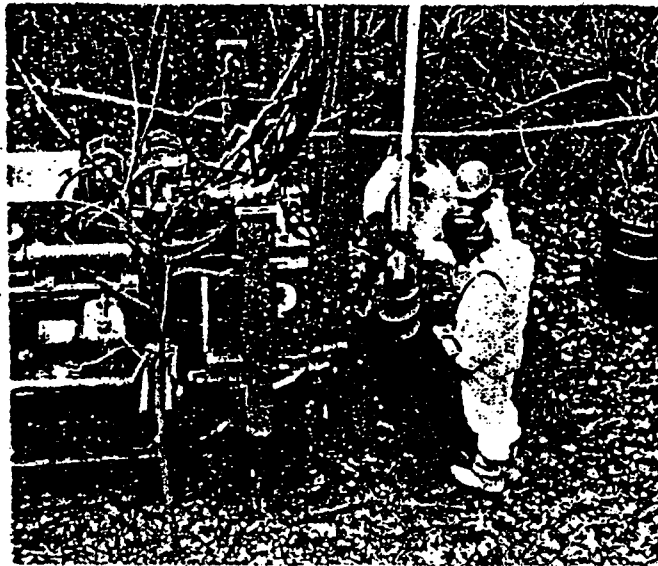


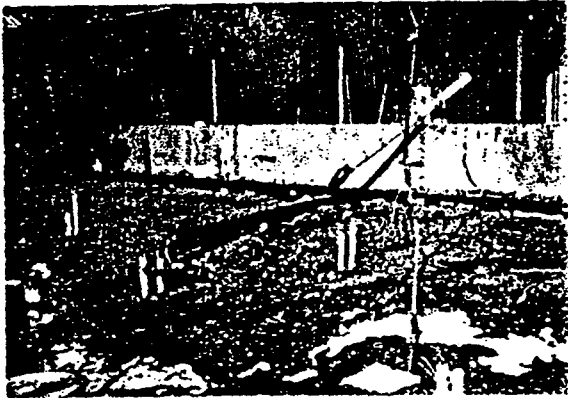
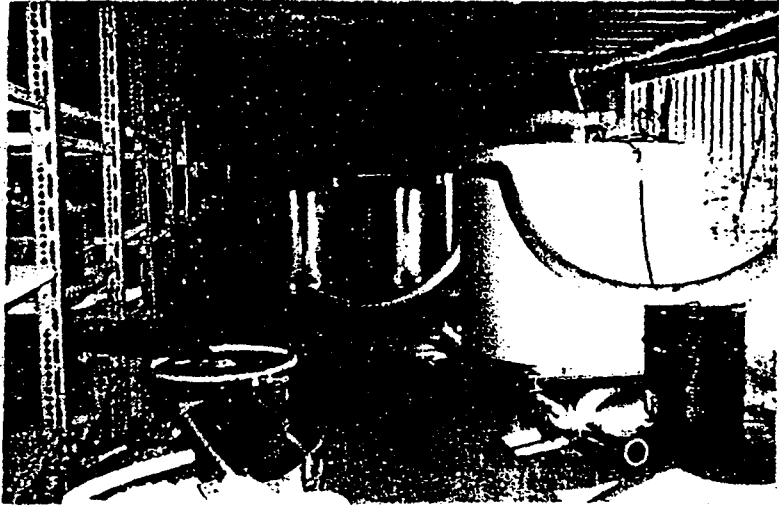
미국의 토양 정화 현장 사례 소개

(주) 콘테크 김 학 명

토양오염현장의 정화사례는 국내에는 아직 없고 주요 선진국중에 주로 독일, 불란서, 네덜란드등 유럽쪽과 아시아에서는 호주 와 일본이 있으나 아직은 시작 단계이므로 사례를 들만한 곳이 주로 미국밖에는 없으므로 미국의 Superfund Remediation Site 위주로 몇가지 사례를 소개하고자 한다.

이미 3月 14日 창립총회 기념으로 5개 Site의 기술별정화 사례를 소개한 바 있으므로 이번에는 다른 4개 Site를 다루어 보았다. 오염정화 기술은 이미 여러 경로를 통해서 소개가 되고 있지만 정작 이를 시행할 법률적, 정책적 제도가 준비되어야 하고 또 정화를 위한 예산, 기금등이 확보가 되어야만 될 것이나 현재 우리는 정화현장의 사례검토와 기술문제를 논하고 있는 것이다. 계속해서 제도와 기금의 준비 작업을 하기 위해서라도 이러한 사례 검토와 기술적 검토는 의의가 있다고 할 것이다.





