解説

緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI の現状と今後の展開

(日本原子力研究所) 茅野 政道, 安達 武雄

緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI は、1979年の米国スリーマイル島原子力発電所2号炉(TMI-2)事故を契機に開発が進められた。これが第1世代 SPEEDI であり、国内原子力施設の事故に対応する文部科学省のシステムとして実運用されている。第2世代の SPEEDI である世界版 SPEEDI (WSPEEDI) は、国外事故の我が国への影響をリアルタイムで評価することを目的としたもので、その開発はチェルノブイリ事故起因の放射性物質が我が国でも検出されたことがきっかけとなっている。また、WSPEEDI の開発と並行して、気象予報機能の改良を主目的とした SPEEDI の高度化も行われている。現在、SPEEDI は第3世代の SPEEDI である SPEEDI-MP の開発に進展している。本システムでは、大気中での問題を対象としていた従来版を、海洋拡散や土壌面への放射性物質の移行まで包括的に扱えるように改良することを目的としている。このような研究開発の間、チェルノブイリ事故、旧動燃再処理施設の火災爆発事故、JCO 事故、三宅島の火山ガス噴出等、様々な大気放出に SPEEDI を適用し事故調査に貢献するとともに、信頼性の検証を行ってきた。本稿では、以上の研究開発の歴史や、実事故への適用例について概説するとともに、SPEEDI-MP を中心にした今後の展開について述べる。

I. はじめに

原子力施設の事故により大気中へ放射性物質の放出が予想される場合や、放出が実際に起こった場合、初期の防災対策やモニタリング計画策定のために、大気中の放射性物質の濃度や被ばく線量分布を迅速かつ高精度に予測する必要がある。これを目的とした先駆的計算予測システムには米国ローレンスリバモア国立研究所の ARAC¹⁾があり、米国 TMI-2事故以降、先進各国で同種のシステムが開発されてきた。我が国では、日本原子力研究所(以下、原研)が、1980年から1987年にかけて SPEEDI²⁾(System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information: 第1世代 SPEEDI)を開発し、現在、「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム」³⁾として、文部科学省により運営されている。

SPEEDI の実用化後も、原研では研究開発を継続しており、1987年から2000年の第2世代 SPEEDI の開発では、海外で発生した原子力事故に対応するための世界版 SPEEDI (WSPEEDI) と SPEEDI の高度化版を整備した。現在は、放射性物質の大気・海洋・陸域での移行挙動を包括的に扱うことのできる第3世代 SPEEDI である数値環境システム SPEEDI-MP (Multi-model Package) の開発に進展している。

これらのシステムの特徴等は、第1表に示すとおりで

ある。本稿では、システムの概要や実事故等への対応、今後の展開について述べる。

II. 緊急時環境線量情報予測システム SPEEDI (第1世代 SPEEDI)

SPEEDI も含めた各国のシステム開発は、主に1980年代に着手された。当時の計算機能力、オンラインで入手できる気象データ、気象・拡散モデルの研究開発状況などの制限により、先進的システムにおいても、予測計算システムは、観測地点の風速データの内外挿と変分解析により3次元風速場を作成する質量保存風速場モデルと、物質の移流拡散方程式を数値的に解く大気拡散モデルの組合せで構成されていた。そのため、予測性能は現

第1図 SPEEDI の被ばく線量計算の流れ図

図中の気象庁数値予報と地形データから局地気象予報への矢印は、SPEEDI の高度化版で追加された機能。

Present Status and Future Prospect on System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information, SPEEDI: Masamichi CHINO, Takeo ADACHI.

(2003年 4月21日 受理)

第1表 SPEEDI 開発の歴史と特徴

世代	名称	開発年代	予測対象, 予報可能時間	主な特徴
1	SPEEDI	1980～1987	大気中の放射性物質, 日本, 約6時間	文部科学省システムとして実運用
2	WSPEEDI	1987～2000	大気中の放射性物質, 世界, 168時間	国外事故に対応, 情報交換ネットワーク機能による日米ネットワーク
	高度化 SPEEDI		大気中の放射性物質, 日本, 52時間	改良版文部科学省システムとして実運用予定
3	SPEEDI-MP	2000～	大気, 海洋, 陸域を包括的に扱う, 日本および世界, 数週間から数ヶ月(事後評価)	環境影響評価, 事後評価

