

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

**無機聚合材料與水泥固化有機固體廢棄物之性能差異
與長期穩定性研究**

**The geopolymer material solidifying organic solid waste compared
with using cement and its long-term stability**

計畫編號：108A006

受委託機關(構)：國立臺北科技大學 資源工程研究所

計畫主持人：鄭大偉 教授

聯絡電話：02-2771-2171 分機號碼 2730

E-mail address：twcheng@ntut.edu.tw

研究期程：中華民國 108 年 04 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 陸拾柒 萬元

核研所聯絡人員： 陳欣妤

報告日期：108 年 12 月 13 日

目錄

目錄	i
表目錄	vi
圖目錄	ix
中文摘要	xii
Abstract.....	xiv
壹、計畫緣起與目的.....	1
一、無機聚合材料.....	3
二、前期研究成果.....	5
三、研究目的	8
貳、研究方法與過程.....	9
一、實驗材料	9
(一)陽離子型交換樹脂.....	9
(二)爐石粉	10
(三)矽灰石	12
(四)氫氧化鈉溶液.....	14
(五)矽酸鈉溶液.....	14
(六)鋁酸鈉溶液.....	14
(七)高錳酸鉀	14
(八)氯化銫	15
(九)氯化鋇	15
二、實驗方法及流程.....	16
(一)持續觀察前期試驗－添加模擬核種之大型試驗.....	17

(二)比較不同製作流程試驗	20
(三)比較不同高錳酸鉀添加量試驗	23
(四)不同液固比的影響	26
(五)無機聚合材料與金屬黏結性試驗	29
(六)無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗	32
(七)模擬實廠製作大型試驗	35
三、固化體測試項目	38
(一)自由水	39
(二)溶出試驗	40
(三)機械強度試驗	42
(四)耐水性試驗	43
(五)耐候性試驗	44
(六)耐高溫性試驗	46
(七)透水性試驗	46
(八)透氣性試驗	48
四、實驗設備	50
(一)桌上型攪拌器	50
(二)X 射線螢光能譜儀 (XRF)	51
(三)雷射粒度測定儀	52
(四)X 光繞射分析儀 (XRD)	53
(五)水平雙軸強制式拌合機	54
(六)感應耦合電漿原子發射光譜分析儀	55
(七)可程式高溫爐(耐高溫性試驗)	56

(八)全自動黏著力拉拔試驗儀(金屬黏結力測試).....	57
參、結果與討論	58
一、持續觀察前期試驗—添加模擬核種之大型試驗	58
(一)自由水	59
(二)機械強度	61
(三)耐候性試驗.....	63
(四)耐水性試驗.....	65
(五)溶出試驗	67
(六)小結	69
二、比較不同製作流程試驗.....	70
(一)自由水	71
(二)機械強度	72
(三)耐候性試驗.....	73
(四)耐水性試驗.....	76
(五)耐高溫性試驗.....	79
(六)小結	83
三、比較不同高錳酸鉀添加量試驗	84
(一)自由水	85
(二)機械強度	86
(三)耐候性試驗.....	88
(四)耐水性試驗.....	91
(五)小結	94
四、比較不同液固比試驗.....	95

(一)自由水	96
(二)機械強度	97
(三)耐候性試驗.....	99
(四)耐水性試驗.....	103
(五)耐高溫性試驗.....	104
(六)透水透氣試驗.....	108
(七)小結	110
五、無機聚合材料與金屬黏結性試驗	112
(一)拉拔強度	113
(二)小結	116
六、無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗	117
(一)金屬容器表面變化.....	118
(二)抗壓強度	119
(三)小結	121
七、模擬實廠製作大型試驗.....	122
(一)自由水	123
(二)機械強度	124
(三)耐候性試驗.....	124
(四)耐水性試驗.....	124
(五)溶出試驗	125
(六)小結	125
肆、結論與建議	126
一、結論	126

二、建議	129
伍、參考文獻	130

表目錄

表 1-1 國內外固化樹脂之研究成果比較表	6
表 2-1 離子交換樹脂基本性質	9
表 2-2 爐石粉之 XRF 成分分析	11
表 2-3 矽灰石之 XRF 成分分析	13
表 2-4 本年度添加模擬核種之大型試驗鹼液配比	19
表 2-5 本年度添加模擬核種之大型試驗實驗配比	19
表 2-6 比較不同製作流程試驗鹼液配比	22
表 2-7 比較不同製作流程試驗實驗配比	22
表 2-8 比較不同高錳酸鉀添加量試驗鹼液配比	25
表 2-9 比較不同高錳酸鉀添加量試驗實驗配比	25
表 2-10 比較不同液固比試驗鹼液配比	28
表 2-11 比較不同液固比試驗實驗配比	28
表 2-12 無機聚合材料與金屬黏結性試驗鹼液配比	30
表 2-13 無機聚合材料或水泥與金屬黏結性試驗實驗配比	31
表 2-14 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗鹼液配比	33
表 2-15 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗配比	34
表 2-16 模擬實廠製作大型試驗鹼液配比	37
表 2-17 模擬實廠製作大型試驗實驗配比	37
表 2-18 低放射廢棄物均勻固化體測試項目、方法及標準	38
表 2-19 耐候性試驗溫、濕度試驗範圍	44
表 3-1 添加模擬核種之大型試驗實驗配比	58
表 3-2 R41-K5 系列(大型試驗)固化體表面	61

表 3-3 R41-K5 系列(大型試驗)耐候性試驗前後表面對照表	63
表 3-4 R41-K5 系列(大型試驗)耐水性試驗前後表面對照表	65
表 3-5 R41-K5 系列(大型試驗)模擬核種鋇離子溶出指數	67
表 3-6 R41-K5 系列(大型試驗)模擬核種銫離子溶出指數	68
表 3-7 比較不同製作流程試驗實驗配比對照表	70
表 3-8 不同製作流程固化體外觀對照表(28 天)	72
表 3-9 不同製程耐候性試驗前後固化體表面對照表	74
表 3-10 不同製程耐水性試驗前後固化體表面對照表	77
表 3-11 耐高溫性試驗前後固化體表面對照表	80
表 3-12 比較不同高錳酸鉀添加量試驗實驗配比對照表	84
表 3-14 不同高錳酸鉀添加量固化體外觀(28 天)	86
表 3-15 不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後固化體表面對照表 .	89
表 3-16 不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後固化體表面對照表 .	92
表 3-17 比較不同液固比試驗實驗配比對照表	95
表 3-18 不同液固比自由水試驗結果對照表	96
表 3-19 不同液固比固化體外觀對照表(28 天)	97
表 3-20 不同液固比耐候性試驗前後固化體表面對照表	100
表 3-21 耐高溫性試驗前後固化體表面對照表	105
表 3-22 無機聚合材料滲透係數對照表	109
表 3-23 無機聚合材料與金屬黏結性試驗實驗配比	112
表 3-24 不同材料與鐵片之拉拔測試前後對照表	114
表 3-25 不同材料與不鏽鋼之黏結力測試前後對照表	115
表 3-26 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗配比	117

表 3-27 試驗前後金屬容器表面對照表	118
表 3-28 不同模具製作之無機聚合樹脂固化體對照表	119
表 3-29 模擬實廠製作大型試驗實驗配比	122

圖目錄

圖 1-1 無機聚合材料之基本結構	3
圖 1-1 無機聚合大型樹脂固化體	5
圖 2-1 爐石粉外觀	10
圖 2-2 爐石粉之粒徑分佈圖	11
圖 2-3 爐石粉之 XRD 晶相分析	11
圖 2-4 矽灰石外觀	12
圖 2-5 矽灰石之粒徑分佈圖	13
圖 2-6 矽灰石之 XRD 晶相分析	13
圖 2-9 比較不同製作流程試驗製作流程	21
圖 2-10 比較不同高錳酸鉀添加量試驗製作流程	24
圖 2-11 比較不同液固比試驗製作流程	27
圖 2-12 無機聚合材料或水泥與金屬黏結性試驗流程	30
圖 2-13 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗流程圖	33
圖 2-14 模擬核種混合樹脂流程圖	36
圖 2-15 模擬實廠製作大型試驗實驗流程	36
圖 2-16 半自動控制抗壓試驗機	42
圖 2-17 固化體之耐水性試驗	43
圖 2-18 體積變化及環境控制試驗儀	45
圖 2-19 耐候性試驗溫度控制流程圖	45
圖 2-20 透水性試驗裝置	47
圖 2-21 透氣性試驗裝置	49
圖 2-22 桌上型攪拌器	50

圖 2-23 X 射線螢光能譜儀	51
圖 2-24 雷射粒度測定儀	52
圖 2-25 X 光繞射分析儀	53
圖 2-26 水平雙軸強制式拌合機	54
圖 2-27 感應耦合電漿原子發射光譜分析儀.....	55
圖 2-28 可程式高溫爐	56
圖 2-29 全自動黏著力拉拔試驗儀.....	57
圖 3-1 添加模擬核種之大型試驗製作情形	58
圖 3-2 R41-K5 系列(大型試驗)Φ5×10 cm 圓柱固化體自由水(28 天)59	
圖 3-3 R41-K5 系列(大型試驗)大型固化體自由水(28 天).....	60
圖 3-4 R41-K5 系列(大型試驗)機械強度圖	62
圖 3-5 R41-K5 系列(大型試驗)耐候性試驗前後強度對照圖	64
圖 3-6 R41-K5 系列(大型試驗)耐水性試驗前後強度對照圖.....	66
圖 3-7 比較不同製作流程試驗自由水(28 天).....	71
圖 3-8 不同製作流程機械強度對照圖	73
圖 3-9 不同製程耐候性試驗前後機械強度對照圖	75
圖 3-10 不同製程耐水性試驗前後機械強度對照圖	78
圖 3-11 C-R41-K5(製程調整)耐高溫性試驗前後機械強度對照圖..	82
圖 3-12 不同高錳酸鉀添加量機械強度比較圖	87
圖 3-13 不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後機械強度比較圖	90
圖 3-14 不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後機械強度比較圖	93
圖 3-1 不同液固比機械強度對照圖.....	98
圖 3-16 不同液固比耐候性試驗前後機械強度比較圖	101

圖 3-17 改善測試方法後經耐候性試驗後之固化體	102
圖 3-17 耐高溫性試驗前後固化體機械強度對照圖	107
圖 3-18 滲透試驗試體外觀圖	108
圖 3-19 無機聚合材料及水泥材料與金屬板材之拉拔強度對照圖	113
圖 3-20 不同模具灌注之固化體機械強度比較圖	120
圖 3-21 模擬實廠製作大型試驗製作情形	122
圖 3-22 大型試驗之自由水結果(7 天)	123

中文摘要

離子交換樹脂廣泛地被使用於核能工業中，用於淨化各種放射性廢水，而這些廢離子交換樹脂的處理則是各國亟待解決的課題。一般而言廢樹脂的處理技術可概分成減容及固定化，前者透過化學或物理方式，減少廢棄物之體積，但還是有著高成本、二次廢棄物等問題；後者則因固化材料之不同，有著各種隱憂，因此開發一種新型固化材料是項急迫且重要的。無機聚合材料(geopolymer)是一種結構類似沸石的三維架構鋁矽酸鹽材料，它具有許多優異的性質，如高機械性質、高耐久性、抗酸腐蝕及固化重金屬，相當適合固化放射性廢棄物。無機聚合材料之原料容易取得，製程及設備亦相當簡單，可於常溫環境製作，是各國皆有研究及重視，具有相當潛力的放射性廢棄物處理材料。本研究團隊前期利用強氧化劑預處理離子交換樹脂，再以無機聚合技術開發一個新的放射性廢料的固化材料並放大試體的尺寸至 60L 以上，並以 $\Phi 5 \times 10$ cm 試體之固化體測試其機械強度與耐久性質研究。結果顯示，以無機聚合技術固化廢離子交換樹脂，並模擬實廠製作大型固化體(60L)，固化體之 28 天機械強度可達 6.9MPa，且各項試驗皆能符合規範之標準，且經計算增容比後，其值為 4.28，相較於水泥固化時，能減少 3/4 之儲存空間，成果良好。故本年度將進一步研究，測試無機聚合樹脂固化體與實際保存用金屬桶之表面作用行為，並測試無機聚合樹脂固化體之耐高溫性、透氣/透水性...等多元化檢測，藉以瞭解未來固化體之特性。實驗結果發現，以無機聚合材料固化離子交換樹脂，並不使用強氧化劑作前處理，依然可安定化離子交換樹脂，其 28 天機械強

度可達 6.4MPa，各項試驗也依舊符合規範標準，且其耐高溫性良好，經高溫測試後仍能保持固化體之完整；與水泥材料相比，無機聚合材料也展現出更加優異之黏結性質；本研究團隊也成功將離子交換樹脂固化在實際保存用之金屬桶中，後續將持續觀察其發展與變化。

Abstract

Ion exchange resins are widely used in the nuclear energy industry to purify various radioactive waste water, and the treatment of these waste ion exchange resins is an issue to be solved immediately in various countries. The waste resin treatment technology can be roughly divided into volume reduction and immobilization. The former uses chemical or physical methods to reduce the volume of waste, but it still has problems such as high cost and secondary waste; the latter is due to the difference in cured materials. Through all kinds of hidden concerns, it is urgent and important to develop a new type of curing material. Geopolymeric material is a kind of aluminosilicate material with three-dimensional structure similar to zeolite. It has many excellent properties, such as high mechanical properties, high durability, resistance to acid corrosion and solidification of heavy metals, which is quite suitable for solidifying radioactive waste. The raw materials of geopolymeric materials are easy to obtain, and the process and equipment are quite simple. They can be produced in normal temperature environment. They are researched and valued by various countries and have considerable potential for radioactive waste treatment materials. The research team used a strong oxidant to pre-process the ion exchange resin in the early stage, and then developed a new solidified material of radioactive waste by geopolymerization technology and enlarged the size of the test body to more than 60L, and tested it with a solidified body of $\Phi 5 \times 10$ cm. The results show that the geopolymerization technology is used to cure the waste ion exchange resin, and the large-scale solidified body (60L) is simulated in real field. The 28-day mechanical

strength of the solidified body can reach 6.9 MPa. After calculating the capacity increase ratio, the value is 4.28, which can reduce the storage space by 3/4 compared with the solidification of cement, and the results are good. Therefore, this year will further research, test the surface interaction behavior of the geopolymeric resin cured body and the actual storage metal barrel, and test the geopolymeric resin cured body's high temperature resistance, air permeability / water permeability characteristics of the cured body. The experimental results show that the ion-exchange resin is cured with geopolymeric materials without using a strong oxidant as a pretreatment, and the ion-exchange resin can still be stabilized. Its 28-day mechanical strength can reach 6.4 MPa, and various tests still meet the standard standards, and Its high temperature resistance is good, and it can maintain the integrity of the cured body after high temperature testing. Compared with cement materials, geopolymeric materials also show more excellent bonding properties. The research team also successfully cured the ion exchange resin in actual storage. In the metal bucket, the development and changes will be continuously observed in the future.

壹、計畫緣起與目的

離子交換樹脂被廣泛的使用於廢水淨化系統，核子反應爐中使用粒狀離子交換樹脂異於一般冷卻水與廢水除礦系統中之樹脂。核子反應爐中使用過之粒狀離子交換樹脂屬於濕性固體之低放射性廢棄物。過去國內的廢樹脂曾以水泥固化法進行處理，但是鑒於長期貯存後水泥固化體有產生膨脹龜裂之虞，故自1987年7月以後，全面停止粒狀廢離子交換樹脂的水泥固化，而改採脫水後暫存。根據放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則十五條之一規定，若廢樹脂未經安定化處理可脫水暫貯，但年限為五年。因此廢樹脂是一項迫切需要處理的低放射性廢棄物。我國核電廠累計至目前共貯放待處理之脫水樹脂有18,888桶[行政院原子能委員會，2019]。另外，核能研究所執行TRR燃料池清理計畫，其中廢離子交換樹脂(13 m³)，已全數由TRR燃料池清出安全貯存，亦待進行安定化處理。鑒於上述因素，粒狀廢離子交換樹脂固化劑之研發為一個重要議題。近年有一種稱為無機聚合材料(Geopolymer)可以有效的固化廢離子交換樹脂，前期經本團隊之研究證明此技術可以有效的固化廢離子交換樹脂。因此本期研究主要目的針對無機聚合材料固化離子交換樹脂的標準作業程序、無機聚合固化體與其盛裝桶金屬表面之作用行

為，包括結合性、耐候性、溫濕度影響及其他變因等進行研究。

一、無機聚合材料

無機聚合材料(Geopolymer)為一種非晶質或半晶質的材料，其結構與沸石相似 [Davidovits, 1999]如圖1-1所示。於鹼性溶液中，使Si和Al膠體由反應粉體顆粒表面析出，形成無機聚合材料之前驅物膠體。隨後再與鹼金屬矽鋁酸鹽溶液觸發聚合反應，形成無機聚合物的主幹，生成之產物以 SiO_4^- 及 AlO_4^- 組成之三維架狀結構；整體持續進行脫水及聚合反應，最後多餘的 Ca^{2+} 離子與 SiO_4^- 及 AlO_4^- 生成針狀C-S-H膠體($\text{CaO}-2\text{SiO}_2-3\text{H}_2\text{O}$)[Robayoa et al., 2016]。C-S-H 膠體填塞架狀結構之孔隙，使結構更為緻密且強度提升[邱仔安，2016]。其與水泥最大不同是水泥鍵結形式為水合鍵結，無機聚合材料則是化學鍵結。

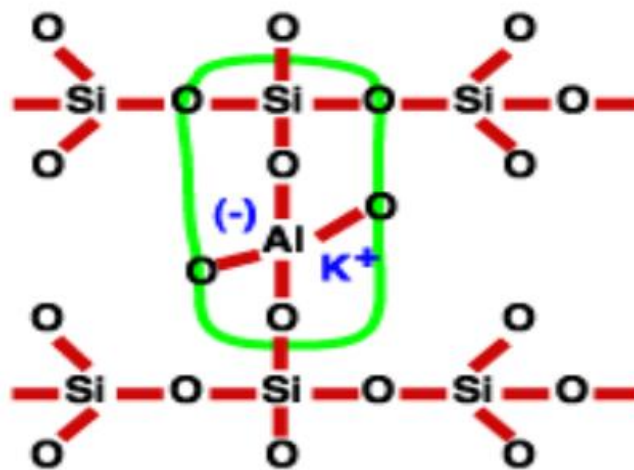


圖 1-1 無機聚合材料之基本結構

無機聚合材料可固定化低電荷陽離子，大部分的金屬將以氫氧化物形式沉澱於無機聚合材料中，且兼具良好的抗溶出能力，但不適用於酸性環境下[Provis, 2009]。低階及中階放射性廢棄物可以無機聚合技術來固化。另因核能研究所執行TRR燃料池清理所產生之廢樹脂主要放射性伽瑪射線核種為半衰期較 ^{60}Co 長之 ^{137}Cs ，且其比活度及表面輻射劑量率亦高，考量安定化系統之設備成本與作業簡便性等及國際上已有相關應用實例（如SIAL[®]），因此利用無機聚合技術固化離子交換樹脂具有技術上的可行性。

二、前期研究成果

國內外固化樹脂之研究成果比較結果顯示如表 1-1，本團隊前期研究之無機聚合大型樹脂固化體，模擬實廠固化情形，固化體尺寸大於 60 L，如圖 1-1 所示，樹脂添加量為濕基 41.8 wt.%，28 天機械強度為 6.9MPa，耐水性試驗後機械強度為 10.1 MPa，耐候性試驗後機械強度為 2.3 MPa，溶出試驗後之溶出指數 $C_s=8.2$ 、 $S_r=11.9$ ，增容比為 4.28。實驗結果顯示，以無機聚合技術固化離子交換樹脂，並製成單一批次 60L 大型固化體，其各項檢測皆能符合規範標準，成果良好。

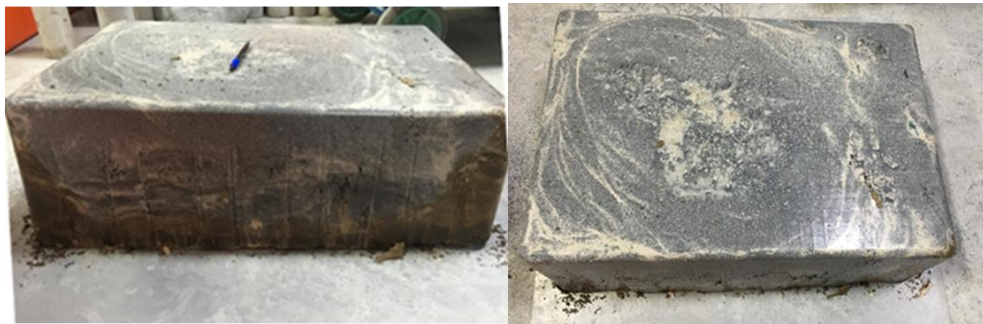


圖 1-1 無機聚合大型樹脂固化體

表 1-1 國內外固化樹脂之研究成果比較表

作者	固化劑	研究成果
本研究團隊 -2018	爐石基無機聚合物 (60L、Φ5×10 cm)	1. 樹脂添加量為濕基 41.8 wt.%。 2. 28 天機械強度為 6.9 MPa。 3. 耐水性 10.1 MPa。 4. 耐候性 2.3MPa。 5. 溶出指數 Cs=8.2、Sr=11.9。
本研究團隊 -2017	爐石基無機聚合物 (Φ5×10cm)	1. 樹脂添加量為乾基 22.1wt.%，相當於濕基 45wt.%。 2. 28 天機械強度為 7MPa。 3. 耐水性 6.2MPa。 4. 耐候性 6.4MPa。 5. 耐真菌性 4.8MPa。 6. 耐輻射性 7.9MPa。 7. 溶出指數 Cs=13.48、Sr=16.44，累積溶出百分數第 90 天 Cs=6.26×10⁻⁴cm、Sr=1.07×10⁻⁴cm。
Khairudin et al.-2015	C 級飛灰基 無機聚合物	1. 樹脂添加量為濕基 10 wt.%。 2. 28 天機械強度為 6.1 MPa。
Kryvenko et al.-2015	爐石粉添加矽酸鈉 溶液、膨潤土及氫 氧化鈣(Φ4.6×6 cm)	1. 樹脂添加量為濕基 45 wt.%。 2. 7 天機械強度為 11.4 MPa，28 天 15.6 MPa。 3. 耐水性 19 MPa。 4. 耐候性 12.8 MPa。 5. 耐真菌性 16 MPa。 6. 累積溶出百分數第 42 天 Cs=9.3 x10⁻⁴ cm、Sr=6.3×10⁻⁴ cm。
Lichvar et al.-2013	SIAL-無機聚合物 (15×15×15 cm)	1. 樹脂添加量為乾基 17.5 wt.%。 2. 機械強度 11.2~37.5 MPa。
Sun et al.-2011	硫鋁酸鹽水泥 (SAC)添加聚丙烯 短纖維(Φ5×5 cm)	1. 樹脂添加量為乾基 17.8 wt.%。 2. 28 天機械強度為 18.8 MPa。 3. 耐水性 18.3 MPa。 4. 耐候性 21.4 MPa。

