

北朝鮮地下核実験対応のための WSPEEDI-II 自動計算システムの移管と運用

Transfer and Operation of WSPEEDI-II Automatic Calculation System
for Responses to Nuclear Tests by North Korea

根本 美穂 海老根 典也 岡本 明子 保坂 泰久
都築 克紀 寺田 宏明 早川 剛 外川 織彦

Miho NEMOTO, Noriya EBINE, Akiko OKAMOTO, Yasuhisa HOSAKA
Katsunori TSUDUKI, Hiroaki TERADA, Tsuyoshi HAYAKAWA and Orihiko TOGAWA

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

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

August 2021

Japan Atomic Energy Agency

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。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
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（<https://www.jaea.go.jp>）
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 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒 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
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (include data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Intellectual Resources Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
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

北朝鮮地下核実験対応のための WSPEEDI-II 自動計算システムの移管と運用

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
防災支援研修ディビジョン

根本 美穂*1、海老根 典也、岡本 明子、保坂 泰久*2、
都築 克紀+1、寺田 宏明+1、早川 剛+2、外川 織彦+3

(2021 年 6 月 18 日受理)

北朝鮮が地下核実験を実施した際には、原子力緊急時支援・研修センター（支援・研修センター）は、原子力規制庁からの要請に基づき、国による対応への支援活動として、原子力基礎工学研究センター（基礎工センター）の協力を得て、WSPEEDI-II を用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、予測結果を原子力規制庁に提出する。

本報告書は、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で開発され、平成 25 年（2013 年）2 月から平成 29 年（2017 年）9 月までに実施された 3 回の地下核実験対応に使用された WSPEEDI-II 自動計算システムの支援・研修センターへの移管と整備について記述する。また、移管・整備した自動計算システムに関するその後の保守と運用について説明するとともに、北朝鮮地下核実験対応における今後の課題について記述する。

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

+2 原子力緊急時支援・研修センター

+3 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

*1 株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター

*2 株式会社 NESI

Transfer and Operation of WSPEEDI-II Automatic Calculation System for Responses to Nuclear Tests by North Korea

Miho NEMOTO*¹, Noriya EBINE, Akiko OKAMOTO, Yasuhisa HOSAKA*²,
Katsunori TSUDUKI⁺¹, Hiroaki TERADA⁺¹, Tsuyoshi HAYAKAWA⁺² and Orihiko TOGAWA⁺³

Nuclear Emergency Human Resource 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 June 18, 2021)

When North Korea has carried out nuclear tests, Nuclear Emergency Assistance and Training Center (NEAT) predicts atmospheric dispersion of radionuclides by using the WSPEEDI-II upon requests from Nuclear Regulation Authority (NRA) and submits the predicted results to NRA in cooperation with Nuclear Science and Engineering Center (NSEC). This is a part of the activity of NEAT supporting the Japanese Government in emergency responses.

The WSPEEDI-II automatic calculation system specialized for responses to nuclear tests by North Korea was developed by NSEC and was used for responses to three nuclear tests from February 2013 to September 2017. This report describes the transfer and installation of the calculation system to NEAT, and the subsequent maintenance and operation. Future issues for responses to nuclear tests are also described in this report.

Keywords: Nuclear Tests by North Korea, Atmospheric Dispersion of Radionuclides,
WSPEEDI-II Automatic Calculation System, Transfer and Installation,
Maintenance and Operation

+ 1 Environment and Radiation Sciences Division, Nuclear Science and Engineering Center,
Nuclear Science Research Institute, Sector of Nuclear Science Research

+ 2 Nuclear Emergency Assistance and Training Center

+ 3 Nuclear Emergency Preparedness Research and Development Division, Nuclear
Emergency Assistance and Training Center

* 1 Visible Information Center, Inc.

* 2 NESI, Inc.

目 次

1. はじめに	1
2. 北朝鮮による地下核実験対応の経緯と体制	2
2.1 我が国及び原子力機構における対応	2
2.2 WSPEEDI-II 自動計算システムと支援ツールの構成	4
3. WSPEEDI-II 自動計算システムの移管と整備	12
3.1 自動計算システムの移管・整備の経緯	12
3.2 自動計算システムを構成するサーバ機器とソフトウェアの整備	14
3.3 気象データ取得のためのネットワークの構築	20
3.4 移管・整備した自動計算システムの機能確認	23
4. WSPEEDI-II 自動計算システムの保守と運用	25
4.1 OS（オペレーティング・システム）の更新	25
4.2 その他の保守・運用作業	34
5. 今後の課題	35
5.1 最新の計算モデル及び新規の大気拡散予測システムの導入の検討	35
5.2 今後の北朝鮮地下核実験対応のあり方	35
6. おわりに	37
謝辞	38
参考文献	39

