

核能安全委員會

委託研究計畫書

(案號：AEC11012047L)

高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究

---112 年度期末報告---

委託單位：核能安全委員會

執行單位：國立清華大學

中華民國 112 年 11 月

摘要

國內將有數座高強度輻射設施，包括多座質子(~250 MeV)癌症治療機、1 座重離子(~400 MeV/A)癌症治療機、以及二座高能電子(1500 與 3000 MeV)同步輻射加速器。由於上述質子/重離子癌症治療與高能電子加速器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，已在國際逐漸形成討論焦點。因此在未來幾年，國內有必要逐步建置高強度輻射設施活化產物管理與輻射安全評估的建議。因此，本計畫針對上述國內高強度輻射設施進行放射活化特性研究，建立其運轉產生之活化產物活度與殘存評估技術、放射性廢棄物的抑低與管理相關規範的精進，提出高強度輻射設施進行除污及除役規劃建議，以利未來設施除役的規劃執行與安全審查。考量各種加速器的特性及其二次中子產生機制與引發物質活化的差異，本計畫以加速器類型區分為(1)質子/重離子癌症治療加速器與(2)高能電子加速器二大類來分別探討，111 年進行二類設施各式加速器的大致輻射等級的比較分析，並深入探討質子/重離子治療機運轉引發之物質活化議題，112 年則以探討 GeV 等級高能電子加速器的物質活化問題為主軸。計畫成果與經驗將有利於國內對於加速器運轉引發物質活化相關議題的管理與管制。

Abstract

There will be several high-intensity accelerator facilities in Taiwan, including a few proton (~250 MeV) cancer therapy machines, one heavy-ion (~400 MeV/A) cancer therapy machine, and two high-energy electrons (1500 and 3000 MeV) synchrotron facilities. Significant secondary neutrons may be generated through hadronic cascades in proton/heavy-ion induced nuclear reactions or photonuclear reactions after electromagnetic cascades in high-energy electron accelerators. Those neutrons potentially induce material activation in accelerator components and surrounding environment to varying degrees depending on the characteristics of neutrons and material properties. Therefore, studies on radiation protection aspects in decontamination and decommissioning of these facilities are deemed to be important and necessary for both the facility owners and regulatory agencies. Based on collected operation histories and advanced Monte Carlo techniques, the project aimed to develop suitable models and methodologies to quantify the magnitudes and general trends of material activation in the above-mentioned facilities. Accordingly, practical guidelines or recommendations are provided to support future decommissioning activities. Considering the mechanisms and characteristics of the secondary neutron production in these facilities, this project was divided into parts. A comparative study of the two categories was performed and an in-depth investigation of the material activation caused by the operation of proton/heavy-ion therapy accelerators was conducted in 2022. In this year, the focus was shifted to the material activation of GeV-grade high-energy electron accelerators. The results and experience obtained from this project will facilitate the management and regulation of material activation in these facilities.

目錄

目錄.....	III
圖目錄.....	VI
表目錄.....	X
第一章、背景與目的.....	1
第二章、預期完成之工作項目與時程規劃	3
第三章、計畫工作項目與成果.....	6
3.1 文獻收集與研析.....	6
3.1.1 除役相關建議	6
3.1.2 活化產物的生成途徑	6
3.1.3 電子加速器二次中子產率與活化	7
3.2 高能電子加速器設施資料收集與彙整.....	18
3.3 蒙地卡羅技術建立 II.....	23
3.3.1 二次中子產率驗證	23
3.3.2 靶材活化驗證	25
3.3.3 高能電子加速器設施中子產率及活化評估	31
3.4 參數靈敏度分析 II.....	39
3.4.1 能量差異對活化的影響	40
3.4.2 照射情節對活化的影響	44
3.4.3 靶材差異對活化的影響	50
3.4.4 實際運轉情節對活化結果的修正	56
3.5 活化評估/量測/管理的建議	57
3.6 研討會.....	57
3.7 結論.....	62
參考資料.....	64
附件一 IAEA-NW-T-2.9 : Decommissioning of Particle Accelerators	66
4.1 引言.....	66
4.1.1 背景	66

4.1.2	目的	69
4.1.3	範圍	69
4.1.4	架構	70
4.2	加速器設施的分布	70
4.3	加速器特性、種類及重要組件	71
4.3.1	引言	71
4.3.2	加速器與輻射	72
4.3.3	粒子加速器的分類	74
4.3.3.1	分類基準	74
4.3.3.2	第一類至第四類粒子加速器特性	76
4.3.4	第一類粒子加速器	78
4.3.5	第二類粒子加速器	78
4.3.5.1	中等能量加速器	78
4.3.5.2	直線加速器	79
4.3.5.3	迴旋加速器	79
4.3.6	第三類粒子加速器	79
4.3.7	第四類粒子加速器	80
4.4	加速器設施的輻射(活化)特性	80
4.4.1	第一類加速器特性	82
4.4.2	第二類加速器特性	83
4.4.3	第三類及第四類加速器特性	87
4.5	加速器除役規劃及執行	90
4.5.1	除役策略	90
4.5.2	影響除役策略的因素	91
4.5.3	除役規劃	91
4.5.4	環境衝擊評估	92
4.5.5	除役計劃的準備與執行	93
4.5.6	加速器拆除技術	94
4.5.7	組織和管理	94

4.5.8 利益關係人(設施所有人).....	95
4.5.9 因應除役需要的設施設計	95
4.6 備用組件及廠房的再利用.....	97
4.7 成本.....	97
4.7.1 成本估算	98
4.7.2 成本結構	99
4.7.3 財務審查	100
4.7.4 資金	101
4.8 放射性廢棄物管理.....	101
4.8.1 放射性廢棄物處理與管理的一般性原則	101
4.8.2 放射性廢棄物處理與管理的特殊原則	102
4.9 健康與安全.....	103
4.9.1 IAEA 安全標準.....	103
4.9.2 除役安全分級	105
4.9.3 分級方法的意義	105
4.9.4 輻射防護	106
4.9.5 環境保護	107
4.9.6 輻射與非輻射危害	108
4.10 結論.....	110
附件二 加速器運轉引發物質活化的分析：週期性與連續照射情節的差異與修正	112

圖目錄

圖 3.1. 光子與銅靶作用的反應截面[4].....	7
圖 3.2. 100 MeV 以下電子與 12 種靶材作用後的中子產率[3].....	8
圖 3.3. 150 – 266 MeV 電子作用在 4.3 倍 radiation length(X_0)的鉛靶，於靶材 90° 方向的二次中子能量分布，圖中實線為基於 Quasi-neutron effect 所預測的二次中子能量分布[3].....	9
圖 3.4. 400 MeV 電子與厚銅靶作用後的二次中子產率隨角度的變化[3].....	9
圖 3.5. (a)5.5 公分鉛靶 (b)3.5 公分鎢靶 (c)12.1 公分錫靶及 (d)14 公分銅靶受 2.04 GeV 電子照射後的二次中子產率，點為實驗結果，線為蒙地卡羅 MCNPX2.5d 的計算結果[7].....	10
圖 3.6. Brugger 等人利用 2.5 GeV 電子轟擊銅靶(紅)並在側向(T1-T3)及後向(D)放置樣品進行活化實驗[9].....	15
圖 3.7. 1.3 GeV 電子同步加速器中的 4 個樣品殘存活度量測結果[10]	17
圖 3.8. TLS 同步加速器示意圖[2].....	19
圖 3.9. 以 2.04 GeV 電子轟擊鉛靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果(點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較.....	24
圖 3.10. 以 2.04 GeV 電子轟擊鎢靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果(點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較	24
圖 3.11. 以 2.04 GeV 電子轟擊錫靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果(點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較	25
圖 3.12. 以 2.04 GeV 電子轟擊銅靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果(點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較	25
圖 3.13. (左)IAEA-188 號報告[3]中鉛靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較.....	27
圖 3.14. (左)IAEA-188 號報告[3]中鐵靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較.....	27
圖 3.15. (左)IAEA-188 號報告[3]中銅靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較.....	28
圖 3.16. (左)IAEA-188 號報告[3]中鎢靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本	

團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較.....	28
圖 3.17. (左)IAEA-188 號報告[3]中鉛靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本 團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較.....	28
圖 3.18. (左)Brugger 等人[9]的不鏽鋼活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果	30
圖 3.19. (左)Brugger 等人[9]的鋁活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果.....	30
圖 3.20. (左)Brugger 等人[9]的銅活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果.....	30
圖 3.21. 參考 TPS 安全分析報告建立之 FLUKA 幾何模型[2].....	32
圖 3.22. 3 GeV 電子+Fe 的二次中子產率、角度分布及能量分布.....	33
圖 3.23. 鐵靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化	34
圖 3.24. 鐵靶材受 3 GeV 電子照射後，可能生成 ^{55}Fe 的活化途徑.....	34
圖 3.25. 鐵靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形.....	34
圖 3.26. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的前向混凝土殘存比活度隨冷 卻時間的變化.....	35
圖 3.27. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的側向混凝土殘存比活度隨冷 卻時間的變化.....	36
圖 3.28. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子在表混凝土面的通量分布.....	36
圖 3.29. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的 殘存活度分布情形.....	37
圖 3.30. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘 存活度在不同深度的變化.....	37
圖 3.31. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘 存活度在不同深度的變化.....	38
圖 3.32. 3 GeV 及 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶的中子產率比較.....	40
圖 3.33. 鐵靶材經 1.5 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化	41
圖 3.34. 鐵靶材經 1.5 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形...41	41
圖 3.35. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的前向混凝土殘存比活度隨 冷卻時間的變化.....	42
圖 3.36. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的側向混凝土殘存比活度隨	

冷卻時間的變化.....	42
圖 3.37. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形.....	43
圖 3.38. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘存活度在不同深度的變化.....	44
圖 3.39. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘存活度在不同深度的變化.....	44
圖 3.40. 鐵靶材經 3 GeV 電子異常運轉照射後，殘存活度隨冷卻時間的變化..	46
圖 3.41. 鐵靶材經 3 GeV 電子異常運轉照射後，經一年冷卻後的殘存活度分布情形.....	46
圖 3.42. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，轟擊鐵靶材所誘發的前向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化.....	47
圖 3.43. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，轟擊鐵靶材所誘發的側向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化.....	47
圖 3.44. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形.....	48
圖 3.45. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘存活度在不同深度的變化.....	48
圖 3.46. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘存活度在不同深度的變化.....	49
圖 3.47. 3 GeV 電子轟擊在鐵、鋁、銅、鎢的二次中子能量分布	50
圖 3.48. 鋁靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化	51
圖 3.49. 鋁靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形	51
圖 3.50. 銅靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化	52
圖 3.51. 銅靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形	52
圖 3.52. 鎢靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化	53
圖 3.53. 鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形	53
圖 3.54. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3GeV 電子照射結束後前向混凝土的殘存比活度隨冷卻時間的變化.....	54
圖 3.55. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束後前向混凝土的殘存比活度	

隨冷卻時間的變化.....	55
圖 3.56. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束，並經過一年冷卻後，前向 混凝土中 7 種重要核種的殘存活度與外釋基準的比值.....	56
圖 3.57. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束，並經過一年冷卻後，側向 混凝土中 7 種重要核種的殘存活度與外釋基準的比值.....	56
圖 3.58. 研討會簽到單(1/2).....	58
圖 3.59. 研討會簽到單(2/2).....	59
圖 3.60. 計畫主持人許榮鈞教授為研討會進行開場.....	60
圖 3.61. 與會人員照片.....	60
圖 3.62. 同步輻射中心林郁琦博士對 TPS 進行介紹.....	61
圖 3.63. 房博文針對 IAEA-NW-T-2.9 號報告進行介紹.....	62
圖 4.1. 世界各地的加速器.....	71

表目錄

表 3.1. 鋁靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3].....	11
表 3.2. 鐵靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3].....	12
表 3.3. 銅靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3].....	12
表 3.4. 鎢靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3].....	13
表 3.5. 鉛靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3].....	13
表 3.6. 不鏽鋼樣品中的活化核種飽和比活度實驗結果及 FLUKA 計算結果.....	14
表 3.7. 不鏽鋼(D, steel)的活化量測結果與 FLUKA 計算結果的比較[9].....	15
表 3.8. 鋁(D, Al)的活化量測結果與 FLUKA 計算結果的比較[9].....	16
表 3.9. 日本境內 5 部電子加速器特性一覽[12].....	18
表 3.10. TPS 正常運轉情況下的射束損耗分析[2].....	20
表 3.11. 安全分析報告運轉參數及實際運轉參數比較.....	21
表 3.12. 根據 TPS 安全分析報告推估之年度粒子損失.....	22
表 3.13. 根據 TPS 實際運轉狀況推估的年度粒子損失.....	22
表 3.14. 3 GeV 電子入射的 5 種靶材設計.....	26
表 3.15. Brugger 等人[9]的活化實驗中，不鏽鋼、銅、鋁的活化樣品元素組成.....	29
表 3.16. 混凝土塊材成份表，比例為重量百分濃度.....	32
表 3.17. TPS 安全評估報告[2]與本研究的模型比較.....	39
表 3.18. 3 GeV 轟擊在鐵、鋁、銅、鎢的二次中子產率及平均能量.....	50
表 4.1. 6 種 (p,n) 核反應及對應的閾值能量.....	73
表 4.2. 依加速器應用進行分類.....	74
表 4.3. 依粒子能量進行分類.....	76
表 4.4. 加速器中的組件及其功能.....	77
表 4.5. 加速器組件中常見的活化核種.....	81
表 4.6. 第一類 LINAC 中典型活化核種.....	82
表 4.7. 第二類加速器的主射束所誘發的活化核種.....	85
表 4.8. 第二類加速器的二次中子所誘發的活化核種.....	85
表 4.9. 混凝土內的活化核種示例.....	86
表 4.10. 高能量電子對撞機中常見的活化核種.....	88

表 4.11. 強子加速器各個材料的活化通道及活化核種.....89

第一章、背景與目的

本研究針對國內高強度輻射設施進行除污及除役規劃暨安全審查技術相關研究，第一年針對質子及重離子癌症治療機的活化進行探討，本年度則針對國內兩座高能電子(1500~3000 MeV)加速器活化進行分析。上述加速器在運轉期間會因高能粒子與物質發生核反應，誘發二次中子，再進一步活化設施周遭的各式材料，如加速器磁鐵、屏蔽，造成設施除役時的廢棄物處理問題，而主管機關對於上述潛在的放射性廢棄物管理議題，同樣需要被考慮。有鑑於此，本研究統整國內的高強度設施進行分析，旨在建立放射活化殘存評估技術，並呈現高強度設施的殘存活度特性，俾利設施進行活化產物管理及輻射安全評估規範及輻射安全評估作業。活化分析技術與結果也有利主管機關瞭解設施的殘存活度分析歷程及概況，俾利未來進行高強度設施的除役導則審查等相關工作。

本計畫第一年(111 年)針對國內質子/重離子癌症治療高強度輻射設施進行研析，其中六大工作項目：(1)針對高強度輻射設施，蒐集研析放射性活化分析影響相關之國際學術文獻或技術報告。(2)針對國內數種不同高強度輻射設施的類別，建立初步活化分析技術，探討重要組件與設施周遭介質活化大致趨勢，並歸納比較不同設施活化程度的等級。(3)調查盤點國內~250 MeV 質子治療機與~400 MeV 重離子治療機的設備特性與運轉情形，著重收集與設施物質活化相關的運轉參數。(4)針對上述質子/重離子癌症治療設施，引入蒙地卡羅數值模擬運算分析方法，依前述運轉參數的收集，用以模擬評估相關加速器設施之放射活化潛勢的情形，據以探討重要組件與設施周遭介質的活化影響。(5)針對質子/重離子癌症治療設施，透過設施規格與運轉參數的靈敏度分析，建立其與周遭物質活化的關聯性，歸納比較設施等級，並探討抑低(預防)物質活化程度的方法與可行性評估。(6)辦理高強度加速器設施除役放射活化評估技術教育訓練 1 場皆順利完成，內容詳見 111 年期末報告。

本計畫第二年(112 年)針對國內高能電子加速器設施 Taiwan Light Source (TLS：1500 MeV)與 Taiwan Photon Source (TPS：3000 MeV)進行研析，根據國外

相關文獻針對高能電子加速器的活化評估結果，並結合國內 TPS 設施的安全評估報告，瞭解高能電子加速器設施的活化特性，研究活化產物活度評估技術，並結合物質外釋相關規範，落實電子加速器設施的安全評估報告審查，確保人員及環境輻射安全。計畫書規劃工作項目主要包括：(1)調查盤點國內二座高能電子加速器：Taiwan Light Source 與 Taiwan Photon Source 的設備特性與運轉情形，著重收集與設施物質活化相關的運轉參數。(2)針對上述高能電子加速器設施，引入蒙地卡羅數值模擬運算分析方法，依前述運轉參數的收集，用以模擬評估相關加速器設施之放射活化潛勢的情形，據以探討重要組件與設施周遭介質的活化影響。(3)針對高能電子加速器設施，透過設施規格與運轉參數的靈敏度分析，建立其與物質活化產物活度與殘存劑量評估關聯性，並歸納比較設施差異。(4)彙整文獻與二年研究成果，建立高強度輻射設施(質子/重離子癌症治療與高能電子加速器)的活化評估與量測方法的建議，以及設施活化產物管理與輻射安全評估的建議。(5)辦理高強度加速器設施活化產物活度與殘存評估輻射安全研討會 1 場。

本計畫總體目標是針對高強度輻射設施進行國外放射性活化分析相關文獻回顧、國內設施運轉歷程調查、放射性活化情形評估及參數靈敏度分析，俾利輔導設施經營者順利完成設施除役作業。111 年著重在文獻回顧與蒙地卡羅技術建立，研析高強度輻射設施之活化情形與除役策略，根據文獻回顧結果建立可靠的蒙地卡羅分析技術，最後彙整研究成果辦理高強度加速器設施除役放射活化評估技術教育訓練。本年度(112 年)著重在高能電子加速器設施的活化狀況評估，以 TPS 安全評估報告內容為基礎，瞭解早期高能電子加速器設施對於活化的評估結果，並與文獻回顧進行比較，補足 TPS 安全評估報告中可能的不足，再結合目前國內高能電子加速器設施的運轉狀況進行設施的活化評估，活化的評估將利用蒙地卡羅進行計算及靈敏度分析，最後彙整 111 及 112 年度研究成果辦理輻射安全研討會。

第二章、預期完成之工作項目與時程規劃

本年度主要工作項目包括(1)調查盤點國內二座高能電子加速器：Taiwan Light Source (1500 MeV)與 Taiwan Photon Source (3000 MeV)的設備特性與運轉情形，著重收集與設施物質活化相關的運轉參數。(2)針對上述高能電子加速器設施，引入蒙地卡羅數值模擬運算分析方法，依前述運轉參數的收集，用以模擬評估相關加速器設施之放射活化潛勢的情形，據以探討重要組件與設施周遭介質的活化影響。(3)針對高能電子加速器設施，透過設施規格與運轉參數的靈敏度分析，建立其與物質活化產物活度與殘存評估關聯性，並歸納比較設施差異。(4)彙整文獻與二年研究成果，建立高強度輻射設施(質子/重離子癌症治療與高能電子加速器)的活化評估與量測方法的建議，以及設施活化產物管理與輻射安全評估的建議。(5)辦理高強度加速器設施活化產物活度與殘存評估輻射安全研討會 1 場。為完成上述工作事項並達到計畫目標，本計畫採取下列方法與步驟：

1. 邀請國家同步輻射研究中心輻射安全人員參與本計畫，以利收集 Taiwan Light Source (1500 MeV)與 Taiwan Photon Source (3000 MeV)設施運轉數據與資訊解讀，特別著重可能與射束損失(物質活化源頭)相關之運轉參數，如運轉電流、運轉時間、正常與不預期射束損失的數量與分佈等資訊。提醒注意：同步輻射電子加速器的運作模式與質子/重離子癌症治療加速器的運轉模式有很大的差異，癌症治療加速器目的是直接利用加速之質子/重離子照射病人治療癌症或照射水假體進行品管程序，但是同步輻射加速器的目的是利用電子轉彎產生的同步輻射，不希望原始電子損失，因此二類設施的射束損失數量與情節大不相同，此一差異是本研究收集運轉資訊與建立物質活化模型必須特別注意之處。
2. 利用設施運轉參數調查結果與射束損失情節，據以建立同步輻射電子加速器的蒙地卡羅模擬模型，藉以評估加速器組件及周遭環境的活化潛勢。

3. 本研究透過一系列參數靈敏性的研究，連結加速器組件活化程度與眾多因子間的影響程度，透過量化關係以期能做為評估高能電子加速器運轉產生之物質活化的程度，最後並歸納比較設施差異。
4. 整合二年的文獻回顧及蒙地卡羅分析結果，據以提出高強度輻射設施(質子/重離子癌症治療與同步輻射電子加速器)的活化評估與量測方法的建議，以及設施活化產物管理與相關輻射安全評估的建議。
5. 彙整年度成果與各設施參與人員提供之實務經驗，邀請講員辦理國內高強度輻射設施活化產物活度與殘存劑量評估的研討會，分享相關資訊，接受各界意見回饋，以期達到學術與實務應用整合。

針對前述工作項目，本團隊以下表時程依序完成規劃中的各個項目：

[112 年]

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	高能電子加速器設施資料收集與彙整				*							
蒙地卡羅技術建立 II												
參數靈敏度分析 II								*				
活化評估/量測/管理的建議												*
研討會												
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
預定查核點	<p>第 1 期：期初查核：3 月 15 日前提出期初規劃報告，由機關進行書面審查。重點：規劃。</p> <p>第 2 期：期中查核：於 7 月 15 日前提出期中進度報告，由機關進行書面審查，並召開期中進度審查會議，由計畫主持人向機關進行簡報。重點：高能電子加速器設施文獻研析與蒙地卡羅技術建立 II。</p> <p>第 3 期：期末查核：於 11 月 25 日前提出期末成果報告，由機關進行書面審查，並召開期末成果審查會議，由計畫主持人向機關進行簡報。重點：活化評估/量測/管理的建議。</p>											

第三章、計畫工作項目與成果

3.1 文獻收集與研析

3.1.1 除役相關建議

承 111 年期末報告 3.1.1 節除役相關建議，IAEA SSG-49 號報告[1]建議放射性物質生產設施之除役工作應確保除役工作人員、民眾及環境的安全，並建立基本安全原則(fundamental safety principles)、安全要求(safety requirement)、安全指南(safety guides)。內容包含工作時的安全措施、國際間的除役經驗及建議。IAEA SSG-49 號報告[1]中也建議設施的除役工作報告應分為三期，第一期於設施建立，基於安全評估報告建立設施之除役規劃；第二期報告針對設施運轉歷程等重要資訊進行記錄，並依據實際運轉情形微調第一期評估報告；第三期報告則於設施停止運轉前，內容包含除役工作的環境衝擊評估及人員安全評估，並將第三期報告送交主管機關審查，而尚未建立除役規劃之單位，IAEA SSG-49 號報告也建議盡早為之。

以 IAEA SSG-49 號報告對於放射性物質生產設施的除役建議為基礎，本團隊將其精神推廣至高強度設施可能產生的活化問題進行評估，以 Taiwan Photon Source(TPS)的評估工作為例，第一期除役工作報告建立在安全評估報告[2]中的活化評估結果，第二期除役工作評估則結合目前的設施運轉狀況，包含設施運轉電流、運轉時間、射束損失點等活化重要參數，結合第一期的活化評估模型，並導入實際運轉參數進行分析，提高活化評估結果的準確度性，也俾利設施在停止運轉時的第三期除役報告建立。

3.1.2 活化產物的生成途徑

根據 IAEA-188 號報告[3]中對於電子加速器的活化來源可分為兩類：電子/制動輻射與物質的作用及二次中子與物質的作用，電子/制動輻射與物質的作用主要為高能光子與物質產生光核反應(Photonuclear reaction)，包含光子能量在數十 MeV 時的 Giant Dipole Resonance；數十 MeV- GeV 的 Quasi-deuteron effect 以

及數百 MeV 以上時的 Pion production，如圖 3.1 所示[4][5]。

Giant Dipole Resonance 主要為光子傳遞能量給原子核(Nucleus)，並使原子核內的核子(Nucleon)產生共振，且核內質子與中子傾向於分成兩群進行方向相反的共振；Quasi-deuteron effect 則是在光子能量增加時，光子能量較傾向於傳遞給原子核中的中子-質子對(neutron-proton pair)而非整個原子核；Pion production 則是指光子能量足以生成 π 介子，並誘發後續的強子串級(Hadron cascade)引發活化並生成二次中子的現象[3][6]。上述的三種光核反應除了在撞擊加速器材料，如射束棄置接收器(Beam dump)、磁鐵、不鏽鋼管路時所生成的活化，光核反應發生時也有一定的機會生成二次中子，相較於光子與物質作用的反應截面僅在數邦以下，熱中子的中子吸收(Neutron capture)的反應截面可能高達數千邦以上，因此在分析高強電子加速器的活化時，除了高能電子/制動輻射所誘發的活化，對於二次中子與物質作用所造成的活化潛勢也不可忽視。

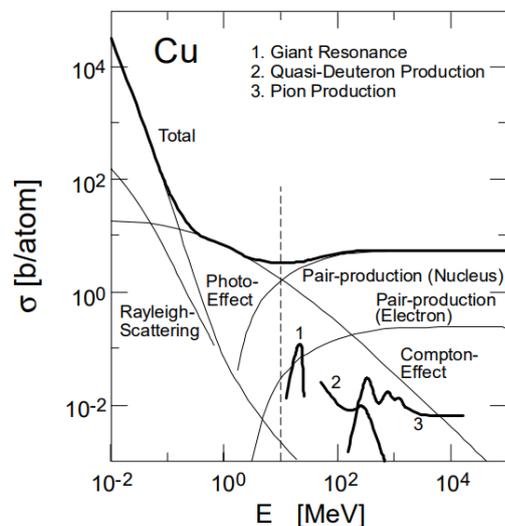


圖3.1. 光子與銅靶作用的反應截面[4]

3.1.3 電子加速器二次中子產率與活化

IAEA-188 號報告[3]中針對高能電子與物質作用後的二次中子產率的相關論述如圖 3.2、圖 3.3、圖 3.4。

圖 3.2 中呈現 100 MeV 以下電子與 12 種不同厚靶作用的中子產率，圖中可以觀察到中子生成的閾值能量約為 10 MeV，電子能量介於 10-40 MeV 時，隨著

能量增加中子的產率亦大幅度提升，並在約 50 MeV 以後產率趨於平緩。在圖 3.2 也可以觀察到靶材的原子量愈大時，相同能量的電子可以產生更多的二次中子。

圖 3.3 則呈現 150–266 MeV 電子作用在 4.3 個 radiation length 的鉛靶上時，90° 方向的二次中子能量分布，由圖中可以發現二次中子的能量與入射電子的能量呈正相關，即入射電子能量愈高，二次中子的能量也愈高；除此之外，當二次中子能量低於 60 MeV 時，入射電子能量對於中子產率的差異較不明顯，而在二次中子能量高於 100 MeV 時，入射電子能量對於中子產率的影響則愈趨顯著。

圖 3.4 則呈現 400 MeV 電子與厚銅靶作用後的二次中子產率隨角度的變化，當二次中子能量低於 100 MeV 時，中子產率與角度的關聯性較低；而隨著二次中子能量增加，前向性的二次中子分布顯著高於後向性的二次中子，且 0°-30° 的二次中子最高能量可以到達 200MeV 以上，120°-180° 的二次中子能量則低於 200 MeV。

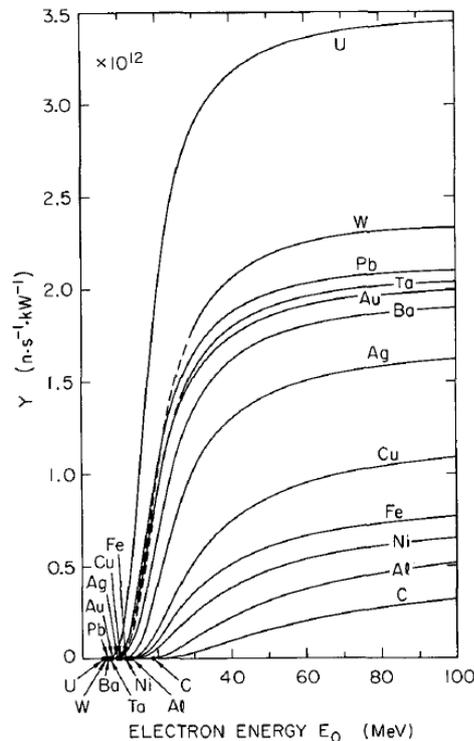


圖3.2. 100 MeV 以下電子與 12 種靶材作用後的中子產率[3]

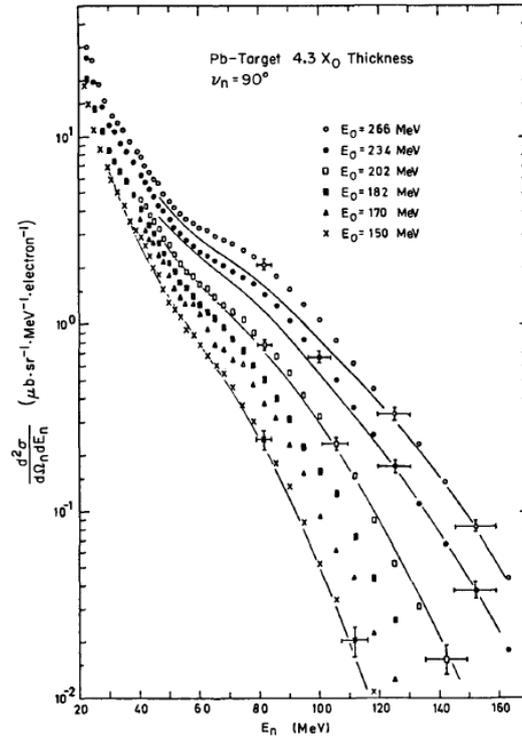


圖3.3. 150 – 266 MeV 電子作用在 4.3 倍 radiation length(X_0)的鉛靶，於靶材 90° 方向的二次中子能量分布，圖中實線為基於 Quasi-neutron effect 所預測的二次中子能量分布[3]

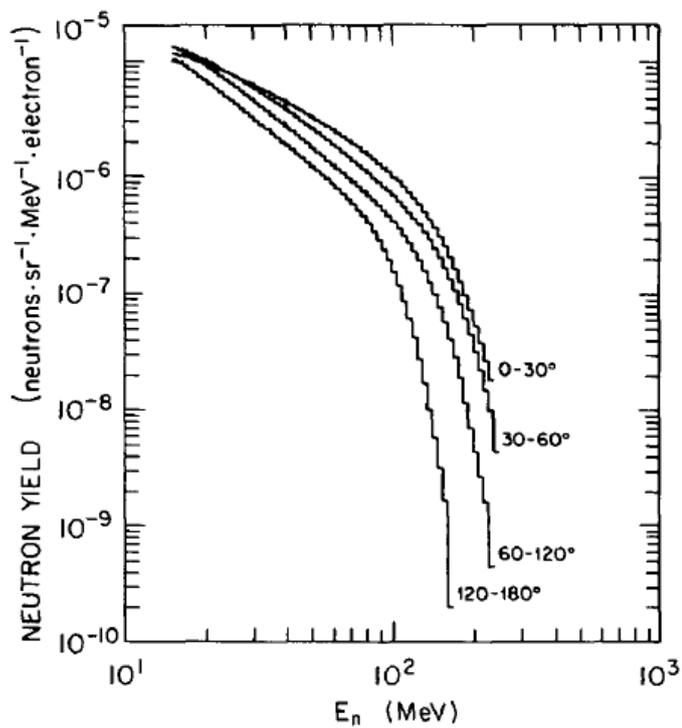


圖3.4. 400 MeV 電子與厚銅靶作用後的二次中子產率隨角度的變化[3]

前述 IAEA-188 號報告中針對電子與物質作用後所誘發的二次中子特性，可以粗略的觀察到二次中子產率與靶材原子序的依存性、二次中子能量與入射電子能量的依存性以及二次中子角度分布與二次中子能量的依存性，但上述的資料入射電子能量均低於國內高強度電子加速器的 1.5 GeV 以及 3 GeV 能量，因此 Lee 等人[7]利用 2.04 GeV 電子轟擊鉛、鎢、錫及銅靶的二次中子量測實驗結果也值得一併探討，圖 3.5 呈現 2.04 GeV 電子轟擊 4 種靶材後，分別在 48°、90° 及 140° 方向的二次中子量測結果，圖中呈現中子能量低於 20 MeV 時，中子在前、側、後向的產率大致相同，而隨著中子能量上升，高能中子在前向的產率則高於側向及後向，尤其是在中子能量大於 200 MeV 時，前向的中子產率高於側向及後向達到 10 倍以上；除此之外，也可以觀察到蒙地卡羅程式 MCNPX2.5d 對於高能電子誘發的二次中子產率預測普遍低於實驗結果。

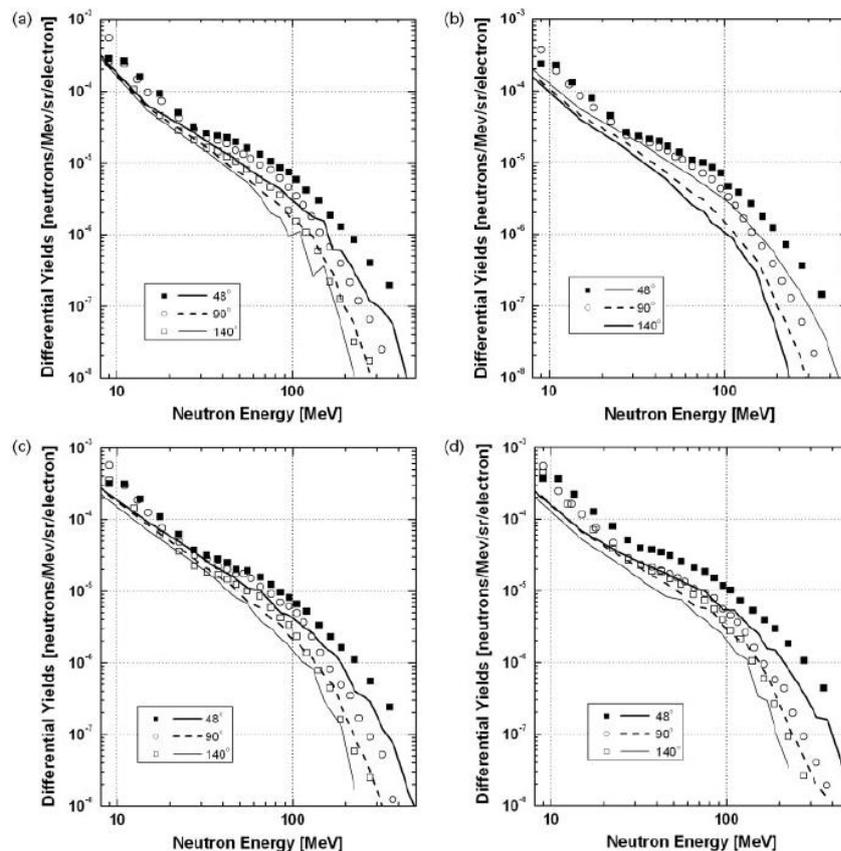


圖3.5. (a)5.5 公分鉛靶 (b)3.5 公分鎢靶 (c)12.1 公分錫靶及 (d)14 公分銅靶受 2.04 GeV 電子照射後的二次中子產率，點為實驗結果，線為蒙地卡羅 MCNPX2.5d 的計算結果[7]

針對電子加速器組件的活化問題，IAEA-188 號報告[3]中指出吸收最多制動輻射的組件即有可能是活化最嚴重的組件，包含射束棄置接收器(Beam dump)、靶體(Target)、準直器及夾具(Collimator and jaws)及補償濾波片(Compensating filters)，並根據常用的材料分析其活化狀況，如表 3.1-表 3.5 呈現鋁、鐵、銅、鎢、鉛受高能電子轟擊後，靶材內的活化核種及其飽和活度。

表3.1. 鋁靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3]

核種	半衰期	飽和活度(GBq kW ⁻¹)
Be-7	53.6 d	4.8
C-11	20.34 min	1.9
N-13	9.96 min	0.5
O-15	123 s	2.5
F-18	109.7 min	5.2
Ne-24	3.38 min	0.11
Na-22	2.62 y	9.3
Na-24	14.96h	10.0
Al-25	7.24 s	1.4
Al-26	7.4 × 10 ⁵ y	330.
Al-26m	6.37 s	
Mg-27	9.46 min	0.59

表3.2. 鐵靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3]

核種	半衰期	飽和活度(GBq kW ⁻¹)
Sc-46	83.9 d	7.4
V-48	16.0 d	15.0
Cr-51	27.8 d	15.0
Mn-52	5.6 d	1.3
Mn-52m	21.1 min	
Mn-54	303 d	22.0
Mn-56	2.576 h	1.2
Fe-52	8.2 h	2.1
Fe-53	8.51 min	27.0
Fe-55	2.60 y	490.

