

行政院原子能委員會  
放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

精進用過核子燃料貯存輻射安全  
驗證方法研究與案例測試

期末報告

受委託機關： 國立清華大學

計畫主持人： 許榮鈞

計畫編號： 104FCMA018

報告日期： 中國民國 105 年 12 月 05 日

# 精進用過核子燃料貯存輻射安全 驗證方法研究與案例測試

## 期末報告

受委託單位：國立清華大學 核子工程與科學研究所

研究主持人：許榮鈞

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣八十九萬元

行政院原子能委員會放射性物料管理局 委託研究

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

# 目錄

1. 中文摘要.....	2
2. 英文摘要.....	3
3. 計畫緣起.....	4
4. 計畫目的.....	5
5. 執行方法以及進行步驟.....	9
6. 完成之工作項目及具體成果.....	11
<b>6.1. 蒐集及研析國際利用 ADVANTG 進行的研究與案例測試；歸納金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量</b> .....	12
6.1.1. 蒐集及研析國際利用 ADVANTG 進行的研究與案例測試 ...	12
6.1.2. 歸納金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量 .....	13
6.1.3. 輻射安全分析工具 .....	15
<b>6.2. ADVANTG 程式研究與案例測試</b> .....	17
6.2.1. Ueki 的輻射屏蔽衰減係數量測實驗 .....	17
6.2.2. Wagner 的貨櫃監測儀案例 .....	21
6.2.3. 日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽.....	26
6.2.4. 探井探勘案例.....	31
6.2.5. 驗證案例文獻計算結果 .....	33
<b>6.3. 以核一乾式貯存設施為測試案例</b> .....	38
6.3.1. 核一乾貯護箱屏蔽計算模型.....	38
6.3.2. 核一乾貯護箱屏蔽計算比較.....	42
<b>6.4. 以核二乾式貯存設施為測試案例</b> .....	52
6.4.1. 核二乾貯護箱屏蔽計算模型.....	52
6.4.2. 核二乾貯護箱屏蔽計算比較.....	56
7. 結論 .....	64
8. 參考文獻.....	67

# 1. 中文摘要

用過核子燃料乾式貯存作業的輻射安全分析為核能發展後端營運的重要議題與技術，但是相關分析牽涉到許多複雜困難的計算，其中關鍵的技術是快速可靠的輻射遷移計算能力。本研究計畫目的在於引進目前國際上最先進的 ADVANTG 技術，搭配國內核工界常用蒙地卡羅遷移計算程式 MCNP，應用於乾式貯存相關的輻射安全分析計算。ADVANTG 程式可自動產生粒子權重射源與重要性遷移地圖的變異數降低參數，透過 CADIS 理論結合可大幅度減少 MCNP 蒙地卡羅模擬的計算時間與誤差。ADVANTG/MCNP 主要優勢在於計算效率，因此在有限時間內，仍可保有快速可靠分析能力。計算結果可與其他分析模式互相比較與驗證，精進國內乾式貯存輻射安全分析技術。計畫內完成四個國際案例驗證測試，以及核一、二乾貯案例計算，本研究建立的 ADVANTG/MCNP 技術與相關經驗可提供主管機關做為審查時快速驗證的有力工具。

## 2. 英文摘要

Radiation shielding analysis for interim dry storage of spent nuclear fuels is one of important issues and technologies in management of the back-end nuclear fuel cycle. The analysis in essence involves many complicated computational difficulties and efficient techniques for performing high-fidelity transport simulations are indispensable. The Monte Carlo method is one of the choices and is usually the preferable one. In Taiwan, MCNP is the most popular code used in related analyses. To make a challenging MCNP simulation computationally practical or feasible, efficient variance-reduction techniques are necessary in most cases. This project aimed at establishing the ADVANTG methodology and using it to reexamine this challenging shielding problem. Based on the concept of consistent adjoint driven importance sampling, the ADVANTG code performs automatic variance reduction using an adjoint-derived biased source and a weight-window map to greatly accelerate the MCNP transport simulation. The method and experience obtained in this study can be readily adapted to performing independent verification for similar analyses and can provide the authorities with a solid basis for reviewing the safety analysis report of related activities.

### 3. 計畫緣起

用過核子燃料貯存與運送作業相關輻射安全分析技術的建立，為我國目前核能發展技術的重要一環。用過核子燃料貯存與運送作業的輻射安全分析是一個複雜的問題，需考慮許多困難的大規模輻射遷移計算，目前的解決之道需仰賴先進的數值方法與高速電腦。MCNP 程式是國內核工與輻射安全分析的主力計算工具，該系列程式使用最可靠精確的連續能量中子作用截面，以及內建使用者便利的建模工具，因此常被運用於國內絕大部分相關的安全分析報告。但是，MCNP 是一個 3 維的蒙地卡羅遷移程式，模擬計算費時且結果常附帶可觀的統計誤差，因此如何建立一種可靠又快速的驗證技術以利進行類似分析是一個重要的議題。

本計畫引進 ADVANTG 技術於用過核子燃料相關的輻射安全分析，它是一種先進的變異數降低技術，連結 Denovo 程式(決定論法)與 MCNP 程式(蒙地卡羅法)的計算，結合不同數值方法的優點，可以達到有效加速計算效率的目的。ADVANTG 技術預期可以保有 MCNP 計算結果的品質與精確度，同時又大幅減少蒙地卡羅粒子遷移的計算時間，對於未來國內用過核子燃料貯存與運送作業輻射安全審查與驗證可有極大的助益，值得深入探討並建立相關技術。

## 4. 計畫目的

用過核子燃料貯存與運送作業相關的輻射安全分析是一個具有挑戰性的問題，除了複雜的射源特性與幾何模型外，這類型的分析同時包含了深穿透(Deep Penetration)、輻射滲流(Radiation Streaming)與天空散射(Skyshine)等困難的大規模輻射遷移計算，目前的解決之道需仰賴先進的數值方法與高速電腦。本團隊過往曾經使用了MAVRIC/SCALE 程式來改善此一困難的蒙地卡羅計算問題，且取得不錯的成果<sup>1-5</sup>，圖 4-1、4-2 所示為 MAVRIC 程式計算核一乾式貯存護箱表面劑量分析結果(TSC01 熱測試護箱)，圖中亦可看出蒙地卡羅計算結果先天帶有統計誤差的問題。

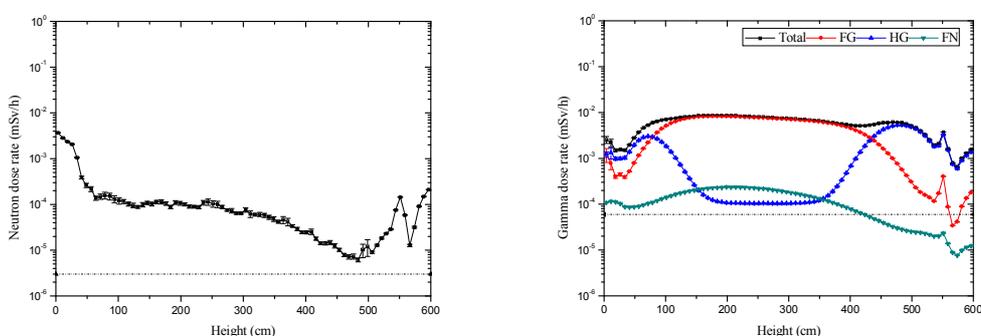


圖 4-1、核一乾貯護箱側邊表面 1 cm 處中子(左)、加馬(右)劑量率隨護箱高度變化

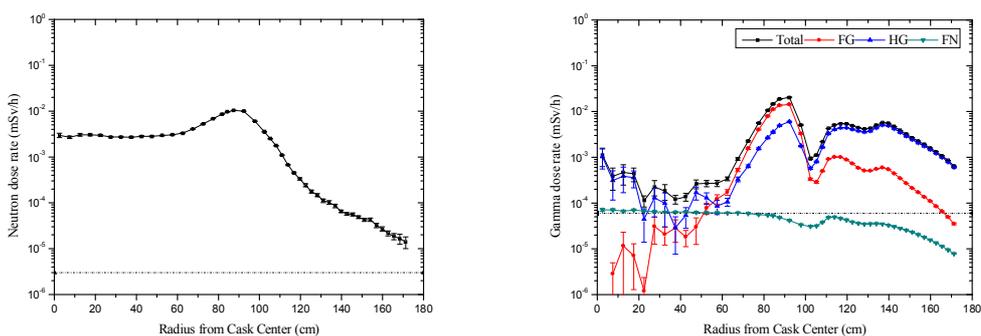


圖 4.2、核一乾貯護箱頂部表面 1 公分處中子(左)、光子(右)劑量率隨護箱半徑變化

但是，MAVRIC/SCALE 程式在國內並未被普遍採用；事實上，MCNP 程式

一直是國內核工領域分析的主要計算工具，該系列程式使用最可靠精確的連續能量中子作用截面，以及內建使用者便利的建模工具，常運用於國內相關的安全分析報告。使用 MCNP 程式進行複雜問題的分析通常需要大量的電腦資源與時間，因此不利於審查階段快速地進行案例檢視與驗證。

因此，如何有效加快 MCNP 程式運行效率對於分析執行者與審查單位都具有相當的吸引力，這是一個重要問題且具有很多實質助益的應用潛力，其中之一是直接對於未來國內用過核子燃料貯存輻射安全審查與驗證有相當的助益，值得深入探討並建立相關技術。因此行政院原子能委員會放射性物料管理局（以下簡稱物管局）辦理「精進用過核子燃料貯存輻射安全驗證方法研究與案例測試」委託研究計畫案，以掌握用過核子燃料貯存的輻射安全分析方法，提供我國用過核子燃料貯存作業管制之參考。

有鑒於此，本研究計畫將配合物管局的規劃，引進國外最先進的 ADVANTG 技術<sup>6</sup>，該程式可配合 MCNP 程式使用，提供有效變異數降低參數以大幅改善 MCNP 程式模擬效率的研究。

ADVANTG 是 Automated Variance Reduction Generator 的縮寫，該程式為由美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory，以下簡稱 ORNL)所發展，套用 Consistent Adjoint Driven Importance Sampling(CADIS)理論，連結決定論法與蒙地卡羅法的計算，結合不同數值方法的優點，將決定論法的解作為蒙地卡羅法模擬過程的依據參數來達到有效加速計算效率的目的。

ADVANTG 程式對於固定的中子、光子、及混合射源等問題，能自動地產生連續能量的變異係數降低參數，結合三維的蒙地卡羅程式 MCNP 來處理粒子遷移計算的問題。程式基本架構如圖 4.3 所示，先各別建立 MCNP 及 ADVANTG 的程式輸入檔，藉由 ADVANTG 內建的 Denovo 程式來解伴隨遷移方程式，結果的伴隨通量可用於產生 3 維的分隔座標各格點空間和能量相依的粒子權重射源 (Biased source)與重要性遷移地圖(Importance map)，ADVANTG 依靠上述參數能自動地輸出一個已套用粒子權重射源參數的新 MCNP 程式輸入檔和含有粒子重要性分布資訊的 wwinp 檔案，將兩者一起進行 MCNP 程式運算，可以有效降低計算統計誤差，大幅減少計算過程所需電腦資源與時間。

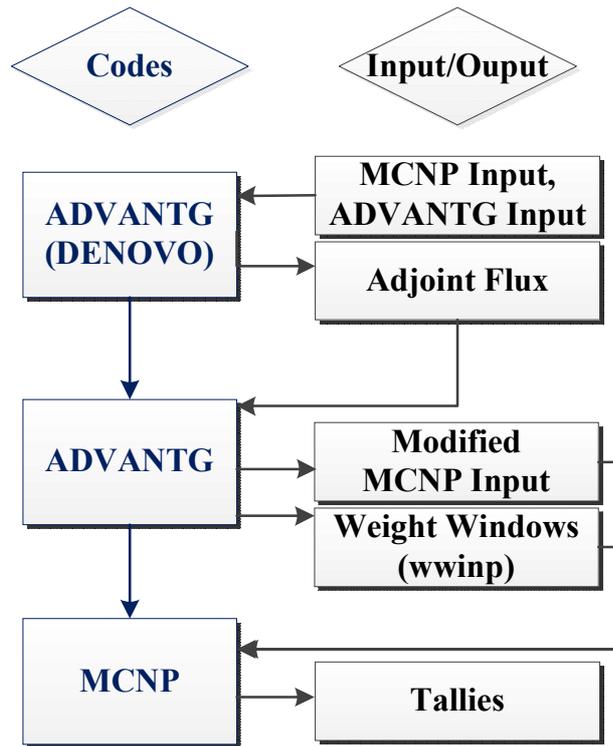


圖 4.3、ADVANTG/MCNP framework 序列流程圖<sup>7</sup>

ADVANTG 程式最新版本為 ADVANTG-v3.0.3，目前僅能和 MCNP5-v1.60 作搭配使用，MCNPX、MCNP6 等版本皆不適用，而其程式的原始碼僅能支援 Python-2.x ( $x \geq 7$ ) 的版本，Python-3.x 目前不適用。ADVANTG 輸出檔.Silo 格式檔案，建議可使用 3 維的視覺化工具 VisIt 程式讀取，在使用 ADVANTG 搭配 MCNP 模擬時，可藉由 VisIt 快速檢查 Denovo 的決定論法計算結果是否合理，再進行蒙地卡羅運算。ADVANTG 讀取 MCNP 輸入檔時，對射源項設定 SDEF card 格式有幾項限制，首先其描述必須是修改版的 SI 和 SP card，SI card 需先被分隔成各個區間，SP card 僅能有一個為連續機率分布函數，其餘的 SP card 需依照 SI card 作同樣區間分隔；另一個限制為，區域的拒絕法(cookie-cutter rejection) 僅支援單一區域。

ADVANTG 技術的主要優勢為保留原始 MCNP 程式的優點，同時有效改善計算效率，可大幅度地減少在面對困難遷移計算問題的計算時間及降低使用者負擔。近年來，ADVANTG 程式逐漸可見應用於一些國際屏蔽分析案例，像在 ORNL 的散裂中子源(SNS)和高通量同位素反應器(HFIR)應用於材料損傷及劑量率分析<sup>8</sup>；也適用於複雜且巨大的幾何模型 ITER Tokamak 核融合試驗電廠<sup>9</sup>，在這些案例分析結果的比較可知 CADIS 理論與 ADVANTG 的優勢，該領域是目前核工相關會議的重點之一，進步迅速，後續進展與應用值得期待。另外，西北太平洋國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory，以下簡稱 PNNL)發表了 PNNL-21026 號報告<sup>10</sup>，應用 ADVANTG 程式驗證 9 種不同遷移計算問題，該問

題都已具有高可信度答案，驗證 ADVANTG 程式在具挑戰性困難的輻射偵測問題可得到高收斂的計數值，而且相較於 MCNP 程式內建的變異數降低技術，ADVANTG 的效率與使用者方便性更形顯著，值得國內引進、應用並深入探討。

本報告中應用於輻射安全分析所使用相關程式版本資料列於表 4.1。在核一、二廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告中，應用 MCNP 程式作輻射安全分析，其版本為 MCNP5 v1.30，本報告採用的 MCNP5 v1.60 為其最新版本。

表 4.1、輻射安全分析程式版本

分析程式	版本
MCNP5	Version 1.60
MAVRIC/SCALE	Version 6.1
ADVANTG	Version 3.0.3

## 5. 執行方法以及進行步驟

本計畫依研究的議題採取下列方法與步驟：

1. 彙整國際相關文獻，除上述之驗證案例 ORNL、ITER 及 PNNL-21026 號報外，蒐集其他相關利用 ADVANTG 程式模擬的期刊文獻，研讀面對各類型的輻射防護應用問題，汲取國際經驗於程式設定優化、使用建議及結論統整。
2. 蒐集研析國際間乾貯設施金屬護箱及混凝土護箱表面輻射劑量數據，提供金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量。
3. 詳閱 ADVANTG 和 MCNP 程式之使用者手冊，對程式設定熟悉，確定兩程式間資料輸出輸入結合無誤。
4. 利用使用者手冊中的探井探勘案例，進行 ADVANTG 程式初步演練，在一固定射源項、兩個不同位置偵檢器問題，如圖 5-1，分三種形式作討論：不套用 CADIS 理論之模擬(CADIS-off)、套用 CADIS 理論之模擬(CADIS-on)、及套用 FW-CADIS 理論之模擬(FW-CADIS)，討論兩偵檢器之劑量率結果，驗證應用理論與否對於計算效率的優化差異，確定程式操作各種變異係數參數，如粒子權重射源、重要性遷移地圖等資料繪圖無誤。利用 MAVRIC/SCALE 程式進行同樣案例計算，討論在同樣的模擬設定下，兩程式間計算結果之差異。參考國際案例，選擇一明確之設定資料，與文獻結果作驗證學習。

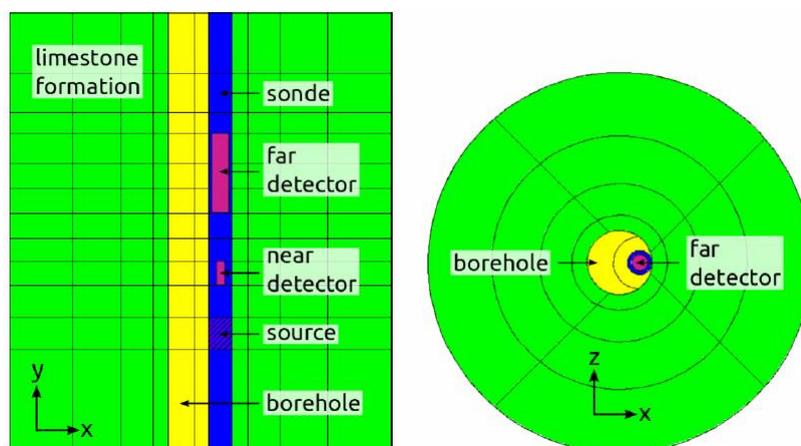


圖 5-1、探井探勘案例幾何示意圖<sup>6</sup>

5. 針對核一廠用過核子燃料乾式貯存護箱模型，利用 ADVANTG 搭配 MCNP 程式作表面劑量分析，並與先前分析結果比較做為驗證，若有差異則檢討可能原因。
6. 針對核二廠用過核子燃料乾式貯存護箱模型，利用 ADVANTG 搭配 MCNP 程式作表面劑量分析，並與先前分析結果比較做為驗證，若有差異則檢討可能原因。
7. 深入 ADVANTG 方法研究與案例測試能力，研提精進我國用過核子燃料貯存安全審查與驗證方法之建議。

## 6. 完成之工作項目及具體成果

本計畫執行「精進用過核子燃料貯存輻射安全驗證方法研究與案例測試」，依計畫書的規劃完成的工作項目有：

- (1) 蒐集及研析國際利用 ADVANTG 進行的研究與案例測試；歸納金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量；
- (2) ADVANTG 程式研究與案例測試；
- (3) 以核一乾式貯存設施為測試案例；
- (4) 以核二乾式貯存設施為測試案例。

針對每一工作項目的內容與成果，分別詳述如下 6.1-6.4 章節。

## 6.1. 蒐集及研析國際利用 ADVANTG 進行的研究與案例測試；歸納金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量

### 6.1.1. 蒐集及研析國際利用 ADVANTG 進行的研究與案例測試

ORNL 發展的 ADVANTG 程式是蒙地卡羅輻射遷移計算領域近年重要的技術進展之一，主要優勢為套用 CADIS 理論，連結決定論法和蒙地卡羅法計算，保留原始 MCNP 程式的優點，結合其自動化產生的變異係數降低參數，能有效改善計算效率，同時大幅度地減少在面對困難遷移計算問題的計算時間及降低使用者負擔。

ADVANTG 程式近年來逐漸被應用於一些國際屏蔽分析案例，像在 ORNL 的散裂中子源和高通量同位素反應器應用於材料損傷及劑量率分析。不論是在面對 SNS 光束線具有高能量且非等向性射源的困難屏蔽分析問題或是探討具有高 neutron 通量率的 HFIR 壓力槽受輻照後完整性時的 DPA (displacements per atom) 分析，研究團隊使用 ADVANTG 程式套用 FW-CADIS 理論，皆證實可以在全區域內的格點計分得到誤差相對一致的結果，且可省下大量的計算時間。

ADVANTG 也被應用於複雜且巨大的幾何模型 ITER 核融合試驗電廠問題，該團隊使用 ADVANTG 搭配 MCNP 程式，驗證相較於類比蒙地卡羅計算，套用 CADIS 理論和 FW-CADIS 理論耦合決定論法和蒙地卡羅法，對運算效率的優化，FOM 值的提升，有顯著的效果。另外，西北太平洋國家實驗室發表了 PNNL-21026 號報告，使用 ADVANTG 程式驗證 9 種不同遷移計算問題，該問題都已具有高可信度答案，驗證 ADVANTG 程式在具挑戰性困難的輻射偵測問題可得到高收斂的計數值，而且相較於 MCNP 程式內建的變異數降低技術，ADVANTG 的效率與使用者方便性更形顯著，值得國內引進、應用並深入探討。

國際上尚未有應用於實際中期貯存劑量分析的案例，為了引進並學習此一重要技術，因此本團隊蒐集了三個利用 ADVANTG 方法的輻射屏蔽案例，分別為 (1) Ueki 的輻射屏蔽衰減係數的量測實驗；(2) Wagner 的貨櫃監測儀案例；以及 (3) 日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽。第一個案例以 Cf-252 的中子點射源照射 9 種不同厚度的屏蔽材料，根據劑量率量測結果可得衰減係數的估算值，我們分別建立 ADVANTG 與對應 MCNP 程式的輸入檔，應用 CADIS 理論將偵檢器設為伴隨(Adjoint)射源，產生權重地圖及權重射源分布用於加速蒙地卡羅計算，結果

並與單純使用 MCNP 作比較。第二個案例是模擬一個貨櫃中放有一 Ba-133 射源及大量的輻射阻擋塊材，在貨櫃外放置四個 NaI 偵檢器用於量測能譜分布，應用 FW-CADIS 理論可得到相對誤差較小的輻射分布結果。第三個案例是日本實驗反應器 JPDR 的輻射劑量分布，我們建構合理近似的反應器幾何，將爐心簡化為一均勻分布之圓柱狀中子射源，應用 FW-CADIS 理論對大範圍的網格劑量分布 (Mesh tally) 計算可有效加速。在 6.2 節將持續針對上述三個案例進行深入探討，正確學習 ADVANTG 理論基礎與進階優化使用，並延伸應用範圍至用過核子燃料乾式貯存的輻射屏蔽與劑量分析。

### 6.1.2. 歸納金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽設計考量

國際上對於用過核子燃料中期貯存的方式可分為乾式和溼式兩種，近年來新運行之用過核子燃料中期貯存設施以乾式貯存為主，其中最常見的方式為金屬護箱及混凝土護箱兩種。各國考量其用過核子燃料處置辦法與政策不同而有不同的選擇。例如美國由於核能政策決定不執行用過核子燃料再處理，大多採直接放置於室外的混凝土護箱，利用厚重的混凝土作為內部用過核子燃料護箱的保護與輻射屏蔽，簡單而安全。另一方面，部分歐洲國家和日本因用過核子燃料處置考量不同或保留彈性，一些案例採用以金屬護箱作室內貯存，主要考量是因為金屬護箱可同時具有貯存及運送功能，便於用過核子燃料再處理過程所需的運送與取出。

