

放射性輸送物の海上輸送におけるリスク評価に関する研究 －リスク評価のための海難事故データの整備－

小田野直光*、澤田 健一*、望月 宙充*、平尾 好弘*、浅見 光史*

Research on Risk Assessment for Maritime Transport of Radioactive Materials - Preparation of Maritime Accident Data for Risk Assessment -

by

Naoteru ODANO, Ken-ichi SAWADA, Hiromitsu MOCHIDUKI,
Yoshihiro HIRAO, and Mitsufumi ASAMI

Abstract

Maritime transport of radioactive materials has been playing an important role in the nuclear fuel cycle in Japan. Due to recent increase of transported radioactive materials and diversification of transport packages with enlargement of nuclear research, development and utilization, safety securement for maritime transport of radioactive materials is one of important issues in the nuclear fuel cycle.

Based squarely on the current circumstances, this paper summarizes discussion on importance of utilization of results of risk assessment for maritime transport of radioactive materials. A plan for development of comprehensive methodology to assess risks in maritime transport of radioactive materials is also described.

Preparations of database of maritime accident to be necessary for risk assessment are also summarized. The prepared data could be utilized for future quantitative risk assessment, such as the event trees and fault trees analyses, for maritime transport of radioactive materials. The frequency of severe accident that the package might be damaged is also estimated using prepared data.

* 海洋リスク評価系
原稿受付 平成22年11月22日
審査日 平成22年12月13日

目 次

1. まえがき	94
2. 放射性物質輸送におけるリスク評価の必要性	95
2.1 原子炉プラントにおけるリスク情報活用の現状	95
2.2 核燃料サイクル関連施設等の現状	95
2.3 放射性物質輸送におけるリスク評価の現状	96
2.4 放射性物質輸送におけるリスク情報の活用方策	96
3. 海上輸送事故データの整備	97
3.1 海上輸送における事故モードの規定と分類	97
3.2 海上輸送における船舶の事故統計データ	97
4. 関連情報の調査による母数の推定	99
5. 輸送事故発生確率データの評価	100
5.1 海難事故発生頻度	100
5.2 人為的要因	100
5.3 海難事故発生頻度の補正	104
5.4 重大事故発生頻度の評価	104
6. まとめ	106
謝辞	106
参考文献	106

1. まえがき

現在、日本で使用されている核燃料は、そのほとんどが海外から船舶で輸送されており、また、使用済燃料については、国内の再処理工場に専用

運搬船により海上輸送されている。従来、使用済燃料は、東海再処理工場及び英仏の再処理工場へ、各原子力発電所から専用運搬船により輸送されていたが、平成 10 年より六ヶ所村の再処理工場の使用済燃料受入れ・貯蔵施設で使用済燃料の受け入れを開始したことから、現在、各原子力発電所から国内の再処理施設への海上輸送が中心になっている。低レベル放射性廃棄物については、各原子力発電所から専用運搬船により六ヶ所村の低レベル廃棄物埋設施設への輸送が行われている。また、プルサーマル発電の開始により、海外からの MOX 新燃料の輸送も実施されている。このように日本における核燃料サイクルにおいて、放射性物質の海上輸送は非常に重要な役割を果たしている。図-1 に日本における核燃料サイクルの輸送の現状を模式的に示す。今後、我が国においては、原子炉解体に伴う低レベル放射性廃棄物の大量輸送が想定されるとともに、六ヶ所 MOX 燃料加工施設の稼働後に国内 MOX 新燃料輸送が想定されている。このように、今後、我が国においては、放射性物質の輸送量が増加し、輸送物が多様化していくことが想定される。我が国は、世界的に見ても、放射性物質輸送の先進国であり、極めて高い輸送安全の実績を誇っているが、今後の輸送量の増大、輸送物の多様化の状況にあっても、より一層の安全輸送の確保が求められており、国及び事業者において、様々な安全輸送確保の取り組みがなされている。

このような状況の下、当所では、より一層の安全輸送確保方策のひとつとして、原子炉プラント等で試行が進んでいるリスク情報を活用した安全規制・安全確保活動の推進に係る施策に着目し、放射性物質輸送のリスク評価結果の情報を安全規制・安全確保活動に活用していくための方策、

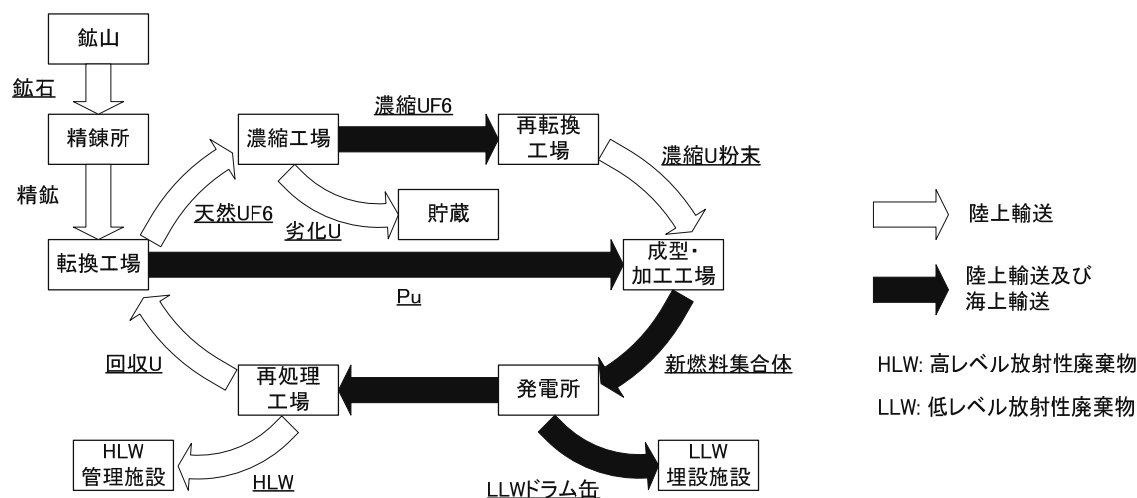


図-1 我が国の核燃料サイクル及び輸送の概念図

及びそのために必要な技術基盤の整備の検討を実施した。その検討に基づき、放射性物質輸送におけるリスク評価の研究計画を策定し、平成20年度及び21年度の2ヵ年に渡り先導研究として、「放射性輸送物の海上輸送におけるリスク評価に関する研究」を実施し、放射性物質の輸送リスク評価の基盤的データの整備の一環として、事故統計等の分析等を実施した。本報告は、これらの成果の一部をとりまとめたものである。

2. 放射性物質輸送におけるリスク評価の必要性

今後の放射性物質の輸送量の増大及び輸送物の多様化に対応した安全輸送確保のための取り組みのひとつとして、有効な手段として考えられるのがリスク評価結果の活用である。ここでは、その考え方の概要と、当所で実施した研究の位置付けについて述べる。

