

行政院原子能委員會放射性物料管理局

核一廠室外乾式貯存設施之熱傳對
周圍環境影響研析

期末報告

執行單位：財團法人核能與新能源教育研究協進會

計畫主持人：施純寬研究員

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

計畫編號：107FCMA005

中華民國一〇七年十二月

核一廠室外乾式貯存設施之熱傳對 周圍環境影響研析

執行單位：財團法人核能與新能源教育研究協進會

計畫主持人：施純寬研究員

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局

研究經費：新台幣伍拾玖萬伍仟元整

行政院原子能委員會放射性物料管理局 委託研究

中華民國 107 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

為能進一步瞭解核一廠室外乾貯護箱空氣流道將近 60°C 的熱排氣對於場址所造成的熱衝擊，本研究蒐集核一廠室外乾貯設施臨近地形資料，以作為計算流體力學分析模式發展的依據並透過所蒐集的氣象資料作為案例分析的邊界條件，以探討出氣口熱排釋對周圍環境之影響。經過本研究團隊的研究，本研究已針對場址主要風場條件(含風向及風速)進行探討，其結果顯示，護箱出口約 60°C 的熱空氣，即使在最為嚴峻的南風條件下，只會對乾華溪下游的草地及混凝土堤岸造成最多 2°C 之增溫，其影響遠小於日夜溫差所致之影響。而更進一步綜合將風場發生機率、熱影響效應與日常生活案例進行討論後得知乾貯設施熱排釋所造成的影響並不會大於 5kW 的家用瓦斯爐，因此無需多慮。

關鍵字：核一廠、室外乾貯設施、熱流影響評估

ABSTRACT

The objective of this study is to assist the regulatory body to investigate and estimate the thermal impact from the 60 °C hot exhaust of Dry storage systems (DSSs) of Chinshan nuclear power plant (NPP). A CFD method has been developed to model the surroundings orographic and climate condition by collected information. Through the hard work in this year, some representative cases have been purposed and solved by the developed method, including several wind direction and speed conditions. It shows that the hot air diffusion just slightly affect (about 2 °C) the vegetation around the downstream area of Qian-Hua creek under south wind condition. The influence level is obviously lower than the temperature varying during day and night. After combining the wind field occurrence probability and consequences of thermal, this study further compares the thermal influence of dry storage facility with other cases in life experience. The results clearly note that the influence induced by dry storage will not greater than the household gas stove with 5kW heat power in modern society.

Keyword: Chinshan NPP, Outdoor DSS, Thermal Impact Assessment

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
一、研究背景與目的.....	1
二、統御方程式與數值模式.....	5
2.1 統御方程式.....	5
2.2 數值模式.....	6
2.2.1 DO 熱輻射模式.....	6
2.2.2 紊流模式.....	8
2.2.3 自然對流模式.....	9
三、核一廠乾貯系統幾何資料蒐集.....	10
3.1 核一廠乾貯設施場址資訊蒐集.....	10
3.2 核一廠 INER-HPS 系統資訊蒐集.....	11
3.2 材料性質.....	14
3.2.1 流體材料性質.....	14
3.2.2 固體材料性質.....	14
3.3 護箱衰變熱設定.....	16
3.4 場址所在地氣象資料研析.....	17
3.5 日照熱通量估算.....	19
四、模式建立、邊界條件定義與案例選擇.....	21
4.1 模式建立與網格生成.....	21

4.2 網格靈敏度測試.....	23
4.3 邊界條件設定.....	24
4.3 各式風場情境研提與案例規劃.....	25
五、各式風場保守案例計算與資訊研析.....	27
5.1 日照輻射影響評估.....	27
5.2 無風狀態案例研析.....	30
5.2.1 無風案例之流場探討.....	30
5.2.2 無風案例之分析結論.....	34
5.3 軟風狀態之案例研析.....	35
5.3.1 北北東方軟風之影響.....	35
5.3.2 東方軟風之影響.....	36
5.3.3 南方軟風之影響.....	37
5.3.4 軟風案例之分析結論.....	38
5.4 微風狀態之案例研析.....	39
5.4.1 北北東方微風之影響.....	39
5.4.2 東方微風之影響.....	41
5.4.3 南方微風之影響.....	42
5.4.4 微風案例之分析結論.....	44
5.5 清風狀態之案例研析.....	45
5.5.1 北北東方清風之影響.....	45
5.5.2 東方清風之影響.....	47
5.5.3 南方清風之影響.....	48
5.5.4 清風案例之分析結論.....	49
5.6 用過核燃料貯存護箱之出氣口溫度對設施周圍環境之安全探討....	51
5.7 民眾說明資訊.....	52
六、結論.....	54

參考文獻.....	55
-----------	----

圖目錄

圖 1、核一廠乾貯護箱實體與未來安裝位置之地面標記.....	1
圖 2、INER-HPS 系統於乾貯場之列置狀況與鄰近邊坡之地形地貌模型[1]	2
圖 3、核一廠乾貯場址配置與場界圖面[1].....	3
圖 4、核一廠乾貯場址之資料(106 年 8 月 11 日).....	10
圖 5、核一廠乾貯護箱 1/4 模型示意圖	12
圖 6、核一廠近年風場資訊(a)102 年、(b)103 年、(c)104 年、(d)105 年 ...	18
圖 7、核一廠近一年月均溫.....	19
圖 8、日照角度示意圖.....	20
圖 9、核一廠乾貯設施全場址與臨近地形幾何示意圖.....	22
圖 10、核一廠乾貯設施全場址與臨近地形網格分佈.....	22
圖 11、核一廠乾貯設施於夏至下午 1 點時之分析結果；(A)考慮日照與熱 排釋(B)僅考慮日照(C)僅考慮熱排釋.....	29
圖 12、核一廠乾貯設施於無風狀況下對場址周圍造成之溫度影響量.....	31
圖 13、核一廠乾貯設施於無風狀況下之自然對流流場.....	31
圖 14、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度 1K 之等溫面.....	32
圖 15、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度 2K 之等溫面.....	32
圖 16、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度 5K 之等溫面.....	33
圖 17、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度 10K 之等溫面.....	33
圖 18、核一廠乾貯設施出氣口熱排氣與人員高度比較圖.....	34
圖 19、核一廠乾貯設施於北北東方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響 量.....	35
圖 20、核一廠乾貯設施於北北東方軟風狀況下之流場.....	36
圖 21、核一廠乾貯設施於東方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	36

圖 22、核一廠乾貯場址受東方軟風影響時之尾流分佈.....	37
圖 23、核一廠乾貯場址受南風影響時背向階梯造成的混合效果.....	37
圖 24、核一廠乾貯設施於南方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	38
圖 25、核一廠乾貯設施於北北東方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響	39
圖 26、核一廠乾貯設施於北北東方微風狀況下之流場.....	40
圖 27、核一廠乾貯設施於東方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	41
圖 28、核一廠乾貯場址受東方微風影響時之尾流分佈.....	42
圖 29、核一廠乾貯場址受南方微風影響時，背向階梯造成的混合效果....	43
圖 30、核一廠乾貯設施於南方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	43
圖 31、核一廠乾貯設施於北北東方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響 量.....	45
圖 32、核一廠乾貯設施於北北東方清風狀況下之流場.....	46
圖 33、核一廠乾貯設施於東方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	47
圖 34、核一廠乾貯場址受東方清風影響時之尾流分佈.....	48
圖 35、核一廠乾貯場址受南方清風影響時，因背向階梯造成的混合效果	49
圖 36、核一廠乾貯設施於南方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響....	49

表目錄

表 1 核一廠乾貯設施熱流影響評估重要分析參數列表.....	13
表 2 空氣材料性質.....	14
表 3 不銹鋼(304 及 304L)材料性質	14
表 4 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)材料性質	15
表 5 混凝土材料性質.....	15
表 6 核一廠乾貯場址風向與風量歸納表.....	17
表 7、不同網格之計算結果.....	23
表 8 核一廠乾貯場址風向與風量之涵蓋案例歸納表.....	26
表 9 核一廠乾貯於各式風場下鄰近受影響區域資訊匯整.....	51
表 10 核一廠乾貯設施發熱量與生活常見案例之比較.....	53

一、研究背景與目的

台電公司於民國96年起為解決核一廠燃料池空間不足之問題，故向主管機關行政院原子能委員會放射性物料管理局(以下簡稱物管局)提出核一廠乾式貯存(以下簡稱乾貯)設施之申照案[1]，並於物管局邀集國內各領域專家與學者進行審查後核發其執照。核一廠乾貯之護箱系統採用源於美國NAC公司之UMS系統，並經核研所依場址特性、管制要求及台電允諾標準進行重新設計而成為如圖 1所示之INER-HPS系統。重新設計之INER-HPS系統具有與UMS相同的沸水式燃料束裝載量(56束)，惟其考量我國環境溫度較原設計廠家為高，且台電允諾場界劑量率可達法規限值的1/5之故，而增設外加屏蔽層(Add-on Shielding, AOS)，僅以單一護箱14 kW熱負載進行設計，其熱負載較原UMS系統之23 kW為低；台電甚至於安全分析報告中明確允諾單一護箱所裝載之最大熱負載將不會超過7 kW。



圖 1、核一廠乾貯護箱實體與未來安裝位置之地面標記

核一廠室外乾貯設施之熱傳設計，係藉由被動式散熱(Passive Cooling)之設

計思維，透過護箱中密封鋼筒內之用過核子燃料所產生的熱量來加熱空氣，並藉由空氣流道的設計將熱空氣由護箱頂部之出氣口排出；於此同時更將對空氣流道形成壓力差，促使冷空氣由下方進氣口吸入。此一散熱設計已於原能會進行安全分析報告審查時，嚴謹確認貯存護箱之排熱功能，可確保用過核燃料護套及設施各組件之溫度皆能維持於安全限值之下。

然而，由於國人環境觀念的日益抬頭，對於各項人工設施對環境的影響已不單僅是評估是否嚴重影響環境；而是更希望能於設施設置的同時，儘可能達到對環境友善的目標；使用期長達40年的乾貯設施，對環境影響之程度亦因而受到國人的關注。若進一步檢視核一廠乾貯的安全分析報告，可以得知此款護箱於裝載用過核子燃料後，將依據如圖 2所示之配置方式，將30組護箱貯存於核一廠內西南隅乾華溪下游左岸[1]之乾貯場。此一室外乾貯護箱貯存場因受限於部分土地坡度高於30%而不開發；可規劃作為貯存場場址之面積土地約有0.45公頃。這意味著該廠址於其規劃的用地面積下，具有至少有210 kW(最大達420 kW)之熱散失量對外圍地形與植被產生影響。



圖 2、INER-HPS系統於乾貯場之列置狀況與鄰近邊坡之地形地貌模型[1]



圖 3、核一廠乾貯場址配置與場界圖面[1]

進一步由圖 2 場址模型與目前所蒐集而得之場址實際照片可以得知，場址內之 30 個護箱係採集中擺置，並遠離未開發之坡地。若進一步參考安全分析報告中之貯存場配置圖(圖 3)則可發現，該案最靠近坡地之 30 號護箱，距離內圍籬尚有 7.6 m，在此之外更設有外圍籬；這意味著最近的護箱表面至具有非草地之植被至少有著 13.7 m 以上的距離。

雖然上述的設計資訊顯示最近的護箱與鄰近場址之植被尚有顯著之距離，但主管機關為能向國人說明 INER-HPS 護箱出氣口所釋出之熱空氣對於鄰近未開發坡地及植被之影響程度，因而透過本研究進行研析。整體而言，本計畫之工作項目依物管局原訂研究目標可概分如下：

1. 核一廠室外乾貯設施臨近地形與風場資訊蒐集及案例規劃。
2. 建立核一廠室外乾貯設施臨近場址周圍環境之熱傳分析模式、各項案例計算與結果探討。
3. 用過核燃料貯存護箱之出氣口溫度對設施周圍環境之安全探討。
4. 撰寫研究計畫成果報告。

在檢視上述工作項目與計畫執行之相關性及順序後，擬依循招標規範之要求

與次序進行以下分析工作：

1. 核一廠室外乾貯設施臨近地形與風場資訊蒐集。
2. 核一廠室外乾貯設施臨近場址周圍環境之熱傳分析模式建立。
3. 撰寫研究計畫期中報告並透過同儕審查機制進行修訂。
4. 各式風場情境研提與案例規劃、保守案例計算。
5. 用過核燃料貯存護箱之出氣口溫度對設施周圍環境之安全探討。
6. 撰寫研究計畫成果報告並透過同儕審查機制進行修訂。

於此期末報告中，將逐步就地形、風場資訊蒐集並藉以完成分析模式建立，待分析模式建立後，再著手透過所建立之模式進行案例規劃與計算以符合本計畫查核要求。

二、統御方程式與數值模式

2.1 統御方程式

本研究為確保與以往分析方法的一致性，故仍採用與美國NRC NUREG-2174相同，並已多次應用於我國乾貯相關熱流分析作業之商用計算流體力學軟體FLUENT[2]進行技術發展。雖然整體乾貯場址附近之流場大致可以穩態分析進行探討，但為能充份涵蓋可能之狀況與可能面臨之暫態分析需求，本研究仍以暫態統御方程式[3]來描述整體之流場特性：

質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

其中，

ρ 為流體密度；

而 \vec{v} 為速度向量。

動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\overline{\overline{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

其中， P 為靜壓力， $\rho \vec{g}$ 為體積力項；

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

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

其中，

μ 為流體黏滯係數；

\mathbf{I} 則為單位張量。

能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4)$$

其中，

E 為單位質量之總能量；

h 為焓值；

P 為靜壓力；

\vec{v} 為速度向量；

κ_{eff} 則為等效熱導率：

$$k_{eff} = k + k_t \quad (5)$$

其中，

k 為物質本身之分子熱導率；

k_t 則為流場紊流所致之熱導率。

2.2 數值模式

2.2.1 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，但仍無法描述熱輻射機制對此系統之影響。在此平行驗證工作中採用於前一期研究中已充份校驗之熱輻射模擬模式-DO模式[2]。DO模式除已於許多乾貯相關的研究中被加以應用外，本研究團隊更有充份的使用經驗與嚴謹的校驗程序來確保分析模式之精確性。

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：

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (6)$$

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：

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s}) \Delta\lambda_k \quad (7)$$

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)。

2.2.2 紊流模式

由於本研究擬探討的乾貯系統與其場址所在位置之臨近地區，其所需分析之計算域高度約在25 m左右，因此護箱熱排釋量所造成的自然對流與來自於場址氣候所致之風場將成為兩項需納入本研究考慮之對流機制。為求能精確的掌握紊流所造成的對流效應，本研究擬在相關分析採用適用性已受認同的k- ω [5]作為紊流模擬之數值模式， κ - ω 模式之方程式可以表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

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：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (10)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (11)$$

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：

$$\mu_t = \alpha^* + \frac{\rho k}{\omega} \quad (12)$$

其中，紊流阻尼 α^* 可以定義為

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* + \left(\frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / \text{R}_k}{1 + \text{Re}_t / \text{R}_k} \right) \quad (13)$$

