JAEA-Review 2021-021 DOI:10.11484/jaea-review-2021-021



原子力防災における 大気拡散モデルの利用に関する考察

Consideration on Utilization of Atmospheric Dispersion Models for a Nuclear Emergency Preparedness and Response

外川 織彦 大倉 毅史 木村 仁宣 永井 晴康

Orihiko TOGAWA, Takehisa OHKURA, Masanori KIMURA and Haruyasu NAGAI

安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター 防災研究開発ディビジョン

Nuclear Emergency Preparedness Research and Development Division Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness

. . .

Japan Atomic Energy Agency

November 2021

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。 本レポートの成果(データを含む)に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の 条件で利用してください。(<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja</u>) なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課 〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<u>https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en</u>). Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under

the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

原子力防災における大気拡散モデルの利用に関する考察

日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 原子力緊急時支援・研修センター 防災研究開発ディビジョン

外川 織彦、大倉 毅史+1、木村 仁宣、永井 晴康+2

(2021年8月18日受理)

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故を契機として、原子力防災への大気拡散モデルの利 用について、様々な状況とレベルで論争は続いた。しかし、計算モデルによる予測は原子力災害 対策に使用可能かどうかといった二者択一の極端な議論が多く、緊急時対応の科学的検証に基づ いて丁寧に議論されてきたとは言い難かった。一方、日本原子力研究開発機構(原子力機構)内 外には、大気拡散モデルやその解析結果の潜在的利用希望者が少なからず存在することが分かっ たが、複数の種類がある大気拡散モデルについて、その目的と用途に応じた使い分けに関して理 解不足と誤解があることが見受けられた。

本報告書では、原子力防災に利用される大気拡散モデルについて、原子力機構で開発または使 用されているモデルを中心として、モデルの概要や計算手法等を比較するとともに、それらのモ デルを利用した解析例を記述した。これにより、原子力機構内外における大気拡散モデルの潜在 的利用希望者に対して、今後の検討や活動に参考となることを目的とした。

原子力緊急時支援・研修センター:〒311-1206 茨城県ひたちなか市西十三奉行 11601-13

+1 原子力人材育成センター

⁺² 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学ディ ビジョン

Consideration on Utilization of Atmospheric Dispersion Models for a Nuclear Emergency Preparedness and Response

Orihiko TOGAWA, Takehisa OHKURA+1, Masanori KIMURA and Haruyasu NAGAI+2

Nuclear Emergency Preparedness Research and Development Division Nuclear Emergency Assistance and Training Center Sector of Nuclear Safety Research and Emergency Preparedness Japan Atomic Energy Agency Hitachinaka-shi, Ibaraki-ken

(Received August 18, 2021)

Triggered by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident, there have been a lot of arguments among various situations and levels about utilization of atmospheric dispersion models for a nuclear emergency preparedness and response. Most of these arguments, however, were alternative and extreme discussions on whether predictions by computational models could be applied or not for protective measures in a nuclear emergency, and it was hard to say that these arguments were politely conducted, based on scientific verification in an emergency response. It was known, on the other hand, that there were not a few potential users of atmospheric dispersion models and/or calculation results by the models within the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and outside. However, they seemed to have a lack of understanding and a misunderstanding on proper use of different kinds of atmospheric dispersion models.

This report compares an outline of models and calculation method in atmospheric dispersion models for a nuclear emergency preparedness and response, with a central focus on the models which have been developed and used in the JAEA. Examples of calculations by these models are also described in the report. This report aims at contributing to future consideration and activities for potential users of atmospheric dispersion models within the JAEA and outside.

Keywords: Nuclear Emergency Preparedness and Response, Atmospheric Dispersion Model, Gaussian Plume Model, Trajectory Puff Model, Numerical Simulation Model

⁺¹ Nuclear Human Resource Development Center

⁺² Environment and Radiation Sciences Division, Nuclear Science and Engineering Center, Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research

目次

1. 1	はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.) 2.1 2.2	原子力防災における大気拡散モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
3. 1 3.1 3.2 3.3	代表的な大気拡散モデルの概要
4. 2 4.2 4.2 4.2 4.4	大気拡散モデルの利用による解析例291 気象指針モデルを使用した大気拡散計算の試算292 OSCAAR を使用した防護措置の被ばく低減効果の解析353 WSPEEDI-IIを使用した北朝鮮地下核実験の対応404 WSPEEDI-IIを使用した福島第一原発事故の解析44
5. 5.2 5.2	大気拡散モデルの利用に関する今後の課題 ···································49 1 近隣諸国における原子力緊急時対応体制の確立 ··················49 2 RNテロ事象発生時の環境モニタリング方法の整備 ············49
6. 3	おわりに ・・・・・・51
謝辞 参考	·····································
- 1	01

Contents

1.	In	troduction ······1
2.	At	mospheric dispersion models for a nuclear emergency preparedness
9	ai) 1	Atmospheria disponsion models for each phase of a nuclear FPR
2	2.2	Features and comparisons of atmospheric dispersion models ·······6
3.	Οι	atlines of representative atmospheric dispersion models11
g	8.1	Atmospheric dispersion model in the Meteorological Guideline of Japan11
5	3.2	Atmospheric dispersion model in a probabilistic consequence analysis18
ę	3.3	Real-time simulation model for atmospheric dispersion ······24
4.	Ex	camples of calculations using atmospheric dispersion models
4	1.1	Preliminary calculations of atmospheric dispersion
		using a model in the Meteorological Guideline of Japan
4	1.2	Analyses of exposure reduction effects by protective measures using OSCAAR $\cdots 35$
4	1.3	Responses to underground nuclear tests by North Korea using WSPEEDI-II $\cdots \cdots 40$
4	1.4	Analyses of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident
		using WSPEEDI-II ······44
5.	Fu	ature issues on utilization of atmospheric dispersion models ••••••••49
5	5.1	Establishment of a framework for nuclear emergency responses
		in neighboring countries ······49
5	5.2	Development of methodologies on environmental monitoring
		in case of RN terrorist events ······49
6.	Co	oncluding remarks ······51
Acl	kno	wledgements ······53
Rei	fere	ences ······54

1. はじめに

原子力緊急時の準備と対応(Nuclear Emergency Preparedness and Response:以下、原子力 防災という)において、大気拡散モデルは重要な役割を果たすが、開発目的や用途に応じて多数 の種類のモデルが存在する。我が国の原子炉施設の安全審査に用いられる「発電用原子炉施設の 安全解析に関する気象指針」(以下、気象指針という)^{1),2)}では、近距離における簡易的な評価モ デルであるガウス・プルームモデルが用いられ、平常時及び事故時における放射性物質の放出を 想定した空気中濃度が計算されている。このモデルは平坦地形における定常放出に対してのみ有 効である。一方、気象場の時間的・空間的変動を考慮できる大気拡散モデルとして流跡線パフモ デルが開発されており、確率論的リスク評価に関する研究の一環として環境影響評価プログラム 等で使用されている。

原子炉施設の安全審査において実施されている事故を想定した大気拡散解析は、放射性物質の 放出及び気象条件を厳しく設定して被ばく線量値を求める安全側の評価を目的としており、大気 拡散の取り扱いは一定時間内での定常状態を仮定している。しかし、現実の事故に対する原子力 防災対策上からは、対象サイト特有の非定常状態、すなわち海陸風循環、山谷風循環等の条件に おける大気拡散の特徴を把握することが重要であり、複雑地形の影響や時間的・空間的な気象変 動を大気拡散に考慮できる数値解析モデルを用いた評価が必要である。このため、我が国では、 1979年に米国で発生したスリーマイル島原子力発電所事故を契機として、複雑地形や気象変動を 考慮した厳密評価が可能であり、原子炉施設の緊急時に適用できる緊急時環境線量情報予測シス テム¹ (SPEEDI: System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)³⁾が開 発された。

我が国において SPEEDI の存在が一躍大きな注目を集めたのは、平成 23 年 3 月 11 日に発生し た東日本大震災に起因した東京電力(株)福島第一原子力発電所事故(以下、福島第一原発事故 という)の時であろう ⁴⁾。この事故では、多くの周辺住民が避難生活を余儀なくされる事態に至 った。事故当時における政府の住民避難への対応を巡っては多くの批判が出されたが、その中で もSPEEDIの活用を巡る問題は事故対応の失敗の代表のようにマスメディアや国会で批判され続 けた。その内容は、事故当時に放出源情報が得られずに予測結果が防護対策の指標線量と比較で きる絶対値になっていないという理由により、避難や屋内退避等の防護対策に使われなかったこ と、及び予測結果を公開することで起きるかもしれないパニックを恐れて情報公開が遅れたこと に集約されるであろう。これについて、当時の政府は IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告 書 5の中で、事故の教訓として「放出源情報に基づく予測ができないという制約下では、一定の 仮定を設けて SPEEDI により放射性物質の拡散傾向等を推測し、避難行動の参考等として本来活 用すべきであった。また、SPEEDIの計算結果については、当初段階から公表すべきであった。」 と述べている。また、「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会(政府事故調)」、 「福島原発事故独立検証委員会(民間事故調)」も、ほぼ同様の判断を示しており、政府事故調は 報告書の中で避難行動への活用の具体例まで示している。一方、「東京電力福島原子力発電所事故 調査委員会(国会事故調)」は、「放出源情報を欠いた状況での SPEEDI の計算結果は、意思決定

¹ 日本原子力研究所での開発段階では「緊急時環境線量情報予測システム」という名称だったが、 文部科学省での運用段階において「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム」と改称 された。本報告書では開発段階における名称を使用する。

の主な判断根拠にはなりえなかった。政府や専門家には無用な混乱(パニック)や誤用による被 ばくを避ける責任があった。」と正反対の結論を述べている⁶。

上記のような SPEEDI の活用法に関する論争はその後も継続したが、原子力緊急時における大 気拡散モデルの存在や利用方法等について、大気拡散解析の専門家でない研究者や技術者のみな らず一般住民にまで知らしめた。その一方で、計算モデルによる予測は原子力災害対策(避難や 一時移転等の判断)に使用可能かどうかといった二者択一の極端な議論が多く、緊急時対応の科 学的検証に基づいて丁寧に議論されてきたとは言い難い面が多々あった。一方、日本原子力研究 開発機構(以下、原子力機構という)内外からの関連した問合せを通じた議論により、大気拡散 解析の専門家でない研究者や技術者が大気拡散モデルを利用したい、あるいは計算モデルによる 解析結果を利用したいという潜在的利用希望者が少なくないことが分かった。しかし、複数の種 類がある大気拡散モデルについて、その目的と用途に応じた使い分けに関して理解不足と誤解が あることが見受けられた。さらに、前述の気象指針で採用された手法(以下、気象指針モデルと いう)は原子炉施設の安全審査等に使用されており、多くの原子力施設を所有している原子力機 構ではその知識と経験が非常に重要であるにも拘らず、気象指針モデルの使用経験者が年々減少 して現状ではその人数が少なくなっていることが危惧された。

原子力機構内外における上記のようなニーズや状況を鑑み、本報告書では原子力防災への大気 拡散モデルの利用について、原子力機構で開発または使用されているモデルを中心として、モデ ルの概要や計算手法等を比較するとともに、それらのモデルを利用した解析例を記述する。これ により、原子力機構内外における大気拡散モデルや解析結果の潜在的利用希望者に対して、今後 の検討や活動に参考となることを目的とする。最初に本報告書の第2章では、原子力防災の各段 階において利用される大気拡散モデルについて、代表的な大気拡散モデルを概説し、それらの特 徴を比較する。次に第3章では、原子力機構で開発または使用されている大気拡散モデルを中心 として、代表的なモデルの概要(開発の背景と目的、計算手法や特徴等)を説明する。さらに第 4章では、第3章で説明した代表的な大気拡散モデルを利用した解析例を記述する。最後に第5 章では、大気拡散モデルの利用に関する今後の課題(近隣諸国における原子力緊急時対応、及び RN テロ事象発生時の対応)を記載する。

2. 原子力防災における大気拡散モデル

2.1 原子力防災の各段階における大気拡散モデル

原子力防災のために実施される各種の解析・評価・対応は、図 2-1 に示すように、(i) 計画時、 (ii) 緊急時、(iii) 復旧時、という 3 段階に大別される ⁷⁾。各段階における大気拡散モデルの利用 について以下に記述する。

原子力防災の計画時では、大気拡散モデルは原子炉施設の設置許可申請に係る安全審査等に使 用される。このうち、事故時に関する安全審査については、原子炉施設を建設する場合、万が一 事故が起きたとしても安全設計や立地条件が妥当であることを確認するため、設計段階における 原子炉施設の安全性が評価される。ここでは、想定事故(重大事故と仮想事故)に対して、公衆 の被ばく線量を解析することにより、安全設計の妥当性(深層多重防護の原則によって種々の安 全設備の設計がなされているかどうか)、及び立地条件の妥当性(当該原子炉施設と公衆が十分に 離隔されているかどうか)が判断される。この際、着目地点における放射性物質の空気中濃度を 計算するために、気象指針^{1),2)}に記載された手法が使用される。ここでは、ガウス・プルームモデ ルという近距離における簡易的なモデルが一般的に用いられている。

また、確率論的リスク評価² (PRA: Probabilistic Risk Assessment) に関する研究の一環とし て、原子力発電所事故時における公衆の放射線影響を確率論的に評価する環境影響評価 (レベル 3 PRA) 手法が開発されている。この中では、大気に放出された放射性物質による公衆の被ばく 線量を算出するために大気拡散モデルが使用されている。レベル 3 PRA で考慮されている大気環 境における放射性物質の移流・拡散・地表面沈着の各プロセス、及び公衆への主要な被ばく経路 を図 2-1 (i) に示す。レベル 3 PRA では防護対策による被ばく低減効果や放射線被ばくによって もたらされる公衆の健康影響を推定する。これらの結果は、実効的な防護対策の策定、規制にお ける安全裕度の最適化、安全目標の策定等のよる合理的な規制、その他より一層の安全性向上の ためのリスク情報として活用される。ここでは、ガウス・プルームモデルという近距離における 簡易的なモデル、あるいは気象場の時間的・空間的変動を考慮できる流跡線パフモデルが用いら れている。

原子力防災の緊急時では、原子力施設で実際に事故が起こり、放射性物質が環境中へ放出され る可能性がある。環境への放出のうち大気へ放出されるものについては、実時間大気拡散シミュ レーションモデルによる解析が行われる。福島第一原発事故前の原子力緊急時対応では、SPEEDI を使用して放射性物質の大気中拡散やそれに起因する空間線量率の経時変化を予測し、環境モニ タリングの結果とともに、避難や一時移転という防護対策の設定やその範囲を判断することとし ていた。原子力防災の緊急時における放射性物質の大気中拡散・地表面沈着及び環境モニタリン グポストによる空間線量率の測定に関する概略図を図 2-1 (ii) に示す。しかし、実際に福島第一 原発事故が発生した時には、原子炉の状況の推移を予測して SPEEDI に放出源情報を提供する緊 急時対策支援システム (ERSS: Emergency Response Support System)⁸が想定通りに作動しな かったため、予測した放出源情報を利用した SPEEDI による大気中拡散や空間線量率の経時変化

² 機器の故障などを発端として被害の発生に至る事象の組み合わせの連鎖である事象シーケンス を体系的に列挙し、その発生確率及びそれがもたらす影響を推定することにより、原子力施設 等の安全性を総合的に評価する手法である。

を推定することができなかった。このため、SPEEDIでは単位放出率を仮定した予測結果しか提 供できず、また地震による停電や津波等によって当該原発周辺の環境モニタリングデータが入手 できなかったため、防護対策の設定やその範囲を判断する根拠にはなり得なかった。たとえ ERSS が想定通りに作動していたとしても、推定された放出源情報には大きな不確かさが含まれており、 SPEEDIと組み合わせて定量的に妥当な予測結果を提供できたかどうか検証されたことはない。 実際、事故後にも ERSSと同様な過酷事故解析プログラムにより放出源情報の推定が行われてい るが、その結果はまだ定まっていない。福島第一原発事故後に SPEEDI の活用を巡る論争が活発 に行われたが、平成 26 年に原子力規制庁は、原子力緊急時における避難や一時移転等の防護措置 を判断するに当って、SPEEDI のような大気拡散計算による予測結果は使用しないことを決定し た 9 。この基本的考え方に基づいて、防災基本計画、原子力災害対策指針、原子力災害対策マニ ュアル等の記載内容において必要な修正が行われた。これらの修正では、放射性物質の放出前に は原子力施設の状態を踏まえて、緊急時活動レベル(EAL: Emergency Action Level)に応じた 予防的防護措置を講ずることとした。また、放射性物質の放出後には環境モニタリング結果を踏 まえて、運用上の介入レベル(OIL: Operational Intervention Level)に応じた更なる防護措置 を講ずることとした¹⁰。

現状では、実時間大気拡散シミュレーションモデルは、原子力緊急時における避難や一時移転 等の防護措置の判断や決定ではなく、むしろ環境モニタリングデータを使用した逆解析による放 出源情報の推定に最大の能力を発揮する。さらに推定された現実的な放出源情報を用いて、より 広範囲における放射性物質の時間的・空間域分布を推定し、環境モニタリングデータの補完によ る詳細な被ばく線量の推定、放射性物質の大気拡散や地表面沈着のプロセス解析などに広く活用 されている。

