

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

用過核子燃料乾式貯存護箱輻射屏蔽度量分析驗證

**Validation of Radiation Shielding Analysis for a Spent-Fuel
Dry Storage Cask**

計畫編號：1002001INER026

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：江祥輝 教授

聯絡電話：03-5715131 轉 34296

E-mail address：shjiang@mx.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：張淑君

報告日期：100 年 12 月 18 日

中文摘要

本計畫之目的在針對裝填 56 束特選用過核燃料之試運轉貯存護箱進行精準的輻射屏蔽計算分析，以便能與將來試運轉時測得的護箱表面劑量率分佈相比較。本計畫擬利用 SCALE 6.0 程式系統的 MAVRIC 控制模組執行貯存護箱表面劑量率分佈計算。密封鋼筒中 56 束用過核燃料將據實建立幾何模型。護箱表面劑量率除徑向和高度分佈外亦將包含周向分佈。

英文摘要

This project aims to carry out the detailed radiation shielding analysis for the storage cask installed with 56 specific spent fuel elements in order to facilitate the comparison of the calculated dose rate with the measured ones to be made in the pre-operational stage. The MAVRIC control module in the SCALE 6.0 code system will be used for the calculation of the surface dose rates of the storage cask. The 56 spent fuel elements in the canister will be modeled in detail. In addition to the radial and height distributions, the azimuthal distribution will be included.

目錄

中英文摘要.....	I
目錄.....	II
圖目錄.....	III
表目錄.....	IV
一、計畫緣起與目的	1
二、研究方法與過程	2
(1) 貯存護箱屏蔽計算模型	2
(2) 用過燃料束射源項	5
(3) 計算程式簡介與設定	8
三、研究結果	11
(1) 計算模型之比較	11
(2) 表面劑量率周向分佈	11
(3) 不確定度分析	13
四、結論與未來工作	14
五、參考文獻	15
附錄 CADIS.F90 修正檔	16

圖目錄

圖一、貯存護箱幾何模型(左)HOMOGENIZED MODEL(右)DETAILED MODEL . 2	
圖二、密封鋼筒幾何模型之橫切面(左)和縱切面(右)..... 3	3
圖三、編號 TSC01 貯存護箱內用過燃料束之裝填配置 6	6
圖四、燃料中子射源軸向強度分佈 7	7
圖五、燃料光子射源軸向強度分佈 7	7
圖六、TSC01 貯存護箱中子射源項之外部檔案 9	9
圖八、周圍等效劑量轉換因子(中子) 10	10
圖九、周圍等效劑量轉換因子(光子) 10	10
圖十、TSC01 貯存護箱側邊和頂部之表面劑量率分佈 11	11
圖十一、TSC01 貯存護箱側邊和頂部表面中子和光子劑量率之周向分佈 12	12
圖十二、貯存護箱表面中子劑量率分佈 14	14

表目錄

表一、貯存護箱計算模型之材料組成	4!
表二、用過燃料束各部組件之 SS304 重量與中子通率比率.....	5!
表三、安全分析報告與試運轉貯存護箱之總射源項強度	6!
表四、用過燃料束結構材料之 ^{60}Co 含量($\mu\text{Ci}/\text{mg}$)	13!

一、計畫緣起與目的

「核一廠用過核燃料乾式貯存設施安全分析報告」已於 97 年 2 月通過原能會審查。隨後環境差異分析經環保署環評小組審查通過，接著環保署召開環評大會審查亦已通過，目前正等待台北縣政府水土保持計畫審查。雖然現場施工尚無法進行，但台電公司已完成 20 組密封鋼筒和傳送護箱的製造。等水土保持計畫審查通過即能進行現場整地和承載平台興建、以及混凝土貯存護箱製造。台電公司被要求必須先執行兩個貯存護箱試運轉，測試吊卸、搬運、裝填、運送、貯存各步驟作業，通過後，才能正式啟用貯存設施執行貯存作業。

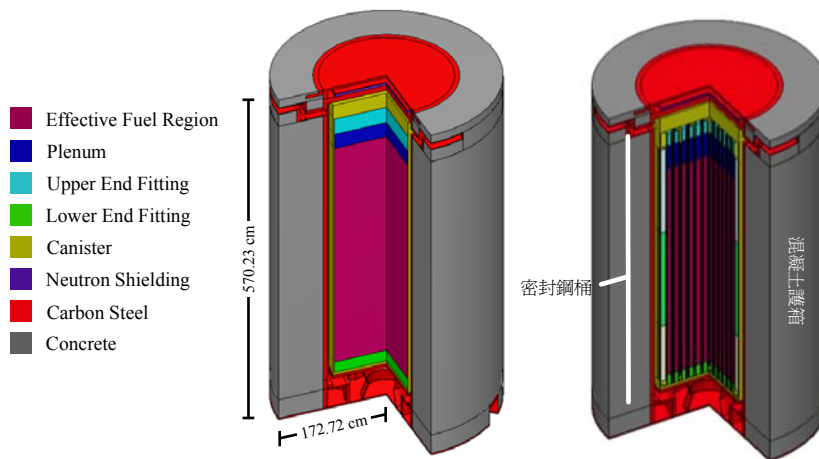
台電核一廠用過核燃料乾式貯存護箱(INER-HPS)每個護箱可盛裝最大燃耗度 36,000 MWD/MTU、最短冷卻時間 10 年、U-235 初始平均濃縮度 1.9~3.25 wt%及最大熱負載 14KW 之 56 束 BWR 用過核燃料元件。經輻射屏蔽計算分析，貯存護箱側壁表面之平均劑量率小於 0.5 mSv/h，空氣進出口表面之平均劑量率小於 1 mSv/h，頂部表面之平均劑量率小於 0.5 mSv/h，均符合原設計基準。國內用過核燃料乾式貯存並非只有目前核一廠 30 個貯存護箱一個案子，緊接著還有核二廠和核三廠用過核燃料乾式貯存，甚至將來還有核一廠乾貯擴充申請案，因此驗證乾式貯存護箱輻射屏蔽計算分析之準確性確有急迫之需求，澄清差異之道只有與實際測量結果比較一途。本計畫配合核一廠試運轉之貯存護箱，進行驗證分析之研究。

由於貯存護箱設計基準係考慮造成最大射源項之用過核燃料元件，然而實際裝填時各束用過核燃料元件之燃耗、冷卻時間、U-235 初始平均濃縮度等特性並不相同且比設計基準用過核燃料元件產生的射源項來得低，因此試運轉實際貯存護箱表面劑量率一定比設計基準來得低。為了仔細驗證評估輻射屏蔽計算分析能力，必須根據實際裝填 56 束 BWR 用過核燃料元件分別計算其射源項，實際模擬具有各自射源強度特性之每束用過核燃料，重新執行輻射屏蔽計算，所得護箱表面劑量率分佈才能與測量數據相比較。因此本計畫之目的即在針對裝填 56 束特選用過核燃料之試運轉貯存護箱，進行精準的輻射屏蔽計算分析，以便能與將來試運轉時測得的護箱表面劑量率分佈相比較。