表3.3. 銅靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3]

核種	半衰期	飽和活度(GBq kW ⁻¹)
Co-58	71.3 d	24.0
Co-58m	9.2 h	
Co-60	5.263 y	24.0
Ni-63	92 y	17.0
Cu-61	3.32 h	32.0
Cu-62	9.76 min	407.0
Cu-64	12.80 h	185.0

表3.4. 鎢靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3]

核種	半衰期	飽和活度(GBq kW ⁻¹)
Ta-180m	8.15 h	1.8
Ta-182	115.1 d	13.0
Ta-182m	16.5 min	
Ta-183	5.0 d	23.0
Ta-184	8.7 h	1.8
Ta-185	50 min	21.0
W-181	140 d	330.
W-183m	5.3 s	320.0
W-185	75 d	300.
W-185m	1.62 min	

表3.5. 鉛靶受高能電子照射後的活化核種一覽[3]

核種	半衰期	飽和活度(GBq kW ⁻¹)
Tl-204	3.81 y	0.9
Tl-206	4.19 min	37.0
Tl-207	4.79 min	93.0
Tl-207m	1.3 s	
Pb-202	3.0 × 10 ⁵ y	2.2
Pb-202m	3.62 h	
Pb-203	52.1 h	31.0
Pb-203m	6.1 s	
Pb-204m	66.9 min	89.0

A. Fasso 等人[8]探討以 92 GeV 電子轟擊不鏽鋼靶材，計算靶材中各個核種

的飽和比活度，並利用蒙地卡羅軟體 FLUKA 重現實驗架構，再將兩者進行比較，結果如表 3.6 所示，實驗結果與模擬結果的比值介在 0.31 – 4.3 之間。

表3.6. 不鏽鋼樣品中的活化核種飽和比活度實驗結果及 FLUKA 計算結果

Radio-nuclide	T _{1/2}	Specific Activity (Bq/g)			Ratio
		Exp.	FLUKA	SD (%)	
⁴⁶ Sc	83.8 d	0.13	0.065	12	0.5
⁴⁸ V	15.97 d	0.31	0.52	7	1.7
⁵¹ Cr	27.7 d	4.12	2.7	5	0.65
⁵² Mn	5.6 d	0.17	0.74	6	4.3
⁵⁴ Mn	312.2 d	3.54	2.9	2	0.82
⁵⁹ Fe	44.5 d	0.028	0.0088	27	0.31
⁵⁶ Co	77.7 d	0.29	0.46	7	1.6
⁵⁷ Co	271.8 d	1.3	1.1	4	0.85
⁵⁸ Co	70.9 d	2.65	1.4	3	0.52
⁶⁰ Co	5.27 y	0.18	0.085	21	0.47
⁹⁵ Nb	34.9 d	0.038	0.013	27	0.34

Brugger 等人[9]利用 2.5 GeV 電子轟擊 25.4 公分厚的銅靶，並在靶材的側向以後向放置銅、鋁、不鏽鋼樣品進行活化實驗，實驗架構如圖 3.6 所示，照射時間為 93 小時，平均功率為 16W，電子損失為 1.1×10^{16} ，Brugger 等人也利用蒙地卡羅程式 FLUKA 進行活化評估，並將實驗與模擬結果進行比較。表 3.7 呈現銅靶後方的不鏽鋼樣品的實驗與模擬結果，該樣品中計有 10 種活化核種，半衰期接近一年的核種計有錳-54 及鈷-57，值得注意的是，FLUKA 所評估的活化結果與實驗的比值在 0.41 – 2.2 之間，顯示 FLUKA 評估活化的能力在數量級的正確性上有極大的把握，表 3.8 則呈現銅靶後方的鋁樣品實驗結果與模擬結果的比較，兩者的比值介在 0.34 – 4.0 之間，文獻中針對側向的鋁樣品、銅樣品及不鏽鋼樣品均進行比較，模擬結果與實驗結果的比值在 0.32 – 1.5 之間。

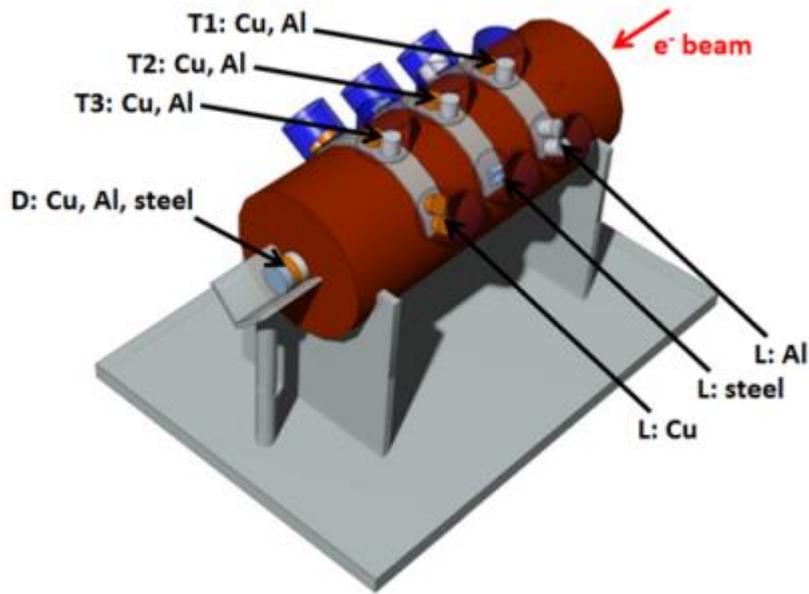


圖3.6. Brugger 等人利用 2.5 GeV 電子轟擊銅靶(紅)並在側向(T1-T3)及後向(D)放置樣品進行活化實驗[9]

表3.7. 不鏽鋼(D, steel)的活化量測結果與 FLUKA 計算結果的比較[9]

Isotope	$t_{1/2}$	Measurement (Bq/g)	ratio M/MDA	ratio FLUKA/M
^{46}Sc	83.8d	0.31 (7.0%)	25	0.83 (8.8%)
^{48}V	16.0d	8.8 (5.9%)	220	1.9 (6.7%)
^{51}Cr	27.7d	1030. (11%)	1515	1.2 (12%)
^{52}Mn	5.6d	3.7 (5.8%)	89	2.2 (6.4%)
^{54}Mn	312.1d	42. (8.2%)	2600	0.62 (8.4%)
^{59}Fe	44.5d	0.10 (33%)	1.6	0.41 (40%)
^{56}Co	77.3d	3.2 (5.2%)	263	1.25 (5.8%)
^{57}Co	271.79d	55. (9.8%)	1957	0.93 (9.9%)
^{58}Co	70.82d	19. (8.2%)	326	0.76 (8.6%)
^{57}Ni	35.6h	0.24 (16%)	5.0	0.46 (17%)

表3.8. 鋁(D, Al)的活化量測結果與 FLUKA 計算結果的比較[9]

Isotope	$t_{1/2}$	Measurement		ratio	
		(Bq/g)		M/MDA	FLUKA/M
^{22}Na	2.6y	1.6	(7.8%)	188	1.1 (8.6%)
^{46}Sc	83.8d	0.076	(17%)	2.8	0.54 (29%)
^{48}V	16.0d	0.12	(15%)	4.5	1.1 (32%)
^{51}Cr	27.7d	11.	(12%)	31	0.34 (15%)
^{52}Mn	5.6d	0.11	(14%)	5.0	1.7 (21%)
^{54}Mn	312.1d	6.5	(8.2%)	587	1.1 (8.8%)
^{57}Co	271.79d	0.032	(20%)	4.2	4.0 (26%)
^{58}Co	70.82d	0.041	(43%)	1.6	3.0 (51%)
^{65}Zn	244.26d	0.12	(24%)	6.8	3.3 (27%)

Masumoto 等人[10]量測一部 1.3 GeV 電子同步加速器的 4 組混凝土樣品，操作電流為 0.4 μA ，量測結果如圖 3.7 所示，4 組樣品中均計讀到由熱中子吸收所生成的鈷-60 及鎊-152，其中 No.3 樣品位於射束導出磁鐵附近的混凝土殘存活度是相對於另一個近磁鐵混凝土(No.1)殘存活度的 4 倍，且在 No.3 樣品中發現了鈉-22、錳-54 及銫-134。在 No.3 樣品中也可以發現在淺層混凝土中有明顯的活度增建現象，在深度 4 公分至 12 公分的位置可以量測到較嚴重的活化潛勢，且自表面至 12 公分深的混凝土超過外釋基準。(圖中鈷-60、鎊-152、銫-134、錳-54 及鈉-22 的外釋基準皆為 0.1 Bq/g [11])。

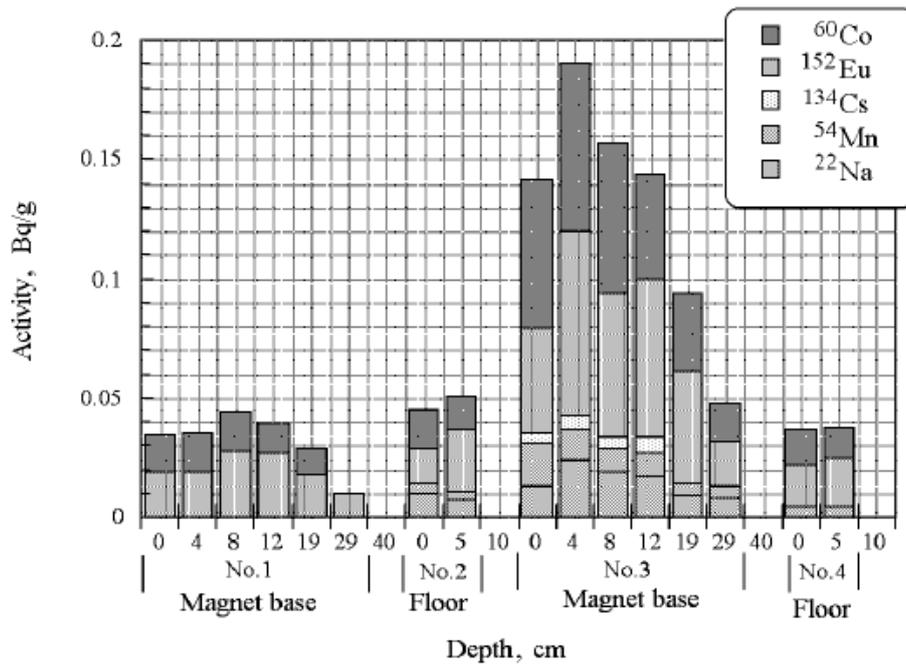


圖3.7. 1.3 GeV 電子同步加速器中的 4 個樣品殘存活度量測結果[10]

Yoshida 等人[12]比較日本境內 5 部不同的電子加速器，如表 3.9 所示，加速器粒子能量介於 0.575–8 GeV 之間，Yoshida 等人分別在 5 部加速器中以 CR-39 中子周圍等效劑量計量測中子，在 PF, UVSOR 及 SR-Center 額外架設 TLD 及金箔片量測二次中子，PF 加速器除了上述的中子量測實驗，額外進行混凝土的鑽心取樣實驗進行活化核種的量測，磁鐵及金屬組件則以 LaBr₃ 閃爍偵檢器或高純鍺偵檢器測量加馬能譜，定性磁鐵及金屬組件中的活化核種。Yoshida 等人同時使用蒙地卡羅軟體 PHITS 3.02 及活化評估套件 DCHAIN-SP 評估二次中子特性及活化潛勢，惟模型使用簡化的高能電子轟擊 1 毫米厚鐵靶所誘發的中子分布及地面混凝土活化潛勢，電子能量則以各設施的最大粒子能量進行計算。

量測結果發現，加速器的射束注入點及射束導出點是整個電子加速器設施中劑量最高的位置，其劑量率約小於 2.5 μSv/h，其餘位置的劑量率與背景值大略相同，而在劑量率最高的位置，熱中子通量率約約 100 n/cm²/s；針對磁鐵中的活化核種分析結果，PHITS 模擬指出十種最常見的核種為 ⁵⁷Ni, ⁵¹Cr, ⁵⁶Co, ⁵²Mn, ⁵⁵Fe, ⁵⁸Co, ⁵⁷Co, ⁵⁴Mn, ⁴⁸V, ^{44m}Sc，而除了 ⁵⁵Fe 的加馬產率較低不易量測，其餘九種核

種均在實驗量測中被發現。而針對 PF 設施的混凝土鑽心取樣實驗，除了天然核種以外並未發現其他的活化核種。針對 PHITS 的中子特性模擬結果與實驗量測進行比較，Spring-8 機組中的中子通量計算結果較實驗高出 6.7 倍，PF 設施中則高出 15.3 倍，UVSOR 設施中低估 0.40 倍，顯示簡化的蒙地卡羅模型在射束損失數量、射束損失位置分布難以符合實際情況下有可能出現較大的偏差，對於設施除役時投入實際量測進行活化評估仍是必要的手段。

表3.9. 日本境內 5 部電子加速器特性一覽[12]

Facility	SPring-8	PF	UVSOR	HISOR	SR Center
Foundation year	1996	1982	1983	1996	1996
Energy (GeV)	8	2.5	0.75	0.7	0.575
Type	L-B-MR	L-MR	L-B-MR	MR	MR
Operation mode	Storage/Top-up	Storage/Top-up	Storage/Top-up	Storage	Storage
Annual operation period (days)	230	160	250	210	180
Perimeter of the storage ring (m)	1436	187	53	22	3.14
Average stored electrons (m^{-1})	2.08×10^9	9.37×10^9	6.25×10^9	2.06×10^9	1.6×10^{10}

L: Linear accelerator (linac)
 B: Booster synchrotron
 MR: Main ring (storage ring)

3.2 高能電子加速器設施資料收集與彙整

調查盤點國內二座高能電子加速器：Taiwan Light Source (1500 MeV)與 Taiwan Photon Source (3000 MeV)的設備特性與運轉情形，著重收集與設施物質活化相關的運轉參數。

根據 TPS 安全分析報告[2]，電子同步加速器的運轉原理有別於迴旋加速器，以 TLS 同步加速器為例，電子同步加速器的電子加速過程為：電子槍(GUN) → 直線加速器(LINAC) → 傳輸線(LTB) → 同步輻射增能環(Booster) → 傳輸線(BTS) → 電子儲存環(Storage Ring)，如圖 3.8 所示，而 TPS 與 TLS 的加速原理相同，最大差異是電子加速器能量由 1.5 GeV 提升至 3 GeV。在上述的電子加速過程中，各個加速與傳輸過程中不可避免的會有一定數量的射束損失，根據報告中的假設：

- Gun → LINAC : 20% loss
- LINAC 加速 : 10% loss

- LINAC → LTB : 10% loss
- LTB 傳輸 : 10% loss
- LTB → Booster : 10% loss
- Booster 加速 : 10% loss
- BTS 傳輸 : 10% loss
- BTS (Storage ring) : 10% loss

上述針對射束損失的估計與瑞士同步輻射光源設施 SLS(Swiss Light Source) 相比，SLS 設施由 LINAC 到 Storage Ring 的射束損失為 38%，由 Booster 到 Storage Ring 的損失為 19%，相較 TPS 評估的 52%與 27%，均顯示 TPS 的射束損失估計更為保守，對於後續的二次中子與活化評估更能體現保守合理高估的精神。

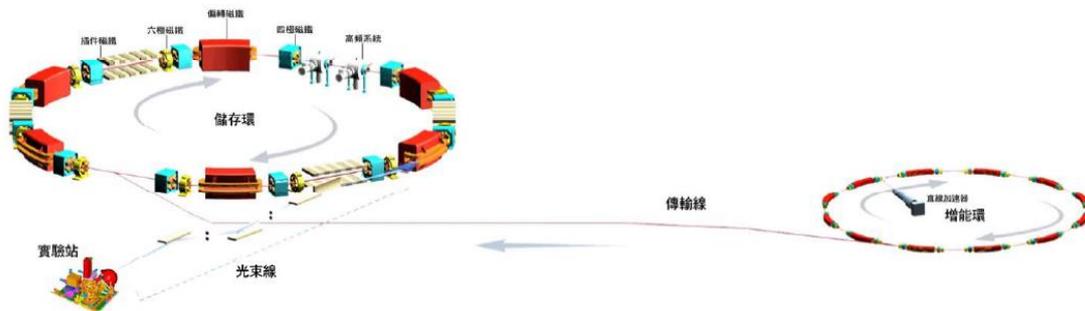


圖3.8. TLS 同步加速器示意圖[2]

TPS 的運作原理相較於迴旋加速器直接使用加速粒子轟擊靶材，TPS 將電子加速到 3 GeV 後儲存在 Storage Ring 中，再以二極偏轉磁鐵(Dipole Magnet)或插件磁鐵(Insertion Device)偏折電子產生同步輻射光，兩種加速器運作模式對於射束的損失量有顯著的不同。表 3.10 呈現 TPS 在正常運轉下各個歷程的電子電流及射束損失，自 GUN 出口端的電子束為 $1.30 \times 10^{11} \text{ e}^-/\text{s}$ ，經過 20%的射束損失後到達 LINAC，LINAC 加速器會再損失 10%電子束，依序到達 Storage Ring，前述由 LINAC 至 Storage Ring 的射束損失為 52%，符合由 LINAC 出口 $9.38 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$

降至 $4.48 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$ 的減少比例。

表3.10. TPS 正常運轉情況下的射束損耗分析[2]

Beam Loss Analysis for TPS Normal Operation									
Location		Electron (e ⁻ /s)	Electron (W)	Operation	Loss (e ⁻ /s)	Loss (W)	Shielding	Loss (e ⁻ /s) ^(d)	Loss (W)
GUN	inlet	n/a	n/a	Start	n/a	n/a	LINAC Room	Inj. 4.58E+10 Str. 0.00E+00	Inj. 0.48 Str. 0.00
	outlet	1.30E+11	1.88E-03	Ext./Inj.	2.60E+10	3.75E-04			
LINAC	inlet	1.04E+11	2.50	Ramping	1.04E+10	0.25			
	outlet	9.38E+10	2.25	Ext./Inj.	9.38E+09	0.23			
LTB	inlet	8.44E+10	2.03	Transfer	8.44E+09	0.20	Shared Tunnel	Inj. 3.95E+10 (2.43E+10) ^(e) Str. 1.71E+08	Inj. 11.67 Str. 0.0823
	outlet	7.59E+10	1.82	Ext./Inj.	7.59E+09	0.18			
Booster	inlet	6.83E+10	32.81	Ramping	6.83E+09	3.28			
	outlet	6.15E+10	29.52	Ext./Inj.	6.15E+09	2.95			
BTS	inlet	5.54E+10	26.57	Transfer	5.54E+09	2.66			
	outlet	4.98E+10	23.91	Ext./Inj.	4.98E+09	2.39			
Storage Ring	inlet ^(a)	4.48E+10	21.52	Storage ^(b)	1.71E+08	8.23E-02			
	outlet	n/a	n/a	Dump ^(c)	4.32E+12 (e ⁻)	2073.6 (J)			

- a. 正常注射填滿儲存環到 400 mA 的時間為 96.34 秒。
b. 儲存時期的電子損耗速率以 400 mA 恆定電流運轉來估計，其對應的射束生命期為 7 小時。
c. 每一次的電子棄置都以滿載儲存環電流 400 mA 來估計。
d. Inj. 代表注射時期的電子損耗速率；Str. 則代表儲存時期的電子損耗速率。
e. 由於在環形屏蔽隧道內損耗的所有注射電子其能量並不完全相同，從輻射安全的角度來看，利用功率修正回來得到的 3 GeV 電子損耗速率才是合理用來估算輻射劑量的數字。

TPS 在正常運轉時可分為三個階段，其一為注射電子，來自 GUN+LINAC 的電子損失率為 $4.58 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$ ，來自 LTB+Booster+BTS+儲存環的電子損失率為 $2.43 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$ ，共計 $7.01 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{s}$ ，每一次電子注射需要 96.3 秒才足以填滿儲存環到 400 mA，因此每一次全新的電子注射會損失 $6.75 \times 10^{12} \text{ e}^-$ 。其二為儲存階段，電子在儲存環中的電流為 400 mA，射束生命期為 7 個小時，因此在儲存階段時的電子損失率為 $1.71 \times 10^{18} \text{ e}^-/\text{s}$ 。最後為電子棄置階段，儲存環中的電子會一次性的進入棄置接收器中，電子損失為 $4.32 \times 10^{12} \text{ e}^-$ 。假定設施的生命週期為 20 年，每年設施運轉 300 天，每天運轉情節假設為一次全新的電子注射填滿儲存環至 400 mA，並持續運轉 20 小時的恆定電流運轉，最後將滿載電流棄置。結合電子同步加速器運轉的三個階段與運轉情節，每年在電子注射階段的電子損失為 $6.75 \times 10^{12} \text{ e}^- \times 300/\text{y} = 2.03 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{y}$ ；儲存階段的電子損失為 $1.71 \times 10^{18} \text{ e}^-/\text{s} \times 20 \text{ h/d} \times 300 \text{ d/y} \times 3600 \text{ s/h} = 3.70 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{y}$ ；棄置階段的電子損失為 $4.32 \times 10^{12} \text{ e}^- \times 300/\text{y} = 1.30 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{y}$ ，總計 $7.02 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{y}$ ，TPS 同步加速器運轉 20 年的最大損耗電子總數目則近似為 $1.5 \times 10^{17} \text{ e}^-/20 \text{ y}$ ，上述射束損失可被視為預期範圍內的正常運轉情節。

本年度也以同步輻射中心安全分析報告為基礎，參考目前的運轉狀況進行比較討論，重點承襲 IAEA-SSG49 號報告的精神：在設施運轉期間應針對實際運轉狀況週期性更新運轉參數，更新設施的除役規劃及活化預測。

表 3.11 呈現 TPS 安全分析報告中的運轉參數及實際運轉參數的比較，根據表 3.11 所獲得到粒子損失則如表 3.12 及表 3.13。以 TPS 安全分析報告的運轉參數所推估的年度粒子損失為 7.02×10^{15} e⁻/y；而以 TPS 實際運轉狀況所獲得的年度粒子損失則為 4.55×10^{15} e⁻/y，較安全分析報告中的評估結果降低 65%。

表3.11. 安全分析報告運轉參數及實際運轉參數比較

	TPS 安全分析報告	TPS 實際運轉狀況
LINAC 注射功率	2.25 W	1.125 W
儲存環電流	400 mA	500 mA
射束生命期	不小於 7 小時	不小於 9 小時
射束損失	每個加速階段 10%	每個加速階段 5%
設施運轉情節 (年)	注射 300 次	注射 200 次 ^{*註 1}
	儲存 6000 小時	儲存 6000 小時
	棄置 300 次	棄置 100 次

註 1：設施運轉時有可能遭遇射束注射失敗，因此以每年注射 200 次保守估算之

表3.12. 根據 TPS 安全分析報告推估之年度粒子損失

Beam loss analysis for TPS normal operation									
Location		Electron (e-/s)	Electron (W)	Operation	Loss (e-/s)	Loss (W)	Shielding	Loss (e-/s)	Loss (W)
GUN	inlet	n/a	n/a	start	n/a	n/a	LINAC Room	Inj.	Inj.
	outlet	1.30E+11		Ext./Inj.	2.60E+10			4.58E+10	--
LINAC	inlet	1.04E+11	2.5	Rampling	1.04E+10	0.25	Room	Str.	Str.
	outlet	9.38E+10	2.25	Ext./Inj.	9.38E+09	0.23		--	--
LTB	inlet	8.44E+10	2.03	Transfer	8.44E+09	0.20	Shared Tunnel	Inj.	Inj.
	outlet	7.59E+10	1.82	Ext./Inj.	7.59E+09	0.18			
Booster	inlet	6.83E+10	32.81	Rampling	6.83E+09	3.28	Shared Tunnel	3.95E+10	11.67
	outlet	6.15E+10	29.52	Ext./Inj.	6.15E+09	2.95		2.43E+10	
BTS	inlet	5.54E+10	26.57	Transfer	5.54E+09	2.66	Tunnel	Str.	Str.
	outlet	4.98E+10	23.91	Ext./Inj.	4.98E+09	2.39			
Storage ring	inlet	4.48E+10	21.52	Storage	1.71E+08	0.08	Tunnel	1.71E+08	0.08
	outlet	n/a	n/a	Dump	4.32E+12	2072			
1. 2.25 W @ LINAC output									
2. 400 mA @ storage									
3. Life time >= 7h									
4. 10% loss in each stage									
正常運轉	每次運轉20小時，一年運轉300天，運轉20年				異常運轉	注入儲存環電流連續照射1個小時			
Inj. 300 times	2.03E+15	e-/y	28.9%		Beam loss	4.48E+10	e-/s		
Storage 6000h	3.70E+15	e-/y	52.7%						
Dump 300 times	1.30E+15	e-/y	18.4%						
Total	7.02E+15	e-/y							

表3.13. 根據 TPS 實際運轉狀況推估的年度粒子損失

Beam loss analysis for TPS normal operation									
Location		Electron (e-/s)	Electron (W)	Operation	Loss (e-/s)	Loss (W)	Shielding	Loss (e-/s)	Loss (W)
GUN	inlet	n/a	n/a	start	n/a	n/a	LINAC Room	Inj.	Inj.
	outlet	4.93E+10		Ext./Inj.	0.00E+00			4.81E+09	
LINAC	inlet	4.93E+10	1.18	Rampling	2.47E+09	0.06	Room	Str.	Str.
	outlet	4.69E+10	1.125	Ext./Inj.	2.34E+09	0.06			
LTB	inlet	4.45E+10	1.07	Transfer	2.23E+09	0.05	Shared Tunnel	Inj.	Inj.
	outlet	4.23E+10	1.02	Ext./Inj.	2.12E+09	0.05			
Booster	inlet	4.02E+10	19.29	Rampling	2.01E+09	0.96	Shared Tunnel	1.18E+10	3.68
	outlet	3.82E+10	18.33	Ext./Inj.	1.91E+09	0.92		7.67E+09	
BTS	inlet	3.63E+10	17.41	Transfer	1.81E+09	0.87	Tunnel	Str.	Str.
	outlet	3.45E+10	16.54	Ext./Inj.	1.72E+09	0.83			
Storage ring	inlet	3.27E+10	15.71	Storage	1.67E+08	0.08	Tunnel	1.67E+08	0.08
	outlet	n/a	n/a	Dump	5.40E+12	2590			
1. 1.125 W @ LINAC output									
2. 500 mA @ storage									
3. Life time >= 9h									
4. 5% loss in each stage									
正常運轉	每年運轉6000小時，考量注射失敗、參數調整等需求，會有多次注射的情況								
Inj. 200 times	4.12E+14	e-/y	9.0%						
Storage 6000h	3.60E+15	e-/y	79.1%						
Dump 100 times	5.40E+14	e-/y	11.9%						
Total	4.55E+15	e-/y							

3.3 蒙地卡羅技術建立 II

針對上述高能電子加速器設施，引入蒙地卡羅數值模擬運算分析方法，依前述運轉參數的收集，用以模擬評估相關加速器設施之放射活化潛勢的情形，據以探討重要組件與設施周遭介質的活化影響，為了確保對於蒙地卡羅技術的掌握及其結果的可靠度，本團隊將以高能電子與物質作用後的二次中子產率及靶材活化模擬結果與文獻資料進行比對，增加後續活化潛勢分析結果的信心。

3.3.1 二次中子產率驗證

Lee 等人[7]利用 2.04 GeV 電子轟擊鉛、鎢、錫及銅靶，並在相對射束入射方向的 48°、90°及 140°以有機閃爍偵檢器配合中子飛行時間(Time-of-flight)量測二次中子的產率與角度分布，本團隊參考 Lee 等人的實驗架構，以 FLUKA 建立相同的實驗情境比較二次中子特性的實驗結果與模擬結果差異。

圖 3.9 為高能電子與鉛靶作用後的二次中子產率，左圖 Lee 等人的實驗結果與 MCNPX2.5d 的預測結果比較，MCNPX2.5d 的中子產率預測結果與實驗結果比較略微低估；右圖為 FLUKA 的預測結果與 Lee 等人的實驗結果比較，FLUKA 所預測的 48°中子產率在 8-400 MeV 的中子能量區間均低於實驗量測結果，而在 90°及 140°，當中子能量大於 150 MeV 時，FLUKA 的預測結果與實驗結果相符，但中子能量低於 150 MeV 時 FLUKA 的預測結果仍然低於實驗量測。

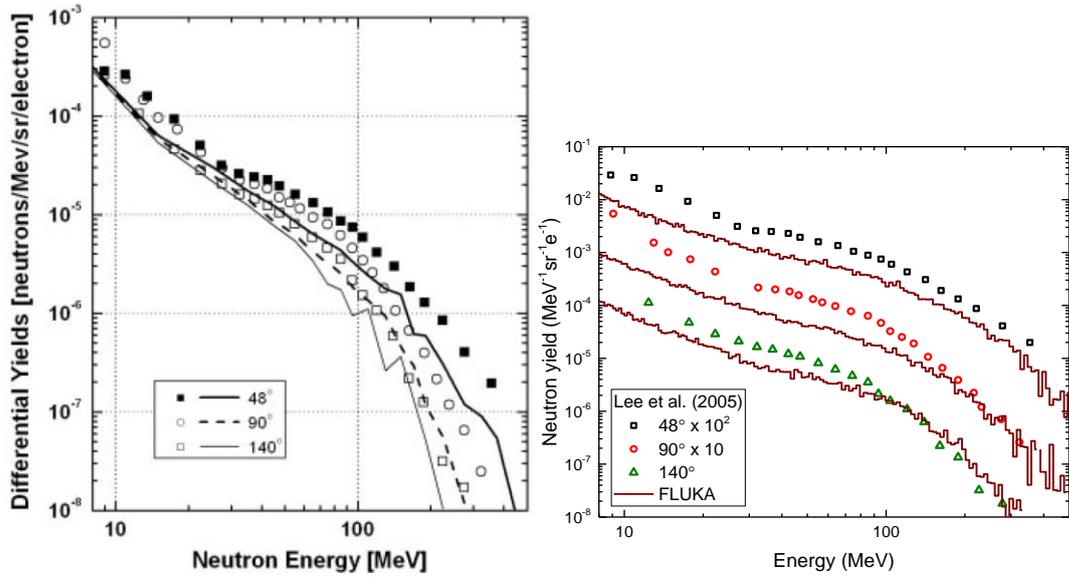


圖3.9. 以 2.04 GeV 電子轟擊鉛靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果 (點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較

圖 3.10-圖 3.12 分別為高能電子轟擊鎢、錫及銅靶的二次中子產率實驗結果與 MCNPX2.5d、FLUKA 的預測結果，與前述高能電子轟擊鉛靶所發現的二次中子產率與角度分布特性大致相同，而 FLUKA 所預測的二次中子產率同樣在 90° 及 140° 的 150 MeV 以上中子與實驗結果較一致，其餘角度及能量則低於實驗結果。

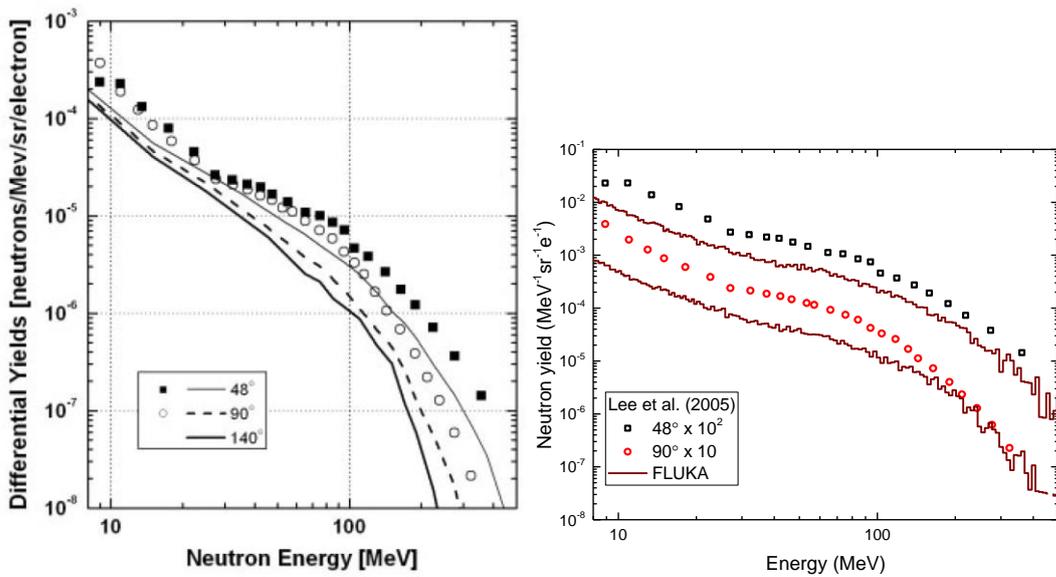


圖3.10. 以 2.04 GeV 電子轟擊鎢靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果 (點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較

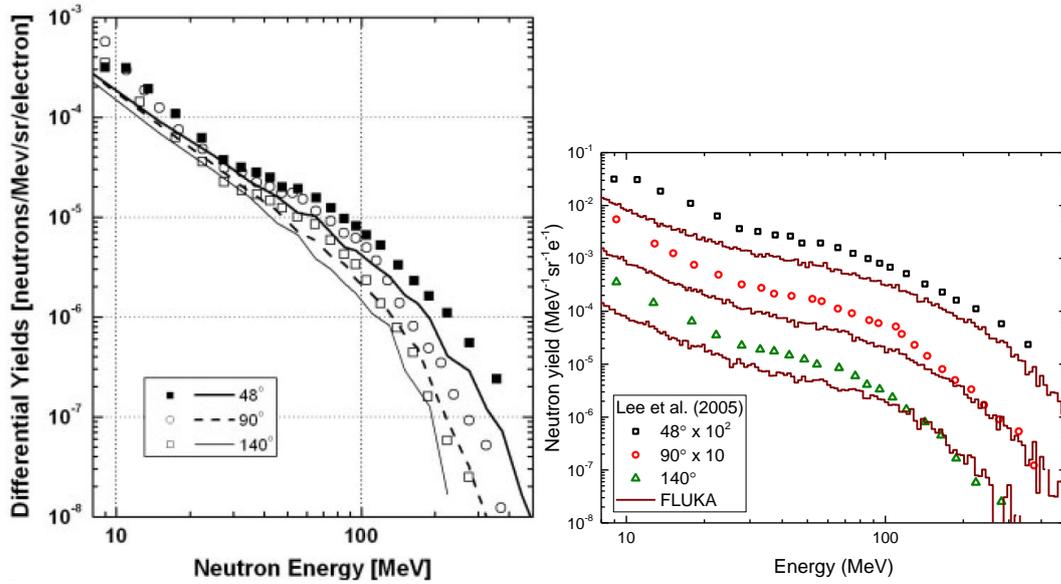


圖3.11. 以 2.04 GeV 電子轟擊錫靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果 (點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較

