

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

(出國類別：實習)

迴旋加速器離子源和高頻系統及其升級技術實習

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：助理研究員

姓 名：杜定賢

出國地區：加拿大、美國

出國期間：91年10月20日至91年11月30日

報告日期：92年01月30日

I4/
09104960

摘 要

此次出國實習主要目的為深入瞭解(1)迴旋加速器升級之相關技術，(2)加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術。實習地點和時間(當地時間)為加拿大 TRIUMF 國家實驗室(91, 10, 21 – 91, 11, 22)和美國博克萊大學加速器實驗室(91, 11, 25 – 91, 11, 27)。迴旋加速器升級主要相關技術包括離子源、注入線及高頻系統，實習期間分別與各分系統專家學習討論並保持聯繫管道，獲益良多。為使升級技術確實掌握，對離子源和高頻系統之基礎原理及其量測技術在實習期間亦做深入探討，並攜回多份相關技術報告。為使核研所迴旋加速器未來能提升產能及可靠度，建議實施迴旋加速器升級，並邀請相關專家來所顧問指導，俾使升級工作更順利進行。

目 次

摘 要	(頁碼)
一、目 的	1
二、過 程	1
三、心 得	4
四、建 議	7
五、附 錄	10

一、目的

此次出國實習主要目的是為了深入瞭解(1)迴旋加速器升級之相關技術，(2)加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術，(3)收集吸收迴旋加速器相關維修運轉經驗，這是為了配合未來迴旋加速器性能升級工作預做準備。出國實習地點是加拿大 Triumf 國家實驗室及美國博克萊(Berkeley)大學加速器實驗室。預期成果為：(1)獲得迴旋加速器升級所需技術架構，對於未來核研所迴旋加速器升級之工作可預做完整規劃準備。(2)獲得相關子系統個別之升級技術(例如離子源系統、高頻系統等)，可事先部分升級或精進改良現有系統。(3)獲得 1.2 mA 迴旋加速器整體運轉與維修經驗，對於未來本所加速器升級後之維護運轉可預做準備工作。

二、過程

此次出國實習主要目的地為加拿大 Triumf 國家實驗室及美國博克萊大學加速器實驗室，從 91 年 10 月 20 日至 11 月 30 日，總共為期 6 週。前 5 個星期是在加拿大 Triumf 國家實驗室實習，最後一週是在博克萊大學加速器實驗室。以下就 Triumf 國家實驗室和博克萊大學加速器實驗室實習過程分做報告。

(一) Triumf 國家實驗室實習過程

首先，針對 TRIUMF 國家實驗室現況做一簡介。核研所 TR30/15 中型迴旋加速器建於 1993 年，購於加拿大 EBCO 公司，原設計單位即為加拿大 TRIUMF 國家實驗室。TRIUMF 於 70 年代初期開始建造 500 MeV 大型迴旋加速器，該型加速器是設計加速負氫離子，加速能量範圍是 60 – 520 MeV，主要用於次原子領域方面的科學研究，亦稱為 Meson facility。圍繞著 500 MeV 大型迴旋加速器，TRIUMF 的組織可分為加速器技術組(Accelerator technology division)、迴旋加速器運轉組(Cyclotron operations division)、同位素分離加速組(ISAC, Isotope Separator ACcelerator) division、科學組(Science division)、技術轉移組(Technology transfer division)、行政管理組(Admin.

division)。現階段 TRIUMF 的主要研究工作著重在 ISAC 設施的建立，以產生放射性射束(Radioactive Ion Beams)來研究宇宙大爆炸初期的核反應。

TRIUMF 中與核研所迴旋加速器比較有密切關連的是技術轉移組中的應用技術小組(Applied Technology Group)，其工作之一是執行 TR30 迴旋加速器的維修運轉和靶技術的建立，由於核研所 TR30/15 迴旋加速器與其相似，因此可與其互交換維修運轉經驗。另外，TRIUMF 迴旋加速器運轉組的高頻小組(RF)和離子源小組(Ion source)則可從其學習加速器的關鍵技術高頻和離子源技術。此次國外公差實習加速器升級技術主要就是在這三個小組實習。

在 Triumf 實習的第一天，先拜會其加速器運轉組負責人 Dr. G. Dutto，他很熱心幫忙安排日後辦公位置及接待人員，並特別說明在 Triumf 內任何資訊設施都是可公開的，歡迎挖掘學習。但關於 TR30 迴旋加速器，由於是屬於私人公司 Nordion 所有，其相關資訊基本上不對外公開，如欲探詢相關資訊，需獲該公司認可。因此有關 1.2 mA 迴旋加速器的運轉資料，有些並無法完整獲得。

在 Triumf 實習的主要工作項目可區分為列幾項：

(1) 收集 1.2 mA 迴旋加速器運轉參數以及與迴旋加速器升級有關的設備規格

這一部份實習工作的接待人員是應用技術組(ATG)內 TR30 迴旋加速器運轉負責人 Mr. Rick Bloemhard (Email: brick@triumf.ca)。主要工作項目為收集 1.2 mA 迴旋加速器運轉參數以及與迴旋加速器升級有關的設備規格，相關資料請見附錄一。1.2 mA 迴旋加速器主要運轉參數介紹如下：最大輸出電流 1.2 mA(升級前原為 500 μ A)，通常運轉電流為 1 mA，固體靶照射電流為 450 μ A(原為 250 μ A)，射束抽取器電流為 500 μ A，射束傳送效率(beam transmission)為 16%(原為 10%)，高頻系統最大輸出功率 70 kW(原為 40 kW)。迴旋加速器升級相關設備主要為離子源系統、高頻系統、注入線系統、固體靶系統、冷卻水系統。

(2) 收集並研讀離子源升級技術報告

這一部份工作的接待人員是離子源小組成員 Mr. Dick, Yuan

(Email: yuan@triumf.ca)。主要工作項目為收集並研讀離子源工作原理及升級技術報告，相關資料請見附錄二及附錄五(攜回資料)之離子源部份。升級後離子源主要規格參數為：輸出電流(I) > 15 mA，射束發散角(α) $\leq \pm 25$ mrad，標準發散度(normalized emittance) $\leq 0.5 \pi$ mm mrad，電子流(I_e) ≤ 80 mA，電弧功率(P_{arc}) 120V/40A，燈絲壽命($T_{f.l}$) > 3 weeks。

(3) 收集研讀高頻系統技術報告以及操作實習

這一部份工作的接待人員是高頻小組成員 Amiya Mitra (mitra@triumf.ca), Raveen Kumaran (raven@triumf.ca), Joseph Lu (jjlu@triumf.ca), Yuri Bylinsky (bylinsky@triumf.ca)。主要工作項目為收集並研讀高頻系統工作原理及升級技術報告，以及高頻系統功率放大器操作實習，實習項目包括傳輸線匹配量測技術、加速器共振腔 Q 值和共振頻率量測實習、功率放大器的最大輸出調整技術等，相關資料請見附錄五(攜回資料)之高頻系統部份。升級後的高頻系統其功率輸出由 40 kW 提升到 70 kW，功率傳輸線改為 6 吋管。

(4) 收集迴旋加速器和固體靶維修經驗

這一部份實習工作的接待人員是應用技術組(ATG)內 TR30 迴旋加速器運轉負責人 Mr. Rick Bloemhard (Email: brick@triumf.ca)。主要工作項目為交換迴旋加速器和固體靶運轉維修經驗，相關資料照片請見附錄三和附錄五(攜回資料)之靶系統部份。獲得維修經驗包括：固體靶站定位調整及照射軌跡顯影方法，固體靶站冷卻水管路放射性防護方法。此外，射束抽取器之碳膜他們已研發自製成功，未來對於碳膜的購買可提供多一條管道。

