

# 國立交通大學

## 加速器光源科技與應用學位學程

### 碩士論文

研究以非液氦操作模式來設計超導充磁系統之低溫腔體

Study of designing a liquid-helium-free cryogenic system for the superconducting magnetization system

研究生：俞詠騰

指導教授：黃清鄉 博士

張俊彥 教授

中華民國一百年十一月

研究以非液氦操作模式來設計超導充磁系統之低溫腔體

Study of designing a liquid-helium-free cryogenic  
system for the superconducting magnetization system

研究生：俞詠騰

Student : Yung-Teng YU

指導教授：黃清鄉

Advisor : Ching-Hsiang HWANG

張俊彥

Chun-Yen CHANG



A Thesis  
Submitted to  
Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in

Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source

November 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一十年十一月

# Study of designing a liquid-helium-free cryogenisystem for the superconducting magnetization system

Student: Yung-Teng Yu

Advisor: Ching-Hsiang HWANG  
Chun-Yen CHANG

Graduate Program for Science and Technology of Accelerator Light Source  
National Chiao Tung University

## Abstract

For studying and constructing a superconducting magnet that is able to provide a strong magnetic field and with a large enough space for the magnetization as well. The study of designing a liquid-helium-free cryogenic system for the superconducting magnetization system has been proposed. This cryogenic system will be main cooling by a cryocooler, and using the liquid nitrogen to cooling the huge joule heat by current leads from 300K to 80K. In addition, the source of this strong magnetic field superconducting magnet system with two superconducting coil as a source of supply, and studying how to make the sample space big enough in a limited space. This paper will contain the low-temperature thermal analysis, the study of cavity design, besides the optimized of current leads.

# 研究以非液氦操作模式來設計超導充磁系統之低溫腔體

學生：俞詠騰

指導教授：黃清鄉

張俊彥

國立交通大學加速器光源科技與應用學位學程

## 摘要

為了研究與建造一能供給強磁場且擁有足夠大的充磁空間的超導磁鐵，一個能提供給該系統極低的環境溫度與電流的低溫超導腔體計畫被提出，此低溫腔體將以低溫冷凍機為主要冷卻來源，並以液氮輔助降低電流導電棒之龐大焦耳熱，除此之外，此強磁場源系統採用兩組超導線圈作為供應磁場來源，並研究及設計如何才能使整體機制可以容納大型樣品空間，在有限的空間下做合理的運用。

此論文內容將包含低溫腔體熱分析，腔體設計之研究，與電流導電棒及超導電流導電棒之最佳化過程。

## 誌謝

這篇論文與低溫腔體能設計完成要感謝非常多人，而第一個要感謝的就是我的指導教授黃清鄉老師，老師對於低溫腔體設計在主軸上給予方向，並讓學生充分發揮，且能在研究上有錯誤時明確的指出問題並給予改善的意見，讓我在研究低溫腔體的過程中可以不斷地進行思考以改進設計，並教導我報告的技巧與各種在研究這條路上需要注意的事情，還有成大材料系的陳引幹陳教授，陳教授在各種腔體上的設計給予的配合度極高，且在建造低溫腔體時，需要購買許多儀器與腔體部件，陳教授不僅在這方面上十分配合與信任我們，並請蔡承霖博士與楊佳明博士幫助我們在計畫上遇到的困難，使低溫腔體的設計與建造能順利進行，再來要感謝淡江物理的杜昭宏杜教授，杜教授在八環繞射儀上的讓步非常多，讓塊材腔體之設計可行性大幅提高，並讓充磁腔體之設計能達到目標之要求，為了讓我們能了解八環繞射儀上的使用限制，杜教授兩度親自帶我們觀察八環繞射儀儀器，讓我們能研究如何設計塊材腔體與充磁系統，非常謝謝杜教授的幫助，也要感謝交通大學張俊彥教授在實驗上給予學生足夠的空間來專心的研討與研究，並在行政的工作上給予幫助。

另外要感謝的有同步輻射磁鐵組陳輝煌副組長，陳大哥在低溫腔體的結構設計上有非常多的經驗與紮實的應用成果，在很多我的結構設計上提出改進的意見，並能在理論與工程上的盲點給予精闢的見解，省去很多走

冤枉路的時間，而再來要感謝的是磁鐵組詹智全詹大哥，詹大哥在超導磁鐵的研究上有十分豐富的經驗，在高溫超導與電流導電棒之設計上有多次的設計與使用經驗，且詹大哥在很多理論的方面給了我十分寶貴的意見，常常在苦思不得其解時詢問詹大哥，可得到一針見血的見解，而再來一定要謝謝范陽春范大哥，如果沒有范大哥，低溫腔體僅是紙上談兵，無法真正的建造出來，范大哥常以簡單的方法克服我們這些在實作上經驗不足的人遇到的問題，且超導線圈亦是請范大哥幫忙繞製與測試，在超導線圈的繞製裡面，范大哥的技術與小心使其他實驗室無法達到的精度或磁場可真正的躍現於眼前，也讓我了解到很多時候我們設計儀器或設備的時候不能僅靠軟體或公式就可以決定一切，所有的工程都有誤差，若未考慮到這些誤差，再美好的設計也只是空談。

在我的研究生生涯裡，影響我最深也對我幫助最大的是陳思達學長，學長不論是在訓練我如何寫論文，教導我做研究的心態，及如何做實驗的種種技巧與小心謹慎的步伐，皆是十分具有耐心且具責任感的幫助著我，讓我從剛進來什麼都不懂的大學生，蛻變為一個研究生，他常說當我覺得什麼都不會的時候才能從研究所畢業，剛開始還真的不懂，到現在才知道為什麼，學海無涯，在研究的路途上，沒有什麼都會的一天，只能盡量充實自己學識便是了，對思達學長之感謝只能真摯的以一聲謝謝來謝謝他。

而建造這低溫腔體除了主要的一些設計問題外，還常有機械上與真空

上的問題，要感謝磁鐵組的大家還有真空組的朋友們、低溫小組黃亭淵的幫助，如果沒有你們，這充磁系統是沒辦法設計出來的，多謝大家的頃囊相授，熱情地跟我講述在設計、研究與模擬上還有哪些需要注意的地方，在一個低溫系統裡面要用的東西太多，在這裡沒辦法一一感謝，僅能誠摯的感謝大家。

還有要感謝的有我女友及家人們，他們無私的奉獻且處處配合我的研究，常讓我慚愧於自己的自私，尤其是女友嫻珈還幫助我編排論文格式及圖表等編寫論文的瑣事，讓我省去了很多時間，可以專心編寫論文的內容，真的很謝謝她。

在最後要感謝這個計畫，沒有這個計畫我也沒有辦法設計一充磁系統之低溫腔體，能自己設計一個系統，並建造出來使用，是擁有工程師靈魂的人的一種幸福與浪漫，希望在不久的將來我能看到充磁系統實機開始運作，並發揮它的作用，為更多需要磁場研究或建造低溫系統的人提供良好的研究結果。

# 目 錄

Abstract	i
摘要	ii
誌謝	iii
目錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	ix
第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 系統簡介	5
1.3 研究目的	11
第 2 章 充磁腔體結構之研究與分析	12
2.1 腔體結構之設計	12
2.2 電流導電棒構造分析	24
2.2.1 熱負載最佳化理論	24
2.2.2 電流導電棒構造與熱負載分析	30
2.2.3 腔體表面溫度分析	38
第 3 章 腔體熱分析	41
3.1 熱分析理論	41

3.1.1 熱傳導	41
3.1.2 熱輻射	43
3.1.3 熱對流	48
3.2 腔體各層熱分析	50
3.2.1 80K 液氮儲存槽	50
3.2.2 50K 輻射熱遮蔽層	54
3.2.3 4.2 超導線圈本體	59
第 4 章 溫度校正腔體設計與建構	63
4.1 腔體結構相關設計	63
4.2 腔體熱分析	66
4.3 實驗結果	73
第 5 章 結論與展望	78
5.1 結論	78
5.2 未來展望	79
附錄一. 銅電流導電棒電阻率計算	81
附錄二. 接觸式超絕緣層之研究	83
附錄三. 各層零件穩態熱模擬	86
參考文獻	108

## 表 目 錄

表 一. 使用熱輻射遮蔽層與不使用之差異	16
表 二. 塊材離中心距離之與磁場關係	22
表 三. 塊材腔體長度與磁場關係	22
表 四. 電流導電棒最小熱負載與第一段低溫冷凍機功率表	26
表 五. 超導電流導電棒規格表	28
表 六. 各段電流導電棒長度	31
表 七. 兩組電流導電棒熱負載最小時，各段之截面積與其熱負載	36
表 八. 表面室溫與熱負載關係表	40
表 九. 對流熱傳係數	48
表 十. 80K 層熱負載	53
表 十一. 50K 層熱負載	58
表 十二. 4.2K 層熱負載	61
表 十三. 低溫系統熱負載總表	62
表 十四. 溫度校正腔體熱負載	72
表 十五. 穩態溫度分析	77
表 十六. 80K 層 穩態熱模擬 各項零件熱流量	94
表 十七. 50K 層 穩態熱模擬 各項零件熱漏	103
表 十八. 4.2K 層 穩態熱模擬 各項零件熱漏	106

## 圖目錄

圖 一. 液氮液氮冷卻型	2
圖 二. 使用低溫冷凍機型	2
圖 三. PPMS 樣品置放示意圖	3
圖 四. (a)插入塊材充磁腔體之充磁井 (b)使用真空蓋使樣品空間與充磁井內部隔絕	4
圖 五. SWLS (a) 低溫冷卻頭位置 (b) 低溫冷卻頭放大圖	7
圖 六. 低溫腔體內部各隔溫層與其他部件示意圖	8
圖 七. 低溫腔體側視圖	9
圖 八. 低溫腔體透視圖	9
圖 九. 充磁系統簡介圖	10
圖 十. 真空安全閥	13
圖 十一. 液氮輸入端(左)與輸出端(右)	13
圖 十二. 多訊號真空端子(左)與 BNC 訊號接頭真空端子(右)	14
圖 十三. 手伸孔法蘭	14
圖 十四. 三段式電流導電棒示意圖	17
圖 十五. (a)超導線圈與其支撐架剖面圖 (b)超導磁鐵磁場模擬圖	18
圖 十六. Sumitomo RDK-415D Z 軸震動資料	19
圖 十七. (a)傳統超導磁鐵低溫腔體 (b)本計畫超導磁鐵低溫腔體	21
圖 十八. 八環可容許腔體前端長度示意圖	23
圖 十九. 電流導電棒之長度與熱負載關係圖	25
圖 二十. 電流密度及溫度關係	28
圖 二十一. 電流密度及平行磁場關係圖	28
圖 二十二. 電流密度與垂直磁場關係圖	28
圖 二十三. 手伸孔內各部冷卻連結部分位置示意圖	31
圖 二十四. 480 安培：300K-80K 電流導電棒最佳化截面積	33
圖 二十五. 480 安培：80K-50K 電流導電棒最佳化截面積	34
圖 二十六. 200A 安培：300K-80K 電流導電棒最佳化截面積	35
圖 二十七. 200A-80K-50K 電流導電棒最佳化截面積	36
圖 二十八. 系統表面溫度與熱負載關係圖	38
圖 二十九. 塑鋼之熱傳導係數與溫度關係圖	42
圖 三十. 具有輻射遮蔽板之兩大平板間的輻射交換	44
圖 三十一. 各種不同形狀之熱輻射交換計算公式	45
圖 三十二. 自然對流之溫度與熱對流係數關係圖	49
圖 三十三. 強迫對流之溫度與熱對流係數關係圖	49
圖 三十四. 80K 液氮層溫度分布	52
圖 三十五. 80K 液氮層熱流量分布圖	53
圖 三十六. 50K 層溫度分布	57

圖 三十七. 50K 層熱流量分布圖	58
圖 三十八. 4.2K 線圈主體溫度分布	60
圖 三十九. 4.2K 線圈主體熱流量分布圖	61
圖 四十. 低溫腔體穩態溫度分布圖	62
圖 四十一. 低溫冷凍機功率與溫度圖	68
圖 四十二. 低溫冷凍機第一段功率與第一段腔體熱負載關係圖	68
圖 四十三. 低溫冷凍機第二段功率與第二段腔體熱負載關係圖	70
圖 四十四. 32K 時, 第一段腔體溫度分布圖	70
圖 四十五. 第一段腔體熱流量	71
圖 四十六. 降溫至 3K 時, 第二段腔體溫度分布圖	71
圖 四十七. 第二段腔體熱流量	71
圖 四十八. 腔體表面包覆 30 層超絕緣層	73
圖 四十九. 每層超絕緣層厚度約為 0.1 mm	73
圖 五十. 儀器輸入輸出介面	74
圖 五十一. 溫度感應器置放位置	74
圖 五十二. 第一段輻射熱遮蔽層穩態溫度	75
圖 五十三. 可紀錄溫度最低點為 4.012K	76
圖 五十四. 其可紀錄電阻最大值至 7327.6 $\Omega$ (4.012K 時為 6706.5 $\Omega$ )	76
圖 五十五. 電阻過大超出儀器可量測範圍	76
圖 五十六. 已校正溫度感應器之電阻與溫度關係圖	77
圖 五十七. 包覆層數與熱通量關係圖	84
圖 五十八. 包覆 MLI 層數之密度與熱傳導係數關係圖	84
圖 五十九. 水平位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖	86
圖 六十. 高度位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖	86
圖 六十一. 液氮傳輸管溫度分布圖	87
圖 六十二. 480A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖	87
圖 六十三. 300-80K 200A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖	88
圖 六十四. 300-80K 480A 電流導電棒(通電)溫度分布圖	88
圖 六十五. 300-80K 200A 電流導電棒(通電)溫度分布圖	89
圖 六十六. 液氮傳輸管熱流量	89
圖 六十七. 水平位置固定玻璃纖維螺桿熱流量	90
圖 六十八. 高度位置固定玻璃纖維螺桿熱流量	90
圖 六十九. 300-80K 480A 電流導電棒(未通電)熱流量	91
圖 七十. 300-80K 200A 電流導電棒(未通電)熱流量	91
圖 七十一. 300-80K 480A 電流導電棒(通電)熱流量	92
圖 七十二. 300-80K 200A 電流導電棒(通電)熱流量	92
圖 七十三. 80K 液氮層淨輻射熱負載溫度分布圖	93
圖 七十四. 80K 液氮層淨輻射熱負載熱流量	93

圖 七十五. 上蓋玻璃纖維吊桿溫度分布圖	95
圖 七十六. 高度位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖	95
圖 七十七. 第一段可撓導冷銅片溫度分布圖	96
圖 七十八. 80K-50K 480A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖	96
圖 七十九. 80K-50K 200A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖	97
圖 八十. 80K-50K 480A 電流導電棒(通電)溫度分布圖	97
圖 八十一. 80K-50K 200A 電流導電棒(通電)溫度分布圖	98
圖 八十二. 上蓋玻璃纖維吊桿熱流量	99
圖 八十三. 高度位置固定玻璃纖維螺桿熱流量	99
圖 八十四. 80K-50K 480A 電流導電棒(未通電)熱流量	100
圖 八十五. 80K-50K 200A 電流導電棒(未通電)熱流量	100
圖 八十六. 80K-50K 480A 電流導電棒(通電)熱流量	101
圖 八十七. 80K-50K 200A 電流導電棒(通電)熱流量	101
圖 八十八. 50K 輻射熱遮蔽層淨輻射熱模擬溫度分布圖	102
圖 八十九. 50K 輻射熱遮蔽層淨輻射熱模擬溫度分布圖	102
圖 九十. 上蓋玻璃纖維吊桿溫度分布圖	104
圖 九十一. 上蓋玻璃纖維吊桿熱流量	104
圖 九十二. 4.2K 超導線圈淨輻射熱模擬溫度分布圖	105
圖 九十三. 4.2K 超導線圈淨輻射熱模擬溫度分布圖	105
圖 九十四. 第一段腔體熱通量局部放大分布圖	107
圖 九十五. 第二段腔體熱通量局部放大分布圖	107

# 第 1 章 緒論

## 1.1 研究背景

在國科會跨領域合作計畫”可攜式強磁場源”中，其目的為使用高溫超導塊材擄獲強磁場，利用儀器使塊材維持在低溫環境下，使塊材本身可維持其磁場，再將已充磁之高溫超導塊材移至八環繞射儀上供給實驗使用，故本計畫需建造一高磁場源(磁場強度 12T 以上)給予塊材擄獲強磁場，並在塊材擄獲強磁場後將其冷卻在 20K 以下，應用於八環繞射儀或需要強磁場(磁場強度 3T)做為實驗環境的實驗需求上。

在本計畫中，提供塊材充磁磁場之強磁場源為同步輻射黃清鄉研究員負責研究與製造，而高溫超導塊材由成功大學材料系陳引幹教授所提供，並由淡江大學杜昭宏教授應用於八環繞射儀上。

學生俞詠騰在本計畫中負責研究與分析如何使用非液氦冷卻系統建造超導充磁系統之低溫腔體，使超導磁鐵可維持在 4K 以下提供強磁場並兼具移動方便的特性，並研究與分析低溫腔體之熱漏，比較各種低溫腔體與強磁場系統，找出對本系統而言最佳設計方案並實行。

一般常見強磁場源低溫冷卻系統可分為以下兩種：

液氮液氮冷卻型：

一般實驗站或實驗室常用型磁性量測儀器，其特點為可有效降至目標溫度，且工作穩定，不易因外在因素影響系統，但其樣品空間較小，且受腔體隔溫設計限制，使用上限制較大，

圖一. 液氮液氮冷卻型                      圖二. 使用低溫冷凍機型

為中央研究院之 PPMS 系統。



圖一. 液氮液氮冷卻型                      圖二. 使用低溫冷凍機型

使用低溫冷凍機型：

使用於需常駐使用超導磁鐵之實驗設施，其特點為使用方便，無需注入液氮液氮即可操作，但其缺點為對熱漏等分析十分嚴謹，若設計時有未考慮之熱負載，則系統不易降至設計溫度，不如液氮液氮系統等若估算上稍有誤差，仍可由增加液氮液氮注入量使系統降至目標溫度，也因上述原因，目前使用低溫冷凍機之系統之磁場較小，或是

使用雙低溫冷凍機負荷熱負載。

而跨領域合作計畫中為了要充磁高溫超導塊材，超導磁鐵除了磁場需求較高外，亦需一超過 70 mm 之充磁空間以提供塊材使用，且磁場均勻度在萬分之五以內（100mm）以提供給高溫超導塊材之聚頻磁鐵使用，而一般磁場源系統若需達 10T 以上，其可放置樣品空間較小，且無法在充完磁後直接移出塊材，需將整個系統回到室溫後方可移出樣品，與本系統之樣品在充磁後仍需維持低溫之目標相違背，如圖三。

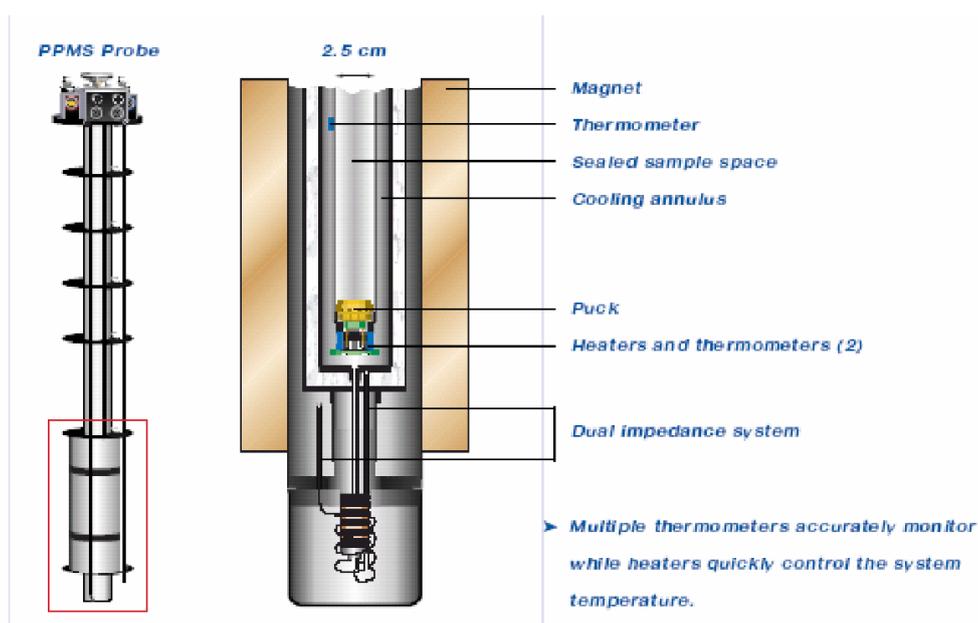
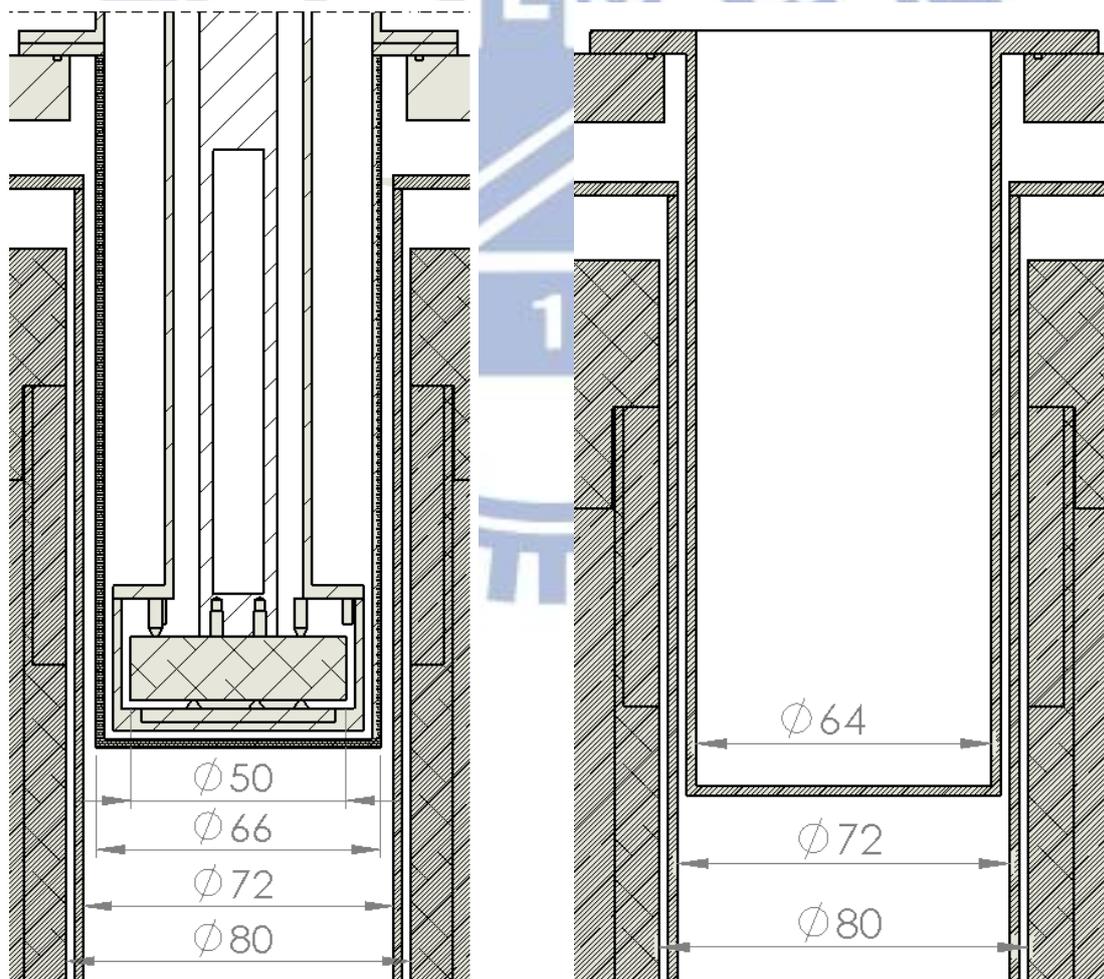


圖 三. PPMS 樣品置放示意圖

而本系統除可提供較大磁場與高磁場均勻度範圍外，充磁樣品空間亦為本系統之一重要特點，充磁空間可視需求改變樣品大小與樣品環境，一為供給高溫超導塊材腔體使用之空間，由於高溫超導塊材需

使用其本身低溫冷卻系統，故其所需空間較大，故充磁時以高溫超導塊材腔體直接插入充磁系統充磁並封入真空腔體內與超導磁鐵一銅維持真空，如圖四之(a)所示，本方案之可容許最大樣品空間為 68 mm，而另一供給其他使用者使用有另一選項使充磁井為室溫範圍，可在得到樣品目標磁場後直接離開充磁系統，無需等待充磁系統回溫，如圖四之(b)所示，使樣品與充磁系統分別獨立運作，此方案之可容許最大樣品空間為 64 mm，且無論是兩種方案哪一種，超導磁鐵皆可由電腦控制電流以改變磁場。



圖四. (a)插入塊材充磁腔體之充磁井

(b)使用真空蓋使樣品空間與充磁井內部隔絕

## 1.2 充磁系統簡介

而要達成高磁場之低溫腔體有數項要求，第一項要求為研究如何降低系統各溫層熱漏，尤其是為了提供第二代超導體線能達更大臨界電流圈之極低溫度環境(4.2K 以下)，使超導線能提供更強的磁場

在本系統中，冷卻功率來源為低溫冷凍機(Cryocooler)，其不需通以液氮液氦，僅需插電通水冷卻即可運作，為一提供低溫環境良好冷卻來源，但其功率較低，故本系統需嚴格計算系統之熱負載(Head load)，並研究及分析如何使其熱負載達最小化。

第二項要求為冷卻其電流導電棒(Current Leads)，由於本系統之磁場源要求較高，僅一組超導線圈並無法達到其所需磁場，需使用兩組超導線圈使其達到目標磁場，但兩組線圈即需兩組電流源，其所產生之熱源超過一低溫冷凍機可負荷之熱負載，在研討與分析後，本計畫採用一冷凍機與一液氮冷卻電流棒，於熱負載較高處以液氮冷卻，熱負載較低處以冷凍機冷卻，使其能達到我們要求的條件，亦能使系統運作成本降低。

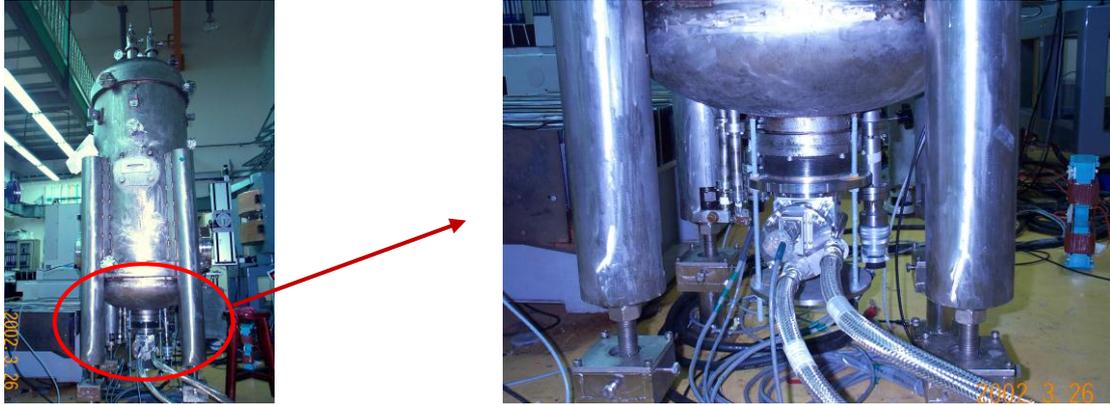
第三項為腔體與線圈之間距離，因八環繞射儀空間限制，塊材前端腔體不可太長，但長度若太短，無法插入高磁場源均勻磁場範圍，故需將低溫腔體做特殊設計，將低溫層與室溫層間距拉近，但此舉將使低溫層熱負載大幅上升，故特別設計一導冷裝置於低溫層與室溫層

間，吸收室溫層輻射熱，差別如圖所示：

本系統完成後預計將提供 12T 之高磁場，及正負 50mm 萬分之五之高磁場均勻度，除可提供塊材擄獲磁場外，亦提供新型高溫超導塊材插件磁鐵充磁使用。

充磁腔體可分為兩大主體，一為靜置腔體，另一為吊起式超導線圈，會這樣設計主要是考量超導線圈安裝問題，超導線圈安裝有兩種方式，側躺式與垂直式，其各有優缺點，最後選擇以垂直方式置放超導線圈主要為兩個原因，一為線圈安裝較容易，且可以吊掛方式置放線圈，熱傳導較小，另一為本裝置為塊材充磁使用，若線圈為垂直方式置放，實驗所需塊材置入時亦可以天車吊入，增加使用上的友善度。

另一設計各實驗室較不同處為低溫冷卻頭(Cold Head)置放位置，其可置於腔體上方或腔體下方，本腔體若置於上方時，有維修與連結冷卻裝置時較直接且簡易的優點，但因本實驗需在上方安置塊材腔體，且亦需有電源真空端子(Power Feedthrough)安裝空間，故若將低溫冷卻頭亦安裝於腔體上，則上方空間過於壅塞，且考慮同步輻射曾設計 SWLS 超導磁鐵亦將低溫冷卻頭安裝於磁鐵下方(如圖五)，可借鏡其經驗設計低溫冷卻機冷卻連結裝置。



圖五. SWLS (a) 低溫冷卻頭位置 (b) 低溫冷卻頭放大圖

### 充磁系統之低溫腔體如

圖六所示，低溫腔體主體內為強磁場超導磁鐵及低溫腔體，低溫腔體以四個部分組成，最外層為真空腔體，其功能為使腔體內部保持真空，並安置多個真空端子予以溫度監測系統、電源供應系統、液氮注入輸出與內部各零件連接，直徑約一米寬，並設置一手伸孔給予內部低溫冷凍機與欲冷卻組件連結，及電流導電棒與液氮層之冷卻連結，第二層為液氮層，其功能為冷卻銅電流導電棒，並為第三層 50K 層提供輻射熱遮蔽，使 50K 層之輻射熱大負載大幅下降，第三層為 50K 層熱遮蔽層，此層為 4.2K 層之輻射熱遮蔽層，將 4.2K 層之輻射熱降低，並提供給超導電流導電棒之熱端更低溫度，使其可達更大臨界電流，最內層為 4.2K 超導線圈本體，本層之熱負載以越小越好，因溫度降低至越低溫，超導線之臨界電流越大，且受背景磁場之影響越小。

而充磁系統整體組成包括低溫腔體、電腦監控設備、兩台電源供應器、兩台溫度監測器、一台液位計、渦輪真空幫浦及低溫冷卻系統，

如圖 九所示，低溫冷卻系統主要冷卻功率來源為低溫冷凍機冷卻系統，並以液氮冷卻系統輔助冷卻銅電流導電棒，溫度監測系統將有 9 個測量點，以電腦監控各層與超導線圈之溫度，而液氮層之液位亦以液位計監測，並以電腦控制電源供應器以改變超導磁鐵之磁場，本系統將使用兩台電源供應器分別提供電流 480 安培與 200 安培，而腔體內部將運作在  $10^{-6}$  torr 之高真空下。

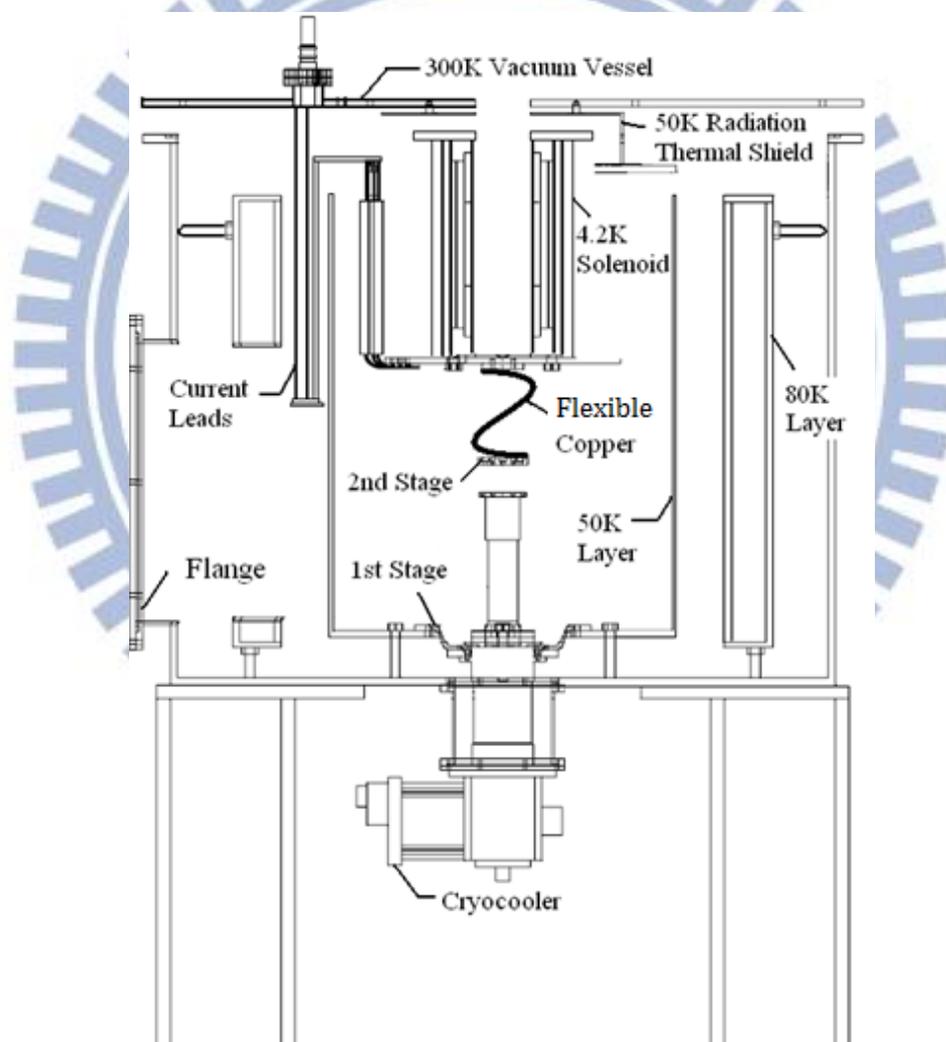


圖 六. 低溫腔體內部各隔溫層與其他部件示意圖

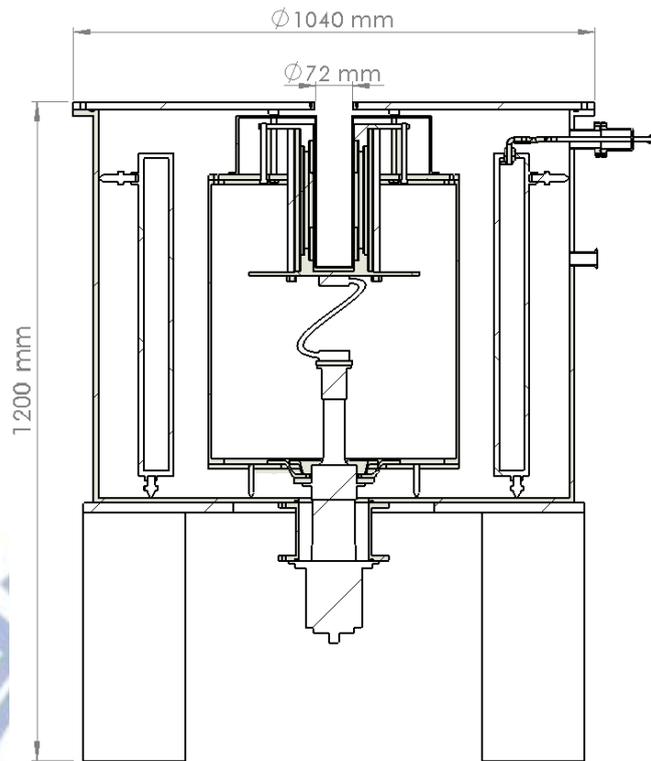


圖 七. 低溫腔體側視圖

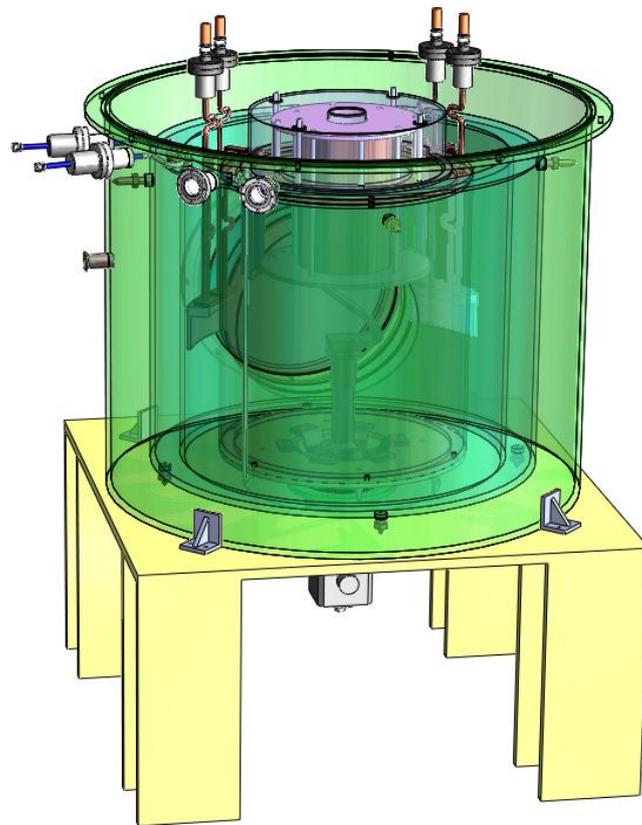
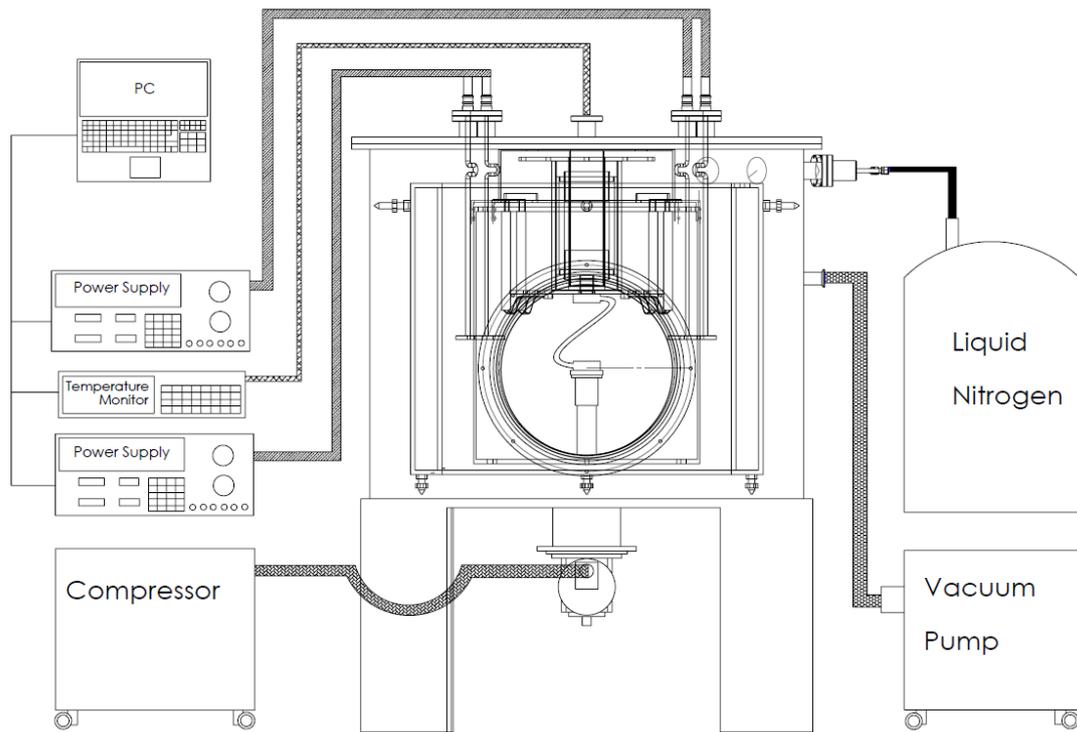


