

2 4 放射性物質の海上輸送に係る原子力事故評価システム

海上安全研究領域

*小田野 直光、松岡 猛、大西 世紀、近内 亜紀子
平尾 好弘、村田 裕幸、澤田 健一

環境・エネルギー研究領域 間島隆博

1. はじめに

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、現在は、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。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。近年では、原子力の研究、開発及び利用の拡大に伴い、放射性物質の輸送量の増加と輸送形態の多様化が進んでおり、放射性物質の海上輸送時の安全確保は重要な課題のひとつである。

海上輸送時に原子力災害が発生した場合には、国土交通省が被害拡大防止及び復旧等のために必要な措置を原子力事業者に命令することとなるが、国土交通省が迅速かつ的確な指示を行うためには事故の規模、周辺環境及び住民等への影響を予測するシステムが必要である。そのため、海上技術安全研究所においては、国土交通省の委託により、万が一の事故発生時において活用することのできる環境影響評価システムの構築を行った。本報では、構築したシステムの概要と想定事故に対する事故評価システムの適用結果について報告する。

2. 海上輸送に係る原子力事故評価システムの構築

海上輸送に係る原子力事故評価システムは、外部被曝評価シミュレーションコード、大気・海洋拡散シミュレーションコード、各種データベースにより構成されている。

外部被曝評価シミュレーションコードは、通常輸送時及び事故時の輸送容器及び船体周囲での放射線線量分布をモンテカルロ計算法によって評価する。対象とする収納物は、使用済燃料、低レベル放射性廃棄物、ガラス固化体、MOX新燃料、新燃料集合体、 UO_2 ペレット・粉末、 UF_6 粉末であり、現在、日本国内で海上輸送が行われている主要な輸送容器をほとんど含んでいる。また、運搬船については、主要な専用運搬船、コンテナ船、チャーター船を対象としている。

大気拡散シミュレーションコードは、輸送容器から漏洩する放射性物質の空気中での拡散を評価するものであり、プログラムの内容は原子力安全

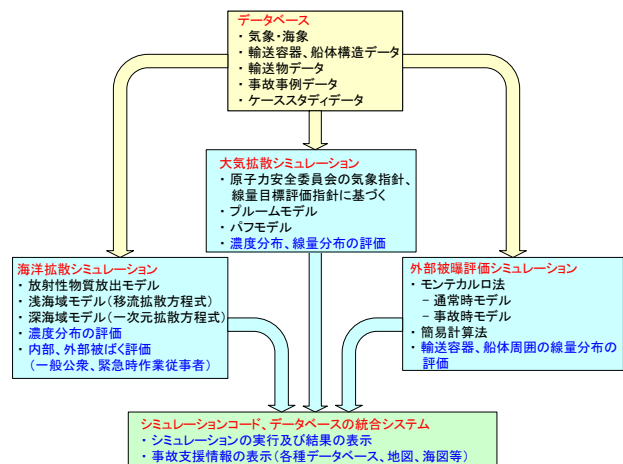


図1 海上輸送に係る原子力事故評価システムの構成

委員会安全審査指針に基づいている。また、より現実的な評価を行えるよう、重力沈降、降雨沈着等の効果を考慮することができる。

海洋拡散シミュレーションコードは、海没した輸送容器から漏洩する放射性物質の海洋中の拡散を評価するもので、海洋中での放射性核種の濃度分布を評価し、被曝シナリオに基づき一般公衆及び緊急作業従事者の内部及び外部被曝線量を評価する。海洋拡散モデルとして、三次元拡散方程式を差分法で解く方法と、海流を考慮せずに鉛直方向の拡散のみを考慮して解析的に解を得る方法を用意している。また、輸送容器が海没した際に輸送容器から漏洩する放射性物質の量は、バリア効果を考慮したモデルと考慮しないモデルの両者を用いて評価することができる。

事故評価システムでは、事故時の運用時に有益な情報を提供するため、シミュレーション結果を可視化する機能と、各種のデータベースを保有している。データベースには、過去の事例研究の解析結果、輸送容器・運搬船に関する情報、海流データなどが含まれている。上記に述べたシミュレーションコードとデータベースは有機的に結合している。

3. 想定事故に対する本システムの適用

開発した事故評価システムの妥当性を検証するため、想定事故に対して事故評価システムを適用して、結果の評価を行った。開発した事故評価システムでは、迅速に放射性物質の海洋放出による被曝評価を行えるモデルを構築しており、本論文では、特に、海洋拡散シミュレーションコードに着目した適用結果について報告する。

(1) IAEA-TECDOC-1231

「放射性物質海上輸送事故の厳しさ、可能性及びリスク (IAEA-TECDOC-1231)」⁽¹⁾は、5カ国の参加のもと、約5年間を越えて行われた「放射性物質の海上輸送における過酷な事故に関する研究協力プログラム」の結果であり、同報告書の付録3に電力中央研究所が実施した海没時被曝影響評価⁽²⁾が記載されている。海没時被曝影響評価は、使用済燃料、高レベル廃棄物およびPu粉末の水深200 mへの海没事故時の対象としている。