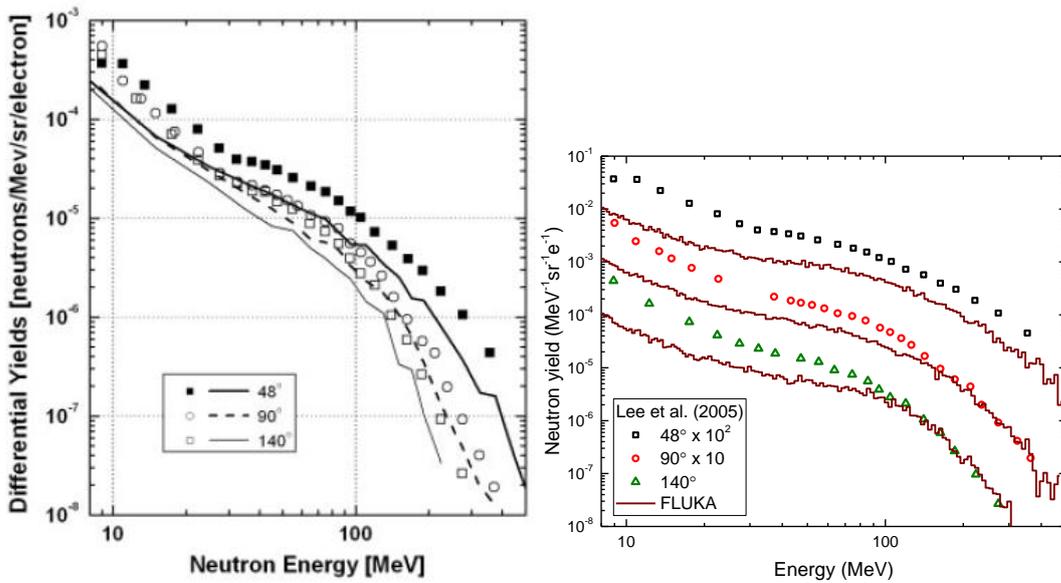


圖3.12. 以 2.04 GeV 電子轟擊銅靶的二次中子產率(左) Lee 等人[7]的實驗結果 (點)與 MCNPX2.5 d(線)的比較(右) FLUKA 與 Lee 等人[7]的實驗結果比較

3.3.2 靶材活化驗證

IAEA-188 號報告[3]中，利用物理模型預測高能電子與鋁、鐵、銅、鎢、鉛靶材進行作用後的靶材飽和活度，本團隊則利用 FLUKA 的預測結果與 IAEA-188 號報告進行比較，惟 IAEA-188 號報告中針對入射電子能量、靶材設計等重

要參數多有缺漏，本團隊於是採用 3 GeV 的電子作為射源，並根據 Rock 及 Vasilescu[13]計算電子靶材的厚度及半徑作為活化計算基準，各靶材厚度及半徑如表 3.14 所示，表中所示之厚度及半徑可沉積 95%的電子入射能量。

表3.14. 3 GeV 電子入射的 5 種靶材設計

靶材	X_0 (cm)	$t_{95\%}$	$R_{95\%}$ (cm)
鋁	8.897	11.5 X_0 (102.3 cm)	10.77
鐵	1.757	12.8 X_0 (22.5 cm)	3.82
銅	1.436	13.1 X_0 (19.1 cm)	3.42
鎢	0.350	17.1 X_0 (6.0 cm)	1.80
鉛	0.561	17.8 X_0 (10.0 cm)	3.12

圖 3.13 呈現 IAEA-188 號報告中鋁靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度，以及 FLUKA 的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果比較，鋁靶經高能電子轟擊後，針對 11 種有興趣的核種其飽和活度介在 0.1 – 300 GBq/kW；TPS 的安全分析報告中利用較早期的 FLUKA 版本進行活化預測，與 IAEA 的資料比值介在 0.1 – 10 倍之間，兩者的差異在 1 個數量級以內，本團隊則採用較新版本的 FLUKA 2021 版本進行活化預測，預測結果與 IAEA-188 號報告的比值同樣介於 1 個數量級以內。

圖 3.14-圖 3.17 則分別呈現與鐵、銅、鎢及鉛靶與高能電子作用後的理論飽和活度及 FLUKA 計算結果，比較 5 種不同靶材的 FLUKA 預測結果與 IAEA-188 號報告的差異，發現兩者的比值介在 10^{-2} –10 之間，FLUKA 的預測結果整體而言低於 IAEA-188 號報告的資料，細究中間的差異來源可能為 IAEA-188 號報告的資料出版於 1979 年，使用了較早期的物理模型導致結果的偏差，而 FLUKA 的理論模型經多方的實驗驗證，本團隊認為較有可信度，對於活化預測的可靠度應更優於 IAEA-188 號報告，為了印證此論述，本團隊參考 Brugger 等人[9]的高

能電子實驗結果進一步驗證 FLUKA 的活化預測能力。

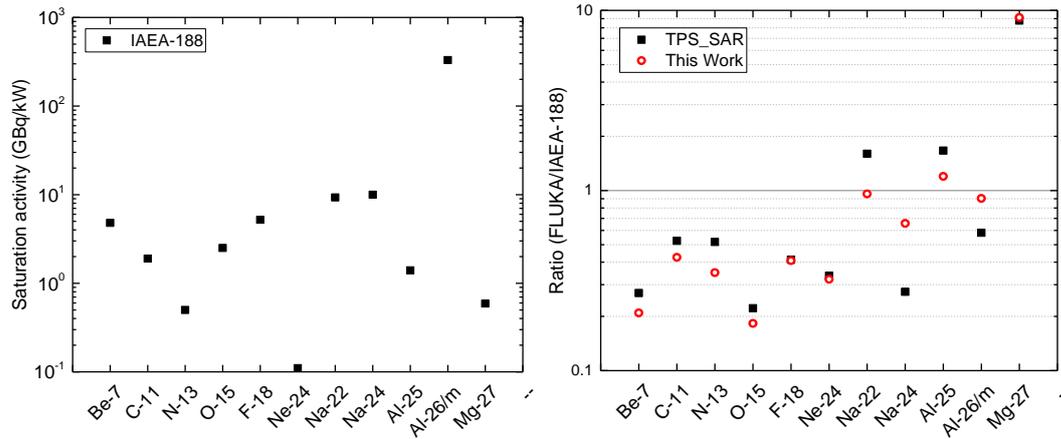


圖3.13. (左)IAEA-188 號報告[3]中鋁靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較

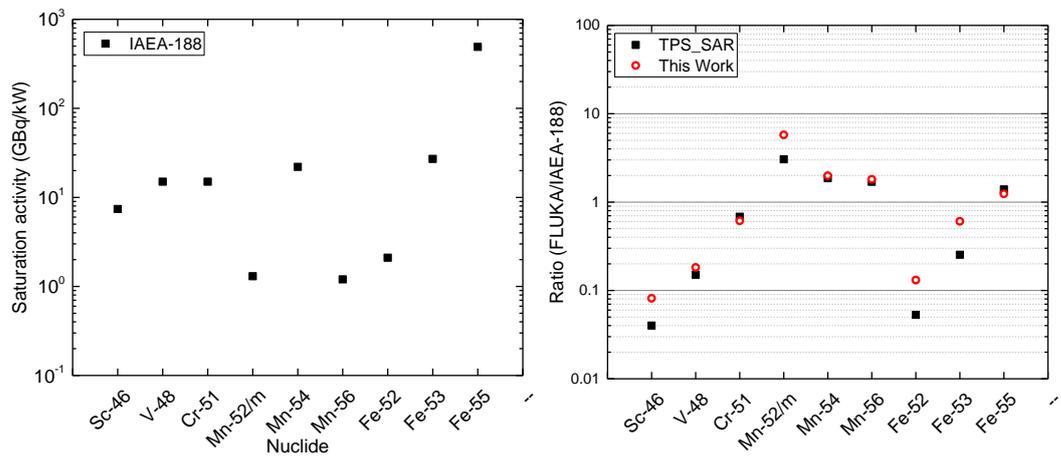


圖3.14. (左)IAEA-188 號報告[3]中鐵靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較

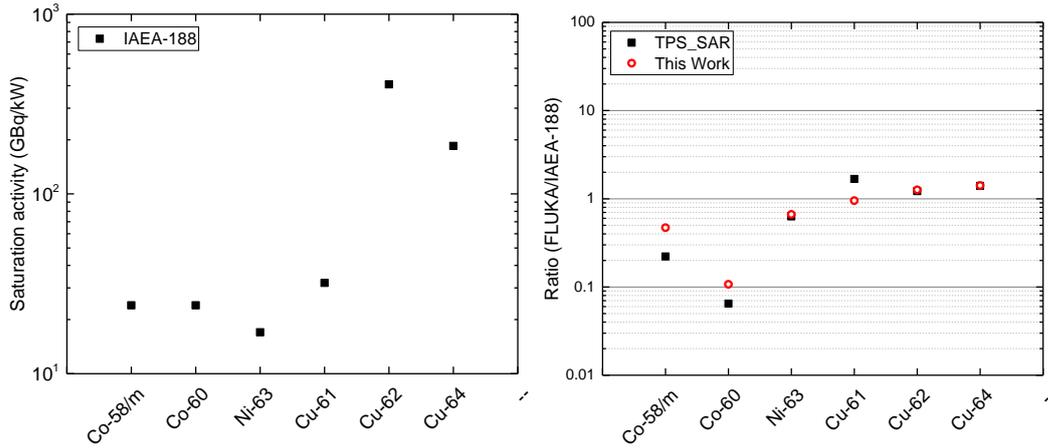


圖3.15. (左)IAEA-188 號報告[3]中銅靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較

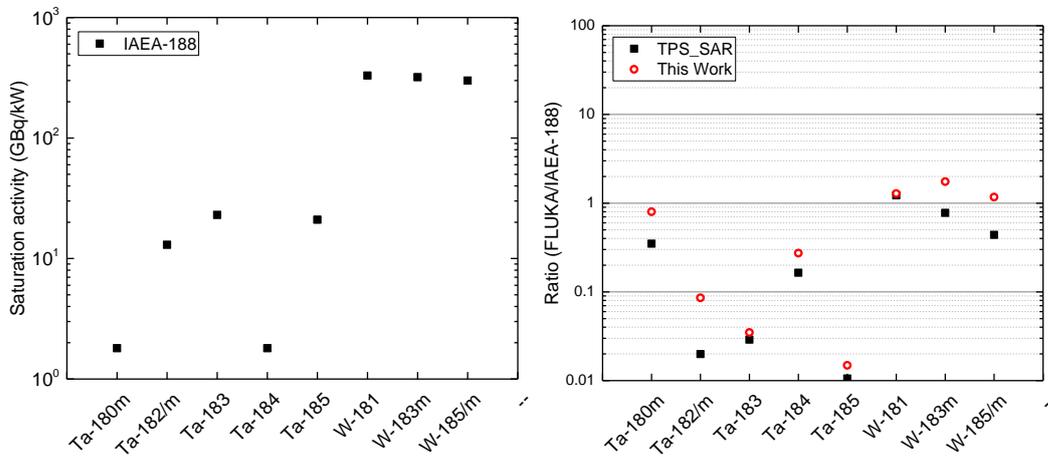


圖3.16. (左)IAEA-188 號報告[3]中鎢靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較

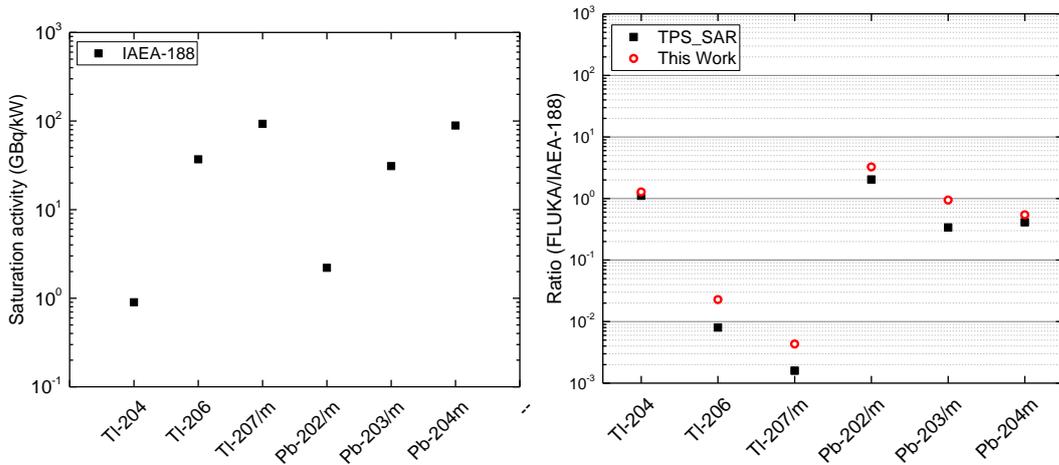


圖3.17. (左)IAEA-188 號報告[3]中鉛靶經高能電子轟擊後的理論飽和活度(右)本團隊的計算結果與 TPS 安全分析報告的結果進行比較

Brugger 等人[9]利用 2.5 GeV 電子轟擊 25.4 公分厚的銅靶，並在靶材的側向及後向放置銅、鋁、不鏽鋼樣品進行活化實驗，本團隊利用 FLUKA 重建 Brugger 等人的實驗架構，照射情節為使用 2.5 GeV 電子連續照射厚銅靶 93 小時，總射束損失 1.1×10^{16} 電子，並針對銅靶後方的三種活化樣品的預測結果與實驗進行比較，活化樣品的元素組成如表 3.15 所示，照射結束後，半衰期少於 83.8 天的核種其活度會在冷卻 14 天後進行定量，半衰期多於 83.8 天的核種其活度則在冷卻 4.5 個月後定量。Brugger 等人在該文獻中也將實驗結果與 FLUKA, CERN 的預測結果進行比較。

表3.15. Brugger 等人[9]的活化實驗中，不鏽鋼、銅、鋁的活化樣品元素組成

	Steel		Copper		Aluminium
Fe	63.088	Cu	99.328	Al	96.4589
Cr	17.79	Al	0.4745	Si	1.08
Mn	11.43	Si	0.13	Mg	0.83
Ni	6.5	Fe	0.0261	Mn	0.696
Si	0.38	S	0.0137	Fe	0.5
N	0.31	Cd	0.004	Cu	0.115
Co	0.11	Sb	0.004	Zn	0.1044
P	0.019	Cr	0.0021	Cr	0.033
C	0.095	Te	0.002	Ti	0.0302
Mo	0.09	Pb	0.002	Pb	0.0287
Cu	0.085	Sn	0.002	Sn	0.0278
V	0.07	As	0.002	Ca	0.0201
Ti	0.01	Ag	0.002	Bi	0.0161
Nb	0.01	Zn	0.002	Ni	0.0128
W	0.01	Mn	0.0016	P	0.0126
O	0.002	Se	0.0011	Ga	0.0102
S	0.001	Bi	0.001	Cl	0.0087
		Ni	0.001	S	0.0076
		P	0.0004	V	0.0041
		Co	0.0002	Zr	0.0024

圖 3.18-圖 3.20 分別呈現不鏽鋼、鋁及銅靶的實驗結果及 FLUKA 的活化預測，在 3 種靶材中，不鏽鋼中的 ^{51}Cr 中量測到的比活度最高，經過 14 天的冷卻後比活度為 $1030 \pm 11 \% \text{ Bq/g}$ ，其餘核種的比活度則在 0.01-100 Bq/g 的範圍內；本團隊以 FLUKA 預測的樣品活化結果與 Brugger 等人的實驗結果呈現高度的一

致性，除了鋁樣品中的 ^{46}Sc 未能成功計算結果，其餘樣品中的核種活度與實驗結果的差異均在 10 倍以內，而 Brugger 等人的模擬結果與實驗結果的差異範圍同樣在 10 倍以內，證實本團隊利用 FLUKA 的活化預測結果可靠。

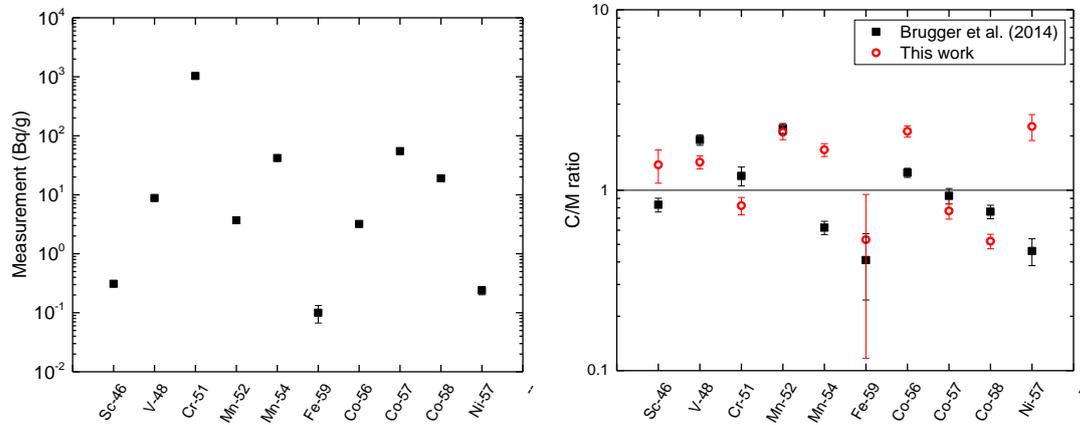


圖3.18. (左)Brugger 等人[9]的不鏽鋼活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果

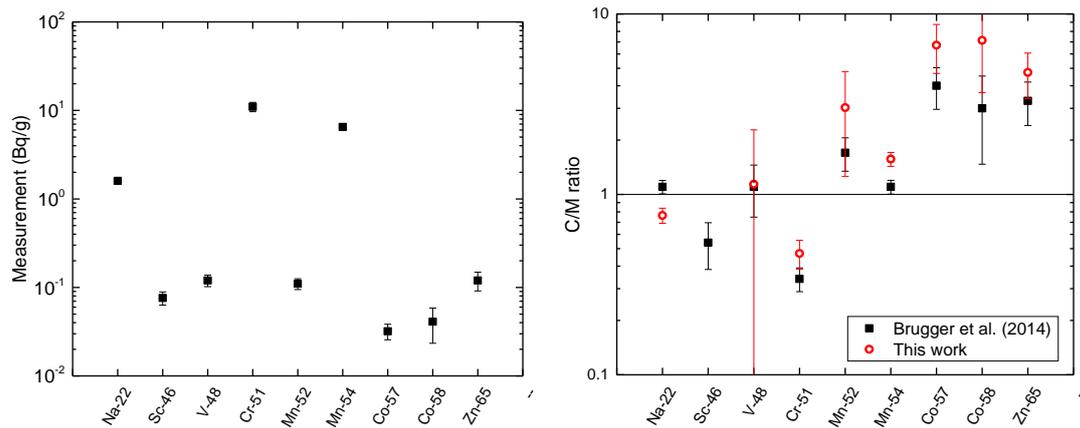


圖3.19. (左)Brugger 等人[9]的鋁活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果

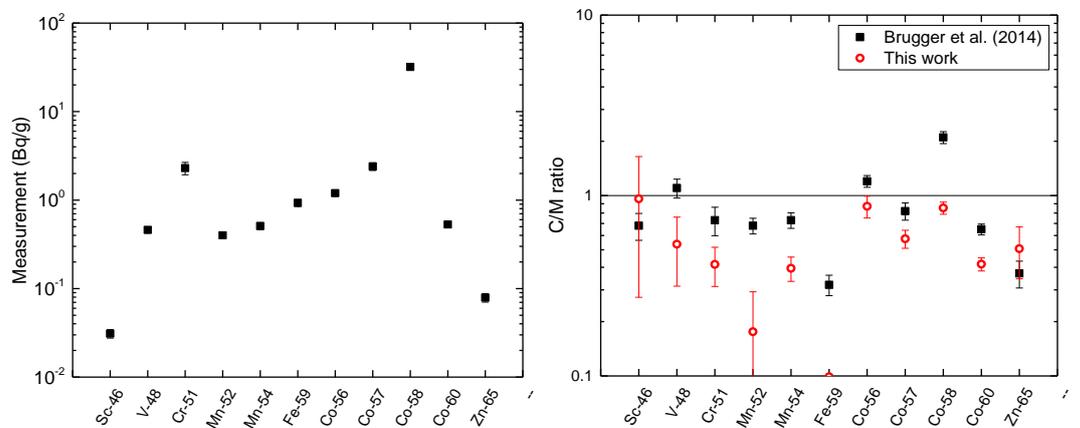


圖3.20. (左)Brugger 等人[9]的銅活化量測結果(右)FLUKA 的活化預測結果

3.3.3 高能電子加速器設施中子產率及活化評估

依照 3.2 節資料收集與彙整結果，寫入蒙地卡羅軟體進行高能電子加速器設施中子產率及活化評估，考量電子加速器設施龐大運作複雜，實務上對於準確定位加速器運轉時的射束損失位置存在一定的困難與不確定性，於是本團隊主要針對運轉終止時高能電子的射束棄置接收器作為評估位置，該位置常態接受高能量電子的轟擊，對於設施的中子產率及活化評估具有一定的代表性，評估重點包含高能電子與射束棄置接收器作用後的二次中子產率、能量分布、角度分布，射束棄置接收器的活化以及混凝土的活化。高能電子加速器設施中子產率及活化分為兩步驟進行評估，第一部份設計以 3 GeV 單能電子射束轟擊厚度 22.5 公分，半徑 3.82 公分的鐵靶，靶材設計參照表 3.14，並圍繞靶體設計一球殼量測二次中子的產率、能量分布及角度分布；第二部份為設計 1 個半徑 200 公分，高 400 公分的混凝土，並在中間挖一半徑 100 公分，高 300 公分的空間放入鐵靶材，靶材設計同第一部份。加速器活化分析最大的困難與不準度來自原始射束損耗數量與位置的估計，為了克服與簡化問題的分析，參考 3.2 節定義了二種極端的射束照射情節來涵蓋 TPS 所有可能的射束損耗情節與評估最壞的影響：

- ✓ 正常運轉假設情節：低功率長期連續地照射同一位置，20 年連續運轉的總電子損失為 $1.5 \times 10^{17} e^-$ 。以下的活化分析依此情節進行模擬計算。
- ✓ 異常運轉假設情節：高功率短期照射同一位置，電子照射功率的大小由前述儲存環注入點的全功率電子射束 ($4.48 \times 10^{10} e^-/s$) 所決定，約為 21.52 W，短暫全功率照射某一定點 1 小時。此一部份的活化分析詳見 3.4 節靈敏度分析的比較。

並在照射結束後的 30 年內記錄靶材及混凝土的殘存活度，並針對冷卻 1 年後的靶材與混凝土殘存活度進行空間分布分析，蒙地卡羅模型如圖 3.21。其中，混凝土中除了原本如表 3.16 的塊材原料，影響混凝土活化的重要微量元素，包含 Co、Eu、Cs 均以 1 ppm 原子濃度進行計算。

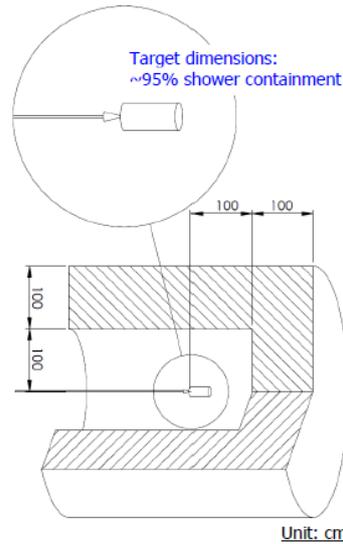


圖3.21. 參考 TPS 安全分析報告建立之 FLUKA 幾何模型[2]

表3.16. 混凝土塊材成份表，比例為重量百分濃度

元素	氫	碳	氧	鈉	鎂	鋁	矽	鉀	鈣	鐵
%	1.0	0.1	52.9	1.6	0.2	3.4	33.7	1.3	4.4	1.4

圖 3.22 為 3 GeV 電子+Fe 的二次中子產率、角度分布及能量分布，FLUKA 的預測結果顯示二次中子的產率在 0°方向為最低的 0.014 n/sr/e，隨著角度增加在 90°方向達到最大的 0.045 n/sr/e，總中子產率為 0.038 n/sr/e。雖然在 0°方向的中子產率低於其他的角度，但 0°方向的中子平均能量為最高的 18.0 MeV，45°方向的中子平均能量為 6.6 MeV，90°方向的中子平均能量則為 3.5 MeV，總中子平均能量為 4.4 MeV。0°方向的中子產率最低，可能肇因於 22.5 公分的鐵靶材對於前向散射的二次中子產生屏蔽效果，因為 MeV 等級的中子在往 0°方向遷移時可能與鐵原子碰撞而改變進行方向，降低 0°方向的中子數量，而高能量的電子因為作用機率較低，有較高的機會不與鐵原子作用，逕直往初始的 0°方向遷移並被計讀。

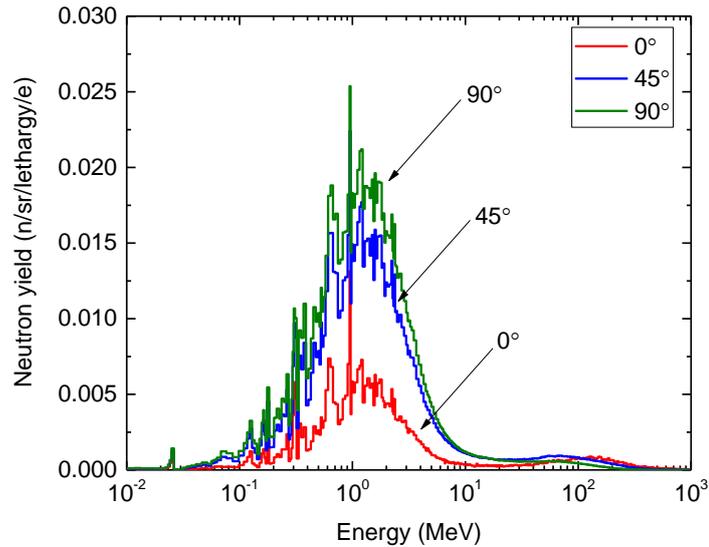


圖3.22. 3 GeV 電子+Fe 的二次中子產率、角度分布及能量分布

圖 3.23 呈現鐵靶材經 20 年連續照射後，殘存活度隨冷卻時間的變化，在鐵靶材中最主要的活化核種為 ^{55}Fe ，其來源可能為 $^{56}\text{Fe}(\gamma, n)$ 光核反應，或是由二次中子誘發的 $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)$ 及 $^{56}\text{Fe}(n, 2n)$ ，三種反應的反應截面如圖 3.24 所示， $^{56}\text{Fe}(\gamma, n)$ 主要由 10 – 30 MeV 的光子進行反應， $^{54}\text{Fe}(n, \gamma)$ 主要為 1 MeV 以下的中子，而 $^{56}\text{Fe}(n, 2n)$ 則主要為 10 MeV 以上的中子進行反應。 ^{55}Fe 的半衰期為 2.73 年，在照射結束時的比活度約為 8,400 Bq/g，依照國內的 ^{55}Fe 一公噸以上外釋基準為 1,000 Bq/g[11]，即需要約 3-4 個半衰期進行活化衰減，鐵靶才有機會被視為一般廢棄物。圖 3.25 呈現鐵靶材在照射結束後，經過 1 年冷卻後的殘存活度分布情形，X 軸為靶材的軸向，長度為 22.5 公分，Y 軸為徑向，半徑 3.82 公分，靶材的活化情形存在顯著的空間分布差異，活化最嚴重的區域約在半徑 0-1 公分，深度 0-15 公分的位置，而在半徑 2 公分以外的區域活化程度較低，但所有位置的殘存活度仍高於外釋基準。

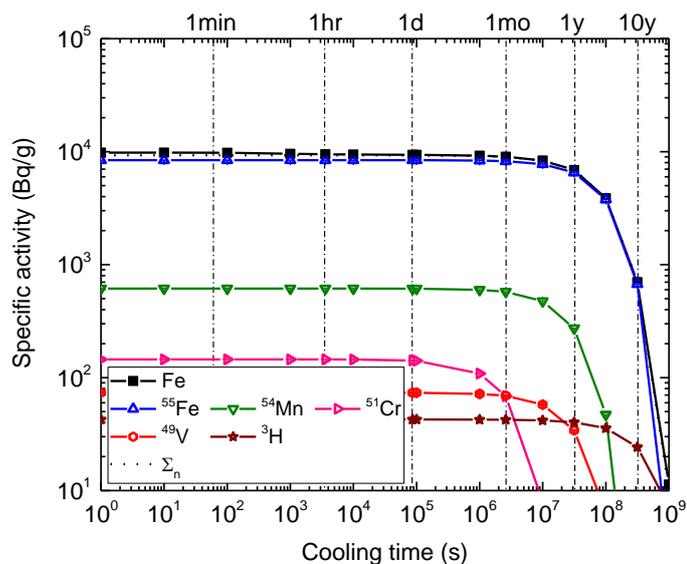


圖3.23. 鐵靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化

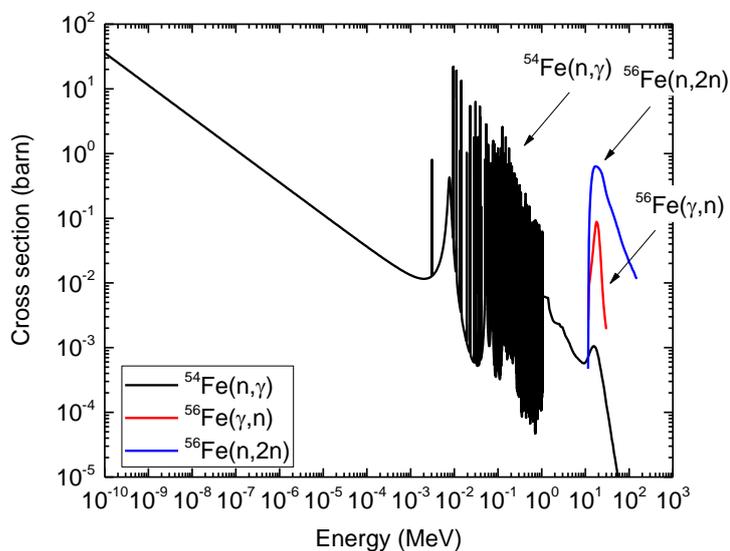


圖3.24. 鐵靶材受 3 GeV 電子照射後，可能生成 ^{55}Fe 的活化途徑

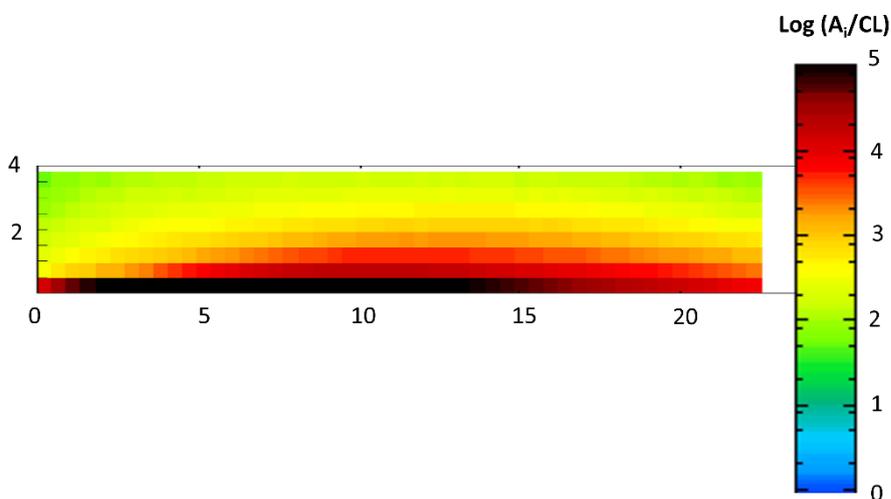


圖3.25. 鐵靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.26 及圖 3.27 呈現前向表面及側向表面混凝土在照射結束後的殘存比活度隨冷卻時間的變化，圖中個別核種活化的僅呈現對於混凝土殘存活度有顯著貢獻，或是其比活度已接近其外釋基準，兩個方向混凝土中的主要活化核種種類相同，均為 ^{152}Eu 、 ^{55}Fe 、 ^{37}Ar 、 ^{28}Al 、 ^{24}Na 、 ^{22}Na 、 ^{15}O 、 ^3H ，而在前向混凝土的活化狀況整體高於側向，尤其是照射結束時，前向混凝土的活化高於側向約有 5 倍之多，前述二次中子的角度分布 0° 低於 90° ，與目前的混凝土活化分布預測結果有所出入，本團隊於是進一步檢視前向與側向混凝土內的中子分布情形，確認混凝土內的中子通量維持前向低於側向的趨勢，而前向混凝土中的高能中子多於側向混凝土，如圖 3.28，因此推測 0° 方向的高能量中子可能開啟其他的活化反應通道，造成前向混凝土的殘存活度高於側向混凝土。

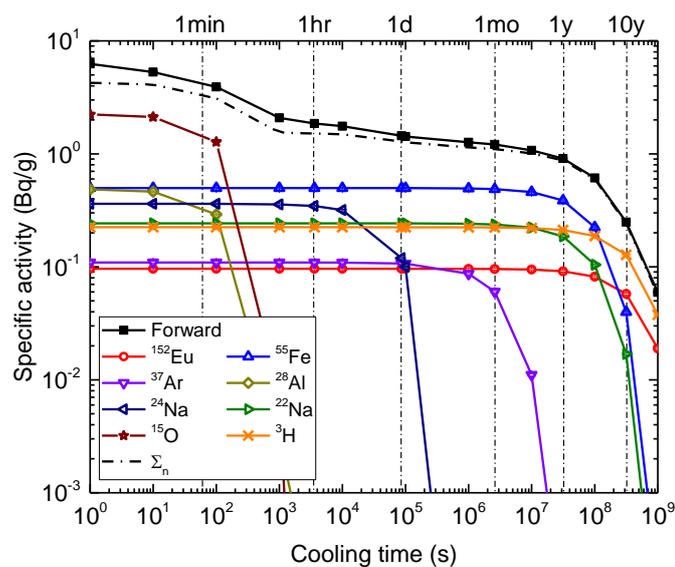


圖3.26. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的前向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

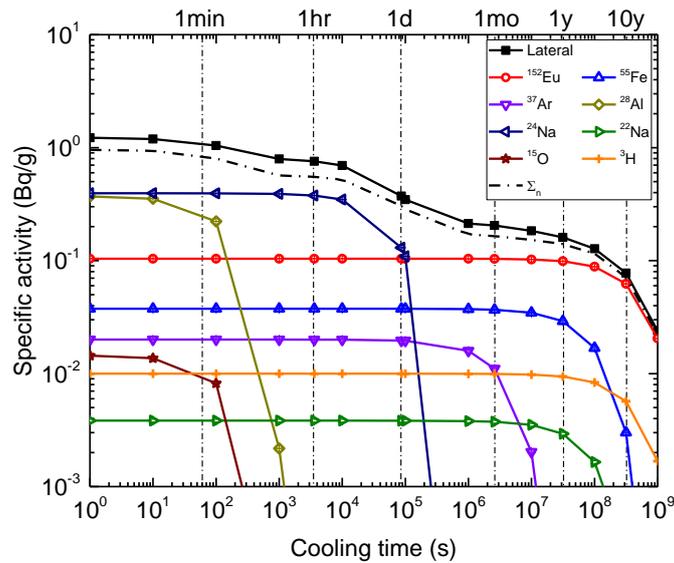


圖3.27. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的側向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

