

行政院原子能委員會
放射性物料管理局

乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析

<103FCMA001>

期末報告

國立清華大學

施純寬

曾永信

中華民國 103 年 11 月 26 日

摘要

為了充實我國乾貯系統安全管制之技術與最新資訊，本研究針對乾貯設施於設計壽命期間的熱流行為進行研究，以期透過計算流體力學分析技術，瞭解乾貯系統之密封鋼筒於不同貯存條件下之溫度分布與可能之應力腐蝕，並瞭解 TSC 於台灣環境下長期使用之可靠性。分析結果指出，核一乾貯系統之 TSC 溫度在設計壽命期間的不同熱負載條件下，可以藉由一簡易之無因次化匯整出關係式供未來快速評估之用。而以此為基礎所建立的應力腐蝕趨勢預估工具更可協助評估各種熱流參數(如熱負載、環境溫度等)對應力腐蝕趨勢之影響狀況。另一方面，研究中亦擬藉由國際間安全、管制與分析之資訊進行研究，以全盤瞭解乾貯系統各元件之溫度限值的制定背景。預期本計畫執行所獲得的成果除了可以提供管制單位瞭解乾貯於設計壽命期間的 TSC 特性與應力腐蝕可能性外，相關資訊的蒐集更有助增進民眾對乾貯安全餘裕的認知。

關鍵字：乾貯系統、計算流體力學、設計壽命、應力腐蝕

ABSTRACT

In order to improve the technology and new information of the regulatory for dry-storage system (DSS), a computational fluid dynamics (CFD) technology has been utilized to investigate the thermal-hydraulic behaviors of the TSC during the design lifetime. Several parameters, such as the thermal load, storage time and surrounding temperature, are also been considered in this study. The results not only can help us to understanding the thermal behavior on the TSC, but also be used to further investigate the possibility of SCC on the TSC. The results also confirm that the temperature profile under several loading conditions during design lifetime can be presented as a normalized temperature and becomes a fast assessment tool to evaluate the temperature profile under any loading conditions. Based on the finding, a normalized CGR prediction methodology also been developed to investigate the influence of thermal-hydraulic parameters, such as the thermal load, ambient temperature and so on. On the other hand, the background and decision basis of temperature limitation for the important compartments of DSS are also been investigated through documentations review process. The results obtained by this project are expected can provide suitable recommendations for SCC field application. And, the research contributes from the forward-looking academics will providing the safety evidence of the dry storage application in our country.

Keywords:DSS, CFD, design lifetime, Normalized, SCC

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
一、前言.....	1
1.1 研究背景與目的.....	1
1.2 工作進度與達成度說明.....	3
二、我國核電廠乾貯系統資料與分析參考資料.....	4
2.1 核一廠乾貯系統系統結構.....	4
2.2 材料性質.....	8
2.2.1 流體熱傳性質.....	8
2.2.2 固體熱傳性質.....	9
2.2.3 燃料束流阻係數.....	12
三、數值模式與軟體選用.....	16
3.1 統御方程式.....	16
3.2 數值模式.....	17
3.2.1 DO 熱輻射模式.....	17
3.2.2 紊流模式.....	19
3.2.3 自然對流模式.....	20
四、分析模式建立.....	21
4.1 乾貯系統幾何模式建立.....	22
4.2 衰變熱計算技術.....	23

4.2.1 衰變熱預估模式.....	23
4.2.2 乾貯批次衰變熱估算工具建立.....	28
4.2.3 實際裝載作業之燃料束功率差異模擬技術.....	31
五、設計壽命期間熱流現象研析.....	33
5.1 案例選擇.....	33
5.2 核一乾貯設計壽命期間熱負載之影響評估.....	35
5.2.1 整體熱流特性比對.....	35
5.2.2 設計壽命期間熱流分析.....	46
5.3 TSC 表面 SCC 可能性評估.....	50
5.3.1 誘發 SCC 之環境與機制研析.....	50
5.3.2 乾貯於設計壽命期間之 SCC 發生可能性與 R-CGR 趨勢研析	54
六、材料溫度限值研析與國際乾貯發展狀況.....	58
6.1 乾貯系統材料溫度限值研析.....	58
6.1.1 燃料丸.....	58
6.1.2 燃料護套.....	61
6.1.3 鋁材.....	62
6.1.4 TSC 殼體.....	63
6.1.5 碳鋼.....	64
6.1.6 混凝土.....	66
6.1.7 屏蔽材料.....	67
6.1.8 乾貯系統意外事件溫度限值之管制背景匯整.....	68
6.2 國際乾貯發展狀況.....	70
6.2.1 超出設計壽命之熱流研究.....	71
6.2.2 高燃耗乾貯國際發展狀況.....	74
七、結論.....	77

參考文獻.....	78
附件 A 燃料束流阻 UDF 程式碼.....	80
附件 B 額定負載之燃料束熱功率函式程式碼.....	83
附件 C TSC-01 燃料束熱功率函式程式碼.....	87
附件 D TSC-02 燃料束熱功率函式程式碼.....	93
附件 E TSC-07 燃料束熱功率函式程式碼.....	99
附件 F TSC-25 燃料束熱功率函式程式碼.....	105

圖目錄

圖 1 核一乾貯系統示意圖.....	5
圖 2 核一乾貯系統功率配置圖.....	6
圖 3 對稱邊界模型之簡化示意圖.....	21
圖 4 核一 1/4 貯存階段模型	22
圖 5 不同衰變熱估算方法之差異.....	27
圖 6 核一池內各周期燃料束衰變熱與護箱裝載之熱負載試算工具....	29
圖 7 核一乾貯系統在裝載不同配置之燃料後，在後續貯存期間的熱負 載變化.....	30
圖 8 不同負載配置下的溫度分佈.....	30
圖 9 程式碼測試過程示意圖.....	32
圖 10 案例 1(14KW)熱流分析結果	37
圖 11 SAR 正常案例熱流分析結果[1]	38
圖 12 案例 2(12KW)熱流分析結果	39
圖 13 案例 3(10.5KW)熱流分析結果	39
圖 14 案例 4(9.5KW)熱流分析結果	40
圖 15 案例 5(8.5KW)熱流分析結果	40
圖 16 案例 6(7.5KW)熱流分析結果	41
圖 17 案例 7 TSC-025(5.75KW)熱流分析結果.....	41
圖 18 案例 8 TSC-07(5.3KW)熱流分析結果.....	42
圖 19 案例 9(4.7KW)熱流分析結果	42
圖 20 案例 10 TSC-02(3.75KW)熱流分析結果.....	43
圖 21 案例 11 TSC-01(3.75KW)熱流分析結果.....	43
圖 22 (a)VSC-17 內部燃料功率配置、(b)vsc-17 內部燃料束溫度分佈	

.....	44
圖 22 TSC-01 與 TSC-02 之細部溫度與流場比對	45
圖 23 TSC-01 與 TSC-02 之 TSC 表面溫度分佈比對	45
圖 24 TSC-01 於裝載期間之元件溫度趨勢。	46
圖 25 TSC 表面於不同貯存條件下之溫度分佈	48
圖 26 TSC 表面之無因次化溫度分佈	49
圖 27 TSC 表面最高溫度與負載之關係式	49
圖 28 304 不銹鋼於不同溼度與溫度條件下受氯鹽誘發 SCC 之可能性 [NUREG/CR-7170]	52
圖 29 混合鹽類之各種不同潮解狀況.....	53
圖 30 台北近年之相對溼度.....	56
圖 31 不同環境溼度下對 TSC 表面之相對溼度影響	56
圖 31 不同熱負載下 TSC 表面之 R-CGR 分佈趨勢	57
圖 35 燃料丸變型與竹節效應示意圖[9].....	59
圖 36 304 沃斯田鐵系不銹鋼於不同溫度下之抗拉伸式驗結果[13].....	64
圖 37 鉛之抗拉強度與溫度之關係圖.....	67
圖 38 PNNL-22646 分析報告中之乾貯護箱分析模式.....	71
圖 39 不同貯存時間下，護箱內燃料束最高溫度之變化趨勢.....	72
圖 40 不同貯存時間下，護箱表面之最高溫度之變化趨勢.....	72
圖 41 溼/乾貯燃料之未來貯存趨勢預估	75
圖 42 EPRI 高容量乾貯測試計畫時程表.....	76

表目錄

表 1 核一乾貯系統重要尺寸列表.....	7
表 2 液態水熱傳性質.....	8
表 3 氬氣熱傳性質.....	9
表 4 空氣熱傳性質.....	9
表 5 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質.....	9
表 6 不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性.....	10
表 7 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性.....	10
表 8 鉛屏蔽熱傳特性.....	10
表 9 鋁合金(6061-T651)熱傳特性.....	11
表 10 鋁合金熱傳特性.....	11
表 11 燃料丸(UO ₂)熱傳特性.....	11
表 12 混凝土熱傳特性.....	12
表 13 ATRIUM-10 燃料組件重要幾何尺寸：.....	15
表 14 ATRIUM-10 燃料各項局部損失係數及摩擦因子.....	15
表 15 各種不同衰變熱估算模式之計算結果.....	26
表 16 核一分析案例之衰變熱設定值。.....	34
表 17 標準申照案例(14KW)之分析結果比對.....	38
表 18 核燃料設計重要參數列表.....	60
表 19 美國境內各電廠新退出燃料之燃耗度列表.....	76

一、前言

1.1 研究背景與目的

為能強化我國乾貯系統之安全性，物管局於民國 100 年起，即陸續進行了許多與乾式貯存熱流、臨界、屏蔽等相關之研究工作，以期能透過與學術界的技術合作與交流，針對國際最新之安全議題與國內各界對乾貯系統所提出之質疑進行澄清。上述眾多研究之成果顯示，無論面臨設計基準事故[1,2]或是超越設計基準事故(Beyond Design-Basis Accident)[3-6]，我國現已核照之兩套乾貯系統皆有充足的餘裕與救援時間可供處置因應。因此，本年度之研究即轉而對乾貯系統於設計壽命期間因熱流條件變化所致之影響進行探討。

然而，由於最初安全工作中係以每個乾式貯存護箱具有較大熱荷載之保守條件進行評估，以求取較為合保守之系統溫度以及容許處置時間。但由於實際裝載作業時，將採用較低熱荷載之方式來進行燃料的裝填與貯存，而使得初始之熱流表現較先前分析結果更為和緩。除此之外，由於用過核子燃料的衰變熱將隨著退出爐心的時間增長而減弱，將使得系統元件的溫度表現與最初利用裝載上限進行分析後之結果有所差異。因此為能精確掌握乾貯系統於設計壽命期間的熱傳行為，勢必進行完整的參數評估，並進一步掌握系統之熱流特性。

上述分析工作的重要性除了有助於協助管制單位掌握系統之特性外，更可用進一步作為釐清長期貯存疑慮；例如，鹽霧附著於密封鋼筒(Transportable Storage Canister, TSC)而可能誘發之應力腐蝕(Stress Corrosion Cracking, SCC)。這是因為當物體的表面溫度較高時，即使發生鹽霧附著，仍不致於因為天候的改變而出現反潮現象，致使原本附著於 TSC 表面氣鹽結晶再次溶解，反而不易產生 SCC；但由於乾貯系統因不同熱荷載與貯存時間之影響，則可能使 TSC 表面形成不同的溫度分佈，而形成可能發生 SCC 之熱流環境條件。

依據台電公司所提之安全分析報告，其密封鋼筒在沿海環境下貯存 40 年之腐蝕測試結果，影響僅為密封鋼筒厚度之千分之 6，對密封鋼筒結構完整性影響極為有限，並不會影響貯存之安全性。且在乾貯設施運轉期間，台電公司有長期監測密封鋼筒材料之耐久性與抗鏽蝕性，其於護箱裝設與密封鋼筒外殼材料相同之環境測試試片，作為長期材料耐腐蝕劣化之監測，以確保密封鋼筒之長期安全性。因此本計畫擬由設計壽命期間熱流條件之改變為基礎，進一步瞭解 TSC 表面發生 SCC 可能性及相對裂紋成長速率(Relative Crack Growth Rate)之趨勢。為此，本研究擬藉由計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析技術，針對不同參數組合下所致之 TSC 表面溫度分佈進行探討，並提供材料專家後續進行乾式貯存系統 TSC 表面 SCC 發生機率與可能位置之評估依據。

另一方面，由於以往熱流分析在進行超越設計基準事故時，往往極度保守地採用了設計基準事故之材料溫度限值作為事故發展時程之判定依據，而未對材料完整之物理特性進行全面性的瞭解，致使社會大眾接受到相關事故分析結果後，誤以為超出此設計限值即可能導致不可控制之事故狀況。因此，為了能更精確地瞭解乾貯設施各元件之材料選用依據以及相關溫度設定點之決定背景與原理。本研究亦擬於計畫執行期間，蒐集並匯整國際間與乾貯相關之分析報告或是學術研究成果，以完整描述系統各項元件之材料特性與溫度值間之關係。預期透過更為完整的背景資料蒐集，除了可以協助管制與學術研究單位，於未來進行評估結果說明時，得以減低不必要的誤解與爭議外，更有助於管制單位瞭解各種事故狀況下之系統特性，而得以精進相關管制技術。整體而言，本計畫之工作項目研究目標可概分如下。

1. 乾式貯存國際發展資訊蒐集
2. 乾式貯存設施密封鋼筒表面溫度的空間與時間分布模擬與分析
3. 乾貯系統意外事件溫度限值管制背景資訊研析
4. 乾貯系統重要元件在意外事件溫度限值下的材料資訊蒐集與研析
5. 撰寫研究計畫成果報告

依據工作所需時程與研究之相依性，本計畫擬於一年期間完成以下工作項目，以符合計畫之要求：

1. 建立長期貯存條件下 TSC 三度空間與時間溫度分布的 CFD 模型與方法
2. 標準案例的溫度分布預測
3. 重要貯存參數，如燃耗之靈敏度分析。
4. 乾貯系統重要元件在正常與意外事件下材料溫度極限管制溫度準則資訊蒐集與研析
5. TSC 表面 SCC 可能性評估
6. 撰寫研究計畫期中與期末成果報告

1.2 工作進度與達成度說明

本計畫於計畫執行期間，已依據合約書中原訂工作步驟及進度規劃順利達成相關工作，並通過委託研究單位物管局之每次季查核。截至本報告撰寫期間，本計畫已完成所有工作項目：

1. 乾式貯存國際發展資訊蒐集
2. 乾式貯存設施密封鋼筒表面溫度的空間與時間分布模擬與分析
 - 乾貯護箱設計壽命期間熱流特性分析
 - 乾貯護箱設計壽命期間 SCC 預估方法建立與現象研析
3. 乾貯系統意外事件溫度限值管制背景資訊研析
4. 乾貯系統重要元件在意外事件溫度限值下的材料資訊蒐集與研析
5. 撰寫研究計畫期中報告
6. 撰寫研究計畫期末成果報告

二、我國核電廠乾貯系統資料與分析參考資料

我國目前共有核一廠[1]及核二廠兩套乾貯系統[2]，現我國核一乾貯設施將待水保計畫通過後進行熱測試作業，核二乾貯設施現正進行建照執照審查。上述二套系統之相關設計資料更已於先前之[3, 4]中加以蒐集並歸納。在考量兩套乾貯系統之作業時程與研究工作之計算負載，本研究將先行針對核一乾貯系統進行模式發展並藉以進行後續之分析工作，而核二系統之相關設計壽命之熱流分析，則可待業者提出運轉規劃時，再依據其最新燃料池狀況與裝載規劃進行設計壽命期間之熱流分析。

2.1 核一廠乾貯系統系統結構

核一乾貯系統(INER-HPS)是由核研所協助台電核一廠，引進自美國 NAC 公司 UMS 乾貯系統，其最大容許容量為 56 束沸水式(Boiling Water Reactor, BWR)用過核子燃料束。燃料束於本系統中乃是裝載於燃料套管內並由盤式提籃進行承載。此提籃主要之構成元件包括有中子吸收板 BORAL、燃料套筒(Sleeve)、碳鋼製承載圓盤(Supporter disk)、鋁製導熱圓盤(Conduction disk)以及用於固定上述元件之上下鉸件與繫桿(Tie rod)等元件。此系統與 NAC 公司 UMS 系統最大的不同在於本系統為確保此系統之屏蔽能力符合我國之相關法規，故於承載密封鋼筒的混凝土護箱外，額外加裝一外加屏蔽層以降低輻射劑量。

整體而言，核一廠之密封鋼筒直徑約為 1.7033 公尺，高度約為 4.835 公尺，其中內裝之鋼製承載盤約為 1.587 公分厚，總數量為 43 片；而鋁製之導熱圓盤厚度約為 1.27 公分，數量為 17 片。上述板件利用繫桿穿過上下焊件並鎖固而成為一體。而核一廠之混凝土護箱直徑約為 3.454 公尺，高度約為 5.74 公尺；外加混凝土屏蔽層係為與混凝土護箱等高厚度約為 35 公分之圓殼物體；此一屏蔽層於護箱安裝完畢後會再安裝於護箱外圍，整體相關重要尺寸整理後如表 1 所示。

而在裝載功率的配置上，核一對於實際裝載時的功率係將整個燃料提籃之裝載空間分別三區(圖 2)並分別裝載具有：(A)0.1644 kW、(B)0.139 kW 與(C)0.099kW 三種功率之燃料，但相關安全分析報告中仍採用較保守之總熱負載 14kW、單束燃料具有 250W 衰變熱之條件進行分析。

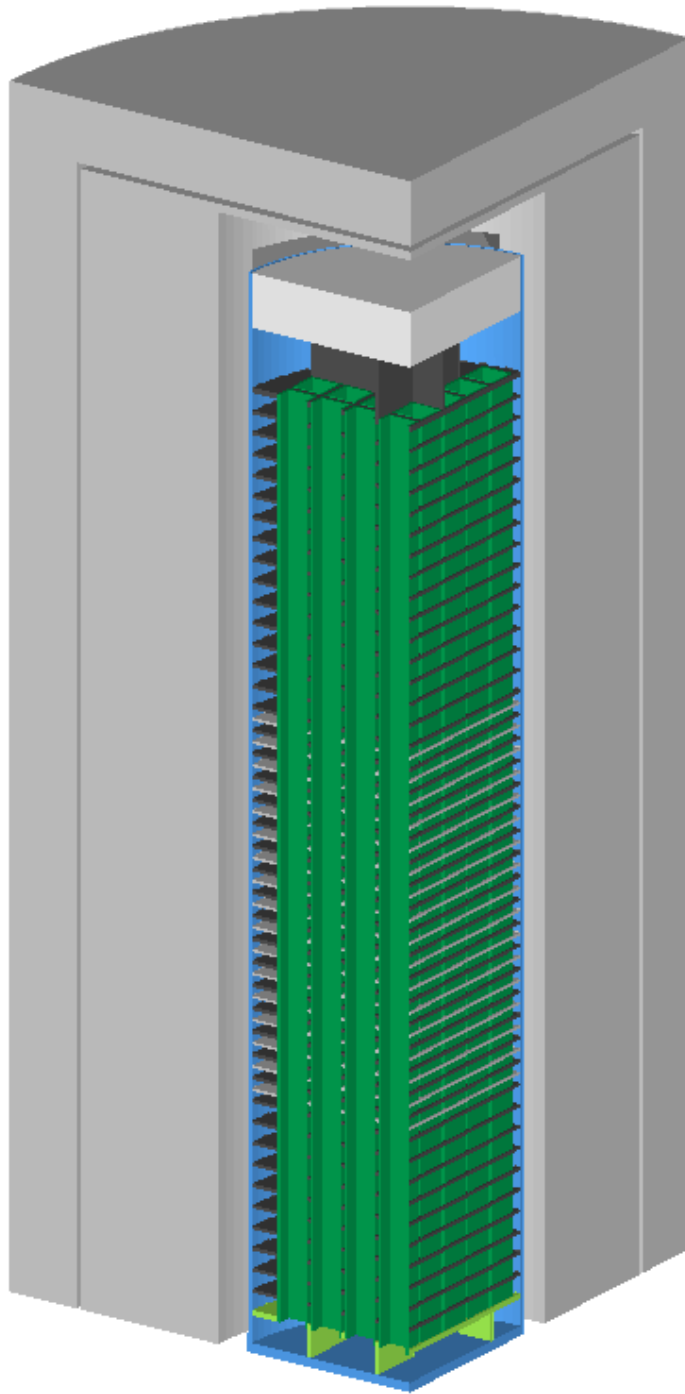


圖 1 核一乾貯系統示意圖

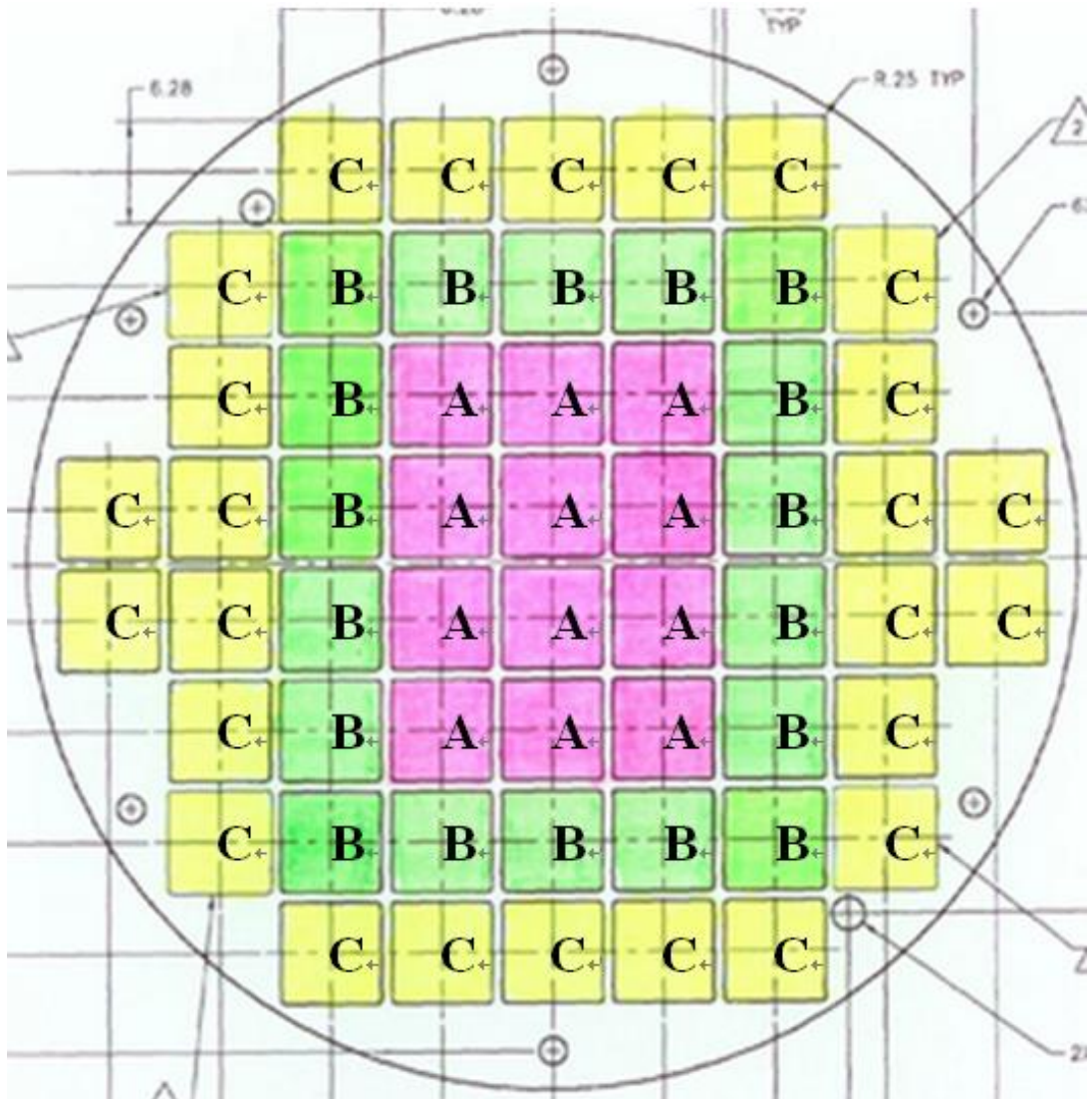


圖 2 核一乾貯系統功率配置圖

表 1 核一乾貯系統重要尺寸列表

系統組件	元件	特徵尺寸	數值(公尺)
密封鋼筒		外直徑	1.7033
		總長	4.835
		厚度	0.016
燃料提籃	承載圓盤	厚度	0.01587
	導熱圓盤	厚度	0.0127
	結構上蓋	厚度	0.076
	屏蔽上蓋	厚度	0.178
	底部焊件	高度	0.127
	可裝載燃料數		56
混凝土護箱	內襯	厚度	0.064
		外徑	2.019
	混凝土護箱	高度	5.70
		外徑	3.454
		厚度	0.719
	外加屏蔽層	厚度	0.35

2.2 材料性質

核一系統各元件材料之熱傳特性經蒐集後整理為流體與固體兩類，並分別描述如下。

2.2.1 流體熱傳性質

本系統使用到的流體主要包括，裝載與冷卻所需之液態水、長期貯存所需之氮氣以及傳送與貯存過程中用以冷卻之空氣。而所蒐集到之材料性質如下表[1]所示：

表 2 液態水熱傳性質

	溫度(K)					
	300	320	340	350	360	373.15
DENSITY (Kg/m ³)	997.009	989.120	979.4319	973.710	967.118	957.854
C _p (J/Kg-K)	4179	4180	4188	4195	4203	4217
Viscosity (N-s/ m ²)	8.55e-4	5.77e-4	4.20e-4	3.65e-4	3.24e-4	2.79e-4
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.613	0.640	0.660	0.668	0.674	0.680
Thermal Expansion Coefficient	3.365e-4					

表 3 氦氣熱傳性質

	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
DENSITY (Kg/m ³)	0.1625	0.1219	0.09754	0.0834	0.06969	0.0611
Cp (J/Kg-K)	5193					
Viscosity (N-s/m ²)	1.99e-5	2.43e-5	2.83e-5	3.20e-5	3.50e-5	3.82e-5
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.152	0.187	0.220	0.252	0.278	0.304
Thermal Expansion Coefficient	3.33e-3					

表 4 空氣熱傳性質

	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
DENSITY (Kg/m ³)	1.1614	0.8711	0.6964	0.5804	0.4975	0.4354
Cp (J/Kg-K)	1007	1014	1030	1051	1075	1099
Viscosity (N-s/m ²)	1.846e-5	2.301e-5	2.701e-5	3.058e-5	3.388e-5	3.698e-5
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0524	0.0573
Thermal Expansion Coefficient	3.33e-3					

2.2.2 固體熱傳性質

本系統使用到的固體包括有金屬類的碳鋼、不銹鋼、鉛、含硼鋁板、鋳合金等以及非金屬類的中子吸收材、混凝土、鈾燃料丸等。所蒐集到之材料性質如下表所示：

表 5 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質

熱傳特性	NS-4-FR	NS-3
Conductivity (W/m-K)	0.65	0.85
Density (Kg/m ³)	1630.40	1718.98
Specific Heat (J/Kg-K)	1335.55	623.82

表 6 不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)				
	296.72	352.27	463.38	546.72	657.83
Conductivity (W/m-K)	15.05	16.09	18.00	19.21	20.76
Density (Kg/m ³)	8016.37	7994.22	7949.93	7908.41	7858.59
Specific Heat (J/Kg-K)	483.98	503.24	533.38	550.13	567.30
Emissivity	0.36				

表 7 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)					
	296.72	352.27	463.38	518.94	630.05	685.60
Conductivity (W/m-K)	41.36	41.59	41.88	41.01	38.77	37.54
Density (Kg/m ³)	7861.36					
Specific Heat (J/Kg-K)	473.10					
Emissivity	0.8					

表 8 鉛屏蔽熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)			
	371.45	477.55	578.15	605.35
Conductivity (W/m-K)	33.87	31.69	25.12	20.93
Density (Kg/m ³)	11380			
Specific Heat (J/Kg-K)	125.60			
Emissivity	0.28			

表 9 鋁合金(6061-T651)熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)					
	352.27	407.83	463.38	518.94	574.49	657.83
Conductivity (W/m-K)	171.30	174.00	176.28	176.28	176.28	176.28
Specific Heat (J/Kg-K)	962.94					
Emissivity	0.22					

表 10 鋁合金熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)			
	392	572	752	932
Conductivity (W/m-K)	14.33	15.16	16.61	18.06
Density (Kg/m ³)	6560.36			
Specific Heat (J/Kg-K)	301.44	309.82	318.19	330.75
Emissivity	0.75			