二、研究方法與過程

(1) 貯存護箱屏蔽計算模型

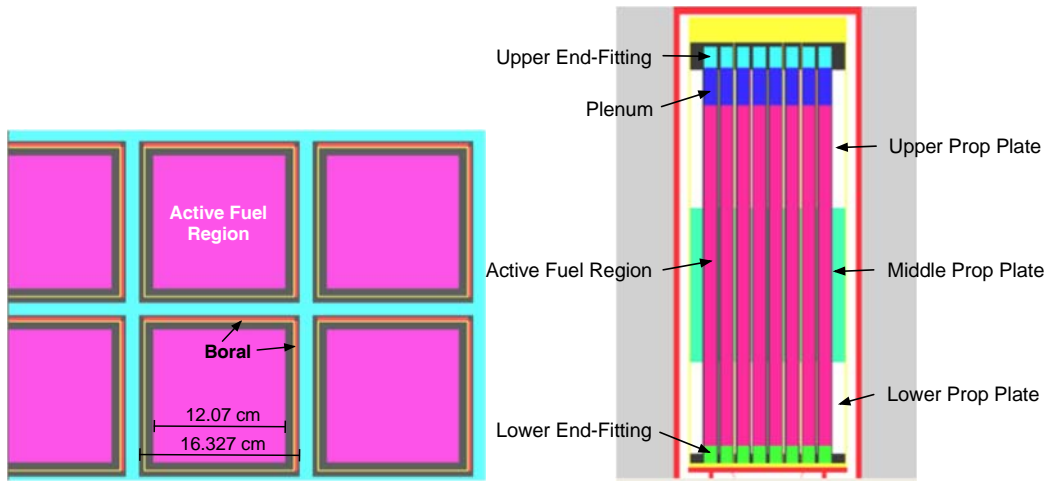
INER-HPS 用過核燃料貯存護箱(高度 5.7 公尺，直徑 3.4 公尺)，其結構分為兩大部分，密封鋼筒和混凝土護箱。混凝土護箱，係為屏蔽密封鋼筒內用過燃料束之輻射線，混凝土厚度約有 72 公分，護箱底部有四個空氣進氣口，而距底部 550 公分高處另有四個出氣口，透過自然對流來移除用過核燃料產生之衰變熱。密封鋼筒內共有 56 個格架可放置用過核燃料，在兩兩相鄰之格間，皆貼上一層 0.34 cm 厚的中子吸收板，降低臨界意外發生之可能性。格架由 42 片承載圓盤固定之，在中間區段，因用過燃料束中段衰變熱較大，更於承載圓盤之間隔中，各插入一片鋁製導熱圓盤增加散熱效果。安全分析報告貯存護箱之幾何模型[1]，係將 56 束用過核燃料和硼板作均質化處理，簡化密封鋼筒之內部結構，並將用過燃料束沿軸向分成四區，上端板區(Upper End-Fitting)、氣室(Plenum)、有效燃料區(Active Fuel Region)和下端板區(Lower End-Fitting)，圖一(左)顯示安全分析報告屏蔽分析所建構之幾何模型。而本研究為提昇屏蔽計算之準確性，參考工程圖面，詳細模擬密封鋼筒內之細部結構，修改後之幾何計算模型顯示於圖一(右)，並藉此機會一併探討使用均質化幾何模型評估貯存護箱表面劑量率之適切性。



圖一、貯存護箱幾何模型(左)Homogenized Model(右)Detailed Model

貯存護箱詳細幾何模型，模擬密封鋼筒之細部幾何結構，包含放置燃料束之方形格架，與格架外側貼上之中子吸收板(Boral)，如圖二所示。而格架外之承載圓盤和導熱圓盤區域，僅分成上中下三個區域，中段是同時含有承載圓盤和導熱圓盤之區域，

而上下段則是僅含有承載圓盤。此計算模型所設定之材料，其密度和核種組成主要參照核一乾貯的安全分析報告，唯有密封鋼桶內的用過燃料束依燃料束大小重新均質化，外圍承載圓盤部分，則分成上、中、下三個部分作均質化。詳細材料設定列於表一。



圖二、密封鋼筒幾何模型之橫切面(左)和縱切面(右)

表一、貯存護箱計算模型之材料組成

Name	Density (g/cm ³)	Nuclide/ Element	Atom Density (atom/barn-cm)
Active Fuel Region	3.90463	U-235	1.3613E-04
		U-238	6.9397E-03
		O	1.4152E-02
		Zr	4.7179E-03
		Sn	5.3504E-05
		Fe	4.8120E-05
		Cr	1.9445E-05
		Ni	8.9869E-06
		Hf	2.4541E-07
		Mn	1.0976E-06
Plenum	0.2738	Cr	6.0111E-04
		Fe	2.0472E-03
		Ni	2.6628E-04
		Mn	5.9870E-05
Upper End-Fitting	0.5245	Cr	1.1513E-03
		Fe	3.9208E-03
		Ni	5.0999E-04
		Mn	1.1467E-04
Lower End-Fitting	1.4318	Cr	3.1431E-03
		Fe	1.0704E-02
		Ni	1.3923E-03
		Mn	3.1305E-04
Boral	2.68	B-10	2.2130E-03
		B-11	1.2190E-02
		C	3.7860E-03
		Al	5.2160E-02
Dry-air	1.209E-04	C	7.3716E-09
		O	1.0689E-05
		N	3.9804E-05

Name	Density (g/cm ³)	Nuclide/ Element	Atom Density (atom/barn-cm)
NS-4-FR	3.90463	B-10	8.5530E-05
		B-11	3.4220E-04
		C	2.2640E-02
		O	2.6090E-02
		Al	7.7630E-03
		H	5.8540E-02
		Fe	8.3500E-02
Carbon Steel	7.8212	C	3.9214E-03
SS304	7.94	Cr	1.7430E-02
		Fe	5.9360E-02
		Ni	7.7210E-03
Concrete	2.2426	Mn	1.7360E-03
		H	1.3401E-02
		O	4.4918E-02
		Na	1.7036E-03
		Al	1.7018E-03
		Si	1.6205E-02
Upper Prop Plate	1.3882	Ca	1.4785E-03
		Fe	3.3858E-04
		Fe	1.1592E-01
		C	5.4438E-03
Middle Prop Plate	1.6287	Fe	1.0657E-01
		C	5.0047E-03
		Al	7.8627E-03
Lower Prop Plate	1.3397	Fe	1.1187E-01
		C	5.2536E-03

(2) 用過燃料束射源項

核一乾貯試運轉，兩個貯存護箱之編號為 TSC01 和 TSC02，本研究僅針對編號 TSC01 之貯存護箱進行輻射屏蔽分析，以 SAS2H 程式計算用過核燃料之燃料中子、燃料光子和結構光子射源項。安全分析報告之屏蔽分析，為求保守估計，於計算燃料光子射源項時，是採用 GE8x8-1 型燃料，燃耗度為 36 GWD/MTU，²³⁵U 初始濃縮度 3.25wt%，燃料冷卻時間為 10 年；計算中子及其他結構物光子射源項時，以燃耗度為 36GWD/MTU，²³⁵U 初始濃縮度 1.9wt%，燃料冷卻時間為 10 年為條件。其中對於其他結構物之活化光子射源項之計算，乃是由假定其他結構物材料為含有雜質 1.2g/kg 之 ⁵⁹Co 的 SS304 不鏽鋼受中子照射所決定，並依燃料束各區結構物重量和中子通率比率(表二)，定出各區結構光子射源強度。

表二、用過燃料束各部組件之 SS304 重量與中子通率比率

燃料束組件	SS304 重量(kg)	中子通率比率
上端板	2.10	0.1
氣室	2.00	0.2
有效燃料區	0.33	1.0
下端板	4.83	0.15

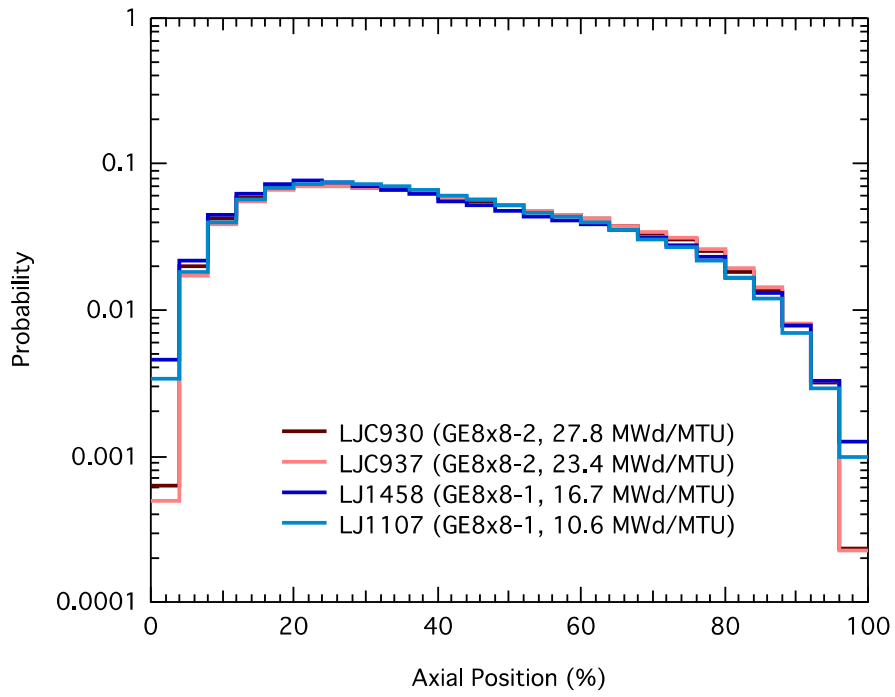
圖三顯示 TSC01 貯存護箱 56 束燃料束之編號及裝填配置。此次試運轉吊運之燃料束型號有兩種，GE-8×8-1 型和 GE-8×8-2 型。雖然都是 8×8 晶格排列，但 ²³⁵U 初始濃縮度、水棒數目、有效燃料區高度和燃料棒尺寸都不相同，因此本研究分別針對兩種用過燃料束建立幾何模型，並依各根燃料束之退出燃耗(10.58~27.83 GWD/MTU)和冷卻時間作計算，求出各燃料束三種射源項之強度，表三整理出 TSC01 貯存護箱內之總射源強度以供參考。至於燃料中子和光子射源項之軸向分佈，則是依各根用過燃料束之燃耗度軸向分佈，再搭配射源項強度(S)與燃耗度(burnup)之關係 ($S \propto burnup^n$) 決定之。核研所報告[2]指出 GE8×8-1 和 GE8×8-2 型號之燃料束，燃料中子射源與燃耗度的關係分別呈 3.15 和 3.01 次方的關係，而燃料光子射源則是 1.01 和 1.0139 次方。56 束用過核燃料之燃耗度軸向分佈則是由台電提供，搭配上上述參數即可定出用過燃料束之軸向強度分佈，如圖四和圖五所示。

