

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進階研析(定稿版)

案號： NSC11311079L

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 114 年 12 月

摘要

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。

本計畫研究內容為蒐集美國已完成執照終止解除管制之核電廠，其提交執照終止相關報告與申請解除管制之實務經驗，並彙整及研析美國核管會對第 1 級「受輻射影響區」解除管制申請案例之安全審查報告、審查意見及業者之回應內容等。目的為更全面的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，以提供國內管制機關完整掌握核電廠除役期間與解除除役管制之考量要項資訊，強化對於解除除役管制之安全審查與管制能量。

Abstract

In accordance with the Nuclear Reactor Facilities Regulation Act and related regulations, within 6 months after the completion of the nuclear reactor facility decommissioning plan, the licensee must submit a post-decommissioning site environmental radiation survey report and a decommissioning completion report. These documents are to be submitted for review to the competent authority. Upon approval of the review, the decommissioning regulations will be lifted.

This project will collect practical experiences and related reports submitted by U.S. nuclear power plants that have completed license termination and regulatory release. It also involves compiling and analyzing the U.S. Nuclear Regulatory Commission's (NRC) safety evaluation reports, review comments, and licensees' responses concerning Class 1 Impacted Area regulatory release applications. The aim is to gain a more comprehensive understanding of international nuclear power plant decommissioning cases, critical decommissioning technologies, and practical experiences. This knowledge is intended to provide regulatory authorities with complete information on considerations during the decommissioning process and regulatory release, thereby strengthening the capacity for safety reviews and regulation associated with decommissioning release.

目錄

摘要	.....	i
目錄	.....	iii
圖目錄	.....	x
表目錄	.....	xii
專有名詞	.....	xv
一、前言	.....	1
1.1 計畫背景與目的	.....	1
1.2 工作項目	.....	1
二、蒐集及研析文獻	.....	2
三、最終狀態偵檢規劃指引與規劃實務	.....	4
3.1 最終狀態偵檢目的	.....	4
四、最終狀態偵檢簡介	.....	5
4.1 最終狀態偵檢目的	.....	5
4.2 最終狀態偵檢指引與規劃	.....	5
4.3 最終狀態偵檢區域分級	.....	6
4.4 偵檢量測方法	.....	7
4.4.1 掃描(Scanning)	.....	7
4.4.2 固定量測(Fixed Measurements)	.....	7
4.4.3 取樣(Sampling)	.....	8
4.4.4 偵檢儀器選擇之規範	.....	9
4.5 品質管控(QC)偵檢	.....	9
4.5.1 重複量測和偵檢(Replicate Measurements and Surveys)	.....	9
4.5.2 複本樣本和分割樣本(Duplicate and Split Samples)	.....	9
4.6 關注核種(ROC)	.....	10

4.7	劑量模型(Dose Model)	11
4.8	DCGL	11
4.9	SOF(Sum of Fractions)	12
4.10	調查基準(Investigation Level)	12
4.11	偵檢單元最終狀態偵檢結果評估	13
4.11.1	數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)和初步審查	13
4.11.2	偵檢結果統計檢定	13
4.11.3	EMC	13
4.11.4	確認偵檢單元是否需要重新除污/重新分級/重新偵檢	14
4.11.5	判斷偵檢單元是否符合輻射標準	16
4.12	合規劑量(Compliance Dose)計算	17
4.12.6	地下水劑量計算方法	17
4.12.7	地下水以外輻射媒介之偵檢單元平均劑量計算方法	18
4.13	除污作業輔助偵檢(Remedial Action Support Survey, RASS)	18
五、	La Crosse 核電廠第 1 級最終狀態偵檢	19
5.1	廠址簡介	19
5.2	除役時程綜覽	20
5.3	廠房與建築之拆除	21
5.4	最終狀態輻射偵檢規劃與設計	22
5.4.1	開放土地區域分級	22
5.4.2	關注核種(ROC)	23
5.4.2.1	難測核種(HTD)	24
5.4.3	潛在殘餘輻射媒介	24
5.4.4	廠址未來使用情境與關鍵群體平均成員	24
5.4.5	劑量模型(Dose Model)	25

5.4.5.1	回填地下室劑量模型(Basement Fill Model, BFM)	25
5.4.5.2	土壤劑量模型	25
5.4.5.3	地下埋管劑量模型	26
5.4.5.4	地下水劑量評估方法	26
5.4.5.5	保留地上建築劑量模型	27
5.4.5.6	替代使用情境(Alternate Scenario)	27
5.4.6	DCGL	28
5.4.6.1	回填地下室 DCGL	29
5.4.6.2	土壤 DCGL	30
5.4.6.3	地下埋管 DCGL	30
5.4.6.4	保留地上建築 DCGL	31
5.4.7	面積因子(Area Factor)	31
5.4.8	偵檢單元之偵檢結果評估	31
5.4.9	地下結構偵檢結果評估	32
5.4.10	證明合規劑量(Demonstrating Compliance with Dose Criterion)	32
5.5	最終狀態偵檢進行階段	33
5.6	La Crosse 核電廠第 1 級偵檢單元最終狀態偵檢結果	37
5.6.1	偵檢單元分類與偵檢單元編號	37
5.6.2	第 1 級土壤偵檢單元最終狀態偵檢	37
5.6.2.1	偵檢量測方法	38
5.6.2.2	調查基準	38
5.6.2.3	掃描涵蓋率及取樣樣本數	39
5.6.2.4	挖掘區域之偵檢規範	40
5.6.2.5	數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)	40

5.6.3	第 1 級回填地下室偵檢最終狀態偵檢	40
5.6.3.1	偵檢量測方法	41
5.6.3.2	調查基準	41
5.6.3.3	掃描涵蓋率及量測點數	41
5.6.3.4	數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation).....	42
5.6.4	第 1 級地下埋管偵檢單元最終狀態偵檢	42
5.6.4.1	偵檢量測方法	43
5.6.4.2	調查基準	43
5.6.4.3	掃描涵蓋率及量測點數	43
5.6.4.4	數據異常/升高之掃描結果以及調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)	44
5.6.5	第 1 級保留地上建築偵檢單元最終狀態偵檢	44
5.6.6	現存地下水(Existing Groundwater)偵檢	44
5.6.6.1	地下水監測方法	44
5.6.6.2	1983 年汽機廠房下方的地下水污染事件	45
5.6.6.3	除役作業造成之地下水污染	45
5.6.6.4	地下水劑量評估	46
5.7	La Crosse 核電廠合規劑量	46
5.7.6.1	土壤合規劑量	47
5.7.6.2	回填地下室合規劑量	48
5.7.6.3	地下埋管合規劑量	49
5.7.6.4	保留地上建築合規劑量	50
5.7.6.5	現存地下水合規劑量(Existing Groundwater Dose)	51
5.7.6.6	La Crosse 核電廠整體合規劑量	51

5.8	NRC 對 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告的審查與 LS 之回覆	51
5.8.1	審查時程綜覽	52
5.8.2	補充資訊要求(RAI).....	52
5.8.2.1	NRC 於 2020 年 8 月提出之 RAI 與 LS 之回覆	52
5.8.2.2	NRC 於 2022 年針對第 1 級偵檢單元提出之澄清要求與 LS 之回覆.....	54
5.8.3	確認偵檢(Confirmatory Survey).....	55
5.8.4	安全評估審查(SER).....	57
六、	Zion 核電廠第 1 級最終狀態偵檢	58
6.1	廠址簡介	58
6.2	除役時程綜覽	60
6.3	廠房與建築之拆除	62
6.4	最終狀態輻射偵檢規劃與設計	62
6.4.1	開放土地區域分級	62
6.4.1.1	開放土地初始區域分級	62
6.4.1.2	開放土地調整後區域分級	64
6.4.2	關注核種(ROC)與難測核種(HTD).....	65
6.4.2.1	難測核種替代比值	66
6.4.3	潛在殘餘輻射媒介	66
6.4.4	廠址未來使用情境與關鍵群體平均成員	66
6.4.5	劑量模型(Dose Model)	67
6.4.5.1	回填地下室劑量模型(Basement Fill Model, BFM)	67
6.4.5.2	土壤劑量模型	68
6.4.5.3	地下埋管劑量模型	68
6.4.5.4	地下水劑量評估方法	68
6.4.6	DCGL.....	69

6.4.6.1	回填地下室 DCGL.....	69
6.4.6.2	土壤 DCGL.....	70
6.4.6.3	地下埋管 DCGL.....	70
6.4.7	面積因子(Area Factor)	71
6.4.8	偵檢單元之偵檢結果評估	72
6.4.9	證明合規劑量(Demonstrating Compliance with Dose Criterion).....	72
6.5	最終狀態偵檢進行階段	73
6.6	Zion 核電廠第 1 級偵檢單元最終狀態偵檢結果.....	78
6.6.1	第 1 級開放土地偵檢單元最終狀態偵檢結果	78
6.6.1.1	偵檢量測方法	78
6.6.1.2	調查基準	78
6.6.1.3	掃描涵蓋率及取樣樣本數	78
6.6.1.4	挖掘區域之偵檢規範	82
6.6.1.5	第三階段 FSSR.....	82
6.6.1.6	第四階段 FSSR.....	84
6.6.1.7	挖掘區域之 FSS.....	85
6.6.1.8	DRP(Discrete Radioactive Particle)污染	87
6.6.1	第 1 級地下室、嵌管及穿管偵檢單元最終狀態偵檢結果	89
6.6.1.1	偵檢量測方法	92
6.6.1.2	調查基準	93
6.6.1.3	掃描涵蓋率及量測點數	93
6.6.1.4	數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation).....	95
6.6.2	第 1 級地下埋管偵檢單元	97
6.6.3	現存地下水(Existing Groundwater)偵檢結果	97

6.7	Zion 核電廠合規劑量評估	97
6.7.1	土壤合規劑量	97
6.7.2	地下室、嵌管及穿管合規劑量	98
6.7.3	地下埋管合規劑量	98
6.7.4	現存地下水合規劑量(Existing Groundwater Dose)	99
6.7.5	Zion 核電廠整體合規劑量	99
6.8	NRC 對 Zion 核電廠最終狀態偵檢報告的審查與 ZS 之回覆	100
6.8.1	審查時程綜覽	100
6.8.2	補充資訊要求(RAI).....	101
6.8.2.1	NRC 於 2019 年 5 月針對第一階段 FSSR 初版提出之 RAI 與 ZS 之回覆...	101
6.8.2.2	NRC 於 2020 年 4 月針對第二及第三階段 FSSR 提出之 RAI 與 ZS 之回覆	102
6.8.2.3	NRC 於 2020 年 11 月針對第二至第四階段 FSSR 提出之 RAI 與 ZS 之回覆	103
6.8.2.4	ZS 針對 RAI 有關 DRP 問題之回應彙整.....	105
6.8.2.5	ZS 針對 DRP 之調查方法與結果	108
6.8.3	確認偵檢(Confirmatory Survey).....	112
6.8.4	安全評估審查(SER).....	119
七、	我國核電廠解除除役管制要項建議	120
八、	參考文獻	123

圖目錄

圖 1 美國核能電廠除役概要程序圖.....	4
圖 2 MARSSIM 除役輻射偵檢作業程序.....	5
圖 3 La Crosse 核電廠原執照範圍與主要設施.....	19
圖 4 開放土地偵檢單元初始分級.....	22
圖 5 開放土地偵檢單元最終分級.....	23
圖 6 La Crosse 核電廠第一階段偵檢單元位置圖.....	34
圖 7 La Crosse 核電廠第二階段偵檢單元位置圖.....	35
圖 8 La Crosse 核電廠第三階段偵檢單元位置圖.....	36
圖 9 La Crosse 核電廠地下水取樣井位置.....	45
圖 10 Zion 核電廠原執照範圍.....	59
圖 11 Zion 核電廠輻射管制區.....	59
圖 12 Zion 核電廠安全管制區.....	60
圖 13 Zion 核電廠初始分級 - 未受輻射影響區域.....	63
圖 14 Zion 核電廠初始分級 - 受輻射影響第 3 級區域.....	64
圖 15 Zion 核電廠初始分級 - 受輻射影響第 1 級和第 2 級區域.....	64
圖 16 Zion 核電廠調整後分級-受輻射影響第 3 級區域.....	64
圖 17 Zion 核電廠調整後分級 - 受輻射影響第 1 級和第 2 級區域(除右圖上方標示之第 2 級和第 3 級偵檢單元區域).....	65
圖 18 Zion 核電廠第一階段開放土地偵檢單元位置圖.....	74
圖 19 Zion 核電廠第三階段開放土地偵檢單元位置圖.....	75
圖 20 Zion 核電廠第四階段開放土地偵檢單元位置圖.....	76
圖 21 Zion 核電廠第二階段第一部份偵檢單元位置圖.....	77
圖 22 Zion 核電廠第二階段第二部份偵檢單元示意圖.....	77
圖 23 Zion 核電廠挖掘區偵檢單元.....	86

圖 24 Zion 核電廠第二階段偵檢單元示意圖	91
圖 25 Zion 核電廠輔助廠房穿管圖示	91
圖 26 Zion 核電廠輔助廠房拆除前 542 英尺標高平面圖	92
圖 27 Zion 核電廠 542 英尺標高 ISOCS 系統量測照片	95
圖 28 Zion 核電廠 CCDD 存放區域與運輸路徑圖	110
圖 29 使用 DRP DQOs(使用 0.25 m/s 慢速掃描)之偵檢單元(淺紫色區).....	111
圖 30 Zion 核電廠 FSS 偵檢單元曾識別出的 DPR 之位置.....	117
圖 31 Zion 核電廠確認偵檢偵檢單元與掃描覆蓋率	118

表目錄

表 1 NRC 指引文獻	2
表 2 Zion 核電廠最終狀態偵檢相關文獻	2
表 3 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢相關文獻	3
表 4 MARSSIM 中對最終狀態偵檢各區域分級區域大小建議	6
表 5 MARSSIM 中對最終狀態偵檢各區域分級偵檢涵蓋範圍建議	7
表 6 複本樣本和分割樣本 QC 偵檢接受評估表	10
表 7 最終狀態偵檢調查基準	13
表 8 重新除污標準與建議行動	14
表 9 重新分級標準與建議行動	15
表 10 重新偵檢標準與建議行動	16
表 11 判斷一偵檢單元是否符合輻射標準方法	17
表 12 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢時程綜覽	21
表 13 La Crosse 核電廠 ROC 核種混合比例	23
表 14 La Crosse 核電廠替代比值計算方法	24
表 15 La Crosse 核電廠 HTD 替代比值	24
表 16 La Crosse 核電廠地下水劑量轉換因子	27
表 17 La Crosse 核電廠保留地上建築之 ROC 篩選值	27
表 18 La Crosse 核電廠各輻射媒介劑量貢獻率設定	28
表 19 La Crosse 核電廠反應器廠房回填地下室各使用情境經調整之 BcDCGL	29
表 20 La Crosse 核電廠 WGTV 回填地下室各使用情境經調整之 BcDCGL	29
表 21 La Crosse 核電廠回填地下室經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL	30
表 22 La Crosse 核電廠土壤經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL	30
表 23 La Crosse 核電廠地下埋管經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL	30
表 24 La Crosse 核電廠地下埋管經調整之 OpDCGL	31

表 25 La Crosse 核電廠保留地上建築經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL	31
表 26 La Crosse 核電廠面積因子	31
表 27 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢各階段偵檢單元數	34
表 28 La Crosse 核電廠第 1 級土壤偵檢單元列表	37
表 29 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢第 1 級土壤偵檢單元樣本數	39
表 30 La Crosse 核電廠第 1 級回填地下室偵檢單元列表	40
表 31 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢回填地下室偵檢單元 ISOCS 量測點數	42
表 32 La Crosse 核電廠第 1 級地下埋管偵檢單元列表	42
表 33 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢地下埋管偵檢單元量測數	44
表 34 La Crosse 核電廠土壤偵檢單元平均劑量	48
表 35 La Crosse 核電廠回填地下室偵檢單元平均劑量	49
表 36 La Crosse 核電廠地下埋管偵檢單元平均劑量	50
表 37 La Crosse 核電廠「其他地下埋管」之原位地下水情境之劑量	50
表 38 La Crosse 核電廠保留地上建築偵檢單元平均劑量	50
表 39 La Crosse 核電廠地下水劑量評估結果	51
表 40 La Crosse 核電廠合規劑量	51
表 41 ORISE 對 La Crosse 核電廠進行之確認偵檢結果彙整	55
表 42 Zion 核電廠最終狀態偵檢時程綜覽	62
表 43 Zion 核電廠圍阻體與輔助廠房 ROC 核種及混合比例	66
表 44 Zion 核電廠替代比值表(FSS 採用 Max 欄位值)	66
表 45 Zion 核電廠 BFM 地下水曝露係數	68
表 46 Zion 核電廠回填地下室經調整之 BcDCGL	69
表 47 Zion 核電廠回填地下室經調整之 OpDCGL	70
表 48 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 BcDCGL	70
表 49 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 OpDCGL	70

表 50 Zion 核電廠地下埋管經調整之 BcDCGL.....	71
表 51 Zion 核電廠地下埋管經調整之 OpDCGL	71
表 52 Zion 核電廠表土面積因子	72
表 53 Zion 核電廠次表土面積因子	72
表 54 Zion 核電廠最終狀態偵檢各階段偵檢單元數	74
表 55 Zion 核電廠第三階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數	80
表 56 Zion 核電廠第四階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數	81
表 57 Zion 核電廠第四階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數(續)	82
表 58 Zion 核電廠第三階段開放土地偵檢單元偵檢結果彙整	84
表 59 Zion 核電廠第四階段開放土地偵檢單元偵檢結果彙整	85
表 60 Zion 核電廠第二階段，第一部分偵檢單元(共 7 個地下室)	90
表 61 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢回填地下室偵檢單元 ISOCS 量測點數	94
表 62 Zion 核電廠指派回填 CCDD 劑量	98
表 63 Zion 核電廠地下室各結構面積加權之 BcSOF 與劑量評估結果	98
表 64 Zion 核電廠地下埋管偵檢單元劑量評估結果	99
表 65 Zion 核電廠合規劑量	99
表 66 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR 提出之 RAI	101
表 67 ORISE 對 Zion 核電廠進行之確認偵檢結果彙整	112

專有名詞

1. NRC ADAMS(Agencywide Documents Access and Management System)：NRC 文件存取和管理系統。
2. TLP(License Termination Plan)：執照終止計畫。
3. ROC(Radionuclides of Concern)：關注核種。
4. AMAG(Average Member of the Critical Group)：關鍵群體的平均成員。
5. LACBWR(La Crosse Boiling Water Reactor)：La Crosse 沸水式反應器。
6. LSE(LACBWR Site Enclosure)：LACBWR 廠內圍欄區域。
7. DPC(Dairyland Power Cooperative)：Dairyland 電力公司。
8. ISFSI(Independent Spent Fuel Storage Installation)：用過核子燃料乾式貯存設施。
9. ROC(Radionuclides of Concern)：關注核種。
10. FSS(Final Status Survey)：最終狀態偵檢。
11. FSSR(Final Status Survey Report)：最終狀態偵檢報告。
12. SU(Survey Unit)：偵檢單元。
13. PSR(Partial Site Release)：部分廠址釋出。
14. DRP(Discrete Radioactive Particles)：離散的放射性物質粒子。
15. RAI(Request Additional Information)：補充資訊要求。
16. SER(Safety Evaluation Report)：安全審查報告。
17. MDC(Minimum Detectable Concentration)：最小可檢測濃度。

一、前言

1.1 計畫背景與目的

依據美國聯邦法規 10 CFR 50.82 “Termination of License”的規定，除役核電廠在執照終止階段，須提交執照終止計畫(LTP, License Termination Plan)至監管單位進行審查。執照終止計畫(LTP)的目的為說明核電廠廠區的殘餘輻射達成非限制使用標準，釋出廠區並終止執照之輻射標準的程序。並且，除役核電廠應依照通過監管單位審查之核電廠 LTP 內之偵檢規畫進行最終狀態輻射偵檢與評估。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」，主要要進行的作業亦為針對核電廠除役後之最終狀態進行輻射偵檢規劃、執行與評估，目的是確認與證明除役後之核電廠廠址之殘餘輻射符合法規規範，以確保未來廠址作為其他用途之輻射安全性。經最終狀態輻射偵檢評估確認廠址的殘餘輻射符合法規規範後，方可解除相關除役管制。

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)為最終狀態偵檢規劃著主要指引之一，依據該手冊，為增進除役資源之效益，除役核電廠應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」再依放射性污染之可能性由高至低區分為第 1 級、第 2 級與第 3 級等區域。

本研究團隊於 112~113 年已就美國除役核電廠廠址「未受輻射影響區」及第 2 級與第 3 級「受輻射影響區」進行研析，114 年將再就第 1 級「受輻射影響區」進一步蒐集資訊，目的為更全面的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，以提供國內管制機關完整掌握核電廠除役期間與解除除役管制之考量要項資訊，強化對於解除除役管制之安全審查與管制能量

1.2 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 1 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 1 級輻射偵檢結果報告。
3. 研析並彙整摘要 NRC 對 Zion 核電廠第 1 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 1 級輻射偵檢報告。
5. 研析並彙整摘要 NRC 對 La Crosse 核電廠第 1 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。

表 1 NRC 指引文獻

文獻名稱	版本
Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM)[1]	更一版
NUREG-1757, Volume 2 Consolidated Decommissioning Guidance – Characterization, Survey, and Determination of Radiological Criteria, Final Report[2]	更一版

表 2 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

文獻名稱	版本
LS 提交	
La Crosse License Termination Plan(LTP)[3]	更三版
La Crosse Phase 1 FSSR[4]	初版
La Crosse Phase 2 FSSR[5][6]	初版~更一版
La Crosse Phase 3 FSSR[7][8]	初版~更一版
NRC 對 La Crosse 核電廠 FSSR 的審查與 LS 之回覆	
NRC RAI Related to La Crosse FSSR[9]	
NRC RAI 與 LS 回覆 RAI[10]~[13]	四份
NRC SER to La Crosse Class 2 & 3 FSSR SUs and Approval of PSR[14]	
NRC SER to La Crosse Class 1 FSSR SUs and Approval of PSR[15]	
確認偵檢報告	
ORISE 確認偵檢報告[16]~[20]	五份

表 3 Zion 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

文獻名稱	版本
ZS 提交	
Zion License Termination Plan(LTP)[21]	更二版
Zion Phase 1 FSSR[22][23][24]	初版~更二版
Zion Phase 2, Part 1 FSSR[25][26][27]	初版~更二版
Zion Phase 2, Part 2 FSSR[28][29]	初版~更一版
Zion Phase 3 FSSR[30][31]	初版~更一版
Zion Phase 4 FSSR[32][33]	初版~更二版
NRC 對 Zion 核電廠 FSSR 之審查	
NRC SER to Zion FSSR Phase 1[34][35]	初版~更一版
ZS 回覆 NRC SER to Zion FSSR Phase 1 的 RAIs[36]	
NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2 & 3[37]	
NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2, 3 & 4[38]	
ZS 回覆 NRC 的 RAIs[39]~[43]	五份
NRC SER to Zion FSSR All[44]	
確認偵檢報告	
ORAU 確認偵檢報告[45](未受輻射影響區)	
ORAU 確認偵檢報告[46]	
ORISE 確認偵檢報告[47]~[54]	八份

三、最終狀態偵檢規劃指引與規劃實務

3.1 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)

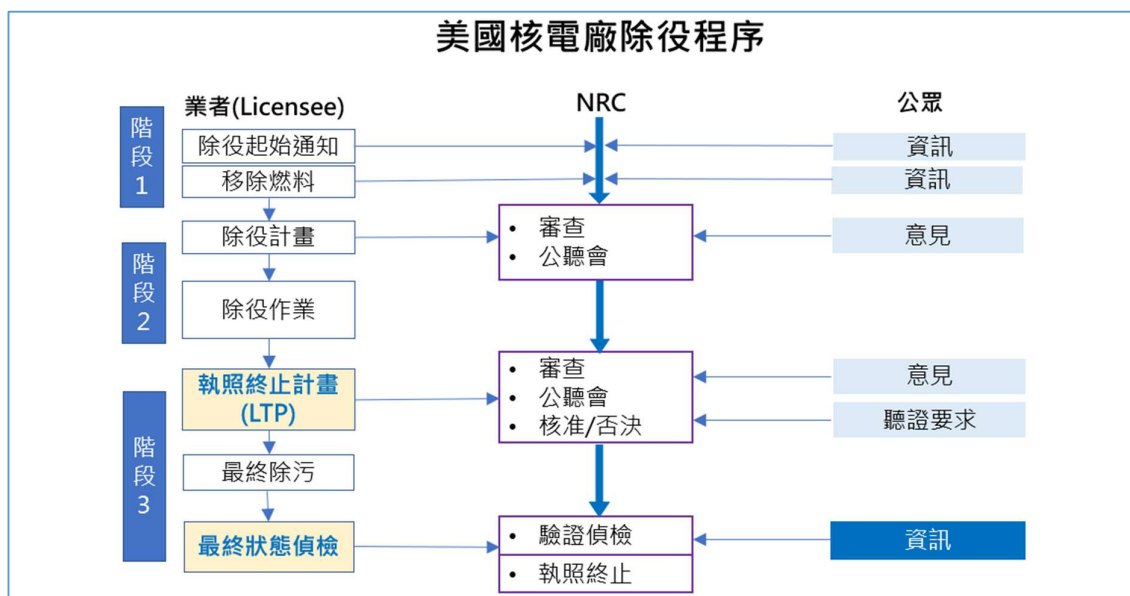


圖 1 美國核能電廠除役概要程序圖

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 1 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。

四、最終狀態偵檢簡介

4.1 最終狀態偵檢目的

最終狀態偵檢的目的為證明除役核電廠在完成拆除與除污後，廠址的殘餘符合符合法規(10 CFR 20.1402)所訂定之非限制使用外釋之輻射標準，並中止執照。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。

4.2 最終狀態偵檢指引與規劃

MARSSIM(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual) 以及 NUREG-1757, Volume 2 是最終狀態偵檢的主要指引文件。

MARSSIM 由四個聯邦機構(美國國防部 (DOD)、能源部 (DOE)、環境保護局 (EPA) 和核能管理委員會 (NRC))協同撰寫，主要目的是提供一個一致的方法，用於進行除役核電廠廠房建築及土壤最終狀態偵檢的規劃與執行，以及偵檢結果的評估。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。

NUREG-1757 是一套由 NRC 合併眾多除役指導文件而成的三卷本 NUREG 系列報告，涵蓋了以下三個主要主題：

1. 除役程序(Volume 1)：說明除役程序。
2. 特性描述、偵檢和輻射標準(Volume 2)：指導如何符合執照終止的輻射標準，以及提供有關除役計畫 (DP)、執照終止計畫 (LTP)、最終狀態調查 (FSS) 和其他提交給 NRC 的技術除役報告指引。
3. 財務保證、記錄保存和時效性(Volume 3)：說明除役的財務要求和時效性。

美國除役核電廠需參照 MARSSIM 與 NUREG-1757 的指引撰寫執照終止計畫(LTP)。在 LTP 內容中，包含廠址歷史評估和特性偵檢結果的摘述、最終狀態偵檢計畫，以及評估最終狀態偵檢結果是否符合輻射標準的方法。LTP 經 NRC 審查通過後，核電廠即應依照 LTP 之規畫進行最終狀態偵檢。

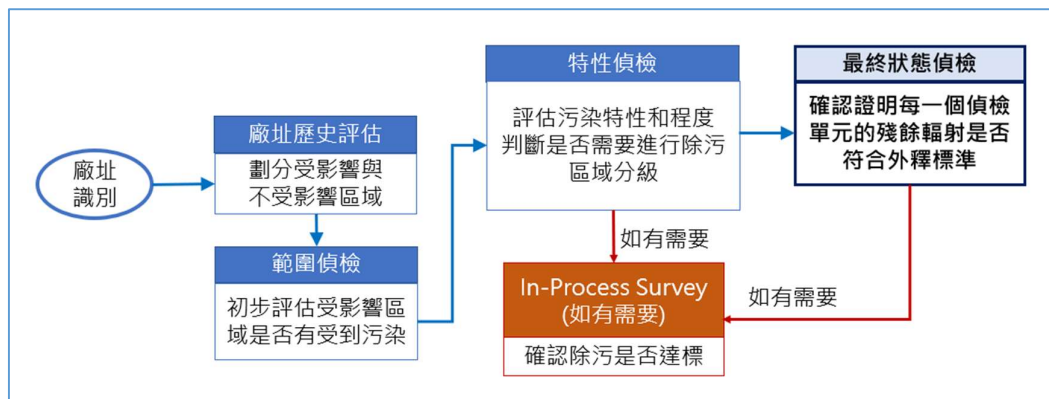


圖 2 MARSSIM 除役輻射偵檢作業程序

4.3 最終狀態偵檢區域分級

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。

圖 2 的除役輻射偵檢作業程序中可以看到，在廠址歷史評估後，會先將依據輻射污染可能性將預定要終止執照區域初步劃分為受輻射影響及未受輻射影響區域，並將區域劃分為偵檢單元(Survey Unit)進行特性偵檢，再根據特性偵檢結果，評估各偵檢單元的污染特性和程度，據以判斷是否需要除污或調整區域分級。若特性偵檢的結果顯示偵檢單元需進行除污，該偵檢單元應進行除污後，並在除污後進行除污輔助偵檢(In-Process Survey)，以確認除污是否有達到標準。未受輻射影響區域經特性偵檢後，若確認其區域分級合適，則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。

受輻射影響區域又分為三級，依照殘餘輻射污染可能性由大到小，分為第 1 級(Class 1)、第 2 級(Class 2)和第 3 級(Class 3)。受輻射影響區域需進行最終狀態偵檢，且不同的區域分級的最終狀態偵檢規範不同。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。更多有關重新分級/重新除污/重新偵檢標準，可參考本計畫「113 年美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之基礎研析期末報告」第三章的 3.3 節。

Class 1 偵檢單元，可及表面應進行 100%的掃描；Class 2 偵檢單元，可及的表面應進行 10%至 100%的掃描，實際比例取決於污染可能性；Class 3 偵檢單元，通常會在判斷污染可能性最大的區域進行表面掃描(如開放土地區域的排水匯集區)。MARSSIM 建議各區域分級的範圍大小與偵檢涵蓋範圍規範請參考表 4 和表 5。

表 4 MARSSIM 中對最終狀態偵檢各區域分級區域大小建議

區域分級	土地	建築與結構
Class 1	~ 2,000 m ²	~ 100 m ²
Class 2	2,000 ~ 10,000 m ²	100 ~ 1,000 m ²
Class 3	無限制	無限制

表 5 MARSSIM 中對最終狀態偵檢各區域分級偵檢涵蓋範圍建議

區域分級	建築結構(Structures)		開放土地	
	表面掃描	表面活度量測	表面掃描	表面活度量測
Class 1	100%	使用統計檢定計算所需量測點數(如有發現輻射偏高區域,則需增加額外量測數)	100%	使用統計檢定計算所需量測點數(如有發現輻射偏高區域,則需增加額外量測數)
Class 2	10~100% (上牆或天花板 10~50%) 系統或判斷決定	使用統計檢定計算所需量測點數	10~100% 系統或判斷決定	使用統計檢定計算所需量測點數
Class 3	判斷決定 (Judgemental)		判斷決定 (Judgemental)	

4.4 偵檢量測方法

在最終狀態偵檢計畫中,偵檢量測的目的在於收集數據,以證明廠址符合非限制性釋出的輻射標準,這些方法主要依循 MARSSIM 的指導原則,包括掃描、固定量測與取樣。

4.4.1 掃描(Scanning)

掃描是一種定性(Qualitative)量測方法,主要目的是為了找出與定位殘留放射性偏高的小區域(Small, Elevated Areas)。在偵檢規劃階段即要確認掃描結果的調查基準,以作為識別活度偏高區域的基準。偵檢人員使用可攜式輻射偵檢器靠近表面移動(例如,在距離地表約 15 公分處以 0.5 公尺/秒的速度移動),一旦發現高活度區域,技術人員會減慢速度或暫停,嘗試隔離該區域並進行標記,以便後續進行更精確的(定量)偵檢或除污。

掃描通常在固定量測或取樣之前進行,除了地下室結構的最終狀態偵檢。地下室結構的最終狀態偵主要使 ISOCS((In Situ Object Counting System)靜態量測,由於單次 ISOCS 量測覆蓋的表面積很大(標稱範圍為 10-30 平方公尺),因此無需進行傳統掃描。

對於開放土地表面 (Open Land Areas) 的加馬掃描,通常使用 碘化鈉 (NaI) 加馬閃爍偵檢器,掃描速度通常設定為每秒約 0.5 公尺,且偵檢器維持在距表面約 15 公分的距離內。掃描量測儀器的選擇重要要素之一是要確認儀器有能力辨別輻射活度是否超過調查基準,確認方法為根據最終狀態偵檢前進行之掃描時計算出來的最小可檢測濃度 (MDC)值來判斷掃描儀器量測靈敏度。

4.4.2 靜態量測(Static Measurements)

靜態量測又稱固定量測或直接量測(Direct Measurement),主要用於偵測結構表面、混凝土或瀝青上的污染量。靜態量測的操作方法是將偵檢器放置在靠近被測表面的位置,量測一定的時間以獲取數據。單次量測的技術時間通常是 1 到 2 分鐘,這通常能提供低於調查基準或最低 MDC 的偵檢能力。

靜態量測主要分為以下幾種：

1. 表面貝他與阿法量測

使用於測量建築物結構表面(如地板、牆壁、天花板、屋頂)以及瀝青或混凝土鋪面上的總污染程度。通常使用面積約 100 cm² 或更大的閃爍偵檢器(Scintillation detectors)或氣體流動比例計數器(Gas-flow proportional detectors)，例如 Ludlum 43-68(氣體流動比例)或 Ludlum 44-116(貝他閃爍)。執行方式為將偵檢器放置在距離表面一定高度，於預定位置進行量測。

2. ISOCS(In Situ Object Counting System)

ISOCS 是最終狀態偵檢時，地下室結構表面的主要偵檢儀器。

主要使用 Canberra ISOCS，這是一種高純度鍍(HPGe)偵檢器。執行方式為將 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。

單次 ISOCS 量測覆蓋的表面積很大(標稱範圍為 10 到 30 平方公尺)，當 ISOCS 探測器與表面保持 3 m 的距離時，對應的視野(FOV, Field of View)達 28 m²。對於因物理限制無法實現 28 m² 視野的偵檢單元，會減少探測器與輻射來源的距離，從而縮小視野，並須增加了測量次數，以確保達到所需的 FSS 面積覆蓋。

此方法可直接用於確定混凝土深度的總活度，並能進行幾何形狀的綜合不確定度分析。

3. 地下埋管量測 (Buried Pipe Measurements)

最終狀態調查的地下埋管偵檢使用碘化銫(CsI)或碘化鈉(NaI)偵檢器進行偵檢，執行方式為以「推拉」式方法將適當尺寸的偵檢器進入管道內部，在預定的間隔位置進行靜態量測，透過靜態測量點的「偵測區域」(Area of Detection)來達到所需的覆蓋率。

測量結果的單位為 cpm(counts per minute)，包含了來自污染源的輻射以及環境中的背景輻射。因為偵檢器無法捕捉到每一次的衰變(受限於幾何形狀、距離和物理特性)，所以儀器讀到的衰變計數(cpm)通常小於實際活度 dpm(disintegrations per minute)，計算 dpm 的方法為將 cpm 除以偵檢器的效率(dpm = cpm/效率)。最後，為了符合法規釋出標準，再進一步將 dpm 轉換為單位面積的活度(dpm/100 cm²)。

以上三種靜態量測儀器，僅 ISOCS 可量測出個別核種活度，而用於建築物結構表面偵檢的氣體流動比例或閃爍偵檢器(貝他與阿法量測)和用於地下埋管偵檢的碘化銫(CsI)或碘化鈉(NaI)偵檢器皆只能測量活度(量測衰變計數)。FSS 使用僅能量測出總活度之儀器時，會將量測結果之活度，依據「混合比例」分配給 ROC 核種，以推算各 ROC 核種之活度。

4.4.3 取樣(Sampling)

取樣(或稱體積取樣, Volumetric Sampling)透過收集特定物質的一部分進行實驗室分

析，以確定物質中的放射性核種種類與濃度。除役核電廠最終狀態偵檢的取樣類型主要有 3 類：土壤取樣、混凝土芯取樣，以及沉積物和地表水/地下水取樣。

蒐集的樣本全部都會於廠內進行加馬能譜分析(in-situ gamma spectroscopy)，部分樣本會送至廠外實驗室進行分析，廠外實驗室分析的目的主要是確認 LTP 中的難測核種 (HTD) 替代比值(由特性偵檢決定)是否仍舊適用。

4.4.4 偵檢儀器選擇之規範

輻射偵檢儀器必須具備可靠的操作和足夠的靈敏度，以偵測廠址中的關注核種 (ROC)。儀器靈敏度以最小可偵測濃度 (Minimum Detectable Concentration, MDC) 來衡量。MDC 為先驗(a priori)的估計，根據最終狀態偵檢前所進行之特性偵檢結果，以統計方法(以 95% 檢出信心度)計算得出。95% 檢出信心度代表當核種濃度在接近 DCGL 值的情況下，儀器仍具備高度機率(95%)得以偵測出來。

根據 MARSSIM，MDC 不應超過 DCGL，建議目標值為 DCGL 的 10% 至 50%。因 DCGL 是據以判斷偵檢結果是否符合輻射標準之基準，若 $MDC > DCGL$ ，那麼即使核種濃度超過標準，儀器也可能「看不到」，造成漏檢，因此要求 $MDC < DCGL$ ，確保核種活度超標時能被確實檢出。

4.5 品質管控(QC)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)。

重複測量和偵檢的方法為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。複本樣本的做法為在原始取樣位置採集第二個完整樣本，分割樣本的做法為將原始樣本等分為兩個等分，並作為單獨的樣本進行分析。

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

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。

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。

4.5.2 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本等分為兩個等分，並作為單獨的樣本進行分析。

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% 的分割樣本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本分析。

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 6，找出原始樣本之 Resolution 對應的 Acceptable Ratio 範圍。
3. 計算並判斷 $\frac{\text{原始樣本測量結果}}{\text{對應的複本樣本或分割樣本測量結果}}$ 是否落在對應的 Acceptable Ratio 範圍中。

表 6 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

4.6 關注核種(ROC)

關注核種(ROC, Radionuclides of Concern)是指在除役核電廠殘餘放射性核種中，最可能對公眾劑量有顯著貢獻的核種。在最終狀態偵檢時，主要針對 ROC 進行偵檢、取樣與分析，目的是避免把資源浪費在與劑量無關或可忽略的核種上。美國 NRC 規範必須在除役計畫中說明 ROC 的選定依據，以確保其完整性與合理性。

在確認 ROC 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)。初始核種清單的建立依據包含相關文獻指南以及土壤與混凝土取樣的分析結果，並排除一些理論上的中子活化產物、惰性氣體以及半衰期小於兩年的核種。

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 ROC。

除役核電廠會根據劑量模型計算電廠各 ROC 的 DCGL 值(單一核種可造成監管單

位規定劑量上限的濃度)。為保守考量不顯著貢獻核種的劑量貢獻，將 IC 的劑量貢獻假設為劑量限值 10%(2.5 mrem/yr)，並依據扣除不顯著貢獻核種的劑量貢獻後之劑量限值調整 DCGL 值。

4.7 劑量模型(Dose Model)

劑量模型是用來評估除役核電廠殘餘放射性物質可能對公眾或環境造成輻射劑量影響的數學或電腦模擬工具，目的是把「殘餘輻射濃度」轉換為「公眾接受的輻射劑量」，以評估與證明在執照終止時，殘餘放射性物質對 AMCG(Average Member of the Critical Group，關鍵群體的平均成員)造成的總有效等效劑量 (TEDE) 不會超過非限制使用外釋之輻射標準(25 mrem/yr)。

劑量模型建立步驟包含：

1. 確認使用情境 (Exposure Scenarios)：如長居農民 (Resident Farmer)、工業用途 (Industrial Uses)、長居園丁(Resident Gardener)...等。
2. 使用情境決定曝露途徑：如外部曝露 (土地或結構中的加馬輻射)、吸入(呼吸進放射性微粒)、攝入 (食用受污染的農作物、牛奶及肉類等)，以及飲用地下水。
3. 收集輸入參數 (Input Parameters)：包含放射性核種資料 (關注核種)、環境參數 (土壤密度、地下水流速與遷移係數等)，以及人因參數 (呼吸率、飲水量與食物攝取量)。

確認使用情境時，需要考慮土地使用規劃者和利害關係人關於土地使用計畫和趨勢的建議，且提供充分的理由說明。依據 NUREG-1757 定義，選擇合理可預見情境 (Reasonably Foreseeable Scenario)是指未來 100 年內最可能的土地使用情境。

建立劑量模型的常用工具是 RESRAD (RESidual RADioactivity)。在最終狀態偵檢的規劃階段，即須確認廠址除役後的使用情境，關注核種，再透過 RESRAD 建立廠址的劑量模型，計算出所有廠址關注核種之 DCGL 值。(DCGL 相關說明請參考下一小節)。

4.8 DCGL

DCGL(Derived Concentration Guideline Level，衍生濃度指引水平)是在核電廠除役過程中，用來判斷殘餘輻射是否符合輻射標準的關鍵數值。其定義為在特定媒介(如土壤、建築結構、地下水)中，單一核種可造成監管單位規定劑量上限(25 mrem/yr)的濃度，計算方式是利用劑量模型，將劑量標準反推換算成核種濃度限制值。

在 MARSSIM 內容中，劑量模型假設殘餘放射性在較大區域內以均勻方式分佈，所推導出來的 DCGL 值以 $DCGL_w$ 表示。最終狀態偵檢的統計檢定是針對「整個偵檢單位」的平均狀況進行判斷。然而，若某個偵檢單位內有小區域活度高於 $DCGL_w$ ，整體活度平均值可能還是低於 $DCGL_w$ ，此時統計檢定仍可能通過，這就會造成風險低估。因此，為確保「小範圍高污染」不會被統計平均掩蓋，須進行 EMC(Elevated Measurement Comparison)，判斷是否仍符合劑量標準。進行 EMC 需要推導計算 $DCGL_{EMC}$ ，有關 $DCGL_{EMC}$ 的計算方式和更多有關 EMC 的說明請參考 4.10.3 小節。

透過劑量模型所推算出之 DCGL 值(單一核種於單一媒介造成 25 mrem/yr 劑量的濃度)，又稱為 BcDCGL(Basic Case DCGL)，為劑量模型的原始基準計算結果，代表單

