

出國報告（出國類別：實習）

赴日 KEK 實習劑量量測評估與輻射安全管制技術

服務機關：核能研究所

姓名職稱：朱健豪

派赴國家：日本

出國期間：99年9月24日~99年10月15日

報告日期：99年11月15日

摘 要

順應國內醫學單位引進質子治療系統之趨勢，需建構質子治療設施興建、運轉之審查與管制技術能力，此設施在運轉過程中會產生快中子而造成較大劑量，故在輻射屏蔽設計與運轉管制上須特別考量。

此次實習主要前往日本高能加速器研究機構(High Energy Accelerator Research Organization, KEK)研習，及安排行程前往日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)參訪 J-PARC 設備；由於 KEK 與 JAEA 共同成立 J-PARC 計畫 (Japan Proton Accelerator Research Complex)，可藉由實際參與加速器設施運轉之實務研習，並修習質子加速器有關之屏蔽設計、輻射防護、劑量量測之技術，將可協助提升質子治療設施審查與管制技術能力，並能了解國際發展現況與方向，加強放射治療產業發展之基礎能力。

本次藉由實習期間另外前往也是位於日本筑波的產業技術總合研究院(National institute of advanced industrial science and technology, AIST)計測標準研究部門(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)，與量子放射科研究人員討論石墨卡計研究、低能量 X 射線比對結果、貝他組織吸收劑量比對內容時程及直線加速器吸收劑量實驗室建置經驗等。藉由雙方學術交流，精進輻射劑量標準量測技術，並以國際合作提昇亞太計量標準量測能力，對於未來我國輻射劑量標準與世界同步有極大助益。

目 次

摘 要

(頁碼)

一、目 的	1
二、過 程	2
(一)本次公差行程	2
(二)實習過程	2
三、心 得	19
四、建 議 事 項	22
五、攜 回 資 料	23
六、參 考 資 料	23

一、目的

本次公差之目的有：

- (一) 收集國際上最新的粒子遷移程式應用與發展技術資訊，應用於質子治療屏蔽設計，作為本所未來發展蒙地卡羅法評估技術的參考。
- (二) 吸收質子治療設備建立所需考量到屏蔽設計之相關經驗，並參與質子治療設備之安全維護運轉，作為國內主管機關未來因應國內需求之參考。
- (三) 建立質子治療設備屏蔽設計評估能力，與國際專家學者技術交流。
- (四) 針對中子量測能譜技術進行技術交流，冀望未來以量測結果驗證評估計算之結果。
- (五) 收集日本研發石墨卡計的實務經驗，討論目前國內研製石墨卡計的困難及解決方案。

二、過 程

(一)本次公差行程

本次公差之行程與主要工作內容如下：

日 期	行 程	工 作 內 容
9 月 24 日 (五)	桃園至日本筑波	去程
9 月 25 日 (六)至 10 月 14 日 (四)	日本筑波	研習劑量量測評估與輻射安全管制技術
10 月 15 日 (五)	日本筑波至桃園	回程

(二)實習過程

本次出差主要前往位於日本茨城縣筑波市的高能加速器研究機構(KEK)應用研究實驗室(Applied Research laboratory)的放射科學中心(Radiation Science Center)，與 Dr. Hiroshi Iwase 學習蒙地卡羅程式 PHITS code 的模擬運算。KEK 是全球領先的加速器研究機構，採用粒子加速器研究物質的基本特性，該機構 1997 年透過日本各相關的核能研究組織重整建立而成，包括東京大學原子核研究所(1955 年建立)、高能物理國家實驗室(National Laboratory for High Energy Physics, 1988 年成立)及東京大學的介子科學實驗室(Meson Science Laboratory)；KEK 原隸屬於日本文部省的國家實驗室，於 2004 年法人化後，隸屬於日本大學共同利用機關法人，為高能物理學與加速器科學的綜合研究機構；另外，KEK 在茨城縣的東海村與日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)共同合作使用高強度質子加速器設施(J-PARC 計畫)，每天有多位 KEK 員工往返 JAEA 及 KEK 之間，目前在筑波及東海兩地的

KEK 員工約 680 員，由於該機構為大學共同利用的機構法人(Inter-University Research Institute Corporation)，其成員包含教授 90 員、準教授 103 員、講師 24 員、助教 113 員及技術員 156 員等，全年度總預算約 332 億 6 千 8 百萬日幣(折合台幣約 120 億左右)，主要營運費用佔總經費大部份(約 295 億 7 千 1 百萬日幣(折合台幣約 107 億左右))，日本本國籍研究人員申請該機構全年度為 6655 人次，外國機構參與該機構全年度為 944 人次，其中包括中國大陸 212 人次、韓國 123 人次及台灣 37 人次等。本次實習地區主要位於筑波市的大穗園區，佔地 1531 萬平方米，另還有東海園區、竹園園區及吾妻園區等。

1. PHITS 程式運算實習

本次前往實習主要講師為 Dr. Hiroshi IWASE 為 PHITS(Particle and Heavy-Ion Transport code System)程式的主要作者之一，其隸屬於 KEK 的放射科學中心小組，主要負責程式運算及輻射防護工作，該小組成員主要負責加速器的輻射防護量測與評估，與本所保健物理組工作性質接近，惟其粒子能量屬高能物理範圍，其小組負責人為 Professor Syuichi Ban。此次研習採用的程式為 PHITS 2.23 的 UNIX 版本，與先前 Dr. Koji Niita 在本所上課的 PHITS 2.08 PC 版相似，可直接採用相同的輸入檔進行運算，PHITS 程式是由 RIST(Research Organization for Information Science and Technology)、Tohoku University 和 JAEA 共同合作發展，將包含重粒子遷移的 NMTC/JAM 第 2 版昇級而成，在程式中依據模擬的物理過程分為兩個部份，包括粒子遷移過程(transport process)及碰撞過程(collision process)，在粒子遷移過程，PHITS 程式可模擬帶電粒子與物質中的電子作用改變方向下在磁場及重力場的運行軌跡；另外，在碰撞過程，考慮粒子衰變過程，以粒子遷移的平均自由徑(mean free path)決定整個反應截面及粒子的生命週期，判斷下一個碰撞點位置。對於低能量範圍：PHITS 採用了 Evaluated Nuclear Data