而， α_{∞}^* 為阻尼；

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (14)$$

$$\text{R}_k = 6 \quad (15)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (16)$$

$$\beta_i = 0.072 \quad (17)$$

2.2.3 自然對流模式

在FLUENT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項($\rho \vec{g}$)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；或利用布希尼克(Boussinesq)近似法與理想氣體方程式來進行密度之計算。有鑑於採用布希尼克近似法來進行求解有助於增進求解之效率與收斂性，且本研究經計算後所獲之流體主要範圍亦約略為3%(10k/310k)，故本研究遂選用此法進行流體性質與體積力之設定。

三、核一廠乾貯系統幾何資料蒐集

3.1 核一廠乾貯設施場址資訊蒐集

我國現行之核一廠乾貯設施仍處於等待水保計畫通過後以進行熱測試作業，因此整體乾貯廠址尚未達到如同圖 2 所示之狀況，依據原能會於106年8月11日就媒體對該場址附近發生土石流失之事件說明稿所附圖例(如圖 4所示)可以得知，目前場址乾華溪上游之左側仍有部分尚未完成地貌整理之狀況。為能貼近現況，且考慮目前場址地貌較靠近26-18號護箱之處，預期將受到較大的熱衝擊；為此，本研究採用此一地貌現況配合目前既有安全分析報告所載之場址資料進行模式建立。



圖 4、核一廠乾貯場址之資料(106年8月11日)

為能進一步給予合理之邊界條件，並探討各式地表所具有的熱特性，本研究將該圖所示之地貌分為三類，並作為後續邊界條件設定之依據：

1. 人工設施之混凝土表面

此類地表主要包括場址地面、內外圍籬之人工設施與兩岸水堤等部分；

此部分地表考量混凝土所具有的表面放射率以模擬趨近實際情況。

2. 乾華溪之河床液面

考量液態水因熱質量極大，且因流動之故而具有近乎定溫表面之特性，故將其與人工設施之混凝土表面分別設定，以增加模擬不同案例(如溪中是否有水)時之彈性；在溪中有水時此邊界將設定為與環境溫度相同之定溫邊界，而在無水階段則會參考上述人工設施邊界進行設定。

3. 高於混凝土護箱進氣口之植被

此類地表即為本研究之主要探討目標，而低於護箱進氣口之區域(如河堤旁之灌木林)則因為高度低於進氣口與場址水平高度；在考量熱氣將會因為自然對流而向上移動之故，將低於場址水平高度之植被亦假設為人工設施之表面，不予考慮其所受之熱衝擊。

3.2 核一廠INER-HPS系統資訊蒐集

核一廠乾貯系統(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35 cm之外加屏蔽層以降低輻射劑量，是故其外部尺寸較原有的UMS護箱更大(如圖 5所示)。本節熱流影響評估重要的分析參數如表1[1]所示；而材料參數將於3.2節說明。

混凝土上蓋

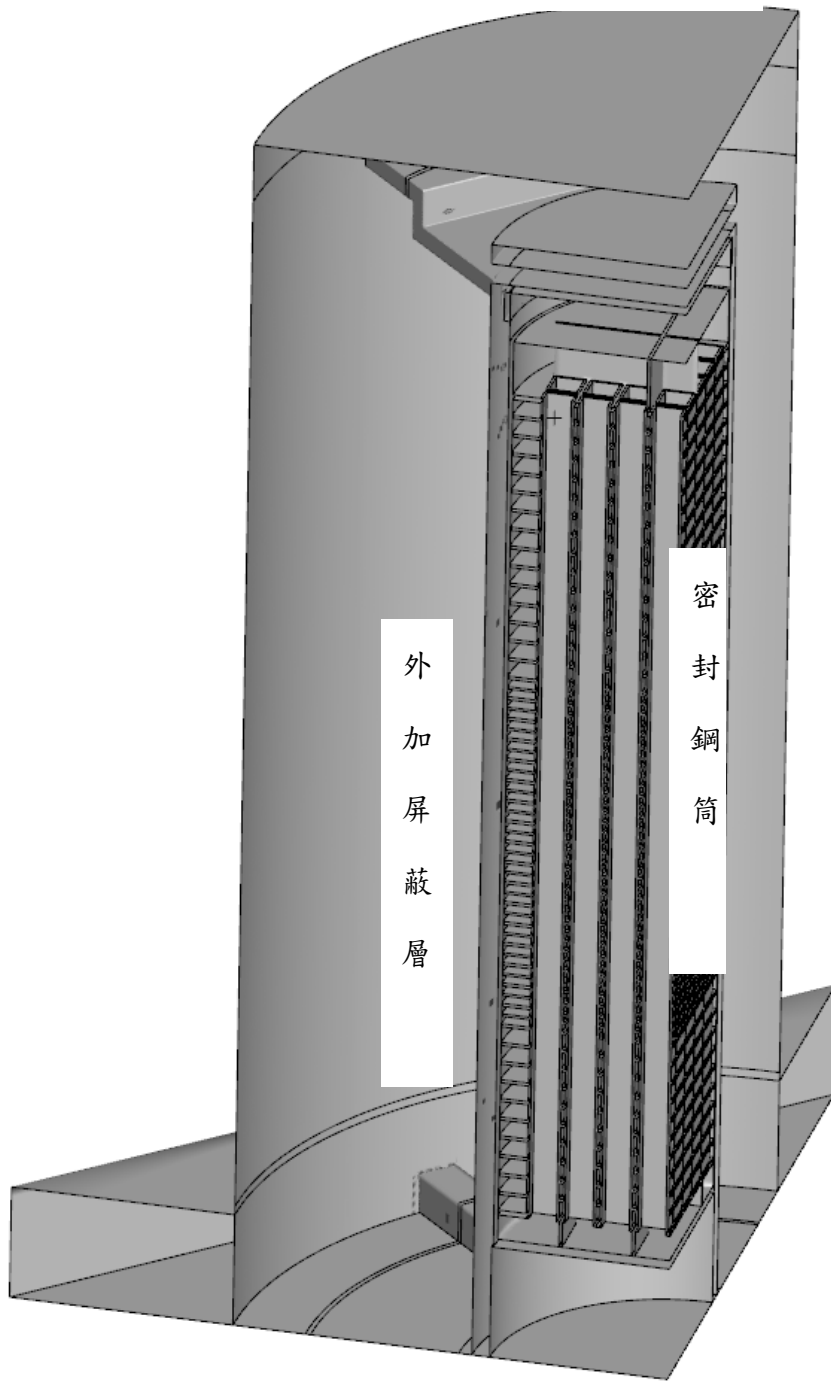


圖 5、核一廠乾貯護箱1/4模型示意圖

表 1 核一廠乾貯設施熱流影響評估重要分析參數列表

參數名稱		特徵值	數值
熱負載		功率	14kW/Cask
對流能力		質流量	0.401kg/s
混凝土護箱	內襯	厚度	0.064(m)
		外徑	2.019(m)
	混凝土護箱	高度	5.70(m)
		外徑	3.454(m)
		厚度	0.719(m)
	外加屏蔽層	厚度	0.35(m)
相鄰護箱間距		距離	1.3(m)

3.2 材料性質

本研究所需考慮的護箱及整體場界熱傳分析所使用的材料可分為流體與固體兩類，分別描述如下。

3.2.1 流體材料性質

本系統使用到的流體僅有貯存過程中用以冷卻作用之空氣，其材料性質如表 2 [1]所示。

表 2 空氣材料性質

	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
Specific Heat (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
Conductivity (W/m-K)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0524	0.0573
Thermal Expansion Coefficient	3.33e-3					

3.2.2 固體材料性質

本分析所需使用之固體材料如表3~表5。

表 3 不銹鋼(304及304L)材料性質

	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	7994.2	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 4 碳鋼(A-36、A-533及SA-588)材料性質

	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 5 混凝土材料性質

	溫 度		
	37.8 °C	93.3 °C	148.9 °C
Conductivity (W/m-K)	1.890	1.848	1.786
Density (Kg/m ³)	2,243		
Specific Heat (J/Kg-K)	837.4		
Emissivity	0.9		
Absorptivity	0.6		

3.3 護箱衰變熱設定

考量本研究之目的係探討核一廠乾貯設施於營運時的熱負載對周圍環境之影響，故本研究以最保守之熱負載條件進行分析規劃：

1. 考慮台電對單一護箱之申照熱負載14 kW，以獲得較全面性且足夠保守之分析結果；
2. 假設該設施滿載，共計有30個護箱，並以目前安全分析報告所載之配置進行建模；
3. 不考慮護箱阻塞、半阻塞之狀況，以核一乾貯系統安全分析報告第6.3節[1]所載之單一護箱質流量0.401 Kg/S進行模擬設定；
4. 所有地表皆設為絕熱邊界，在不考慮對地下物進行熱傳之前提下，獲得保守的地表溫度值；
5. 護箱表面之熱散失量為先前以圖 5模式進行獨立計算之結果，作為本分析案之邊界條件。

3.4 場址所在地氣象資料研析

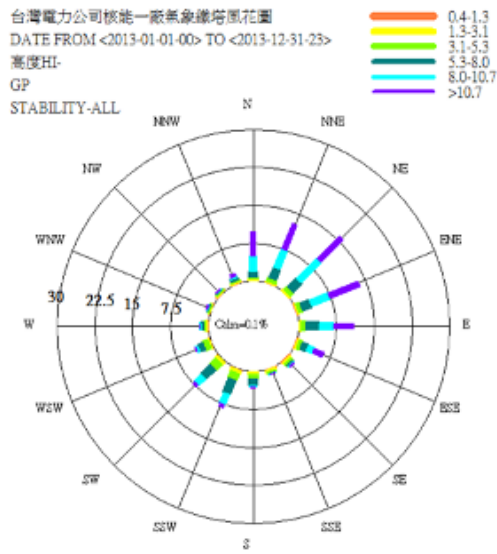
本研究蒐集了核一廠氣象塔近四年的氣象資訊(如圖 6)並加以研析後發現，核一廠乾貯場址之風場主要係以北北東至東北方為主。其風速最大可超過10.7 m/s，且一整年之發生機率達30 %以上；又8-10.7 m/s之風速約略亦有15 %左右，5.5-8.0 m/s之風速則佔全年之10%左右。反之，在考慮無風或是微風狀況下可能造成的自然對流與混合對流，則可能出現在各個方向。進一步綜合具有較高發生率之風場與風速之組合，並考慮不同方向之無風狀況實則代表相同物理定義後，核一廠之各風向資料可大略整理如表 6所示；此一代表性風向與風量資料將可成為後續案例規劃之依據。

表 6 核一廠乾貯場址風向與風量歸納表

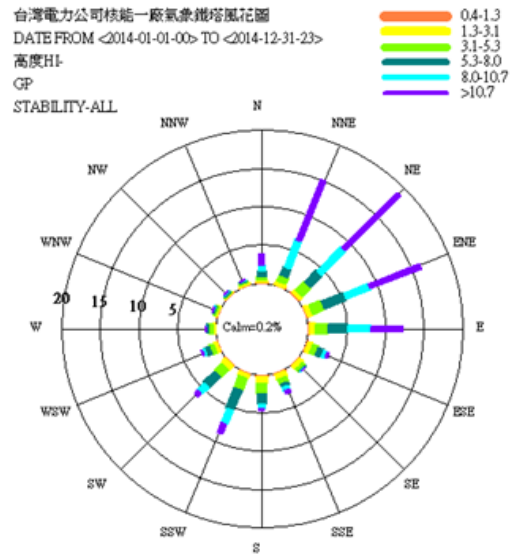
代表方向/風量	無風 ($<0.3\text{m/s}$)	軟風狀態 ($0.3-1.5\text{m/s}$)	微風狀態 ($3.4-5.4\text{m/s}$)	清風狀態 ($8.0-10.7\text{m/s}$)
保守風量	(0.0m/s)	(0.3 m/s)	(5.4m/s)	(10.7m/s)
北北東($\pm 22.5^\circ$)	V	V	V	V
東($\pm 22.5^\circ$)		V	V	V
南($\pm 22.5^\circ$)		V	V	-
西($\pm 22.5^\circ$)		-	-	-

除了上述風向風量之考量外，為能確保分析所得之溫度足以涵蓋該場區之實際狀況，本研究對該場區歷年來月均溫資料進行蒐集，所得之結果則如圖 7所示。該圖所統計之資料顯示，該場址之月均溫並未超過核一廠乾貯安全分析報告所載之 32°C 設計條件，又經過105年原子能共同研究計畫對日常環境因素之影響已證實短期之溫升變化並不會影響乾貯設施之熱排釋[3]；因此本研究以 32°C 作為穩態分析之邊界條件，並於未來必要時納入即時溫度以作為暫態分析之依據。

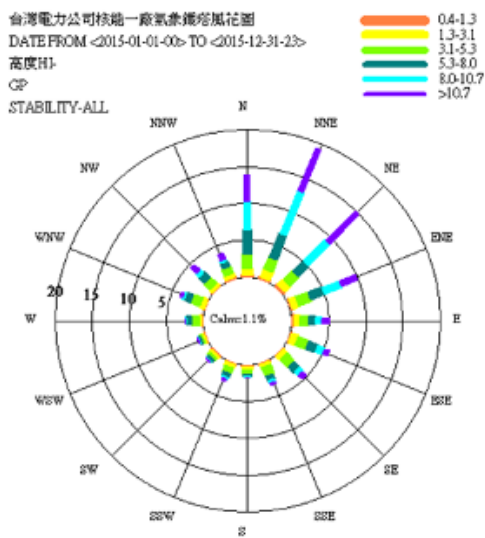
(a)



(b)



(c)



(d)