一核種於特定介質中導致劑量達到法規上限的濃度。BcDCGL 可應用在計算除役核電廠合規劑量，且為 OpDCGL(Operational DCGL)和 DCGL_{EMC} 的計算基準。MARSSIM 中的 DCGL_w 與核電廠 LTP 中的 BcDCGL，是相同的意思，只是使用不同的符號表示。

因為除役核電廠的潛在輻射媒介(Media)不只一個，為確保加總所有媒介後的劑量不超過劑量標準，各媒介所允許造成劑量僅可為劑量標準的一部分(劑量貢獻占比)，且所有潛在輻射媒介劑量貢獻占比的總和應為 100%。各媒介折減後劑量限值回推得出的放射性核種濃度稱為 OpDCGL。最終狀態偵檢規劃時，須根據先前特性偵檢結果評估各媒介的劑量貢獻占比。

OpDCGL 的計算公式： $OpDCGL = BcDCGL * \text{所屬輻射媒介之劑量貢獻率}$ 。

OpDCGL 在最終狀態偵檢實務上應用包含：

1. 作為偵檢單元調查或除污之基準。
2. 作為偵檢儀器的靈敏度的選擇依據。
3. 作為偵檢單元是否符合輻射標準的判斷依據。

最終狀態偵檢時會採用最主要的核種(如 Cs-137)之 OpDCGL 作為行動基準(Action Level)。由於要考量由難測核種的劑量貢獻，會依據難測核種/易測核種替代比值，調整易測核種 OpDCGL。而在資料評估階段，難測核種活度依據 HTD 難測核種/易測核種替代比值推估，並與其相應難測核種的 DCGL 進行比較。

4.9 SOF(Sum of Fractions)

SOF 又稱為 Unity Rule，是評估偵檢單元是否符合輻射標準的方法。因除役核電廠可能存在多種殘留放射性核種，每個核種又有不同的 DCGL 值，當多種放射性核種同時存在時，採用 SOF 來判斷所有放射性核種對公眾造成的劑量總和是否超過輻射標準。

SOF 公式如下：

- 若 $SOF \leq 1 \rightarrow$ 符合標準。
- 若 $SOF > 1 \rightarrow$ 不符合標準。

$$SOF = \sum_i \frac{\text{核種 } i \text{ 濃度}}{\text{核種 } i \text{ 之 DCGL}}$$

當分母為 BcDCGL 時，對應的 SOF 稱為 BcSOF，當分母為 ODCGL 時，對應的 SOF 稱為 OpSOF。

4.10 調查基準(Investigation Level)

調查基準是用來判斷是否需要進行額外行動(例如進一步偵檢或除污)的放射性濃度值。在最終狀態偵檢過程中，偵檢結果超過調查基準之區域將會被標示並進行調查。各區域分級之調查基準請參考表 7。

表 7 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

4.11 偵檢單元最終狀態偵檢結果評估

4.11.1 數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)和初步審查

在進行正式的偵檢數據評估之前，必須對收集到的數據進行全面的審查和評估，以確保數據的適用性，包含以下兩點：

1. 數據驗證與確認(Data Verification and Validation)：驗證的目的是確保是否有依照偵檢規劃執行偵檢，確認的目的為確保數據結果支持數據品質目標(Data Quality Object, DQO)的要求(如偵檢儀器的 MDC 是否符合要求)。
2. 初步數據審查(Preliminary Data Review)：計算偵檢單元中所蒐集樣本的基本統計量，如平均值、標準差和中位數。

4.11.2 偵檢結果統計檢定

最終狀態偵檢(FSS)的目標為透過嚴謹的科學和統計方法，確保做做出的是否可非限制使用釋出之決策是可信、可驗證且符合既定標準的。因此，在規劃階段，需透過統計檢定方法計算出達到所要求信心度所需的樣本數，在完成偵檢後，應將蒐集到的樣本數據進行統計檢定。透過統計檢定能為依據偵檢結果所作的決策，提供其符合指定信心水準的技術性論證。

依據 MARSSIM，最終狀態偵檢選擇哪種統計檢定取決於廠址中是否存在背景輻射，廠址若存在背景輻射，採用 Wilcoxon 檢定，若不存在背景輻射，則採用符號檢定(Sign Test)。Wilcoxon 檢定需要選定一個僅含有背景輻射的參考區域，並比較廠址偵檢區域的偵檢結果與背景輻射參考區域的偵檢結果之輻射劑量差異是否符合輻射標準；符號檢定則不須背景輻射參考區域之偵檢數據，僅須針對廠址偵檢區域的偵檢結果進行評估。

4.11.3 EMC

最終狀態偵檢的統計檢定是針對「整個偵檢單位」的平均狀況進行判斷。當某個偵檢單位內出現小區域活度高於 DCGL_w，整體活度平均值卻低於 DCGL_w 的情況，統計檢定仍可能通過，會造成風險低估。因此，為確保「小範圍高污染」不會被統計平均掩蓋，出現小區域活度高於 DCGL_w 狀況時，須進行 EMC(Elevated Measurement Comparison)，判斷是否仍符合劑量標準。

EMC 的步驟如下：

1. 使用 RESRAD 計算 1 m² 到 100 m² 面積因子(AF, Area Factors)
2. $DCGL_{EMC} = DCGL_w * AF$
3. 個別量測值比較

- 個別量測值 $\leq DCGL_{EMC}$ \rightarrow 可接受。
- 個別量測值 $> DCGL_{EMC}$ \rightarrow 該區域必須進一步調查，可能需要除污或重新分級。

由於 EMC 適用於僅在小區域中出現較高活度的情況，因高活度的面積相對小，能允許高於 $DCGL_w$ 的活度，故 AF 值會大於 1，且越小面積範圍所對應的 AF 值越大。此外，EMC 僅適用於土壤第 1 級偵檢單元，因為根據定義，第 2 級和第 3 級偵檢單元的偵檢結果不應超過 $DCGL_w$ ，土壤以外媒介之最終狀態偵檢若出現超過 $DCGL_w$ 結果，應進行除污。

4.11.4 確認偵檢單元是否需要重新除污/重新分級/重新偵檢

確認最終狀態偵檢的數據品質後，接下來應根據所蒐集之偵檢資料判斷是否需要重新除污/重新分級/重新偵檢。在 MARSSIM 中描述了有關重新除污/重新分級/重新偵檢的原則規範(如樣本分析結果顯示超過或接近 $DCGL$ 、數據變異性比原先分級假設的大、發現不符歷史資訊的新證據...)，但沒有提供明確數值標準。然而，Zion 核電廠和 La Crosse 核電廠的 LTP 第 5 章中則提供了明確的重新除污/重新分級/重新偵檢標準。

表 8 ~ 表 9 為此二除役電廠 LTP 中所指定重新除污/重新分級/重新偵檢標準以及對應建議行動。

表 8 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
第 1 級 偵檢單元	1) 通過統計檢定，且偵檢單元 SOF 的平均值小於等於 1。	無
	2) 通過統計檢定，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。
第 1 級 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 9 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
第 2 級 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第 1 級。
		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第 1 級。
		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第 1 級。
第 3 級 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第 1 級，並於周圍建立適當大小的第 2 級區域。
		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第 2 級。
		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第 2 級。

表 10 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
第 1 級 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。
	偵檢單元曾從第 2 級重新分級為 第 1 級。	未曾重新除污。	將掃描覆蓋率增加為 100%。不須增加樣本 數。
第 2 級 偵檢單元	原來的偵檢單元 進行了分割，以 容納一新增的第 1 級偵檢單元。	新增的 Class 1 偵檢單元相對 原來的第 2 級偵檢單元面積 很小，且不會對原本的統計樣 本規劃造成影響。	增加第 2 級偵檢單元 的掃描或區域覆蓋率。
		對原本的統計樣本規劃造成 影響。	增加第 2 級偵檢單元 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。
第 3 級 偵檢單元	原來的偵檢單元 進行了分割，以 容納一新增的第 2 級偵檢單元。	新增的第 2 級偵檢單元相對 原來的第 3 級偵檢單元面積 很小，且原來的第 3 級偵檢單 元之檢定力未變。	增加第 3 級偵檢單元 的掃描或區域覆蓋率。
		新增的第 2 級偵檢單元相對 原來的第 3 級偵檢單元面積 較大。	以新的偵檢設計重新 偵檢整個偵檢單元。




4.11.5 判斷偵檢單元是否符合輻射標準

最終狀態偵檢將廠址的各種輻射媒介劃分為若干各偵檢單元，各偵檢單元依據其所屬區域分級進行最終狀態偵檢規劃。一偵檢單元完成偵檢後，依據偵檢結果進行評估，最後得出該偵檢單元是否符合輻射標準之決策。除役核電廠中所有的偵檢單元皆須符合輻射標準，以下為判斷是否符合之方法：

- 符合輻射標準：偵檢單元中所有樣本的 OpSOF 皆小於 1。
- 不符合輻射標準：偵檢單元中樣本的平均 OpSOF 大於 1。
- 可能不符合輻射標準：偵檢單元中樣本的平均 OpSOF 小於 1，但至少有一個樣本的 OpSOF 大於 1。

當出現可能不符合輻射標準情況時，偵檢單元可能需要進行調查、EMC，與統計檢定。根據 Zion 核電廠與 LaCrosse 核電廠 LTP 內容，EMC 僅適用於開放土地偵檢單元，並不適用於地下結構於地上建築偵檢單元，表 11 為根據該二電廠 LTP 內容整理之判斷一偵檢單元是否符合輻射標準方法。

表 11 判斷一偵檢單元是否符合輻射標準方法

偵檢單元偵檢結果評估			
樣本或量測點的 OpSOF平均值	個別樣本狀況	判斷或行動	
		開放土地(土壤)	其他媒介
> 1		偵檢單元不符合外釋標準 應進行廣泛除污並重新偵檢	
< 1	任一樣本 	進行EMC(DCGL _{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
	任一樣本 	進行符號檢定(Sign Test)，判斷是否符合外釋標準	
	全部樣本 	偵檢單元符合外釋標準	

4.12 合規劑量(Compliance Dose)計算

完成每一個偵檢單元最終狀態偵檢結果評估後，還需計算來自核電廠每一個潛在輻射媒介(Media)的劑量總和，確保加總所有媒介後的劑量不超過劑量標準。合規劑量的計算方式如下：

1. 計算偵檢單元平均劑量：依據偵檢單元的系統性樣本或量測值的平均 BcSOF，以及輻射偏高區域面積加權的貢獻劑量，計算偵檢單元的平均劑量。
2. 以各輻射媒介中平均劑量最高之偵檢單元的平均劑量作為該媒介的合規劑量。
3. 將各輻射媒介的合規劑量值相加即為電廠之整體合規劑量。

以下兩小節說明偵檢單元評估劑量之計算方法。

4.12.6 地下水劑量計算方法

地下水劑量的計算方法如下：

1. 使用 Federal Guidance Report 11(FGR 11) 所提供之各核種攝入劑量轉換因子 ($mrem/yr$) 乘上關鍵群體的平均成員(AMCG)的年均飲用水量(L/yr)來計算得出各 ROC 核種之地下水劑量轉換因子($\frac{mrem/yr}{pCi/L}$)。

$$\begin{aligned} & \text{劑量轉換因子}_{\text{核種}i} \left(\frac{mrem/yr}{pCi/L} \right) \\ & = \text{FGR 11 攝入劑量轉換因子}_{\text{核種}i} \left(\frac{mrem}{pCi} \right) \\ & * \text{AMCG 年平均飲用水量} \left(\frac{L}{yr} \right) \end{aligned}$$

2. 地下水取樣結果 ROC 核種濃度(pCi/L) 乘上對應之劑量轉換因子 $\left(\frac{mrem/yr}{pCi/L} \right)$ 後相加得出地下水評估劑量(mrem/yr)。

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

4.12.7 地下水以外輻射媒介之偵檢單元平均劑量計算方法

計算地下水以外輻射媒介之偵檢單元的平均劑量計算公式如下：

$$\text{Dose}_{\text{Media}} = 25 \left(\frac{mrem}{yr} \right) * \text{平均 BcSOF} \left(= \sum_i \frac{\text{偵檢單元中核種}i \text{ 的平均濃度}}{\text{核種}i \text{ 於該媒介的 BcDCGL 值}} \right)$$

4.13 除污作業輔助偵檢(Remedial Action Support Survey, RASS)

除污作業輔助偵檢(RASS)是在除污作業進行期間執行的偵檢。其目的是在除污過程中評估除污的效果，確認是否還需要進一步去污，以及偵檢單元是否已預備好可進行最終狀態偵檢。

RASS 是一個 In-Process Survey，並不提供可用於證明符合輻射標準的資訊，其偵檢得採用較彈性的抽樣或掃描方式，以快速與實用的測量協助現場進行決策，若發現異常區域，通常會即時標記並進行額外去污。RASS 會設定一個判斷除污是否有效的判斷指標，通常是簡單的輻射參數(例如，表面附近的直接輻射)，當偵檢結果顯示輻射活度低於判斷指標時，表示除污結果達到預期的效果。

Zion 核電廠與 La Crosse 核電廠之 LTP 中皆規範，拆除潛在受污染的地下結構或鋪設路面被移除後，產生的挖掘區域在回填之前必須進行 FSS，並輔以除污作業輔助偵檢(RASS)。

五、La Crosse 核電廠第 1 級最終狀態偵檢

5.1 廠址簡介

La Crosse 沸水反應爐 (LACBWR)，又稱 Genoa 2，是一座 50 MWe 的沸水反應爐 (BWR)，由 Dairyland Power Cooperative (Dairyland) 擁有，位於美國威斯康辛州西南部的 Vernon County，緊鄰密西西比河東岸。

核電廠原執照範圍 163.5 英畝，其中，LACBWR 範圍(LSE, LACBWR Site Enclosure) 占約 1.5 英畝(1987 年停止運轉，2023 年完成除役)，廠址內曾有 Genoa 1 火力發電廠(於 1989 年拆除)，以及 Genoa 3 火力發電站 (2021 年除役，2024 年拆除)。位於 Genoa 3 南邊的獨立用過核燃料貯存設施 ISFSI，不屬於除役範圍，在核電廠除役後仍保留在 10 CFR Part 50 執照中，用過燃料將保留在 ISFSI 中存放，直到有聯邦儲存設施可轉移貯存。La Crosse 核電廠原執照範圍與主要設施請參考圖 3。

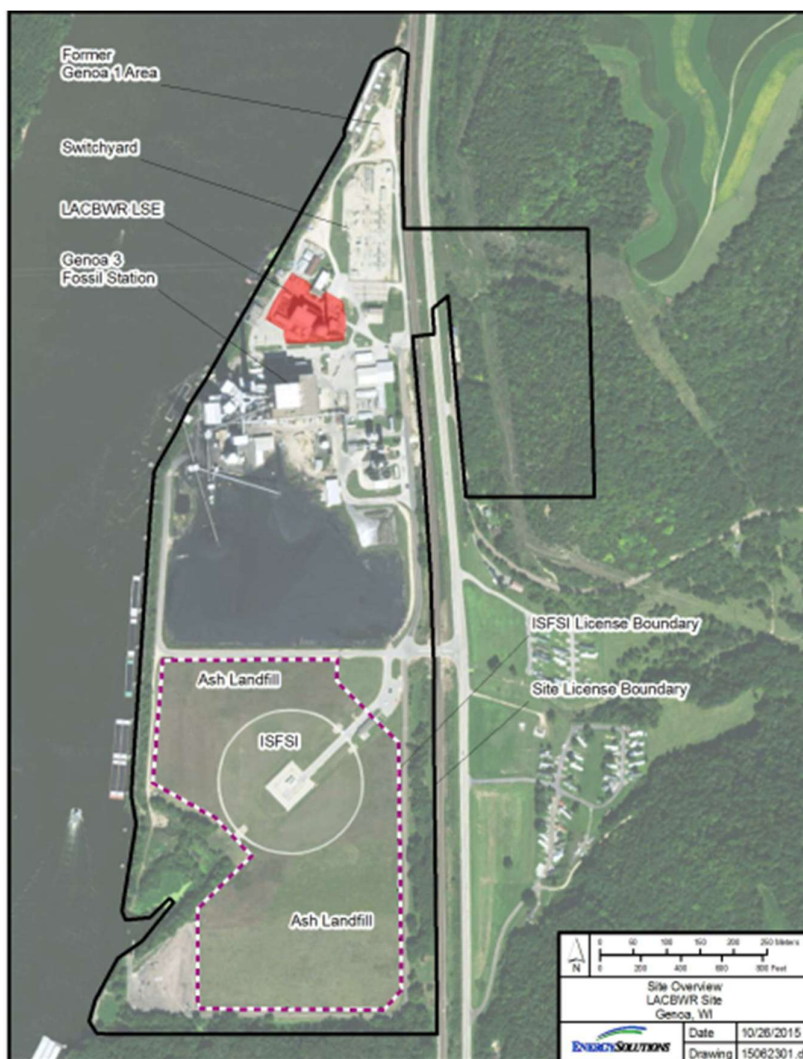


圖 3 La Crosse 核電廠原執照範圍與主要設施

5.2 除役時程綜覽

LACBWR 於 1987 年 4 月 30 日永久停止運轉，並於 1987 年 6 月 11 日完成了反應器內的燃料移除。美國核能管理委員會(NRC)於 1987 年 8 月 4 日終止 DPC 運轉 LACBWR 的執照授權。1988 年 8 月 18 日 NRC 將 DPC 的臨時運轉執照 DPR-45 修改為僅持有執照 DPR-45(Possession Only License No. DPR-45)，於該時，反應器中之燃料已全部移除，DPC 的僅持有執照不被授權進行 LACBWR 的運轉以及反應器燃料的放入或置留。DPC 根據 10 CFR Part 72(獨立儲存用過核燃料、高放射性廢棄物和反應器相關 C 類以上廢棄物的執照要求)，在廠區建造了獨立用過核子燃料乾式貯存設施(ISFSI)，並在 2012 年 9 月 19 日之前將所有 333 個用過核燃料組件移至 ISFSI。

La Crosse 核電廠從 2014 年 10 月至 2015 年 8 月期間對要除役範圍區域進行了特性偵檢，並對土壤、混凝土和瀝青進行了背景研究，結果顯示廠址內的銫-137(Cs-137)濃度與全球輻射落塵的預期背景範圍一致，並確定了潛在的關注核種(ROC)。儘管特性偵檢時，偶爾會於實驗室分析偵測出 ROC 活度，但這些結果多被歸因於計數統計、實驗室干擾或錯誤識別的峰值，並非實際的輻射污染。La Crosse 核電廠特性偵檢的結果摘錄於 LTP 的第二章中(包含受輻射影響以及未受輻射影響區域的特性偵檢結果)。

2016 年 5 月 20 日，NRC 批准將 LACBWR 的僅持有執照 DPR-45 從 DPC 移轉給 LaCrosse Solutions(LS)，LS 是為完成 LACBWR 廠區的拆除和除污等除役作業設立的，目的是加速 LACBWR 廠址的除役時程。

LS 於 2016 年 6 月提交執照終止計畫(LTP)初版及部分區域(未受輻射影響)之釋出請求。NRC 於 2017 年 4 月 12 日核准 La Crosse 核電廠未受輻射影響區域之釋出，釋出之未受輻射影響區域面積共約 88 畝。

LTP 初版提交前，部分區域因安全考量而未能於完成特性偵檢(例如：廢氣槽貯存罐內部結構表面、反應器廠房地下襯板移除後的混凝土、汽機廠房下方土壤、地下結構和管道周圍土壤)，因此這些區域延遲至獲得進入權限後才進行特性偵檢。

La Crosse 核電廠的 LTP 初版提交後，依據 NRC 的審查結果進行補充與修改，LS 於 2018 年 5 月提交 LTP 更一版，NRC 於 2019 年 5 月通過對 La Crosse 核電廠 LTP 更一版的安全評估審查(SER)。隨後，LS 依據 NRC 核准後的 LTP 中最終狀態偵檢之規劃進行最終狀態偵檢與偵檢結果評估。LS 於 2022 年 1 月提交 LTP 更二版和 LTP 更三版，此二版分別更新了 NRC 監管規章內容(上一版本至此次更新期間有異動處)、廠區最新拆除進度、最新劑量評估結果，以及低階放射性廢棄物量評估資訊。有關 La Crosse 核電廠 TLP 更多說明，可參考本計畫「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期末報告」第五章。

2019 年 8 月至 2020 年 1 月，LS 陸續提交最終狀態偵檢報告(FSSR)三個階段的初版，後依據 NRC 於 2020 年 8 月提出之 RAI，於 2020 年 10 月和 11 月分別提交階段二和階段三 FSSR 的更一版。LS 於 2021 年 12 月提出請 NRC 先審查 La Crosse 核電廠第 2 級和第 3 級偵檢單元 FSSR，以及先行釋出第 2 級和第 3 級偵檢單元區域的請求。NRC 於 2022 年 5 月根據 LS 提交之 FSSR、獨立確認偵檢報告，以及 NRC 視察結果，通過 La Crosse 核電廠所有第 2 級和第 3 級偵檢單元和一個第 1 級地下埋管偵檢單元

的安全評估審查(SER)，並核准釋出通過 SER 審查之區域。2022 年期間，LS 多次針對 NRC 所提出有關第 1 級偵檢單元 FSSR 之補充資訊要求(RAI)以及問題予以回覆說明。NRC 於 2023 年 2 月 24 日通過 La Crosse 核電廠剩餘第 1 級偵檢單元的安全評估審查，並核准釋出通過審查之區域。至此，La Crosse 核電廠廠區，除 ISFSI 區域除外，皆完成執照終止及非限制使用釋出。La Crosse 核電廠最終狀態偵檢時程資訊彙整請參考表 12。

表 12 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢時程綜覽

La Crosse核電廠最終狀態偵檢時程綜覽								
年	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
La Crosse核電廠	特性偵檢	2014年10月9日~2015年8月6日：LTP 第二章中摘錄特性偵檢結果 LTP提交後持續進行特性偵檢						
	放射性物品拆除與清運	2007年6月壓力槽(RPV) 被移除並運送處理 2012年9月用過燃料組件與燃料碎片存放至ISFSI乾式貯存設施 2021年11月EnergySolutions公司及其分包商完成所有除污與拆除作業						
	LTP	初版	更一版 (核准)				更二版 更三版	
	FSSR & 回覆RAI			• 初版 - Phase 1 - Phase 2	• Phase 3初版 • 更一版 - Phase 2 - Phase 3 • 回覆RAI(11/2)	請求先完成 Class 2&3 的 審查與核准 釋出	回覆RAI與 Question	
NRC 審查	RAI Question				8/19		6/5、10/14 7/5、7	
	FSSR SER						Class 2 & 3 通過(5/24)	Class 1 通過(2/24)
	確認偵檢		✓	✓	✓	✓		
	廠址釋出		未受輻射影 響區域 (2017/4/12)					受輻射影 響區域 (2023/2/24)

5.3 廠房與建築之拆除

La Crosse 核電廠廠內之廠房與建築的拆除方式分為三類，說明如下：

- 1) 拆除至至少地下 3 英尺深(海拔標高 636 英尺處)
 - 反應器廠房。
 - 廢氣槽貯存室(WGTV)。
- 2) 完全保留
 - LACBWR 行政大樓(LACBWR Administration building)
 - Genoa 3 循環冷卻水泵室(Genoa 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)
 - Genoa 31 循環冷卻水泵室(Genoa 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)

3) 完全拆除

- 除以上廠房與建築外，其他廠房、建築物 and 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)。

5.4 最終狀態輻射偵檢規劃與設計

5.4.1 開放土地區域分級

La Crosse 核電廠原執照範圍約 163.5 英畝，最終狀態偵檢規劃中，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仍保留在 10 CFR Part 50 執照中的 ISFSI 相關區域(約 39 英畝)，以及須進行最終狀態偵檢並釋出的區域(約 36.5 英畝)。

La Crosse 核電廠開放土地在特性偵檢時全部都被劃分為受輻射影響區域，圖 4 為初始偵檢單元分級圖，在進行特性偵檢時，L4012103、L4012105、L4012106 和 L4012108 被歸類為第 3 級開放土地偵檢單元。

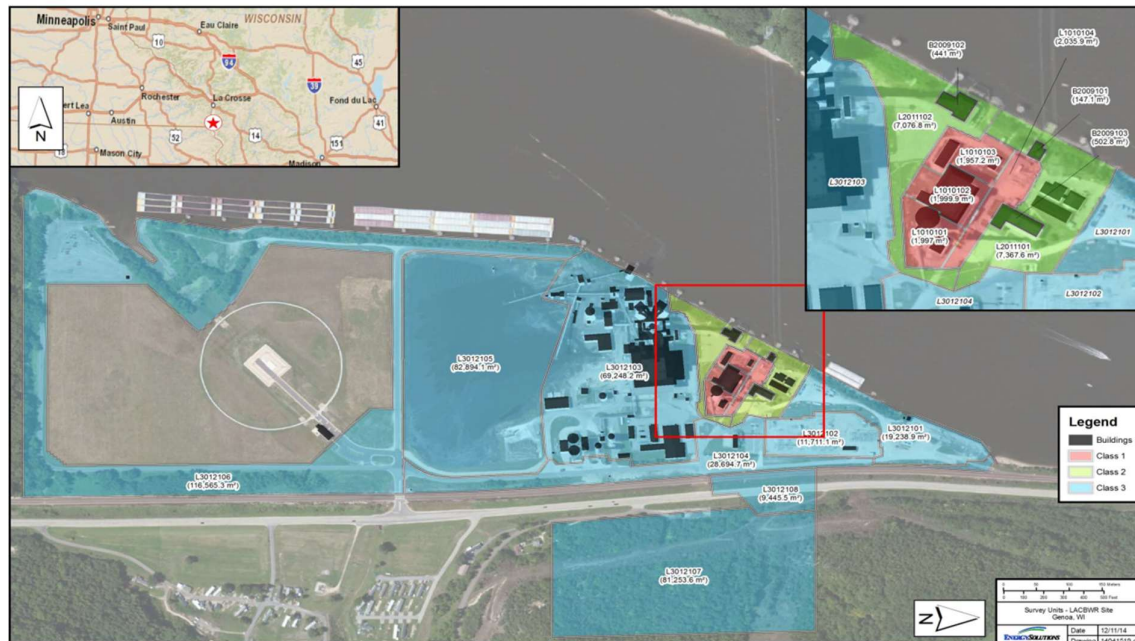


圖 4 開放土地偵檢單元初始分級

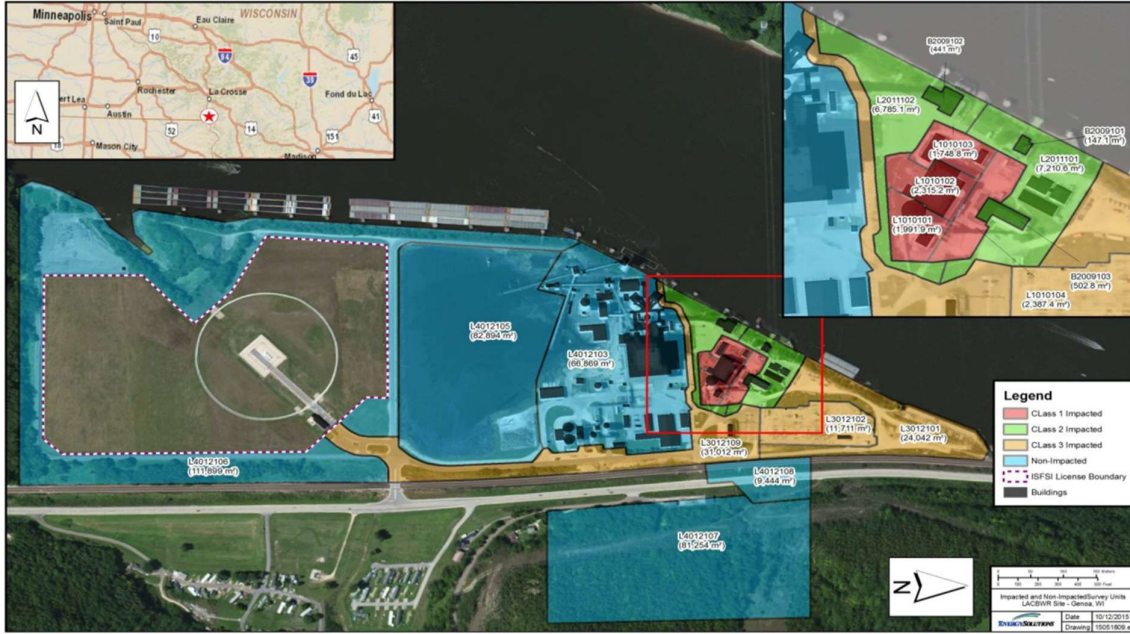


圖 5 開放土地偵檢單元最終分級

根據廠址歷史評估(HSA)和初步特性偵檢的審查結果，在 2015 年被重新分級為未受輻射影響區，因確定這些區域沒有殘留污染的合理可能性。

5.4.2 關注核種(ROC)

La Crosse 核電廠依據特性偵檢結果，確認 ROC 為 Cs-137、Co-60、Sr-90、Eu-154 和 Eu-152，在特性偵檢的土壤和混凝土樣本中，以上 5 個核種幾乎貢獻了總劑量的 100%。特性偵檢結果確認，Co-60 和/或 Cs-137 為主要 ROC，最終狀態偵檢中以 Cs-137 作為主要 ROC，用於計算設計的預期變異性、所需樣本數量，以及調查基準。

表 13 為依據特性偵檢結果，La Crosse 核電廠土壤及地下室 ROC 核種經標準化之混合比例。

表 13 La Crosse 核電廠 ROC 核種混合比例

Radionuclide	Soil % of Total Activity (normalized)	Reactor Building % of Total Activity (normalized)	WGTV % of Total Activity (normalized)
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

5.4.2.1 難測核種(HTD)

在 La Crosse 核電廠 5 個 ROC 中，僅 Sr-90 為純貝他輻射源，屬難測核種(Hard to Detect, HTD)，其他皆為加馬輻射源，屬易測核種。

根據 La Crosse 核電廠 LTP，在最終狀態偵檢期間，將使用 Sr-90/Cs-137 替代比值推斷 Sr-90 之濃度，所採用之 Sr-90/Cs-137 替代比值是依據特性偵檢結果計算得出。替代比值是依據特性偵檢結果計算得出，計算方法為：單一樣本的量測結果中，若 Cs-137 和 Sr-90 皆檢測到，此樣本的 Sr-90/Cs-137 比值計算方式為 Sr-90 檢測值 / Cs-137 檢測值；若檢測到 Cs-137 但未檢測到 Sr-90，則此樣本的 Sr-90/Cs-137 比值計算方式為 Sr-90 MDC / Cs-137 檢測值。為確保推斷 HTD 核種濃度的保守性，以所有樣本 Sr-90/Cs-137 比值的 95th 百分位作為 HTD 替代比值。表 14 為 La Crosse 核電廠替代比值計算方法，表 15 為 La Crosse 核電廠 HTD 替代比值。

表 14 La Crosse 核電廠替代比值計算方法

Cs-137	Sr-90	單一樣本 Sr-90/Cs-137 比值
檢測到	檢測到	Sr-90 檢測值 / Cs-137 檢測值
檢測到	未檢測到	Sr-90 MDC / Cs-137 檢測值
未檢測到	未檢測到	不計算

表 15 La Crosse 核電廠 HTD 替代比值

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

5.4.3 潛在殘餘輻射媒介

La Crosse 核電廠的潛在殘餘輻射媒介共有五種：回填地下室、土壤、地下埋管、保留地上建築，以及地下水。最終狀態偵檢的目的即透過系統及科學方法，規劃、執行與評估來自這五種媒介所造成的劑量，以提供可驗證且具技術辯護力的方法，證明廠址符合外釋輻射標準。

5.4.4 廠址未來使用情境與關鍵群體平均成員

La Crosse 核電廠廠址的合理可預見使用情境為「工業用途 (Industrial Uses)」，原因有下列幾點：

1. 該地區自 1941 年以來一直被用作工業用途。
2. 該地區內有 36 英畝的煤灰掩埋場。
3. 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。

工業用途的關鍵群體平均成員(Average Member of the Critical Group, AMCG)為工業

工作者 (Industrial Worker)。

5.4.5 劑量模型(Dose Model)

劑量模型是用來評估計算除役核電廠潛在殘餘輻射媒介對所造成的關鍵群體的平均成員(AMCG)造成的劑量。在最終狀態偵檢規劃階段，透過劑量模型計算各輻射媒介中，所有廠址 ROC 的 DCGL 值。最終狀態偵檢完成後，將結果與 DCGL 值進行評估比較，可證明在執照終止時廠址的殘留放射性符合輻射標準。

La Crosse 核電廠有五種潛在殘餘輻射來源媒介：回填地下室、土壤、地下埋管、保留地上建築，以及地下水，以下分別說明 La Crosse 核電廠五種殘餘輻射媒介的劑量模型。

5.4.5.1 回填地下室劑量模型(Basement Fill Model, BFM)

BFM 劑量模型的目的是在計算在除役終止時，留在回填地下室中的殘餘放射性對關鍵群體平均成員(AMCG)造成的劑量。回填地下室指的是反應器廠房和廢氣槽貯存室(WGTV)，此兩個廠房在拆除後至少地下 3 英尺深後進行回填。

1. 原位情境(BFM Insitu Scenario)

原位情境假設混凝土保持在執照終止時的狀態，包含兩種曝露途徑：

- 原位地下水情境(BFM Insitu_{gw})：此使用情境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。保守假設 100%的殘餘放射性物質立即釋出到回填物質中，並將回填物質視為「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。
- 原位鑽井廢料情境(BFM Insitu_{ds})：此使用情境並假設在執照終止後，立即建置廠內水井，並假設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，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。

2. 挖掘情境(BFM Excavation Scenario)

挖掘情境假設部分或全部混凝土被挖掘並帶到地表。BF 挖掘情境假設在執照終止後立刻進行挖掘，並將挖掘出部分或全部回填的結構混凝土，並鋪開在地面上。

由於可能同時存在部分結構被挖掘、部分留在地下的情況，回填地下室的劑量評估必須將不同情境的劑量加總起來，回填地下室之 DCGL 值為同時計算入原位地下水情境、原位鑽井廢料情境和挖掘情境造成劑量後之 DCGL 值。

5.4.5.2 土壤劑量模型

表土的標準定義為土壤最上層的 15 公分，La Crosse 核電廠最終狀態偵檢實際也針對 15 公分的深度進行表土取樣。然而，為了評估的保守性，土壤的劑量模型假設土壤

的污染深度為 1 公尺。因為，若土壤劑量模型採用的污染厚度為 15 公分，卻於偵檢時發現土壤污染厚度超過 15 公分時，可能需要從新進行的劑量建模，故採用 1 公尺厚度的假設，可減少當污染厚度略高於 15 公分時產生延誤或不必要除污的可能性。

5.4.5.3 地下埋管劑量模型

除循環水排放管（Circulating Water Discharge Pipe）部分外，La Crosse 核電廠除役後將保留的所有地下埋管均未與受污染系統相關，因此其污染可能極低。此外，La Crosse 核電廠沒有嵌管（即嵌入混凝土中的管線）。類似於回填地下室劑量模型，地下埋管劑量模型包括以下兩種概念模型。由於可能同時存在部分結構被挖掘、部分留在地下的情況，地下埋管的劑量評估必須將不同情境的劑量加總起來，地下埋管之 DCGL 值為同時計算入原位地下水情境和挖掘情境造成劑量後之 DCGL 值。

1. 原位地下水情境(Insitu Scenario)

在原位情境中，假設埋管保持在執照終止時的狀態，並假設管內殘留放射性物質因接觸到水即時釋放與厚度 2.54 公分的表土層混合，其範圍等同於該管內表面積。

2. 挖掘情境(Excavation Scenario)

在挖掘情境中，因為挖掘作業會造成較大範圍的地表擾動，此情境假設管線被挖出後，所有放射性物質立即釋放並混入地表 15 公分厚的土層中。

5.4.5.4 地下水劑量評估方法

根據 La Crosse 核電廠 LTP，最終狀態地下水媒介劑量評估方法為地下水過去兩年內監測井中偵測到最大 ROC 濃度乘上地下水曝露因子後相加。

地下水劑量的計算方法為以 Federal Guidance Report 11(FGR 11) 中所提供的攝入劑量轉換因子(Ingestion Dose Conversion Factors, ING DCF)乘上關鍵群體的平均成員(工業從業人員)之預設每年平均飲水量(327 L/yr)所得之劑量轉換因子($\frac{mrem/yr}{pCi/L}$)再乘上地下水監測取樣 ROC 濃度結果後相加，詳細方法請參考 4.11.6。表 16 為 La Crosse 核電廠地下水劑量轉換因子。

表 16 La Crosse 核電廠地下水劑量轉換因子

Nuclide	FGR 11 ING DCF, mrem/pCi	Groundwater Exposure Factors, mrem/y per pCi/L
H-3	6.40E-08	2.09E-05
C-14	2.09E-06	6.83E-04
Fe-55	6.07E-07	1.98E-04
Ni-59	2.10E-07	6.87E-05
Co-60	2.69E-05	8.80E-03
Ni-63	5.77E-07	1.89E-04
Sr-90	1.42E-04	4.64E-02
Nb-94	7.14E-06	2.33E-03
Tc-99	1.46E-06	4.77E-04
Cs-137	5.00E-05	1.64E-02
Eu-152	6.48E-06	2.12E-03
Eu-154	9.55E-06	3.12E-03
Eu-155	1.53E-06	5.00E-04
Pu-238	3.20E-03	1.05E+00
Pu-239	3.54E-03	1.16E+00
Pu-240	3.54E-03	1.16E+00
Pu-241	6.85E-05	2.24E-02
Am-241	3.64E-03	1.19E+00

5.4.5.5 保留地上建築劑量模型

依據 La Crosse 核電廠 LTP，電廠除役後預計保留的受影響地上建築使用 NUREG-1757, Volume 2, Revision 1, Appendix H, Table H-1 的篩選值作為作為 Base Case DCGLs。 (註：然而，經查 NUREG-1757, Volume 2, Revision 1, Appendix H, Table H-1 之中僅提供了 Co-60、Sr-90，以及 Cs-137 的篩選值，並沒有 Eu-152, Eu-154 的資訊)

依據 La Crosse 核電廠 LTP 中提供電廠 ROC 之地上建築篩選值如表 17。

表 17 La Crosse 核電廠保留地上建築之 ROC 篩選值

ROC	Above Grade Building (dpm/100 cm ²)
Co-60	7100
Sr-90	8700
Cs-137	28000
Eu-152	12700
Eu-154	11500

5.4.5.6 替代使用情境(Alternate Scenario)

根據 NUREG-1757 定義，替代情境屬於「較不可能但合理」(Less Likely but Plausible) 的土地使用情境，仍須考量評估其潛在劑量。La Crosse 核電廠的合理可預見情境為工業用途，替代情境有兩種：

1. 休閒用途情境 (Recreational Use Scenario)

進行了此情境的劑量定性評估，評估結果為劑量低於工業用途，原因是休閒使用者的使用時間(Occupancy Time)會少於工業從業人員，即使安裝了供水井，休閒使用者從水井的攝入率，也會低於工業從業人員。

2. 長居園丁用途(Resident Gardener Use)

建立長居園丁情境模型進行劑量評估，假設長居園丁在執照終止後 30 年才使用廠區，曝露途徑包括直接劑量、吸入、土壤攝入，以及來自現場花園的水果和蔬菜攝入，並使用廠內水井進行飲用水和灌溉。

計算方法為，使用工業用途情境所推導出之 DCGL，作為長居園丁模型的核種濃度，計算出各媒介的劑量值如下(經過 30 年衰變後)：

- 土壤的最高劑量為 27.07 mrem/yr。
- 反應器廠房回填地下室最高總劑量為 28.4 mrem/yr。
- WGTV 回填地下室最高總劑量為 34.9 mrem/yr。

依據 NUREG-1757，如果「較不可能但合理」情境的峰值劑量是「顯著的」(Significant)，則需要更大的保證來證明該情境發生的可能性極低。La Crosse 核電廠 LTP 中說明，雖然上述計算的最高劑量略高於 25 mrem/yr 的劑量，但量不認為是顯著的(not Considered Significant)，因此無需進一步證明這些情境不會發生。

但為了確保長居園丁情境下劑量不會超過 25 mrem/yr，仍舊對土壤和回填地下室的 DCGL 進行調整：

- 土壤 DCGL 調整系數為 0.92(= 25 / 27.07)。
- 反應器廠房回填地下室 DCGL 調整系數為 0.88(= 25 / 28.4)。
- WGTV 回填地下室的 DCGL 調整系數為 0.72(= 25/34.9)。

5.4.6 DCGL

BcDCGL(Base Case DCGL)的定義為在特定媒介(如土壤、建築結構、地下水)中，單一核種可造成劑量標準(25 mrem/yr)的濃度。因潛在輻射媒介不只一種，各媒介的所允許的劑量僅能為劑量標準的一部分(比如 20%)。在最終狀態偵檢規劃階段，即需參照特性偵檢結果，設定每一種輻射媒介之占比，且所有潛在輻射媒介占比總和應為 1。La Crosse 核電廠各輻射媒介的劑量占比請參考表 18。

表 18 La Crosse 核電廠各輻射媒介劑量貢獻率設定

FSS Unit	Source Term/Media for FSS	<i>a priori</i> Fraction, <i>f</i>
Basement	Floor and Walls	0.07
Groundwater "Other Basement"	Floor and Walls	0.01
Soil	Soil	0.36
Buried Pipe	Buried Pipe	0.21
Groundwater "Other Buried Pipe"	Buried Pipe	0.06
Above Grade Building	Floor, Walls, Ceiling	0.16
Existing Groundwater	Groundwater Monitoring Results	0.13
	Sum	1.0

給定輻射媒介劑量占比後，將占比乘上劑量標準(25 mrem/yr)，可得出媒介所造成劑量之限值；將占比乘上將輻射媒介中各 ROC 核種之 BcDCGL，可得出各 ROC 核種造成該媒介劑量限值時之濃度，以 OpDCGL(Operational DCGL)表示。

如前文所述，為保守考量不顯著貢獻核種的劑量貢獻，將 IC 的劑量貢獻假設為劑量限

值 10%(2.5 mrem/yr)，並依據扣除不顯著貢獻核種的劑量貢獻後之劑量限值調整

DCGL 值。此外，La Crosse 核電廠為考量在替代使用情境下，劑量仍不超過劑量標準，亦將 DCGL 值進行調整(土壤：0.92；反應器廠房回填地下室：0.88；WGTV 回填地下室：0.72)。表 19 與表 20 分別為 La Crosse 核電廠反應器廠房和 WGTV 回填地