金屬護箱採室內貯存之輻射屏蔽可分兩大部分探討：一部分為金屬護箱本體，另一部分為外部建築物的輔助屏蔽效果。金屬護箱主結構為不銹鋼和碳鋼組成之圓柱殼層，其頂蓋又分為主檔板 (Primary lid) 和次檔板 (Secondary lid)，中間夾層充滿惰性氣體，內部的格架區為添加硼之合金及不銹鋼組成，護箱內部的包圍材料具有中子屏蔽效果。頂蓋之主檔板和次檔板間會充高壓氣體，而主檔板內會充低壓氣體，當主檔板有滲漏產生時，氣體會由主檔板滲入護箱內；而當次檔板有滲漏時，氣體會滲漏到空氣中，充填氣體的空間會有壓力探測器，確保護箱不會有放射性污染物的釋出。護箱內部之包圍材料有保守預防用過核子燃料再臨界之作用。金屬護箱表面以自然對流的方式冷卻移除用過核子燃料的衰變熱。

一般而言，金屬護箱為了運送便利而有重量限制，其護箱表面劑量率遠高於厚重的混凝土護箱，加上為了防止環境對金屬腐蝕的考量，及預防金屬護箱洩漏問題，考慮在金屬護箱外部建造一座混凝土廠房做為附加的輻射屏蔽，並在廠房側邊上下開闢空氣進出通道<sup>11-12</sup>，目前日本和瑞士對用過核子燃料乾式貯存，皆採金屬護箱室內處置做法。針對整個貯存設施，除了金屬護箱內部設置壓力探測器做為防漏監測之外，亦須對護箱表面和廠房空氣進出通道作溫度監控，同時在設施建物內外也需設置輻射偵檢器，以確保設施運轉的輻射安全。

針對金屬護箱外部建築物，瑞士法規 EN SI-G05<sup>12</sup> 要求該建築需同時具有保護護箱和輻射屏蔽的功能，除相關作業所需吊掛設施外，外部建築需在意外事故發生時能確保護箱的完整性，考慮增強防震結構、氣候變化對溫度影響、分析飛機墜毀撞擊建築對護箱影響等。另外；外部建築亦須增加建築厚度作為輻射屏蔽的功能，以日本 RFS 乾貯場<sup>14</sup> 為例，其金屬護箱貯存區建物外牆厚度約為 1.5 公尺。

文獻案例資料比較，如表 6.1-1 所示：

表 6.1-1、文獻案例比較表

	金屬護箱	混凝土護箱	混凝土護箱外加屏蔽
案例	瑞士法規 EN SI-G05 <sup>12</sup> ； Zwilag 乾貯場 TN-24BH 護箱裝填 59 束 BWR 用過燃料束，裝填負重為 135 噸，金屬護箱直徑 275 公分，高度 627 公分 <sup>13</sup> 。	核一廠乾貯 NAC-UMS； 每一護箱裝填 56 束 BWR 用過燃料束，傳送(金屬)護箱約有 8 公分厚鉛屏蔽和 7 公分厚中子吸收材，混凝土護箱屏蔽約有 70 公分厚之混凝土。	核一廠乾貯 INER-HPS； 在 NAC-UMS 護箱外再加上約 30 公分之混凝土屏蔽。
劑量設計限值	1. 距離護箱 2 公尺任意點劑量率不超過 0.1 mSv/h。 2. 護箱表面任意點劑量率不超過 10 mSv/h。 3. 護箱表面平均劑量率不超過 0.5 mSv/h。	1. 傳送護箱側壁之平均劑量率不超過 4 mSv/h。 2. 護箱表面平均劑量率不超過 0.5 mSv/h。 3. 護箱空氣進/出口之平均劑量率不超過 1 mSv/h。	無。
劑量評估	無。	1. 護箱側壁平均劑量率為 $1.13 \times 10^{-1}$ mSv/h，最大值位於進氣孔端為 $1.40 \times 10^{-1}$ mSv/h。 2. 護箱頂部平均劑量率為 $1.92 \times 10^{-1}$ mSv/h，最大值位於空氣通道上端 $7.35 \times 10^{-1}$ mSv/h。	1. 護箱側壁平均劑量率為 $2.45 \times 10^{-3}$ mSv/h，最大值位於進氣孔端為 $5.45 \times 10^{-2}$ mSv/h。 2. 護箱頂部平均劑量率為 $6.58 \times 10^{-3}$ mSv/h，最大值位於空氣通道上端 $6.61 \times 10^{-3}$ mSv/h。

表 6.1-1 中，劑量評估值之用過核子燃料條件為參照核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告的設計基準用過核子燃料，最大燃耗度 36,000 MWD/MTU，最少冷卻時間 10 年，U<sup>235</sup> 初始平均濃縮度 1.9 至 3.25 wt%。<sup>19</sup>

### TN 24 BH STORAGE CONFIGURATION

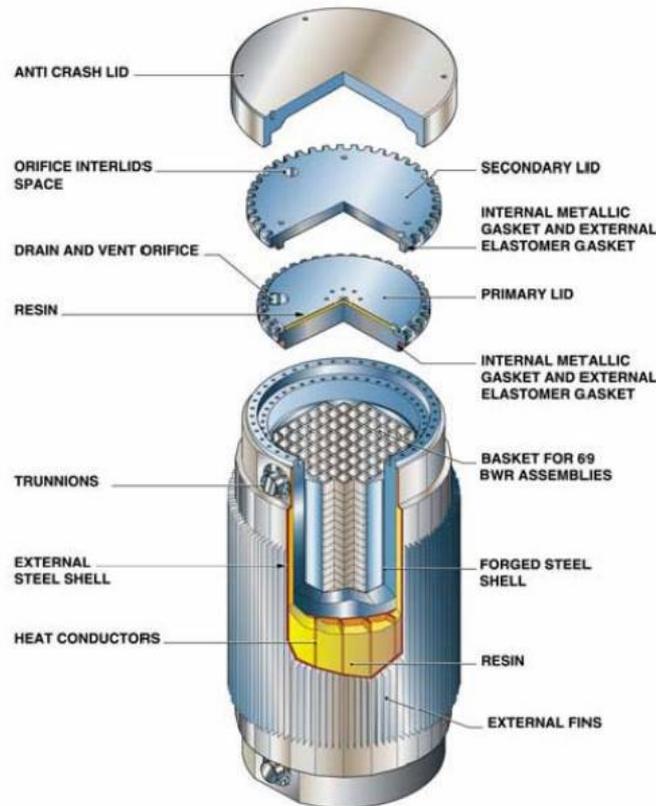


圖 6.1-1、TN24 BH 金屬護箱結構示意圖<sup>13</sup>

#### 6.1.3. 輻射安全分析工具

本報告將採用兩種程式 MCNP 和 MAVRIC/SCALE 作輻射安全分析，以下對兩程式作簡介。

MCNP 為 Monte Carlo Neutral-Particle Transport Code System 的縮寫，由美國洛斯阿拉摩士國家實驗室(Los Alamos National Laboratory)所發展，是一具有多功能、三維座標、連續能量、時間依存、包含中子/光子/電子之蒙地卡羅遷移計算程式。其擁有最可靠精確的連續能量中子作用截面庫(ENDF/B-VII)，內建多樣的變數降低技巧，和內建使用者便利的建模工具，可適用於各輻射安全分析相關議題。MCNP 為目前核工領域學界與業界一致公認最佳之輻射遷移計算機程式，它同樣也是乾式護箱貯存系統審查標準 NUREG-1536 及 NUREG-1567 報告中所建議的屏蔽分析程式之一。MCNP 目前最新的版本為 MCNP6-v1.0，本報告為搭配 ADVANTG 程式使用，皆採用 MCNP5-v1.60。

MAVRIC 為 Monaco with Automated Variance Reduction using Importance Calculation 的縮寫，屬於 ORNL 發展的 SCALE 計算機程式集的一個控制序列。為一使用 CADIS 理論且能自動化地利用具有一致性的粒子權重射源與重要性遷移地圖作為降低變異係數技巧的運算序列。此序列主要應用於使用類比蒙地卡羅計算在較困難的輻射遷移問題，無法有效率地模擬出最後結果。藉由套用 CADIS 計算理論，先進行一次粗略的格點座標計算，由伴隨函數的分佈關係建構粒子重要性地圖及偏移權重，用於最後的蒙地卡羅模擬，使最終能在合理的時間內得到一低誤差範圍的結果。本報告使用的 MAVRIC 控制序列為最新的 SCALE6.1 版本。

本報告的 6.3 及 6.4 節，將對核一、二廠的乾式貯存護箱作表面劑量分析，預計採用三種方式作分析比較，(1)單純使用 MCNP 程式，不搭配變異係數降低技巧；(2)MAVRIC/SCALE，應用其中的 FW-CADIS 理論作模擬加速；以及(3)ADVANTG/MCNP framework，MCNP 程式搭配 ADVANTG 做模擬，同樣應用 FW-CADIS 理論。三種分析方法將在 6.3 及 6.4 節作討論，程式模擬差異如表 6.1-2 所示：

表 6.1-2、乾式貯存護箱表面劑量三種分析方法比較

分析方法	作用截面	分隔座標法(S <sub>N</sub> ) 程式	蒙地卡羅法 程式
MCNP	ENDF/B-VII截面庫 連續能量截面	X	MCNP
MAVRIC	ENDF/B-VII截面庫 27n19g 分群能量截面	Denovo	Monaco
ADVANTG + MCNP	ADVANTG 採 27n19g 分群截面 MCNP 採連續能量截面	Denovo	MCNP

註：27n19g 分群截面：將中子能群依能量區分為 27 群，將光子能群依能量區分為 19 群，分群能量依據參考 ADVANTG 程式使用者手冊<sup>6</sup>。

## 6.2. ADVANTG 程式研究與案例測試

ADVANTG 方法是蒙地卡羅輻射遷移計算領域近年重要的技術進展之一，國際上尚未有應用於實際乾式貯存劑量分析的案例。為了引進並學習此一重要技術，因此本團隊蒐集了三個利用 ADVANTG 程式自動產生粒子權重射源與重要性遷移地圖等降低變異數參數方法搭配 MCNP 程式模擬的輻射屏蔽案例，探討有無使用 ADVANTG 對蒙地卡羅模擬的加速效果差異，案例分別為(1) Ueki 的輻射屏蔽衰減係數的量測實驗；(2) Wagner 的貨櫃監測儀案例；以及(3)日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽。採用此三個輻射屏蔽案例原因為在參考文獻<sup>6</sup>上已具有完整的程式相關內容且附有計算結果可作計算驗證。在最後再探討一個(4)探井探勘案例，將案例以三種形式作討論：原始蒙地卡羅模擬(不套用 CADIS 理論)、套用 CADIS 理論之蒙地卡羅模擬、及套用 FW-CADIS 理論之蒙地卡羅模擬(FW-CADIS)，比較 CADIS 理論應用與否對結果的影響，並就同一案例和之前 MAVRIC/SCALE 分析作比較。

### 6.2.1. Ueki 的輻射屏蔽衰減係數量測實驗

1992 年，Ueki 等學者設計一系列的量測實驗來研究材料的中子屏蔽特性<sup>15</sup>。圖 6.2-1 為其實驗示意圖，圖中長度單位為公分，取一強度為  $4.05 \times 10^7$  n/s 的  $^{252}\text{Cf}$  中子射源，置於特製的石蠟立方體容器中心，特製容器在射束出口方向鑿出一頂角為  $45^\circ$  的圓錐角空間，在距離射源頂 110 公分處放置一中子偵檢器，在兩者間擺放欲測量的中子屏蔽材料。藉由進行 9 種不同厚度的屏蔽材料量測實驗，由偵檢器的劑量率結果，以公式 6.2-1 來推算中子屏蔽材料的衰減係數，式中 T 為屏蔽材料厚度。

$$\text{Attenuation factor} = \frac{Dose_T}{Dose_{T=0}} \quad [6.2-1]$$

在此案例，針對單一屏蔽材料石墨，分別建立 9 種厚度的 ADVANTG 與對應 MCNP 程式的輸入檔，以下示意圖皆以屏蔽材料厚度為 35 公分的案例作呈現，圖 6.2-2 為 MCNP 幾何示意圖。在此應用 CADIS 理論，將偵檢器設為伴隨 (Adjoint) 射源，經 ADVANTG 計算後產生粒子權重射源與重要性遷移地圖用於加速蒙地卡羅計算，結果並與單純使用 MCNP 作比較。

在 CADIS 理論的決定論法計算中，分隔座標法幾何模型如圖 6.2-3 所示，總共切割成 60,984 個格點(X:56、Y:33、Z:33)，集中於中子偵檢器位置，此區亦為有興趣的答案區間。ADVANTG 計算結果，伴隨粒子通量分布如圖 6.2-4 所

示，當伴隨粒子通量經過屏蔽材料時，會呈現隨材料厚度增加而有粒子衰減的物理現象；相對的，在重要性遷移地圖上，粒子權重會和伴隨粒子通量成一倒數關係。由圖 6.2-5 可以發現，新的射源取樣在高能中子區會增加其權重，10 MeV 以上的中子，其權重皆至少放大 10 倍。

程式計算時間如表 6.2-1 所示，以屏蔽材料厚度為 35 公分案例為例，分兩種案例做討論，比較有無搭配 ADVANTG 的差異，兩模擬總計算時間約 6 分鐘，其中搭配 ADVANTG 案例，花費 1 分鐘在決定論法計算，5 分鐘在蒙地卡羅模擬，符合短時間的決定論法計算加速長時間的蒙地卡羅法模擬的原則。中子劑量率計算結果如表 6.2-2 和表 6.2-3 所示，分 F4 tally 和 F5 tally 作討論，F4 tally 為區域偵檢器計分(region tally)，F5 tally 為點偵檢器計分(point detector tally)，兩者定義不同，區域偵檢器計分為特定區域內平均的粒子通量率，通常是用粒子總徑跡長計量方法(track length estimation)；點偵檢器計分，強迫每個追蹤粒子在點偵檢器位置做出貢獻，故其模擬效率較高，兩種計分方式比較，會將區域偵檢器計分視為較正確的答案。模擬的計算效率，會以 FOM 值作討論，FOM 的定義如公式 6.2-2，其中 R：相對誤差、 $T_{MC}$ ：蒙地卡羅模擬計算時間、 $T_{ADVANTG}$ ：ADVANTG 計算時間。

[6.2-2]

表 6.2-3 點計分的兩種案例在各材料厚度情況，FOM 值皆優於表 6.2-2 區域偵檢器計分表現，此為計分方式之差異。而兩種計分結果，在搭配 ADVANTG 案例，對比單獨使用 MCNP 案例，FOM 值皆能優化 10 倍以上。在材料厚度不同時，單獨使用 MCNP 案例的結果隨材料厚度增加而劑量誤差變大，FOM 值變小；搭配 ADVANTG 案例，在點計分時，趨向性變化同單獨使用 MCNP 案例，而在區域偵檢器計分時，材料厚度為 15 公分時有最小結果誤差，此時 FOM 值最佳，所有厚度條件，劑量誤差皆分布在 3% 內，和單獨使用 MCNP 案例比較，此誤差值已屬於相當可靠答案範圍，由此可見 ADVANTG 提供的降低變異數參數方法對蒙地卡羅模擬的效率提升相當有成效。搭配 ADVANTG 案例的衰減係數 C/E 值，C/E 值為計算估計值與實驗量測值相除，其值介於 1.03 到 1.08 間與參考資料結果 1.04 到 1.09 相符<sup>6</sup>。

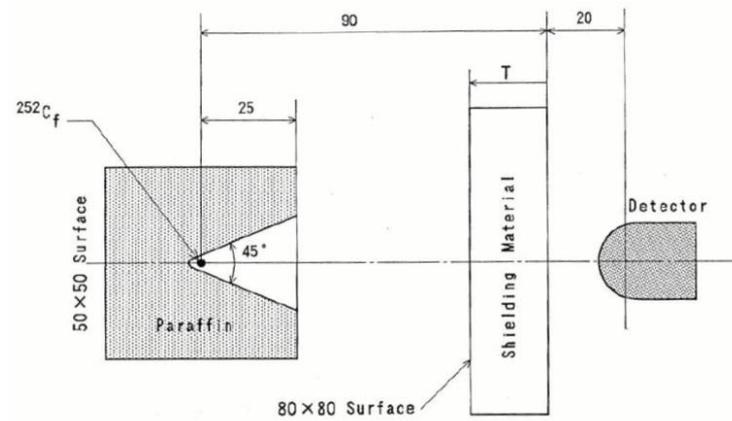


圖 6.2-1、Ueki 的輻射屏蔽衰減係數實驗示意圖

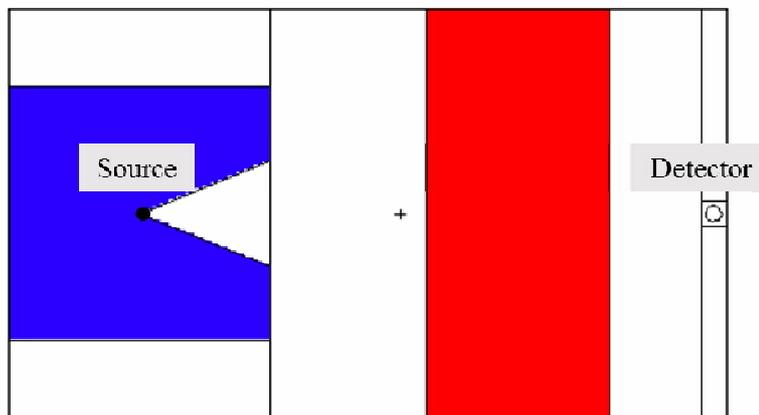
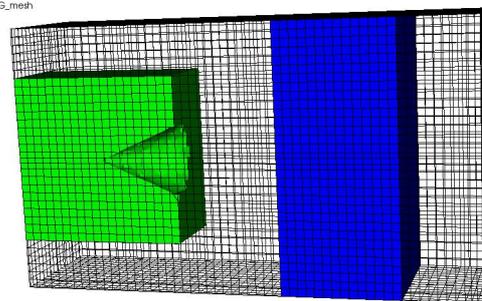


圖 6.2-2、Ueki 案例 MCNP 幾何示意圖，T=35 公分

DB: fields.silo  
 Cycle: 0  
 Filled Boundary  
 Var: mixed\_materials  
 -0 void  
 -1 paraffin  
 -2 graphite  
 Mesh  
 Var: ADVANTG\_mesh



user: RADIATION  
 Tue Mar 22 15:58:12 2016

圖 6.2-3、Ueki 案例分隔座標幾何示意圖，T=35 公分

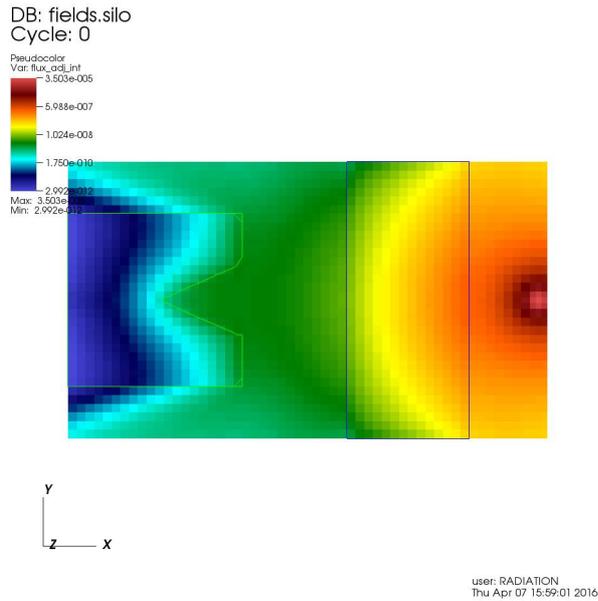


圖 6.2-4、Ueki 案例伴隨粒子通量分布圖，T=35 公分

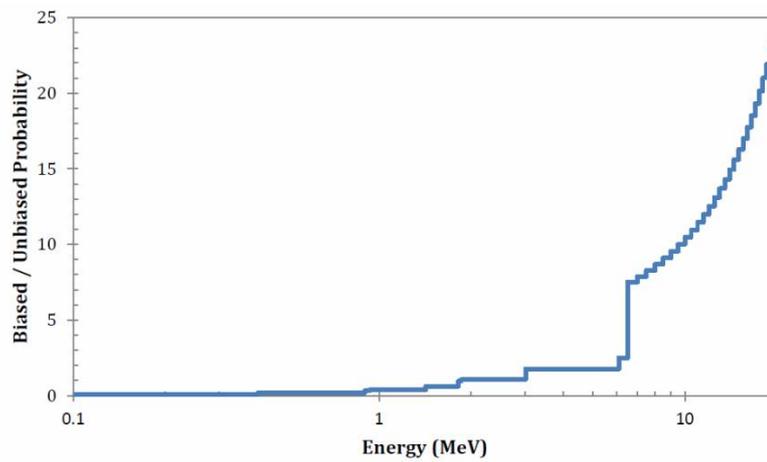


圖 6.2-5、Ueki 案例射源取樣粒子權重和原機率分布函數比，T=35 公分<sup>6</sup>

表 6.2-1、Ueku 案例程式執行時間，T=35 公分

Executing time (s)	ADVANTG (Denovo)	MCNP	Total
MCNP	0	360	360
ADVANTG (CADIS)	69 (59)	300	369

表 6.2-2、Ueki 案例區域偵檢器計分結果 (f4 tally)

Graphite thickness (cm)	MCNP		ADVANTG (CADIS)	
	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM
0	472 $\pm$ 7.40 %	30	499 $\pm$ 2.07 %	392
2	435 $\pm$ 7.68 %	28	441 $\pm$ 1.38 %	875
5	354 $\pm$ 8.21 %	25	372 $\pm$ 0.95 %	1861
10	290 $\pm$ 9.12 %	20	271 $\pm$ 0.77 %	2794
15	238 $\pm$ 10.18 %	16	189 $\pm$ 0.71 %	3259
20	136 $\pm$ 12.81 %	10	132 $\pm$ 0.72 %	3143
25	97 $\pm$ 15.47 %	7	89 $\pm$ 0.75 %	2877
30	71 $\pm$ 17.59 %	5	60 $\pm$ 0.82 %	2394
35	44 $\pm$ 21.25 %	4	40 $\pm$ 0.92 %	1896

表 6.2-3、Ueki 案例點偵檢器計分結果 (f5 tally)

Graphite thickness (cm)	MCNP		ADVANTG (CADIS)	
	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM
0	504 $\pm$ 0.11 %	129374	504 $\pm$ 0.03 %	1868460
2	439 $\pm$ 0.28 %	20863	442 $\pm$ 0.04 %	1041088
5	368 $\pm$ 0.44 %	8758	371 $\pm$ 0.07 %	342802
10	272 $\pm$ 0.64 %	4116	271 $\pm$ 0.11 %	136904
15	193 $\pm$ 0.81 %	2510	192 $\pm$ 0.15 %	73019
20	133 $\pm$ 1.00 %	1650	132 $\pm$ 0.18 %	50295
25	90 $\pm$ 1.21 %	1142	90 $\pm$ 0.21 %	36692
30	61 $\pm$ 1.49 %	746	60 $\pm$ 0.25 %	25751
35	41 $\pm$ 1.77 %	529	40 $\pm$ 0.37 %	11725

#### 6.2.2. Wagner 的貨櫃監測儀案例

2014 年，美國橡樹嶺國家實驗室 Wagner 等學者，發表了一篇有關應用 FW-CADIS 方法在蒙地卡羅輻射遷移計算問題的研究<sup>16</sup>，當中以一個貨櫃監測儀問題作例子。本團隊就此範例作 ADVANTG 案例驗證研究，預期應用 FW-CADIS 理論，可以使偵檢器得到相對誤差較小的輻射分布結果，用於量測射源能譜分布。

案例幾何示意圖如圖 6.2-6，有一長方體貨櫃，其中心置有一 Ba<sup>133</sup> 光子點射源，釋出最高的光子能量為 383.8 keV，貨櫃內還含有數塊的輻射阻擋塊材(圖中深藍色為鐵，淺藍色為聚乙烯)，貨櫃外頭放置 4 個碘化鈉偵檢器(NaI)。