Contents

1. Introduction	1
2. Background and framework for responses to nuclear tests by North Korea	2
2.1 Responses by the Japanese government and JAEA	2
2.2 Structure of WSPEEDI-II automatic calculation system and support tools	4
3. Transfer and installation of the WSPEEDI-II automatic calculation system	12
3.1 Background on transfer and installation of the automatic calculation system	12
3.2 Preparation of server equipment and software configuring the automatic calculation system	14
3.3 Construction of a network for obtaining meteorological data	20
3.4 Verification of the transferred and constructed automatic calculation system	23
4. Maintenance and operation of the WSPEEDI-II automatic calculation system	25
4.1 Revision of OS (Operating System)	25
4.2 Other works for maintenance and operation	34
5. Future issues	35
5.1 Consideration on introduction of an up-to-date calculation model and a new atmospheric dispersion system	35
5.2 Future direction of responses to nuclear tests by North Korea	35
6. Concluding remarks	37
Acknowledgements	38
References	39

1. はじめに

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）は、「災害対策基本法（以下、災対法という）」¹⁾及び「武力攻撃事態等及び存立危機事態における我が国の平和と独立並びに国及び国民の安全の確保に関する法律（以下、事態対処法という）」²⁾において指定公共機関に指定されており、国内で原子力災害が発生した際には、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）が中心となり、国や地方公共団体に対して、原子力機構の専門家の派遣、防災資機材の提供、事故の評価・解析等の技術的支援を実施する。一方、国外における核実験や原子力事故等に伴う我が国への放射線影響評価に関する協力要請に対しても、従前より積極的な支援を行ってきた。

北朝鮮は、北東部の豊溪里（ブンゲリ：北緯 41.3 度、東経 129.2 度）に建設された地下核実験場において、平成 18 年（2006 年）10 月から平成 29 年（2017 年）9 月までに全 6 回の地下核実験を実施した。地下核実験の場合には、実験坑道を掘削した岩盤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が、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。自衛隊機による航空機モニタリングを効果的かつ効率的に行うための参考資料として、原子力機構は 1 回目と 4 回目の地下核実験を除いて、原子力規制庁また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 25 年（2013 年）2 月、平成 28 年（2016 年）9 月及び平成 29 年（2017 年）9 月に北朝鮮によって実施された 3 回目、5 回目及び 6 回目の地下核実験において、支援・研修センターは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）、平成 26 年（2014 年）4 月以前はその前身組織である原子力基礎工学研究部門（以下、基礎工部門という）の協力を得て、WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information, Version II) 自動計算システムを用いて大気拡散予測計算を行い、予測結果を原子力規制庁（あるいは文部科学省）に提供した。自動計算システムは、基礎工部門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-II³⁾⁻⁶⁾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部門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。

上記の北朝鮮地下核実験対応に使用された WSPEEDI-II 自動計算システムは、基礎工センターが所在する原子力科学研究所（以下、原科研という：茨城県東海村）に設置されていた。原科研で作動していた自動計算システムには、いくつかの保守及び運用上の問題が生じていた。このため、支援・研修センターは原子力規制庁及び基礎工センターと協議することにより、平成 30 年度（2018 年度）から令和元年度（2019 年度）にかけて自動計算システムを支援・研修センターに移管して整備し、運用を開始した。これにより、自動計算システムに発生していた問題をすべて解決することができた。

本報告書は、北朝鮮地下核実験対応に特化するために基礎工部門で開発され、平成 25 年（2013 年）2 月、平成 28 年（2016 年）9 月及び平成 29 年（2017 年）9 月の地下核実験対応に使用された WSPEEDI-II 自動計算システムを支援・研修センターへ移管し整備した内容について記述する。また、当該自動計算システムに関するその後の保守と運用について説明するとともに、北朝鮮地下核実験対応における今後の課題について記述する。

2. 北朝鮮による地下核実験対応の経緯と体制

2.1 我が国及び原子力機構における対応

(1) 我が国における対応

我が国において、原子力施設等における災害や放射性物質に係る災害が発生した場合には、その発災原因に応じて、災対法、「防災基本計画」⁷⁾、事態対処法及び「武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律（以下、国民保護法という）」⁸⁾に基づいた対応がなされる。原子力機構は災対法及び事態対処法において指定公共機関に指定されており、これらの災害が発生した際は、国や地方公共団体の要請に応じて、緊急時モニタリング等の各種の支援活動を行う。