地下室各使用情境經調整之 BcDCGL。

表 21 ~ 表 25 為 La Crosse 最終狀態偵檢進行結果評估時使用的 DCGL 值，所有的 DCGL 皆為將不顯著貢獻核種的劑量貢獻與替代使用情境納入考量後之調整值。

5.4.6.1 回填地下室 DCGL

為保守考量，La Crosse 核電廠回填地下室劑量的評估計算，總和了原位地下水情境(BFM Insitu_{gw})、原位鑽井廢料情境(BFM Insitu_{ds})，以及挖掘情境(BFM Excavation Scenario)等情境所造成劑量。分別計算出反應器廠房回填地下室以及 WGTV 三種情境之 DCGL 值後，再計算整個廠房之 DCGL 值。

表 19 La Crosse 核電廠反應器廠房回填地下室各使用情境經調整之 BcDCGL

ROC	Reactor Building Adjusted BFM DCGL _{BS} (pCi/m ²)		
	Insitu GW	Insitu Drilling Spoils	Excavation
Co-60	1.21E+08	4.75E+08	5.45E+06
Sr-90	1.46E+07	2.70E+11	2.80E+09
Cs-137	1.98E+08	1.94E+09	2.47E+07
Eu-152	2.73E+09	1.00E+09	1.21E+07
Eu-154	1.88E+09	9.43E+08	1.12E+07

表 20 La Crosse 核電廠 WGTV 回填地下室各使用情境經調整之 BcDCGL

ROC	WGTV Adjusted BFM DCGL _{BS} (pCi/m ²)		
	Insitu GW	Insitu Drilling Spoils	Excavation
Co-60	6.23E+07	3.86E+08	4.43E+06
Sr-90	6.42E+06	2.20E+11	2.28E+09
Cs-137	1.52E+08	1.58E+09	2.01E+07
Eu-152	2.28E+09	8.16E+08	9.84E+06
Eu-154	1.57E+09	7.67E+08	9.12E+06

表 21 La Crosse 核電廠回填地下室經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL

Radionuclide	Reactor Building Base Case DCGL (DCGL_B) (pCi/m²)	Reactor Building Operational DCGL (OpDCGL_B) (pCi/m²)	WGTV Base Case DCGL (DCGL_B) (pCi/m²)	WGTV Operational DCGL (OpDCGL_B) (pCi/m²)
Co-60	5.16E+06	3.61E+05	4.10E+06	2.87E+05
Sr-90	1.45E+07	1.02E+06	6.40E+06	4.48E+05
Cs-137	2.17E+07	1.52E+06	1.76E+07	1.23E+06
Eu-152	1.19E+07	8.33E+05	9.69E+06	6.78E+05
Eu-154	1.10E+07	7.71E+05	8.97E+06	6.28E+05

5.4.6.2 土壤 DCGL

表 22 La Crosse 核電廠土壤經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL

Radionuclide	Base Case DCGL (DCGL_s) (pCi/g)	Operational DCGL (OpDCGL_s) (pCi/g)
Co-60	1.06E+01	3.83E+00
Sr-90	5.47E+03	1.97E+03
Cs-137	4.83E+01	1.74E+01
Eu-152	2.36E+01	8.51E+00
Eu-154	2.19E+01	7.89E+00

5.4.6.3 地下埋管 DCGL

表 23 La Crosse 核電廠地下埋管經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL

ROC	Buried Pipe Group (dpm/100 cm²)	Buried Pipe Circulating Water Discharge (dpm/100 cm²)
Co-60	7.50E+04	7.75E+04
Sr-90	5.16E+05	7.55E+05
Cs-137	3.18E+05	3.30E+05
Eu-152	1.64E+05	1.67E+05
Eu-154	1.52E+05	1.56E+05

表 24 La Crosse 核電廠地下埋管經調整之 OpDCGL

ROC	Buried Pipe Group OpDCGL _{BP} (dpm/100 cm ²)	Buried Pipe Circulating Water Discharge OpDCGL _{BP} (dpm/100 cm ²)
Co-60	1.57E+04	1.63E+04
Sr-90	1.08E+05	1.58E+05
Cs-137	6.68E+04	6.94E+04
Eu-152	3.44E+04	3.51E+04
Eu-154	3.20E+04	3.27E+04

5.4.6.4 保留地上建築 DCGL

表 25 La Crosse 核電廠保留地上建築經調整之 BcDCGL 與 OpDCGL

Radionuclide	Above-Grade Building Base Case DCGL (DCGL _{AGB}) (dpm/100 cm ²)	Above-Grade Building Operational DCGL (OpDCGL _{AGB}) (dpm/100 cm ²)
Co-60	7,100	1,136
Sr-90	8,700	1,392
Cs-137	28,000	4,480
Eu-152	12,700	2,032
Eu-154	11,500	1,840

5.4.7 面積因子(Area Factor)

最終狀態偵檢的統計檢定是針對「整個偵檢單位」的「平均狀況」進行判斷。當某個土壤偵檢單元內出現核種活度平均低於 DCGL_w，但小區域中卻有高於 DCGL 的情況時，須進行 EMC(Elevated Measurement Comparison)，判斷是否仍符合劑量標準。進行 EMC 的方法請參考 4.10.3 節。La Crosse 核電廠使用 RESRAD 計算出進行 EMC 所需的土壤面積因子，計算結果如表 26。

表 26 La Crosse 核電廠面積因子

Radionuclide	Area Factor				
	1 m ²	2 m ²	5 m ²	10 m ²	100 m ²
Co-60	9.44	5.56	3.07	2.04	1.19
Sr-90	11.22	6.66	3.69	2.45	1.41
Cs-137	9.11	5.42	3.01	2.00	1.18

5.4.8 偵檢單元之偵檢結果評估

完成一偵檢單元的最終狀態偵檢後，應依照 LTP 的內容，對偵檢單元的偵檢量測

結果進行評估。首先先評估依據偵檢結果是否需進行調查(請參考 4.9 小節)，如偵檢結果超過調查基準，應針對活度偏高區域進行更多的量測。偵檢單元偵檢結果的評估方法請參考 4.10 小節，通過評估代表該偵檢單元符合外釋標準。

5.4.9 地下結構偵檢結果評估

依據 La Crosse 核電廠 LTP 第 5.5.4 節，對於建築結構，若出現判斷性量測值高於 OpDCGL 且 OpSOF 大於 1 時(Elevated Judgmental Measurements)，其貢獻的劑量需以「面積加權法(Area-Weighted Approach)」納入考量。此方法先計算面積加權 SOF，並將其加至系統性測量的平均 SOF，所得總和再用於計算該地下室偵檢單元的總體劑量。方程式 1 為面積加權 SOF 的計算公式。

$$SOF_B = \sum_{i=1}^n \frac{Mean\ Conc_{B_{ROC_i}}}{Base\ Case\ DCGL_{B_{ROC_i}}} + \frac{(Elev\ Conc_{B_{ROC_i}} - Mean\ Conc_{B_{ROC_i}})}{\left[Base\ Case\ DCGL_{B_{ROC_i}} \times \left(\frac{SA_{SU}}{SA_{Elev}}\right)\right]}$$

where:

SOF_B	= SOF for structural surface survey unit within a Basement using Base Case DCGLs
$Mean\ Conc_{B_{ROC_i}}$	= Mean concentration for the systematic measurements taken during the FSS of structural surface in survey unit for each ROC_i
$Base\ Case\ DCGL_{B_{ROC_i}}$	= Base Case DCGL for structural surfaces ($DCGL_B$) for each ROC_i
$Elev\ Conc_{B_{ROC_i}}$	= Concentration for ROC_i in any identified elevated area (systematic or judgmental)
SA_{Elev}	= surface area of the elevated area
SA_{SU}	= adjusted surface area of FSS unit for DCGL calculation

方程式 1 La Crosse 核電廠地下結構劑量偏高區域面積加權 SOF 計算公式

5.4.10 證明合規劑量(Demonstrating Compliance with Dose Criterion)

完成每一個偵檢單元最終狀態偵檢結果評估後，需計算來自核電廠每一個潛在輻射媒介(Media)的劑量總和，確保加總所有媒介後的劑量不超過劑量標準。La Crosse 核電廠有五種潛在殘餘輻射來源媒介：回填地下室、土壤、地下埋管、保留地上建築，以及地下水。

方程式 2 為 La Crosse 核電廠的合規劑量計算公式。Max BcSOF_{BASEMET} 和 Max BcSOF_{BURIED PIPE} 項目分別代表回填地下室和地下埋管總和不同情境後之最大偵檢單元平均劑量。為了保守地考慮來自不同區域偵檢單元的地下水濃度可能在下游混合，進而增加對關鍵群體平均成員(AMCG)的總劑量，在計算合規劑量時，回填地下室和地下埋管另外納入另一個不用於計算最大平均劑量之偵檢單元所的原位地下水情境模型的劑量，分別以 Max BcSOF_{BS OB} 和 Max BcSOF_{BPS OB} 項目表示。

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

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)

方程式 2 La Crosse 核電廠合規劑量計算公式

5.5 最終狀態偵檢進行階段

La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢的執行分為三個階段(Phase)進行，各階段的偵檢單元數請參考表 27。

圖 6~ 圖 8 分別為三個階段的偵檢單元位置圖。圖中次表土(Sub-surface)偵檢單元區域以交叉斜線表示，表土(Surface)區域以單斜線表示。在第三階段最終狀態偵檢報告(FSSR)內容中，除了該階段偵檢單元的偵檢結果，還說明了地下水劑量計算方法與評估結果，以及 La Crosse 合規劑量評估結果。

表 27 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢各階段偵檢單元數

偵檢單元數	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
第一階段	第 1 級	-	4	2	-	-
	第 2 級	2	-	-	-	-
	第 3 級	1	-	-	-	-
第二階段	第 1 級	-	-	-	-	1
	第 2 級	-	-	-	3	5
	第 3 級	-	-	-	5	4
第三階段	第 1 級	7	3	-	-	-
	第 2 級	2	-	-	-	-
	第 3 級	2	-	-	-	-

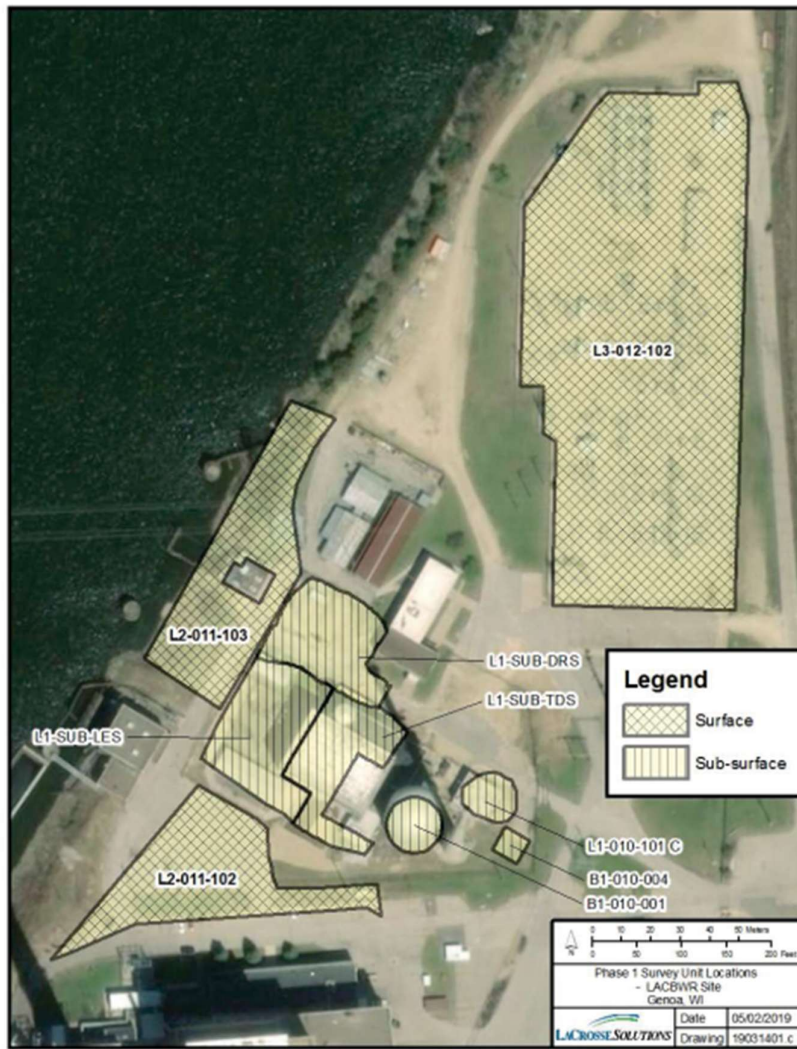


圖 6 La Crosse 核電廠第一階段偵檢單元位置圖



圖 7 La Crosse 核電廠第二階段偵檢單元位置圖

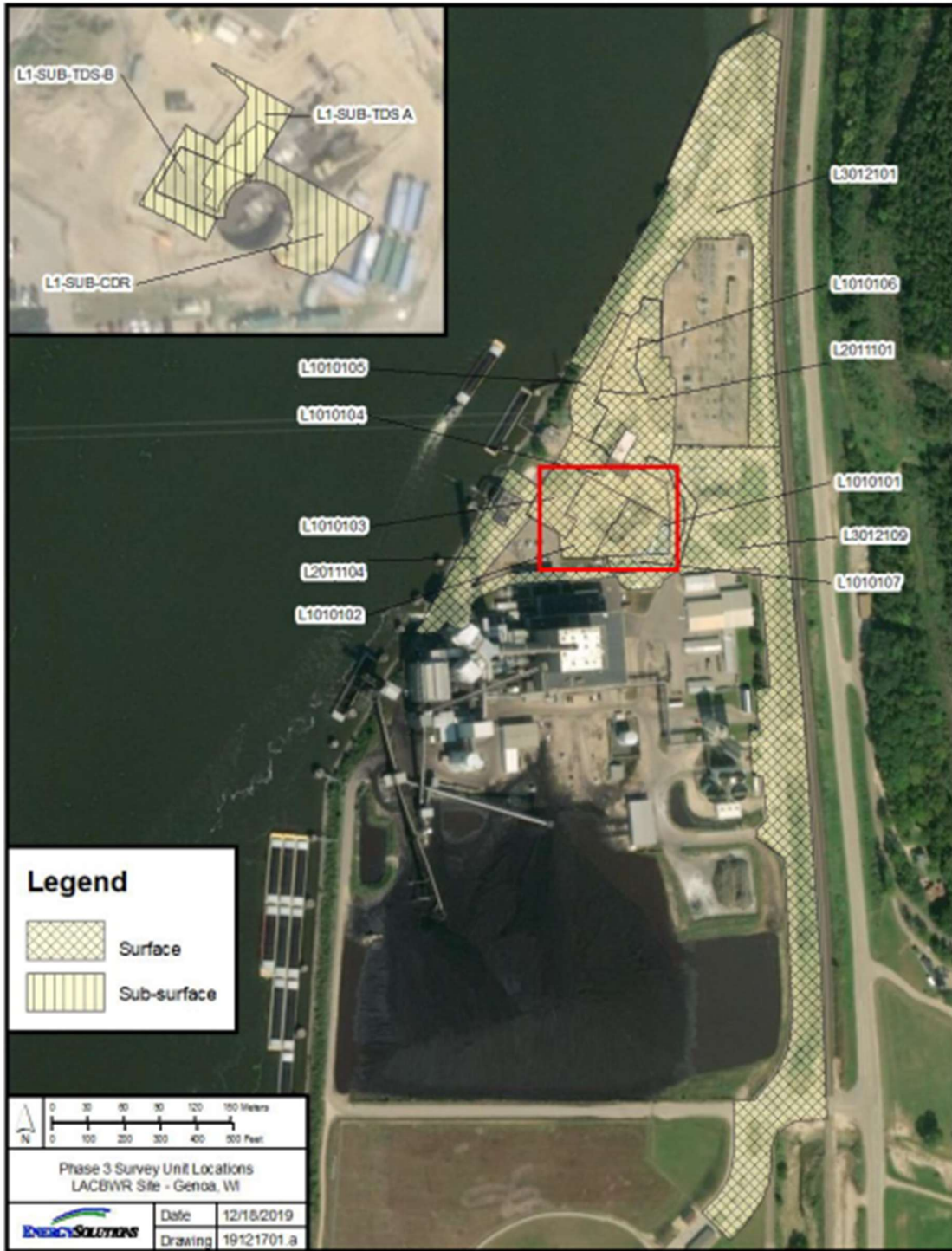


圖 8 La Crosse 核電廠第三階段偵檢單元位置圖

5.6 La Crosse 核電廠第 1 級偵檢單元最終狀態偵檢結果

5.6.1 偵檢單元分類與偵檢單元編號

La Crosse 核電廠在最終狀態偵檢設計中，將土壤偵檢單元又細分為開放土地區域 (OLA, Open Land Area) 以及挖掘區 (SGE, Sub-Grade Excavation) 兩類，其中，挖掘區指的是反應器廠房與 WGTV 廠房建築拆除至至少地下 3 英尺後後裸露的土壤區域。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。唯一例外為偵檢單元 L1-010-101C，此偵檢單元編號中沒有“SUB”，但卻屬於挖掘區，其原因是此挖掘區再進行最終狀態偵檢時已被回填，為補救無法於挖掘狀態進行掃描，LS 使用 GeoProbe 技術收集了更多的系統性土壤樣本。

挖掘區 (SGE) 偵檢單元之分級皆為第 1 級，且填土前後皆須進行偵檢，因此，挖掘區完成偵檢並填土後，亦須進行開放土地 (OLA) 偵檢，故從平面圖上看，挖掘區偵檢單元區域和開放土地偵檢單元區域會有所重疊。

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢將建築與結構偵檢單元細分為地下室結構 (STB, Structure Basement)、地上建築 (AGB, Above-Grade Building)，和地下埋管 (BP, Buried Piping) 三類。此三類偵檢單元的第一碼為偵檢單元類別 (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)，第二碼為區域分級，3-8 碼為阿拉伯數字。

5.6.2 第 1 級土壤偵檢單元最終狀態偵檢

La Crosse 核電廠總共有 7 個第 1 級挖掘區 (SGE) 偵檢單元和 7 個第 1 級開放土地 (OLA) 偵檢單元，其中，4 個挖掘區偵檢單元於第一階段進行偵檢，3 個挖掘區和 7 個開放土地偵檢單元於第三階段進行偵檢。表 28 為 La Crosse 核電廠第 1 級土壤偵檢單元列表。

表 28 La Crosse 核電廠第 1 級土壤偵檢單元列表

階段	偵檢單元編號	類別	名稱	尺寸 (m ²)
一	L1-SUB-DRS	挖掘區	RCA North Area Excavation	1,125
一	L1-SUB-TDS	挖掘區	TB, Sump, Pit Diesel Excavation	1,186
一	L1-SUB-LES	挖掘區	LSA, Eat Shack, Septic Excavation	1,336
一	L1-010-101C	挖掘區	Waste Treatment Building Excavation	88
三	L1-010-101	開放土地	Reactor Building, WTB, WGTV, Ventilation Stack Grounds	1,992
三	L1-010-102	開放土地	Turbine Building, Turbine Office Building, 1B Diesel Generator Building Grounds	2,315

階段	偵檢單元編號	類別	名稱	尺寸 (m ²)
三	L1-010-103	開放土地	LSA Building, Maintenance Eat Shack Grounds	1,749
三	L1-010-104	開放土地	North LSE Grounds	2,387
三	L1-010-105	開放土地	North Interim Debris Storage Area	1,974
三	L1-010-106	開放土地	North Loading Area	1,936
三	L1-010-107	開放土地	Outside East LSE Area	1,675
三	L1-SUB-CDR	挖掘區	Stack, Pipe Tunnel, RPGPA	431
三	L1-SUB-TDS A	挖掘區	Eastern Portion TB, Sump, Pit, Diesel	476
三	L1-SUB-TDS B	挖掘區	RPGPA Area	259

5.6.2.1 偵檢量測方法

土壤偵檢單元量測方法主要有掃描及取樣，取樣包含表土及次表土取樣。

掃描使用的儀器為 Ludlum Model 2350-1 資料記錄器 搭配 Ludlum Model 44-10 偵檢器，以步行速度不超過 0.5 公尺/秒 探頭盡可能靠近地面方式進行。掃描發現高讀數的區域會被標記，並進行調查取樣。

表土樣本取樣深度為地表至地表以下 0.15 公尺。在 第 1 級土壤偵檢單元中，10% 的表土取樣位置需要額外採集次表土樣本。

實驗室儀器的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%，但只要經過保健物理監督人員的評估，考量實際 MDC、報告值、報告的不確定性以及樣本中 OpDCGL 比例，這些結果仍可被接受為有效數據。

根據 LTP，最終狀態偵檢取的樣本中的 10%，或者任何超過 OpDCGL 10%的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，HTD ROC 分析的目的為確認放射性核種的組成比例與 LTP 中之數據無顯著差異。

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。此外，隨機選擇至少 5%的取樣點位置取樣以及在每個偵檢單元中至少收集一個重複土壤樣本，進行用於品質管控(QC)偵檢。

5.6.2.2 調查基準

調查基準設定的目的是為了識別出可能存在活度升高的區域。第 1 級土壤偵檢單元的調查基準如下：

1. 掃描調查基準(Scan Investigation Levels)：掃描調查基準為大於 OpDCGL 或大於掃描 MDC(當掃描 MDC 大於 OpDCGL 時)。
2. 樣本/靜態量測調查基準 (Direct Investigation Levels)：取樣或靜態量測結果的調查基準為大於 OpDCGL。
3. 若表土樣本或表面加馬掃描的結果土壤 OpDCGL 的 75%，則必須在該關注

區域內採集次表土樣本，作為調查。

4. 任何超過 OpDCGL 10%的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析。

5.6.2.3 掃描涵蓋率及取樣樣本數

據 MARSSIM 建議，第 1 級偵檢單元應進行 100% 的掃描，並透過統計檢定計算所需樣本數。La Crosse 核電廠的 7 個第 1 級土壤偵檢單元全數達到 100% 掃描涵蓋率。統計檢定以符號檢定(Sign Test)作為非參數統計檢定方法，可容許的型一錯誤(Type I Error)和型二錯誤(Type II Error)率皆設為 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%。取樣位置則使用 Visual Sample Plan (VSP)進行規劃。

最終狀態偵檢報告中(FSSR)的樣本或 ISOCS 量測有分三種：

1. 隨機/系統性(Random/Systematic): 取樣或量測結果用於判斷偵檢單元是否符合輻射標準。
2. 判斷性(Judgmental): 針對潛在污染最高或最值得關注的特定地點進行的取樣或量測。
3. 調查用(Investigational): 當偵檢單元中有量測結果超過調查基準時進行取樣或量測。

L1-SUB-TDS B 是第三階段最終狀態偵檢報告中的一個第 1 級挖掘區(Class 1 Sub-Grade Excavation, SGE) 偵檢單元。L1-SUB-TDS B 位於反應器廠房發電機區域(Reactor Plant Generator Plant Area, RPGPA)的集水槽區(Sump Area)，L1-SUB-TDS B 的面積為 259 m²，其中包括原集水槽區域(39 m²)。由於該挖掘深度極深(最大深度達地表以下 21 英尺)，且部分區域位於地下水位以下，此偵檢單元在進行最終狀態偵檢前已被回填，因此無法執行加馬掃描。為了彌補缺乏掃描數據，該偵檢單元採取了增強的系統性取樣，此外，此單元還採集了 32 個判斷性(Judgmental)樣本。L1-SUB-TDS B 採用 GeoProbe 技術進行土壤取樣，共於 28 個位置進行取樣，每個取樣點採集 4 個樣本，並從每個取樣點所採集的 4 個樣本中，中選取 Cs-137 濃度最高的一個樣本，共 28 個樣本，用於最終的符號檢定統計測試。La Crosse 核電廠最終狀態偵檢第 1 級土壤偵檢單元樣本或量測點數請參考表 29。

表 29 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢第 1 級土壤偵檢單元樣本數

偵檢單元編號	樣本數		
	系統性	判斷性	調查用
L1-SUB-DRS	14	6	0
L1-SUB-TDS	14	10	0
L1-SUB-LES	14	1	0
L1-010-101C	15	0	0
L1-010-101	14	3	0
L1-010-102	14	2	2

偵檢單元編號	樣本數		
	系統性	判斷性	調查用
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
L1-SUB-CDR	14	0	6
L1-SUB-TDS A	14	4	4
L1-SUB-TDS B	28	32	0

5.6.2.4 挖掘區域之偵檢規範

La Crosse 核電廠 TLP 中規範當拆除潛在受污染的地下結構(如反應器廠房或廢氣貯存槽地下室)或鋪設路面(如柏油路或混凝土墊)被移除後，產生的挖掘區域在回填之前必須進行 FSS，並輔以除污作業輔助偵檢 (Remedial Action Support Surveys, RASS)。挖掘區 FSS 設計為開放土地偵檢(土壤)，並使用被移除建築結構物所屬的分級作為其分級。

若 RASS 偵檢結果顯示濃度低於土壤的 OpDCGL，則評估該區域適合進行 FSS。在 FSS 規劃中，任何為移除地下結構而產生的土壤挖掘區，會被規劃為一個開放土地偵檢單元。挖掘區 FSS 偵檢應對挖掘後暴露的次表層土壤進行掃描，與土壤樣本分析結合使用，並使用土壤的 OpDCGL 作為釋出標準。

5.6.2.5 數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

La Crosse 核電廠所有第 1 級土壤偵檢單元偵檢單元均未出現超過調查基準需進行調查的結果。

5.6.3 第 1 級回填地下室偵檢最終狀態偵檢

La Crosse 核電廠總共有 2 個第 1 級回填地下室偵檢單元，皆於第一階段進行偵檢，分別是反應器廠房(B1-010-001)與 WGTV(B1-010-004)回填地下室。表 30 為 La Crosse 核電廠第 1 級回填地下室偵檢單元列表。

表 30 La Crosse 核電廠第 1 級回填地下室偵檢單元列表

階段	偵檢單元編號	類別	名稱	尺寸 (m ²)
一	B1-010-004	地下結構	Waste Gas Tank Vault Basement	311
一	B1-010-001	地下結構	Reactor Building Basement	512

5.6.3.1 偵檢量測方法

回填地下室偵檢單元量測工具採用 Canberra In-Situ Object Counting System (ISOCS)，ISOCS 量測可直接確定混凝土深處的總活度，單次 ISOCS 量測所涵蓋的表面積很大(通常範圍為 10~30 m²)，故第 1 級結構偵檢單元所需的 100% 掃描涵蓋率，是透過確保偵檢單元 100% 的表面積被系統性 ISOCS 量測的視野(Field-of-View, FOV)所涵蓋來實現的。

實驗室儀器與 ISOCS 的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%，但只要經過保健物理監督人員的評估，考量實際 MDC、報告值、報告的不確定性以及樣本中 OpDCGL 比例，這些結果仍可被接受為有效數據。

根據 LTP，所有最終狀態偵檢取的樣本都會進行廠內加馬分析，且 10% 的系統性或隨機樣本，或活度超過 OpDCGL 10% 之樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，HTD ROC 分析的目的為確認放射性核種的組成比例與 LTP 中之數據無顯著差異。

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。此外，隨機選擇至少 5% 的取樣點位置取樣以及在每個偵檢單元中至少收集一個重複樣本，進行用於品質管控(QC)偵檢。

5.6.3.2 調查基準

調查基準設定的目的是為了識別出可能存在活度升高的區域。第 1 級結構偵檢單元的調查基準為大於 OpDCGL。

5.6.3.3 掃描涵蓋率及量測點數

雖然 MARSSIM 要求第 1 級偵檢單元應進行 100% 的掃描，但地下結構最終狀態偵檢採用的是 [ISOCS](#)(In-Situ Object Counting System)進行量測，透過 ISOCS 量測視野(FOC)，實質上可代替傳統掃描，達到 100% 的覆蓋率。

最終狀態偵檢報告中(FSSR)的樣本或 ISOCS 量測有分三種：

1. 隨機/系統性(Random/Systematic)：取樣或量測結果用於判斷偵檢單元是否符合輻射標準。
2. 判斷性(Judgmental)：針對潛在污染最高或最值得關注的特定地點進行的取樣或量測。
3. 調查用(Investigational)：當偵檢單元中有量測結果超過調查基準時進行取樣或量測。

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢第 1 級回填地下室偵檢單元樣量測點數請參考表 31。除了 ISOCS 靜態量測外，在 10% 的 ISOCS 量測位置採集混凝土芯樣本，已評估 HTD 與替代放射性核種的比率是否仍然有效。

表 31 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢回填地下室偵檢單元 ISOCS 量測點數

偵檢單元編號	回填地下室 ISOCS 量測點數		
	隨機/系統性	判斷性	調查用
B1-010-004	22	1	0
B1-010-001	45	6	0

5.6.3.4 數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

根據 La Crosse 核電廠 LTP 第 5.5.4 節，對於建築結構，若出現判斷性量測值高於 OpDCGL 且 OpSOF 大於 1 時(Elevated Judgmental Measurements)，其貢獻的劑量需以「面積加權法(Area-Weighted Approach)」納入考量。此方法先計算面積加權 SOF，並將其加至系統性測量的平均 SOF，所得總和再用於計算該地下室偵檢單元的總體劑量。(參見方程式 1)

La Crosse 核電廠的兩個回填地下室皆有判斷性量測值高於 OpDCGL 之量測結果，因此皆須以面積加權 SOF 的公式計算地下結構偵檢單元之 SOF 值。

1. 在偵檢單元 B1-010-004 (WGTV 回填地下室)中，有一筆判斷性 ISOCS 測量結果超過 OpDCGL，其 OpSOF 為 14.1505，BcDCG 為 0.9893。將該判斷性量測點的面積加權 SOF 加上系統性測量的平均 BcSOF，計算出該偵檢單元的劑量為 0.5813 mrem/yr。
2. 在偵檢單元 B1-010-001(反應器廠房回填地下室) 中，有兩筆判斷性 ISOCS 測量結果超過 OpDCGL，其 OpSOF 分別為 1.0542 與 1.0734，BcDCGL 分別為 0.074 與 0.0753。將這兩個判斷性測量點的面積加權 SOF 加至系統性測量的平均 SOF，計算出該偵檢單元的劑量為 0.015。

5.6.4 第 1 級地下埋管偵檢單元最終狀態偵檢

La Crosse 核電廠地下埋管被劃分為兩大類：

1. 循環水排放管(Circulating Water Discharge Pipe, CWD)：包含一個偵檢單元 S1-011-102。
2. 地下埋管群 (Buried Pipe Group)：包含所有其他受影響的地下埋管。

地下埋管中，只有循環水排放管偵檢單元 S1-011-102 屬於第 1 級偵檢單元，此偵檢單元於第二階段進行偵檢。表 32 為 La Crosse 核電廠第 1 級地下埋管偵檢單元列表。

表 32 La Crosse 核電廠第 1 級地下埋管偵檢單元列表

階段	偵檢單元編號	類別	名稱	尺寸 (m ²)
三	S1-011-102	地下埋管	Circulating Water Discharge Pipe	614

5.6.4.1 偵檢量測方法

由於地下埋管偵測的是管道內部表面，無法進行傳統掃描，偵檢作業是透過將適當尺寸的偵測器插入管道內部來獲取直接加馬測量。La Crosse 採用 Ludlum Model 44-10 NaI 偵測器進行地下埋管的 FSS 偵檢，將偵測器安裝在滑橇或定位裝置上推入管道內部，進行定點靜態測量，透過靜態量測位置達到管內表面的 100% 面積偵檢涵蓋率。

在 LTP 的偵檢計畫中，地下埋管靜態測量結果輸出以每英尺管道通過的總加馬每分鐘計數(cpm)表示。此 cpm 值除已偵測器的效率後，轉換為每分鐘衰變數(dpm)，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 單位的測量結果。(請參考本報告 4.4.2 小節)

然而，偵檢計畫中偵測器效率是針對平面幾何形狀進行計算的，實際 FSS 測量卻是在圓形 PVC 管道內部進行，這種幾何形狀的差異造成原本的偵測器效率計算結果不準確。為了修正這個誤差，LS 使用 MCNP(Monte Carlo Neutral Particle) 程式模擬 NaI 偵檢器在不同管徑下的反應，並產出效率修正因子。

最終狀態偵檢報告中，地下埋管現場測得的 cpm(每分鐘計數) 採用經 MCNP 模型計算出的效率修正因子進行計算，轉換為 dpm(每分鐘衰變數)算，以確保計算出的單位面積活度(dpm/100 m²)數據是合理的。

5.6.4.2 調查基準

調查基準設定的目的是為了識別出可能存在活度升高的區域。第 1 級結構偵檢單元的調查基準為大於 OpDCGL。

5.6.4.3 掃描涵蓋率及量測點數

雖然 MARSSIM 要求 第 1 級偵檢單元應進行 100% 的掃描，但地下埋管管線內部表面的偵檢，未進行掃描，而是透過「推拉式」(Push Pull)方法，將偵測器插入管線內進行靜態量測，並確保其偵測涵蓋到 100% 的面積。

最終狀態偵檢報告中(FSSR)的樣本或 ISOCS 量測有分三種：

1. 隨機/系統性(Random/Systematic): 取樣或量測結果用於判斷偵檢單元是否符合輻射標準。
2. 判斷性(Judgmental): 針對潛在污染最高或最值得關注的特定地點進行的取樣或量測。
3. 調查用(Investigational): 當偵檢單元中有量測結果超過調查基準時進行取樣或量測。

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢第 1 級地下埋管偵檢單元樣靜態量測點數請參考表 33。

表 33 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢地下埋管偵檢單元量測數

偵檢單元編號	地下埋管 ISOCS 量測點數		
	隨機/系統性	判斷性	調查用
S1-011-102	510	2	0

5.6.4.4 數據異常/升高之掃描結果以及調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

La Crosse 核電廠第 1 級和第 2 級地下埋管偵檢單元均未出現超過調查基準需進行調查的結果，但有一個第 3 級偵檢單元 S3-012-109 A((Storm Drain)於管道彎曲處的偵檢結果超過調查基準，因此進行調查。調查方法為在管道讀數偏高的位置上方地面進行 ISOCS 量測，並於相同位置採集土壤樣本。加馬能譜和土壤樣本分析顯示 K-40 是唯一被識別的放射性核種，確認讀數略高的原因並非來自核電廠運轉造成的污染，而是因管道幾何形狀或天然放射性核種所致。S3-012-109 A 偵檢單元 FSS 偵檢結果的平均 SOF 為 0.1204，相當於劑量 3.0112 mrem/yr。

補充說明：在管道彎道處為何會造成讀數升高？

在管道內部掃描量測加馬數據時，為確保測量結果的準確性，探測器必須與被測表面保持固定距離，但在管道彎道位置，探測器可能無法維持標準距離。若將彎道處的讀數以標準直管幾何轉換，轉換後的單位面積活度讀數會「略高於正常值」。

5.6.5 第 1 級保留地上建築偵檢單元最終狀態偵檢

La Crosse 核電廠共有 3 個第 2 級與 5 個第 3 級保留地上建築偵檢單元，但並沒有第 1 級保留地上建築偵檢單元。

5.6.6 現存地下水(Existing Groundwater)偵檢

5.6.6.1 地下水監測方法

La Crosse 核電廠自反應器於 1987 年永久關閉以來，廠區的地下水監測工作便持續進行，於 2012 年末額外安裝了五對地下水監測井，用以進行地下水評估。圖 9 為 La Crosse 核電廠地下水取樣井位置，取樣頻率為：

1. LaCrosseSolutions 於 2014 年至 2018 年 6 月期間，以半年一次的頻率從監測和供應水井收集地下水樣本，定期進行地下水取樣與分析，以追蹤氫(H-3)濃度的變化。
2. 2018 年 10 月至 2019 年 7 月期間因除役作業造成地下水污染，地下水取樣改為每月一次。
3. 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根據 NRC 的同意，於 2019 年 10 月 1 日廢止。

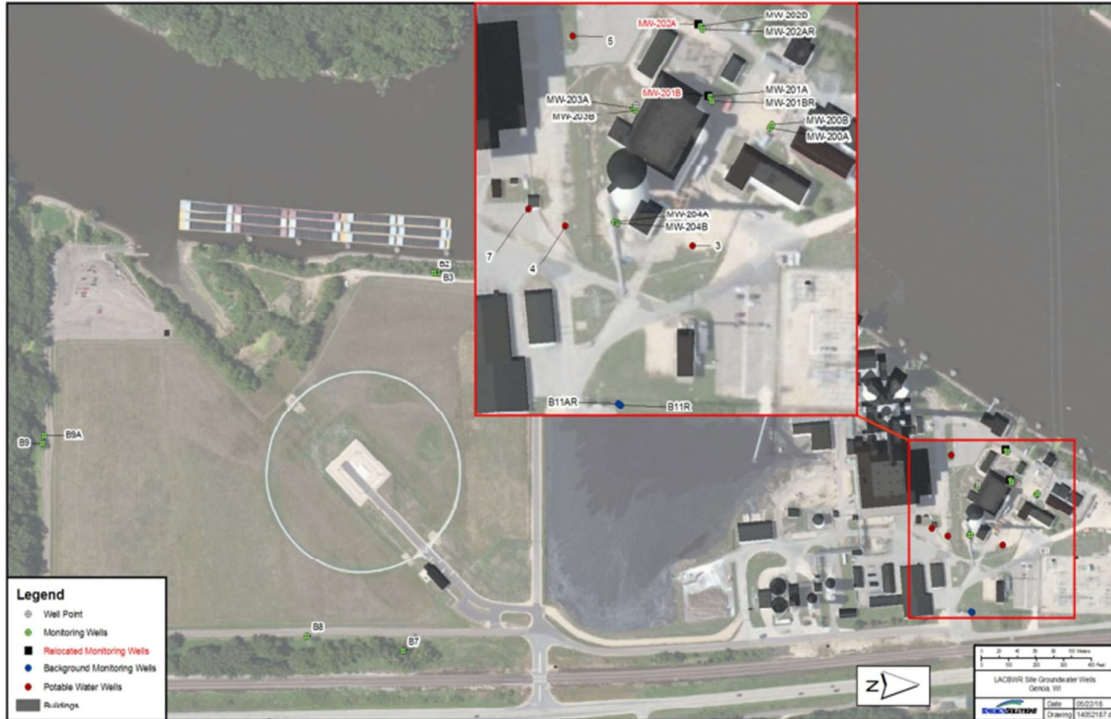


圖 9 La Crosse 核電廠地下水取樣井位置

5.6.6.2 1983 年汽機廠房下方的地下水污染事件

1983 年在汽機廠房下游發現地下水污染，判斷與廠房下方疑似破損的地板排水管有關。2018 年 2 月，汽機廠房的地基被完全移除，包括所有破損的排水管及鄰近土壤，藉由移除這些破損結構，防止其繼續向環境洩漏污染，移除汽機廠房地板後，對位於排水管線下方的區域進行額外的判斷性取樣。

5.6.6.3 除役作業造成之地下水污染

2017 年 12 月前的地下水取樣結果顯示，地下水污染濃度比 1983 年時更低，但於 2017 年 12 月的地下水取樣中，偵測到氬濃度升高。

2018 年 3 月 12 日，LaCrosseSolutions 向 NRC 通報廠址地下水井中檢出超過背景值的氬。經過調查，污染源確認為反應器廠房通風系統的廢氣，這些廢氣在廠房除污和拆除作業期間排出，污染了凍土上的冰雪與融冰。

調查方法為：

1. 從反應器廠房通風系統排氣點下方的冰雪融化/積水進行取樣。
2. 對所有監測井進行更高頻率的取樣：
 - 2014 年至 2018 年 6 月：每半年收集一次監測井與供水井的地下水樣本。
 - 2018 年 10 月至 2019 年 7 月：改為每月取樣。
3. 建立地下水傳輸數值模型(Numerical Groundwater Transport Model)以評估劑量，

並將螢光染料引入反應器池(Sump)中以協助模型校準。

調查結果評估：

1. 反應器廠房通風系統排氣點下方地表的冰雪融化/積水的樣本中，氚濃度高達約 237,000 pCi/L。
2. 監測井氚濃度：於 2018 年 2 月出現最高濃度 24,200 pCi/L，相當於 0.506 mrem/yr，後續取樣顯示氚濃度呈現下降趨勢。
3. 地下水傳輸數值模型評估結果：
 - 據模型評估，地下水氚濃度最高可能曾於短暫幾個月中達到約 60,000 pCi/L，此後濃度便持續下降。
 - 排放到密西西比河的的峰值濃度約 10,000 pCi/L(低於 EPA 的 20,000 pCi/L 的最大允許濃度)。

5.6.6.4 地下水劑量評估

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢規劃時，將之地下水劑量限值設 3.25 mrem/yr(25 mrem/yr 的 13%)。La Crosse 核電廠 LTP 規劃中，最終狀態地下水劑量，以地下水監測井過去兩年內所監測到的最大核種濃度所計算出之劑量作為合規劑量。

但因在 2017 年 12 月發現因除役拆除作業造成的地下水污染，故在最終狀態偵檢報告中，以更保守的方式，估算地下水劑量，計算方式說明如下：

1. 在除役拆除作業造成的地下水污染事故發生前
地下水監測井監測到的最大核種濃度時間為 2014 年 6 月，對應的劑量為 0.471 mrem/yr。雖然超過了兩年內的時限，LaCrosseSolutions 仍保守地將 0.471 mrem/yr，納入合規劑量中。
2. 在除役拆除作業造成的地下水污染後
 - 檢測到地下水氚濃度最大值為 24,200 pCi/L，檢測到的時間是 2018 年 2 月，對應的劑量為 0.506 mrem/yr。
 - 檢測到地表氚濃度最大值為 237,000 pCi/L，根據 NRC 的經驗，地下水和地表水的氚濃度比例最高不超過 1/2，NRC 判斷 110,000 pCi/L 足夠接近地表水氚濃度(氚濃度為 237,000 pCi/L)的一半，並認為使用 110,000 pCi/L 所對應的劑量(2.299 mrem/yr) 可作為地下水的合規劑量。
3. 將除役拆除作業造成的地下水污染前後地下水依據監測及檢測到之最大劑量值相加作為地下水合規劑量。

補充說明：La Crosse 在 LTP 更一版提交前即已針對因除役作業造成地下水污染問題進行處理與評估。NRC 於 2019 年 5 月通過對 La Crosse 核電廠 LTP 更一版的安全評估審查(SER)。

