

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別： 考察 )

赴德、法、美進行中子散射研究設施考察報告

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：研究員 副研究員

姓 名：鄭國川 張欽然

出國地區：德國、法國、美國

出國期間： 89 年 11 月 18 日至 89 年 12 月 02 日

報告日期： 90 年 1 月 11 日

## 摘 要

本次出國所考察之研究機構包括德國 FRM-II、法國的 ILL 與 LLB，以及美國的 NIST 等四個單位，這四個單位皆是現階段核能研究所「台灣研究用反應器設施改善計畫(TRR-II 計畫)」規劃與設計中子實驗設施的重要參考對象。本次考察一方面是與相關研究機構討論其對 TRR-II 建造計畫之可能協助，如人員互訪、技術資料審查與指導等之交流；了解各研究機構之中子束應用推廣、教育、研究方向、及組織架構等。另一方面也因各項中子實驗設施的屏蔽設計不僅關係實驗工作者的輻射安全，針對能譜儀之特殊屏蔽需求與相關的中子遷移計算技術，關係著實驗結果的精準度與品質；因此，也針對中子設施的屏蔽問題進行考察與資料收集。

# 目 次

## 摘 要

一、目 的 . . . . .	1
二、過 程 . . . . .	2
三、心 得 . . . . .	16
四、建 議 . . . . .	22
五、附 錄 . . . . .	24
六、收集資料(送 TRR-II 專案保管) . . . . .	25

## 一、目的

核能研究所的台灣研究用反應器設施改善計畫(TRR-II 計畫)目前在反應器主體部份，已接近基本設計之完成階段，但在中子實驗與應用設施的部份則仍待積極引進與學習先進國家的設計與應用經驗。本次考察一方面是與相關研究機構討論其對本所 TRR-II 建造計畫之可能協助，如人員互訪、技術資料審查與指導等之交流；了解各研究機構之中子束應用推廣、教育、研究方向、及組織架構等。另一方面也因各項中子實驗設施的屏蔽設計不僅關係實驗工作者的輻射安全，針對能譜儀之特殊屏蔽需求與相關的中子遷移計算技術，關係著實驗結果的精準度與品質，本所目前對這些技術欠缺完全之掌握；因此，也針對中子設施的屏蔽問題進行考察與資料收集。

本次出國所考察之研究機構包括德國 FRM-II、法國的 ILL 與 LLB，以及美國的 NIST 等四個單位，這四個單位皆是現階段本所規劃與設計中子實驗設施的重要參考對象。德國的 FRM-II 為興建中的 20MW 反應器，擁有各種照射設施、熱中子源、冷中子源，以及連接至導管大廳的各種中子實驗設施，在設計概念上與本所擬建立之反應器與實驗設施相當接近。法國 ILL 運轉的高中子通量反應器，專做中子相關實驗，擁有為數最多的各種能譜儀、小角度散射儀與其他中子實驗設施，在這些設備與屏蔽設計的關聯性上極具有考察之價值。法國 LLB 是官方的 CEA 與 CNRS 所屬的研究機構，負責 Orphee 反應器中有關中子實驗與應用之相關研究，與本所的性质很接近，而 Orphee 反應器的冷中子導管與實驗設施的設計與本所目前的規劃方向也一致。美國的 NIST 有專供中子實驗用的研究用反應器，由於是屬於國家標準單位，在中子實驗設計的嚴謹要求極高，同時也因國內已有部份學者與 NIST 已建立有合作關係，因此可藉由本次參訪，對於技術資訊的取得與合作方式的洽詢，做更深入的了解。

## 二、過程

### 1. 行程

11月18日(六) 起程旅途赴德 Muenchen

11月19日(日) 起程旅途赴德 Muenchen

11月20日(一) 考察 FRM-

11月21日(二) 考察 FRM-

11月22日(三) 旅途赴法 Grenoble

11月23日(四) 考察 ILL

11月24日(五) 考察 ILL

11月25日(六) 旅途赴法 Paris

11月26日(日) 週末

11月27日(一) 考察 LLB

11月28日(二) 考察 LLB , 旅途赴美 Washington D.C

11月29日(三) 考察 NIST

11月30日(四) 考察 NIST

12月01日(五) 回程旅途

12月02日(六) 回程旅途

### 2. 考察 FRM-

在 FRM- , 計有下列人員參與引導參訪與討論 :

Prof, Dr. W. Glaeser, TU Muenchen, Physics Dept., E21,

Prof, Dr. W. Petry, TU Muenchen, Physics Dept., E13,

Prof, Dr. K. Boening, FRM-

Dr. E. Steichele, FRM-

Dr. J. Neuhaus, FRM-

Dr. N. Pyka, TU Dresden

Dr. Wildgruber, Max Planck Gesellschaft

Dr. R. Gilles, Techn. Hochschule, Darmstadt

等等。

考察訪問主要由 Dr. J. Neuhaus 接待,他是目前慕尼黑大學與 FRM-II 反應器承包商 SIEMENS 公司在工程界面上的負責人,首先導遊 FRM-II 工地現場,參訪導管大廳、反應器大廳、導管隧道等建築,其他有些部份因已完工達 Clean Room 等級,不便訪客進入。反應器雖尚未運轉,所有施工人員、訪客等均嚴格管制進出。現場貨櫃多,正在交貨安裝期。穿越反應器廠房與導管大廳的穿孔預留很大,目的在等待中子導管的安裝與調整之後,再進行屏蔽材質的填塞。整個導管隧道是分成兩個部份,中間以一約 1m 厚的重質混凝土牆相隔,在靠近導管大廳的那一面牆則約是 80cm 的重質混凝土牆。導管隧道都是以可拆卸式的屏蔽塊交錯堆積而成,目的是方便大型機具於安裝調整期之進出;在堆疊界面上可以看到預留有許多鎖孔,可用以鎖上外加的不鏽鋼屏蔽塊,以加強屏蔽或防止堆疊界面的中子潺流效應。在熱中子實驗廠房及導管大廳廠房的牆上對應於中子束的方向,皆預留有開口,為將來中子束的繼續延伸做準備。由於所有的中子實驗設施皆未開始安裝,因此無法實地看出實驗設施的屏蔽狀況。整個工期已有延誤,且反應器運轉執照尚未核下,最新指標係於明年 IGORR8 國際會議時有好的消息。能譜儀等之設計安裝並未隨反應器外包西門子公司,現場慕尼黑大學工程人員在進行中子管組裝,Dr. Neuhaus 強調要有維修運轉之原則才行設計製作安裝。