表 11 燃料丸(UO₂)熱傳特性

熱傳特性	溫度 (K)				
	296.72	383.94	508.94	633.94	758.94
Conductivity (W/m-K)	7.89	7.20	5.75	4.90	4.40
Density(Kg/m ³)	1578	1716	1855	1965	2021
Specific Heat (J/Kg-K)	1658				
Emissivity	0.85				

表 12 混凝土熱傳特性

熱傳特性	溫度(K)		
	296.72	352.27	407.83
Conductivity (W/m-K)	1.89	1.85	1.79
Density (Kg/m ³)	2243		
Specific Heat (J/Kg-K)	837.4		
Emissivity	0.9		
Absorptivity	0.6		

2.2.3 燃料束流阻係數

不同於以往乾貯系統的分析中，往往採用均質化固體來簡化燃料棒的特性，本研究為發展一更具精確度的分析模式，故採用多孔性材質(POROUS MEDIA)模式來發展一新的燃料束模擬技術。由於多孔性材質模式可分為平衡型與非平衡型模式，但經燃料丸在可能乾貯系統中之運轉條件下，其燃料丸的內外溫度差可由解析解求得：

$$T_c - T = (q'''r^2/4k)$$

經計算後，在燃料進行乾貯的貯存條件下，經由上式燃料丸的內外溫度差則僅約 1°C。故由此評估結果來判定，對於燃料池內的熱流分析，採用平衡型多孔性介質模式應足以滿足分析需求。

基於分析嚴謹性之要求，本研究於執行案例計算與討論前，先行針對本研究所採用之多孔性介質模式進行檢驗。表 13 為 AREVA 公司所提供之 ATRIUM-10 燃料元件之重要幾何尺寸；而表 14 則是 ATRIUM-10 之實際流阻係數。

多孔性介質模式在動量方程式中是以一個額外之源(\bar{F})項來加以描述，：

$$\vec{F} = -\left(\frac{\mu}{\alpha}\vec{V} + C_2\frac{\rho\vec{V}^2}{2}\right) \quad (1)$$

上式中 $\frac{\mu}{\alpha}\vec{V}$ 與 $C_2\frac{\rho\vec{V}^2}{2}$ 分別代表黏滯壓降項以及慣性壓降項，

$C_2=K/L$ =單位長度之形狀阻力係數。

$\frac{1}{\alpha}$ 為單位長度之黏滯阻力係數；

μ 為流體黏滯係數；

\vec{V} 為流體速度；

ρ 為流體密度；

如上式所示，FLEUNT 於動量方程式中的外力源項，主要可以表示為單位長度下的黏滯阻力以及慣性阻力兩項，考量單位長度之原因係因 CFD 模擬時往往需考慮模型之實際長度，而非如系統程式中，係將流道長度與幾何之體積獨立為不同變數，故以往在系統程式中常用的阻力係數，需額外與建模過程中給定之多孔介質長度進行處理，以求得單位長度下的流阻係數；其式分別以速度之一次及二次項方程式加以描述：

慣性阻力(Viscous Resistance)：

$$\Delta p/L = C_2\frac{\rho\vec{V}^2}{2} ; \quad (2)$$

黏滯阻力(Viscous Resistance)：

$$\Delta p/L = \frac{\mu}{\alpha}\vec{V} . \quad (3)$$

由上式可以得知，FLUENT中用以估算慣性阻力之係數 C_2 等於 K/L 值。故 FLEUNT中之慣性阻力項可以將燃料廠家所提供之AUTIUM-10直接處理資料；而在黏滯阻力項之處理部分，則可藉由以下計算而得：

$$f\frac{L}{D}\frac{\rho\vec{V}^2}{2} = \frac{\mu}{\alpha}\vec{V} \times L \quad (4)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{f}{2 \times D^2} \times \frac{\rho \vec{V} D}{\mu}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{f}{2 \times D^2} \times \text{Re} \quad (5)$$

若流場處於紊流時， $f = 0.203 \times \text{Re}^{-0.200}$ ；則上式可以寫為：

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha} &= \frac{0.203}{\text{Re}^{0.200}} \frac{1}{2 \times D^2} \times \text{Re} \\ &= 0.1015 / D^2 \times \text{Re}^{0.8} \quad (6) \end{aligned}$$

若對流流場為層流時，此時 $f = \frac{64}{\text{Re}}$ ；故 $\frac{1}{\alpha}$ 可以被寫為：

$$= \frac{32}{D^2} \quad (7)$$

經由以上的處理，即可將 AUTIUM-10 之燃料特性加以處理為 FLUENT 可接受之參數，而相關程式碼亦詳錄於附件 A 燃料束流阻 UDF 程式碼中。

表 13 ATRIUM-10 燃料組件重要幾何尺寸：

有效長度	3.796 m
流面積	9454.8 mm ²
溼周長(wetted perimeter)	3527.8 mm
水力直徑(Hydraulic Diameter)	10.720 mm

表 14 ATRIUM-10 燃料各項局部損失係數及摩擦因子

Location	Loss Coefficient	Friction factor
Bare rod		$0.203 \times Re^{-0.200}$
Central Orifice (ID: 2.430 in)	$21.47 + 168.1 \times Re^{-0.546}$	
Peripheral Orifice (ID: 1.488 in)	$156.9 + 168.1 \times Re^{-0.546}$	
Bottom four Spacer	$0.620 + 108.6 \times Re^{-0.58}$	
Third Spacer	$2.196 \times Re^{-0.084}$	
Top Two Spacer	$0.4646 + 235.7 \times Re^{-0.686}$	
UTP	$-9.68 + 9.526 \times Re^{-0.0046}$	

三、數值模式與軟體選用

3.1 統御方程式

本研究選用已多次應用於乾貯熱水流分析之商用計算流體力學軟體-FLUENT V12.0 為基礎，進行一系列之模式建立、網格生成與測試、邊界模式建立與案例計算等工作。以作為訂定緊急處置措施之參考依據。

乾貯系統於貯存狀態下可能發生之各種意外事故，其熱流特性可由以下統御方程式[5]加以描述：

質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (8)$$

其中，

ρ 為流體密度；

而 \vec{v} 為速度向量。

動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{S}_i \quad (9)$$

其中， p 為靜壓力， $\rho \vec{g}$ 為重力項；

\vec{S}_i 為額外力源， $\overline{\tau}$ 為應力張量，其形式可以寫為：

$$\overline{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right], \quad (10)$$

其中，

μ 為流體黏滯係數；

I 則為單位張量。

而在平衡型多孔性介質中， \vec{S}_i 項可以被寫為：

$$\bar{S}_i = \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \circ \quad (11)$$

能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\bar{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) + S_h \quad (12)$$

其中，

E 為單位質量之總能量；

h 為焓值；

p 為靜壓力；

\bar{v} 為速度向量；

κ_{eff} 則為等效熱導率：

$$k_{eff} = k + k_i \quad (13)$$

其中，

k 為物質本身之分子熱導率；

k_i 則為流場紊流所致之熱導率。

3.2 數值模式

3.2.1 DO 熱輻射模式

上述統御方程式雖可描述熱流現象中的流場以及傳導對流等熱傳機制，但對於熱輻射機制之模擬仍無法藉由以上模式來描述。為此，本研究選用已廣泛使用之 DO 模式進行模擬。此模式除已於許多乾貯相關的研究中被加以應用外，於本研究團隊中亦經過妥善的校驗[5]。DO 模式主要乃是求解輻射傳輸方程式 (Radiation Transport Equation) 來計算有限體積法中各網格之熱輻射效應，其式可以寫為：

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad ; (14)$$

其中， $I(\vec{r}, \vec{s})$ 為 \vec{r} 點沿著 \vec{s} 方向之總輻射強度其式可以寫為：

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k ; \quad (15)$$

λ 為波長；

a_λ 為吸收係數；

$I_{b\lambda}$ 為黑體輻射強度；

σ_s 為散射係數；

n 為折射率(refractive index)。

3.2.2 紊流模式

由於乾貯系統所包含的傳送護箱與貯存用混凝土護箱，其高度皆在 5m 以上，又即使發生傾倒，其高度仍接近 3m，因此高度所造成的自然對流動強度將促使內部對流呈現紊流流場。為求能精確的掌握紊流所造成的熱水流效應，本研究擬在乾貯熱流分析的相關應用中，已受認同的 k- ω 作為紊流模擬之數值模式。

k- ω 模式之方程式[6, 7]可以表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (17)$$

其中，k 為紊流動能，而 ω 則為消散率； \tilde{G}_k 為紊流動能梯度， \tilde{G}_ω 為消散率梯度； Y_k 與 Y_ω 分別為 k 與 ω 因為紊流所造成的消散量； S_k 與 S_ω 分別為 k 方程式與 ω 方程式之源項。 Γ_k 與 Γ_ω 則為等效擴散項，上述變數之定義可以表示為：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} ; \quad (18)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} ; \quad (19)$$

其中， μ 為流體黏滯係數， σ_k 與 σ_ω 為紊流普蘭特常數(turbulent Prandtl number) 而， μ_t 則為：

$$\mu_t = \alpha^* + \frac{\rho k}{\omega} ; \quad (20)$$

其中，紊流阻尼 α^* 可以定義為

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* + \left(\frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / \text{R}_k}{1 + \text{Re}_t / \text{R}_k} \right) ; \quad (21)$$

而， α_∞^* 為阻尼；

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} ; \quad (22)$$

$$\text{R}_k = 6 ; \quad (23)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} ; \quad (24)$$

$$\beta_i = 0.072 。 \quad (25)$$

3.2.3 自然對流模式

在 FLUENT 軟體中的自然對流主要乃是藉由流體密度差以及重力場的設定而達成動量方程式中體積力的計算。由於重力場乃是一常數，因此如何模擬流體密度之變化即是建立自然對流模擬之重要參數。

在 FLUENT 中，用以設定流體密度變化的機制可以分為三種，其一為直接設定法，直接於材料性質表中，將材料性質設定為溫度之函數；而對於理想氣體而言，則可令 FLUENT 直接以理想氣體方程式來進行密度之計算；然而由於本分析中除了屬於理想氣體之空氣與氮氣外，仍有不適用於理想氣體方程式之水；故採用此法並非最佳處置方式。目前最常用的方法乃是採用博欣尼克近似法 (Boussinesq approximation) 來針對流體密度的變化進行處理：

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_\infty)) , \quad (26)$$

其中，流體之 β 值為流體之熱膨脹係數 (Thermal Expansion Coefficient)。

由於博欣尼克近似法具有較易收斂之特性，因此在本研究中將採用此法來處理乾貯內部自然對流之現象。

四、分析模式建立

有鑑於本計畫考量不同乾貯系統，在設計壽命期間之熱流特性分析之所需，因此本研究於進行相關案例分析之前，需針對所需之系統幾何模式與衰變熱估算技術進行精進以發展，以求強化以往分析模式之不足。本章各節將針對所建立之模型加以說明。此外，由於本研究之主要分析標的在於乾貯系統於設計壽命期間的貯存狀況，因此相關的分析模式將僅就混凝土護箱模式進行建構，而不再考慮傳送護箱之部分。

此外本分析模式主要係針對設計壽命期間之熱水流特性進行分析之訴求進行發展，故無需考慮除了正常貯存狀況以外的情境。故於分析模式之建構時，無需考慮護箱外側因為事故情境而產生改變，故只需在單一乾貯系統垂直擺置而形成的幾何與熱流現象 (圖 3) 進行對稱模型的發展。

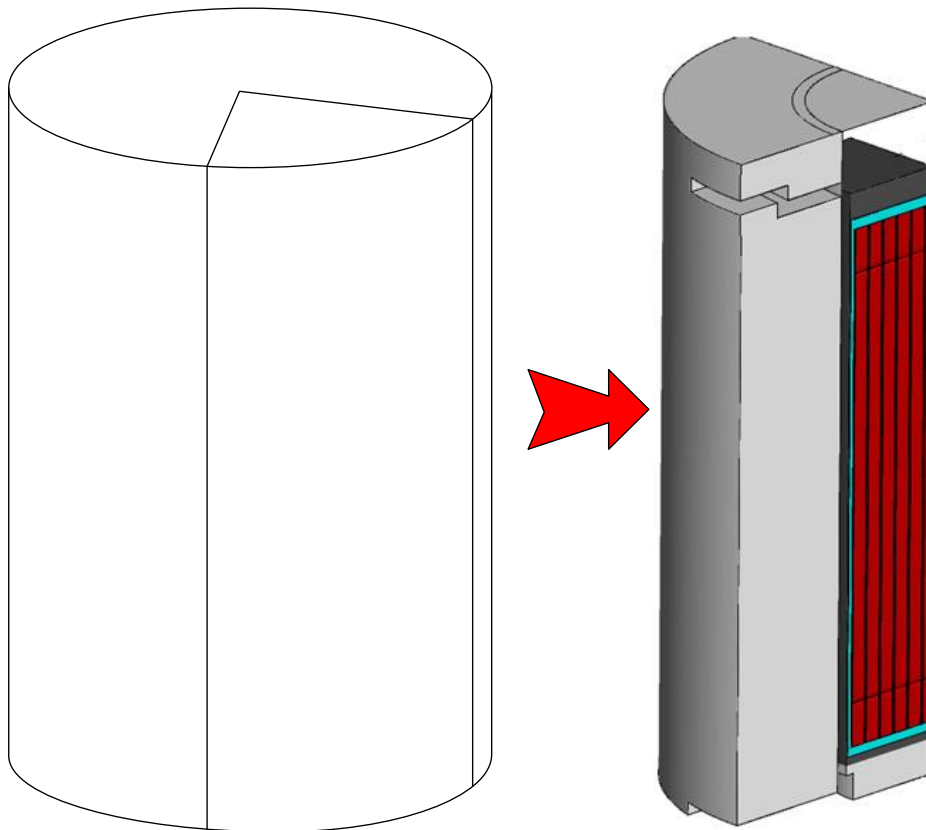


圖 3 對稱邊界模型之簡化示意圖

4.1 乾貯系統幾何模式建立

根據本報告第二章所載之幾何資訊，核一乾貯在模型建構期間，完整考量各個燃料結構、承載盤、散熱圓盤等所有細微結構，僅忽略外加屏蔽層底座之方形結構；所得之 1/4 貯存階段之幾何模型則如圖 4 所示。

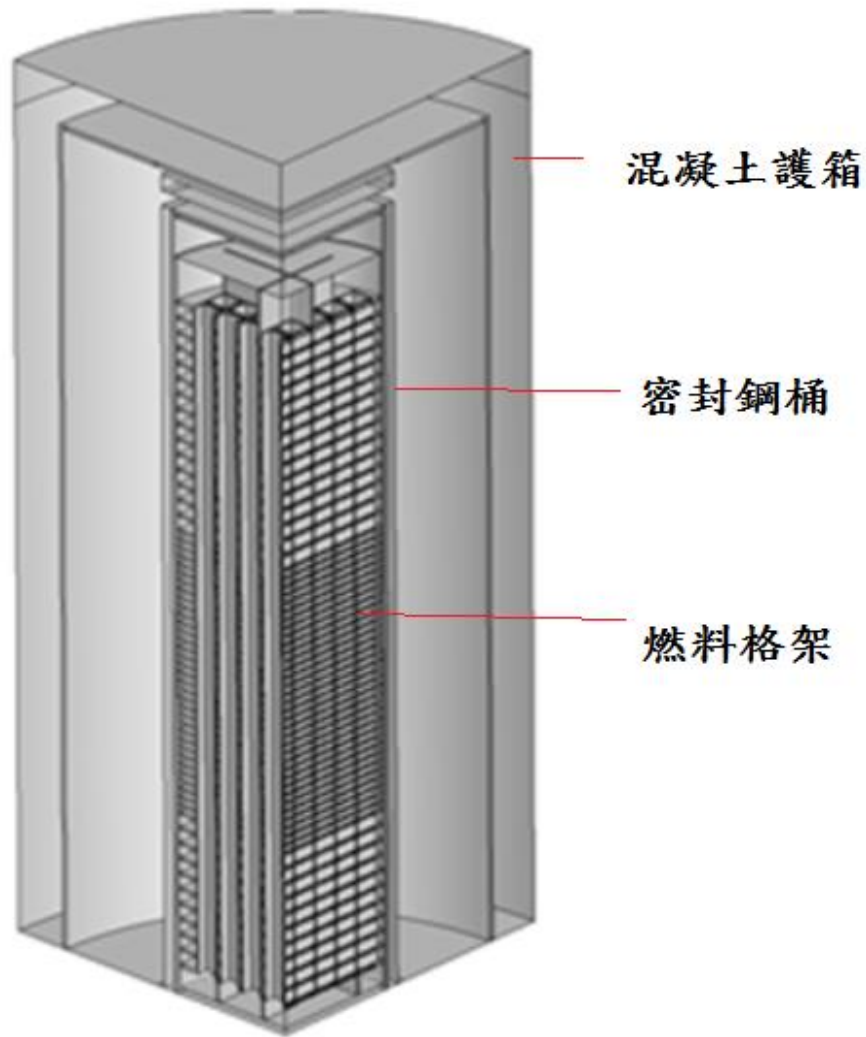


圖 4 核一 1/4 貯存階段模型

4.2 衰變熱計算技術

4.2.1 衰變熱預估模式

由於燃料束在退出爐心後，仍會因為衰變熱而持續放出熱量，因此在進行燃池熱水流分析前，需先行針對燃料束所具有的衰變熱建立一套分析技術，以作為後續模擬所需之邊界條件。

另外，由於本研究之目標之一在於探討在長達數十年的設計壽命期間，乾貯系統可能存在的熱流現象；但由於貯存期間，燃料束所具有的衰變熱將逐漸遞減之故，在長期貯存後的溫度值可以合理地預期將會被原始安全分析所涵蓋。然而對於部分老劣化管理之分析(例如應力腐蝕)往往會因為溫度的降低而使分析條件改變，因此對於長期貯存的相關分析，則勢必需要採用合理的衰變熱功率進行預估，以作為未來老劣化分析之基礎。因此本研究在進行後續分析前，先行針對目前常見的幾個衰變熱模式；包括：ANSI/ANS-5.1-1979、ANS-5.1-1973 與 ASB 9-2 三種進行比較，以確保所選用模式的保守性。其結果顯示(表 15、圖 5)，ASB9-2 模式於停機時間超過 200,000 秒後，其估算之衰變熱即會低於其它兩個模式，故於未來直接提取核一燃料束運轉歷史並估算設計壽命期間的熱流分析時，ASB 9-2 模式估算所得之衰變熱功率將比其它兩種方式更為符合研究所需。

基於以上之比較，本研究即採用目前廣泛應用於核能界之 ASB 9-2 進行燃料束衰變熱計算。ASB 9-2 於估算，衰變熱功率時，係將其分為分裂產物衰變熱與重元素衰變熱功率兩部分：

分裂產物衰變熱：

$$\frac{P}{P_0}(\infty, t_s) = \frac{1}{200} \sum_{n=1}^{n=11} A_n \exp(-\lambda_n t_s)$$
$$\frac{P}{P_0}(t_0, t_s) = (1 + K) \frac{P}{P_0}(\infty, t_s) - \frac{P}{P_0}(\infty, t_0 + t_s)$$

其中，

P/P_0 = 功率因子(fraction of operating power)

t_0 = 運轉時間(cumulative reacting operating time, seconds)

t_s = 停機時間(time after shutdown, seconds)

K = 不準度因子(uncertainty factor), 0.2 for $0 \leq t_s < 10^3$
and 0.1 for $t_s \geq 10^3$

重元素衰變熱功率：

$$\frac{P(U-239)}{P_0} = 2.28 \times 10^{-3} C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}} [1 - \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_0)] \times [\exp(-4.91 \times 10^{-4} t_s)]$$

$$\frac{P(Np-239)}{P_0} = 2.17 \times 10^{-4} C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}} \{1.007[1 - \exp(-3.41 \times 10^{-6} t_0)] \times \exp(-3.41 \times 10^{-6} t_s) - 0.007[1 - \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_0)] \times \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_s)\}$$

其中， $P(U-239)/P_0$ 為 U-239 的功率因子，而 $P(Np-239)/P_0$ 則為 Np-239 的功率因子；

t_0 = 運轉時間(cumulative reacting operating time, seconds)；

t_s = 停機時間(time after shutdown, seconds)；

C = conversion ration, atoms of Pu-239 produced per atom of U-235 consumed；

σ_{25} = effective neutron absorption cross section of U-235；

σ_{f25} = effective neutron fission cross section of U-235。

為能確保燃料池內待乾貯之燃料衰變熱在裝載時的明確性，計算中係以特定週期之爐心衰變熱功率計算，並根據該週期之爐心布局，針對同批燃料束自爐心啟動時至停機期間徑向尖峰因子 RPF_i ，求取其平均燃料束徑向尖峰因子，計算

時所需要的爐心總衰變熱功率則由：

$$\sum_{i=1}^{N_{ass}} \frac{P_i}{P_{0i}} \text{ 求出；}$$

其中 N_{ass} 為燃料束數目；

$$P_{0i} = \frac{P_o}{408} * RPF_i ;$$

P_i 為燃料束 i 之衰變熱功率；

P_o 為爐心運轉總功率。

表15各種不同衰變熱估算模式之計算結果

Time after shutdown(second)	ANSI/ANS-5.1-1979	ANS-5.1-1973	ASB 9-2
1.0E-1	0.0682	0.0675	0.0852
1.0E+0	0.0644	0.0625	0.07779
2.0E+0	0.0613	0.059	0.07357
4.0E+0	0.0569	0.0552	0.06898
6.0E+0	0.0540	0.0533	0.06622
8.0E+0	0.0519	0.0512	0.06415
1.0E+01	0.0501	0.050	0.06242
2.0E+01	0.0449	0.045	0.05635
4.0E+01	0.0398	0.0396	0.05023
6.0E+01	0.0369	0.0365	0.04703
8.0E+01	0.0349	0.0346	0.04477
1.0E+02	0.0334	0.0331	0.04291
2.0E+02	0.0291	0.0275	0.03638
4.0E+02	0.0255	0.0235	0.03025
6.0E+02	0.0234	0.0211	0.02763
8.0E+02	0.0219	0.0196	0.02610
1.0E+03	0.0208	0.0185	0.02302
2.0E+03	0.0176	0.0157	0.01925
4.0E+03	0.0141	0.0128	0.01521
6.0E+03	0.0125	0.0112	0.01331
8.0E+03	0.0115	0.0105	0.01228
1.0E+04	0.01074	0.00965	0.01160
2.0E+04	0.00891	0.00795	0.00962
4.0E+04	0.00751	0.00625	0.00759
6.0E+04	0.00668	0.00566	0.00663
8.0E+04	0.00612	0.00505	0.00610
1.0E+05	0.00571	0.00475	0.00574
2.0E+05	0.00458	0.00400	0.00465
4.0E+05	0.00359	0.00339	0.00349
6.0E+05	0.00306	0.00310	0.00293
8.0E+05	0.00272	0.00282	0.00261
1.0E+06	0.00249	0.00267	0.00239
2.0E+06	0.00182	0.00215	0.00179

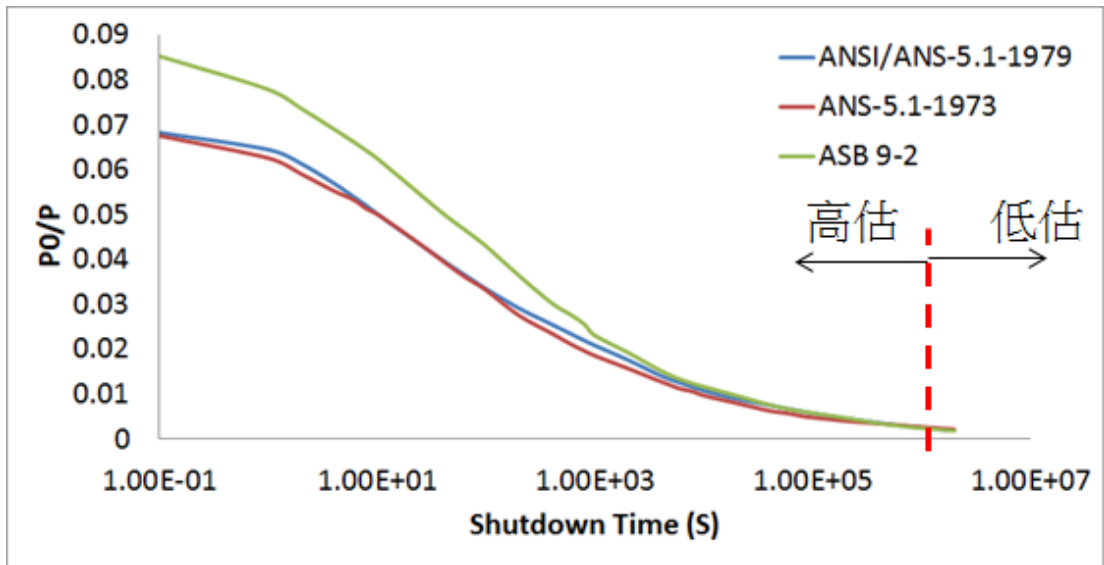


圖 5 不同衰變熱估算方法之差異

4.2.2 乾貯批次衰變熱估算工具建立

依據上節所建立之衰變熱估算技術，即可對燃料池中不同周期退出之用過燃料之衰變熱進行計算。但由於乾貯作業進行時，將會依據所選定的燃料進行組合，以便符合原先設計之裝載容量，因此在進行後續的熱流評估前，仍需針對未來可能出現的不同配置進行估算工具的建立，除用以檢核初始裝載功率外，藉由裝載初始時間的設定，更可針對不同護箱在未來設計貯存壽命期間的內部衰變熱計算依據。

基於上述之開發目的，本研究利用 excel 試算表工具，將 3.2.1 節中所載之衰變熱估算方程式代入其中，並利用由台電核一廠處所蒐集而得的燃料運轉歷史資訊進行估算，即可進行相關所需資訊的計算。圖 6 為本研究所建立之周期/護箱衰變熱估算工具。使用者只需在左上方的紅底框內輸入時間，即可估算出核一燃料池內各周期之燃料束衰變熱；再依據所需，將圖中綠底之乾貯護箱內填入其周期需求，即可獲得整體之初始熱負載。接著，再調整系統之時間，即可獲得乾貯於裝載後的不同時間下的衰變熱變化。

如圖 7 所示，若依據核一 SAR 之設計壽命選定合適之周期進行裝載後，其初始熱負載約為 12.3KW；而再令其內部燃料衰變 30 年後，此護箱之內部熱負載將會下降至原來的一半左右，到了裝載後的 50 年，更將達到原始裝載負載的 1/3 左右。為了瞭解不同裝載方式對未來熱負載的影響，研究中更設計了均勻配置與極端配置的燃料配置案例，用以比較長期貯存下總熱負載的變化。其中均勻配置如字面所述，係以每根燃料之熱負載相同之方式加以配置，而極端配置則是選用池內最高與最低熱功率之燃料加以配置而成。其估算結果顯示，不同的配置在隨著時間的變化後，因原先因為燃料周期選擇而存在的微小差異，將會逐漸的縮小。這意味著探討設計壽命期間的熱流現象，因為熱負載所造成的差異將隨著裝載時間的增加而逐漸降低。

而更進一步的分析結果顯示(圖 8)，不同的燃料配置雖對會 TSC 內部之燃料

束溫度造成明顯的差異，但基於所有配置之溫度皆符合原始 SAR 之設計限值之故，此差異已無任何意義。另一方面，由 TSC 之溫度(Radius=0.85m)差異來看，各種配置對於 TSC 之溫度影響並不明顯；這意味著對於設計壽命期間的熱流分析以及 TSC 可能之老劣化分析而言，內部燃料熱負載之配置差異是可予以忽略的。

