

地球環境問題としての海上交通と海洋汚染

和田 明*

先端技術の導入により、船舶の高品質化や目的にかなう船舶の開発には目覚ましいものがある。海上輸送は我が国周辺の海域ばかりでなく、化石燃料、原子燃料、産業用品の輸送を地球規模にわたって実施されている。一般に、輸送船の事故の確率は 10^{-6} / 航海から 10^{-11} / 航海ときわめて小さいものである。このように海上輸送事故はほとんど起こりえないものであるが、万が一の事故に対しても安全性があるということ、海洋環境へ与える影響を最小限にするという観点から研究が進められている。本文では、船舶航行と海洋汚染の面から、原子力燃料輸送船の安全性の問題とタンカー事故による油汚染とその対策の課題について述べる。

On Marine Transportation and Marine Pollution from the Viewpoint of Global Environmental Problems

Akira WADA*

Introduction of top-notch technologies in the shipbuilding has enabled a remarkable improvement of quality of ships and development of ships designed for highly specific purposes. In our country, marine transportation plays an important role not only within our coastal waters, but also in worldwide sea areas for transporting fossil fuels, nuclear fuels and various industrial products among various parts of the world. Probability of marine accidents in the ocean is estimated to be as low as 10^{-6} to 10^{-11} per navigation, that is to say, disaster in the marine transportation may be considered to be almost improbable to occur. However, studies in the field of maritime accidents have been promoted on the safety to be secured when such accidents may occur and measures for minimizing their effects on marine environment. In this paper, I want to discuss, problems of the security of nuclear fuel transporting vessel, the oil spill from tanker wreck and their countermeasures from the standpoint of navigation ships and marine pollution.

1. 原子力燃料輸送船の安全性について

1-1 背景

海上輸送の通常時の安全評価は、輸送船の乗組員や港湾労働者などについて行われてきている。乗組員などの安全は輸送規則や船舶、荷役に関する規則などにより保証されていることから、これまでの海

上輸送の安全評価法については、海難事故時を対象とした研究が行われてきている。

1-2 輸送船の事故確率

我が国は、原子力によるエネルギーの長期的な安定確保の観点から、使用済燃料を再処理し、回収したプルトニウム、ウランを再利用するという原子燃料リサイクルの実用化を目指している。したがって、使用済燃料は国内において再処理する事を原則としているが、これが完成するまでの間、電力会社はフランス燃料公社 (COGEMA) とイギリス原子燃料会社 (BNFL) に再処理を委託している。

* 日本大学生産工学部教授
Professor, College of Industrial Technology,
Nihon University
原稿受理 2002年11月27日

この再処理の際に発生する高レベル放射性廃棄物は、ホウケイ酸ガラスによって固化され、我が国へ返還されることになっている。1995年2月、輸送容器に収納された高レベル放射性廃棄物の海上輸送が、フランスから日本原燃(株)の廃棄物貯蔵施設に向けて開始された。

また、欧州から日本に向けてMOX新燃料の海上輸送が計画・運行されている。輸送航路は南アフリカ南端の喜望峰回り、ホーン岬回り、パナマ運河経由の航路が考えられ、大西洋、太平洋、インド洋など地球上の全海洋が輸送の対象となっている。

MOX新燃料の海上輸送では、IMC(国際海事機構)の安全基準や国内法令を満足する専用船が使用されている。

輸送船の事故確率の解析については、サウスカロライナのチャールストンからフランスのシェルブルールまでのB型使用済燃料の輸送中、チャーター貨物船が過酷な事故に遭遇する場合を想定したケースが求められている¹⁾。船の衝突のみを想定した過酷事故は輸送物に損傷を与えうる可能性の最も少ない事象であり、一方、衝突及び火災を考慮した連続事象は、想定しうる事故の中で最も過酷な事象である。そのため、大西洋を航海中に使用済燃料輸送物から放射性核種が放出される確率は、 10^{-6} / 航海から 10^{-11} / 航海という範囲の値が報告されている。

