-4)	Visio 電路設計圖 .....	12
圖(2-5)	量測電路板 .....	12
圖(2-6)	電磁屏蔽箱正面圖 .....	13
圖(2-7)	凱文電橋示意圖 .....	14
圖(2-8)	熱敏電阻功率輸出方式 .....	14
圖(2-9)	石墨卡計 .....	15
圖(2-10)	原本程式介面示意圖按鍵及數據監控視窗圖 .....	16
圖(2-11)	程式介面示意圖簡潔的按鍵及數據監控視窗圖 .....	17
圖(2-12)	PID 之 LabVIEW 程式 .....	18
圖(2-13)	PID 控制流程圖 .....	19
圖(2-14)	優化後的恆溫模式流程圖 .....	20
圖(2-15)	絕熱模式流程圖 .....	21

圖(3-1)	實際量測功率數據圖 .....	29
圖(3-2)	電路系統電流變化示意圖 .....	34
圖(4-1)	第一次實驗之功率輸出圖 .....	42
圖(4-2)	第一次實驗之凱文電橋平衡圖 .....	43
圖(4-3)	第二次實驗之功率輸出圖 .....	44
圖(4-4)	第二次實驗之凱文電橋平衡圖 .....	45
圖(4-5)	第三次實驗之功率輸出圖 .....	46
圖(4-6)	第三次實驗之凱文電橋平衡圖 .....	46



## 第一章 緒論

在研究所期間與行政院原子能委員會核能研究所團隊共同開發石墨卡計原級標準系統，計畫由民國99年起至104年共歷時6年。計畫內容分為前期四年計畫「石墨卡計原級標準系統之量測電路開發」與後期兩年計畫「石墨卡計電路系統整合測試與比對驗證」。

前期計畫由民國99年至102年共歷時4年，計畫期間有幾個重要歷程：

1. 於民國99年完成石墨卡計量測電路架構設計，包含高敏感度之溫度量測電路、校準用之核心電加熱電路、微處理機控制介面及所需控制軟體[1]；
2. 於民國100年完成石墨卡計量測電路離散元件實現與測試，包含核心溫度控制電路與加熱電路、夾克 / 護套溫度控制電路與加熱電路等項目[2]；
3. 於民國101年完成石墨卡計溫度控制電路、加熱電路與石墨核心之整合與測試，包含溫度控制電路與加熱電路之整合與測試、溫度控制電路與石墨核心之整合與測試、加熱電路與石墨核心之整合與測試等項目[3]；
4. 於民國102年完成石墨卡計硬體與軟體整合，執行溫度控制測試並檢驗軟體之操作流程 [4]。

承襲前期計畫之成果，後期計畫由民國103年開始至104年共歷時2年，

本人於103年度加入此計畫。103年度計畫期間在行政院原子能委員會核能研究所內完成石墨卡計原級標準系統整合測試，整合之硬體包含石墨卡計本體、核心/夾克/護套三片電路板、電磁屏蔽箱及抽真空系統(包含渦卷式乾幫浦與渦輪幫浦)，軟體部分包含恆溫、絕熱及F校正模式，測試部分為 Co-60 照射劑量實際量測。103年度計畫目標為該石墨卡計原級標準系統之量測數據與現有水吸收劑量標準之差異小於5%，計畫執行結果該石墨卡計原級標準系統量測數據與現有水吸收劑量標準之差異為3.028%，達成預期目標。另一方面，103年度也已撰寫完成石墨卡計系統校正技術與標準作業程序，提供核能研究所研究人員操作之依據。

104年度計畫目標為石墨卡計原級標準系統量測數據與現有水吸收劑量標準之差異小於1%，為達此目標，本年度將與核能研究所共同探討石墨卡計系統的誤差來源、訊號修正方法與改善方案。首先將針對石墨卡計結構的量測技術進行精進，包括電路板I/O接頭改裝、屏蔽箱包封及量測程序修正。接著，再進一步針對石墨卡計原級標準系統進行調校，調校完成後協助核能研究所重新進行Co-60劑量量測，並進行詳細之修正因子計算，期能使最終版本之量測數據與現有水吸收劑量標準差異小於

1%，以達到國家原級標準之需求。現階段已完成新版控制電路板、連接電路板及屏蔽箱設計，並已完成第一項電路板之製作，至於後兩項，仍在積極製作開發中。

在未完成連接電路板、屏蔽箱之製作及新版系統之數據量測前，本論文將依據核能研究所於102年提出之「評估石墨卡計的修正因子」[5]，將真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量等修正因子納入考量，對石墨卡計原級標準系統之現有量測數據進行修正，同時進一步分析導線修正因子對該量測數據的影響及修正方式，期能使修正後之數據更接近水吸收劑量標準。

## 1.1 研究動機

本實驗室學長洪磊於民國 102 至 103 年間參與「石墨卡計原級標準系統」之前、後期計畫，並於 103 年度提出碩士論文「石墨卡計原級標準系統量測不確定度評估之研究」[6]。該論文提及一份量測報告不具有量測不確定度是無法充分表達量測資訊，亦無法與國內甚至國際間同等級之設備進行比對，因此該論文對石墨卡計原級標準系統進行量測不確

定度的評估，建立一套印證量測結果可靠度的評估方法。建立之方式以石墨卡計原級標準系統欲求得之等效輻射率的數學公式推導出等校輻射率之標準不確定度(Standard uncertainty)與各參數標準不確定度之關係式。但礙於學長參與計畫期間，該系統並未進行 Co-60 照射劑量實際量測，因此無法得知輻射照射中標準電阻之跨壓( $V_{i1}$ )與核心加熱用熱敏電阻之跨壓( $V_{i2}$ )，學長論文中僅假設( $V_{i1}$ 、 $V_{i2}$ )二者標準不確定度與輻射照射前標準電阻及熱敏電阻之跨壓( $V_{o1}$ 、 $V_{o2}$ )標準不確定度相同[6]。此外，學長論文中並未探討石墨卡計相關修正因子對石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度影響。

本論文撰寫期間已執行 Co-60 照射劑量實際量測，本人參與計畫期間對修正因子更加重視，因此本論文將進一步探討現階段該石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度，並分析前述各項修正因子納入考量後對量測數據不確定度之影響情形。

## 1.2 論文組織

本論文在實驗室與行政院原子能委員會核能研究所共同開發之「石墨卡計原級標準系統」背景下完成撰寫，因此於第二章節說明石墨卡計原級標準系統架構及其運作原理，包含：機架各設備、量測電路板、石墨卡計及系統軟體四個部分所構成。以便於銜接第三章之不確定度評估及其修正因子探討。

本論文中旨在探討石墨卡計原級標準系統量測不確定度來源及其修正因子，於第三章部分說明數學計算方法，並按照標準量測不確定度、標準量測不確定度應用於卡計實驗數據、修正因子、探討導線修正因子及最後彙整現階段石墨卡計原級標準系統之現有量測數據量測不確定度分析，各節順序說明公式之來龍去脈，並將量測與計算數據呈現於第四章。最後在第五章呈現本論文結論與未來展望。

## 第二章 石墨卡計原級標準系統架構及其運作原理

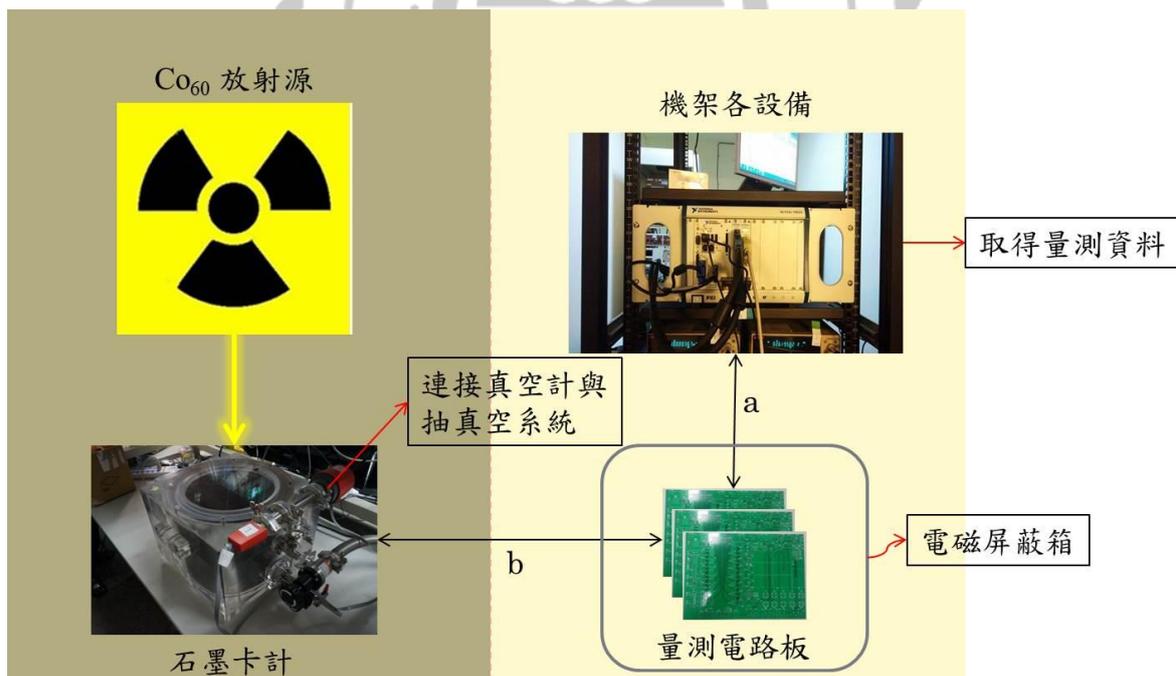
本論文之實驗量測數據及理論均依據石墨卡計原級標準系統而建構，該系統是由硬體及軟體所構成，硬體部分由機架各設備、量測電路板、石墨卡計及  $\text{Co}_{60}$  放射源四大部分所構成，如圖(2-1)所示。軟體部分為使用 LabVIEW 所開發之使用者平台，包含 PID 控制、恆溫模式及絕熱模式之操作流程。

前期計畫的開發與原理分析來自於英國與法國在石墨卡計上的研究 [8,16]，隨著計劃執行至 102 年將學理依據陸續落實至系統中 [4]，本系統執行程序是由機架上之電腦所控制，透過電腦啟動程式後，立即啟動 SMU、DAQ、奈伏計與電源供應器等設備，設備輸出之訊號或電源兩者皆送至圖(2-1)電磁屏蔽箱(灰色方框)中的量測電路板，同時奈伏計也開始擷取量測電路板上凱文電橋(Kelvin Bridge)之跨壓。電磁屏蔽箱中包含三片量測電路板，分別用來加熱及控制石墨卡計內部的核心、夾克與護套等三層之溫度。石墨卡計之三層皆為石墨材質圓盒狀物，如圖(2-2)所示，各層分別置入數顆熱敏電阻，其中紅色圓點為加熱用熱敏電阻，綠色圓點為凱文電橋平衡用熱敏電阻。三片量測電路板上之凱文電橋電路透過 BNC

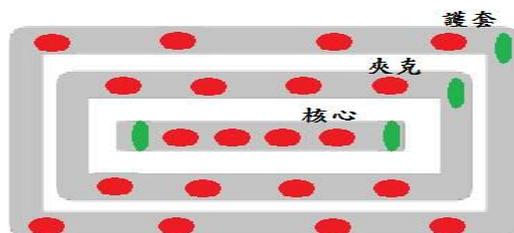
接頭及導線分別與石墨卡計核心、夾克與護套各層之綠色熱敏電阻連接。

圖(2-1)中 a 為機架各設備與量測電路板間之雙向連線，b 為量測電路板與石墨卡計間之雙向連線。

石墨卡計原級標準系統透過軟體程式之 PID 演算法控制核心、夾克與護套三層之溫度，以達成輻射照射前及輻射照射過程所需之恆溫或絕熱模式控制，進而由功率差值計算出石墨核心吸收劑量率或由核心熱敏電阻阻抗差值計算出輻射劑量。



圖(2-1) 石墨卡計原級標準系統示意圖



圖(2-2) 石墨卡計三層示意圖

以下依序針對“機架各設備”、“量測電路板”、“石墨卡計”及“系統軟體”四個部分做進一步介紹。

## 2.1 機架各設備

本節介紹石墨卡計原級標準系統機架上之儀器設備，包含 PC(嵌入式控制器)、數位輸出控制器(DAQ)、可程式化精密電源供應器(SMU)、機箱、奈伏特電壓檢測計(Nanovoltmeter)及可程控直流電源供應器(Power Supply)[3]。

### 2.1.1 PC(嵌入式控制器)

PC 經由通用介面匯流排(GPIB)連接量測儀器以取得控制軟體所需之凱文電橋輸出電壓值，另外，PC 經由通用介面匯流排與機箱內部資料匯流排連接控制儀器以控制周邊儀器及周邊電路元件進行相對應之輸出與動作。本計畫規劃在 PC 上操作 LabVIEW 程式，由 LabVIEW 進行所有流程動作控制與演算法。經評估本系統採用工業嵌入式控制器 NI PXI-8133，如圖(2-3)所示。



圖(2-3) PC(嵌入式控制器)

### 2.1.2 數位輸出控制器(DAQ)

數位輸出控制器之主要功能為接受 PC 指令，驅動電阻網路中的繼電器，使繼電器進行控制程式所規劃的啟閉動作。經評估本系統採用 NI 6512 DAQ 卡(Digital Analog Data Acquisition)，此系列 DAQ 卡具備有工業級數位輸出功能，可提供 $\pm 30\text{ V}$  的直流電壓輸出，並具有 64 個可程控數位開關，足以符合本系統數位開關之需求。

