

由日本福島核子事故 ——談沸石運用於環境復育

作者簡介



高雪君中校，陸軍官校87年班(正67期)、化校正規班90-1期、國防大學理工學院應化所94年班；曾任排長、教官、連長、中隊長、營參謀主任，現任陸軍化生放核訓練中心化學課程組主任教官。

提要》》》

- 一、2011年3月11日，日本福島第一核電廠因地震引發海嘯造成核反應爐機具受損、氫氣爆炸、放射性物質釋放等一連串意外，導致北美、歐洲地區都測得微量輻射污染。應變期間為冷卻反應爐而注入的冷卻水，亦排放洩漏流入大海，隨強勁海流遠布太平洋，造成放射性物質大量散布，對人類健康及環境生態破壞威脅極大。
- 二、日本政府緊急撤離20公里範圍內居民，距離岸邊30公里外海海水銫-137濃度約 $1,000\sim 10,000\text{Bq/m}^3$ ，逾1/8農業用水庫及儲水池，底層土壤含超過8,000貝克高濃度放射性銫，再加上銫-137半衰期為30年，會殘存於空氣、水源、土壤或海洋中，故廣大的污染範圍需修復技術實施環境復育。
- 三、藉由蒐整網路、報章新聞、相關期刊等資料，研究日本執行福島核子事故環境復育工作，發現日本政府、民間企業、學者專家皆積極致力於核子事



故災後環境復育工作，期望利用各種方法移除放射性物質並推廣，以擺脫核子事故陰霾。

四、經研究後發現天然沸石早在1979年三哩島及1986車諾比核子事故中，成功地被使用。在福島核子事故中亦見其蹤影，報導曾指出日本愛媛大學教授逸見彰男，提出人工沸石可成功吸收土壤中九成銻。本文期藉沸石組成結構、物理化學特性、主要用途及其運用之介紹，提供我國軍環境污染復育工作參考。

關鍵字：放射性物質消除、沸石、環保明星

前言

2011年3月11日東京電力公司的福島第一核能發電廠因地震引發海嘯，導致電廠發生第七等級最嚴重核子事故，大量放射性物質飄散大氣中。為搶救核電廠灑水降溫產生之廢水與侵入反應爐的地下水，皆含大量放射性物質，持續注入海洋，影響範圍廣大，對人類身體健康及環境生態造成威脅。

日本官方估算放射性物質釋放量最高為 63×10^{12} 貝克，¹散布環境之放射性物質對人體有害者，包含放射性銻-90、碘-131、銻-134及銻-137，由於放射性銻-137半衰期30年，會一直存在於環境中，對日本民眾生活、健康與廣大生態構成嚴重威脅，影響範圍廣大。

面對核子事故所造成的放射性物質污染，日本政府與地方自治團體、研究機關、民間企業、非營利團體等，均積極研究發展種植植物、中孔物質吸附、竹炭吸

附等環境復育技術，其中以沸石具可移除土壤及水中放射性物質、重複使用等優點，殊值我國參考借鏡。

本文主要目的在藉沸石組成結構、物理化學特性、運用，研究開發成果，提供我國軍在執行環境復育工作參考。

災後環境復育現行作法

在核子事故後，受放射性物質污染之範圍廣大，日本政府致力於環境復育工作，並由日本環境部(MOE)成立示範計畫，將福島核子事故中受污染區域分成12個不同污染等級的鄉鎮區域，執行包括土壤、建築物、道路、公園、水、森林等的除污技術示範(如圖一)。

放射性物質除污技術中，因除污對象不同，使用技術各異(如表一)，計有高壓清洗法、剷除法、排土客土法、沸石散布法等(如圖二)。

在傳統的除污技術上會產生大量廢土及污水，需大量的存放空間，因此，日

1 劉明哲，〈核災危害認知與應變策略〉《環保簡訊》，第23期，民國103年6月20日，頁4-1。

圖一 日本福島事故後環境污染清理示範規劃(12個示範點)



資料來源：環境省，josen.env.go.jp/C10101379_2.pdf，2015年3月20日下載。

本各界皆積極進行放射性物質環境污染的修復技術開發與研究，希能有效處理解決如此大規模的污染，並減少廢土及污水的產生量。如種植植物(向日葵、過江藤)吸收

土壤中的放射性物質、細菌移除法、普魯士藍吸附法、中孔物質吸附法、竹炭吸附法、沸石吸附法等，分述如下：

一、種植植物及養殖藻類

(一)向日葵：日本農林水產省在福島一廠方圓20公里警戒區外側，輻射量較高的計畫性疏散地區種植向日葵(如圖三)及油菜籽，以吸收土壤中的放射性物質。據悉，鉀與肥料中的鉀性質相似，容易被向日葵吸收。²

(二)過江藤：為一多年生匍匐草本，別名水黃芹。日本田中建設公司2013年8~11月，在福島縣南相馬市的5個地點種植過江藤，調查是否能吸收土壤中的放射性銫。結果發現，過江藤能吸收土壤中1/64的放射性銫，而向日葵只能吸收約1/2000

的放射性銫。即過江藤吸收放射性銫效率，是向日葵的約30倍。³

(三)藻類：理化學研究所和筑波大學研究小組，收集約200多種分布於日本國

2 〈日本擬種植向日葵油菜花以淨化受核污染農田〉，騰訊網，xw.qq.com/news/20110516000969，2015/2/20。

3 藍建中，〈過江藤能高效吸收放射性銫〉，新華網，<http://m.zwbk.org>，2015/2/15。



表一 福島縣表面除污技術

項次	對象	除污技術概要	特徵	表面劑量率 ($\mu\text{Sv/h}$)減低率%
1	屋頂	高壓沖洗	以7.5MPa高壓沖洗	9~47
2	壁(粉刷以外)	刷洗	刷洗、紙巾表面擦拭	0~42
3	壁(粉刷)	擦拭	紙巾表面擦拭	0
4	雨水排放道	刷洗	通道青苔，砂土堆積物除去後再刷洗，表面紙巾擦拭	9~97
5	排水溝	刷洗	青苔，砂土堆積物除去後再刷洗，表面紙巾擦拭	32~95
6	庭院	剷除、客土、轉壓	鋤土3~5cm，客土再轉壓	26~55
7	植物	修剪	枝葉修剪	3~6
8	側溝	刷洗+高壓沖洗	青苔，砂土堆積物除去後刷洗再以7.5MPa高壓沖洗	20~73
9	家屋停車場、道路	刷洗+高壓沖洗	青苔，砂土堆積物除去後刷洗再以7.5MPa高壓沖洗	32~65
10	草地	剷除法	除草	15
11		剷除法	除草+鋤土(3cm)	45
12		剷除法+客土	除草+鋤土(3cm)+客土(3cm)	62
13	農地	耕作	耕作	17
14		剷除法	鋤土(3cm)	43
15		客土	直接覆土(3cm)	55
16		剷除+客土	鋤土(3cm)+客土(3cm)	61
17		沸石散布	沸石散布+攪拌	5
18	森林	去除法	去除落葉	21
19		去除+枝打	去除落葉+枝打	36
20	道路	刷洗+高壓沖洗	堆積土除去，刷洗淨、以7.5MPa高壓水洗淨	49~53
21	道路側溝用水路	刷洗+高壓沖洗	刷洗淨、以7.5MPa高壓水洗淨	23~39