사 례 : 1. Biotreatment Pile 방식에 의한 정화현장
정화공사명 : Orphan, New Brunswick, Canada
정 화 자 : New Brunswick 환경국과 캐나다 환경부 (50 : 50)
기 간 : 1990 ~ 1995

오염지구 요약

1990년 전에 주유소가 있던 지역에 hydrocarbon 오염 현상이 조사결과 밝혀져 Remediation 을 착수하게 된 것이고 토양과 지하수가 오염되었으며 규모는 750M³이다.

주요 오염물로는 휘발유와 경유, 그리고 솔벤트류의 3 가지 종류였으며 처리 공법으로는 biotreatment pile이 추천되었던 것이다.

기술 적용

Biotreatment pile은 1991년 10월에 건설되었는데 750M³ 규모의 정화지역에 직사각형의 20M x 10M 크기로 만들고 공기가 통하도록 인입 파이프와 같이 Soil Layers 를 설치했는데 이는 휘발성 Hydrocarbon 의 제거와 Vertical Vent Pipes와 통해서 처리에 효과를 거두기 위함이었다. 그리고 Pile 위에 HDPE Sheet를 깔아놓고 오염토양을 없앴후에 침출수 포집용 Pipe를 연결하여 처리 탱크로 가게 만들어 놓았다.

1마력의 백큘 펌프는 계속해서 공기를 순환시켜 Pile로 통하게 해놓고 계속해서 액체 영양물을 주입하며 정화와 분해가 촉진되게 하였더니 부분적인 토양은 회복되었고 BTEX와 TPH 농도는 낮아졌다. 1993년 8월에 740M³의 토양은

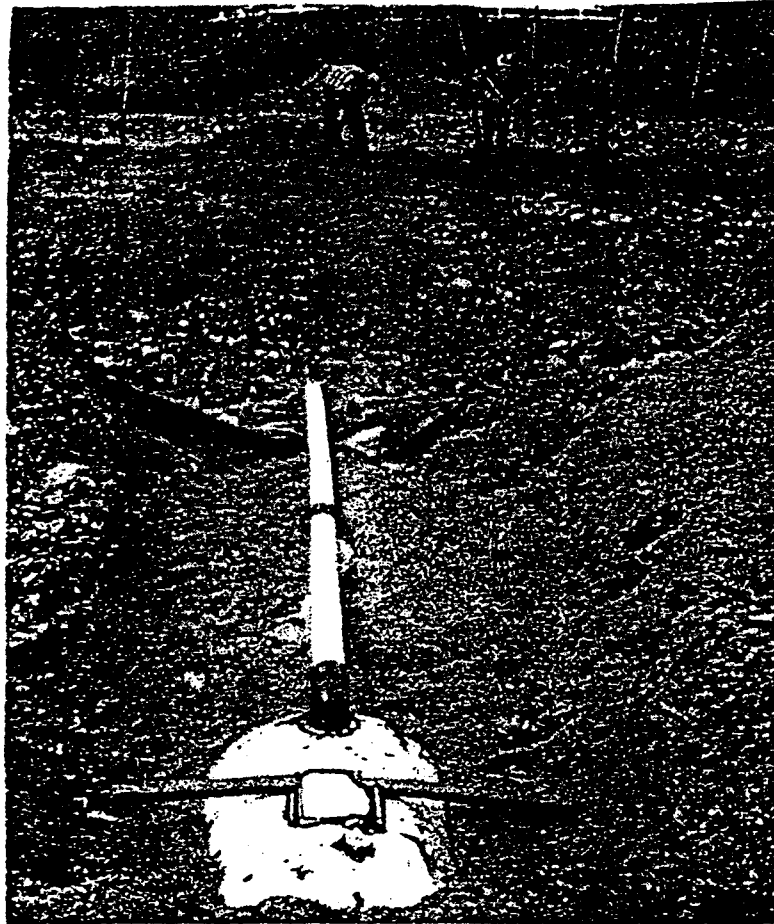
정화가 되어 현장에서 제거하였고 최종적으로 정화되고 남은 10M³정도의 Hydrocarbon을 많이 함유한 소량의 토양만을 소각처리를 위해 다른곳으로 이송시켰다.

결 론

석유오염물이 오염되었던 토양의 98.7%가 성공적으로 ex-situ biotreatment pile에 의해 24개월내에 제거되었고 비교적 간단한 공법이고 저렴한 비용에 의해 효과를 거둔 주유소 오염현장의 사례라고 판단된다.