5.7 La Crosse 核電廠合規劑量

La Crosse 核電廠第三階段最終狀態偵檢報告(Phase 3 FSSR)中包含核電廠的合規劑量計算結果，合規劑量的計算公式請參考方程式 2。

表 34~ 表 39 為 La Crosse 核電廠各輻射來源之偵檢單元的劑量評估結果，以輻射媒介中最大的偵檢單元劑量評估值作為該輻射媒介之合規劑量值(用藍色底色表示)，其中最大劑量來源為地下埋管(3.0112 mrem/yr)。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(參見表 40)，小於 25 mrem/yr，符合除役輻射標準。

5.7.6.1 土壤合規劑量

La Crosse 核電廠土壤偵檢單元平均劑量參見表 34。

平均劑量最大的偵檢單元為 L1-SUB-CDR，L1-SUB-CDR 是第三階段最終狀態偵檢報告中的一個第 1 級挖掘區(Class 1 Sub-Grade Excavation, SGE)偵檢單元。L1-SUB-CDR 偵檢單元位於 L1-010-101 開放土地偵檢單元內，該區域是移除煙囪(Stack)、管道通路(Pipe Tunnel)和反應器廠房發電區域(RPGPA)地基之後的底層土壤，總表面積為 431 m²。L1-SUB-CDR 的最終狀態偵檢共採集了 14 個系統性土壤樣本進行符號檢定，並採集了 6 個調查樣本。此偵檢單元所採集之 14 個系統性土壤樣本的評估結果，平均 BcSOF 為 0.0408，劑量貢獻為 1.0190 mrem/yr。因 L1-SUB-CDR 是所有土壤偵檢單元中劑量貢獻最高的，故以此偵檢單元偵檢結果平均劑量(1.0190 mrem/yr)，作為來自土壤輻射媒介之合規劑量。

表 34 La Crosse 核電廠土壤偵檢單元平均劑量

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

5.7.6.2 回填地下室合規劑量

回填地下室有兩個偵檢單元：B1-010-004(WGTV 地下室)和 B1-010-001(反應器廠房地下室)。

回填地下室劑量模型考慮三種不同情境，原位地下水情境(BFM Insitu_{gw})、原位鑽井廢料情境(BFM Insitu_{ds})，以及挖掘情境(BFM Excavation Scenario)。回填地下室偵檢單元平均劑量計算方法為總和三種情境後的劑量。

方程式 2 為 La Crosse 核電廠的合規劑量計算公式。Max BcSOF_{BASEMET} 項代表回填地下室偵檢單元中平均劑量最高者之 BcSOF 值，偵檢單元 B1-010-004(WGTV 地下結構)為回填地下室偵檢單元中平均劑量最高的，其平均劑量為 0.5813 mrem/yr。

為了保守地考慮來自兩組偵檢單元的地下水濃度可能在下游混合，進而增加對關鍵群體平均成員(AMCG)的總劑量，在計算合規劑量時，回填地下室納入另一個不用於計算最大平均劑量之回填地下室偵檢單元的原位地下水情境模型的劑量，以 GW BcSOF_{BS OB} 項表示。

表 35 為 La Crosse 核電廠回填地下室偵檢單元平均劑量。由於 WGTV 回填地下室偵檢單元平均劑量大於反應器廠房地下室，合規劑量以 WGTV 評估劑量用做 MAX BcSOF_{BASEMENT} 項，評估劑量為 0.5813 mrem/yr。合規劑量之 GW BcSOF_{BS OB} 以反應器廠房地下室(B1-010-001)指定為「其他地下室(Other Basement, OB)」，其原位地下水

情境劑量為 0.0025 mrem/yr。

表 35 La Crosse 核電廠回填地下室偵檢單元平均劑量

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

5.7.6.3 地下埋管合規劑量

La Crosse 核電廠地下埋管被劃分為兩大類：

1. 循環水排放管(Circulating Water Discharge Pipe, CWD)：包含一個偵檢單元 S1-011-102。
2. 地下埋管群(Buried Pipe Group)：包含所有其他受影響的地下埋管。

地下埋管劑量模型考慮兩種不同情境，挖掘情境(Excavation Scenario)和原位地下水情境(Insitu Scenario)。回填地下室偵檢單元平均劑量計算方法為總和兩種情境後的劑量。

方程式 2 為 La Crosse 核電廠的合規劑量計算公式。Max BcSOF_{BURIED PIPE} 項代表地下埋管偵檢單元中平均劑量最高者之 BcSOF 值。

偵檢單元 S3-012-109A 為地下埋管偵檢單元中平均劑量最高者，其屬於地下埋管群，平均劑量為 3.0112 mrem/yr。

為了保守地考慮來自兩組偵檢單元的地下水濃度可能在下游混合，進而增加對關鍵群體平均成員(AMCG)的總劑量，在計算合規劑量時，地下埋管納入另一個不用於計算最大平均劑量之地下埋管偵檢單元的原位地下水情境模型的劑量，以 GW BcSOF_{BPS OBP} 項目表示。

GW BcSOF_{BPS OBP} 排除偵檢單元地下埋管偵檢單元中平均劑量最高之 S3-012-109A 偵檢單元後，從以下兩個偵檢單元中選取最高者：

1. S1-011-102：屬循環水排放管。
2. S2-011-101A：數地下埋管中的牌雨水管。

在比較 S1-011-102 和 S2-011-101A 的原位地下水情境劑量後，確認 S2-011-101A 的劑量貢獻較高，為 0.345 mrem/yr，因此，以此偵檢單元之原位地下水情境評估劑量作為 GW BcSOF_{BPS OBP} 項的合規劑量。

表 36 為 La Crosse 核電廠地下埋管偵檢單元平均劑量。表 37 為 a Crosse 核電廠「其他地下埋管」之原位地下水情境之劑量。

合規劑量中，回填地下室造成的劑量 Max BcSOF_{BURIED PIPE} 項為 3.0112 mrem/yr 加上其他地下埋管(Other Buried Pipe, OBP)之原位地下水情境劑量 0.345 mrem/yr。

表 36 La Crosse 核電廠地下埋管偵檢單元平均劑量

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 37 La Crosse 核電廠「其他地下埋管」之原位地下水情境之劑量

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

5.7.6.4 保留地上建築合規劑量

表 38 為 La Crosse 核電廠保留地上建築偵檢單元平均劑量，其中平均劑量最大的偵檢單元為 B2-010-101，平均劑量為 **0.5055 mrem/yr**，以此為地上建築之合規劑量。

表 38 La Crosse 核電廠保留地上建築偵檢單元平均劑量

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

5.7.6.5 現存地下水合規劑量(Existing Groundwater Dose)

因 La Crosse 核電廠曾因除役作業造成地下水污染，地下水合規劑量計算方法為以下兩項相加：

1. 在除役拆除作業造成的地下水污染事故發生前，地下水監測井監測到的最大核種濃度所對應之劑量 **0.471 mrem/yr**。
2. 在除役拆除作業造成的地下水污染後，最大地下水濃度評估劑量 **2.299 mrem/yr**。

表 39 為 La Crosse 核電廠地下水劑量評估結果。

表 39 La Crosse 核電廠地下水劑量評估結果

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

5.7.6.6 La Crosse 核電廠整體合規劑量

表 40 為 La Crosse 核電廠合規劑量計算結果，全廠所有媒介估算出之劑量為 8.2345 mrem/yr，小於 25 mrem/yr，符合除役輻射標準。

表 40 La Crosse 核電廠合規劑量

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 OBP}	0.0138	0.345
TOTAL	0.3294	8.2345

5.8 NRC 對 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢報告的審查與 LS 之回覆

NRC 對 La Crosse 核電廠的審查方式分為三類：

1. 確認偵檢：由第三方獨立機構進行。
2. 補充資訊要求(Request for Additional Information, RAI)
NRC 審查 ZS 提交之 FSSR 與偵檢單元的釋出紀錄(Release Record)，並參考 ORISE 提供的確認偵檢報告後，如有提出 RAI。
3. 安全評估報告(Safety Evaluation Report, SER)

5.8.1 審查時程綜覽

La Crosse 核電廠除役偵檢與 NRC 審查時程綜覽請參考表 12，重要時程列如下：

1. La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢分三個階段進行，第一、二、三階段的最終狀態偵檢報告(FSSR)初版分別於 2019 年 8 月 29 日、2019 年 12 月 13 日，和 2020 年 1 月 28 日提交。
2. NRC 於 2020 年 8 月 19 日針對 La Crosse 所提交之三份最終狀態偵檢報告提出補充資訊要求(RAI)，LS 於 2020 年 11 月 2 日回應了 NRC 所提出的部分 RAI，並修改和提交第 2 階段和第 3 階段的最終狀態偵檢報告。
3. LS 於 2021 年 12 月 14 日提出 NRC 先完成第 2 級和第 3 級檢單元以及一個第 1 級地下埋管偵檢單元之審查的請求，以便能先釋出相關區域，NRC 同意該請求，並於 2022 年 5 月 24 日通過對 La Crosse 核電廠第 2 級和第 3 級偵檢單元的 SER 審查，並同意通過審查區域的釋出。
4. 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第 1 級偵檢單元的 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 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，並同意相關區域的釋出。至此，La Crosse 核電廠廠區，除 ISFSI 區域外，皆完成執照終止及非限制使用釋出。

5.8.2 補充資訊要求(RAI)

NRC 對 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢提出之補充資訊要求(RAI)，主要有兩份：

1. NRC 於 2020 年 8 月 19 日針對 LS 所提交之三份 FSSR 提出 RAI，LS 於 2020 年 11 月 2 日回應了 NRC 所提出的 RAI，因 NRC 對第 1 級偵檢單元部分的回覆仍有疑問，因此 LS 於 2021 年 12 月 14 日提出 NRC 先完成第 2 級和第 3 級檢單元以及一個第 1 級地下埋管偵檢單元之審查的請求，並獲得同意。
2. 於 2022 年 6 月至 10 月期間，NRC 針對 1 級偵檢單元提出更多澄清要求。

5.8.2.1 NRC 於 2020 年 8 月提出之 RAI 與 LS 之回覆

以下為 NRC 於 2020 年 8 月提出之 RAI 重點項目與 LS 之回覆

1. 品質管制(QC)偵檢

NRC：

在 LTP 中，LS 承諾遵循品質保證程序來驗證最終狀態偵檢數據的有效性，包括 QC 偵檢結果評估。

然而，在許多偵檢單元釋出記錄(Release Record)中，QC 偵檢結果評估失敗，但 LS 認為：「因為測量值遠低於 OpDCGL，因此不需要進一步審查或採取行動。」

NRC 要求 LS 重新評估使用 OpDCGL 作為評估 FSS 數據的品質保證標準的理由，或詳細說明 LTP 中所述的 QC 調查流程。

LS 回覆：

LS 澄清，QC 樣本分析結果可接受標準為：重複測量值必須在標準測量值的 20% 範圍內。

LS 承認，當樣本活度很低或無法檢測到時，他們將標準量測和 QC 量測值都低於 OpDCGL，做為通過 QC 評估的原因。

(NRC 接受了 LS 提出的 QC 評估標準，並且在審查後發現大多數 QC 測量符合此標準。)

2. 背景輻射處理

NRC：

要求澄清在地上建築物 and 地下埋管的 FSS 數據中是否減去背景輻射，以及不遵循 LTP 承諾(不減去背景)的理由。

LS 回覆：

承認所有地上建築物和掩埋管道的 FSS 測量均扣除了環境背景。

(NRC 雖認為 LS 選擇的背景值和扣除背景的做法不適當，但 NRC 透過獨立確認偵檢的評估後，接受了這些偵檢單元的釋出。)

3. 地下埋管效率計算

NRC：

(1) 要求解釋針對不同管徑大小的地下埋管，是用什麼方法來決定偵檢器效率。

(2) 針對「將較大管徑計算出之效率應用於較小管徑」這一點提出質疑，要求提供技術上的理由(Technical Justification)。

(3) LS 針對不同管徑設定了特定的有效偵測面積(Effective Detection Area)，要求提供推導過程。

LS 回覆：

(1) LS 解釋地下埋管偵檢儀器之效率計算包含「實體測量」與「MCNP 模擬修正」兩個步驟。

實體測量使用尺寸為 1 英尺 X 1 公尺的 Cs-137 射源。將偵檢器放置在管路測量用的夾具中，在射源上方移動並進行定點靜態測量，以計算出基礎效率。

由於實際管路的幾何形狀多變，LS 使用 MCNP 模擬軟體，針對每一種特定管徑和長度計算出一個「修正因子」。

最後，將原始校正源測得的效率乘以該 MCNP 修正因子，得出該特定管徑的最終偵檢效率。

(2) LS 說明管徑越大，管壁上的放射源距離位於中心的偵檢器越遠，且光子到達偵檢器的路徑與攔截角度會導致效率降低，因此，較大管徑的效率小於較小管徑。由於 $dpm = cpm / \text{效率}$ ，因此，效率越小計算出的 dpm 越大，故將「較大管徑決定的效率用於較小管徑與材質」是保守的。

(3) LS 針對 NRC 質疑的兩個特定有效偵測面積提供了推導依據。

4. HTD/IC 劑量驗證

NRC：

詢問持續特性偵檢(Continuing Characterization)樣本是否遵循 LTP 要求，所有樣本都進行全部初始核種分析，以驗證不顯著劑量貢獻核種(IC)劑量和替代核種替代比值。

LS 回覆：

LS 承認並非所有持續特性偵檢樣本都遵循了 LTP 進行全部初始核種分析，並依據 LTP 要求，將未進行全部初始核種分析的樣本送往廠外實驗室進行分析。

5. 數據不一致/錯誤

NRC：

要求解釋現場實驗室數據與廠外實驗室數據之間的差異，以及 FSSR 釋放記錄中出現的數據轉錄錯誤。

LS 回覆：

LS 修訂了第二階段和第三階段的 FSSR 報告，以及 31 份相關的偵檢單元釋出記錄(Release Record)。

5.8.2.2 NRC 於 2022 年針對第 1 級偵檢單元提出之澄清要求與 LS 之回覆

此階段集中在針對 16 個第 1 級偵檢單元(回填地下室和和挖掘區)上。

1. WTB 挖掘區(L1-010-101C)問題

NRC：

NRC 發現在廢棄物處理廠房(WTB)挖掘區偵檢單元 L1-010-101C 所進行的掃描中，掃描警報行動水平遠高於 LTP 中所規定行動水平。依據 LTP，該偵檢單元的行動水平應為「背景值 + 3,525 cpm」，但偵檢時卻被設定為「背景值 + 22,140 cpm」，導致未產生任何掃描警報。

LS 回覆：

LS 承認於 L1-010-101C 偵檢單元的行動水平錯誤地設為「背景值 + 22,140 cpm」，同意正確值應該是「背景值 + 3,525 cpm」。

(儘管 NRC 發現 LS 在 L1-010-101C 的 FSS 掃描和調查過程中存在偏離經批准的 LTP 流程的情況。但 NRC 最終認定 LS 對該偵檢單元的掃描和調查取樣方法是足夠的，原因是：1) 根據 MARSSIM，LS 本可以選擇使用更高掃描行動水平；2) 於該區域透過 GeoProbe 技術收集樣本的平均 BcSOF 僅為 0.0144，相當於劑量 0.3597 mrem/yr，遠低於釋出標準)。

2. 要求確認 GeoProbe 樣本的有效性，以證明其代表原生土壤

NRC：

WTB 挖掘區 L1-010-101C 偵檢單元以及 RPGPA 挖掘區 L1-SUB-TDS B 偵檢單元因進行 FSS 時已被回填，因此，LS 使用 GeoProbe 技術採集了多個新的土壤樣本。NRC 要求 LS 證明透過 GeoProbe 取樣技術

在已被回填的挖掘區中採集到的樣本確實代表底層的原生土壤(Native Soil)，而不是用於回填材料。

LS 回覆：

L1-010-101C 使用的回填土壤來自相鄰的 Genoa 3 火力發電廠，其顏色比挖掘底部的原生土壤深得多，透過視覺判斷 GeoProbe 取樣的樣本是來自原生土壤。

由於 L1-SUB-TDS B 偵檢單元的回填界面難以辨識，LS 採取了保守的做法，在四個不同的深度層進行取樣，每個深度層約為一公尺，用於計算合規劑量的數據是四個深度層中測得的最高 Cs-137 濃度。

3. 要求說明 L1-SUB-TDS 的掃描涵蓋率是否達到 100%

NRC：

L1-SUB-TDS 為第 1 級挖掘區偵檢單元(位於汽機廠房區域)，ORISE 於 2018 年 1 月 15 日至 18 日對該挖掘區進行了確認偵檢，ORISE 的確認偵檢報告指出，LS 為 L1-SUB-TDS 所建立的實體邊界，與地理資訊系統(GIS)檔案中規劃的邊界存在不符之處。NRC 要求 LS 提供資訊證明該單元達到 100%表面掃描覆蓋率的要求

LS 回覆：

LS 審查了的現場日誌，確認 ORISE 在確認偵檢活動中未掃描到的該挖掘區部分，已由 LS 於 FSS 期間完成 100% 掃描，且偵檢測量到的放射性核種濃度至少比相應的低一個數量級。

5.8.3 確認偵檢(Confirmatory Survey)

由 NRC 委託第三方獨立機構(ORISE)執行的正式確認偵檢總共有 5 次。確認偵檢進行之時間與結果參見

。

表 41 ORISE 對 La Crosse 核電廠進行之確認偵檢結果彙整

	確認偵檢時間	確認偵檢區域	確認偵檢結果
1	2016 年 11 月	未受輻射影響開放土地區域	認同未受輻射影響區域之分級。
2	2018 年 1 月	汽機廠房開放土地	認同 LS 的最終狀態偵檢設計和實施與 FSSR 結果。
3	2018 年 4 月	循環水排放管道內部	未發現足以阻止同意 FSS 數據符合釋出標準的問題。
4	2019 年 4 月	反應器廠房地下室	
5	2019 年 9 月	受輻射影響開放土地區域	

更多有關 NRC 委託第三方獨立機構對 La Crosse 核電廠進行之確認偵檢資訊說明如下：

1. 第一次確認偵檢

偵檢期間：2016 年 11 月 14 日至 17 日

偵檢對象：4 個未受輻射影響偵檢單元

偵檢方式：

偵檢方式包括目視檢查、加馬掃描和地表土壤取樣，共收集了 16 個隨機土壤樣本和 4 個判斷性樣本。

偵檢結果：

隨機樣本中最大 Cs-137 濃度遠低於標準值，ORSIE 認同將這四個偵檢單元分類為未受輻射影響區域。

2. 第二次確認偵檢

偵檢期間：2018 年 1 月 15 日至 18 日

偵檢對象：汽機廠房偵檢單元 L1-010-102

偵檢方式：

偵檢方式包括目視檢查、加馬掃描和地表土壤取樣，共收集了 14 個隨機土壤樣本和 3 個判斷性樣本。

偵檢結果：

ORISE 測得的最大放射性核種濃度與相對應的 OpDCGL 相比，至少低一個數量級。ORSIE 認為 LS 的最終狀態偵檢設計和實施是適當的，並認同 FSSR 結果可接受，足以證明符合釋出標準。

3. 第三次確認偵檢

偵檢期間：2018 年 4 月 24 日至 26 日

偵檢對象：循環水排放管道內部，S1-011-102 CWD 偵檢單元

偵檢方式：

偵檢方式包括加馬掃描和表面活性測量，共收集了 60 個系統性表面加馬活度測量數據。

偵檢結果：

所有測量結果均為小於 OpDCGL。

4. 第四次確認偵檢

偵檢期間：2019 年 4 月 8 日至 10 日

偵檢對象：反應器廠房地下室偵檢單元

偵檢方式：

偵檢方式包括加馬表面掃描、17 個隨機和 1 個判斷性的 ISOCS 測量，以及 8 個隨機和 1 個判斷性的混凝土體積取樣，ORISE 根據 NRC 要求，對混凝土樣本進行了 Ni-63 和 H-3 分析。

偵檢結果：

所有確認偵檢測量結果都遠低於 OpDCGL，平均 BcSOF 為 0.04。雖然在判斷性混凝土核心樣本中偵測到 Sr-90 和 Ni-63，但其對總 SOF 的貢獻被認為是微不足道的。ORISE 結論是，未發現足以阻止同意 FSS 數

據符合釋出標準的問題。

5. 第五次確認偵檢

偵檢期間：2019 年 9 月 23 日至 26 日

偵檢對象：受輻射影響開放土地區域，包括第 1 級、第 2 級和第 3 級偵檢單元

偵檢方式：

偵檢方式包括加馬掃描和土壤取樣，共收集了 20 個隨機和 26 個判斷性樣本。

偵檢結果：

所有確認偵檢的核種濃度均小於對應的 OpDCGL，確認偵檢數據的最大 SOF 為 0.107。ORISE 確認偵檢的 SOF 整體低於 FSS 的 SOF。兩份採集自 15~30 公分深度的樣本 ROC 濃度均低於最小可偵測濃度(MDC)。

5.8.4 安全評估審查(SER)

NRC 分兩次進行對 La Crosse 核電廠的最終狀態偵檢(FSS)之 SER 審查，第一次進行對第 2 級和第 3 級偵檢單元以及一個第 1 級地下埋管偵檢單元的審查，第二次進行對剩餘第 1 級偵檢單元以及一個第 1 級地下埋管偵檢單元的審查。其原因為 LS 需花更多時間調查級回覆 NRC 針對第 1 級偵檢單元 FSS 所提出之 RAI，故於 S 於 2021 年 12 月 14 日提出 NRC 先完成第 2 級和第 3 級偵檢單元以及一個第 1 級地下埋管偵檢單元 FSS 之審查的請求，以便能先釋出相關區域，並或 NRC 同意。NRC 於 2020 年 5 月 24 日通過對 La Crosse 核電廠第 2 級和第 3 級偵檢單元 FSS 的 SER 審查，而後再於 2023 年 2 月 23 日通過對 La Crosse 核電廠第 1 偵檢單元 FSS 的 SER 審查。

此兩份 SER 審查結果概述如下：

1. NRC 對第 2 級和第 3 級偵檢單元 FSSR 的 SER 安全評估審查報告

報告日期：2022 年 5 月 24 日

審查範圍：

審查評估了 24 個第 2 級和第 3 級偵檢單元(包含 8 個保留地上建築，7 個開放土地和 9 個地下埋管偵檢單元)，以及唯一一個第 1 級地下埋管，總共審查了 25 個偵檢單元的最終狀態偵檢結果。此次審查納入了一個第 1 級地下埋管偵檢單元，原因是為了讓所有地下埋管偵檢單元同時一起釋出。

評估結果：

ORISE 確認偵檢的關注核種土壤濃度結果顯示，第 2 級偵檢單元的最大 SOF 為 0.010，第 3 級偵檢單元的最大 SOF 為 0.021，且 ORISE 的確認偵檢的 SOF 大部分低於 La Crosse 核電廠的 FSS SOF。

因此，NRC 同意審查之偵檢單元符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出輻射標準，並同意釋出。

2. NRC 對第 1 級偵檢單元 FSSR 的 SER 安全評估審查

報告日期：2023 年 2 月 24 日

審查範圍：

審查評估了 16 個第 1 級偵檢單元(包含 2 個回填地下室和 14 個開放土偵檢單元)的最終狀態偵檢結果。

評估結果：

ORISE 對第 1 級開放土地偵檢單元確認偵檢樣本測得 ROC 濃度均低於對應之 OpDCGL 的 50%，ORISE 對第 1 級回填地下室偵檢單元確認偵檢測量 ROC 濃度亦遠低於對應之 OpDCGL。此外，ORISE 確認，LS 所提交 FSSR 與釋出紀錄之數據可用於證明符合外釋標準。

LS 計算的最終合規總劑量為 8.2345 mrem/yr，此劑量低於 10 CFR 20.1402 規定的 25 mrem/yr 上限。在所有五個劑量媒介(地下室、土壤、地下埋管、保留地上建築，和地下水)中，劑量貢獻最高的是地下埋管，估算劑量為 3.0112 mrem/yr。

因此，NRC 同意審查之偵檢單元符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出輻射標準，並同意釋出。

六、 Zion 核電廠第 1 級最終狀態偵檢

6.1 廠址簡介

Zion 核電廠(Zion Nuclear Power Station, ZNPS)由兩座(一號機和二號機)壓水式反應爐(Pressurized Water Reactors, PWR)組成，位於伊利諾伊州東北部 Zion 市附近，坐落於 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要進行最終狀態偵檢並釋出的區域約 112 英畝，以及仍保留在 10 CFR Part 50 執照中的用過燃料乾式貯存設施 ISFSI 相關的區域近 5 英畝。ISFSI 不屬於除役範圍，在核電廠除役後仍保留在 10 CFR Part 50 執照中，所有用過核燃料和超過 C 類的廢棄物裝入容器並貯存於 ISFSI 內，直到轉移至能源部(DOE)。

圖 10 的黑實線範圍為 Zion 核電廠原執照範圍(業主控制區)。圖 11 為輻射管制區約佔 87 英畝，設有圍欄，ISFSI 位於輻射管制區的左下角；圖 12 為安全管制區。

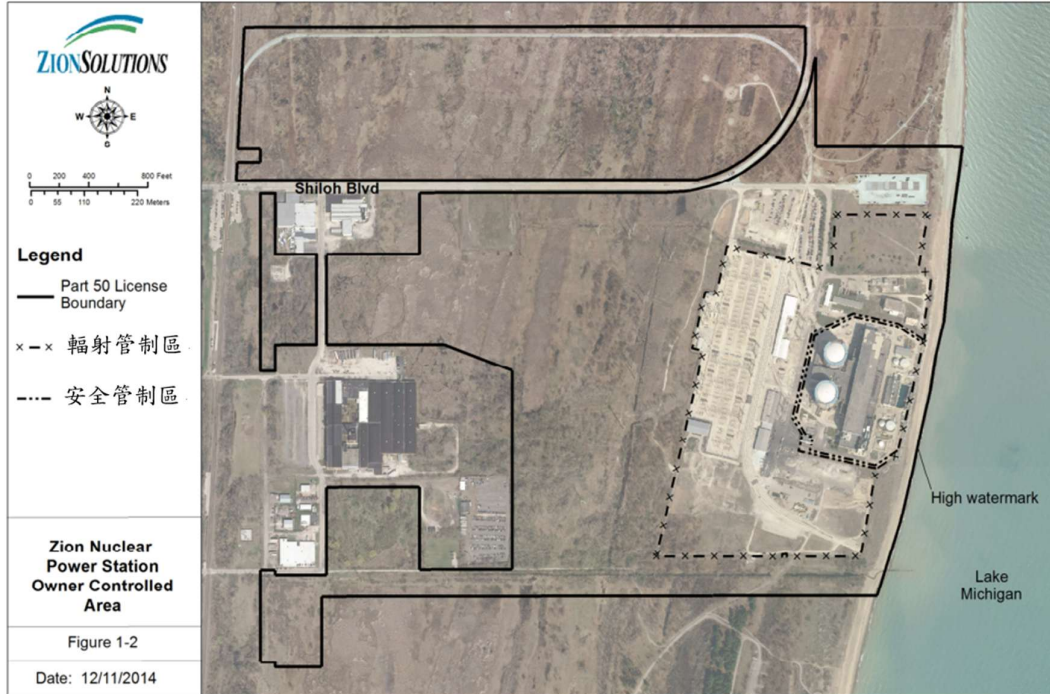


圖 10 Zion 核電廠原執照範圍



圖 11 Zion 核電廠輻射管制區

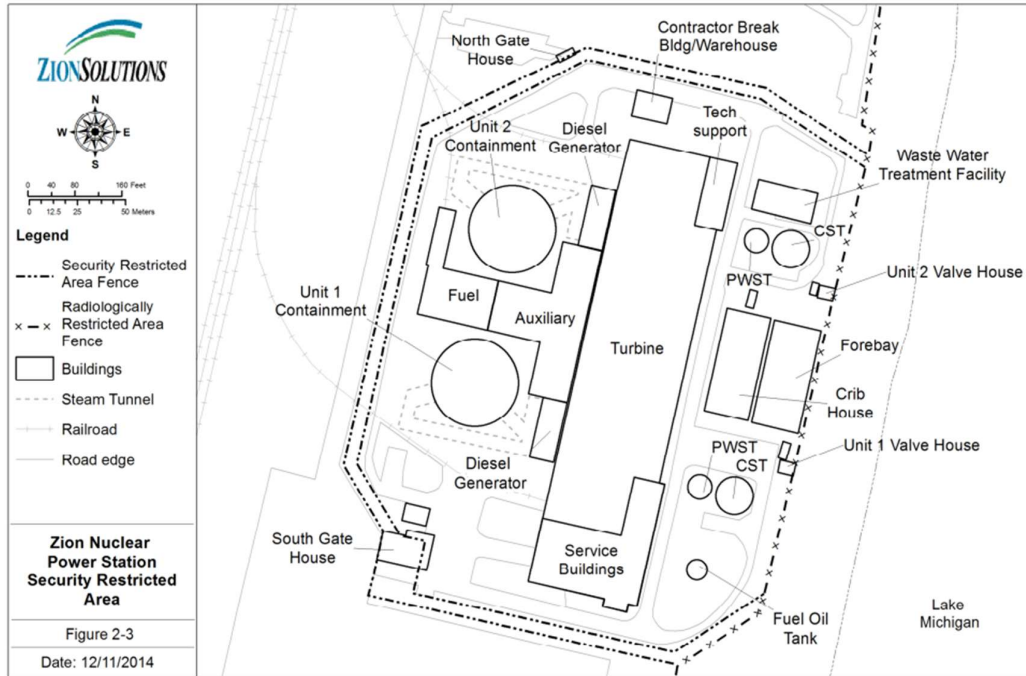


圖 12 Zion 核電廠安全管制區

6.2 除役時程綜覽

Zion 核電廠於 1998 年 2 月 13 日提交永久停止營運的證明，1998 年 3 月 9 日提交永久卸除燃料狀態的證明，並於 2008 年 1 月 25 日向 NRC 提交了將執照轉讓給 ZionSolutions(ZS), LLC 的申請。NRC 於 2009 年 9 月 1 日發布確認令，允許 ZS 開始進行除役工作。Zion 核電廠的實際除役工作於 2010 年 10 月開始，用過核燃料和超 C 級廢棄物於 2015 年轉移至 ISFSI 中。

ZS 於 2011 年 11 月至 2013 年 11 月進行特性偵檢，於 2006 年 8 月至 2013 年 9 月期間完成了水文地質調查。Zion 核電廠特性偵檢的結果摘錄於 LTP 的第二章中(包含受輻射影響以及未受輻射影響區域的特性偵檢結果)。LTP 初版提交前，部分區域因安全考量而未能於完成特性偵檢，因此這些區域延遲至獲得進入權限後才進行特性偵檢。特性偵檢結果如下：

1. 未受輻射影響區

僅檢測到 Cs-137，但其濃度與全球落塵引起的背景值範圍一致，偵檢結果證實其分級是適當的。

2. 第 1 級受輻射影響區

Co-60 和 Cs-137 是唯一濃度高於實驗室分析 MDC 的核種：Cs-137 平均濃度約為 0.12 pCi/g，最高達 3.39 pCi/g；Co-60 平均濃度約為 0.13 pCi/g，最高達 1.04 pCi/g。

3. 第 2 級受輻射影響區

Cs-137 是唯一濃度高於 MDC 的核種，最高濃度為 0.21 pCi/g。

4. 第 3 級受輻射影響區

檢測到 Cs-137，平均濃度為 0.12 pCi/g，最高為 1.14 pCi/g，並於一個樣本中檢測到 Co-60，其濃度為 0.13 pCi/g。

5. 地下水

在 2006 年 5 月的取樣中，監測井 MW-ZN-01S 檢測到 H-3，但濃度遠低於 EPA 飲用水標準 20,000 pCi/L，Sr-90 也在 2006 年 5 月的採樣中被偵測到，濃度非常接近 MDC。結論為沒有跡象顯示地下水受到核電廠影響。

6. 地表水

在 2006 年至 2014 年間，H-3 和電廠衍生核種的濃度均未超過各自的 MDC。

ZS 於 2014 年 12 月 19 日提交執照終止計畫(LTP)初版及部分區域(未受輻射影響)之釋出請求，並於 2015 ~ 2017 年提交多份補充文件。NRC 於 2016 年 3 月 31 日核准 Zion 核電廠未受輻射影響區域之釋出，釋出之未受輻射影響區域面積共約 214 英畝。

ZS 於 2018 年 2 月 7 日提交 LTP 更二版，NRC 於 2018 年 9 月 28 日通過對 Zion 核電廠 LTP 更二版的安全評估審查(SER)。隨後，ZS 依據 NRC 核准後的 LTP 中進行最終狀態偵檢與偵檢結果評估。

在 2017 年春季進行廠房拆除期間，於進行作業調查偵檢(Operational Surveys)和輻射評估時，在第 2 級和第 3 級區域及周圍首次發現離散的放射性物質顆粒(Discrete Particles of Radioactive Material)，並因此為了保守起見，於 2017 年 6 月將大部分開放土地偵檢區域的分級提升至第 1 級。ORISE 於 2020 年 1 月的確認偵檢中，在 16 個樣本中，發現 3 個 DRP，ZS 要求暫停三個月進行移除 DPR 和評估措施。然而，在 ZS 進行最終狀態偵檢之後，ORISE 於 2021 年和 2023 年的確認偵檢中仍持續發現 DRP。

ZS 判斷 DRP 的存在源於 2012 年到 2018 年的廠區拆除作業，當時的拆除作業導致離散放射性粒子(DRP)成為空氣中的懸浮物，並被擴散到 1 號機和 2 號機圍阻體和燃料處理廠房外部之區域。

由於明顯存在 DRP 污染問題且沒有關於 DRP 調查的 NRC 指引，Zion 核電廠的廠址釋出出現重大延誤。而後，NRC 及其承包商為 DRP 建立了劑量係數模型，以評估公眾曝露的潛在劑量，並開發了一種方法來評估掃描 DRP 的靈敏度。此外，ZS 調整了其掃描技術和數據品質目標(DQO)，以盡可能慢的速度和貼近地面的方式進行掃描，以確保足夠的靈敏度來識別相關的 DRP，並重新執行了多次 FSS。

2018 年至 2020 年，ZS 陸續提交最終狀態偵檢報告(FSSR)四個階段的初版，後依據 NRC 提出之 RAI，於 2019 年至 2022 年提交 FSSR 的更版。2022 年 10 月 17 日，Zion 核電廠表示已完成 FSS。2023 年，NRC 要求 ORISE 再次進行確認偵檢，在過去曾發現 DRP 區域進行手動掃描，並評估 DRP 是否可能存在於次表土中。此次確認偵檢，ORISE 又發現並移除了 12 個 DRP。ZS 於 2023 年 5 月 4 日表示，所有已知的 DRP 都已從廠址上移除。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 DRP 已被識別、移除並作為廢棄物處置。NRC 於 2023 年 11 月 8 日通過 Zion 核電廠所有 FSSR 的安全評估審查(SER)，並核准相關區域之釋出。至此，Zion 核電廠廠區，除 ISFSI 區域除外，皆完成執照終止及非限制使用釋出。Zion 核電廠

最終狀態偵檢時程資訊彙整請參考表 42。

表 42 Zion 核電廠最終狀態偵檢時程綜覽

Zion核電廠除役與偵檢時程綜覽							
年	2011~2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Zion 核 電 廠	特性偵檢	2011~2013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。					
	放射性物品 清除與清運						
	LTP	•2014初版 •2017更一版	更二版 NRC核准				
	FSSR & 回覆RAI		Phase 1 初版	<ul style="list-style-type: none"> • 初版 <ul style="list-style-type: none"> - Phase 2, Part 1 - Phase 2, Part 2 - Phase 3 • 更一版：Phase 1 	<ul style="list-style-type: none"> • 初版：Phase 4 • 更一版 <ul style="list-style-type: none"> - Phase 2, Part 1 - Phase 2, Part 2 • 更二版 <ul style="list-style-type: none"> - Phase 1 - Phase 2, Part 1 	回覆RAI	<ul style="list-style-type: none"> • 更一版 - Phase 3 - Phase 4
NRC 審 查	FSSR RAIs			3/22	4/20、11/04		
	FSSR SER			<ul style="list-style-type: none"> •Phase 1 初版 未通過(3/22) •Phase 1 更一版 通過(10/9) 			全部 FSSR 通過(11/8)
	確認偵檢	V (2016)	V	V	V	V	V
	廠址釋出	未受輻射影 響區域 (2016/3/31)					

6.3 廠房與建築之拆除

Zion 核電廠的除役目標是將廠址除役至符合 10 CFR 20.1402 中規定的非限制使用的輻射標準，但獨立用過燃料貯存設施 (ISFSI) 區域除外。

Zion 核電廠除役拆除範圍包含廠址內所有廠房、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)。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。

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。

6.4 最終狀態輻射偵檢規劃與設計

6.4.1 開放土地區域分級

6.4.1.1 開放土地初始區域分級

Zion 核電廠的開放土地初始分級是依據廠址歷史評估結果分級，並使用於 ZS 於 2011 年 11 月至 2013 年 11 月所進行特性偵檢。圖 13 ~ 圖 15 為 Zion 核電廠開放土地初始分級位置圖。

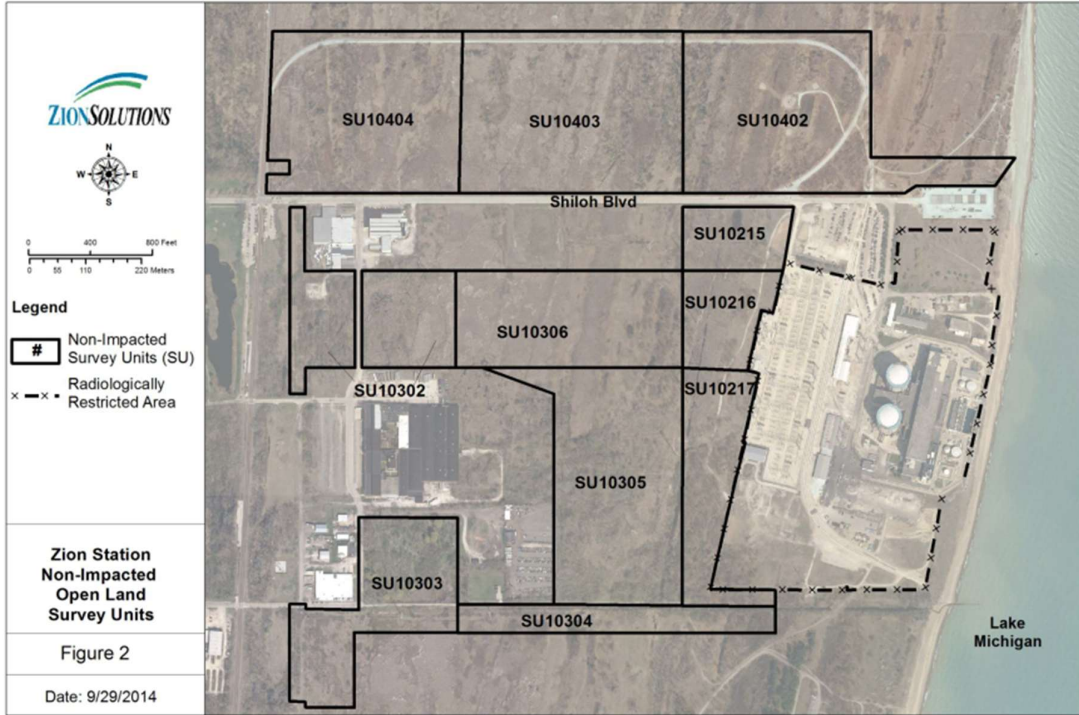


圖 13 Zion 核電廠初始分級 - 未受輻射影響區域

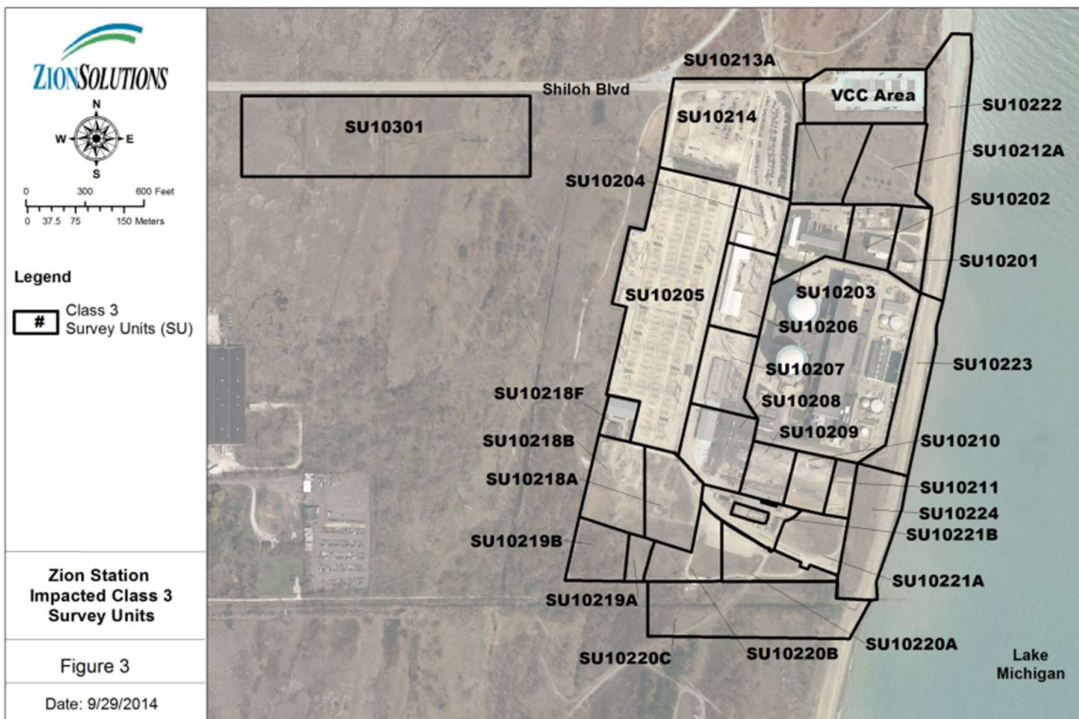


圖 14 Zion 核電廠初始分級 - 受輻射影響第 3 級區域

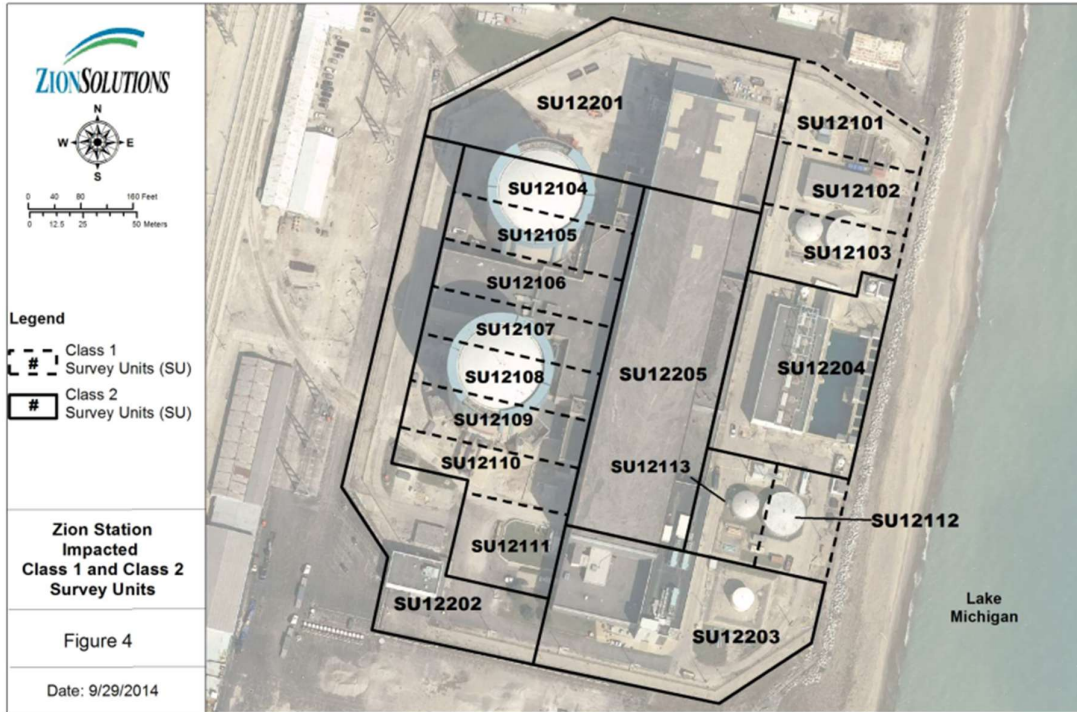


圖 15 Zion 核電廠初始分級 - 受輻射影響第 1 級和第 2 級區域

6.4.1.2 開放土地調整後區域分級

Zion 核電廠在 2017 年春季進行廠房拆除期間，於進行作業調查偵檢(Operational Surveys)和輻射評估時，在第 2 級和第 3 級區域及周圍發現離散的放射性物質顆粒 (Discrete Particles of Radioactive Material, DRP)，並因此為了保守起見，於 2017 年 6 月將大部分開放土地區域的分級提升至第 1 級。圖 16 與圖 17 為整後分級位置圖。