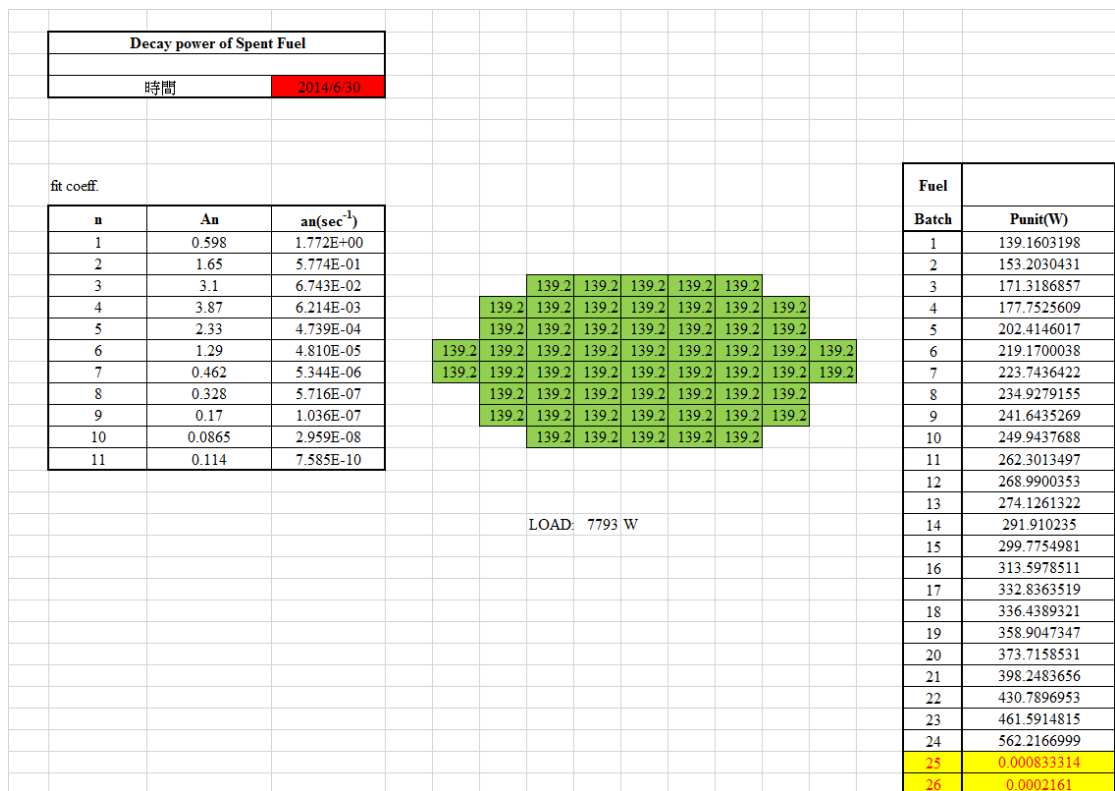


圖 6 核一池內各周期燃料束衰變熱與護箱裝載之熱負載試算工具

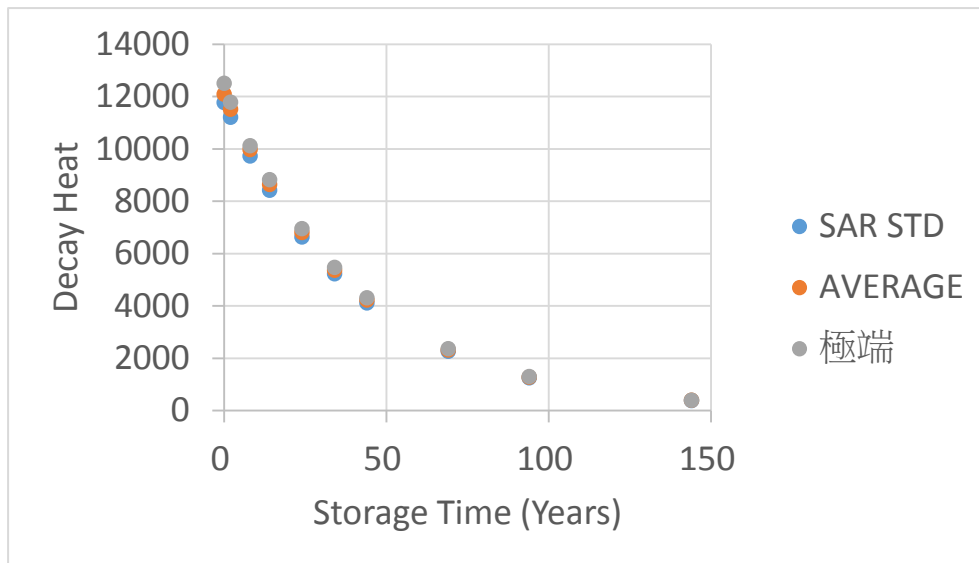


圖 7 核一乾貯系統在裝載不同配置之燃料後，在後續貯存期間的熱負載變化

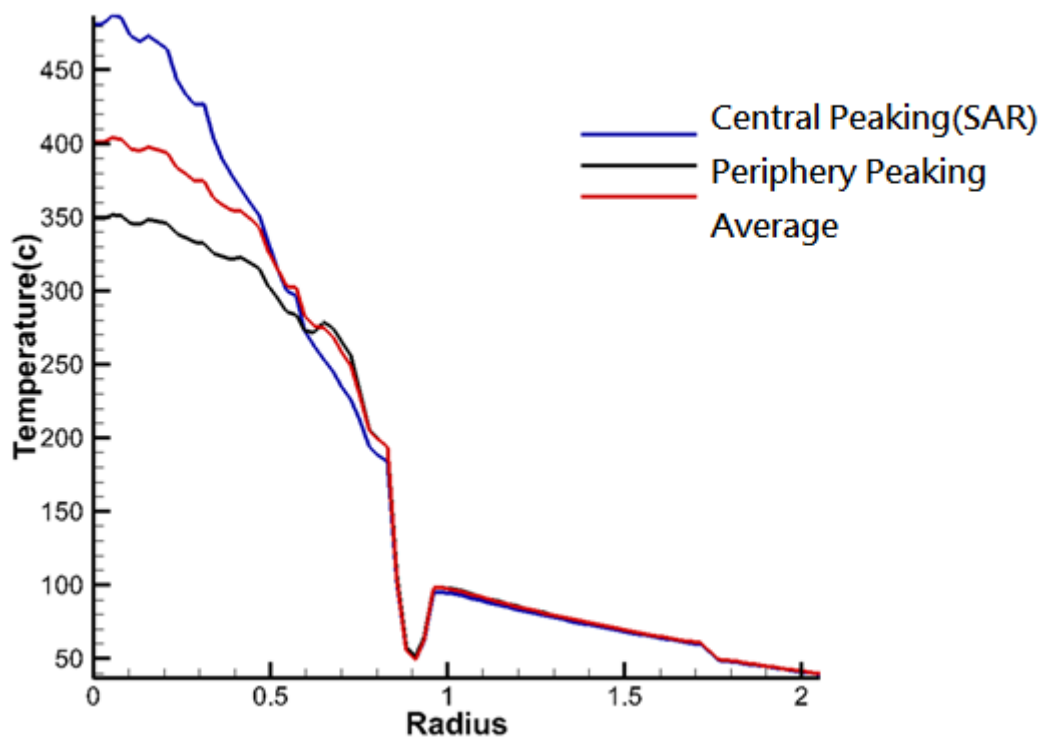


圖 8 不同負載配置下的溫度分佈

4.2.3 實際裝載作業之燃料束功率差異模擬技術

為能更進一步地證實燃料束彼此之間的衰變熱差異，將不會明顯影響內部熱流特性，本研究利用核一乾貯實際裝載配置進行驗證，而為達實際表現相關燃料束熱負載之影響，則需要對現有的分析技術進行精進。

雖然透過較簡易的模式重新編輯方式，將原本分區的邊界條件定義方式，轉為單束設定即可達成此一工作需求。但此一作法除了造成已驗證分析模式的變動外，對於未來大量運算工作下需頻繁地設定新模式可能造成的困擾外，更可能因為手動設定而導入人為的錯誤的可能。為了能根本地解決此一困擾，本研究選擇以程式化之方式，利用已廣泛使用於相關計畫的 UDF 技術，重新定義各燃料之編號與位置，再給定額外之功率修正因此，進而達成功率設定化的目的。

而此一功率因子，更可透過簡易的計算式，將其擴展為初始功率、冷卻時間、貯存時間等參數之總合，進而達到簡化設定與批次化管理之目的。

整體之模式開發係利用各燃料束於垂直軸之幾何一致性為基準，利用水平軸方向的兩個維度(本模式中為 X 與 Z)將其重新定義為獨立之燃料，並給予一個額外的功率因子，進而達到配置的目的。經過上述的處置作業，本研究所建立之相關程式碼如附件 B-附件 F 所示，共計約 2000 行程式碼。

為了更進一步確認大量程式碼中的各係數之正確性，本研究採用了獨立測試之方式，透過一次給定一束燃料額定載之方式結合表面總熱通率與整體溫度分佈確認的測試流程，來確保程式碼的正確性。圖 9 即為測試四組燃料束狀況之溫度分佈，其具有熱源之燃料束將會出現清晰可見的同心圓溫度分佈。

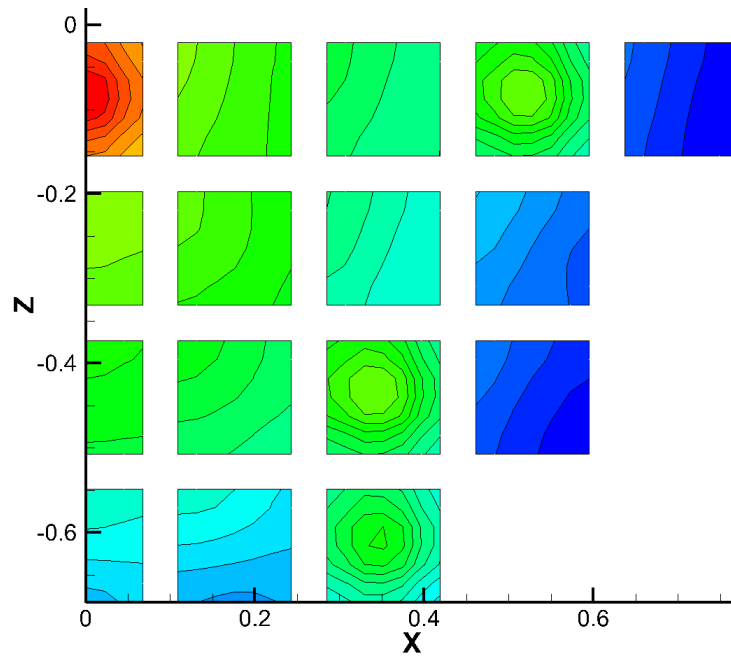


圖 9 程式碼測試過程示意圖

五、設計壽命期間熱流現象研析

5.1 案例選擇

在完成上述各項模式與邊界條件的計算技術建立後，本研究即可針對核一乾貯系統進行設計壽命期間之熱水流特性計算，以瞭解在長期貯存後內部之熱流特性與元件溫度。也因此，雖然核一廠乾貯系統之執照年限為 40 年，但由於每組乾貯系統之初始裝載功率需考慮電廠機組已運轉多年，且最早週期之燃料束已退出多年，故在此分析報告中合理的將系統可能裝載之燃料束延伸至退出爐心後 40 年再進乾貯，以求涵蓋性地檢視燃料束衰變狀況對於護箱內部之熱流狀況以及表面 TSC 溫度分佈之影響。而基於上述之假設前題，後續的分析將需涵蓋冷卻 80 年(40 年溼貯+40 年乾貯)之各種衰變熱組合。

為達上述之分析目的，本研究於核一廠用過核子燃料乾式貯存護箱燃料束配置報告[12]中所載之 25 組護箱配置中，挑選出得以涵蓋的配置進行分析。但由於目前的配置報告中其最高負載僅約 5.7kW 左右，並不足以含括核一乾貯系統之申照範圍，因此本研究遂於部分需超過 5.7kW 熱負載案例中，依比例放大方式，調整至本系統之最大熱負載條件(14kW)。所有選定之案例與其代表之系統狀態則如表 16 所列，其中選擇相近的 TSC-01 與 TSC-02 重複測試之目的即是證實熱負載的配置對熱流分析之影響程度。本研究更將於兩者比對後擇一作為設計壽命期間熱流研析之基準案例。透過上述的案例評選作業，即可建立一組涵蓋最高負載(申照功率)至最低負載並涵蓋可能之裝載時間之計算案例，以滿足此系統所有可能之裝載狀況。

表 16 核一分析案例之衰變熱設定值。

案例編號	熱負載	系統狀態
1	14KW	安全分析報告裝載限值
2	12KW	比例推估之假設負載
3	10.5KW	比例推估之假設負載
4	9.5KW	比例推估之假設負載
5	8.5KW	比例推估之假設負載
6	7.5KW	比例推估之假設負載
7	5.75KW	實際裝載之 TSC-025
8	5.3KW	實際裝載之 TSC-07
9	4.7KW	以 TSC-07 推估之負載
10	3.75KW	實際裝載之 TSC-02
11	3.75KW	實際裝載之 TSC-01
12	衰變熱模式估算	TSC-01 裝載 5 年後
13	衰變熱模式估算	TSC-01 裝載 10 年後
14	衰變熱模式估算	TSC-01 裝載 20 年後
15	衰變熱模式估算	TSC-01 裝載 40 年後
16	衰變熱模式估算	TSC-01 裝載 80 年後

5.2 核一乾貯設計壽命期間熱負載之影響評估

有鑑於現行核一乾貯系統皆是以 14kW 進行分析所得之結果，故利用案例 1 與原有 SAR 分析結果進行比對，除了瞭解兩套分析方法之差異性之外，亦可作為後續討論之依據。

5.2.1 整體熱流特性比對

如圖 10 與圖 11 所示，兩者計算所得之最高溫度皆不超過 240°C，而更進一步的溫度比對(表 17)更顯示，兩者計算所得之溫度差異有限。但整體而言，由於本模式考慮內部對流機制，故相關元件之溫度亦略低於原安全分析報告之結果。除此之外，TSC 與內部燃料之溫度卻因此兩者所採用的模式而呈現不同的分佈。在原有的 SAR 中，因未考慮 TSC 內部對流機制，故所得之軸向溫度分佈近似一對稱分佈，但在本分析工作中，因為考慮了自然對流效應，使得燃料束內存在一向上流動的速度，這使得燃料束內部如同一個加熱通道，並促使其溫度分佈呈現略偏上移的不對稱分佈。由於後續案例與 14KW 之整體溫度趨勢相似(圖 12-圖 21)且整體趨勢圖亦無法量化案例間之差異，故在此不就案例 2 至案例 11 與案例 1 之差異詳加敘述，僅於後續討論中再一併討論其元件溫度變化趨勢。

為了探究燃料裝載並持續冷卻一段時間後，不同配置是否會造成內部溫度的差異，本研究在進行後續的設計壽命貯存熱流分析前，選擇以熱負載差異有限之案例 10(TSC-02)與案例 11(TSC-01)進行討論。其中 TSC-01 之總負載為 3.754 kW 而 TSC-02 之總負載則為 3.756kW，兩者之差異僅有 2.2W。若更進一步細部比對兩護箱之燃料束條件後，則可更進一步的發現兩護箱配置中單根燃料之最大熱負載皆是 118W，而最小熱負載亦為 41-44W 之間。但由於燃料的選用與搭配不同之故，在 TSC-01 中，高於 100W 的燃料束共計 10 根，而 TSC-02 中則僅有 7 根。

上述的配置差異對於兩組護箱配置中各燃料的溫度與速度分佈(圖 23)並未造成明顯的差異。這是因為護箱內的自然對流效應不止促使較熱的燃料棒產生較

大的浮力效應，故進一步地縮小了燃料束熱負載的差異。此一狀況現象亦可由 VSC-17 的模擬結果加以證實，如圖 22a 所示 VSC-17 內部的功率配置呈近似對角分佈之方式，但因自然對流效應之故，其燃料束各處之溫度分佈(圖 22b)並無明顯不對稱現象。

除了上述極為微小之差異外，透過圖 23 所呈現之分析結果證實了在熱負載相當的狀況下，TSC 內部對於整體的溫度分佈影響在進行後續的設計壽命期間熱流分析之影響將可忽略不計。而此一推論更可藉由 1/4 模型之 TSC 之表面溫度分佈(圖 24)之溫度分佈加以證實。本研究考量可能的裝載時間將成為 TSC-01 與 02 兩組護箱於設計壽命期間熱流分析之最大差異，故保守選擇需先裝箱之 TSC-01 來進行分析，故於後續的案例 12 至案例 16 將以 TSC-01 之配置為基礎，進行不同貯存年份之熱流分析。

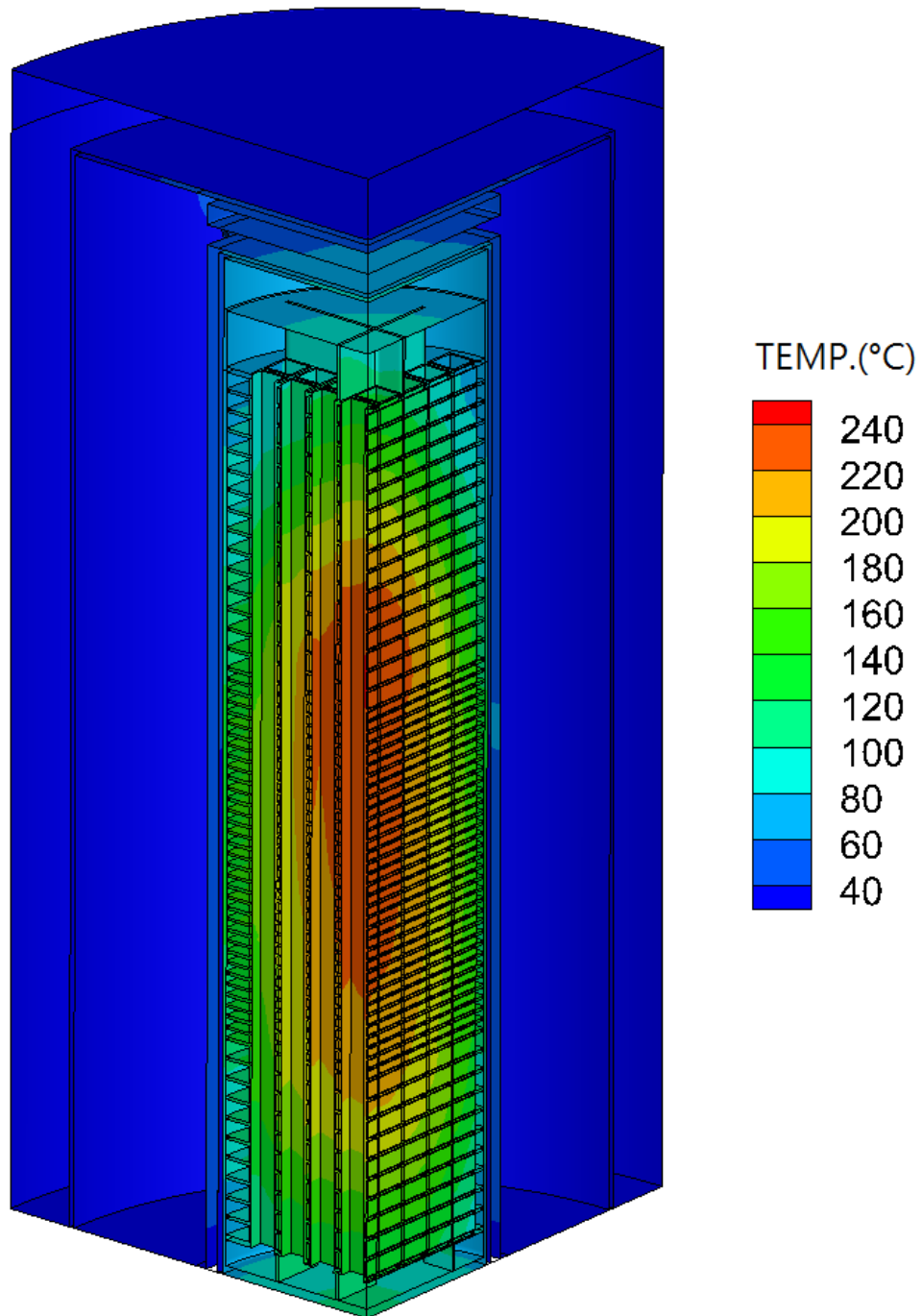


圖 10 案例 1(14KW)熱流分析結果

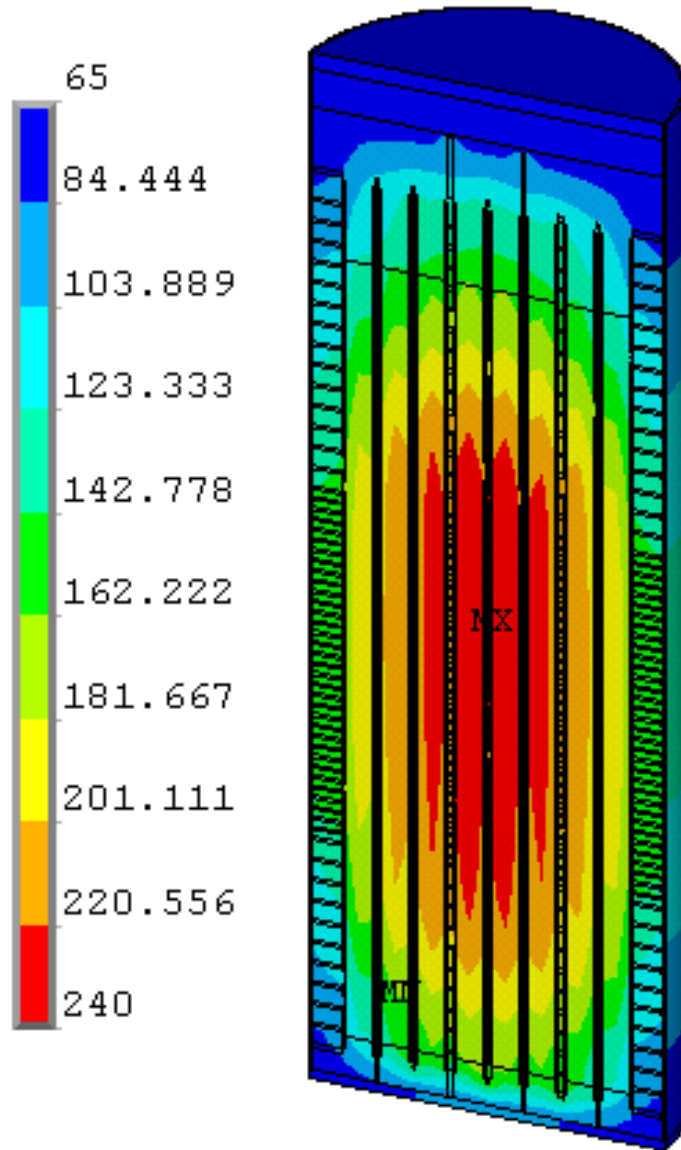


圖 11 SAR 正常案例熱流分析結果[1]

表 17 標準申照案例(14KW)之分析結果比對

正常貯存 ^[3] (周圍溫度 32°C)	最高溫度(°C)							
	燃料護套	承載圓盤	導熱圓盤	密封鋼筒	混凝土護箱混凝土		外加屏蔽結構體 混凝土	
					整體	局部	整體	局部
SAR	236.8	221.8	221.2	134.3	63.2	71.9	61.4	71.0
本分析	226.68	216.85	210.85	137.27	53.24	69.48	58.11	63.08
限值	400.0	371.1	343.3	426.6	65.5	93.3	65.5	93.3