Construction of a Biopile



Completed first soil layer, Ves System Vertical Screens, Sump Tank, Leachate collection piping and Petrogard VI Liner

사 레 : 2. 증기 추출 방식에 의한 기계공장 정화 공사 현장
정화공사명 : Vally Manufacture Product Co.
위 치 : Groveland, Massachusetts
정 화 자 : EPA
기 간 : 1987. 12 ~1988. 4

오염지구 요약

기계공장이므로 폐오일과 용제에 의해 오염된 토양을 Superfund에 의해 정화하는 것으로 비교적 짧은 기간에 실행되었다.

Vacuum Extraction 기술은 광범위하게 적용되는데

- Source Control
 - 오염 물질이 있는 지역의 평가, 분석
 - 긴급 제거 작업
 - 액상형태로 재이용가능
 - 지하수 처리의 용이
 - In situ 와 es situ 공법 적용가능
- 등의 이점이 있어 채택이 되게 되었다.

기술 적용

기술 적용에 관한 다음 결론들은 현장 검증 테스트와 다른 이용할만한 자료로부터 in situ 진공 추출과정의 적용을 검토함으로써 제기되어졌다.

처리 과정은 휘발하는 조직적인 혼합물과 함께 오염된 현장을 완전히 정화하기 위해 실행가능한 기술로 선정되었고 이 기술을 적용하는데 있어 주요 고려사항은 혼합물의 휘발성, 현장 토양 다공성 그리고 특수 현장 정화 공정이다.

정화과정은 10^{-4} 와 10^{-8} 사이에 걸쳐 평가된 침투성을 가지고 토양으로부터

VOCs를 제거하는데 있어 처리의 가능성을 보장해야 하고 토양의 다공성으로 가득찬 공기는 이 기술 적용의 침투성보다 더 중요한 요소이다.

토양의 낮은 침투성과 높은 습도량, 낮은 공기로 가득찬 다공성은 pilot 실증 테스트가 토양의 탈수 가능성을 결정하기 위해 고려되어진다.

0.001보다 큰 Henry 's Constant 와 함께 오염된 화학물질은 Table 2 을 보면 진공추출 과정에 의해 성공적으로 추출되었다. 처리결과 VOCs뿐만 아니라 개솔린, 디젤 연료, kerosene, 그리고 heavy naphthas와 같은 덜 휘발되는 탄화수소를 성공적으로 추출했다. Henry 's Constant는 특이한 오염물이 과정에 의해 추출되는 충분한 휘발성을 가지는지 결정하는데 사용되는 매개변수이다.

이 과정의 처리 단가는 off-gas 처리가 요구되는지 그리고 어떤 폐수가 현장에서 생성되는지에 따라 달라질 수 있다. 이에 따른 비용 증감 요소는 전체 비용에 20%를 더 더할 수 있다.

정화처리 자료에 기초해서 처리 비용은 일반적으로 톤당 \$50 정도이며 보다 큰 정화 프로젝트를 위해, off-gas 처리가 요구되지않고 폐수가 생성되지 않을 때, 정화 비용은 톤당 \$10 이하가 될수 있다.

결 론

진공추출기술은 휘발성의 유기체를 가지고 있는 오염현장을 정화하기 위한 경제적이고 기술적인 잇점을 제공할 수 있는 분야이다.

오염된 현장이 반휘발성 유기체와 VOCs에 덧붙여 중금속을 포함하고 있을 때 진공추출기술을 이용하여 휘발성 물질을 먼저 제거하고 이후 남겨진 오염물질을 정화처리하거나 제거하는데에 유용하게 적용될수 있을것이다.

Table 2 . Dimensionless Henry's Law Constants for Typical VOCs @ 10°C

1. methyl ethyl ketone	0.0121
2. ethylene dibromide	0.0129
3. 1,1,2,2-tetrachloroethane	0.0142
4. dibromochloromethane	0.0164
5. 1,1,2-trichloroethane	0.0168
6. methyl isobutyl ketone	0.0284
7. tetralin	0.0323
8. 1,2-dichloroethane	0.0504
9. 1,2-dichloropropane	0.0525
10. 1,2,4-trichlorobenzene	0.0555
11. methylene chloride	0.0603
12. 1,2-dichlorobenzene	0.0702
13. chloroform	0.0740
14. 1,4-dichlorobenzene	0.0702
15. 1,3-dichlorobenzene	0.0951
16. chlorobenzene	0.1050
17. cis-1,2-dichloroethylene	0.1162
18. o-xylene	0.1227
19. ethylbenzene	0.1403
20. benzene	0.1420
21. methyl ethyl benzene	0.1511
22. 1,1-dichloroethane	0.1584
23. toluene	0.1640
24. 1,3,5-trimethylbenzene	0.1734
25. m-xylene	0.1769
26. p-xylene	0.1808
27. trichloroethylene	0.2315
28. propylbenzene	0.2445
29. trans-1,2-dichloroethylene	0.2539
30. chloroethane	0.3267
31. 2,4-dimethylphenol	0.3568
32. tetrachloroethylene	0.3641
33. 1,1,1-trichloroethane	0.4153
34. carbon tetrachloride	0.6370
35. vinyl chloride	0.6456
36. 1,1-dichloroethylene	0.6628
37. methyl cellosolve	1.8980
38. trichlorofluoromethane	2.3068
39. decalin	3.0127
40. cyclohexane	4.4329
41. 1,1,2-trichlorotrifluoroethane	6.6279
42. n-hexane	10.2430
43. nonane	17.2152
44. 2-methylpentane	29.9975