資料來源：日本原子力學會，<http://www.aesj.or.jp/information/20120616nakaya.pdf>，2015年3月20日下載。

內河川和海域的藻類，放在含有不會釋放輻射的銫的水槽裡培養，測試其吸收率。結果發現真正眼點藻類為89.2%，青萍

為66%。在碘和銫的部分，藍菌類的「地木耳」可去除40%以上⁴的銫。藻類乾燥後的體積僅為原來的1/100。只需陽光

4 郝致均，〈日本開發多樣化清除輻射污染之新技術〉，每日新聞，<http://www.most.gov.tw/int/ct.asp?xItem=1011130022&ctNode=783&lang=C>，2015/2/15。

圖二 日本福島事故後環境污染清理示範



資料來源：環境省，josen.env.go.jp/C10101379_2.pdf，2015年3月20日下載。

和藻類的除污方式成本低廉，非常具有優勢。

二、細菌移除法

廣島大學Ken Sasaki 教授等人，從事以phototrophic bacteria細菌作移除金屬相關研究，使用銻2.5克與細菌90克溶入水中作實驗，結果在24小時內銻的濃度降為原來的1/12，第3天就完全消失了，於細菌上的陰離子可吸引陽離子，故移除銻是可行的。同樣效應在土壤中也確證。⁵

三、普魯士藍吸附法

普魯士藍(Prussian blue)，化學名稱：亞鐵氰化鐵，具有立體方晶格狀的結晶結構，可將銻吸附在其空隙內。

(一)2012年5月31日東京大學生產技術研究所迫田章義教授等人，將可吸收銻的藍色顏料普魯士藍微粒固定到布上，製成長60厘米、寬40厘米的薄布，能99%地吸附溶解在10升水中的10毫克銻，再將布用鹽酸溶液浸泡，則幾乎能100%地回收

銻。⁶

(二)日本「物質與材料研究機構國際奈米構造研究基地」的山內悠輔等人，採用蝕刻(etching)方法在普魯士藍結晶上打孔，開發中孔結構「普魯士藍」(如圖四)，其1公克的表面積為330平方公尺，是市面上普通普魯士藍的10倍以上。由於表面積增大，對銻吸附量也提高10倍以上，解決長期以來對銻的吸附效率不高這個技術難題，成功提升了吸附銻的能力。⁷

四、中孔物質吸附法

(一)所謂中孔(mesoporous)物質，係指擁有大量孔徑2~50nm的多孔材料。其特點在擁有許多小孔，所以表面積大，孔內會發生複雜多樣的化學反應。亦因中孔大小的細微小孔，讓吸附的分子聚集在一起，無法自由移動，其排列和運動受到限制。

(二)「物質與材料研究機構(NIMS)元素戰略材料中心」的研究員謝里夫·埃爾

5 何偉，〈日本福島事故的省思與經驗回饋(下)〉《台電月刊》，352期，民國101年4月，頁31。

6 〈日本開發出「捕輻射」粉末〉，星洲日報網，<http://news.sinchew.com.my/topic/node/210242?tid=12015/2/15>。

7 佐藤成美，〈「物質與材料研究機構」細微小孔捕捉放射性物質〉，<http://www.nippon.com/hk/features/c00505/>，2015/2/15。

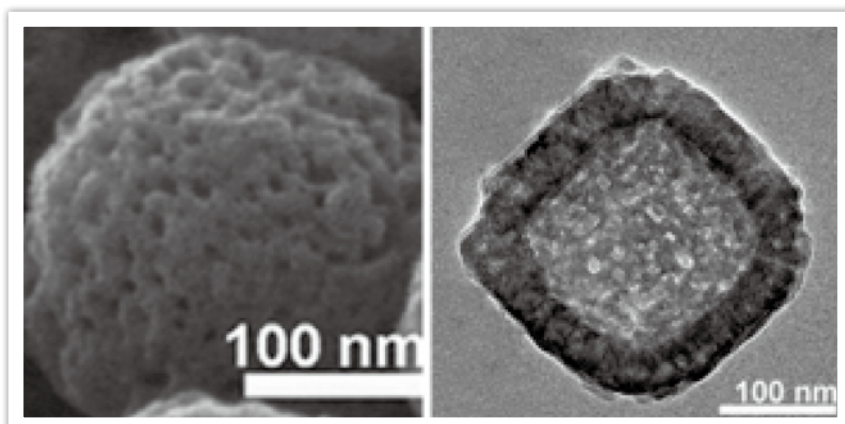


圖三 日本利用向日葵消除土壤中的放射性銫實驗園



資料來源：騰訊網，xw.qq.com/news/20110516000969，2015年2月15日下載。

圖四 中孔普魯士藍的表面結構(左)與內部結構(右)



資料來源：日本網，<http://www.nippon.com/hk/features/c00505/>，2015年2月15日下載。

・薩夫提，以「二氧化矽」為材料，合成中孔二氧化矽吸附材料。由於具有極佳的選擇性只捕捉特定物質，即使在含有

部很難檢測到放射性銫。

(四)若放射性銫濃度達到每升約1,200貝克，用10公斤竹炭，能吸附36萬升污水

鹽分和礦物質的海水中，可將清除對象鎖定在放射性物質上。亦可借助化學反應呈色變化，檢測放射性物質(如圖五)。例如，吸附碘，該材料就會變成綠色。⁸

五、竹炭吸附法

(一)2013年11月25日日本東京大學教授野浪亨等2人，使用特殊方法焚燒竹子，製成可強力吸收放射性碘和銫的新型竹炭。可應用於清除福島第一核電廠事故造成的放射性污染。⁹

(二)在溫度達攝氏660度的條件下，對竹子進行連續6小時的焚燒，其表面形成很多小的孔穴，這些孔穴能吸附放射性物質，製出高效吸附放射性物質的竹炭。¹⁰

(三)製作雙層麻袋，在兩層布之間夾雜這種新型竹炭，將具放射性銫污染的土壤裝入沙袋後發現，其外

8 〈在日本發現的介孔物質〉，新華網，http://news.inhuanet.com/tech/2013-11/26/c_125762651.htm，2015/2/15。

9 〈一種新型竹炭能有效吸附放射性碘〉，新華網，http://news.inhuanet.com/tech/2013-11/26/c_125762651.htm，2015年2月15日。

10 同註9。

圖五 中孔二氧化矽(左)吸附材料的顏色隨吸附物質不同而變化(右)



