

 National Tsing Hua University
國立清華大學核子工程與科學研究所

 臺灣醫用迴旋加速器學會
Taiwanese Society of Medical Cyclotron

 原子能 AEC

確保核安 低碳家園

**國內醫用迴旋加速器設施建造特性、
運轉歷程與國外設施除役經驗報告**

臺灣醫用迴旋加速器學會 理事
陳皇龍

2020.11.21



 National Tsing Hua University
國立清華大學核子工程與科學研究所

 臺灣醫用迴旋加速器學會
Taiwanese Society of Medical Cyclotron

 原子能 AEC

確保核安 低碳家園

**放射性物質生產設施除污及除役
規劃暨安全審查技術研究**

計畫主持人：許榮鈞教授、高潘福理事長
國立清華大學核子工程研究所、臺灣醫用迴旋加速器學會
109年11月21日



計畫背景



- 截至108年底，國內合計有12家設施經營者，共設有13部迴旋加速器生產設施，加速能量介在10-30 MeV之間，其中過半數設施自投入營運迄今已逾15年，最長逾25年。
- 隨著國內生產設施逐漸接近除役年限，放射活化殘存量評估技術及設施除役技術已在業界逐漸形成討論焦點。
- 原能會為國內輻射安全的主管機關，期使透過本研究計畫，引進先進國家之經驗，建立我國生產設施除役相關輻射安全管制技術建議，以確保日後設施除役管制之品質與輻射安全。
- 此外，亦可及早建立國內迴旋加速器生產設施除役專業人才資料庫，並且有機會跨機構網絡協調與技術整合，以利未來推動除役實務作業。

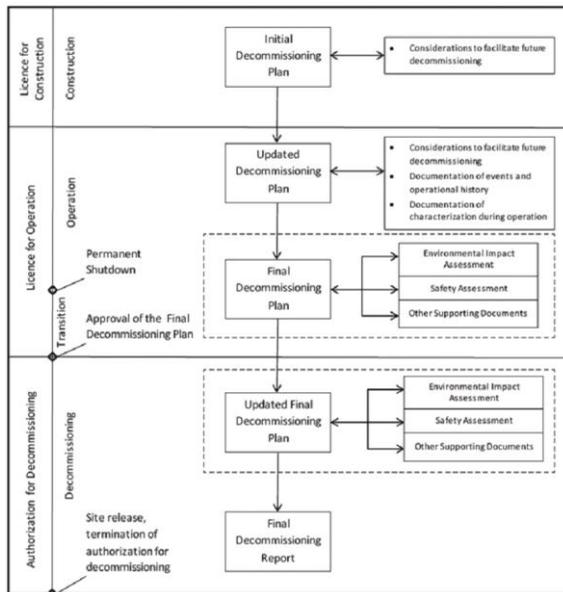


2

計畫目標



- 本計畫(二年期)目標對國內迴旋加速器放射性物質生產設施進行運轉歷程調查、放射性活化情形評估與量測驗證，據以提出除役計畫撰寫導則建議與除役輻射安全審查導則建議。
- IAEA-SSG-49號報告除役計劃建立導則→



研究團隊



臺灣醫用迴旋加速器學會
Taiwanese Society of Medical Cyclotron



• 本計畫團隊人力包含學術單位實驗室(清大核工所、原料中心)與臺灣醫用迴旋加速器學會，本實驗室主要負責活化分析與測量技術評估，學會成員主要負責設施運轉歷程資料收集與應用。

10. 林口長庚
11. 林口長庚
12. 土宣
4. 新光

2. 核研所
3. 中山

7. 義大
8. 阮綜合



1. 台北榮總

5. 三總

9. 台大

6. 慈濟

13. 新吉美碩

設施	聯絡人
北榮	張文儀
中山	高潘福
新光	羅欽堉
三總	周大凱
花蓮慈濟	林明琪
義大	許松瑩
阮綜合	吳淑華
台大	呂惠敏
林口長庚	姚正祥
土宣	陳耀光
新吉美碩	張碧芳

4

國內相關設施主要機型

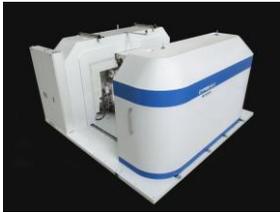


臺灣醫用迴旋加速器學會
Taiwanese Society of Medical Cyclotron





MC17 cyclotron



Sumitomo HM-12S



GE MINI/PETtrace



IBA Cyclone 18/9



CTI RDS 111



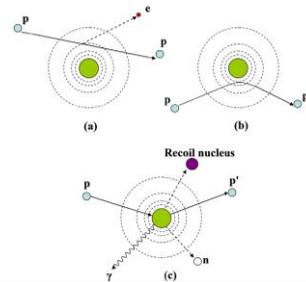
EBCO TR 30/15

5

研究方法與規劃



- 由於迴旋加速器生產設施在運轉過程中有機會因核反應誘發二次中子生成，二次中子輻射再造成迴旋加速器本體、屏蔽或建築物結構體等不同程度的活化。
- 隨著設施建物或加速器本身逐漸接近使用生命規劃週期，終將面臨永久停用問題，或因應設施場所利用目的變更而有拆遷變更場址的需求問題，關於放射活化殘存量評估技術及設施除役技術，已在業界逐漸形成討論焦點，因此在未來幾年，國內有必要逐步建置生產設施除役的相關處理導則與技術建議。
- 關鍵技術：**放射活化殘存量評估與測量**
- 研究架構：
 - 文獻蒐集與設施運轉資料調查→
 - 蒙地卡羅放射活化殘存量評估→
 - 測量與驗證→
 - 相關處理導則與技術建議