2.1 原子炉プラントにおけるリスク情報活用の現状

原子力の安全確保の基本的な考え方は、原子力利用に伴う人々の健康や社会環境に影響を及ぼす潜在的危険性を十分に低く抑えることである。これまでの原子力安全規制は、リスクを抑制するため、事故が起こらないように何重もの安全確保対策をとる多重防護（深層防護とも言う）の考え方を基本として、十分な安全余裕を見込んだ工学的判断に基づく決定論的評価手法を根拠として実施されてきた。近年、原子炉プラントの運転経験や研究成果の蓄積により、原子炉プラントについては、潜在的危険性が顕在化する確率を定量的に評価する確率論的安全評価（PSA：Probabilistic Safety Assessment）技術が向上し、リスク情報（原子力施設で事故が起こる確率やどのような系統・機器等の故障が大きな事故に結びつきやすいか等を評価した情報）活用の可能性が広がってきている。従来の決定論的安全評価に基づく安全規制や安全確保活動は、リスク情報の活用と適切に組み合わせることにより、より合理的な根拠を与えるとともに実効性を向上できることが期待される。

原子力安全規制におけるリスク情報活用の意義は、安全規制の科学的合理性、整合性、透明性の向上及び安全確保活動のための資源の適正配分である。リスク情報を原子炉プラントの設計・建設・運転等、原子力施設の各段階での安全規制等に活用することにより、従来の決定論的な考え方に基づく安全確保の妥当性や改善点を期待される安全

水準に対して定量的に評価・確認することが可能となり、規制活動や自主保安活動等をより合理的なものとするのが可能である。また、リスク情報を用いて原子力の様々な分野における活動を横断的に評価することにより、相互に整合性のあるものにすることが可能である。さらに、規制活動や自主保安活動における意思決定においてリスク情報を明示的に取扱うことにより、判断根拠の客観性を向上させて、国民にとって規制活動や自主保安活動の全体をより分かり易く透明性の高いものにすることが可能である。また、最大限の安全確保努力の中で人的資源等を有効に活用することは重要であり、リスク情報、特にリスクに対する寄与の高い異常な事象とそれに関連する系統・機器等に関する情報を活用した安全上の重要度を考慮して、資源を適正に配分することにより、規制活動や自主保安活動をより効果的・効率的に行うことが可能となる。原子力委員会は、このような考え方を、平成15年11月に決定した、「リスク情報を活用した原子力安全規制の導入の基本方針について」¹⁾で示している。

さらに、原子力安全・保安院においては、平成18年4月に、「リスク情報」活用の基本ガイドライン（試行版）²⁾を策定し、原子力安全基盤機構においては、安全規制への「リスク情報」活用について、「リスク情報」を活用した定期検査項目対象機器の評価^{3),4)}、プラント状態に応じた保守活動に対するリスク評価⁵⁾等の試行的な検討を行っている。また、事業者においても、リスク情報活用における品質確保に関する取り組み、アクシデントマネジメントの整備等を実施している。

2.2 核燃料サイクル関連施設等の現状

核燃料サイクル関連施設や試験研究用原子炉に関しても、原子力委員会が決定した基本方針¹⁾においてリスク情報活用に関して言及があるが、施設数が少なく、施設の形態が多様多様であり、連続運転を目的としていないこと等から、定量的なリスク情報が十分に得られない場合が考えられる。従って、画一的ではなく、リスクの大きさや状態等の施設の特性や運転経験に応じて、安全規制・安全確保の合理性の向上等の観点から有用なものに関し、優先的な導入を図ることが適当であるとされている。現状においては、規制面からのリスク評価の適用はなく、事業者によるデータの蓄積等により自主的保安活動におけるリスク情報の活用が行われている段階である。ウラン加工施設等においては、PSAよりも簡易的なリスク評価手法である総合安全解析（ISA：Integrated Safety Analysis）が、事業者により試行的に実施されて

いる。

2.3 放射性物質輸送におけるリスク評価の現状

放射性物質輸送分野においては、研究レベルとしては、事故発生確率及び事故時環境影響等の評価^{6),7)}がなされているものの、現在まで国内において規制側及び事業者側共にリスク評価の概念に基づく安全対策の試みはなされてきていないのが現状である。輸送にリスク評価が適用されてこなかった背景としては、固定施設と異なり評価対象が移動するために常に周辺環境が変化することから、考慮すべき事項が非常に多く評価が困難であったこと、及び、陸上・海上輸送を問わず我が国における放射性物質輸送が非常に安全に行われきたために、事故及び故障データが非常に少なく、精度の高い評価を行うための基本的情報が不足していることが要因として挙げられる。

米国においては、1970年代に国家環境政策法が制定され、平常時の放射性物質輸送における周辺環境への環境アセスメントが求められるようになったため、米国 SNL (Sandia National Laboratory) において、輸送経路、経路周辺の人口密度及び交通量等を考慮に入れた放射線学的環境影響評価ツールとして RADTRAN が開発され、その後の改良を受けて現在ではリスク評価の概念を含めた RADTRAN 4 が開発されている。国際原子力機関 (IAEA) では、1995年に国際的に使用可能な評価ツールとして米国の RADTRAN 4⁸⁾を基に開発した INTERTRAN 2⁹⁾を発表している。しかしながら、各国の輸送事情及び事故形態、原因の複雑さから一概に上記ツールに当てはめにくいという事情もあり、本ツールは一部の国を除いて使用頻度も低く、開発も事実上停止している状態となっている。特に我が国においては、一部の原子力発電所で使用される前の原料又は燃料等の輸送 (フロントエンド輸送) を除いて、核燃料サイクルの大部分を海上輸送に頼っているという世界的に見ても特殊な輸送実態であることも、主に陸上輸送を対象とした INTERTRAN 2 の適用が進んで来なかった原因の一つであると思われる。

2.4 放射性物質輸送におけるリスク情報の活用方策

原子力安全委員会が策定した平成 22 年度から 5 ヶ年の重点安全研究¹⁰⁾では、放射性物質輸送の安全確保の観点からリスク評価のための研究の必要性が示されており、今後の我が国の放射性物質輸送の輸送量の増大、輸送物の多様化に鑑み、原子炉プラントにおけるリスク情報活用の現状に照らし、今後、リスク情報活用のあり方について検

討を行っていく必要がある。輸送分野においては、容器安全設計、防災対策 (アクシデントマネジメント (AM) 及び訓練等)、輸送方法、容器保全プログラム等の策定にあたり、リスク情報を活用することにより、リスクに見合った合理的な安全規制・安全管理体制の構築が可能であると考えられる。図-2 に、輸送におけるリスク情報活用概念を示す。2.3 章に示したように、輸送分野におけるリスク評価は、社会受容性を説明するための過酷事象についての環境影響評価、過酷事象の発生頻度の評価等、限定的に実施されている状況であり、今後、リスク評価を行うための基盤技術の整備も含め、中長期的な計画を策定して、実施していく必要がある。

