

# シー・エンプレス号事故の対応措置（1996）

## （分散剤と生物学的修復技術の適応について）

AEA テクノロジー・エンバイロメント  
ピーター・ウッド博士

### はじめに

原油タンカー、シー・エンプレス号は、1996年2月15日、サウスウエールズ州ミルフォード・ヘブン近くで座礁した。その後の数日間で、72,000トンのフォーティーズ・ブレンド原油と480トンの重油が海上に流出した。速やかな海上対応が講じられたが、原油は沿岸200kmにわたって漂着した。その後数週間、大規模な沿岸浄化作業が展開された。

この報告書では、この事故の際に行われた新しい流出油対応策のいくつかと、モニタリングの概要を示す。それは、次の通りである。

- \* 海上での分散剤の有効性のモニタリング
- \* 生物学的修復
- \* 原油で汚染された玉石の波浪洗浄
- \* 原油で汚染された玉石に対する現場でのピット洗浄
- \* 砂利の洗浄作業

それぞれを順番に論じる。

### 海上での分散剤の有効性のモニタリング

イギリスの海域で流出油の浄化を図る主要な方法は、承認されている化学分散剤を使用することである。この分散剤は、通常は、比較的新鮮な状態の流出油に対して航空機から散布する。しかし、この分散剤が流出油に有効であるかどうかを判断することが最も重要である。（特にある程度の経時変化と乳化が発生している場合にはそうであるが、全ての流出油を分散できるというわけではない）。海上に拡散された流出油が船舶または航空機から確認できる場合であっても、粘性が高く、経時変化した流出油の場合には、分散剤の効果はすぐには現れないことがある。。そこで、大規模な油流出としては初めて、分散剤の散布作業中に分散された流出油の濃度が測定された。

走査蛍光光度分析法（flow-through-fluorometry）による流出油の分散の進み方のモニタリングの結果、分散剤の適用は自然の分散率を向上させることが分かった。ナショナル・エンバイロメント・テクノロジー・センターの科学者は、海中の様々な深度における流出油の濃度と海上の流出油の濃度をモニターした。その結果、4mの深度では、分散剤で処理された海域の流出油の濃度がおよそ1500 µg/lであるのに対し、分散剤処理が行われていない海域での流出油の濃度は500 µg/l未満であることが判明した。この結果は、分散剤が効果的であることを確認するものであった。この結果は、対応管理センターに伝えられた。そして、同センターは、分散剤が効果的であることを認識した上で、分散剤の散布を継続

することができた。

予想通り、分散剤は、座礁したタンカーから流出する新鮮な状態の原油に対して最も高い効果を有することが判明した。したがって、分散剤を使用する場合の戦略としては、まず始めに、タンカーから流出する新鮮な原油を対象とした。この処置が成功した後、経時変化が進んだ板状油塊を次の目標とした。

エマルジョンを分散剤で処理した際、最初の添加で解乳化が起り、その後の添加で分散油の濃度を高めることができたことが判明した。

分散剤散布作業が成功するかどうかは、特定の油流出部分の処理をいつ停止するか判断に依存する。シー・エンプレス号から流出した新鮮な原油の場合には、帯状の油層になる傾向があったが、分散剤の散布によって薄いキラキラと光る程度の油膜が残るだけの状態にまで厚さを薄くすることができた。経時変化を起こした油の場合には、分散剤散布作業が順調に進むにつれて、主な問題は海面上を覆うエマルジョンの面積が小さくなることであった。このエマルジョン浮遊層が海面のおよそ 30% にまでなると分散剤の効果はなくなったので、作業は停止された。

この作業中、およそ 445 トンの分散剤が航空機から散布された。この散布対応作業の特記すべき点は、散布目標を指示するために、散布航空機の上空に遠隔探査設備を有する航空機を配置することで達成された非常に効果的な目標補促であった。この作業方法はイギリスではよく確立されたものであり、DC3 型散布航空機は 10-20m 幅しかない原油の帯にものを絞り込むことができる。