DJ	DH	DG	DF	DE	DD	DC	DB	DA
		P-52 LJ1151 51W	AJ-58 LJ1102 52W	AE-48 LJ1196 54W	AH-47 LJ1120 51W	AL-52 LJ1129 50W		
	AJ-60 LJ1354 54W	AE-53 LJ1203 62W	AJ-54 LJ1240 63W	AG-60 LJ1487 64W	AD-57 LJ1343 63W	AG-59 LJ1455 62W	AB-57 LJ1294 54W	
	AJ-55 LJ1100 56W	AJ-47 LJ1261 65W	AD-53 LJ1363 68W	AT-3 LJC932 112W	AL-50 LJ1458 69W	AG-58 LJ1401 65W	AE-49 LJ1289 56W	
AD-56 LJ1137 45W	AE-51 LJ1315 57W	AF-59 LJ1488 67W	AU-5 LJC935 113W	AT-5 LJC930 125W	AU-3 LJC938 114W	AF-51 LJ1280 68W	AE-52 LJ1312 57W	AF-60 LJ1116 50W
AB-55 LJ1112 50W	AK-55 LJ1241 60W	AG-53 LJ1454 68W	AT-4 LJC931 113W	AT-6 LJC929 123W	AT-7 LJC923 113W	AB-54 LJ1341 68W	AE-50 LJ1253 58W	AB-58 LJ1107 42W
	AD-55 LJ1199 57W	AG-56 LJ1392 66W	AF-58 LJ1467 69W	AU-4 LJC937 104W	AH-52 LJ1472 69W	AD-60 LJ1252 66W	AK-56 LJ1290 57W	
	AD-59 LJ1201 55W	AJ-59 LJ1159 63W	AH-49 LJ1422 64W	AB-56 LJ1469 64W	AJ-57 LJ1160 63W	AE-47 LJ1300 63W	AG-55 LJ1453 55W	
		P-51 LJ1149 48W	AF-52 LJ1213 53W	AD-58 LJ1447 54W	AD-54 LJ1430 53W	P-54 LJ1095 50W		

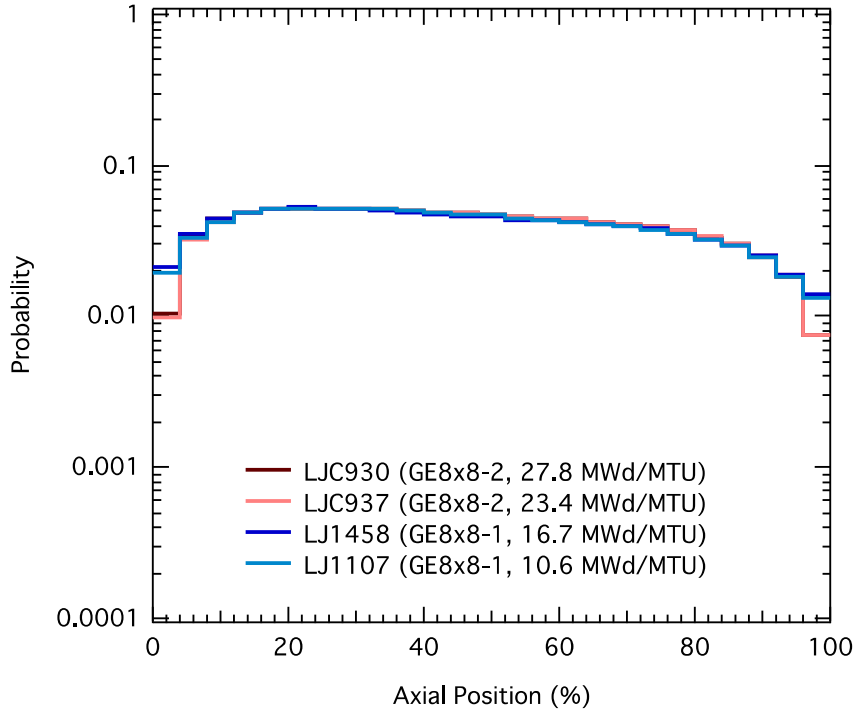
圖三、編號 TSC01 貯存護箱內用過燃料束之裝填配置

表三、安全分析報告與試運轉貯存護箱之總射源項強度

Source Term	SAR	TSC01
Fuel Neutron (n/s)	1.1233E+10	1.681E+08
Fuel Gamma (γ -ray/s)	6.2328E+16	1.498E+16
Hardware Gamma (γ -ray/s)	4.6015E+14	1.309E+13



圖四、燃料中子射源軸向強度分佈



圖五、燃料光子射源軸向強度分佈

(3) 計算程式簡介與設定

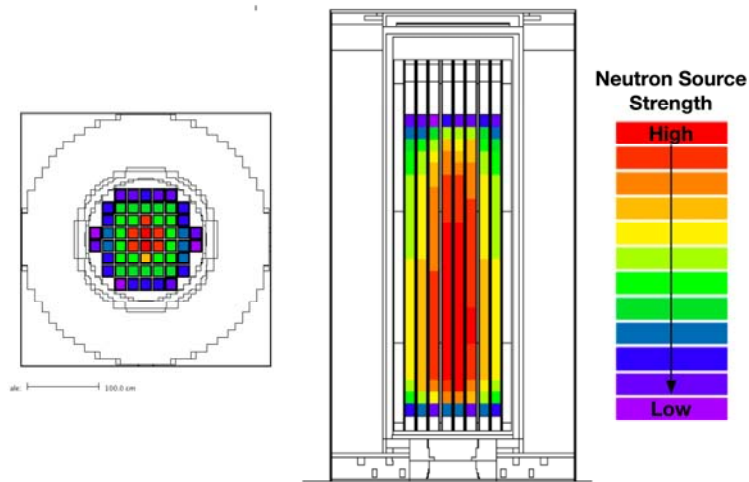
用過燃料乾式貯存護箱分析是複雜的深穿透屏蔽計算，要在合理的時間內計算出護箱表面之劑量率，必需利用 CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) 方法，增加蒙地卡羅遷移計算之效率，因此本研究使用 SCALE6 系統[3]之 MAVRIC 控制模組，以三維分格縱座標遷移計算程式 (DENOVO) 之伴隨遷移計算，求得伴隨通率分佈(Adjoint Flux)來設定重要性地圖(Importance Map)和射源偏導(Source Biasing)之參數，再以 MONACO 程式作蒙地卡羅遷移計算。

