



# 土壤地下水污染場址 調查案例

土壤污染評估調查人員在職訓練  
( 案例分享 )

# 簡報大綱

- 01 工廠調查案例
- 02 智慧表徵調查
- 03 複雜場址精確調查
- 04 高度異質性場址整治評估
- 05 結語與建議

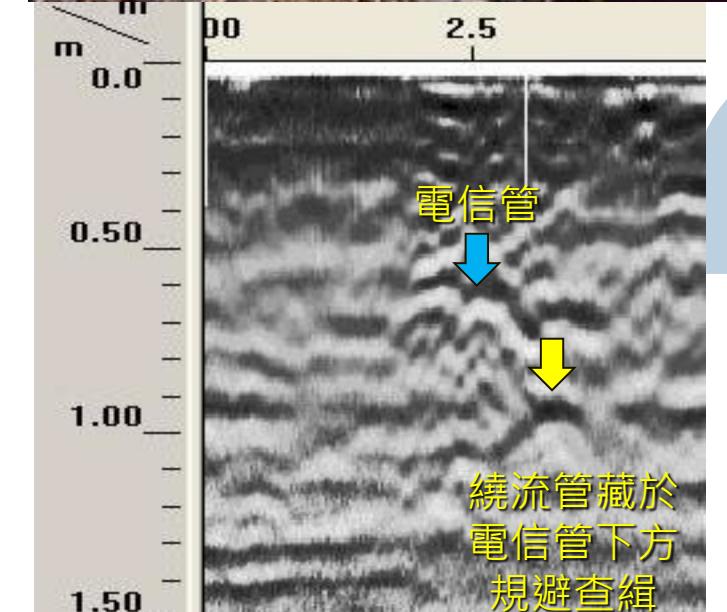
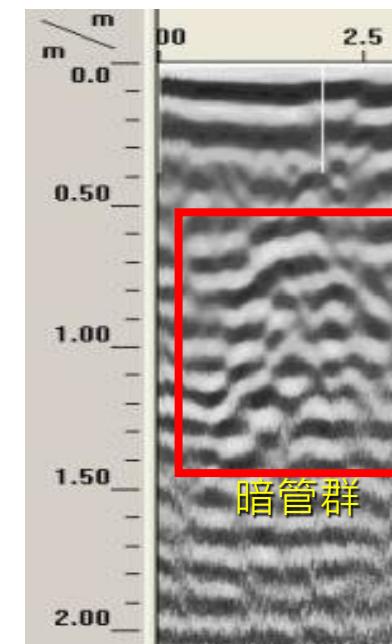
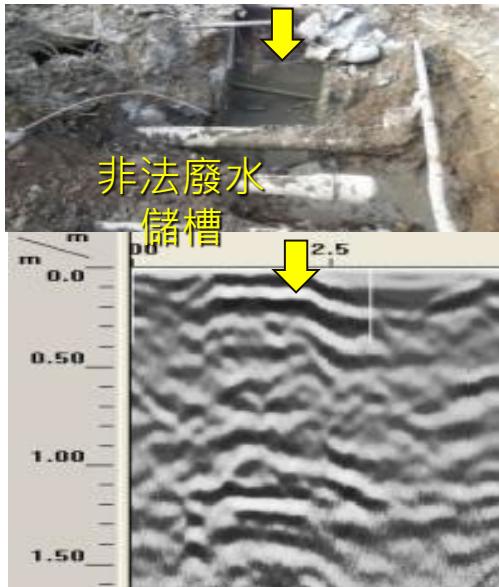
# 工廠調查案例

01



# 工廠偷接暗管

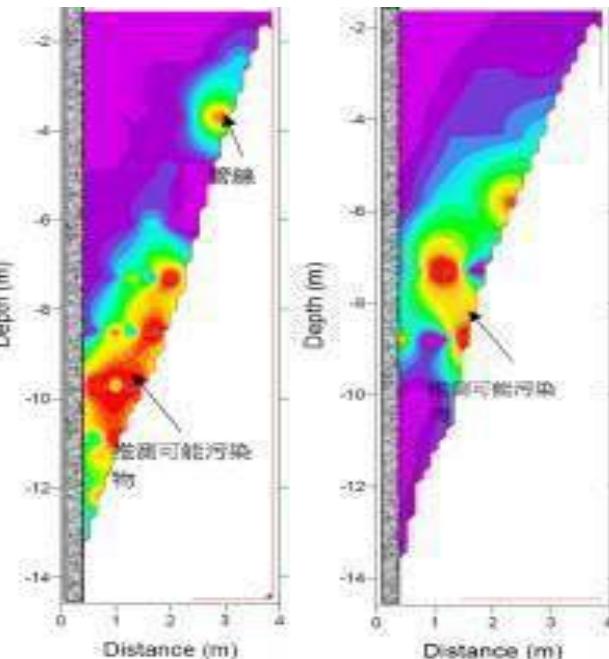
- ❖ 10家電鍍工廠業者涉嫌偷排氯化物、六價鉻、銅、鎳等有毒重金屬廢水，檢方動員透地雷達 (GPR) 探測涉案工廠廠區，針對工廠埋設的暗管進行開挖
- ❖ 多頻GPR確認暗管及非法廢水儲槽位置，檢調單位即刻開挖，違法業者當場認罪





# 釐清洩漏源（運作中製藥工廠）

MW01雷達波井測結果

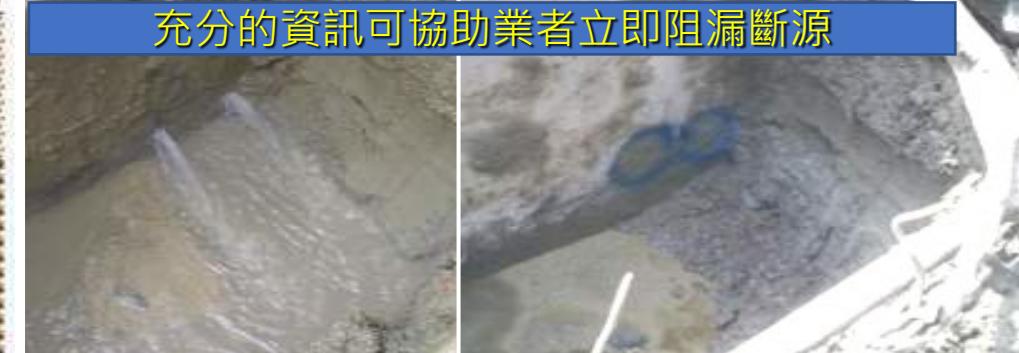


地下水高濃度二氯甲烷 (DCM)  
污染團已滲入低滲透性層中，  
深度範圍 4.5-10.5 m

質地	深度 (m)(bgs)	DCM : 0.072	DCM : 438
		B : 1.51	B : 0.164
細砂	3.0		
砂質粉土	5.5		
粉土質砂	7.8		
礫石夾 粉土、 砂	10.2		
礫石夾 砂	12.0		
礫石夾 粉土、 砂	15.7		

- ❖ 鑽探與設井多深度地質物性分析
- ❖ 多深度微水試驗、多深度單井流速流向測定評估含水層高、低滲透性層分布
- ❖ 針對高污染區進行井測，釐清可能洩漏區方位與範圍

充分的資訊可協助業者立即阻漏斷源



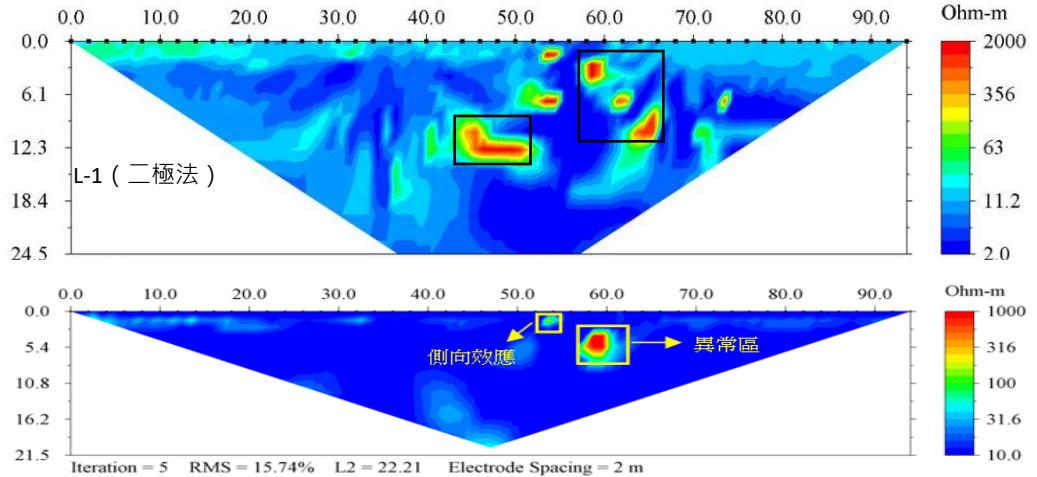
多種分析建立地質量化資訊  
評估高低滲透性地層污染分布、來源與方位



# 各式調查技術佐證（運作中石化工廠）

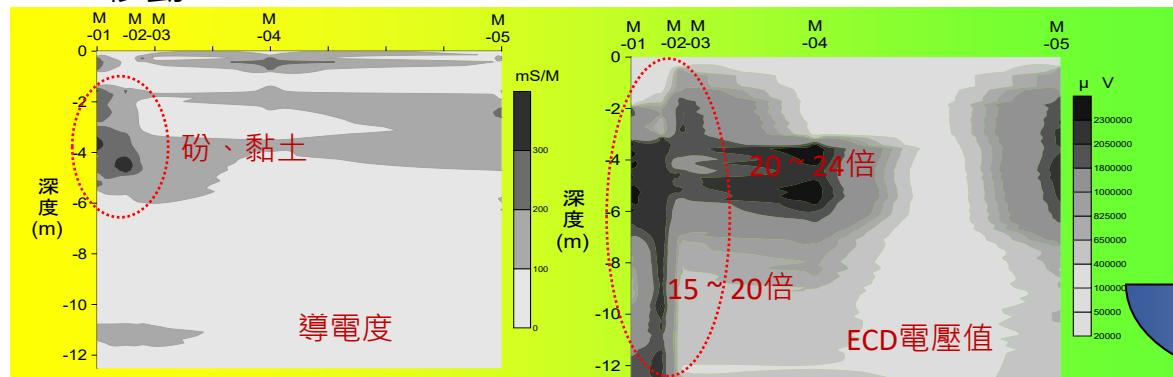
## 地電阻影像法

- 地電阻剖面顯示電阻率達上千Ohm-m



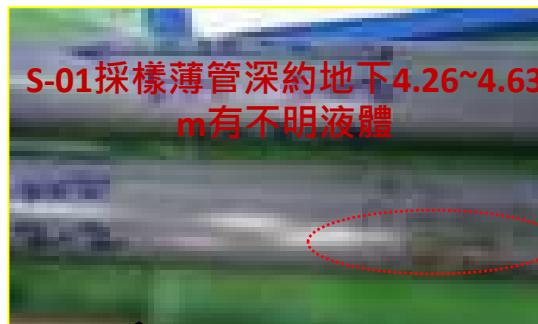
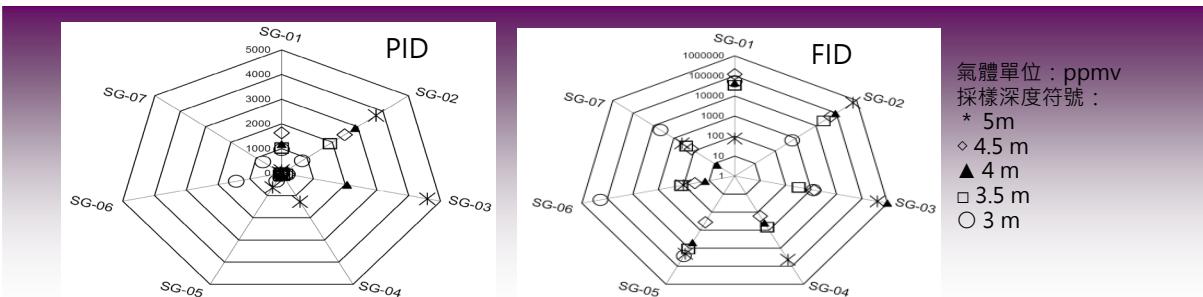
## MIP調查

- MIP-ECD顯示局部污染卡鎖於矽黏土，局部污染仍往下移動



- ❖ 200 m道路調查6孔氣體、4孔MIP
- ❖ 4口簡易井均檢出污染物遠超過管制標準
- ❖ 土壤發現不明液體，檢出1,2-二氯乙烷 6,060 mg/kg ( 757.5倍 )

- 土氣 ( PID達上千ppmv ; FID達% )

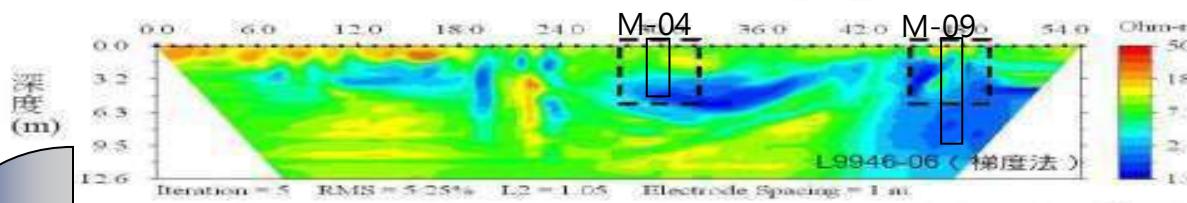
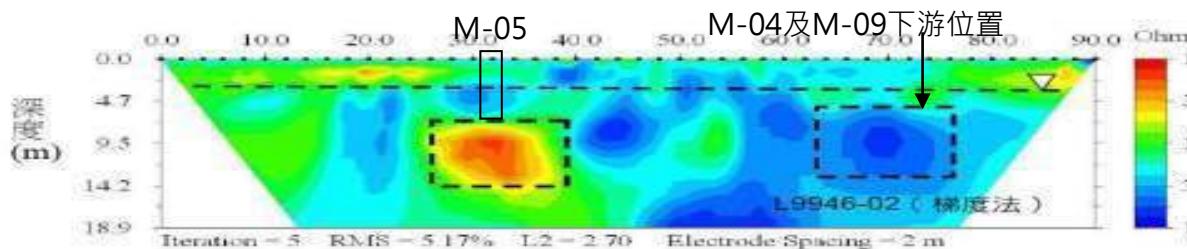


- ❖ 監測井最高檢出1,2-二氯乙烷 15,100 mg/L，已超過飽和溶解度 (8,520 mg/L)
- ❖ 並測得多項高濃度含氯烯類



# 各式調查技術佐證（運作中農藥工廠）

- ❖ 地球物理地電阻剖面顯示**不同異常高、低電阻訊號**

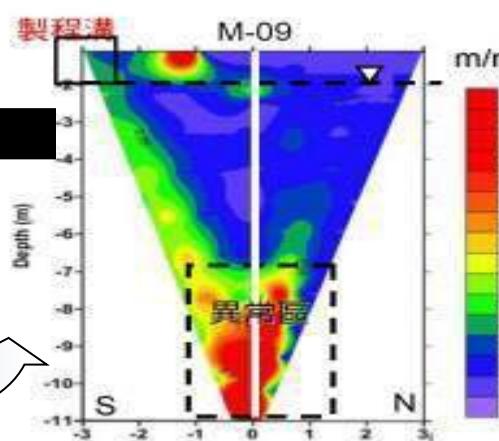


- ❖ MIP測值7-11 m僅超過背景4-5倍 (**反映訊號不明顯**)



- ❖ 電阻「長相」異常區**地下水1,2-DCA超標1萬5千倍**

- ❖ 雷達波井測 (BGPR) 顯示異常區集中在底部，且證明洩漏來源自製程溝



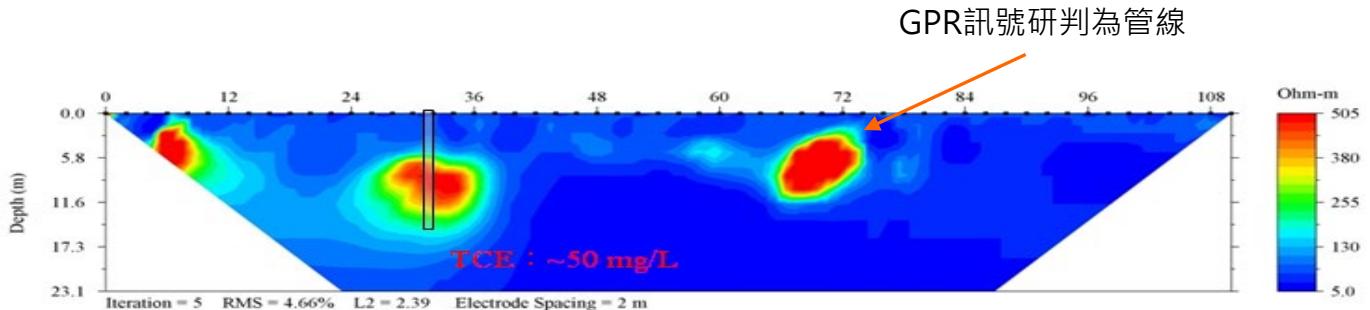


# 各式調查技術佐證（運作中金屬製造工廠）

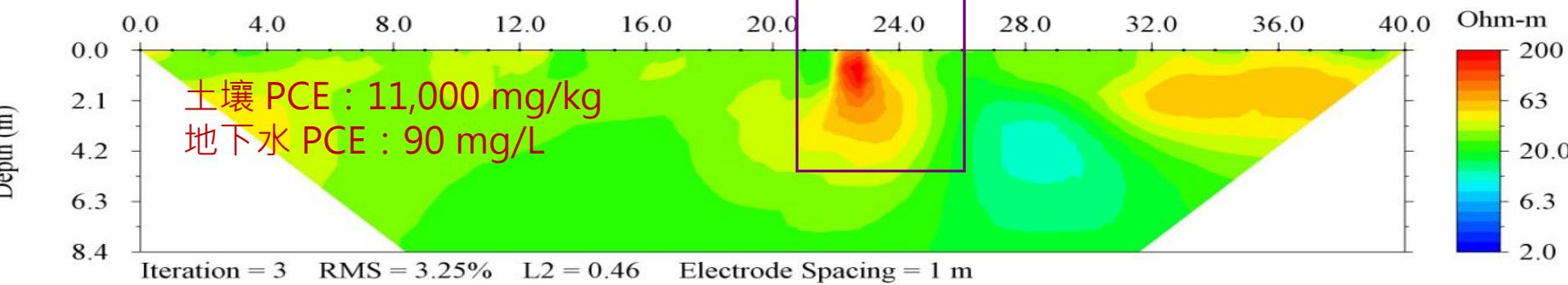
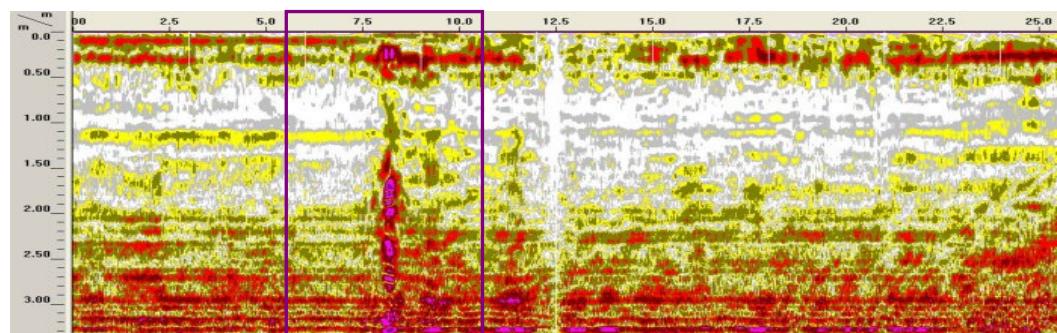
- ❖ 環境干擾、雜訊較高
- ❖ 調查範圍受限，但可能較鄰近污染洩漏源
- ❖ GPR/ERT初勘釐清管線結構物，異常區，研判可能洩漏位置、方位
- ❖ 各種方法成果交互佐證