原子力防災の復旧時では、緊急時より時間的・空間的に詳細かつ多種類の環境モニタリングデ ータが追加的に取得できる可能性があり、これら追加的な環境モニタリングデータ及び社会環境 データを用いた長期的な被ばく線量評価が中心になるであろう。復旧時において考慮すべき公衆 への主要な被ばく経路を図 2-1 (iii) に示す。ここでは、追加的なデータを収集・解析し、長期的 な被ばく線量評価に必要となる事故サイト特有の様々な環境パラメータを取得することにより、 より現実的な被ばく線量が評価される。これらの結果は、除染活動による被ばく低減の最適化、 現存被ばく状況における参考レベルの設定、避難指示区域等における住民帰還の判断などに活用 されるだろう。このため、復旧時における大気拡散モデルの利用は計画時や緊急時に比べて限定 的になると思われる。しかし、緊急時に比べて追加的な環境モニタリングデータが取得できる可 能性があるため、実時間大気拡散シミュレーションモデルを利用して、緊急時で実施された放出 源情報の推定や各種のプロセス解析等について再評価が行われるだろう。







2.2 大気拡散モデルの特徴と比較

(1) 代表的な大気拡散モデルの種類

2.1 節に記述したように、原子力防災の各段階における解析・評価・対応で大気拡散モデルを 利用する場合には、その目的や用途が異なるため最適なモデルを利用する必要がある。本節では、 代表的な大気拡散モデルを概観し、主な特徴を比較した。代表的な大気拡散モデルとして、ここ では、(i) ガウス・プルームモデル、(ii) 流跡線パフモデル、(iii) 数値解析モデル、という3種類 を取り上げた¹¹⁾。代表的な大気拡散モデルの特徴とその比較を表 2-1 に示す。

ガウス・プルームモデル(表 2·1 の上段)は、放射性プルーム³が風下方向に直線的に流され、 プルーム軸の周りにガウス分布型(釣鐘型関数)に拡がっていくと表現するもので、Pasquillに より提案されたモデル¹²⁾である。このモデルは、放射性物質が定常的に放出され、地形が平坦で あり、建物などの影響が無視でき、かつ風速場が時間的・空間的に一様であるという仮定の基で、 移流・拡散方程式を解析的に解いた場合に得られる大気中放射性物質濃度の分布式で拡散を表現 する。地形の影響や非定常状態に対応できないため、このモデルに対する仮定が充たされること は現実の大気状況ではほとんどないが、一つの式で解析的に空気中放射性物質濃度が計算できる というモデルの取り扱いの容易さにより、数 km 程度という近距離における簡易的な評価モデル として実用的に広く使われている。原子炉施設の安全審査等に使用されている気象指針では、ガ ウス・プルームモデルが採用されており、このモデルを利用した代表的な計算プログラムとして 日本の COQDOQ-FC ^{13),14}、米国の MACCS2 ^{15),16}が挙げられる。

ガウス・プルームモデルと比較して、複雑地形や気象変化にも対応できるような大気拡散モデ ルでは、気流の地形による変化や非定常性を評価するために予め気流計算を行い、これを入力と して大気中放射性物質の移流・拡散方程式を数値的に解く方法が一般的である。気流計算モデル は、大別して対象領域内にある気象観測データを積極的に計算に取り入れて現況を解析する診断 型モデルと、気象観測データを初期条件として用いて流体を支配する各種の物理方程式を数値的 に解く予報型モデルが提案されている。診断型モデルのうち最も簡単なものは内挿モデルである が、内挿により作成した3次元風速場は質量保存則を満たさないため非現実的な収束や発散が生 じることがある。そのため、内挿モデルの結果に変分解析法による最小の修正を加えて計算する 多くの質量保存風速場モデルが提案され、この手法が現在の診断型モデルの主流となっている。 一方、予報型モデルは、気流を支配する運動方程式、熱力学方程式等の物理方程式を数値計算に よって解き、各格子点における風向・風速や乱れ等を予測する。診断型モデルの精度が気象観測 データの質と量に強く依存するのに対して、予報型モデルは気象観測データのない地域でも予測 計算が可能であり、また乱れの構造も予測できるというという特徴がある。

気流計算に続く放射性物質の大気拡散計算については、流跡線パフモデル(表 2-1 の中段)で は、放出された放射性物質が Fick の拡散式に基づいて拡散するという仮定を用いる。診断型の 気流計算モデルと解析解で表される拡散モデルを組み合わせた移流・拡散モデルには、放射性プ ルームをガウス分布型の気塊(パフ)で表わすパフモデルや、ガウス型プルームの断片(セグメ ント)で表わすセグメントモデルが提案されてきたが、ガウス・プルームモデルで直線として扱

³ 気体状またはエアロゾル状の放射性物質が大気とともに煙のように流れていく状態のことであ り、「放射性雲」ともいう。

われてきたプルーム軸の時間的・空間的変化を考慮したものである。流跡線パフモデルは、ガウ ス分布型の丸い気塊(パフ)が時間とともに拡がりながら、時々刻々変化する風によって流され ていくモデルである。このため、流跡線パフモデルでは変動放出にも対応することができる。流 跡線パフモデルを使用した代表的な計算プログラムとして、日本の OSCAAR ¹⁷⁾⁻²⁰、米国の RASCAL ^{21),22}が挙げられる。

一方、数値解析モデル(表 2·1 の下段)では、気流計算に続く放射性物質の大気拡散計算は、 予報型モデルの気流計算と数値解析による移流・拡散計算を組み合わせて実施する。放射性物質 の移流・拡散方程式を数値的に解く場合、放出点が広い範囲に及ぶような一般公害関係の研究で は、差分近似による解法が一般的に用いられてきた。しかし、原子力施設のスタック放出のよう な点源に対しては、放射能を多数の粒子群で表わし、各粒子の移流・拡散で濃度分布を表現する 粒子拡散モデル(ランダムウォークモデル)や PIC (Particle In Cell)モデルが用いられている。 数値解析モデルは、流跡線パフモデルと同様に変動放出にも対応することができ、複雑地形や気 象変動を考慮できる厳密評価モデルとして利用される。また、多くの場合に局地域から広域まで の様々な領域における適用が可能となっている。数値解析モデルを使用した代表的な計算プログ ラムとして、日本の SPEEDI³、WSPEEDI-II²³⁾⁻²⁶及び DIANA^{27),28}、並びに米国の NARAC²⁹⁾ が挙げられる。ただし、DIANA では空間的変動が考慮されておらず、局地域の解析のみに使用 される。

(2) 代表的な大気拡散計算プログラム

上記の代表的な大気拡散モデルを採用した大気拡散計算プログラムを概観し、主な特徴を比較 する。代表的な5種類の大気拡散計算プログラムの特徴とその比較を表2-2に示す。ここでは、 原子力機構及び我が国で開発された OSCAAR、DIANA、SPEEDI及び WSPEEDI-II を概観・ 比較の対象として、これに MACCS2 を加えた。MACCS2 は米国で開発されたものであるが、第 4章の大気拡散モデルの利用による解析で例示しているため、比較対象に加えた。

5種類の大気拡散計算プログラムのうち、MACCS2とOSCAARの本来の目的と用途は、想定 される様々な事故に対して、被ばく線量、防護対策による被ばく線量低減効果及び放射線による 人の健康影響を確率論的に解析することであり、いわゆるレベル 3 PRA プログラムに分類される。 しかし、採用している大気拡散モデルは互いに異なり、MACCS2ではガウス・プルームモデル、 OSCAARでは流跡線パフモデルが使用されている。一方、SPEEDIとWSPEEDI-IIの本来の目 的と用途は、実際に事故が起きて放射性物質が大気中に放出された際の拡散の様子を予測するこ とであり、いわゆる実時間大気拡散シミュレーションプログラムに分類される。双方とも、大気 拡散モデルには数値解析モデルが使用されているが、気流計算モデルが互いに異なっている。 SPEEDIでは診断型モデルと予報型モデルの併用、WSPEEDI-IIでは予報型モデルが使用されて いる。東京電力ホールディングス株式会社(平成 28 年 4 月以前は東京電力株式会社)が開発・ 所有している DIANA は原子力防災の計画時及び緊急時の両方に利用することを想定している。 このプログラムの本来の目的と用途は、想定あるいは実際の事故に対して、放射性物質が大気中 に放出された際の拡散の様子を予測することである。大気拡散モデルには数値解析モデルが使用 されているが、空間的変動が考慮されていない。

5 つの大気拡散計算プログラムは本来の目的と用途が異なるため、その特徴に相違があるのは 言わば当然のことであり、その目的と用途に応じて計算プログラムが設計・開発されている。従 って、原子力防災に対する目的と用途も異なる。MACCS2 と OSCAAR はレベル 3 PRA プログ ラムとして開発されたため、主として原子力防災の計画時における事前解析に利用される。大多 数の気象条件に対する大気拡散計算を実施してその結果について統計解析を行うため、大気拡散 モデルにはガウス・プルームモデルや流跡線パフモデルという近距離における簡易的なモデルが 採用されている。ここでは、地形の影響や時間的・空間的な気象変動は考慮されていないか、あ るいは簡易的に取り扱われている。地形影響や気象変動の取り扱いが単純である反面で、短期間 及び長期間の被ばく線量、防護対策による被ばく線量低減効果、及び放射線による人の健康影響 を推定するモデルが組み入れられている。

一方、SPEEDIとWSPEEDI-IIは実時間大気拡散シミュレーションプログラムとして開発されたため、主として原子力防災の緊急時における実時間解析あるいは回復時におけるその再評価に利用される。大気拡散モデルには数値解析モデルが採用され、地形の影響や時間的・空間的な気象変動を考慮できる厳密評価プログラムとして利用されている。SPEEDIとWSPEEDI-IIでは適用領域が異なっており、SPEEDIは局地域のみ、WSPEEDI-IIは局地域から半地球規模までへの適用が可能である。予報型の数値計算モデルの場合には、将来の現象を予報できるという特徴を持っている。しかし、このモデルは物理方程式を数値的に解くために通常は多くの計算時間を要し、境界条件の取り扱いなどにも難しさがあるという課題も見受けられる。

計算プログラム	米国:MACCS2 (日本:気象指針)	日本:OSCAAR 米国:RASCAL	日本:SPEEDI 日本:WSPEEDI-II 日本:DIANA(空間 的変動がなく局地域 のみの解析) 米国:NARAC
モデルの特徴	近距離における簡易的な評価 ・定常放出 ・平地での近距離(数 km 程度) ・時間的・空間的に一様な風速場 ・移流・拡散方程式の解析解	気象場の時間的・空間的変動を考慮した評価 ・変動放出 ・変動放出 ・移流計算:風速変動に伴う流跡 線解析 ・拡散計算:ガウス分布型の気塊 (パフ)の拡がりの時間変化	複雑地形や気象変動を考慮した厳 密評価 ・変動放出 ・局地域から広域までの複雑地形 ・時間的・空間的に変動する風速 場 ・放射性物質の移流・拡散方程式 を数値的に解析
大気拡散の概念図			
モデルの種類	ガウス・プルームモデル	流跡線ペフモデル	数値解析モデル (粒子拡散モデル)

表 2-1 代表的な大気拡散モデルの特徴とその比較

計算	モデル	本来の目的と用途	地 思 懇	気急	良条件の設定	計算時間 (CDIT TU:)	計算可能期間
SUDVIN	ディュー	挿げよその様々な重装に対した 荘	声 >	~ 1時間41~ ~	まが開始によった「歩	(All L Lille) / (All Lille)	190 時間 (
	シック・	河下 015 212 214 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 1	<	く・1月1月17~	り王间町ぶっし た (次)	〇 · ※J Z HT HJ/ 8 760 ケースを	170 時间(刈炙り4 にか) 平均的た気象条体を用
	ディー	(**、)(***、)(***、)(****)(***************		日道派で入学	メニジンに チャッチード	o 、 し 、 し 、 し 、 、 し 、 、 し 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	いる場合は、120時間以
		健康影響を確率論的に解析する。				, , , ,	上も可能)
OSCAAR	流跡線パ	想定される様々な事故に対して、彼	×	時 〇:時間]変化する。	\triangleleft	気象庁が公表している
	フモデル	ばく線量、防護対策による被ばく線		目			気象データから抽出
		量低減効果及び放射線による人の	•	空 ム:メッ	シュ毎 (メッシュの粗		
		健康影響を確率論的に解析する。		間さは、入	、力気象データに依存)		
DIANA	数値解析	想定あるいは実際の事故に対して、	0	時 〇:時間]変化する。	\bigtriangledown	対象サイト内の気象観
	モデル	放射性物質が大気中に放出された		围			測データ (任意期間)
		際の拡散の様子を予測する。		空 Δ:メッ	シュ毎 (気象観測値を		特定風向風速条件(数時
				間外挿した	- 一様気象場で、地形の		間程度?)
				効果のみ	、考慮)		
SPEEDI	数値解析	実際に事故が起き、放射性物質が大	0	時 〇:時間]変化する。	×:15 分/24 時	気象庁が公表している
	モデル	気中に放出された際の拡散の様子		目		間分の計算	気象データ(約3日先ま
		を予測する。		泊 〇:メッ	シュ毎(地形や海洋を		での予報計算、過去は任
				間 考慮に入	、 れて計算。OSCAAR		意期間)
				よりもメ	(こうが絶なって)		
WSPEEDI	数値解析	実際に事故が起き、放射性物質が大	0	時 〇:時間]変化する。	×:約1時間/	気象庁が公表している
II-	モデル	気中に放出された際の拡散の様子		目		24 時間分の	気象データ(約7日先ま
		を、SPEEDIと同等の局地域から	•	泊 〇:メッ	シュ毎(地形や海洋を	SPEEDI 同等計	での予報計算、過去は任
		半球規模まで予測する。		間考慮に入	、れて計算。降水による	箅	意期間)
				沈着プロ	(セスを詳細に計算)		

表 2-2 代表的な大気拡散計算プログラムの特徴とその比較

JAEA-Review 2021-021

3. 代表的な大気拡散モデルの概要

3.1 気象指針における大気拡散モデル

気象指針の概要

我が国の原子炉施設の安全解析に関する気象指針^{1),2)}は、発電用原子炉施設の安全評価に当って、 当該原子炉施設の平常運転時及び想定事故(重大事故及び仮想事故)時における被ばく線量評価 に際し、大気中における放射性物質の拡散状態を推定するために必要な気象観測方法、観測値の 統計処理方法及び大気拡散の解析方法を定めたものである。原子炉施設の安全評価は、通常運転 時における公衆の被ばく低減対策、安全設計の妥当性評価及び立地条件の妥当性評価から構成さ れる。原子炉施設の安全解析では、原子炉施設から放出される放射性物質による原子炉施設周辺 における公衆の被ばく線量がその対象となるので、当該施設周辺における放射性物質の大気中に おける拡散状態を推定することが重要である。

原子炉施設の安全解析は、平常運転時と想定事故(重大事故及び仮想事故)時について行われ、 その際に使用する気象条件は、それらの現象の特性を考慮して定める。ここでは、想定事故時に おける大気拡散の解析方法を中心にして気象指針の概略を示すが、平常運転時における解析方法 と対比させる方が理解しやすいので、平常運転時の解析方法も併せて簡潔に記述する。平常運転 時における安全解析は、通常、当該原子炉施設周辺における1年間という長期間の被ばく線量を 評価するものであり、この場合には年間の気象データを基に建屋及び地形等が拡散に及ぼす影響、 放出モード等を考慮して現実的な解析を行うこととしている。一方、想定事故時における安全解 析は、想定事故期間中の被ばく線量を評価するものである。この場合には、平均的な気象条件よ りも出現頻度から考慮して、めったに遭遇しないと思われる厳しい気象条件を用いて解析を行う こととしている。

気象観測方法については、(i)気象観測の目的及び区分、(ii)観測項目、(iii)観測方法、(iv)観 測期間、について記載されている。また、観測値の統計処理方法については、a)毎時の気象デー タを統計の基礎として使用するとともに、b)気象データの統計整理について、平常運転時の場合 と想定事故時の場合に分けて整理することとされている。

(2) 空気中濃度算出のための基本方程式

平常運転時及び想定事故時における放射性物質の空気中濃度は、風向、風速、その他の気象条 件がすべて一様に定常であって、放射性物質が放出源から定常的に放出され、かつ地形が平坦で あるとした場合に、放射性物質の空間濃度分布が水平方向、鉛直方向ともに正規分布になると仮 定した基本拡散式を基礎として求める。この基本方程式はいわゆるガウス・プルームモデルと呼 ばれるものであり、その概念図を図 3-1 に示す。すなわち、放射性プルームは風下方向に直線的 に流され、放射性プルームの軸のまわりにガウス分布状(釣鐘型関数)に拡がっていくと表現す るものである。基本方程式は以下のように表される。

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} exp\left(-\lambda\frac{x}{U}\right) exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right]$$
[1]