(二) 博克萊大學加速器實驗室實習過程

博克萊大學加速器代號為 88-Inch Cyclotron，由美國能源部門支持進行基礎核子科學研究。該型加速器設計可用來加速週期表上任一元素，加速能量從 He 到 O 離子為 32.5 MeV/nucleon；常見的離子和其最大加速能量(MeV/nucleon)分別為 Ar (23), Kr (14), Xe (8), Bi (5)。輕離子如 p, d, ^3He 和 ^4He 最大加速能量可分別達 55, 65, 135 和 130 MeV。更詳細有關博克萊大學加速器實驗室簡介資料請參考附錄四。

在博克萊大學加速器實驗室實習主要是由 Dr. Thomas Kuo (tkuo@triumf.ca)接待陪伴，由於實際實習時間只有三天，因此重點著重在參觀加速器及離子源設施，並利用晚上和假日時間向 Dr. Thomas Kuo 學習加速器基本原理及更深入的加速器物理和離子源升級技術。Dr. Thomas Kuo 原工作於 TRIUMF，現已退休，但仍於世界很多加速器設施實驗室做顧問，協助加速器改良升級工作。其在 TRIUMF 工作期間，負責離子源升級工作，成效相當讓世界相關設施單位認可。這一次很幸運能向其當面學習，獲益良多。主要學習項目包括：離子源基本工作原理、離子源升級技術、迴旋加速器基本工作原理、Buncher 設計概念等。

三、心得

前已提及，此次出國實習主要目的為深入瞭解(1)迴旋加速器升級之相關技術，(2)加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術。未來核研所迴旋加速器計畫實施性能升級，而與升級有關之主要技術將包括離子源、注入線及高頻系統技術，國外實習期間分別與各分系統專家學習討論並建立聯繫管道，獲益良多。為使升級技術確實掌握，對離子源和高頻系統之基礎原理及其量測技術在實習期間亦做深入探討，並攜回多份相關報告，以為日後更進一步的研讀與參考。心得部份的報告將針對(1)迴旋加速器升級之相關技術和(2)加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術等分別做報告。

(一)迴旋加速器升級之相關技術

核研所 TR30/15 中型迴旋加速器最大輸出質子束電流為 $500 \mu\text{A}$ (原設計值)，而位於加拿大 Nordion 公司之同型迴旋加速器於 1994-1995 年經改良升級後(經費約 100 萬美金)，最大輸出電流可達 $1200 \mu\text{A}$ ，運轉至今一切正常。因此，核研所迴旋加速器的升級在技術上是可行的，而且該項技術已是成熟技術。附錄六表一列出 Nordion 迴旋加速器升級前後的規格比較，而核研所迴旋加速器與 Nordion 迴旋加速器(升級前)的規格比較則列於附錄六表二。概要來說，加速器升級最主要的幾個相關系統分別為(1)離子源(Ion source)，(2)注入線

(Injection line)，(3)高頻系統(RF system)，(4)靶站(Target station)，(5)冷卻水系統(Cooling system)，以下分別再做進一步說明：

1 離子源(Ion source)

離子源輸出電流由 5 mA 提升到 12 mA，主要改進的組件包括：(1)燈絲形狀和材質的改進，燈絲形狀由長弧形改成兩個矮半圓形，可減少電漿的 $E \times B$ 損耗，燈絲材質由鎢絲(W)改為鈹絲(Ta)，可增加燈絲電子的發射(emission)效率；(2)離子源本體磁鐵強度及排列方式的改進，可增強限制電漿(Plasma confinement)的磁場強度，減少電漿損失；(3)引出裝置(Extraction System)的改進，引出電極改良設計並新增 Einzel lenz 以提高離子源電流的引出效率；(4)增設 Beam chopper 功能，可協助大電流時之射束調整；(5)加強真空幫浦抽氣率以提升真空度，當電流增大時可減少加速粒子與空氣粒子的碰撞機會而降低損耗。

2 注入線(Injection line)

注入線的功能是將離子源產生的射束電流導引注入加速腔內，目前注入到加速腔的射束並未配合高頻系統的加速相位，幾乎有 60% 的粒子是在非加速相位時被注入加速腔內，這些粒子是浪費掉的。升級後的注入線主要是增加一個 Buncher，其功能是先將粒子束聚集成一團一團，再將一團一團的粒子束配合加速相位注入到加速腔內，可大為增加注入效率。Buncher 裝置包括硬體本身和 RF 放大器及 RF 控制器。

3 高頻系統(RF system)

由於射束電流的增加，高頻系統的功率亦需增加，射束電流每增加 100 uA (30 MeV)，高頻系統的功率需增加 3 kW，加速器輸出電流由 500 uA 增到 1200 uA，高頻系統的功率需增加 21 kW，再加上可靠度考量，升級後的高頻系統的功率由目前 40 kW 增到 70 kW。高頻系統的升級組件包括：功率放大器，高頻控制盒，傳輸線等。

4 靶站(Target station)

由於射束電流的增加，靶站的散熱能力需加強，因此靶站的冷卻水系統，真空密封方式，射束診斷裝置都需改進才可接受大電流。現有固體靶體可承受 300 uA(30 MeV)電流，未來第一階段希望能發展靶體能承受 400 uA (30 MeV)質子束。

5 冷卻水系統(Cooling system)

由於迴旋加速器射束提升，所有射束通過的裝置或系統亦跟著增加功率，因此需更高的散熱能力，冷卻水系統因而需增加冷卻能力。

核研所迴旋加速器與 Nordion 之加速器有一基本的不同點是核研所迴旋加速器可加速兩種粒子：氫和氘粒子，而 Nordion 之加速器只能加速氫粒子。因為這個緣故，二者的高頻系統結構及 Dee 結構是不同的，核研所迴旋加速器的高頻系統由於要適用於 2 種頻率，結構上不如 Nordion 的堅固緊密，因此在電流升級的容量，恐無法像 Nordion 到達 1200 uA，預估可達 800 – 1000 uA，仍需經試驗才知確定可升級量。

(二) 加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術

有關加速器離子源和高頻系統之基礎原理及量測技術，在加拿大 TRIMF 實習期間收集到許多相關資料，可分類為加速器、離子源、高頻系統、靶站以及相關的 design note。在美國博克萊大學加速器實驗室實習期間則學習到不同加速器的基本原理。由於這一部份較偏於技術層面，在此僅簡要說明這一方面的實習心得。加速器離子源方面主要實習到(1)離子源的基本工作原理，是以電漿角度來看待離子源的工作模式；(2)如何提升離子源的電流輸出，可經由調整燈絲形狀材質、離子源本體磁鐵強度及排列方式、改進引出電極、增強真空度等來提升電流輸出。高頻系統方面主要實習到(1)傳輸線(Transmission line)匹配量測技術。加速器高頻系統由於利用傳輸線傳送高頻功率至加速腔，傳輸線的匹配是很重要的調整技術，這方面需學習項目主要為 Smith chart 的應用；(2)加速器共振腔工作原理。加速器內 50 kV 加速電壓是以共振方式建立，加速腔體本身是一個共振結構，其共振工作原理以及如何測量 Q 值和共振頻率是主要課題；(3)功率放大器的最大輸出調整技術。為使加速器電流達最大輸出，高頻系統功率放大器需要能提供最大輸出功率，這一方面學習項目包括燈絲的調適，輸入阻抗的匹配量測，放大器共振結構的調變，功率輸出最大化等；(4)高頻系統全系統之調整技術。功率放大器經由傳輸線連接到加速腔時，二者間的匹配調整、共振結構的調變、高壓的建立以及射束負載效應為主要學習項目。