資料來源：日本網，<http://www.nippon.com/hk/features/c00505/>，2015年2月15日下載。

中的放射性銫。¹¹

六、沸石吸附法

(一)2011年4月19日日本金澤大學教授太田富久等人，將天然沸石礦物和化學物質混合製成粉末，可有效捕捉溶解在水中的放射性碘、銫、銂並使之沉澱。其吸附放射性物質效果良好，放射性碘濃度即使達到100ppm也能清除。¹²

(二)2012年7月14日，日本愛媛大學農學院教授逸見彰男等人，以火力發電廠燃燒後的煤灰，加上氯化鈉及氫氧化鈉等物質，製造出人工沸石結晶「NaP1型沸石」，這種結晶體不但具有磁性，每顆結晶上有0.36奈米的小孔，大小正好和銫原子差不多，可集中吸附銫原子，¹³提高輻射污染土壤的除污效率(如圖六)。

1.「NaP1型沸石」，可吸收土壤中九成的放射性物質銫，每千公克的土壤中投入100公克沸石攪拌10分鐘後，即完成吸附，接著再以磁鐵裝置回收吸附放射性銫的沸石結晶，除污後的土壤則可放回原來的土地。¹⁴

2.隨後在福島縣川俣町及飯館村進行實驗，川俣町每千公克土壤中的放射性銫，從1,700貝克降到了121貝克，飯館村從13,000貝克降到了1,360貝克，土壤中的放射性物質減少了九成。¹⁵

3.與造紙公司合作，開發出加入人工沸石的農用覆蓋布，並用來覆蓋稻田，結果川俣町生產的白米每千公克含放射性銫原本為51貝克，覆蓋後降為7貝克以下。¹⁶

(三)日本近畿大學兼職講師森村毅等

11 同註9。

12 同註8。

13 〈日本開發出吸附土壤中放射性物質的新方法〉，新華網，http://news.xinhuanet.com/world/2012-07/14/c_112437919.htm，2015年2月15日。

14 〈廉價人工沸石可吸收土壤9成銫〉《自由日報》，<http://www.clue.com.tw>，2015年2月15日。

15 同註14。

16 同註14。



人，開發出含有礦物沸石的建築材料「沸石鈣灰漿」。¹⁷

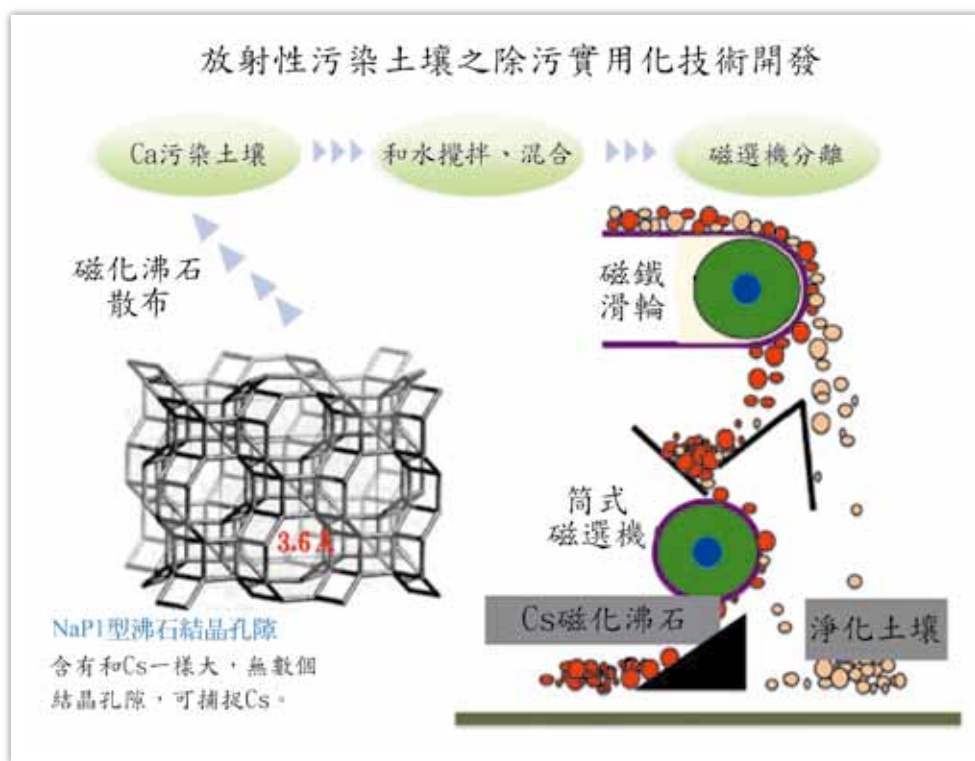
1.沸石鈣灰漿在凝固後能大量吸收溶解在水中的放射性銫，可用於建造存儲放射性污染物的設施或者淨化污水的過濾器。由於其凝固後擁有無數極小的孔洞結構，即使過濾含固體雜質的污水，也不易堵塞。

2.當含有放射性銫的污水通過新型沸石鈣灰漿凝固體時，銫和含有銫的物質就能被吸收和過濾。由於具有容易滲水等性能，進行吸收含銫水溶液實驗時，成功吸收水中99%以上的銫。

七、小結

蒐整發現上列之作法均有侷限性，除沸石可用於廢土及污水之處理，去除放射性碘、銻及銫，通用性較廣。1979年三哩島及1986年車諾比的核子事故中，沸石成功地被使用在清除陸地及海洋中的放射性物質上。在車諾比事故中，超過50萬噸的沸石被投入反應爐以吸收放射性金屬；

圖六 NaP1型沸石吸收土壤中放射性物質—銫



資料來源：遠見彰男，放射能污染土壤的除染實用化技術開發，2013年。

災區附近的牛隻也被餵食沸石以清除牛奶中的輻射離子；受到污染的土地也因沸石才能完全沒有銫或是銻等放射性物質殘留；沸石也被用來清除三哩島核電廠部分核心熔毀之後附近的水域。¹⁸

此次福島核子事故災後環境復育，亦見沸石之運用，除了事故剛發生時，東京電力公司於第一至第四反應爐之入口監視管制間前方，放置裝有沸石大沙袋(如圖七)，以防放射性物質擴散外，產官學界更多面向的研究與開發沸石用於除放射

17 劉雪婷，〈日本開發吸收放射性銫的建築材料——沸石鈣灰漿〉，新華網，<http://big5.ce.cn/gate/big5/hj.ce.cn/news/2012-06-07/11274.htm>，2015年2月20日。

18 〈沸石有效幫助輻射污染後排毒〉，養身保健網，http://www.naturalnews.com/031873_Zeolites_radiation.html，2015年2月15日。

圖七 沸石砂包設置地點(左)投入沸石的砂包(右)



資料來源：原子力規制委員會，<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/files/en20110416>，2015年3月8日下載。