況解析に近かった。

SPEEDI の計算の流れを, 第1図に示す。はじめに統計手法により気象観測地点での6時間先までの風向風速変動を予報し, 次に, 観測データと予報データを基に質量保存風速場モデルで3次元風速場の予測を行う。濃度計算は, 放射性物質を表す仮想粒子群を放出点から発生させ, 3次元風速場による移流と大気の乱れによる拡散で風下に広がっていく粒子群を追跡する粒子拡散モデルで行う。濃度値は, 計算領域を3次元に分割した格子により構成されるセル内の粒子数をカウントすることで計算できる。このシステムは, 地形の影響を考慮でき, 空間的・時間的な濃度変動を予測できる点で, 当時は画期的なものであった。現在は, 気象モデルや観測, 通信技術の発展により, 気象予報の面で大幅な性能向上が可能であり, 後述する SPEEDI の高度化を行っている。

このようなシステムを実用に供するには, その予測性能を熟知する必要がある。原研では東海村と筑波山周辺において, 平坦地形と複雑地形での野外拡散実験を6年にわたり実施し, モデルの性能評価を行った。その結果, 上記のモデルの予測精度が, 平坦地形でファクタ2, 複雑地形上でファクタ5程度であることを明らかにした⁴⁾。

システム完成後, 原研は旧科学技術庁の委託により, 現地気象データの収集や予測結果の配信のための情報交換ネットワーク整備のための調査と, 福島県および佐賀県などを対象とする SPEEDI ネットワークシステムのプロトタイプ整備を行った。その後, 運用管理は, (財)原子力安全技術センターに引き継がれ, 現在の中央情報処理機能の骨格が形成されるとともに, ネットワークの拡張が順次行われ, 現在, 第2図に示すように, 文部科学省, 原子力安全委員会, 経済産業省, 19地方公共団体, 全国21箇所の緊急時応急対策拠点施設(オフサイトセンター), 原子力緊急時支援・研修センターおよび(財)日本気象協会が, ネットワークに組み込まれている。また, 原子力安全委員会の防災対策指針にその活用が位置付けられ, 国や地方自治体の防災訓練に活用されている。

第2図 SPEEDI ネットワークシステムの
情報交換ネットワーク図

Ⅲ. 世界版 SPEEDI(WSPEEDI)の開発と SPEEDI の高度化(第2世代 SPEEDI)

1. WSPEEDI の開発

1986年4月に旧ソ連邦でチェルノブイリ原子炉事故が発生し, その際大気環境中に放出された放射性物質は北半球の広い範囲に拡散し, 我が国でも検出されている。この事故を契機に, 国境を越えて広範囲に影響をもたらす大規模な原子炉事故が及ぼす環境汚染の状況を早期に予測するため WSPEEDI が開発された⁵⁾。

WSPEEDI は, 世界中の任意の地点からの放射性物質の大気中放出を対象として, 水平方向には1,000 km 四方から半地球規模の範囲, 高さ方向には地上から対流圏を含む10 km の範囲での空気中濃度, 沈着量, および被ばく線量の分布予測を迅速に行う機能を持つ。将来予測は, 気象庁の地球規模数値予報を利用して計算実行時点から約7日先まで可能である。WSPEEDI は, 基本的に SPEEDI と同様に, 質量保存風速場モデルと粒子拡散モデルの組合せであるが, 広域・高高度までを計算領域とするため, 座標系等に工夫がされている。

国際原子力機関(IAEA), 世界気象機関(WMO), 欧州共同体委員会(CEC)は, 共同でチェルノブイルデータをを用いた大気中輸送モデル評価研究(ATMES: Atmospheric Transport Model Evaluation Study)およ

びその後継の欧州拡散実験⁶⁾(ETEX: European Tracer Experiment)を実施し、緊急時対応の長距離大気拡散数値モデルの精度検証を行ってきた。1994年に実施したETEXでは、この実験を実事故と仮定して、人工トレーサガスの放出とともに、欧州約2,000 km四方内に配置した168地点のサンプラーで放出開始から90時間後まで3時間ごとの濃度測定を実施している。実験と並行して、20カ国の24機関から28モデルが3日先までの濃度分布を予報し、その結果を評価部会が客観的に処理して性能評価を行った。評価結果によれば、参加モデルのうち、濃度の分布形を良好に再現したモデルのほとんどには、濃度値を過大評価する傾向がみられたが、WSPEEDIには過大評価、過小評価のどちらの傾向もみられず、トップクラスの評価を得ている。