MAVRIC 程式僅能設定單一射源項，因此護箱表面劑量率需分別計算 56 束用過核燃料射源項後再作加總，如此一來會耗費相當多的計算時間，才能取得合理的數據。依先前之研究成果[4]發現花費 166 天的計算時間，仍然有多數區域之統計誤差高於 10%。為了提升計算效率，本研究進一步修改 MAVRIC 的程式碼，直接依照 TSC01 貯存護箱內 56 束用過燃料束之裝填配置，一次設定所有射源項之空間分佈。首先，我們詳細檢視 MAVRIC 程式碼，結果發現 MAVRC 程式計算時所採用之射源強度空間分佈是儲存於 CADIS.f90 檔的 volume(x,y,z)陣列，其中 x、y 和 z 為 XYZ 三軸之指標。而本研究之修改方法是保留 MAVRIC 預設之射源設定功能，僅在射源項設定後，增加讀取外部檔案數據之程式碼（見附錄 Line Number 207~215），依各晶格位置之射源強度作設定，逐一取代原先設定之射源強度分佈。而所需設定之數目與空間分格設定有關，因此在外部檔案(圖六)中第一行則是設定描述射源項空間分佈所需之晶格數目，其後則為各晶格所在位置之 XYZ 指標和其射源強度。在實際執行 MAVRIC 程式計算前，依 56 束燃料束之射源項強度和軸向強度分佈，建立三個射源項空間分佈檔案。由空間切割的設定找出 56 束燃料束之射源項位置，即 XYZ 指標。而本研究將每根燃料束在 XY 平面分成四等份，且於有效燃料區軸向分成 25 區，所以燃料中子和燃料光子射源項共需要設定 5600 個晶格之射源強度，才能完整定義之。至於結構光子射源部分除了有效燃料區外，還包含氣室和上下端板，所需定義之晶格數為 7616 個。為了證明修改後之 MAVRIC 程式可依外部檔案之描述進行設定，更將 MAVRIC 程式輸出之射源檔(msm)，利用 MESHVIEW 程式作圖。圖七顯示 TSC01 貯存護箱之中子射源項強度分佈，與 56 束用過核燃料之裝填配置一致，直接證實本研究修改後之 MAVRIC 程式，是可同時針對 56 束用過核燃料之射源項進行屏蔽計算。

Line Number	1	5600			
	2	63	65	16	2.1280e+03
	3	64	65	16	2.1280e+03
	4	63	66	16	2.1280e+03
	5	64	66	16	2.1280e+03
	6	63	65	17	6.7720e+04
	7	64	65	17	6.7720e+04
	8	63	66	17	6.7720e+04
	9	64	66	17	6.7720e+04
	10	63	65	18	1.4490e+05
	11	64	65	18	1.4490e+05
	12	63	66	18	1.4490e+05
	13	64	66	18	1.4490e+05
	14	63	65	19	2.0270e+05
	15	64	65	19	2.0270e+05
	16	63	66	19	2.0270e+05
	17	64	66	19	2.0270e+05
	18	63	65	20	2.3430e+05
	19	64	65	20	2.3430e+05
	20	63	66	20	2.3430e+05
	21	64	66	20	2.3430e+05
	22	63	65	21	2.4500e+05

⋮

圖六、TSC01 貯存護箱中子射源項之外部檔案

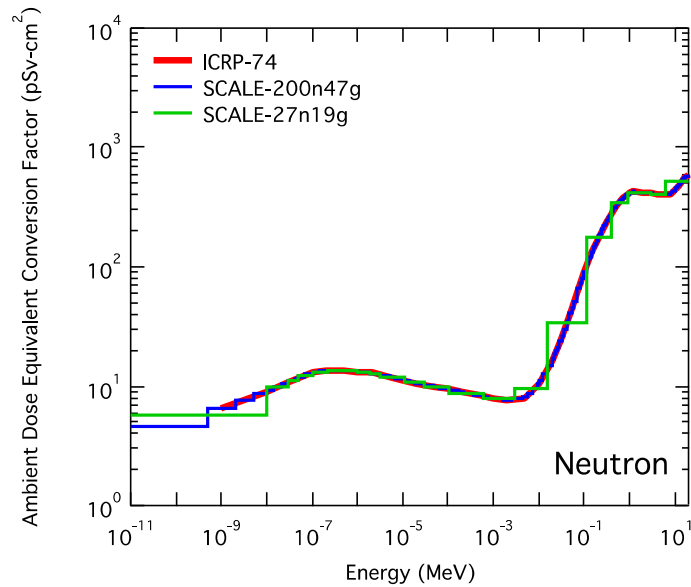


圖七、TSC01 貯存護箱中子射源項之強度分佈

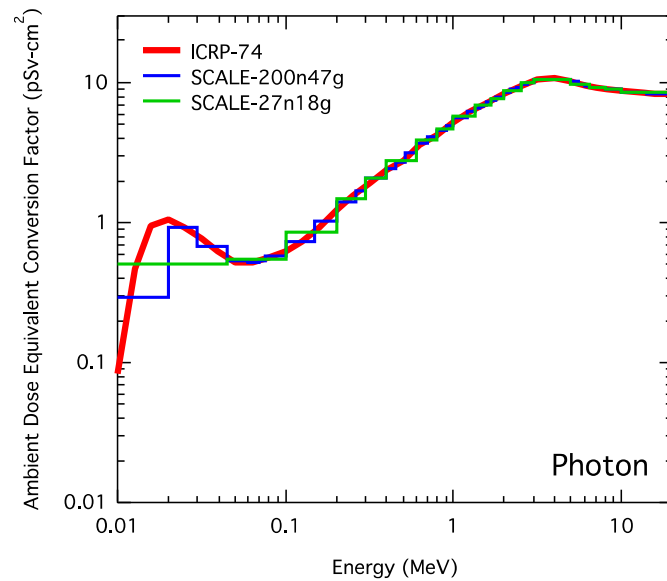
本研究所使用之計算機器，是搭載時脈 2.8 GHz 的 Intel Core i7 中央處理器。為了因應 DENOVO 程式需使用大量的記憶體空間，更將記憶體擴充至 24 GB。DENOVO 程式運算所需之記憶體空間，與空間分格數目和截面群組數成正比。而本研究詳細地模擬密封鋼筒之內部結構，DENOVO 程式之計算模型需依 XYZ 軸分成 126×120×61 個區域，已花費相當大的記憶體空間，因此屏蔽計算之截面資料庫則是選用截面群組

數較低之 V7-27N19G 作運算。

貯存護箱之表面劑量率，則是採用總徑跡長計量方法(Total Track Length Estimator)算出粒子通率，並配合 ICRP 第 74 號報告之劑量轉換因子，轉換成 ICRU 球（直徑 30 公分，76.2% Oxygen, 11.1% Carbon, 10.1% Hydrogen and 2.6% Nitrogen）深度 10 公厘處之周圍等效劑量。護箱頂部和側邊表面各以 5cm 和 10cm 為一分區，並將周向分為十二等分，詳細計算出 TSC01 貯存護箱表面劑量率之空間分佈。



圖八、周圍等效劑量轉換因子(中子)

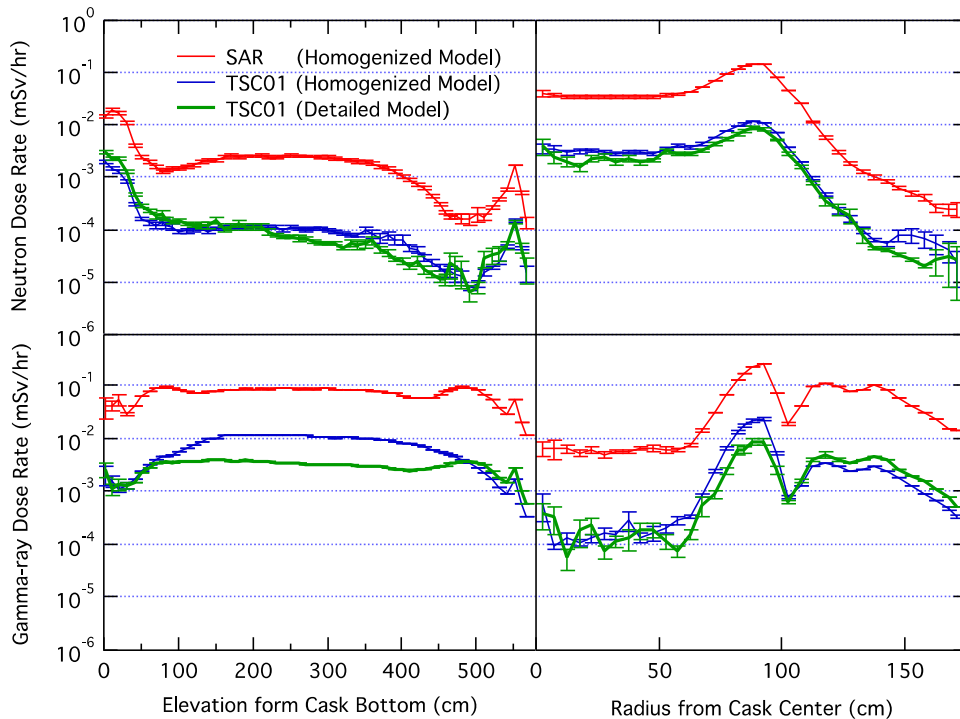


圖九、周圍等效劑量轉換因子(光子)