接著 Dr. Neuhaus 花了很長時間就整體佈局說明各中子束管與能譜儀，目前之現狀是與反應器內部設計人員不斷溝通協調後的結果，而最佳化方案經常只是位置些微更動，而且常常是學生論文工作的成果。

在會見亦擔任 TRR-II 技術評審委員的 Prof. Boening 後，Dr. Neuhaus 再說明其導管與能譜儀有別於他人之興建方式，FRM-II 是提供經費、人力委請其他大學教授總其責，自設計、興建、運轉，以至服務他人、爭取後續經費、改進等，都屬於非常長期之合作。接著預定將來擔任 FRM-II 科學負責人的 Prof. Dr. Petry 接見，強調慕尼黑大學之態度，極願意交流、散播知識。他認為一件能譜儀最少需要 10 人/年時間建造，以後也有需要持續改進，人員培養因此要看的遠，國外見習起碼要一年，因此才能認識各國同儕，知道問誰。心胸開闊，英文可以，對新文化好奇，係接受人選之條件。他建議亦可循德國駐台單位管道，從生物、材料等領域申請訪德機會，亦可向 FRM-II 提出具科學價值之研究專題。明年 FRM-II 將承辦 ICNS 2001 國際會議，歡迎台灣的使用者投稿。雖然興建工作極忙，時機許可，Prof. Dr. Petry 本人與同仁均願赴台交流協助。

在瞭解 TRR-II 專案選擇四種能譜儀於第一期中興建後，Prof. Dr. Petry 十分同意此四種選擇，並安排 FRM-II 這四種能譜儀之儀器科學家介紹他們的進展情形。這些專家有負責反射儀的 Dr. Wildgruber，負責冷中子三軸儀的 Dr. Pyka，負責粉末繞射儀的 Dr. Gilles 等。在聽取 Dr. Pyka 的介紹時，特別詢問其有關三軸儀旋轉屏蔽體的設計情形，Dr. Pyka 稱他只負責中子光學的設計問題，詳細屏蔽設計並不知情，只知在第一分光儀 (monochromator) 的屏蔽體 (Shielding Drum) 非常厚，為了節省空間，他們是用約  $6.0\text{g/cm}^3$  的超重質混凝土做成。第一分光儀的圓形屏蔽體約高 2m，分成上、中、下三節，中間的那一節是可以旋轉的，配合所設定的數個不同大小橫截面的中子引出口，可以調節所要接收的中子散射角度和中子束寬度。在旋轉屏蔽體的中子出口設有第二道中子關斷裝置 (Secondary Shutter)，用以完全關斷由分光儀至照射樣品位置之中子束。

Prof. Dr. Glaeser 亦安排時間接見。Prof. Dr. Glaeser 曾擔任 ILL 所長，現任物理系 E21 研究群與 FRM-II 專案負責人，即將退休。對於 TRR- 專案極願給予協助，頻頻詢問有無可效勞處。另外 Dr. Steichele 負責導管等工作，費心指導本所楊村農博士實習，亦曾見面致謝。

由於 TRR-II 尚未廣為人知，週二下午 Dr. Neuhaus 安排鄭國川向 Prof. Dr. Petry 研究群同仁介紹 TRR-II 現況，為時一小時。

### 3. 考察 ILL

在 ILL，計有下列人員參與引導參訪與討論：

Dr. Colin Carlile, 副所長，負責技術部門，

Dr. Christian Vettier, 副所長，負責科學部門，

Dr. Giavanna Cicognani, 科學協調人，用戶服務，

Dr. Siri Kulda, 三軸儀 IN20 負責人，

Dr. Peter Hoghoj, 光學負責人，2001 起擔任衍生公司 Xenocs 執行長，

Mr. Bruno Guerard, 偵測器小組，

Mr. Walter Kaiser, 工程部門負責人，

Ms. Isabelle Grillo, SANS 儀器科學家，

Dr. Sabine Mahline, 屏蔽設計計算，

Dr. Vincent Leiner, ADAM 儀器科學家，U. Bochum.，

Prof, Dr. Y Petroff, ESRF 研究所所長，

等等。

考察主要由 Dr. Carlile 接待，Dr. Carlile 首先介紹 ILL，強調係用戶機構，非研究機構，有內部研究，但亦與外界合作。儀器科學家及整個服務系統於服務用戶時，均假設使用者無中子相關背景知識。在 40 組儀器上平均每件實驗約 4 天而已，故儀器科學家必須非常彈性來服務各種應用實驗。儀器科學家與使用者之接觸藉助各種會議，當中的討論促使申請射束實驗。幾千使用者當中年輕大學生與研究生佔多數，ILL 甚至訓練傳授低溫技術，輻射防護等必備知識。ILL 有世紀更新計畫，分批改進現有 40 組儀器，全部更新一輪，預估要 15 年。

ILL 員工約 420 人，分屬行政( 90 人)、科學( 120 人)、儀器與技術( 110 人)、反應器( 100 人)等部門，另有博士生、超博士、短期聘用等 60 人，來務服約 2 千個使用者(其中平均每天約 60 人至 80 人在場接受服務)。德( 30 % )、法( 30 % )、英( 25 % )三國共出資 85%，其他國家(義、西、俄、奧、希、瑞典)各 2 % 以上，年 380MFF 經費。