### 2.1.3 可程式化精密電源供應器(SMU)

主要功能是用來對加熱器提供高精準度之電壓電流輸出，經評估本系統採用 NI PXI-4141，本模組具有 4 個 SMU 通道，可滿足本系統加熱電路之需求。

### 2.1.4 機箱

本機箱功能為連結嵌入式控制器、數位輸出控制器及可程式化精密電源供應器等單元，並提供上述單元運作電源與標準基座。經評估本系統採用 NI PXI-1062Q，本機箱工作溫度範圍 0 到  $55^{\circ}\text{C}$ 、可容納 3U PXI 和 CompactPCI 模組，可滿足現有規劃與未來擴充功能之需求。

### 2.1.5 奈伏特電壓檢測計(Nanovoltmeter)

因凱文電橋之輸出電壓值非常微小，因此需一奈伏特等級電壓檢測計，專責用以測量凱文電橋電路輸出電壓值。經評估本系統採用三台 Keithley 2182A Nanovoltmeter。

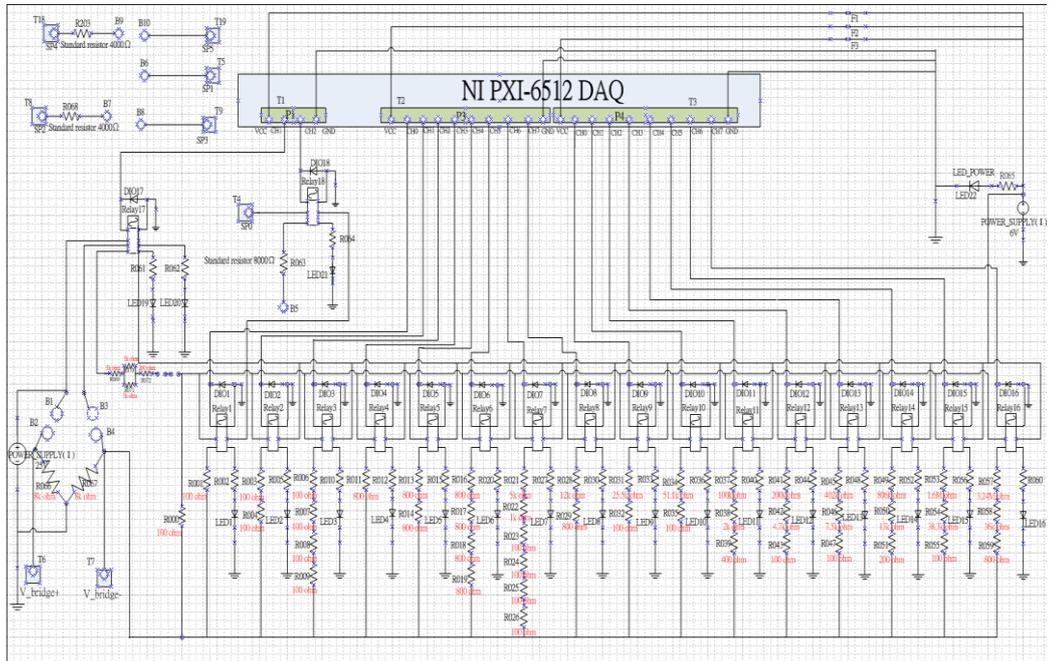
### 2.1.6 可程控直流電源供應器(Power Supply)

可程控直流電源供應器主要用以提供石墨核心層、石墨夾克層與石墨護套層之凱文電橋電路之電源供應，並提供 PCB 板上其他元件所需之驅動電源(例如：繼電器、工作狀態指示燈)，經評估本系統採用兩台 Agilent E3631A。

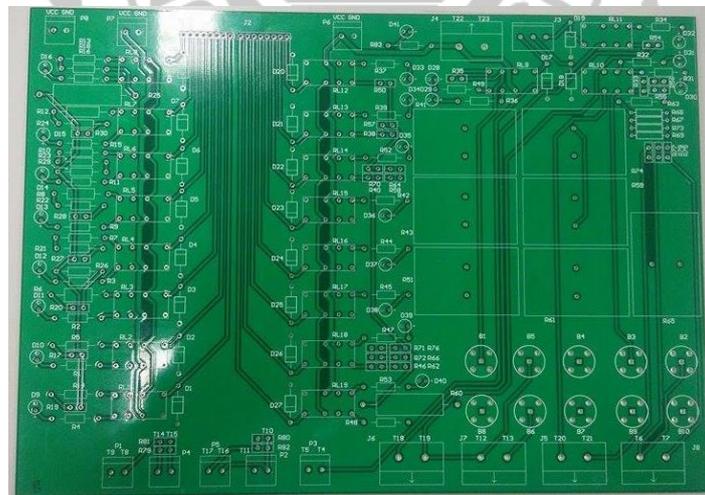
## 2.2 量測電路板

首先以 Visio 進行電路初步設計如圖(2-4)所示。電路圖中包含凱文電橋(Kelvin Bridge)、電阻網路及加熱電阻控制開關三個主要單元。本論文所採用之量測電路板如圖(2-5)所示，共有三片量測電路板，皆安置於圖(2-6)之電磁屏蔽箱中分別用於控制及量測石墨卡計核心、夾克及護套三

層之熱敏電阻。



圖(2-4) Visio 電路設計圖

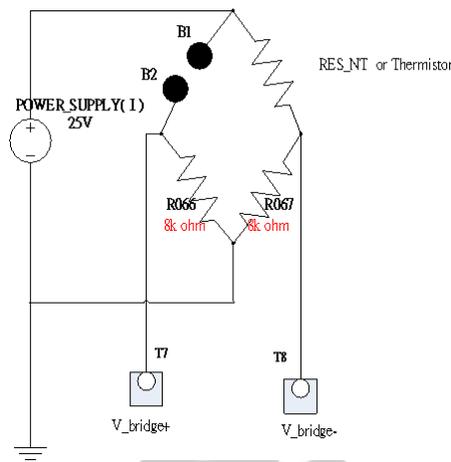


圖(2-5) 量測電路板



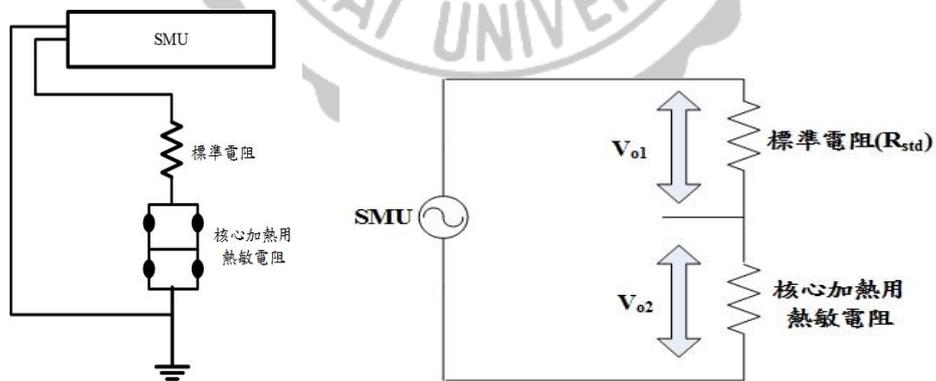
圖(2-6) 電磁屏蔽箱正面圖

凱文電橋設計於圖(2-5)量測電路板系統中，用於量測石墨卡計核心、夾克和護套這三層是否達到熱平衡狀態。其工作原理如圖(2-7)所示，其中 B1 與 B2 兩點連接如圖(2-2)石墨卡計各層綠色圓點之熱敏電阻，透過奈伏計量測之  $V_{bridge}$  跨壓數值是否超過於零來判斷石墨卡計該層是否已達到熱平衡狀態。



圖(2-7) 凱文電橋示意圖

經過 LabVIEW 程式之 PID 計算後，透過 PXIe-4143(SMU)供應電能給加熱用途之熱敏電阻功率，其功率在照射前可透過 PID 來穩定輸出，以及照射過程中也可以透過 PID 計算穩定的減少輸出功率來達到恆溫功能。其功率輸出方式如圖(2-8)。



圖(2-8) 熱敏電阻功率輸出方式

### 2.3 石墨卡計

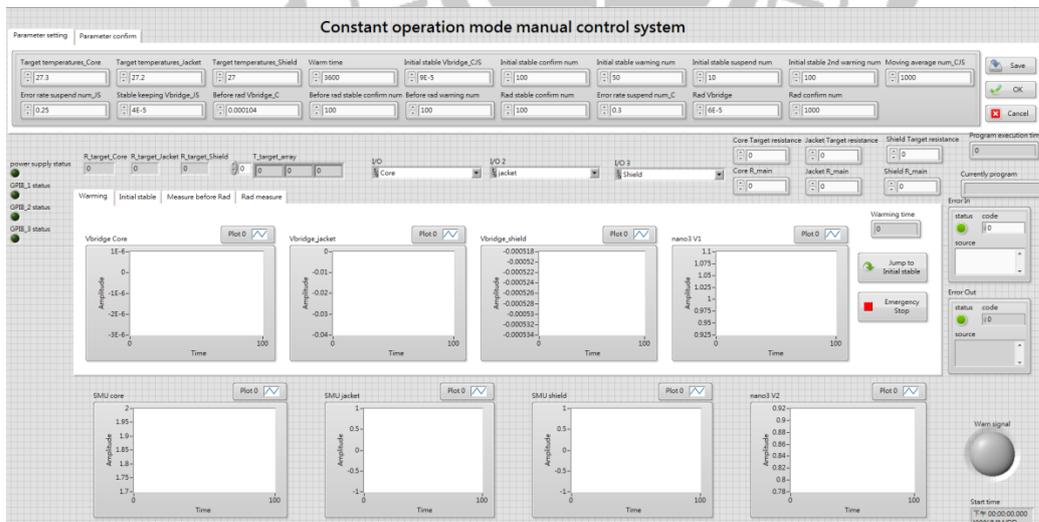
石墨卡計是以壓克力 PMMA (Polymethylmethacrylate) 作為外殼，如圖(2-9)所示，包含外部接通抽真空設備與真空測量計。圖片另一端有 BNC 接口，分別提供 Core、Jacket、Shield 之熱敏電阻連接用。圖(2-9)中有兩個紅色盒為真空劑量表，連接抽真空系統(包含渦卷式乾幫浦與渦輪幫浦)。在 2008 年法國石墨卡計的研究文獻中[17]，對石墨卡計內部構造進行深入量測及探討，包含卡計內各部分之：面積、質量、密度、溫度...之大量物理上之材質探討及分析，詳實內容可參閱其文獻。



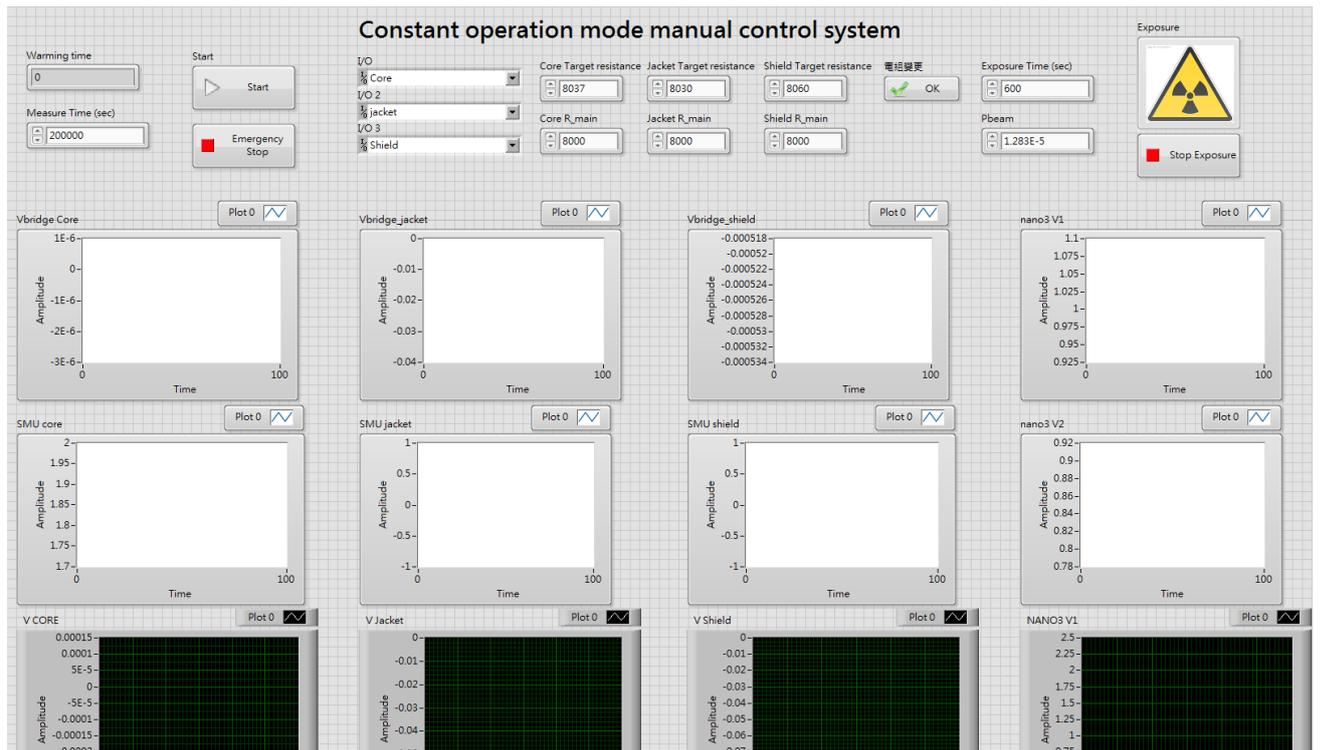
圖(2-9) 石墨卡計

## 2.4 系統軟體

由 LabVIEW 程式開發之系統軟體提供石墨卡計原級標準系統有一個人性化界面的操作端，在 104 年度的計畫期中報告中已完成現階段的程式介面優化[7]，原具有多餘的按鍵以及繁複的設定介面如圖(2-10)，移除繁複的設定介面保持人機介面的整潔、移除部分用不到的按鍵以及分頁，並將原本的設定的參數固定，只留下簡潔的控制按鍵以及數據監控視窗如圖(2-11)。另一方面，系統操作介面由 PID 控制、恆溫模式與絕熱模式三大因素所構成。