三、研究結果

(1) 計算模型之比較

圖十顯示 TSC01 貯存護箱側邊和頂部，周向平均之表面劑量率分佈。與安全分析報告之設計基準相比，TSC01 貯存護箱裝載之用過燃料束，燃耗較低且冷卻時間較長，表面中子和光子劑量率皆降低 10 倍以上，由此可知，安全分析報告之表面劑量率有相當大的安全餘裕 (~10)。此外，若將屏蔽計算模型之密封鋼筒作均質化處理，並假設射源項強度於徑向是均勻分佈，進一步發現中子劑量率僅有些微的差異，唯一差異較大的是在貯存護箱側邊有效燃料區之光子劑量率，其主要原因是密封鋼筒內多為高質量數元素的材料，對伽瑪射線有較佳的屏蔽效果，而 TSC01 貯存護箱內之燃料佈局是將高燃耗之燃料束放置於中央，因此忽略射源項之徑向分佈，將會高估表面光子劑量率約 3 倍左右。



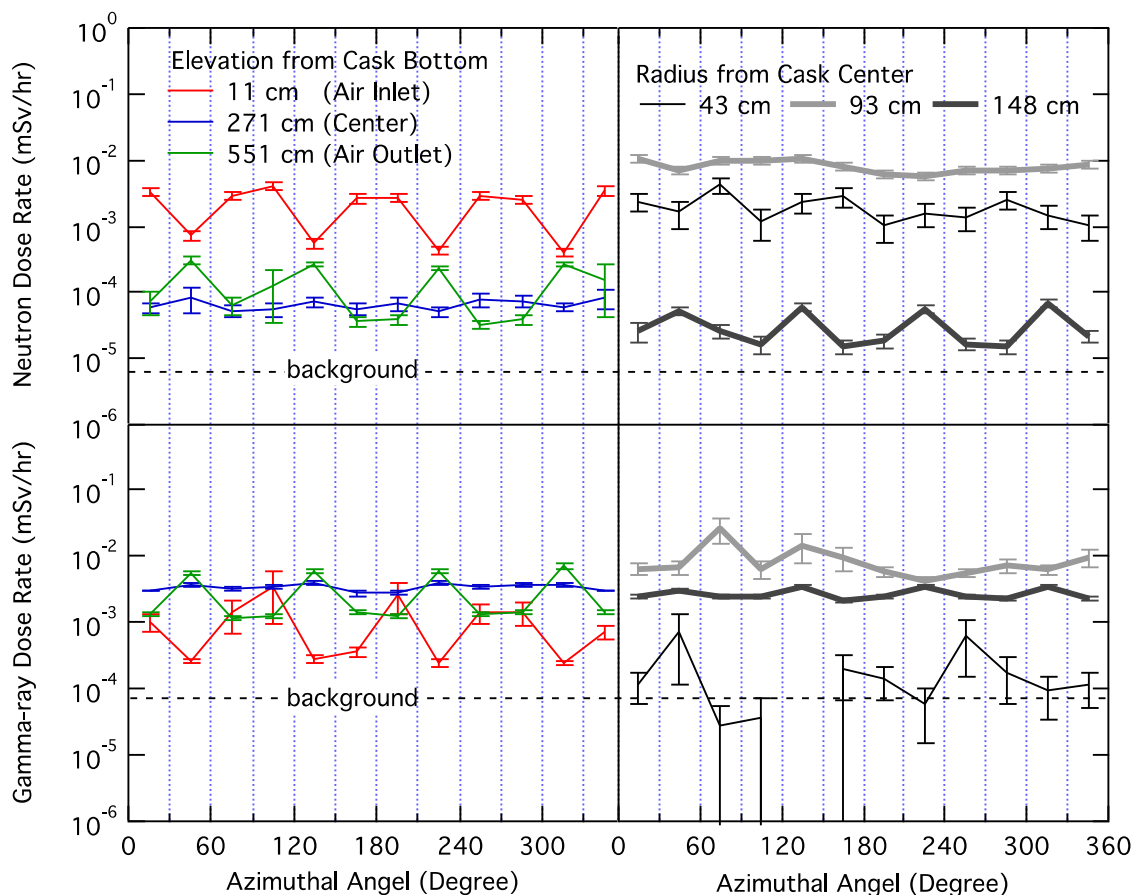
圖十、TSC01 貯存護箱側邊和頂部之表面劑量率分佈

(2) 表面劑量率周向分佈

圖十一顯示貯存護箱側邊，三個高度位置（進氣口、出氣口和燃料束中心）表面劑量率之周向分佈。因輻射集流效應，貯存護箱底部四個空氣進氣口(60°-120°, 150°-210°, 240°-300°, 330°-30°)，和距貯存護箱底部 550 公分高處四個出氣口(30°-60°, 90°-120°, 150°-180°, 210°-240°)，和距貯存護箱底部 550 公分高處四個出氣口(30°-60°, 90°-120°, 150°-180°, 210°-240°)，和距貯存護箱底部 550 公分高處四個出氣口(30°-60°, 90°-120°, 150°-180°, 210°-240°)。

120°-150°, 210°-240°, 300°-330°), 不論是中子和光子劑量率都有明顯上升, 然而在燃料束中心位置, 劑量率之周向分佈相當均勻, 並沒有明顯之差異。而貯存護箱頂部, 表面劑量率因統計誤差較大, 看不出顯著之分佈, 唯有在距護箱中心半徑 148 公分處, 因出氣口位置之屏蔽效果較弱, 導致四個出氣口方位之劑量率都有明顯偏高的現象。

根據文獻資料[5]顯示, 在海拔 40 公尺高的中子劑量率背景值為 $6.4 \times 10^{-6} \pm 3.9\%$ mSv/hr, 而光子劑量率背景值為 7.2×10^{-5} mSv/hr, 所以實際量測 TSC01 貯存護箱之劑量率比背景值高約 10 倍以上。但貯存護箱之表面光子劑量率, 根據 Boardhead 等人[6]的研究指出實驗量測值低於計算值約 60%, 此外評估結構光子射源之 Co-59 含量也是採用保守值, 因此實際量測 TSC01 貯存護箱光子劑量率, 在某些區域可能會與背景值相近, 需要花費較多的量測時間才能取得統計誤差小之量測數據。



圖十一、TSC01 貯存護箱側邊和頂部表面中子和光子劑量率之周向分佈

(3) 不確定度分析

為了驗證貯存護箱屏蔽計算分析之準確性，未來將與實驗結果作比較。雖然本研究已竭盡所能依實際情況進行模擬分析，但是受限某些因素，仍然有些假設和妥協之設定，在此進一步討論兩項會影響屏蔽計算之不確定度因素，其中一項是結構光子射源項，另一項是中子截面資料庫。結構光子射源項主要是來自中子活化之 Co-60，其射源項強度跟結構材料內 Co-59 初始含量和活化中子通率有關。在結構材料中 Co-59 屬於微量元素，並沒有標準含量可供參考，根據廠商提供之資訊 Co-59 含量為 0.47%，但是 Boardhead 等人[6]利用 SAS2H 程式分析後，發現會大幅高估結構光子射源，因此建議設定改為 0.1%，而本研究則是延用核一乾貯安全分析報告之保守設定 0.12%。此外，燃料束各區受中子照射而產生活化，但各區之中子通率強度皆不相同，本研究是依燃料區內之中子通率強度，搭配奇異公司提供 GE 8x8 燃料束之中子通率比率參數，推算出其他各區之中子通率強度，而此一數據是透過何種方式取得，原廠並無清楚的說明。表四[6]列出 6 束壓水式用過核燃料，實際測量各區結構材料內含之鈷 60 濃度，雖然六束燃料束之燃耗度與冷卻時間皆一致，但是可明顯看出鈷 60 含量有相當大的差異。總結而論，計算分析與實際裝填之結構光子射源強度可能會有一段差距，若要準確地評估結構光子射源項，唯有針對實際裝填之用過燃料束，進行破壞性的取樣作微量元素分析，或是使用非破壞性之伽馬射線掃描，來修正計算分析之數據。