應用 FW-CADIS 理論，分隔座標法將貨櫃幾何切割為 592,920 個格點(X:90、Y:109、Z:61)，格點集中於有興趣的 4 個偵檢器位置及貨櫃內屏蔽塊材間隙，因為經屏蔽塊材後粒子通量變化較巨，格點集中於塊材間隙能使決定論法估計通量變化更準確，提供更佳的降低變異係數參數。將 4 個偵檢器設為伴隨射源，FW-CADIS 理論會進行兩次的決定論法計算，圖 6.2-7 左圖為第一次對問題近似的決定論法計算粒子通量分布(Forward flux)，為一概估答案，可發現鐵的屏蔽效果較聚乙烯好，以此答案修正伴隨射源進行第二次決定論法計算，得到圖 6.2-7 右圖的伴隨通量分布，再得出降低變異係數參數進行蒙地卡羅模擬。

ADVANTG 計算結果，表 6.2-4 顯示新的射源取樣隨著能量增加會增重其比例，尤其著重於 160 keV 以上的光子能群；而 50 keV 以下的光子貢獻甚小，此範圍原本佔有 50 % 的取樣比例，經修訂後其前後取樣比例降為十萬分之一。表 6.2-5 為 ADVANTG 和 MCNP 的程式運行時間，決定論法計算時間為 12 分鐘，兩案例 MCNP 計算時間皆為 12 小時。圖 6.2-8 左圖為模擬能譜分布結果，右圖為各能群分布相對誤差，可發現兩案例輻射分布相似，但搭配 ADVANTG 案例各能群答案之誤差皆優於單獨使用 MCNP 案例，由圖 6.2-9 繪出兩案例各能群相對誤差統計結果，發現搭配 ADVANTG 案例，其結果誤差在 5 % 以下佔有 68 %，而單獨使用 MCNP 案例僅有 3 %，有無搭配 ADVANTG 使用在蒙地卡羅計算效率上影響甚巨。

討論兩分布結果之差異，將結果相減並除以總誤差，由表 6.2-6 作統整表示，發現其結果差異分布近似於常態分布，證明兩結果為對同一問題之模擬，搭配 ADVANTG 作模擬並不會對原問題作修改。

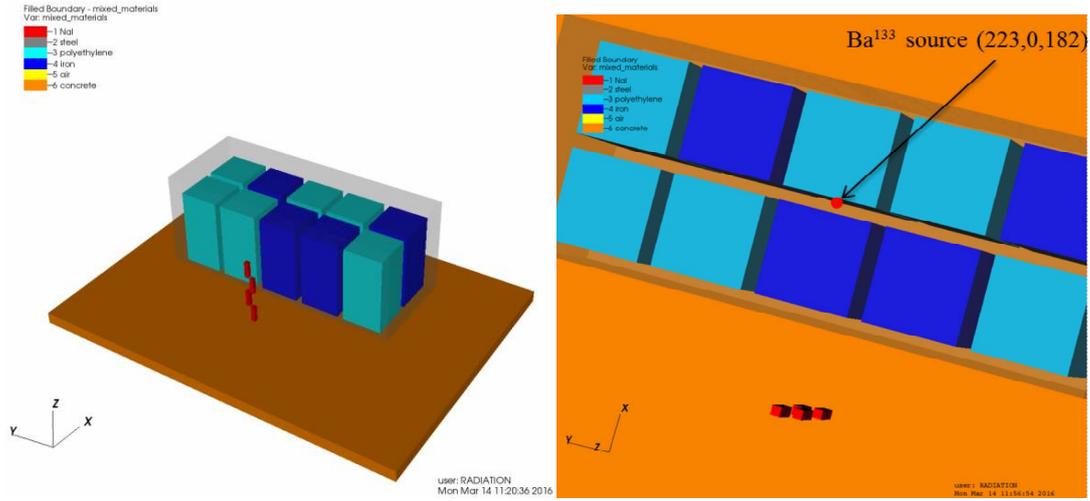


圖 6.2-6、貨櫃監測儀案例幾何示意圖(深藍色:鐵、淺藍色:聚乙烯)

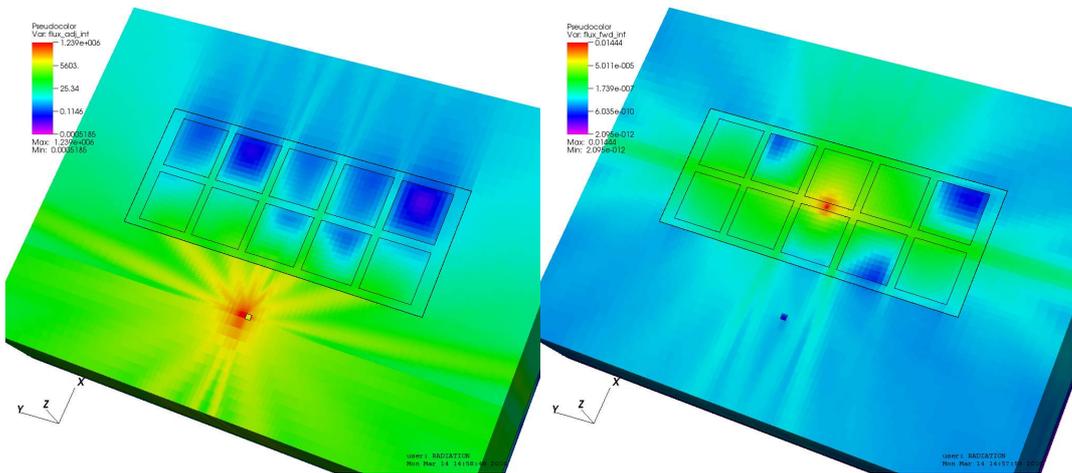


圖 6.2-7、Forward 通量分布圖(左)和 Adjoint 通量分布圖(右)在 Z=182.88 公分位置

表 6.2-4、射源取樣機率分布函數

Energy (keV)	Unbiased prob.	Biased prob.	biased/unbiased
4.62	6.23E-02	6.40E-07	1.027E-05
30.63	1.26E-01	1.30E-06	1.027E-05
30.97	2.34E-01	2.40E-06	1.027E-05
34.95	8.45E-02	8.68E-07	1.027E-05
53.16	7.80E-03	2.69E-03	0.345
79.61	9.66E-03	3.33E-03	0.345
81.00	1.20E-01	4.14E-02	0.345
160.61	2.33E-03	3.26E-03	1.398
223.24	1.64E-03	3.37E-03	2.508
276.40	2.61E-02	5.37E-02	2.508
302.85	6.68E-02	1.83E-01	2.741
356.01	2.26E-01	6.20E-01	2.741
383.85	3.26E-02	8.93E-02	2.741

表 6.2-5、貨櫃監測儀案例程式執行時間

Executing time (min)	ADVANTG			MCNP	Total
	Forward S <sub>N</sub>	Adjoint S <sub>N</sub>	Total S <sub>N</sub>		
MCNP	X	X	X	720	720
ADVANTG (FW-CADIS)	7.47	4.42	12.17	720	732

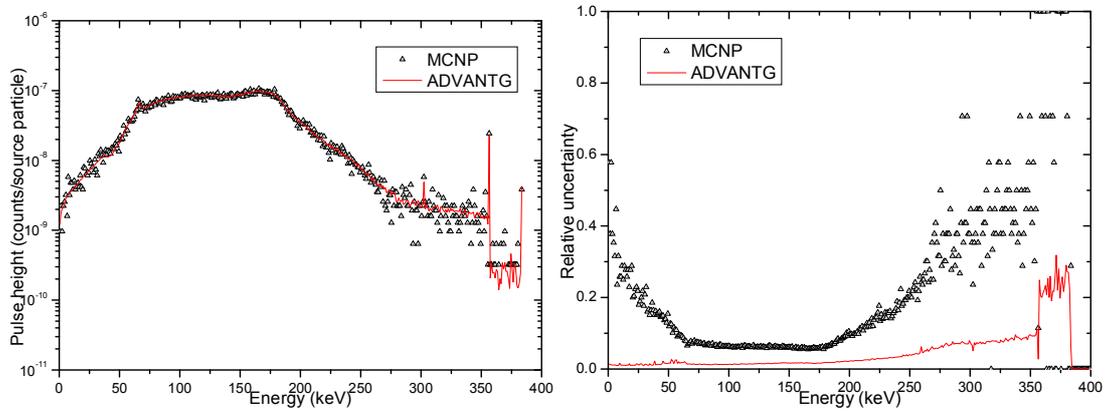


圖 6.2-8、貨櫃監測儀案例模擬能譜分布結果(左)和各能群分布相對誤差(右)

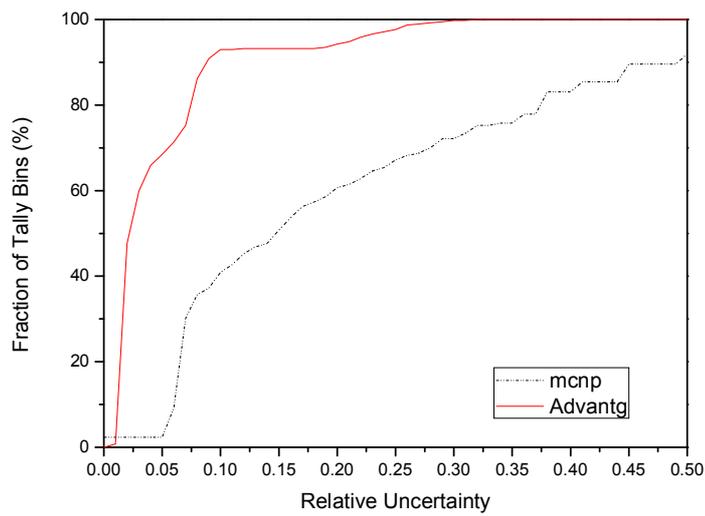


圖 6.2-9、貨櫃監測儀案例各能群誤差小於特定誤差值比例

表 6.2-6、搭配 ADVANTG 和單獨使用 MCNP 條件模擬結果差異分布

Difference level	Fraction of bins within (%)	Normal distribution (%)
<1 $\sigma$	68.23	68.27
<2 $\sigma$	93.23	95.45
<3 $\sigma$	96.88	99.73
<4 $\sigma$	100.00	99.99

### 6.2.3. 日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽

JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)為日本第一個研究用沸水式反應器，輸出功率為 90 MWt，從 1963 年臨界運轉至 1976 年，總輸出能量為 21,500 MWD<sup>17</sup>。JPDR 具有多個運轉目的：演練核能發電過程、進行核子燃料輻射測試、和核反應器特性相關研究等，作為將核能電廠商用化前的資料收集和經驗累積的平台。自 1981 年開始進行 JPDR 的除役作業，直至 1990 年代中期才完全除役。

討論 JPDR 的輻射粒子分布問題，作為 ADVANTG 的驗證案例，建構簡化的反應器幾何，將爐心簡化為一均勻分布之圓柱狀中子射源，圖 6.2-10 左圖為 MCNP 幾何示意圖。應用 FW-CADIS 理論，對大範圍的網格劑量分布(Mesh tally)計算作有效加速。

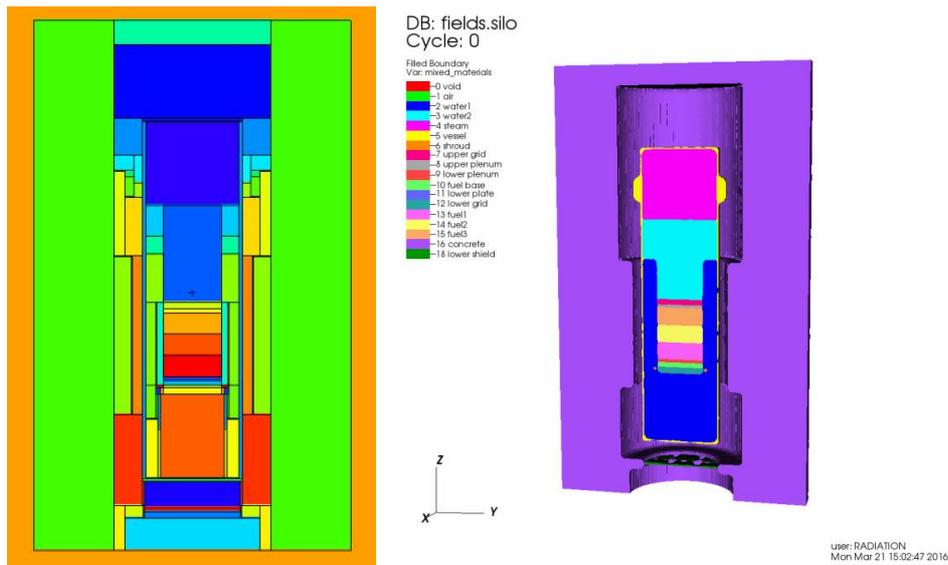


圖 6.2-10、JPDR 案例幾何示意圖，MCNP 幾何(左)和分隔座標幾何(右)

圖 6.2-10 右圖為分隔作標法幾何模型，將幾何均勻切割為邊長 8.5 公分的立方體，共分隔成 992,016 個格點(X：84、Y：84、Z：145)。將格點計分設為伴隨射源，ADVANTG 計算結果如圖 6.2-11 所示，左圖為第一次近似計算粒子分布結果，右圖第二次伴隨粒子分布結果，以此產生降低變異係數參數對蒙地卡羅模擬作加速。兩案例計算時間如表 6.2-7 所示，因此問題格點切割多且幾何較複雜，故決定論法計算時間較長，ADVANTG 執行時間約 150 分鐘，再進行 720 分鐘的 MCNP 模擬與單獨使用 MCNP 案例作比較。

表 6.2-8 為徑向射源取樣機率前後比較表，發現在靠近爐心外層的取樣權重較高，此原因為靠近爐心外層的射源對整體輻射粒子分布影響較大，故增加其權重使得模擬效率提高。表 6.2-9 為縱向射源取樣機率前後比較表，發現在射源頂部和底部取樣機率較高。新的射源能譜將會加重高能粒子的取樣權重，此三種射源取樣方式都是為了迫使粒子能夠有更高的機率跑出爐心，進而能夠得到誤差相對一致的全反應器格點計分結果。

圖 6.2-12、圖 6.2-13 分別為單獨使用 MCNP 案例和搭配 ADVANTG 案例的格點計分結果及其相對誤差。由圖 6.2-14 及表 6.2-10 來比較兩案例格點計分結果差異，單獨使用 MCNP 案例，其格點計分結果誤差小於 15%，僅佔不到全體的 4%，而搭配 ADVANTG 案例，則能佔全體的 76%，經結果比較，顯示搭配 ADVANTG 對 MCNP 模擬作加速，的確能有效改善蒙地卡羅法模擬效率。

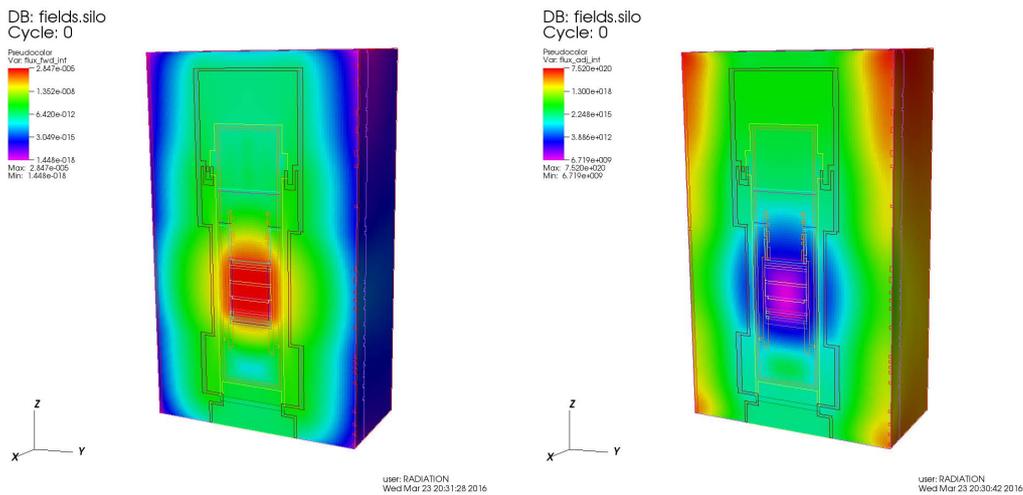


圖 6.2-11、Forward 通量分布圖(左)和 Adjoint 通量分布圖(右)

表 6.2-7、JPDR 案例程式執行時間

Executing time (min)	ADVANTG			MCNP	Total
	Forward S <sub>N</sub>	Adjoint S <sub>N</sub>	Total S <sub>N</sub>		
MCNP	X	X	X	720	720
ADVANTG (FW-CADIS)	73.6	75.3	153.2	720	873

表 6.2-8、JPDR 案例徑向取樣隨射源半徑變化機率分布函數

Outer radius (cm)	Unbiased prob.	Biased prob.	Ratio(biased/unbiased)
6.479	0.018	0.001	0.065
12.958	0.036	0.004	0.105
19.437	0.055	0.008	0.141
25.916	0.073	0.014	0.191
32.395	0.091	0.024	0.262
38.874	0.109	0.042	0.389
45.353	0.127	0.077	0.602
51.832	0.145	0.139	0.953
58.311	0.164	0.245	1.495
64.79	0.182	0.447	2.460

表 6.2-9、JPDR 案例縱向取樣隨爐心高度變化機率分布函數

Center height (cm)	Unbiased prob.	Biased prob.	Ratio(biased/unbiased)
7.34	0.100	0.120	1.197
22.01	0.100	0.092	0.920
36.68	0.100	0.077	0.768
51.35	0.100	0.069	0.693
66.02	0.100	0.069	0.685
80.69	0.100	0.073	0.728
95.36	0.100	0.083	0.831
110.03	0.100	0.102	1.021
124.70	0.100	0.133	1.328
139.37	0.100	0.183	1.830



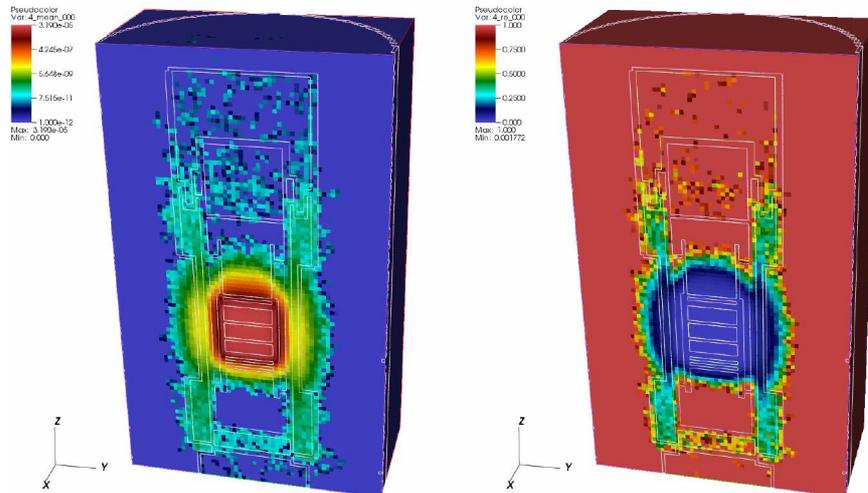


圖 6.2-12、JPDR 案例單獨使用 MCNP 條件格點計分結果及其相對誤差<sup>6</sup>

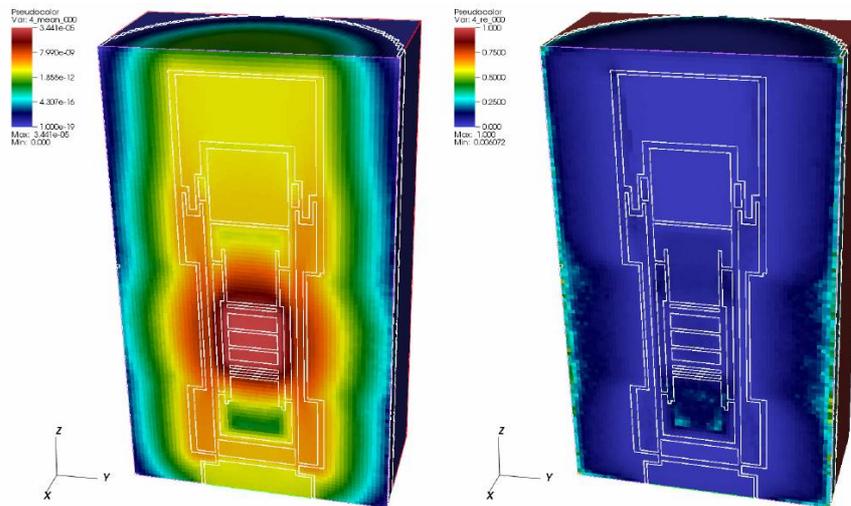


圖 6.2-13、JPDR 案例搭配 ADVANTG 條件格點計分結果及其相對誤差<sup>6</sup>

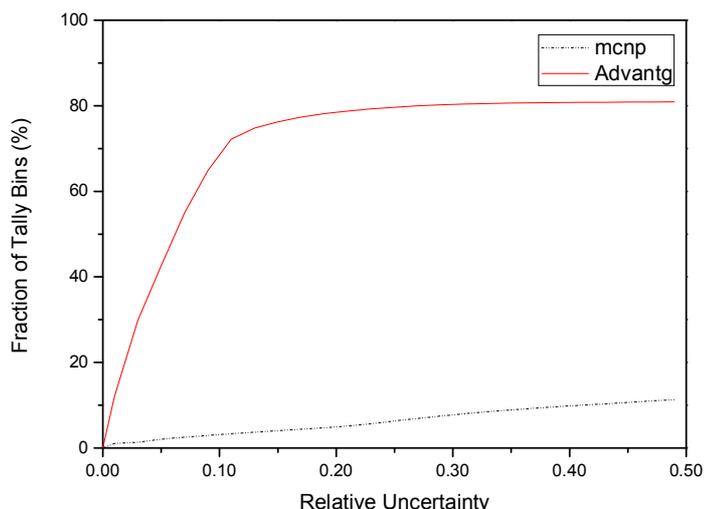


圖 6.2-14、JPDR 案例各格點計分誤差小於特定誤差值比例

表 6.2-10、JPDR 案例各格點計分誤差小於特定誤差值比例

Relative error	$\leq 5\%$	$\leq 10\%$	$\leq 15\%$
MCNP	1.74%	2.94%	3.87%
ADVANTG	35.45%	64.82%	75.57%

#### 6.2.4. 探井探勘案例

以一探井研究的岩石密度探測工具的簡單模型為例<sup>18</sup>，驗證 CADIS 理論的應用：一直徑 20 cm 的水柱內含一直徑 10 cm 工具（鐵）包圍在大範圍的碳酸鈣內，工具裡有一等向性的點射源 Cs<sup>137</sup>，強度為  $10^{11}$  photons/s (661.7 keV)，現有兩個 NaI 偵檢器，一個位於射源上 20 cm 處(near)，另一個位於射源上 40 cm 處(far)，此例主要於計算兩個偵檢器內的光子通量率。

以 ADVANTG 搭配 MCNP 程式作計算，結果以三種形式作討論：不套用 CADIS 理論之模擬、套用 CADIS 理論之模擬(CADIS-on)、及套用 FW-CADIS 理論之模擬(FW-CADIS)比較其理論應運對結果的影響，並就同一案例和 MAVRIC/SCALE 作比較，圖 6.2-15 為兩程式幾何示意圖。CADIS 理論中決定論法的格點切割共分隔為 124,313 個格點(X：49、Y：43、Z：59)，格點較集中於通量率變化較大的區域如：射源項、偵檢器、及工具本身，增進決定論法答案的準確性，進而使蒙地卡羅模擬的結果更佳。