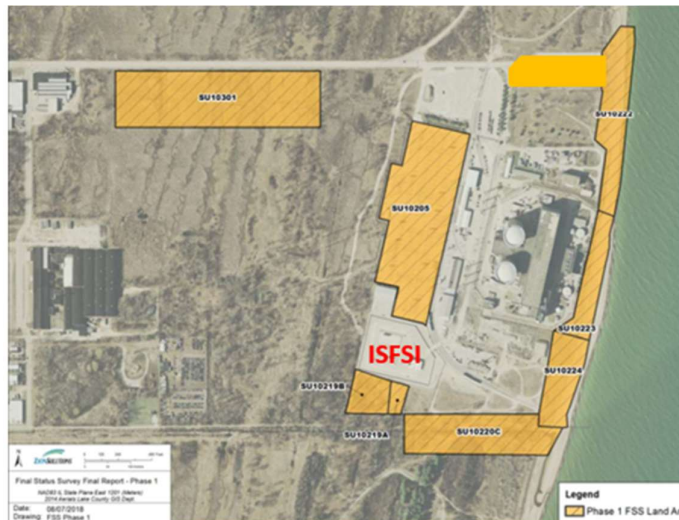


圖 16 Zion 核電廠調整後分級 - 受輻射影響第 3 級區域

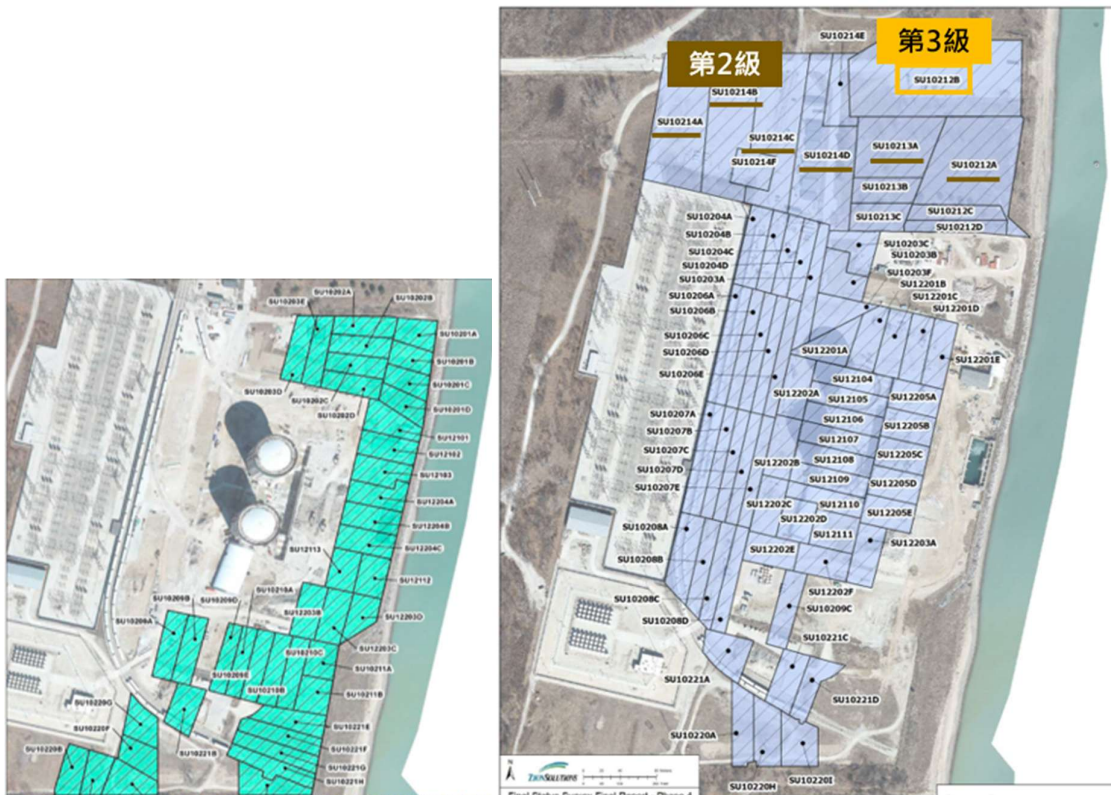


圖 17 Zion 核電廠調整後分級 - 受輻射影響第 1 級和第 2 級區域(除右圖上方標示之第 2 級和第 3 級偵檢單元區域)

6.4.2 關注核種(ROC)與難測核種(HTD)

Zion 核電廠根據反應器廠房與輔助廠房特性偵檢混凝土芯樣本的分析結果確認 ROC。在受污染的混凝土中，Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-134 和 Cs-137 等 5 個核種貢獻的劑量佔 99.5%。圍阻體的混凝土(被活化)，H-3、Eu-152 和 Eu-154 又貢獻了扣除以上 5 個核種劑量後之劑量的 99%，此三個核種為圍阻體特有 ROC。表 43 為 Zion 核電廠反應器廠房與輔助廠房 ROC 核種及混合比例。

至於土壤 ROC，由於土壤特性偵檢很少檢測得出核種，且大多數土壤樣本中檢測到的放射性核種為濃度與廠外因全球沉降影響造成的濃度相似之 Cs-137，因此，採用輔助廠房地下室混凝土樣本的 ROC 作為土壤的 ROC。

1. 圍阻體地下室 ROC：Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-134、Cs-137、H-3、Eu-152，和 Eu-154。
2. 輔助廠房地下室 ROC：Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-134，和 Cs-137。
3. 土壤 ROC：Co-60、Ni-63、Sr-90、Cs-134，和 Cs-137。

表 43 Zion 核電廠圍阻體與輔助廠房 ROC 核種及混合比例

Radionuclide	Containment	Auxiliary Building ⁽²⁾
	% of Total Activity (normalized) ⁽¹⁾	% of Total Activity (normalized) ⁽¹⁾
H-3	0.08%	NA
Co-60	4.72%	0.92%
Ni-63	26.50%	23.71%
Sr-90	0.03%	0.05%
Cs-134	0.01%	0.01%
Cs-137	68.17%	75.32%
Eu-152	0.44%	NA
Eu-154	0.06%	NA

6.4.2.1 難測核種替代比值

在 Zion 核電廠 ROC 中，Ni-63、Sr-90 和 H-3 被歸類為 HTD 核種，其他 ROC 則屬易測核種，HTD 核種中，H-3 為圍阻體特有 ROC。

根據 Zion 核電廠 LTP，在最終狀態偵檢期間，Ni-63 的替代核種是 Co-60，Sr-90 的替代物核種是 Cs-137，H-3 的主要替代物核種是 Cs-137。替代比值是依據特性偵檢從圍阻體和輔助建廠房地下室中採集到的混凝土芯樣本的分析結果來計算，計算方法為：將混凝土芯樣本分析結果計算出 HTD 與替代核種的平均值 (Mean)、最大值 (Max) 和 95% 上限 (Upper Confidence Level, UCL)，在 FSS 期間，採用最大比值做為替代比值，以確保保守性。表 44 為 Zion 核電廠替代比值，FSS 推斷 HTD 核種濃度時，採用的是其中的最大值(Max)欄位。

表 44 Zion 核電廠替代比值表(FSS 採用 Max 欄位值)

Ratios	Containment			Auxiliary Building		
	Mean	Max	95%UCL	Mean	Max	95%UCL
H-3/Cs-137	0.208	1.760	0.961	N/A	N/A	N/A
Ni-63/Co-60	30.623	442	193.910	44.143	180.450	154.632
Sr-90/Cs-137	0.002	0.021	0.010	0.001	0.002	0.002

6.4.3 潛在殘餘輻射媒介

Zion 核電廠的潛在殘餘輻射媒介共有四種：回填地下室、土壤、地下埋管，以及地下水。最終狀態偵檢的目的即透過系統及科學方法，規劃、執行與評估來自這四種媒介所造成的劑量，以提供可驗證且具技術辯護力的方法，證明廠址符合外釋輻射標準。

6.4.4 廠址未來使用情境與關鍵群體平均成員

Zion 核電廠廠址的合理可預見使用情境為「長居農民情境 (Resident Farmer Scenario)」，選擇此使用情境是為了確保進行最保守、最能涵蓋潛在風險的劑量評估。

長居農民情境的關鍵群體平均成員(Average Member of the Critical Group, AMCG)為被設定為長居農民 (Resident Farmer)。

6.4.5 劑量模型(Dose Model)

劑量模型是用來評估計算除役核電廠潛在殘餘輻射媒介對所造成的關鍵群體的平均成員(AMCG)造成的劑量。在最終狀態偵檢規劃階段，透過劑量模型計算各輻射媒介中，所有廠址 ROC 的 DCGL 值。最終狀態偵檢完成後，將結果與 DCGL 值進行評估比較，可證明在執照終止時廠址的殘留放射性符合輻射標準。

Zion 核電廠有四種潛在殘餘輻射來源媒介：回填地下室、土壤、地下埋管、，以及地下水，以下分別說明 Zion 電廠四種殘餘輻射媒介的劑量模型。

6.4.5.1 回填地下室劑量模型(Basement Fill Model, BFM)

BFM 劑量模型的目的是在計算在除役終止時，留在回填地下室中的殘餘放射性對關鍵群體平均成員(AMCG)造成的劑量。回填地下室指的是反應器廠房和輔助廠房，此兩個廠房在拆除後至少地下 3 英尺深後進行回填。

BFM 模型保守地假設在被回填的地下結構物中安裝了一口供水井。

回填地下室劑量模型的劑量包含以下四個獨立結構輻射來源，計量計算為四個來源的總和：

1. 地下室表面：包括鋼筋混凝土牆壁、地板以及圍阻體的鋼襯層。透過劑量模型計算劑量。
2. 嵌管 (Embedded Pipe, EP)：指垂直穿過牆壁或水平穿過地板，並包含在特定建築物內的管線。
3. 穿管 (Penetrations, PN)：指穿過混凝土牆或地板，連接兩棟建築或連接建築與外部地面的管線、管套或殘餘混凝土
4. 清潔混凝土回填材料 (Clean Concrete Fill)：即使這些材料經確認為清潔，仍會被賦予一個保守的劑量值來計算總劑量，以確保合規性。

以上四個結構輻射來源中，地下室表面、嵌管和穿管所造成的劑量透過回填地下室劑量模型進行評估計算。「清潔混凝土回填材料」是指用於回填已拆除的地下室結構空隙的材料回填材料，儘管該材料經過驗證是清潔的，並且預期對劑量的影響為零，為了確保保守地證明廠址符合劑量標準，LTP 選擇為這些回填物分配一個劑量值，分配劑量為所允許的最大掃描最小可偵測濃度 (Maximum Scan MDC)，以確保即使考慮了回填材料可能達到的最大 MDC，整個地下回填結構的總劑量仍符合輻射標準。

Zion 核電廠回填地下室劑量模型考量了以下兩種情境，並保守地以地下水情境加上鑽探棄土情境所造成之劑量和作為最終合規劑量。：

1. 地下水情境 (Groundwater Scenario, GW)
地下水情境殘餘放射性從地下結構表面、嵌管和穿管釋放到回填材料的間隙水中居住農民透過使用水井中的水（飲用、灌溉等）而受到曝露。
2. 鑽探棄土情境 (Drilling Spoils Scenario, DS)
假設在安裝水井時，被污染的回填材料和鑽探棄土被帶到地表，居民因曝露於

這些被撒在地表的棄土而接受到劑量。

6.4.5.2 土壤劑量模型

Zion 核電廠的土壤劑量模型針對土壤殘餘放射性物質計算 DCGL 時，建立了兩種不同的污染土壤厚度時的模型：15 公分(表土層定義厚度)和 1 公尺。1 公尺污染厚度模型是為了提供彈性，以便在當發現存在深度超過 15 公分至 1 公尺的污染時，能夠進行保守的合規證明。

6.4.5.3 地下埋管劑量模型

Zion 核電廠的地下埋管劑量模型是為了計算保留在土壤中管線的殘餘放射性所建立的。類似於回填地下室劑量模型，地下埋管劑量模型同樣模型考量了兩種最保守的假想情境，計算合規劑量時，將兩種情境劑量相加。

1. 原位情境(In situ Scenario)

假設所有埋管保持「原狀」，管線內活度會瞬間釋放到相鄰的土壤中。此情境考慮了非飽和區(Unsaturated Zone)和飽和區(Saturated Zone)兩種情況，並採用較低的 DCGL 值。

2. 挖掘情境(Excavation Scenario)

假設所有埋管在執照終止後被挖出，且管線內所有放射性活度會瞬間釋放並與地表土壤混合。

6.4.5.4 地下水劑量評估方法

Zion 核電廠在 LTP 中說明「根據截至 LTP 更一版完成時所進行的地下水監測結果，尚未發現任何地下水污染，且預期在執照終止時亦不會出現。然而，若在除役過程中發現地下水污染，將依據 LTP 中的 BFM(Basement Fill Model)地下水曝露係數計算劑量」。

表 45 為 Zion 核電廠 BFM 地下水曝露係數表，此表根據 LTP 中的地下室回填模型(BFM)計算得出，其目的為計算關鍵群體平均成員(AMCG)常居農民造成之劑量。

表 45 Zion 核電廠 BFM 地下水曝露係數

Radionuclide	Dose (mrem/y)			Groundwater Concentration (pCi/L)	GW Exposure Factor (mrem/y per pCi/L)
	Drinking Water	Plant/Meat/Milk	Total		
Co-60	5.40E-02	5.82E-02	1.12E-01	4.48E+00	2.50E-02
Cs-134	6.58E-01	1.28E+00	1.94E+00	2.21E+01	8.75E-02
Cs-137	5.23E-01	1.01E+00	1.54E+00	2.21E+01	6.94E-02
Eu-152	3.17E-02	6.30E-03	3.80E-02	1.05E+01	3.62E-03
Eu-154	4.61E-02	9.14E-03	5.52E-02	1.05E+01	5.26E-03
H-3	1.38E-01	7.88E-02	2.17E-01	4.89E+03	4.43E-05
Ni-63	4.42E-03	1.13E-02	1.57E-02	1.61E+01	9.78E-04
Sr-90	2.87E+01	1.49E+01	4.36E+01	3.99E+02	1.09E-01

6.4.6 DCGL

BcDCGL(Base Case DCGL)的定義為在特定媒介中，單一核種可造成劑量標準(25 mrem/yr)的濃度。因潛在輻射媒介不只一種，各媒介的所允許的劑量僅能為劑量標準的一部分(比如 20%)。在最終狀態偵檢規劃階段，即需參照特性偵檢結果，設定每一種輻射媒介之占比，且所有潛在輻射媒介占比總和應為 1。

給定輻射媒介劑量占比後，將占比乘上劑量標準(25 mrem/yr)，可得出媒介所造成劑量之限值；將占比乘上將輻射媒介中各 ROC 核種之 BcDCGL，可得出各 ROC 核種造成該媒介劑量限值時之濃度，以 OpDCGL(Operational DCGL)表示。

Zion 核電廠在計算經不顯著貢獻核種(Insignificant Contributor, IC)調整後的 DCGL 時，預設的 IC 劑量佔比取決於不同的輻射媒介。根據規定，IC 是指劑量加總後不超過劑量總額 10% 之核種群。為了保守地將這些被排除在劑量模型之外的核種納入考量，DCGL 會乘以一個調整因子(例如，如果 IC 劑量佔 5%，則 DCGL 乘以 95%；如果佔 10%則乘以 90%)。

6.4.6.1 回填地下室 DCGL

Zion 核電廠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)和反應器下方的混凝土(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泥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泥土地板和牆壁(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。

圍阻體內回填地下室表面、嵌管與穿管結構的 IC 劑量佔比設為 10%，其他廠房回填地下室表面、嵌管與穿管結構的 IC 劑量佔比設為 5%。表 46 為 Zion 核電廠回填地下室經調整之 BcDCGL，表 46 為 Zion 核電廠回填地下室經調整之 OpDCGL。

表 46 Zion 核電廠回填地下室經調整之 BcDCGL

Nuclide	Auxiliary Building	Containment	SFP/Transfer Canal	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

Note 1: The Base Case DCGL for the SFP/Transfer Canal set equal to the lower of either the Auxiliary Building or Containment Base Case DCGL. The Containment Base Case DCGLs were lower for all ROC, therefore the SFP/Transfer Canal Base Case DCGLs were set equal to Containment Base case DCGLs.

表 47 Zion 核電廠回填地下室經調整之 OpDCGL

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

(1) The Operational DCGLs for Floors & Walls will be applied to the surfaces in the Circulating Water Intake Pipe and Circulating Water Discharge Pipe

6.4.6.2 土壤 DCGL

雖然模型計算出的土壤 IC 劑量百分比落在 0.17% 至 1.96% 之間，但為了保守性，Zion 核電廠選用了 10% 作為土壤 DCGL 調整值。表 48 為 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 BcDCGL，表 49 為 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 OpDCGL。

表 48 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 BcDCGL

Radionuclide	Surface Soil DCGL (pCi/g)	Radionuclide	Subsurface Soil DCGL (pCi/g)
Co-60	4.26	Co-60	3.44
Cs-134	6.77	Cs-134	4.44
Cs-137	14.18	Cs-137	7.75
Ni-63	3572.10	Ni-63	763.02
Sr-90	12.09	Sr-90	1.66

表 49 Zion 核電廠表土及次表土經調整之 OpDCGL

Radionuclide	Surface Soil (pCi/g)	Radionuclide	Subsurface Soil (pCi/g)
Co-60	1.091	Co-60	0.881
Cs-134	1.733	Cs-134	1.137
Cs-137	3.630	Cs-137	1.984
Ni-63	914.458	Ni-63	195.333
Sr-90	3.095	Sr-90	0.425

6.4.6.3 地下埋管 DCGL

Zion 核電廠選用了 10% 作為地下埋管的 DCGL 調整值。表 50 為 Zion 核電廠地

下埋管經調整之之 BcDCGL，表 51 為 Zion 核電廠地下埋管經調整之之 OpDCGL。

表 50 Zion 核電廠地下埋管經調整之 BcDCGL

Radionuclide	Buried Piping DCGL (dpm/100 cm ²)
Co-60	2.64E+04
Cs-134	4.54E+04
Cs-137	1.01E+05
Ni-63	4.89E+07
Sr-90	4.50E+04

表 51 Zion 核電廠地下埋管經調整之 OpDCGL

Radionuclide	Buried Piping (dpm/100 cm ²)
Co-60	6.76E+03
Cs-134	1.16E+04
Cs-137	2.59E+04
Ni-63	1.25E+07
Sr-90	1.15E+04

6.4.7 面積因子(Area Factor)

最終狀態偵檢的統計檢定是針對「整個偵檢單位」的「平均狀況」進行判斷。當某個土壤偵檢單元內出現核種活度平均低於 DCGL_w，但小區域中卻有高於 DCGL 的情況時，須進行 EMC(Elevated Measurement Comparison)，判斷是否仍符合劑量標準。進行 EMC 的方法請參考 4.10.3 節。Zion 核電廠使用 RESRAD 計算出進行 EMC 所需的土壤面積因子，表 52 及表 53 及分別為表土及次表土面積因子。

表 52 Zion 核電廠表土面積因子

Area (m ²)	Area Factors for Radionuclides of Concern				
	Cs-137	Co-60	Cs-134	Ni-63	Sr-90
0.01	1.50E+03	1.23E+03	1.33E+03	3.31E+05	8.40E+04
0.03	4.98E+02	4.09E+02	4.42E+02	1.76E+05	3.03E+04
0.1	1.50E+02	1.23E+02	1.33E+02	6.92E+04	8.52E+03
0.3	4.98E+01	4.09E+01	4.42E+01	2.57E+04	2.88E+03
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
300	1.46E+00	1.16E+00	1.30E+00	2.75E+01	6.14E+00
1,000	1.33E+00	1.08E+00	1.20E+00	8.26E+00	1.88E+00
3,000	1.26E+00	1.05E+00	1.16E+00	4.68E+00	1.73E+00
10,000	1.13E+00	1.02E+00	1.08E+00	1.86E+00	1.33E+00
64,500	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

表 53 Zion 核電廠次表土面積因子

Area (m ²)	Area Factors for Radionuclides of Concern				
	Cs-137	Co-60	Cs-134	Ni-63	Sr-90
0.01	2.04E+03	1.10E+03	1.52E+03	5.16E+05	1.45E+05
0.03	6.80E+02	3.65E+02	5.08E+02	1.98E+05	4.95E+04
0.1	2.04E+02	1.10E+02	1.52E+02	6.30E+04	1.50E+04
0.3	6.80E+01	3.65E+01	5.08E+01	2.14E+04	5.01E+03
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	2.18E+02	5.72E+01
100	2.59E+00	1.37E+00	1.95E+00	6.51E+01	1.76E+01
300	2.29E+00	1.26E+00	1.77E+00	2.17E+01	5.92E+00
1,000	1.90E+00	1.16E+00	1.56E+00	6.53E+00	1.78E+00
3,000	1.72E+00	1.13E+00	1.46E+00	4.12E+00	1.65E+00
10,000	1.32E+00	1.07E+00	1.22E+00	1.81E+00	1.30E+00
64,500	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

6.4.8 偵檢單元之偵檢結果評估

完成一偵檢單元的最終狀態偵檢後，應依照 LTP 的內容，對偵檢單元的偵檢量測結果進行評估。首先先評估依據偵檢結果是否需進行調查(請參考 4.9 小節)，如偵檢結果超過調查基準，應針對活度偏高區域進行更多的量測。偵檢單元偵檢結果的評估方法請參考 4.10 小節，通過評估代表該偵檢單元符合外釋標準。

6.4.9 證明合規劑量(Demonstrating Compliance with Dose Criterion)

完成每一個偵檢單元最終狀態偵檢結果評估後，還需計算來自核電廠每一個潛在輻

射媒介(Media)的劑量總和，確保加總所有媒介後的劑量不超過劑量標準。Zion 核電廠有四種潛在殘餘輻射來源媒介：回填地下室、土壤、地下埋管，以及地下水。其中，回填地下室劑量為四個結構(地下室表面、嵌管、穿管，以及清潔混凝土回填料)的劑量總合。

合規劑量的計算方法如下：

1. 計算偵檢單元平均劑量：依據偵檢單元的系統性樣本或量測值的平均 BcSOF，以及輻射偏高區域面積加權的貢獻劑量，計算偵檢單元的平均劑量。
2. 以各輻射媒介中平均劑量最高之偵檢單元的平均劑量作為該媒介的合規劑量。
3. 將各輻射媒介的合規劑量值相加即為電廠之整體合規劑量。

方程式 3 為 Zion 核電廠的合規劑量計算公式，其中 BcSOF_{BASEMENT} 的計算包含來自地下室表面、嵌管以及穿管之劑量。

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

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

方程式 3 Zion 核電廠合規劑量計算公式

6.5 最終狀態偵檢進行階段

Zion 核電廠的最終狀態偵檢的執行分為四個階段(Phase)進行，各階段的偵檢單元數請參考表 54。第一、三和四階段的偵檢對象為開放土地，第二階段分為兩部分，第一部分偵檢對象地下室、嵌管和穿管，第二部分偵檢對象為地下埋管。在第四階段的最終狀態偵檢報告(FSSR)中，除了該階段偵檢單元的偵檢結果，還說明了地下水劑量計算方法與評估結果，以及 Zion 核電廠合規劑量評估結果。圖 18~ 圖 20 為第一、三和四階段的開放土地偵檢單元位置圖，圖 21 為第二階段第一部分偵檢單元位置圖，圖 22 為第二階段第二部分偵檢單元示意圖。

表 54 Zion 核電廠最終狀態偵檢各階段偵檢單元數

偵檢單元數	區域分級	開放土地 (土壤)	地下室、嵌管和穿管 (第二階段，第一部分)	地下埋管 (第二階段，第二部分)
第一階段	第 1 級	-	-	-
	第 2 級	-	-	-
	第 3 級	8	-	-
第二階段	第 1 級	-	16	-
	第 2 級	-	-	4
	第 3 級	-	15	3
第三階段	第 1 級	41	-	-
	第 2 級	-	-	-
	第 3 級	-	-	-
第四階段	第 1 級	60	-	-
	第 2 級	6	-	-
	第 3 級	1	-	-

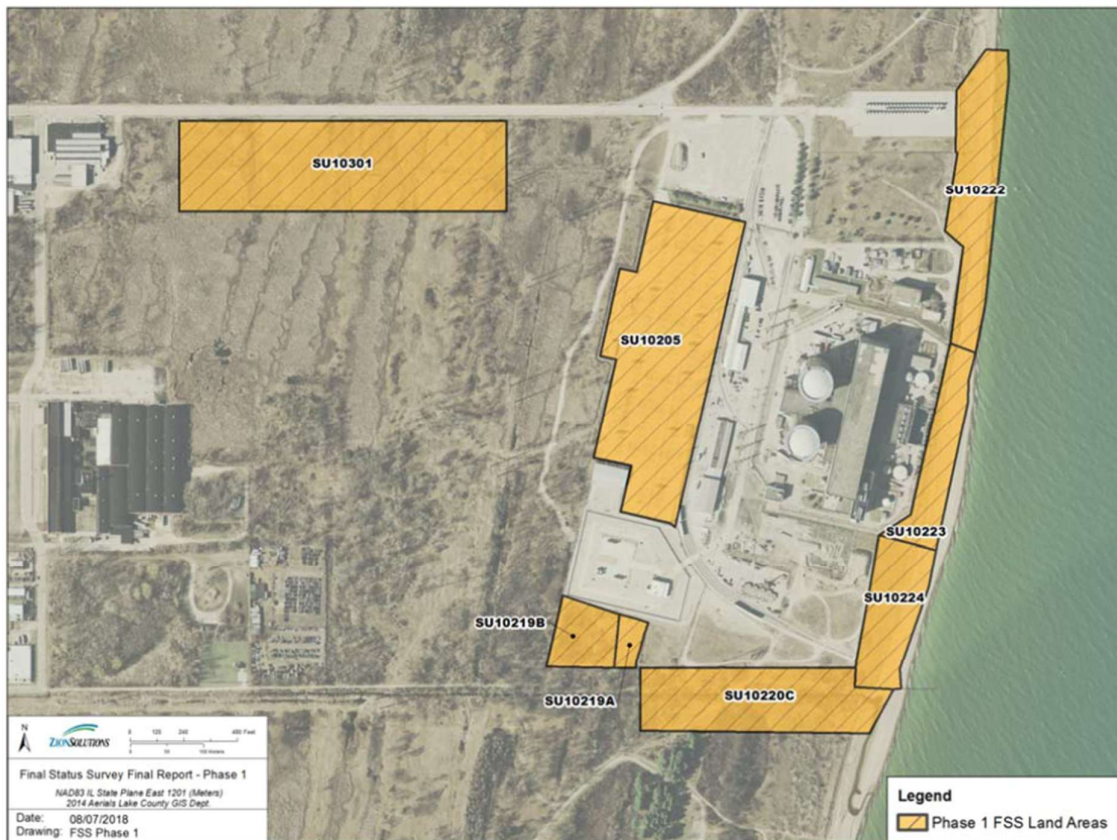


圖 18 Zion 核電廠第一階段開放土地偵檢單元位置圖

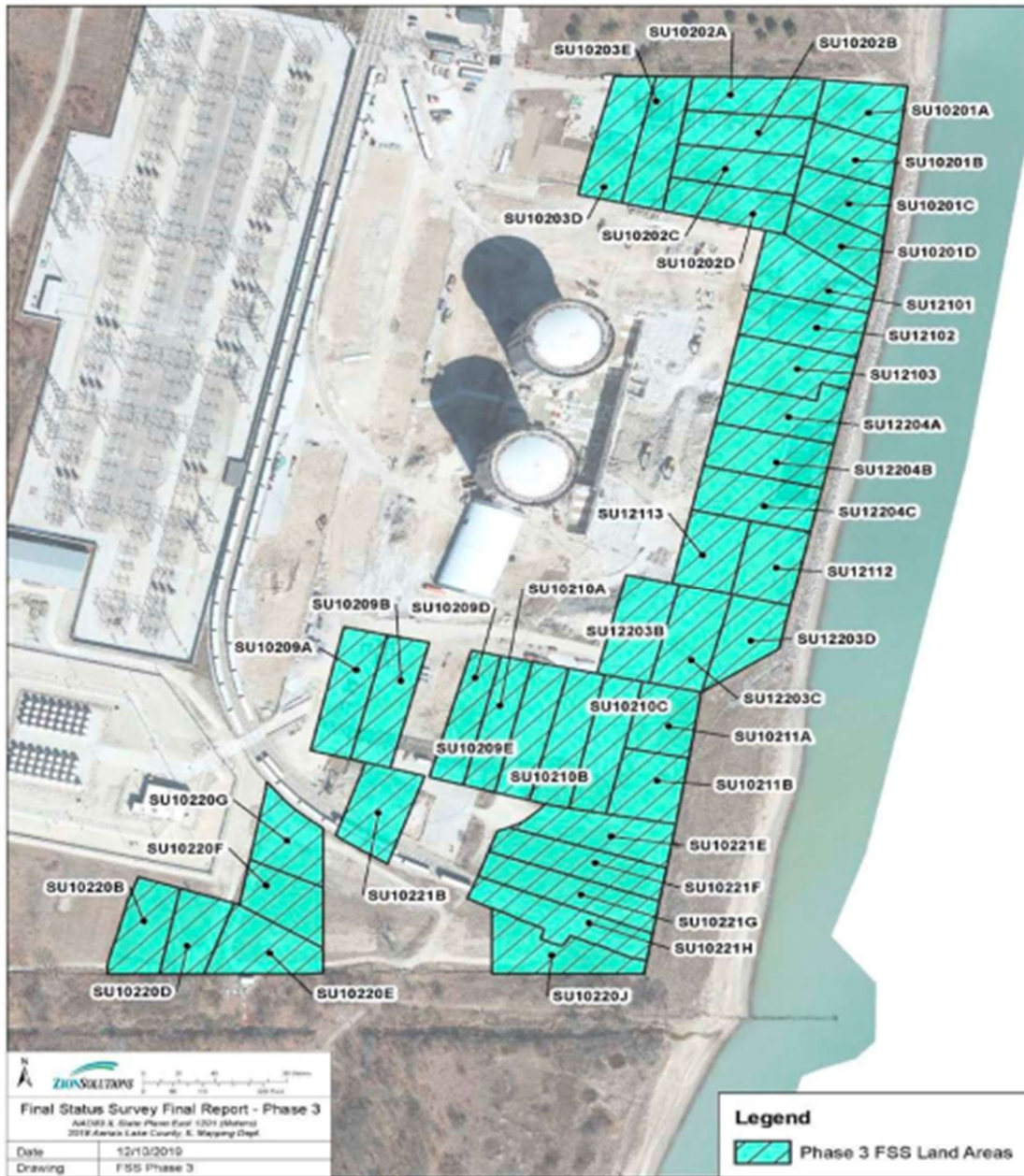


圖 19 Zion 核電廠第三階段開放土地偵檢單元位置圖

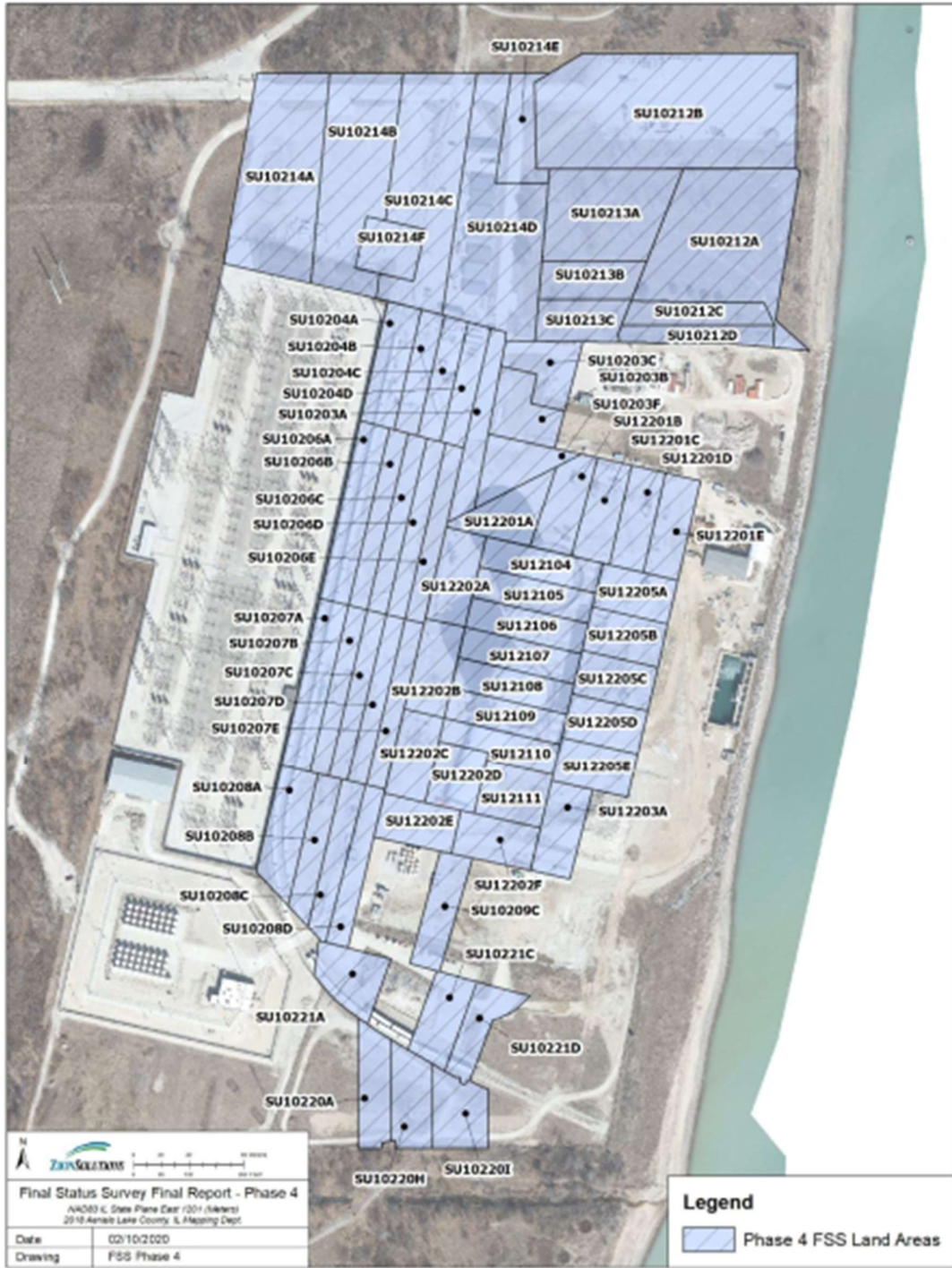


圖 20 Zion 核電廠第四階段開放土地偵檢單元位置圖

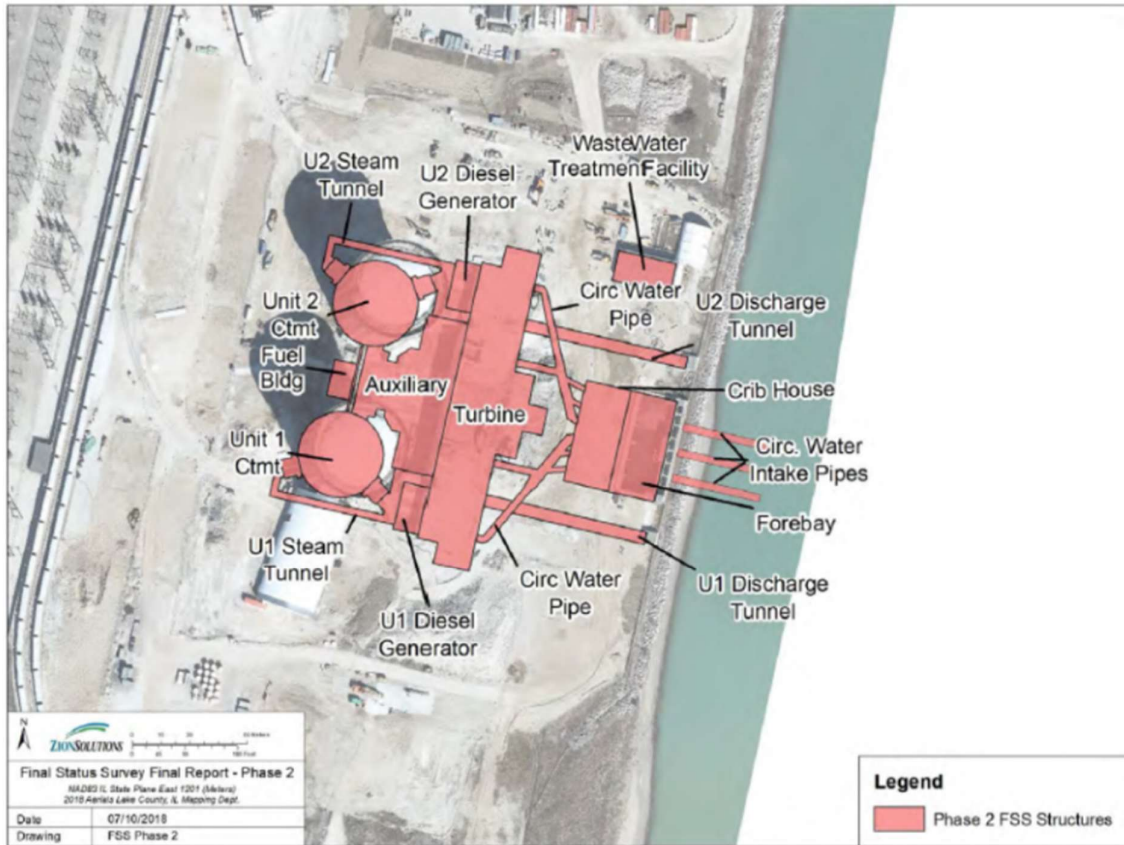


圖 21 Zion 核電廠第二階段第一部份偵檢單元位置圖

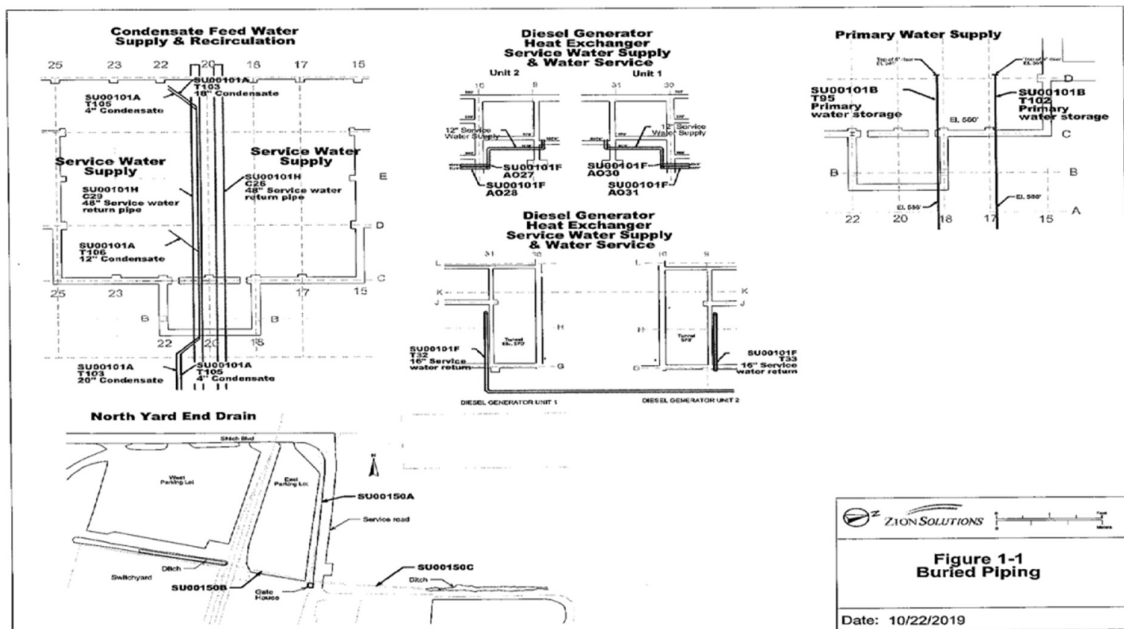


圖 22 Zion 核電廠第二階段第二部份偵檢單元示意圖

6.6 Zion 核電廠第 1 級偵檢單元最終狀態偵檢結果

6.6.1 第 1 級開放土地偵檢單元最終狀態偵檢結果

Zion 核電廠共有 101 個第 1 級開放土地偵檢單元，其中，41 個偵檢單元於第三階段進行偵檢，61 個偵檢單元於第四階段進行偵檢。於第三階段進行偵檢的第 1 級開放土地偵檢單元，大部分最初被歸類為第 2 級或第 3 級，但由於除役活動中發現離散放射性粒子(DRP)，保守地重新分級為第 1 級。第四階段進行偵檢的第 1 級開放土地偵檢單元亦有許多也是從第 2 級或第 3 級重新分級而來。