圖 八. 低溫腔體透視圖



圖九. 充磁系統簡介圖



### 1.3 研究目的

第一個目的首要為供給跨領域合作計畫之”可攜式高溫超導磁鐵”做為充磁強磁場源，而除了給超導塊材作為擄獲磁場之強磁場源外，亦將利用其強磁場、大樣品範圍、開放式磁場區、高磁場均勻度之特性提供給需要此系統的研究使用。

而以往國內建造低溫系統常以液氮或液氦為主要冷卻來源，但隨著低溫冷制機的進步，使用該系統的研究日益增加，但若要使用低溫冷制機其熱負載需較詳細的分析，研究要如何設計才能使熱漏下降，以冷卻至各項實驗所需之溫度，而本論文嘗試整理國內外論文與書籍之論點，並以理論、模擬與實驗互相參照，提供給需要設計或使用低溫系統之研究人員參考。

並期望將本系統研究經驗活用，提供給有興趣的學校或廠商做為非液氮液氦使用之低溫系統研究，充分發揮低溫系統可用性。

## 第 2 章 充磁腔體之研究與分析

### 2.1 腔體結構之設計

腔體主要組成為熱遮蔽部分與，其熱遮蔽可分為三層，300K 層、77K 層、50K 層，層與層之間互相獨立，以玻璃纖維錐棒固定。

在低溫冷卻系統裡，要分為這麼多層冷卻是有原因的，在液氮液氮系統裡，液氮層為液氮層之隔溫層，其存在目的為提供液氮層一吸收熱緩衝層，液氮熱容極小，若使用液氮直接冷卻目標物品至目標溫度，液氮使用量極高，若使用液氮將液氮外層冷卻至液氮汽化溫度 77K，則液氮之熱交換層則由 300K 變為 77K，參考史蒂芬-波茲曼定律，輻射熱正比於兩溫度介面之四次方差，對液氮層而言，增加一液氮層對輻射熱之影響極為巨大。

而在低溫冷凍機系統裡，要分為多層冷卻之原因如同液氮液氮系統一般，設法降低目標層之輻射熱為有效使低溫層降至更低溫之作法，本系統使用之低溫冷卻機分為兩段冷卻，其第二段最低可降至 2.5K (接近 0W 熱負載)，而亦有僅有一段冷卻之低溫冷卻機，其使用上較為方便，但因輻射熱之龐大與低溫冷凍機效率關係，若要降至 4K 以下其功率極低，不符合本系統使用。

而本系統除了 50K 熱遮蔽層與 4.2K 超導線圈本體外，有一液氮槽，其作用為冷卻電流導電棒第一段高熱負載，各層設計如下：

300K 層：真空腔體，以一真空隔絕熱對流，並有安全閥(safety valve)設計，降溫時會使腔體內部器壓上升，當低溫腔體內部壓力過大時，安全閥將彈出，如圖 十



圖 十. 真空安全閥

真空腔體上尚有四真空端子(Feedthrough)，二為真空液氮端子注入輸出，如圖 十一



圖 十一. 液氮輸入端(左)與輸出端(右)

另二真空端子為溫度感應器使用之多訊號(Multi-Pin Feedthrough)

真空端子及液位計 BNC 訊號接頭真空端子，如圖 十二



圖 十二. 多訊號真空端子(左)與 BNC 訊號接頭真空端子(右)

因內部低溫冷卻頭需與冷卻配件組合，故靜置腔體皆開一直徑 40cm 手伸孔，並於真空腔體開一直徑 480 法蘭(Flange)，內徑 400mm，配合手伸孔使用，如圖 十三。

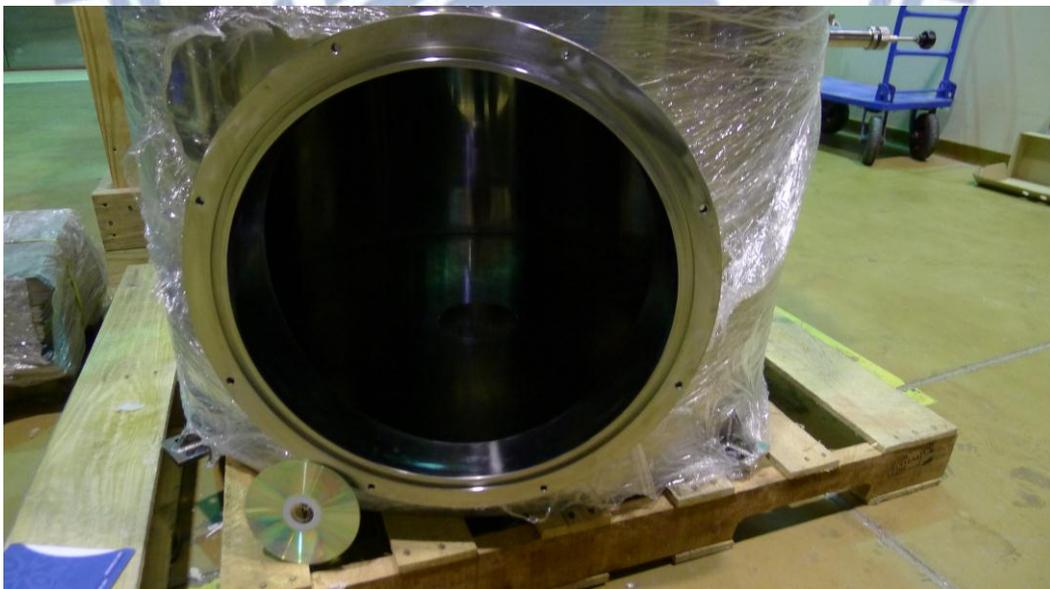


圖 十三. 手伸孔法蘭

80K 層：液氮儲存槽，設置本層原因主要為冷卻電流導電棒至 80K，

且可作為 300K 之熱輻射遮蔽層。

50K 層：輻射熱遮蔽層，因輻射熱與熱源溫度成四次方關係，若可有效降低與 4.2K 熱交換之熱源溫度即可大幅降低 4.2K 層輻射熱，故低溫系統皆有設置輻射熱遮蔽層，此層將吸收靜置腔體底部與吊起式超導線圈 300K 桶大部份輻射熱。

吊起式超導線圈主要組成為 300K 桶上蓋、50K 桶上蓋 (4.2K 支撐架)、50K 熱遮蔽罩、電流導電棒與超導電流導電棒、4.2K 超導線圈本體與其支架。

300K 桶上蓋：與 300K 真空腔體連結，為主要支撐整個吊起式超導線圈重量零件，蓋上除四個電源真空端子外，中央開孔 80mm 給予超導塊材腔體置入充磁，

50K 桶上蓋：其吊於 300K 層下，與 50K 熱遮蔽層連結，4.2K 超導線圈支架站於其上，並於 4.2K 超導線圈上遮罩一 50K 銅製熱輻射遮蔽層，減少輻射至 4.2K 超導線圈之輻射熱，並與超導電流導電棒連結，冷卻超導電流導電棒 50K 端。

50K 熱遮蔽罩：為銅製薄板熱遮蔽罩，用於吸收 300K 可能輻射至 4.2K 超導線圈之輻射熱，冷卻源為 50K 桶上蓋，此層非常重要，其為 4.2K 超導線圈主體維持在 4K 以下之重要設計，若無此層隔絕室溫之輻射熱，讓超導磁鐵直接與室溫層做輻射熱交換，則超導磁鐵將

無法有效降至目標溫度，且本層置放空間較小，層內與層外僅 1 cm 包覆超絕緣層，故本層之厚度亦為最佳化且考量工程上的限制後而決定，超導線圈上之輻射熱遮蔽罩僅 0.3 cm，而超導線圈充磁井內之輻射熱遮蔽管厚度為 0.2 cm，表一為使用熱輻射遮蔽層與未使用之 4.2K 超導磁鐵層熱負載數值。

表一. 使用熱輻射遮蔽層與不使用之差異

	淨輻射熱	包覆超絕緣層(層數)
未使用 50K 輻射熱遮蔽層	11.02 W	1.1 W (10)
使用 50K 輻射熱遮蔽層	8.5 mW	1.42 mW (5)

在低溫腔體裡，熱負載之主要來源為超導磁鐵之電流導電棒，因電流導電棒需一路從室溫衍伸至超導線圈及低溫區，若皆使用一般銅製電流導電棒會使低溫冷凍第二段超導線圈之熱負載過高，故銅製電流導電棒僅使用至 50K (一般液氮液氦系統為 77K)，而接著使用高溫超導電流導電棒，本系統之超導電流導電棒使用之超導體為 Bi-2223，有關電流導電棒之詳細分析與設計於 2.2 節內有詳細分析。

電流導電棒與超導電流導電棒：

主要分為三段，分段原因於電流導電棒章節中詳述，第一段於 300K 至 77K(液氮層冷卻連結處)，第二段於 77K 至 50K(50K 桶上蓋)，

第三段於 50K 至 4.2K 超導線圈支架(超導電流導電棒)，如圖 十四。

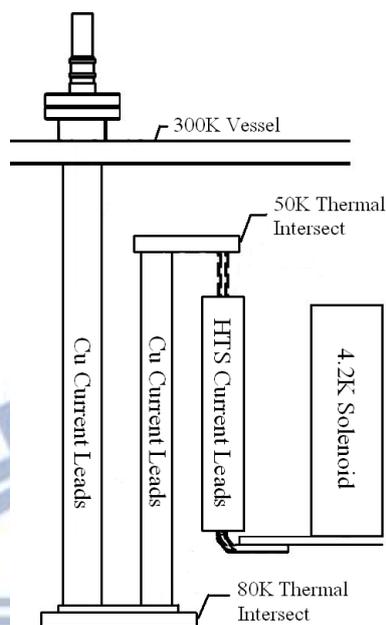


圖 十四. 三段式電流導電棒示意圖

#### 4.2K 超導線圈

以低溫超導線 NbTi 與第二代高溫超導線綜合使用之超導線圈，利用低溫超導線與第二代高溫超導線可承受背景磁場不同之原理，將第二代高溫超導線設置於線圈內層，以獲得有限線材之最大磁場，其線材分佈與磁場分佈如圖 十五所示。

本體與其支架：

由上下兩銅製夾製具固定五層超導線圈，並由上方玻璃纖維螺桿支撐，站立於 50K 桶上蓋上，下方夾製具除固定超導線圈外，亦負責將超導電流導電棒與超導線圈連接，如圖 十五之(a)所示。

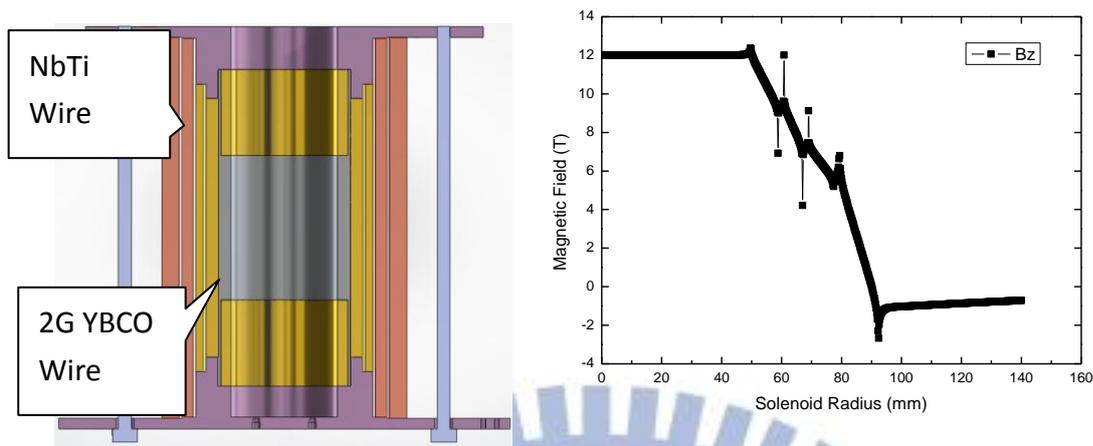


圖 十五. (a)超導線圈與其支撐架剖面圖 (b)超導磁鐵磁場模擬圖

整體結構因特殊原因配合設計有下列幾種：

### 1. 降低低溫冷卻頭帶來之震動

由於低溫冷卻頭(cold head)在運作時會伴隨著馬達的運作帶來震動，其震幅不大，約  $40 \mu\text{m}$  (如圖 十六)

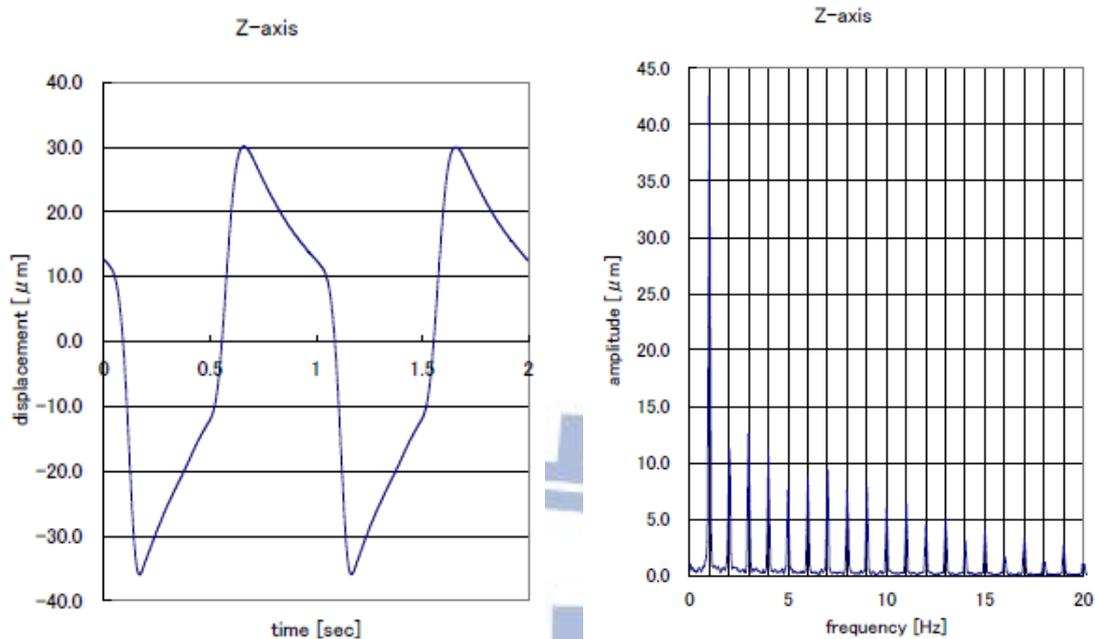


圖 十六<sup>1</sup>. Sumitomo RDK-415D Z 軸震動資料

為避免冷頭震動影響超導磁鐵穩定性，設計了三種結合方式使低溫冷卻頭與充磁腔體之間擁有緩衝空間以減低震盪。

- I. 安裝冷頭位置以真空伸縮管(Bellows)吸震並將震動傳遞至地上。
- II. 低溫冷凍機 第一段 50K 冷卻連結片以 Z 型連結第一段熱遮蔽層
- III. 低溫冷凍機 第二段 4.2K 冷卻連結片以 S 型連結第二段超導線圈

## 2. 熱變形安全設計：

- I. 各隔溫層之間固定：

若要整體系統層與層之間相互位置固定，最好的方式是直接將

<sup>1</sup> “Specification Chart of Sumitomo Cryocoolers” Sumitomo Cryogenics of America, Inc. 1833 Vultee Street, Allentown Available: [http://www.shicryogenics.com/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=30&Itemid=248&lang=en](http://www.shicryogenics.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=30&Itemid=248&lang=en)

層與層之間以上鎖方式固定，但低溫腔體內層與層之溫差極大，若使用上鎖方式固定，固定端之零件難以避免變形或破損，為避免連結處因溫差大造成熱膨脹伸縮等問題受損，不以上鎖方式固定，而以互相支撐或吊或頂等方式固定相對位置，並以可容許伸縮量較大之材料製作，以增加零件可承受之應力範圍。

- II. 在無法避免有溫差之零件及固定位置等盡量以相同材質製作，並給予形變空間避免應力過大造成損壞，如 80K 液氮層與電流導電棒連結處，以彎曲狀電流導電棒給予形變空間，避免因不同材料之間熱膨脹/收縮不同而造成變形

### 3. 室溫層與低溫層窄間距研究：

因本充磁腔體需予超導塊材充磁，但因超導塊材腔體長度受八環繞射儀限制，故其長度有其限制，因此，超導充磁腔體、超導塊材腔體、八環繞射儀之間有其互相牽制條件，以直徑來看，超導充磁腔體直徑越小，所能達到磁場越強，線圈成本亦降低，但因要達到八環繞射儀所需磁場，超導塊材不可太小，否則磁場強度不足，則超導塊材腔體直徑加大，故彼此間互相調整後，以塊材腔體直徑 76mm，充磁線圈內徑 80mm 為最後設計結果，而以長度而言，長度越長，則充磁腔體所能得到熱絕緣空間越大，可達到溫度越低，但因八環繞射儀空

間有限，故塊材腔體前端(進入充磁腔體區)長度限制在 160mm 以下，而若以傳統杜爾瓶隔溫設計，300k-50k-4.2K 則每層固定金屬板就共佔據 40mm，若在加上需進入超導磁鐵約 100mm 才可達到磁塊所需磁強場度，則僅剩 20mm 可提供給超絕緣層與各層之間支撐，則其熱傳導與熱輻射交換熱將會大於低溫冷凍機所能負荷之熱負載，為符合整體實驗需求，傳統杜爾瓶隔熱設計無法符合我們需使用於超導塊材充磁實驗上的需要，故我們將 4.2K 層至於 300K 層下方，使整體絕熱結構為 300K-4.2K-50K，而 300K 輻射至 4.2K 層之輻射熱由一薄銅熱遮罩隔絕，將 300K 之主要輻射熱由 50K 層接收，此設計可將 4.2K 超導線圈大幅接近 300K 腔體，並仍由 50K 層做為熱遮蔽層，且熱絕緣空間/長度增加，大幅降低傳導熱與增加超絕緣層(Super Insulator)層數，圖 十七可清楚表達傳統方式與本設計之不同。

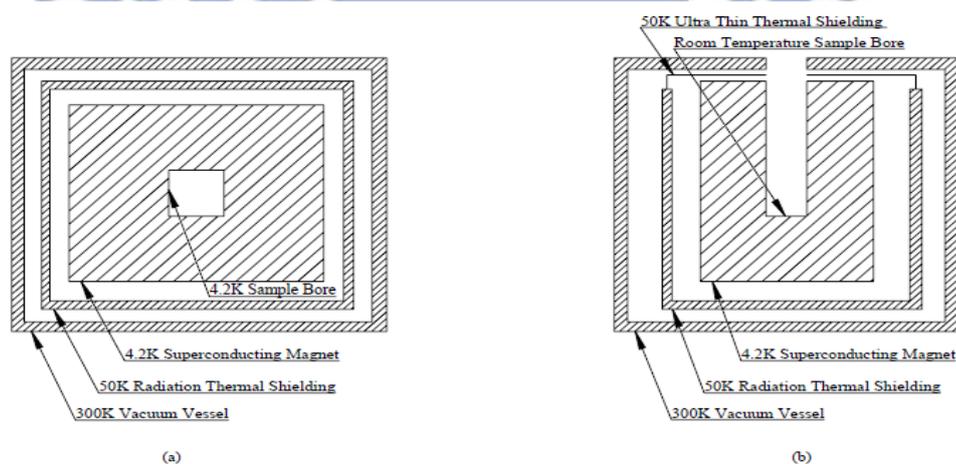


圖 十七. (a)傳統超導磁鐵低溫腔體

(b)本計畫超導磁鐵低溫腔體

2. 塊材腔體與充磁腔體最佳化：八環上塊材腔體前端(即進入腔體端)最長可為 180mm，而適用長度為 160mm (保留旋轉空間與移動空間)，為配合八環上尺寸，腔體與線圈需做最佳化，鋼板上端至線圈上緣為 53mm，而線圈總長為 299mm，其中插入長度與磁場強度、均勻度關係如表 二。

表 二 . 塊材離中心距離之與磁場關係

塊材離中心距離	塊材最小磁場值	磁場均勻度
50-60 mm (離線圈上緣 100 mm)	12 T	0.8%
60-70 mm (離線圈上緣 90 mm)	11.74 T	2.7%
70-80 mm (離線圈上緣 80 mm)	11.29 T	6.3%
80-90 mm (離線圈上緣 70 mm)	10.56 T	11.4%

而塊材腔體前端與塊材距離為 10 mm，故總長度與磁場、均勻度關係如表 三。

表 三. 塊材腔體長度與磁場關係

塊材腔體長度	磁場	均勻度
160 mm (50+100+10)	12 T	0.8%
150 mm (50+90+10)	11.74 T	2.7%
140 mm (50+80+10)	11.29 T	6.3%
130 mm (50+70+10)	10.56 T	11.4%

在與成功大學與淡江大學討論後，在八環上留給腔體端長度空間最大可達 180mm，如圖 十八，而為了讓塊材腔體能有稍微旋轉以進行樣品校正的空間，空出 20mm 給予杜教授使用，以表 三可達最大磁場之腔體長度為 160mm 為最後使用方案。

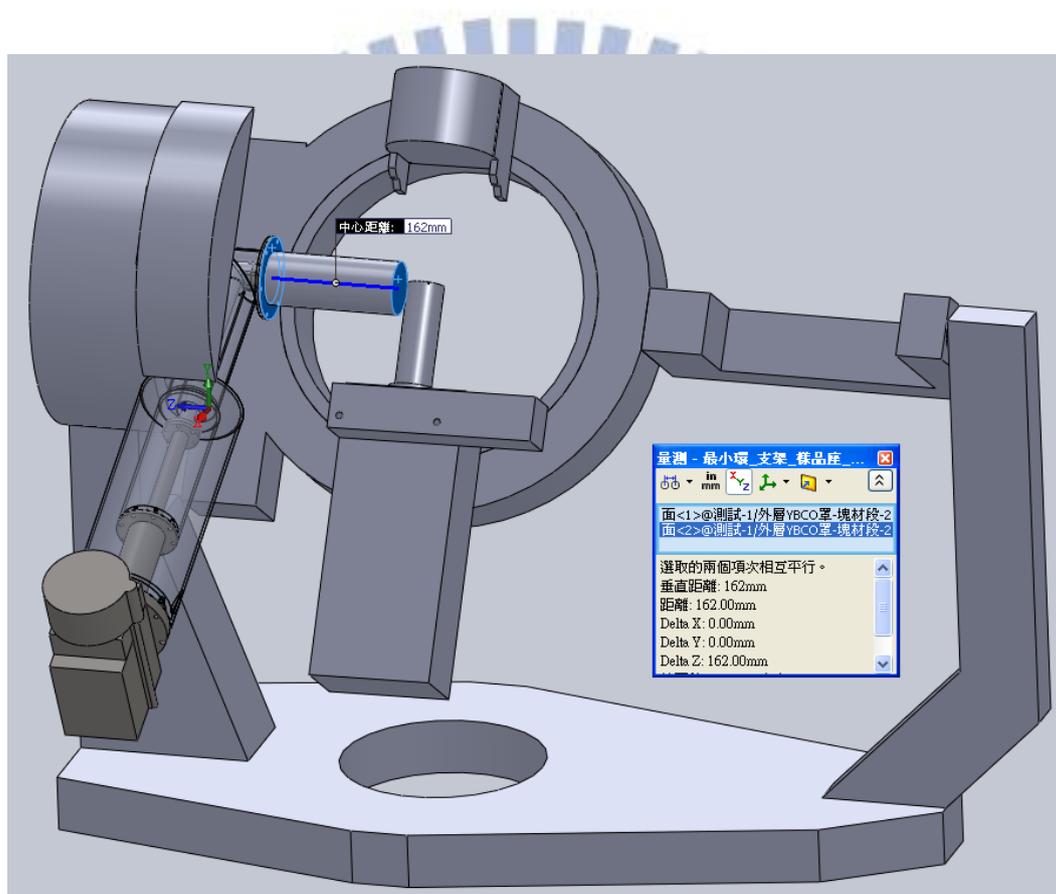


圖 十八 . 八環可容許腔體前端長度示意圖

## 2.2 電流導電棒構造分析

### 2.2.1 熱負載最佳化理論

#### A. 銅電流導電棒

為研究如何設計才能使一般銅電流導電棒之熱負載達到最小，必須從理論上了解電流導電棒之熱負載組成，而電流導電棒之熱負載可分為傳導熱負載與焦耳熱負載，由於這兩熱負載為相互矛盾，傳導熱負載小，焦耳熱負載必大，反之亦然，故我們整理成方程式，並試著從中尋找熱負載最小值。

電流導電棒之傳導熱負載  $Q_c$  可由下列方程式表示：

$$Q_c = \frac{A}{L} \times \int_{T_2}^{T_1} k dt \quad (2.1)$$

其中  $A$  為截面積， $L$  為電流導電棒長度， $\int_{T_2}^{T_1} k dt$  表示由溫度 1 ( $T_1$ ) 至溫度 2 ( $T_2$ ) 之熱傳導係數積分值，當使用銅，溫度自 300K 至 50K 時，其值為 1094 W/cm。

電流導電棒之電流熱負載  $Q_p$  可由下列方程式表示：

$$Q_p = I^2 \times R = I^2 \times \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.2)$$

其中  $I$  為電流， $\rho$  為電阻率，使用銅時， $\rho = \rho_0 \times (1 + \alpha t)$ ，

$\rho_0 = 1.7 \times 10^{-8} \Omega m$ 。

而總熱負載為

$$Q_{\text{total}} = Q_c + Q_p = \frac{A}{L} \times \int_{T_2}^{T_1} k dt + I^2 \times \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.3)$$

將方程式(2.3)微分運算取極值  $\frac{1}{L} \times \int_{T_2}^{T_1} k dt - \frac{L}{A^2} \times I^2 \times \rho = 0$ ，則  
可得

$$A = \pm L \times \sqrt{\frac{I^2 \times \rho}{\int_{T_2}^{T_1} k dt}} \quad (2.4)$$

將方程式(2.4)代回方程式(2.3)，得

$$Q_{\text{total}} = 2 \times \sqrt{I^2 \times \rho \times \int_{T_2}^{T_1} k dt} \quad (2.5)$$

方程式(2.5)作圖為：

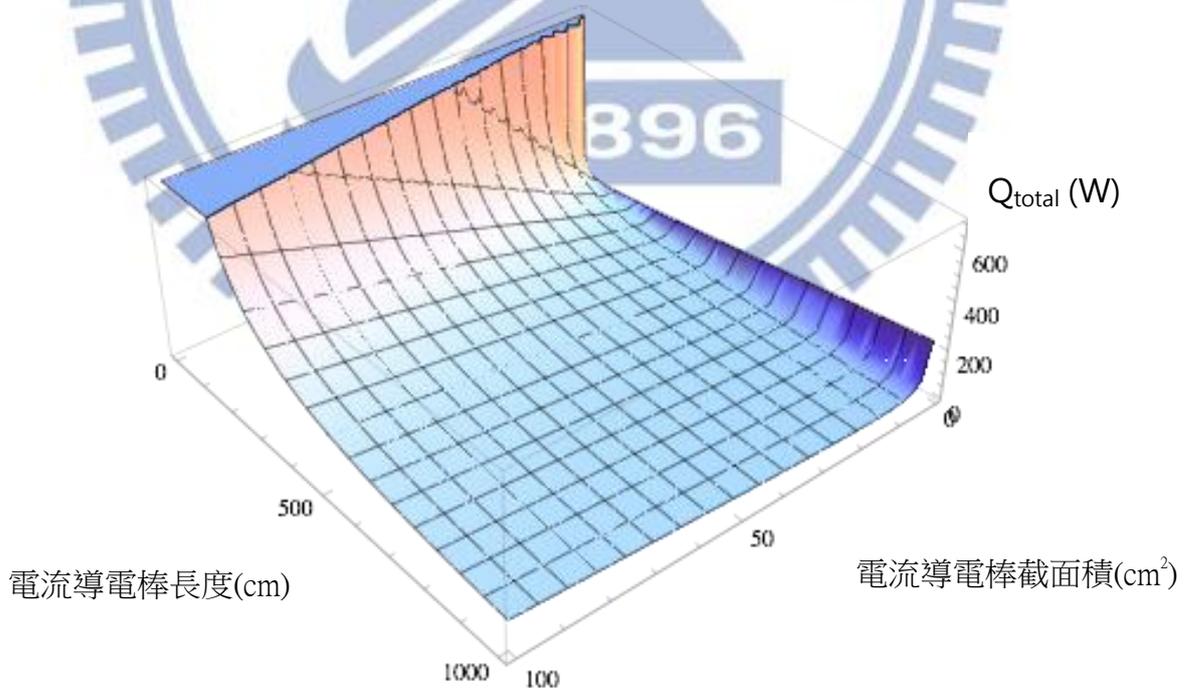


圖 十九. 電流導電棒之長度與熱負載關係圖

表 四. 電流導電棒最小熱負載與第一段低溫冷凍機功率表

	熱負載最小值 (W)
480A-300K-50K 電流導電棒	31.75
200A-300K-50K 電流導電棒 (一對)	13.23
加總熱負載	88
第一段低溫冷凍機於 50K 之功率輸出	45

根據方程式可知熱負載最小值( $W_{\min}$ )為一定值，其值雖隨著電流導電棒之截面積改變，有其對應電流導電棒之長度可得熱負載最小值，且其最小值僅受材料及溫差影響，但此熱負載最小值經過計算後必大於低溫冷凍機所能負荷之範圍，故使用液氮輔助冷卻銅電流導電棒。

由於液氮僅可冷卻到 77K，與超導電流導電棒所需之 64K 相差甚遠(參考高溫超導電流導電棒說明)，故銅電流導電棒設計兩段式降溫，第一段液氮冷卻，設定為 80K，第二段以低溫冷凍機冷卻，設定溫度至 50K，300K-80K 之銅電流導電棒以液氮降溫，80K-50K 以低溫冷凍機第二段降溫。

## B. 4.2K 高溫超導電流導電棒：

在高溫超導電流棒最佳化過程中，雖然高溫超導電流導電棒之熱負載僅來自於傳導熱，但其臨界電流密度與高溫超導電流導電棒之熱端 (Hot end) 溫度有相依關係，熱端之溫度越低，使用相同線徑之高溫超導電流導電棒之臨界電流密度越高，而高溫超導電流導電棒之線徑越粗，其所能通之臨界電流越大，但其傳導熱亦隨之提高，為降低 4.2K 層之熱負載，需選擇適用於本超導線圈所設定之電流之高溫超導電流導電棒，高溫超導電流導電棒，其規格如表 五所示：

根據本磁鐵之超導線圈兩種線材設定 1G-Wire NbTi、2G-Wire YBCO，分別通以 200A 與 480A，若以兩段式電流導電棒之設定，可使用 CSL-18/160.2 與 CSL-18/160.3，對 4.2K 層造成 0.4 W 熱負載，以三段式電流導電棒之設定，可使用熱漏最低之 CSL-12/160.3，對 4.2K 層僅造成 0.1 W 熱負載，在第二段 4.2K 層中，低溫冷凍機僅可提供 1.5 W 之功率，0.3 W 之差異可減低線圈溫差，並可能讓線圈降至更低溫，可達之臨界電流提高(尤其是第二代超導線)，使獲得磁場加大，但真正使電流導電棒分為三段的主因並非僅是錦上添花的為了降至更低溫獲得更大磁場，而是高溫超導電流導電棒之臨界電流會受磁場影響。

表 五<sup>2</sup>. 超導電流導電棒規格表

臨界電流(高於表內數值) 兩溫度介面間傳導熱漏				
TYPE	@77K	@64K	77K-4K	64K-4K
CSL-12/160.3	370A	740A	0.07 W	0.05 W
CSL-18/160.2	300A	600A	0.2 W	0.16 W
CSL-18/160.3	750A	1500A	0.2 W	0.16 W

