

行政院核能安全委員會

委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析

案號： NSC11301014L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

報告作者：陳韶萱

報告日期：中華民國 113 年 11 月

摘要

配合我國核電廠除役作業現場實務與核能安全委員會管制需求，針對我國核電廠申請解除除役管制之文件內容及相關報告審查要項之管制重點，本計畫蒐集並研析美國 Zion 和 La Crosse 核電廠 Class 2 與 Class 3 最終狀態偵檢相關文獻，包含偵檢規劃、偵檢報告、相關技術文件、美國核管會的審查意見，以及業主對審查意見的回應和應對措施等。

本報告研析內容包含最終狀態偵檢規劃指引、Zion 核電廠與 La Crosse 核電廠根據指引的規劃實務、Zion 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查、La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查，以及對我國核電廠解除除役管制要項的建議等。提出的建議包含實務上核電廠最終狀態偵檢的提交方式、監管單位對最終狀態偵檢報告審查的項目，以及核電廠在完成最終狀態偵檢後應避免的狀況。

Abstract

To get the knowledge of the content and practical experiences related to the termination of licenses for nuclear power plants in the United States, this project has collected and analyzed documentation related to the final status surveys (FSS) for Class 2 and Class 3 survey units at the Zion and La Crosse nuclear power plants in the United States which includes survey planning, survey reports, relevant technical documents, the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) review comments, and the plant operators' responses and measures addressing those comments.

This report analyzes the guidelines for final status survey planning, practical examples from the implementation of these guidelines at Zion and La Crosse nuclear power plants, and a review of the final status survey reports for both facilities, including the NRC's evaluation process. After consolidating, summarizing, and analyzing the collected literature, recommendations for the review and regulatory requirements pertaining for the decommissioning and deregulation of domestic nuclear power plants were proposed, covering practical submission methods for final status survey documentation, regulatory review considerations, and situations that nuclear power plants should avoid after completing the final status survey.

目錄

摘要.....	i
目錄.....	iii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xi
專有名詞.....	xv
一、前言.....	16
(一) 計畫背景與目的.....	16
(二) 工作項目.....	16
二、蒐集及研析文獻.....	18
三、最終狀態偵檢規劃指引與規劃實務.....	20
(一) 最終狀態偵檢目的.....	20
(二) 最終狀態偵檢單元區域分級.....	21
2.1 最終狀態偵檢單元區域分級規範.....	21
2.2 Zion 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務.....	23
2.2.1 Zion 核電廠開放土地區域.....	23
2.2.2 Zion 核電廠建築與結構.....	28
2.3 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務.....	33
2.3.1 La Crosse 核電廠開放土地區域.....	33
2.3.2 La Crosse 核電廠建築與結構區域.....	37
(三) 偵檢量測方法.....	39
3.1 品質管控(QC)偵檢.....	40
3.1.1 重複量測和偵檢(Replicate Measurements and Surveys).....	40
3.1.2 複本樣本和分割樣本(Duplicate and Split Samples).....	41
3.2 調查基準(Investigation Levels).....	42

3.3 重新分級/重新除污/重新偵檢標準	42
3.4 Zion 核電廠最終狀態偵檢量測方法規劃實務	44
3.4.1 表土(Surface Soils).....	44
3.4.2 次表土(Subsurface Soils)	44
3.4.3 挖掘土的再利用(Reuse of Excavated Soils).....	46
3.4.4 人工鋪面區域(Pavement Covered Areas).....	46
3.4.5 地下埋管(Buried Piping).....	46
3.4.6 地下水(Groundwater).....	46
3.4.7 沉積物和地表水(Sediments and Surface Water).....	46
3.5 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢量測方法規劃實務	46
3.5.1 表土(Surface Soils)與次表土(Subsurface Soils).....	46
3.5.2 挖掘出的土壤與乾淨填料(Excavated Soils and Clean Fill)	47
3.5.3 人工鋪面區域(Pavement Covered Areas).....	47
3.5.4 地下埋管	47
3.5.5 地下水.....	47
3.5.6 沉積物和地表水(Sediments and Surface Water).....	47
3.5.7 建築、結構和設備(Survey Considerations for Buildings, Structures and Equipment).....	47
(四) 劑量模型.....	48
4.1 Zion 核電廠劑量模型	48
4.1.1 回填地下室結構表面(Backfilled Basement Structure Surfaces).....	49
4.1.2 土壤.....	49
4.1.3 地下埋管(Buried Piping).....	49
4.1.4 嵌管(Embedded Piping).....	49
4.1.5 穿管(Penetrations)	49

4.1.6 地下水.....	49
4.2 La Crosse 核電廠劑量模型.....	50
4.2.1 回填地下模型(BFM, Basement Fill Model)	50
4.2.2 土壤.....	51
4.2.3 埋地管道	51
4.2.4 地下水.....	51
4.2.5 保留之地上建築	51
(五) 關注核種(ROC)	52
5.1 Zion 核電廠最終狀態偵檢之 ROC	52
5.1.1 Zion 核電廠初始核種清單	52
5.1.2 Zion 核電廠反應器廠房和輔助廠房地下室 ROC.....	54
5.1.3 Zion 核電廠土壤 ROC	54
5.1.4 Zion 核電廠地下埋管 ROC	54
5.1.5 使用於調整 DCGL 的不顯著貢獻核種劑量貢獻比例	55
5.1.6 難測核種(HTD)替代核種比值	55
5.2 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢之 ROC	55
5.2.1 La Crosse 核電廠初始核種清單	55
5.2.2 La Crosse 核電廠 ROC	56
5.2.3 La Crosse 核電廠地下埋管 ROC	56
5.2.4 使用於調整 DCGL 的不顯著貢獻核種劑量貢獻比例	57
5.2.5 難測核種(HTD)替代核種比值	57
(六) DCGL 和 SOF.....	57
6.1 DCGL(Derived Concentration Guideline Levels)	57
6.2 SOF(Sum-of-Fractions)	58
(七) 最終狀態偵檢結果評估	58
7.1 EMC(Elevated Measurement Comparison).....	60

7.1.1 Zion 核電廠面積因子	60
7.1.2 La Crosse 核電廠面積因子	61
7.2 劑量評估計算	61
7.2.1 運用 DCGL 計算	61
7.2.2 運用劑量轉換因子計算	61
7.3 偵檢單元偵檢結果評估	62
7.4 除役核電廠合規劑量(Compliance Dose)	63
7.4.1 Zion 核電廠合規劑量計算公式	63
7.4.2 La Crosse 核電廠合規劑量計算公式	63
四、 Zion 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查	66
(一) Zion 核電廠除役簡介	66
(二) Zion 核電廠最終狀態偵檢報告與審查概述	68
(三) Zion 核電廠開放土地偵檢單元最終狀態偵檢報告	68
3.1 Phase 1 FSSR	69
3.1.1 偵檢規劃	69
3.1.2 偵檢結果	72
3.1.3 結論	73
3.2 Phase 4 FSSR	73
3.2.1 偵檢規劃	73
3.2.2 偵檢結果	76
3.2.3 結論	78
(四) Zion 核電廠地下結構偵檢單元最終狀態偵檢報告	79
4.1 FSSR Phase 2-Part 1 地下室結構偵檢結果報告(Class 3)	79
4.1.1 偵檢規劃	79
4.1.2 偵檢結果	86

4.1.3 結論.....	87
4.2 FSSR Phase 2–Part 2 地下埋管	87
4.2.1 偵檢規劃.....	87
4.2.2 偵檢結果.....	91
4.2.3 結論.....	92
(五) NRC 對 Zion 核電廠最終狀態偵檢報告的審查	93
5.1 NRC 對 Zion 核電廠開放土地 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之審查	94
5.1.1 Phase 1 FSSR 審查結果	94
5.1.2 Phase 3 FSSR	96
5.1.3 Phase 4 FSSR 審查結果	96
5.1.4 開放土地區域確認偵檢(Confirmatory Survey)	96
5.1.5 DRP(Discrete Radioactive Particles).....	102
5.1.6 隔離和管制措施違規事件	103
5.1.7 NRC 對 Zion 核電廠開放土地最終狀態偵檢報告之審查	104
5.2 NRC 對 Zion 核電廠地下結構 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之審查	104
5.2.1 地下結構區域確認偵檢(Confirmatory Survey)	105
5.2.2 NRC 對 Zion 核電廠地下結構最終狀態偵檢報告之審查結論	105
5.3 地下水劑量.....	106
5.4 最終狀態劑量加總和分析.....	106
5.5 潛在可能因 DRP 粒子造成的劑量	106
5.6 NRC 對最終狀態劑量的評估.....	107
5.7 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR 之 SER 總結	107
五、 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查	108
(一) La Crosse 核電廠除役簡介.....	108
(二) La Crosse 核電廠核電廠最終狀態偵檢報告.....	110
2.1 Phase 1 FSSR	111

2.1.1 偵檢規劃	111
2.1.2 偵檢結果	114
2.1.3 結論	114
2.2 Phase 2 FSSR	114
2.2.1 偵檢規劃	114
2.2.2 偵檢結果	118
2.2.3 結論	119
2.3 Phase 3 FSSR	120
2.3.1 偵檢規劃	120
2.3.2 偵檢結果與劑量評估	123
2.3.3 地下水現況概述(Overview of Existing Groundwater)	123
2.3.4 合規劑量計算	124
2.3.5 結論	126
(三) NRC 對 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告的審查	127
3.1 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元提出之 RAIs	128
3.2 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元相關確認偵檢結果	129
3.3 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之 SER 審查	129
3.3.1 開放土地偵檢單元之審查結果	129
3.3.2 地下埋管偵檢單元之審查結果	130
3.3.3 剩餘地上建築偵檢單元之審查結果	130
3.3.4 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 FSSR 之 SER 總結	130
六、我國核電廠解除除役管制要項建議	130
七、參考文獻	132

圖目錄

圖 1 美國核能電廠除役概要程序圖	20
圖 2 MARSSIM 除役輻射偵檢作業程序	21
圖 3 Zion 核電廠未受輻射影響偵檢單元	24
圖 4 Zion 核電廠初始分級-輻射管制區外之 Class 3 開放土地偵檢單元	24
圖 5 Zion 核電廠初始分級-輻射管制區內之 Class 3 開放土地偵檢單元	25
圖 6 Zion 核電廠初始分級-Class 1 和 Class 2 開放土地偵檢單元	25
圖 7 Zion 核電廠開放土地 Class 3 偵檢單元對照圖(左：初始分級，右：最終分級)...	26
圖 8 Zion 核電廠開放土地 Class 1 & 2 偵檢單元(左：初始分級，中和右：最終分級)	26
圖 9 Zion 核電廠 1 號機圍阻體 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分)	28
圖 10 Zion 核電廠 2 號機圍阻體 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分)	29
圖 11 Zion 核電廠 2 號機輔助廠房 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分).....	30
圖 12 Zion 核電廠汽機廠房 Class 2 偵檢單元(地下三英尺以下部分).....	31
圖 13 Zion 核電廠循環水系統前池 Class 2 偵檢單元	31
圖 14 La Crosse 核電廠開放土地初始偵檢單元分級	34
圖 15 La Crosse 核電廠開放土地受輻射影響區域偵檢單元圖	35
圖 16 Zion 核電廠原執照範圍	66
圖 17 Zion 核電廠輻射管制區	67
圖 18 Zion 核電廠安全管制區	67
圖 19 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元位置	70
圖 20 Zion 核電廠 Phase 4 偵檢單元位置	75
圖 21 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 偵檢單元標示圖	80
圖 22 ISOCS 測量位置標記系統範例	84
圖 23 Zion 核電廠 Phase 2-Part 2 偵檢單元標示圖	88
圖 24 2020 年 9 月 2 日確認偵檢單元	98

圖 25 Zion 核電廠 FSS 偵檢單元圖(左：Phase 1；中：Phase 3；右：Phase 4).....	99
圖 26 2023 年 11 月 3 日表土確認偵檢偵檢單元和掃描涵蓋比例	99
圖 27 次表土確認偵檢單元和 Grid ID	100
圖 28 FSS 偵檢單元及發現 DRP 位置	101
圖 29 La Crosse 廠址全覽	109
圖 30 La Crosse 廠址初步分級與廠房位置圖	109
圖 31 La Crosse 核電廠 Phase 1 偵檢單元位置圖	112
圖 32 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元位置圖	116
圖 33 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元位置圖	121

表目錄

表 1 NRC 指引文獻.....	18
表 2 Zion 核電廠最終狀態偵檢相關文獻.....	18
表 3 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢相關文獻	19
表 4 偵檢單元區域分級依據與範例	22
表 5 最終狀態偵各偵檢單元區域大小與偵檢涵蓋範圍規定	23
表 6 Zion 核電廠開放土地區域偵檢單元數.....	27
表 7 Zion 核電廠 Class 2 & Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍	27
表 8 Zion 核電廠建築結構最終狀態偵檢偵檢單元數	32
表 9 Zion 核電廠地下室及地下埋管偵檢單元分級之調整與原因	32
表 10 Zion 核電廠 Class 2 & Class 3 建築與結構偵檢單元區域大小及掃描範圍.....	32
表 11 La Crosse 核電廠開放土地區域偵檢單元數.....	35
表 12 La Crosse 核電廠 Class 2 & Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍	37
表 13 La Crosse 核電廠建築與結構偵檢單元數	38
表 14 La Crosse 核電廠 Class 2 & Class 3 建築與結構偵檢單元區域大小及掃描範圍 ..	39
表 15 最終狀態偵檢的量測方法說明	40
表 16 複本樣本和分割樣本 QC 偵檢接受評估表	41
表 17 最終狀態偵檢調查基準	42
表 18 重新除污標準與建議行動.....	42
表 19 重新分級標準與建議行動.....	43
表 20 重新偵檢標準與建議行動.....	43
表 21 建築表面之常見核種執照終止篩選值	48
表 22 Zion 核電廠之初始核種清單及其混合比例	53
表 23 Zion 核電廠反應器和輔助廠房地下室 ROC 活度與貢獻劑量	54
表 24 Zion 土壤 ROC 活度與貢獻劑量	54

表 25 Zion 核電廠混凝土芯替代核種最大比值	55
表 26 La Crosse 核電廠之初始核種清單及其混合比例	56
表 27 La Crosse 核電廠 ROC 活度混合比例	56
表 28 La Crosse 核電廠 Sr-90/Cs-137 替代比值	57
表 29 有背景輻射時(使用背景參考區域).....	59
表 30 沒有背景輻射時(無使用背景參考區域).....	59
表 31 Zion 核電廠表土層土壤面積因子	60
表 32 Zion 核電廠次表土層土壤面積因子	61
表 33 La Crosse 核電廠表土層土壤面積因子	61
表 34 偵檢單元偵檢結果評估方法	62
表 35 Zion 核電廠最終狀態偵檢開放土地偵檢單元各 Phase 偵檢單元數	69
表 36 Zion 核電廠 Phase 1 開放土地偵檢單元列表	69
表 37 Zion 核電廠表土土壤 ROC 之 DCGL.....	71
表 38 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元掃描範圍及表土樣本取樣個數	72
表 39 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	73
表 40 Zion 核電廠 Phase 4 中 Class 2 和 3 開放土地偵檢單元列表	74
表 41 Zion 核電廠 Phase 4 偵檢單元表土樣本取樣數	76
表 42 Zion 核電廠 Phase 4 Class 2 和 3 偵檢單元異常數據/掃描偏高之結果和調查	77
表 43 Zion 核電廠 Phase 4 Class 2 和 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	78
表 44 Zion 核電廠最終狀態偵檢地下結構偵檢單元各 Phase 偵檢單元數	79
表 45 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 Class 3 地下室和嵌管偵檢單元列表	79
表 46 Zion 核電廠地下室之關注核種 BcDCGL(pCi/m ²)	82
表 47 Zion 核電廠地下室之關注核種 OpDCGL(pCi/m ²).....	82
表 48 Zion 核電廠地下嵌管(Embedded Pipe)之關注核種 BcDCGL	82
表 49 Zion 核電廠地下嵌管(Embedded Pipe)之關注核種 OpDCGL.....	83

表 50 Zion 核電廠地下穿管(Penetrations)之關注核種 BcDCGL	83
表 51 Zion 核電廠地下穿管(Penetrations)之關注核種 OpDCGL.....	83
表 52 Zion 核電廠 Phase 2–Part1 偵檢設計摘要	85
表 53 Zion 核電廠 Phase 2–Part1 偵檢量測次數	86
表 54 Zion 核電廠 Phase 2–Part 1 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	87
表 55 Zion 核電廠 Phase 2–Part 1 地下埋管偵檢單元列表	88
表 56 Zion 核電廠地下埋管之關注核種 DCGL(pCi/m ²).....	89
表 57 Zion 核電廠地下埋管替代核種 OpDCGL 計算結果	89
表 58 Zion 核電廠 Phase 2–Part2 偵檢設計摘要	90
表 59 Zion 核電廠 Phase 2–Part2 偵檢量測次數	90
表 60 Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	92
表 61 Zion 核電廠最終狀態偵檢與 NRC 審查時程綜覽	93
表 62 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2018~2019)	93
表 63 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2020)	94
表 64 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2021~2023)	94
表 65 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR Phase 1 審查提出問題和 Zion 核電廠的回覆.....	95
表 66 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR Phase 2 Class 2 和 Class 3 地下結構偵檢單元之 RAI 和 Zion 核電廠的回覆	104
表 67 Zion 核電廠地下結構區域確認偵檢結果	105
表 68 Zion 核電廠加總合規劑量	106
表 69 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢各 Phase 偵檢單元數.....	110
表 70 La Crosse 核電廠 Phase 1 偵檢單元列表	111
表 71 La Crosse 核電廠 Phase 1 Class 2 和 3 偵檢單元掃描範圍及表土樣本取樣個數	114
表 72 La Crosse 核電廠 Phase 1 Class 2 和 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	114
表 73 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元列表	114

表 74 地上建築掃描比率彙整	117
表 75 地下埋管掃描比率彙整	117
表 76 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元量測點個數	118
表 77 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	119
表 78 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元列表	120
表 79 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元掃描比率彙整	122
表 80 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元量測點個數	122
表 81 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量	123
表 82 La Crosse 核電廠地下室偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果	124
表 83 La Crosse 核電廠開放土地(土壤)偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果	124
表 84 La Crosse 核電廠地上建築偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果	125
表 85 La Crosse 核電廠地下埋管偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果	125
表 86 La Crosse 核電廠地下水現況 SOF 和劑量評估結果	125
表 87 La Crosse 核電廠反應器廠房地下水情境 BcSOF 和劑量評估結果	125
表 88 La Crosse 核電廠地下埋管地下水情境 BcSOF 和劑量評估結果	125
表 89 La Crosse 核電廠合規劑量計算結果	126
表 90 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢與 NRC 審查時程綜覽	127
表 91 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元提出之 RAIs 與 La Crosse 核電廠之回覆	128
表 92 La Crosse 核電廠確認偵檢列表	129

專有名詞

1. NRC ADAMS(Agencywide Documents Access and Management System)：NRC 文件存取和管理系統
2. DPC(Dairyland Power Cooperative)：Dairyland 電力公司。
3. ISFSI(Independent Spent Fuel Storage Installation)：用過核子燃料乾式貯存設施。
4. LTP(License Termination Plan)：執照終止計畫。
5. ROC(Radionuclides of Concern)：關注核種。
6. FSS(Final Status Survey)：最終狀態偵檢。
7. FSSR(Final Status Survey Report)：最終狀態偵檢報告。
8. SU(Survey Unit)：偵檢單元。
9. PSR(Partial Site Release)：部分廠址釋出。
10. DRP(Discrete Radioactive Particles)：離散的放射性物質粒子。
11. RAI(Request Additional Information)：補充資訊要求。
12. SER(Safety Evaluation Report)：安全審查報告。
13. MDC(Minimum Detectable Concentration)：最小可檢測濃度。

一、前言

(一) 計畫背景與目的

依據我國核子反應器設施管制法及相關法規命令，核子反應器設施之除役，經營者應檢送除役計畫，並須依主管機關核定之除役計畫據以執行，並於取得主管機關核發之除役許可後 25 年內完成。另亦要求核子反應器設施除役計畫執行完成後 6 個月內，經營者應檢附除役後之廠址環境輻射偵檢報告及除役完成報告，報請主管機關審查，經審查同意後，方會解除除役管制。其中，除役後之廠址環境輻射偵檢報告內容應包括：偵檢之目的、項目、方法及取樣位置圖，偵檢結果及分析，輻射劑量評估及其他經主管機關指定之事項。另除役完成報告應包括：除役策略及作業情形，除役過程作業人員及民眾之輻射防護，最終廠址輻射劑量調查結果，放射性廢棄物管理及物質外釋情形，除役後廠址後續監管作業及其他經主管機關指定之事項。

有關除役核電廠最終狀態偵檢作業，參考美國多部會輻射偵檢與廠址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)[1]，係透過廠址歷史調查程序，將廠區建物與土地劃分為「未受輻射影響區」及「受輻射影響區」，其中受輻射影響區依放射性污染之可能性，由高至低可再區分為第 1 級、第 2 級與第 3 級等區域。本(113)年度將就第 2 級與第 3 級受輻射影響區，蒐集瞭解國際核電廠除役相關案例及除役關鍵技術與實務的經驗，以掌握核電廠除役期間與解除除役管制之考量要項，並藉此強化管制機關對於解除除役管制之安全審查與管制能量。

本計畫的目的為配合我國核電廠除役作業現場實務與核能安全委員會管制需求，針對我國核電廠申請解除除役管制之文件內容及相關報告審查要項之管制重點，進行研析並提出具體建議事項，以強化解除除役管制之安全審查管制作業。研究內容為蒐集與研析彙整美國已完成執照終止解除管制之核電廠有關「第 2 級與第 3 級」最終狀態偵檢報告(FSSR)文獻，以及美國核管會對偵檢報告的審查結果與業者對審查意見之回應等，並根據蒐集文獻的研析結果提出管制建議，供國內管制單位做為解除核電廠除役管制之審查與管制作業的參考。

(二) 工作項目

本計畫之工作項目如下：

1. 蒐集美國 Zion 和 La Crosse 核電廠第 2 級與第 3 級最終狀態偵檢相關文獻，包含偵檢規劃、偵檢報告、相關技術文件、美國核管會的審查意見，以及業主對審查意見的回應和應對措施。
2. 研析並彙整摘要 Zion 核電廠第 2 級與第 3 級輻射偵檢結果報告。
3. 研析並彙整摘要 NRC 對 Zion 核電廠第 2 級與第 3 級輻射偵檢報告之審查結果與業主對審查意見的回應和應對措施。

4. 研析並彙整摘要 La Crosse 核電廠第 2 級與第 3 級輻射偵檢報告。
5. 研析並彙整摘要 NRC 對 La Crosse 核電廠第 2 級與第 3 級輻射偵檢報告之審查結果與業主對審查意見的回應和應對措施。
6. 研析我國核電廠解除除役管制要項，提出管制及審查、視察之建議事項，並進行期末報告之撰寫與修訂。

二、蒐集及研析文獻

本計畫依據工作項目從美國核管會(NRC)的 ADAMS(The Agencywide Documents Access and Management System)公開文件存取和管理系統中蒐集所需研析文獻，依據類別將主要參考文獻彙整如表 1~表 3 提供參考。

表 1 NRC 指引文獻

文獻名稱	版本	日期
Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM)[1]	Revision 1	2000 年 08 月
NUREG-1757, Volume 2 Consolidated Decommissioning Guidance – Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria, Final Report[2]	Revision 1	2003 年 09 月

表 2 Zion 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

文獻名稱	更版	日期
Zion 核電廠提交		
Zion License Termination Plan(LTP)[3]	Revision 2	2018 年 02 月
Zion Phase 1 FSSR[4]	Revision 2	2020 年 02 月
Zion Phase 2, Part 1 FSSR[5]	Revision 2	2020 年 11 月
Zion Phase 2, Part 2 FSSR[6]	Revision 1	2020 年 06 月
Zion Phase 3 FSSR[7]	Revision 1	2022 年 09 月
Zion Phase 4 FSSR[8]	Revision 2	2022 年 09 月
NRC 對 FSSR 之審查		
NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2 & 3[9]	-	2020 年 04 月
NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2, 3 & 4[10]	-	2020 年 11 月
NRC SER to Zion FSSR - Phase 1[11]	-	2019 年 03 月
NRC SER to Zion FSSR - Phase 1 Revision 1[12]	-	2019 年 10 月
NRC SER to Zion FSSR All[13]	-	2023 年 11 月
Zion 對 NRC 提出 RAIs 之回覆		
Zion 回覆 NRC 對 FSSR 的 RAIs	-	2020 年 05 月 ~ 2022 年 10 月
確認偵檢報告		
ORAU 確認偵檢報告	-	2016 年 08 月
ORISE 確認偵檢報告	-	2018 年 10 月 ~ 2023 年 11 月

表 3 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

文獻名稱	更版	日期
La Crosse 核電廠提交		
La Crosse License Termination Plan(LTP)[14]	Revision 1	2019 年 03 月
La Crosse Phase 1 FSSR[15]	-	2019 年 08 月
La Crosse Phase 2 FSSR[16]	Revision 1	2020 年 10 月
La Crosse Phase 3 FSSR[17]	Revision 1	2020 年 10 月
NRC 對 FSSR 的審查		
NRC RAIs Related to La Crosse FSSR[18]	-	2020 年 08 月
NRC SER to La Crosse Class 2 & 3 FSSR SUs and Approval of PSR[19]	-	2022 年 05 月
Zion 對 NRC 提出 RAIs 的回覆		
La Crosse 回覆 NRC 對 FSSR 的 RAIs[20]	-	2020 年 11 月
確認偵檢報告		
ORISE 確認偵檢報告	-	2018 年 06 月 ~ 2020 年 01 月

三、最終狀態偵檢規劃指引與規劃實務

(一) 最終狀態偵檢目的

依美國聯邦法規 10 CFR 50.82 “Termination of License”的規定，除役作業可分為三個階段，第一階段為初期作業階段(Initial Activities Phase)，從持照人決定永久停止運轉開始，至開始進行主要除役工作／安全貯存為止；第二階段為主要除役／安全貯存階段(Major Decommissioning / Storage Phase)，是進行主要除役和貯存作業的主要階段；第三階段為執照終止階段，在此階段要進行最終狀態偵檢以及最後除污等作業，以確認及證明核電廠的殘餘輻射符合外釋輻射標準，並終止執照。(請參考圖 1)

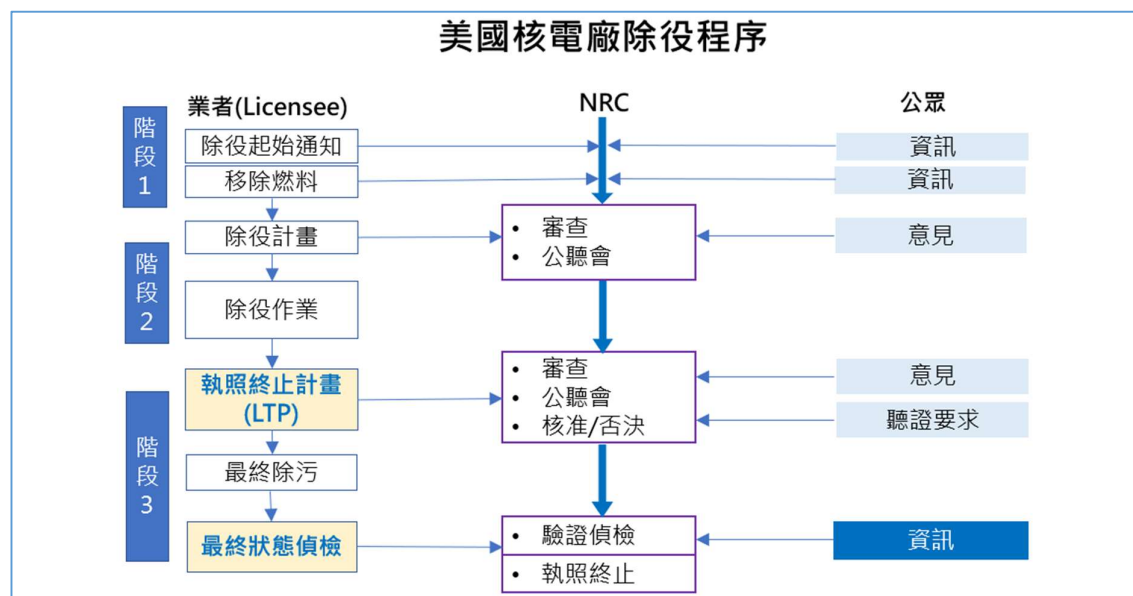


圖 1 美國核能電廠除役概要程序圖

MARSSIM 以及 NUREG-1757, Volume 2 是最終狀態偵檢的主要指引文件。根據 MARSSIM 對除役輻射偵檢作業程序之指引，在進行最終狀態偵檢前應進行廠址歷史評估、範圍偵檢，以及特性偵檢，圖 2 為 MARSSIM 建議的除役輻射偵檢作業程序。執照終止計畫(LTP)中須包含廠址歷史評估和特性偵檢的結果，以及最終狀態偵檢計畫。核電廠，應依照經 NRC 審查通過之執照終止計畫(LTP)內所規劃的最終狀態偵檢計畫執行最終狀態偵檢與評估偵檢結果。

我國核電廠除役對應美國核電廠執照終止階段所要進行的除役作業為「解除除役管制作業」，可參考美國核電廠與 NRC 對最終狀態偵檢計畫以及最終狀態偵檢報告(FSSR)的內容與審查，建立對「解除除役管制作業」之執行與審查規範。本計畫聚焦於有關美國核電廠實務上對最終狀態偵檢之規劃，以及第 2 級與第 3 級偵檢單元的 FSSR 和 NRC 對 FSSR 的審查。有關 MARSSIM 以及 NUREG-1757, Volume 2 指引之內容，以及 LTP 內容和 NRC 對 LTP 之審查，可參考原能會 111 年度「核電廠除役期間除污策略技

術彙整與安全評估及相關特性分析」計畫的子項計畫二分項二計畫-「核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析」期末報告[21]，與 112 年度「美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析」計畫期末報告[22]。

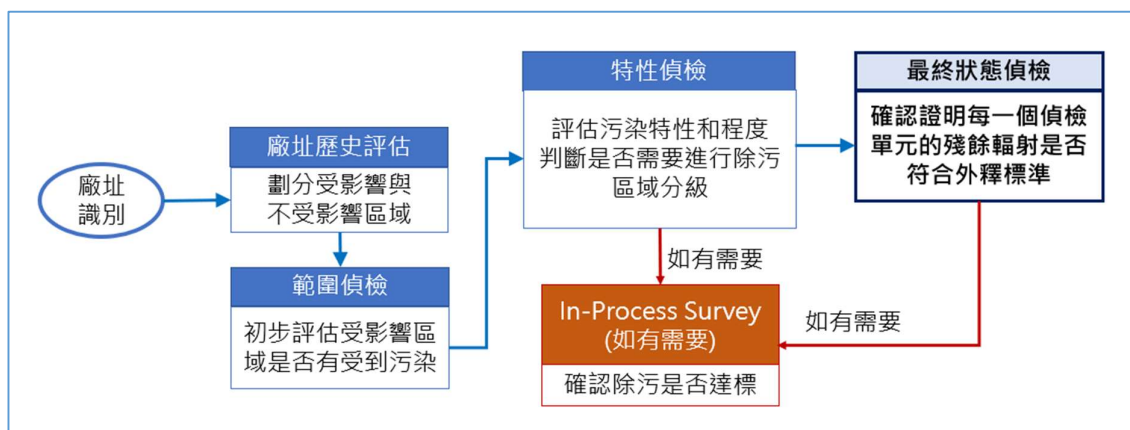


圖 2 MARSSIM 除役輻射偵檢作業程序

最終狀態偵檢規劃的重要元素包含：偵檢單元區域分級、偵檢方法、關注放射性核種、最終狀態偵檢結果評估方法、釋出標準、劑量評估方法，以及偵檢品保等。依序說明於以下章節。

(二) 最終狀態偵檢單元區域分級

2.1 最終狀態偵檢單元區域分級規範

依據 MARSSIM 指引，為增進有限資源之利用效益，應將預計要終止執照釋出的廠址區域進行區域分級，殘餘輻射污染可能性越高的區域投入的偵檢資源越多。依據輻射污染可能性將預定要終止執照區域劃分為受輻射影響區域和未受輻射影響區域，其中，受輻射影響區域又分為三級，殘餘輻射污染可能性愈大的區域為第 1 級(Class 1)，殘餘輻射污染可能性最小的區域為第 3 級(Class 3)。

一偵檢單元為某特定尺寸大小的土地或結構區域，將依據最終狀態偵檢結果，個別決定該區域是否超過釋出標準。根偵檢單元的尺寸和大小決定根據包含：污染可能性、污染分佈，以及物理邊界。偵檢單元的初始分級依據為廠址歷史評估結果，並依據特性偵檢結果來判斷初始偵檢單元的分級是否合適，外圍區域未曾與電廠運轉有關連且未有污染紀錄之區域可考慮初步劃分為未受輻射影響區域。未受輻射污染區域僅需進行特性偵檢，受輻射影響區域除特性偵檢外，還需進行最終狀態偵檢，雖未受輻射影響區域不須進行最終狀態偵檢，但於完成除役前，仍可能依需要持續進行相關之監控或檢測。偵檢單元的分級的依據與範例請參考表 4。

若特性偵檢或監測的結果顯示某偵檢單元的輻射污染程度與該偵檢單元之區域分級不符合，應重新分級。在進行最終狀態偵檢後，如發現偵檢單元的輻射濃度和預期污染程度不同，亦須將該偵檢單元重新分級並重新進行最終狀態偵檢。偵檢單元重新分級時，通常是由較低污染可能性分級改為較高污染可能性分級，偵檢單元重新分級後，偵

檢規劃需要進行調整，且依照偵檢單元尺寸大小規定，可能須將偵檢單元切割為多個面積較小的偵檢單元。

對於 Class 1 偵檢單元，可靠近的土壤表面應進行 100% 的掃描。對於 Class 2 偵檢單元，可靠近的表面應進行 10% 至 100% 的掃描，實際比例取決於污染可能性，掃描範圍比例與偵檢單元發現輻射提高的區域或接近釋出標準的可能性成正比。對於 Class 3 偵檢單元，通常會在污染可能性最大的區域進行判斷性表面掃描，對於開放土地區域，包含地表排水區域和匯聚點(Surface Drainage Areas and Collection Points)。如果沒有這些特徵，則判斷性掃描的位置將由偵檢設計人員自行決定。各區域分級的尺寸大小與偵檢涵蓋範圍規範請參考表 5。

表 4 偵檢單元區域分級依據與範例

偵檢單元區域分級		除污前輻射污染可能性	範例	特性偵檢	最終狀態偵檢
受輻射污染區域	Class 1	大於 DCGL	1) 曾經除污過區域。 2) 曾有輻射洩漏或噴灑污染。 3) 曾作為掩埋或處置場。 4) 曾作為廢棄物貯存場。 5) 含有離散高活度的區域。	需進行	需進行
	Class 2	不大於 DCGL	1) 從存放未密封放射性物質之場所。 2) 可能受污染的運輸路線。 3) 煙囪釋放點的順風區域。 4) 可能接收到空浮輻射的天花板或牆壁上緣。 5) 污染管制區域的外緣。		
	Class 3	含殘餘輻射機率很小	1) Class 1 或 Class 2 外圍區域。 2) 殘留污染可能性極低但沒有足夠資訊可證明可合理分類為不受影響輻射影響區域。		
未受輻射污染區域		合理判斷沒有潛在殘餘輻射污染區域。需進行特性偵檢確認，但不需進行最終狀態偵檢。			不需進行

表 5 最終狀態偵各偵檢單元區域大小與偵檢涵蓋範圍規定

偵檢單元 區域分級	區域大小規定		偵檢涵蓋範圍規定	
	土地	建築與結構	掃描	取樣/量測數
Class 1	~ 2,000 m ²	~ 100 m ²	100%	使用統計檢定計算所需數量 (如有發現高輻射區域，需增加額外取樣/量測數)
Class 2	2,000 ~ 10,000 m ²	100 ~ 1,000 m ²	10% ~ 100%	使用統計檢定計算所需數量
Class 3	無限制	無限制	專家判斷	無限制

2.2 Zion 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務

2.2.1 Zion 核電廠開放土地區域

2.2.1.1 偵檢單元初始分級

在最終狀態偵檢前，已透過過廠址歷史評估進行偵檢單元初始分級，並依照初始分級進行特性偵檢。偵檢單元初始分級首先依是否可能受到電廠運轉輻射影響的區域劃分為未受輻射影響約 214 英畝，以及受輻射影響區約 117 英畝(除役範圍為 112 英畝，不在除役範圍的 ISFSI 區域約 5 英畝)。

未受輻射影響偵檢單元需進行特性偵檢確認分級正確，分為 11 個偵檢單元，已於 2016 年 3 月 16 日經 NRC 核准 PSR(部分廠址釋出)，更多有關 Zion 核電廠開放土地未受輻射影響特性偵檢結果，請參考原能會「112 年美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析」委外計畫期末報告第七章。

受輻射影響偵檢單元再依據潛在殘餘輻射可能性劃分為 Class 1，其次 Class 2，和 Class 3 偵檢單元，潛在潛在殘餘輻射可能性最大的分為 Class 1，其次 Class 2，最小的 Class 3。受輻射影響偵檢單元亦須進行特性偵檢確認分級正確，若特性偵檢或其他偵檢或監控結果顯示需調整分級，應重新進行最終狀態偵檢偵檢單元之分級，並依照各偵檢單元區域分級之規範規畫最終狀態偵檢設計。

