

日本水俣灣汞污染及其清理計畫個案介紹

梁 旭 程*

摘要

日本九州蘇本縣水俣灣 (Minamata Bay) 在 1953-1960 年間，發生了一種因汞中毒的神經系統病，一百五十人死亡，以漁民佔多數，後來在日本本州新潟 (Nigata) 亦發生類似不幸事件。本文乃報導水俣灣汞污染之發生及其清理計畫整個個案。

整個個案之重要記事如下：

- 1932年工廠 (Chisso Corporation) 開始排放廢水
- 1956年首先發現水俣病
- 1971年製訂汞排放標準及開始研究處理方法
- 1973年訂定汞污染底泥清理辦法
- 1974年熊本縣政府成立清理專案委員會
- 1975年開始清理工程規劃設計
- 1977年設置監測網
- 1978年掩埋地區圍堤竣工
- 1981年開始清理工程

Chisso Corporation 生產乙炔、乙醛、醋酸、氯乙烯單體及其他化學品，其中在乙醛及氯乙烯單體之生產過程中使用汞作為觸媒 (催化劑)。因生產過程所產生之廢水含汞而排入水俣灣，所以造成汞污染，其中最嚴重污染之底泥汞含量高達 2,619 ppm；水俣灣內大部份之底泥的汞含量在 20~260 ppm 之間，自然界底泥之汞含量約在 0.2 ppm。

經研究結果，水俣病患者乃因進食含過量汞之水產食物而中毒，汞則從底泥經食物鏈而累積在水產生物中，患病者頭髮、肝、腎、腦等之含汞量約為正常人之 30—80 倍。所以，日本政府決定清理水俣灣之含汞底泥，以免繼續造成傷害。

經過多年的研究，日本政府訂定了含汞底泥暫定去除基準，其計算公式如下：

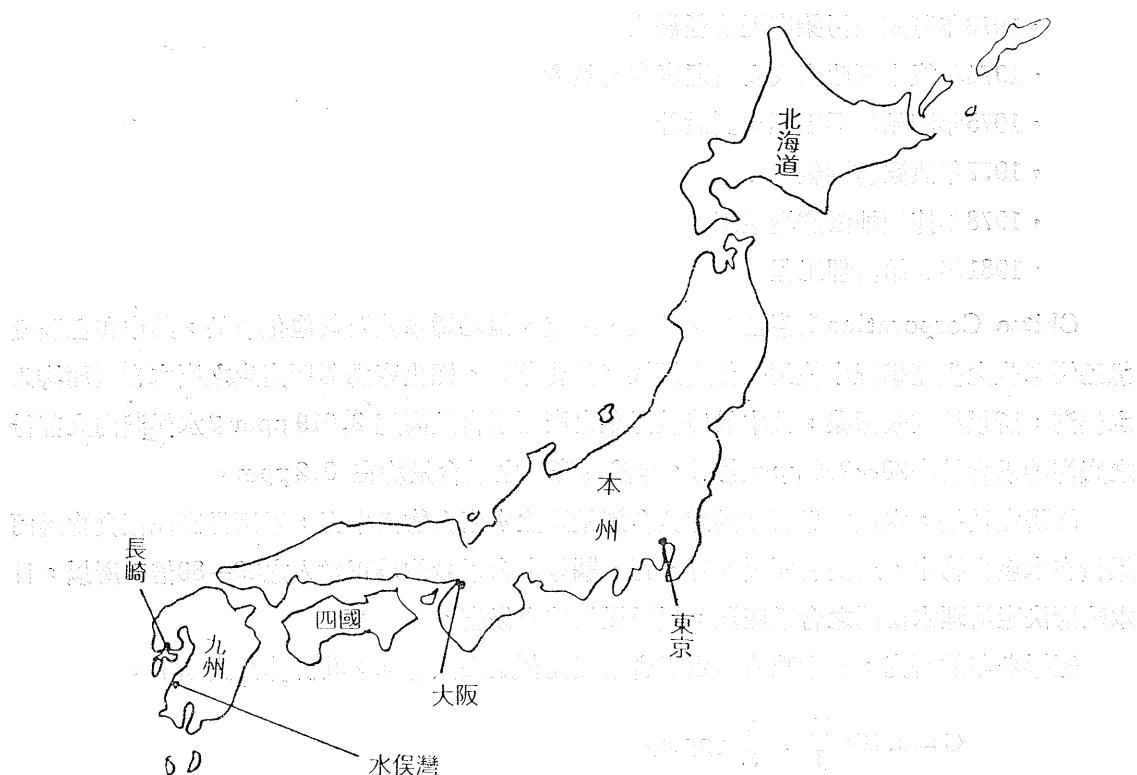
$$C = 0.18 \cdot \frac{H}{J} \cdot \frac{1}{S} (\text{ppm})$$