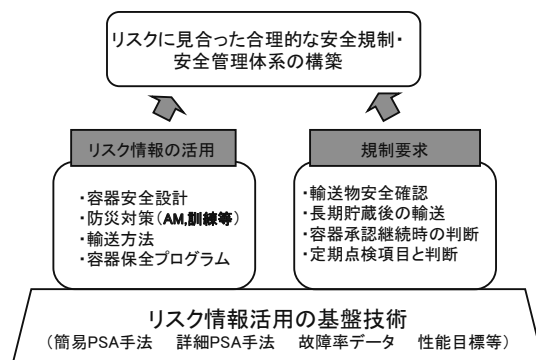


図-2 輸送におけるリスク情報活用概念

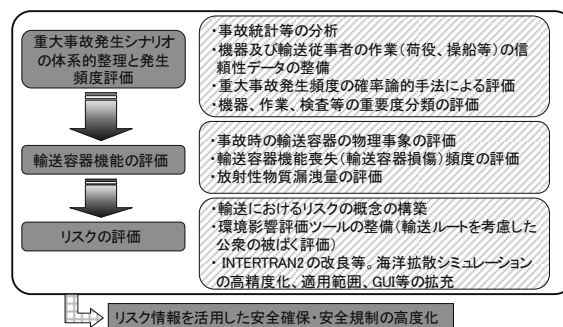


図-3 輸送リスク評価手法の体系化に向けた研究の方向性

そのため、当所では、リスク情報活用の基盤技術の確立を目指し、輸送リスク評価手法の体系化に向けた研究の方向性を検討した。その概念を図-3に示す。輸送のリスク評価を実施するにあたっては、リスクを評価するための事故の発生頻度と影響評価の評価が必要である。また、放射線による影響を評価するためには、事故発生時の輸送容器からの放射性物質の漏洩挙動の把握も必要である。そのため、研究の流れとして、①重大事故発生シナリオの体系的整理と発生頻度評価、②輸

送容器機能の評価、③リスクの評価、という3段階で研究を実施する計画を策定している。重大事故発生シナリオの体系的整理と発生頻度評価については、過去にも様々な研究事例^{6),11),12)}が存在するが、重大事故発生シナリオの評価が限定的であり、船舶の運航、荷役等のオペレーションも含めた輸送システム全体としての体系的なリスク評価を実施した事例はなく、事故統計等の分析、機器及び輸送従事の作業(荷役、操船等)の信頼性データの整備、重大事故発生頻度の確率論的手法による評価、機器、作業、検査等の重要度分類の評価等のデータを蓄積していくことが必要である。また、輸送容器機能の評価については、事故時の輸送容器の物理事象の評価、輸送容器機能喪失(輸送容器損傷)頻度の評価、放射性物質漏洩量の評価等について、手法の確立と評価データの蓄積が必要である。さらに、リスクの評価においては、環境影響評価ツールの整備を進めるとともに、輸送におけるリスクの概念の構築が必要である。輸送におけるリスクの概念検討で重要な点は、リスク評価情報を安全規制及び安全活動にどのように活用するかを明確にしていくことが必要である。例えば、原子炉プラントにおいては、安全目標の指標として、炉心損傷頻度、格納容器機能喪失頻度等の定量的な指標を示しているが、輸送における安全目標をどのように設定するかが今後の課題である。安全目標検討にあたっては、リスク評価の事例検討を積み上げていくことが必要であり、基盤技術の整備後に幅広く実施していくことが必要である。また、輸送システムは、人為的要因も絡む複雑なシステムであり、原子炉プラントで導入されている定量的安全目標の設定に拘ることなく、定量的なリスク評価の結果を、安全規制の科学的合理性、整合性、透明性の向上及び安全確保活動のための資源の適正配分という観点から活用していくかということを意識しつつ、進めていくことが必要である。

3. 海上輸送事故データの整備

3.1 海上輸送における事故モードの規定と分類

海上輸送において起こり得る事故は多種多様であるため、事故確率を検討するには、事例を分類するための事故モード、すなわち事故種別を規定しなければならない。そこで、輸送事故の統計を扱う関係機関において、事故種別がどのように規定され、事故事例がどのように分類されているか調査した。事故種別は、今後のリスク評価においてフォルトツリー(FT)の頂上事象、あるいはイ

ベントツリー(ET)の起因事象の候補となるため、明確にする必要がある。

本研究では、我が国の放射性物質専用運搬船に対して輸送物に影響を及ぼす可能性のある海難種別についてデータ整備を実施した。表-1に示す一般的な海難種別の分類と規定から、整備対象とする海難種別について検討する。IAEAにおける共同研究プロジェクトの研究結果によれば⁶⁾、運搬船の特性から考えて乗揚・沈没は運搬する輸送容器に直接的な損傷を与えず、また二重底及び第一船倉の前部に船首区画を有しているため、接触事故もそれ自体では容器を損傷し得ない。従って、苛酷な衝突あるいは火災・爆発だけが、B型使用済燃料輸送容器の直接的な損傷をもたらす可能性があるとしている。国内の既往研究では、それらに加えて「荒天による沈没」を重大事象とした例がある¹²⁾。その他、輸送物に間接的な影響を及ぼし得る海難種別の特徴は以下の通りである。

(1)「転覆」「沈没」「浸水」

主に波浪によるものであり、専用運搬船のサイズ・復原性から考えて発生しにくい。ただし、一旦発生すれば、統計上「転覆」の殆ど、「浸水」の半数程が沈没・全損に進展する。

(2)「乗揚」

浸水・沈没へと進展する可能性は、事例調査において10%程度と低い。

(3)「衝突(単)」・「船体・機関故障」

重大な影響を及ぼす可能性は低い。

従って、輸送物に直接的な影響を及ぼし得る、あるいは間接的であるが重大な結果となり得る海難種別を必須とし、それ以外の影響の低い種別は参考までの調査とした。表-2に研究対象の海難種別をまとめて示す。

3.2 海上輸送における船舶の事故統計データ

海上輸送における船舶の事故統計データは以下の通りである。

・海難事故件数・要因

- 海上保安庁「海難及び人身事故の発生と救助の状況について」(各年)
- 海難審判庁「海難レポート」(各年)
- 同「海難審判庁裁決録」(随時)
- Lloyd's 海難データ(Lloyd's Register Fairplay(LRF)、2005年次)