Table 1 Groveland Site Equipment List

Equipment	Number required	Description
Extraction wells	4 (2 sections each)	2 in. Sched. 40 PVC, 24-ft total depth
Monitoring wells	4 (2 sections each)	2 in. Sched. 40 PVC, 24-ft total depth
Vapor-liquid separator	1	1,000-gal capacity, steel
Activated carbon canisters	Primary: 2 units in parallel Secondary: 1 unit	Canisters with 1,200 lb of carbon in each canister - 304 SS 4 in. inlet and outlet nozzles
Vacuum pump skid	1	Terra Vac recovery unit model 17 25 HP motor
Holding tank	1	2,000-gal capacity, steel

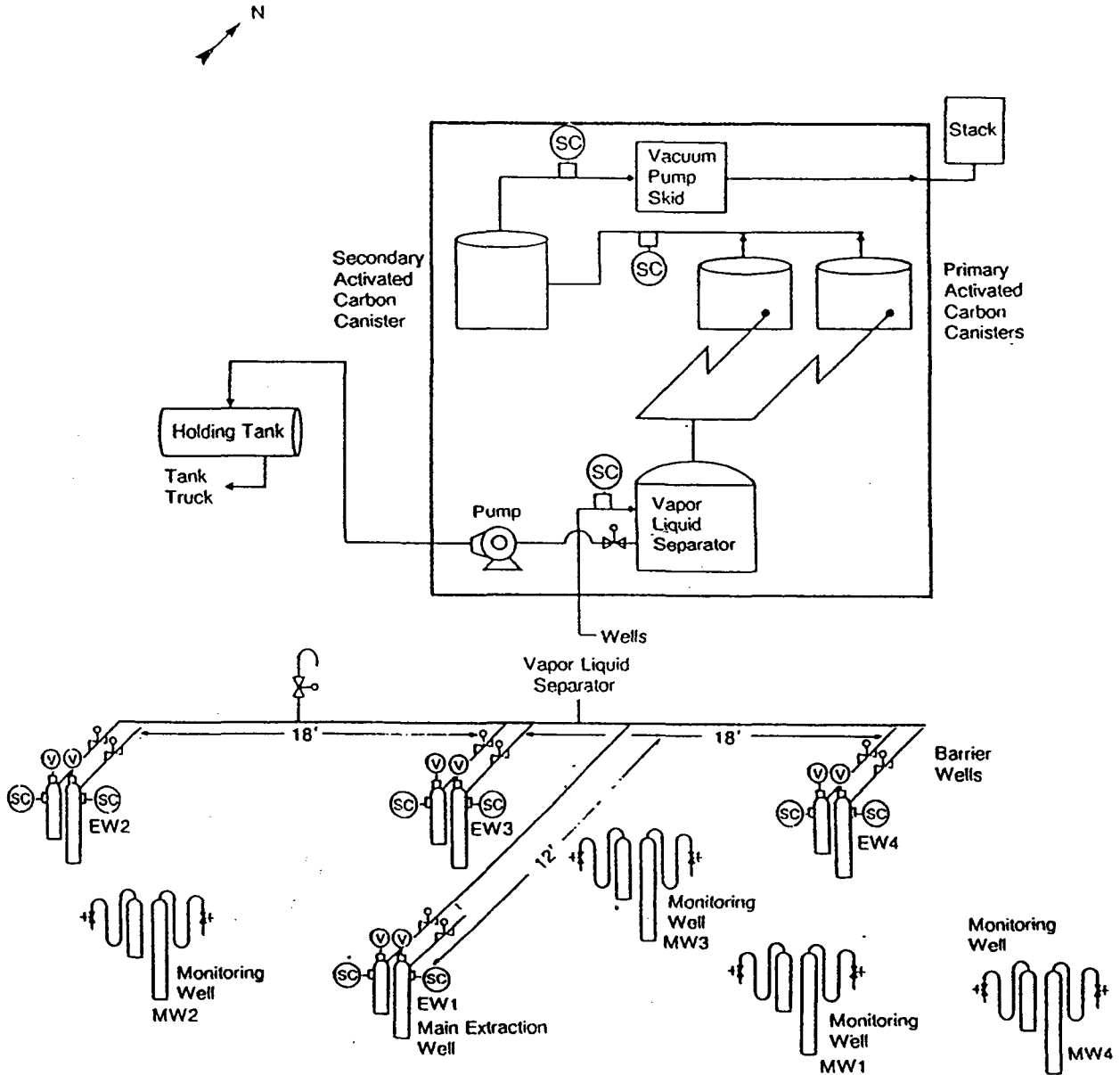


Figure A-1. Schematic diagram of equipment layout.

사 례 : 3.열적처리에 의한 방부제 정화 현장
정화공사명 : Bayou Bonfouca Superfund Site
위 치 : Slidell, Louisiana
정 화 자 : EPA VI 지역내에 있는 군시설 사무소
기 간 : 1992년 2월부터 계속 진행중임

오염지구의 특성

1970년대초에 건설, 운영되었던 Cresote(방부제) 공장은 많은 양의 방부제를 유출시켜 지상과 지하수를 오염시켰고 이후 이 오염물질에 불이나서 오염상태를 더 넓게 확산시켰다.

수년에 걸친 오염현장은 Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH)이 위주인 침전물을 남겼으며 면적은 169,000 Cubic yards에 이르렀다. (상세 내역은 Table 3 참조)

이에 따라 이 지역 소유주인 군당국은 기술 검토후에 열적처리(소각) 방법으로 정화를 시도하게 된 것이다.

기술 적용