與 TRR-II 之人員訓練交流原則上沒限制，惟因對於成員之公平性上，未簽約時的相互合作最好保持看不見程度，若要正式大規模合作，例如完整團隊來，租用新舊儀器與射束時間等，則必須簽約成為一員，亦即付費最少 2 % (約 7.6MFF)。對於 TRR-II 第一期建造四種能譜儀的意見之一是建議考慮 Chopper Spectrometer，認為較三軸儀更有用，更多物理可做。

在 Dr. Carlile 引導下，走訪一圈 ILL 各設施與技術部門，隨後並個別與各部門、各儀器科學家唔談瞭解相關工作。走訪中，分別進入了 ILL 的兩個導管大廳以及反應器大廳參觀。由於 ILL 有為數眾多的中子實驗設施，因此廠房四處多有明顯的中子束狀態指示器(Beam Status Indicators)，顯示出目前有哪些中子束是在引出狀態。進入反應器大廳必須通過雙層氣密門及佩帶臨時劑量計，進入兩個導管大廳則不需要。各個中子實驗設施之間彼此並沒有太明顯的房間或大塊屏蔽來區隔，多數只是用約 15cm 厚的可堆砌式重質混凝土或加硼環氧樹脂做重點式的屏蔽。對各個實驗設施而言，基本上可以看出最大的屏蔽

體是在由主線光子(Primary Beam)開始分光的部分(也就是 monochromator 的部分), 屏蔽多數是由鐵塊內襯鉛板和碳化硼板組成。在出了 monochromator 的屏蔽體後, 中子光束寬度通常只有 1cm 左右, 並不見特別的屏蔽設置。在照射樣品的位置, 有小範圍的屏蔽, 屏蔽材以加硼環氧樹脂塊堆積而成為主, 在照射樣品正對射束方向的後方通常置有中子擋板(Beam Stop), 以加硼環氧樹脂塊和小塊鉛版為主; 在分析儀或中子偵測器的位置, 有比較大的屏蔽體, 但主要是為了減低中子偵檢的背景, 而非人員劑量的考慮, 屏蔽材質包括鎘板(Cadmium)和加硼環氧樹脂塊。在比較長的那個導管大廳所看到的小角度散射儀(D11), 其已遠離爐心 100m 以上, 導管是被重質混凝土做成的獨立屏蔽塊所包圍; 在接近照射樣品的位置, 中子導管被設計成可以從主中子線上加入或移走, 藉以調節所需的中子束發散量, 因此在這個部分所看到的導管獨立屏蔽較大; 樣品後方就是內含可移動式 BF<sub>3</sub> 偵檢器的真空腔體, 長度約四十米, 腔體由不鏽鋼內襯碳化硼板所構成, 厚度約 15cm。

我們也走訪光學部門, 此部門負責導管等光學組件之開發, 所參觀鍍膜機與核研所物理組所擁有自製之連線式機器比較, 除了係直立非平臥, 又有自動送樣換樣設備外, 型式規模皆相同。今年中此部門衍生成立 Xenocs 公司推廣所發展技術, 負責人 P. Hoghoj 成為公司的執行長, 目前公司主要生產 90cm 長的鏡片, 打算擴展至生產 100cm 的鏡片。ILL 亦發展大面積位感偵測器, 參觀了發展中的 Microstrip Gas Detector, ILL 可以供應 TRR-II 特殊偵測器, 但若此類商業收入超過 4MFF, ILL 無法留下經費, 因此較願意以科學合作名義進行此類工作。

工程部門 Walter Kaiser 先生介紹其 Design House, 即使成員 10 人中有 5 人係臨時聘用, 仍強調自行作光學與機械設計之必要, 製作可外包, 現場安裝亦必須訓練有素的內部技術員, 才能累積經驗持續改進。ILL 的中子導管是裝入 10m 長, 6mm 厚的長方體不鏽鋼框罩(Neutron Guide Housing)中, 導管一節節順軌道滑入, 框罩外表定點預留對準、觀測、抽氣等開口,

提供導管受控環境。ILL 射束管塞均依可替換原則設計，鋁導管約 5 年老化現象，Zircaloy 導管則幾乎永久可用。

Dr. Siri Kulda 引導我們參觀三軸儀 IN20，主要可以看出厚度達 90~100cm 的第一分光儀重質混凝土屏蔽體(內襯加硼環氧樹脂板)、屏蔽體外有 5~6 公分厚的鉛和不鏽鋼所構成的第二道中子關斷裝置。在分析儀的位置，有厚約 20cm 的環氧樹脂塊堆疊成的屏蔽體。在中子偵檢器的位置則是以鋁製的容器內塞鍍板(Cadmium)和加硼環氧樹脂塊來減低中子偵測的背景。

Dr. G Cicognani 為我們說明 ILL 使用者計畫申請之處理情形。網路申請已達五成並成長中，有利於統計分析，一年兩次申請，每次約 450 件。網路電子化評審也在推動中，並有快速線設計，讓熱門時效題材及時上線測試，以決定下一步。台灣同仁申請案目前仍必須在與成員合作條件下提，已有約 7 人曾申請，吳茂昆教授 可能是惟一曾獲分配射束時間者。

Dr. S. Maline 是我們在 ILL 唯一能找到目前正對若干中子實驗設施進行屏蔽計算的專家，她並非 ILL 的全時員工，而是 ILL 以部分工時(part time)聘來，用 MCNP-4C 進行更新中的熱中子三軸儀的屏蔽計算。計算的方式也是以接龍運算的方式，一段一段由爐內一直算至中子偵檢器位置。由於計算耗時而統計精確度不容易掌握，因此她也認為如果能用類似 DORT/TORT 這種程式，簡化計算的幾何，應該可以提供更好更快的分析結果。