6.6.1.1 偵檢量測方法

開放土地偵檢單元量測方法主要有掃描及取樣，取樣包含表土及次表土取樣。

掃描使用的儀器為 Ludlum Model 2350-1 資料記錄器 搭配 Ludlum Model 44-10 偵檢器，以步行速度不超過 0.5 公尺/秒，探頭盡可能靠近地面方式進行。掃描發現高讀數的區域會被標記，並進行調查取樣。

表土樣本取樣深度為地表至地表以下 0.15 公尺。在 第 1 級土壤偵檢單元中，10% 的表土取樣位置需要額外採集次表土樣本。

實驗室儀器的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%，但只要經過保健物理監督人員的評估，考量實際 MDC、報告值、報告的不確定性以及樣本中 OpDCGL 比例，這些結果仍可被接受為有效數據。

根據 LTP，最終狀態偵檢取的樣本中的 10%，或者任何超過 OpDCGL 10%的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，HTD ROC 分析的目的為確認放射性核種的組成比例與 LTP 中之數據無顯著差異。

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。此外，隨機選擇至少 5%的取樣點位置取樣以及在每個偵檢單元中至少收集一個重複土壤樣本，進行用於品質管控(QC)偵檢。

6.6.1.2 調查基準

調查基準設定的目的是為了識別出可能存在活度升高的區域。第 1 級土壤偵檢單元的調查基準如下：

1. 掃描調查基準(Scan Investigation Levels)：掃描調查基準為大於 OpDCGL 或大於掃描 MDC(當掃描 MDC 大於 OpDCGL 時)。
2. 直接/靜態量測調查基準 (Direct Investigation Levels)：取樣或靜態量測結果的調查基準為大於 OpDCGL。
3. 若表土樣本或表面加馬掃描的結果次表土層 OpDCGL 的 75%，則必須在該關注區域內採集次表土樣本，作為調查。
4. 任何超過 OpDCGL 10%的樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析。

6.6.1.3 掃描涵蓋率及取樣樣本數

據 MARSSIM 建議，第 1 級偵檢單元應進行 100% 的掃描，並透過統計檢定計算所需樣本數。

雖然第 1 級偵檢單元目標是 100% 掃描涵蓋率，但由於 Zion 核電廠存在無法進入的區域(例如積水、低矮樹木、障礙物)，有少數第 1 級偵檢單元並未達到 100% 掃描，未完成 100% 掃描之偵檢單元及原因說明如下：

1. SU 10212D (NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore)：約 377m² 的區域因排水溝中的積水而無法進行掃描。
2. SU 10213C (NE Corner of Exclusion Area)：約 123m² 的開放土地區域由於低矮樹木而無法進行掃描；約 86m² 的區域由於積水和冰而無法進行掃描。
3. SU 10220I (SE Corner of Exclusion Area – Lakeshore)：濕地中的一個區域由於積水而無法進行掃描。
4. SU 12111 (South Yard Area Northeast of Gate House)：南側 20 公尺的區域由於積水而無法進行掃描，透過採集判斷性表土樣本來替代。

ZS 根據 LTP 的要求，已努力對第 1 級開放土地偵檢單元的所有可及土壤表面進行 100% 的掃描。NRC 在對 FSSR 的 SER 審查中，認為透過結合 ZS 執行的 FSS、其他調查以及 ORISE 的確認偵檢，仍有合理的保證證明這些區域得到了充分調查。

最終狀態偵檢報告中(FSSR)的樣本或 ISOCS 量測有分三種：

1. 隨機/系統性(Random/Systematic)：取樣或量測結果用於判斷偵檢單元是否符合輻射標準。因採用非參數(Non-Parameter)統計檢定方法計算所需樣本數，簡稱 NP。
2. 判斷性(Judgmental)：針對潛在污染最高或最值得關注的特定地點進行的取樣或量測，簡稱 Judg。
3. 調查用(Investigational, Inv)：當偵檢單元中有量測結果超過調查基準時進行取樣或量測，簡稱 Inv。

開放土地偵檢單元透過統計檢定計算所需系統樣本數，統計檢定以符號檢定(Sign Test)作為非參數統計檢定方法，可容許的型一錯誤(Type I Error)和型二錯誤(Type II Error)率皆設為 5%。偵檢單元取樣位置則使用 Visual Sample Plan (VSP)進行規劃。

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%。大部分 Zion 核電廠透過統計檢定計算所需樣本數為 17 個，樣本數差異通常是因為變異性差異與偵檢單元面積差異。

除了以上三種樣本，還有用於品質控制的 QC 樣本。表 55 為 Zion 核電廠第三階段開放土地第 1 級偵檢單元的樣本數。表 56 和表 57 為 Zion 核電廠第四階段第 1 級開放土地偵檢單元的樣本數。

表 55 Zion 核電廠第三階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數

Survey Unit	Description	Area	Class	# of Samples				Spacing
		(m ²)	(initial/Final)	NP	Judg	Inv	QC	(m)
10201A	NE Corner of Restricted Area - Lakeshore	1,554	3/1	17	0	0	1	10.3
10201B	NE Corner of Restricted Area - Lakeshore	1,427	3/1	17	0	0	1	9.8
10201C	NE Corner of Restricted Area - Lakeshore	1,379	3/1	17	0	0	1	9.7
10201D	NE Corner of Restricted Area - Lakeshore	1,472	3/1	17	0	0	1	10.0
10202A	IRSF/Fire Training Area	1,757	3/1	17	0	0	1	10.7
10202B	IRSF/Fire Training Area	1,711	3/1	17	0	0	3	10.8
10202C	IRSF/Fire Training Area	1,696	3/1	17	0	0	1	10.7
10202D	IRSF/Fire Training Area	1,680	3/1	18	0	0	1	10.4
10203D	East Training Area	1,993	3/1	17	1	0	2	11.6
10203E	East Training Area	1,886	3/1	17	0	3	2	11.3
10209A	Restricted Area South of Gate House	1,966	3/1	17	0	5	2	11.6
10209B	Restricted Area South of Gate House	1,977	3/1	17	0	0	1	11.6
10209D	Restricted Area South of Gate House	1,586	3/1	17	0	0	1	10.4
10209E	Restricted Area South of Gate House	1,560	3/1	17	1	5	2	10.3
10210A	Restricted Area South of Turbine Building	1,788	3/1	17	0	0	1	11.0
10210B	Restricted Area South of Turbine Building	1,913	3/1	17	0	0	1	11.4
10210C	Restricted Area South of Turbine Building	1,893	3/1	17	0	0	1	11.3
10211A	SE Corner of Restricted Area (Lakeshore)	1,536	3/1	17	0	0	1	10.2
10211B	SE Corner of Restricted Area (Lakeshore)	1,663	3/1	17	0	0	2	10.6
10220B	SE Corner of Exclusion Area - Inland	1,696	3/1	14	1	0	1	11.8
10220D	SE Corner of Exclusion Area - Inland	1,475	3/1	15	0	0	1	10.7
10220E	SE Corner of Exclusion Area - Inland	1,976	3/1	15	0	0	1	12.3
10220F	SE Corner of Exclusion Area - Inland	1,578	3/1	15	0	0	1	11.0
10220G	SE Corner of Exclusion Area - Inland	1,674	3/1	15	0	0	2	11.4
10220J	SE Corner of Exclusion Area - Inland	2,030	3/1	17	0	0	1	11.7
10221B	South of Protected Area - Inland	1,855	3/1	17	9	10	3	11.3
10221E	South of Protected Area - Lakeshore	1,975	3/1	17	0	0	1	11.6
10221F	South of Protected Area - Lakeshore	1,968	3/1	17	0	0	1	11.6
10221G	South of Protected Area - Lakeshore	1,956	3/1	17	0	0	1	11.5
10221H	South of Protected Area - Lakeshore	1,994	3/1	17	0	0	1	11.6
12101	WWTF Sludge Drying Bed Area	2,036	1/1	17	0	0	1	11.8
12102	WWTF	2,024	1/1	18	0	7	2	11.4
12103	Unit 2 PWST/SST Area	2,034	1/1	17	0	9	2	11.8
12112	Unit 1 PWST/SST Area West	1,693	1/1	17	0	16	2	10.7
12113	Unit 1 PWST/SST Area West	1,658	1/1	30	0	5	3	8.0
12203B	Under Service Building and Southeast Yard	1,989	2/1	30	0	16	4	8.7
12203C	Under Service Building and Southeast Yard	1,955	2/1	30	0	17	3	8.7
12203D	Under Service Building and Southeast Yard	1,635	2/1	30	0	14	3	7.9
12204A	Crib House Area	1,943	2/1	17	0	0	1	11.5
12204B	Crib House Area	1,971	2/1	17	0	0	1	11.6
12204C	Crib House Area	1,994	2/1	17	0	0	3	11.6

表 56 Zion 核電廠第四階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數

Survey Unit	Description	Area	Class	# of Samples				Spacing
		(m ²)	(initial/Final)	NP	Judg.	Inv.	QC	(m)
10203A	East Training Area	1,999	3/1	17	0	0	1	11.7
10203B	East Training Area	1,977	3/1	17	6	0	2	11.6
10203C	East Training Area	1,871	3/1	17	3	0	2	11.3
10203F	East Training Area	1,888	3/1	17	0	0	1	11.3
10204A	North Gate Area	2,231	3/1	19	0	0	2	11.6
10204B	North Gate Area	1,549	3/1	17	0	2	2	10.3
10204C	North Gate Area	1,547	3/1	17	0	0	1	10.3
10204D	North Gate Area	1,545	3/1	17	0	1	2	10.2
10206A	Station Construction Area	2,844	3/1	24	0	0	2	11.7
10206B	Station Construction Area	1,837	3/1	17	0	4	3	11.2
10206C	Station Construction Area	1,833	3/1	17	0	0	1	11.2
10206D	Station Construction Area	1,829	3/1	17	0	1	2	11.1
10206E	Station Construction Area	1,825	3/1	17	0	0	1	11.1
10207A	North Warehouse Area	2,675	3/1	23	4	26	4	11.6
10207B	North Warehouse Area	1,736	3/1	17	0	10	2	10.9
10207C	North Warehouse Area	1,735	3/1	17	0	12	2	10.9
10207D	North Warehouse Area	1,733	3/1	17	1	2	2	10.8
10207E	North Warehouse Area	1,731	3/1	17	0	0	1	10.8
10208A	South Warehouse Area	2,460	3/1	21	1	0	2	11.6
10208B	South Warehouse Area	1,835	3/1	17	0	0	1	11.2
10208C	South Warehouse Area	1,868	3/1	17	0	4	2	11.3
10208D	South Warehouse Area	1,827	3/1	17	0	10	2	11.1
10209C	Restricted Area South of Gate House	1,970	3/1	17	0	15	2	11.6
10212A	NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	9,550	3/2	18	0	2	2	24.8
10212B	VCC Construction Area	16,154	3/3	17	0	4	2	Random
10212C	NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	1,744	3/1	19	0	0	2	10.3
10212D	NE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	1,490	3/1	22	2	0	2	8.8
10213A	NE Corner of Exclusion Area	5,730	3/2	17	0	0	1	19.7
10213B	NE Corner of Exclusion Area	1,994	3/1	17	3	27	3	11.6
10213C	NE Corner of Exclusion Area	1,934	3/1	17	9	6	3	11.5
10214A	Construction Parking Area	8,542	3/2	17	0	10	2	24.1
10214B	Construction Parking Area	7,372	3/2	17	0	1	2	22.4
10214C	Construction Parking Area	7,579	3/2	17	0	6	2	22.7
10214D	Construction Parking Area	8,946	3/2	17	1	6	2	24.7
10214E	Construction Parking Area	1,989	3/1	17	0	2	2	11.6
10214F	Construction Parking Area	1,661	3/1	17	0	1	2	10.6
10220A	SE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	2,025	3/1	23	0	13	3	10.1
10220H	SE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	2,088	3/1	17	4	0	2	11.9
10220I	SE Corner of Exclusion Area - Lakeshore	2,060	3/1	17	5	16	2	11.8

表 57 Zion 核電廠第四階段第 1 級開放土地偵檢單元樣本數(續)

Survey Unit	Description	Area (m ²)	Class (initial/Final)	# of Samples				Spacing (m)
				NP	Judg.	Inv.	QC	
10221A	South of Protected Area - Inland	1,976	3/1	22	12	9	6	10.2
10221C	South of Protected Area - Inland	1,959	3/1	17	8	13	3	11.5
10221D	South of Protected Area - Inland	1,697	3/1	17	7	22	3	10.7
12104	North Half of Unit 2 Containment	1,940	1/1	17	0	0	1	11.5
12105	South Half of Unit 2 Containment	1,938	1/1	17	0	0	1	11.5
12106	North Half of Fuel & Auxiliary Buildings	1,936	1/1	17	0	0	1	11.5
12107	South Half of Fuel & Auxiliary Buildings	1,934	1/1	17	0	0	1	11.5
12108	North Half of Unit 1 Containment	1,933	1/1	17	0	0	1	11.5
12109	South Half of Unit 1 Containment	1,931	1/1	17	0	0	1	11.5
12110	Yard Between Unit 1 Containment and Turbine	1,740	1/1	17	0	0	1	10.9
12111	South Yard Area Northeast of Gate House	1,964	1/1	17	3	0	2	11.6
12201A	North Protected Area Yard	1,992	2/1	17	0	0	1	11.6
12201B	North Protected Area Yard	1,995	2/1	17	0	0	1	11.6
12201C	North Protected Area Yard	1,968	2/1	17	0	6	2	11.6
12201D	North Protected Area Yard	1,842	2/1	17	0	5	3	11.2
12201E	North Protected Area Yard	1,902	2/1	18	0	2	2	11.0
12202A	Gate House and Southwest Yard	1,998	2/1	17	0	0	1	11.6
12202B	Gate House and Southwest Yard	1,999	2/1	17	0	0	1	11.7
12202C	Gate House and Southwest Yard	1,894	2/1	17	0	0	1	11.3
12202D	Gate House and Southwest Yard	1,663	2/1	17	0	0	1	10.6
12202E	Gate House and Southwest Yard	1,845	2/1	17	2	0	2	11.2
12202F	Gate House and Southwest Yard	1,858	2/1	17	5	0	2	11.2
12203A	Under Service Building and Southeast Yard	1,988	2/1	30	0	14	3	8.7
12205A	Area Under the Turbine Building	1,809	2/1	17	0	0	1	11.1
12205B	Area Under the Turbine Building	1,814	2/1	17	0	0	1	11.1
12205C	Area Under the Turbine Building	1,818	2/1	17	0	0	1	11.1
12205D	Area Under the Turbine Building	1,821	2/1	17	0	0	1	11.1
12205E	Area Under the Turbine Building	1,825	2/1	17	0	4	2	11.1

6.6.1.4 挖掘區域之偵檢規範

Zion 核電廠 TLP 中規範當拆除潛在受污染的地下結構(如反應器廠房或廢氣貯存槽地下室)或鋪設路面(如柏油路或混凝土墊)被移除後，產生的挖掘區域在回填之前必須進行 FSS，並輔以除污作業輔助偵檢 (Remedial Action Support Surveys, RASS)。挖掘區之 FSS 設計為開放土地偵檢(土壤)，並使用被移除建築結構物所屬的分級作為其分級。

若 RASS 偵檢結果顯示濃度低於土壤的 OpDCGL，則評估該區域適合進行 FSS。在 FSS 規劃中。挖掘區 FSS 偵檢應對挖掘後暴露的次表層土壤進行掃描，與土壤樣本分析結合使用，並使用使用次表土之 OpDCGL 作為釋出標準。

6.6.1.5 第三階段 FSSR

第三階段總共有 41 個第 1 級開放土地偵檢單元，初次進行 FSS 時間為 2019 年 3 月 29 日至 2019 年 8 月 24 日。第三階段 FSSR 報告初版於 2019 年 12 月提交，在第三階段 FSSR 初版中共有 10 個偵檢單元於依據偵檢結果需進行調查，須調查原因包含：掃描或樣本分析結果超過調查基準、發現離散放射性粒子(Discrete Radioactive Particle, DRP)，以及設定的系統量測位置無法量測(如積水或非泥土地)，因而調整量測位置。其

中，於 4 個偵檢單元(10202B、10202D、10209A，和 10209E)上發現了 DRP，這些 DRP 在調查後都進行了移除並重新進行量測。

在第三階段偵檢單元進行 FSS 後，11 個已完成 FSS 之偵檢單元因偵檢單元狀態改變而須重新偵檢，重新偵檢之原因說明如下：

1. 偵檢單元 12203B、12203C、12203D 和 12113 於 FSS 執行完成後，於偵檢單元土壤上暫時存放清潔混凝土拆除碎片(Clean Concrete Demolition Debris, CCDD)。此四個偵檢單元的樣本數增加至 30，HTD 核種分析的樣本數由 10% 增至 20%。
2. 根據除役要求，地下剩餘的建築結構距離地面須超過 3 英尺，以下第三階段偵檢單元不符此要求，因此進行了處理，以致改變了偵檢單元地質狀況：
 - 偵檢單元 12112 內有高於地面以下三英尺的混凝土基礎結構，因此進行挖掘與移除混凝土作業，造成地質特徵發生顯著變化。
 - 為確保埋於地下的結構不高於地面下三英尺處，從廠外運入乾淨回填土，鋪設於 10201C、10201D、10202C、10202D、12102 及 12103 偵檢單元上，造成地質特徵發生顯著變化。

第三階段重新進行 FSS 的時間為 2021 年至 2022 年 8 月，第三階段 FSSR 報告更一版於 2022 年 09 月提交。更一版中，更新了重新執行 FSS 的偵檢單元的數據和相關修訂，其餘未重新偵檢之偵檢單元於初版 FSSR 中的相關內容並未修改。(補充說明：初次 FSS 發現 DRP 之偵檢單元，在移除 DRP 後重新量測的結果，並將重新量測結果紀錄於初版，後續並沒有重新執行 FSS。)

第三階段 FSSR 更一版中有 15 偵檢單元需要進行調查(初版的 10 個進行調查的偵檢單元中，有 9 個仍列於更一版中，剩餘 1 個因重新偵檢結果無須進行調查，故排除)，並又於 5 個偵檢單元(12102、12103、12113、12203B、12203C) 上發現 DRP，這些 DRP 在調查後都進行了移除並重新量測。

第三階段最終狀態偵檢過程中於部分偵檢單元內發現了若干個分散的，輻射偏高區域，但所有超過 OpDCGL 的區域都被挖掘並移除(除污)，並重新進行量測。第三階段 FSSR 內容表示，完成除污後，所有偵檢單元的 ROC 濃度皆低於 OpDCGL，且所有偵檢單元的量測結果均通過符號檢定與回溯功率曲線，符合除役輻射標準。

Zion 核電廠第三階段 FSSR 更一版中，評估劑量最大之偵檢單元編號是 10209D，其樣本平均 BcSOF 為 0.022，對應的劑量為 0.544 mrem/yr。表 58 為 Zion 核電廠開放土地第三階段偵檢結果彙整。

表 58 Zion 核電廠第三階段開放土地偵檢單元偵檢結果彙整

		第三階段 最終狀態偵檢報告(FSSR)	
		初版(2019年12月)	更一版(2022年09月)
進行調查偵檢單元數		10	15
進行調查原因		<ul style="list-style-type: none"> • 掃描或樣本量測結果超過調查基準 • 發現DRP • 設定的系統量測位置無法量測(如積水或非泥土地)·因而調整量測位置。 	
調查方法		取樣(表土、次表土、QC)	
DRP處理方法		移除DRP、除污後重新量測(重新量測結果皆小於MDC)	
平均劑量最大之偵檢單元	偵檢單元編號	10209D	
	平均BcSOF	0.022	
	平均劑量	0.544 (mrem/yr)	

6.6.1.6 第四階段 FSSR

第四階段總共有 67 個開放土地偵檢單元，其中 60 個是第 1 級。初次進行 FSS 時間為 2019 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 14 日，第四階段 FSSR 報告更一版(針對 NRC 對第二和第三階段提出的 RAIs 進行小修改後之版本)於 2020 年 4 月提交，在第四階段 FSSR 更一版中共有 40 個偵檢單元於依據偵檢結果需進行調查，須調查原因包含：掃描或樣本分析結果超過調查基準、發現 DRP，以及設定的系統量測位置無法量測(如積水或非泥土地)，因而調整量測位置。其中，於 9 個偵檢單元(10204D、10206D、10207A、10207B、10207C、10209C、10220A、10221C、12201D)上發現了離散放射性粒子(DRP)，這些 DRP 在調查後都進行了移除，並重新進行量測。

在第四階段偵檢單元進行 FSS 後，5 個已完成 FSS 之偵檢單元因偵檢單元狀態改變而須重新偵檢，重新偵檢之原因說明如下：

1. FSS 執行完成後，於偵檢單元 12203A 上曾暫時存放清潔混凝土拆除碎片 (Clean Concrete Demolition Debris, CCDD)，此偵檢單元的樣本數增加至 30，HTD 核種分析的樣本數由 10%增至 20%。
2. 根據除役要求，地下剩餘的建築結構距離地面須超過 3 英尺，以下第四階段偵檢單元不符此要求，因此進行了處理，以致改變了偵檢單元地質狀況：
 - 偵檢單元 12201C 和 12201D 內有高於地面以下三英尺的混凝土基礎結構，因此進行挖掘與移除混凝土作業，造成地質特徵發生顯著變化。
 - 為確保埋於地下的結構不高於地面下三英尺處，從廠外運入乾淨回填土，鋪設於 10201E、10205A 偵檢單元上，導致地質特徵發生重大變化。

第四階段重新進行 FSS 的時間為 2021 年至 2022 年 8 月，第四階段 FSSR 報告更二版於 2022 年 09 月提交。更二版中，更新了重新執行 FSS 的偵檢單元的數據和相關修訂，其餘未重新偵檢之偵檢單元於更一版 FSSR 中的相關內容並未修改。

第四階段 FSSR 更二版中共有 41 個偵檢單元需要進行調查的情況，但並無偵檢單元發現到新的 DRP。

第四階段最終狀態偵檢過程中於部分偵檢單元內發現了若干個輻射偏高區域，但所

有超過 OpDCGL 的區域都被挖掘並移除(除污)，並重新進行量測。第四階段 FSSR 內容表示，完成除污後，所有偵檢單元的 ROC 濃度皆低於 OpDCGL，且所有偵檢單元的量測結果均通過符號檢定與回溯功率曲線，符合除役輻射標準。

Zion 核電廠第四階段 FSSR 更二版中，評估劑量最大之偵檢單元編號是 12203A，其樣本平均 BcSOF 為 0.040，對應的劑量為 0.994 mrem/yr。第四階段更二版評估劑量最大之偵檢單元編號是 12213B，其樣本平均 BcSOF 為 0.040，對應的劑量為 0.968 mrem/yr。表 59 為 Zion 核電廠開放土地第四階段偵檢結果彙整。

表 59 Zion 核電廠第四階段開放土地偵檢單元偵檢結果彙整

		第四階段 最終狀態偵檢報告(FSSR)	
		更一版(2020年04月)	更版(2022年09月)
進行調查偵檢單元數		40	41
進行調查原因		<ul style="list-style-type: none"> • 掃描或樣本量測結果超過調查基準 • 發現DRP • 設定的系統量測位置無法量測(如積水或非泥土地)，因而調整量測位置。 	
調查方法		取樣(表土、次表土、QC)	
DRP處理方法		移除DRP、除污後重新量測(重新量測結果皆小於MDC)	
平均劑量最大之偵檢單元	偵檢單元編號	10213B	
	平均BcSOF	0.039	
	平均劑量	0.968(mrem/yr)	

6.6.1.7 挖掘區域之 FSS

6.6.1.7.1 燃料處理廠房與車棚挖掘區

2018 年春季期間，對燃料處理廠房(Fuel Handling Building, FHB)與車棚(Car Shed)進行一項挖掘作業(見圖 23)。挖掘範圍涵蓋了偵檢單元 12105、12106 和 12107 的西半部。為了在回填前，對挖掘區內暴露的地下土壤執行最終狀況偵檢。執行 FSS 時，這些挖掘區偵檢單元的編號被重新指定為 12105K、12106K 和 12107K，並被歸類為第 1 級。整個挖掘面積的 100% 均進行了掃描偵檢。(參見圖 23)

在掃描過程中，未發現任何放射性活度升高的區域。根據 Zion 核電廠第四階段 FSSR，挖掘區內地下土壤樣本的最大 OpSOF 為 0.453，而偵檢單元 12107K 具有最大的平均 OpSOF，為 0.155。在反應器圍阻建物拆除前完成，此區域以乾淨回填土完成回填。

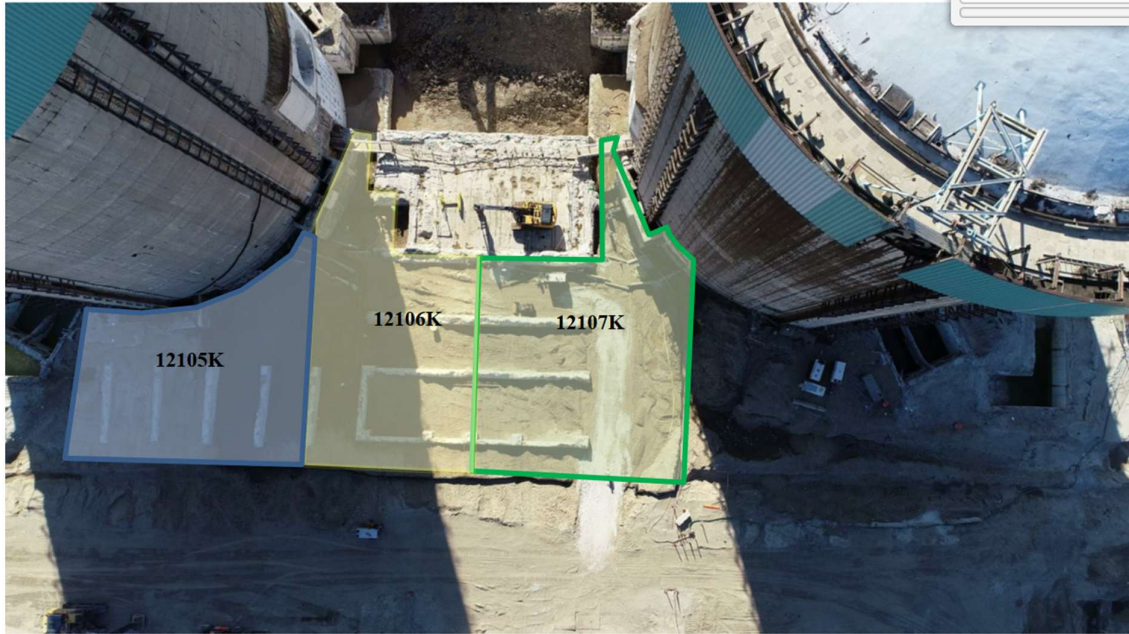


圖 23 Zion 核電廠挖掘區偵檢單元

6.6.1.7.2 圍阻體與汽機廠房之間的地下土壤挖掘區

依據 LTP，位於圍阻體與汽機廠房之間的地下土壤，應在地下管線與妨礙進入地下區域的構造物移除後，進行地下土壤放射性污染評估。此要求適用於偵檢單元 12109，以及偵檢單元 12110 的北側邊界。此區域的土壤完全被移除並作為受污染廢棄物處理。回填前執行之除污作業輔助偵檢(RASS)結果顯示，未偵測到超過 OpDCGL 的關注核種(ROC)。

6.6.1.7.3 1 號機與 2 號機圍阻體挖掘區

2018 年 8 月，ZS 完成了輔助廠房地下室與用過燃料池的拆除與回填。接下來預定拆除的建物為 1 號與 2 號圍阻體(Containment Domes)。ZS 當時的計畫是將 1 號與 2 號圍阻體外部混凝土指定為「乾淨混凝土拆除碎片」(Clean Concrete Demolition Debris, CCDD)，並將該 CCDD 作為地下室回填材料使用。

然而，在 588 英尺標高的圍阻體周圍的表土壤已確認為受污染。儘管需要對圍阻周圍土壤進行除污，但當時所需的時間過長，因此選擇以替代方式處理：以外運乾淨土壤鋪設犧牲層覆蓋受污染的原始表土，覆蓋厚度最高達 1.5 英尺。犧牲層完成後，圍阻穹頂結構即可進行拆除，無需等待土壤除污完成。

至 2018 年 12 月，1 號機與 2 號機圍阻體均已拆除，產生的 CCDD 亦已移出該區。CCDD 移除後，再移除犧牲層土壤，並對暴露出的原始土壤進行 100%掃描。警報設定值為偵測儀器的最低可偵測計數率(MDCR)加上背景值，並設定任何高於 MDCR 的放射性活度訊號，皆需進一步調查並依需要進行除污。

2019 年 2 月 26 日至 2019 年 6 月 18 日期間，掃描偵測發現多處放射性活度超過 MDCR 的區域，所有超過地下土壤 OpDCGL 的土壤均予以挖除並作為放射性廢

棄物處置。挖除完成後，進行除污後的掃描及樣本分析。所有除污後的土壤樣本之 OpSOF 皆小於 1，符合釋出標準。然而，所有挖掘區域仍維持開放，以便 ORISE 進行除污後土壤的確認偵檢。

6.6.1.8 DRP(Discrete Radioactive Particle)污染

離散放射性粒子(DRP) 是指微小且具有高度放射性的粒子，通常約在毫米(millimeters) 或微米(micrometers) 的數量級，有能力在短時間內對局部區域傳遞極高劑量。

在 Zion 核電廠除役過程中，DRP 曾成為一個重要的問題，因為在 2012 年至 2018 年的除役拆除作業時，DRP 曾變成空氣傳播物，並被傳送到 1 號機和 2 號機圍阻體及燃料處理廠房外部環境中。

由於 DRPs 的特殊性和高放射性，NRC 發現，當時的法規文件(如 MARSSIM Rev. 1 和 NUREG-1757)並未提供關於如何適當偵檢或評估公眾曝露劑量的指導。

由於早期缺乏針對 DRP 的調查和劑量評估現成的指南，NRC 與其承包商進行專門研究，以建立評估 DRP 造成公眾曝露劑量的指導和方法：

1. 新的劑量係數與決定性效應研究
 - NRC 委託一家合格的承包商開發 DRP 劑量係數。這些係數針對核電廠最可能存在的污染物以及公眾潛在曝露途徑進行估計。
 - 同一承包商還提供了一份報告，評估如果 DRP 被吸入或攝入，可能導致的潰瘍閾值 (Ulceration Threshold)，這是一種潛在的確定性效應。
2. 掃描靈敏度評估方法的開發
 - 為了確保能夠可靠地偵測到 DRP，NRC 委託 ORISE 開發了新的偵測方法，用於評估掃描 DRP 的靈敏度。ORISE 文件化並使用了這種方法來評估針對 Co-60 和 Cs-137 作為點源而非面積源的掃描。
 - 最終，NRC 確認，透過使用手持式掃描技術，並且盡可能貼近表面和緩慢地(0.25 公尺/秒)進行，可以識別出 DRP。ZS 也修改了其掃描技術和數據品質目標(DQOs)，並重新執行了多次 FSS。

6.6.1.8.1 CCDD(Clean Concrete Demolition Debris)

CCDD 指的是拆除後的乾淨混凝土碎片，根據 Zion 核電廠 LTP，允許回填地下室使用 CCDD 為回填材料。但在用於回填之前，這些材料必須經過偵檢，如果偵檢結果檢測到任何與核電廠相關的放射性核種 (Plant-Derived Radionuclides)，該混凝土就不能用作清淨回填物，而應作為低水平放射性廢棄物處理。預計作為回填物的混凝土碎片包括 1 號機和 2 號機圍阻體的外層、汽機廠房，以及輔助廠房。

Zion 核電廠實際共有以下七個地下室結構使用 CCDD 作為回填材料，包含汽機廠房(TB)地下室、輔助廠房(Auxiliary Building)地下室、用過燃料池和燃料運輸通道(SFP/Transfer Canal)、循環冷卻水泵室(Crib House)、廢水處理設施(WWTF)，以及 1 號機和 2 號機圍阻體地下室。

6.6.1.8.2 CCDD 隔離與管控問題

2018 年 8 月，Zion 核電廠完成了輔助廠房及用過燃料池的拆除與回填。接下來拆除 1 號機和 2 號機圍阻體，當時圍阻體的外部混凝土被分類為清潔混凝土拆除廢棄物(CCDD)，並預計要作為回填材料。為確保這些混凝土符合無限制釋放的標準，必須避免 CCDD 與污染土壤接觸，但圍阻體外面周圍的表層土壤已被確認為受污染土壤。由於當時的時程安排，無法立即完成土壤除污。因此，採取了一項替代方案：使用來自廠外的潔淨土(Sacrificial Layer)覆蓋受污染的表層土壤，厚度最達 1.5 英尺，再將 CCDD 暫置於潔淨土上，讓拆除圍阻體的作業可於土壤除污前進行。進行 1 號機和 2 號機圍阻體拆除時，ZS 於 2019 年年初時將 CCDD 堆放在數個「已完成 FSS」的開放土地偵檢單元上，並於拆除完成後，於 2019 年夏天移除 CCDD 與潔淨土。NRC 判定 ZS 未能實施並維持已批准的 LTP 規定，構成了非引述違規(Non-Cited Violation, NCV) - 違反 LTP 關於在 FSS 活動期間直到解除執照前應維持隔離與控制以避免再污染的規定。

在偵檢單元 12205A 至 12205E 中，由於 CCDD 發生了顯著的混合和深層沉降，並且隨著移除工作帶走了大量土壤，ZS 認為這「顯著改變了偵檢單元的最終狀態」，因此決定對這五個單位重新執行 FSS。並且，ZS 將所有挖掘區域都暫保持開放，以便 ORISE 進行確認偵檢。2019 年 8 月，ORISE 對圍阻體周圍裸露的地下土壤進行確認偵檢，發現 3 顆小型放射性顆粒，並予以移除。而後，ZS 使用來自廠外的潔淨填土覆蓋所有地下室剩餘結構至至少 3 英尺厚。

在 NRC 審查和調查 ZS 最初提交的偵檢單元釋出紀錄後，發現 ZS 未對大部分受 CCDD 影響的偵檢單元重新執行 FSS，不足以提供合理的保證來確認沒有受到 CCDD 的影響，最終，ZS 對所有曾被放置 CCDD 或運送 CCDD 的開放土地偵檢單元重新執行了 FSS。

6.6.1.8.3 ORISE 確認偵檢中發現到的 DRP

NRC 及其承包商 ORISE 進行的獨立確認偵檢中曾多次發現 DRP：

1. 2019 年 8 月，對圍阻體周圍裸露的地下土壤進行確認偵檢，發現 3 顆小型放射性顆粒。
2. 2020 年的確認性偵檢(第三階段偵檢區域)：在針對第三階段偵檢單元的掃描中，發現了七個高輻射區域，其中一個區域是因 DRP 和混凝土碎片造成。
3. 2021 年的檢查性偵檢：鑑於 DRPs 的持續存在，NRC 於 2021 年 4 月與 ORISE 進行了一次檢查性偵檢，主要目的是尋找 DRP，共發現了 8 個 DRP。
4. 在輔助廠房地下室的地板混凝土上方的沉積物樣本中，識別並移除了 1 個 DRP。
5. 2023 年的大規模 DRP 偵檢：NRC 於 2023 年要求 ORISE 進行廣泛的 DRP 掃描，以確認 ZS 清除工作的有效性。ORISE 在這次大規模掃描後，從表面土壤中識別並收集了 12 個 DRP，但在針對次表層土壤的有限評估中，並未識別到任何 DRP。

6.6.1.8.4 NRC 對 DRP 造成劑量的評估

NRC 對 DRP 造成潛在劑量的評估採取了 Risk-Informed(將風險評估納入決策過程)

方式，評估假設有 DRP 殘留(判斷為極不可能)的情況下，公眾可能受到的最大劑量是否仍在安全限值內。以下是 NRC 對 DRP 造成劑量評估的要點彙整：

1. 偵檢與清除結論

- 無已知 DRP 殘留：經過 ZS 和 NRC 承包商 ORISE 的努力，NRC 相信所有已知的 DRP 都已被識別、移除並作為廢棄物處置。因此，預期中 DRP 曝造成的劑量是零。
- ALARA 達成：NRC 認為，由於為識別和移除 DRP 所付出的巨大延遲和成本，實際上已經達成了合理可行低水平(AARA)的目標。

2. 假設情景評估

儘管所有 DRP 均被移除，NRC 仍考慮了由於人為錯誤或其他特殊情況，仍有 DRP 殘留在廠址上，導致公眾可能曝露的情況。NRC 將這種可能性歸類為「可能性較低但合理的情景」(Less Likely but Plausible, LLBP)，DRP 劑量評估方法與結果如下：

- **總有效等效劑量 (TEDE)**：假設曝露於 2023 年偵檢中收集到的 DRP，所造成的假定劑量小於 10 mrem TEDE。即使考慮到掃描技術的靈敏度範圍，估計最大可能劑量也小於 20 mrem。
- **公眾劑量限值**：即使發生曝露，所產生的曝露劑量低於公眾劑量限值 100 mrem/yr TEDE
- **確定性效應(Deterministic Effects)**：NRC 也評估了潛在的淺層劑量等效值(Shallow Dose Equivalent, SDE)和局部劑量等效值(Localized Dose Equivalent, LDE)。這些假定的劑量評估結果為遠低於任何確定性效應的閾值。
- **時效性**：由於 DRPs 的主要關注放射性核種是 Co-60、Eu-152 和 Eu-154，這些核種的半衰期相對較短(Co-60 為 5.27 年，Eu-152 為 13.5 年，Eu-154 為 8.59 年)。因此，即使有 DRP 殘留，其造成的潛在劑量也會隨時間而減少。

3. NRC 最終結論

對 DRP 潛在相互作用的劑量評估僅是用於為終止執照的決策提供風險資訊，而不是合規性評估。基於上述評估，NRC 相信：

- 即使在極不可能發生曝露的情況下，由此產生的劑量也不會超過公眾劑量限值，且不會造成確定性效應。
- DRP 已經被充分處理，並支持廠址符合非限制性釋出標準。

6.6.1 第 1 級地下室、嵌管及穿管偵檢單元最終狀態偵檢結果

Zion 核電廠總共有 16 個第 1 級地下室、嵌管和穿管偵檢單元，皆於第二階段，第一部分進行偵檢。嵌管 (Embedded Pipe) 指的是垂直或水平穿過混凝土樓板，並且嵌入在特定建築物內的管道；穿管 (Penetration)則是指穿過混凝土牆和/或樓板、介於兩座建築物之間、並在每座建築物的牆壁或樓板表面處開口的管道(或若管道已移除則為剩餘的管套(Pipe Sleeve)，或若管道和管套均已移除則為中間有穿孔的混凝土洞)。表 60 為

Zion 核電廠第二階段，第一部分偵檢單元。圖 24 Zion 核電廠第二階段偵檢單元示意圖。圖 25 為 Zion 核電廠輔助廠房穿管圖示。圖 26 為 Zion 核電廠輔助廠房 拆除前 542 英尺標高平面圖。

表 60 Zion 核電廠第二階段，第一部分偵檢單元(共 7 個地下室)

SU	Name	Class ⁽⁶⁾	Size (m ²)
01100 ⁽¹⁾	Unit No. 1 Containment above 565 ft.	1	2,465
01110 ⁽¹⁾	Unit No. 1 Containment Under Vessel Area	1	294
01111	Unit No. 1 Containment Incore-Sump Drain	1	0.86
01112	Unit No. 1 Containment Penetrations	1	242
02100 ⁽²⁾	Unit No. 2 Containment above 565 ft	1	2,465
02110 ⁽²⁾	Unit No. 2 Containment Under Vessel Area	1	294
02112	Unit No. 2 Containment Penetrations	1	242
03202	SFP/Transfer Canal	1	723
05100	Auxiliary Building 542 ft. Floor and Walls	1	7,226
05119	Auxiliary Building Embedded Floor Drains	1	294
05120	Auxiliary Building Penetrations	1	949
06100 ⁽³⁾	Turbine Building Basement and Steam Tunnels	3	27,135
06105A ⁽³⁾	Circulating Water Discharge Pipe	3	1,075
09200 ⁽⁴⁾	Unit Nos. 1 & Unit 2 Circulating Water Discharge Tunnels	3	4,868
06105B ⁽⁴⁾	Turbine Building Embedded Pipe	3	238
06107 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Turbine Building Buttress Pit	3	1,596
06108 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Turbine Building Buttress Pit	3	1,596
06201 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Turbine Building 570' Diesel Fuel Storage	1	813
06202 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Turbine Building 570' Diesel Fuel Storage	1	813
06209 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Steam Tunnel Floor Drain	3	47
06210 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Steam Tunnel Floor Drain	3	46
06211 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Tendon Tunnel Floor Drain	3	51
06212 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Tendon Tunnel Floor Drain	3	42
06213 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Steam Tunnel East Valve House	1	304
06214 ⁽⁴⁾	Unit No. 1 Steam Tunnel West Valve House	1	304
06215 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Steam Tunnel East Valve House	3	240
06216 ⁽⁴⁾	Unit No. 2 Steam Tunnel West Valve House	3	240
08100 ⁽⁵⁾	Crib House	3	8,435
08401 ⁽⁵⁾	Forebay	3	5,407
08102A&B ⁽⁵⁾	Unit No. 1 and Unit No. 2 Circulating Water Intake Pipes	3	4,412
09100	Waste Water Treatment Facility	1	1,124

