

行政院原子能委員會放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

國際輻防組織與核能先進國家
低放處置輻射風險標準研究

計畫編號：101FCMA006

報告編號：101FCMA006-05

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：邱鎧盛

報告作者：黃友禮

報告日期：中華民國 101 年 12 月

**International Radiation Risk Standards Comparison and Analysis
for Low- Level Radioactive Waste Disposal**

By

Yu-Li Hwang

Low- level radioactive waste disposal is mainly operated in two ways: shallow disposal and geological disposal. Both disposal methods are facing the possibility of radiation exposure in the future and that means potential exposure. To deal with potential exposure, the best way is to set up radiation risk standards for the disposal of low level radioactive waste for related control measures. This article compares and analyzes the international radiation risk standards in the hope to help establish radiation risk standards for our country.

Keyword: Low- Level Radioactive Waste; Disposal; Risk.

Health Physics Division

Institute of Nuclear Energy Research

國際輻防組織與核能先進國家低放處置輻射風險標準研究

摘要

黃友禮

低放處置方式分淺層處置與地質處置兩種。這兩種處置方式均面臨未來造成曝露的可能性，也就是潛在暴露。對於此一潛在暴露，最佳的方法就是訂立低放處置輻射風險標準加以管制。本文比較與分析各國的低放處置輻射風險標準，希望有助於我國低放處置風險標準的訂立。

關鍵字：低放射性廢棄物、處置、風險

核能研究所保健物理組

目 錄

1.前言	1
2.低放處置的潛在曝露的防護	3
2.1 防護未來世代	4
2.2 關鍵群體.....	5
2.3 潛在曝露.....	6
2.4 防護最佳化	6
2.4.1 一般事項	6
2.4.2 自然過程情節應用輻射規定.....	8
2.4.3 人類闖入應用輻射規定.....	9
2.5 技術與管理人的原則	10
2.6 符合輻射防護原則	12
2.6.1 一般事項	12
2.6.2 分階段的方法	12
2.6.3 證明符合放射性規定.....	14
3.國際低放處置輻射風險標準比較與分析.....	16
3.1 ICRP 第 60 號報告.....	16
4.結論.....	19
參考文獻.....	21

附圖目錄

圖 1 方法的選擇	7
-----------------	---

附表目錄

表 1：國際低放處置輻射風險標準比較.....	17
-------------------------	----

1.前言

國際輻射防護組織與核能先進國家低放處置輻射風險標準研究對於放射性廢棄物最終處置的安全標準，主要為劑量與風險兩種指標，各國依其國情有不同的法規限值。我國目前訂定低放與高放處置設施對一般人造成之個人年有效劑量，不得超過 0.25 毫西弗，並應合理抑低。高放處置設施特別規定對關鍵群體中個人所造成的個人年風險，不得超過一百萬分之一。對於這些標準似仍有檢討的空間，尤其對特定曝露情節(如人類闖入)如何管制等均亟待釐清。今年本項工作將蒐集國際輻射防護組織(例如 IAEA、ICRP 等)及歐、美、日等核能科技先進國家，對於放射性廢棄物處置之輻射風險與安全的建議標準進行研究。

目前低放射性廢棄物為核能民生應用無可避免的衍生產物，主要係來自於核能電廠及使用放射性物質的場所，包括醫療、工業、農業、研究等。放射性廢棄物必須予以妥善處置，而最終處置則是徹底解決問題的方法。

低放射性廢棄物之最終處置方式，主要概分為陸地處置(land disposal)與海拋(sea dumping)兩種，但在 1983 年倫敦公約中，各國同意停止海拋行為。目前各國已運轉或規劃中的低放射性廢棄物最終處置場均採陸地處置方式進行。陸地處置可分為淺層處置(shallow land disposal)或稱近地表處置(near surface disposal)與地質處置(geological disposal)。淺層處置是將廢棄物放置於地表上或地表下深約三十公尺的處置設施中。地質處置則是將廢棄物放置於較深的地層中，包括坑道處置及海床下處置等不同型式。藉由多重障壁設計方式使放射性廢棄物與人類生活環境隔離，以確保人體健康與環境品質。

這兩種處置方式，在其封閉後均可能造成因人類闖入以及自然過程造成未來的民眾暴露，這就是潛在曝露。最佳的方法就是訂立低放處置輻射風險標準加以管制，本文比較各國低放處置輻射風險標準，來作為本國訂立的參考。