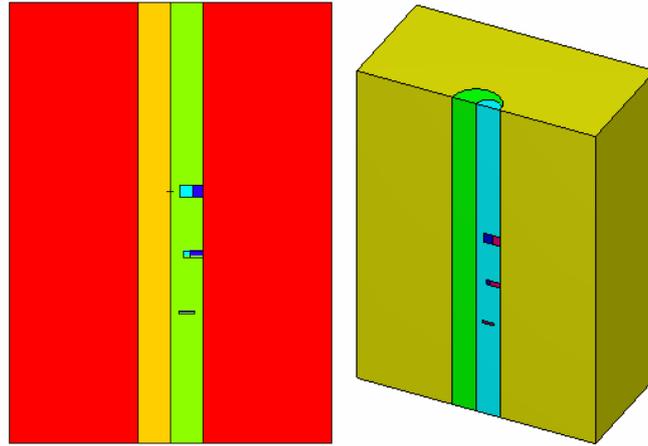


圖 6.2-15 探井研究案例幾何示意圖，MCNP(左)和 MAVRIC(右)

表 6.2-11、ADVANTG 搭配 MCNP 區域偵檢器計分結果

ADVANTG + MCNP	Time (min)			Near detector			Far detector		
	For S <sub>N</sub>	Adj S <sub>N</sub>	MC	Flux (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Error (%)	FOM	Flux (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Error (%)	FOM
MCNP	X	X	30	4.75	100	0	15.47	100	0
CADIS-near	X	3.39	26	38.90	0.95	374	X	X	X
CADIS-far	X	3.39	27	X	X	X	1.80	1.19	231
FW-CADIS	1.80	3.47	25	38.34	1.15	248	1.77	0.82	488

註：MCNP：預設不套用變異數降低技術的模擬、CADIS-near：套用 CADIS 理論之模擬，伴隨射源設定在 near detector、CADIS-far：套用 CADIS 理論之模擬伴，隨射源設定在 far detector、FW-CADIS：套用 FW-CADIS 理論之模擬。

表 6.2-12、MAVRIC 區域偵檢器計分結果

MAVRIC	Time (min)			Near detector			Far detector		
	For S <sub>N</sub>	Adj S <sub>N</sub>	MC	Flux (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Error (%)	FOM	Flux (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Error (%)	FOM
Monaco	X	X	30	49.86	100	0	X	X	X
CADIS-near	X	2.56	29	35.80	0.732	593	X	X	X
CADIS-far	X	2.56	29	4.19	80.23	0.0528	1.78	0.632	782
FW-CADIS	1.51	2.56	28	35.38	1.17	227	1.76	0.953	343

以總計算時間 30 分鐘為條件，ADVANTG 搭配 MCNP 程式區域偵檢器計分結果如表 6.2-11 所示，單獨使用 MCNP 案例的計算效率十分不理想，在兩個偵檢器位置皆無法得到一個可靠的答案；而搭配 ADVANTG 的答案誤差比例皆低於 1.5%，且有好的計算效率表現。套用 CADIS 理論，若僅定義單一伴隨射源區域，只會在具有定義的偵檢器有好的答案，但在另一偵檢器的表現將會是十分不理想的；套用 FW-CADIS 理論，同時定義兩偵檢器為伴隨射源，雖在單一偵檢器計算效率可能會略差於僅定義一伴隨射源的形式，但其在兩個偵檢器皆能獲得好的答案值。在實際的情況下，因距離射源項的遠近關係，追蹤粒子會有較大的比例往近的偵檢器前進，故近的偵檢器數值會比遠的偵檢器數值更容易收斂，因此在未套用 FW-CADIS 的形式下，近的偵檢器答案較遠的偵檢器答案會有更小的誤差範圍且有更高的計算效率，在更複雜的案例其差距將會十分明顯。套用 FW-CADIS 理論將會改善追蹤粒子密度分布不均的情況，使能在一次的計算內，皆能使各目標區的答案有相近可接受的誤差範圍。

表 6.2-12 為 MAVRIC 程式對同一問題在同樣計算時間條件下的區域偵檢器計分結果。是否套用 CADIS 理論，兩程式在粒子通量結果表現一致，有套用理論的在設定偵檢器能得到一可靠的答案，而在另一偵檢器表現會非常差；套用 FW-CADIS 理論能使兩偵檢器皆能得到有效答案值。以套用 FW-CADIS 理論條件討論兩程式差異，在 Denovo 決定論法運算上，ADVANTG 程式所耗時間較長，故在初始設定上還是有所差異，目前已確定格點切割方式、理論方法、及應用截面相同，往後將對此部分設定作更深入探討。在近的偵檢器粒子通量結果兩程式約有 8 % 的差異，而在遠的偵檢器粒子通量結果兩程式約有 0.5 % 的差異，此主要原因為 MCNP 和 Monaco 程式的差別，MCNP 為採連續能量作用截面作蒙地卡羅模擬，其結果會較 Monaco 採能群作用截面具有可信度。

#### 6.2.5. 驗證案例文獻計算結果

本章節內容為三個驗證案例之文獻計算結果，(1) Ueki 的輻射屏蔽衰減係數的量測實驗；(2) Wagner 的貨櫃監測儀案例；以及(3)日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽。

##### (1) Ueki 的輻射屏蔽衰減係數的量測實驗

圖 6.2-16 和圖 6.2-17 各別為 Ueki 量測實驗案例文獻區域偵檢器計分和點偵檢器計算結果，可與 6.2.1 節之表 6.2-2 和表 6.2-3 作驗證，過程中程式模擬設定皆相同。可以用上述圖表結果的 FOM 值來量化 ADVANTG 對 MCNP 程式的加

速效益。

Graphite thickness (cm)	MCNP		ADVANTG	
	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM
0	454 $\pm$ 8%	25	495 $\pm$ 2.2%	376
2	449 $\pm$ 8%	26	438 $\pm$ 1.4%	853
5	359 $\pm$ 9%	20	370 $\pm$ 1.0%	1831
10	245 $\pm$ 10%	16	270 $\pm$ 0.8%	2854
15	182 $\pm$ 12%	11	189 $\pm$ 0.8%	3065
20	133 $\pm$ 14%	8	132 $\pm$ 0.8%	2970
25	89 $\pm$ 17%	6	89 $\pm$ 0.8%	2740
30	56 $\pm$ 20%	4	59 $\pm$ 0.9%	2292
35	45 $\pm$ 23%	3	40 $\pm$ 0.9%	1922

圖 6.2-16、Ueki 案例區域偵檢器計分文獻結果 (f4 tally)<sup>6</sup>

Graphite thickness (cm)	MCNP		ADVANTG	
	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM	Dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FOM
0	505 $\pm$ 0.1%	115741	504 $\pm$ 0.03%	1949318
2	442 $\pm$ 0.3%	17343	441 $\pm$ 0.04%	1105217
5	372 $\pm$ 0.5%	7234	371 $\pm$ 0.07%	358877
10	269 $\pm$ 0.7%	3604	271 $\pm$ 0.11%	143522
15	193 $\pm$ 0.9%	2202	192 $\pm$ 0.16%	67349
20	132 $\pm$ 1.0%	1483	132 $\pm$ 0.19%	47528
25	89 $\pm$ 1.3%	986	90 $\pm$ 0.22%	35328
30	59 $\pm$ 1.6%	668	60 $\pm$ 0.26%	25073
35	40 $\pm$ 1.9%	467	40 $\pm$ 0.33%	15595

圖 6.2-17、Ueki 案例點偵檢器計分文獻結果 (f5 tally)<sup>6</sup>

## (2) Wagner 的貨櫃監測儀案例

圖 6.2-18 和圖 6.2-19 為貨櫃監測儀案例模擬能譜分布和各能群相對誤差文獻結果，對應 6.2.2 節之圖 6.2-8。圖 6.2-20 為各能群誤差小於特定誤差值比例文獻結果，對應圖 6.2-9。以各能群誤差小於特定誤差值圖表示有無搭配 ADVANTG 對模擬的影響。

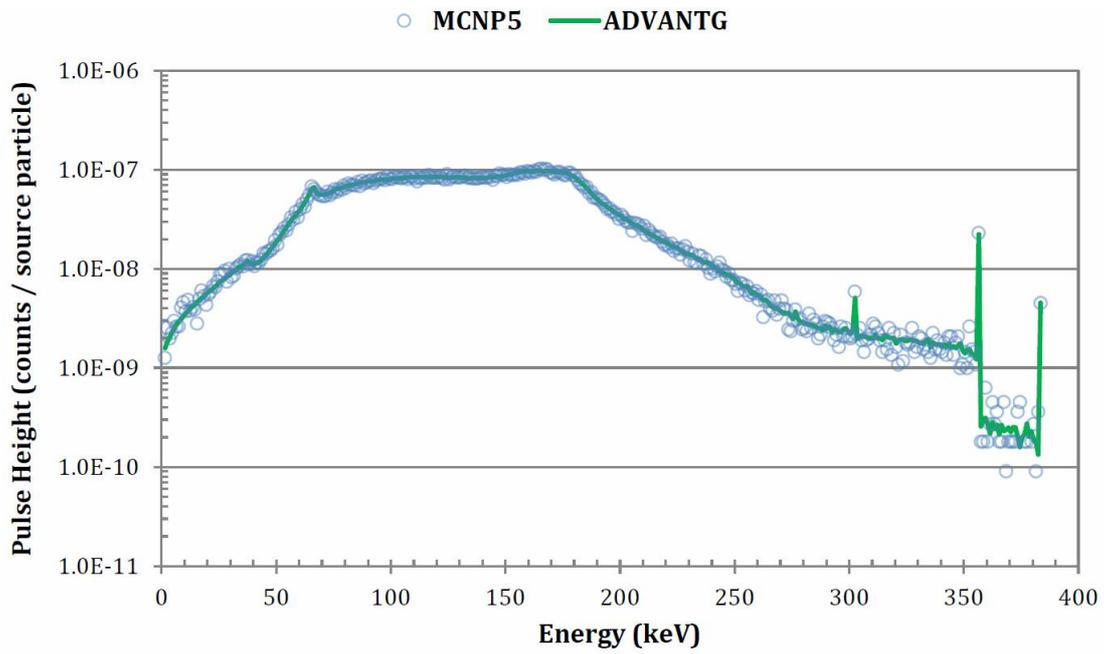


圖 6.2-18、貨櫃監測儀案例模擬能譜分布文獻結果<sup>6</sup>

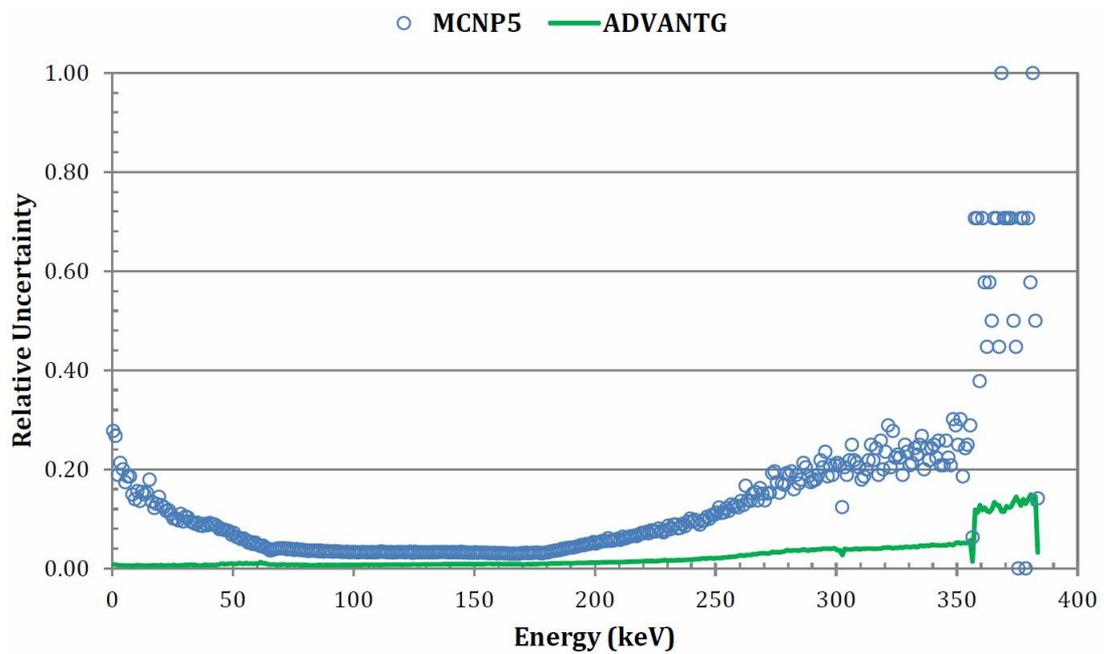


圖 6.2-19、貨櫃監測儀案例各能群分布相對誤差文獻結果<sup>6</sup>

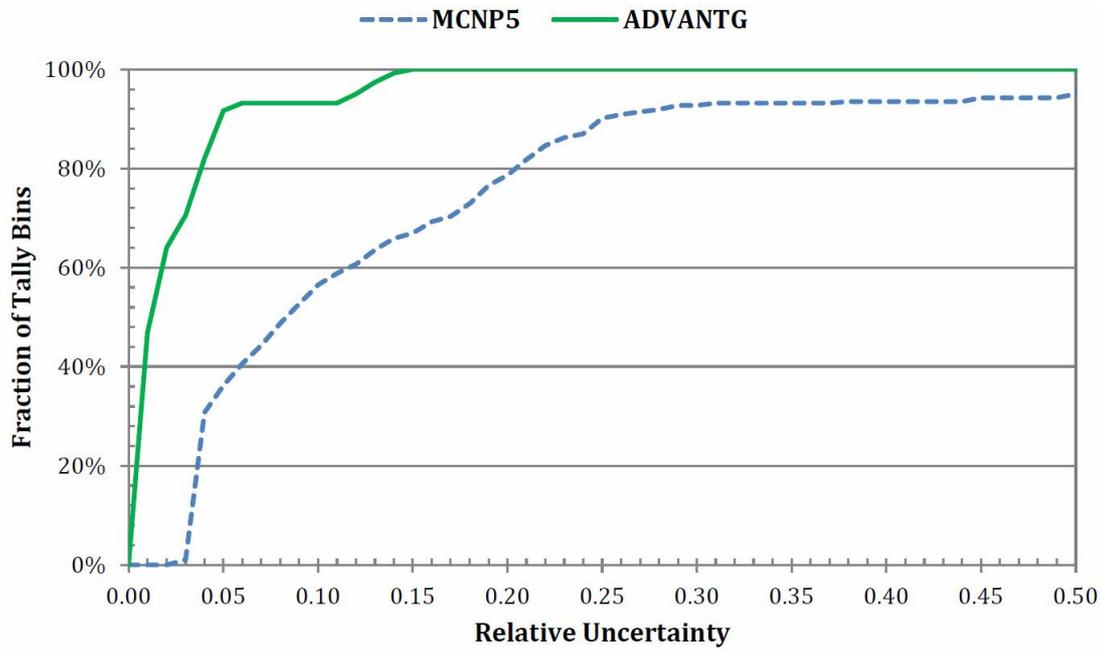


圖 6.2-20、貨櫃監測儀案例各能群誤差小於特定誤差值比例文獻結果<sup>6</sup>

### (3) 日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽

圖 6.2-21 為 JPDR 案例各格點計分誤差小於特定誤差值比例文獻結果，對應圖 6.2-14。以各格點計分小於特定誤差值圖表示搭配 ADVANTG 對模擬的加速影響。

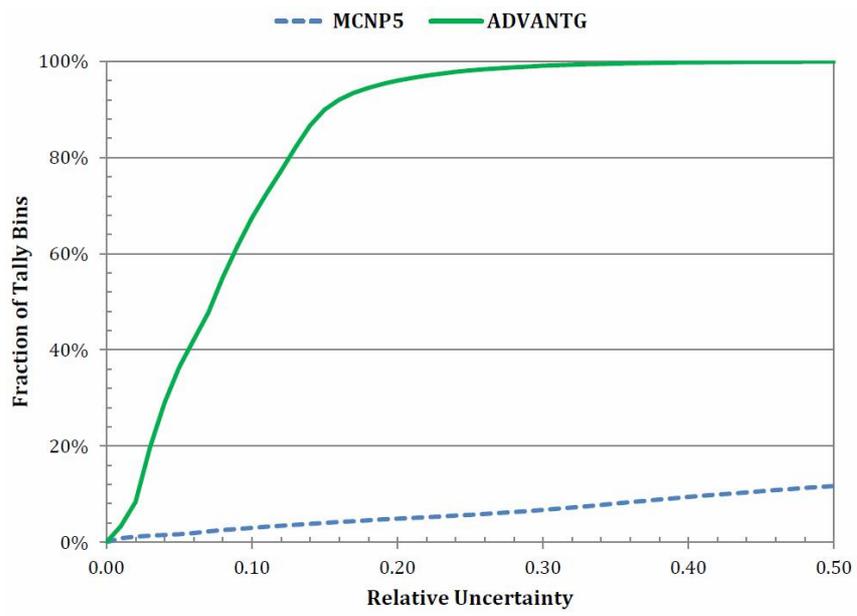


圖 6.2-21、JPDR 案例各格點計分誤差小於特定誤差值比例文獻結果<sup>6</sup>

### 6.3. 以核一乾式貯存設施為測試案例

核一乾式貯存設施測試案例，在此針對熱測試 TSC01 護箱做討論。以三種具代表性的蒙地卡羅程式(MCNP、MAVRIC、ADVANTG/MCNP)對護箱屏蔽模型作詳盡的表面劑量分析並比較其計算效率和評估結果的準確度。

核一乾式貯存設施，為核能研究所(INER)以技術轉移方式承接，由美國 NAC-UMS 護箱考慮核一廠之情況與限制，進行設計改良成 INER-HPS 護箱。核一乾式貯存設施預計放置 30 組護箱，台電公司承諾以廠界個人年有效劑量 0.05 mSv 為限值，為現行法規規範之五分之一，採對原 NAC-UMS 護箱外加屏蔽(Add-On Shield, AOS)作改善。每組護箱可裝載 56 束用過核子燃料，其設計基準用過核子燃料束條件為最大燃耗度 36,000 MWD/MTU， $U^{235}$  之初始平均濃縮度 1.9~3.25 wt%，需經濕式貯存 10 年，此條件下護箱內部熱負載不得高於 14 kW。

#### 6.3.1. 核一乾貯護箱屏蔽計算模型

核一乾貯試運轉計畫預計裝填 112 束用過核子燃料，熱測試 TSC01 護箱為其中之一(未含外加屏蔽)，其燃料束實際裝載佈局如圖 6.3-1 所示，總衰變熱約為 4 kW。TSC01 護箱幾何示意圖如圖 6.3-2 左所示，外觀為一圓柱體(高 5.7 m，直徑 3.4 m)，主要分兩部分：不鏽鋼材質的密封鋼筒(Canister)和具有碳鋼內襯及混凝土材質的混凝土護箱(Concrete)，參考安全分析報告作法將密封鋼筒內部依用過核子燃料束特性均勻化為四區，上端版區(Upper End Fitting, UEF)、充氣區(Plenum)、有效燃料區(Effective Fuel)、下端版區(Lower End Fitting, LEF)，如圖 6.3-2 右所示。

TSC01 護箱用過核子燃料射源項部分，考慮實際裝填之 56 束燃料束個別的運轉情形，以 TRITON/SCALE 程式作燃耗運算模擬，得到個別燃料束之射源強度、能譜和軸向分布，在此為簡化問題，射源項定義皆以 56 束燃料束之平均情況作探討。用過核子燃料射源項可劃分為三類：燃料中子(Fuel Neutron, FN)、燃料光子(Fuel Gamma, FG)和結構光子(Hardware Gamma, HG)，其能譜和軸向分布如圖 6.3-3 至 6.3-8 所示，燃料中子射源絕大部分來自鈾系元素的自發性分裂或其進行阿伐衰變後的( $\alpha, n$ )反應；燃料光子射源為分裂產物和鈾系元素進行加馬衰變；結構光子射源來自不鏽鋼活化後產生之  $Co^{60}$ ，因燃料束在運轉過程中受中子照射而活化，保守估計每 kg SS304 不銹鋼內會含有 1.2 g 的  $Co^{59}$  雜質，此非為實際的濃度為一保守值，結構光子射源強度為 1 kg 的不鏽鋼射源強度乘以各區不鏽鋼含量，再乘以各區的區域通量比例。三種射源項射源強度如表 6.3-1 所示。

A	B	C	D	E	F	G	H	I
		LJ1099 48.2W	LJ1109 50.6W	LJ1092 50.7W	LJ1086 50.0W	LJ1149 48.2W		
	LJ1181 54.6W	LJ1420 61.5W	LJ1186 62.9W	LJ1281 64.6W	LJ1412 61.7W	LJ1490 61.6W	LJ1111 54.1W	
	LJ1355 54.6W	LJ1202 66.4W	LJC934 101.1W	LJC892 109.1W	LJC899 106.2W	LJ1321 65.8W	LJ1331 55.5W	
LJ1090 44.6W	LJ1489 60.9W	LJ1172 67.2W	LJC927 116.0W	LJC887 122.6W	LJC933 111.2W	LJ1394 68.6W	LJ1356 56.8W	LJ1115 43.9W
LJ1096 43.9W	LJ1421 58.6W	LJ1171 66.8W	LJC816 117.7W	LJC861 120.3W	LJC902 120.2W	LJ1389 68.4W	LJ1273 56.4W	LJ1098 44.0W
	LJ1097 56.1W	LJ1155 65.3W	LJC886 108.3W	LJC900 110.4W	LJC928 98.3W	LJ1380 66.5W	LJ1444 51.1W	
	LJ1443 53.1W	LJ1221 61.7W	LJ1232 61.7W	LJ1456 62.9W	LJ1468 62.9W	LJ1301 61.5W	LJ1212 51.2W	
		LJ1093 48.7W	LJ1151 50.0W	LJ1192 50.8W	LJ1094 49.9W	LJ1101 49.0W		

圖 6.3-1、熱測試 TSC01 護箱 56 束用過核子燃料束實際布局圖

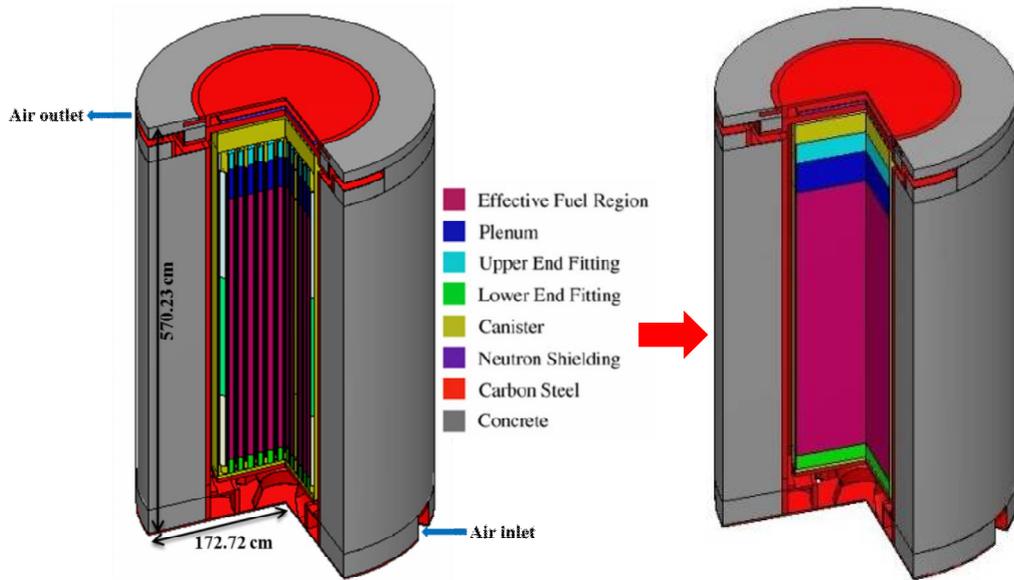


圖 6.3-2、TSC01 護箱幾何示意圖，左為詳細結構、右為均勻化之密封鋼筒

表 6.3-1、TSC01 護箱用過核子燃料射源強度

Source Strength (1/s)		TSC01 Cask (56 fuels)
Fuel Neutron		$2.526 \times 10^{08}$
Fuel Gamma		$1.611 \times 10^{16}$
Hardware Gamma	LEF	$6.078 \times 10^{12}$
	Effective Fuel	$2.768 \times 10^{12}$
	Plenum	$3.354 \times 10^{12}$
	UEF	$2.147 \times 10^{12}$