ここで、 χ は位置 (x, y, z) における放射性物質濃度 (Bq/m^3)、Q は放射性物質の放出率 (Bq/s)、 *U* は放出源高さを代表する風速 (m/s)、 λ は放射性物質の物理的崩壊定数 (s^{-1})、*H* は放出高さ (m)、 σ_y は濃度分布の y 方向の拡がりのパラメータ (m)、 σ_z は濃度分布の z 方向の拡がり のパラメータ (m) であり、放出点からの距離と大気安定度に依存する。 σ_y 及び σ_z は風下距離 x (km) と大気安定度の関数として表されるが、この関数関係を図 3-2 に示す。図における A~F は大気安定度を示し、太陽からの熱射量や夜間における地面からの放熱量と、風による気流の乱 れを表す指標である。我が国の気象指針では、大気安定度は Pasquill-Meade の方法 ³⁰に従って、 拡散しやすいケースから順に「不安定」(A~C)、「中立」(D) 及び「安定」(E~F) の6段階に 分類されている。



図 3-1 ガウス・プルームモデルの概念図

JAEA-Review 2021-021



図 3-2 放射性物質濃度分布の拡がりのパラメータ (左:y 方向、右:z 方向)

(3) 平常運転時における地表空気中濃度の算出

平常運転時の被ばく線量計算に用いる地表空気中濃度は、上記の基本方程式に基づき算出し、 これを基に年間平均濃度を求める。この場合、風が放出点から見て着目地点を含む方位(16方位 区分における着目方位)に向かう場合及びその隣接方位に向かう場合の寄与を合算する。着目方 位の年間平均濃度の計算は、連続放出の場合には、風向別大気安定度別風速逆数の総和を用いる。 一方、間欠放出の場合には、着目方位及びその隣接方位に対する風向出現頻度(3方位の出現頻 度の合計)と年間放出回数を基に、その3方位に向かう合計回数を二項確率分布の信頼度を67% として求め、これを3方位の風向出現頻度で比例配分する。また、風速については、風向別大気 安定度別風速逆数の平均を用いるが、放出回数が多く放出時間が長い場合には、各方位への放出 回数は風向出現頻度に比例するものとする。着目方位の年間平均濃度の計算に当たっては、風向 が1方位内で一様に変動するとして濃度の平均化を行う。

前述のように、ガウス・プルームモデルは平坦地形に対してのみ有効である。そのため、我が 国のような複雑地形に適用する場合には、地形の影響を考慮したモデル用の放出高度(放出源の 有効高さ)を求め、これをガウス・プルーム式の放出高さに入力して濃度計算を行っている。放 出源の有効高さは、排気筒の地上高さ、排気筒の吹上げ高さ、建屋及び地形による影響等を総合 的に検討して定める。敷地の地形が複雑な場合、または放出源に対する建屋等の影響が著しいと 予想される場合には、放出源の有効高さの妥当性を検討するため、それぞれの幾何学的条件を取 り入れた模型を用いて風洞実験を実施する。

(4) 想定事故時における相対濃度の算出

想定事故時の被ばく線量計算に用いる放射性物質の地表空気中濃度は、単位放出率当たりの風 下濃度(以下、相対濃度という)に事故期間における放射性物質の放出率を乗じて算出する。放 射性ヨウ素の吸入に伴う内部被ばく線量計算には相対濃度を用い、その算出方法は次の式の通り である。

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T} \left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i} \, {}_{d}\delta_{i}$$
^[2]

ここで、 χ/Q は実効放出継続時間4中の相対濃度 (s/m³)、*T* は実効放出継続時間 (h)、(χ/Q_i は時刻 *i* における相対濃度 (s/m³)、 $d\delta_i$ は時刻 *i* における風向が当該方位 *d* にあるとき $d\delta_i = 1$ 、他の方位にあるとき $d\delta_i = 0$ である。

 $(\chi | Q)_i$ は実効放出継続時間の長短に応じて計算を行う。短時間放出⁵の場合には、風向が一定 と仮定して次の式より計算する。

$$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i} = \frac{1}{\pi\sigma_{yi}\sigma_{zi}U_{i}}exp\left(-\frac{H^{2}}{2\sigma_{zi}^{2}}\right)$$
[3]

ここで、上式で使用しているパラメータは基本方程式(3.1節(2)の[1]式)で説明されており、下 付き文字 *i* は時刻 *i* を示す。

一方、長時間放出の場合には、放出された放射性物質の全量が一方位内のみに一様分布とする と仮定して次の式により計算する。

$$\left(\frac{\chi}{Q}\right)_{i} = \frac{2.032}{\sigma_{zi}U_{i}x} exp\left(-\frac{H^{2}}{2\sigma_{zi}^{2}}\right)$$

$$\tag{4}$$

$$2.032 = \sqrt{\frac{2}{\pi} \times \frac{16}{2\pi}}$$
^[5]

ここで、x は放出点から着目地点までの距離(m)である。

建屋等の影響がある場合にはこの影響を補正する。また、風洞実験により (χ/Q_i) の補正が必要な場合には適切な補正を行う。

内部被ばく線量計算には97%に相当する相対濃度(以下、97%相対濃度という)を用いる。

⁴ 実効放出継続時間は、事故期間中の放射性物質の全放出量を1時間当たりの最大放出量で除す ることにより求める。

⁵ 実効放出継続時間が1~8時間の場合には、短時間放出とみなして(χ/*Q*)*i* を計算する。ただし、 実効放出継続時間が1時間の場合と1時間を超える場合では、1時間を超える時にその時間内 における1時間毎の移動平均を求める操作を行うため計算方法が若干異なる。実効放出継続時 間が8時間を超える場合は、長時間放出とみなして(χ/*Q*)*i* を計算する。

97% 相対濃度の求め方は以下の通りである。

- ・相対濃度は、毎時刻の気象データと実効放出継続時間を基に、方位別の着目地点について求 める。
- ・着目地点の相対濃度は、毎時刻の相対濃度を年間について小さい方から累積した場合、その 累積出現頻度が97%に当たる相対濃度とする。すなわち、1時間毎の年間気象データ(8,760 ケース)を使用する場合には、相対濃度の低いものから積み上げて8,498番目(8,760×0.97 を初めて超える番目)の相対濃度が97%値として求められる。
- ・ただし、ある方位の1時間毎の相対濃度は毎時刻の気象データから得られるが、その中には 風向が他の方位にあって χ/Q がゼロになるものも含まれる。そのため、着目方位以外の方位 にある χ/Q の頻度が97%以上(着目方位への風向出現頻度が3%未満)あると、着目方 位における97%に相当する χ/Q は得られない。
- ・内部被ばく線量計算に用いる 97 % 相対濃度は、上記の方法で求めた方位別の相対濃度のう ち、全方位における最大の値を使用する。

ある風下方位におけるある距離での 97 % 相対濃度の計算例を図 3-3 に示す。ここでは、南西 方向を風下とした例を示している。この場合、気象の出現回数は合計で 120 回あるので、相対濃 度の低い順から積み上げて 117 番目の χ/*Q* が 97 % 相対濃度となる。



図 3-3 方位毎の 97% 相対濃度の計算例(南西方位を風下としたある距離における例)

上記の方法で求められた 97% 相対濃度に、事故期間における放射性物質の放出率、評価対象 とする年齢群の呼吸率及び線量換算係数を掛けることにより、放射性ヨウ素の吸入に伴う内部被 ばく線量を評価することができる。 気象指針では、着目方位における相対濃度を求めるために計算値の 97% 値が使用されている。 97% 値が採用された経緯と根拠については、気象指針の前身である「原子炉安全解析のための 気象手引」(以下、気象手引という)³¹⁾に若干ではあるが説明されている。気象手引では、気象指 針や立地審査指針³²⁾などが制定される以前に実施された東海炉⁶と JPDR⁷ (ともに茨城県東海村 に建設された原子炉施設)について、97% 値採用の根拠として安全解析の例が記載されている。 当時の安全解析においては、現地における年間の気象データではなく、空気中濃度が明らかに安 全側になるような特定の気象データを設定した。気象手引では、現地における年間の気象データ を用いて空気中濃度を評価する上で、「放射性物質がある方向に運ばれる時、風下の濃度は風速に 逆比例し、また他方位の風の時は実質的に濃度ゼロと考えられる。」ことから風速逆数の累積出現 頻度を計算した結果、「東海炉及び JPDR では、風向を考慮した風速の累積頻度で表わした場合、 いずれも 97% 程度を用いていたと言える。」と結論された。もう少し分かりやすく補足すると、 「東海炉及び JPDR の安全解析では、風向を考慮した風速逆数の累積頻度で表わした場合、いず

れも97%程度の風速逆数を用いて空気中濃度を評価していたと言える。」ということである。

(5) 想定事故時における相対線量の算出

放射性プルームからの γ 線による外部被ばく線量は、地表空気中濃度を用いずに、放射性物質 の空間濃度分布を算出してこれを γ 線量計算モデル^{33),34)}に適用して求める。想定事故時の γ 線に よる外部被ばく線量については、相対濃度(χ/Q)の代わりに、空間濃度分布と γ 線量計算モデ ルを組み合わせた相対線量(D/Q)を使用して、相対濃度と同様な考え方により求める。 γ 線に よる外部被ばく線量計算に用いる相対線量は次の式で算出する。

$$\left(\frac{D}{Q}\right)_{i} = K_{1}E\mu_{en} \int_{0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^{2}} B(\mu r) \frac{\chi_{i}(x', y', z')}{Q} dx' dy' dz'$$
[6]

ここで、(*D*(*Q*)*i* は時刻*i* における相対線量(μ Gy/Bq)、*D* は計算地点(*x*, *y*, 0) における空気カ ーマ率(μ Gy/h)、*Q* は放射性物質の放出率(Bq/h)、*K*₁ は空気カーマ率への換算係数(dis·m³· μ Gy/(MeV·Bq·h))、*E* は γ 線の実効エネルギー(MeV/dis)、 μ en は空気に対する γ 線の線エネ ルギー吸収係数(m⁻¹)、 μ は空気に対する γ 線の線減衰係数(m⁻¹)、*r* は放射性プルーム中の任 意の点(*x*, *y*, *z*) から計算地点(*x*, *y*, 0) までの距離(m)、*B*(μ *r*) は空気に対する γ 線の再生係 数、 χ (*x*, *y*, *z*) は時刻 *i* における放射性プルーム中の任意の点(*x*, *y*, *z*) での放射性物質の濃度 (Bq/m³) である。このうち、空気に対する γ 線の再生係数 *B*(μ *r*) は次の式で算出する。

⁶日本原子力発電株式会社(原電)が運営していた東海発電所を指しており、日本初の商業用黒 鉛炉かつ商業用原子力発電所である。炉型は英国製の黒鉛減速炭酸ガス冷却型原子炉(GCR) で、これに耐震強度の増強など日本独自の改良を加えたものである。平成10年3月に運転を終 了し、原子炉解体プロジェクトが進められている。

⁷ JPDR (Japan Power Demonstration Reactor)は、かつて日本原子力研究所が運転した日本初の発電用原子炉である。米国ゼネラル・エレクトリック(GE)製の沸騰水型原子炉で、熱出力は 4.5 万 kW(電気出力 1.25 万 kW)だった。昭和 38 年 10 月に日本で初めて原子力による発電に成功した。昭和 51 年 3 月に運転を終了し、昭和 61 年から平成 8 年にかけて解体された。

$$B(\mu r) = 1 + \alpha(\mu r) + \beta(\mu r)^{2} + \gamma(\mu r)^{3}$$
[7]

ここで、α、β及びγは定数値である。

γ線による外部被ばく線量計算に用いる 97 % に相当する相対線量(以下、97 % 相対線量という)については、本節(4)に示した 97 % 相対濃度と同様な方法により求める。

3.2 確率論的事故影響解析における大気拡散モデル

(1) OSCAAR 開発の背景と目的

日本原子力研究所(以下、原研という)では、確率論的リスク評価(PRA)に関する研究の一 環として、原子力発電所事故時における公衆の放射線影響を確率論的に評価する環境影響評価手 法(レベル 3 PRA)の確立を目指し、平成 2 年に確率論的環境影響評価プログラム OSCAAR (Off-Site Consequence Analysis code for Atmospheric Release in reactor accident)を開発し た¹⁷⁾⁻²⁰⁾。そして、確率論的環境影響評価プログラムの国際比較計算への参加、チェルノブイリ原 子力発電所等で得られた環境中の実測データを基にした、被ばく評価上重要な I-131 や Cs-137 の食物連鎖を含む生態圏移行モデルに関する検証、特定シナリオに対してモンテカルロ法に基づ く入力パラメータの不確実さ伝播解析・感度解析手法を導入したレベル 3 PRA に係わる不確実さ 評価などを通じて、OSCAAR プログラムの適用性能の確認や機能の検証作業を行ってきた。

(2) 計算プログラムの構成

OSCAAR の構成と計算の流れを図 3-4 に示す。OSCAAR は原子力発電所事故時に大気へ放出 された放射性物質の環境中移行、それに伴う公衆への被ばく、被ばく集団の健康影響等の影響評 価を行うための一連の計算モジュールとデータファイルで構成されている。OSCAAR は原子炉事 故時の確率論的環境影響評価プログラムであり、大気拡散・地表沈着モデルは全体を構成する一 連の計算モジュールの一つである。



図 3-4 レベル 3 PRA プログラム OSCAAR の構成と計算の流れ

各計算モジュールの機能は以下の通りである。大気拡散・地表面沈着解析モジュールでは、放 出源情報と気象データを用いて、大気中における放射性物質の移流・拡散及び地表面への沈着を 解析する。解析結果である放射性物質の大気中濃度及び地表面沈着量を次のモジュールに引き渡 す。ここで重要な入力データである大気への放出源情報については、原子力機構安全研究センタ ー(以下、安全研究センターという)ほかが実施しているレベル2 PRA の解析結果⁸、福島第一 原発事故の評価から得られたデータなどが用いられる。早期被ばく線量算定モジュールでは、放 射性プルームの通過中あるいは通過後の短期間における早期の個人の被ばく線量を算定する。被 ばく経路として、放射性プルームからの外部被ばく、地表に沈着した放射性物質からの早期の外 部被ばく、放射性プルームの吸入による内部被ばくの3経路を考慮している。長期被ばく線量算 定モジュールでは、長期に渡って環境中に残留する長半減期の放射性核種に起因する個人の被ば く線量を算定する。被ばく経路として、地表に沈着した放射性物質からの長期の外部被ばく、地 表面から再浮遊した放射性物質の吸入による内部被ばく、汚染された食物の摂取による内部被ば くの3経路を考慮している。被ばく低減効果解析モジュールでは、事故時の被ばく線量をより現 実的に評価するため、屋内退避、避難、一時移転、安定ヨウ素剤の配布、食物摂取制限といった 防護対策の実施による被ばく低減効果を解析する。健康影響推定モジュールでは、放射線被ばく によってもたらされる、早期の身体的影響、晩発性の身体的影響及び遺伝的影響を推定する。こ こで示した計算モジュールのうち、大気拡散・地表面沈着モデル、それに関連した気象サンプリ ングや被ばく線量計算結果の整理について以下に述べる。

(3) 大気拡散・地表面沈着モデル

原子力発電所事故時において、放射性物質は原子炉建屋から直接あるいは排気筒を通じて大気 中に放出される。そのため、放出された放射性物質の大気中移流・拡散及び地表面への沈着を解 析し、時間的・空間的な分布を求めることが、その後の被ばく線量算定や健康影響推定で重要と なる。解析に用いる大気拡散モデルとして、レベル3PRA プログラムでは計算の簡便さ及び拡散 パラメータに関する実験データの豊富さという点からガウス・プルームモデルが用いられてきた。 そして、様々な放出源情報を対象に、膨大な数の気象条件に対する計算を繰り返し行うため、計 算コストの観点から対象サイトの気象データのみを使用する直線プルームモデルが現在でも広く 用いられている。しかし、放射性物質が長時間に渡って放出される場合や放出率の時間変化を伴 う場合、対象サイトの気象データに依存する直線プルームモデルの適用には限界がある。そのた め、OSCAAR の大気拡散・沈着面沈着解析モジュールでは、気象場の時間的・空間的変動を考慮 して放射性物質の大気中移流・拡散を解析するガウス型の流跡線パフモデルを採用している。流 跡線パフモデルの概念図を図 3-5 に示す。このモデルは、連続した放射性物質の放出プルームを 適当な時間間隔で分割してそれぞれ独立の放出パフとし、入力となる気象場の情報を基に放射性 物質の移流・拡散を解析して、評価地点における大気中濃度あるいは地表沈着量を各パフからの 寄与の合計として求める方法である。位置(x, y, z)における放射性物質の全量が Q(t) であるパ フiの水平方向及び鉛直方向の拡散がガウス分布であると仮定すると、評価地点(x, y, z)におけ る時刻 t の濃度 $\chi(x, y, z, t)$ は以下の式で求められる。

⁸ PRA 手法は、発生し得る起因事象に対する炉心損傷頻度を評価する「レベル1PRA」、レベル1 PRAの評価結果に基づき、格納容器機能喪失に至る事故シナリオの発生頻度及び放出源情報(ソ ースターム)を評価する「レベル2PRA」、レベル2PRAの評価結果に基づき、被ばくによる リスクを評価する「レベル3PRA」というように、事故の進展に応じて3段階に分けることが できる。

$$\chi(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^{N} \chi_i(x, y, z, t)$$
[8]

$$=\sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{i}(t)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_{h,i}^{2} \sigma_{z,i}} exp\left[-\frac{(x_{i}-x)^{2}+(y_{i}-y)^{2}}{2\sigma_{h,i}^{2}}\right] exp\left[-\frac{(z_{i}-z)^{2}}{2\sigma_{z,i}^{2}}\right]$$
[9]

