

# 核設施放射性災害應變與 複合式災害互依性分析技術建立

## Development of the Analysis Techniques for Emergency Response to Radiological Accidents and Infrastructures Interdependency under Multiple Concurrent Hazards

主管單位：行政院原子能委員會

徐清鈺 汪子文 林家德 黃佳慧 邱鈺婷

Ching-Yu Hsu, Tzu-Wen Wang, Jyh-Der Lin, Chia-Hui Huang, Yu-Ting Chiu

行政院原子能委員會核能研究所

### 摘要

發生國際間重大核子或輻射事故時，政府必須採取適當的緊急應變行動，以確保民眾和環境之安全。緊急應變行動所涵蓋的技術領域相當廣泛，包括規範與標準研擬、輻射偵測、劑量評估、防護措施整備等，因此必須建立相關的技術以支援政府的決策系統，故本研究針對輻射長程之擴散模式、經濟影響、健康效應、緊急應變準則進行模擬分析。

此外，因應近年來天候環境變化與人為事故頻傳，所衍生對於複合式災害之顧慮，探討核設施在此類災害下的可能風險，本研究亦檢視核能電廠之水災風險，並開發核能電廠與其他基礎設施互依性分析方法論，為相關管制分析能力奠定必要基礎，以協助原能會等相關主管部門研擬管制措施，確保在重大天災或人為事故下，核設施仍能安全運轉並提供基載電力，除善盡核能管制機關施政責任，亦可增進民眾對核能應用之信心，進而推廣核能發展，對低碳能源使用持續貢獻。

**關鍵詞：**長程之擴散模式、經濟影響、健康效應、緊急應變

## **Abstract**

To cope with postulated catastrophic accidents that might be caused by a series of equipment failures in nuclear power plants, government has to adopt an adequate emergency response to protect people and environment. Emergency response actions extensively cover various technical issues, include making standard and regulation, radiation indicators, dose assessment, emergency preparedness, etc. Therefore, it is necessary to set up technical base and support government decision. This research discusses such technical base: long-range dispersion models, economic impacts, health effect, and emergency response.

In light of recent climate change associated phenomena and human-caused events, risk of nuclear infrastructure form multiple concurrent hazards is also addressed in this report. This research also reviews risk from flood disaster in nuclear power plant and explores infrastructure independency methodology between nuclear power plant and other infrastructure. The purpose is to build up essential capability of analysis and regulation.

Hopefully, this capability could help Atomic Energy Commission (AEC) establishing measures and regulations to keep nuclear power base load safely, in any cases of catastrophic natural or human disaster. Moreover, Nuclear power can enhance its social acceptance through reliable capability and continues to contribute to low-carbon energy production.

**Keywords:** long-range dispersion models, Economic Impacts, Health Effect, Emergency Response, Infrastructure Interdependency

## 一. 前言

「核設施放射性災害應變與複合式災害互依性分析技術建立」計畫為反映國際間在放射性災害應變與基礎設施安全研究上的進展，拓展核研所於核電廠輻射外釋事故緊急應變計畫與定量風險評估的研究範圍，以因應國科會99年成立特別額度計畫類別，鼓勵研發單位提出新研究議題的需求。本計畫規劃於民國99年度，計畫研究動機原來自於大陸積極拓展核電建設，規劃於沿岸設立為數甚多的核電廠，對於可能發生的核子事故與相關應變應預先研議之需求，而民國98年發生的莫拉克風災，則引起有關極端氣候對於基礎設施安全之衝擊以及核電廠如何因應之考量。

本計畫於100年度開始執行，而日本於100年3月11日發生規模9的東太平洋地震，引發巨型海嘯，更導致福島第一核電廠內的三部機組發生爐心熔損事故。雖然此次災害最嚴重的區域局限於日本，也無人因核災輻射而死亡，但國際間一直高度關切輻射的國際擴散效應。福島事故的起源來自地震加海嘯的複合式災害(Multiple current hazards)，唯此事故與本計畫標題的契合，純屬巧合。福島一廠安然度過強烈地震的挑戰，但地震造成鄰近基礎設施的癱瘓，包括交通道路與外部電力網絡，乃至於隨之而來的海嘯來襲後，電廠喪失所有緊急電源，又無法及時取得外電的支援，終致爐心熔損。福島事故正凸顯本計畫研究議題的必要性，尤其是基礎設施與核設施之間在平時與緊急時期的相互依存性。

本計畫目標為完成國際間放射性災害相關偵測評估技術之建立研究以及對於我國核設施與其他基礎設施互依性方法論的初步研究，以提升國內核能安全與輻射災害應變主管機關以及其他相關單位在災害應變方面之規劃、預警、應變等各階段之能力技術。下文分別以下列項目，敘述本計畫於100年度的研究概況：

- 國際間輻射災害應變技術長程擴散模式研究
- 核子事故的經濟影響分析
- 核一、二、三廠廠外水災風險檢討
- 基礎設施互依性分析方法論探討
- 輻射的健康效應與輻射或核子事故緊急應變準則