圖(2-10) 原本程式介面示意圖按鍵及數據監控視窗圖



圖(2-11) 程式介面示意圖簡潔的按鍵及數據監控視窗圖

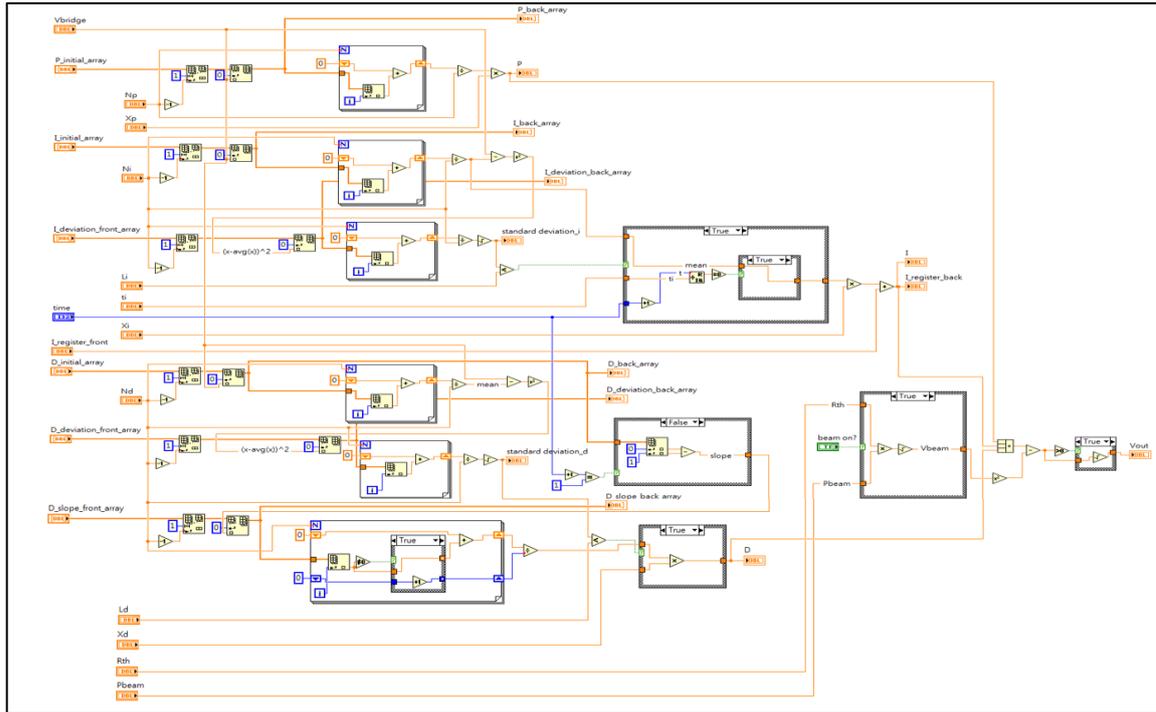
## 2.4.1 PID 控制

透過團隊以 LabVIEW 軟體由開發之 PID，程式撰寫如圖(2-12)所示

其運作原理流程圖如圖(2-13)所示，運作原理流程圖之明確定義可參考原

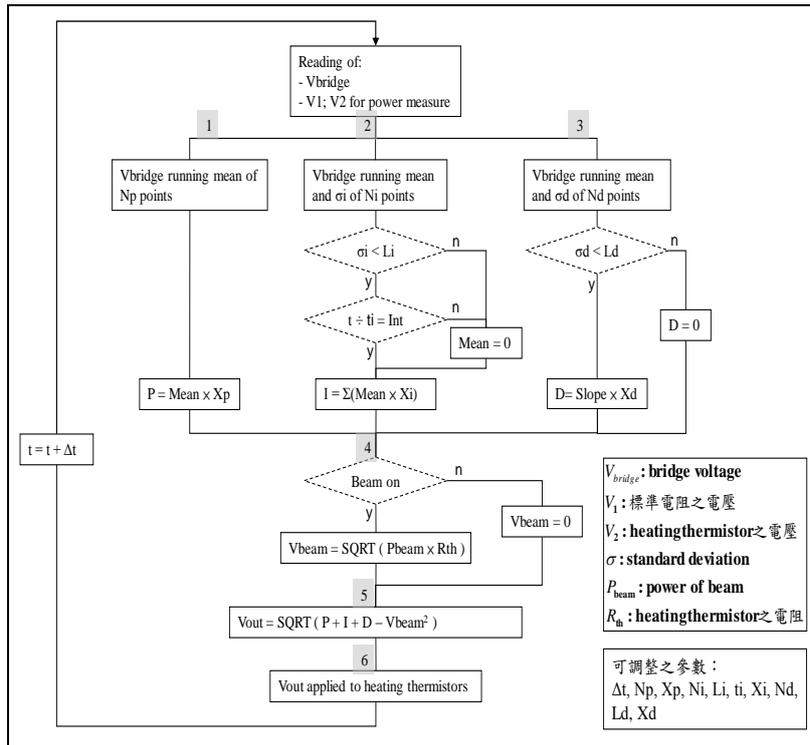
出處[8]。圖(2-12) 程式編寫為狀態機結構，並利用位移暫存器(shift

register)來完成 PID 每秒之遞迴運算作業。



圖(2-12) PID 之 LabVIEW 程式

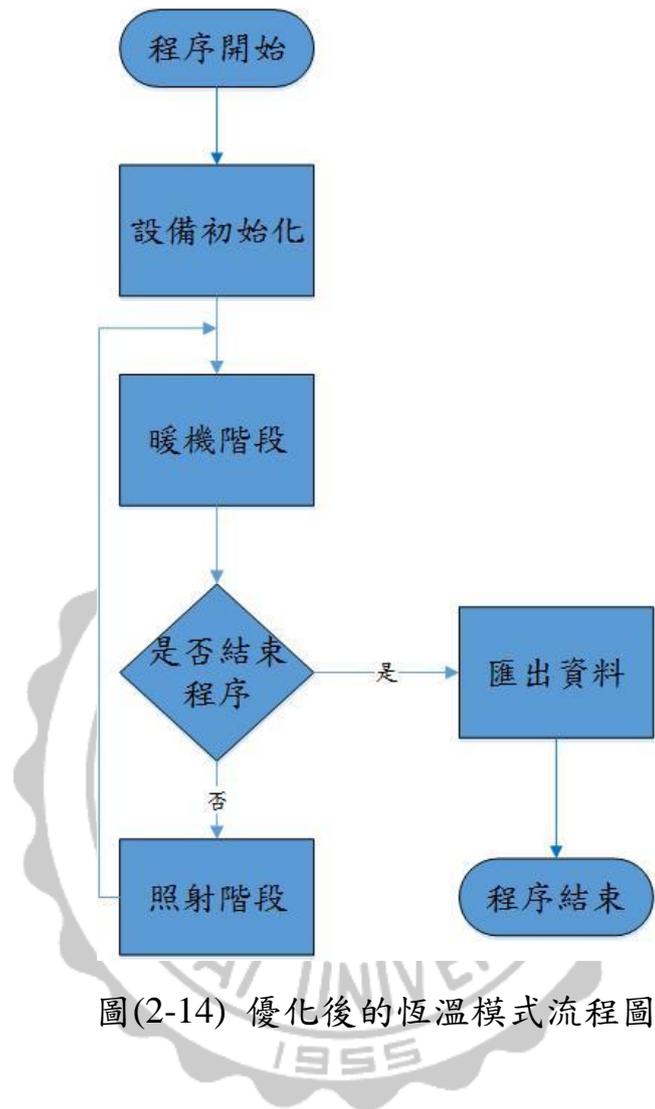
圖(2-12)為 PID 程式撰寫，其中所見之 P\_initial\_array、I\_initial\_array 及 D\_initial\_array 為初始值設定之外，其餘 I\_deviation\_front\_array、I\_register\_front、D\_deviation\_front\_array、D\_slope\_front\_array 等輸入端為位移暫存器之輸入端口，P\_back\_array、I\_back\_array、I\_deviation\_back\_array、I\_register\_back、D\_back\_array、D\_deviation\_back\_array、D\_slope\_back\_array 等輸出端為位移暫存器之輸出連接，回傳數值作為 PID 下一秒之遞迴數據源。



圖(2-13) PID 控制流程圖

### 2.4.2 恆溫模式

恆溫模式中有暖機階段與照射階段，兩階段皆受到 PID 控制達成恆溫，並根據暖機階段與照射階段之不同恆溫功率，其差值即可計算出輻射劑量，其優化後的恆溫模式流程圖如圖(2-14)所示。

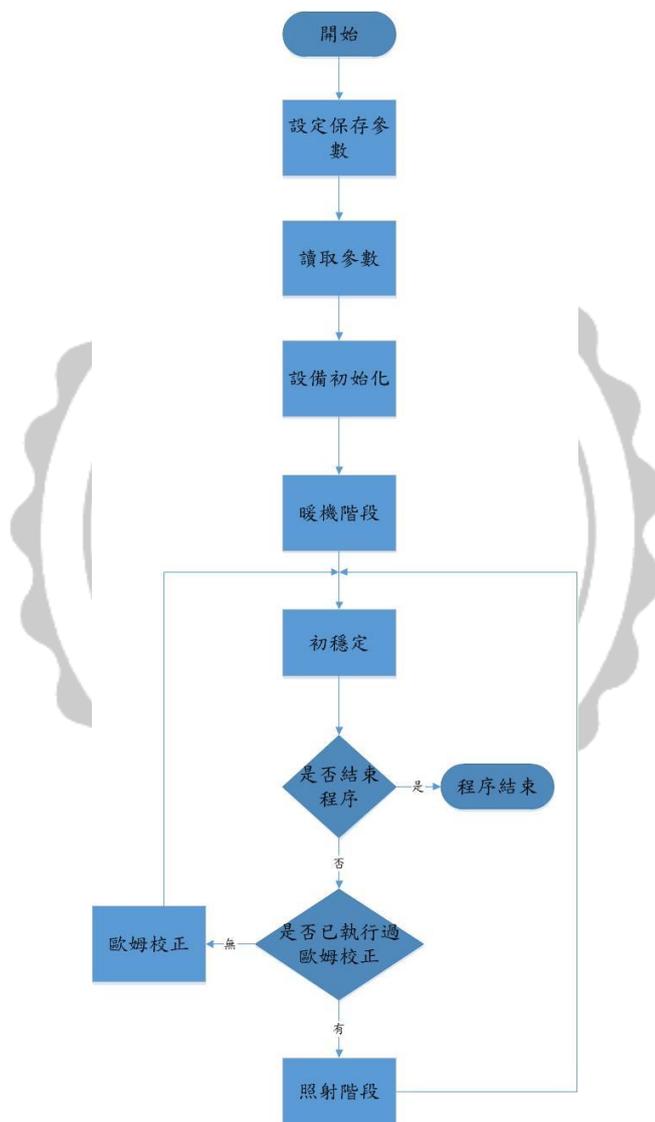


圖(2-14) 優化後的恆溫模式流程圖

### 2.4.3 絕熱模式

絕熱模式主要分為暖機、初穩定、量測階段及照射階段，大致上與恆溫模式相似，但多了歐姆校正這個流程，用以觀察因加入額外電阻而造成電橋的平衡破壞後之電壓變化量，其絕熱模式之流程如圖(2-15)，而

本論文以恆溫模式之實驗數據分析為主，故絕熱模式僅介紹此流程，參考自 103 年度期末報告[9]。



圖(2-15) 絕熱模式流程圖

### 第三章 石墨卡計原級標準系統量測不確定度評估及其修正因子探討

本論文旨在完成石墨卡計原級標準系統量測數學之不確定度評估，由學長論文中提及一份量測報告不具有量測不確定度是無法充分表達量測資訊，亦無法與國內甚至國際間同等級之設備進行比對，因此該論文對石墨卡計原級標準系統進行量測不確定度的評估，建立一套印證量測結果可靠度的評估方法[6]，關於量測不確定度對實驗室的影響可參考 ISO/IEC 17025:2005 量測與校正實驗室能力一般要求[13]，以及 ISO/IEC 17025 規範及認證實務介紹[14]。

另一部分關於修正因子包含真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量等修正因子納入考量[5]，進一步分析導線修正因子對該量測數據的影響，接著對石墨卡計原級標準系統之現有量測數據進行修正，透過公式計算出量測數據標準量測不確定度。

本章依據為標準量測不確定度、標準量測不確定度應用於卡計實驗數據、修正因子、探討導線修正因子、石墨卡計原級標準系統之現有量測數據量測不確定度分析。

### 3.1 標準量測不確定度

量測不確定是透過分析或找出各項誤差來源，以數學來量化為“A類”及“B類”不確定度。將不確定度分為A類與B類之目的是取得不確定度的兩種途徑，此兩種評估方法的基礎均基於機率分佈，用任一方法得到的不確定度分量，都可用變異數或標準差來量化。其中“A類”以統計方法來評估；“B類”為綜合經驗數據評估，兩者皆以機率分佈的數學概念為分析基礎，經計算可得各項標準不確定度(Standard uncertainty)，再合併成組合標準不確定度(Combined standard uncertainty)。另一方面，找出特定信賴水準與有效自由度之涵蓋因子，可用於計算擴充不確定度(Expanded uncertainty)，則此擴充不確定度將具有合理的校正能力 [10]。

本節將依序說明建立量測不確定度方程式、A類量測不確定度、B類量測不確定度與組含量測不確定度。

### 3.1.1 建立量測不確定度方程式

首先根據量測方法、操作步驟與計算公式等等，建立量測模式[6]，量測結果為  $y$ ，與量測過程中各種量測值、修正值或相關參數值由  $n$  個獨立自變數輸入量  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  構成，因此  $y$  之組合標準量測不確定度方程式如公式(3.1)所示。

$$y = f\left(x_i \mid_{i=1}^n\right) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \dots\dots\dots(3.1)$$