* 中鼎工程股份有限公司環境工程部組長

有關此公式，將在文中作詳細介紹。而水俣灣利用上述公式的計算出之所需清理底泥最低含汞量（C）為 25ppm，意即凡超過 25 ppm 含汞量之底泥均需要清理。

清理底泥採用浚渫方法，估計浚渫面積達 211 公頃，污泥量達 150 萬立方尺，總工程費約需新臺幣 36 億，其中包括設置監測網、建掩埋場圍堤、臨時水處理設施、浚渫底泥及整地護岸工程等。清理工程首先在水俣灣之北方建臨時防波堤來減少浚渫時所產生之海水混濁情形，然後在灣口設置魚網，盡量減少水生物之進出；掩埋場是利用灣內一角落圍堤而成，圍堤是雙層鋼板，中間填砂，對水之滲透，有高度之防止效果，也確保汞無法滲回灣內。估計水俣灣內底泥之總含汞量約百分之八十將永遠掩埋在圍堤內，掩埋場內過剩之海水將經過混凝、沉澱及過濾後排回灣內，在施工期間，水質及水生物均將經常嚴密地進行監測，以防止發生二次污染；當浚渫完工時，掩埋場將覆蓋泥土，以防止因空氣或陽光照射而將無機汞氧化為有機汞；全部工程預計約需十年完成。

日本九州熊本縣水俣灣（Minamata Bay 見圖一）在 1953—1960 年間，發生了一種因汞中毒的神經系統病，最初以為是傳染性疾病，患者有視野狹窄、運動失調、語言障礙等病徵，初期患病者死之率甚高，高達 36.9%，至 1965 年有 41 人死亡，至 1976 年患病者有 960 人，死亡 150 人，此外，有些在母體中之胎兒，更受到永久性的傷害。發生原因是由於附近一家以氧化汞為催化劑的工廠，排放大量含汞廢水，這些氧化汞在海底經微生物轉化成甲基汞，然後經食物鏈濃縮而進入人體，水俣灣魚產類經測定含汞量高達 100ppm，患病者以附近



圖一 水俣灣位置表示圖

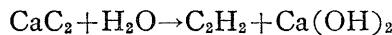
漁民佔多數。後來在 1965 年，日本本州新潟（Nigata）亦發生類似不幸事件。本文乃報導水俣灣汞污染之發生及其清理計畫之全部個案內容，從工程觀點方面來探討，供國人參考，如有不周之處，敬祈各位專家不吝賜教。

首先介紹全部個案之重要記事，分列如下：

- 1932年工廠（Chisso Corporation）開始排放廢水
- 1956年開始發現水俣病
- 1971年製訂汞排放標準及開始研究處理方法
- 1973年訂定汞污染底泥清理辦法
- 1974年熊本縣政府成立清理專案委員會
- 1975年開始清理工程規劃設計
- 1977年設置監測網
- 1978年掩埋地區圍堤竣工
- 1981年開始清理工程