此外，對於我們運轉加速器時遭遇到的一些問題亦在 TRIUMF

實習期間獲得解決方法。問題一：固體靶站的定位檢查。由於台灣地區地震常發生，固體靶站恐有移位，因此需做定位檢查。Nordion 的靶站定位檢查方法是利用特殊塗料或真空膏塗在靶面上，照射時可顯現出照射痕跡以方便做定位檢查。這種方法較以前所使用的輻射顯影法簡便，最重要是人員不用直接接觸即可檢視定位結果，目前已採用此法做靶站校正檢查，效果不錯。問題二：固體靶站照射時，冷卻水管路會有放射物質流通，在電流大時尤其明顯。這是因冷卻水受中子照射產生 $n + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{16}\text{N} + p$ 反應， ${}^{16}\text{N}$ 半衰期 7.1 秒，Nordion 解決方法是在靶室內將冷卻水管路延長 50 呎，以延遲 ${}^{16}\text{N}$ 的流出以減少靶室外的放射線。

四、建議

此次國外公差實習，對實習地點尤其是加拿大 TRIUMF 國家實驗室加速器設施及技術的繼續成長進步印象深刻，特別是與核研所同型的 TR30 迴旋加速器性能的提升，令人鼓舞，也令人不好意思。令人鼓舞的是核研所十年前建立的迴旋加速器有升級的潛能，而且有現成的升級技術和現成的專家，有機會迎頭趕上進入毫安培級的加速器，這正是世界目前先進加速器的等級，並不是每一型加速器都有升級的可能。對於核研所迴旋加速器可以深深感受到不進則退的古訓，因此藉此機會誠懇提出以下建議：

(一) 核研所迴旋加速器性能升級

核研所利用迴旋加速器產製之核醫藥品，目前採取自製自銷策略，為提高競爭力和產能，迴旋加速器的可靠度和產量是非常重要的影響因素，實施迴旋加速器性能升級正可提高迴旋加速器的可靠度和產能。

附錄六表三列出迴旋加速器升級時所需增加或改進的配備和儀器，同時還列出單價、製造商和優先次序。製造商標示台灣表示可以自己發包製作，以下就經費、實施方法和時程說明。

1 經費

附錄六表三所列的經費總共為 61.5 萬美金(不含優先次序 3 的項目)，資料是由迴旋加速器聘請的顧問 Dr. Thomas Kuo 提供(他曾參與過 Nordion TR30 加速器的升級工作)，所列經費只含硬體價格，不含運費、安裝、測試和人事費等。Nordion 迴旋加速器升級經費總共約為 100 萬美金。

2 實施方法和時程

核研所迴旋加速器升級如無法一次完成，可以分階段實施。第一階段可先實施高頻系統升級，高頻系統由於其一體性，無法分割實施，又由於其經費較高，因此建議第一階段實施，第一階段預估一年半內完成。第二階段實施離子源及注入線的升級。離子源和注入線本身又可分割成數個子項目，每個子項目可分時實施，對於加速器的升級成效每個子項目各有其成效比例，如某個子項目因故無法實施，加速器的升級並不會因而失敗，只是會減低升級功效。第二階段預估一年半可完成。第三階段實施固體靶的升級，預估 1-2 年完成。因此如分階段實施升級，預估 3 年時間完成加速器升級，再一年時間完成固體靶系統升級。

在此願意特別提及，加速器專家 Dr. Thomas Kuo 和 RF 專家 Mr. Bill Uzat，他們原都是在 TRIUMF 服務(目前已退休)，對核研所迴旋加速器原都有參與設計製作經驗，並對 Nordion 加速器升級亦有參與設計製作經驗。他們曾是核研所聘請的加速器顧問，都表示願意協助核研所加速器進行升級。有他們的大力協助，核研所加速器升級更可順利完成，但需把握時間，畢竟他們已不年輕。

核研所迴旋加速器性能升級後之優點，前已提及除可提高迴旋加速器的可靠度和產能外，亦可顯現核研所迴旋加速器的持續進步，能與世界其他新型加速器同步。惟如考慮目前國內市場需求，目前加速器仍能充分供應並有餘裕，如以市場需求為考量，核研所迴旋加速器性能升級尚無急迫性，但在經費許可下，可以也應未雨籌謀，畢竟追求卓越是一貫的信念。

(二) 參與加速器國際研討會

為使瞭解國外加速器進步的最新發展以及直接接觸聯繫各國加

速器專家，因此建議參加國際研討會，在加速器方面建議能參加

1 International Conference on Cyclotrons and their Applications

此項國際會議已辦 16 屆，第 17 屆將於 2004 年在日本東京舉辦。此項會議顧名思義即討論迴旋加速器的各項技術及其應用，藉由此會議，可知道國外加速器進步的最新發展及各項最新應用技術，並可直接接觸聯繫各國加速器專家，與世界加速器保持聯繫。核研所迴旋加速器如能升級完成，其中各項應用技術亦可在此會議發表文章，可提升核研所在加速器領域的知名度。

2 Workshop on Accelerator Operation(WAO)

此項國際會議已辦 3 屆，第 4 屆將於 2003 年在日本舉辦。此項會議討論主題包括 Automation, Ergonomics and Safety Issues, Reliability, Availability and Serviceability of Accelerators, Tools for Accelerator Operation, Software Sharing and Standardization, Maintenance of Accelerators, Cooperation with Controls People, Remote Operation 等。其中加速器的自動化、可靠度、維護方法等都與我們有關連，值得參與討論。

