

「龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論
(大破口冷卻水流失事故)」
安全評估報告

行政院原子能委員會核能管制處
中華民國 105 年 2 月 1 日

目 錄

摘要	i
第一章 簡介	1
第二章 輻射劑量分析申照模式	3
第三章 分析結果與討論	13
第四章 總結	17

摘 要

台電公司暫態熱水流TITRAM(TPC/INER Transient Analysis Methods)第三階段工作，計畫新增發展核能電廠輻射劑量分析技術，針對核能電廠設計基準事故或嚴重事故分析，根據現行執照基準的方法，建立廠外禁制區及低密度人口區邊界與主控制室內的輻射劑量分析技術，作為提供終期安全分析報告(FSAR) 相關分析和申請案運用分析的工具。台電公司於103年8月6日以電核安字第1038066358號函，將編號為TITRAM/LM-RAD-MHD-01「龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論(大破口冷卻水流失事故)」之專題報告送原子能委員會(以下簡稱原能會)審查。(註：台電公司原已規劃執行核能一、二、三廠及龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論大破口冷卻水流失事故之分析並提出專題報告送審，因龍門電廠部分最早完成，故先提出)。

台電公司所提送審報告共四章，第一章為前言；第二章介紹龍門電廠冷卻水流失事故(Loss-of-Coolant Accident, LOCA)輻射劑量分析方法論，包含劑量分析的基準、一次圍阻體洩漏、主蒸汽隔離閥 (Main Steam line Isolation Valve, MSIV)洩漏與放射性碘物質再懸浮外釋的核種傳輸及移除的模式、控制室通風系統運作模式及禁制區邊界 (Exclusion Area Boundary, 簡稱EAB)/低密度人口區 (Low Population Zone, 簡稱LPZ)外圍邊界與控制室人員於事故期間接受輻射劑量之計算模式；第三章針對EAB/LPZ外圍邊界及控制室人員的輻射劑量分析結果進行討論；第四章為其結論。

為達此安全分析報告審查任務，原能會成立專案審查小組，小組成員包括學者、專家及原能會輻射防護處與核能管制處各專案小組。經4次審查會議，共提出48項審查意見。本會另要求台電公司就本方法論與龍門電廠FSAR計算方法假設條件完全相同時，所得計算結果與龍門電廠FSAR數值之比較及說明，經台電公司陳送本方法論與龍門核能發電廠FSAR計算方法比較之補充報告，審查小組再提出4項補充審查意見。根據台電公司所提供之安全分析報告、補充報告與各次回覆意見，撰寫此安全評估報告。本報告敘述原能會對台電公司「龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論大破口冷卻水流失事故」之審查結果，內

容分為簡介、輻射劑量分析申照模式、分析結果與討論及總結等四章，除總結外，其餘各章均包含概述、審查發現及審查結論三部份。

經就台電公司所提送審報告內容及對審查意見之答覆內容進行審查，審查結果認為可以接受，另有後續管制要求事項共計 2 項，詳見本報告第四章總結。

第一章 簡介

一、概述

所提送審報告係針對龍門電廠的大破口冷卻水流失事故(Loss-of-Coolant Accident, 以下簡稱 LOCA)執行輻射劑量分析工作, 報告使用美國核能管制委員會許可之 RADTRAD v3.03 程式, 以 TID-14844 報告中所定義之輻射源項及相關法規指引為基礎, 使用美國聯邦指引報告(Federal Guidance Report, FGR) 11 及 12 的劑量轉換因子 (Dose Conversion Factor, DCF), 考量電廠的設計特性、可能洩漏的途徑與現行執照基準 (Current Licensing Basis), 建立評估 EAB/ LPZ 與控制室包封區域內人員於事故發生時期接受輻射劑量的方法, 並確認龍門電廠目前的安全設計與運轉技術規範 (Technical Specification) 提供足夠的輻射防護能力, 確保發生大破口冷卻水流失事故時, 人員接受之輻射劑量在法規限值內。

所提送審報告依內容區分為四章, 第一章為前言, 第二章介紹龍門電廠 LOCA 輻射劑量分析方法論, 包含劑量分析的基準、一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏與放射性碘物質再懸浮外釋的核種傳輸及移除的模式、控制室通風系統運作模式及 EAB/LPZ 外圍邊界與控制室人員於事故期間接受輻射劑量之計算模式。第三章針對 EAB/LPZ 外圍邊界及控制室人員的輻射劑量分析結果進行討論, 第四章為結論。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A-I-0-001, 請台電公司補充說明美國核能管制委員會法規指引(Regulatory Guide)1.96 之參引問題, 並請將 RADTRAD 納入參考文獻資料。台電公司提出澄清說明法規指引 1.96 相關內容已反映於法規指引 1.195 之中, 並提出報告修訂, 將 RADTRAD 納入參考文獻資料中, 經審查答覆內容可以接受。