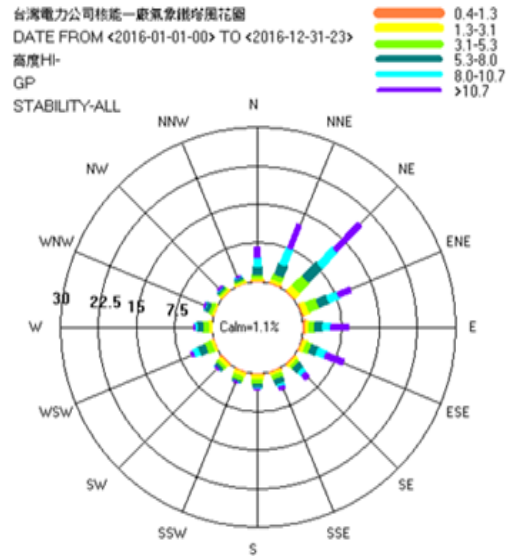


圖 6、核一廠近年風場資訊(a)102年、(b)103年、(c)104年、(d)105年

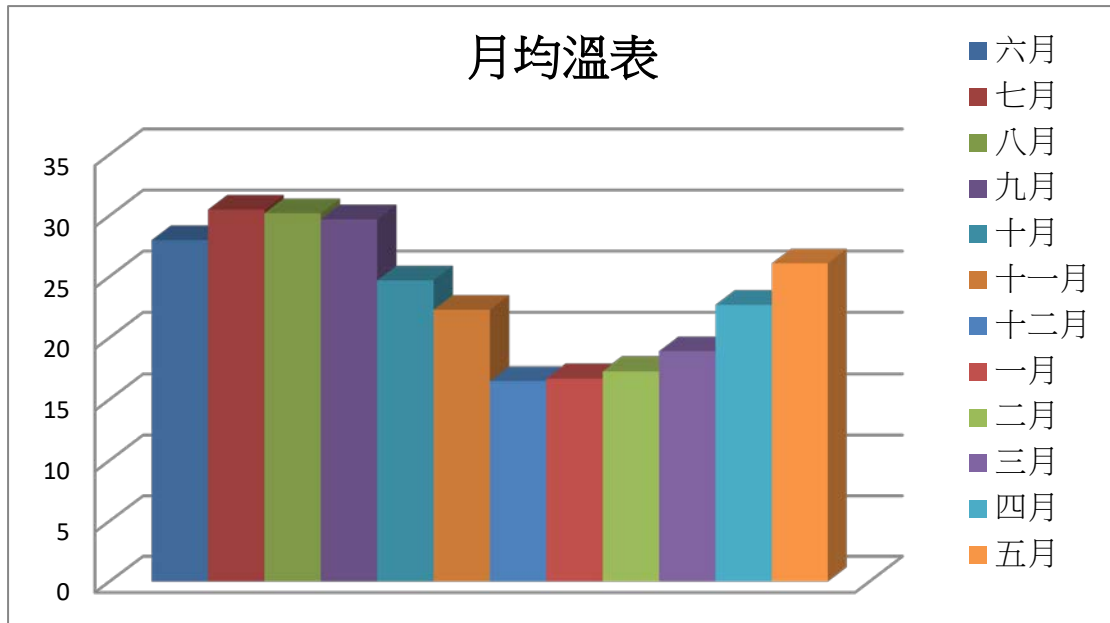


圖 7、核一廠近一年月均溫

3.5 日照熱通量估算

為能詳實考慮場址所在之日照熱輻射，本研究不再以10 CFR 71中對於日照輻射之法規定義，而改以FLUENT內建之日照軌跡模式(Solar Tracing Model)評估特定時間下的日照角(如圖 8所示)並作為模擬期間之邊界條件，其計算式為：

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\varphi \cos\beta - \sin\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\varphi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega$$

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{(284 + n)}{365} \right]$$

$$\omega = 15^\circ \times (m - 12)$$

其中， n 與 m 分別為日數與月份；而計算後所獲之邊界條件再導入模型中混凝土表面及植被地表，即可表現出應有之日照效應。

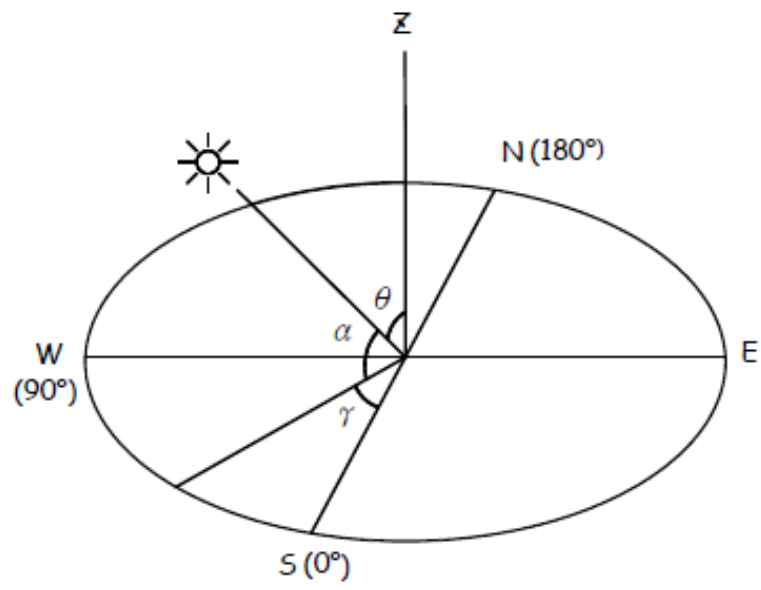


圖 8、日照角度示意圖

四、模式建立、邊界條件定義與案例選擇

基於以上所蒐集之系統資訊與各項運轉參數，本研究利用FLUENT之前處理程式-GAMBIT，將所獲得之護箱與廠址地理資訊進行幾何模型建立、網格生成與邊界條件設定等作業，以下將逐一就各階段模式發展成果進行說明。

4.1 模式建立與網格生成

如圖 9所示，在考慮所有護箱於場址內依原申照配置進行貯存時，將會對不同方向來的風場造成阻隔效果。因此在整體的分析模式中，係依據核一乾貯系統安分析報告所載之外加屏蔽層尺寸與護箱配置方式進行模型繪製。此外，在考量場界圍籬可能會對熱氣造成阻隔效應而使其流向遠離長有植被之地表，故本研究中將圍籬予以忽略。

不同於以往僅著重於護箱內的流場研析，本研究為能探討護箱熱排氣對於外圍環境的影響，需額外考慮場址附近空間之大氣，以求能解析熱氣由護箱出氣口釋出後之傳遞與擴散特性。因此，本研究除繪製貯存場場界內之範圍外，更視需求向具外延伸10-20 m不等的範圍以建立相鄰之地形，並向上拉伸整體計算域至25 m高，以探討熱氣排釋後所造成的擴散現象。

上述模型在考慮網格品質與流場複雜度後，將鄰近護箱之區域以約0.1m之長度作為網格生成之依據，並於進出氣口之處以0.02m之尺寸進行網格設定；而外界之最粗網格則以不超過0.4m為標準進行設定。而在完成相關評估後，本研究亦透過案例測試與現場勘驗的方式進行幾何模型的合適性測試，並多次修正：

1. 北方模型邊界與護箱距離加大約30m；
2. 修正多軸油壓板車停放淺坑幾何形狀；
3. 增設廠區西側隔離牆。

透過以上設定，本案最後所獲得之網格分佈如圖 10所示；整體節點數目約為1500萬左右，且絕大多數配置於護箱附近以求取較佳的分析準確度。

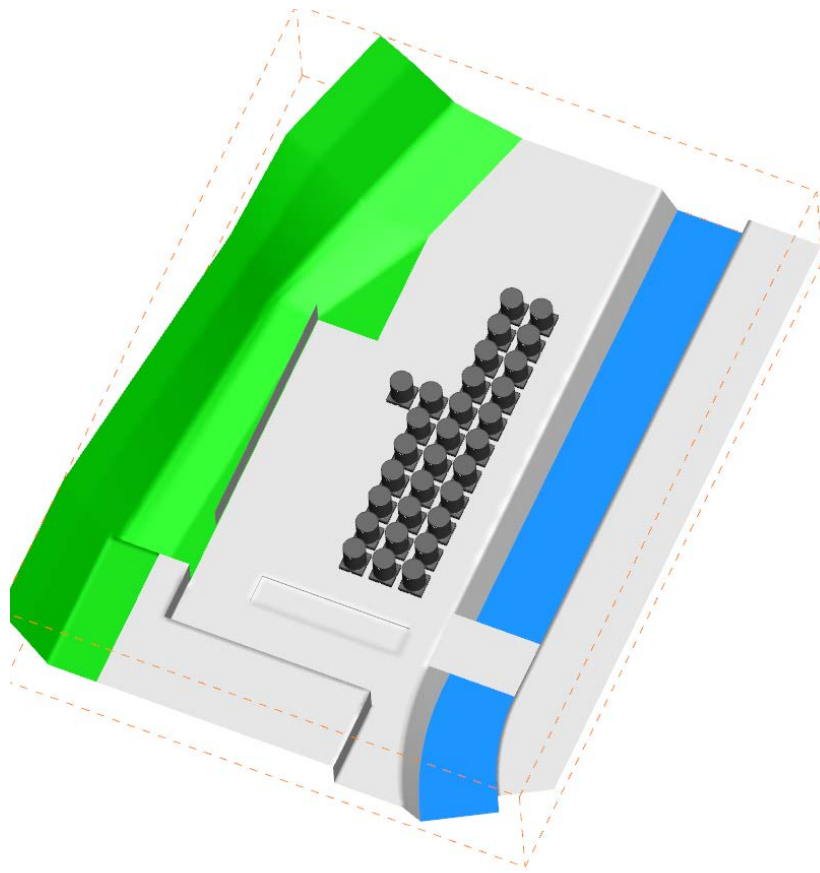


圖 9、核一廠乾貯設施全場址與臨近地形幾何示意圖

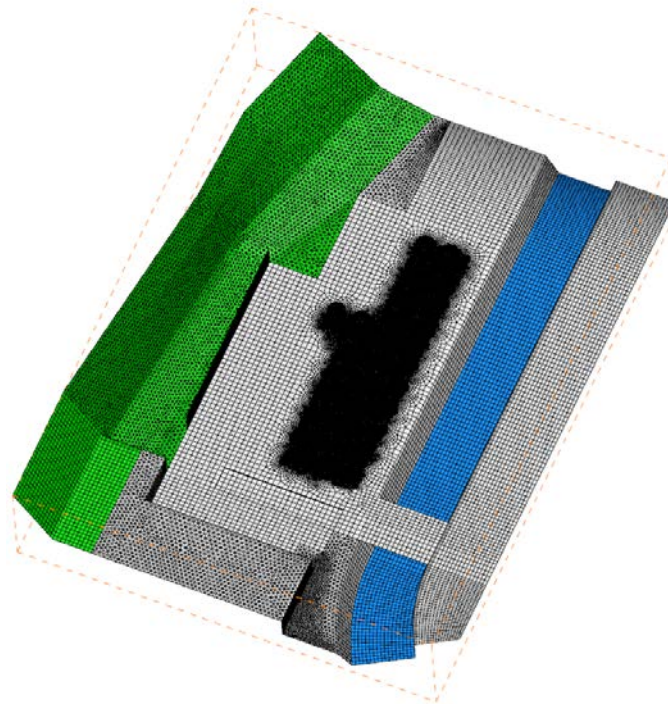


圖 10、核一廠乾貯設施全場址與臨近地形網格分佈

4.2 網格靈敏度測試

為能確保分析所得結果不致因為網格分佈所致而造成過大的誤差，本研究採用 NRC 最新擬定的 NUREG-2215[6]中所載，對計算流體力學分析方法進行網格所造成的網格靈敏度評估。

本評估考量此計畫之分析標的係為植被表面受到分析結果之影響，故選擇以其最高溫度差作為網格測試標的；其值於具有不同網格數目之模式下所得計算結果如表 7 所示。而依據此一設定所求得之所造成的網格差異小於 1%，故可於後續分析工作採用標準網格並忽略其誤差不計。

表 7、不同網格之計算結果

網格類型	網格尺寸	$\Delta T(k)$
標準網格	~15,000,000	1.101
加密 1 次	~17,000,000	1.080
加密 2 次	~21,000,000	1.077

4.3 邊界條件設定

有鑑於本計畫是針對護箱於正常貯存狀況下面臨不同風場所造成之熱排釋對周圍環境之影響評估，研究中僅需就風量、風向進行探討。本研究將環境溫度 32°C 定為基準溫度，熱流分析所獲得的任何溫度結果均減去此基準溫度，以溫度差的型式表現，後續若需要考量環境溫度變化對場址周圍溫度的影響性，則直接計算環境溫度與 32°C 之差值，隨後以線性疊加方式進行場址周圍溫度估算，從而達到減少計算負擔的效益。

依據上述之模式建立與風場研析，本研究之分析模式所採用的邊界條件可歸納如下：

- 考慮輻射熱傳機制，並將季節條件下之日照輻射量納入考量；
- 考慮每一護箱與場址環境間的質量守恆與能量守恆；
- 假設空氣通道之對流機制已經建立，並假設正常貯存條件之環境溫度為 32°C ；
- 整體模型(含護箱及場址)底部假設為絕熱，並忽略地表以下物質之結構物所具有的熱質量；
- 假設單一護箱熱負載為 14 kW ，其護箱配置則依安全分析報告所載狀況為之；
- 所有流固邊界設定為共軛熱傳邊界，並假設其為速度 $=0$ 之無滑動邊界條件；
- 各風場之邊界設定為速度進口邊界，其溫度係以 32°C 為之；
- 所有出口邊界(包含計算域頂部邊界)設定為壓力出口邊界，其溫度係依案例環境溫度進行調整；
- 所有計算域之固體邊界(如混凝土護箱外表面)，係假設為混合邊界，並依實際材料狀況填入表面放射度、吸收度、表面熱對流係數與環境溫度，以模擬對流、輻射熱傳等效應。

4.3 各式風場情境研提與案例規劃

為確保此一研究能以有限的分析資源，釐清各種風場下由護箱熱排釋後對環境之熱衝擊，本研究擬以以下數種案例進行後續分析：

案例一：無風狀態(Calm)

依據表 6 所載之風向風量歸納結果可以發現，核一廠乾貯廠址所在位置有機會出現風速小於0.3m/s之無風狀況。考量於此案例下，探討整體流場將會直接受自然對流影響將是其主要價值，進而可以呈現與其他混合對流不同之流場，故將本案例將以風速為0m/s之條件保守進行模擬，並將其編號為CASE1進行分析以利鑑別；

案例二：軟風狀態(Light Air)

依據蒲福風級表之分類與場址所具有之風速歸納結果，核一廠乾貯廠址所在位置西北順時針至西南的範圍內出現軟風之風場。為能確保分析可以涵蓋較小風量與自然對流的混合效應，本類案例將命名為CASE2，並以風花圖上所載之1.5m/s作為風量條件，以期能探討此風級下自然對流與強制對流之混合效應對於植被之影響。又，考慮不同風向對於臨近地形以及植被之影響，本研究考慮由以下風向進行探討：

1. 北北東之來風，此風向將與護箱之列置近乎平行，並造成較顯著的尾流現象；因此擬以CASE2-NNE進行編號以利討論。
2. 正東之來風，此風向將與護箱之列置近乎垂直，並直接對其下游之左側山壁植被造成較大影響，故擬以CASE2-E進行編號以利討論。

在綜合考慮其它風向之發生機率以及對於植被之影響可被上述案例涵蓋，故不再額外探討風向之影響。

案例三：微風狀態(Gentle Breeze)

綜合蒲福風級表與核一廠風花圖所載之資訊，本研究以5.4 m/s之微風進行本類案例之規劃，並在考量該場址可能之風向後以CASE3-NNE與CASE3-E進行研

析；

案例四：清風狀態(Fresh Breeze)

綜合蒲福風級表與核一廠風花圖所載之資訊，本研究以10.7 m/s之清風進行本類案例之規劃；並在合理考慮風速愈高時，熱擴散所造成的植被影響愈小來保守涵蓋更高風速之影響；在考量該場址可能之風向後以CASE4-NNE與CASE4-E進行研析；