一方、国外で発生した原子力事故等への対応については、前述の法律には明確に記載されておらず、広く緊急事態全般を対象とした「緊急事態に対する政府の初動対処体制について」⁹⁾に基づき、官邸対策室の設置や緊急参集チームの召集が行われる。特に、放射性物質の影響が想定される事象については、内閣官房副長官を議長とする放射能対策連絡会議による対応が実施される。なお、国外の原子力事故等における発災国への支援については、国際原子力機関（IAEA）の緊急時対応援助ネットワーク（RANET：Response and Assistance Network）¹⁰⁾に基づき、原子力機構等の事前に登録された機関が対応する。

また放射能対策連絡会議は、「放射能対策連絡会議の設置について」¹¹⁾に基づいて内閣官房に設置される。同会議は、「国外における原子力関係事象発生時の対応要領」¹²⁾を定めている。この中で、対象とする国外の原子力関係事象として、緊急事態に至らない場合も含め、「国外で発生する原子力関係事象であって、我が国に放射性物質または放射線による周辺環境への影響または社会的影響を及ぼすおそれのあるもの」と規定している。これらの事象について、放射能（線）測定・分析の充実（特にモニタリングの強化）、人体に対する影響に関する研究の強化、放射能に対する報道・勧告・指導、その他放射能対策に係る諸問題に関して、関係機関の相互の連絡・調整を緊密に行うこととしている。

上記対応のうち、モニタリングの強化については、「国外における原子力関係事象発生時の「モニタリング強化」の実施について」¹³⁾を別途定め、放射能対策連絡会議の構成省庁である原子力規制庁（平成 25 年（2013 年）4 月以前は文部科学省）によるモニタリング強化の結果についての取りまとめや関係各省庁の役割分担について示している。この中で、原子力規制庁の役割の 1 つとして、「必要に応じて、日本原子力研究開発機構等に大気浮遊じん等の放射能の測定を依頼するなど、モニタリング強化への協力を要請するものとする。」と規定されている。

平成 18 年（2006 年）10 月から平成 29 年（2017 年）9 月まで北朝鮮によって 6 回の地下核実験が実施されたが、これら地下核実験の都度に放射能対策連絡会議またはその幹事会が招集され、上記の「モニタリング強化」の取決めに従って「当面の対応措置」が議論・決定された¹⁴⁾⁻²⁰⁾。地下核実験の場合は、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が、我が国として万全を期す観点から、モニタリングの強化、関係各国等からの情報収集、広報体制の強化といった措置が講じられた。

モニタリングの強化のうち、防衛省による航空自衛隊機を用いた高空の大気浮遊じん等の採取・測定では、試料採取の大凡の領域と高度を決めるため、「モニタリング実施の参考情報

として、(国研)日本原子力研究開発機構において、単位量の放射性物質の放出を仮定した拡散計算を行う。」とされた。6回の地下核実験のうち、平成25年(2013年)2月に実施された3回目の地下核実験以降、大気拡散予測計算の実施とその位置付けが「当面の対応措置」に明記された。原子力機構で実施された大気拡散予測計算の結果は原子力規制庁(3回目は文部科学省)に提出され、同庁においてまとめられた各種のモニタリング結果とともに原子力規制庁(3回目は文部科学省)のホームページ(以下、HPという)を通じて毎日公開された。

(2) 原子力機構における対応

平成18年(2006年)10月から平成29年(2017年)9月まで北朝鮮によって6回の地下核実験が実施されたが、原子力機構は原子力規制庁または文部科学省から、「モニタリング強化」の取決めに記述された環境試料の採取・分析や空間放射線量率の測定を要請されたことはこれまでない。一方、1回目と4回目の地下核実験を除いて、原子力規制庁または文部科学省から、放射性物質の一定単位放出率(1 Bq/h)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。それぞれの地下核実験対応において、予測計算の実施は地下核実験実施日から開始され、放射能対策連絡会議による「当面の対応措置」が解除され平常体制に戻るまで、1週間から10日間程度継続された。

平成21年(2009年)5月に、北朝鮮による2回目の地下核実験が実施された際、文部科学省からの要請により、WSPEEDI-IIを用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、文部科学省に予測結果を提出した。予測結果は文部科学省のHPを通じて毎日公開された²¹⁾。2回目の地下核実験では基礎工部門が単独で対応に当たった。原子力機構では、平成24年(2012年)4月より、文部科学省からの計算依頼の受信後、土休日を含め2時間以内に予測結果を提供することが可能な体制を構築し、平成25年(2013年)3月までの約11ヶ月に渡って維持した²²⁾。