此外, 審查小組提出 RAI 編號 A-I-0-002/A-I-0-003/A-I-0-004/A-I-5-001/A-F-1-001, 分別就送審報告目錄部份所採用「附表目錄」、「附圖目錄」及「施

行細則」用詞，與送審報告本文中使用的表圖之用詞方式不一致、第七條有關劑量專有名詞之用詞、報告中有關美國聯邦法規篇章用詞及參考文獻所載核子事故緊急應變法施行細則之年份等，要求提出澄清修訂。台電公司已逐項提出說明並修訂送審報告內容，經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

送審報告本章主要就執行龍門電廠大破口冷卻水流失事故分析之程序與相關參數所引用之規範文獻，以及送審報告章節內容作一介紹概述。經就台電公司送審報告本章內容及台電公司對審查小組提問之答覆內容與送審報告修訂內容進行審查，審查結果可以接受。

第二章 輻射劑量分析申照模式

一、概述

龍門電廠 LOCA 輻射劑量分析方法論的基準包含爐心分裂產物盤存量的估算、輻射源項估算、放射性碘核種的組成、放射性核種除汙能力及放射性衰變等，其符合所參照之美國核能管制委員會法規指引 1.3 及 1.195 的管制立場及評估要求，並參照美國核能管制委員會標準審查規範，將一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏以及緊急爐心冷卻系統(Emergency Core Cooling System，簡稱 ECCS)之閥泵與管路洩漏等三個可能洩漏源納入劑量分析考量。另 BWROG 報告指出，如果使用該報告所述方法考慮主蒸汽管路、主蒸汽洩水管路對於放射性物質的滯留與沉積移除效用，則須考慮沉積於管壁的碘核種可能因為管內流體流動，使其再度進入管路空間，成為懸浮物質，且應視其為有機碘，不考慮管路對放射性物質的滯留效用。由於執行 MSIV 洩漏分析時有考量核種於 MSIV 下游管路中的滯留與沉積移除效應，因此，亦將放射性碘物質因再懸浮而外釋到大氣環境的影響納入分析。而相關之評估結果需符合禁制區與低密度人口區邊界人員之劑量限值，亦須符合控制室包封區域人員之劑量限值。

放射性核種經一次圍阻體洩漏及其下游路徑外釋到大氣環境的示意圖如送審報告圖 2-2，共有 5 個隔室空間(Compartment)及 5 個路徑(Pathway)，當反應器廠房恢復負壓狀態前，保守考量放射性核種從反應器廠房大型機具進口以地表排放方式進入大氣環境，其後，考量放射性核種經過備用氣體過濾系統(Standby Gas Treatment System，SGTS)，從聯合廠房煙囪(Combined Plant Services Stack，CPSS)以高空排放方式進入大氣環境，估算 EAB/LPZ 外圍邊界及控制室人員的輻射劑量。

放射性核種經 MSIV 洩漏及其下游路徑外釋到大氣環境的示意圖如送審報告圖 2-3，共有 7 個隔室空間及 6 個路徑，保守考量放射性核種從汽機廠房卡車出入口以地表排放方式進入大氣環境，估算 EAB/LPZ 外圍邊界的輻射劑量。針對控制室人員的輻射劑量分析，則保守考量放射性核種從汽機廠房排氣煙囪以

地表排放方式進入大氣環境，並從控制室緊急取氣口進入控制室包封內。

沉積於 MSIV 下游管路之放射性碘核種因再懸浮而外釋到大氣環境的示意圖如送審報告圖 2-4，共有 5 個隔室空間及 4 個路徑，保守考量放射性核種從汽機廠房卡車出入口以地表排放方式進入大氣環境，估算 EAB/LPZ 外圍邊界的輻射劑量。針對控制室人員的輻射劑量分析，則保守考量放射性核種從汽機廠房排氣煙囪以地表排放方式進入大氣環境，並從控制室緊急取氣口進入控制室包封內。

於評估廠外人員接受之輻射劑量時，需先評估人員所在位置之大氣擴散因子、參照法規指引 1.3 中規範於意外狀況下不同時段之人員呼吸率，以及聯邦指引報告 FGR-11 及 FGR-12 報告中之劑量轉換因子，再以 RADTRAD 程式建立分析模型，進行人員劑量之分析。

控制室通風系統運作的示意圖如送審報告圖 2-5，該模型考量大氣環境中放射性物質經由外界取氣系統經 CRHA 系統過濾及未經過濾之漏入 (in-leakage) 方式進入控制室包封區域，以及內部空氣經再循環過濾系統過濾控制室包封區域內的放射性碘物質，同時考慮內部的放射性物質再外釋到大氣環境的可能。