自然に分散した原油の量と化学的に分散された原油の量を正確に区分することは困難である。合計で、およそ 47% (33,800 トン) が分散され、この内のおよそ 7,200 トンが自然に分散されたものと推定される。つまり、およそ 26,600 トンが化学的に分散されたことになる。445 トンの分散剤が使用されたことを考慮すると、分散剤 1 トン当たり 60 トンの原油が化学的に分散されたことになる。この割合は通常の想定(分散剤 1 トンで 20 トンの原油を分散できる)よりも大きなものであるが、これは合理的な推定であると考えられる。分散剤が新鮮な原油に対して使用されると高い分散率が期待でき、機器分析によるモニタリング結果も、効果的な分散が容易に行われたことを示している。

### 生物学的修復方法

生物学的修復方法は、シー・エンプレス号の事故の際には原油で汚染された海岸の標準的な浄化方法としては使用しなかった。しかし、対応管理センターは、この機会を利用して幾つかの実験的な研究を行った。

AEA テクノロジーの科学者は、生物学的修復方法の可能性を評価するために、多くの海岸で調査を行った。予備調査の結果、人力による洗浄作業が完了していた 6 カ所の海岸が対象となることが分かった。この選考過程で考慮された要因は、海岸の自然エネルギー水準、微生物による油の生物分解性、海岸線の自然の栄養分水準、および、原油で汚染された基層のタイプである。

この調査の結果、栄養水準は冬期と早春期には十分であるが、気温の低下が制約要因となることが判明した。しかし、その後の調査の結果、気温が上昇する夏期には栄養分の不足が制約要因となることが判明した。しかし、人工的な栄養分の添加によって、この問題を解決することは可能であろう、という結論になった。

ブルウェル湾に実験区域が設置された。この海岸は、ミルフォードヘブンの内部にある自然エネルギーの低い海岸である。この海岸は、粘土層の上部に堆積した玉石、砂礫および小石で構成されており、海水と空気の透過率が高い。フォーティーズ・ブレンド原油と重油の両方が存在しており、かつ、堆積物のサンプルにより、適量のバクテリア群が存在することが分かった。関係する規制上の承認を得た後、天然の炭化水素分解バクテリアの生育を刺激するために、窒素やリン酸などの栄養分を添加した。海岸には、9カ所に実験区域を設置した。この内の3カ所では栄養分を毎週添加し、次の3カ所では徐放性の栄養分を毎月添加し、残りの3カ所では栄養分は全く添加しなかった。環境庁も、実験期間中、監視を行い、栄養分の添加が海岸近くの環境に影響を与えないことを確認した。

その結果、2つの方法で栄養分を添加した場合に、重油とフォーティーズ・ブレンド原油の両方の生物分解率が全く同じ割合で上昇することが判明した。この処置は、海岸近くの海水の栄養分には計測可能な影響は与えなかったし、有害な影響も認められなかった。エネルギーの低い海岸の自然回復力を改善するためには、徐放性の栄養分を添加する方法が費用対効果に優れた方法である可能性がある、との結論に達した。

#### \* 油で汚染された玉石の波浪洗浄

波浪洗浄として知られている手法は、シー・エンプレス号の事故の際に2カ所の海岸で使用した。この手法は、基本的には、干潮時に軌道式掘削機を使用して、満潮マーク（汀段）付近にある油に汚染された玉石を潮間帯の中央部に移動するものである。潮位が上昇するにつれて、波打ち際で開放される波浪エネルギーは、油に汚染された玉石からかなりの量の乳化したフォーティーズ・ブレンド原油を除去することができるようになる。また、磯波帯の海岸ないしは海水中の天然の鉱物の微粒子が、油に作用して鉱物と油のフロックを形成し、油滴の凝集を阻止する。そして、このフロックは海中に分散する。