作者	固化劑	研究成果
		5. 耐輻射性 17.6 MPa。 6. 溶出指數 $C_s=5.65\sim 8.16$ 。
Majersky et al. -2006	SIAL-無機聚合物	1. 樹脂添加量為乾基 20 wt.%。 2. 機械強度 ≥ 15 MPa，溶出指數 >10
周耀中等人 -2004	鹼活化礦渣水泥 (ASC)($\Phi 5\times 5$ cm)	1. 樹脂添加量為乾基 20.5 wt.%。 2. 28 天機械強度為 15 MPa。
潘榕光等人 -2004	中度抗硫水泥添加 爐石粉及飛灰 ($\Phi 5\times 10$ cm)	1. 樹脂添加量為濕基 13 wt.%。 2. 機械強度為 3.07 MPa。
周敦仕-1999	普通水泥添加爐石 粉及飛灰 ($\Phi 5\times 10$ cm)	1. 樹脂添加量為濕基 13 wt.%。 2. 28 天機械強度為 3.1 MPa。
孫金星-1998	普通水泥添加爐石 粉及飛灰 ($\Phi 5\times 10$ cm)	1. 樹脂添加量為乾基 17 wt.%。 2. 浸水前機械強度為 4.1 MPa，浸水後 7 MPa。 3. 添加碳纖維浸水前 4.2 MPa，浸水後 4.6 MPa。
魏保范等人 -1995	鹼活化礦渣水泥 (ASC)添加矽灰 ($\Phi 5\times 5$ cm)	1. 樹脂添加量為濕基 35.4wt.%。 2. 28 天機械強度為 14.6 MPa。

三、研究目的

利用無機聚合技術進行離子交換樹脂固化，係自 2017 年起，已開始進行研究，並得到良好之成果，目前已進入試量產階段測試，為確保未來實際應用之可行性，故尚須更多方面之研究。本期研究之研究目的即為：

1. 持續觀察 107 年單批次 60L 之模擬實廠級固化試驗其耐水性、耐候性及離子溶出試驗結果。
2. 測試無機聚合固化粒狀樹脂之耐高溫性、透氣/透水性...等多元化檢測，藉以瞭解未來固化體之特性。
3. 研究無機聚合固化體與其盛裝桶金屬(碳鋼、不鏽鋼...等)表面之作用行為，包括結合性、耐候性、溫濕度影響及其他變因研究等，並蒐集國內外相關文獻。
4. 完成一個使用金屬桶之模擬實廠級固化試驗，單批次至少 60L。

貳、研究方法與過程

一、實驗材料

(一)陽離子型交換樹脂

本研究使用之樹脂，是普特樹脂公司的核能級陽離子型交換樹脂(NRW100)，基本性質如表 2-1 所示。

表 2-1 離子交換樹脂基本性質[普特樹脂公司，2018]

樹脂型態	陽離子型	型號	NRW100
聚合物結構	聚苯乙烯與二乙烯苯膠體		
官能基(理論)	磺酸	酸鹼性	強酸性
表面外觀	棕色凝膠球形粒狀	離子型態	H ⁺ (99.9%)
交換容量	1.8 eq/L	含水率	51-55%
比重	1.2	粒度範圍	425 – 1200 μm
溫度限制	120°C	雜質-鐵(最大)	50 ppm
雜質-鈉(最大)	40 ppm	雜質-重金屬(最大)	40 ppm

(二)爐石粉

本研究使用中聯資源股份有限公司之 S4000 爐石粉 (CNS1259 120 級)，如圖 2-1 所示。此粉體是爐渣從高爐流出後，以高壓冷卻水急速冷卻而得，由於迅速冷卻使其中矽酸鹽類無法形成良好之結晶，其性質不穩定，具有高度活性[中國鋼鐵公司，2000]，可作為無機聚合材料之主要粉體原料。表 2-2 為 XRF 成分分析結果，主要以 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 為主，其中以 CaO 含量最高約為 57.42 wt.%。圖 2-2 為粒徑分佈圖，其中位徑(D_{50})為 12.02 μm 。圖 2-3 為 XRD 晶相分析，從圖譜可看出其為非晶質相。



圖 2-1 爐石粉外觀

表 2-2 爐石粉之 XRF 成分分析

成分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Others	L.O.I
wt. %	57.42	27.36	10.81	0.30	0.57	1.15	1.31	1.08

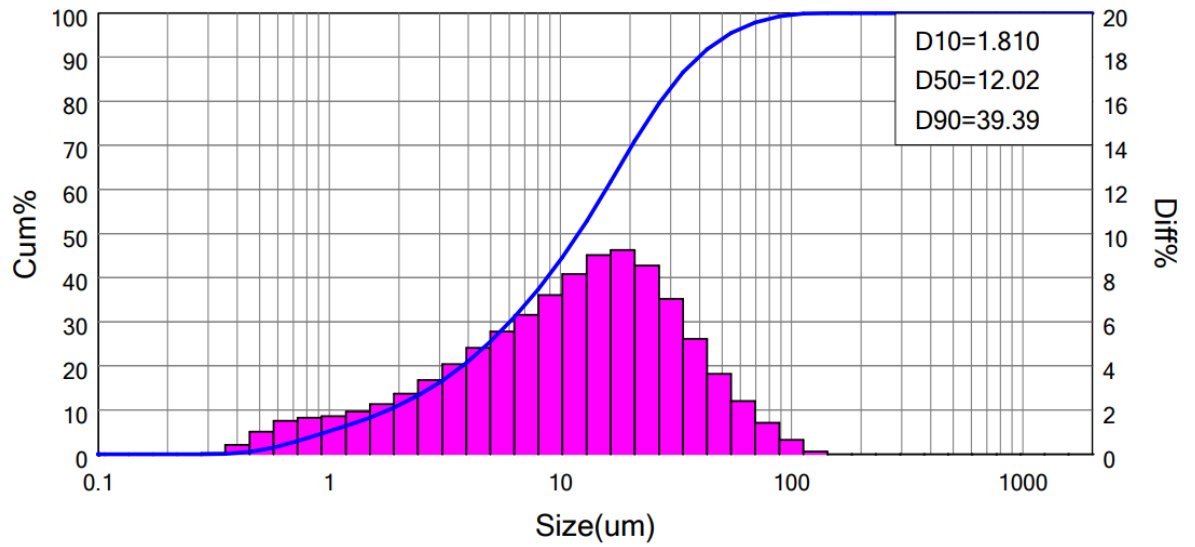


圖 2-2 爐石粉之粒徑分佈圖

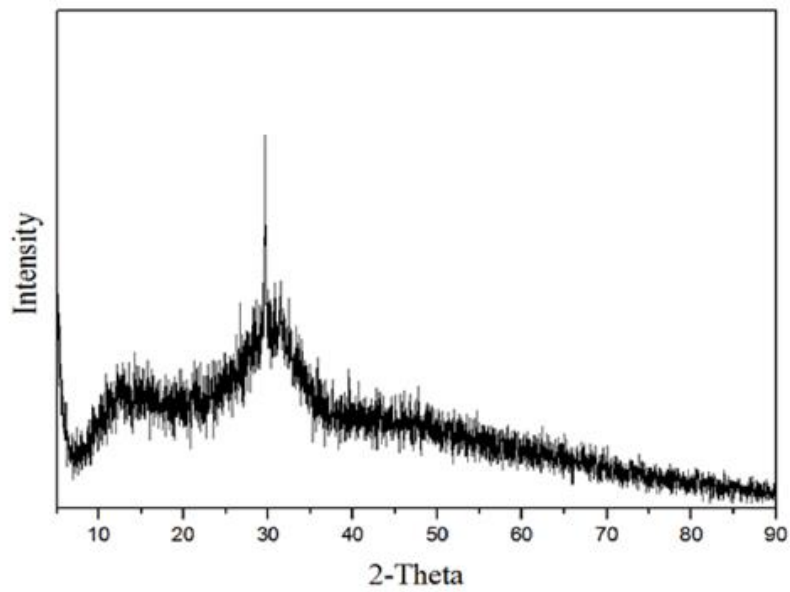


圖 2-3 爐石粉之 XRD 晶相分析

(三)矽灰石

本研究使用矽灰石作為抗裂粉體，其化學式為 CaSiO_3 ，外觀為白色細微粉末狀，如圖 2-4 所示。由於此粉體為纖維針狀，可填補固化體之空隙，減少收縮，進而增強固化體之機械強度[楊立昌，2014]。添加矽灰石之無機聚合材料固化體較未添加之固化體強度明顯上升[曹師維，2017]。表 2-3 為矽灰石之 XRF 成分分析結果，其主要以 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 為主，其中以 CaO 含量最高，約為 58.1 wt.%。圖 2-5 為矽灰石之粒徑分析圖，中位徑(D_{50})為 44 μm 。圖 2-6 為矽灰石之 XRD 晶相分析，從圖譜可看出其主要礦物相為矽灰石相。

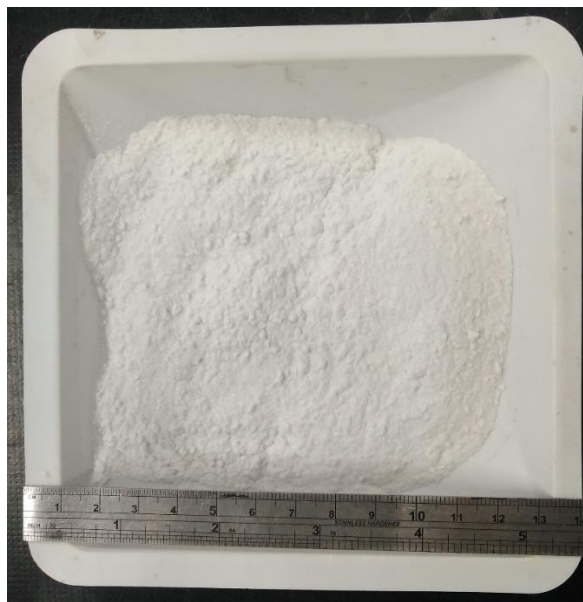


圖 2-4 矽灰石外觀

表 2-3 矽灰石之 XRF 成分分析

成分	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Others
wt. %	58.1	37.5	2.3	0.8	1.3

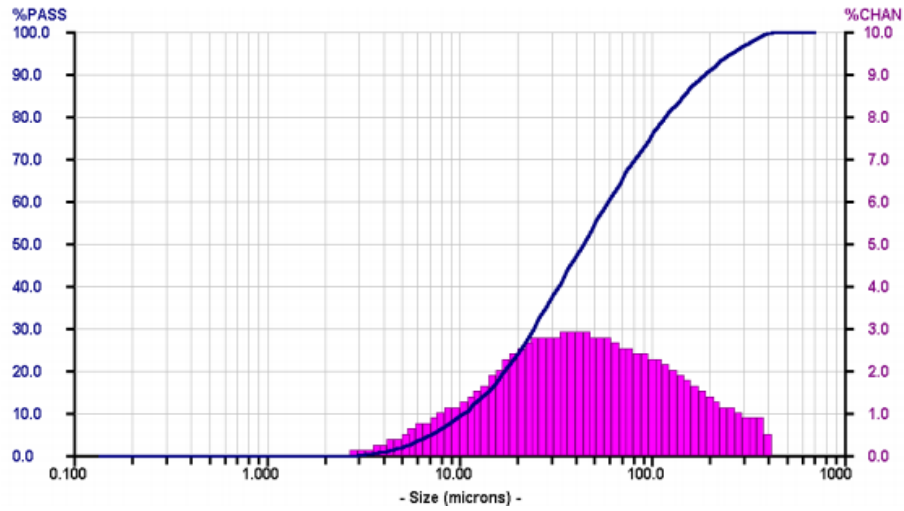


圖 2-5 矽灰石之粒徑分佈圖

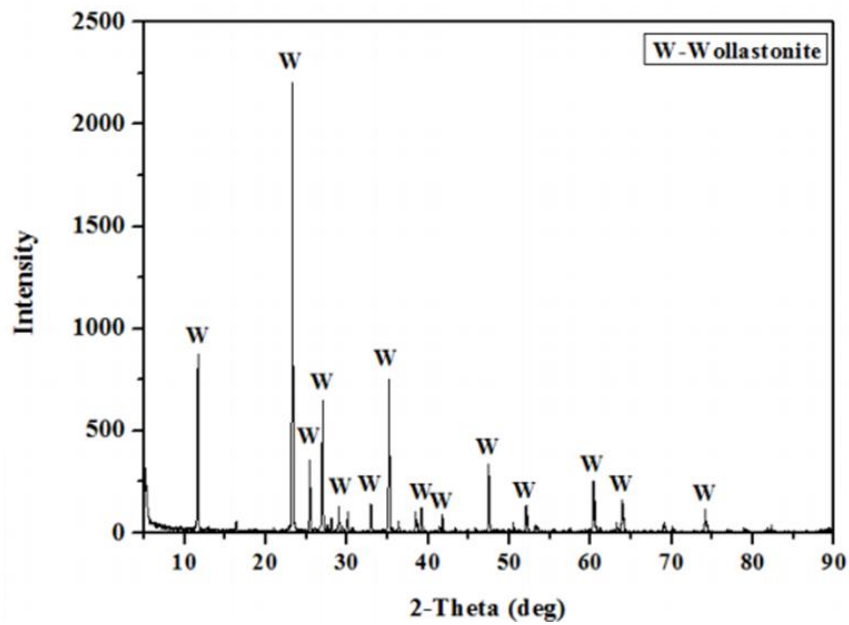


圖 2-6 矽灰石之 XRD 晶相分析

(四)氫氧化鈉溶液

本研究使用之工業級片鹼於城乙化工有限公司購買，其純度達 98%以上，將其溶解於水中並充分放熱後使用。主要用途為溶出原料粉體中之 Si、Al 離子，形成無機聚合前驅物。

(五)矽酸鈉溶液

本研究使用之矽酸鈉溶液(3 號水玻璃)於榮祥股份有限公司購買，其成分為 Na_2O (9.5%)及 SiO_2 (29%)，主要用途為額外提供無機聚合反應中之 Si 離子，增加膠體聚合之能力。

(六)鋁酸鈉溶液

本研究使用之鋁酸鈉溶液於台友化學有限公司購買，其 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ 莫爾比約為 1.8，用途為額外提供無機聚合反應中之 Al 離子，增加膠體聚合之能力，使反應更加完整。

(七)高錳酸鉀

本研究使用之高錳酸鉀於第一化工原料股份有限公司購買，其純度達 99%，化學式為 KMnO_4 ，比重為 2.7，屬強氧化劑，本研究將其作為前處理劑，將其與樹脂混拌後使樹脂失去活性，不再

進行離子交換反應，使固化體更加穩定[曹師維，2017]。

(八)氯化銫

本研究使用之氯化銫於第一化工原料股份有限公司購買，其純度達 99%，化學式為 CsCl 。本研究將其作為模擬放射性核素，將其加入離子交換樹脂中，模擬實際狀況及檢測溶出試驗。

(九)氯化鋇

本研究使用之氯化鋇於第一化工原料股份有限公司購買，其純度達 99%，化學式為 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。本研究將其作為模擬放射性核素，將其加入離子交換樹脂中，模擬實際狀況及檢測溶出試驗。

二、實驗方法及流程

本研究團隊以無機聚合技術固化陽離子型交換樹脂，其實驗流程分為三部分：

1. 持續觀察 107 年單批次 60L 之模擬實廠級固化試驗其耐水性、耐候性及離子溶出試驗結果，並以此為基礎進行後續實驗。
2. 參照前期實驗參數，以不同製作流程及不同高錳酸鉀添加量之實驗參數，測試其機械強度、自由水、耐水性及耐候性試驗結果，並以最佳配比之參數，檢測其耐高溫性、透氣/透水性，藉以瞭解未來固化體之特性。
3. 研究無機聚合固化體與其盛裝桶金屬(碳鋼、不鏽鋼…等)表面之作用行為，包括結合性、耐候性、溫濕度影響及其他變因研究等，並以此為基礎，完成使用金屬桶單批次 60L 之模擬實廠級固化試驗。

(一)持續觀察前期試驗－添加模擬核種之大型試驗

本實驗為前期模擬實廠固化情形，添加模擬核種，配製成單一批次 60L 之大型固化體，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出試驗。

1.實驗流程

實驗模擬實廠拌合情形，放大尺寸配製成單一批次 60 L 之固化體，並添加模擬核種，探討其影響。模擬核種配製流程如圖 2-7，首先配製氯化銫與氯化鋇溶液，離子濃度皆為 1000 ppm，攪拌 3 分鐘，接著加入樹脂攪拌 10 分鐘，靜置 5 日，每日固定時間攪拌 5 分鐘，瀝乾 3 天並取樣，測量其含水率及離子濃度，最後封存。實驗流程如圖 2-8，將高錳酸鉀粉體與部分鹼液攪拌 2 小時，接著加入樹脂攪拌 2 分鐘，樹脂內銫與鋇之濃度分別為 997.5 及 999.9 ppm，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 1 分鐘，呈均勻漿體後，灌入 60 L 固化箱中，再從中取部分漿體灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模，室溫養護分別於 7、14、28 天後脫模，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出試驗。

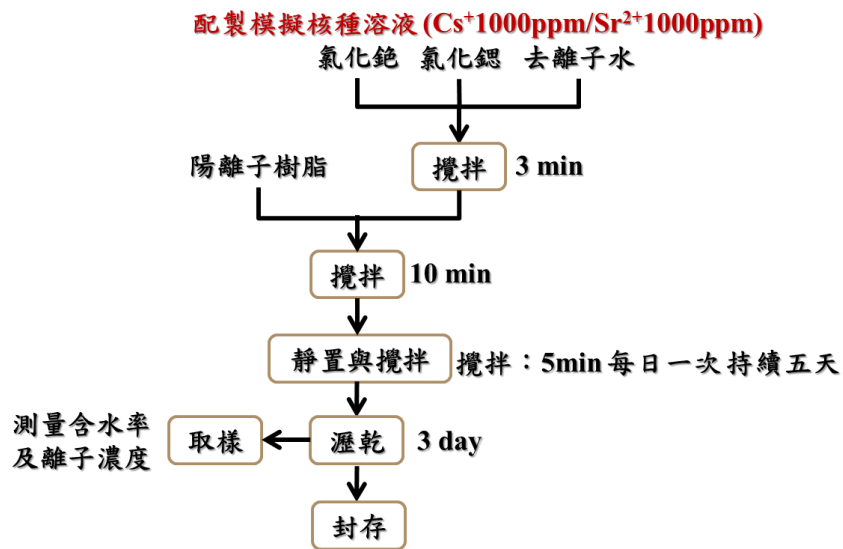


圖 2-7 模擬核種混合樹脂流程圖

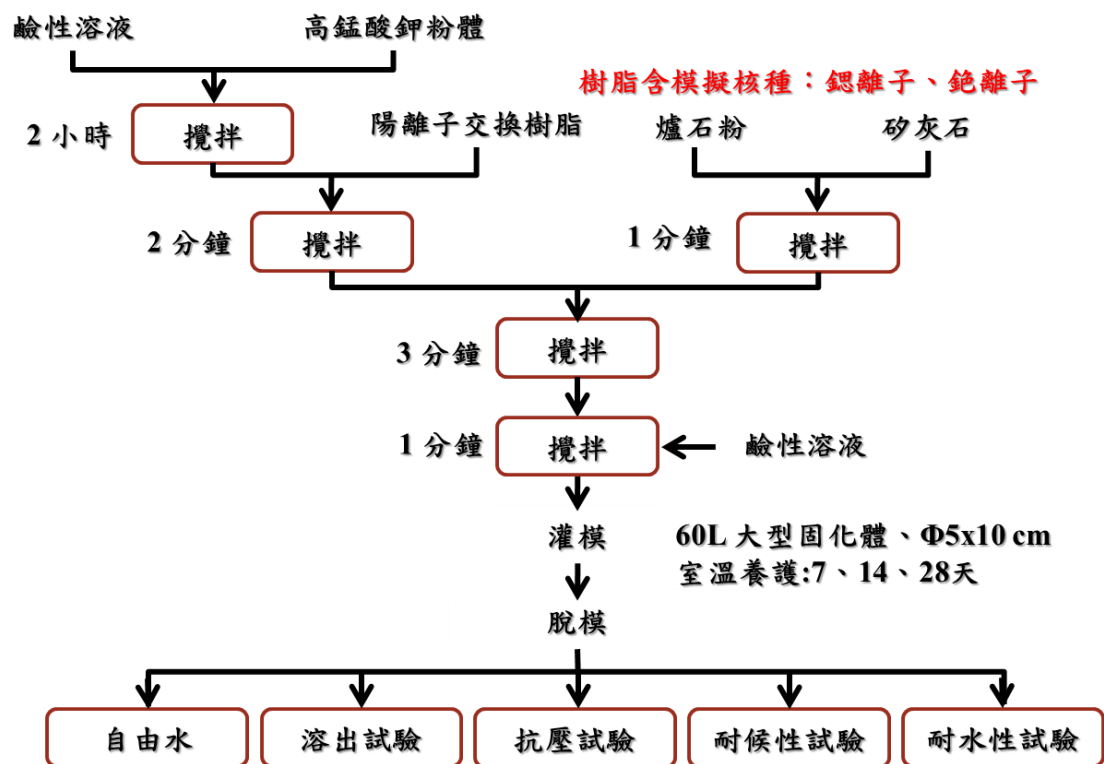


圖 2-8 添加模擬核種之大型試驗固化體製作流程

2.前期實驗配比

本實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-4 所示，
SiO₂/NaO₂ 莫爾比為 0.8，SiO₂/Al₂O₃ 莫爾比為 50。實驗配比如表
2-5 所示，陽離子型交換樹脂含水率為 50wt.%，額外添加之高錳
酸鉀粉體為陽離子型交換樹脂之 5 wt.%，液固比(L/S)為 0.91(包含
陽離子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B)為 0.85(鹼液與粉體之比
例)。