表四、用過燃料束結構材料之 ^{60}Co 含量($\mu\text{Ci}/\text{mg}$)

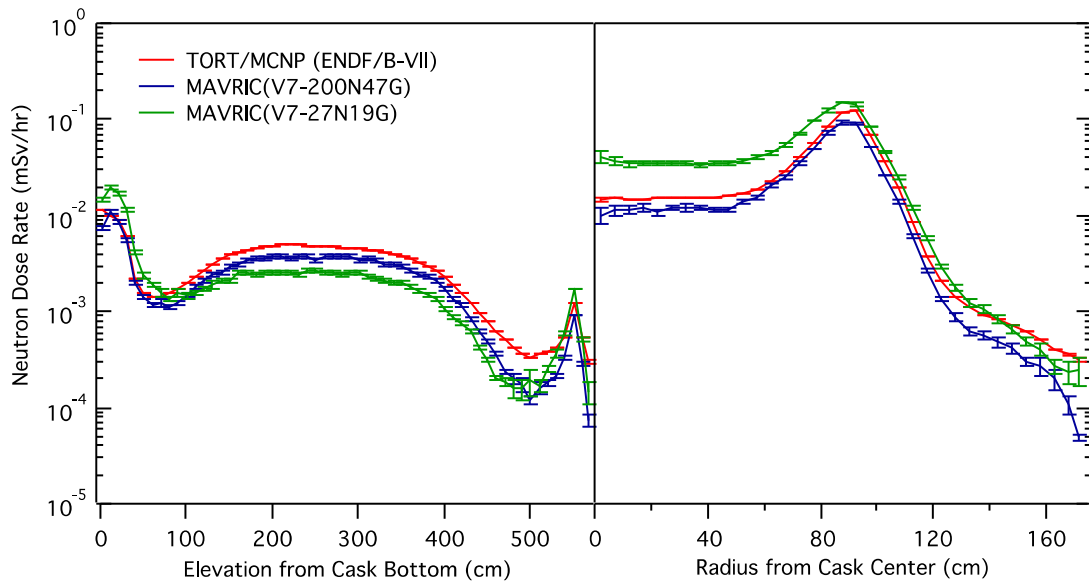
Location	Point Beach LM036F	Surry R15	Surry L04	Turkey Point B02	Turkey Point D01	Ginna A05
Bottom nozzle	4.9	8.3	15.0	1.1	12.0	---
Spacer grid average	18.2	16.9	2.5	11.3	11.0	23.5
Top nozzle	2.3	0.8	0.6	0.5	3.3	1.9
Top grid (plenum)	4.1	4.5	0.4	3.1	6.8	----
Assembly type	W14 X 14	W15 X 15	W15 X 15	W15 X 15	W15 X 15	W14 X 14

*Burnup : 33 MWD/MTU, Cooling time:9 yr

中子截面隨入射中子能量之變化相當大，因此將截面資料作群組化後，進行複雜的深穿透屏蔽計算，則有可能影響最終計算之表面中子劑量率。先前的研究[7]以

INER-HPS 貯存護箱為例，詳細比較屏蔽計算分析使用連續截面資料庫，與 200 群和 27 群中子截面資料庫，護箱表面中子劑量率之差異。圖十二顯示使用 27 群中子截面資料庫之計算結果，在貯存護箱側邊中子劑量率會低估約 57%，而頂部則有明顯高估約 39%。但是改採 200 群中子截面資料庫雖然有明顯的改善，中子劑量率仍有 25% 的低估，所以使用群組化之截面資料庫確會影響屏蔽計算分析之準確性。

本研究之屏蔽計算分析是使用 27 群截面資料庫，所以計算結果會有一定程度的偏差，若要改善截面群組化對屏蔽計算準確度之影響，需改採用 200 群的截面資料庫作計算。但是依本研究之計算設定，搭配 27 群中子截面資料庫，需要約 6 GB 的記憶體空間，採用 200 群中子截面資料庫則要增加為 30 GB，超過我們計算機設備之記憶體最大容量 24 GB，因此需要有適合的機器才能作進一步的運算。



圖十二、貯存護箱表面中子劑量率分佈

四、結論與未來工作

本研究針對核一用過燃料乾式貯存護箱進行輻射屏蔽分析。計算模型仔細模擬密封鋼桶內之細部結構，射源項更依 TSC01 貯存護箱裝填配置之燃料束作設定。此外，本研究更改進 MARVIC 程式，使其可直接定義射源項之空間分佈，大幅提升乾式貯存護箱輻射屏蔽計算分析之計算效率。花費約 15 天的運算時間，即分析出 TSC01 護箱頂部和側邊表面中子和光子劑量率之詳細分佈。未來驗證分析之實驗量測則可依照計算分佈結果，與實驗器材之特性，制定適切的量測計劃。根據目前台電公司之試運

轉規劃，僅有一天的量測時間可供我們測定 TSC01 貯存護箱之輻射劑量率強度分佈，如何有效率的取得實驗數據則是一大考驗。至於屏蔽計算分析方面，現階段本研究已竭盡所能考慮所有因素，讓屏蔽計算分析更貼近 TSC01 貯存護箱實際情況，但是仍有些許參數是需要配合未來實際狀況，如 TSC01 裝填之燃料束配置，密封鋼桶放置的面向、偵檢器位置和偵檢器的響應函數，不斷地進行調整。總而言之，本研究已建立 TSC01 貯存護箱之輻射屏蔽分析方法，未來只需修正部分參數後再重新計算，即可與實驗量測結果值進行驗證分析的研究。

五、參考文獻

1. 核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告，台灣電力公司，民國 95 年。
2. *SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations*, ORNL/TM-2005/39, Version 6.0, Vols. I–III (January 2009).
3. 李國威、邱一夫、周志銘，核一廠用過核子燃料燃燒歷程彙整暨射源項參數靈敏度分析 INER-7360R，民國 99 年。
4. 江祥輝、許榮鈞、陳彥甫、林政緯、陳君柔，用過核子燃料輻射屏蔽技術研究核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告，民國 99 年。
5. Munehiko Kowatari and et al., *Evaluation of the Altitude Variation of the Cosmic-ray Induced Environmental Neutrons in the Mt. Fuji Area*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 42, No. 6, p. 495–502, 2005.
6. Bryan L. Broadhead and et al., *Evaluation of Shielding Analysis Methods in Spent-fuel Cask Environment*, *Nuclear Technology*, Vol. 117, p. 206-222, 1997.
7. Y. F. Chen, R. J. Sheu, S. H. Jiang, J. N. Wang, 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*, 2010, *Manuscript submitted for publication*.
8. J. F. Briesmeister, (Ed.), *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*. LA-13709-M. Los Alamos National Laboratory, USA, 2000.

附錄 CADIS.f90 修正檔

```

1 module cadis_module
2 !*****
3 !
4 ! Create a mesh importance map and a mesh source from adjoint fluxes
5 !
6 !             Consistent Adjoint Driven Importance Sampling
7 !
8 ! The importance map and the mesh source will be consistent: the particles
9 ! sampled from the biased source will be born with weights that match the
10 ! target weights of the weight windows for the cell they were born into.
11 !
12 !
13 ! REFERENCES
14 !
15 ! 1. A. HAGHIGHAT and J. C. WAGNER, "Monte Carlo Variance Reduction with
16 !   Deterministic Importance Functions," Progress in Nuclear Energy, 42(1),
17 !   25-53, (2003).
18 !
19 ! 2. WAGNER, J. C. Acceleration of Monte Carlo Shielding Calculations with
20 !   an Automated Variance Reduction Technique and Parallel Processing,
21 !   Ph.D. dissertation, Pennsylvania State University, University Park,
22 !   Pennsylvania (1997).
23 !
24 !*****
25 use vast_kind_param, only: single ! scalelib
26 use numericalConstants_module      ! scalelib
27 use boundingBox_module             ! basicGeom
28 use energyStructure_module         ! smClib
29 use geometryGrid_module           ! gridGeom
30 use meshImportanceMap_module       ! monaco
31 use meshSource_module             ! monaco
32 use meshSourceHelper_module        ! monaco
33 use meshSourceSaver_module         ! monaco
34 use source_module                  ! monaco
35 use sourceGeom_module              ! monaco
36
37 use tortVarsclFile_module
38
39
40 implicit none
41
42 interface setupCADIS
43   module procedure setupCADIS1
44   module procedure setupCADIS2
45 end interface setupCADIS
46
47 public setupCADIS
48 private setupCADIS1, setupCADIS2
49 private checkAdjointFlux
50
51 ! for CADIS testing
52 public separableBiasedSource, simpleMeshSource
53
54 contains
55
56 ! Subroutine - only for TORT's with continuous mesh
57 !-----
58 subroutine setupCADIS1(tortVarsclFile, trueSource, geometryGrid, outputUnit, &
59                       energyStructure, subCells, sourceTrials, &
60                       meshImportanceMap, meshSource)
61   implicit none
62   type (tortVarsclFile_type), intent(in)    :: tortVarsclFile
63   type (source_type), intent(in)           :: trueSource
64   type (geometryGrid_type), intent(in)     :: geometryGrid
65   integer, intent(in)                     :: outputUnit
66   type (energyStructure_type), intent(in)  :: energyStructure
67   integer, intent(in)                     :: subCells
68   integer, intent(inout)                  :: sourceTrials
69   type (meshImportanceMap_type), intent(out) :: meshImportanceMap
70   type (meshSource_type), intent(out)     :: meshSource