工作項目(109年)



1. **規劃與文獻收集**：針對迴旋加速器放射性物質生產設施，蒐集研析放射性活化分析影響或除役相關之國際學術文獻或技術報告。
2. **諸經驗國資料收集-法規要求、技術與處理實例**：針對迴旋加速器放射性物質生產設施，探討諸經驗國對除役之法規管制要求、技術措施與處理實例，擷取相關經驗回饋我國以利參考。
3. **國內設施資料收集**：蒐集並參考國內迴旋加速器放射性物質生產設施之建造特性與運轉歷史狀況，歸納建立模擬參數基礎資料庫。
4. **蒙地卡羅技術建立**：引入蒙地卡羅數值模擬運算分析方法，依前述模擬參數基礎資料庫，用以模擬評估加速器設施之放射活化污染潛勢情形，據以探討加速器組件、設施周遭介質與建物結構體等的活化影響。
5. **參數靈敏度分析**：對上述模擬參數基礎資料庫，進行參數靈敏度分析，歸納靈敏性參數類別及說明。
6. **辦理教育訓練**：彙整本研究的成果與經驗，辦理迴旋加速器放射性物質生產設施除役放射活化分析技術教育訓練。

工作項目(109年)




年月													備註	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
工作項目														
文獻收集				*										
諸經驗圖資料收集														
國內設施資料收集								*						
蒙地卡羅技術建立														
參數靈敏度分析													*	
教育訓練														
工作進度估計百分比 (累積數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		

8

文獻收集




1983-Nucl. Sci. Eng.-Neutron Producti...	2020/5/15 下午 10:29	Adobe Acrobat ...	Appendixes_-_Reference_Data_Jo_Par...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
1986_Residual Radioactivity in a Cyclo...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	European Commission_Report122_Pa...	2020/6/4 下午 01:36	Adobe Acrobat ...
1994-Med Phys-RESIDUAL LONG-LIVE...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	IAEA_SSG-49_Decommissioning of Me...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2001-AIP Conference-Predicting long...	2020/5/18 下午 02:46	Adobe Acrobat ...	IAEA_TECDOC-855 clearance level IAEA	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2001-Radiochim. Acta-Excitation funct...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	IAEA_TECDOC-1211	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2006_Health Phys_Decommissioning p...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	IAEA_TRS-414 : Decommissioning of S...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2008-Phys_Med_Biol-Monte Carlo si...	2020/5/1 下午 01:33	Adobe Acrobat ...	ICRP_Report74	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2009-NIMPRB-Characteristics compari...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	IRPA : Radiological and Economic Im...	2020/6/5 上午 01:52	Adobe Acrobat ...
2010_Med_Phys Prediction of neutron i...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	KEK_根本和善_part1_regulations	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2011-Rad.Measur.-Evaluation of neut...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	KEK_根本和善_part2_cyclotron decom...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2012_conference_Considerations Mea...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...	KEK_根本和善_part3_measurement and...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2012_Considerations-Measurements-a...	2020/4/23 下午 05:48	Adobe Acrobat ...	Material table_Compendum of Materi...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2012-AIP Conference-Considerations, ...	2020/5/18 下午 05:35	Adobe Acrobat ...	NRC_UN2910 (包裝放射物管理值)	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2015-Rad. Phys. Chem.-Accurate Mont...	2020/5/16 上午 12:26	Adobe Acrobat ...	Textbook_Quality in Nuclear Medicine...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...
2016-NIMPRB-Assessment of the prod...	2020/5/16 上午 12:37	Adobe Acrobat ...			
2016-phys. Med.-Assessment of the ne...	2020/5/18 下午 06:28	Adobe Acrobat ...			
2016-Physica Medica-Decommissioni...	2020/5/18 下午 04:47	Adobe Acrobat ...			
2016-Reevaluation of Photon Activati...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2017-Activation Reduction Method fo...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2017-AIP Conference-Activation of air ...	2020/5/18 下午 05:38	Adobe Acrobat ...			
2017-appli. Rad. Iso.-Characterisation ...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2017-appli. Rad. Iso.-Evaluation of the...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2017-Neutron transport calculation for...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2018-appli. Rad. Iso.-Validating produ...	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
2020-NUCLEAR TECHNOLOGY_Devel...	2020/6/3 下午 12:15	Adobe Acrobat ...			
RPD113(2005)140-151	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			
RPD115(2005)216-221	2020/5/1 下午 01:32	Adobe Acrobat ...			

相關文獻論文(含國內外)：27篇

相關文獻報告：12篇

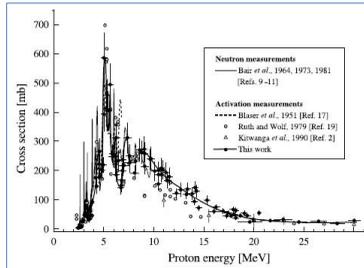
9

文獻收集



• 資料庫與驗證 (反應截面、中子/核種產率、劑量驗證)