表 2-4 本年度添加模擬核種之大型試驗鹼液配比

鹼液濃度	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
12 M	0.8	50

表 2-5 本年度添加模擬核種之大型試驗實驗配比

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)	高錳酸鉀粉 體添加量 (樹脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
R41- K5	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)	5.0

試體編號說明：R 代表濕基樹脂添加量/K 代表高錳酸鉀粉體添加量

(二)比較不同製作流程試驗

本研究團隊於前期實驗中觀察到，高錳酸鉀粉體與鹼液攪拌後會形成凝膠狀，不利於實廠使用，因此本實驗透過更改製作流程，期望改善上述情形，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及耐高溫性試驗，觀察其影響與變化。

1.實驗流程

本實驗流程如圖 2-9 所示，將高錳酸鉀粉體、陽離子交換樹脂及部分鹼液一同攪拌 5 分鐘，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 1 分鐘，呈均勻漿體後，再將其灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模，在室溫養護分別於 7、14、28 天後脫模，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及耐高溫性試驗。

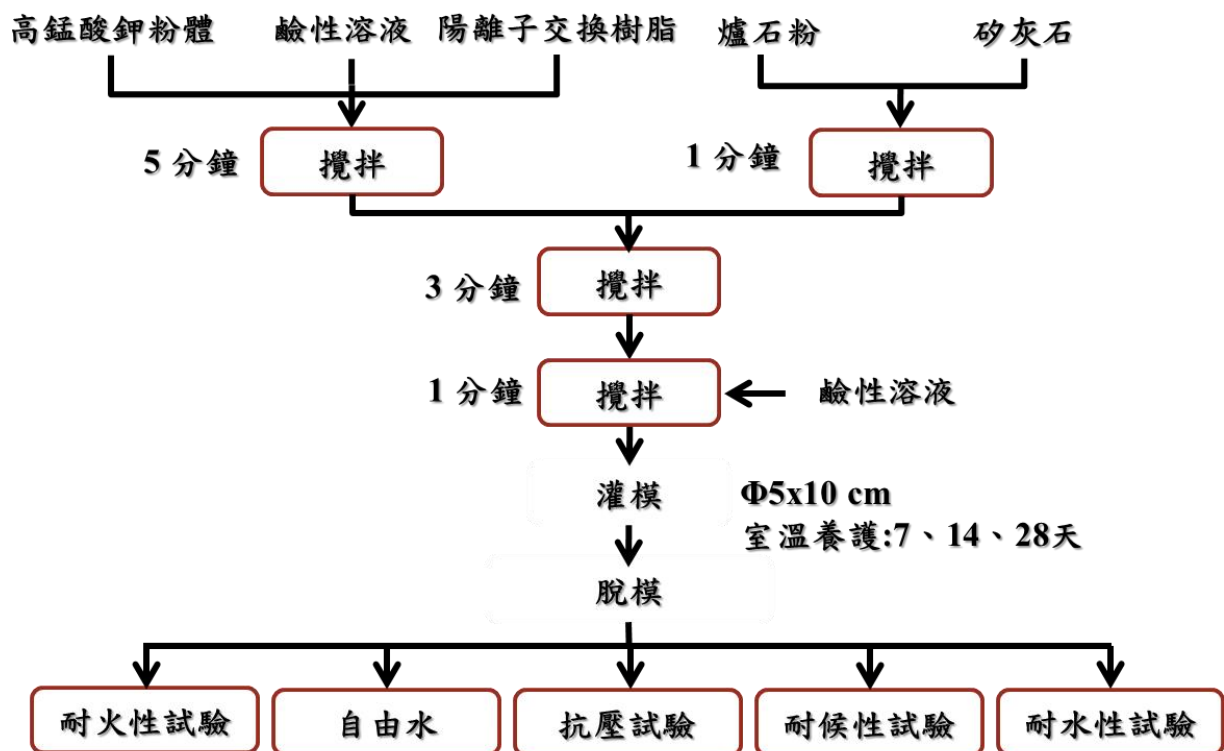


圖 2-9 比較不同製作流程試驗製作流程

2.實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-6 所示，
 $\text{SiO}_2/\text{NaO}_2$ 莫爾比為 0.8， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50。實驗配比如表
 2-7 所示，陽離子型交換樹脂含水率為 50 wt.%，額外添加高錳酸
 鉀粉體分別為陽離子型交換樹脂之 5wt.%，液固比(L/S)為 0.91(包
 含陽離子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B)為 0.85(鹼液與粉體之
 比例)。

表 2-6 比較不同製作流程試驗鹼液配比

鹼液濃度	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
12 M	0.8	50

表 2-7 比較不同製作流程試驗實驗配比

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)	高錳酸鉀粉 體添加量 (樹脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
C-R41 -K5	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)	5.0

試體編號說明：C 代表製程調整/R 代表濕基樹脂添加量/K 代表高

錳酸鉀粉體添加量

(三)比較不同高錳酸鉀添加量試驗

本實驗為探討不同高錳酸鉀添加量對無機聚合樹脂固化體之影響，將高錳酸鉀粉體添加量降低為 0 及 1 wt.%，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性，觀察其影響與變化，並與前期實驗結果做比較。

1.實驗流程

本實驗為降低高錳酸鉀粉體添加量，並探討其對無機聚合樹脂固化體之影響。實驗流程如圖 2-10 所示，將高錳酸鉀粉體與部分鹼液攪拌 2 小時，接著加入樹脂攪拌 2 分鐘，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 1 分鐘，呈均勻漿體後，灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模，於室溫養護分別於 7、14、28 天後脫模，測試其機械強度、自由水、耐候性及耐水性。

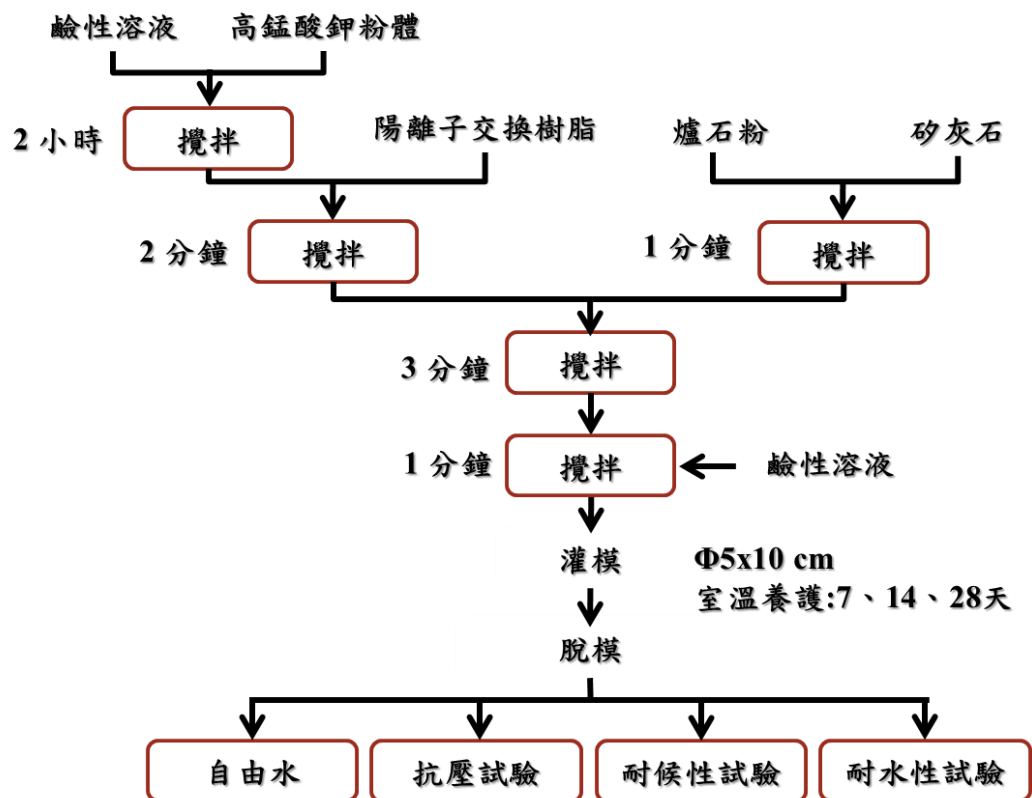


圖 2-10 比較不同高錳酸鉀添加量試驗製作流程

2. 實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-8 所示， $\text{SiO}_2/\text{NaO}_2$ 莫爾比為 0.8， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50。實驗配比如表 2-9 所示，添加之樹脂含水率為 50 wt.%，額外添加高錳酸鉀粉體為陽離子型交換樹脂之 0 及 1 wt.%，液固比(L/S)為 1.0(包含陽離子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B)為 1.0(鹼液與原料粉體之比例)。

表 2-8 比較不同高錳酸鉀添加量試驗鹼液配比

鹼液濃度	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
12 M	0.8	50

表 2-9 比較不同高錳酸鉀添加量試驗實驗配比

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)	高錳酸鉀粉 體添加量 (樹脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
R40- K0	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0	50.0	40.0 (20.0)	0.0
R40- K1	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0	50.0	40.0 (20.0)	1.0

試體編號說明：R 代表濕基樹脂添加量/K 代表高錳酸鉀粉體添加量

(四)不同液固比的影響

本實驗為探討不同液固比對無機聚合樹脂固化體之影響，將原先液固比從 1.0 降至 0.9，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性、透水透氣性及耐高溫性，觀察其影響與變化。

1.實驗流程

本實驗為降低製作時之液固比，並探討其對無機聚合樹脂固化體之影響。實驗流程如圖 2-11 所示，首先將樹脂與部分鹼液攪拌 2 分鐘，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 30 秒，呈均勻漿體後，灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模，於室溫養護分別於 7、14、28 天後脫模，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性、透水透氣性及耐高溫性。

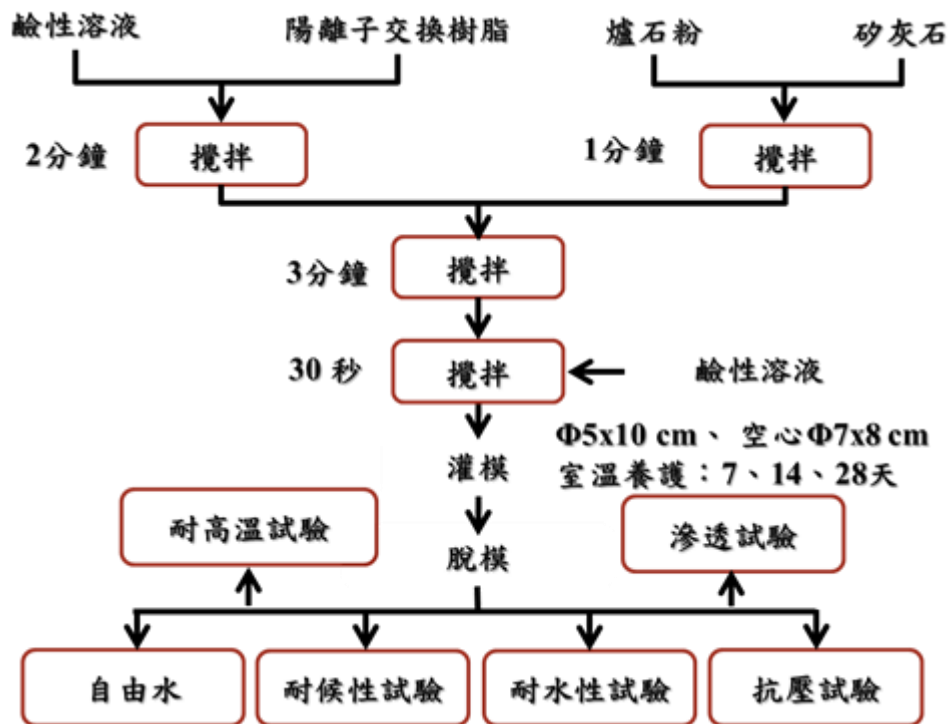


圖 2-11 比較不同液固比試驗製作流程

2. 實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-10 所示，
 $\text{SiO}_2/\text{NaO}_2$ 莫爾比為 0.8， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50。實驗配比如表 2-11
 所示，添加之樹脂含水率為 50 wt.%，液固比(L/S)為 0.91(包含陽離
 子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B)0.85(鹼液與原料粉體之比例)。

表 2-10 比較不同液固比試驗鹼液配比

鹼液濃度	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
12 M	0.8	50

表 2-11 比較不同液固比試驗實驗配比

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
L0.9-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)

試體編號說明：R 代表濕基樹脂添加量/ L 代表液固比

(五)無機聚合材料與金屬黏結性試驗

本實驗為測試無機聚合材料未來澆置於保存離子交換樹脂固化體用之金屬容器時，金屬材料與爐石基無機聚合材料之黏結性，故將採用[CNS15200-5-7 塗膜機械性質：附著試驗(拉脫法)]，了解若未添加粒狀離子交換樹脂之無機聚合材料與水泥，兩者金屬板材之黏結力之差別。

1.實驗流程

本實驗為測試無機聚合材料與水泥兩者對金屬板材之黏結力。實驗流程如圖 2-12 所示，首先將膠結材與溶液攪拌一分鐘，接著塗佈在鐵片及 304 不銹鋼片上，室溫養護 1 天後以[CNS15200-5-7 塗膜機械性質：附著試驗(拉脫法)]測試其附著力。

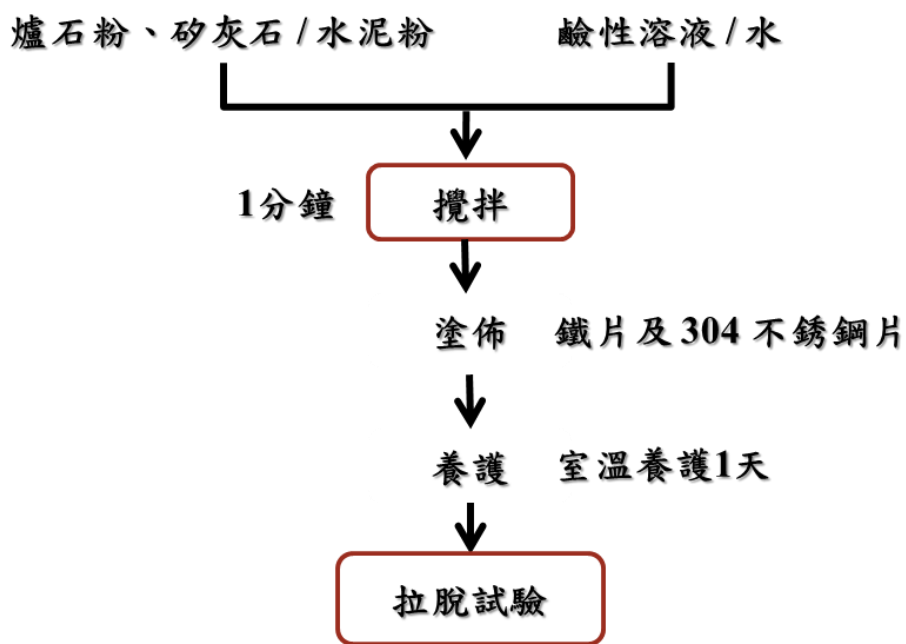


圖 2-12 無機聚合材料或水泥與金屬黏結性試驗流程

2. 實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-12 所示，
 $\text{SiO}_2/\text{NaO}_2$ 莫爾比為 0.8， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50。實驗配比如表 2-13
 所示，液固比(L/S)為 1.0。

表 2-12 無機聚合材料與金屬黏結性試驗鹼液配比

鹼液濃度	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
12 M	0.8	50

表 2-13 無機聚合材料或水泥與金屬黏結性試驗實驗配比

試體編號	L/S	爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)	水泥粉 (wt.%)	鹼性溶液 (wt.%)	水 (wt.%)
GP	0.85	43.1	10.8	-	46.0	-
OPC	0.85	-	-	53.9	-	46.0

試體編號說明：GP 代表為無機聚合材料/OPC 代表為水泥材料

(六)無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗

本實驗為測試無機聚合樹脂固化體未來澆置於保存離子交換樹脂固化體用之金屬容器時，無機聚合樹脂固化體是否會與金屬容器產生反應，故將無機聚合樹脂澆置於金屬容器中，觀察固化體與金屬容器之相容性(有無反應情形等)。

1.實驗流程

本實驗將測試無機聚合樹脂固化體是否會與金屬容器產生反應，固將無機聚合樹脂澆置於金屬容器中，觀察固化體與金屬容器之相容性。實驗流程如圖 2-13 所示，首先將樹脂與部分鹼液攪拌 2 分鐘，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 30 秒，呈均勻漿體後，灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之鐵模及 304 不鏽鋼容器中，室溫養護 28 天，最後觀察金屬容器表面之變化。

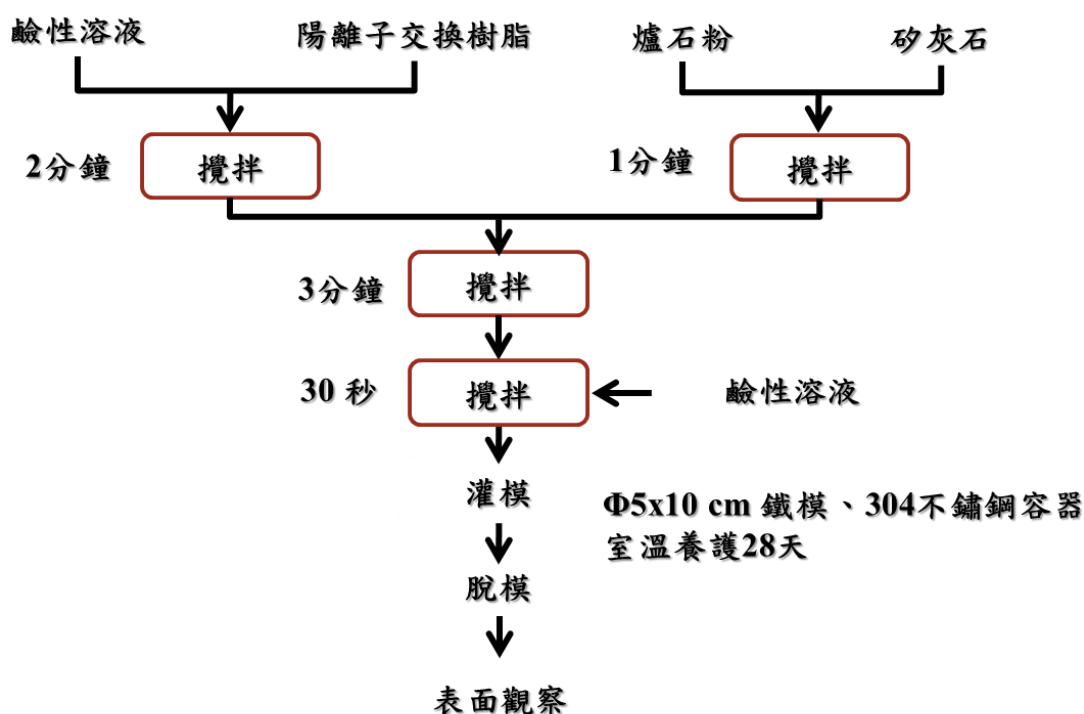


圖 2-13 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗流程圖

2. 實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-14 所示，
 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 莫爾比為 0.8， $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 莫爾比為 50。實驗配比如表 2-15
 所示，添加之樹脂含水率為 50 wt.%，液固比(L/S)為 0.91(包含陽離
 子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B) 0.85(鹼液與原料粉體之比例)。

表 2-14 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗鹼液配比

鹼液濃度	$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
12 M	0.8	50

表 2-15 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗配比

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
M-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)