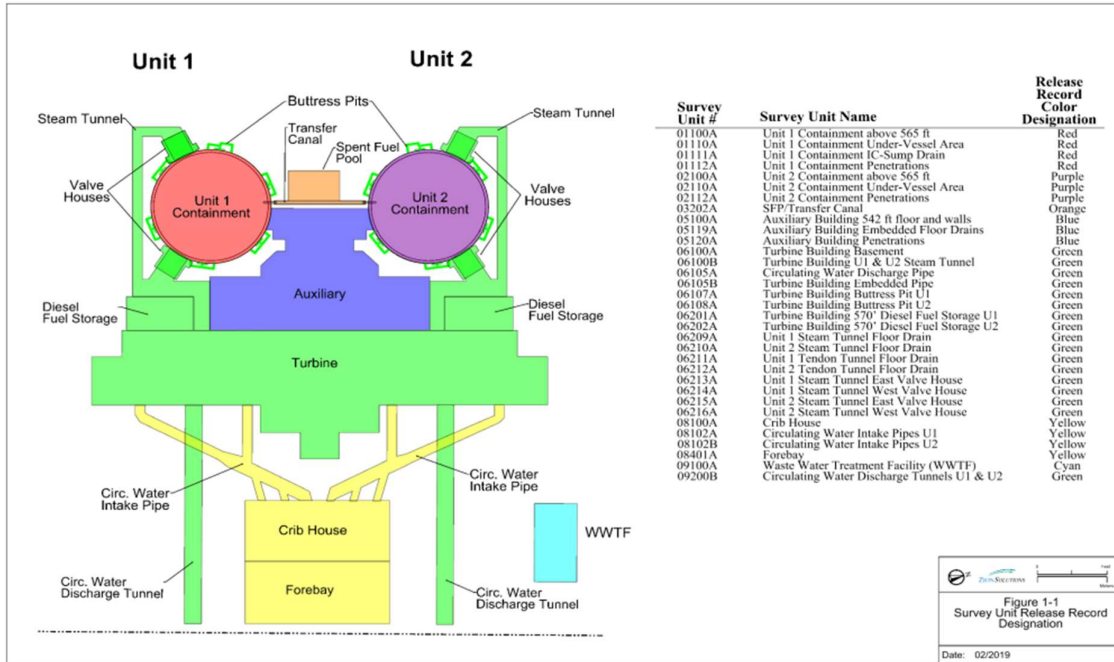


圖 24 Zion 核電廠第二階段偵檢單元示意圖

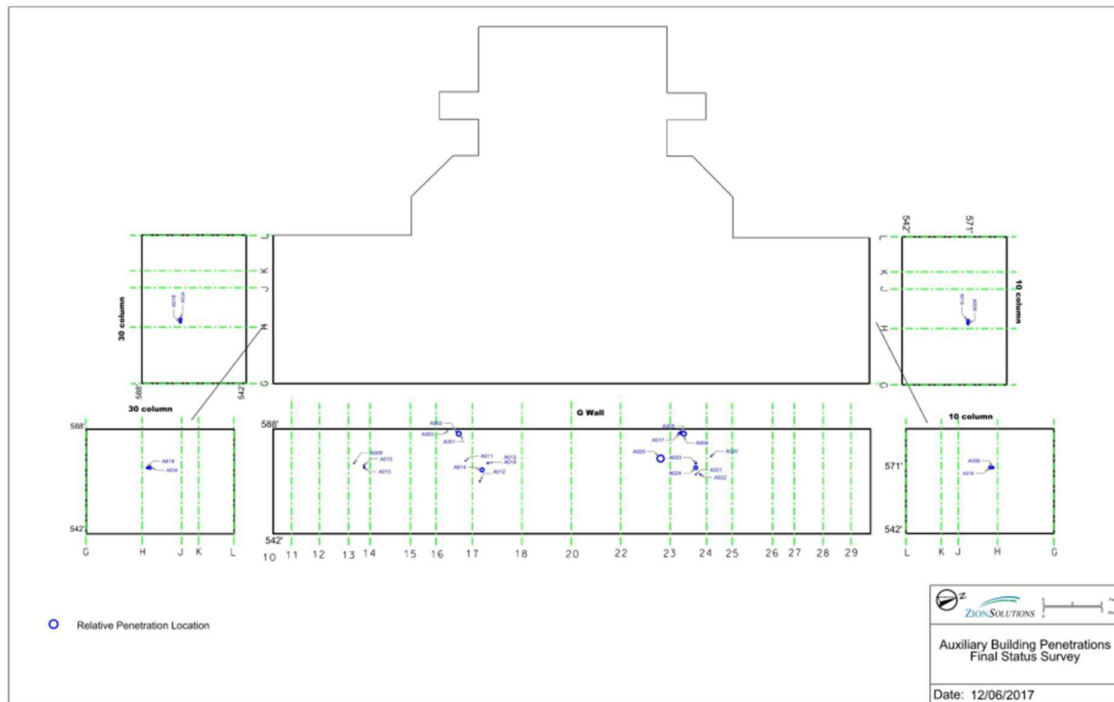


圖 25 Zion 核電廠輔助廠房穿管圖示

Figure 3-1, Auxiliary Building 542' Elevation

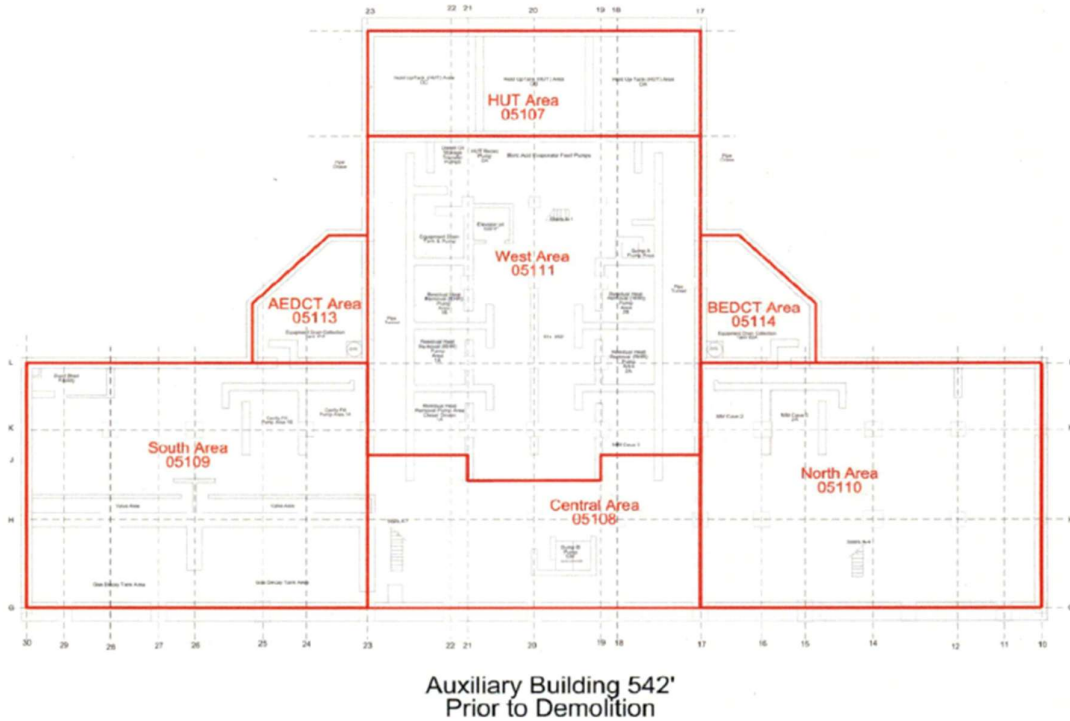


圖 26 Zion 核電廠輔助廠房拆除前 542 英尺標高平面圖

6.6.1.1 偵檢量測方法

6.6.1.1.1 地下室表面

對於地下室表面(包括混凝土和鋼襯裡)的 FSS，主要使用現場物體計數系統 (In Situ Object Counting System, ISOCS)。ISOCS 偵測器通常垂直於目標表面，並放置在 3 公尺的距離處。標準的偵測視野 (Field Of View, FOV)範圍(Nominal Range)為 28 m²，但根據物理限制，FOV 範圍可從 10 m² 到 52 m²。對於第 1 級偵檢單元，要求達到 100% 面積覆蓋率，為確保無未勘測角落或間隙，量測格點的距離設定為 4 m。

6.6.1.1.2 嵌管及穿管

對於嵌管和穿管的 FSS，測量方法依其尺寸和可及性而異：

1. 長度較長或小直徑管道(通常小於 12 英寸)：

使用 碘化鈉 (NaI) 或 碘化鉍 (CsI) 閃爍偵測器，偵測器透過彈性纖維複合棒或連接到蛇形相機系統 (See Snake Camera System) 的纜線插入管道，採用簡單的「推拉」(Push-Pull) 方法前進，通常在管道內每行進 1 英尺 (foot) 的間隔處，獲取一次一分鐘的靜態量測，以達到 100% 面積覆蓋率，偵測器輸出(總計數率，cpm)會被轉換為 dpm/100 cm² 的加馬表面活度，然後再轉換為 pCi/m²。

2. 淺層或大直徑穿透部(通常大於 12 英寸)

使用手持式儀器，例如 阿法/貝他塑膠閃爍偵測器 (alpha/beta Plastic Scintillator Detectors) 或 正比偵測器 (Proportional Detectors)，進行手持掃描 (Hand-Held Scanning) 和靜態量測，

6.6.1.1.3 取樣

為了確定 HTD ROC 的濃度和比率，需要進行取樣，取樣類型為混凝土核心樣本，取樣位置通常是偏向於歷史上或觀測上具有固定或體積污染跡象的位置，以代表最壞情況。

實驗室儀器與 ISOCS 的目標最小可檢測濃度(MDC)為對應之 OpDCGL 的 10%，但只要經過保健物理監督人員的評估，考量實際 MDC、報告值、報告的不確定性以及樣本中 OpDCGL 比例，這些結果仍可被接受為有效數據。

根據 LTP，所有最終狀態偵檢取的樣本都會進行廠內加馬分析，且 10% 的系統性或隨機樣本，或活度超過 OpDCGL 10% 之樣本，都會送至廠外進行 HTD ROC 分析，HTD ROC 分析的目的為確認放射性核種的組成比例與 LTP 中之數據無顯著差異。

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。此外，隨機選擇至少 5% 的取樣點位置取樣以及在每個偵檢單元中至少收集一個重複樣本，進行用於品質管控(QC)偵檢。

6.6.1.2 調查基準

調查基準設定的目的是為了識別出可能存在活度升高的區域。第 1 級結構偵檢單元的調查基準為大於 OpDCGL。

6.6.1.3 掃描涵蓋率及量測點數

雖然 MARSSIM 要求第 1 級偵檢單元應進行 100% 的掃描，但地下結構最終狀態偵檢採用的是 [ISOCS](#)(In-Situ Object Counting System)進行量測，透過 ISOCS 量測視野 (FOC)，實質上可代替傳統掃描，達到 100% 的覆蓋率。

表 61 為 Zion 核電廠最終狀態偵檢第二階段，第一部分之地下室、嵌管及穿管偵檢單元樣量測點數表。圖 27 為 Zion 核電廠 542 英尺標高 ISOCS 系統量測照片。

除了 ISOCS 靜態量測外，在 10% 的 ISOCS 量測位置採集混凝土芯樣本，以評估 LTP 中所指定之 HTD 與替代放射性核種的比率仍然有效。

表 61 La Crosse 核電廠最終狀態偵檢回填地下室偵檢單元 ISOCS 量測點數

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



圖 27 Zion 核電廠 542 英尺標高 ISOCS 系統量測照片

6.6.1.4 數據異常/升高之掃描結果和調查(Anomalous Data/Elevated Scan Results and Investigation)

Zion 核電廠第 1 級地下室、嵌管及穿管偵檢單元因數據異常、高於調查基準之結果與調查及後續作業說明如下：

1. **HTD 難測核種 (HTD) 比值失效**

- **相關偵檢單元**

圍阻體底部區域(Unit 1 & Unit 2 Containment Under Vessel, SU 01110 及 02110)

- **問題說明**

根據 LTP，進行 FSS 偵檢時，HTD 核種(H-3 與 Sr-90)將透過替代核種(如 Cs-137、Co-60)進行推估。

特性偵檢後，此偵檢單元又進行兩次除污，移除了所有特性偵檢時採樣的混凝土表面，使得低溶解度的 Cs-137 明顯減少，較高溶解度的 H-3 與 Sr-90 反成為主要核種。

因此，Cs-137 作為 HTD 核種(H-3 與 Sr-90)的替代核種不再具合理性。

- **調查與行動**

ZS 提交了替代方案給 NRC，決定使用除污後 19 個 FSS 混凝土鑽芯樣本的 HTD 實際測量濃度 (pCi/g) 來證明合規性，而非使用 LTP 中的 HTD 替代比值來推算 HTD 濃度。

2. **NRC 認為 H-3 活度在外推至 6 英寸深度時的潛在劑量可能超標**

- **相關偵檢單元**

圍阻體底部區域(Unit 1 & Unit 2 Containment Under Vessel, SU 01110 及 02110)

- **問題說明**

NRC 提出鑽芯實際取得的樣本深度為 1/2 英吋，但若將 1/2 英吋深度測得的 H-3 活度以外推法估算到 6 英吋深度，某些鑽芯樣本可能會超過 BcDCGL。

- **調查與行動**

ZS 同意從這些核心位置周圍額外移除至少 1 至 4 英吋的混凝土。在某些地點，為了有效處理，移除了所有剩餘混凝土直到鋼襯裡暴露。移除混凝土後，H-3 濃度顯著降低 SNRC 隨後同意回填圍阻體地下室。

3. **輔助廠房地下室樓板污染事件**

- **相關偵檢單元**

輔助廠房地下室樓板(SU 05100)

- **問題說明**

2018 年 4 月，1 號機圍阻體穿透部穿管有碎片掉落到輔助廠房地下室，造成 15,000 dpm/100 cm² 的固定污染。

- **調查與行動**

ZS 啟動狀況報告 (CR ES-ZION-CR-2018-0510)。隨後，執行了除污輔助偵檢(RASS)，對 25 個 ISOCS 測量點位進行重複測量，以驗證污染源項是否改變。

儘管有 11 個位置的 Cs-137 水平比原始 FSS 提高超過 20%，但 RASS 的平均 OpSOF (0.13)低於原始 FSS 結果(0.17)。結論是該事件及相鄰的無污活動對 FSS 數據未產生顯著的影響。

4. **升高之掃描結果**

- **相關偵檢單元**

用過燃料池/轉運水槽 (Spent Fuel Pool/Transfer Canal, SU 03202)

- **問題說明**

手持掃描結果顯示沿著靠近輔助廠房的東邊邊緣，沿著壁架(Ledges) 掃描結果升高(1.0 - 1.5 mR/hr)，懷疑是由相鄰的壁架發出。

- **調查與行動**

專家推測這些升高的測量結果並非來自 SFP/Transfer Canal，而是來自相鄰輔助廠房的壁架。工作人員在位於 SFP/Transfer Canal 偵檢單位外部的壁架上放置鉛毯 (Lead Blankets)，以進行遮蔽，並進行 19 次的額外的 ISOCS 測量。遮蔽後，SFP/Transfer Canal 偵檢單元最終的劑量評估(BcSOF) 為 0.979 mrem/yr，遠低於 25 mrem/年 的輻射標準。

5. **超過調查基準檢之偵檢結果**

- **相關偵檢單元**

- 1 號機蒸汽隧道閘房(Steam Tunnel Valve Houses, SU 06213 & 06214)

- 圍阻體穿管 (Containment Penetrations, SU 01112, 02112, 05120)

- **問題說明**

相關偵檢單元最初的分級為第 2 級或第 3 級，在執行初步 FSS 期間，數個 ISOCS 測量點位結果超過 OpDCGL 的 50%或超過 OpDCGL。

- **調查與行動**

這些偵檢單元被調查，並重新分級為第 1 級偵檢單元，根據第 1 級偵檢單元要求重新設計並執行 FSS。雖仍有部分 FSS 偵檢結果超過 OpDCGL，但最終偵檢單元之偵檢結果通過 Sign Test，證明符合釋出輻射標準。

6.6.2 第 1 級地下埋管偵檢單元

Zion 核電廠共有 4 個第 2 級與 3 個第 3 級地下埋管偵檢單元，但並沒有第 1 級地下埋管偵檢單元。

6.6.3 現存地下水(Existing Groundwater)偵檢結果

地下水的評估是依據廠內監測井持續進行的地下水監測結果進行評估。

根據 2006 年至 2020 年的地下水監測結果，除了 H-3 以外，沒有檢測到其他來自電廠的關注放射性核種(ROC)，且大部分時間 H-3 濃度低於 MDC (200 pCi/L)。在多年監測結果中，2006 年觀測到的 H-3 濃度 586 pCi/L 為最高值。ZS 保守地採用此數值計算地下水計算合規劑量，計算所得的劑量為 0.026 mrem/yr。

6.7 Zion 核電廠合規劑量評估

6.7.1 土壤合規劑量

根據 Zion 核電廠 FSSR 報告，所有開放土地(土壤)偵檢單元的平均劑量均低於 1 mrem/yr。其中，第三階段 FSS，平均劑量最高的開放土地偵檢單元為 12209D(Restricted Area South of Gate House)，其平均劑量為 0.544 mrem/yr，第四階段 FSS，平均劑量最高的開放土地偵檢單元為 10213B(Restricted Area South of Gate House)，其平均劑量為 0.968 mrem/yr。

然而，NRC 審查第四階段 FSSR(SER)後，注意到 Zion 核電廠之 FSSR 傾向於報告回填後的 FSS 偵檢結果，而不是在完成除污後、尚未回填之前對挖掘表面進行的偵檢結果。第四階段 FSSR 的偵檢單元劑量統計表中僅列出偵檢單元 12105、12106 和 12107 的劑量評估結果，沒列出其挖掘表面，即偵檢單元 12105K、12106K、12107K 的劑量評估結果。

NRC 審查發現，偵檢單元 12105、12106 和 12107 等挖掘表面，即偵檢單元 12105K、12106K、12107K 的評估劑量，範圍在 0.51 mrem/yr 到 1.02 mrem/yr 之間。這比偵檢單元 12105、12106 和 12107(已回填後的 FSS 偵檢結果)的評估劑量(範圍在 0.20 mrem/yr 到 0.25 mrem/yr)高出多達五倍。基於優先採用最保守的偵檢結果之原則，NRC 認為應優先採用挖掘區域未回填前之偵檢結果。

此外 ZS 在回應 NRC 的補充資訊要求「(RAI)時，承認現場加馬能譜分析結果與廠外(Off-site)加馬能譜結果之間存在偏差。為了矯正這種可能導致非保守影響的偏差，

ZS 推導出一個校正因子：1.91，並承諾將此 1.91 的校正因子應用於使用現場加馬能譜分析計算出的劑量。

由於 ZS 認為將偵檢單元 12106K 是所有土地偵檢單元中具有最高劑量潛力的開放土地偵檢單元，並獲得 NRC 審查同意。偵檢單元 12106K 經校正因子調整後之平均 BcSOF 為 0.078，平均劑量為 1.95 mrem/yr，以此劑量作為 Zion 核電廠最終作為土壤媒介之合規劑量。

6.7.2 地下室、嵌管及穿管合規劑量

Zion 核電廠合規劑量計算公式請參考方程式 3。根據 LTP，回填地下室劑量為四個結構(地下室表面、嵌管、穿管，以及清潔混凝土回填料(CCDD))的劑量總合。

根據 Zion 核電廠 LTP，允許回填地下室使用 CCDD 為回填材料。CCDD 指的是拆除後的乾淨混凝土碎片，ZS 對地下室中所使用的 CCDD 回填物指定了一個劑量值如表 62。

表 63 為 Zion 核電廠地下室各結構面積加權之 BcSOF 與劑量評估結果(BcSOF_B：地下室表面；BcSOF_{EP}：嵌管；BcSOF_{PN}：穿管；BcSOF_{CF}：清潔混凝土回填料)。在所有地下室中，劑量貢獻最大的為 1 號機圍阻體地下室，評估劑量為 11.080 mrem/yr，以此做為地下室媒介之合規劑量。

表 62 Zion 核電廠指派回填 CCDD 劑量

Basement Structure	Dose for Concrete Fill (mrem/yr)
Auxiliary Building	0.99
Unit No. 1 Containment	1.77
Unit No. 2 Containment	1.77
SFP/Transfer Canal	0.15
TB	1.58
Crib House/Forebay	1.57
WWTF	6.40

表 63 Zion 核電廠地下室各結構面積加權之 BcSOF 與劑量評估結果

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

6.7.3 地下埋管合規劑量

Zion 核電廠共有 4 個第 2 級和 3 個第 3 級地下埋管，表 64 為 Zion 核電廠地下埋管偵檢單元劑量評估結果，在所有地下埋管偵檢單元中，評估劑量最大的是 Primary Water Supply Header，為 5.674 mrem/yr，以此做為地下埋管媒介之合規劑量。

表 64 Zion 核電廠地下埋管偵檢單元劑量評估結果

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

6.7.4 現存地下水合規劑量(Existing Groundwater Dose)

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

根據 2006 年至 2020 年的地下水監測結果，2006 年觀測到的 H-3 濃度 586 pCi/L 為最高值。ZS 保守地採用此數值計算地下水計算合規劑量，計算所得的劑量為 **0.026 mrem/yr**。

ZS 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，NRC 於 2019 年 11 月 5 日 同意 ZS 終止地下水監測計畫。

6.7.5 Zion 核電廠整體合規劑量

表 65 為 Zion 核電廠合規劑量計算結果，全廠所有媒介估算出之劑量為 18.75 mrem/yr，小於 25 mrem/yr，符合除役輻射標準。

表 65 Zion 核電廠合規劑量

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

6.8 NRC 對 Zion 核電廠最終狀態偵檢報告的審查與 ZS 之回覆

NRC 對 Zion 核電廠的審查方式分為三類：

1. 確認偵檢：由第三方獨立機構進行。
2. 補充資訊要求(Request for Additional Information, RAI)
NRC 審查 ZS 提交之 FSSR 與偵檢單元的釋出紀錄(Release Record)，並參考 ORISE 提供的確認偵檢報告後，如有提出 RAI。
3. 安全評估報告(Safety Evaluation Report, SER)

6.8.1 審查時程綜覽

Zion 核電廠除役偵檢與 NRC 審查時程綜覽請參考

表 42，重要時程列如下：

1. Zion 核電廠的最終狀態偵檢分四個階段進行，第一階段的最終狀態偵檢報告(FSSR)初版於 2018 年 11 月 1 日提交。
2. NRC 於 2019 年 3 月 22 日提出針對 Zion 所提交之第一階段 FSSR 的 SER 審查報告，並於該次 SER 中提出了 RAI，Zion 第一階段 FSSR 並未通過此次 SER 審查。ZS 於 2019 年 5 月 14 日回覆 NRC 所提出之 RAI，於 2019 年 6 月提交第一階段 FSSR 更一版，NRC 於 2019 年 10 月 9 日提出針對第一階段 FSSR 更一版之 SER 審查報告，此次 SER 審查結果為通過。
3. ZS 於 2019 年提交了第二階段和第三階段的 FSSR 初版，NRC 於 2020 年 4 月 20 日和 2020 年 11 月 4 日提出針對第二階段和第三階段的 FSSR 的 RAI。ZS 於 2020 年至 2022 年 10 月針對此兩份 RAI 多次提供補充資訊及回覆。
4. 由於 DRP 污染問題，NRC 委託 ORISE 於 2020 至 2022 年期間多次進行確認偵檢。2023 年，NRC 要求 ORISE 再次進行確認偵檢，在過去曾發現 DRP 區域進行手動掃描，並評估 DRP 是否可能存在於次表土中。此次確認偵檢，ORISE 仍舊發現並移除了 12 個 DRP。
5. ZS 於 2020 年提交第一階段和第二階段 FSSR 的更版，以及第四階段 FSSR 的初版，並於 2022 年提交第三階段和第四階段 FSSR 的更版，2022 年 10 月 17 日，Zion 核電廠表示已完成 FSS。
6. ZS 於 2023 年 5 月 4 日表示，所有已知的 DRP 都已從廠址上移除。
7. 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 DRP 已被識別、移除並作為廢棄物處置。NRC 於 2023 年 11 月 8 日通過 Zion 核電廠所有 FSSR 的安全評估審查(SER)，並核准相關區域之釋出。至此，Zion 核電廠廠區，除 ISFSI 區域除外，皆完成執照終止及非限制使用釋出。

6.8.2 補充資訊要求(RAI)

NRC 對 Zion 核電廠最終狀態偵檢提出之補充資訊要求(RAI)，主要有三份，請參見表 66。

表 66 NRC 對 Zion 核電廠 FSSR 提出之 RAI

RAI	提出時間	審查之 FSSR
1	2019 年 5 月 14 日	第一階段初版
2	2020 年 4 月 20 日	第二階段(含第一及第二部分)及第三階段
3	2020 年 11 月 4 日	第二、三、四階段

6.8.2.1 NRC 於 2019 年 5 月針對第一階段 FSSR 初版提出之 RAI 與 ZS 之回覆

此份 RAI 是 NRC 於審查第一階段 FSSR 初版的 SER 報告中提出，其他的 RAI 則是獨立於 FSSR SER 提出。以下為 NRC 提出之 RAI 項目與 ZS 回覆之摘要彙整：

1. 要求補充說明判斷性掃描 (Judgmental Scanning)的執行方式

NRC：

NRC 質疑第 3 級區域的掃描策略似乎並非於 MARSSIM 和 LTP 中所規範，採用判斷性掃描(於判斷殘餘輻射可能性之區域掃描)，而是採用隨機選擇區域方式進行掃描，要求補充說明判斷性掃描 (Judgmental Scanning)的執行方式。

ZS 回覆：

ZS 解釋，有三個第 1 級偵檢單元，因無足夠證據表明有哪些區域殘餘輻射可能性較高，選擇了隨機掃描方式，但在其他六個第 1 級偵檢單元中，選擇了殘餘輻射可能較高區域，執行了判斷性掃描和土壤取樣。

2. 要求補充說明為何使用偵檢單元特定 HTD 核種替代比值

NRC：

NRC 指出 ZS 在偵檢單元 10223 中使用了偵檢單元特定 HTD 替代比值，取代 LTP 中所設定之替代比值，但未依 LTP 規定事先尋求 NRC 核准。

ZS 回覆：

ZS 說明將修訂偵檢單元 10223 的釋出紀錄，改為使用 LTP 中設定之替代比值來推斷 Ni-63 和 Sr-90 的濃度。

3. FSSR 報告中的錯誤

NRC：

FSSR 出現有多處數值與實驗室報告不符錯誤，要求進行詳細的 QA/QC 審查並重新提交更正後的報告。

ZS 回覆：

ZS 立即更正了 NRC 提出的錯誤，並啟動了矯正行動計畫 (CAP) 和 QA 稽核。ZS 承諾將採取多項計劃行動，包括針對技術與行政管理方面進行培訓、建立錯誤清單、規範版本控制和文件命名協議，以及改善

正式化的審查流程，特別是增加對陳述/行政類錯誤的獨立審查，並會將修正後之第一階段 FSSR 重新提交給 NRC。

6.8.2.2 NRC 於 2020 年 4 月針對第二及第三階段 FSSR 提出之 RAI 與 ZS 之回覆

ZS 於 2020 年 11 月 11 日提交針對此份 RAI 之回覆，NRC 在審查此份回覆後，認為部分回覆不足以讓 NRC 完成審查，需要進一步增強或修改。以下為 NRC 提出之 RAI 與 ZS 之回覆，以及 NRC 認為需要進一步增強或修改處之摘要彙整。

1. **LTP 所規範之調查與重新分級程序未被持續遵循**

NRC：

ZS 未持續遵循 LTP 的調查流程(偵檢結果超過調查基準值要進行調查)和重新分級承諾。包括：第 1 級和第 2 及區域測量值超過 OpDCGL)但未調查；第 3 級區域測量值遠超調查基準但未重新分級或調查。

ZS 回覆：

ZS 針對未遵循 LTP 的調查流程的區域進行了邊界劑量評估，並承諾將額外劑量 (合計約 3.042 mrem/yr) 加回汽機廠房的平均劑量中。

2. **未對 10% 的樣本進行 HTD 分析以確認替代核種比值**

NRC：

ZS 未持續遵循 LTP 之規範，對 10% 樣本進行 HTD 分析以驗證替代比率。對某些偵檢單元，Ni-63 陽性但 Co-60 陰性，質疑替代比值的適用性。另質疑 ZS 將陽性 Sr-90 結果視為「不可靠的離群值」缺乏技術依據。

ZS 回覆：

ZS 承認未滿足 10% HTD 分析要求，並承諾重新從檔案中取回多個混凝土核心樣本，並送交實驗室進行全套核種分析以符合 LTP 要求。對於 Ni-63 陽性/Co-60 陰性的情況，ZS 解釋 LTP 要求 HTD 和替代核種都必須陽性才能計算新比率，否則應使用 LTP 表 5-15 的最大比值。對於 Sr-90 離群值，重新分析證實該結果為「偽陽性」，因此使用最大比值是恰當的。

NRC 認為需要進一步增強或修改處 (Insufficient Response)：

RC 質疑 ZS 對於 Sr-90 離群值結論的技術基礎，需要更明確的佐證。(儘管 ZS 後來提供了重分析結果支持其結論，但此問題被 NRC 列為需要進一步澄清的範圍)。

3. **嵌管和穿管的灌漿承諾**

NRC：

ZS 未依照 LTP 規範對所有測量值超過結構 OpDCGLB 的嵌管道進行灌漿。

ZS 回覆：

ZS 承認這汽機廠房有兩處嵌管應被灌漿。ZS 評估了不灌漿帶來的劑

量 (0.083 mrem/yr)，並提議將該劑量加總到汽機廠房的平均劑量中。

4. 圍阻體穿管 DCGL 比較

NRC：

ZS 未遵循 LTP 規範，在進行穿管偵檢單元劑量評估時，針對每個放射性關注核種 (ROC) 使用兩個相鄰地下室中最嚴苛 (最保守) 的 DCGL 進行比較和劑量計算。

ZS 回覆：

ZS 重新依照 LTP 規範進行穿管的劑量評估，重新評估後圍阻體穿管的評估劑量上升，而輔助廠房和汽機廠房的劑量下降。ZS 承諾將更新 FSSR 與偵檢單元釋出紀錄。

5. FSS 完整性與最終狀態合規證明

NRC：

ZS 需證明 FSS 完成後進行的額外除污、粒子移除或潛在的再污染作業，沒有破壞 FSS 的完整性，且 FSS 報告應確實反映廠址的最終狀態。

ZS 回覆：

ZS 聲稱所有提交的釋放紀錄皆反映廠址最終狀況，且任何再污染或除污措施都發生在 FSS 執行之前。

NRC 認為需要進一步增強或修改處 (Insufficient Response)：

此為 NRC 認為回覆最不足之處：NRC 指出有資訊顯示 FSS 完成後，混凝土碎屑仍被放置在偵檢單元 12203 和 12113 上。此外，ZS 承認 DRP 粒子在最終 FSS 之後被識別和修復。NRC 要求提供：「更清晰、更詳細的時間表」，說明污染和 DRP 粒子移除的時間與 FSS 紀錄完成時間的關係。

6.8.2.3 NRC 於 2020 年 11 月針對第二至第四階段 FSSR 提出之 RAI 與 ZS 之回覆

針對此份 RAI 以與後續 NRC 透過電話會議提出之問題，ZS 於 2021 年 2 月 10 日、2021 年 4 月 2 日，以及 2022 年 10 月 17 日提交多份回覆與補充資訊說明。以下為 NRC 提出之 RAI 項目與 ZS 回覆之摘要彙整：

1. FSS 最終狀態與再污染

NRC：

NRC 發現許多釋出紀錄與最終放射性狀態不一致，因為在 FSS 完成後，偵檢單元曾發生混凝土拆除碎屑 (CCDD) 污染、調查或除污。NRC 要求 ZS 提供反映最終放射性狀態的修訂 FSSR/釋出紀錄。

ZS 回覆：

ZS 原本的回覆為僅對因 CCDD 存放而導致地貌改變的偵檢單元 12205A-E 重新執行了 FSS，而對於其他六個受 CCDD 影響的偵檢單元，ZS 執行了特別監督調查 (Special Surveillances)，確認其放射性條件與 FSS 結果一致，故無需修訂釋出紀錄。但在 NRC 提出認為需要

進一步增強或修改後，最後對所有受 CCDD 影響的偵檢單元皆重新執行 FSS。

NRC 認為需要進一步增強或修改處 (Insufficient Response)：

此為 NRC 認為回覆最不足之處：NRC 指出有資訊顯示 FSS 完成後，混凝土碎屑仍被放置在偵檢單元 12203 和 12113 上。此外，ZS 承認 DRP 粒子在最終 FSS 之後被識別和移除。NRC 要求提供：「更清晰、更詳細的時間表」，說明污染和 DRP 粒子移除的時間與 FSS 紀錄完成時間的關係。

2. 除污輔助偵檢 (RASS) 與 DQOs

NRC：

要求 ZS 提供 Power Block 等區域的除污輔助偵檢(RASS) 或除污後偵檢數據，以證明其符合 FSS 的數據品質目標 (DQO)，因為在這些區域回填前，NRC 的承包商 (ORISE) 未能進行 100% 確認偵檢。

ZS 回覆：

ZS 說明在 Power Block 區域，RASS 偵檢使用了與 FSS 相同的儀器、偵檢方法和警報設定點，因此滿足了 FSS 的 DQO。

3. 無法進入區域的劑量合理性

NRC：

針對多個因積水、冰塊或植被而未能完成 100% 掃描的偵檢單元，要求 ZS 提供理由，證明這些未掃描區域仍能合理保證符合 25 mrem/yr 的釋出標準。

ZS 回覆：

ZS 說明現場團隊已盡力排除障礙，但因天氣頻繁變化，只能在有限條件下完成 FSS。ZS 透過：1) 增加判斷式樣本取樣、2) 評估周圍已掃描區域的結果，確認周邊無殘留放射性高於背景的潛力，以及 3) 部分區域雖然最初被列為無法進入，但最終已完成掃描，做出這些區域的劑量貢獻可忽略不計之結論。

4. ORISE 發現與後續除污行動

NRC：

NRC 要求 ZS 討論 ORISE 確認偵檢發現的輻射偏高的區域或 DRP 粒子的調查和除污措施，並提供修訂後的紀錄。

ZS 回覆：

ZS 針對 ORISE 發現的地點都進行了調查，調查結果連同矯正都記錄在矯正行動計畫 (CR) 和 RAI 回覆中。ZS 採取了矯正措施包括將第 2/3 級區域重新劃分為第 1 級區域，以提高掃描嚴格度。

5. DRP 組成成分與掃描敏感度

NRC：

要求 ZS 證明其掃描敏感度足以偵測 DRP，並解釋其組成成分、來源

和預期分佈區域。

ZS 回覆：

ZS 承認其 FSS 掃描儀器的 MDCR 可能無法識別活度較低的粒子，這解釋了 ORISE 發現的粒子未在 FSS 中被偵測到。ZS 提供了關於 DRPs 組成、來源和潛在分佈區域的詳細資訊。

更詳細有關 ZS 針對 DRP 問題之說明請參見本報告下一小節。

6. QC 數據不一致與實驗室差異

NRC：

要求 ZS 解釋為什麼分割樣本(Split Sample)的未通過品管 (QC) 的驗收標準 (resolution < 4)，以及廠內實驗室和廠外實驗室之間的濃度數據差異。

ZS 回覆：

在缺乏 ROC 陽性結果時，ZS 使用 K-40(一種天然放射性核種)來證明 QC 樣本的一致性。ZS 發現 Eberline 報告的加馬放射性核種濃度一致地高於廠內實驗室分析結果。ZS 為了保守起見，計算出平均比率約為 1.91，並將此因子應用於土壤 BcSOF，使廠址總合規劑量從 17.781 mrem/yr 提高到 18.73 mrem/yr。

7. 文件品質與編輯錯誤

NRC：

NRC 認為釋放紀錄中技術和編輯錯誤過多，要求 ZS 審查未來提交文件的整體品質

ZS 回覆：

ZS 承諾採取矯正行動，包括讓 LT/FSS 經理和高階管理層擔任未來報告的主作者，以確保 FSS 要求遵循行業標準與 NRC 指南。ZS 還將分拆最終報告以提高簡潔性，並在本次提交中使用了獨立第三方審查。

6.8.2.4 ZS 針對 RAI 有關 DRP 問題之回應彙整

NRC 在 2020 年 11 月所提出之 RAI 中，對離散放射性粒子(DRP) 的調查方法和結果提出了重大質疑，要求 ZS 證明其掃描敏感度足以偵測這些粒子，並詳細說明其性質和來源，以下是 ZS 針對 NRC 所提有關 DRP 問題之回覆：

1. 初次發現時間與地點

2015 年 6 月，在 2 號機圍阻體外部區域發現了多個 DRP。

2. DRP 粒子組成成分與物理特性

- 絕大多數 DRP 的主要放射核種是 Co-60。
- 粒子本質上是金屬質、輕微磁性、不規則形狀，通常肉眼可見。
- 典型尺寸約為 1 mm 直徑，厚度小於 1 mm。

3. DRP 來源

- DRP 的成分與反應器內部組件經中子活化後產生的特性一致。
- 調查確定這些 DRP 屬於「遺留」(Legacy)性質，並非來自當時外部儲存

的放射性物質。根據其放射性、金屬特性和尺寸，這些微粒被認為源自圍阻體內部的反應爐內部組件切割(Reactor Internals Segmentation)作業期間產生的活化金屬碎屑(Activated Metal Tailings)

- ZS 並強調，結構拆除產生的**混凝土碎屑並非是 DRP 的來源**。

4. 洩漏時間區間

- 洩漏可能早在 2012 年就已開始(當時 2 號機開始進行水下反應器內部組件切割作業)，直到 2016 年底在每個圍阻體開口周圍安裝帳篷圍護結構(Tent Enclosure Structure)為止，帳篷圍護結構又稱「廢棄物裝載帳篷」(Waste Loadout Tents)或「廢棄物處理帳篷」(Waste Processing Tent)。
- 帳篷的主要目的是在進行內部混凝土拆除及廢棄物移出時提供一個封閉的環境，確保受污染的物質可以在「有遮蓋」(Under Cover)的情況下進行裝載，防止放射性微粒逸散到外部環境。帳篷內配備了通風系統和 HEPA(高效濾網)過濾系統，以過濾空氣並控制氣流，帳篷設計包含鐵路通道(Rail Access)，允許軌道車輛進入，以便將圍阻體內的受污染廢棄物直接裝載運走。
- 帳篷於 2016 年底至 2017 年間安裝建造，連接在每個圍阻體的開口處，在安裝這些帳篷之前，圍阻體開口處僅有施工門，導致內部的 DRP 可能因風力夾帶或設備移出而洩漏。

5. DRP 洩漏至圍阻體外之途徑與機制 (Leakage Pathways and Mechanisms)

- **通風與風力夾帶(Ventilation and Wind Entrainment)**

在 2011 年底，為了施工需要在每個圍阻體上開設了施工開口。雖然開口處設有通風系統來維持負壓，理論上空氣應由外向內流動，然而，工程評估中沒有充分考慮到開口處的「表面風速」(Face Velocity)與外部自然風速的對比。

計算顯示，空氣被吸入開口的速度非常慢，低於每小時 1 英里，相比之下，建築物外部的平均自然風速通常高於這個速度。由於外部風速大於內部的吸入風速，自然風可以吹進開口邊緣或在開口處形成湍流。這股氣流能夠將位於圍阻體內部、靠近開口處的 DRP 捲起並帶出建築物外，此機制稱為風力夾帶(Wind Entrainment)。

- **設備移除(Equipment Removal)**

在安裝廢棄物裝載帳篷之前，受污染的設備或組件會透過每個圍阻體的開口及重型起重軌道系統移出，在移除過程中，DRP 可能因為風、雨或人員互動而從設備上脫落。此外，由於當時的水過濾系統不足以完全捕獲切割產生的微粒，部分 DRP 可能懸浮在水面上，並附著在從水中移出的設備上，進而在乾燥後擴散到周圍區域。

- **裝載反應器內部組件之內襯桶(Liners)於運送過程造成 DRP 擴散**

2014 年 9 月，裝載有反應器內部組件切割部分的內襯桶(Liners)被暫時存放在廠址南側的低地停車場的一個屏蔽陣列中，該位置之相關偵檢單元

為 10221A、10221B 和 10221C。

污染擴散的原因是操作人員在戶外，而非在受控的室內或封閉環境中將一個內襯桶放入其外殼包裝(Overpack)。

該內襯桶隨後被向北運輸，DRP 沿著這條運輸路徑被發現。受影響的區域從裝載區開始，一路向北延伸，在此事件後，識別並清理了超過 100 顆 DRP，這些微粒成分主要是 Co-60，與反應器內部組件切割產生的金屬碎屑特徵一致，活性範圍介於 0.001 μCi 到 3 μCi 之間。

之後，針對此事件啟動了狀況報告(Condition Report) CR-2014-00107，清理了發現的 DRP，並對運輸路徑鄰近的步行區、停車場和主要通道進行了調查(未發現額外的 DRP)。

6. 後續處理

- 在 2016 年進行大規模拆除之前，移除兩個圍阻體周圍約 6 到 8 英寸的表層土壤，並將其作為放射性廢棄物處理。清理完畢後，對留下的瀝青表面進行了偵檢，確認沒有殘留 DRP。
- 高風險區域認定
 - 2) 最高的風險區域位於安全管制區(Security Restricted Area)，主要集中在每個圍阻體周圍，以及燃料處理廠房之間的東西向行進路徑。
 - 3) 第二高風險區位於偵檢單元 10221A, 10221B, 10221C，因為反應器內部組件的內襯桶曾暫時存放於此。

7. 掃描敏感度與偵測能力不足

NRC 質疑 FSS 掃描儀器 (Ludlum 44-10 NaI 偵測器搭配準直儀)的敏感度，因為品管樣本中發現了 DRP，但掃描未發出警報。

• 偵測能力分析(MDA)

ZS 承認，偵測器搭配準直儀(Collimator)雖然提高掃描的敏感度(MDCR)，但它限制了偵測器的視場(Field of View, FOV)。

ZS 根據偵檢單元 12112 中發現的 Co-60 品管樣本，計算該 DRP 的最小可偵測活度(MDA)約為 7,987 pCi。

結論：由於發現的粒子活度為 757 pCi 遠低於偵測器的 MDA (7,987 pCi)，因此掃描未發出警報是預期的結果。

• 位置相關性 (Positional Dependence)