文獻標題(英文)	文獻標題(中文)	作者	年代	國家	加速器				活化		除後 過程說明 有無	法規管制 要求/字樣 有無	資料庫與鏈條	
					機型	能量 (MeV)	使用 年限	射束 損失 ($\mu\text{A}^2\text{hr}$)/yr	自屏蔽 有無	活化 計算分析 有無				活化 量測數據 有無
Excitation function of the $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ nuclear reaction from threshold up to 30MeV	從閾值能量到30MeV的 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ 核反應的激發函數(反應截面)	E. Hess <i>et al.</i>	2001	Germany	CV28	4-21			無	無	有	無	無	臺灣所付的反應截面，也經IAEA組織所採用，可供日後驗證各Monte Carlo code內是否有正確或合理的反應截面資料或核模型。
Assessment of the production of medical isotopes using the Monte Carlo code FLUKA: Simulations against experimental measurements	使用Monte Carlo code FLUKA評估醫用同位素的產生：模擬與實驗量測比較	Angelo Infantino <i>et al.</i>	2016	Italy	TR13 TRUIME	13			有	有	有	無	無	證實FLUKA應用於13MeV質子產生正子放射核種產生的可行性。
Characterisation of the secondary neutron field generated by a compact PET cyclotron with MCNP6 and experimental measurements	藉由MCNP6模擬計算與實驗量測Compact PET迴旋加速器產生的二次中子產率的特徵	D. Albani <i>et al.</i>	2017	Italy	IBA	18	N/A	N/A	無	有	有	無	無	比較在不同位置，經SAND II code處理過之實驗值與MCNP6模擬計算值所得之平均中子能譜



經由 neutron measurement 和 activation measurement 而得的 $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ 反應截面。(E. Hess et al.,2001)

文獻收集



• 模擬計算方法

文獻標題(英文)	文獻標題(中文)	作者	年代	國家	加速器				活化		除後 過程說明 有無	法規管制 要求/字樣 有無	模擬計算方法	
					機型	能量 (MeV)	使用 年限	射束 損失 ($\mu\text{A}^2\text{hr}$)/yr	自屏蔽 有無	活化 計算分析 有無				活化 量測數據 有無
Prediction of neutron induced radioactivity in the concrete walls of a PET cyclotron vault room with MCNPX	利用MCNPX code模擬預測迴旋加速器設施中混凝土牆內因中子誘發產生的放射活性	J. Javier <i>et al.</i>	2010	Spain	GE PET TRAC	18	10	35000	有	有	有	無	有	利用MCNPX v2.6.0 code模擬計算長期轉運後混凝土牆內不同深度活化的長半衰期核種比活度。在10年的運行中估計的最高比活度受到限制之下。因此迴旋加速器室可以作為放射核種治療。
Accurate Monte Carlo modeling of cyclotrons for optimization of shielding and activation calculations in the biomedical field	對於迴旋加速器的精確Monte Carlo模型，用於優化生物醫學領域的屏蔽和活化計算	Angelo Infantino <i>et al.</i>	2015	Italy	GE PETTrace	16.5	19		無	有	有	無	無	利用FLUKA version2011.2b.6分析迴旋加速器相關的核種產生、周圍等效劑量及活化上參數的最佳化分析。模擬計算與實驗量測分析，其周圍等效劑量結果兩者的比值均在0.99-1.01之間。提供我們將來在使用FLUKA模擬活化分析上信心及參考。
Activation Reduction Method for a Concrete Wall in a Cyclotron Vault	降低迴旋加速器設施內混凝土牆活化的方法	Kazuyoshi Masumoto <i>et al.</i>	2017	Japan	no refer	30			無	有	有	無	無	利用全分析及TLD分析中子通量率。在這之後則利用PHITS模擬計算中子能譜及其引發的活化。其模擬計算結果與實驗量測結果有不錯的吻合性 (CM比值在3倍以內)
Validating production of PET radionuclides in solid and liquid targets: Comparing Geant4 predictions with FLUKA and measurements	驗證在固態或液態靶中PET正子放射核種產生：Geant4和 FLUKA MC code 間模擬預測比較、實驗量測	T. Amin <i>et al.</i>	2018	Canada	TR13 TRUIME	13			有	有	有	無	無	使用Geant4 code分析與其他文獻研究使用過的FLUKA 模擬計算值與文獻實驗值做比較，Geant4 仍在可接受的範圍內。整體而言，Geant4已經不但是用來評估低能量質子誘發放射核種產生之產率評估的工具。

文獻收集



• 設施活化計算(1/2)

文獻標題(英文)	文獻標題(中文)	作者	年代	國家	加速器				活化			除役 過程說明 有無	法規管制 要求/等級 有無	設施活化計算
					機型	能量 (MeV)	使用 年限	射束 損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{hr}$)/yr	自屏蔽 有無	活化 計算分析 有無	活化 量測數據 有無			
Residual Radioactivity in a Cyclotron and its Surroundings	迴旋加速器的殘餘放射性活度及其環境	A. B. Philips, et al	1986	USA	*For research	1-43 25	21	250000	無	無	有	有	無	實驗量測時間均在迴旋加速器停機後的一年，不論是在迴旋加速器的機件或是混凝土牆壁，所有的殘餘放射性均低於法規之解除標準。 建議不需將可測得放射性的迴旋加速器機件拆到一般環境，大部分材料將被視為低放射性廢物處理。
Residual long-level radioactivity distribution in the inner concrete wall of a cyclotron vault	迴旋加速器設施中內層混凝土牆壁的殘餘長半衰期放射性活度分布	K. Kimura et al	1994	Japan	*For research	1-40	11	150000	無	有	有	無	無	量測及根據計算顯示室內混凝土牆壁的放射性活化程度。
Predicting long-lived, neutron-induced activation of concrete in a cyclotron vault	預測迴旋加速器室混凝土中的中子誘發活化的長半衰期核種	Carroll, L. R.	2001	USA	CP-42	17 42		80000(17MeV) 100000(42MeV) 200uAfor -500 hours	無	有	有	無	無	量測及根據計算顯示室內混凝土牆壁的放射性活化程度。
Decommissioning procedures for an 11 MeV self-shielded medical cyclotron after 16 years of working time	工作16年後11 MeV自屏蔽醫用迴旋加速器的退役程序	R. Calandrio et al	2006	Italy	CTI RDS112 Eclipse	11	16		有	有	有	有	有	主要針對除設計中拆解加速器過程中，人員接受的人員劑量進行討論。根據國際工作人員有效劑量管轄小於20 mSv，且攝入的體內有效劑量大小可忽略，表示幾乎沒有風險，但仍需在除役拆解的過程中持續監控及測量，來達到除役的安全程度。 ●意大利目前的限制和法律規定要求客戶將活化部件無限期地存放在授權區域以進行放射性廢物處理。