試體編號說明：M 代表固化於金屬容器/R 代表濕基樹脂添加量

(七)模擬實廠製作大型試驗

本實驗為模擬實廠實際製作之情形，將放大無機聚合樹脂固化體製作量至 60L 以上，並添加模擬核種，且澆置於實際保存用金屬容器中，了解其實際可行性，最後測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出率，觀察其影響與變化。

1.實驗流程

本實驗為模擬實廠實際製作情形，並澆置於實際保存用金屬容器中。模擬核種配製流程如圖 2-14，首先配製氯化銫與氯化鋇溶液，離子濃度皆為 1000 ppm，攪拌 3 分鐘，接著加入樹脂攪拌 10 分鐘，靜置 5 日，每日固定時間攪拌 5 分鐘，瀝乾 3 天並取樣，測量其含水率及離子濃度，最後封存。實驗流程如圖 2-15 所示，首先將樹脂與部分鹼液攪拌 2 分鐘，之後加入經混拌 1 分鐘之爐石粉與矽灰石攪拌 3 分鐘，最後加入剩餘鹼液攪拌 30 秒，呈均勻漿體後，灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱模及實際保存用之金屬容器中，於室溫養護分別於 7、14、28 天後脫模，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出率。

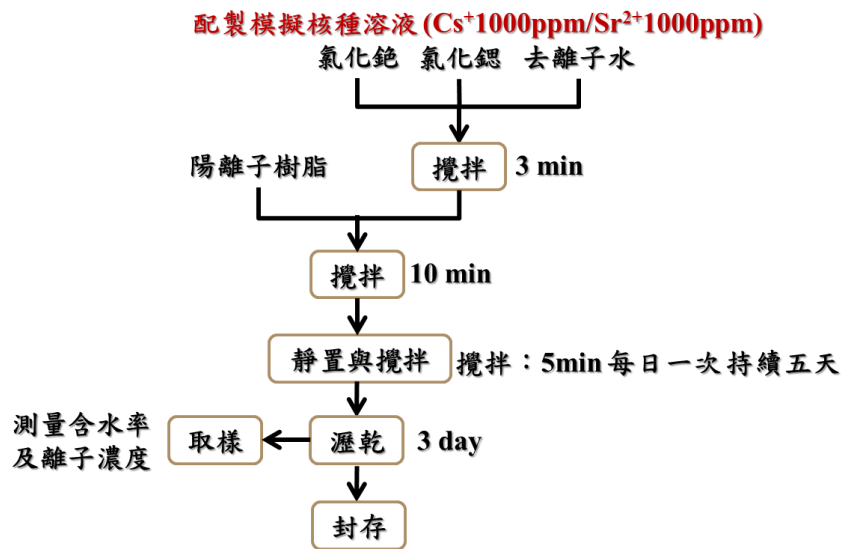


圖 2-14 模擬核種混合樹脂流程圖

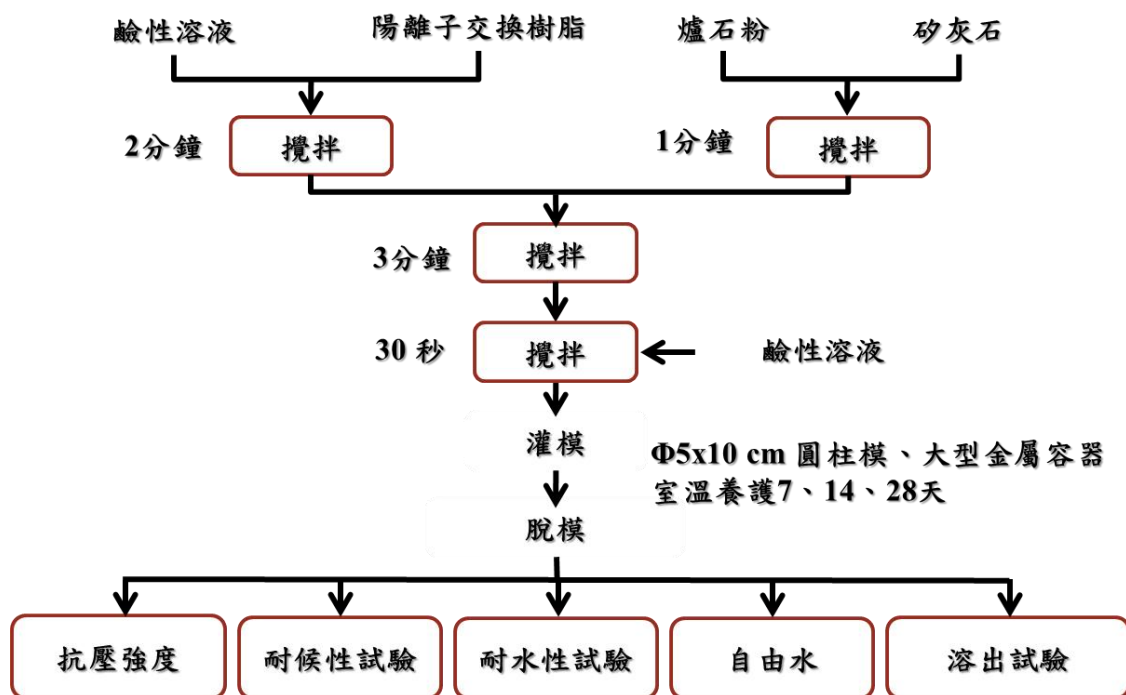


圖 2-15 模擬實廠製作大型試驗實驗流程

2.實驗配比

實驗使用之鹼液濃度為 12 M，其配比參數如表 2-16 所示，
SiO₂/NaO₂ 莫爾比為 0.8，SiO₂/Al₂O₃ 莫爾比為 50。實驗配比如表 2-17
所示，添加之樹脂含水率為 50 wt.%，液固比(L/S)為 0.91(包含陽離
子型交換樹脂之水分)，水膠比(W/B) 0.85(鹼液與原料粉體之比例)。

表 2-16 模擬實廠製作大型試驗鹼液配比

鹼液濃度	SiO ₂ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
12 M	0.8	50

表 2-17 模擬實廠製作大型試驗實驗配比

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
F-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)

試體編號說明：F 代表模擬實廠製作/ R 代表濕基樹脂添加量

三、固化體測試項目

由於放射性廢棄物具有一定之危險性，為了安全地貯存這些危險物質，國際原子能總署制定了處置放射性廢棄物的規範，作為其在操作、運送、貯存過程至最後處置時安全評估的重要考量因素。各國對於放射性固化體之品質要求及測試標準皆有所不同，而我國主要是參考美國的測試項目，規範要求良好之機械、化學、耐輻射、耐生物及穩定等性質，僅機械強度的要求有所不同。本研究依照表 2-18 所示，低放射性廢棄物固化體測試項目、方法及標準進行試驗，並進行耐高溫性、透氣/透水性...等多元化檢測，藉以瞭解未來固化體之特性。

表 2-18 低放射廢棄物均勻固化體測試項目、方法及標準

[放射性物料管理局，2011]

項次	測試項目	標準方法	標準內容
一	自由水	ANSI/ANS55.1	1.自由水含量小於固化體體積之百分之零點五。 2.自由水之 pH 值應介於 4~11。

項次	測試項目	標準方法	標準內容
二	溶出指數	ANS16.1	固化體內各核種溶出指數應大於 6。
三	機械強度	ASTM-C39	固化體之抗壓強度應大於每平方公分 15 公斤。
四	耐水性	固化體須浸水 90 天後測試機械強度(常溫下)。	經耐水性測試後，固化體之機械強度應大於每平方公分 15 公斤。
五	耐候性	固化體經溫、濕度循環變化後測試機械強度。	經耐候性測試後，固化體之機械強度應大於每平方公分 15 公斤。

(一)自由水

依 ANSI/ANS55.1 與 FCMA-WFC-110 固化體自由水測定方法，檢測固化體自由水含量。試體灌模養護後，待硬化後測量體積。養護 28 天後，目測是否有自由水產生，若有水分泌出則倒出量測水分體積，並檢測其 pH 值。將水分體積除以原固化體之體積即為自由水比例。

(二)溶出試驗

依 ANS16.1 及 FCMA-WFC-310 固化體溶出指數測定方法，實驗分為短期(5 天)以及後續長期(90 天)。廢棄物固化體釋出放射性核種之指標，並不能代表廢棄物固化體長期(數百至數千年)於處置場環境試驗的溶出情形，只能做為參考。模擬核種固化體養護 28 天後，先以水洗淨固化體，再浸泡於試體表面積 10 倍之去離子水容器中，依規範之時間間隔取樣和更新溶出液，再以整個試驗期間所取樣的樣品，以 ICP-MS 測定其溶出數據，計算出試體的溶出指數(L_i)。試體中欲測定之核種 i 的有效擴散率 D (effective diffusivity)可由質量傳送方程式來表示，如公式(2-1)，其中溶出間隔之平均時間 T 如公式(2-2)，最後試體中欲測定之核種 i 的溶出指數 L_i 定義為公式(2-3)。

$$D = \pi \left[\frac{a_n/A_0}{(\Delta t)_n} \right] \left[\frac{V}{S} \right]^2 T \quad (2-1)$$

D ：有效擴散率(cm^2/s)

a_n ：核種自試體在 n 次溶出間隔時釋放出之總量

A_0 ：核種在試體中第一次溶出間隔開始之總量

$(\Delta t)_n = t_n - t_{n-1}$ ：第 n 次溶出間隔時間(s)

V：試體體積(cm^3)

S：試體之表面積(cm^2)

T：溶出間隔之平均時間(s)，即

$$T = \left[\frac{1}{2} \left(t_n^{1/2} + t_{n-1}^{1/2} \right) \right]^2$$

(2-2)

t_n ：浸泡至第 n 次溶出間隔時間(s)

t_{n-1} ：浸泡至第 n-1 次溶出間隔時間(s)

$$L_i = \frac{1}{7} \sum_1^7 [\log(\beta/D_i)]_n$$

(2-3)

β ：常數($1.0\text{cm}^2/\text{s}$)

D_i ：核種 i 之有效擴散率

(三)機械強度試驗

本研究以半自動控制抗壓試驗機(50-A22A03)進行測定，如圖 2-16 所示。將漿料灌入 $\Phi 5 \times 10$ cm 之圓柱體 PE 模具，每組參數製作 5 個試體後，於 7 及 28 天室溫養護後脫模後進行抗壓試驗。其抗壓公式如(2-4)所示。

$$P = \frac{W}{A} \quad (2-4)$$

P=機械強度(MPa)

W=最大荷重(kgf)

A=受力面積(cm^2)



圖 2-16 半自動控制抗壓試驗機

(四)耐水性試驗

依 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天後脫模之試體浸泡於固化體 10 倍表面積之去離子水中，如圖 2-17 所示，待 90 天後，以目視檢試試體外觀有無變化，再進行機械強度測試。



圖 2-17 固化體之耐水性試驗

(五)耐候性試驗

依 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫膜之試體進行耐候試驗。本實驗使用台灣可造企業生產之體積變化及環境控制試驗儀，如圖 2-18 所示。利用溫、濕度變化關係模擬實際氣候環境，以研判固化體經長期季節循環後所受之影響。實驗開始之溫度為 20~30℃，濕度為 60~80%，持續一小時；在 20 分鐘內升溫至 50~60℃，濕度提高至 85~95%，持續一小時；在 40 分鐘內降溫至初始溫度及濕度，持續一小時；在 40 分鐘內降溫至-10℃，持續一小時；最後 20 分鐘內升溫至初始溫度，以上為一次循環。每一循環時間為 6 小時，試驗次數為 30 次，共計 180 小時，試驗結束後再進行機械強度測試。溫、濕度控制如表 2-19、圖 2-19 所示。

表 2-19 耐候性試驗溫、濕度試驗範圍

溫度(°C)	-10	20~30	50~60
濕度(%)	-	60~80	85~95



圖 2-18 體積變化及環境控制試驗儀

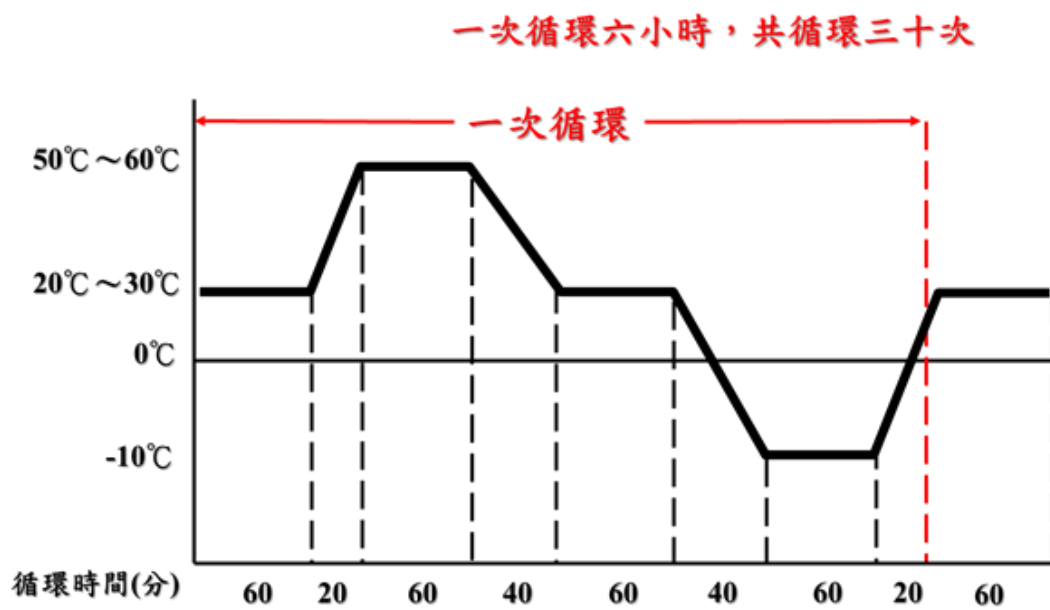


圖 2-19 耐候性試驗溫度控制流程圖

(六)耐高溫性試驗

根據放射性物料管理局之規範，其耐火性試驗方法僅適用於瀝青與塑膠固化體，不適用於水泥類固化體，因此本研究參考 Saavedra 等人(2017)之實驗方法進行耐高溫性試驗。本研究透過可程式高溫爐，將室溫養護 28 天後脫模之試體進行耐高溫性試驗，將試體從室溫開始升溫，升溫速率為 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，分別升溫至 100、200、300、400、500 及 600°C ，持續一小時後，靜置一天使其自然冷卻，最後觀察試體外觀並進行抗壓試驗。

(七)透水性試驗

本研究參考吳璿煒(2019)之水力徑向滲透試驗，測量無機聚合樹脂固化體之滲透係數，試體需製備成中空圓柱體，其內、外徑分別為 30 及 70 mm，高則為 80mm，待固化 28 天後檢測其滲透係數。試驗流程如下，將試體裝入試驗裝置，如圖 2-20 所示，藉由氣水轉換裝置給予加壓水頭，水經加壓流入中空試體中，形成內外壓力差，使其進行滲透，最後依 Darcy 定律計算滲透係數 $K_w(\text{m/s})$ ，如式(2-5)所示：

$$k_w = \frac{q \times \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{2\pi L \times \Delta h} \quad (2-5)$$

q 為流量(m^3/sec)、 L 為試體長(m)、 R_1 與 R_2 分別為試體的外、內半徑(m)、 Δh 為試驗過程的水頭差(m)。



圖 2-20 透水性試驗裝置[吳璿煒，2019]

(八)透氣性試驗

本研究參考吳璿焜(2019)之氣體徑向滲透試驗，測量無機聚合樹脂固化體之滲透係數，試體需製備成中空圓柱體，其內、外徑分別為 30 及 70 mm，高則為 80mm，待固化 28 天後檢測其滲透係數。試驗裝置如圖 2-21 所示，以氮氣作為滲透之流體，試體中空處為內腔室(V_{in})，試體外層與模具邊緣之空間與外接腔體為外腔室(V_{out})。將外腔室加壓至一定壓力(P_{out})，與內腔室壓力(P_{in})形成內外壓力差($P_{out} > P_{in}$)驅使氮氣向內腔室流動，記錄內外腔室之壓力變化，直至內外壓力平衡，此為第一階段，之後再給予外腔室加壓進行第二階段壓力平衡，本試驗共進行四階段，每次加壓約為 250 hpa，最後以 Brace 等人所提出之壓力脈衝法計算其滲透係數 k_a (nD)，如式(2-6)所示：

$$k_a = m \frac{L}{A} \times \frac{V_{in}V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \mu c \quad (2-6)$$

m 為各階段內腔室壓力變化半對數圖之斜率， L 為試體長度(cm)， A 為試體截面積(cm^2)， V_{in} 為外腔室體積(cm^3)， V_{out} 為內腔室體積(cm^3)， μ 為黏滯係數(dyne s/cm^2)，氮氣黏滯係數為 $0.00174 \text{ dyne s/cm}^2$ ， c 為壓縮係數。

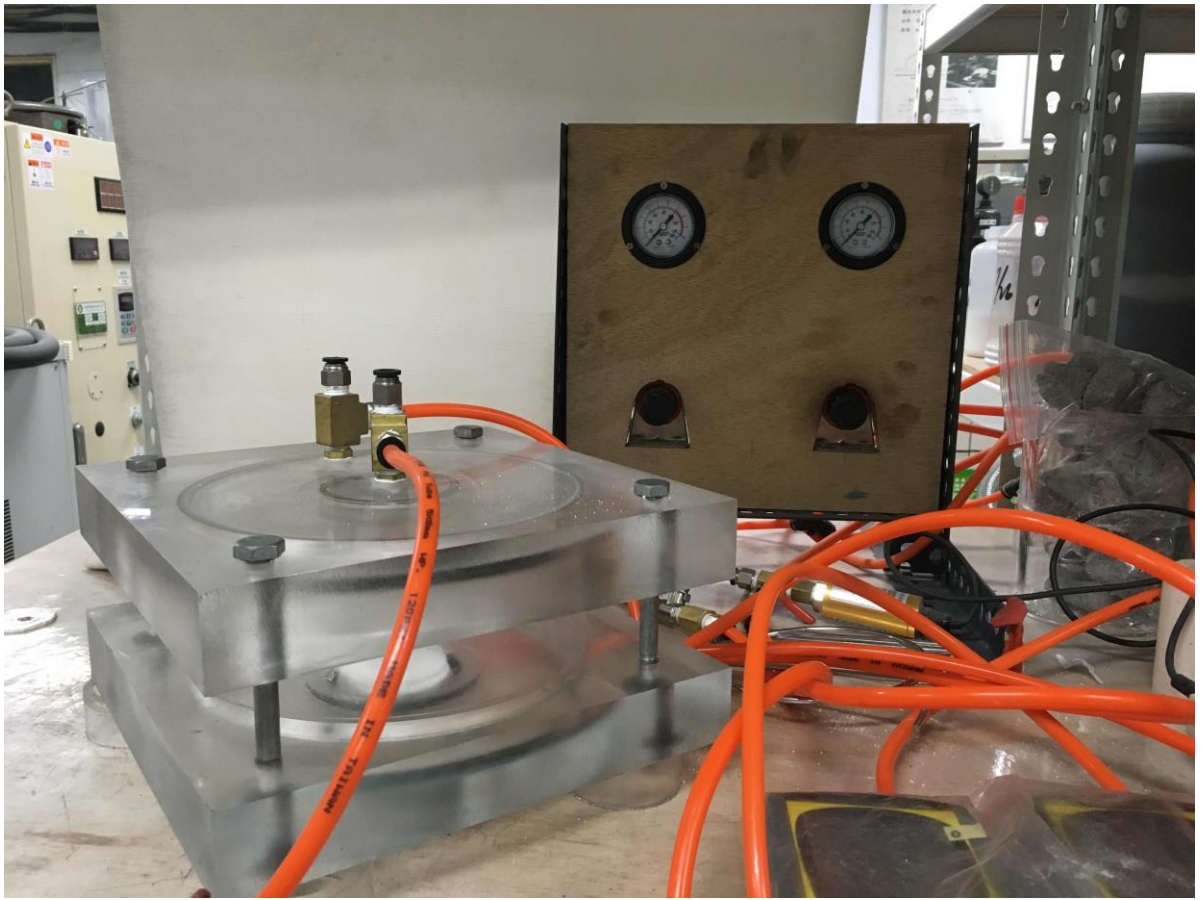


圖 2-21 透氣性試驗裝置

四、實驗設備

(一)桌上型攪拌器

本研究使用之攪拌器係使用由金慶和企業有限公司所出品之 10 公升桌上型攪拌器，型號為 SP-500A，如圖 2-22 所示。樣品製備時，將轉速控制於 132 rpm，將粉體原料(離子交換樹脂、爐石粉、矽灰石)和鹼性溶液置於容器內攪拌，製成爐石基固化體。



圖 2-22 桌上型攪拌器

(二)X 射線螢光能譜儀 (XRF)

本研究使用 X 射線螢光能譜儀 (EX-XRF, Rigaku NEXCG) 作為成分分析，如圖 2-23。檢測原理是樣品在 X 射線照下，特定元素的內層電子吸收能量躍遷後，外層電子回到基態並放出螢光 (特徵 X 光)，藉由此特徵光譜便可分析樣品中所含的元素種類，進一步定出成分含量。