WSPEEDIは、国境を越える大規模事故時に、同種のシステム間で予測情報を迅速に交換し、相互評価するための情報交換ネットワーク機能をもつ。本ネットワークの情報交換用ワークステーションは、図形出力を保存したデータベースにアクセスして、キーワードから必要な計算結果を引き出せるホームページを有しており、特に、米国エネルギー省(DOE)のARACシステムとの間では電子会議システムによる情報交換も可能である。後述のように、1997年の旧動燃再処理施設の事故や1999年のJCO事故でもARACと共同で大気拡散解析を行った。

2. SPEEDIの高度化

従来のSPEEDIには、前線通過などの急激な広域気象変動や大気の状態の変動が予報できないこと、予測精度が観測点の質と量に大きく依存すること、精度向上のため上層風の観測値が必要等の課題があった。新たな体系では、気象庁の気象数値予報格子点データを初期値および境界条件とする大気力学モデル⁷⁾を導入し、最長52時間後までの風速場、温度場、乱流量を含む3次元気象場の予測を可能にした。気象場の予測に引き続き、質量保存風速場モデルと粒子拡散モデルの組合せにより、濃度および被ばく線量を計算する。これにより、緊急時対応システムの重要な役割である被ばく線量分布の将来予測に必要な局地気象予報は、格段に向上した。

原研は文部科学省からの委託により、SPEEDIの高度化版を原子力安全技術センターのSPEEDIネットワークシステムの中央情報処理計算機へ移植し、現在、同センターによる運用試験が行われている。

3. 実事故等への対応

1998年にスペインのアルゲシラスで起きた¹³⁷Csの焼却事故に対応して、米国のARACと協力して、事故の数日後から事後解析を行い、欧州の研究機関との情報交換を行った。予測図例を第3図に示す。

第3図 WSPEEDIによるスペインのアルゲシラスで発生した¹³⁷Cs焼却事故の解析
大気放出から4日後の地上濃度分布予測。

国内では、1997年に旧動力炉核燃料開発事業団東海事業所のアスファルト固化処理施設で発生した火災・爆発事故で、当時の大気拡散の状況の再現計算を行うとともに、爆発に伴い環境に放出された¹³⁷Csの量を、環境中のサンプルデータと大気拡散シミュレーション計算の比較により推定し、国の事故調査に貢献した⁸⁾。

1999年に発生したJCO臨界事故では、臨界により発生した希ガスとヨウ素の大気中への放出による空気吸収線量率の分布を予測し、モニタリングデータとの比較から放出量を推定し、さらにこれを基に被ばく線量を算出した⁹⁾。臨界事故では短半減期の核種が放出されるため、娘核種の生成についても考慮した計算を行っている。予測結果を、モニタリングポスト数値の時間推移と比較すると、第4図に示すように、その一致度はかなり高いものと判断できる。測定値と1 Bq/hの放出を仮定した希ガスによる空気吸収線量率の計算値の比率から得られる希ガス放出率は、約 8×10^{12} Bq/hであった。線量値推定では、放出された希ガスによる外部被ばく線量を推定した。線量分布を第5図に示す。これによれば、対策が必要な線量や公衆の年間実効線量当量限度に比べ、十分に小さな値となっている。この結果は、事故調査報告書でも、事故時に大気中に放出された放射性物質による被ばく線量が健康に影響を及ぼすものではないことを示す科学的根拠として用いられた。

非原子力分野への適用例としては、三宅島火山ガスの広域拡散予測がある。2000年8月28日に新聞等で大きく取り上げられた関東西部での異臭騒ぎでは、高度化SPEEDIによる再現計算を行い、関東地方西部に高濃度が出現するプロセスを、他に先駆けて明らかにした¹⁰⁾。また、シミュレーションによる予測濃度と、測定結果の

第4図 JCO 事故時の東海村内モニタリングポストでの空気吸収線量率の測定と予測の比較

第5図 JCO 事故により大気中に放出された希ガスによる外部被ばく線量の分布予測

比較から SO_2 の放出量を概算しており、この数値は後日、三宅島周辺で始まった観測結果とよく一致している。これ以降、原研では、民間企業等からの要請もあり、リアルタイムでの火山ガスの大気拡散予測を継続している。朝6時に、ホームページで当日21時までの SO_2 地上濃度分布を公表することで、地方自治体、民間企業等のニーズに対応している。