上記の体制構築の当初では、文部科学省からの大気拡散予測計算の要請に対して、担当者がWSPEEDI-IIを使用して手動で予測計算を実施した。しかし、地下核実験対応をより短期間で効率的に実施し、かつ担当者の負担を軽減するため、基礎工部門では北朝鮮地下核実験対応に特化したWSPEEDI-II自動計算システムを開発した。このシステムでは、それまでの北朝鮮地下核実験対応の経験に基づいて、計算領域、計算条件、入力パラメータ、出力パターン等が予め最適化・設定されている。自動計算システムでは、毎正時を放出開始とした24時間放出を想定した予測計算を定期的に行い、必要な予測結果図を作成しておくことにより、地下核実験が実施された場合には迅速に予測結果をまとめた資料を作成することができる。

平成25年(2013年)2月に、北朝鮮が3回目の地下核実験を実施した際、文部科学省からの要請により、WSPEEDI-II自動計算システムを用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、文部科学省に予測結果を提出した。予測結果は文部科学省のHPを通じて毎日公開された²³⁾。3回目の地下核実験においては支援・研修センターと基礎工部門が協力・連携して対応した。

平成25年(2013年)4月に北朝鮮核実験対応が文部科学省から原子力規制庁へ移管された後、WSPEEDI-IIによる放射性物質の大気拡散予測計算は、(公益財団法人)原子力安全技

術センター（以下、原安技センターという）への委託となり、基礎工部門の協力の下で同センターに **WSPEEDI-II** の運用体制を構築した。その際、それまでの北朝鮮核実験対応への原子力機構の貢献に対して原子力規制庁から「感謝状」が送られ（平成 26 年（2014 年）4 月 25 日付）、以後の北朝鮮核実験対応に対する原子力機構の関与・協力は一旦なくなった。4 回目の地下核実験では、原子力規制庁からの委託により原安技センターが対応した。

平成 28 年（2016 年）1 月末に原子力規制庁が原安技センターへの委託を終了したため、以降の北朝鮮核実験実施に際しては、原子力規制庁からの依頼文書（平成 28 年（2016 年）4 月 25 日付）に基づいて支援・研修センターが再び対応することとなり、本対応の位置付けを再確認するとともに対応体制を再構築した。支援・研修センターでは、原子力規制庁から大気拡散予測計算の緊急要請を受けた際には、国内における原子力緊急事態に関する指定公共機関としての初動対応を定めた「原子力緊急事態及び武力攻撃事態等における初動対応」に準じて対応することとした。気象庁が地震波から推定した地下核実験の実施日時と実施地点を原子力規制庁から受信した後、北朝鮮地下核実験対応に特化するために計算条件や出力パターン等が予め最適化・設定されている **WSPEEDI-II** 自動計算システムを用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施する。地下核実験対応には迅速性と正確性が求められるため、支援・研修センターでは、担当者全員が迅速かつ正確に対応できるように、報告書を自動で作成するための「報告資料作成ツール」と、地下核実験実施翌日以降の計算条件に切替えるための「計算モード切替ツール」という 2 つの支援ツールを別途開発した（詳細は 2.2 で記述）。

北朝鮮による 5 回目（平成 28 年（2016 年）9 月）及び 6 回目（平成 29 年（2017 年）9 月）の地下核実験が実施された際、支援・研修センターでは基礎工センターの協力の下、**WSPEEDI-II** 自動計算システムを用いて放射性物質の大気拡散予測計算を実施し、迅速な提供が求められる状況で原子力規制庁が要請する期限内に原子力規制庁に予測結果を提出した²⁴⁾。これら対応の際には、先述した 2 つの支援ツールも使用した。予測結果は原子力規制庁の HP を通じて毎日公開された^{25),26)}。

その後、原科研に設置されていた **WSPEEDI-II** 自動計算システムにいくつかの保守及び運用上の問題が生じたため、原子力規制庁からの要請に応じて、平成 30 年度（2018 年度）から令和元年度（2019 年度）にかけて自動計算システムを支援・研修センターに移管して整備する作業を実施した（詳細は 3 章で記述）。これにより、自動計算システムに生じた諸問題はすべて解決された。新たな対応体制が構築されたことを機に、北朝鮮地下核実験対応に対する原子力規制庁から新たな依頼文書（令和元年（2019 年）6 月 7 日付）が支援・研修センターに送付された。以降は、その依頼文書に従って地下核実験の準備と対応を行うこととなった。