ここで、 χ_i は放射性核種 *i* の空気中濃度 (Bq/m³)、*N* は評価対象核種の数、 $\sigma_h(t)$ 、 $\sigma_n(t)$ は 放出プルームの水平及び鉛直方向の拡がりの拡散パラメータである。



図 3-5 流跡線パフモデルの概念図

大気拡散・沈着面沈着解析モジュールで用いられる気象データは気象庁の数値予報データ(GPV データ:Grid Point Value)を基に作成され、スケールの異なる2つの格子網で構成される。広 域風速場データには、日本全土を含み水平格子間隔約150kmで、3つの気圧面(925、850及び 700 hPa)における高度と上層風の現況解析値(9時と12時)及び予報値(3時間毎)が含まれ る。また、対象サイトを含む約400km四方の狭域気象場データには、格子間隔約20kmで、地 上風と大気安定度の現況解析値(9時と12時)及び予報値(1時間毎)が含まれる。OSCAAR の評価点を構成する距離別及び方位別の同心円メッシュにおける平均降水量データは、降水量の 予報値(1時間毎)を基に与えられる。また、放出点近傍の建屋が拡散に及ぼす影響、熱エネル ギーを伴った放出物質の浮力による上昇の効果等も考慮している。降雨の洗浄効果による湿性沈 着は、同心円メッシュで与えた降雨強度によって変化する洗浄係数を用いたモデルで評価する。 そのため、ガウス型直線プルームモデルと異なり、対象サイトから離れた領域における降雨の影 響も的確に評価できる。

(4) 気象サンプリング

原発事故時に大気へ放出された放射性物質の時間的・空間的な分布は、放出時の気象条件(風 や大気の状態、降雨の有無等)に大きく左右される。レベル3PRAでは、対象サイトにおける事 故発生時に出現可能なあらゆる気象条件に対して事故影響を計算し、その気象条件の出現確率を 考慮してその影響の頻度分布が与えられる。しかし、出現する気象条件は無数にあるため、すべ ての気象条件に対して計算することは原理的に不可能なだけでなく、計算資源の観点からも現実 的ではない。そのため、レベル3PRAの実施に当っては、対象サイトで起こり得る広範な気象条 件の中から評価に用いる気象条件を抽出することが必要になる。以上のような、レベル3PRAの 解析において行う気象条件の抽出を気象サンプリングと言う。

流跡線パフモデルを採用する OSCAAR は、放出開始から評価対象領域外に出るまでの気象条 件の時間変化(気象シーケンス)を一つの気象条件として扱う。つまり、気象サンプリングとは、 評価に用いる気象シーケンスの出発点(放出開始時刻)を抽出することである。この時、出現可 能な気象シーケンスの全範囲を代表し、できるだけ正確な事故影響の頻度分布を与えることがで きるように選択しなければならない。気象サンプリングには、事故開始時刻をランダムに選択す るランダム・サンプリング法や一定の時間間隔毎に選択するサイクリック・サンプリング法など がある。これらの方法では、出現頻度は小さいものの大きな事故影響が生じる気象シーケンスが 抜け落ちることを防ぐため、相当数の気象シーケンスを選択する必要がある。

(5) 被ばく線量計算結果の整理

OSCAAR 解析において、抽出したすべての気象条件を用いて被ばく線量を算出してその結果を 評価する場合、あるいは設定された防護対策による被ばく低減効果を評価する場合には、図 3-6 に示す方法を用いて被ばく線量の計算結果を放出点からの距離によって整理して図示する。

最初に、1 つの気象条件を用いて OSCAAR による被ばく線量計算を行い、放出点(原子力施設) からの距離毎に全方位のうち最大の被ばく線量値を抽出する(図 3-6 の左上)。次に、抽出したす べての気象条件について OSCAAR による計算を繰り返し、放出点からの距離 X における被ばく 線量値を最小値から順に並べて、気象条件の出現頻度として整理する(例えば、図 3-6 の左下。 横軸に気象条件の出現頻度、縦軸に被ばく線量値を小さい順に並べたもの)。この際、被ばく線量 値の累積頻度の 5 %、50 % 及び 95 % を求めておく。最後に、この結果を整理し直し、被ばく線 量値を放出点からの距離毎に図示する(例えば、図 3-6 の右。横軸に放出点からの距離、縦軸に 被ばく線量値)。この際、必要に応じて被ばく線量値には累積頻度の 50 % や 95 % の範囲を示す。 図 3-6 の右に示した図において、被ばく線量値と防護措置の指標を比較・解析することにより、 防護対策の実施方法と有効な範囲、被ばく線量の低減効果についての検討に活用することができ る。



図 3-6 被ばく線量計算結果の放出点からの距離 X による整理

(6) 計算結果の整理方法に関する気象指針との比較

被ばく線量の計算結果の整理方法について、気象指針と OSCAAR では考え方や方法がいくつ か異なっている。第一の相違点は、最大と見なす被ばく線量値である。気象指針が 97 % 値を用 いている一方で、OSCAAR では 95 % 値を用いている。気象指針において 97 % 値が採用された 経緯と根拠は、3.1 節(4)でも述べた通り、気象手引に若干ではあるが説明されており、茨城県東 海村に建設された 2 つの原子炉施設の安全評価における解析結果が根拠となっている。一方 OSCAAR で採用された 95 % 値については、95 % という値そのものに意味がある訳ではなく、 使用した気象条件の相違による被ばく線量値の不確かさの度合いを示す指標の一つ(被ばく線量 値の累積頻度の 5 %、50 % 及び 95 %)である。

第二の相違点は、被ばく線量値の計算方法及び表示方法である。気象指針では最初に方位別の 着目地点において相対濃度(γ線による外部被ばく線量計算の場合には相対線量)の97%値を 求め、その97%値のうち全方位における最大の値を被ばく線量計算に用いる。一方 OSCAAR で は、全方位に渡る最大の被ばく線量値を距離毎に抽出して、被ばく線量値を気象条件の出現頻度 で昇順に整理する。次に、被ばく線量値を放出点からの距離毎に整理し直し、被ばく線量値には 気象条件の相違による不確かさを表す指標(累積頻度の50%、95%等の範囲)も併せて示され る。気象指針と OSCAAR の主たる相違は、被ばく線量値が方位別に計算・表示されるか距離別 に計算・表示されるかということであり、これは各々の計算プログラムの用途の違いによると考 えられる。気象指針は原子炉施設の安全評価に使用されるため、最終的には最大の被ばく線量値 が着目される。ただし、我が国の原子炉施設のほとんどは海岸に立地されているので、その最大 の被ばく地点が陸側にあるのか海側にあるのかを判断する必要がある。このため気象指針では、 被ばく線量値を方位別に計算・表示する方がより好都合であろう。一方 OSCAAR では、4.2 節に 記述するように、被ばく線量値と防護措置の指標を比較・解析することにより、防護対策の実施 方法と有効な範囲、被ばく線量の低減効果について、放出点からの方位別でなく距離別に検討す るため、被ばく線量値を距離別に計算・表示する方がより有効であろう。 3.3 実時間大気拡散シミュレーションモデル

(1) WSPEEDI-II 開発の背景と経緯

原研では、1979年に発生したスリーマイル島原子力発電所事故(米国)を契機に、緊急時環境 線量情報予測システム SPEEDI の開発を開始し、昭和 59年に基本システムを完成させた ³⁾。 SPEEDI は、国内の原子力発電所等の事故により環境中に放出された放射性物質の拡散状況や被 ばく線量を迅速に予測計算するシステムであり、我が国で初めて開発された緊急時のための実時 間大気拡散シミュレーションシステムである。昭和 61年に文部科学省の委託により SPEEDI は 原子力安全技術センターへ移管され、運用が開始された。その後原研により SPEEDI は機能向上 等の改良が進められた。平成 11年の茨城県東海村の JCO 臨界事故を受けて、平成 12年に施行 された災害対策基本法 ³⁵⁾に基づく原子力災害対策マニュアル ³⁶⁾において、SPEEDI は国の原子力 防災対策を支援する中核的システムとして正式な位置付けが確立した。

SPEEDIの基本システムの完成後、1986年にチェルノブイリ原子力発電所事故(旧ソ連、現ウ クライナ)が発生した。この事故により環境中に放出された放射性物質は、国境を越えて非常に 広範囲に拡散し、ウクライナやロシア等に留まらず我が国にまで及んだ。SPEEDIでは、事故サ イトを含む約 100 km 四方までの計算領域を想定しているため、このような非常に広範囲に及ぶ 拡散状況を予測することはできない。このチェルノブイリ原子力発電所事故を契機に、広域に渡 る放射性物質の拡散を迅速に予測する必要性が認識されるようになり、原研では世界の任意地点 における原子力施設等の事故に対応可能な世界版 SPEEDI (WSPEEDI: Worldwide version of SPEEDI)の開発を開始し、平成 9 年に世界版緊急時環境線量情報予測システム第 1 版 (WSPEEDI-I)が完成した。

WSPEEDI-I は、原研で開発された質量保存風速場モデル WSYNOP と粒子型大気拡散モデル GEARN で構成されている。WSPEEDI-I の完成により、地球規模の複雑な拡散現象の計算を可 能にした。WSPEEDI-I は、チェルノブイリ原子力発電所事故への適用や欧州広域拡散実験 ETEX への参加により計算性能が検証されたほか、スペインのアルヘシラスでの¹³⁷Cs 誤焼却事故にお ける大気拡散解析に使用された。これらの使用経験から、大気渦による拡散プロセスや降雨によ る湿性沈着プロセスの再現精度、使用する気象データの精度が気象予測計算に大きく依存するこ とによる局地的な拡散計算の精度、緊急時対応システムとして重要となる放出源の推定機能の必 要性など、WSPEEDI-I における課題が明らかになった。原研ではこれらの課題を解決するため の研究が進められ、原子力機構となった後、平成 21 年 2 月に世界版緊急時環境線量情報予測シス テム第 2 版 (WSPEEDI-II) を完成させた ²³⁾⁻²⁶⁾。SPEEDI、WSPEEDI-I 及び WSPEEDI-II で は、大気拡散モデルには数値計算モデルが用いられており、それぞれの計算プログラムの特徴を 表 3-1 に示す。

計算プログ	グラム	SPEEDI	WSPEEDI-I	WSPEEDI-II	
気象モ	デル	大気力学モデル (PHYSIC) 質量保存風速場モデル (WIND21)	質量保存風速場モデル (WSYNOP)	大気力学モデル (MM5)	
大気拡散。	モデル	粒子拡散モデル (PRWDA21)	粒子拡散モデル (GEARN)	粒子拡散モデル (GEARN)	
計算領域		事故サイト周辺 (25 km~100 km 四方、鉛直 2,000 m)	狭域を除く 地球上の任意の領域 (水平数百 km〜数千 km、鉛直 10 km)	地球上の任意の領域 (水平数十 km~数千 km、鉛直 10 km)	
最小	水平	$250 \mathrm{~m}$	10 km 程度	1 km 程度	
解像度9	鉛直	10 m	20 m 程度	20 m 程度	
枚 二 粉 9	水平	100×100	100~200 程度	100~200 程度	
俗丁级。	鉛直	20 層	20~30 層程度	20~30 層程度	

表 3-1 SPEEDI、WSPEEI-I 及び WSPEEDI-II における特徴の比較

(2) WSPEEDI-II の構成と特徴

WSPEEDI-IIは、気象モデルとして米国ペンシルバニア州立大学(PSU)及び米国大気研究セ ンター(NCAR)で開発された MM5 を導入しており、大気拡散モデルは WSPEEDI-I で採用し ていた GERAN を MM5 の出力に対応できるよう改良したモデルが導入されている。図 3-7 に WSPEEDI-II の構成と計算モデルを示す。新たに導入された MM5 で計算される 3 次元気象場計 算では雲生成プロセスや降水プロセス等が詳細に考慮されており、より高精度な乱流拡散や湿性 沈着が計算できるようになっている。局地的な拡散計算における課題については、MM5 及び改 良版 GEARN に実装されているネスティング機能により解決されている。ネスティング機能とは、 局地的な領域について効率的かつ高解像度で計算する機能である。格子間隔の大きい広域計算領 域の中に詳細格子の局地計算領域を設定し、領域間の大気及び放射性物質の流入出の整合性を考 慮して計算することで、局地的な領域における拡散計算の精度を向上させるだけでなく、計算コ ストが削減され迅速な影響評価が可能となった。また WSPEEDI-II ではモニタリングポスト情報 からの放出源推定が可能となっており、放出点、放出開始時刻、放出継続時刻、放出量の4つの 放出条件を推定対象としている。その他、国外システムとの間で予測結果の比較検討ができる国 際予測情報交換機能、MM5 の計算で使用される全球数値予報データ(GPV データ)を GPV 配 信機関から WSPEEDI-II に自動転送する機能、ウェブベースの GUI によるシステム操作機能な どが実装され、より利便性の高いシステムとなった。出力機能については、大気中濃度(Bg/m³)、 地表沈着量(Bq/m²)、空気吸収線量率(µGy/h)、外部被ばく線量(mSv)、吸入摂取による内部

⁹ 最小解像度及び格子数はユーザによって設定するパラメータであり、ここでは典型的な設定範囲を記述している。

被ばく線量(mSv)について計算結果を描画出力することができ、出力時間間隔は任意に設定できる。

WSPEEDI-II は、欧州広域拡散実験 ETEX のデータやチェルノブイリ原子力発電所事故時の ¹³⁷Cs データを用いたモデル検証等により、WSPEEDI-I と比較して高解像度化による精度向上や 高度な物理プロセスの考慮による再現性の向上が実証されており、福島第一原発事故の大気拡散 解析や、北朝鮮地下核実験の大気拡散予測で使用された実績がある。WSPEEDI-II の北朝鮮地下 核実験及び福島第一原発事故への適用については、4.3 節及び 4.4 節にそれぞれ解析例を示す。



図 3-7 WSPEEDI-II の構成と計算モデル

(3) WSPEEDI-II 自動計算システムの概要

北朝鮮が地下核実験を実施した場合、防衛省の自衛隊機による航空モニタリングを効果的かつ 効率的に実施するための参考情報として、原子力機構は、原子力規制庁(あるいは文部科学省) から、特定の放射性物質の一定単位放出率を仮定した大気拡散予測計算を実施することを要請さ れる。北朝鮮地下核実験対応の体制を構築した当初は、WSPEEDI-IIに計算領域、気象条件、放 出条件、出力パターン等を手動で設定し、大気拡散予測計算を実施していた。しかし、不測のタ イミングで実施される地下核実験の突発性や、10日前後に渡る対応の継続性を考慮し、原子力機 構原子力基礎工学研究センター(以下、基礎工センターという)では北朝鮮地下核実験対応に特 化した計算システムとして、WSPEEDI-II 自動計算システムを開発した。

WSPEEDI-II 自動計算システムでは、主に文部科学省と原子力機構の協議の下、これまでの北 朝鮮地下核実験対応の経験に基づいて、地下核実験時の放射性物質の大気拡散状況を把握するた めに最適と考えられる計算条件が予め設定されている。計算条件の中で、計算領域や放出放射性 物質のように基本的に毎回の地下核実験対応において固定的な計算条件と、放出位置や放出開始 時刻のように可変的な計算条件がある。固定的な計算条件は自動計算システム内で自動設定され ており、可変的な計算条件は担当者によって必要に応じて変更可能となっている。

WSPEEDI-II 自動計算システムで設定すべき計算条件は、(i)計算範囲、(ii)水平格子数及び水 平解像度、(iii)放出位置、(iv)放出高度、(v)対象核種、(vi)放出量、(vii)出力高度、(viii)放 出開始時刻及び放出継続時間、(ix)出力時刻、という9個の条件である。計算条件の設定根拠に ついては他の関連文献を参照されたい^{37),38)}。すべての計算条件は自動計算システム内で自動設定 されているが、放出位置と放出開始時刻は担当者によって必要に応じて変更可能となっている。 北朝鮮地下核実験における放射性物質の大気拡散予測計算の内容を表 3-2 にまとめた。

計算 実施日	対象核種	放出時間※1	出力結	果**2	出力 数
初日	¹³¹ I ¹³³ Xe ¹³⁷ Cs <3 パターン>	計算開始時刻から 24 時間後まで	2日目の 9、12、15、18時 <4パターン>	地上 上空 1,000 m 上空 2,000 m 上空 3,000 m <4 パターン>	48
2 日 目	¹³¹ I ¹³³ Xe ¹³⁷ Cs <3 パターン>	初日の計算開始時刻 から24時間後まで 2日目の0時から 同日の24時まで	3日目の 地上 3日目の 上空 1,000 m 9、12、15、18時 上空 2,000 m <4 パターン> 上空 3,000 m		48
3 日目 以降	¹³¹ I ¹³³ Xe ¹³⁷ Cs <3 パターン>	計算実施前日の 0時から 同日の24時まで 計算実施日の 0時から 同日の24時まで	計算実施翌日の 9、12、15、18時 <4 パターン>	地上 上空 1,000 m 上空 2,000 m 上空 3,000 m <4 パターン>	48