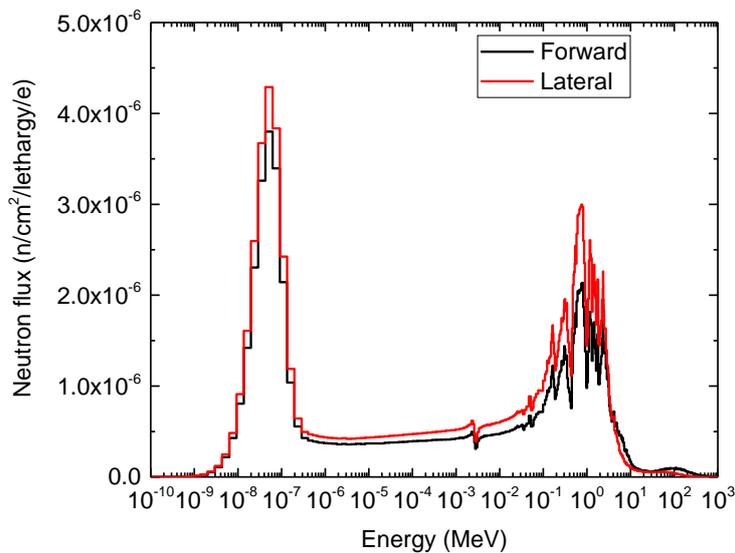


圖3.28. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子在表混凝土面的通量分布

假設 TPS 同步加速器運轉 20 年的總損耗電子($1.5 \times 10^{17} \text{ e}^-/20 \text{ y}$)皆撞擊在特定局部位置，圖 3.29 為照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形。圖中位於(0,0)的黑色方塊為鐵靶材，在此一極端的照射情結下，前向混凝土自表面至深度 50 公分深的混凝土有成為活化廢棄物的風險，側向混凝土則自表面至深度 20 公分有可能成為活化廢棄物。圖 3.30 及圖 3.31 則呈現同樣在照射結束 1 年後，前向與側向混凝土的殘存活度隨深度的變化，在前向混凝土中，比活度最

高的核種為 ^{55}Fe 、 ^{22}Na 及 ^{152}Eu ，其中 ^{55}Fe 的外釋基準為 1,000 Bq/g， ^{22}Na 及 ^{152}Eu 的外釋基準測為 0.1 Bq/g，而自表面至 50 公分深的混凝土，核種的殘存活度可能高於外釋基準，與圖 3.29 所獲得的結果相符；在側向混凝土中，由於中子的能量較低，主要由熱中子活化所生成的 ^{152}Eu 貢獻混凝土中的殘存活度，較低能量的中子入射也反應在活化核種隨深度衰減的速度較快，相對於前向混凝土的 100 公分位置的活化與表面活化的比值約為 1/100，側向混凝土的表面活化與 100 公分位置的活化差異則達到 1/1000。

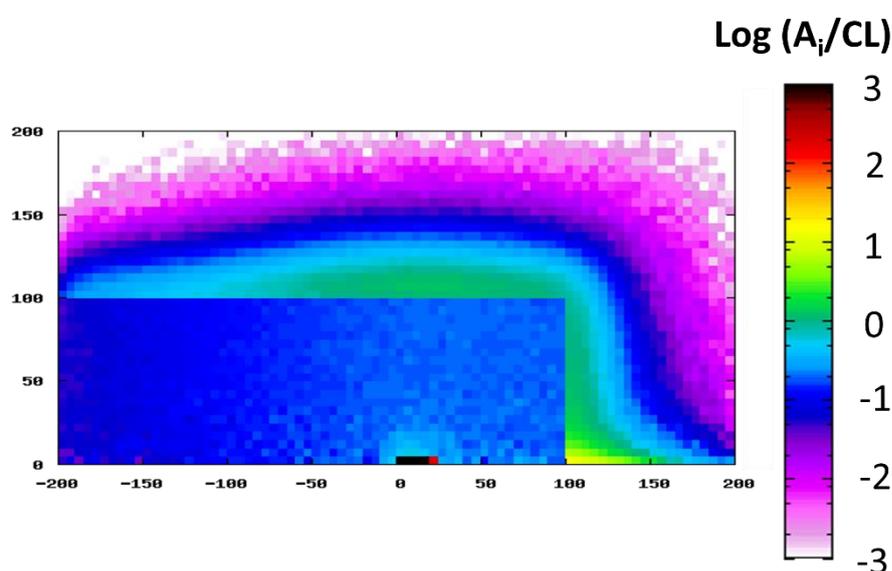


圖3.29. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形

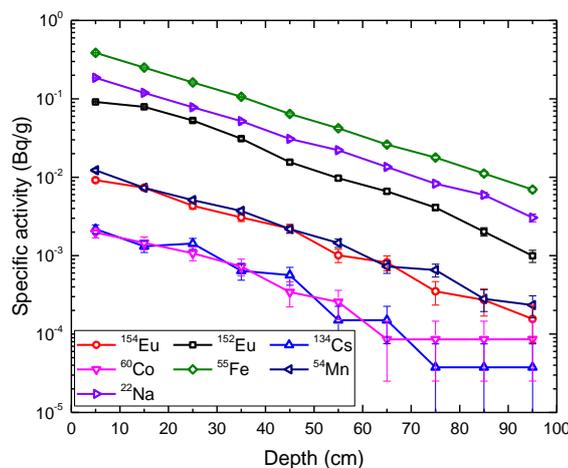


圖3.30. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

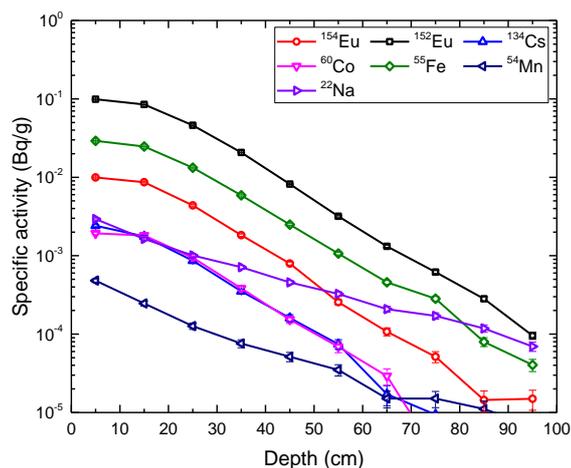


圖3.31. 3 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

台灣光子源(TPS)輻射安全評估報告中[2]針對混凝土的活化有以下結論：“混凝土屏蔽內側如預期發生某種程度的活化情形，但是不論是零度或是九十度方向的屏蔽牆，評估出來 EC¹數值全都小於 1.0”。而本研究前述針對混凝土的評估結果則顯示具有一定程度的活化風險(保守的假設照射情節下)，表 3.17 呈現 TPS 安全評估報告與本研究的評模型參數比較，兩者在射束損失與模型上沒有顯著差異，但在混凝土中的元素組成中，本研究額外將鈷、銻、鎢等混凝土中常見的微量元素以 1 ppm 的粒子濃度納入，據以評估混凝土的活化情形。Fujibuchi 等人[14]統整 5 部文獻，9 種混凝土的量測結果，發現鈷在混凝土中的濃度介於 0.048- 480 ppm，鎢則介於 0.004 – 7.7 ppm，微量元素在混凝土中的濃度數量級差異極大，顯示日後設施在進行混凝土活化評估工作時需要特別注意混凝土中微量元素的可能範圍，因為此一重要輸入參數將影響活化分析結果甚劇。

¹ EC 與本研究中 A_i/CL 意義相同，均用於評估核種活化與外釋基準的比較

表3.17. TPS 安全評估報告[2]與本研究的模型比較

	TPS 安全評估報告	本研究
工作負載	$7.71 \times 10^{15} \text{ e}^-/\text{y}$ $(1.5 \times 10^{17} \text{ e}^-/20\text{y})$	$1.5 \times 10^{17} \text{ e}^-/20\text{y}$
靶材	鐵靶	鐵靶
評估模型	同圖 3.21	同圖 3.21
混凝土組成(塊材)	H(0.6 wt%) C(--) O(49.8 wt%) Na(1.7 wt%) Mg(0.2 wt%) Al(4.6 wt%) Si(31.6 wt%) K(1.9 wt%) Ca(8.3 wt%) Fe(1.2 wt%)	H(1.0 wt%) C(0.1 wt%) O(52.9 wt%) Na(1.6 wt%) Mg(0.2 wt%) Al(3.4 wt%) Si(33.7 wt%) K(1.3 wt%) Ca(4.4 wt%) Fe(1.4 wt%)
混凝土組成(微量元素)	--	Co (1 ppm by atom) Cs (1 ppm by atom) Eu (1 ppm by atom)

3.4 參數靈敏度分析 II

針對高能電子加速器設施，透過設施規格與運轉參數的靈敏度分析，建立其與物質活化產物活度與殘存評估關聯性，並歸納比較設施差異。本團隊針對三個不同參數分析對於活化的影響，其一為入射電子能量差異，將選用 1.5 GeV 及 3 GeV 電子能量進行分析；其二為照射情節對於活化的影響，將選用低功率長期連

續照射及高功率短期照射進行比較；其三為靶材的差異，將選用數種靶材所誘發的二次中子及活化進行分析，並針對分析結果綜合比較對於活化的影響程度。

3.4.1 能量差異對活化的影響

考量國內現有的兩部高能電子同步加速器(TLS、TPS)的加速能量分別為 1.5 GeV 及 3 GeV，本研究於是針對上述兩種能量的誘發活化差異進行比較及探討。

圖 3.32 呈現 1.5 GeV 電子與 3 GeV 電子轟擊在鐵靶上的二次中子產率比較，相較於 3 GeV 電子+Fe 的二次中子產率為 0.038 n/sr/e，1.5 GeV 電子+Fe 的二次中子產率降至 0.019 n/sr/e，約減少 50%的中子產率；而總中子的平均能量則由 4.4 MeV 微幅下降至 4.1 MeV。

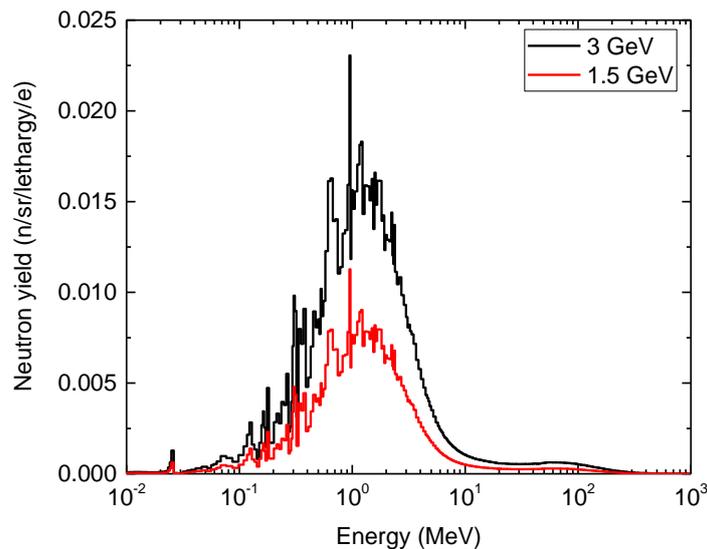


圖3.32. 3 GeV 及 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶的中子產率比較

圖 3.33 呈現鐵靶經 1.5 GeV 電子連續照射 20 年後的殘存活度隨冷卻時間的變化，與圖 3.23 比較，鐵靶材主要的活化核種同樣為 ^{55}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{49}V 及 ^3H ，但各個核種的殘存活度均有一定程度的下降，尤其是主要貢獻鐵靶殘存活度的 ^{55}Fe ，由原先照射結束時的 8400 Bq/g 降至 5500 Bq/g，而外釋基準只有 0.1 Bq/g 的 ^{54}Mn ，也由原先照射結束時的 600 Bq/g 降至 350 Bq/g，顯見入射電子能量的降低確實減少了靶材中的殘存活度水平。圖 3.34 則呈現鐵靶材在冷卻 1 年後的殘存活度空間分布，雖然 1.5 GeV 電子所誘發的靶材活化較低，但考量外釋

基準的情況之下，經冷卻 1 年的靶材殘存活度仍極有可能高於外釋基準。

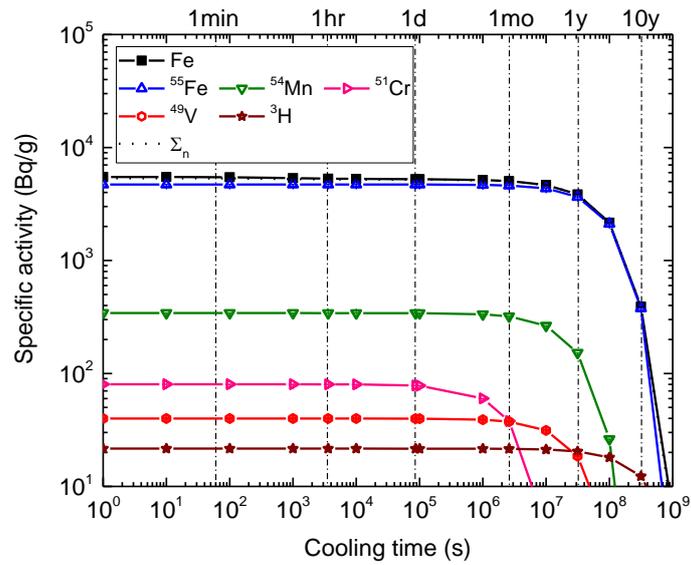


圖3.33. 鐵靶材經 1.5 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化

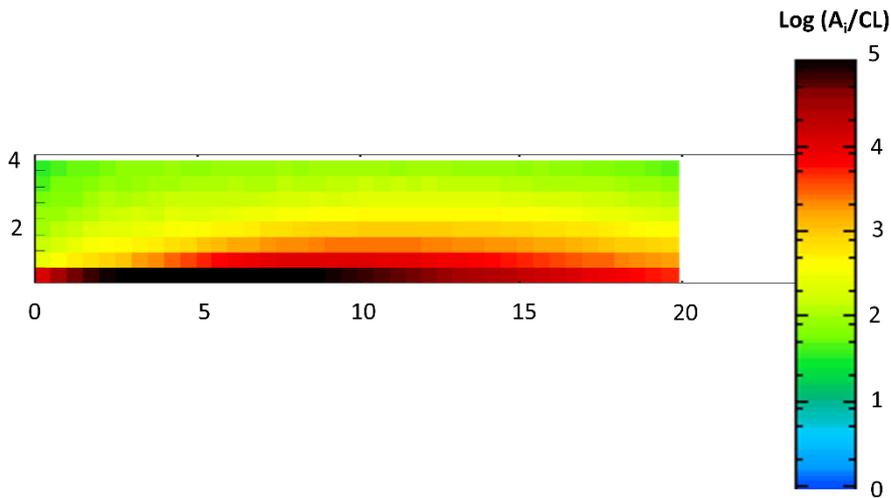


圖3.34. 鐵靶材經 1.5 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.35 及圖 3.36 分別呈現 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶所誘發的前向與側向混凝土殘存活度水平隨冷卻時間的變化，與 3 GeV 電子的照射情節相比，混凝土中的主要活化貢獻核種仍然為 ^{152}Eu 、 ^{55}Fe 、 ^{37}Ar 、 ^{28}Al 、 ^{24}Na 、 ^{22}Na 、 ^{15}O 及 ^3H ，但 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶的二次中子產率較低，因此混凝土的活化水平也下降，以前向混凝土為例，在 3 GeV 電子照射結束時，混凝土的總殘存比活度為 6.8 Bq/g，而

1.5 GeV 電子照射結束時，混凝土的總殘存比活度則降為 3.9 Bq/g；側向混凝土的殘存比活度也由 1.5 Bq/g 降為 0.7 Bq/g，兩個方向的殘存活度均下降約 50%，與二次中子產率的降幅一致。

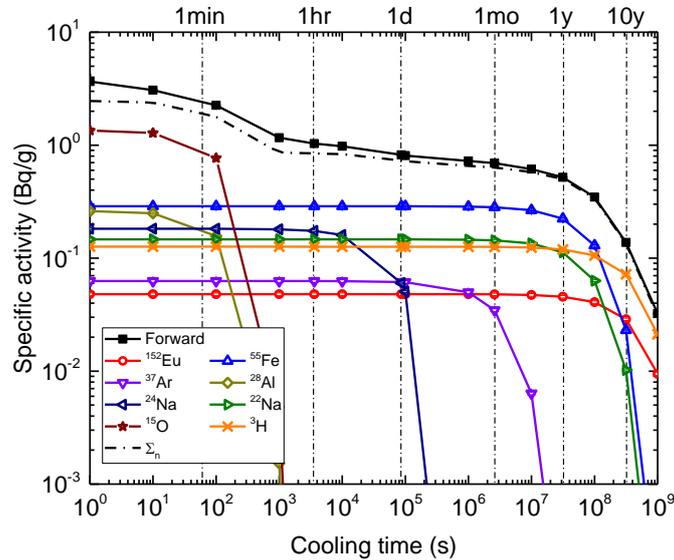


圖3.35. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的前向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

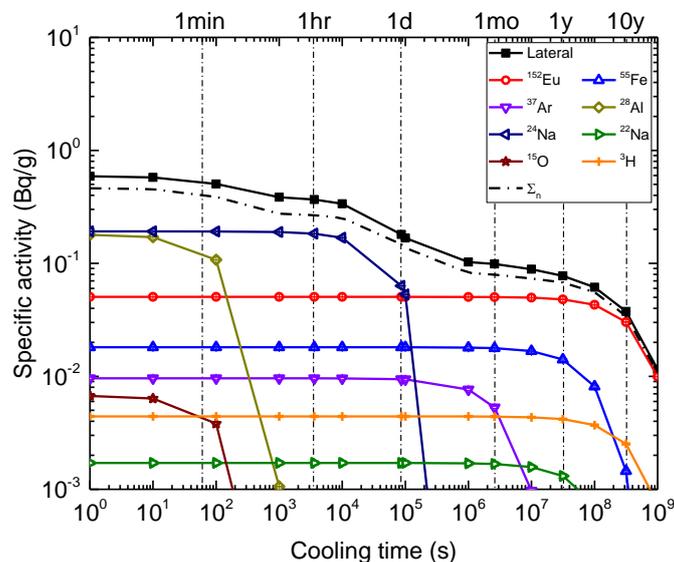


圖3.36. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材的二次中子所誘發的側向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

圖 3.37 呈現 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶 20 年，再經 1 年冷卻後的殘存活度空間分布，在上述的照射情節及冷卻時間下，前向混凝土的殘存活度水平仍有高於外

釋基準的風險，圖 3.38 呈現前向混凝土中重要長半衰期核種的殘存比活度隨深度的變化，與 3 GeV 電子的照射情節相比，殘存活度最顯著的核種同為 ^{55}Fe 、 ^{22}Na 及 ^{152}Eu ，3 種核種的殘存比活度比值分別降低 40%、40%、50%，但在靠近表面的混凝土中， ^{22}Na 及 ^{152}Eu 的殘存活度仍接近 0.1 Bq/g 的外釋基準；而側向混凝土在電子能量由 3 GeV 降為 1.5 GeV 時，核種的殘存活度水平幾乎全數低於外釋基準，圖 3.39 呈現側向混凝土的殘存活度核種隨深度的變化， ^{152}Eu 的比活度在混凝土表面為 0.05 Bq/g，低於 0.1 Bq/g 外釋基準，其餘活化核種的殘存活度則遠低於外釋基準值。

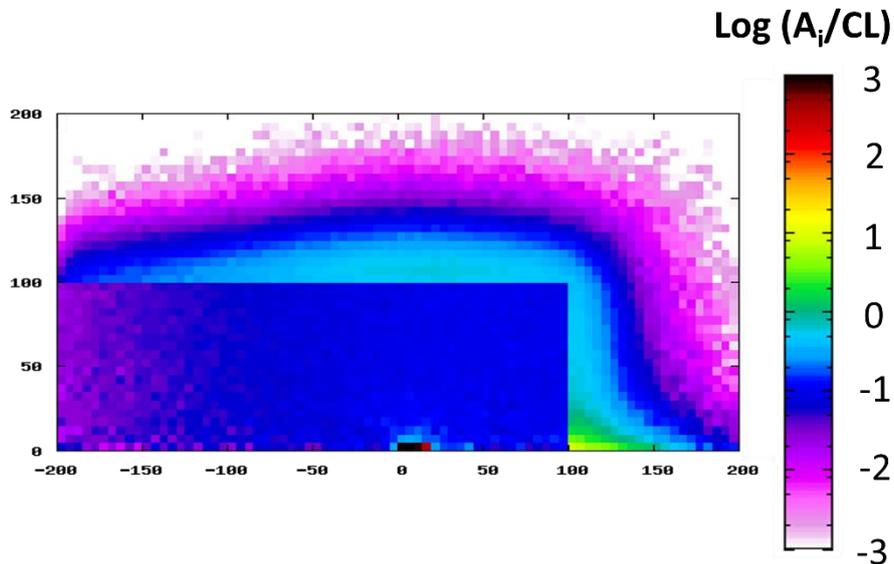


圖3.37. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形

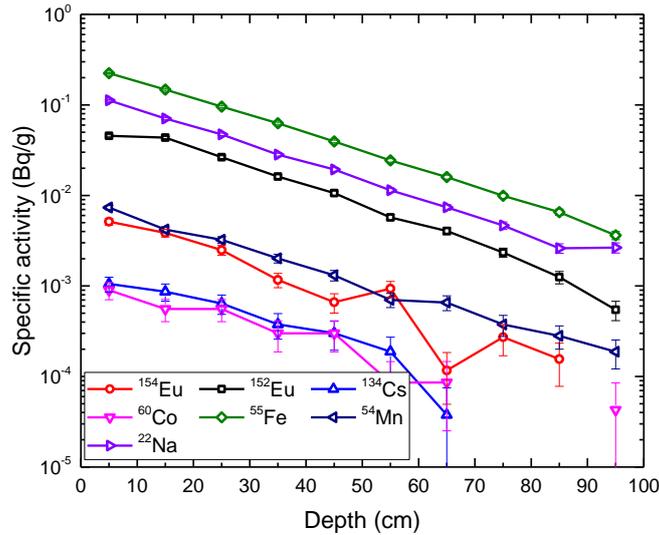


圖3.38. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

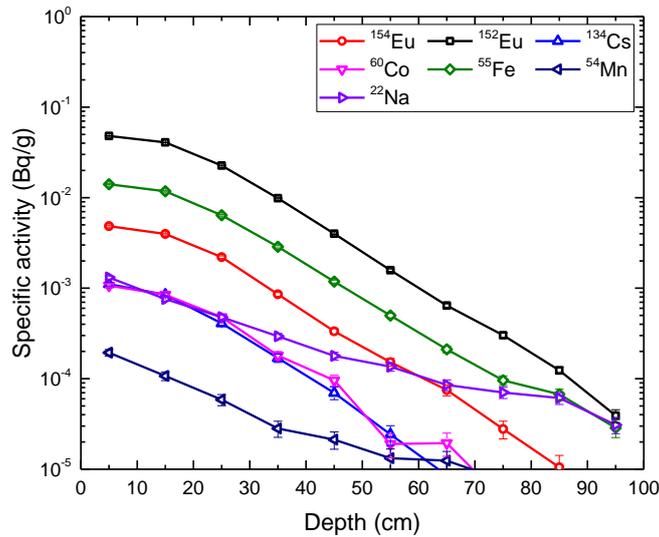


圖3.39. 1.5 GeV 電子轟擊鐵靶材 20 年，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

3.4.2 照射情節對活化的影響

照射情節的差異對於中子產率(n/e^-)及能量分布沒有影響，但對於活化潛勢的貢獻則值得進一步探討，3.3.3 節中針對電子加速器設施中的正常運轉進行靶材及混凝土的活化分析，正常運轉係指加速器設施的運轉情節貼近於長時間低電流的實際運轉情節，相對於正常運轉情節則建立異常運轉情節的活化分析，異常

運轉情節泛指短時間高電流的運轉情節，本節次則針對異常運轉下對於活化累積的影響。

- ✓ 正常運轉假設情節：低功率長期連續地照射同一位置，20 年連續運轉的總電子損失為 $1.5 \times 10^{17} e^-$ 。
- ✓ 異常運轉假設情節：高功率短期照射同一位置，電子照射功率的大小由前述儲存環注入點的全功率電子射束 ($4.48 \times 10^{10} e^-/s$) 所決定，約為 21.52 W，短暫全功率照射某一定點 1 小時。

圖 3.40 呈現鐵靶材在異常運轉情節下，殘存活度隨冷卻時間的變化。在照射結束時，靶材的比活度約為 $7 \times 10^4 \text{ Bq/g}$ ，較正常運轉情節下的活化嚴重，但由於靶材中的活化多為短衰期的核種所貢獻，如 ^{53}Fe ($T_{1/2} = 8.5 \text{ min}$) 及 ^{49}Cr ($T_{1/2} = 42.3 \text{ min}$)，因此靶材的活化在經過 1 個月以上的冷卻後，活度已大幅下降 1000 倍，且主要的活化轉而由活化程度較低的 ^{55}Fe 所貢獻。圖 3.41 則呈現鐵靶材異常運轉後，經 1 年冷卻時間後的活化分布情形。主要的活化區域位在電子入射的軸線上，且在深度 5–10 公分的位置活化最嚴重。隨著遠離電子入射的軸線，靶材中的活化水平也逐漸降低，在距離電子入射軸線最遠的位置，其活化程度有可能與外釋標準相近。

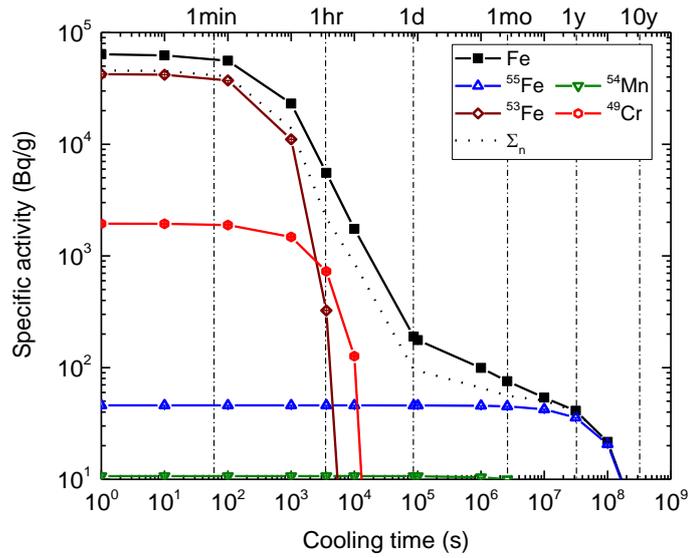


圖3.40. 鐵靶材經 3 GeV 電子異常運轉照射後，殘存活度隨冷卻時間的變化

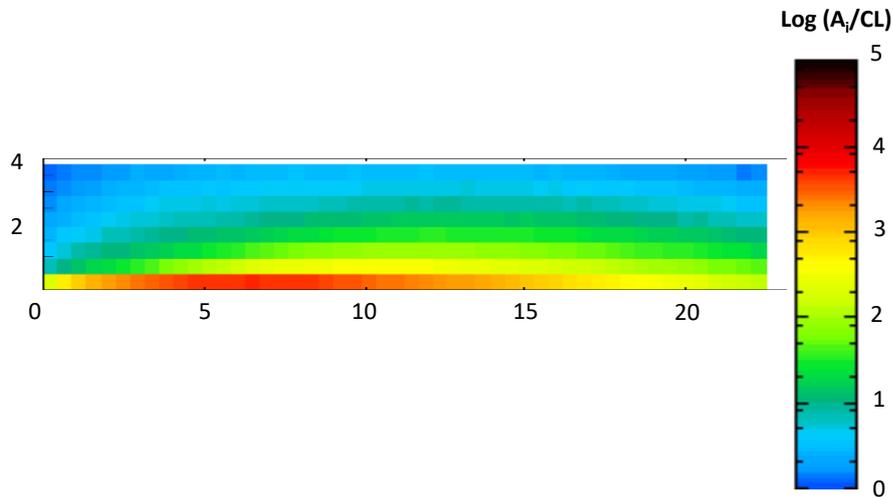


圖3.41. 鐵靶材經 3 GeV 電子異常運轉照射後，經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.42 及圖 3.43 分別呈現 3 GeV 電子異常運轉後，前向混凝土與側向混凝土的殘存活度隨冷卻時間的變化。以前向混凝土為例，與正常運轉後所誘發的前向混凝土活化相比，短半衰期的核種累積較為顯著，包含 ^{15}O ($T_{1/2} = 122.2 \text{ s}$)、 ^{28}Al ($T_{1/2} = 2.2 \text{ min}$)、 ^{13}N ($T_{1/2} = 10.0 \text{ min}$)、 ^{24}Na ($T_{1/2} = 15.0 \text{ h}$)，在照射結束時，上述活化核種的比活度相較於正常運轉的活度累積上升了 10 至 100 倍，但這些短半衰期核種衰變速度較快，經過約 1 個月的冷卻後，混凝土的比活度即下降約 10^5 倍以上。而其他長半衰期的核種比活度則下降約 2 至 100 倍。在側向混凝土中，同

樣呈現短半衰期核種在異常照射結束時的比活度較正常運轉下所累積的活度高，而長半衰期核種的比活度則有一定比例降低的趨勢。

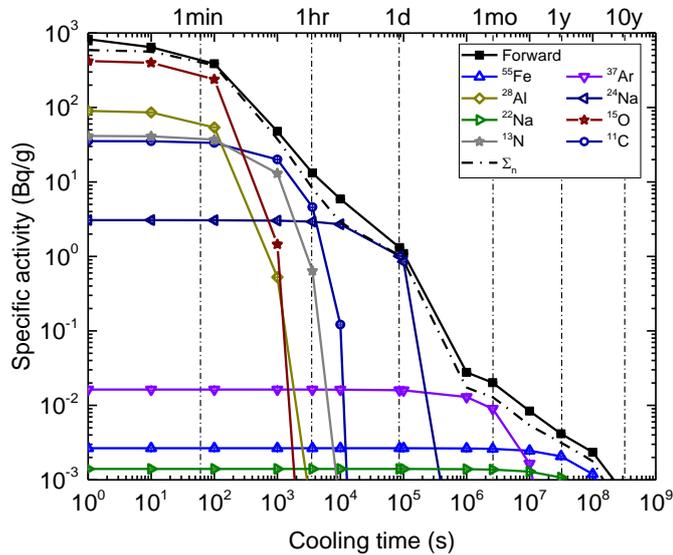


圖3.42. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，轟擊鐵靶材所誘發的前向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

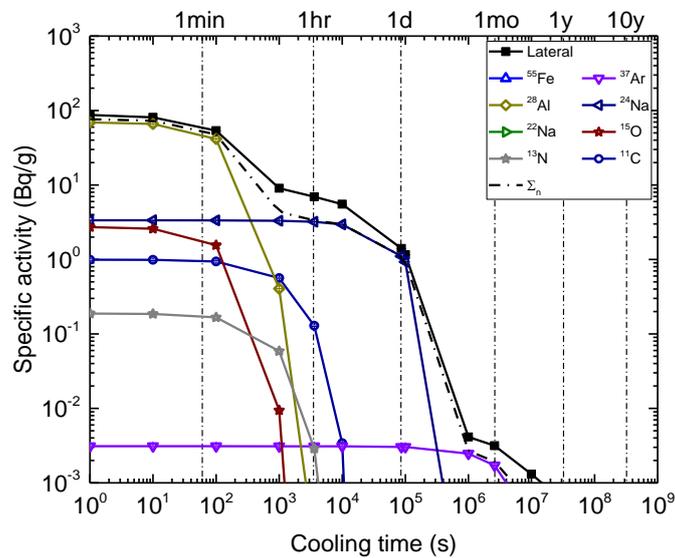


圖3.43. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，轟擊鐵靶材所誘發的側向混凝土殘存比活度隨冷卻時間的變化

圖 3.44 呈現在異常運轉結束，再經 1 年冷卻後的殘存活度空間分布情形。

前述在異常運轉情節下，針對短半衰期核種的累積較為顯著，但普遍在 1 個月

冷卻後，短半衰期核種多數已衰變，不構成嚴重活化的問題。而長半衰期核種雖然衰變速度較慢，但長半衰期核種在異常運轉情節下累積數量較少，對應在圖 3.44 的活度累積的分布即可發現，經 1 年冷卻後在短半衰期核種多數衰變，長半衰期核種累積活度較低的情況下，前向及側向混凝土的殘存比活度低於外釋基準，圖 3.45 及圖 3.46 則呈現七種混凝土中重要長半衰期的比活度隨深度的變化，七種核種的殘存比活度均遠低於外釋基準的 0.1 Bq/g (^{55}Fe 為 1000 Bq/g)。

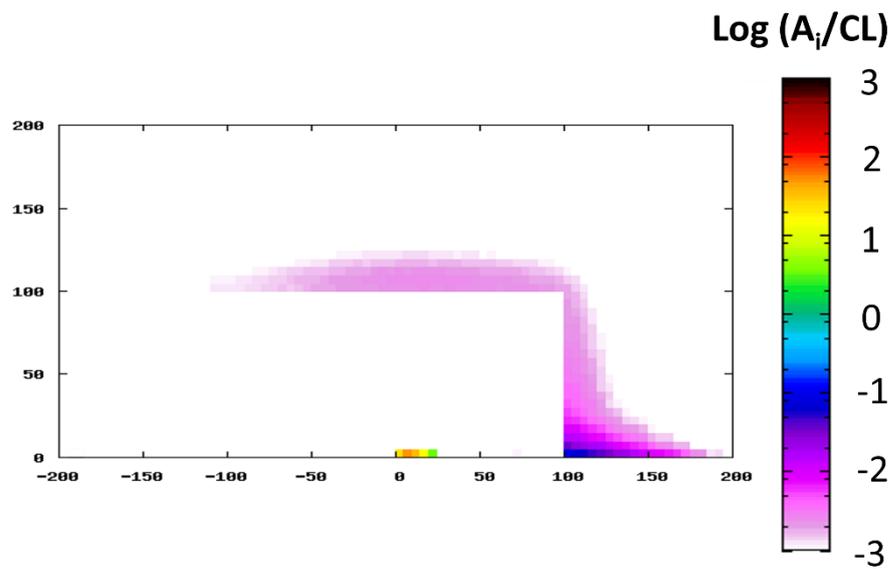


圖3.44. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束經 1 年冷卻後，混凝土的殘存活度分布情形

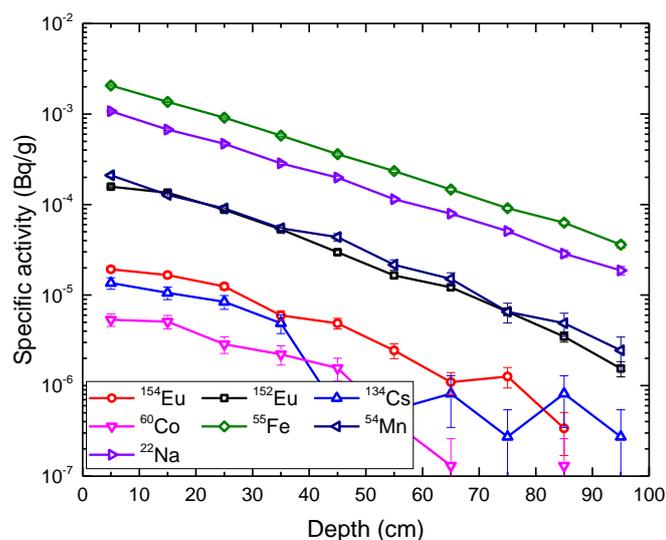


圖3.45. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束 1 年後，前向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