これらの統計データから事故発生数をカウントする際、3.1章で検討した事故種別の他に、調査

表－1 我が国の海難種類の定義と統計データ間での種類比較

種類	定義	海難審判庁 (海難レポート)	海上保安庁 (海難及び人身事故レポート)	Lloyd's Register Fairplay
衝突	船舶が、航行中又は停泊中の他の船舶と衝突又は接触し、いずれかの船舶に損傷を生じた場合をいう。	○	○衝突(単)は衝突に含む	○
衝突(単)	船舶が、岸壁、棧橋、灯浮標等の施設に衝突又は接触し、船舶又は船舶と施設の双方に損傷を生じた場合をいう。	○		○「接触」扱い
乗揚	船舶が、水面下の浅瀬、岩礁、沈船等により乗り揚げ又は底触し、喫水線下の船体に損傷を生じた場合をいう。	○	○	○「座礁(難破)」扱い
沈没	船舶が海水等の浸入によって浮力を失い、船体が水面下に没した場合をいう。	○	×沈没の原因に含める	○
浸水	船舶が海水の浸入などにより機関、積み荷などに濡れ損を生じたが、浮力を失うまでに至らなかった場合をいう。	○	○	○
転覆	荷崩れ、浸水、転舵等のため、船舶が復原力を失い、転覆又は横転して浮遊状態のままとなった場合をいう。	○	○	△「浸水」あるいは「沈没」扱い
行方不明	船舶が行方不明になった場合をいう。	△「その他」扱い	○	○
火災	船舶で火災が発生し、船舶に損傷を生じた場合をいう。ただし、他に分類する海難の種類に起因する場合は除く。	○	○	○「火災・爆発」
爆発	積荷等が引火、化学反応等によって爆発し、船舶に損傷を生じた場合をいう。	○	○	○「火災・爆発」
機関損傷	主機、補機が故障した場合、又は燃料、空気、電気等の各系統が損傷した場合をいう。	○	○	○「船体・機関損傷」
安全阻害	船舶には損傷がなかったが、貨物の積み付け不良のため、船体が傾斜して転覆等の危険な状態が生じた場合のように、切迫した危険が具体的に発生した場合をいう。	×	○	×
運航阻害	船舶には損傷がなかったが、燃料・清水の積み込み不足のために運航不能におちいった場合のように、船舶の通常の運航を妨げ、時間的経過に従って危険性が増大することが予想される場合をいう。	×	○	×
遭難	海難の原因、態様が複合していて他の海難の種類の一に分類できない場合、又は他の海難の種類のいずれにも該当しない場合をいう。	○	△「その他」扱い、あるいは遭難原因に含める	△「その他」扱い、あるいは遭難原因に含める

表－2 研究対象の海難種別

データ整備対象	海難種別
必須	・船舶どうしの衝突 ・火災及び爆発 ・転覆、沈没、浸水 (上記事象によらない荒天等によるもの)
参考	・衝突(単独) ・乗揚 ・船体及び機関故障

対象とする船舶種類を決定する必要がある。整備対象の専用運搬船の仕様は次の通りである。

- ・ 主要寸法：全長約 100m、
- ・ 総トン数：約 5,000 トン
- ・ 貨物積載個数：使用済燃料輸送容器最大 20 基

同船クラスの貨物船と対象とした過去の統計量は十分とは言えないため、以下のように船舶調査範囲を拡張する。

- ・ 船種：「貨物船」「油送船」「旅客船」に限定
 - 過去に大型のコンテナ船や油送船に対する耐衝突性が議論されたこと、フェリー等は比較の数も多く中型以上であること等から範

囲に含める。漁船やプレジャーボート等は航行挙動が異なること、小型で衝突影響が無いことから考慮しない。

- ・船舶サイズ：総トン数 500GT 以上
 - 上記と同様に、大型のコンテナ船、油送船、フェリー等は範囲に含め、漁船、プレジャーボート等は考慮しない。
 - 衝突・座礁予防に貢献する航行安全関係設備、特に航海用レーダ、プロットング装置、自動船舶識別装置 (AIS) は、SOLAS 条約によって総トン数 500GT 以上 (或いは 300GT) の船舶に搭載が義務づけられる。また、火災時の消化装置に関して、同条約によって全ての旅客船及び 500GT 以上の貨物船で機関室に固定式消火装置及び火災探知装置が、また 500GT 以上の旅客船及び 2,000GT 以上の貨物船の機関室に局所消火装置が義務づけられる。一方、500GT 未満の内航貨物船 (危険物運搬船を除く) について言えば、機関室火災に対する安全対策という点で上記の船舶と乖離しており、一括りにして扱うのは適切でない。また、外航船に関する Lloyd's 海難データの登録船舶は、殆ど 500GT クラス以上と考えてよく、調査対象の船舶サイズの範囲を揃えるという点からも都合がよい。

4. 関連情報の調査による母数の推定

事故発生頻度を評価するためには、事故発生数の他に事故頻度の母数を決定する必要がある。母数には、調査対象の範囲と単位が重要である。母数の範囲とは、事故調査対象の船舶が母数の単位として、例えば回数、距離、時間等がある。母数は事故統計データには記載されないのが一般的であるため、実際の輸送計画に基づいて別途調査する必要がある。

調査対象船舶の種類は、3.2 章で述べた通りである。調査対象船舶の母数推定に用いる船舶データは下記の通りである。

- ・日本海運集会所「船舶明細書」(各年)
- ・国交省総合政策局「港湾統計年報」(各年)
- ・Lloyd's 海難データ (2005 年次)

「船舶明細書」は内航船の隻数、「港湾統計年報」は内航船の航海数の推定に用いた。Lloyd's 海難データは船舶の入出港データから外航船の隻数と航海数の推定に用いた。以下に、船舶の事故発生頻度で用いられる母数と推計手法を示す。母数を直に数えられる場合は稀であり、推計精度の課題は残る。選択する母数によって事故発生頻度の単位が異なることに留意する。

(1) 船舶の隻数

(事故発生頻度の単位：<件/隻・年>)

年間に日本近海で稼働している船の隻数を母数とする。船舶の特性や稼働状況にかかわらず、どの船舶に対しても同頻度とみなす精度上の課題がある。調査対象船舶のうち、2010 年現在の日本船籍の内航船隻数は船舶明細書から 1,242 隻であり、2005 年の一年間に日本に寄港した外航船隻数は Lloyd's 海難データより 6,770 隻である。前者には日本船籍の外航船も含まれるため、後者と重なる部分を若干補正する必要があるが、総じて年間 8,000 隻 (最低限) と推計できる。

(2) 船舶の航海数

(事故発生頻度の単位：<件/航海>)

船舶の一航海を母数とする。一航海とはある船舶によるある港から次の港までの航海のことを指す。推計には港湾毎の入港隻数や輸出入貨物トン数の統計を用い、甲種・乙種港湾の入港隻数の総計をもって全航海数と見なす。稼働船のみを対象とする利点はあるが、航海する海域や航海距離に係わらず、どのような稼働状況の船舶でも一航海あたりの頻度を同じとする精度上の課題が残る。表-3 に調査対象船舶の航海数の推計 (10 年間合計) を示す。本整備で対象とする船舶の推計航海数は年間平均で最低約 1,600 万航海である。また、内航の自動車航送船の割合が相当大きいことに留

表-3 調査対象船舶の推計航海数 (10 年間合計)

船舶種類		隻数	比率
外航船	500GT 以上	1,111,950	6.9%
	同上 (海外へ直接出港)	315,073	2.0%
内航船	500GT 以上	2,723,856	17.0%
自動車航送船	外航 (海外出港分無視)	9,166	0.1%
	内航	11,859,742	74.0%
合計 (最低限の推計航海数)		16,019,787	100.0%
内航自動車航送船を除外した合計		4,160,045	