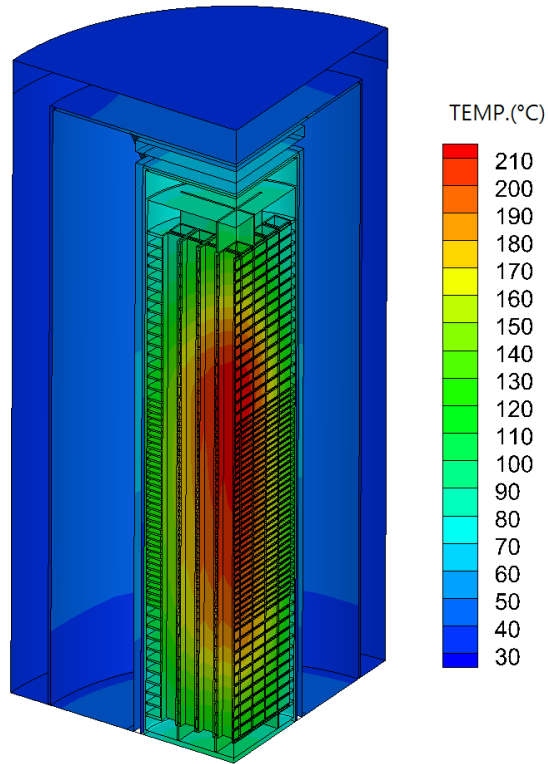


圖 12 案例 2(12KW)熱流分析結果

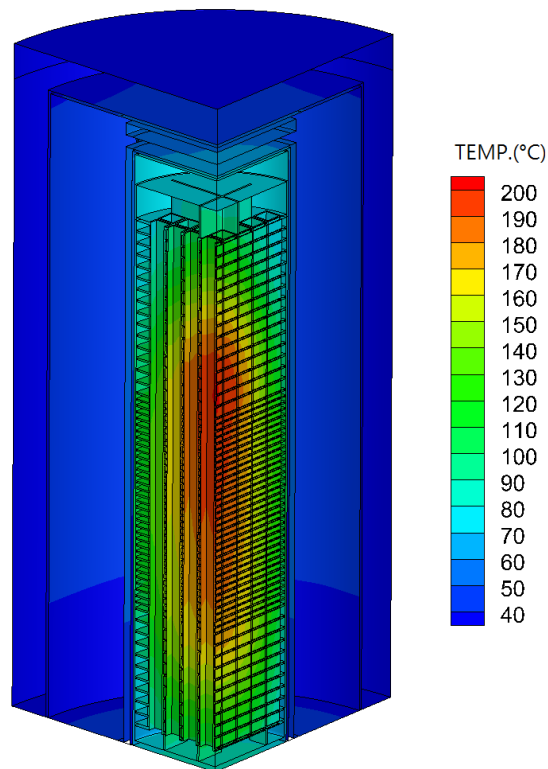


圖 13 案例 3(10.5KW)熱流分析結果

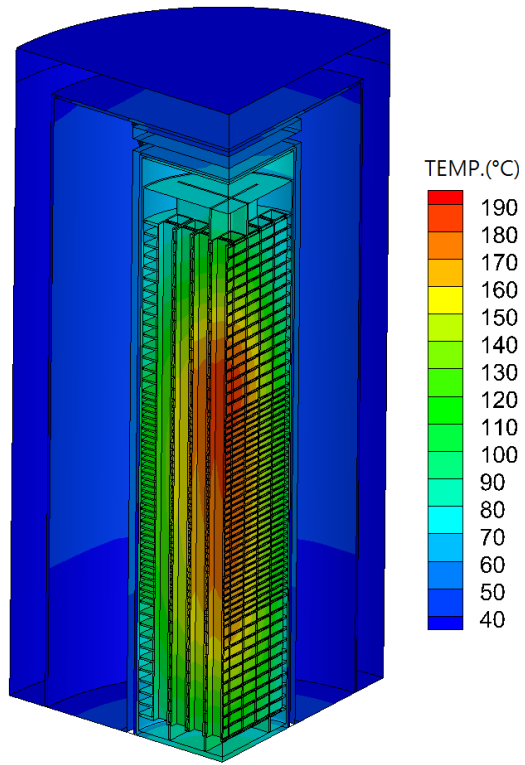


圖 14 案例 4(9.5KW)熱流分析結果

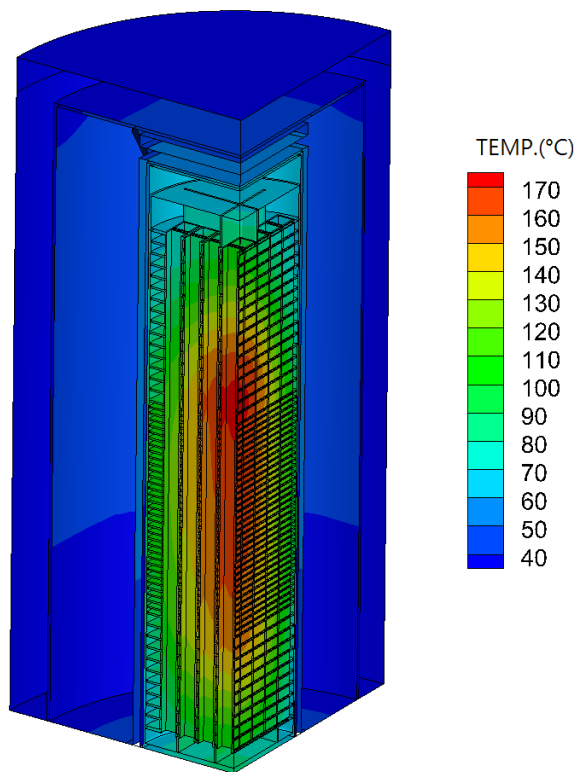


圖 15 案例 5(8.5KW)熱流分析結果

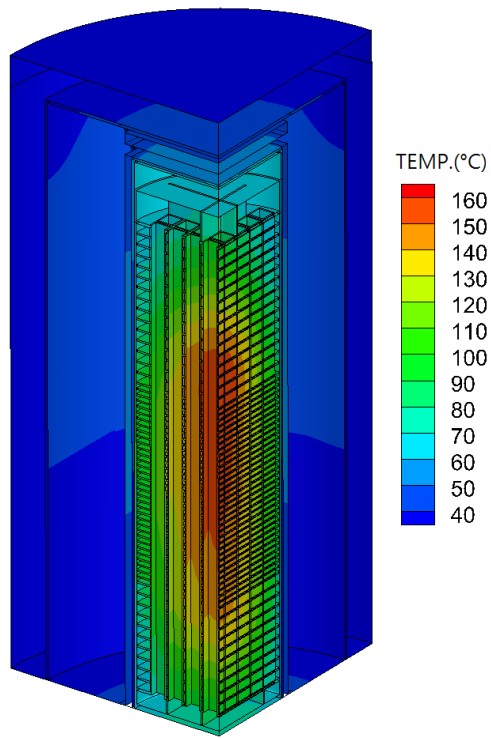


圖 16 案例 6(7.5KW)熱流分析結果

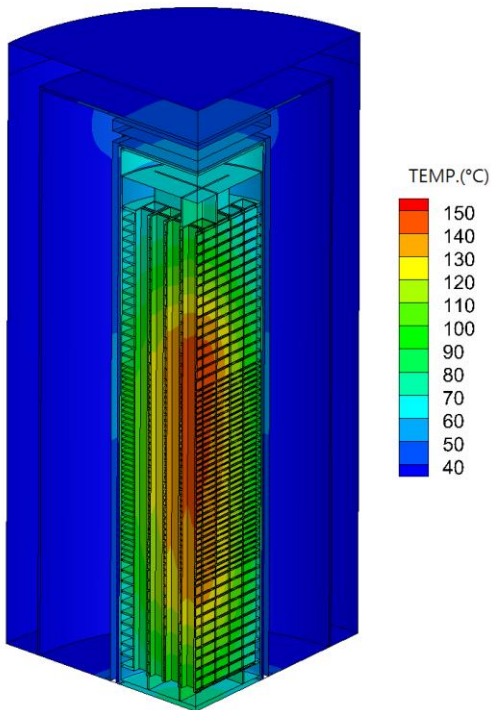


圖 17 案例 7TSC-025(5.75KW)熱流分析結果

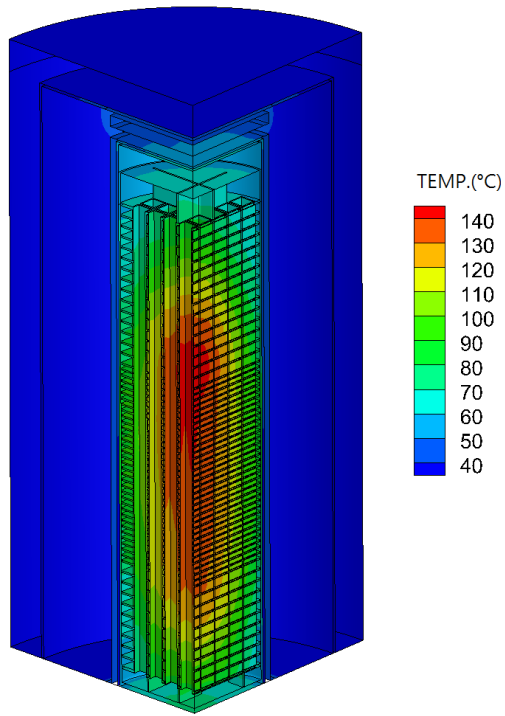


圖 18 案例 8 TSC-07(5.3KW)熱流分析結果

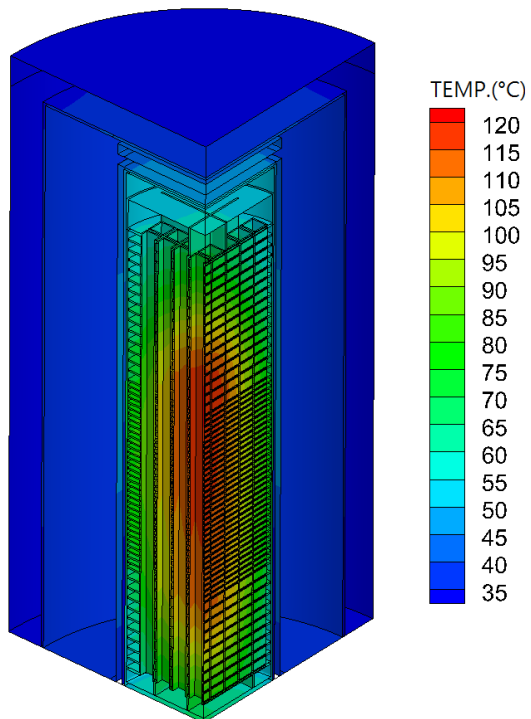


圖 19 案例 9(4.7KW)熱流分析結果

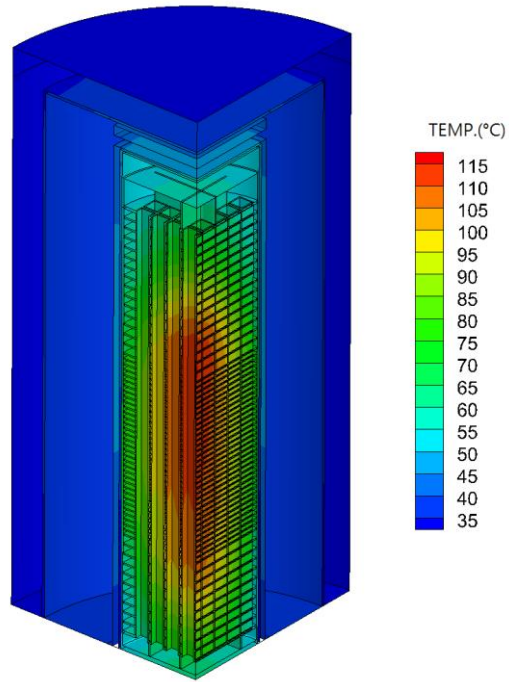


圖 20 案例 10 TSC-02(3.75KW)熱流分析結果

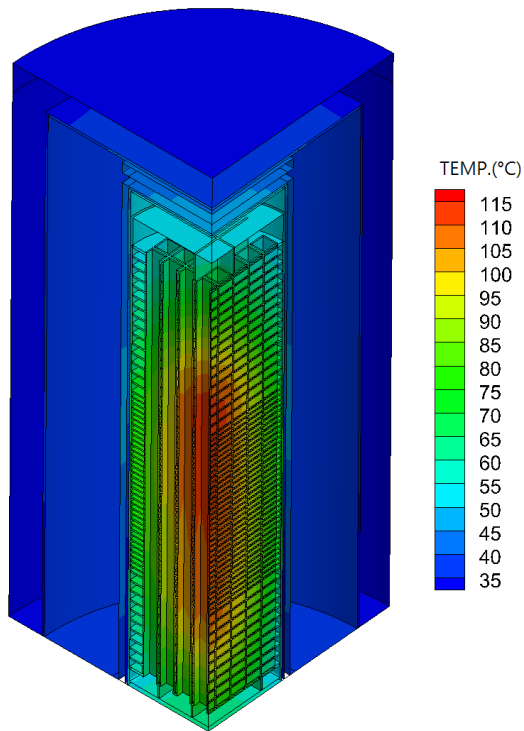
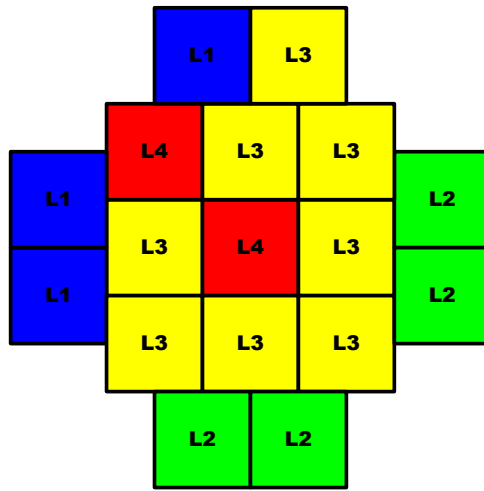


圖 21 案例 11 TSC-01(3.75KW)熱流分析結果

(a)



L1 = 707.00 W
L2 = 744.05 W
L3 = 963.75 W
L4 = 1048.5 W

(b)

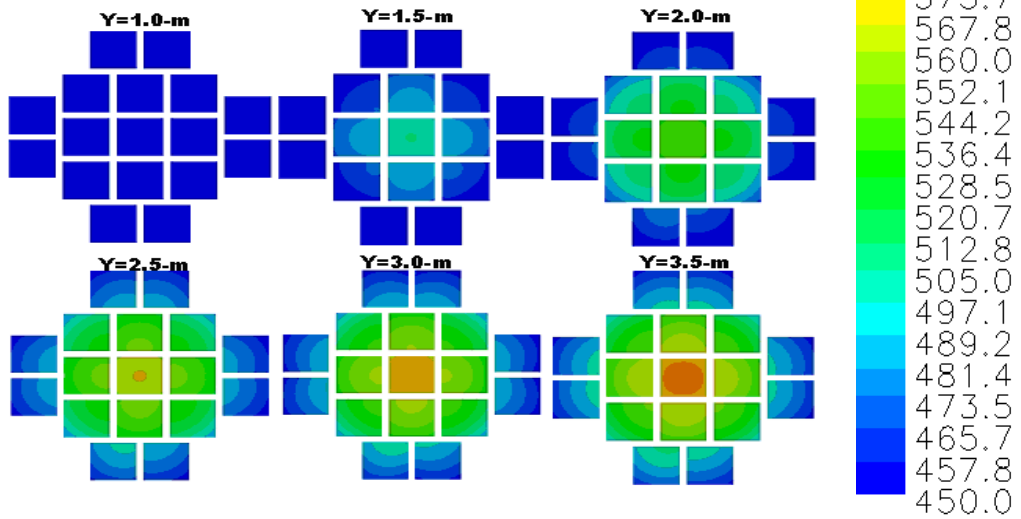


圖 22 (a)VSC-17 內部燃料功率配置、(b)vsc-17 內部燃料束溫度分佈

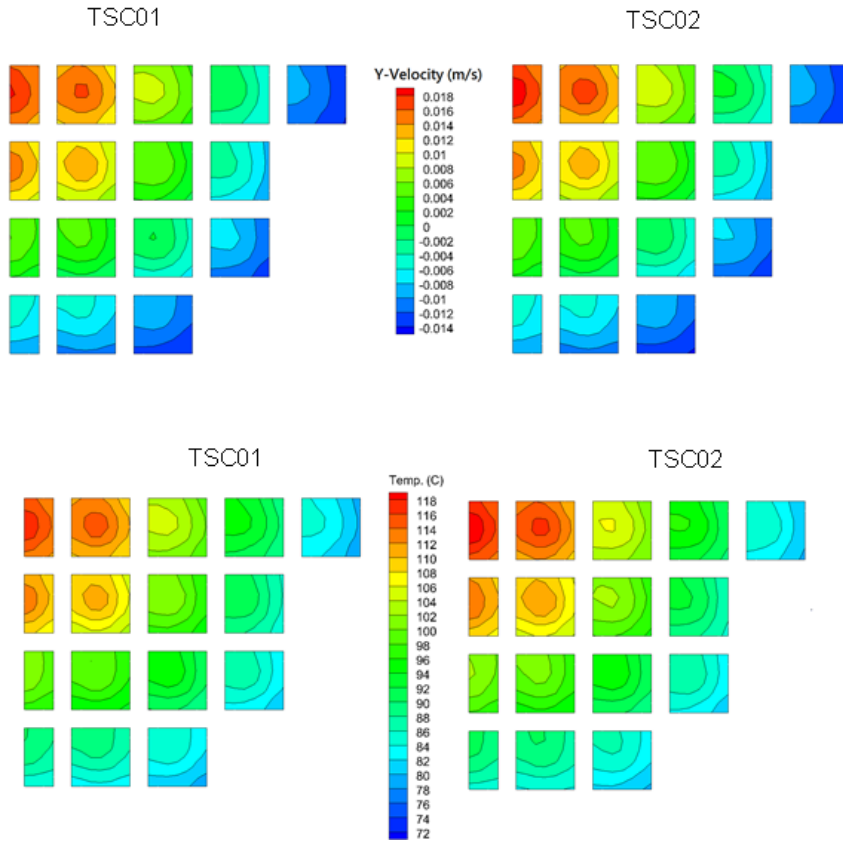


圖 23 TSC-01 與 TSC-02 之細部溫度與流場比對

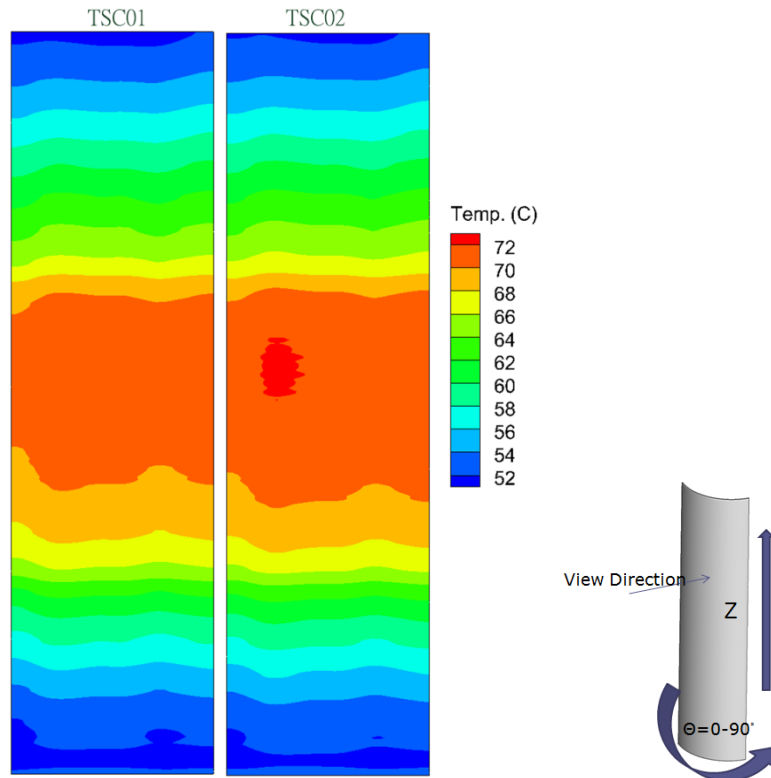


圖 24 TSC-01 與 TSC-02 之 TSC 表面溫度分佈比對

5.2.2 設計壽命期間熱流分析

透過上述分析技術的建立以及案例的評估，本研究選用了 INER-HPS 中最早進行裝載的 TSC-01 進行設計壽命期間的熱流特性分析，以期了解相關元件在長時間的貯存後之熱流特性。另外，如同先前章節所述，不同功率之間的熱流特性極為相似且呈現隨功率下降而遞減的趨勢，故本節僅就不同案例間的量化結果進行討論，而不再針對全系統之熱流分佈進行探討。

圖 25 為 TSC-01 裝載後開始 5-80 年期間之各元件溫度趨勢，其整體溫度之分佈可以 TSC 為分界區分為內部元件與外部元件。其中，燃料束、燃料提籃等內部元件，皆明顯地隨貯存時間的增加而呈現降溫的趨勢，這是因為內部燃料皆為衰變熱之主要傳導途徑，故當貯存時間增長而導致衰變熱下降時，亦直接的影響了相關元件的最高溫度。反之，當衰變熱由 TSC 殼體對外側的空氣流道散熱時，TSC 以外的元件，如內襯、VCC 與 AOS 等元件，則因為非熱的主要散熱途徑，故其溫度變化趨勢將不甚明顯。

此一趨勢意味著當用過核子燃料裝載入 TSC 並進行乾貯後，整體的熱流特性將隨著時間的增加而呈現趨於穩定的降溫趨勢，故由管制角度來看，採用裝載初期之衰變熱進行估算即足以滿足設計壽命期間的元件溫度管制需求。

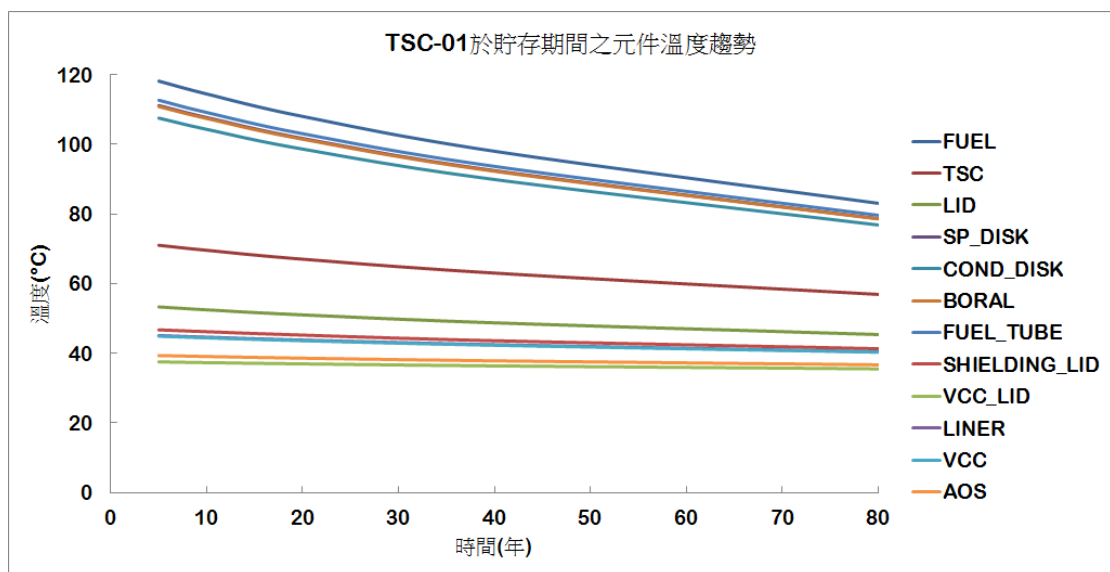


圖 25 TSC-01 於裝載期間之元件溫度趨勢。

然而，圖 25 之溫度趨勢顯示，用以包封並保護內部燃料及組件之 TSC 鋼筒，其溫度將隨著貯存年限與內部熱源之衰退而造成不同的變化。因此就整體設施於設計貯存壽命期間的可靠性而言，有必要針對 TSC 溫度趨勢進行更詳盡的討論。

圖 26 為 TSC 沿軸向之溫度分佈於不同負載條件下之分佈狀況，整體而言其趨勢係與熱負載呈正比之關係，且其軸向分佈之變化亦受到影響：

1. 在高度 1.2m 以下因位於軸向功率漸增之區域，故其溫度亦呈現漸增之趨勢；
2. 1.2 至 3m 之間，因燃料束於此段之熱功率為一均勻分佈，且此高度區間之提籃亦置入鋁製導熱圓盤，故其溫度分佈變化亦呈現較為平緩之狀況。
3. 在 3.0m-4.4m 之區間，因燃料束軸向功率逐漸下降之故，故令此區間之溫度亦呈現下降之狀況。
4. 4.4m 以上的空間，因恰巧位於燃料提籃的上內部組件與上蓋位置，故其溫度亦直接受到相關結構之影響；例如在 4.6-5.0m 處，因 TSC 上蓋直接接受熱輻射與對流之加熱，而令此段溫度較 4.4-4.6m 更高。

上述大量案例的計算雖然顯現出 TSC 表面溫度與熱負載、幾何結構之關連性，但卻無法提供一快速且有效的預估方式，以利管制作業之進行。為能進一步協助管制單位建立 TSC 溫度之預估能力，本研究遂著手將上述(圖 26)之所有計算結果進行無因次化作業，以求建立功率與 TSC 表面之關連性。

在經由無因次式： $T^* = (T - T_{amb}) / (T_{max} - T_{amb})$ 之處理後，可以發現在 0-4.4m(圖 27)之間，各案例之溫度分佈大致呈現近似之分佈，而大於 4.4m 則係因為受到內部對流與熱輻射效應而具有較大的差異性。此一結果亦味著，TSC 表面之溫度分佈與熱負載確實存在一相關性，因此若能進一步尋找出兩者之間的關係，即可建立一套估算工具，以快速求得特定負載下 TSC 表面任一軸向位置之溫度。

經過更進一步的評估，本研究發現 TSC 表面之最高溫度與內部熱負載間，存在一線性之關係，而其關係式經線性適配法求得為：

$$T_{max} = 5.9513 \times P(\text{kW}) + 47.143(^{\circ}\text{C})$$

未來無論是應力分析或是後續提及之氯鹽應力腐蝕評估，需要以 TSC 之溫度為基準進行評估時，即可透過此回歸式與圖 27 之溫度趨勢，快速求任一熱負載下 TSC 表面之溫度值。

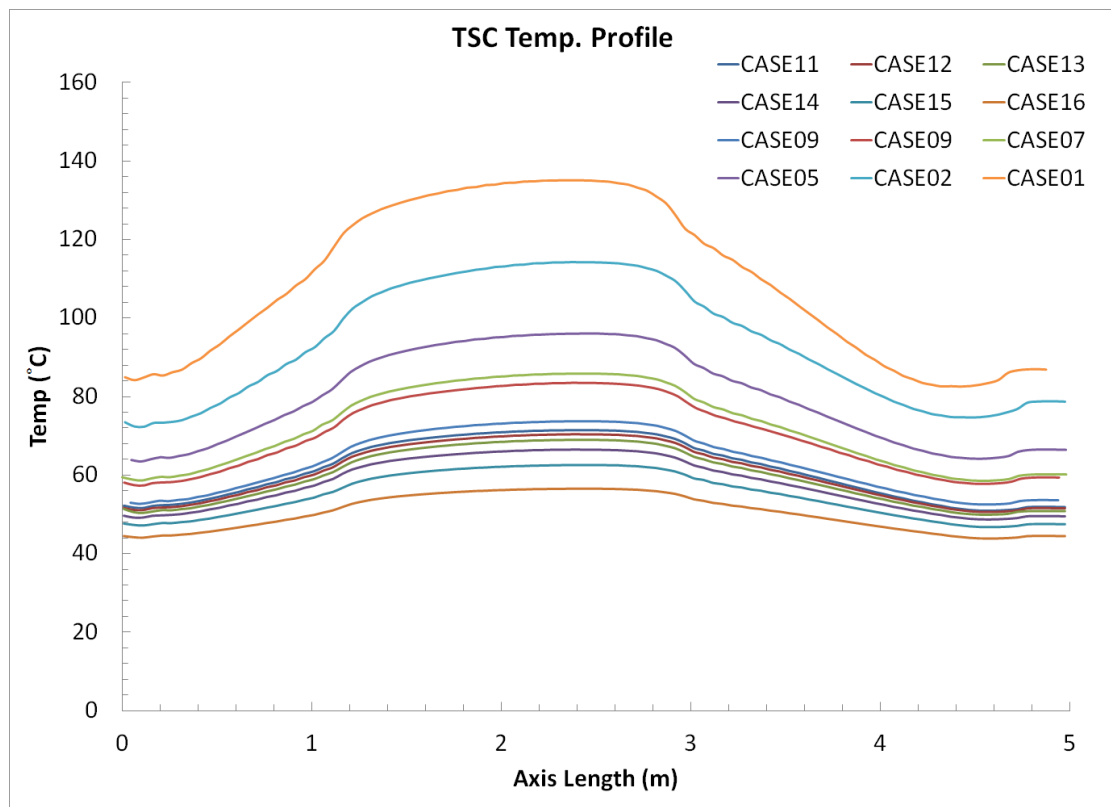


圖 26 TSC 表面於不同貯存條件下之溫度分佈

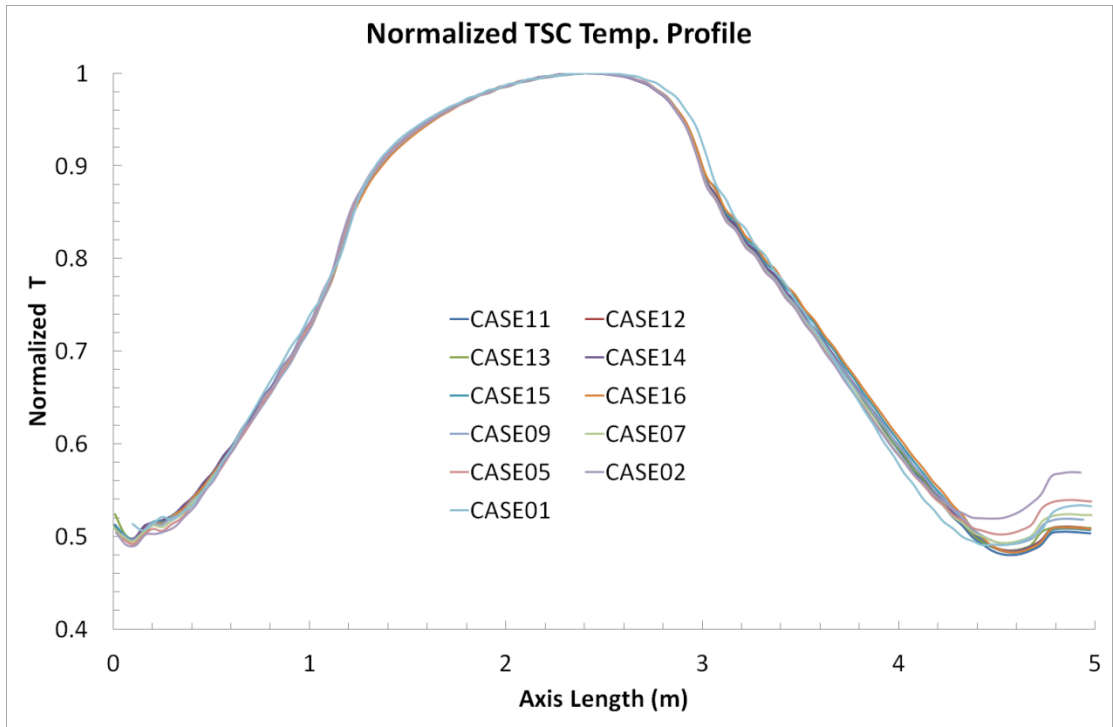


圖 27 TSC 表面之無因次化溫度分佈

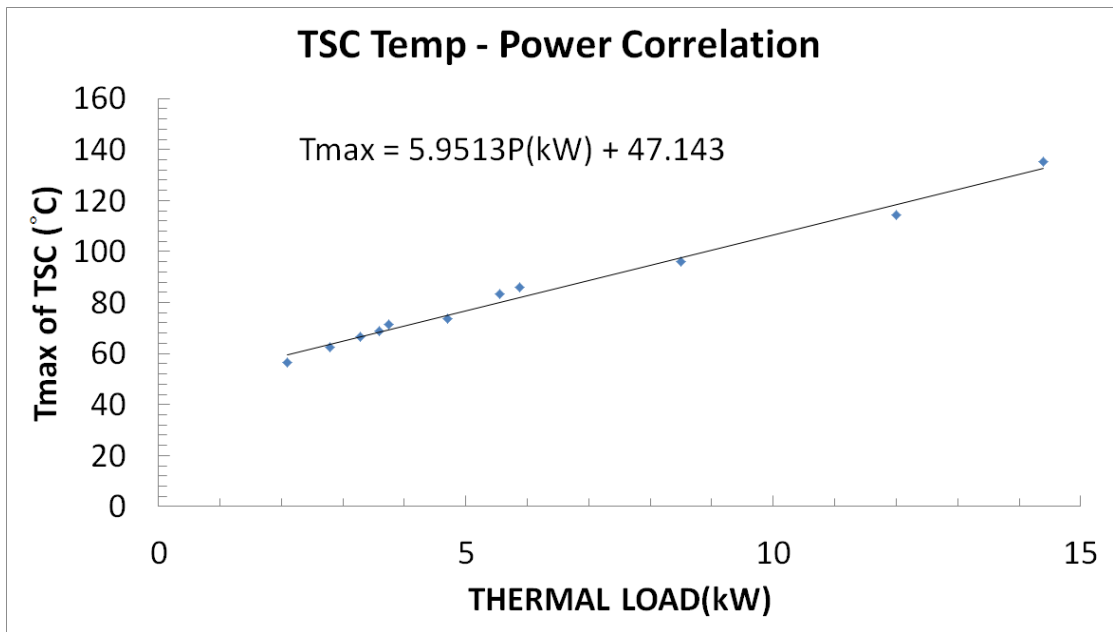


圖 28 TSC 表面最高溫度與負載之關係式

5.3TSC 表面 SCC 可能性評估

在完成乾貯系統設計壽命期間的熱流分析後，本研究亦著手針對目前乾貯系統在設計壽命期間最廣受注目的應力腐蝕議題進行研析，透過熱流分析之面向提供進一步研究此機制之熱流背景，以期為國內外之材料學者進行相關研究時提供必要之助力。