另，本報告研究之低放射性廢棄物，係依據原能會發布之「放射性物料管理法施行細則」⁽¹⁾第四條規定，我國放射性廢棄物分為兩類(原能會 2003)，包括：

(1)高放射性廢棄物：指備供最終處置之用過核子燃料或其經再處理所產生之萃取殘餘物。

(2)低放射性廢棄物：指前款以外之放射性廢棄物。

本報告內容第 1 章說明研究目的與報告架構。第 2 章說明放射性廢棄物處置對於人與環境保護相關安全標準。第 3 章說明低放射性廢棄物處置潛在曝露的防護。第 4 章說明國際低放處置輻射風險標準比較與分析。第 5 章對今年研究成果結論，並提出建議。

2.低放處置的潛在曝露的防護

在地質處置的安全議題中，具有高活度(可能產生熱)及含有長半化期放射性核種之廢棄物，通常考慮採用深層地質處置。並且這類廢棄物需要被隔離和保存相當長一段時間。幾個有關這類廢棄物新關注的領域，其中包括：適用許可地質貯存庫的安全情況下之定義及內容、提供處置設施核安全防護措施和允許廢棄物檢索之安全評估關係、潛在人員闖入處置設施之安全評估、安全替代指標的規範、用於評估處置設施長期行為之參考生物圈概念，以及處置設施後關場期之監管。

隨著 ICRP 所發表的指引中產生以下議題：哪些人應在闖入處置場的事件中受到保護而免受危害-住在場址附近的人民、闖入者和/或本地闖入者(在近地表處置場的情況下，這兩者可能無法區別)。有意或無意闖入與蓄意或非蓄意闖入之間是否有區別？這些闖入潛在影響應如何受到保護，並在這種情況下訂出適合劑量標準呢？

ICRP 第 81 號報告為這領域國際指引的發展提供了有用的基礎，但區別有意和無意人員闖入未必對當地社區是有利的，且如果 ICRP 指引解釋成“雙重標準”則有混淆的可能性。更明確、合理清楚的避免人員闖入所導致之劑量是必要，確認貯存系統長期演化、放射性核種衰變與人員闖入後果之間的差異是有用的。

在評估後果方面，由於長期的時間區間和不確定性，只有一個後果的指示是合理與適當的。且使用一些程式化模擬情節來指出可能發生的後果是合理的。模擬情節必須是保守的，但不可過於無理。這種做法與輻射防護方面所使用的“參考人”觀念上類似。一般認為模擬分析不應過於複雜，建議三種基本的闖入情節：直接闖入與輻射直接曝露並接受高劑量輻射(鑽井者曝露於用

過核燃料輻射曝露之下)、直接闖入與延長輻射曝露並接受低劑量(廢棄物已由貯存庫中移除,且人民居住於廢棄物上面或附近)以及非直接曝露,且由已損壞障壁的貯存庫受到低劑量的輻射曝露,所接受的曝露比自然演化過程中所受曝露要來的快。

地質處置的概念可分為三種類型:在岩鹽礦之地質處置、在不飽和岩層之地質處置以及飽和岩層形成多重工程屏障之地質處置。在上述每種情況下人類闖入的可能性和目的是不同的,並且人類闖入所造成的後果也是不同的。

2.1 防護未來世代

低放處置的主要目的是防護現在與未來世代,避免現在世代產生的廢棄物所產生的輻射結果。但是,永久全面的隔離是不可能達成,廢棄物的內容物某些比例會遷移至生物圈,在未來百年或千年可能產生曝露。在如此長時間刻度的個人與民眾的劑量將被人評估,而這些評估的可靠度隨著未來時段的增加而減少。因此,基本定律是,未來的個人與民眾至少負擔得起現在世代之今日所採取行動的相同程度防護。但是,對於很多處置系統,於處置系統建立過程就防止未來世代的選擇(例如可回收性),但在任何情況下,這將損害處置系統的安全。

防護未來世代至少相同於現在世代的目的是,表示使用現行劑量與風險的約束的指標,這些約束由認為相關健康損害來推導。劑量與風險,充當量健康損害,不能在未來的大約數百年以外的時段以任何肯定方式來預測。從事較長時間區段的劑量與風險評估,並在一個測試中適當法規中給予指標之比較來處置場是可接受的,這是處置系統現行做法。如此的評估不必然認為能預估未來的健康損害。