文獻收集



• 設施活化計算(2/2)

文獻標題(英文)	文獻標題(中文)	作者	年代	國家	加速器				活化			除役 過程說明 有無	法規管制 要求/等級 有無	設施活化計算
					機型	能量 (MeV)	使用 年限	射束 損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{hr}$)/yr	自屏蔽 有無	活化 計算分析 有無	活化 量測數據 有無			
Considerations, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning	低能量迴旋加速器在除設計計畫中的注意事項、量測及廢物處理	J. J. Sunderland, C. E. Erdahl, B. R. Bender, L. Seney, and G. L. Watkins	2012	USA	Scandromax	17	20	300000	無	有	有	無	無	根據計算顯示室內混凝土牆壁的放射性活化程度，混凝土牆壁的活化程度與活化度將於設置15年後降至與背景相同；其迴旋加速器的活化度也降至37 MBq (1 mCi) 以下。
Effectiveness of self-shielding type cyclotrons	自屏蔽迴旋加速器的實效	Kanoyoshi Masumoto et al	2014	Japan	five cyclotron facilities	7-20			有	有	無	無	無	結果顯示對於有使用自屏蔽的機型而言，加速器材料與機型的活化度皆可被忽略。
Decommissioning procedures for a 17 MeV medical cyclotron	一台17MeV的醫用迴旋加速器之退役程序	L. D' Ambrosio et al	2016	Italy	MC17	17	10		無	有	有	有	無	根據計算顯示室內混凝土牆壁的放射性活化程度及除設計量測中工作人員的人員劑量。對於工作人員而言，累積的體內有效劑量管轄小於20 μSv ，而攝入的體內有效劑量大小可忽略。
Neutron transport calculation for Activation Evaluation for Decommissioning of PET cyclotron Facility	對於PET迴旋加速器設施之活化評估的中子運算計算	Kazuyoshi Masumoto et al	2017	Japan	CYPRIS-HMIS	18	20	10000	無	有	有	無	無	使用公分厚鉛的磁屏蔽加上銅包即可有效降低中子通量的78%，因此如加上這種設計的屏蔽，可有效降低中子在混凝土牆上的活化程度。
Activation of air and concrete in medical isotope production facilities	醫用同位素產生設施中空氣與混凝土的活化	Dodd, A. C., Shuckeborn, R. J., Carr, D. A., & Jamsh, A.	2017	Canada	no refer				無	有	無	無	無	結果顯示旋轉磁鐵與磁極通有最大的活化程度。不同的放射核種在不同條件中產生，且部分很低的活化放射性核種可能低於背景。

諸經驗國資料收集



- 澳洲國家醫用迴旋加速器
- 現在可以獲取ANSTO和ARPANSA公開論壇的會議記錄和演講：
 - 2010年11月30日舉行的公共論壇會議記錄：
 - Minutes - Public forum - Decommissioning the National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/minutes_forum_NMC.pdf
 - Minutes - Public forum - Decommissioning the National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/minutes_forum_NMC.rtf
 - 演講-ANSTO重大專案交付辦公室（工程和資本項目）經理Andy Garcia先生
 - ANSTO Camperdown project public presentation
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMCPublicForum_ANSTO.pdf
 - ARPANSA監管與政策部主管Rhonda Evans女士總結的要點
 - Key points - Public forum - Decommissioning of the National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMCForum_keypoints.pdf
 - Key points - Public forum - Decommissioning of the National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMCForum_keypoints.rtf

16

諸經驗國資料收集



- 澳洲國家醫用迴旋加速器
- 收到的意見書
- ARPANSA收到了三份提交的文件，其中一份在國家醫用迴旋加速器除役申請中被標記為機密。兩個公開可用的意見是：
 - Submission - City of Sydney - Decommissioning - National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMC_CityOfSydney_sub.pdf
 - Submission - University of Sydney - Decommissioning - National Medical Cyclotron
https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMC_UniversityOfSydney_sub.pdf
- ANSTO申請書
 - ANSTO Camperdown - Application to decommission - Cover letter – 7 September 2010
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/LettertoARPANSA7September2010.pdf>
- ARPANSA 許可證申請文件
 - ANSTO Camperdown Facility License Application
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/ANSTOFacilityLicenceApplicationA0230.pdf>
 - ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Effective Control Plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/EffectiveControl.pdf>
 - ANSTO Camperdown Facility decommissioning - Safety management plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/SafetyManagement.pdf>
 - ANSTO Camperdown - Decommissioning - Radiation protection plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/RadiationProtection.pdf>
 - ANSTO Camperdown Facility Waste Management Plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/WasteManagement.pdf>
 - Security plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/SecurityPlan.pdf>
 - ANSTO Camperdown Facility Decommissioning Emergency Plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/EmergencyPlan.pdf>
 - Decommissioning plan
<https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/SecurityPlan.pdf>

