

氏名	ひら お よし ひろ 平 尾 好 弘
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)技術社会システム専攻
学位論文題目	核燃料及び使用済核燃料の海上輸送リスク評価に関する研究
指導教員	東北大学教授 若林 利男
論文審査委員	主査 東北大学教授 若林 利男 東北大学教授 斎藤 浩海 東北大学教授 中田 俊彦 東北大学准教授 高橋 信

論文内容要旨

核燃料及び使用済核燃料の海上輸送は、我が国において原子力施設間の物流を支える重要な役割を担っており、その安全確保は最優先事項である。近い将来、核燃料サイクル計画の進展及び原発事故処理に伴う輸送環境の変化が予想されており、輸送安全の課題として危険状況の発生を未然に防ぐための事前予防的なりスク管理が求められている。よって、将来に向けて海上輸送に係るリスクの評価分析を可能にし、リスク情報に基づく安全確保活動や規制要件等の施策立案を支援する必要がある。本研究では、我が国の輸送環境に適した核燃料及び使用済核燃料の海上輸送リスク評価手法を構築し、且つ評価に要する基本データの整備と信頼性の検証を行うこと、そしてそれらを用いて現行の海上輸送リスクを評価分析し、それをベースに近い将来予想されるリスクレベルを把握することを目的としている。本論文はその成果をまとめたものであり、全文8章よりなる。

第1章は緒言であり、本研究の背景として我が国の核燃料輸送が抱える安全性課題について述べ、確率論的安全評価(Probabilistic Risk Assessment, PRA)の導入に向けた海上輸送リスク評価手法の必要性を示して研究目的を述べた。

第2章においては、我が国における核燃料の輸送環境に適応した実証的な海上輸送リスク評価手法の構築について述べている。輸送環境の調査から、我が国では海上輸送を主体とし、陸と海のインタフェースでクレーンによる港湾荷役が行われること、通常輸送時の公衆被ばくを考慮する必要がないこと、使用済燃料に対して水を内部に含んだ湿式容器を用いること、施設間の海上輸送ルートがほぼ一意に定まること等、環境の特徴を示した。それらに基づいて海上輸送リスクの特定から評価までカバーするプロセスを構築し、本研究で開発、評価した手法及びデータの位置づけを説明した。表1にそれら手法とデータの整備項目と本論文における説明箇所を示す。また、荷役作業者の通常時累積被ばく、及び輸送物の海没による海洋経路被ばくに対する線量評価手法について述べ、有用性を明らかにした。

第3章においては、海上輸送に係る潜在的な事故シナリオの収集と重要度評価を行う事故シナリオ管理シス

表1 海上輸送に係るリスク評価手法と基本データの整備項目

	主な整備内容	評価手法とデータの整備項目	説明箇所
通常輸送時	手法開発	荷役作業中の従事者累積被ばく評価	2章
	手法開発	輸送物の海没で海洋拡散した放射性物質による海洋経由被ばく線量評価	2章
事故時	手法開発 データ評価	・事故シナリオ管理システムの開発 ・船舶及びクレーン荷役に対する重要シナリオの選定	3章
	データ評価	・重要シナリオに対する事故進展イベントツリー作成 ・起因事象発生頻度、事象分岐確率等の基本データ評価	4章
	データ評価 (手法開発含む)	事故負荷に対する輸送物の応答データ評価	5章
	手法開発 (データ評価含む)	海上輸送条件（沖合通航位置、通航時間等）を考慮したリスク評価手法の拡張	6章
	整備した手法及びデータの応用によるリスク情報	海上輸送リスク評価のケーススタディ	7章

テムの開発について述べ、ネットを介した専門家らによる協働と情報共有、シナリオ選定段階のトレーサビリティと透明性の確保等、システムの有用性を明らかにした。また、使用済核燃料を対象に実施したシステム活用事例をもとに、個別シナリオの重要度についてリスクマップを示して定性的な分析を行った。その結果、海上輸送の重要シナリオとして大型船衝突と沈没、タンカー類衝突によるプール火災、沖合での機関室火災、荒天波浪等による転覆・沈没を選定し、また荷役に対してワイヤ・フック等の不具合やクレーン倒壊による輸送物落下を選定した。

第4章では、3章で選定した重要シナリオに対して、事故発生確率の評価に用いる事故進展イベントツリー（Event Tree, ET）の作成、及びET分析に用いる基本データを評価した。基本データは我が国最新の一般統計に基づくが、評価に際して統計から直接的に推定困難な二つの重要パラメータに対して独自の手法を開発した。一つは海難起因事象の発生頻度算定に用いる船舶母数について、外航船の隻数を個別船舶の発着港データから評価する手法、及び運搬船とルートを共有する長距離フェリーと短距離フェリーについて年間航海数と平均航海距離を推定する手法を示した。もう一つは、クレーン等による荷の落下事故件数について、クレーン等に起因する死傷者数の統計をベースに業種別の災害要因分析から事故の型を「荷の落下」「倒壊崩壊」「玉掛用具」に絞り込み、さらにバードの労働災害経験則を用いて死傷者を伴わない落下事象を含む件数を評価する手法を示した。それらを用いて評価した起因事象の発生頻度について、既往研究や海外のデータベースの評価値と比較し妥当性を評価した。また、ETの事象分岐確率について同様に我が国の統計に基づいて検討し、推定に用いたデータと仮定を明示することで評価値の客観性、信頼性を高めることができた。