性物質的技術。故就沸石資料加以蒐集，研究其組成結構、物理化學特性及其運用，以作為我執行環境復育之參考。

沸石特性與運用

沸石為1756年由瑞典礦物學家克朗斯提(Cronstedt)發現之低密度軟性礦石，由氧化矽、氧化鋁與鹼在水汽壓力下作用形成的結晶性矽鋁酸鹽礦物，其結構中含有大約20%的水分，水分會受熱而失去，當溫度降低時再吸收，使得它在水中煮沸時會冒泡泡，因此命名為「沸石」。¹⁹

一、化學組成結構

沸石之晶體結構是由鋁氧四面體(AlO_4)與矽氧四面體(SiO_4)兩種單元所建構而成的三度空間網狀架構，其架構呈開放性，並具有相互連通的空間或管道(如

圖八)。因堆積方式及矽／鋁原子數比不同，而形成各種不同結構的沸石，²⁰自然界常見且具工業經濟價值的沸石計有斜發沸石、絲光沸石、凌沸石、鈣十字沸石、片沸石、毛沸石、濁沸石等。²¹

其中因鋁原子為三價，呈 AlO_4 四面體時帶負電荷，須仰賴陽離子來中和其電性，這就是為何有陽離子充填在這些空間及管道中，而大量的結晶水亦填充在此。因此沸石的結構式可以寫為： $\text{M}_x/\text{n}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y] \cdot \text{wH}_2\text{O}$ ，其中n為陽離子「M」的氧化數，常見的陽離子有鹼金、鹼土、稀土金屬、銨或氫離子。

沸石骨架結構中含有4、5、6、8、10或12個四面體構成的環面，形成一定大小的孔洞及管道，使得加熱脫水處理過的沸石能選擇性的吸附大小適當的分子

19 江晃榮，〈沸石的奇蹟——向癌細胞說再見〉《樸實文化》，2008年11月5日。

20 李中光、劉新校、陳天予、侯佳蕙合著，〈沸石在廢水處理中的應用：(一)沸石之基本性質〉《環保簡訊》，第19期，頁1-1。

21 〈沸石〉，中國百科網，<http://www.chinabaike.com/z/yj/498545.html>，2015/2/15。



，因此沸石又稱為「分子篩」。同時不同大小的陽離子會使得沸石孔洞的大小、極性隨之改變，分子篩的功用就更富變化(如圖九)。²²

二、物理化學特性

沸石的多孔性特殊結構使其具備有優越的吸附性、離子交換性、催化性和穩定性能，分述如下：

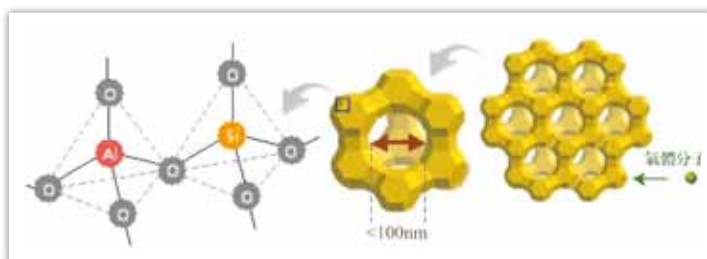
(一) 吸附性能

1. 具有高效的吸附性能：在沸石架構中廣泛分布著孔洞及管道，占總體積的40～50%，²³使其具有很大的表面積，可吸附並儲存大量的分子，因此沸石的吸附量遠遠超過其他物質。越輕的沸石表示其中的孔徑越多，所能吸附的量自然比較多。

2. 具選擇吸附性：在沸石的結構中，陰離子晶格上的負電荷與平衡陽離子的正電荷中心在空間上是不重疊，因此沸石內部具有較大靜電吸引力。由於此靜電力關係，使得沸石對極性、不飽和極易極化分子具有優先選擇吸附作用。²⁴

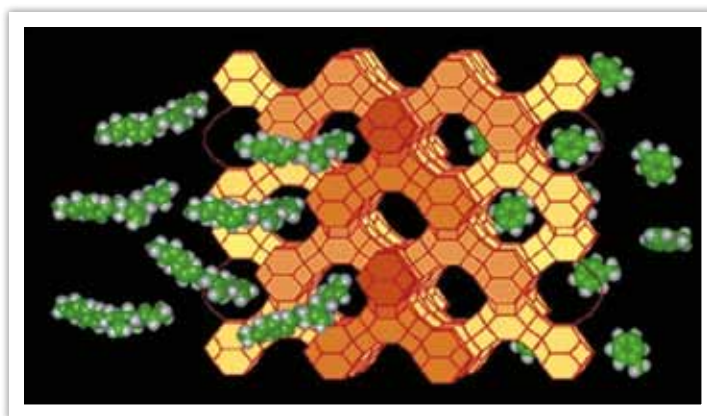
3. 具分子篩性能：沸石之孔穴及孔道，在一定的物理條件下，具有精確而固定的孔徑，天然的沸石孔徑大多在20～80nm²⁵之間，小於這個孔徑的物質能被吸收，而大於這個孔徑的物質則被排除在外

圖八 沸石結構



資料來源：龍騰文化，http://www.lungteng.com.tw/LungTengNet/HtmlEpaper/Scientific/index_133.html，2015年3月20日下載。

圖九 沸石具有規則性的孔洞



資料來源：百度文庫，<http://wenku.baidu.com/view/4b6e8dc7aa00b52acfc7caa4.html>，2015年3月20日下載。

，這種現象被稱為「分子篩」作用。因此沸石具有篩選分子性能。

(二) 離子交換性能

離子交換性能是沸石重要性質之

22 陳威豪，〈神奇寶貝——沸石〉，百度文庫，<http://wenku.baidu.com/view/4b6e8dc7aa00b52acfc7caa4.html>，2015/2/15。

23 〈沸石〉，財團法人核能資訊中心，<http://www.marketplace.com.tw/sell/show-2997699.html>，2015/2/20。

24 陳彬、吳志超，〈沸石在水處理中的運用〉《工業水處理》，第26卷第8期，2006年8月。

25 〈會冒泡的石頭〉，龍騰文化，http://www.lungteng.com.tw/LungTengNet/HtmlEpaper/Scientific/index_133.html，2015/2/15。

一，在沸石晶格的孔穴中 K^+ 、 Na^+ 等金屬陽離子和水分子與矽鋁氧晶格維繫力較弱，極易與周圍的陽離子發生交換作用，交換後的沸石結構不會被破壞，只是透過離子交換使得晶格結構內部電場與比表面積等發生變化。其反應機制可表示為 $Z-Na^{++}NH_4^+ \rightarrow Z-NH_4^{++}Na^+$ (如圖十)。

沸石對於各陽離子典型的選擇交換順序為： $Cs^+ > Rb^+ > K^+ > NH_4^+ > Sr^{2+} > Na^+ > Ca^{2+} > Fe^{3+} > Al^{3+} > Mg^{2+} > Li^+$ 。²⁶