日本 Chisso Corporation 生產乙炔、乙醛、醋酸、氯乙烯單體等化學品，其簡化之方式程表示如下：

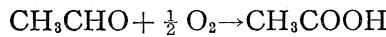
1. 碳化鈣→乙炔



2. 乙炔→乙醛



3. 乙醛→醋酸



4. 乙炔→氯乙烯單體

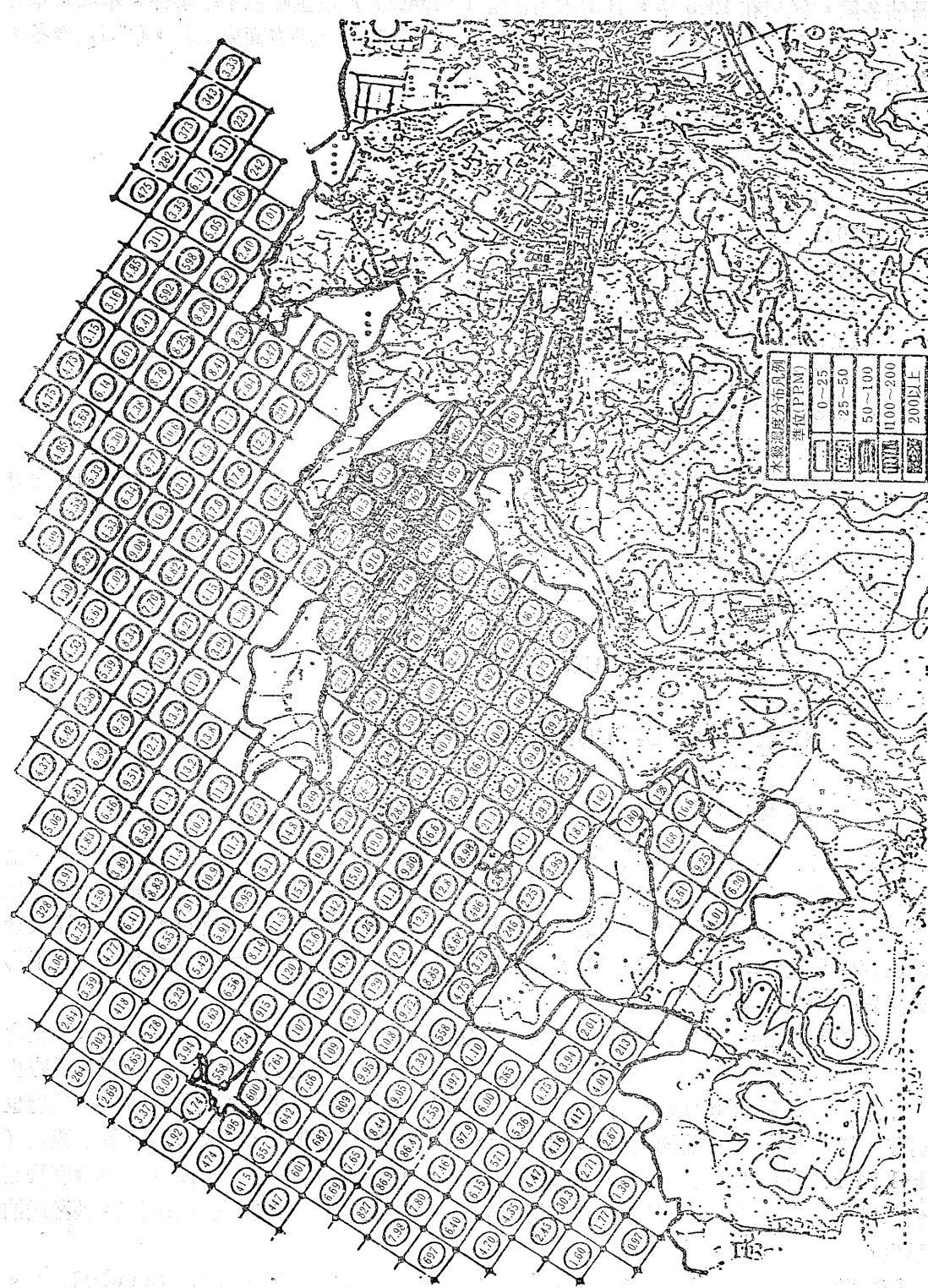


從上述方程式中，可看出在生產乙醛及氯乙烯單體時，需使用汞作為觸媒（催化劑），而生產過程所產生之廢水含汞而排入水俣灣，歷四十年之久，估計排入灣內之總汞量約 150 噸以上，所以造成灣內底泥污染，其中最嚴重污染之底泥含汞量高達 2,101ppm，灣內底泥汞含量約在 20—260ppm 之間（見圖二），灣外底泥含汞量約在 1—20ppm，自然界底泥之平均汞含量約為 0.2ppm。

經過深入研究，汞經廢水排入灣內後，經生物累積而濃縮在魚類及貝類體內，人進食含過量汞之水產而得水俣病，患者頭髮、肝、腎、腦等之汞含量為正常人之 30—80 倍。為防止汞污染之繼續發生，Chisso Corporation 已於 1971 年停止使用汞的生產方法，而日本政府也製訂了汞排放標準，目前總汞（Total Mercury）之排放標準為 0.005mg/l，而有機汞（Alkyl Mercury）則不可測出；但水俣灣之底泥，仍然含高濃度汞。因此，日本政府決定清理水俣灣之含汞底泥，以免繼續造成傷害，同時，也可讓水俣灣恢復本來面貌，供漁民捕魚為生。

至 1973 年，日本政府訂定了「汞污染底泥清除試驗性標準（Tentative Standard）」。至 1975 年，訂定「底汚之暫定去除基準」，包括了含有害物質（如汞、PCB、重金屬等）底

圖二 水俣灣底泥汞含量公佈情況



泥之監測、清除、存放及處置等規定。去除基準之研究乃經日本多年對有關影響因素之探討而訂定，其計算公式如下：

$$C = 0.18 \cdot \frac{H}{J} \cdot \frac{1}{S} \text{ (ppm)}$$

C為所需清理底泥之最低含汞量，H為平均潮汐差，J為底泥之汞放出率，S為安全係數，此公式所考慮之綜合複雜因素包括環境中之容許濃度、擴散混合係數、水產食品之含汞限值及汞在水產食品中之濃縮係數等，簡化後便獲得上述公式（詳見表一）。H潮汐差可從海灣之潮汐記錄中求得；S安全係數訂在10—100之範圍內，詳細分類可參見表二；J放出率是從實驗中求出，實驗流程如圖三。水侯灣含汞底泥之計算實例列如下：

$$\text{溶出率} \quad J = 2 \times 10^{-4}$$

潮位差 $\triangle H=2.9m$

安全係數 S = 100

$$\therefore C = 0.18 \times \frac{2.9}{2 \times 10^{-4}} \times \frac{1}{100}$$

=26.1

$\doteq 25$ ppm

表一 暫訂去除基準之公式演變及簡化過程

c : 暫定去除基準 (所需清理底泥的最低含汞量)