表 3-2 北朝鮮地下核実験における放射性物質の大気拡散予測計算の内容

※1 放出条件は一定単位放出率(1 Bq/h)を想定している。

※2 出力対象は大気中の放射性物質濃度(Bq/m³)である。

WSPEEDI-II 自動計算システムは、表 3・2 に示すように、各計算実施日によって放出時間や出 カパターンといった計算条件が異なるため、核実験実施当日用の計算モード、核実験実施 2 日目 用の計算モード、核実験実施 3 日目以降用の計算モードという 3 つの計算モードが用意されてい る。これらの計算モードをそれぞれ、初日モード、2 日目モード、3 日目以降モードという。また、 核実験実施当日用の計算モードには例外として初動モードという計算モードが用意されており、 前述した可変的な計算条件の 1 つである放出位置の設定を変更し、再計算を実施する必要がある 場合に使用する。

北朝鮮地下核実験対応では、決められた時間内に大気拡散予測計算を実施して拡散予測図を報 告資料にまとめ、原子力機構原子力緊急時支援・研修センター(以下、支援・研修センターとい う)の幹部の確認と承諾を得た上で、原子力規制庁へ提出する必要がある。しかし報告資料を作 成するためには、WSPEEDI-II 自動計算システムで計算された拡散予測図を Microsoft Word®に 貼付して体裁を整えるなど、多大な時間と労力を要する。また、状況に応じて計算モードや放出 条件の設定・変更が求められるが、Linux サーバ上での操作を必要とするため、担当者全員が操 作することは困難である。そのため、支援・研修センターでは、地下核実験対応時において担当 者全員が迅速かつ正確に対応できるように、上記の対応作業を支援するツールとして、「報告資料 作成ツール」と「計算モード切替ツール」を作成した。

4. 大気拡散モデルの利用による解析例

4.1 気象指針モデルを使用した大気拡散計算の試算

(1) 大気拡散計算の試算の目的

平成 24 年に原子力規制庁は、原子力発電所の立地道府県等が地域防災計画を策定するに当り、 防災対策を重点的に充実するべき区域を決定するための参考情報を得るために、大気拡散計算の 試算を実施した^{39),40}。この試算は、原子力発電所の事故により放出される放射性物質の量、放出 継続時間などを仮定し、周辺地域における放射性物質の大気拡散の様子を推定するものであった。 しかし、予測計算上の仮定や限界があるので、この試算はあくまでも目安として参考にすべき情 報であることに留意が必要である。ちなみに、平成 23 年 3 月 11 日に発生した福島第一原発事故 を踏まえ、原子力安全委員会報告(平成 24 年 3 月)⁴¹⁾では、防災対策を重点的に充実するべき区 域の目安について、それまでの目安である原子力施設から 8~10 km までの区域を見直し、概ね 30 km までの区域とすることとしている。

ここで実施した大気拡散計算の試算は、以下のような精度や信頼性に仮定や限界があることを 踏まえている。

- ・地形データを考慮しておらず、気象条件についても放出地点において放射性物質がある一方 向に継続的に拡散すると仮定していること。
- ・試算結果は個別の具体的な放射性物質の拡散予測を表しているのではなく、年間を通じた気象条件などを踏まえた総体としての拡散傾向を表したものであること。
- ・初期条件の設定(放射性物質の放出シナリオ、気象条件、試算の前提条件等)や評価手法に より解析結果は大きく異なること。
- ・各対象サイトで実測した1時間毎の年間気象データ(8,760個=365日×24時間)を用いて いるため、すべての気象条件をカバーできるものではなく、また今後の事故発生時の予測を したものでもないこと。

(2) 大気拡散計算の条件と方法

大気拡散計算の試算では、米国で開発されて米国原子力規制委員会(NRC)においても大気拡 散や被ばく線量を評価する際に使用される MACCS2^{15),16)}を利用した。これは、年間の大気安定 度や風向・風速などの気象条件から、放射性物質の大気拡散の傾向を試算するものである。 MACCS2では、近距離における簡易的な評価モデルであるガウス・プルームモデルが用いられて いる。想定事故時の大気拡散の解析方法は、気象指針に記載された手法(以下、気象指針モデル という)^{1),2)}を基礎とした。気象指針モデルでは、想定事故時の線量計算に用いる放射性物質の地 表空気中濃度は、単位放出率当たりの風下濃度(相対濃度)に事故期間における放射性物質の放 出率を乗じて算出する。最初に、方位別の着目地点における相対濃度を算出し、毎時刻の相対濃 度を年間について小さい方から累積した場合、その累積出現頻度が 97% に当たる値を 97% 相 対濃度とする。次に、試算に用いる 97% 相対濃度は求めた 97% 相対濃度のうち最大の値を使 用する。

放射性物質の放出源情報については、福島第一原発事故と同程度のシビアアクシデントを基に してより厳しい条件を想定した。試算に用いた放出源情報は以下の通りである。

- ・放出量:福島第一原発1~3号機の3基分の総放出量、あるいは発電所サイトの出力比に応じた放射性物質量を想定した放出量が一度に放出されると仮定した。総放出量は、日本国政府がIAEA 閣僚会議へ報告した放出量(I-131とCs-137の合計をヨウ素換算して77万テラベクレルとなる多様な核種の放出を想定したもの) 5である。
- ・放出継続時間:放出量が最も多かった2号機の放出継続時間(10時間)と仮定した。
- ・放出高さ:地表面近傍の濃度が最も大きくなる0m(地上放出)と仮定した。
- ・被ばく線量の推定値は、外部被ばく及び内部被ばくの両方を考慮した。

(3) 大気拡散計算の試算結果

福島第一原発を含めた日本全国の原子力発電所 17 サイトについて、各対象サイトにおける 1 時間毎の年間気象データ(8,760 時間分の大気安定度、風向、風速、降雨量)から、放射性物質 が拡散する方位と距離を計算した。その中で、拡散距離が最も遠隔となる方位(16 方位区分)に おいて、実効線量(または赤色骨髄線量)の線量基準¹⁰が気象指針に示された 97 % 値に達する 距離¹¹を試算した。すなわち、8,760 ケースの方位別及び距離別の実効線量(または赤色骨髄線量) を計算し、着目する方位及び距離における各計算値を小さい順から並べ替え、97 % に相当する 計算値が線量基準を超える最大の距離をその方位における 97 % 拡散距離と定義する。ただし、 着目する方位のある距離における実効線量(または赤色骨髄線量)の 97 % 値を計算する際には、 着目する方位以外に風が吹き、その方位における被ばく線量がゼロとなる出現確率も含めて計算 するということに留意すべきである。

97% 拡散距離を求める方法を例示した概念図を図 4·1 に示す。この図は、ある方位において実 効線量を計算した結果を小さい順に並べた場合に、3つの風下距離(X₁、X₂及び X₃km)におけ る線量計算値の出現頻度を例示したものである。出現頻度の分布形については、ここでは便宜上、 図 3·3 の計算例に示された相対濃度の分布形を用いた。また説明を簡単にするため、放出高さを 地上(0 m)と仮定した結果を示す。線量計算値の出現頻度は、本来、風下距離が異なると分布 形は同じにならないが、地上放出の場合にはほぼ同じ分布形になると考えられる。この例では地 上放出を仮定したため、その分布形は同じであるが、放出点に近い風下距離ほど高線量の計算値 の出現頻度が多くなる。例示した 3 つの風下距離において、97% に相当する実効線量はその線 量基準である 100 mSv を超えているが、最も遠い距離である X₃ km がその方向における 97% 拡 散距離と定義される。すなわち、当該方位では X₃ km より内側の区域では線量基準を超えること を意味する。

¹⁰ 実効線量については、外部及び内部被ばく線量の合計で最初の7日間で100 mSv である。これは、IAEA において一時移転が必要とすべき線量基準に準拠している。赤色骨髄線量については、外部被ばく線量が10時間で1 Gy である。これは、IAEA において避難が必要とすべき線量基準に準拠している。

¹¹ 最も遠隔となる方位(最大遠隔方位)以外の方位における線量基準に達する拡散距離は、最大 遠隔方位よりも当然小さくなるものであり、この方位の 97 % 値は陸側方向の全方位について 基準線量に達する範囲をカバーしている。



図 4-1 97% 拡散距離を求める方法を例示した概念図

1時間毎の年間気象データ8,760個(大気安定度、風向、風速、降水量)をすべて用いて、8,760 ケースの大気拡散・被ばく線量解析を行い、方位別及び距離別の被ばく線量を評価した。ただし、 MACCS2では風向の変化に対応できないため、同一ケースでは、放射性物質の大気中への放出開 始時刻の風向が大気拡散中ずっと続くと仮定する。東海第二原発サイトにおける風下方位の出現 確率を図4-2に示す。図において紫色は陸側の風下方位を示す。また、赤い点線は3%(=100% -97%)を示し、出現確率が3%以下であればその風下方位では97%拡散距離が求められない ことを意味する。図4-2に示されているように、東海第二原発サイトでは東南東へ向かう風(西 北西からの風)が卓越しており、また5つの方位(風下方向が北東、東北東、南南西、南及び西) については97%拡散距離を設定することができなかった。





東海第二原発サイトにおける 97 % 拡散距離の試算例を図 4·3 に示す。これは、対象サイト出 カに対応した放射性物質量の瞬時放出を仮定した場合、実効線量に関する 97 % 拡散距離を試算 したものである。図中の赤い四角が方位別の 97 % 拡散距離(赤い四角の脇に距離を km で記載) を表し、緑の線は隣接する 97 % 拡散距離を便宜上直線で結んだものである。赤い四角が示され ていない方位が 5 つ見受けられるが、これは図 4·2 に示されているように、当該方位に 97 % 拡 散距離を求められない場合を示す。また、表 4·1 は東海第二原発に関する試算例について、実効 線量及び赤色骨髄線量に対する方位別の線量基準 (30 ページの脚注 10 参照)を超える距離 (97 % 拡散距離)の試算結果をまとめたものである。この表には、大気放出量について、福島第一原発 の 3 基分の総放出量と同じと仮定した場合、及び発電所サイトの出力比に応じた放射性物質量を 想定した放出量を仮定した場合の 2 通りについて、試算結果がまとめられている。表において、 黄色は海洋側方位、緑色は陸側方位のうち 97 % 拡散距離が最大となる方位を示す。また、*印 は当該方位に 97 % 拡散距離が出現しない場合を表す。

図 4-3 及び表 4-1 を見ると分かるように、東海第二原発サイトの場合には実効線量に関する 97 % 拡散距離は南西の風下方向が最大になり、その距離は 13.1 km と試算された。また、赤色 骨髄線量についても南西の風下方向が最大であり、0.2 km と試算された。図 4-2 に示された風下 方位の出現確率では東南東へ向かう風が最大頻度となっているが、図 4-3 に示された 97 % 拡散 距離は南西の風下方向が最大になっており、風下方位の頻度と 97 % 拡散距離の最大値との関係 は必ずしも対応していない。これは、97 % 拡散距離は風向の頻度だけで決まるものではなく、 その時の風速や大気安定度によっても影響を受けるためであると考えられる。

福島第一原発を含めた日本全国の原子力発電所17サイトについて、サイト出力に対応した放射 性物質量の瞬時放出を仮定した場合、実効線量に関する97%拡散距離の陸側方位の最大値は 13.1~40.1 km、赤色骨髄線量については0.2~2.4 kmと試算された。一方、福島第一原発1~3 号機の3基分の総放出量と同じと仮定した場合には、実効線量及び赤色骨髄線量に関する97%拡 散距離の陸側方位の最大値はそれぞれ14.9~23.8 km、0.2~1.2 kmと試算された。本試算は、 道府県が地域防災計画を策定するに当り、防災対策を重点的に充実するべき区域を決定するため の参考とすべき情報を得る目的で実施された。本試算結果は、PAZ¹²が原子炉施設から半径概ね5 km、UPZ¹³が原子炉施設から半径概ね5 km~30 kmとされた根拠の一つとなった⁴²。



図 4-3 東海第二原発におけるサイト出力に対応した放射性物質量の放出を仮定した 実効線量に関する 97% 拡散距離の試算例 400 (赤い四角と脇の数値は 97% 拡散距離(km)を示す。)

¹² PAZ (Precautionary Action Zone) は「予防的防護措置を準備する区域」を意味し、原子力施 設から半径概ね5km 圏内である。

¹³ UPZ (Urgent Protection action planning Zone) は「防護措置を準備する区域」を意味し、原 子力施設から半径概ね5km~30km 圏内である。

	赤色骨髄線量 (福島第一原子力発電所(1~3 号機)の放射性物質量と同じと 仮定) 97%値	赤色骨髄線量 (サイト出カに対応した放射性 物質量と仮定) 97%値	実効線量 (福島第一原子力発電所(1~3 号機)の放射性物質量と同じと 仮定) 97%値	実効線量 (サイト出カに対応した放射性 物質量と仮定) 97%値
N	<0.2	<0.2	5.9	4.0
NNE	<0.2	<0.2	2.1	1.6
NE	*	*	*	*
ENE	*	*	*	*
E	<0.2	<0.2	9.9	6.9
ESE	0.3	<0.2	17.1	12.3
SE	0.2	<0.2	12.5	8.3
SSE	*	*	*	*
S	*	*	*	*
SSW	0.3	<0.2	13.1	8.6
SW	0.5	0.2	18.5	13.1
WSW	<0.2	<0.2	11.6	7.7
W	*	*	*	*
WNW	<0.2	<0.2	8.4	5.8
NW	0.2	<0.2	11.5	7.6
NNW	0.3	<0.2	13.4	8.7

表 4-1 東海第二原発サイトにおける方位別の線量基準を超える距離(97% 拡散距離)

*印は、当該方位に着目した時に97%値が出現しない場合を示す。

また計算上は、線量基準を超える平均的な距離としての期待値や発生確率の極めて低い極端な 気象条件によるすそ値なども推定できる。着目する方位における線量の期待値とは、8,760 ケー スの解析によって得られた距離別の線量に発生確率(本解析では、1/8,760 = 1.14×10⁴)を乗じ て、着目する方位毎に合算した線量の平均値である。線量のすそ値とは、最初に、8,760 ケース の解析によって得られた方位別、距離別の線量を昇順に並び換え、累積出現確率が100%となる 線量を求める。次に、これらの算出結果から、方位別に100%値の距離対線量の関係を導出し、 実効線量が100 mSv となる距離が最も大きい陸側方位の値を線量のすそ値とする。このため、 100%値は、年間の気象条件を考慮すると、着目する方位の当該距離より外側に100 mSv(最初 の7日間)が出現する可能性がないということを意味する。以上の定義に従うと、東海第二原発 サイトにおいて、海側を除く16方位のうち最大値となる方位における実効線量の期待値とすそ値 の出現距離はそれぞれ4.3 km、44.9 km、また赤色骨髄線量の期待値とすそ値の出現距離はそれ ぞれ0.2 km、1.6 kmと推定された。

4.2 OSCAAR を使用した防護措置の被ばく低減効果の解析

(1) 防護措置の被ばく低減効果解析の背景

平成 24 年当時における原子力防災の動向については、国際的には ICRP Publ. 109 ⁴³における 複合的な防護対策の最適化や IAEA GSG-2 ⁴⁴における防護措置に関する判断基準など、原子力緊 急事態に対する準備と対応の考え方に大きな変革が進み、具体的な防護対策の目標を効果的に達 成するための事前計画の重要さが強調されていた。このため、我が国では具体的な地域防災計画 の策定及び防護対策の実施に役立つ技術的情報を提供することが重要であった。

平成22年10月には、当時の原子力安全委員会は「原子力の重点安全研究計画」の実施状況に おいて、原子力防災分野の「緊急時における判断等を的確に行うための技術的指標の整備」の中 で、PRA 手法を用いた早期防護対策の複合的実施戦略を対象にして、最適な防護指標、実施範囲、 実施時期等を分析して技術的課題をまとめた(第1期計画の総合評価)。また、第2期(平成22 年度~平成26年度)の計画では、防災指針類の見直しのための技術的支援研究、及び実効性向上 のための地域防災計画策定の技術的支援研究を通じて、国や地方公共団体による防災計画策定に 役立てる研究を進めることとされた。この研究に資するため、安全研究センターではレベル3PRA 手法による防護措置の被ばく低減効果の解析を実施した⁴⁵⁾。

(2) 被ばく低減効果の解析方法

原子炉事故時の防護措置による被ばく低減効果の解析には、原子力機構で開発されたレベル 3 PRA プログラム OSCAAR を使用した。ここでは、事故後の短期間における被ばく低減効果を検 討するため、放射性プルームからの外部被ばく、地表に沈着した放射性物質からの外部被ばく、 放射性プルーム中の放射性物質の吸入による内部被ばくという3つの被ばく経路からの早期被ば く線量を推定し、7 日間の被ばく期間を考慮した。現実的な被ばく線量を推定するためには、防 護措置や生活習慣などを解析に反映する必要がある。ここでは防護措置として、屋内への退避(一 般住宅あるいはコンクリート施設)、予防的避難、安定ヨウ素剤の服用という3種類の措置を考慮 した。屋内退避の被ばく低減効果は、外部被ばくに対する建物による遮へい効果、内部被ばくに 対する建物による気密効果として評価され、一般住宅とコンクリート施設ではその効果が異なる。 予防的避難については、放出開始前に当該施設から 30 km 以遠の地点におけるコンクリート施設 に避難すると仮定し、その避難施設において7日間被ばくすると仮定した。安定ヨウ素剤の服用 は、安定ヨウ素が甲状腺に満たされることによって放射性ヨウ素の甲状腺残留量が低減される効 果を持つ。安定ヨウ素剤の服用時期と放射性ヨウ素の甲状腺残留量の低減割合の関係を図 4-4 に 示す40。安定ヨウ素の服用時期によって放射性ヨウ素の甲状腺残留量が変化することが理解され、 その効果は放射性ヨウ素を吸入するタイミングが最も大きくなっている。本解析では、放出開始 の12時間前に全解析対象範囲において同時期に服用すると仮定した。このため、安定ヨウ素剤の 服用による被ばく低減効果は、各評価地点における放射性プルーム通過までの時間によって異な る。ここでは、放射性プルームは安定ヨウ素の服用後12時間から30時間程度で通過すると推定 された。