모든 Remediation Site가 그렇듯이 Bayou Bonfouca 지역도 오염물질의 특성과 요구조건을 감안하여 정화기술로는 소각이 제일 효과적이라고 판단하여 기술이 선택되어 배치된 것이었다. 오염된 폐기물의 성상은 축축하고 조직적으로 오염된 침전물 위주이므로 이러한 물질을 소각하는 것은 높은 건조열량을 가진 Rotary Kiln이 요구되었으며 Hybrid Treatment Systems이라는 공법의 Kiln과

이차연소시설등 Full Component가 정화현장에 설치되었고 시간당 처리량은 25톤 기준이었다.

규정의 요구조건

이 현장의 정화는 미국 CERCLA 프로그램 아래 실행되어지는 것으로 EPA와 루이지애나주 환경당국 그리고 군당국의 환경규정에 따라 운영되어야 하는 것이었다.

즉 모든 규정에 의해 대기 오염기준, 침출수 처리, 소각재에서 유독물질 검출등에서 적합성을 갖추어야 하며 특히 소각로 운영시 Destruction Removal Efficiency, HCL, SO₂, NO_x, Lead Total Hydrocarbon, Dioxin과 Chlorinated dibenzofuran 과 다른 방출 기준등을 충족시키기 위해 정기적인 검사와 부정기적인 조사에서 기준을 충족시켜야만 한다. 기타 소각로 시설에 관한 내용은 국내 운전되고 있는 Rotary Kiln 구조와 유사하다.

결 과

1992년부터 가동되어 처리를 성공적으로 마친 이 현장은 소각방식에 의한 성공적인 정화를 진행중에 있고 인근에 있는 다른 오염물질까지 처리하도록 군당국으로부터 요구를 받고 있으며 이 현장에 부속적으로 물리, 화학적 처리, 소각된재, 매립장 등이 있어 Integrated Remediation Facility 의 견본이라고 할수 있다. 즉 다단계의 정화기술이 응용되는바 기계적인 굴착, 컴퓨터에 의한 정밀 분석, 슬러지 차단공정, 탈수와 감량화, 소각물질 분류, 소각, 물리, 화학처리 공정을 거쳐 매립지 그리고 Capping, 폐수와 지하수 처리 시설등이 연계되어 처리되고 있는 현장이다. 이와 같이 미국적 기술인 이동가능한 Rotary Kiln방식에

의한 소각 정화는 우리 나라로는 상상하기 어렵지만 미국에서는 대중화 되었고 기존의 공법중 가장 많이 적용되고 있는 기술이고 향후 도입 가능성이 큰 분야라고 예상된다. 참고로 이 현장은 U.S Army Corps of Engineers (USACE)로부터 1993, 1994년 연속 안전관리 최우수 Site 로 선정되었다.