Zion 核電廠初始分級圖請參考圖 3~圖 6。

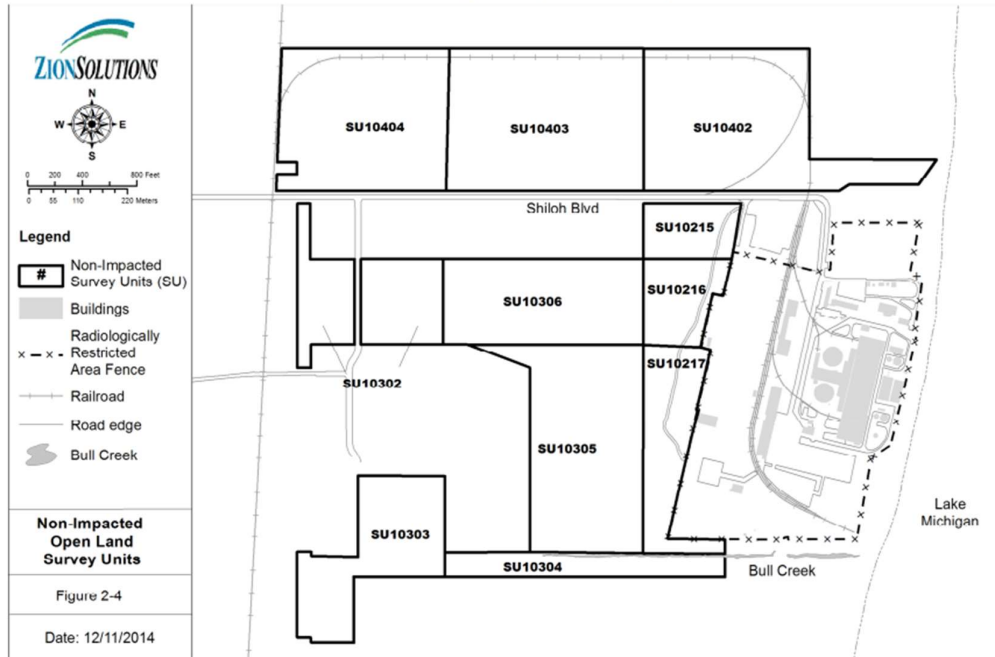


圖 3 Zion 核電廠未受輻射影響偵檢單元

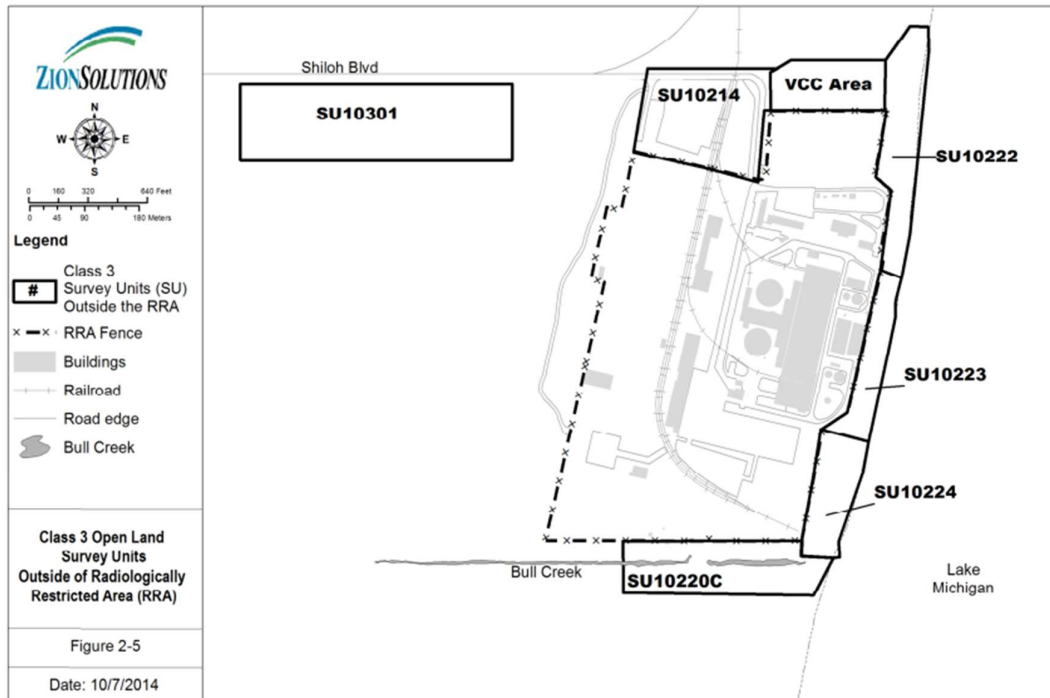


圖 4 Zion 核電廠初始分級-輻射管制區外之 Class 3 開放土地偵檢單元

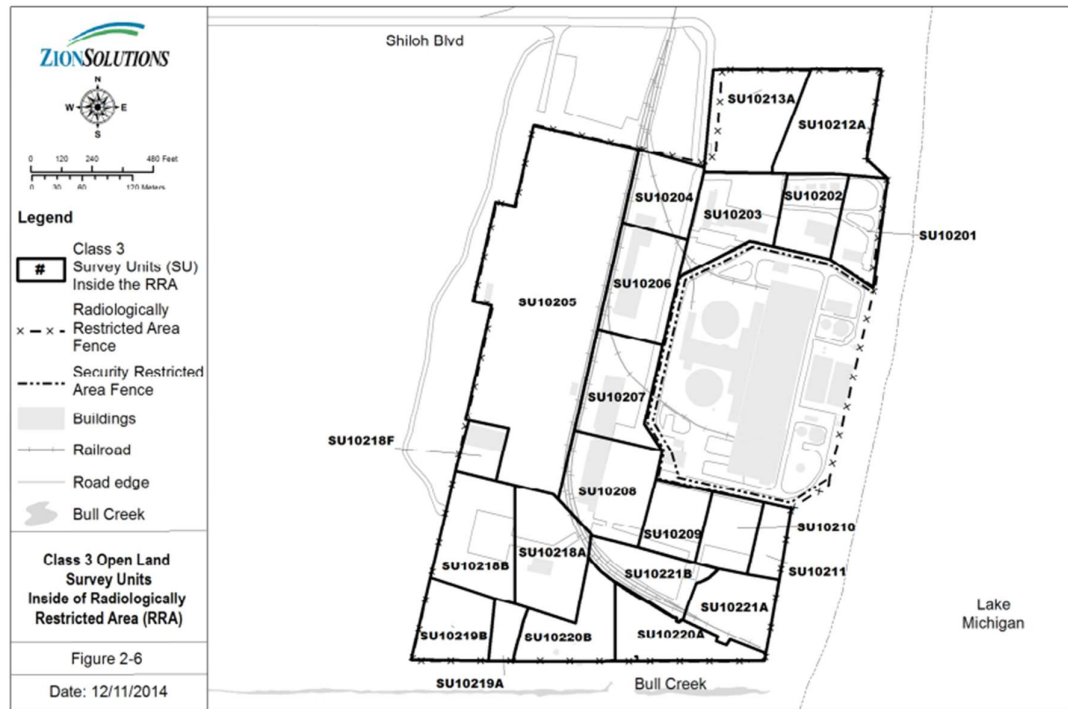


圖 5 Zion 核電廠初始分級-輻射管制區內之 Class 3 開放土地偵檢單元

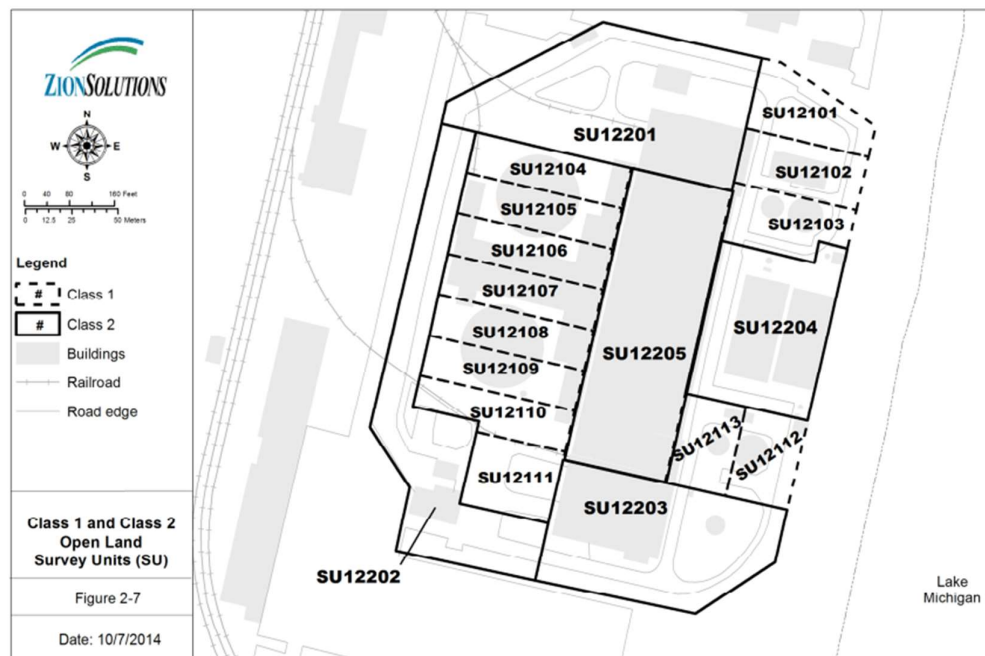


圖 6 Zion 核電廠初始分級-Class 1 和 Class 2 開放土地偵檢單元

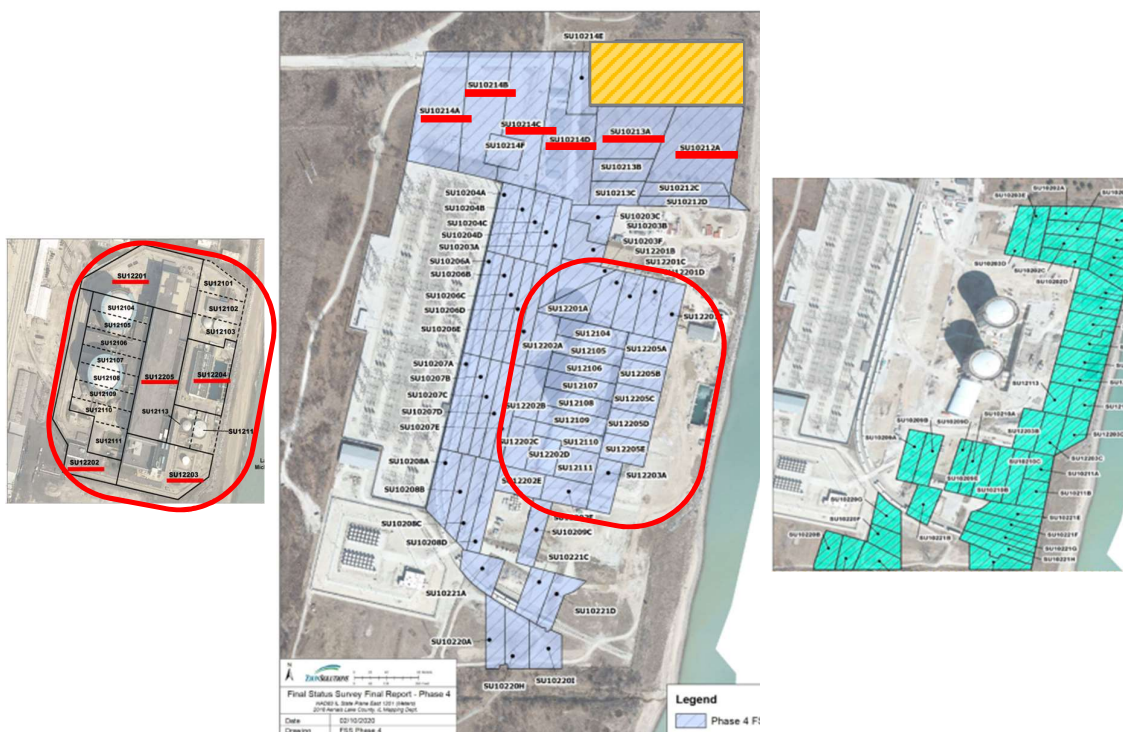
2.2.1.2 偵檢單元區域分級調整與最終分級

圖 7 及圖 8 分別為 Zion 核電廠開放土地 Class 3 以及 Class 1 和 Class 2 偵檢單元的初始分級和和最終分級對照圖，表 6 為 Zion 核電廠除役輻射偵檢的初始分級和最終分級偵檢單元數對照表。在初始分級時，僅有反應器周圍區域的(圖 8 紅色圓角矩形範

圍內，屬安全管制區)被劃分為 Class 1 和 Class 2 區域，但因於最終狀態偵檢進行期間，開放土地上發現了離散放射性物質粒子(DRP)，故進行偵檢單元的重新分級(部分 Class 3 偵檢單元調整為 Class 1 或 Class 2 偵檢單元，Class 2 偵檢單元調整為 Class 1)。為符合重新分級後之區域大小規範，將偵檢單元進行分割，因而偵檢單元數在在分級調整後大幅增加。



圖 7 Zion 核電廠開放土地 Class 3 偵檢單元對照圖(左：初始分級，右：最終分級)



註 1：紅色底線部分為 Class 2 偵檢單元，橘色底區域 Class 3 偵檢單元，其餘為 Class 1 偵檢單元。

註 2：右邊綠底區域為最終狀態偵檢 Phase 3 偵檢單元，中間藍紫色底區域為 Phase 4 偵檢單元。

圖 8 Zion 核電廠開放土地 Class 1 & 2 偵檢單元(左：初始分級，中和右：最終分級)

表 6 Zion 核電廠開放土地區域偵檢單元數

Zion 核電廠除役輻射偵檢 開放土地		偵檢單元數/面積	
		初始分級	最終分級
受輻射影響區域	Class 1	13 [24,759 m ²]	101 [187,855 m ²]
	Class 2	5 [39,747 m ²]	6 [47,719 m ²]
	Class 3	29 [401,042 m ²]	9 [213,245 m ²]

2.2.1.3 Class 2 和 Class 3 偵檢單元區域大小與掃描涵蓋範圍

Zion 核電廠最終狀態偵檢之最終分級共有 6 個 Class 2 和 9 個 Class 3 開放土地偵檢單元。依據 MARSSIM(參考表 5)，Class 2 開放土地偵檢單元適當區域大小範圍為 2,000~10,000 m²，適當掃描比例為 10%~100%；Class 3 開放土地偵檢單元的大小無限制，掃描比例由專家判斷決定。

表 7 為 Zion 核電廠 Class 2 和 Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍彙整表，所有偵檢單元皆符合 MARSSIM 之規範。

表 7 Zion 核電廠 Class 2 & Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍

偵檢單元編號	名稱	區域大小(m ²)	掃描範圍
Class 2 偵檢單元 MARSSIM 規範		2,000 ~ 10,000	10% ~ 100%
10212A	NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	9,550	50%
10213A	NE Corner of Exclusion Area	5,730	
10214A	Construction Parking Area	8,542	
10214B	Construction Parking Area	7,372	
10214C	Construction Parking Area	7,579	
10214D	Construction Parking Area	8,946	
Class 3 偵檢單元 MARSSIM 規範		無限制	專家判斷
10205 ⁽¹⁾	Switchyard	54,573	0%
10219A	Area Far South of Switchyard (A)	2,433	5%
10219B	Area Far South of Switchyard (B)	7,516	
10220C	Adjacent to South Restricted Area - Lakeshore	27,870	
10222	North Beach Area	21,778	
10223	Power Block Beach Area	12,371	
10224	South Beach Area	14,608	
10301	West Training Area	55,942	

10212B	Vertical Concrete Cask(VCC) Construction Area	16,154	10%
--------	--	--------	-----

註(1)：偵檢單元 10205 因為安全考量(在靠近帶電高壓線的地方使用電動手持儀器的安全問題)，沒有進行掃描。

2.2.2 Zion 核電廠建築與結構

2.2.2.1 建築與結構偵檢單元初始分級

Zion 核電廠除役方法為拆除並清除所有受影響的建築物、結構、系統和組件到至少地面下 3 英尺處，所有剩餘的地下建築結構及地下埋管皆分類為受輻射影響區域。

經廠址歷史評估被分類為受輻射影響的 Class 1 建築結構列如下：

- 1 號機圍阻體(Unit 1 Containment Building)
- 2 號機圍阻體(Unit 2 Containment Building)
- 燃料處理廠房(Fuel Handling Building)
- 放射性廢棄物廠房(Radioactive Waste Building)
- 輔助廠房(Auxiliary Building)

以上廠房內部包含核反應爐、主反應爐系統、反應爐支援系統、放射性廢棄物系統，以及核燃料處理和儲存系統，Zion 核電廠的大部分放射性物質都集中於這些建築廠房中，放射性物質經常在這些廠房內進行處理、移動和儲存。在核電廠運轉期間，這些廠房經常受到放射性液體的洩漏、表面污染的擴散以及放射性氣溶膠的影響，結構表面也常被標示為污染區域。這些廠房的除役方法為：除地面以下 3 英尺的結構地板和牆體，以及有可能作為回填材料重複使用知混凝土外，所有系統和結構材料進行完全切割、移除及作為廢棄物處置。

在除役完成時，地面上的建築廠房結構所有部分均不會保留，因此地面上的建築廠房並不需要進行最終狀態偵檢(FSS)。地面下 3 英尺(標高 588 英尺)以下的廠房建築結構偵檢單元初始分級皆為 Class 1，請參考圖 9(1 號機圍阻體)、圖 10(2 號機圍阻體)，以及圖 11(輔助廠房)。

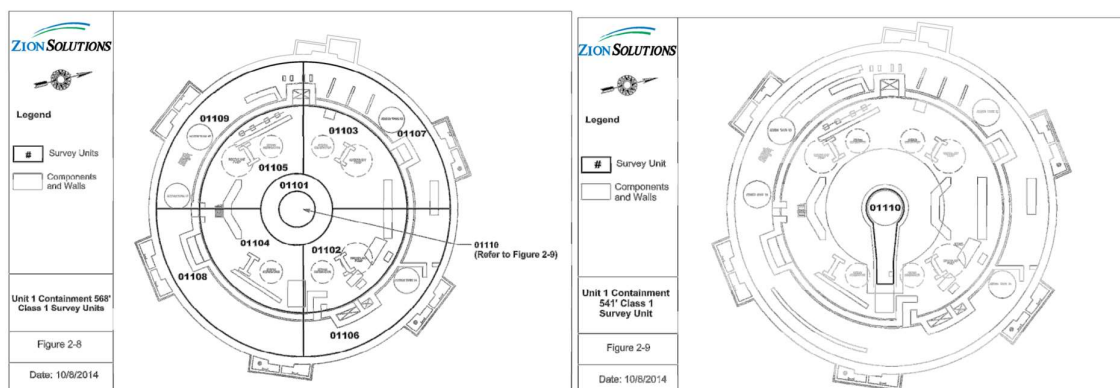


圖 9 Zion 核電廠 1 號機圍阻體 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分)

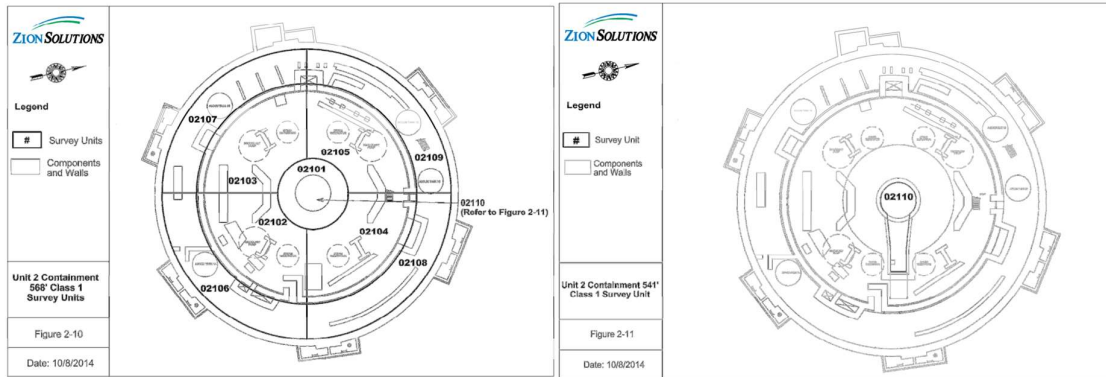
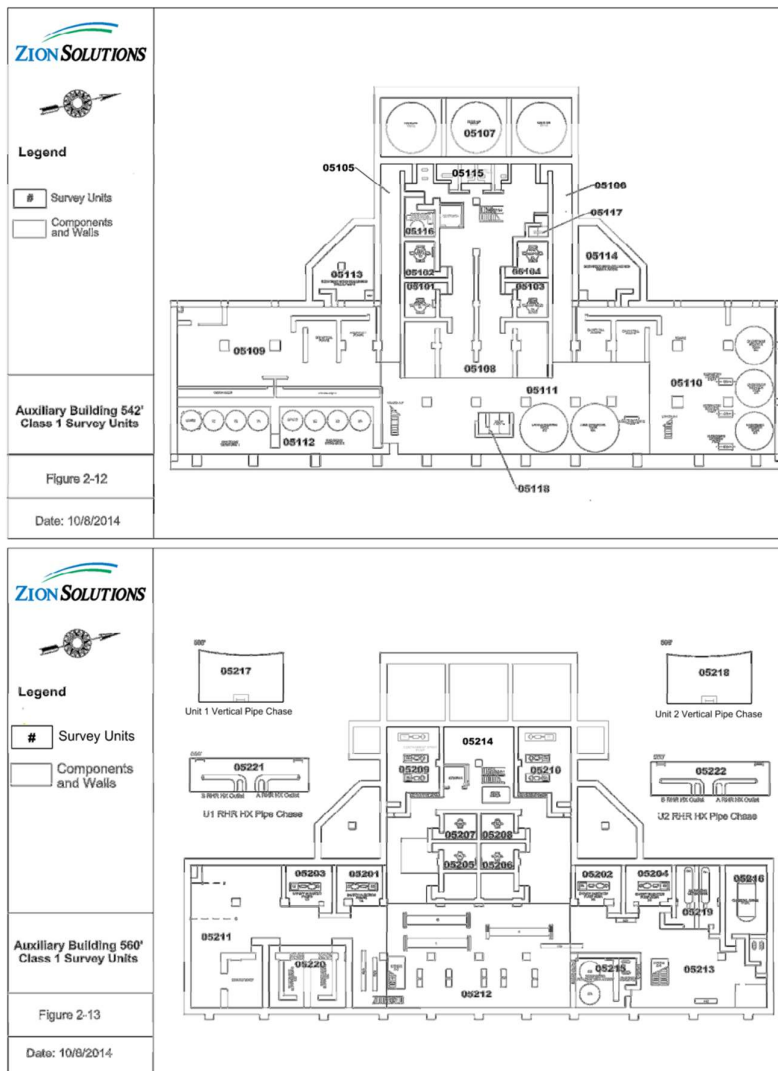


圖 10 Zion 核電廠 2 號機圍阻體 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分)



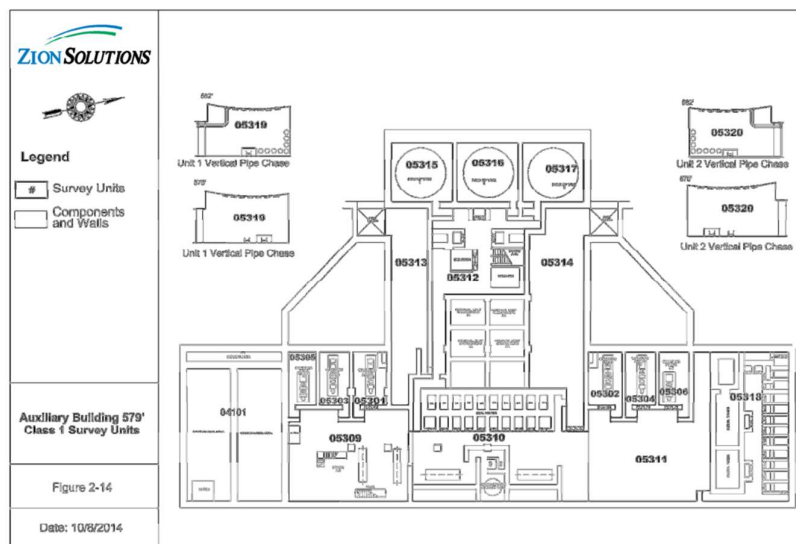


圖 11 Zion 核電廠 2 號機輔助廠房 Class 1 偵檢單元(地下三英尺以下部分)

經廠址歷史評估被分類為受輻射影響的 Class 2 和 3 建築結構羅列如下：

- 汽機廠房(Turbine Building)
- 循環冷卻水泵室(Crib House)
- 1 號機組主蒸汽閥室(Unit 1 Main Steam Valve Houses)
- 2 號機組主蒸汽閥室(Unit 2 Main Steam Valve Houses)
- 廢水處理設施(WWTF Waste Water Treatment Facility)
- 倉庫/機械維護訓練區(Warehouse/Mechanical Maintenance Training Area)
- 建造廠房(Station Construction Building)
- 伊利諾伊州核安全部建築(Illinois Department of Nuclear Safety (IDNS) Building)
- 警衛室(Gate House)
- 北倉庫(North Warehouse)
- 南倉庫(South Warehouse)

所有 Class 2 和 3 建築結構都位於 Zion 核電廠的的輻射管制區內，主要功能是容納二次側蒸汽發電系統，或是提供辦公室和倉儲空間。二次側系統初步分級為受輻射影響的主要原因是因為在電廠運轉期間透過蒸汽產生器發生過從主側到二次側的洩漏。這些廠房在運轉期間通常不包含放射性系統或物質，然而，由於其靠近放射性排放途徑、二次側系統的放射性污染、放射性物質的臨時儲存和運輸，以及過去涉及放射性物質控制失效的事件，可能會在這些建築物內外發現殘餘放射性物質，因此被初步分類為受輻射影響的 Class 2 或 3。與 Class 1 受輻射影響建築結構相同，除役方法為：除地下基礎和有可能重複使用作為硬填料的混凝土結構外，將所有 Class 2 或 3 系統和結構材料完全切割、移除，並作為廢棄物或可回收材料處理。588 英尺標高以下的 Class 2 結構偵檢單位詳見圖 12(汽機廠房)和圖 13(循環冷卻水泵室下方的循環水系統前池)。在廠址最終狀態時，將不保留任何 Class 3 建築結構。

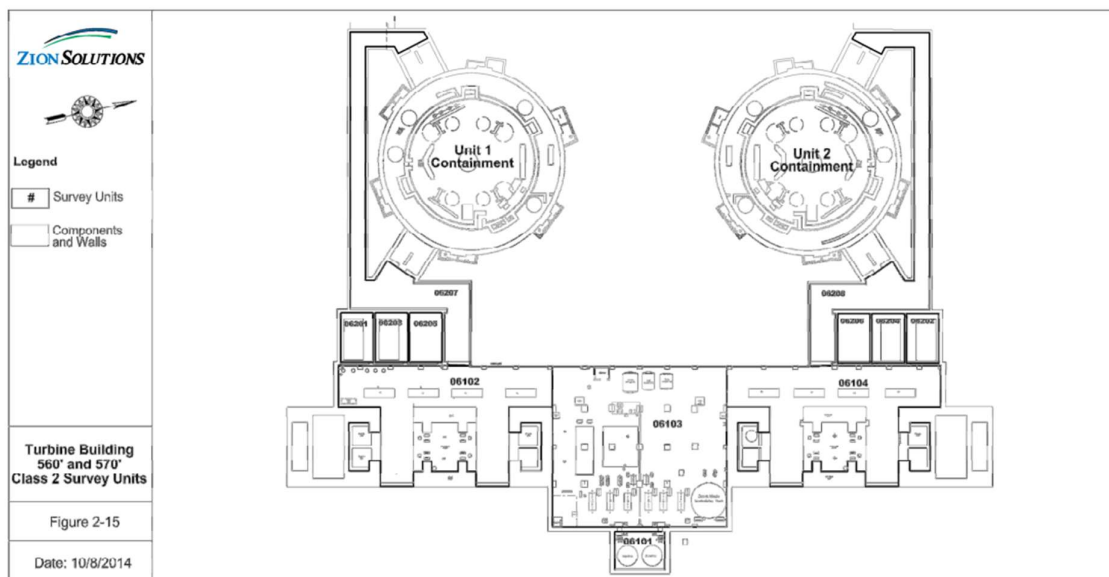


圖 12 Zion 核電廠汽機廠房 Class 2 偵檢單元(地下三英尺以下部分)

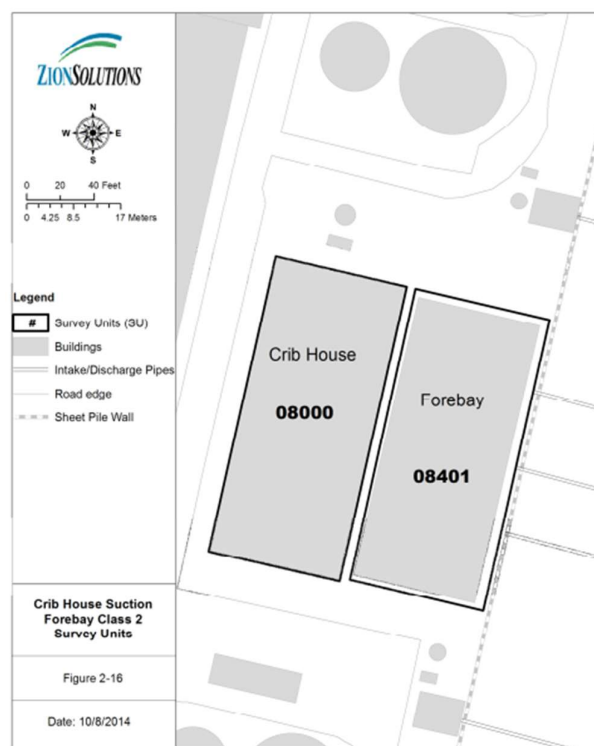


圖 13 Zion 核電廠循環水系統前池 Class 2 偵檢單元

2.2.2.2 偵檢單元區域分級調整與最終分級

Zion 核電廠建築結構各區域分級之最終狀態偵檢偵檢單元數檢單元數如表 8。

部分地下建築結構及地下埋管偵檢單元分級在最終狀態偵檢經過重新調整，重新分級原因請參考表 9。

表 8 Zion 核電廠建築結構最終狀態偵檢偵檢單元數

Zion 核電廠建築與結構	區域分級	偵檢單元數
地下室結構	Class 1	16
	Class 3	15
地下埋管	Class 2	4
	Class 3	3

表 9 Zion 核電廠地下室及地下埋管偵檢單元分級之調整與原因

偵檢單元編號/名稱	初始分級	最終分級	重新分級原因
地下建築結構偵檢單元			
06213 和 06214 The Unit 1 East and West Main Steam Valve Houses	Class 3	Class 1	數個最終狀態偵減量測值超過 50% OpDCGL
06201 和 06202 Unit 1 and Unit 2 Diesel Fuel Oil Storage Tank Room	Class 2 和 Class 3	Class 1	除役期間這兩個區域會運輸拆 除之放射性物品
地下埋管偵檢單元			
SU 00101B Primary Water Supply Header	Class 3	Class 2	在移除 PWST(主要貯水桶)時 檢測到殘留輻射
Survey Units 00150A/B & C North End Storm Drain	未受輻射影 響	Class 2	於沉積物樣本中，檢測到濃度 分別為 2.22E+00 pCi/g 和 1.80E-01 pCi/g 的 Cs-137 和 Co-60。

2.2.2.3 Class 2 和 Class 3 偵檢單元區域大小與掃描涵蓋範圍

Zion 核電廠最終狀態偵檢之最終分級共有 4 個 Class 2 和 18 個 Class 3 地下室及地下埋管偵檢單元。依據 MARSSIM(參考表 5)，Class 2 建築結構偵檢單元適當區域大小範圍為 100~1,000 m²，適當掃描比例為 10%~100%；Class 3 建築結構偵檢單元的大小無限制，掃描比例由專家判斷決定。表 10 為 Zion 核電廠 Class 2 和 Class 3 地下室及地下埋管偵檢單元區域大小及掃描範圍彙整表，所有偵檢單元皆符合 MARSSIM 之規範。

表 10 Zion 核電廠 Class 2 & Class 3 建築與結構偵檢單元區域大小及掃描範圍

偵檢單元編號	名稱	表面積大小 (m ²)	掃描範圍
Class 2 偵檢單元 MARSSIM 規範		100 ~ 1,000	10% ~ 100%
00101B	Primary Water Supply Header T-095 and T-102 Buried Pipe	29	50%

偵檢單元編號	名稱	表面積大小 (m ²)	掃描範圍
00150A/B&C	North End Storm Drain Buried Pipe	204	25%
Class 3 偵檢單元 MARSSIM 規範		無限制	專家判斷
00101A	Condensate Feed Water Supply and Recirculation Buried Pipe	228	10%
00101F	Diesel Generator Service Water Supply and Service Water Return Buried Pipe	89	10%
00101H	Service Water Supply Header CO-26 and CO-29 Buried Pipe	488	10%
06100/06105A 09200	Turbine Building	27,135	3%
06105B	Turbine Buildin. 560 ft. EP	238	3%
06107	U1 Buttress Pit	1,596	8%
06108	U2 Buttress Pit	1,596	7%
06209	U1 Steam Tunnel EP	47	10%
06210	U2 Steam Tunnel EP	46	10%
06211	U1 Tendon Tunnel EP	51	10%
06212	U2 Tendon Tunnel EP	42	10%
06215	U2 East Valve House	240	100%
06216	U2 West Valve House	240	100%
08100/08401 08102A/B	Crib House/Forebay	18,254	4%

2.3 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務

2.3.1 La Crosse 核電廠開放土地區域

2.3.1.1 偵檢單元初始分級

在最終狀態偵檢前，已透過過廠址歷史評估進行偵檢單元初始分級，並依照初始分級進行特性偵檢。偵檢單元初始分級首先依是否可能受到電廠運轉輻射影響的區域劃分為未受輻射影響約 88 英畝，以及受輻射影響區域約 75.5 英畝(除役範圍約 36.5 英畝，不在除役範圍的 ISFSI 相關區域約 39 英畝)。

未受輻射影響偵檢單元需進行特性偵檢確認分級正確，分為 5 個偵檢單元，已於 2017 年 4 月 12 日經 NRC 核准 PSR(部分廠址釋出)，更多有關 Zion 核電廠開放土地未受輻射影響特性偵檢結果，請參考原能會「112 年美國核電廠完成除役後解除除役管制

要項之先期研析」委外計畫期末報告第六章。

受輻射影響偵檢單元再依據潛在殘餘輻射可能性劃分為 Class 1，其次 Class 2，和 Class 3 偵檢單元，潛在潛在殘餘輻射可能性最大的分為 Class 1，其次 Class 2，最小的 Class 3。受輻射影響偵檢單元亦須進行特性偵檢確認分級正確，若特性偵檢或其他偵檢或監控結果顯示需調整分級，應重新進行最終狀態偵檢偵檢單元之分級，並依照各偵檢單元區域分級之規範規畫最終狀態偵檢設計。

La Crosse 核電廠初始分級圖請參考圖 14。

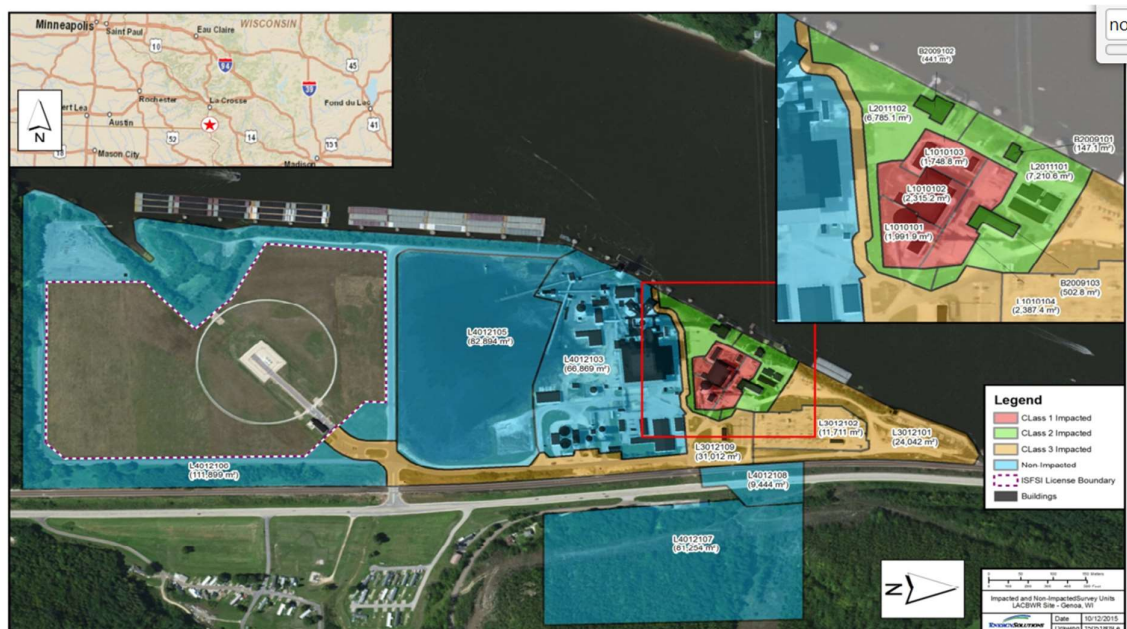


圖 14 La Crosse 核電廠開放土地初始偵檢單元分級

2.3.1.2 開放土地偵檢單元區域分級調整與最終分級

La Crosse 核電廠在開始進行最終狀態偵檢後，所有偵檢單元的區域分級皆未再進行調整。La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢設計中，將開放土地偵檢單元又細分為開放土地區域(OLA, Open Land Area)以及地下挖掘區(SGE, Sub-Grade Excavation)兩類。從偵檢單元編號可以分辨出偵檢單元之分級及分類，OLA 及 SGE 偵檢單元編號的第一碼都是 L，第二碼為區域分級，OLA 偵檢單元編號的第 3-8 碼為阿拉伯數字，SGE 偵檢單元編號的 3-5 碼為 SUB，6-8 碼為英文字母。SGE 區域偵檢單元之分級皆為 Class 1，且 OLA 區域和 SGE 區域有重疊(請參考圖 15)。

表 11 為 La Crosse 核電廠除役輻射偵檢開放土地初始分級和最終分級偵檢單元數對照表。La Crosse 核電廠開放土地最終狀態偵檢分為三個階段(Phase)進行，其中，Phase 1 和 Phase 3 進行開放土地(OLA 和 SGE)以及地下室的偵檢，Phase 2 進行地上建築和地下埋管區域的偵檢。