図 4-4 安定ヨウ素剤の服用時期と放射性ヨウ素の甲状腺残留量の低減割合の関係

防護措置による被ばく低減効果の解析対象は、モデルサイトにおける 1,100 MWe のモデルプラントとした。モデルサイトにおける 1 時間毎の年間気象データ 8,760 ケースから 248 ケースをサンプリングして解析を行った。3.2 節(5)に示したように、各気象条件について距離毎に被ばく線量の最大値を抽出し、抽出した値を小さい順に並べて 50% 値と 95% 値を設定した。OSCAARの入力データとなる放出源情報については、大規模放出と管理放出の 2 つのケースに対して、各種の放射性物質の放出割合、主たる放出開始までの時間、放出継続時間及び放出高さを設定した。各種の放射性物質の放出割合は、原子炉停止時における炉内内蔵量に対する大気への放出量の割合である。これらの放出源情報は、レベル 1 / 2 PRA の解析結果 ¹⁷⁷を参考にして決定した。OSCAAR 解析に用いた放射性物質の放出割合を表 4-2 に示す。表に示した福島第一原発事故の情報は、大規模放出と管理放出の 2 つのケースと比較するための参考情報である。

	希ガス	有機 ヨウ素	無機 ヨウ素	Cs 類	Te 類	Ba 類	Ru 類	La 類
解析ケース								
大規模放出	$9.5 imes 10^{-1}$	$1.6 imes10^{-3}$	$3.1 imes 10^{-2}$	$2.8 imes10^{-2}$	$2.8 imes 10^{-4}$	$1.2 imes 10^{-8}$	$2.4 imes 10^{-11}$	$5.2 imes 10^{.12}$
管理放出	$8.7 imes 10^{-1}$	$4.5 imes 10^{-5}$	$8.6 imes 10^{-4}$	$7.5 imes 10^{-4}$	$3.2 imes 10^{-4}$	$2.0 imes 10^{-8}$	$3.4 imes 10^{-11}$	$6.5 imes 10^{\cdot 12}$
福島第一原発事故								
1号機	$9.5 imes 10^{-1}$	_	$6.6 imes 10^{-3}$	$2.9 imes 10^{.3}$	$1.1 imes 10^{-2}$	$4.0 imes 10^{-5}$	$9.0 imes 10^{-10}$	$1.2 imes 10^{-7}$
2 号機	$9.6 imes 10^{-1}$	_	$6.7 imes 10^{-2}$	$5.8 imes 10^{-2}$	$3.0 imes10^{-2}$	$2.6 imes 10^{-4}$	$5.4 imes 10^{-10}$	$8.4 imes 10^{-7}$
3号機	$9.9 imes10^{\cdot1}$	_	$3.0 imes 10^{-3}$	$2.7 imes 10^{-3}$	2.4×10^{-3}	$4.3 \times 10^{.4}$	$8.6 imes 10^{-10}$	$1.3 imes 10^{.7}$

表 4-2 OSCAAR 解析に用いた放射性物質の放出割合

(3) 被ばく低減効果の解析結果

大規模放出に対して複合的な防護措置を講じた場合の被ばく線量の解析結果の例を図 4-5 (実 効線量)及び図 4-6 (甲状腺等価線量)に示す。設定した複合的な防護措置は、(i)予防的避難、 (ii)2日間のコンクリート屋内退避及びその後に7日間の避難(以下、段階的避難という)、(iii)2 日間の自宅屋内退避とした。また、両図中の灰色の点線は、IAEA が示した包括的判断基準(最 初の7日間で実効線量100 mSv、甲状腺等価線量50 mSv)⁴⁴⁾である。被ばく線量の解析結果と 包括的判断基準を比較した図 4-5 及び図 4-6 から、以下のことが導出された。

- ・実効線量の場合には、適切な領域において複合的な防護対策((i)予防的避難(5 km 以内)、
 (ii) コンクリート屋内退避及びその後に段階的避難(5 km~10 km)、(iii) 自宅屋内退避(10 km~30 km))を組み合わせることにより、実効線量に対する包括的判断基準100 mSv を下回ることが可能である。
- ・甲状腺等価線量の場合には、5 km~30 km の範囲においては、段階的避難や屋内退避(コン クリート屋内退避を含む)のみでは、甲状腺等価線量に対する包括的判断基準 50 mSv を上 回る可能性がある。
- ・5 km~30 km の範囲においても、段階的避難や屋内退避と安定ヨウ素剤の服用(図 4-6 では 放出開始の12時間前に摂取した場合)を組み合わせて実施することにより、甲状腺等価線量 に対する包括的判断基準 50 mSv を下回ることが可能である。



図 4-5 OSCAAR による大規模放出と複合的な防護対策の計算例(実効線量(Sv))
 (上図における○、■、▲及び◆は 50% 値を表し、
 記号から上に延びる点線の上部の横棒は 95% 値を表す。)



図 4-6 OSCAAR による大規模放出と複合的な防護対策の計算例(甲状腺等価線量(Sv))
 (上図における○、■、▲及び◆は 50% 値を表し、
 記号から上に延びる点線の上部の横棒は 95% 値を表す。)

大規模放出と管理放出に対する解析結果から、以下のことがまとめられた。大規模な放出が予 想される場合には迅速な防護措置が必要となる。すなわち、本解析ケースでは、放射性物質が環 境中へ放出される前に、PAZの領域では、予防的避難を実施することにより高い被ばく低減効果 を期待できる。また UPZ 内では、放出点に近い 5~10 km ではコンクリート屋内退避と段階的避 難、10 km 以遠は自宅屋内退避によって、実効線量の十分な低減が見込まれる。さらに、放射性 ヨウ素の吸入による甲状腺被ばくについては、UPZ 内における安定ヨウ素剤の事前摂取により高 い被ばく低減効果が見込まれる。一方、管理放出の場合では(ここでは、解析結果を掲載してい ない)、IAEA の包括的判断基準をほとんどの気象条件で満たしているが、屋内退避と安定ヨウ素 剤を組み合わせることで十分な被ばく低減効果が見込まれる。

4.3 WSPEEDI-II を使用した北朝鮮地下核実験の対応

地下核実験対応の背景と経緯

北朝鮮は、北東部の豊渓里(プンゲリ:北緯 41.3 度、東経 129.2 度)に建設された核実験場に おいて、平成 18 年 10 月から平成 29 年 9 月まで全 6 回の地下核実験を実施した。地下核実験の 場合には、実験坑道を覆う岩板等に亀裂がなく坑道が完全に閉鎖されている状況で実施されるた め、一般的に放射性物質が大気中に放出されることは想定されない。しかし、我が国として万全 を期す観点から、モニタリングの強化という対応措置が講じられた。防衛省の自衛隊機による航 空モニタリングを効果的かつ効率的に行うための参考情報として、原子力機構は 1 回目と 4 回目 の地下核実験を除いて、原子力規制庁(あるいは文部科学省)から、放射性物質の一定単位放出 率を仮定した大気拡散予測計算を実施することを要請された。

平成 28 年 9 月に実施が発表された北朝鮮による 5 回目の地下核実験において、支援・研修セ ンターは基礎工センターの協力を得て、9月 9 日から 15 日にかけて WSPEEDI-II 自動計算シス テムによる放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、原子力規制庁に予測結果を報告した。予測 結果は原子力規制委員会のホームページを通じて毎日公開された 47)。自動計算システムは、基礎 エセンターが開発した世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版 WSPEEDI-II ²³⁾⁻²⁶⁾を基盤 として、北朝鮮地下核実験対応に特化するために基礎工センターが構築したものである。自動計 算システムによる予測結果は、防衛省の航空自衛隊機による高空の大気浮遊じん等の試料採取計 画策定において参考資料として用いられた。

平成 29 年 9 月には、北朝鮮による 6 回目の地下核実験実施の報道を受け、5 回目の対応の場合 と同様に、支援・研修センターは基礎エセンターの協力を得て、9 月 3 日から 11 日にかけて WSPEEDI-II 自動計算システムによる放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、原子力規制庁に 予測結果を報告した。予測結果は原子力規制委員会のホームページを通じて毎日公開された 480。 この予測結果も同様に、防衛省の航空自衛隊機による試料採取計画策定に活用された。

(2)6回目の地下核実験に対する実対応

WSPEEDI-II による北朝鮮地下核実験の対応例として、平成 29 年 9 月に実施された 6 回目の 核実験に対する実対応を以下に示す。平成 29 年 9 月 3 日 12 時 50 分に、北朝鮮による地下核実 験の可能性について報道された。当日は休日(日曜日)であったが、支援・研修センターでは原 子力総合防災訓練の対応中であったため、本報道を受けて担当者は地下核実験対応体制へ移行し た。その後、原子力規制庁から連絡があり、WSPEEDI-II による拡散予測計算の要請を受けた。 放出開始時刻については、核実験実施時刻に近い正時とするのが通例であるが、本核実験の実施 時刻が 12 時 29 分 57 秒であったことから、核実験実施直後に放射性物質が放出する可能性を想 定して 12 時とした。また放出位置については、前回の 5 回目の地下核実験では北緯 41.3 度、東 経 129.2 度であったが、本対応では気象庁の地震波の解析により北緯 41.3 度、東経 129.1 度であ ると提示された。前回の地下核実験と放出位置が異なり、初日モードの計算によって当日 5 時に 出力されていた大気拡散予測結果を使用することができなかったため、WSPEEDI-II 自動計算シ ステムで設定されている放出位置を北緯 41.3 度、東経 129.1 度に変更し、放出開始時刻を 12 時 として初動モードにより再計算を実施した。その後、大気拡散予測結果を報告資料にまとめて原 子力規制庁へ送付した。 核実験実施日の翌日以降は毎日自動計算を継続し、大気拡散予測結果をとりまとめた報告資料 を原子力規制庁へ送付する体制を維持した。6回目の地下核実験対応における大気拡散予測計算 の流れを図 4-7 に示す。土曜日及び日曜日については、担当者を3人選定し両日とも2人体制で 対応に当った。

9月12日に、原子力規制庁よりモニタリング強化体制を終了する旨の連絡を受け、支援・研修 センターにおいても地下核実験対応が終了し、通常体制へ移行した。なお、原子力規制庁へ送付 した報告資料は、前述したように、航空自衛隊機による大気浮遊じんの採取における参考資料に 活用されるとともに、プレスリリースとして原子力規制委員会のホームページにモニタリング結 果とともに毎日公開された。



図 4-7 6回目の北朝鮮地下核実験対応時における大気拡散予測計算の流れ (平成 29 年 9 月 3 日~11 日の 9 日間の対応)

(3) 放射性物質の大気拡散予測結果の考察

6回目の地下核実験対応について、WSPEEDI-II 自動計算システムによる大気拡散予測結果の 一部を例として、風速場の再現性の観点から考察を行った。大気拡散予測結果と同時刻における 天気図の比較を図 4-8(予測結果)³⁸⁾及び図 4-9(天気図)⁴⁹⁾に示す。ここでは風速場についての 考察を行うため、風速場の特徴を捉えている大気拡散予測結果を選定した。

天気図を見ると、東北沖の太平洋に低気圧が発達しており、等圧線の間隔が比較的狭いことか ら強い風が発生していることが示唆される。予測結果において東北沖の太平洋で半時計回りに大 きく渦巻く風ベクトルが確認でき、低気圧による強風が再現されている。また、東北沖の太平洋 の低気圧によって生じる寒冷前線に着目すると、北から吹き込む風と南西風による前線の形成が 計算されている。また、黄海に目を向けると高気圧が見られ、予測結果においても風ベクトルが時計回りに小さく渦巻いており、高気圧によって弱風が吹き出す様子が確認できる。これらより、 平成29年9月8日18時における地下核実験対応における大気拡散予測計算では、風速場が精度 良く再現されていると判断できる。



Cs-137 concentration at surfce JST= 2017-09-08_18h00m

図 4-8 北朝鮮地下核実験対応における大気拡散予測結果 38) (平成 29 年 9 月 8 日 18 時における予測結果) (中央付近の橙色から水色のコンター図は予測結果の地上大気中濃度である。 右側の赤い「低」は低気圧であり、青い実線と三角は寒冷前線を示す。 赤い矢印はその前線に向かって吹き込む風を表す。 左側の藍色の「高」と矢印はそれぞれ高気圧及びその高気圧から吹き出す風を表す。)



図 4-9 北朝鮮地下核実験対応における天気図 ⁴⁹⁾ (平成 29 年 9 月 8 日 18 時における天気図)

4.4 WSPEEDI-II を使用した福島第一原発事故の解析

(1) 福島第一原発事故の解析の背景と目的

基礎エセンターでは、平成23年3月11日に発生した福島第一原発事故によって大気に放出さ れた放射性物質の放出量、大気拡散及び地表面沈着プロセスの早期解明を目指した研究を実施し た。これは、福島第一原発事故の規模や公衆への被ばく線量等の評価を行う上で、放射性物質の 環境への放出量や大気拡散・地表面沈着の状況を把握することが喫緊の課題であったことによる。 地震や津波等の影響によって、環境モニタリング、気象観測が機能しない状態が継続したこと、 放出量推定に利用される緊急時対策支援システム ERSS [®]が機能停止になったことなどにより、 SPEEDIの予測計算は単位放出または仮想放出に限定されており、環境汚染の状況が十分に把握 できていなかった。

このため、WSPEEDI-IIを用いた大気拡散シミュレーションと環境モニタリングデータを融合 させた解析によって、放射性物質の大気放出率を推定するとともに、大気拡散及び地表面沈着の 状況を再構築した。これにより、福島第一原発事故に起因する環境影響評価、被ばく線量評価な ど事故対応に資することとした。なお、大気放出率の推定は、当時の原子力安全委員会からの依 頼により委員会に協力する形で実施された。

(2) 福島第一原発事故の解析手法

原子力事故時における放射性物質の大気放出率の推定方法の概念を図 4-10 に示す。最初に、主 要な放射性物質に対して単位放出率(1 Bq/h)を仮定して大気拡散シミュレーションを行い、モ ニタリングポスト等による環境モニタリングデータの測定点における大気中濃度や空気吸収線量 率を算出する。次に、当該測定点における大気中濃度や空気吸収線量率の測定値との比を計算す ることにより、現実的な大気放出率(Bq/h)を推定する。実際の解析では、大気放出率のみが推 定される訳ではなく、放出開始時刻、放出継続時間、放出高さも同時に推定の対象となり、大気 放出に係るパラメータは総称して放出源情報と呼ばれる。図 4-10 に示される概念図では、大気放 出率を推定するのは単純な作業に思われるが、実際の推定作業ではかなりの専門的知識と時間・ 労力を必要とする。すなわち、放出源情報を構成する 4 つのパラメータ(大気放出率、放出開始 時刻、放出継続時間及び放出高さ)のセットをある対象時間帯の入力データとして大気拡散シミ ュレーションを行い、環境モニタリングデータとの比較を試行錯誤しながら繰り返して、環境モ ニタリングデータとの誤差が最も小さくなりデータを最も忠実に再現するモットをその時間帯の 放出源情報とした。この作業を対象時間帯毎に繰り返し、放出源情報の時間変化を推定した。



図 4-10 原子力事故時における放射性物質の大気放出率の推定方法の概念

次に、放射性物質の大気拡散及び地表面沈着の解析については、上記の方法で推定された放出 源情報を入力データとして WSPEEDI-II による大気拡散シミュレーションを実施することによ り、様々なスケールにおける放射性物質の大気拡散及び地表面沈着等の時間的・空間的分布を再 構築するとともに、それらのプロセスに関する解析と解明を行った。その際には、環境中におけ る放射性物質の移行挙動だけでなく、可能ならば事故進展情報や炉内状況データとの関連付けを 試みることとした。