意する。それらは航路が一定で運搬船のモデル航路と重なるのは一部であることから、頻度を推定する際にそれらを含めた場合と含めない場合を分けて考える。

(3) 船舶の航海距離

(衝突事故発生頻度の単位：〈件/海里〉)

船舶の航海距離単位を母数とする。航海距離単位とは 1 海里のことである。船舶の衝突頻度は、船舶の形状や速度、航行海域の船舶密集度、他船との見合い関係等多数の要因に依存するため、それらの条件が付いた上での頻度が得られると便利である。例えば、特定の船舶が特定の海域を単位距離だけ航行したときの衝突頻度等である。

専用運搬船がモデル航路上を通過する際の海里単位の衝突事故発生頻度を算定するための十分な情報はないが、次のような仮定のもと海里単位への換算をすることとした。

- ・ 上述の隻・年単位に対して、年間の平均航海数を 200 回と仮定して航海単位に換算し、さらに外航船に対して年間の平均航行距離を 6 万海里あるいは 116,000km と仮定する。
- ・ 航海単位に対して、一航海当たりの平均航行距離を、内航船で 500km、外航船で領海内 22km (12 海里) 及び外洋 9,000km、一航海当たりの航行時間を 12 時間と仮定する。

なお、この仮定はあくまでも推測の域を出ないため、前提条件に注意して用いる必要がある。本研究では、我が国の沿岸域が対象であることから、一航海当たりの航行距離を内航船・外航船ともに 500km と仮定した場合の参考頻度を次章に示す。

5. 輸送事故発生確率データの評価

これまで調査してきた事故発生数と母数を用いて事故発生頻度を評価し、米国での評価事例との比較を行った。また、事故発生の原因が人為的要因か、またはその他の要因に基づくものかについて、判る範囲で調査した。さらに、IAEA で提唱されているモデルを利用して、放射性物質運搬船が沈没に至るような衝突事故の発生確率を評価した。

5.1 海難事故発生頻度

表－4～8 に「海難及び人身事故レポート」10 年分のデータに基づく、調査対象の海難事故発生頻度を示す。「その他の海域」とは東京湾と瀬戸内海を除いた海域を指し、運搬船のモデル航路では

それらの輻輳海域は通航しないことから、その他の海域での頻度も併せて示した。また、全航海数において約 3/4 を占める内航の自動車航送船（カーフェリー）を除外した母数による頻度も併せて示す。それらは、全国規模に定期航海を行っているものの特定航路の往復を行っているため、モデル航路上で重なる箇所は全体の一部である。ここでは、母数を全航海数としたときの頻度を中位、内航自動車航送船を除外した航海数の頻度を高位とする。なお、「火災・爆発」のうち、機関室故障が原因となるのは 58% である¹³⁾。また、「転覆・沈没・浸水」のうち、全損及び重損に至る割合は 93.4% である¹⁴⁾。

また、運搬船のモデル航路における一航海あたりの衝突事故発生頻度を推定した。モデル航路として、鹿児島県から青森県まで、途中寄港しない日本海ルート及び太平洋ルートを考える。表－9 に本研究の結果と米国 SNL 報告¹⁵⁾に基づく海里単位の衝突頻度を用いた場合の頻度を比較のために示す。なお、米国 SNL 報告では内航船をカウントしていないこと、及び本研究では日本海側と太平洋側の海域毎の評価を行っていないことに注意する必要がある。

5.2 人為的要因

人為的要因とその他の要因についても調査を実施した。災害は、人為的要因（内的要因）と天候や機器故障等の外的要因が重なって起こるのが殆どであり、厳密に弁別することは困難である。ここでは各海難種別に対する海難要因の特徴について、過去の研究等に基づき、検討を実施した。

表－10 に海難審判庁で裁決のあった海難について「海難レポート」に示されている海難種別毎の海難要因を示す。表中の海難要因のうち、次の三つが外的要因で、他は全て人為的要因と考えられる。

- ・ 船体・機関・設備の構造・材質・修理不良
- ・ 不可抗力
- ・ その他

表－10 に示すように、「衝突（単）」「火災・爆発」「機関損傷」に外的要因が若干ある程度で、その他の海難の要因は人為的要因と判断して良いと考えられる。以下にそれぞれの海難の特性を述べる。

(1) 衝突

船舶同士の衝突は、道路上での車両衝突同様、自船と他船のいずれかまたは両方に人為的要因が

表-4 衝突事故発生件数と頻度 (海難レポートによる件数補正済)

条件付衝突	母数		単位	船舶の衝突		衝突(単)	
両方とも500トン以上	(中位用)	(高位用)	(10年間の件)	175		1426	
	8.0E+04		(隻・年)	2.2E-03		1.8E-02	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	1.1E-05	4.2E-05	8.9E-05	3.4E-04
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	4.1E-08	1.6E-07	3.3E-07	1.3E-06
両方とも500トン以上で、且つその他の海域	-		(10年間の件)	60			
	8.0E+04		(隻・年)	7.4E-04			
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	3.7E-06	1.4E-05		
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	1.4E-08	5.3E-08		
両方とも500トン以上で、且つ重大事故	-		(10年間の件)	15			
	8.0E+04		(隻・年)	1.9E-04			
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	9.3E-07	3.6E-06		
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	3.4E-09	1.3E-08		
両方とも500トン以上で、且つその他の海域で、且つ重大事故	-		(10年間の件)	3			
	8.0E+04		(隻・年)	3.4E-05			
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	1.7E-07	6.4E-07		
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	6.2E-10	2.4E-09		

(母数と頻度の区分セルは、左が全推定航海数、右が内航自航船を除外した推定航海数に基づく)

表-5 衝突事故発生件数と頻度 (海難レポートによる件数補正済)

条件付火災・爆発	母数		単位	火災・爆発	
500トン以上の船	(中位用)	(高位用)	(10年間の件)	22	
	8.0E+04		(隻・年)	2.8E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	1.4E-06	5.3E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	5.1E-09	2.0E-08
500トン以上で機関室火災	-		(10年間の件)	13	
	8.0E+04		(隻・年)	1.6E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	8.1E-07	3.1E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	3.0E-09	1.1E-08
500トン以上で湾内火災	-		(10年間の件)	14	
	8.0E+04		(隻・年)	1.7E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	8.5E-07	3.3E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	3.2E-09	1.2E-08
500トン以上で湾外火災	-		(10年間の件)	8	
	8.0E+04		(隻・年)	1.1E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	5.3E-07	2.0E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.0E-09	7.5E-09

(母数と頻度の区分セルは、左が全推定航海数、右が内航自航船を除外した推定航海数に基づく)

表-6 転覆・沈没・浸水故発生件数と頻度 (海難レポートによる件数補正済)

条件付転覆・沈没・浸水	母数		単位	転覆・沈没・浸水	
500トン以上の船	(中位用)	(高位用)	(10年間の件)	10	
	8.0E+04		(隻・年)	1.3E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	6.2E-07	2.4E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.3E-09	8.9E-09
500トン以上の船で、全損または重損に至る	-		(10年間の件)	9	
	8.0E+04		(隻・年)	1.2E-04	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	5.8E-07	2.2E-06
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.2E-09	8.3E-09