c_1 ：環境中汞之容許濃度

n ：擴散混合倍數

i : 溶出率

s : 安全係數

c_f ：水產食品之限制值

i : 綜合濃縮係數

c_2 ：擴散混合後水質中汞之濃度

N_L : 滚出速度

Q：某水域中之海水交換速度

ΔH : 漲退潮位差

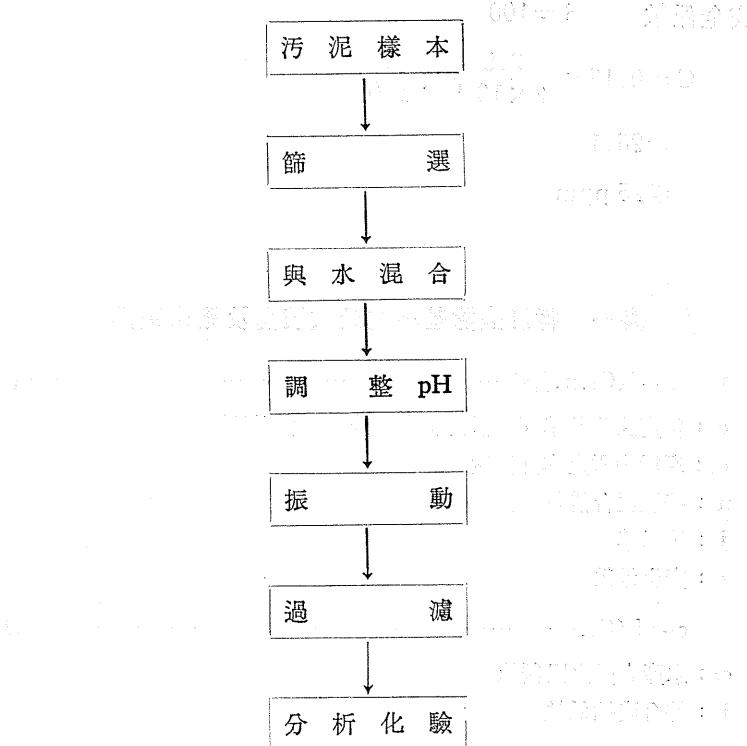
合併(2)及(3)，因 $c_2 \leq c_1$ 得下列公式

$$c = 0.18 \cdot \frac{\Delta H}{\Delta T} \cdot \frac{1}{10^6} \text{ (ppm)}$$

表二 暫訂去除基準中之安全係數(s)值

| | s 值 | 各種情況 |
|----|------|--|
| 1. | 10 | 港內非漁獲區 |
| 2. | 50 | 在漁獲水域內，而捕獲以攝食底泥及 附着於底泥之生物* 之魚貝類 $\leq \frac{1}{2}$ 總 漁獲量 |
| 3. | 100 | 在漁獲水域內，而捕獲以攝食底泥及 附着於底泥之生物* 之魚貝類 $> \frac{1}{2}$ 總 漁獲量 |
| 4. | 特別考慮 | 在漁獲水域內有地域性不同之嗜食習 慣 |