Depth (m)



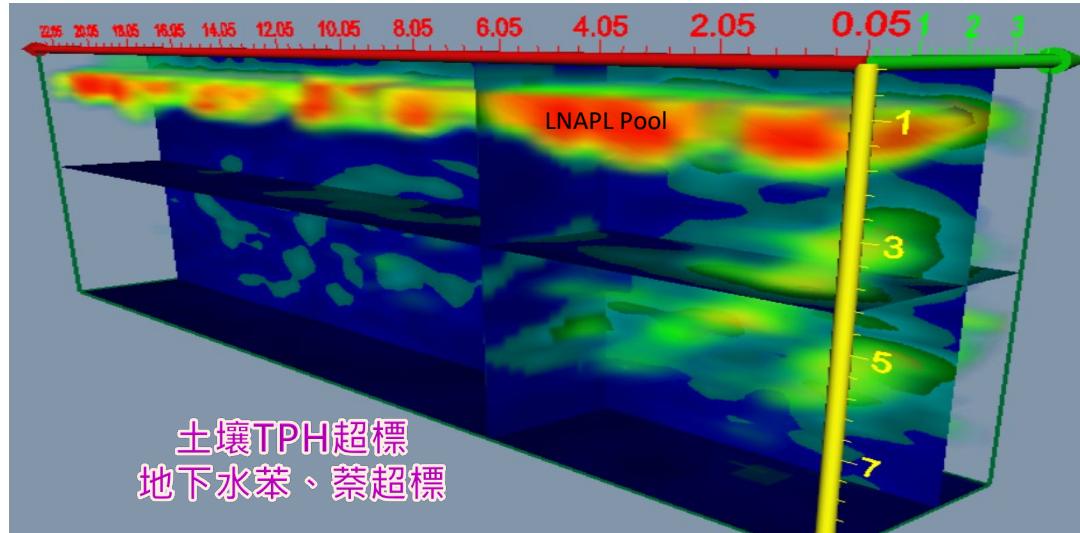
GPR訊號研判並無結構，但出現異常反射



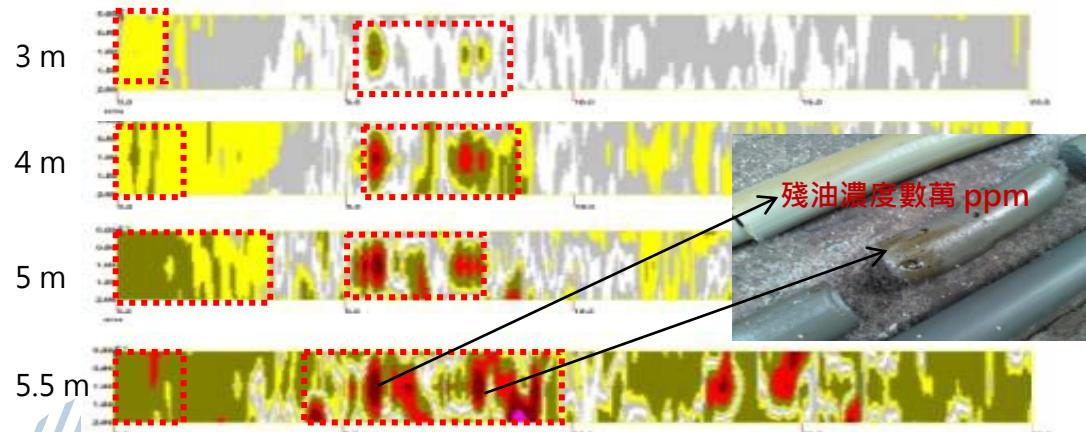


# NAPL分布調查

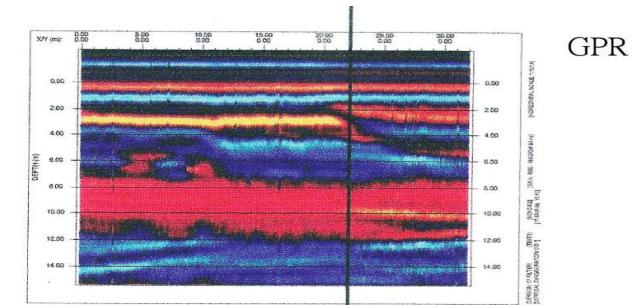
北部廢棄工廠浮油分布 ( 3D-GPR ; 現場量測浮油厚度1-3 m )



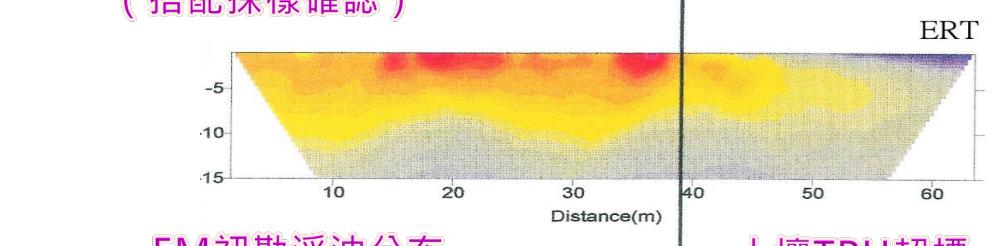
南部某工廠TPH分布 ( 3D-GPR )



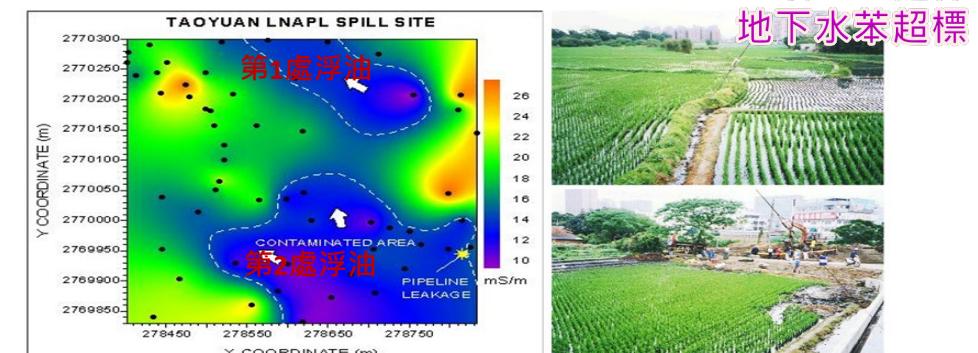
輸油管漏油事件 ( 調查範圍超過 60,000,m<sup>2</sup> ) , 應用EM、ERT與GPR協助 分析浮油分布



界定污染區與污染深度  
( 搭配採樣確認 )

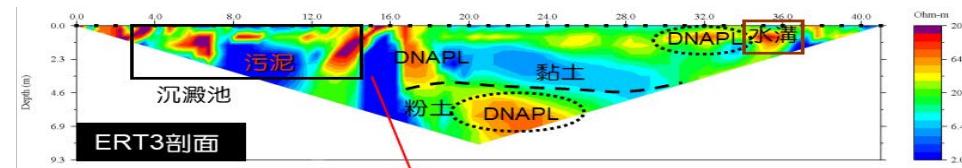


EM初勘浮油分布

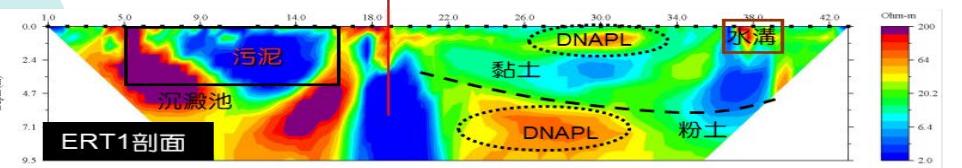




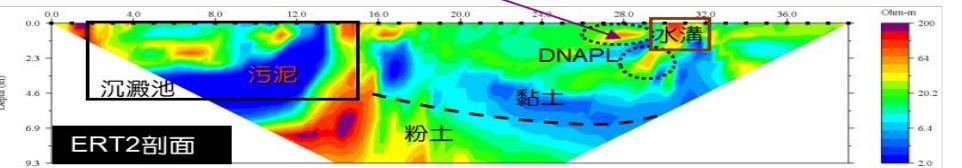
# DNAPL調查（廢棄染整工廠）



沉澱池邊界通電不良造成資料遮蔽  
(人造地下結構物含有金屬構造)



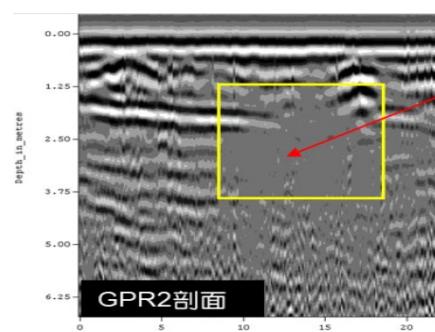
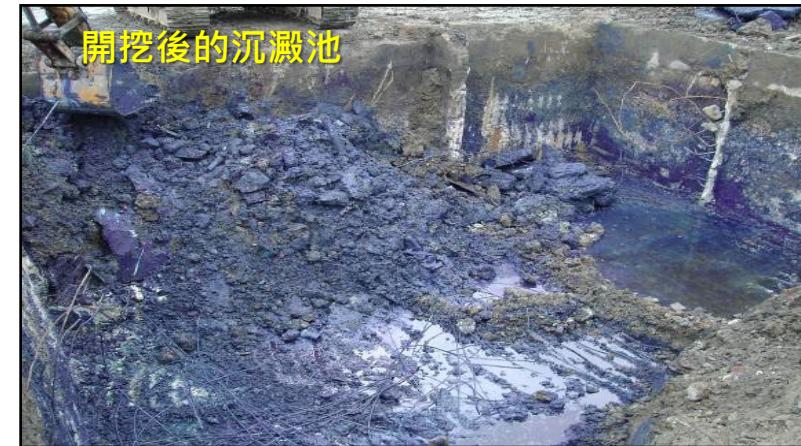
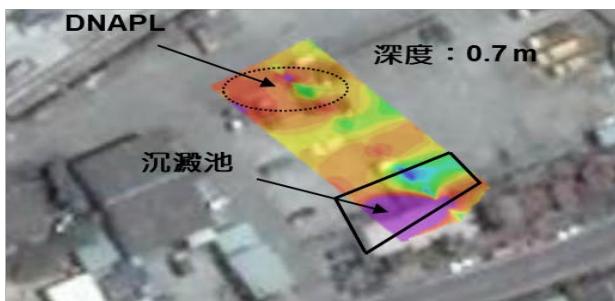
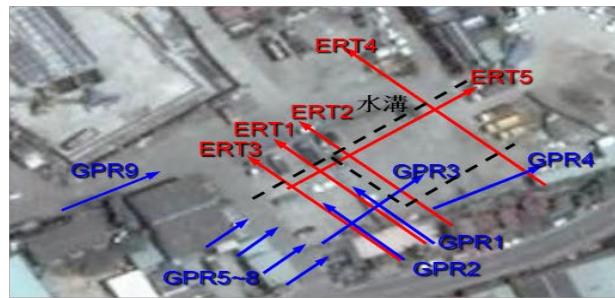
DNAPL鄰近GW-2



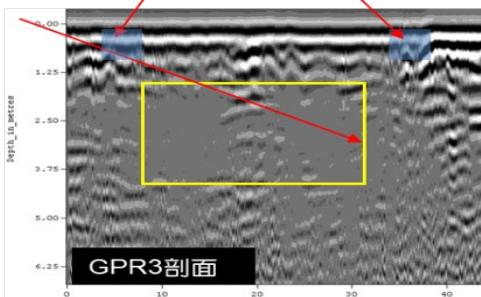
❖ 氯苯類DNAPL多鄰近北側水溝；DNAPL已深及地下10 m以下

❖ 土壤1,2-二氯苯、1,3-二氯苯超標

❖ 地下水1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、氯苯、苯超標



應屬含有金屬或  
濕潤污泥之反映

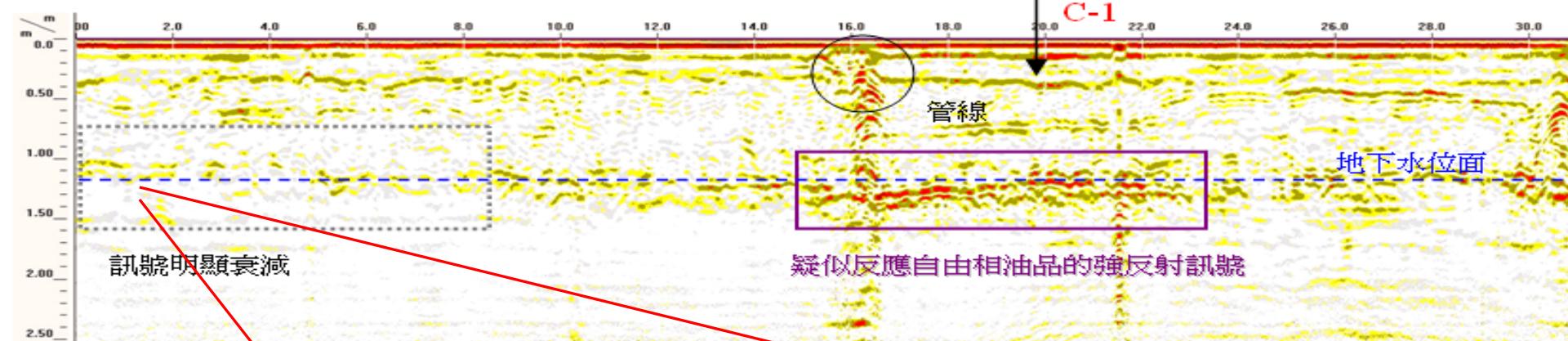
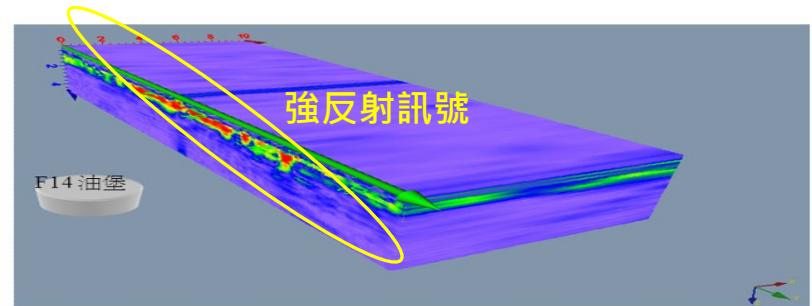


沉澱池邊界



# 浮油分布調查（軍事基地調查）

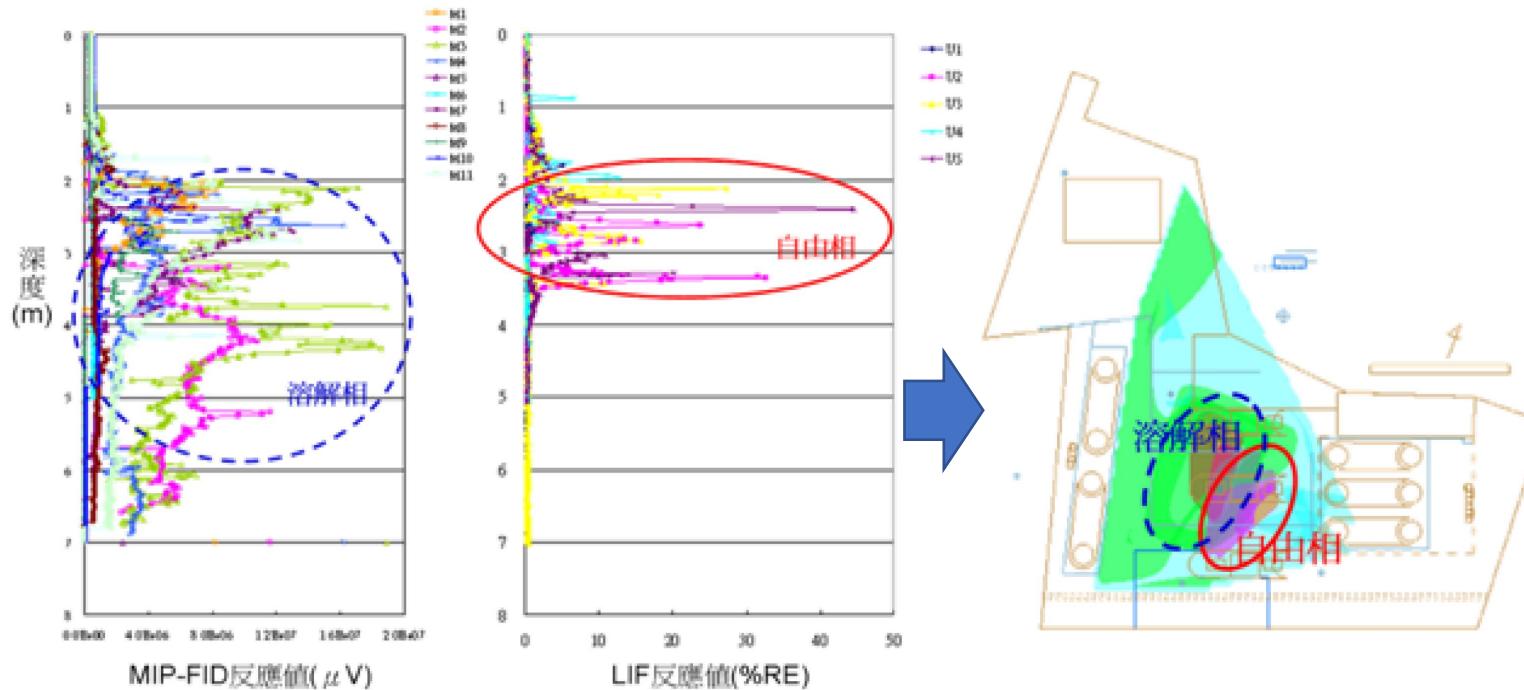
- ❖ 新鮮油品：高電阻率（低導電率）
- ❖ 風化油品，導電率上升，訊號衰減
- ❖ 土壤TPH超標、地下水苯超標





# LNAPL調查（加油站案例）

- ❖ 紫外光學雷射誘發螢光系統 (UVO Laser Induced Fluorescence System)
- ❖ 原理：部分污染物具有光激發螢光反應之特性，運用於石化類污染判別（可螢光顯色之NAPL）