一方、我が国のMOX新燃料輸送は、我が国の特別規制に従い、二重船殻構造を持った運搬船によって行われる。したがって、事故による損傷が輸送物に生じる確率はさらに小さく考えられる。渡部ら²⁾は、ヨーロッパから日本に向けての放射性物質の輸送時に、輸送容器は損傷を受けないが、二重船殻構造を持った専用船の全損(航走不可能となるケース)の確率を、 2.6×10^{-5} / 航海と評価した。したがって、輸送物の海没の確率はさらに小さく考えられる。以上の研究成果から輸送物が海没し、核種が漏洩する確率は非常に小さく、事故による輸送物からの核種の漏洩は、ほとんど考慮する必要がないことを示している。

このように、輸送船は他船との衝突や火災の可能性がきわめて小さく、万が一の衝突の場合にも沈みにくい二重の船体構造となっており、火災発生時にも注水装置が作動して貨物倉の温度上昇を防止する措置がとられている。海没事故はほとんど考えられない事象ではあるが、万が一の事故に対しても、海上輸送の安全性を公衆や沿岸諸国に説明するという

社会的受容性(PA: Public Acceptance)の観点から研究が進められてきた。

1-3 仮想海没事故による影響評価方法³⁾

輸送物の想定海没地点については、昨今のサルベージ技術から大陸棚に相当する水深200mまでは速やかな回収が可能である。回収できずに環境に与える影響が最も大きくなる水深が200mと考えられることから、200m水深の海域に沈没することを想定している(Fig.1)。

海洋中の核種の濃度分布は、3次元の移流拡散方程式にスクベンジング効果(核種が海洋中の懸濁物質に吸着、沈降することによって、海洋から取り除かれる効果)と核種の崩壊を考慮し、差分法で解くことによって、海洋中核種濃度分布が求められる。ここで用いる流動場は、3次元のボックスモデルや、力学モデルを用いて求められる。次に、放射性核種濃度をもとに、評価領域で漁獲された海産物の摂取による内部被曝、ならびに海浜作業等による外部被曝を考慮し、個人被曝線量当量を求めることが一般的な方法である。

1-4 被曝線量当量の評価方法³⁾

被曝線量当量には個人線量と集団線量がある。個人線量は最も大きな影響を受けると考えられる個人に対する評価であり、集団線量は特定の地域で生活する人々の全体に対する評価である。我が国の評価においては、個人線量に対する評価が一般的であり、欧米においては集団線量評価が一般的である。

海洋中の放射性核種濃度をもとに、評価領域で漁獲された海産物の摂取による内部被曝線量、ならびに海浜作業などによる外部被曝線量をICRPの評価方法により算出する。

評価に使用する海洋中の放射性核種濃度は、保守側の評価結果が得られるように、摂取する海産物の生息領域である海洋の表層(0~100m水深)の濃度

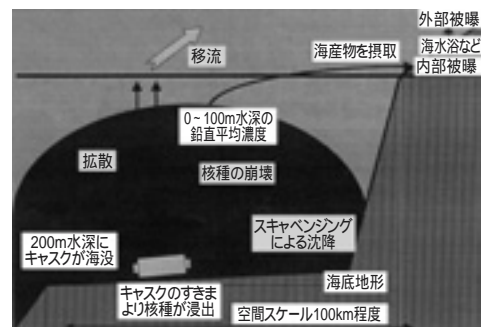


Fig. 1 海洋拡散現象評価方法の模式図

の最大値とするのが一般である。

1 - 5 具体的な評価例³⁾

高レベル放射性廃棄物の海上輸送事故を対象に評価が行われている^{4,5)}。

輸送容器 1 基に28体のガラス固化体が収納されていると想定し、その輸送物が万が一、東日本の太平洋側に海没する事を想定した場合、この時の海水中濃度から、公衆の被曝線量当量は海没後約2か月で最大値を取り、 5.9×10^{-4} mSv/y である。これはICRPの勧告による公衆被曝の実効線量当量限度(1 mSv/y)を大幅に下回る。なお、1 mSv/yは日本における平均的な自然放射線による被曝線量に相当する。