於評估控制室人員接受之輻射劑量分析時，需先評估人員所在位置之大氣擴散因子、參照法規指引 1.3 中於意外狀況下不同時段之人員呼吸率，以 RADTRAD 程式建立控制室運作模式，依據標準審查規範 6.4 節中之控制室人員之佔駐因子(Occupancy Factor)，以及 FGR-11 及 FGR-12 報告中之劑量轉換因子，再進行人員劑量之分析。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-001，請台電公司說明送審報告所提方法與 FSAR 計算方法相異之處及其意義與依據，台電公司針對送審報告與 FSAR 計算方法六項內容相異處提出說明，並將說明納入送審報告中。針對台電公司前述說明，審查小組再請台電公司補充說明使用 PAVAN 程式計算大氣擴散係數 χ/Q

時，並未如同 FSAR 之計算有乘上安全係數 1.5 之原因。台電公司提出澄清說明 FSAR 第 15.6.5 節中，因外釋高度與氣象儀器之間的高度差可能存在的未定因素，故將 PAVAN 程式計算之事故期間各時段的大氣擴散因子乘上 1.5 的修正因子，並進而說明 PAVAN 程式之 ADJWND 副程式本身已具有考慮高度落差之修正功能，故認為修正因子 1.5 係屬重複。針對台電公司之說明，審查小組再請台電公司澄清說明 ADJWND 副程式是處理氣象儀與外釋點高度不同之風速理論校正，係不同穩定度之函數而並非固定之校正值，與 GE 公司在 FSAR 內之修正因子 1.5 並無一定之關係。台電公司提出說明 ADJWND 副程式對不同高度風速校正之功能，並說明未來於各廠評估應用時，應視實際之排放情形決定其修正因子。針對台電公司之答覆，經查龍門核電廠禁制區及低密度人口區劑量評估報告之附件二，FSAR 將 PAVAN 計算的大氣擴散係數乘上安全係數 1.5，乃是考量 PAVAN 副程式所修正的風速得到之 χ/Q 會不保守，並非重覆考量氣象量測裝置與實際外釋點兩者間的高度差，因此再請台電公司澄清說明。台電公司提出澄清，說明目前龍門電廠 FSAR 用於計算 EAB/LPZ 人員於事故期間接受劑量的大氣擴散因子時(龍門核電廠禁制區及低密度人口區劑量評估報告之附件二)，針對放射性物質高空排放，考量氣象量測裝置與實際外釋點兩者間的高度差，以儀器裝置高度等同於外釋高度之假設的條件(沒有使用 PAVAN 程式 ADJWND 副程式之風速修正功能)下獲得大氣擴散因子計算結果高於考慮風速修正結果的現象，因此決定將 PAVAN 於事故期間各時段的大氣擴散因子計算結果乘以一個修正因子 1.5，做為輻射劑量分析使用。此作法係考量氣象量測裝置與實際外釋點兩者間的高度差並經由 ADJWND 副程式修正風速後獲得大氣擴散係數計算結果，再根據上述方法乘上修正因子 1.5。未來應用本方法論於國內核能電廠時，針對放射性物質高空排放的情形，則必須考量各廠氣象儀器裝設位置與放射性物質實際外釋點的高度，輸入 PAVAN 程式。另外，針對 ADJWND 副程式本身存在的或其他因素造成的不確定性，未來應用本方法論時，可由當時負責計算事故期間各時段大氣擴散因子的專家或公司(如 GE)，根據各廠的設計數據及大氣資料等，決定其修正因子。台電公司並提出報告修訂，經審查其

答覆內容可以接受。台電公司所承諾未來方法論應用時須考量個廠特性條件部分，則納入後續管制要求事項。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-002，請台電公司說明劑量相關分析模型相關參數假設數值之採用依據，台電公司說明是依據法規指引 1.3 中之規定，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-003，請台電公司澄清龍門電廠圍阻體之型式，並說明採用除汙因子之依據。台電公司答覆說明依據標準審查計畫中對 Mark-I、Mark-II 或 Mark-III 圍阻體除汙因子之規定，並將前述說明納入送審報告，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-004/A-I-2-008，請台電公司補充說明假設燃料棒於事故發生時全部損壞，將會有爐心分裂產物盤存量中的 25%放射性碘核種進入一次圍阻體內的理由或依據。台電公司答覆說明根據法規指引 1.195 之法規立場 3.2，沸水式電廠 LOCA 輻射劑量分析工作應假設事故發生時，50%的碘核種爐心盤存量立即進入一次圍阻體，並可假設其中的 50%立即沉積在一次圍阻體表面，因此可外釋到大氣環境的碘核種輻射源項為碘核種爐心盤存量的 25%，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-005，請台電公司補充說明為何假設抑壓池對洩出蒸汽的整體除汙因子為 5。台電公司答覆說明根據標準審查計畫 6.5.5 內容，Mark-I 圍阻體設計之抑壓池對於通過汽體的除汙因子不得高於 5；Mark-II 及 Mark-III 圍阻體設計之通過汽體的除汙因子不得高於 10。因龍門電廠為 ABWR 圍阻體，所以本方法論單純假設等同 Mark-I 圍阻體，假設整體除汙因子為 5，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-006，請台電公司澄清本方法論是否有依法規指引 1.195 第 2.5 節要求放射性物質從外釋點移動至 EAB 或 LPZ 外圍邊界的過程不得考慮放射性衰變效應，台電公司說明本方法論有考量上述保守度，並提出報告修訂，將此補充說明納入報告中，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-007，有關送審報告中僅說明本方法論假設抑