圖 2-23 X 射線螢光能譜儀

(三)雷射粒度測定儀

本研究原料之粒徑分析係採用雷射粒徑分析儀測定，為 Bettersizer S2 研究級雷射粒徑分析儀，如圖 2-24 所示。本設備測定之粒徑範圍 $0.02\ \mu\text{m}$ 至 $2000\ \mu\text{m}$ ，樣品分析之前，必須與分散劑（六聚磷酸鈉）混合製備成漿體，且經超音波震盪器震盪，確認樣本分散後即可取樣倒入循環器內進行測定。分析原理係藉由一個發散的雷射光束作光源，並且在樣品池前後放置兩個透鏡，其中樣品池後面的透鏡同時具有兩個作用，一是將發散的雷射光束變成平行光(二次準直)，二是接收後，向大角度散射光(聚光)。樣品池前面的透鏡，接收前向散射光。在兩個透鏡的對焦平面上各放置一個光電偵測器，用來接收前向和後向散射信號，這樣就可以將前向和後向散射光同時接收，對前向和後向散射光進行分別處理整合運算，並引入小角度散射光和大角度散射光集合兩種處理技術，進行動態光散射粒徑分析之檢測。



圖 2-24 雷射粒度測定儀

(四)X 光繞射分析儀 (XRD)

本研究中，原料之晶相分析，係使用X光繞射分析儀（X-ray diffractometer，XRD），如圖2-25 所示，進行主要礦物結晶相之鑑定。

鑑定前需先將試樣研磨至粉體，再將粉末置於載台進行晶相分析。

本研究所使用之X光繞射分析儀型號為BRUKER D2 PHASER

X-ray，儀器之操作設定電壓30 kV及電流30 mA，所用之靶金屬材料

為銅（ $\text{CuK}\alpha, \lambda=1.54060 \times 10^{-10} \text{ m}$ ）。本實驗所使用之繞射角度範圍設

為5度至90度，掃描速率為 $12^\circ/\text{min}$ 。繞射後，數據配合電腦資料庫

(JCPDS)來比對結晶相。



圖 2-25 X 光繞射分析儀

(五)水平雙軸強制式拌合機

水平雙軸強制式拌合機系使用台灣計器科技有限公司所出品之 100~120 公升拌合機，型號為 YS/5S100/60，如圖 2-26 所示。製備樣品時，以雙軸交叉拌合，將轉速控制於 30~32 rpm，將離子交換樹脂、粉體與鹼性配方液置於容器內攪拌，使其形成固化體。



圖 2-26 水平雙軸強制式拌合機

(六)感應耦合電漿原子發射光譜分析儀

本研究使用之感應耦合電漿原子發射光譜分析儀 (Inductively Coupled Plasma- Optical Emission spectrometry, ICP-OES), 如圖 2-27 所示, 由美國珀金埃爾默公司出產, 型號為 Optima 8000 , 用於液態樣品之元素分析, 可同時偵測多種元素。發射光譜分析法的基本原理, 是利用每一元素均具有特定的能階, 且原子自基態被提升至激發態後, 激發態的原子再回到基態的過程中, 放出之能量相當於此能階差的光, 故可經由量測這些發射光譜及光譜強度, 進行化學元素組成的判定。本儀器偵測極限可達 ppm 至 ppb 等級。



圖 2-27 感應耦合電漿原子發射光譜分析儀

(七)可程式高溫爐(耐高溫性試驗)

本研究使用可程式高溫爐，將室溫養護 28 天後脫模之試體進行耐高溫性試驗。本研究使用台灣奇豪電熱有限公司所生產之可程式高溫爐，如圖 2-28 所示。此高溫爐可支援最多 12 段式加熱程式設定，最高加熱溫度可達 1600°C。



圖 2-28 可程式高溫爐

(八)全自動黏著力拉拔試驗儀(金屬黏結力測試)

本研究使用全自動黏著力拉拔試驗儀，測試無機聚合材料與水泥材料與金屬之黏結力，如圖 2-29 所示，由美國 DeFelsko® 公司出產，型號為 PosiTest® AT，用於測試塗層或黏著劑與金屬、木材、混凝土和其他剛性基底材的黏著力。



圖 2-29 全自動黏著力拉拔試驗儀

參、結果與討論

一、持續觀察前期試驗—添加模擬核種之大型試驗

前期實驗為模擬實廠固化情形，添加模擬核種，配製成單一批次 60L 之大型固化體，並灌模至 $\Phi 5 \times 10$ cm 圓柱模，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出試驗。其配比如表 3-1 所示。

圖 3-1 為製作情形。

表 3-1 添加模擬核種之大型試驗實驗配比

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)	高錳酸鉀粉 體添加量 (樹脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
R41- K5	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)	5.0



圖 3-1 添加模擬核種之大型試驗製作情形

(一)自由水

固化體若分泌液體，可能會將放射性核種釋出，因此固化體必須排除自由水現象。各國標準不同，但皆期望排除此現象，我國標準依照 ANSI/ANS55.1 方法，自由水含量必須小於 0.5%。如圖 3-2 及 3-3 所示，大型固化體及 $\Phi 5 \times 10$ cm 圓柱固化體皆無自由水產生，符合規範標準。



圖 3-2 R41-K5 系列(大型試驗) $\Phi 5 \times 10$ cm 圓柱固化體自由水(28 天)
(樹脂添加量為 41wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)



圖 3-3 R41-K5 系列(大型試驗)大型固化體自由水(28 天)
(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度
為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

(二)機械強度

本實驗以 $\Phi 5 \times 10$ cm 圓柱固化體以及大型固化體中鑽心取樣，進行機械強度試驗。表 3-2 為 R41-K5 系列(大型試驗)固化體之表面，可發現其表面有些許孔洞，應為灌模時未充分震動所產生之孔隙。圖 3-4 為機械強度結果圖，其 28 天機械強度達 6.9MPa，已達規範標準，且隨著齡期其強度有上升之趨勢；以鑽心取樣之試體進行檢測，365 天之機械強度仍達 8.2MPa。

表 3-2 R41-K5 系列(大型試驗)固化體表面

$\Phi 5 \times 10$ cm 圓柱(28 天)	大型固化體鑽心取樣(180 天)
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

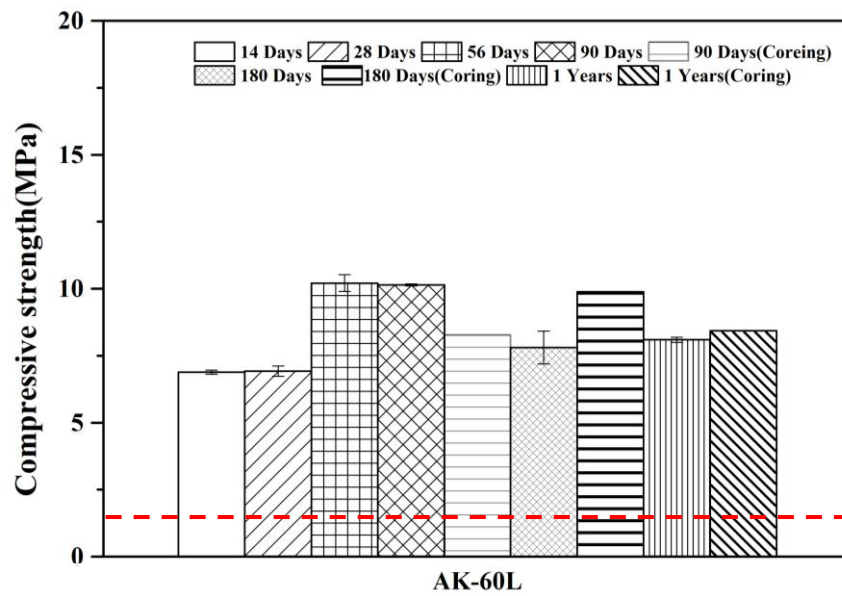


圖 3-4 R41-K5 系列(大型試驗)機械強度圖

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，虛線為規範標準 1.5MPa)

(三)耐候性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之試體進行溫、濕度變化循環模擬實際氣候環境試驗，再觀察其表面變化並進行機械強度測定。表 3-3 為耐候性試驗前後表面對照表，可看出經耐候性試驗後，固化體表面僅些許剝落。圖 3-5 為耐候性試驗前後強度對照圖，經耐候性試驗後其強度有明顯下降，僅剩 2.3MPa，但仍符合規範標準。

表 3-3 R41-K5 系列(大型試驗)耐候性試驗前後表面對照表

耐候性試驗前	耐候性試驗後
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

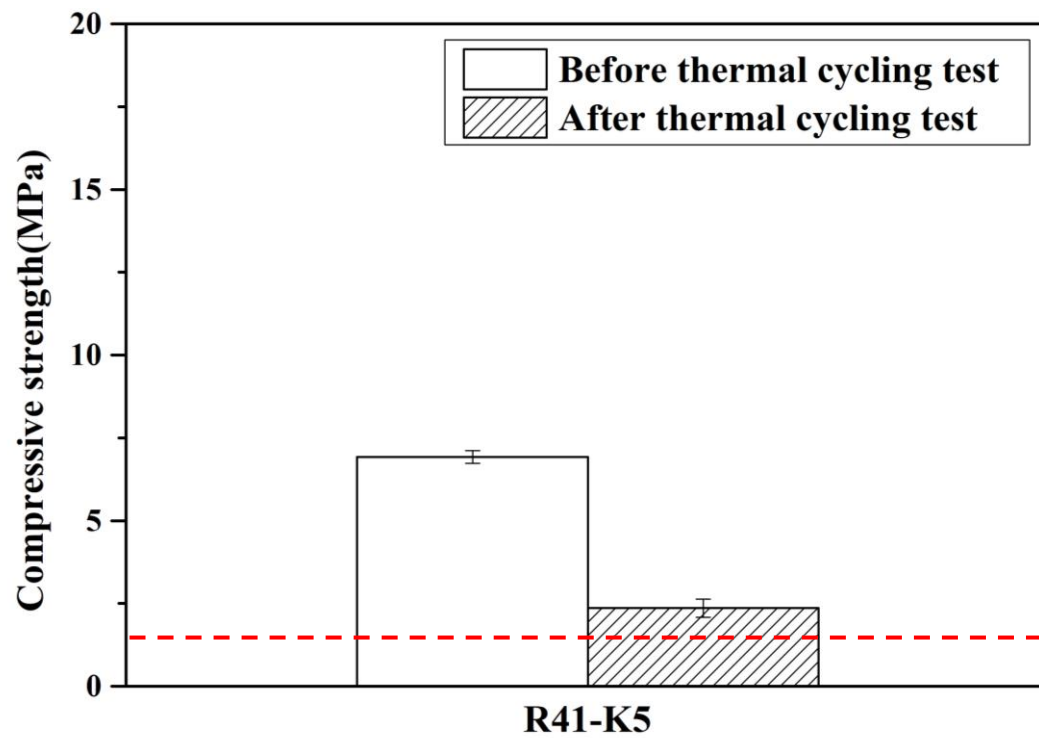


圖 3-5 R41-K5 系列(大型試驗)耐候性試驗前後強度對照圖

(樹脂添加量為 41wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, 虛線為規範標準 1.5MPa)

(四)耐水性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行耐水性試驗，浸泡於水中待 90 天後，取出觀測表面變化及測量機械強度。表 3-4 為耐水性試驗前後表面對照表，可看出經耐水性試驗後，固化體表面並無明顯變化。圖 3-6 為耐水性試驗前後強度對照圖，經耐水性試驗後其強度有上升之趨勢，強度達 10.9MPa，符合規範標準。

表 3-4 R41-K5 系列(大型試驗)耐水性試驗前後表面對照表

耐水性試驗前	耐水性試驗後
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

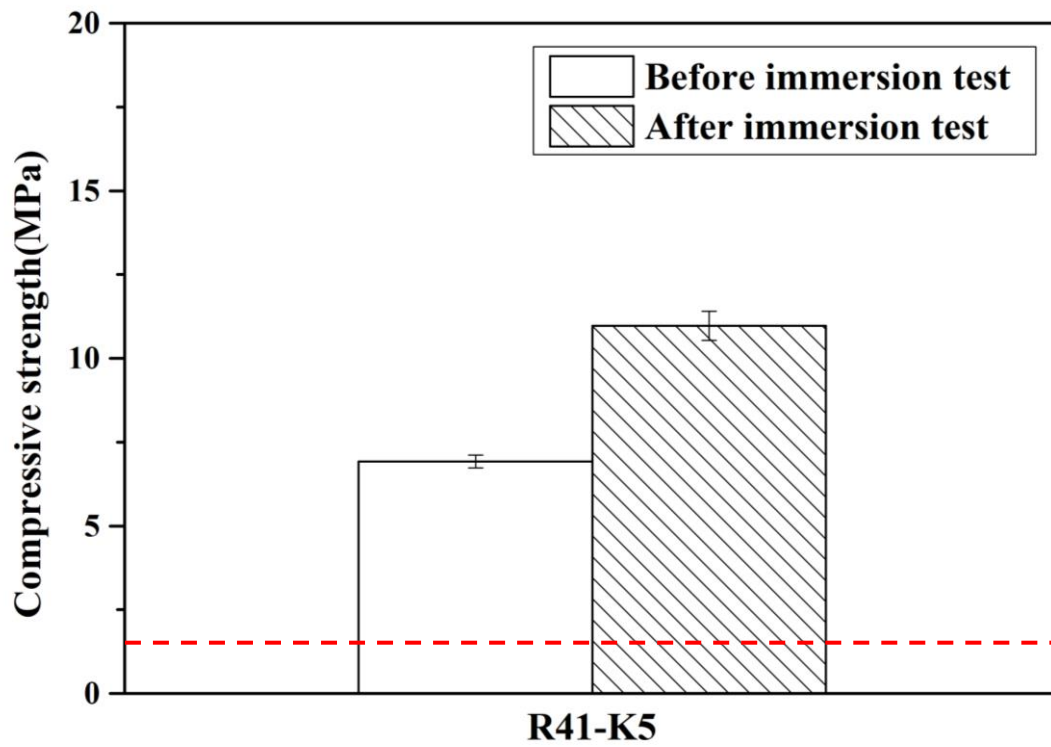


圖 3-6 R41-K5 系列(大型試驗)耐水性試驗前後強度對照圖

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，虛線為規範標準 1.5MPa)

(五)溶出試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-310 固化體溶出指數測定方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行溶出試驗，先以水洗淨固化體，再浸泡於其表面積 10 倍之去離子水容器中，依規範之時間間隔取樣和更新溶出液，再將整個試驗期間所取樣的樣品，以 ICP-MS 測定其溶出數據，計算出試體的溶出指數(L_i)。其結果如表 3-5、3-6 所示，兩種模擬核種之平均溶出指數皆大於規範標準之 6，其中銫離子擴散率遠大於銈離子，原因係因為銫離子性質較活潑，較容易析出[王文文等人，2018]。

表 3-5 R41-K5 系列(大型試驗)模擬核種銈離子溶出指數

取樣時間	溶液濃度 (mg/L)	溶出總量 (μg)	有效擴散率 D (cm^2/sec)	溶出指數 (L_{Sr})	平均溶出指數 AVG (L_{Sr})
第 2 小時	0.0207	41.3	1.26E-11	10.9	11.9
第 7 小時	0.0100	20.0	3.87E-12	11.4	
第 1 天	0.0097	19.3	1.08E-12	12.0	
第 2 天	0.0100	20.0	1.43E-12	11.8	
第 3 天	0.0100	20.0	2.43E-12	11.6	
第 4 天	0.0107	21.3	3.89E-12	11.4	
第 5 天	0.0107	21.3	5.02E-12	11.3	
第 19 天	0.0223	44.7	2.71E-13	12.6	
第 47 天	0.0213	42.7	1.79E-13	12.7	
第 90 天	0.0163	32.7	9.46E-14	13.0	

表 3-6 R41-K5 系列(大型試驗)模擬核種銫離子溶出指數

取樣時間	溶液濃度 (mg/L)	溶出總量 (μg)	有效擴散率 D (cm^2/sec)	溶出指數 (L_{Cs})	平均溶出指數 AVG (L_{Cs})
第 2 小時	0.7724	1544.8	1.76E-08	7.8	8.3
第 7 小時	0.2100	420	1.72E-09	8.8	
第 1 天	0.2530	506	7.45E-10	9.1	
第 2 天	0.8687	1737.3	1.08E-08	8.0	
第 3 天	1.0965	2193	2.94E-08	7.5	
第 4 天	0.6283	1256.7	1.36E-08	7.9	
第 5 天	1.0085	2017	4.50E-08	7.3	
第 19 天	2.1683	4336.7	2.57E-09	8.6	
第 47 天	3.6780	7356	5.35E-09	8.3	
第 90 天	3.7037	7407.3	4.88E-09	8.3	

(六)小結

1. 前期實驗為模擬實廠固化情形，添加模擬核種，配製成單一批次 60L 之大型固化體。其各項測試皆符合規範標準，顯示以無機聚合物固化離子交換樹脂時為可行，後續將繼續觀測，樹脂固化體之長期發展。
2. 本實驗以無機聚合物固化陽離子交換樹脂，樹脂固化量為濕基 41.8 wt.%，固化後試體並未產生自由水現象，其 28 天強度達 6.9MPa，經耐候性試驗後強度為 2.3MPa，經耐水性試驗後強度達 10.9MPa，鋁及鉍離子之平均溶出指數各為 11.9 及 8.3，皆符合規範標準。
3. 本研究團隊於實驗過程中發現，高錳酸鉀粉體與鹼液攪拌後會形成凝膠狀之膠體，不利於製作，因此後續將嘗試改善製作流程，避免此情形發生。

二、比較不同製作流程試驗

本研究團隊於前期實驗中觀察到，高錳酸鉀粉體與鹼液攪拌後會形成凝膠狀，不利於實廠使用，因此本實驗透過更改製作流程，期望改善上述情形，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及耐高溫性試驗，觀察其影響與變化。表 3-7 為其實驗配比對照表，本試驗僅改變製作流程，其配比皆參照前期大型試驗配比。

表 3-7 比較不同製作流程試驗實驗配比對照表

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹 脂(wt.%) (乾基)	高錳酸鉀粉 體添加量(樹 脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
R41 -K5 (大型 試驗)	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)	5.0
C-R41 -K5 (製程 調整)	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)	5.0

(一)自由水

自由水結果如圖 3-7 所示，本試驗更改製作流程後，製成之固化體從灌模養護直到 28 天後脫模，表層皆未產生自由水，符合規範之標準。



圖 3-7 比較不同製作流程試驗自由水(28 天)

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

(二)機械強度

表 3-8 為不同製作流程固化體外觀對照表。圖 3-8 為不同製作流程機械強度對照圖。從結果得知，製程調整後，強度明顯低於改善前，其 28 天機械強度僅 5.3MPa，推測是因更改流程後，高錳酸鉀未充分溶解於鹼液中，無法使離子交換樹脂完全失去活性，導致強度降低。

表 3-8 不同製作流程固化體外觀對照表(28 天)

R41-K5(大型試驗)	C-R41-K5(製程調整)
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後)

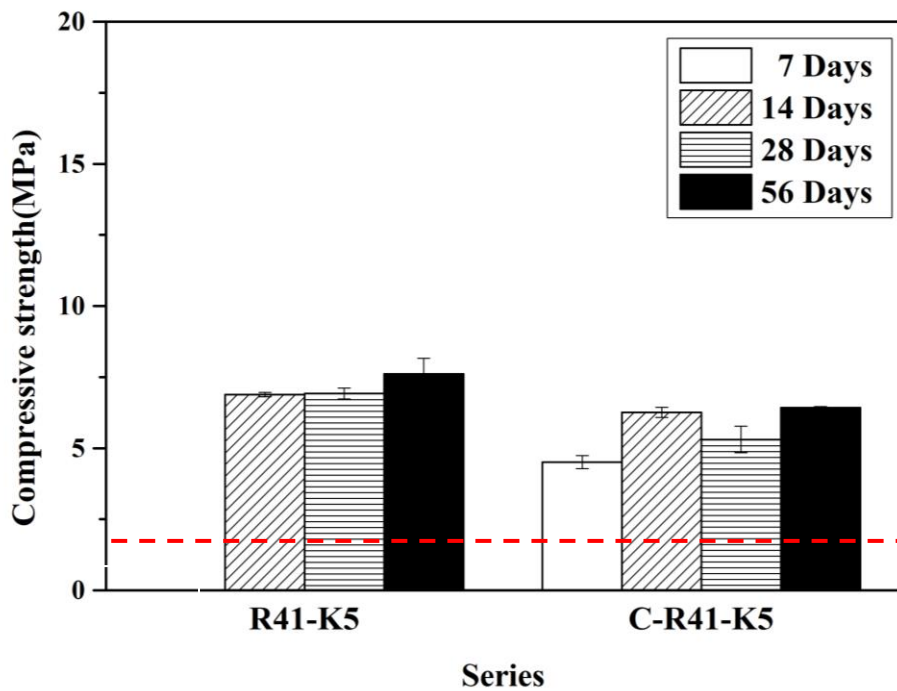


圖 3-8 不同製作流程機械強度對照圖

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後，虛線為規範標準 1.5MPa)

(三)耐候性試驗

為了解製程調整後，製作之固化體耐候性質，本試驗依照規範 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行溫、濕度變化循環模擬實際氣候環境試驗，於實驗後觀察固化體表面差異並進行機械強度測定。表 3-9 為不同製程耐候性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-9 為不同製程耐候性試驗前後機

械強度對照圖。經製程調整之固化體於耐候性試驗後，其表面有嚴重的剝落情形，但其強度仍有 2.9MPa，符合規範標準。

表 3-9 不同製程耐候性試驗前後固化體表面對照表

R41-K5(大型試驗)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗前
	
R41-K5(大型試驗)試驗後	C-R41-K5(製程調整)試驗後
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後)

