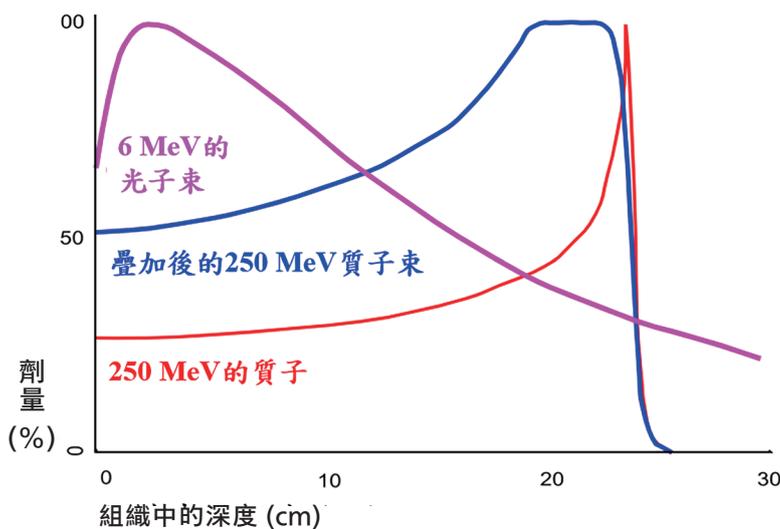


粒子加速器在癌症治療上的應用

劉宗凱

國家同步輻射研究中心 高頻小組

癌症，又名惡性腫瘤，它在已開發國家中為主要死因之一，在台灣，更是長年佔據國人十大死因之首。目前標準的癌症治療大致可分為外科手術、放射線治療、藥物化學療法。在治療上，醫生會根據病患與病灶的狀況，給出最適當的治療組合，並不會侷限在單一的治療法。其中放射線治療則可分為傳統的光子治療，以及粒子放射線治療，後者是利用質子或重粒子之布拉格峰(Bragg Peak)的特性(如圖一)，能於特定深度處釋放出最大的能量，故可將能量集中在腫瘤區域釋放，給予深部腫瘤足夠劑量，同時也減少鄰近正常細胞的傷害。此優勢可在打擊癌細胞的同時，大幅降低副作用、提升治療後的生活品質。

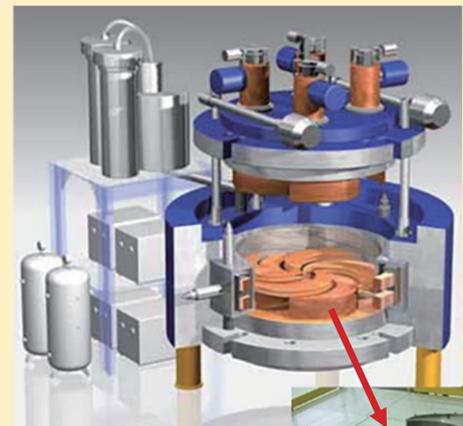


圖一 以250 MeV的質子穿透生物組織在特定深度大量釋出能量的布拉格峰效應示意圖，並與X光放射治療比較。(圖片來源為wiki)

粒子放射線治療的粒子束是透過加速器獲得能量。為了讓粒子束流有恰好的穿透深度，使得粒子束流的布拉格峰落在患灶上，必須給予粒子束流適當的能量。為了能有效殺死癌細胞卻又不會給周遭的正常細胞造成永久性的傷害，必須給予患灶適當的劑量，因此粒子束的束流能量與電流大小有一定的要求。以質子束為例，其能量約介於70 - 250 MeV、平均電流大小約0.5 nA，即在人體中有足夠的穿透深度，達到10 cm³大小腫瘤2 Gy/min劑量率的需求。迴旋加速器與同步加速器較容易滿足上述能量與平均電流大小的需求，也是目前市面上常用的質子治療系統。迴旋加速器又可分為等時迴旋加速器(isochronous cyclotron)與同步迴旋加速器(synchro-cyclotron)，前者保持時變電

場的頻率不變，但磁鐵隨粒子束能量而增加磁場強度，進而抵銷質量的相對論性效應、保持粒子角速度不變；後者則是保持磁場不隨時間變化，但隨著粒子束能量增加而調整時變電場的頻率，以配合因質量的相對論性效應而降低的粒子角速度，這兩者在設計上與運作上都有很大的差異，其結構與比較可見圖二[1-4]。

(a) ProBeam



高低起伏的鐵芯

迴旋加速器應用在粒子放射線治療上的好處在於占地較小，操作上較為容易，但因為受限於使用鐵芯的磁鐵，其磁場的強度與場型是固定的，使得粒子束輸出能量也為固定，必須使用能量選擇的設備，才可達到調控能量的功能。而粒子經過能量選擇器，會產生較多的二次輻射，需要考慮額外的輻射屏蔽來避免物質活化的效應。至於同步加速器的子系統則較為複雜，並且使用特殊的慢速粒子引出，好處是粒子束能量調整性高，也不需要額外的能量選擇，不會產生二次輻射。