壓池對洩出蒸汽的整體除汙因子為 5，但未明確說明微粒碘、元素碘、有機碘之除汙因子部分提出補充說明。經台電公司答覆說明輻射劑量分析模型中，已分別假設微粒碘、元素碘、有機碘之除汙因子為 5、5、1，並將補充說明納入送審報告中，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-009/A-I-2-028，針對送審報告中計算 EAB 之全身劑量值時是使用有效劑量轉換因子，與核管法施行細則中規範之全身劑量不同，請台電公司澄清二者之關係。台電公司說明參照法規指引 1.195 之法規立場，全身劑量計算時需使用 FGR-12 中之有效劑量轉換因子，並提出送審報告修訂，將此補充說明以及統一使用劑量之國際制單位西弗或毫西弗納入送審報告中，經審查可以接受。另依據前述台電公司答覆內容，審查小組提出依據龍門核電廠禁制區及低密度人口區劑量評估報告(99 年 11 月)，I-135 之 DCF 值含其子核種 Xe-135m，故其值較 FGR 12 為大，請台電公司補充說明是否納入考量。台電公司答覆說明，送審報告中所使用之 I-135 全身劑量轉換因子與龍門核電廠禁制區及低密度人口區劑量評估報告定稿版 (99 年 11 月)相同，皆考量 Xe-135m，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-010，請說明送審報告 2.3.1 節「體積洩漏百分比為 0.5%/day」之參數來源，台電公司說明數據來源為 FSAR 表 15.6-8，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-011/A-I-2-017，請台電公司說明送審報告第 2.3.1 節體積洩漏因壓力、溫度變化而改變之相關公式、分析數據及其推導過程。台電公司提出 GE 分析報告，說明分析過程使用 Darcy 公式及理想氣體定律進行體積流率修正，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-012，請台電公司說明 RADTRAD 程式針對一次圍阻體洩漏 6 項模式中參數之採用依據，台電公司補充說明各參數數值之來源及依據，並將補充說明納入送審報告中，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-013，請台電公司澄清報告第 2.3.1 節 第 6 頁中使用 RADTRAD 程式模型示意圖之正確性。台電公司答覆說明依龍門電廠

31113-1T22-M2001 及 31113-1T22-M2002 圖面，SGTS 之 SDD 及龍門電廠之安全設計 (FSAR 第 6.2.5.2、6.5 節及表 5.2-6 表 5.2-7)，模型示意圖考慮在 LOCA 下 ACS 處於隔離不運作狀態，一次圍阻體空間並不會經過 ACS 相關管路及閥與 SGTS 連通，原示意圖正確，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-014，要求台電公司說明送審報告中所定義之反應爐內部空間為何。台電公司於答覆中說明，依據法規指引 1.195 的管制立場，最大可考量滯留與稀釋的反應器內部空間體積為實際體積的 50%，因此送審報告中保守地假設均勻混合空間為實際體積的 10%，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-015，請台電公司說明 RADTRAD 程式針對主蒸汽隔離閥洩漏 7 項模式中參數採用之依據。台電公司答覆說明各參數數值之來源及依據，並將答覆說明納入送審報告中，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-018，請就報告 2.3.2 節第 5 項中所述「有效空間體積為 83,000 ft³，即實際空間體積的 20%，並考慮放射性元素碘及懸浮微粒碘的沉積效應為 99.5%。」之參數來源。台電公司說明數據來源為 FSAR 表 15.6-8，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-019，請說明送審報告 2.3.2 節第 7 項中「假設主蒸汽管路與洩水管路的有效空間體積分別為 188.9 ft³ 及 13.3 ft³，皆為實際空間體積 50%」之參數來源。台電公司說明 50% 為 GE 計算書使用之數據，主蒸汽管路與洩水管路的實際空間體積可從 FSAR 表 15.6-8 得到，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-020，本方法論使用龍門電廠現行執照基準，考量放射性碘物質於主蒸汽管路與洩水管路內的滯留與沉積效應，微粒碘與元素碘之除汙因子隨體積流率而有變化，請台電公司說明其理論基礎和關係式，並解釋為何元素碘之除汙因子會比微粒碘高。台電公司答覆說明龍門電廠係採用 MSIV Leakage Iodine Transport Analysis 之模型。由元素碘及懸浮微粒碘沉積速度 (cm/sec) 的計算式比較可知，相同溫度的條件下，懸浮微粒碘的沉積