五、附錄

附錄一 1.2 mA 迴旋加速器運轉參數以及與迴旋加速器升級有關的設備規格

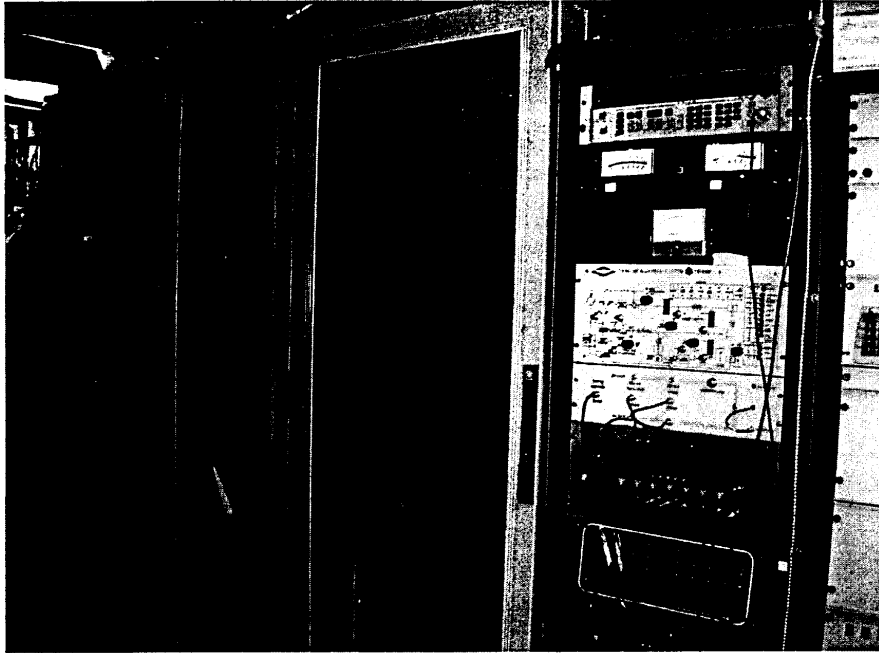


圖 1 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器 RF 系統之功率放大器外觀。

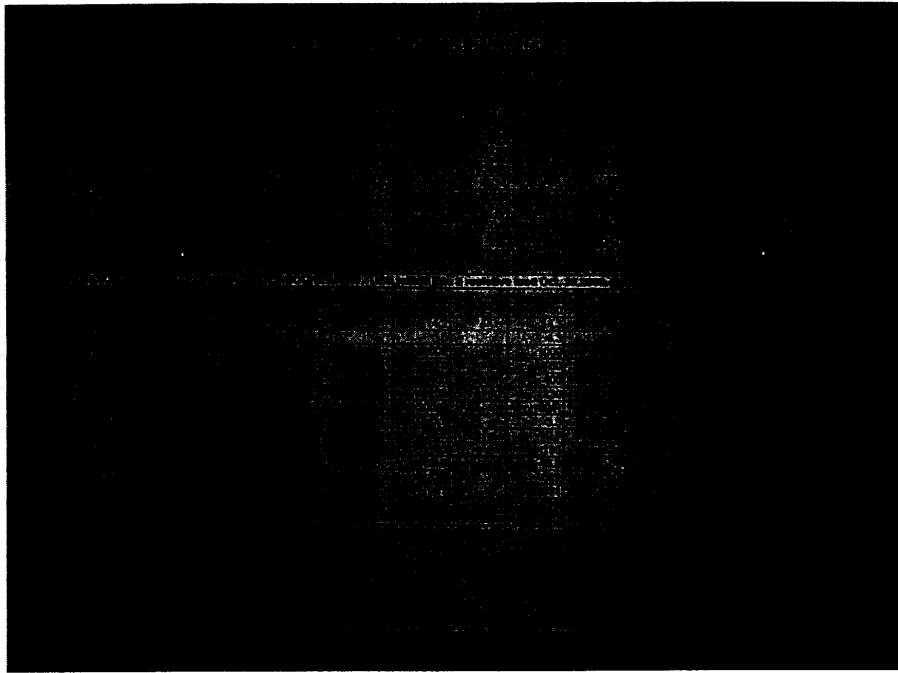


圖 2 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器 RF 系統之運轉參數。

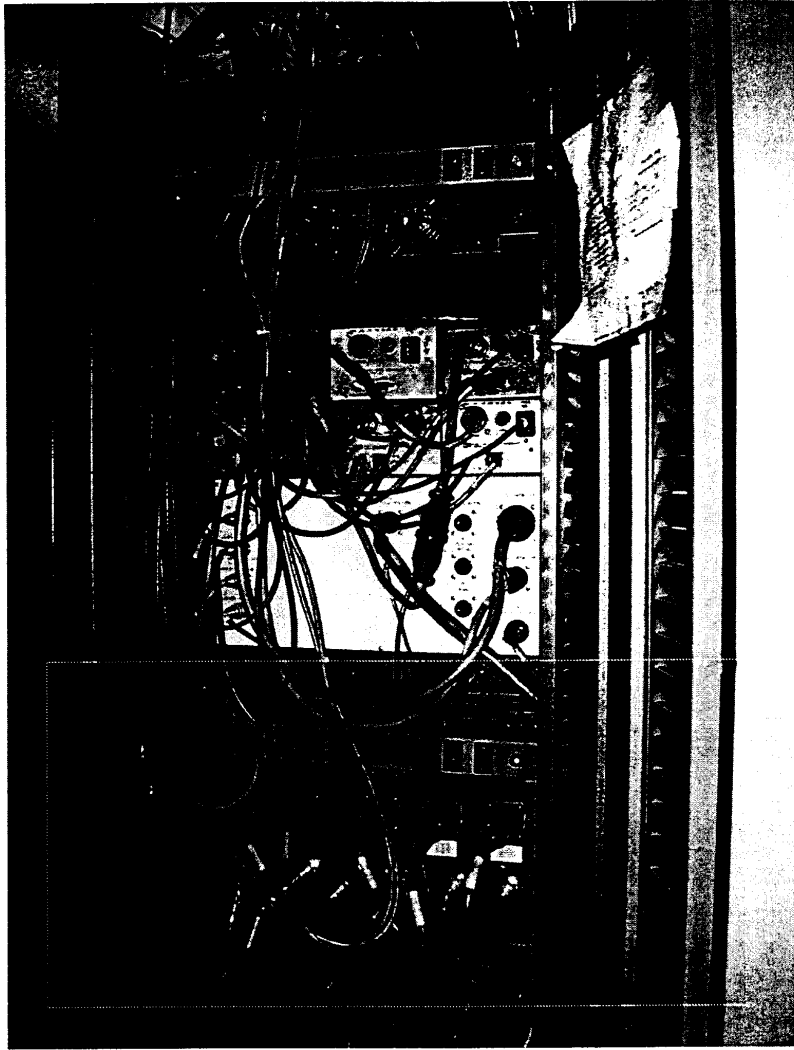
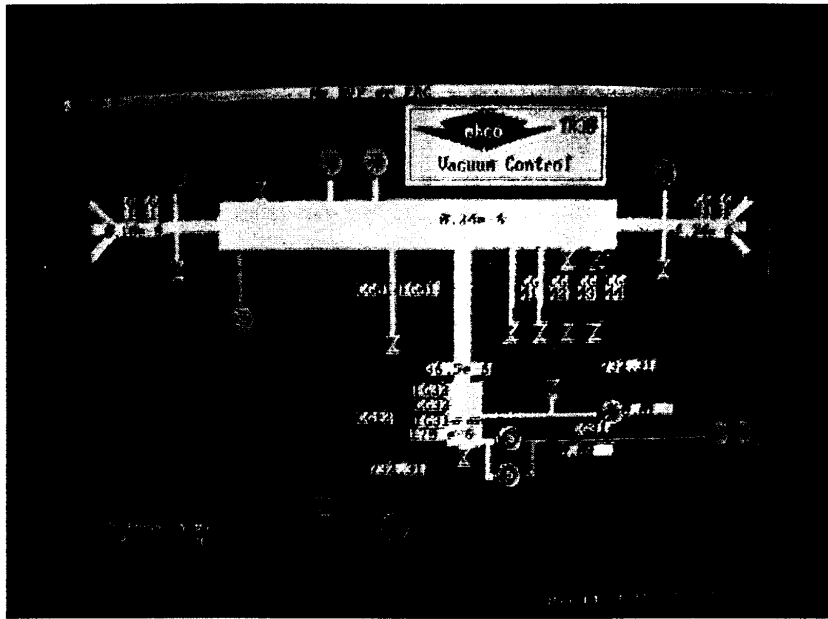


圖 3 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器 RF 系統之控制盒外觀。



(a)



(b)