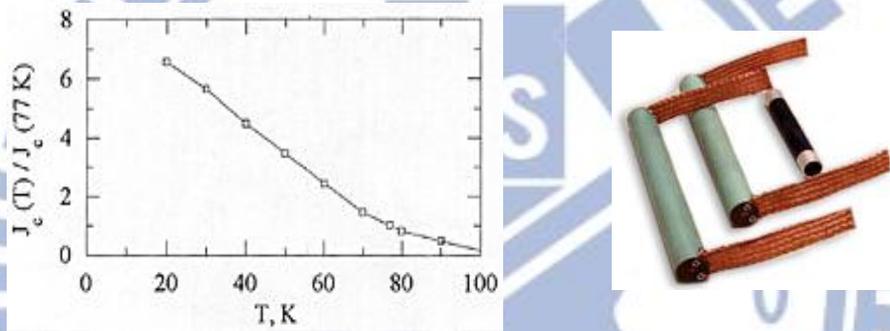


圖 二十 電流密度及溫度關係

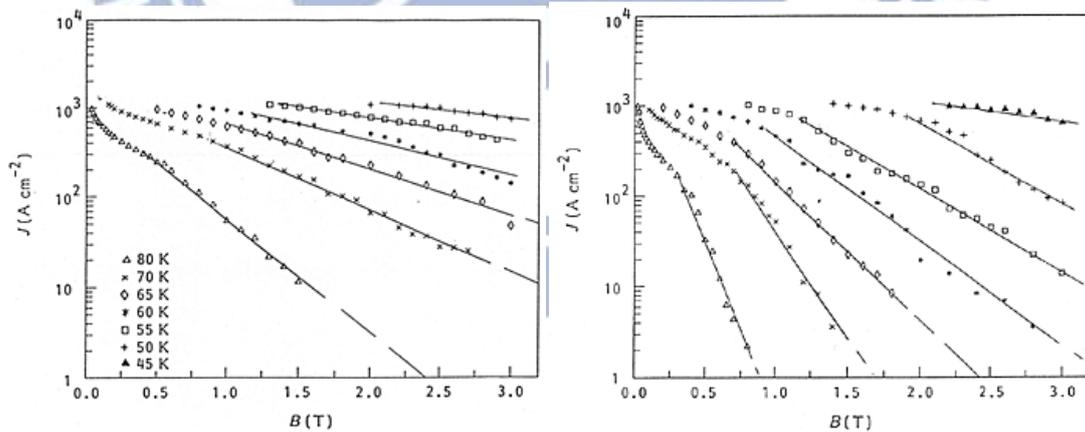


圖 二十一. 電流密度及平行磁場關係 圖 二十二. 電流密度與垂直磁場關係

<sup>2</sup> “Specification Chart of Can Superconductors” Can Superconductors of Czech Republic, Ringhofferova 66 251 68 Kamenice Available:

<http://www.can-superconductors.com/products/current-leads/>

由上列各圖可解釋為何超導電流棒中 300-50K 為何需分為兩段，因超導電流棒一端需維持在 64K 或更低溫環境下才可使電流受背景磁場之影響降低，且可使臨界電流上升，若使用低溫冷凍機與液氮一同冷卻 80K 層溫度，除了臨界電流下降，電流受磁場影響因素變大，傳至 4.2K 之熱漏亦隨之增加，且為了達到目標電流，所使用之超導線徑需加大，也將使傳至 4.2K 之熱傳導上升。

而使用液氮層與 50K 層分開之設計，可使液氮有效冷卻 300-80K 之超導電流棒，超導超導電流棒達更大臨界電流且受磁場影響下降，亦可使 4.2k 本體與外界熱傳導及熱輻射負載下降。

雖然使用（熱漏較高型號）高溫超導電流導電棒以第二段之低溫冷凍機功率尚能應付，但高溫超導電流導電棒熱端溫度高時電流密度受背景磁場影響極大是我們無法接受的，故降低高溫超導電流導電棒熱端溫度，為為何使用三段式電流導電棒之主因。

## 2.2.2 電流導電棒構造與熱負載分析

### I. 電流導電棒構造分析

根據(2.5)式所示，總熱負載最小值僅決定於電流、溫差與電流導電棒材質，且發生在傳熱與焦耳熱相等時，而電流導電棒之截面積與長度之關係如式(2.4)所示，亦為上述三點所決定，故電流導電棒任何一截面積皆有一對應之長度可得熱負載最小值，但參考圖 十九，當其截面積或長度值過小時，易受其值稍微改變即造成總熱負載快速上升，使系統可容許工程上的誤差極小，且由於電流導電棒需經極大溫差，當電流導電棒長度過短時，溫度梯度過高，電流導電棒變形量大，易造成連結零件損壞。

本系統之電流導電棒長度為考量整體系統設計後所決定，第一考量因素為電流導電棒需與液氮桶相連結，且液氮桶為固定於靜置腔體上，電流導電棒固定於腔體吊起部分，估需於腔體吊起部分吊入靜置腔體將電流導電棒連結於液氮桶冷卻連結平台上，而第二考量因素為電流導電棒與冷卻平台連結之位置需與低溫冷凍機與 50K 熱遮蔽層及 4.2K 超導線圈主體之冷卻連結位置不可相差太遠，否則難以固定，如圖 二十三。後取決於各層間位置與各種工程施作上的考量，並加上提供變形給因大溫差而伸縮的彎段設計，決定各段電流導電棒之長度，如表 六所示：

表 六. 各段電流導電棒長度

	長度(cm)	圖示
300K-80K 電流導電棒	53	
80K-50K 電流導電棒	28	

電流導電棒與液氮層冷卻平台連結部分與系統低溫冷凍機第一段、第二段冷卻端設計為一同固定，如圖 二十三：

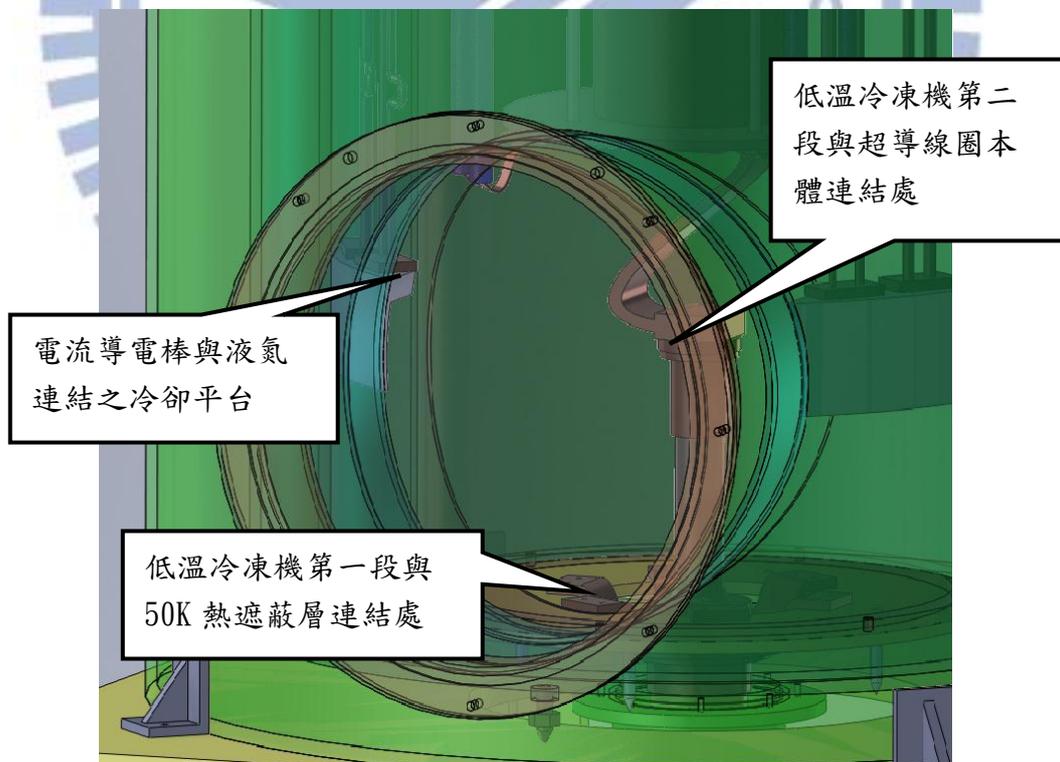


圖 二十三. 手伸孔內各部冷卻連結部分位置示意圖

## II. 銅電流導電棒最小熱負載分析

而以下之分析為銅電流導電棒參造章節 2.2.1，以式(2.3)寫入 Mathematica 軟體，整理出各段電流導電棒通以不同截面積通以相同電流時之長度與熱負載相關圖，選擇以最小熱負載為前題下，適合系統使用的各段電流導電棒截面積。

### A. 通以 480 安培之兩段電流導電棒：

如節 2.2.1 內所述，電流導電棒總共分為三段(如圖 十四所示)，而銅電流導電棒需分為兩段，溫度 300K-80K 為第一段，溫度 80K-50K 為第二段，而 480 安培與 200 安培之電流大小不同，亦影響電流導電棒之最小熱負載之截面積的不同(參考公式 2.4)，故 480 安培與 200 安培之各段電流導電棒亦分開計算其最小熱負載截面積。

1.) 300K-80K:

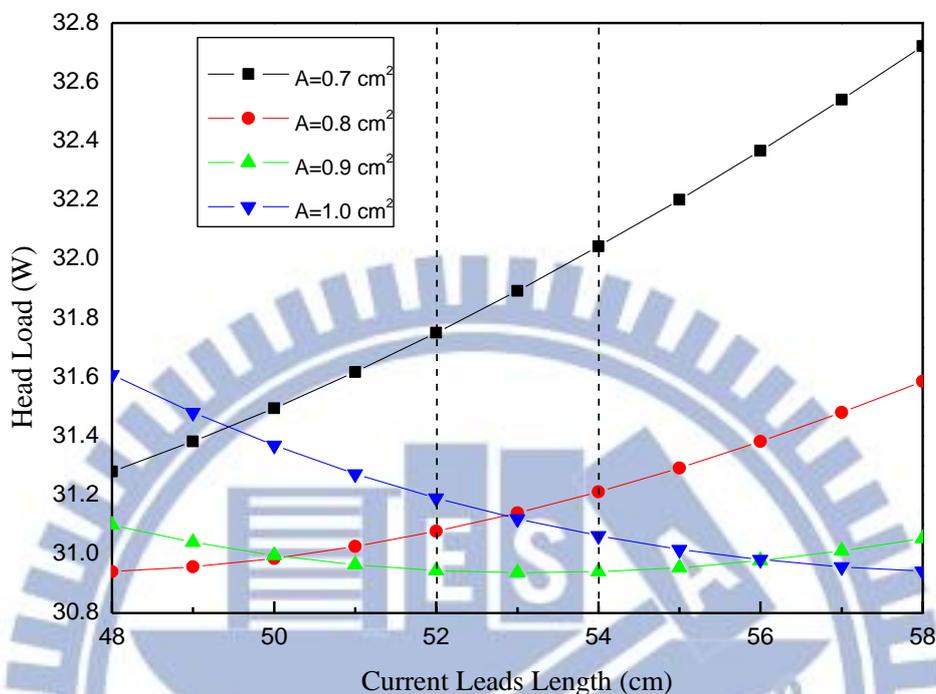


圖 二十四. 480 安培：300K-80K 電流導電棒最佳化截面積

上圖為通以 480 安培之電流導電棒於 300K-80K 時，各截面積對應之電流導電棒長度與熱負載關係圖，虛線範圍為電流導電棒長度±1 cm，可得當截面積為 0.9 cm<sup>2</sup> 時，最小熱負載在系統之電流導電棒長度設計範圍，故我們 300-80K 段設計電流導電棒之截面積為 0.9 cm<sup>2</sup>。

## 2.) 80K-50K:

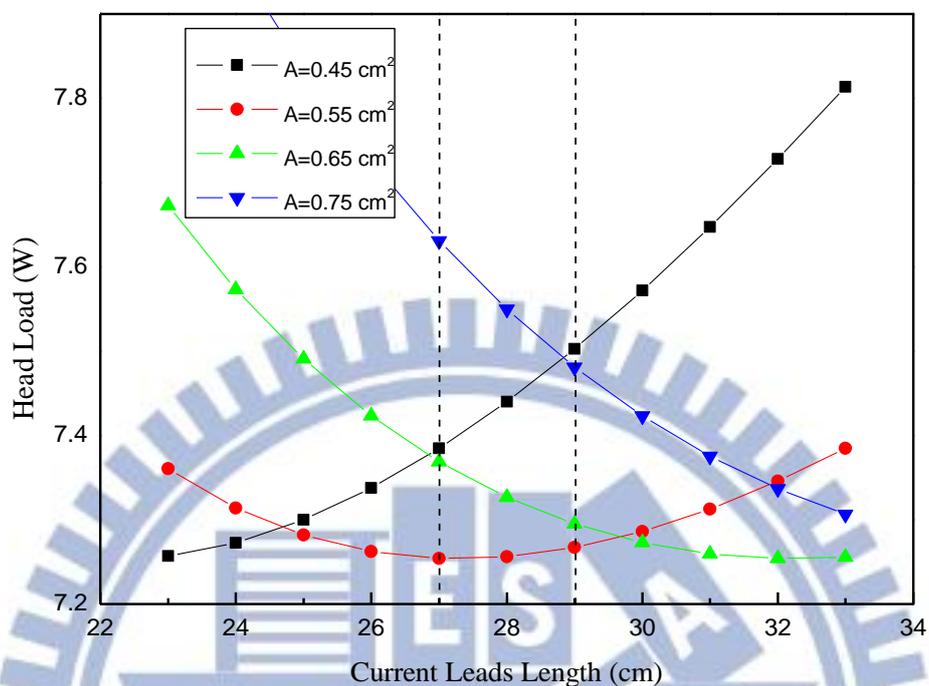


圖 二十五. 480 安培：80K-50K 電流導電棒最佳化截面積

上圖為通以 480 安培之電流導電棒於 80-50K 時，各截面積對應之電流導電棒長度與熱負載關係圖，虛線範圍為電流導電棒長度 $\pm 1$  cm，可得當截面積為  $0.55 \text{ cm}^2$  時，最小熱負載在系統之電流導電棒長度設計範圍，故我們 300-80K 段設計電流導電棒之截面積為  $0.55 \text{ cm}^2$ 。

## B. 通以 200 安培之兩段電流導電棒

### 1.) 300K-80K

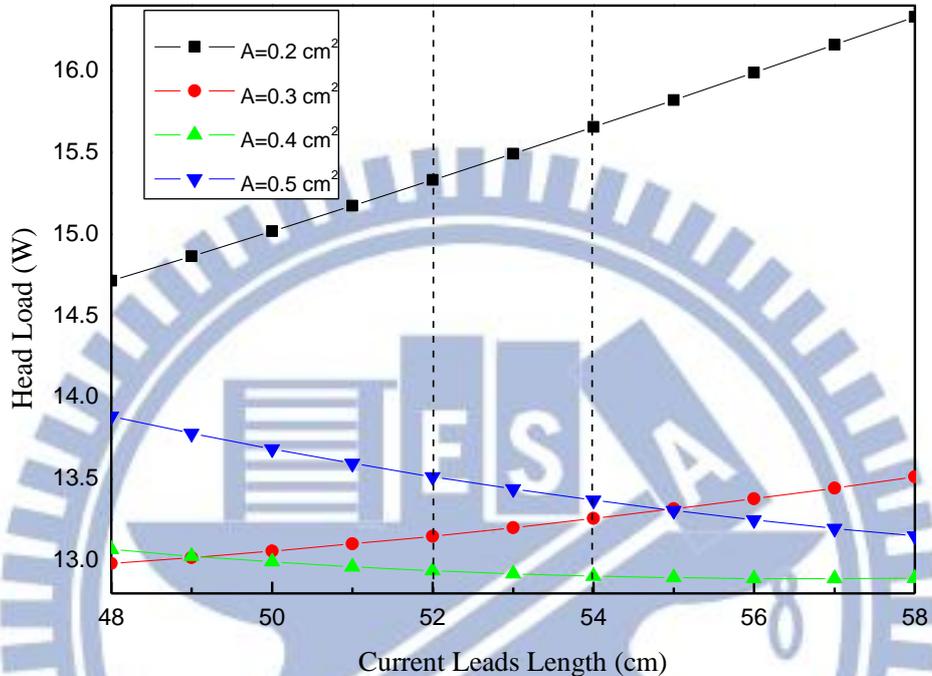


圖 二十六. 200A 安培：300K-80K 電流導電棒最佳化截面積

上圖為通以 200 安培之電流導電棒於 300K-80K 時，各截面積對應之電流導電棒長度與熱負載關係圖，虛線範圍為電流導電棒長度 $\pm 1$  cm，可得當截面積為  $0.4 \text{ cm}^2$  時，最小熱負載在系統之電流導電棒長度設計範圍，故我們 300-80K 段設計電流導電棒之截面積為  $0.4 \text{ cm}^2$ 。

### 2.) 80K-50K:

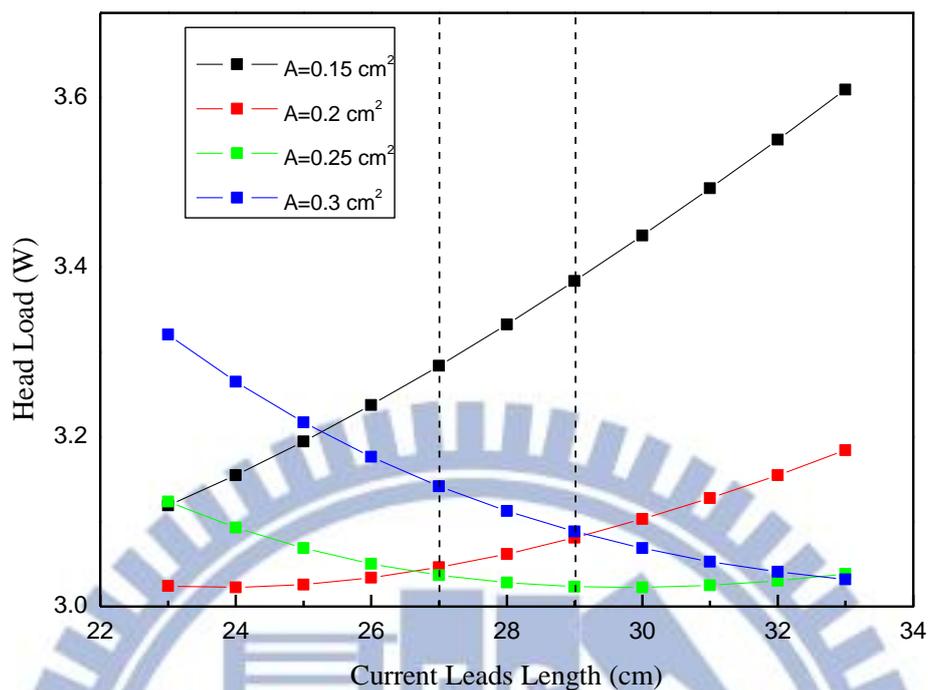


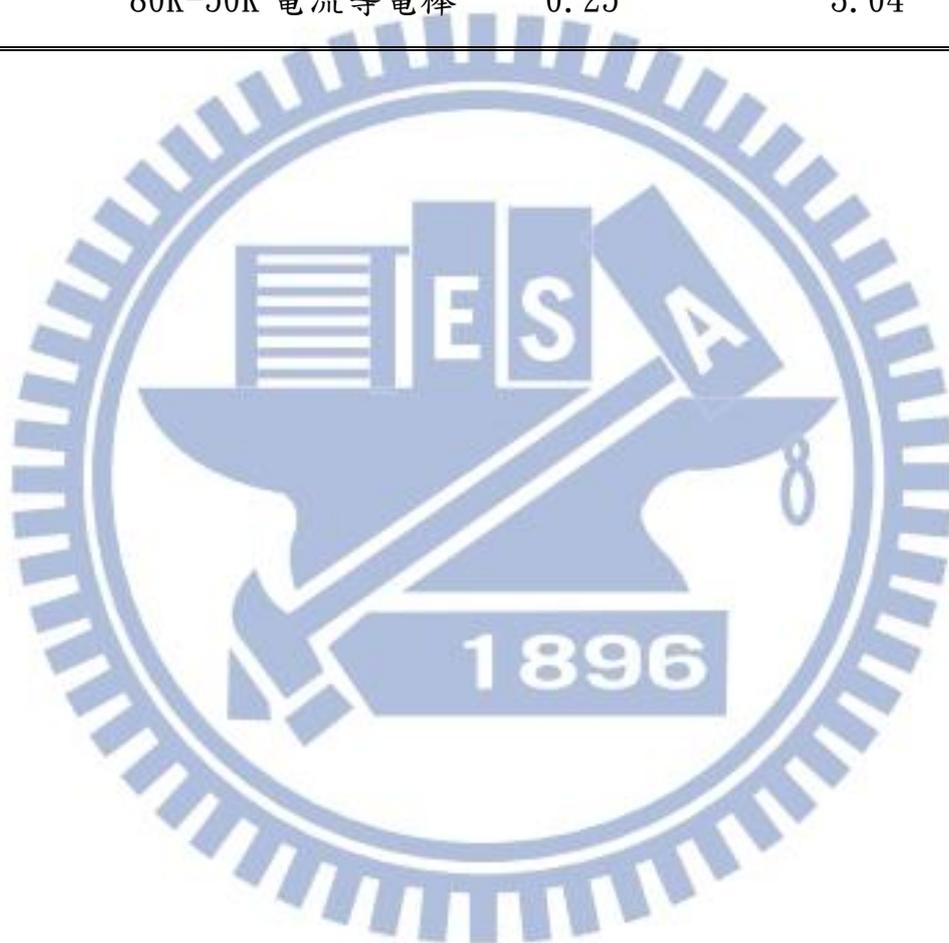
圖 二十七. 200A-80K-50K 電流導電棒最佳化截面積

上圖為通以 200 安培之電流導電棒於 80-50K 時，各截面積對應之電流導電棒長度與熱負載關係圖，虛線範圍為電流導電棒長度 $\pm 1$  cm，可得當截面積為  $0.25 \text{ cm}^2$  時，最小熱負載在系統之電流導電棒長度設計範圍，故我們 80-50K 段設計電流導電棒之截面積為  $0.25 \text{ cm}^2$ 。

將電流導電棒各組與各段之截面積與熱負載作整理，如表 七

表 七. 兩組電流導電棒熱負載最小時，各段之截面積與其熱負載

	截面積( $\text{cm}^2$ )	熱負載(W)
480 安培 300K-80K 電流導電棒	0.9	30.9365
80K-50K 電流導電棒	0.55	7.254
200 安培 300K-80K 電流導電棒	0.4	12.92
80K-50K 電流導電棒	0.25	3.04



### 2.2.3 腔體表面溫度分析

一個良好設計的低溫系統即使其系統內溫度極低，其系統表面亦須維持在室溫，以避免系統結水或結冰，而欲使系統整體於運作時表面仍能維持室溫，需考慮表面之熱對流、熱輻射及與熱傳導後，使系統表面維持室溫，需先分析系統表面可負荷之熱負載。

由於系統表面之電流真空端子與外部導電棒直徑等已確定規格，故以已建立之模型進行熱分析，設定其自然對流係數與室溫輻射環境，給定一可變冷源，其冷源熱負載與系統表面溫度關係圖如下：

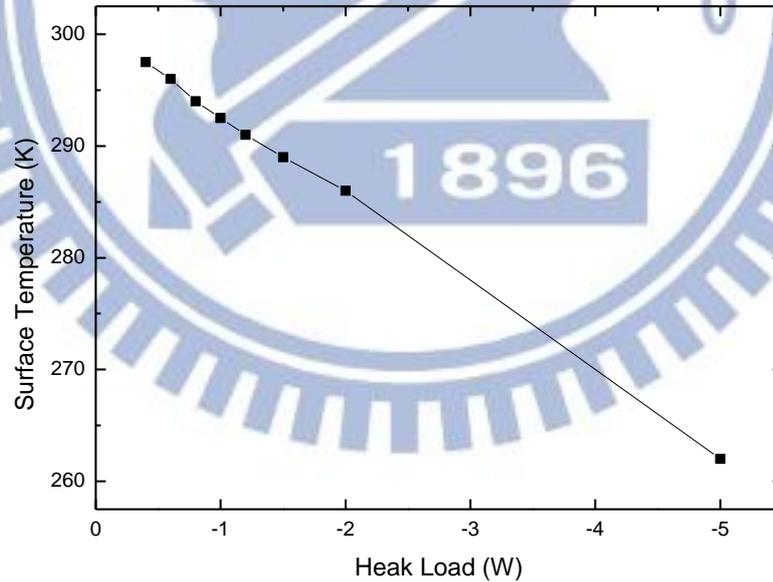


圖 二十八. 系統表面溫度與熱負載關係圖

由上述分析可知單支銅電流導電棒之傳導熱需降至 0.8W 以下，系統才可維持在室溫範圍，若傳導熱超過 0.8 W，系統未通電時溫度過低(與傳導熱成正比)，通電後溫度提高(與焦耳熱成正比)，但系統要求為不論通電與否，系統表面皆須維持室溫，故若以整體熱負載最小之分析結果設計系統，將使系統表面結冰或結霜(參考表 八)，為避免此種情況發生，重新考量電流導電棒之設計。

首先考慮僅使用自然對流能否使系統維持在室溫，而欲使傳導熱小於 0.8W 的情況下，以銅電流導電棒 480 安培為例，其焦耳熱我們可由式(2.3)推得約 315W (總熱負載最小達成時，傳導熱與焦耳熱之值相等)，在此情況下，焦耳熱將大幅上升，且最嚴重的副作用為此時的總熱負載將大幅上升，將使儲存之液氮可維持運作時間大幅下降，如表 八。

將系統維持在室溫的環境之下普遍有兩種解決方法，一為使用散熱片或風扇，二為雙管齊下，使用散熱片可有效增加對流面積，而使用風扇可有效增加對流係數，一般強迫對流之對流係數約為 25~250，其精確值取決於溫差與風速，在此取一般工業用風扇，其強迫對流之對流係數取  $100 \text{ W/m}^2$ ，經模擬後其可適用之最大電流導電棒截面積為  $0.8 \text{ cm}^2$ (平衡溫度為 291K)，並對電流導電棒最佳化，可得強迫對流下電流導電棒之熱負載與系統表面溫度關係，其總熱負載較最小熱負

載組多了 0.34W，係由 480 安培之電流導電棒截面積由最佳值  $0.9 \text{ cm}^2$  降至  $0.8 \text{ cm}^2$  所帶來，由表 八可清楚了解各方案差異。

表 八. 表面室溫與熱負載關係表

	總熱負載最小	表面室溫	強迫對流
T1 (200A)	253.3K	297K	297K
T2 (480A)	215.2K	297K	293K
T1' (通電)	265K	400K	298K
T2' (通電)	277K	630K	297K
Qc	44.8 W	3.2W	39.72 W
Qe	43.24 W	678 W	48.7 W
Qtotal	88.04 W	681.2 W	88.38 W

## 第 3 章 腔體熱分析

### 3.1 熱分析理論

熱的傳遞路徑不外乎三種：熱傳導、熱對流、熱輻射，在低溫腔體中，要如何有效的降低這三項造成的熱負載對能否降至目標溫度為設計低溫腔體的重點，而要如何設計並降低各項熱負載則需先了解其理論再對症下藥，由於本低溫腔體採用低溫冷凍機冷卻，腔體內部可直接抽取真空，無需液氮液氦系統般有氣體上的考量，故低溫腔體欲降至目標溫度主要為降低熱傳導與熱輻射，熱對流為表面室溫平衡時參考，本節內主要著墨處為熱傳導與熱輻射。

#### 3.1.1 熱傳導

在量化熱傳熱傳遞時，常以熱流率方程式 (Fourier' s Law) 計算每單位時間的熱傳量，熱流率方程式可表示為：

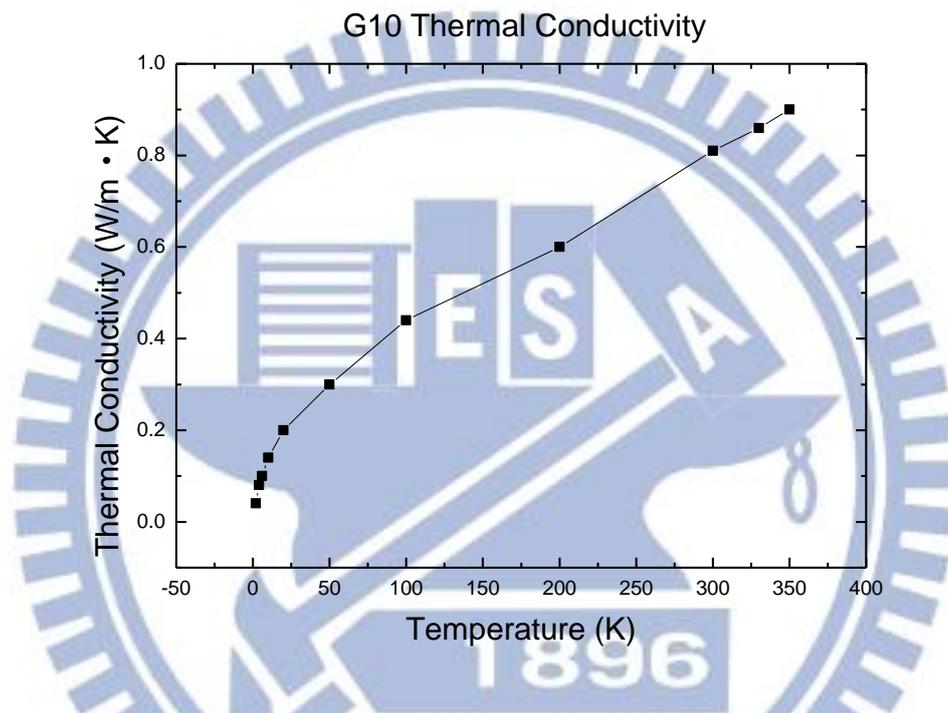
$$q_x = -k \frac{dT}{dX} \quad (3.1)$$

$q_x$  ( $W/m^2$ ) 表示在 X 方向，每單位垂直熱傳方向的面積的熱傳率，且與 X 方向的溫度梯度  $\frac{dT}{dX}$  成正比，比例常數  $k$  ( $W/m \cdot K$ ) 為熱傳導

係數，負號表示熱由高溫傳至低溫，在穩態情況下，可改寫為：

$$q_x = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3.2)$$

在系統溫差大時，熱傳導係數k隨著溫度改變而改變，如圖二十九：



圖二十九. 塑鋼之熱傳導係數與溫度關係圖

故方程式改寫為

$$q_x = -\frac{1}{L} \times \int_{T_2}^{T_1} k dt \quad (3.3)$$

而此方程式表示熱流通量 (Heat Flux)，而截面積為A之平面，其

熱傳導之熱流率 (Heat Flow)，為熱流通量與面積之乘積，表示式：

$$q = q_x \times A = \frac{A}{L} \times \int_{T_2}^{T_1} k dt \quad (3.4)$$

### 3.1.2 熱輻射

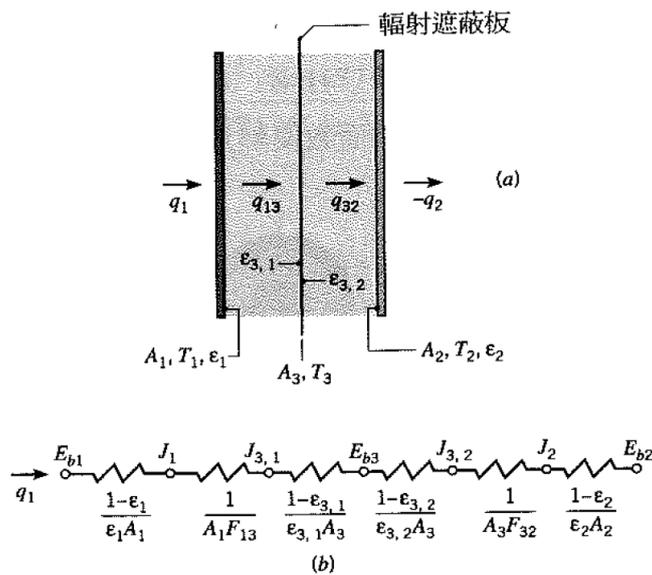
因以往做低溫實驗時使用液氮液氦冷卻，熱負載計算可容許誤差值較大，常以經驗值做計算，但本實驗需使用冷凍機做為冷卻來源，若熱負載稍大，即無法冷卻至目標溫度，則可能使超導線材無法發揮該有的表現，無法達到目標磁場，故嘗試以理論的方式與經驗所得值媒合，了解其中關係，以利實驗可達到預定目標。

而在傳統低溫熱分析之中，較為困難為熱輻射分析，低溫系統中，熱輻射為一主要的熱負載來源，為了減低輻射熱負載，低溫系統常使用超絕緣層（Super Insulation，簡稱 S. I.）來降低輻射熱，在以往估算常以廠商給定之實驗值為計算根據，但為了系統更區間設計不同，了解超絕緣層使用理論為必要的。

在本節中，將比較各參考資料中不同的計算方式，並與我們現有的實驗資料做比較，得一適用於本低溫腔體系統之計算方式。

#### I. 絕緣層使用

在”熱傳遞(Fundamentals of Heat and Mass Transfer)”一書中，其 13 章-表面間的輻射交換中，提到了輻射遮蔽板，其將其視為一額外增加的熱阻（如圖 三十所示）



圖三十<sup>3</sup>. 具有輻射遮蔽板之兩大平板間的輻射交換  
(a)概略圖 (b)網路表示圖

其增加一層超絕緣層，即可視為增加一熱阻，而當一特例發生時（多個輻射遮蔽板，其所有放射率皆為等值，如超絕緣層之使用），若具有  $N$  個遮蔽板，則方程式可改寫為

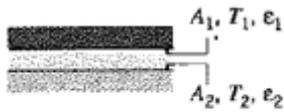
$$(Q_{12})_N = (1/(N+1)) \times (Q_{12})_0 \quad (3.5)$$

$(Q_{12})_0$  為沒有輻射遮蔽板情況下之輻射傳遞率

在沒有輻射遮蔽板情況之下，輻射熱交換之算法以圖 三十一表示：

<sup>3</sup> Frank Incropera, David P Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, New York USA. 1996, pp. 709

大型(無限大)平行板

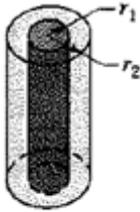


$$A_1 = A_2 = A$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

長型(無限長)同心圓柱



$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

同心圓球

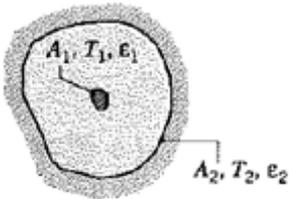


$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}$$

在大型凹穴中凸面物



$$\frac{A_1}{A_2} \approx 0$$

$$F_{12} = 1$$

$$q_{12} = \sigma A_1 \epsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

圖 三十一<sup>4</sup> 各種不同形狀之熱輻射交換計算公式

<sup>4</sup> Frank Incropera, David P Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, New York USA. 1996, pp. 710

## II. 試算與比較

為確定估算方法是正確的，並評估其他設計一般使用的安全係數 (safety factor) 為估算之多少倍數，參考同步輻射 SWLS 磁鐵設計報告內之熱輻射估算，並以相同條件下以本論文之估算方式下去做計算，比較其結果。

在同步輻射 SWLS 磁鐵設計報告之中，有關超絕緣層使用為液氮桶 4.2K 層，其熱輻射交換表面為 50K 至 4.2K，包覆 5 層超絕緣層，可包覆空間之寬度為 0.381 cm，其相關參數與計算如下：

設 4.2K 之表面溫度，表面積  $A \approx 1632 \text{ cm}^2$ ，使用 5 層超絕緣層，其相對應之”有效量測熱轉換係數”為

$$K_i = 15.3 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$$

並直接與面積做乘積

$$Q_{r(4.2K)} = K_i \times A = (15.3 \times 10^{-7}) \times (1632) = 2.5 \text{ mW}$$

得其熱流量為 2.5 mW

接著以本論文之估算方式嘗試計算包覆超絕緣層之熱流量：

以式(3.5)計算包覆 5 層之輻射熱

$$(Q_{12})_5 = (1/(5+1)) \times (Q_{12})_0$$

而包覆該層之超導線圈形狀為同心圓柱，參考圖 三十一之公式：

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

其中  $A_1$  與  $A_2$  間距極小， $A_1/A_2 \doteq 1$ ，輻射率  $\varepsilon_1$  與  $\varepsilon_2$  以拋光鋁之輻射率 0.04 做計算

得  $(Q_{12})_0$  為 10.2 mW，再代入式(3.5)內，得

$$(Q_{12})_5 = (1/(5+1)) \times (Q_{12})_0 = 1.7 \text{ mW}$$

乘以安全係數 1.5 倍 = 2.89 mW

可得當安全係數取 1.5 倍時，估算之熱流量與 SWLS 設計報告內之熱流量估算值接近，故在之後的熱分析估算裡，輻射熱皆以安全係數 1.5 倍做為設計標準。

安全係數之用途為將分析後之熱負載乘以安全係數後仍能冷卻至目標溫度，使系統可能未考慮到之因素對目標之影響降到最小。

### 3.1.3 熱對流

對流熱流率方程式可表示為：

$$q_x = h \times (T_s - T_\infty) \quad (3.6)$$

其中  $q$  為對流熱流通量 ( $W/m^2$ )，與界面及流體間的溫度差 ( $T_s - T_\infty$ ) 成正比。此式稱為牛頓冷卻定律，其中比例常數  $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ) 稱為對流熱傳係數。其與邊界層的狀況有關而受到諸如表面形狀、流體運動狀況與流體熱力學及輸送性質種類的影響，而典型的對流熱傳係數如表九所示：