表 8 核一廠乾貯場址風向與風量之涵蓋案例歸納表

代表方向	無風(0.0m/s)	軟風(0.3m/s)	微風(5.4m/s)	清風(10.7m/s)
NNE	CASE1	CASE2-NNE	CASE3-NNE	CASE4-NNE
E		CASE2-E	CASE3-E	CASE4-E
S				-

五、各式風場保守案例計算與資訊研析

在完成前述之分析技術發展與模式建立與案例研提等多項工作後，本研究即可著手進行個項案例之計算，以作為與管制單位就整體計畫成果進行討論之依據。以下將逐一就日照影響、無風、軟風、微風與清風等案例進行探討。

5.1 日照輻射影響評估

由於輻射熱傳的計算所需求各個網格間對於輻射通量的吸收與折射等效應此在將其考慮在內時，所花費的資源遠遠超過忽略日照輻射不計之所需。惟考慮案例分析期間，仍有必要探討日照輻射忽略與否是否造成源自於護箱熱排釋對植被之影響。為此，本研究擬定此一章節，以案例評估之方式探討各式風場下考慮輻射與否時所獲之計算結果，並作為以後分析工作中忽略日照輻射影響與否之依據。

本節將分別計算以下三個案例，並透過交叉比對來進行日照輻射對本案之影響：

1. 考量日照輻射影響與護箱熱排釋之案例
2. 考慮日照影響但不考慮護箱熱排釋之案例
3. 不考慮日照影響但考慮護箱熱排釋之案例

上述三個案例經過求解後所得分析結果如圖 11所示；透過A與C交叉比對可以發現，在此時間條件下，日照輻射將會因為地形的遮蔽效應而不會對西側山坡與乾華溪左岸造成輻射熱；且透過案例A與B的比較可以發現無論是否考慮護箱的熱排釋，日照輻射本身即會對廠址附植被造成些許的升溫現象。此外，若更進一步的再將三個案例結果進行綜合探討則可以發現在同時考慮日照輻射與護箱熱排釋後，對於植被之加熱效應(溫度、範圍)並未有所不同，甚至可見部分高溫區塊在考慮了日照輻射後反而較小。這是因為日照輻射與護箱的熱排釋皆是一個熱源項，因此在混合對流流場下，反而可能促成對流的形成。

而綜合此三案的比對結果可以證實，日照輻射之效應於本案中係為一獨立因子；其主要影響範圍僅止於非尾流區之影響；因此在考慮本案主要在探討護箱熱排釋對原環境之影響，以下之分析工作將可合理忽略日照輻射之影響，逕行探討護箱熱排釋之效應。

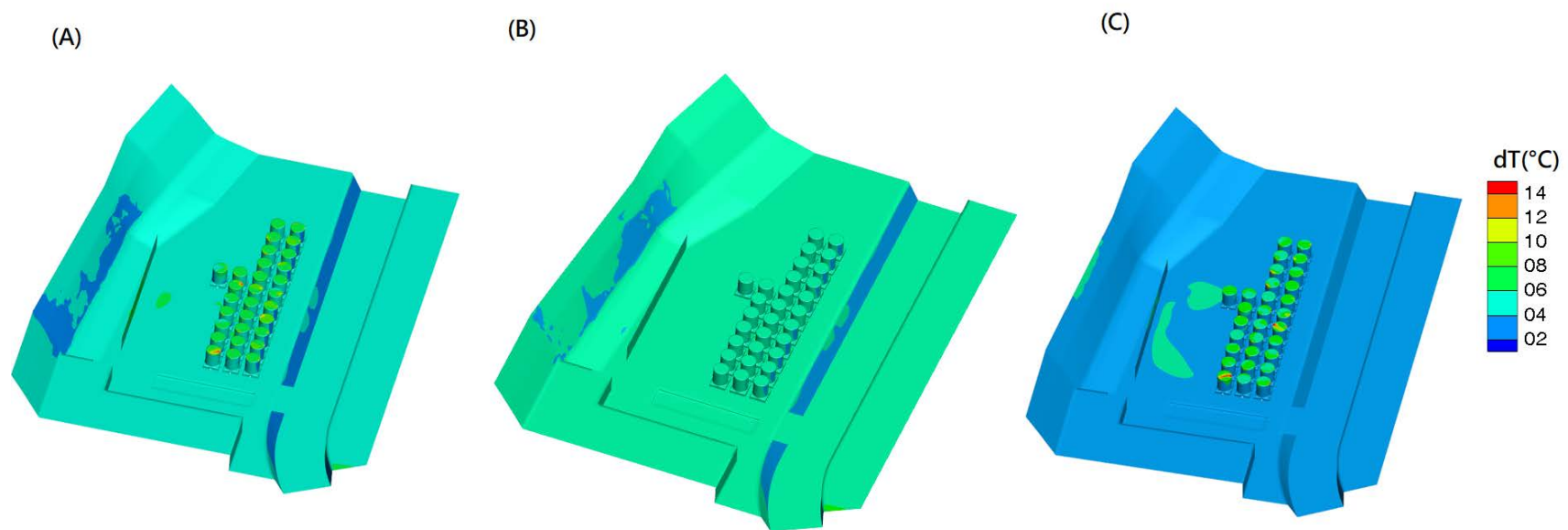


圖 11、核一廠乾貯設施於夏至下午1點時之分析結果；(A)考慮日照與熱排釋(B)僅考慮日照(C)僅考慮熱排釋

5.2 無風狀態案例研析

本案例(CASE1)主要係探討無風狀況下，乾貯場與其鄰近地形場址內30個裝載有14 kW熱負載之護箱所造成的熱衝擊。

5.2.1 無風案例之流場探討

而所得結果則可由圖 12之地表溫度分佈、圖 13所示之整體對流流場與圖 14-圖 17之等溫面分佈進行探討。

由圖 12與圖 13所示之地表溫度與流場分佈可發現，在無風狀況下貯存場內氣流將因為護箱表面的加熱效果與出氣口之熱排氣(約1.5 m/s)向外釋出，帶動氣流由環境四周向場址緩慢流動，空氣於護箱區間受熱後成為上升氣流。也因此整體乾貯場的熱排釋將不會對臨近地表之植被造成熱衝擊。而由護箱表面溫度約略高出環境溫度10°C左右之資訊，進一步在保守假設視因子為1之前提下，得知其輻射熱通量為：

$$Q = F\epsilon\sigma(T_w^4 - T_s^4) = 1 * 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8}(315.15^4 - 305.15^4) \approx 60W/m^2;$$

此一輻射熱量值遠小於台灣於夏至下午一點時的日照輻射通量~1000W/m²；由此得知，其護箱表面因略高溫度所造成的輻射熱亦可忽略不計。

而若進一步再觀察圖 14-圖 17之等溫面亦可發現，整體乾貯設施因護箱所造成的主要熱氣將集中於出口處，並因為護箱內所形成的自然對流流量於出口處形成類似噴嘴效應，並往垂直護箱表面之方向移動一段距離，才會因為擴散與自然對流的浮力而向上流動；但因為護箱的出氣口高達地表近5公尺，故無需在意人員於場址內巡檢時所受之熱衝擊(圖17)。