(2) 理論解モデル

開発したシステムでは、海洋拡散モデルとして、三次元拡散方程式を差分法で解く方法（差分解モデル）と、海流を考慮せずに鉛直方向の拡散のみを考慮して解析的に解を得る方法（理論解モデル）を用意している。本論文では、理論解モデルを用い、IAEA-TECDOC-1231の評価結果と比較した。

解析条件は以下のように設定した。海岸線、海底および海面からの放射性物質の移行は生じず、海流はないものとした。また、輸送容器の海没点から無限遠点では放射性物質が存在しないものとし、初期条件となる輸送容器から放出する放射性物質の放出形態としては、容器内の放射性物質の全量が浸出により1年間に定量で連続的に放出する形態を仮定する。

(3) 本システムを用いたシミュレーション

海上輸送に係る原子力事故評価システムの理論解モデルを用い、IAEA-TECDOC-1231と同様の放出条件において被曝影響評価を実施した。表1に使用済燃料に対する評価結果を示す。海流を考慮しないことなど、保守側の設定を用いているため、本システムを用いた計算結果の方が、IAEA-TECDOC-1231の結果よりも高めの結果になった。

理論解モデルは、単純なモデルを採用しているため、IAEA-TECDOC-1231よりも精度が低く、安全性を説明するための資料としては、IAEA-TECDOC-1231の手法のほうが優れている。しかし、計算時間が短く、計算結果が保守的な結果となっていることから、事故時の意思決定に用いるためには、十分利用可能である。

表1 本システム評価結果と
IAEA-TECDOC-1231の評価結果の比較

	本システム (mSv/y)	IAEA-TECDOC -1231(mSv/y)
内部被曝	5.0×10^{-4}	3.2×10^{-4}
外部被曝	1.0×10^{-4}	0.9×10^{-4}
合計	6.0×10^{-4}	4.1×10^{-4}

4. 緊急時対応のあり方の検討

IAEAの輸送規則⁽³⁾では、800℃で30分の火災、

9mからの非降伏面への落下および 200 mへの浸漬など厳しい事故条件を設定し、その条件下での遮蔽性能および密封性能の要件を課している。緊急時対応のあり方を検討するため、このようなシビアな事故が発生した場合の放射線学的な影響を開発した事故評価システムにより評価し、緊急時対応のポイントを整理した。

(1) 放射線防護上の線量限度

緊急時対応のあり方を検討するにあたり、放射線防護上の線量限度について整理しておく。ICRPは1990年勧告⁽⁴⁾において、職業被曝について、決められた5年間の平均が1年あたり実効線量で20 mSvを線量限度とし、任意の1年に実効線量で50 mSvを超えるべきではないとしている。また、緊急時の対策に従事する作業員の被曝の制限について、ICRPは以下のように勧告している。緊急被曝は、重大な事故時においても、対策活動を制御することにより制限できる。事故対策のための緊急被曝は稀にしか起こらないので、重大な事故時に一時的に線量制限を緩和しても、生涯にわたる期間のような長期的な観点から見た場合に、防護レベルを低下させることにはならないと考えられる。そこで、事故対策あるいは緊急の救済作業に従事する職業人の被曝線量の上限値は、実効線量でおよそ0.5 Sv、皮膚の等価当量でおよそ5 Svとすべきと勧告している。ただし、人命救助の場合にはこれらの制限は設けない。いったん事故が制御可能な状態になったら、救済作業は行為における職業被曝の一部として扱われるべきである。

(2) 被害想定

被害想定として、遮蔽性能および密封性能について、IAEA輸送規則に規定されている事故時における要求性能を考慮し、遮蔽性能については輸送物から1 m離れた場所における放射線量が10 mSv/hに上昇する状況を、密封性能については⁸⁵Krが10×A2/week放出される状況を想定した。

a. 遮蔽性能劣化

輸送物の遮蔽性能の劣化により輸送物から1 m離れた場所における放射線量が10 mSv/hとなった場合について、居住区などにおける被曝線量を事故評価システムに内蔵されている外部被曝評