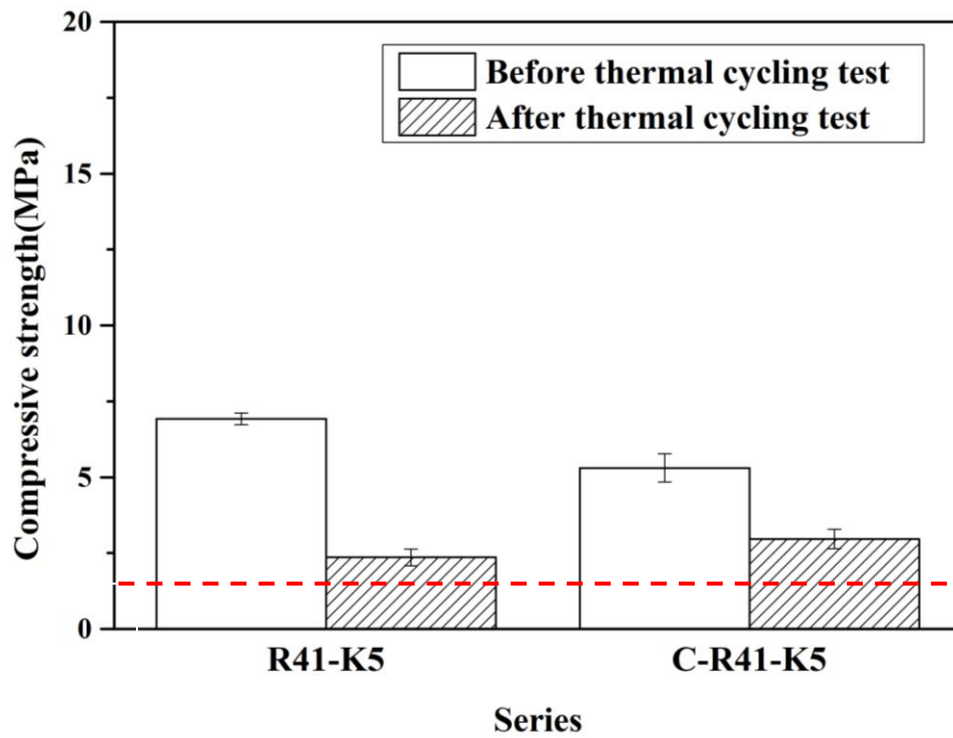


圖 3-9 不同製程耐候性試驗前後機械強度對照圖

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後，虛線為規範標準 1.5MPa)

(四)耐水性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行耐水性試驗，浸泡於水中待 90 天後，取出觀測表面變化及測量機械強度。表 3-10 為不同製程耐水性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-10 為不同製程耐水性試驗前後機械強度對照圖。經製程調整之固化體於耐水性試驗後，表面並無明顯變化，其強度亦保持在 5.6MPa，與試驗前並無明顯差異。

表 3-10 不同製程耐水性試驗前後固化體表面對照表

R41-K5(大型試驗)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗前
	
R41-K5(大型試驗)試驗後	C-R41-K5(製程調整)試驗後
	

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後)

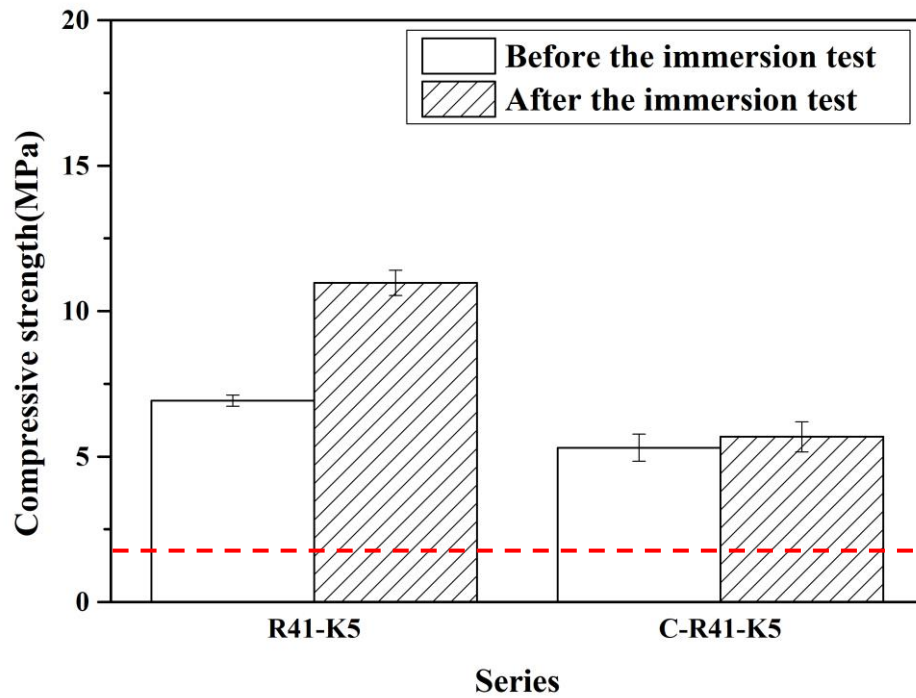


圖 3-10 不同製程耐水性試驗前後機械強度對照圖

(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為製程調整前，右為製程調整後，虛線為規範標準 1.5MPa)

(五)耐高溫性試驗

本試驗參照 Saavedra 等人(2017)之實驗方法，將室溫養護 28 天後脫模之試體進行耐高溫性試驗。首先將試體從室溫開始升溫，升溫速率為 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，分別升溫至 100°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C 及 600°C ，持續一小時後，靜置一天使其自然冷卻，最後觀察試體外觀並進行抗壓試驗。表 3-11 為耐高溫性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-11 為耐高溫性試驗前後固化體機械強度對照圖。如圖所示，無機聚合物具有不發煙、不燃燒之特性，因此經耐高溫性試驗後，固化體表面並無大裂縫產生，仍可保持固化體之完整性。但當溫度上升至 500°C 時，其顏色已顯灰白色；機械強度則下降，僅剩 1MPa 左右。

表 3-11 耐高溫性試驗前後固化體表面對照表

試驗溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
100°C		
試驗溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
200°C		
試驗溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
300°C		

試驗 溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
400°C		
試驗 溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
500°C		
試驗 溫度	C-R41-K5(製程調整)試驗前	C-R41-K5(製程調整)試驗後
600°C		

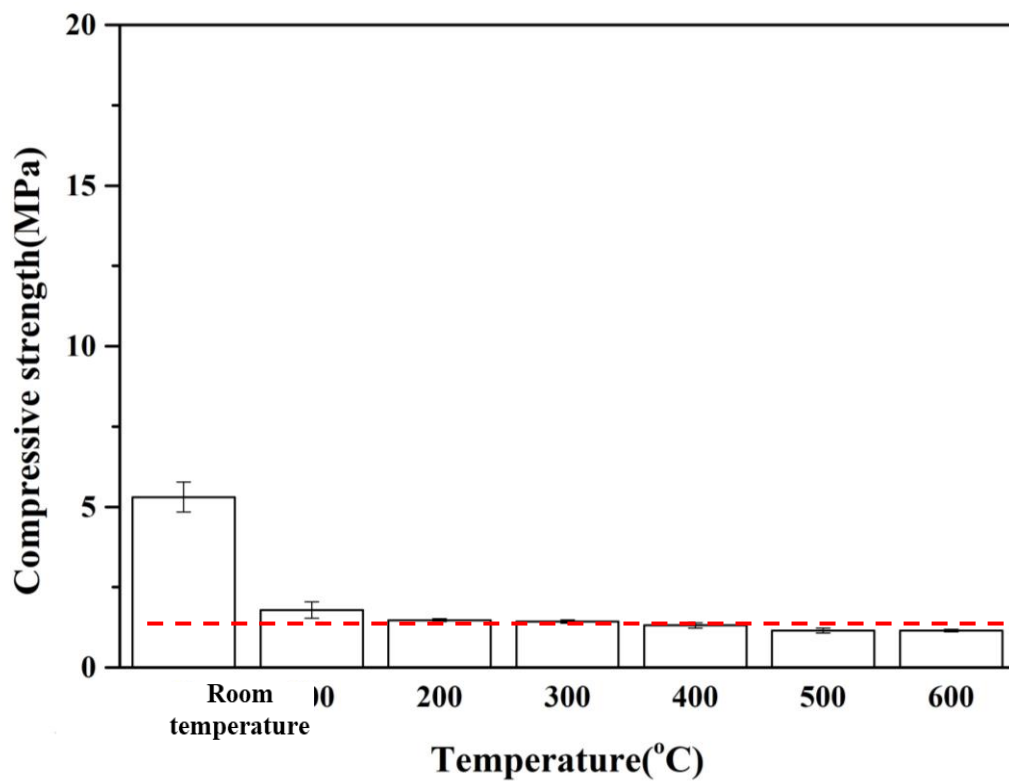


圖 3-11 C-R41-K5(製程調整)耐高溫性試驗前後機械強度對照圖
(樹脂添加量為 41wt.%，高錳酸鉀粉體添加量為 5 wt.%，鹼液濃度
為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

(六)小結

1. 本實驗為改善鹼液與高錳酸鉀粉體攪拌時形成之凝膠，嘗試更改製作流程避免此現象發生，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及耐高溫性試驗，觀察其影響與變化，其 28 天機械強度雖有所下降，但仍符合規範標準。
2. 本實驗以無機聚合物固化陽離子交換樹脂，並更改製作流程，樹脂固化量為濕基 41.8 wt.%，固化後試體並未產生自由水現象，其 28 天強度為 5.3MPa，經耐候性試驗後強度為 2.9MPa，經耐水性試驗後強度為 5.6MPa，經耐高溫性試驗後，其強度皆下降至 1MPa，但試體並無裂縫產生。
3. 經製程調整後，可改善鹼液凝膠化的情形發生，但固化體之強度有所下降，且經耐候性試驗後固化體表面有嚴重剝落，因此後續將探討其它解決辦法，避免製作上之不便。

三、比較不同高錳酸鉀添加量試驗

本實驗為探討不同高錳酸鉀添加量對無機聚合樹脂固化體之影響，將高錳酸鉀粉體添加量降低為 0 及 1 wt.%，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性，觀察其影響與變化，並與前期實驗結果做比較。表 3-12 為其實驗配比對照表。

表 3-12 比較不同高錳酸鉀添加量試驗實驗配比對照表

試體 編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)	高錳酸鉀 粉體添加 量(樹脂 wt.%)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)				
R40- K0	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0	50.0	40.0 (20.0)	0.0
R40- K1	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0	50.0	40.0 (20.0)	1.0
R40- K5 (前期 試驗)	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0	50.0	40.0 (20.0)	5.0

(一)自由水

表 3-13 為不同高錳酸鉀添加量之自由水試驗結果，如表所示，三者表層皆未產生自由水，符合規範之標準。

表 3-13 比較不同高錳酸鉀添加量試驗之自由水(28 天)

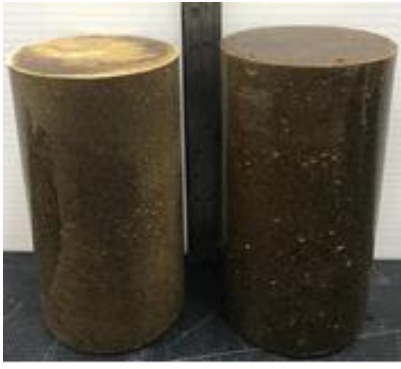
R40-K0	R40-K1	R40-K5(前期試驗)
		

(樹脂添加量為 40 wt.%，高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5wt.%，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，R40-K5 為前期結果)

(二)機械強度

表 3-14 為不同高錳酸鉀添加量固化體外觀對照表。圖 3-12 為不同高錳酸鉀添加量機械強度對照圖。如表所示，隨著高錳酸鉀添加量增加，固化體顏色越呈褐棕色，三者 28 天機械強度分別為 7.2、10.6 及 10.5MPa，皆符合規範標準，於後期其強度皆有所下滑，但平均保持在 7 MPa 上下，並於 90 天後趨於穩定。

表 3-14 不同高錳酸鉀添加量固化體外觀(28 天)

R40-K0	R40-K1	R40-K5(前期試驗)
		

(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，R40-K5 為前期結果)

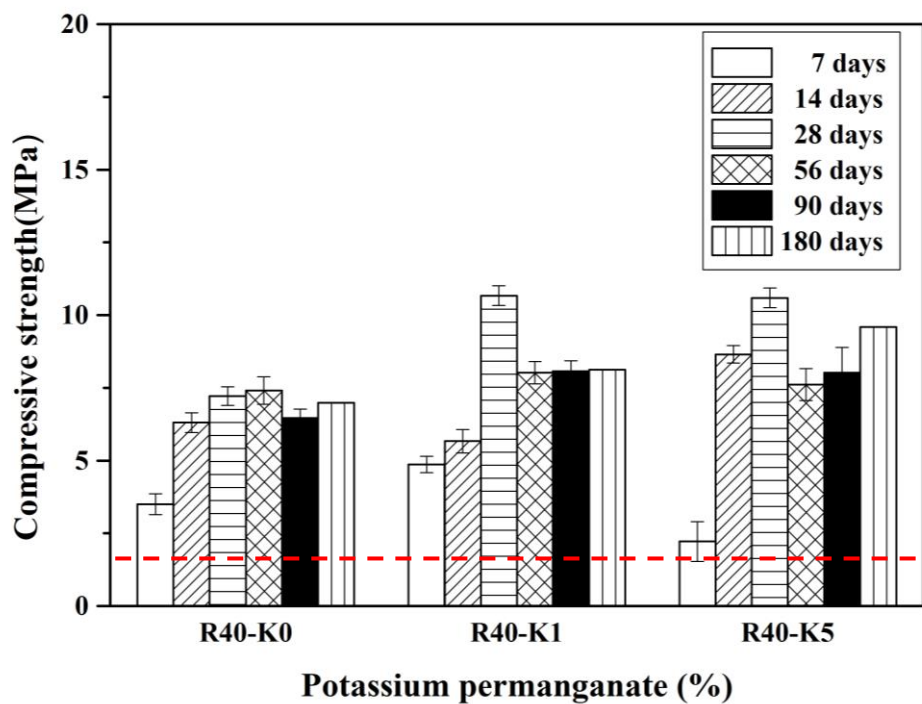


圖 3-12 不同高錳酸鉀添加量機械強度比較圖

(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, R40-K5 為前期結果, 虛線為規範標準 1.5MPa)

(三)耐候性試驗

為探討高錳酸鉀添加量，對固化體耐候性之影響，本試驗依照規範 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行溫、濕度變化循環模擬實際氣候環境試驗，於實驗後觀察固化體表面差異並進行機械強度測定。表 3-15 為不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-13 為不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後機械強度對照圖。如圖所示，三者經耐候性試驗後表面皆有剝落現象，其中又以添加 1、5 wt.%高錳酸鉀之固化體更為嚴重；機械強度則是三者皆符合標準，且強度與高錳酸鉀添加量呈反比，未添加高錳酸鉀之 R40-K0 系列強度可達 5MPa，明顯優於另二個系列。

表 3-15 不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後固化體表面對照表

R40-K0 試驗前	R40-K1 試驗前	R40-K5(前期試驗)試驗前
		
R40-K0 試驗後	R40-K1 試驗後	R40-K5(前期試驗)試驗後
		

(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%,
鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，R40-K5 為
前期結果)

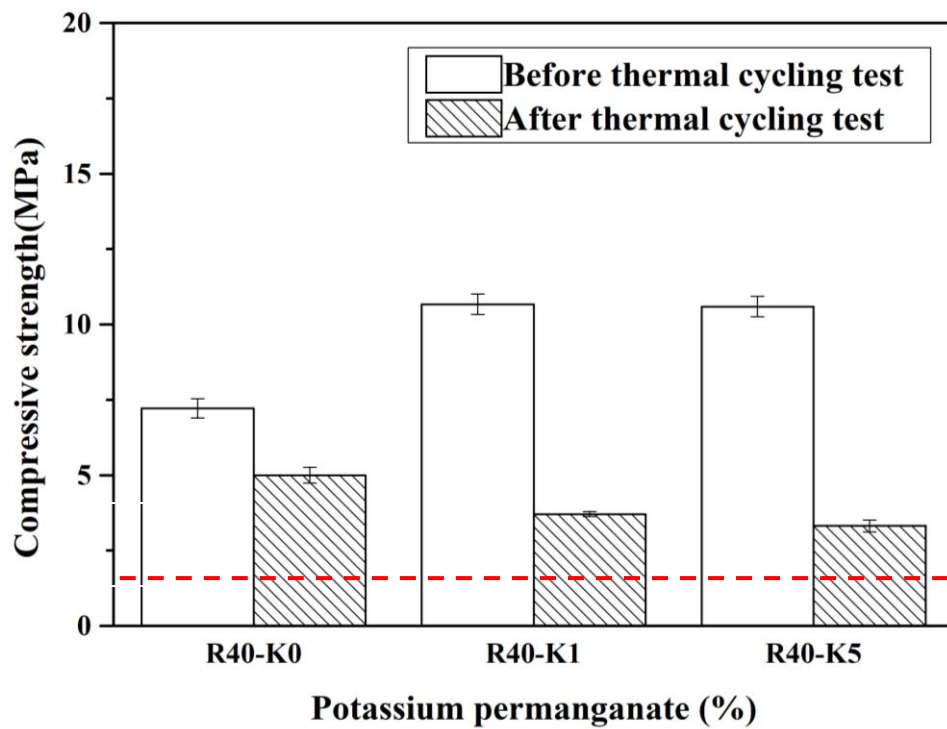
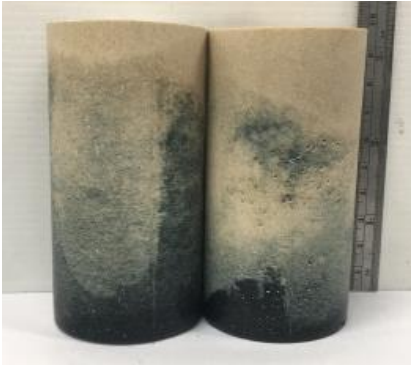


圖 3-13 不同高錳酸鉀添加量耐候性試驗前後機械強度比較圖
(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%,
鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，R40-K5 為
前期結果，虛線為規範標準 1.5MPa)

(四)耐水性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行耐水性試驗，浸泡於水中待 90 天後，取出觀測表面變化及測量機械強度。表 3-16 為不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-14 為不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後機械強度對照圖。如圖所示，三系列之固化體經耐水性試驗後，其表面皆無明顯破裂，表面顏色則慢慢褪至白色，此為添加爐石粉之無機聚合材料之正常現象；三者經試驗後強度皆有所下降，但仍符合規範標準。

表 3-16 不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後固化體表面對照表

R40-K0 試驗前	R40-K1 試驗前	R40-K5(前期試驗)試驗前
		
R40-K0 試驗後	R40-K1 試驗後	R40-K5(前期試驗)試驗後
		

(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%,

鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，R40-K5 為

前期結果)

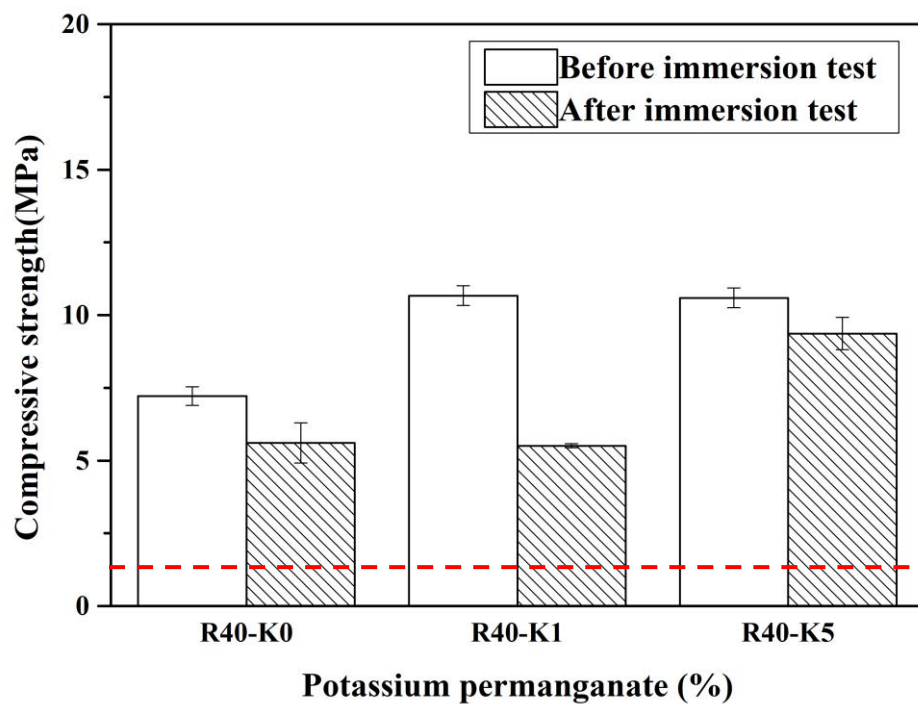


圖 3-14 不同高錳酸鉀添加量耐水性試驗前後機械強度比較圖
(樹脂添加量為 40 wt.%, 高錳酸鉀粉體添加量分別為 0、1 及 5 wt.%,
鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, R40-K5 為
前期結果, 虛線為規範標準 1.5MPa)