表九. 對流熱傳係數

過程	$h$ ( $W/m^2 \cdot K$ )
自然對流	
氣體	2-25
液體	50-100
強迫對流	
氣體	25-250
液體	50-20,000

截面積為  $A$  之平面，其熱傳導之熱流率，為熱流通量與面積之乘積，表示式：

$$q = q_x \times A = A \times h \times (T_s - T_\infty) \quad (3.6)$$

在本系統分析中，由於腔體內部維持在真空的環境之下，故對流分析僅限於腔體表面，熱對流分析結果僅影響超導電流棒表面溫度，與腔體結構設計關連較少，而熱對流係數計算考慮因素較多，故直接以 Ansys 模擬軟體給予室溫與空氣流動情況分析。本系統表面之對流係數與溫度關係圖，如圖 三十二、圖 三十三：

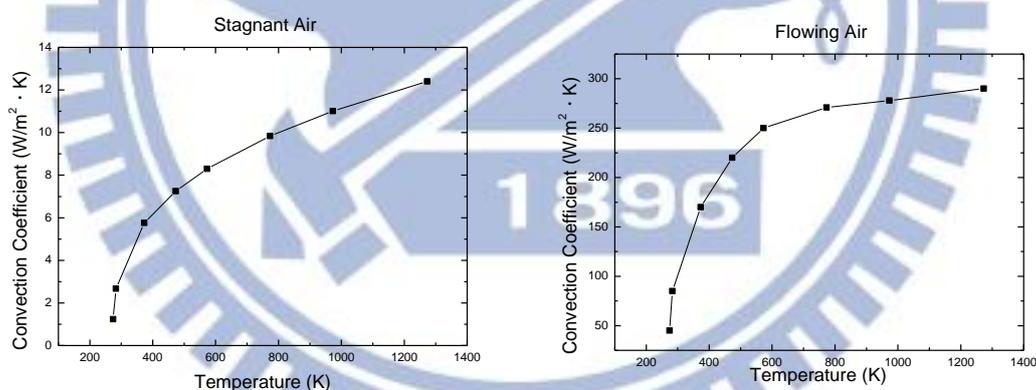


圖 三十二. 自然對流之溫度與熱對流係數關係圖

圖 三十三. 強迫對流之溫度與熱對流係數關係圖

## 3.2 腔體各層熱分析

本節內將依造 3.1 節內描述之理論觀點，盡可能降低熱負載，且各零件以符合工程上可行性之加工來設計低溫腔體，並以低溫腔體內各層各零件以 3.1 節內提到之計算方法估計熱漏，輔以 Ansys 分析軟體進行穩態熱分析，再將其列表比較，本節中以各層為一主體，方便閱讀與計算，而各零件之 Ansys 穩態熱模擬之溫度分布與熱流量於附錄三中收錄，有興趣了解細節者可參考附錄。

### 3.2.1 80K 液氮儲存槽熱分析

熱源分為傳導熱負載，輻射熱負載，與超導電流棒 300-80K 所帶來之傳導熱與電阻熱（電流熱），冷源來自於液態氮之汽化熱，故其僅能冷至 80K，僅靠該冷源無法達到更低溫，若將其與低溫冷凍機作連結，反而成為低溫冷凍機之熱負載。

#### I. 傳導熱負載

本層熱傳導有四個路徑（除超導電流棒）外，液氮傳輸管、液位器訊號線、水平位置固定玻璃纖維螺桿、高度位置固定玻璃

纖維螺桿。

由熱傳導公式(3.4)可知，截面積越小，熱傳遞長度越長，則傳導熱越小，故我們設計接觸時盡量拉長距離，減小截面積。

液氮傳輸管：截面積  $14.18 \text{ mm}^2$ ，管長  $430 \text{ mm}$ ，材料-不鏽鋼，熱傳導係數積分值  $2.743 \text{ W/mm}$ ，則  $Q_c = 90.4 \text{ mW}$

液位器訊號線：截面積  $0.0127 \text{ mm}^2$ ，長  $60 \text{ cm}$ ， $Q_c = 5.625 \text{ mW}$

水平位置固定玻璃纖維螺桿：截面積  $30 \text{ mm}^2$ ，管長  $65 \text{ mm}$ ，材料-玻璃纖維，熱傳導係數積分值  $0.1815 \text{ W/mm}$ ， $Q_c = 83.77 \text{ mW}$

高度位置固定玻璃纖維螺桿：截面積  $30 \text{ mm}^2$ ，管長  $34 \text{ mm}$ ，材料-玻璃纖維，熱傳導係數積分值  $0.1815 \text{ W/mm}$ ， $Q_c = 160.1 \text{ mW}$

## II. 輻射熱負載：

分析條件，熱輻射交換溫度為  $300\text{K}-80\text{K}$ ，20 層超絕緣層，間隔  $8 \text{ cm}$ ，輻射率  $0.04$ （拋光鋁），圓柱型面積為  $1.46 \text{ m}^2$ ，面對面部分面積為  $0.32 \text{ m}^2$ （公式不同分開計算）。

$$\text{分析計算：圓柱部分 } (Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, (Q_{12})_{20} = (1/(N+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_0 = 13 \text{ W} \quad , \quad (Q_{12})_{20} = 0.6 \text{ W}$$

乘以安全係數  $1.5$  倍  $= 0.9 \text{ W}$

其中  $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼定律常數 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )， $A_1$  為分析物體之表面積， $T_1$  為分析物體溫度， $T_2$  為與分析物體行熱交換之表面溫度， $\varepsilon_1$  為分析物體表面之輻射率， $\varepsilon_2$  為與分析物體表面熱交換之表面輻射率，於此將  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  視為拋光鋁之輻射率 0.04， $\frac{A_1}{A_2}$  為分析物體與其做熱交換之物體表面積比例，在此因其值接近，視為 1

$$\text{面部分 } (Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, (Q_{12})_{20} = (1/(N+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_0 = 2.98 \text{ W}, (Q_{12})_{20} = 0.142 \text{ W}$$

$$\text{乘以安全係數 } 1.5 \text{ 倍} = 0.213 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = 1.12 \text{ W}$$

以熱分析軟體對 80K 液氮層做穩態熱分析：

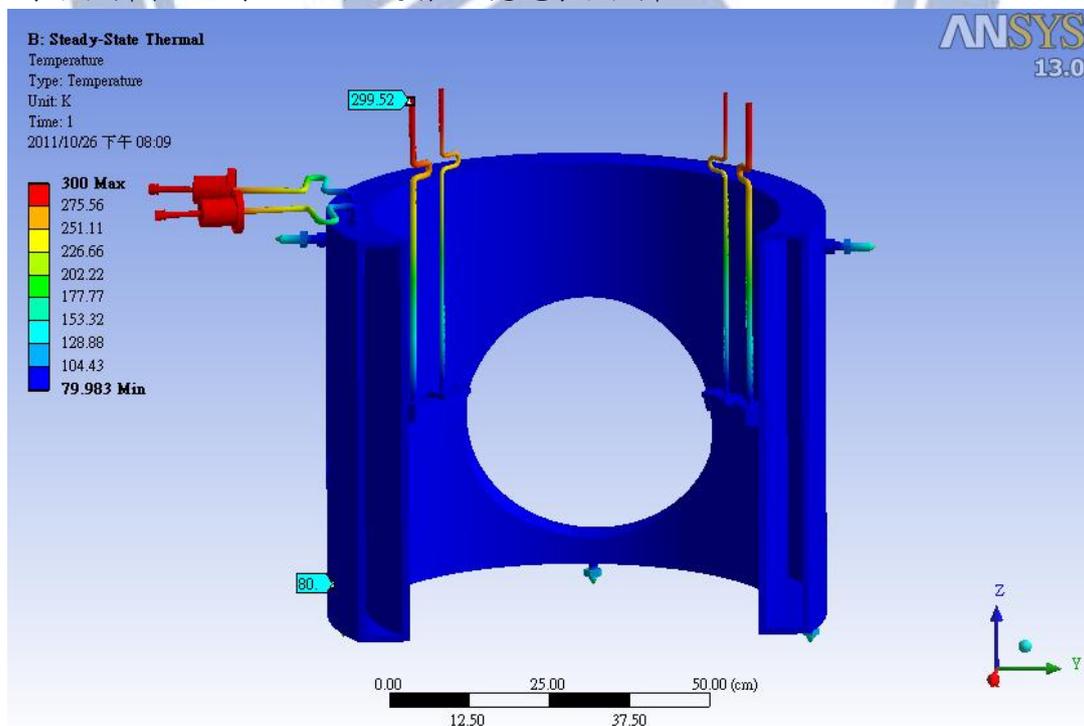


圖 三十四. 80K 液氮層溫度分布

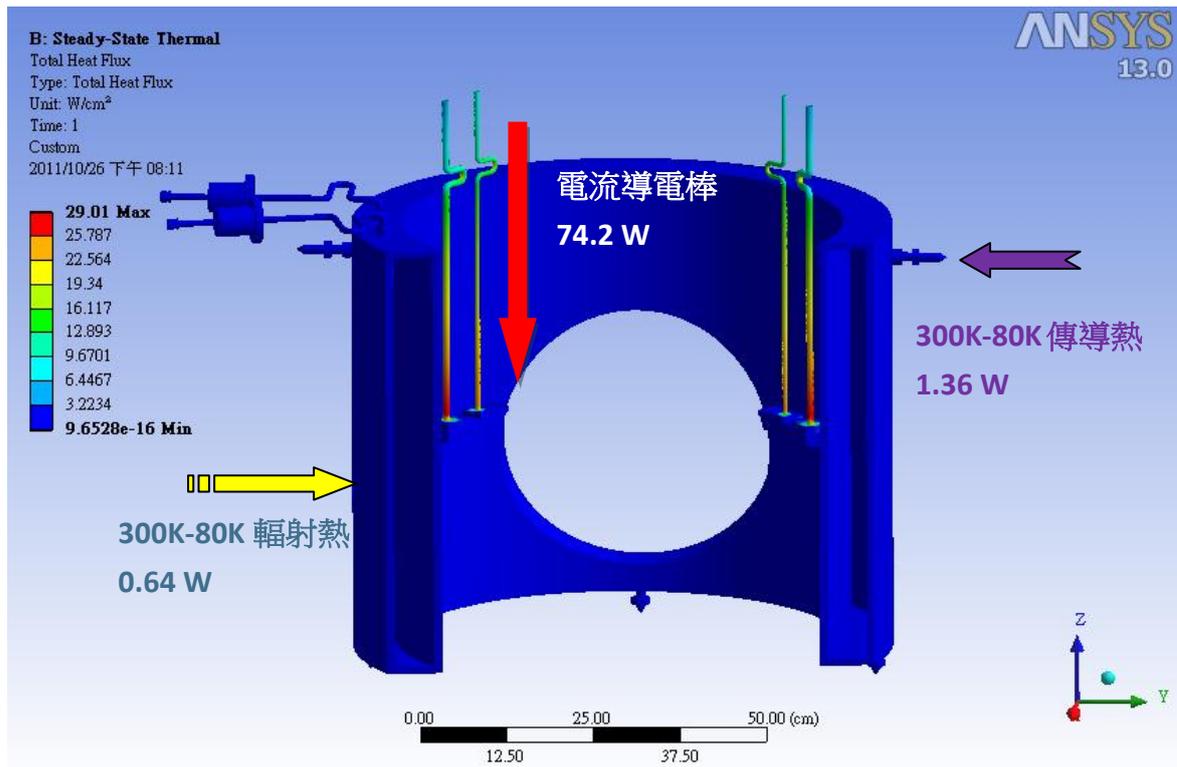


圖 三十五. 80K 液氮層熱流量分布圖

表 十. 80K 層熱負載

	估算值 (安全係數)	模擬值
傳導熱	1.16 W	1.36 W
輻射熱	0.742 W	0.64 W
	1.12 W (×1.5)	
300K-80K 電流導電棒	88.38 W	74.2 W
液氮層可維持運作時間	12.35 hour	14.69 hour

### 3.2.2 50K 熱遮蔽層熱分析

熱源分為傳導熱負載，輻射熱負載，與電流傳導棒 80-50K 所帶來之傳導熱與電阻熱（電流熱），冷源來自於低溫冷凍機 1<sup>st</sup> Stage 之傳導熱

#### I. 傳導熱負載

本層熱傳導有三個路徑（除電流傳導棒外），上蓋玻璃纖維吊桿、高度位置固定玻璃纖維螺桿、第一段熱傳導銅片

上蓋玻璃纖維吊桿：截面積  $0.7854 \text{ cm}^2$ ，長  $12 \text{ cm}$ ，材料為玻璃纖維，溫差  $300\text{K} \sim 50\text{K}$ ，熱傳導係數積分值  $k' = 1.905 \text{ W/cm}$ ， $Q_c = 0.125 \text{ W}$ ，共四根  $Q_c' = 0.5 \text{ W}$

高度位置固定玻璃纖維螺桿：截面積  $A = 0.2 \text{ cm}^2$ ，管長  $L = 5\text{cm}$ ，材料為玻璃纖維，溫差  $300\text{K} \sim 50\text{K}$ ，熱傳導係數積分值  $k' = 1.905 \text{ W/cm}$ ， $Q_c = 0.076 \text{ W}$ ，共四根  $Q_c' = 0.3 \text{ W}$

## II. 輻射熱負載：

本層輻射熱遮蔽層來源需分為四部分計算，因其可包覆超絕緣層之空間不同，且與之熱交換表面溫度亦不同，本層中間圓柱輻射熱遮蔽層之輻射熱交換表面為液氮層，且包覆超絕緣層空間大，輻射熱負載極小，其他三部分則與室溫層做輻射熱交換，分別為圓柱狀薄輻射熱遮蔽層，上下輻射熱遮蔽層平行板，與超導線圈輻射熱遮蔽層，其中超導線圈輻射熱遮蔽層可包覆超絕緣層之空間極小，僅 2 mm，而各估算之公式亦有不同，液氮層內側之圓柱狀輻射熱遮蔽層與圓柱狀薄輻射熱遮蔽層及超導線圈內側輻射熱遮蔽管，其輻射熱以圖 三十一之長形同心圓柱公式計算，二為輻射熱遮蔽層上下蓋，以圖 三十一之大型平行板公式計算。

分析計算：

液氮層內側之圓柱狀輻射熱遮蔽層(溫差 80K-50K)：

本層面積 $A_1$ 為  $0.79 \text{ m}^2$

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, (Q_{12})_{20} = (1/(20+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_0 = 31.7 \text{ mW}, (Q_{12})_{20} = 1.5 \text{ mW}$$

其中  $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼定律常數 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )， $A_1$  為分析物體之表面積， $T_1$  為分析物體溫度， $T_2$  為與分析物體行熱交換之表面溫度， $\varepsilon_1$  為分析物體表面之輻射率， $\varepsilon_2$  為與分析物體表面熱交換之表面輻射率，在此將  $\varepsilon_1$  與  $\varepsilon_2$  皆視為拋光鋁之輻射率 0.04， $\frac{A_1}{A_2}$  為分析物體與其做熱交換之物體表面積比例，在此因其值接近，視為 1。

圓柱狀薄輻射熱遮蔽層(溫差 300K-50K)：

本層面積  $A_1$  為  $0.135 \text{ m}^2$

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, (Q_{12})_{20} = (1/(20+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_{20} = 0.183 \text{ W}$$

輻射熱遮蔽層大型平行板(溫差 300K-50K)：

本層面積  $A_1$  為  $0.41 \text{ m}^2$

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, (Q_{12})_{20} = (1/(20+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_{20} = 0.135 \text{ W}$$

圓管超導線圈內側輻射熱遮蔽管(溫差 300K-50K)：

本層面積  $A_1$  為  $0.072 \text{ m}^2$

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, \quad (Q_{12})_{20} = (1/(20+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_0 = 0.17 \text{ W}, \quad (Q_{12})_{20} = 8.6 \text{ mW}$$

$$Q_{\text{total}} = 0.38 \text{ W}, \quad \text{乘以安全係數之熱負載為 } 0.57 \text{ W}$$

以熱分析軟體對 50K 輻射熱遮蔽層做穩態熱分析：

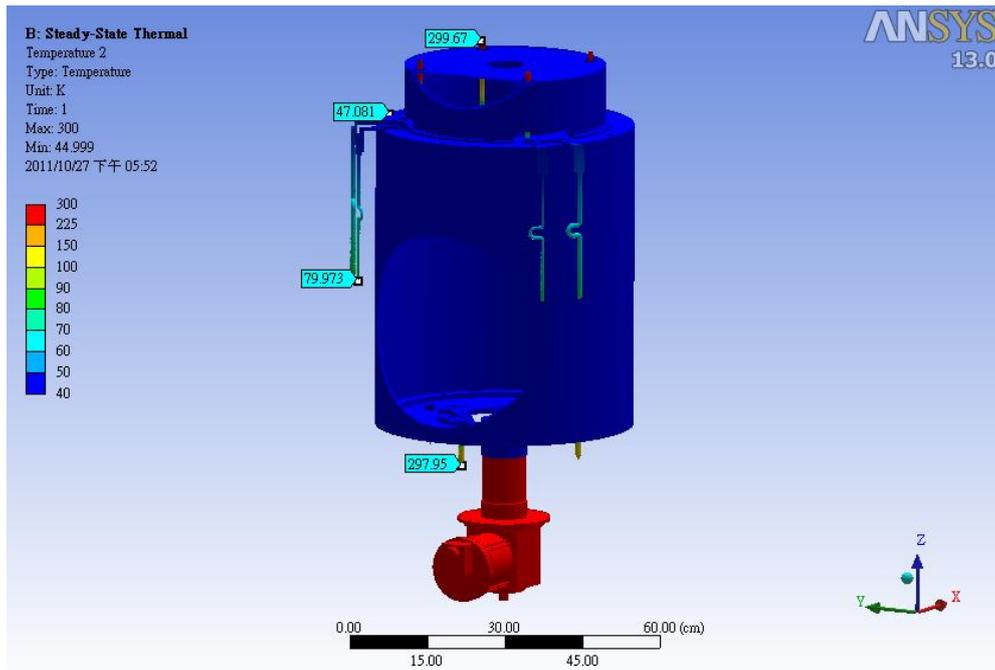


圖 三十六. 50K 層溫度分布

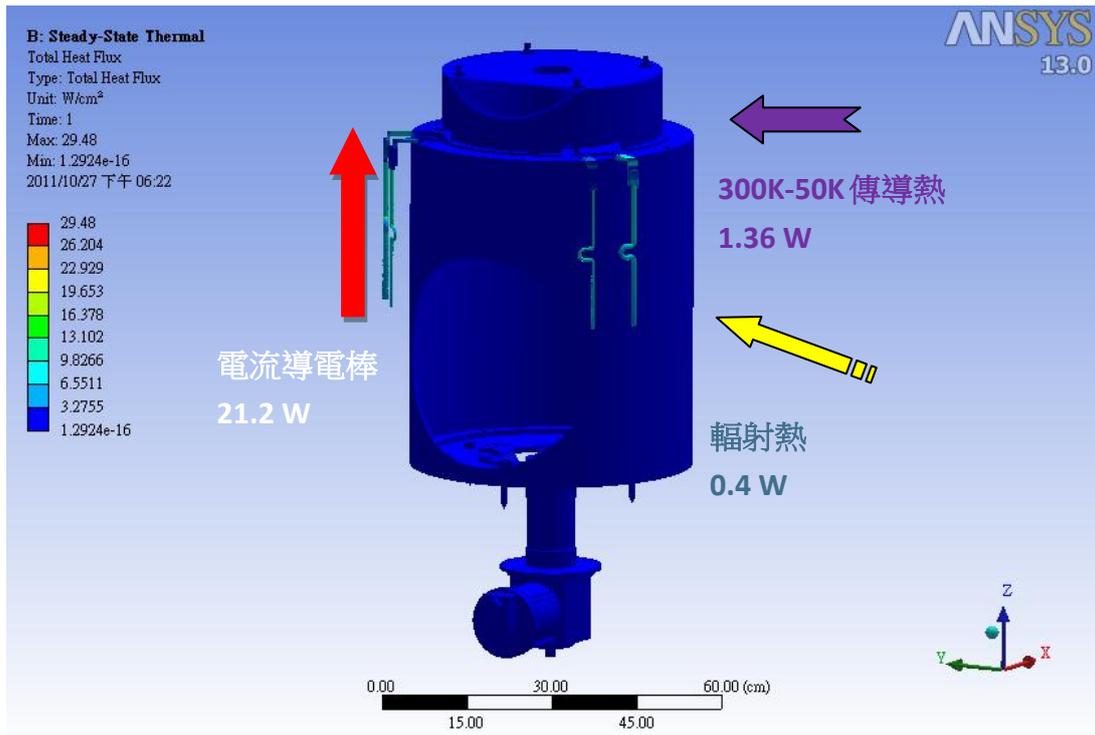


圖 三十七. 50K 層熱流量分布圖

表 十一. 50K 層熱負載

	估算值(安全係數)	模擬值
300K-50K 熱傳導	0.8 W	1.36 W
80K-50K 熱輻射	1.5 mW 2.25 mW (×1.5)	1.8 mW
300K-50K 熱輻射	0.378 W 0.567 W (×1.5)	0.4 W
80K-50K 電流棒	20.58 W	21.2 W
總熱負載	21.79 W	22.98 W

### 3.2.3 4.2K 超導線圈本體熱分析

熱源分為傳導熱負載，輻射熱負載，冷源來自於低溫冷凍機第二段之傳導熱

#### I. 傳導熱負載

本層熱傳導熱負載僅一路徑(超導導電棒除外)，50K 上蓋玻璃纖維支撐桿

由熱傳導公式(3.4)計算  $Q_c$

上蓋玻璃纖維吊桿：截面積  $A = 0.7854 \text{ cm}^2$ ，管長  $L = 10 \text{ cm}$ ，材料為玻璃纖維，溫差  $-50\text{K} \sim 4.2\text{K}$ ，熱傳導係數積分值  $k' = 84.6 \text{ mW/cm}$ ， $Q_c = 6.65 \text{ mW}$ ，共四根  $Q_c' = 26.6 \text{ mW}$

#### II. 輻射熱負載：

分析條件，熱輻射交換溫度為  $50\text{K} \sim 4.2\text{K}$ ，20 層超絕緣層，間隔：8 cm，輻射率 0.2 (拋光銅)，圓柱型面積為  $0.1674 \text{ m}^2$ ，面對面部分面積為  $0.155 \text{ m}^2$  (公式不同須分開計算)。

$$\text{分析計算：圓柱部分 } (Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}, (Q_{12})_{20} = (1/(N+1)) \times (Q_{12})_0$$
$$(Q_{12})_0 = 11.8 \text{ mW} \quad , \quad (Q_{12})_{20} = 0.593 \text{ mW}$$

其中  $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼定律常數 ( $\sigma = 5.67 \times$

$10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),  $A_1$  為分析物體之表面積,  $T_1$  為分析物體溫度,  $T_2$  為與分析物體行熱交換之表面溫度,  $\varepsilon_1$  為分析物體表面之輻射率,  $\varepsilon_2$  為與分析物體表面熱交換之表面輻射率, 在此將  $\varepsilon_1$  與  $\varepsilon_2$  皆視為拋光鋁之輻射率 0.04,  $\frac{A_1}{A_2}$  為分析物體與其做熱交換之物體表面積比例, 在此因其值接近, 視為 1

面部分(300K-50K)

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_2(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, (Q_{12})_{20} = (1/(20+1)) \times (Q_{12})_0$$

$$(Q_{12})_0 = 10.99 \text{ mW}, (Q_{12})_{20} = 0.55 \text{ mW}$$

$$Q_{\text{total}} = 1.143 \text{ mW}$$

以熱分析軟體對 4.2K 超導線圈本體做穩態熱分析：

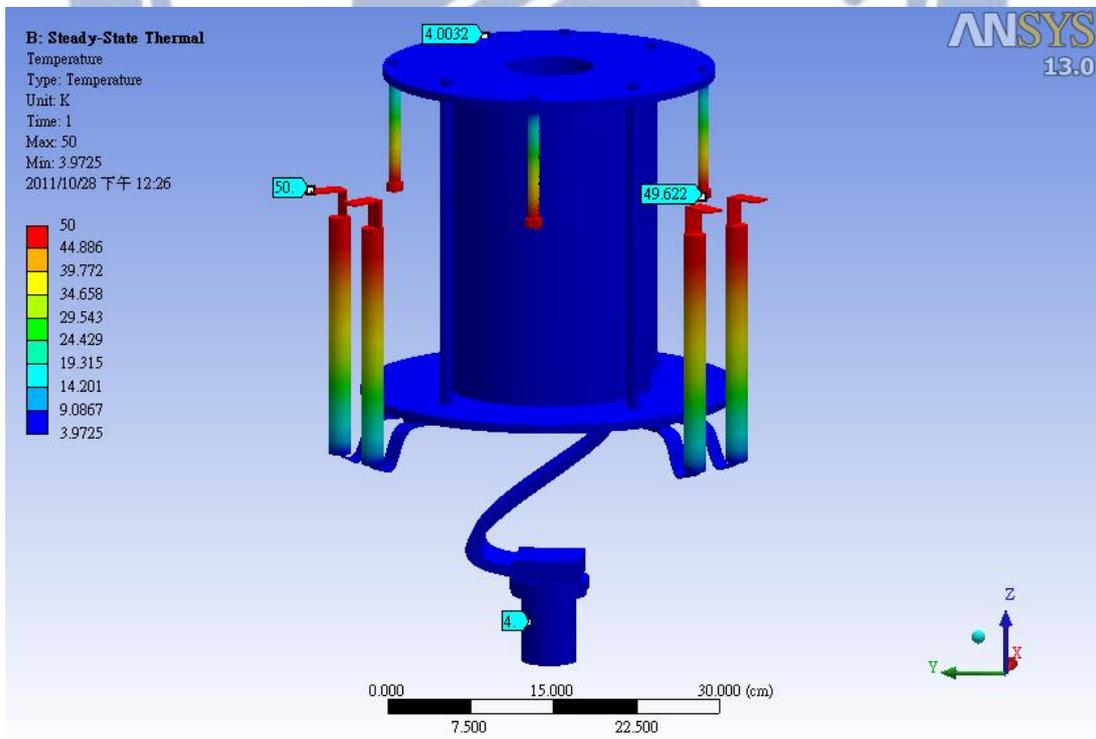


圖 三十八. 4.2K 線圈主體溫度分布

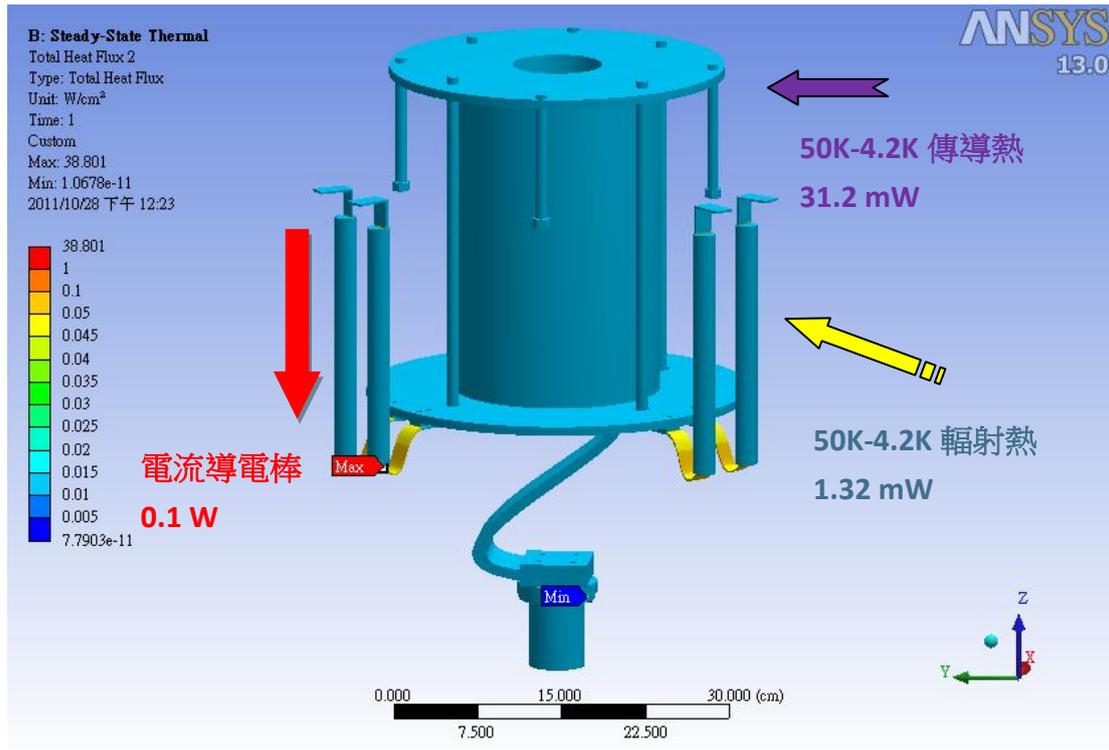


圖 三十九. 4.2K 線圈主體熱流量分布圖

表 十二. 4.2K 層熱負載

	估算值(安全係數)	模擬值
50K-4.2K 熱傳導	26.6 mW	31.2 mW
50K-4.2K 熱輻射	1.143 mW	1.32 mW
	1.715 mW (×1.5)	
超導電流導電棒	0.1 W	0.1 W
總熱負載	0.128 W	0.133 W

由表 十三可得低溫腔體內熱負載分佈，可看出低溫腔體之主要熱負載為電流導電棒之焦耳熱，此為低溫系統中無法避免之熱負載，

若高溫超導體之超導態範圍可至更高溫度則焦耳熱亦能大量下降，低溫系統之設計將更容易，目前二代超導線正在發展高溫超導電流導電棒，若其量產並能在 80K 以上仍維持超導態則低溫冷凍機之發展將更蓬勃。

表 十三. 低溫系統熱負載總表

	估算值	模擬值
傳導熱	1.99 W	2.75 W
輻射熱	1.12 W	1.04 W
焦耳熱	109.06 W	95.5 W
總熱負載	112.17 W	99.29 W

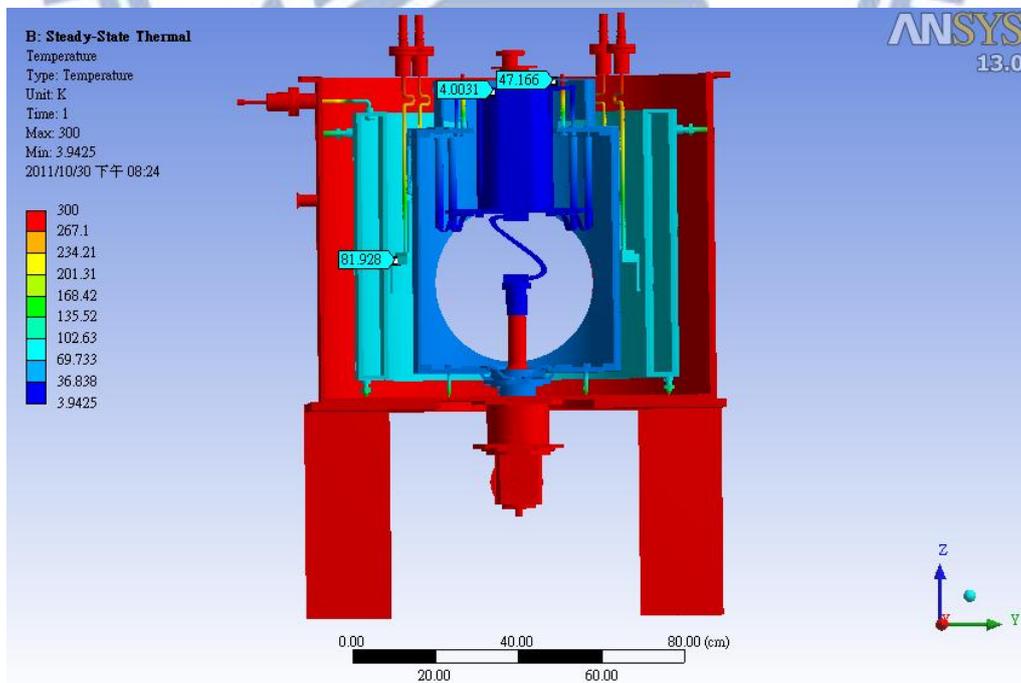


圖 四十. 低溫腔體穩態溫度分布圖

## 第 4 章 溫度校正腔體設計與建構

### 4.1 腔體結構相關設計

#### I. 建構原因：

本系統之低溫腔體除了超導磁鐵外亦有放置塊材之低溫腔體，而每個腔體都有其隔溫層，要清楚了解每個腔體內部溫度狀況需在許多位置安裝低溫感應來判斷冷卻情況，尤其是未來建造塊材腔體時亦須研究溫度與擄獲磁場之關係，故要數個溫度感應器提供低溫環境下準確溫度值來判斷冷卻情況。

但廠商所提供之已效正溫度感應器與未效正溫度感應器價差過大，且若要使其溫度效正至低溫範圍則價位更加高昂，若全數購買已效正溫度感應器，對本計畫而言花費太高，若自行建立一溫度效正系統不僅可使經費花費下降，並將經費用至於超導線材等其他可增進系統磁場表現的部份，亦可使實驗需要特別關注的溫度區間之點數更加密集(如 30K 至 4K)，故建立一溫度校正腔體以效正溫度感應器對本低溫系統而言是十分必要的。

#### II. 腔體設計：

不論是何種低溫腔體，盡量降低每一層熱負載使系統盡可能降至更低溫為低溫系統的基本要求，在低溫效正腔體中，因其樣

品要求空間小，僅需在低溫平台上置放最多 8 顆溫度感應器即可，冷卻平台體積與重量皆不大，直接與第二段低溫冷卻頭連結，未與其他溫層接觸，故無傳導熱，而熱對流因腔體在真空環境直接忽略，故在第二段冷卻中其熱負載來源僅來自輻射熱負載，由估算可得第二段即使不包覆超絕緣層隔絕輻射熱亦可有效降至 4K 以下(4K 以下溫度感應器無法量測，且低溫冷卻頭第二段至多冷卻至 3K)，故第二段溫度感應器效正低溫冷卻平台僅以銅平台與第二段低溫冷卻頭連結。

而第一段冷卻層之主要目的為提供第二段輻射熱遮蔽層，由於其功能僅為提供輻射熱遮蔽層，與充磁低溫腔體之 50K 輻射遮蔽層設計理念相同，減少該層厚度，以能使該層最高溫仍能有效為第二段冷卻平台提供輻射熱遮蔽即可，該層上下溫差並不對系統有大影響，故本層之材質以鋁為設計材質，其加工容易與輻射率較低之特性符合該層要求，第二段熱遮蔽曾在估算後(參考腔體熱分析)，其輻射熱若無包覆超絕緣層隔絕輻射，其熱負載亦非第二段低溫冷卻頭可以負荷的，由此可看出超絕緣層之使用對低溫系統之重要性，本層之重量約 7 公斤，詢問低溫冷卻頭製造廠商後確定第二段低溫冷卻頭可負荷約 10 公斤以下物品，故直接固定於第二段低溫冷卻頭上除去傳導熱，使本層僅需克服輻射

熱之熱負載即可，而包覆之超絕緣層層數取估算值包覆超絕緣層之 2 被，作為設計上之安全係數。

### III. 溫度感應器校正原理：

以一已校正溫度感應器為標準，得第二段冷卻平台之正確溫度，將冷卻平台自 300K 降至 4K，並以電腦紀錄其他未校正溫度感應器之電阻與溫度關係，將各溫度感應器之電阻與溫度關係取對數後，整理為溫度控制儀器可讀取之程式碼，並分別寫入溫度感應器內，於下次該溫度感應器使用時即可得正確溫度值。



## 4.2 腔體熱分析

如 3.2 所述，低溫腔體之熱分析可分為三個路徑：熱傳導、熱對流、熱輻射，在溫度修正腔體中，以抽真空杜絕熱對流熱負載，而冷卻層第一段與第二段之間除低溫冷凍機外無其他連結杜絕熱傳導，故溫度修正腔體唯一許考慮之熱分析為輻射熱分析。

### 1.) 熱輻射估算：

#### A. 第一段輻射熱遮蔽層輻射熱估算：

因腔體為同心圓柱體，於計算時其將視因子設為 1，而若以一般鋁加工之表面輻射率為 0.8，則第一段表面溫度目標溫度設為 50K，外腔體表面溫度 300K，面積為 0.42 m<sup>2</sup>，其內部表面輻射熱交換計算如下