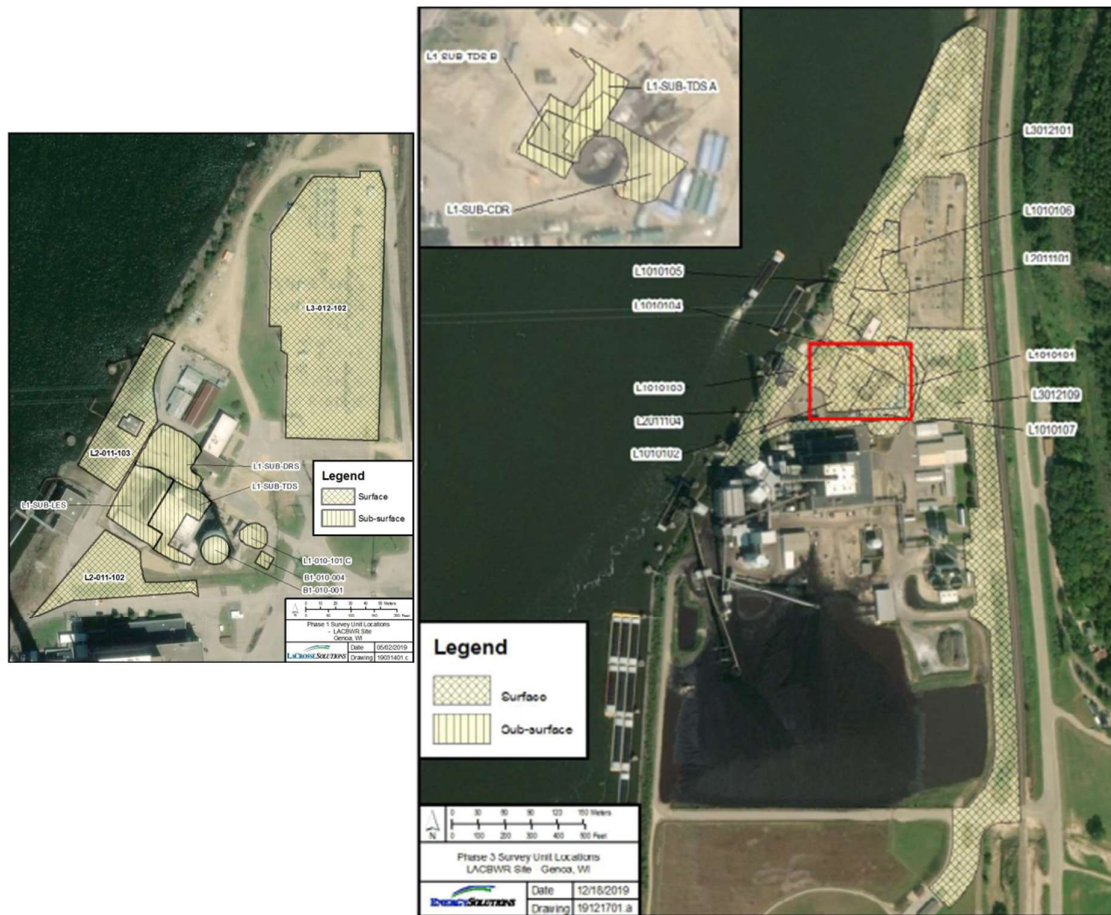


圖 15 La Crosse 核電廠開放土地受輻射影響區域偵檢單元圖

表 11 La Crosse 核電廠開放土地區域偵檢單元數

La Crosse 核電廠除役輻射偵檢		偵檢單元數/面積	
		初始分級	最終分級
OLA 開放土地區域	Class 1	4 [8,443 m ²]	7 [14,028 m ²]
	Class 2	2 [13,996 m ²]	4 [15,715 m ²]
	Class 3	3 [66,765 m ²]	3 [59,783 m ²]
SGE 地下挖掘區	Class 1	-	7 [4,901 m ²]

2.3.1.3 Class 2 和 Class 3 偵檢單元區域大小與掃描涵蓋範圍

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢之最終分級共有 4 個 Class 2 和 3 個 Class 3 開放土地 (OLA)偵檢單元。依據 MARSSIM(參考表 5

表 5)，Class 2 開放土地偵檢單元適當區域大小範圍為 2,000 ~ 10,000 m²，適當掃描比例為 10% ~ 100%；Class 3 開放土地偵檢單元的大小無限制，掃描比例由專家判斷決定。表 12 為 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍彙整表，所有偵檢單元皆符合 MARSSIM 之規範。

表 12 La Crosse 核電廠 Class 2 & Class 3 開放土地偵檢單元區域大小及掃描範圍

偵檢單元 編號	名稱	區域大小(m ²)	掃描範圍
Class 2 偵檢單元 MARSSIM 規範		2,000 ~ 10,000	10% ~ 100%
L2-011-101	Area North of LACBWR Site Enclosure (LSE) Fence	5,728	25%
L2-011-102	Area South of LSE Fence	2,257	
L2-011-103	Genoa 3 Crib House Surrounding Area	2,445	
L2-011-104	Genoa 3 Crib House and Circulating Water Discharge Land Area	5,285	
Class 3 偵檢單元 MARSSIM 規範		無限制	專家判斷
L3-012-101	North End of Licensed Site	5,285	10%
L3-012-102	Transmission Switch Yard	11,711	
L3-012-109	Plant Access and ISFSI Haul Road Grounds	28,187	

2.3.2 La Crosse 核電廠建築與結構區域

2.3.2.1 偵檢單元區域分級調整與最終分級

La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢設計中，將建築與結構偵檢單元又細分為結構地下室(STB, Structure Basement)、地上建築(AGB, Above-Grade Building)，和地下埋管(BP, Buried Piping)三類。La Crosse 核電廠建築與結構偵檢單元編號第一碼為偵檢單元類別，第二碼為區域分級，3-8 碼為阿拉伯數字。STB 和 AGB 偵檢單元編號的第一碼為 B，BP 偵檢單元編號第一碼為 S。

在最終狀態偵檢開始執行後，建築與結構偵檢單元皆未重新分級。各區域分級之偵檢單元數檢單元數如表 13。

表 13 La Crosse 核電廠建築與結構偵檢單元數

La Crosse 核電廠除役輻射偵檢		偵檢單元數
STB 結構地下室	Class 1	2
	Class 2	3
AGB 地上建築	Class 3	5
	Class 1	1
BP 地下埋管	Class 2	5
	Class 3	4

2.3.2.2 Class 2 和 Class 3 偵檢單元區域大小與掃描涵蓋範圍

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢之最終分級共有 8 個 Class 2(3 個地上建築和 5 個地下埋管)和 9 個 Class 3(5 個地上建築和 4 個地下埋管)建築與結構偵檢單元。依據 MARSSIM(參考表 5

表 5)，Class 2 建築與結構偵檢單元適當區域大小範圍為 100~1,000 m²，適當掃描比例為 10%~100%；Class 3 建築與結構偵檢單元的大小無限制，掃描比例由專家判斷決定。表 14 為 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 建築與結構偵檢單元區域大小及掃描範圍彙整表，其中有 3 個 Class 2 地上建築偵檢單元表面積超過 MARSSIM 規範，在 phase 2 最終狀態報告中說明為符合 MARSSIM 規範，將表面積超過 MARSSIM 規範的偵檢單元分割至符合規範，但仍使用同一個偵檢單元編號。

表 14 La Crosse 核電廠 Class 2 & Class 3 建築與結構偵檢單元區域大小及掃描範圍

偵檢單元編號	類型	名稱	表面積大小(m²)	掃描範圍
Class 2 偵檢單元 MARSSIM 規範			100 ~ 1,000	10% ~ 100%
B2-010-101	AGB 地上建築	LACBWR Crib House	1,060	30%
B2-010-102		Genoa 3 Crib House	2,873	27%
B2-010-103		LACBWR Administration Building	5,433	25%
S2-011-103 A	BP 地下埋管	De-Icing Line	46	48%
S2-011-103 B		Low Pressure Service Water	17	53%
S2-011-103		Circulating Water Intake Pipe	57	74%
S2-011-101 A		Storm Drain 3	26	32%
S2-011-101 B		Storm Drain 6	20.42	25%
Class 3 偵檢單元 MARSSIM 規範			無限制	專家判斷
B3-012-101	AGB 地上建築	Back-up Control Center	1,710	11%
B3-012-102		Transmission Sub-Station Switch House	861	
B3-012-103		Genoa 1 Crib House	296	
B3-012-104		Barge Wash Break Room	116	13%
B3-012-109		Security Shack	122	12%
S3-012-109 A	BP 地下埋管	Storm Drain 1	47.4	11%
S3-012-109 B		Storm Drain 2	729	10%
S3-012-102 A		Storm Drain 4	96.31	10%
S3-012-102 B		Storm Drain 5	291.86	10%

(三) 偵檢量測方法

最終狀態偵檢的量測方法包含現場量測(Field Measurement)和實驗室樣本分析兩大類，現場量測又可分為掃描和靜態量測兩類。

表 15 最終狀態偵檢的量測方法說明

量測方法分類	量測方法	說明
現場量測	掃描 Scan	掃描為使用便攜式輻射檢測儀器來檢測特定表面(例如地面、牆壁、地板、設備)上是否存在放射性核種的量測方法。 由於靜態量測或取樣偵檢方法，皆是在有限的位置點上量測或取樣，而活度較高區域可能僅存在於偵檢單元中很小的範圍內，故可能無法有效地透過直接量測或取樣方法識別出這些小區域。此外，掃描調查通常相對快速且成本低廉。因此，掃描通常在直接測量或取樣之前進行。在偵檢規劃階段即要確認掃描結果的調查基準，以作為識別活度較高區域的基準。 掃描量測儀器的選擇重要要素之一是根據先驗掃描MDC(a priori scanning MDC)確認檢測能力限值，以確認儀器的檢測能力足以辨別輻射活度是否超過調查基準。
	靜態量測 Static Measurements	靜態量測是將儀器放置在適當的距離上方，並在預定的時間間隔內(例如 10 秒、60 秒等)進行一次性測量並記錄讀數。直接量測可在偵檢單元中的隨機位置、系統性規劃位置，以及掃描識別出較高活度區域進行。 應依據可能存在的污染類型、測量靈敏度要求選擇儀器類型。現場加馬能譜分析(in-situ Gamma Spectrometry)儀器是非常有效的現場量測儀器，因為加馬射線的穿透性使其能夠檢測到更深層的污染情況。
實驗室樣本分析	取樣分析	樣本類別：樣本類型有土壤、沉積物、混凝土和地下水等，根據需要透過加馬能譜儀、阿伐能譜儀，或液體閃爍計數器進行分析。

3.1 品質管控(QC)偵檢

除了蒐集和分析用來判斷偵檢單元是否符合外釋輻射標準的樣本外，偵檢設計亦應包含品質管控偵檢。品質管控(QC)偵檢的目的為驗證最終狀態偵檢結果是正確和可信的，QC 偵檢結果將與原始 FSS 偵檢結果進行比較。FSS 常規採用的 QC 偵檢包含：重複測量和偵檢(Replicate Measurements and Surveys)和複本樣本和分割樣本(Duplicate and Split Samples)。

3.1.1 重複量測和偵檢(Replicate Measurements and Surveys)

3.1.1.1 執行方式

隨機選擇要進行重複測量和偵檢的 FSS 偵檢單元，並於被選擇到的偵檢單元中，隨機選擇 5% 的固定量測位置和掃描位置上進行重複量測或偵檢。

3.1.1.2 接受標準

- 每個偵檢單元的原始偵檢的評估結論和重複量測或偵檢的評估結論一致。
- 未發現超過調查基準的位置點。
- 如果未達到一致的評估結果，或發現了於原來偵檢未發現的情況，將進行進一步評估。

3.1.2 複本樣本和分割樣本(Duplicate and Split Samples)

複本樣本和分割樣本是評估樣本精確性(Precision)和準確性(Accuracy)的主要方法。複本樣本指在原始取樣位置採集第二個完整樣本，分割樣本為將原始樣品等分為兩個等分，並作為單獨的樣品進行分析。

3.1.2.1 複本樣本執行方式

由偵檢負責人員決定。

3.1.2.2 分割樣本執行方式

- 土壤：於偵檢單元中隨機選取 5% 的土壤樣本進行分割樣本分析。
- 其他的介質(如：混凝土)：由偵檢負責人員決定。
- 將約 5% 的分割樣品送往合格的廠外實驗室，或由現場實驗室不同的檢測器進行樣品分析。

3.1.2.3 接受標準

採用 NRC 檢查程序 No. 84750《放射性廢棄物處理、排放及環境監測》來判斷複本樣本和分割樣本的結果是否可被接受。判斷方式如下：

1. 計算原始樣本的 Resolution：
$$\frac{\text{原始樣本測量結果值}}{\text{標準差}}$$
2. 根據表 16，找出原始樣本之 Resolution 對應的 Acceptable Ratio 範圍。
3. 計算並判斷 $\frac{\text{原始樣本量測結果}}{\text{對應的複本樣本或分割樣本量測結果}}$ 是否落在對應的 Acceptable Ratio 範圍中。

表 16 複本樣本和分割樣本 QC 偵檢接受評估表

Resolution	Acceptable Ratio
<4	0.4-2.5
4-7	0.5-2.0
8-15	0.6-1.66
16-50	0.75-1.33
51-200	0.80-1.25
>200	0.85-1.18

3.2 調查基準(Investigation Levels)

在最終狀態偵檢過程中，任何有疑慮之區域將會被標示並進行調查並依需要進行進一步的偏倚偵檢(Biased Surveys)和取樣。(請參考表 17)

表 17 最終狀態偵檢調查基準

區域分級	掃描調查基準	靜態量測調查基準
Class 1	> OpDCGL 或 > MDC _{SCAN} (若 MDC _{SCAN} 大於 OpDCGL)	> OpDCGL
Class 2		> OpDCGL
Class 3		> 0.5 OpDCGL

3.3 重新分級/重新除污/重新偵檢標準

對 Class 1 開放土地偵檢單元，任何殘餘輻射超過 DCGL_{EMC} 的區域需進行除污，以降低殘餘輻射至可接受程度。對開放土地以外的 Class 1 偵檢單元，任何殘餘輻射超過 BcDCGL(Base Case DCGL)的區域都需進行除污。如果某個區域進行了除污，將會執行除污輔助掃描偵檢，以確保除污作業有達到效果。

在偵檢 Class 2 偵檢單元中，如果任何單一 FSS 測量結果超過 OpDCGL，該偵檢單元或其中的部分將會被調查。如果調查後確認有小區域的輻射活度超過 OpDCGL，或者如果調查顯示有超過 OpDCGL 的可能，則整個或部分偵檢單元將重新分級為 Class 1，並依照 Class 1 的規定重新設計並重新進行偵檢。

在 Class 3 偵檢單元中，如果某個測量結果超過 OpDCGL 的 50%，則該偵檢單元或其中的部分將會進行調查。如果調查確認殘餘輻射超過 OpDCGL 的 50%，則該偵檢元或受影響的部分將重新分級為 Class 1 或 Class 2 偵檢單元，並按照 Class 1 或 Class 2 的規定重新設計並重新進行偵檢。

將偵檢單元從較低限制的分級重新分類為更高限制的分級可以不經 NRC 事先批准。然而，重新分級為較低限制的分級需要事先獲得 NRC 的批准。根據統計檢定或偵檢結果，表 18～表 20 列出重新分級/重新除污/重新偵檢標準以及建議行動。

表 18 重新除污標準與建議行動

重新除污標準		
重新除污標準		建議行動
Class 1 偵檢單元	1) 通過 Sign Test 統計檢定，且偵檢單元 SOF 的平均值小於等於 1。	無
	2) 通過 Sign Test 統計檢定，且偵檢單元 SOF 的平均值小於等於 1，但部分輻射偏高區域(Elevated Areas)需進行除污： • 土壤 > DCGL _{EMC} • 其他輻射來源 > BcDCGL	局部除污(Spot Remediation)並使用原有偵檢設計重新偵檢
	3) 未通過 Sign Test 統計檢定，或偵檢單元 SOF 的平均值大於 1。	廣泛除污(General Remediation)並以新的偵檢設計重新偵檢整個偵檢單元。
Class 1 地下偵檢單元	偵檢單元之平均輻射劑量除以劑量標準(25 mrem/yr)大於等於 1。	廣泛除污並以新的偵檢設計重新偵檢整個偵檢單元。

表 19 重新分級標準與建議行動

重新分級標準			
重新分級標準			建議行動
Class 2 偵檢單元	一或多個量測結果超過 OpDCGL，或者偵檢單元的一部分進行了除污。	高輻射區域相對於偵檢單元之範圍小，且輻射的來源是已知的。	僅將高輻射區域範圍重分級為 Class 1。
		高輻射區域相對於偵檢單元之範圍小，且輻射的來源是未知的。	將高輻射區域附近重分級為 Class 1。
		高輻射區域相對於偵檢單元之範圍大。	整個偵檢單元重分級為 Class 1。
Class 3 偵檢單元	一或多個量測結果超過 50% OpDCGL，或者偵檢單元的一部分進行了除污。	高輻射區域相對於偵檢單元之範圍小。	將高輻射區域附近重分級為 Class 1，並於周圍建立適當大小的 Class 2 區域。
		高輻射區域相對於偵檢單元之範圍大。	
	一或多個量測結果超過 1% OpDCGL，或者偵檢單元的一部分進行了除污。	高輻射區域相對於偵檢單元之範圍小。	僅將高輻射區域範圍重分級為 Class 2。
		高輻射區域相對於偵檢單元之範圍大。	將高輻射區域附近重分級為 Class 2。

表 20 重新偵檢標準與建議行動

重新除污標準

重新偵檢標準			建議行動
Class 1 偵檢單元	偵檢單元曾重新除污過。	重新除污的區域通過符號檢定且樣本或量測點的 OpSOF 平均值小於 1。偵檢單元原有的檢定力未變。	重新掃描曾重新除污區域。 在重新除污的區域內蒐集樣本或量測，以證明除污成功。
		未通過符號檢定或樣本或量測點的 OpSOF 平均值大於 1。	以新的偵檢設計重新偵檢整個偵檢單元。
	偵檢單元曾從 Class 2 重新分級為 Class 1。	未曾重新除污。	將掃描覆蓋率增加為 100%。不須增加樣本數。
Class 2 偵檢單元	原來的偵檢單元進行了分割，以容納一新增的 Class 1 偵檢單元。	新增的 Class 1 偵檢單元相對原來的 Class 2 偵檢單元面積很小，且不會對原本的統計樣本規劃造成影響。	增加 Class 2 偵檢單元的掃描或區域覆蓋率。
		對原本的統計樣本規劃造成影響。	增加 Class 2 偵檢單元的掃描或區域覆蓋率，並以新的偵檢設計重新偵檢整個偵檢單元。
Class 3 偵檢單元	原來的偵檢單元進行了分割，以容納一新增的 Class 2 偵檢單元。	新增的 Class 2 偵檢單元相對原來的 Class 3 偵檢單元面積很小，且原來的 Class 3 偵檢單元之檢定力未變。	增加 Class 3 偵檢單元的掃描或區域覆蓋率。
		新增的 Class 2 偵檢單元相對原來的 Class 3 偵檢單元面積較大。	以新的偵檢設計重新偵檢整個偵檢單元。

3.4 Zion 核電廠最終狀態偵檢量測方法規劃實務

此節內容摘譯自 Zion 核電廠 LTP 第五章。

3.4.1 表土(Surface Soils)

Zion 核電廠最終狀態偵檢設計中，表土指室外區域從地表表面到 15 公分深度的土壤層(劑量建模時假設為受到均勻污染)。這些區域將透過取樣、加馬掃描和現場量測方式進行偵檢。偵檢涵蓋範圍依據開放土地區域分級進行規劃(參考表 5)，所有樣本都將透過加瑪光譜儀進行分析。

3.4.2 次表土(Subsurface Soils)

次表土指的是最終狀態時，地表下 15 公分以下的土壤，或者是將在執照終止時留

在結構物下方的土壤，例如地下室地板/地基或路面下方的土壤。為挖掘或移除可能受污染的地下室而進行的土壤挖掘，將在回填之前進行開放土地最終狀態偵檢(FSS)，並使用次表土的 OpDCGLs 作為釋出標準。

3.4.2.1 次表土掃描

根據 NUREG-1757，在進行 FSS 期間，次表土並不會進行掃描，但若次表土需要進行除污，會使用到掃描進行除污輔助偵檢。

3.4.2.2 次表土取樣

根據 NUREG-1757 附錄 G，如果廠址歷史評估(HSA)顯示不存在大量地下殘餘輻射的可能性，則無需進行次表土偵檢。Zion 核電廠的廠址歷史評估顯示此表土中的殘餘輻射極少。因此，Zion 規劃在 FSS 期間僅規畫進行少量的次表土取樣。

在 Class 1 開放土地偵檢單元中，在偵檢單元內表土取樣點隨機選擇 10%處進行次表土取樣，在 Class 2 和 Class 3 開放土地偵檢單元偵檢設計中不採集次表土樣本。但若表土樣本或次表土加馬掃描的結果發現次表土可能存在濃度超過次表土 OpDCGL 的 75%，則將在關注區域內採集額外的次表土樣本。

3.4.2.3 對地下室和地基的次表土取樣

Zion 核電廠在執照終止時，將保留部分廠房建築設施在地面下 3 英尺以下的建築結構(包含：反應器 1 號機和 2 號機、輔助機房、汽機廠房、Crib House/Forebay、廢水處理設施(WWTF)以及用過燃料池)。根據特性偵檢次表土取樣結果，判斷這些建築物下方土壤中的殘餘輻射濃度不太可能超過 DCGL。然而，在執照終止之前，仍需確認這些地板下方土壤的輻射狀況。一旦建築物拆除進展到可以接近的階段，反應器廠房、輔助廠房和用過燃料池下方的土壤為指定進行「持續特性偵檢」區域。取樣位置將偏向於有高機率污染積累的次表土位置。還將進行角度土壤鑽孔(Angled Soil Borings)以直接進入地板下方土壤。從地板下方土壤採集的所有樣品將進行加馬光譜分析。地板下方土壤樣品中的 10%，以及加馬活度超過 0.1 SOF 的樣本，將進行難測放射性核種(HTD)分析。

如果可能，偵檢設計還將考慮通過鑽穿地下混凝土地板來採集下方的土壤樣品。然而，截至目前，由於地下水會通過鑽孔滲入地下室，這一點尚不可行。這在圍阻體尤其如此，因為通過建築基部進行取樣將破壞內部鋼襯的完整性。為了解決地下水滲入問題並仍能調查污染從建築物內部遷移到基礎下方土壤的潛力，對輔助廠房、反應器廠房以及用過燃料池的地下保留結構的持續特性化偵檢將包括混凝土地板芯取樣，但不會完全穿過建築基礎或襯板(Foundation or Liner)。鑽芯位置將偏向於那些有較高潛力成為污染遷移至建築根基下土壤之通道的區域，包括應力裂縫、地板和牆壁的交界處，以及穿過牆壁和地板的管道穿透處。如果從基礎中最深的 0.5 英寸鑽芯(Core)樣品中未檢測到可量測到的活度，則假定該位置不會是建築結構下之土壤的來源污染。如果在鑽芯的最深點檢測到活性，則將根據識別的活度大小和地下水滲入的潛力，考慮是否將鑽芯繼續延伸至下方的土壤。如果在靠近或位於保留地下建築結構下方的土壤中檢測到殘餘輻射，則調查還將包括對建築物外部結構潛在污染的評估。

3.4.3 挖掘土的再利用(Reuse of Excavated Soils)

Zion 核電廠不會堆積或使用挖掘出之土壤做為地下回填使用。然而，為了挖掘出埋藏地下的組件(例如混凝土墊、埋藏管道、埋藏電纜等)，將會產生覆土(Overburden Soil)，這些組件將被移除並作為廢料處理，或將安裝新的系統組件，在這種情況下，在組件被移除或安裝新組建後，覆土將被重新填回挖掘區，並將進行輻射評估。在挖掘之前，將對挖掘區的範圍及鄰近挖掘區域的土壤進行掃描。此外，在挖掘過程中，將定期對挖掘出的土壤進行掃描，並在土壤堆放在挖掘區旁以便重用後，對其表面進行掃描，在任何掃描位置，若檢測到的活動量超過土壤 OpDCGL 的 50%，將進行土壤取樣分析。任何經確認含有殘餘輻射且濃度超過土壤 50% OpDCGL 的土壤，將不會用作回填，並將作為廢棄物處理。

所有地下的回填材料，將進行輻射評估，評估方式包括加瑪掃描和材料取樣，樣本將通過加馬光譜儀進行分析。

3.4.4 人工鋪面區域(Pavement Covered Areas)

人工鋪面區域(如瀝青、混凝土鋪面)需要進行輻射偵檢。鋪面區域將被納入其所在的開放土地偵檢單元中，因為鋪設區域位於室外，其輻射暴露情景與表土的直接輻射最為相似，並將根據其所在的開放土地偵檢單元的分級進行偵檢。每個系統化採樣點將取得鋪設表面的樣本，樣本材料將被粉碎，通過加馬光譜分析，並與每個潛在關注的放射性核種的表土 OpDCGL 進行比較，如果結果顯示殘餘輻射超過表土 Base DCGL，則鋪設材料將被移除並作為放射性廢棄物處理，且將對其下的土壤進行調查。

3.4.5 地下埋管(Buried Piping)

保留的地下埋管在除污後會進行最終狀態偵檢，偵檢方式為使用適當尺寸的檢測器進入管道內部進行靜態量測，量測間隔依據管道區域分級計算適當距離。

3.4.6 地下水(Groundwater)

透過地下水監測井進行地下水中的殘餘輻射評估。

3.4.7 沉積物和地表水(Sediments and Surface Water)

透過蒐集地表水底部沉積物的樣本，並依據表土 OpDCGL 進行沉積物評估。對排水系統中殘餘輻射的評估，將透過沉積物取樣、表面污染量測，或兩者結合來進行。

3.5 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢量測方法規劃實務

此節內容摘譯自 La Crosse 核電廠 LTP 第五章。

3.5.1 表土(Surface Soils)與次表土(Subsurface Soils)

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢設計的表土與次表土偵檢量測方法和 Zion 核電廠大致相同(請參考本章 3.2.1 和 3.2.2 節)，但有兩處差異：1) Zion 核電廠的表土層和次表土定義分別為為地面下 15 公分和地面下 15 公分以下，La Crosse 核電廠的定義則為地面下 100 公分和地面下 100 公分以下；2) La Crosse 核電廠除了規定所有土壤樣本要透過加瑪光譜儀進行分析外，還規範從開放土地偵檢單元(包括地下室的挖掘區域)收集到之

土壤樣本的 10%要進行 HTD 難測核種分析(如 Sr-90)。此外，如果個別土壤樣本中的殘餘輻射超過 0.1 的 SOF，則該樣本也要進行 HTD 分析。

3.5.2 挖掘出的土壤與乾淨填料(Excavated Soils and Clean Fill)

La Crosse 核電廠不會堆積或使用挖掘出之土壤做為地下回填使用。然而，為了挖掘出埋藏地下的組件(例如混凝土墊、埋藏管道、埋藏電纜等)，將會產生覆土(Overburden Soil)，這些組件將被移除並作為廢料處理，或將安裝新的系統組件，在這種情況下，在組件被移除或安裝新組建後，覆土將被重新填回挖掘區，並將進行輻射評估。在挖掘之前，將對挖掘區的範圍及鄰近挖掘區域的土壤進行掃描。此外，在挖掘過程中，將定期對挖掘出的土壤進行掃描，並且挖掘後堆放在挖掘旁的裸露土壤表面也會進行掃描以供再利用。在任何掃描位置，若檢測到的活動量超過土壤 OpDCGL 的 50%，將進行土壤取樣分析。任何經確認含有殘餘輻射且濃度超過土壤 50% OpDCGL 的土壤，將不會用作回填，並將作為廢棄物處理。

對於為移除可能受污染的建築地基結構而挖掘出的土壤，在回填前必須進行最終狀態偵檢(FSS)，其 FSS 設計為開放土地偵檢單元，並以被移除結構中最嚴格的區域分級作為其分類，使用土壤 OpDCGL 作為釋出標準。

所有地下的回填材料，將進行輻射評估，評估方式包括加瑪掃描和材料取樣，樣本將通過加馬光譜儀進行分析。

3.5.3 人工鋪面區域(Pavement Covered Areas)

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢設計的人工鋪面區域偵檢量測方法和 Zion 核電廠大致相同，請參考本章 3.4.4 內容。

3.5.4 地下埋管

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢設計的人工鋪面區域偵檢量測方法和 Zion 核電廠大致相同，請參考本章 3.4.5 內容。

3.5.5 地下水

透過地下水監測井進行地下水中的殘餘輻射評估。

3.5.6 沉積物和地表水(Sediments and Surface Water)

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢設計的人工鋪面區域偵檢量測方法和 Zion 核電廠大致相同，請參考本章 3.4.7 內容。

3.5.7 建築、結構和設備(Survey Considerations for Buildings, Structures and Equipment)

La Crosse 核電廠將保留的地上建築結構包含：LACBWR 行政大樓、G-3 循環冷卻水泵室(Crib House)、變電站開關設備室、G-1 循環冷卻水泵室(Crib House)、駁船洗滌休息室、備用控制中心，以及警衛室。

使用靜態量測進行偵檢，並以 NUREG-1757, Vol. 2, Appendix H 中 Table H.1 的建築表面之常見核種執照終止篩選值(Screening Balues for Building)作為保留地上建築結構的輻射評估標準。(如表 21)

表 21 建築表面之常見核種執照終止篩選值

Table H.1 Acceptable License Termination Screening Values of Common Radionuclides for Building-Surface Contamination

Radionuclide	Symbol	Acceptable Screening Levels ^a for Unrestricted Release (dpm/100 cm ²) ^b
Hydrogen-3 (Tritium)	³ H	120000000
Carbon-14	¹⁴ C	3700000
Sodium-22	²² Na	9500
Sulfur-35	³⁵ S	13000000
Chlorine-36	³⁶ Cl	500000
Manganese-54	⁵⁴ Mn	32000
Iron-55	⁵⁵ Fe	4500000
Cobalt-60	⁶⁰ Co	7100
Nickel-63	⁶³ Ni	1800000
Strontium-90	⁹⁰ Sr	8700
Technetium-99	⁹⁹ Tc	1300000
Iodine-129	¹²⁹ I	35000
Cesium-137	¹³⁷ Cs	28000
Iridium-192	¹⁹² Ir	74000

Notes:

a Screening levels are based on the assumption that the fraction of removable surface contamination is equal to 0.1. For cases when the fraction of removable contamination is undetermined or higher than 0.1, users may assume for screening purposes that 100 % of surface contamination is removable, and therefore the screening levels should be decreased by a factor of 10. Users may calculate site-specific levels using available data on the fraction of removable contamination and DandD Version 2.

b Units are disintegrations per minute (dpm) per 100 square centimeters (dpm/100 cm²). One dpm is equivalent to 0.0167 becquerel (Bq). Therefore, to convert to units of Bq/m², multiply each value by 1.67. The screening values represent surface concentrations of individual radionuclides that would be deemed in compliance with the 0.25 mSv/y (25 mrem/y) unrestricted release dose limit in 10 CFR 20.1402. For radionuclides in a mixture, the "sum of fractions" rule applies (see Part 20, Appendix B, Note 4).

(四) 劑量模型

劑量模型的建立與分析是為了證明殘餘輻射不會導致劑量超過 25 mrem/yr 的標準。

在 NUREG-1757 Vol.2 Appendix M 中說明了決定劑量模型之使用情境的程序，劑量模型的使用情境有三類：居住農夫(Resident Farmer)、城市居民(Urban Resident)，以及工廠工人(Industrial Uses)。

4.1 Zion 核電廠劑量模型

Zion 核電廠劑量模型之使用情境為居住農夫，關鍵群體為常住農民的平均成員

(AMCG, Average Member of the Critical Group)。

Zion 核電廠的執照終止後的殘餘輻射歸類至四個潛在來源：回填地下(Backfilled Basements)、地下埋管(Buried Pipe)、土壤(Soil)，以及地下水。回填地下的劑量包括來自結構表面(牆壁和地板)、嵌管(Embedded Pipe)和地下穿管(Penetration)的劑量，以及用於地下回填之乾淨混凝土的劑量。

根據廠址歷史，沒有跡象顯示 Zion 核電廠的表土或次表土土壤存在顯著污染，地下水污染的可能性也非常低。在進行最終狀態偵檢後，將彙總這四個來源的劑量，將彙總這五個來源的劑量，以證明符合 25 mrem/yr 的劑量標準。

Zion 核電廠根據不同的輻射來源及情境，以 RESRAD 建立劑量模型，從中計算出各種輻射來源以及情境下的 ROC 核種的 DCGL 值，以及地下水劑量轉換因子。

4.1.1 回填地下室結構表面(Backfilled Basement Structure Surfaces)

Zion 核電廠的反應器廠房及輔助廠房在除役後會保留地下 3 英尺以下之結構，在保留結構表面鋪上鋼筋混凝土，上面覆蓋至少 3 英尺厚的土壤，以回填地下模型(BFM, Basement Fill Model)評估其劑量，模型中假設在地下回填物中安裝了一口供水井。這口井水會在居住農夫場景中用於飲用、灌溉、牧場/作物灌溉和牲畜供水。BFM 模型結合 DUST-MS(Disposal Unit Source Term-Multiple Species)模組和 RESRAD 評估計算劑量和 DCGL 值。

4.1.2 土壤

表土的定義為深度土壤最上層的 15 cm，次表土壤的定義為從地面下 15 cm 到 100 cm 深的土壤層，使用 RESRAD 分別計算了表土層和次表土層的 DCGL 值。

4.1.3 地下埋管(Buried Piping)

地下埋管的定義為穿過土壤的管道。兩種假設情境：1)假設所有管道都被挖掘(Excavation)出來，2)以及假設所有管道都保持原位(Insitu)。使用 RESRAD 計算劑量，並因保守考量，將這兩種情景的劑量相加來確認 DCGL 值。

4.1.4 嵌管(Embedded Piping)

嵌管的定義為穿過混凝土牆或混凝土地板，並包含在特定建築物內的管道。嵌管中殘餘輻射物質的釋出途徑是透過包含該管道的地下室結構。嵌管的劑量會與包含該管道的地下室牆壁和地板之表面劑量相加。

4.1.5 穿管(Penetrations)

穿管的定義為穿過混凝土牆或地板的系統管道，連接兩個建築物，或連結建築物和地面，多數穿管殘留的放射性活度預計較低。

穿管根據它們與哪些地下空間相連被劃分為不同的偵檢單元。針對每個穿管穿透口偵檢單元，計算其 DCGL 值，並保守假設殘留的放射性物質同時 100%釋放到透管所連接的兩個地下空間。

4.1.6 地下水

將使用地下水濃度的曝露因子($\frac{\text{mrem/yr}}{\text{pCi/L}}$)進行地下水污染的劑量評估。

4.2 La Crosse 核電廠劑量模型

La Crosse 核電廠劑量模型之使用情境為工廠工人(Industrial Uses)，之關鍵群體為工業從業人員的平均成員(AMCG, Average Member of the Critical Group)。在 LTP 第六章中說明了工廠工人使用情境為 La Crosse 核電廠之「合理可預見情境」原因如下：

La Crosse 核電廠被認為適合持續用於工業用途的原因可以從其歷史背景、現有設施、周邊土地使用情況以及未來發展可能性進行分析。

首先，該地區自 1941 年以來一直被用作工業用途。Dairyland Power Cooperative(DPC)最初為建設 G-1 火力發電站而取得土地，其後又多次擴展，最終形成 163.5 英畝的工業區域。該地包含轉運站(Transmission Station)和其他重要基礎設施，用於支持未來電力供應。此外，現存的 G-3 發電站正在進行設備升級，並計劃在未來 20-25 年內繼續運行，進一步鞏固其作為工業地點的價值。此外，該地區還包括 36 英畝封閉的煤灰填埋場，進一步限制了其作為住宅用途的可行性。

其次，核電廠所在區域的地理特性使其不適合住宅開發。該廠址被密西西比河、鐵路、美國陸軍工程兵團(USACE)物業及野生動植物保護區包圍，與周邊小型社區相隔較遠。此外，鄰近地區有其他更適合且成本更低的土地可用於住宅發展。La Crosse 核電廠廠址的轉型成本及其對環境的潛在挑戰，使其在未來 100 年內更可能保留為工業用途。

綜上，根據 NUREG-1757 的定義和評估，LACBWR 的合理預期使用情景為工業用途，並將工廠工人定義為該地的關鍵群體(AMCG)。住宅用途在未來雖然有可能，但屬於不太可能的情境。

La Crosse 核電廠的殘餘輻射歸類至五潛在來源：回填地下、地下埋管、土壤、地上保留建築，以及地下水。執照終止時，大部分殘餘的輻射將被包含在地下剩餘結構的混凝土中。沒有跡象顯示 La Crosse 廠址存在顯著的土壤污染，也沒有跡象顯示在執照終止狀態下會出現土壤污染。在進行最終狀態偵檢後，將匯總這五個來源的劑量，以證明符合 25 mrem/yr 的劑量標準。

La Crosse 核電廠根據不同的輻射來源及情境，以 RESRAD 建立劑量模型，從中計算出各種輻射來源以及情境下的 ROC 核種的 DCGL 值以及地下水劑量轉換因子。地上保留建築物則使用 NUREG-1757 表 H.1 中的篩選值作為輻射標準。

4.2.1 回填地下模型(BFM, Basement Fill Model)

La Crosse 核電廠的反應器廠房及廢氣罐貯存室(WGTV)廠房在除役後會保留地下 3 英尺以下之結構，在保留結構表面鋪上鋼筋混凝土，上面覆蓋至少 3 英尺厚的土壤，並以回填地下模型(BFM)評估其劑量。BFM 概念模型包括兩種情境；1) Insitu 情境：混凝土保持在執照終止時的原樣(as-left)，2) Excavation 情境：部分或全部混凝土被開挖並帶到地面。由於不能排除部分回填結構被開挖且部分保留在地下的情況，因此，保守的以 BFM Insitu 情境和 BFM 挖掘情境劑量的總和作為證明符合輻射標準之劑量。La

Crosse 地下空間不包含嵌管和穿管。

4.2.1.1 BFM Insitu 情境

BFM Insitu 情境包括以下兩種曝露情境：1) 曝露於含殘餘放射性物質的井水，此情稱為 BFM Insitu_{gw}。2) 曝露於因建置水井而挖掘出到地面的物質，此情稱為 BFM Insitu_{ds}。

BFM Insitu_{gw} 情境的概念模型假設地板和牆壁中的殘餘放射性物質在回填後，因接觸的水而外釋出至鄰近的回填物質中。此情境假設 100% 的殘餘放射性物質立即釋出到回填物質中，然後將回填物質視為受污染的土壤。該情境假設在廠房下游邊緣附近建置了一口水井，並保守的假設地下水和井水間沒有建築物結構阻擋。由於可能受污染的表面上方至少有 3 英尺厚的覆蓋物，因此直接曝露和飲食/吸入土壤的輻射劑量可以忽略不計或為零，對於工業從業人員平均成員(AMCG)，BFM Insitu_{gw} 情境造成的曝露途徑是來自廠內水井的飲用水。