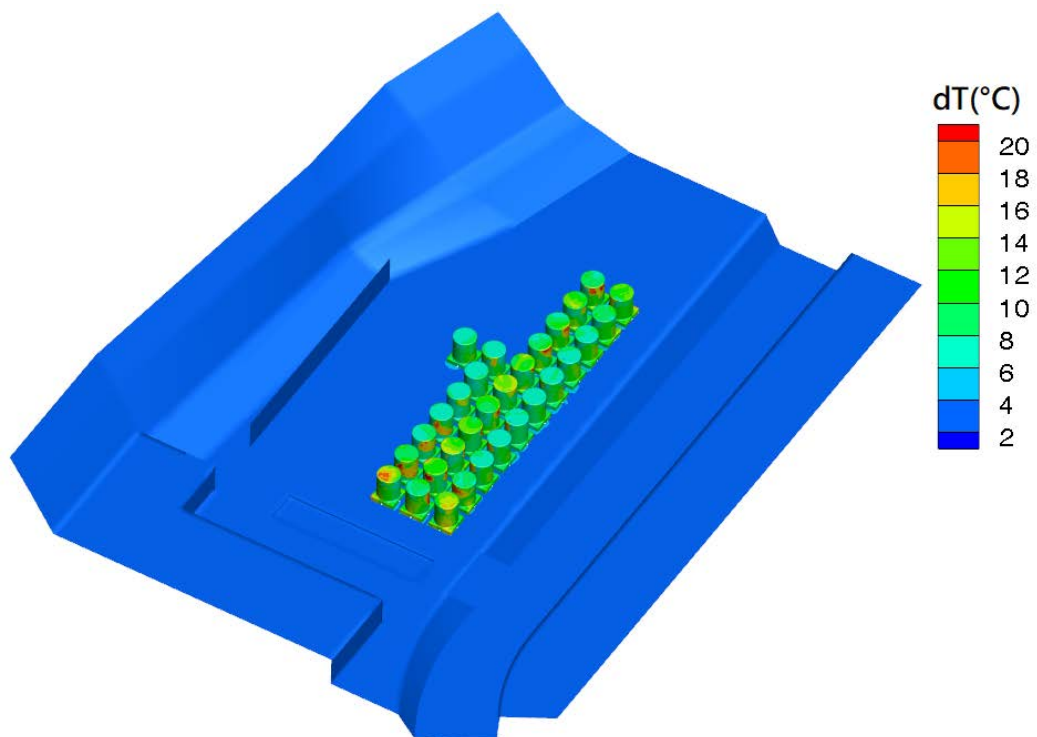


圖 12、核一廠乾貯設施於無風狀況下對場址周圍造成之溫度影響量

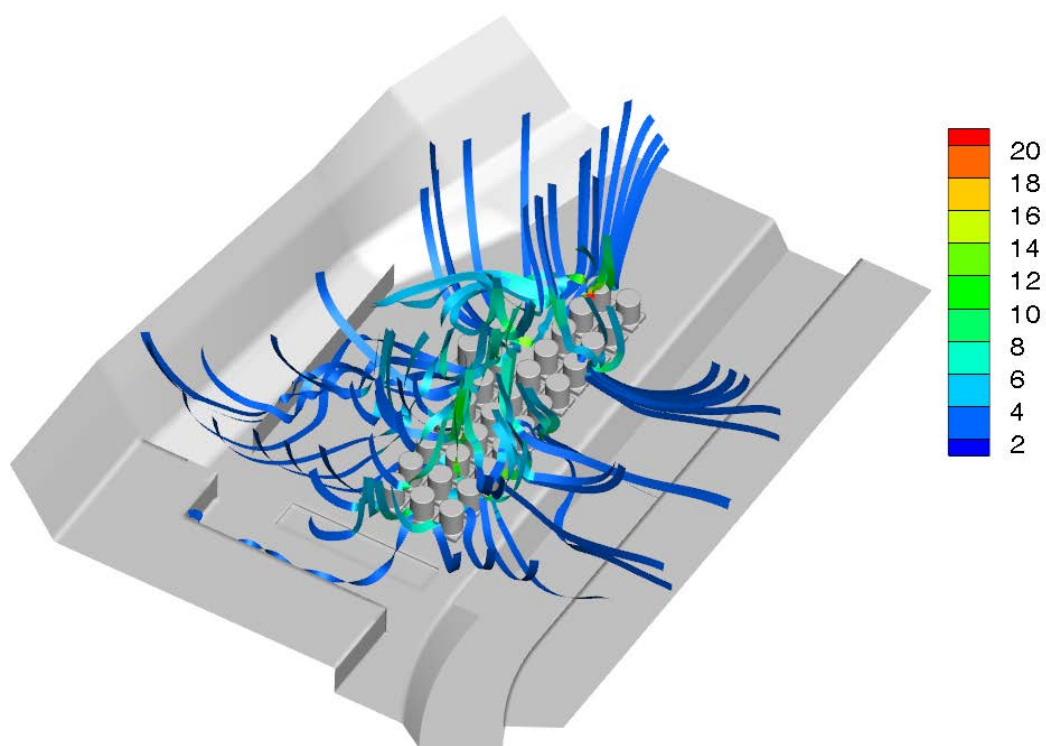


圖 13、核一廠乾貯設施於無風狀況下之自然對流流場

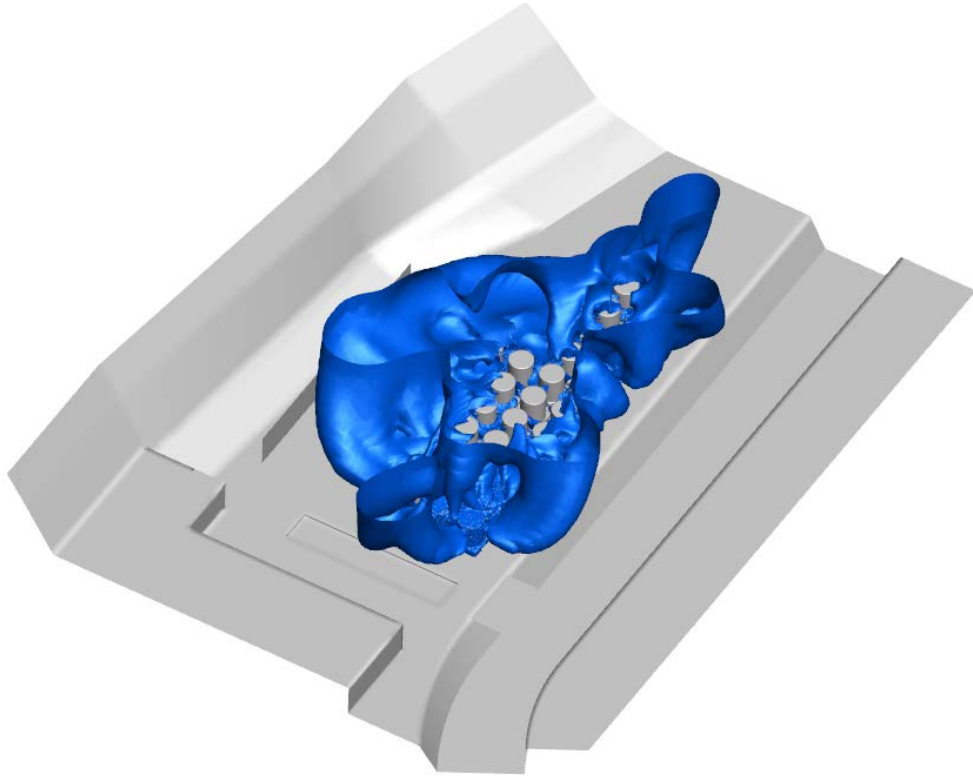


圖 14、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度1K之等溫面

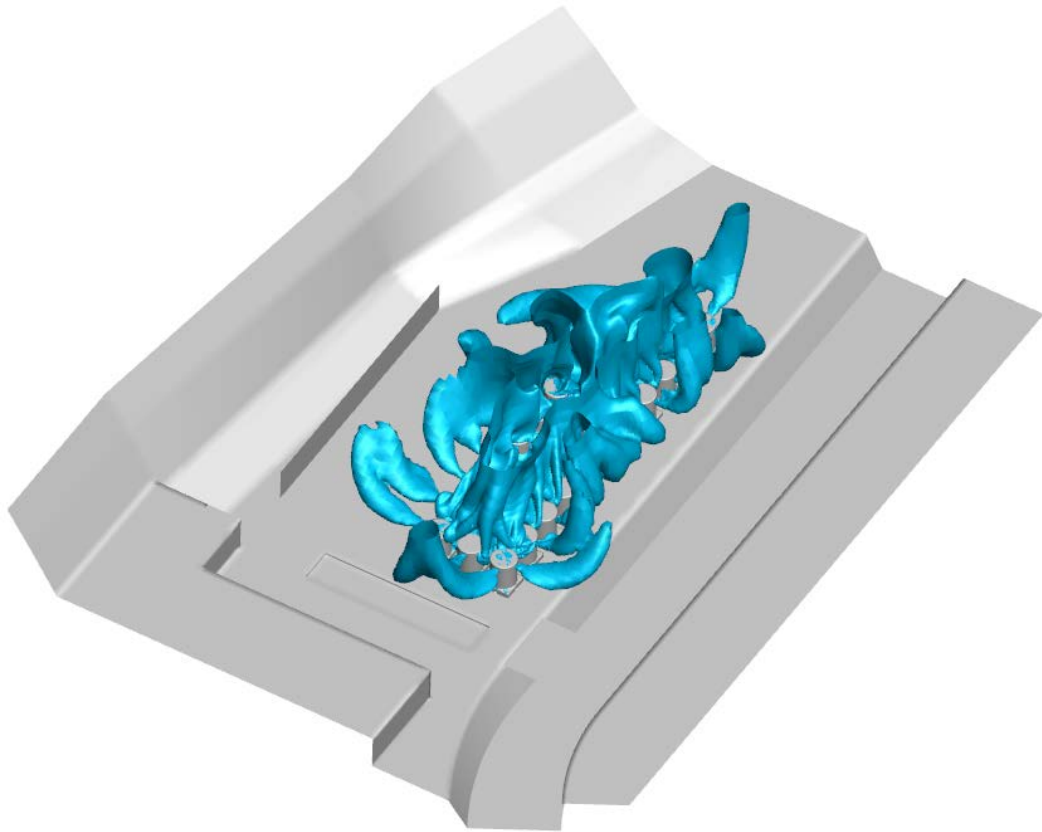


圖 15、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度2K之等溫面

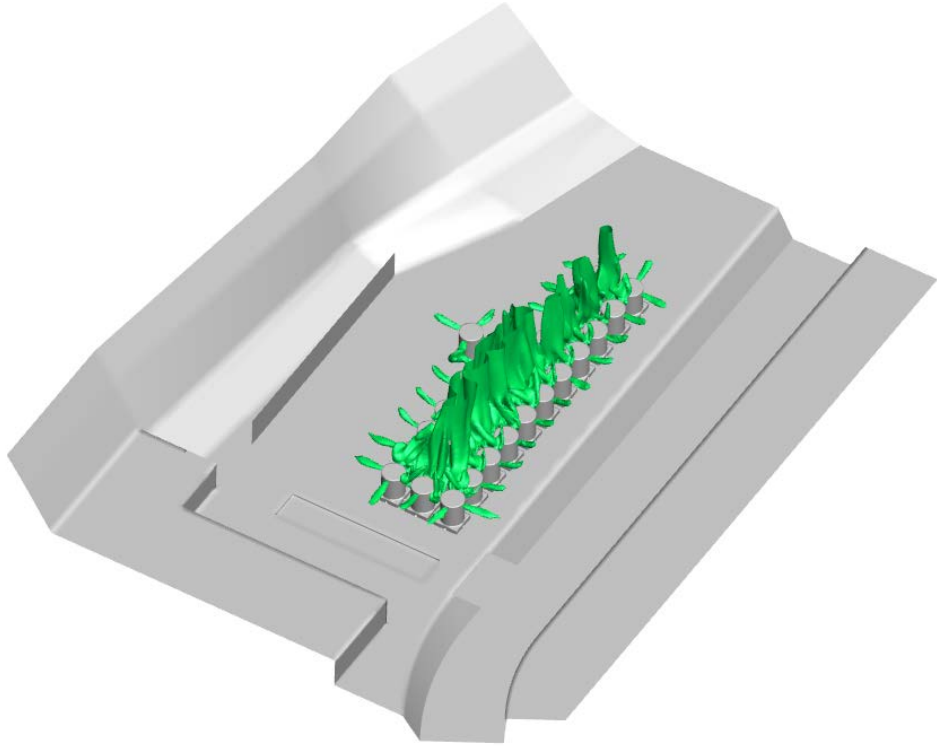


圖 16、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度5K之等溫面

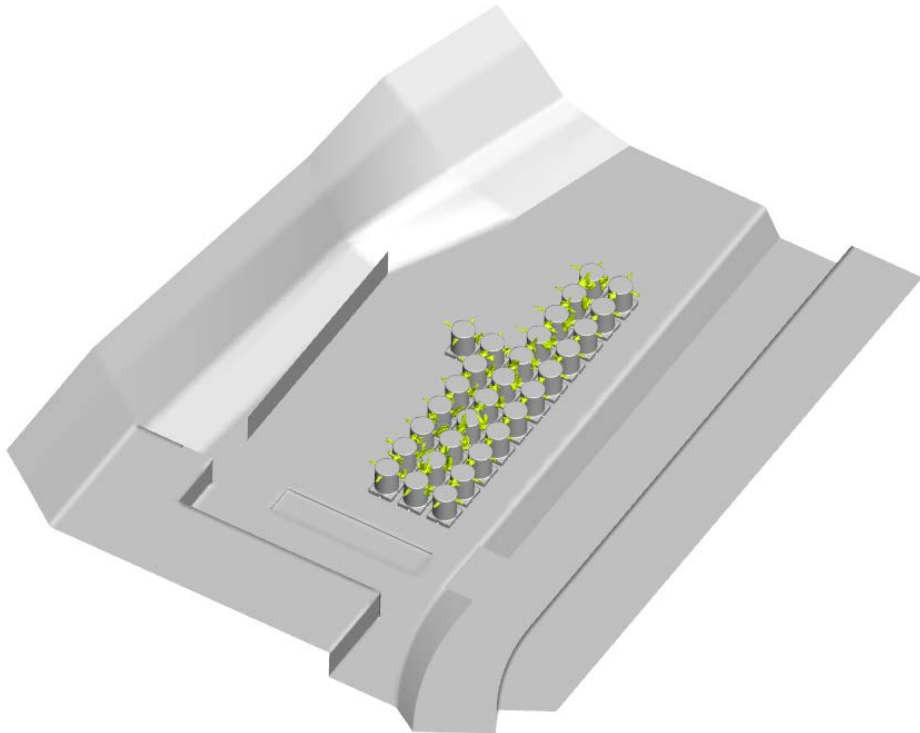


圖 17、核一廠乾貯設施熱排氣高於環境溫度10K之等溫面

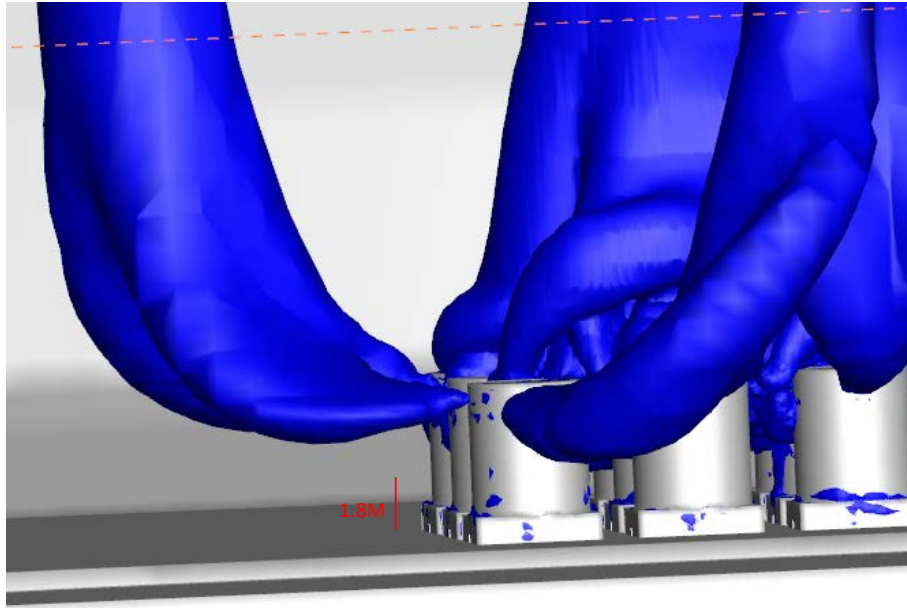


圖 18、核一廠乾貯設施出氣口熱排氣與人員高度比較圖

5.2.2 無風案例之分析結論

經過上述無風狀態下之案例分析，可以發現在此條件下整個核一廠乾貯場之流場將為自然對流效應主導。是故，所有熱氣將聚積於乾貯廠的正上方，並於向上流動之同時，引導外圍冷空氣進行補充，因此不會對植被造成熱影響。

5.3 軟風狀態之案例研析

本節除了將針對分別來自於北北東、與正東兩個方向，流速為0.3 m/s之軟風進行研析；並在考慮鄰近地形可能造成的混合效應後，特別針對出現機率極低的南風進行探討，並期望逐一由地表溫度、流場與熱排釋影響進行研析，以瞭解此風場下與純自然對流之差異。

5.3.1 北北東方軟風之影響

圖 19與圖 20為此案例下之地表溫度差與等溫面分佈，由上述二圖所展示的溫度場可以明顯的發現護箱所產生的熱排釋在與軟風所形成的混合對流後，將使尾流方向略為向下游偏移，但整體而言仍是屬於自然對流主導之流場特性；這意味著護箱熱排置所造成的熱氣在此風場條件下將沒有機會對其下游處(往乾華溪上游)造成尾流籠罩現象，並進一步形成高溫區域。

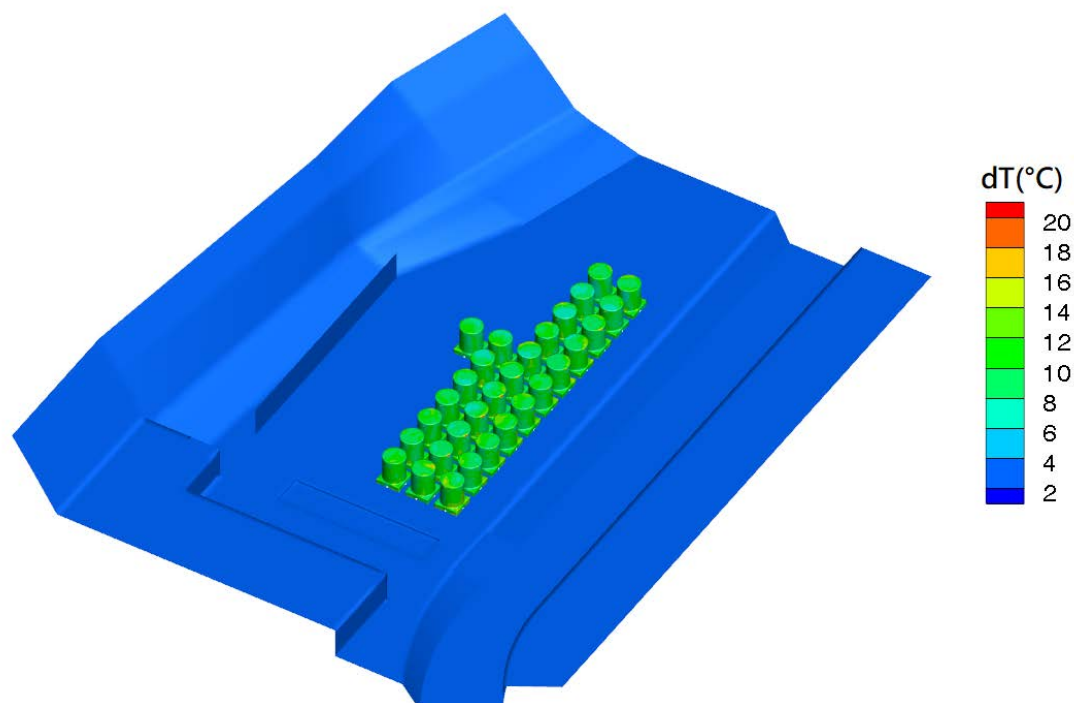


圖 19、核一廠乾貯設施於北北東方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響量

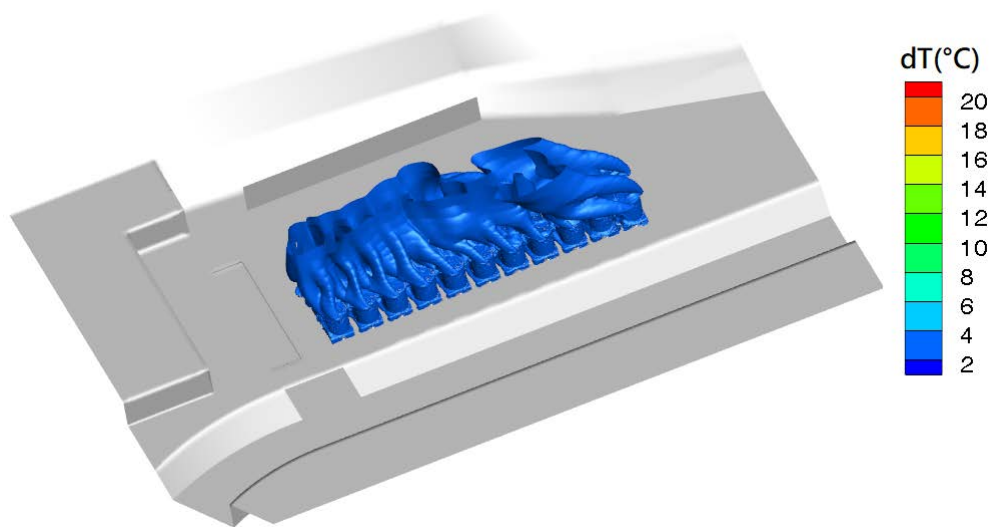


圖 20、核一廠乾貯設施於北北東方軟風狀況下之流場

5.3.2 東方軟風之影響

在此案例中，風將從乾貯場址的側邊，以垂直乾華溪部分流道之方向流入護箱之中；也因為在此風向下護箱的配置將不會出現上述案例中因為多數護箱受尾流影響之狀況。此外，因為此風量下流場仍將與自然對流較為相近，故無論是地表之受熱狀況或是整體尾流分佈皆與自然對流相去不遠(圖 21與圖 22)，亦不致使坡度較高的地表受到乾貯設施的熱排釋影響。