第5章では、我が国の使用済燃料及び新燃料の各輸送物に対して、輸送規則の条件を超える事故負荷（衝撃、火災）が与えられたときの応答モデルを開発し、負荷の程度に応じた収納物の放出割合及び漏えい放射線の線量率を表す応答データの評価を行った。使用済燃料用の湿式キャスクに対する収納物の放出割合について、米国の乾式レールキャスクの応答モデルをベースに内水の効果を考慮したパラメータ推定を行って評価するとともに、米国の応答データと比較して湿式キャスクの応答の特徴を明らかにした。外部線量率について、内水消失、中性子及び γ 線遮へい材欠損による上昇効果を表わす評価手法の開発を行い、PWR用とBWR用とで鉛遮へい体の有無による衝撃応答の差が現れることを示した。さらに、火災によるキャスク外部からの連続的な熱負荷に対する各部の温度上昇を解析し、仮想的な蓋密封の破損、或いは燃料棒の破裂に至るまでの時間余裕を明らかにした。一方、新燃料輸送物に対する応答モデルについては、落下衝撃による燃料棒の破損割合を縦衝撃理論に基づいて作成した。

第6章では、船舶に搭載された船舶自動識別装置（AIS）からのデータを利用した海上リスク評価手法の拡張について述べている。むつ小川原沖で実測したAISデータを分析して得られる詳細な海上交通データの特徴を示すとともに、4章で示した統計に基づく平均的な基本データの評価値と比較して信頼性を検証した。ミクロな衝突関係を表す式を用いて同海域の衝突発生頻度を、通航時間帯による誤差を含めて、他船と並行に走る場合で $4E-7 \pm 50\%$ (20海里)、入出港時に航路を横切の場合で $6.5E-7 \pm 20\%$ (経度10分)と評価した。他船並行の場合、東京湾及び瀬戸内海を除くその他の海域の統計評価値と同レベルであること、また航路横切りの衝突頻度は他船並行と比べて航行距離が半分程でも1.5～2.5倍も高いこと等を明らかにした。最後に、特定海域のAISデータの分析から運搬船の沖合通航位置、通航時間帯、進行方向、横切り時等を考慮した輸送条件別の事故確率を推定できることを示し、従来の平均的な事故確率をそれらにかえることで海上輸送リスク評価手法を拡張できることを明らかにした。これによって、特定の輸送ルートであっても輸送条件の違いによる代案を提示してリスク比較することが可能になり、我が国の海上輸送に対するPRAの適用性を高めることができた。

第7章では、前章まで整備した手法とデータを用いて、我が国の海上輸送を模擬した輸送リスク評価のケーススタディを行っている。評価のベースとして、使用済燃料を御前崎沖からむつ小川原港まで運搬船で海上輸送し、同港で荷役作業を行うまでを想定した。まず、重要シナリオに対するリスクを定量化して特徴を明らかにした。リスク全体における各重要シナリオによる寄与を評価したところ、沈没による寄与が大きく、次いで荷役落下による寄与も沈没の4割程度と大きいことがわかった。船舶沈没に着目すると、衝突に起因する割合は1～3%程度と低く、機関室火災や荒天・波浪等に起因する割合が比較的高いことを明らかにした。被ばく影響リスクは水深200m～500mの距離割合が多い海域で高く、水深200m以浅のサルベージ可能な割合の多い海域で低いことを示した。また、輸送物衝撃やプール火災による被ばく影響は主に海上に留まるため、公衆のいる陸地に殆ど影響が及ばないことを示した。例外的に伊豆諸島付近での発生を仮定した場合の公衆影響を評価したが無視できるレベ

ルであった。沈没によるリスクや荷役落下によるリスクは海上輸送リスクにおいて支配的であり、主なリスク管理対象と考えられる。

以上のベース評価をもとに輸送環境の変化によるリスク感度を分析した。まず、輸送物が異なる場合の沈没による健康リスクの変動を推定し、使用済燃料に対して高レベル廃棄物で約1/2、MOX新燃料及びウラン新燃料で4桁以上低いことを明らかにした。年間個人被ばく線量で比較すると、使用済燃料と高レベル廃棄物に対してICRPの線量当量限度より一桁以上低く、沈没による被ばく影響が低いことを確認した。