17

諸經驗國資料收集



• 澳洲國家醫用迴旋加速器

- 以下是ARPANSA首席執行官的決策信及其原因說明和設施許可證F0230：
 - ARPANSA CEO decision - Application to decommission the Camperdown Nuclear Medicine Cyclotron
 - <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/CEOdecisionNMC.pdf>
 - Decommissioning licence - National Medical Cyclotron
 - <https://www.arpansa.gov.au/sites/default/files/legacy/pubs/regulatory/NMC/NMCLicence.pdf>

18

諸經驗國資料收集



• 日本國家精神病學與神經醫學研究中心小型醫用迴旋加速器拆卸工作報告

• 摘要

- [目的]在醫院中安裝小型醫用迴旋加速器以生產放射性同位素的設施的數量正在增加，但是關於其拆卸和處置的報導很少。這次，我們報告了我們醫院正在拆除用於製造PET藥品的小型醫用迴旋加速器。
- [方法]將拆卸工作計劃分為**拆卸前調查**，**拆卸工作**和**拆卸後報告**。放射性物質的處理主要根據“放射線發生裝置使用設施中的放射性化合物的處理”進行處理，這是科學技術廳科長的通知。
- [結果]劑量最高的部位是靶部位的真空箔，檢出的同位素為 ^{22}Na ， ^{57}Co ， ^{60}Co ， ^{65}Zn 等。包圍放射性物質的容器的總體積為200 L 13罐和50 L 1罐。該總數小於最初計劃的數量，並且認為這主要是由於迴旋加速器的冷卻期超過一年。
- [結論]將來，為了**減少伴隨廢除加速器的放射性物質的量**，認為須評估冷卻時間並持續改善處理方法。

19

國內設施資料收集



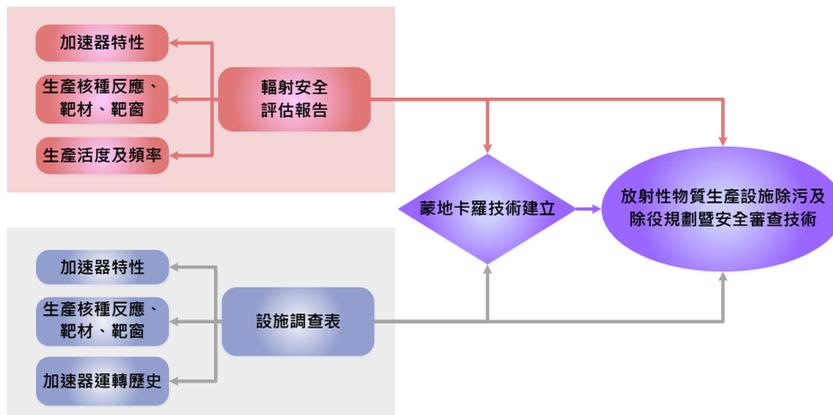
- 透過台灣醫用迴旋加速器學會來調查與蒐集，並參考國內現有13部迴旋加速器放射性物質生產設施之建造特性與運轉歷史狀況，歸納建立模擬參數基礎資料庫，收集資訊資料。

- 電話諮詢
- 問卷調查
- 訪視

2019年				
核種	平均靶電流 (μA)	照射時間 (h/w)	周射束損失 (μA-h/w)	周生產活度 (mCi/w)
F-18	40	10	400	4500
2019-w1				
2019-w2				
2019-w3				
2019-w4				
2019-w5				
2019-w6				
2019-w7				
2019-w8				
2019-w9				
2019-w10				
2019-w11				
2019-w12				
2019-w13				
2019-w14				
2019-w15				
2019-w16				
2019-w17				
2019-w18				
2019-w19				

加速器建造特性與運轉歷史調查表				
機號名稱	GE	型號		調查者
加速器廠牌	GE	型號		交收日期
加速器型號	請勾加速器「種別」或「H-O區」或「H-O區」			
加速器自體屏蔽之有無	請勾加速器「有自屏蔽」或「無自屏蔽」			
標準最大加速電壓	H	0.6 MeV		
	D	NA MeV		
加速器開始建造日(年/月/日)				
加速器完成建造日(年/月/日)				
加速器正式運轉日(年/月/日)				
許可證字號				
有效日(年/月/日)				
目前台務運轉人員數量	人			
靶材類型與使用狀況說明	生產核種	靶材	體積 (cc)	最大靶電流 (μA)
例	F-18	鈾	2.2	2
1號靶	F-18			
2號靶	C-11			
3號靶	N-13			
4號靶	O-15			
5號靶	NA			
6號靶	F-18			
7號靶	C-11			
8號靶	N-13			
靶-18水深度	%			
加速器本體資料	(請勾已加裝)或參考核射安全評估報告相關廠商文件輸入			
加速器本體材料(鉛/鋼)	鋼	鉛		
加速器本體材料厚度(cm)	24	12		
加速器自屏蔽層資料	(請勾已加裝,如無自屏蔽請填)或參考核射安全評估報告相關廠商文件輸入			
自屏蔽層材料(鉛/鋼)	鉛	鋼	鉛厚度(cm)	鋼厚度
自屏蔽層材料厚度(cm)				
最大電流說明	如:本設施於108年2月1日起靶電流由30μA提高至40μA,生產活度由3500mCi提高至5000mCi			