圖 4 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器(a)真空系統，(b)注入線控制畫面。

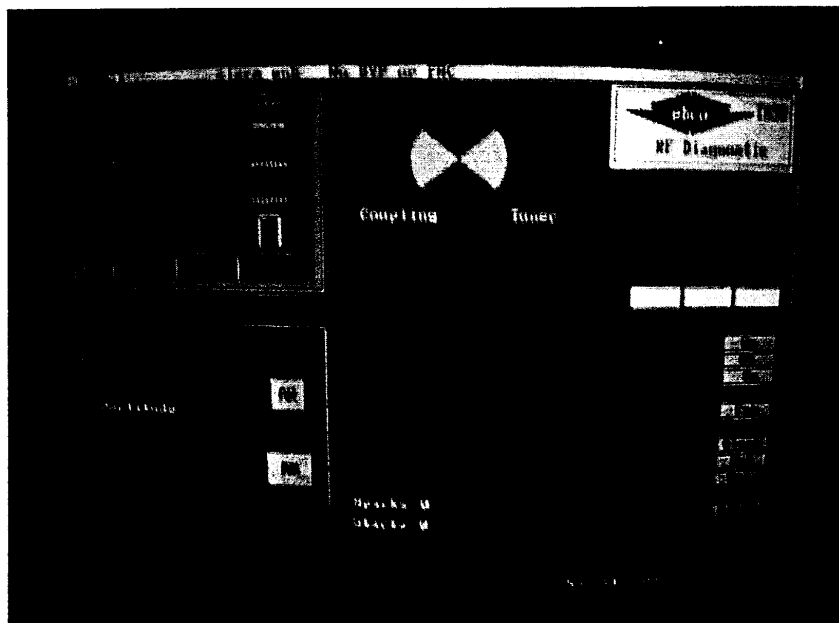
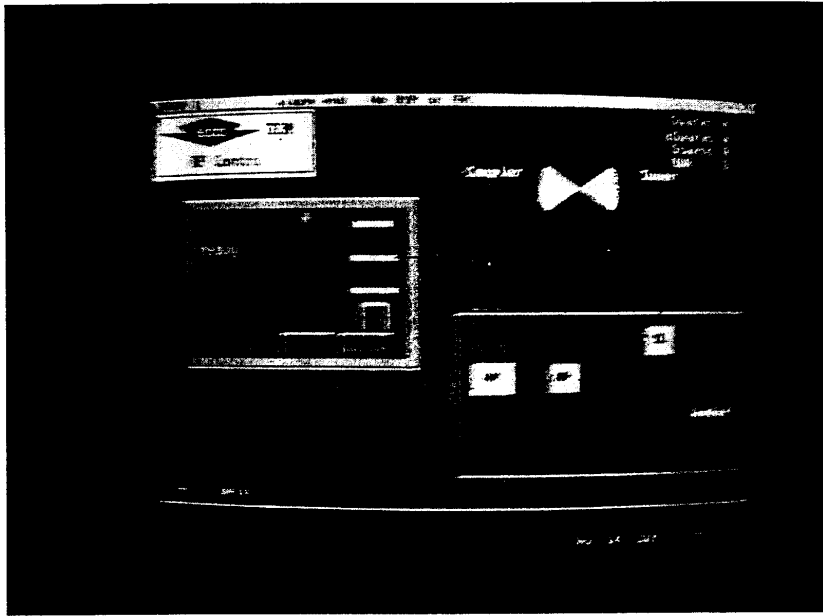