```

```

71 integer :: ierror, iregion, icount
72 integer :: i,j,k, g
73 integer :: nx,ny,nz,nr,ng,ns
74 real(kind=double), dimension(:, :, :), pointer :: volumes
75 real(kind=double), dimension(:, :), allocatable :: adjoint
76 real(kind=double), dimension(:, :), allocatable :: source
77 real(kind=double), dimension(:, :), allocatable :: temp
78 real(kind=double) :: total, volume, totalVolume
79 real(kind=double) :: totalDRF, unbiasedSum, biasedSum
80 real(kind=double) :: vweight
81 ! modified by YF Chen 2011
82 real(kind=double) :: sourceintensity
83 integer :: xx,yy,zz, sourcenum
84 !
85 real(kind=double), dimension(:), allocatable :: eweight
86 logical :: nu, talk=.false., peptalk=.true.
87 type (boundingBox_type) :: boundingBox
88
89 if(geometryGrid%title=='no geometry supplied')then
90     nx = tortVarsclFile%im ! number of cells, not planes
91     ny = tortVarsclFile%jm
92     nz = tortVarsclFile%km
93     nr = nx*ny*nz
94 else
95     nx = geometryGrid%nx
96     ny = geometryGrid%ny
97     nz = geometryGrid%nz
98     nr = nx*ny*nz
99 end if
100 ng = tortVarsclFile%igm
101
102 ! Step Zero: Same mesh for importance map and biased source
103 if(peptalk)write(outputUnit,*)'          Step Zero'
104
105 if(geometryGrid%title=='no geometry supplied')then
106     ! get from varscl (single precision)
107     meshImportanceMap%geometryGrid = newgeometryGrid( &
108         real(tortVarsclFile%x(:,1),kind=double), &
109         real(tortVarsclFile%y(:,1),kind=double), &
110         real(tortVarsclFile%z,      kind=double))
111 else
112     ! use the user supplied (double precision)
113     meshImportanceMap%geometryGrid = copyGeometryGrid(geometryGrid)
114 end if
115
116 meshImportanceMap%nx = nx
117 meshImportanceMap%ny = ny
118 meshImportanceMap%nz = nz
119 meshImportanceMap%nr = nr
120 meshImportanceMap%ng = ng
121
122 allocate(meshImportanceMap%importance(1:nr,1:ng),stat=ierror)
123 if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'importance',ierror
124 10 format(4x,'cadis_module:  setupCADIS1():  ',/,&
125     4x,'          Error allocating memory for ',A,I4)
126
127 meshSource%geometryGrid = copyGeometryGrid(meshImportanceMap%geometryGrid)
128 meshSource%nx = nx
129 meshSource%ny = ny
130 meshSource%nz = nz
131 meshSource%ng = ng
132
133 allocate(meshSource%spectra(1:nx,1:ny,1:nz),stat=ierror)
134 if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'spectra',ierror
135
136 allocate(meshSource%amounts(1:nx,1:ny,1:nz),stat=ierror)
137 if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'amounts',ierror
138 meshSource%amounts = ZERO
139 allocate(meshSource%vweights(1:nx,1:ny,1:nz),stat=ierror)

```

```

141     if(ierr/=0)write(outputUnit,10)'weights',ierror
142
143     ! Step One: Adjoint Flux as a function of position and energy
144     if(peptalk)write(outputUnit,*)'    Step One'
145
146     ! for each region in the grid geometry, set the adjoint flux
147     allocate(adjoint(1:nr,1:ng),stat=ierror)
148     if(ierr/=0)write(outputUnit,10)'adjoint',ierror
149     adjoint = ZERO
150     iregion = 0
151     do k=1,nz
152         do j=1,ny
153             do i=1,nx
154                 iregion = iregion+1
155                 adjoint(iregion,1:ng) = &
156                     real(tortVarsclFile%flij(i,j,k,1:ng),kind=double)
157             end do
158         end do
159     end do
160
161     call checkAdjointFlux(nr,ng,adjoint,outputUnit)
162
163     ! Step Two: True source emission as a function of position and energy
164     !           volumes is a pdf of source emission location
165     if(peptalk)write(outputUnit,*)'    Step Two'
166
167     !if(peptalk)then
168     !    call displaySource(trueSource, outputUnit)
169     !end if
170
171     allocate(volumes(1:nx,1:ny,1:nz),stat=ierror)
172     if(ierr/=0)write(outputUnit,10)'volumes',ierror
173     boundingBox = getBoundingBoxFromSource(trueSource)
174     !if(peptalk)call displayBoundingBox(boundingBox,outputUnit)
175     call volumeMap(meshSource%geometryGrid, boundingBox, volumes)
176     totalVolume = sum(volumes) ! of cells with source in them
177     !if(peptalk)write(outputUnit,*)'    initial sum of volumes:',totalVolume
178
179     nu = hasNonUniformSampling(trueSource%sourceGeom)
180
181     if(subCells>0 .and. .not.nu)then
182         call maskTrueSource4(meshSource%geometryGrid,trueSource,volumes, subCells)
183         totalVolume = sum(volumes) ! of cells with source in them
184         !if(peptalk)write(outputUnit,*)'    first try at volumes: ',totalVolume
185     end if
186
187     ! for point sources, small shapes, etc we need to actually sample the source
188     ! for a non-uniform source, we need to sample it
189     if(totalVolume<=ZERO .or. nu)then
190         ! none of the above selected points registered as valid source points
191         ! Might be a degenerate source so try sampling the source
192         write(outputUnit,*)'    WARNING: In creating a mesh source using cell center sampling'
193         write(outputUnit,*)'    (subCells=',subCells,') no cells with source were found.'
194         write(outputUnit,*)'    Using sourceTrials=',sourceTrials,' to create source.'
195
196         if(sourceTrials>sourceTrialsDefault*10)then
197             write(outputUnit,*)'    WARNING: The number of source trials for making a mesh source
198             write(outputUnit,*)'    This step may take a while...'
199         end if
200         if(sourceTrials>sourceTrialsDefault*100)then
201             sourceTrials = 100*sourceTrialsDefault
202             write(outputUnit,*)'    Source trials capped at ',sourceTrials
203         end if
204
205         call sourceMappedToGrid(meshSource%geometryGrid,trueSource, &
206             sourceTrials, volumes)
207         ! modified by Y.F. Chen 2011
208         ! change source intensity
209         open(unit=100,file='sourcemap.txt')
210         read (100,'(I8)')(sourcenum)