MIP：  
深度：地表下2至6公尺  
污染範圍：泵島區至站屋之間  
以溶解相為主

LIF：  
高濃度區間：地表下2至3.3公尺（地下水位豐枯水季的範圍）  
以自由相或殘留相為主；

資料來源：吳庭年(2013)，運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識

# 智慧表徵調查

01



# 智慧表徵調查概念

## ❖ Smart Characterization Method (SCM)

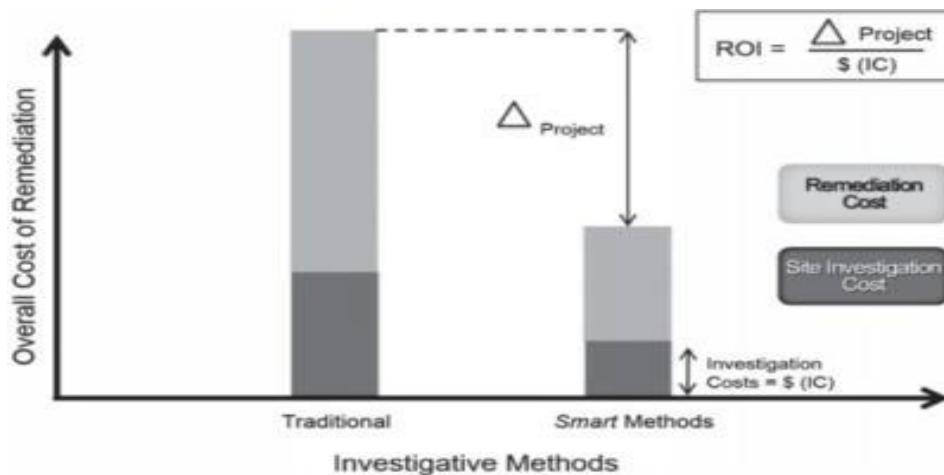
將調查視為一種投資而非支出

收益：

- 優化整治設計
- 操作節省成本
- 縮短積極整治時間

SCM ROI觀念：Return on Investigation

投資報酬率觀念：投入每單位調查成本所獲得之整體成本節省效益



智慧型表徵調查方法：

- 土壤及地下水採樣
- 動態的
- 即時的
- 高解析度的
- 三維之地下環境特徵及滲透特性

污染特性調查及評估：

靈活運用調查工具

不一定需要認證實驗室分析

整治成效確認：

需要認證實驗室分析

整治效率（效益）：

ROI 提升及整治完成確定性

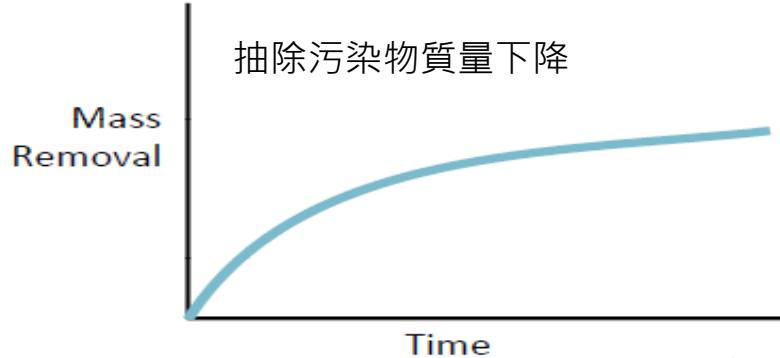
Source: The New ROI: Return on Investigations by Utilizing Smart Characterization Methods ( Suthan et al., 2015 )



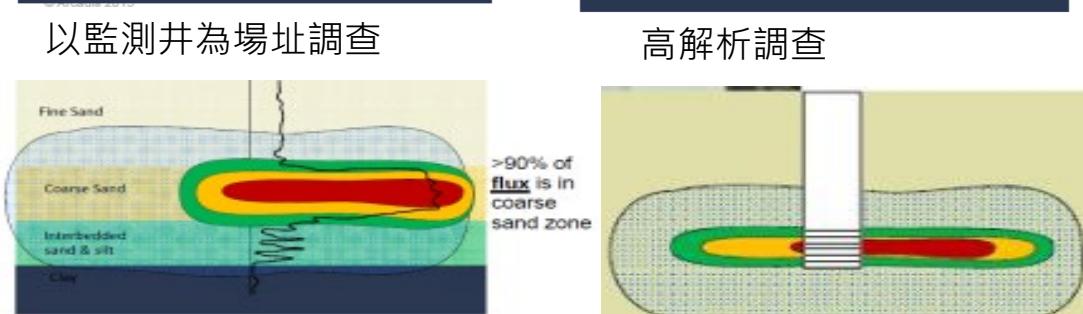
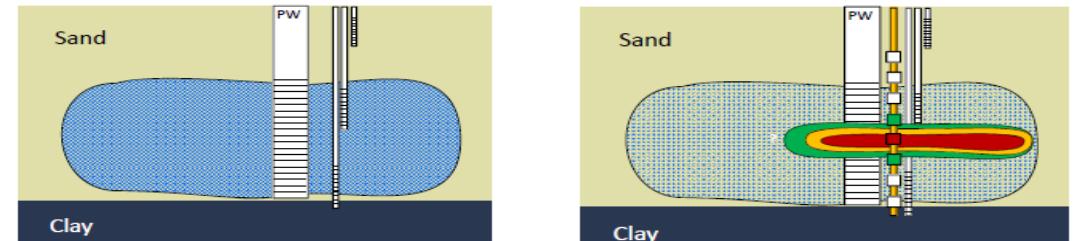
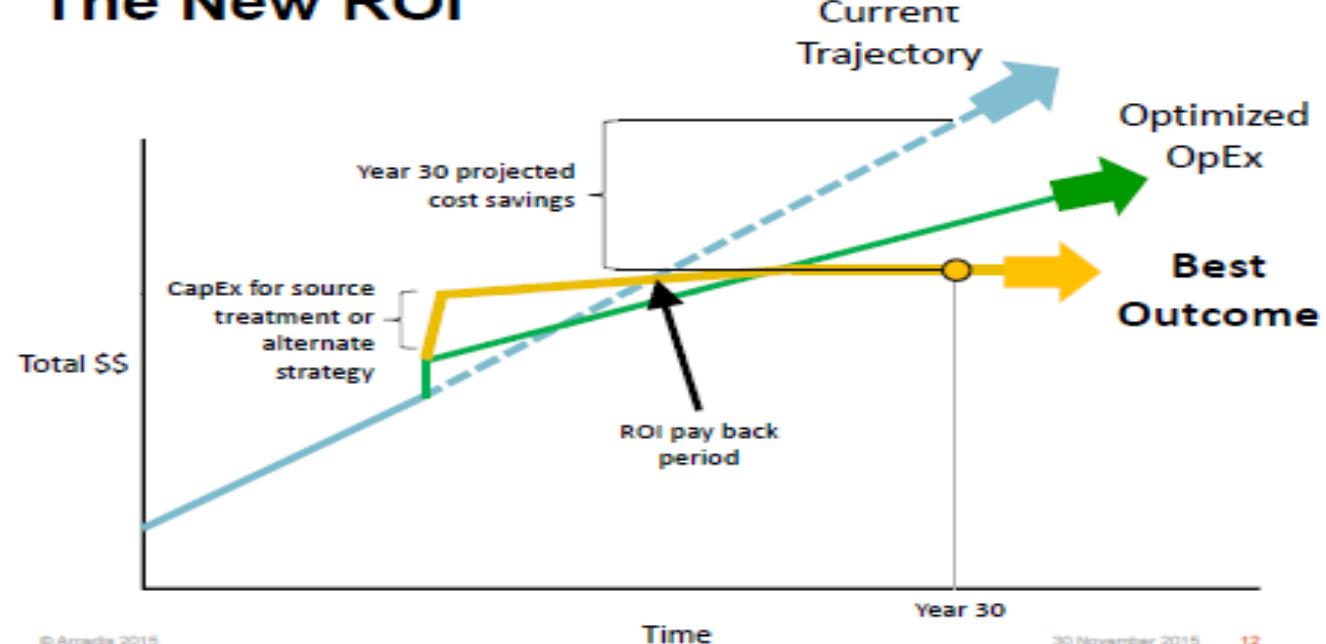
# 智慧表徵調查概念

## 國外應用案例

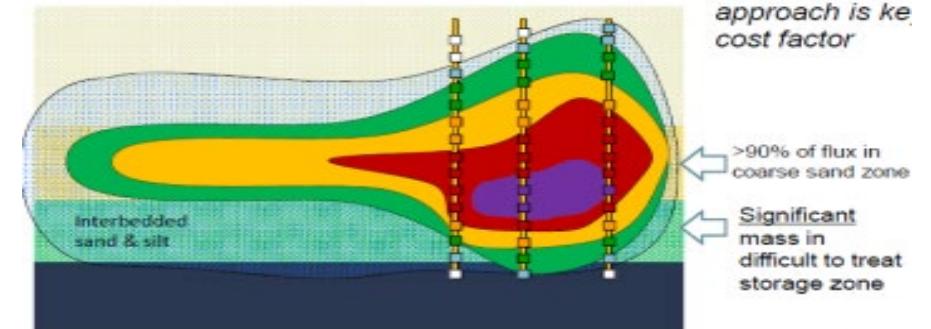
- VOCs污染團
- 以監測井為場址調查
- P&T操作20年



## The New ROI



結合高解析地質調查、品質通量評估 : >90%之污染通量集中在粗砂地層



進一步高解析調查評估污染源整治效益

資料來源 : Joe Quinnan, Nick Welty (2015)

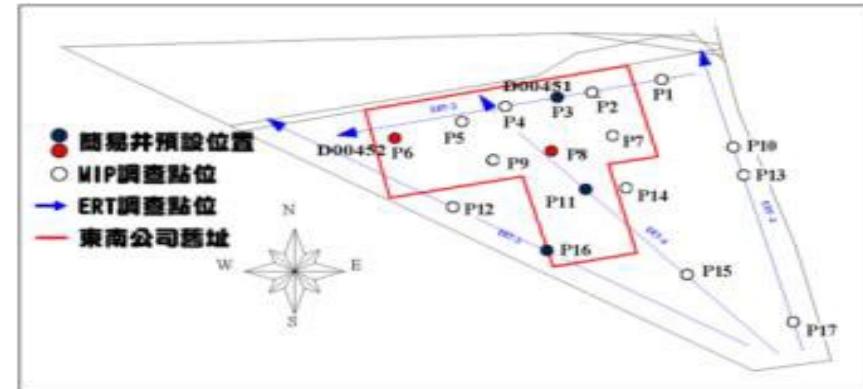


# 某場址歷年調查成果

## 2012年度計畫污染調查及查證

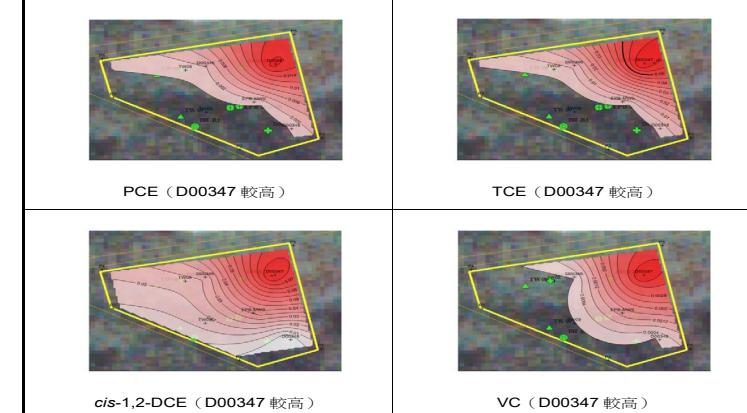
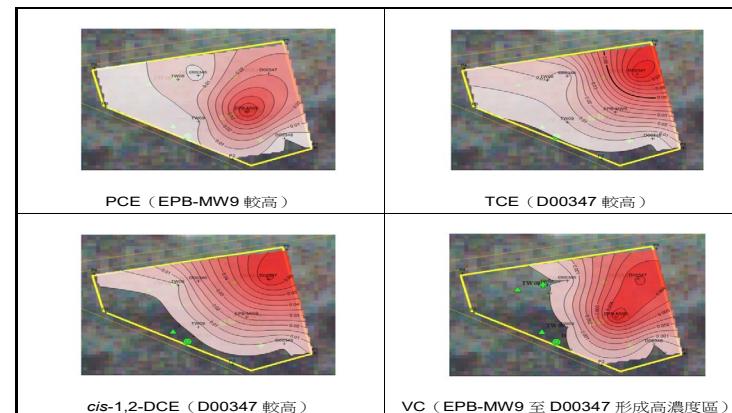
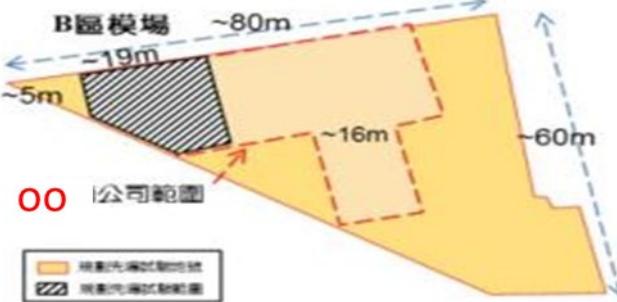


顯示D00452、R00625靠近場址污染來源



- D00451 (近P3，井深7 m)**  
檢出PCE，低於地下水管標
- D00452 (近P6，井深7 m)**  
PCE、TCE及VC超過地下水管標，濃度分別為0.18 mg/L、0.23 g/L、0.025 mg/L
- R00625 (近P6，井深15 m)**  
僅有TCE超過管標，濃度為0.116 mg/L

## 2014年度計畫補充調查





# 整治細部調查

## 現場調查工作

- 地電阻 (含透地雷達)
- 增加既有井採樣分析
- 增加 6 口簡易井設置採樣分析
- 成效評估井 (B-MW1-4) 及地電井 (B-EW1-6) 設置
- 增加多重式地物井測
- 成效評估井 (B-MW1-4、D00451、D00452、D00347、R00625) 採樣分析
- 增加單井流向流速、微水試驗 (B-MW1-4、B-EW1-6) 多深度水文調查分析

## 目的

- 污染分布及程度
- 基準水質建立
- 改善設計依據

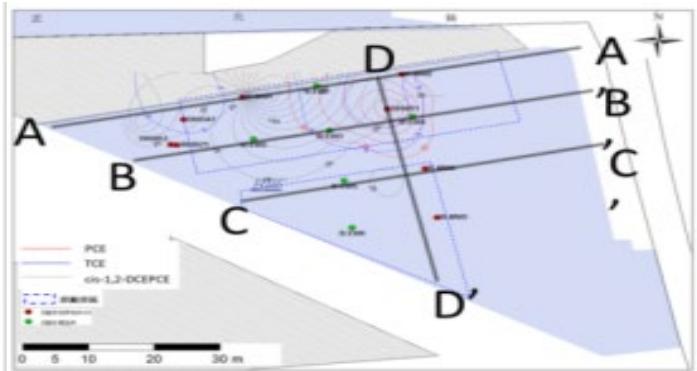
## 調查程序

- ERT → 簡易井 → 成效評估井 (地電井)  
→ 多重式井測 → 多深度調查 (水文試驗、採樣)



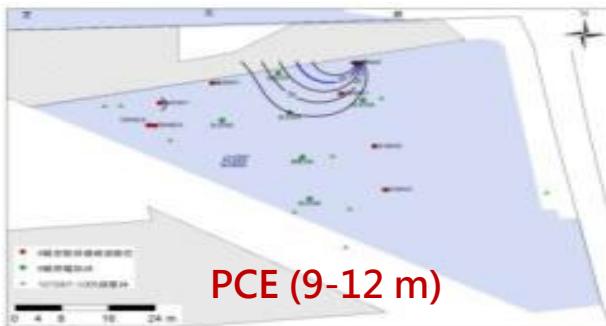


# 細部調查成果—污染分布

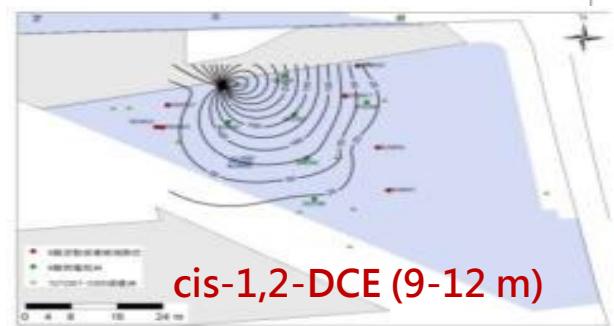


## ❖ 智慧表徵解讀及整治設計原則

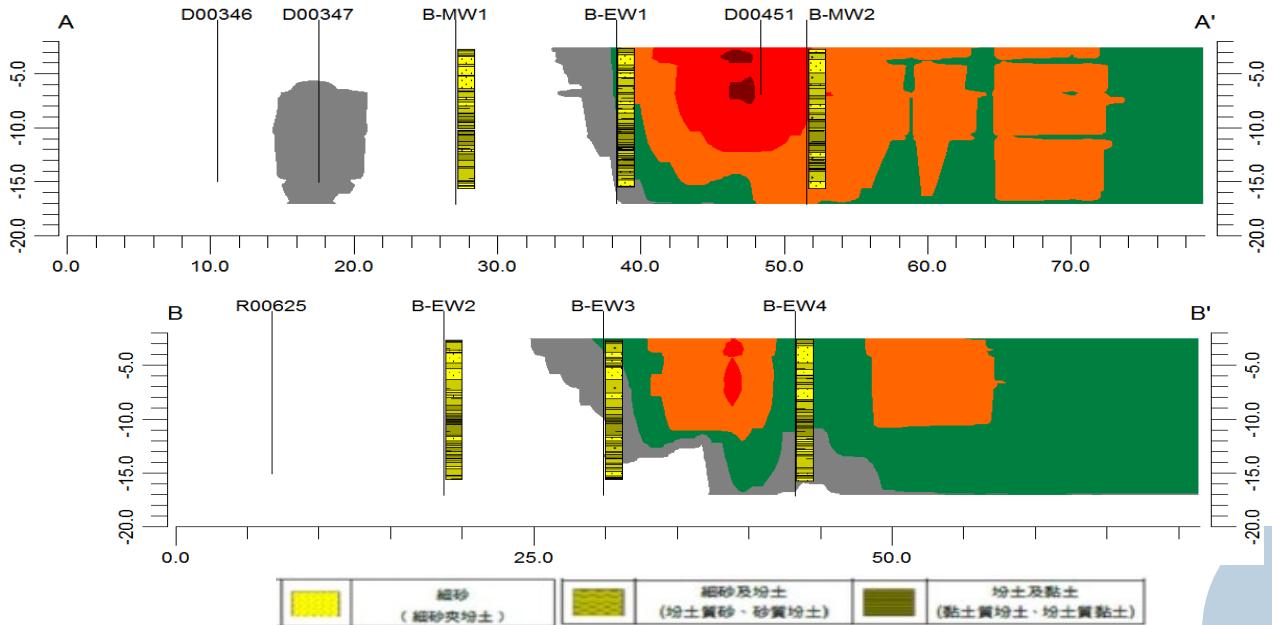
- 超管標深度約12 m ( 超監標達17 m )
- 濃度較高深度範圍4-8 m
- 9-12 m屬低滲透性**粉黏土地層**
- 4-8 m屬較高滲透性細砂與砂粉土地層
- 9-12 m已遭受污染 ( 增加整治不確定性 )