速度較元素碘慢，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-021，送審報告第 2.3.1 節第 2 點一次圍阻體洩漏率修正為 0.404%/day、第 2.3.2 節第 1 點四個 MSIV 整體洩漏率修正為 0.636%/day、第 2.3.2 節第 2 點四個 MSIV 整體洩漏率於 24 小時後降低至 0.513%/day。有關上述修正結果，請台電公司詳細描述其修正計算流程與所使用參數之依據。台電公司答覆說明本方法論使用 Darcy 公式及理想氣體定律推導出體積流率與圍阻體壓力及溫度之關係式，並依據圍阻體於 LOCA 時之壓力-溫度分析數據，帶入關係式即得到事故後 24 小時之體積流率為事故開始時的比率，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-022，請台電公司針對主蒸汽管及洩水管中放射性碘除污因子估算方法，提出補充說明。台電公司答覆說明相關計算方法乃根據法規指引 1.195 附錄 A 之法規立場 5.5，使用美國核能管制委員會認可之方法（記載於 BWROG 報告），依據圍阻體於 LOCA 期間的壓力-溫度分析結果，計算主蒸汽管路/洩水管路內的蒸汽流率、溫度、壓力，再依據管路設計數據、管路溫度計算各型態碘物質的沉積速率，最終換算為除污因子。經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-023，請台電公司依據法規指引 1.145 第 1.2 節，補充說明邊界外圍之計算方法。台電公司答覆說明，本方法論使用 FSAR 高空排放之大氣擴散係數，該數據計算結果已藉由靈敏度分析，定義各方位發生最大 χ/Q 之距離。經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-024，請台電公司說明再懸浮碘核種外釋等效體積流率的計算，以及等效體積流率轉換為人員劑量之程序。台電公司答覆說明，該計算過程使用法規指引 1.195 接受之 Cline 模型，由放射性碘之再懸浮率及核種活度等參數，即可計算得出等效體積流率。將等效體積流率輸入 RADTRAD 之輻射劑量計算模型，即可算出人員劑量。經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-025，請台電公司澄清送審報告中 EAB 與 LPZ

之大氣擴散因子是否係重新計算，並說明 EAB 與 LPZ 之距離為何。台電公司答覆說明大氣擴散因子是以 PAVAN 程式計算所得，而 EAB 與 LPZ 之距離均為 300 米，並將答覆說明內容納入送審報告，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-026，請台電公司澄清分析大氣擴散因子所使用 PAVAN 及 ARCON96 程式之選用規則。台電公司說明由煙囪或地表排放是依事故特性而定，並說明洩漏源之外釋點相關資訊。針對台電公司之說明，再請台電公司補充說明針對於不同時段分別由煙囪或地表排放之事故，其大氣擴散因子 χ/Q 與人員劑量彙總之考量方式，台電公司分別答覆說明 EAB/LPZ 輻射劑量分析及各種不同分析途徑之大氣擴散因子分析方式。針對台電公司之說明，再請台電公司補充說明針對控制室輻射劑量分析時採用 PAVAN 或 ARCON96 程式之原因，並說明彙總各時段之核種排放與大氣擴散因子以得到人員劑量之方式。台電公司除分別說明各種排放途徑與分析方法外，亦分別提出報告修訂。針對台電公司之說明，再請台電公司澄清其提出報告修訂中說明採用 ARCON96 程式可能獲得不保守之數據，並說明採用 ARCON96 或 PAVAN 程式之法規或技術依據。台電公司以分析案例印證法規指引 1.194 中所述 ARCON96 程式於近距離下不保守之情形，並將答覆說明內容納入送審報告，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-029，請台電公司說明控制室劑量分析時相關參數之採用依據。台電公司答覆說明各參數之意義與採用來源，並將答覆說明內容納入送審報告，經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-030，請台電公司提供「8 小時」、「8~24 小時」、「24 小時後」使用的人員呼吸率分別為 3.47×10^{-4} 、 1.75×10^{-4} 、 2.32×10^{-4} m^3/sec 不同時段呼吸率差異之理由，及將法規指引 1.3 列為參考文獻。台電公司答覆說明是本方法論用於廠外輻射劑量計算之呼吸率係根據法規指引 1.3 之法規立場 2c 的要求，且已將法規指引 1.3 列入參考文獻。經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-032，請台電公司說明「 L_{intake} 、 $L_{\text{inleakage}}$ 、 L_{recir} 」之參數來源。台電公司答覆說明 L_{intake} (緊急運轉模式)、 $L_{\text{inleakage}}$ 、 L_{recir} 數據來源為 FSAR 表 15.6-8， L_{intake} (正常運轉模式)數據來源為 GE Nuclear Energy