不能假設未來世代知道現在世代低放處置所採用的處置。因此低放處置的未來世代的防護之達成，主要要靠於建造階段處置場的被動措施，而不過分依賴未來世代採取的積極的措施。然而，處置設施封閉後，維持一段長時間的行政管制也許可加強處置設施安全性可信度，尤其可降低闖入者的可能性。尤其淺層處置的全部輻射安全的重大貢獻措施，端賴行政管制能繼續延長一段長時間。

2.2 關鍵群體

關鍵群體的曝露評估，是以平均年劑量，也就是說人口群體指一些個人代表群體預期接受最高年劑量，而這群體小到有年齡、飲食、其他影響劑量接受行為，均有相對同質性。

由於考量長時間刻度，關鍵群體的性質與習性以及所處的環境僅能假設。因而該關鍵群體必須是假設。關鍵群體的假設性質與習性必須以合理保守且似真實的假設為基礎來選擇，而且考量現行的生活型態以及可獲得的場址或地區特定資訊。這個方法符合輻射領域所採用，並以 ICRP 的報告為基礎。此外，在很多情況不同情境有不同關鍵群體也許有不同的發生機率，因此最高劑量也許不連結最高風險。因此，決策者要清楚表示不同情境及其相關發生機率(至少其相應機率值)，這是很重要的。

關鍵群體不能有假設獨立生物環境來界定。由於自然力的作用發生長期生物環境重大改變相同於發生於過去的現象。人力作用可能影響生物環境，但只能推測人類行為。關鍵群體與生物環境被界定使用基於現行可取的場址或區域的資訊的場址特定方法，或基於更多習慣與條件的格式化的方法對於較長期的時間刻度格式化的方法將變得更重要。

在長期而言，同關鍵群體同質性不是主要考量，假如適當關注選擇關鍵群體的習慣與特質。此外，可能假設低放處置場外釋放放射性污染生物環境可能維持於一段時間且相對的一定量，該一段時間比起人類生命期限還非常長。然後有理由計算個人生命周期的平均年劑量/風險，這意味無須計算不同年齡組群的劑量，這個平均足夠表示年劑量/風險。最後，關鍵群體之假設特性應符合支持關鍵群體的生物環境的可能性。

2.3 潛在曝露

潛在曝露也許對於低放處置系統的預期行為作用過程所產生，這過程通常於一額定時間一個發生機率。因此防護可靠的過程曝露個人之最佳的達成方法，是考量該過程發生機率與該過程曝露量。分開處置正常排放與機率情況也許不是必須的。

2.4 防護最佳化

2.4.1 一般事項

約束最佳化是評估低放射性廢棄物處置選擇的可接受性的主要方法。決策者執行該方法要確定各種可能選擇方法的可能曝露的來龍去脈，見圖 1。其中，「規範的技術」是指不考量社會經濟的因數之技術，而「判段程序」是指考量社會經濟的因數之最佳化技術，詳細論述見本文 17 頁第一段；「聚集的方法」是指將自然過程產生的風險與造成劑量，訂立單一風險或劑量限值來限定的方法，「非聚集的方法」是指將自然過程產生的風險與造成劑量，分別訂立風險與劑量限值來限定的方法。