註：*指蝦、蟹、蝦、蛄 (Squill-fish)、海蔘、烏魚、或腹足綱的介類。



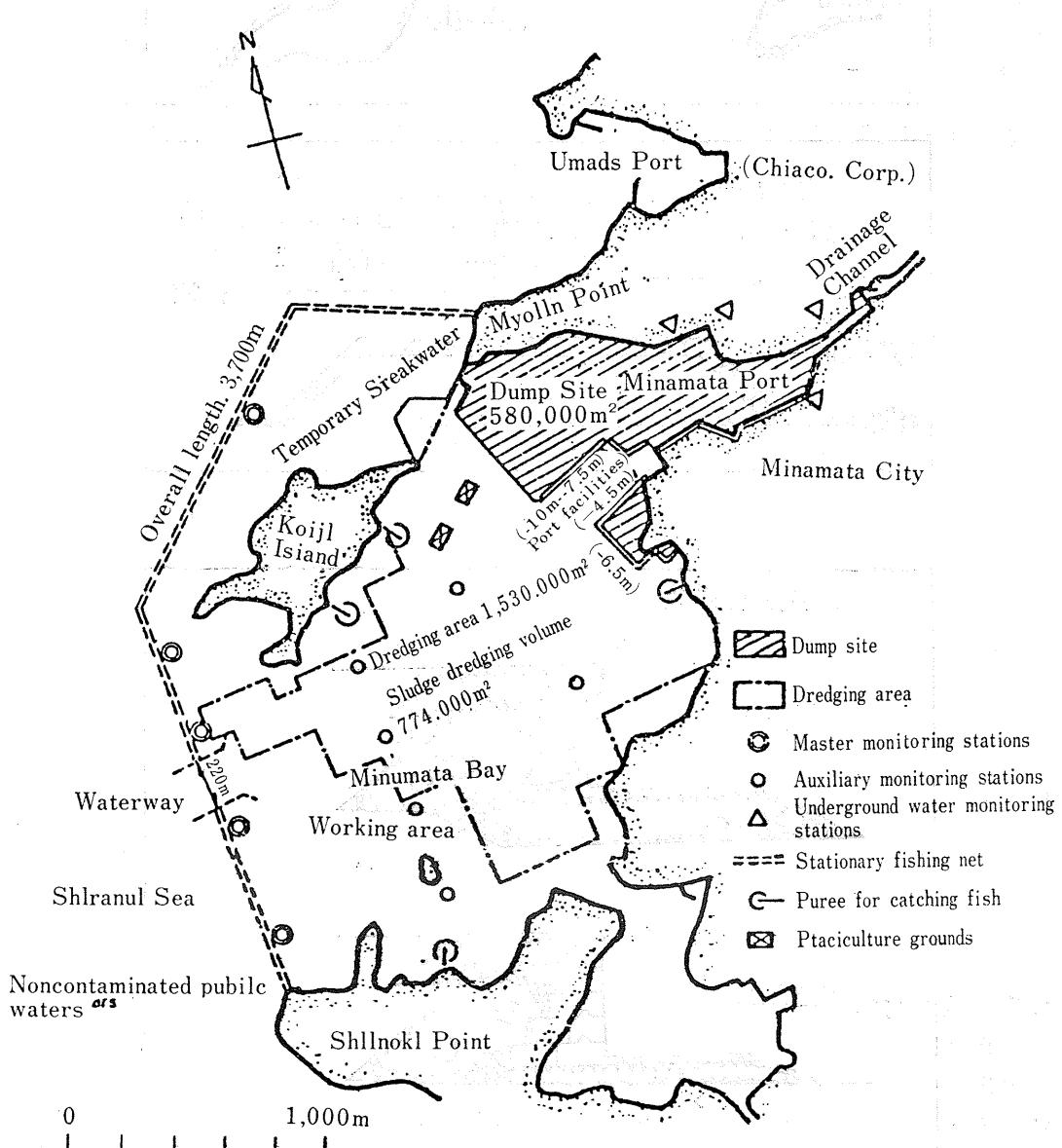
圖三 底泥有害物質溶出實驗步驟流程

即凡超過 25ppm 含汞量之底泥均需要清理。

水俣灣為懸路海 (Shiranui Sea 見圖四) 內之港灣，汞汙泥沉澱在灣內最深處達 4 公尺，水俣灣長約 2 公里，寬 1.5 公里，水深由岸邊漸漸向外海加深至 20 公尺，平均潮差約 3 公尺，流速在 5cm/sec 內，波高低於 0.7 公尺，表面 10 公尺之底泥均為軟泥，無任何承載力，含水率為 200—400%。經數年之規劃設計，日本政府準備採用浚渫方法來清除汞污染之底泥，浚渫後掩埋在附近之處置區內，浚渫面積合計達 211 公頃 (灣內部份 153 公頃，掩埋地區

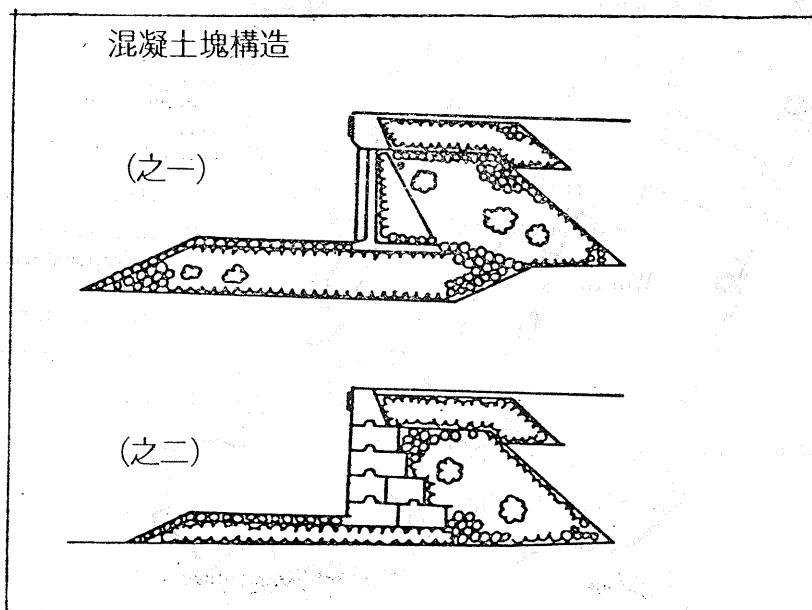
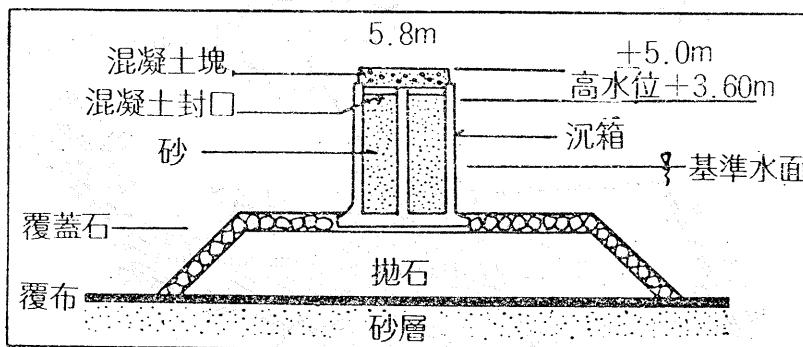
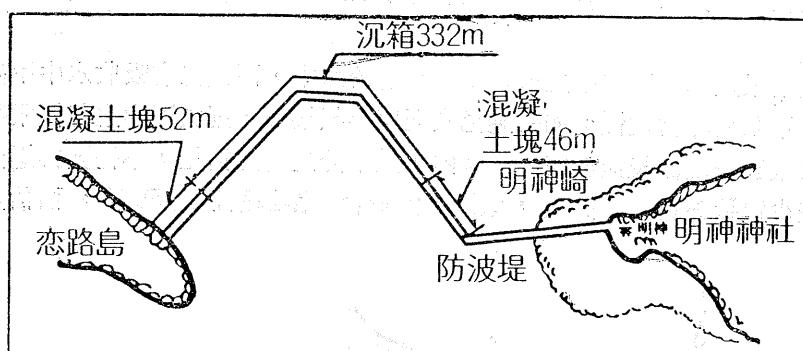
58公頃），浚渫量約150萬立方公尺（灣內部份77萬立方公尺，掩埋地區73萬立方公尺），總工程費約需新臺幣36億（以1978年日元計算約193億），包括設置監測系統、建造圍堤、臨時廢水處理設施、浚渫工程及整地護岸工程等；Chisso Corporation 負責65%，其餘由政府補助。

從溶出試驗結果顯示，底泥中之汞並不容易溶於水中，而底泥有吸收水中甲基汞之傾向。無機汞轉化成甲基汞非常緩慢，如果避免底泥與氧氣接觸，則底泥中之無機汞將不會造成污染，所以將含汞底泥浚渫後掩埋在處置區內，是十分足夠之措施，不需要經過固化。處置區設在附近可減少運送經費及浚渫量，處置區內約含浚渫總汞量之50%，而估計約為灣內