這是因為，即使目前已有許多學者針對氯鹽引發之不銹鋼應力腐蝕現象投入大量的研究人力與資源，但目前結果除了證實 SCC 之發生溫度、溼度及工件應力狀況相關外，尚無法釐清其起裂機制與其它微量元素對此議題之影響，自然亦無法建立合適的評估模式。反之，相較於目前尚未確定的起裂機制，若能藉由目前已經存在的裂紋成長速度(Crack Growth Rate, CGR)評估模式與熱流分析之搭配，或可建立一簡易可用的評估技術，以協助探討乾貯系統於設計壽命期間，因為環境與內部衰變熱改變對 SCC 裂紋成長機制之影響，並嘗試作為未來進行再檢測作業規劃之依據。

5.3.1 誘發 SCC 之環境與機制研析

美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)之研究結果指出，304 系不銹鋼在含有氯鹽溶液之環境中，氯鹽的腐蝕效應將會造成應力腐蝕破裂之狀況。而其研究結果(圖 29)更指出，不同的鹽類、溫度、相對溼度與絕對溼度之參數組合皆有可能令試片發生 SCC，而此一現象發生的首要條件即是必需於試片表面存在有熔融的氯鹽溶液。故由圖 29 中可以發現，所有發生 SCC 之試片，其所在環境之相對溼度皆有一種以上之鹽類發生潮解，即成為評估試片是否可能發生 SCC 之主要條件。這是因為不同的鹽類具有不同的潮解溼度；例如在相對溼度 20%左右氯化鈣即可能發生潮解，並進而造成 SCC 的發生，而常見的氯化鈉則需超過 80%的相對溼度才會發生潮解。但事實上，一般環境所具有的鹽類較可能是多種鹽類的混合物，故可能在實際環境中呈現部分鹽類潮解，但部分仍為

結晶態之狀況(圖 30)，這意味著本研究在嘗試建立 SCC 之裂紋長成速度時，需考慮最廣的可能潮解溼度，如圖 29 所示之 15~80%。而另一方面，若更進一步的對溫度與 SCC 發生之環境進行審視則可發現，當溫度低於 24°C 或時並未發現 SCC 之現象，推測這是因為溫度過低時裂紋成長的活化能受限之故。

根據以上由 EPRI 研究結果所獲得之資訊，則可初步地將可能發生 SCC 之熱流條件介定於：

1. 相對溼度 15-80%；
2. 溫度大於 24°C，之環境。

在獲得可能發生 SCC 之邊界條件後，若更進一步的建立在此溫-溼度範圍內之裂紋可能之成長速度，即可獲得一初步一以熱流條件為基礎發展而成的預估工具。

EPRI 之研究成果 NUREG/CR-7170 指出，對於裂紋成長與溫度之關係，可藉下式來進行估算：

$$\frac{da}{dt} \begin{cases} \alpha \exp \left[-\frac{Q_g}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] & \text{for } RH \geq DRH \text{ and } K1 > 0 \\ 0 & \text{for } RH < DRH \text{ or } K1 \leq 0 \end{cases}$$

其中， Q_g 為目前 EPRI 暫之最保守活化能(40KJ/mol)， R 為理想氣體常數， T_{ref} 為參考溫度，其值為 80°C(353.15K)，而 DRH 則為上述定義之潮解相對溼度。

然而，由於目前的 SCC 之 CGR 量化預估仍尚未有充足之實驗結果加以印證，故本計畫係以瞭解 TSC 表面因不同熱流環境下發生 SCC 可能性及相對 CGR(Relative CGR, R-CGR)趨勢較高之位置進行研析，以增進對 SCC 之瞭解。因此，以下章節將針對 SCC 之劣化效應以無因次化(Normalized)之方式，探討不同環境條件之 R-CGR 之定性影響。

另外，當空氣中的總水量固定的前提下，氣體的相對溼度將隨著溫度的提高而降低，故在相關計算前需估算出相對溼度(RH)並與潮解相對溼度(DRH)進行比較。其計算方式可表示為：

$$RH = \frac{\rho_w}{\rho_{w,MAX}} ;$$

其中， $\rho_w = \frac{e}{R_w T}$ ；

$e = \exp(20.386 - 5132K/T) \text{mmHg}$ ；

$R_w = 461.52 \text{J}/(\text{kg K})$ 。

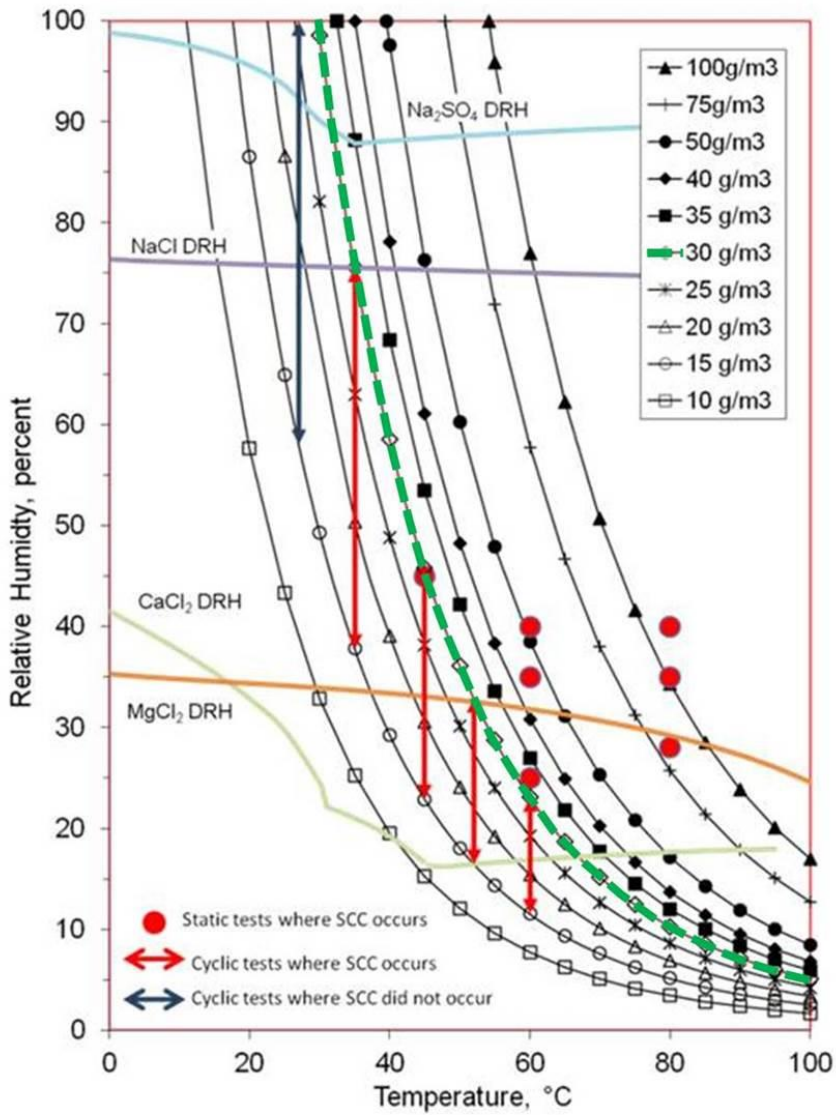


圖 29 304 不銹鋼於不同溼度與溫度條件下受氯鹽誘發 SCC 之可能性 [NUREG/CR-7170]

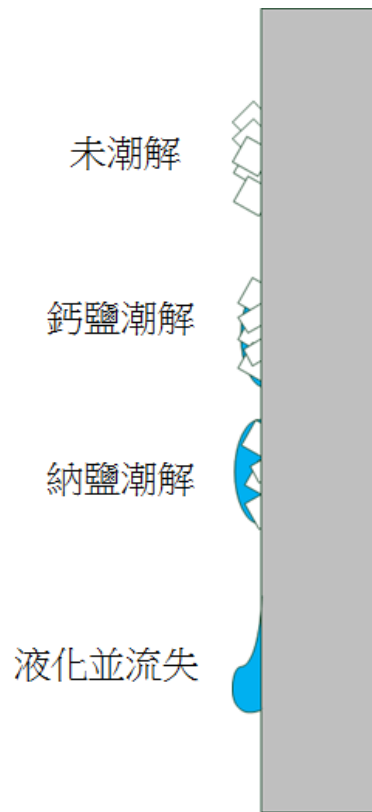


圖 30 混合鹽類之各種不同潮解狀況

5.3.2 乾貯於設計壽命期間之 SCC 發生可能性與 R-CGR 趨勢研析

經由前節所建立之 SCC 評估工具，並配合圖 27 與圖 28 之無因次溫度分佈後，本研究即可對乾貯設計壽命期間可能之 SCC 狀況進行參數探討。以下將選出幾個案例，用以初步探討不同條件之下 TSC 表面是否可能發生 SCC 與其後續 CGR 狀況：

1. 當 TSC 內之熱負載為 14KW 時，其溫度範圍將所獲得之 TSC 溫度範圍約為 131°C 至 82°C 之間，根據先前的溫度判定範圍可以直接得知該負載下 TSC 表面將不致有任何潮解鹽類，未在 SCC 環境條件內，故無發生 SCC 之趨勢；
2. 當 TSC 負載下降至 12KW 時，其 TSC 表面溫度範圍約為 75.3-118.6°C 之範圍，且可得知低於無因次溫度 0.55 之範圍(0-0.6m)極會坐落於 SCC 之環境條件內。

$$0.55=(118.6 - 32)/(80 - 32)$$

因此若再配合週圍環境之可能相對溼度(圖 31)後，即可求得在保守的 80% 相對進口溼度下，流入空氣流道後之空氣在 TSC 表面 0-0.6m 之範圍內，其相對溼度約為：

$$e_{32^{\circ}\text{C}} = \exp(20.386 - 5132K/305.15) * 0.8 = 28.35768 ;$$

$$\rho_{W,32^{\circ}\text{C}} = \frac{e}{R_w T} = 0.000201 ;$$

$$e_{75.3^{\circ}\text{C}} = \exp(20.386 - 5132K/348.45) = 286.5516 ;$$

$$\rho_{WMAX,75.3^{\circ}\text{C}} = \frac{e}{R_w T} = 0.001782 ;$$

$$RH = \frac{0.000201}{0.001782} \% = 11.3\%$$

此相對溼度亦低於 DRH，故亦無 SCC 之可能。

3. 但當 TSC 負載下降至 TSC01 所具有的 3.7KW 左右時，其 TSC 表面溫度範圍約為 50.7-69.4°C 之範圍，且可得知整個 TSC 表面皆坐落於 SCC 之環境條件內。

因此若再配合週圍環境之可能相對溼度(圖 31)後，即可求得在保守的 80% 相對進口溼度下，流入空氣流道後之相對溼度約為：

$$e_{32^{\circ}\text{C}} = \exp(20.386 - 5132K/305.15) * 0.8 = 28.35768 ;$$

$$\rho_{W,32^{\circ}\text{C}} = \frac{e}{R_w T} = 0.000201 ;$$

$$e_{50^{\circ}\text{C}} = \exp(20.386 - 5132K/323.45) = 90.453 ;$$

$$\rho_{WMAX,50^{\circ}\text{C}} = \frac{e}{R_w T} = 0.00606 ;$$

$$RH = \frac{0.000201}{0.006062} \% = 33.2\%$$

此時，若更進一步探討不同相對溼度環境之影響時則可發現(圖 32)，TSC 表面的相對溼度隨著環境溼度的下降而合理的減低，但直至環境溼度低於 50% 之前，TSC 表面之相對溼度皆高於 DRH。由於計算所得之相對溼度已高於氯化鈣之 DRH。因此透過 EPRI 之關係式即可估算出所有負載狀況其 TSC 表面無因次化 CGR 之分佈趨勢(圖 33)。其結果顯示，當熱負載高於 13KW 時，TSC 整體表面因為溫度較高之故，而未落於 DRH 範圍內，故此一條件下 TSC 表面將不致發生 SCC。而當負載逐漸減低時，由於 TSC 表面頂端與底端的溫度較低，因此其 R-CGR 將其它位置更高。

而若更進一步的針對 11-6KW 之負載進行比對可以發現，其 TSC 兩端的 R-CGR 趨勢將隨著年份的增加而逐漸減低，這是因為 CGR 係為溫度之函數，故當溫度降低時，其 CGR 亦隨之下降，因此在無因次化後的 R-CGR 亦呈現下降的趨勢。反之，TSC 之中央部分亦因為溫度的逐漸下降，而使其溼度低於 DRH 之範圍，故其造成中央部位的 R-CGR 有上昇之趨勢。

最後，當 TSC 內部負載更進一步降低時，由於溫度降低所而使得裂紋活化能減低之故，其 R-CGR 亦隨之下降，此一結果意味著，當裝載時間漸增時，若 TSC 表面存在 SCC 所致之裂紋，其裂紋的變化亦將隨著貯存時間的增加而逐漸趨於穩定。

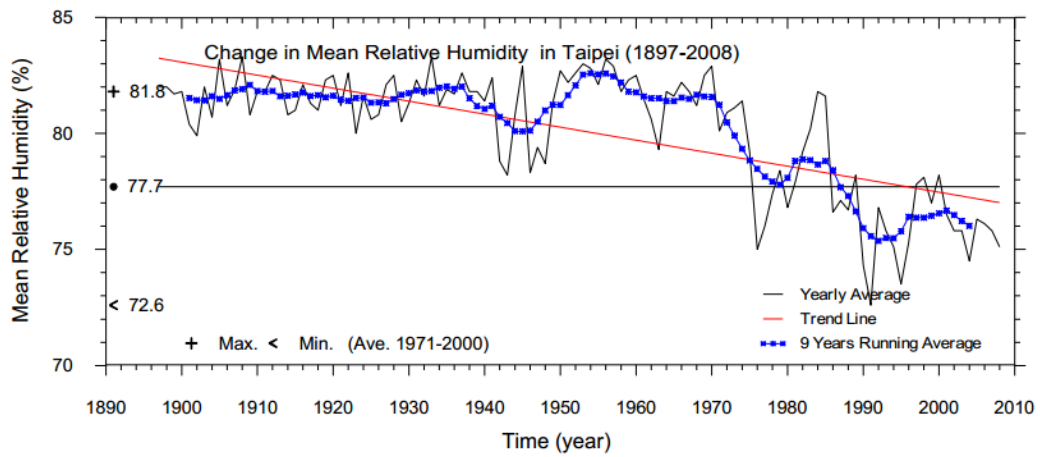


圖 31 台北近年之相對溼度

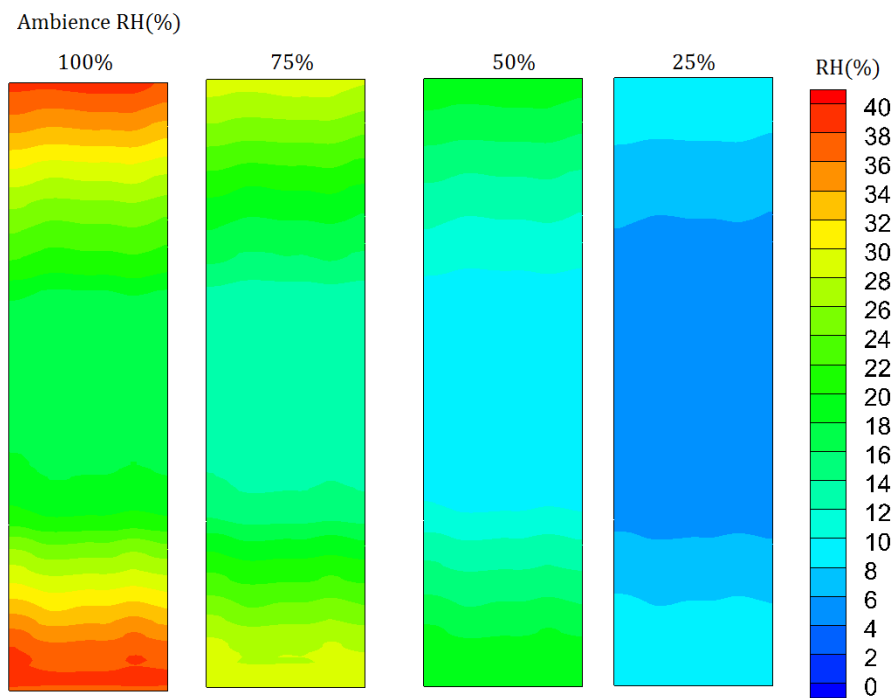


圖 32 不同環境溼度下對 TSC 表面之相對溼度影響

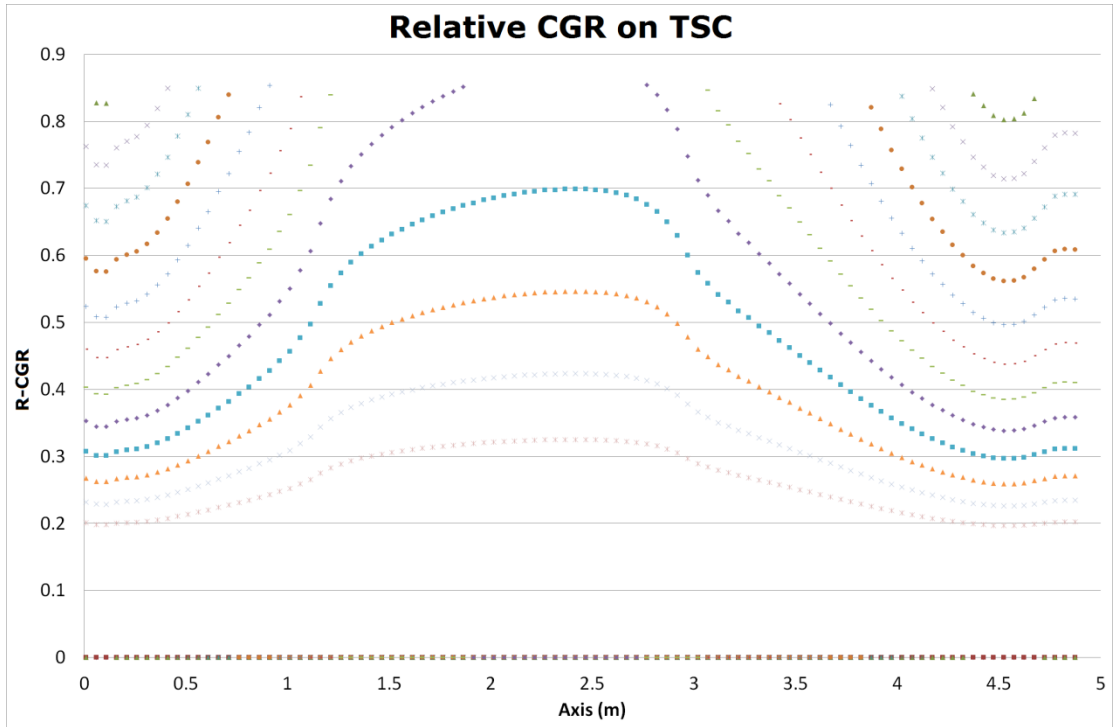


圖 33 不同熱負載下 TSC 表面之 R-CGR 分佈趨勢

六、材料溫度限值研析與國際乾貯發展狀況

本研究之最初目的除了瞭解乾貯系統在設計壽命期間的熱流現象之外，亦擬針對乾貯系統之材料溫度限值來源與現今國際之發展狀況等乾貯資訊進行蒐集與匯整。其中第五章即是針對分析相關之工作成果進行陳述，以利管制單位之審查，而本章則是將資訊性之相關成果匯集所成，便於管制單位於未來進行引用或是參照。

6.1 乾貯系統材料溫度限值研析

6.1.1 燃料丸

商業運轉用之反應器機組，其燃料丸係為燒結後之氧化鈾丸，因其設計之熔點極高(2865°C)，因此於一般乾貯之相關設計規範中(如 ISG-11)中，並未對其溫度加以規範。然而，由於核能設施的安全受國內各團體之觀注，且可能因為不當的資訊傳遞而導致對乾貯系統安全性發生誤解，故於本報告中仍然針對燃料丸之各項特性與國內團體所提出之燃料丸竹節效應(Bambooning)之成因加以說明。

燃料丸於運轉期間因為核分裂將使其放出大量熱源，其功率密度大略可以由該反應器之運轉熱功率、徑向與軸向功率因子以及燃料束的數量來加以估計；例如核一廠之各個機組分別有 408 束燃料，且目前之熱功率為 1840MWt，因此若考慮爐心中的徑向功率因子(約 1.4)後，其單一燃料束之熱功率則約為：

$$1840\text{MW}/408 \text{ 根} * 1.4(\text{POWER FACTOR}) = 6.3\text{MW}$$

又，若要更進一步地估算燃料丸於運轉時由中心至燃料丸表面之溫度差，則可利用基本熱傳公式之解析解來進行估算：

$$T_c - T = (q'''r^2/4k)$$

其中，熱產生率(q''')則可由燃料丸體積與軸向功率因子來求得，經計算後其

值約為 $387.996\text{MW}/\text{m}^3$ 。故代入上式後所得之燃料丸中心至表面的溫度差可達約 600°C 。

此一極高的溫度差，除了使得燃料丸表面出現較大的徑向拉伸應力之外，由於核分裂所產生的分裂氣體，亦將使得燃料本身產生膨脹現象。在此二效應之下，將使得燃料丸本身的體積變大，進而接觸到燃料護套內緣(圖 34)，進而使燃料護套的外觀產生環狀之變化。

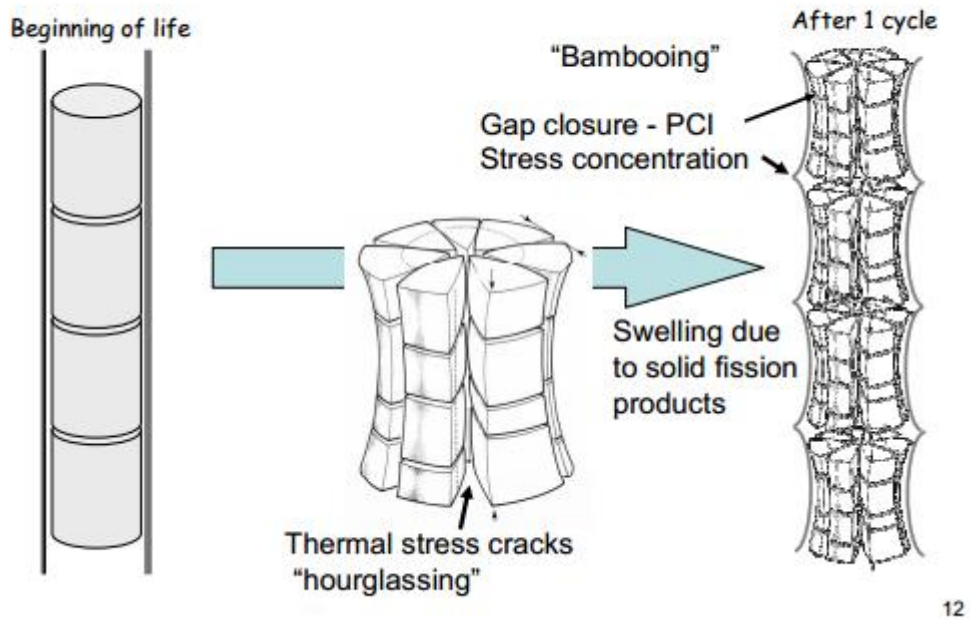


圖 34 燃料丸變型與竹節效應示意圖[9]

此一現象主要肇因於燃料丸之尺寸與特性以及運轉溫度所致，因此以下將分別加以說明，以釐清現行新式設計之燃料在乾貯期間，並不可能發生竹節效應。

愈大尺寸的燃料丸在發生溫度改變時，因為其燃料材料的熱膨脹特性，將導致其燃料丸表面產生更大的熱應變，並進而造成燃料丸的變形的可能性。但由於燃料本身的尺寸亦影響到了反應爐運轉的效益，故燃料廠商在燃料設計時，早已多次的對燃料的設計進行多次的改進。由表 18 可以發現愈新燃料設計中，其燃料丸尺寸皆較以往更小；例如採用 10X10 設計的 ATRIUM-10 就具有比 GE8X8 更小的燃料丸直徑，這除了使得因為燃料本身在運轉時因為高熱通率所造成的溫

度梯度以及分裂氣體而造成的變形量將會較舊的燃料更小之外，燃料棒數目的增加，更使得相同功率的設計下，具有更大的燃料護套表面積，而有效的降低熱通量並進而使燃料束的乾化(BWR)或是沸騰(PWR)產生位置延後，而達到運轉效益與燃料安全性雙贏的局面。

表 18 核燃料設計重要參數列表

燃料棒參數	GE8X8-1	GE8*8-2	GE8X8	GE9B	ATRIUM-10
燃料丸直徑，cm	1.057	1.041	1.027	1.044	0.867
護套內徑，cm	1.08	1.066	1.052	1.064	0.884
U235 濃縮度，%	1.95	3.25	3.24	3.69	4.372

而在運轉溫度方面。相較於燃料丸於運轉期間相距 0.5cm 中心與外表即可能存在有 600°C 的溫度。不同於運轉時的狀況，燃料在退出爐心後將只具有衰變熱，經由先前相同的計算可以得知，其熱產生率僅約 15396W/ m³，約為運轉時燃料丸所發出熱量的 1/25000。這使得燃料丸在達到符合乾貯所需的冷卻條件下，其燃料丸的內外溫度差將遠小於 1°C；且考量退出爐心後其燃耗度再不會增加，故亦無額外的分裂氣體產生。

綜合以上之各項說明可以得知，燃料丸之竹節效應已是約 30 年前舊式燃料設計才有可能發生；且相較於爐心運轉的條件，乾貯時的溫度、熱通率等因子並不比運轉嚴苛亦不會產生新的分裂氣體，故於燃料退出反應爐並進行乾貯後，將無任何出現竹節效應之原因。

而基於上述之資料蒐集與研析後可以確認，NRC 之 NUREG-1536 中並未對燃料丸之溫度進行任何設限，這是因為乾貯系統的作業容許溫度遠低於燃料丸之熔點與運轉設定點，且由先前所提及之衰變熱通量之估算即可得知，燃料丸中心與護套之溫度差異極為有限，故若針對燃料丸進行溫度限制將無任何實質之管制效益。

6.1.2 燃料護套

沿續上述之討論，用於保護燃料丸不致直接與工作流體接觸之元件係為燃料護套，燃料丸亦藉由此一中空管組合而成為一根棒狀之燃料棒，再依不同燃料之設計組合為 8X8、9X9 或是 10X10 之 BWR 燃料束，或是 17X17 之 PWR 燃料束。燃料護套之材料常為鈳合金材料，其具有相對較佳的熱傳導效果與化學穩定性與機械性質，因此被選為商業輕水式反應爐之護套材料。

也由於護套是維持燃料束完整性之最重要元件，因此在美國 NRC 中相關的乾貯法規 ISG-11 中，即針對燃料護套之容許溫度作出非常明確的定義：

1. 在正常情況下燃料護套的溫度不得超過 400°C；
2. 在異常或事故情況下，燃料護套的溫度不得超過 570°C；
3. 最大溫度變化不得超過 65°C，且循環不得超過 10 次

經過相關資料的檢索與研析後，上述溫度限值之來源主要係來自於 NUREG-1536[10] 審查導則 8.8 章中。定義上述溫度限值之原因係因為在正常貯存期間，燃料護套本身的潛變(creep)係為最主要的破壞機制，而當燃料護套的環向應力(hoop stress)大於 90MPa 時，即有可能在為期數十年的貯存期間因為燃料護套產生的潛變而導致燃料護套的完整性受到影響。

此外，NRC 的相關資料亦指出，此一正常貯存之溫度限值，可以透過申請人提交相關環向應力的證明文件來適度的放寬；例如，若當燃料護套到達 540°C 時，其環向應力才會超出 90MPa，此時，正常貯存的溫度限值，將可以放寬到 540°C。但由於溫度超過 570°C 時，將導致燃料護套的主要破壞機制產生改變，因此即使環向應力之評估資料證明燃料溫度超過 570°C 時其環向應力才會超過 90MPa，但仍不可採用超過 570°C 之溫度值作為正常貯存下之溫度限值。