Libraries 如 ENDF-B/VI(McLane et al., 1996)和 JENDL-3.3 library(Shibata et al.,2002)達到 20 MeV 和 LA150 達到 150 MeV(Chadwick et al., 1999) , 另外, PHITS 在光子與電子遷移部份, 採用了在 1 GeV 以下與 MCNP4C code(ITS 3.0 version)相同的 Evaluated Nuclear Data(Briesmeister et al., 1997), 對高能量範圍合併兩個新的 models: 包括 JAM(Nara et al., 2000) 及 JQMD(Niita et al., 1995), 模擬粒子誘發反應可達 200 GeV, 及核子-核子(nucleus-nucleus) 反應。故 PHITS 整體架構包含三個重要元素(PHITS= MCNP+JAM+JQMD)如: (1)JAM: 強子-核子(hadron-nucleus)反應能量可到 200 GeV; 在 PHITS 計算中, 高能 hadron-nucleus 反應的截面可藉由 hadronic cascade model(Jet AA Microscopic Transport Model, JAM)計算而得, 在 JAM 的 model 中藉著使用 resonance model 和 string model 將每一個 hadron-hadron 截面參數化, 重建適當的實驗數據, (2)JQMD: nucleus-nucleus 碰撞可達數個 GeV/nucleon, (3)MCNP: 重離子遷移包括低能中子和輕子(leptons), 在粒子遷移模擬中, 採用 SPAR code 計算帶電粒子和重粒子的 stopping power, 故 PHITS 可以建立於與 MCNP4C code 相同的 nuclear 資料庫中模擬低能中子、光子及電子遷移。

PHITS code 可運算的粒子包括: proton(0~200 GeV)、neutron(0~200 GeV)、Meson(10^{-5} eV~200 GeV)、Barion(0~200 GeV)、nucleus(0~100 GeV/u)、photon(1 keV~1 GeV)和 electron(1 keV~1 GeV)等, 如圖 1 所示。

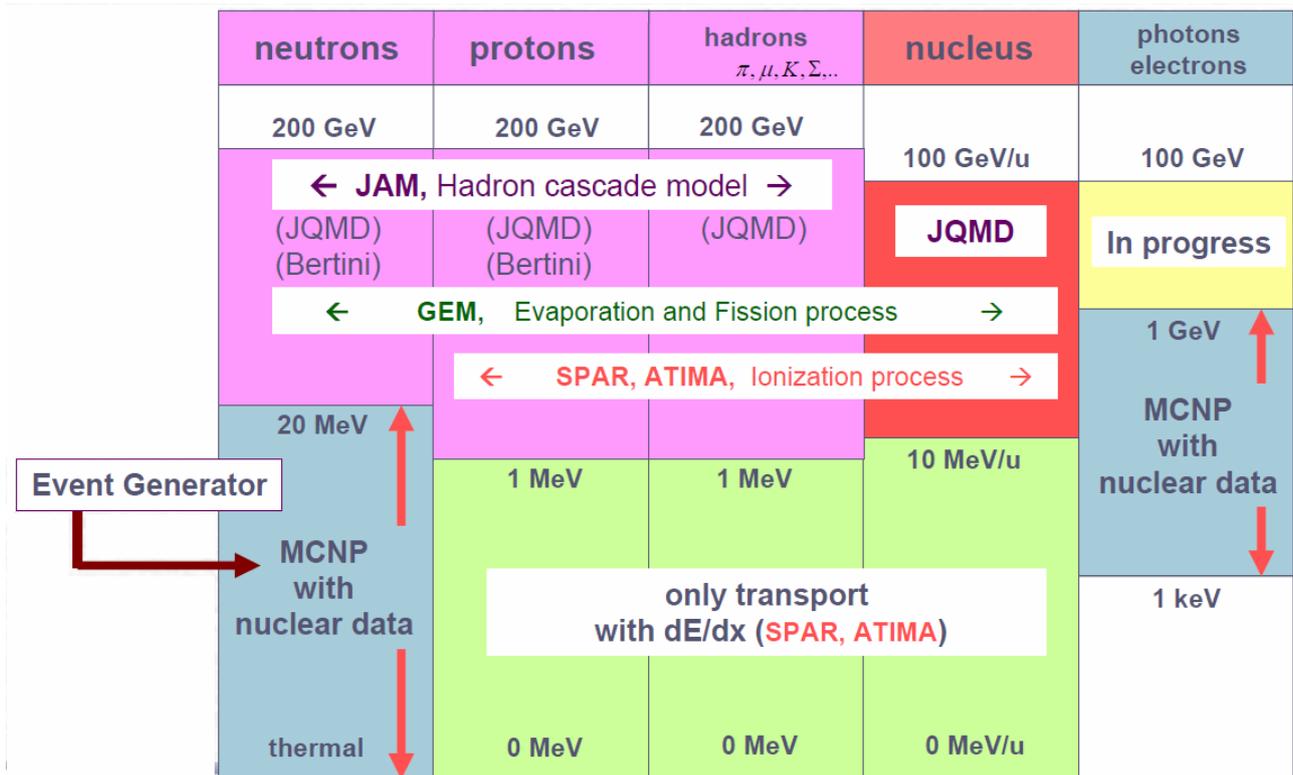


圖 1、Map of Models, transport particles and energies in PHITS

2. PHITS 程式問題研討

(1)由於在輻射防護設計方面，屏蔽可能是主要的成本考量因素之一，且須顧及工作人員及民眾的輻射防護安全，故各政府的管制單位皆擬定相關輻射防護法規，保障民眾安全。而必須評估屏蔽防護後民眾可能接受的有效劑量，其值必須符合法規限值之要求；在國際上如 NCRP 144 號及 51 號報告中的質子治療設備中的屏蔽要求，其外圍屏蔽牆量測的等效劑量率限值規定必需小於 $20\mu\text{Sv/h}$ 以下。屏蔽設計除參考過去經驗外，採用蒙地卡羅法模擬是目前主要的方法之一。目前 PHITS 程式在日本主要應用在核分裂中子源(spallation neutron source)、重粒子治療(heavy ion therapy)及宇宙射線(space radiation)等。新版的 PHITS 程式增加了 EGS5(Hirayama et al.,2005)在光子與電子粒子遷移部份，及 JQMD 在 soft heavy ion collisions 部份，並使用 tabulated cross sections(Sihver and Mancusi,2008)改善劑量與通量計