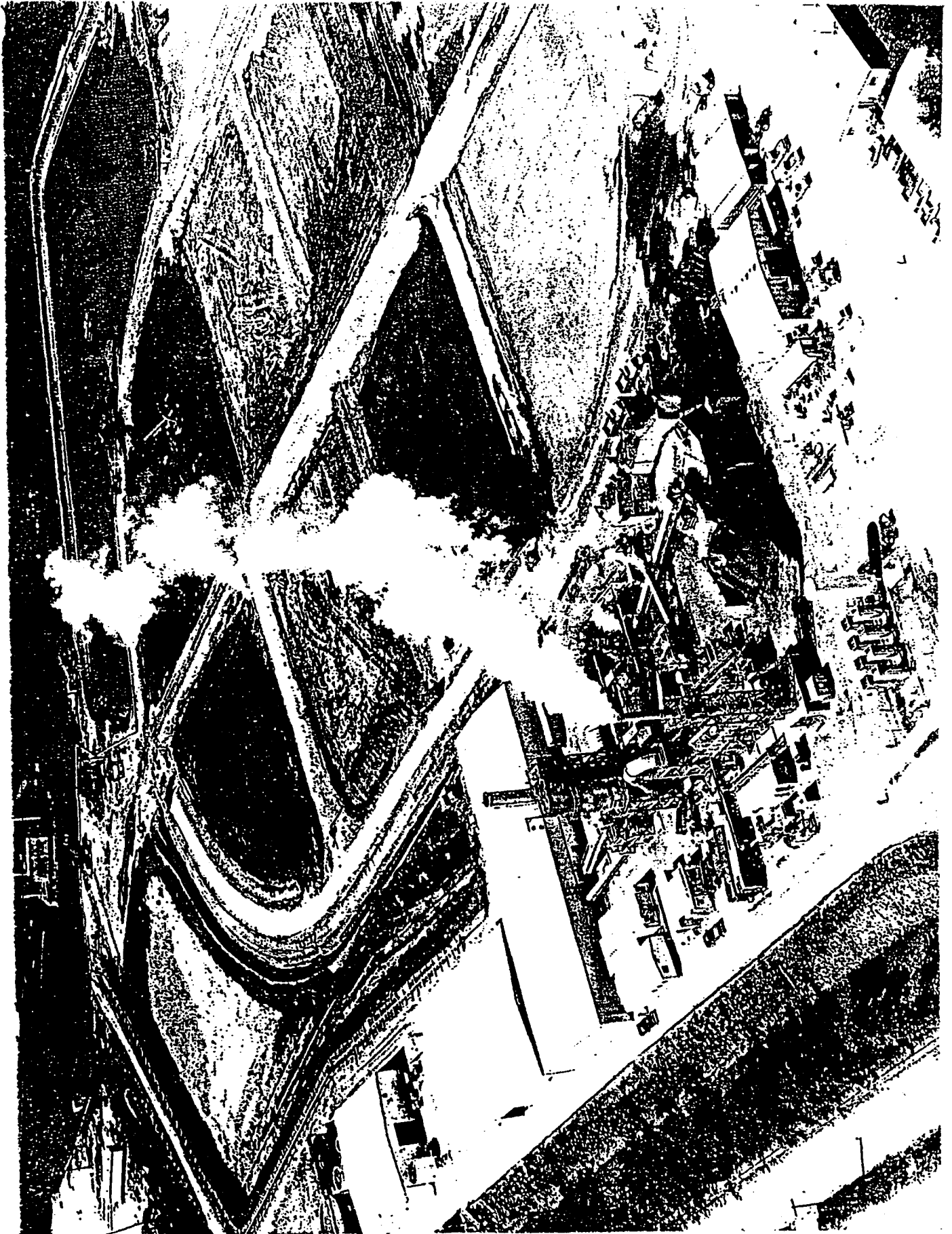


Figure 1 Transportable Hybrid Thermal Treatment System® (HTTS®)
Unit at the Bayou Bonfouca Superfund Site

Table 3 Physical and Chemical Properties of Bayou Bonfouca Site Wastes

Component	Weight (tons)	Wt %	BTU/lb	%C	%H	%O	%H ₂ O	%Ash	Total (%)
Bayou Dredging - Filter Cake	107,186	68%	434	2.45	0.26	1.36	35	61	100
Bayou Dredging - Combustible Debris	15,600	10%	434	2.45	0.26	1.36	35	61	100
Excavation	12,320	8%	100	2.00	0.50	1.50	15	81	100
Bayou Dredging - Oversize	9,248	6%	434	2.45	0.26	1.36	35	61	100
Stripping	5,879	4%	8297	33.37	4.74	37.60	20	4	100
Eastern Drainage Channel	4,200	3%	100	2.00	0.50	1.50	15	81	100
Other Site Wastes	3,089	2%	1820	8.48	0.91	3.88	13	74	100
TOTAL	157,502								

Note: The quantity and composition of dredged materials from the bayou represent their conditions after filtering.