(三)催化性能

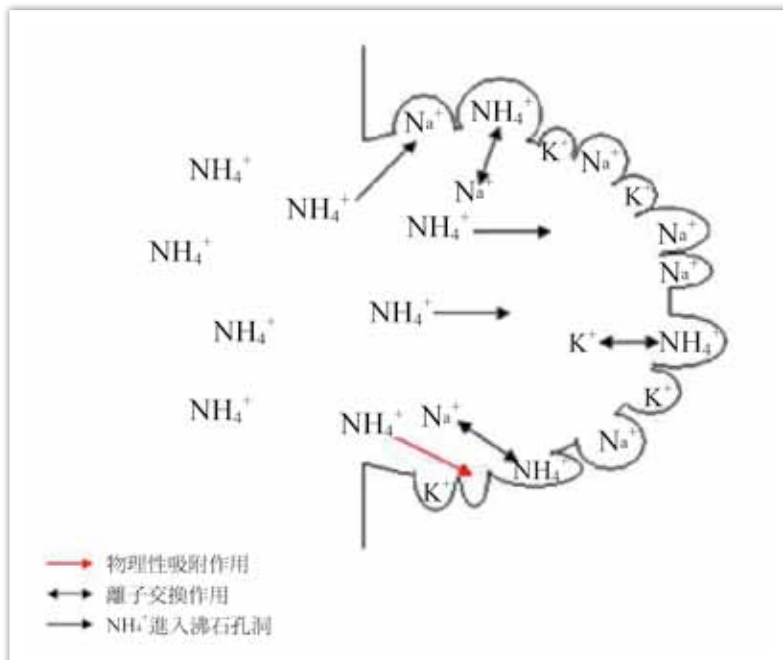
1.由於沸石具有很大的吸附表面，可以容納相當多數量的吸附物質，因而能促使化學反應在其表面上進行，所以沸石又可作為有效的固體酸²⁷催化劑和催化劑載體。

2.沸石之孔穴及孔道有一定的規則性，因此在催化反應中具有形狀選擇性，可分為：

(1)反應物選擇性：反應物小於沸石孔洞口的才能進入沸石結構中進行反應。

(2)產物選擇性：產物中分子的形狀及大小比沸石孔洞口小有可能跑出來成為產物，若初步反應形成的產物尺寸太大，則必須再重組或轉化成較小的分子。

圖十 沸石孔洞中的鈉、鉀離子與外界銨離子之離子交換示意圖



資料來源：蔡政鴻、陳惠芬，礦物界的環保明星沸石，2011年。

(3)過渡狀態的選擇性：在沸石孔洞內進行催化反應時，反應中間體的形成也受到沸石孔洞尺寸的限制，太大的中間體不易生成，以致由此種反應途徑形成的產物也隨之減少。²⁸

3.沸石之所以能做催化劑載體，主要和沸石具多孔洞結構及陽離子交換性能有關。許多具有催化活性的金屬離子，可以通過離子交換進入沸石孔洞中，隨後還原為元素狀態或轉變成具有催化活性的化合物。由於沸石具高比表面積，因此金屬處

26 蘇裕昌，〈新機能紙產品——去除放射性污染物質用途之吸著型沸石機能紙及彈性包裝袋的開發〉《漿紙技術》，(2013)VOL.17 No.2，頁32。

27 固體酸(solid acid)的概念是來自碳氫化合物和無機酸，例如硫酸或氫氟酸等，會催化一些反應如裂解，而某些觸媒固體，如氧化鋁或沸石也有相似的效果，因此稱為固體酸。

28 同註22。



在極高的分散狀態，不僅提高金屬的利用效率，而且提高抗中毒效應，從而改善沸石的催化性能。

(四)具再生能力

經實驗發現，沸石再生後的吸附能力與再生前相差無幾，有效壽命達151小時，比再生前壽命縮短僅17小時，有效壽命長並可重複再生使用。又因為天然沸石是一種較廉價的礦物質，成本較其他吸附劑低，再生成本低，再生液經吹脫後可重複利用。²⁹

三、沸石的應用

自從18世紀發現以來，科學家即不斷研究此物質，使得其運用非常廣泛，分述如下：

(一)在石油、化學工業中，用作石油煉製的催化裂化、氫化裂化和石油的化學異構化、重整、烷基化、歧化，以提高石油和天然氣質量；作為氣、液淨化、分離和儲存劑。硬水軟化、海水淡化劑；特殊乾燥劑(乾燥空氣、氮、烴類等)。

(二)在農業上用作土壤改良劑，具保肥、保水、防止病蟲害的作用，主要原因是植物所需的磷與鉀肥若混合沸石，可緩慢的釋放，不因肥料過多而來不及吸收，造成肥料的流失，植物生長更好。

(三)在禽畜業中，作飼料(豬、雞)的添加劑和除臭劑等，可促進牲畜生長，提高小雞存活率。

(四)在建材工業中，用作水泥水硬性活性摻和料，燒製人工輕骨料，製作輕質高強度板材和磚。亦可降低建築物對外界

熱源、噪音以及溼氣吸收。

(五)作為填料，用於造紙、合成橡膠、塑料、樹脂、塗料充填劑和素質顏色等。

(六)在太陽能方面的應用，近幾年來美國利用斜發沸石從太陽輻射中吸收和釋放熱能，既用來空調，又用於水加熱。加拿大發明了一種儲存太陽能的新辦法，用來為房間供熱，他們採用了一種裝滿沸石的容器，這種取暖辦法是利用沸石容易吸熱量，在與濕潤空氣接觸時又可以放出熱量的原理。³⁰

(七)在環境保護方面，用來處理廢氣、廢水，可從廢水廢液中脫除或回收金屬離子；從合成氨工廠的廢氣中回收氨，從硫酸廠的廢氣中回收SO₂，此外，還可以從其它工業廢氣中吸附一氧化碳和氨等；脫除廢水中放射性污染物，在福島核子事故中，多數學者專家將它運用於土壤及廢水中放射性物質的吸收。

1.去除廢水中氨氮：水體中氨氮含量增加會導致水體營養化，藻類大量繁殖，溶解氧銳減，水質嚴重惡化，從而破壞水生生態平衡。去除氨氮是利用沸石對陽離子的選擇性交換和再生特性。

2.去除有機污染物：沸石對有機污染物的吸附能力主要取決於有機物分子極性和大小，極性分子較非極性分子易被吸附；隨著分子直徑的增大，被吸附進入孔穴的機會逐漸變小。含有極性基團或可極化基團等有機分子，能與沸石表面發生強烈吸附作用如二氯甲烷、三氯乙烷、酚類、

29 吳連成、馮靈芝、王震及王莉合著，〈天然沸石對味精廢水的脫氮試驗研究〉[J]. 2005(3)：頁20～23。

30 〈沸石資源的發展趨勢〉，中國百科網，<http://www.chinabaike.com/z/keji/ck/511461.html>，2015年3月8日。

苯胺、甲醛、甲苯。

3.去除重金屬離子：鋅、鉻、鎳等重金屬離子是造成環境污染、對人體極為有害的物質。由於沸石本身晶格結構特徵，具離子交換性能，能同時除去水中 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 等重金屬離子。