(母数と頻度の区分セルは、左が全推定航海数、右が内航自航船を除外した推定航海数に基づく)

表－7 乗揚・座礁事故発生件数と頻度（海難レポートによる件数補正済）

条件付乗揚・座礁	母数		単位	乗揚・座礁	
500トン以上の船	(中位用)	(高位用)	(10年間の件)	1148	
	8.0E+04		(隻・年)	1.4E-02	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	7.2E-05	2.0E-03
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.7E-07	7.4E-06
500トン以上でその他の海域	-		(10年間の件)	647	
	8.0E+04		(隻・年)	8.1E-03	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	4.0E-05	1.1E-03
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	1.5E-07	4.2E-06
500トン以上で、沈没・全損・解轍・二重底破口	-		(10年間の件)	102	
	8.0E+04		(隻・年)	1.3E-03	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	6.3E-06	1.8E-04
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.4E-08	6.6E-07
500トン以上で、軽微・修理・他船による引きおろし、えい航	-		(10年間の件)	1046	
	8.0E+04		(隻・年)	1.3E-02	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	6.5E-05	1.8E-03
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	2.4E-07	6.8E-06

（母数と頻度の区分セルは、左が全推定航海数、右が内航自動車航送船を除外した推定航海数に基づく）

表－8 機関損傷事故発生件数と頻度（海難レポートによる件数補正済）

条件付機関損傷	母数		単位	機関損傷	
500トン以上の船	(中位用)	(高位用)	(10年間の件)	299	
	8.0E+04		(隻・年)	3.7E-03	
	1.6E+07	4.2E+06	(航海)	1.9E-05	7.2E-05
	4.3E+09	1.1E+09	(海里)	6.9E-08	2.7E-07

（母数と頻度の区分セルは、左が全推定航海数、右が内航自動車航送船を除外した推定航海数に基づく）

表－9 運搬船のモデル航路における一航海あたりの衝突事故発生頻度の比較

	総距離	沿岸域	輻輳区域 (津軽海峡)	港を除く総衝突頻度 (海保、本整備)		港を除く総衝突頻度 (LRFP、SNL)	接近水域での衝突頻度 (LRFP、SNL)
(単位)	(km)			(航海)		(/海里)	
日本海側ルート	1,900	1,788	112	5.7E-05	1.7E-04	3.8E-04	3.0E-07
太平洋側ルート	2,000	2,000	0	4.4E-05	1.7E-04	2.1E-03	-
				(中位)	(高位)		(参考値)

必ず係わる。過去に、人為的要因と悪天候や操縦性に係る航海機器・推進装置の不備とが重なった事件が 61%、残りの 39%が純粋な人為的要因による事件との FT 解析例がある¹⁶⁾。

(2)火災・爆発

火災・爆発の原因は海難審判の裁決録から物的原因あるいは貨物の出火や引火元不明等、不可抗力、原因不明も存在する。表－11 に、昭和 40～50 年代にかけて分析された船舶火災の原因を示す¹³⁾。

(3)乗揚・座礁

乗揚・座礁の発生要因は、衝突同様、人為的要因が必ず関わり、場合により船舶の操縦性、航海機器、推進装置等の故障・欠如が関係する。

(4)船体・機関故障

船体・機関故障の原因は、機器故障・劣化等によるものが比較的多くみつかると。気象海象が起因しており、整備・点検・管理で防げるものと判断されなければ、外的要因としてカウントされる。比率については表－10 に示した。

表-10 海難種類別海難要因分類 (海難レポート、2002~2008、7年間合計)

海難要因	衝突	衝突 (単)	乗揚	沈没	転覆	遭難	行方 不明	火災	爆発	機関 損傷	浸水	合計
船舶運航管理の不適切	29	19	15	6	10	8	0	8	5	21	2	123
船体・機関・設備の構造・材質・修理不良	6	8	1	3	1	2	0	4	0	69	2	96
発航準備不良	8	1	11	3	5	5	0	0	0	1	3	37
水路調査不十分	2	24	168	0	2	1	0	0	0	0	0	197
針路の選定・保持不良	11	39	138	0	5	2	0	0	0	0	0	195
操船不適切	25	92	41	5	30	5	0	0	0	0	1	199
船位不確認	1	69	299	0	0	1	0	0	0	0	0	370
見張り不十分	2864	64	17	0	2	1	0	0	0	0	0	2948
居眠り	167	74	389	0	0	0	0	0	0	0	0	630
操舵装置・航海計器の整備・取扱不良	4	5	1	0	0	1	0	0	0	0	0	11
気象・海象に対する配慮不十分	13	22	45	2	81	22	0	0	0	1	3	189
錨泊・係留の不適切	14	4	33	8	12	14	0	0	0	0	13	98
荒天措置不適切	4	3	18	10	31	12	0	0	0	0	2	80
灯火・形象物不表示	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91
信号不履行	541	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	544
速力の選定不適切	110	22	9	0	1	2	0	0	0	0	1	145
航法不遵守	983	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	988
主機の整備・点検・取扱不良	2	3	0	0	2	2	0	7	0	342	19	377
補機等の整備・点検・取扱不良	1	10	1	6	2	11	0	11	0	76	45	163
潤滑油等の管理・点検・取扱不良	3	2	1	0	0	0	0	14	0	179	0	199
電気設備の整備・点検・取扱不良	1	4	1	0	0	3	0	39	0	2	0	50
甲板・荷役等作業の不適切	1	3	3	7	19	4	0	7	5	1	5	55
漁労作業の不適切	0	0	0	1	12	0	1	0	0	0	0	14
旅客・貨物等積載不良	1	1	0	2	8	1	0	0	0	0	0	13
サービスに関する指揮・監督の不適切	271	48	115	2	13	4	0	11	2	11	4	481
報告・引継の不適切	120	14	40	1	2	1	0	1	0	1	0	180
火気取扱不良	0	0	0	0	0	0	0	41	2	0	0	43
不可抗力	0	0	0	1	3	2	0	0	2	2	0	10
その他	13	6	8	5	15	5	0	11	0	10	2	75
合計	5286	542	1357	62	256	109	1	154	16	716	102	8601
裁決件数	2143	422	1155	38	196	85	1	108	9	607	72	4836
裁決の対象となった船舶隻数	4500	455	1220	45	240	99	1	112	9	607	73	7361
海難の原因ありとされた船舶隻数	4031	427	1156	40	205	85	1	107	9	607	71	6739
人為的要因/全要因	100%	97%	99%	85%	93%	92%	-	90%	88%	89%	96%	98%

表-11 船舶火災の人為的要因と物的要因

要因	審判庁裁決録		要救助海難統計(海保)	
	件数	%	件数	%
人為的要因	105	83.3%	803	80.9%
人為的+物的	4	3.2%		
物的要因	2	1.6%	26	2.6%
不可抗力	2	1.6%	30	3.0%
その他	1	0.8%	29	2.9%
要因不明	12	9.5%	105	10.6%
計	126		993	