次に、将来計画を見据えた輸送量の変化による感度を分析し、使用済燃料に対して現在の年間輸送量に基づく現行リスクを推定するとともに、将来のリスクが基本的に輸送量の増加に応じて増えることを明らかにした。ただし、中継施設に対する入出港回数の増加を仮定すると、航路横切りによる入出港リスクが全体の1割程度と無視できないレベルになるため、輸送スケジュールにおける中継回数の調整が重要と考えられる。また、MOX新燃料の輸送リスクは使用済燃料と比べて4桁低く、将来においても使用済燃料に対するリスクが支配的であることを示した。さらに、米国の陸上輸送と比較して輸送モードによるリスク特性を調査し、海上輸送における事故時リスクの通常時リスクに対する相対的重要性、及び陸上輸送における通常時公衆リスクの支配的な大きさ等を明らかにした。最後に、以上の結果に関して、使用データの不確実性、保守性から過大評価である旨の注意点を述べ、特に沈没に係るデータの精度向上の必要性を指摘した。

第8章では、本研究のまとめと結論を述べている。

以上、本研究では、核燃料及び使用済核燃料に対する海上輸送リスク評価手法を確立し、且つ我が国の統計に基づく基本データを一定の信頼性ととも提供することができた。そして、実際的な海上輸送状況を模したケーススタディを通じて、それらのPRAに対する適用可能性を示すことができた。本研究の成果は今後、リスク情報の充実に資するとともに、確率論的安全評価の導入による規制の合理化、過酷事故対応、ソフト面のリスク低減等、海上輸送の安全性向上に大いに寄与するものと期待される。

論文審査結果の要旨

核燃料及び使用済核燃料の海上輸送は、我が国において原子力施設間の物流を支える重要な役割を担っており、その安全確保は最優先事項である。輸送安全の課題として危険状況の発生を未然に防ぐための事前予防的なリスク管理が求められている。そこで将来に備えて海上輸送に係るリスクの評価分析を可能にし、リスク情報に基づく安全確保活動や規制要件等の施策立案を支援する必要がある。本研究では、我が国の輸送環境に適した核燃料及び使用済核燃料の海上輸送リスク評価手法を開発し、評価に要する基本データの整備と信頼性の検証を行うことを目的としている。そして、それらを用いて現行の海上輸送リスクを評価分析し、それをベースに近い将来予想されるリスクレベルを把握している。本論文はその成果をまとめたものであり、全文8章よりなる。

第1章は諸言であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章においては、我が国の輸送環境の特徴を調査し、それに基づいて構築した海上輸送リスク評価手法について述べている。新たに開発した手法のうち、荷役作業従事者の通常時累積被ばく及び輸送物の海没による海洋経由被ばくに対する線量評価手法について有用性を明らかにした。

第3章においては、2章の評価手法のうち、海上輸送に係る潜在的な事故シナリオの収集と重要度評価を行う事故シナリオ管理システムの開発について述べるとともに、使用済核燃料を対象に行ったシステム活用事例の分析を通して、海上輸送と荷役に対する重要シナリオを選定した。

第4章では、3章の重要シナリオに対して、発生確率評価に用いる事故進展イベントツリーを作成し、使用する基本データを最新統計に基づいて評価した。直接に推定困難な船舶母数及び荷役落下件数について評価手順と仮定を明らかにし、既往データと比較することで評価の客観性を高めた。

第5章では、我が国の使用済核燃料及び新燃料の輸送物に対し、過酷な事故負荷が与えられたときの収納物の放出割合及び漏えい放射線の線量率を表す応答データを評価した。特に湿式容器に対する内水の影響を明らかにするとともに、内水消失と中性子及びγ線遮へい材欠損による外部線量率の上昇を表わす評価手法の開発を行った。

第6章では、2章の評価手法のうち、船舶の自動識別(AIS)データを利用した海上リスク評価手法の拡張について述べている。むつ小川原沖の実測に基づく船舶動静データから他船並行時及び航路横切り時の衝突発生頻度をマイクロに算定し、4章の結果と比較して評価の妥当性を示した。

第7章では、実際の海上輸送リスク評価のケーススタディを行っている。重要シナリオに対するリスクを評価し、各シナリオの寄与と沈没リスクの特性を明らかにした。また、輸送物の種類や輸送量の変化に対するリスク感度を分析し、将来も使用済核燃料のリスクが支配的であること、及び航路横切り等入出港リスク管理の必要性を明らかにした。

第8章では、本研究のまとめと結論を述べている。

以上、本論文では、核燃料及び使用済核燃料に対する海上輸送リスク評価手法を確立し、実際の輸送状況に対し、ケーススタディを通じて本手法及びデータの有用性を示した。本論文は、今後、リスク情報の充実に資するとともに、過酷事故対応、ソフト面のリスク低減等、海上輸送の安全性向上に貢献するのみならず、リスク評価・管理学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。