31113-1T43-M2002 報告，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-033，請說明是否有使用法規指引 1.195 第 2.8 節全身劑量計算公式中之 GF_k (dose reduction due to the compartment geometry correction factor)。台電公司答覆說明 RADTRAD 程式計算全身劑量的式子為法規指引 1.195 內的式(10)，本方法論有使用該參數 (GF_k)，因該參數係以空間體積進行推算，使用者無需再作設定，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-036，法規指引 1.195 第 3.4 節要求分析需涵蓋之放射性元素為 Xe、Kr、I，但在送審報告表 2-1 所列核種，未將上述三個元素所有的放射性核種納入劑量分析，例如 Kr-85、Kr-89、Xe-137、Xe-138 等，少考慮放射性核種可能會造成劑量被低估，請台電公司澄清。台電公司補充說明爐心分裂產物盤存量計算係屬輻射劑量分析方法論之上游，本方法論並未加以探討評估。經審查其答覆內容認為本方法論後續搭配爐心分裂產物盤存量計算方法論進行輻射劑量分析時，應將放射性元素 Xe、Kr、I 之所有核種納入劑量評估，本項將列入後續管制要求。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-2-038，請台電公司對報告圖 2-2, 2-3, 2-4 中之「假想空中」提供完整的說明。台電公司答覆說明本方法論的龍門電廠 LOCA 分析模式，必須同時考慮三個放射性物質洩漏來源，包括：一次圍阻體洩漏、主蒸汽隔離閥洩漏及放射性碘物質再懸浮外釋，若使用單一個 RADTRAD 模式模擬全部洩漏源，將超出程式 (3.03 版) 於隔室空間數量上的限制。為避免重複計算同一洩漏源的放射性危害，必須使用將重複計算的放射性物質導入到一個假想的空間中，但該空間不會與大氣環境連結，並將前述說明加註於送審報告各圖中，經審查可以接受。

審查小組另提出 RAI 編號 A-I-2-016、A-I-2-027、A-I-2-031、A-I-2-034、A-I-2-035、A-I-2-037，針對送審報告本章部份文字、圖表或參考文獻不妥善之處，請台電公司澄清修正，台電公司已修訂送審報告內容，經審查可以接受。

另為確認台電公司本項方法論之評估能力，審查小組再要求台電公司在本方法論與龍門電廠 FSAR 計算方法採用相同假設條件之情況下，針對所得計算

結果與龍門電廠 FSAR 數值提出比較及說明，台電公司依要求提送本方法論與龍門核能發電廠 FSAR 計算方法計算結果比較之補充報告。針對台電公司所提補充報告，審查小組提出 4 項意見，審查情形說明於下。

審查小組提出 RAI 編號 A-F-2-001，請台電公司澄清補充報告方法論所使用的反應器廠房內部空間體積，台電公司說明正確數字為 10%，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-F-3-002，針對送審補充報告第三節表 2 文中之全身劑量於控制室部份有 5.9% 的誤差，請台電公司說明 FSAR 的結果是否也如同本案所使用 3 個運算結果再加總或其他方式得到結果；另對有關控制室的體表劑量的差異，請台電公司澄清 RADTRADv3.10 程式的運算結果是否較使用 RADTRADv3.03 程式計算數個時間點的控制室內放射性活度再做後處理更為精確。台電公司答覆說明本案建立之一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及再懸浮碘物質外釋之 RADTRAD 模型及使用之輸入數據，與 FSAR 分析對應之計算書所記載者完全相同，兩者之計算結果比較，在廠外劑量方面完全相同，在控制室劑量方面，除了一次圍阻體洩漏所造成之甲狀腺劑量與全身劑量略有差異外，其餘皆完全相同，至於為何有差異，目前無法確認，此項差異導致之“一次圍阻體洩漏+MSIV 洩漏+再懸浮碘物質外釋”加總劑量差異，在甲狀腺劑量方面可忽略(相對於 0.14Sv)，在全身劑量方面差 5.9% (相對於 1.7E-4Sv)。另法規指引 1.195 所記載之體表劑量計算公式，可計算空間 k 中，N 個核種在 T 個時間區間內對人員造成的累積體表劑量，RADTRAD v3.10 可以自動算出每秒區間 j 各核種 i 的積分活度濃度 $(IA_k)_{ij}$ ，即在事故 30 天內任一核種 i 有 $T=2,592,000$ 筆 $(IA_k)_{ij}$ 。若使用 RADTRAD v3.03 程式計算數個時間點($T < 2,592,000$ 筆)的控制室內放射性活度再做後處理，其計算結果必定較不精確，經審查答覆內容可以接受。