2.2 **WSPEEDI-II** 自動計算システムと支援ツールの構成

(1) **WSPEEDI-II** の概要

昭和 61 年（1986 年）に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故（旧ソビエト連邦：現ウクライナ）を契機に、国境を越えて広範囲に拡がる放射性物質の大気拡散を迅速に予測する必要性が認識されるようになり、日本原子力研究所（以下、原研という：原子力機構の前身組織）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緊急時環境

線量情報予測システム WSPEEDI の開発を開始し、平成 9 年（1997 年）にそのシステム第 1 版（WSPEEDI-I）を完成させた。その後原研では、WSPEEDI-I において明らかとなったいくつか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の平成 21 年（2009 年）2 月にそのシステム第 2 版（WSPEEDI-II）を完成させた³⁾⁻⁶⁾。

WSPEEDI-II の構成と計算モデルを図 2-1 に示す。WSPEEDI-II は、大気力学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 MM5²⁷⁾が導入された。また、大気拡散モデルとして原研で開発されて WSPEEDI-I で採用された GERAN²⁸⁾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た。大気力学モデル MM5 で実施される 3 次元気象場計算では雲生成過程や降水過程等が詳細に考慮され、より高精度な乱流拡散や湿性沈着が計算できる。局地的な大気拡散予測計算における課題は、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た。ネスティング機能では、低解像度の広域計算領域の中に高解像度の局地計算領域を入れ子状に設定し、領域間の気象計算及び放射性物質の流出入の整合性を考慮して計算する。これにより、局地的な領域における大気拡散予測計算の精度を向上させるだけでなく、計算コストを削減することで迅速な大気拡散予測計算が可能となった。また WSPEEDI-II ではモニタリングポスト情報から放出源の推定が可能であり、放出点、放出開始時刻、放出継続時間及び放出量という 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 の初期・境界条件として使用される気象庁の全球数値予報データ（GPV データ：Grid Point Value）²⁹⁾をデータ配信機関から WSPEEDI-II に自動転送する機能、Web ベースのグラフィカルユーザーインターフェイス（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（Bq/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、欧州における広域野外大気拡散実験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過程の考慮による再現性の向上が実証されており、東京電力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）の大気拡散解析や、北朝鮮地下核実験の大気拡散予測等で使用された実績がある。また、中国大陸から下層ジェット気流により日本に輸送されるイネウンカ類と呼ばれる害虫の飛来予測にも適用されており、原子力以外の分野においても実績を残している³⁰⁾。