BFM Insitu_{ds} 情境假設在執照終止後，立即建置廠內水井。假定安裝過程中鑽孔接觸的地板混凝土中的殘餘放射性物質與地板表面上方的填充材料混合，帶到地面，並散佈在 15 cm 厚的土壤層中。BFM Insitu_{ds} 曝露途徑與受污染之表土的曝露途徑相同。

BFM Insitu_{gw} 使用 RESRAD，Insitu_{ds} 使用 Excel 並結合 RESRAD 評估計算劑量和 DCGL 值。

4.2.1.2 BFM 挖掘情境

BFM 挖掘情境假設在執照終止後的某個時間，將挖掘出部分或全部回填的結構混凝土，並鋪開在地面上。因保守性考量，假設在執照終止後立刻進行挖掘。此情境之輻射劑量評估使用 Excel。

4.2.2 土壤

表土的標準定義為土壤最上層的 15 cm，為了保守起見，並確保 FSS 的效能，LACBWR 將用於劑量評估的表土層厚度假設為 1 m，並使用 RESRAD 評估計算劑量和 DCGL 值。

4.2.3 地下埋管

地下埋管劑量評估的概念模型類似於 BFM，包括兩種情境：Insitu 情境和挖掘情境。Insitu 情境假設釋放的放射性物質位於地下的 2.54 厘米厚土壤層中，不考慮因管道的存在而減少的輻射物質於環境中的傳導和遷移，這是一種保守的假設。挖掘情景假設管道被挖掘，然後所有放射性物質立即釋出到 15 cm 厚的表土層中。劑量評估使用 RESRAD 結合 Excel。

4.2.4 地下水

將使用地下水濃度的曝露因子($\frac{\text{mrem/yr}}{\text{pCi/L}}$)進行地下水污染的劑量評估。

4.2.5 保留之地上建築

將保留的受影響地面以上建築包括： LACBWR 行政大樓、G-3 循環冷卻水泵室 (Crib House)、變電站開關設備室、G-1 循環冷卻水泵室(Crib House)、駁船洗滌休息室、備用控制中心，以及警衛室，使用 NUREG-1757 表 H.1 中的篩選值作為最終狀態偵檢結果之輻射標準(參考表 21)。

(五) 關注核種(ROC)

在確認關注核種名單前，首先要先建立除役核電廠中可能會存在的初始核種清單 (Initial Suite of Radionuclides)。根據 NUREG-1757 Vol.2 的 3.3 節，貢獻劑量加總少於輻射標準劑量 10%之核種稱為不顯著貢獻核種(IC, Insignification Contributors)，初始核種清單扣除不顯著貢獻核種後，剩餘的核種即為關注核種(ROC, Radionuclides of Concern)。ROC 將做為劑量模型的劑量來源，不顯著貢獻核種所貢獻的劑量則用於調整 DCGL 值。

5.1 Zion 核電廠最終狀態偵檢之 ROC

此節內容摘譯自 Zion 核電廠 LTP 第六章。

5.1.1 Zion 核電廠初始核種清單

Zion Solutions TSD 11-001 文獻中說明了 Zion 核電廠初始核種清單建立的建立程序：

1. 參考以下文獻後列出納入考量核種：
 - NUREG/CR-3474：反應器材料中的長壽命活化產物。
 - NUREG/CR-4289：商業核能發電廠內外的殘餘放射核種濃度。
 - WINCO-1191：美國商業核能反應器的放射性核種。
 - ICRT Publication 38：核種半衰期資訊。
 - 19 份停機後廢棄物流(Waste Stream)報告。
2. 將上一步驟所得之「考量核種」，刪去惰性氣體、半衰期小於兩年的放射性核種，以及理論上會產生但相對於 Co-60 和 Ni-63 含量低於 0.01%的中子活化產物後，剩餘的核種視為 Zion 核電廠除役後可能存在的核種。
3. 在 Zion 核電廠特性偵檢完成後，從反應器廠房及輔助廠房取得之混凝土芯樣本分析結果發現有多份樣本存在 Ag-108m 和 Eu-155(根據 TSD 14-019 文獻)，故將此兩個核種加入初始核種清單。

依據反應器及輔助廠房取得之混凝土芯樣本分析結果建立初始核種清單的混合比例(請參考表 22)

表 22 Zion 核電廠之初始核種清單及其混合比例

核種	反應器廠房	輔助廠房
	活度比例(%)	活度比例(%)
H-3	0.074	0.174
C-14	0.008	0.044
Fe-55	0.174	0.106
Ni-59	0.156	0.498
Co-60	4.675	0.908
Ni-63	26.275	23.480
Sr-90	0.027	0.051
Nb-94	0.178	0.013
Tc-99	0.008	0.016
Ag-108m	0.282	0.017
Sb-125	0.025	0.017
Cs-134	0.008	0.010
Cs-137	67.582	74.597
Eu-152	0.436	0.017
Eu-154	0.058	0.009
Eu-155	0.018	0.008
Np-237	0.000	0.0004
Pu-238	0.001	0.001
Pu-239	0.000	0.0005
Pu-240	0.000	0.001
Pu-241	0.007	0.028
Am-241	0.007	0.001
Am-243	0.000	0.001
Cm-243	0.001	0.0003
Cm-244	0.001	0.0003
Total	100	100

在 ZionSolutions TSD 14-010 文獻中提供了初始核種清單的 DCGL 值。根據初始核種清單的 DCGL 值與混合比例可以算出各個核種的劑量貢獻率，劑量貢獻最多的核種是 Cs-137，超過 96%，其次為 Co-60，接近 1.7%。若根據貢獻劑量加總少於輻射標準劑量 10%之核種稱為不顯著貢獻核種之定義，除了 Cs-137，其他核種皆可納入不顯著貢獻核種。然而，為保守起見，以及預期最終狀態偵檢時有被檢測出之可能，將 ROC 加入了 Co-60 和 Cs-134。此外，Sr-90 和 Ni-63 是 HTD 核種，在輔助廠房地下室結構中貢獻劑量微小，但卻仍有被檢測出之可能，因此也保留為 ROC。而 H-3、Eu-152，和 Eu-

154 因有可能存在於被活化的混凝土中，反應器廠房之 ROC 除了輔助廠房的 5 個 ROC 外，還加上了此三個核種。在表 22 中以淺藍色底表示出 ROC 核種與其混合比例。

5.1.2 Zion 核電廠反應器廠房和輔助廠房地下室 ROC

表 23 Zion 核電廠反應器廠房和輔助廠房地下室 ROC 活度與貢獻劑量

核種	反應器廠房(%)		輔助廠房(%)	
	活度比例	劑量貢獻比例	活度比例	劑量貢獻比例
H-3	0.074	0.017	-	-
Co-60	4.675	1.669	0.908	0.783
Ni-63	26.275	0.366	23.480	0.270
Sr-90	0.027	1.072	0.051	0.742
Cs-134	0.008	0.015	0.010	0.039
Cs-137	67.582	96.269	74.597	96.959
Eu-152	0.436	0.067	-	-
Eu-154	0.058	0.010	-	-
不顯著貢獻核種 貢獻劑量	0.864	0.512	0.954	1.313
Total	100	100	100	100

5.1.3 Zion 核電廠土壤 ROC

確認土壤中關注核種的程序，與第 5.1.1 節描述的程序相同，但在特性偵檢的結果中，很少發現有檢測得出核種的土壤樣本，因此，採用輔助廠房地下室的 ROC 作為土壤的 ROC，並應用土壤 DCGL 計算各 ROC 之劑量貢獻比例。

表 24 Zion 土壤 ROC 活度與貢獻劑量

核種	反應器廠房(%)	
	活度比例	劑量貢獻比例
Co-60	0.91	3.878
Ni-63	23.48	0.119
Sr-90	0.05	0.072
Cs-134	0.01	0.028
Cs-137	74.60	95.733
不顯著貢獻核種貢獻劑量	0.95	0.171
Total	100	100

5.1.4 Zion 核電廠地下埋管 ROC

地下埋管指的是在執照終止後將保留在廠址地下，直徑 1 英吋到 48 英吋的管道。

在 Zion 核電廠 LTP 產出時並未開始地下埋管的特性偵檢，因此，以輔助廠房保留地下室之 ROC 作為地下埋管之 ROC。

5.1.5 使用於調整 DCGL 的不顯著貢獻核種劑量貢獻比例

Zion 核電廠在考量不顯著貢獻核種劑量貢獻而調整 DCGL 值時，依據不同輻射來源，使用 5%~10% 作為不顯著貢獻核種的劑量貢獻比例。

5.1.6 難測核種(HTD)替代核種比值

地下保留結構的偵檢方法使用 ISOCS 靜態量測，但 ROC 中 Sr-90、Ni-63 和 H-3 不是加馬射線發射源，屬難測核種(HTD)，因此，採用替代核種(Surrogate)方式計算其活度。根據反應器廠房和輔助廠房混凝土芯樣本分析結果，保守採用樣本分析結果的最大比值作為最終狀態偵檢計算時的比例。土壤的難測核種替代比例亦採用輔助廠房的替代核種最大比值(參考表 25)

表 25 Zion 核電廠混凝土芯替代核種最大比值

核種比例	反應器廠房	輔助廠房
Sr-90/Cs-137	0.021	0.002
Ni-63/Co-60	442	180.45
H-3/Cs-137	1.76	-

5.2 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢之 ROC

此節內容摘譯自 La Crosse 核電廠 LTP 第六章。

5.2.1 La Crosse 核電廠初始核種清單

EnergySolutions TSD RS-TD-313196-001 文獻中說明了 Zion 核電廠初始核種清單建立的建立程序：

1. 參考以下文獻後列出納入考量核種：
 - NUREG/CR-3474：反應器材料中的長壽命活化產物。
 - NUREG/CR-4289：商業核能發電廠內外的殘餘放射核種濃度。
 - 1988 年所進行的一項 LACBWR 廢棄燃料存量之評估。
 - 數份 10 CFR Part 61 的廢棄物流(Waste Stream)報告。
2. 將上一步驟所得之「考量核種」，刪去惰性氣體、半衰期小於兩年的放射性核種，以及理論上會產生但相對於 Co-60 和 Ni-63 含量低於 0.01% 的中子活化產物。
3. 檢視廢棄物處理廠房(WTB)、反應器廠房和管道/通風隧道(Piping/Ventilation Tunnels)中採集的混凝土芯樣本檢測出來的放射性核種後，確認所有檢測出之核種皆包含上面「考量核種」清單內。
4. 依據反應器廠房、WTB、WGTV(Waste Gas Tank Vault)，以及和管道/通風隧道的初始和持續特性化過程中蒐集的 38 個混凝土芯分析結果建立初始核清單混合比率。(請參考表 26)

表 26 La Crosse 核電廠之初始核種清單及其混合比例

核種	活度比例		
	土壤	反應器廠房	WGTV
H-3	1.51E-01	2.36E-02	2.52E-01
C-14	1.72E-03	1.27E-03	9.37E-03
Fe-55	2.36E-02	1.40E-02	-8.13E-03
Ni-59	7.40E-04	2.48E-04	4.74E-02
Co-60	3.43E-02	4.58E-02	4.76E-03
Ni-63	2.64E-01	2.77E-01	1.89E-01
Sr-90	5.22E-02	7.59E-02	9.12E-03
Nb-94	1.68E-04	1.07E-04	1.01E-03
Tc-99	2.06E-03	2.16E-03	6.91E-03
Cs-137	4.41E-01	4.92E-01	4.49E-01
Eu-152	2.93E-03	1.84E-03	4.49E-03
Eu-154	1.50E-03	2.49E-03	1.60E-03
Eu-155	2.08E-03	6.61E-04	4.56E-03
Np-237	2.15E-06	2.17E-06	0.00E+00
Pu-238	1.16E-03	2.27E-03	7.95E-04
Pu-239/240	7.80E-04	3.17E-03	1.90E-04
Pu-241	1.56E-02	4.58E-02	2.35E-02
Am-241	3.56E-03	1.03E-02	3.25E-03
Am-243	5.85E-04	6.18E-04	4.55E-04
Cm-243/244	1.65E-04	1.58E-04	1.78E-04
全部	1.00	1.00	1.00

5.2.2 La Crosse 核電廠 ROC

在 EnergySolutions TSD LC-FS-TSD-002 文獻中提供了初始核種清單的 DCGL 值。根據初始核種清單的 DCGL 值與混合比例可以算出各個核種的劑量貢獻率。La Crosse 核電廠最後確認之 ROC 為 Cs-137、Co-60、Sr-90、Eu-154 和 Eu-152。表 27 為將 ROC 的活度重新標準化，使其比率總合為 1 的表格。土壤/地下埋管(Pipe)、反應器廠房和 WGTV 之不顯著貢獻核種(IC)的貢獻劑量比例從 0.3% 到 7.3%。

表 27 La Crosse 核電廠 ROC 活度混合比例

核種	活度比例		
	土壤/地下埋管	反應器廠房	WGTV
Co-60	6.44E-02	7.41E-02	1.01E-02
Sr-90	9.81E-02	1.23E-01	1.94E-02
Cs-137	8.29E-01	7.96E-01	9.57E-01
Eu-152	5.49E-03	2.97E-03	9.56E-03
Eu-154	2.81E-03	4.04E-03	3.42E-03
總和	1.0	1.0	1.0

5.2.3 La Crosse 核電廠地下埋管 ROC

La Crosse 核電廠採用表 26 之核種清單作為地下埋管的初始核種清單，根據 EnergySolutions TSD LC-FS-TSD-002 文獻中所提供的初始核種清單的 DCGL 值，可計

算核電廠地下埋管初始核種清單的劑量貢獻值，從中得出之 ROC 與表 27 中的 ROC 相同，包含 Co-60、Sr-90、Cs-137、Eu-152，以及 Eu-154 等五個核種。

5.2.4 使用於調整 DCGL 的不顯著貢獻核種劑量貢獻比例

La Crosse 核電廠考量不顯著貢獻核種劑量貢獻而調整 DCGL 值時，所有輻射來源(土壤、地下保留結構、地下埋管，和地上保留建築)皆以 10%作為不顯著貢獻核種的劑量貢獻比例。

5.2.5 難測核種(HTD)替代核種比值

表 28 La Crosse 核電廠 Sr-90/Cs-137 替代比值

廠房或區域	Sr-90/Cs-137 替代比值
WGTV	6.75E-02
反應器廠房	5.00E-01
土壤	5.02E-01

(六) DCGL 和 SOF

6.1 DCGL(Derived Concentration Guideline Levels)

DCGL，導出濃度指引水平，指在核電廠除役後，單一輻射來源之單一核種造成殘餘劑量達到輻射標準(25 mrem/yr)時之核種濃度。以下是 DCGL 各項符號說明：

- DCGL_w：同 DCGL，適用於核種均勻分配於偵檢單元中的情況。指當核種均勻分配於偵檢單元中時，單一核種造成殘餘劑量達到輻射標準(25 mrem/yr)時之核種濃度。
- DCGL_{EMC}：適用於偵檢單元中小範圍區域內之輻射偏高(Elevated Concentration)區域。當開放土地偵檢單元中有限範圍內土壤的為輻射偏高區域時，對該輻射偏高區域的土壤可容許的核種濃度。
- BcDCGL(Base Case DCGL)：同 DCGL_w。
- OpDCGL(Operational DCGL)：因除役核電廠有多個輻射來源(如：回填地下、地下埋管、土壤、地上保留建築，以及地下水等)，為使所有輻射來源所造成的劑量總和不超過輻射標準，預設允許每類輻射來源所造成的劑量僅可為為除役輻射標準(25 mrem/yr)的一個比例(如:25%)，且各類輻射來源所允許之劑量比例的總合為 100%。OpDCGL 指的是單一輻射來源之單一核種造成殘餘劑量達到所對該輻射來源所設定輻射標準(25 mrem/yr 乘上允許的比例)時之濃度。

為考量到不顯著貢獻核種造成的劑量(IC Dose)，容許關注核種(ROC)造成的劑量須扣除不顯著貢獻核種造成的劑量。初始核種清單中貢獻劑量加總少於輻射標準劑量 10%之核種稱為不顯著貢獻核種(IC, Insignification Contributors)，保守假設不顯著貢獻核種造成的劑量為劑量標準的 10%(2.5 mrem/yr)，因此因不顯著貢獻核種調整之 DCGL 值的定義為：單一核種造成殘餘劑量達到 90%輻射標準時之濃度。

6.2 SOF(Sum-of-Fractions)

SOF 是處理多個核種或輻射來源的一種簡單且靈活的方式。所謂的輻射來源是指任何含有殘餘輻射的物質或介質，例如：表土、地下水和地下埋管等為三種不同的輻射來源。DCGL_w(同 BcDCGL) 為單一輻射來源之單一核種造成殘餘劑量達到輻射標準(25 mrem/yr)時之核種濃度。在判斷是否符合外釋標準時，每個核種和輻射來源的劑量都需要分別計算，然後將其相加，且加總劑量需低於外釋輻射標準。

計算單一輻射來源中單一核種劑量的簡單方法是，計算核種濃度和 DCGL_w 的相對比例，然後將該比例乘以 25 mrem/yr。對於多個輻射來源與核種，這些比例可以相加，並將其總和乘以劑量限值，因此，所有核種和輻射來源的比例總和不得超過“1”(即 Unity)。

SOF(Sum-of-Fractions)即為各關鍵核種的測量結果活度除以對應之 DCGL 後相加之值。以下是 DCGL 各項符號說明各項符號說明：

- BcSOF：各關鍵核種的測量結果活度除以對應之 BcDCGL 後相加之值，當 BcSOF 等於 1 時，代表劑量等於外釋輻射劑量限值(25 mrem/yr)。

$$BcSOF = \sum_{\text{核種 } i} \frac{\text{核種 } i \text{ 濃度}}{\text{核種 } i \text{ 之 BcDCGL}}$$

- OpSOF：各關鍵核種的測量結果活度除以對應之 OpDCGL 後相加之值，當 OpSOF 等於 1 時，代表劑量等於該輻射來源所允許的劑量限值。

$$OpSOF = \sum_{\text{核種 } i} \frac{\text{核種 } i \text{ 濃度}}{\text{核種 } i \text{ 之 OpDCGL}}$$

(七) 最終狀態偵檢結果評估

美國除役核電廠進行最終狀態偵檢時，將廠區根據殘餘輻射污染可能性進行區域分級，並依照區域分級，規範不同的偵檢要求，污染可能性越大的區域，投入越多的資源進行越詳細的偵檢。此外，將廠區的土地與建築或結構依照區域分級的規範切割為大小適當的偵檢單元，每一個偵檢單元依據其區域分級進行最終狀態偵檢規劃、執行與評估。每一個偵檢單元皆會產出其個別的最終狀態偵檢結果紀錄，稱為 Release Record。

在完成一偵檢單元的最終狀態偵檢後，首先應審查測量數據，以確認偵檢單元是否已正確分級(請參考本報告第三章第(二)節)。如果最終狀態偵檢顯示某區域的分級錯誤，則該區域應重新進行分級，並重新進行該區域的最終狀態偵檢。之後，接著確定測量結果是否顯示偵檢單元符合執照終止的輻射標準。

根據 Code of Federal Regulations (10 CFR 20.1402)，除役核電廠非限制使用外釋之標準為：

1. 輻射標準：關鍵群體的平均成員(AMCG)來自背景輻射以外之殘餘輻射的年總有效劑量不得大於 25 mrem(0.25 mSv)
2. 合理抑低(ALARA)標準：殘餘輻射必須降到 ALARA 水平。

因除役核電廠可能會有多個殘餘輻射來源，每個輻射來源的殘餘劑量總和需小於除役輻射標準(25 mrem/yr)，為使所有輻射來源所造成的劑量總和不超過輻射標準(25

mrem/yr)，來自每類輻射來源的殘餘輻射劑量僅可為除役輻射標準的一個預設比例(如:25%)，且各類輻射來源所允許之劑量比例的總合為 100%。因此，所有的偵檢單元的最終偵檢的劑量評估結果皆須符合 LTP 中所設定其所屬輻射來源所允許的劑量限值，且廠區內所有輻射來源的殘餘劑量總和要小於除役輻射標準(25 mrem/yr)，才能判定除役核電廠符合外釋標準。根據 MARSSIM Table 8.2，有背景輻射和沒有背景輻射時判斷是否符合外釋標準的方法分別如表 29 和表 30。

表 29 有背景輻射時(使用背景參考區域)

偵檢結果	判斷是否符合外釋標準
偵檢單元的最大量測值背景參考區域的最大量測的差異小於 DCGL。	偵檢單元符合外釋標準。
偵檢單元的量測平均值和背景參考區域的量測平均值的差異大於 DCGL。	偵檢單元不符合外釋標準。
偵檢單元的量測值平均和背景參考區域的量測平均值的差異小於 DCGL，但有偵檢單元的量測值和參考區域的量測平均值大於 DCGL。	依據以下兩項結果判斷是否符合外釋標準： 1. EMC(Elevated Measurement Comparison)：僅適用於開放土地偵檢單元(土壤)。 2. WRS Test 檢定

表 30 沒有背景輻射時(無使用背景參考區域)

偵檢結果	判斷是否符合外釋標準
偵檢單元所有量測值小於 DCGL。	偵檢單元符合外釋標準。
偵檢單元量測平均值大於 DCGL。	偵檢單元不符合外釋標準。
偵檢單元量測平均值小於 DCGL，但有量測值大於 DCGL。	依據以下兩項結果判斷是否符合外釋標準： 1. EMC(Elevated Measurement Comparison)：僅適用於開放土地偵檢單元(土壤)。 2. Sign Test 檢定

MARSSIM 指引中判斷是否符合外釋標準方法適用於僅存在單一污染核種時，但當偵檢單元中包含由多種核種時，需要考慮每種核種對劑量的貢獻，NUREG-1757 Vol.2 第 2.7 節中說明了使用使用 SOF(Sum of Fraction 方法)進行判斷合規性(Compliance)的方法。SOF 為各關鍵核種的測量結果活度除以對應之 DCGL 後相加之值，當 SOF 等於 1 時，代表劑量等於劑量限值。

當核種濃度之間存在固定比例時，可以為每種核種計算出一個 DCGL_w。透過最容易測量的單一替代核種的濃度與其 DCGL_w(根據存在的其他核種進行修正後之值)進行比較，即可判斷是否符合執照終止的輻射標準。例如，若 Cs-137 和 Sr-90 同時存在，使用 Cs-137 的測量濃度進行判斷，可能比分別測量 Cs-137 和 Sr-90 更簡單，從而節省勞

力和分析費用。在使用替代核種代表其他核種時，應在偵檢單元內進行足夠數量、空間上分佈的測量，以確定替代核種與其他核種之間的比例的一致性。當核種濃度之間沒有固定比例時，則有必要評估每種核種的濃度。此時，需考慮每種核種濃度相對於其 DCGL_W 的總和，以此證明符合輻射標準。

7.1 EMC(Elevated Measurement Comparison)

根據 MARSSIM，當開放土地偵檢單元的量測平均值小於 DCGL，但有量測值大於 DCGL 時，要進行 EMC 和統計檢定，要特別注意的是，EMC 僅適用於開放土地(土壤)偵檢單元。當開放土地偵檢單元有樣本或量測值超過 BcDCGL 時，應進行 EMC 評估。EMC 僅適用於第一級偵檢單元，第二級和第三級偵檢單元不應存在超過 BcDCGL 的輻射污染，若第二級和第三級偵檢單元有樣本或量測值超過 BcDCGL 時，應進行重新分級和重新偵檢。

進行 EMC 時，首先要使用 RESRAD 計算 1 m² 到 100 m² 面積因子(AF, Area Factors)，而後計算 DCGL_{EMC} = AF * BcDCGL。最後，根據下面公式判斷是否符合標準。

$$\frac{\delta}{DCGL_W} + \frac{\tau_1 - \delta}{DCGL_{EMC_1}} + \frac{\tau_2 - \delta}{DCGL_{EMC_2}} + \cdots \frac{\tau_n - \delta}{DCGL_{EMC_n}} < 1$$

where:

- δ = the survey unit average activity;
- $DCGL_W$ = the survey unit Base Case DCGL concentration,
- τ_n = the average activity value of hot spot n , and
- $DCGL_{EMC_n}$ = the DCGL_{EMC} concentration of hot spot n .

7.1.1 Zion 核電廠面積因子

表 31 Zion 核電廠表土層土壤面積因子

Area (m ²)	Area Factors for Radionuclides of Concern				
	Cs-137	Co-60	Cs-134	Ni-63	Sr-90
1	1.50E+01	1.23E+01	1.33E+01	8.06E+03	8.90E+02
3	6.46E+00	5.24E+00	5.73E+00	2.73E+03	3.13E+02
10	3.06E+00	2.47E+00	2.72E+00	8.23E+02	1.03E+02
30	2.10E+00	1.68E+00	1.86E+00	2.75E+02	4.02E+01
100	1.62E+00	1.29E+00	1.44E+00	8.26E+01	1.64E+01

表 32 Zion 核電廠次表土層土壤面積因子

Area (m ²)	Area Factors for Radionuclides of Concern				
	Cs-137	Co-60	Cs-134	Ni-63	Sr-90
1	2.04E+01	1.10E+01	1.52E+01	6.49E+03	1.50E+03
3	9.26E+00	4.91E+00	6.92E+00	2.17E+03	5.23E+02
10	4.48E+00	2.36E+00	3.35E+00	6.51E+02	1.64E+02
30	3.23E+00	1.70E+00	2.42E+00	2.17E+02	5.72E+01
100	2.59E+00	1.37E+00	1.95E+00	6.51E+01	1.76E+01

7.1.2 La Crosse 核電廠面積因子

La Crosse 核電廠的 LTP 中只提供表土層的面積因子。

表 33 La Crosse 核電廠表土層土壤面積因子

Radionuclide	Area Factors				
	1m ²	2m ²	5m ²	10m ²	100m ²
Cs-137	9.44	5.56	3.07	2.04	1.19
Co-60	9.11	5.42	3.01	2.00	1.18
Sr-90	11.21	6.66	3.69	2.45	1.41
Eu-152	9.30	5.50	3.04	2.02	1.18
Eu-154	9.38	5.54	3.06	2.03	1.18

7.2 劑量評估計算

最終狀態輻射偵檢劑量評估計算方法有二，一為運用 DCGL，另一為運用劑量轉換因子。

7.2.1 運用 DCGL 計算

計算公式如下，Media 代表劑量來源(如土壤、地下保留結構、地下埋管，和地上保留建築等)：

$$\text{Dose}_{\text{Media}} = (25 \text{ mrem/yr}) * \sum_{\text{核種 } i} \frac{\text{核種 } i \text{ 濃度}}{\text{核種 } i \text{ 之 } \text{BcDCGL}} = (25 \text{ mrem/yr}) * \text{BcSOF}$$

7.2.2 運用劑量轉換因子計算

劑量轉換因子適用於計算地下水造成的劑量，公式如下：

$$\text{Dose}_{\text{地下水}} = \sum_{\text{核種 } i} \text{核種 } i \text{ 濃度} \left(\frac{\text{pCi}}{\text{L}} \right) * \text{劑量轉換因子} \left(\frac{\text{mrem}}{\text{yr}} \right)$$

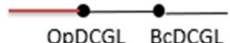
7.3 偵檢單元偵檢結果評估

如前所述，在完成一偵檢單元的最終狀態偵檢後，首先應審查測量數據，以確認偵檢單元是否已正確分級，如果最終狀態偵檢顯示某區域的分級錯誤，則該區域應重新進行分級，並重新進行該區域的最終狀態偵檢。當確認偵檢單元的區域分級正確後，接著要評估評估單元是否符合外釋標準。

前文中已提及因除役核電廠有多個輻射來源，為使所有輻射來源所造成的劑量總和不超過輻射標準，預設允許每類輻射來源所造成的劑量僅可為為除役輻射標準(25 mrem/yr)的一個比例，依據所允許的劑量導出之關注核種的濃度限制稱為 OpDCGL。將

將一量測點中各關注核種(ROC)的核種濃度除以對應之 OpDCGL 後相加，即為該量測值之 OpSOF 值(如下計算式)。一個偵檢單元中會於多個量測位置進行取樣或量測，若偵檢單元中每一個量測點的所有 ROC 核種濃度皆小於其對應之 OpDCGL，則該偵檢單元符合外釋標準；若偵檢單元中量測點的 OpSOF 平均值大於 1，則該偵檢單元不符合外釋標準；若偵檢單元中量測點的 OpSOF 平均值小於 1，但部分量測結果中有核種濃度大於對應的 OpDCGL 或 BcDCGL，則需進行統計檢定或 EMC 來判斷是否符合外釋標準，判斷方式請參考表 34。

表 34 偵檢單元偵檢結果評估方法

偵檢單元 內量測結 果的 OpSOF 平 均值	偵檢單元內量測值狀況	判斷或行動	
		開放土地偵檢單元(土 壤)	其他輻射來源偵檢單 元
> 1		偵檢單元不符合外釋標準 進行廣泛除污並重新偵檢	
< 1	任一量測值大於 BcDCGL 	進行 EMC，判斷是否符 合外釋標準	進行局部除污至低於 BcDCGL，並重新進 行偵檢
	任一量測值介於 OpDCGL 和 BcDCGL 之 間 	進行統計檢定，判斷是否符合外釋標準。 無背景污染：Sign Test 有背景污染：WRS Test	
	全部量測值小於 OpDCGL 	偵檢單元符合外釋標準	

7.4 除役核電廠合規劑量(Compliance Dose)

所有偵檢單元完成最終狀態(FSS)偵檢，且評估每一個偵檢單元皆符合除役標準後，將計算最終合規劑量(Compliance Dose)。合規劑量的計算方式為加總每個輻射來源(如：地下室、土壤、埋管和現有地下水)的最大偵檢單元平均劑量，此劑量加總方式是保守的，因為不同的輻射來源可能不相鄰(contiguous)或同時存在。

7.4.1 Zion 核電廠合規劑量計算公式

Zion 核電廠有四個不同的輻射來源：回填的地下建築結構、土壤、地下埋管以及地下水。要證明符合劑量標準，必須按照下面方程式將這四個輻射來源的劑量相加。嵌管劑量、穿管劑量和潔淨混凝土回填劑量將會與地下的牆壁和地板表面劑量相加，來計算地下建築結構的總劑量，合規劑量計算方式如方程式 1：

方程式 1 Zion 核電廠合規劑量計算公式

$$\text{Compliance Dose} = (\text{Max BcSOF}_{\text{BASEMENT}} + \text{Max BcSOF}_{\text{SOIL}} + \text{Max BcSOF}_{\text{BURIED PIPE}} + \text{Max SOF}_{\text{GROUNDWATER}}) \times 25 \text{ mrem/yr}$$

where:

Compliance Dose	=	must be less than or equal to 25 mrem/yr,
Max BcSOF _{BASEMENT}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) for backfilled Basements (including surface, embedded pipe, penetrations and fill [if required]),
Max BcSOF _{SOIL}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) for open land survey units,
Max BcSOF _{BURIED PIPE}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) from buried piping survey units,
Max SOF _{GROUNDWATER}	=	Maximum SOF from existing groundwater

7.4.2 La Crosse 核電廠合規劑量計算公式

La Crosse 核電廠有五個不同的輻射來源：回填的地下建築結構、土壤、地下埋管、地上建築，以及地下水。要證明符合劑量標準，必須按照下面方程式將這五個輻射來源的劑量相加，合規劑量計算方式如

方程式 2。

方程式 2 La Crosse 核電廠合規劑量計算公式

$$\text{Compliance Dose} = (\text{Max BcSOF}_{\text{BASEMENT}} + \text{Max BcSOF}_{\text{SOIL}} + \text{Max BcSOF}_{\text{BURIED PIPE}} + \text{BcSOF}_{\text{AG BUILDING}} + \text{GW BcSOF}_{\text{BS OB}} + \text{GW BcSOF}_{\text{BPS OBP}} + \text{Max SOF}_{\text{EGW}}) \times 25 \text{ mrem/yr}$$

where:

Compliance Dose	=	must be less than or equal to 25 mrem/yr,
Max BcSOF _{BASEMENT}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) for backfilled Basements,
Max BcSOF _{SOIL}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) for open land survey units,
Max BcSOF _{BURIED PIPE}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) from buried piping survey units,
Max BcSOF _{AG BUILDING}	=	Maximum BcSOF (mean of FSS systematic results plus the dose from any identified elevated areas) from above grade standing building survey units,
GW BcSOF _{BS OB}	=	Groundwater scenario dose from the “Other Basement” (OB) which is defined as the basement not used to generate the Max BcSOF _{BASEMENT} term in Equation 1
GW BcSOF _{BPS OBP}	=	Groundwater scenario dose from the “Other Buried Pipe” (OBP) which is defined as the buried pipe survey unit not used to generate the Max BcSOF _{BURIED PIPE} term in Equation 1
Max SOF _{EGW}	=	Maximum SOF from existing groundwater (EGW)

四、Zion 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查

(一) Zion 核電廠除役簡介

Zion 核電廠位於伊利諾伊州東北部靠近 Zion 市，在 Michigan 湖西岸。Zion 核電廠原執照面積約 331 英畝，經廠址歷史評估與特性偵檢評估後，歸屬未受輻射影響區域之面積約 214 英畝，歸屬受輻射影響區域約 117 英畝。受輻射影響區域包含和 ISFSI 相關的土地區域(仍保留在 10 CFR Part 50 執照中)近 5 英畝，以及要進行最終狀態偵檢並釋出的區域約 112 英畝。

Zion 核電廠的除役方法為拆除並清除廠址內所有廠房、建築、結構和構件至至少地下 3 英尺深(地下三英尺深處之海拔標高為 588 英尺)。在執照終止時會保留的建築結構包含：1 號機和 2 號機圍阻體在移除混凝土後外露的鋼襯層(Exposed Steel Liner)和反應爐下方的混凝土(Under-Vessel Concrete)，以及鋼襯層外地面下的結構混凝土、輔助廠房和汽機廠房的鋼筋混凝土地下室地板和外牆(移除所有內牆和地板)、用過燃料池(SFP)和燃料運輸通道的鋼筋混凝土地板和牆壁(移除其鋼襯層)，以及循環冷卻水泵室(Crib House)、廢水處理設施、循環進水和排水管道之前水池(Forebay)等建築於 588 英尺標高以下的結構。

所有 588 英尺標高以上的建築結構將被移除，並作為廢棄物處理。屬於 Commonwealth Edison 公司的開關設備室將予以保留。所有用過核燃料和超過 C 類的廢棄物裝入容器，並轉移至獨立用過燃料乾式儲存設施(ISFSI)。燃料將留在場內的 ISFSI 中乾式儲存，直到轉移至能源部(DOE)。圖 16、圖 17 和圖 18 分別為 Zion 核電廠原執照範圍、輻射管制區與安全管制區。

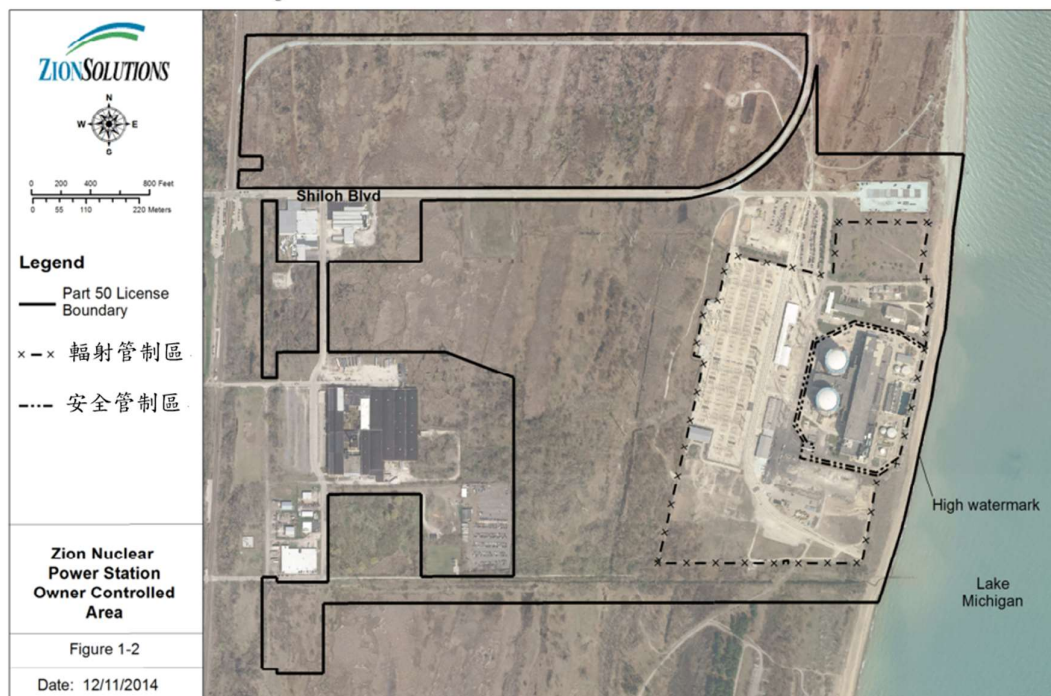


圖 16 Zion 核電廠原執照範圍



圖 17 Zion 核電廠輻射管制區

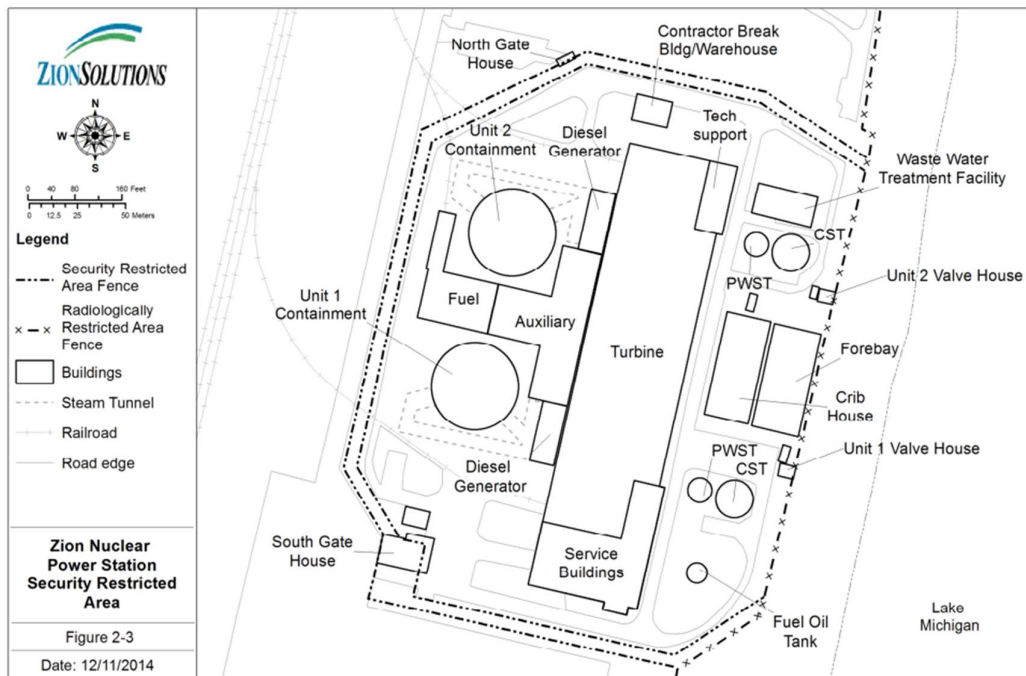


圖 18 Zion 核電廠安全管制區

(二) Zion 核電廠最終狀態偵檢報告與審查概述

Zion 核電廠的最終狀態偵檢的執行與報告分為 4 個 Phase，其中，Phase 1、Phase 3 和 Phase 4 偵檢對象為開放土地，一個 Phase 有單獨的最終狀態偵檢報告(FSSR)一份，Phase 2 又分為 Part 1 和 Part 2，偵檢對象分別為地下室與嵌管以及地下埋管，兩部份各有一份 FSSR。此外，每個偵檢單元有各自的 Release Record。在 Phase 4 的 FSSR 內容中，除了包含開放土地偵檢單元之偵檢結果，還說明了地下水劑量計算方法與結果，以及 Zion 核電廠四個輻射來源的最終狀態劑量總和符合標準的證明。