歐洲同步輻射研究中心 ESRF 與 ILL 相鄰，(事實上兩者與 EMBL 共用招待所、餐廳、圖書館等)機會難得，因此提出參觀要求，並獲安排。ESRF 所長 Prof. Petroff 亦擔任台灣 SRRC (同步輻射中心)技術評審委員會主席，特親自引導參觀，就模型壁報解說後，陪同自研究大樓通過高架通道直赴儲存環、控制室、射束線實驗站等參觀，並選定高壓物性研究與病毒結晶分析兩研究實驗站說明，讓人瞭解同步 X 光輻射化不可能為可能的研究，大幅延伸了人類知識領域。同步輻射與中子輻射為相輔相成的先進材料研究工具，ESRF 現在座落地點在兩條河

流交會處,地下水位甚高,雖然原來有地勢更佳的地點可選擇,最後仍以使用者間的重疊考量,為促使交流之方便,選址在 ILL 附近的現址。而地下水位造成之地基變動則靠動態調整對準儲環磁鐵方式解決,最近藉用人造衛星定位信號,更可在短時間將為數眾多,距離遙遠,受屏蔽阻隔的磁鐵對準一遍。Prof. Petroff 對於位於 INER 的 TRR-II 與位於新竹的 SRRC 間之距離甚為關心,認為兩者距離稍遠,因而使用者交流之促進需要受到重視,ESRF 之運作亦採成員國方式,每年經費與組織內人員數比 ILL 稍高,即 428MFF 與 518 人(1999 年),但因同步輻射與中子射束性能不同,ESRF 每年研究申請案約 1400 件,數量較大,且兩種實驗在樣品環境上的樣品大小差異很大,相關實驗無法同時,甚至不能先後進行,因此即使應用研究題材息息相關,ESRF 與 ILL 在申請案處理上仍各自分開考量。

#### 4. 考察 LLB

在 LLB,計有下列人員參與引導參訪與討論:

Dr. C.H.de Novion, LLB 所長,

Dr. J. Teixeira, LLB 副所長,

Dr. R. Kahn, 所長助理,負責一般技術支援,

Dr. G. Pepy, SANS 科學家,輻防負責人,指定為國際交流負責人,並為與 TRR-II 合作聯絡人,

Dr. P. Gautier-Picard, CILAS 公司中子射束儀器負責人,

Mr. E. Verdeau, 反應器運轉副負責人,

Mr. I. Meden, 反應器運轉員,

Dr. A. Menelle, LLB 反射儀負責人,

Dr. A. Chabre, CEA 研究用反應器部門副主任。

考察主要由所長 Dr. de Novion 接待，所有安排十分正式。依照事先擬就之節目行程表，Dr. de Novion 先介紹 LLB，並隨後聽取我們對 TRR-II 的現況介紹。LLB 係法國政府 CEA 與 CNRS 兩部會，共同出人出錢合作成立的機構，歷史悠久已近 30 年，惟最近因 CNRS 首長更迭，政策改變，造成續約分攤經費之困擾；另一方面，法國凝態物質界有轉向運用同步輻射源（SOLEIL）之提議，經費排擠亦造成不安定。但每年科學研究使用人數有成長趨勢，長期並無問題，LLB 現有 24 組能譜儀，每年申請案約 500 件，約七成來自法國本身。

在與 Dr. de Novion, Dr. Teixeira, 和 Dr. G. Pepy 的會談中，他們皆強調建造新的中子實驗設施，有力的工程支援是成功的重要條件，一些共同需要的服務包括電腦、數據獲取、步進馬達驅動軟體等，某些特別的技術服務則首重在偵測器方面，視所選擇而有不同，另外設計辦公室與實驗室也涉及機械、電子、冷凍、樣品環境等各方面專業的集合，其中機械設計負荷最重，ILL 就尋求外界支援。至於內部使用者與使用計畫，LLB 認為一定要有，不能僅靠著純外部使用者（如 ILL 情形），這或許是國家級政府支持單位應有之考量。使用者申請案之處理與 ILL 相似。實驗科學人才的培育最少需 1-2 年，看法與其他單位一致。

參觀反應器 ORPHEE 亦很正式，在簡報之後，由反應器運轉副負責人 Mr. E. Verdeau 引導進入反應器大廳參觀，進出管制十分嚴格，先以識別證刷進安全門後，再進入雙層氣密們。反應器大廳內部整潔不紊，在反應器水池頂部，剛好見到當時正在進行矽晶植磷照射，各種直徑尺寸的矽晶棒亦在等候之列。池頂的劑量率指示燈有黃和綠兩種，據 Mr. E. Verdeau 說，一般都是在綠燈狀態，黃燈狀態通常是出現在溫水層失效的狀況。

散射儀器之考察因第一日進入 Saclay 院區手續延誤，以及第二日午後必須趕赴機場，縮短行程，而有所打亂，Dr.