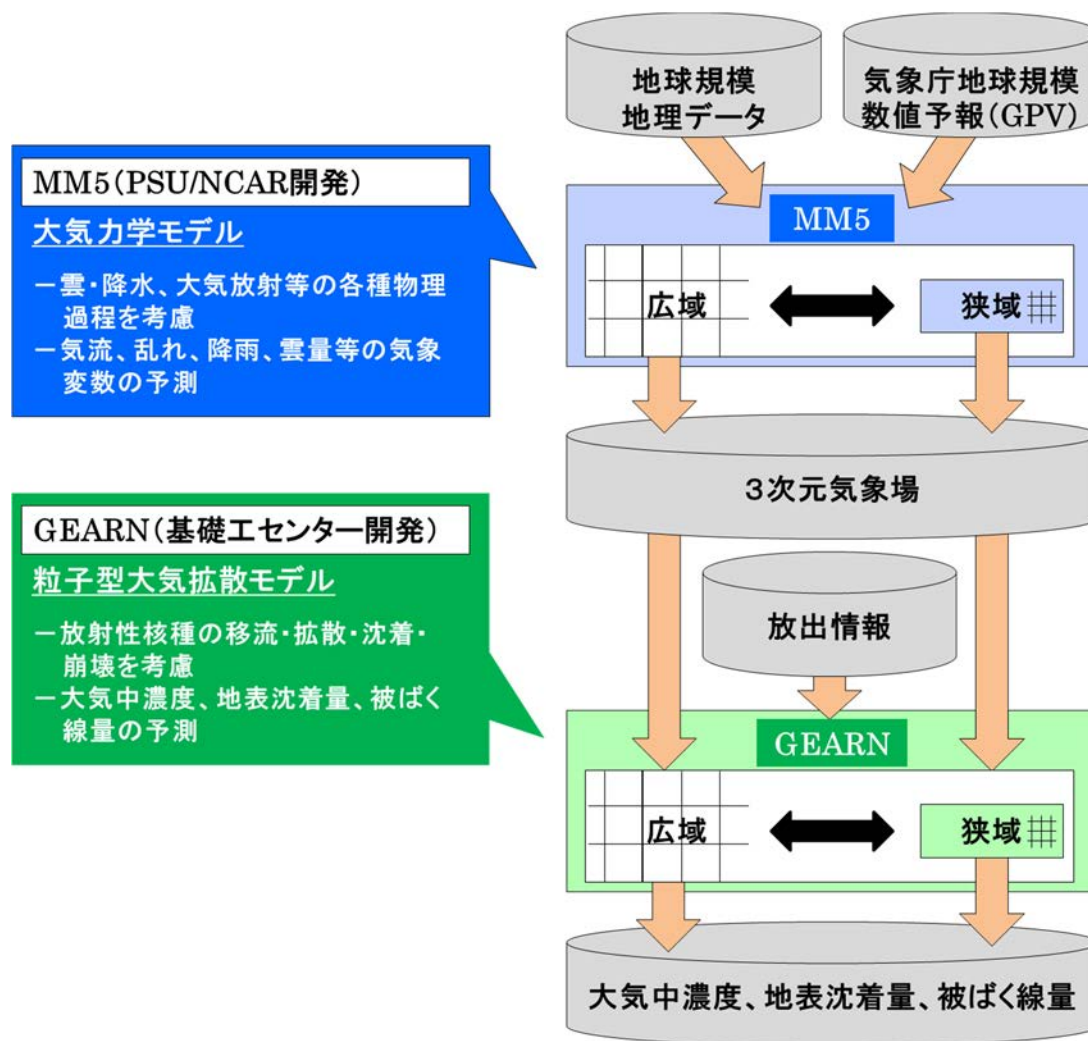


図 2-1 WSPEEDI-II の構成と計算モデル

(2) WSPEEDI-II 自動計算システムの開発経緯と概要

北朝鮮による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、基礎工部門では北朝鮮地下核実験対応に特化したシステムとして、WSPEEDI-II 自動計算システムを開発した。本節では、自動計算システムの概要とシステムに設定されている計算条件について記述する。

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。計算条件の中でも、計算領域や放出核種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。

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 2-1 にまとめた。計算条件の設定理由について下記に示す^{22),24)}。

① 放出位置

放出位置は、地下核実験場が建設されている北朝鮮北東部の豊溪里（ブンゲリ：北緯 41.3 度、東経 129.2 度）として大気拡散予測計算を実施した。放出点座標の詳細は原子力規制庁から送付される要請文書に記載されており、気象庁が観測した地震波の震源情報に基づいて決定される。放出位置が事前設定と異なる場合は、担当者によって WSPEEDI-II 自動計算システムの設定を必要に応じて変更する。

② 放出高度

地下核実験場から放射性物質が漏れ出す場合、地表から放出されると想定できる。そのため、WSPEEDI-II 自動計算システムでは、放出高度を地上高さ 1 m（鉛直座標系では地表と同等）に設定した。

③ 計算範囲

大気拡散予測計算の範囲は、豊溪里にある地下核実験場から放出された放射性物質による日本への影響範囲を確認できるように、日本全域及び放出位置にあたる北朝鮮を含む 3,000 km 四方に設定した。

④ 水平格子数及び水平解像度

WSPEEDI-II では、計算領域を格子で分割し各格子について大気拡散予測計算を行っており、格子数が多いほど計算時間が長くなる。WSPEEDI-II 自動計算システムでは、計算精度と計算時間を考慮し、水平格子数を 150×150、水平解像度を 20 km に設定した。

⑤ 対象核種

対象核種は、 ^{131}I （ヨウ素 131）、 ^{133}Xe （キセノン 133）及び ^{137}Cs （セシウム 137）の 3 核種の放出を想定した。希ガスである ^{133}Xe は地下核実験時に放出されやすい核種であり、降水による湿性沈着がないことから、他の核種に比べて大気拡散範囲が広がると予想され、航空機モニタリングの実施場所の選定に適していると考えられる。 ^{131}I 及び ^{137}Cs については、原子力規制庁が実施する地上での大気浮遊じん採取における核種分析の対象である。

⑥ 放出量

地下核実験により放出される放射性物質の量を推定することは困難であるため、一定単位放出率（1 Bq/h）を仮定した。

⑦ 出力高度

大気拡散予測結果の出力高度は、地上、上空 1,000 m、上空 2,000 m 及び上空 3,000 m

の4高度とした。地上については、地上での大気浮遊じん等の採取・測定の参考情報として設定した。上空1,000 m及び上空2,000 mについては、鉛直方向における放射性プルームの動きを確認できるように設定した。上空3,000 mについては、過去に実施した大気拡散予測計算において、放射性物質の到達高度が上空3,000 m程度であったことから、出力高度を上空3,000 mに設定した。