圖 5 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器 RF 系統控制畫面。

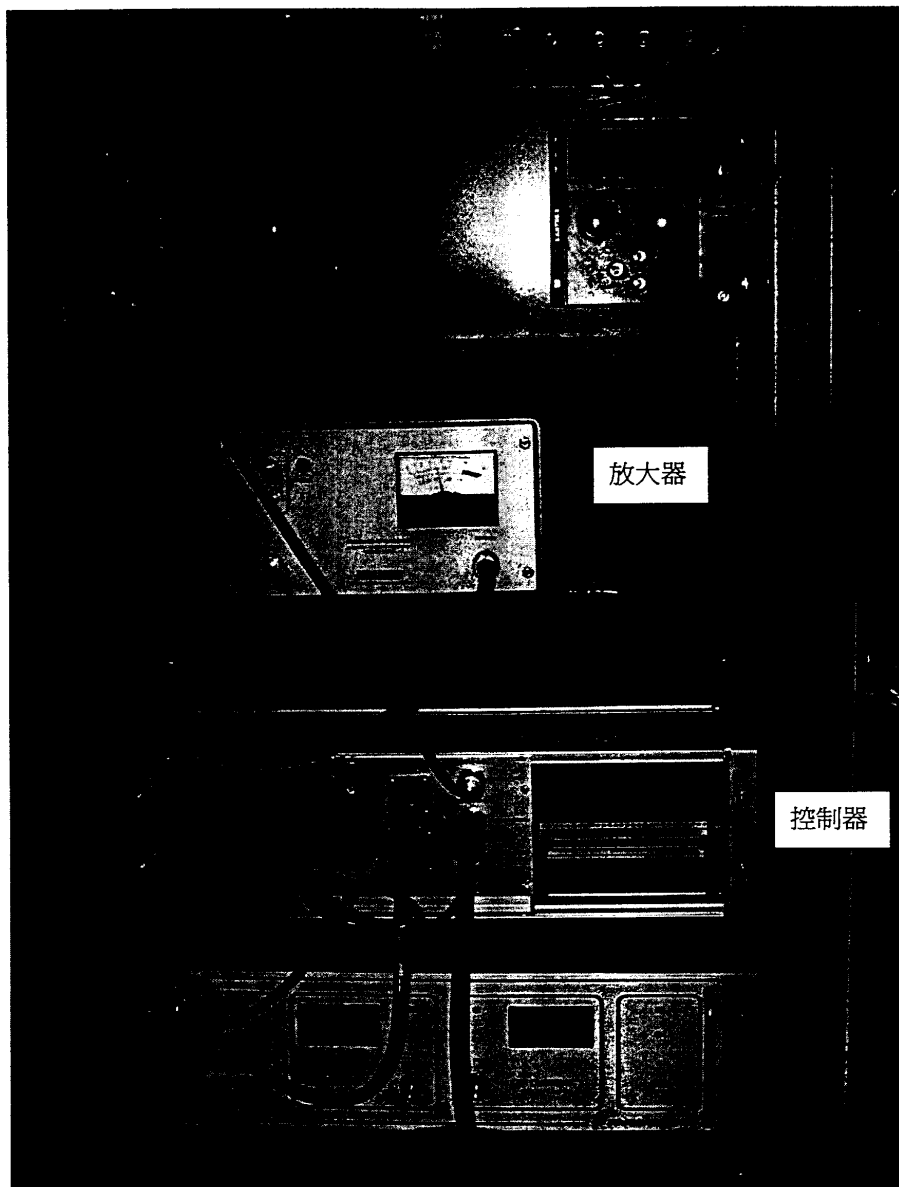


圖 6 Nordion 1.2 mA 迴旋加速器 Buncher 之 RF 放大器和控制器。

附錄二 離子源磁場資料

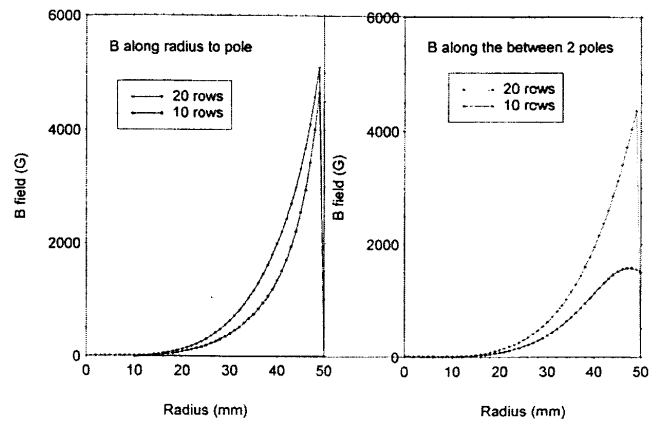
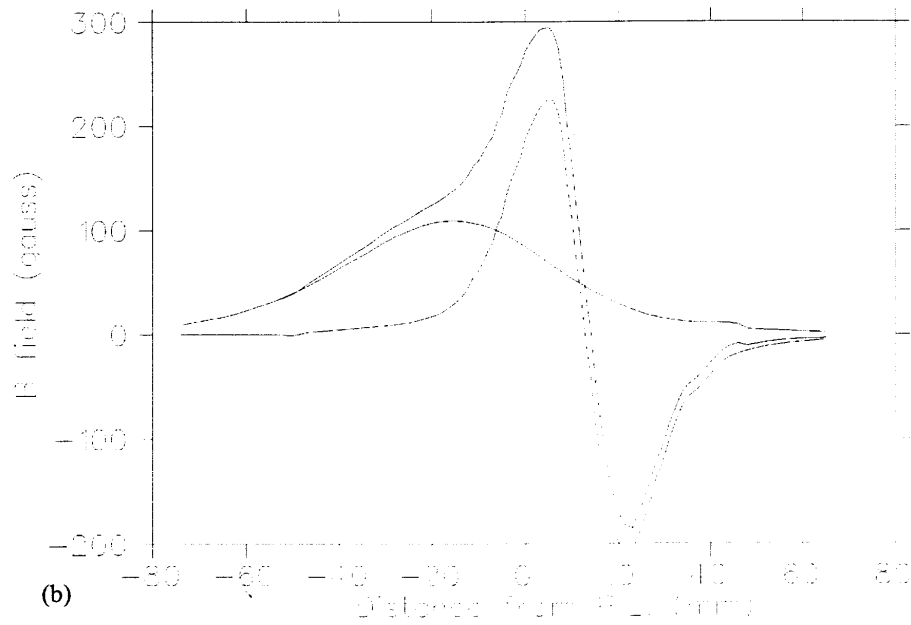


Fig. 6 Comparison magnetic fields along the radius between 10 & 20 rows magnets at 10 amp. cur.

(a)



(b)