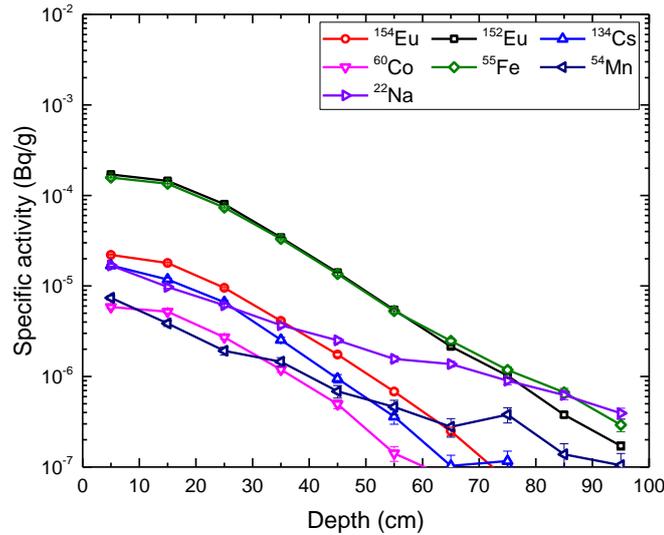


圖3.46. 3 GeV 電子在異常運轉情節下，並在照射結束 1 年後，側向混凝土的殘存活度在不同深度的變化

基於照射情節差異對於活化可能造成可觀的影響，本團隊參考文獻與團隊近年參與的活化分析經驗，發現加速器常用的照射情節大致可區分為三種，第(0)種的週期性照射情節最貼近加速器真實運轉情節，其活化預測結果最貼近實際的活化情形，其餘兩種則是文獻中常見的簡化連續照射情節，兩種簡化連續照射情節分別為(1)忽略二次照射之間的停機，直接連成簡化的連續照射；以及(2)同樣是簡化的連續照射但降低射束輸出，也就是將總工作負載平均分配在設施的生命期。本團隊以第(0)種照射情節誘發活化為基礎，比較兩種簡化連續照射情節對於活化預測的差異，分析結果發現：情節(1)針對長半衰期核種的活化預測結果較為高估；情節(2)針對短半衰期的活化預測則較為低估。而簡化連續照射情節的活化預測誤差，則與加速器運轉時的工作因數有關。本團隊整理相關研究成果，以「加速器運轉引發物質活化的分析：週期性與連續照射情節的差異與修正」為題目，撰文乙篇投稿於輻防月刊，全文請詳見附件二。有鑒於此一研究成果的實務應用重要性，本團隊亦有系統地延伸研究內涵，整理並投稿到國際知名期刊。

3.4.3 靶材差異對活化的影響

除了鐵以外，加速器設施中常使用的材料包含鋁、銅、鎢等材料，高能電子轟擊在上述靶材時，同樣可能誘發中子生成以及活化問題，本節於是針對靶材差異對活化的影響進行探討。

圖 3.47 呈現 3 GeV 電子轟擊在鐵、鋁、銅、鎢的二次中子能量分布比較，靶材設計如表 3.14。根據 FLUKA 的預測，靶材原子序越小，二次中子的產率越低，而能量則愈高，如表 3.18 所示。

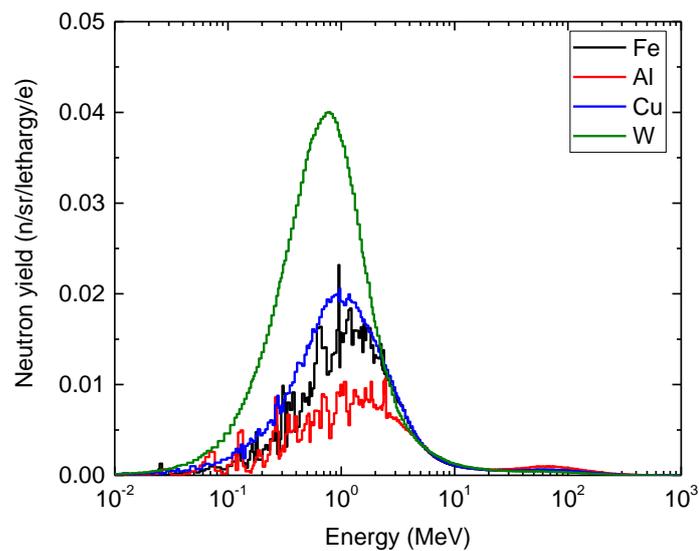


圖3.47. 3 GeV 電子轟擊在鐵、鋁、銅、鎢的二次中子能量分布

表3.18. 3 GeV 轟擊在鐵、鋁、銅、鎢的二次中子產率及平均能量

二次中子	鐵	鋁	銅	鎢
原子序	26	13	29	74
產率 (n/e)	0.48	0.33	0.60	1.10
能量 (MeV)	4.4	7.9	3.7	1.8

圖 3.48 呈現鋁靶材經過 3 GeV 電子連續轟擊 20 年後的殘存活度隨冷卻時間的變化，在照射結束時的比活度約為 200 Bq/g，主要的活化來自 ^{26m}Al ，其他活化核種包含 ^{28}Al 、 ^{27}Mg 、 ^{24}Na 、 ^{22}Na 、 ^3H 。而在十年以上的冷卻後，靶材的殘存

活度只剩下 ^3H 的貢獻，整個靶材的比活度降至 10 Bq/g 以下。圖 3.49 則呈現鋁靶材經過 1 年冷卻後的活化空間分布，在電子主射束的路徑上有顯著的活化情形，而隨著靶材位置遠離射束路徑(半徑增加)，活化的水平顯著降低。

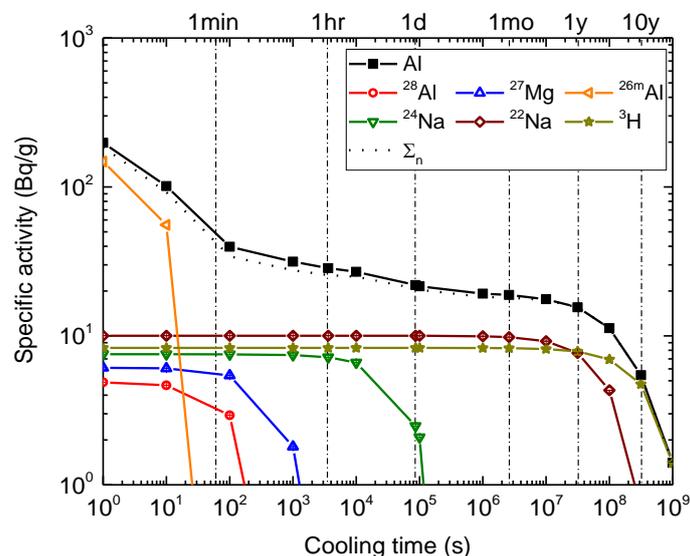


圖3.48. 鋁靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化

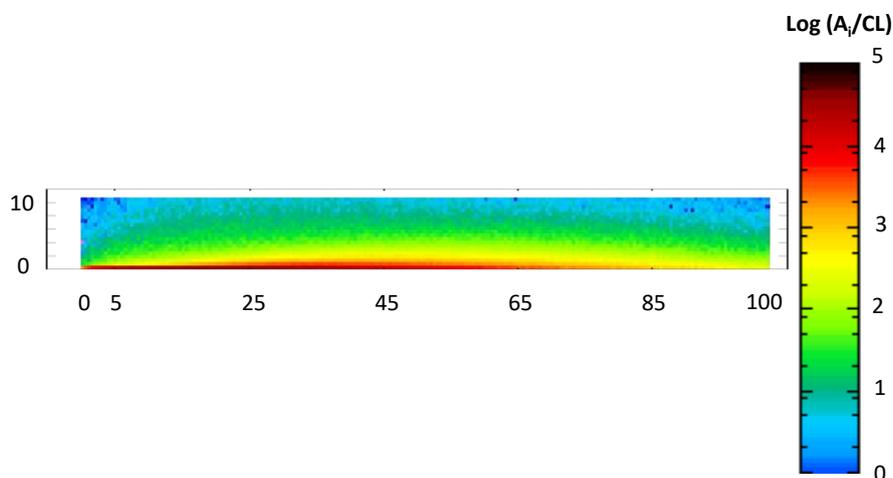


圖3.49. 鋁靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.50 呈現銅靶材經過 3 GeV 電子連續轟擊 20 年後的殘存活度隨冷卻時間的變化，在照射結束時的比活度約為 1.5×10^4 Bq/g，主要的活化來自 ^{62}Cu 及 ^{64}Cu ，其他活化核種包含 ^{61}Cu 、 ^{58}Co 、 ^{57}Co 、 ^{55}Fe 。而在十年以上的冷卻後，靶材的殘

存活度主要由 ^{63}Ni 及 ^3H 的貢獻，整個靶材的比活度降至 100 Bq/g 以下。圖 3.49 則呈現銅靶材經過 1 年冷卻後的活化空間分布，除了在電子射束路徑上的活化最為嚴重以外，整個銅靶材的活化均有大於外釋基準的風險。

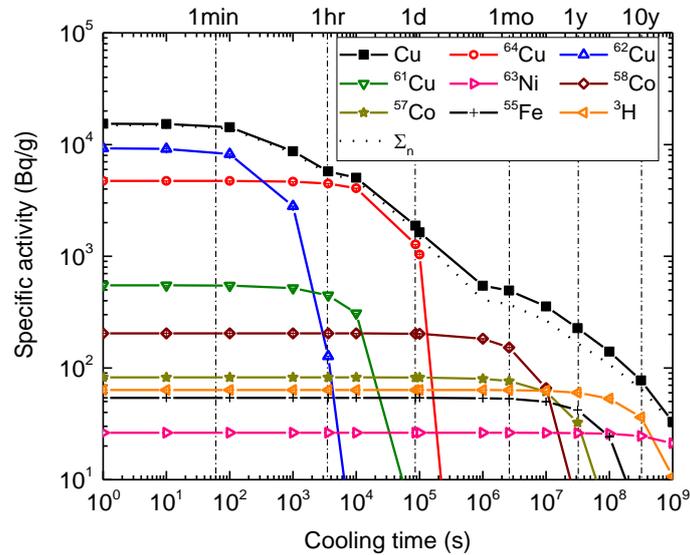


圖3.50. 銅靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化

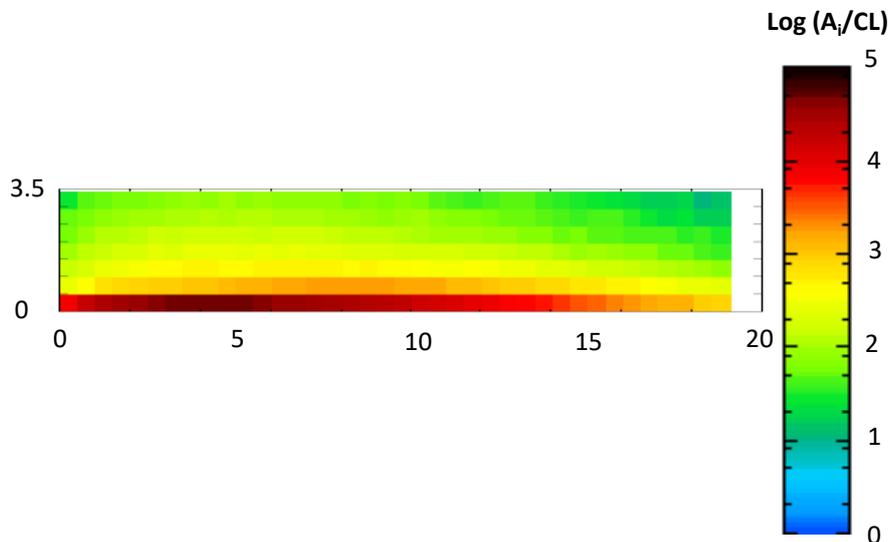


圖3.51. 銅靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.52 呈現鎢靶材經過 3 GeV 電子連續照射 20 年後，靶材殘存活度隨冷卻時間的變化。在照射結束時，靶材的殘存比活度達到 10^5 Bq/g ，主要由 ^{181}W 、 ^{185}W 及 $^{181\text{m}}\text{Ta}$ 所貢獻，而在較長冷卻時間下的重要活化核種則包含 ^{179}Ta 及 ^3H 。圖

3.53 則呈現鎢靶材在冷卻時間為 1 年時的殘存活度空間分布，與前述案例相似，嚴重活化的位置主要集中於電子入射的路徑上，並隨著位置遠離其活化程度逐漸降低。

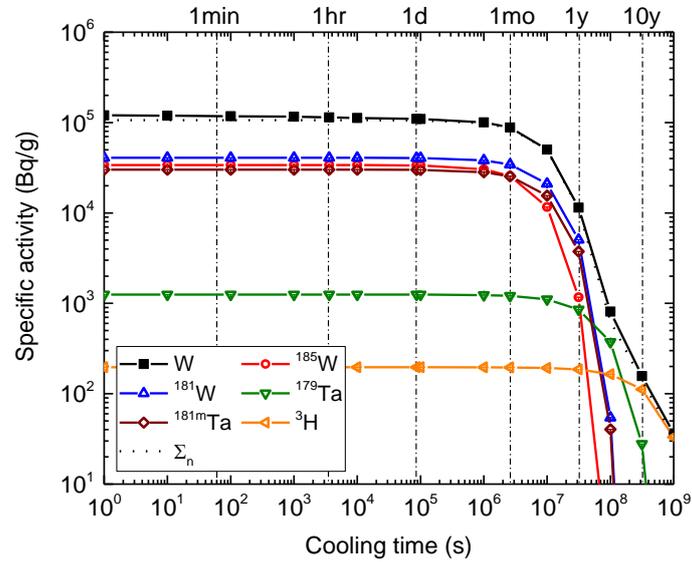


圖3.52. 鎢靶材經 3 GeV 電子連續照射 20 年後，殘存活度隨冷卻時間的變化

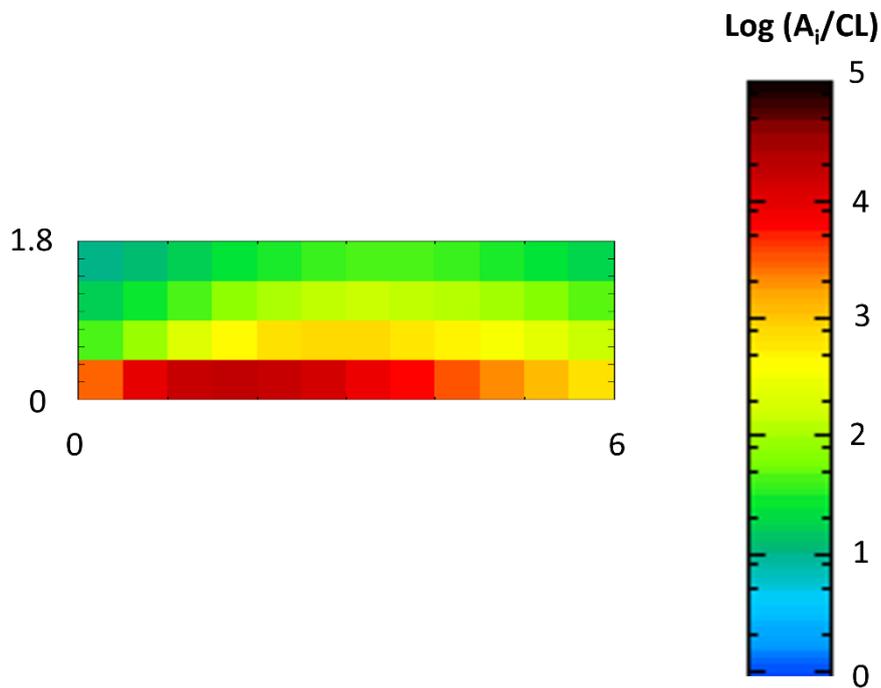


圖3.53. 鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束經一年冷卻後的殘存活度分布情形

圖 3.54 呈現 4 種不同的靶材在經 3 GeV 電子連續照射 1 年後，前向混凝土

的殘存比活度隨冷卻時間的變化。在任一冷卻時間下，由銅靶材所誘發的活度最高，以鎢靶材誘發的活度最低，而此現象與二次中子產率的趨勢不相符，推測肇因於靶材設計因應阻擋 95% 電子能量的目的，存在靶材長度不一的現象。靶材長度不一對於二次中子的影響有二：其一為靶材長度不同對於屏蔽前向散射中子的效率不同，進一步造成前向混凝土的活化與中子產率的關係不相符；其二為二次中子生成的位置不是點射源，因此需要距離平方反比的修正。

另一方面，由 4 種不同靶材發誘發的前向混凝土殘存活度隨冷卻時間的變化趨勢相符，即表示主要的活化核種種類一致，僅比活度高低存在些微差異。透過此一分析結果，即可得知 4 種靶材所誘發的二次中子能量雖然不同，但在混凝土中所生成的活化核種種類則相同，根據 3.3.3 節的分析結果，主要的活化核種為 ^{152}Eu 、 ^{55}Fe 、 ^{37}Ar 、 ^{28}Al 、 ^{24}Na 、 ^{22}Na 、 ^{15}O 、 ^3H ，後續針對混凝土的活化分析也可以省略對單一核種活化程度探討，而是以活度總合進行討論。

圖 3.55 為 4 種靶材誘發的側向混凝土活化，由鎢靶材所誘發的殘存比活度最高，銅次之，鐵第三，鋁則最低，與二次中子產率一致。

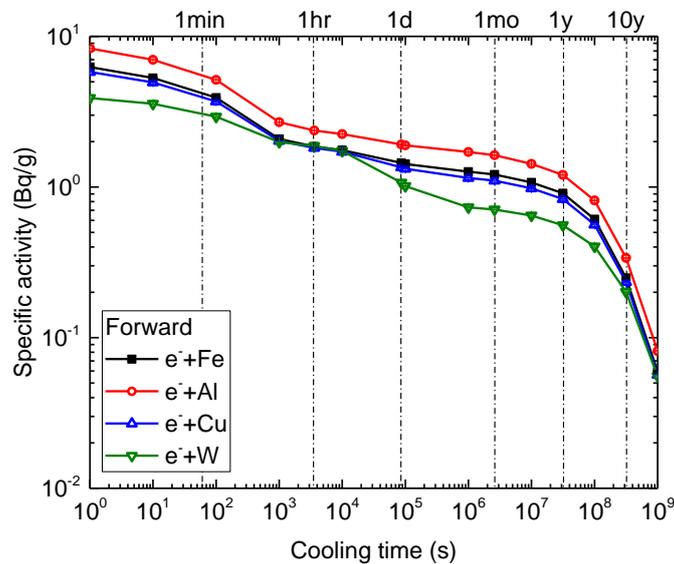


圖3.54. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3GeV 電子照射結束後前向混凝土的殘存比活度隨冷卻時間的變化

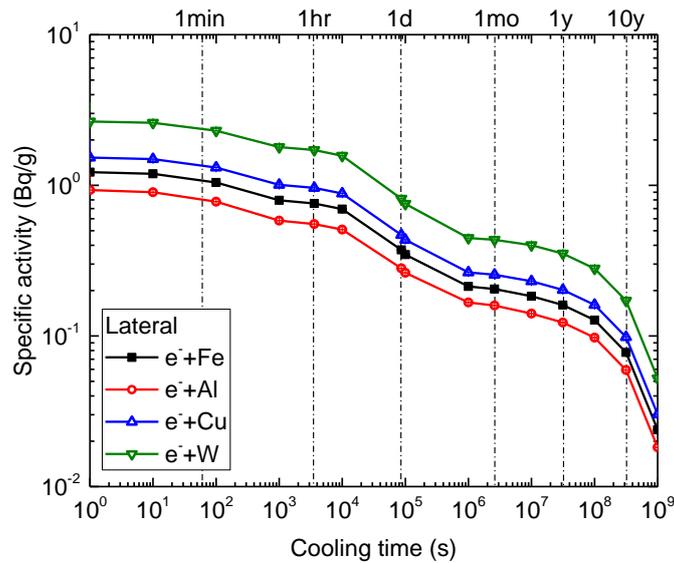


圖3.55. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束後前向混凝土的殘存比活度隨冷卻時間的變化

圖 3.56、圖 3.57 呈現前向及側向混凝土在經過 1 年冷卻後，混凝土的外釋基準值隨深度的變化，計有 7 種重要的長半衰期核種納入計算，包括 ^{22}Na 、 ^{54}Mn 、 ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 及 ^{154}Eu 。在前向混凝土中，鋁所誘發的活化自表面至深度約 50 公分有超過外釋基準的風險，鐵、銅所誘發的活化自表面至深度約 40 公分有超過外釋基準的風險，而鎢所誘發的前向混凝土活化則自表面至 30 公分有超過外釋基準的風險。在側向混凝土中，鎢所誘發的活化自表面至 20–30 公分有超過外釋基準的風險，鐵、銅所誘發的活化則自表面至 10–20 公分有超過外釋基準的風險，而鋁靶材所誘發的側向混凝土活化則沒有超過外釋基準。

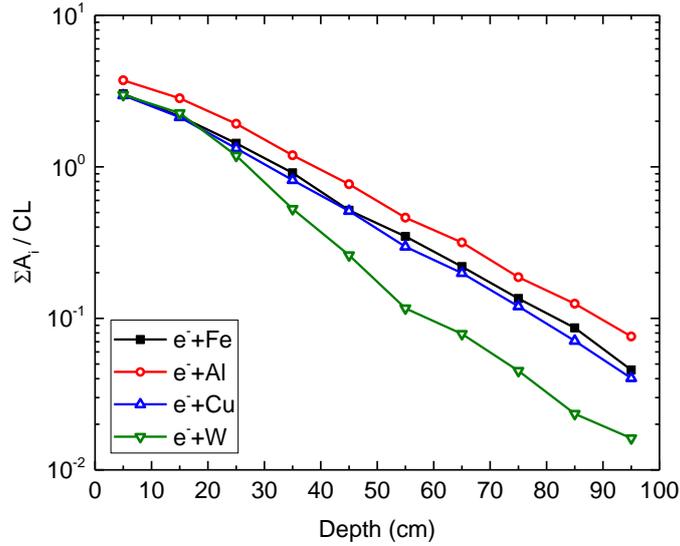


圖3.56. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束，並經過一年冷卻後，前向混凝土中 7 種重要核種的殘存活度與外釋基準的比值

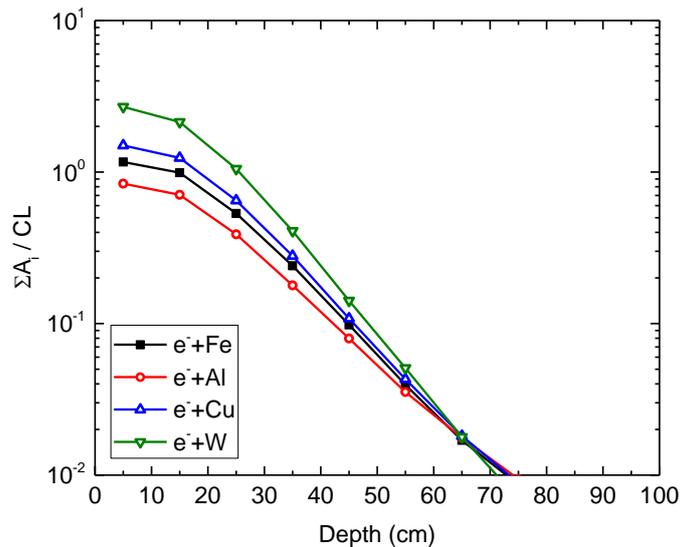


圖3.57. 鐵、鋁、銅、鎢靶材經 3 GeV 電子照射結束，並經過一年冷卻後，側向混凝土中 7 種重要核種的殘存活度與外釋基準的比值

3.4.4 實際運轉情節對活化結果的修正

3.2 節中針對 TPS 安全分析報告與目前實際運轉狀況的比較，每年的射束損失為安全分析報告中估值的 65%，在射束能量相同，射束損失位置不變的前提下，二次中子的產率與誘發的活化水平同樣會降為前述評估結果的 65%。以 3.3.3 節 3 GeV 電子在安全分析報告評估下的正常運轉情形為例，照射結束時，鐵靶中

^{55}Fe 的殘存比活度約為 8400 Bq/g，而套用實際運轉情形後， ^{55}Fe 的比活度應為 5500 Bq/g。在前向混凝土與側向混凝土中的殘存比活度同樣會降為原先的 65%，原先在冷卻一年後前向混凝土中的殘存比活度與外釋基準的比較，在深度 40-50 公分的位置仍可能大於外釋基準，套用實際運轉的照射情節後，大於外釋基準的深度減少為 30-40 公分。側向混凝土也由原先的 10-20 公分轉為全數低於外釋基準。

3.5 活化評估/量測/管理的建議

本團隊參考 IAEA-NW-T-2.9 號報告 Decommissioning of Particle Accelerators [15]，針對加速器活化管理與設施除役相關議題，摘錄彙整重要建議如附件一，該報告根據國際間的加速器設施特性及相關經驗歸納整理系統的除役工作相關建議，國內未來的除役工作可參考該報告中所列舉的注意事項，並據以建立可行、安全的除役規劃。

3.6 研討會

彙整本研究的成果與經驗舉辦高強度加速器設施活化產物活度與殘存評估輻射安全研討會 1 場，時間為 112 年 11 月 7 日於清華大學綠能大樓會議室舉辦，廣邀國內產、學、研與管制機關一起參與，包含核能安全委員會、國家原子能科技研究院、國家同步輻射中心、漢民原醫、中華民國輻射防護協會以及本校諸多單位。研討會中將本研究計畫所建立之技術與彙整之資訊予以公開分享討論，並從各界獲得反饋，預期可提升國內相關設施未來推動除役作業與放射性廢棄物管理的水準。簽到單及會議照片如下：

**清華大學能源與環境研究中心
會議簽名單**

時 間：112 年 11 月 07 日（星期二） 上午 09:00-16:00

地 點：綠能館 207 室

議 題：高強度加速器設施活化產物活度與殘存評估輻射安全研討會

請簽名：

所屬單位	姓名	請簽名
核能安全委員會	許雅娟	許雅娟
核能安全委員會	梁詠慈	梁詠慈
核能安全委員會	林琦峰	林琦峰
核能安全委員會	蕭展之	蕭展之
中華民國輻射防護協會	賴柏辰	賴柏辰
中華民國輻射防護協會	賴柏倫	賴柏倫
國家同步輻射研究中心	林郁琦	林郁琦
國家同步輻射研究中心	陳昂佑	陳昂佑
國家同步輻射研究中心	溫博鈞	溫博鈞
國家同步輻射研究中心	黃思榮	黃思榮

圖3.58. 研討會簽到單(1/2)

所屬單位	姓名	請簽名
國家同步輻射研究中心	林思妤	林思妤
漢民原醫	藍仁鴻	藍仁鴻
漢民原醫	林志遠	林志遠
國家原子能科技研究院	林聰得	林聰得
國家原子能科技研究院	王正寧	王正寧
國家原子能科技研究院	邱一夫	邱一夫
國家原子能科技研究院	林怡君	林怡君
臺灣加速器學會	陳皇龍	陳皇龍
清華大學	許榮鈞	許榮鈞
清華大學	謝澄憶	謝澄憶
清華大學	房博文	房博文

圖3.59. 研討會簽到單(2/2)

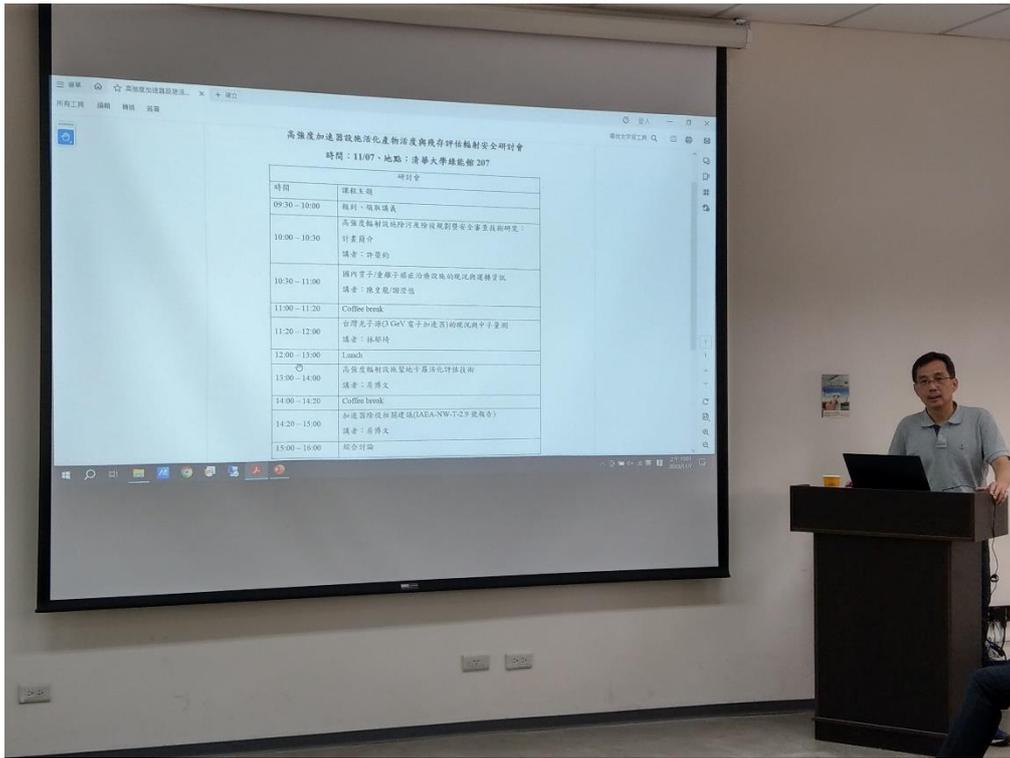


圖3.60. 計畫主持人許榮鈞教授為研討會進行開場



圖3.61. 與會人員照片



圖3.62. 同步輻射中心林郁琦博士對 TPS 進行介紹



圖3.63. 房博文針對 IAEA-NW-T-2.9 號報告進行介紹

3.7 結論

本年度高強度輻射設施除污及除役規劃暨安全審查技術研究主要標的物是高能電子加速器進行活化分析，實際參考對象為國內兩座現有設施 1.5 GeV 的 TLS 及 3.0 GeV 的 TPS，研究起點主要參考相關設施的安全度分析報告內容與文獻研析的結果。承襲 IAEA-SSG-49 號報告的除役精神，加速器設施的除役規劃應根據實際運轉狀況進行週期的評估及調整，本報告透過蒐集 TPS 的實際運狀況，發現每年的射束損失約為安全分析報告預估的 65%。本研究持續鑽研蒙地卡羅活化分析技術，參考 TPS 安全度分析報告的評估架構重新以最新版本 FLUKA 進行活化評估，並基於原有的分析情節再合理增加混凝土中(不可避免)雜質所造成之活化的影響，殘存活度分析結果顯示，在極端的照射情節下(所有的射束損失均集中在單一位置)，前向及側向混凝土可能有程度不同的活化風險。此外，本研究也進一步討論電子能量、照射情節、靶材差異對活化的影響，並將實際運轉情節對活化結果進行修正。值得注意，基於照射情節差異對於活化評估的可觀影

響，本團隊參考文獻與團隊近年參與的活化分析經驗，發現加速器常用的照射情節大致可區分為三種：原則上，週期性照射情節最貼近加速器真實運轉情節，其活化預測結果最貼近實際的活化情形，但是受限於蒙地卡羅程式輸入的限制，實務上常見以下列二種簡化連續照射情節來取代，第一種簡化是直接忽略二次照射之間的停機，直接串成連續照射，此一假設總是保守，但須注意是否過度高估；第二種簡化也是連續照射但降低射束輸出，也就是將總工作負載平均分配在設施生命期，此一假設則總是低估，針對長半衰期核種的活化預測尚可，但不適用於針對短半衰期核種的活化預測。本研究有系統地分析三種照射情節在不同應用環境下的預測，據以導出對應的修正因子，主要與加速器運轉的工作因數與核種半衰期有關，此部分的研究成果將有利於未來國內各式加速器的活化分析與安全審查。

除了透過蒙地卡羅分析程式量化評估高強度設施潛在的活化風險問題，本團隊也重點整理 IAEA-NW-T-2.9 : Decommissioning of Particle Accelerators 報告，該報告根據國外加速器除役經驗建立相關除役建議，報告內容有助於國內未來的除役相關管理及管制的精進。結合兩年研究結果，本團隊於 112 年邀請國內產、學、研與管制機關共同針對活化分析結果及 IAEA-NW-T-2.9 內容進行分享討論，並從各界獲得反饋，預期可提升國內相關設施未來推動除役作業與放射性廢棄物管理的水準。

參考資料

- [1] International Atomic Energy Agency. Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities. IAEA Specific Safety Guide No. SSG-49 (2019)
- [2] 國家同步輻射研究中心。台灣光子源(TPS)輻射安全評估報告 (2010)
- [3] International Atomic Energy Agency. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators. IAEA Technical series No. 188; (1979)
- [4] E. Freytag. Strahlenschutz an Hochenergie Beschleunigern. Karlsruhe: G. Braun (1972)
- [5] J.C. Liu and V. Vylet. Radiation protection at Synchrotron Radiation Facilities, Radiat. Prot. Dosim. 96, 345-357 (2001)
- [6] J.D. Cossairt. Radiation physics for personnel and environmental protection. Fermilab report TM-1834 (2014)
- [7] H.S. Lee, S. Ban, T. Sanami, K. Takahashi, T. Sato, K. Shin, C. Chung, Angular distribution measurements of photo-neutron yields produced by 2.0 GeV electrons incident on thick targets. Radiat. Prot. Dosim. 116, 653-657 (2005)
- [8] A. Fasso, M. Silari, L. Ulrici. Predicting Induced Radioactivity at High Energy Accelerators. SLAC-PUB-8215 (1999)
- [9] M. Brugger, A. Errahhaoui, M. Kim, H.S. Lee, S. Roesler, H. Vincke. Activation benchmark study at a 2.5 GeV electron accelerator. Prog. Nucl. Energy. 4, 363-366 (2014)
- [10] K. Masumoto, A. Toyoda, K. Eda, Y. Izumi, T. Shibata, Evaluation of radioactivity induced in the accelerator building and its application to decontamination work J. Radioanal. Nucl. Chem. 225, 465-469 (2003)
- [11] 《一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法》(民國 93 年 12 月 29 日)
- [12] G. Yoshida, H. Matsumura, K. Masumoto, H. Nakamura, A. Toyoda, F. Nobuhara, S. Iwai, K. Nishikawa, K. Hayashi, J. Ishioka, H. Hanaki, H. Miyauchi, S. Nagahashi, M. Sawada, K. Goto, Y. Yamamoto, T. Miura, K. Bessho. Investigation into activation of accelerators at various synchrotron radiation facilities in Japan. J. Nucl. Sci. Technol. 543-554 (2021)
- [13] R.K. Bock and A. Vasilescu. The particle detector brief book. Springer- Verlag Berlin Heidelberg (1998)
- [14] T. Fujibuchi, A. Nohtomi, S. Baba, M. Sasaki, I. Komiya, Y. Umedzu, H. Honda. Distribution of residual long-lived radioactivity in the inner concrete walls of a compact medical cyclotron vault room. Ann. Nucl. Med. **29**, 84-90 (2015)
- [15] International Atomic Energy Agency. Decommissioning of Particle Accelerators.