4.去除放射性物質：利用沸石的離子交換性能，可以消除水中的放射性 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr ，尤其是對放射性物質 ^{137}Cs 的選擇性，遠遠的高於其他的鹼元素和鹼土元素，而且交換了 ^{137}Cs 的沸石可原封不動的作為放射源使用。

對我之啟示

沸石可說是礦物界的環保明星，可運用國軍平、戰時任務中，以利我環境污染復育任務遂行。環保署自95年起，辦理「軍事營區受污染地下水污染來源調查」工作，發現軍事營區作業場所如兵工廠、靶場、火炮射擊場、彈藥庫、廢彈拆

解處理廠、化學儲槽及油品更換等維修工廠，存在油料、重金屬、揮發性有機物、火炸藥類物質等土壤或地下水污染潛勢。若將沸石檢討運用於污染潛勢區或已污染場址，俾利預防污染或減少對環境造成危害。

國軍於平時亦投入化生放核災害救援，並於核子事故中支援放射性物質之清除。於執行清除任務時，應考量在具輻射污染環境下，如何避免污染擴散，及減低人員曝露劑量。文獻指出沸石對銫吸著率可達99.90%(如表二、圖十一)，³¹若能將沸石檢討運用於放射性物質處理，定能確保作業人員及環境安全。

一、放射性物質清除

我國現有核能發電廠計核一、核二及核三廠等3座核能電廠，6部機組，當面臨緊急事故時，依「核子事故緊急應變法」第10條，國軍於發生核子事故時，應即刻成立指揮所，並協助實施人員、車輛及重要道路等輻射污染之清除。

表二 沸石粒徑對銫吸附特性影響

	振盪時間 min	原水 mg/L	溶液量 mL	試樣量 g	PH	處理水 mg/L	吸著量 mg/g	去除率 %
沸石粒徑 800 μm	1	20.0	150	0.500	5.9	2.1	5.37	89.50
	5				5.6	1.6	5.52	92.00
	30				5.7	0.24	5.93	98.80
	60				5.9	0.13	5.96	99.35
	180				6.0	0.07	5.98	99.65
沸石粒徑 5 μm	1	20.0	150	0.500	6.5	0.021	5.99	99.90
	5				6.3	0.041	5.99	99.80
	30				6.3	0.027	5.99	99.87
	60				6.1	0.031	5.99	99.85
	180				6.3	0.014	6.00	99.93

資料來源：蘇裕昌，〈新機能紙產品——去除放射性污染物質用途之吸著型沸石機能紙及彈性包裝袋的開發〉，2013年。

31 同註26，頁33。



災後復原作業亦是救災重要的一環，若處理不當即造成污染擴散。若能將沸石運用於道路除污或人員、車輛及裝備除污後之放射性廢水處理，可減低輻射劑量，降低救災人員曝露劑量，減輕環境生態破壞。

(一)道路除污：將製成粉末的沸石，於道路除污時，加入水中，於噴灑時覆蓋於道路上，利用沸石可吸附放射性物質原理，可降低環境中輻射劑量，放射性物質亦不隨除污後廢水四處流竄，造成污染擴散。

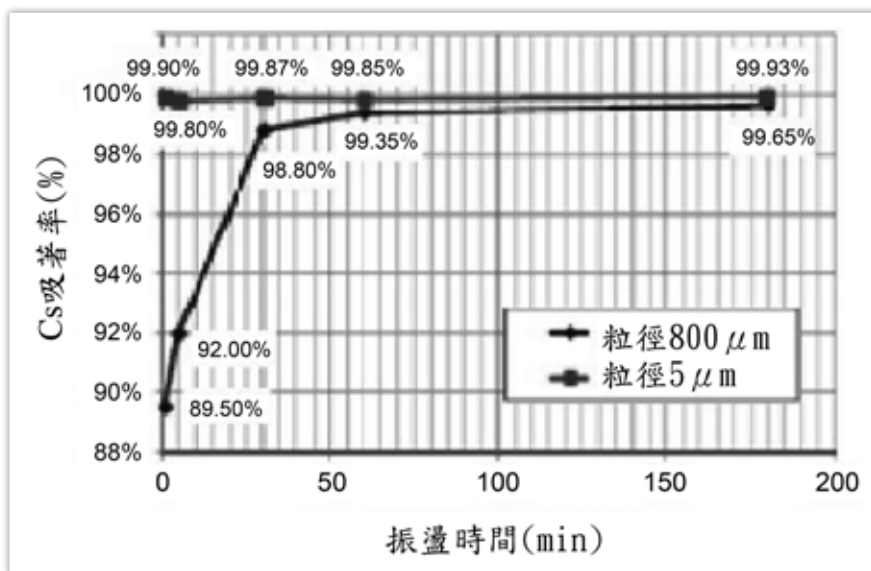
(二)人員、裝備、車輛實施放射性物質清除時，通常使用冷水沖洗，在其除污後廢水，須集中回收，實施運送處理。若於廢水收集槽，投入沸石，集中吸附放射性物質，有效處理污水，減少污水體積。

(三)含有放射性物質之沸石，可藉由磁性吸附或凝集劑與廢土及污水分離(如圖十二)，並藉由酸化過程將放射性物質與沸石分開，沸石即可再生利用，放射性物質固化封存，即可達到減少放射性污染物之體積。

二、重金屬移除

「重金屬原位鈍化技術」是一種污染土壤的修復方法，係指在污染土壤添加

圖十一 沸石粒徑對銫吸著的影響(武島et al., 2012)



資料來源：蘇裕昌，〈新機能紙產品——去除放射性污染物質用途之吸著型沸石機能紙及彈性包裝袋的開發〉，2013年。

一些活性物質(鈍化修復劑)，降低重金屬在土壤中的有效濃度或改變其氧化還原狀態，從而有效降低重金屬遷移性、毒性及生物有效性。³²

沸石粉為一良好的黏土礦物類無機鈍化劑，具高效低成本且不產生二次污染的特性，對重金屬離子 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 等均有較強吸附能力(如圖十三)，³³藉沸石吸附重金屬離子，使其鈍化，以復育重金屬污染之土壤。