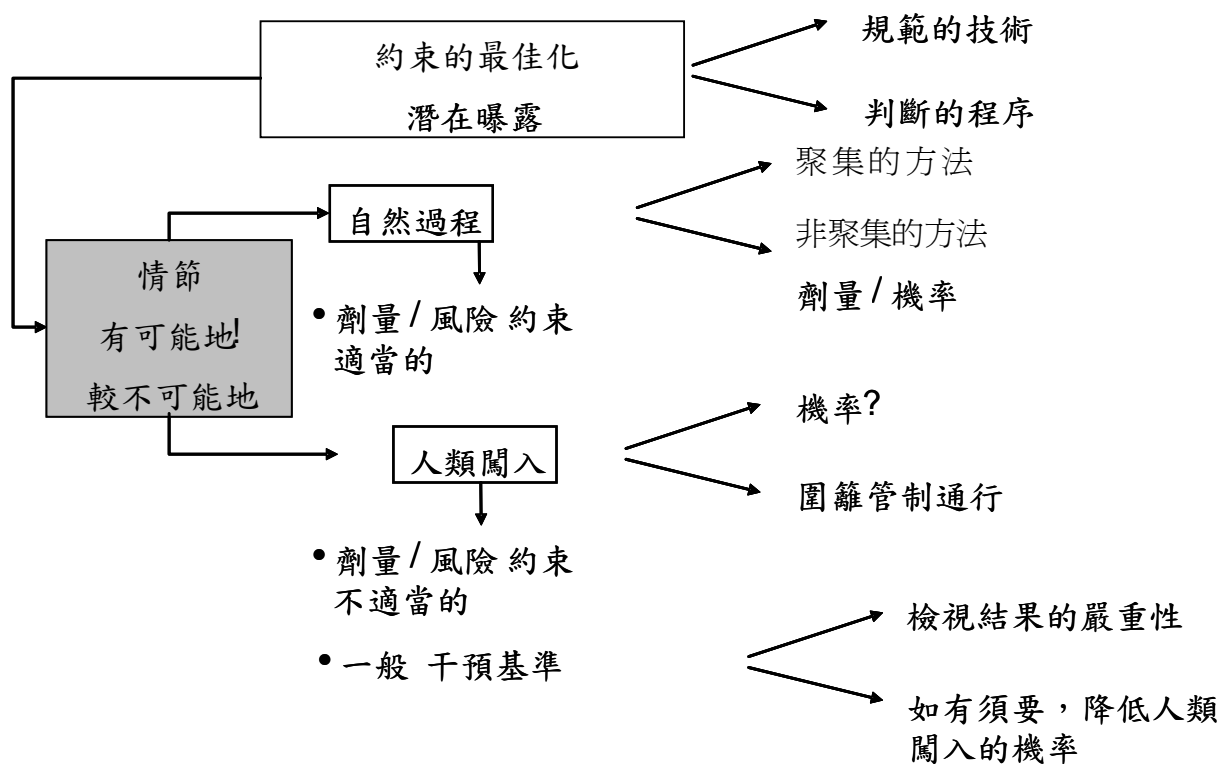


圖 1 方法的選擇

正式潛在曝露最佳化技術尚有留待發展，如下列 ICRP 報告所強調的：

- ICRP 64 號報告⁽²⁾：處置放射性廢棄物導致輻射源外釋也許需一段非常長的時間，這引起潛在曝露評估對於事件與過程的機率分派的方法學問題。
- ICRP 76 號報告⁽³⁾：潛在曝露最佳化防護還是有很大的決解的，尤其當機率很低但結果很嚴重的時候。
- ICRP 77 號報告⁽⁴⁾：長半化期核種的風險評估的潛在曝露的角色尚未清楚。

本文中，最佳化防護是判斷程序，具有考量社會與經濟因素，將被以結構與實質量化的方式來執行。最佳化防護是確保採取合理措施減低未來的劑量到達需要投入資源與這些減低措施一致的程度。最佳化原則將以重覆的方法應用於低放處置系統研製的過程，尤其涵蓋場址的選擇與處置場設計階段。

有兩類必須考量潛在曝露的曝露情境：自然過程與人類闖入。最佳化將探索和使用合理的措施去降低自然過程的機率與曝露量，這些措施包含：抗地震的本質、留存的能力、貯存桶的設計；以及疏忽的人類闖入之合理的措施如行政管制措施、選擇處置場的深度。

評估個人的劑量與風險要投入最佳化程序。兩類曝露情境(自然過程與人類闖入)的應用的輻射防護規定是不同的。第一類的評估劑量風險是和劑量風險約束比較，以便建立有關個人曝露的可接受性。但是，當考量到人類闖入的情事，低放廢棄物處置就沒有適當使用約束值。這是因為沒有或很少科學基礎去預測未來人類行動的本質與機率，以及因為闖入事件已經被投入在適當的地方越過一些或全部障壁充當最佳化防護的一部分。

傳統上，集體劑量是進一步投入最佳化防護，但在低放處置是限制使用的，但是及時考量曝露人員的數人以及個人劑量分布可能有某些助益。

2.4.2 自然過程情節應用輻射規定

自然過程這個詞句包含不是人類闖入所有導致個人曝露的過程，一般建議於正常曝露情況個人相關劑量上限劑量約束值每一年 0.3 mSv，這相對的風險約束級數是每一年 10^{-5} 。