附件一 IAEA-NW-T-2.9 : Decommissioning of Particle Accelerators

4.1 引言

4.1.1 背景

自 1930 年代開始，加速器即被認為有潛力作為工業發展與醫學應用上的重要工具，直至 1994 年，加速器的總數已達約 10,000 部，而每年約以 15% 的速率持續增加。

目前，幾乎所有 IAEA 會員國都在使用粒子加速器，超過 97% 的加速器投入醫學或商業應用，數百部用於科學研究，最常見的加速器應用包含：

- [1] 放射性同位素生產
- [2] 醫學應用，如放射診斷、癌症治療
- [3] 醫學儀器的消毒與食品殺菌
- [4] 利用小型加速器產生中子的礦物及石油勘探
- [5] 材料科學及相關應用，如改變材料性質、中子活化分析、核融合材料測試及半導體晶片加工
- [6] 基礎物理研究
- [7] 考古定年、貨櫃檢驗

由於正子造影(Positron Emission Tomography, PET)及正子造影合併斷層掃描(PET combined with Computed Tomography, PET-CT)的使用，促使近十年來小型醫用迴旋加速器的數量大幅增加。

正子造影作為建立醫學影像的必要技術，其應用擴及腫瘤學、神經病學及心臟病學等範疇，可以預期，相關技術的迅速發展以及對於新型放射核種的需求將會將加速器應用推展至工業、藥物等領域，隨著技術的發展，對於迴旋加速器以及放射性核種的需求也會持續上升；另一個在正在持續成長的領域則是光子源(同步光源及自由電子雷射)在研究與工業應用的範疇。

最典型的加速器主要是加速電子及質子，部份加速器則會使用氦離子、氦離子($^3\text{He}^{2+}$ 及 α 離子)或重離子，活化的生成可能源於上述的加速粒子與物質的直接作用，或是間接生成的二次粒子與物質的作用。加速器環境內活化產物的比活度高低可能有非常顯著的差異，其差異會受加速器種類、活化產物與射束損失點的距離、冷卻時間所影響，在大部份的情況下，這些活化產物的活度都相對較低。在除役計畫中，評估設施內的活化特性是一個必要的環節，目前電腦程式已具備足夠的能力評估加速器設施的活化，本報告中會針對典型的活化評估方法進行呈現。

在高能加速器運轉期間，二次輻射與周遭物質的作用可能誘發加速器組件與建物的活化，因此在設施除役時，一定數量的放射性廢棄物必須被移除。然而在已知的幾個加速器運轉實務經驗中，除役問題的受重視程度遠低於運轉時的安全問題，在較早期所建立的加速器中，除役問題所面臨的風險並未被重視，然而，在發現運轉及維護人員面臨設施活化所帶來的風險時，相關單位隨即投入輻射防護補救措施。數篇國際報告與文件即針對上述問題提出相關建議，包含加速器與靶材活化所帶來的殘存劑量率問題，以及造成後續設施除役時的挑戰。

在 1970 年代以前，放射性廢棄物的生成以及後續除役時可能的曝露風險都不曾被重視，然而在當時，國際間已有數千部加速器投入運轉。第一個針對加速器除役的全面性研究首見於 1979 年位於美國，愛達荷，太陽谷(Sun Valley)的國際會議中，某些早期的電子加速器及迴旋加速器僅使用了一般的拆除方法即完成除役，部份拆除下來的零組件中被作為廢棄金屬販售，當時的加速器粒子能量與強度較低，因此大部份的活化幾乎無法被偵測。而早期加速器的除役記錄幾乎不可考，僅有少量的拆除零件在大學博物館以“Atom Smashers: Fifty Years”為題展示及留存在 Smithsonian Institute。

早期的加速器除役記錄只有例行性收錄在技術報告，或是在 1970-1980 年代之間有少量的除役報告可供參考。

至 1979 年，在美國本土經估計已有 1200 部以上的粒子加速器，體積自小型

的科克勞夫-沃耳吞加速器(Cockcroft-Walton)及粒子直線加速器，至大型數個 GeV 的同步加速器等。至此階段，至少有數百部的加速器可能誘發活化問題。阿岡諾國家研究所(Argonne National Lab.)在美國能源部的支持之下針對美國本土五部加速器的除役工作進行研究，研究內容包含在加速器除役時部份加速器組件再利用的可能，五部加速器的除役資訊如下：

- [1] 羅徹斯等大學(University of Rochester) 250 MeV 同步迴旋加速器：該加速器於 1968 年停止運轉，並於 1971 年拆除。不鏽鋼組件被再利用於屏蔽材料，其他的放射性廢棄物則予以掩埋，沒有廢棄物中殘存核種種類相關資訊。加速器建物則由該大學繼續使用，對於混凝土的活化潛勢未進行分析，除役期間最高的劑量率為 1.4 mSv/h，除役成本為 US \$104,500。
- [2] 哈佛大學(Harvard University) 6 GeV 電子同步加速器：該加速器於 1973 年 5 月停止運轉，大部份的加速器組件被送往實驗室再利用，加速器建物未被拆除，除役期間最高的劑量率為 1 mSv/h，除役成本為 US \$735,200。
- [3] 卡內基梅隆大學(Carnegie Mellon University) 440 MeV 同步迴旋加速器：該加速器於 1969 年停止運轉，並在 1974-1975 年間進行除役，除役期間最高的劑量率為 1.75 mSv/h，除役成本為 US \$504,000。
- [4] 耶魯大學(Yale University) 重離子直線加速器：該加速器於 1975 年 1 月停止運轉，並隨即進行除役工作，大部份的組件被送往其他實驗室再利用，加速器建物經檢查沒有活化問題(Radiological clean)，除役成本為 US \$105,000。
- [5] 布魯克赫文(Brookhaven) 3GeV 質子同步加速器：該加速器於 1966 年 12 月停止運轉，並在一年後開始除役工作，當局宣稱一年的冷卻時間有效降低設施的活化水平，主要的組件被再次利用，其他的材料則被轉售予廢料商。

上述五個除役計畫的共通點，在於加速器的主要部份均被其他設施再次利用，

或運送至其他加速器實驗室進行儲存。

隨著前述除役規劃的進行，針對除役計畫、成本、經驗等相關文件逐漸在國際社會中出現，例如 1999 年由歐盟所發表的 Evaluation of the Radiological and Economic Consequences of Decommissioning Particle Accelerators，但該文件僅針對歐洲大陸的加速器進行討論，本報告是第一部提供系統性的除役資訊及導則供國際間加速器設施參考，而加速器的除役不僅在已開發國家受到重視，在開發中國家針對上述議題也逐漸浮上檯面。

4.1.2 目的

本報告旨在提供粒子加速器的除役經驗，並重點提示在除役期間可能遭遇的困難。本報告供設施經營者，特別是設施已接近除役階段或是有意讓設施延役的經營單位、法務機關、廢棄物處理單位、政府主管機關、各地政府、除役承包商以及加速器設計監造單位。

本報告也提供加速器誘發活化以及放射性廢棄物處理問題的解決方法，預期有助於設施在設計階段即可將除役問題納入考量，並**確立放射性廢棄物減量及降低除役時對加速器建物影響的目標**。本報告所提供的導則方向僅根據專家學者的建議，但未與各 IAEA 成員之間達成最後共識。

4.1.3 範圍

本報告針對粒子加速器設施的除役提供相關資訊，特別是有顯著活化或污染的加速器設施。加速器設施的應用領域、設計、建造、運轉與除役之間的關係會進行解析，除役相關資訊也會從除役方法、組織及科技三個面向進行呈現。

本報告所論及的加速器設施除役僅包含粒子加速器的主要及次要系統，不包含附屬設施(如：研究實驗大樓、放射藥物與放射化學實驗室)，雖然核融合機器不屬於加速器設施，但核融合設施的除役工作與加速器設施的除役有諸多雷同之處，因此在附錄中會收錄核融合設施的除役經驗。

4.1.4 架構

本報告架構旨在支持無相關經驗工作者，在進行加速器除役工作是可以根據本報告為基準逐步完成。

在本章引言之後，第二章針對各國的加速器進行盤點，包含數量、種類、地理分布。第三章將加速器將依據加速器的粒子種類及加速能量，概括將加速器分為四大類進行討論。第四章將根據第三章加速器分類基準，討論四大類加速器的輻射特性。第五章將列舉加速器設施的除役過程，包含除役措施的要求和定義、起草除役計畫、計畫執行及廠址外釋。第六章包含廠址的再利用及加速器設施的重建。第七章討論除役所需成本，包含部份國家的法律問題。第八章討論廢棄物規劃，包含處理、封裝、運送、儲存以及棄置的選擇。第九章討論健康與安全(包含輻射以及工業風險)以及加速器除役的輻射防護。第十章則進行總結。

4.2 加速器設施的分布

目前大部份的小型加速器均以醫學及工業應用為主，而世界各國的各式加速器數量已超過 30,000 部。

盤點世界各地的加速器資訊是一件困難的事情，因為在大部份的國家中，加速器的監管組織相對複雜；除此之外，加速器產業的同業競爭，也傾向於不提供其客戶相關資訊。在 1999 年，歐盟寄出的 266 份問卷中，僅收到 91 份問卷回覆，約 40% 的回收率。

在 2003 年八月，IAEA 嘗試盤點短期可能面臨除役的加速器設施，但基於前述資料搜集所面臨的問題，該清單所羅列的資訊並不完整。

對於世界各地加速器數量、種類及應用等相關資訊的缺乏，IAEA 集合了一個名為 IAEA Database of Ion Beam, Spallation Neutron and Synchrotron Light Sources in the World 的資料庫，該資料庫囊括加速器設施的技術資訊，且所有資訊都源於可公開資料，如 IAEA 資料庫、IAEA 會員研究單位及加速器供應商。

而為了更完善的對目前的加速器科技進行分類，科學界廣泛使用的加速器製造商常用術語將被用於分類參考。

該資料庫將以加速器為基礎的輻射設施分為三大類：靜電加速器 (electrostatic accelerators)，同步光源 (synchrotron light sources)，散裂中子源 (spallation neutron sources)。該資料庫囊括加速器的地理位置，如圖 4.1，也包含了各加速器的種類及運轉相關資料。

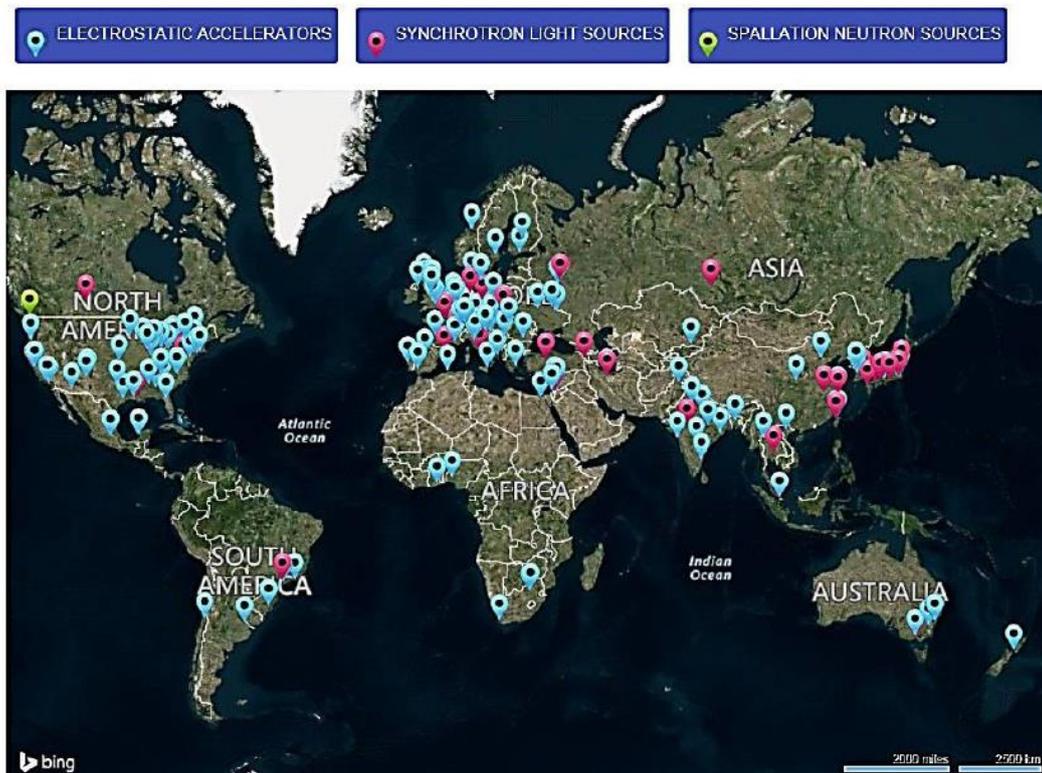


圖4.1. 世界各地的加速器

4.3 加速器特性、種類及重要組件

4.3.1 引言

加速器的種類繁多，從長度僅有 1-2 公尺的醫用直線加速器到 27 公里長的強子對撞機均屬於加速器的範疇。各種加速器的安全運轉有賴於屏蔽的設計，而典型的屏蔽材料包含鉛、混凝土以及鐵，且可能存在各式各樣的形狀與型式。

在加速器設施數十年的運轉歷程中，加速器本體及其周圍材料可能受主射束

及二次粒子的長時間照射而活化，介質的表面也有可能沾染活化物質而有污染的風險。上述的活化問題與表面污染問題的嚴重程度，與加速器種類、加速器運轉歷史及加速器應用有極大的相關性，而除役時面對活化及污染的嚴重程度差異極大，可能從毫無風險到有顯著風險，因此加速器在設計製造階段時，即應將除役時的工作內容納入考量。

加速器的除役挑戰肇因於以下四點：

- [1] 設施的殘存活度差異極大，部份設施的活化問題輕微，甚至與外釋基準相差無幾，但已知殘存活度的分布與粒子損失熱點的位置高度相關
- [2] 各國建議的外釋基準普遍極低，因此在量測實務可能是一個嚴峻的挑戰
- [3] 外釋基準與殘存活度定量方法尚無共識，此問題源於尚未訂定通用的外釋法規
- [4] 設施在結束運轉時的輻射特性受運轉歷史、加速器特性、存在異常活化核種等問題而有差異，上述的差異也限縮了建立通用型除役規劃的可能

4.3.2 加速器與輻射

除役工作中的殘存活度問題源於加速器運轉期間的輻射場特性，輻射通常來自射束轟擊在束集堆、準直器或射束檢測組件，其他異常運轉情形也有可能引發二次輻射。

在質子設施中，數個 MeV 的質子束即可能誘發活化，如表 4.1 所示，而隨著質子能量增加，核反應會伴隨蒸發中子、散裂反應及強子串級，在數百個 MeV 的質子與物質反應時，強子串級主要由二次中子傳播，而質子能量大於 450 MeV 時，二次質子與二次中子對強子串級的貢獻約略相等。

表4.1. 6種 (p,n) 核反應及對應的閾值能量

Reaction	Threshold Energy (MeV)
${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$	1.019
${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	1.882
${}^{45}\text{Sc}(p,n){}^{45}\text{Ti}$	2.908
${}^{51}\text{V}(p,n){}^{51}\text{Cr}$	1.556
${}^{63}\text{Cu}(p,n){}^{63}\text{Zn}$	4.214
${}^{65}\text{Cu}(p,n){}^{65}\text{Zn}$	2.165

在低能量區間，電子依靠與原子碰撞，發生核外電子的游離與激發損失能量，隨著電子能量增加，部份的能量損失產生制動輻射(bremsstrahlung)，生成制動輻射所需的閾值能量稱為臨界能量(critical energy, E_c)，其中 E_c 與靶材的原子序有關： $E_c[\text{MeV}]=800/(Z+1.2)$ ，因此原子序越大的靶材，產生制動輻射的臨界能量愈低；制動輻射有明顯的前向性分布，且隨著入射電子能量增加，前向性分布的趨勢會更加顯著。

當電子能量遠高於臨界能量，電子的能量損失大部份都轉換成制動輻射時，電磁串級的反應即開始生成。高能電子產生一個制動輻射光子所需要移動的平均距離稱為 radiation length (X_0)，此時所生成的高能制動輻射光子主要與物質的反應為成對發生(pair production)而再次生成高能正負電子，高能正負電子會再生成制動輻射光子。上述的反應會反覆發生，並使得光子與電子的數量不斷增殖，直到電子的能量不足以再生成制動輻射光子。

強子與物質的作用主要為直接的強子-核反應，但電子與原子核的作用則是生成光子，再間接與原子核發生光核反應，光子能量較低時，由 giant resonance 主導光核反應，並釋出蒸發中子；當光子能量較高時，中子的生成也會來自 pseudo deuteron breakup 及 photo-pion production 光核反應。

將質子加速器與電子加速器進行比較，電子與物質發生核反應的能量較高，

反應截面也較低，因此，在粒子能量與粒子損失數量相等的基準之下，電子加速器設施的殘存劑量率比質子加速器的劑量率低 1-2 個數量級。以高能粒子入射所誘發核反應的距離進行觀察，電子在徑向生成電磁串級的深度約為 $20 X_0$ ，而反應最激烈的深度約為 $5-8 X_0$ ，以鐵靶材為例，深度約在 $20 X_0$ 等效為 35.2 公分， $5-8 X_0$ 等效為 8.8–14.1 公分，但強子串級的反應所影響的深度通常會到達 1 公尺以上。

電磁串級與強子串級的發生主要位於加速器的組件中，其中一般又以束集堆、射束塑形器(narrow aperture)及實驗用靶體的活化最嚴重。逃逸的二次中子及光子則有機會活化周遭的介質及屏蔽材料，但可以預期活化的潛勢遠低於前述的加速器組件。

質子加速器的輻射場特性也可以套用在重離子加速器上，兩者最大的差別在於相同的動能之下，重離子的射程較質子更短，因此兩者除了在高能粒子入射時物質發生核反應的深度差異以外，後續的強子串級與二次中子特性均相似。

4.3.3 粒子加速器的分類

4.3.3.1 分類基準

加速器的分類基準繁多，例如：加速器應用領域、最大粒子能量、最大電流以及粒子傳輸的時間結構。表 4.2 及表 4.3 呈現兩種加速器的分類方法。

表4.2. 依加速器應用進行分類

應用	電子	質子	重離子	光子	中子
放射治療	*	*	*	*	*
工業造影	n.a	n.a	n.a	*	*
材料分析					
活化分析	n.a	*	*	n.a	*

顯微技術	*	*	*	*	n.a
X 射線螢光造影	*	*	*	*	
地質探勘	*	n.a	*	*	*
中子散射	n.a	*	n.a	n.a	*
同步光源	*	n.a	n.a	*	n.a
自由電子雷射	*	n.a	n.a	n.a	n.a
離子分離	n.a	n.a	*	n.a	n.a
考古研究	*	n.a	*	n.a	n.a
離子佈植	n.a	n.a	*	n.a	n.a
表面分析	*	n.a	n.a	*	n.a
放射性同位素生產	n.a	*	*	n.a	*
輻射加工	*	n.a	n.a	*	n.a
輻射滅菌	*	n.a	n.a	*	n.a
科學研究					
核結構物理	*	*	*	*	*
中子物理	*	*	*	*	*
原子與固態物理	*	*	*	*	*
核生化	*	*	*	*	*
材料輻射損傷	*	*	*	*	*
粒子物理	*	*	*	n.a	*

*：適用；n.a：不適用

表4.3. 依粒子能量進行分類

等級	粒子能量範圍	加速器種類	範例
第一類	低能量 (2-30 MeV)	電子直線加速器	放射治療用直線
		靜電加速器	加速器
			凡得瓦加速器
第二類	中等能量 (10 -100 MeV)強子 (30 -100 MeV)電子	質子迴旋加速器	PET/SPECT 核種
		直線加速器	製備加速器
第三類	高能量 (100 – 數百 MeV)	質子同步迴旋加速器	質子治療用加速 器
第四類	極高能量 (GeV – TeV)	同步加速器	基礎物理研究用 加速器

在表 4.3 中，以能量進行加速器的分類並沒有考慮強子加速器與電子加速器的差異，也沒有考慮加速器應用所帶來的影響，一般而言，電子加速器所誘發的活化水平會低於強子加速器，因此，第二類電子加速器的能量下限應以 30 MeV 為宜。

基於除役工作及活化評估需要，讀者可以建立其他的基準進行加速器分類，但分類基準應朝四個面向進行思考：

- [1] 加速器靶材的活化潛勢評估
- [2] 加速器靶材周遭的組件活化潛勢評估
- [3] 加速器所有組件的活化潛勢評估
- [4] 照射室內的活化潛勢評估

4.3.3.2 第一類至第四類粒子加速器特性

加速器的零組件在四類加速器中多有雷同，各個組件的功能可參閱表 4.4。

在粒子加速器中有三個潛在的活化種類：

- [1] 活化：加速器零組件會直接與加速粒子發生核反應而活化，或是該零組件靠近射束損失點而被二次粒子活化
- [2] 污染：加速器零組件可能被活化的潤滑油、冷卻水或損壞的靶材所污染，或是來自異常運轉情節、活化材料的濺射或蒸發。
- [3] 非來自加速器運轉的活化：如校正射源或其他。

表4.4. 加速器中的組件及其功能

零組件	功能	主要材料
Source or gun	產生帶電粒子	不鏽鋼、銅
Chopper	生成脈衝波型	鐵、銅、鎢或其他
Vacuum chamber	提供射束線真空環境	不鏽鋼、鋁
Vacuum pumping system Vacuum valve	真空系統	不鏽鋼
Radiofrequency cavity	加速粒子	銅、鈮
Radiofrequency wave guide	射頻系統電源	銅、鋁
Magnetic system	射束偏轉、聚焦	銅、鐵、不鏽鋼、鋁
Electrostatic and magnetic kickers and septa	改變射束方向	銅、鐵
Cryogenic system	超導磁鐵冷卻 (第三類、第四類)	不鏽鋼、鋁
Cooling systems	去離子水冷卻系統	不鏽鋼、銅、樹脂、水
Collimators, jaws	改變射束尺寸	鋁/銅合金、鉛

Mask, heat shields	廢熱吸收	銅、不鏽鋼、鋁
Wigglers, undulators	生成同步光源	銅、鐵、稀土元素
Stoppers, beam dumps	束集堆	不鏽鋼、銅、鋁、水、石墨
Targets, beamline windows	利用射束-靶材作用改變射束組成	各種材料、鈹、鋁合金、碳
Screens, scanning wires, Faraday cups	射束監測	銅、不鏽鋼及其他
Permanent magnets	同步加速器中防止帶電粒子進入光束線	鐵、鈷、鎳、鋁、鈔、稀土元素
Dedicated antiparticle sources, neutron sources	利用射束轟擊靶材生成特定輻射	鎢、汞及其他

4.3.4 第一類粒子加速器

靜電加速器，如 ven de Graaff accelerator, Pelletron, Tandem type accelerator，均屬於第一類粒子加速器，其粒子加速能量約略在 20 MeV 以下；除了靜電加速器以外，粒子能量在 20 MeV 以下的直線加速器及貝他加速器(betatron)同樣屬於第一類加速器，一般而言，第一類加速器不易產生活化的問題，然而加速器零組件有重覆利用的需求時仍需進行活化評估。

4.3.5 第二類粒子加速器

4.3.5.1 中等能量加速器

第二類粒子加速器有兩種

[1] 30 – 100 MeV 電子加速器

[2] 10 – 100 MeV 質子或強子加速器

這兩類加速器的主要射束及二次輻射(中子及高能加馬)均會誘發活化。

4.3.5.2 直線加速器

LINAC 的應用主要有加速器注入器(injector)、同位素生產、產生中子源及材料科學實驗，LINAC 中大部份的活化會發生在束集堆、靶材，或是束集堆及靶材附近的加速器管線。

4.3.5.3 迴旋加速器

各式各樣的迴旋加速器基本原理大致相同，將離子源注入加速腔進行加速，並在電磁場的配合下讓加速粒子依環形移動，並在粒子達到最大加速能量後導出加速腔。而在迴旋加速器的加速離子分為正離子與負離子，正離子在達到最大加速能量時利用靜電導流板(electrostatic deflector)導出電流；負離子則是利用剝離電子的方法導出電流，前者的粒子會直接撞擊靜電導流板而產生二次輻射，後者產生的二次輻射則較少，因此一般而言，加速正離子的迴旋加速器會有較顯著的活化問題。

加速離子與靶材或射束準直系統的主要作用為(p,xn)或(d,xn)反應生成二次中子，這些二次中子會導致加速器本身及周遭材料的活化。

4.3.6 第三類粒子加速器

第三類粒子加速器包含粒子加速能量 100 至 數百 MeV 的迴旋加速器、同步加速器及同步迴旋加速器，以及高能量的 LINAC。其中 250 MeV 等級質子加速器及 400 MeV/u 碳離子加速器通常用於深部腫瘤治療。

高能量的加速粒子有潛力造成加速器本體及周遭材料的顯著活化，在多機頭(multigantry)的迴旋加速器系統中，射束傳輸線的周圍都有被活化的風險，包括靶體周遭屏蔽材料、能量選擇系統(energy selection system)、射束線及設施牆體；若加速器的應用為生成中子源，如使用汞靶的加速器，整體的活化潛勢會更加嚴

重。

4.3.7 第四類粒子加速器

第四類粒子加速器中的 LINAC，同步加速器，儲存環用於生成 GeV – TeV 等級的質子、電子束用於基礎粒子研究，或是生成同步光源。第四類粒子加速器的除役工作需要適當的規劃，數量龐大且重量可觀的零組件在除役時是必須面對的問題，因此在除役時必須考量體積減量的可能性，且減量目標以因應最終儲存方式或是活化特性調查需求進行調整。

4.4 加速器設施的輻射(活化)特性

加速器設施內的活化會經由以下幾種途徑生成：

- [1] 正常運轉下，主射束與靶材、射束準直系統及其他材料反應誘發活化
- [2] 異常運轉下，主射束與加速器結構發生反應而誘發活化，或長期在射束線內的微量粒子損失造成的射束線及組件活化
- [3] 主射束轉向所釋放出的輻射(同步光源或制動輻射)所誘發的活化
- [4] 上述三種狀況所誘發的二次輻射(中子、高能光子)所誘發的活化

可能誘發活化的核反應有很多種，但最重要的仍屬加速粒子與吸收材料的作用，如(p,n)及(p, α)反應。其他由二次粒子所誘發的活化則包含中子誘發的核反應、光核反應或高能強子所誘發的活化。在加速器設施中的活化與反應器有很大的不同，源於粒子種類的差異、粒子能量的差異以及材料使用的差別，且在加速器設施中不會有釋放 α 粒子的核分裂產物，主要都是釋放 β 及 γ 的短或中半衰期活化核種，大部份的活化材料也可以被歸類為活化極低的放射性廢棄物。表 4.5 列舉在加速器組件典型的活化核種。

表4.5. 加速器組件中常見的活化核種

受照射材料	活化核種
塑膠、潤滑油	^3H , ^7Be , ^{11}C
混凝土、鋁	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{152}Eu
鐵、不鏽鋼	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{44}Sc , $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{63}Ni
銅	^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{44}Sc , $^{44\text{m}}\text{Sc}$, ^{46}Sc , ^{47}Sc , ^{48}Sc , ^{48}V , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{52\text{m}}\text{Mn}$, ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{63}Ni , ^{65}Ni , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{61}Cu , ^{64}Cu , ^{63}Zn , ^{65}Zn

針對加速器零組件的活化廢棄物，機械加工手段無助於移除放射性核種，而表面污染問題通常也會在事件發生時立刻進行排除，在除役工作中也毋須額外的處理。但在加速器周圍的屏蔽材料則有可能在加速器的長時間運轉下產生活化，且根據加速器的種類，屏蔽的活化潛勢可能有極大的差異。理論上在屏蔽內的活化核種種類繁多，但短半衰期的核種僅在考量輻射防護問題時需要被納入，以設施除役的角度而言短半衰期的核種可以先行忽略。

在大部份的狀況中，加速器設施會以混凝土作為輻射屏蔽的牆體材料，但在不同加速器的種類之間仍可能存在屏蔽設計差異，如無固定屏蔽(第一類 LINAC)、混凝土屏蔽合併自屏蔽設計(第二類醫用迴旋加速器)或厚混凝土屏蔽。屏蔽的設計主要針對降低工作人員的曝露，以及避免材料的輻射損傷，但屏蔽材料的活化也應該被考慮，尤其是在第二類-第四類的加速器設施中，混凝土內的微量元素活化及鋼筋的活化在除役工作中應該有完整的評估作業。

加速器組件的活化受粒子種類、加速能量、操作電流、材料組成等影響，一般在加速器停止運轉後存在十分顯著的殘存活度；加速器中的流體(冷卻水、空氣)同樣有面臨被活化的風險，且流體的活化可能造成個人的曝露或對加速器廠

域外環境的影響，因此在除役工作開始前，必須對加速器廠址內外的各種流體及土壤特性進行審慎的評估。

4.4.1 第一類加速器特性

用於放射治療的 10 MeV 以下 LINAC 佔第一類加速器的大宗，這類的加速器會在轉向磁鐵及靶材的位置產生制動輻射，再與其他材料發生(γ, n)反應而生成活化，當光子與 hardening filter 與準直器中的高原子序核種(如：鉛、鎢)作用時即有機會生成活化核種，除此之外，不鏽鋼、銅與鋁的雜質也有可能成為活化核種。

表 4.6 呈現最相關的 LINAC 零組件所發現的活化核種，這些活化核種有 3 個特點：

- [1] 短半衰期核種已全數衰變：大部份發現的活化核種其半衰期的尺度都在一年
- [2] 發現半衰期較長的 ^{60}Co
- [3] 活化分布有明顯的不均勻性，在活化程度較高的小塊零件中，其比活度較整體組件的平均值高十倍以上

表4.6. 第一類 LINAC 中典型活化核種

活化核種	半衰期	比活度 (Bq/kg)	活化組件
^{65}Zn	244 d	500 – 5000	加速器零組件
^{60}Co	5 y	500 – 5000	加速器零組件
^{65}Mn	312 d	500 – 5000	加速器零組件
^{57}Co	271 d	500 – 5000	加速器零組件
^{181}W	121 d	20000 – 100000	加速器零組件
^{124}Sb	60 d	100000 – 150000	加速器零組件

在各個加速器組件中，可能存在少量活化顯著的零組件，因此在除役時必須先針對各個部份粗略的針對關鍵核種進行活度評估，而短半衰期的高度活化核種則可以透過適當的冷卻達到降低殘存活度的目標。

由於第一類加速器的除役經驗相對豐富，目前已經有較多的相關資料可供參考，但該資料中針對廢棄物處理成本及方法有較高的參考價值，對於殘存活度的評估作業仍需於現場量測結果交互比較驗證。除此之外，設施除役時也需注意是否使用了特殊材料，利用加馬射線能譜儀，如 NaI, CdTe, HPGe 等偵檢器均有助於辨別環境中的活化核種。

使用劑量計結合特定核種的加馬常數(gamma ray emission constant)也可以用於評估活化的程度，在短暫的開機之後，距離 LINAC 機頭 20 公分位置的劑量率在 1–5 $\mu\text{Sv/h}$ ，距離 50 公分位置的劑量率為 0.1–0.3 $\mu\text{Sv/h}$ ，主要的貢獻核種為 ^{198}Au , ^{124}Sb , ^{187}W 。在設施長時間的運轉之後，劑量率會顯著提高，而劑量率最高的位置在靶材及射束硬化器(hardening filter)，在距離 20 公分的位置其劑量率可能高達數百 $\mu\text{Sv/h}$ 。

部份較早期的 LINAC 會使用耗乏鈾(depleted uranium)作為零組件的材料，一般會用於機頭屏蔽或準直器，但凡使用耗乏鈾的組件都會特別標注，也易於辨別，而這些組件在除役時也需要特別處理。

4.4.2 第二類加速器特性

第二類加速器包含用於 PET 核種製備 10 – 20 MeV 醫用質子迴旋加速器，PET 及 SPECT 核種製備 30 MeV 工業用質子/氬離子迴旋加速器，及其他用於研究、材料科學及工業應用之數十 MeV 加速器。

任何加速器用於生產放射性同位素均會造成可觀的活化問題，源於所有加速粒子均會被用於與靶材及準直器的作用。靶體的材料與靶體的設計存在多種形式，以製備 ^{18}F 為例，靶體一般會以銀、鈮或鈦製作，並以鈦或 HAVAR(42.5%鈷、20%鉻、20%鎳及微量的錳、鉬、鐵及其他)密封，靶體一般會以鋁固定，並在數

十立方公分的空間內充填 H_2^{18}O 。

為了要有效率的製備放射性核種，根據加速器種類及其冷卻能力，加速器的運轉電流會介在 $10-100\ \mu\text{A}$ ，目前較新型的 PET 加速器傾向於使用雙靶體設計，相對於單靶體將更節省照射時間。

加速器組件中所有的金屬組件都會在長時間的運轉後被活化，尤其是 HAVAR；鋁材的活化則因其活化核種半衰期極短，除役時不需做特別的處理。約有 10% 的加速粒子會損失在準直器上，造成準直器的活化問題，較常見的準直器材料為鈹及碳，而碳製的準直器其活化核種半衰期較短。

在正離子的加速器中，約有 40% 的加速粒子會損失在銅製的導流板，並誘發顯著的活化；在負離子的加速器，加速粒子的導出效率達 95% 以上，粒子導出組件的活化也低於正離子加速器的導流板組件。

除了射束直接轟擊的加速器組件活化以外，間接生成的二次中子也會造成加速器本體及周遭環境的活化，包含磁鐵架、真空腔、鉛屏蔽以及混凝土屏蔽，表 4.7 至表 4.9 列出 PET 加速器設施中主要的活化核種，考量材料使用、工作負載 (workload)、靶材種類、核反應途徑等差異，表中所列舉之活化潛勢與現實狀況必定不同。文獻中常使用蒙地卡羅方法或實驗量測評估加速器組件的活化潛勢，由於加速器組件的取樣不易，**模擬與實驗的比值差異在 10 倍以內均可以視為結果吻合。**

表4.7. 第二類加速器的主射束所誘發的活化核種

活化核種	半衰期	活度 (MBq)	活化組件
⁴⁸ V	15 d	< 0.01 – 0.05	靶材
⁵¹ Cr	27 d	5 – 31	靶材
⁵² Mn	5 d	3 – 22	靶材
⁵⁴ Mn	312 d	0.3 – 1	靶材
⁵⁶ Co	77 d	6 – 49	靶材
⁵⁷ Co	271 d	2 – 10	靶材
⁵⁸ Co	70 d	15 – 100	靶材
¹⁸³ Re	70 d	0.2 – 2	靶材
¹⁸⁴ Re	38 d	0.01 – 0	靶材
¹⁷⁹ Ta	1 y	0.2 – 1	準直器
¹⁸¹ W	121 d	8000 – 20000	準直器

表4.8. 第二類加速器的二次中子所誘發的活化核種

活化核種	半衰期	比活度 (Bq/kg)	活化組件
⁶⁵ Zn	244 d	$3 \times 10^6 - 2 \times 10^7$	加速電極(銅)
⁵⁸ Co	70 d	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$	磁鐵架
⁶⁰ Co	5 y	$1 \times 10^2 - 5 \times 10^3$	磁鐵架
⁶³ Ni	100 y	$1 \times 10^3 - 8 \times 10^4$	磁鐵架

表4.9. 混凝土內的活化核種示例

活化核種	半衰期	比活度 (Bq/kg)	活化組件
^{22}Na	2.6 y	10 – 30	混凝土
^{46}Sc	83.79 d	40 – 200	混凝土
^{54}Mn	312.3 d	10 – 40	混凝土
^{60}Co	5.27 y	40 – 2000	混凝土
^{65}Zn	244.26 d	1 – 6	混凝土
^{134}Cs	2.06 y	2 – 8	混凝土
^{152}Eu	13.54 y	10 – 50	混凝土
^{154}Eu	8.59 y	1 – 5	混凝土

表 4.9 呈現混凝土在除役時的活化核種參考比活度，相較於加速器組件的採樣困難，混凝土採樣相對簡單，文獻中對於混凝土活化的模擬結果與實驗結果一致性較高，但兩者的差異仍可能受加速器的運轉歷史、混凝土屏蔽的大小及形狀，以及混凝土組成而影響。

總而言之，PET 醫用迴旋加速器在除役時，在輻射特性分析階段必須建立完整報告包含設施量測、取樣及數值分析。

所有理論上可能活化的加速器零組件均應在除役時移除，並存放在安全的空間等待下一步的廢棄物處置作業，尤其是靶材及射束監測組件的活化需要特別注意。

在解體加速器時，所有的零組件必須事先分類，確認是否屬於活化嚴重的類別，活化嚴重的零組件類別包含：

[1] 準直器

[2] 加速粒子導出系統

[3] 離子源

這些組件的體積一般較小，在除役工作時優先移除有助於降低工作人員的曝

露風險。

工作人員進行真空腔體的拆除工作時必須考慮被污染的風險，包含評估腔體內正常運轉/異常運轉所造成的活化，並在進行相關工作前先進行適當的除污。真空泵的活化有限，但真空油有機率受到污染，因此建議獨立回收，並在丟棄前確認其污染狀況，真空系統的處理亦同，當真空系統是位於照射室內時，鐵製零件可能有輕微的活化情形，冷卻水、冷卻水淨化樹脂或冷卻水去離子系統中則有可能發現氚或其他活化核種。