算。

(2)在 PHITS 程式中，可採用劑量轉換因子(dose conversion factor, DCF)將能譜轉換成等效劑量，惟 DCF 指有針對於光子及中子部份(沒有質子的劑量轉換因子)，在評估劑量時主要的 Tally 有兩個：[T-Track]和[T-Cross]兩種，在[T-Track] Tally 中，可採用一加乘因子(multiplier)直接將能譜計算轉換至等效劑量，與 MCNP 作法相似，如中子的劑量轉換因子為 $K=-102$ ，光子的劑量轉換因子為 $K=114$ 等，其單位為 $(\mu\text{Sv/h})/(\text{n/sec/cm}^2)$ ，其相關劑量轉換因子可參考 Y. Sakamoto 與 Y. Yamaguchi 合著的 Dose Conversion Coefficients in the Shielding design calculation for high energy proton accelerator facilities(JAERI-Tech 2001-042，已自日本攜回)，但是如果採用[T-Cross] Tally 方式計算，則需採用幾何條件設成非常薄的 Foil，即可以此 Tally 運算。對於過去常用 MCNP 程式中採用的 DCF 值，由於 PHITS 程式中的 DCF 為 group-wise DCF，並非 MCNP 程式中 DE/DF function 的 point-wise DCF，目前程式暫時不考慮改變成 point-wise DCF，且差異不大。在實際程式運算時其步驟為：(1)在輻射屏蔽後面必須要設定偵檢器，如[T-track]，(2) 計算中子通率 $F=\text{neutron fluence } (\#/cm^2)$ ，由 $F \times \text{DFC}=(\mu\text{Sv/h})/(\text{sec})$ 可得到 $\mu\text{Sv} \times 1/3600=0.000278\mu\text{Sv}$ ，(3)設定劑量轉換因子的參數為 $(0.000278 -102)$ ，其中-102 為在 PHITS 程式中採用中子劑量轉換因子的參數。

(3) 由於蒙地卡羅的運算效率與電腦速度有關，在 KEK 模擬程式是採用 Linux 在工作站運算，而本所先前取得的 Windows 版本應可昇級為 Linux 系統版本，目前雖然 Linux 版本是 free 的，但是沒有使用手冊，其安裝程式不難，但電腦在平行運算的 Cluster system 設定需要測試，故未來如果要在核研所 Linux 系統執行平行運算，可能需要更多時間針對電腦的設定問題進行討論，目前 PHITS code 中，Linux 系統中的 mpi1 是可以執行的(但 mpi2

不確定)，所以先從日本取得 mpif77 的 compiler，暫時以 Windows 版本藉著 Cygwin 虛擬作業環境下在本所的 Cluster 系統運算，可行後再執行 Linux 系統的安裝與測試即可。

(4)目前 PHITS 的 Tally 在幾何條件的選擇上，只有[r-z]、[reg]和[xyz]三種選擇，如果是針對 sphere geometry 就必須採用幾何條件的方式以 cell 畫圖執行，對於[t-cross]的 geometry tally，如果使用的圓柱形(r-z tally)超過三個平面時則不建議採用，但如果採用[t-track]的 tally 方式即可，故採用 tally 的方式選擇參數時應謹慎考量。

(5)ANGEL 繪圖程式配合 PHITS 運算結果可輕易的畫出自己需要的圖形，由於採用 PHITS 程式運算模擬其結果形成一系列的數據，透過其他繪圖軟體則必須重新輸入或剪輯相關數據資料，過程較為繁複且容易出錯，而 windows 版本的 ANGEL 不如 UNIX 版本彈性，目前已攜回 ANGEL 4.31 版本使用手冊，透過 ANGEL 的運算可輕易得到我們想要的影像結果；另外，也可透過 PHITS 的 timer 功能得到運算過程的動態呈現，對於運算結果的展現有明顯的幫助。

(6)PHITS 程式運算劑量 deposit 的方法採用[T-Heat]的 Tally 模式，也適用於低能中子、光子及電子，mesh 的選項有三種包括 reg, r-z 及 xyz mesh，在實際的質子作用案例中，射源部份可將半徑 r 設定為 0，假設是 pencil 射源，而質子的作用過程則採用半徑小的圓柱體將射束路徑包起來以觀察其 Bragg peak 現象；另外，如採用 r-z mesh，則必須考量在質子作用範圍內其設定的 resolution 是否足夠，也就是 nz 的數量是不是夠大，最好在 0.1 cm 以內才可有效觀察到 Bragg peak 的現象。

(7)實習過程中運算多種案例：吸收劑量、有效劑量、中子能譜、中子通率、不同參數選擇重點、二維及三維幾何圖形呈現方式、ANGEL 程式畫圖、100 公分的混凝土下以 400 MeV

C-12 撞擊 30 cm 水後的中子能譜變化情形、160 MeV 質子在銅物質的核反應(Med. Phys. 26(12) 2597-2601)及 160 MeV 質子在 CH₂ 核反應和 GEANT3、GEANT4 比較(Med. Phys. 30 (7) 1926-1931)等。

(8)由於本所先前 windows 版本的 PHITS 操作手冊為 2.08 版本，而在 KEK 運算的版本為 UNIX 2.25 版本，兩者差異為在 windows 版中的 4.5 節運用 CG 的幾何設定 Body 的定義目前仍不建議運作及 Region 的功能不能運作；另外，在[T-Heat] tally 中的 output 參數中，有關 heat、simple 及 all 是計算劑量的參數，而 deposit-heat、deposit-simple 及 deposit-all 則可運算偵檢器的 response function。

(9)由於 PHITS 程式主要設定為粒子遷移的運算程式(包括劑量評估及生物效應)，在功能設定上擁有磁場的條件及 LET 的運算功能，對於標準實驗室的游離腔電場部份並不提供相關的評估條件；有關運算結果，除了以 2 維及 3 維的方式檢查幾何條件，PHITS 程式還提供動態呈現的功能，可以將運算結果依不同時間粒子作用情形以動態呈現，在 XYZ mesh 後增加 t-type 的指令即可，其中 tmin 和 tmax 單位為 nsec，如下所示：

```
[t-gshow]
  mesh=xyz
  x-type=2
    nx=100
    xmin=-10
    xmax=10
  y-type=2
    ny=1
    ymin=-1
    ymax=1
  z-type=2
    nz=100
    zmin=-5
    zmax=29
  axis=xz
  file=gshow.dat
  output=6
  epsout=1
  angel = nofr noms notl
t-type=2
  nt=100
  tmin=0
  tmax=3
```