表-12 浸水・転覆・沈没の船種別・要因数(S52
~S56年合計)

海難要因	貨物船			旅客船			合計
	浸水	転覆	沈没	浸水	転覆	沈没	
会社・業者等、管理に係るもの	3	3	3		2		11
乗組員・作業員に係るもの	55	53	64	3	5		180
その他(不可抗力、要因不明)	5	2	2	2			11
合計	63	58	69	5	7	0	202
人為的要因/全要因	92%	97%	97%	60%	100%	-	95%

(5) 転覆・沈没・浸水

貨物船の場合、貨物の過積載・偏積載あるいは荒天避難の不適切、貨物積付作業の不適切等、航行中荷崩れに繋がるようなことが主な原因として挙げられる。旅客船の場合、3割強が自動車積付に係るものである。表-12に人為要因とそれ以外を分けて件数を示す¹⁴⁾。

5.3 海難事故発生頻度の補正

輸送実績に基づく事故発生頻度の補正について検討した。運搬船の安全体制を考慮した事故頻度の補正にはミクロなFT解析等の分析を用いるのが一般的である。一方、マクロな統計に対して、実証的とは言えないが、過去のデータから今後の事後確率を予測する目的でベイズ推定を援用する試みもある。例えば、ある事故発生頻度・分布のもとで、20年間の実績で事故件数ゼロが連続して現れる信頼度を問うものである。表4~8に示すように、おおよその事故発生頻度は、隻・年単位で 10^{-3} オーダーであり、航海単位ではさらに一桁以上低下すると判断できる。1,000年あるいは1万航海に数回という頻度に対して、ポアソン分布等を仮定したうえで20年程度の連続した事故数ゼロの実績で補正しても変化は現れなかった。以上の仮定では事故数ゼロが連続して現れる可能性は、依然高いままである。

5.4 重大事故発生頻度の評価

運搬船が海没に至るような重大な衝突事故の発生確率を茨城県日本原子力発電株式会社東海港から青森県むつ小川原港間の輸送を例として、一般船舶のデータに基づき評価した。

航行中の運搬船の衝突事故の発生確率に関して、出発港、到着港、寄港及び航行する海域に分けて算出する次式のモデルがIAEA TECDOC-1231で提唱されている⁶⁾。

$$P_{SC,V} = 0.5P_{SC,DepP} + \sum_i P_{SC,Ri} N_i + \sum_j P_{SC,Pj} + 0.5P_{SC,DesP} \quad (1)$$

以下、(1)式に基づいて重大衝突事故発生確率を概算した結果を示す。ここで、各パラメータ定義は、以下の通りである。

$P_{SC,V}$: 航行中の衝突発生確率
 $P_{SC,DepP}$: 出発港を航行中の衝突発生確率
 $P_{SC,Ri}$: 海域*i*で1海里航行する間の衝突発生確率

N_i : 海域*i*を航行する海里数
 $P_{SC,Pj}$: 寄港する港を航行中の衝突発生確率
 $P_{SC,DesP}$: 到着港を航行中の衝突発生確率

(1) 港内における衝突事故発生確率

IAEA-TECDOC-1231においては、1997年のLloyd's 海難統計に基づいた東海港及び日立港における衝突事故発生確率として、 1.02×10^{-4} /入出港という値が提示されている。また、2005年の港湾統計情報¹⁷⁾によると、到着港である日立港の入港隻数は2,535隻であり、一方、出発港であるむつ小川原港の入港隻数は739隻である。よって、むつ小川原港における衝突事故発生確率は、日立港に比べて低いことが予想されるが、ここでは日立港と同じ値を採用することとする。

$$P_{SC,DepP} = P_{SC,DesP} = 1.02 \times 10^{-4} / \text{入出港} \quad (2)$$

ここで、1997年の港湾統計情報¹⁸⁾では、日立港の入港隻数は3,719隻となっており、2005年の入港隻数は1997年当時の約70%に減少している。また、近年のISPSコード（船舶及び港湾施設の保安に関する国際規則）の導入やISMコード（国際安全管理規則）の普及等により、この値が低くなっている可能性は高いと考えられる。

(2) 港外航行中における衝突事故発生確率

IAEA-TECDOC-1231において、1海里当たりの衝突事故発生頻度は、日本の東海岸（太平洋側）では、

$$P_{SC,Ri} = 1.9 \times 10^{-6} / \text{海里} \quad (3)$$

となっている。ただし、本データは1979年から1993年のLloyd's統計によるものであり、近年のAISの設置義務化（500GT以上の内外航船舶）等のSOLAS条約に基づく航行安全性の向上等により、この値はさらに小さくなる可能性がある。むつ小川原港から日本原子力発電株式会社東海港への予想航路から航行距離を算出すると、その値は約330海里となる。従って、港外航行中における衝突事故発生確率は、

$$\sum_i P_{SC,Ri} N_i = 1.9 \times 10^{-6} / \text{海里} \times 330 \text{海里} = 6.3 \times 10^{-4} / \text{海里} \quad (4)$$

となる。

(3) 一航海中の衝突事故発生確率

寄港はしないため、(1)式の右辺第3項 $P_{SC,Pj}$ はゼロであることから、(1)式に(2)式と(4)式を代入すると、一航海中に遭遇する衝突事故の発生確率は、

$$P_{SC,V}=7.3 \times 10^{-4} / \text{航海} \quad (5)$$

となる。

(4) 衝突事故発生時に被衝突船となる確率

ここまでは(1)式に基づいて衝突事故発生確率の算出を行ってきたが、ここからは、衝突事故が沈没等の重大事故に発展する確率を考える。衝突事故が発生した場合には、運搬船は衝突船あるいは被衝突船となり得るが、衝突船となる場合には、想定し得る船体損傷を考慮しても輸送物の海没に至る可能性は低いと考えられる。従って、運搬船が重大な船体損傷を受ける可能性がある被衝突船となる場合のみを考慮することとする。ここで、衝突事故においては、海難審判において裁決された衝突船側の責任の程度を分析した結果、衝突船側に事故の主たる責任(全因及び主因)があると判断された事例が約8割となっている。運搬船は、当直体制の強化及びISMコードの取得等、その運航管理体制は一般船舶に比較して非常に厳格なものとなっている。このことから、仮に衝突事故が発生した際に、運搬船側が衝突船となる確率は、被衝突船となる確率に比べて低くなるものと考えられる。従ってここでは、運搬船が被衝突船となる確率を0.8とする。

(5) 衝突船が大・中型船である確率

運搬船はVLCCの衝突にも耐えられる構造を有している。VLCCの総トン数は一般的に150,000GT程度である。そこで、運搬船に重大な損傷を及ぼす可能性がある船舶を、安全側の観点から100,000GTを越える大型船と仮定する。このとき、衝突船が上記条件を満たす船舶である確率は、日本海事協会(NK)の登録船籍数のデータ¹⁹⁾から推測すると0.038となる。