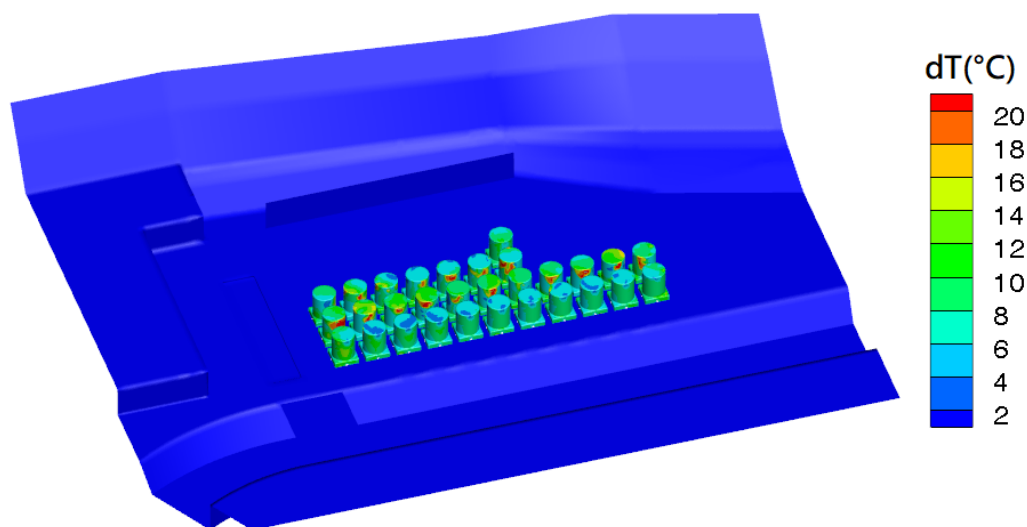


圖 21、核一廠乾貯設施於東方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

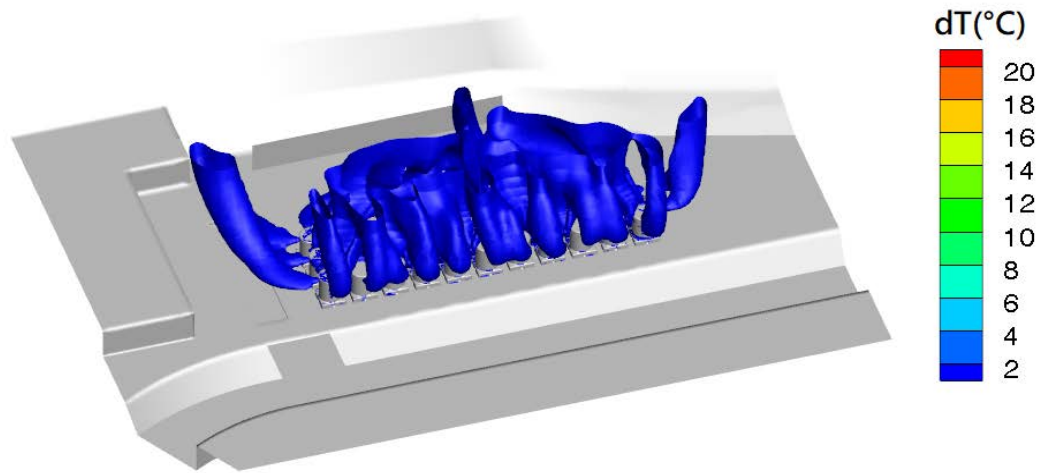


圖 22、核一廠乾貯場址受東方軟風影響時之尾流分佈

5.3.3 南方軟風之影響

相較於其它風向並未對附近植被造成影響，當核一乾貯設施出現歷年來發生機率極低的南風時，其風場將會因為位於乾華溪上游之部分土坡所存在的背向階梯而產生較大的混合效應(圖 23)，這使得該案例在較小的風量下即有較大的混合效果，並且發展至可以影響下游植被(圖 24)之狀況。然而考量此一受影響之溫度僅約 4°C ，且此類風向出現之機率極低，因此預期對於植被將不會有顯著影響。

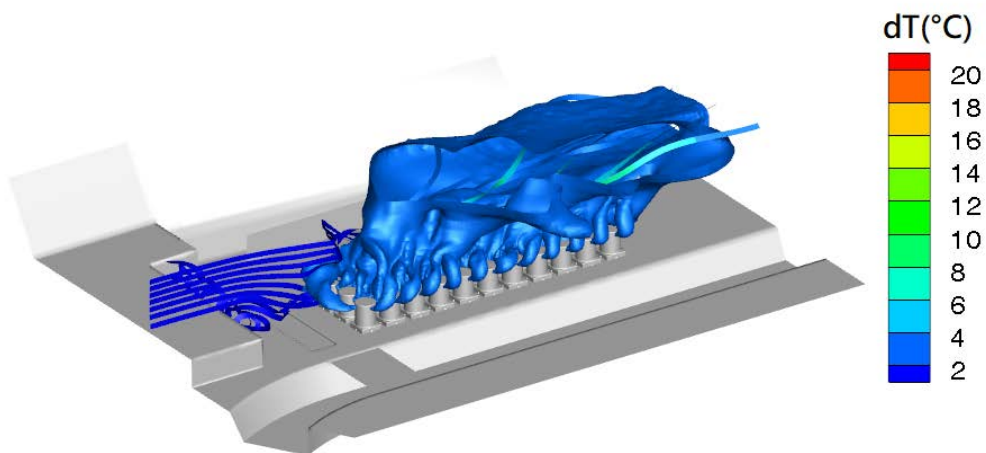


圖 23、核一廠乾貯場址受南風影響時背向階梯造成的混合效果

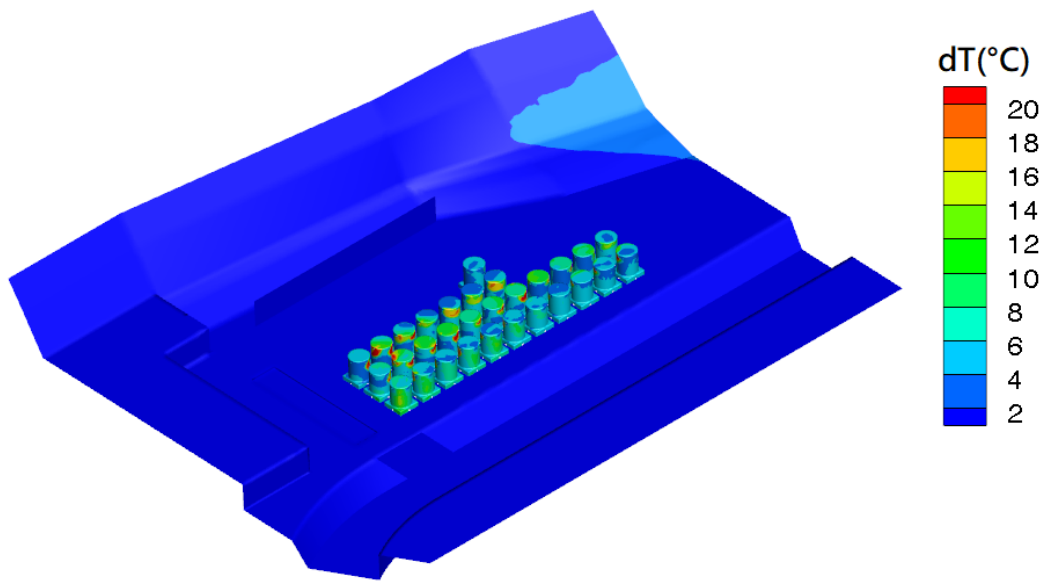


圖 24、核一廠乾貯設施於南方軟風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

5.3.4 軟風案例之分析結論

經過上述各個風向之軟風案例分析，可以發現在此條件下整個核一廠乾貯廠之流場將為除了受自然對流效應主導之外，亦可能有局部流場會因為混合對流而改變；此外，若考慮特定風向與地形之影響時，護箱所排出之熱氣有一定程度會對附近植被造成短暫的影響，惟此影響僅約 4°C 且小於日夜之常見溫差，因此可以合理視為不會對於植被造成明顯影響。

5.4 微風狀態之案例研析

本節將針對分別來自於北北東、與正東兩個方向，流速為5.4 m/s之微風進行研析；此外，也因為先前南方軟風之案例造成略明顯的植被影響，故本節中亦一併將其考慮在內。

5.4.1 北北東方微風之影響

圖 25為此案例下之地表溫度差與等溫面分佈可以明顯的發現護箱所產生的熱排釋在與微風混合後，並未明使其下游(乾華溪上游)出現受熱現象。這意味著護箱熱排置所造成的熱氣在此風場條件下除了向上移動之外，亦有一部分是因為較的風場所造成的混合效應，讓其均勻化所致。如圖 26所示，在此流場下其具有顯明溫差(2°C)之尾流長度約止於多軸油壓板車處，故沒有機會對更下游處(往乾華溪上游)造成高溫區域。

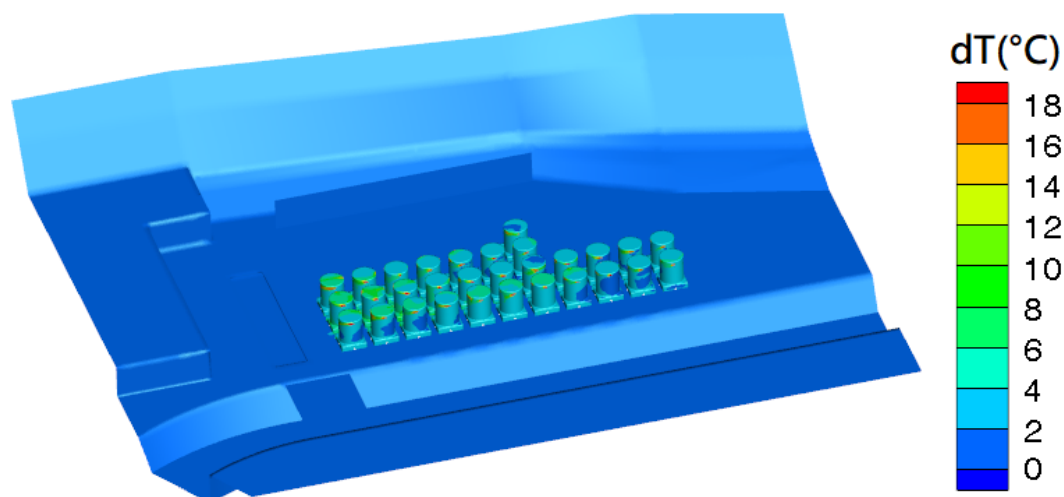


圖 25、核一廠乾貯設施於北北東方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

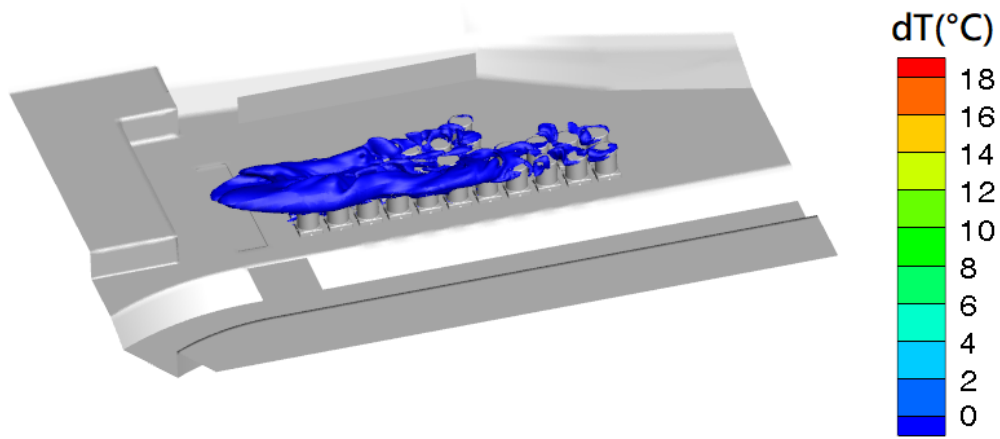


圖 26、核一廠乾貯設施於北北東方微風狀況下之流場

5.4.2 東方微風之影響

在此案例中，風將從乾貯場址的側邊，以較軟風更快的速度垂直乾華溪部分流道之方向流入護箱之中；這使得強制對流與自然對流的混合效應也較以先前的案例更強。如圖 27所示，此一增強的混合效果如先前南方軟風之效應般讓尾流擴大，並且更貼近地表。這使得位於西側的空地存在著若干受尾流影響的區域，並具有約2-4°C之溫升影響。然而受益於場址西側的混凝土牆所形成阻隔，使得該尾流往場址西側持續發展前，更進一步的被混合與擲抬。此一現象使得該混凝土牆後方的植被受尾流影響的程度減少。如圖 28所示，被標示為淡紫色的混凝土牆擲抬了尾流，使其向上移動並減少了對鄰近植被的影響範圍。

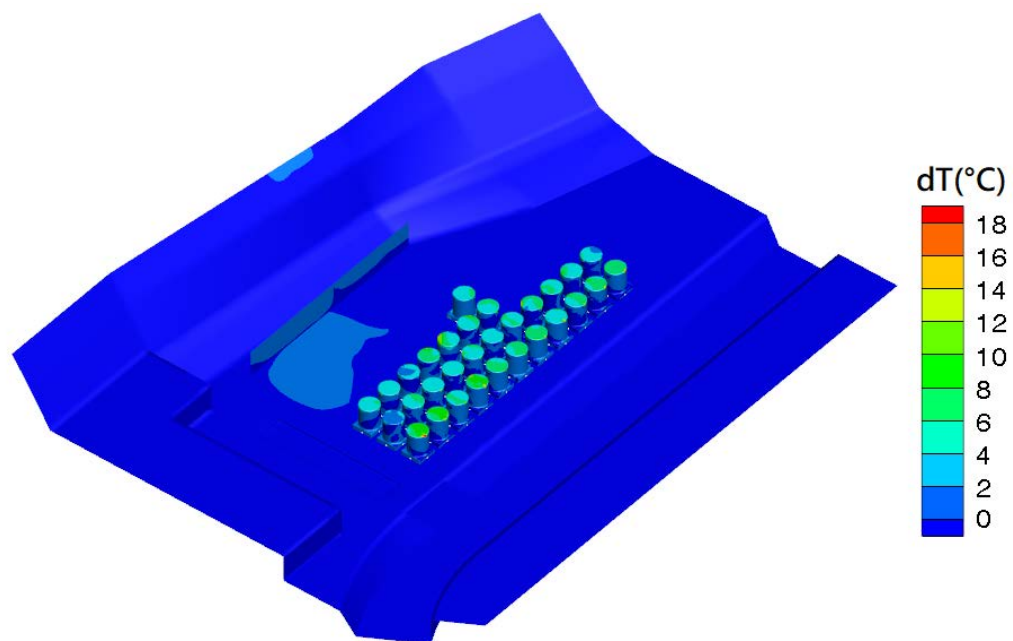


圖 27、核一廠乾貯設施於東方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

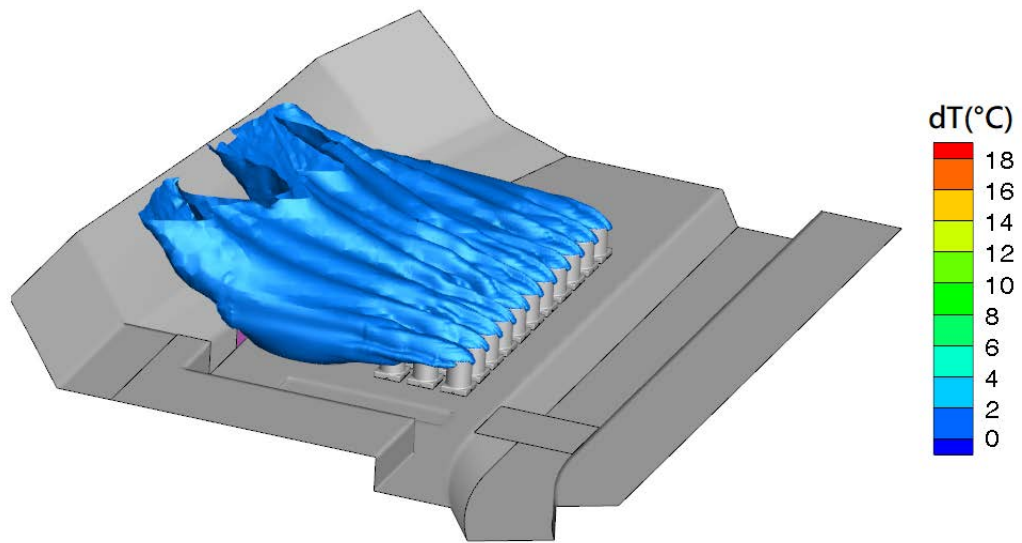


圖 28、核一廠乾貯場址受東方微風影響時之尾流分佈

5.4.3 南方微風之影響

相較於先前軟風狀態的南風所造成的擴散效應，當南風持續增強至微風狀態時，混凝土護箱所形成的阻礙也就愈大；這使得風場在經過背向階梯後，大部分的流量僅能由如圖 29所示般的，藉由護箱行列的兩側流經乾貯場。這使得原本在山坡上會因為混合效應的尾流而加熱的區域，反而受到了該分流的保護，並將熱排釋所造成的熱影響，侷限於乾華溪的下游(如圖 30所示)，而不致對鄰近坡地的植被造成影響。