```

```

211         do i=1,sourcenum
212             read (100,'(3(I3,1X),E11.4')(xx,yy,zz,sourceintensity)
213                 volumes(xx,yy,zz)=sourceintensity
214         end do
215         close(100)
216         !
217         totalVolume = sum(volumes) ! of cells with source in them
218         !if(peptalk)write(outputUnit,*)'                second try at volumes: ',totalVolume
219         write(outputUnit,*)'                Done.'
220     end if
221
222     if(totalVolume<=ZERO)then
223         ! There were no cells that have true source in them.
224         ! The grid must not encompass the true source.  Bummer.
225         ! Fix it or the code will die with a divide-by-zero later
226         write(outputUnit,*)'                No source found in geometryGrid!'
227         write(outputUnit,*)'                Eeeeeek.  Have to assume a uniform source over the grid.'
228         call volumeMap(meshSource%geometryGrid, volumes)
229         totalVolume = totalDefinedVolumeGeometryGrid(meshSource%geometryGrid)
230         !if(peptalk)write(outputUnit,*)'                third try at volumes: ',totalVolume
231     end if
232
233
234     volumes = volumes/totalVolume
235
236     ! how many voxels really have source
237     ns = 0
238     do k=1,nz
239         do j=1,ny
240             do i=1,nx
241                 if(volumes(i,j,k)>ZERO)ns=ns+1
242             end do
243         end do
244     end do
245     meshSource%ns = ns
246     allocate(meshSource%energy(1:meshSource%ns,1:ng),stat=ierror)
247     if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'energy',ierror
248     allocate(meshSource%weights(1:meshSource%ns,1:ng),stat=ierror)
249     if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'weights',ierror
250
251     ! the unbiased source pdf - function of space and energy
252     allocate(source(1:nr,1:ng),stat=ierror)
253     if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'source',ierror
254     source = ZERO
255     iregion = 0
256     do k=1,nz
257         do j=1,ny
258             do i=1,nx
259                 iregion = iregion+1
260                 source(iregion,1:ng) = volumes(i,j,k)*trueSource%epdft(1:ng)
261             end do
262         end do
263     end do
264
265     ! Step Three:  Total Detector Response Function
266     if(peptalk)write(outputUnit,*)'                Step Three'
267
268     ! for the given source distribution, calculate the total detector
269     !     response function (integral of source()*adjflux() over E and space)
270     allocate(temp(1:nr,1:ng),stat=ierror)
271     if(ierror/=0)write(outputUnit,10)'temp',ierror
272     temp = source*adjoint
273     totalDRF = sum(temp)
274     ! for now, use total DRF per source particle
275     !     do not use:
276     !         totalDRF = totalDRF * trueSource%strength
277     ! store it in the mesh importance map
278     if(totalDRF<=ZERO)then
279         write(outputUnit,507)totalDRF
280         507 format(/,&

```



```

281         ' The total detector response of importance map is ',ES14.7,/,&
282         ' Since this represents the sum of the true source multiplied by the',/,&
283         ' adjoint flux, this means that there were no voxels where both the',/,&
284         ' true source and the adjoint flux were greater than zero.',/,&
285         ' One cause of this could be using a neutron response function as ',/,&
286         ' adjoint source with a true photon source.',/,&
287         ' MAVRIC has been stopped.')
288     write(outputUnit,507)totalDRF
289     stop
290 end if
291 meshImportanceMap%totalDRFperSource = totalDRF
292
293 ! Step Three-B: The importance map
294 if(peptalk)write(outputUnit,*)'      Step Three-B'
295
296 ! The importances for each energy group in each cell are defined as
297 ! the total detector response divided by the adjoint flux
298 ! This corresponds to the center of the weight window
299 meshImportanceMap%importance = ZERO
300 iregion = 0
301 do k=1,nz
302     do j=1,ny
303         do i=1,nx
304             iregion = iregion + 1
305             do g=1,ng
306                 if(adjoint(iregion,g)>ZERO)then
307                     meshImportanceMap%importance(iregion,g) = totalDRF/adjoint(iregion,g)
308                 end if
309             end do
310         end do
311     end do
312 end do
313
314 call destructEnergyStructure(meshImportanceMap%energyStructure)
315 meshImportanceMap%energyStructure = copyEnergyStructure(energyStructure)
316
317 ! Step Four: The biased source distribution = sources*adjoint/totalDRF
318 ! only store spectra for non-zero voxels
319 if(peptalk)write(outputUnit,*)'      Step Four'
320
321 iregion = 0
322 icount = 0
323 do k=1,nz
324     do j=1,ny
325         do i=1,nx
326             iregion = iregion + 1
327             if(volumes(i,j,k)>ZERO)then
328                 icount = icount + 1
329                 meshSource%energy(icount,1:ng) = temp(iregion,1:ng)/totalDRF
330             end if
331         end do
332     end do
333 end do
334
335 ! mesh source is a general mesh source, so separate space and energy
336 ! the weights of the biased source are equal to the weights of the imp map
337 ! but the meshSource class wants the space and energy separated,
338 ! so that each can be independent
339
340 meshSource%vweights = ZERO
341 meshSource%eweight = ZERO
342 unbiasedSum = sum(trueSource%epdf)
343 if(unbiasedSum<=ZERO)then
344     write(outputUnit,*)'UnbiasedSum of source of importance map is ',unbiasedSum
345     call displaySource(trueSource, outputUnit)
346 end if
347 iregion = 0
348 icount = 0
349 allocate(eweight(1:ng))
350 do k=1,nz

```

```

351     do j=1,ny
352         do i=1,nx
353             iregion = iregion + 1
354             meshSource%spectra(i,j,k) = 0
355             volume = volumes(i,j,k)
356
357             if(volume>ZERO)then
358                 icount = icount + 1
359
360                 meshSource%spectra(i,j,k) = icount
361                 biasedSum = sum(meshSource%energy(icount,1:ng))
362                 meshSource%amounts(i,j,k) = biasedSum
363                 if(biasedSum>ZERO)then
364                     meshSource%energy(icount,1:ng) = &
365                         meshSource%energy(icount,1:ng)/biasedSum
366                     vweight = unbiasedSum*volume/biasedSum
367                     meshSource%vweights(i,j,k) = vweight
368                     eweight(1:ng) = meshImportanceMap%importance(iregion,1:ng)/vweight
369                     where(trueSource%epdf==ZERO)
370                         eweight = ZERO
371                     end where
372                     meshSource%eweight(icount,1:ng) = eweight(1:ng)
373                 end if
374             end if
375         end do
376     end do
377 end do
378
379
380 ! Step Five: Finish up the mesh source
381 if(peptalk)write(outputUnit,*)'      Step Five'
382
383 meshSource%ew = .true.
384 meshSource%va = .true.
385 meshSource%vw = .true.
386
387 ! if the true source was degenerate in any dimension,
388 ! try to preserve that
389 if(boundingBox%xmax<=boundingBox%xmin)then
390     meshSource%xdegen = .true.
391     meshSource%xval = boundingBox%xmin
392 end if
393 if(boundingBox%ymax<=boundingBox%ymin)then
394     meshSource%ydegen = .true.
395     meshSource%yval = boundingBox%ymin
396 end if
397 if(boundingBox%zmax<=boundingBox%zmin)then
398     meshSource%zdegen = .true.
399     meshSource%zval = boundingBox%zmin
400 end if
401
402 ! if the original source was limited by unit, region or mixture
403 ! try to preserve that
404 meshSource%limUnit = trueSource%unit
405 meshSource%limMedia = trueSource%media
406 meshSource%limMixture = trueSource%Mixture
407
408 ! scale for the total source strength
409 meshSource%amounts = meshSource%amounts*trueSource%strength
410
411 ! energy structure
412 call destructEnergyStructure(meshSource%energyStructure)
413 meshSource%energyStructure = copyEnergyStructure(energyStructure)
414
415 ! fill up the total arrays needed for sampling
416 call prepareMeshSource(meshSource)
417
418 ! Step Six: Garbage Collection
419 if(peptalk)write(outputUnit,*)'      Step Six'
420

```

```

421     deallocate(eweight)
422     deallocate(temp)
423     deallocate(source)
424     deallocate(volumes)
425     deallocate(adjoint)
426 end subroutine setupCADIS1
427
428
429 ! Subroutine - only for TORT's with continuous mesh
430 !-----
431 subroutine setupCADIS2(tortVarsclFile, trueSource, geometryGrid, outputUnit, &
432 .....
433
434
435
436
437 ! subroutine - dumb down the biased source distribution so that Monaco
438 ! can use it
439 !   What?? Is this used, is it even right???
440 !   Looks like adjoint is found from an empty importance map?!?!
441 !-----
442 subroutine separableBiasedSource(source, meshSource, outputUnit, &
443 ....
444
445
446
447 ! Subroutine - only for TORT's with continuous mesh
448 !   Set up a mesh source with only one mesh cell - same as a standard source
449 !
450 !   Used during testing of CADIS stuff
451 !-----
452 subroutine simpleMeshSource(source, outputUnit, meshSource)
453 ....
454
455
456 ! Subroutine
457 !-----
458 subroutine checkAdjointFlux(nr,ng,adjoint,outputUnit)
459 ....
460
461 end module cadis_module
462

```