## 二. 國際輻射災害應變技術長程擴散模式研究

### 2.1 前言

近年來，核子輻射事故議題備受關切，車諾比事件後，該輻射災害污染擴散範圍可遍及於全球性影響，為大量放射性物質散佈於大氣中的重要核子擴散事故，且由於誤判氣候條件、危險距離認知錯誤及與傳送距離過於遙遠等，並未於第一時間進行防護措施，事後造成相當大的恐慌，成為有史以來發生最嚴重的環境災害。由於核子輻射塵受到氣象條件與大氣環流的支配影響，將可擴散遍及於全球，其為長程(大尺度)污染擴散範圍，故氣象條件對於核子輻射塵在大氣中擴散扮演著非常重要之角色。

## 2.2 內容概要

長程擴散傳輸是大氣裡一項非常重要的過程，透過長程擴散傳輸的發生，大氣的化學或放射性物質可由局部地區的源地開始向外地擴散，進而產生全球性的影響。因此，大氣長程擴散傳輸的模擬分析將有助於我們瞭解大氣氣流的變化情形。

目前全球中發展且應用許久的長程擴散模式包括：

1. 美國能源部 ARAC(MATHEW/ADPIC)
2. 日本原子能研究所(JAERI)WSPEEDI(Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)
3. 德國 URAD-IM (EUROPEAN Air pollution Dispersion-Inverse Model extension)
4. 匈牙利 FLEXPART(FLEXPART Particle Dispersion Model) 及 FLEXPART/A
5. 義大利 ECHMERIT (ECHAM5-MERCURY-ITALY)
6. 美國國家大氣中心(NCAR)等單位發展之 WRF/ Chem

我們以歐洲 COST 所編列分類之各模式來做篩選。COST(European Cooperation in Science and Technology)，成立於1971年，其為歐洲科學與技術發展的國家政府間之合作組織，COST組織係透過歐洲科學家主動發起行動(COST action)，並由有興趣的國家均可參與，並分由幾個WG(Working Group)加以進行著，像是COST 728、COST 732...等。如COST 732為2005年所推行，其主要目的為改善和確保於市區與工業環境中之微尺度氣象模式應用於流動預測和傳輸過程。而藉由歷年來COST組織所編列匯整之各大氣化學傳輸和擴散模式，可對該各模式之特性、發展，並由交互比較中做更進一步的了解及應用。

將這些模式參數及計算形式列表比較，發現中尺度之模式在參數計算上考量較多，尤其是以預測與診斷氣象變數來看，顯示其運算上較為縝密；並且在驗證與評估形式來看，中尺度模式也大多經過評估基準數據集及模式交互比對得到驗證，更具有可靠性。再來，從巢狀卡式法來看，發現能夠達到偶合運算(two way)的模式並不多，僅有WRF/Chem、MCCM、Meso-NH，顯現出這些模式能夠更符合物理現象做運算，所得到之結果將更為準確且可信。並再做進一步地比較探討下，發現WRF/Chem模式具即時線上運算分析且程式可取得使用，且配合目前國內外使用之環境與發展價值來看，最後評估出WRF/Chem模式為適合國內發展應用之長程擴散模式。

## 2.3 小結

WRF/Chem模式為適合國內發展應用之長程擴散模式，以應對未來核災及大氣擴散事故之相關緊急應變工作。縱使現今WRF/Chem發展中仍面臨許多的問題與挑戰尚待克服，像是為了配合模式連線與偶合的需求所增加許多模式運算負

載，並且在尋求符合真實大氣現況的需求上，各個細節皆需投入大量人力、物力與宏觀的科學思維，需要長時間的研究經驗累積與集思廣益等；然而由於國內外已有許多學術及研究單位在應用發展WRF/Chem模式，未來研究探討下，相信更能夠順利地發展該模式。

### 三. 核子事故的經濟影響分析

#### 3.1 前言

分析核子事故對國家經濟的衝擊，其目的為：(1)在緊急應變管理與整備時，事先提供決策者評估採取對策(Countermeasures)所需之成本與效益分析，做為決策過程之參考(2)評估發生後須補助給受到影響的民眾之金額，及事先規劃相關單位權責與經費來源；(3)電廠在計算電價時，必須考慮外加的成本，如對環境的衝擊與事故時所需付出的成本。

#### 3.2 內容概要

核子事故發生後所需花費的經費可分為：防護對策經費、健康效應經費、間接或二次效應經費。防護對策經費指核子事故發生後，所採取各種防護措施所需之費用，其費用又可分為人口移動(Population Movement)經費、農作物管制經費(Agricultural restriction)、除污(Decontamination)費用；健康效應經費主要指人體受到輻射造成的早期確定效應、晚期機率效應與遺傳效應所需之補償與醫療費用；間接或二次效應經費係核子事故後政府採取的防護對策，也可能對外圍不受輻射影響地區的經濟活動帶來正面與負面的衝擊，如工作機會、政府稅收、觀光業等都可能受到影響。

為瞭解核子事故發生後對國家整體經濟的衝擊，歐盟環境指導委員會(European Commission Directorate-General Environment)成立Extern E計畫，委託比利時核子研究中心評估一座1,250MWe核反應器，假設模擬核子事故放射性核種外釋到環境的經濟損失與進行評估結果的靈敏度分析。

重大核子事故時如須長期的防護對策，如復原行動等，仍持續造成金錢的支出。有些額外的花費可能在多年後才出現(如潛伏性的遺傳效應)，短期的花費可視為第一年支出的金額，可視為核子事故對國家經濟的直接衝擊。但要評估較長期的經濟衝擊，則需計算投資貼現率(Discount)，貼現率是計算投資現值的方法，可視為今日必須為未來數年花費所需支出的金額。