為了降低建造與運轉成本，加速器的發展則是使用超導磁鐵的技術，以設備小型化、單室治療為發展趨勢。表一為多種質子治療系統的比較。現階段全世界運轉中的粒子放射線治療設施共有約110座，治療的病患也逐年上升，未來也有越來越多的質子或重粒子的放射線治療設施在計畫或興建中，台灣則有2座運轉中的質子治療設施(林口長庚紀念醫院與高雄長庚紀念醫院)、興建中的則有臺北榮民總醫院的碳粒子治療系統與臺灣大學醫學院附設醫院的質子治療系統，相關的統計資料可見參考文獻[5]。

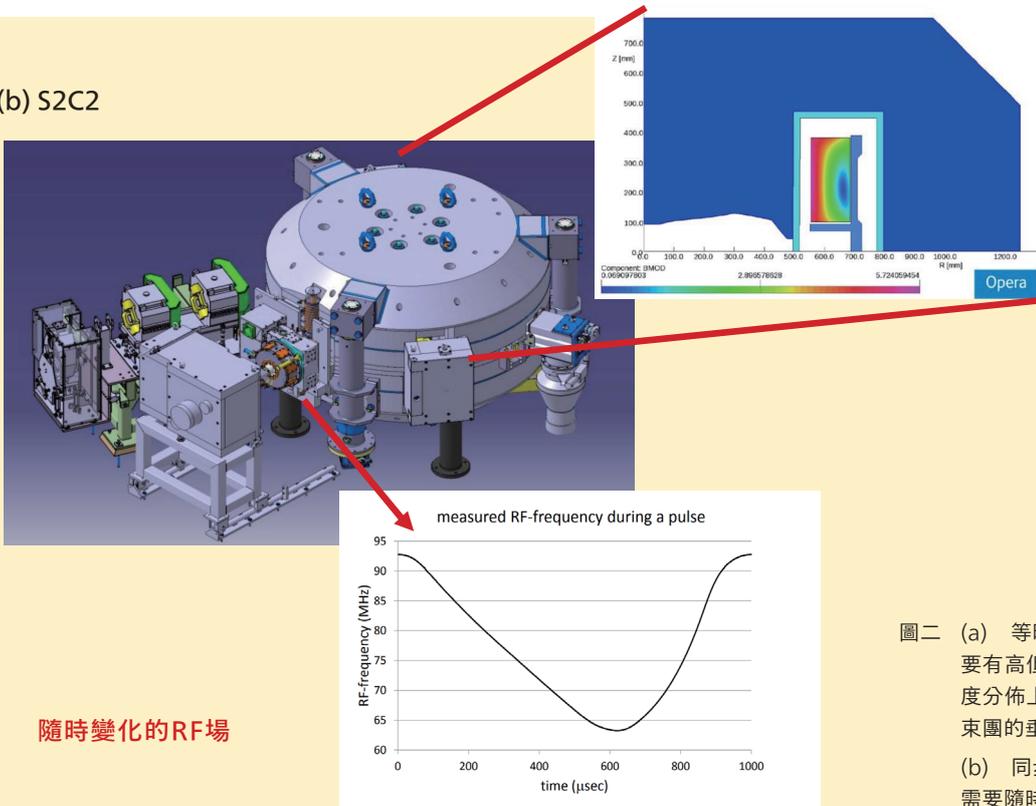
國輻中心累積了多年加速器相關的知識、技術與經驗，持續協助癌症治療相關醫院與產業，如提供加速器方面的技術諮詢服務，讓相關醫療院所能迅速、有效率的完

成系統安裝與試車，或是協助訓練加速器相關人材，培訓粒子放射線治療系統加速器的運轉與維護人員。國輻中心也持續參與相關產業設計醫療用質子/重粒子加速器，協助相關產業的公司開發優質而普及的癌症治療工具。

參考文獻

1. S. Zaremba and W. Kleeven, "Cyclotrons: Magnetic Design and Beam Dynamics", arXiv:1804.08961
2. M. Schillo, "Superconducting Cyclotrons - A Medical Device Manufacturer's View", CIEMAT 2013.
3. F. Chautard, "Cyclotrons", JUAS 2014.
4. W. Kleeven, "Accelerators for industrials and medical applications-PART4", JUAS 2014.
5. PTCOG website: <https://www.ptcog.ch/>

(b) S2C2



圖二 (a) 等時迴旋加速器範例，特點為需要高低起伏的鐵芯，用於產生在角度分佈上有強弱變化的磁場，以達到束團的垂直聚焦效果[2]。
(b) 同步迴旋加速器範例，特點在於需要隨時改變的RF頻率[4]。

表一 多種質子治療系統的比較

類型	等時迴旋加速器		同步迴旋加速器		同步加速器
	系統	最大能量	磁鐵類型	加速器直徑	
系統	C230	ProBeam	S2C2	s250	ProBeam
最大能量	230 MeV	250 MeV	250 MeV	250 MeV	250 MeV
磁鐵類型	常溫	超導	超導	超導	--
加速器直徑	4.3 m	3.1 m	2.5 m	1.8 m	~5m
占地面積	多室	*261 m ²	13 x 31 m ²	10 x 12 m ²	29 x 27 m ²

*此為單室治療室架構下的佔地面積，亦提供多室治療室的架構。