氬氣冷卻系統的污染程度較低，閘門、管線跟壓縮機在回收及丟棄前仍建議先行評估活化狀況。

所有在照射室內的金屬零組件均有可能被活化，尤其是含有鐵及銅的金屬，包含管線、閘門、連接器、部份空氣壓縮系統、空調系統管線，或是輕鋼架等等。

初步的活化檢查可以使用可攜式的污染偵檢器或劑量計，合併使用加馬能譜儀(如 NaI, CdTe)辨別活化核種，建立廣域的活化產物分布狀況及對應的加馬分布，然而，屏蔽內的背景輻射可能使該工作極具挑戰，以少量取樣的方式進行活化核種評估是可行的方法。

4.4.3 第三類及第四類加速器特性

第三類加速器包含 100 MeV–GeV 等級粒子加速器，包括質子迴旋加速器、質子同步迴旋加速器及高能量 LINAC。癌症治療用質子加速器屬於第三類加速器的範疇，以及其他用於物理研究、中子源與光子源加速器。

第三類加速器輻射特性檢查可以透過量測加速器及其周遭的劑量率，並同時利用模擬計算及現場量測評估活化。評估活化的目的是辨別有潛在活化風險的零組件。設施停止運轉後，經過一段適當的冷卻時間有助於降低短半衰期核種的活度，冷卻時間的決定可藉由量測的結果進行估算。混凝土的鑽心取樣及加速器零組件的取樣量測可用於活化分析，尤其是評估活化的在混凝土中的深度分布。

在高能量加速器中所誘發的活化核種較多，重要的核種如表 4.10、表 4.11。

表4.10. 高能量電子對撞機中常見的活化核種

材料	活化核種	半衰期
鋁	^{22}Na	2.6 y
	^{54}Mn	312 d
銅	^{51}Cr	27.7 d
	^{52}Mn	5.6 d
	^{54}Mn	312.2 d
	^{56}Co	77.7 d
	^{57}Co	271.8 d
	^{58}Co	70.9 d
	^{60}Co	5.27 y
鉛	^{105}Ag	41.3 d
	^{122}Sb	2.7 d
	^{124}Sb	60.2 d
	^{203}Hg	46.6 d
	^{202}Tl	12.2 d
不鏽鋼	^{46}Sc	84 d
	^{48}V	16 d
	^{51}Cr	27.7 d
	^{52}Mn	5.6 d
	^{54}Mn	312.2 d
	^{59}Fe	44.5 d
	^{56}Co	77.3 d
	^{57}Co	271.8 d
	^{58}Co	70.9 d
	^{60}Co	5.27 y
^{95}Nb	34.9 d	
鐵-混凝土	^{48}V	15.97 d
	^{51}Cr	27.7 d
	^{52}Mn	5.6 d
	^{54}Mn	312.2 d
	^{59}Fe	44.5 d
	^{56}Co	77.7 d

表4.11. 強子加速器各個材料的活化通道及活化核種

活化核種	半衰期	銅	不鏽鋼	鋁	混凝土
⁷ Be	53.3 d	Spall (Al, Cu)	Spall (C,N)	Spall (Al)	Spall (O, C)
²² Na	2.6 y	Spall (Al, Cu)	Spall (Fe, Ni)	Spall (Al)	Spall (Ca, Si, Al)
⁴⁶ Sc	83.8 d	Spall (Cu)	Spall (Fe, Cr, Mn)	Spall (Mn)	Spall (Fe)
⁴⁴ Ti	60.4 y	Spall (Cu)	Spall (Fe, Cr, Mn)	n.a.	Spall (Fe)
⁵⁴ Mn	312.1 d	Spall (Cu)	Spall (Fe, Mn)	Spall (Fe, Mn)	Spall (Fe)
⁵⁷ Co	271.8 d	Spall (Cu)	⁵⁸ Ni(n,pn)	n.a.	n.a.
⁵⁸ Co	70.8 d	Spall (Cu)	⁵⁸ Ni(n,p)	n.a.	⁵⁹ Co(n,2n)
		⁵⁹ Co(n,2n)			
⁶⁰ Co	5.27 y	Spall (Cu)	⁶⁰ Ni(n,p)	n.a.	⁵⁹ Co(n, γ)
		⁵⁹ Co(n, γ)	⁵⁹ Co(n, γ)		
⁶⁵ Zn	244.3 d	⁶⁵ Cu(p,n)	⁶⁵ Cu(p,n)	n.a.	n.a.
			⁶² Ni(α , n)		

n.a. 不適用

在經過數年的運轉及數天的冷卻後，在離子源注入器及粒子加速的相關零組件會有較高的殘存劑量率，其劑量率會在 100 μ Sv/h 至數個 mSv/h，某些特定的位置其劑量率可能更高。在第三類及第四類加速器中，主要的活化零組件包含：

- [1] 鐵鋅材料，如磁鐵及管線支架
- [2] 銅，如導線
- [3] 不鏽鋼，如支架、冷卻水管路、加速器零件
- [4] 鋁，如電源線、管線
- [5] 塑膠及樹脂，如線路絕緣材料及塗層
- [6] 石墨、銅、鎢、不鏽鋼或鋁合金，如準直器、束集堆
- [7] 專用於冷卻水淨化系統的樹脂材料
- [8] 混凝土屏蔽
- [9] 土壤

材料之間在密度及微量元素上可能存在差異，導致活化水平不同，如微量元素在中子捕獲效應的反應截面較高，少量的濃度差異即可能改變活化潛勢；電路

板的處置因為牽涉到化學廢棄物的處理，除役時也需要額外的注意；真空泵油及冷卻水則是第三類及第四類加速器中典型的活化流體。

一般而言，電子加速器所誘發的活化會低於同級的強子加速器，部份零組件會被歸類為低階放射性廢棄物，甚至有部份可以直接進行外釋；而活化水平較高的零組件則需要額外的處置及儲存，處置方法根據其風險而訂。

高能量加速器通常受限於其龐大的體積和運轉時的高劑量率而安裝在地下，因此在除役時，必須評估周遭土壤及岩石的殘存活度，在質子及重離子設施中，土壤及岩石的活化較為嚴重，而在電子設施中的活化則是微量或可忽略。

針對加速器設施的設計及材料選擇的優化可以顯著減少活化，並降低除役工作的成本，可以透過早期的蒙地卡羅模擬評估殘存活度，並據以改進設施內的設計及材料。

4.5 加速器除役規劃及執行

加速器的除役原因除了設施已屆運轉生命週期，其他的外部影響，如極端氣候、設施經營不善、政策、市場萎縮、加速器升級等，均有可能讓設施面臨除役工作，理想的除役規劃應始於設施設計建造階段，並在運轉期間不斷更新必要資訊，直至永久停止運轉。

4.5.1 除役策略

根據 IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 6 的建議，除役策略分為**(1) 立即拆除**或**(2) 延緩拆除**。

設施經營者應該在設施運轉初期即根據國家的除役法規及廢棄物處理辦法建立除役策略，除役策略應盡可能從各個面向進行考慮，確立該策略的適用性，例如待除役設施的輻射特性、適當的設施特性加權因子用於優化除役策略、除役策略是否符合設施及國家的客觀條件，上述除役策略的適用性思考均應建檔留存，並在設施運轉期間不斷更新。

立即拆除的除役策略通常適用於第一類粒子加速器，因為延緩拆除對於降低殘存活度幾乎沒有助益，相對的，第二類至第四類粒子加速器透過延緩拆除的手段減少短半衰期核種的活度則是較好的辦法，而選擇了延緩拆除時，必須確保設施被安全的隔離，尤其是一般民眾可以輕易靠近的設施，如醫院。

除役的最終目標應該在除役工作開始前訂定，一般而言是將廠址以非管制區外釋，然而將廠址轉而用於其他核能或輻射設施也是選擇之一，除役目標的選擇對於除役成本、廢棄物處理及除役時間的長短均有所影響。

4.5.2 影響除役策略的因素

決定除役策略時必須考慮以下因素：

- [1] 法規：遵照國家除役相關法規，以及除役工作相關許可的申請
- [2] 財務保證：可靠的除役成本預估及必要的相關財力
- [3] 設施狀況：加速器拆除的複雜性、設施附屬建物的狀況
- [4] 除役工作執行：設施除役原因、除役方法的適用性、加速器或廠址的再利用
- [5] 廢棄物處置：國家的廢棄物處理法規、外釋基準、特殊危害廢棄物的處理、放射性廢棄物的現地儲存問題
- [6] 人員健康與環境影響：對人員健康與安全的評估、廢棄物處置過程中對環境的衝擊、除役過程中的放射性和有害物質的狀況
- [7] 資訊管理及人力資源：符合規定之除役工作人員、熟知設施資訊的相關從業人員、除役經驗傳承、設施運轉資訊搜集
- [8] 社會衝擊與相關利益者的衝突：對設施所在地的社會衝擊、相關利益者的問題解決

4.5.3 除役規劃

除役工作應該在設施設計階段開始規劃，並隨著設施運轉不斷更新規劃內容，

其優勢在於早期即可以開始思考降低工作人員及一般民眾曝露方法，以及減少除役工作、廢棄物處理以及廠址外釋時對環境的影響，而加速器相關的重要資料保存，也有助於除役所需成本及必要資源的評估。

新設施的除役規劃一般在申請建造許可或運轉許可時一併提出，並隨著設施運轉不斷更新資料，目前已在運轉的設施普遍沒有完整的除役規劃，這類設施應該盡快在停止運轉前建立其除役策略。

第一類及第二類加速器的除役規劃一般不須考慮對環境的衝擊，因為這一類加速器的廠址會再安裝新的加速器再利用，不會進行廠址使用目的的變更；第三類及第四類的加速器的活化分布則較廣，因此在建立除役規劃時必須更加全面。

除役規劃必須在設施運轉期間作週期性的更新，且每一次的設計變更都必須對除役規劃作對應的修正，包含廢棄物評估、廢棄物處置方法、除役成本重新估算，以及加速器設施及建物改建對除役工作的影響，**若有較佳的除役相關經驗傳承、新的安全要求，或是除役最終處置目標的修改，除役規劃都必須有相應的更新。**

若設施運轉期間有重大意外且可能影響除役時的設施輻射特性，除役規劃也必須進行修改，且必須針對意外狀況作詳盡的紀錄以及後續的影響評估。

設施可能受到各種原因影響而發生預期外的加速器永久停止運轉狀況，當主管機關面臨設施意外停止運轉時，必須立刻介入並確認經營單位有足夠的財力完成後續的除役工作。有鑑於此，主管機關應及早審核設施的除役規劃，確保各設施保留足夠的資料進行除役工作，也必須考慮設施在最終除役規劃完成前即永久停止運轉時的介入行動，確保設施可以維持在安全的狀態直到完成最終除役規劃並執行之。

4.5.4 環境衝擊評估

環境衝擊評估(environmental impact assessment, EIA)是用於預測任何行為對於生態系統、自然資源及生態圈的潛在影響，加速器系統的EIA在於考慮輻射或

非輻射的風險，以及該風險對除役工作的影響。EIA 也必須考慮在國家的環境保護法規下的合法性。

第一類加速器中的醫用 LINAC 沒有強制要求在除役規劃中納入 EIA，但仍建議完成簡易的環境影響分析；第三類及第四類的粒子加速器則強列建議在除役規劃中納入 EIA。

EIA 的評估項目應包含除役工作進行時對環境的影響，以及未來廠址外釋後對一般民眾及環境的潛在影響。

EIA 的評估對象包含工作人員、一般民眾及環境，且其內容應包含廠址及其周遭的相關背景資訊、預期的除役工作內容、除役工作的潛在衝擊，以及降低衝擊的各種方法。大型加速器除役時則須額外考慮異地運輸(off-site transportation)、地質與土壤、水文、當地生態、附近的保育類生物、空氣品質、噪音、歷史文物的保留、環境美化、社會經濟衝擊、一般民眾及工作人員健康、廢棄物處理及其他相關的潛在影響。

EIA 的評估結果可作為除役規劃中的環境保護基準，並盡可能降低除役工作對環境的影響。

4.5.5 除役計劃的準備與執行

最終除役計劃在開始執行前必須經過主管機關審核，且在除役期間仍需遵守所有加速器相關規範，除了經主管機關核定可以降低危害的行為，如放射性廢棄物移除。

除役計劃的準備與執行一般包含：

- [1] 根據加速器等級(依能量或應用分類，詳參 4.3.3 節)建立安全基準
- [2] 向主管機關申請除役許可
- [3] 儘早與受除役工作影響之人員達成除役共識及其他必要溝通
- [4] 確保輻射防護工作與廢棄物管理的適當溝通與執行
- [5] 清楚指派在除役工作中各個人員所扮演的角色及相關責任

- [6] 如果團隊中沒有除役專業人員，應聘請專業除役專案管理團隊執行除役工作
- [7] 團隊中若有人員無除役工作經驗，應提供適當的除役工作訓練
- [8] 蒐集各種必要資訊建立除役工作的安全評估，並根據評估結果準備個人的防護設備，除役團隊需確保設備的正常運作，以及所有工作人員瞭解設備的正確使用方式
- [9] 預先規劃及租借除役工作中需要的各式機具，如起重機、切割機
- [10] 審查、建立緊急狀況應變措施，並在每一次的安全措施修改時公告周知，確保工作人員可以正確對應緊急狀況
- [11] 各種廢料、容器、設備在進出工作區域時使用適當的工具，並畫設物料進出的行進路線
- [12] 與主管機關確認放射性廢料的外釋基準、量測方法以及儀器校正，並確保工作人員正確進行量測作業
- [13] 建立在除役工作期間的管理組織及系統
- [14] 確保足夠的資金及資源進行除役工作，避免不必要的工作延宕
- [15] 聘用土木技師針對除役期間的建物強度及完整性進行監測

4.5.6 加速器拆除技術

加速器設施的拆除與核能設施或其他輻射設施並無二致，Boing, L., “Ten key actions for decommissioning”, Nucl. Plant J. **23**, 56-58, 2005. 中討論諸多針對核能設施的除役工作；CERN 在 1993 年提出的同步迴旋加速器除役報告中，則建議加速器的除役工作仍應針對各個設施的特性進行獨立的分析。

4.5.7 組織和管理

除役組織和管理包含除役工作的計劃、準備及執行，考量工作所需要技術、行政和法律規範，並克服可能的困難或延宕，除此之外，除役管理也需負擔除役

工作的品保作業，確保除役工作符合加速器等級的除役規劃。

4.5.8 利益關係人(設施所有人)

在核能設施中，除役工作一般屬於設施所有人的工作之一，但在加速器設施中，設施所有人與加速器操作可能屬於不同單位(如大專院校、研究機構、政府單位)，而設施所有人大部份傾向於設施廠址在除役後可以作為一般性使用。另一方面，社會大眾則希望可能危害民眾健康的輻射問題或有危害的廢料被適當的移除。

4.5.9 因應除役需要的設施設計

新設施在設計、監造及運轉中時均應將未來的除役納入考量，包含優化設計或運轉方法，俾利未來除役工作的執行，以優化設計為例：

- [1] 建立方便進出加速器室的通道提供日常維護、除污、拆除或各種設備的進出路線，以及未來加速器移出的通道
- [2] 設施設計時避免不必要的材料活化或污染，有助於增加除污效率
- [3] 選擇材料時宜選用不易活化、抗化學腐蝕及耐磨損等性質，降低設施在永久停機時的除污問題
- [4] 設施保持良好通風設計，用於降低臭氧累積、氣體活化的曝露以及設備腐蝕
- [5] 參考其他設施的加速器除役經驗，用於優化設施設計
- [6] 評估設施在運轉時的活化與除污可能影響的最大範圍，並據以降低污染及活化問題，尤其是在研究用加速器需額外注意

上述的作法可以降低除役工作的困難，但仍需確保過程符合行政規範及輻射安全。

早期的加速器設施在建造時通常沒有考慮除役的問題，設施經營者可以透過

升級的機會考慮設施的優化，簡化未來的除役工作。

在設施的運轉期間，對於設施中的潛在活化應有足夠的瞭解並據以提出降低的手段，早期的加速器及混凝土的活化評估有助於掌握除役時工作人員及社會大眾可能受到的輻射危害。

瞭解設施的活化潛勢及其輻射特性有助於設施安全穩定的運轉、維護及除役，部份工具提供相對準確的活化評估，雖然評估結果與實際狀況可能略有差異，但仍可視為除役計劃建立的必要工具。

加速器設計階段時，有四個部份可用於簡化除役工作：

- [1] 材料的選擇：材料的組成及運轉歷史與核種種類、廢棄物殘存活度、除役時的工作人員曝露習習相關，且應避免使用拆除費用昂貴或沒有廢棄物處理管道的材料，CERN 開發了一款 ActiWiz 軟體可供工程師選擇適合的材料，舉例來說，使用鋁代替銅作為磁鐵線圈可以有效減少 ^{60}Co 的活化；鎢比鉛重了 60%，對於屏蔽輻射的效益更佳，且鎢相較於鉛的毒性較低，但鎢的售價高於鉛。在選擇材料時，加速器的運轉安全與除役工作應一同考量。
- [2] 加速器組件的位置：加速器在進行組件位置調整時，應盡可能遠離射束損失點，組件的輻射損傷可能減少加速器壽命並生成額外的放射性廢棄物。
- [3] 設施的構築方法：若混凝土屏蔽是以可拆卸的混凝土模塊堆疊而成，這一類的設計稱為模塊化(modularization)，模塊化設計在除役時可以更容易進行輻射特性的評估及拆除。
- [4] 運轉及設備維護：加速粒子自加速腔體室的導出效率應盡可能提高，避免異常運轉所誘發的設備以及屏蔽的活化。

在設施設計時即把除役工作納入考量，將有助於減少拆除費用、避免不必要的活化產物生成並最大化可以回收利用的可能。為了有效的評估設計的可行性，

蒙地卡羅模擬程式是一個有利的工具，包括 MCNP6、FLUKA、PHITS 及 MARS。

4.6 備用組件及廠房的再利用

除役工作的初衷包含設備及建物的拆除，以及後續的廢棄物處理及廠址復原，而加速器組件及廠址的再利用在除役工作終止後是可行的方案之一，根據各地的外釋基準，除役工作所產生的大量金屬、混凝土及輕微活化廢棄物可能造成高昂的清運成本，因此在除役規劃時可以一併考慮回收再利用的可能。

對於設施廠址應考慮在除役後繼續用於其他輻射工作場所的效益，在經濟層面上，因為部份牆體的保留必然可以顯著減少放射性廢棄物的清運成本。一旦設施決定了再重覆使用，應盡可能清楚評估設施特性確定其符合新設施的使用規範及執照；如果設施的未來規劃沒有限制使用目的，舊有設施仍需對新設施可能需要的除役工作儲備可能的資金需求。

針對金屬廢棄物，即使部份地方的法規允許透過熔融再鑄的方式進行處置，其處置成本仍然高昂，也有可能因為熔鑄過後的金屬不符合其他使用規定而報廢，因此金屬廢棄物再利用於輻射工作場所才是較可行的辦法。

加速器及設施的再利用在澳洲、美國、加拿大均有相關實務經驗可循，但有限的加速器二手交易市場、未受保障的用過加速器、特殊規格組件等問題也增加設備及組件再利用的困難與挑戰。

4.7 成本

核設施的除役與石化燃料電廠的停止商轉遠遠不同，勞動成本以及放射性廢棄物處理費用的提高使除役成本成為加速器生命週期中需要被重視的支出之一。1980 年代中期，美國部份核能產業的營建成本上升造成嚴重的財務問題，主管機關同時也意識到運轉中的核設施有可能面對無力處理設施的除役工作，而節節升高的放射性廢棄物處置成本及有限的處置場更讓上述問題雪上加霜，雖然美國積極增加廢棄物處理設施，但更精確的除役成本預估方法也應該隨著核工業成長

不斷改變。

1979 年美國阿岡諾實驗室針對 4 部份加速器的除役細節及成本進行研究，大部份的備用設備都被再利用，因此僅有少量的放射性廢棄物需要處理，4 部加速器的除役成本如下：

[1] 1971 年，250 MeV 同步迴旋加速器，US \$104,500。

[2] 1973 年，6 GeV 電子同步加速器，US \$735,200。

[3] 1974-1975 年，440 MeV 同步迴旋加速器，US \$504,000。

[3] 1975 年，重離子 LINAC，US \$105,000。

經過四十餘年的時間，上述的成役成本與現在的市場早已不符，且上述 4 部加速器除役不包含放射性廢棄物的處置成本；目前要完整除役一部第一類的醫用加速器約需要 US \$20,000 – US \$40,000，過去設施的除役成本已無法完整反應規費、廢棄物處理及勞動成本。

Ameriphysics 是一間提供輻射、環境及廢棄物解決方案的美國公司，近日，該公司除役了一臺 30 MeV IBA 加速器及其附屬設備、2 間加速器室、4 間靶室、4 間熱室及 3 個通風櫃，共計花費 US \$6,300,000，該除役工作包含除污及 6000 噸低放廢棄物的處置。Ameriphysics 參考 MARSSIM 撰寫並執行了設施最終狀況 (final status) 的量測計劃，並利用 RESRAD 及 MicroShield 兩個程式建立廠址的外釋標準。

4.7.1 成本估算

除役工作中的各個面向都會影響除役成本，如除役規劃、設施永久停止運轉後的冷卻時間、暫存空間的使用、除役資源及技術、廢棄物處置的相關法規及設施，以及設施除役後的最終用途等。

成本的估算完成於除役計劃的初步規劃階段，並根據成本估算結果評估除役計劃的可行性，成本的估算會隨著除役計劃逐漸完整而臻於精確，而在除役規劃

的早期與後期所建立的成本估算可能會有顯著的差異。設施在進行除役經費的準備時，除了確保成本的估算與計劃足夠完整，也建議預留除役期間可能發生的意外支出。

除役的成本估算是除役工作中最困難的環節之一，若沒有相關經驗，可以將整個除役工作拆分成獨立的工作項目，並由特定的公司進行評估。

IAEA 及其他國際組織訂定了一份除役工作費用標準清單，項目包含：

- [1] 在除役工作的各個階段產生的廢棄物總量及處置成本評估，可以被回收再利用的物品其潛在收入也應被考慮
- [2] 相關文件準備的費用，如最終的除役計劃
- [3] 任何必要的規費及許可申請費用
- [4] 聘用勞工的拆除成本
- [5] 聘請外部專業經理人的費用
- [6] 設施特性調查的費用
- [7] 除役需求所額外購置的儀器設備費用
- [8] 除役工作後的復原費用，如環境恢復
- [9] 除役工作中的意外預備金準備

最關鍵的部份仍是設施預想未來除役時所需要的成本及花費，而最佳的猜測可以透過每二至三年一次的成本評估修改及更新。雖然在除役工作中不可避免的存在諸多不確定性造成成本的增加，然而對於設施狀況的掌握度約低，對於意外準備金的準備則需要對應的提升，即使經評估除役工作中已經完整掌握設施狀況，仍建議保留除役經費的 10% 作為意外預備金。

4.7.2 成本結構

2011 年時，由 OECD 核能協會、IAEA 及歐盟提出除役成本估算的標準化清單，其內容包含 11 個項次：

- [1] 除役前工作
- [2] 設施永久停止運轉
- [3] 因應安全儲存或封閉的額外作業
- [4] 管制區內的拆除作業
- [5] 廢棄物加工、儲存及處置
- [6] 設施的技術、信息的行政和管理(infrastructure and operation)
- [7] 廠址的拆除及復原
- [8] 除役工作的管理、工程及其他支援
- [9] 研發工作
- [10] 燃料及核能材料
- [11] 雜項開支

而在加速器的除役成本結構中，除了燃料與核能材料以內的 10 個項目均包含其中，各項支出佔除役成本的多寡受眾多因素影響，如加速器種類、特性、除役規劃、當地廢棄物處置成本等，相關的評估經驗在 OECD nuclear energy agency, International structure for decommissioning costing (ISDC) of nuclear installations, OECD/NEA, Paris (2012) 文獻中可作查詢。

4.7.3 財務審查

財務審查工作的責任在於除役工作管理人，確保除役工作可以順利進行，財務審查的工作內容基於完善除役成本的評估，以及保留除役所需的一切必要資源。

除役成本的評估作為財務審查的基礎，應貫徹整個加速器的運轉歷程，包含：

- [1] 設施建造時的初步除役成本評估
- [2] 設施運轉期間基於運轉狀況及量測結果的週期性成本評估修正
- [3] 設施永久停止運轉後，基於最終的輻射特性量測進行的除役成本修正

4.7.4 資金

美國的主管機關會要求設施提供除役的資金評估及財力證明，確保除役所需的資金足夠，美國核管會(US NRC)也提供方案協助加速器設施除役時的資金需求。

除役設施有義務說服主管機關其除役工作對於社會大眾及環境的衝擊已盡可能降低、確保一般民眾及工作人員的健康及安全，以及備妥充裕的資金用於除役。

4.8 放射性廢棄物管理

4.8.1 放射性廢棄物處理與管理的一般性原則

加速器設施的除役廢棄物管理的主要目標包含：

- [1] 在除役工作的各個階段達成廢棄物減量
- [2] 避免不同危害的廢棄物種類混雜，如放射性廢棄物、化學危害廢棄物
- [3] 遵守各項廢棄物處置、儲存、加工等法規

與其他輻射設施相似，部份除役工作所產生的廢棄物由於活化程度低，可以被視為一般廢棄物處置，大部份的 IAEA 會員已針對各種活化核種的外釋基準立法規範，目前廣泛由國際認可的外釋基準是由 IAEA 於 2004 年所頒布，而在某些地區，外釋基準會根據廢棄物的使用目的再作調整(如再利用於核能產業或作為一般使用)。

在除役工作開始前，宜事先完成廢棄物處理的規劃，包含廢棄物處理的廠商、相關法規申請、工作人員的完善訓練以及思考廢棄物可能造成的生物危害，上述廢棄物處理的規劃也應建檔留存。

設施除役期間也應注意除役工作所產生的廢棄物，如人員防護服、除污所產生的二次廢棄物，選用適當的除污方法，可以有效降低廢棄物的產生。

在廢棄物處理程序開始前，需要先確認廢棄物處理的方式與法規，部份低活

化廢棄物可以被視為一般廢棄物處理，但需要對主管機關提出相關報告，證明量測方法、殘存活度的量測結果以及不確定度為有效結果，避免在判斷是否為活化廢棄物時出現模稜兩可的結果。

廢棄物的處理途徑通常依其特性進行分類，特性包含廢物型態(固態、液態)、殘存活度以及其他非輻射的污染，英國的 Drigg 鎮中的廢棄物處理設施即列舉一系列無法處理的廢棄物種類，如濕式廢棄物、生物危害廢棄物、具有腐蝕及爆炸風險廢棄物等，因此加速器設施在除役前應清查廢棄物種類，以利建立廢棄物的處理途徑及相關法規申請。

進行廢棄物中的微量元素活化量測時應使用適當的儀器，某些情況下既有的監視系統即可視為適當的儀器，但在較複雜的除役規劃中仍需購入某些特定儀器，如高純鍍偵檢器；如果已知的單一活化核種存在於建物結構中時，可以利用劑量計搭配適當的轉換公式進行量測，透過適當的轉換，可以將測得的劑量率轉換為核種的比活度，再與外釋基準進行比較。

4.8.2 放射性廢棄物處理與管理的特殊原則

加速器組件與建物結構經過長時間的運轉後會成為活化廢棄物，而在第三類與第四類加速器除役中，可能生成大量的活化廢棄物。

加速器設施中的活化廢棄物多為固態的組件，如真空腔、泵、磁鐵或其他射束線組件，大部份的備用組件則有一定的污染風險，屏蔽材料則有可能受到二次輻射的影響而活化。每部加速器設施的活化程度均有所不同，主要受到加速器種類、相對射束損失點的位置、運轉歷程等參數所影響。

對於比較老舊的設施，由於沒有適當的操作加速器，或是沒有盡早考慮活化減量的措施，可以預期會生成大量的活化廢棄物，對於那些沒有適當引導射束方向的加速器設施，屏蔽材料即有可能成為活化熱點並生成較多的活化廢棄物。

在長時間運轉的設施中常發現的一個問題，是因為射束使用時間、射束電流及加速器材料的異動導致活化的狀況有所改變，但這些資訊通常都疏於紀錄，造

成活化評估的困難。在時間足夠的情況之下，活化廢棄物可依其核種種類設計適當的冷卻時間，直到活化程度可被歸類為一般廢棄物進行處理，IAEA-RS-G 1.7 中針對相關的活化除污辦法已建立相關的標準。

一般而言，加速器除役工作期間所生成的放射性廢棄物均為低活化廢棄物，且大部份的活化核種半衰期較短，因此經過適當的冷卻時間並經過驗證後，即可被視為一般廢棄物進行棄置或再利用。

對於放射性廢棄物內的核種種類與活度應該要適當的進行量測，蒙地卡羅分析與加馬能譜量測均可以實現核種分析，部份的難測核種，如固體廢物中的⁵⁵Fe、⁶³Ni 及 ³H 則可以透過活度比例的方式進行估算，對於活化比例的決定方法則可以使用放射化學的核種分離方法。對於殘存活度的定性與定量方法在實務上可能有執行上的困難，而錯誤的殘存活度特性分析會造成對廢棄物處理與管理方式的誤判，因此對於殘存活度的特性分析方法應經過主管機關、廢棄物處理單位及加速器廠商的多方驗證。

加速器運轉期間所生成的活化廢棄物，與除役工作期間所生成的事業廢棄物應分屬不同的兩類廢棄物進行評估，評估工作包含廢棄物的種類以及殘存活度，且業主應積極與廢棄物處理單位針對處理方法進行討論，並取得主管機關認可，建立符合加速器特性的廢棄物處理方法。

4.9 健康與安全

4.9.1 IAEA 安全標準

輻射安全與工業安全是除役工作中既有的安全標準，IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 2 報告中針對設施管理與作業進行了安全的規範；IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 6 中則特別針對除役工作安全進行規範；IAEA Safety Reports Series No.77 則針對除役工作時的安全提出導則及評估，包含各類的風險及意外樣態。

在除役期間，工作人員、一般民眾及環境均應該被適當的保護並降低可能受

到的輻射或非輻射的風險，工作人員及一般民眾的輻射風險受劑量限值規範，但仍需注意 ALARA 的劑量抑低原則，目前除役工作時的環境保護及安全要求源於歐盟的相關法規，廠址經除役後的外釋使用同屬環境保護的範疇。

雖然在設施運轉期間及設施除役期間的輻射防護構想及目標相同，但受限於非常規的工作模式及工具使用，可能使得輻射防護的工作存在方法及執行面的差異。

在除役期間的工作架構對於工作人員輻射防護及降低曝露風險必須有充份的準備，IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4 (Rev.1)及 IAEA Safety Reports Series No. 77 針對上述建議有相關的導則可供參考，而除役工作的許可也需要考慮人員安全、輻射防護以及環境保護的相關問題。

加速器設施經營者在除役期間必須盡可能降低除役工作對廠址及周邊環境的影響，環境保護的相關措施必須貫徹整個除役過程，甚至是廠址是以限制性使用外釋時，相關保護措施仍需持續，直到外釋廠址可以被作為非限制性使用為止。

除役工作期間有可能產生新的危害風險，因此建立除役規劃的目標即包含對危害風險的評估及預防，或是對相關人員的保護措施。在加速器的正常運轉期間，包括建物、系統或組件中會因應安全需求存在眾多安全閘，然而當加速器進入除役階段時，部份安全閘可能會解聯，造成安全的隱憂，需要額外注意。

自加速器的正常運轉階段轉換為除役階段前，所有必要的除役規劃、準備工作、加速器運轉期間的紀錄及設施更動資料均應齊備，上述資料愈趨完善，對於降低工作人員及環境風險均有所助益。

主管機關對於除役工作應促進安全文化的建立，並時刻對於安全問題抱持審視及學習的態度；對於除役的工作人員，業主應提供足夠的訓練，並確保工作人員的資格足以負擔相關工作，維護除役工作的安全，相關的訓練記錄均應妥善保存。

除役工作期間，含有放射性或無放射性的廢水需要審慎的處理，在某些情況下，這些廢水會遵照放射性廢棄物的處理方法進行一定時間的儲存，而廢水的排

放則需要遵守相關的法規及許可。一般而言，排放許可僅針對加速器運轉期間，除役期間的廢棄物種類與運轉前間可能有所不同，應再重新申請排放許可。除此之外，在儲存空間有限的情況下，大量的廢棄物生成必然會無法處理，因此在建立除役規劃時，即應該估算廢棄物產量及需要的儲存空間。

4.9.2 除役安全分級

IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 6 報告中建議：「各設施在除役工作的各個階段均應根據輻射風險的高低建立安全分級」，分級方法可以根據加速器設施的複雜程度建立，並將影響除役工作的規劃及執行，其影響範疇也擴及廠址外釋時的限制性使用與否。

主管機關進行監管時，應注意除役工作是否因應設施種類所誘發的危害及風險採取適當的措施，分級方法則是透過除役規劃的分析、文件及行動評估是否符合安全要求，分級方法必須以不損害安全為前提，並符合所有相關安全要求和標準，在粒子加速器除役工作中的分級方法需要考慮的因素如下：

- [1] 加速器等級及加速粒子種類(包含加速器複雜度、運轉使用歷史)
- [2] 加速器設施的狀態，如建物、加速器系統及組件的耗損狀況及完整性
- [3] 輻射、生物及化學危害種類
- [4] 設施的生命週期階段(如設計、建造、運轉、停機或除役)
- [5] 評估範圍(如加速器升級)，重點在於考慮除役工作可能對設施本身安全的負面影響，或是對設施周遭的安全衝擊。
- [6] 資訊的可靠度及不確定性。
- [7] 除役工作的複雜程度。
- [8] 設施除役的最終目標(限制性使用或非限制性使用)

4.9.3 分級方法的意義

分級方法的使用可以在除役工作時更有效率的進行資源分配及優化工作內

容，透過分級方法的使用，也可以確保除役規劃符合安全需求。分級方法對整個除役規劃均有所影響，特別是以下部份：

- [1] 鑑別建物、加速器系統及組件。
- [2] 除役工作的掌握。
- [3] 授權過程。
- [4] 除役工作的回顧與檢討。
- [5] 除役規劃管理；除役規劃的管理應根據專案的複雜程度、專案大小及潛在危害進行調整。
- [6] 工作人員及人員訓練。
- [7] 監管。

4.9.4 輻射防護

IAEA Safety Standards Series 所提供的輻射防護原則及安全實務係參考 ICRP 所建立，建立設施的除役規劃時必須根據法規要求納入輻射防護計劃。

除役工作時的輻射防護原則，是降低工作人員受到的輻射曝露，以及在緊急狀況時的干預措施，除役單位應根據風險制定和維護緊急干預措施，並及時向主管機關回報安全相關的重大事件。對於工作人員及民眾的輻射防護措施應根據劑量限制不斷優化及調整。

除役單位可以建立一個獨立的輻射防護組織，專職處理工作人員及一般民眾的健康與輻射安全議題，除役時的輻射防護措施與正常運轉時的輻射防護措施可能相似甚至相同，但除役時的輻射防護規劃仍必須經過再次審查，特別是以下幾點更須特別注意，降低可能發生的輻射危害：

- [1] 工作人員靠近輻射源，如移除加速器周圍的屏蔽材料
- [2] 拆除工程或污染物移除造成活化核種的逸散，如切割、真空油移除
- [3] 引入需要特定管制和足夠人員訓練的新技術或程序
- [4] 重新規劃區域使用規範時應公告周知