圖四 水俣灣污泥處置計畫平面圖 (Ref: Wpcf, May 1980)

底泥所含之總汞量的 80%，將永久掩埋在處置區內。浚渫前曾採用 Cutter-Suction 方法實驗，灣內魚類含汞量並沒有增高，但為能更安全施工，決定採用 Cutterlen-Suction 方法進



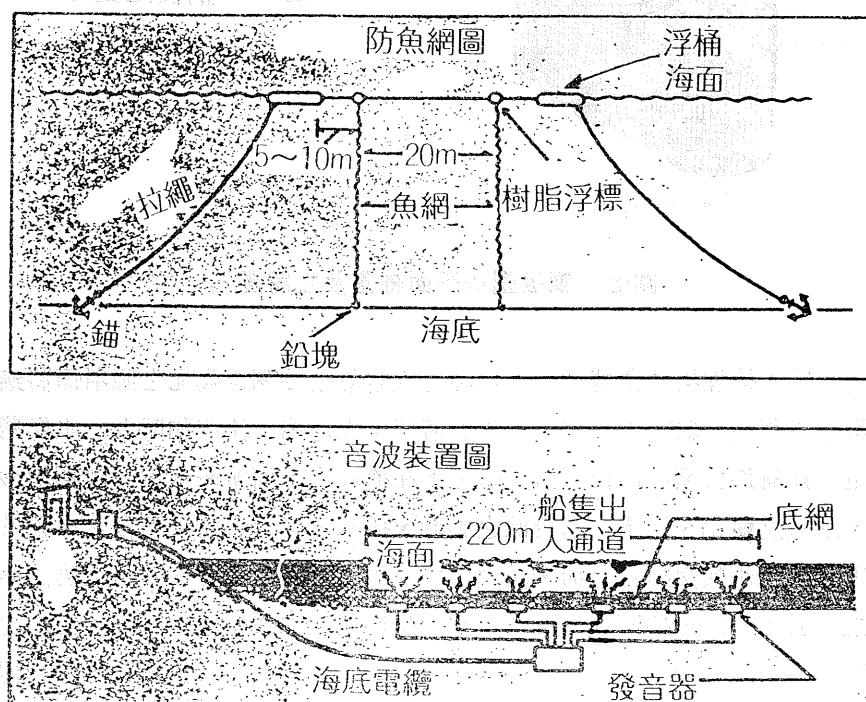
圖五 臨時防波堤平面及剖面圖

行浚渫。

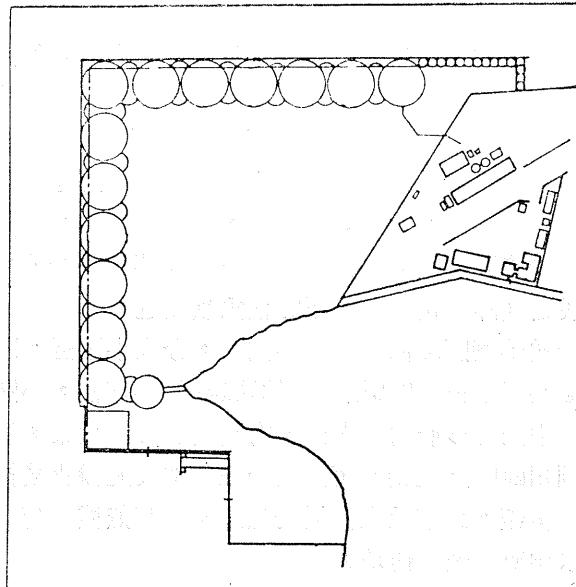
清理工程首先在水保灣之北方建臨時防波堤（見圖五）來減少外海波浪對灣內之影響，因而減少浚渫時所造成之海水混濁情形，且不致混濁擴散至灣外。在築臨時防波堤前，因底泥無承載力，所以要利用 Sand Compaction 及 Sand Drain 方法進行地盤改良，在地盤更換成砂層後，便開始拋石建防波堤，防波堤全長 430 公尺，兩島連接處為混凝土塊，共長 98 公尺（見圖五），中間為沉箱部份，共長 332 公尺，沉箱內填砂，上蓋混凝土塊（見圖五）。然後在灣口（見圖四）設置設魚網，全長 3,700 公尺，中間留 220 公尺通道讓船隻出入，在船隻通道上設音波發射設備（詳見圖六），以防止魚類接近。

掩埋場是利用灣內一角落築圍堤而成（見圖四），分大小兩區，圍堤是雙層鋼板樁，中間填砂（見圖七），兩區共用鋼板樁 232 枝（大的區域需用 219 枝，小區域需用 13 枝），每枝鋼板樁直徑為 29.5 公尺，中間之砂層對水之滲透有高度之防止效果，以確保汞無法滲回灣內。掩埋場內過剩之海水利用臨時之混凝土、沉澱及過濾處理設施淨化後排回灣內。掩埋場在施工時保持一定深度之海水覆蓋，以避免底泥受陽光之照射將無機汞轉為甲基汞之發生；所有既存排入掩埋場內之排水均改道至其他地方。