參考圖二十三之同心圓柱輻射熱公式估算：

$$(Q_{12})_0 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

其中  $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼定律常數 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )， $A_1$  為分析物體之表面積， $T_1$  為分析物體溫度， $T_2$  為與分析物體行熱交換之表面溫度， $\varepsilon_1$  為分析物體表面之輻射率， $\varepsilon_2$  為與分析物體表面熱交換之表面輻射率， $\frac{A_1}{A_2}$  為分析物體與其做熱交換之物體表面積比例，在此因其值接近，視為 1

估算後 $(Q_{12})_0'' = 367 \text{ W/m}^2$ ，而內腔體之表面面積為  $0.42 \text{ m}^2$

則表面熱交換為 $(Q_{12})_0'' \times A = 367 \times 0.42 = 154 \text{ W}$

由上述估算可知，若要第一段 50K 格溫層降至較低溫度，需大量降低其等效輻射率，故我們將腔體包覆 30 層 (3 cm) 超導絕緣層，並將鋁製腔體高度拋光，使輻射率下降為  $\varepsilon = 0.04$

包覆超絕緣層厚輻射熱估算：

$$(Q_{12})_N = (1/(N+1)) \times (Q_{12})_0$$

其中 $(Q_{12})_N$ 為包覆 N 層時的輻射熱通量， $(Q_{12})_0$ 為未包覆超絕緣層之淨輻射熱，N 為超絕緣層包覆數量

則表面輻射熱負載為 $(Q_{12})_{30}$ 為  $2.57 \text{ W}$

安全係數 1.5 倍，則第一段熱負載為  $3.85 \text{ W}$

為求系統平衡態，將參考廠商所提供之低溫冷凍機之功率/溫度圖，

如圖 四十一

**TYPICAL REFRIGERATION CAPACITY\***  
 \*Reference data for new condition.

RDK-415D Typical Load Map (60Hz)

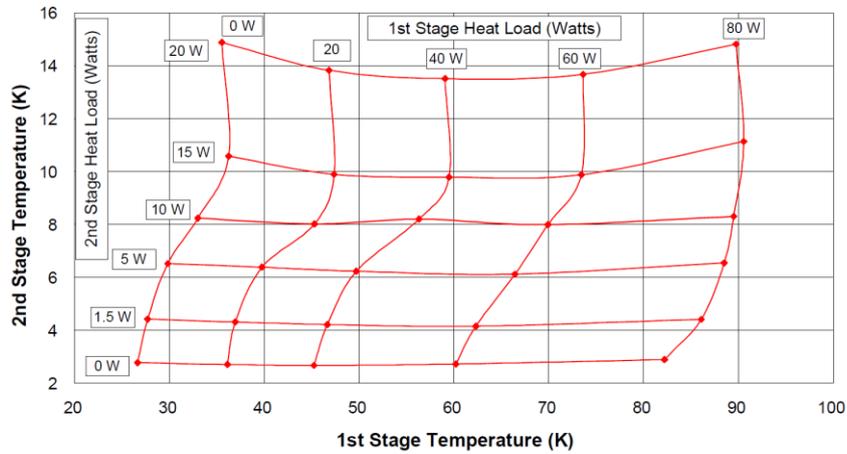


圖 四十一. 低溫冷凍機功率與溫度圖

由圖 四十一可知低溫冷凍機功率隨著溫度而下降，為得知第一段低溫冷凍機平衡溫度，以圖 四十二做比對

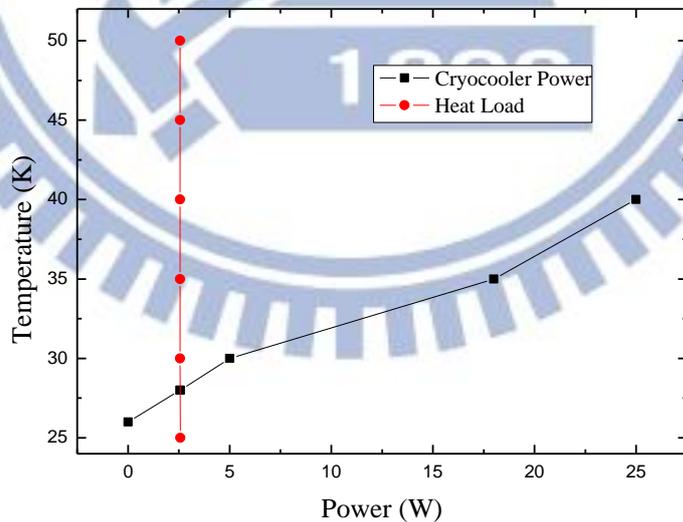


圖 四十二. 低溫冷凍機第一段功率與第一段腔體熱負載關係圖

從圖 四十二我們可得以該腔體環境熱損下，低溫冷凍機可持續提供冷卻功率至 28K，其冷卻功率與熱負載方達成平衡。

B. 第二段溫度感應器冷卻平台輻射熱估算：

由於第一段輻射熱遮蔽層溫度已降至十分低溫，使溫度感應器冷卻平台之熱交換表面溫度降低，且溫度感應器冷卻平台面積較小，在估算後冷卻平台估計可降至目標溫度以下，故不包覆超絕緣層

參考圖二十三之大型凹穴中凸面物輻射熱公式估算：

$$(Q_{12})_0 = \sigma \varepsilon_1 A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

其中  $\sigma$  為史蒂芬-波茲曼定律常數 ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )， $A_1$  為分析物體之表面積， $T_1$  為分析物體溫度， $T_2$  為與分析物體行熱交換之表面溫度， $\varepsilon_1$  為分析物體表面之輻射率

※熱漏雖會隨溫差改變，但  $(44^4 - 4.2^4) \approx (44^4 - 3^4)$  故以最大值計算即可

估算後  $(Q_{12})_0 = 85 \text{ mW/m}^2$ ，而內腔體之表面面積為  $0.42 \text{ m}^2$

則表面熱交換為  $(Q_{12})_0 \times A = 85 \times 0.02 = 1.7 \text{ mW}$

可知第二段平衡溫度將低於 3K (超過溫度效正感應器有效範圍)

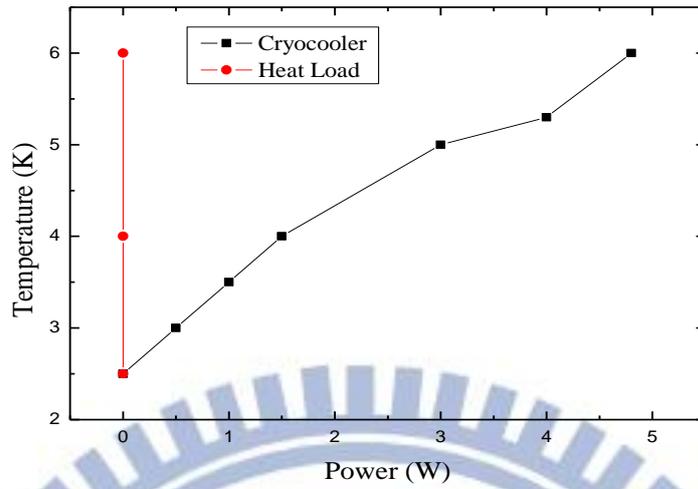


圖 四十三. 低溫冷凍機第二段功率與第二段腔體熱負載關係圖

## 2.) 溫度校正腔體穩態熱模擬:

第一段輻射熱遮蔽層:

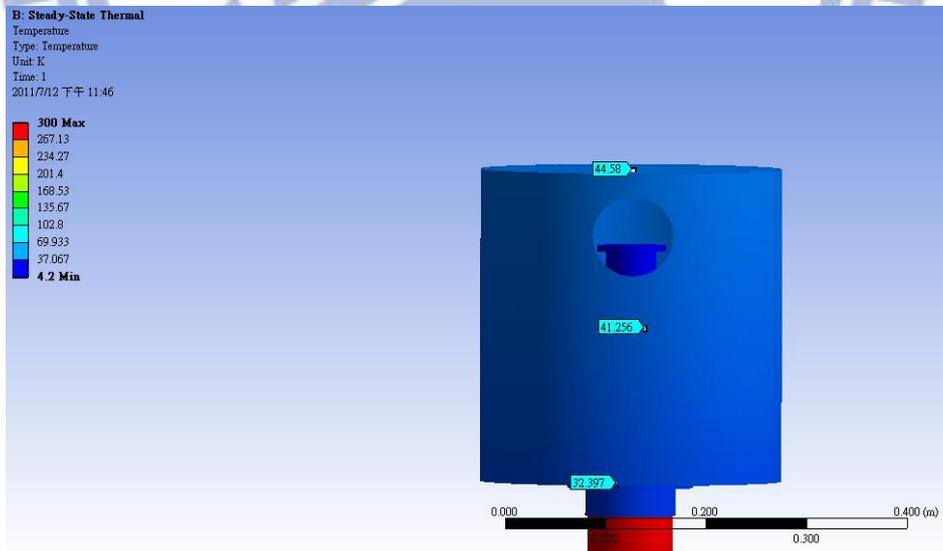


圖 四十四. 32K 時，第一段腔體溫度分布圖

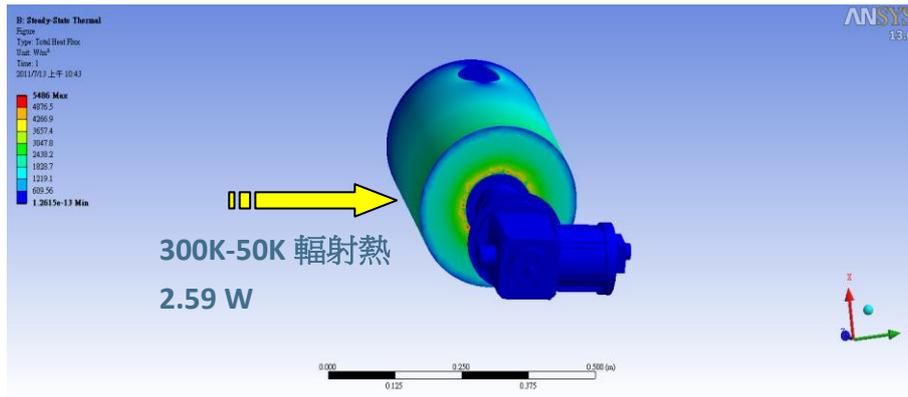


圖 四十五. 第一段腔體熱流量

第二段溫度感應器冷卻平台：

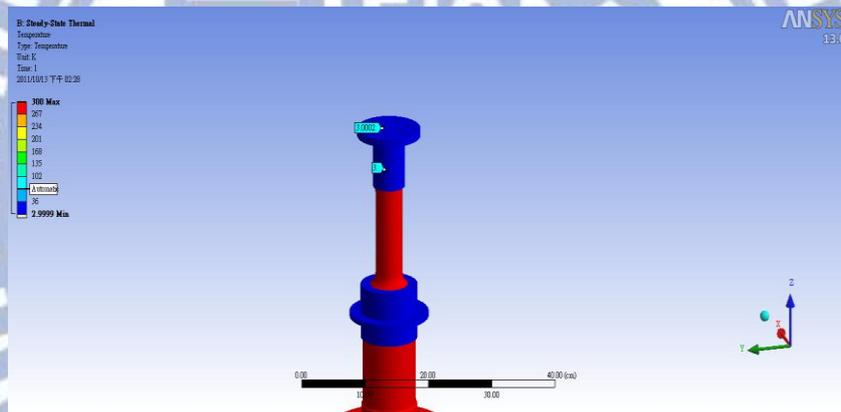


圖 四十六. 降溫至 3K 時，第二段腔體溫度分布圖

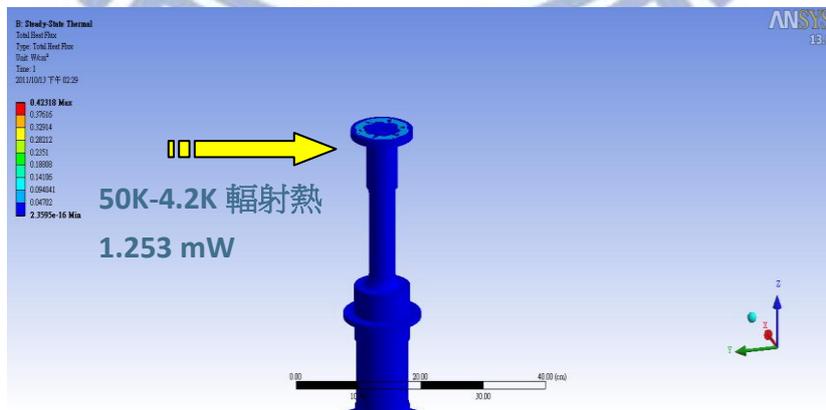
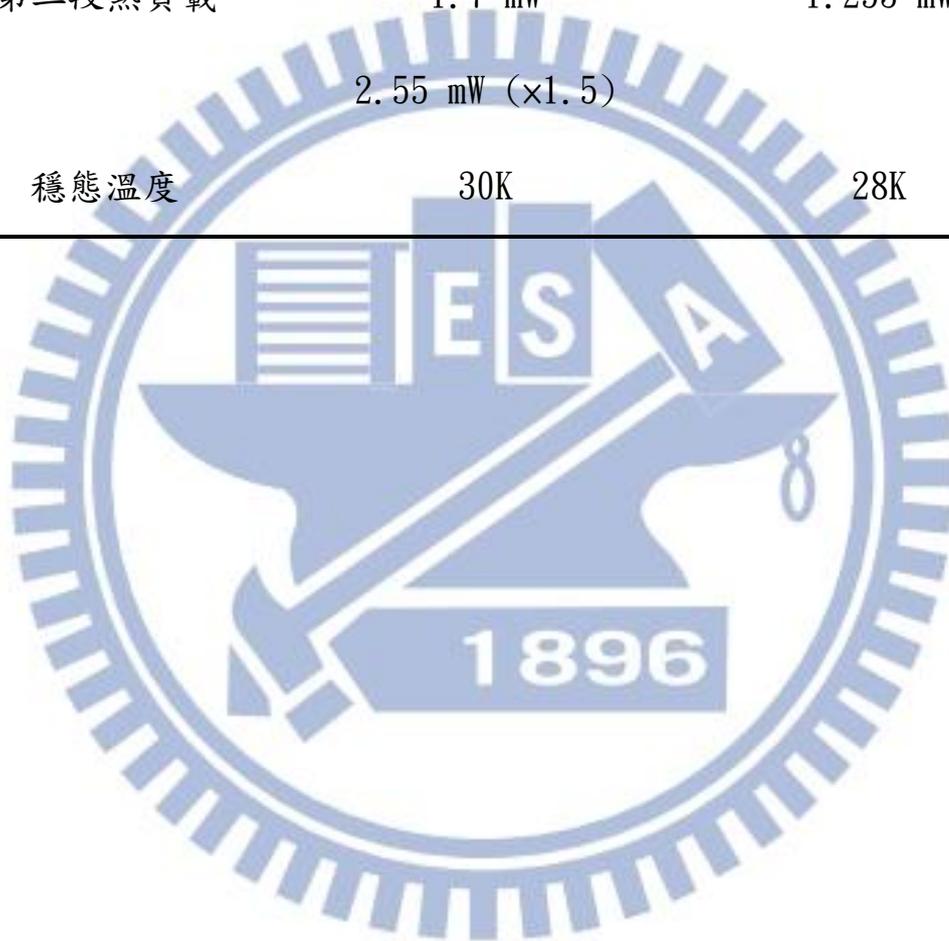


圖 四十七. 第二段腔體熱流量

表 十四. 溫度校正腔體熱負載

	估算值(安全係數)	模擬值
第一段熱負載	2.57 W	2.59 W
	3.85 W (×1.5)	
第二段熱負載	1.7 mW	1.253 mW
	2.55 mW (×1.5)	
穩態溫度	30K	28K



### 4.3 實驗

#### A. 實驗過程

將溫度校正腔體之溫度感應器與 Lakeshore 218S 溫度顯示器連結後，透過溫度校正腔體多插針(Multi-Pin)真空端子與腔體內部連接後，以 M3 螺絲固定於第二段溫度感應器冷卻平台上後，以渦輪真空幫浦將溫度校正腔體抽至  $10^{-4}$  torr 或更高之真空度後，檢查低溫冷凍機之壓縮機之水冷設施水壓正常與否，並檢查氬氣供應與輸回管之順序是否正確，並連結低溫冷卻頭之電源至壓縮機上，檢查三相電流之電流方向後，方可啟動低溫冷凍機。

溫度校正腔體於第一段格溫層內包覆 30 層超絕緣層，每層超絕緣層之厚度為 0.1 mm，但不可包覆過緊，約一公分 20 層才可使超絕緣層效果發揮至最大。



圖 四十八. 腔體表面包覆 30 層超絕緣層



圖 四十九. 每層超絕緣層厚度約為 0.1 mm

校正過程使用溫度監控器紀錄各溫度感應器電阻值與已校正溫

度感應器之溫度，並在整理後以  $\log \Omega$  與溫度關係圖載入儀器內，使其可表達正確溫度值，如圖 五十。

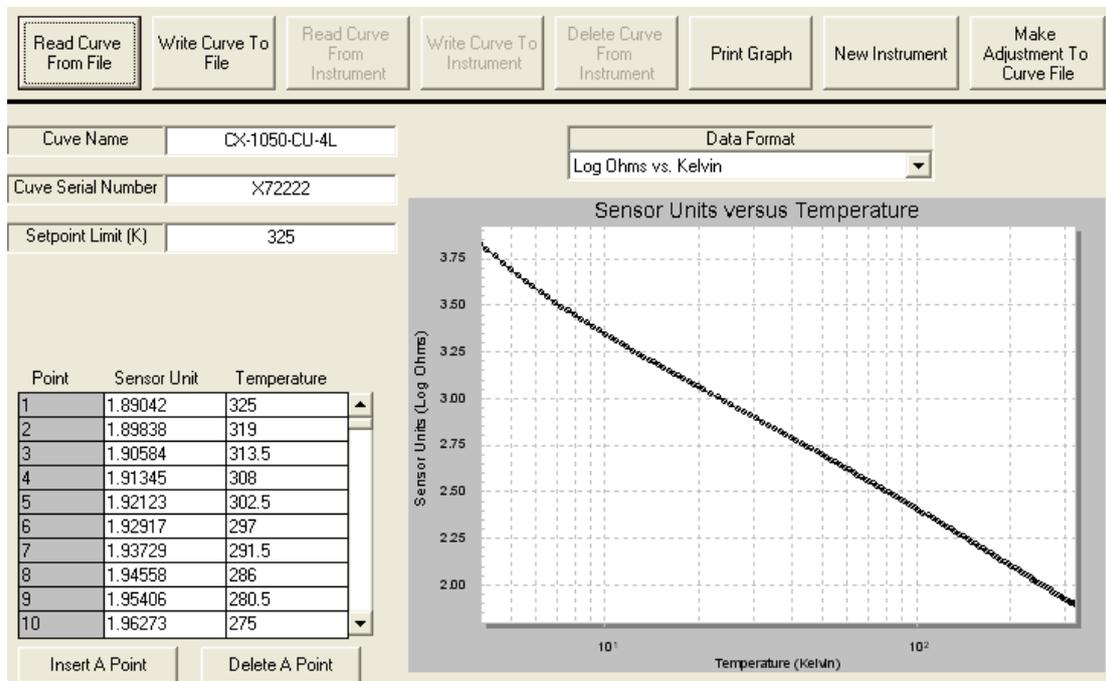


圖 五十. 儀器輸入輸出介面

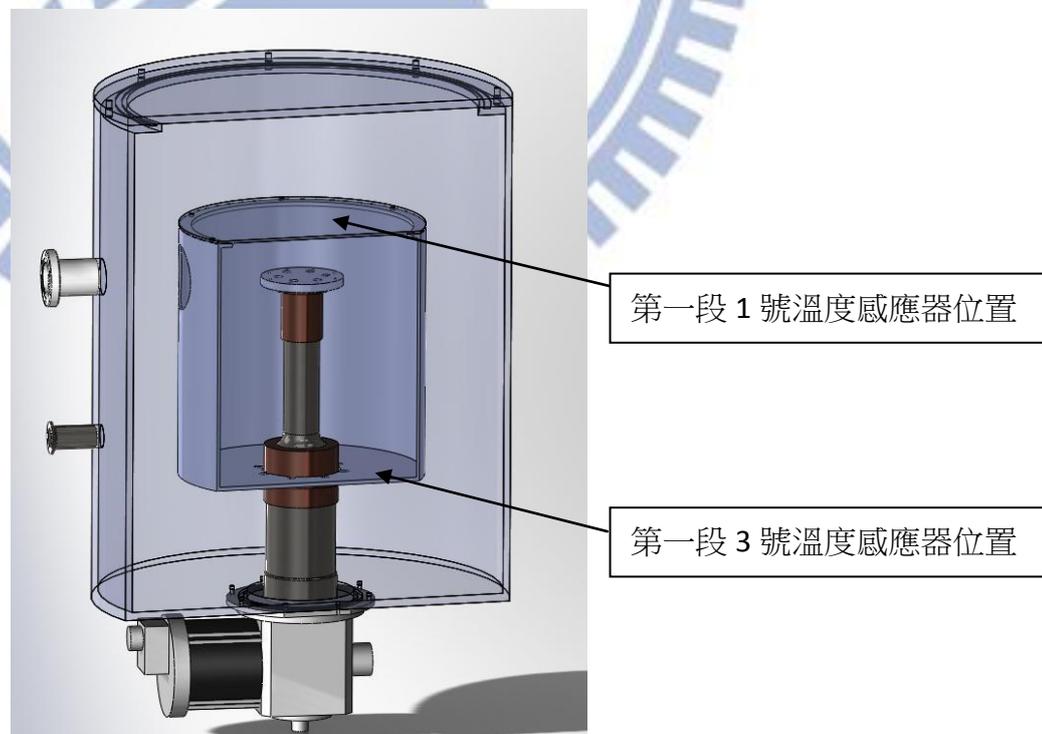


圖 五十一. 溫度感應器置放位置

## B. 第一段輻射遮蔽層穩態溫度

如圖 三十一所示，在降溫了四小時之後，第一段輻射遮蔽層才達到穩態溫度，其輻射遮蔽層之低溫冷卻頭連結端與上蓋分別 26.2K 與 28.4K，與值得一提的是，則低溫冷卻頭第二段穩態溫度為 26.2K，第二段低溫冷卻頭僅需一小時半即可將第二段冷卻平台冷至 4K 以下，可知低溫冷卻頭第一段與第二段之輸出功率並非完全相依，主要冷卻速度僅取決於該層熱漏大小。



圖 五十二. 第一段輻射熱遮蔽層穩態溫度

## C. 第二段溫度感應器冷卻平台穩態溫度

第二段溫度感應器冷卻平台可於一小時內冷至 10K，但由 10K 至 4K 以下需超過半小時時間，且此時低溫冷卻頭震動幅度較大，其馬達達最大運轉頻率，在低於 4K 並進入穩態後震動幅度減小。而由於溫度感應器冷卻平台之平衡溫度低於溫度感應器之有效量測溫度，故於電腦有效紀錄溫度之最低溫度為 4.012K，如圖 二十。



圖 五十三. 可紀錄溫度最低點為 4.012K

在低於可有效記錄溫度 4K 後，唯一可量測之數據為溫度感應器之電阻值，但亦有其有效範圍，量測之電阻最大值如圖 五十四所示。



圖 五十四. 其可紀錄電阻最大值至 7327.6 Ω (4.012K 時為 6706.5 Ω)

系統再持續運作後，其電阻值亦超過儀器上限，無法提供數值，如圖 五十五所示。



圖 五十五. 電阻過大超出儀器可量測範圍

為了驗證估算與模擬之差異，並推算第二段溫度感應器冷卻平台

最後溫度，試著以電阻與溫度之對數圖比較超過七千歐姆後約為幾 K，參考圖 五十六，可得第二段溫度感應器冷卻平台約降至 3K 以下，與以低溫冷卻頭之功率與冷卻平台熱負載平衡圖(圖 四十三)評估之穩態溫度十分接近。

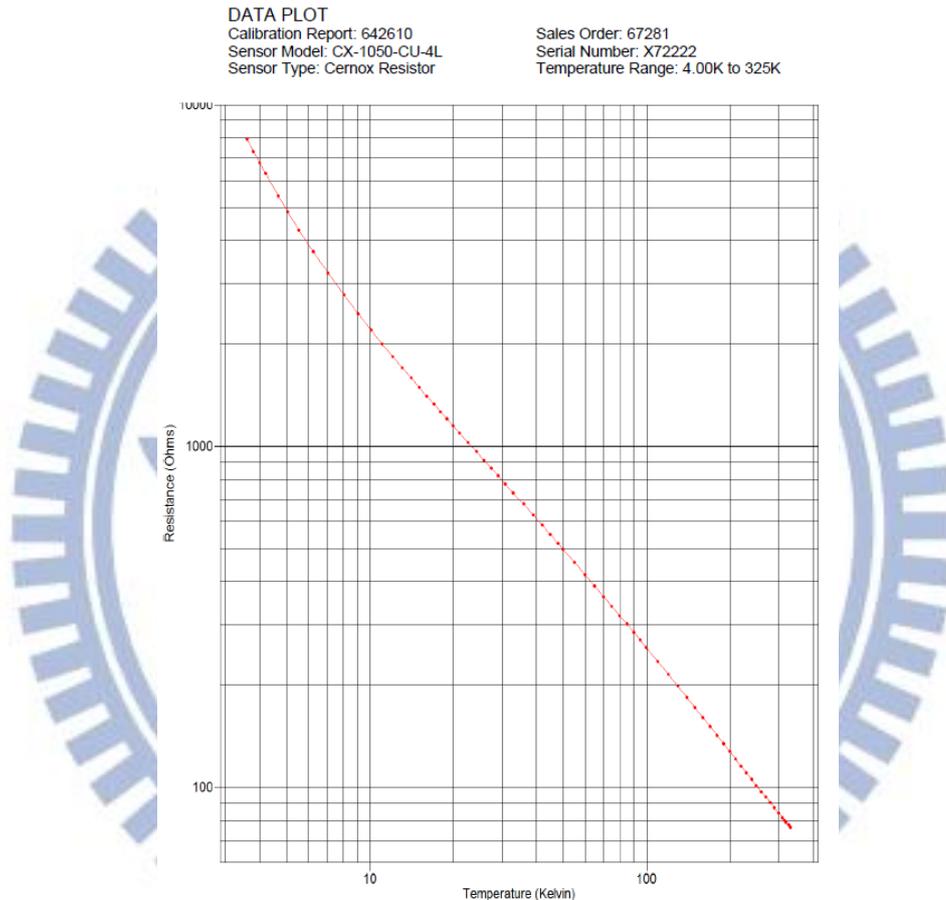


圖 五十六. 已校正溫度感應器之電阻與溫度關係圖

表 十五. 穩態溫度分析

	估算	模擬	實驗
第一段穩態溫度 (K)	30	28	26.2
第二段穩態溫度 (K)	<3	<3	<3(推測)

## 第 5 章 結論與未來展望

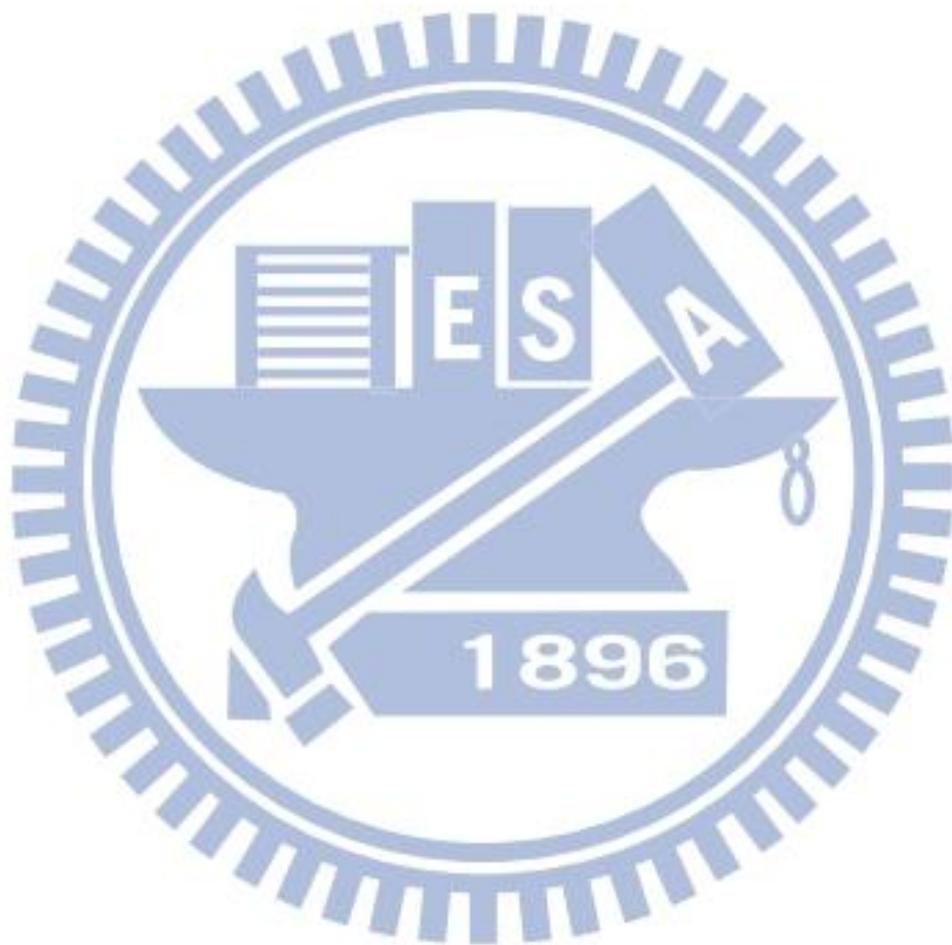
### 5.1 結論

利用低溫冷凍機做為冷卻來源取代傳統液氦液氮冷卻來源成為低溫環境下研究的趨勢，而如何應用低溫冷凍機冷卻大型儀器在國內的廠商或實驗室裡經驗較少，藉由這次跨領域合作計畫機會，借取同步輻射低溫冷凍機使用之經驗建立強磁場充磁系統，本論文在研究如何建造一低溫腔體的課題中，由於銅電流導電棒所產生的大量熱負載遭遇一些瓶頸，於採用各種方法皆無法有效降低大電流下電流導電棒的負載的情況下，必須取得除了一台低溫冷凍機外的冷卻來源外的冷卻功率，本研究中不使用一般常用增加低溫冷凍機的做法，而採取了使用液氮冷卻額外的熱負載，並以多段式電流導電棒得到了與增加低溫冷凍機一樣效果的低溫熱輻射遮蔽層。

於本論文中除了整理各種分析與理論外，腔體設計亦有相當多的地方須考量工程上的問題，各層間固定上的考量，溫差大時不同材質易造成的碎裂問題，或金屬材質承受的應力等，如無同步輻射相關設計經驗，亦無法設計一可使用的低溫腔體，理論需與工程結合為設計一儀器的重大考量。

而一儀器之使用需與各式各樣的自動控制配合，於論文內雖無提及，但各儀器如溫度監控、電流控制、液位監測等皆需與電腦互相配

合方能使用，簡而言之，欲建立一系統除了需從理論上的分析，程式上的模擬外，工程設計上的經驗與電腦控制間的整合，缺一不可。



## 5.2 未來與展望

目前超導應用受限於政府機關或實驗設施，很大的因素是受到超導工作溫度的限制，雖目前全世界科學家努力提升超導體之工作溫度，但若低溫冷凍機的應用可以更廣泛，超導體之使用亦能大幅提升，當一般研究機構可輕鬆負荷的時候，超導體應用與研究定能更上一層樓。

而低溫冷凍機除了能冷卻超導外，一般物品皆可使用，只要能準確估算其熱漏值，低溫系統建立並不困難，且低溫系統以往使用不便主要是因為使用液氮液氦冷卻時除了需有液氮液氦來源外，注入輸出等傳輸亦非十分方便，且因液氮十分昂貴，其熱容亦小，冷卻系統時常曠日廢時，等待期間漫長，若使用低溫冷凍機並有效估算其熱負載，系統通電即可使用，運轉費用亦較低，使用上的友善度極佳，其功率亦可隨要求使用不同機型，極適合取代液氮液氦做為低溫系統之冷卻源頭，在未來超導電流導電棒發展越臻成熟的情況下，可大幅降低低溫系統內之焦耳熱，則使用低溫冷凍機產生低溫環境之研究為不可忽視之潮流。

## 附錄一. 銅電流導電棒電阻率計算

由於銅之電阻率會隨著溫度而改變，以一般實驗而言，電阻率隨溫度改變不大，但因本低溫系統溫差大，且超導體通電之電流高，電阻率稍微改變即對分析結果差距大，熱負載之估計需精準估算方能使系統之設計最佳化。

而以程式計算後發現其電阻率以最低溫度之電阻率與最高溫度電阻率平均即可（假設溫度均勻分布），故將本計算至於附錄中，若有不均勻溫度分布需依照溫度分布切割計算電阻率。

經程式以截面積  $A$  由  $1-50(\text{cm}^2)$ ，電流導電棒長度  $L$  由  $1-100(\text{cm})$ ，且將長度  $L$  切為 20 段，且已由 Ansys 模擬，溫度為平均分配，故每段平均分配  $300\text{K}-50\text{K}$  溫差，並以該段最高溫度為基準，決定  $\rho$ ，得該段電阻  $R$ ，並計算總電阻  $R_{\text{total}}$ ，以不同的  $A$  及  $L$  得各種電阻值，取其中最小值  $R_{\text{min}}$ ，並乘以電流平方可得其熱負載為  $32.35 \text{ w}$ 。

下列幾點為方便比較，電流導電棒截面積皆以  $1 \text{ cm}^2$  做運算。

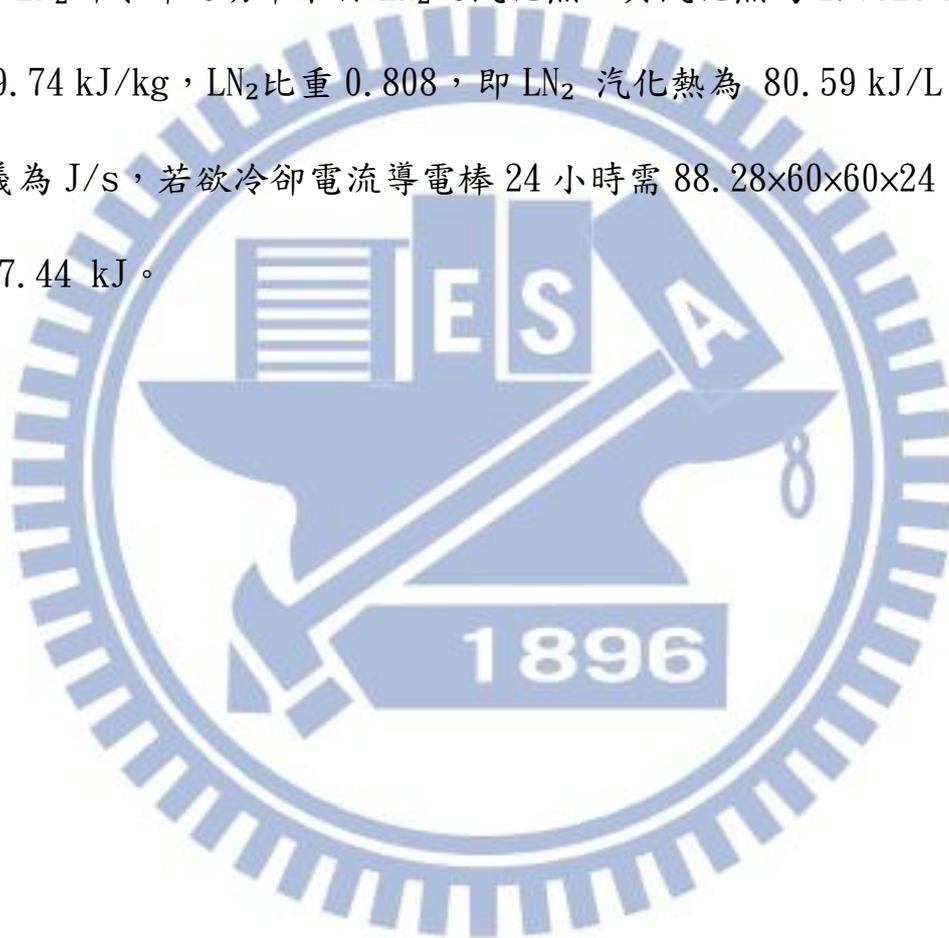
因銅之電阻率隨著溫度改變值為線性改變，故若以  $300\text{K}$  之電阻率  $\rho=1.857 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  及  $50\text{K}$  之電阻率  $\rho=2.189 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$  取平均值  $\rho=1.038 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  所算之最小電阻值亦與上述電阻值相同。