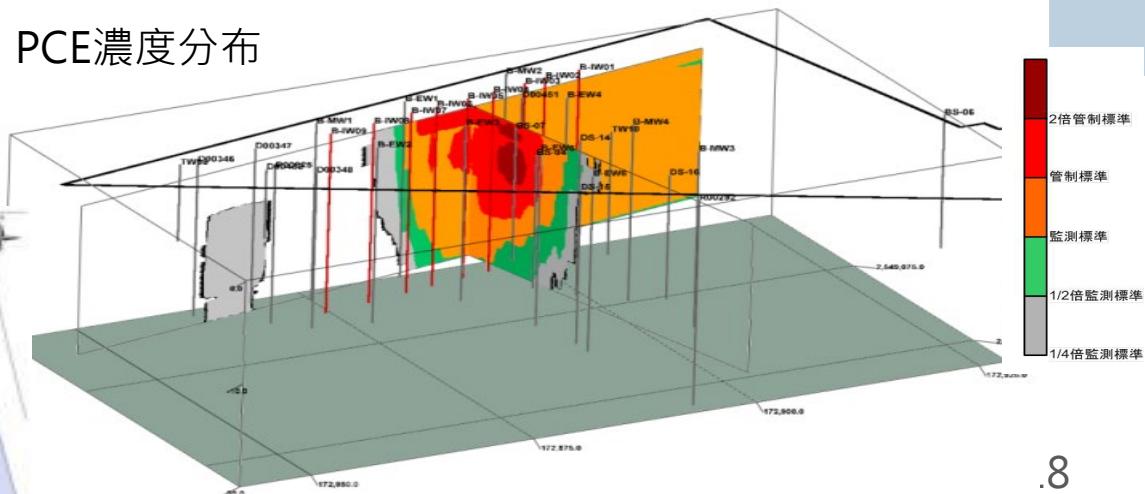
PCE (9-12 m)



cis-1,2-DCE (9-12 m)



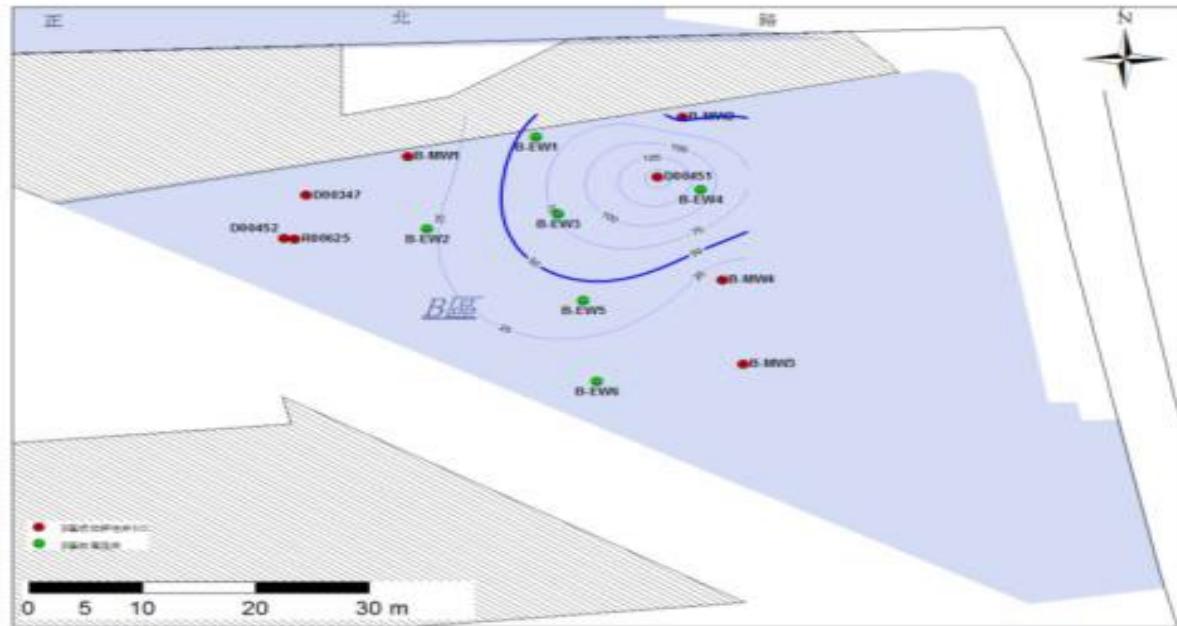
PCE濃度分布





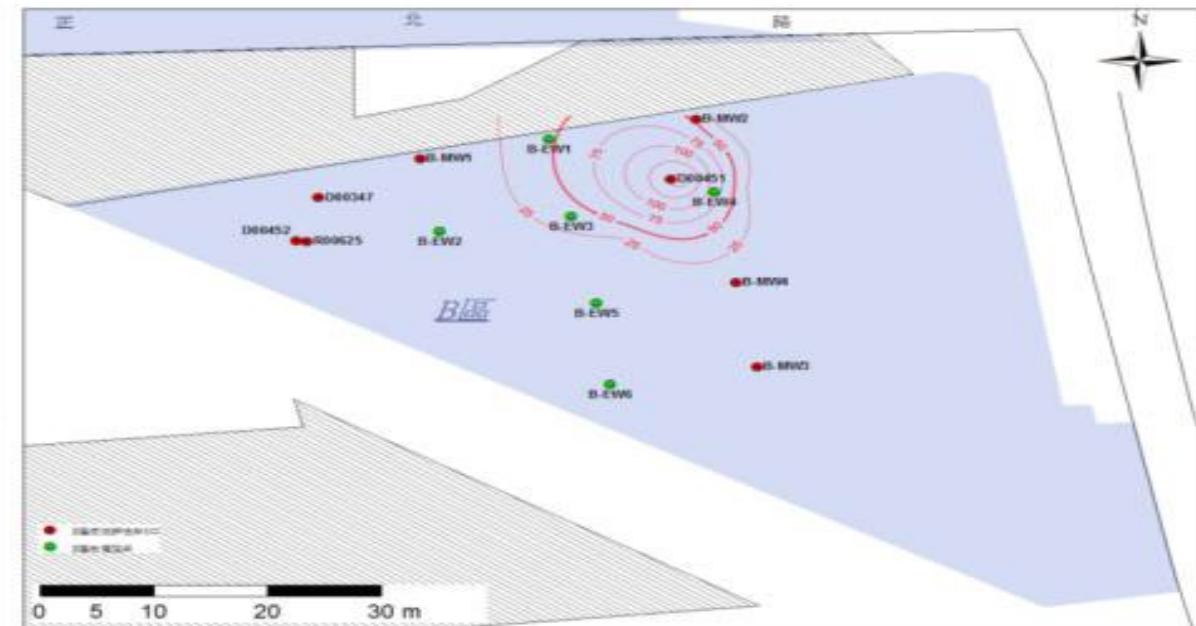
# 細部調查成果—污染分布

- ❖ 污染規模大小為整治經費之關鍵因數
- ❖ 精確調查成果效益：實際整治區面積縮小為48.6%



污染調查採樣井8口（單一深度）

PCE濃度大於50 ppb之面積（改善重點區）： $364\text{ m}^2$   
污染厚度約15 m，污染體積約 $5,500\text{ m}^3$



增加既有井、增設6口簡易井多深度採樣

PCE濃度大於50 ppb之面積（改善重點區）： $177\text{ m}^2$ ，  
**364 m<sup>2</sup>之48.6%**  
污染厚度約12 m，污染體積約 $2,100\text{ m}^3$

# 複雜場址精確調查

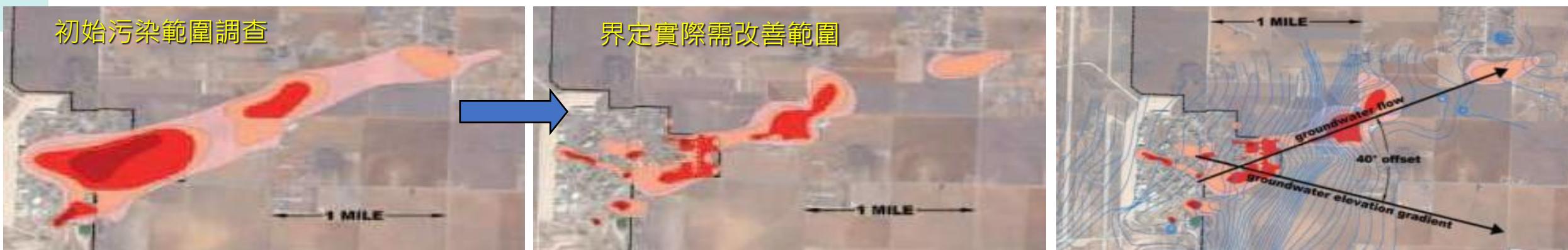
03



# 精確整治概念

## ❖ 傳統調查整治無法克服地下環境複雜性對污染影響

- ▶ 有限水井產出之等水位線或等濃度圖將與實際現況有相當大之落差
- ▶ 污染究竟會移動或局限到何處？整治藥劑能否傳輸至污染目標區？



## ❖ 精確整治 (Surgical Remediation)

- ▶ 對地下環境細部特徵正確掌握 (2 D、3 D、4 D)
- ▶ 擁有更佳的整治傳輸技術或整治工法，能克服地質異質性之整治瓶頸



# 大尺度異質性場址調查技術

## ❖ 井間分溶示蹤劑試驗PITT

- ▶ **基本原理**：一口或多口井同時注入保守性示蹤劑（溴、丙醇）或分溶示蹤劑（戊醇、己醇）
- ▶ **執行方法**：穩定抽水（**污染水需處理或回注**），採集地下水樣，分析地下水樣之示蹤劑濃度
- ▶ **執行應用**：識別界定污染源、評估整治成效
- ▶ **應用限制**：
  - 污染源區位置不明確，無法決定試驗井位
  - 不易維持定量抽水（異質性）或足夠洩降錐

## ❖ 試蹤劑試驗

- ▶ **執行應用**：推估延散係數、有效孔隙率、流速
- ▶ **應用限制**：不易維持定量抽水（**污染水需處理或回注**）、難以掌握空間特徵參數

## ❖ 地電阻影像剖面法

- ▶ **基本原理**：以電性區分地層中物理特性，依據兩端電極之間的電位差及通過電流計算地層中視電阻率分布，釐清可能容易匯流污染之地層及潛在污染區
- ▶ **執行方法**：地面式、單孔或跨孔井測
- ▶ **執行應用**：建立二維及三維地下環境細部特徵，配合灌注期間評估藥劑傳輸分布，掌握整治成效
- ▶ **應用限制**：厚層鋼筋網或鄰近高壓電流不易施測

## ❖ 水力掃描法 (Hydraulic Tomography, HT)

- ▶ **執行方法**：結合**光纖光柵感測器**多深度量測溫度與水壓
- ▶ **執行應用**：配合灌注期間量測水壓或溫度來源，整合資料建立**三維水文地質模型**（空間K場、S場及優勢流徑）
- ▶ **應用限制**：井位空間配置限制試驗區範圍



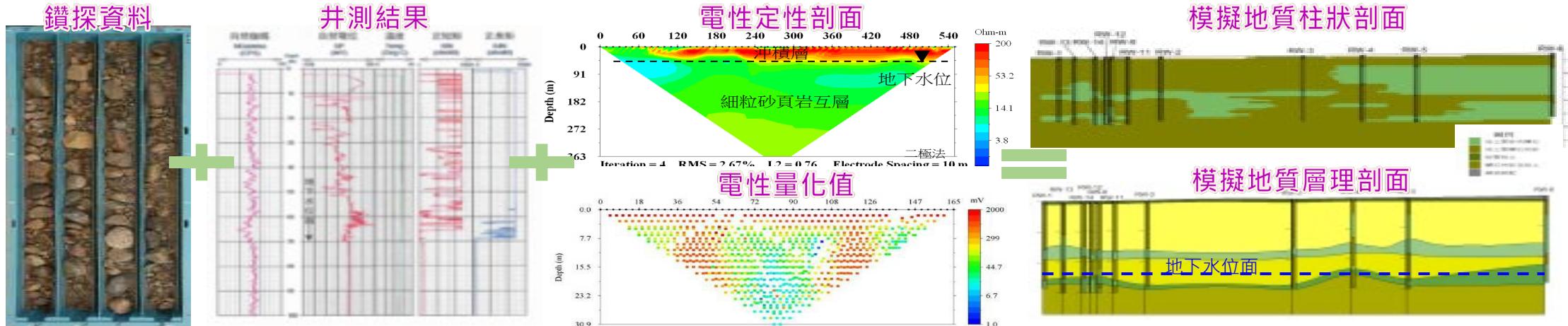
# 大尺度異質性場址調查技術（續）

- ❖ 洩降與距離曲線分析法 (Drawdown Distance Analysis) 及空間矩分析法 (Spatial Moment Analysis)：採用涵蓋整個含水層的洩降觀測點，推估異質性含水層水文地質參數（有效流通係數  $T_{\text{eff}}$  與有效儲水係數  $S_{\text{eff}}$ ），此方法需要搭配較多觀測井，且考慮在大時間下未遭遇水文地質邊界 (Wu *et al.*, 2005)
- ❖ 水力掃瞄法 (Hydraulic Tomography)：傳統抽水試驗之改良，在有限的觀測點，透過各種水力條件（如調整抽水位置或反映不同邊界條件）產生之水力地質掃瞄結果，採序率方法迭代逆推水文地質參數 (Zhu and Yeh, 2005；倪春發與葉天齊，2006；蔡瑞彬，2022)。本方法可利用既設井執行，但受限地質變化複雜，可能造成抽水洩降未必能擴及既設井，並須進行繁複數學演算
- ❖ 地球物理方法：結合地球物理探勘技術輔助建立特徵概念模型。近年來MADE (Macrodispersion Experiment) 場址大量研究以地電阻法探勘剖面逆推大範圍含水層  $K$  值分布

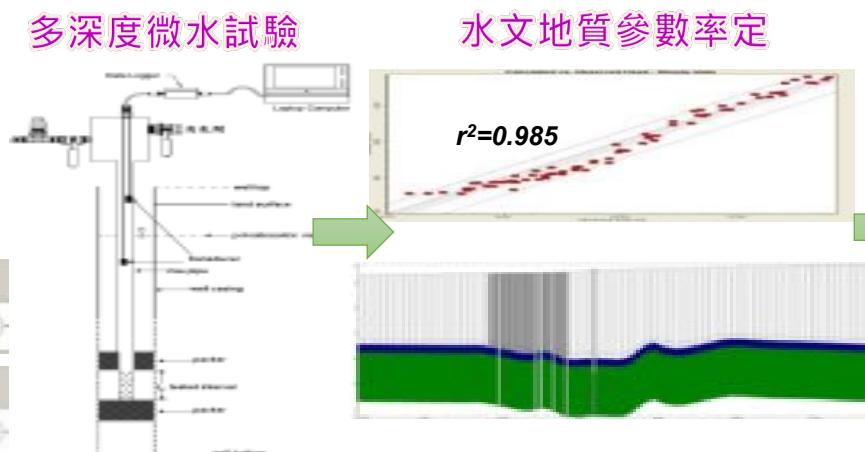
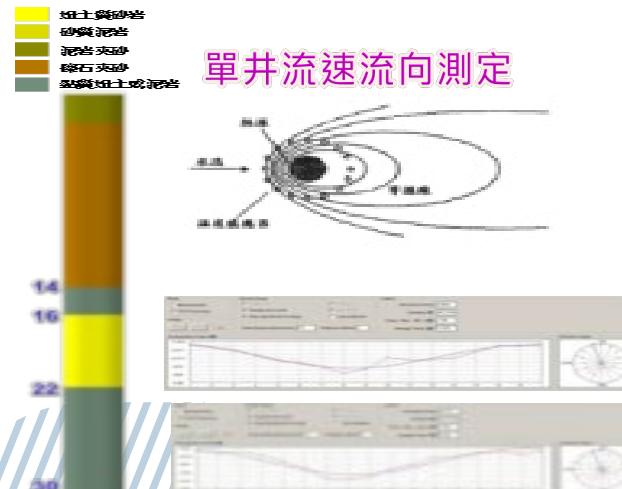