上述限制的原因係因為當燃料護套的溫度超過 570°C 時，其主要破壞機制將轉為應力破裂(stress rupture)，因此在短期與緊急的事故下，燃料護套的溫度仍需受到 570°C 溫度限值的管制。

最後，NUREG-1536 中亦指出，由於氫化物可能積存於燃料護套表面並可能因為溫度的變化而導致護套出現強度或完整性不足之疑慮，故定義出相關的溫度限值與循環周期次數以避免作業期間之溫昇衍生不必要的完整性疑慮。

6.1.3 鋁材

由目前所蒐集到的資料顯示，鋁合金與含硼鋁板(如 Boral)等材料，其最重要的溫度限值係來自於材料本身潛變之因素，尤其是當鋁材料為結構件，並需承載超過自重的負載時，依據依據 NUREG-1536 中述，當材料的設計溫度超過 93.9°C(200°F)時即需考慮潛變效應，且若超過 ASME SECTION II 所要求的 204.4°C(400°F)時，則更需針對各種潛變來源進行評估。這是因為鋁的材料機械強度極低，且於乾貯的工作溫度範圍內，其差異值可達 4 倍(由 200MPa→50MPa)。但由於核一的含硼鋁板皆是以蒙皮式固定於燃料束方管或提籃上，故不僅無承受負載外，亦無需承受自身重量，因此其限值將不受 NUREG-1536 中所載溫度之限制。

排除上述材料性質之限制，乾貯系統內的鋁合金仍需考量其它的加工製程所帶來的溫度限值；例如：核一乾貯系統中用以製作導熱圓盤的鋁合金 AL-6061[16]，其本身具有時效硬化的特性，亦即鋁合金材料經過一系列的固溶熱處理(solution treatment)→淬火(quench)→時效處理(aging treatment)之程序後，材料內部會逐漸產生微小的析出物，並使得材料的強度提高。而此控制溫度的限值將可確認材料特性不受影響，故沿用安全分析報告中對鋁材之溫度 398.8°C 係為合理之作法。而在含硼鋁板(BORAL)的部分，由於該材料之長期溫度限值 454°C(850°F)與短期溫度限值 537°C(1000°F)係由供應廠家所提出之規格書中[17]所載之限值故最初申照時係沿用該材料之規範書；因此含硼鋁板的熱限值定義並不受潛變溫度限值，而是基於其它工程領域之考量所致。若考慮乾貯系統在超越設計基準事故中可能面臨之狀況，超過原設計限值可能導致含硼鋁板之耐用度出現問題，因此建議沿用安全分析報告中材料廠家所提供之溫度限值進行管制。

6.1.4 TSC 殼體

核一乾貯的提籃以及 TSC 零件，其材料皆是 304 或 304L 之沃斯田鐵系不銹鋼；其中 304 不銹鋼是為含碳量約為 0.08% 之不銹鋼，而 304L 則只有約 0.03% 之含碳量。但由於此類鋼材在超過 400°C 時，將會因為碳的析出而在晶界附近形成碳化鉻，並使晶界附近的晶粒產生乏鉻現象。即使是由 304 改良而成的 304L 低碳不銹鋼，上述的碳析出並形成碳化鉻的機制仍會在高溫時產生晶界腐蝕的問題，因此在工程應用上若考量長期使用下可能因為碳析出而導致材料抗蝕能力的減低問題時，則需將 304 與 304L 不銹鋼之長期使用條件設定為 426.6°C，其主要原因就是為了避免晶界腐蝕之問題。

但若由發生超越設計基準事故之情況來看，此時在意的並非短期碳析出所造成的晶界腐蝕問題，而是考量該結構在事故情況下的抗外力能力，例如：TSC 在事故期間的機械強度將影響後續搶救措施的考量，或考量燃料提籃在超過 426.6°C 時，是否產生變形並進而影響臨界分析之有效性。

經研究，基於不銹鋼於 600°C 前之材料抗拉伸強度變化有限之故的前提下 [13]，可以證實即使事故期間燃料提籃之溫度未超過 600°C 前，應可忽略溫度對 TSC 之材料強度之影響。

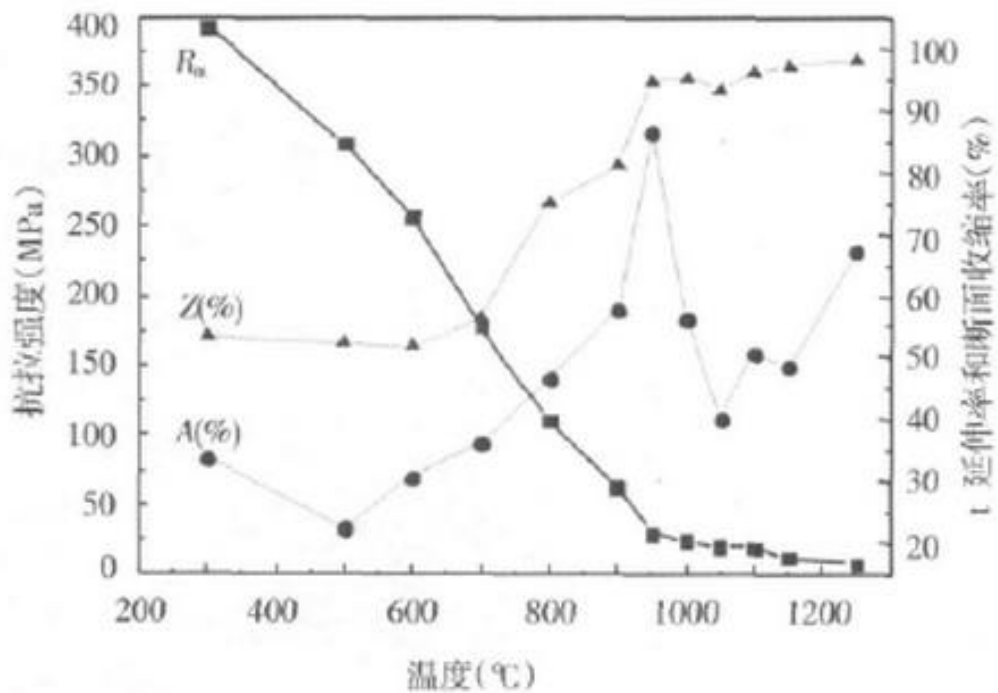


圖 35 304 沃斯田鐵系不銹鋼於不同溫度下之抗拉伸式驗結果[13]

6.1.5 碳鋼

對於 SA537、SA564 與 SA193 等三種碳鋼主要因其應力強度較高，故被選用作為提籃之材料，雖然此類材料不會如同上述之 304 不銹鋼，因乏鉻現象而導致耐蝕性受到影響，但由於此類材料在超過 426.6°C (800°F) 時，仍會發生較明顯的潛變問題，因此對於長期使用上需將其納入設計考量中，亦因如此，SAR 對於此類材料仍係以 426.6°C (800°F) 作為期設計限值。故於乾貯系統中超越設計基準事故分析中，採用此條件進行系統之可用性將是較為保守且嚴謹的條件，但系統並不致於因為短暫接近設計值而出現安全疑慮。

不同於上述的高碳鋼，乾貯系統中可能採用之 ASTM A36、A537、A588、A615、A350 等材料，主要用以作為混凝土護箱基板、頂底板、傳送護箱製作之用，但因其結構強度將受溫度值改變而出現明顯變化，故在選擇其設計限值時，

需以最初進行應力分析之材料強度為基準，設定其溫度限值，如此才可確保相關分析結果之適用性。例如，上述鋼材之強度在 371.1°C (700°F)時僅剩 17.2 Ksi，故若分析時係以 19.6 Ksi 為材料強度之條件，則其材料溫度限值就不得超過 500 °F。

對實際作業而言，因工程設計中往往考量一定程度之安全係數，並以最大承載條件進行估算；故可預期在材料因意外事故而達此設計之溫度限值時，相關元件預期將不致出現立即損壞之情形，因此利用意外事故之溫度限值來管制超越設計基準事故並無不妥。

6.1.6 混凝土

對於混凝土之溫度限值，本節擬由兩部分來加以說明，其一係為混凝土本身之材料特性，另一部份則是考量混凝土材料應用於乾貯作業時，因澆灌至鋼製元件中而需考慮之膨脹與材料握裹力等問題。

經資料蒐集後發現，混凝土本身的強度在超過 200°C 時才會開始下降，而在 800°C 時仍會保有原來一半之值。而其彈性係數將由 40°C 開始下降，直至 500°C 時降為原來的 20%。這些混凝土特性的改變主要係因為 573°C 砂中的石英成分發生晶相轉變，由 α 相轉成高溫 β 相，造成膨脹而裂縫增加所致。

但若就乾貯設施而言，上述的溫度值已超過乾貯統中常見的 93.3°C 以及 176.7°C 等溫度限值許多。這是因為在乾貯系統的加工中，混凝土材料中往往加入鋼筋或是鋼製內襯等元件。而低溫澆灌並凝結後的混凝土將會在乾貯系統裝載後的溫昇造成不同材料之間因為熱膨脹係數的差異而造成過高的熱應力，並導致握裹力降低。因此 NRC 在乾貯設施之審查導則 NUREG-1536 中已明確的針對相關混凝土材料之溫度進行規範。

NUREG-1536 中明載當混凝土於正常與異常時，若其溫度低於 93.3°C 時，無需提出任何測試(No test are need)來證實混凝土強度不受影響。因此在核一乾貯的 SAR 中，即採用此種方式，將正常與異常狀況下之局部溫度限值定訂在 93.3°C 以下。

基於以上之評估結果顯示，乾貯系統之混凝土溫度限值之選定係以考慮系統在長時間使用下之完整性而訂定，但此一溫度相較材料本身發生劣化之溫度點仍有極大的差距，故在乾貯系統的超越設計基準事故中使用安全分析報告中之限值係為一合理且保守之作法。

6.1.7 屏蔽材料

乾貯系統的屏蔽材料主要包括有用於傳送護箱的鉛屏蔽與其外側的 NS4-FR 聚合物材料兩種。以下將針對其特性進行說明。

鉛為一高密度且質軟之元素，由於其機械強度不高，故在原始設計中即將其設計為不受力元件，整體系統與本身的重量係經由傳送護箱的內外殼承載。因此使他的材料強度將受到溫度的上昇而明顯下降(圖 36)，仍不致影響該材料的使用。又，經資料蒐集後可以發現，鉛之融點為 327.5°C ，故原始 SAR 選用 315.5°C 作為設計限值係為合理之設定。且由於傳送護箱僅可能於裝載或是再取出時接觸較高溫度，故此限值對於整體之作業影響亦為有限。

而不同於純元素的鉛，NS4-FR 係為較不耐高溫之聚合物類材料，由其溫度限於原始 SAR 中係訂定為 148.8°C ，而由 NRC 於 2000 年 5 月 26 日中所公佈的 EVENT #27036 中即指出，在經過 162.77°C (325°F) 之熱測試 150-200 天後，NS4 有分裂、起泡等劣化反應。雖無更接近 148.8°C 之測試結果，但顯示溫度愈高將有可能導致聚合物的劣化，故建議即使在超越設計基準事故中，仍沿用原始材料廠家所提供之限值進行相關分析與管制。

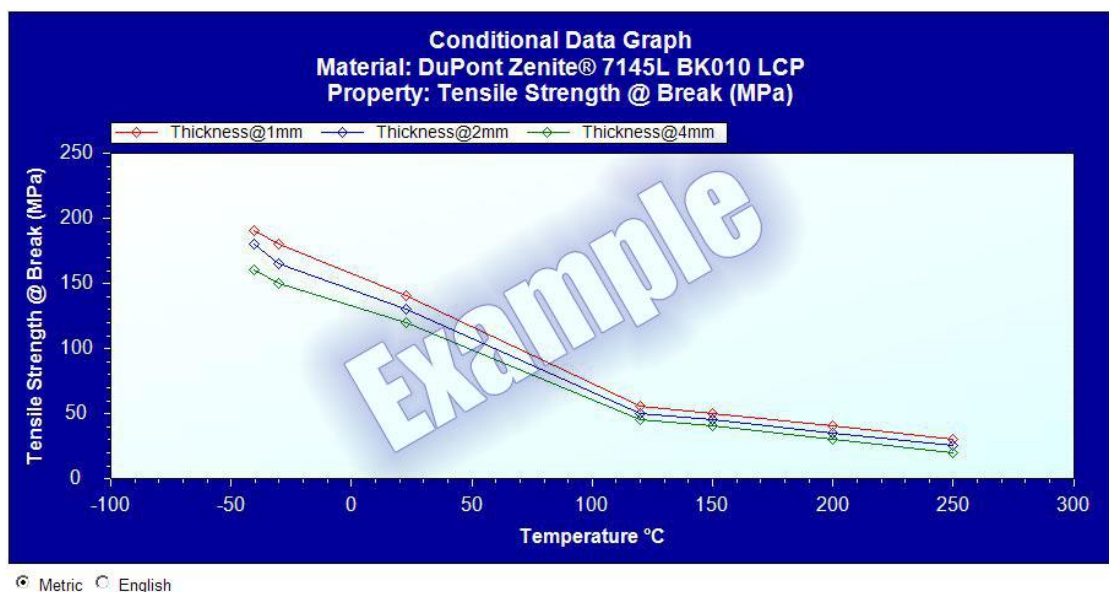


圖 36 鉛之抗拉強度與溫度之關係圖

6.1.8 乾貯系統意外事件溫度限值之管制背景匯整

根據 6.1 章中對各項材料之溫度限值研析結果，本計畫將乾貯設施中常用之各項材料於意外事故中之溫度限值加以匯整如下，以便於管制作業之說明。透過此表之比對後，更進一步地證實乾貯系統之設計限值與材料之熔點或材料變質溫度有極大之差異，且實際分析所獲之元件溫度亦低於此一限值。故對於分析中採用上述之設計限值確能保證材料之可靠性。

材料名稱	材料熔(變質)溫度	設計限值	核一安全分析結果	訂定基準與依據
燃料護套	1852°C	A · 400°C	<236.8°C	依據 NUREG-1536 之要求，防止長期貯存下因圓周應力>90MPa 所造成的材料潛變
		B · 570°C	<367.4°C	依據 NUREG-1536 之要求，預防短期溫度過高而導致的材料破裂
304&304L	1400°C	426.6°C	<258.2°C	依據材料本身特性加以制定，防止材料乏鉻現象而導致長期貯存期間之抗蝕能力降低。
鋁材	667°C	398.8°C	<350.5°C	依據材料本身特性加以制定，防止時效硬化效果不致因為高溫減低。

SA537 材料	~1400°C	426.6°C	<352.2°C	依據材料本身特性加以制定，防止潛變造成長期使用之設備劣化
A36 等材料	~1400°C	371.1°C	<352.2°C	依據材料本身特性加以制定，並與工程設計採用之強度為依據進行設定
混凝土	573°C	A · 93.3°C	<71.9°C	<p>主要係防止混凝土熱膨脹導致結構握裹效果減低，之問題；主要依循 NUREG-1536 進行規範</p> <p>1 · 低於 93.3°C 無需提具任何資料與證明</p> <p>2 · 超過 93°C 但低於 176.7°C，則需證明材料的膨脹係數小於 $11 \times 10^{-6} \text{mm/mm/}^\circ\text{C}$</p>
		B · 176.7°C	<160°C	
鉛	327.5°C	315.5°C	<149.2°C	依據材料本身性質進行設定，保守選擇低於材料融點(327.5°C)之限值。
NS-4-FR	162.77°C	148.8°C	<147.5°C	依循聚合物之供應廠家所提供之資料進行規範以防止聚合物受高熱所產生的材料劣化問題。

6.2 國際乾貯發展狀況

乾式貯存技術發展至今已在全球 22 個國家中的 123 乾貯設施中使用，並裝載數以萬計的燃料束。此技術發展至今，其設施的類型主要已大致抵定為窖式、金屬護箱式與混凝土護箱式之設計，即使更新的乾貯系統被設計出來，但仍然不脫上述類型的範疇。因此即使再討論更新式的乾貯系統對於此部分資訊與未來發展將不具有太大的意義。因此本節將主要針對不同於現有系統之設計規範部分進行研析。經蒐尋相關資料後顯示，目前主要的發展方向大略可朝向超出原有設計壽命之貯存狀況以及高燃耗燃料的乾貯發展，這是因為目前已具有乾貯設施的國家，已大致針對較舊週期的燃料進行乾貯的作業或是規劃；而扣除這些被規劃貯存的燃料後，所剩餘的燃料將大部分屬於高燃耗燃料。另外，也由於部分國家，尤其是美國，其乾貯設施已運轉多年，並將屆其原始設計壽命，因此超出設計壽命之相關分析除了有助於釐清內部狀況外，對於長期貯存的老化管理更有其必要性。因此，本節將著眼於此二方向進行資料研析，以協助管制單位建立相關之資訊與技術；以下將分別針對上述兩課題之研究結果進行說明。

6.2.1 超出設計壽命之熱流研究

在超出設計壽命之相關研究中，目前本研究已蒐集到美國 NRC 委託 PNNL 所執行之研究報告，該計畫截止於 2013 年，並於當年 9 月提交其期末報告[14].

此計畫主要係針對 HI-STORM 100 與 MPC-32 系統進行裝載超過原始設計壽命期間之後的系統熱流狀況進行模擬分析(圖 37)，其分析之時間週期長達有 300 年。

而為了適度的簡化分析工作，PNNL 採用了擬穩態分析方式，將不同時間的熱流特性，藉由合適的衰變熱估算技術加以計算，以作為上述系統之邊界條件，並作為其模擬之依據。其方式與本研究所採用之方法類似，僅有所採用之衰變熱估算模式不同。

其相關分析結果中與元件溫度相關之部分經篩選後如圖 38 與圖 39 所示，其結果顯示無論是相關元件之內部衰變熱變化或是內部元件及 TSC 之溫度變化，皆與前章中所述之分析結果相似，這也再次的印證本研究所建立之分析方法確有其實用性。

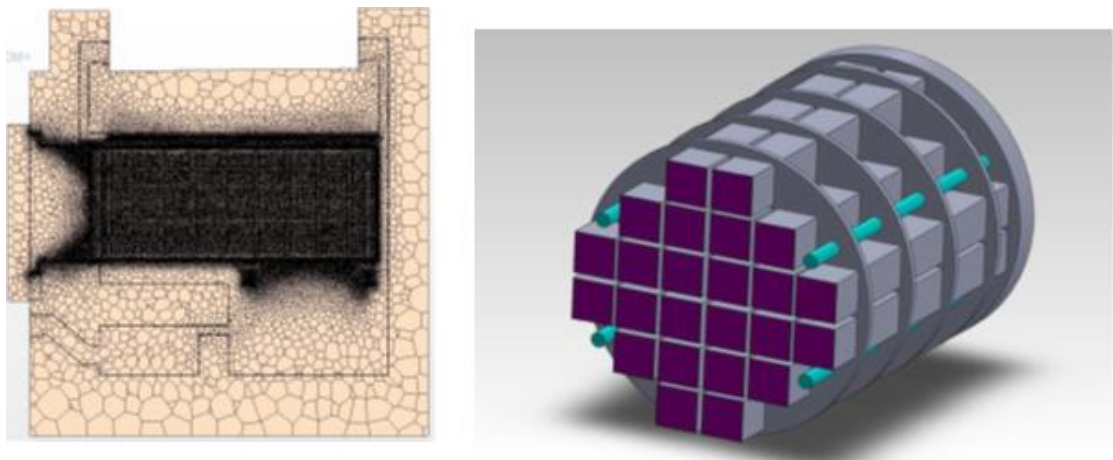


圖 37 PNNL-22646 分析報告中之乾貯護箱分析模式

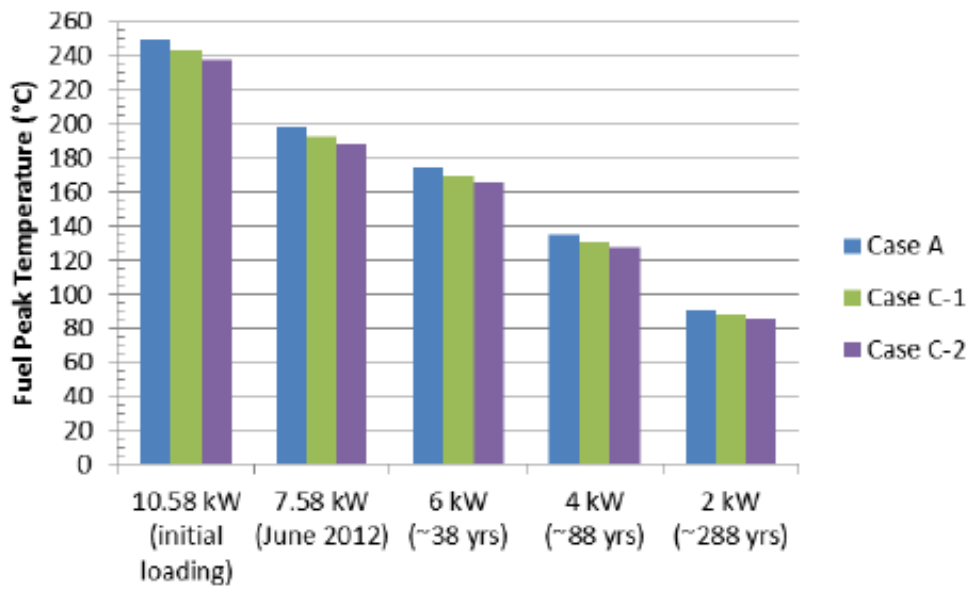


圖 38 不同貯存時間下，護箱內燃料束最高溫度之變化趨勢

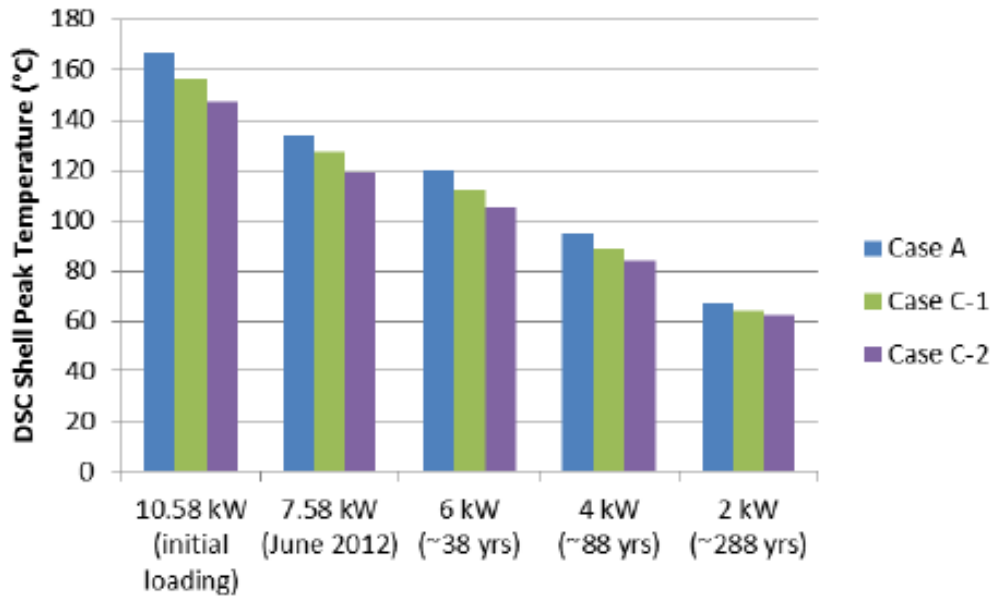


圖 39 不同貯存時間下，護箱表面之最高溫度之變化趨勢

此外，本研究中亦針對可能因為 SCC 造成 TSC 密封效果減低而產生的溫度特性改變進行研析，並指出未來或許可以利用熱流分析技術針對 TSC 表面之溫度分佈改變進行研究，以建立可監測系統狀態之技術。

另一方面，在可能元件老化並導致分析的不確定性方面，該報告之重點亦可臚列如下：

1. 基於零件老劣化的機制與效益的不確定性，元件表面特性的改變可能造成熱輻射效應或其它熱傳能力的改變，並進而造成分析結果的不準度，而更可能造成未來劣化管理或評估的分析基準的適用性疑慮。
2. 由於衰變熱的下降，使得元件溫度降低，並進而造成熱輻射機制的比重改變，而使得熱負載在低於原始設計限值約 45% 時，其溫度分佈將會變得更加的平緩。
3. 在水平系統中，由於重力場所造成的燃料束位置的偏移若未加以考慮，將可能因為忽略接觸熱阻的造成一定程度的誤差。因此研究中特別建議建立一個特殊的 COBRA-SFS 模式，來進一步探討水平與垂直系統中的影響。

6.2.2 高燃耗乾貯國際發展狀況

雖然目前本研究已蒐集到相關高燃耗乾貯之資訊，但由於此計畫係由美國 EPRI 受 NRC 委託於 2014 年開始之計畫，因此該計畫施行至今，僅有半年左右。故其更進一步的研究成果或是進度或可能因為相關報告尚未提交或是未逾保存時限，故本階段僅能就所蒐集到的測試計畫先行說明該計畫之背景、目的、作法與時程等資訊。

此計畫係由 EPRI 領導的一個為期五年的測試計畫，其目的是用以蒐集裝載燃耗超過 45GWD/MTU 的高燃耗燃料後的乾貯系統之系統數據，以作為未來施行高燃耗燃料乾貯作業之所需。在實驗的過程中，此測試計畫將會盡可能的仿照實際的裝載、乾燥充氬與傳送等作業，並置入乾貯設施中存放多年。除此之外研究中亦指出將透過分離效應測試(Separate Effects Test, SET)與小尺度測試(Small-scale Test, SST)等方式進行資料之蒐集，以作為後續設施與燃料在貯存一定年限後的完整性評估依據。而在為期五年的第一期測試計畫中，主要的工作包括了燃料的選擇、裝載與測試蒐集的準備工作以完成長期貯存的準備，而整體包含後續開封後的燃料檢驗與研究的工作則預期將超過耗時超過 15 年甚至更長的時間。此計畫之時程與該報告中所載之溼貯/乾貯燃料之貯存量預估趨勢交叉比對來看，由於自從 1990 年後，燃料束在爐心內之燃耗大多是在超過 45GWD/MTU 後才會被移除，而近年退出之燃料甚至高達 57GWD/MTU 左右。故合理假設未來所產生之新的用過燃料皆為高燃耗燃料的前提下，目前(2014)的美國境內用過燃料總數大約是 70000MTU 左右，而有大約 25000MTU 已完成乾貯。而在未來 20 年間所增加的燃料大約有 4000MTU，而被乾貯的燃料亦大略與增加之用過燃料之總 MTU 相符。這意味著美國境內較低燃耗的用過燃料預計應在 20 年內將會被全面的乾貯完畢，而燃耗較高的燃料則尚待相關高燃耗乾貯的計畫與技術完成後，才有機會進行乾貯；也因此，在約 2035 年後仍被溼貯的用過燃料束總 MTU 將快速的減少。但由於新退出之燃料並不適合直接乾貯，而需等待數年後才能進行乾

貯，因此 EPRI 上述的預期在 2055 年後仍維持溼貯的燃料將維持在常數值。

由上述 EPRI 的評估趨勢可以很明顯的發現到，美國目前係以乾貯為未來燃料貯存之主要方式，並盡可能地減少燃料池內的燃料，其目的或與 NRC 於福島事故後，建議儘早施行燃料池以減輕燃料池負載之核能發電之整體安全建議相符。

基於以上的討論可以得知，乾貯系統的發展需要極長的時間準備與驗證，故 EPRI 之測試計畫截至報告撰寫之時，僅完成了燃料的選擇並同步施行準備工作(圖 41)。而其相關乾貯設施的設計與申照(Design and Licensing Basis Document, DLBD)則預期在今年的 12 月底前才會完成，未來本研究將持續觀注並持續蒐集其進度報告或相關研究成果，以增進國內對高燃耗乾貯資訊之完整度。