則運算公式可簡寫為

$$\frac{A}{L} \times 1094 + 480^2 \times 1.038E - 6 \times \frac{L}{A}$$

由於 LN<sub>2</sub> 僅可冷卻到 77K，與超導電流導電棒所需之 64K 相差甚遠，故 300K-50K 之電流導電棒設計兩段式降溫，300K-77K 以 LN<sub>2</sub> 降溫，77K-50K 以低溫冷凍機降溫。

LN<sub>2</sub> 所冷卻之功率來自 LN<sub>2</sub> 之汽化熱，其汽化熱為 2.7928 kJ/mol = 99.74 kJ/kg，LN<sub>2</sub> 比重 0.808，即 LN<sub>2</sub> 汽化熱為 80.59 kJ/L，Watt 定義為 J/s，若欲冷卻電流導電棒 24 小時需 88.28×60×60×24 = 7627.44 kJ。



## 附錄二. 接觸式超絕緣層之研究

### I. 接觸式超絕緣層估算

接觸式超絕緣層又稱為 Multilayer Insulation (MLI)，其組成為一層鋁箔，一層玻璃纖維布，其中鋁箔為降低輻射熱，而玻璃纖維布用來當絕緣層，而 MLI 雖亦以阻絕熱輻射負載為主要目的，但其使用上並非做為單純熱遮蔽層，而是直接以兩面之間塞滿 MLI 做為隔熱層，其計算為”等效熱傳導係數”，而非”等效熱輻射係數”，故其計算方式來自於不同的需求，塊材冷卻腔體空間較小，可以其為參考。

其計算方式如下

$$K_a = \frac{1}{n/\Delta x} \left[ h_s + \left( \frac{\sigma \epsilon T_2^3}{2 - \epsilon} \right) \left[ 1 + \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{T_1}{T_2} \right) \right]$$

$$Q_c = A/L \times K_a \times \Delta T$$

而在使用 MLI 的情況上有一狀況需特別注意，即當 MLI 層數過高時，其層與層之間越容易互相接觸，而使得原本的點接觸轉變為面接

觸或線接觸，將提高其熱傳導係數，其實驗數據如下，參照圖 五十七及圖 五十八。

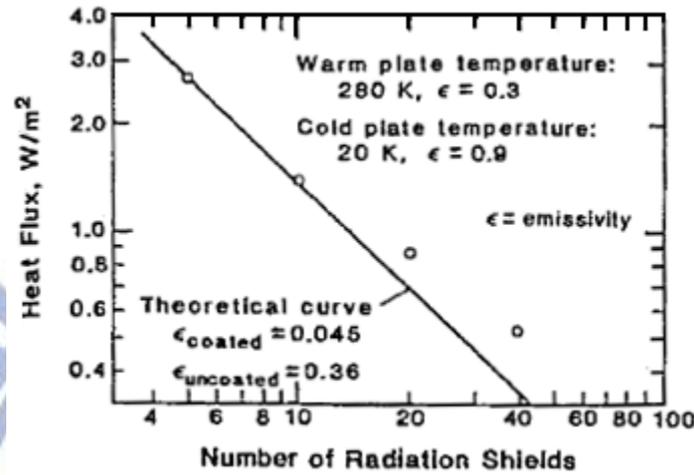


圖 五十七. 包覆層數與熱通量關係圖

上圖可看出當 MLI 包覆層數高出一定值時，實際達到的效果不如預期。

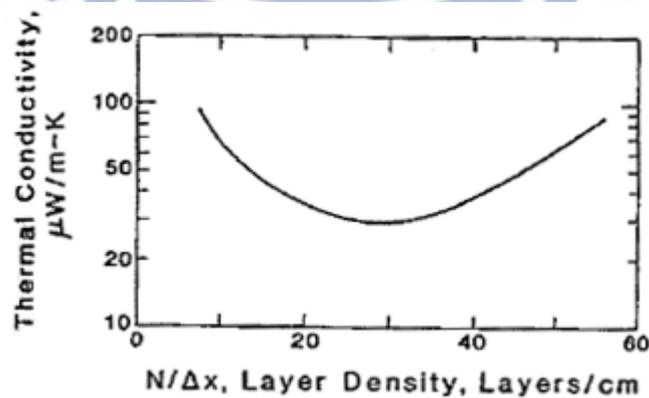


圖 五十八. 包覆 MLI 層數之密度與熱傳導係數關係圖

上圖可得其有適當包覆層數密度，包覆過密時效果反而下降。

## II. 接觸式超絕緣層試算

在 SWLS 磁鐵設計報告之中，MLI 使用於 50K-64K 輻射遮蔽層，間隙為 0.4 cm，其輻射熱交換表面為 300K 至 50K，其相關計算如下：

設 50K 之表面溫度，間隔 0.4 cm，表面積  $A \approx 1680 \text{ cm}^2$ ，使用 8 層 MLI，其相對應之”有效量測熱傳導係數”為

$$K_i = 8.3 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^{-\circ}\text{K}$$

則其熱流量(Heat flow)為

$$Q_r = (\Delta T)(K_i)(A)/X = (300-50)(8.3 \times 10^{-7})(1680)/(0.4) \approx 0.87 \text{ W}$$

嘗試計算 MLI 熱流量

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{1}{n/\Delta x} \left[ h_s + \left( \frac{\sigma \epsilon T_2^3}{2-\epsilon} \right) \left[ 1 + \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{T_1}{T_2} \right) \right] \\ &= \frac{1}{8/0.005} \left[ 0.0851 + \left( \frac{5.67 \text{E}-8 * 0.05 * 300^3}{2-0.05} \right) \left[ 1 + \left( \frac{50}{300} \right)^2 \right] \left( 1 + \frac{50}{300} \right) \right] \\ &= 8.26 \times 10^{-5} \text{ W/m}^{-\circ}\text{K} \end{aligned}$$