3. AIST 技術標準研究部門技術問題研討

AIST 為一獨立行政法人機構，共有九個所區，本次公差所拜訪的計測標準研究部門為 NMIJ/AIST 量子放射科(Quantum Radiation Division)的劑量標準研究室(Dosimetry section)，其位址與 KEK 同在筑波地區，透過此次 KEK 研習過程，前往 AIST 進行國家標準實驗室技術交流。研究範疇則涵蓋 6 大領域，標準與量測技術(投入人力 15%)、奈米材料與製造(投入人力 17%)、環境與能源(投入人力 24%)、資訊與電子技術(投入人力 16%)、生命科學與技術(投入人力 18%)、地質調查與地球科學暨海洋科學與技術(投入人力 10%)，日本產業技術總合研究所 2008 年的年度經費主要由政府補助，部份來自委託研究基金及其他雜項補助等。AIST 共包括 21 個研究部門(Research Institute)、29 個研究中心(Research Center)、與 6 個創始研究實驗室(Research Initiative)、3 個研究基礎核心設施(Research core)及 2 個智慧型研究基礎中心(Center for intellectual infrastructure)。

此次訪問 AIST 主要著重點在於：(1)討論石墨卡計研究問題，(2)討論執行 APMP RI(I)-S6

貝他射線吸收劑量國際比對活動，(3)討論 APMP RI(I)-K2 低能量 X 射線比對內容及(4)參觀其新建的直線加速器高劑量照射系統。日本的石墨卡計為恆溫模式(constant temperature)系統，與我們實驗室未來要設計的石墨卡計的 quasi-adiabatic system 不同，溫度的偵測採用微小的熱敏溫度計(約 0.33 mm 直徑)連接到惠斯敦電橋(Wheatstone bridge)上，熱卡計的溫度維持主要以電壓加熱的方式進行，由輻射吸收的能量則由外在的電量計量測，所以在石墨熱卡計的核心部份所吸收的熱能可以藉由轉換直接獲得由輻射所產生的吸收劑量，所以透過石墨熱卡計評估的吸收劑量可以直接校正由臨床上放射治療所採用的水吸收劑量量測設備。其卡計週邊設備已模組化完成，並自動擷取模式及高壓供應調整其卡計的恆溫模式。其系統如圖 2-4 所示。



圖 2、石墨卡計外接電橋部份

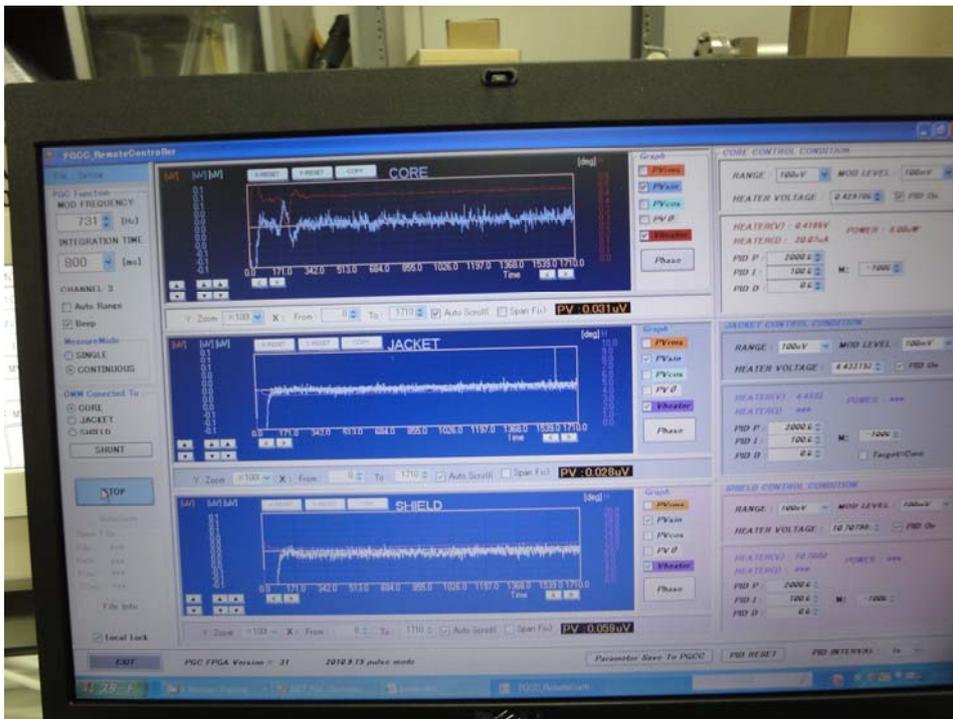


圖 3、石墨卡計程式介面部份



圖 4、石墨卡計模組化系統，包括調整 core(CH1)、jacket(CH2)及 shield(CH3)部份

AIST 製作卡計採用的熱敏溫度計為 NTC THERMISOTRS(TYPE BR11/14/16/23)，此型式為一微小玻璃塗料串珠式熱敏溫度計，玻璃塗料提供完全的密封效果以達到不易彎曲及高

穩定度特性，如圖 5 所示。目前 NTC THERMISTORS 有兩款可提供選擇：ADJACENT 和 OPPOSITE 導線形式，如圖 6 所示，其相關規格可作為日後製作石墨卡計之參考。另外，其溫度校正是將其溫度計送至國家實驗室校正，非自行校正。

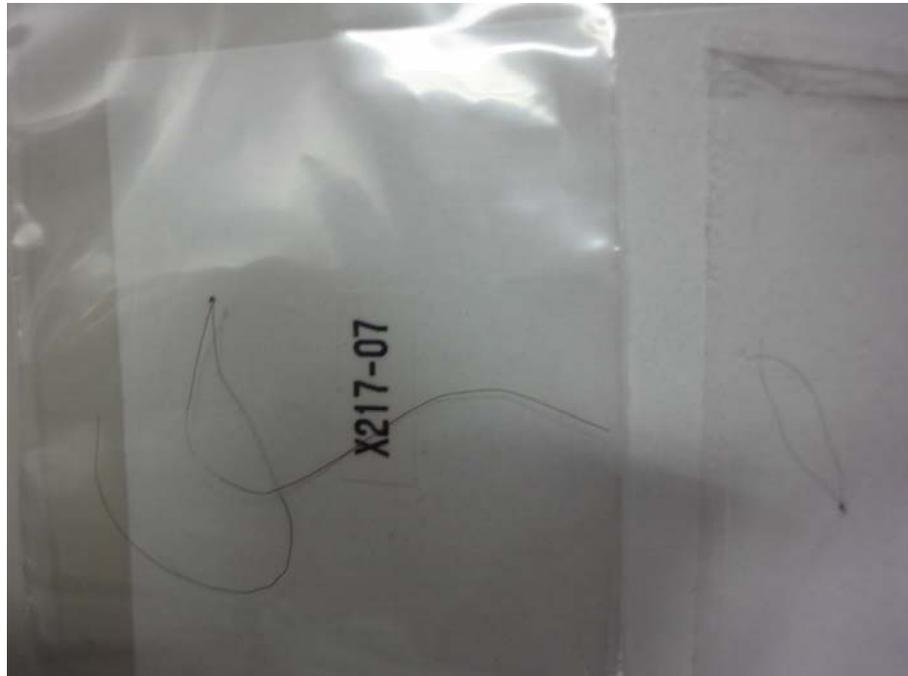


圖 5、日本 AIST 石墨卡計採用的熱敏溫度計(NTC THERMISTORS)