G. Pepy 在第二日引導我們參觀了幾個散射儀。基本上可以看出，自行設計、發展甚至製作的很多，以中子偵測器的屏蔽體來說，一共看到三代的成品，Dr. G. Pepy 稱這是經過日積月累的實驗來衡量過偵測器的效能後，由最初較粗糙的屏蔽，逐年改進而成。Dr. G. Pepy 打開其中一個中子偵測器的屏蔽體讓我們觀察，可以看見是以鎘片包圍  $\text{He}^3$  偵測器，整個屏蔽盒由高密度塑膠塊製成，表面襯以  $\text{B}_4\text{C}$  之環氧樹脂板。LLB 準備將幾個中子偵測器的屏蔽體內改用價格較昂貴的加鋰(Lithium)高密度塑膠塊，以減少加馬背景。準直器內部亦襯有  $\text{B}_4\text{C}$  板減少中子散射。觀察三軸儀和粉末散射儀也都見到了包圍第一分光儀的厚重屏蔽，此等屏蔽有中子遮斷裝置深入屏蔽體內，中子遮斷裝置是以  $\text{B}_4\text{C}$  和鉛構成，當進入實驗樣品照射區的柵欄被開啟時，中子遮斷裝置會連鎖的自然啟動，以切斷中子流之引出。由於受到直接中子束照射，第一分光儀屏蔽體通常以厚 50-60cm 重質混凝土構成，重 50-60 噸，在面對射束的方向上更厚達 80cm。通常屏蔽體完工後，在開始引出中子時，即量測屏蔽體外輻射量，有時還得視需要用鉛或鐵做局部補強，因此接近反應器爐體周圍地板荷重能力事先宜提高，最好自  $10\text{t/m}^2$  升至  $14\text{t/m}^2$ 。LLB 的小角度散射儀(SANS)所用的速度選擇器為匈牙利製，最初產品品質不錯，但公司化產品初期有缺點，聽說現在已改善。此產品比德國 Dornier 公司出品者便宜，且自己可作保養維修，有其優點。中子導管若有外加真空室，環境在控制下，玻璃等較無應力龜裂危險，但裝配對準較難，較諸中子導管本身亦作真空維持用各有優劣。

Dr. G. Pepy 特別帶我們進入了他稱為第二層反應器阻絕體(confinement)的區域，這個區域是位在反應器主要阻絕體(main confinement, 30~50cm 厚混凝土)之外，高度在地面以下的一個環繞主要阻絕體的管路間，他強調這個所謂雙層牆(double wall)的區域在反應器嚴重意外事故發生時，系統會將主要阻絕體可能含輻射物質的氣流帶至這裡，然

後再由這個區域抽至煙囪排放。亦即藉由這個區域

做緩衝區，以及因為有位於地面高度底下的天然屏蔽，對緩和放射物質排放的嚴重性有相當大的助益。

Dr. G. Pepy 也談到了導管大廳地面的負重問題，由於在設計之初即以考量到，大量的屏蔽設施可能使得地面下沉，為使中子導管的對準相對於地面的下沉具有可調節的彈性，其導管大廳的地面設計為兩層，底下一層為堅實的地基，上面則是一層由可移動的拋光石塊所構成的地面。

LLB 在科學與技術上均有建樹，相對於 TRR- 欲建立之四組能譜儀，在三軸儀方面就有四套，所內研究群也在磁性，聚合體等方面實力不錯，願意協助 TRR- 作人才培育；除了儀器科學家外，熟悉細節的工程技術人員的訓練也在內。事實上，LLB 已將儀控電子部份標準化，即位置、單一偵測器數據獲取，及多重偵測器數據獲取這三類之軟體與硬體，且透過 CILAS 公司外賣，列如用在韓國 HRPD 上。這些儀器亦可直接向 LLB 洽購。TRR-II 所採購儀具例如中子導管亦可在 LLB 用中子束先行驗收試用。除此以外購買射束時間進行實驗訓練，或參與能譜儀再造工作皆可考慮。射束時間一般收費每天 25KFF，視專用、共用，射束品質可能再增減。合作事宜視合作規模有不同行政手續，小事所內自行決定，大事如一年射束租用才往上陳報，而且科學交流合作訓練較自由，技術合作涉及技術外移，可能必需上報。LLB 指定 Dr. G. Pepy 為後續聯絡人，Dr. Pepy 亦在協助摩洛哥反應器之使用，非常熱心於國際合作。

CILAS 公司原為工業國防用雷射之公司，亦曾在中子束儀器業績良好，但不知何故，TRR-II 專案失去與該公司之連繫，並傳已不經營中子束業務。此次 LLB 之旅，CILAS 公司風聞後主動安排於 LLB 訪問第一日之夜間驅車前往兩小時外之公司現場考察。在那邊看到了他們已製造好的一些 0.5m 至 1.5m 長短不等的中子導管、裝載導管的框罩、鏡管的磨光、鍍膜、膠合和檢驗粗糙度的雷射儀等設備。Dr.

Picard 宣稱他們可以提供整合型的服務，例如美國

ORNL 四條中子導管之製作（含中子遮斷器）；五年前，透過以 GMI（Grenoble Modular Instruments）名義，統包韓國 HRPD（粉末散射儀）相關的儀器（由 LLB 授權的控制儀表和軟體）、屏蔽設施、花岡石地板等的施工和安裝，當時費用約 15MFF。顯然考察所見與傳聞有異，CILAS 公司仍經營中子束業務，除可自行研磨、鍍膜、膠合、對準製作導管以外，應有能力承接系統工程設計製作，此係 TRR-II 計畫可參考之興建伙伴，有必要速與連絡，索取產品技術資料與經費估計，作為執行方案之一參考依據。

## 5. 考察 NIST

在 NIST，計有下列人員參與引導參訪與討論：

Dr. J. Lynn, 研究群負責人，

Dr. C. Han, NIST MSEL 聚合體組與 NIST 資深研究員，

Dr. M. Rowe, NCNR 主任，亦為 TRR- 技術評審委員，

Dr. I. Schroeder, 工程負責人，主要在中子導管等方面，

Dr. W. Wu, NIST MSEL 聚合體組研究群負責人，

Dr. Derek Ho, 儀器科學家，

Dr. P. Brandt, 工程負責人，主要在能譜儀等方面，

等等。

此行主要係與 Dr. J. Lynn 先聯絡，Dr. Lynn 為 TRR-II 與 NIST NCNR 人員訓練合約聯絡人。然 Dr. C. Han 新獲任命為 TRR-II 中子應用評審委員與中子應用研究中心籌備委員，故亦熱心接待安排。NIST 與 TRR-II 來往關係密切，近期才與 TRR-II 簽約協助人員訓練工作，故此行主要針對幾個實驗進