2. 海洋における油汚染とその対策

タンカーの座礁などの事故により流出する油の量は、陸上から海洋上に流出される油を含めた全流出量の約55%程度を占めている。油流出事故そのものはMARPOL条約などの国際規制の引き締めなどによって確実に減少している。

しかし、このような流出事故は局所的に大きな被害をもたらす、海洋生態系上に多大なダメージを与えているのは既知の事実である。海洋環境に及ぼす油汚染は、湾岸戦争後のペルシャ湾の状況が最も新しい記憶として残っている。イラクによって、多くの油田や石油パイプラインが破壊され、大量の原油がペルシャ湾に流れ出たのである。その流出量は約5億バレルと推定されている。ペルシャ湾付近には多くの海鳥やマングローブの自生林などが存在しており、流出油によって被害にあった海鳥は2～5万羽と考えられている。

また、1989年に起こったエクソン・バルディーズ号の事故では、4万バレルもの油が流出し、鳥類や哺乳類の楽園といわれるアラスカ南岸に大きな被害を与えている。

本章では、限りあるエネルギー資源である原油の特性を知るとともに、海洋上に流出した油に対して迅速な処理活動を行うための対応策について述べることにする。

2 - 1 原油の特性^{6,7)}

原油は、黒褐色の粘着性のあるものであり、水よりも比重が軽く特有の臭気を持っている液体である。多種類の炭化水素化合物と、硫黄、窒素、酸素の化合物や油溶性金属化合物が混在している。また塩分と土砂を少量含み、固形パラフィンやアスファルト

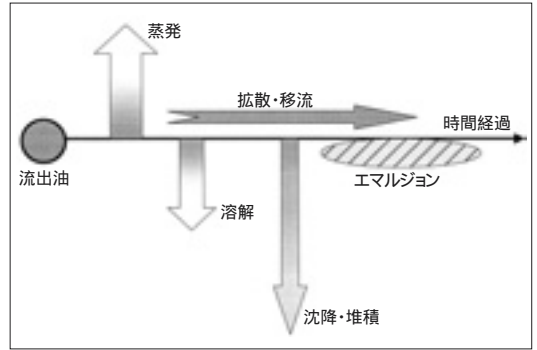


Fig. 2 流出油の挙動

などの固体成分も混在されている。このような原油が海上に流出すると、油膜の拡大とともに空中への蒸発、水中への溶解や拡散などを始める。そして、この過程を繰り返しながら最終的に微粒子となり、生物分解されていくのである(Fig.2)。しかし、全てが還元されるわけではなく、流出量の1/3以下が海域に残存する事になるが、最終的に微粒子状となり、海底の泥に混じり、生物学的に不活性化されていく。

2 - 2 流出油の処理^{8,9)}

油流出事故が起こった場合、複数の活動すべき選択肢の検討をしなければならない。さらに、処理活動の決定に影響を及ぼす要因についても考慮しなければならない。意志決定は、事前計画作成の一環として組み込まれ、危機管理の概念によって行われるべきである。また、効果的に流出油を管理するためには、適切な組織を配置し、業務と責任の分担を適切に行う事が基本的な要件となる。

最適な流出油の対応を決定するには、海洋条件や気象データ、及び油の特性のデータを短時間に入手し、状況に応じて、多数の事例データを前もって具体的に把握し、流出油の拡散状況についての知識を確保することが、重要な基盤となる。基本となる対策としては、オイルフェンスの展開、油流出源の修理・閉塞、残油の移し替え、流出油の回収、油処理剤の散布の五つの応急処置が選択されるべき事項である。

2 - 3 油処理剤^{8,9)}

油処理剤は、1960年代に欧米で登場し、我が国でもいくつかの品種が出されたが、性能上の問題が多く、製造側、使用側ともに使用目的が明確ではなかった。当時はまだ処理剤に関する規定がなかったため、毒性の強い油処理剤が使用され、水産物に大き