⑧ 放出開始時刻及び放出継続時間

放出開始時刻及び放出継続時間は、過去の計算条件を参考に設定した。初日は、地下核実験実施時刻に近い正時を放出開始時刻としており、その後24時間放射性物質の放出が継続するという仮定の下で大気拡散予測計算を実施した。正式な地下核実験実施時刻は、地下核実験後に原子力規制庁から送付される要請文書に記述されており、気象庁が地震波を観測した時刻に基づいて推定している。2日目は、初日に設定した放出開始時刻及び地下核実験実施2日目の0時を放出開始時刻とした2ケースを想定し、それぞれ24時間放出として大気拡散予測計算を実施した。3日目以降については、計算実施日の前日0時及び計算実施日0時を放出開始時刻とした2ケースを想定し、いずれも24時間放出とした。これは地下核実験が実施されてしばらく時間が経過した後に、放射性物質が漏れ出すことを考慮したためである。

⑨ 出力時刻

大気拡散予測結果の出力は、過去の出力方法を参考にして、放射性プルームの動きを確認できる3時間間隔に設定した。出力時刻は、計算実施日の翌日9時、12時、15時及び18時の4時刻とした。以前は、地下核実験実施日において上記の出力に加え、地下核実験実施当日における放出開始時刻の3時間後、6時間後、9時間後及び12時間後について出力していたが、地下核実験実施当日に大気拡散予測結果を航空自衛隊機の航空ルート of 参考資料とすることは難しいため、現在は上記の出力のみとしている。

表 2-1 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

計算 実施日	対象核種	放出時間※1	出力結果※2		出力 結果 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	3 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 日目の 0 時から 同日の 24 時まで			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
		計算実施日の 0 時から 同日の 24 時まで			48

※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 2-1 に示すように、各計算実施日によって放出時間や出力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の 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。

(3) 支援ツールの開発経緯と概要

北朝鮮による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、支援・研修センター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。2 種類の支援ツールについて、それらの開発経緯と機能等を以下に記述する²⁴⁾。

① 報告資料作成ツール

平成 25 年（2013 年）2 月に実施された 3 回目の地下核実験において、支援・研修センターは基礎工部門と協力・連携して、大気拡散予測計算を実施するとともに手動によって報告資料を作成したが、作業負担や作業効率の面で課題が残されていた。手動で報告資料を作成する場合、まず WSPEEDI-II 自動計算システムにより Web ページ上に出力された大気拡散予測図をダウンロードして保存する。拡散予測図は指定された 4 時刻における 3 核種を対象とした 4 高度での大気中濃度を予測した図であり、報告資料 1 式につき 48 枚にのぼる。1 ページ毎に拡散予測図を 2 枚ずつ貼付した後、拡散予測図すべてに所定のヘッダーを付け、ページ下部には注釈を添える。その他、計算条件や出力内容等を記述した表紙を作成するなど、文部科学省や原子力規制庁のプレス発表用に体裁を整える必要がある。報告資料の作成後には、計算条件や出力内容等の誤表記、拡散予測図の貼付に間違いがないかを複数名でチェックする。この一連の作業を経て報告資料が完成する。これらの作業を手動で行うのは膨大な手間と時間がかかるとともに、拡散予測図の貼付ミス等のリスクもあった。このため、担当者は自動計算システムの概要や拡散予測図の要請内容を熟知している必要があり、対応できる人員は限られていた。そこで、作業の手間・時間や貼付ミス等によるリスクを低減するために、報告資料を自動で作成するツールの開発に至った。

報告資料作成ツールは、必要な入力情報を入力することにより、WSPEEDI-II 自動計算システムによって Web ページに出力された大気拡散予測図から必要な図のみを抽出し、体裁を整えた報告資料を自動的に作成するツールである。報告資料作成ツールを使用することにより、拡散予測図の保存から体裁調整までを一括で自動処理することができる。手動による作成作業と比較すると、作業工程が簡単化され作業時間も大幅に短縮される。作成された報告資料に対して目視と手動で確認・修正が必要であるが、プログラム処理による報告資料作成であるため、情報入力の誤りや拡散予測図が出力されている Web ページに問題等がなければ、誤表記や誤貼付けのリスクも大幅に低減される。そのため、入力すべき情報を把握し、報告資料作成ツールの操作方法を習得していれば、報告資料を迅速に作成することができる。