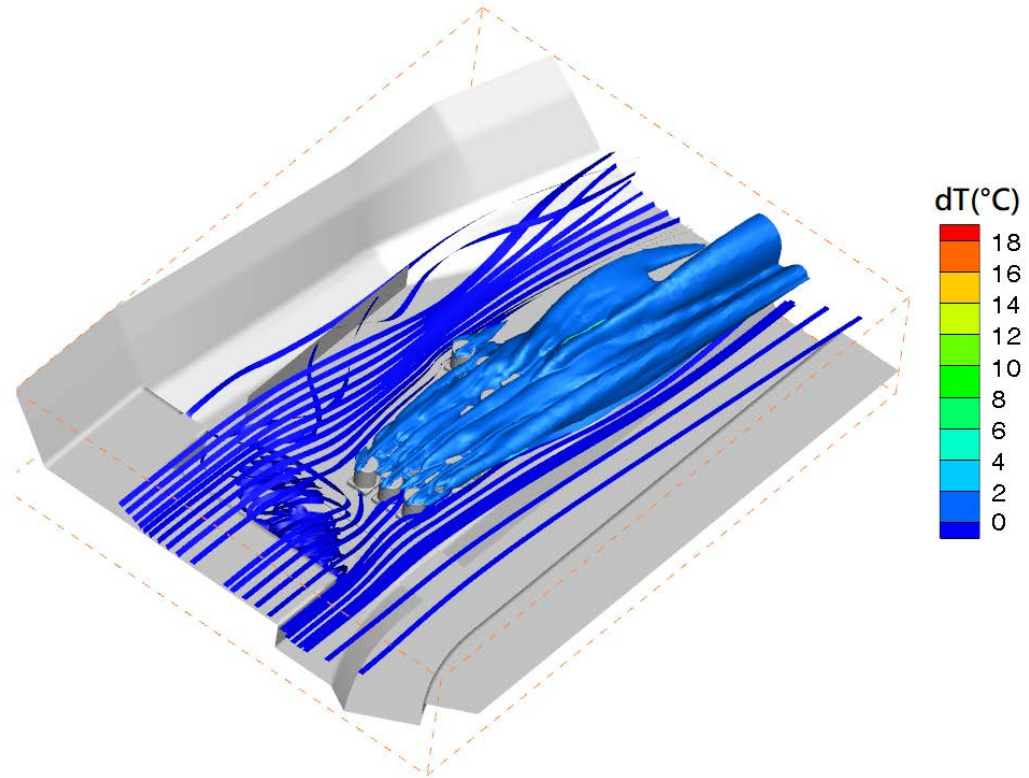


圖 29、核一廠乾貯場址受南方微風影響時，背向階梯造成的混合效果

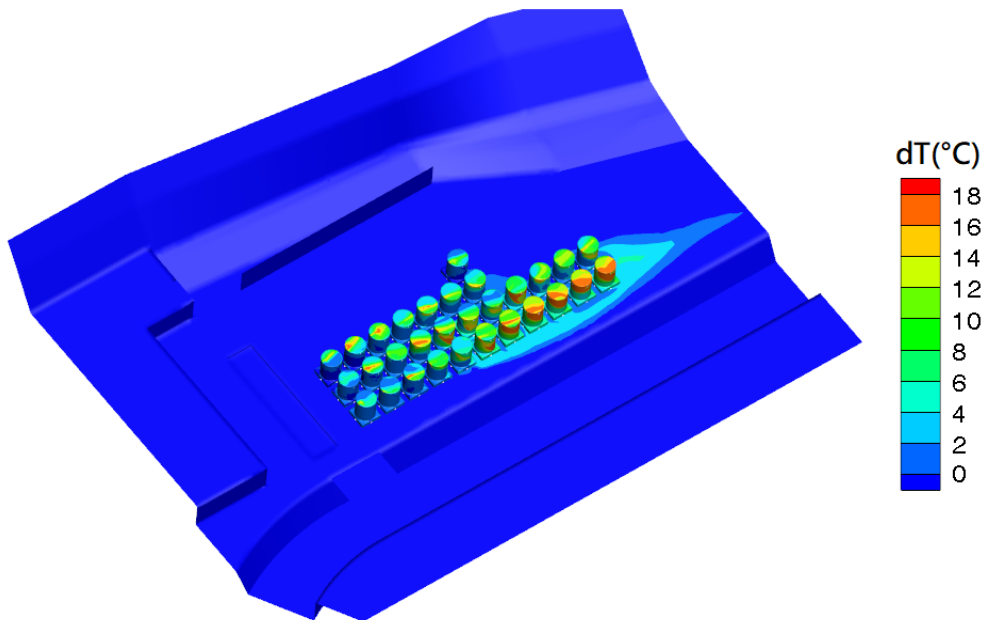


圖 30、核一廠乾貯設施於南方微風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

5.4.4 微風案例之分析結論

經過上述各個風向之微風案例分析，可以發現在此條件下整個核一廠乾貯廠之流場將為由前述案例中的自然對流效應主導轉為強制對流效應主導。為強制對流所造成的保護效果，原本出現些許熱影響的南風案例在本風場下將會把熱影響範圍侷限於場址及其下游的草坪，不致對鄰近坡地之植被造成影響。

此外，在原本因為自然對流而能有效把熱量帶離西側山坡的東風案例中，反而因為風量的增加而使該區域略受影響；但有趣的是，原本核一乾貯設施即在該處設有擋土牆；此一擋土牆有效的阻隔了熱尾流沿著山坡流動的路徑，因此在本風速條件下，乾貯設施對於鄰近植被的影響亦不會大於 2°C 。

5.5 清風狀態之案例研析

本節主要針對前述各節中所探討的風向接續探討，風速為10.7m/s之清風狀態下之影響。

5.5.1 北北東方清風之影響

圖 31為清風由北北東向乾華溪上游吹動時所造成的地表溫度差分佈；由圖面上可以明顯的發現護箱所產生的熱排釋在與受到此強制對流擾動與混合後溫度已大幅下降，故無法對附近的山坡等造成熱影響。除此之外，也由於從北北東吹入乾貯場的風，將會受到護箱行列的阻礙而不易直接流經設箱間隙中，而僅能透過如圖 32所示的流動方式，沿著乾華溪與靠近擋土牆的通道穿過。而此一沿著擋土牆通道流動的風，將會於下游處受到位於多軸油壓板車停放處的土堤而轉向，並進一步地將尾流往乾華溪推。是故在本案例中尾流動沒有機會對乾華溪上游的植被造成顯著的影響。

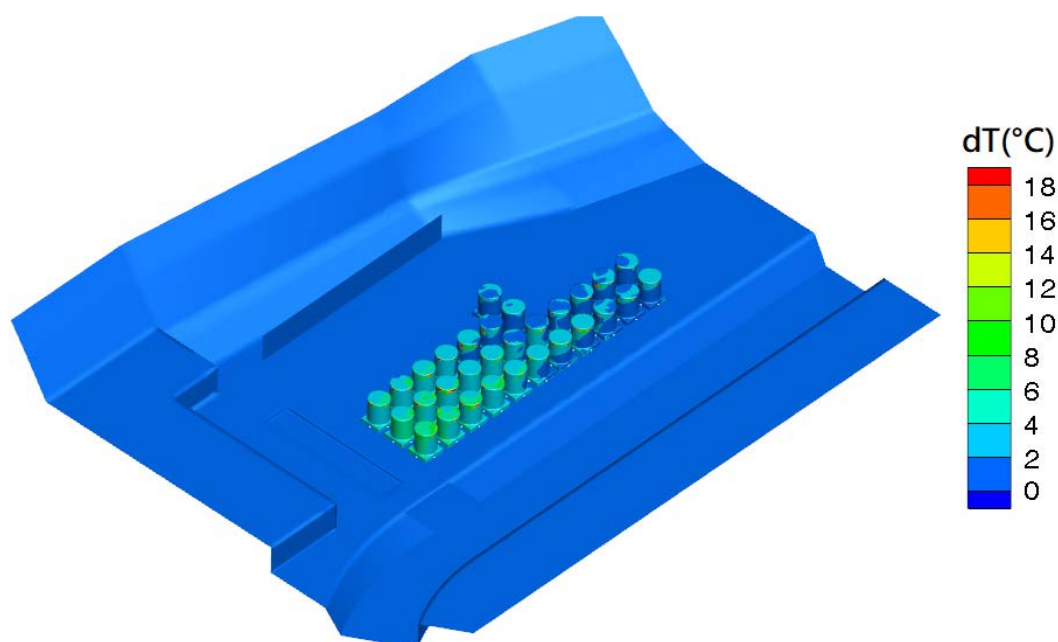


圖 31、核一廠乾貯設施於北北東方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響量

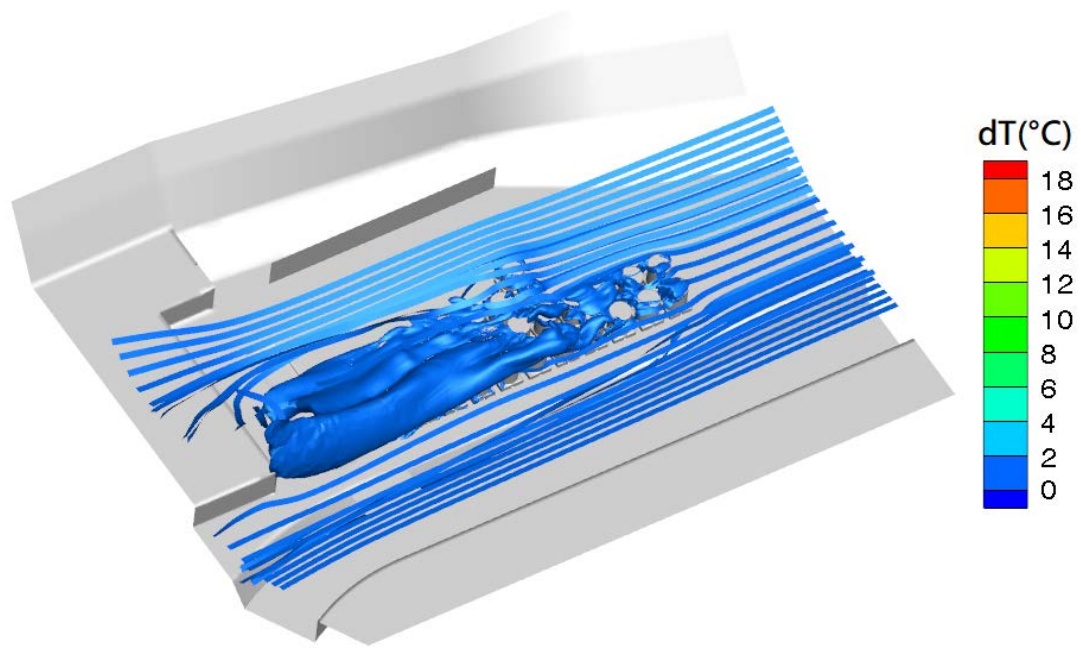


圖 32、核一廠乾貯設施於北北東方清風狀況下之流場

5.5.2 東方清風之影響

在此案例中速度高達10.7m/s的風將從乾貯場的側邊以垂直乾華溪部分流道之方向流入護箱之中；而不同於南風或北北東風向的最主要差異在於沿著這側方向的護箱數較少，這意味著風場要穿透此一護箱行列而逕行對其熱排釋氣體進行混合的難度，將較其他兩個方向的風場容易許多。如圖 27所示，此一增強的混合效果明顯地穿透護箱之間，因此護箱的垂直面上並未見到明顯因為熱排釋覆蓋所形成的高溫區域。而透過圖 28等溫面與流線，更可再次的證明於此風場條件下，整體的混度與流場分佈已然趨於純強制對流的特性。也因為其強制對流提供的混合均溫效果，更使得護箱的熱排釋未對鄰近植被造成任何影響。