な影響を及ぼしていた。1971年11月に新潟港外で発生した「ジュリアナ号」事件をきっかけに、我が国でも油処理に関する規定が設けられ、1983年10月からはMARPOL73/78条約の批准に伴う海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の一部改正により、一定基準をクリアしたものでなければ使用できないことが法的に義務づけられることになった。

現在、通常型油処理剤、濃縮型油処理剤、自己攪拌型(セルフミキシング)油処理剤の三種類の油処理剤が市販されているが、我が国では、そのうちの通常型の油処理剤しか市販されていない。

油処理剤は界面活性剤を混合した製剤であり、海上に浮上する油の水中への拡散を助長させるものである。油処理剤は流出油が粘性の高い油中水エマルジョン(チョコレート色のムース)を形成した後では効果が小さくなるため、ムースの形成又は風化によって粘性が大きくなる前に使用する必要がある。

使用方法は、個別状況に応じて最適の組み合わせを見出す必要がある。公海上では、油処理剤は船舶や航空機からの適用が可能である。油処理剤の適用に当たっては性能が実証された機器を使用し、機器及び油処理剤メーカーの使用上の注意を守ることが重要である。

2 - 4 機械的除去⁹⁾

機械的油除去方法は、海洋へ流出した油を物理的に除去するものであり、理想的な方法とされている。従来、流出油を包囲して、水面から油を回収するための浮遊オイルフェンスの開発と改良に多大な研究努力が行われてきた。この種の方法として油のスキミ

ング(汲み取り)による回収や吸着処理も含まれている。

海面に流出した原油の拡散を防止するために、周囲を包囲する帯状の用具をオイルフェンスと呼んでいる。浮体と重錘とからなっており、使用する際には海面上30cm程度から海面下40~80cm程度の範囲で、帯状の防散壁が形成するように作られている。

比較的平穏な海面(潮流3ノット以下、風速15m/秒以下、波高2m以下程度)での使用に、その効果を発揮する事ができる。しかし、外洋などの気象・海象条件が著しく変化する場所での使用には、多くの問題が残っている。

2 - 5 事故への対応シナリオの例

東京湾内で油流出事故が生じたという仮定で、東京湾の粒子追跡プログラム¹⁰⁾をもとに、袖ヶ浦沖の二箇所(東側、西側)で拡散予測を行った。四つのシーズンの東京湾の流動パターンに基づいて、流出後3日以内のデータを用いて拡散予測を行うものとする。なお、原油の特性である蒸発などの自然浄化作用は無視するものとし、水=油という条件で行うこととしている。また、拡散予測を行うとともに、その流出油に対する対策方法を検討していく。

1) 秋：袖ヶ浦沖西側(Fig.3)

東京湾全体に広がる恐れがある。流出油はまず、湾奥の方向へ進み、その後、外洋に向かって進むが、また流出点の付近へ戻るといった複雑な動きをする。さらに東京側・千葉側ともに沿岸漂着の危険性がある。このため、処理方法の決定は迅速に行う必要がある。まず流出直後に沿岸域にオイルフェンスを展

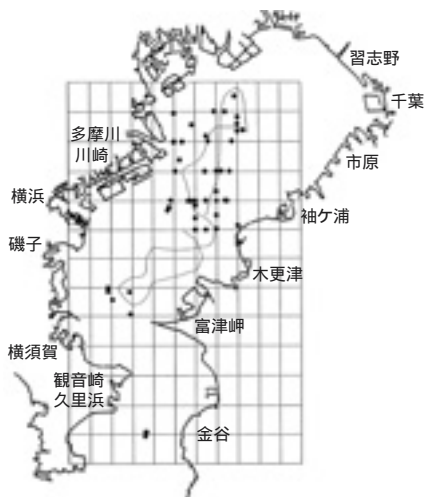


Fig. 3 油の拡がり：袖ヶ浦沖の西側で流出、秋季



Fig. 4 油の拡がり：袖ヶ浦の東側で流出、秋季

張し、その後流出油を囲むようにオイルフェンスを使用する。そして、拡散範囲に応じて回収船が油処理剤の使用を決定する。オイルフェンスによる囲いに失敗した場合は、沿岸部のオイルフェンスと早期の油処理剤の仕様を検討する必要がある。