事故最後的延伸範圍評估經濟後果，比較適用於重大核子事故，因為空間延伸範圍很廣，有時候可能好幾個國家都受到影響。如此一來就必須整合多個國家來源的數據，這些數據有時不是根據同一種統計理論分析得到，有時各國的經濟情況也不同(如幣值兌換率、利息、貼現率、國民年平均所得等)，使評估過程更複雜及結果有更多不確定性。

核子事故對經濟與社會的影響，有些是難以量化的。由車諾比事件的經驗，

從經濟角度來看，事故發生後，當地的經濟活動長期受到嚴重影響，包括：(1) 在受到放射性核種污染地區的食品，即使污染程度低也無法賣到外地，原因為民眾對這些食品失去信心；(2) 生產清潔的食品，所需之成本與售價提高很多；(3) 污染地區失去吸引力造成間接衝擊，如觀光蕭條或經濟投資退縮等。

核子事故後，所採取的防護與復原對策，和國家經濟、社會、環境的後果，期間有一循環的過程，對評估國家經濟的長期影響具有不確定性，若有大型生產設備銷毀，對國家經濟更有重大影響。社會角度是探討受輻射影響區域的社會生活，研究發現：(1) 就業和社交活動產生重大變革；(2) 經濟、文化、環境的財產繼承受到損害；(3) 喪失社會信心，包括在當地、國家甚或國際上的信心。所以從社會的角度評估核子事故的經濟影響，很難予以量化。

若假定模擬核子事故後外釋到環境的放射性物質總量有4種情境，如表1。情境1表示爐心有熔毀現象；情境4為廠內安全系統可啟動的意外洩漏量；情境3指中等洩漏量，被法國國家安全機關視為參考事故情境(Reference Accident Scenario)。評估事故外釋輻射源項的放射性核種，選擇爐心中的惰性氣體、碘(I)、銫(Cs)、銻(Te)、及少量的重金屬與氧化金屬等。

評估方法係採用用歐盟開發的程式COSYMA評估人口移動經費、健康效應經費與農作物管制經費，不評估除污費用。評估的區域分別考慮：(1) 小地區指核能電廠周圍100公里半徑範圍；(2) 大地區指100~3,000公里之間的範圍。程式中輸入的人口數選擇西歐中部地區城市(德國Karlsruhe)的資料，執行民眾防護行動的劑量干預標準參照國際相關規範建議，分述如下：

1. 掩蔽時間根據地區特性在2~6小時。
2. 依據ICRP 40標準(全身劑量50毫西弗，甲狀腺劑量500毫西弗)執行疏散，持續三天。
3. 移居標準(從地面污染情況計算年有效劑量)為：(1) 56公里內50mSv/y；(2) 75公里內100mSv/y；(3) 75公里外200mSv/y。
4. 地面污染的移居時間2年。
5. 食物禁用標準：
  - (1) 牛奶：碘超過500 Bq/kg，Cs超過1,000 Bq/kg，Sr超過125 Bq/kg；
  - (2) 其他食品(牛、羊、豬肉及內臟、綠色蔬菜、根莖類蔬菜、馬鈴薯與穀物類：碘超過2,000 Bq/kg，Cs超過1,250 Bq/kg，Sr超過750 Bq/kg。

上述四種外釋情境評估兩年內在大區域與小區域民眾可能接受集體劑量與健康效應的人數，健康效應的補償費用，農作物管制與民眾疏散移居的費用，進一步推導人口移動經費、健康效應經費與農作物管制經費佔總評估支出經費的百分比如表2。評估結果可知核子事故緊急應變時疏散與移居成本最少，造成民眾健康效應的支出最大。避免民眾受到高輻射劑量引起健康效應，儘早疏散是最佳決策。

### 3.3 小結

由於核子事故的經濟影響評估，有各種不確定度，包括：長期環境影響；防護行動的執行力；輻射導致疾病的劑量；以及社會層面的影響難以用經濟評估，而且各國國情不同。各國醫療水準與農作產品的價格不同，評估結果可能有差異。然而，本章經濟評估模式的評估結果，可以幫助政府在核子事故或輻射意外事件緊急應變上有更完善的管理策略與準備。

## 四. 核一、二、三廠廠外水災風險檢討

### 4.1 前言

為評估核電廠在遭受天然災害威脅時，是否有足夠之安全餘裕可因應，本章以莫拉克等級之豪大雨量探討颱風對核一、二、三廠廠外水災之影響，可供電廠人員因應管理事故的適切性，及找出需改進之潛在弱點，以提升安全。

### 4.2 內容概要

莫拉克颱風在民國 98 年 8 月 8 日襲擊台灣，帶來大量雨量，台灣南部地區發生嚴重水災及山坡崩坍。其中甲仙鄉小林村在這次風災當中慘遭滅村的危機，在小林村於發生山崩時，降雨量已高達 1856 mm，已遠超過該地區山坡穩定之臨界值 1700 mm。大規模順向坡之地滑崩塌是為致災之主因。

假想核電廠遇到莫拉克等級的颱風會產生的事故情節，在功率運轉期間，電廠廠內機組會依據「颱風期間運轉方案」視風速大小停機或降載，如核電廠外部遭受到颱風危害，可能發生的廠外事件包括洪災、土石流、海水倒灌及順向坡走山引發災害。