# 實場常用水文地質調查方法

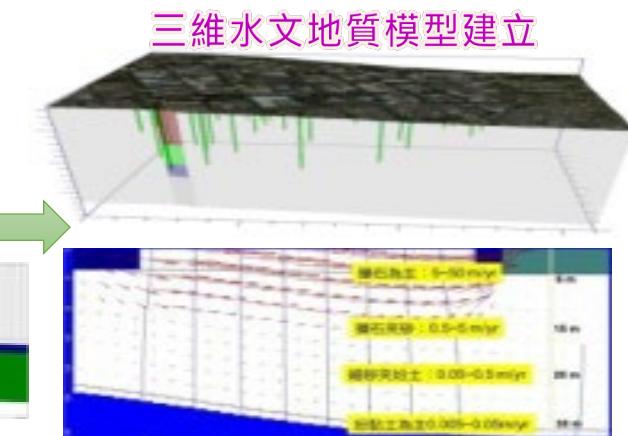
- ❖ 地質鑽探資料、井測資料、電阻量化資料，建立地質柱狀剖面、層理剖面



- ❖ 單井流速流向測定、多深度微水試驗
- ❖ 長期水位監測與時頻分析



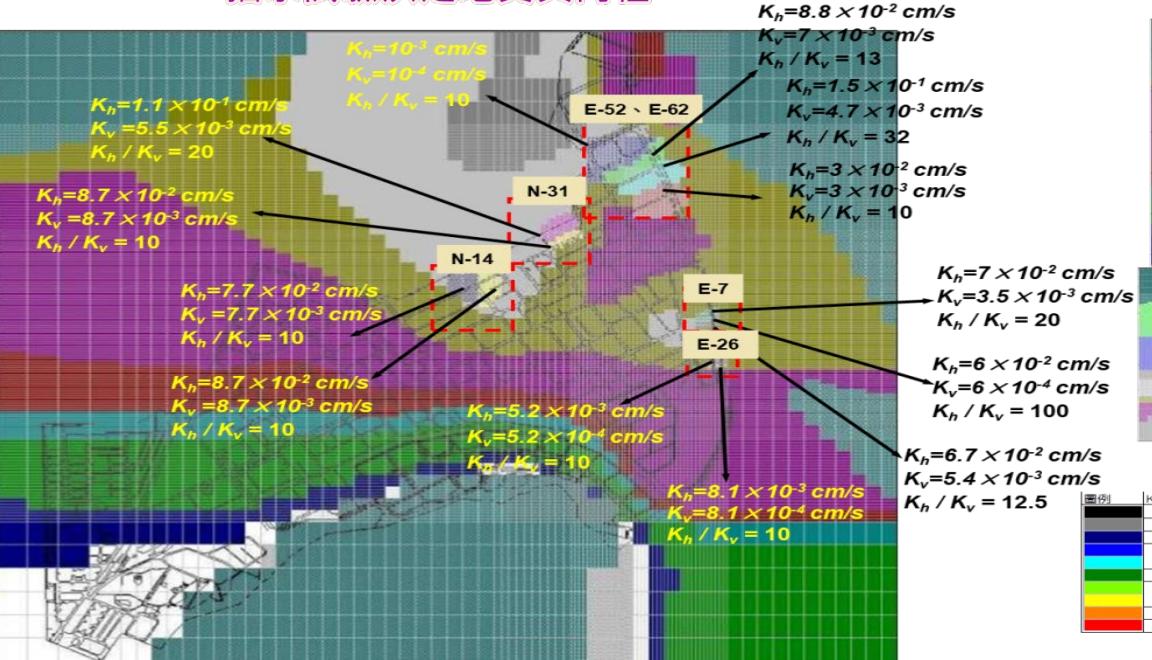
水文地質參數率定



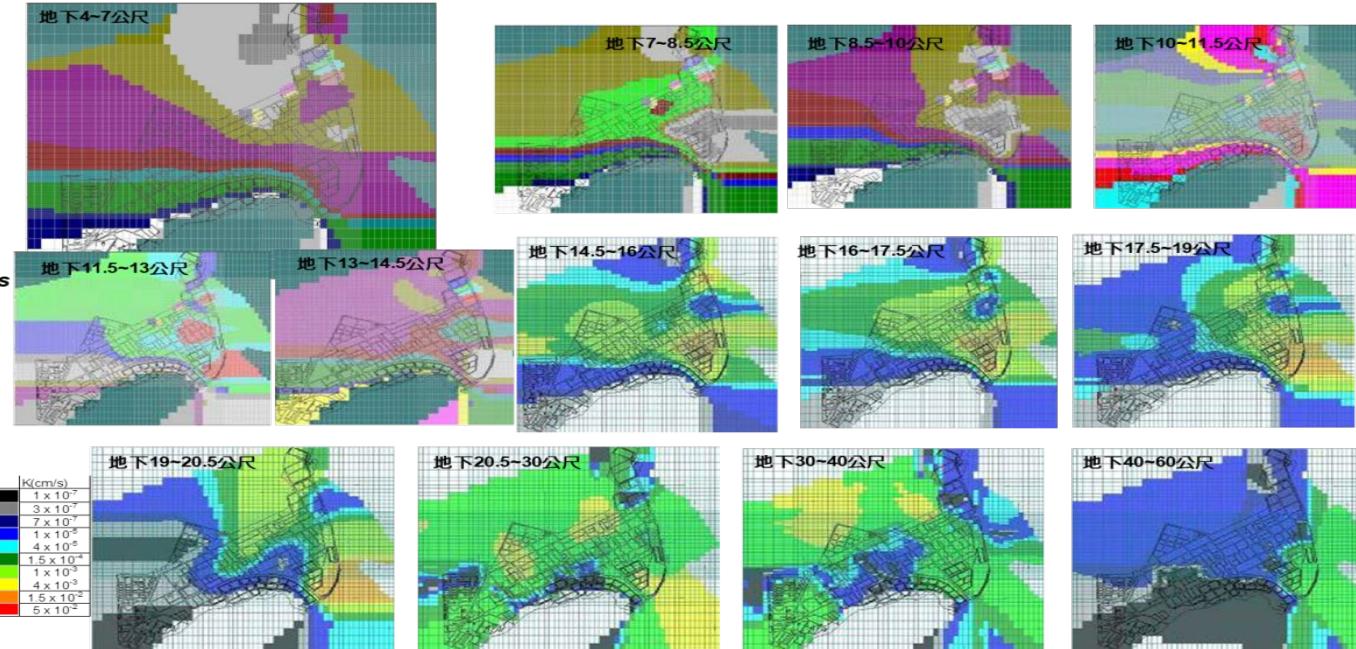


# 大尺度水文地質模型

抽水試驗決定地質異向性

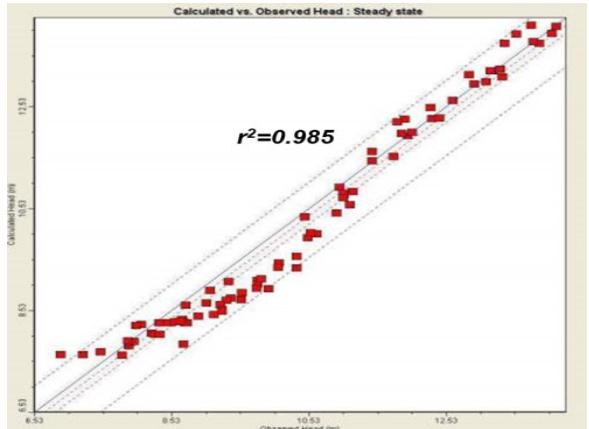


鑽探物性分析試驗決定地質異質性

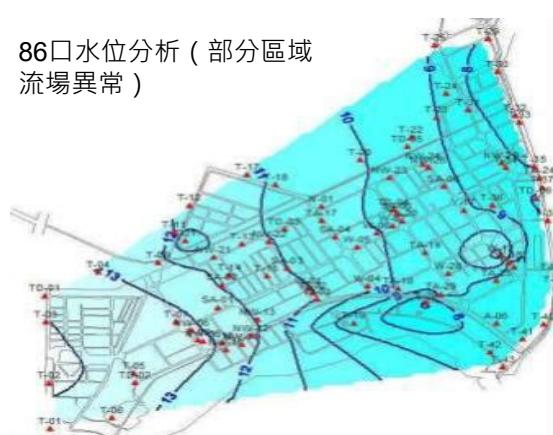


Calculated vs. Observed Head : Steady state

$$r^2=0.985$$



86口水位分析 (部分區域流場異常)



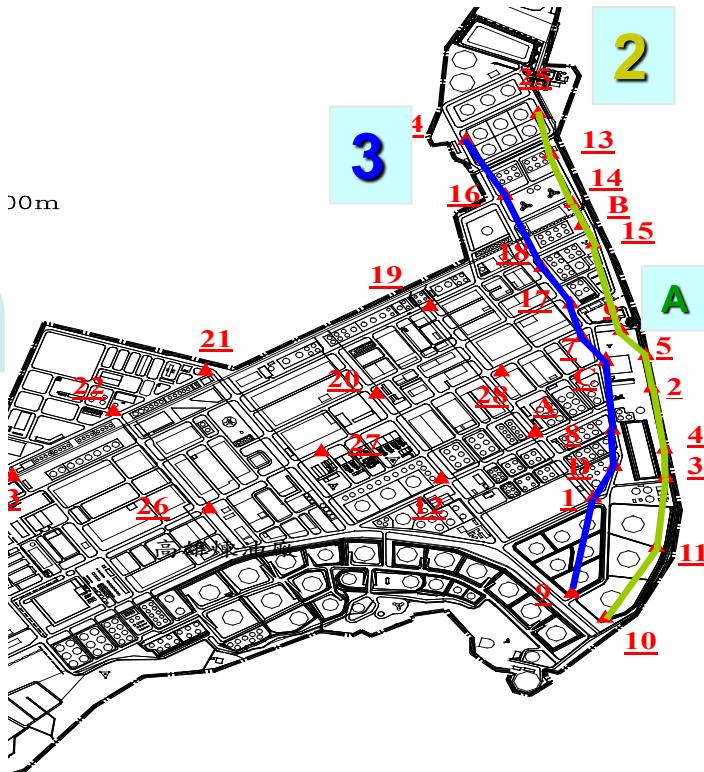
82口水位分析 (剔除4口水位異常井)



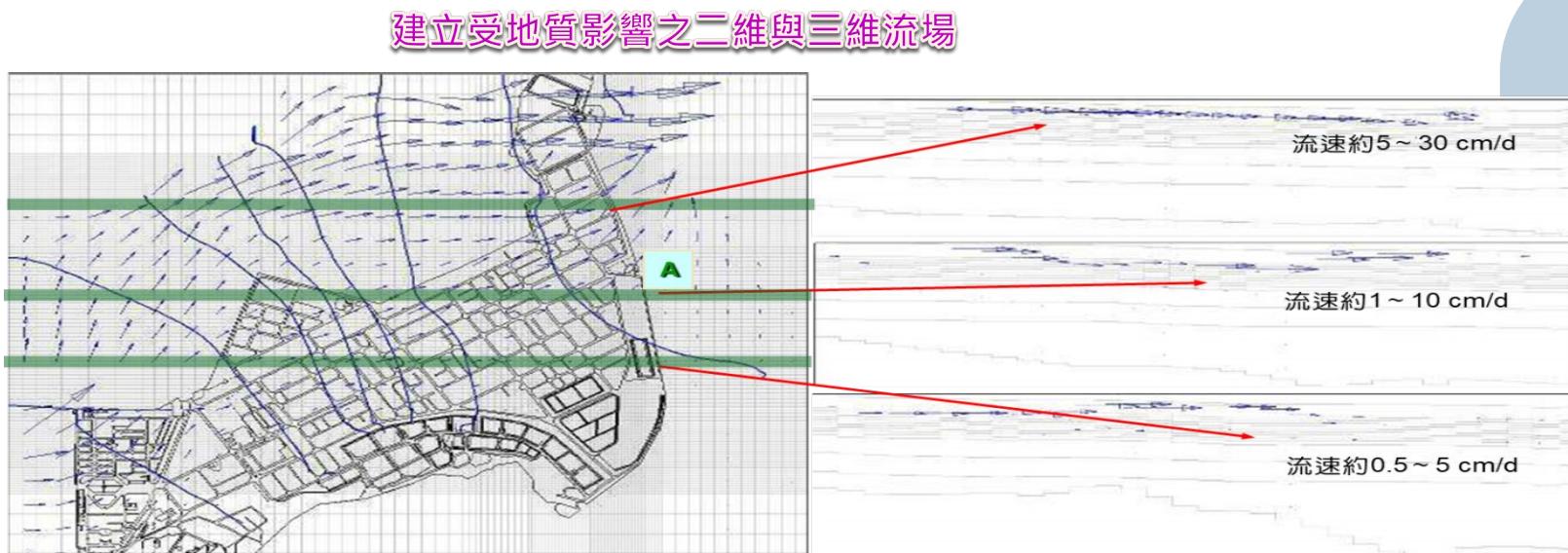
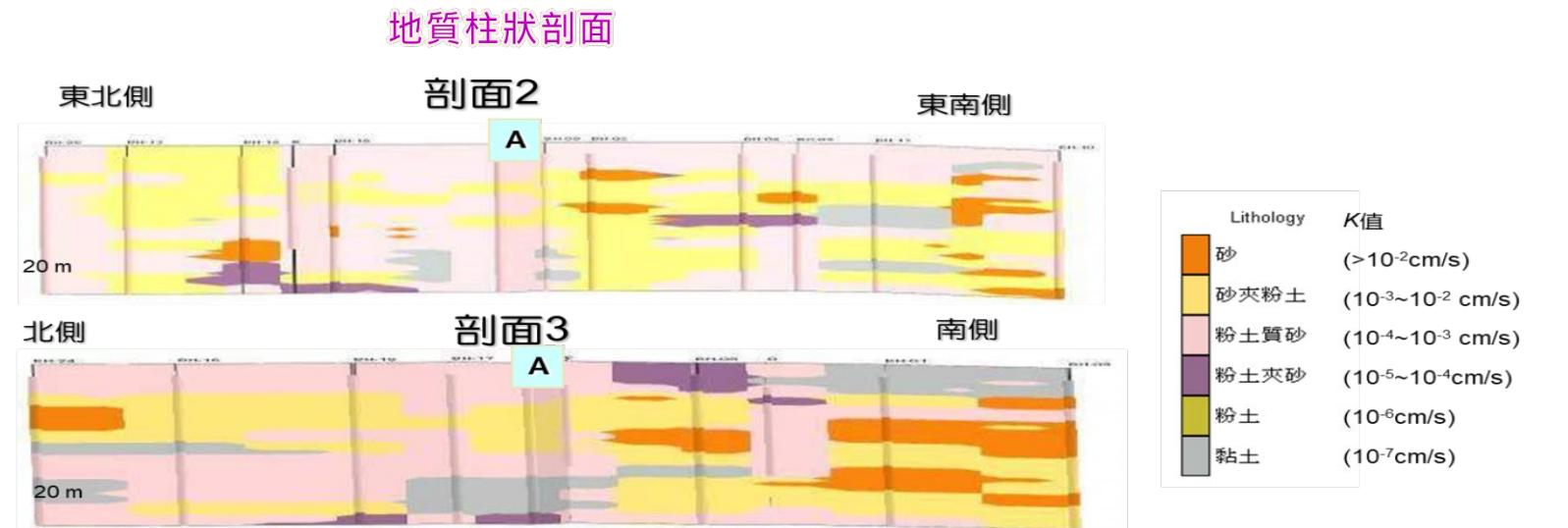
- ❖ K值大致分布在 $10^{-5}$ 至 $10^{-2}$  cm/s；局部地區高達 $10^{-1}$  cm/s或低至 $10^{-7}$ 至 $10^{-6}$  cm/s
- ❖ 流場與水頭分布、地質邊界、地質空間異向性，及沿水力梯度方向之地質變化有關



# 大尺度水文地質模型（續）



- ❖ 東側淺層（地下10 m）地質滲透性大致愈往周界愈佳
- ❖ 愈往東北側淺層（地下10 m）滲透性較佳；愈往東南側深層（地下10-20 m）滲透性較佳

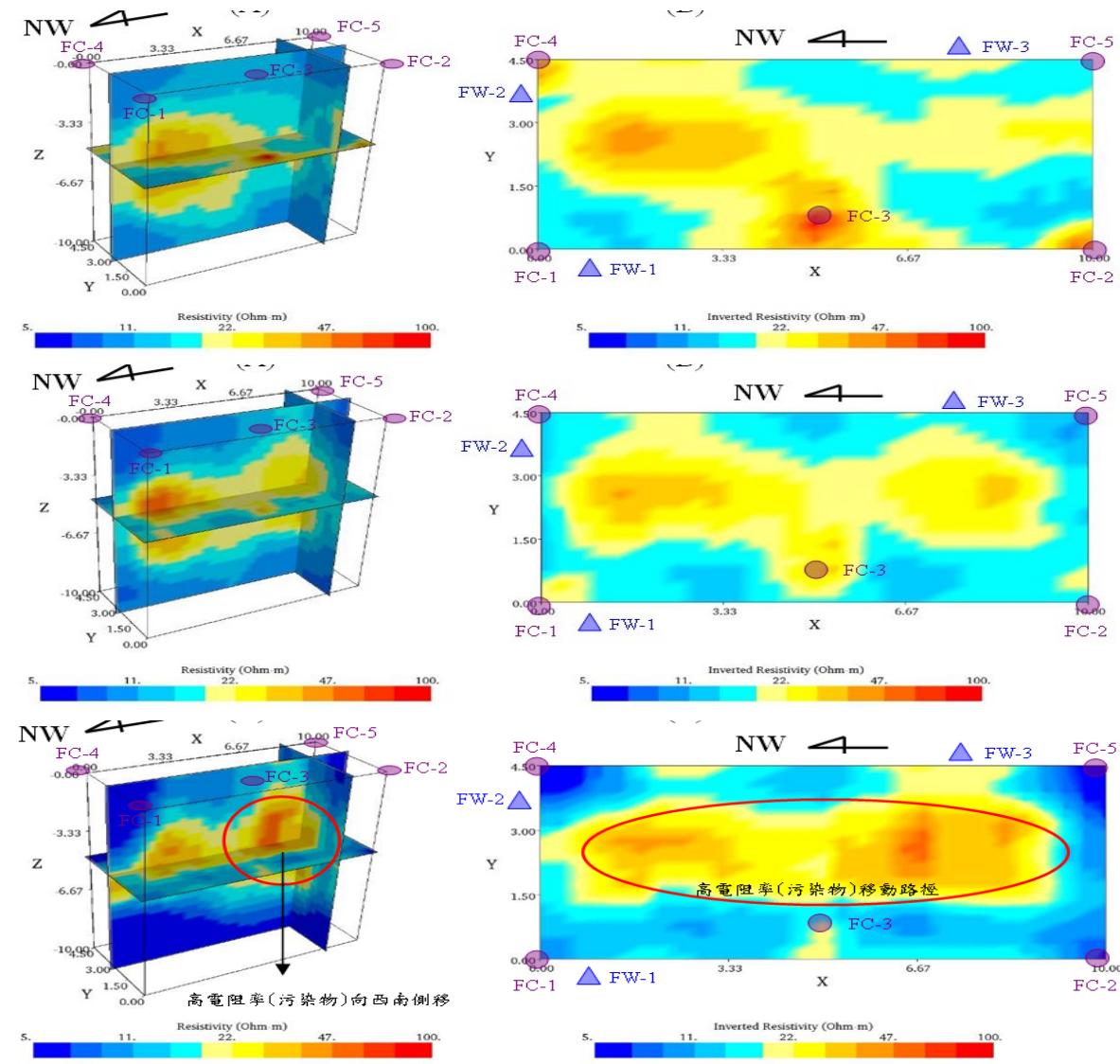
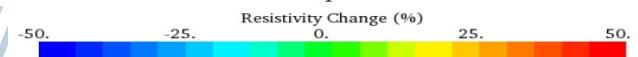
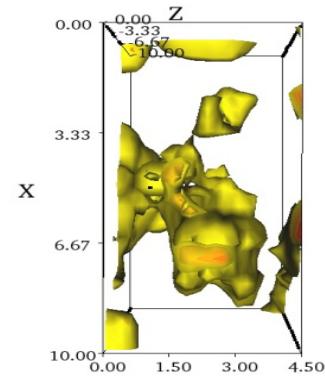




# 整治評估—污染分布動態

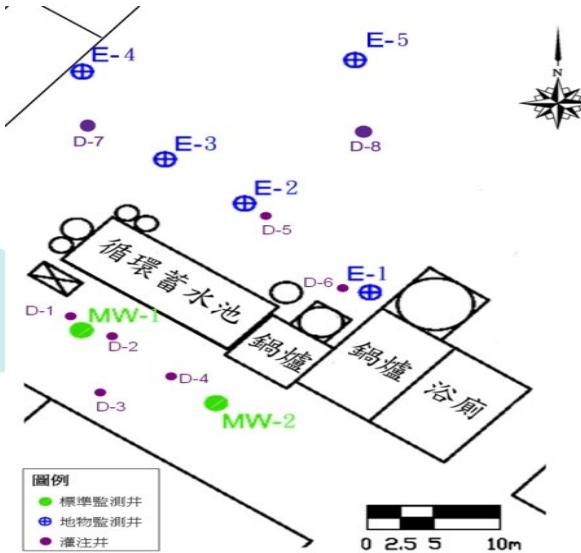
- ❖ 跨孔式地電阻影像法 (Cross-Hole ERT, CHERT)
- ❖ 定期監測，評估LNAPL流布
- ❖ 發現污染範圍擴大，立即增設監測井，並調整抽水程序
- ❖ 地物井同時作為監測及水力試驗之用，提升井的使用效益