證實是否符合約束的方法：(1) 藉由結合劑量與機率聚集風險；(2)對於每種曝露情況表示分別的劑量與發生機率。使用兩者會達成某種程度的防護。

在聚集的方法中，相關低放射性廢棄物處置系統可能的過程引起未來劑量的所有風險，要與劑量約束值比較。這個方法概念上滿足但需要考量廣泛的評估所有相關的曝露情況及其相關的機率。

在非聚集劑量/機率的方法中，可能代表性外釋情節被確認，與這些情節將計算劑量並與劑量約束值比較。其他不可能的情節的輻射重要性，被分別評估其結果劑量及其發生機率。注意的是，這個方法無需這些發生情節精準量化機率，反而要正確評估輻射結果平衡對於輻射結果的預估機率量。其他注意事項如計算的劑量或風險的時間與大小範圍也許是重要性。

雖然這些方法可達成相同程度的防護，為了決策目的從分別考量特定情況引起劑量發生機率，與結果劑量也許須獲得更多資訊。

2.4.3 人類闖入應用輻射規定

評估人類闖入的曝露的可能性是不可避免的決策結果，這個決策是集中低放射性廢棄物於個別的處置設施而不是稀釋或疏散廢棄物。人類闖入可能帶來廢棄物至表面直接曝露附近的民眾造成重大輻射劑量。人類闖入的外釋，如鑽孔，也許發生將汙染遷移至生物環境而曝露，這曝露是非直接相關的或伴隨著闖入事件而發生。

人類闖入曝露防護達成最佳方法是努力降低闖入事件的機率，執行合理的措施去警告社會低放處置設施的存在。這也許包含選址時處置設施設置至深層或合併使得闖入更困難之健全的設計特性，或主動式行政管制(如限制進入或監測可能外釋) 和被動式行政管制(如紀錄與標記)。

因為人類闖入的發生不能全部被排除，決策者將考量一個或多個典型似合理格式的闖入情節去評估處置場可能闖入可能的結果。原則上，人類闖入的重要性理想上也許評估時使用以風險為基礎的方法，該方法考量闖入的機率與其相關結果。但是，預估闖入風險的機率是需要依據未來人類行為所做的假設。因為對於預估未來人類行為的本質與機率沒有科學基礎存在，不適宜量化績效評估中包含闖入事件的機率，此評估結果將比較劑量或風險約束。

一般建議低放射性廢棄物管理最佳化防護的劑量約束值為對民眾每年 0.3 mSv。此值不是用於評估人類闖入的約束值因為依照定義闖入將越過屏障，這被認為是處置設施的最佳化防護。

然而，人類闖入防護之重要措施是必需的。此外的社會也許不知道由闖入而導致的曝露，任何防護必須行動將於處置系統制定時期被考量。闖入也需引起未來的個人急性或長期劑量。一般認為，在人類闖入的環境中，可能導致居住於場址附近的民眾非常高的劑量，因而在現行規定中干預總是正當的。從事合理作業努力去降低人類闖入的機率或限制其結果。在這方面，一般建議，現存的年劑量大約 10 mSv 可充當一般參考基準，低於此值干預不可能是正當的；相反的，現存的年劑量大約 100 mSv 可充當一般參考基準，高於此值干預被認為總是正當的

2.5 技術與管理人的原則

一般建議，潛在曝露之技術與管理的原則將運用於處置系統建立過程期間，以加強整個封閉後階段保持輻射安全之信心。此原則應用於處置系統以符合內在的廢棄物危險水平，以及發現評估的殘餘不準確度之方法。

這些原則的關鍵是在深層防禦的概念，提供成功被動式安全措施，此措施加強處置是健全的與有足夠安全餘裕之信心。低放廢棄物處置之深層防禦主要是使用多重障壁，其提供不同防禦線的組合，去防護低放廢棄物處置系統可能安全挑戰。