사 레 : 4. 전기용해 방식에 의한 Vitrification 정화 현장
 정화공사명 : Parsons Chemical Site Remediation
 위 치 : Grand Ledge, 미시간州
 정 화 자 : EPA Region 5
 기 간 : 1993 ~ 1994

오염지구 요약

오 염 물 질	최대한 기준	정화시 기준
Chlordane	89,000 ppb	1,000 ppb
4,4' - DDT	340,000 ppb	4,000 ppb
Dieldrin	87,000 ppb	80 ppb
Mercury	34,000 ppb	12,000 ppb
Dioxins	Trace	N/A

파슨스 화학 공장은 1945년 부터 1979년까지 화학물질의 제조와 혼합, 그리고 농업 화학물질 (herbicides, pesticides)의 포장을 주로 해왔던 곳이다. 이에 따른 공장으로부터 400M 반경의 주변 토양과 배수 시설이 오염이 되게 되어 이를 정화하게 된 것이다.

정화추진과정

미시간 州정부와 EPA Region 5가 협력하여 이 지역 정화 프로그램을 세웠고 EPA가 기술적 검토와 소요경비 분석을 하여 전기용해 방식에 의한 정화공법을 채택하게 된 것인데 ① 처음에는 현장에 Rotary Kiln을 설치 처리, ② 오염물을 옮겨서 소각처리, ③ 현장옆에 새로운 매립지를 건설하여 이송처리, ④ 아니

면 오염물을 옮겨서 매립처리등의 공법을 검토한바 있었다. 이에 따라 신기술인 전기용해 방식이 EPA의 Superfund Innovation Technology Evaluation 에 등록, 채택되어 적용하게 된 것이다.

기술 적용

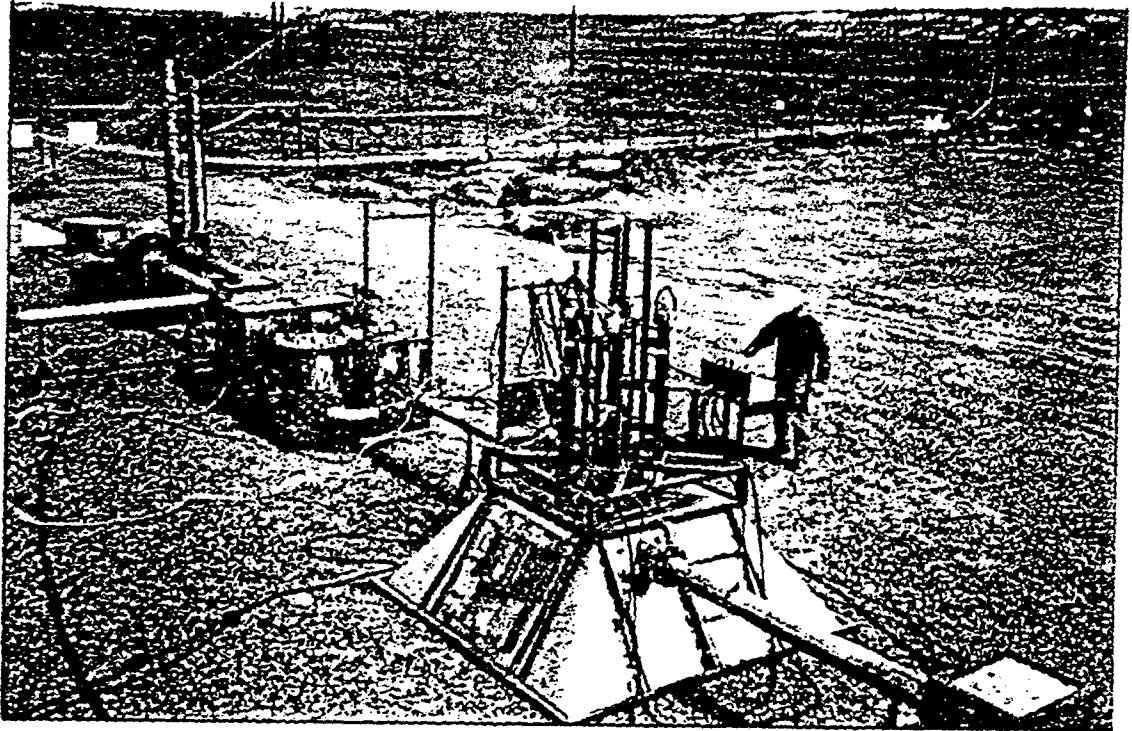
오염은 파슨스 공장 주변지역에 폭넓게 퍼져있었고 모든 지역에 5 피트 두께의 토양층에 침전되어있었다. 오염물을 제거하기위해 길이 16 피트까지 trench를 만들었고 다시 9개로 나누어진 26 피트 스퀘어 셀을 만든후 전기 용해를 위해 오염된 곳과 오염되지 않은 깨끗한 토양을 분리하기 위해 Concrete Wall을 만들어 주었다.