國內設施資料收集



國內設施資料收集



• 設施文件收集狀況、設備特性

編號	設施	輻射安全評估報告年分	配置平面圖	射束生產條件	正式運轉年分	許可證字號	廠牌	型號	序號	能量 (MeV)	加速粒子	有無自屏蔽
1	北榮	V	PDF	每季形式	81	醫物字第2100058號	Scanditronix	MC-17F	18013	17.2/17	H-	X
2	核研所	建議提供80	PDF	X	82	物字第2100058號	ACSI	TR-30/15		8.6/8	D-	X
										15~30	H-	
3	中山	V	CAD	V	88	醫物字第2100060號	CTI	RDS 111	DV17	11	H-	Y
										7.5~15	D-	
4	新光	建議提供 剛成立時報告	CAD	V	90	醫物字第2100067號	GE	Minitrace		9.6	H-	Y
5	三總	V	CAD	V	92	醫物字第2100064號	IBA	CYCLONE 18/9		18	H-	X
6	花蓮慈濟	V	PDF	V	92	醫物字第2100065號	GE	PETtrace	335UP0	9	D-	Y
										16.5/16	H-	
7	義大	V	PDF	V	94	醫物字第2100066號	GE	PETtrace		8.4/8	D-	Y
										16.5	H-	
8	阮綜合	建議提供新增C-11評估報告	PDF	V	94	醫物字第2100078號	Sumitomo	HM-12S	6	8.4	D-	Y
										12	H-	
9	台大	V	PDF	V	94	醫物字第2100068號	GE	PETtrace	644UP5	16.5	H-	Y
10	林口長庚-S	V	CAD	V	96	醫物字第2100070號	Sumitomo	HM-12S	WWCF2200	8.4	D-	Y
										12	H-	
11	林口長庚-GE	V	PDF	V	104	醫物字第2100193號	GE	PETTrace 880S	2169UP1	16.5/16.4	H-	Y
										6/NA	D-	
12	士宜	X	PDF	建議修正格式	106		Sumitomo	HM-12S		NA	D-	Y
										12	H-	
13	新吉美碩	V	CAD	V	107	物字210088號	IBA	KIUBE 100		18	H-	X
											D-	

國內設施資料收集



• 各設施對應靶號、生產核種、靶材、照射能量、靶電流、靶體與靶窗資訊(1/3)

設施代碼	安裝靶號	生產核種	生產核種反應	靶材	靶材型態	照射能量 (MeV)	照射靶體積 (c.c.)	最大靶電流 (μA)	最大生產深度 EOB (mCi)	靶體材料	靶窗材質	靶窗厚度 (μm)	靶型號	
A	1	C-11	14N(p,n)11C		gas		750	40	2000	Al				
	3	O-15			gas		250	30	300	Al				
	5	F-18(F2)	18O(p,n)18F	18O-F2	gas		300	40	200	Ni				
	6	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water		2.7	45	2000	Nb				
	7	N-13	16O(p,α)13N		water		3.5	10	100	Al				
	8	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water		0.7	40	1000	Nb				
	B	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	17	3	12	1000				
2		Tl-201	203Tl(p,3n)201Tl	Tl-203	solid	30		200	2000					
3		Ga-67	68Zn(p,2n)67Ga	Zn-68	solid	30		160	2000					
4		In-111	112Cd(p,2n)111In	Cd-112	solid	30		160	2000					
5		I-123	124Xe(p,2n)123Xe → 123I	Xe-124	gas	30		120	1.2					
其他		Co-57	58Ni(p,2p)57Co		solid	30								
其他		Ge-68	69Ga(p,2n)68Ge		solid	30								
其他		Mo-99	100Mo(p,pn)99Mo		solid	30								
其他		Tc-99m	100Mo(p,2n)99mTc		solid	30								
其他		Zr-89	89Y(p,n)89Zr		solid	26								
其他		Cu-62												
其他		Cu-64												
其他		I-124												
其他		Pb-201												
其他		Zn-62												
研究用		neutron		一般研究用照射和靶靶 (用於產生中子源 中子應用研究) 9Be(p,n)9Be →8Be + 4He	9Be	solid	30							

國內設施資料收集



- 各設施對應靶號、生產核種、靶材、照射能量、靶電流、靶體與靶窗資訊(2/3)

設施代碼	靶號	生產核種	生產核種反應	靶材	靶材型態	照射能量 (MeV)	照射靶體積 (cc)	最大靶電流 (µA)	最大生產深度 EBH (µm)	靶體材料	靶窗材料	靶窗厚度 (µm)	靶型號	
C	1-1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	11	2.2	40	2400	Ag	Havar	25.4		
	2-1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	11	2.2	40	2400	Ag	Havar	25.4		
	-	N-13	16O(p,n)13N	H2O (5 mMol Ethanol)	water	11				Al	Titanium	25.4		
	-	C-11	14N(p,n)11C	14N+1% O2	gas	11				Al	Havar	25.4		
	-	O-15	15N(p,n)15O	15N+1% O2	gas	11				Al	Havar	25.4		
D	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	9.6	2.3	45	2500					
	2	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	9.6	2.3	45	2500					
E	1	F-18(小靶)	18O(p,n)18F	H2O18	water	18	1.1	30	1500	Nb	Havar	50		
	-	F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne-0.5%F2	gas	9				Nb	Havar	18		
	3	C-11	14N(p,n)11C	14N+O2	gas	18	50	35	1200	Al	Al	500		
	-	NA												
	5	F-18(大靶)	18O(p,n)18F	H2O18	water	18	2.4	40	5000	Nb	Havar	50		
	-	O-15	14N(d,n)15O	N2 +O2 或 CO2	gas	9				Al	Havar	25		
	-	NA												
	-	N-13	16O(p,n)13N	H2O (5 mMol Ethanol)	water	18	1.7	30	800	Al	Havar	25		
	F	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16	2.5	40	2500	Nb			
		2	N-13	16O(p,n)13N	H2O (5 mMol Ethanol)	water	16	0.8	30	700	Ag			
3		O-15	14N(d,n)15O	N2 +O2 或 CO2	gas	8	35.5	40	2000	Al				
5		C-11	14N(p,n)11C	14N+O2	gas	16	79.5	50	3000	Al				
6		F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne+1%F2	gas	8	60	40	500	Al				
G		1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.7	30	5500	Nb	Havar& Titanium	25	
	-	N-13	16O(p,n)13N	H2O (5 mMol Ethanol)	water	16.5				Ag	Havar& Titanium	25		
	-	O-15	14N(d,n)15O	N2 +1%O2	gas	8.4				Al	Havar	25		
	4	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.7	30	5500	Nb	Havar& Titanium	25		
	-	C-11	14N(p,n)11C	14N+0.5%O2	gas	16.5				Al	Havar	25		
	-	F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne+0.5-1%F2	gas	8.4				Al	Havar& Titanium	25		