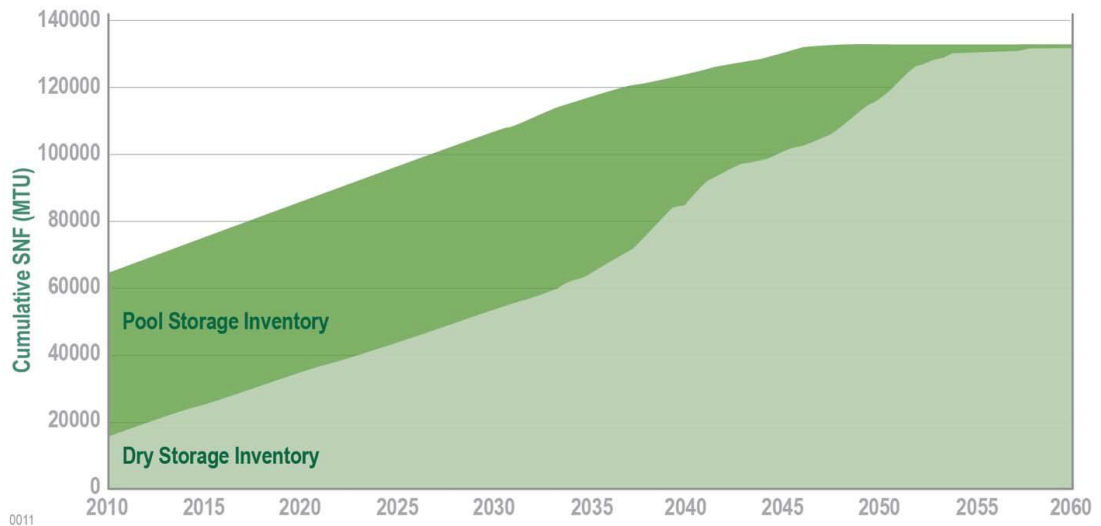


圖 40 溼/乾貯燃料之未來貯存趨勢預估

表 19 美國境內各電廠新退出燃料之燃耗度列表

時間	電廠名稱	燃耗(GWD/MTU)
9 年內	Maine Yankee	49.5
7 年內	HB Robison	56.9
6 年內	Oconee	55
4 年內	other	53.8

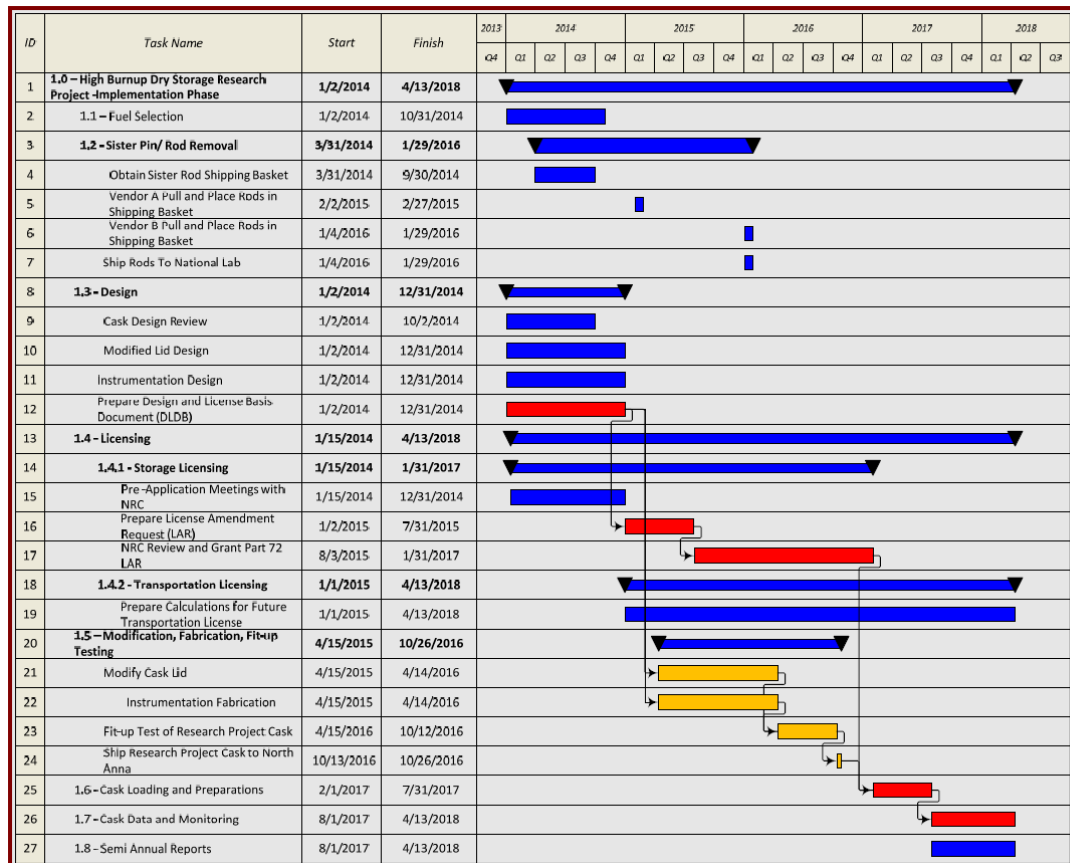


圖 41 EPRI 高容量乾貯測試計畫時程表

七、結論

為了充實我國管制單位於乾貯系統安全管制之技術與國際資訊，本研究於為期一年的計畫執行期間，針對乾貯設施於設計壽命期間的熱流行為與國際間乾貯的最新發展資訊進行了研究。最後，本研究順利完成核一廠乾貯系統之設計壽命期間分析技術與衰變熱評估技術的建立，並利用申照功率之條件進行了貯存 40 年與更長時間下的熱流特性。另一方面，為能更進一步瞭解熱流條件對 SCC 發生條件之影響；本研究亦以熱流分析為基礎，建立了一套預估工具，並用以預估各種負載下，TSC 表面受熱流因素影響所致之相對裂紋成長率之趨勢。其結果顯示，在較低的熱負載狀況下 TSC 表面溫度將會因為功率的下降而處於可能誘發 SCC 之環境區間內，且其發生位置與劣化速度將與熱負載及環境溫度有關。

而在乾貯材料設計限値之訂定背景部分，本研究已完成燃料束至提籃以內材料之限値訂定研析，其結果顯示，燃料護套之限値係受限於潛變與應力破裂而訂；而在燃料提籃與 TSC 等不銹鋼材上，其限値主要係防止材料因為溫度過高而發生晶界腐蝕現象，但若是以嚴重事故之處置角度來看，短暫超過安全分析報告中所載之 426.6°C ，並不會造成明顯立即危險，而更進一步的研析顯示，不銹鋼在低於 600°C 前的拉伸強度變化並不明顯；此結果證實即使系統發生超越設計基準事故，而使提籃溫度接近 570°C 的護套限値時，並不會造成 TSC 與提籃強度的明顯減低，故應不致影響後續救災或是以最初臨界分析結果涵蓋性。

最後，在國際乾貯技術發展的資料蒐集部分，本研究蒐集了國際間對超過設計壽命與高燃耗燃料乾貯之相關資訊，其結果可供管制單位作為未來法規建立之參考。其結果顯示，目前最主要的乾貯發展已經朝向更長貯存期間與更高燃耗之燃料處置進行研究。

參考文獻

- 1 台灣電力公司，“核一廠用過燃料式貯存設施安全分析報告-第六章第三節熱傳分析，”民國 97 年 1 月。
- 2 台灣電力公司，“核二廠用過燃料式貯存設施安全分析報告-第六章第三節熱傳分析，”民國 101 年 3 月。
- 3 施純寬、曾永信，“假設複合式災害情節對乾式貯存設施營運影響分析報告，”101 年 12 月。
- 4 施純寬、曾永信，“乾式貯存設施於假設複合式災害事故下之熱流分析暨密封鋼筒內部對流監測機制研究，”102 年 12 月。
- 5 ANSYS, “FLUENT V12 Theoretical Manual,” ANSYS Inc., 2009.
- 6 Pacific Northwest Laboratory and Idaho National Engineering Laboratory, “Performance Testing and Analyses of the VSC-17 Ventilated Concrete Cask”, EPRI TR-100305, Final Report, May 1992.
- 7 F. R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications.,” AIAA Journal, Issue 32 Vol. 8, p.:1598-1605, 1994.
- 8 In K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, “Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model.,” Begell House Inc., Heat and Mass Transfer Vol. 4, p.p. 625-632., 2003.
- 9 Donald R. Olander, “NUCLEAR FUELS present and future ,”ENGINEERING JOURNAL : VOLUME 13 ISSUE 1 ISSN 0125-8281, 2009.
- 10 NRC, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at General License Facility,” NUREG-1536 Rev.1, July 2010.
- 11 H. Gross, P. Uban, C. Fznzlein, “Technological and licesing challenges for high burnup fuel,” Siemens AG, Erlangen, Germany.
- 12 鄧永宏等人，“核一廠用過核燃料乾式貯存護箱燃料束配置報告，”ISFSI-REP-07001-06，民國 102 年 6 月。

- 13 譚威、王宇順， “304 奧氏體不銹鋼的高溫拉伸行為和形變組織研究，” 中國鑄造裝備與技術，2 月 2012 年。
- 14 PNNL, “ THERMAL PERFORMANCE SENSITIVITY STUDIES IN SUPPORT OF MATERIAL MODELING FOR EXTENDED STORAGE OF USED NUCLEAR FUEL,” PNNL-22646, Sep, 2013.
- 15 EPRI, “High Burnup Dry Storage Cask Research and Development Project-Final Test Plan,” Contract No.: DE-NE-0000593, Feb. 2014.
- 16 Defense Printing Service Detachment Office, "Metallic Material and Elements for Aerospace Vehicle Structure," Philadelphia, PA MIL-HDBK-5G 1994 Vol.1.
- 17 NAC, “Standard Specification for BORAL composite sheet,” EA790-2001 Rev. 2, page B38.

附件 A 燃料束流阻 UDF 程式碼

```

DEFINE_PROFILE(friction_factor_LAM,t,i)
/* Viscous Resistance
Profile UDF in a Porous Zone
that utilizes F_PROFILE*/
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(friction_factor_ATRIUM_10,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydraulic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        F_PROFILE(c,t,i) =
        32./Dh/Dh/1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
}
begin_c_loop(c,t)
{
    a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t));
    F_PROFILE(c,t,i) =
    0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)
}
DEFINE_PROFILE(K_LTP_P,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydraulic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t));
        F_PROFILE(c,t,i) =
        (21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.
        301875*1.7812096*1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
}
DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydraulic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t));
        F_PROFILE(c,t,i) =
        (156.9+168.1*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.
        301875*1.7812096*1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
}
DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
{

```

```

real x[ND_ND];                )/0.64389*1.7812*1.7812096*           f=0;
real a,Dh,Re;                2;                               }
cell_t c;                    }                                           else
Dh=12.3225E-3; /* Hydraulic   end_c_loop(c,t)                       f=1;
Diameter*/                   }                                           source = MaxPower*f;
begin_c_loop(c,t)            return source;
{
Re=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,      DEFINE_SOURCE(suorce_KSDSS,        #if !PR_HOST
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,  c,t,dS,eqn)
t)*C_W(c,                    {
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)  real x[ND_ND];                    {
;                               real A,B,L1,L2,f,p0,              if (A> height)
source,height,MaxPower;      f=1-(A-height)/L1;
C_CENTROID(x,c,t);          }
height=x[1];                else if (height>B)
p0=0.67666298;              {
L1 =                          f=1-(height-B)/L2;
0.15*3.62547442;            }
L2 =                          }
3.62547442*0.8;            else if
A = p0+L1;                   (height>4.3021374)
B = p0+L2;                    {
                                f=0;
                                }
                                }
                                else
                                f=1;
                                source = MaxPower*f;
                                return source;
                                #endif /* !PR_HOST*/
                                #if !RP_NODE
                                if (A> height)
                                {
                                f=1-(A-height)/L1;
                                }
                                else if (height>B)
                                {
                                f=1-(height-B)/L2;
                                }
                                }
                                else if
                                (height>4.3021374)
                                {
                                (-9.68+9.526*pow(Re,0.0046)
                                {

```

```

        f=1-(height-B)/L2;
    }
    else if
(height>4.3021374)
    {
        f=0;
    }
    else
        f=1;
    source = MaxPower*f;
    return source;
#endif /* !RP_NODE*/

```

```

#if !PARALLEL

```

```

    if (A> height)
    {

        f=1-(A-height)/L1;
    }
    else if (height>B)
    {

        f=1-(height-B)/L2;
    }
    else if
(height>4.3021374)
    {
        f=0;
    }
    else
        f=1;
    source = MaxPower*f;
    return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}

```

附件 B 額定負載之燃料束熱功率函式程式碼

CSDSS

```

DEFINE_SOURCE(suorce_10year,          source = MaxPower*f;
c, t, dS, eqn)                        return source;                f=1-(height-B)/L2;
{                                       #if !PR_HOST                    }
    real x[ND_ND];                                else if
    real A, B, L1, L2, f, p0,                if (A> height)                (height>4.1378)
source, height, MaxPower;                {                               {
    C_CENTROID(x, c, t);                                f=0;
    height= x[1];                                f=1-(A-height)/L1;            }
    p0=0.3278;                                }                               else
    A = p0+0.15*3.81;                            else if (height>B)            f=1;
        B = p0+3.81*0.8;                            {                               source = MaxPower*f;
        L1 = 0.5715;                                }                               return source;
        L2 = 0.762;                                f=1-(height-B)/L2;          #endif /* !RP_NODE*/
    }
    MaxPower=169.6/0.06578                    else if
/0.825;                                    (height>4.1378)                #if !PARALLEL
    if (A> height)                                {
    {                                             f=0;                            if (A> height)
    }                                             }                               {
    f=1-(A-height)/L1;                            else                               f=1-(A-height)/L1;
    }                                             f=1;                            }
    else if (height>B)                            source = MaxPower*f;          }
    {                                             return source;                else if (height>B)
    #endif /* !PR_HOST*/                            {
    f=1-(height-B)/L2;                            #if !RP_NODE                    f=1-(height-B)/L2;
    }                                             }
    else if                                    if (A> height)                }
(height>4.1378)                                {                               else if
    {                                             f=1-(A-height)/L1;            (height>4.1378)
    f=0;                                }                               {
    }                                       }                               f=0;
    else                                       else if (height>B)            }
    f=1;                                {                               else
    }                                       }
}

```

```

        f=1;
        source = MaxPower*f;
        return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}
DEFINE_SOURCE(suorce_20year,
c, t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real A, B, L1, L2, f, p0,
source, height, MaxPower;
    C_CENTROID(x, c, t);
    height= x[1];
    p0=0.3278;
    A = p0+0.15*3.81;
    B = p0+3.81*0.8;
    L1 = 0.5715;
    L2 = 0.762;

    MaxPower=133.9/0.06578
/0.825;
    if (A> height)
    {
        f=1-(A-height)/L1;
    }
    else if (height>B)
    {
        f=1-(height-B)/L2;
    }
    else if
(height>4.1378)
    {
        f=0;
    }
    else
        f=1;
}

        source = MaxPower*f;
        return source;
#if !PR_HOST
        if (A> height)
        {
            f=1-(A-height)/L1;
        }
        else if (height>B)
        {
            f=1-(height-B)/L2;
        }
        else if
(height>4.1378)
        {
            f=0;
        }
        else
            f=1;
        source = MaxPower*f;
        return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
        if (A> height)
        {
            f=1-(A-height)/L1;
        }
        else if (height>B)
        {
            f=1-(height-B)/L2;
        }
        else if
(height>4.1378)
        {
            f=0;
        }
        else
            f=1;
        source = MaxPower*f;
        return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}
DEFINE_SOURCE(suorce_50year,
c, t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real A, B, L1, L2, f, p0,

```

```

source, height, MaxPower;          {                               #if !PARALLEL
  C_CENTROID(x, c, t);
  height= x[1];                     f=1-(height-B)/L2;         if (A> height)
  p0=0.3278;                        }                           {
  A = p0+0.15*3.81;                else if
    B = p0+3.81*0.8;               (height>4.1378)         f=1-(A-height)/L1;
    L1 = 0.5715;                   {                           }
    L2 = 0.762;                    f=0;                       else if (height>B)
                                   }                               {
  MaxPower=71.4/0.06578/          else
0.825;                             f=1;                       f=1-(height-B)/L2;
  if (A> height)                   source = MaxPower*f;      }
  {                                 return source;           else if
                                   #endif /* !PR_HOST*/   (height>4.1378)
  f=1-(A-height)/L1;              #if !RP_NODE             {
  }                                f=0;
  else if (height>B)               if (A> height)          }
  {                                 {                           else
                                   {                               f=1;
                                   }                               source = MaxPower*f;
                                   }                               return source;
  f=1-(height-B)/L2;              f=1-(A-height)/L1;      #endif /* !PARALLEL*/
  }                                }
  else if                          else if (height>B)      }
(height>4.1378)                   {                           DEFINE_SOURCE(suorce_100yea
  {                                 f=0;                       r, c, t, dS, eqn)
    f=0;                            f=1-(height-B)/L2;      {
  }                                }
  else                              else if
    f=1;                            (height>4.1378)
  source = MaxPower*f;             {
  return source;                   f=0;
#if !PR_HOST                       }
  if (A> height)                   f=1;
  {                                 source = MaxPower*f;
  f=1-(A-height)/L1;              return source;
  }
  else if (height>B)               #endif /* !RP_NODE*/
                                   {
  MaxPower=24.1/0.06578/

```

```

0.825;                                f=1-(height-B)/L2;                                f=1;
if (A> height)                        }                                source = MaxPower*f;
{                                       else if                                return source;
    (height>4.1378)                    {                                       #endif /* !RP_NODE*/
    f=1-(A-height)/L1;                {                                       {
    }                                    f=0;                                }
else if (height>B)                    }                                #if !PARALLEL
{                                       else
    f=1-(height-B)/L2;                source = MaxPower*f;                if (A> height)
    }                                    return source;                    {
    else if                            #endif /* !PR_HOST*/                f=1-(A-height)/L1;
(height>4.1378)                        #if !RP_NODE                            }
    {
        f=0;                            if (A> height)                        else if (height>B)
    }                                    {                                       {
    else                                  f=1-(A-height)/L1;                    f=1-(height-B)/L2;
        f=1;                            }                                    }
    source = MaxPower*f;                else if (height>B)                    else if
    return source;                       {                                       (height>4.1378)
#if !PR_HOST                            {                                       {
    if (A> height)                       f=1-(height-B)/L2;                    f=0;
    {                                       }                                    }
    }                                    else
    f=1-(A-height)/L1;                else if                                f=1;
    }                                    (height>4.1378)                    source = MaxPower*f;
    else if (height>B)                    {                                       return source;
    {                                       }                                    #endif /* !PARRLLEL*/
    }                                    }
    }                                    }
    else
    }
}

```

附件 C TSC-01 燃料束熱功率函式程式碼

CSDSS

```

cell_t c;
2;
#include "udf.h" Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic }
#include "mem.h" Diameter*/ end_c_loop(c,t)
DEFINE_PROFILE(friction_fac
tor_ATRIUM_10,t,i) }
{ begin_c_loop(c,t) DEFINE_PROFILE(K_LTP_P,t,i)
real x[ND_ND]; {
real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) = real x[ND_ND];
cell_t c; 32./Dh/Dh/1.7812096*2; real a,Dh;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic } cell_t c;
Diameter*/ end_c_loop(c,t) Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
}
begin_c_loop(c,t) begin_c_loop(c,t)
{
a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c, DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i) a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c, { t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t)); real x[ND_ND]; t)*C_W(c,t));
F_PROFILE(c,t,i) = real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) =
0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_ cell_t c; (156.9+168.1*pow(a*C_R(c,t)
MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812 Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.
096*2; Diameter*/ 301875*1.7812096*1.7812096*
} 2;
end_c_loop(c,t) }
} begin_c_loop(c,t) end_c_loop(c,t)
{
a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
DEFINE_PROFILE(friction_fac t)*C_W(c,t)); DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
tor_LAM,t,i) {
real x[ND_ND]; (21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t) real x[ND_ND];
real a,Dh; *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2. real a,Dh,Re;
301875*1.7812096*1.7812096* cell_t c;
}

```



```

Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic           end_c_loop(c,t)                       if (deep >
Diameter*/                             }                               cloumn_1)
begin_c_loop(c,t)
{
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,             DEFINE_SOURCE(ZONE_A, c, t,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,     dS, eqn)
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)       {
;                                     real x[ND_ND];
F_PROFILE(c,t,i) =                  real A, B, L1, L2, f, p0,
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*       source, height,
pow(Re, -0.58)*4+2.196*pow(R     MaxPower, Fxz, fuel_13, fuel_1
e, -0.084)+235.7*pow(Re, -0.6   4, fuel_15, fuel_16, row_1, row
86)*2))/4.362577*1.7812*1.7    _2, row_3, row_4, cloumn_1,
812096*2;                           cloumn_2, wide , deep;
}                                     C_CENTROID(x, c, t);
end_c_loop(c,t)                       wide =x[0];
}                                     height= x[1];
DEFINIE_PROFILE(K_UTP,t,i)           deep= x[2];
{                                     p0=0.216225;
real x[ND_ND];                       fuel_13=0.971046771;
real a,Dh,Re;                         fuel_14=0.944320713;
cell_t c;                             fuel_15=1.095768374;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic           row_1=0.06703;
Diameter*/                             row_2=0.243;
begin_c_loop(c,t)                     row_3=0.41897;
{                                     row_4=0.59494;
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,             cloumn_2=-0.33098;
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,     cloumn_1=-0.15501;
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)       A = p0+0.15*3.81;
;                                     B = p0+3.81*0.8;
F_PROFILE(c,t,i) =                   L1 = 0.5715;
(-9.68+9.526*pow(Re,0.0046)      MaxPower=112.25/0.0657
)/0.64389*1.7812*1.7812096*     8/0.825;
2;                                     /* 給定擺置係數*/
}                                     if (wide < row_1)
{

```

```

return source;                                {
#define_SOURCE(ZONE_B, c, t,
#if !PR_HOST                                  f=0;
                                              dS, eqn)
                                              {
if (A> height)                                else
                                              real x[ND_ND];
{                                               real A, B, L1, L2, f, p0,
                                              source, height,
f=1-(A-height)/L1;                            MaxPower,Fxz,fuel_8,fuel_9,
}                                               fuel_10,fuel_11,fuel_12,row
else if (height>B)                            _1,row_2,row_3,row_4,cloumn
{                                               _1, cloumn_2, wide , deep;
                                              C_CENTROID(x, c, t);
f=1-(height-B)/L2;                            wide=x[0];
}                                               height= x[1];
                                              deep= x[2];
else if                                        if (A> height)
(height>4.026225)                            {
{                                               p0=0.216225;
f=0;                                           fuel_8=1.00308642;
}                                               fuel_9=0.956790123;
}                                               fuel_10=0.956790123;
else                                           else if (height>B)
f=1;                                           {
source =                                       fuel_12=1.064814815;
MaxPower*f*Fxz;                                row_1=0.06703;
return source;                                row_2=0.243;
}                                               row_3=0.41897;
}                                               row_4=0.59494;
}                                               cloumn_2=-0.33098;
}                                               cloumn_1=-0.15501;
}                                               A = p0+0.15*3.81;
}                                               B = p0+3.81*0.8;
}                                               L1 = 0.5715;
}                                               L2 = 0.762;
}                                               MaxPower=64.8/0.06578/
}                                               0.825;
}                                               /* 給定擺置係數*/
}                                               if (wide < row_1)
}                                               {
}                                               Fxz=fuel_8;
}                                               }
}
}
else if
(height>4.026225)

```

```

else if (wide < row_2)          f=0;          {
{                                }
    Fxz=fuel_9;                else                f=1-(height-B)/L2;
}                                f=1;          }
else if (wide > row_2)          source =      else if
{                                MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
    if (deep                    return source;    {
>column_1)                    #if !PR_HOST    f=0;
    {                            }
                                if (A> height)    else
                                {                f=1;
                                }                source =
                                Fxz=fuel_12;    MaxPower*f*Fxz;
                                }                return source;
    else if (deep >            f=1-(A-height)/L1;    #endif /* !RP_NODE*/
column_2)                    }
    {                            else if (height>B)
                                {
                                Fxz=fuel_11;    f=1-(height-B)/L2;    #if !PARALLEL
                                }                }
                                else if
                                Fxz=fuel_10;    (height>4.026225)    {
                                }                f=0;                f=1-(A-height)/L1;
                                }                }
/*給定擺置係數完成*/        else                else if (height>B)
    if (A> height)            f=1;                {
    {                            source =
                                MaxPower*f*Fxz;    f=1-(height-B)/L2;
                                return source;    }
                                #endif /* !PR_HOST*/    else if
                                #if !RP_NODE        (height>4.026225)
                                {
                                if (A> height)    f=0;
                                }                }
                                f=1-(height-B)/L2;    else
                                }                f=1;
                                else if            source =
                                (height>4.026225)    MaxPower*f*Fxz;
                                {
                                else if (height>B)

```

```

return source;
#endif /* !PARLLEL*/
MaxPower=51.28571429/0
.06578/0.825;
f=1-(A-height)/L1;
}
/* 給定擺置係數*/
else if (height>B)
{
}
}
if (wide < row_1)
{
}
DEFINE_SOURCE(ZONE_C, c, t,
dS, eqn)
{
}
Fxz=fuel_1;
f=1-(height-B)/L2;
}
}
real x[ND_ND];
else if (wide < row_2)
else if
}
real A, B, L1, L2, f, p0,
{
(height>4.026225)
{
}
}
source, height,
Fxz=fuel_2;
f=0;
}
MaxPower,Fxz,fuel_1,fuel_2,
}
else if (wide < row_3)
}
fuel_3,fuel_4,fuel_5,fuel_6
else
}
,fuel_7,row_1,row_2,row_3,r
{
Fxz=fuel_3;
f=1;
}
ow_4,cloumn_1, cloumn_2,
}
source =
wide , deep;
}
else if (wide < row_4)
MaxPower*f*Fxz;
return source;
C_CENTROID(x, c, t);
else if (deep >
#if !PR_HOST
}
}
wide=x[0];
{
if (A> height)
}
height= x[1];
}
}
deep= x[2];
cloumn_1)
{
}
}
p0=0.216225;
{
Fxz=fuel_6;
}
}
fuel_1=0.994428969;
}
}
}
fuel_2=0.974930362;
}
}
}
fuel_3=0.91643454;
else if (deep >
f=1-(A-height)/L1;
}
}
fuel_4=1.052924791;
cloumn_2)
}
}
}
fuel_5=1.091922006;
{
}
}
}
fuel_6=1.111420613;
Fxz=fuel_5;
}
}
}
fuel_7=0.857938719;
}
}
}
row_1=0.06703;
else
f=1-(height-B)/L2;
}
}
row_2=0.243;
Fxz=fuel_4;
}
}
}
row_3=0.41897;
}
}
}
row_4=0.59494;
}
}
}
cloumn_2=-0.33098;
else
{
}
}
}
cloumn_1=-0.15501;
Fxz=fuel_7;
f=0;
}
}
}
A = p0+0.15*3.81;
}
}
}
B = p0+3.81*0.8; /*給定擺置係數完成*/
else
}
}
}
L1 = 0.5715;
if (A> height)
f=1;
}
}
}
L2 = 0.762;
{
source =
}
}
}

```

```

MaxPower*f*Fxz;          f=0;          {
    return source;      }
#endif /* !PR_HOST*/    else          f=1-(height-B)/L2;
#if !RP_NODE            f=1;          }
                        source =          else if
if (A> height)          MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
{                        return source;    {
    f=1-(A-height)/L1;  #endif /* !RP_NODE*/          f=0;
}                        }
else if (height>B)      #if !PARALLEL    else
{                        if (A> height)    f=1;
                        {                  source =
                            if (A> height) MaxPower*f*Fxz;
                                {          return source;
                                    #endif /* !PARRLEL*/
                                        f=1-(A-height)/L1;    }
                                }
                        }
else if                  f=1-(A-height)/L1;    }
(height>4.026225)      }
{                        else if (height>B)

```

附件 D TSC-02 燃料束熱功率函式程式碼

CSDSS

```

cell_t c;
2;
#include "udf.h" Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic }
#include "mem.h" Diameter*/ end_c_loop(c,t)
DEFINE_PROFILE(friction_fac
tor_ATRIUM_10,t,i) }
{ begin_c_loop(c,t) DEFINE_PROFILE(K_LTP_P,t,i)
real x[ND_ND]; {
real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) = real x[ND_ND];
cell_t c; 32./Dh/Dh/1.7812096*2; real a,Dh;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic } cell_t c;
Diameter*/ end_c_loop(c,t) Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
}
begin_c_loop(c,t) begin_c_loop(c,t)
{
a=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c, DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i) a=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c, { t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c, t)); real x[ND_ND]; t)*C_W(c, t));
F_PROFILE(c,t,i) = real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) =
0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_ cell_t c; (156.9+168.1*pow(a*C_R(c,t)
MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812 Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.
096*2; Diameter*/ 301875*1.7812096*1.7812096*
} 2;
end_c_loop(c,t) }
} begin_c_loop(c,t) end_c_loop(c,t)
{ }
a=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c, t));
DEFINE_PROFILE(friction_fac t)*C_W(c, t)); DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
tor_LAM,t,i) {
real x[ND_ND]; (21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t) real x[ND_ND];
real a,Dh; *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2. real a,Dh,Re;
301875*1.7812096*1.7812096* cell_t c;