NRC 從對 Zion 核電廠的最終狀態偵檢報告(FSSR)和 2021 年確認偵檢資料與 RAI 回應進行審查時，得知從 2012 年到 2018 年在 Zion 核電廠廠區進行的除役作業導致離散放射性粒子(DRPs)成為空氣中的懸浮物，並被擴散到核電廠廠區內，1 號機和 2 號機圍阻體和燃料處理廠房外部之區域。Zion 核電廠的污染控制和矯正措施未能完全解決 DRPs 的釋出問題，因此在 FSS 期間及後來的 2021 年和 2023 年的確認偵檢中，不時發現 DRPs。NRC 視查員(Inspectors)針對不適當的除役作業提出了一個對 10 CFR 20.1501 的 Severity Level IV 違規。

由於明顯存在 DRP 污染問題且沒有關於 DRP 調查的 NRC 指引，NRC 和 Zion 核電廠在評估情況時出現了重大延誤。最終，在考量了對 DRPs 的掃描靈敏度估計和曝露 DRPs 的潛在劑量後，NRC 認為，手動掃描時儘量靠近表面並儘量緩慢進行應該可以為識別環境中的 DRPs 提供足夠的靈敏度。Zion 因此修改了其掃描技術和數據品質目標(DQOs)，並使用適當的技術重新執行了多次 FSS。2022 年 10 月 17 日，Zion 核電廠表示已完成其 FSS。2023 年 5 月 4 日，Zion 核電廠表示已將所有已知的 DRPs 從廠址中移除，並已提供合理保證以證明 Zion 核電廠廠址符合非限制性釋出的法規要求。

2023 年，NRC 要求其承包商 ORISE 返回廠址，進行確認性偵檢，在過去曾發現 DRPs 區域進行大範圍的手動掃描，並評估 DRPs 是否可能存在於地下土壤中。NRC 的目標是驗證 Zion 核電廠對 DRPs 的識別和除污是否有效，並確認 FSS 是否符合 LTP。

最終，透過 FSS、確認性偵檢和 Zion 核電廠的狀況調查，NRC 認為有合理保證所有 DRPs 已被識別、移除並作為廢棄物處置。

以下文中有關統計相關部分之詳細說明，可參考原能會「111 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析-子項計畫二-分項 2」期末報告第二章第(八)節。有關區域分級與調整部分請參考本報告第三章第 2.2 節(Zion 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務)。

(三) Zion 核電廠開放土地偵檢單元最終狀態偵檢報告

表 35 為 Zion 核電廠最終狀態偵檢各階段偵檢單元數表，其中 Phase 1 全數都是 Class 3 偵檢單元，Phase 3 全數都是 Class 1 偵檢單元，Phase 2 則除了 6 個 Class 2 和 1 個 Class 3 外，其他都是 Class 1 偵檢單元。本報告研析範圍為 Class 2 和 Class 3 偵檢單元相關結果，本計畫僅就 Phase 1 和 Phase 4 之 Class 2 和 3 的開放土地偵檢單元進行研析。

表 35 Zion 核電廠最終狀態偵檢開放土地偵檢單元各 Phase 偵檢單元數

FSS Phase	區域分級		
	Class 1	Class 2	Class 3
Phase 1	-	-	8
Phase 3	41	-	-
Phase 4	60	6	1

3.1 Phase 1 FSSR

3.1.1 偵檢規劃

Zion 核電廠 Phase 1 FSS 包含 8 個 Class 3 開放土地偵檢單元，面積共 197,101 m²。位於東北角的偵檢單元 10212 和 10213A 原本也納入在 Phase 1 中，但在提交出版的 Phase 1 FSSR 給 NRC 後發現發現此兩個偵檢單元內都有地下管道需要拆除，因此將之延後至 Phase 4 再進行 FSS。表 36 為 Phase 1 偵檢單元列表，圖 19 為 Phase 1 偵檢單元位置圖。

表 36 Zion 核電廠 Phase 1 開放土地偵檢單元列表

偵檢單元	名稱	Class	尺寸(m ²)
10205	Switchyard	3	54,573
10219A	Area Far South of Switchyard (A)	3	2,433
10219B	Area Far South of Switchyard (B)	3	7,516
10220C	Adjacent to South Restricted Area - Lakeshore	3	27,870
10222	North Beach Area	3	21,778
10223	Power Block Beach Area	3	12,371
10224	South Beach Area	3	14,608
10301	West Training Area	3	55,942

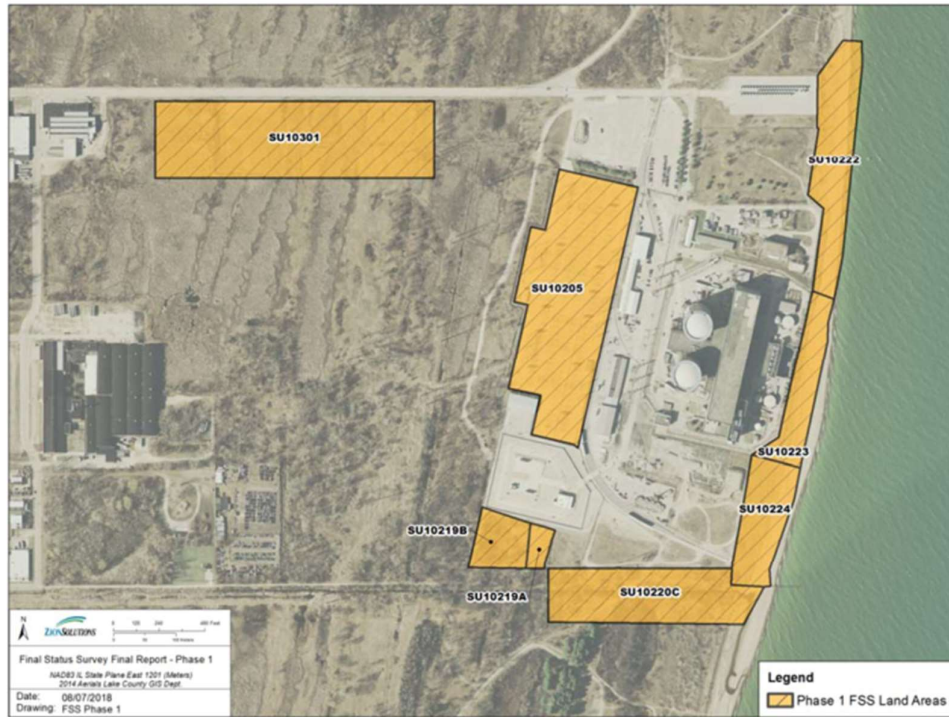


圖 19 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元位置

3.1.1.1 用於決策之輸入(Identify Inputs to the Decision)

- 需要的資訊(Information Needed): 需要偵檢單元殘餘活度和表面區域的評估。廠址歷史評估和特性偵檢為 FSS 的初步資料來源，並透過 FSS 的量測和取樣確認潛在核種的濃度和變異性(Variability)資訊。
- 歷史資訊(Historical Information): 經廠址歷史評估和特性偵檢確認的區域分級。
- 輻射偵檢資料(Radiological Survey Data): 使用廠址歷史評估及特性偵檢取得的資料來計算 FSS 所需樣本數。
- 關注核種(ROC, Radionuclides of Concern): 如前文所述，在特性偵檢的結果中，很少發現有檢測得出核種的土壤樣本，因此，採用輔助廠房地下室的 ROC 作為土壤的 ROC(參考表 23 表 24)，包含 Co-60、Ni-63、Ni-63、Cs-134 和 Cs-137，其中劑量貢獻比例最大的是 Cs-137(95.733%)，其次為 Co-60(3.878%)
- 進行 FSS 時，難測關注核種 Ni-63 和 Sr-90 之濃度分別使用替代核種 Co-60 和 Cs-137 推算其濃度。因在特性偵檢的結果中，很少發現有檢測得出核種的土壤樣本，故採用輔助廠房地下室的 ROC 作為土壤的 ROC，土壤的難測核種替代比例亦採用輔助廠房的替代核種最大比值(參考表 25)。

根據 Zion 核電廠 LTP，區域分級為 Class 2 和 3 的開放土地偵檢單元只需進行表土取樣，不需進行次表土取樣。表 37 為 Zion 核電廠表土的 BcDCGL 與 OpDCGL 值。

表 37 Zion 核電廠表土土壤 ROC 之 DCGL

Radionuclide	Base Case DCGL	Operational DCGL
	(pCi/g)	(pCi/g)
Co-60	4.26	1.091
Cs-134	6.77	1.733
Cs-137	14.18	3.630
Ni-63	3,572.10	914.458
Sr-90	12.09	3.095

3.1.1.2 調查基準(Investigation Level)：

開放土地 Class 3 偵檢單元的掃描調查基準為經標準化及替代核種調整後之 ROC 核種 OpDCGL 的 50%。(參考表 17)

3.1.1.3 取樣與分析方法

表土樣本採集深度為 15 公分，透過現場加馬光譜儀進行加馬發射放射性核種的分析。採集的介質包括土壤和沙子。依據 LTP，在 Class 3 偵檢單元中，不需要進行次表土取樣。

實驗室儀器的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%。如果測量結果的 MDC 超過目標值將接受為有效數據。

根據 LTP，最終狀態偵檢取的樣本中的 10%，或者任何超過 OpDCGL(OpSOF) 10% 的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，分析的目的為確認放射性核種的組成與 LTP 中假定的組成無顯著差異。所有作業均需符合品質保證項目計畫(QAPP)的要求，包括使用訓練有素的技術人員、經過校準的儀器及規範的操作程序。除這些要求外，選擇至少 5% 的樣本數量進行品質管控(QC)評估，並在每個偵檢單元中至少收集一個重複土壤樣本用於品質管控評估。

3.1.1.4 統計檢定：

選擇符號檢定(Sign Test)作為非參數統計檢定方法。統計檢定可容許的型一錯誤(Type I Error)和型二錯誤(Type II Error)率皆為 5%。透過統計方法計算所需樣本時，灰色區域下限(LBGR)設為 OpDCGL 的 50%。

3.1.1.5 樣本數量

8 個偵檢單元中，有 7 個單元要求收集 14 個表土樣本以進行非參數統計檢定。在偵檢單元 10222 中，增加了一個樣本(N=15)，以確保足夠的偵檢覆蓋範圍，因為由於密歇根湖水位變化使該單元的很大一部分無法接近。樣本位置運用軟體 VSP 規劃。

3.1.1.6 判斷性樣本數量和位置

判斷性樣本的選擇由負責的專家或工程師決定。

3.1.1.7 掃描區域和位置數量

根據 LTP 規定，對於 Class 3 偵檢單元，應在污染可能性最大的區域進行判斷性(偏差)表面掃描。對於開放土地，這可能包括地表排水區域和集水點。根據廠址歷史評估、特性化偵檢結果和偵檢單元的使用方式，至少隨機選擇偵檢單元表面面積的 5% 進行掃描。在調查單元 10219A、10220C 和 10301 中，對於污染風險較高的地點，進行了額外的掃描和/或土壤樣本取樣。

3.1.1.8 品質管控樣本數量

根據 LTP 和 QAPP 的品質管控措施規範，對偵檢單元中 5% 的土壤樣本進行「分割樣本」分析，位置隨機選擇。

表 38 為 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元掃描範圍及表土樣本取樣個數資訊列表。

表 38 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元掃描範圍及表土樣本取樣個數

偵檢單元	偵檢單元分級	掃描範圍比例	偵檢單元面積(m ²)	掃描區域面積(m ²)	隨機樣本數	判斷性樣本數	調查樣本數
10205 ⁽¹⁾	3	0 %	54,573	0	14	0	0
10219A	3	5 %	2,433	126	14	8	0
10219B	3	5 %	7,516	378	14	0	0
10220C	3	5 %	27,870	1,400	14	5	0
10222	3	5 %	21,778	1,200	15	0	0
10223	3	5 %	12,371	630	14	0	0
10224	3	5 %	14,608	756	14	1	0
10301	3	5 %	55,942	2,800	14	1	2

註(1)：偵檢單元 10205 因為安全考量(在靠近帶電高壓線的地方使用電動手持儀器的安全問題)，沒有進行掃描。

3.1.2 偵檢結果

3.1.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

- 在偵檢單元 10301 中，因出現偏高的掃描結果了進行進一步調查，包括採集調查用的表土土壤樣本。
- 在偵檢單元 10223 中，三個品質管控樣本中檢測出超過 MDC 濃度的 Sr-90，亦進行了調查。Zion 核電廠基於以下原因推斷，在調查單元 10223 檢測到的 Sr-90 可能是偽陽性：
 1. 對樣本 L3-10223A-FQGS-004-SS 的第二次分樣進行的廠外實驗室重新分析，未顯示出超過 MDC 的 Sr-90。
 2. 樣本 L3-10223A-FRGS-003-SS 顯示 Sr-90 略高於 MDC，且在不確定範圍內，符合 LTP 第 2 版中針對地下土壤的操作 DCGL 的 75%。
 3. 樣本的地理位置位於 Zion 核電廠的輻射管制區域圍欄之外。
 4. 與廠外實驗室的討論中有提及了可能受到的分析干擾。

5. 2019 年 10 月，因 NRC 的關切，額外採集了兩個次表土壤樣本的結果。
6. 截至該時，已分析了超過 718 個表土土壤樣本和 440 個次表土土壤樣本，未有土壤內 Sr-90 濃度檢測為陽性的結果。

3.1.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

BcSOF 的平均值等於 1 時，劑量為 25 mrem/yr，表 39 為 Zion 核電廠 Phase 1 開放土地偵檢單元中量測結的 BcSOF 的平均值，以及依據 BcSOF 值計算出的評估劑量。

表 39 Zion 核電廠 Phase 1 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估劑量

偵檢單元	平均 BcSOF	Dose(mrem/yr)
10205	0.0041	0.1015
10219A	0.0094	0.2348
10219B	0.0210	0.5252
10220C	0.0151	0.3772
10222	0.0118	0.2941
10223	0.0030	0.0752
10224	0.0045	0.1116
10301	0.0105	0.2625

3.1.3 結論

Zion 核電廠 Phase 1 中 8 個開放土地 Class 3 偵檢單元依照規劃實施最終狀態偵檢，在每個偵檢單元中，所有 ROC 均通過統計符號檢定，並確認其效率曲線之效能。所有量測結果中，ROC 濃度值均未超過 OpDCGL 或任何調查基準(Investigational Levels)，因此，根據 Zion 核電廠 LTP 第 5.10 節，偵檢單元符合釋出標準。

3.2 Phase 4 FSSR

3.2.1 偵檢規劃

Zion 核電廠 Phase 4 FSS 包含 60 個 Class 1、6 個 Class 2 以及 1 個 Class 3 的開放土地偵檢單元，面積共 178,182 m²，此份報告研析的範圍為其中 Class 2 和 3 的偵檢單元。Phase 4 大部分偵檢單元最初被分級為 Class 2 或 Class 3，然而，因偵檢期間在 Class 2 和 Class 3 偵檢單元周圍發現了 DRP(離散放射性粒子)，許多 Class 2 和 Class 3 的偵檢單元被新分級為 Class 1，並在偵檢偵檢單元編號後加上字母標示進行細分。Zion 核電廠 Phase 4 FSSR 中說明所有發現到 DRP 的區域都經過調查、範圍界定，並以保守的方式進行了除污和重新偵檢。

表 40 為 Phase 4 中 Class 2 和 3 之偵檢單元列表，圖 20 為 Phase 4 偵檢單元位置圖，偵檢單元編號用框框框起來的是唯一的一個 Class 3 偵檢單元，偵檢單元編號下面有橫槓的為 Class 2 偵檢單元。本報告僅先就 Class 2 和 3 部分進行研析。

表 40 Zion 核電廠 Phase 4 中 Class 2 和 3 開放土地偵檢單元列表

偵檢單元	名稱	Class	尺寸(m ²)
10212A	NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	2	9,550
10212B	VCC Construction Area	3	16,154
10213A	NE Corner of Exclusion Area	2	5,730
10214A	Construction Parking Area	2	8,542
10214B	Construction Parking Area	2	7,372
10214C	Construction Parking Area	2	7,579
10214D	Construction Parking Area	2	8,946

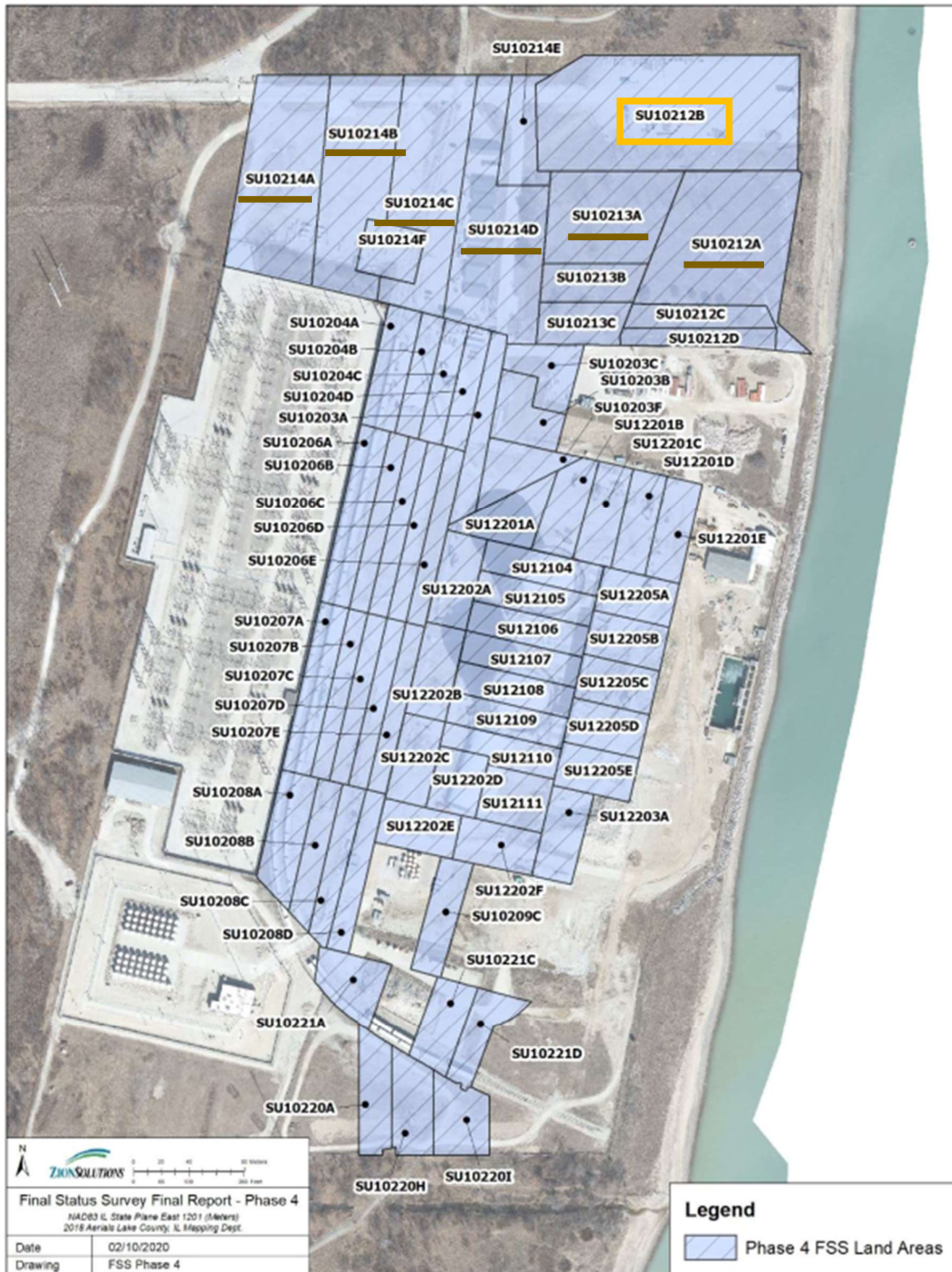


圖 20 Zion 核電廠 Phase 4 偵檢單元位置

3.2.1.1 用於決策之輸入(Identify Inputs to the Decision)

請參考本章 3.1.1.1 小節

3.2.1.2 調查基準(Investigation Level)：

開放土地 Class 3 偵檢單元的掃描調查基準為經標準化及替代核種調整後之 ROC 核種 OpDCGL 的 50%。開放土地 Class 2 偵檢單元的掃描調查基準為經標準化及替代核種調整後之 ROC 核種 OpDCGL 的 100%。(參考表 17)

3.2.1.3 取樣與分析方法

請參考本章 3.1.1.3 小節。

3.2.1.4 統計檢定：

請參考本章 3.1.1.4 小節。

3.2.1.5 樣本數量

在 FSS Phase 4 的 7 個 Class 2 和 3 偵檢單元中，只有一個 Class 2 的偵檢單元收集 18 個表土樣本，其他都是 17 個。樣本位置運用軟體 VSP 規劃。

3.2.1.6 判斷性樣本數量和位置

判斷性樣本的選擇由負責的專家或工程師決定。

3.2.1.7 掃描區域和位置數量

Phase 4 的 FSSR 中並未提供每個偵檢單元詳細的掃描比例，只說明依照 LTP 第五章規定。依據 MARSSIM 和 Zion 核電廠第五章之規範，Class 2 開放土地偵檢單元的掃描比例應為系統性 10%~100%以及判斷決定(Judgmental)，Class 3 偵檢單元則皆由判斷決定，沒有規範最低比例。

3.2.1.8 品質管控樣本數量

對偵檢單元中 5%的土壤樣本進行「分割樣本」分析，位置隨機選擇。

表 41 為 Zion 核電廠 Phase 4 開放土地 Class 2 和 3 偵檢單元表土樣本取樣數資訊。

表 41 Zion 核電廠 Phase 4 偵檢單元表土樣本取樣數

偵檢單元	區域分級 (初始/最終)	偵檢單元 面積(m ²)	樣本數				取樣點間距 (m)
			隨機	判斷性	調查	品管	
10212A	3/2	9,550	18	0	2	2	24.8
10212B	3/3	16,154	17	0	4	2	隨機
10213A	3/2	5,730	17	0	0	1	19.7
10214A	3/2	8,542	17	0	10	2	24.1
10214B	3/2	7,372	17	0	1	2	22.4
10214C	3/2	7,579	17	0	6	2	22.7
10214D	3/2	8,946	17	1	6	2	24.7

3.2.2 偵檢結果

3.2.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

表 42 Zion 核電廠 Phase 4 Class 2 和 3 偵檢單元異常數據/掃描偏高之結果和調查

偵檢單元	區域分級	說明
10212A	2	掃描警示(Scan Alarms)識別出 2 個小區域(面積均小於 100 m ²)輻射偏高，因而進行調查。在每個位置採集了 1 個表土和 1 個次表土樣本。加馬光譜分析結果顯示，僅有一個樣本的 Cs-137 活度超過最低可檢出濃度(MDC)，所有樣本的 Co-60 或 Cs-134 活度均未超過 MDC。由於調查樣本的 OpSOF 均小於 1.0，最大 OpSOF 為 0.089，因此無需進一步行動。
10212B	3	掃描警示識別出 2 個小區域(分別為 1 m×1 m 和 1m×8m 區域)輻射偏高，因而進行調查。在較小區域中採集了 1 個表土樣本，在較大區域中採集了 3 個表土樣本。此外，每個區域還採集了一個次表土樣本。加馬光譜分析結果顯示，僅有一個表土樣本的 Cs-137 活度超過 MDC，而所有樣本的 Co-60 或 Cs-134 活度均未超過 MDC。由於調查樣本的 OpSOF 均小於 0.5，最大 OpSOF 為 0.059，因此無需進一步行動。
10213A	2	無
10214A	2	掃描警示識別出在 4 個小區域輻射偏高，因而進行了調查。除了在其中一個小區域採集 2 個表土和 2 個次表土樣本，其他小區域皆採集了 1 個表土和 1 個次表土樣本。加馬光譜分析結果顯示，有 3 個樣本的 Cs-137 活度超過 MDC，而所有樣本的 Co-60 或 Cs-134 活度均未超過 MDC。
10214B	2	掃描警示識別出在 1 個區域輻射偏高，因而進行了調查。該區域的地表為破損的瀝青和土壤。在此活度偏高的區域中採集了 1 個表土和 1 個次表土樣本，並對表土樣本進行了 QC 分割樣本分析。加馬光譜分析結果顯示，這些樣本中 ROC 的活度均未超過 MDC。因此無需進一步行動。
10214C	2	在多次掃描警報後進行了調查，在偵檢單元西端標記出約 6 m×7m 的區域，該區域位於混合破損瀝青和土壤的路面上。從 6 個位置各採集了一對表土和次表土樣本。加馬光譜分析結果顯示，1 個樣本的 Cs-137 活度水平超過了 MDC，1 個樣本的 Cs-134 活度超過 MDC，所有樣本的 Co-60 活度均未超過 MDC。所有調查樣本的 OpSOF 均小於 1，因此未採取進一步行動。
10214D	2	在多次掃描警報後進行了調查，識別出 4 個活度偏高的區域。在這些區域中採集了 6 個表土和 6 個次表土樣本。調查樣本的加馬光譜分析結果顯示，Cs-137 的活度較低，且 Co-60 和 Cs-134 的活度均未超過 MDC。這些樣本的 OpSOF 為 0.115，因此未採取進一步行動。

在 Zion 核電廠 Phase 4 FSSR 報告中提及移除了在多個在掃描過程中發現的離散放射性粒子(DRP, Discrete Radioactive Particles), 因所有在其中曾發現 DRP 之偵檢單元全屬於 Class 1, 故未列於在此份報告中, 預計將於後續研究計畫中進行相關研析。

3.2.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

BcSOF 的平均值等於 1 時, 劑量為 25 mrem/yr, 表 43 為 Zion 核電廠 Phase 4 Class 2 和 3 開放土地偵檢單元中量測結的 BcSOF 的平均值, 以及依據 BcSOF 值計算出的評估劑量。

表 43 Zion 核電廠 Phase 4 Class 2 和 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量

偵檢單元	平均 BcSOF	Dose(mrem/yr)
10212A	0.012	0.304
10212B	0.010	0.250
10213A	0.021	0.519
10214A	0.009	0.230
10214B	0.010	0.243
10214C	0.009	0.009
10214D	0.009	0.232

3.2.3 結論

Zion 核電廠 Phase 4 中 1 個開放土地 Class 3 和 6 個 Class 2 偵檢單元依照規劃實施最終狀態偵檢, 在每個偵檢單元中, 所有 ROC 均通過統計符號檢定, 並確認其效率曲線之效能。所有量測結果中, ROC 濃度值均未超過 OpDCGL 或任何調查基準 (Investigational Levels), 因此, 根據 Zion 核電廠 LTP 第 5.10 節, 偵檢單元符合釋出標準。

(四) Zion 核電廠地下結構偵檢單元最終狀態偵檢報告

Zion 核電廠最終狀態偵檢 Phase 2 的偵檢範圍為地下剩餘建築結構，分兩部分(Part1 和 Part 2)進行偵檢，第一部分為地下室和嵌管，包含 16 個 Class 1 偵檢單元和 15 個 Class 3 偵檢單元，第二部分為地下埋管，含 4 個 Class 2 偵檢單元 3 個 Class 3 偵檢單元。表 44 為 Zion 核電廠最終狀態偵檢 Phase 2 地下室結構偵檢單元數表，本報告研析範圍為 Class 2 和 Class 3 偵檢單元相關結果，Class 1 的部分將待後續年度繼續研析。

表 44 Zion 核電廠最終狀態偵檢地下結構偵檢單元各 Phase 偵檢單元數

FSS Phase	Part	區域分級		
		Class 1	Class 2	Class 3
Phase 2	Part 1/地下室和嵌管	16	0	15
	Part 2/地下埋管	0	4	3

4.1 FSSR Phase 2-Part 1 地下室結構偵檢結果報告(Class 3)

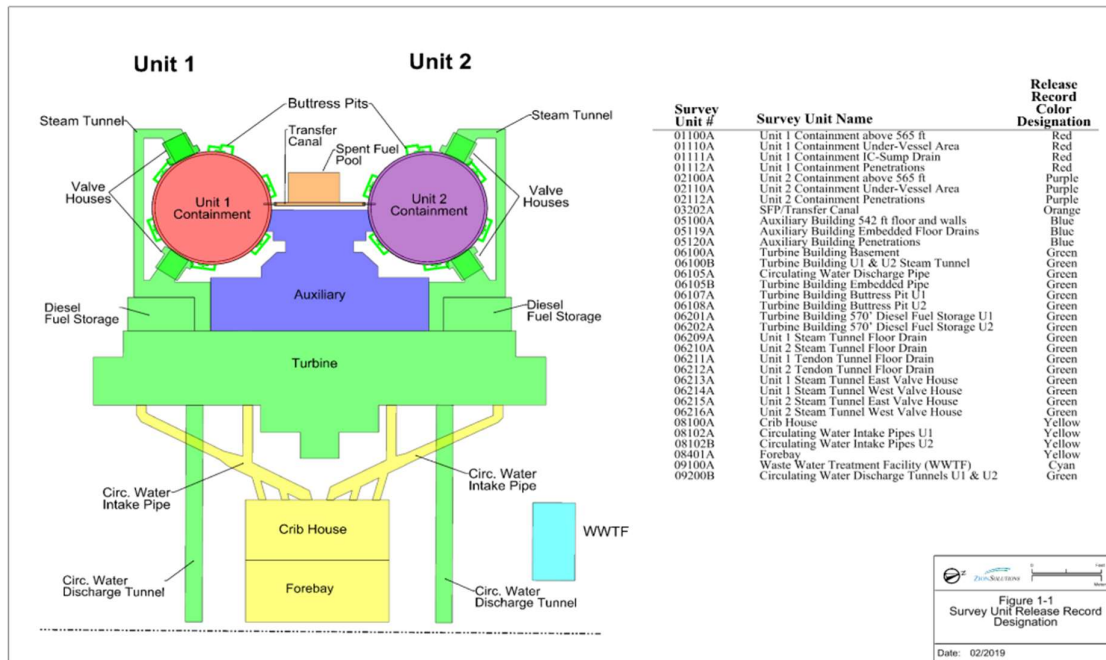
4.1.1 偵檢規劃

Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 的最終狀態偵檢包含 6 個 Class 1 偵檢單元和 15 個 Class 3 的地下室和嵌管偵檢單元。本報告的研析範圍為 Class 2 和 3 偵檢單元，表 45 為 Phase 2-Part 1 之 Class 3 偵檢單元列表，圖 21 為 Phase 2-Part 1 偵檢單元標示圖。

表 45 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 Class 3 地下室和嵌管偵檢單元列表

偵檢單元	名稱	Class	尺寸(m ²)
06100	Turbine Building Basement and Steam Tunnels	3	27,135
06105A	Circulating Water Discharge Pipe	3	1,075
09200	Unit 1 & Unit 2 Circulating Water Discharge Tunnels	3	4,868
06105B	Turbine Building Embedded Pipe	3	238
06107	Unit 1 Turbine Building Buttress Pit	3	1,596
06108	Unit 2 Turbine Building Buttress Pit	3	1,596
06209	Unit 1 Steam Tunnel Floor Drain	3	47
06210	Unit 2 Steam Tunnel Floor Drain	3	46
06211	Unit 1 Tendon Tunnel Floor Drain	3	51
06212	Unit 2 Tendon Tunnel Floor Drain	3	42
06215	Unit 2 Steam Tunnel East Valve House	3	240
06216	Unit 2 Steam Tunnel West Valve House	3	240
08100	Crib House	3	8,435
08401	Forebay	3	5,407
08102A&B	Unit 1 and Unit 2 Circulating Water Intake Pipes	3	4,412

圖 21 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 偵檢單元標示圖



4.1.1.1 用於決策之輸入(Identify Inputs to the Decision)

- 需要的資訊(Information Needed)：需要偵檢單元殘餘活度和表面區域的評估。廠址歷史評估和特性偵檢為 FSS 的初步資料來源，並透過 FSS 的量測和取樣確認潛在核種的濃度和變異性(Variability)資訊。
- 歷史資訊(Historical Information)：經廠址歷史評估和特性偵檢確認的區域分級。
- 輻射偵檢資料(Radiological Survey Data)：使用廠址歷史評估及特性偵檢取得的資料來計算 FSS 所需樣本數。
- 關注核種(ROC, Radionuclides of Concern)：輔助廠房地下室的 ROC 請參考表 23。
- 進行 FSS 時，難測關注核種 Ni-63 和 Sr-90 之濃度分別使用替代核種 Co-60 和 Cs-137 推算其濃度。輔助廠房地下室的 ROC 的難測核種替代比例參考表 25。

表 46～表 51 分別為 Zion 核電廠地下室、嵌管，以及穿管的關注核種 BcDCGL 和 OpDCGL。

表 46 Zion 核電廠地下室之關注核種 BcDCGL(pCi/m²)

ROC	Auxiliary Building	CTMT	SFP/ Transfer Canal ⁽¹⁾	Turbine Building	Crib House /Forebay	WWTF
H-3	5.30E+08	2.38E+08	2.38E+08	1.29E+08	1.93E+08	1.71E+07
Co-60	3.04E+08	1.57E+08	1.57E+08	7.03E+07	5.52E+07	2.83E+07
Ni-63	1.15E+10	4.02E+09	4.02E+09	2.18E+09	3.25E+09	2.89E+08
Sr-90	9.98E+06	1.43E+06	1.43E+06	7.74E+05	1.16E+06	1.03E+05
Cs-134	2.11E+08	3.01E+07	3.01E+07	1.59E+07	2.13E+07	2.31E+06
Cs-137	1.11E+08	3.94E+07	3.94E+07	2.11E+07	2.96E+07	2.93E+06
Eu-152	6.47E+08	3.66E+08	3.66E+08	1.62E+08	1.23E+08	7.55E+07
Eu-154	5.83E+08	3.19E+08	3.19E+08	1.43E+08	1.12E+08	5.74E+07

表 47 Zion 核電廠地下室之關注核種 OpDCGL(pCi/m²)

ROC	Auxiliary Building	Unit 1 & Unit 2 Containment		SFP/ Transfer Canal	Turbine Building		Crib House/ Forebay	WWTF
		(above 565 ft.)	Under Vessel		(Floors & Walls) ⁽¹⁾	(Circ Water Discharge Tunnel)		
H-3	1.71E+08	3.25E+07	2.37E+08	4.98E+07	1.10E+07	5.39E+07	7.43E+07	3.28E+06
Co-60	9.81E+07	2.15E+07	1.56E+08	3.28E+07	5.98E+06	2.94E+07	2.13E+07	5.43E+06
Ni-63	3.71E+09	5.50E+08	4.00E+09	8.41E+08	1.85E+08	9.11E+08	1.25E+09	5.55E+07
Sr-90	3.22E+06	1.96E+05	1.42E+06	2.99E+05	6.58E+04	3.24E+05	4.47E+05	1.98E+04
Cs-134	6.81E+07	4.12E+06	2.99E+07	6.30E+06	1.35E+06	6.65E+06	8.20E+06	4.44E+05
Cs-137	3.58E+07	5.39E+06	3.92E+07	8.24E+06	1.79E+06	8.82E+06	1.14E+07	5.63E+05
Eu-152	2.09E+08	5.00E+07	3.64E+08	7.66E+07	1.38E+07	6.77E+07	4.74E+07	1.45E+07
Eu-154	1.88E+08	4.36E+07	3.17E+08	6.67E+07	1.22E+07	5.98E+07	4.31E+07	1.10E+07

表 48 Zion 核電廠地下嵌管(Embedded Pipe)之關注核種 BcDCGL

ROC	Auxiliary Bldg. Basement Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Turbine Bldg. Basement Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Containment Incore Sump Embedded Drain Pipe (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Steam Tunnel Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Tendon Tunnel Embedded Floor Drains (pCi/m ²)
H-3	N/A	N/A	8.28E+09	N/A	1.61E+10
Co-60	7.33E+09	6.31E+09	5.47E+09	4.07E+10	1.06E+10
Ni-63	2.78E+11	1.96E+11	1.40E+11	1.26E+12	2.72E+11
Sr-90	2.41E+08	6.94E+07	4.98E+07	4.48E+08	9.70E+07
Cs-134	5.10E+09	1.43E+09	1.05E+09	9.22E+09	2.04E+09
Cs-137	2.68E+09	1.89E+09	1.37E+09	1.22E+10	2.67E+09
Eu-152	N/A	N/A	1.28E+10	N/A	2.48E+10
Eu-154	N/A	N/A	1.11E+10	N/A	2.16E+10

表 49 Zion 核電廠地下嵌管(Embedded Pipe)之關注核種 OpDCGL

ROC	Auxiliary Bldg. Basement Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Turbine Bldg. Basement Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Containment Incore Sump Embedded Drain Pipe (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Steam Tunnel Embedded Floor Drains (pCi/m ²)	Unit 1 & Unit 2 Tendon Tunnel Embedded Floor Drains (pCi/m ²)
H-3	N/A	N/A	6.62E+08	N/A	3.22E+08
Co-60	7.33E+09	2.52E+08	4.38E+08	1.63E+09	2.12E+08
Ni-63	2.78E+11	7.84E+09	1.12E+10	5.04E+10	5.44E+09
Sr-90	2.41E+08	2.78E+06	3.98E+06	1.79E+07	1.94E+06
Cs-134	5.10E+09	5.72E+07	8.40E+07	3.69E+08	4.08E+07
Cs-137	2.68E+09	7.56E+07	1.10E+08	4.88E+08	5.34E+07
Eu-152	N/A	N/A	1.02E+09	N/A	4.96E+08
Eu-154	N/A	N/A	8.88E+08	N/A	4.32E+08