行一般性之瞭解以及為明年 TRR-II 派人赴 NIST 接受訓練進行溝通，以往參訪同仁已有之報導將不再重覆。

在與 Dr. Ivan Schroeder 的談話中了解到，NIST 原欲在 2000 年進行反應器冷卻水塔、冷中子源與靠近爐內的中子導管更新案，因多種因素展延至明年三、四月間進行，真正時間仍有許多不正確定性。Ivan Schroeder 建議 TRR-II 應趁機參與工作、實習，學取經驗，但須注意時間點之配合（此再是一例，需要較彈性之出國公差預算編列與執行辦法），且此項實習為期約一個月，為技術員性質之工作，非研究人員性質。若時機不當，無法參與幫忙，常常會給人無事可做，只是影印文件藍圖回家的印象。至於建築工程與導管能譜儀界面問題之考察，NIST 工程部門或可協助，但一、二天足夠了，而其中有使用者需要的部份，則宜尋求其他部門協助，一般也只幾天即可。

Dr. Ivan Schroeder 談到中子導管是否需要獨立地基之問題，雖然很多地方沒有，但 Dr. Ivan Schroeder 認為要，其著眼點不在中子光學，也不在振動隔離，而是於因地基本身或因負載導致下沉不均所引起之對準麻煩，特別是完工後重重屏蔽阻隔造成對準之不便。屏蔽改善移動常是造成地基下沉不均原因之一。獨立導管地基可隔離之。當然若有方便的對準設計，就不一定要獨立地基了。這一些敘述和在 LLB 的 Dr. G. Pepy 的說法是一致的。

Dr. Derek Ho 引導我們參觀了幾個實驗設施，和前面幾個國家的中子實驗設施相較，NIST 的「 $\Pi$ 」字型中子導管獨立屏蔽，以及剛進入導管大廳的大面屏蔽牆，都採用比較特殊的設計，他們在混凝土屏蔽塊中填入混有鋼材的石蠟，有點接近一般在製作重質混凝土時，通常要填入鋼珠一樣，因此這樣的屏蔽材應該接近重質混凝土的屏蔽效能。每塊屏蔽塊看起來都接近 80~100cm 長，某些部分的中子導管屏蔽還內襯加硼塑膠板，以加強吸收中子的功能。Derek 向我們介紹了三個小角度散射儀，其中兩個(編號 NG3 和 NG7)的中子偵檢器真空腔體各長 30m，另一個較舊型的則只有 8m。腔體由不鏽鋼內襯碳

化硼板所構成，厚度約 15~20cm。同樣的，為調節所需的中子束發散量，NG3 和 NG7 在接近照射樣品的位置，中子導管被設計成可以由電腦來控制從主中子線上加入或移走，可移動的部分有八節，每節長 1.5m。

參觀 NIST MSEL 之聚合體組之中子應用專題，花了不少時間。雖然並不靠產業界經費維持，但研究成果在產業界的價值仍要現出來，吳文立博士介紹了一個這樣的專題：“Characterization of Porous Low-K Interlayer Dielectric Materials”此專題使用 SANS 探討新開發，具內部空洞之低 K 值界面層介電材料，低 K 值介電材料係下一代積體電路朝次微米發展之關鍵，產生奈米級內部空洞來降低 K 值是一條路徑，SANS 協同其他方法是決定此類空洞材料的有效方法，非常有助於此新材料之開發。另外 SANS 等被用來量測光刻術於次微米下之圖案尺寸。這一類之專題對於中子束之推廣應用十分有幫助。

### 三、心得

#### A. 中子束散射儀器：中子導管與能譜儀

##### 1. 強力自主之工程支援之必要

中子導管與能譜儀之興建以及後續之發展均必需要工程專業人力之參與支援，即使隸屬於大學之 FRM-II 亦可見到原來執行工程設計的人員在現場組裝並克服各種工程問題（並未隨核反應器發包他人），其他 ILL、LLB、NIST 等單位負責人則特別安排時段與其工程部門負責人晤談。他們皆強調這係成功之重要關鍵。因為中子束應用之多樣性，各單位均持續地增添或更新儀器性能來滿足研發需要，自主累積之經驗因而更加重要。必要之工程支援當中，則因中子束儀器特性，以機械設計最重要，其他偵測器與數據擷取系統，則較可能依賴外界成品。TRR-II 有核能研究所為後盾，則應以 LLB 與 ILL 為例，亦成立偵測器與數據擷取等電子工程技术後援，充份發揮核能專業，提昇整體研發競爭優勢。

##### 2. 並不只是蓋起來就好了，最佳化設計之必要

對於第一次的人來說，這是高標準的要求，但是世界上中子源為數不多，而每個中子均彌足珍貴，因此所考察的每個設施都花了最多的精力和時間在設計之最佳化上，讓核反應器各用途間均儘可能滿足，各能譜儀性能均儘可能發揮。這有時候可能僅僅是幾何上的小改變即可達成，然而能夠做到如此，則有賴設計建造期中各方捐棄本位，迎接挑戰。知識成長，經驗累積，競爭力提昇也是在此過程中產生的。管理階層之態度亦應存有即使時程延誤，即使犯錯，也要做好的心理準備。

##### 3. 保持對各中子束研究設施之交流聯繫

此次考察中子束研究設施，各單位似仍對 TRR- 專案十分陌生，更不知中子束之規劃，雖均表達願助一臂之力，

但未曾有來往機會。另外，譬如，此行獲知 ILL 衍生新成立 Xenocs 公司，Cilas 公司仍在生產供應各設施中子導管等，對於 TRR-II 專案有必要爭取寬列年考察名額，參加重要會議及訪問各交流單位之機會，以期獲得及時資訊與各種可能協助。

#### 4. 新科技的採用列入設計優先考慮

在 ILL 實驗大廳四周佈有無線傳輸中繼台，對於能譜儀實驗之遙控或數據解析上，無線傳輸減少或免除佈線的問題。而在用戶服務上，其網路已能接受使用者專題計畫之申辦業務。TRR-II 專案於興建規劃中，可多加入這些考慮。