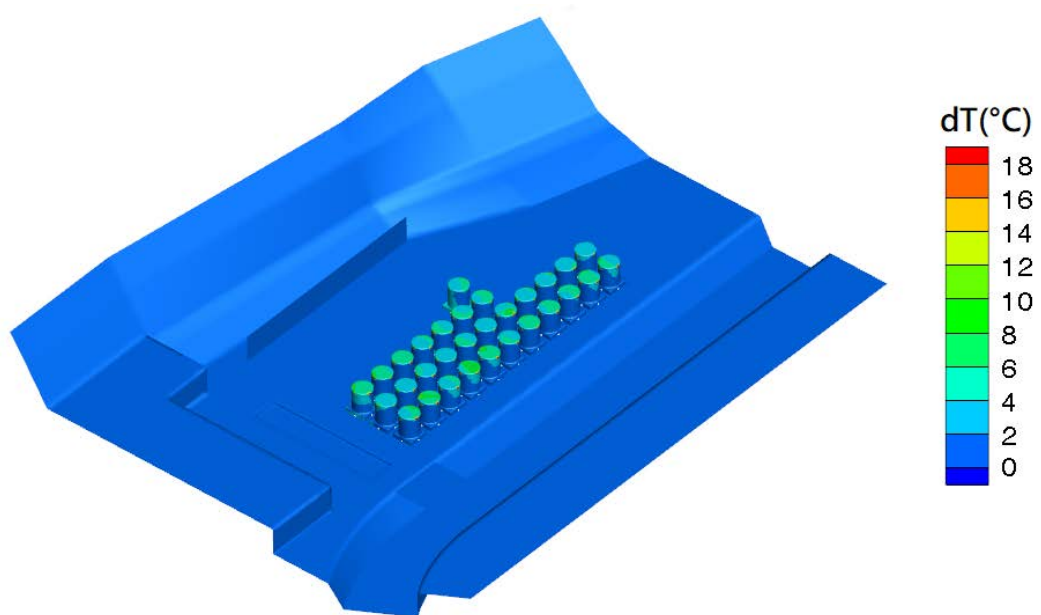


圖 33、核一廠乾貯設施於東方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

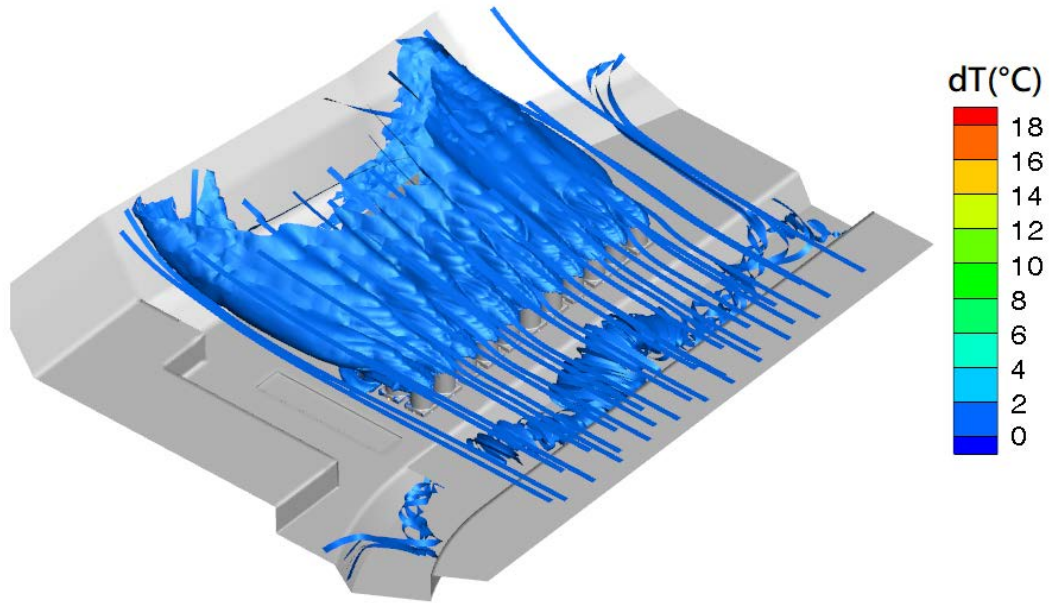


圖 34、核一廠乾貯場址受東方清風影響時之尾流分佈

5.5.3 南方清風之影響

當南風持續增強至10.7m/s(清風狀態)時，先前討論過的混凝土護箱流阻所致的分流現象亦更加明顯。也因如圖 35顯示有更多的流體經過乾貯與擋土牆間的通道，並造成如圖 36所示的地表溫度分佈。由圖中可以很明顯的看到因為此一間隙類似一個漸擴流道之外形，故而使該處的流體因為白努力定律而減速，並形成較高的壓力；這使得尾流更加偏移至乾華溪堤岸處，而不致於影響其下游之植被。

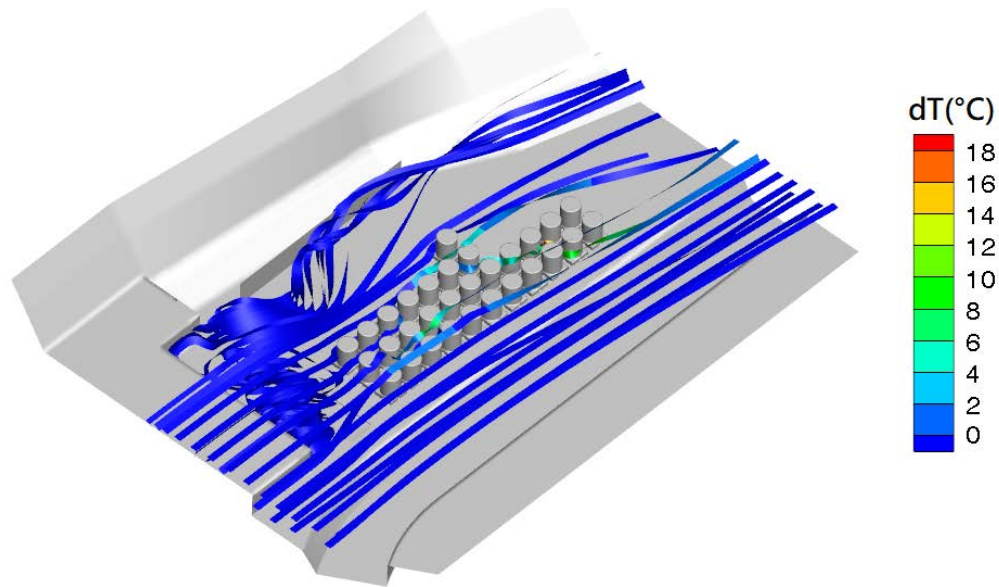


圖 35、核一廠乾貯場址受南方清風影響時，因背向階梯造成的混合效果

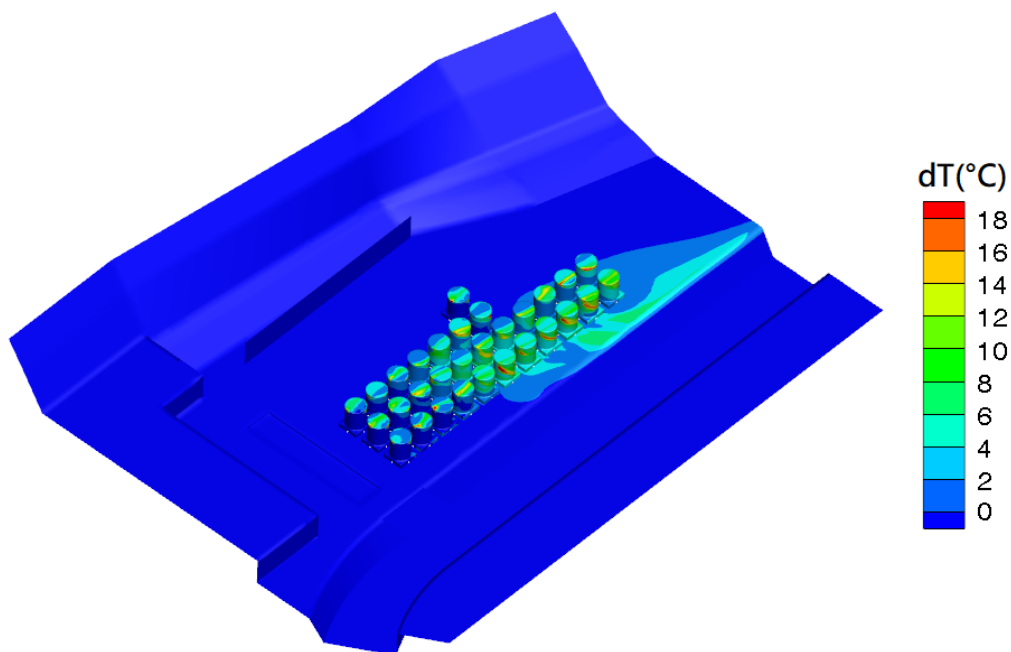


圖 36、核一廠乾貯設施於南方清風狀況下對場址周圍造成之溫度影響

5.5.4 清風案例之分析結論

經過上述各個風向之清風案例分析，可以發現在此強制對流旺盛的流場條件下，核一廠乾貯場址因為護箱熱排釋所造成的尾流，除會會被強制對流所混合稀釋而降溫之外，因為鄰近地形所造成的流力機制，亦會迫使尾流轉向，而偏離具

有植被之處，故而能減少對植被的影響。綜合以上的發現，可以確認在此流場條件下，其最大影響溫度僅約4°C且位於乾華溪之堤岸上，對於鄰近山坡之植被幾乎沒有影響。

5.6 用過核燃料貯存護箱之出氣口溫度對設施周圍環境之安全探討

為能更進一步的將以上各案例之發現加以彙整，本研究進一步結合第二章所蒐集之風花圖所示之風場比例，並在考慮風場角度之相近性後，將代表案例(NNE、E、S)方向±22.5 度之風場發生機率加以匯總而獲得如表 9 所示之資訊。由表可見，乾貯場內各護箱的熱排釋在不同風場與風速條件下將以南風及東風附近的風場對於其風場下游影響最為明顯。在南風的案例中雖然可能因為護箱行列配置之故而使尾流的溫度較高，考量其整體風場發生機率極低，且又有大部分作用於已整地之草皮或乾華溪混凝土堤岸，故可判定其對於鄰近地表之植被影響不大且長時間作用之機率亦極為有限。反之，若在東風案例中，則僅有微風狀況下可能因為自然對流與風場所致之混合對流可能造成人造地表與局部植被受到約 2°C 之影響，其影響亦屬有限。除此之外，在出現機率最大的北北東方向之來風，或是完全無風狀態之條件下，並未見到任何地表植被受風場及熱排釋之綜和影響。

表 9 核一廠乾貯於各式風場下鄰近受影響區域資訊匯整

	無風	軟風			微風			清風		
		~NNE	~E	~S	~NNE	~E	~S	~NNE	~E	~S
影響位置	N/A	N/A	N/A	下游邊坡	N/A	場址內側	乾華溪下游/左岸	N/A	N/A	乾華溪下游/左岸
影響區類型	N/A	N/A	N/A	灌木植被	N/A	人造地表	草皮/堤岸	N/A	N/A	草皮/堤岸
影響溫度(°C)	N/A	N/A	N/A	2-4	N/A	~2	4-6	N/A	N/A	4-6
風場出現機率	1.1%	14%	6%	~3%	16%	6%	<1%	~23%	8%	<1%

5.7 民眾說明資訊

用過核子燃料在裝載於密封鋼筒加以密封，並貯存於混凝土護箱後，其輻射劑量已降低至不會危害人體之程度，且其輻射劑量更將隨著距離的拉長而迅速下降。於此狀況下，用過核子燃料因為衰變所釋放出的熱量實則為一種單純能量(熱量)的排釋，與利用電熱器、電暖爐、冷氣機熱交換機所釋出之熱源並無不同，且其產熱方式亦非燃燒，故在熱排釋的同時並不會產生燃燒所出現之氮氧化物、硫化物及二氧化碳等物質。為能更進一步說明乾貯護箱所釋放熱的大小，本節遂將核一乾貯場之護箱熱排釋量與生活中常見產熱大小進行比對。

如表 10 所示，核一乾貯於最初申照之時係以 14KW 作為申照熱負載，其目的在於求取較為保守之設計結果，以增加國人對其安全的信賴。實際上，其裝載允諾為不超過 7KW，實際規劃所得之護箱熱負載則可約略平均為 5KW 左右。一般而言，國人對於 5KW 似乎認定非常大的發熱源，但實際上，以一個體積約為 4.5m×4.5m×5.0m 的龐然大物而言，其發熱量僅大約等於廚房用的瓦斯爐，更比快炒店為了追求火力所使用的快速瓦斯爐所具有的火力小上一半。換句話說若假定乾貯場址為一同面積之露營營地，則每一個單位帳篷及所含附屬作業空間所佔範圍也約略與護箱所佔面積相符相去不遠；則在乾貯護箱所排釋之熱，亦與兩個防風瓦斯爐進行野炊時之熱量差不多。

若假設該場址為一大型餐廳，並配有 10 個快速爐的廚房與 100 桌的宴客空間，並假設每桌佔地約為 3.0m×3.0m，則綜合廚房、宴客空間、茶水間等瓦斯爐之產熱、交通車怠速之廢熱等，其所造成的熱源恐亦超過乾貯場之熱排釋許多。

而綜合生活中常見案例之對比，吾人應可明確得知，乾貯設施於單位土地面積所造成的熱排釋並未明顯大於文明社會中常見活動，其影響在進一步納入前節對風場之出現機率、風向對於鄰近植被影響後，可以證實乾式貯存設施出氣口所具有的高溫，在經過空曠地形的擴散與風場的混和已不會對周圍植被造成影響，可請國人放心。

表 10 核一廠乾貯設施發熱量與生活常見案例之比較

	核一乾貯設施		生活常見案例		
	申照值	實際值	防風瓦斯爐	家用瓦斯爐	營業用瓦斯爐
發熱功率 (KW)	14	<7	4.1	6	10

六、結論

本計畫已依原計畫書所載之時程規劃完成期末報告之各項研究項目，其中包括了核一廠乾貯設施之護箱與場址設施設計資訊、周圍地表資訊、以及氣象資料之蒐集與研析，並據以完成了一套可以進行各類風場分析之三維分析模式。

透過了合適的規劃，本研究所建立的計算模型除考慮核一廠乾貯場內的30個護箱之外，亦將其所規劃之貯存場址、內外圍籬與鄰近之地表加以描繪，而對於目前尚未施工之局部地形，亦透過保守性之考量在此模型中加以涵蓋。此外，透過合適的網格配置，本研究順利地利用將體積達20萬立方公尺的計算域納入分析，並在有限的網格數量下同時考慮了局部流場的精細度與網格品質。

透過上述所建立的分析模式，本研究更針對北北東、東以及南方所來的風向，於軟風(0.3m/s)、微風(5.4m/s)以及清風(10.7m/s)的風場條件下進行探討，其結果顯示，護箱出口約60°C的溫度在離開出口後就會被空氣混和而大幅降溫，只有在南風可能受護箱排列與附近地形之綜合效應而對乾貯場址在乾華溪下游的草地及混凝土堤岸造成大約2°C與4°C左右的影響外，皆不會對鄰地原始植被造成顯著影響。

最後本研究在綜合了風場發生機率、熱影響效應之後，進一步地對乾貯設施與生活常見案例進行比對，確認核一乾貯設施之實際平均熱負載(5kW)與家用瓦斯爐相距不遠，可充份證實乾貯設施的熱排釋並不會大於日常文明生活常見案例，亦不會對環境造成顯著影響。

參考文獻

1. 台灣電力公司，“核一乾貯系統安全分析報告”，民國97年11月。
2. ANSYS Inc., FLUENT 12.0 User's Manuals, 2009.
3. 台電公司，“106緊急應變計畫之民眾防護措施分析規劃與檢討修正報告”，民國106年12月。
4. 曾永信，“乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬”，民國105年12月。
5. F. R. Menter. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". AIAA Journal. 32(8). 1598–1605. August 1994.
6. U.S.NRC, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities," NUREG-2215, 2018.