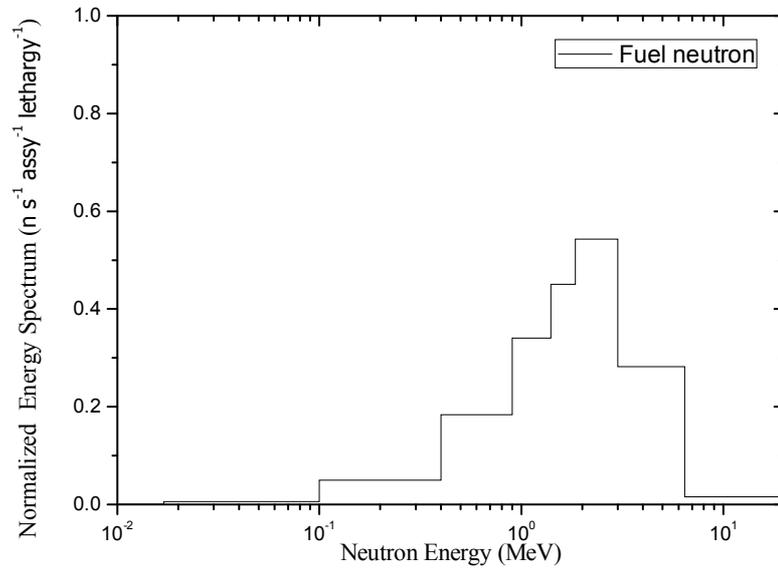


圖 6.3-3、TSC01 護箱燃料中子射源項平均能譜

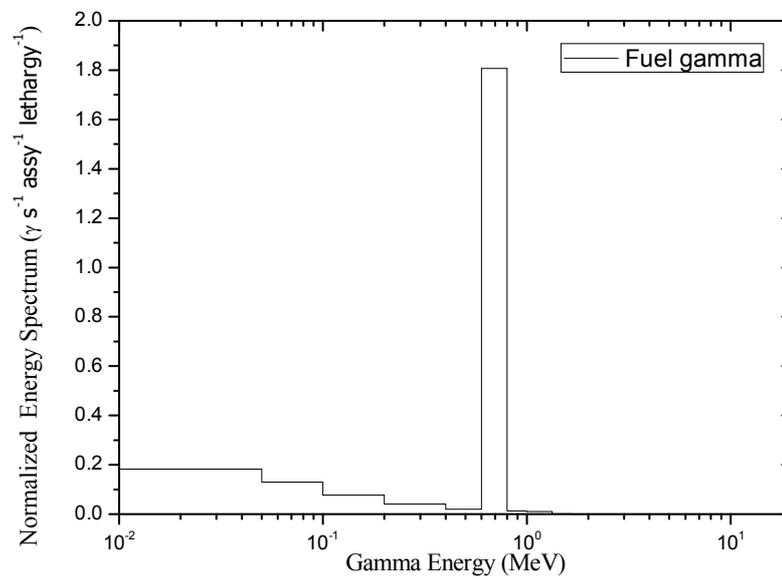


圖 6.3-4、TSC01 護箱燃料光子射源項平均能譜

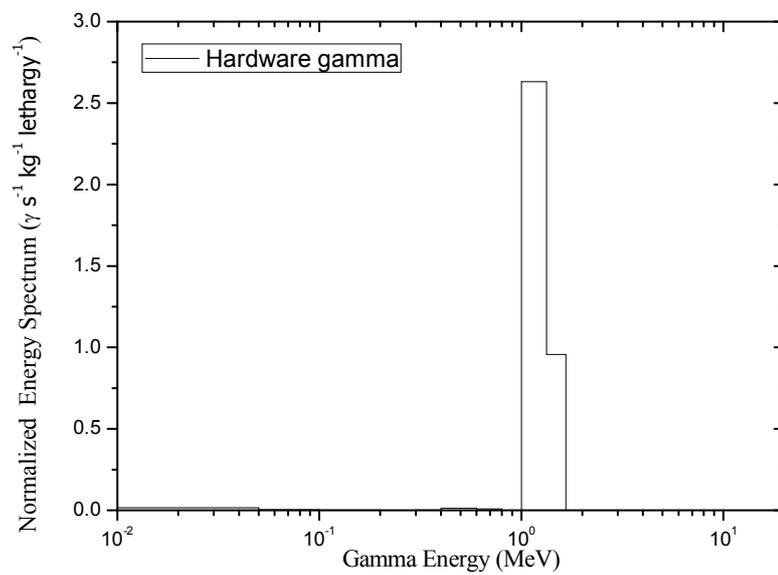


圖 6.3-5、TSC01 護箱結構光子射源項平均能譜圖

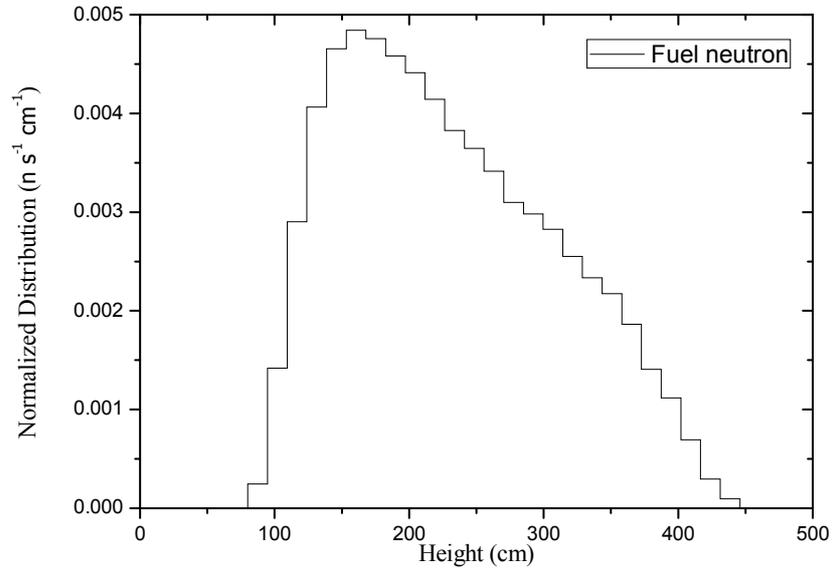


圖 6.3-6、TSC01 護箱燃料中子射源項平均軸項分布

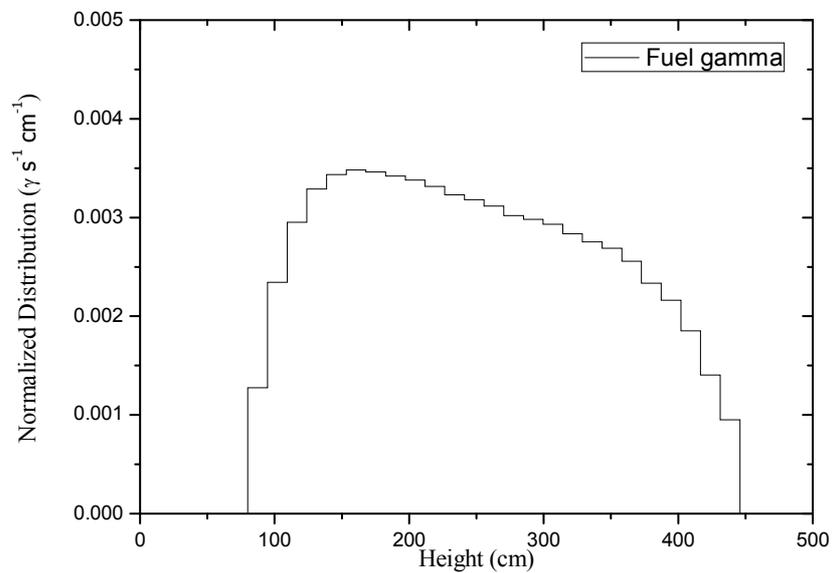


圖 6.3-7、TSC01 護箱燃料光子射源項平均軸項分布

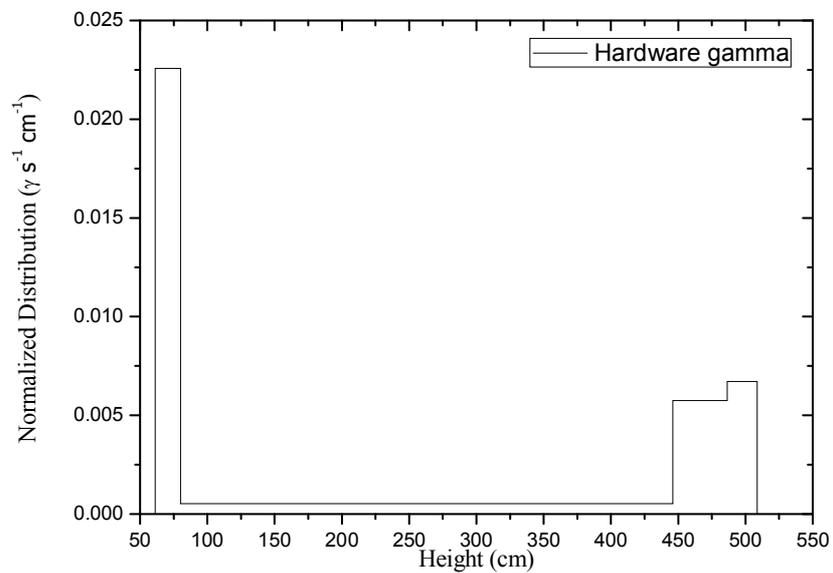


圖 6.3-8、TSC01 護箱結構光子射源項平均軸項分布

### 6.3.2. 核一乾貯護箱屏蔽計算比較

以三種蒙地卡羅程式，其版本資訊和程式間差異如表 4.1 和表 6.1-2 所述，各程式在同樣的電腦環境下，考慮相同的護箱幾何模型(圖 6.3-9)、材料設定和射源定義作護箱表面劑量評估計算。其中，MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 兩程式皆應用 FW-CADIS 理論，其決定論計算參數設定相同，將一圍繞護箱表面之小區域設為伴隨射源，因主要目標為評估護箱表面劑量，希望能迫使模擬粒子往表面計分區域移動。將幾何空間切割成 156,240 個格點(X：72、Y：70、Z：31)作 Forward  $S_N$  和 Adjoint  $S_N$  計算，集中於燃料束、密封鋼筒、混凝土護箱進出氣孔等粒子遷移變化較劇烈的地區。

核一乾貯護箱屏蔽案例包含三種分析方法和三種用過核子燃料射源項共需個別進行 9 次模擬來完成此計算比較，皆操作於個人電腦裝載 Window 7 作業系統配置 3.4 GHz CPU 和 16 GB 記憶體。各程式個別射源案例皆控制於約一天的計算時間，詳細計算時間如表 6.3-2 所示，其中套用 FW-CADIS 理論的 MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 程式在加馬射源部分需耗費約 8 分鐘進行兩次  $S_N$  計算，在需同時考慮中子和二次光子的中子射源部分則需耗時約 30 分鐘。決定論法計算時間長短受格點數所影響，格點切割越詳細耗費在  $S_N$  計算之時間越長，過程需依靠使用者經驗作取捨進而有較佳之計算效率。

表 6.3-3 呈現三種分析方法護箱表面區域偵檢器計分結果，分為側邊跟頂部兩區域，各別定義於護箱側邊 10 cm 處有效燃料區之高度區域和頂部 10 cm 處密封鋼筒所涵蓋區域。燃料中子射源項部分，單 MCNP 案例，不外加其他使用者設定之降低變異係數技巧，已有可接受的計算結果和效率，各答案之統計誤差值皆在 3 % 以下。ADVANTG/MCNP 結果和單 MCNP 結果一致，因應用了 FW-CADIS 理論，對模擬計算之效率皆有優化，特別是在兩中子計分部分，FOM 值約優化 2 倍。同樣套用理論的 MAVRIC，亦同樣對模擬計算有所優化，但其計算結果在側邊中子和加馬劑量及頂部加馬劑量為低估，在頂部中子劑量為高估。MCNP 程式因採用連續能量截面庫作模擬，對比 Monaco 所採用的多群能量截面庫，其結果被認為是更正確可靠之答案，特別是在護箱屏蔽這種深穿透模擬問題。在燃料光子射源項，因其光子能量較低不易穿透護箱的多層屏蔽，單 MCNP 計算無法得到可靠答案值。在結構光子射源項，因光子能量較高約 1.25 MeV，模擬粒子遷移相對容易，故單 MCNP 計算仍有可信任之結果。MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 程式，採用結合決定論法和蒙地卡羅法優點的降低變異係數技巧，的確有效改善低能光子遷移計算困難的問題，明顯提升兩光子射源項之計算效率，特別是在護箱側邊的部分，但 MACRIC 結果皆略高估於 ADVANTG/MCNP 結果。

圖 6.3-10 至圖 6.3-15 為護箱側邊/頂部表面 1 cm 處中子、加馬和總劑量率分布隨高度變化三分析方法結果，大致上三分析方法結果皆有類似的分布曲線。在中子劑量率部分，護箱側邊最大值位於進氣口端；頂部最大值位於密封鋼筒和混凝土護箱間夾層之空氣通道。圖 6.3-10，側邊分布受燃料中子射源項的軸向分布影響，其軸向分布較集中於燃料束的下半部，故護箱下半部劑量率值較高；圖 6.3-13，頂部分布可區分為密封鋼筒和混凝土護箱兩區，密封鋼筒上方多為碳鋼結構對光子影響較甚，混凝土護箱堆中子影響較甚，故密封鋼筒上方中子劑量率大於混凝土護箱上方。在同樣的計算時間內作討論，圖中計算結果之統計誤差大小可視為計算效率好壞之表現，三分析方法在中子劑量率部分皆效果良好，惟單 MCNP 在某些位置仍有較大之統計誤差。採用連續能量截面之 MCNP 結果與多群能量截面 MAVRIC 相比，護箱側邊 MAVRIC 在有效燃料區皆低估約 1.5 倍，惟在進氣孔端為高估，護箱頂部 MAVRIC 皆較為高估。

加馬劑量率部分，護箱側邊呈現一平緩分布，頂部最大值仍位於空氣通道上方。不論是側邊或頂部，MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 結果相近，皆有良好之統計誤差，惟在頂部密封鋼筒上方受碳鋼結構影響統計誤差較大。用過核子燃料三種射源項皆會對加馬劑量率有所貢獻，單 MCNP 結果和另外兩方法比較在某些區域皆有較大的落差，下面將就三射源項在三方法加馬劑量率結果貢獻分布作討論。

圖 6.3-16 至圖 6.3-21 為三方法個別之護箱側邊/頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化。圖 6.3-16 和 6.3-19 顯示單 MCNP 計算無法得到較低能量之燃料光子射源項之貢獻，且在側邊有效燃料高度和頂部密封鋼筒上方結構光子射源項也無法有良好的計算結果，惟燃料中子射源項不是影響。MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 兩方法，皆因應用了有效的降低變異係數技巧，而有良好的計算效率，結果相近，惟在最困難計算的頂部密封鋼筒上方，具有多層碳鋼屏蔽，其結果皆仍有較大的計算統計誤差。

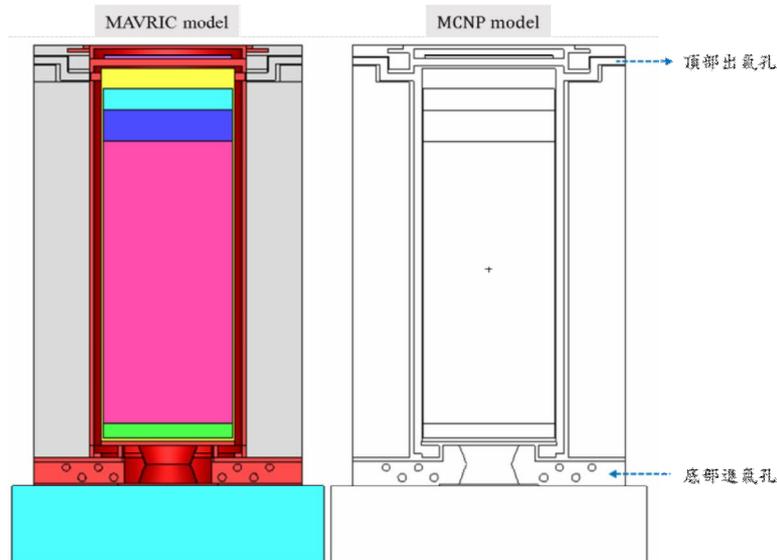


圖 6.3-9、TSC01 護箱屏蔽計算模型，左為 MAVRIC、右為 MCNP

表 6.3-2、TSC01 護箱屏蔽案例三種分析方法計算時間比較

	Source	Forward $S_N$ (min)	Adjoint $S_N$ (min)	Total $S_N$ (min)	MC (hr)	Total (hr)
MCNP	FN	n/a	n/a	n/a	25.00	25.00
	FG	n/a	n/a	n/a	25.00	25.00
	HG	n/a	n/a	n/a	25.00	25.00
MAVRIC	FN	20	14	35	23.75	24.33
	FG	4	3	8	24.52	24.65
	HG	3	3	7	24.78	24.90
ADVANTG + MCNP	FN	17	12	30	24.52	25.02
	FG	3	4	8	24.90	25.02
	HG	3	4	8	24.90	25.03

註：Source: FN(Fuel Neutron)燃料中子、FG(Fuel Gamma)燃料光子、HG(Hardware Gamma)結構光子。MC：Monte Carlo 蒙地卡羅模擬。

表 6.3-3、TSC01 護箱表面區域偵檢器計分結果三分析方法比較

Source	Radiation	MCNP			MAVRIC			ADVANTG + MCNP		
		Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)
FN	Side Neutron	$1.76 \times 10^{-4}$	1.09	5.61	$1.05 \times 10^{-4}$	0.82	10	$1.76 \times 10^{-4}$	0.22	138
	Top Neutron	$2.86 \times 10^{-3}$	1.22	4.48	$4.16 \times 10^{-3}$	0.69	15	$2.85 \times 10^{-3}$	0.80	10
	Side Gamma	$2.66 \times 10^{-4}$	0.18	206	$1.80 \times 10^{-4}$	0.27	96	$2.67 \times 10^{-4}$	0.16	260
	Top Gamma	$7.12 \times 10^{-5}$	1.97	1.72	$5.22 \times 10^{-5}$	1.22	4.74	$7.34 \times 10^{-5}$	1.80	2.06
FG	Side Gamma	$5.53 \times 10^{-19}$	10.63	0.06	$8.62 \times 10^{-3}$	0.14	352	$7.85 \times 10^{-3}$	0.06	1850
	Top Gamma	$1.13 \times 10^{-19}$	70.85	0.001	$2.36 \times 10^{-3}$	5.28	0.243	$1.90 \times 10^{-3}$	2.63	0.963
HG	Side Gamma	$6.48 \times 10^{-4}$	2.19	1.39	$6.41 \times 10^{-4}$	0.12	464	$6.26 \times 10^{-4}$	0.05	2664
	Top Gamma	$1.43 \times 10^{-3}$	5.92	0.19	$1.48 \times 10^{-3}$	3.83	0.459	$1.38 \times 10^{-3}$	3.35	0.593

註：Source: FN(Fuel Neutron)燃料中子、FG(Fuel Gamma)燃料光子、HG(Hardware Gamma)結構光子。模擬的計算效率，以 FOM 值作討論，FOM 的定義如下式 6.3-1，其中 R：相對誤差、T<sub>Simulation</sub>：總模擬計算時間，FOM 值越高代表計算效率越好，反之越差。

[6.3-1]