Ⅳ. 数値環境システム SPEEDI-MP (第3世代 SPEEDI)

アジアでの原子力施設の増加、国内核燃料サイクル施

設の稼動、原子力軍艦の寄港、核テロなど、公衆への被ばくの潜在的可能性は多様化・増加している。放射性物質は気圏、陸圏および水圏を物理・化学的状态を変えて移行・循環し、公衆はその一部をいろいろな過程を経て摂取する。このような状況に包括的に対応するためには、放射性物質の大気・海洋・陸域での移行挙動を連続的に扱うことのできる新たな包括的数値シミュレーション技術の開発が不可欠であり、そのため、現在、原研では第3世代の SPEEDI として、数値環境システム SPEEDI-MP の開発に取り組んでいる。

このシステムは、最新の数値シミュレーション技術

第6図 ナホトカ号の座礁事故による重油流出の再現シミュレーション
事故から、20日後の海面漂流の様子を、粒子分布で表している。

基盤とした大気・陸域・海洋の包括的な物質循環研究ツールであると同時に、様々な環境影響予測のためのシステムの母体となることを目指している。大気・海洋・地表結合モデルの開発では、汚染予測モデルに環境データを提供する大気・海洋・地表モデルを整備するとともに、連続性を持たせるために、これらを連動実行して海表面、地表面での水分や熱の移動、海面付近の気流の海面流への影響等を動的に行うためのモデルカップラを開発している。さらに、原子力事故、火山ガス放出、重油流出などに対応した環境汚染モデルを開発している。

第6図に、1997年1月に日本海沖で発生したナホトカ号座礁による重油流出の再現シミュレーションを示す。海表面を漂う重油の拡散に大きな影響を与える海面流は、海上の気象場の影響を強く受けるため、大気・海洋の結合計算が不可欠になる。SPEEDI-MPによる大気モデルと海洋モデルの連動実行により、当時卓越していた冬の季節風により重油が日本海沿岸に漂着する様子が再現されている。

SPEEDI-MPの完成により、原子力事故との関連では、以下の機能が期待できる。

- (1) 国内事故については、事前の対策計画立案、事故後の風評被害の防止や、長期的な海洋、土壌監視範囲推定のための詳細な事後評価を可能にする。
- (2) 海上での放出事故に対して大気・海洋汚染予測を可能にする。
- (3) アジア地域での事故について、WSPEEDIで簡易的に扱っている降雨等の影響まで詳細に考慮した予測を可能にする。

V. 終わりに

本稿では、TMI-2事故以降、筆者らが行ってきた

SPEEDI関連の一連の研究開発と実事故への対応について述べた。(財)原子力安全技術センターにおいて実運用されているSPEEDIはここ数年のうちに高度化SPEEDIに移行し、被ばく線量分布の将来予測機能は向上するであろう。SPEEDI-MPは、高度化SPEEDIよりもさらに高度な気象モデルが使われているが、筆者は、事故時にリアルタイムで稼働させる予測システムとしては、迅速性や結果の安定性などの観点から、高度化SPEEDIレベルで十分ではないかと考える。これまでの緊急時対応経験から考えて、今後、重要となる緊急時の機能は、予測とモニタリングの連携による、より精度の高い放出量や汚染分布の推定であろう。また、原子力安全委員会や現地活動本部が的確な判断を行うためには、事故状況やモニタリング情報を有機的に利用できる実用的な情報提供環境が整備されるべきである。これらは、緊急時に対応する諸機関のメンバーと十分に協議しつつ、ニーズに合わせた開発と改良、維持が必要であり、SPEEDIの予測結果の配信等で諸機関と情報交換を行う機会の多い、(財)原子力安全技術センター等での開発が望ましいと考える。

また、複数の国内モニタリングポストで異常値を検出し、かつ国内サイトから事故通報がない場合には、国外からの放射性物質の流入が考えられる。そのため、WSPEEDIでは放出源推定の機能が重要になる。これについては、原研で開発が進んでおり、大陸からの有害物質等の発生源推定にも利用されている。北朝鮮の原子炉再稼働や核テロの可能性など原子力に関連した国際情勢にも留意すべき点は多く、WSPEEDIの機能強化の必要性は今後、高まるものと考ええる。