國內設施資料收集



- 各設施對應靶號、生產核種、靶材、照射能量、靶電流、靶體與靶窗資訊(3/3)

設施代碼	靶號	生產核種	生產核種反應	靶材	靶材型態	照射能量 (MeV)	照射靶體積 (cc)	最大靶電流 (µA)	最大生產深度 EBH (µm)	靶體材料	靶窗材料	靶窗厚度 (µm)	靶型號
H	A-2	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	12	2.2	60	5000	Nb			
	B-2	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	12	2.2	60	5000	Nb			
	A-1	C-11	14N(p,n)11C	14N+O2	gas	12	88	40	1700	Al			
I	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.5	40	8000	Nb	Havar	25/50	
	2	N-13	16O(p,n)13N	Deionated Water	water	16.5	0.8	30	450	Ag	Havar& Titanium	25	
	-	O-15	14N(d,n)15O	N2 +1%O2	gas	8.4			40	Al	Havar	25	
	4	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.5	40	8000	Nb	Havar	25/50	
	5	C-11	14N(p,n)11C	14N+0.5%O2	gas	16.5	78	50	3000	Al	Havar	25	
	6	F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne+0.3%F2	gas	8.4	60	40	300	Al	Havar	25	
J	A-1	C-11	14N(p,n)11C	14N2 Gas	gas	15	30	1300	Al	Havar	25		
	A-2	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	2.4	45	6500	Nb	Havar	25		
	A-3	N-13	16O(p,n)13N	H2O (5 mMol Ethanol)	water	2.4	30	220	Ag	Havar	25		
	-												
	B-1	F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne+2%F2	gas	15	40	350	Al	Havar	25		
	B-2	F-18	18O(p,n)18F	18O enriched Gas with 0.5% Ar carrier	gas	2.4	45	6500	Nb	Havar	25		
	B-3	O-15	14N(d,n)15O	N2 +0.5%O2 或 +2.5%CO2	gas	2.4	40	110	Ag	Havar	25		
K	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.4	65	13000	Nb	Havar	25/50	
	-	N-13	16O(p,n)13N	16O	water	16.5				Ag	Havar& Titanium	25	
	-	O-15	14N(d,n)15O	N2 +1%O2	gas	8.4				Al	Havar	25	
	4	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	16.5	2.4	65	13000	Nb	Havar	25/50	
	-	C-11	14N(p,n)11C	14N+1%O2 或 10%ethanol	gas	16.5				Al	Havar	25/50	
	-	F-18(F2)	20Ne(d,n)18F2	Ne+0.3%F2	gas	8.4				Al	Havar	25	
	-												
	1	F-18	18O(p,n)18F	H2O18	water	12	2.2	60	4500				
M	1	F-18(小靶)	18O(p,n)18F	H2O18	water	18	2.5	45	4500	Nb	Havar	35	Conical 5
	5	F-18(小靶)	18O(p,n)18F	H2O18	water	18	2.5	45	4500	Nb	Havar	35	Conical 5
	7	F-18(大靶)	18O(p,n)18F	H2O18	water	18	5	85	10000	Nb	Havar	35	Conical 12
	8	Gas	60Zn(p,n)60mZn	60Zn+0.5%O2	solid	18				Nb	Nb		Mini 60Zn

國內設施資料收集



- 各設施對應靶號、生產核種、歷年資料、靶電流、照射時間與生產活度(1/3)

設施代碼	安裝靶號	生產核種	歷年資料 起始年份	歷年資料 終尾年份	平均 靶電流 (μA)	平均每週 照射時間 (h/w)	平均每週 射束損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{h/w}$)	平均每週 生產活度 ($\text{mCi}\cdot\text{h/w}$)	平均每年 總靶電流 ($\mu\text{A}/\text{年}$)	平均每年 總照射時間 (h/年)	平均每年 總射束損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{h}/\text{年}$)	平均每年 總生產活度 ($\text{mCi}/\text{年}$)	
A	1	C-11											
	3	O-15	2001	2005/2019	31.2				52.7		30.2	7222.0	
	5	F-18(F2)	2001	2019	39.5				256.0		488.2	2445.9	
	6	F-18											
	7	N-13	2001	2019	10.4				59.8		137.0	2937.4	
	8	F-18											
	B	1	F-18										
		2	Tl-201										
3		Ga-67											
4		In-111											
5		I-125											
其他		Co-57											
其他		Cr-51											
其他		Mn-56											
其他		Tc-99m											
其他		Zn-69											
其他		Cs-132											
其他		Cs-134											
其他		I-124											
其他		Pb-201											
其他		Zn-62											
研究用		incision											
C		1-1	F-18	2010	2019	31.5	21.2	669.4	16148.8	1667.7	1121.8	35477.4	851219.5
	2-1	F-18	2010	2019	31.0	21.1	661.0	10776.2	1645.6	1116.7	35034.8	564994.8	
	-	N-13											
	-	C-11											
	-	O-15											