アムロスとマロスの2カ所は、油に汚染された玉石のなごさが広がっていたので、波浪洗浄を行うのが適当と考えた。

アムロスでは、漂着したエマルジョンが付着した玉石の荒れた海岸には、雲母、緑泥石、カオリナイト、石英、方解石、長石などの微粒鉱物とも存在していることが判った。このエマルジョンが海中に運ばれると、粘土と油のフロックが形成され、更にもう一度同種の鉱物と結合することが判った。この現象は粘土鉱物と比べて非粘土鉱物（石英、方解石および長石）によるものは少なかった。形成されたフロックは、総じて、大きさは30 μm、或いはそれより大きめであった。このような知見より、対策当事者は、玉石海岸を浄化するために波浪洗浄法を採用することにした。

その後、アムロスでは波浪洗浄作業が継続的に実施され、海岸の砂礫中の油の濃度を低減することに成功した。この波浪洗浄作業の際、海岸近くの海水中の微粒子中の油は、海岸線に滞留している油に比べて、大幅に生物分解されていることが化学的な証拠から判明した。

マロスでも、漂着したエマルジョンが玉石の海岸で鉱物の微粒子と共存しており、このエマルジョンが海中に運ばれると、フロックが形成されていた。マロスでの観察の結果、玉石表面のエマルジョンの高濃度は汚染後およそ 14 日間持続していることが判明した。しかし、汚染から 50 日後には、このエマルジョンは不安定化し、移動し易くなり、海岸の砂地で最大で 3m 下まで浸透し、浸透性の低い氷積土 / 下降漸動基盤にまで達していた。この結果、一部の油は玉石海岸の潮位の変動の影響を受け、虹状の油膜となり消失していた。

マロスの漂着エマルジョンのサンプルの油の組成を検査した結果、油流出後 14 日目から 51 日目までは同海岸では顕著な生物分解は生じなかったことが判明した。その結果、今回においても、海岸の油の量的低減に貢献する主なプロセスは極めて薄い油膜になることによるものと考えられる。波浪洗浄作業を行わなかった場合には、この極めて薄い油膜になるプロセスは数カ月間以上も続いたものと考えられる。

マロスでの波浪洗浄作業は、油汚染後 47 日目に開始し、7 日間続いた。表 1 は、作業に関する統計を示すものである。推定で 8,150 トンの油濁した玉石を、850m にわたって海方向に 12m ないし 18m 移動した。移動する必要がある玉石のトン数は、エマルジョンが海岸の砂地に浸透した深さと直接的な関係がある。海岸での玉石の移動がエマルジョンが不安定になる前のより早い時期に行われていた場合には、移動する必要があるトン数はこれより少なかったであろう。波浪洗浄を開始してから 2 回の満潮を経た後に収集したサンプルを分析した結果、表層部と深部の油濃度はともに 22ppm を超えていないことが判明した。移動する前の濃度の 700ppm 強に比べると大幅な減少である。これは、増強された油拡散プロセスと波浪洗浄作業の相乗効果によるものと考えられる。この仮説は、詳細なガスクロマトー質量分析 (アルカン・ホパン比率) (alkanes:hopane ratio) によって支持されており、この分析では、海岸の漂着エマルジョンの消失は、生物分解活動が刺激されたことによるものではないことを確認している。

波浪洗浄作業の過程で沖合の油の濃度を測定した結果、海水の垂直方向への油の分散が行われたことを確認した。水深 1m の油濃度は、海岸近くでは最大で 600  $\mu\text{g/l}$  であったが、海岸から 1km の範囲内では 150  $\mu\text{g/l}$  にまで減少していた。

得られた結果から、粘土鉱物と油のフロックが出来ていることが確認できる状況においては、波浪洗浄は、今や、油に汚染された海岸に対する一つの有効な流出油対応策として考えることができるとの結論が出せる。さらに、油の生物分解は、微粒鉱物との相互作用後に海中で増進されると思われるので、波浪洗浄は、生態系からの油の除去率を効果的に向上させるメカニズムであると考えられる。