事後評価については、JCO事故後の風評被害の問題がクローズアップされるなど重要さが認識されており、

これについては原研の SPEEDI-MP の果たす役割が大きいものと考え、開発を進めていく予定である。

—参考文献—

- 1) T.J. Sullivan, J.S. Ellis, C.S. Foster, *et al.*, "Atmospheric Release Advisory Capability: Real-Time Modeling of Airborne Hazardous Materials", *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **74**, 2343~2361 (1993).
- 2) K. Imai, M. Chino, H. Ishikawa, *et al.*, *SPEEDI: A Computer Code System for the Real-Time Prediction of Radiation Dose to the Public due to an Accidental Release*, JAERI-1297, Japan Atomic Energy Research Institute, (1985).
- 3) 文部科学省, 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム, パンフレット, (2003).
- 4) M. Chino, H. Ishikawa, "Experimental Verification Study for System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information: SPEEDI, (II); Simulation of Field Tracer Experiments at an Isolated Mountain", *J. Nucl. Sci. Technol.*, **25**, 805~815 (1988).
- 5) M. Chino, H. Ishikawa, H. Yamazawa, *et al.*, *WSPEEDI (Worldwide Version of SPEEDI): Emergency Response System to Predict Radiological Impacts on the Japanese People due to a Nuclear Accident in Abroad*, JAERI-1334, Japan Atomic Energy Research Institute, (1995).
- 6) K. Nodop (Ed.), *Proc. ETEX Symp. on Long-range Atmospheric Transport, Model Verification and Emergency Response*, EUR 17346 EN, (1997).
- 7) 永井晴康, 茅野政道, 山澤弘実, "大気力学モデルを用

いた緊急時の放射能大気拡散予測手法の開発", 原子力誌, **41**, 777~785 (1999).

- 8) 茅野政道, 永井晴康, "動燃アスファルト固化処理施設事故による ^{137}Cs の環境放出量の推定", 原子力誌, **39**, 644~646 (1997).
- 9) JCO 臨界事故調査支援原研タスクグループ, JCO 臨界事故における原研の活動, JAERI-Tech 2000-34, (2000).
- 10) 永井晴康, 寺田宏明, 茅野政道, "2000年8月28日に関東地方で発生した異臭騒ぎと三宅島噴火との関連: 数値シミュレーションによる考察", 天気(気象学会), **48**, 227~230 (2001).

著者紹介

茅野政道(ちの・まさみち)

1979年名古屋大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士課程修了。同年日本原子力研究所に入所し、緊急時環境放射能予測システム SPEEDI と WSPEEDI の開発に従事。現在、東海研究所環境科学研究部大気環境研究グループで、大気、海洋、陸域での物質循環の包括的予測研究を担当。

安達武雄(あだち・たけお)

1970年京都大学大学院理学研究科化学専攻修士課程修了。同年日本原子力研究所に入所し、原子炉燃料・材料の分析法開発に従事。現在、東海研究所環境科学研究部長として、環境中の放射性物質等を対象とした環境動態解明・予測研究、環境保全・修復技術開発、および分析技術開発の総括を担当。

投稿記事の学会誌への掲載について

2003年2月 編集委員会

学会誌への投稿を掲載するかどうかについては、編集委員会が判断するものであると考えています。記事の内容については、著者に責任がありますが、編集委員会が以下のいずれかに該当すると判断した記事については、掲載をお断りすることにしてしています。

- (1) 事実を無視し、あるいは歪曲した意見。
- (2) 文章に論理性がなく、意味不明な場合。
- (3) 掲載することにより、学会の品位に傷がつく恐れがある場合。
- (4) 良識に欠けると思われる意見。例えば、個人あるいは組織への中傷・誹謗、一方的な極め付けなど。
- (5) 美醜、好悪に類する判断が求められている場合。
- (6) すでに掲載された記事と同じ内容を繰り返し主張している場合。
- (7) 商業的な広告・宣伝などを目的とする場合。

なお、編集委員会は、会員の皆様から寄せられる投書には、謙虚に耳を傾け誠実に対応しますが、「原著者または編集委員会に対する非常識な要求(例えば、極めて短い期限での返答を求めていたり、守秘義務に反する情報開示を求めていたりする場合など)」が求められた場合には、編集委員会としては投書に対し、返答できかねる場合があります。