表 50 Zion 核電廠地下穿管(Penetrations)之關注核種 BcDCGL

Radionuclide	Auxiliary Bldg. (pCi/m ²)	Unit 1/Unit 2 Containment (pCi/m ²)	SFP/ Transfer Canal (pCi/m ²)	Turbine Bldg. (pCi/m ²)	Crib House/ Forebay (pCi/m ²)	WWTF (pCi/m ²)
H-3	3.14E+08	2.33E+08	1.13E+16	2.58E+08	N/A	N/A
Co-60	6.95E+06	1.54E+08	1.04E+08	1.41E+08	N/A	N/A
Ni-63	5.35E+09	3.93E+09	4.33E+13	4.38E+09	N/A	N/A
Sr-90	1.90E+06	1.40E+06	2.16E+10	1.55E+06	N/A	N/A
Cs-134	2.58E+07	2.94E+07	1.74E+08	3.20E+07	N/A	N/A
Cs-137	4.86E+07	3.85E+07	3.40E+08	4.23E+07	N/A	N/A
Eu-152	2.59E+07	3.58E+08	2.20E+08	3.25E+08	N/A	N/A
Eu-154	1.84E+07	3.11E+08	1.99E+08	2.86E+08	N/A	N/A

表 51 Zion 核電廠地下穿管(Penetrations)之關注核種 OpDCGL

Radionuclide	Auxiliary Bldg. (pCi/m ²)	U1/U2 Containment (pCi/m ²)	SFP/ Transfer Canal (pCi/m ²)	Turbine Bldg. (pCi/m ²)	Crib House/ Forebay ⁽¹⁾ (pCi/m ²)	WWTF ⁽¹⁾ (pCi/m ²)
H-3	3.99E+09	3.42E+09	4.84E+16	3.23E+09	N/A	N/A
Co-60	8.82E+07	2.26E+09	4.45E+08	1.76E+09	N/A	N/A
Ni-63	6.79E+10	5.78E+10	1.86E+14	5.48E+10	N/A	N/A
Sr-90	2.41E+07	2.06E+07	9.26E+10	1.94E+07	N/A	N/A
Cs-134	3.28E+08	4.32E+08	7.48E+08	4.00E+08	N/A	N/A
Cs-137	6.17E+08	5.66E+08	1.46E+09	5.29E+08	N/A	N/A
Eu-152	3.29E+08	5.26E+09	9.44E+08	4.06E+09	N/A	N/A
Eu-154	2.33E+08	4.58E+09	8.53E+08	3.58E+09	N/A	N/A

4.1.1.2 調查基準(Investigation Level)：

調查基準請參考表 17。

4.1.1.3 決定資料點數(Determination of Number of Data Points)

ISOCS(In Situ Object Counting System)為地下室結構表面的主要偵檢儀器。ISOCS 探測器垂直放置於所測表面，大多數情況下，探測器的外露面與表面保持 3 m 的距離。探測器上安裝的鉛錘或支架可確保源到探測器之間的距離一致，並將探測器對準測量區域的中心。在安裝 90 度遮罩後，對應的視場(FOV, Field of View)達 28 m²。對於因物理限制無法實現 28 m² 視場的測量單元，會減少探測器與輻射來源的距離，從而縮小視場，並會增加了測量次數，以確保達到所需的 FSS 面積覆蓋。

系統性測量數量根據偵檢單元的分級決定。根據 Zion 核電廠 LTP，結構地下室要求的面積覆蓋率：Class 1 偵檢單元需 100%，Class 2 需 50%以上，Class 1 需 1%以上。

將 FSS 偵檢單元的偵檢面積範圍除以偵檢儀器的 FOV，可以計算出偵檢單元所需最少量測次數。圖 22 為 ISOCS 測量位置標記系統的範例。

根據 LTP 第 5 章，在 FSS 中收集的 ISOCS 測量位置中隨機選擇 10%的位置進行混凝土芯樣採集，以確認 HTD 核種與替代核素的比例。為減少高處作業的安全隱憂，並集中於預期殘餘放射性最集中的區域，混凝土芯樣位置選自偵檢單位的地板和較低的牆面。

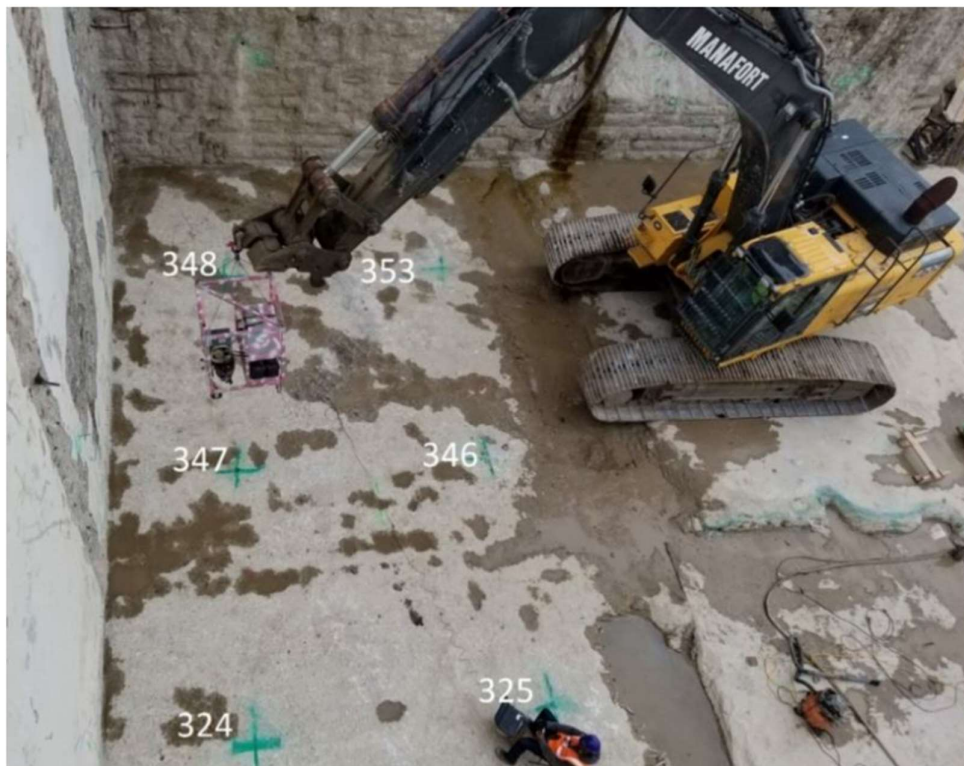


圖 22 ISOCS 測量位置標記系統範例

可直接接觸的淺層穿管或短距離嵌道使用手持式便攜探測器(如 Gas-Flow Proportional 或閃爍探測器)進行偵檢。無法直接接觸的嵌管或穿管使用適當大小的 NaI 或碘化鉍 (CsI) 探測器進行調查，這些探測器通過柔性纖維複合材料桿插入並移動於管道內，或安裝於柔性攝像頭/光纖電纜上。

管道探測器使用簡單的推拉(Push-Pull)方法探測每根管道或穿管，並透過捲尺或距離編碼器，以可重現的方式確定探測器在管內的位置，以確保每英尺的管道量測時間為一分鐘。每次測量的視場保守地假設為 1 英尺。也就是若要達到 100%的偵檢面積覆蓋率，須按 1 英尺間隔進行測量。

4.1.1.4 判斷/調查量測和位置

由負責的專家或工程師決定位置。判斷性測量位置通常選擇在感興趣的區域進行，包括待測表面的裂縫和裂隙、排水口和低點、變色區域等。

如果在進行 FSS 過程中，遇到的測量結果與所調查表面的預期不符，則會進行調查以確定差異的原因，和界定高活性區域的邊界或確認相鄰除污活動未改變 FSS 偵檢單元內的狀況。

4.1.1.5 品質管控樣本數量

品質管控樣本數為樣本集的 5%，使用隨機值產生器隨機選擇重複樣本和重複掃描的區域。表 52 為 Zion 核電廠 Phase 2–Part1 偵檢設計摘要，表 53 為 Zion 核電廠 Phase 2–Part1 偵檢量測次數，兩張表格內資料包含 Phase–Part1 中所有偵檢單元。

表 52 Zion 核電廠 Phase 2–Part1 偵檢設計摘要

FEATURE	DESIGN BASIS													
Survey Unit #	01100	01110	01111	01112	02100	02110	02112	03202	05100	05119	05120	06100	06105B	06107
Description	U1 CTMT 565 ft	U1 CTMT Under Vessel	U1 CTMT Incore Sump Drain	U1 CTMT PN	U2 CTMT 565 ft	U2 CTMT Under Vessel	U2 CTMT PN	SFP/ Transfer Canal	Aux Bldg.	Aux Bldg. 542 ft EP	Aux Bldg. PN	Turb. Bldg. (1)	Turb. Bldg. 560 ft EP	U1 Buttress Pit
Area (m ²)	294	2,465	0.86	242	294	2,465	242	723	7,226	294	949	27,135	238	1,596
Number of Measurements	19	155	22	369	19	155	369	76	453	2636	730	28	133	7 judgmental
Spacing	28 m ² FOV	28 m ² FOV	1-ft. Interval	1-ft. Interval	28 m ² FOV	28 m ² FOV	1-ft. Interval	28 m ² FOV	28 m ² FOV	1-ft. Interval	1-ft. Interval	Random	Random	Biased
DCGLs	Operational DCGLs Presented in Tables 2-2 (structures), Table 2-4 (embedded pipe) and Table 2-6 (penetrations)													
Classification (Initial/Final)	1/1	1/1	1/1	1.2 & 3/1	1/1	1/1	1.2 & 3/1	1/1	1/1	1/1	1.2 & 3/1	2/3	2/3	2/3
Investigation Level	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL
Scan Area Coverage	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	3%	3%	8%
QC	5% Duplicate Measurements													

FEATURE	DESIGN BASIS												
Survey Unit #	06108	06201	06202	06209	06210	06211	06212	06213	06214	06215	06216	08100	09100
Description	U2 Buttress Pit	U1 570 ft. DG Rooms	U2 570 ft. DG Rooms	U1 Steam Tunnel EP	U2 Steam Tunnel EP	U1 Tendon Tunnel EP	U2 Tendon Tunnel EP	U1 East Valve House	U1 West Valve House	U2 East Valve House	U2 West Valve House	Crib House/ Forebay (2)	WWTF
Area (m ²)	1,596	813	813	47	46	51	42	304	304	240	240	18,254	1,124
Number of Measurements	6	51	51	48	48	52	46	26	26	20	20	14	71
Spacing	Biased	28 m ² FOV	28 m ² FOV	2-ft. Interval	2-ft. Interval	10-ft. Inter	10-ft. Inter	28 m ² FOV	28 m ² FOV	28 m ² FOV	28 m ² FOV	Random	28 m ² FOV
DCGLs	Operational DCGLs Presented in Tables 2-2 (structures), Table 2-4 (embedded pipe) and Table 2-6 (penetrations)												
Classification (Initial/Final)	2/3	2/1	2/1	2/3	2/3	2/3	2/3	2/1	2/1	2/3	2/3	2/3	3/1
Investigation Level	>0.5 OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>OpDCGL	>OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>OpDCGL
Scan Area Coverage	7%	100%	100%	10%	100%	10%	100%	100%	100%	100%	100%	4%	100%
QC	5% Duplicate Measurements												

表 53 Zion 核電廠 Phase 2-Part1 偵檢量測次數

Survey Unit	Non-Parametric Measurements	Quality Control Measurements	Judgmental/ Investigation Measurements	Total Measurements
01100	164	9	0	173
01110	60	3	0	63
01111	22	3	0	25
01112	369	19	0	388
02100	164	9	0	173
02110	54	3	0	57
02112	369	20	0	389
03202	76	4	0	80
05100	425	23	5	453
05119	2,636	180	0	2,816
05120	730	5	0	735
06100	28	3	24	55
06105A	0	0	4	4
9200	0	2	15	17
06105B	134	14	0	148
06107	0	1	7	8
06108	0	1	6	7
06201	0	3	51	54
06202	0	3	51	54
06209	68	4	0	72
06210	60	3	0	63
06211	58	3	0	61
06212	44	3	0	47
06213	0	2	26	28
06214	0	2	26	28
06215	0	1	20	21
06216	0	1	20	21
08100	14	1	0	15
8102 A&B	0	1	4	5
8401	0	1	14	15
09100	70	4	0	74

4.1.2 偵檢結果

4.1.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

在 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 的 Class 3 偵檢單元中，僅 06100(urbine Building Basement)和 09200B(Circulating Water Discharge Tunnels)偵檢單元有異常數據/掃描偏高的情況，詳細說明如下：

根據 LTP 第 5 章，汽機廠房大樓地下室偵檢單元，包括 1 號和 2 號機蒸汽通道、1 號和 2 號機主蒸汽閥門房、1 號和 2 號機柴油發電機房、1 號和 2 號機預應力通道、循環水排放通道、循環水排放管和循環水進水管，被歸類為 Class 3。當 2016 年 3 月進行汽機廠房的 FSS 時，根據尚未經 NRC 核准的 LTP 初版進行了風險測試。偵檢設計使用 Basement Inventory Levels(BIL)作為地下室偵檢單元的 OpDCGL，因為當時尚未制定 OpDCGL。FSS 數據的初步分析直接與 BIL 進行比較，這些偵檢單元的 FSS 測量均低於 0.5 的 SOF。且依據當時的 LTP，並未需要進行於 LTP 第 2 版中才要求的承諾，例如

為 HTD ROC 分析獲取混凝土岩心樣本。然而，在 LTP 第 2 版中，OpDCGL 值已更新，2016 年進行的 FSS 的量測值需與經 NRC 批准的 LTP 第 2 版中的 OpDCGL 進行比較。由於 OpDCGL 顯著更保守，2016 年汽機廠房 FSS 中的 5 個測量結果超過了 OpDCGL 的 50%。但沒有測量超過 BcDCGL。

當發現此差異時，汽機廠房地下室空間已完全回填，無法進行額外的調查。Zion 核電廠 FSSR 中說明：儘管 LTP 初版與第 2 版存在這些差異，但已獲取了足夠的測量結果來充分量化汽機廠房內殘餘的輻射，且計算出的劑量不僅能夠合理反映實際情況(具有代表性)，而且也選擇了較為保守的方式來估計劑量。

Zion 核電廠在提交 FSSR 過程中發現這些差異後，啟動了一份狀況報告(ES-ZION-CR-2019-0020)來記錄問題並說明後續的矯正措施。

此外，在回填前，ORISE 對汽機廠房地下室進行了確認性偵檢，無發現異常。

4.1.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

BcSOF 的平均值等於 1 時，劑量為 25 mrem/yr，為 Zion 核電廠 Phase 2–Part 1 地下室和嵌管偵檢單元量測結果的 BcSOF 的平均值，以及依據 BcSOF 值計算出的評估劑量。(包含 Class 1 和 3 偵檢單元之偵檢結果)

表 54 Zion 核電廠 Phase 2–Part 1 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量

Basement	$BcSOF_B$	$BcSOF_{EP}$	$BcSOF_{PN}$	$BcSOF_{CF}$	$BcSOF_{BASEMENT}$	Dose (mrem/yr)
Unit 1 Containment	0.222	0.049	0.101	0.071	0.443	11.080
Unit 2 Containment	0.122	0.000	0.010	0.071	0.203	5.071
Auxiliary Building	0.078	0.007	0.037	0.040	0.162	4.043
SFP/Transfer Canal	0.033	0.000	0.000	0.006	0.039	0.979
Turbine Building	0.068	0.001	0.002	0.063	0.134	3.340
Crib House/Forebay	0.006	0.000	0.000	0.063	0.069	1.723
WWTF	0.013	0.000	0.000	0.256	0.269	6.725

4.1.3 結論

Zion 核電廠 Phase 2–Part 1 的所有偵檢單元符合釋出標準。

4.2 FSSR Phase 2–Part 2 地下埋管

4.2.1 偵檢規劃

Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 的最終狀態偵檢包含 4 個 Class 2 偵檢單元和 3 個 Class 3 的地下埋管偵檢單元。表 55 為 Phase 2–Part 2 之偵檢單元列表，圖 23 為 Phase 2–Part 2 偵檢單元標示圖。

表 55 Zion 核電廠 Phase 2-Part 1 地下埋管偵檢單元列表

偵檢單元	名稱	Class	尺寸(m ²)
00101A	Condensate Feed Water Supply and Recirculation	3	2,455
00101B	Primary Water	2	312
00101F	Diesel Generator Heat Exchanger Service Water Supply and Return	3	956
00101H	Service Water Supply Header	3	5,248
00150A/B&C	North East Storm Drain	2	2,187

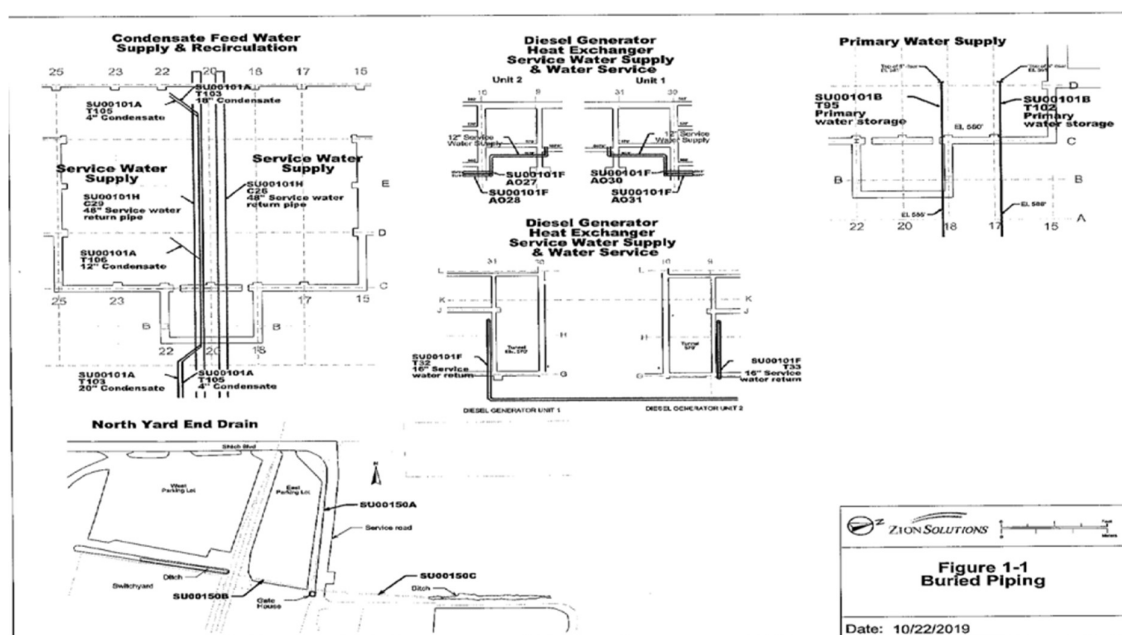


圖 23 Zion 核電廠 Phase 2-Part 2 偵檢單元標示圖

4.2.1.1 用於決策之輸入(Identify Inputs to the Decision)

- 需要的資訊(Information Needed): 需要偵檢單元殘餘活度和表面區域的評估。廠址歷史評估和特性偵檢為 FSS 的初步資料來源，並透過 FSS 的量測和取樣確認潛在核種的濃度和變異性(Variability)資訊。
- 歷史資訊(Historical Information): 經廠址歷史評估和特性偵檢確認的區域分級。
- 輻射偵檢資料(Radiological Survey Data): 使用廠址歷史評估及特性偵檢取得的資料來計算 FSS 所需樣本數。
- 關注核種(ROC, Radionuclides of Concern): 採用輔助廠房地下室的 ROC 作為地下埋管之 ROC，請參考表 23。
- 進行 FSS 時，難測關注核種 Ni-63 和 Sr-90 之濃度分別使用替代核種 Co-60 和 Cs-137 推算其濃度。使用輔助廠房地下室的 ROC 的難測核種替代比例(參考表 25)。

表 56 為 Zion 核電廠地下埋管的關注核種 BcDCGL 和 OpDCGL。表 57 為 Zion 核電廠地下埋管替代核種 OpDCGL 計算結果。

表 56 Zion 核電廠地下埋管之關注核種 DCGL(pCi/m²)

Radionuclide	Base Case Buried Pipe DCGL dpm/100cm ²	Operational Buried Pipe DCGL dpm/100cm ²
Co-60	2.64E+04	6.76E+03
Cs-134	4.54E+04	1.16E+04
Cs-137	1.01E+05	2.59E+04
Ni-63	4.89E+07	1.25E+07
Sr-90	4.50E+04	1.15E+04

表 57 Zion 核電廠地下埋管替代核種 OpDCGL 計算結果

Survey Unit Number	Survey Unit Name	Co-60	Cs-134	Cs-137	Gross Gamma ⁽¹⁾
		(pCi/m ³)			
00101A	Condensate Feed Water Supply and Recirculation Buried Pipe	6.16E+03	1.16E+04	2.58E+04	2.49E+04
00101B	Primary Water Supply Header T-095 and T-102 Buried Pipe	6.16E+03	1.16E+04	2.58E+04	2.49E+04
00101F	Diesel Generator Service Water Supply and Service Water Return Buried Pipe	6.16E+03	1.16E+04	2.58E+04	2.49E+04
00101H	Service Water Supply Header CO-26 and CO-29 Buried Pipe	6.16E+03	1.16E+04	2.58E+04	2.49E+04
00150A/B & C	North End Storm Drain Buried Pipe	6.16E+03	1.16E+04	2.58E+04	2.49E+04

4.2.1.2 調查基準(Investigation Level)：

調查基準請參考表 17。

4.2.1.3 決定資料點數(Determination of Number of Data Points)

地下埋管區域在進行最終狀態偵檢前已就地除污。透過測量總表面污染和/或收集沉積物樣本，證明其符合對應的 OpDCGL 值。管線系統內部的輻射調查包括使用適當尺寸的探測器插入管線內部，並以簡單的推拉(Push-Pull)方法進行，這樣可以精確、可重複地確定探測器在管線系統中的位置。

探測器的配置與偵檢表面保持固定幾何關係，從而可以計算出具防護意義的探測效率。接著將探測器部署到實際管線內，並根據管線的污染潛力，以定時測量的方式在適

當的間隔內獲取數據。每種管徑假定一個保守的「檢測區域」，並且保守地假設所有活動均均勻分布在此檢測區域內。通過預定的測量間隔獲取靜態測量數據，以實現面積覆蓋。每英尺管線的測量輸出代表以總每分鐘計數(cpm)計量的加馬活度。此 cpm 值會依據探測器效率轉換為每分鐘計數(dpm)。總活動量以 dpm 計算，並依據管徑的有效總表面面積調整，最終測量結果以每 dpm/100 m² 的單位表示

對於無法直接接觸或靠近 CCDD 混合的管線或排水管的輻射評估，將透過在過濾器(Traps)和其他合適的量測點進行測量來完成，當這些點的輻射水平被認為可以代表內部表面輻射水平時，即可合理推斷管線其他部分的狀況。

4.2.1.4 判斷/調查量測和位置

由負責的專家或工程師決定位置。判斷性測量位置通常選擇在感興趣的區域進行，包括待測表面的裂縫和裂隙、排水口和低點、變色區域等。

如果在進行 FSS 過程中，遇到的測量結果與所調查表面的預期不符，則會進行調查以確定差異的原因，和界定高活性區域的邊界或確認相鄰除污活動未改變 FSS 偵檢單元內的狀況。

4.2.1.5 品質管控樣本數量

品質管控樣本數為樣本集的 5%，使用隨機值產生器隨機選擇重複樣本和重複掃描的區域。表 58 為 Zion 核電廠 Phase 2-Part2 偵檢設計摘要。

表 58 Zion 核電廠 Phase 2-Part2 偵檢設計摘要

FEATURE	DESIGN BASIS				
Survey Unit #	00101A	00101B	00101F	00101H	00150A/B & C
Description	Condensate Feed Water Supply and Recirculation Buried Pipe	Primary Water Supply Header T-095 and T-102 Buried Pipe	Diesel Generator Service Water Supply and Service Water Return Buried Pipe	Service Water Supply Header CO-26 and CO-29 Buried Pipe	North End Storm Drain Buried Pipe
Area (m ²)	228.080	29.010	88.843	487.555	203.894
Number of Measurements	47	100	31	59 per pipe	272
Spacing	Measurement Every 1-Foot	Measurement Every 1-Foot	Measurement Every 1-Foot	Measurement Every 2-Feet	Measurement Every 2-Feet
DCGLs	Operational DCGLs Presented in Table 2-10 (buried pipe)				
Classification (Initial/Final)	3/3	3/2	3/3	3/3	Non-impacted/2
Investigation Level	>0.5 OpDCGL	>OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>0.5 OpDCGL	>OpDCGL
Scan Area Coverage	10%	50%	10%	10%	25%
QC	5% Duplicate Measurements				

表 59 Zion 核電廠 Phase 2-Part2 偵檢量測次數

Survey Unit	Non-Parametric Measurements	Quality Control Measurements	Judgmental/ Investigation Measurements	Total Measurements
00101A	257	18	0	275
00101B	253	17	0	270
00101F	256	17	0	273
00101H	132	7	0	139
0150A/B & C	272	18	0	290

4.2.2 偵檢結果

4.2.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

在 Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 的偵檢單元中，僅 00101B (Primary Water Supply Header) 偵檢單元有異常數據/掃描偏高的情況，詳細說明如下：

主要供水主管道偵檢單元被歸類為 Class 2 的地下埋管。在管道內進行的 253 次測量中，有 244 次測量超過了 OpDCGL 的 50%，其中 53 次測量值的 OpSOF 超過 1。根據 LTP 第 5 章，在 Class 2 偵檢單元中出現這些測量結果將促使採取額外的測量以界定較高活度區域，並重新將該偵檢單元分級為 Class 1。重新分級後將要求 100% 的表面覆蓋率，對於管道來說，透過每隔一英尺進行一次測量來實現 100% 表面覆蓋率。然而，儘管主要供水主管道偵檢單元在偵檢設計時被歸類為 Class 2，但其 FSS 是按 Class 1 的標準進行的，對每一英尺可接觸的管道都進行了測量，實現了 100% 的表面覆蓋。此外，這些測量清晰地界定了較高活度的區域，並將超過 OpSOF 為 1 的測量值納入計算平均 BcSOF 中，以進行合規性評估。

在評估偵檢單元 00101B 的測量數據時，負責的輻射工程師假設 FSS 測量檢測到的活度升高不是由於管道內的殘留放射性引起的，而是由於鄰近測量單元中的放射性廢料的儲存、搬運、包裝和運輸造成的環境背景活度增加。數據顯示，管道內的前九次測量數值一致，隨後的兩次測量活度上升了約 50%。接下來的 19 次測量數值再次保持一致，然後在接下來的四分鐘內下降到初始觀察水平(Originally Observed Levels)。這種現象重複發生，表明可能有放射性物料包裹在管道 FSS 附近的區域內移動。

為了調查這一可能性，於 2019 年 8 月在 6 英吋內徑的鋼製管道樣品上進行了背景研究，並將其運至埋管 FSS 進行的地面位置。此區域位於已拆除的 WWTF 旁邊，靠近渦輪機建築基址的東北方。背景研究的延遲是為了等待可能影響背景的放射性物品從該區域移除。這次背景研究旨在評估放射性物品移除後對周圍背景的影響。

背景研究結果顯示，所取得的 20 次背景測量的平均值為 1,752 cpm，最大值和最小值分別為 1,805 cpm 和 1,693 cpm。在主要供水管道 FSS 測量中檢測到的活度升高可能是由於附近存放和包裝的放射性材料引起的瞬時劑量。然而，為了合規性證明，並未從任何測量中扣除背景，背景研究結果僅供參考，並列在 Release Record 中。

4.2.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

BcSOF 的平均值等於 1 時，劑量為 25 mrem/yr，為 Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 地下埋管偵檢單元量測結果的 BcSOF 的平均值，以及依據 BcSOF 值計算出的評估劑量。

表 60 Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量

Survey Unit	Description	Class	# of Measurements	Mean OpSOF	Max OpSOF	# OpSOF> 1	Mean BcSOF	Dose to Survey Unit (mrem/yr)
00101A	Condensate Feed Water Supply and Recirculation Buried Pipe	3	275	0.320	0.493	0	0.082	2.052
00101B	Primary Water Supply T-095 and T-102 Buried Pipe	2	270	0.784	1.506	53	0.227	5.674
000101F	Diesel Generator Heat Exchangers Service Water Supply and Return Buried Pipe	3	273	0.144	0.488	0	0.037	0.922
00101H	Service Water Supply Header Buried Pipe	3	139	0.127	0.288	0	0.033	0.814
00150A/B&C	North End Storm Drain Buried Pipe	2	290	0.107	0.276	0	0.027	0.683

4.2.3 結論

Zion 核電廠 Phase 2–Part 2 的所有偵檢單元符合釋出標準。

(五) NRC 對 Zion 核電廠最終狀態偵檢報告的審查

Zion 核電廠除役偵檢與 NRC 審查時程綜覽與詳細時程請參考表 61～表 64。

Zion 核電廠的 FSS 分為 4 個 Phase 進行，Phase 1、3 和 4 涵蓋廠址的開放土地區域，Phase 2 分為 Part 1 和 Part 2 兩部份，分別進行地下室和嵌管以及地下埋管偵檢單元之偵檢。

2020 年 ORISE 進行確認偵檢時發現 DRP，NRC 於 2020 年 4 月 20 日和 11 月 4 日提出兩份針對 FSSR 的 RAIs，2019~2023 年年間，Zion 核電廠進行了數次的 FSSR 與 Release Records 之更版，ORISE 應 NRC 之要求也進行的多次的確認偵檢，最終於 2023 年 11/08，Zion 核電廠的 FSSR 通過 NRC 的 SER 審查。

表 61 Zion 核電廠最終狀態偵檢與 NRC 審查時程綜覽

年	2012~2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Zion	特性偵檢 放射性物品清除與清運	2012~2013年，特性偵檢和放射性物品清除與清運同時進行，部分區域因放射性物品的清除與清運作業無法進行特性偵檢。故2014年提交LTP初版後，ZionSolutions仍持續進行特性偵檢。					
	LTP	• 2014 初版 • 2017 Rev. 1	Rev. 2 NRC核准				
	FSSR		Phase 1	• Phase 1 更版 • Phase 2, Part 1 • Phase 2, Part 2 • Phase 3	• Phase 1 更版 • Phase 2, Part 1更版 • Phase 2, Part 2 更版 • Phase 4	• 回覆 RAIs Phase 3, 4 更版	11/08 通過 NRC SER
NRC 審查	FSSR RAIs			4/20、11/04			
	FSSR Phase 1 SER		3/22(未通過) 10/9(通過)				
	FSSR SER						11/08 (通過)
	ORISE進行 確認偵檢		V	V 1/31 發現DRP	V		V

表 62 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2018~2019)

年	2018	2019							
	日期	11/1	3/11		05/14	6/21	9/30		11/25 12/30
Zion 提交	提交項目	FSSR Phase 1	FSSR Phase 2 Part 1		回覆NRC審查提出之問題	FSSR Phase 1 Rev. 1	FSSR Phase 2 Part 1 Rev. 1		FSSR Phase 2 Part 2 FSSR Phase 3
NRC 審查 (含確認偵檢)	日期		2/7	3/22			10/9		
	審查項目		ORISE提出 確認偵檢 報告	FSSR Phase 1 安全審查(SE)			FSSR Phase 1 安全審查(SE)		
	審查結果			未通過 (不足以證明 符合無限制 釋出標準)			通過 (足以證明符 合無限制釋 出標準)		

表 63 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2020)

年		2020							
Zion 提交	日期	2/29		5/1	5/15	6/4, 6/30		11/11	
	提交項目	FSSR Phase 1 Rev. 2		FSSR Phase 4	回覆RAIs			回覆RAIs	
					補充 FSSR Phase 4 FSSR Phase 2, Part 2 Rev. 1			FSSR Phase 2, Part 1 Rev. 2	
NRC 審查 (含確認偵檢)	日期	1/24,28,31	4/20	4/24			11/4		12/17
	審查項目	ORISE提出確認偵檢報告	FSSR Phase 2 & 3	ORISE 確認偵檢報告			FSSR Phase 2, 3 & 4		Zion 對 RAIs 之回覆
	審查結果	發現DRP Zion核電廠要求暫停三個月進行評估和矯正措施	提出 RAIs				提出 RAIs		未通過

表 64 Zion 核電廠 FSSR 和 NRC 審查詳細時程(2021~2023)

年		2021			2022		2023	
Zion 提交	日期	2/10	4/2	4/15	9/30	10/17	05/04	
	提交項目	更新對RAIs的回覆，說明作業程序、澄清事項、偵檢完成、ORISE確認性偵檢的發現、偵檢後管制、矯正措施、狀況報告和DRP。		補充回覆RAIs	FSSR Phase 3 Rev. 1, FSSR Phase 4 Rev. 2	更新對 RAI 1-g的回覆 聲明完成 FSSs	聲明已移除所有的DRPs並可提供符合輻射標準的保證	
NRC 審查 (含確認偵檢)	日期	09/02					11/03	11/08
	項目	ORISE提出確認偵檢報告					ORISE提出確認偵檢報告	Zion All FSSR
	審查結果							通過

5.1 NRC 對 Zion 核電廠開放土地 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之審查

Zion 核電廠 FSSR Class 2 和 Class 3 開放土地偵檢單元的偵檢結果請參考本報告第四章第(三)節。Zion 核電廠於 FSS Phase 1、Phase 3 以及 Phase 4 進行開放土地最終狀態偵檢。

5.1.1 Phase 1 FSSR 審查結果

Zion 核電廠 2018 年 11 月 1 日提交 FSSR Phase 1 FSSR，包含 8 個 Class 3 開放土地偵檢單元。NRC 於 2019 年 3 月 22 日提出對 FSSR Phase 1 的 SER 審查報告，此份 SER 的結論是 Zion 核電廠 Phase 1 FSSR 未足以證明符合非受限釋出的標準。2019 年 5 月 14 日，Zion 核電廠針對 NRC 於 SER 提出的問題提供回覆，修訂 Phase 1 FSSR，並

於 2019 年 6 月 21 日重新提交。NRC 於 2019 年 10 月 9 日發函回應修訂後 Phase 1 FSSR(SER)，此份 SER 的結論是 Zion 核電廠 Phase 1 FSSR 足以證明符合非受限釋出的標準，但對 SU 10223 提出了具體意見。2020 年 3 月 3 日，Zion 核電廠提交了 SU 10223 的修訂 Release Record 以及 Phase 1 FSS 最終報告的修訂版。表 65 整理了 NRC 針對 Phase 1 FSSR 提出的問題以及 Zion 核電廠對 NRC 所提問題的回覆。

表 65 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR Phase 1 審查提出問題和 Zion 核電廠的回覆

NRC SER 提出問題	Zion 核電廠回覆
根據 FSSR Phase 1 報告樣本和掃描座標是使用 Visual Sample Plan (VSP) 中的隨機抽樣工具決定，此策略似乎使用非偏倚的方式選擇掃描區域，但 MARSSIM 和 LTP 卻建議 Class 3 偵檢單元使用專判斷方式選擇潛在污染可能性最大的區域進行掃描，要求說明為何選擇隨機掃描以及是否考慮到可能具有較高潛在污染的區域。	說明每一個偵檢單元的掃描區域比例和取樣決定方式，並說明除了隨機決定掃描區域，每一個偵檢單元另外進行的判斷性取樣和掃描。
針對偵檢單元 10223，採用偵檢單元特定核種替代比率(Survey Unit-Specific Surrogate Ratio)，而非使用 LTP 中所說的最大比值(參考表 25)，且事先未經 NRC 核准。	說明 10223 偵檢單元因曾於特性偵檢時檢測出低劑量 Sr-90，因而進行的一系列調查，而後判定為偽陽性的經過，以及由於這個過程將採用更保守的(保守 716 倍)的替代比率進行計算 Sr-90 的評估劑量。並說明未來如要採用和 TLP 規定不同的替代比率將先提交 NRC 批准。
部分 FSSR 報告內容和附錄中的實驗室報告有差異，如將偵檢單元編號錯誤或誤植到其他偵檢單元偵檢結果等。要求核電廠內部要進行更詳細的 QA/QC 審查。	修正錯誤並說明如何會進行更詳細的 QA/QC 審查。
LTP 中規範當在表土土壤樣本中檢測超過 75%OpDCGL 時，應進行次表土取樣調查。但數個偵檢單元 10223 樣本的 Sr-90 濃度超過次表土 OpDCGLs 的 75%，且其中 3 個超過 MDC，但未如 LTP 所規劃的進行次表土偏倚取樣。 此外，10223 之 Sr-90 的 MDC 值均不足以檢測到次表土 OpDCGL 的 75%。	進行 SU 10223 次表土調查，樣本分析結果全低於次表土 OpDCGLs。反覆進行取樣和分析，結果大部分是低於 MDC 或略高於 MDC 但在誤差範圍內，最後於 2019 年 10 月重新於附近區域取得 2 個樣本，分析結果皆低於 MDC。Zion 核電廠認為依據廠址歷史，該區不會出現 Sr-90，是假陽性所致。此外，2019 年 10 月取樣樣本的 MDC 足夠低，足以確認 Sr-90 未超過 MDC。

5.1.2 Phase 3 FSSR

Zion 核電廠於 2019 年 12 月 30 日提交 Phase 3 FSSR，Phase 3 包含 41 個開放土地 Class 1 偵檢單元。NRC 於 2020 年 4 月 20 日針對 Phase 2 和 Phase 3 提出了 RAI。Zion 核電廠於 2020 年 5 月 15 日回覆了 RAI，並提交了對 Phase 2 和 Phase 3 中 11 個 Release Record 的修訂，並於 2020 年 6 月 4 日補充回覆內容，並提交上述部分 Release Record 的修訂版。Zion 核電廠於 2022 年 9 月 30 日提交 FSSR Phase 3 最後更新版。

因 FSSR Phase 3 全部都是 Class 1 偵檢單元，預計於後續年度再進行相關研析。

5.1.3 Phase 4 FSSR 審查結果

Zion 核電廠於 2020 年 5 月 1 日提交 Phase 4 FSSR，Phase 4 包含 67 個開放土地 Class 1 偵檢單元，其中，60 個為 Class 1，6 個為 Class 2，1 個為 Class 3。Phase 4 大部分偵檢單元最初被分級為 Class 2 或 Class 3，然而，因偵檢期間發現了離散放射性粒子(DRP)，許多 Class 2 和 Class 3 的偵檢單元被新分級為 Class 1，並在偵檢偵檢單元編號後加上字母標示進行細分。