(3) 大気放出率の推定結果

上記の方法で推定した福島第一原発事故における I-131 と Cs-137の大気放出率の推定結果を図 4-11 に示す。図の上部分に示した大気放出率は事故初期に暫定値として推定されたものであるが、 3月15日の短期間の大量放出、3月23日辺りのなだらかな放出、3月30日の短期間放出が再現 されている ⁵⁰。また、図の下部分は3月12日0時~16日0時までの放出率を再推定したもので あり、1号機及び3号機の水素爆発に伴う短期間の大量放出と関連付けされている ⁵¹。再推定に 当っては、大気拡散シミュレーションによる計算値と環境モニタリングによる測定値の差異を低 減するため、大気拡散及び気象場計算へのフィードバック解析法並びに大気放出率逆推定法を開 発した ⁵²。推定された放出源情報は、環境モニタリング状況に最も即した国内唯一の情報として 広く活用された。日本国政府は、IAEA に対する政府の報告書に暫定推定値(平成23年6月)、 及び追加報告書に再推定値(同年9月)を記載した。また、当時の原子力安全委員会は、放出率 及び総放出量の推定値を発表するとともに(平成23年4月、5月及び8月)、推定放出率を用い た SPEEDI による甲状腺被ばく線量及び外部被ばく線量を公表した(同年3月及び4月)。推定 された総放出量は、当時の原子力安全・保安院による INES (International Nuclear and Radiological Event Scale:国際原子力・放射線事象評価尺度)におけるレベル7の判断の参考デ ータとなった。さらに、UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation:原子放射線の影響に関する国連科学委員会)、WHO (World Health Organization:世界保健機関)、国立環境研究所、名古屋大学等が大気拡散シミュレーションの入 カデータとして活用した。



図 4-11 福島第一原発事故における I-131 と Cs-137 の大気放出率の推定結果
 (上図:3月12日~4月6日までの暫定放出率推定値、
 下図:3月12日0時~16日0時までの放出率再推定値)

原子力事故時における放出源情報の推定は、利用できるデータや情報の量が時間の進展ととも に多くなる場合があるので、一般的には時間が経つほどより詳細かつ合理的な推定が得られるこ とが多くなると予想される。新たに利用可能となるデータには、追加的な環境モニタリングデー タ、炉内状況データ、事故進展情報などが含まれる。また、計算対象の拡張・補完やモデルの改 良として、局所域からより広域への対象領域の拡張、海洋拡散シミュレーションによる海洋の分 布状況の補完、大気拡散・地表面沈着モデルの改良などがある。基礎エセンターでは、(i) 東日本 域における大気拡散シミュレーションの実施 ⁵³、(ii) 海洋拡散シミュレーションとの融合による 海洋データの利用 ⁵⁴、(iii) 新規の環境モニタリングデータの利用、大気拡散モデルの沈着スキー ムの改良及び海洋拡散シミュレーションの融合 ⁵⁵、(iv) 新規の大気拡散モデルの導入と種々の測 定データを利用したベイズ推定に基づく最適化手法の利用 ⁵⁶というように大気放出率推定の詳細 化と改善を段階的に進めた。

上記のうち、大気拡散シミュレーションと海洋拡散シミュレーションとの融合は重要である。 我が国の原発は沿岸地域に建設されているため、原発からの大気放出のうち海洋側へ向かう放射 性プルームは陸上に設置されたモニタリングポスト等では検出されない。このため、大気拡散シ ミュレーションのみでは海洋側へ放出された放射性プルームの寄与を正確に捉えることができず、 特に総放出量の推定では誤差が大きくなることが予想される。基礎エセンターでは、大気拡散モ デルと並行して海洋拡散モデル STEAMER ⁵⁷⁾も開発しており、大気拡散に海洋拡散の計算を結合 して実施することにより、より現実的な大気放出率を推定することができた。

(4) 大気拡散及び地表面沈着の解析結果

上記の手法で推定した放出源情報を WSPEEDI-II の入力データとして用いて大気拡散シミュ レーションを行うことにより、放射性物質の大気拡散及び地表面沈着の時間的・空間的分布を再 構築するとともに、それらのプロセスに関する解析と解明を実施した。

福島第一原発事故後には、当該原発の北西方向 30~40 km までの地域において空間線量率の上 昇が見られた。このプロセスを解明するために、WSPEEDI-II を用いて大気拡散シミュレーショ ンによる局地詳細計算を実施した 52)。3 月 15 日 18 時及び 21 時での当該原発の周辺地域におけ る空間線量率(左図)、降水量、I-131 濃度及び地表風(右図)の計算結果を図 4-12 に示す。この 計算シミュレーションにより、3 月 15 日夜間に原発の北西方向に空間線量率の上昇を示す地域が 再現された(左図)。降水量、I-131 濃度及び地表風の計算結果(右図)の解析により、この線量 率上昇プロセスは、同日午後に大量に放出された放射性プルームが南東風よって北西方向に流さ れ、降水帯と重なったことにより放射性物質が地表面に湿性沈着したことが原因であると推定さ れた。この線量率上昇をもたらした放射性物質の大量放出は3月 15 日午前と午後に生じたことが 推定され、この大量放出は2 号機の圧力低下事象と関連付けられた。

上記の局所域における空間線量率上昇の解析のほか、東日本域における大気拡散シミュレーシ ョンを実施し、局所域からより広域へ対象領域を拡張することにより、追加的な環境モニタリン グデータを用いた I-131 と Cs-137 の推定放出率を確認・改善するとともに、東日本域における Cs-137 の地表沈着量の時間的・空間的分布を計算し、その沈着プロセスを解析した⁵³⁾。また、事 故に伴って大気中に放出された放射性物質のうち、放射性ヨウ素等の短半減期核種による事故初 期段階における吸入による内部被ばく線量を評価するために、被ばく線量推計に必要となる大気 中放射性物質濃度の時間的・空間的分布を大気拡散シミュレーションにより再構築した^{56),58)}。こ こでは、内部被ばく線量への寄与率を考慮して、I-131、I-133、I-132、Te-132 及び Cs-137 を計 算対象核種とし、I-131 と Cs-137 の放出率推定結果を基にして、数少ない環境モニタリングデー タや推定インベントリ等から放射能比の時間変化を求めることにより、I-133 と Te-132 の放出率 を推定した。さらに、環境中における Cs-134 / Cs-137 比の空間分布を利用して、事故時の大量 放出時においてどの原子炉が主として寄与したかを推定した⁵⁹⁾。ここでは、各炉の燃料燃焼度が 異なることに着目して、WSPEEDI-II を用いることにより Cs-134 / Cs-137 比の環境中分布の再 現を試みたものである。この結果、3 月 12 日から 21 日までの大量放出を引き起こした原子炉(1 号機~3 号機)を推定することができた。

WPEEDI-II による大気拡散及び地表面沈着の解析及びそれらのプロセス解明の結果は、各種の 学術雑誌の論文で多数引用されたほか、国際会議への招待講演を受けるなど学術的に注目された。 また、国会議員、関連省庁(厚生労働省、環境省、原子力規制庁ほか)、地方公共団体(茨城県ほ か)に報告されるとともに、住民の被ばく線量評価の基礎資料、食品モニタリングの参考情報等 として活用された。



図 4-12 福島第一原発の北西部における空間線量率、降水量等の空間分布の計算結果 ⁵²⁾
(a:3月15日18時の空間線量率、b:同日同時刻の I-131 濃度、降水量、地表風、 c:3月15日21時の空間線量率、d:同日同時刻の I-131 濃度、降水量、地表風)
(a と c の図における水色から赤色のコンター図は空間線量率の計算値(1~100 µ Gy/h)を表す。
b と d の図における赤い実線は I-131 濃度、水色から紫色のコンター図は降水量(0.1~10 mm/h)
及び黒い矢印は地表風の計算値を表す。a~dの図における丸印とその脇の数値はそれぞれ モニタリングポストの位置及び空間線量率の実測値(µ Gy/h)を表す。)

5. 大気拡散モデルの利用に関する今後の課題

5.1 近隣諸国における原子力緊急時対応体制の確立

我が国の近隣諸国では、近年原子力発電所の建設と稼働が進められ、稼働中の原発は76機に及 ぶ(韓国:24、台湾:4、中国:48(令和3年1月1日現在))⁶⁰⁾。これらの原発で原子力災害が 起こった場合には、大気へ放出された放射性核種が偏西風に流されて我が国へ放射線影響を及ぼ すことが懸念される。原発事故を含む国外での原子力災害の際には、内閣官房副長官を議長とす る放射能対策連絡会議(原子力規制庁、文部科学省、気象庁など19の関係府省庁の代表から構成 される)⁶¹⁾が招集され、モニタリング強化など所要の対策が講じられる。

北朝鮮が地下核実験を実施した際には、原子力機構では確立済みの専用の大気拡散計算システ ムと対応体制(北朝鮮対応版)を用いて、国による緊急時対応の一環として、航空自衛隊が高空 のモニタリング試料を採取するための参考情報として、放射性物質の単位放出率を仮定した大気 拡散計算を実施する。北朝鮮対応版では、その対応に特化した WSPEEDI-II 自動計算システムを 用いている。北朝鮮地下核実験に対する原子力機構の役割は、放射能対策連絡会議の申し合わせ 書⁶²⁾にも明記され、原子力規制庁を通じて原子力機構に依頼される。一方、近隣諸国において原 子力災害が発生した場合には、放出源情報の入手と解析、状況に応じた入出力条件の設定、我が 国への放射線影響の評価など、北朝鮮地下核実験対応より複雑な大気拡散計算システムと対応体 制(近隣諸国対応版)を確立する必要がある。

本課題では、近隣諸国で原子力災害が発生した場合に備えて、専用の大気拡散計算システムを 新たに構築するとともに、対応体制及び方法を整備する。ここでは北朝鮮地下核実験と同様に、 WSPEEDI-II のような実時間大気拡散シミュレーションモデルを基礎にするのが適切であろう。 また、構築した大気拡散計算システムを用いてケーススタディを実施し、対応体制及び方法の最 適化を行う。この際、福島第一原発事故や北朝鮮地下核実験と同様に、放出源情報を直ちに入手 できる可能性は小さいので、構築した大気拡散計算システムを用いて何をどのように推定し、そ れを我が国の対応にどう使用するかを検討しておくことは重要である。

5.2 RN テロ事象発生時の環境モニタリング方法の整備

我が国において放射性物質(R:Radiation)や核物質(N:Nuclear)を使用したテロ事象が 発生した場合、国及び関連機関の対応については、NBC テロ¹⁴対策会議幹事会で検討された「NBC テロその他大量殺傷型テロ対処現地関係機関連携モデル」⁶³⁾において対応モデルが示されている。 この中で原子力機構は、原子力規制庁や都道府県知事からの派遣要請により、初動対応を含む汚 染検査・除染等に係る支援を行う研究機関・専門機関として明記されており、これに基づいて RN テロ事象発生時には原子力機構へ支援要請がなされると考えられる。支援内容として、汚染検査 及び除染(環境モニタリングを含む)、並びに原因物質の特定に係る分析が想定されるが、原子力 機構としての具体的な対応体制及び方法の整備は十分とは言えない。

¹⁴ NBC テロとは、核 (nuclear)、生物 (biological) 及び化学物質 (chemical) による特殊災害 テロのことを言う。

想定される支援要請の一つである環境モニタリングについては、RN テロ事象が発生する場所 と時期、飛散する放射性物質、想定される放射線影響などを事前に予測することは困難であるた め、すべての事象に対する対応方法を整備することは不可能である。また、RN テロ事象は人口 や高層建築物などが密集する都市域で発生する可能性が高いため、原発事故の対応等に比べて、 比較的狭い領域における複雑な建築物群や地下街による飛散物質の集中性と不均一性を考慮する 必要がある。このため、複雑な人工物群における放射性物質の大気拡散及び物体表面沈着を予測 することができるような高分解能大気拡散計算モデルを利用して、様々な入力条件によるケース スタディを実施することにより、都市域での環境モニタリングにおいて対象とすべき項目や留意 事項を整理・分類化して、それに基づいて具体的な対応体制及び方法を整備することが重要かつ 有効である。

本課題では、RN テロ事象が発生した場合の環境モニタリングについて、高分解能大気拡散計 算プログラムを導入・整備するとともに、整備した計算プログラムを用いてケーススタディを実 施することにより、その対応体制及び方法を整備してその最適化を行う。現時点において原子力 機構では、2 種類の高分解能大気拡散計算プログラムが開発されている。一つは基礎エセンター が開発している LOHDIM-LES⁶⁴⁾であり、もう一つはシステム計算科学センターが開発している CityLBM⁶⁵⁾である。両センターではこれら2種類の計算プログラムの統合を進めている。統合作 業が終了した後に、統合された計算プログラムの特徴、使用目的・用途、適用範囲などを詳細に 調査することにより、当該計算プログラムが上記の目的を達成するために使用可能かどうかを検 討することが重要である。

6. おわりに

福島第一原発事故対応を契機として、原子力防災への大気拡散モデルの利用方法について、政 府や地方公共団体関係者、大気拡散解析や原子力防災の専門家などの間でその後も論争は続いた が、緊急時対応における大気拡散モデルの存在や利用方法等について、大気拡散解析の専門家で ない研究者や技術者のみならず一般住民にまで知らしめた。その一方で、原子力災害対策(避難 や一時移転等の判断)に計算モデルによる予測は使用可能かどうかといった二者択一の極端な議 論が多く、緊急時対応の科学的検証に基づいて丁寧に議論されてきたとは言い難い面が多々あっ た。また、大気拡散解析の専門家でない研究者や技術者において、大気拡散モデルやその解析結 果に対して、原子力機構内外には潜在的利用希望者は少なからず存在することが分かった。しか し、複数の種類が存在する大気拡散モデルについて、その目的と用途に応じたモデルの使い分け について理解不足と誤解があることが見受けられた。

原子力機構内外における上記のようなニーズや状況を鑑み、本報告書では、原子力防災への大 気拡散モデルの利用について、原子力機構で開発あるいは使用されているモデルを中心として、 モデルの概要や計算手法を比較するとともに、それらのモデルを利用した解析例を記述した。こ れにより、原子力機構内外における大気拡散モデルの潜在的利用希望者に対して、今後の検討や 活動に参考となることを目的とした。

大気拡散計算プログラムをユーザとして利用するに当り、潜在的利用希望者にはいくつかの検 討・解決すべきハードルが存在する。第1のハードルは大気拡散計算システムの構築である。原 子力機構等で開発済みで公開された計算プログラムを利用する場合でも、計算器サーバを購入・ 整備して当該プログラムをインストールし、そのシステムが正常に作動することを確認する作業 が伴う。この際、気流計算プログラムの初期及び境界条件となる数値予報データ(GPV データ) をどのように入手するかを検討する必要がある。過去の大気拡散計算を行う場合には、特定の関 連ウェブサイトから無償で入手することが可能である。しかし、実時間計算あるいは予報計算を 実施する場合には、GPV 配信機関(我が国の場合は(一財)気象業務支援センター)を通じて所 定の GPV データを入手する必要がある。この場合には、配信費用が発生するばかりでなく情報セ キュリティ対策を講じた受信ネットワークを新たに構築しなければならない。大気拡散計算シス テムを構築するためには、費用と労力のほか専門的な知識・経験が必要である。第2のハードル は構築した大気拡散計算システムを利用した解析・適用とシステムの保守管理である。このため には、保守管理の費用と専門的な知識・経験を持った人員が必要であろう。原子力機構内外には 大気拡散モデルの潜在的利用希望者は少なからず存在するものの、上記のように越えるべきいく つかのハードルが存在するため、大気拡散計算システムを独自に構築するためにはこれらのハー ドルを事前に検討・解決しなければならない。このことが、大気拡散モデルの潜在的利用希望者 が多いにも拘らず計算システムの構築が進まない理由の一つであろう。

大気拡散計算システムを独自に構築することなく、大気拡散解析や原子力防災を専門とする他 の研究者や技術者が計算した解析結果を利用する場合には、計算システムを独自に構築すること に伴ういくつかのハードルは除外することができるが、解決すべき別の問題が生じるだろう。他 の研究者や技術者が計算した解析結果をそのまま利用するにしても、加工・編集して利用するに しても、解析結果がユーザの目的や用途に合致しているとは限らず、むしろほとんどの場合に合 致していないと思われる。この場合には、解析結果の加工・編集を当該プログラムの開発者に依 頼するほか、計算実施業者に委託することが考えられる。いずれにしても、時間と労力、計算委 託する場合には費用がかかるため、これらを解決すべく検討する必要がある。

上記のハードルや問題を解決するために、原子力機構や我が国で開発された代表的な大気拡散 計算プログラムを一括して保守管理し、ユーザの目的や用途に応じた解析・適用を実施する組織・ 部署を設置することが手段の一つになるだろう。この構想は、SPEEDIを巡る論争の最中である 平成27年7月に、原子力規制庁と内閣府(原子力防災担当)(以下、当該府庁という)によって 提案された¹⁰。この構想は、地域防災計画や避難計画に係る具体化・充実化に当たって、地方公 共団体が大気拡散計算を活用する場合に、当該府庁は専門的・技術的観点から支援を行うもので ある。具体的には、関係地方公共団体が取り組む地域防災計画の具体化・充実化を支援するため、 当該府庁が関係地方公共団体の依頼に基づき、その目的に応じた適切な大気拡散計算の実施及び 利用が図られるように、原子力機構安全研究・防災支援部門が有する専門的知見や能力を活用し ていくこととした。併せて環境モニタリングを含む防災訓練の高度化にも資するよう安全研究セ ンターの協力を得るなど、支援・研修センターを中心とする専門的・技術的な支援体制を、平成 27年度内を目途に構築することとした。しかし、様々な政策的・技術的事情によって、当該府庁 が主導・関与した上記の構想は実現しなかった。このため、原子力防災への大気拡散モデルの利 用について、そのニーズや対象範囲などを調査して、必要な人員や予算を考慮・比較することに より、原子力機構独自で上記のような組織や部署の設置を検討することは有用であろう。