圖 7 迴旋加速器離子源(a)限制磁場分佈，(b)過濾磁場分佈。

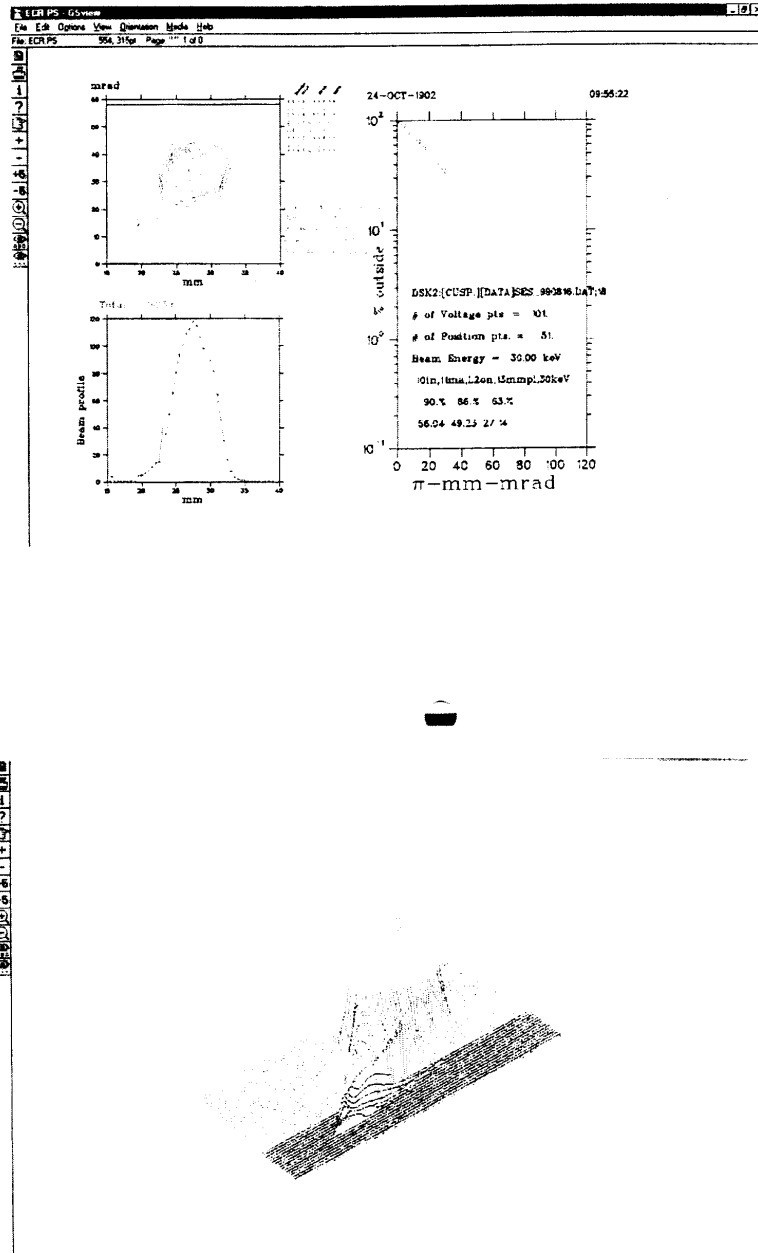


圖 8 迴旋加速器離子源射束之 emittance。

附錄三 迴旋加速器和固體靶維修經驗

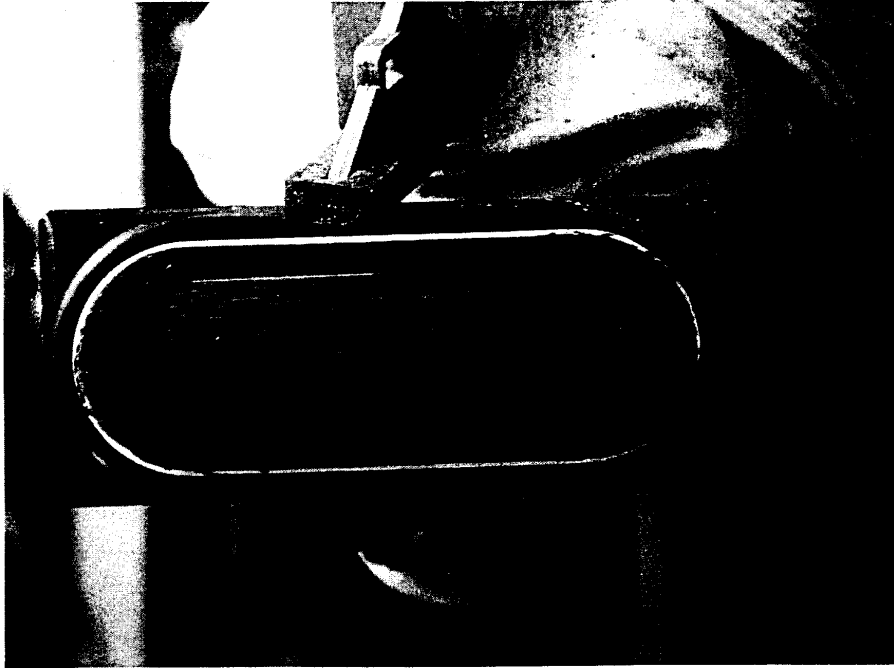


圖 9 固體靶射束定位校正顯影圖示。

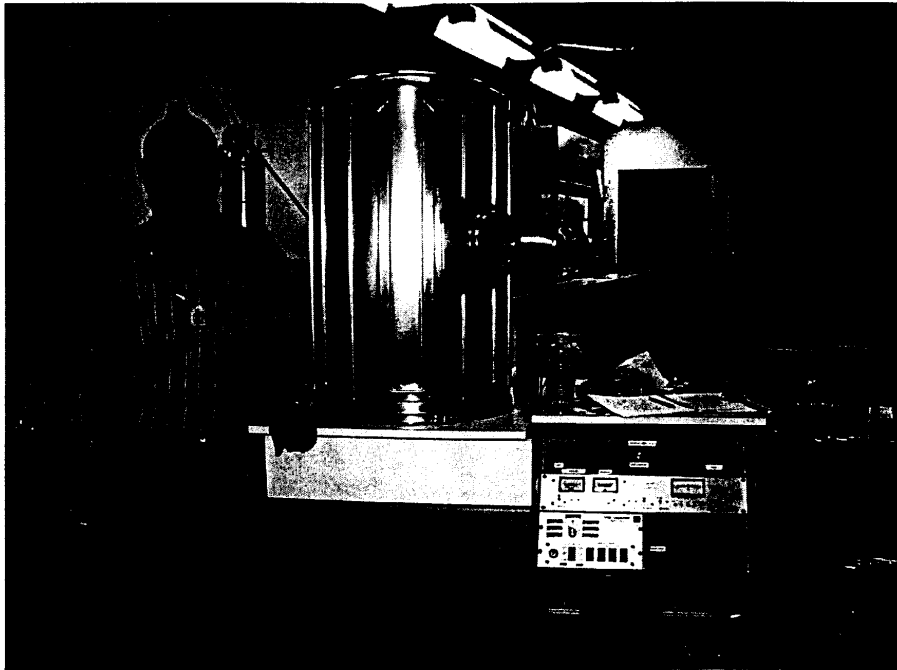


圖 10 TRIUMF 自製碳膜蒸鍍設備及工作者。

附錄四 美國博克萊大學加速器實驗室簡介資料

The 88-Inch Cyclotron is operated as a national facility in support of U.S. Department of Energy programs in basic nuclear science. The central component is a sector-focused, variable-energy cyclotron that can be fed by either of two Electron Cyclotron Resonance (ECR) ion sources. This versatile combination produces heavy-ion beams of elements throughout the periodic table. For helium to oxygen, beam energies are up to 32.5 MeV/nucleon; for heavier ions the maximum energy per nucleon decreases with increasing mass. Typical ions and maximum energy (MeV/nucleon) are argon (23), krypton (14), xenon (8) and bismuth (5). Most metallic ions and all gaseous ions up to mass 170 have either been accelerated or can be developed as needed, with energies high enough for nuclear physics studies. High intensity light ions - p, d, ^3He and ^4He - are produced up to total energies of 55, 65, 135, and 130 MeV, respectively.

Accelerator Use

The demand for beam time at the 88-Inch Cyclotron remained high in FY01, a trend which is continuing into FY02. A reduced operating schedule was implemented beginning January 2002 in response to budgetary constraints. The Cyclotron will continue in a mode of 9.5 days on and 4.5 days off every two weeks through FY02. Gamma sphere continues to be a major attraction for outside users and is being utilized at full capacity for both on-line and off-line experiments. The Berkeley Gas-Filled Separator (BGS) ran a large number of hours in FY01 resulting in the confirmation of the Element 110 discovery at GSI and the first successful coupling of the separator with the Univ. of Oslo liquid-phase chemistry apparatus, SISAK. The BEARS project has demonstrated a ^{14}O beam at the level of $2 \times 10^5/\text{sec}$ and is working on increasing the intensity by another order of magnitude. Meanwhile experiments continue using ^{11}C . The research time (beam on target) in FY01 was 4669 hours, an increase of 7% from FY00 levels. The Accelerator Operation Summary (Table 1) shows that in FY01 65% of the calendar year was scheduled. The Cyclotron operated very efficiently. Eighty-three percent of the scheduled time was used for research (beam on target) while the remaining time was divided between tuning (11%), machine studies (2%), and unscheduled maintenance (only 4%).

Nuclear science research accounted for 3792 research hours, applied research for 724

hours, high energy, space and materials sciences for 118 hours, and biology for 35 hours. 90% of the nuclear science research utilized one of the two major facilities in operation, Gamma sphere (60%) and BGS (30%). Radioactive beams provided by BEARS, primarily ^{11}C , accounted for 1% of the nuclear science beam research. The nuclear science research can be broken down into nuclear structure (56%), heavy elements and chemistry (34%), weak interactions (7%), exotic nuclei (2%) and astrophysics (1%). The applied research - in partnership with both U.S. and foreign industries, small business, and government laboratories - consisted primarily of radiation effects testing for space applications using either the proton or heavy ion irradiation facility. The research for high energy physics was done in support of the development of detectors and associated electronics for the ATLAS detector at LHC and as well as CCDs for particle astrophysics (SNAP). Some materials science work was also performed to support of the study of radiation damage in semiconductor materials by the Center for Advanced Materials at LBNL. The biology research was done in support of NASA, DOE and NIH programs.

The cyclotron fed by its ECR sources provides a wide range of ions, energies, and intensities and most elements can be accelerated. In FY01, 30 different species were accelerated, including the rare isotopes ^{18}O , ^{36}S , ^{36}Ar , $^{44,48}\text{Ca}$, ^{50}Ti and ^{64}Ni . Among these, the ^{48}Ca , Ti and Ni beams were used for BGS runs and required high beam intensities. New magnets and an aluminum plasma chamber were installed in the LBL ECR to provide higher performance and better reliability. A liner was inserted into the AEER-U in order to prevent ^{48}Ca from sticking to the walls of the source. This improved the efficiency almost a factor of ten, and allowed the use of ^{48}Ca at high intensities (0.7 μA from the Cyclotron) for two BGS experiments. We are working towards improving the intensity of these heavy beams by upgrading the ion sources and injection line.

Radioactive Beam Technology

The 88 Operations group is collaborating on several projects which involve the production, transportation and ionization of radioactive atoms (RIBs). ECR ion sources are crucial in these efforts in order to efficiently ionize radioactive atoms prior to further acceleration. These efforts are important for the development of new scientific opportunities at the Cyclotron as well as to further the technologies critical for the Rare Isotope Accelerator (RIA) identified as the next major nuclear science facility in the

2002 NSAC LRP.

The BEARS project, which couples the 88-Inch as a post accelerator with the Biomedical Isotope Facility as a production cyclotron, is described in the Low Energy Research Section (KB0401024) of this document. In FY01, efforts were concentrated on the production of ^{14}O , with a half-life of 70 seconds. This beam was successfully accelerated in late FY01 at a level of $2 \times 10^5/\text{sec}$. Efforts are continuing to increase the intensity of this beam. ^{11}C beams continue to be available with intensities up to 2×10^8 pps. Two experiments have been carried out in FY01 and early FY02 using this beam. ^{11}C at 3 MeV/nucleon was accelerated for one of these experiments, a new energy low for an accelerated RIB from the 88-Inch. In FY02, tests will be made to determine the efficacy of using RIBs such as ^{11}C in Gamma sphere. If feasible, this may be a way to get directly at the $^{11}\text{C}(p,\gamma)$ cross section which is important for the CNO cycle.