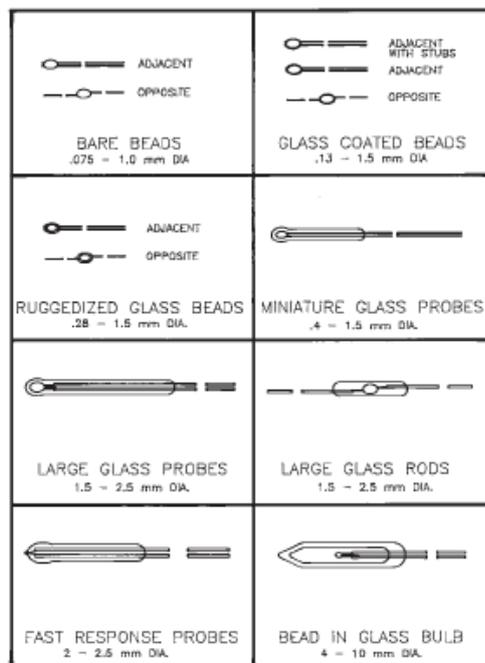


圖 6、NTC THERMISTORS 熱敏溫度計規格

高能直線加速器系統為日本 AIST 新建置的設備，因應醫院需求，日本的二級實驗室都相繼採購直線加速器作為校正設備，我國國家游離輻射標準實驗室建置直線加速器有其必要性，另外國際度量衡局(BIPM)對於高能光子部份也增設關鍵比對項目，在亞太地區已有日本及澳洲建置完成。日本 AIST 採購 ELEKTA 公司擁有 15 MeV 及 6 MeV 光子能量的加速器，該加速器無加裝治療計畫及 Multi-leaf 功能，其設備沿用過去小型加速器空間，故受限空間及輻射防護問題，機頭僅能朝左照及向下照兩個方向，如圖 7 所示。



圖 7、日本 AIST 的高能醫用加速器裝置(圖左為照射室、圖右為控制室)

亞太計量組織(APMP)將於 2011 年開始舉辦 APMP RI(I)-S6 貝他組織吸收劑量國際比對，共有 6 個國家參加，透過此次機會與其實驗室負責人 Dr. Saito 討論比對事務，並協助修改比對議定書，並參觀其貝他標準劑量照射系統。該系統仿倣德國 PTB 國家標準實驗室之系統建置，為使貝他粒子在量測過程不受外界干擾，採用高密度保麗龍材料包封實驗平台外緣(如圖 8 所示)，其照射系統與本所設備相同，均採用 BSS-2 系統，惟該系統溫度濕度偵測裝置校正不易，故另外加裝溫濕度偵測設備，而 BSS-2 系統僅作為照射器用。

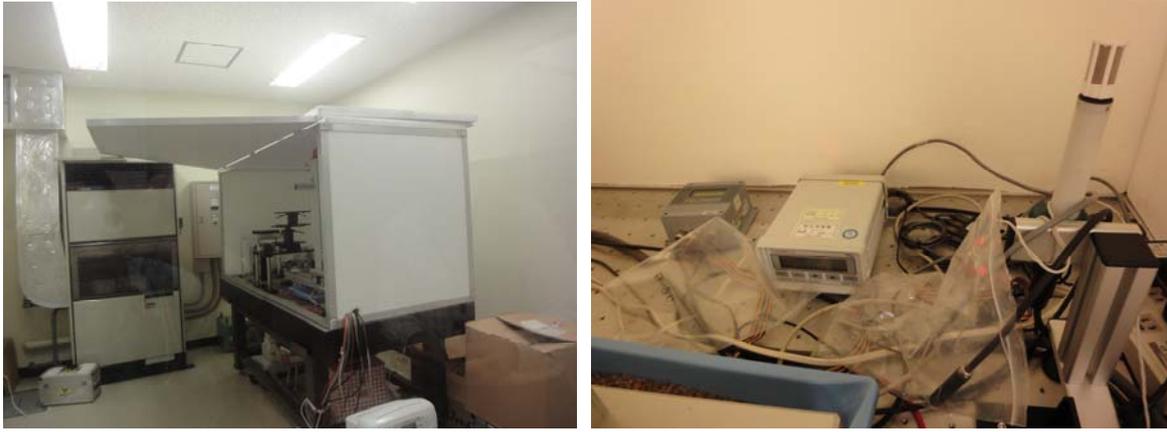


圖 8、日本 AIST 的貝他組織吸收劑量標準系統裝置(圖左為照射室、圖右為溫濕度裝置)

4. 應邀於 KEK Radiation Science Center 演講及與日本 PHITS 小組技術交流

Radiation Science Center 分為輻射及化學小組，分別管理 KEK 的輻射與化學安全，並領導此領域的研究與設計工作，本人有幸應該單位邀請，對其成員作專題演講，由其主管 professor Ban 主持，透過專題演講進行學術交流，針對最近研究主題：Establishment and QA of patient diagnostic dose in Taiwan 進行報告，簡報首頁如圖 9 所示，席間進行許多技術交流與探討，包括自由空氣游離腔的製作，空氣衰減因子的評估、蒙地卡羅計算結果及台灣醫療品保推動的情形等。當然也藉由此機會介紹核研所及保健物理組的核心技術，以及最後花四張投影片介紹台灣的許多有趣的地方。Radiation Science Center 其專業技術與本所的保健物理組接近，蒙地卡羅程式的 EGS5 及 PHITS 開發本部隸屬於該中心，Yoshihito Namito 博士為開發 EGS 程式的主要作者之一，針對自由空氣游離腔的電子損失、光子散射及收集棒的遮蔽效應問題都作多方的技術交流，另外，Dr. Ban 也自行設計 KEK 量測高能光子的自由空氣游離腔，故與此次的演講內容在專業技術能力接近，也建立日後技術交流的關係，而其中心另擁有包括環境、人員劑量、輻射量測及輻射劑量評估等人材，惟其應用的能量範圍屬於高能物理部份。