### 3.1.2 A 類量測不確定度

比如分析量測值  $y$  之組合標準量測不確定度方程式其中一項之自變數  $x_1$ ，可藉由一系列  $x_1$  觀測值或統計值分析，以實際量測之統計方法分析實驗結果。此類情況下可採用 A 類量測不確定度評估如，可表示為：

$S(\bar{a}) = \frac{s(a_t)}{\sqrt{t}}$ ，如公式(3.2)所推導。適用於評估量測的隨機性及重複性所產生的可能變異[6,11]。公式(3.2)中  $t=1,2,3,\dots, n$  為量測取樣數量； $\bar{a}$  為其取樣平均值； $n$  任意數。

$$S(\bar{a}) = \sqrt{\text{Var}(\bar{a})} = \sqrt{\text{Var}\left(\frac{1}{t} \sum_{i=1}^n a_i\right)} = \sqrt{\frac{1}{t^2} \sum_{i=1}^n \text{Var}(a_i)} = \sqrt{\frac{1}{t^2} * t * \text{Var}(a_t)} = \sqrt{\frac{\text{Var}(a_t)}{t}} = \frac{s(a_t)}{\sqrt{t}} \dots\dots\dots(3.2)$$

### 3.1.3 B 類量測不確定度

B 類的標準不確定度是以經驗上的機率分配模式為基準，根據經驗值、原始數據、儀器規格表、解析度、環境條件、廠商說明書或先前測得之觀測值等任何有效資料，作為機率分布所推導之機率密度函數依據。通常 B 類評估方式適用於評估無法量測或不需要量測的可能變異情形 [6,11]。B 類的標準不確定度是以一個非以重複觀察得到的自變數輸入量  $x_i$  做分析，需利用  $x_i$  可能變化的全部資訊進行判斷，這些資訊可能包括：

1. 以往的量測數據；
2. 對材料性質及儀器性能的相關經驗知識；
3. 製造說明書；
4. 校正與其他證明書的資料；
5. 參考手冊對引用資料所附的不確定度等 [10]。

公式(3.3)中所使用之  $U$  為單一獨立事件  $x_i$  之不確定值； $k$  為擴充係數 [12]。

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \dots\dots\dots(3.3)$$

### 3.1.4 組含量測不確定度

若欲計算公式(3.1)  $y$ 之組合標準不確定度 $u_c(y)$ ，需列出各項獨立因素的標準不確定度之後，利用公式(3.4)計算組合標準不確定度 $u_c(y)$ 的值[6,10,11]。組合不確定度是根據公式(3.1)所建立之數學方程式而來，計算的過程中每一項不確定因子均為互相獨立之事件， $(\frac{\partial f}{\partial x_i})$ 為敏感係數，根據公式(3.1)微分計算獲得，搭配各項獨立之事件之不確定度，同時可使整體組合不確定度之物理量統合回原公式(3.1)之物理量。

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \dots\dots\dots(3.4)$$

### 3.2 標準量測不確定度應用於卡計實驗數據

為將前述之數學公式帶入石墨卡計原級標準系統中，首先石墨卡計之吸收劑量(Absorb Dose)開始分析[8]，其數學表示如公式(3.4)。 $\dot{D}_c$ 為吸收劑量； $P_{rad}$ 為石墨卡計吸收功率； $m_c$ 為石墨盒質量； $\gamma_{cal}$ 為石墨對 Co-60 輻射之熱能產率(thermal yield)。

$$\dot{D}_c = \frac{P_{rad}}{m_c} \times \frac{1}{\gamma_{cal}} \dots\dots\dots(3.4)$$

### 3.2.1 建立石墨卡計量測不確定度方程式

由上述公式(3.4)分析並搭配第二章 2.2 節凱文電橋之圖(2-8) 熱敏電阻功率輸出方式,可得知石墨卡計原級標準系統之量測功率 $P_{rad}$ 來自於照射前恆溫所消耗功率減去照射中恆溫功率如公式(3.5)描述。其中公式參數搭配第二章 2.2 節凱文電橋之圖(2-8)彙整為表(3-1) 不確定因子參數表。

$$\dot{D}_c = \frac{P_{rad}}{m_c \times \gamma_{cal}} = \frac{(P_o - P_i)}{m_c \times \gamma_{cal}} = \frac{(V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}})}{m_c \times \gamma_{cal}} \dots\dots\dots(3.5)$$

表(3-1) 不確定因子參數表

參數	說明	不確定類別	參數	說明	不確定類別
$V_{o1}$	輻射照射前標準 電阻之跨壓	A	$V_{i1}$	輻射照射中標準 電阻之跨壓	A

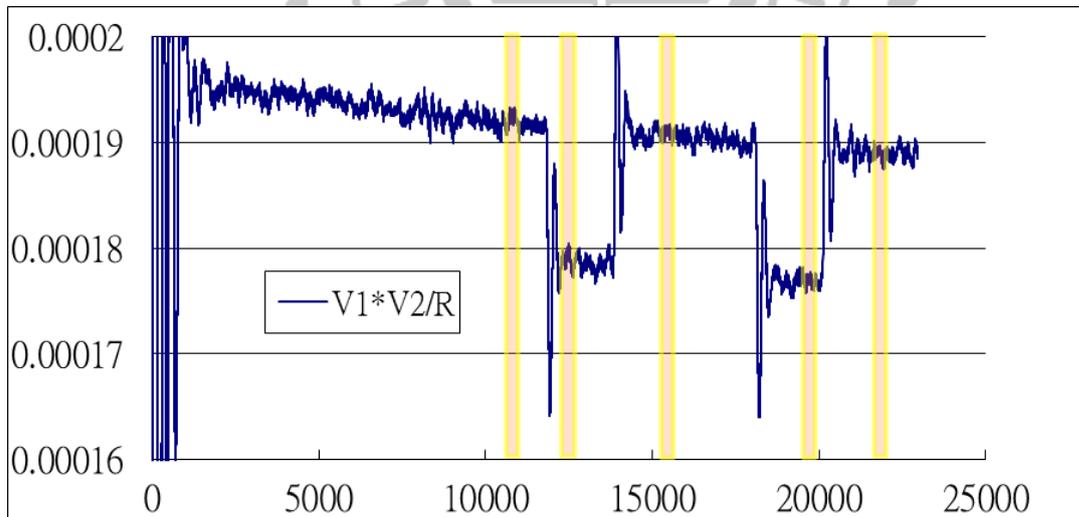
$V_{o2}$	輻射照射前熱敏 電阻之跨壓	A	$V_{i2}$	輻射照射中熱敏 電阻之跨壓	A
$P_o$	輻射照射前 恆溫消耗功率	A	$P_i$	輻射照射中 恆溫消耗功率	A
$R_{std}$	標準電阻	B	$m_c$	石墨質量	

為建立量測不確定度方程式，需由石墨卡計原級標準系統釐清定義出  $n$  個獨立自變數輸入量  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。依據公式(3.5)分析石墨卡計原級標準系統，在電路量測上影響吸收劑量的不確定因子有  $V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, R_{std}$  五個獨立事件變量，因此可列出量測不確定度方程式如公式(3.6)[6]。

$$y = f(V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, R_{std}) = \frac{(V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}})}{m_c \times \gamma_{cal}} \dots\dots\dots(3.6)$$

### 3.2.2 石墨卡計 A 類量測不確定度

此類量測不確定度可用於分析石墨卡計量測系統之電壓量測值不確定度，以圖(3-1) 實際量測功率數據圖為例，分別在 10803~11802 秒、12803~13802 秒、15003~16002 秒、19003~20002 秒與 21003~22002 秒(圖 3-1 之黃色加亮區間)取樣 1000 點，取樣之因子為  $V_{o11}$ 、 $V_{o12}$ 、 $V_{o21}$ 、 $V_{o22}$ 、 $V_{o31}$ 、 $V_{o32}$  與  $V_{i11}$ 、 $V_{i12}$ 、 $V_{i21}$ 、 $V_{i22}$ 、 $V_{i31}$ 、 $V_{i32}$  之輻射照射中標準電阻與熱敏電阻之跨壓數據，各別計算數據之標準差，即為本次實驗之 A 類不確定度來源。



圖(3-1) 實際量測功率數據圖

### 3.2.3 石墨卡計 B 類量測不確定度

本論文所使用之 B 類不確定度針對標準電阻作分析，是以分析標準電阻之規格來取得  $R_{std}$  之 B 類不確定度，計算方式如公式(3.7)。U 為標準電阻之阻抗不確定值，比如市售之 1%，8000Ω 之電阻有  $8000\Omega \times 1\% = 80\Omega$  之阻抗不確定值； $k$  為擴充係數，假定此誤差範圍信心水準為 95% [6,12]，涵蓋因子  $k = 2$ 。

$$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 1\%}{2} = 40\Omega \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

### 3.2.4 石墨卡計組合量測不確定度

組合不確定度是由 A 類、B 類之量測不確定度因子各別搭配其敏感係數之平方合開根號而得，故本論文須對原量測不確定度方程式(3.6)之各量測不確定因子做偏微分，其各別因子之偏微分結果如公式(3.8)至公式(3.12)所示。

$$\frac{\partial y}{\partial V_{o1}} = \frac{V_{o2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

$$\frac{\partial y}{\partial V_{o2}} = \frac{V_{o1}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

$$\frac{\partial y}{\partial V_{i1}} = \frac{-V_{i2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$\frac{\partial y}{\partial V_{i2}} = \frac{-V_{i1}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\frac{\partial y}{\partial R_{std}} = \frac{(V_{o1}V_{o2} - V_{i1}V_{i2})}{R_{std}^2} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \dots\dots\dots(3.12)$$

各別完成因子之偏微分後，帶入組合不確定度如公式(3.4)，可得到公式(3.13)之計算結果。

$$u_c(D_c) = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial V_{o1}} \right)^2 u^2(V_{o1}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{o2}} \right)^2 u^2(V_{o2}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{i1}} \right)^2 u^2(V_{i1}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{i2}} \right)^2 u^2(V_{i2}) + \left( \frac{\partial f}{\partial R_{std}} \right)^2 u^2(R_{std}) \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots(3.13)$$

### 3.3 修正因子

本論文撰寫期間已執行三次實際Co-60 照射劑量量測，本人參與計畫期間之目標為石墨卡計原級標準系統量測數據與現有水吸收劑量標準之差異小於1%，因此期間對修正因子更加重視。

使用石墨卡計量測輻射劑量時，有幾項修正因子可納入考慮分別為真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量等修正因子等[5]。在計畫期間石墨卡計原級標準系統

量測數據與現有水吸收劑量標準之差異為3.028%，此數據若經核能研究所之修正因子修正後，石墨卡計原級標準系統量測數據計算結果與現有水吸收劑量標準之差異為1.5622%，得到更接近預期目標之結果。修正因子使用之修正方法如公式(3.14)所示，公式(3.14)所提及之修正因子參數與其對應不確定度整理如表(3-2)[5]。

$$\dot{D}_c = \frac{P_{rad}}{m_c \times \gamma_{cal}} \times k_{gap} \times k_{imp} \times k_{def} \times k_{axial} \times k_{radial} \times k_{w/c} \dots\dots(3.14)$$

表(3-2) 修正因子與其所對應之不確定度

項目	名稱	不確定度
$k_{gap}$	真空間隙修正	0.1400%
$k_{imp}$	雜質修正	0.1000%
$k_{def}$	熱缺損修正	0.1000%
$k_{axial}$	軸向修正	0.1000%
$k_{radial}$	徑向修正	0.1000%

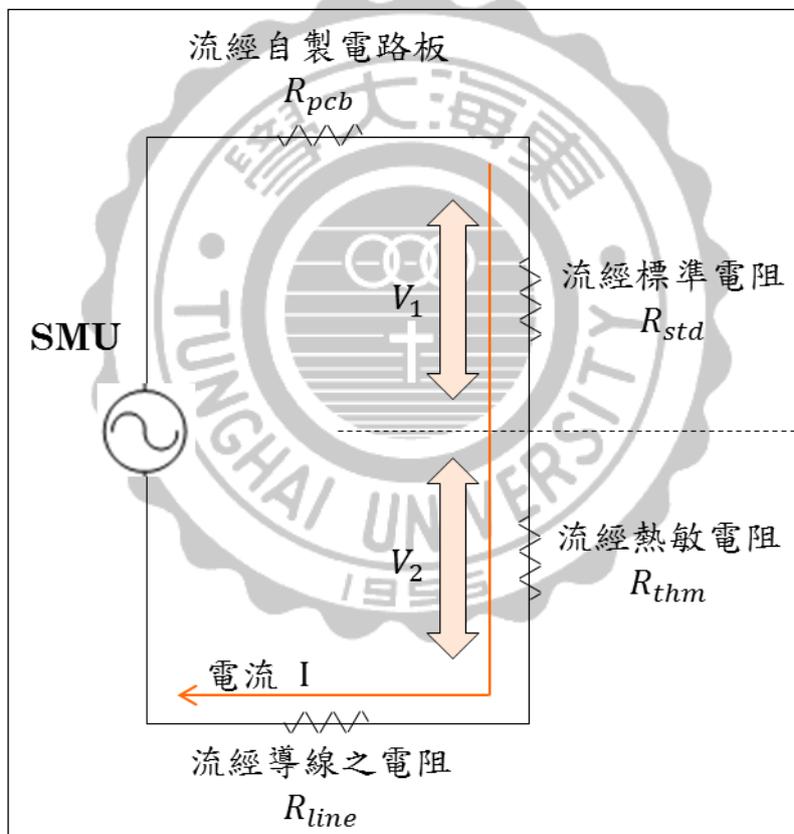
$k_{w/c}$	水吸收劑量除 以石墨吸收劑量	<b>0.1000%</b>
總計		<b>0.2638%</b>

### 3.4 探討導線修正因子

在核研所的評估石墨卡計的修正因子報告中[5]，提及該團隊參考自 A standard for absorbed dose rate to water in a Co-60 field using a graphite calorimeter at the national metrology institute of Japan. 之期刊[15]，該文獻中不僅說明 5 項修正因子，且整理為表格於該文獻 337 頁中，促使本人重新探索石墨卡計系統中可修正之因子。