其他技術與管理的原則是促成加強達成安全必需程度的信心。

- (a) 低放廢棄物處置系統的建立作業必是基於穩固工程原則與作業，其到達的程度被測試與實驗來證實，並考量需要研究與創新來改進安全。此改進盡可能反映在核准的法規和標準或其他適當的文件。
- (b) 品質保證的廣泛系統確保處置場系統被建造依據計畫和設計。
- (c) 所有參與處置系統建立階段人員，其行為影響輻射安全，將其訓練與合格化去執行其工作。並考量人類引發錯誤的可能性。
- (d) 低放廢棄物處置系統的建立期間應迭代執行輻射評估直到封閉，以確認該系統的弱點與靈敏度。這些評估被嚴格執行以便證明是否符合安全規定。應注意評估方法的內在限制條件、資料可能誤差、現存資料的另一種解釋，以確保計算結果足以表示或符合該系統的所造成結果。將這些評估執行同業審查、文件公開討論、開放民眾參與討論，也是對其加強信心的重要貢獻。
- (e) 建立回饋機制，以便評估的結果能可量去指引低放廢棄物處置系統建立階段。低放廢棄物處置系統建立階段之所有團體的緊密合作是增進安全必要的。

另外，參與低放廢棄物處置系統建立過程之所有個人與組織的技術與管理原則，是對於管理所有作業保持一致與完全之安全方法。這個原則就是指“安全文化”。

2.6 符合輻射防護原則

2.6.1 一般事項

評估符合輻射防護原則是基於廣泛安全事實，此事實支持以多行推理，包含好的了解系統價值以及量化績效，並支持以或補充以定性的論點，包含場址相關性質的觀察以及系質相似體的資訊。分析複雜性將符合低放廢棄物的危險性。假如有個健全評估證明其結果在建議約束值之內，也許不需要進一步分析。

在一個長期輻射評估，在合理選擇測試情況下，計算劑量或風險，就好像在 ICRP 架構下所界定的劑量或風險進行評估。輻射評估將被認為是績效措施或安全指標，指示廢棄物處置系統所提供的輻射安全程度。提供額外的洞察，其也許有用於尤其是遙遠未來的定性比較，也就是說保持低放廢棄物處置系統潛在的危險由其他自然過程或人類引起風險。在正確的觀點，該比較也許有助於低放廢棄物處置系統之輻射可接收性的判斷。

在較長的時間尺度上的廢棄物處置系統的劑量或風險進行評估，一種方法是考慮的劑量或風險到達 1000 至 10000 年等級定量估計。這種方法側重於該期間內的劑量計算最直接關係到健康損害，還確認可能性在較長的時間框架相關的風險災難性的地質變化，如冰川作用和構造運動，可能會隱藏廢棄物處置系統的風險。另一種方法是考慮到進一步未來的定量計算，越來越多地使用格式化的方法，於判斷的計算結果時考慮了時間長度。

2.6.2 分階段的方法

低放射性廢棄物處置系統的建立過程可能需要幾十年，和包含幾個界定良好的里程碑決策點。這些連續的階段是選址、系統設計、建造、運轉、

封閉以及封閉後。證明遵守輻射防護原則是處置場運轉前所必要的。在作業中，這是最好的使用一個分階段、迭代的方法，包括漸進式評估處置場建立的各個階段，和嚴格審查進展之過程。

任何廢棄物處置系統之長期的評估，其不確定性是固有的。這些不確定因素，其中有一些是無法量化的，說明如下：

- (a) 數據的不確定性，反映並不十分了解，受設計和影響封閉後周圍的環境之處置場性能。
- (b) 未來狀態的不確定性，這反映了我們預測未來的人類行為和環境的未來狀態之不完善能力。
- (c) 模型的不確定性，這反映了執行計算機模型的數學描述時，處置系統概念性描述與概念的數學描述的不確定性。

鑑於處置系統的複雜性，應當作出努力於低放廢棄物處置系統的建立過程中理解這些不確定性的意義，並通過場址特性和實驗來減少不確定性。此外，在過去已採用的改進方法，以了解和評估這些不確定因素的重要意義。儘管盡了最大的努力，以減少不確定性，剩餘的不確定性將存在於決策的時機裡。專家判斷應被使用於評估這些殘餘的不確定性與調查結果是很重要的。

一般認為，不確定性分析，應該是劑量或風險計算過程一個不可分割的一部分的，不管任何時間盡可能，報告的結果應包括可能的值的範圍，而不是一個單點值。分析的不確定性對於評估的目的應該能滿足需要的。

2.6.3 證明符合放射性規定

證明符合放射性規定將於未來符合，並非如此簡單直接的比較，估計劑量/風險的約束。證明低放處置系統滿足標準不能是絕對的，因為固有的不確定性，特別是在長期的場址的地理環境、生物圈、工程障壁之發展的認知。適當的評估應當是科學合理，採納合理的概念理解系統的性質，用程式化的方法和合理的保守的適當的假設，而且通常是藉由諮詢專家進行同業審閱。這些評估也說明尚存的不確定度藉由計算結果合適的表示的（例如，數字範圍或評估值邊界值）。因此，決定處置系統的可接受性，應根據合理的保證，而不是一個絕對的證明符合。