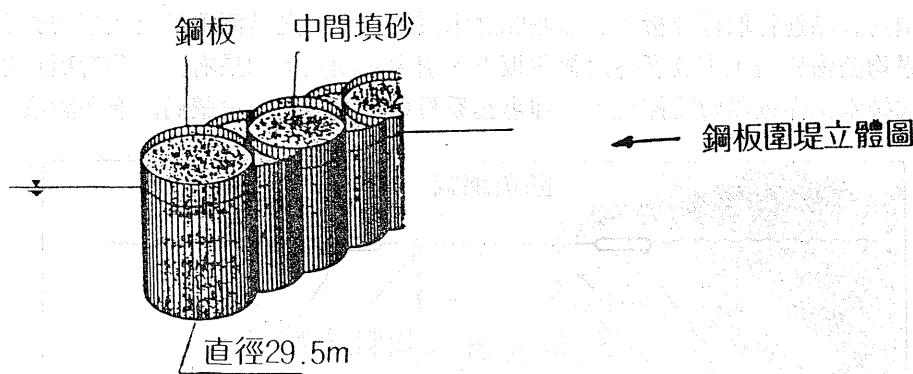
為防止二次污染之發生，施工期間進行嚴密之監測，含水質及水生物各項目。監測點之公佈如圖八，包括 5 個基本點、7 個補助點、5 個地下水監測點、5 個參考點及利用監測船在施工範圍內各點進行取樣分析。各監測點之水質及水生物之監測項目及頻率列於表三，所有監測結果均公佈於施工事務所外之報告板上，讓大眾閱覽，如果有任何分析項目超過規定時，浚渫或排水工作則將暫時停止，清理專案委員會將立刻召開會議商討有關對策。