洪災情境方面，我國核一、二廠防洪設計是根據最大可能流量(Maximum probable flood) 566 cms 洪峰來設計，相當於 10,000 年回歸期的防洪設計標準見表 3；而莫拉克風引發的雨量最大小時可達 139.5 mm，與表 3 中 100 年防洪頻率接近，對應其流量為 293 cms，表示核一廠防洪設計較 100 年防洪頻率大 2 倍，因此可知核一、二廠防洪設計可承受莫拉克豪雨引發水災，尚有一段餘裕。核三的防洪設計係依據屋頂排放系統 5 分鐘期間可能最大降雨(Probable Maximum Precipitation, PMP)降雨強度之 26.7in/h (678.2mm/h)，回歸週期大於 10,000 年，對應莫拉克豪雨引發水災(139.5mm/hr)約 1000 年回歸週期，故核三廠也尚有一段餘裕。綜合上述，核一、二、三廠防洪設計可承受莫拉克等級的豪大降雨。此外，各廠 FSAR 反應器廠房排洪能力分別為 297 mm/hr, 241mm/hr, 700 mm/hr，而相對於莫拉克颱風最大小時雨量為 139.5 mm 而言，各廠均有足夠的排洪能力。

土石流情境方面，核一、二、三廠的警戒值分別為 500 mm、550 mm、600 mm，若各廠附近的測站之累積雨量達到各別的警戒值，須注意有無土石流的

發生，但覆蓋於此等岩層上的土石量並不多，即使保守假設有土石流，但電廠周圍的山丘高度均不到 100 m，相較於小林村崩山落差高達 900 多公尺的情形，發生類似嚴重的災害的機會應不大。

海水倒灌情境方面，三個廠址的高度，核一、二、三廠分別為 12 m、12 m 及 15 m。核一、二廠最高潮位高度為 1.733 m，係風暴潮所引起。核三廠之最大湧浪高度經估算為 12.53 m，係由颱風或海嘯所導致，然而廠區位於海平面上 15 m，雖僅 SW 泵室低於 12.53 m，但有足夠的 NPSH 以為因應。若不慎發生海水倒灌，較可能發生的災難是電力系統及交通的中斷，使得路面汪洋一片，民眾及車輛都寸步難行，影響民眾安全。

另外，順向坡滑動情境方面，順向坡滑動一直是台灣坡地災害中最普遍而且最嚴重者之一，常發生於在沉積岩層中，順向坡在地震及颱風豪雨的作用下，容易發生滑動，滑動的土石直接掩沒房舍或造成土石流，亦間接對下游造成災害，而核一、二、三廠廠址都選在穩定的岩盤上，離順向坡都相距甚遠，受順向坡危害甚低。

### 4.3 小結

就現有的歷史記錄與更新後的雨量與地質調查，核一、二、三廠目前廠外水災的設計均無應立即強化的需求。在廠外水災裡，大致以洪災對核電廠造成的影響最為顯著，但倘若各廠排洪能力足夠，有緊急疏散措施，並定期追蹤周圍的雨量與地質等方面資訊，應可防範各種災害之發生。

## 五. 基礎設施互依性分析方法論探討

### 5.1 前言

在 2001 年核三廠因為季節性鹽霧害效應，衍生變壓器火災，進而造成外電喪失與短暫之電廠全黑事件；2011 年日本東太平洋地震，衍生海嘯，並造成福島核電廠事故等事例，均使核能管制相關單位聯想與關切：若同樣等級的氣候現象或事故發生於核電廠周圍，或劇烈天候期間又同時發生人為引發如電網不穩、運輸事件、冷卻水長期不足、鄰近工業設施災變等事件時，做為重要基載電源的核能電廠是否仍可提供穩定電力，甚或是否可以安全停機，減緩此類所謂複合式災害帶來的巨大影響？

定量風險評估技術主要在處理不確定環境條件下的決策問題，雖然在核能電廠應用著力最深，但畢竟仍屬於傳統的定量風險評估法，在面對現代基礎設施常有的網絡連結特性，以及影響顯著、不容忽視的互依性(Interdependency)作用之下，有時候因果條件並不清楚，或有強烈的反饋作用，此情形之下此傳統分析能力已顯得不足，因此有必要加強新方法論的引進，進一步希望可探討風險評估結合的可能性。

## 5.2 內容概要

互依性的定義為為兩個基礎設施之間的雙向關係，透過此種關係，任一方的狀態得以影響或關聯到另一方；或當兩個基礎設施彼此相依(dependent)時，泛稱為互依，影響互依性分析的因素包括時間尺度、地理尺度、擴散與較高階的效應、社會/心理因素、運轉程序、營運策略、復原與回復步驟、政府法規、法令與政策制度。

目前用於建立基礎設施互依性模型的方法主要可概分為兩類：互依性分析(Interdependency analysis)與系統分析(System analysis)。一般說的「互依性分析」是指定性分析。系統分析屬於相當「定量」性(quantitative)的技巧，能夠找出隱藏的互依性，但也與計算機模擬息息相關。這些技巧往往需要複雜的計算架構，因為其作法直指細節，也相當花時間。

互依性有八種最佳的分析方法，各分析方法特性如表 4 及表 5 評估結果顯示比較成熟且未來發展出工具的可能性最高的有代理人基模擬、系統動力學與派翠網絡等三種，其中代理人基模擬、系統動力學為本國值得本所投入相關研發的技術主題，分別說明如下：