Percent Change of Resistivity

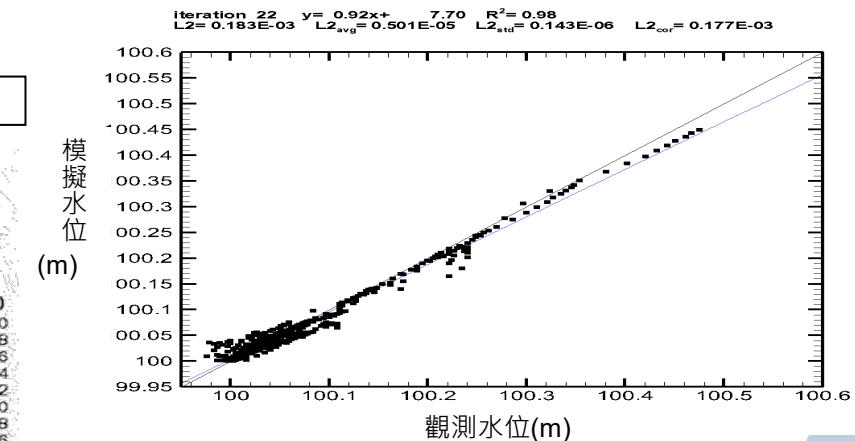
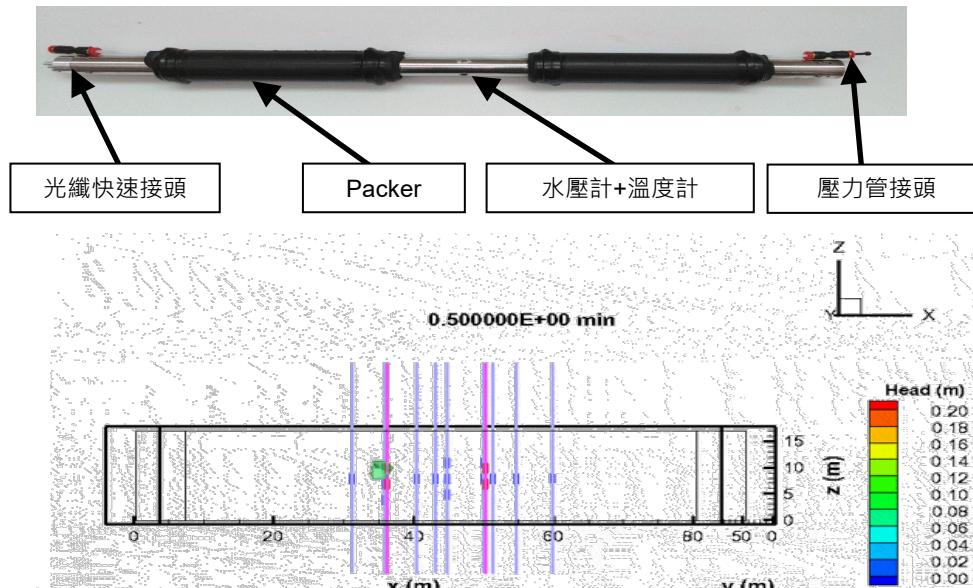




# 水力掃描法 (Hydraulic Tomography, HT)

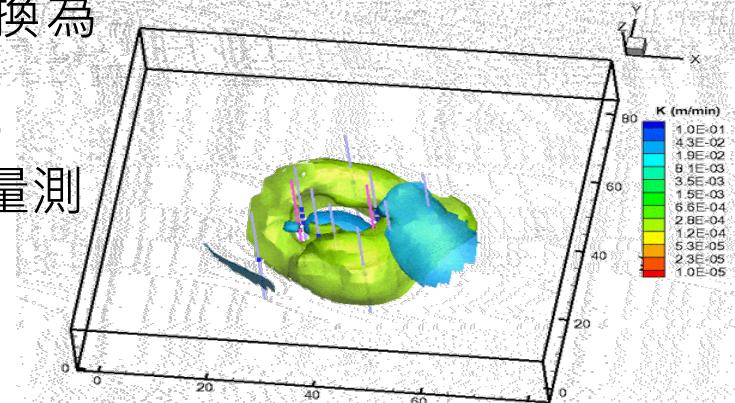


整治場址應用案例



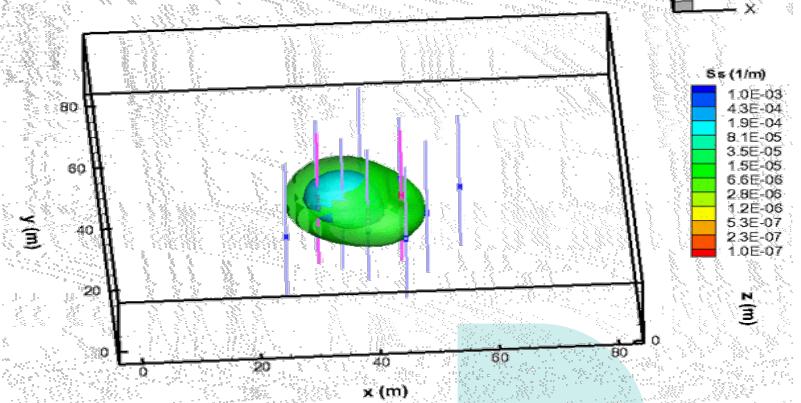
❖ HT 藉由抽水或灌注，分析井中不同深度參數（水位、溫度、壓力...）以序率分析方法將水位資料轉換為水文地質參數異質場

● 推估K場



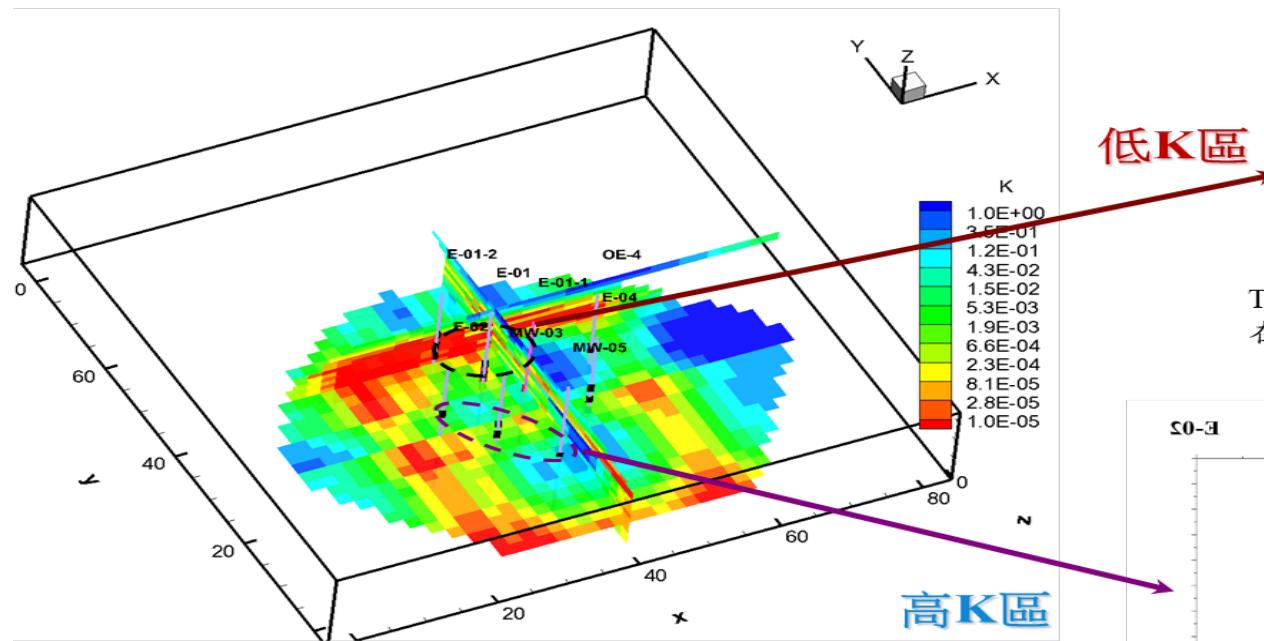
❖ 結合新型光纖光柵感測器 (Fiber Bragg Grating, FBG) 可多深度量測溫度與水壓

● 推估比儲水係數場

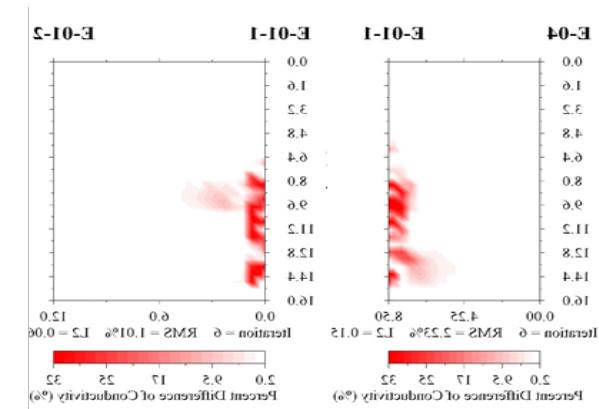




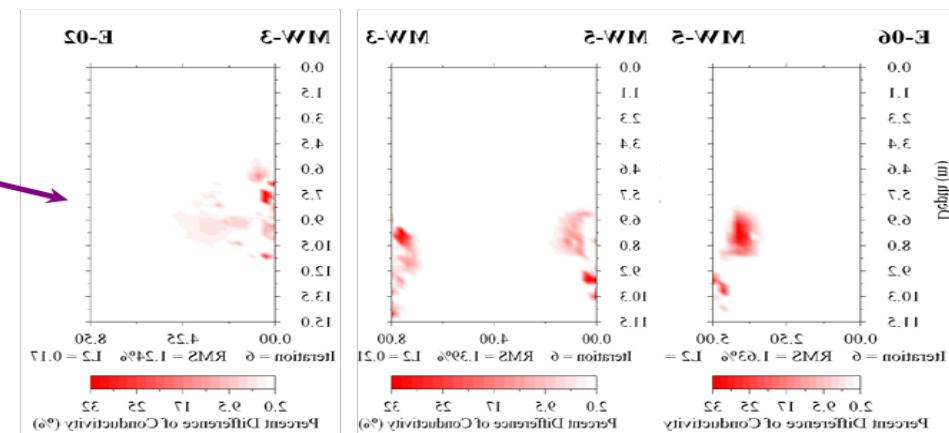
# 整治評估—藥劑分布動態



- ❖ 水力掃描法配合TL-CHERT評估傳輸
- ❖ 高 K 區藥劑傳輸分布距離如預期較遠
- ❖ 低 K 區藥劑訊號相對較集中於井周圍



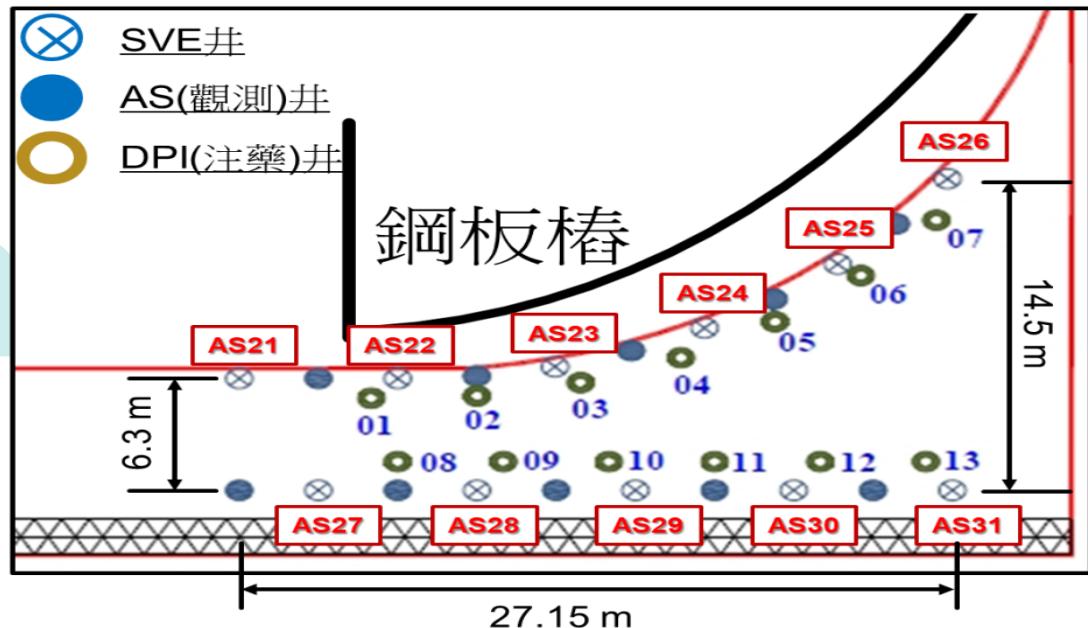
TL-CHERT成果顯示在低K區導電率變化率只集中在灌注井周圍，且增加率偏高，研判藥劑傳輸不易



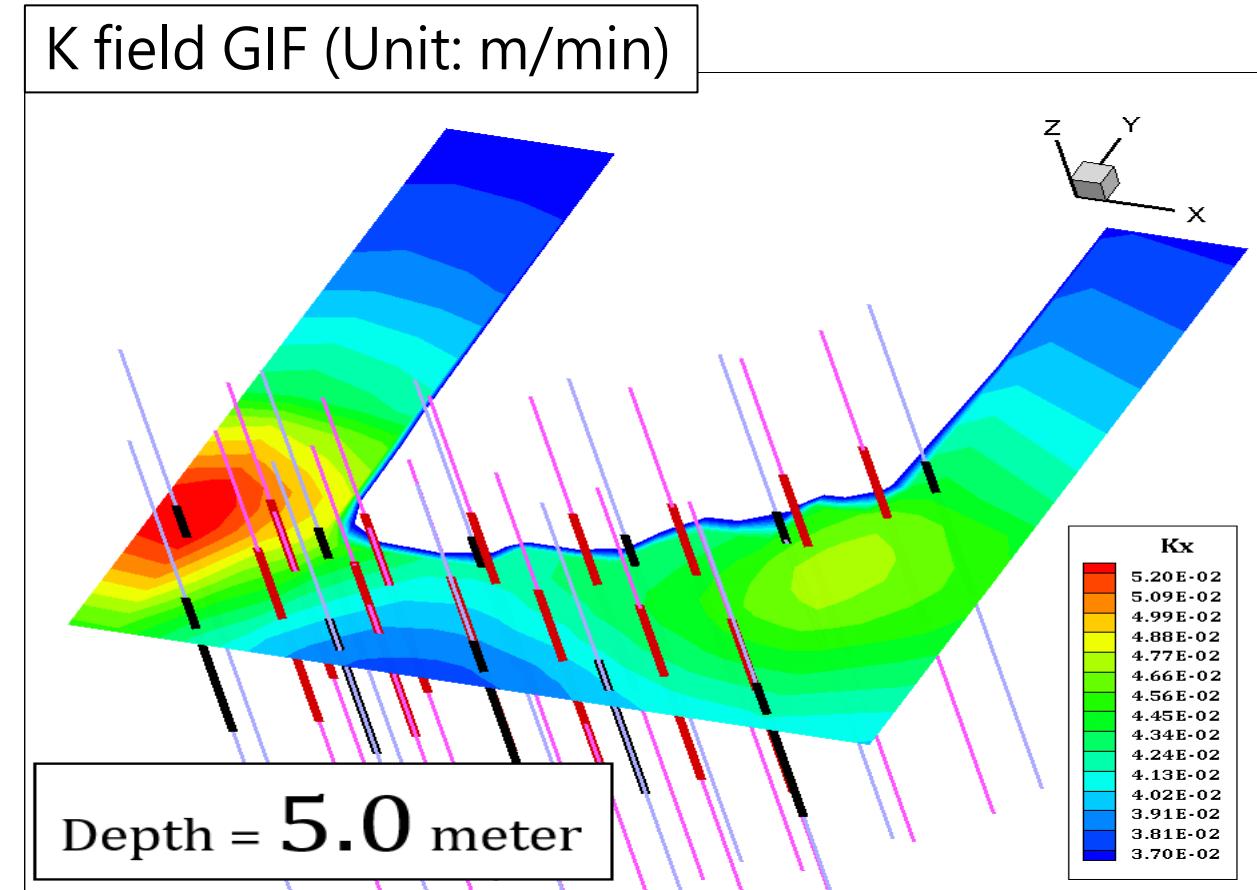
TL-CHERT成果顯示在高K區導電率變化範圍較大，且增加率較低，表示在相近的藥劑量傳輸範圍較廣，水平傳輸現象較顯著



# 整治評估—藥劑傳輸分布預測



- ❖ 場址K值隨深度增加有逐漸增大趨勢
- ❖ 兩個較為高K值的部分，分別為鋼板樁前面部分與鋼板樁轉彎處的位置
- ❖ 注藥最深位置在7.66 m，因此展示到地表下7.66 m



04

# 高度異質性場址 整治評估



# 某含氯污染場址

## ❖ 場址背景介紹

- 大型含氯污染場址模場試驗
- 污染物：1,2-DCA、VC，濃度達數十mg/L ( 1,2-DCA最高超標達1,200倍；VC最高超標達700倍 )
- 低滲透性滯水層，地質屬砂、坋黏土互層
- 地下水位約地下4 m，污染深度約地下17.5-31.5 m
- 污染熱區範圍：12 m ( 長 ) × 12 m ( 寬 ) × 14 m ( 厚 )
- 整治方法：加強式厭氧生物復育法
- 整治時間：6個月，停機後3個月複驗



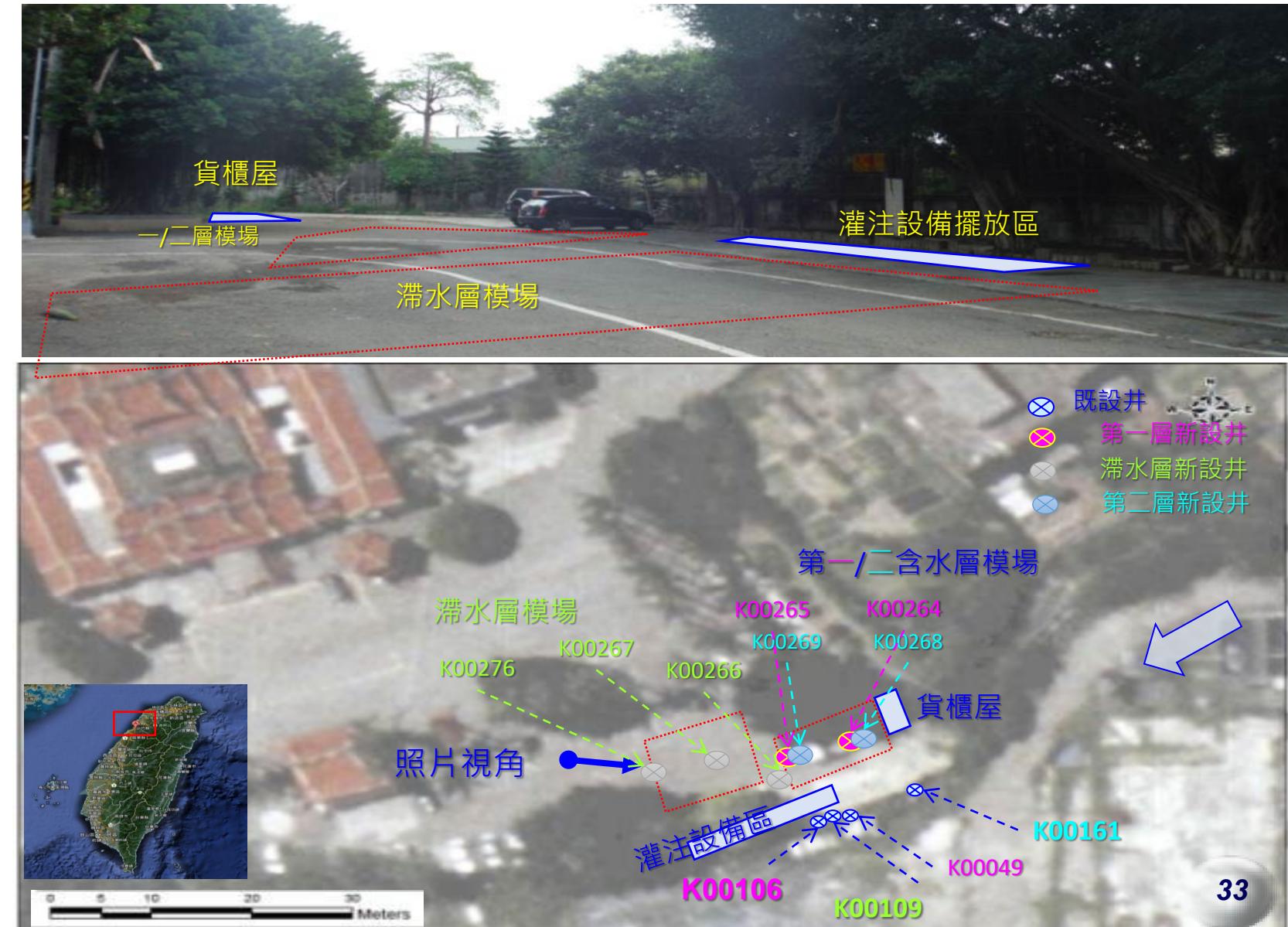
# 現場環境配置示意

## ❖ 地理位置

- ▶ 北部某工業區西側
- ▶ 某宮廟前空地

## ❖ 模場規劃

- ▶ 鄰近過去既設監測井
- ▶ 三處試驗區（一、二含水層二區，滯水層一區）
- ▶ 各含水層試驗規劃
  - **第一含水層**：電極電解產氫 / 氧生物降解試驗；必要時灌注藥劑（加強式現地生物厭氧 / 好氧降解法）
  - **滯水層**：3階段多深度灌注生物基質藥劑（加強式厭氧生物複育）
  - **第二含水層**：3階段多深度灌注生物基質藥劑（加強式厭氧生物複育）