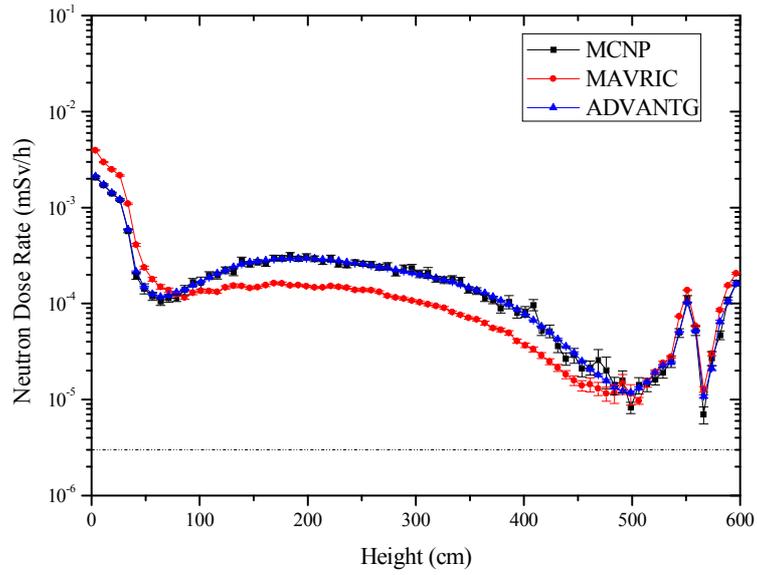


圖 6.3-10、護箱側邊表面 1 cm 處中子劑量率分布隨高度變化

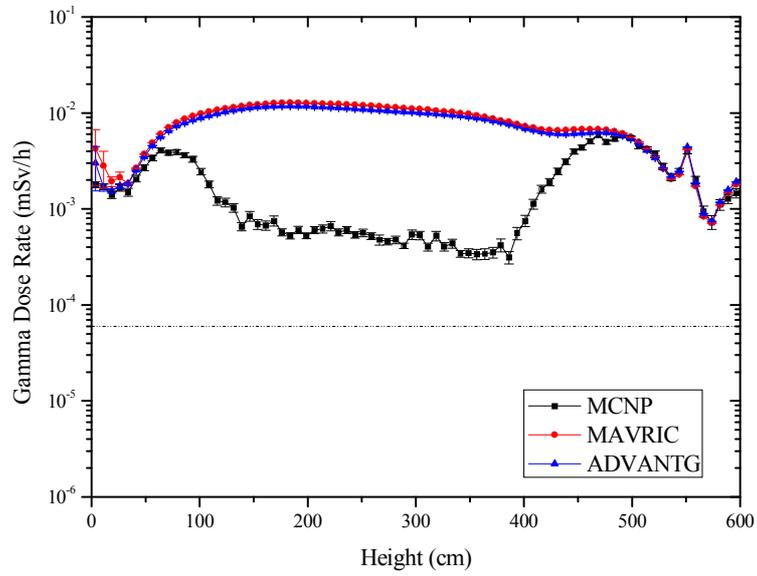


圖 6.3-11、護箱側邊表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化

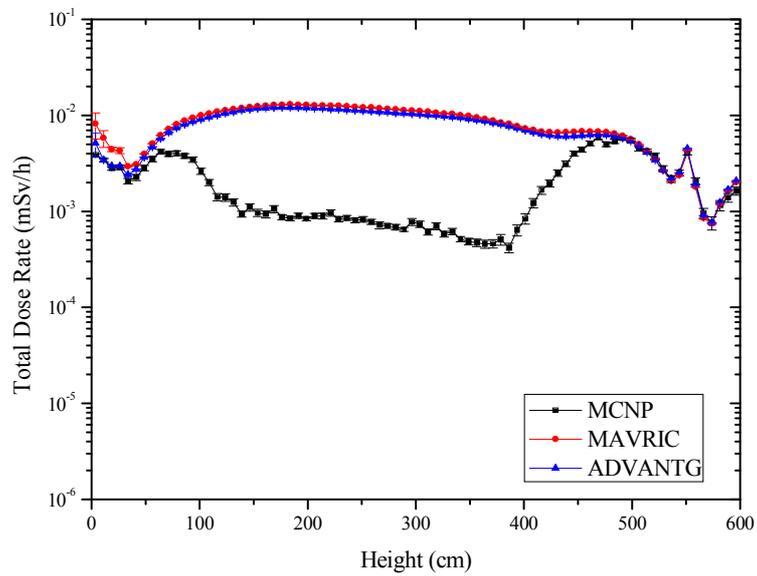


圖 6.3-12、護箱側邊表面 1 cm 處總劑量率分布隨高度變化

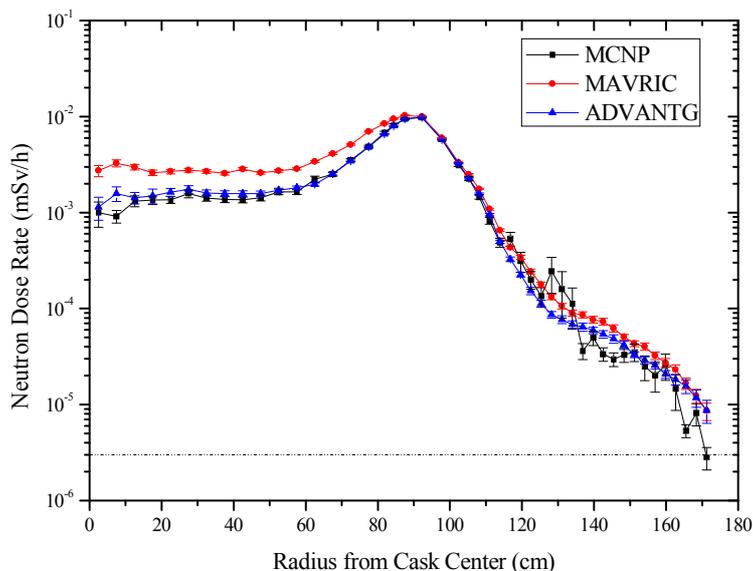


圖 6.3-13、護箱頂部表面 1 cm 處中子劑量率分布隨護箱半徑變化

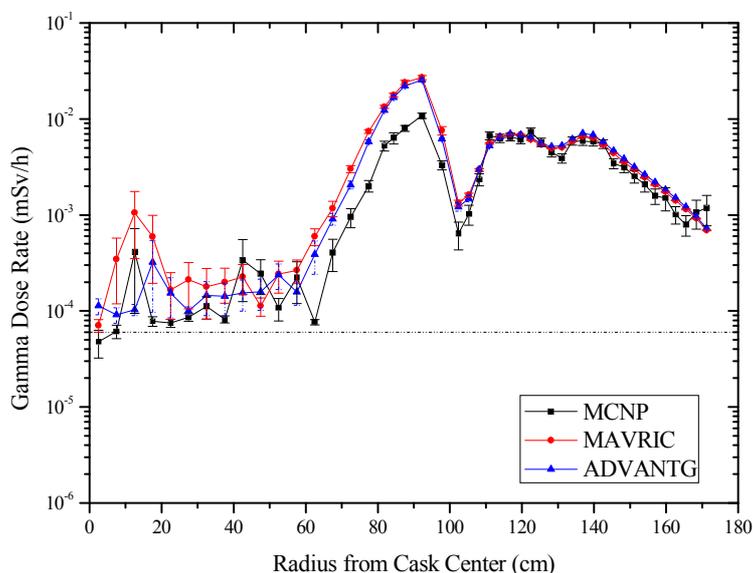


圖 6.3-14、護箱頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨護箱半徑變化

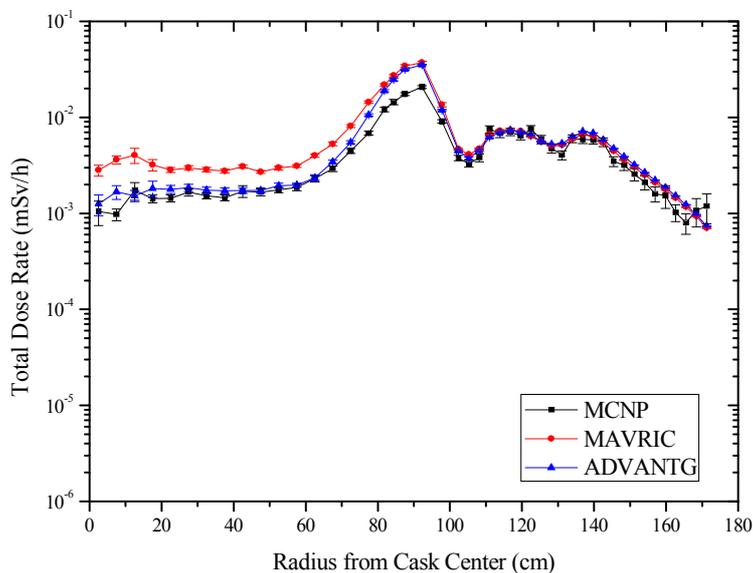


圖 6.3-15、護箱頂部表面 1 cm 處總劑量率分布隨護箱半徑變化

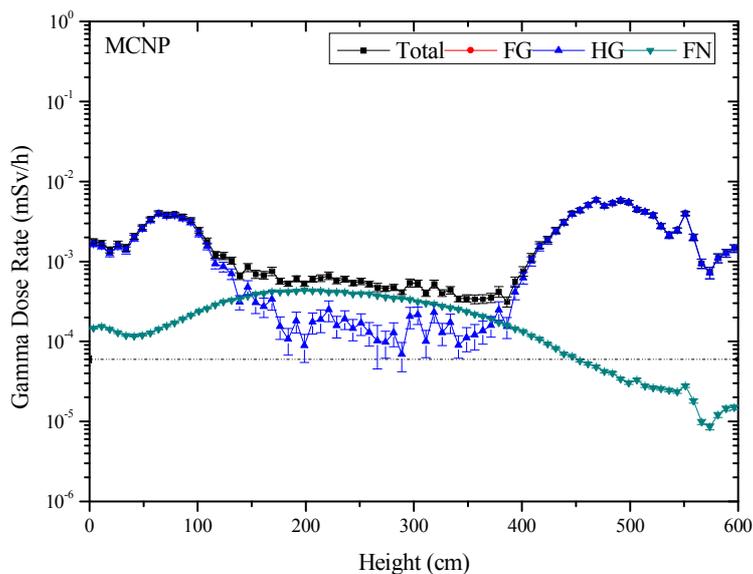


圖 6.3-16、MCNP，護箱側邊表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化

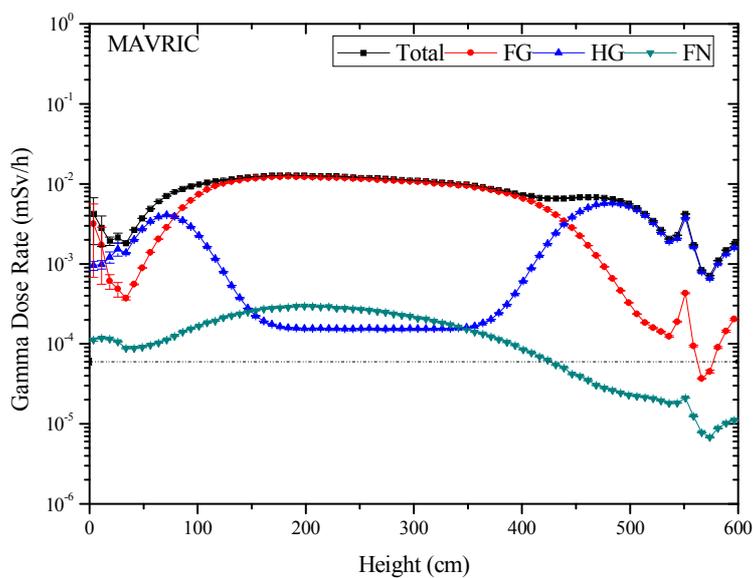


圖 6.3-17、MAVRIC，護箱側邊表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化

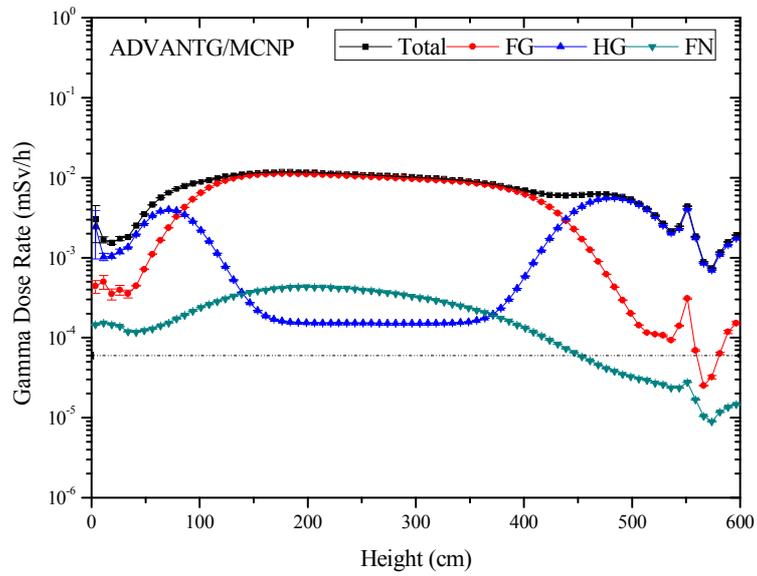


圖 6.3-18、ADVANTG/MCNP，護箱側邊表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化

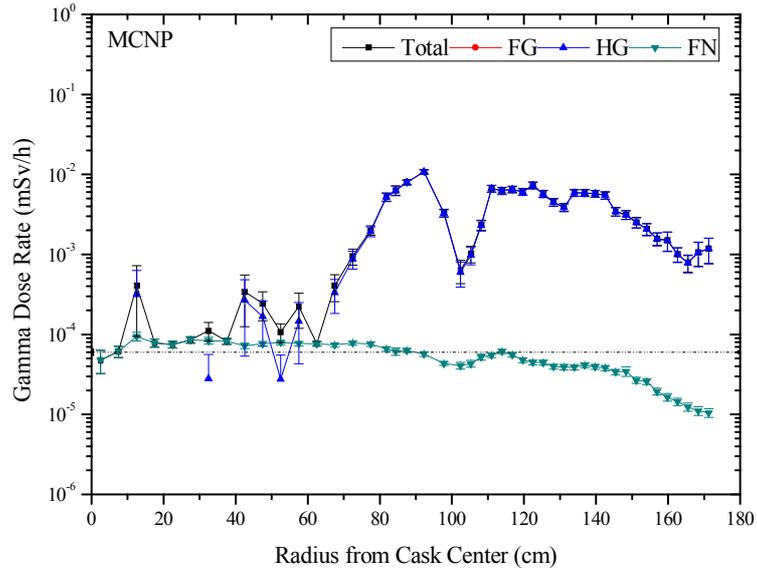


圖 6.3-19、MCNP，護箱頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨護箱半徑變化

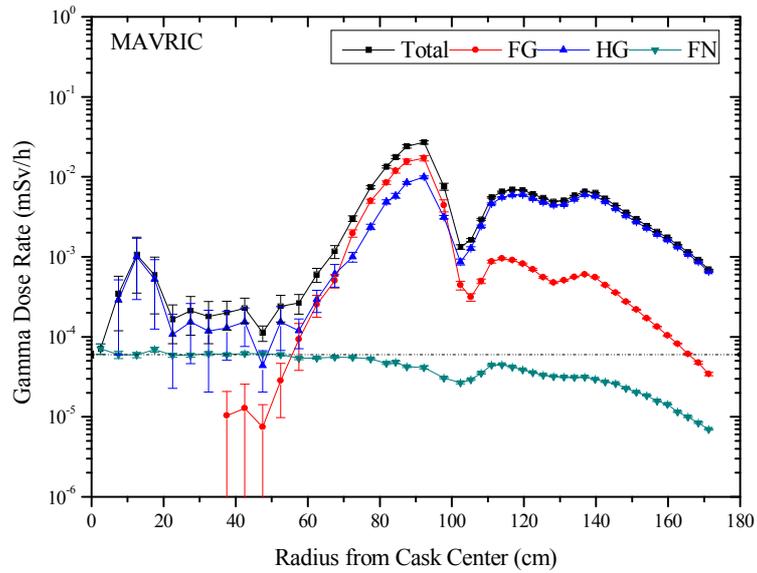


圖 6.3-20、MAVRIC，護箱頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨護箱半徑變化

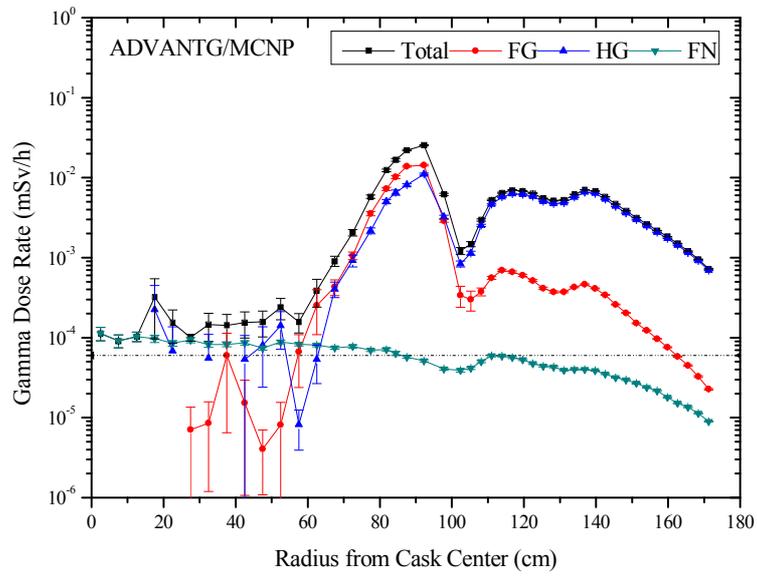


圖 6.3-21、ADVANTG/MCNP，護箱頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨護箱半徑變化

## 6.4. 以核二乾式貯存設施為測試案例

核二乾式貯存設施測試案例，在此針對改良的 NAC-MAGNASTOR 護箱作討論。同樣以三種具代表性的蒙地卡羅程式(MCNP、MAVRIC、ADVANTG/MCNP)對護箱屏蔽模型作詳盡的表面劑量分析並比較其計算效率和評估結果的準確度。

核二乾式貯存設施，採用美國 NAC-MAGNASTOR 護箱，考量核二廠之情況與限制，對其進行設計修改而來，又稱 NAC/CTCIM 護箱，主要是針對混凝土護箱的屏蔽部分作設計變更。核二乾式貯存設施預計放置 27 組護箱，須符合廠界個人年有效劑量 0.05 mSv 的限制。每組護箱可裝載 87 束用過核子燃料，其分析基準已涵蓋核二廠待貯存之用過核子燃料束規格條件(最大燃耗度 35,000 MWD/MTU、 $U^{235}$  之最大初始平均濃縮度 3.25 wt%、需經濕式貯存 20 年)，此條件下護箱內部熱負載不得高於 14.6 kW。

### 6.4.1. 核二乾貯護箱屏蔽計算模型

核二乾貯護箱屏蔽計算模型，以 NAC-MAGNASTOR 護箱為原型，對外部混凝土屏蔽作設計變更，其護箱幾何示意圖如圖 6.4-1 所示，外觀為一圓柱體(高 6.0 m，直徑 4.3 m)，主要分兩部分，不鏽鋼材質的密封鋼筒和具有碳鋼內襯及混凝土材質的混凝土護箱。密封鋼筒內部裝填之用過核子燃料束依燃料束特性均勻化為四區，上端版區(UEF)、充氣區(Plenum)、有效燃料區(Effective Fuel)、下端版區(LEF)，其餘內部燃料格架等組件依實際配置建構模型。

MAGNASTOR 護箱射源項為 87 束用過核子燃料，在此案例選定安全分析報告中核二廠 BWR 用過核子燃料束燃料條件組合參數 2，其運轉條件為最大燃耗度 34,000 MWD/MTU、至少冷卻 20 年和  $U^{235}$  之初始平均濃縮度 2.84 wt%。用過核子燃料射源項可區分為三類：燃料中子(FN)、燃料光子(FG)和結構光子(HG)，其能譜和軸向分布皆依照安全分析報告所提供，如圖 6.4-2 至圖 6.4-7 所示，燃料中子射源絕大部分來自鈾系元素的自發性分裂或其進行阿伐衰變後的( $\alpha, n$ )反應；燃料光子射源為分裂產物和鈾系元素進行加馬衰變；結構光子射源來自不鏽鋼活化後產生之  $Co^{60}$ ，因燃料束在運轉過程中受中子照射而活化，保守估計每 kg SS304 不鏽鋼內會含有 1.2 g 的  $Co^{59}$  雜質，此非為實際的濃度為一保守值，結構光子射源強度為 1 kg 的不鏽鋼射源強度乘以各區不鏽鋼含量，再乘以各區的區域通量比例。三種射源項射源強度如表 6.4-1 所示。

核一與核二乾貯護箱屏蔽計算模型差異，主要呈現在三個方面：護箱幾何、射源強度和密封鋼筒均勻化程度。台灣目前的乾貯設施為滿足台電公司在廠界個人年有效劑量小於 0.05 mSv 的承諾值，國際廠商的護箱設計得標後，大多需依

此限制進行設計變更，增強其護箱屏蔽能力。核一乾貯採取外加屏蔽方式作改善，而核二則是修改其混凝土護箱屏蔽部分，但在 6.3 節討論的 TSC01 護箱案例為未外加屏蔽案例，此節討論的 MAGNASTOR 護箱為實際預定使用之護箱，故兩者體積差異頗大，在側邊混凝土護箱厚度差約 30 cm，在頂部混凝土護箱厚度差約 65 cm，因屏蔽層增厚，使得粒子遷移通過層層屏蔽機率降低，亦增加了護箱表面劑量率估算的難度，兩護箱案例在其他幾何區域亦有些許設計差異；兩護箱案例裝載用過核子燃料束數目不同，核一為 56 束，核二為 87 束，故在三種射源項總強度皆不同，燃料中子差約 19 倍、燃料光子差約 4 倍、結構光子差約 10 倍；TSC01 護箱內部密封鋼筒整體均勻化為四區，而 MAGNASTOR 護箱僅對燃料束幾何作均勻化仍保留密封鋼筒內部結構特徵。核二乾貯護箱案例因應上述差異，皆使其表面劑量屏蔽計算分析較為困難。

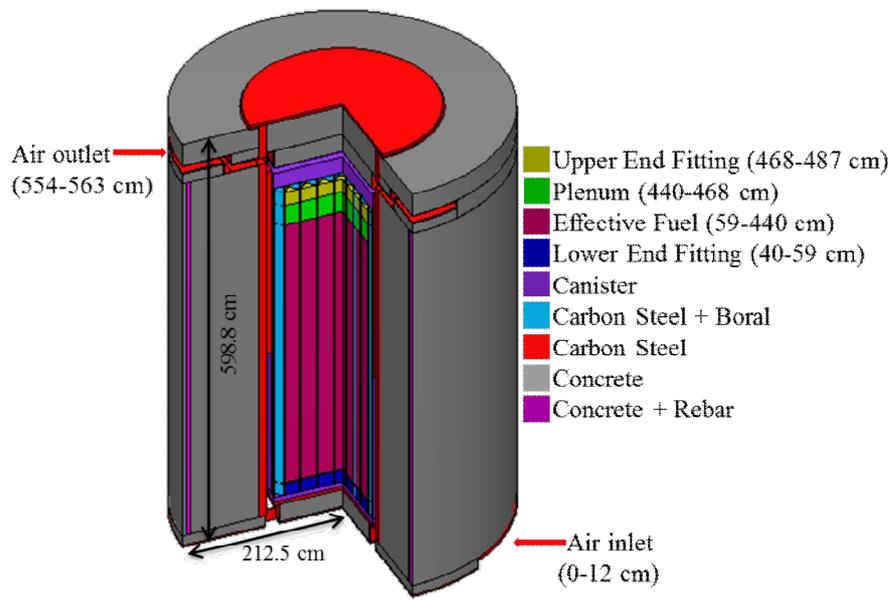


圖 6.4-1、MAGNASTOR 幾何示意圖

表 6.4-1、MAGNASTOR 護箱用過核子燃料射源項射源強度

Source Strength (1/s)		MAGNASTOR Cask (87 fuels)
Fuel Neutron		$4.813 \times 10^{09}$
Fuel Gamma		$6.577 \times 10^{16}$
Hardware Gamma	LEF	$6.020 \times 10^{13}$
	Effective Fuel	$2.818 \times 10^{13}$
	Plenum	$3.757 \times 10^{13}$
	UEF	$1.793 \times 10^{13}$