### B. 建築與屏蔽

#### 1. 導管隧道四周空間預留彈性

考量中子束管塞，中子束導管與速度選擇器等裝卸、對準、維修時，人員機件等進出與操作之需要，各國外設施均儘量預留空間，屏蔽牆盡量設計為可移動或可拆卸式，甚至隧道頂亦可掀開。屏蔽設計會因粒子長程遷移計算的準確性問題、中子導管對準的誤差問題、屏蔽材質的均勻性問題，以及整個實驗場地的佈置問題，而必須保留屏蔽設置上的彈性，因此隨後增添通常有其必要。特別是當應用需求不確定與多變時。這些情形惟有以彈性作法預留空間，較可能滿足設施運轉彈性與減低人員劑量的雙重需求。

#### 2. 為將來任何可能應用預留機會

FRM-II 之反應器大廳及導管大廳牆壁上已預留一些活動式開口，為將來中子束繼續延伸留下機會。長遠來看，FRM-II 已為其日後之持續發展成果以及競爭力建立優勢，值得 TRR-II 借鏡。

#### 3. 進出門禁管制規定，一絲不苟，且網路化電子化

FRM-II 工地現場參觀中，陪同警衛亦步亦趨，

Saclay 院區進出人員未有陪同就不能換證，一切手續非常徹底。刷磁卡，立時證件製作，或於事件核准後於網上通告宣佈，憑磁卡於效期內行動等作法，核研所尚未能採行。以後專案用戶進出核研所與 TRR-II 區域之門禁與接待服務，宜早有想法，納入興建規劃工作之中。

#### 4. 高密度屏蔽混凝土技術之掌握，克服空間限制之一途徑

各單位有用至密度  $6 \text{ g/cm}^3$  或更高者，普遍皆用  $5 \text{ g/cm}^3$ ，雖然較貴，但克服空間限制，或留出較大空間，為符合實驗需要之一途徑。此項技術之掌握或備用有其必要。

#### 5. 以經驗、實測和修補增添策略，補屏蔽計算有不確定性之不足

從人員劑量的觀點來看，應預留添加或更動設計所需的空間，注意設計足夠的負重懸掛或支撐裝置。特別是爐體四周因第一分光儀四周屏蔽重，空間擠，而往往在運轉後需增加高密度屏蔽（鐵、鉛等），以 Orphee 的經驗，將樓板載重提昇至  $15 \text{ t/m}^2$  較理想。大面屏蔽最好以可拆卸式的屏蔽塊堆疊為佳，在堆疊界面上盡量預留鎖孔，可用以鎖上未來需外加的屏蔽塊，以加強屏蔽或防止堆疊界面的中子潺流效應。另外，從中子偵檢器的屏蔽觀點來看，減低中子偵測的背景與偵測器的特性息息相關，往往由最初的設計仍需經由實測和調整，才能找出最佳化的背景屏蔽結果。

#### 6. 核能科技設施藝術生活化

德國 FRM-II 所有各項建造經費中約編列百分之一之藝術化費用，因此，譬如反應器安全圍籬，每隔一段距離，將設置藝術燈飾，藝術化之「工程」分開獨立發包，期盼位於校園中之管制區域或能與區外融合。如此再參照台中中山醫院正子攝影室與病房等之五星級旅館之室內設計(例

如，鉛玻璃上裝飾彩繪玻璃國畫等)，顯見適當經費與心力投注於藝術生活化，以改變核能科技設施之古板印

象，值得考慮。

## 7. 儀控組件標準化

各能譜儀均應有共通儀具組件，例如步進馬達之位置或角度控制，中子偵測器計數器，位感偵測器（含飛行時間）之數據擷取系統等，故 FRM-II、ILL、LLB 等均欲自行發展並標準化，除求取精度和速度以外，並可在維修備件與軟體發展等方面獲得便利。為了相同目的，其他商場上可獲得之組件，例如旋轉載台、溫度控制、磁場控制等亦設法簡化為少數幾種，減少備件，增加互通性。

### C. 組織、用戶服務與人員交流訓練

1. 各設施管理運作性質各異，與用戶關係不盡相同，但學術界仍為主體。

① FRM-II 為德國巴利伐亞省所支持，慕尼黑大學興建的設施，以後將由大學管理，並於開闢自由校園內劃出管制區。興建期間之主力來自原 FRM 反應器及物理系各相關教授研究群（例如 E21、E13 等），事實上主要負責的教授均請假以便投入興建。至於使用方面，大學人手不足，除德國國內其他單位自籌經費人力投入專屬設施外，中子散射能譜儀散射儀之建造甚至採用 FRM-II 提供人力經費，由其他大學教授負責承包興建工作，以及完工後之維護運轉和對他人的服務等等，換取的是部份專屬射束使用時間之權利。此種模式值得借鏡。

② ILL 則為歐洲聯合設施，共 9 個夥伴國，其中德、法、英出資最多，擁有（經營）此設施，因此服務對象以成員國為主，屬用戶服務型組織，內部研究皆與外界合作為原則。從網頁等各種資訊齊全，進入大門之接待，招待所住宿、餐廳、儀器科學家陣容等，皆可感受到對