石墨卡計原級標準系統量測不確定度主要分析於公式(3.4)，配第二章 2.2 節量測電路板中圖(2-8) 熱敏電阻功率輸出方式，可得知石墨卡計原級標準系統之量測功率  $P_{rad}$  來自於照射前恆溫所消耗功率減去照射中恆溫功率如公式(3.5)描述。進一步考慮到輻射照射前與輻射照射中流經熱敏電阻的電流量值不同，相對於輻射照射前與輻射照射中流經導線之電流也不同，因此依據圖(2-8) 熱敏電阻功率輸出方式，進一步分析導線

因電流不同具有不同功率消耗，示意如圖(3-2)。圖中 $R_{line}$ 為石墨卡計本體與電磁屏蔽箱之間所連接的導線，其規格為RG316銅軸電纜(coaxial cable)有著 27.6 Ohms / 100m 的導線阻抗，資料由核能研究所合作廠商新象所提供。



圖(3-2) 電路系統電流變化示意圖

### 3.4.1 導線修正因子數學建立

根據石墨卡計之吸收劑量分析[8]，其數學表示如公式(3.4)。公式(3.4)中所描述的 $P_{rad}$ 與圖(3-2)描述之消耗功率不同，而圖(3-2)所描述之電路系統電流變化更接近實際的量測狀態，由此觀點出發得到公式(3.15)

$$P_{rad} = P_o - P_i = (\bar{P}_o + \tilde{P}_o) - (\bar{P}_i + \tilde{P}_i) \dots\dots\dots(3.15)$$

公式(3.15)中的 $\bar{P}_o$  為理想照射前恆溫功率； $\bar{P}_i$ 為理想照射中恆溫功率； $\tilde{P}_o$ 為照射前導線電阻造成的功率； $\tilde{P}_i$ 為照射中導線電阻造成的功率。 $\tilde{P}_o$ 與 $\tilde{P}_i$  數值會因為照射前後電流大小不相同造成導線消耗的功率也不同，因此會造成量測數據上的誤差。為找出誤差存在的可能性加入導線消耗功率之考量，如公式(3.2)。

$$\begin{aligned} P_{rad} &= P_o - P_i \\ &= (\bar{P}_o + \tilde{P}_o) - (\bar{P}_i + \tilde{P}_i) \\ &= \left[ V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} + \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right] - \left[ V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} + \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right] \dots\dots\dots(3.16) \end{aligned}$$

公式(3.16)中  $\left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)$  與  $\left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)$  的即為導線電流，其差異就是導致導

線上功率損耗不均的原因，將公式(3.16)整理為公式(3.17)可以更加清楚導線電阻造成量測誤差量  $\widetilde{\Delta P}$  與理想的輻射功率差值  $\overline{\Delta P}$  (相當於理想輻射功率  $\overline{P_{rad}}$ )。

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= P_o - P_i \\
 &= (\overline{P}_o + \widetilde{P}_o) - (\overline{P}_i + \widetilde{P}_i) \\
 &= (\overline{P}_o - \overline{P}_i) + (\widetilde{P}_o - \widetilde{P}_i) \\
 &= \left[ V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right] + \left[ \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right] \dots\dots\dots(3.17)
 \end{aligned}$$

定義出主要的導線誤差後，希望能透過修正因子的修正方式來修正數據上的偏差量，因此公式(3.18)整理修正量之關係並由公式(3.19)導出修正量  $k_{line}$  值。並將上述之各公式所使用的參數與意義整理為表(3-3)。

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= P_o - P_i \\
 \overline{\Delta P} &= P_{rad} - \Delta P \dots\dots\dots(3.18)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{rad} \times k_{line} &= \overline{P_{rad}} \\
 k_{line} &= \frac{\overline{P_{rad}}}{P_{rad}} = \frac{P_{rad} - \Delta P}{P_{rad}} \dots\dots\dots(3.19)
 \end{aligned}$$

表(3-3) 公式使用之參數與意義

符號	說明	符號	說明
$P_o$	$P_o = \bar{P}_o + \tilde{P}_o$	$\tilde{P}_o$	照射前功率誤差
$P_i$	$P_i = \bar{P}_i + \tilde{P}_i$	$\tilde{P}_i$	照射中功率誤差
$\bar{P}_o$	理想照射前功率	$\overline{\Delta P}$	理想輻射功率
$\bar{P}_i$	理想照射中功率	$\widetilde{\Delta P}$	量測誤差量
$P_{rad}$	量測之輻射功率	$k_{line}$	導線功率損失的修正因子

### 3.4.2 導線修正因子不確定度

根據本章提出之修正因子  $k_{line}$  需加以判斷其不確定性以利後續計算， $k_{line}$  是由公式(3.19)而來因此需探討其中各項因子的來源，重新整理此可得公式(3.20)。

$$k_{line} = \frac{\overline{P_{rad}}}{P_{rad}} = \frac{P_{rad} - \Delta P}{P_{rad}} \dots\dots\dots(3.20)$$

$$= \frac{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right)}{V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}}}$$

公式(3.20)中包含  $V_{o1}$ ,  $V_{o2}$ ,  $V_{i1}$ ,  $V_{i2}$ ,  $R_{std}$  與  $R_{line}$  之量測不確定因子，因此須對其每一項參數進行敏感度分析，如公式(3.21)至公式(3.26)所示。

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial V_{o1}} = \frac{\left( \frac{V_{o2}}{R_{std}} + \frac{2 \times V_{o1} \times R_{line}}{R_{std}^2} \right) \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left[ \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right) \right] \left( \frac{V_{o2}}{R_{std}} \right)}{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2} \dots\dots\dots(3.21)$$

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial V_{o2}} = \frac{\left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right) \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left[ \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right) \right] \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)}{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2} \dots\dots\dots(3.22)$$

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial V_{i1}} = \frac{\left( -\frac{V_{i2}}{R_{std}} + \frac{2 \times V_{i1} \times R_{line}}{R_{std}^2} \right) \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left[ \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right) \right] \left( \frac{-V_{i2}}{R_{std}} \right)}{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2} \dots\dots\dots(3.23)$$

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial V_{i2}} = \frac{\left( \frac{-V_{i1}}{R_{std}} \right) \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left[ \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right) \right] \left( \frac{-V_{i1}}{R_{std}} \right)}{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial R_{std}} = \frac{\left\{ \left[ \frac{V_{i1} V_{i2} - V_{o1} V_{o2}}{R_{std}^2} + \frac{2 R_{std} R_{line} (V_{o1}^2 - V_{i1}^2)}{R_{std}^4} \right] \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left[ \left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right) - \left( \left( \frac{V_{o1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} - \left( \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2 \times R_{line} \right) \right] \left( \frac{V_{i1} V_{i2} - V_{o1} V_{o2}}{R_{std}^2} \right) \right\}}{\left( V_{o2} \frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2} \frac{V_{i1}}{R_{std}} \right)^2} \dots\dots\dots(3.25)$$

$$\frac{\partial k_{line}}{\partial R_{line}} = \frac{\left(\frac{V_{o1}}{R_{std}}\right)^2 - \left(\frac{V_{i1}}{R_{std}}\right)^2}{V_{o2}\frac{V_{o1}}{R_{std}} - V_{i2}\frac{V_{i1}}{R_{std}}} \dots\dots\dots(3.26)$$

完成上述之敏感係數計算後，可帶入評估 $k_{line}$ 組合不確定度，其公式為公式(3.27)。

$$u_c(k_{line}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial k_{line}}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i)} \dots\dots\dots (3.27)$$

### 3.5 石墨卡計原級標準系統之現有量測數據量測不確定度分析

現階段該石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度，可納入上述之導線修正因子分析結果，帶入石墨卡計原級標準系統量測數據計算之結果與現有水吸收劑量標準之差異為 1.54185%，所使用之計算方法如公式(3.28)，並針對公式(3.28)做 $\dot{D}_c$ 劑量之量測不確定度計算，方法同 3.3 與 3.4 節，計算出敏感係數後組合為 $\dot{D}_c$ 劑量之量測不確定度，此處不再贅述其微分過程，由第四章呈現計算結果。

$$\dot{D}_c = \frac{P_{rad}(c)}{M_{core}} \times k_{gap} \times k_{imp} \times k_{def} \times k_{axial} \times k_{radial} \times k_{w/c} \times k_{line} \dots(3.28)$$

## 第四章 實驗數據分析

在執行石墨卡計電路系統整合測試與比對驗證計畫期間已完成三次輻射照射實驗，能分析之數據量較少是由於照射須由核能研究所具照射執照之研究人員進行操作，而石墨卡計量測系統已完之三次輻射照射實驗依序為為 2014.10.15、2014.12.30 及 2015.02.09 之三組數據來表現。於 4-1 節表格(4-1)整理出實驗順序。

本章將分為石墨卡計量測數據、石墨卡計數據之不確定度及現階段該石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度三部分，用以完整描述量測之數據及第三章公式使用之情形。

### 4.1 石墨卡計量測數據

實驗室研究團隊於「石墨卡計電路系統整合測試與比對驗證(1/2)」計劃期間如期完成儀器整合並進行輻射實驗。其石墨卡計量測系統之量測結果如表(4-1)。表格之量測數照射劑量葛雷(Gy)與量測之照射功率焦耳(J)換算如公式(4.1)所示：

$$\text{葛雷(Gy)} = \frac{\text{焦耳(J)}}{\text{質量(kg)}} \dots\dots\dots(4.1)$$

表(4-1) 石墨卡計量測系統之量測結果

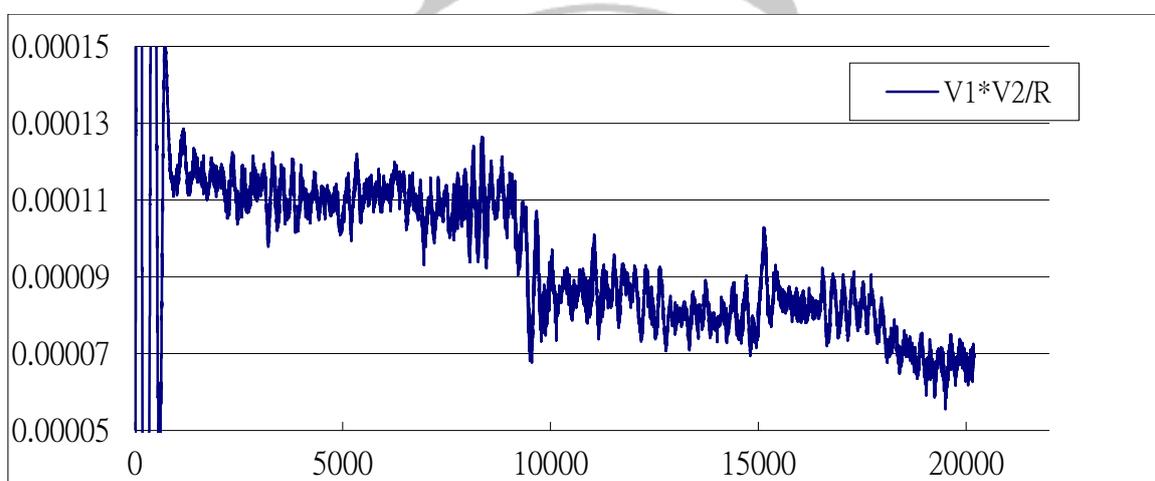
次數	實驗日期	量測之照射 功率 $P_{rad}$ (J)	量測之照射 劑量 (Gy)	水吸收劑量 (Gy)	百分誤差計算 (石墨卡計與水吸收劑量比)
第一次 實驗	2014.10.15	$2.19676 * 10^{-5}$	$2.0811 * 10^{-2}$	$1.2145 * 10^{-2}$	$\frac{ 1.2145 * 10^{-2} - 2.0811 * 10^{-2} }{1.2145 * 10^{-2}}$ = 71.35%
第二次 實驗	2014.12.30	$1.2905 * 10^{-5}$	$1.2225 * 10^{-2}$	$1.26477 * 10^{-2}$	$\frac{ 1.26477 * 10^{-2} - 1.2225 * 10^{-2} }{1.26477 * 10^{-2}}$ = 3.342%
第三次 實驗	2015.02.09	$1.2784 * 10^{-5}$	$1.2111 * 10^{-2}$	$1.24489 * 10^{-2}$	$\frac{ 1.24489 * 10^{-2} - 1.2111 * 10^{-2} }{1.24489 * 10^{-2}}$ = 2.714%

表格(4-1)已展示出三次實驗彙整數據，下列 4.1.1 至 4.1.3 節將對三次時間各別作完整數據描述。

#### 4.1.1 第一次實驗量測數據

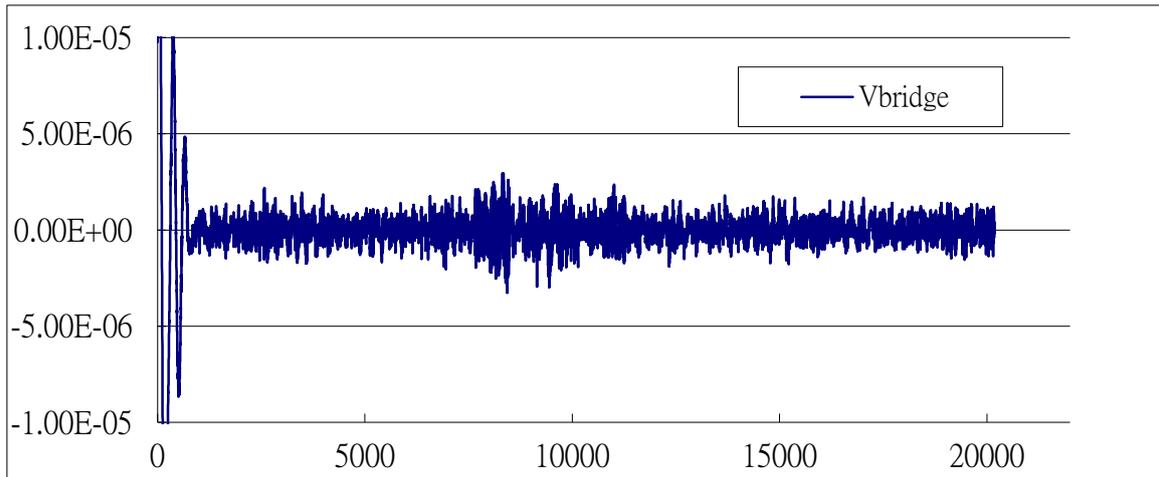
第一次Co-60劑量實際量測，時間為2014.10.15。量測結果如圖(4-1)，前面第0~9400秒之間是等待石墨卡計內部石墨盒達目標阻值並保持恆溫，