- 1.代理人基模型(ABM)：此方法的特點為採用以個體為基礎的電腦模型，模擬與複雜系統主題相關的特性，譬如浮現行為、蒙地卡羅方法、計算社會學、多代理人系統與演化型程式開發等。
- 2.系統動力模型：為瞭解複雜系統行為隨時間變化的一種方法，處理內部回饋圈與時間延遲等可能影響整體系統行為的效應。系統動力學與其他方法不同的地方在於該方法是以「回饋圈」及「存量與流量」的概念來研究複雜系統，這些概念是以系統組件之間的關係為基礎，有助於掌握系統非線性的特性。

此兩種方法具備網絡分析所需的屬性以及模擬浮現行為的能力，正可以補足傳統定量風險評估之不足，而目前已有許多基礎設施分析應用此兩種技術，評估系統可能出現的弱點或防治措施的成效，例如交通基礎設施評估。

## 5.3 小結

除了長久以來為人關注的核能安全議題之外，做為一種發電基礎設施而言，核能電廠其實也一樣面對著基礎設施普遍需面對的互依性問題。本段介紹目前為人所使用的基礎設施互依性方法論，其中以代理人基模型(ABM)與系統動力學方法，為我們值得探究。未來若能引進或開發新技術，並與風險評估技術結合，也許可運用於關鍵基礎設施(運作)脆弱度分析，預先發掘潛在的問題，供相關單位及早規劃因應，同時也可藉此拓展我國核電廠對於複合式災害風險評估的範圍與能力，強化互依性與後果影響分析深度，以因應天候環境變化或基礎設施失效之狀況，提升我國核能管制與運轉及相關政府單位的防災預警與防範作為。

## 六. 輻射的健康效應與輻射或核子事故緊急應變準則

### 6.1 前言

發生核子或輻射事件，工作人員或民眾可能受到輻射曝露，引起輻射的健康效應。因此，世界核能先進國家的政府事先必須制訂緊急應變與整備作業之相關規範與準則，以取確保人民生命與財產的安全。本章內容除說明輻射的健康效應外，並敘述國際間核子或輻射事件所採用一致性的緊急應變與整備作業準則，以做為發生國內外重大核子或輻射事故時，決策者採取緊急應變與民眾防護行動的重要基準。

### 6.2 內容概要

國際間發生重大核子事故或輻射事件，影響的範圍相當廣泛。例如日本東京電力公司福島第一核能電廠於 2011 年 3 月 11 日因地震引發海嘯，造成國際核子與輻射事件等級分類系統第 7 級之最嚴重核子事故，有大量放射性物質外釋到陸地與海洋，因此政府必須採取適當的防護措施，降低民眾受到輻射健康效應的風險。

游離輻射可能破壞人體細胞中分子的化學鍵，而損壞人體內重要組織器官結構及功能的完整性。觀察 DNA 分子受到輻射的變化，常用細胞學的遺傳技術分析染色體異常(Chromosome Aberration)或染色分體異常(Chromatid Aberration)的數量。許多染色體的異常，有些是不穩定的，其中以循環淋巴球發生雙中節染色體(Dicentric Chromosome)的數量做為生物劑量學受到輻射作用的評估標。

輻射對人體健康的效應可分為機率效應與確定效應，機率效應在相對較低的劑量也可觀測到，包括致癌效應與遺傳效應。機率效應主要因為細胞受到輻射傷害改變基因庫的結構，雖然受到影響的細胞仍具有分裂的能力，但逐漸在身體上出現癌症的症狀或在後代產生遺傳疾病，因無法預測以致無劑量的低限值。確定效應則在高劑量(通常高於 1 戈雷)情況下才能觀察到，包括急性的輻射症狀如嘔吐、皮膚燒傷或出現紅斑等現象，劑量太高也可能直接造成死亡等，輻射的確定效應主要是細胞被殺死所造成組織或器官功能的喪失，此類效應的嚴重性與劑量有函數關係，必須超過某個劑量門檻(或稱為低限值)才会有臨床症狀。

ICRP 估計輻射致死癌症的風險，從事輻射作業人員受到急性曝露時，每西弗劑量有 8% 的致癌機率；一般民眾受到急性曝露時，每西弗劑量有 10% 的致癌機率。人體接受 0.2 戈雷以下的低輻射劑量或在每小時 0.1 戈雷以下低劑量率的急性輻射曝露，ICRP 採用低 LET(Linear Energy Transfer)輻射評估致癌的機率，認為在低輻射劑量或在低劑量率的情況下，致癌機率減少一半。因此，輻射工作者接觸輻射曝露得到的致癌風險為西弗劑量 4%，一般民眾受到輻射曝露得到的致癌風險為西弗劑量 5%。

流行病學研究顯示，人體接受 50 毫西弗劑量以下，沒有統計學上有意義的致癌風險，換言之在此劑量範圍內致癌的不確定因素無法用流行病學的方法解釋，但絕對不表示在此劑量之下就完全沒有風險。

核子事故後必須先評估早期和晚期健康效應的風險，並治療有可能受到急性輻射效應的人員以及降低吸入放射性核種的活度，如服用碘片以降低甲狀腺可能吸入放射性碘同位素的劑量。