NRC 於 2020 年 11 月 4 日提出了另一份 RAI，主要針對 Phase 3 和 Phase 4 的 Release Record。Zion 核電廠於 2020 年 11 月 11 日回覆該份 RAI，並提交部分 Release Record 的修訂版。NRC 在 2020 年 12 月 17 日的函件中對回覆提出意見，Zion 核電廠於 2021 年 2 月 10 日的函件中修訂了對 RAI 的回覆，並於 2021 年 4 月 2 日和 2021 年 4 月 15 日提供補充資料。Zion 核電廠於 2022 年 9 月 30 日提交 FSSR Phase 4 最後更新版，ORISE 於 2023 年 11 月 3 日提供 Zion 核電廠確認偵檢報告，NRC 於 2023 年 11 月 8 日的對 Zion 核電廠全部 FSSR 之 SER 審查報告中說明了審查結果通過。

本報告的研析範圍為 Class 2 和 Class 3，經研析 NRC 於 2020 年 11 月 4 日提出的 RAIs，其中所提的問題皆與 Class 1 偵檢單元相關，並未針對 Class 2 和 Class 3 偵檢單元提出 RAIs。

5.1.4 開放土地區域確認偵檢(Confirmatory Survey)

以下說明 NRC 委託外部機構進行所有有關開放土地確認偵檢之結果概述(含 Class 1 區域)。

5.1.4.1 確認偵檢報告日期：2016 年 8 月 5 日

- 確認偵檢範圍：
 - Phase 4
 - Class 2 偵檢單元：10213A。
- 偵檢方法：土壤取樣。
- 調查結果：
 - 僅檢測到低濃度的 Cs-137 超過了 MDC，所有其他放射性核種均低於 MDC。

5.1.4.2 確認偵檢報告日期：2019 年 2 月 7 日

- 確認偵檢範圍：挖掘區域的覆土(Overburden Soil from two Excavations)

- Phase 3 :
 - Class 1 偵檢單元：10209E。
- Phase 4 :
 - Class 1 偵檢單元：10204B&C、10206D&E，和 10207D&E。
- 偵檢方法：掃描和土壤取樣。
- 調查結果：
 - 所有土壤樣本的濃度均低於 OpDCGL，且和 FSS 實驗室的測量結果無顯著差異。

5.1.4.3 確認偵檢報告日期：2020 年 1 月 31 日

- 確認偵檢範圍：發電區域內，與拆除過程中為防止污染或損害，在建築物下方或周圍放置之土壤(Sacrificial Soil) 相關的次表土層。
 - Phase 4 :
 - Class 1 偵檢單元：10203、12201A 至 C、12202A 至 F、12104 至 12111。
- 偵檢方法：加馬掃描和土壤取樣。
- 調查結果：
 - 此次確認偵檢包括兩次到廠址現場的調查：
 - 首次調查於 ORISE 識別出數個異常後，Zion 核電廠要求暫停確認偵檢。ORISE 在其收集的 16 個判斷性樣本中發現了三個 DRP 粒子。除 DRP 外，土壤的偵檢結果符合 OpDCGLs。
 - 在 Zion 核電廠完成土壤的評估和矯正措施後，ORISE 於三個月後返回重新進行調查，收集了 21 個判斷性樣本。ORISE 發現兩個 Co-60 的 DRP，且一個樣本中 Cs-137 的 OpSOF 值超過 1，但 BcSOF 小於 1。其他所有樣本的 OpSOF 皆小於 1。ORISE 判斷該廠址部分區域確實含有殘留放射性。

5.1.4.4 確認偵檢報告日期：2020 年 4 月 24 日

- 確認偵檢範圍：
 - Phase 3 :
 - Class 1 偵檢單元：10201、10202、10203、10209、10211、10220、10221、12102、12103、12112、12113、12203 和 12204。
 - Phase 4 :
 - Class 1 偵檢單元：10150、10206、10207、10208、10213、10214、10219、12201、和 12205。
- 偵檢方法：掃描、直接測量以及土壤取樣。
- 調查結果：
 - 加馬掃描識別出 7 個明顯高於背景輻射的區域，其中 3 個是由於獨立乾式燃料儲存設施(ISFSI)產生的輻射所致。
 - 其中兩個區域發現了一個 DRP 粒子和一塊類似混凝土的碎片(交由廠內人

員處理)，判斷是造成輻射偏高的原因。

5.1.4.5 確認偵檢報告日期：2021 年 9 月 2 日

- 偵檢目的：針對潛在的離散放射性粒子(DRPs)進行調查。
- 偵檢範圍：
 - 圖 24 為此次確認偵檢單元圖，共分為三個確認偵檢單元(CSU)圖，圖 25 為 Zion 核電廠 FSS 各 Phase 偵檢單元圖。偵檢範圍涵蓋約 3%的區域，運用 VSP 軟體將 CSU 偵檢單元切割成網格，並以系統加隨機取規劃方式在 3%的區域範圍中選擇量測/取樣點。

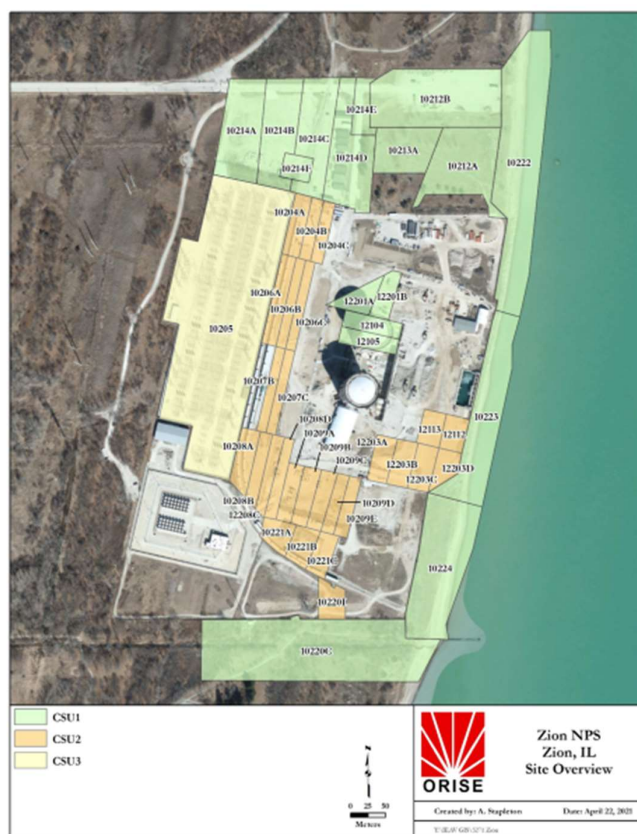


圖 25 Zion 核電廠 FSS 偵檢單元圖(左：Phase 1；中：Phase 3；右：Phase 4)

- 調查方法：
 - 掃描和土壤取樣。
- 調查結果：
 - 偵檢結果了 8 個 DRPs(Eight Particles)。分析結果顯示這些 DRP 中主要包含來自核電廠的放射性同位素(如 Co-60、Cs-137、Eu-152、Eu-154 等)，符合廠址歷史調查記錄，但有些樣本中意外發現了鈷、鈾及 Ra-228 等未知來源的同位素。根據放射性來源，這些 DRP 分為四類：反應爐腐蝕產物的中子活化產物(如 Co-60、Ni-63)、反應爐生物屏蔽材料的中子活化產物(如 Eu-152、Ba-133)、受輻照燃料的裂變產物(如 Pu-239/240)，以及鈷同位素等未知來源物質。

5.1.4.6 確認偵檢報告日期：2023 年 11 月 3 日

- 確認偵檢範圍：調查涵蓋了大部分的 FSS 區域，偵檢包括表土和次表土。圖 26 為此次確認偵檢掃描涵蓋範圍；圖 27 為此次確認偵檢次表土確認偵檢單元和 Grid ID；圖 28 為 Zion 核電廠 FSS 偵檢單元及發現 DRP 位置。

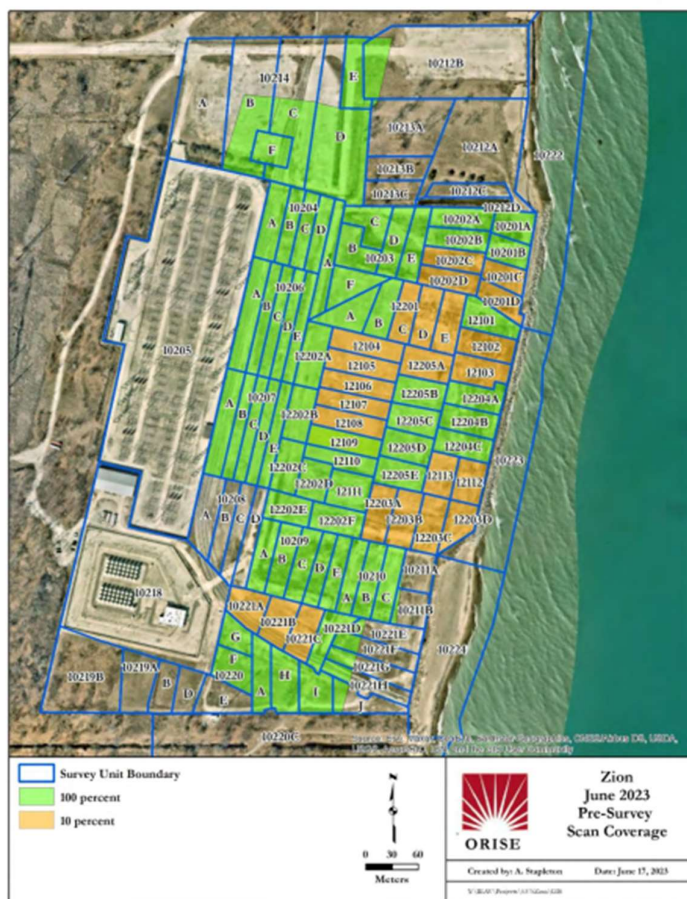


圖 26 2023 年 11 月 3 日表土確認偵檢偵檢單元和掃描涵蓋比例

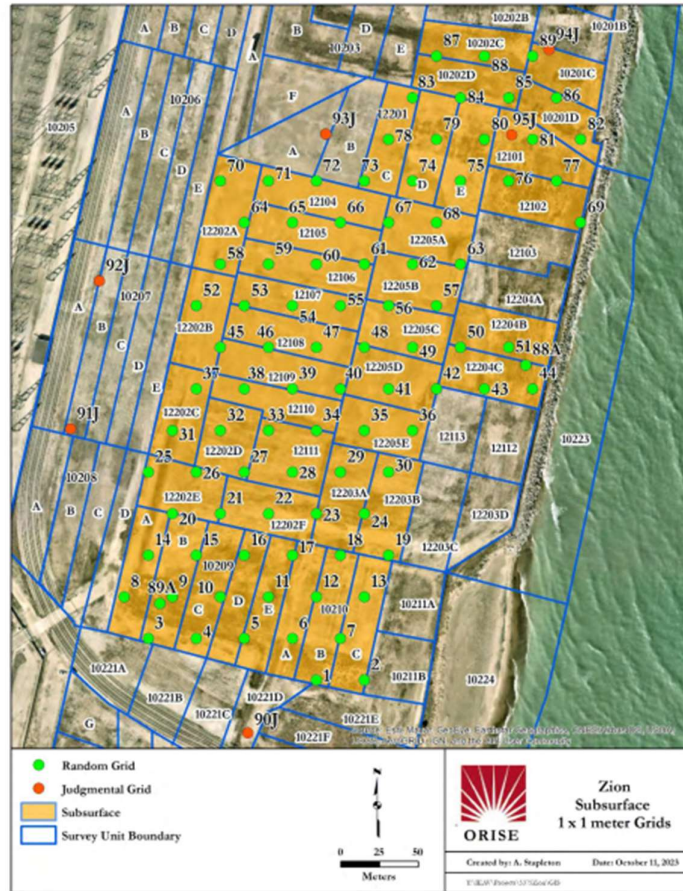


圖 27 次表土確認偵檢單元和 Grid ID

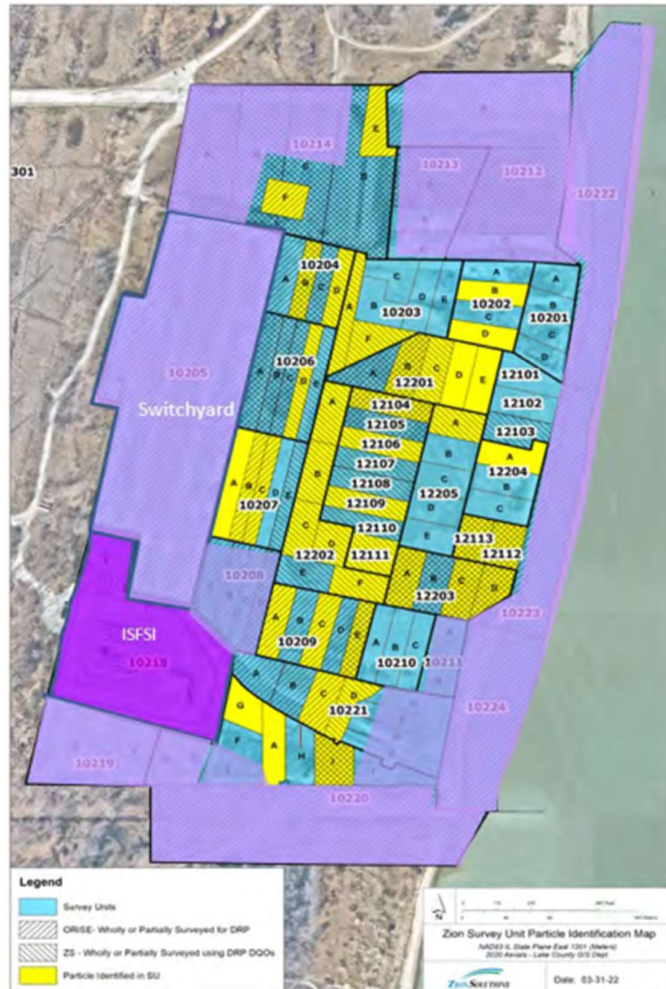


圖 28 FSS 偵檢單元及發現 DRP 位置

- 偵檢方法：
 - 地表掃描。
 - 次表土掃描：對部分次表土進行加馬輻射評估，以檢查放射性粒子是否滲透至地表以下。
 - 取樣分析。
- 調查結果：
 - 在地表掃描中識別並收集了 12 個 DRPs，但並未顯示出顯著的輻射升高。
 - 此表土壤未發現 DRPs。
 - 放射性劑量影響評估：根據檢測結果，NRC 對 12 個 DRPs 的劑量影響進行了評估。雖然 DRPs 的存在是一種可能性低但有可能的風險，但 NRC 根據此調查結果認為，這些離散粒子對於廠址非限制性釋出的影響不顯著。由於整體輻射水平較低，廠址中放射性劑量的累積風險也被認為符合釋出標準。

- 確認與 FSS 數據有一致性：ORISE 的土壤樣本結果大致上與 Zion 核電廠在最終狀態偵檢中所取得的數據一致，兩者在大多數區域的輻射水平相符。惟在兩個位置，ORISE 的結果略高顯示在某些小區域可能存在微量熱點。然而，這些數值仍在 NRC 的釋放標準之內，不影響廠址釋出的合規性評估。
- 總結而言，2023 年 11 月 3 日的確認偵檢進一步確認了 Zion 核電廠廠址的輻射水平適合非限制性釋出，並未發現超出釋出標準的輻射污染。

5.1.5 DRP(Discrete Radioactive Particles)

DRPs 是一種微小但高度集中的放射性微粒，通常具有毫米或微米級別的尺寸。根據《MARSSIM, Rev. 2》中的描述，DRPs 能在短時間內向局部區域傳遞極高的輻射劑量。由於 DRPs 的體積小但放射性活度高，它們的輻射可對皮膚或其他局部區域造成顯著的劑量負荷，而這種局部暴露可能引發急性健康效應。

MARSSIM 第 1 版或 NUREG-1757 及其相關技術文件，都沒有提供關於如何適當調查或評估民眾暴露於 DRP 劑量的指引，過去的一些核設施釋放記錄也顯示，不同地區在應對 DRPs 的評估上不一致，這些差異導致了 NRC 在制定 DRP 的調查技術和方法上的延遲。為了增進對 DRPs 的調查，NRC 委託了核研究專家發展 DRP 的劑量係數，並針對最可能的污染源(如 Co-60、Sr-137)進行研究。這些劑量係數旨在建立更加準確的模型，以評估公共暴露情境中的潛在劑量。

由於 DRPs 可經由吸入或攝入進入人體，NRC 進一步調查其在不同暴露途徑下可能產生的影響。當 DRP 進入體內時，可能會造成特定組織(如肺或胃腸道)局部輻射劑量超出一般均勻暴露情況，甚至在高活度情況下引發潰瘍等確定性效應。對此，NRC 的研究承包商在報告中特別分析了潰瘍閾值，以探討吸入或攝入 DRP 後的潛在健康風險。

此外，DRPs 的探測敏感度亦為一大挑戰。與廣泛存在於大面積的污染相比，DRPs 的局部存在使得其在掃描過程中易被忽略。為此，NRC 承包的 ORISE 機構提出了一種方法來評估 DRP 掃描的靈敏度，這套方法將 DRPs 視為點源(而非一般面源)進行評估，使測量能更加精確地識別 DRP。

在 Zion 核電廠廠址的確認偵檢中，NRC 發現歷史上記錄的 DRP 已經被大部分清除，僅在少量區域有發現。由於這些調查顯示現存 DRPs 的劑量影響低於公共劑量限值(100 mrem/yr)，NRC 對廠址釋放給予了合理的安全保證。此外，DRPs 的放射性衰變半衰期相對較短(如鈷-60 的半衰期為 5.27 年)，因此即使殘留少量 DRPs，其放射性也會隨時間減少，進一步降低未來暴露風險。

在 2023 年的確認偵檢中，ORISE 與 NRC 使用手動掃描技術對大部分廠址進行了檢查，並確保大多數 DRP 已被清除。根據估算，所有 EDE/CEDE³ 劑量估算結果均低於 100 mrem/年 TEDE(公眾劑量限值)，其他假設劑量估算(淺層劑量當量(SDE)和局部劑量當量(LDE)也遠低於任何會引起健康效應的最低劑量標準。因此，NRC 認為即使在極少數情況下有接觸風險，也屬於微乎其微但仍有可能(Less Likely but Plausible)的範圍，符合 NUREG-1757 指引。NRC 最終將 DRP 劑量評估視為一個執照終止風險參考(不納入合規劑量計算)。

5.1.6 隔離和管制措施違規事件

5.1.6.1 Zion 核電廠 LTP 中有關隔離和管制措施規範

以下為 Zion 核電廠 LTP 中有關隔離和管制措施規範：

- 隔離和管制措施在最終狀態偵檢期間至除污作業結束且偵檢區域獲得許可釋出之前持續有效。
- 如果某一偵檢單元的隔離和管制措施被破壞，將進行評估並記錄，以確認該區域內沒有引入會影響最終狀態偵檢結果的放射性物質。
- 地下室回填材料
 - 可以使用乾淨混凝土碎塊。
 - 不可使用挖掘出的土壤。
- 可將為移除或安裝新埋管而挖掘的土壤在進行掃描後回填。但若挖掘出的土壤的掃描結果超過 OpDCGL 的 50%，將進行土壤取樣，且不會用於回填挖掘處，將作為廢棄物處置。

5.1.6.2 隔離和管制措施違規事件

Zion 核電廠在確認偵檢時發現廠區內有多處 DRP 的原因如下：

Zion 核電廠曾把潛在可能受污染的混凝土碎塊(CCDD, Contaminated Concrete Demolition Debris)暫時存放於已經完成 FSS 的偵檢單元，且部分偵檢單元沒有重新執行 FSS。因此，存在部分混凝土碎片可能留在這些區域的潛在風險。

NRC 於 2020 年第一季進行視察時發現此情況，開出了 Severity Level (SL) IV, Non-Cited Violation (NCV)違規單。

Zion 核電廠在對 NRC RAI 的回覆中提到，放置在已完成偵檢單元的 CCDD 是來自圍阻體外圍的混凝土，他們認為這些混凝土受到污染的風險較低，但在現場走訪和檢查(Walkdowns and Inspections)後，發現存在顯著的 CCDD 混合(Intermixing)和深層沉降(Deep Settling)。

Zion 核電廠最終在所有曾暫時存放 CCDD 的偵檢單元中重新分級並重新進行最終狀態偵檢。

5.1.6.3 NRC 對 Zion 核電廠於最終狀態偵檢進行後的隔離和管制評估

以下為 NRC 對 Zion 核電廠於最終狀態偵檢進行後的隔離和管制評估結論：

- 在某些情況下隔離和管制沒有做好，而且最初提供給 NRC 的 FSS Release Record 未反映最終廠址狀況。
- Zion 核電廠在這些區域重新進行最終狀態偵檢是適當的，符合 LTP 和 MARSSIM 的要求。
- NRC 認為 Zion 核電廠在最終狀態偵檢完成後對部分場地重新整地，導致可能受到放射性污染的材料在不同偵檢單元之間移動，而使偵檢單元與其最終狀態偵檢報告(FSSR)中記錄的最終場地條件不一致。此舉增加了對 FSSR 審查的複雜性。
- 只有一個高污染區域有擴散性污染，且土壤濃度遠低於非限制使用外釋標準。

- 儘管在進行最終狀態偵檢後，隔離和管制似乎未能完全維持，NRC 仍可以使用先前於 Phase 3 和 Phase 4 收集的數據，作為評估偵檢單元平均濃度是否符合 DCGLs 的基礎。
- 對於 DRPs，在最終狀態偵檢完成後移動土壤的動作的確給 DRPs 的來源和傳輸以及偵檢的充分性帶來重大不確定性。因此，NRC 指示其承包商在廠址上對 DRPs 進行了廣泛調查。

5.1.7 NRC 對 Zion 核電廠開放土地最終狀態偵檢報告之審查

NRC 對 ORISE 識別出的輻射偏高區域和可能存在於現場的 DRP 進行了獨立的劑量分析。NRC 工作人員認為該輻射偏高區域的潛在劑量符合 10 CFR 20.1402 中非限制使用外釋的標準。根據最終狀態偵檢報告，開放土地偵檢單元最大的 BcSOF 為 0.078(SU 12106K)，相當於 1.95 mrem/yr。NRC 同意 Zion 核電廠將 0.078 作為 Max BcSOF_{SOIL}。NRC 對 ORISE 標示的輻射偏高區域和假設存在的 DRP 進行了劑量分析，以評估其風險。結論指出，即使存在假設性 DRP，其對個人的潛在劑量也低於公共劑量限制，符合 10 CFR 20.1402 的無限制釋放標準。

5.2 NRC 對 Zion 核電廠地下結構 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之審查

Zion 核電廠於 FSS Phase 2 進行地下結構最終狀態偵檢，分 Part 1 和 Part 2 兩部分進行，Part 1 中包含 6 個 Class 1 偵檢單元和 15 個 Class 3 的地下室和嵌管偵檢單元，Part 2 中包含 4 個 Class 2 偵檢單元和 3 個 Class 3 的地下埋管偵檢單元。

Zion 核電廠於 2019 年 3 月 11 日提交 Phase 2, Part 1，並為回應 NRC 提出之 RAI，於 2019 年 9 月 30 日和 2020 年 11 月，分別提交了更新版。

Zion 核電廠於 2019 年 11 月 25 日提交 Phase 2, Part 2 FSSR，並為回應 NRC 提出之 RAI，於 2020 年 6 月 30 日，提交了更新版。

NRC 於 2020 年 4 月 20 日對 Phase 2 及 Phase 3 提出了 RAI，Zion 核電廠於 2020 年 5 月 15 日回應 RAI，並對 Phase 2 及 Phase 3 的 11 份 Release Record 進行了修訂。Zion 核電廠於 2020 年 6 月 4 日補充了 RAI 回應，並如上所述對某些 Release Record 進行修訂。

Zion 核電廠 FSSR Class 2 和 Class 3 地下結構單元的偵檢結果請參考本報告第四章第(四)節。表 66 整理了 NRC 針對 FSSR Phase 2 有關 Class 2 和 3 地下結構偵檢單元的 RAI 以及 Zion 核電廠對 NRC 所提問題的回覆。

表 66 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR Phase 2 Class 2 和 Class 3 地下結構偵檢單元之 RAI 和 Zion 核電廠的回覆

NRC 提出 RAI	Zion 核電廠回覆
要求提供 Class 3 偵檢單元超過 1% OpDCGL 要重新分級之標準似乎沒有被遵循的說明。	對於 Class 3 偵檢單元超過 1% OpDCGL 要重新分級之標準，僅適用於後續調查結果確認超過 OpDCGL 的 50%的情況。

NRC 提出 RAI	Zion 核電廠回覆
在 LTP 中有承諾要進行特性化偵檢，並進行 HTD 分析，以驗證不顯著核種的替代比例。NRC 要求說明那些 Release Record 中有包含持續特性化偵檢的結果。	補充說明持續進行之特性偵檢區域的 HTD 分析結果，以及對根據分析結果，不顯著核種是否需要進行調整的說明。
對於未收集沉積物和/或碎片樣本的地下埋管偵檢單元，應提供補充資訊為何為取樣。並說明為何從偵檢單元 00150 A/B 和 C 中收集的沉積物樣本未進行 HTD 分析。	未收集沉積物和/或碎片樣本的地下埋管偵檢單元是因無可供取樣的沉積物和/或碎片。且因管道開口的掃描顯示剩餘活性極低，通過直接測量數據與地下埋管的 OpDCGL 比較，即可立即證明符合標準。
要求檢查穿管和嵌管偵檢單元，並解釋與 LTP 規定的管道灌漿承諾有不一致之處。如有不一致，請提供因未對嵌管或穿透部分進行灌漿而產生的劑量影響估算。	說明相關偵檢單元的灌漿狀況、量測方式，以及評估劑量。

5.2.1 地下結構區域確認偵檢(Confirmatory Survey)

表 67 為 NRC 委託 ORISE 進行 Zion 核電廠地下結構區域確認偵檢之結果。

表 67 Zion 核電廠地下結構區域確認偵檢結果

確認偵檢報告日期	確認偵檢範圍	說明
2016/08/05	汽機廠房	偵檢結果無異常且支持 FSS 之區域分級。
2018/10/09	圍阻體和輔機廠房	• 1 號機和 2 號機圍阻體底部有 3 個混凝土樣本的 H-3 超過 BcDCGL。(Class 1) • 輔助廠房有兩個位置的混凝土樣本 Cs-137 超過 BcDCGL。(Class 1) • NRC 總結認為未發現任何會阻礙 FSS 數據用於證明符合外釋標準的問題。
2019/02/07	廢水處理設施	未發現任何會阻礙 FSS 數據用於證明符合外釋標準的問題。
2020/01/24	用過燃料池和燃料傳送水道(Transfer Canal)	
2020/01/28	地下穿管(Penetrations)與嵌管	

5.2.2 NRC 對 Zion 核電廠地下結構最終狀態偵檢報告之審查結論

雖然，Zion 核電廠地下結構最終狀態偵檢報告發生以下多個未遵循 NRC 所批准的

LTP 要求的情況：在幾個 Class 1 偵檢單元，未於超過調查水平的區域進行額外調查；未在汽機廠房和循環冷卻水泵室(Crib House)中 10%的測量點採集混凝土芯樣本；沒有一貫地遵守其「當偵檢結果符合某些標準，要於嵌入式管道或管道間進行灌漿」的承諾，但，NRC 根據 Phase 2 FSSR 以及委託 ORISE 的獨立確認偵檢，確認 Phase 2 FSSR 的偵檢單元符合非限制使用外釋與 ALARA 的標準。

5.3 地下水劑量

Zion 核電廠在 LTP 中指出「地下水中現有殘餘輻射劑量預計會很小。然而，如果在除役過程中發現地下水污染時，將使用地下水暴露因子計算劑量」

Zion 核電廠於 2019 年 10 月 9 日的信函中請求 NRC 同意終止地下水監測計畫。在 2019 年 11 月 5 日的信函中，NRC 同意 Zion 停止地下水監測計畫。

隨後，Zion 核電廠承諾繼續進行地下水採樣供 NRC 審查，NRC 審查了 Zion 核電廠提供的地下水劑量資訊，以及 2016 年至 2019 年 Zion 年度地下水輻射防護計畫報告中的數據，確認在 2016 年至 2019 年期間，未在監測井中檢測到其他與核電廠相關的放射性核種。

NRC 認為，Zion 核電廠使用於 2006 年量測到的最高 H-3 濃度(586 pCi/L)來證明符合輻射標準是保守的，並確認計算所得的劑量為 0.026 mrem/yr。

5.4 最終狀態劑量加總和分析

Zion 核電廠的合規劑量計算方程式請參考方程式 1，Zion 核電廠在部分廠址釋出請求(PSR)中提供的合規劑量計算結果如表 68，總加總合規劑量為 18.75 mrem/yr。

表 68 Zion 核電廠加總合規劑量

Source	SU	Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
Max BcSOF _{BASEMENT}	Unit No. 1 Containment	0.444*	11.1
Max BcSOF _{SOIL}	12106K	0.078	1.95
Max BcSOF _{BURIED PIPE}	Primary Water Supply Header	0.227	5.68
Max SOF _{EGW(elevated groundwater)}	Groundwater	0.001	0.026
TOTAL		0.75	18.75

5.5 潛在可能因 DRP 粒子造成的劑量

已知的 DRP 粒子皆已清除，NRC 認為，經過徹底的調查後，廠址內不應再有遺留放射源 DRP，因此預期因 DRP 造成的曝露劑量為零。然而，由於因人為錯誤或其他特殊可能性，NRC 將遇到 DRP 的情境視為微乎其微但仍有可能(Less Likely but Plausible Condition)，以風險評估廠址釋出決策。2023 年調查中任何 DRP 的曝露劑量皆低於 10 mrem TEDE。若有 DRP 未檢測到，推估劑量約為 20 mrem。因所使用的掃描技術具有的靈敏度接近於已識別並收集到的任何 DRP 的兩倍，此外，可能的淺層和深層劑量低於 2 rem，遠低於職業限值(50 rem)，故，NRC 的結論為廠址執照終止後遇到 DRP 的可能性極低，即使發生曝露，劑量也低於 10 CFR 20.1302 的公眾劑量限值(100 mrem/yr

TEDE)。

5.6 NRC 對最終狀態劑量的評估

NRC 審查了 Zion 核電廠所計算的總劑量，確認符合先前在 LTP 中批准的方法，且使用的最大劑量參數皆適當。2023 年確認偵檢中發現一處放射性活度超標的「熱點」，位於幾個偵檢單元的交界處。Zion 核電廠尚未對該區域進行調查或清理，但 NRC 評估後認為，該熱點增量劑量在 4.1 至 8.4 mrem/yr 之間，加入該地原本劑量後，總計範圍在 5.0 至 14.9 mrem/yr 之間，仍符合釋出標準。NRC 並指出，Zion 核電廠的合規劑量計算較為保守，假設暴露於所有最高劑量的媒介物，但實際上很難發生。此外，經 ORISE 及 Zion 核電廠徹底清理後，廠址內無已知 DRP 殘留，僅評估若存在 DRP 的假設劑量，確認低於公眾劑量限制且不致產生確定性效應。ALARA 評估顯示，對結構和土壤的輻射劑量已降至合理的可接受水平。NRC 認為清理行動已符合法規，廠址已具備合理的殘留輻射安全保障。

5.7 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR 之 SER 總結

10 CFR 50.82(a)(11) NRC 終止核電設施執照的標準，要求除役作業須依據經核准的 LTP 執行，且最終輻射偵檢及相關文件需證明符合 10 CFR Part 20, Subpart E 和 F 的除役標準。針對 Zion 核電廠，NRC 確認除役作業已完成，最終狀態偵檢報告(FSSR)證實殘餘輻射活度滿足 LTP 和 10 CFR 20.1402 的釋出標準，最大劑量為 18.75 mrem/年，低於 25 mrem/年的無限制釋放標準。所有檢測出的 DRPs 已移除，並確定對公眾的曝露風險極低，符合 100 mrem/年公眾劑量限值。NRC 總結，偵檢報告充分且合規，不需與 EPA 進行第二級協商，支持釋出 Zion 核電廠的 128 個偵檢單元。

五、La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告與 NRC 審查

(一) La Crosse 核電廠除役簡介

La Crosse 核電廠位於美國威斯康辛州西南部的 Vernon County，緊鄰密西西比河東岸。該核電廠原執照範圍 163.5 英畝，LACBWR 僅占約 1.5 英畝，擁有者為 Dairyland 電力公司，廠區內顯著設施包括 LACBWR 核電廠、位於其北側的變電站及原 G-1 火力發電廠遺址(已於 1989 年拆除)、南側的 G-3 火力發電廠及儲存過過燃料的 ISFSI 設施(請參考圖 29)。其中，歸屬未受輻射影響區域之面積近 88 英畝，歸屬受輻射影響區域約 75.5 英畝。受輻射影響區域包含和 ISFSI 相關的土地區域(仍保留在 10 CFR Part 50 執照中)約 39 英畝，以及要進行最終狀態偵檢並釋出的區域約 36.5 英畝。未受輻射影響區域已於 2017 年 4 月 12 日通過 PSR(部分廠址釋出)。圖 30 為 La Crosse 廠區初步分級與廠房位置圖。

La Crosse 核電廠的除役方法為，拆除反應器廠房和廢氣槽貯存室(WGTV)至至少地下 3 英尺深(地下三英尺深處之海拔標高為 636 英尺)。除以下建築結構外，其他受影響的廠房、建築物和組件都將完全拆除(包含廢棄物處理廠房(WTB)、汽機廠房、管路和通風管道、反應器及發電機設備，以及排氣煙囪地基)。預期保留的受輻射影響之地上建築結構不會含有殘留放射性，並將接受最終狀態偵檢(FSS)。

將保留的地上受輻射影響建築結構包括：

- LACBWR 行政大樓(LACBWR Administration building)
- G-3 循環冷卻水泵室(G-3 Crib House)
- LACBWR 循環冷卻水泵室(LACBWR Crib House)
- 變電站開關設備室(Transmission Sub-Station Switch House)
- G-1 循環冷卻水泵室(G-1 Grib House)
- 駁船洗滌休息室(Barge Wash Break Room)
- 備用控制中心(Back-up Control Center)
- 警衛室(Security Station)

與 Genoa 3 火力發電廠(G-3)相關的建築廠房預計不會受到放射性影響，除 G-3 循環冷卻水泵室(Crib House)因位於受輻射影響的土壤偵檢單元而被分類為受輻射影響外，其他區域皆歸屬不受輻射影響區域內。

反應器廠房和廢氣槽貯存室(WGTV)在執照終止將保留的地下結構為 636 英尺標高(地下 3 英尺)以下的地下室。在反應其廠房內，所有內部結構表面、系統和組件將被拆除，所有內部混凝土也將被移除以露出鋼襯層(Exposed Steel Liner)。鋼襯層以下的結構混凝土將保留。在 WGTV 中，將保留的結構包括地板和基礎牆壁，以及 636 英尺標高以下的混凝土樁帽和樁。執照終止後保留在 LACBWR 的結構由鋼筋混凝土構成，將被覆蓋至少 3 英尺的土壤並改造成無法被佔用的狀態。



圖 29 La Crosse 廠址全覽



圖 30 La Crosse 廠址初步分級與廠房位置圖

(二) La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告

La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢的執行與報告分為 3 個 Phase 進行，各 Phase 的偵檢單元數請參考表 69。

La Crosse 核電廠在最終狀態偵檢設計中，將開放土地偵檢單元又細分為開放土地區域(OLA, Open Land Area)以及地下挖掘區(SGE, Sub-Grade Excavation)兩類。從偵檢單元編號可以分辨出偵檢單元之分級及分類，OLA 及 SGE 偵檢單元編號的第一碼都是 L，第二碼為區域分級，OLA 偵檢單元編號的第 3-8 碼為阿拉伯數字，SGE 偵檢單元編號的 3-5 碼為 SUB，6-8 碼為英文字母。SGE 區域偵檢單元之分級皆為 Class 1，且 OLA 區域和 SGE 區域有重疊。

La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢設計中，將建築與結構偵檢單元又細分為結構地下室(STB, Structure Basement)、地上建築(AGB, Above-Grade Building)，和地下埋管(BP, Buried Piping)三類。La Crosse 核電廠建築與結構偵檢單元編號第一碼為偵檢單元類別，第二碼為區域分級，3-8 碼為阿拉伯數字。STB 和 AGB 偵檢單元編號的第一碼為 B，BP 偵檢單元編號第一碼為 S。

更多有關 La Crosse 核電廠區域分級說明請參考本報告第三章第 2.3 節(La Crosse 核電廠最終狀態偵檢區域分級實務)。

表 69 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢各 Phase 偵檢單元數

最終狀態 偵檢階段	區域 分級	OLA 開放土地	SGE 地下挖掘區	STB 地下結構	AGB 地上建築	BP 地下埋管
Phase 1	Class 1		4	2		
	Class 2	2				
	Class 3	1				
Phase 2	Class 1					1
	Class 2				3	5
	Class 3				5	4
Phase 3	Class 1	7	3			
	Class 2	2				
	Class 3	2				

2.1 Phase 1 FSSR

以下主要涵蓋 Class 2 和 3 偵檢單元相關資訊，部分內容也涉及 Class 1 偵檢單元。

2.1.1 偵檢規劃

La Crosse 核電廠 Phase 1 FSS 包含 4 個 Class 1 地下挖掘區(SGE)、2 個 Class 2 和 1 個 Class 1 開放土地(OLA)，以及 1 個 Class 3 地下結構(STB)偵檢單元。表 70 為 Phase 1 偵檢單元列表，圖 31 為 Phase 1 偵檢單元位置圖。

表 70 La Crosse 核電廠 Phase 1 偵檢單元列表

偵檢單元	類別	名稱	Class	尺寸(m ²)
L1-SUB-DRS	SGE	RCA North Area Excavation	1	1,125
L1-SUB-TDS	SGE	TB, Sump, Pit Diesel Excavation	1	1,186
L1-SUB-LES	SGE	LSA, Eat Shack, Septic Excavation	1	1,336
L1-010-101C	SGE	Waste Treatment Building Excavation	1	88
L2-011-102	OLA	Area South of LACBWR Site Enclosure (LSE) Fence	2	2,258
L2-011-103	OLA	G-3 Crib House Surrounding Area	2	2,445
L3-012-102	OLA	Transmission Switch Yard	3	11,711
B1-010-004	STB	West Training Area	1	311
B1-010-001	STB	Reactor Building Basement	1	512