圖 9、日本 KEK 專題演講簡報首頁

PHITS 程式組成一個跨單位合作研發團隊，主要負責人為 Dr. Koji Niita，其隸屬於 RIST(Research Organization for Information Science & Technology)，每個月固定舉辦一至二次會議，大部份來自 JAEA，而 KEK 僅有 Dr. Iwase 一人參加，每人專業領域不同，有專長於評估宇宙射線及飛行安全(如 Dr. Tatsuhiko Sato，其為 JAEA 環境及放射科學小組的負責人)，以及 Dr. Yosuke Iwamoto 專長於中子量測，對於未來國內發展質子加速器時，其輻射管制對洩漏中子的量測與評估多有助益，由於其與德國針對高能中子能譜量測持續進行技術交流，而目前國內已採購針對高能量中子量測的多球體設備，惟評估技術能力待建立，未來可與 JAEA 合作，有效提昇國內的高能中子量測與評估能力。

5. KEK in Tsukuba 及 JAEA in Tokai 參訪行程

在 KEK 主要參觀獲得 2008 年諾貝爾物理獎的驗證實驗設備(B factory 和 Belle detector)，1973 年日本物理學家小林誠和益川敏英將推廣至三代夸克可用來解釋弱相互作用中的電荷宇稱對稱性破缺，及宇宙重粒子數不對稱，兩人因此於 2008 年獲得諾貝爾物理獎，此研究為微觀物理起源是粒子物理理論研究的重大課題之一，故在 Belle 實驗為 KEK 在 B factory 的重要實驗，B factory 為 Belle 偵檢器(如圖 10)其可精準量測週長三公里的 KEKB 加速器(如圖 11)

所發出的龐大數目的 B mesons 和 anti B meson 對，此研究成果可提供解開宇宙反物質消失之迷的新線索。

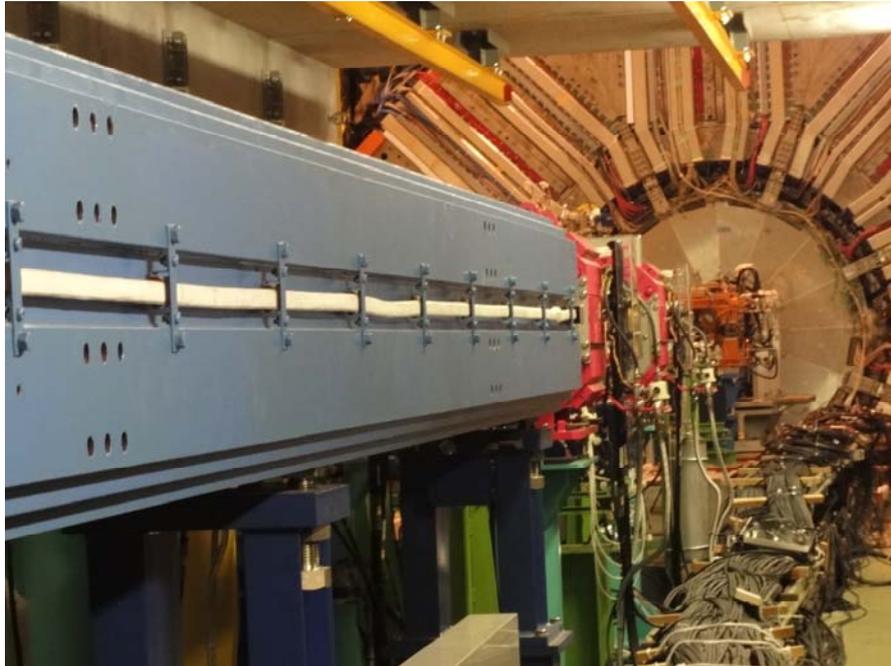


圖 10、日本 KEK 內的 Belle detector

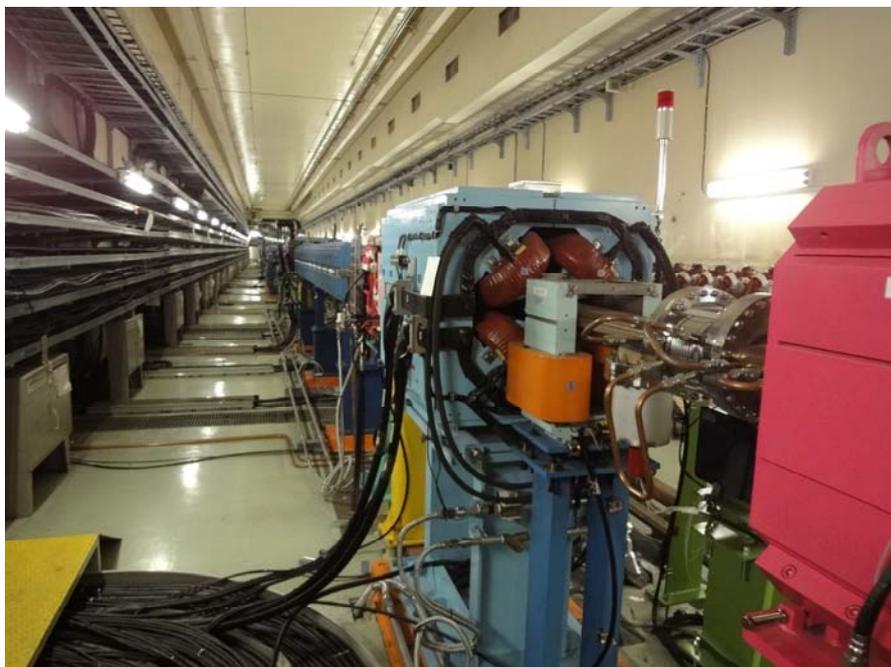


圖 11、日本 KEK 的 B 加速器

此次參訪日本原子力研究開發機構(JAEA)由其 J-PARC Center 安全組副組長 Dr. Hiroshi Nakashima 接待，JAEA 為日本原子力研究所(Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI)和日本核循環發展研究所(Japan Nuclear Cycle Development Institute)合併而成的機構，主要參觀 J-PARC 的物質暨生命研究裝置(Material and Life Science Facility)及東海至神岡長基線的 neutrino 振動實驗設備(Tokai to Kamioka long-baseline neutrino oscillation experiment)。J-PARC 於 2008 年由日本 JAEA 和 KEK 合作建造頂尖的脈衝式中子源裝置(JSNS)，如圖 12 所示，同年已成功完成核分裂生成中子實驗，利用此裝置進行 3 GeV 脈衝質子打進水銀靶引起核分裂中子實驗，利用 hydrogen moderator 減速，提供高功率且穩定的中子源，已向全球展現其發展中子科技的技術能力，強化日本在高能粒子物理學的發展，此技術可應用於觀測物質微觀物質結構、探索宇宙形成、磁性物質以及生物科學在大分子物質與蛋白質研究領域。J-PARC 目前除開放日本本國研究外，也利用此裝置對國外科學家及產業界徵募實驗項目，包括中子束流與 Muon 束流的物質與生命科學研究、k 介子束流、強子(hadron)、 μ 粒子(Muon)與中子束流 Neutrino 從事原子核和粒子物理研究等。