國內設施資料收集



- 各設施對應靶號、生產核種、歷年資料、靶電流、照射時間與生產活度(2/3)

設施代碼	安裝靶號	生產核種	歷年資料 起始年份	歷年資料 終尾年份	平均 靶電流 (μA)	平均每週 照射時間 (h/w)	平均每週 射束損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{h/w}$)	平均每週 生產活度 ($\text{mCi}\cdot\text{h/w}$)	平均每年 總靶電流 ($\mu\text{A}/\text{年}$)	平均每年 總照射時間 (h/年)	平均每年 總射束損失 ($\mu\text{A}\cdot\text{h}/\text{年}$)	平均每年 總生產活度 ($\text{mCi}/\text{年}$)
D	1	F-18	2017	2018	45.0	11.8	530.2	14488.9	1980.0	511.1	23009.3	627746.0
	3	F-18	2010	2020	40.4	10.2	407.6	61450.2	1942.0	449.6	17651.4	3150691.5
E	1	F-18(小靶)	2003	2019	20.7	3.0	69.5	3764.0	1090.1	156.0	3658.4	198264.3
	-	F-18(F2)										
	3	C-11	2003	2019	9.7	0.4	9.6	1241.8	511.9	18.8	510.4	65816.7
	-	NA										
	5	F-18(大靶)	2003	2019	24.6	2.5	83.4	4456.4	1304.9	130.4	4420.9	236190.9
-	O-15											
-	NA											
-	N-13	2003	2019	1.0	0.0	0.5	17.4	55.5	0.9	27.4	920.3	
F	1	F-18	2003	2019	35.7	1.2	44.1	2775.2	1890.4	64.4	2337.1	147083.5
	2	N-13										
	3	O-15										
	5	C-11										
	6	F-18(F2)										
	G	1	F-18	2004	2019	57.8	4.8	285.4	13698.1	2354.3	187.7	11218.7
-		N-13										
-		O-15										
4		F-18	2004	2019	57.9	4.6	275.3	13171.0	2392.9	183.6	11010.9	528458.1
-		C-11										
H	A-2	F-18	2005	2017/2019	60.0	4.9	294.7	10855.1	3180.0	191.2	11470.7	421769.8
	B-2	F-18	2005	2017/2019	60.0	17.0	1018.9	9671.0	3180.0	677.9	40671.3	389194.1
	A-1	C-11	2008	2017/2019	40.0	0.8	32.8	1510.5	352.0	10.6	422.8	19368.6
	-	F-18(F2)										

國內設施資料收集



- 各設施對應靶號、生產核種、歷年資料、靶電流、照射時間與生產活度(3/3)

設施代碼	靶號	生產核種	歷年資料 起始年份	歷年資料 終尾年份	平均 靶電流 (μA)	平均每周 照射時間 (h/w)	平均每周 劑量積大 (Gy/hw)	平均每周 生產活度 (MBq/hw)	平均每季 總靶電流 (μA/q)	平均每季 總照射時間 (h/q)	平均每季 總劑量積大 (Gy/q)	平均每季 總生產活度 (MBq/q)
I	1	F-18	2005	2019	57.9	7.0	465.4	5745.1	2935.1	356.4	23859.8	305726.9
	2	N-13	2017	2019	10.0	0.3	2.6	153.3	464.5	5.6	55.6	3320.5
		O-15										
	4	F-18	2005	2006/2019	33.3	0.9	31.6	2275.6	724.0	20.6	761.0	56195.0
	5	C-11	2013	2019	49.9	7.2	360.8	83.3	2159.1	137.0	6897.9	2509.5
	6	F-18(F2)										
J	A-1	C-11	2007	2019	30.0	1.0	29.5	991.6	512.5	18.2	544.8	18394.9
	A-2	F-18	2007	2019	48.1	7.2	346.5	10015.6	2158.5	310.9	15045.2	436136.0
	A-3	N-13	2007	2008/2019	37.5	0.8	25.0	337.5	30.0	0.7	21.7	287.5
	B-1	F-18(F2)	2007	2007/2019	15.0	1.0	30.0	400.0	45.0	3.0	90.0	1200.0
	B-2	F-18	2007	2019	47.5	6.2	295.8	8893.6	2445.6	323.7	15486.3	463726.2
	B-3	O-15										
K	1	F-18	2014	2019	53.1	6.4	338.6	16998.5	2481.3	327.3	17376.1	900886.0
		N-13										
		O-15										
	4	F-18	2014	2019	53.2	6.5	345.8	17012.5	2406.7	334.3	17633.2	901620.2
		C-11										
		F-18(F2)										
L	1	F-18										
	2	F-18										
M	1	F-18(小靶)	2019	2020/5	53.3	1.4	68.7	3101.6	239.0	7.8	362.8	15685.8
	5	F-18(小靶)	2019	2020/5	54.3	1.1	59.2	2438.2	218.4	6.3	294.3	11899.3
	7	F-18(大靶)	2019	2020/5	83.0	4.0	335.4	23115.3	1782.9	84.4	7055.9	491034.3
	8	Gd-68										



National Tsing Hua University
國立清華大學核子工程與科學研究所




確保核安 低碳家園

Thanks