由9400~1500 秒期間開始Co-60輻射照射，可於圖(4-2)中觀察出提供恆溫的功率有明顯下降。1500秒後關閉輻射，圖(4-2)中並沒有明顯的回到照射前輸出功率，其原因是輻射艙門關閉後，團隊人員與核研所人員皆十分興奮的進入照射室觀察石墨卡計，導致環境溫度上升使恆溫系統持續降低輸出功率。



圖(4-1) 第一次實驗之功率輸出圖

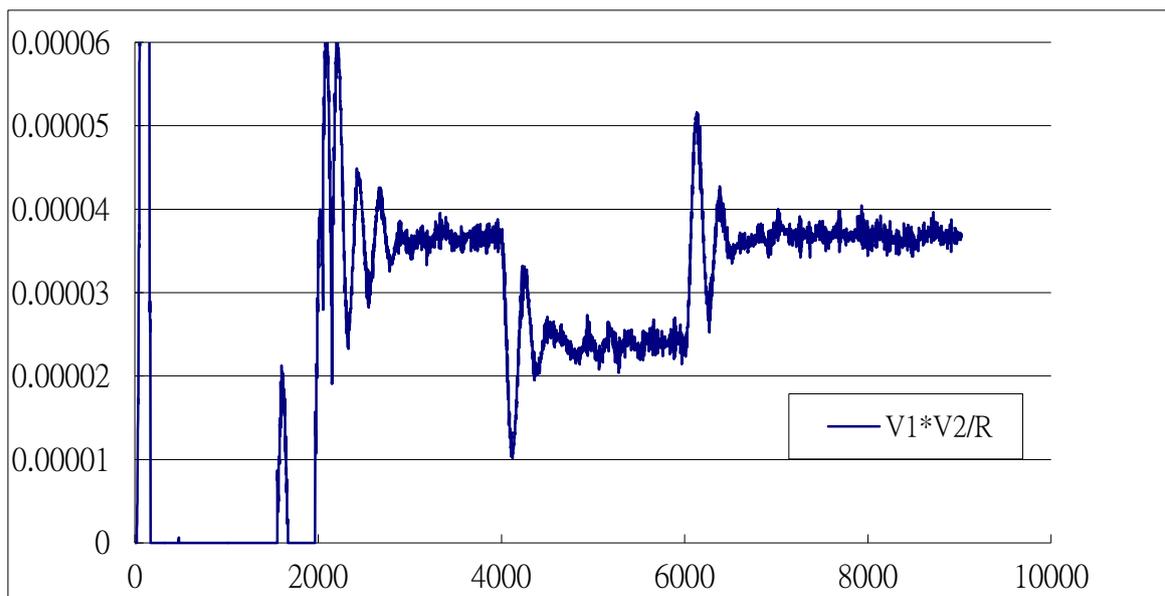
圖(4-2)為2014.10.15本次實驗過程中凱文電橋的量測狀態，本次實驗凱文電橋數據表現達成預期，能透過LabVIEW軟體之PID控制在 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 福特(V)的壓差範圍內。



圖(4-2) 第一次實驗之凱文電橋平衡圖

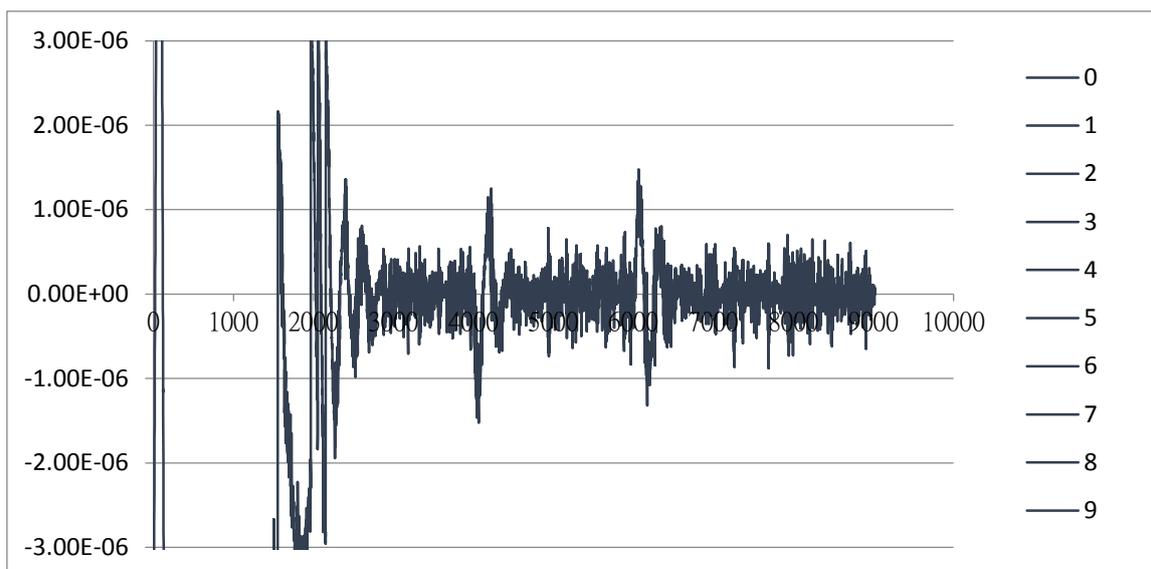
#### 4.1.2 第二次實驗量測數據

第二次Co-60劑量實際量測實驗時間為2014.12.30，這次實驗已完成更新電路板，改使用0.1%之Digi-key精密電阻。實驗之功率輸出量測結果如圖(4-3)，0~4000秒作為石墨盒達目標阻值並保持恆溫，4000~6000秒為Co-60輻射照射時間，6000之後Co-60輻射艙門關閉並回覆與目標阻值保持恆溫。



圖(4-3) 第二次實驗之功率輸出圖

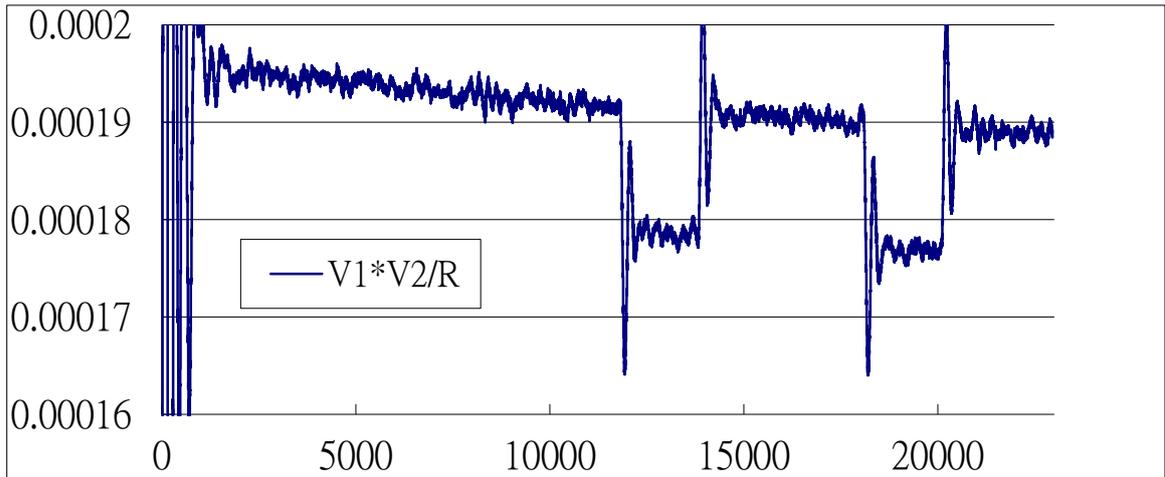
圖(4-4)為2014. 12.30本次實驗過程中凱文電橋的量測狀態，本次實驗凱文電橋數據表現達成更換精密電阻後之預期目標，能透過LabVIEW軟體之PID控制在  $\pm 1 \times 10^{-6}$  福特(V)的壓差範圍內。



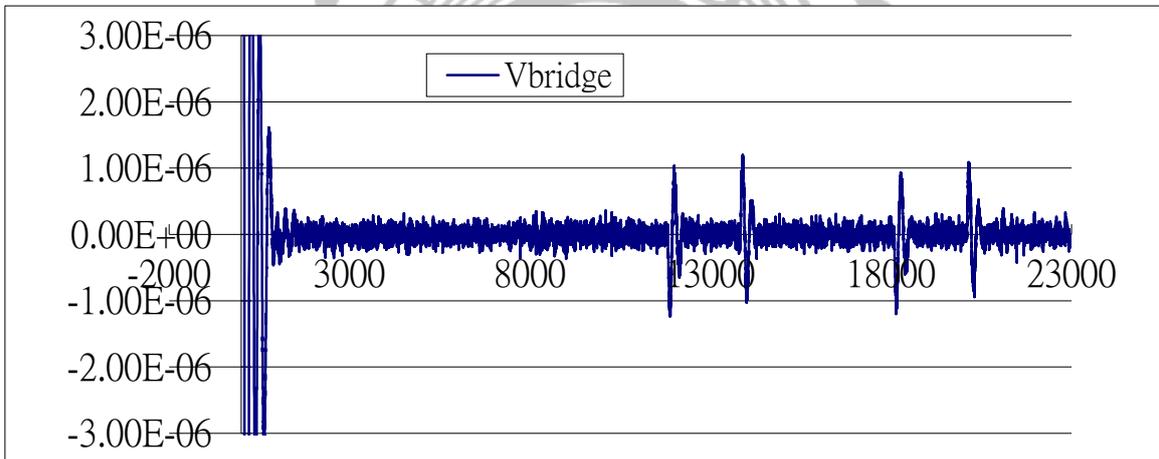
圖(4-4) 第二次實驗之凱文電橋平衡圖

#### 4.1.3 第三次實驗量測數據

第三次Co-60劑量實際量測實驗時間為2015.2.9，本次實驗與2014.12.30的實驗環境雷同，本次實驗數據進行兩次輻射照射，並取其整體的照射前功率與照射中功率平均值為本次實驗數據。圖(4-5) 為2015.2.9實驗之功率輸出圖，圖(4-6)為2015.2.9實驗之凱文電橋平衡圖。



圖(4-5) 第三次實驗之功率輸出圖



圖(4-6) 第三次實驗之凱文電橋平衡圖

## 4.2 石墨卡計數據之不確定度

本節透過第三章之計算公式，可計算得紀錄各次實驗的量測不確定度，呈現方式以表格列出照射時間與各項重要數據整理，以及量測不確

定度計算結果。下列將依序以三次實驗數據各別做評與描述。

#### 4.2.1 第一次實驗量測不確定度

第一次Co-60劑量實際量測，時間為2014.10.15。本次實驗使用1%市售精密電阻所構成之電路板，所採用之量測原始數據為表(4-2)。

表(4-2) 第一次實驗量測原始數據

項目	平均值	標準差	項目	平均值	標準差
Po	1.08190E-04	5.89097E-06	Vo1	0.970544	0.018814
Pi	8.62222E-05	4.11864E-06	Vo2	0.908365	0.017935
Po-Pi	2.19676E-05	7.18796E-06	Vi1	0.843433	0.028956
水吸收劑量	1.2145E-02		Vi2	0.787516	0.0274
劑量誤差	71%				

本次實驗數據分析其量測不確定度如表(4-3)，以下將列出A類標準不確定度、B類標準不確定度、各項不確定因子的敏感係數與最後整合的組合不確定度。

表(4-3) 第一次實驗之量測不確定度

2014.10.15	
A類標準 不確定度 取樣次數( $q$ ) 為5600次	$u(V_{o1}) = \frac{s(V_{o1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0188}{\sqrt{5600}} = 0.0002512V$ $u(V_{o2}) = \frac{s(V_{o2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0179}{\sqrt{5600}} = 0.0002392V$ $u(V_{i1}) = \frac{s(V_{i1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.02896}{\sqrt{5600}} = 0.00038699V$ $u(V_{i2}) = \frac{s(V_{i2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0274}{\sqrt{5600}} = 0.00036614V$
B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 1\%}{2} = \frac{80\Omega}{2} = 40\Omega$
各項不確定因子 之敏感係數	$\frac{\partial f}{\partial V_{o1}} = \frac{V_{o2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = \frac{0.9084}{8000} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715}$ $= 0.150449914929 \approx 0.15(A \cdot s / kg \cdot h)$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o2}} = \frac{V_{o1}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = \frac{0.9705}{8000} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715}$ $= 0.160734965256 \approx 0.16(A \cdot s / kg \cdot h)$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i1}} = \frac{-V_{i2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = \frac{-0.7875}{8000} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715}$ $= -0.130426362843 \approx -0.13(A \cdot s / kg \cdot h)$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i2}} = \frac{-V_{i1}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = \frac{-0.8434}{8000} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715}$ $= -0.139684564345 \approx -0.14(A \cdot s / kg \cdot h)$