國軍射擊訓練場地因基(演)訓實施射擊，靶場背彈牆及射擊線等區域遺留廢彈(頭)，經長期日曬雨淋，造成土壤鉛和銅重金屬污染(如圖十四)。

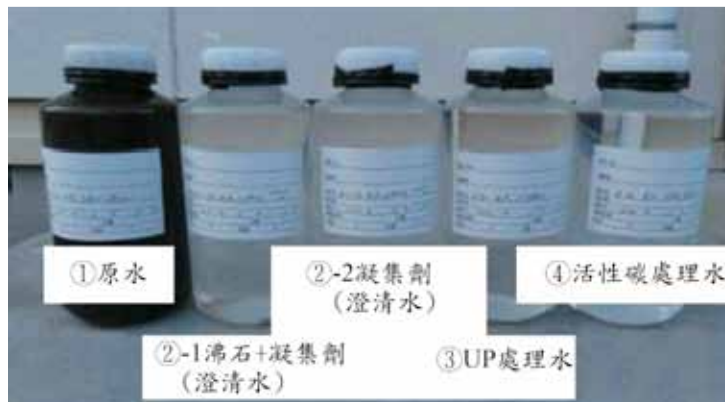
為防範土壤重金屬污染，除由單位

32 王立群、羅磊、馬義兵，〈重金屬污染土壤原位鈍化修復研究進展〉《應用生態學報》，2009年，20(5):1214-1222。

33 許秀云、蔡玉曼，〈改性沸石對重金屬離子競爭吸附特性研究〉《地質學刊》，2010年，34(1):92-97。

圖十二 含鉀放射性污水加入除污物質測試

項次	項目	鉀 (134+137) (Bq/Kg)
1	原水	17,290
2-1	沸石+凝集劑(澄清水)	29
2-2	凝集劑(澄清水)	57
3	UF處理水	25
4	活性碳處理水	ND



資料來源：環境省，josen.env.go.jp/shibata_23U-11.pdf，2015年3月20日下載。

清除廢彈頭、彈殼、彈鏈等金屬殘留物外，可檢討運用沸石，混合加入訓練場之土壤中，利用沸石離子交換性能，吸附土壤中之重金屬，復育重金屬污染之土壤，以維環境安全(如圖十五)。

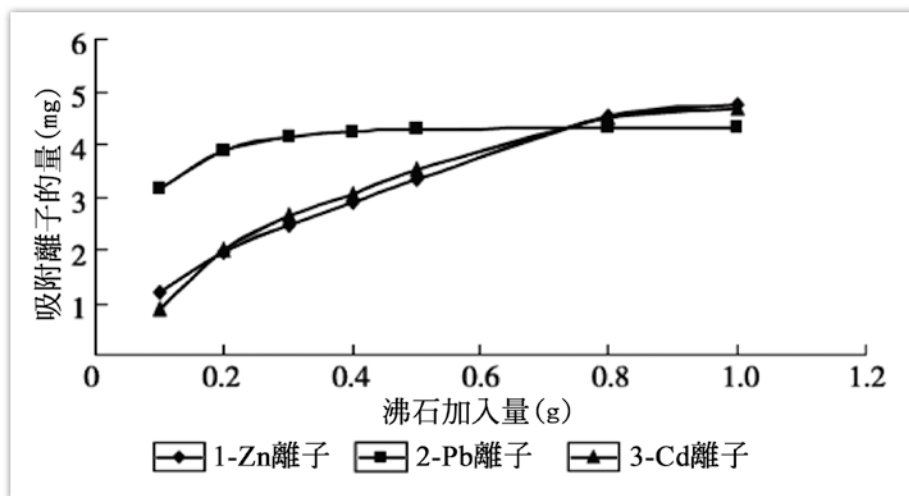
三、有機污染移除

有機污染物會經由皮膚接觸或呼吸系統對人體造成傷害，並有致癌、致畸胎之虞，對生態及人體健康造成相當程度的威脅。沸石具有物種選擇性吸附、耐水氣、用途廣泛、可塑性高與再生使用率佳等優點的吸附劑，相當適合用於吸附揮發性有機物。其對有機物的吸附能力主要取決於有機物分子極性和大小，特別是含有極性基團和可能極化基團的有機分子，能與沸石表面發生強烈吸附作用。

亦有文獻中指出，改性後的沸石對於親水性與疏水性的有機物均有高吸附量(如圖十六)，可以視為雙親性的吸附劑，能有效吸附工廠排放廢水中不同種類之有機物。³⁴

在95~100年軍事場址及污染樣態調查結果中(如圖十七、十八)，發現油料儲存與供油設施、保修／發動機維修廠、廢

圖十三 改性沸石用量對吸附重金屬溶液影響



資料來源：許秀云、蔡玉曼，〈改性沸石對重金屬離子競爭吸附特性研究〉，2010年。



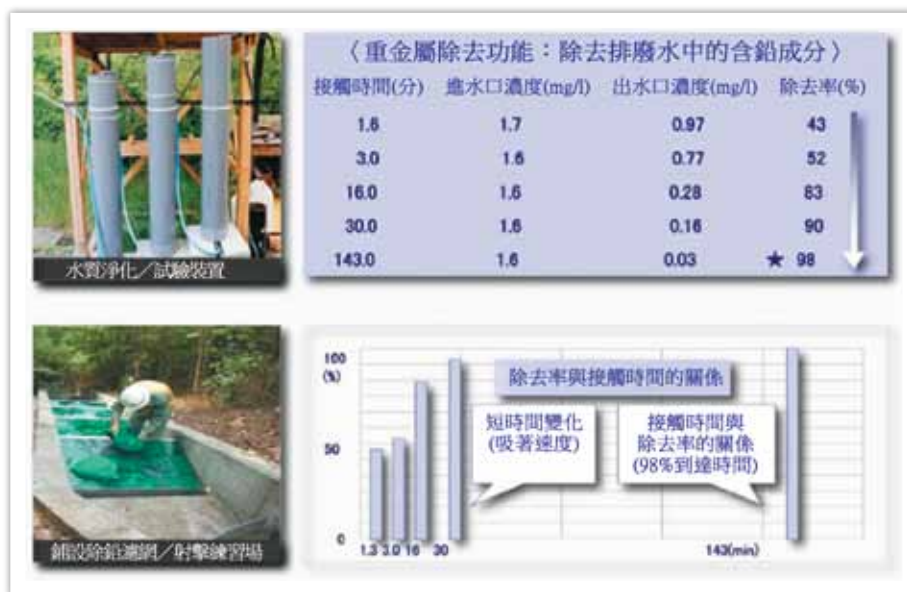
圖十四 國軍靶場污染場址一大甲劍井段(左)及其調查結果(右)



資料來源：林錕松，土壤及地下水污染整治法規暨實務案例，2013年。

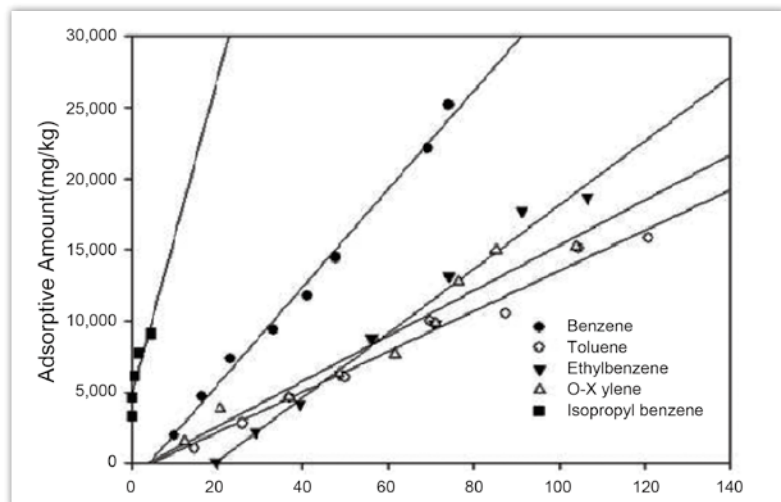
油／廢溶劑儲存設施、兵工廠、空軍基地等場所，皆有揮發性有機化合物(VOCs)潛在污染物，若能將沸石可去除有機污染物之功能，運用於各污染潛勢區，去除廢水、廢氣及廢棄物中之有機污染物，如於廢水中加入沸石吸收有機污染物，或將含有沸石濾網之空氣清潔機，裝置於具有機揮發物之污染場所，用以捕捉有機物質，以維人員及環境安全。