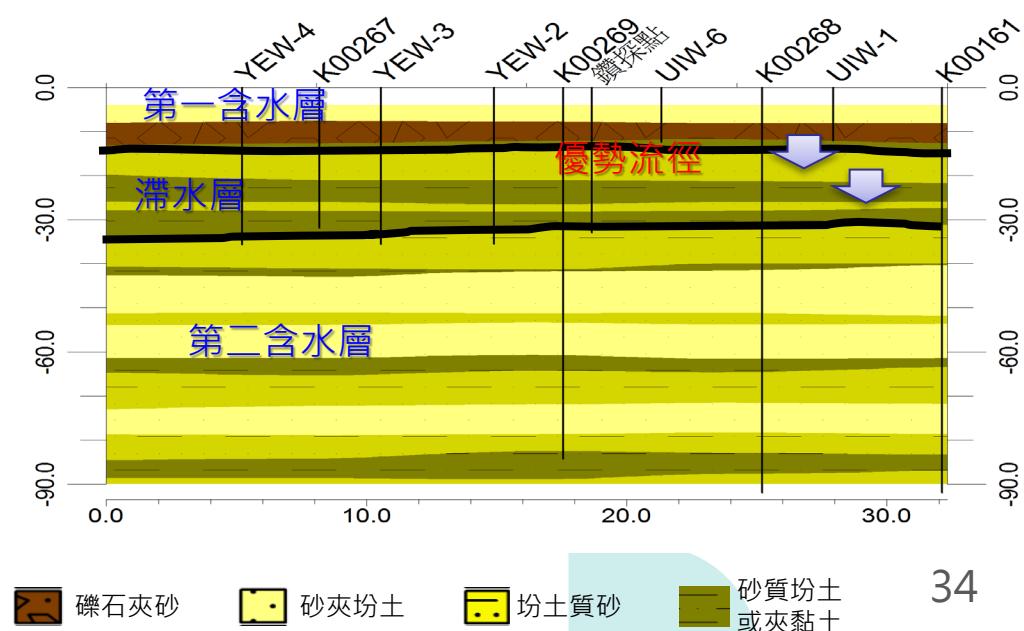
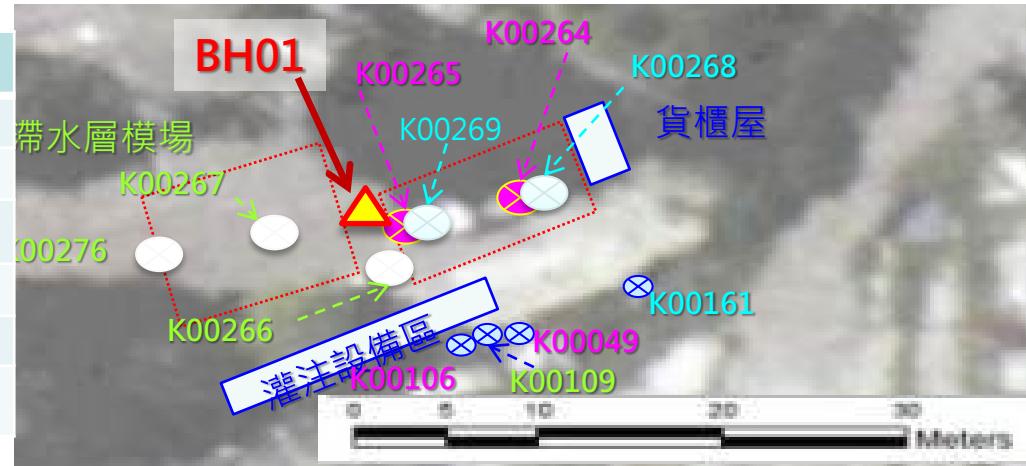
# 滯水層細部水文地質

## ❖ 水文地質補充調查

- 地質鑽探物性分析
- 地電阻影像法探勘
- 多深度水文試驗K值
- 多深度單井流速流向測定
- 建立模場區量化分層概念

各樣品DHC菌群量

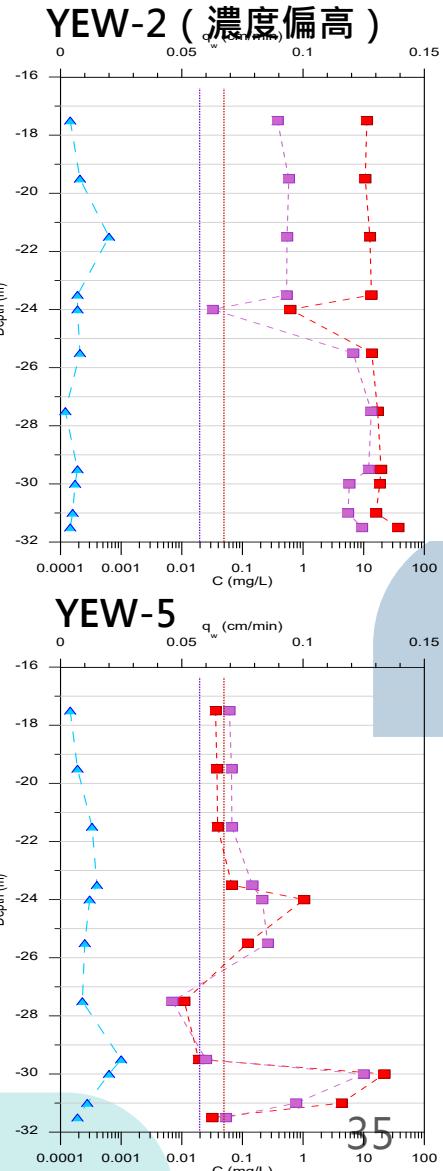
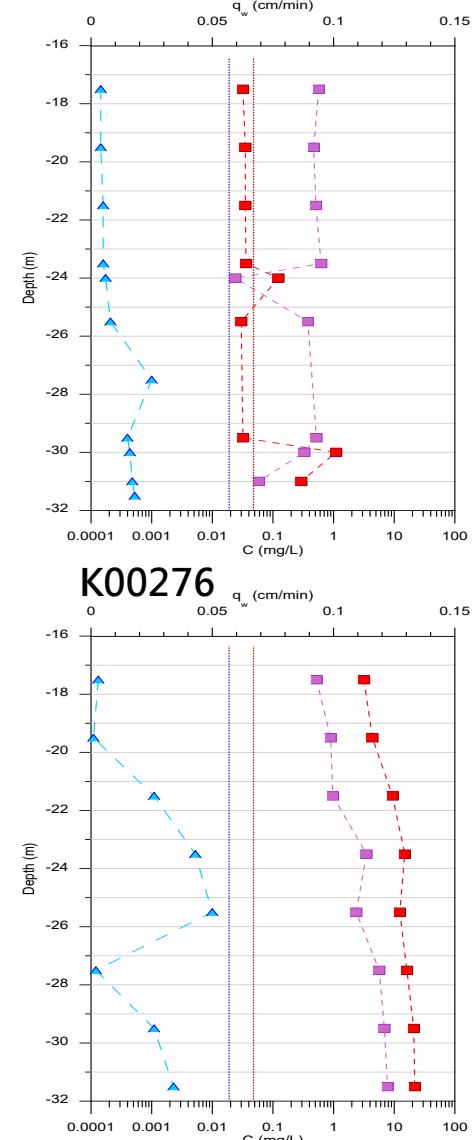
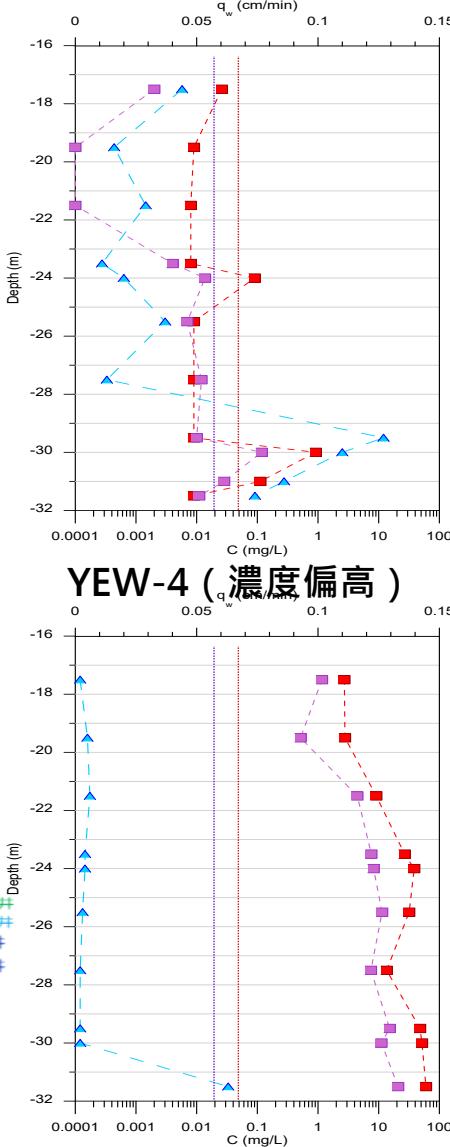
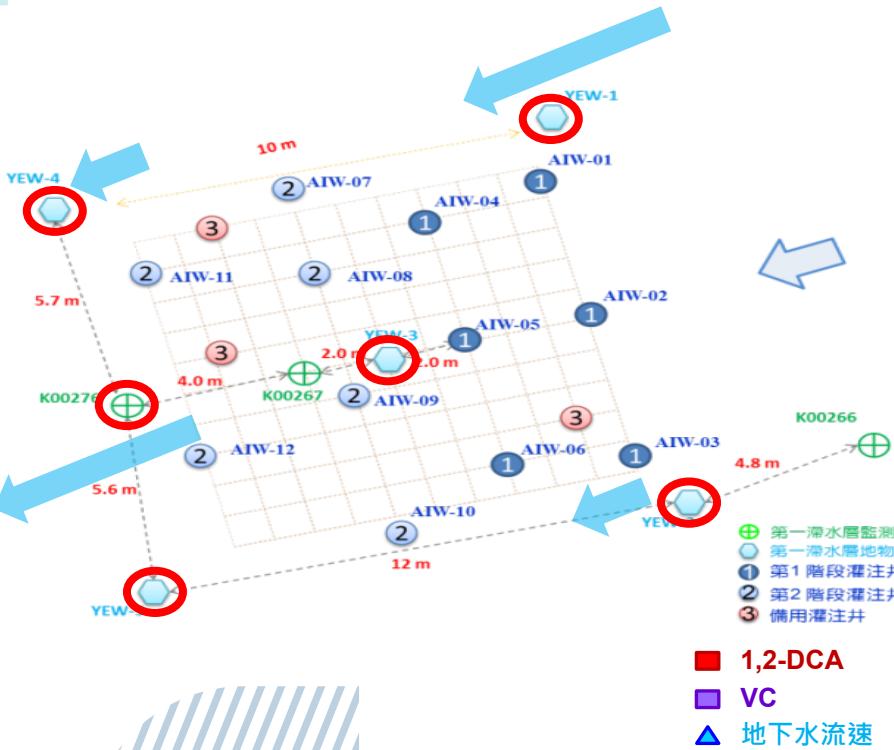
地下水樣本編號	DHC菌群量 (gene copies/mL)
K00161	$3.55 \times 10^3$
K00109	$5.37 \times 10^4$
土壤樣本編號	DHC菌群量 (gene copies/g)
K00266-1 (17.0 m)	$1.87 \times 10^5$
K00266-2 (20.0 m)	$8.55 \times 10^4$
K00266-3 (25.0 m)	$2.00 \times 10^5$
K00266-4 (29.5 m)	$7.41 \times 10^5$





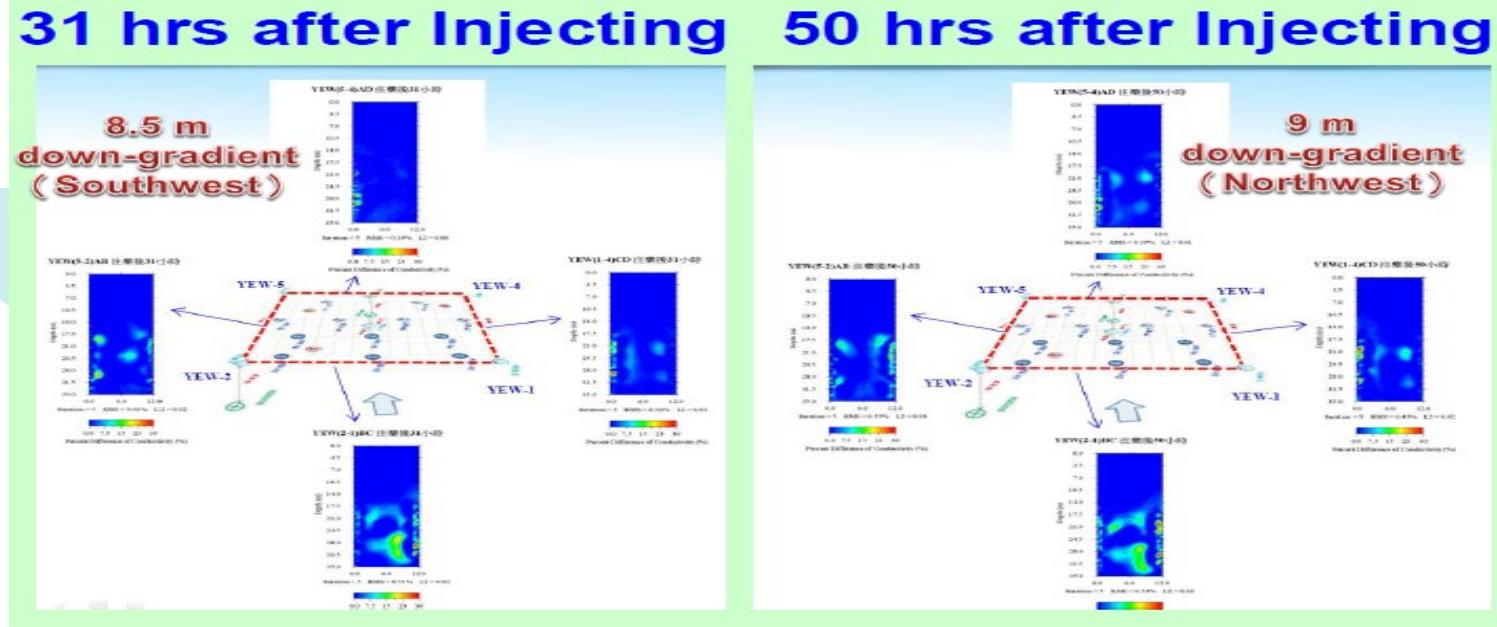
# 污染濃度與流速關係

- ❖ 6口井以YEW-1(上游)、K00276(下)流速較高；YEW-2(上游)、YEW-4(下游)流速較低
- ❖ YEW-1、YEW-5污染物濃度大致與流速成反比





# 灌注成效評估—TL-CHERT

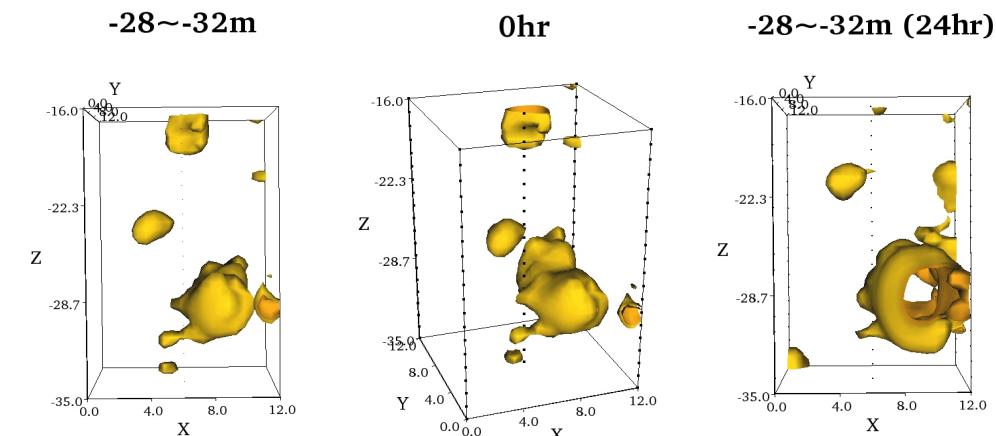


- ❖ 細砂層水平傳輸達4-8 m，坋黏土層水平傳輸達1-3 m
- ❖ 西南側下游地質滲透性明顯優於西北側
- ❖ 宜加強西北側附近灌注；減緩西南側附近灌注率

❖ 地表下30公尺剖面



❖ 3維CHERT展示 (0,24 hr)