	$\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = \frac{\partial}{\partial R_{std}} \left[ \frac{(V_{o1}V_{o2} - V_{i1}V_{i2})}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \right]$ $= \frac{(0.8816 - 0.6642)}{8000^2} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715} \approx 9.014 \times 10^{-6} \text{ (A} \cdot \text{s/kg} \cdot \text{h)}$
組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)}$ $= \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial V_{o1}} \right)^2 u^2(V_{o1}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{o2}} \right)^2 u^2(V_{o2}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{i1}} \right)^2 u^2(V_{i1}) + \left( \frac{\partial f}{\partial V_{i2}} \right)^2 u^2(V_{i2}) + \left( \frac{\partial f}{\partial R_{std}} \right)^2 u^2(R_{std}) \right]^{\frac{1}{2}}$ $= [1.3804655 \times 10^{-7}]^{\frac{1}{2}} = 3.7154616 \times 10^{-4}$

#### 4.2.2 第二次實量測不確定度

第二次Co-60劑量實際量測實驗時間為2014.12.30，這次實驗已完成更新電路板，改使用0.1%之Digi-key精密電阻，所採用之量測原始數據為表(4-4)。分析其量測不確定度如下表(4-5)。本次實驗進行一次輻射照射，取兩次輻射前與後之恆溫數據做平均及一次輻射中恆溫數據。本次實驗不確定方程式因量測數據增加而更新不確定度因素如：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o11}, V_{o12}, V_{i1}, V_{i2}, V_{o21}, V_{o22}, R_{std})。其中吸收劑量公式改為：\dot{D}_c = \frac{(V_{o1}V_{o2} + V_{o21}V_{o22})/2 - V_{i1}V_{i2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}}。V_{o11} 與 V_{o21} 取平均後計算$$

可得 $V_{o1}$ ，同理  $V_{o2}$  亦用此方法獲得。標準差則以平方合開根號獲得。

表(4-4) 第二次實驗量測原始數據

項目	平均值	標準差	項目	平均值	標準差
Po	3.6573E-05	8.0284E-07	V <sub>o11</sub>	5.7571E-01	6.3204E-03
Pi	2.3915E-05	9.6755E-07	V <sub>o12</sub>	5.0774E-01	5.5877E-03
Po2	3.7096E-05	7.3314E-07	V <sub>i1</sub>	4.6577E-01	9.4483E-03
Po-Pi	1.2905E-05	1.2573E-06	V <sub>i2</sub>	4.1059E-01	8.3425E-03
水吸收劑量	1.2648E-02		V <sub>o21</sub>	5.8005E-01	5.7141E-03
劑量誤差	1.2380E-02		V <sub>o22</sub>	5.1158E-01	5.0516E-03

表(4-5) 第二次實驗之量測不確定度

2014.12.30	
A類標準 不確定度 取樣次數(q) 為1000次	$u(V_{o11}) = \frac{s(V_{o11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00632}{\sqrt{1000}} = 0.0001999V$ $u(V_{o12}) = \frac{s(V_{o12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00559}{\sqrt{1000}} = 0.0001767V$ $u(V_{i1}) = \frac{s(V_{i1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00945}{\sqrt{1000}} = 0.0002988V$ $u(V_{i2}) = \frac{s(V_{i2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00834}{\sqrt{1000}} = 0.0002638V$ $u(V_{o21}) = \frac{s(V_{o21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00571}{\sqrt{1000}} = 0.0001807V$ $u(V_{o22}) = \frac{s(V_{o22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00505}{\sqrt{1000}} = 0.0001598V$
B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 0.1\%}{2} = \frac{8\Omega}{2} = 4\Omega$

<p>各項不確定因子 之敏感係數</p>	$\frac{\partial f}{\partial V_{o11}} = \frac{V_{o2}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.04205 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o12}} = \frac{V_{o1}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.04768 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i1}} = \frac{-V_{i2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.068 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i2}} = \frac{-V_{i1}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.07714 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o21}} = \frac{V_{o22}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.04236 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o22}} = \frac{V_{o21}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.04803 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = \frac{\partial}{\partial R_{std}} \left[ \frac{(V_{o1}V_{o2} + V_{o21}V_{o22})/2 - V_{i1}V_{i2}}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \right]$ $= \frac{(0.1033)}{8000^2} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715} \approx 2.1383 \times 10^{-6} (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$
<p>組合不確定度</p>	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o11}, V_{o12}, V_{i1}, V_{i2}, V_{o21}, V_{o22}, R_{std})$ $= 3.40468 \times 10^{-5}$

### 4.2.3 第三次實驗量測數據量測不確定度

第三次 Co-60 劑量實際量測實驗時間為 2015.2.9，這次實驗與第二次實驗使用相同電路板，量測環境皆雷同，所採用之量測原始數據為表(4-6)。

本次實驗有兩次輻射照射，固有三次輻射前；兩次輻射中恆溫數據。

表(4-6) 第三次實驗量測原始數據

項目	平均值	標準差	項目	平均值	標準差
Po	1.9172E-04	4.6865E-07	V <sub>o11</sub>	1.3036E+00	1.5824E-03
Pi	1.7847E-04	6.4554E-07	V <sub>o12</sub>	1.1765E+00	1.4467E-03
Po2	1.9063E-04	2.5014E-06	V <sub>i11</sub>	1.2581E+00	2.2603E-03
Pi2	1.7680E-04	5.4502E-07	V <sub>i12</sub>	1.1349E+00	2.0651E-03
Po3	1.8896E-04	6.6276E-07	V <sub>o21</sub>	1.3000E+00	8.5313E-03
Po-Pi	1.2802E-05		V <sub>o22</sub>	1.1732E+00	7.7999E-03
			V <sub>i21</sub>	1.2523E+00	1.9186E-03
			V <sub>i22</sub>	1.1296E+00	1.7520E-03
水吸收劑量	1.2449E-02		V <sub>o31</sub>	1.2943E+00	2.2549E-03
劑量誤差	1.8890E-02		V <sub>o32</sub>	1.1680E+00	2.0618E-03

分析其量測不確定度如下表(4-7)。本次實驗不確定方程式因量測數據增加而更新不確定度因素如：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o11}, V_{o12}, V_{i1}, V_{i2}, V_{o21}, V_{o22}, V_{i21}, V_{i22}, V_{o31}, V_{o32}, R_{std}) \quad \circ$$

其中吸收劑量公式改為：

$$\dot{D}_c = \frac{(V_{o11}V_{o12}+V_{o21}V_{o22}+V_{o31}V_{o32})/3-(V_{i11}V_{i12}-V_{i21}V_{i22})/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \quad \circ$$

V<sub>o11</sub>、V<sub>o21</sub> 與 V<sub>o31</sub> 取平均後計算可得 V<sub>o1</sub>，同理 V<sub>o2</sub> 亦用此方法獲得。

表(4-7) 第三次實驗之量測不確定度

2015.2.9	
A類標準 不確定度 取樣次數( $q$ ) 為1000次	$u(V_{o11}) = \frac{s(V_{o11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00158}{\sqrt{1000}} = 0.00005004V$ $u(V_{o12}) = \frac{s(V_{o12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00145}{\sqrt{1000}} = 0.00004575V$ $u(V_{i11}) = \frac{s(V_{i11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00226}{\sqrt{1000}} = 0.000071478V$ $u(V_{i12}) = \frac{s(V_{i12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00207}{\sqrt{1000}} = 0.00006530V$ $u(V_{o21}) = \frac{s(V_{o21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00853}{\sqrt{1000}} = 0.0002698V$ $u(V_{o22}) = \frac{s(V_{o22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00780}{\sqrt{1000}} = 0.0002467V$ $u(V_{i21}) = \frac{s(V_{i21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00192}{\sqrt{1000}} = 0.00006067V$ $u(V_{i22}) = \frac{s(V_{i22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00175}{\sqrt{1000}} = 0.00005540V$ $u(V_{o31}) = \frac{s(V_{o31})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00225}{\sqrt{1000}} = 0.00007130V$ $u(V_{o32}) = \frac{s(V_{o32})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00206}{\sqrt{1000}} = 0.00006520V$
B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 0.1\%}{2} = \frac{8\Omega}{2} = 4\Omega$

<p>各項不確定因子 之敏感係數</p>	$\frac{\partial f}{\partial V_{o11}} = \frac{V_{o2}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.06495 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o12}} = \frac{V_{o1}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.07197 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i11}} = \frac{-V_{i2}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.09398 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i12}} = \frac{-V_{i1}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.10418 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o21}} = \frac{V_{o22}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.06477 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o22}} = \frac{V_{o21}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.07177 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i21}} = \frac{-V_{i22}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.09354 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i22}} = \frac{-V_{i21}/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = -0.10370 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o31}} = \frac{V_{o32}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.064482 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o32}} = \frac{V_{o31}/3}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} = 0.07145 (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$ $\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = \frac{\partial}{\partial R_{std}} \left[ \frac{(V_{o1}V_{o2} + V_{o21}V_{o22} + V_{o31}V_{o32})/3 - (V_{i1}V_{i2} - V_{i21}V_{i22})/2}{R_{std}} \times \frac{1}{m \cdot r_{cal}} \right]$ $= \frac{(0.10232)}{8000^2} \times \frac{1}{0.001055575132 \times 0.715} \approx 2.1183 \times 10^{-6} (\text{A} \cdot \text{s} / \text{kg} \cdot \text{h})$
<p>組合不確定度</p>	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2} u^2(x_i) = f(V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, V_{o21}, V_{o22}, V_{i21}, V_{i22}, V_{o31}, V_{o32}, R_{std})$ $= 3.01885 \times 10^{-5}$

### 4.3 現階段該石墨卡計原級標準系統量測數據之不確定度

石墨卡計量測系統之量測值修正後的結果是否影響到量測的不確定度，本章節在修正後的數值提供充分計算與考量。可參閱 3.3 節之公式 (3.14) 與進一步討論的導線修正因子如公式(3.19)，其量測不確定度因子評估後的數值整理如下表(4-8)所示。過程詳見 4.3.1 節，最後整體石墨卡計吸收劑量之量測不確定度值詳見 4.3.2 節。

表(4-8) 量測不確定度因子數值

項目	不確定度	項目	不確定度
$u(\dot{D}_c)_{2014.10.15}$	<b>0.0372%</b>	$K_{line(2014.10.15)}$	<b>0.000085%</b>
$u(\dot{D}_c)_{2014.12.30}$	<b>0.0034%</b>	$K_{line(2014.12.30)}$	<b>0.000064%</b>
$u(\dot{D}_c)_{2015.02.09}$	<b>0.0030%</b>	$K_{line(2015.02.09)}$	<b>0.000063%</b>
$K_{gap}$	<b>0.1400%</b>	$K_{axial}$	<b>0.1000%</b>
$K_{imp}$	<b>0.1000%</b>	$K_{radial}$	<b>0.1000%</b>
$K_{def}$	<b>0.1000%</b>		

### 4.3.1 導線修正因子量測不確定度

根據本論文第三章3.4.2節的公式(3.27)為計算，透過表(4-9)呈現計算後的各別數值與量測不確定度，其中 $R_{line}$ 為石墨卡計本體與電磁屏蔽箱之間所連接的導線，其規格為RG316銅軸電纜(coaxial cable)有著 27.6 Ohms / 100m 的導線阻抗，實際量測長度皆為3公尺因導線具有 0.828Ω(Ohms)的阻抗(資料由核能研究所合作廠商新象所提供，因此使用 B類標準不確定度以信心水準為95% [4]，涵蓋因子 $k = 2$ 帶入計算)。

表(4-9) 導線修正因子量測不確定度

2014.10.15	
A類標準 不確定度 取樣次數( $q$ ) 為5600次	$u(V_{o1}) = \frac{s(V_{o1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0188}{\sqrt{5600}} = 0.0002512V$ $u(V_{o2}) = \frac{s(V_{o2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0179}{\sqrt{5600}} = 0.0002392V$ $u(V_{i1}) = \frac{s(V_{i1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.02896}{\sqrt{5600}} = 0.00038699V$ $u(V_{i2}) = \frac{s(V_{i2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.0274}{\sqrt{5600}} = 0.00036614V$

B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 1\%}{2} = \frac{80\Omega}{2} = 40\Omega$ $u(R_{line}) = \frac{U}{k} = \frac{0.828\Omega \times 1\%}{2} = 0.00414\Omega$	
各項不確定因子 之敏感係數	$\frac{\partial f}{\partial V_{o1}} = -5.713 \times 10^{-4}$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o2}} = 6.014 \times 10^{-4}$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i1}} = 5.115 \times 10^{-4}$	$\frac{\partial f}{\partial V_{i2}} = -5.374 \times 10^{-4}$ $\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = 1.372 \times 10^{-8}$ $\frac{\partial f}{\partial R_{line}} = -1.326 \times 10^{-4}$
組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, R_{std}, R_{line})$ $= 8.495 \times 10^{-7}$	
2014.12.30		
A類標準 不確定度 取樣次數( $q$ ) 為1000次	$u(V_{o11}) = \frac{s(V_{o11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00632}{\sqrt{1000}} = 0.0001999V$ $u(V_{o12}) = \frac{s(V_{o12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00559}{\sqrt{1000}} = 0.0001767V$ $u(V_{i1}) = \frac{s(V_{i1})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00945}{\sqrt{1000}} = 0.0002988V$ $u(V_{i2}) = \frac{s(V_{i2})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00834}{\sqrt{1000}} = 0.0002638V$ $u(V_{o21}) = \frac{s(V_{o21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00571}{\sqrt{1000}} = 0.0001807V$ $u(V_{o22}) = \frac{s(V_{o22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00505}{\sqrt{1000}} = 0.0001598V$	
B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 0.1\%}{2} = \frac{8\Omega}{2} = 4\Omega$ $u(R_{line}) = \frac{U}{k} = \frac{0.828\Omega \times 1\%}{2} = 0.00414\Omega$	

各項不確定因子 之敏感係數	$\frac{\partial f}{\partial V_{o1}} = -5.796 \times 10^{-4}$	$\frac{\partial f}{\partial V_{i2}} = -5.287 \times 10^{-4}$
	$\frac{\partial f}{\partial V_{o2}} = 6.560 \times 10^{-4}$	$\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = 1.466 \times 10^{-8}$
	$\frac{\partial f}{\partial V_{i1}} = 4.674 \times 10^{-4}$	$\frac{\partial f}{\partial R_{line}} = -1.416 \times 10^{-4}$