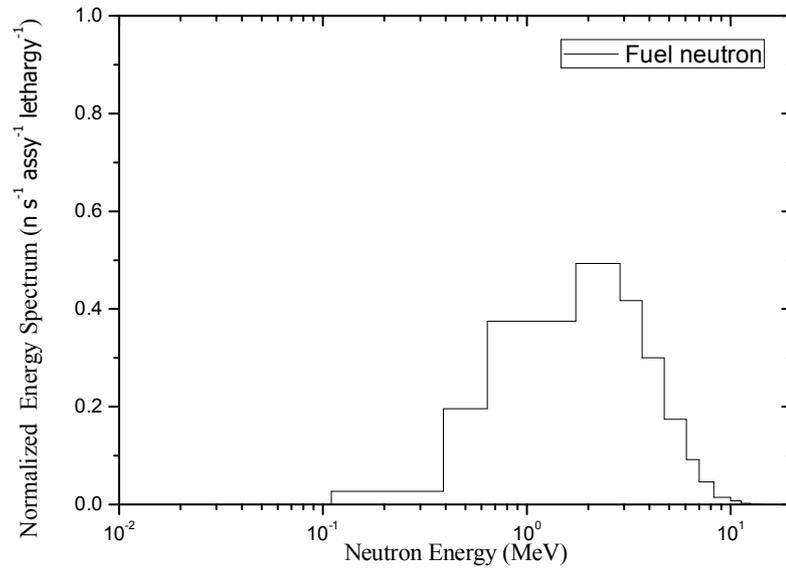


圖 6.4-2、SAR MAGNASTOR 護箱燃料中子射源項能譜

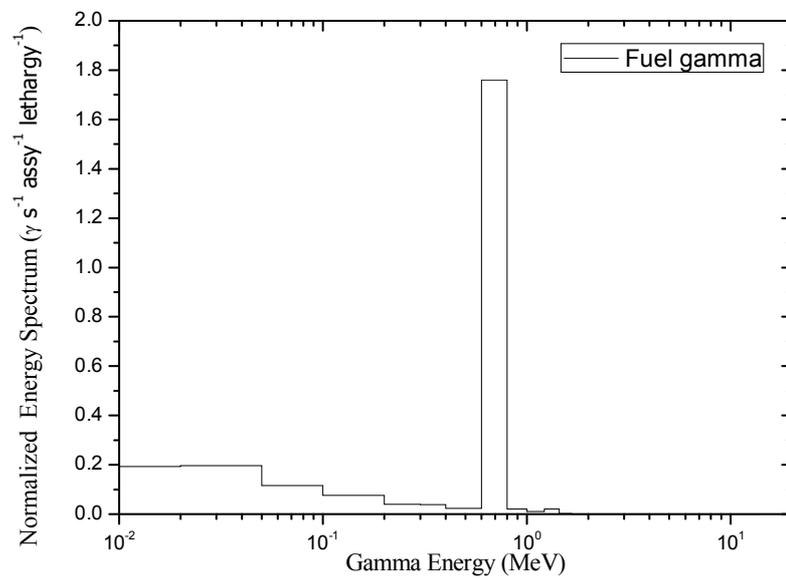


圖 6.4-3、SAR MAGNASTOR 護箱燃料光子射源項能譜

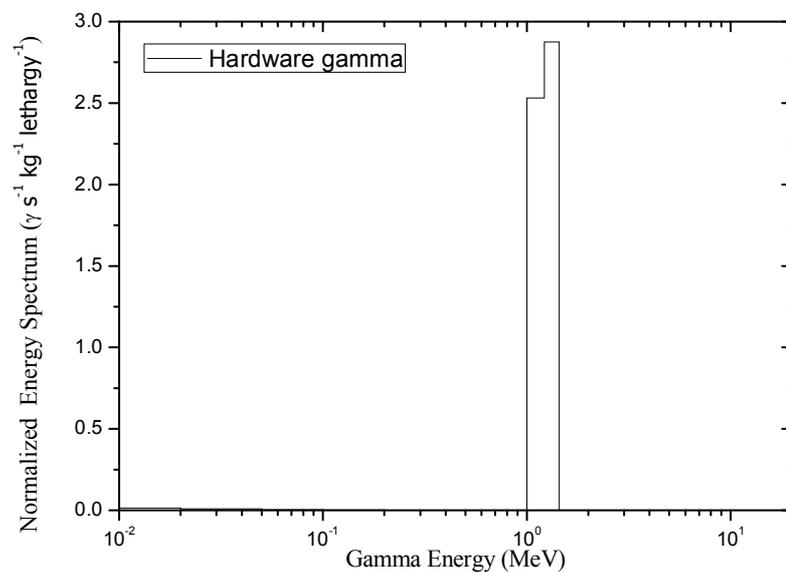


圖 6.4-4、SAR MAGNASTOR 護箱結構光子射源項能譜

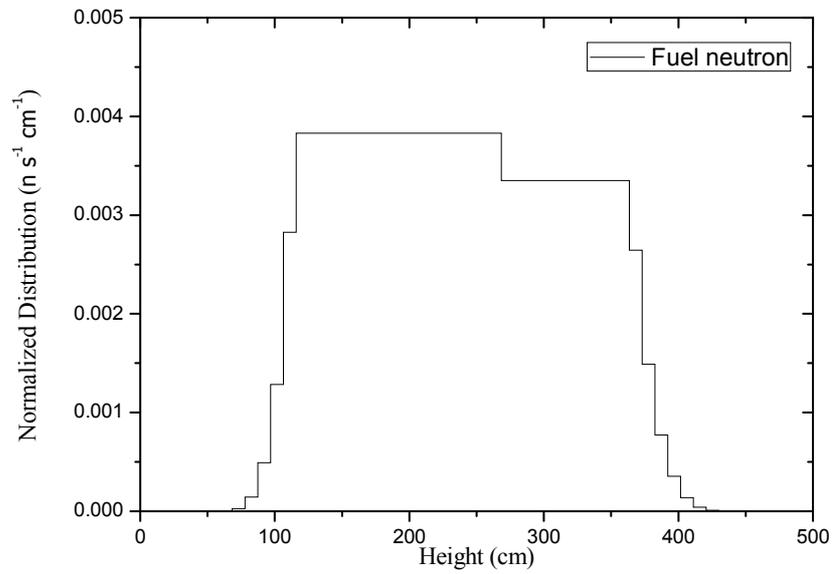


圖 6.4-5、SAR MAGNASTOR 護箱燃料中子射源項軸項分布

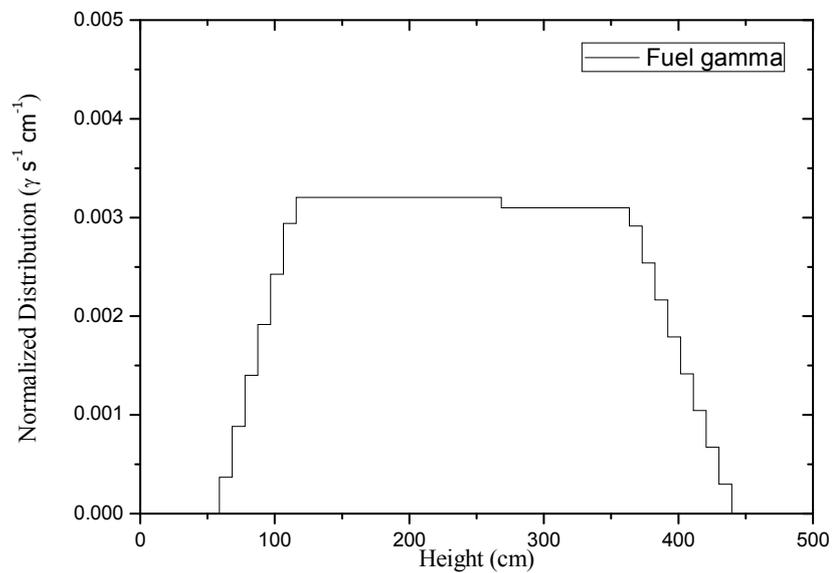


圖 6.4-6、SAR MAGNASTOR 護箱燃料光子射源項軸項分布

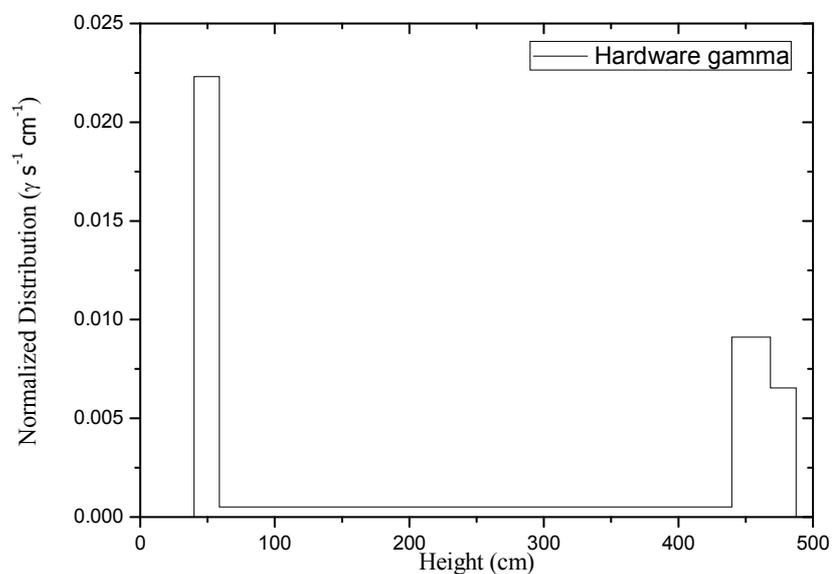


圖 6.4-7、SAR MAGNASTOR 護箱結構光子射源項軸項分布

#### 6.4.2. 核二乾貯護箱屏蔽計算比較

以三種蒙地卡羅程式，其版本資訊和程式間差異如表 4.1 和表 6.1-2 所述，各程式在同樣的電腦環境下，考慮相同的護箱幾何模型(圖 6.4-8)、材料設定和射源定義作護箱表面劑量評估計算。其中，MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 兩程式皆應用 FW-CADIS 理論，其決定論計算參數設定相同，將一圍繞護箱表面之小區域設為伴隨射源，因主要目標為評估護箱表面劑量，希望能迫使模擬粒子往表面計分區域移動。幾何空間切割成 557,032 個格點(X: 98、Y: 98、Z: 58)，集中於燃料束、密封鋼筒、混凝土護箱進出氣孔等粒子遷移變化較劇烈的地區。

核二乾貯護箱屏蔽案例包含三種分析方法和三種用過核子燃料射源項共需個別進行 9 次模擬來完成此計算比較，皆操作於個人電腦裝載 Window 7 作業系統配置 3.4 GHz CPU 和 16 GB 記憶體。各程式個別射源案例皆控制於約 26 小時的計算時間，詳細計算時間如表 6.4-2 所示，其中套用 FW-CADIS 理論的 MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 程式在加馬射源部分需耗費約 30 分鐘進行兩次  $S_N$  計算，在需同時考慮中子和二次光子的中子射源部分則需耗時約 120 分鐘。決定論法計算時間長短受分隔座標格點數所影響，格點切割越詳細在  $S_N$  計算耗費時間越長，此過程需依靠使用者經驗作取捨進而而有較佳之計算效率。

表 6.4-3 為三種分析在護箱表面區域偵檢器計分結果，分為側邊跟頂部兩區域，各別定義於護箱側邊一圓柱殼層，高度介於 59 至 440 cm 之間即有效燃料區之高度，護箱頂部一半徑為 92 cm 之圓盤，即為有效燃料區涵蓋區域。在燃料中子射源項案例，單 MCNP 程式不外加其他使用者設定之降低變異係數技巧，在控制的計算時間內，已有可接受的計算結果和效率。ADVANTG/MCNP 計算結果如預期一樣和單 MCNP 程式結果一致，因應用了 FW-CADIS 理論，對模擬計算之效率皆有優化，特別是在兩中子計分部分，FOM 值約優化了百倍。同樣套用理論的 MAVRIC，亦同樣對模擬計算有所優化，但其優化效益略低於 ADVANTG/MCNP，MAVRIC 計算結果對比 MCNP 和 ADVANTG/MCNP 在側邊中子和加馬劑量為低估，在頂部中子劑量和加馬劑量為高估。MCNP 程式因採用連續能量截面庫，和 Monaco/MAVRIC 所採用的多群能量截面庫相較，其結果被認為是更正確可信之答案，特別是在護箱屏蔽這種深穿透模擬問題。

在射源能量較低之燃料光子射源項案例，單 MCNP 程式操作在 26 小時的模擬時間，在護箱表面計分區域仍沒有得到任何計數值，但在結構光子射源項案例，因射源能量相對較高，故具有部分光子穿越層層屏蔽抵達表面計分區，但如表 6.4-3 所示，其結果之統計誤差仍太大無法被視為一有意義之答案。MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 有效改善光子遷移計算之困難問題，特別是在護箱側邊的區域有特別高的 FOM 值，兩程式結果相比 MAVRIC 皆高估護箱表面之加馬劑量

率分布。

圖 6.4-9 至圖 6.4-14 為護箱側邊/頂部表面 1 cm 處中子、加馬和總劑量率分布隨高度變化三分析方法結果，大致上三分析方法在各劑量率結果皆有類似的分布曲線。首先探討中子劑量率部分，護箱側邊最大值位於進氣口端，頂部最大值位於密封鋼筒和混凝土護箱間夾層之空氣通道上方，此兩劑量高點為受中子滲流之影響。同樣的問題考慮在同樣的計算時間內，計算結果之統計誤差大小即可視為計算效率好壞之表現，ADVANTG/MCNP 和 MAVRIC 效率相近，且兩者皆優於單 MCNP 程式。單 MCNP 在護箱側邊中子劑量率結果雖具有較大之統計誤差，但仍可觀察出其結果分布和 ADVANTG/MCNP 相近。而採多群能量中子截面之 MAVRIC 和採連續能量中子截面 MCNP 相比，MAVRIC 約在護箱側邊中子劑量率低估 2 倍，造成此劑量率差異原因應為多群能量的中子截面缺乏足夠的中子自屏蔽修正。新版的 SCALE6.2.1 程式已提供連續能量能譜截面庫作使用，此後將以採用連續能量能譜之 MAVRIC 程式作計算，應能驗證目前發現的劑量率低估之結果。

加馬劑量率部分，在護箱側邊呈現一平緩分布，中間的有效燃料區高度為一寬峰，其在進氣孔道區受到光子滲流的影響並無像中子一樣劇烈。在護箱頂部加馬劑量最高點仍為夾層空氣通道上方。比較三分析方法結果分布，護箱側邊近乎呈現一致的結果惟在高度 400 cm 以上開始出現差異，此部分將在以下討論各射源項對加馬劑量率貢獻分布時作探討。在護箱頂部，MAVRIC 結果皆略為高估於 ADVANTG/MCNP。護箱表面加馬劑量率結果為由三射源項計算之總和，單 MCNP 在部分區域皆有較大之落差，無法作為有意義的比較，下面將就各射源項在加馬劑量率結果貢獻分布作討論。

圖 6.4-15 至圖 6.4-20 為三方法個別射源項在護箱側邊/頂部表面 1 cm 處加馬劑量率分布隨高度變化。由 MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 的結果分布可知，燃料中子射源項產生之二次光子為主要貢獻項，除以下兩個區域之外：護箱側邊 450 cm 以上之區域，由於此處(UEF 和 plenum)之結構光子能量射源較強故其轉變為主要加馬劑量貢獻項；另一區域為護箱頂部空氣夾層上方，此處為燃料光子和結構光子造成之滲流影響較大。MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 兩方法，因應用了 FW-CADIS 理論，在三個射源項皆能有良好的計算結果，且結果分布一致；然而，單 MCNP 控制在 26 小時的計算時間內，無法得到一有意義之答案值，特別是燃料光子和結構光子射源項，無法有效引導模擬粒子穿透護箱達有效區。

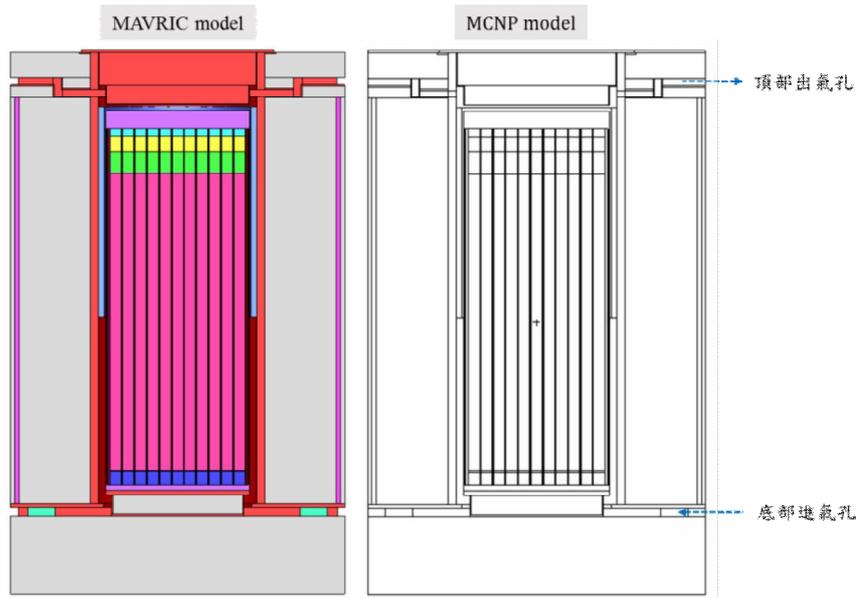


圖 6.4-8、MAGNASTOR 護箱屏蔽幾何模型，左為 MAVRIC、右為 MCNP

表 6.4-2、MAGNASTOR 護箱屏蔽案例三種分析方法計算時間比較

	Source	Forward SN (min)	Adjoint SN (min)	Total SN (min)	MC (hr)	Total (hr)
MCNP	FN	n/a	n/a	n/a	26.00	26.00
	FG	n/a	n/a	n/a	26.00	26.00
	HG	n/a	n/a	n/a	26.00	26.00
MAVRIC	FN	72.19	45.50	119.08	24.20	26.18
	FG	12.65	11.30	25.34	25.57	25.99
	HG	11.33	11.52	24.41	25.60	26.01
ADVANTG + MCNP	FN	64.46	48.49	115.55	24.09	26.02
	FG	11.68	14.59	27.62	25.55	26.01
	HG	10.21	14.49	25.95	25.59	26.02

註：Source：FN(Fuel Neutron)燃料中子、FG(Fuel Gamma)燃料光子、HG(Hardware Gamma)結構光子。MC：Monte Carlo 蒙地卡羅模擬。

表 6.4-3、MAGNASTOR 護箱表面區域偵檢器計分結果三分析方法比較

Source	Radiation	MCNP			MAVRIC			ADVANTG + MCNP		
		Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)
FN	Side Neutron	$3.33 \times 10^{-5}$	7.72	0.11	$1.80 \times 10^{-5}$	0.65	16	$3.53 \times 10^{-5}$	0.52	24
	Top Neutron	$1.45 \times 10^{-4}$	19.84	0.02	$2.65 \times 10^{-4}$	4.60	0.33	$1.91 \times 10^{-4}$	2.16	1.37
	Side Gamma	$3.20 \times 10^{-4}$	0.60	18	$2.81 \times 10^{-4}$	0.72	13	$3.22 \times 10^{-4}$	0.64	16
	Top Gamma	$2.09 \times 10^{-4}$	4.07	0.39	$2.25 \times 10^{-4}$	1.60	2.70	$2.03 \times 10^{-4}$	1.96	1.67
FG	Side Gamma	-	-	-	$7.22 \times 10^{-5}$	0.12	463	$4.99 \times 10^{-5}$	0.10	641
	Top Gamma	-	-	-	$2.68 \times 10^{-4}$	5.83	0.19	$2.13 \times 10^{-4}$	4.29	0.35
HG	Side Gamma	$3.68 \times 10^{-6}$	78.23	0.001	$1.56 \times 10^{-5}$	0.12	429	$8.78 \times 10^{-6}$	0.11	529
	Top Gamma	$2.50 \times 10^{-4}$	47.03	0.003	$4.89 \times 10^{-4}$	1.88	1.84	$3.50 \times 10^{-4}$	0.99	6.54

註：Source：FN(Fuel Neutron)燃料中子、FG(Fuel Gamma)燃料光子、HG(Hardware Gamma)結構光子。模擬的計算效率，以 FOM 值作討論，FOM 的定義如公式 6.3-1，FOM 值越高代表計算效率越好，反之越差。