처리시 지하수가 트렌치 안으로 들어오는것을 막기위해 처리장 근처에 임시 저류조를 만들어 그리고 지하수를 유도시켰다. 전기 용해 방식은 오염물에 2개의 전극봉 설비를 크레인으로 이동고정시킨후 오염물질 성상에 따라 초기 1000℃에서 1,600℃ 의 고온으로 폐기물을 용해 vitrification 시키는 것이다.

결 과

이 공법은 신공법으로 1994년에야 인정받은 바 있으며 결과에 대한 Criteria 는 Table 과 같다.

유리화된 생성물의 분석 결과 유기오염물질의 완벽한 부재, 중금속의 고화, 용출안됨이 확인되었고 대기오염도 문제가 없는 것으로 보고 되었다. 이 현장적용 기술은 EPA에 의해 유사한 다른 현장에 적용되도록 추천되고 있으며 유기물, 무기물, 독극 물질 또는 방사능 오염지역 정화처리도 가능하며 현지에서 이동없이 처리가능 하며 거기에다가 콘크리트, 금속류, 드럼등도 처리가능하며 성상에 따라 20 ~ 50% 까지 용적 감량화가 가능하다고 한다.



Intermediate-scale (75 kW) equipment used for testing at the Maralinga Test Range.

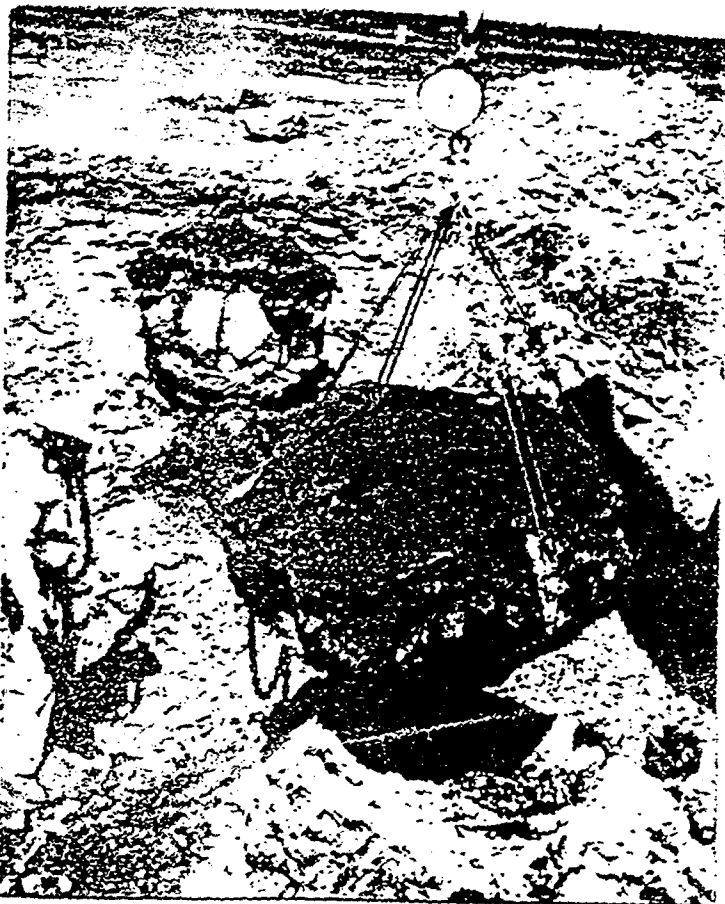


Figure 2

A 5-ton intermediate-scale test monolith being removed for examination, sampling, and analysis. This melt treated buried waste containing U, Pu, Pb, barium-shielding bricks, massive amounts of steel scrap, electric cable, protective clothing, and plastic.