組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, R_{std}, R_{line})$ $= 6.407 \times 10^{-7}$
--------	--

2015.02.09

A類標準 不確定度 取樣次數(q) 為1000次	$u(V_{o11}) = \frac{s(V_{o11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00158}{\sqrt{1000}} = 0.00005004V$ $u(V_{o12}) = \frac{s(V_{o12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00145}{\sqrt{1000}} = 0.00004575V$ $u(V_{i11}) = \frac{s(V_{i11})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00226}{\sqrt{1000}} = 0.000071478V$ $u(V_{i12}) = \frac{s(V_{i12})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00207}{\sqrt{1000}} = 0.00006530V$ $u(V_{o21}) = \frac{s(V_{o21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00853}{\sqrt{1000}} = 0.0002698V$ $u(V_{o22}) = \frac{s(V_{o22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00780}{\sqrt{1000}} = 0.0002467V$ $u(V_{i21}) = \frac{s(V_{i21})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00192}{\sqrt{1000}} = 0.00006067V$ $u(V_{i22}) = \frac{s(V_{i22})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00175}{\sqrt{1000}} = 0.00005540V$ $u(V_{o31}) = \frac{s(V_{o31})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00225}{\sqrt{1000}} = 0.00007130V$ $u(V_{o32}) = \frac{s(V_{o32})}{\sqrt{q}} = \frac{0.00206}{\sqrt{1000}} = 0.00006520V$
-----------------------------------	--

B類標準 不確定度	$u(R_{std}) = \frac{U}{k} = \frac{8000\Omega \times 0.1\%}{2} = \frac{8\Omega}{2} = 4\Omega$ $u(R_{line}) = \frac{U}{k} = \frac{0.828\Omega \times 1\%}{2} = 0.00414\Omega$	
各項不確定因子 之敏感係數	$\frac{\partial f}{\partial V_{o1}} = -1.323 \times 10^{-3}$ $\frac{\partial f}{\partial V_{o2}} = 1.447 \times 10^{-3}$ $\frac{\partial f}{\partial V_{i1}} = 1.278 \times 10^{-3}$	$\frac{\partial f}{\partial V_{i2}} = -1.398 \times 10^{-3}$ $\frac{\partial f}{\partial R_{std}} = 1.424 \times 10^{-8}$ $\frac{\partial f}{\partial R_{line}} = -1.376 \times 10^{-4}$
組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f(V_{o1}, V_{o2}, V_{i1}, V_{i2}, R_{std}, R_{line})$ $= 6.338 \times 10^{-7}$	

在表(4-9)  $K_{line}$  量測不確定度的計算後可得到三次的實驗量測不確定度，其三次量測不確定度取第二次與第三次兩組實驗數據的平均為  $6.373 \times 10^{-7}$ 。故本論文所提出之  $K_{line}$  修正因子具有著0.00006373%的不確定度。

#### 4.3.2 導線修正因子量測不確定度

石墨卡計量測系統之量測值修正後的結果受到修正因子的不確定度影響，本節在得到修正後的不確定數值加以計算石墨卡計量測不確定度，如 3.5 節的公式(3.28)之量測不確定度。表(4-9)所示各項量測不確定度，

由於第一次實驗的量測數據較不具參考性因此僅分析後兩者實驗數據。

表(4-10) 現階段石墨卡計量測不確定度

原始方程式： $\dot{D}_c = \frac{P_{rad}(c)}{M_{core}} \times k_{gap} \times k_{imp} \times k_{def} \times k_{axial} \times k_{radial} \times k_{w/c} \times k_{line}$							
2014.12.30							
B類標準 不確定度	$u\left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right) = \frac{U}{k} = \frac{1.2225 \times 10^{-2} \times 0.0034\%}{2} = 2.078 \times 10^{-7} \text{Gy}$ $u(k_{gap}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0073 \times 0.14\%}{2} = 7.05 \times 10^{-4}$ $u(k_{imp}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9998 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{def}) = \frac{U}{k} = \frac{1.00 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{axial}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0002 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{radial}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9997 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{w/c}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0516 \times 0.1\%}{2} = 5.26 \times 10^{-4}$ $u(k_{line}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9998 \times 6.373 \times 10^{-7}}{2} = 3.186 \times 10^{-7}$						
各項不確定因子 之敏感係數	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right)} = 1.05875</math></td> <td style="width: 50%; border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial k_{axial}} = 0.0129406</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial k_{gap}} = 0.0128494</math></td> <td style="border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial k_{radial}} = 0.0129471</math></td> </tr> <tr> <td style="border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial k_{imp}} = 0.0129458</math></td> <td style="border: none;"><math>\frac{\partial f}{\partial k_{w/c}} = 0.0123081</math></td> </tr> </table>	$\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right)} = 1.05875$	$\frac{\partial f}{\partial k_{axial}} = 0.0129406$	$\frac{\partial f}{\partial k_{gap}} = 0.0128494$	$\frac{\partial f}{\partial k_{radial}} = 0.0129471$	$\frac{\partial f}{\partial k_{imp}} = 0.0129458$	$\frac{\partial f}{\partial k_{w/c}} = 0.0123081$
$\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right)} = 1.05875$	$\frac{\partial f}{\partial k_{axial}} = 0.0129406$						
$\frac{\partial f}{\partial k_{gap}} = 0.0128494$	$\frac{\partial f}{\partial k_{radial}} = 0.0129471$						
$\frac{\partial f}{\partial k_{imp}} = 0.0129458$	$\frac{\partial f}{\partial k_{w/c}} = 0.0123081$						

	$\frac{\partial f}{\partial k_{def}} = 0.0129432$	$\frac{\partial f}{\partial k_{line}} = 0.0129458$
組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f \left( \frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}, k_{gap}, k_{imp}, k_{def}, k_{axial}, k_{radial}, k_{w/c}, k_{line} \right) = 7.41264 \times 10^{-4}$	
2015.02.09		
B類標準 不確定度	$u\left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right) = \frac{U}{k} = \frac{1.2111 \times 10^{-2} \times 0.0034\%}{2} = 2.059 \times 10^{-7} \text{Gy}$ $u(k_{gap}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0073 \times 0.14\%}{2} = 7.05 \times 10^{-4}$ $u(k_{imp}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9998 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{def}) = \frac{U}{k} = \frac{1.00 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{axial}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0002 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{radial}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9997 \times 0.1\%}{2} = 5.00 \times 10^{-4}$ $u(k_{w/c}) = \frac{U}{k} = \frac{1.0516 \times 0.1\%}{2} = 5.26 \times 10^{-4}$ $u(k_{line}) = \frac{U}{k} = \frac{0.9998 \times 6.373 \times 10^{-7}}{2} = 3.186 \times 10^{-7}$	
各項不確定因子 之敏感係數	$\frac{\partial f}{\partial \left(\frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}\right)} = 1.05875$ $\frac{\partial f}{\partial k_{gap}} = 0.0127296$ $\frac{\partial f}{\partial k_{imp}} = 0.0128251$ $\frac{\partial f}{\partial k_{def}} = 0.0128225$	$\frac{\partial f}{\partial k_{axial}} = 0.0128199$ $\frac{\partial f}{\partial k_{radial}} = 0.0128263$ $\frac{\partial f}{\partial k_{w/c}} = 0.0121933$ $\frac{\partial f}{\partial k_{line}} = 0.0128251$

組合不確定度	$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} = f \left( \frac{P_{rad}(c)}{M_{core}}, k_{gap}, k_{imp}, k_{def}, k_{axial}, k_{radial}, k_{w/c}, k_{line} \right) = 7.41262 \times 10^{-4}$
--------	---

由表(4-1)的分析，依據核研所提供之修正因子包含真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量等修正因子等，計算後整理出表(4-11)，加入導線修正因子後可整理出表(4-12) 現階段量測結果與不確定度。

表(4-11) 石墨卡計量測系統之量測修正後結果

次數	實驗日期	量測之照射 功率 $P_{rad}$ (J)	量測之照射 修正劑量 (Gy)	水吸收劑量 (Gy)	百分誤差計算 (石墨卡計與水吸收劑量比)
第一次 實驗	2014.10.15	$2.19676 \times 10^{-5}$	$2.1796 \times 10^{-2}$	$1.2145 \times 10^{-2}$	$\frac{ 1.2145 \times 10^{-2} - 2.1796 \times 10^{-2} }{1.2145 \times 10^{-2}}$ $= 79.46\%$
第二次 實驗	2014.12.30	$1.2905 \times 10^{-5}$	$1.2804 \times 10^{-2}$	$1.26477 \times 10^{-2}$	$\frac{ 1.26477 \times 10^{-2} - 1.2804 \times 10^{-2} }{1.26477 \times 10^{-2}}$ $= 1.2358\%$
第三次 實驗	2015.02.09	$1.2784 \times 10^{-5}$	$1.2684 \times 10^{-2}$	$1.24489 \times 10^{-2}$	$\frac{ 1.24489 \times 10^{-2} - 1.2684 \times 10^{-2} }{1.24489 \times 10^{-2}}$ $= 1.8885\%$

表(4-12) 石墨卡計量測系統之現階段量測結果與不確定度

次數	量測之照射 功率 $P_{rad}$ (J)	量測之照射現 階段修正劑量 (Gy)	修正計量之不 確定度	水吸收劑量 (Gy)	百分誤差計算 (石墨卡計與水吸收劑量比)
第二次 實驗	$1.2905 * 10^{-5}$	$1.28014 * 10^{-2}$	0.074%	$1.26477 * 10^{-2}$	$\frac{ 1.26477 * 10^{-2} - 1.28014 * 10^{-2} }{1.26477 * 10^{-2}}$ = 1.21555%
第三次 實驗	$1.2784 * 10^{-5}$	$1.26815 * 10^{-2}$	0.074%	$1.24489 * 10^{-2}$	$\frac{ 1.24489 * 10^{-2} - 1.26815 * 10^{-2} }{1.24489 * 10^{-2}}$ = 1.86814%

由於實驗第一次數與第二三次環境不同，故本論文提及之數據皆以第二、第三次實驗數據之平均值為主，因此卡計量測之數據未經修正與水吸收計量差異為 3.028%；經過核研所修正因子校正後為 1.56215%；納入本論文分析之導線修正因子後與水吸收計量差異為 1.541845%。

## 第五章 結論與未來展望

本論文於探討本實驗室與行政院原子能委員會核能研究所共同開發之「石墨卡計原級標準系統」的量測不確定度來源及其修正因子。根據現階段之石墨卡計版本所取得之實驗數據分析，完成對所擷取之實驗數據進行其量測不確定度分析及修正因子校正，其量測數據與現有水吸收劑量標準之差異已降為 1.5418%，已十分接近本年度計畫之預期目標。

本論文未能來得及替 104 年度計畫所更新之石墨卡計原級標準系統量測不確定度做評估，同時本論文探討之量測不確定度來源及其修正因子來自於恆溫模式下的量測數據，仍有絕熱模式之量測不確定度來源及其修正因子可以持續評估。另一方面在修正因子部分現階段團隊已分析出真空間隙、核心雜質、軸向不均勻、徑向不均勻、熱缺陷、水吸收劑量除以石墨吸收劑量及導線散熱等 7 種修正因子，在實驗中仍有其他物理變量可持續研究分析其修正因子。

## 參考文獻

- [1] 溫志宏、陳家豪、苗新元，行政院原子能委員會石墨卡計原級標準系統之量測電路開發 99 年度期末報告，2010。
- [2] 溫志宏、陳家豪、苗新元，行政院原子能委員會石墨卡計原級標準系統之量測電路開發 100 年度期末報告，2011。
- [3] 溫志宏、苗新元、劉日新，行政院原子能委員會石墨卡計原級標準系統之量測電路開發 101 年度期末報告，2012。
- [4] 溫志宏、劉日新、翁峻鴻，行政院原子能委員會石墨卡計原級標準系統之量測電路開發 102 年度期末報告，2013。
- [5] 黃增德、蘇水華、林怡君，評估石墨卡計的修正因子，2013。
- [6] 洪磊，石墨卡計原級標準系統量測不確定度評估之研究，2014。
- [7] 溫志宏、翁健二，石墨卡計電路系統整合測試與比對驗證(2/2)期中報告，2015。
- [8] J. Daures and A. Ostrowsky. 2005. New constant-temperature operating mode for graphite calorimeter at LNE-LNHB. *Institute of Physics Publishing*. 50(2005):4035-4052.
- [9] 溫志宏、翁健二，行政院原子能委員會石墨卡計原級標準系統之

- 量測電路開發 103 年度期末報告，2014。
- [10] 黃景鐘、王正忠、葉錦勳，環境試樣放射核種分析之不確定度評估指引，行政院原子能委員會輻射偵測中心，2001 年。
- [11] 房性中，量測作業之不確定度分析與探討，中華技術雜誌，2001。
- [12] 林柏佐，信賴區間與信心水準的解讀，<http://web.ntnu.edu.tw>。
- [13] 財團法人全國認證基金會，ISO/IEC 17025:2005 量測與校正實驗室能力一般要求，2005。
- [14] 沈翰祖，財團法人全國認證基金會，ISO/IEC 17025 規範及認證實務介紹，2011。
- [15] Y. Morishita\*, M. Kato, N. Takata, T. Kurosawa, T. Tanaka and N. Saito. 2012. A standard for absorbed dose rate to water in a Co-60 field using a graphite calorimeter at the national metrology institute of Japan. *Radiation Protection Dosimetry*. 154(3):331-339.
- [16] A. R. DuSautoy. 1996. The UK primary standard calorimeter for photon-beam absorbed dose measurement. *Phys. Med. Biol.* 41(1996):137-151
- [17] A. Ostrowsky and J. Daures. 2008. The construction of the graphite calorimeter GR9 at LNE-LNHAB. *CEA-R-6184*. Issn:0429-3460.