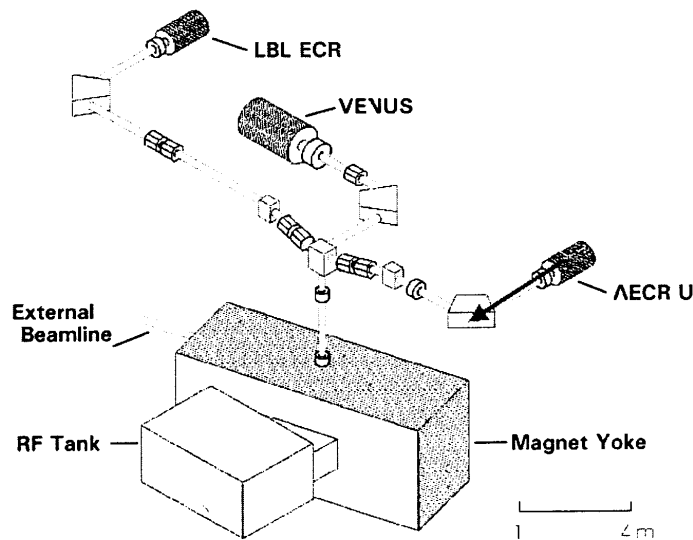
A low energy (30 keV) ^{14}O beam is produced using the 88-Inch Cyclotron. The oxygen is then ionized in the IRIS ECR source, accelerated to 30 kV, then implanted to provide an ^{14}O source for beta shape spectrum measurements. The production of this beam is now standard and the experiments have progressed. This technique has also been demonstrated to work for the production of ^{19}Ne .

For heavier species with longer half-lives, it is also possible to use the 88-Inch Cyclotron as both the production and post-accelerator. A collaboration between 88-Inch Operations, the BEARS group, LLNL and Rutgers has been developing beams of Kr and Br isotopes, both volatile species which are easy to extract from the target and transport. A thin target of ^{74}Se has been designed for the production of the 14-hour species ^{76}Kr in the reaction $^{74}\text{Se}(^4\text{He},2n)^{76}\text{Kr}$. Production rates have been measured and transport and trapping of the radioactive Br and Kr has been demonstrated. In the Winter/Spring of FY02, ionization and acceleration of the ^{76}Kr will be tested, with a nuclear structure experiment planned for Summer FY02. In FY03, it is anticipated that ^{77}Br will be developed and used to measure the (p, γ) cross section.

AIP and RIA R&D Overview

During the time span of FY02 through FY04 the 88-Inch accelerator development program will focus on two goals; extending the mass range up to mass 238 at energy of 5 MeV/u at low intensity and significantly increasing the ion beam intensity up to mass range 140. These improvements will provide new scientific opportunities for the low energy nuclear physics community at the 88-Inch Cyclotron. The improvement program will involve all parts of the accelerator: a new injector ion source, upgrade of the cyclotron injection line, and the cyclotron vacuum as well as external beam lines. Figure 2 illustrates the timing of the upgrade projects. The first part of this plan is to bring a new high performance ECR ion source VENUS (Versatile ECR ion source for Nuclear Science) into operation. It is a 3rd generation Electron Cyclotron Resonance ion source and will be the first ECR ion source with sufficiently strong magnetic fields for optimum performance at frequencies up to 28 GHz, twice the frequency of the LBNL AECR-U. For moderate charge states it will produce at least 4 times the current of the AECR-U and the gains for very high charge states will be greater. This will boost the maximum energies and intensities for heavy ions from the cyclotron, particularly for ions with mass 60 and above. VENUS will also serve as a prototype for the RIA ECR. It is designed to meet the intensity, charge states and emittance requirements anticipated for the RIA driver linac.

The 88-Inch Cyclotron



附錄五 攜回資料名稱(存於核研所圖書室)

Cyclotron

A 30 MeV H- cyclotron for isotope production.pdf
Commisioning and first operation of TR30 cyclotron.pdf
Cyclotron for isotope production.pdf
Operation of TR30 cyclotron.pdf

Ion source

A design of an ECR ion source for radioactive ion beams for ISAC
on-line.pdf
Dc H-D- source at triumf.pdf
Beam_induced_multipacting.pdf
Commissioning and initial operation of a radioactive beam ion source.pdf
A high intensity dc H- source for low energy injection.pdf
Ecr ion source for ISAC.pdf
Emittance mass scanner.pdf
Further development for H-D- multicusp source.pdf
Measurements on dc H- multicusp ion source for triumf.pdf
Multicusp source for ISAC.pdf
On the developement of 15 mA dc H- multicusp source.pdf
Optics for Cusp Source in Il.pdf
Radioactive ion beams at ISAC.pdf
Summary on radioactive beam ion source.pdf

RF

Multipacting_transmission_line.pdf
Stablizing_power_amp.pdf
CERN Accelerator School and Rutherford Appleton Laboratory : Course on rf
engineering for particle accelerators, Oxford, UK, 3 - 10 Apr 1991 : proceedings, v 1
Turner, S [ed] CERN, 11 Jun 1992. - 312 p.
CERN Accelerator School and Rutherford Appleton Laboratory : Course on RF
engineering for particle accelerators, Oxford, UK, 3 -10 Apr 1991 : proceedings, v 2
Turner, S [ed] CERN, 11 Jun 1992. - 262 p.

Targetry

High current encapsulated target system for radioisotope production.pdf

F-18 targetry.pdf

Encapsulated target for isotope production.pdf

High current radioisotope production with solid target system.pdf

Investigation of thermal performance of solid targets for radioisotope production.pdf

TRIUMF design notes

TRI-DN-93-08.pdf

TRI-DN-90-25.pdf

TRI-DN-92-20.pdf

TRI-DN-88-37.pdf

TRI-DN-93-25.pdf

TRI-DN-94-09.pdf

附錄六

表一 Nordion 迴旋加速器升級前後規格比較

	500 uA system	1.2 mA system
H ⁺ Source	5 mA	12 mA
Current	0.4 pi-mm-mrad	0.5 pi-mm-mrad
Emittance		
Beam Bias	25 kV	27.5 kV
Extraction System	old type	new type
Einzel Lens	No	Yes, -20 kV
Turbo pump	360 l/s	2 x 360 l/s
Buncher	No	Yes
Steering	Mono-pole	Bi-polar
Inflector	±7.5 kV	±8.3 kV
Pop-up	0.5 mA	1.5 mA
Centering injection	No	Yes
1 st /2 nd gap optics	Original	new
RF amplifier	40 kW	70 kW
RF control	Original	New
Transmission line	4 inch diam.	6 inch diam.
Bias for multipacting	No	Yes
External beam optics	Original	New
Target system	Original	New
Control software	Original	Modified

郭耀庭 先生提供

表二 核研所迴旋加速器與 Nordion 迴旋加速器(升級前)的規格比較

	INER TR30/15	Nordion original TR30
Source and injection system	H, D ⁺	H ⁺
RF system	Dual frequencies Sliding Dee Stems	Single frequency Solid Dee Stems
RF Amplifier	Dual frequencies (more complicated input circuit)	Single frequency (simpler input circuit)
Magnet	Trim coils complicate the RF liner and Dees	Simpler magnet structure No complication
Beam line optics	More beam lines	Less beam lines

表三

Estimate of Cyclotron upgrade

Item	Components	\$US (thousand)	Manufacture	Priority
	Ion Source			
1	Magnetic structure Holder Magnetic bar	10	Taiwan	2
2	Power supplies Filament P.S. (> 375 A)	10	Power Ten	1
3	New extraction lens	2.5	Taiwan	1
4	New isolation for 25 kV with shielding ring	4	Taiwan	1
5	Einzel lens and with steering magnetic	4	Taiwan	1
6	Turbo pump > 550 l/s	20	Seiko seiki	2
7	Beam chopper	15	Tom	2
	Injection			
8	Buncher and amplifier/control	30	Taiwan	1
9	Steering bi-polar ps			3
10	SQQ rotation			3
	RF			
11	New amplifier system (70 kW)	320	Cyclotron West	1
12	6'' transmission line	50		1
13	RF control box	50	Triumpf	1
	External beam optics			
14	4 quadrupoles and ps			3
	Target station			
15	High power target station upgrade cooling, collimators, vacuum seal	50	Nordion, Taiwan	1

	Control system	50	Triumpf, Taiwan	1
16	ControlView			
17	PLC			