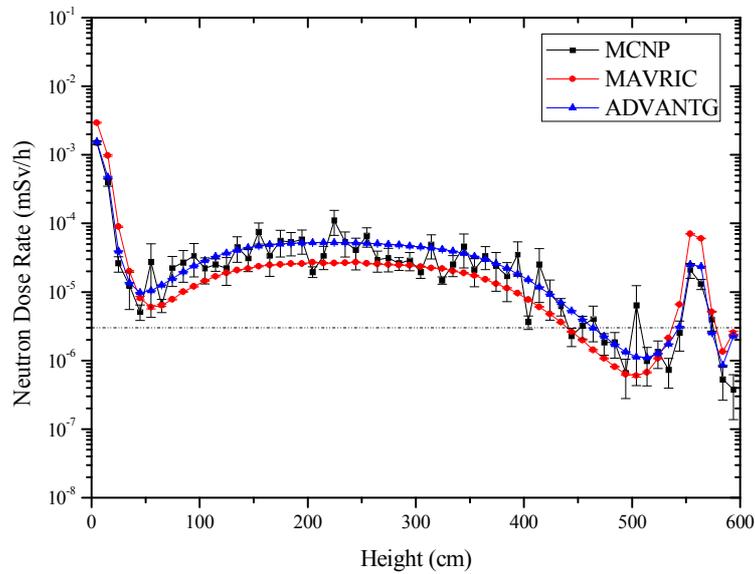


圖 6.4-9、MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處中子劑量率分布隨高度變化

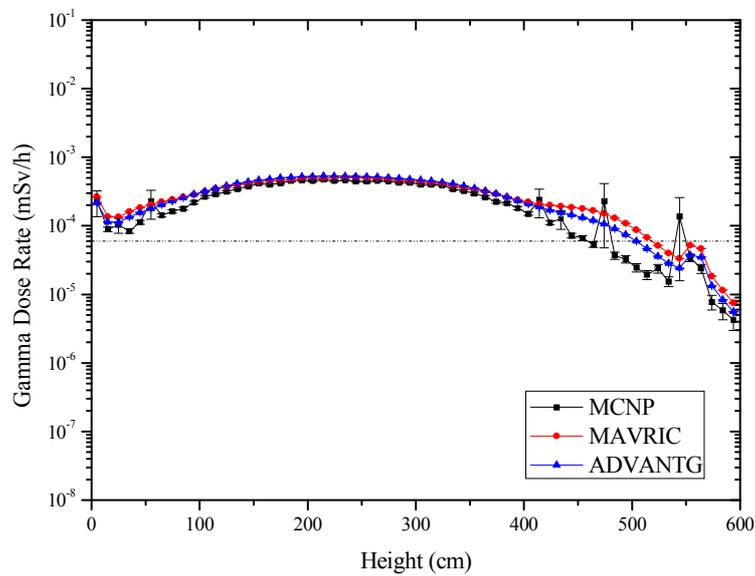


圖 6.4-10、MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處光子劑量率分布隨高度變化

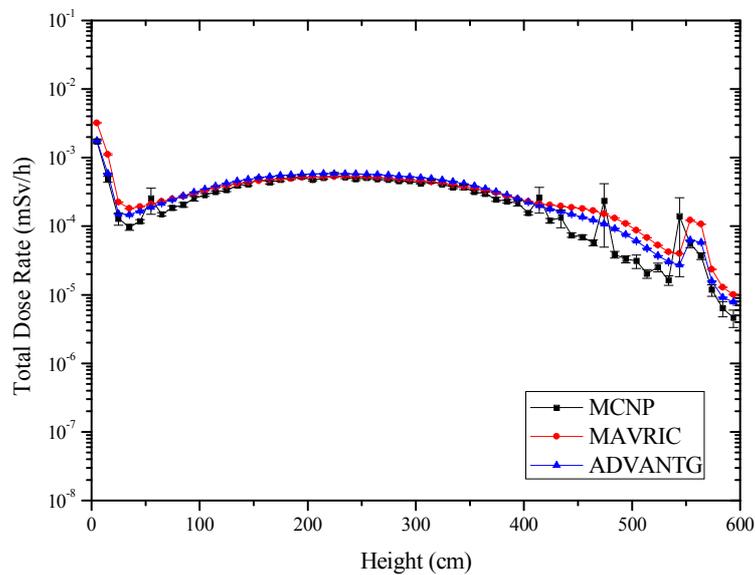


圖 6.4-11、MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處總劑量率分布隨高度變化

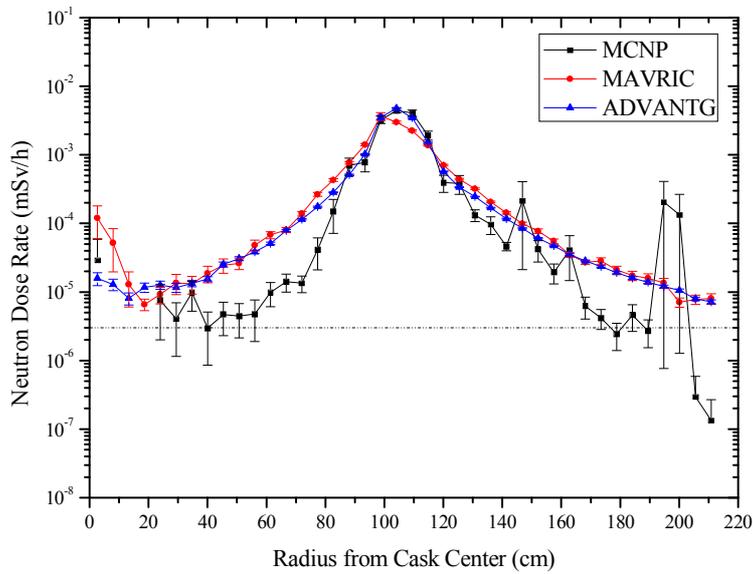


圖 6.4-12、MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處中子劑量率分布隨護箱半徑變化

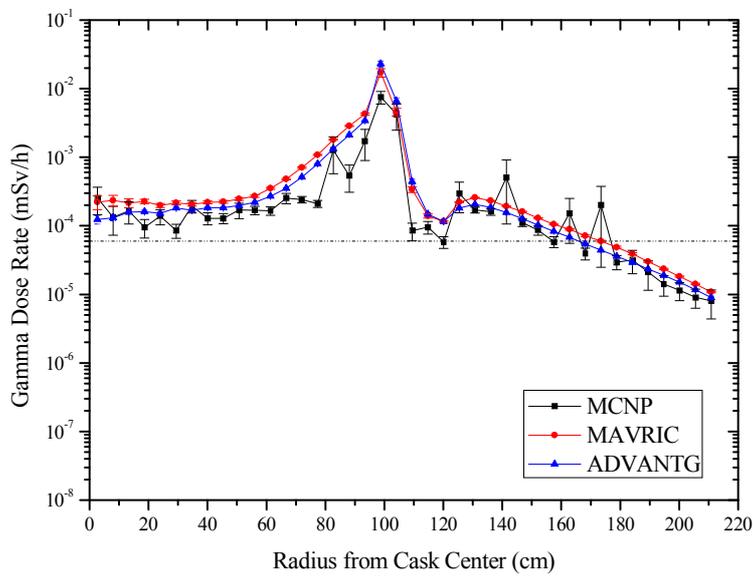


圖 6.4-13、MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處光子劑量率分布隨護箱半徑變化

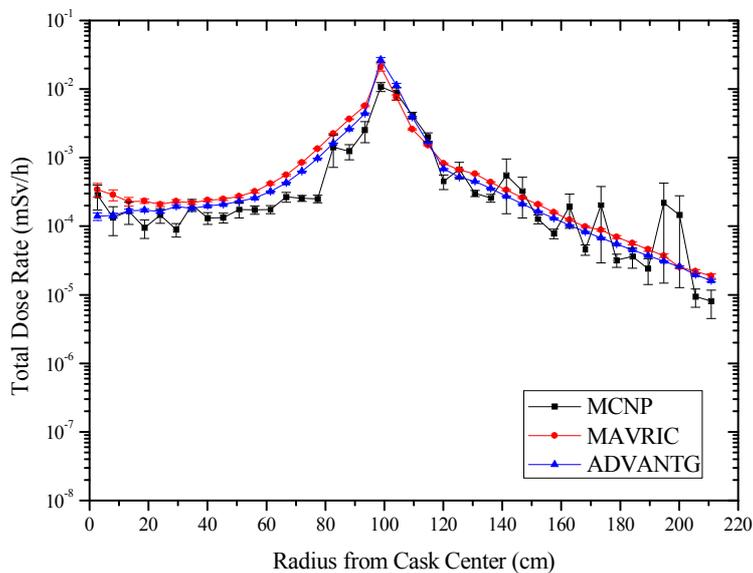


圖 6.4-14、MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處總劑量率分布隨護箱半徑變化

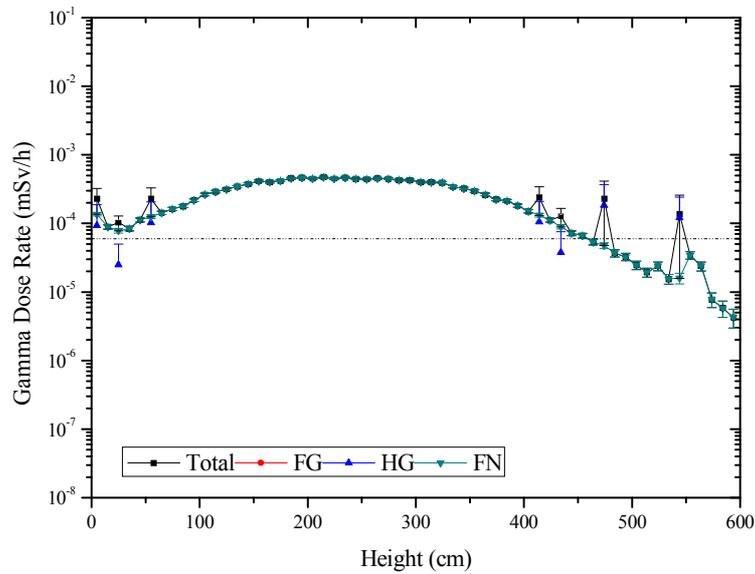


圖 6.4-15、MCNP，MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處光子劑量率分布隨高度變化

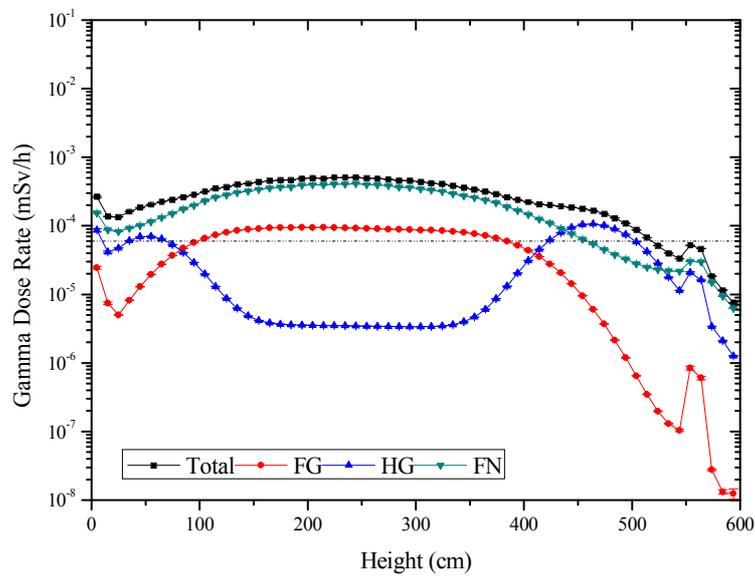


圖 6.4-16、MAVRIC，MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處光子劑量率分布隨高度變化

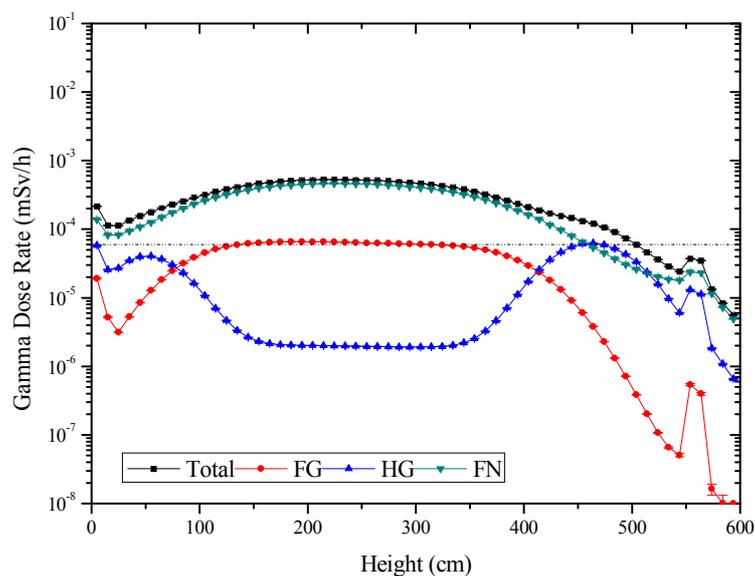


圖 6.4-17、ADVANTG，MAGNASTOR 護箱側邊表面 1 cm 處光子劑量率分布隨高度變化

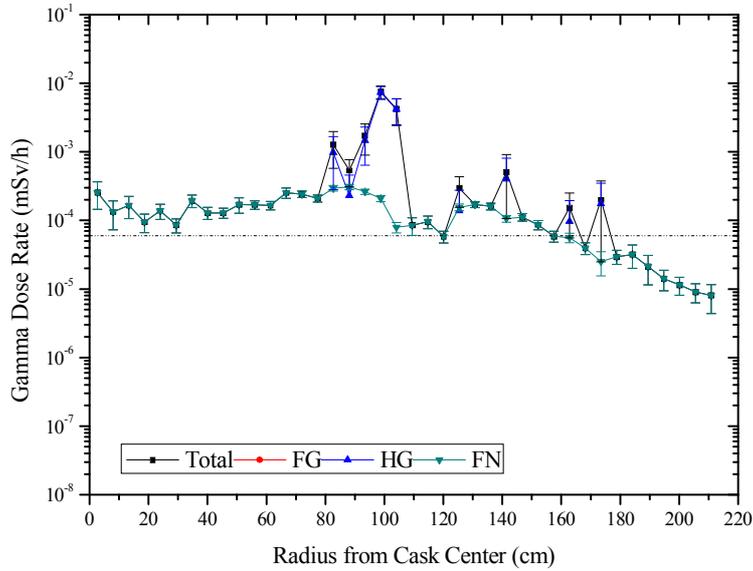


圖 6.4-18、MCNP，MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處光子劑量率分布隨護箱半徑變化

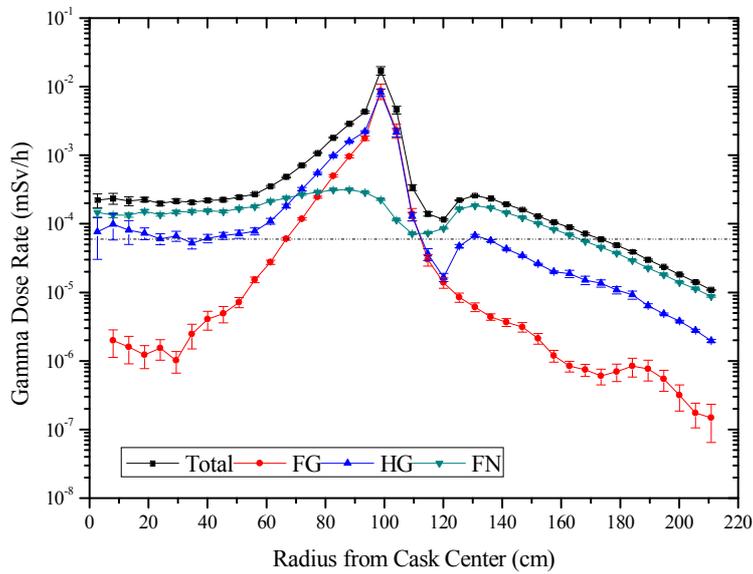


圖 6.4-19、MAVRIC，MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處光子劑量率分布隨護箱半徑變化

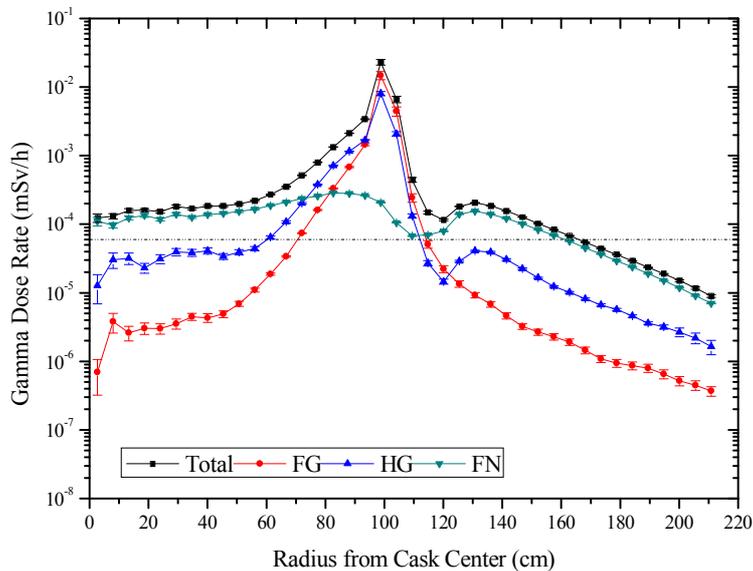


圖 6.4-20、ADVANTG，MAGNASTOR 護箱頂部表面 1 cm 處光子劑量率分布隨護箱半徑變化

## 7. 結論

用過核子燃乾式貯存作業的輻射安全分析為核能發展後端營運的重要議題與技術，相關分析牽涉到許多困難的計算問題，例如複雜的射源與幾何模型、深穿透計算、輻射滲流、以及天空散射問題，目前的解決方法需仰賴先進的數值方法與高速電腦。過去，本團隊曾引入 MAVRIC/SCALE 程式來改善此一困難的蒙地卡羅計算問題，且有不錯的成效。但 MAVRIC 程式在國內並未被普遍採用，且其模擬計算使用多能群近似截面；相較於國內核工領域分析的主要計算工具 MCNP 程式，其使用最可靠精確的連續能量中子作用截面以及內建使用者便利的建模工具，常運用於國內相關的安全分析報告。MCNP 是一個 3 維的蒙地卡羅遷移程式，進行複雜問題的模擬時，計算費時且結果常附帶可觀的統計誤差，因此不利於快速地進行案例檢視與驗證。

本研究引進美國 ORNL 發展的 ADVANTG 程式，預期可以保有 MCNP 計算結果的品質與精確度，同時又大幅減少蒙地卡羅粒子遷移的計算時間，對於未來國內用過核子燃料貯存與運送作業輻射安全審查與驗證可有極大的助益，值得深入探討並建立相關技術。ADVANTG 結合 MCNP 程式，其自動化產生之粒子權重射源與重要性遷移地圖等變異數降低參數，目標是大幅度減少 MCNP 程式蒙地卡羅模擬過程的計算時間，計算結果可與之前分析數據互相比較與驗證，精進國內乾式貯存輻射安全分析技術，相關結果與經驗可提供主管機關做為審查參考。

ADVANTG 研究案例測試，討論國際上三個利用 ADVANTG 程式自動產生粒子權重射源與重要性遷移地圖等降低變異數參數方法搭配 MCNP 程式模擬的輻射屏蔽案例，探討有無使用 ADVANTG 對蒙地卡羅模擬的加速效果差異，案例分別為：

- (1) Ueki 的輻射屏蔽衰減係數的量測實驗，利用  $\text{Cf}^{252}$  中子射源照射 9 種不同厚度的石墨，根據劑量率量測結果推得衰減係數估算值。其應用 CADIS 理論，將屏蔽材後的偵檢器設為伴隨(adjoint)射源，經 ADVANTG 計算後，發現射源取樣在高能中子區會增加其比例且重要性遷移地圖在粒子經過屏蔽材區域會有權重逐漸下降的趨勢，符合材料屏蔽物理特性。劑量率模擬結果顯示不論屏蔽材料厚度條件，使用 ADVANTG 做模擬加速對比單獨使用 MCNP 做模擬皆有更佳優異的計算效率表現。
- (2) Wagner 的貨櫃監測儀案例，模擬一個貨櫃，中心放有一 Ba-133 點光子射源及大量的輻射阻擋塊材，在貨櫃外放置四個 NaI 偵檢器用於量測能

譜分布。應用 FW-CADIS 理論預期可得到相對誤差較小的輻射分布結果。將 4 個 NaI 偵檢器設為伴隨射源，依照 ADVANTG 計算結果對高能光子取樣權重增加。模擬結果為有使用 ADVANTG 作加速，其各能群粒子計數相對誤差在 5% 以下的佔有 68%；而單獨使用 MCNP 的粒子計數結果，相對誤差小於 5% 的僅有 3%。

- (3) 日本實驗反應器 JPDR 的輻射屏蔽，討論 JPDR 的輻射粒子分布，建構近似的反應器幾何，將爐心簡化為一均勻分布之圓柱狀中子射源。應用 FW-CADIS 理論對大範圍的網格劑量分布(Mesh tally)計算有效加速。網格計數結果顯示單獨使用 MCNP 模擬，計數誤差小於 15% 的僅佔全部網格 4%；而有使用 ADVANTG 的結果，技術誤差小於 15% 的佔全部的 76%。

經過以上三個案例探討，發現使用 ADVANTG 程式的確能對 MCNP 模擬效率上有顯著的提升。

討論一探井研究問題，在同樣的幾何條件及運算時間下，討論 ADVANTG 結合 MCNP 和 MAVRIC/SCALE 兩個程式的差異，兩程式模擬結果具一致性，皆能呈現應用 CADIS 理論後，對蒙地卡羅程式的加速效果。兩程式在 Denovo 的運行時間仍有差異，目前已確定格點切割方式、理論方法、及應用截面相同，往後將對此內容作更深入探討。MCNP 為採連續能量作用截面作蒙地卡羅模擬，其結果會較 Monaco 採能群作用截面具有可信度。

最後分別應用三種具代表性的蒙地卡羅程式(MCNP、MAVRIC、ADVANTG/MCNP)，針對核一、二乾貯護箱問題進行表面劑量分析，比較其計算效率和評估結果的準確度。

以核一熱測試 TSC01 護箱為例，依安全分析報告做法將密封鋼筒內之射源合理均勻化，考慮相同的計算環境、護箱幾何、材料與射源定義下，固定約一天的計算時間進行護箱表面劑量評估。單 MCNP 程式作計算，不考慮其他使用者另設之降低變異係數技巧，在燃料中子射源的計算已有可接受的計算效率；但在燃料光子方面，因其光子能量較低不易穿透多層屏蔽，難以得到可信答案；結構光子因光子能量較高，模擬粒子遷移相對容易。使用 MAVRIC 程式作計算，應用 FW-CADIS 理論，可有效改善低能光子遷移計算困難的問題，但因目前使用之 SCALE6.1 版僅支援多能群截面，對比 MCNP 的連續能量截面可能造成誤差。使用 ADVANTG/MCNP 程式，應用 FW-CADIS 理論，結合 Denovo 程式自動化處理蒙地卡羅變異數降低與 MCNP 連續能量截面的優點，除了有效改善計算效率，計算結果亦相對可靠。利用約一天的計算時間內，護箱表面平均劑量率計算結果，能有 3.5 % 以下之統計誤差值，其 FOM 指標顯示其效率遠優於單 MCNP

的情況。

以核二安全分析報告之 MAGNASTOR 護箱為例，考慮詳細之密封鋼筒結構，保留 87 束燃料束幾何，在相同的計算環境、護箱幾何、材料與射源定義下，固定約 26 小時的計算時間，進行護箱表面劑量的比較。單 MCNP 程式作計算，不考慮其他使用者另設之降低變異係數技巧，在燃料中子部分，除頂部中子劑量外，已有可接受之計算結果和效率。但在兩種光子射源項問題，皆無法獲得可靠答案值。對比 TSC01 護箱，僅低能光子有遷移計算困難的問題，MAGNASTOR 護箱因屏蔽層增厚，模擬粒子不易穿透，不論是中子或光子相關問題，不使用適合的降低變異係數技巧，在此困難評估的案例，難以獲得可信任之結果。MAVRIC 和 ADVANTG/MCNP 應用 FW-CADIS 理論作加速，的確大幅度地改善各射源問題之計算效率，特別是在光子射源部分，的確有效解決光子在多層屏蔽問題的遷移計算困難。但兩方法結果在不同區域有所差異，MAVRIC 在護箱側邊會低估中子劑量，在護箱頂部會高估光子劑量，MCNP 程式因採用連續能量截面庫作模擬，對比 Monaco 所採用的多群能量截面庫，其結果被認為是更正確可靠之答案，特別是在護箱屏蔽這種深穿透模擬問題，此部分需使用新版之 SCALE6.2.1 作探討研究。在此案例利用約 26 小時的計算時間，評估護箱表面平均劑量率結果，能獲得 4.5 % 以下之統計誤差值，ADVANTG/MCNP 和 MAVRIC 之 FOM 指標除在二次光子部分外皆優於單 MCNP 案例，且 ADVANTG/MCNP 效率為最佳。

本研究引進最新的 ADVANTG/MCNP 技術，目前已完成四個國際案例驗證及二個複雜真實的乾貯案例計算，證實其可用性與優異性，除了更可靠的劑量評估，亦能在計算效率達到最佳化的實務結果。建立起的 ADVANTG/MCNP 技術對於主管機關在於未來國內用過核子燃料貯存與運送作業輻射安全審查與驗證可有極大的助益。

## 8. 參考文獻

1. R.J. Sheu\*, A.Y. Chen, Y-W. H. Liu, and S.H. Jiang, “Shielding calculations for a spent fuel storage cask: A comparisons of discrete ordinates, Monte Carlo and hybrid methods”, Nuclear Science and Engineering, Vol. 159, 23-36, 2008.
2. A.Y. Chen, Y.F. Chen, J.N. Wang, R.J. Sheu\*, Y-W. H. Liu, and S.H. Jiang, “A comparison of dose rate calculations for a spent fuel storage cask by using MCNP and SAS4”, Annals of Nuclear Energy, Vol. 35, 2296-2305, 2008.
3. R.J. Sheu\*, Y.F. Chen, S.H. Jiang, J.N. Wang, and U.T. Lin, “Dose evaluation for an independent spent fuel storage installation using MAVRIC”, Nuclear Technology, Vol. 175, 335-342, July 2011.
4. Y.F. Chen, R.J. Sheu\*, S.H. Jiang, J.N. Wang, and U.T. Lin, “Surface dose rate calculations of a spent fuel storage cask by using MAVRIC and its comparison with SAS4 and MCNP”, Nuclear Technology, Vol. 175, 343-350, July 2011.
5. Y.F. Chen, Y.F. Chiou, S.J. Chang, S.H. Jiang, and R.J. Sheu\*, “Effects of source and geometry modeling on the shielding calculations for a spent nuclear fuel dry storage cask”, Nuclear Technology, Vol. 182, 224-234, May 2013.
6. S.W. Mosher, S.R. Johnson, A.M. Bevill, A.M. Ibrahim, C.R. Daily, T.M. Evans, J.C. Wagner, J.O. Johnson and R.E. Grove, “ADVANTG-an automated variance reduction parameter generator”, Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, August 2015.
7. E.D. Blakeman, D,E, Peplow, J.C. Wagner, B.D. Murphy, and D.E. Mueller, “PWR Facility dose modeling using MCNP5 and the CADIS/ADVANTG variance-reduction methodology”, Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, September 2007.
8. J.M. Risner and E.D. Blakeman. “Analysis of DPA Rates in the HFIR Reactor Vessel Using a Hybrid Monte Carlo/Discrete Ordinates Methodology”, Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, 2013.

9. A.M. Ibrahim, S.W. Mosher, T.M. Evans, D.E. Peplow, M.E. Sawan, P.P.H. Wilson, J.C. Wagner, "ITER Neutronics Modeling Using Hybrid Monte Carlo/SN and CAD-based Monte Carlo Methods." Nuclear Technology, Vol.175(1), 251-258, 2011.
10. M.W. Shaver, E.A. Miller, R.S. Wittman, and B.S. McDonald, "Transport Test Problems for Hybrid Methods Development." Richland, W.A., USA: Pacific Northwest National Laboratory, December 2011.
11. Masumi Wararu, "Spent Fuel Management in Japan and Key Issues on R&D Activities" CRIEPI, INMM Spent Fuel Management Seminar, 2013.
12. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, "G05 Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung", 2008
13. Lise Wattez, "BWR-SPENT FUEL TRANSPORT AND STORAGE WITH THE TN<sup>TM</sup>9/4 & TN<sup>TM</sup>24BH CASKS", 2004.
14. Tatsuya Ishikawa, "Current Status of Japan's Storage facility for Spent fuels", Recyclable-Fuel Storage Company, 2013.
15. K. Ueki, A. Ohashi, and Y. Anayama. "Neutron Shielding Ability of KRAFTON N2 – Mannan – KRAFTON N2 Sandwich-type Materials and Others." ANS Radiation Protection and Shielding Division Topical Meeting, April 26 - May 1, Pasco, WA., 1992.
16. J.C. Wagner, D.E. Peplow, and S.W. Mosher, "FW-CADIS Method for Global and Regional Variance Reduction of Monte Carlo Radiation Transport Calculations." Nuclear Science and Engineering. Vol.176 (1), 37-57, 2014.
17. T. Sukegawa, N. Sasamoto, and K. Fujiki, "Accuracy Verification for Calculation of Inventory in JPDR Due to Neutron Activation" INDC-JPN-0164. IAEA International Nuclear Data Committee, 1993.
18. D. E. Peplow, "MAVRIC: MONACO with Automated Variance Reduction Using Importance Calculation, " Oak Ridge, TN, USA: Oak Ridge National Laboratory, June, 2011.

19. 台灣電力公司，《核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告》，台北：台灣電力公司，2007。
20. 台灣電力公司，《核二廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告》，台北：台灣電力公司，2012。