另審查小組提出 RAI 編號 A-F-1-001 及 A-F-3-001，針對送審補充報告文字內容與法規用辭作適當修正，台電公司修正後，經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

送審報告本章說明龍門核電廠大破口冷卻水流失事故之分析程序與模式，包括各種洩漏途徑之射源項與相關參數假設、廠外之大氣擴散分析及人員劑量分析之有關參數，以及控制室人員劑量分析之模式與有關參數等。送審報告針

對大破口冷卻水流失之事故影響分析之方法及其在 FSAR 第十五章之應用，均詳細完整說明，送審報告架構完整，並已依審查意見提出澄清或修訂送審報告內容，經審查可以接受，惟後續管制要求如下：

- 1.未來應用本方法論於國內核能電廠時，針對放射性物質高空排放的情形，必須考量各廠氣象儀器裝設位置與放射性物質實際外釋點的高度，輸入 PAVAN 程式。另外，針對 ADJWND 副程式本身存在的或其他因素造成的不確定性，未來應用本方法論時，應由負責計算事故期間各時段大氣擴散因子者，根據各廠的設計數據及大氣資料等，決定其修正因子。(RAI A-I-2-001)
- 2.本方法論後續搭配爐心分裂產物盤存量計算方法論進行輻射劑量分析時，應將放射性元素 Xe、Kr、I 之所有核種納入劑量評估。(RAI A-I-2-036)

第三章 分析結果與討論

一、概述

所提送審報告本章主要提出依前章之分析模式執行事故時放射性物質外釋對 EAB 及 LPZ 外圍邊界與主控制室內人員於事故期間接受的輻射劑量分析結果。

送審報告表 3-1，載明放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋，造成 EAB 人員於事故發生後 2 小時內接受的甲狀腺劑量分別為 2.2505×10^{-2} 、 4.4717×10^{-4} 及 2.6376×10^{-5} Sv，共約 0.023 Sv，低於法規限值 3 Sv。放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋造成 EAB 人員於事故期間前 2 小時接受的全身劑量分別為 5.035、 2.532×10^{-2} 及 8.295×10^{-5} mSv，共約 5.1 mSv，低於法規限值 250 mSv，兩者皆符合核子反應器設施管制法施行細則第三條規定。

送審報告表 3-2，放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋，造成 LPZ 外圍邊界人員於事故期間接受的甲狀腺劑量分別為 5.4141×10^{-2} 、2.0326 及 0.7516 Sv，共約 2.84 Sv，低於法規限值 3 Sv。放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋造成 LPZ 外圍邊界人員於事故期間接受的全身劑量分別為 13.753、6.802 及 0.206 mSv，共約 20.8 mSv，低於法規限值 250 mSv，兩者皆符合核子反應器設施管制法施行細則第三條規定。

送審報告表 3-3，放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋，造成控制室包封內人員於事故期間接受的甲狀腺劑量分別為 1.0802、102.35 及 37.897 mSv，共約 141.33 mSv，低於法規限值 300 mSv。放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋造成控制室包封內人員於事故期間接受的全身劑量分別為 3.280×10^{-2} 、0.149 及 3.579×10^{-4} mSv，共約 0.18 mSv，低於法規限值 50 mSv。

放射性物質經一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋，

造成控制室包封區域內人員於事故期間接受的體表劑量分別為 1.309、8.727 及 1.122×10^{-2} mSv，共約 10.5 mSv，低於法規限值 300 mSv，三者皆符標準審查規範 6.4 節的規定。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A-I-3-001，請台電公司說明龍門電廠 EAB/LPZ 之距離與其廠界之大小關係為何，並確認審報告中所稱「廠外」人員接受輻射劑量之適切性。台電公司提出澄清說明，並將送審報告內容前述用詞修正為 EAB 與 LPZ 外圍邊界人員接受之輻射劑量，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-3-002，請台電公司澄清控制室人員體表劑量估算方式。台電公司提出說明及修訂送審報告，將一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及放射性碘物質再懸浮之外釋等途徑之劑量分析結果分別列出，經審查其答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-3-003，請台電公司依「游離輻射防護安全標準」第七條，修訂報告內容並將劑量單位使用毫西弗(mSv)取代侖目(rem)。台電公司提出澄清說明及修改送審報告 3.2 節內容及送審報告表 3-3 數據，另劑量單位也以 mSv 取代 rem，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-3-004，請台電公司將 FSAR 之劑量數值一併納入相關表格中，台電公司已修訂送審報告，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A-I-3-005，針對送審報告 3.2 節所述體表劑量估算方式是利用式 (3-1) 及 (3-2)，考量控制室體積、劑量轉換因子與控制室人員佔駐因子，依據 RADTRAD 程式求得之事故後 2、8、24、96、720 小時控制室包封區域內之放射性核種活度，進而算出體表劑量。惟放射性核種活度是指數衰變減少，若時間間隔數目少，且以各時間間隔最終點之活度進行積分，會嚴重低估累積活度與體表劑量。台電公司答覆說明僅以 2、8、24、96、720 小時五個時間點計算體表劑量的確會有低估的情形，本方法論修正改用 RADTRAD v3.10 版計算體表劑量，以各核種於各時間的外釋率 (Ci/sec)，對時間積分即可獲得大氣環境的累積活度；控制室內的活度則根據活度平衡計算得到。一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏、放射性碘物質再懸浮之外釋造成控制室包封區域內部人員於事故期間接受之劑量更新為 1.3、8.7、 1.12×10^{-2} mSv，共計 10 mSv，仍低於法規限值 300 mSv。審查小組審查後請再澄清控制室甲狀腺劑量與全身劑