其中  $h_s$  為 MLI 層與層之間的熱傳導係數，

以鋁與玻璃纖維傳導值  $0.0851 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  為假設。

$$Q_c = A/L \times K_a \times \Delta T \approx 0.87 \text{ W}$$

附錄三. 各層零件穩態熱模擬：

80K 層

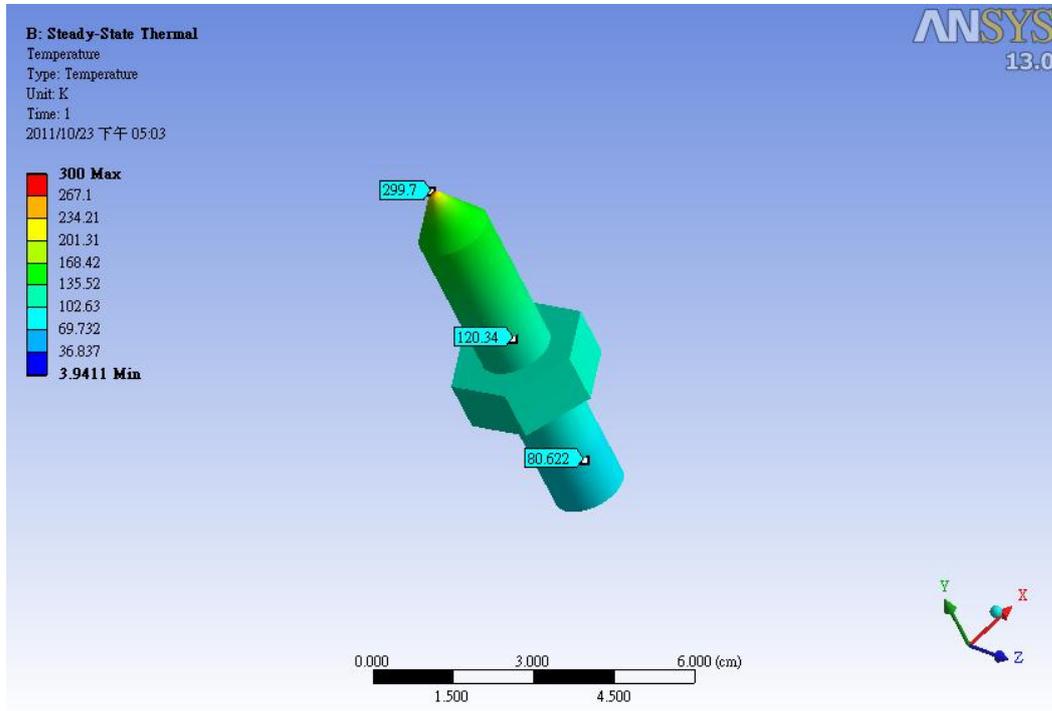


圖 五十九. 水平位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖

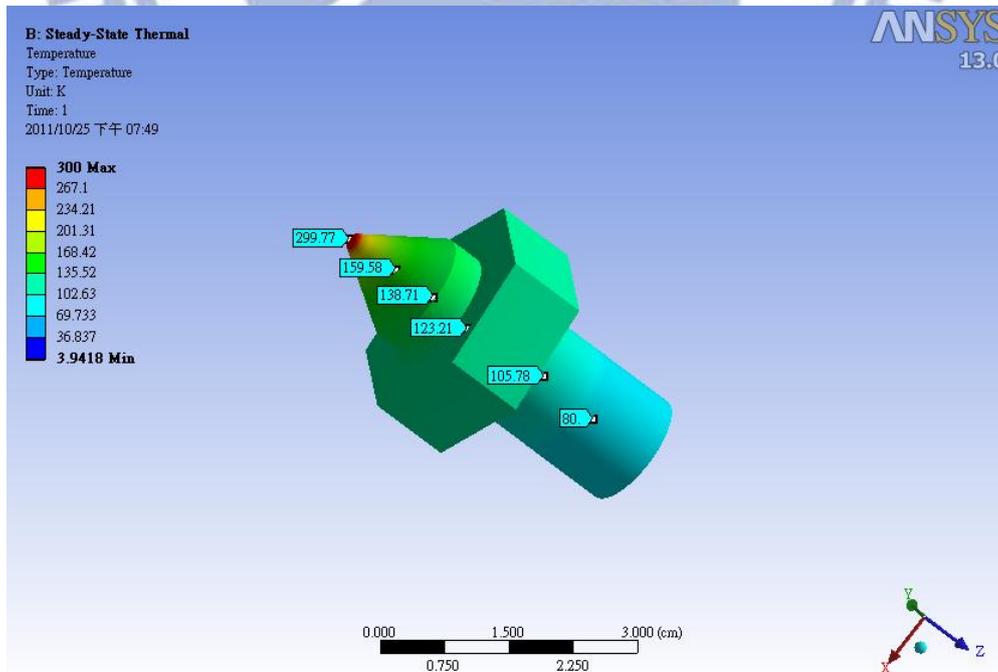


圖 六十. 高度位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖

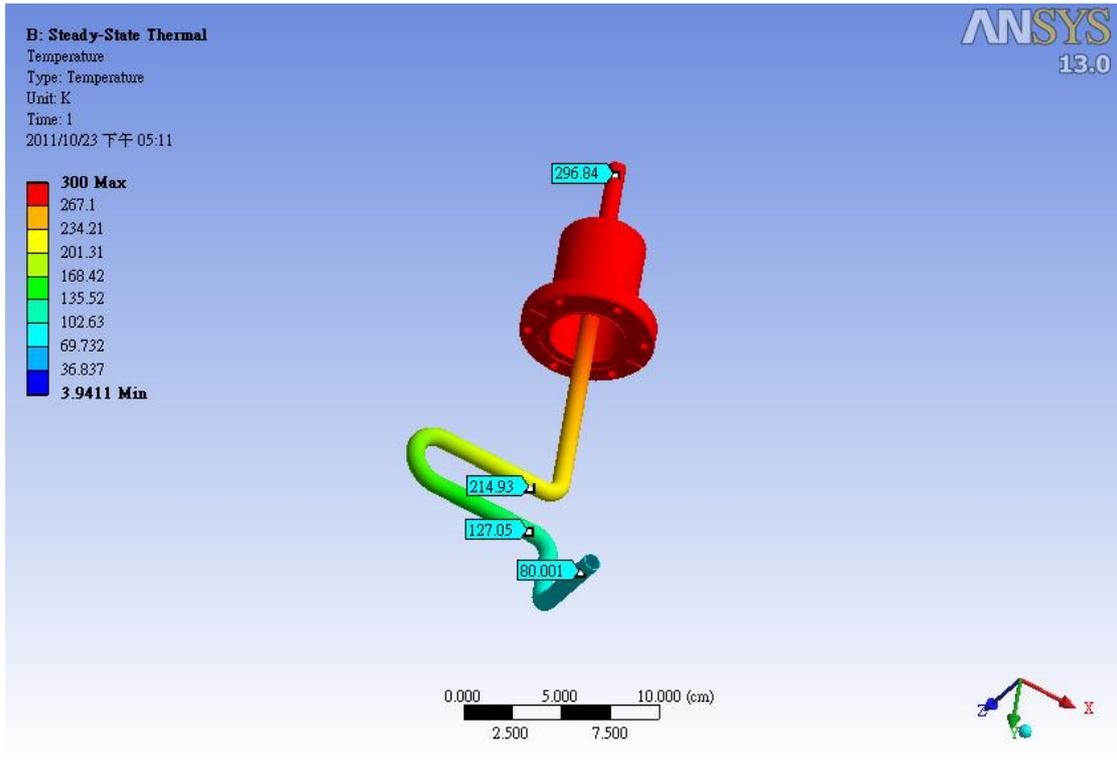


圖 六十一. 液氮傳輸管溫度分布圖

300-80K

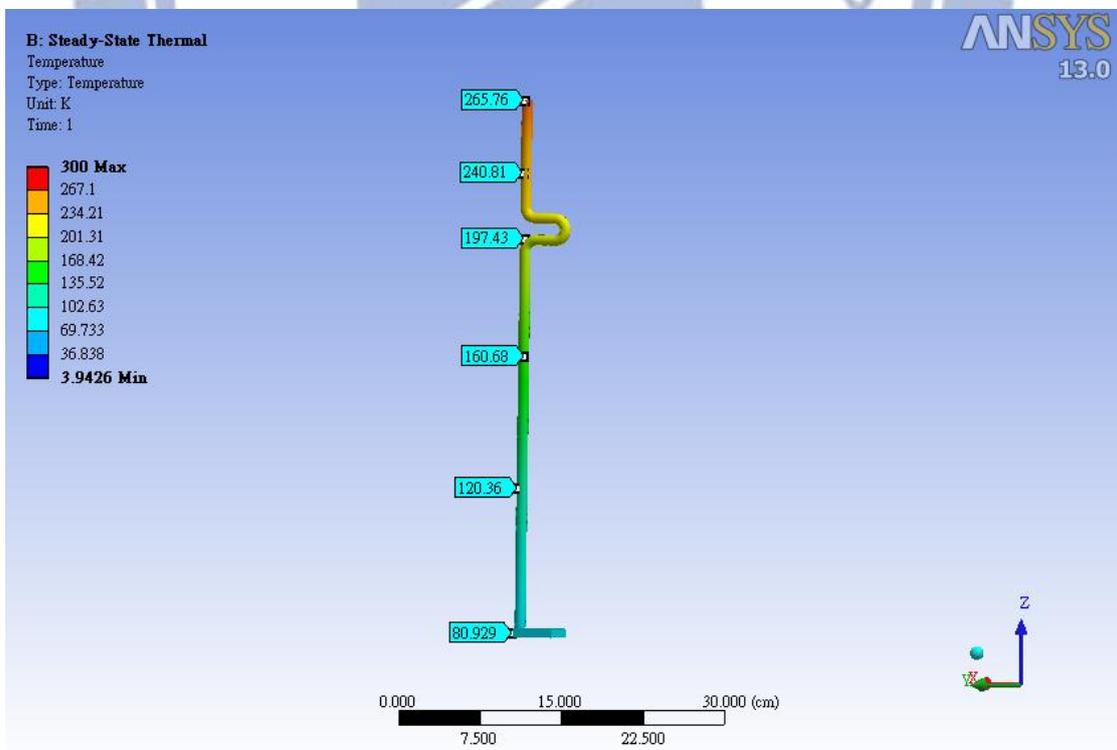


圖 六十二. 480A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖

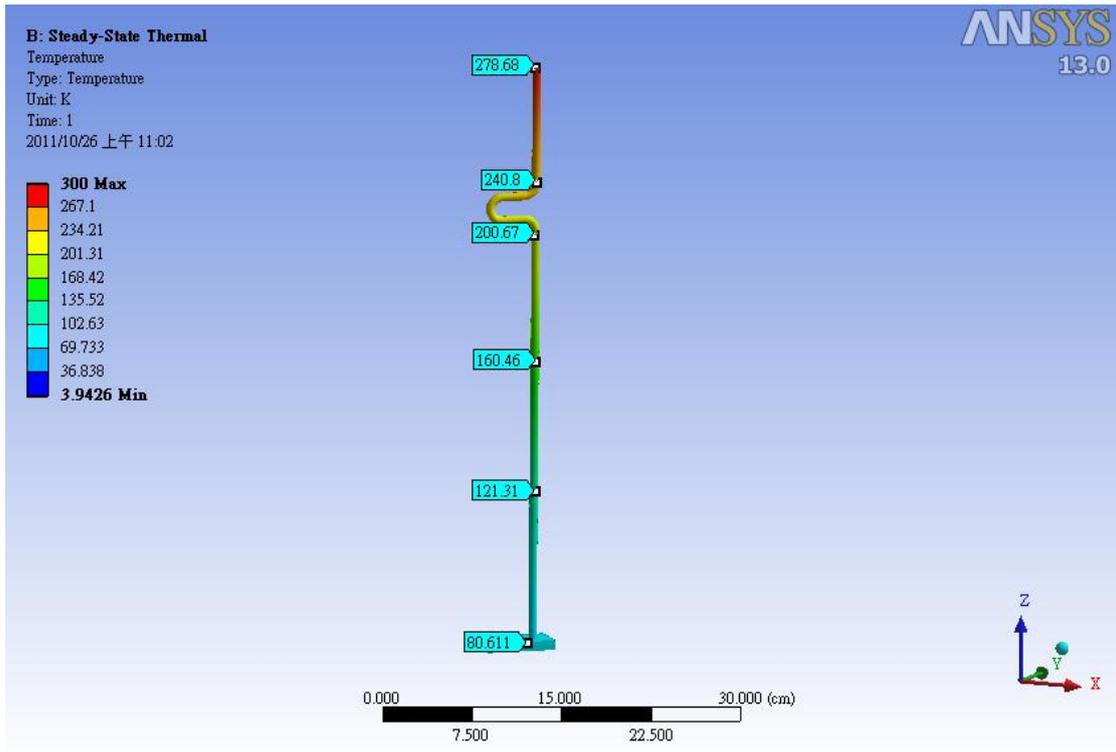


圖 六十三. 300-80K 200A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖

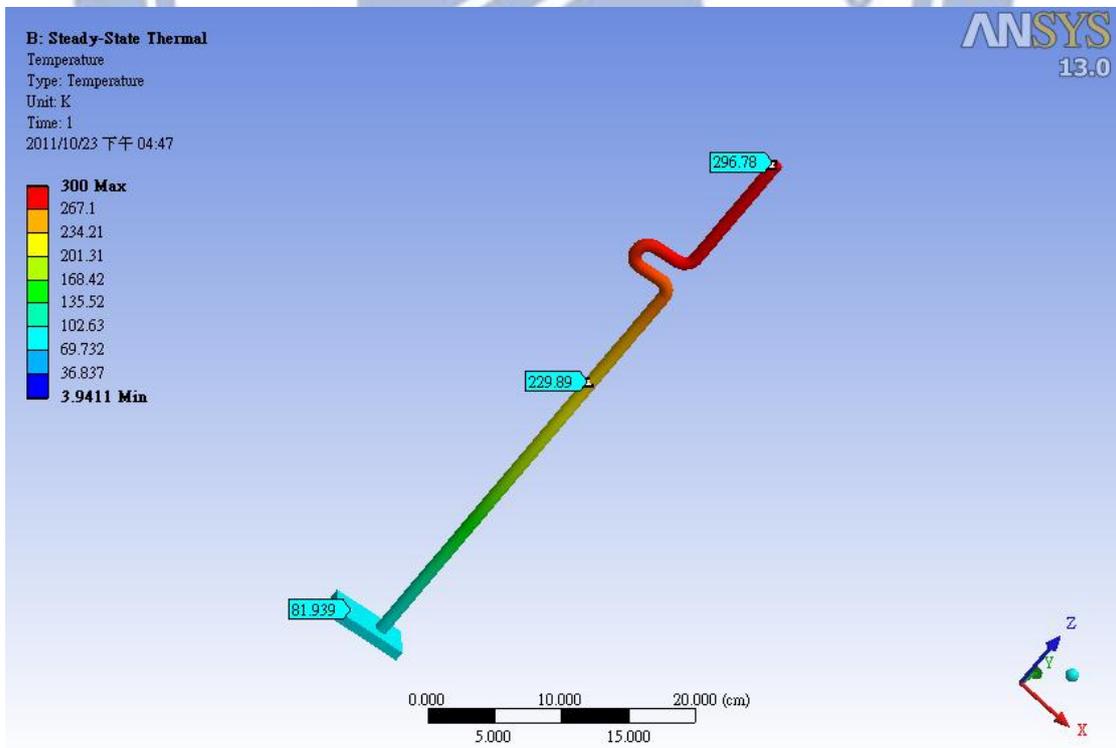


圖 六十四. 300-80K 480A 電流導電棒(通電)溫度分布圖

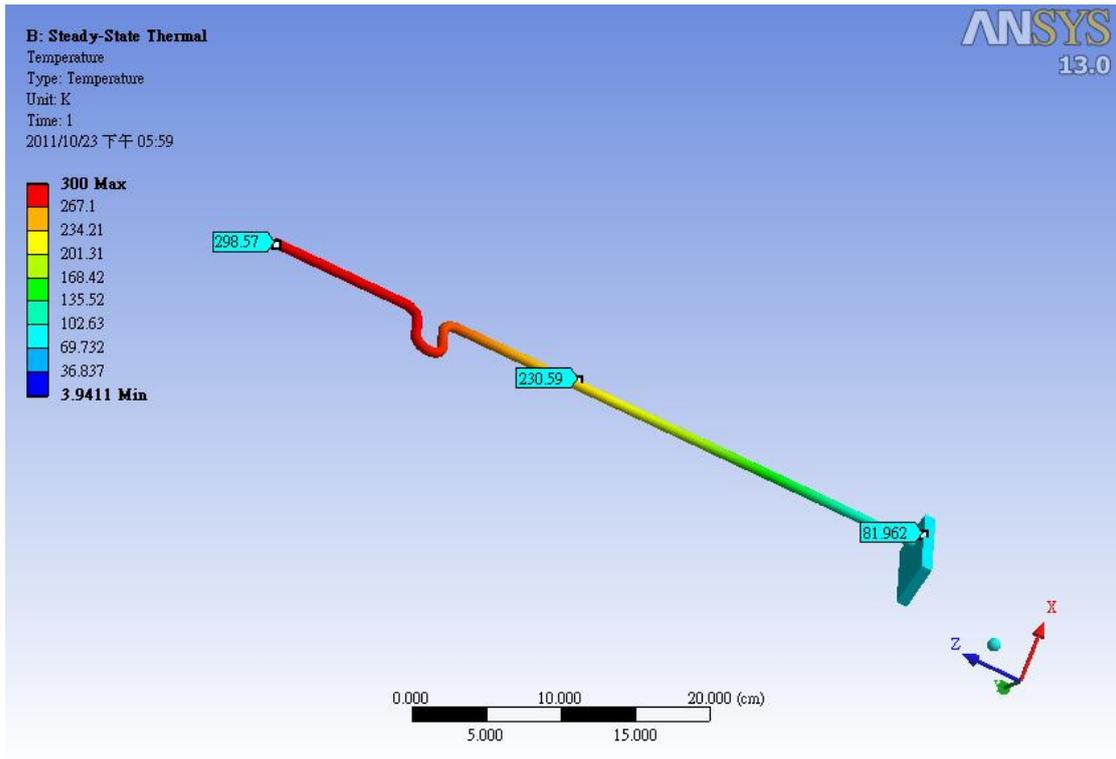


圖 六十五. 300-80K 200A 電流導電棒(通電)溫度分布圖

熱流量

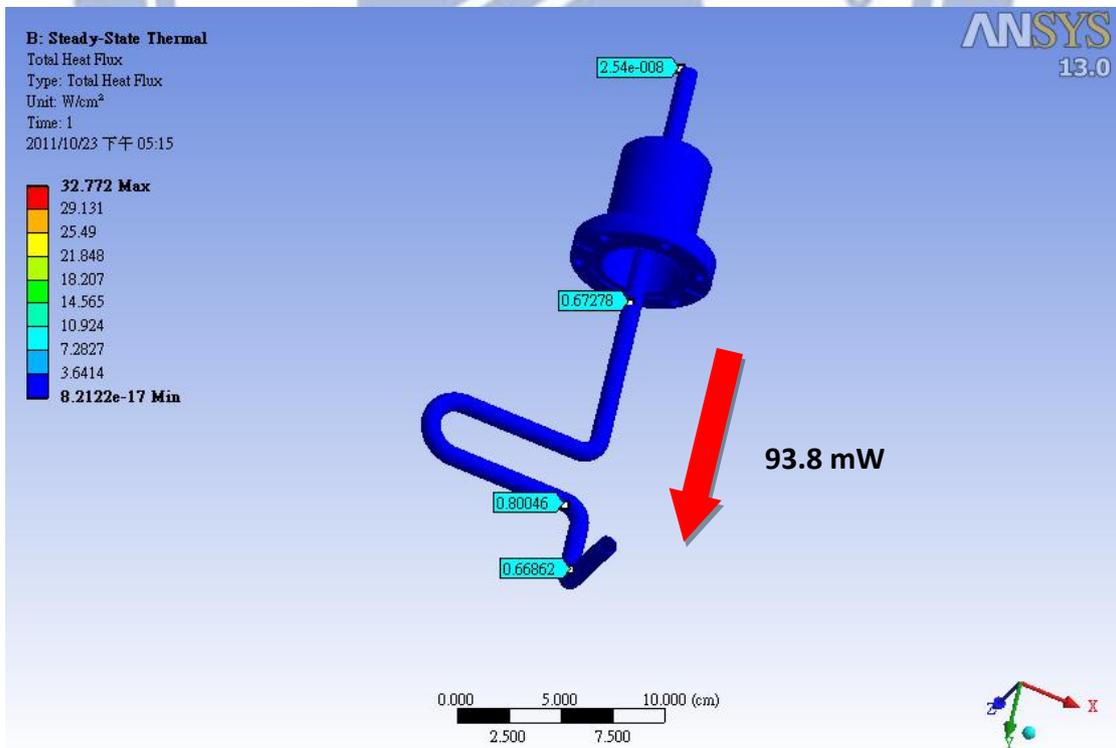


圖 六十六. 液氮傳輸管熱流量

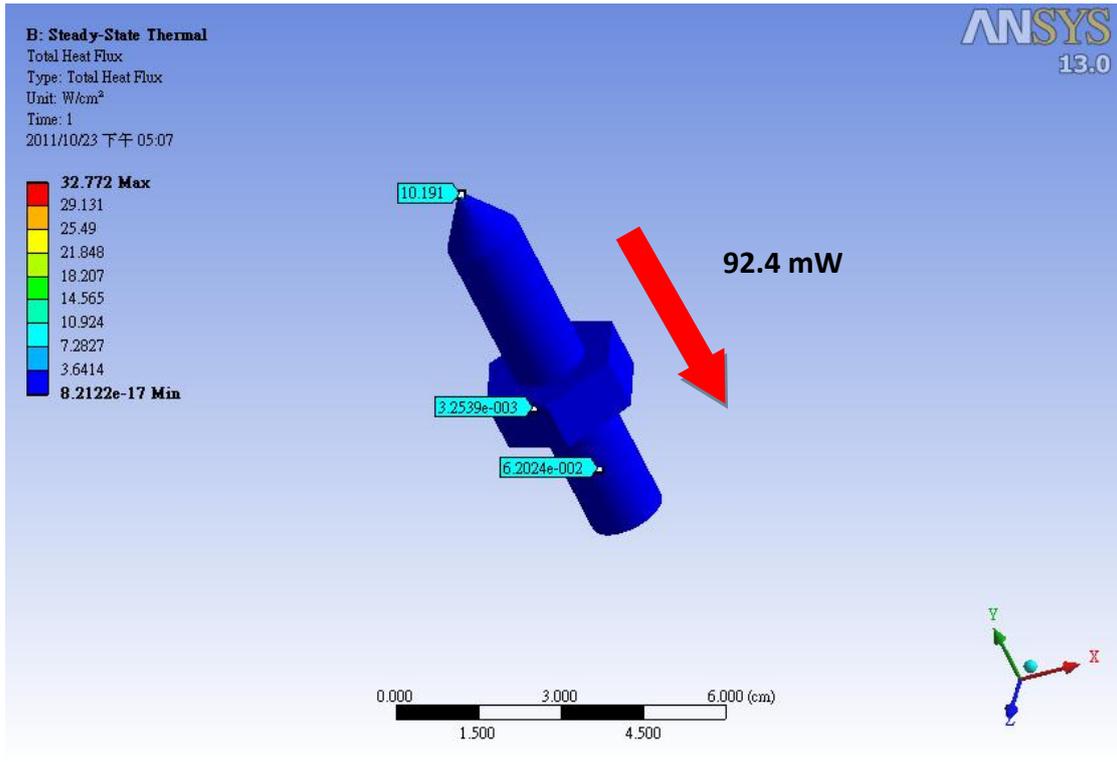


圖 六十七. 水平位置固定玻璃纖維螺桿熱流量

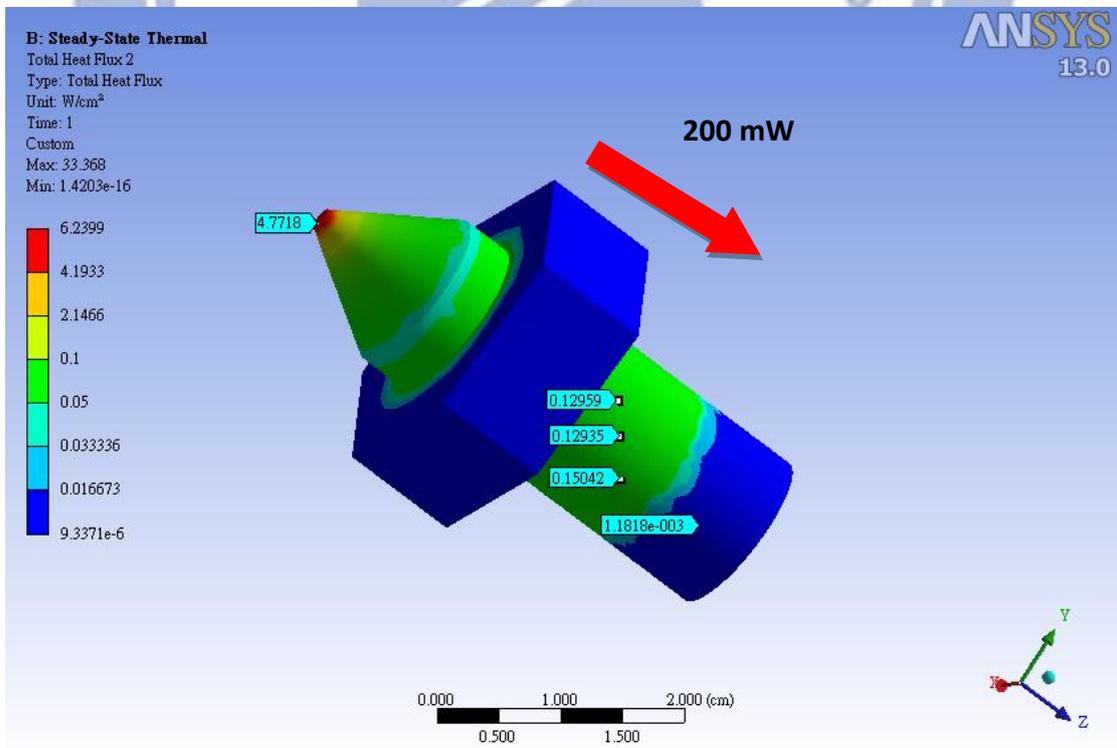


圖 六十八. 高度位置固定玻璃纖維螺桿熱流量

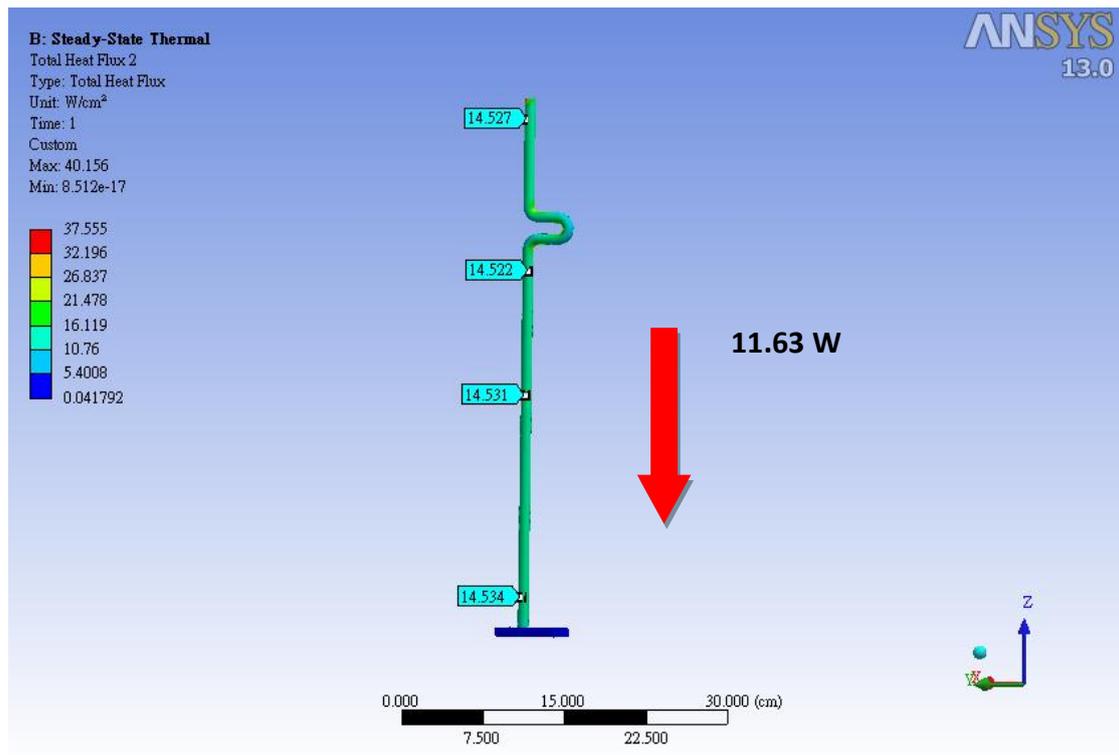


圖 六十九. 300-80K 480A 電流導電棒(未通電)熱流量

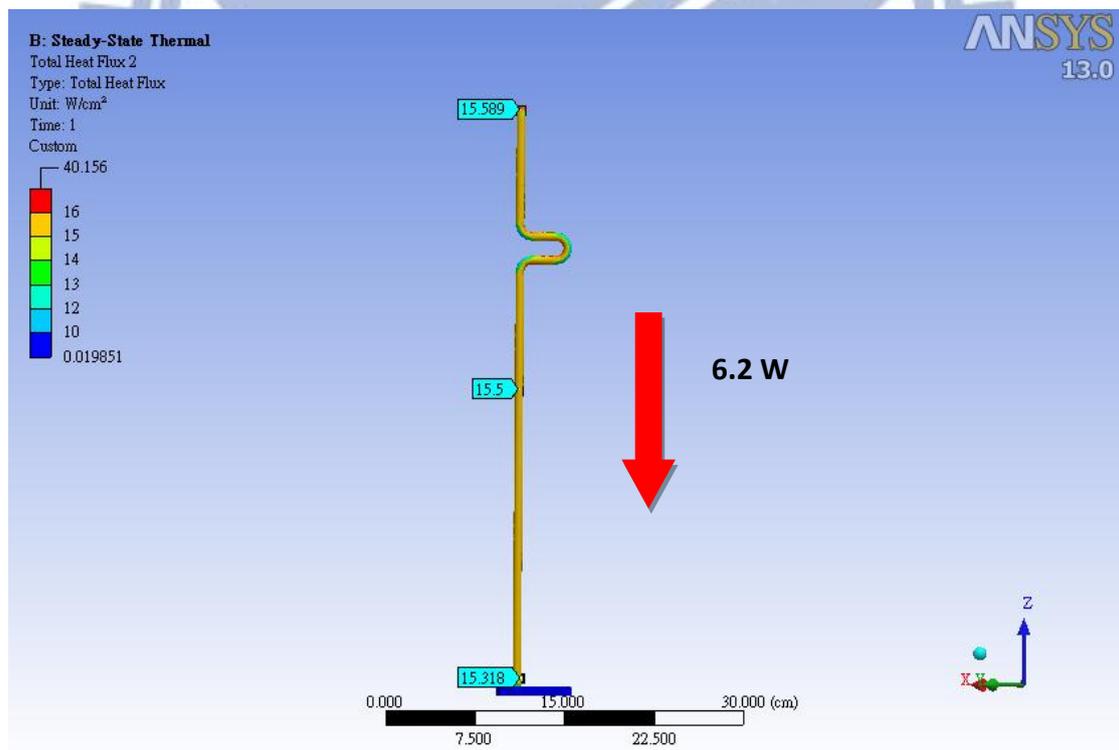


圖 七十. 300-80K 200A 電流導電棒(未通電)熱流量

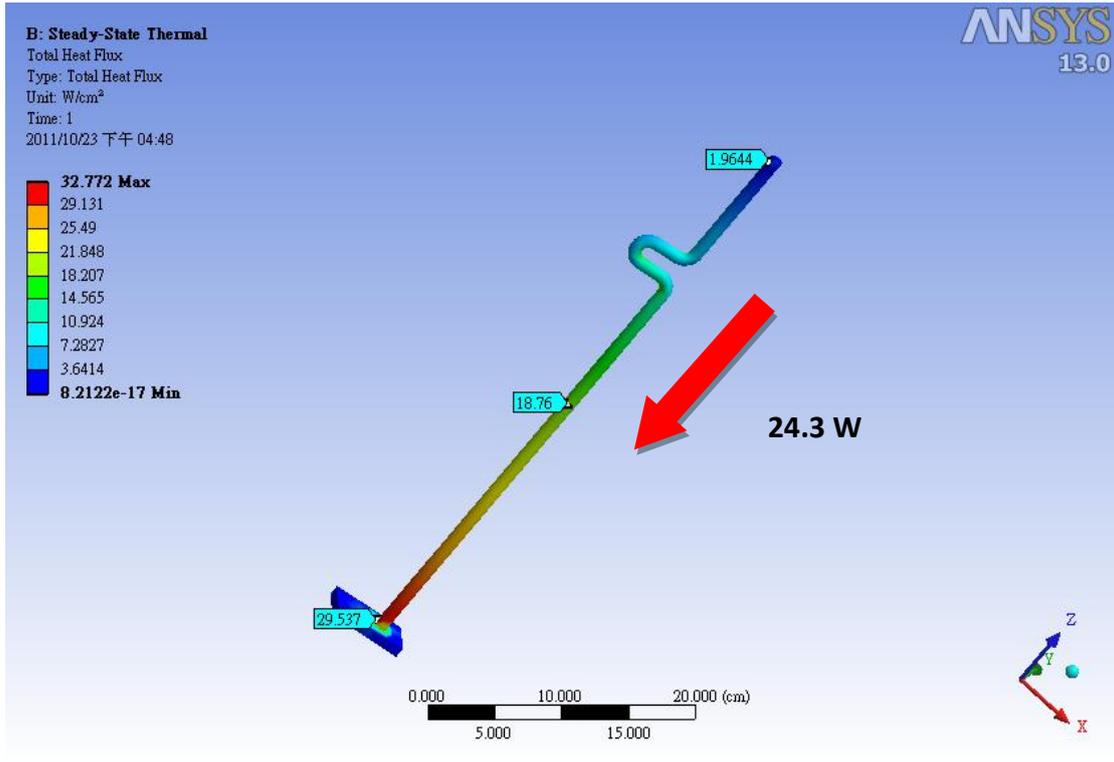


圖 七十一. 300-80K 480A 電流導電棒(通電)熱流量

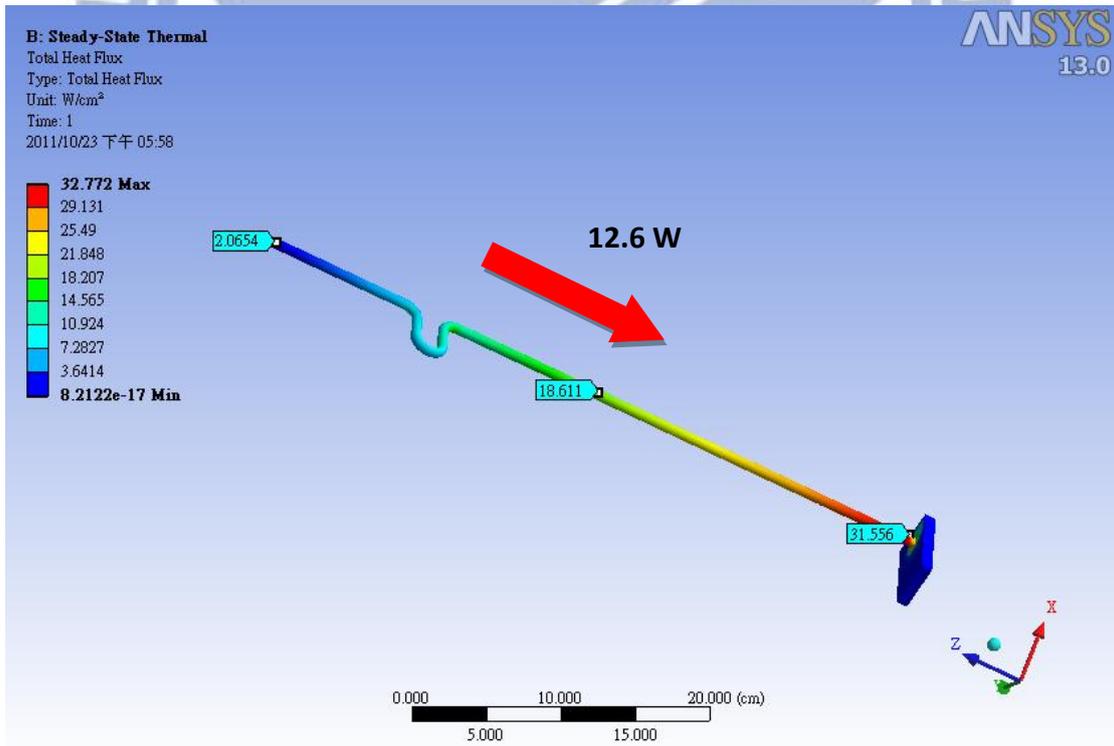


圖 七十二. 300-80K 200A 電流導電棒(通電)熱流量

輻射熱模擬：

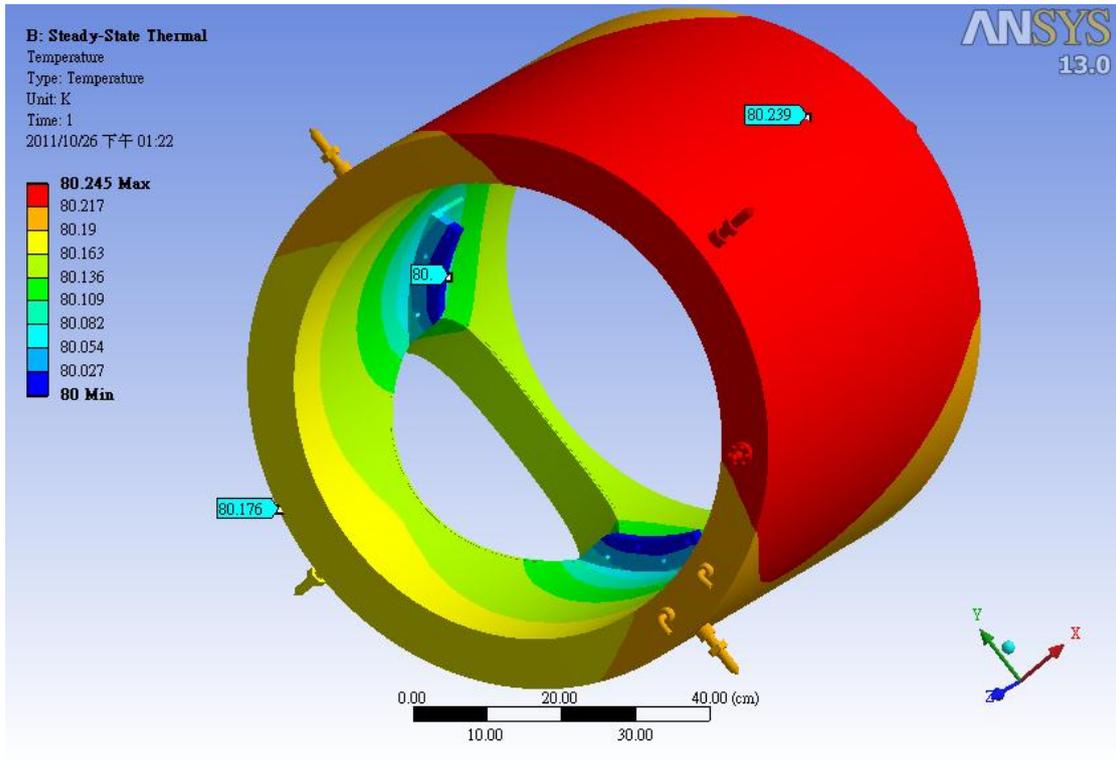


圖 七十三. 80K 液氮層淨輻射熱負載溫度分布圖

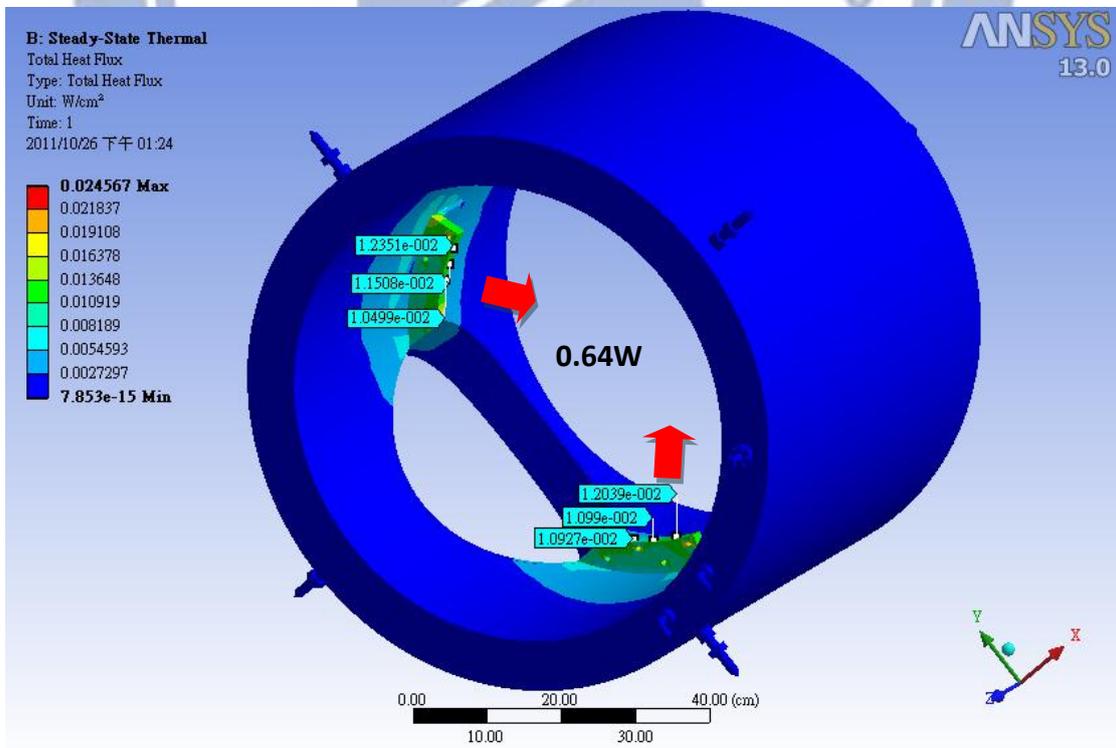


圖 七十四. 80K 液氮層淨輻射熱負載熱流量

表 十六. 80K 層 穩態熱模擬 各項零件熱流量

種類	W (J/s)	數量
<b>傳導熱</b>		
液氮傳輸管	$93.8 \times 10^{-3}$	2
水平位置固定玻璃纖維螺桿	$92.4 \times 10^{-3}$	4
高度位置固定玻璃纖維螺桿	$200 \times 10^{-3}$	4
<b>電流傳導棒</b>		
480 安培 (未通電)	11.63	2
200 安培 (未通電)	6.2	2
480 安培 (通電)	24.3	2
200 安培 (通電)	12.6	2
<b>輻射熱</b>		
300K-80K 輻射熱	0.64	1
總熱負載 (未通電)	37.7	
(通電)	75.8	