```

```

Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic          end_c_loop(c,t)                if (deep >
Diameter*/                          }                cloumn_1)

    begin_c_loop(c,t)

    {
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,          DEFINE_SOURCE(ZONE_A, c, t,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,    dS, eqn)
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)      {
;
    F_PROFILE(c,t,i) =
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*
pow(Re,-0.58)*4+2.196*pow(R
e,-0.084)+235.7*pow(Re,-0.6
86)*2))/4.362577*1.7812*1.7
812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
}

DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh,Re;
    cell_t c;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)
;
    F_PROFILE(c,t,i) =
(-9.68+9.526*pow(Re,0.0046)
)/0.64389*1.7812*1.7812096*
2;
    }
}

```

```

return source;                                {                               DEFINE_SOURCE(ZONE_B, c, t,
#if !PR_HOST                                  f=0;                               dS, eqn)
                                              }
                                              {
if (A> height)                                else                                real x[ND_ND];
{                                               f=1;                                real A, B, L1, L2, f, p0,
                                              source =                             source, height,
f=1-(A-height)/L1;                            MaxPower*f*Fxz;                    MaxPower,Fxz,fuel_8,fuel_9,
}                                               return source;                    fuel_10,fuel_11,fuel_12,row
else if (height>B)                            #endif /* !RP_NODE*/              _1,row_2,row_3,row_4,cloumn
{                                                                                                                       _1, cloumn_2, wide , deep;
                                                                                                                       C_CENTROID(x, c, t);
f=1-(height-B)/L2;                            #if !PARALLEL                      wide=x[0];
}                                                                                                                       height= x[1];
                                                                                                                       deep= x[2];
else if                                        if (A> height)                    p0=0.216225;
(height>4.026225)                              {                                     fuel_8=0.99378882;
{                                               {                                     fuel_9=0.97826087;
f=0;                                           f=1-(A-height)/L1;                fuel_10=0.962732919;
}                                               }                                     fuel_11=1.02484472;
else                                           else if (height>B)                fuel_12=1.040372671;
f=1;                                           {                                     row_1=0.06703;
source =                                       f=1-(height-B)/L2;                row_2=0.243;
MaxPower*f*Fxz;                                }                                     row_3=0.41897;
return source;                                else if                             row_4=0.59494;
#endif /* !PR_HOST*/                          (height>4.026225)                cloumn_2=-0.33098;
#if !RP_NODE                                  {                                     cloumn_1=-0.15501;
                                                                                                                       A = p0+0.15*3.81;
if (A> height)                                f=0;                                B = p0+3.81*0.8;
{                                               }                                     L1 = 0.5715;
else                                           else                                L2 = 0.762;
f=1;                                           f=1;                                MaxPower=64.4/0.06578/
source =                                       source =                             0.825;
MaxPower*f*Fxz;                                MaxPower*f*Fxz;                    /* 給定擺置係數*/
return source;                                return source;
#endif /* !PARRLLEL*/                          #endif /* !PARRLLEL*/              if (wide < row_1)
#if !RP_NODE                                  }                                     {
if (A> height)                                f=0;                                Fxz=fuel_8;
{                                               }
else                                           else                                }
f=1-(A-height)/L1;                            f=1;
}                                               source =
else if (height>B)                            MaxPower*f*Fxz;
{                                               return source;
f=1-(height-B)/L2;                            #endif /* !PARRLLEL*/
}
else if                                        if (wide < row_1)
(height>4.026225)                              (height>4.026225)                {
{                                               {
f=0;                                           f=1-(A-height)/L1;                Fxz=fuel_8;
}                                               }
else                                           else if (height>B)                }
f=1;                                           {
source =                                       f=1-(height-B)/L2;
MaxPower*f*Fxz;                                }
return source;                                else if
#endif /* !PR_HOST*/                          (height>4.026225)
#if !RP_NODE                                  (height>4.026225)
if (A> height)                                f=0;
{
else
f=1-(A-height)/L1;
}
else if (height>B)
{
f=1-(height-B)/L2;
}
else if
(height>4.026225)
{
f=0;
}
else
f=1;
source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
if (A> height)
{
else
f=1-(A-height)/L1;
}
else if (height>B)
{
f=1-(height-B)/L2;
}
else if
(height>4.026225)
{
f=0;
}
else
f=1;
source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
if (A> height)
{
else
f=1-(A-height)/L1;
}
else if (height>B)
{
f=1-(height-B)/L2;
}
else if
(height>4.026225)
{
f=0;
}
else
f=1;
source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/

```



```

else if (wide < row_2)          f=0;          {
{                                }
    Fxz=fuel_9;                else                f=1-(height-B)/L2;
}                                f=1;          }
else if (wide > row_2)          source =      else if
{                                MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
    if (deep                    return source;    {
>column_1)                      #if !PR_HOST      f=0;
    {                            }
                                if (A> height)    else
                                {                    f=1;
                                }                    source =
                                Fxz=fuel_12;        MaxPower*f*Fxz;
                                }                    return source;
    else if (deep >            f=1-(A-height)/L1;    #endif /* !RP_NODE*/
column_2)                        }
    {                            else if (height>B)
                                {
                                Fxz=fuel_11;        f=1-(height-B)/L2;    #if !PARALLEL
                                }                    }
                                else if            if (A> height)
                                Fxz=fuel_10;        (height>4.026225)    {
                                }                    {
                                f=0;                f=1-(A-height)/L1;
                                }                    }
/*給定擺置係數完成*/          else                else if (height>B)
    if (A> height)              f=1;                {
    {                            source =          f=1-(height-B)/L2;
                                MaxPower*f*Fxz;    }
                                return source;    else if
                                #endif /* !PR_HOST*/ (height>4.026225)
                                #if !RP_NODE      {
                                if (A> height)        f=0;
                                {                    }
                                f=1-(height-B)/L2;    }
                                }                    else
                                }                    f=1;
                                else if            source =
                                (height>4.026225)    MaxPower*f*Fxz;
                                {
                                else if (height>B)

```

```

return source;
#endif /* !PARLLEL*/
MaxPower=53.42857143/0
f=1-(A-height)/L1;
.06578/0.825;
}
/* 給定擺置係數*/
else if (height>B)
{
DEFINE_SOURCE(ZONE_C, c, t,
Fxz=fuel_1;
f=1-(height-B)/L2;
dS, eqn)
{
}
}
real x[ND_ND];
else if (wide < row_2)
else if
(height>4.026225)
real A, B, L1, L2, f, p0,
{
Fxz=fuel_2;
{
f=0;
source, height,
}
}
MaxPower,Fxz,fuel_1,fuel_2,
}
else if (wide < row_3)
else if
fuel_3,fuel_4,fuel_5,fuel_6
else
}
,fuel_7,row_1,row_2,row_3,r
{
Fxz=fuel_3;
f=1;
ow_4,cloumn_1, cloumn_2,
}
source =
wide , deep;
else if (wide < row_4)
MaxPower*f*Fxz;
return source;
C_CENTROID(x, c, t);
else if (deep >
#if !PR_HOST
width=x[0];
cloumn_1)
{
if (A> height)
height= x[1];
{
}
f=1-(A-height)/L1;
deep= x[2];
}
}
p0=0.216225;
else if (deep >
}
fuel_1=0.99197861;
Fxz=fuel_6;
{
}
}
fuel_2=0.99197861;
}
else if (deep >
f=1-(A-height)/L1;
}
fuel_3=0.935828877;
cloumn_2)
{
}
else if (height>B)
fuel_4=1.010695187;
{
Fxz=fuel_5;
{
}
}
fuel_5=1.048128342;
{
Fxz=fuel_5;
}
}
fuel_6=1.122994652;
}
else
f=1-(height-B)/L2;
}
fuel_7=0.898395722;
}
else if
}
row_1=0.06703;
else
Fxz=fuel_4;
}
}
row_2=0.243;
}
}
row_3=0.41897;
else if
}
}
row_4=0.59494;
}
}
}
cloumn_2=-0.33098;
else
{
}
}
cloumn_1=-0.15501;
else if (height>4.026225)
{
}
}
}
}
A = p0+0.15*3.81;
}
}
B = p0+3.81*0.8; /*給定擺置係數完成*/
else
}
}
L1 = 0.5715;
if (A> height)
f=1;
}
L2 = 0.762;
{
source =
}
}

```

```

MaxPower*f*Fxz;                                f=0;                                {
    return source;                                }
#endif /* !PR_HOST*/                            else                                f=1-(height-B)/L2;
#if !RP_NODE                                    f=1;                                }
                                                source =                                else if
if (A> height)                                MaxPower*f*Fxz;                    (height>4.026225)
{                                                return source;                        {
    f=1-(A-height)/L1;                            #endif /* !RP_NODE*/                f=0;
}                                                }
else if (height>B)                                #if !PARALLEL                        else
{                                                if (A> height)                        f=1;
    f=1-(height-B)/L2;                            {                                        source =
}                                                {                                        MaxPower*f*Fxz;
    else if                                        f=1-(A-height)/L1;                    return source;
(height>4.026225)                                }                                        #endif /* !PARRLEL*/
    {                                                else if (height>B)                    }

```

附件 ETSC-07 燃料束熱功率函式程式碼

CSDSS

```

cell_t c;
2;
#include "udf.h" Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic }
#include "mem.h" Diameter*/ end_c_loop(c,t)
DEFINE_PROFILE(friction_fac
tor_ATRIUM_10,t,i) }
{ begin_c_loop(c,t) DEFINE_PROFILE(K_LTP_P,t,i)
real x[ND_ND]; {
real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) = real x[ND_ND];
cell_t c; 32./Dh/Dh/1.7812096*2; real a,Dh;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic } cell_t c;
Diameter*/ end_c_loop(c,t) Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
}
begin_c_loop(c,t) begin_c_loop(c,t)
{
a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c, DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i) a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c, { t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t)); real x[ND_ND]; t)*C_W(c,t));
F_PROFILE(c,t,i) = real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) =
0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_ cell_t c; (156.9+168.1*pow(a*C_R(c,t)
MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812 Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.
096*2; Diameter*/ 301875*1.7812096*1.7812096*
} 2;
end_c_loop(c,t) }
begin_c_loop(c,t) end_c_loop(c,t)
{ }
} a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
DEFINE_PROFILE(friction_fac t)*C_W(c,t)); DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
tor_LAM,t,i) {
real x[ND_ND]; (21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t) real x[ND_ND];
real a,Dh; *Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2. real a,Dh,Re;
301875*1.7812096*1.7812096* cell_t c;

```

```

Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic      end_c_loop(c,t)                if (deep >
Diameter*/                       }                cloumn_1)

begin_c_loop(c,t)
{
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,        DEFINE_SOURCE(ZONE_A, c, t,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,   dS, eqn)
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)    {
;                                real x[ND_ND];
                                real A, B, L1, L2, f, p0,
                                source, height,
                                MaxPower, Fxz, fuel_13, fuel_1
                                4, fuel_15, fuel_16, row_1, row
                                _2, row_3, row_4, cloumn_1,
                                cloumn_2, wide , deep;
                                C_CENTROID(x, c, t);
                                wide =x[0];
                                height= x[1];
                                deep= x[2];
                                p0=0.216225;
                                fuel_13=0.960276339;
                                fuel_14=0.93955095;
                                fuel_15=1.050086356;
                                fuel_16=1.050086356;
                                row_1=0.06703;
                                row_2=0.243;
                                row_3=0.41897;
                                row_4=0.59494;
                                cloumn_2=-0.33098;
                                cloumn_1=-0.15501;
                                A = p0+0.15*3.81;
                                B = p0+3.81*0.8;
                                L1 = 0.5715;
                                L2 = 0.762;
                                MaxPower=144.75/0.0657
                                8/0.825;
                                /* 給定擺置係數*/
                                if (wide < row_1)
                                {
                                Fxz=fuel_15;
                                else
                                Fxz=fuel_13;
                                }
                                else if (wide > row_1)
                                {
                                if (deep
                                >cloumn_1)
                                Fxz=fuel_16;
                                else
                                Fxz=fuel_14;
                                }
                                /*給定擺置係數完成*/
                                if (A> height)
                                {
                                f=1-(A-height)/L1;
                                }
                                else if (height>B)
                                {
                                f=1-(height-B)/L2;
                                }
                                else if
                                (height>4.026225)
                                {
                                f=0;
                                }
                                else
                                f=1;
                                source =
                                MaxPower*f*Fxz;
}
}

DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)
{
real x[ND_ND];
real a,Dh,Re;
cell_t c;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
begin_c_loop(c,t)
{
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)
;
F_PROFILE(c,t,i) =
(-9.68+9.526*pow(Re,0.0046)
)/0.64389*1.7812*1.7812096*
2;
}
}

```

```

return source;                               {               DEFINE_SOURCE(ZONE_B, c, t,
#ifdef !PR_HOST                                f=0;             dS, eqn)
                                               }               {
                                               }               real x[ND_ND];
                                               }               real A, B, L1, L2, f, p0,
                                               }               source, height,
                                               }               MaxPower, Fxz, fuel_8, fuel_9,
                                               }               fuel_10, fuel_11, fuel_12, row
                                               }               _1, row_2, row_3, row_4, column
                                               }               _1, column_2, wide , deep;
                                               }               C_CENTROID(x, c, t);
                                               }               wide=x[0];
                                               }               height= x[1];
                                               }               deep= x[2];
                                               }               p0=0.216225;
                                               }               fuel_8=0.978077572;
                                               }               fuel_9=0.994940978;
                                               }               fuel_10=0.969645868;
                                               }               fuel_11=1.003372681;
                                               }               fuel_12=1.053962901;
                                               }               row_1=0.06703;
                                               }               row_2=0.243;
                                               }               row_3=0.41897;
                                               }               row_4=0.59494;
                                               }               column_2=-0.33098;
                                               }               column_1=-0.15501;
                                               }               A = p0+0.15*3.81;
                                               }               B = p0+3.81*0.8;
                                               }               L1 = 0.5715;
                                               }               L2 = 0.762;
                                               }               MaxPower=118.6/0.06578
                                               }               /0.825;
                                               }               /* 给定擺置係數*/
                                               }               if (wide < row_1)
                                               }               {
                                               }               Fxz=fuel_8;
                                               }               }

```

```

else if (wide < row_2)          f=0;          {
{                                }
    Fxz=fuel_9;                else                f=1-(height-B)/L2;
}                                f=1;          }
else if (wide > row_2)          source =      else if
{                                MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
    if (deep                    return source;    {
>column_1)                      #if !PR_HOST      f=0;
    {                            }
                                if (A> height)    else
                                {                f=1;
                                }                source =
                                Fxz=fuel_12;      MaxPower*f*Fxz;
                                }                return source;
    else if (deep >            f=1-(A-height)/L1;
column_2)                        }
    {                            else if (height>B)
                                {
                                Fxz=fuel_11;      f=1-(height-B)/L2;    #if !PARALLEL
                                }                }
                                else if          if (A> height)
                                Fxz=fuel_10;      (height>4.026225)    {
                                }                {
                                }                f=0;          f=1-(A-height)/L1;
                                }                }
/*給定擺置係數完成*/          else                else if (height>B)
    if (A> height)              f=1;          {
    {                            source =        {
                                MaxPower*f*Fxz;    f=1-(height-B)/L2;
                                return source;    }
                                #endif /* !PR_HOST*/
                                #if !RP_NODE      else if
                                #if !RP_NODE      (height>4.026225)
                                {
                                if (A> height)    f=0;
                                {                }
                                }                else
                                }                f=1;
                                else if          f=1;
                                (height>4.026225)    source =
                                {                MaxPower*f*Fxz;
                                }
                                else if          f=1-(A-height)/L1;
                                (height>4.026225)    }
                                {                else if (height>B)
                                }                }

```

```

        return source;
#endif /* !PARLLEL*/
                                MaxPower=59.28571429/0
                                f=1-(A-height)/L1;
                                }
                                .06578/0.825;
                                }
                                /* 給定擺置係數*/
                                else if (height>B)
                                {
                                if (wide < row_1)
                                {
                                DEFINE_SOURCE(ZONE_C, c, t,
                                dS, eqn)
                                {
                                Fxz=fuel_1;
                                f=1-(height-B)/L2;
                                }
                                }
                                real x[ND_ND];
                                else if (wide < row_2)
                                else if
                                (height>4.026225)
                                {
                                real A, B, L1, L2, f, p0,
                                {
                                source, height,
                                Fxz=fuel_2;
                                f=0;
                                MaxPower,Fxz,fuel_1,fuel_2,
                                }
                                fuel_3,fuel_4,fuel_5,fuel_6
                                else if (wide < row_3)
                                }
                                ,fuel_7,row_1,row_2,row_3,r
                                {
                                else
                                ow_4,cloumn_1, cloumn_2,
                                Fxz=fuel_3;
                                f=1;
                                wide , deep;
                                source =
                                C_CENTROID(x, c, t);
                                else if (wide < row_4)
                                MaxPower*f*Fxz;
                                wide=x[0];
                                {
                                return source;
                                height= x[1];
                                #if !PR_HOST
                                deep= x[2];
                                cloumn_1)
                                if (A> height)
                                {
                                p0=0.216225;
                                {
                                Fxz=fuel_6;
                                }
                                fuel_1=1.028915663;
                                Fxz=fuel_5;
                                }
                                fuel_2=0.927710843;
                                else if (deep >
                                f=1-(A-height)/L1;
                                fuel_3=0.860240964;
                                cloumn_2)
                                }
                                fuel_4=1.079518072;
                                {
                                else if (height>B)
                                {
                                fuel_5=1.130120482;
                                Fxz=fuel_5;
                                }
                                fuel_6=1.180722892;
                                }
                                fuel_7=0.792771084;
                                else
                                f=1-(height-B)/L2;
                                row_1=0.06703;
                                Fxz=fuel_4;
                                }
                                row_2=0.243;
                                else if
                                (height>4.026225)
                                {
                                row_3=0.41897;
                                }
                                f=0;
                                row_4=0.59494;
                                }
                                cloumn_2=-0.33098;
                                else
                                {
                                cloumn_1=-0.15501;
                                Fxz=fuel_7;
                                }
                                A = p0+0.15*3.81;
                                }
                                B = p0+3.81*0.8; /*給定擺置係數完成*/
                                else
                                L1 = 0.5715;
                                if (A> height)
                                f=1;
                                L2 = 0.762;
                                {
                                source =

```



```

MaxPower*f*Fxz;          }          f=1-(height-B)/L2;
    return source;       else          }
#endif /* !PR_HOST*/    f=1;          else if
#if !RP_NODE             source =    (height>4.026225)
                          MaxPower*f*Fxz;          {
    if (A> height)      return source;          f=0;
    {                   #endif /* !RP_NODE*/          }
                          }
    f=1-(A-height)/L1;  #if !PARALLEL          else
    }                   source =          f=1;
    else if (height>B)  MaxPower*f*Fxz;
    {                   return source;
    f=1-(height-B)/L2; #endif /* !PARRLLEL*/
    }                   }
    else if
(height>4.026225)      {
    {                   f=1-(A-height)/L1;
    f=0;               }
    }                   else if (height>B)
    }                   {

```

附件 F TSC-25 燃料束熱功率函式程式碼

CSDSS

```

cell_t c;
2;
#include "udf.h" Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic }
#include "mem.h" Diameter*/ end_c_loop(c,t)
DEFINE_PROFILE(friction_fac
tor_ATRIUM_10,t,i) }
{ begin_c_loop(c,t) DEFINE_PROFILE(K_LTP_P,t,i)
real x[ND_ND]; {
real a,Dh; F_PROFILE(c,t,i) = real x[ND_ND];
cell_t c; 32./Dh/Dh/1.7812096*2; real a,Dh;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic } cell_t c;
Diameter*/ end_c_loop(c,t) Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
}
begin_c_loop(c,t) begin_c_loop(c,t)
{
a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t));
DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i) a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t));
real x[ND_ND];
real a,Dh;
cell_t c; Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
}
}
DEFINE_PROFILE(friction_fac
tor_LAM,t,i) {
real x[ND_ND];
real a,Dh;
}

```

```

Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic           end_c_loop(c,t)           if (deep >
Diameter*/                             }           cloumn_1)
begin_c_loop(c,t)
{
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,           DEFINE_SOURCE(ZONE_A, c, t,           Fxz=fuel_15;
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,           dS, eqn)           else
t)*C_W(c,           {           Fxz=fuel_13;
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)           real x[ND_ND];           }
;           real A, B, L1, L2, f, p0,           else if (wide > row_1)
F_PROFILE(c,t,i) =           source, height,           {
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*           MaxPower,Fxz,fuel_13,fuel_1           if (deep
pow(Re,-0.58)*4+2.196*pow(R           4,fuel_15,fuel_16,row_1,row           >cloumn_1)
e,-0.084)+235.7*pow(Re,-0.6           _2,row_3,row_4,cloumn_1,           Fxz=fuel_16;
86)*2))/4.362577*1.7812*1.7           cloumn_2, wide , deep;           else
812096*2;           C_CENTROID(x, c, t);           Fxz=fuel_14;
}           wide =x[0];           }
end_c_loop(c,t)           height= x[1];
}           deep= x[2];
DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)           p0=0.216225;           /*給定擺置係數完成*/
{           fuel_13=0.996539792;           if (A> height)
real x[ND_ND];           fuel_14=0.948096886;           {
real a,Dh,Re;           fuel_15=1.031141869;           f=1-(A-height)/L1;
cell_t c;           fuel_16=1.024221453;           }
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic           row_1=0.06703;           else if (height>B)
Diameter*/           row_2=0.243;           {
begin_c_loop(c,t)           row_3=0.41897;           f=1-(height-B)/L2;
{           row_4=0.59494;           }
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,           cloumn_2=-0.33098;           else if
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,           cloumn_1=-0.15501;           (height>4.026225)
t)*C_W(c,           A = p0+0.15*3.81;           {
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t)           B = p0+3.81*0.8;           f=0;
;           L1 = 0.5715;           }
F_PROFILE(c,t,i) =           L2 = 0.762;           else
(-9.68+9.526*pow(Re,0.0046)           MaxPower=144.5/0.06578           f=1;
)/0.64389*1.7812*1.7812096*           /0.825;           source =
2;           /* 給定擺置係數*/           MaxPower*f*Fxz;
}           if (wide < row_1)
{

```

```

return source;
#endif /* !PR_HOST */

if (A > height)
{
f=1-(A-height)/L1;
}
else if (height > B)
{
f=1-(height-B)/L2;
}
else if (height > 4.026225)
{
f=0;
}
else
{
f=1;
source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST */
#endif /* !RP_NODE */

if (A > height)
{
f=1-(A-height)/L1;
}
else if (height > B)
{
f=1-(height-B)/L2;
}
else if (height > 4.026225)
{
f=0;
}

return source;
}
#endif /* !PARALLEL */

DEFINE_SOURCE(ZONE_B, c, t,
dS, eqn)
{
real x[ND_ND];
real A, B, L1, L2, f, p0,
source, height,
MaxPower, Fxz, fuel_8, fuel_9,
fuel_10, fuel_11, fuel_12, row
_1, row_2, row_3, row_4, cloumn
_1, cloumn_2, wide, deep;
C_CENTROID(x, c, t);
wide=x[0];
height= x[1];
deep= x[2];
p0=0.216225;
fuel_8=0.986394558;
fuel_9=1.003401361;
fuel_10=0.926870748;
fuel_11=1.045918367;
fuel_12=1.037414966;
row_1=0.06703;
row_2=0.243;
row_3=0.41897;
row_4=0.59494;
cloumn_2=-0.33098;
cloumn_1=-0.15501;
A = p0+0.15*3.81;
B = p0+3.81*0.8;
L1 = 0.5715;
L2 = 0.762;

MaxPower=117.6/0.06578
/0.825;
/* 给定擺置係數*/
if (wide < row_1)
{
Fxz=fuel_8;
}
}

```

```

else if (wide < row_2)          f=0;          {
{                                }
    Fxz=fuel_9;                else                f=1-(height-B)/L2;
}                                f=1;          }
else if (wide > row_2)          source =      else if
{                                MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
    if (deep                    return source;    {
>column_1)                      #if !PR_HOST      f=0;
    {                            }
                                if (A> height)    else
                                {                f=1;
                                }                source =
                                Fxz=fuel_12;    MaxPower*f*Fxz;
                                }                return source;
    else if (deep >            f=1-(A-height)/L1;
column_2)                        }
    {                            else if (height>B)
                                {
                                Fxz=fuel_11;    f=1-(height-B)/L2;    #if !PARALLEL
                                }                }
                                else if        if (A> height)
                                Fxz=fuel_10;    (height>4.026225)    {
                                }                {
                                }                f=0;                f=1-(A-height)/L1;
                                }                }
/*給定擺置係數完成*/          else                else if (height>B)
if (A> height)                  f=1;          {
{                                source =        f=1-(height-B)/L2;
    f=1-(A-height)/L1;          MaxPower*f*Fxz;    }
}                                return source;    }
else if (height>B)            #endif /* !PR_HOST*/
{                                #if !RP_NODE        (height>4.026225)
    f=1-(height-B)/L2;        {
                                if (A> height)    f=0;
                                }                }
}                                else                else
                                f=1-(A-height)/L1;    f=1;
                                }                source =
                                else if (height>B)    MaxPower*f*Fxz;

```

```

return source;
#endif /* !PARLLEL */
MaxPower=73.28571429/0      f=1-(A-height)/L1;
.06578/0.825;             }
/* 給定擺置係數*/         else if (height>B)
}                             {
DEFINE_SOURCE(ZONE_C, c, t,  {
dS, eqn)                   Fxz=fuel_1;          f=1-(height-B)/L2;
{                             }
real x[ND_ND];              else if (width < row_2) else if
real A, B, L1, L2, f, p0,   { (height>4.026225)
source, height,              Fxz=fuel_2;          {
MaxPower, Fxz, fuel_1, fuel_2, } f=0;
fuel_3, fuel_4, fuel_5, fuel_6 else if (width < row_3) }
, fuel_7, row_1, row_2, row_3, r { else
ow_4, cloumn_1, cloumn_2,    Fxz=fuel_3;          f=1;
width, deep;                 } source =
C_CENTROID(x, c, t);        else if (width < row_4) MaxPower*f*Fxz;
width=x[0];                  { return source;
height= x[1];                 if (deep > #if !PR_HOST
deep= x[2];                    cloumn_1) if (A> height)
p0=0.216225;                  {
fuel_1=1.009746589;           Fxz=fuel_6;          {
fuel_2=0.98245614;           }
fuel_3=0.955165692;          else if (deep > f=1-(A-height)/L1;
fuel_4=1.009746589;          cloumn_2)           }
fuel_5=1.091617934;          { else if (height>B)
fuel_6=1.091617934;          Fxz=fuel_5;          {
fuel_7=0.859649123;          } f=1-(height-B)/L2;
row_1=0.06703;               else                  }
row_2=0.243;                  Fxz=fuel_4;          {
row_3=0.41897;               } else if
row_4=0.59494;                } (height>4.026225)
cloumn_2=-0.33098;           else                  {
cloumn_1=-0.15501;           Fxz=fuel_7;          f=0;
A = p0+0.15*3.81;            }
B = p0+3.81*0.8;             /*給定擺置係數完成*/ else
L1 = 0.5715;                  if (A> height)      f=1;
L2 = 0.762;                   { source =

```

```

MaxPower*f*Fxz;          f=0;          {
    return source;      }
#endif /* !PR_HOST*/    else          f=1-(height-B)/L2;
#if !RP_NODE            f=1;          }
                        source =          else if
if (A> height)         MaxPower*f*Fxz; (height>4.026225)
{                       return source;    {
    f=1-(A-height)/L1; #endif /* !RP_NODE*/          f=0;
}                       }
else if (height>B)     #if !PARALLEL    else
{                       if (A> height)    f=1;
                        {               source =
                                if (A> height) MaxPower*f*Fxz;
                                {               return source;
                                #endif /* !PARRLLEL*/
                                f=1-(A-height)/L1; }
                                }
                        }
else if                f=1-(A-height)/L1; }
(height>4.026225)     }
{                       else if (height>B)

```