(五)小結

1. 本實驗將高錳酸鉀粉體添加量降低為 0 及 1 wt.%, 測試其機械強度、自由水、耐候性及耐水性, 觀察其影響與變化, 並與前期實驗結果做比較。三系列固化體之試驗結果皆符合規範標準, 其中以未添加高錳酸鉀之 R40-K0 系列最為穩定, 經耐候性試驗後, 強度下降最少。
2. 本實驗以無機聚合物固化陽離子交換樹脂, 並降低高錳酸鉀添加量至 0、1 wt.%, 並與前期試驗(高錳酸鉀添加量 5 wt.%)做比較, 樹脂固化量為濕基 40 wt.%, 固化後三者皆未產生自由水現象, 其 28 天強度分別為 7.2、10.6 及 10.5MPa, 經耐候性試驗後強度分別為 5.0、3.7 及 3.3MPa, 經耐水性試驗後強度分別為 5.6、5.5 及 9.3MPa。
3. 從目前實驗結果發現, 未添加高錳酸鉀之固化體, 經耐久性試驗後, 其強度明顯優於其它兩者, 且不添加高錳酸鉀便可避免鹼液凝膠化之情形發生, 有利於實廠使用, 因此後續將嘗試不添加高錳酸鉀進行後續實驗。

四、比較不同液固比試驗

本實驗為探討不同液固比對無機聚合樹脂固化體之影響，將原先液固比從 1.0 降至 0.9，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性、透水透氣性及耐高溫性，觀察其影響與變化。表 3-17 為其實驗配比對照表。

表 3-17 比較不同液固比試驗實驗配比對照表

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
L0.9-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)
R40-K0	1.0	1.0	24.0	6.0	30.0		40.0 (20.0)

(一)自由水

表 3-18 為不同液固比自由水試驗結果對照表，如表所示，降低液固比後，表面並未產生自由水，符合規範之標準。

表 3-18 不同液固比自由水試驗結果對照表

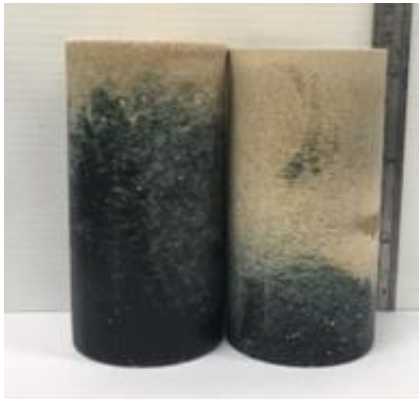
R0.9-R41	R1.0-R40
	

(樹脂添加量分別為 41 及 40 wt.%，L/S 分別為 0.9 及 1.0，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

(二)機械強度

表 3-19 為不同液固比固化體外觀對照表。圖 3-15 為不同液固比機械強度對照圖。如圖所示，兩者之外觀並無太大差異，但降低液固比後，其 7 天強度更高，因為液固比更低，聚合脫水的反應更快，因此於 7 天之強度較高，但不影響後期強度，兩者之 28 天強度並未有太大差異，分別為 6.4MPa 及 7.2MPa，皆符合規範，後續須繼續進行觀察。

表 3-19 不同液固比固化體外觀對照表(28 天)

L0.9-R41	L1.0-R40
	

(樹脂添加量分別為 41 及 40 wt.%，L/S 分別為 0.9 及 1.0，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

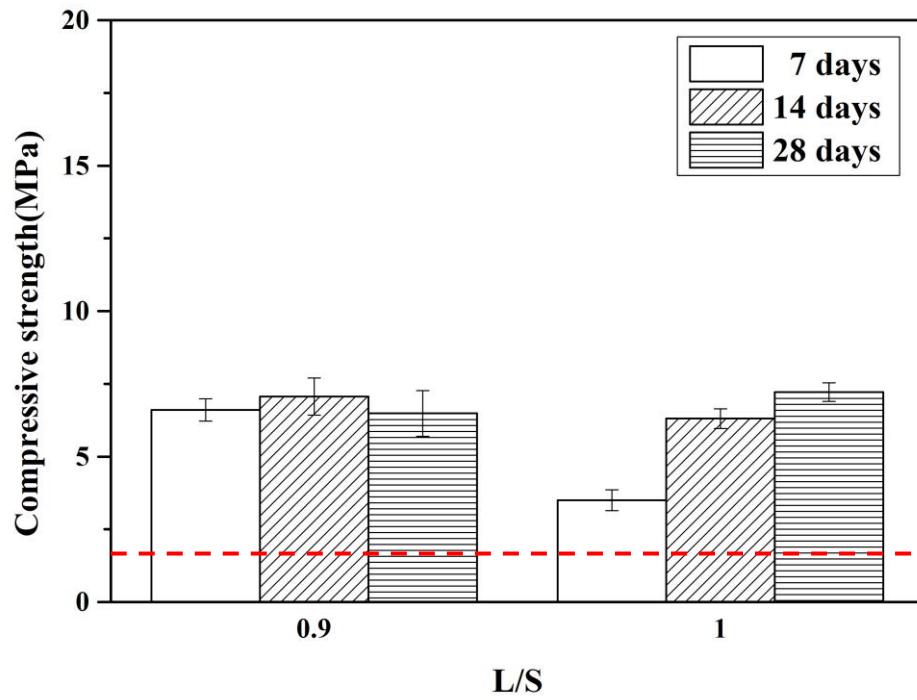


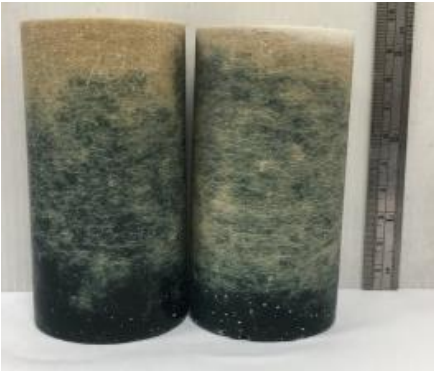
圖 3-1 不同液固比機械強度對照圖

(樹脂添加量分別為 41 及 40 wt.%, L/S 分別為 0.9 及 1.0, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, 虛線為規範標準 1.5MPa)

(三)耐候性試驗

為探討降低液固比後固化體之耐候性，本試驗依照規範 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行溫、濕度變化循環模擬實際氣候環境試驗，於實驗後觀察固化體表面差異並進行機械強度測定。表 3-20 為不同液固比耐候性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-16 為不同液固比耐候性試驗前後機械強度對照圖。如圖所示，經耐候性試驗後，固化體表面還是會有表面剝落的情形發生，其原因是樹脂內的水份於零度下時會結冰膨脹，導致固化體表面剝落。先前進行試驗前，固化體均是脫模後直接測試，導致固化體表面水份太高，因而產生剝落；若於脫模後先靜至室溫一天，使其表面水份減少，則可保持固化體之完整性，且強度亦有所提升，從原先之 2.7MPa 上升至 5.4MPa，如圖 3-17 所示。

表 3-20 不同液固比耐候性試驗前後固化體表面對照表

L0.9-R41 試驗前	L1.0-R40 試驗前
	
L0.9-R41 試驗後	L1.0-R40 試驗後
	

(樹脂添加量分別為 41 及 40 wt.%，L/S 分別為 0.9 及 1.0，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

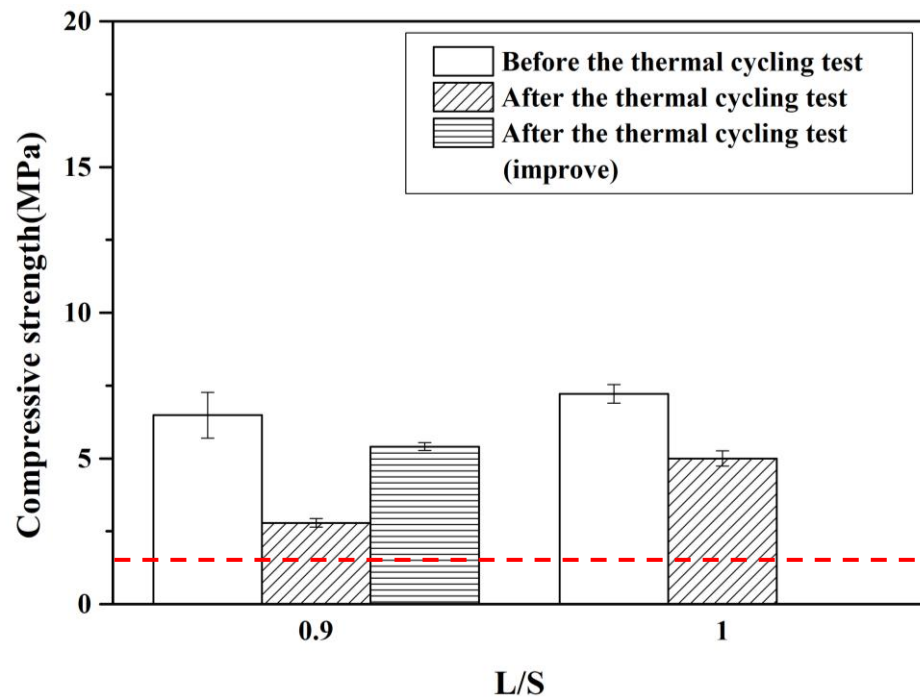


圖 3-16 不同液固比耐候性試驗前後機械強度比較圖

(樹脂添加量分別為 41 及 40 wt.%, L/S 分別為 0.9 及 1.0, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, improve 為改善測試方法後之強度, 虛線為規範標準 1.5MPa)



圖 3-17 改善測試方法後經耐候性試驗後之固化體

((樹脂添加量為 41 wt.%, L/S 為 0.9, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

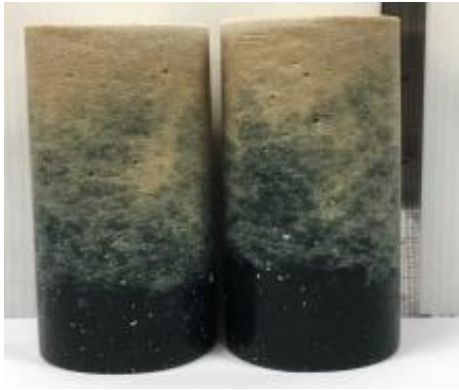
(四)耐水性試驗

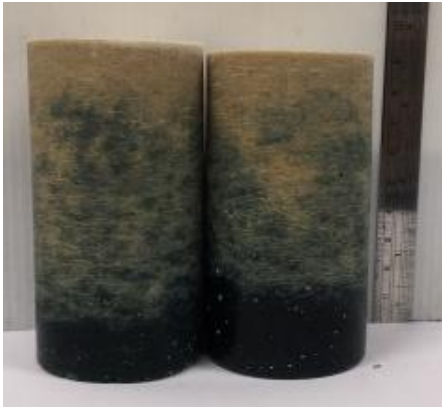
本試驗是依照規範 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行耐水性試驗，浸泡於水中待 90 天後，取出觀測表面變化及測量機械強度。目前齡期未到，尚在進行試驗，後續將持續觀察。

(五)耐高溫性試驗

本試驗參照 Saavedra 等人(2017)之實驗方法，將室溫養護 28 天後脫模之試體進行耐高溫性試驗。首先將試體從室溫開始升溫，升溫速率為 5 °C/min，分別升溫至 100、200、300、400、500 及 600°C，持續一小時後，靜置一天使其自然冷卻，最後觀察試體外觀並進行抗壓試驗。表 3-21 為耐高溫性試驗前後固化體表面對照表，圖 3-17 為耐高溫性試驗前後固化體機械強度對照圖。如圖所示，經耐高溫性試驗後，樹脂固化體依舊能保持其完整性，且於 100°C 之試驗後，其強度仍有 6.1MPa；即使升溫至 600°C，依舊有 1.2MPa，顯示無機聚合材料具有優秀之耐熱性能。

表 3-21 耐高溫性試驗前後固化體表面對照表

試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
100°C		
試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
200°C		
試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
300°C		

試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
400°C		
試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
500°C		
試驗溫度	L0.9-R41(降低液固比)試驗前	L0.9-R41(降低液固比)試驗後
600°C		

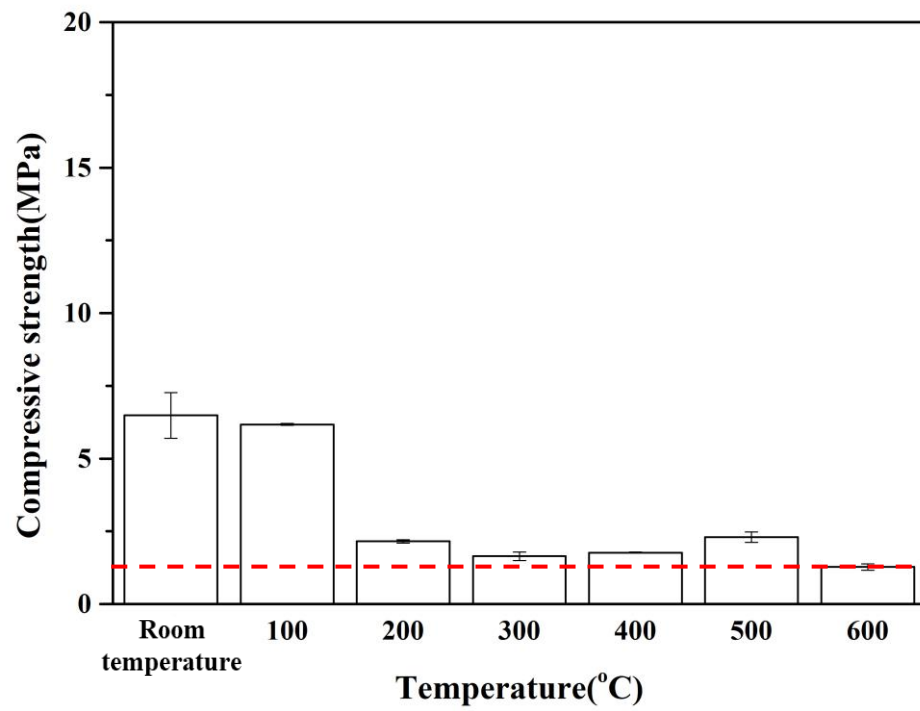


圖 3-17 耐高溫性試驗前後固化體機械強度對照圖

(樹脂添加量為 41 wt.%，L/S 為 0.9，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

(六)透水透氣試驗

本試驗參考吳璿煒(2019)之氣體徑向滲透試驗及水力徑向滲透試驗，以測量無機聚合樹脂固化體之滲透係數，試體需製備成中空圓柱體，其內、外徑分別為 30 及 70 mm，高則為 80mm，如圖 3-18 所示，待固化 28 天後檢測。表 3-22 為無機聚合材料滲透係數對照表。滲透係數約低則表示試體的透水透氣性質越低，本研究參照吳璿煒(2019)之滲透係數做對照組，如表所示，無機聚合樹脂固化體上之滲透性較一般無機聚合砂漿高，應是固化體內尚有連通之孔隙，導致氣體或水體可依此孔隙快速通過，因此其滲透性較高。

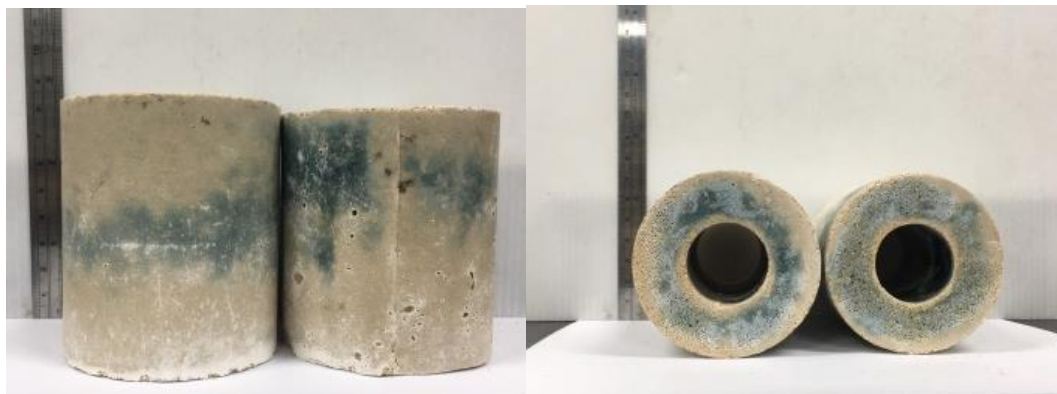


圖 3-18 滲透試驗試體外觀圖

(樹脂添加量為 41 wt.%，L/S 為 0.9，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50)

表 3-22 無機聚合材料滲透係數對照表

作者	材料	水力滲透係數(m/s)	氣體滲透係數(m ²)
吳璿焜 (2019)	爐石飛灰基 無機聚合砂漿	<1E-13	6E-13
本研究	爐石基 無機聚合材料	7.79E-09	2.75E-13

(七)小結

1. 本實驗將液固比從 1.0 降至 0.9，並測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性、耐高溫性及透水透氣性，觀察其影響與變化，並與前期實驗結果做比較。目前測試結果皆符合規範標準，但兩系列之差異較不明顯，需繼續觀察後期變化。
2. 本實驗以無機聚合物固化陽離子交換樹脂，並降低液固比至 0.9，並與前期試驗(液固比 1.0)做比較，樹脂固化量分別為濕基 41.8 及 40 wt.%，固化後皆未產生自由水現象，其 28 天強度分別為 6.4 及 7.2 MPa，經耐候性試驗後強度分別為 5.4 及 5.0MPa，耐水性試驗尚在齡期中。
3. 耐候性試驗中，先前進行試驗前，固化體均是脫模後直接測試，導致固化體表面水份太高，在低溫結冰體積膨脹及收縮因而產生剝落現象；若於脫模後先靜至室溫一天，使其表面水份減少，則耐候性試驗後仍可保持固化體之完整性
4. 經耐高溫性試驗後，無機聚合樹脂固化體仍能保持其完整性，並且於 100°C 之測試後，其強度達 6.1MPa；經 600°C 之測試後，仍有 1.2MPa
5. 本實驗測試無機聚合樹脂固化體之滲透係數，並與無機聚合砂

漿做比較，發現無機聚合樹脂固化體之滲透係數較大，可能係樹脂固化體有細微孔洞，使水體或氣體從其中滲出。

五、無機聚合材料與金屬黏結性試驗

本實驗為測試無機聚合材料未來澆置於保存離子交換樹脂固化體用之金屬容器時，金屬材料與爐石基無機聚合材料之黏結性，故試驗採用[CNS15200-5-7 塗膜機械性質：附著試驗(拉脫法)]，了解若未添加粒狀離子交換樹脂之無機聚合材料與水泥，兩者金屬板材之黏結力之差別。實驗配比如表 3-23 所示。

表 3-23 無機聚合材料與金屬黏結性試驗實驗配比

試體編號	L/S	爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)	水泥粉 (wt.%)	鹼性溶液 (wt.%)	水 (wt.%)
GP	0.85	43.1	10.8	-	46.0	-
OPC	0.85	-	-	53.9	-	46.0

(一)拉拔強度

本實驗為測試無機聚合材料及水泥材料與金屬板材之黏結力，實驗採用[CNS15200-5-7 塗膜機械性質：附著試驗(拉脫法)]，將無機聚合材料與水泥材料分別塗佈至鐵片及 304 不鏽鋼片上，如表 3-24、25 所示，在以黏著力拉拔試驗機測試其拉拔強度。其強度結果如圖 3-19 所示，無論是在鐵片或是不銹鋼片上，無機聚合材料之拉拔強度皆高於水泥材料，Sicakova(2018)測試無機聚合材料及水泥與混凝土的黏結強度，也得到類似的結果，顯示無機聚合材料相較於水泥材料有更優異的黏結性。