ZS 解釋，DRP 的偵測結果極度依賴其在偵測器 FOV 內的位置。在最差幾何條件下，偵測 DRP 的 MDA 可能比最佳幾何條件下高達 17 倍。這種位置依賴性可以解釋為什麼 ORISE 發現的 DRP 在 ZS 之前的掃描中可能被遺漏。

8. 矯正措施與調查範圍擴大

為應對這些問題，ZS 採取了多項矯正行動：

• 重新分級

為確保調查嚴謹性，ZS 在 2016 年 7 月決定將安全管制區域內的所有

第 2 級和輻射管制區內的第 3 級偵檢單元重新分級為第 3 級偵檢單元。

- **DRP 調查計劃**

ZS 執行了 DRP 調查計畫 (DRP Survey Plan)，該計畫擴大了掃描範圍，納入了高風險區域(如電力區、CCDD 運輸路徑和廢棄物裝載區)，並使用專門設計的 DRP DQOs(0.25 公尺/秒 慢速掃描)進行 100% 表面掃描。

- **持續監測**

輻射作業人員進行定期 DRP 掃描，尤其是在往返輻射控制區/拆除邊界的路徑上，以確保所有發現的 DRP 立即被移除和處理。

9. DRP 輻射風險評估

- 一般民眾攝入 DRP 的機率約為 0.122%，吸入 DRP 的機率微乎其微。
- 假設未來居住者攝入一顆活度為 0.21 μCi Co-60 的 DRP，造成之約定有效劑量當量 CEDE 約為 2.45 mrem。
- 假設未來居住者吸入一個 20 μm 的 DRP，造成之約定有效劑量當量 CEDE 約為 4.19E-03 mrem。
- ZS 總結，即使廠址中可能殘留一些 DRP，它們的活度也不足以對未來居住者構成不可接受的高風險。

6.8.2.5 ZS 針對 DRP 之調查方法與結果

ZS 於 2022/10/17 的 RAI 回覆中詳細描述了針對 DRP 問題所進行之調查之方法與結果，摘要說明如下：

1. 偵檢單元納入準則

- 臨時存放過 CCDD 的區域。(參考圖 28)
- CCDD 運送至裝載區的路徑。(參考圖 28)
- 廢棄物裝載區。(參考圖 28)
- ORISE 在 2021 年確認偵檢中發現活度偏高的區域。
- 與先前發現粒子或活度偏高區域之 Class 1 偵檢單元相鄰的 Class 2 偵檢單元。
- 先前已發現 DRP 但未依 DRP DQOs (使用 0.25 m/s 的慢速掃描)進行偵檢的單元。(圖 29 淺紫色區域為使用 0.25 m/s 慢速掃描之偵檢單元)

2. 偵檢單元排除準則

- 第 3 級偵檢單元。
- 之前 FSS 偵檢及 ORISE 確認偵檢中皆未發現 DRP。
- 在最終整地期間進行的偵檢調查中皆未發現 DRP。
- 未在 FSS 完成後曾存放 CCDD 或運輸 CCDD 的區域。

3. 最終偵檢範圍

- 2021 年 4 月後，共有 52 個偵檢單元符合 DRP DQO 方式進行偵檢(約 45%)。
- 以二項式檢定 (Binomial Test) 統計檢定證明偵檢範圍覆蓋率足夠。

4. 偵檢結果

在 52 個偵檢單元 中，有 9 個偵檢單元檢測到 DRP，當檢測到 DRP 或與之相關的活度升高區域時，ZS 會立即採取一系列調查、矯正、清除和文件記錄作業，以確保廠址符合非限制使用釋出標準。

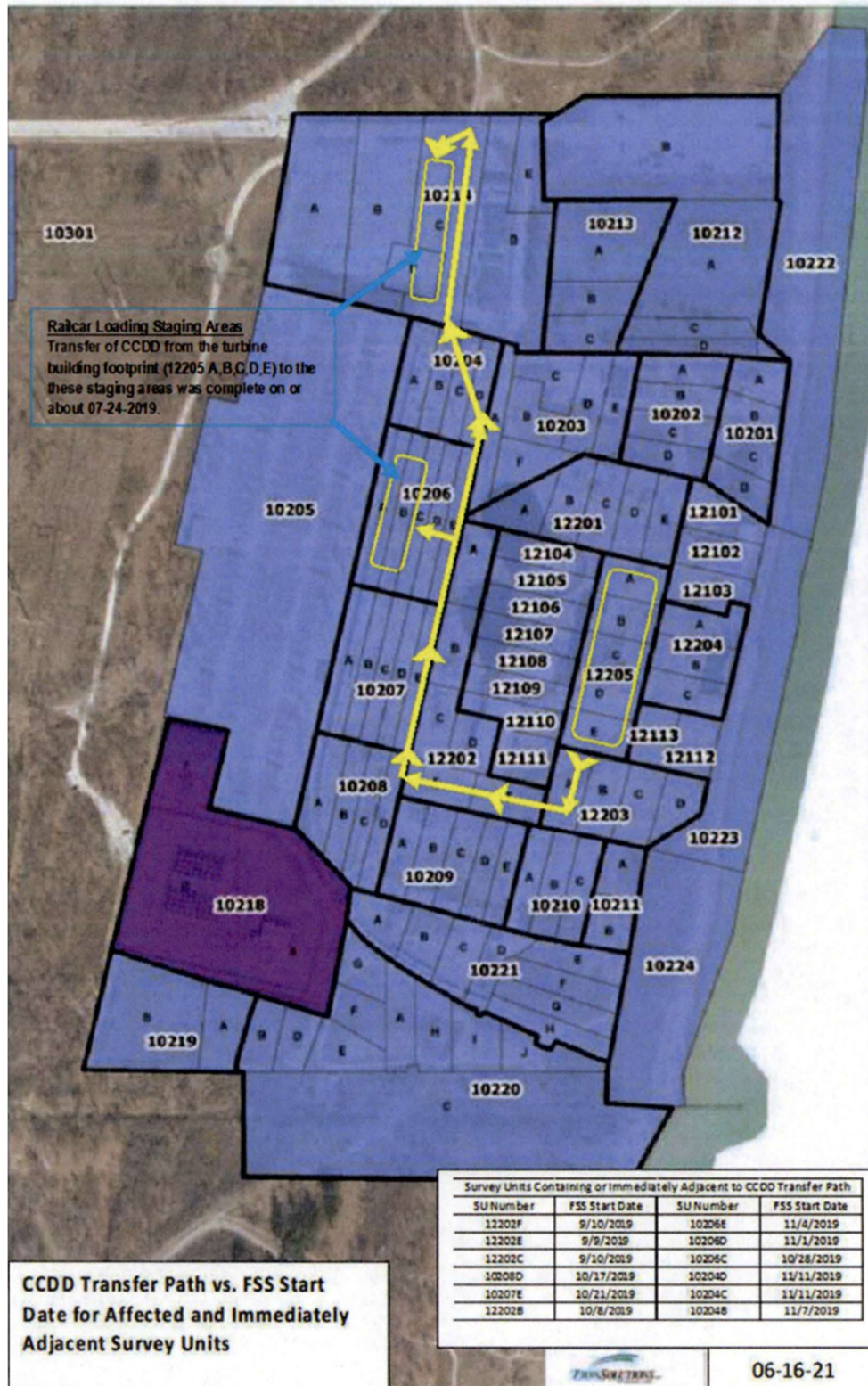


圖 28 Zion 核電廠 CCDD 存放區域與運輸路徑圖

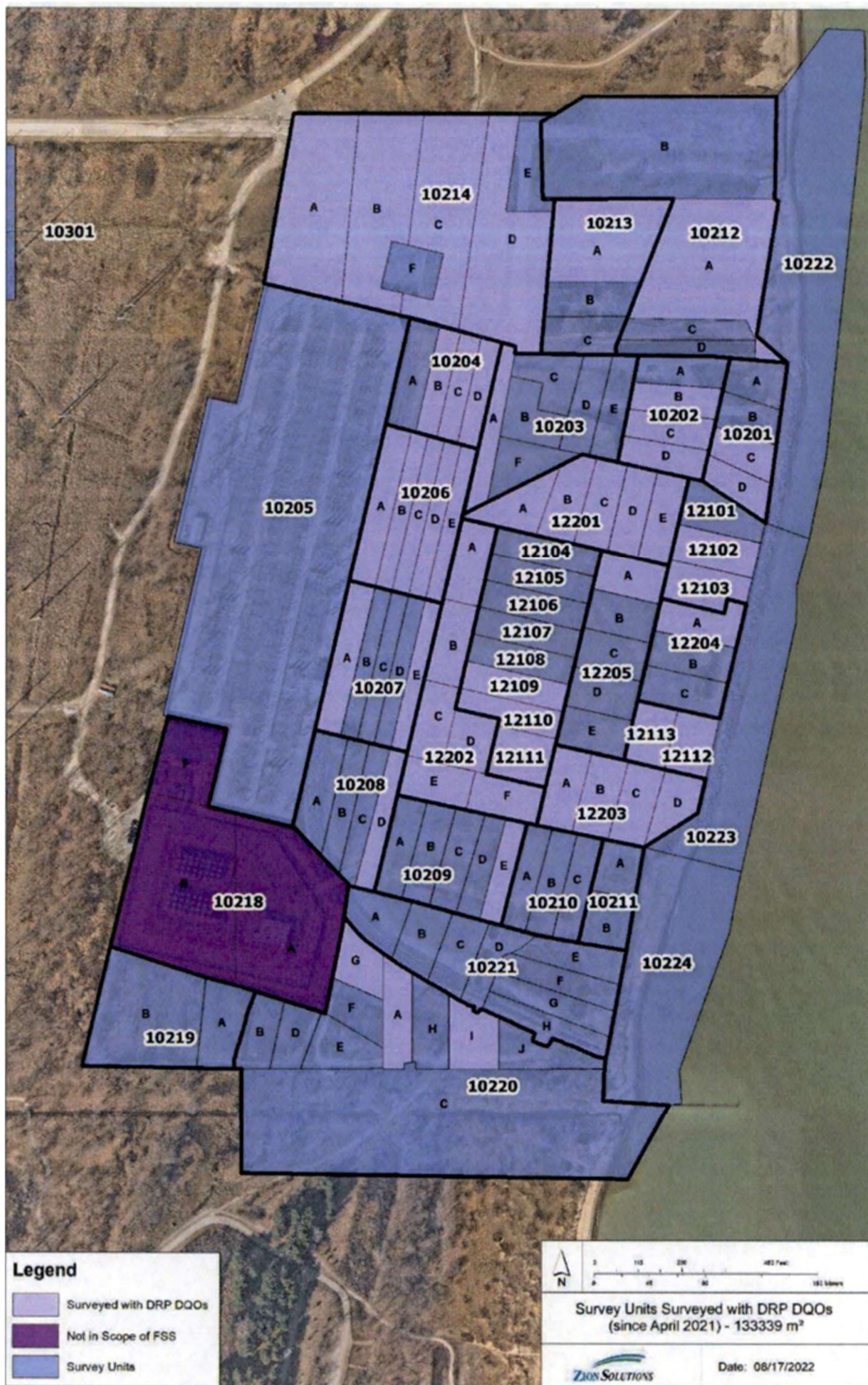


圖 29 使用 DRP DQOs(使用 0.25 m/s 慢速掃描)之偵檢單元(淺紫色區)

6.8.3 確認偵檢(Confirmatory Survey)

由 NRC 委託第三方獨立機構(ORAU 或 ORISE)執行的正式確認偵檢總共有 10 次。確認偵檢進行之時間與結果參見表 67。其中，編號 1 是針對未受輻射影響區域進行之確認偵檢，編號 2~10 是針對受輻射影響區域進行之確認偵檢。

表 67 ORISE 對 Zion 核電廠進行之確認偵檢結果彙整

	報告日期	偵檢區域	確認偵檢結果
1	2015/8/31	未受輻射影響開放土地區域	支持確認偵檢區域之未受輻射影響區域分級。
2	2016/8/5	汽機廠房地下室和開放土地第 3 級偵檢單元	支持確認偵檢區域之第 3 級區域分級。
3	2018/10/9	圍阻體及輔助廠房地下室	未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。 因 H-3 在兩個圍阻體的混凝土中都出現了超過釋出標準的情況，ZS 回應 NRC 與 ORISE 建議，額外移除至少 1 至 4 英吋的混凝土，移除混凝土後，H-3 濃度顯著降低。
4	2019/2/7	廢水處理設施 以及部分第 1 級開放土地區域	未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。
5	2020/1/24	用過燃料池和燃料運輸通道	
6	2020/1/28	圍阻體和輔助廠房剩餘嵌管道和穿管	
7	2020/1/31	發電區犧牲層移除後的露出下層土壤	偵檢區域含有超過標準之殘餘放射性
8	2020/4/24	部分第四階段開放土地偵檢單元	未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。確認偵檢數據支持偵檢單位的區域分級。
9	2021/9/3	部分第三和第四階段開放土地偵檢單元	- 偵檢區含有超過標準之殘餘放射性。 - 從統計角度：偵測到的 DRP 粒子不足以否定 FSS 數據可用以證明符合釋出標準。
10	2023 年	幾乎 100% Class 1 偵檢單元的表土和有限的次表土	- 在表土中找到 12 個 DRP，次表土未發現 DRP。 - 在兩個位置發現了 ZS 沒發現的熱點。 - NRC 的結論是即使考慮此熱點，相關 SUs 的總劑量仍低於劑量標準 25 mrem/yr。

更多有關 NRC 委託第三方獨立機構對 Zion 核電廠進行之確認偵檢資訊說明如下：

1. 第一份確認偵檢報告

偵檢區域：廠址中約 214 英畝被劃分為未受輻射影響開放土地區域

報告日期：2015 年 8 月 31 日

偵檢期間：2015 年 7 月 6 日至 9 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)目視檢查、2)加馬和貝他表面掃描、加馬、3)貝他輻射測量，以及 4)土壤和雜項取樣。

偵檢結果：

七個表土樣本中，有六個樣本的 Cs-137 濃度高於 MDC，但遠低於 Cs-137 釋出標準，且低濃度的 Cs-137 存在於背景樣本中是預期的。樣本中 Sr-90 分析結果均低於 Sr-90 釋出標準和 MDC。

2. 第二份確認偵檢報告

偵檢區域：汽機廠房地下室(區域分級為第 3 級區域)、開放土地偵檢單元 10213A

報告日期：2016 年 8 月 5 日

偵檢期間：2016 年 4 月 25 日至 28 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2)加馬 ISOCS 測量，以及 3)土壤、沉積物和水樣取樣。

偵檢結果：

掃描級樣本中分析結果均遠低於 DCGL。

3. 第三份確認偵檢報告

偵檢區域：圍阻體地下室和輔助廠房地下室

報告日期：2018 年 10 月 9 日

偵檢期間：2018 年 4 月 16 日至 26 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2)加馬 ISOCS 測量、3) 隨機和判斷性混凝土芯取樣、4)輔助廠房污水坑的水和沉積物取樣，以及 5) 實驗室分析(含 HTD)。

整體結論：未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。

偵檢結果：

- 圍阻體中所有 ISOCS 測量結果均低於 OpDCGL。
- 輔助廠房熱點：輔助廠房有兩個混凝土樣本的 Cs-137 濃度超過 BcDCGL，然而，整體 SOF 數值仍小。
- 圍阻體有三個 H-3 混凝土樣本，2 號機有一個 H-3 混凝土樣本超過 BcDCGL。
- 輔助廠房的水和沉積物取樣結果顯示存在移動性放射性物質。

提出建議：

因 H-3 在兩個圍阻體的混凝土中都出現了超過釋出標準的情況，ORISE 建議 NRC 應評估其污染深度是否超過 6 英吋。

4. 第四份確認偵檢報告

偵檢區域：廢水處理設施 (WWTF) 以及部分第 1 級開放土地區域

報告日期：2019 年 2 月 7 日

偵檢期間：2018 年 9 月 24 日至 27 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) 混凝土芯取樣、3) 土壤取樣、4)從
助廠房污水坑的水和沉積物取樣，以及 5) 實驗室分析(含 HTD)

整體結論：未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。

偵檢結果：

- 所有偵檢結果均低於對應之 OpDCGL。

5. 第五份確認偵檢報告

偵檢區域：用過燃料池和燃料運輸通道(SFP/Transfer Canal)地下室

報告日期：2020 年 1 月 24 日

偵檢期間：2018 年 7 月 9 日至 12 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) ISOCS 測量、3) 混凝土芯取樣，
以及 4) 實驗室分析。

整體結論：未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。

偵檢結果：

- 所有偵檢結果均低於對應之 OpDCGL。

6. 第六份確認偵檢報告

偵檢區域：圍阻體和輔助廠房剩餘嵌管道和穿管

報告日期：2020 年 1 月 28 日

偵檢期間：2018 年 6 月 4 日至 7 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) ISOCS 測量、3) 穿管內部布擦拭
取樣，以及 4)統計檢定。

整體結論：未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。

偵檢結果：

- 所有偵檢結果均低於對應之 BcDCGL。

7. 第七份確認偵檢報告

偵檢區域：發電區(Power Block)犧牲層移除後的露出下層土壤(Subsurface Soils Associated with the Sacrificial barrier)

報告日期：2020 年 1 月 31 日

偵檢期間：2019 年 4 月 16 日至 18 日、2019 年 7 月 15 日至 19 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) 土壤取樣、3) 實驗室分析。

整體結論： 偵檢區含有超過標準之殘餘放射性。

初次偵檢結果(4月)：

- 此次確認偵檢因發現 DRP，依 ZS 要求暫停三個月進行調查與處理後，再次進行確認偵檢。
- 識別出 2 個 DRP，分別含有 Co-60 活度 1.757 μCi 和 0.372 μCi 。
- 一個樣本含有混凝土狀碎屑，Cs-137 濃度達到 1,672 pCi/g。
- 圍繞該碎屑的土壤樣本 SOF 超過 OpDCGL。

第二次偵檢結果(7月)：

- 識別出 2 個 DRPs，分別含有 Co-60 活度 0.259 μCi 和 0.450 μCi 。
- 一個樣本的 Cs-137 濃度超過 OpDCGL，但 BcDCGL。

8. 第八份確認偵檢報告

偵檢區域：部分第四階段開放土地偵檢單元

報告日期：2020 年 4 月 24 日

偵檢期間：2019 年 12 月 2 日至 5 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) 土壤取樣、3) 實驗室分析。

整體結論：

- 未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。
- 確認偵檢數據支持偵檢單位的區域分級。

偵檢結果：

- 加馬掃描識別出 7 個與背景值明顯不同，具有輻射水平較高的區域。其中，ISFSI 南北兩側的區域有大範圍且靠近 ISFSI 處輻射增強的現象，這是預期的結果。另有 5 處區域的加馬輻射水平升高，部分區域的升高幅度顯著。
- 所有隨機樣本的 OpSOF 均小於 1。
- 一個判斷性樣本(土壤環繞著混凝土碎屑)的 Cs-137 超過 OpDCGL，但低於 BcDCGL。
- 採集自排水口的沉積物樣本中，偵測到 Cs-137 和 Co-60 濃度高於 MDC。

9. 第九份確認偵檢報告

偵檢區域：部分第三和第四階段開放土地偵檢單元

報告日期：2021 年 9 月 3 日

偵檢期間：2021 年 4 月 26 日至 30 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) 土壤取樣、3) 實驗室分析。

整體結論：

- 偵檢區含有超過標準之殘餘放射性。
- 從統計角度：偵測到的 DRP 粒子不足以否定 FSS 數據可用以證明符合釋出標準。

偵檢結果：

- 總共確認了 8 顆粒子(來自 7 個樣本)，這些粒子的放射性核種組成可分為四類來源：
 - 1) 腐蝕產物中子活化：3 顆粒子主要含有 Co-60。
 - 2) 生物屏蔽中子活化：粒子含有 Eu-152/154 和 Ba-133。
 - 3) 燃料碎片：1 顆粒子含有超鈾元素(如 Am-241)和裂變產物(如 Cs-137 和 Sr-90)。
 - 4) 未知來源：2 顆粒子含有高濃度鈾(Thorium)、鈾(Uranium)和 Ra-228。
- 土壤樣本：分析結果大多與背景水平一致。

10. 第十份確認偵檢報告

偵檢目的：此次確認偵檢目的為評估 Zion 核電廠的表土次表土中是否存在離散放射性粒子(DRP)

偵檢區域：

表土：28 個偵檢單元，掃描覆蓋率從 10% 到 100% 不等。

次表土：於 95 個次表土曾網格單元挖掘進行 100% 掃描。

報告日期：2023 年 11 月

偵檢期間：2023 年 6 月 26 日至 2023 年 7 月 10 日

偵檢方式：

偵檢方式包括：1)加馬表面掃描、2) 次表土層網格調查、3) 取樣，和 4)實驗室分析。

整體結論：

- 未出現影響 FSS 數據用以證明符合釋出標準之問題。
- 確認偵檢數據支持偵檢單位的區域分級。

偵檢結果：

- 總總共從地表土壤中隔離出 12 顆 DRP。Co-60 是這些粒子中報告的主要放射性核種濃度，但有少數樣本中 Eu-154 和/或 Eu-152 的濃度高於 Co-60。
- 次表土中未發現任何 DRP。
- 39 個隨機表土樣本的 OpSOF 均小於 1，最大值為 0.05。
- 發現了兩個 ZS 沒發現的熱點：兩個判斷性次表土樣本的 OpSOF 大於 1，其中一個樣本的 BcSOF 大於 1。

圖 30 為 Zion 核電廠偵檢單元中曾透過 ZS 所執行之 FSS 及 ORISE 確認偵檢識別出的 DPR 之位置。圖 31 為 Zion 核電廠確認偵檢偵檢單元與掃描覆蓋率。

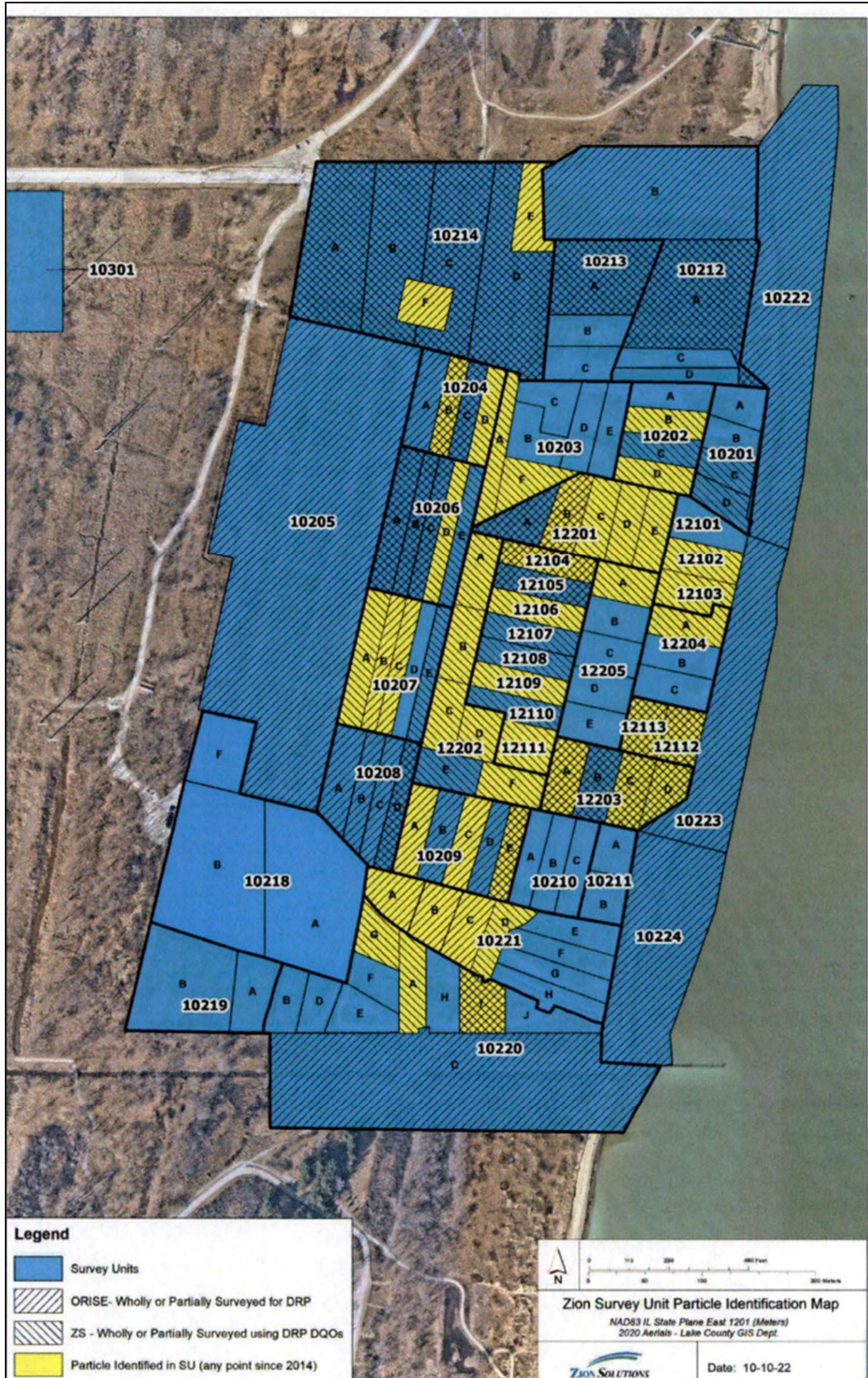


圖 30 Zion 核電廠 FSS 偵檢單元曾識別出的 DPR 之位置

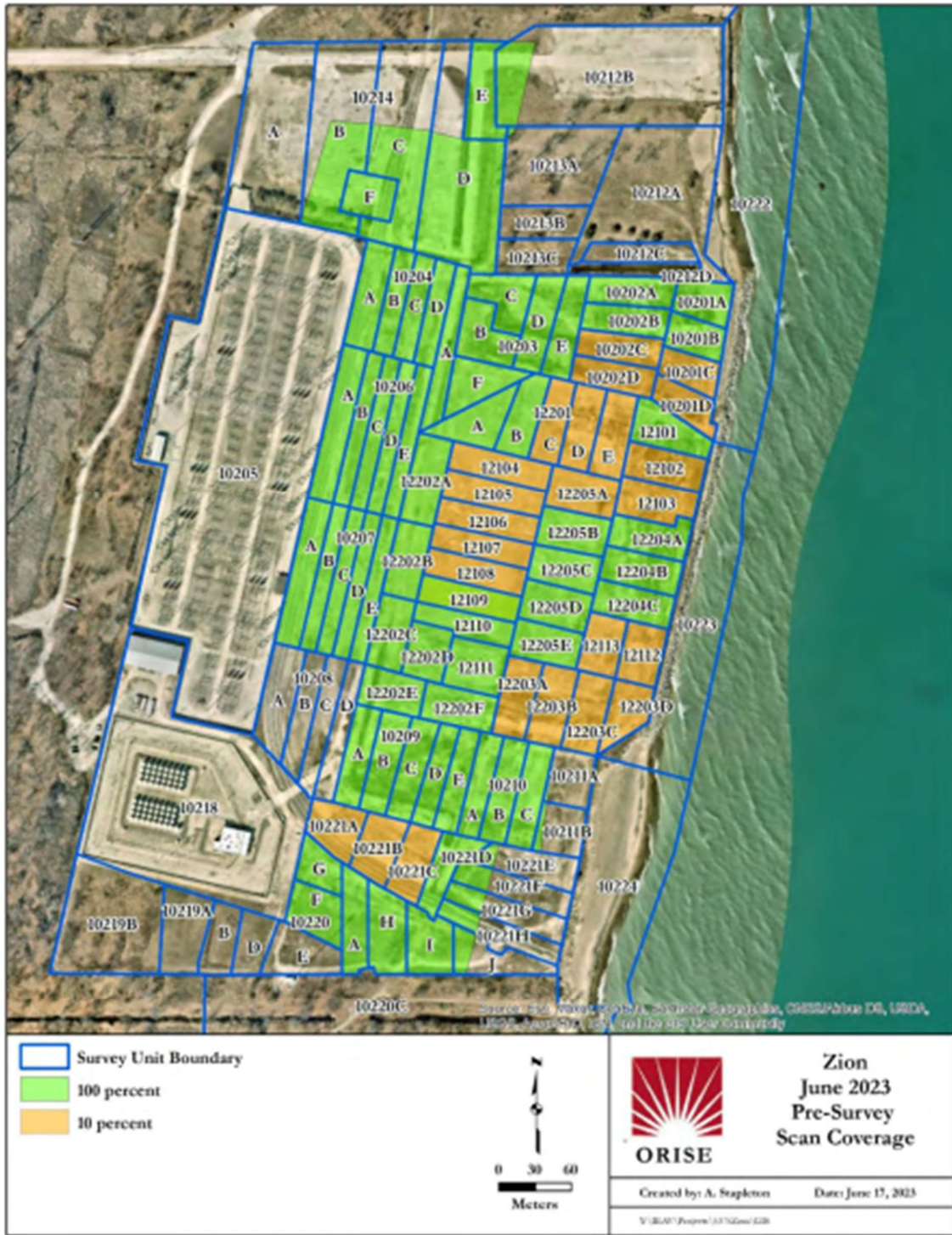


圖 31 Zion 核電廠確認偵檢偵檢單元與掃描覆蓋率

6.8.4 安全評估審查(SER)

NRC 於 2023 年 11 月 8 日通過對 Zion 核電廠偵檢單元最終狀態偵檢的 SER 審查。SER 審查結果概述如下：

報告日期：2023 年 11 月 8 日

審查範圍：

審查評估了 Zion 核電廠提交的所有最終狀態偵檢報告與相關資料。

離散放射性粒子(DRPs)問題：

Zion 核電廠廠址在 FSS 期間發現廠內廣泛存在 DRP，導致 SER 審查時程延遲。根據調查與評估，ZS 判斷 DRP 最可能的來源是反應器內部構件分割作業期間產生的活化金屬尾料釋放出來的。

DRP 之擴散機制包含圍阻體施工開口通風負壓不足，以致 DRP 微粒經風力夾帶逸散至外部、圍阻體內設備移除過程之微粒脫落，以及高放射性反應器切割組件在戶外裝載與運輸過程中擴散至廠區。

NRC 及其承包商 ORISE 進行了廣泛的掃描和調查，包括 2021 年和 2023 年的確認偵檢。NRC 最終認為，雖然不排除極低的可能性仍有 DRP 存在，但預期的潛在劑量仍會低於公眾劑量限制(100 mrem/yr TEDE0，且不會引起確定性效應。NRC 將這種可能性歸類為「可能性較低但合理的情景」(Less Likely but Plausible, LLBP)。對 DRP 的劑量評估僅是用於為終止執照的決策提供風險資訊，而不是合規性評估。

NRC 相信：

- 1) 即使在極不可能發生曝露的情況下，由此產生的劑量也不會超過公眾劑量限值，且不會造成確定性效應。
- 2) DRP 已經被充分處理，並支持廠址符合非限制使用釋出標準。

評估結果：

NRC 及其承包商 ORISE 執行了多次獨立確認偵檢。雖然確認偵檢發現了 ZS FSSRs 中未發現的「熱點」，但 NRC 獨立評估後確認，即使將此熱點劑量納入考量，總劑量仍低於 25 mrem/yr 的標準。

ZS 計算的最終合規總劑量為 18.75 mrem/yr，此劑量低於 10 CFR 20.1402 規定的 25 mrem/yr 上限。在所有四個劑量媒介(地下室結構、土壤、地下埋管和地下水)中，劑量貢獻最高的是 1 號機圍阻體的地下室結構，估算劑量為 11.1 mrem/yr。

因此，NRC 同意審查之偵檢單元符合 Part 20, Subpart E 的未限制使用釋出輻射標準，並同意釋出。

七、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。

7.1 NRC 對未受輻射影響區域和受輻射影響區域區域審查管制之異同

未受輻射影響區域的定義是「無顯示存在合理潛在殘餘輻射超出天然背景或落塵水平之區域」；受影響區域則是「具有潛在或確認污染之區域」。NRC 對未受輻射影響區域和第 1、2、3 級區域審查管制之關鍵要項及異同說明如下：

相同點：

1. 最終目標都是未受限制使用釋出：兩者審查的最終目標都是批准將廠地部分區域從 NRC 的 10 CFR Part 50 執照中移除，以供非受限制使用。
2. 未受輻射影響區域和受輻射影響區域要符合相同的輻射標準法規(10 CFR Part 20, Subpart D)，且 NRC 會對此進行審查。
3. 未受輻射影響區域和受輻射影響區域的偵檢設計與執行均依據了 MARSSIM 和 NUREG-1757 指引。
4. 未受輻射影響區域和受輻射影響區域皆需經 NRC 或其承包商的獨立確認偵檢或評估來驗證，以確保其偵檢數據和結論的可靠性。

相異點：

1. 主要審查目的：
 - 未受輻射影響區域：確定區域劃分為「未受輻射影響」的分級是否合理且有充分理由支持：
 - 受輻射影響區域：確定最終狀態偵檢(FSS)的結果可證明殘餘輻射總劑量符合非限制使用釋出標準(25 mem/yr) 和 ALARA。
2. 法規調查強制性
 - 未受輻射影響區域：法規(10 CFR 50.83(a)(3))僅強制要求對受輻射影響區域執行輻射測量，因此不強制要求進行輻射測量來證明符合輻射標準。
 - 受輻射影響區域：強制要求執行最終狀態偵檢，並要求提供在統計上可證明具備足夠可信賴度的偵檢數據來證明符合輻射標(10 CFR 20.1402)。
3. 偵檢嚴謹度
 - 未受輻射影響區域：偵檢嚴謹度較低。未受輻射影響區域僅需進行特性偵檢，特性偵檢的目的為確認分級合理，建議的加馬掃描覆蓋率通常為 1% 至 5%。
 - 受輻射影響區域：嚴格依循 MARSSIM 分級方法，偵檢嚴謹度高。(例如第 1 級區域需達成 100% 掃描覆蓋，並使用統計學檢定來證明符合輻射標準)。會審查不同分級之偵檢單元是否有達到對應之偵檢覆蓋率(更多有關不同分級之偵檢嚴謹度規範請參考表 5)。
4. 劑量評估重點

- **未受輻射影響區域**：評估偵測到的放射性核種(如 Cs-137)濃度是否落在全球落塵背景值範圍內。
- **受輻射影響區域**：必須進行詳細的合規劑量加總，將所有媒介的劑量相加，以證明總劑量不超過 25 mrem/yr。

5. HTD 核種處理

- **未受輻射影響區域**：不需要對難以偵測的核種 (HTD) 進行分析或評估。
- **受輻射影響區域**：審查要求必須充分證明用於推算 HTD 核種的方法(例如使用替代比值)是合理的，並確保 HTD 核種的潛在劑量風險已被考量。

7.2 審查核電廠是否符合解除除役管制之要項

1. 確認是否確實依循 FSS 規劃執行 FSS 偵檢：

- 是否依照不同區域分級之偵檢覆蓋率進行偵檢。
- 偵檢儀器之靈敏度是否足夠。
- 偵檢結果超過調查基準時是否有進行調查。
- 偵檢結果超過重新分級基準時是否有進行重新分級並重新進行偵檢。
- 偵檢結果超過重新偵檢基準時是否有進行重新偵檢。
- 是否有依照規畫進行品質管控(QC)偵檢。
- 是否有依照規劃進行難測核種分析。

2. 比較獨立確認偵檢結果與 FSS 偵檢結果：

- 確認獨立確認偵檢結果是否支持 FSS 偵檢結果。

3. 確認是否符合輻射標準：

- 各偵檢單元之偵檢結果是否符合輻射標準。
- 各輻射媒介之合規劑量計算方法與計算結果是否合理。
- 所有媒介之合規劑量總和是否符合未限制使用外釋輻射標準。

4. 其他：

- 確認地下埋管偵檢儀器之偵檢效率計算方法與效率修正因子計算方法是否合理。若偵檢器效率計算方法依據的幾何形狀與偵檢幾何形狀不同(如計算時是依據平面射源，實際量測時卻為管狀)，以及針對不同管道直徑大小或不同管路型狀，應使用軟體(如 MCNP)計算合適之效率修正因子。

7.3 借鑑 La Crosse 核電廠與 Zion 核電廠實務經驗提出之建議

1. 針對 La Crosse 核電廠因除役拆除作業造成之地下水污染問題，污染源確認為反應器廠房通風系統的廢氣，污染了凍土上的冰雪與融冰，建議在進行除污和拆除作業期間，應對所有潛在的污染排放途徑(特別是通風系統廢氣)實施嚴格的控制和隔離措施，以確保放射性物質不會外洩至環境介質並滲入地下水。
2. 針對 Zion 核電廠 DRP 污染擴散的問題，提出預防建議。

1) 預防 DRP 洩漏至圍阻體外部

Zion 案例顯示，DRP 主要源自反應器內部組件切割作業產生的活化金屬碎屑。由於圍阻體開口的通風負壓不足以抵抗外部風力，導致微粒經由「風

力夾帶」逸散至外部，為預防 DRP 洩漏至圍阻體外部，建議：

- **建立封閉作業環境：** 在執行切割反應器內部組件等可能產生高活度離散粒子的作業時，必須確保嚴密的圍堵。建議於圍阻體開口處安裝「廢棄物裝載帳篷」(Tent Enclosure Structure)或類似的圍護結構，以提供封閉環境進行廢棄物裝載。
- **強化通風口控制：** 圍阻體內部進行切割作業時，應確保通風系統具備足夠的「表面風速」(Face Velocity)，以抵抗外部自然風速，防止內部空氣因湍流外洩。
- **完善水下切割作業之過濾系統：** 在進行水下切割時，應確保水過濾系統足以捕獲微小的金屬碎屑，防止粒子懸浮於水面並附著在設備上被帶出。

2) 管控廢棄物運輸與裝卸

Zion 曾發生因在戶外停車場將裝載反應器切割組件的內襯(Liner)放入外包裝，導致 DRP 沿運輸路徑擴散的事件，為預防類似污染事件，建議：

- 避免在未受嚴密管控的戶外開放區域進行高放射性廢棄物的包裝作業。
- 規劃特定的廢棄物運輸路徑，並對該路徑進行更頻繁的輻射監測。

3) 增強污染偵測敏感度：應發展和採用專門的 DRP 偵測方法和增強的掃描技術，例如使用 0.25 公尺/秒的慢速掃描，並確保偵測儀器盡可能貼近表面進行，以確保能夠可靠地識別和移除低活度 DRP。

4) 防止偵檢單元再污染：建議在偵檢單元完成最終狀態偵檢(FSS)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(例如清潔混凝土拆除碎片 CCDD 或其他材料)而造成再次污染。核電廠應實施並維持經批准的隔離與控制程序，直到解除管制為止。

八、參考文獻

NRC 指引文獻

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.

La Crosse 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

3. La Crosse LTP, Revision 3., March, 2019.
4. La Crosse Phase 1 FSSR, August, 2019.
5. La Crosse Phase 2 FSSR, December, 2019.
6. La Crosse Phase 2 FSSR, Rev. 1, October, 2020.
7. La Crosse Phase 3 FSSR, January 2020.
8. La Crosse Phase 3 FSSR, Rev. 1, October, 2020.
9. NRC RAIs Related to La Crosse FSSR, August, 2020.
10. NRC RAIs 與 LS 回覆 NRC RAI, November, 2020.
11. NRC RAIs 與 LS 回覆 NRC RAI, July, 2022.
12. NRC RAIs 與 LS 回覆 NRC RAI, September, 2022.
13. NRC RAIs 與 LS 回覆 NRC RAI, October, 2022.
14. NRC SER to La Crosse Class 2 & 3 FSSR SUs and Approval of PSR, May, 2022.
15. NRC SER to La Crosse Class 1 FSSR SUs and Approval of PSR, February, 2023.
16. ORISE Independent Confirmatory Survey for La Crosse, January, 2017.
17. ORISE Independent Confirmatory Survey for La Crosse, March, 2018.
18. ORISE Independent Confirmatory Survey for La Crosse, June, 2018.
19. ORISE Independent Confirmatory Survey for La Crosse, June, 2019.
20. ORISE Independent Confirmatory Survey for La Crosse, January, 2020

Zion 核電廠最終狀態偵檢相關文獻

21. Zion LTP, Rev. 2., February 7, 2018.
22. Zion Phase 1 FSSR, January, 2018.
23. Zion Phase 1 FSSR, Rev. 1, June, 2019.
24. Zion Phase 1 FSSR, Rev. 2, February, 2020.
25. Zion Phase 2, Part 1 FSSR, February, 2019.
26. Zion Phase 2, Part 1 FSSR, Rev. 1, December, 2019.
27. Zion Phase 2, Part 1 FSSR, Rev. 2, November, 2020.
28. Zion Phase 2, Part 2 FSSR, November, 2019.
29. Zion Phase 2, Part 2 FSSR, June, Rev. 1, 2020.

30. Zion Phase 3 FSSR, December, 2019.
31. Zion Phase 3 FSSR, Rev. 1, September, 2022.
32. Zion Phase 4 FSSR, Rev. 1, April, 2020.
33. Zion Phase 4 FSSR, Rev. 2, September, 2022.
34. NRC SER to Zion FSSR - Phase 1, March, 2019.
35. NRC SER to Zion FSSR - Phase 1 Revision 1, October, 2019.
36. ZS 回覆 Phase 1 RAI, May, 2019.
37. NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2 & 3, April, 2020.
38. NRC RAIs Related to Zion FSSR Phase 2, 3 & 4, November, 2020.
39. ZS 回覆 NRC RAI, May 2020.
40. ZS 回覆 NRC RAI, February 2021.
41. ZS 回覆 RAI, May, 2021.
42. ZS 回覆 RAI, April, 2021.
43. ZS 回覆 RAI, October, 2022.
44. NRC SER to Zion FSSR All, November, 2023.
45. ORAU Independent Confirmatory Survey for Zion, May, 2016.
46. ORAU Independent Confirmatory Survey for Zion, August, 2016.
47. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, February, 2018.
48. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, October, 2018.
49. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, 24, January, 2020.
50. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, 28, January, 2020.
51. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, 31, January, 2020.
52. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, April, 2020.
53. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, September, 2021.
54. ORISE Independent Confirmatory Survey for Zion, November, 2023.

其他

55. 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。
56. 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。
57. 行政院原子能委員會委託研究計畫期末報告，計畫名稱：113 年度 美美國核電廠完成除役後解除除役管制要項之基礎研析，中華民國 113 年 12 月。