謝辞

原子力防災への大気拡散モデルの利用について、原子力機構内外から少なからぬ問合せをいた だき、その方々へ回答・協議するとともに、追加の調査や検討を行いました。そのことが本報告 書を作成するきっかけや動機となりました。本件に関する問合せや協議にご参加いただいた原子 力機構外の機関、及び追加の調査や検討にご協力いただいた原子力機構内の部署を下記に列挙致 し、感謝の意を表します。

原子力機構外では、原子力規制庁監視情報課、原子力規制庁総務課国際室、内閣府(原子力防 災担当)、第八管区海上保安本部、茨城県原子力安全対策課、青森県原子力安全対策課、ひたちな か警察署から問合せがあり、その内容等について回答・協議しました。

原子力機構内では、福島研究開発部門 福島研究開発拠点 安全管理部 安全管理課 依田朋之氏、 原子力人材育成センター 国際原子力人材育成課 鈴木崇史氏から問合せをいただき、その内容等 について回答・協議しました。また、追加の調査や検討において、原子力科学研究部門 原子力科 学研究所 原子力基礎工学研究センター 環境・放射線科学研究ディビジョン 環境動態研究グルー プ、同部門同研究所 放射線管理部 環境放射線管理課、安全研究・防災支援部門 安全研究センタ ー 原子炉安全研究ディビジョン リスク評価・防災研究グループ、同部門 原子力緊急時支援・研 修センター 防災支援研修ディビジョン 原子力防災支援グループ、及び核不拡散・核セキュリテ ィ総合支援センター CTBT・輸送支援室の関係者の方々には、多大なご協力をいただきました。 なお、上記の組織名は令和3年4月1日時点のものです。

- 53 -

参考文献

- 原子力委員会:「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針について」(昭和 52 年 6 月 14 日), available from http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V22/N06/197703V22N06.html (accessed on 2021-07-27).
- 2) 原子力安全委員会決定:「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」(昭和57年1月28日、平成13年3月29日一部改訂),原子力安全委員会指針集,改訂13版,pp.374-403, 大成出版社 (2011).
- 3) K. Imai, M. Chino, H. Ishikawa, M. Kai, K. Asai, T. Homma, A. Hidaka, Y. Nakamura, T. Iijima and S. Moriuchi: "SPEEDI : A Computer Code System for the Real-Time Prediction of Radiation Dose to the Public due to an Accidental Release", JAERI 1297 (1985), 75p.
- 4) 茅野政道: 「SPEEDI を真に原子力防災に生かすために」, Isotope News, No.725, pp.22-26 (2014).
- 5) 原子力災害対策本部:「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書一東 京電力福島原子力発電所の事故について一」(平成 23 年 6 月), available from https://www.kantei.go.jp/jp/topics/2011/pdf/houkokusyo_full.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 6) 衆議院調査局経済産業調査室・課:「福島第一原発事故と4つの事故調査委員会」,調査と情報,第756号(平成24年8月23日), available from http://doi.org/10.11501/3526040 (accessed on 2021-07-27).
- 7)日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター:「安全研究センター成果報告書(令和元年度)」, JAEA-Review 2020-020 (2020), 144p.
- 8) 原子力規制庁:「緊急時対策支援システム(ERSS)の運用マニュアル(内規)の制定につい て」,令和元年度第12回原子力規制委員会,資料7(令和元年6月12日), available from https://www.nsr.go.jp/data/000272881.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 9) 原子力規制委員会決定:「緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)の運用について」(平成 26 年 10 月 8 日), available from https://warp.da.ndl.go.jp/info[:]ndljp/pid/11118514/www.nsr.go.jp/data/000048107.pdf (accessed on 2021-07-27).

- 10) 原子力規制庁,内閣府政策統括官(原子力防災担当):「防災基本計画の改定を踏まえた今後の対応について」,平成27年度第20回原子力規制委員会,資料2(平成27年7月22日),available from https://warp.ndl.go.jp/info⁻ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/data/000115657.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 11) 茅野政道:「原子力と大気拡散研究」,日本原子力学会誌,第 32 巻, pp.1080-1086 (1990).
- 12) F. Pasquill and F.B. Smith: "Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources", Ellis Horwood Ltd., Publisher (1983).
- 高原省五:「COQDOQ-FC:核燃料施設の想定事故時被曝線量評価コード」, PRODAS(日本 原子力研究開発機構プログラム等検索システム), available from https://prodas.jaea.go.jp/? COQDOQ-FC (accessed on 2021-07-27).
- 14) 玉置等史, 吉田一雄:「MOX 燃料加工施設 PSA 実施手順書」, JAEA-Technology 2010-004 (2010), 124p.
- 15) H-N Jow, J. L. Sprung, J. A. Rollstin, L. T. Ritchie and D. I. Chanin: "MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS): Model Description", NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Vol. 1 (1990).
- 16) D. Chanin and ML. Young: "Code Manual for MACCS2: User's Guide", NUREG/CR-6613, Vol.1, SAND97-0594 (1998).
- 17)本間俊充,石川淳,富田賢一,村松健:「軽水炉モデルプラントの広範な事故シナリオに対す る環境影響評価」,JAERI-Research 2000-060 (2000), 80p.
- 18) T. Homma, K. Tomita and S. Hato: "Uncertainty and Sensitivity Studies with the Probabilistic Accident Consequence Assessment Code OSCAAR", Nuclear Engineering and Technology, Vol.37, No.3, pp.245-258 (2005).
- 19) 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン 放射線安全・防災研究グループ:「OSCAAR コードパッケージの使用マニュアル」, JAEA-Testing 2020-001 (2020), 65p.
- 20) M. Kimura, T. Oguri, J. Ishikawa and M. Munakata: "Development of an Evaluation Method for Planning of Urgent Protection Strategies in a Nuclear Emergency Using a Level 3 Probabilistic Risk Assessment", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.58, No.3, pp.278-291 (2021).

- 21) S.A. McGuire, J.V. Ramsdell, Jr. and G.F. Athey: "RASCAL 3.0.5: Description of Models and Methods", NUREG-1887 (2007).
- 22) J.V. Ramsdell, Jr., G.F. Athey, S.A. McGuire and L.K. Brandon: "RASCAL 4: Description of Models and Methods", NUREG-1940 (2012).
- 23) H. Terada, A. Furuno and M. Chino: "Improvement of Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (I); New Combination of Models, Atmospheric Dynamic Model MM5 and Particle Random Walk Model GEARN-new", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.41, No.5, pp.632-640 (2004).
- 24) H. Terada and M. Chino: "Improvement of Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (WSPEEDI), (II); Evaluation of Numerical Models by ¹³⁷Cs Deposition due to the Chernobyl Nuclear Accident", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.42, No.7, pp.651-660 (2005).
- 25) H. Terada and M. Chino: "Development of an Atmospheric Dispersion Model for Accidental Discharge of Radionuclides with the Function of Simultaneous Prediction for Multiple Domains and its Evaluation by Application to the Chernobyl Nuclear Accident", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.9, pp.920-931 (2008).
- 26) 寺田宏明, 永井晴康, 古野朗子, 掛札豊和, 原山卓也, 茅野政道:「緊急時環境線量情報予測 システム(世界版) WSPEEDI 第2版の開発」, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.7, No.3, pp.257-267 (2008).
- 27) 東京電力:「柏崎刈羽原子力発電所における放射性物質の拡散影響評価結果」,平成27年度第3回新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会,資料No.1-3(平成27年12月16日), available from
 https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/37789.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 28) 原子力安全技術センター:「SPEEDIと DIANAの比較」(原子力安全技術センター資料),平成 27 年度第3回新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会,資料 No.1-4(平成 27 年 12 月 16 日), available from https://www.pref.niigata.lg.jp/uploaded/attachment/37791.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 29) J.S. Nasstrom, G. Sugiyama, R.L. Baskett, S.C. Larsen and M.M. Bradley: "The National Atmospheric Release Advisory Center Modelling and Decision-Support System for Radiological and Nuclear Emergency Preparedness and Response", International Journal of Emergency Management, Vol.4, No.3, pp.524-550 (2007).

- 30) P.J. Meade: "The Effects of Meteorological Factors on the Dispersion of Airborne Material", Paper Presented in International Symposium on Safety and Siting of Nuclear Plants, Rome, Italy (1959).
- 31) 原子力委員会:「原子炉安全解析のための気象手引について」(昭和 40 年 11 月 11 日),原子 炉安全基準専門部会報告書, available from http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V10/N11/196501V10N11.HTML (accessed on 2021-07-27).
- 32) 原子力委員会決定:「原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて」(昭和 39年5月27日), available from http://www.ikata-tomeru.jp/wp-content/uploads/2015/02/koudai106gousyo.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 33) 原子力委員会:「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針について」(昭和51年9月28日), available from http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/hakusho/wp1977/ss1010105.htm (accessed on 2021-07-27).
- 34) 原子力安全委員会決定:「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」(昭和50年5月13日、平成13年3月29日原子力安全委員会一部改訂),原子力安全委員会指針集,改訂13版,pp.404-469,大成出版社 (2011).
- 35)「災害対策基本法」(昭和 36 年法律第 223 号、平成 30 年法律第 66 号による改正), available from
 https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336AC0000000223 (accessed on 2021-07-27).
- 36) 原子力防災会議幹事会:「原子力災害対策マニュアル」(平成 24 年 10 月 19 日、令和 2 年 7 月 27 日一部改訂), available from https://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 37) 中西千佳, 佐藤猛, 佐藤宗平, 永井晴康, 掛札豊和, 堅田元喜, 都築克紀, 池田武司, 奥野浩, 山本一也, 川上剛, 岡本明子, 武藤重男:「北朝鮮による地下核実験に備えた放射性物質の拡散予測体制の構築と実対応」, JAEA-Technology 2013-030 (2013), 105p.
- 38) 石崎修平,早川剛,都築克紀,寺田宏明,外川織彦:「北朝鮮による地下核実験に対する大気 拡散予測の対応活動」, JAEA-Technology 2018-007 (2018), 43p.

- 39) 原子力規制委員会:「放射性物質の拡散シミュレーションの試算結果について」, 平成 24 年度 第7回原子力規制委員会, 資料 3-1 (平成 24 年 10 月 24 日), available from https://warp.da.ndl.go.jp/info⁻ndljp/pid/11126546/www.nsr.go.jp/data/000047109.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 40) 原子力規制委員会:「拡散シミュレーションの試算結果(総点検版)」, 平成 24 年度第 17 回原 子力規制委員会, 資料 2-1 (平成 24 年 12 月 13 日), available from https://warp.da.ndl.go.jp/info[:]ndljp/pid/11126546/www.nsr.go.jp/data/000047210.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 41) 原子力安全委員会:「「原子力施設等の防災対策について」の見直しに関する考え方について ー中間とりまとめー」,平成23年度第14回原子力安全委員会臨時会議,資料第2号(平成 24年3月22日),原子力施設等防災専門部会防災指針検討ワーキンググループ(報告), available from https://warp.ndl.go.jp/info[:]ndljp/pid/3499478/www.nsc.go.jp/anzen/shidai/genan2012/gena n014/siryo2.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 42) 原子力規制委員会:「平成 24 年度原子力規制委員会第 7 回会議議事録」(平成 24 年 10 月 24 日), available from https://warp.da.ndl.go.jp/info[:]ndljp/pid/11160054/www.nsr.go.jp/data/000047395.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 43) International Commission on Radiological Protection: "Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations", ICRP Publication 109, Annals of the ICRP, Vol.39, No.1 (2009).
- 44) International Atomic Energy Agency, "Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency", IAEA Safety Standards Series No. GSG-2 (2011).
- 45)日本原子力研究開発機構 安全研究センター:「レベル 3PSA 手法による防護措置の被ばく低減効果の分析」,原子力規制委員会 第2回原子力災害事前対策等に関する検討チーム,資料1(平成24年11月30日), available from https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402581/www.nsr.go.jp/data/000049981.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 46) J. R. Johnson: "Radioiodine Dosimetry", Journal of Radioanalytical Chemistry, Vol.65, No.1-2, pp.223-238 (1981).

- 47) 原子力規制委員会:「北朝鮮による核実験実施発表に対する放射能影響の観測結果:過去の観測結果(平成28年度)」, available from https://warp.da.ndl.go.jp/info[:]ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/activity/monitoring/h280 909.html (accessed on 2021-07-27).
- 48) 原子力規制委員会:「北朝鮮による核実験実施発表に対する放射能影響の観測結果:過去の観測結果(平成29年度)」, available from https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/h290903.html (accessed on 2021-07-27).
- 49) 日本気象協会 tenki.jp:「実況天気図(2017年09月08日)」, available from http://www.tenki.jp/past/2017/09/08/chart/(accessed 2021-07-27).
- 50) M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata and H. Yamazawa: "Preliminary Estimation of Release Amounts of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Accidentally Discharged from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant into the Atmosphere", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.48, No.7, pp.1129-1134 (2011).
- 51) G. Katata, M. Ota, H. Terada, M. Chino and H. Nagai: "Atmospheric Discharge and Dispersion of Radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. Part I: Source Term Estimation and Local-Scale Atmospheric Dispersion in Early Phase of the Accident", Journal of Environmental Radioactivity, Vol.109, pp.103-113 (2012).
- 52) G. Katata, H. Terada, H. Nagai and M. Chino: "Numerical Reconstruction of High Dose Rate Zones due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident", Journal of Environmental Radioactivity, Vol.111, pp.2-12 (2012).
- 53) H. Terada, G. Katata, M. Chino and H. Nagai: "Atmospheric Discharge and Dispersion of Radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident. Part II: Verification of the Source Term and Analysis of Regional-Scale Atmospheric Dispersion", Journal of Environmental Radioactivity, Vol.112, pp.141-154 (2012).
- 54) T. Kobayashi, H. Nagai, M. Chino and H. Kawamura: "Source Term Estimation of Atmospheric Release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident by Atmospheric and Oceanic Dispersion Simulations", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.50, No.3, pp.255-264 (2013).

- 55) G. Katata, M. Chino T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii and Y. Sanada: "Detailed Source Term Estimation of the Atmospheric Release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident by Coupling Simulations of an Atmospheric Dispersion Model with an Improved Deposition Scheme and Oceanic Dispersion Model", Atmospheric Chemistry and Physics, Vol.15, pp.1029-1070 (2015).
- 56) H. Terada, H. Nagai, K. Tsuduki, A. Furuno, M. Kadowaki and T. Kakefuda: "Refinement of Source Term and Atmospheric Dispersion Simulations of Radionuclides during the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident", Journal of Environmental Radioactivity, Vol.213, pp.106104_1 - 106104_13 (2020).
- 57) T. Kobayashi, H. Kawamura, K. Fujii and Y. Kamidaira: "Development of a Short-Term Emergency Assessment System of the Marine Environmental Radioactivity around Japan", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.54, No.5, pp.609-616 (2017).
- 58) 永井晴康:「被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション;福島第一原子力発電所事故 初期段階における大気中放射性物質濃度分布の再構築」,日本原子力学会誌,Vol.55,No.12, pp.712-717 (2017).
- 59) M. Chino, H. Terada, H. Nagai, G. Katata, S. Mikami, T. Torii, K. Saito and Y. Nishizawa: "Utilization of ¹³⁴Cs/¹³⁷Cs in the Environment to Identify the Reactor Units that Caused Atmospheric Releases during the Fukushima Daiichi Accident", Scientific Report, Vol.6, pp.31376_1 - 31376_14 (2016).
- 60) 日本原子力産業協会:「Press Release:世界の原子力発電開発の動向 2021 年版を刊行」(令和3年5月28日), available from https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2021/05/doukou2021-press_release. pdf (accessed on 2021-07-27).
- 61) 内閣官房:「放射能対策連絡会議の設置について」(平成15年11月21日内閣官房長官決裁, 平成27年10月6日一部改正), available from https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/konkyo.html (accessed on 2021-07-27).
- 62) 内閣官房:「北朝鮮による核実験の可能性に伴う当面の対応措置について(平成 29 年 9 月 3 日杉田内閣官房副長官指示)」, available from https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/170903soti.pdf (accessed on 2021-07-27).

- 63) NBC テロ対策会議幹事会(事務局:内閣官房副長官補付(事態対処・危機管理担当)):「NBC テロその他大量殺傷型テロ対処現地関係機関連携モデル」(平成13年11月22日、平成28 年1月29日改訂), available from https://www.mhlw.go.jp/topics/2017/01/dl/tp0117-z02-01s.pdf (accessed on 2021-07-27).
- 64) H. Nakayama, D. Satoh, H. Nagai and H. Terada: "Development of Local-Scale High-Resolution Atmospheric Dispersion Model Using Large-Eddy Simulation part 6: Introduction of Detailed Dose Calculation Method", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.58, No.9, pp.949-969 (2021).
- 65) N. Onodera, Y. Idomura, Y. Hasegawa, H. Nakayama, T. Shimokawabe and T. Aoki: "Real-Time Tracer Dispersion Simulations in Oklahoma City Using the Locally Mesh-Refined Lattice Boltzmann Method", Boundary-Layer Meteorology, Vol.179, pp.187-208 (2021).

This is a blank page.