事故發生時優先的處置措施為：(1)從高輻射場區撤離；(2)搶救生命，救援受輕重傷人員；(3)初步執行體外除污；(4)依放射性核種種類，施用藥劑治療；(5)治療受到灼傷或外傷的人員；(6)從事故現場和受傷者身上取樣與收集相關資訊；(7)評估事故初期的嚴重性；(8)將重傷者或嚴重受污染人員轉送至適當的醫院或輻射醫療中心醫院。

國際原子能總署依據輻射對人體的健康效應，建立一套核子或輻射事故時的緊急應變與整備作業準則，其目的希望各國能遵循一致性的統一規範，制訂相關的運作標準(Operational Levels)，讓事件發生期間，能採取適當的防護行動與應變作業，以確保工作人員與民眾的健康。各國在制訂核子事故或輻射事件相關的緊急應變規範及採取防護行動的決策時，應考慮各種社會、經濟、環境與心理等因素，最重要的決策者必須對輻射的健康風險有徹底的認知。在規劃或執行其決策時，從可防止或降低預期劑量以及減輕已接受劑量的傷害為啟動點。主要避免民眾接受輻射劑量，減輕已接受劑量的傷害在對已受到輻射曝露者，施以醫療救助或諮詢，可降低輻射確定效應與機率效應的風險。

依據外釋放射性核種的曝露途徑及對人體的健康效應，若為避免接受高輻射劑量造成嚴重確定效應，表 6 說明緊急應變與防護行動以避免或降低確定效應的一般準則。表 7 為採取行動的一般準則。從表 6 與表 7 中，一般準則可以用預期劑量或已接受劑量表示。為避免緊急事故執行防護行動時，造成防護人員或一般民眾接受的劑量超過表 6 及表 7 一般準則的標準值，在實務運作上，必須研擬可量測或可觀測結果的運作準則。運作準則必須訂出可量測或可觀測的標準值，又可分為干預基準(Interventional Level-IL)與緊急行動基準(Emergency Action Level – EAL)，運作準則可以立即與直接應用於採取適當防護與應變行動的決策依據。

緊急應變干預基準，必須建立可量測或可觀測的量，做為採取防護與應變行動的干預基準(IL)，防止或避免民眾接受劑量超過一般準則的標準。干預基準是可用現場儀器量測、偵測或分析或經實驗室分析的數值，發生重大核子或輻射事故，防護與應變行動可能包括掩蔽、疏散、移居與農作物產品管制。表 8 列出輻射或核子事故時與緊急應變及防護行動有關的干預基準，可視事故的大小與輻射影響範圍做適當的修正。

### 6.3 小結

輻射對人體健康的效應可分為機率效應與確定效應，機率效應在相對較低

的劑量也可觀測到，包括致癌效應與遺傳效應，此類效應無劑量低限值。確定效應則在高劑量情況下才能觀察到徵候，包括急性的輻射症狀如嘔吐、皮膚燒傷或出現紅斑等現象，劑量太高也可能直接造成死亡等，主要是細胞被殺死所造成組織或器官功能的喪失，此類效應有劑量低限值才會有臨床症狀。

國際原子能總署依據輻射對人體的健康效應，建立一套核子或輻射事故時的緊急應變與防護行動準則，其目的希望各國能遵循一致性的統一規範，讓決策者在緊急事件期間，能採取適當的防護與應變行動，以確保工作人員與民眾的健康。

### 參考文獻(核能研究所報告)

1. 徐清鈺、方清發(2011)，「國際輻射災害應變技術長程擴散模式研究」，INER-8625R。
2. 汪子文(2011)，「核子事故的經濟影響分析」，INER-8011。
3. 黃佳慧、邱鈺婷 (2011)，「核一、二、三廠廠外水災風險檢討」，INER-8837。
4. 林家德、黃佳慧、邱鈺婷 (2011)，「基礎設施互依性分析方法論探討」，INER-8535。
5. 汪子文、楊雍穆(2012)，「輻射的健康效應與輻射或核子事故緊急應變準則」，INER-8925。

表 1、核子事故放射性核種外釋情境與外釋量(汪子文, 2011)

外釋情境	外釋放射性核種佔爐心總量的比例(%)					
	惰性氣體	I	Cs	Te	鹼土與重金屬	氧化金屬
1	100	10	10	10	1	1
2	10	1	1	1	0.1	0.1
3	1	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01
4	0.1	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001

表 2、核子事故所需經費的比例(汪子文, 2011)

外釋情境		健康效應經費(%)	農作物管制經費(%)	疏散與移居經費(%)
1	小區域	13.3	1.0	1.8
	大區域	51.7	32.2	
2	小區域	8.9	1.9	0.7
	大區域	54.5	34.0	
3	小區域	7.1	2.6	0.4
	大區域	60.6	29.3	
4	小區域	9.2	3.2	2.5
	大區域	70.3	14.8	

表 3、核一、二、三廠最大降雨量與逕流量(黃佳慧, 2011)

回歸期 (年)	鞍部測站 (核一、二廠附近測站)		淡水測站 (核一、二廠附近測站)		恆春測站 (核三廠附近測站)
	最大小時降雨量(mm)	流量*(cms)	最大小時降雨量(mm)	流量*(cms)	最大小時降雨量(mm)
10	62.5	138	76.0	168	85
50	92.0	203	112.0	247	109
100	109.7	242	132.8	293	118
200	124.0	273	152.0	335	128
500	146.0	322	182.0	401	140
1,000	171.9	379	214.8	474	151
10,000	252.7	557	325.2	717	183