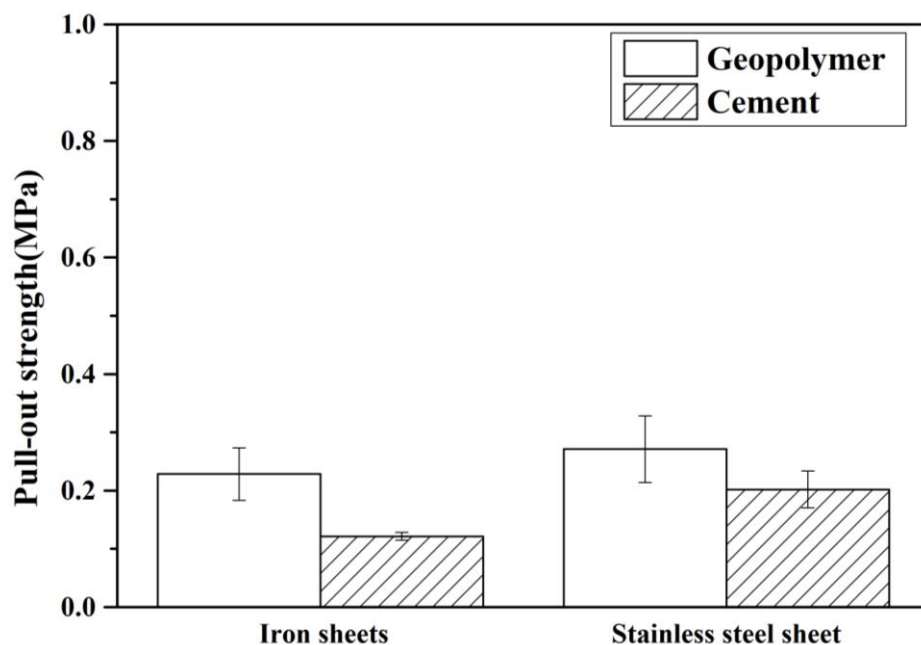


圖 3-19 無機聚合材料及水泥材料與金屬板材之拉拔強度對照圖

表 3-24 不同材料與鐵片之拉拔測試前後對照表

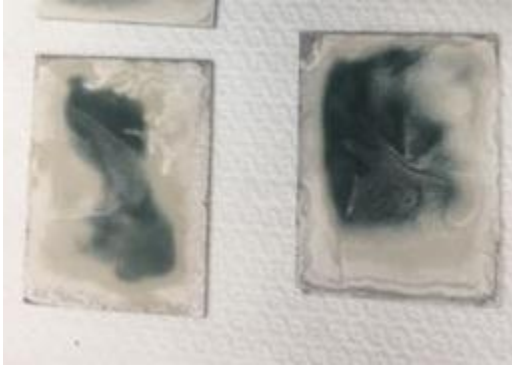
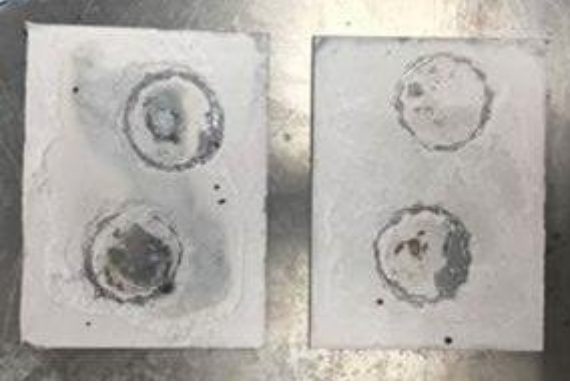
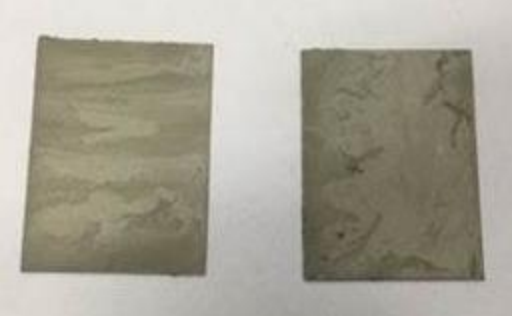
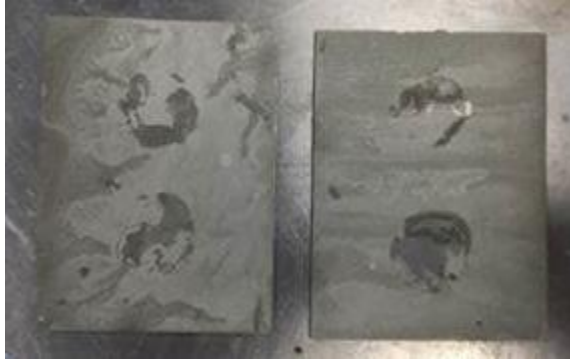
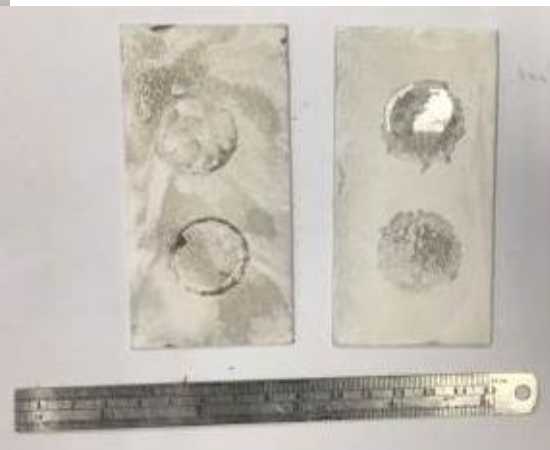
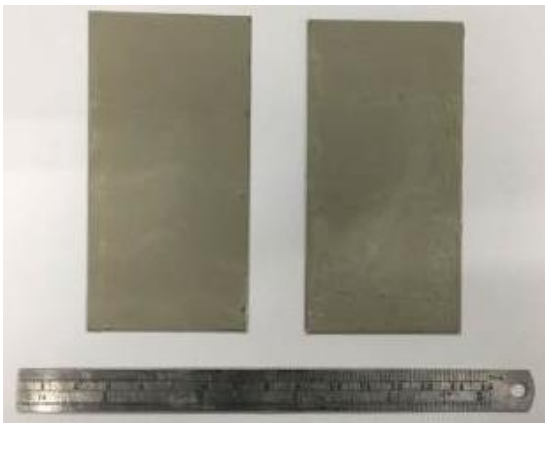
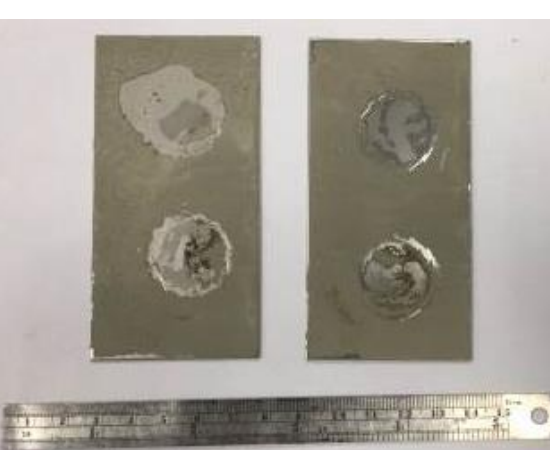
無機聚合材料(鐵片)試驗前	無機聚合材料(鐵片)試驗後
	
水泥材料(鐵片)試驗前	水泥材料(鐵片)試驗後
	

表 3-25 不同材料與不鏽鋼之黏結力測試前後對照表

無機聚合材料(不鏽鋼)試驗前	無機聚合材料(不鏽鋼)試驗後
	
水泥材料(不鏽鋼)試驗前	水泥材料(不鏽鋼)試驗後
	

(二)小結

本實驗為測試無機聚合材料及水泥材料與金屬板材之黏結力，以黏著力拉拔試驗機測試其拉拔強度。結果顯示無論是在鐵片或是不銹鋼片上，無機聚合材料之拉拔強度皆優於水泥材料，顯示無機聚合材料有更優異之黏結性。

六、無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗

本實驗為測試無機聚合樹脂固化體未來澆置於保存離子交換樹脂固化體用之金屬容器時，無機聚合樹脂固化體是否會與金屬容器產生反應，故將無機聚合樹脂澆置於金屬容器中，觀察固化體與金屬容器之相容性(有無反應情形等)。配比如表 3-26 所示。

表 3-26 無機聚合樹脂固化體與金屬容器之相容性試驗實驗配比

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
M-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)

(一)金屬容器表面變化

本實驗以 $\Phi 5 \times 10$ cm 之鐵模及 304 不鏽鋼容器做測試，檢測無機聚合樹脂固化體是否會與金屬容器產生反應。表 3-27 為試驗前後金屬容器表面對照表，如表所示，鐵模於試驗後，其表面仍有鏽蝕之情形；不鏽鋼容器與無機聚合樹脂固化體黏結良好，因此有部分固化體殘留其上，且表面並未產生鏽蝕之情形。

表 3-27 試驗前後金屬容器表面對照表

$\Phi 5 \times 10$ cm 鐵模試驗前	$\Phi 5 \times 10$ cm 鐵模試驗後
	
304 不鏽鋼容器試驗前	304 不鏽鋼容器試驗後
	

(二)抗壓強度

本實驗係比較使用鐵模以及一般 PE 模具製作之無機樹脂固化體之強度，觀察鏽蝕現象是否對固化體有所影響，表 3-28 為兩者之外觀比較表。圖 3-20 為機械強度比較圖，如圖所示，以鐵模灌注之固化體強度高於以 PE 模具灌注之固化體，強度可達 9.2MPa，可見鏽蝕對無機聚合固化體本身並無負面影響。強度上升之原因，推測為灌模時，鐵模底部未完全密封，有些微漏漿之情形，導致液固比更低，因此強度更高於後者。

表 3-28 不同模具製作之無機聚合樹脂固化體對照表

以鐵模灌注之固化體(28 天)	以 PE 模具灌注之固化體(28 天)
	

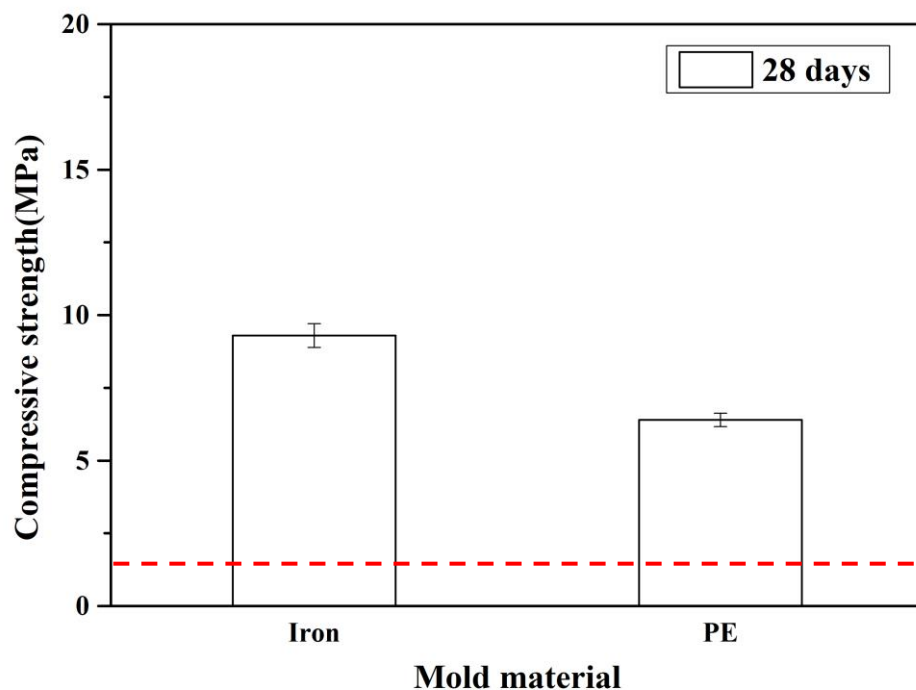


圖 3-20 不同模具灌注之固化體機械強度比較圖

(樹脂添加量為 41 及 40 wt.%, L/S 為 0.9 及 1.0, 鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50, 左為鐵模, 右為 PE 模具, 虛線為規範標準 1.5MPa)

(三)小結

1. 本實驗為測試無機聚合樹脂固化體是否會與金屬容器產生反應，將灌模至鐵模以及 304 不鏽鋼容器中，觀察容器之變化。
結果顯示，鐵模灌漿後，其模具有部分鏽蝕情形發生；以相同配比灌漿至不銹鋼容器中，並未產生鏽蝕。
2. 本實驗比較以鐵模及 PE 模具製作之固化體機械強度是否有所不同，結果顯示鏽蝕並未對樹脂固化體產生負面影響，其 28 天機械強度可達 9.2MPa，推測強度上升之原因為灌漿時，部分漿液從底部流出，導致液固比更低，因此強度有所上升。
3. 實驗後發現，以一般未經處理之鐵模製作固化體，模具仍有鏽蝕之風險，未來可嘗試以無機聚合防鏽塗料塗佈在模具內部，阻止鏽蝕情況，並且可考慮降低液固比，觀察其變化。

七、模擬實廠製作大型試驗

本實驗為模擬實廠實際製作之情形，將放大無機聚合樹脂固化體製作量至 60L 以上，並添加模擬核種，且澆置於實際保存用金屬容器中，了解其實際可行性，最後測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性及溶出率，觀察其影響與變化。配比如表 3-29 所示。圖 3-21 為實際製作之情形。

表 3-29 模擬實廠製作大型試驗實驗配比

試體編號	L/S	W/B	粉體		鹼性 溶液 (wt.%)	樹脂含 水率 (wt.%)	濕基樹脂 (wt.%) (乾基)
			爐石粉 (wt.%)	矽灰石 (wt.%)			
F-R41	0.91	0.85	25.1	6.3	26.8	50.0	41.8 (20.9)



圖 3-21 模擬實廠製作大型試驗製作情形

(一)自由水

圖 3-22 為 7 天之自由水結果，如圖所示， $\Phi 5 \times 10$ cm 固化體之表面已無水份，而大型固化體表面仍有些微潮濕，係因為固化體正在行無機聚合反應，且近日氣候較為潮濕及陰冷，固化體尚未完全硬化，因此表面留水分，後續會繼續觀察表面之情形。



圖 3-22 大型試驗之自由水結果(7 天)

(樹脂添加量為 41 wt.%，L/S 為 0.9，鹼液濃度為 12 M、 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為 0.8、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 為 50，左為小型圓柱，右為大型固化體)

(二)機械強度

本實驗將參照 FCMA-WFC-410 固化體抗壓強度測定方法，測試其機械強度。目前養護至第 8 天，但無法測試其 7 天機械強度，係因為近日氣候較為潮濕及陰冷，影響無機聚合反應，使其硬化較為緩慢，後續會持續觀察及測試。目前亦尚在等待齡期以進行試驗。

(三)耐候性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-610 固化體耐候性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之試體進行溫、濕度變化循環模擬實際氣候環境試驗，再觀察其表面變化並進行機械強度測定。目前尚在等待齡期以進行試驗。

(四)耐水性試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-510 固化體耐水性試驗方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行耐水性試驗，浸泡於水中待 90 天後，取出觀測表面變化及測量機械強度。目前尚在等待齡期以進行試驗，後續將持續觀察。

(五)溶出試驗

本試驗是依照規範 FCMA-WFC-310 固化體溶出指數測定方法，將室溫養護 28 天脫模之固化體進行溶出試驗，先以水洗淨固化體，再浸泡於試體表面積 10 倍之去離子水容器中，依規範之時間間隔取樣和更新溶出液，再以整個試驗期間所取樣的樣品，以 ICP-MS 測定其溶出數據，計算出試體的溶出指數(L_i)。目前尚在等待齡期以進行試驗。

(六)小結

本實驗為模擬實廠實際製作之情形，將放大製作尺寸並灌模至實際保存用之金屬容器中，觀察其影響及變化，目前各項試驗皆在等待齡期中，將持需觀察其後續之變化。

肆、結論與建議

一、結論

1. 前期試驗之大型固化體，其各項試驗結果皆符合規範標準，固化後試體並未產生自由水現象，其 28 天強度達 6.9MPa，365 天強度達到 8.2MPa。經耐候性試驗後強度為 2.3MPa，經耐水性試驗後強度達 10.9MPa，鋇及銫離子之平均溶出指數各為 11.9 及 8.3，後續將持續觀察長齡期之發展。
2. 前期研究過程中發現，高錳酸鉀粉體與鹼液攪拌後會形成凝膠狀之膠體，不利於製作，因此嘗試改善製作流程。經製程調整之固化體，其 28 天強度為 5.3MPa，經耐候性試驗後強度為 2.9MPa，耐水性試驗後強度為 5.6MPa，其各項試驗結果皆符合規範標準。耐高溫性試驗後試體雖無裂縫產生，但其強度僅 1MPa，不盡理想。
3. 將高錳酸鉀粉體添加量降低為 0 及 1 wt.%，測試其機械強度、自由水、耐候性及耐水性，觀察其影響與變化，並與前期實驗結果做比較。三系列固化體之試驗結果皆符合規範標準，其中以未添加高錳酸鉀之 R40-K0 系列最為穩定，經耐候性試驗後，強度下降最少，其 28 天機械強度為 7.2MPa，經耐候性試驗後

強度仍達 5.0MPa，經耐水性試驗後強度為 5.6MPa，故後續將嘗試不添加高錳酸鉀進行實驗。

4. 由於目前製作之製程工作性相當良好，故嘗試將液固比從 1.0 降低至 0.9，測試其機械強度、自由水、耐候性、耐水性、透水透氣性及耐高溫性，觀察其影響及變化。降低液固比後其 28 天機械強度為 6.4 MPa，經耐候性試驗後強度為 5.4 MPa，耐水性試驗尚在等待齡期中將持續觀察後續變化。測試其耐高溫性後發現，於 100°C 之試驗後其強度達 6.1MPa；經 600°C 之測試後，仍有 1.2MPa，固化體皆保持其完整性，顯示無機聚合材料有顯著之耐火性。測試其滲透係數，並與無機聚合砂漿做比較，發現其滲透係數較大，可能係樹脂固化體有細微孔洞，使水體或氣體從其中滲出。
5. 檢測無機聚合材料及水泥材料與金屬板材之黏結性發現，無論是鐵片或是 304 不鏽鋼片，無機聚合材料之拉拔強度皆優於水泥材料，顯示無機聚合材料較水泥材料有更加優異之黏結性。
6. 無機聚合樹脂固化體灌製金屬容器內，測試其是否會與容器內部產生反應。測試後發現，以鐵模進行固化，模具將產生部分鏽蝕；以 304 不鏽鋼容器進行固化，容器並未產生鏽蝕情形。

7. 本研究再以模擬實廠之製作並放大製作尺寸至 60L，並灌模至實際保存用之金屬容器中，觀察其影響及變化，目前各項試驗皆在等待齡期中，將持續觀察其後續之變化。

二、建議

1. 本研究團隊於實驗中發現，使用傳統鐵模固化無機聚合材料，
模具內部有部分鏽蝕之情形，後續可嘗試以無機聚合防鏽塗料
塗佈模具內部，避免鏽蝕情形。
2. 由於實際儲存用之鐵桶為 200L 之大型容器，放大固化尺寸至
60L 尚不足以達至一半，後續可嘗試放大固化尺寸至 100L 以
上，觀察其變化。

伍、參考文獻

1. 中國鋼鐵公司，爐石利用推廣手冊，2000。
2. 王文文、謝華、王烈林、桑培倫、蘇偉、張霖濤，2018，地質水泥固化體中 Sr(II)、Cs(I)、U(VI)的長期浸出行為研究，原子能科學技術，第五十二卷，第 10 期，第 1740-1747 頁。
3. 行政院原子能委員會，核能電廠低放射性廢棄物產量表，
<http://www.aec.gov.tw>，2017。
4. 周耀中、雲桂春，2004，放射性廢離子交換樹脂水泥固化與機理探討，原子能科學技術，第三十八卷，第 133-138 頁。
5. 放射性物料管理局，2011，低放射性廢棄物均勻固化體脂法規精進與測試方法建立。
6. 邱仔安，2016，鹼激發膠結材反應機理之研究，碩士論文，國立臺灣科技大學營建工程系，台北。
7. 吳璿煒，2019，混凝材料耐久性快速試驗方法開發及其在水泥與無機聚合砂漿測試應用，碩士論文，國立臺灣科技大學資源工程系，台北。
8. 孫金星，1998，廢樹脂水泥固化研究，核研季刊，第二十七期，第 35-43 頁。

9. 曹師維，2017，無機聚合技術固化模擬放射性粒離子交換樹脂之研究，碩士論文，國立台北科技大學材料及資源工程系碩士班，台北。
10. 普特樹脂公司，產品介紹 https://www.purolite.com/product/nr_w100。
11. 潘榕光、張本地，2004，利用田口式最佳化分析法評量樹脂行低階核廢料固化配方，中正嶺學報，第三十二卷，第二期，第13-22 頁。
12. 魏保范、李潤珊，1995，反應堆放放射性廢樹脂固化的研究，天津師大學報，第十五卷，第三期。
13. Brace W. F., Walsh J. B., and Frangos W. T., 1968, "Permeability of Granite under High Pressure", Journal of Geophysical Research, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236
14. Davidovits J., 1999, "Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology", Proceeding of Geopolymer '99 Second International Conference, France, pp. 9-37.
15. Khairudin N. W. A., Yasir M. S., Majid A. A., Wahab M.A., Marzukee N., Paulus W., Philip E., Thanaletchumy and Irwan M. N., 2015, "Immobilization of spent ion exchange resin from puspati triga reactor using fly ash-based geopolymer", Malaysian Journal of Analytical Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 472-480.

16. Kryvenko P., Cao H., Weng L. and Kovalchuk O., 2015, "Applicability of alkaliactivated cement for immobilization of lowlevel radioactive waste in ion-exchange resins", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1, No.6, pp. 40-45.
17. Lichvar P., Rozloznik M. and Sekely, S., 2013, "Behaviour of aluminosilicate inorganic matrix sial® during and after solidification of radioactive sludge and radioactive spent resins and their mixtures", International Atomic Energy Agency, Waste Technology Section, Vienna (Austria); [1 CD-ROM]
18. Majersky D., Sekely S., Zavodska D. and Breza M., 2006, "Application of Inorganic SIAL Matrix and Movable Technology in Solidification of the TRU Sludges and Sludge/Resin Mixtures", WM'06 Conference, Tucson, AZ.
19. Provis J., 2009, "Immobilisation of toxic wastes in geopolymers", *Geopolymers, structure, processing, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited Abington Hall, Cambridge, UK, pp. 421-440.
20. Robayoa R. A., Mejía de Gutiérrez R. and Gordillo M., 2016, "Natural pozzolan-and granulated blast furnace slag-based binary geopolymers", *Mater. Construcc.*, Vol.66, pp. 1-8.
21. Saavedra W. G. V., Mejía de Gutiérrez R., 2017, "Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures", *Construction and Building Materials*, Vol. 154, pp. 229-235.

22. Sicakova A., 2018, “The influence of different pre-treatments of concrete surface on the bond strength of geopolymer-type coating layer”, *Sustainability* 2018, Vol.10.
23. Sun Q., Li J. and Wang J., 2011, “Solidification of borate radioactive resins using sulfoaluminate cement blending with zeolite”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, pp. 5308–5315.
24. Wang H., Li H. and Yan F., 2005, “Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 268, pp.1-6.
25. Wu H. and Wu T., 2003, “Degradation of radioactive ion-exchange resin using H_2O_2 ”, *Journal of the Chinese Institute Chemical Engineers*, Vol. 34, pp. 263-274.