評估結果是否符合約束值需要判斷。劑量/風險約束值在更遠的將來的時間區段應越來越多地被視為僅是參考值。約束值提供了判斷的依據。評估結果之數值符合約束值不應該強迫接受是安全的。尚需要有足夠的支持數據，證據和分析的良好品質，以及處置系統的整體設計與建造和前面提到的技術和管理原則相一致的要求。同樣的道理，超過約束值沒有必然迫使拒絕承認處置系統是一個安全的情況。只是其評估結果，可能納入沒有量化的保守性論點。當時間架構增加，評估超過劑量或風險劑量或風險約束值應增加誤差。這不能被誤解為減少保護後代，與世代公平保護原則矛盾，而是作為一個充分考慮計算結果的不確定性。然而，任何違反設計必須是正當化，而且處置系統的安全必須得到其他證據支持，違反設計的原因必須進行評估，以確定額外的措施是否會導致更好的防護。

在最佳化防護和應用的技術和管理原則中，需要作出判斷。然而，這不應該是一個在期限上或數量上無限制的過程。更特別的，一般觀點是，自然過程只要適當的約束就已得到符合，並即採取合理措施，以減少人類

闖入的機率，並依據健全工程、技術和管理的原則，輻射防護規定可以被認為是符合的。

3.國際低放處置輻射風險標準比較與分析

3.1 ICRP 第 60 號報告

ICRP 第 60 號報告(1990)⁽⁵⁾將個人輻射曝露分為兩類：(1)正常曝露(normal exposure)係指合理可預期發生之曝露，其發生之機率為 1 或趨近於 1 適合以輻射劑量標準管制，(2)潛在曝露(potential exposure)為不可確知一定會發生的曝露，適合以輻射風險標準管制。

低放處置潛在曝露之管制需訂定風險標準來管制，其對策主要是預防(prevention)與減緩(mitigation)，通常其發生機率、後果及劑量之大小，可在一定程度上加以控制。預防是減少發生機率的措施。減緩是降低劑量大小或嚴重程度的措施，發生前階段，可用輻射作業的輻防體系來處置，一旦發生，按干預(intervention)輻防體系來處置。

依據 ICRP 第 46 號報告(1985)⁽⁶⁾對風險定義如下：

$$R=P(D) \times p(\text{eff}/D)$$

$P(D)$ ：對個人或關鍵群所造成之輻射劑量介於 D 與 $D+dD$ 之機率。

$p(\text{eff}/D)$ ：個人或其子孫在其接受輻射劑量 D 後所造成致命健康效應之機率。ICRP 第 46 號報告建議放射性廢棄物最終處置之安全標準：

(a)劑量標準：1 mSv/y (相當於每年得到致死癌症的機率為 5×10^{-5})

(b)風險標準： 10^{-5} y^{-1}

ICRP 第 81 號報告⁽⁷⁾將放射性廢棄物最終處置造成曝露的過程分為兩種：自然過程(natural processes)，大自然正常、漸近之的過程(如冰河作用、地殼構造運動與等地質改變等)，將造成曝露，機率性的過程，將造成潛在曝露；其次，人類闖入(human intrusion)屬無意闖入(inadvertent

intrusion)，屬於機率性事件，將造成潛在曝露。這潛在曝露發生，在於淺地層處置為人類闖入築屋或農耕暴露事件；在於深地層處置，則為人類闖入鑽孔(drilling) 事件。

ICRP 第 81 號報告指出人類闖入屬於機率性情節，可能會造成很高的劑量，用劑量標準管制並不適當。建議在處置場開發階段，可用合理措施(如監管、提高處置場深度、加強防止闖入措施等)降低民眾闖入機率或限制其後果。

下表 1⁽⁸⁾比較各國的低放射性廢棄物處置輻射風險標準，其中美國、法國、我國均以 0.25 mSv/y 來訂立自然過程與人類闖入潛在曝露之劑量標準，而未訂立風險標準。另日本訂立了 10~100 mSv/y 自然過程與人類闖入潛在曝露之低放射性廢棄物處置劑量標準，而未訂立潛在曝露風險標準，只有韓國訂了低放射性廢棄物處置一般曝露標準為 0.1 mSv/y，而其潛在曝露風險標準訂為 10^{-6} y^{-1} ，這訂得比 IAEA、ICRP 所定的一般曝露標準為 0.3 mSv/y，潛在曝露風險標準 10^{-5} ，還嚴格。