表 4、互依性分析八種方法屬性標準(林家德, 2011)

屬性種類 屬性代號	模擬重點	設計策略	互依性類型	事件類型	引發事件進程	數據需求	監測領域	範疇	成熟度
<b>a</b>	互依性分析	由下而上	實體 (Physical)	事故	擴散 (e.g.橫跨基礎設施)	高	脆弱度評估	離散	高
<b>b</b>	系統分析	由上而下	資通 (Cyber)	攻擊	昇級效應 (跨基礎設施且放大)	低	失效分析	連續	中
<b>c</b>			地理 (Geography)	失效	共因		救援/預防		低
<b>d</b>			邏輯(Logic)		侷限		資訊產生		

表 5、互依性分析方法之評估結果(林家德, 2011)

	代理人基 (Agent-based) 模型	系統動力學 (System Dynamics)	混搭系統模型 (Hybrid)	投入-產出模型 (Input-Output Model)	層級式全像模型 (Hierarchical Holographic Modeling)	關鍵路徑法 (Critical-Path)	高階結構法 (High Level Architecture)
模擬重點	<b>b</b>	<b>a、b</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>a</b>	<b>a、b</b>	<b>a、b</b>
設計策略	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>a、b</b>
互依性類型	<b>a、b、c、d</b>	<b>a、b</b>	<b>a、b、c、d</b>	<b>a</b>	<b>a、c、d</b>	<b>a、b、c、d</b>	<b>a、b、c、d</b>
事件類型	<b>a、b、c</b>	<b>c</b>	<b>a、b、c</b>	<b>c</b>	<b>a、b</b>	<b>c</b>	<b>a、b、c</b>
引發事件進程	<b>a、b、c、d</b>	<b>a、d</b>	<b>a、d</b>	<b>a、d</b>	<b>c、d</b>	<b>a、d</b>	<b>a、b、c、d</b>
數據需求	<b>a、b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>a</b>	<b>b</b>
監測領域	<b>b、d</b>	<b>d</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>b、d</b>	<b>b、c</b>
範疇	<b>a</b>	<b>a、b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>a</b>	<b>a</b>
成熟度	<b>a</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>c</b>

表 6、執行防護與應變行動以避免或降低確定效應的一般準則(汪子文,2012)

一般準則	防護行動與其它應變行動的範例
體外急性曝露(小於 10 小時)	如果為預期劑量則
AD <sub>紅骨髓</sub> <sup>a</sup> 1 戈雷	----- 立刻採取急迫防備性防護行動(即使處於艱困情況)以便讓劑量低於一般標準
AD <sub>胎兒</sub> 0.1 戈雷	----- 提供公眾訊息以及警報
AD <sub>組織</sub> <sup>b</sup> 0.5 公分處 25 戈雷	----- 進行緊急除污
AD <sub>皮膚</sub> <sup>c</sup> 100 平方公分 10 戈雷	
急性吸入的體內曝露( $\Delta=30$ 天) <sup>d</sup>	如果為已接受劑量則
AD( $\Delta$ ) <sub>紅骨髓</sub> 對核種原子序大於或等於 90° 者 0.2 戈雷	-----執行立即身體檢查、輔導以及指示之醫藥治療
對核種原子序小於或等於 89° 者 2 戈雷	-----進行污染管制
AD( $\Delta$ ) <sub>甲狀腺</sub> 2 戈雷	-----立即進行排泄 <sup>f</sup> (如果適當)
AD( $\Delta$ ) <sub>肺</sub> <sup>e</sup> 30 戈雷	-----進行長期醫療(後續醫學)監測之登錄
AD( $\Delta$ ) <sub>結腸</sub> 20 戈雷	-----提供廣泛心理輔導
AD( $\Delta'$ ) <sub>胎兒</sub> <sup>h</sup> 0.1 戈雷	

- <sup>a</sup> AD( $\Delta$ )<sub>紅骨髓</sub>代表從一個均勻且強的穿透輻射場中曝露所對於體內組織或器官(例如紅骨髓、肺部、小腸、生殖腺、甲狀腺)以及眼睛中水晶體的平均 RBE 加權吸收劑量。
- <sup>b</sup> 由於近距離接觸放射性射源(例如用手或口袋持射源)照射到身體表面下 0.5 公分深組織 100 平方公分面積之劑量。
- <sup>c</sup> 100 平方公分皮膚劑量(在身體表面下 40mg/cm<sup>2</sup>(或 0.4mm)的皮膚結構)。
- <sup>d</sup> 在時間 $\Delta$ 內曝露的群體個人中百分之五會發生一個嚴重確定效應之吸入量( $I_{05}$ )所對應的 RBE 加權吸收劑量。
- <sup>e</sup> 在這些核種分組中不同的標準曾被用來考慮各核種特定吸入門檻值之顯著不同。
- <sup>f</sup> 排泄一般準則是考慮在沒有排泄下預期劑量，排泄是一種生理過程，可以利用化學或生物劑來促成，從而使與身體結合的放射性核種排出體外。
- <sup>g</sup> 就一般標準的目的而言，所謂肺部是指呼吸系統的肺泡空隙區域。
- <sup>h</sup> 就此特案而言， $\Delta'$ 指胎兒在母體內發育期間。

表 7、緊急曝露狀況下以降低機率效應風險之防護與應變行動的一般準則(汪子文, 2012)