圖 31 La Crosse 核電廠 Phase 1 偵檢單元位置圖

2.1.1.1 用於決策之輸入(Identify Inputs to the Decision)

- 需要的資訊(Information Needed)：需要偵檢單元殘餘活度和表面區域的評估。廠址歷史評估和特性偵檢為 FSS 的初步資料來源，並透過 FSS 的量測和取樣確認潛在核種的濃度和變異性(Variability)資訊。
- 歷史資訊(Historical Information)：經廠址歷史評估和特性偵檢確認的區域分級。
- 輻射偵檢資料(Radiological Survey Data)：使用廠址歷史評估及特性偵檢取得的資料來計算 FSS 所需樣本數。
- 關注核種(ROC, Radionuclides of Concern)：如表 27。
- 進行 FSS 時，難測關注核種 Sr-90 之濃度使用替代核種 Cs-137 推算其濃度。(參考表 28)。
- 調查基準規範請參考表 17。

2.1.1.2 取樣與分析方法

表土樣本採集深度為 15 公分，但有部分單元採集深度深至 12 英吋。透過現場加馬光譜儀進行加馬發射放射性核種的分析。採集的介質包括土壤和礫石。

實驗室儀器的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%。如果測量結果的 MDC 超過目標值將接受為有效數據。

根據 LTP，最終狀態偵檢取的樣本中的 10%，或者任何超過 OpDCGL(OpSOF) 10% 的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，分析的目的為確認放射性核種的組成與 LTP 中假定的組成無顯著差異。所有作業均需符合品質保證項目計畫(QAPP)的要求，包括使用訓練有素的技術人員、經過校準的儀器及規範的操作程序。除這些要求外，選擇至少 5%的樣本數量進行品質管控(QC)評估，並在每個偵檢單元中至少收集一個重複土壤樣本用於品質管控評估。

2.1.1.3 統計檢定：

選擇符號檢定(Sign Test)作為非參數統計檢定方法。統計檢定可容許的型一錯誤(Type I Error)和型二錯誤(Type II Error)率皆為 5%。透過統計方法計算所需樣本時，灰色區域下限(LBGR)設為 OpDCGL 的 50%。

2.1.1.4 樣本數量

在 Phase 1 偵檢單元中，相對偏移(Relative Shift)值為 3，因此需 14 個隨機樣本或測量值進行符號檢定。三個例外單元(L3-012-102、B1-010-001 和 B1-01-004)相對偏移值為 1.67，需 17 個樣本或測量值。相對偏移值和偵檢單元內量測值之變異數相關。由於建築物地下室調查方式的特殊性，符號檢定測量數的決定是根據 100%表面覆蓋率和 ISOCS 的視場範圍。樣本和測量位置透過 Visual Sample Plan (VSP)軟體計算。

2.1.1.5 判斷性樣本數量和位置

在判斷性樣本方面，通常每個 Phase 偵檢單元至少需一個判斷性樣本，但單元 L1-010-101C 例外。這些樣本的選擇取決於調查主管，位置多為感興趣的區域。對 L1-SUB-TDS 偵檢單元，以持續進行的特性偵檢樣本作為判斷性樣本。

2.1.1.6 掃描區域和位置數量

掃描區域方面，Class 3 開放土地偵檢單元因無污染風險，在每個隨機樣本周圍設掃描區域，需覆蓋總表面積的 10%。Class 1 和 Class 2 開放土地偵檢單元則分別要求 100%和 25%的掃描覆蓋率。所有結構偵檢單元需 100%掃描，位置依 ISOCS 測量系統性佈局確定。

2.1.1.7 品質管控樣本數量

除了要求儀器校準以及經批准的程序進行，至少對總樣本數和測量數的 5%進行品質管控評估。每個開放土地偵檢單元至少採集了一個土壤樣本的複本樣本進行品質管控評估，並在隨機選定的 5%掃描位置進行重複掃描。在結構地下室偵檢單元中，隨機選定 5%的 ISOCS 測量位置進行重複測量，以進行質量控制評估。

表 71 為 La Crosse 核電廠 Phase 1 Class 2 和 3 偵檢單元掃描範圍及土壤樣本取樣

個數資訊列表。

表 71 La Crosse 核電廠 Phase 1 Class 2 和 3 偵檢單元掃描範圍及表土樣本取樣個數

偵檢單元	Class	掃描範圍比例	偵檢單元面積(m ²)	掃描區域面積(m ²)	隨機樣本數	判斷性樣本數	調查樣本數
L2-011-102	2	25 %	2,258	585	14	2	0
L2-011-103	2	25 %	2,445	617	14	2	5
L3-012-102	3	11 %	11,711	1,344	28	1	0

2.1.2 偵檢結果

2.1.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

以下為 Phase 1 中 Class 2 和 3 偵檢單元中出現異常數據/掃描偏高之結果和調查。

- 在調查單元 L2-011-103 中，因出現偏高的掃描結果了進行進一步調查，所有調查樣本的 SOF 均小於 0.1 DCGL，未採取進一步行動。

2.1.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

BcSOF 的平均值等於 1 時，劑量為 25 mrem/yr，表 72 為 La Crosse 核電廠 Phase 1 偵檢單元中量測結的 BcSOF 的平均值，以及依據 BcSOF 值計算出的評估劑量。

表 72 La Crosse 核電廠 Phase 1 Class 2 和 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估劑量

偵檢單元	平均 BcSOF	Dose(mrem/yr)
L2-011-102	0.0095	0.2368
L2-011-103	0.0097	0.2416
L3-012-102	0.0090	0.2247

2.1.3 結論

偵檢單元符合釋出標準。

2.2 Phase 2 FSSR

以下主要涵蓋 Class 2 和 3 偵檢單元相關資訊，部分內容也涉及 Class 1 偵檢單元。

2.2.1 偵檢規劃

La Crosse 核電廠 Phase 2 FSS 包含 2 個 Class 2 和 4 個 Class 3 的地上建築(AGB)偵檢單元，以及 1 個 Class 1、2 個 Class 2 和 6 個 Class 3 的結構地下室(BP)偵檢單元。表 73 為 Phase 2 偵檢單元列表，圖 32 為 Phase 2 偵檢單元位置圖。

表 73 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元列表

偵檢單元	類別	名稱	Class
B2-010-101	AGB	LACBWR Crib House	2
B2-010-102	AGB	G-3 Crib House	2

偵檢單元	類別	名稱	Class
B2-010-103	AGB	LACBWR Administration Building	2
B3-012-101	AGB	Back-up Control Center	3
B3-012-102	AGB	Transmission Sub-Station Switch House	3
B3-012-103	AGB	G-1 Crib House	3
B3-012-104	AGB	Barge Wash Break Room	3
B3-012-109	AGB	Security Shack	3
S1-011-102	BP	Circulating Water Discharge Pipe	1
S2-011-103 A	BP	De-Icing Line	2
S2-011-103 B	BP	Low Pressure Service Water	2
S2-011-103	BP	Circulating Water Intake Pipe	2
S3-012-109 A	BP	Storm Drain 1	3
S3-012-109 B	BP	Storm Drain 2	3
S2-011-101 A	BP	Storm Drain 3	3
S2-011-101 B	BP	Storm Drain 6	3
S3-012-102 A	BP	Storm Drain 4	3
S3-012-102 B	BP	Storm Drain 5	3



圖 32 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元位置圖

2.2.1.1 地上建築(AGB)偵檢方法

LTP 規定的依據偵檢單元分級所需的最低掃描覆蓋率如表 5。

依據 LTP，對於 Class 3 偵檢單元，通常會在具有最大污染潛力的區域進行判斷性表面掃，包括地表排水區、通風排氣口、裂縫和低處的積水點，如果缺乏以上特徵，判斷性掃描的位置將由偵檢設計者自行決定。根據歷史資料審查與為準備 FSS 而進行的實地走訪結果，未顯示出任何需要特別增加污染潛力的區域。因此，偵檢設計者決定以隨機方式選擇測量點。

對於 Class 1 和 Class 2 的地面以上偵檢單元，掃描區域由系統性規劃，且所有地面以上的建築物，至少指定了一處判斷性掃描位置。

每個掃描位置的最高掃描讀數點和任何需要進一步調查的區域，都進行了靜態測量以檢查表面總污染。檢測器直接放置在被調查的表面上，並記錄了一分鐘的計數。對於讀數較高的區域，會標記並進行進一步的調查測量。表 74 為地上建築掃描比率彙整。

表 74 地上建築掃描比率彙整

Survey Unit	Survey Unit Classification	Area (m ²)	Area Scanned (m ²)	% Scan
B2-010-101	2	1,060	322	30
B2-010-102	2	2,873	780	27
B2-010-103	2	5,433	1,345	25
B3-012-101	3	1,710	185	11
B3-012-102	3	861	95	11
B3-012-103	3	296	33	11
B3-012-104	3	116	15	13
B3-012-109	3	122	15	12

2.2.1.2 地下埋管(BP)偵檢方法

使用適當大小的檢測器於管道內部設定好的量測位置進行量測。檢測器在測量表面上會固定在特定的位置上，以計算出適當的檢測效率。

測量輸出以每英尺管道通過的總加馬活性(cpm)表示。此 cpm 值隨後根據檢測器的效率轉換為 dpm。總活性以 dpm 表示，然後根據管道直徑轉換為單位面積的活性，最終得到以 dpm/100 cm²表示的測量結果。

表 75 為地下埋管掃描比率彙整。

表 75 地下埋管掃描比率彙整

Survey Unit	Survey Unit Classification	Area (m ²)	Area Scanned (m ²)	% Scan
S1-011-102	1	614	614	100
S2-011-103 A	2	46	22	48
S2-011-103 B	2	17	9	53
S2-011-103	2	57	42	74
S3-012-109 A	3	47	5	11
S3-012-109 B	3	729	70	10
S2-011-101 A	2	25	8	32
S2-011-101 B	2	20	5	25
S3-012-102 A	3	96	10	10
S3-012-102 B	3	292	29	10

2.2.1.3 量測點個數

表 76 為 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元量測點個數彙整。

表 76 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元量測點個數

Survey Unit	Random/Systematic Static Measurements	Judgmental Static Measurements	Investigational Samples or ISOCS Measurements
B2-010-101	28	2	0
B2-010-102	56	4	0
B2-010-103	112	35	0
B3-012-101	14	1	0
B3-012-102	14	1	0
B3-012-103	14	1	0
B3-012-104	14	1	0
B3-012-109	14	1	0
S1-011-102	510	2	0
S2-011-103 A	50	2	0
S2-011-103 B	23	3	0
S2-011-103	29	1	0
S3-012-109 A	20	2	1 ⁽¹⁾
S3-012-109 B	60	1	0
S2-011-101 A	33	1	0
S2-011-101 B	21	1	0
S3-012-102 A	33	1	0
S3-012-102 B	40	1	0

2.2.2 偵檢結果

2.2.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

以下為 Phase 2 中 Class 2 和 3 偵檢單元中出現異常數據/掃描偏高之結果和調查。

- 在偵檢單元 S3-012-109 A 中，管道彎曲處的掃描讀數偏高，因此進行了進一步調查，包括收集 ISOCS 數據。審查所收集 ISOCS 數據後確認，偏高讀數是由形狀幾何異常引起的，雖然讀數略高於正常值，但低於 DCGL_{BP}。

2.2.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

表 77 La Crosse 核電廠 Phase 2 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估計量

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Mean Fraction of Adjusted Gross Base Case DCGL	Dose (mrem/yr)
B2-010-101	-	0.0203	0.5081
B2-010-102	-	0.0126	0.3154
B2-010-103	-	0.0057	0.1426
B3-012-101	-	0.0122	0.3038
B3-012-102	-	0.0028	0.0711
B3-012-103	-	0.0136	0.3409
B3-012-104	-	0.0010	0.0239
B3-012-109	-	0.0022	0.0541
S1-011-102	0.0012	-	0.0299
S2-011-103A	0.0126	-	0.3155
S2-011-103B	0.0120	-	0.3006
S2-011-103	0.0240	-	0.6005
S3-012-109A	0.1204	-	3.0112
S3-012-109B	0.0213	-	0.5317
S2-011-101A	0.0696	-	1.7407
S2-011-101B	0.0611	-	1.5278
S3-012-102A	0.0028	-	0.0712
S3-012-102B	0.0645	-	1.6121

2.2.3 結論

偵檢單元符合釋出標準。

2.3 Phase 3 FSSR

以下主要涵蓋 Class 2 和 3 偵檢單元相關資訊，部分內容也涉及 Class 1 偵檢單元。

2.3.1 偵檢規劃

La Crosse 核電廠 Phase 3 FSS 包含 7 個 Class 1、2 個 Class 2 和 2 個 Class 3 的開放土地(OLA)偵檢單元，以及 3 個 Class 1 地下挖掘區(SGE)偵檢單元。表 78 為 Phase 3 偵檢單元列表，圖 33 為 Phase 3 偵檢單元位置圖。

表 78 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元列表

Survey Unit	Type	Survey Unit Description	Class	Size (m ²)
L1-010-101	OLA	Reactor Building, WTB, WGTV, Ventilation Stack Grounds	1	1,992
L1-010-102	OLA	Turbine Building, Turbine Office Building, 1B Diesel Generator Building Grounds	1	2,315
L1-010-103	OLA	LSA Building, Maintenance Eat Shack Grounds	1	1,749
L1-010-104	OLA	North LSE Grounds	1	2,387
L1-010-105	OLA	North Interim Debris Storage Area	1	1,974
L1-010-106	OLA	North Loading Area	1	1,936
L1-010-107	OLA	Outside East LSE Area	1	1,675
L2-011-101	OLA	Area North of LSE Fence	2	5,728
L2-011-104	OLA	G3 Crib House, Circ. Water Discharge Land	2	5,285
L3-012-101	OLA	North End of Licensed Site	3	19,885
L3-012-109	OLA	Plant Access, ISFSI Haul Road Grounds	3	28,187
L1-SUB-CDR	SGE	Stack, Pipe Tunnel, RPGPA	1	431
L1-SUB-TDS A	SGE	Eastern Portion TB, Sump, Pit, Diesel	1	476
L1-SUB-TDS B	SGE	RPGPA Area	1	259
OLA = Open Land Area SGE = Sub-Grade Excavation				



圖 33 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元位置圖

2.3.1.1 取樣與分析方法

表土層定義為前 15 公分深度的土壤，最終狀態偵檢調查(FSS)針對這 15 公分進行取樣。然而，為保守起見並確保 FSS 的執行效率，La Crosse 核電廠表土的劑量評估模型假設表土層為從地面向下 1 公尺的深度。

2.3.1.2 掃描

對於 Class 3 開放土地偵檢單元，通常會在具有最大污染潛力的區域進行判斷性表面掃描，Class 1 和 Class 2 開放土地調查單位中，掃描區域是在系統網格上設定掃描區域。個確定的掃描區域都通過 GPS 定位、標記並完全掃描，對於讀數較高的區域進行標記並收集調查樣本，探測器盡量貼近地面，並以不超過每秒 0.5 公尺的速度進行掃描。表 79 為 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元掃描比率彙整。

表 79 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元掃描比率彙整

Survey Unit	Survey Unit Classification	Area (m ²)	Area Scanned (m ²)	% Scan
L1-010-101	1	1,992	1,992	100%
L1-010-102	1	2,315	2,315	100%
L1-010-103	1	1,749	1,749	100%
L1-010-104	1	2,387	2,387	100%
L1-010-105	1	1,974	1,974	100%
L1-010-106	1	1,936	1,936	100%
L1-010-107	1	1,675	1,675	100%
L2-011-101	2	5,728	1,509	26%
L2-011-104	2	5,285	1,344	25%
L3-012-101	3	19,885	2,007	10%
L3-012-109	3	28,187	2,897	10%
L1-SUB-CDR	1	431	431	100%
L1-SUB-TDS A	1	476	476	100%
L1-SUB-TDS B	1	259	NA ¹	NA ¹

2.3.1.3 量測點個數

表 80 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元量測點個數彙整。

表 80 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元量測點個數

Survey Unit	Random/Systematic Samples	Judgmental Samples	Investigational Samples
L1-010-101	14	3	0
L1-010-102	14	2	2
L1-010-103	14	2	1
L1-010-104	14	4	1
L1-010-105	14	2	2
L1-010-106	14	2	6
L1-010-107	14	4	5
L2-011-101	14	3	0
L2-011-104	14	8	2
L3-012-101	14	2	0
L3-012-109	14	4	24
L1-SUB-CDR	14	0 ⁽¹⁾	6
L1-SUB-TDS A	14	4	4
L1-SUB-TDS B	28 ⁽²⁾	32	0

2.3.2 偵檢結果與劑量評估

2.3.2.1 異常數據/掃描偏高之結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

在所有 Phase 3 偵檢單元中，共有 91 個掃描讀數偏高的情況，並因此收集了 53 個調查樣本，所有調查樣本與 OpDCGL 相比，其 OpSOF 均小於 1.0。因此，沒有任何調查樣本或測量結果導致偵檢單元需要除污或重新分級。Phase 3 FSSR 報告中指出，Phase 3 偵檢單元中未發現任何異常。

2.3.2.2 使用 DCGL 計算評估劑量

表 81 La Crosse 核電廠 Phase 3 偵檢單元 BcSOF 平均值和評估劑量

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
L1-010-101	0.0110	0.2751
L1-010-102	0.0095	0.2363
L1-010-103	0.0140	0.3393
L1-010-104	0.0110	0.2624
L1-010-105	0.0104	0.2609
L1-010-106	0.0104	0.2603
L1-010-107	0.0135	0.3377
L2-011-101	0.0124	0.3103

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
L2-011-104	0.0102	0.2557
L3-012-101	0.0148	0.3699
L3-012-109	0.0176	0.4389
L1-SUB-CDR	0.0408	1.0190
L1-SUB-TDS A	0.0141	0.3526
L1-SUB-TDS B	0.0385	0.9613

2.3.3 地下水現況概述(Overview of Existing Groundwater)

La Crosse 核電廠 Phase 3 FSSR 中包含地下水現況概述如下：

La Crosse 核電廠從 2014 年 6 月到 2018 年 6 月，每半年收集地下水樣本，從 2018 年 10 月到 2019 年 7 月則改為每月收集，收集來源來自監測井和供水井。2019 年 9 月 24 日，La Crosse 核電廠向威斯康星州自然資源部請求不再進行後續行動。所有的監測井和供水井監測已於 2019 年 10 月 1 日根據 NRC 的同意被廢止。

使用劑量轉換因子計算地下水劑量，並以 327 L/yr 的工業工人飲水攝取率來計算地下水曝露因子。2014 年 6 月的地下水樣本檢測到 H-3 和 Sr-90，並且在幾個井中檢測到 C-14、Te-99、Eu-152、Pu-239 和 240，以及 Am-241 等放射性物質。從 2014 年 6 月的地下水樣本中計算出的最大劑量為 0.471 mrem/yr。

2018 年 3 月 12 日，La Crosse 核電廠通報 NRC，發現地下水中的 H-3 濃度超過背

景值。該 H-3 被認為與反應器廠房的通風系統排放有關。事件的最大 H-3 氬濃度為 24,200 pCi/L，對應的劑量為 0.506 mrem/yr。經過計算和假設，NRC 確認以 110,000 pCi/L 的 H-3 濃度來證明合規性，這對應的劑量為 2.299 mrem/yr，合併後的總劑量為 2.779 mrem/yr。

2.3.4 合規劑量計算

La Crosse 核電廠 Phase 3 FSSR 中包含核電廠的合規劑量計算結果，合規劑量的計算方法本報告第三章 7.4 小節。表 82~ 表 88 為 La Crosse 核電廠各輻射來源之偵檢單元的劑量評估結果，選擇輻射來源中最大的偵檢單元劑量評估值作為該輻射來源之合規劑量值(用藍色底色表示)。為保守計算劑量，反應器廠房地下室和地下埋管會將 Insitu 情境和 BFM 挖掘情境加總作為合規劑量，有關 Insitu 情境和 BFM 挖掘情境請參考本報告第三章 4.2.1 節。將所有輻射來源最大評估劑量加總後所得的廠址最終狀態合規劑量為 8.2345 mrem/yr(參考表 89)。

表 82 La Crosse 核電廠地下室偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
B1-010-004	0.0233	0.5813
B1-010-001	0.0006	0.015

表 83 La Crosse 核電廠開放土地(土壤)偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
L1-010-101	0.0110	0.2751
L1-010-101C	0.0144	0.3597
L1-010-102	0.0095	0.2363
L1-010-103	0.0140	0.3393
L1-010-104	0.0110	0.2624
L1-010-105	0.0104	0.2609
L1-010-106	0.0104	0.2603
L1-010-107	0.0135	0.3377
L2-011-101	0.0124	0.3103
L2-011-102	0.0095	0.2368
L2-011-103	0.0097	0.2416
L2-011-104	0.0102	0.2557
L3-012-101	0.0148	0.3699
L3-012-102	0.009	0.2247
L3-012-109	0.0176	0.4389
L1-SUB-CDR	0.0408	1.0190
L1-SUB-TDS A	0.0141	0.3526
L1-SUB-TDS B	0.0385	0.9613
L1-SUB-DRS	0.0105	0.262
L1-SUB-TDS	0.0125	0.3115
L1-SUB-LES	0.01	0.2495

表 84 La Crosse 核電廠地上建築偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
B2-010-101	0.0202	0.5055
B2-010-102	0.0128	0.3197
B2-010-103	0.0057	0.1426
B3-012-101	0.0122	0.3038
B3-012-102	0.0028	0.0711
B3-012-103	0.0136	0.3409
B3-012-104	0.0010	0.0239
B3-012-109	0.0022	0.0541

表 85 La Crosse 核電廠地下埋管偵檢單元 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	Mean Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
S1-011-102	0.0012	0.0299
S2-011-103 A	0.0126	0.3144
S2-011-103 B	0.0120	0.3006
S2-011-103	0.0240	0.6010
S3-012-109 A	0.1204	3.0112
S3-012-109 B	0.0213	0.5317
S2-011-101 A	0.0696	1.7407
S2-011-101 B	0.0586	1.4645
S3-012-102 A	0.0028	0.0712
S3-012-102 B	0.0645	1.6121

表 86 La Crosse 核電廠地下水現況 SOF 和劑量評估結果

Survey Unit	Maximum SOF	Dose (mrem/yr)
2014	0.0188	0.4710
2018/2019	0.0920	2.299
Total EGW	0.1108	2.779

表 87 La Crosse 核電廠反應器廠房地下水情境 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	GW BcSOF _{BS OB}	Dose (mrem/yr)
B1-010-001	0.0001	0.0025

表 88 La Crosse 核電廠地下埋管地下水情境 BcSOF 和劑量評估結果

Survey Unit	GW BcSOF _{BPS OBP}	Dose (mrem/yr)
S1-011-102 (CWD)	0.0002	0.0050
S2-011-101A	0.0138	0.345

表 89 La Crosse 核電廠合規劑量計算結果

Source	Base Case SOF	Dose (mrem/yr)
Max BcSOF _{BASEMENT}	0.0233	0.5813
Max BcSOF _{SOIL}	0.0408	1.0190
Max BcSOF _{BURIED PIPE}	0.1204	3.0112
Max BcSOF _{AG BUILDING}	0.0202	0.5055
Max SOF _{EGW}	0.1108	2.770
GW BcSOF _{BS OB}	0.0001	0.0025
GW BcSOF _{BPS OB}	0.0138	0.345
TOTAL	0.3294	8.2345

2.3.5 結論

La Crosse 核電廠符合釋出標準。

(三) NRC 對 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告的審查

La Crosse 核電廠除役偵檢與 NRC 審查時程綜覽請參考表 90。La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢分三個 Phase 進行，Phase 1、Phase 2 和 Phase 3 的最終狀態偵檢報告(FSSR)分別於 2019 年 8 月 29 日、2019 年 12 月 13 日，和 2020 年 1 月 28 日提交，並於 2020 年 2 月 14 日提出部分廠區釋出(PSR)的請求。NRC 於 2020 年 8 月 19 日對 La Crosse 所提交，3 個 Phase 的 FSSR 提出補充資訊要求(RAI)，La Crosse 核電廠於 2020 年 11 月 2 日回應了 NRC 所提出的 RAI，並修改和提交 Phase 2 和 Phase 3 的 FSSR，並於 2021 年 12 月 14 日提出 NRC 先完成 Class 2 和 Class 3 偵檢單元的審查的請求，以便能先釋出 Class 2 和 Class 3 偵檢單元，NRC 同意該請求，並於 2020 年 5 月 24 日通過對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元的 SER 審查，並同意相關區域的 PSR。NRC 於 2021 年 6 月 7 號、2021 年 7 月 5 號，以及 2022 年 10 月 22 日又分別提出了針對 Class 1 偵檢單元的 RAI，La Crosse 核電廠於 2022 年的 7 月 28 日、9 月 7 日，以及 10 月 20 日回覆 NRC 所提針對 Class 1 偵檢單元的 RAI。NRC 於 2023 年 2 月 23 日通過對 La Crosse 核電廠 Class 1 偵檢單元的 SER 審查，並同意相關區域的 PSR。

NRC 對 La Crosse 核電廠之 SER 審查報告分兩份，一份是針對 Class 2 和 Class 3 偵檢單元，一份針對 Class 1 偵檢單元。本計畫將先研析 NRC 針對 Class 2 和 Class 3 偵檢單元的提出的 RAI 以及 SER 審查報告，並彙整 NRC 委託 ORISE 進行之確認偵檢有關 Class 2 和 Class 3 偵檢單元的結果。

表 90 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢與 NRC 審查時程綜覽

年	2016	2019				2020			2021	2022		2023
	日期	6/28	3/11	8/29	12/13	1/28	2/14	11/02	12/14	7/28、9/7、10/20		
La Crosse 提交	提交項目	LTP 初版	LTP Rev. 1 (NRC核准)	FSSR Phase 1 初版	FSSR Phase 2 初版	FSSR Phase 3 初版	PSR	FSSR Phase 2 & 3 Rev. 1	請求NRC先完成 Class 2 & 3 SUs 的審查與核准釋出	回應NRC所提出針對Class 1的RAIs		
NRC 審查	日期							8/19	6/7、7/5	10/20	5/24	2/24
	審查項目							FSSR	FSSR	FSSR	FSSR Class 2 & 3 SUs	FSSR Class 1 SUs
	審查結果							提出 RAIs	提出針對Class 1 SUs的RAIs	FSSR SER通過核准Class 2 & 3 SUs的釋出		FSSR SER通過核准Class 1 SUs的釋出

3.1 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元提出之 RAIs

表 91 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元提出之 RAIs 與 La Crosse 核電廠之回覆

NRC 提出之 RAIs	La Crosse 核電廠之回覆
要求說明 LACBWR Crib House (Survey Unit B2-010-101) 中 3 個固定量測是否是為調查量測。	說明 NRC 所提及之 3 個固定量測並非調查量測，並修改該偵檢單元的 Release Record 補充說明。
要求說明有哪些區域有進行後續特性偵檢。	說明要持續進行特性偵檢之偵檢單元。大部分是 Class 1 偵檢單元，但包含兩個 Class 2 開放土地偵檢單元。
要求進行後續特性偵檢的區域，提供個別樣本不顯著核種劑量的詳細計算結果。	La Crosse 核電廠計算了持續進行特性偵檢之偵檢單元的不顯著核種劑量，並通過修訂納入每個偵檢單元的 Release Record 中。分析結果顯示後續特性偵檢樣本的不顯著核種劑量貢獻未超過 LTP 中假設的值(即 2.5 mrem/yr)。
要求提供部分地下埋管偵檢單元，未採集沉積物和/或碎片(Debris)樣本的理由	說明部分偵檢單元未採集沉積物和/或碎片的理由，如： - 未發現可用於採樣的沉積物或碎屑。管道開口的掃描顯示殘留活動量極低，因此直接測量已足以證明合規。 - 雖發現讀數高於預期，但經分析確認原因是陶質管中的天然放射性物質(NORM)，且未檢測到高於最低可檢測量(MDA)的放射性核種。
要求說明使用於地上建築與地下埋管偵檢儀器 MDC 與效能的詳細計算過程與適用性。	依據要求說明使用於地上建築與地下埋管偵檢儀器 MDC 與效能的詳細計算過程與適用性。
要求說明為何地上建築偵檢單元未因不顯著核種的劑量貢獻考量調整 DCGL 值	說明使用 Tc-99 進行儀器效率計算能夠補償建築物的不顯著核種劑量的原因。
針對地下埋管偵檢單元，要求將樣本中各核種的混合比例與計算 Gross OpDCGL 採用的比例進行比較。	說明在沉積物樣本中僅檢測到 Cs-137，因此不需要對核種混合比例進行調整。
要求補充說明品保 QA/QC	依據要求說明品保 QA/QC 方法與程序。
要求說明哪些偵檢數據包含背景輻射，哪些不包含背景輻射。並說明，為何未遵循 LTP 中所說「證明符合	所有地面上建築和地下埋管偵檢單元均不包含背景輻射，唯有一個地下埋管偵檢單元(S2-

NRC 提出之 RAIs	La Crosse 核電廠之回覆
無限制輻射釋放標準時不扣除背景輻射」的承諾。	011-103)例外，原因是因為若排除環境背景輻射，會產生過多的負數據。 對於開放土地區域，均不包含背景輻射。 EnergySolutions 承諾將來在 LTP 中，將清楚區分環境背景輻射和降塵背景輻射，並明確說明背景輻射如何應用於偵檢數據。
要求提供背景輻射的確認程序。	依據要求提供確認背景輻射的方法。

3.2 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元相關確認偵檢結果

NRC 和 ORAU(Oak Ridge Associated Universities)的承包商 ORISE(Oak Ridge Institute of Science and Education)，在 La Crosse 核電廠的除役過程中進行了多次的檢查和確認偵檢。所有確認偵檢的結果皆小於 OpDCGL 的 50%。表 92 為確認偵檢日期及確認偵檢範圍列表。

表 92 La Crosse 核電廠確認偵檢列表

日期	確認偵檢範圍
2017 年 1 月 23 日	未受影響土地區域
2018 年 3 月 23 日	汽機廠房 1010102 偵檢單元
2019 年 6 月 26 日	反應器廠房地下室
2020 年 1 月 10 日	剩餘開放土地區域

NRC 審查了 La Crosse 核電廠的偵檢結果、偵檢方法、用以證明殘餘輻射符合未受限制外釋標準的計劃，以及確認偵檢結果。根據數據審查、討論以及 ORAU 與 NRC 的觀察，NRC 確認，La Crosse 核電廠符合未受限制外釋標準。

3.3 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 偵檢單元之 SER 審查

3.3.1 開放土地偵檢單元之審查結果

NRC 針對 La Crosse 核電廠開放土地 Class 2 和 Class 3 偵檢單元評估結果為：FSS Release Record 可證實 La Crosse 核電廠殘餘輻射符合非限制釋出輻射標準。ORISE 確認偵檢的關注核種土壤濃度結果顯示，所有確認單元的放射性濃度均低於 OpDCGL 的 50%。Class 2 偵檢單元的最大 SOF 為 0.010，Class 3 偵檢單元的最大 SOF 為 0.021。ORISE 的確認偵檢的 SOF 結果大部分低於 La Crosse 核電廠的 FSS SOF 結果。

因此，NRC 確認釋出 La Crosse 核電廠開放土地 Class 2 和 Class 3 偵檢單元剩餘地上建築結構 La Crosse 核電廠剩餘地上建築 Class 2 和 Class 3 偵檢單元不會對符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出標準產生不利影響。

3.3.2 地下埋管偵檢單元之審查結果

NRC 針對 La Crosse 核電廠地下埋管 Class 2 和 Class 3 偵檢單元評估結果為：FSS Release Record 可證實 La Crosse 核電廠殘餘輻射符合非限制釋出標準。La Crosse 核電廠 FSSR 中，地下埋管偵檢單元的最大 SOF 為 0.1204，來自暴雨排水管 1，對應的劑量為 3.0112 mrem/yr。NRC 人員在調整輻射來源修正因子(Source Modification Factor)，並保守地未扣除背景輻射測量值後計算的地下埋管最大劑量為 8.1 mrem/yr。

對地下埋管最大劑量數據假設的差異，對是否符合外釋標準結果不會產生影響。因此，因此，NRC 確認釋出 La Crosse 核電廠地下埋管 Class 2 和 Class 3 偵檢單元剩餘地上建築結構 La Crosse 核電廠剩餘地上建築 Class 2 和 Class 3 偵檢單元不會對符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出標準產生不利影響。

3.3.3 剩餘地上建築偵檢單元之審查結果

NRC 針對 La Crosse 核電廠剩餘地上建築 Class 2 和 Class 3 偵檢單元評估結果為：FSS Release Record 可證實 La Crosse 核電廠殘餘輻射符合非限制釋出標準。La Crosse 核電廠 FSSR 中，地下埋管偵檢單元的最大 SOF 為 0.0202，對應的劑量為 0.5055 mrem/yr。

因此，NRC 確認釋出 La Crosse 核電廠剩餘地上建築 Class 2 和 Class 3 偵檢單元剩餘地上建築結構 La Crosse 核電廠剩餘地上建築 Class 2 和 Class 3 偵檢單元不會對符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出標準產生不利影響。

3.3.4 NRC 對 La Crosse 核電廠 Class 2 和 Class 3 FSSR 之 SER 總結

NRC 確認 La Crosse 核電廠執照範圍內的 Class 2 和 Class 3 偵檢單元的除役作業已完成，並符合 LTP 規定的釋出標準。NRC 批准釋出上述偵檢單元，將其從 La Crosse 核電廠執照中移除。

六、我國核電廠解除除役管制要項建議

因各國之法規與做法皆有不同之處，所提之建議事項僅供國內監管單位參考。

依據對蒐集文件的研析結果，針對我國核電廠申請解除除役管制之文件內容及相關報告審查要項之管制重點，提出建議事項如下。更多有關最終狀態偵檢規劃審查的相關建議可參考原能會「美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析」計畫的期末報告。

1. 美國 Zion 和 La Crosse 核電廠進行最終狀態偵檢時皆分階段(Phase)進行，Zion 核電廠分 4 個 Phase，La Crosse 核電廠分 3 個 Phase。相關指引並未規範各 Phase 要進行之偵檢，從實務上可以看出，兩個電廠的 Phase 1 主要進行開放土地偵檢單元的偵檢，Phase 2 主要進行建築結構偵檢單元的偵檢，之後的 Phase 則進行尚未完成之開放土地偵檢單元的偵檢。這種分階段提交的方法旨在早期向 NRC 提供有關除污和偵檢作業的詳細資訊，以根據反饋改進流程。這種分階段提交方法目的在最終狀態偵檢作業的早期就能提供 NRC 相關資訊，以儘早獲得 NRC 的意見審查回饋，使能更有效地進行修正。

2. 最終狀態偵檢報告分兩類提供給 NRC 審查，一為偵檢單元的 Release Record，另一為各 Phase 的最終狀態偵檢報告(FSSR)。偵檢單元的 Release Record 中完整記錄個別偵檢單元的輻射偵檢結果，將作為相關 FSSR 附錄，FSSR 則供偵檢結果的摘要和總結，以證明該區域符合未限制使用的釋出標準。
3. 最終狀態偵檢報告審查的項目包含：
 - 1) 偵檢單元中所有的量測值結果，包含掃描、樣本、固定量測等，並評估根據最終狀態偵檢規劃，量測結果是否已觸發要進行調查、重新分級或重新偵檢，以及是否有依據規畫進行相對應的活動。
 - 2) 偵檢單元是否有依據最終狀態偵檢規劃進行 HTD 核種分析和品質管控(QC) 偵檢。
 - 3) 若有進行獨立的確認偵檢，是否確認偵檢的結果皆小於 50%的 OpDCGL。
 - 4) 偵檢單元的掃描範圍比例是否符合其區域分級之規範。
 - 5) 偵檢儀器效能和掃描儀器的 MDC 是否足夠(需小於 50%的 OpDCGL)。
 - 6) 收集的樣本數量是否足夠。
 - 7) 是否有遵守品質管控計劃。
 - 8) 偵檢結果與釋出標準的比較以及統計測試的結果。
 - 9) 是否依照最終狀態偵檢規劃進行合規性劑量計算，採用的參數是否合適，以及合規劑量計算結果是否符合釋出標準。
4. Zion 核電廠的部分偵檢單元在進行最狀態偵檢後，將核電廠以為未受污染的混凝土塊堆放在其上，造成 DRP 污染，使得最終狀態偵檢的執行和審查進度大幅延後。建議核電廠的偵檢單元在進行狀態偵檢後，應確保不會因置放可能有來自核電廠運轉之放射性物質，造成再次污染。

七、參考文獻

1. NUREG-1575, Rev. 1 Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM). August 2000.
2. NUREG-1757 Vol. 2, Rev. 2 Consolidated Decommissioning Guidance—Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria. Final Report. July 2022.
3. Zion LTP, Rev. 2., February 7, 2018.
4. Zion Phase 1 FSSR, Rev. 2, February, 2020.
5. Zion Phase 2, Part 1 FSSR, Rev. 2, November, 2020.
6. Zion Phase 2, Part 2 FSSR, June, Rev. 1, 2020.
7. Zion Phase 3 FSSR, Rev. 1, September, 2022.
8. Zion Phase 4 FSSR, Rev. 2, September, 2022.
9. NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2 & 3, April, 2020.
10. NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2, 3 & 4, November, 2020.
11. NRC SER to Zion FSSR - Phase 1, March, 2019.
12. NRC SER to Zion FSSR - Phase 1 Revision 1, October, 2019.
13. NRC SER to Zion FSSR All, November, 2023.
14. La Crosse LTP, Revision 1., March, 2019.
15. La Crosse Phase 1 FSSR, Rev. 1, August, 2019.
16. La Crosse Phase 2 FSSR, Rev. 1, October, 2020.
17. La Crosse Phase 3 FSSR, Rev. 1, October, 2020.
18. NRC RAIs Related to La Crosse FSSR, August, 2020.
19. NRC SER to La Crosse Class 2 & 3 FSSR SUs and Approval of PSR, May, 2022.
20. La Crosse 回覆 NRC 對 FSSR 的 RAIs, November, 2020.
21. 行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告，計畫名稱：111 年度 核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析，子項計畫二-分項 2：核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析，中華民國 111 年 12 月。
22. 行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告，計畫名稱：112 年度 美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之先期研析，中華民國 112 年 12 月。