# 50K 層熱模擬

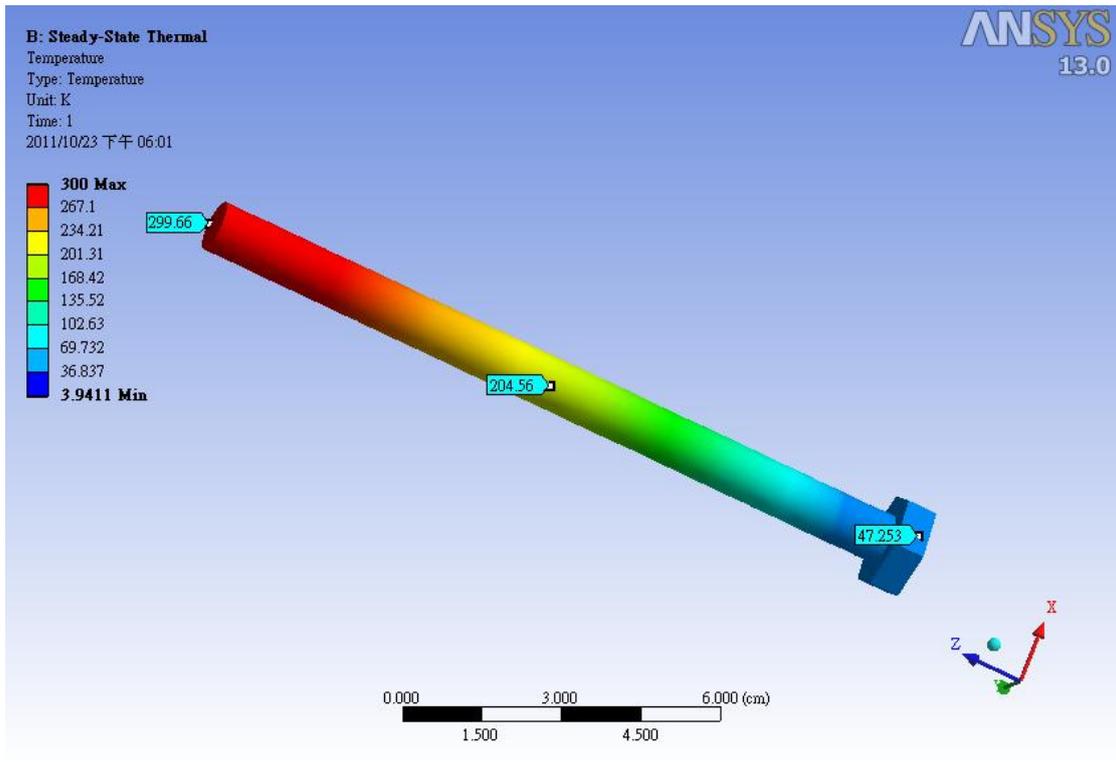


圖 七十五. 上蓋玻璃纖維吊桿溫度分布圖

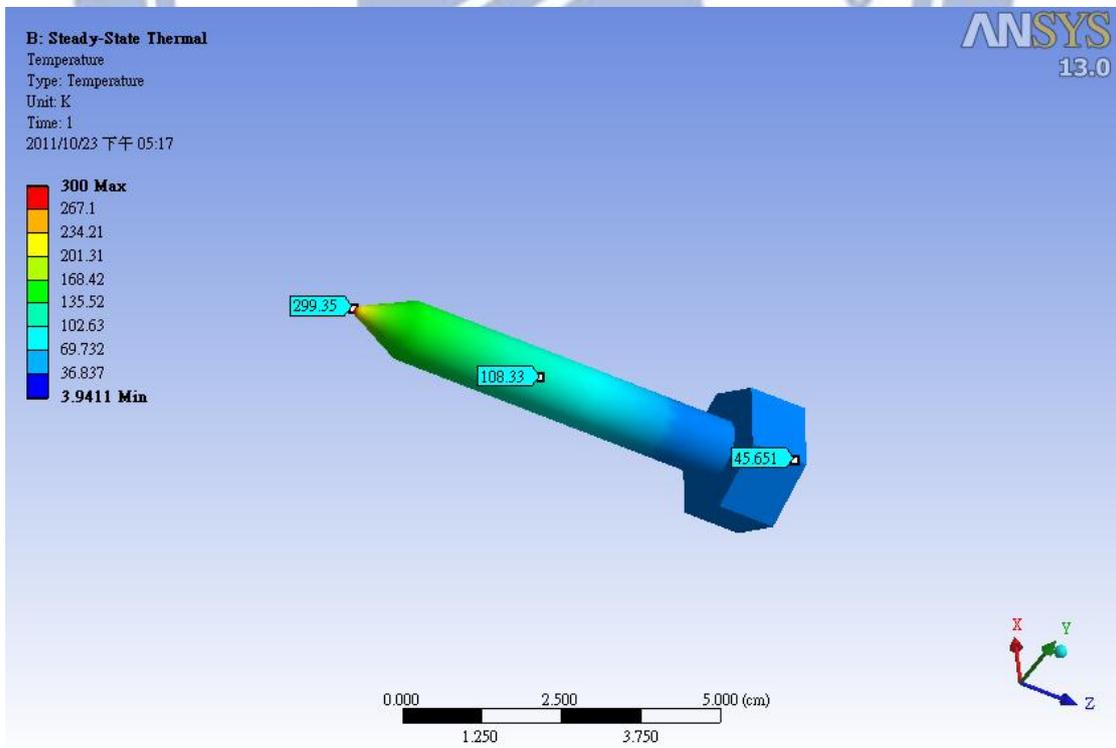


圖 七十六. 高度位置固定玻璃纖維螺桿溫度分布圖

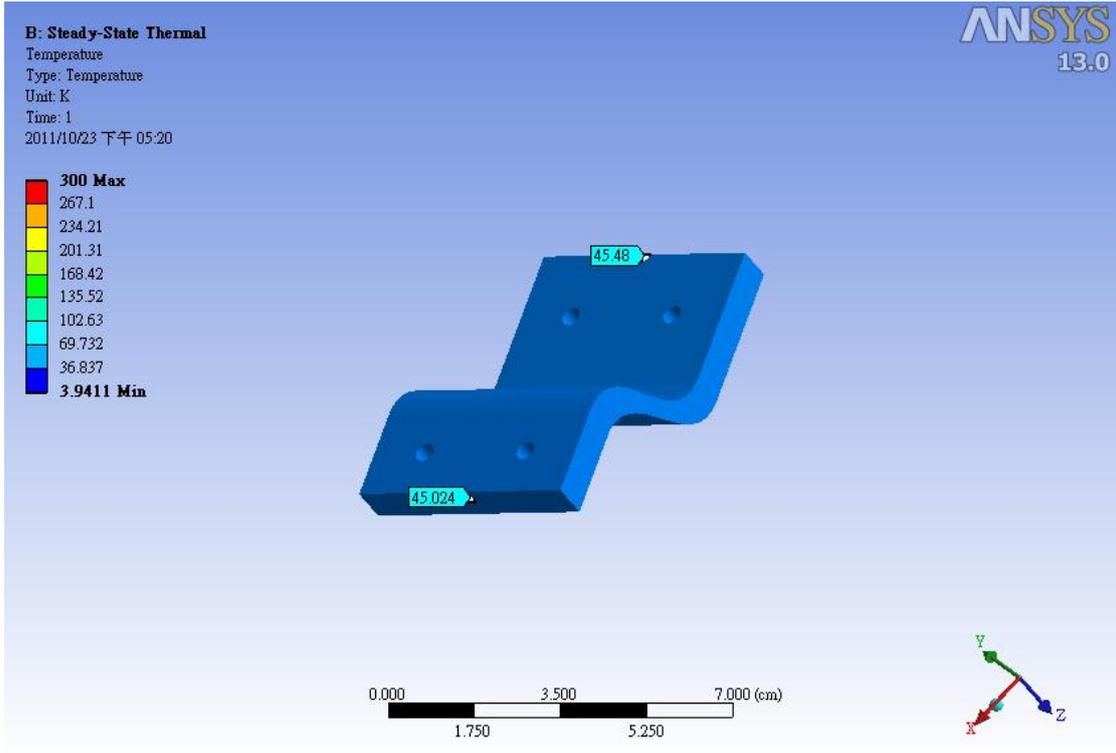


圖 七十七. 第一段可撓導冷銅片溫度分布圖

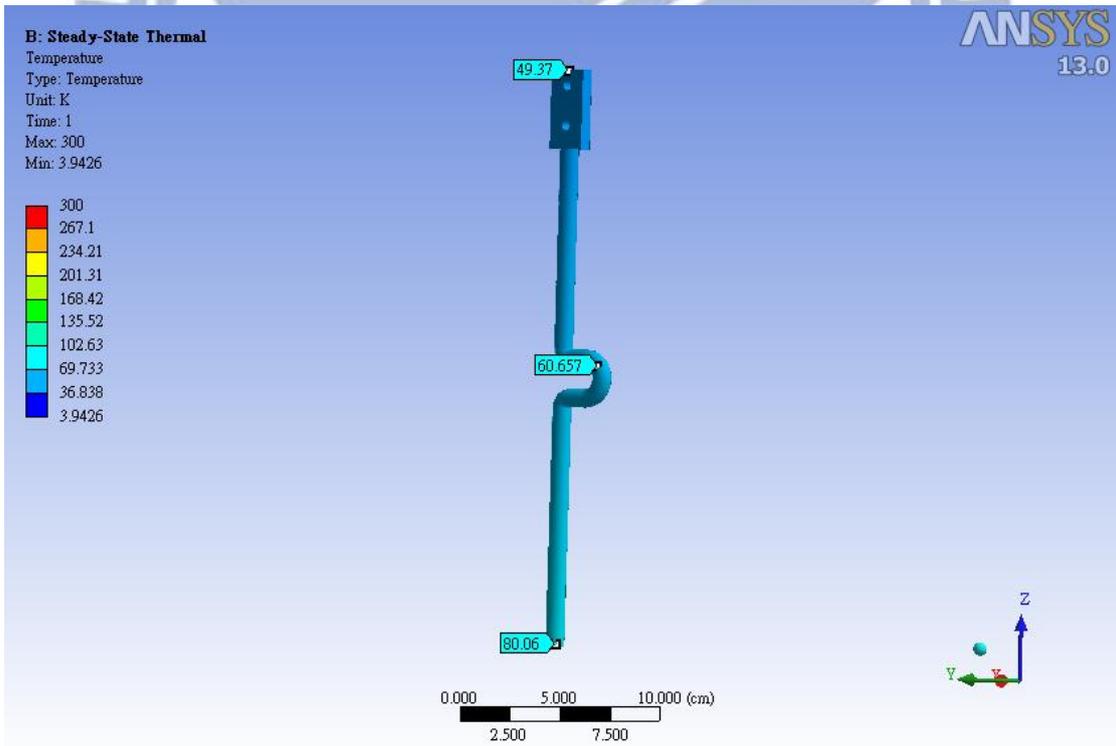


圖 七十八. 80K-50K 480A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖

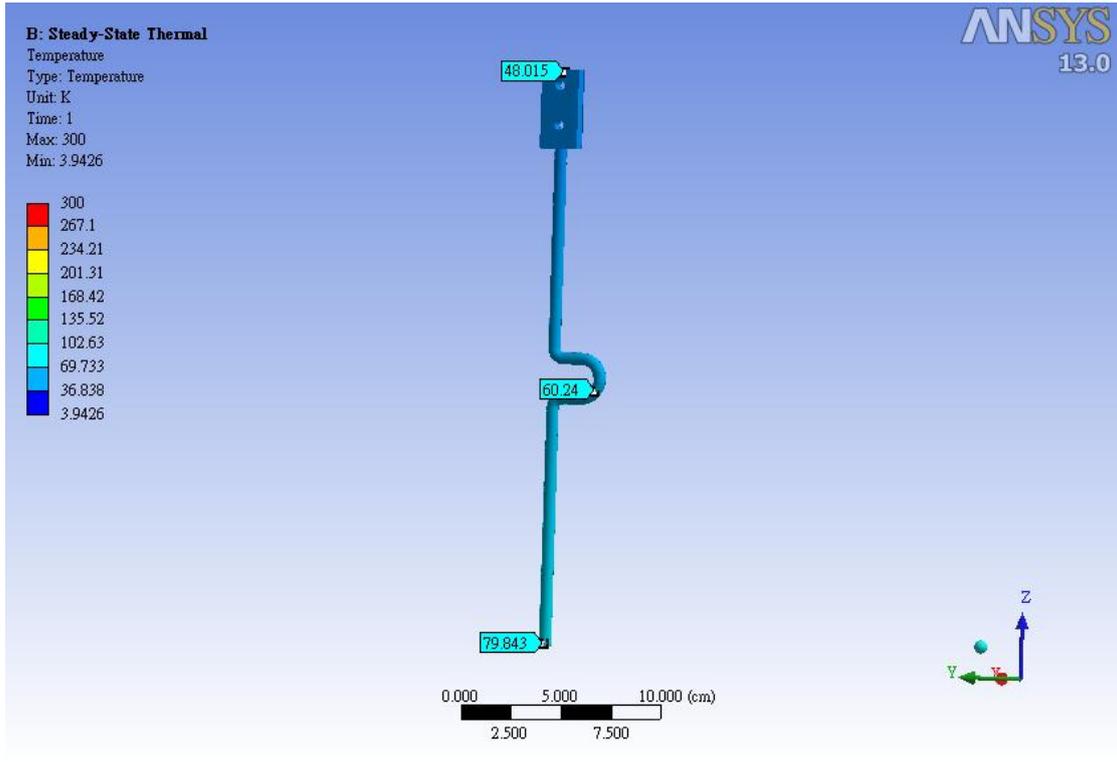


圖 七十九. 80K-50K 200A 電流導電棒(未通電)溫度分布圖

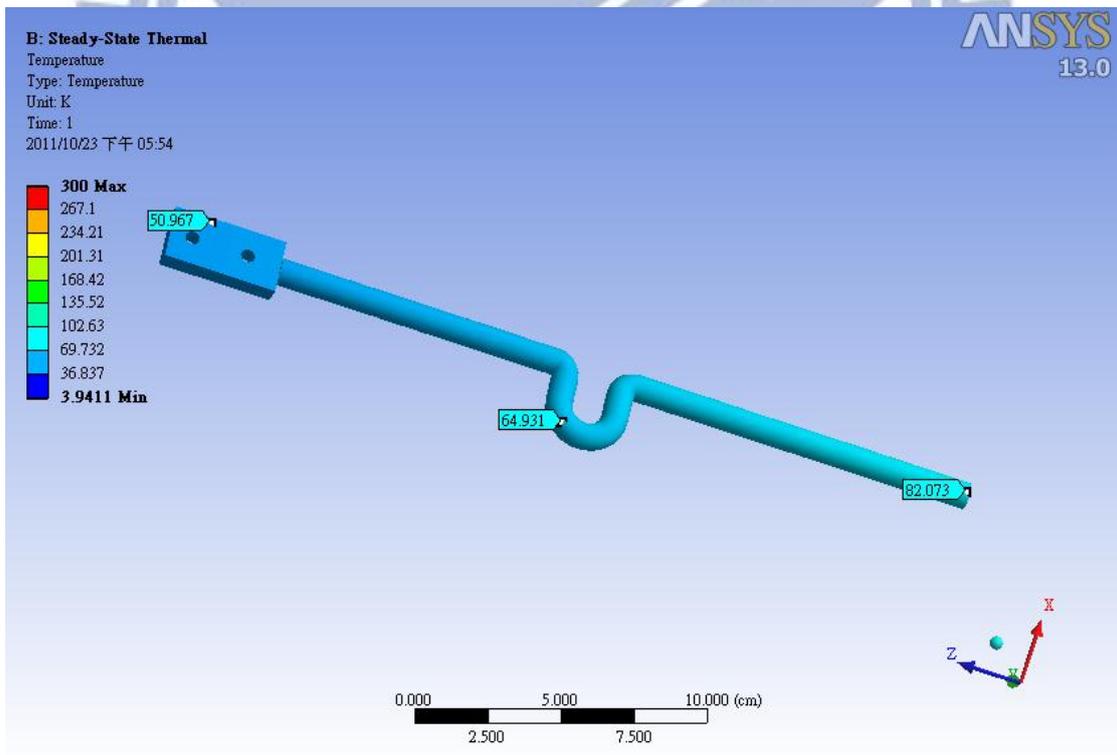


圖 八十. 80K-50K 480A 電流導電棒(通電)溫度分布圖

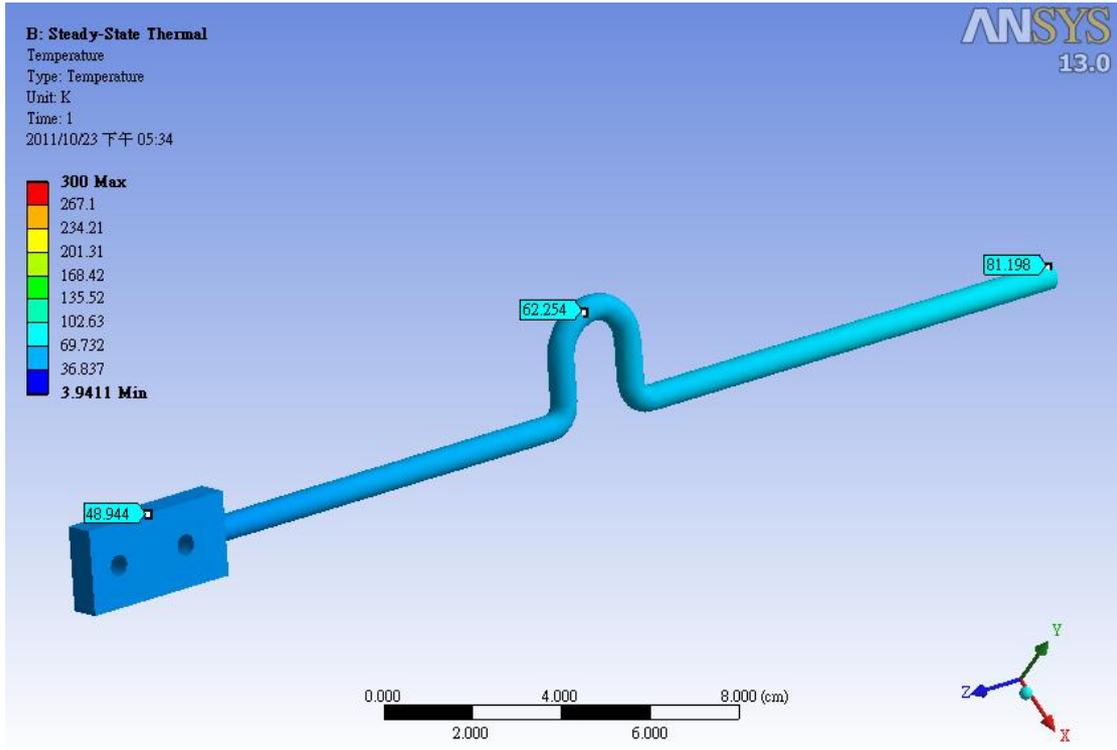


圖 八十一. 80K-50K 200A 電流導電棒(通電)溫度分布圖



## 熱流量分布圖

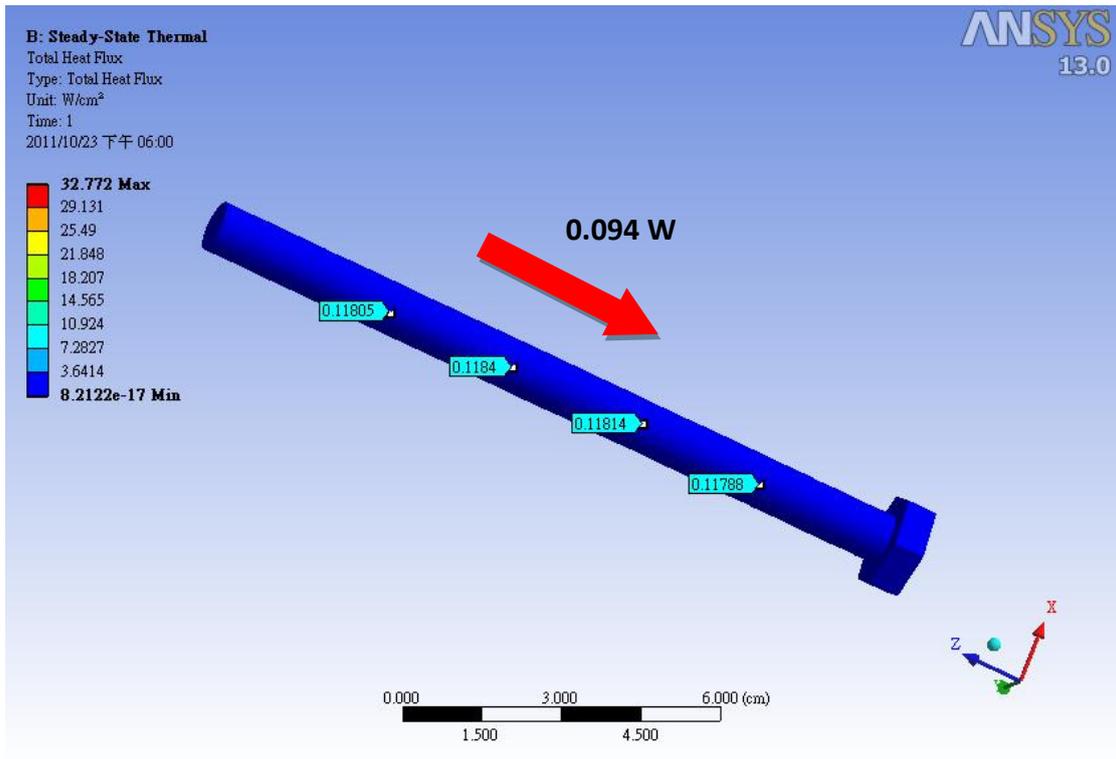


圖 八十二. 上蓋玻璃纖維吊桿熱流量

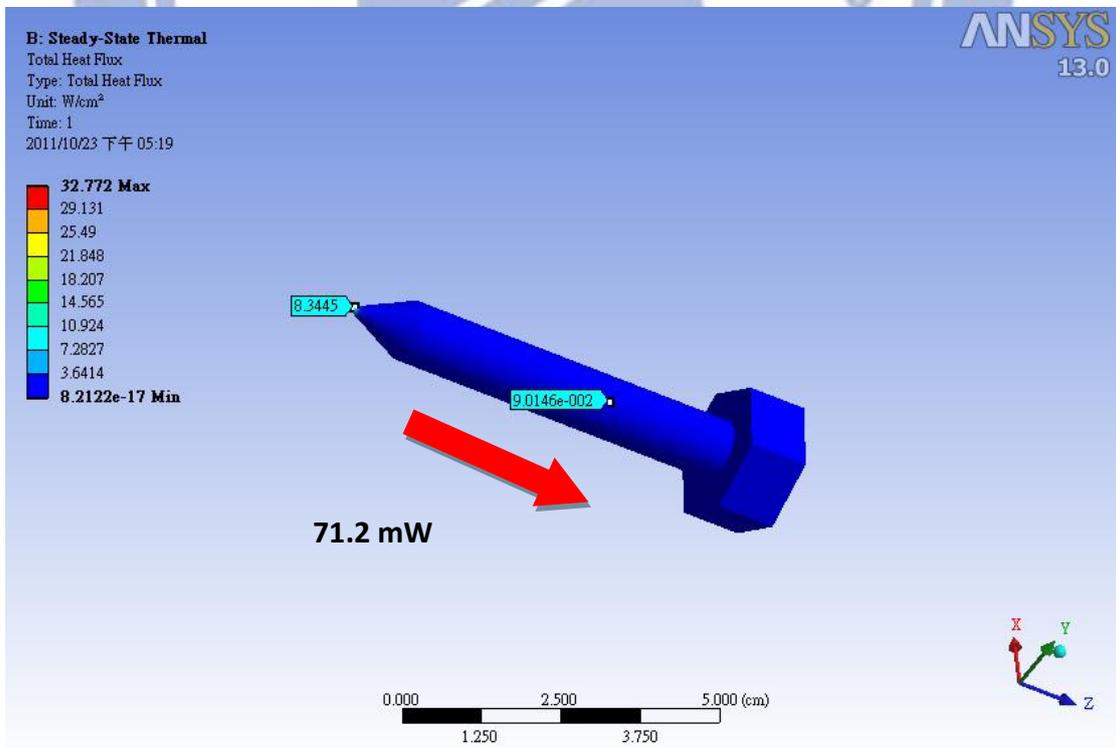


圖 八十三. 高度位置固定玻璃纖維螺桿熱流量

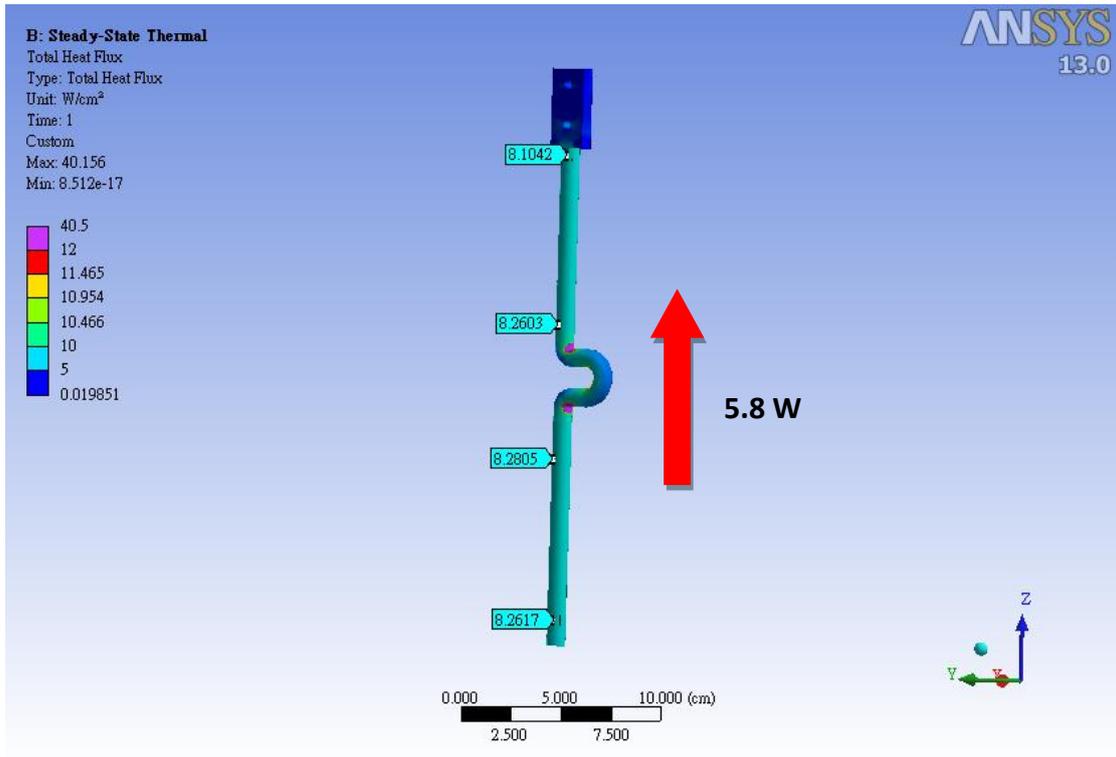


圖 八十四. 80K-50K 480A 電流導電棒(未通電)熱流量

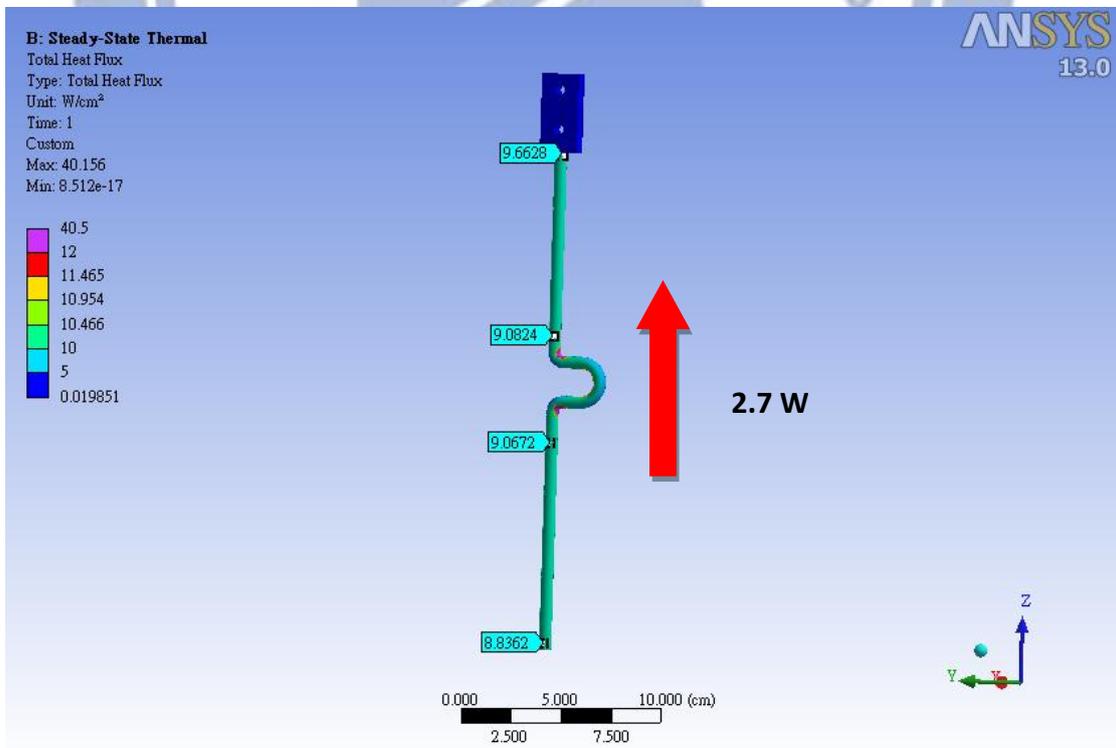


圖 八十五. 80K-50K 200A 電流導電棒(未通電)熱流量

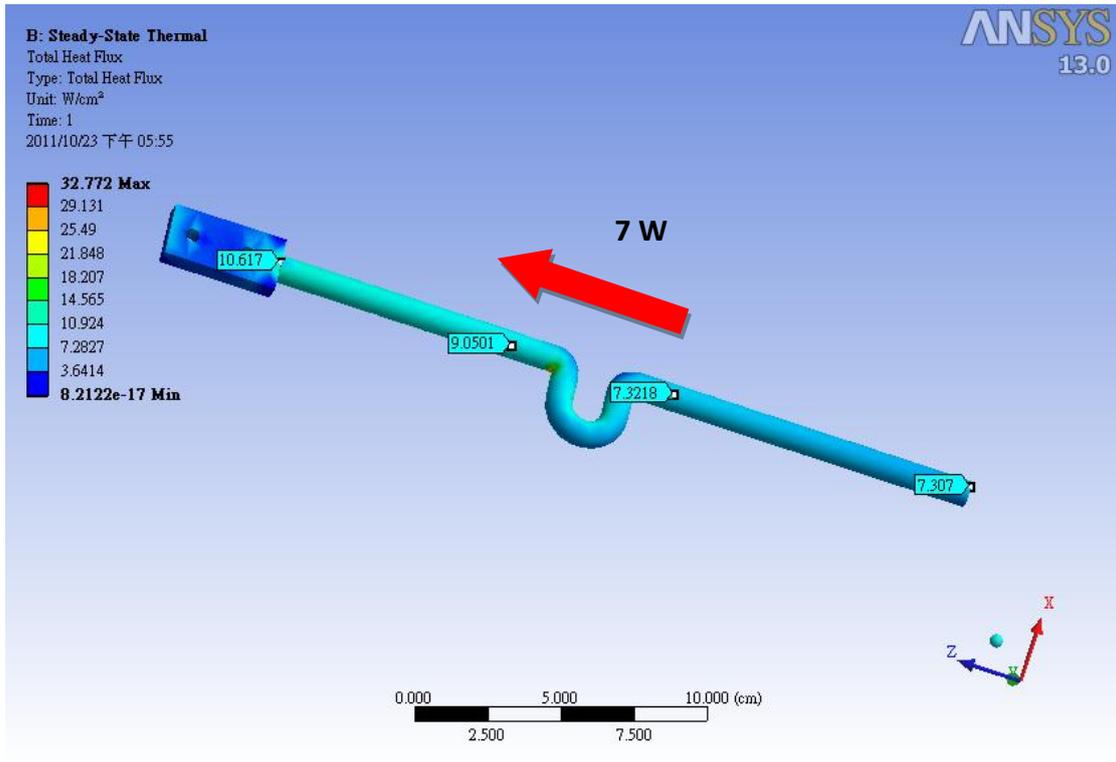


圖 八十六. 80K-50K 480A 電流導電棒(通電)熱流量

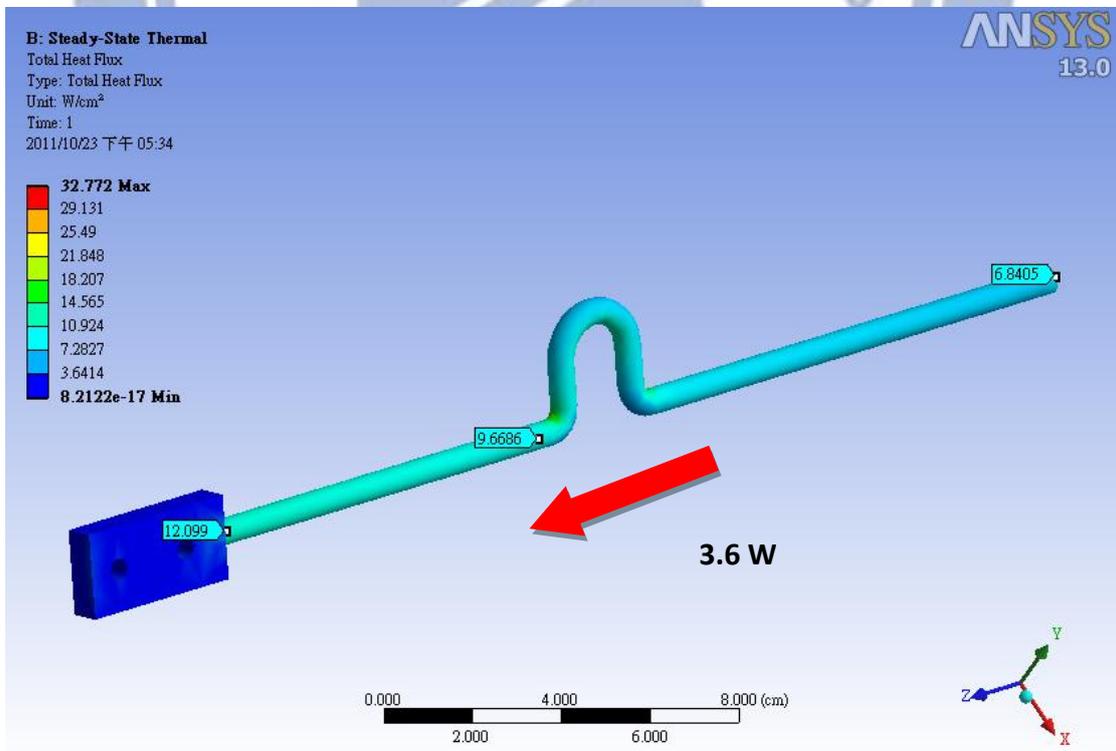


圖 八十七. 80K-50K 200A 電流導電棒(通電)熱流量

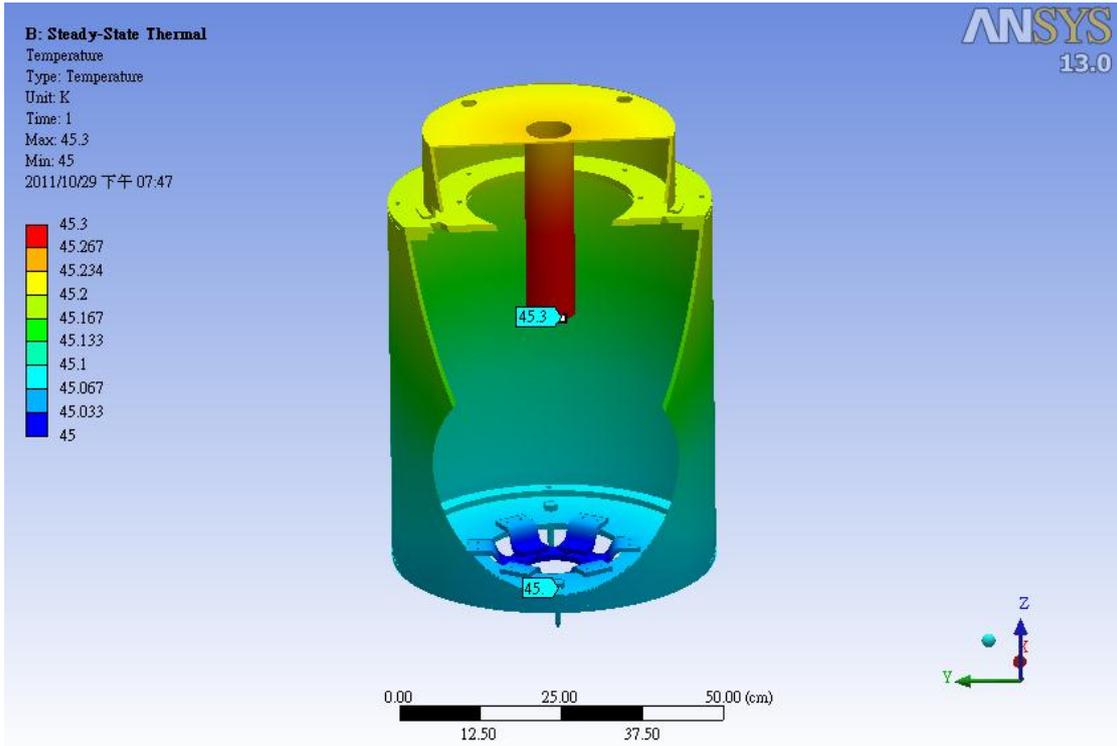


圖 八十八. 50K 輻射熱遮蔽層淨輻射熱模擬溫度分布圖

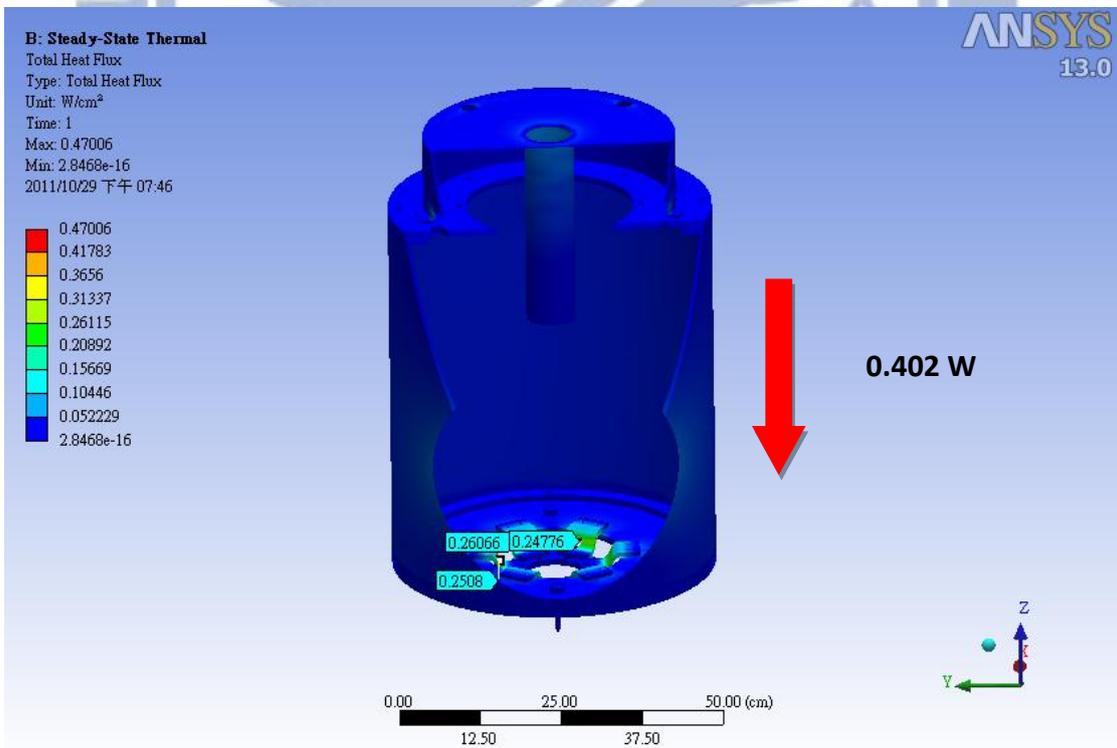


圖 八十九. 50K 輻射熱遮蔽層淨輻射熱模擬溫度分布圖

表 十七. 50K 層 穩態熱模擬 各項零件熱漏

種類	W (J/s)	數量
傳導熱		
上蓋玻璃纖維吊桿	$94 \times 10^{-3}$	4
高度位置固定玻璃纖維螺桿	$71.2 \times 10^{-3}$	4
電流傳導棒		
480 安培 (未通電)	5.8	2
200 安培 (未通電)	2.7	2
480 安培 (通電)	7	2
200 安培 (通電)	3.6	2
輻射熱		
300K-50K 輻射熱	0.4	1
80K-50K 輻射熱	$1.8 \times 10^{-3}$	1
總熱負載 (未通電)	18.78	
(通電)	22.98	

## 4. 2K 層 穩態熱模擬

### 穩態熱模擬之溫度分布圖

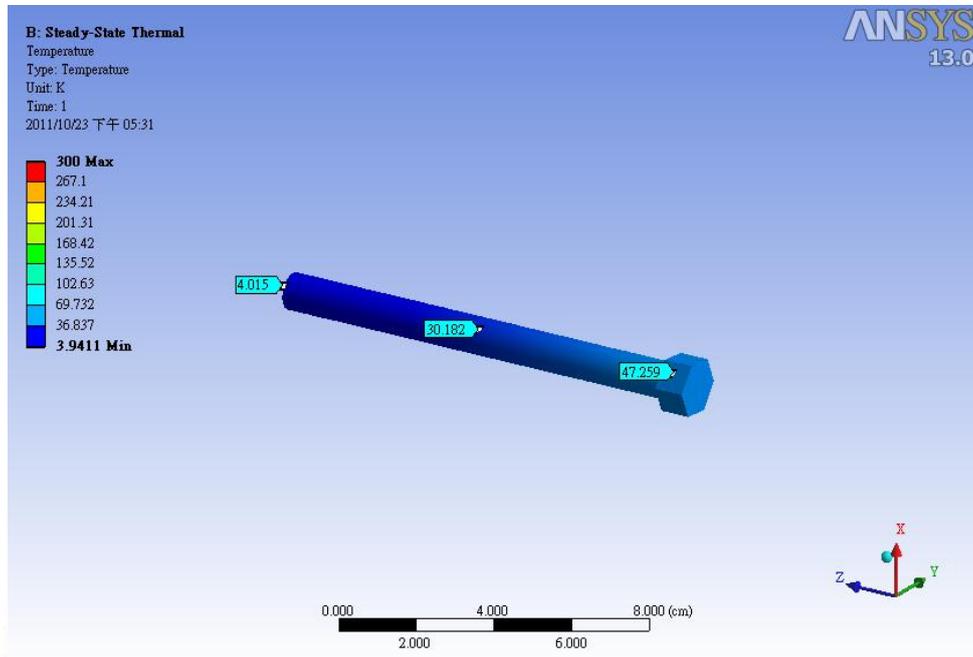


圖 九十. 上蓋玻璃纖維吊桿溫度分布圖

### 穩態熱模擬之熱流量

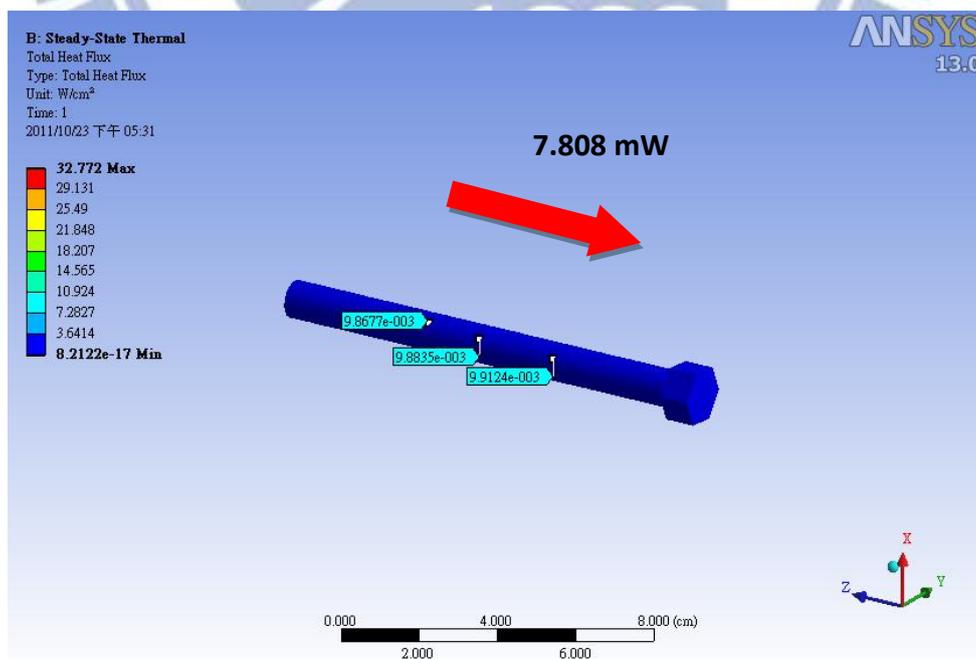


圖 九十一. 上蓋玻璃纖維吊桿熱流量

# 輻射熱模擬

## 穩態熱模擬之溫度分布圖

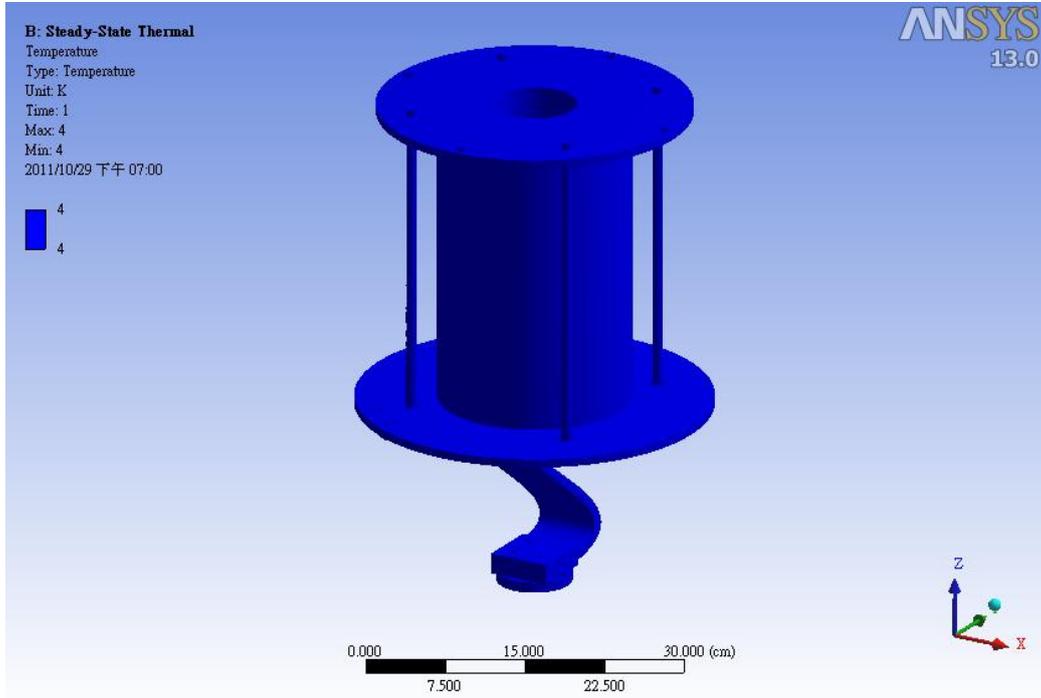


圖 九十二. 4.2K 超導線圈淨輻射熱模擬溫度分布圖

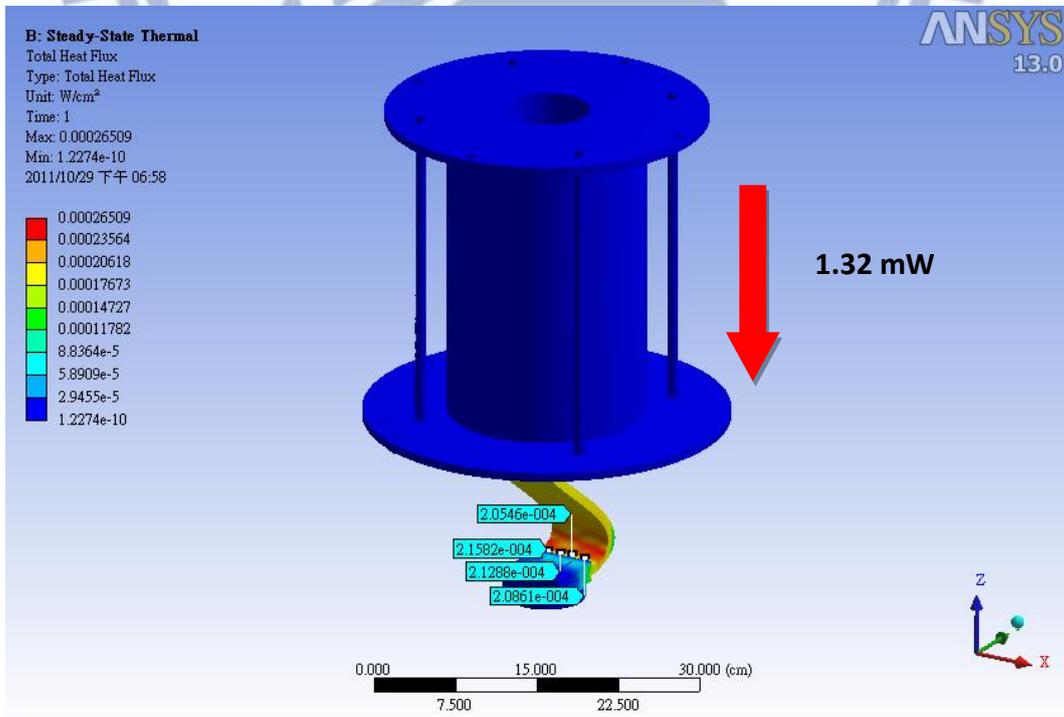


圖 九十三. 4.2K 超導線圈淨輻射熱模擬溫度分布圖

表 十八. 4.2K 層 穩態熱模擬 各項零件熱漏

種類	W (J/s)	數量
傳導熱		
上蓋玻璃纖維吊桿	$7.8 \times 10^{-3}$	4
電流傳導棒		
高溫超導電流導電棒	0.05	2
輻射熱		
50K-4.2K 輻射熱	$0.13 \times 10^{-3}$	1
總熱負載	0.13	

溫度校正腔體熱流量

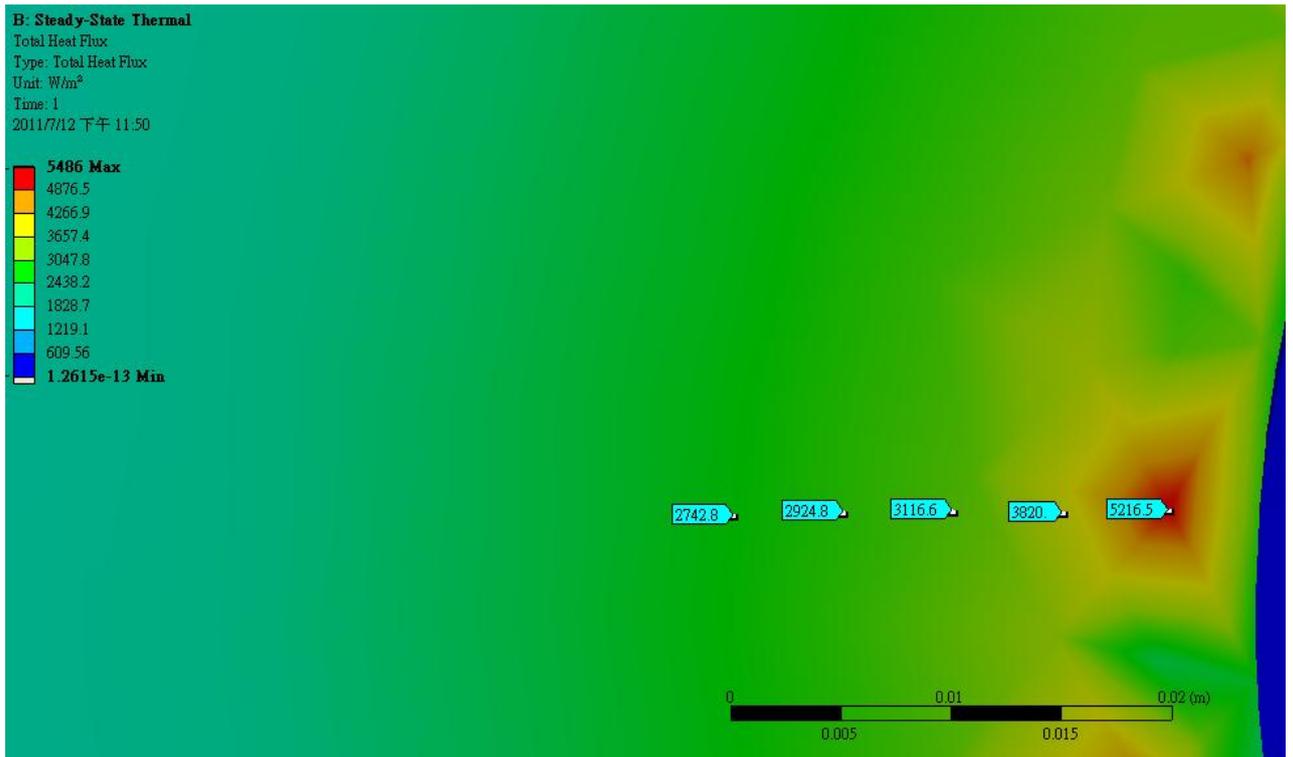


圖 九十四. 第一段腔體熱通量局部放大分布圖

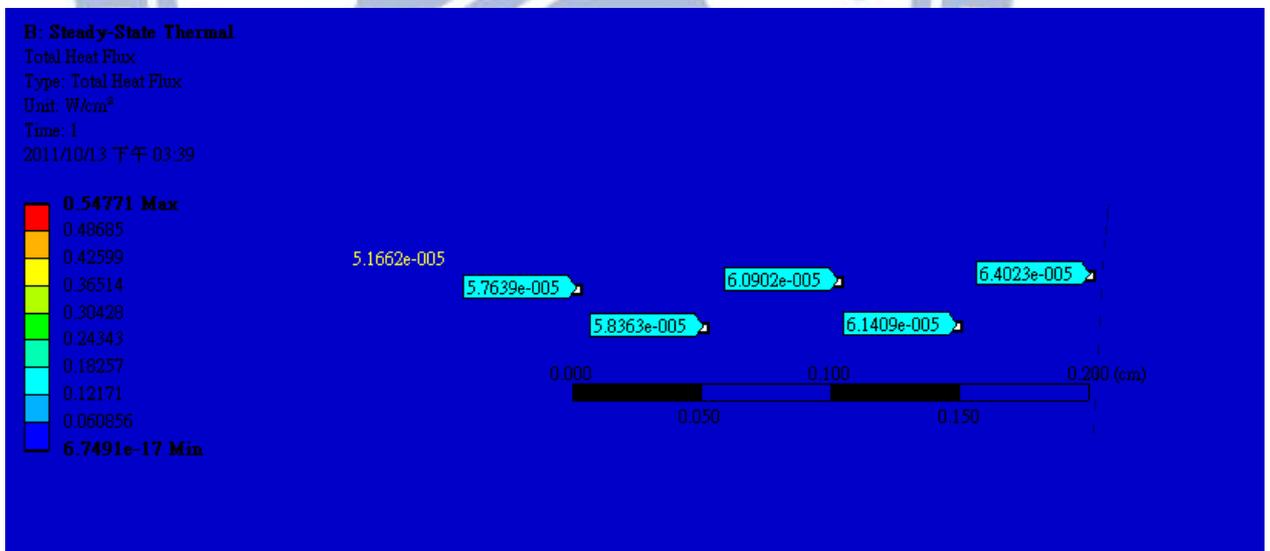


圖 九十五. 第二段腔體熱通量局部放大分布圖

## 參考文獻

- [1] “Operating Manual for Physical Property Measurement System,” *Quantum Design, Inc.*, 6325 Lusk Boulevard, San Diego, CA • USA. Available: <http://www.qdusa.com/products/ppms.html>
- [2] T. Kii, H. Zen, N. Okawachi, M. Nakano, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshikawa, T. Yamazaki. ”Design study on high-Tc superconducting micro-undulator,” *Proceedings of FEL 2006*, BESSY, Berlin, Germany (2006)
- [3] S.D.Chen, Y.T.Yu, Z.W.Huang, J.C.Jan, C.S.Hwang, I.G.Chen, C.H.Du, T.M.Uen, D.J.Huang, and C. Y. Chang. “Design of a HTS Magnet for Application to Resonant X-Ray Scattering,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, VOL. 21, NO. 3, JUNE 2011
- [4] “Specification Sheet of 2G HTS wire,” *SuperPower, Inc.* 450 Duane Ave. Schenectady, NY USA. Available: [http://www.superpower-inc.com/system/files/SP\\_Coil+Application\\_0809.pdf](http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_Coil+Application_0809.pdf)
- [5] C. Bean, “Magnetization of high-field superconductors,” *Rev. Mod. Phys.* 36, 31–39 (1964)
- [6] I.G. Chen, J Liu, R Weinstein, K Lau, “Characterization of YBaCuO, including critical current density J, by trapped magnetic field,” *J. Appl. Phys.* 72, 1013 – 1019 (1992)
- [7] C.S. Hwang, B. Wang, R. Wahrer, H.H. Chen, C.H. Chang, F.Y. Lin, T.C. Fan, C.T. Chen, “Design and construction performance of a compact cryogen-free superconducting wavelength shifter,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, no. 1, pp. 686-690 (2002)
- [8] “Specification Chart of Sumitomo Cryocoolers” Sumitomo Cryogenics of America, Inc. 1833 Vultee Street, Allentown Available: [http://www.shicryogenics.com/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=30&Itemid=248&lang=en](http://www.shicryogenics.com/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=30&Itemid=248&lang=en)
- [9] “Specification Chart of Can Superconductors” Can Superconductors of Czech Republic, Ringhofferova 66 251 68 Kamenice Available: <http://www.can-superconductors.com/products/current-leads/>
- [10] Thomas M. Flynn, *Cryogenic Engineering*. Marcel Dekker, INC New York USA 1997, pp. 359–419.

- [11] Frank Incropera, David P Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, New York USA. 1996, pp. 702–713.
- [12] H. H. Chen, *et. al.*, “Analysis of Heat Load in a Superconducting Wiggler With a Semi-Cold UHV Beam Duct,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1320-1323 (2006)
- [13] F. Y. Lin, C. S. Hwang, C. H. Chang, T. C. Fan, H. H. Chen, and M. H. Huang, “Auto-filling cryogenic system for superconducting wiggler,” in *Proc. EPAC 2002*, 2004, pp. 1726–1728.
- [14] C. S. Hwang *et al.*, “Superconducting Wiggler With Semi-Cold Beam Duct at Taiwan Light Source,” 2005, *Nucl. Instrum. Meth. A* 556, (2006) 607-615..