圖六 防魚網及貢波裝置圖

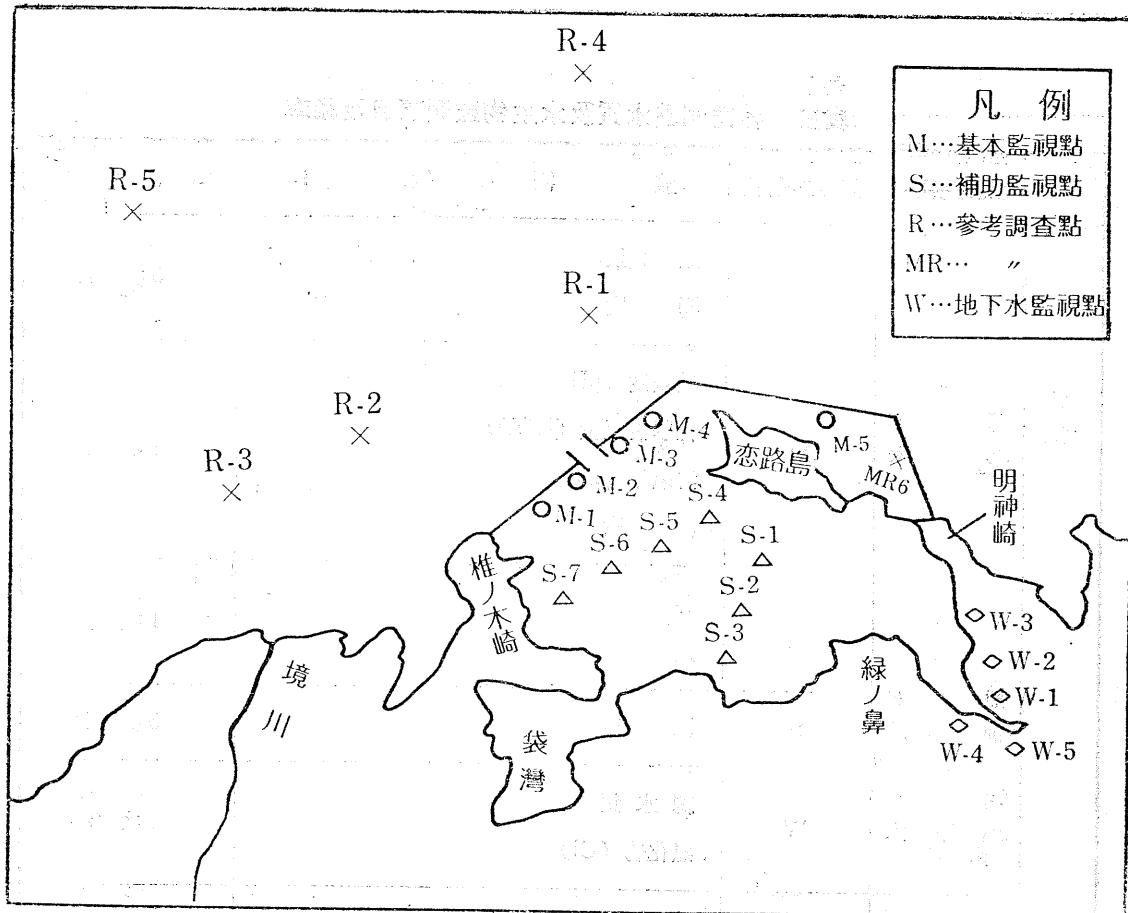


掩埋區鋼板圍堤平面佈置圖

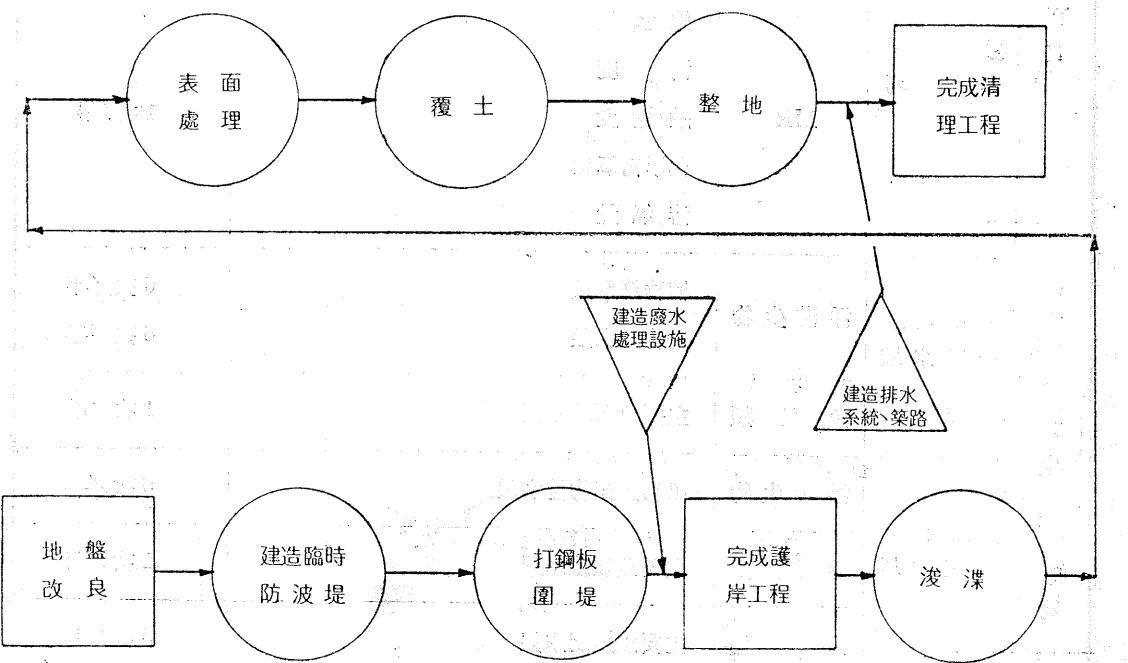


圖七 鋼板圍堤平面佈置及立體圖

當浚渫完工時，掩埋場將覆蓋泥土，以防止因空氣之接觸及陽光之照射而將無機汞氧化為有機汞，全部工程預計約需十年完成，整個清理工程之施工流程如圖九。水俣灣含汞底泥清理工程在施工前有進行環境影響評估之研究，在掩埋場方面所研究項目包括地形之變化、海流之變化、水質之變化、漁業與水資源之影響、排水地區之影響、景觀之影響及影響之對策等。在施工方面所研究之項目包括浚渫之影響、海上交通之影響、陸上交通之影響、漁業及水產資源之影響等。掩埋場將利用作為公園憩息場所及加以綠化，以彌補海面之消失及改善景觀之調配。清理工程最重要的目的除了去除灣中含汞底泥，尚可消除居民心理上之害怕、恢復部份之水產資源及永久確保居民之健康。



圖八 監測點平面佈置圖



圖九 清理工程施工流程圖

表三 各監測點水質及水生物監測項目及頻率

| | 監測點種類 | 監測點編號 | 監測項目 | 監測頻率 |
|------|-------|-------|-----------------|-------|
| 水質 | 基本 | M | 總水銀 | 3次／日 |
| | | | 濁度 | |
| | | | 酸鹼度 (pH) | 1次／日 |
| | | | 化學需氧量 (COD) | |
| | | | 溶氧量 (DO) | |
| | | | 油 脂 | 1次／週 |
| | | | 砷 銅 | |
| | 補 助 | S | 濁 度 | 5 次／日 |
| | 地 下 水 | W | 總水銀 氯化物 (Cl) | 1次／季 |
| | 參考 | R | 總水銀 | 1次／週 |
| | | | 濁度 | 1次／週 |
| | | MR | 酸鹼度 | |
| | | | 化學需氧量 | |
| | | | 溶 氧 量 | |
| 水生生物 | 一般水域 | 浮游生物 | 植物總水銀 | 6次／年 |
| | | | 動物總水銀 | 6次／年 |
| | | 魚貝類 | 主要魚類總水銀 | 1次／季 |
| | 施工水域 | 浮游生物 | 動物／植物總水銀 | 6次／年 |
| | | 魚貢類 | 主要魚類總水銀 | 1次／月 |
| | | 魚 塘 | 主要魚類總水銀 | 3次／月 |

參 考 資 料

1. 毒性物質點線面

莊進源 等著

73年1月

2. 認識汞的污染

曾聰智

72年6月

3. 嘗訂之含汞底泥去除基準

日本環境廳水質保全局

1973年8月

4. Control of Mercury Pollution in Japan and the

Minamata Bay Clean-up

T. Ishikawa C. Y. Ikegaki

WPCF May 1980

5. 水俣灣及其周圍水域堆積汚泥處理對策

日本熊本縣公害白皮書

1983年

6. Bottom Sediments Control in Japan

S. Seki, Japan Society on Water Polution Research

Enviromental Engilneering Course.

7. Environmental Pollution Control for Hazardous Waster in Japan

A. Ichikawa, University of Tokyo

8. 水俣灣堆積汚泥處理事業概要

日本熊本縣

9. 水銀

喜田村正次 等共著

1976年7月

10. 底泥調查方法與解說

日本環境測定分析協會

1977年2月