圖 12、日本 J-PARC 的 Material and Life Science Facility 的中子及 μ 粒子源裝置

超級神岡探測器(super-kamiokande)為日本2002年諾貝爾物理獎得主- 小柴昌俊的實驗設備，小柴昌俊設計神岡探測器接收太陽的微中子，測量其入射方向研究太陽微中子缺失問題，此量測結果提出微中子振盪證據，證明微中子有質量獲得諾貝爾獎，此探測器位於日本岐阜縣的一個深達 1000 米的廢棄砒礦坑中，為高 41.4 m 直徑、39.3 m 的圓柱型水槽，內裝滿 5 萬噸的純水和 11129 支的光電倍增管，由 J-PARC 經地底下 33.5 公尺可控制發射方向的前置檢出器(如圖 13 所示)發射出的粒子，在 295 公里外以探測器偵測。



圖 13、日本 T2K 計畫中在 J-PARC 的前置檢出器

三、心得

- 1、日本 KEK 的 Radiation Science Center 的專業能力與本所保健物理組接近，主要負責 KEK 的輻射防護暨其相關研究，包括輻射度量、宇宙射線、人員劑量計、環境化學及蒙地卡羅計算等，且蒙地卡羅計算程式 EGS 及 PHITS 的開發總部也設在該中心。KEK 為法人機構，每年開放許多的國內外研究學者前往參與實驗及技術交流，透過密切的學術交流合作，確實有效提昇其專業技術能力。
- 2、日本 JAEA 與 KEK 同樣為獨立行政法人，但由於涉及核能相關研究領域較為敏感，過去要前往該單位執行技術交流較為不易，本次特別由 J-PARC Center 安全組副組長 Dr. Hiroshi Nakashima 接待參與實驗室介紹及訪問行程，J-PARC Center 屬於世界上頂尖的研究設備中心，本所因應台灣地區將建立質子加速器之需求，透過此次的交流可為未來奠定研究合作基礎，提昇本所在高能物理研究發展之技術能力。
- 3、至目前為止，PHITS 程式之使用不如 MCNPX 普及(比較分析如表 1)，且與 MCNPX 使用接近，建議本所可採用此程式模擬高能粒子的輻射屏蔽計算，然而，此次在 KEK 採用 UNIX 版本計算案例與在本所採用 PC 版本不同，未來應可與日本 KEK 合作，將本所 PHITS 版本改成 UNIX 版，並在我們的平行運算的電腦 cluster 系統內運算，可增加評估運算效率。
- 4、在目前的 PHITS 程式中，已經有兩組 dose conversion factor(DCF)包括中子和光子兩種，故計算中子能譜轉換成等效劑量可採用此方法進行，惟其程式目前的 DCF 還沒有包括質子及其他粒子部份，未來採用此程式時可持續與日本 KEK 聯繫，或是將 MCNP 程式中的 DCF 放進 PHITS 程式中的 database 中。
- 5、在 PHITS 程式中並沒有設計有關 sphere geometry mesh 的參數設定，僅有 xyz 及 r-z 的 tally，未來如需評估 Tally 角度問題時，就必須以許多平面堆疊的方式作出類似圓形的幾何形狀，已經與 Dr. Iwase 溝通過，未來應可增加此參數的可能；另外，在運算 fluence 和 current Tally 時，發現採用[cross] tally 的方法計算不同角度的中子通率與中子通量時，在相同角度時採

用 r-z tally 和 xyz tally 計算的 neutron current 能譜不同，故採用[cross] tally 計算時要小心，如同時計算超過 3 個平面時可能會出錯，最好改成用[track] tally 的方法較會可行。

表 1、全球粒子評估計算程式比較分析表

General	MCNPX	GEANT4	FLUKA	MARS	PHITS
Version	2.5.0	8.0 p1	2005	15	2.09
Lab. Affiliation	LANL	CERN,IN2P3 INFN,KEK,SLAC TRIUMF,ESA	CERN INFN	FNAL	JAEA,RIST GSI Chalmers Univ.
Language	Fortran 90/C	C++	Fortran 77	Fortran 95/C	Fortran 77
Cost	Free	Free	Free	Free (US Gov.)	Free
Release Format	Source & binary	Source & binary	Source & binary	Binary	Source & binary
User Manual	470 pages	280 pages	387 pages	150 pages	176 pages
Users	~2000	~1000	~1000	220	220
Web Site	mcnpx.lanl.gov	cern.ch/geant4	www.fluka.org	www-ap.fnal. gov/MARS	Under const.
Workshops	~7/year	~4/year	~1/year	~2/year	~1/year
Input Format	Free	C++ main Fixed geometry	Fixed or free	Free	Free
Input Cards	~120	N/A	~85	~100	~100
Parallel Execution	Yes	Yes	No	Yes	Yes

6、ANGEL 程式應用在蒙地卡羅結果繪圖功能非常方便，直接輸入相關指令即可繪出專業且美觀的圖形，惟在 PC 版本操作較為不易，未來轉換成 UNIX 版本後，應可引進 ANGEL 程式撰寫技術，縮短輸入資料及繪圖的時間，也可邊運算邊觀察目前粒子的遷移狀況；另外，T-type 的功能可作為運算結果呈現的利器，在簡報時展現粒子遷移的狀況，非常的明確且淺顯易懂。

7、日本 NMIJ/AIST 已建置完成高能醫用加速器及石墨卡計原級標準，澳洲亦於 2009 建置完成相關設施，代表日本、澳洲在高能光子標準的技術能力已領先亞洲其他國家，目前中國大陸及韓國也正積極發展高能光子的原級標準及採購照射設備，而我國目前已開始設計製