表 1：國際低放處置輻射風險標準比較

	劑量標準(mSv/y)	風險標準(y^{-1})
IAEA、ICRP	0.3	10^{-5}
美國	0.25	-
法國	0.25	-
日本	0.01(基本情節) 0.3(變動情節) 10~100(人為或稀有事件 情節)	-
韓國	0.1	10^{-6}
中華民國	0.25	-

我國可參酌日本訂立自然過程與人類闖入潛在曝露之低放射性廢棄物處置劑量標準，而不訂立潛在曝露風險標準，也可參酌韓國訂立低放射性廢棄物處置一般曝露標準、潛在曝露風險標準，為其較 IAEA、ICRP 所定的還嚴格，似可放寬。

4. 結論

放射性廢棄物的存在是既成的事實，來自醫、農、工、研業者的放射性廢棄物與未來核能電廠除役拆廠產生的廢棄物，均須予以妥善處置。日本 NSC 考量處置的長期安全，具有很高之不確定性，為了讓放射性廢棄物處置安全評估更具科學的合理性，參酌採用風險機率概念方式，進行放射性廢棄物處置的安全評估，依不同發生頻度的事件之對應情節，採取不同的劑量限值，唯，由於未來人類行為的不可預測性與氣候變遷自然災害發生機率估算之困難，欲對風險加以評估，在執行上恐難落實。

本文比較各國低放處置輻射風險標準，來作為本國訂立低放處置輻射風險標準的參考。低放處置輻射風險標準訂立優點，是考量機率性事件之機率及其後果，合理化安全標準，並提供不同情節重要性的比較基礎。但缺點是事件機率值的設定困難，含有不準度相同風險的不同事件，民眾仍將較為關切高劑量低機率的事件，這將導致發生機率與造成劑量分開討論。尤其是人類闖入情節因為對於人類未來行為無法量化機率，沒辦法訂立其風險標準，而對於自然事件引發的低放處置潛在曝露風險，可從以往地質歷史中，預估其風險適合訂立風險標準。可在低放最終處置場的選址過程中，選擇潛在曝露風險低的場址設立。

放射性廢棄物處置的基本原則，為下一個世代由今日放射性廢棄物處置行動所受到的保護水平應等同於這個世代所受到的保護水平，此意味著要使用現有自健康損傷推導出的風險和劑量標準，所以應將這些劑量或風險標準應用至適當定義臨界群體的未來劑量預估值，以實現對下一個世代的保護，這

些評估不應視為對未來數百年健康效應的量度，對於更長的時間，它們代表處置系統能夠承受的防護指標。

另，參酌表 1 美、法、日諸國均未訂立低放處置風險標準，且人類闖入情節因為對於人類未來行為無法量化機率，沒辦法訂立其風險標準，建議本國應效法日本建立人類闖入與自然過程情節的低放處置輻射劑量標準，而非低放處置輻射風險標準，以利低放處置之推展；有關低放處置輻射劑量標準，如表 1 國內已有研究及標準，故本計畫將不再進行進一步研究及未來計畫。

參考文獻

1. 原能會，2009，放射性物料管理法施行細則，中華民國九十八年四月二十二日，會物字第 0980007399 號函發文實施。
2. ICRP (1993) Protection from Potential Exposure: A Conceptual Framework. ICRP Publication 64, Annals of the ICRP 23 (1).
3. ICRP (1997) Protection from Potential Exposures: Application to Selected Radiation Sources. ICRP Publication 76, Annals of the ICRP 27 (2).
4. ICRP (1997) Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste. ICRP Publication 77, Annals of the ICRP 27 Supplement 1997.
5. ICRP (1991) 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (1-3).
6. ICRP (1985) Radiation Protection Principles for the Disposal of Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 46, Annals of the ICRP 15 (4).
7. ICRP (2000) Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, ICRP Publication 81, Annals of the ICRP 28 (4).
8. 放射性物料管理局，「低放射性廢棄物最終處置輻射風險標準研修說明簡報資料」，民國 99 年 6 月 29 日。