2) 秋：袖ヶ浦沖東側 (Fig.4)

東京湾湾奥を循環する。この循環流は東京港付近まで回る大きな動きなので、油処理剤を中心とした分散処理がよいと思われる。東京湾全域への拡散・沿岸漂着の可能性は少ないのでオイルフェンスの展開は考えなくて良いだろう。

2-6 展望

油処理剤の開発・改良を行う際、処理剤に対する生物毒性について考慮しなくてはならない。油流出事故が起きた場合、その海域の環境を事故前の状態に出来るだけ戻す事が最優先される事項である。油処理剤は油回収船などによって人工の波動エネルギーを起こす事によりエマルジョンの形成を抑制し、油をある程度回収し、そこへ濃度の低い処理剤を投入すれば、生物に対する影響も小さくできまた迅速に処理活動を行うことができるであろう。

油流出事故の場合、現場海域の海洋条件が大きな影響力を持っている。現場海域が荒れている場合、油回収船などの船舶は海洋に出ることはできないと考えられる。このような時に航空機から散布が非常に有効である。濃縮型・自己攪拌型の油処理剤の導入が遅れている理由として、通常型のものに比べて毒性が強いという点が考えられるので、この点の開発・検討を早急に行うべきである。

2-7 考察

輸送や貯蔵の際にタンカーの座礁や石油パイプラインの破損などによって、多くの原油が海上に流出してしまう。その流出量は、年間で300~400万バレルと推定されている。こうした事故が生じた場合、迅速な対応が必要であり、原油の回収を急がなければならない。そのためには、各国の組織作りから地域での役割までをはっきりし、資機材その他の油処理方法を選び出さなければならない。油流出事故に対する対処方法は、各国で研究・開発が行われているが、その中でも油処理剤に関してのものが多く、日本においても、多くの実験がなされているが、その結果では、処理能力の高い処理剤ほど毒性が強いようである。

このことから、いかに低毒性の処理剤を利用し、回収能力を向上させるかが問題となる。機械的な回収

により油の回収を行い、二次処理として処理剤を投入することで、低毒性の処理剤でも十分な効果が得られるのではないだろうか。実際には、放出した油の約10%程度を回収すればよい方であり、油流出後2~3日が勝負となるのである。すなわち、一次処理を行ってから二次処理を行うのではなく、処理剤の特性を生かすために回収船などによって生じる波動エネルギーを利用し散布することにより、より一層の効果をもたらすことができるのである。

参考文献

- 1) Sprung, J. L. et al.: Data and methods for the assessment of the risks associated with the maritime transport of radioactive materials results of the SeaRAM program studies, SAND98 - 1171 / 1. The NCAR CSM Ocean Model, NCAR Technical Note / TN - 423 + STR, 1998
- 2) Watabe, N. et al.: An Environmental Impact Assessment for Sea Transport of High Level Radioactive Waste, RAMTRANS, Vol. 7, pp.117-127, 1996
- 3) 財団法人中央研究所バックエンド研究会編: 『核燃料輸送工学』日刊工業新聞社、pp.228-240、1998年
- 4) A. Wada: Circulation Analysis in the Pacific Ocean for Collective Dose Assessment of Radionuclides, Proc. of 25th IAHR Congress, 1992
- 5) Tsumune, D. et al.: Study on Method of Environmental Impact Assessment Sea Transportation of Radioactive Materials, PATRAM 95, 1995
- 6) 上原益夫 『石油学入門』日刊工業新聞社、昭和55年
- 7) 小川博 『海洋の油汚染』海文堂、昭和50年
- 8) 海上災害防止センター 『海上防災の調査研究報告書』平成4~6年3月
- 9) シップ・アンド・オーシャン財団 『大規模油流出事故対応の防除技術・資機材の研究開発報告書』平成4~6年3月
- 10) Wada, A., Takano, T. & T. Hozumi: Estimation Method for Residence Time of Bay Water, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 14, No. 1, pp. 57-66