量若改用 RADTRAD v3.10 評估，其分析結果是否與 RADTRAD v3.03 有明顯差異。經台電公司補充說明兩者差異小於 1%，並無顯著差異，經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

送審報告本章說明依龍門電廠相關設計，使用 RADTRAD 程式進行事故時之人員劑量評估，包括禁制區 EAB 與低密度人口區 LPZ 外圍邊界之人員劑量分析以及控制室之人員劑量分析，各項分析結果顯示均能符合相關法規之劑量限值規範；送審報告架構完整，並已依審查意見提出澄清或修訂送審報告內容，經審查可以接受。

本方法論乃針對大破口冷卻水流失事故下進行龍門電廠輻射劑量分析，未來應用時若涉及其他設計基準事故分析範圍，仍應驗證並說明含括於大破口冷卻水流失事故輻射劑量分析範圍內，否則應重新評估並經原能會審查同意。

第四章 總結

一、審查結論

「龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論(大破口冷卻水流失事故)」內容包含龍門電廠 LOCA 之爐心分裂產物盤存量的估算、輻射源項估算、放射性碘核種的組成、放射性核種除汙能力及放射性衰變等，皆符合所參照美國核能管制委員會法規指引 1.3 及 1.195 的管制立場及評估要求。送審報告並已依據所參照美國核能管制委員會之標準審查規範內容，將一次圍阻體洩漏、MSIV 洩漏及緊急爐心冷卻系統洩漏等途徑納入劑量分析工作考量，另由於 MSIV 洩漏考量核種於 MSIV 下游管路中的沉積現象，此方法論亦依 BWROG 報告之要求，將放射性碘物質因再懸浮而外釋到大氣環境的影響納入分析。

送審報告於評估廠外人員接受之輻射劑量時，已先評估人員所在位置之大氣擴散因子，並參照法規指引 1.3 中所規範於意外狀況下不同時段之人員呼吸率，以及美國聯邦指引報告 FGR-11 及 FGR-12 中之劑量轉換因子等參數，再以經美國核能管制委員會認可的 RADTRAD 程式建立分析模型，進行人員劑量之分析。而於評估控制室人員接受之輻射劑量分析時，亦以 RADTRAD 程式建立控制室運作模式，並依據標準審查規範 6.4 節，除前述大氣擴散因子、人員呼吸率與劑量轉換因子外，亦考量控制室人員之佔駐因子，據以進行人員劑量之分析。

另送審報告依所提方法論所建立評估模式，執行事故時 EAB/LPZ 與控制室包封區域人員接受之輻射劑量分析結果，均符合法規限值。該分析方法論所建立評估禁制區邊界(EAB)/低密度人口區(LPZ)外圍邊界與控制室包封區域內人員，於事故發生時期接受輻射劑量的分析程序與引用之參數等，均係參照並符合美國核能管制委員會相關法規指引文件與標準審查規範之規定。

綜合審查小組審查結果可以接受，對於送審之「龍門電廠設計基準事故輻射劑量分析方法論(大破口冷卻水流失事故)」報告，准予備查。

二、後續管制要求

- 1.未來應用本方法論於國內核能電廠時，針對放射性物質高空排放的情形，必須考量各廠氣象儀器裝設位置與放射性物質實際外釋點的高度，輸入 PAVAN 程式。另外，針對 ADJWND 副程式本身存在的或其他因素造成的不確定性，未來應用本方法論時，應由負責計算事故期間各時段大氣擴散因子者，根據各廠的設計數據及大氣資料等，決定其修正因子。
- 2.本方法論乃針對大破口冷卻水流失事故下進行龍門電廠輻射劑量分析，未來應用時若涉及其他設計基準事故分析範圍，仍應驗證並說明含括於大破口冷卻水流失事故輻射劑量分析範圍內，否則應重新評估並經原能會審查同意。
- 3.本方法論未來搭配爐心分裂產物盤存量計算方法論進行輻射劑量分析時，應將放射性元素 Xe、Kr、I 之所有核種納入劑量評估。