価計算コードシステムを用いて評価した。使用済燃料運搬専用船に軽水炉からの使用済燃料を収納するキャスクが8基搭載されているものとし、そのうち居住区に最も近い1つの輸送物の遮蔽性能が劣化すると仮定して、評価を行った。実効線量率の評価結果は、居住区で3.0 μSv/h、機関室で58 μSv/hであった。48時間で事故対応が行われ、乗組員の避難が完了すると仮定すると、48時間の機関室内の滞在を考慮しても、実効線量で2.8 mSvの被曝であり、ICRPの勧告よりも十分低い線量である。また、事故直後、居住区へ退避することで、48時間船内に滞在したとしても、142 μSv程度の被曝であり、一般公衆の線量限度である1 mSvよりも十分低い線量となり、居住区への退避が事故時に有効な手段であることが示された。

b. 大気拡散

本評価システムでは、連続放出についてはプルームモデルを、瞬時放出については日本の原子力安全委員会安全審査指針に基づくパフモデルを用い、大気拡散シミュレーションを実施している。本論文では、想定事故として⁸⁵Krが10×A2/week放出し、風下のある地点に12時間存在する人の被曝線量をプルームモデルで評価した。放出時の周辺環境は、風速1 m/s、放出高さ0 m、大気安定度Fとした。救援活動の時間として48時間の滞在を考慮すると、風下100 mでの被曝線量は14 mSvであり、ICRP勧告の制限値よりも十分低い。

c. 海洋拡散

海洋拡散計算における、想定被害としては、輸送容器の海没を想定し、水深200 mで¹³⁷Cs、⁹⁰Sr及び²³⁹Puが各々A2/weekで放出するものとした。放射性物質の海洋拡散時の海洋中での放射性物質濃度を、理論解モデルを用いて評価した。全ての場合について、1年後の水深0 - 100 mの平均濃度は、バックグランド濃度よりも低い。

(3) 被害想定に基づく対応

本事故評価システムにより、輸送物の潜在する危険性に基づき、被害想定を実施することが可能である。遮蔽性能劣化については、船上の各位置および船体周囲における線量が評価できる。大気拡散については、風下方向距離における被曝線量が評価できる。海洋拡散については、核種毎、水

深毎の濃度が評価でき、環境への影響を把握することができる。

事故直後には、本事故評価システムによる評価結果に基づき、放射線学的な影響の度合いに基づき事故への対応方針を決定すべきである。乗組員の避難状況および放射線測定データなど詳細な情報が入手次第、対応方針を変更していくべきである。また、事故支援要員の緊急時作業時の被曝についても、事故評価システムの評価結果に基づく、計画を立案することが効果的である。

また、「(2)被害想定」で述べたように、輸送物が事故条件における要求性能を満たしていれば、シビアな事故が発生した場合でも、放射線学的な影響は大きくない。人命救助優先など、他の船舶事故と同様の対処を基本としてよいと考えられる。

海上原子力事故評価システムでは、輸送物を回収する作業員の被曝計算も可能であるので、作業員に対する放射線学的な影響への対応方針決定に役立たせることが可能である。例題として、水深 200 m で¹³⁷CsがA2/weekで放出した場合について、海没した輸送物を回収する作業員の海没水深における核種濃度に基づく被曝線量率を計算した。海洋に放出された放射性物質による被曝線量は、相当の作業時間を考慮しても、放射線作業従事者の線量限度と比較して、はるかに小さい線量であり、放射線学的には全く問題にならない。輸送容器の回収は、容器表面または漏洩部分の線量が十分に低くなってから実施されるものと想定されるので、本評価では、輸送物自体からの被曝は考慮していない。

5. 結論

放射性物質の海上輸送時に万が一事故が発生した際に、国土交通省が事故対策を実施することを支援することを目的として、海上輸送に係る原子力事故評価システムを構築した。本論文では、その基本的な機能を紹介するとともに、仮想的な事故を想定し、事故評価システムを適用した結果を示した。その結果、本システムは、事故時の支援を行うのに十分な精度で迅速に事故影響を評価することができることが明らかとなった。また、

IAEA 輸送規則における事故条件での要求性能を考慮し、遮蔽性能および密封性能の劣化を想定した事故時の評価を実施し、事故時の船員および環境に与える影響を評価し、事故時の対応のあり方を議論した。放射性物質の海上輸送においては、過酷な事故を想定しても、船員及び環境への影響はほとんどないことが明らかとなった。

開発したシステムは万が一の事故時の支援を目的として開発したものであるが、事故時の対策のあり方を議論するためのツールとしても有効である。放射性物質の海上輸送の安全確保のため、海上技術安全研究所においては、今後、本システムの維持および運用を行っていく予定である。

6.謝辞

本研究は、平成 13 年度より 16 年度まで、国土交通省海事局からの受託研究として実施したものである。

参考文献

- (1) International Atomic Energy Agency, “Severity, Probability and Risk of Accidents during Maritime Transport of Radioactive Material”, IAEA-TECDOC-1231, 2001.
- (2) D. Tsumune, H. Suzuki, T. Saegusa, N. Watabe, H. Asano, K. Maruyama and Y. Kinehara, “Dose Assessment for Public by Packages Shipping Radioactive Materials Hypothetically Sunk on the Continental Shelf”, pp. 91, Annex 3, IAEA-TECDOC-1231, 2001.
- (3) International Atomic Energy Agency, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 1996 Edition (As Amended 2003)”, IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1, (2003).
- (4) International Commission on Radiological Protection, “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of the ICRP 21 (1-3), Pergamon Press (1991).