表1：マロス海岸での移動作業に関する記録統計

日付	海岸での移動						海方向への移動距離 m
	長さ m	幅 m	最大高さ m	平均高さ m	容量 m <sup>3</sup>	重量 t*	
4月15日	150	2.0	0.5	0.5	150	275	12
4月16日	115	2.5	1.0	1.0	290	525	12
4月17日	125	3.0	1.5	1.0	375	675	12
4月18日	175	2.5	1.5	1.0	440	800	12
4月19日	150	6.0	2.0	1.5	1350	2450	12
4月20日	25	7.0	3.0	2.0	350	625	18
**	(100)	-	-	-	(900)	(1650)	(6)
4月21日	110	7.0	3.0	2.0	1540	2800	18
合計	850	-	-	-	4495	8150	-

\* 容量  $\times 2.6$  (玉石の推定密度)  $\times 0.7$  (推定充填密度) として計算。

\*\* 玉石は、当初、4月19日に移動されたが、潮汐の影響を受けなかったため、そこからさらに海方向に移動したものの。

#### \* 油で汚染された玉石に対する現場でのピット洗浄

シー・エンプレス号の事故に関しては、玉石の洗浄のためにピット洗浄を初めて行った。50-100トンの玉石を収容できる大型のピットを掘削し、耐久性の高いプラスチックシートで内張りした。玉石を入れて、高圧水と承認された脱脂剤(表面クリーナー)で洗浄した。油は、ピットの表面からすくい取り、洗浄された玉石は海岸に戻した。或る場合には、金属製の箱を沈めてピットとして使用した。この玉石洗浄方法は油の大部分を取り除くだけのものであることに留意する必要がある。ピットに残っている汚れのついた玉石は、なごさの玉石層の表面には戻さず、他の玉石に汚染が移らないようにするために埋められた。

#### \* 砂利の洗浄作業

数カ所に、洗浄作業場を設置した。これらの作業場は、セメント・ミキサー、金属製の箱、一時貯槽、コンベヤーおよび足場材料など、直ぐに入手できる道具を利用して設置された。油まみれの砂利を、トラックに搭載されたセメント・ミキサーに入れ、承認された脱脂剤を入れた海水を加えた。そして時々、軽油 - を添加した。(しかし、後になって、必要がないことが分かったので、脱脂剤と軽油の使用は停止した)。セメント・ミキサーを使用することで、砂利が攪拌され、油が分離されてくる。この混合物は、さらに分離するように静置する。油を含んだ海水は水洩れのない金属箱またはタンクに流し込み、油は表面スキマーで除去した。洗浄された砂利は海岸に戻した。

処理効率は、油汚染の程度、セメント・ミキサーの能力、および、使用できるセメント・ミキサーの数に依存する。セメント・ミキサーは、名目上10トンの能力があるので、1バッチの処理サイクルを2時間とすると1日に50トン程度を処理することができる。しかし、AEA テクノロジーの最近の研究では、この長さの処理サイクルは必ずしも必要ではないとしている。

## 結論

シー・エンプレス号の事故に対する浄化処理は、大きな成功を収めたと言える。この機会を利用して、流出油処理に対する革新的な手法を試みることと、海上処理および海岸での洗浄を検証することができた。リアルタイムでのモニタリングは、対応を進めている最中の意思決定を可能にし、かつ、環境保護を強化する上で非常に有益なものであった。

分散剤の散布作業中に分散した油の濃度をモニターすることで、分散剤の有効性を証明することができる。波浪洗浄は、今や、効果的な流出油対応策であると考えられる。現場でのピット洗浄とセメント・ミキサーを使用した砂利の洗浄は、他の方法では難しい砂利の洗浄に有益であることが証明された。徐放性の栄養分を添加する生物学的修復法は、低エネルギー環境の自然の回復力を向上する上で費用対効果に優れた手法となる可能性がある。