(6) 運搬船が大きな損傷を受ける可能性のある角度で衝突する確率

運搬船が被る被害は、衝突船及び運搬船の衝突時の船速及び衝突角度等に依存する。ここでは、衝突船の衝突角度が30度以内であるならば運搬船に大きな損傷は生じないと仮定し、かつ衝突角度は0~90度で等確率で発生すると仮定する。このとき、運搬船が大きな損傷を受ける確率は、

$$(90-30)/90=0.667 \quad (6)$$

となる。

(7) 運搬船が大型船との衝突事故により大きな損傷を被り得る確率

以上、(1)から(6)までの結果を勘案すると、運搬船がむつ小川原港及び日本原子力発電東海港間の航行中に大型船との衝突事故が発生し、大きな損傷を被る可能性のある確率は、

$$\begin{aligned} & 7.3 \times 10^{-4} / \text{航海} \times 0.8 \times 0.038 \times 0.667 \\ & = 1.5 \times 10^{-5} / \text{航海} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。ただし、この発生確率は一般船舶のデータに基づいたものである。運搬船においては、運航管理体制が一般船舶に比較して非常に厳格なものとなっており、また少なくとも入出港時には海上保安庁の巡視艇が運搬船の監視任務に就くことが予想される。さらに、運搬船はVLCCの衝突によっても健全性が保たれることが確認されている。以上のことから、運搬船において本事象が発生する確率は(7)式の値よりもさらに小さく考えられ、加えて本事象から沈没等の重大事故に発展する確率は、その値よりもさらに小さく、安全側に見積もっても 10^{-6} /航海のオーダーになると考えられる。

陸上の原子力発電所では、リスク評価の際の性能目標として以下の定量的な指標が提示されている²⁰⁾。ひとつは、リスクの源となる炉心に内蔵される放射性物質の放出をもたらす炉心損傷の発生確率、すなわち炉心損傷頻度(CDF: Core Damage Frequency)であり、もうひとつは、原子炉格納容器等の発電炉の最外層の防護機能が確保されていれば、環境への放射性物質の放出を極めて低いレベルに抑制することが可能であるとの観点から、格納容器の防護機能喪失の年当たりの発生確率である格納容器機能喪失頻度(CFF: Containment Failure Frequency)である。各々の指標値として以下の定量値が提示されている。

- ・ CDF : 10^{-4} /炉・年程度
- ・ CFF : 10^{-5} /炉・年程度

放射性物質の輸送に関しては、現在、上記のような定量的な性能指標は提示されていないが、運搬船が沈没等の重大事故に発生する確率(10^{-6} /航海オーダーと推定)は、陸上の原子力発電所における指標を参考としたときに、十分に小さい値で

あると考えられる。

6. まとめ

本論文は、リスク情報の安全規制及び安全確保活動への活用の観点から放射性物質海上輸送のリスク評価の意義について論じるとともに、今後、リスク評価のケーススタディを実施するにあたり必須となる海上輸送時の事故統計のデータ整備及び事故発生頻度評価についてまとめたものである。

放射性物質の海上輸送については、今後、我が国において輸送量が増大すること及び輸送物が多様化する状況の中で、いかに安全輸送を確保するかが課題であり、リスク情報の活用方策をより具体化していくことが必要である。そのためにも、種々の輸送に対するケーススタディを継続していくことが必要である。

また、今回整備した海上輸送事故データ及び事故発生頻度データについては、今後、上記ケーススタディを実施するにあたり、ET解析、FT解析等の詳細なリスク分析に活用していく予定である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、(独)原子力安全基盤機構国際輸送規則検討会試験要件等分科会輸送リスク評価等WGメンバーである、電気事業者、輸送事業者、輸送容器メーカー、関係府省等の専門家の方々と、輸送リスク評価に関してご議論いただいたことに感謝申し上げる次第である。なお、本論文の3～5.3章に記載した内容は、(独)原子力安全基盤機構「平成21年度放射性物質輸送に係るリスク評価手法の整備事業」に係る委託調査研究として実施したものである。また、5.4章に記載した内容は、(独)日本原子力研究開発機構の委託調査研究として実施したものである。

参考文献

- 1)原子力安全委員会：リスク情報を活用した原子力安全規制の導入の基本方針について(2003)
- 2)原子力安全・保安院：「リスク情報」活用の基本ガイドライン(試行版)(2006)
- 3)(独)原子力安全基盤機構：平成15年度 原子炉施設の検査に対する確率論的安全評価の活用に関する報告書、JNES/SAE04-059 (2004)
- 4)(財)原子力発電技術機構：平成14年度 リスク

- 情報を活用した規制への PSA 活用に関する報告書、INS/M02-27(2003)
- 5)(財)原子力発電技術機構：平成13年度リスク情報を考慮した規制の国内プラントへの適用性検討に関する報告書、INS/M01-32 (2002)
- 6)IAEA: Accident Severity at Sea during Transport of Radioactive Material, Report of the Coordinated Research Project on Accident Severity during Sea Transport、TECDOC-1231(2001)
- 7)津旨大輔、丸山康樹、鈴木浩、三枝利有：海洋大循環モデルを用いた海洋中核種濃度評価手法の開発、電力中央研究所報告、U99007(1999)
- 8)Neuhauser, K.S., Kanipe, F.L.: RADTRAN 4: A Computer Code for Transportation Risk Analysis, Rep. SAND-89-2370、TTC-0943、Sandia Natl. Lab.(1992).
- 9)Ericsson, A.M., Jaernry, C.: INTERTRAN 2: Transportation Risk Assessment Package <http://www.amckonsult.se/>
- 10)原子力安全委員会：原子力の重点安全研究計画(第2期)(2009)
- 11)(社)日本造船研究協会：放射性物質の海上輸送の安全に関する調査研究(海上火災)(第46基準研究部会)平成10年度報告書 (1999)
- 12)渡部直人、鈴木浩、高野裕：放射性物質輸送の確率論的安全評価(その4)専用運搬船の海難事故発生確率に関する検討、電力中央研究所報告、U97076(1998)
- 13)金子俊男、樋富和夫、沢田博史、桐谷 伸夫：船舶火災の実態と原因について、船舶技術研究所報告 17(6) (1980)、pp.361-412
- 14)海難審判庁：浸水・転覆・沈没海難(1982)
- 15)Sprung, J.L., et al.: Data and Method for the Assessment of the Risks Associated with the Maritime Transport of Radioactive Materials Results of the SeaRAM Program Studies、SAND98-1171(1998)
- 16)(社)日本造船研究協会：第49基準研究部会船舶の総合的安全評価に関する調査研究(平成11年度報告書)(2000)、p.55、
- 17)国土交通省総合政策局情報管理部：港湾統計(2007)
- 18)国土交通省総合政策局情報管理部：港湾統計(1999)
- 19)ClassNK：Register of Ships on CD-ROM (2005)
- 20)原子力安全委員会安全目標専門部会：発電用軽水型原子炉施設の性能目標について－安全目標案に対応する性能指標について－(2006)