作石墨卡計，作為台灣地區在高能光子的原級標準，惟照射器限於經費問題仍未解決，未來應可考量與日本技術交流，強化高能光子標準建置之技術能力。

8、日本 AIST 將於 2011 年開始主辦 APMP RI(I)-S6 貝他粒子組織吸收劑量的亞太比對活動，我國亦參加該比對活動，日本採用的量測設備與本所相同，皆為 BSS-2 系統，惟其照射系統仿德國 PTB 國家實驗室將整個照射裝置以保麗龍包覆起來，防止貝他粒子在空氣中受到環境變化影響，此裝置為的是要保持系統的溫度，達到恆溫之目的；另外，該實驗室負責人 Dr. Saito 也邀請本所提供比對議訂書之意見，本所將依照過去執行多次比對經驗，與日本討論國際比對相關事宜。

9、日本 AIST 的熱卡計採用的熱敏溫度計其校正溫度為 0 °C、40 °C 和 70 °C。由於熱敏溫度計在溫度及電阻之間的關係，校正不同溫度可以繪出相關的曲線，以決定其參數，由於 AIST 的石墨卡計為恆溫系統，該系統僅需要知道溫度，因為操作電流源並維持 core 的溫度為定值即可，故從電橋的輸出信號以 digital lock-in amplifier 控制恆溫系統；然而，本所採用的系統為 adiabatic mode，必需控制 Jacket 溫度和 core 相同，為此目的，需要準備兩組熱敏溫度計，且其溫度-電阻關係相似，所以必須校正熱敏溫度計及選擇適當的 core 和 jacket 的熱敏電阻溫度計。

10、國內建置質子加速器過程中，中子能譜量測能力是不可或缺之技術，可驗證模擬結果，並計算高能粒子束的屏蔽效果，JAEA 長期與大阪大學核物理中心(Research Center for Nuclear Physics, RCNP)合作，並有採用其質子射束條件量測其高能中子能譜之經驗，由於過有許多的蒙地卡羅計算高於 20 MeV 的中子 response function，但較少有實驗方法驗證蒙地卡羅計算結果，且能譜量測採用多球體的 unfolding 技術較為困難，故未來可與 JAEA 合作發展國內高能中子的量測技術，參與大阪大學 RCNP 中心的研究計畫。

四、建議事項

此次赴日本高能加速器研究機構實習劑量量測評估與輻射安全管制技術及參訪 AIST 及 JAEA，收獲極大，茲針對日後實驗室之工作規劃提出幾點建議：

- 1、此次公差實習主要學習 PHITS 程式並與 KEK、NMIJ/AIST 及 JAEA 研究人員進行技術交流，並於實習期間安排專題演講，介紹本所及近期相關研究主題，可直接面對研究人員，有效率的交換研究心得，較參加國際會議及參訪增加更多深入討論的機會，且 KEK 過去有多位研究人員拿到諾貝爾獎，對其單位後進投入研究多有激勵，並開放鼓勵國內、外研究人員參與該單位研究計畫，故建議本所應更開放國際學人參與本所相關研究，也積極派遣本所研究人員至外國進行學術交流與實習，確保本所研究能力與世界同步。
- 2、我國近期將建置質子治療機並發展質子治療技術，本次公差實習 PHITS 程式，其在模擬質子治療及屏蔽散射後中子能譜劑量展現相當的能力，並且 KEK 及 JAEA 在中子劑量量測也採用 Bonner spheres 方式量測中子能譜，本所未來可參與其量測與模擬的合作計畫，討論中子能譜的 unfolding 方式，並將建置完成的量測系統透過 JAEA 提出申請，參與大阪大學 RNCP 的研究計畫，執行量測比對，可增進本所在高能中子的量測與評估能力。
- 3、本次參訪日本 NMIJ/AIST 的貝他標準實驗室，觀察其對貝他照射環境的控制，本所將於明年參加 APMP RI(I)-S6 貝他組織吸收劑量的量測比對，建議將本所的貝他實驗室參考此次參訪所觀察到的系統部份進行改裝，在照射器外加裝保麗龍隔熱屏板，照射時將屏板蓋住，以確保恆溫環境，並且將溫濕度系統分離於 BSS-2 系統，採用本所自行設計的溫濕度量測系統，以解決 BSS-2 系統溫濕度校正困難等問題。
- 4、高能醫用加速器及熱卡計已是國際上標準實驗室發展能力的重要指標，本所將於 2012 年完成石墨卡計的研製與劑量驗證，惟高能醫用加速器因為預算的關係無法立即採

購，為提升本所在高能光子劑量研究能力，建議應建置醫用加速器設備，而為解決當前面臨到的質子標準劑量量測問題，可參考 IAEA 398 號及 ICRU 59 號報告，採用 Co-60 射源校正，並透過 protocol 轉換的方式獲得高能粒子的吸收劑量。

五、攜回資料(存核能研究所保健物理組)

1、JAEA 簡介光碟。

2、**Medical Physics** , Vol. 26, Number 12, 2597-2601, 1999.

3、**Medical Physics** , Vol. 30, Number 7, 1926-1931, 2003.

4、ANGEL 程式使用手冊.

5、V. Mares, C. Pioch, H. Iwase, “Bonner Spheres Measurement in quasi-monoenergetic neutron fields of 244 and 387 MeV”, EURADOSE WG11 Meeting October 2010.

6、Dose Conversion coefficients in the shielding design calculation for high energy proton accelerator facilities, Yukio SAKAMOTO and Yasuhiro YAMAGOCHI, JAERI-TECH 2001-042

7、K. Niita, T. Sato, H. Iwase, et al., “PHITS- a particle and heavy ion transport code system”, Radia. Meas. 41 1080-1090 (2006)

8、L. Sihver, T Sato, K. Gustafsson, et al., “An update about recent developments of the PHITS code”, Adv. in Space Res. 45 892-899(2010)

六、參考資料

1、H. Hirayama, Y. Namito, A. Bielayew, et al., “The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (2005)

2、D. Mancusi, L Sihver, K. Gustafsson, et al., “PHITS-bench mark of partial charge-changing cross sections for intermediate-mass systems”, Nucl. Instr. Meth. B254 30(2007)

3 · L. Sihver, D Mancusi, “Improved dose and fluence calculations by using tabulated cross sections in PHITS. In: Proceedings to the 2008 Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and 16th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Dresden, Germany, 19-25 October (2008)