一般準則	防護行動與其它應變行動的範例
預期劑量超過以下一般標準：採取急迫防護行動以及其它應變行動	
H <sub>甲狀腺</sub> 前 7 天 50 毫西弗	服用穩定碘之甲狀腺阻隔
E 前 7 天 100 毫西弗	掩蔽、疏散、除污、食物牛奶飲水消費限制、公共保險
H <sub>胎兒</sub> 前 7 天 100 毫西弗	
預期劑量超過以下一般標準：採取早期應變防護行動與其它應變行動	
E 每年 100 毫西弗	暫時移居、除污、食物牛奶飲水更換、公共保險
H <sub>胎兒</sub> 胎兒母體內發育時期 100 毫西弗	
已接受劑量並且超過以下一般標準：採取更長期醫療行動來檢查並且有效治療輻射導致的健康效應。	
E 一個月 100 毫西弗	就特定放射性敏感器官的等效劑量進行篩選(作為後續醫療與輔導根據)
H <sub>胎兒</sub> 胎兒母體內發育時期 100 毫西弗	個別狀況應通報與輔導
備註：H <sub>T</sub> ----器官或組織 T 等效劑量	E-----有效劑量

表 8、緊急應變與防護行動干預基準(汪子文, 2012)

編號	干預基準值	應變行動
IL-1	距地表面 1m 處劑量率 1,000 微西弗/小時 表面污染量測 <sup>e</sup> 總貝他 活度 2,000 計數/秒(cps) 表面污染量測 <sup>f</sup> 總阿伐 活度 50cps	-立即疏散人員或掩蔽 <sup>a</sup> 。 -疏散人員進行除污 <sup>b</sup> 。 -避免不正當的飲食 <sup>c</sup> 。 -禁止食用當地產物 <sup>d</sup> 、雨水、牛羊奶。 -登記疏散人員及提供健康檢查。 -如射源 1m 處劑量率大於或等於 1,000 微西弗/小時，人員立即做健康檢查。
IL-2	距地表面 1m 處劑量率 100 微西弗/小時 表面污染量測總貝他 活度 200cps 表面污染量測總阿伐 活度 10cps	-暫停食用當地產物、雨水、牛羊奶，取樣 分析是否符合 IL-5 與 IL-6 標準。 -暫時離開目前的生活區；注意飲食 <sup>c</sup> ；登 記污染區人數與執行劑量評估及提供健 康檢查。 -如處理射源 1m 處 <sup>e</sup> 劑量率大於或等於 100 微 西弗/小時，人員立即做健康檢查。
IL-3	距地表面 1m 處劑量率 1 微西弗/小時 表面污染量測 <sup>fi</sup> 總貝他 活度 20cps 表面污染量測 <sup>fi</sup> 總阿伐 活度 2cps	-暫停消耗非基本當地產物 <sup>g</sup> 、雨水、奶 <sup>h</sup> ， 並取樣分析是否符合 IL-5 與 IL-6 標準。 -擴大取樣距離。 -發現分裂產物外釋 <sup>j</sup> ，發放碘片 <sup>k</sup> 阻斷放射 放射性碘同位素。 -執行劑量評估。
IL-4	距皮膚 10cm 處劑量率 1 微西弗/小時 皮膚表面污染量測 <sup>f</sup> 總貝他 活度 1,000cps 皮膚表面污染量測 <sup>f</sup> 總阿伐 活度 50cps	-提供皮膚除污 <sup>b</sup> 與正確飲食 <sup>c</sup> 。 -登記與提供醫療照護。
IL-5	食物、牛羊奶、水 (1)總貝他活度 100 貝克/公斤 或(2)總阿伐活度 5 貝克/公斤	-大於 IL-5，利用 IL-6 評估。 -低於 IL-5 可安全食用。
IL-6	食物、牛羊奶、水 H-3：2×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤 Fe-59：9×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤 Co-60：8×10 <sup>2</sup> 貝克/公斤 Sr-89：6×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤 Sr-90：2×10 <sup>2</sup> 貝克/公斤 I-131：3×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤 Cs-134：1×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤 Cs-137：2×10 <sup>3</sup> 貝克/公斤	-大於 IL-6，不可食用。 -低於 IL-6，可限制消耗量。

- a 掩蔽是指進入封閉式的大型或石磚結構的建築物，並盡量勿靠近牆壁或窗戶。  
b 如不方便立即除去污染物，可先更換衣物儘速前往適當地點淋浴。  
c 勸導疏散人員暫時勿飲水、吸煙及手部勿接觸口鼻。  
d 在開擴地形當地生長作物如蔬菜較可能受到外釋放射性核種的直接污染。  
e 此外部劑量率僅適用於密封危險射源。  
f 要使用性能良好的污染偵測儀器。  
g 限制可能造成嚴重健康效應作物的消耗量，或以外地的食物取代。  
h 用 IL-3 干預基準的標準篩選牛羊奶。  
i 經由雨水沈積氫的子核種可能造成高於 4 倍以上的背景劑量率，雨停後需數小時才會降  
至平常的背景值。核子或輻射事故在有雨的情況，劑量評估時應排除氫氣子核種的貢獻  
度。  
j 核子事故若有分裂產物外釋，同時含有大量的放射性碘同位素。  
k 分發或服用碘片僅需數天時間即可有效降低甲狀腺劑量。