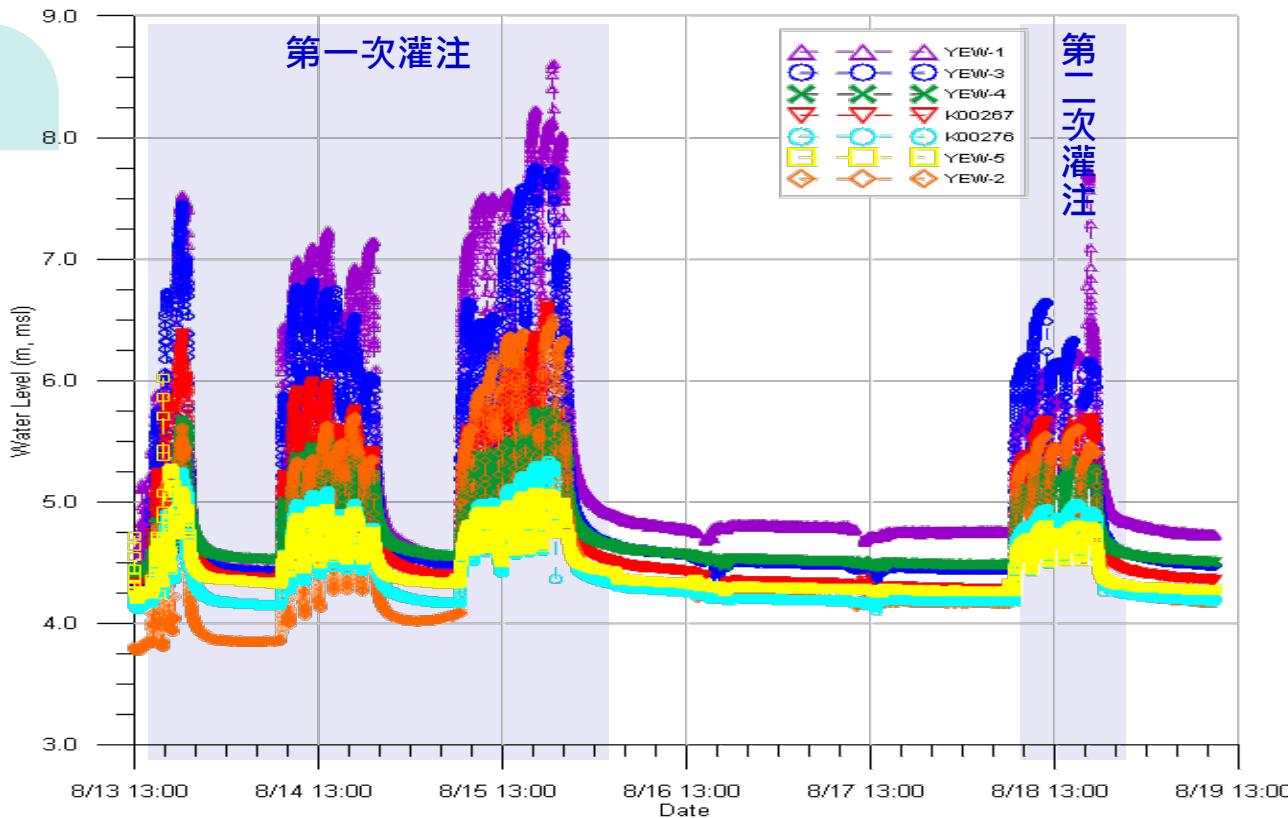


# 灌注成效評估—水變變化

❖ 灌注過程各井水位因灌注壓力而升高

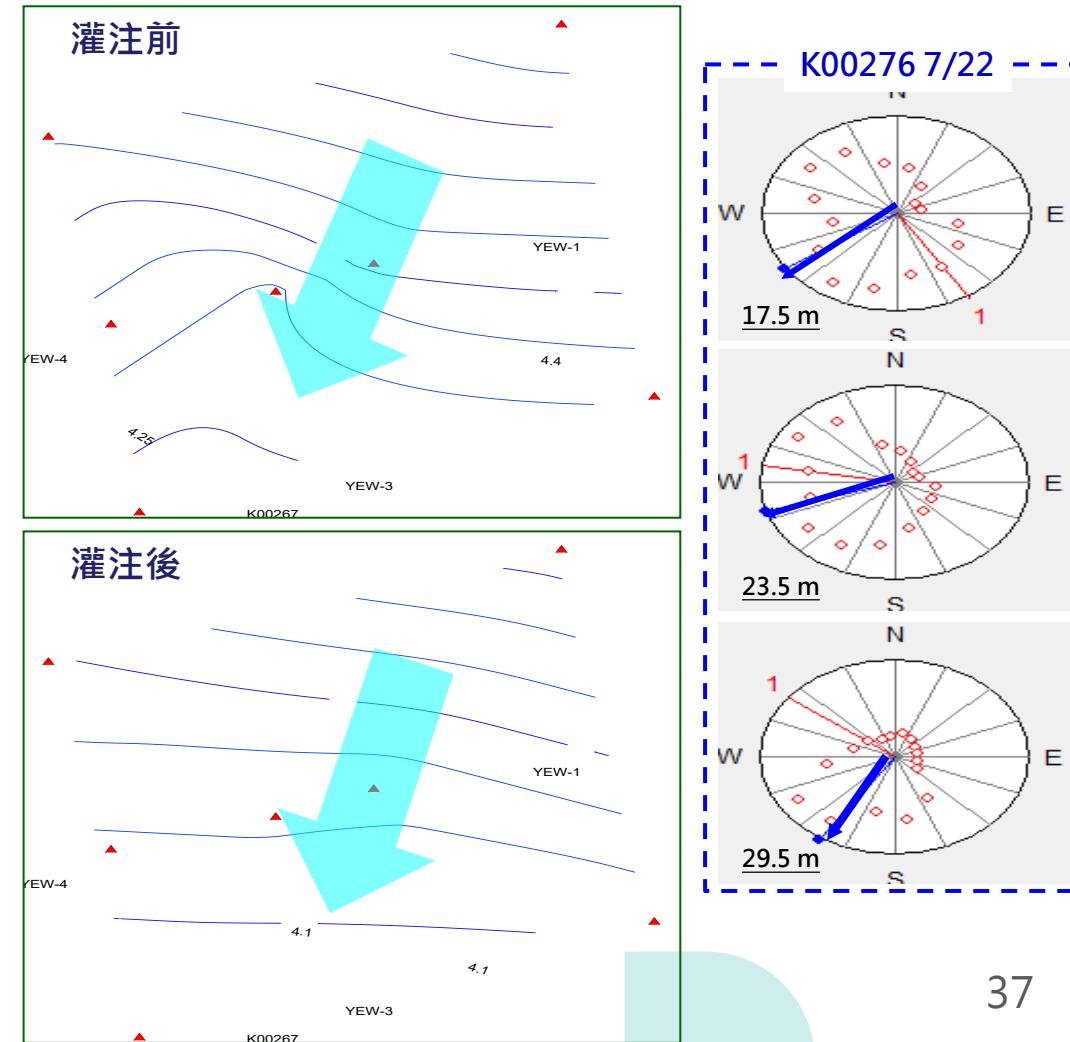
→ YEW-1-3、K00267距灌注孔較近，影響較明顯 (2-3.5 m)

→ YEW-4,5、K00276距灌注孔較遠，變化約1 m



可根據各井水位響應變化推求不同方向傳輸性

❖ 灌注前後試驗區流場皆朝西南方向  
與CHERT監測結果相同

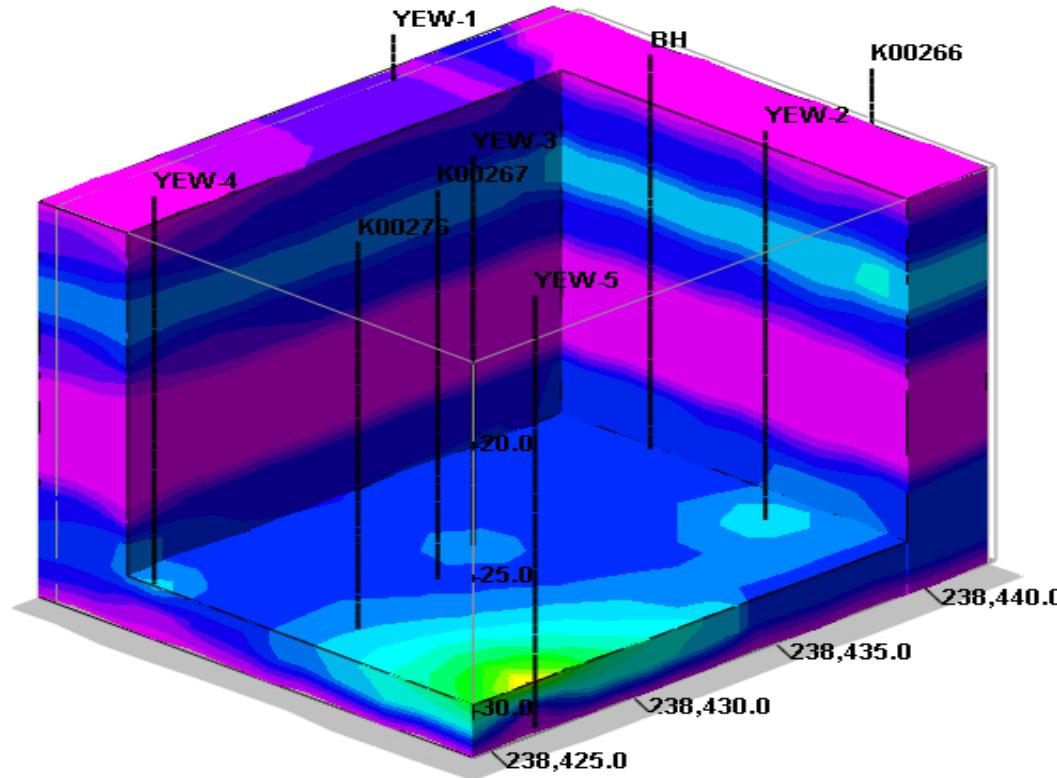
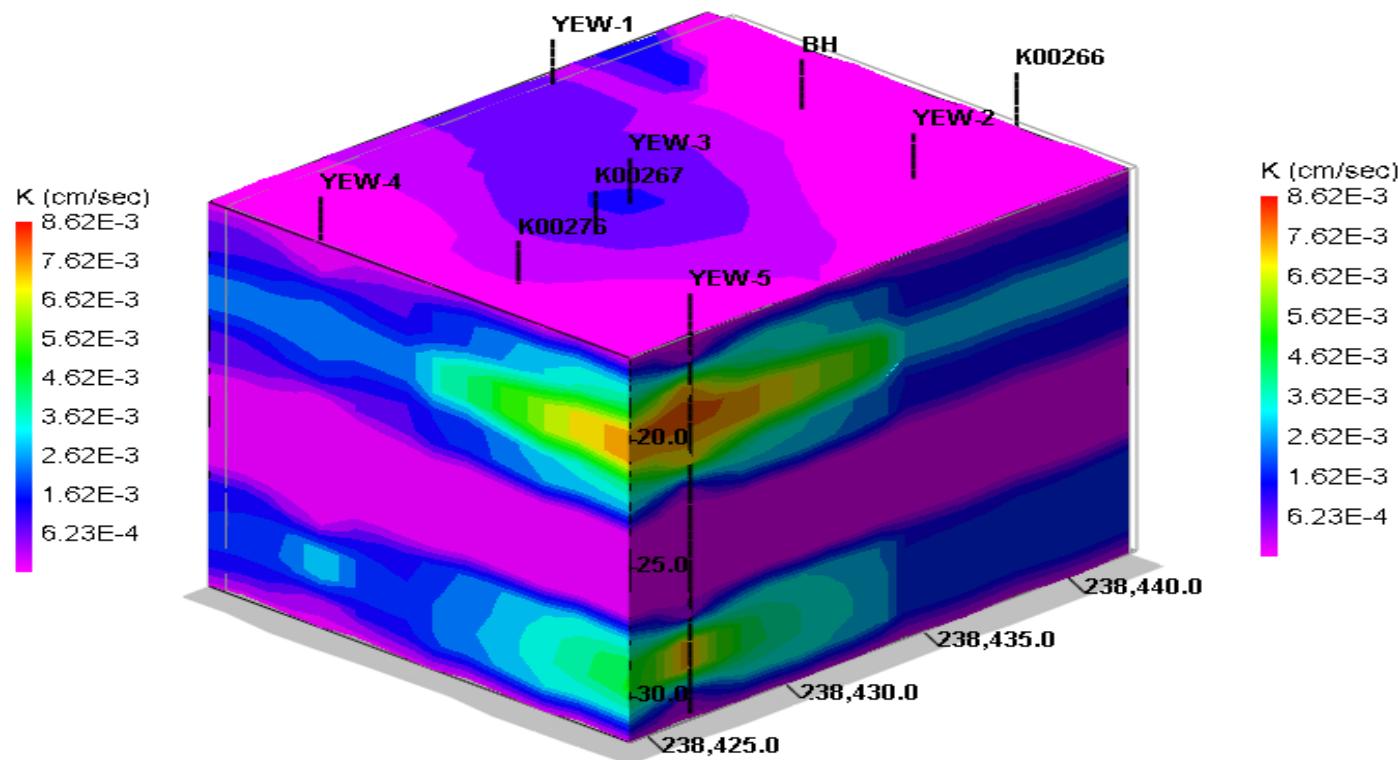




# 灌注成效評估—更新地質模型

## ❖ 三維地質量化模型

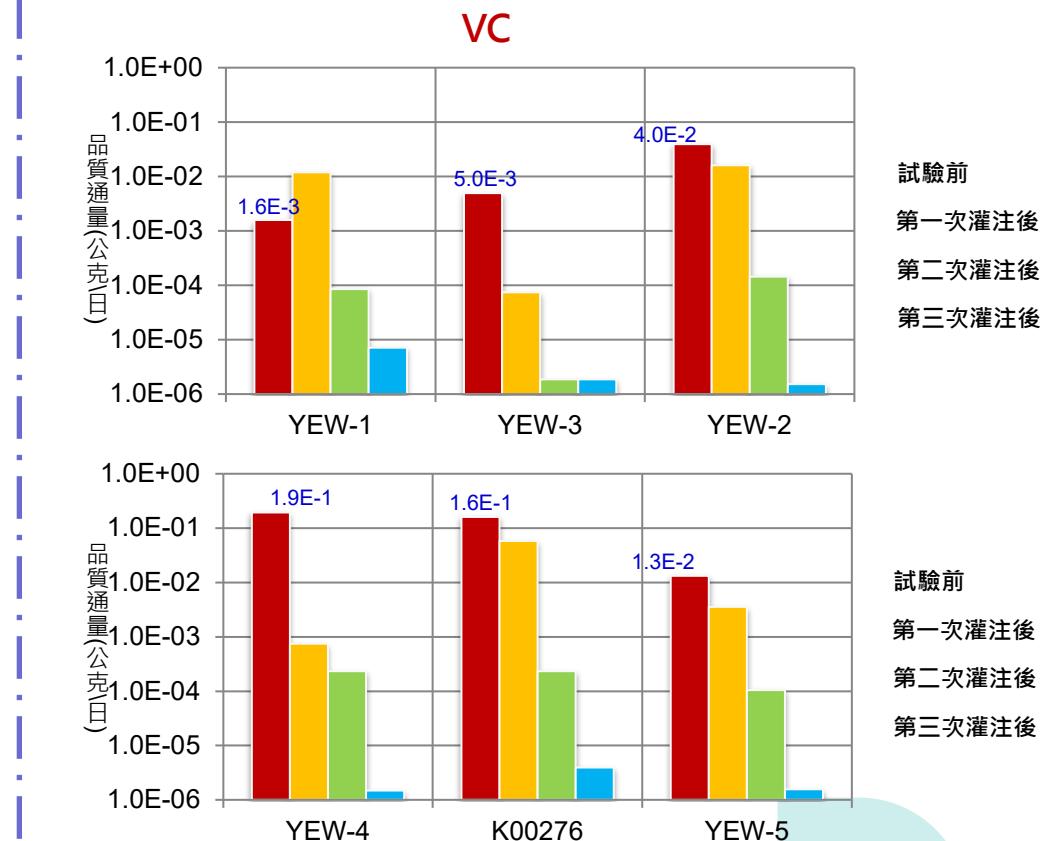
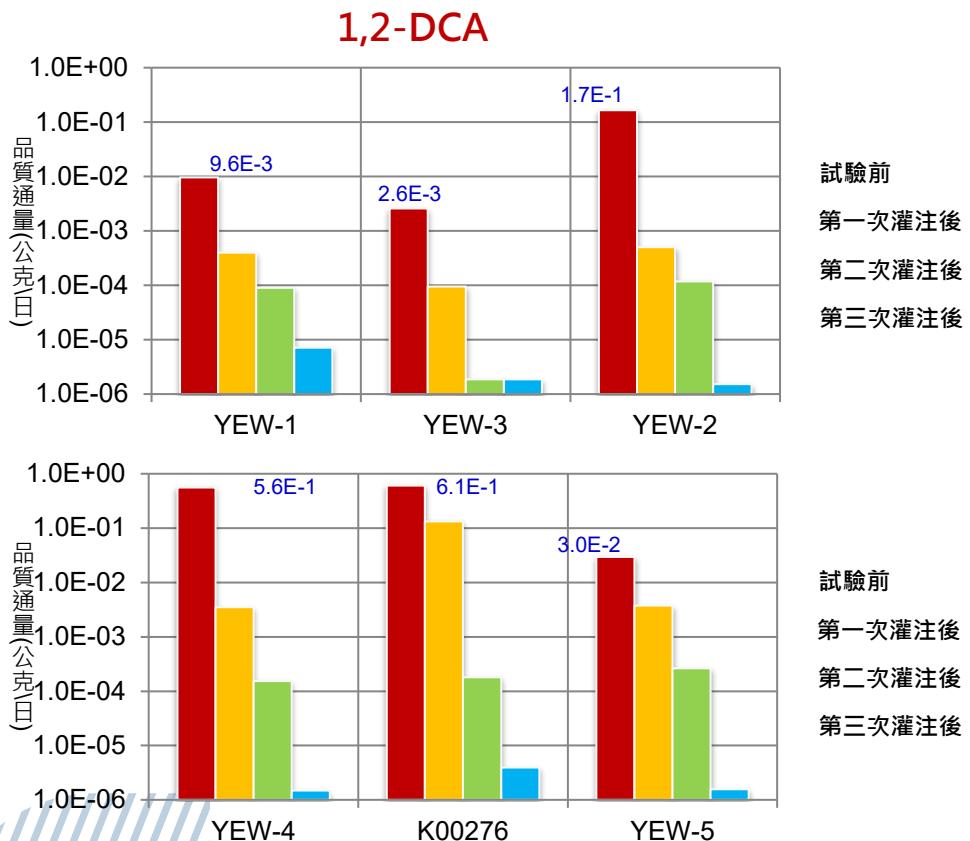
- 17.5-31.5 m ( 8 個深度/口 ) 進行MLST試驗，結合物性分析、井測及地電阻轉換資料等，建立先導試驗區 K 值量化模型
- YEW-5 到 K00276 附近為 K 值最高區域，應為滯水層主要優勢流徑方向





# 品質通量變化

- ❖ 6口井污染物質量通量（算術平均）：1,2-DCA初始 $9.6 \times 10^{-3}$ 至 $6.1 \times 10^{-1}$  g/day；VC初始 $1.6 \times 10^{-3}$ 至 $1.9 \times 10^{-1}$  g/day
- ❖ 6口井經改善後1,2-DCA及VC品質通量均降至 $1 \times 10^{-5}$  g/day以下



# 結語與建議

05



# 結論與建議

## 1. 地下環境細部調查之重要性

- ① 第一時間採智慧表徵調查更具價值
- ② 初始花費10元調查場址，水文地質應占9元；隨著整治進行，生化資訊則應持續調查掌握（Nyer and Kratzmeyer, 2000）
- ③ 複雜地下環境同時結合各式調查技術有其必要性

## 2. SCM觀念的應用

- ① 靈活運用成熟調查技術，將調查視為一種整治投資
- ② 精確整治需以智慧表徵調查為前提，能掌握污染物與地質間的關係
- ③ 持續發展高解析調查技術

## 3. 空間—時間調查評估之重要性

- ① 多深度採樣與質量通量觀念可大幅降低單點採樣分析之誤差
- ② 結合跨孔式井測與水力掃描技術協助評估空間—時間地下環境資訊

敬請指教 Thank You