圖十五 地下水及土壤重金屬鉛除去試驗

資料來源：綠能環技股份有限公司，http://www.etrust-global.com/resco_html/RZ_demonstration.html，2015年3月20日下載。

34 趙煥平、彭俊倫，〈雙親性沸石對不同水溶解度有機物之吸附〉，環保簡訊，<http://setsg.ev.ncu.edu.tw/newsletter/epnews612.html>，2015/3/13。

圖十六 改性沸石對苯、甲苯、乙苯、鄰二甲苯與丙基苯等溫吸附曲線



資料來源：環保簡訊，<http://setsg.ev.ncu.edu.tw/newsletter/epnews612.html>，2015年3月20日下載。

四、淨化水質

(一)淨化地下水

近來天候異常，出現乾旱或水災的現象日益頻繁，一遇乾旱或水災，自來水或因供水量不足，或因原水濁度飆高，皆會造成限水，屆時營區因自來水廠分區停水，而啟動地下水使用。若能將沸石加入地下水槽內，去除氨氣、重金屬及有機污染物淨化水質，提供官兵乾淨水源。

(二)淨化生活污水

自民國96年起，新建住宅配合都市污水處理系統，皆須

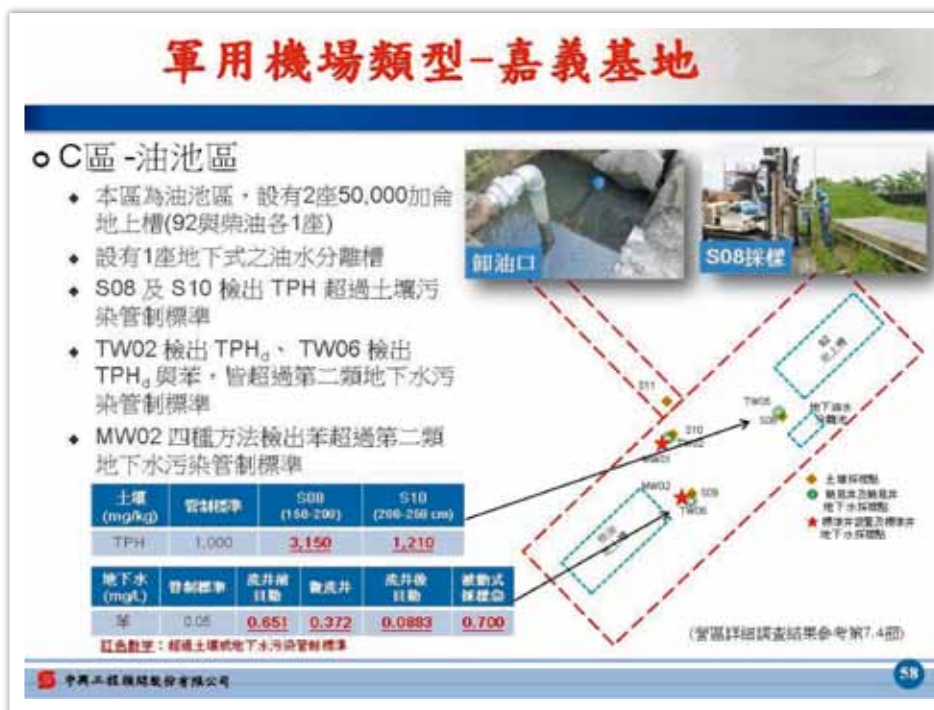
圖十七 95~100年軍事場址調查結果及污染樣態



資料來源：林錕松，土壤及地下水污染整治法規暨實務案例，2013年。



圖十八 國軍機場污染場址—嘉義基地污染調查結果



資料來源：林錫松，土壤及地下水污染整治法規暨實務案例，2013年。

設有污水處理設施，生活污水須經污水處理設施處理後，始可排放至下水道。國軍營區若於民國96年前興建，則無污水處理設施。近期肇生營區生活廢污水，未經處理直接流入排水溝產生異味，造成地方環境污染，遭民眾檢舉案件發生。若能參考日本將沸石製成濾材(如圖十九)，放置於排水溝，可吸附氨氮、有機物及油污，

淨化生活污水，以避免類案發生。

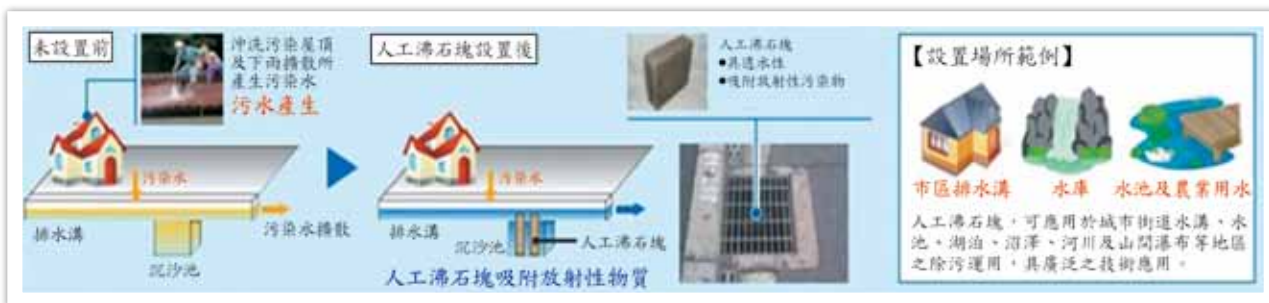
結語

從文獻資料中，可知沸石具吸附放射性物質能力，可用於放射性污染之水源及土壤中，且價格低廉，可再生循環及二次污染小等使用優點。於我核電廠廢水清除中亦見其運用，若檢討運用於國軍核子事故中，放射性物質的消除作業，以減低輻射劑量，降低救災人員所曝露劑量，減輕環境生態破壞。

因沸石對污染物淨化效果佳，性能品質安定，是良好的環境污染復育材料。若能將沸石淨化、修復環境的能力，運用於我國軍環境污染復育與防治工作，不僅得以節約公帑，亦可減少環保糾紛抗爭情事和環境污染危害，維護人類生存空間。

(本篇選錄自核生化防護半年刊第99期)

圖十九 人工沸石製成濾材放置於排水溝



資料來源：前田建設工業株式會社，人工沸石用於住宅地排水溝除污技術的實證試驗，2011年。