而在建立除役規劃時，必須考慮以下事項：

- [1]盡可能確保工作人員以一般民眾的輻射防護安全無虞
- [2]確保有足夠的輻射防護專業人員維持除役工作期間的輻射安全
- [3]確保除役工作人員具有合格的訓練及輻射防護或其他必要的技能
- [4]使用適當的輻射防護器具降低體內或體外的劑量曝露，如鉛屏蔽、抽氣系統、過濾系統
- [5]投入適當的清潔作業降低輻射曝露並預防污染擴散
- [6]透過遠端控制拆除高度活化的設備儀器，並使用各種方法降低工作人員的體外曝露
- [7]根據殘存劑量的高低或污染的嚴重程度畫設工作區域
- [8]將輻射量測結果及輻射防護措施建檔留存

除役單位必須檢視工作期間的空間規劃，並釐清空間使用方式與輻射曝露、輻射防護措施和安全程序之間的相關性；除役單位也應評估設施除役完成外釋後，對於後續使用者的輻射曝露，以及必要的輻射防護措施。

4.9.5 環境保護

除役工作時提供足夠的環境保護是除役單位的責任之一，可以透過全面的除役工作管制抑低對廠址及廠址周圍環境的衝擊。在整個除役工作的過程中環境保護措施均應持續執行，若廠址作為限制性使用外釋，環境保護的工作則應繼續。在除役規劃建立階段時就應進行環境衝擊評估(Environment Impact Assessment, EIA)工作，並導入 4.9.3 節的分級方法。

當收集資訊進行環境衝擊評估時，設施運轉期間的廠址監測及廠址周圍的環境監測資料應該重點評估，除此之外，任何有關設施異動或異外事件所造成的影響都該審慎檢視，曾經排放的活化氣體、活化廢水，或是被二次粒子照射而活化

的土壤及地下水均有可能對環境造成衝擊，衝擊範圍有可能擴及廠址以外。在電子加速器設施，活化的狀況較輕微，甚至低於儀器的量測極限，但仍可以透過可靠的預測方法完成法規所要求的環境衝擊評估工作。

在整個除役的過程中均應持續的進行環境監測，任何有潛在放射性或危害的廢棄物均應進行管制，當廢棄物進行外釋處理時，處理廠也應持續進行監測及紀錄，確保有放射性或危害的廢棄物有足夠的管控，避免意外釋放到環境中。

4.9.6 輻射與非輻射危害

設施運轉時所使用的安全導則與除役工作時的安全方針應分別建立，設施除役時可能產生額外的危害風險，並對一般民眾或參訪者造成損害，這些危害可能源於設施建物或加速器組件的拆除，或是受除役工作影響而造成的場域特性改變，如混凝土刨除時的污染物逸散至空氣中。因此在除役工作開始前，對於除役可能的危害樣態應進行全盤的評估。

在加速器拆除期間，輻射危害或常規安全風險可能獨立或相伴發生，例如：

- [1] 輻射危害
- [2] 工作場所污染危害
- [3] 環境污染危害
- [4] 生物、物理或化學危害

輻射危害則可能源於多種樣態，例如：

- [1] 未被清查的放射源
- [2] 冷卻流體的洩漏或屏蔽的損壞
- [3] 設施運轉期間的工作流體洩漏或污染且未被適當清除
- [4] 含有活化流體的管路
- [5] 含有活化流體的暗管，且有破裂風險
- [6] 裝載活化冷卻水的水槽

- [7] 抽氣系統及過濾系統中具有放射性的微粒
- [8] 拆除過程中的大量放射性廢棄物，如加速器組件或建築廢棄物
- [9] 原劃設的安全區域受到污染
- [10] 已除污的區域因人員移動或材料搬運而再次污染

除役工作所產生的危害並非全為輻射危害，也包括施工危害、工程危害、化學危害、生物危害、熱危害、聽力與視力危害、工作人員個人受傷等，因此除役工作前應建立人員健康與安全的防護計劃、風險評估以及應急方案。

加速器的設施除役屬於輻射危害與非輻射危害同時存在，根據各國的規定，對於各項危害可能必須進行獨立評估或是複合式評估。除役團隊應劃分因除役工作而生成的危害項目，並事先諮詢各主管機關對於危害的評估方法及法規，如果國內尚無相關法規規範各種危害，相關主管機關仍應訂定限值作為除役單位的工作參考。

設施除役工作期間的危害風險被辨視後，除役設施應建立安全分析評估報告，且報告中應包含應急方案，並準備必要的防護用具，除了設備的準備以外，針對工作人員應進行安全防護訓練，並定期舉辦應急方案演習，而在狀況允許的狀況之下，除役單位也應盡可能移除已知的危害風險。

保護工作人員免於危害風險的措施包含：

- [1] 適當的使用工程控制，如屏蔽、排氣系統
- [2] 適當的規劃工作流程降低輻射曝露 (ALARA)
- [3] 工作人員的工作訓練及對應特定危害的防護方法
- [4] 個人的劑量偵測並劃定工作區域
- [5] 整合健康與安全要求並建立標準程序
- [6] 使用個人防護用具，並針對用過用具進行適當的處理
- [7] 降低在工作區域所受到的劑量曝露，如廢棄物獨立儲存並頻繁的移除
- [8] 透過告示、劃設區域或門禁避免污染擴散

當除役工作中的某個階段適用多種風險管控措施時，各個方法的優劣應進行全盤的評估，包含劑量抑低或其他潛在風險。而在除役期間所引發的非輻射危害，如切削、鑽孔、除污時的化學與工業危害、工作場所工安問題也應一併考慮。

4.10 結論

加速器的除役工作宜在設施永久停止運轉後盡快開始，而除役工作所需要的各項資源及工作，包含技術、法規、安全、財務等等應在取得運轉許可時即完成初步規劃。

一般而言，加速器設施的除役工作相對直觀，透過參考其他種類的輻射設施除役經驗即可獲得大致的方向，尤其是設施運轉期間沒有受到污染的加速器設施。

國際間已有諸多的加速器除役相關經驗，根據過去的除役經驗，除役工作可以在未造成任何社會大眾、工作人員及環境的負面影響下成功完成，這些成功的除役經驗應持續傳承給入門的除役工作團隊作為參考。

本報告中列舉了除役的限制及挑戰，包括：

- [1] 財務或基礎設施的短缺不足以支撐除役工作
- [2] 放射性廢棄物處理設施，或棄置場所的缺乏
- [3] 未能在加速器運轉初期及早建立除役規劃
- [4] 記錄的缺失，如建造記錄、運轉記錄，造成除役工作規劃的困難
- [5] 低活度的殘存活度或污染量測

IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 6 號報告，Requirement 10 中闡述：「設施經營者應備妥除役規劃，並在設施的生命週期中，根據主管機關要求持續更新該規劃，確保設施最終可以安全除役。」

設施經營者也應考慮以下建議：

- [1] 建立適當且完善的財務規劃，並持續的進行更新，該財務規劃應包含建

物拆除、包裝、運送、棄置或回收

[2] 在設施的設計、建造及運轉階段均應考慮除役工作的規劃，例如：

- 使用模組化的屏蔽設計取代整塊的屏蔽牆
- 使用不易活化的材料
- 優化運轉參數，降低射束損失

為了降低廢棄物處理的成本，在加速器永久停止運轉前即應該評估設施活化的程度，並將評估結果與除役規劃相結合。

設施運轉期間的各式資料都應該進行建檔留存，建檔留存作業應持續整個加速器設施的生命週期，甚至更長。

高能量加速器(射束高於 1 GeV)若在永久停止運轉後隨即開始除役工作，因應可能的高殘存活度應採用遠端儀控的方式進行，若在除役工作開始前先放置一段時間進行冷卻，則可以有效降低輻射水平。大部份的中等加速器則可以透過適當的屏蔽後由人員直接進入工作。低能量加速器(射束低於 10 MeV)在除役時則毋須考慮殘存活度的問題。

附件二 加速器運轉引發物質活化的分析：週期性與 連續照射情節的差異與修正

摘要

利用蒙地卡羅法進行加速器設施運轉引發之物質活化與殘存活性的分析有賴於合理照射情節的假設，文獻中常見的照射情節有三種，第一種是週期性的照射，另外二種則屬於簡化的連續照射情節：(0)根據設施每日例行的運轉歷程建立類似週期性照射的情節，此一模型最接近真實情況，但不易複製延伸到長期的設施運轉歷史；(1)忽略二次照射之間的停機，直接連成簡化的連續照射；(2)同樣是簡化的連續照射但降低射束輸出，也就是將總工作負載平均分配在設施的生命期。本研究深入探討這三種照射情節對於加速器運轉引發之物質活化分析的效應，特別是各種不同半衰期核種的累積與衰變的影響，並據以建立適當的修正因子，以利簡化的連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用。

關鍵字：照射情節、殘存活性、設施除役

簡介

國際原子能總署於 2020 年出版了一份主

題為加速器除役的報告[1]，內容彙整過往加速器除役的重要經驗，點出設施除役過程中應注意的關鍵議題與實用建議。報告中強調加速器運轉歷程與可能誘發的物質活化的息息相關，設施應依實際運轉狀況的資訊定期更新活化評估；報告中亦指出使用蒙地卡羅方法搭配合理的運轉假設情節是國際間通用的活化評估方法之一。

關於加速器運轉射束輸出開關的模擬，文獻回顧顯示有三種照射情節假設常用於活化分析：(0)根據設施每日例行的運轉歷程建立類似週期性照射的情節，例如 Martínez-Serrano 與 de los Rios[2,3] 分析 ^{18}F 生產設施周遭物質活化的週期性照射情節；又例如 Wu 等人[4]應用類似模型解析一座運轉 30 年的質子治療設施可能造成的活化狀況。此一模型最接近真實情況，但若使用於蒙地卡羅的活化分析，則不易複製延伸到數十年之久的運轉歷史，主要是受限於極端冗長的重覆輸入用於定義頻繁的射束開關照射情節。另外二種照射情節的假設則是將頻繁射束開關的週期性照射情節大幅簡化為一次性長期連續的照射，通常有下列二種近似方式：(1)忽略二次

照射之間的停機，直接連成簡化的連續照射 [5,6]；(2)同樣是簡化的連續照射但降低輸出電流，也就是將總工作負載平均分配在設施的生命期[7,8]。

圖 1 顯示上述三種常見於活化分析照射情節的示意圖。情節(0)是根據設施實際運轉狀況所建立的週期性照射，其預測結果應最接近真實情況，但其在蒙地卡羅模擬的輸入描述上非常冗長，而且不同設施有不同運轉情節，因此難以客觀互相比較或參考引用。相反地，情節(1)與情節(2)的簡化連續照射在蒙地卡羅程式中易於描述，但其預測結果是否合理反應實際運轉情況則令人存疑？針對加速器運轉引發之物質活化的分析，為了兼顧照射情節描述的方便性與活化預測的正確性，本研究以典型放射性物質生產設施的照射歷程為基礎，有系統地比較前述三種情節對於不同半衰期核種的累積與衰變，據以建立適當的修正因子，以利簡化的連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用。另外，為擴大應用範圍，本研究進一步建立無因次照射情節，以一次射束開關的照射週期為單位，將運轉照射時間與核種半衰期進行無因次化處理，推導所得之修正因子可更方便應用於各式加速器的運轉情節。

三種照射情節的活化解析

一次典型射束開關的照射情節下，某一特定核種活度(A)的累積與衰變隨時間變化如 [1]所描述：

$$A = R(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_c} \quad [1]$$

其中， R 為飽和活度， λ 為該核種的衰變常數， t_i 為照射時間， t_c 為冷卻時間。如圖 1 所示，情節(0)為週期性照射，每一次的射束開關視為一個照射週期 t_T ，包含運轉的照射時間 t_i 與停機的冷卻時間，設施的運轉歷程則由 n 個照射週期構成。情節(1)則忽略二次照射之間的停機，壓縮運轉歷程為連續照射($n \times t_i$)的時間。情節(2)則按比例降低射束輸出，將總工作負載平均分配給設施的運轉全程時間($n \times t_T$)。三種照射情節的總工作負載相同，均為 $n \times t_i \times \phi$ ，其中 ϕ 為單位時間的射束輸出。對齊三種照射情節的最後停止運轉時間(EOB)，本研究的重點在於觀察比較三種照射情節 EOB 之後各種不同半衰期核種活度的差異。

情節(0)在 n 個照射週期結束後的核種活度(A_{p0})如[2]的推導所示：

$$\begin{aligned} A_n &= R(1 - e^{-\lambda t_i}) \\ A_{n-1} &= R(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_T} \\ A_{p0} &= \sum_{i=1}^n A_i = R(1 - e^{-\lambda t_i}) \frac{1 - (e^{-\lambda t_T})^n}{1 - e^{-\lambda t_T}} \quad [2] \end{aligned}$$

情節(1)在連續照射 nt_i 時間後的殘存核種活度

(A_{c1})如[3]所示：

$$A_{c1} = R(1 - e^{-\lambda n t_i}) \quad [3]$$

情節(2)在降低射束輸出($\phi \times t_i/t_T$)連續照射 $n t_T$ 時間後的殘存核種活度(A_{c2})則如[4]所示：

$$A_{c2} = R \frac{t_i}{t_T} (1 - e^{-\lambda n t_T}) \quad [4]$$

比較二種簡化的連續照射情節所得之 EOB 核種活度(A_{c1} 與 A_{c2})與接近實際狀況的週期性照射結果(A_{p0})的差異，我們即可獲得不同照射簡化情節對於加速器運轉引發之物質活化分析的影響，並據以進行適當修正。

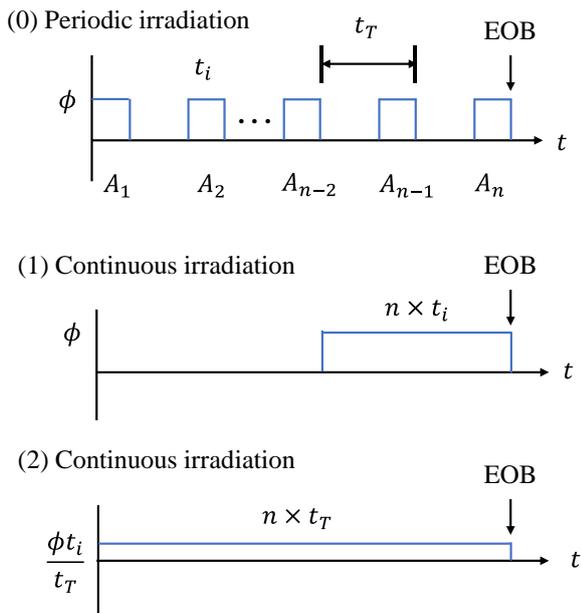


圖 1. 常用於活化分析的三種射束照射情節

放射性物質生產設施活化評估的應用

國內有多座迴旋加速器的核醫藥物放射性物質生產設施，其運轉會伴隨二次中子的產生以及設施周遭物質的活化。參考大部分

設施的每日例行運轉情節，本研究選擇以下參數進行活化預測的比較： $t_i = 2 \text{ h}$ 、 $t_T = 24 \text{ h}$ 、 $n = 20 \text{ y} \times 365 \text{ d/y} = 7300$ ，也就是設施每天運轉約 2 小時產製同位素，持續運行約 20 年。考量前述三種照射情節，圖 2 呈現該設施停機後各種不同半衰期核種殘存活度的比較。圖 3 則呈現以週期性照射結果 A_{p0} 為基準，比較二種簡化情節各自所預測之活度的差異。針對半衰期小於 10^3 秒的核種， A_{c1} 與 A_{p0} 結果類似，二者都接近飽和活度，但 A_{c2} 的預測則遠低於 A_{p0} 的結果， $A_{c2}/A_{p0} = 1/12$ ，恰好與 t_i/t_T 比例一致。半衰期介於 10^3 - 10^9 秒的核種， A_{c1} 的預測與 A_{p0} 相比呈現不同程度的高估；半衰期小於 10^6 秒的核種， A_{c2} 的預測與 A_{p0} 相比則呈現不同程度的低估。至於長半衰期的核種($>10^6$ 秒)， A_{c2} 與 A_{p0} 的預測幾乎吻合，但 A_{c1} 的預測明顯高估，最大差異為 A_{p0} 的 12 倍，恰為 t_i/t_T 比例的倒數。半衰期超過 10^9 秒以上的核種，三種照射情節的活化預測再趨於相同。

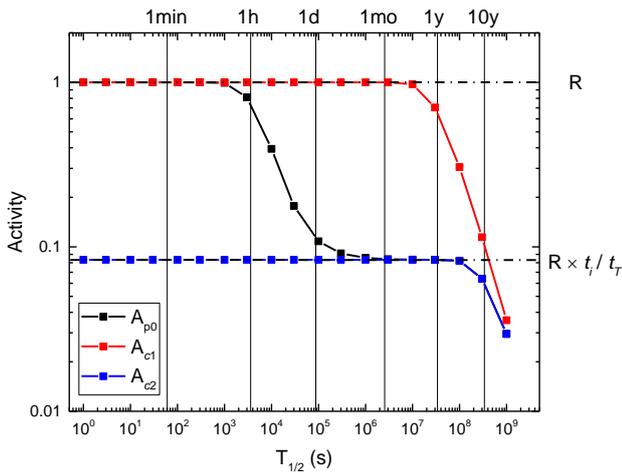


圖 2. 利用三種照射情節評估不同半衰期核種的殘存活度

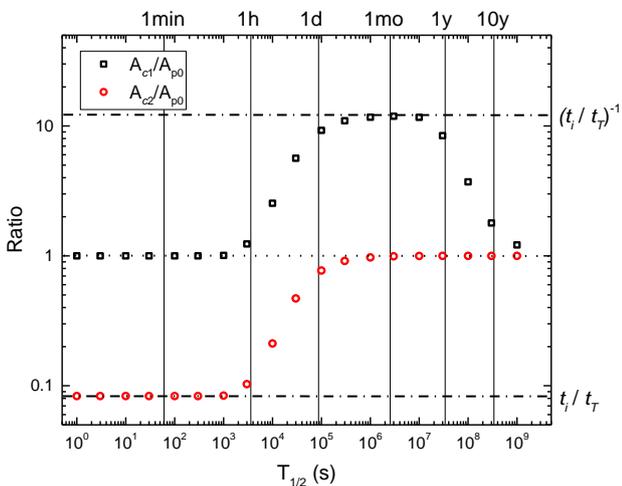


圖 3. 以 A_{p0} 為基礎比較 2 種簡化連續照射情節所得之殘存活度預測的差異

圖 2 與圖 3 中 A_{c1} 與 A_{p0} 在核種半衰期大於 10^9 秒時會再次趨於相等，這是因為在週期性照射的情節下，極長半衰期的核種在每一次中間停機時的衰變極少，幾乎可忽略，因此週期性照射結果與一次性連續性照射的預測自然趨於一致。然而此現象僅發生在核種半衰期遠大於設施生命期的情況，例如：當核種

半衰期是設施生命期的 3 倍以上時， $|1 - (A_{c1}/A_{p0})| < 10\%$ ；當核種半衰期是設施生命期的 30 倍以上時， $|1 - (A_{c1}/A_{p0})| < 1\%$ 。

總結上述觀察，簡化的情節(1)適用於評估半衰期小於 10^3 秒或大於 10^9 秒的核種，而簡化的情節(2)則適用於評估半衰期大於 10^6 秒的核種，若非此二特例，簡化連續照射情節的預測應搭配適當的修正因子，藉此彌補照射情節簡化所造成活化預測的高估或低估。

舉例說明上述分析結果的實際應用，參考 Fang 等人[9]針對放射性物質生產設施混凝土活化的評估，該研究利用簡化情節(1)進行蒙地卡羅活化分析，針對混凝土中六個重要核種的活度預測，文中建議的修正因子分別為： ^{54}Mn ($T_{1/2}=0.85$ 年) 8.9、 ^{55}Fe ($T_{1/2}=2.74$ 年) 3.6、 ^{60}Co ($T_{1/2}=5.27$ 年) 2.3、 ^{134}Cs ($T_{1/2}=2.07$ 年) 4.6、 ^{152}Eu ($T_{1/2}=13.54$ 年) 1.4、 ^{154}Eu ($T_{1/2}=8.59$ 年) 1.7，這些數值與圖 3 中 A_{c1}/A_{p0} 的結果一致。

值得注意，圖 2 與圖 3 的結果是針對設施每天運轉約 2 小時的情況下所得，若是有不同的運轉情節則需重新比較方程式[2]-[4]的預測。為了方便各類設施不同運轉情節的參考與引用，本研究進一步將前述照射情節的時間進行無因次化處理，方法與案例探討如下。

無因次處理與案例探討

針對週期性照射情節的一般化，選擇以一個照射週期 t_T 為單位來度量照射時間 t_i 或核種半衰期 $t_{1/2}$ 應是最好選擇，此二參數對應之無因次化物理量這裡定義為工作因數 T_R 與衰變因數 T_H 。此時，方程式[2]-[4]描述三種照射情節在EOB時的核種活度可以改寫成如下[5]-[7]所示：

$$A_{p0} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right) \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \quad [5]$$

$$A_{c1} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n T_R}{T_H}}\right) \quad [6]$$

$$A_{c2} = R T_R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}\right) \quad [7]$$

$$\begin{cases} T_R \equiv \frac{t_i}{t_T}, & 0 < T_R < 1 \\ T_H \equiv \frac{t_{1/2}}{t_T}, & T_H > 0 \end{cases}$$

先選擇工作因數 $T_R=1/10$ 的情況進行說明，圖4呈現情節(0)預測EOB後各種不同半衰期核種的殘存活度，並顯示其隨照射週期次數 n 的變化。 T_H 小於0.01的核種經過1次照射其數量即達最高飽和活度(R)；隨著照射週期次數的增加， T_H 大於10的核種會達到一個次飽和活度($R \times T_R$)的穩定狀態。次飽和活度的物理意義在此可被解讀為核種衰變減少的數量與產製增加的數量達到平衡，即第 n 次照射結束後至第 $n+1$ 次照射結束所衰變的核種數量與第 $n+1$ 次照射所增加的核種數量達

到平衡，如下推導[8]所示：

$$A_{p0} = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right) \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{n}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \equiv kR$$

$$kR \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}\right) = R \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}\right)$$

$$T_H \rightarrow \infty, k = \frac{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{T_R}{T_H}}}{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T_H}}} \rightarrow T_R \quad [8]$$

上式顯示長半衰期核種的殘存活度與飽和活度比值會趨近 T_R ，此一觀察也與Wu等人[4]的論點一致。考量更長半衰期的核種(當 T_H 持續增加時)，核種的活度無法維持在次飽和狀態，在有限的照射次數下會呈現隨著 T_H 的增加而減少。

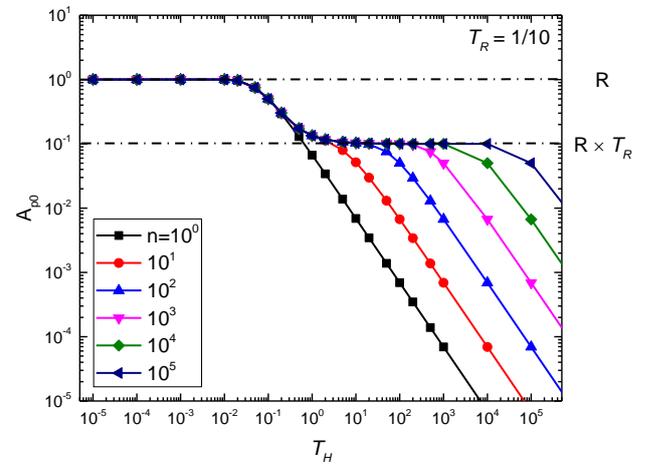


圖4. T_R 為1/10時，在不同照射週期次數累積下，情節(0)預測EOB後各種半衰期核種的活度

同樣固定 $T_R=1/10$ ，圖5則呈現三種照射情節在不同的照射週期次數下所預測的核種殘存活度。當照射只有1次時， A_{c1} 與 A_{p0} 的預

測是完全一樣的，但 A_{c2} 明顯低估短半衰期核種， A_{c2} 與 A_{p0} 所預測的活度只有在 T_H 大於10的情況會吻合。當照射次數逐漸增加時，三種照射情節的差異也逐漸明顯，整體變化大致如前一小節所述，簡化的情節(1) A_{c1} 適用於評估短半衰期或極長半衰期的核種，而簡化的情節(2) A_{c2} 則適用於評估長半衰期的核種，詳細半衰期數字或範圍會受工作因數 T_R 與照射次數 n 的影響，請參考圖5內容的呈現。若非如此，簡化連續照射情節的預測都應搭配適當的修正因子。前述放射性物質生產設施活

化評估中假設的工作因數 T_R 為1/12，其結果可與本案例 $T_R=1/10$ 與 $n=10^4$ 的情況進行大致比較：當評估半衰期約為小於 10^3 秒或大於 10^9 秒的核種，照射週期24小時對應之 T_H 為 <0.01 或 $>10^4$ ，情節(1)的簡化連續照射可獲得合理預測($A_{c1}/A_{p0}\sim 1$)；當評估半衰期約大於 10^6 秒的核種，照射週期24小時對應之 T_H 為 >10 ，情節(2)簡化連續照射是不錯的近似($A_{c2}/A_{p0}\sim 1$)。至於其它半衰期核種評估所需之簡化連續照射修正因子可由圖6內容讀取。

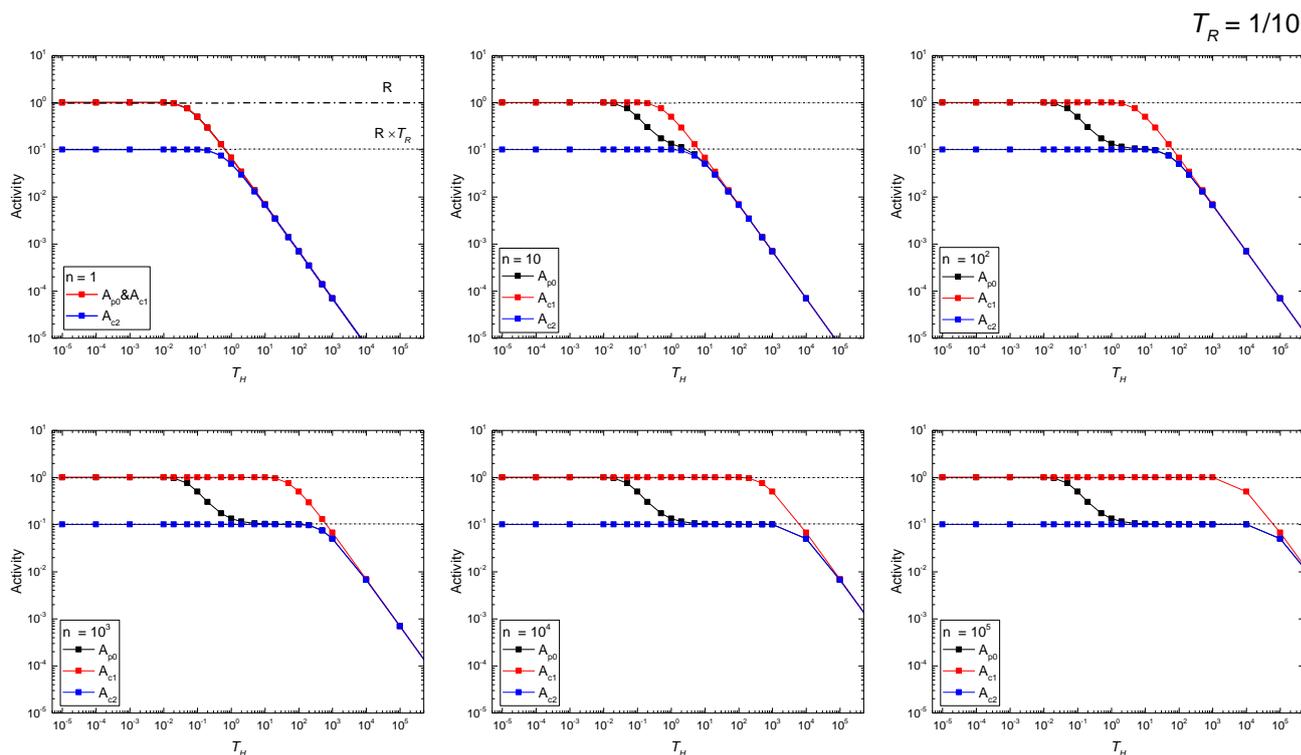


圖5. T_R 為 1/10 時，在不同照射週期次數累積下，三種照射情節預測 EOB 後各種半衰期核種的活度

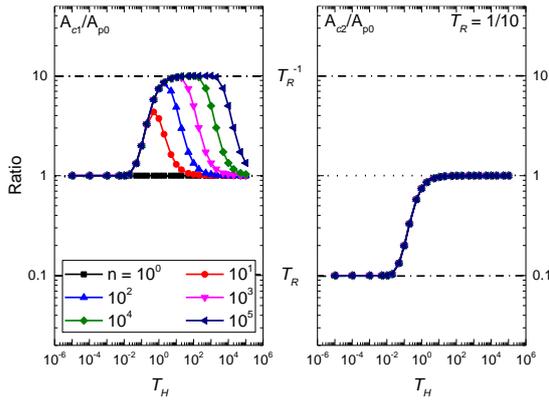


圖 6. T_R 為 1/10 時, A_{c1}/A_{p0} 及 A_{c2}/A_{p0} 在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

加速器設施的種類繁多，視其目的有不同的照射情節，除了前述 T_R 為 1/10 的案例之外，圖 7 與圖 8 進一步分別呈現兩種不同工作因數下 A_{c1}/A_{p0} 及 A_{c2}/A_{p0} 的比值，以利使用者參考引用。圖 7 呈現 T_R 為 1/2 時的活度預測比值， A_{c1} 與 A_{p0} 的預測在 T_H 小於 0.1 時是一致的； A_{c2} 與 A_{p0} 的預測在 T_H 大於 10 時一致；至於 T_H 介於 0.1–10 之間的核種，簡化的連續照射情節可能導致 0.5–2 倍的活度預測差異，建議進行適當修正。圖 8 呈現 T_R 為 1/100 時的活度預測比值， A_{c1} 與 A_{p0} 的預測在 T_H 小於 0.001 時是一致的； A_{c2} 與 A_{p0} 的預測在 T_H 大於 10 時一致；至於 T_H 介於 0.001–10 之間的核種，簡化的

連續照射情節可能導致 0.01–100 倍的活度預測差異，更應該執行必要修正避免過度高估或低估。

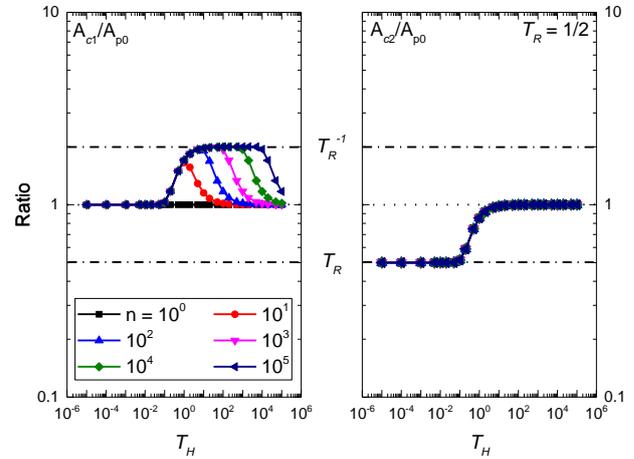


圖 7. T_R 為 1/2 時, A_{c1}/A_{p0} 及 A_{c2}/A_{p0} 在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

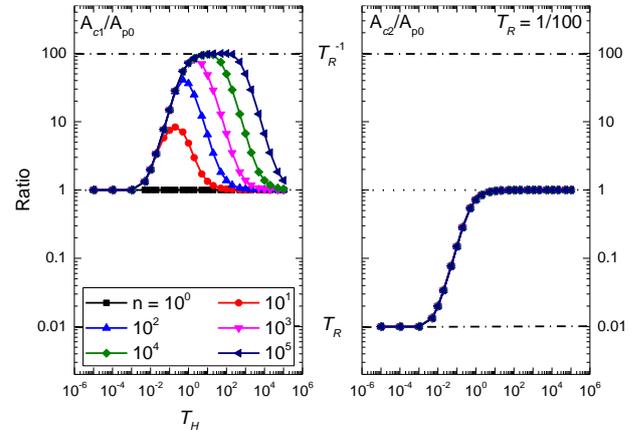


圖 8. T_R 為 1/100 時, A_{c1}/A_{p0} 及 A_{c2}/A_{p0} 在不同照射週期次數及衰變因數下的變化

結論

參考文獻中常用於加速器引發物

質活化分析的射束照射情節，本研究考慮週期性照射情節以及二種近似簡化的連續照射情節，以放射性物質生產設施的例行運轉為例，有系統地比較三種照射情節對於不同半衰期核種的殘存活度預測。相較於接近實際的週期性照射情節，比較結果顯示簡化的情節(1)適用於評估短半衰期或極長半衰期的核種；而簡化的情節(2)則適用於評估長半衰期的核種；至於其它半衰期的核種評估，簡化連續照射情節的預測可能導致不同程度的低估或高估。針對此一議題並考量加速器運轉照射情節的變化，本研究提供一系列的簡化連續照射修正因子，有利於簡化連續照射模型在蒙地卡羅活化分析的正確使用，也有利於相關設施活化分析或除役規劃的審查。

參考文獻

- [1] IAEA, 2020. Decommissioning of Particle Accelerators. International Atomic Energy Agency, Technical Reports No. NW-T-2.9, Vienna, Austria.
- [2] Martínez-Serrano, J.J. and de los Rios, A.D., 2014. Prediction induced activity in the HAVAR foils of the ^{18}F production targets of a PET cyclotron and derived radiological risk. *Health Phys.* **107**, 103-110.
- [3] Martínez-Serrano, J.J. and de los Rios, A.D., 2010. Prediction of neutron induced radioactivity in the concrete walls of a PET cyclotron vault room with MCNPX. *Med. Phys.* **37**, 6015-6021.
- [4] Wu, Q., Wang, Q., Liang, T., Zhang, G., Ma, Y., Chen, Y., Ye, R., Liu, Q., Wang, Y., Wang, H., 2016. Study on patient-induced radioactivity during proton treatment in hengjian proton medical facility. *Appl. Rad. Isot.* **115**, 235-250.
- [5] Augusto, R.S., Trudel, A., Liu, Z., Kinakin, M., Paley, W., Bjelić, Z., Messengerg, A., Mildenerger, J., Chak, J., Groumoutis, T., Smith, J., Pinto, D., 2021. An overview of the shielding optimization studies for the TRIUMF-ARIEL facility. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **1005**, 165401.
- [6] Yoshida, G., Matsumura, H., Masumoto, K., Nakamura, H., Toyoda,

A., Nobuhara, F., Iwai, S., Nishikawa, K., Hayashi, K., Ishioka, J., Hanaki, H., Miyauchi, H., Nagahashi, S., Sawada, M., Goto, K., Yamamoto, Y., Miura, T., Bessho, K., 2021. Investigation into activation of accelerators at various synchrotron radiation facilities in Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.* **59**, 543-554.

[7] Luo, C., Li, W., Yang, B., Su, Y., Li, Y., Li, Z., Mao, W., Liu, X., Yan, W., Ma, F., 2022. Induced radiation studies and personnel dose assessment in a carbon ion therapy facility. *Appl. Rad. Isot.* **188**, 110350.

[8] Carbonez, P., La Torre, F. P., Michaud, R., Silari, M., 2012. Residual radioactivity at the CERN 600 MeV synchrocyclotron. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* **694**, 234-245.

[9] Fang, P.W., Wang, K.W., Hsieh, Y.I., Huang, J.C., Sheu, R.J., 2022. Characteristics of neutron production and concrete activation in cyclotron vaults for self-shielded and non-self-shielded facilities. *Radiat. Phys. Chem.* **201**, 110448.