用戶的服務品質極佳。每年服務使用者約 1,400 人，每天平均約 60 個使用者在場。若再加上 ESRF 來去更眾

多的使用者，則人數更多，這些人以學生、博士後研究、教授最多。ILL 的反應器由法國 CEA 支援運轉。

- ③ LLB 為位於法國 CEASaclay 院區內之中子散射設施，由 CEA 與 CNRS 共同出錢和出人來運作，服務法國使用者，有內部使用者，最近亦加入歐盟提供歐洲其他國家使用。LLB 之任務亦包括建造和維護散射儀器，並同時訓練學生，供論文研究。事實上 LLB 研究所所長為 CEA 所派，副所長為 CNRS 所派，如此合作已將 30 年，或許可作為 TRR-II 中子散射使用推廣之參考。
- ④ NIST 屬於商業部，但中子設施（NCNR）是國家設施，且是美國唯一擁有國際級冷中子源的設施。NCNR 隸屬於 NIST 的材料科學與工程實驗室，該實驗室下之聚合體組有數個長期使用 NCNR 的計畫，其他 NIST 部門亦然。美國國家科學基金會 NSF 亦在 NCNR 內成立高解析度中子散射中心（CHRNS），投資建立了一套三組能譜儀，約四成儀器時間讓外人使用。所謂參與研究群（PRT）的方式吸引了 Exxon Mobil, Univ of Minnesota, Texaco R&D 等共同合作於特定儀器之建造和使用服務。

各單位運作略有不同，但學校教授、博士後研究、博士生論文寫作為主要使用者，是其共通特點，因此，大學研究主管機關之介入（如 CNRS、NSF 等）為必然的現象。

## 2. 人員培訓要能長期在國外單位工作

所有訪問的各單位均樂意接受 TRR-II 派遣人員學習，吸取經驗，甚至可提供部份經費補助，但全體一致要求長期停留（一年或更長），一則對該單位亦有所幫助，一則認為足夠長的時間才能學到足夠的技能學識，對 TRR-II 也才有實質幫助。如何突破 TRR-II 人員培訓在

經費、名額、與人選所限制的現況，有待突破窠臼的想法和做法出現。FRM-II 在 2001 年是安裝中子儀器的

時間，時機對人才培育最有利。ILL 有 Millenium Program, 明年起每年約更新再造 4-5 台儀器，每年都是派人去學習的好時機。

#### 四、建議

(1) 定期訪問國外相關單位，推廣交流

TRR-II 專案技術管理階層應定期訪問國外相關單位，建立關係，尋求交流合作，據以擬定計畫執行方案，作為推動工作之依據。

(2) 及早網羅機械設計與施工人才進入設計群的核心

中子束實驗設施的興建，除了重視中子光學與中子散射材料的設計外，中子量測儀器、軟體和必要的自動控制系統也都是重點。但綜觀各國中子實驗設施負責人的建言，咸認最終成功的關鍵，卻在於有良好的機械設計，精密的施工與調整設備，和熟練的技術人員。因此，應該及早網羅機械設計與施工人才進入設計群的核心，並給予中子設施興建必要的訓練。

(3) 增加與中子設施系統工程廠商之接觸機會

中子束設計人員應廣增與一些具有建造中子設施、能提供相關儀器、和對中子設施所需各項材料製造有經驗與能力的工程公司接觸的機會，一方面比較容易取得相關資訊，一方面可以掌握實際的施工技術。這樣的公司又以能作整體系統工程設計者為最佳。

(4) 預留人員與偵檢器屏蔽調整的空間與彈性

體認設計的最佳化不可能於設計之初即可達成，因此設計時預留調整的空間與彈性是必須的。對於各項散射儀的人員屏蔽和中子偵測的背景屏蔽，宜盡量採用活動式的設計，預留可以增補和修飾的空間。

(5) 及早收集相關的核儀資訊

宜及早收集各項中子偵測設備的相關資訊，如各種中子偵檢器、相關的核儀與數據擷取和處理軟體，尤

其是對某些已咸認是標準化的儀器，更應盡量羅列與收集相關資料。

(6) 加強科學家和工程人員訓練與年輕化

對於儀器科學家和工程施工人員的訓練必須同時並進，及早訂出有彈性的人員網羅與團隊移地訓練辦法，是能深入技術核心的最佳途徑。而為了配合技術的累積與長久的營運相關問題之解決，核心技術人員的年輕化也是要件之一。

## 五、附錄

本節附錄包括由各個單位取得的文件資料，彙整如下：

### 1. FRM-II

- A. 慕尼黑大學主辦的 IGORR8 國際會議海報(2001 年 4 月)。
- B. 慕尼黑大學主辦的 ICNS 國際會議海報(2001 年 9 月)。

### 2. ILL

- A. ILL 專題申請案評審委員會分組與關鍵字系統。
- B. 2000 年 10 月向 ILL 申請射束時間與 ILL 核准射束時間依國家別之統計分佈。
- C. 曾經向 ILL 提出申請射束時間之台灣科學家名單。
- D. ILL 衍生公司 Xenocs 的產品介紹與聯絡資訊。

### 3. LLB

- A. LLB 組織與人員。
- B. LLB 中子偵測相關電子產品型錄與聯絡資料。
- C. 赴 LLB 參與中子散射實驗之申請書。

### 4. NIST

- A. NIST 材料科學與工程實驗室聚合體(Polymer)部門組織圖。
- B. Characterization of Porous Low-k Interlayer Dielectric Materials。

## C. Photolithography.

## 六、收集資料 (送 TRR-II 專案保管)

1. ILL News for reactor users, No.31, June 1999.
2. ILL News for reactor users, No.33, June 2000.
3. Guide to Neutron Research Facilities at the ILL, the Yellow Book, Dec 1997.
4. Understanding Structure, Science at ILL and ESRF, by EPSRC.
5. Institute Laue-Langevin.
6. Exploring Matter with Neutrons, Highlights in Research at the ILL.
7. A Computing Guide for Small-Angle Scattering Experiments.
8. RESTRAX version 4.1.
9. ORPHEE.
10. Laboratoire Leon Brillouin.
11. Equipments Experimentaux, LLB.
12. Scientific Report 1997/1998, LLB.
13. NCNR 1999, NIST.
14. NG3 and NG7 30-Meter SANS Instruments Data Acquisition Manual
15. ESRF.
16. ESRF Newsletter, October 2000.
17. Seeing Things in a Different Light, ESRF.
18. ESRF Highlights 1999.