② 計算モード切替ツール

WSPEEDI-II 自動計算システムでは、計算実施日によって放出時間や出力パターンといった計算条件が異なるため、計算内容に合わせて 4 つの計算モード（初日モード、2 日目モード、3 日目以降モード及び初動モード）が用意されている。また、放出条件（放出位置及び放出開始時刻）についても、可変条件として必要に応じて設定・変更することができる。計算モード及び放出条件は、自動計算システムを導入している Linux サーバ内の設定ファイルで管理しており、設定・変更をするためには Linux の操作コマンド等の基礎知識が必要となる。業務等で普段から Linux サーバを使用している者であれば、難しい操作ではないが、Linux に関する知識のない者が本作業を行うのは非常に負担がかかる。また、操作を誤ると自動計算システムに影響を及ぼす可能性も考えられるため、非常にリスクの高い作業となる。そこで、Linux に関する知識のない者でも計算モード及び放出条件の設定・変更作業が容易となるツールを開発した。

計算モード切替ツールは、WSPEEDI-II 自動計算システムで設定されている計算モード及び放出条件を、Windows 上で設定・変更することを目的として開発したツールである。上述の通り、本来計算モード及び放出条件を設定・変更するためには Linux サーバにアクセスする必要があるため、Linux サーバ上における操作が必要となる。しかし、計算モード切替ツールを使用することにより、リモート・ログオン・クライアントを使用せずに GUI 上の操作のみで計算モード及び放出条件を設定・変更することができる。また、その他の支援機能として、現在設定されている計算モード及び放出条件を確認する機能を実装している。

3. WSPEEDI-II 自動計算システムの移管と整備

3.1 自動計算システムの移管・整備の経緯

平成 25 年（2013 年）2 月、平成 28 年（2016 年）9 月及び平成 29 年（2017 年）9 月に北朝鮮によって実施された 3 回目、5 回目及び 6 回目の地下核実験対応に使用された WSPEEDI-II 自動計算システムは、支援・研修センター（茨城県ひたちなか市）ではなく、基礎工センターが所在する原科研（茨城県東海村）に設置されていた。上述の 3 回の対応時に作動していた自動計算システムには、下記のような保守及び運用上の問題があった。

- (1) 原科研における停電時（全域及び建屋）には対応不能である。
- (2) 自動計算システムを格納・作動させているサーバが老朽化している。
- (3) 自動計算システムを常時運用する体制ではない。

上記 (1) については、原科研では所全域及び特定建屋の計画停電（それぞれ年に 1～2 回）が実施されるが、特別の建屋を除いて非常用発電設備が備えられていないため、停電時には対応不能であった。一方、支援・研修センターには非常用発電設備が整備されているため、原則的には計画的及び突発的な停電は起こらない。(2) については、WSPEEDI-II 自動計算システムを格納・作動させている既存のサーバ機器及び汎用ソフトウェアは購入後数年が経過して老朽化しているため、サーバ機器や汎用ソフトウェアの更新が必要であった。(3) については、自動計算システムの開発部署である基礎工センターは研究開発組織であるため、常時保守管理が可能な運用をすることができなかった。

上記の問題を解決するため、原子力規制庁及び基礎工センターと協議した結果、WSPEEDI-II 自動計算システムを原科研から支援・研修センターへ移管して整備することが最善であると結論された。ここでは、原科研で作動している既存の自動計算システムを単にサーバ機器ごと移動するのではなく、新しいサーバ機器一式を調達して支援・研修センターに設置し、必要なソフトウェア一式をそれらに格納する方法を取った。移管・整備した自動計算システムを支援・研修センターが保守・運用することにより、上記すべての問題を解決することができると考えられた。この際、支援・研修センターにおける自動計算システムの移管・整備作業（計算機能の確認・検証を含む）が完了するまで、原科研に設置されていた既存の自動計算システムを作動させておくこととした。これにより、常時どちらかの自動計算システムが作動しているため、北朝鮮地下核実験対応は間断なく実施することができる体制とした。

WSPEEDI-II 自動計算システムを支援・研修センターに設置して作動させるためには、気象データである GPV データを一般財団法人気象業務支援センターから毎日オンラインで直接取得するネットワークを支援・研修センターに新たに構築する必要があった。また、新規に構築する自動計算システムでは、当時作動していた自動計算システムを構成するサーバ機器、ソフトウェア及びネットワークの構成要素と仕様を踏襲することを基本とするが、必要または適切な場合には最新のものを導入・整備することとした。

支援・研修センターに新たに整備する WSPEEDI-II 自動計算システムの構成について、原子力規制庁及び原子力機構内の関係部署（基礎工センター及びシステム計算科学センター）と事前に協議した。決定した自動計算システム及びネットワークの論理構成及び物理構成をそれぞれ図 3-1 及び図 3-2 に示す。また、自動計算システムの移管・整備作業は、基礎工センター及びシステム計算科学センターとその都度協議して協力や助言を得ながら進めた。

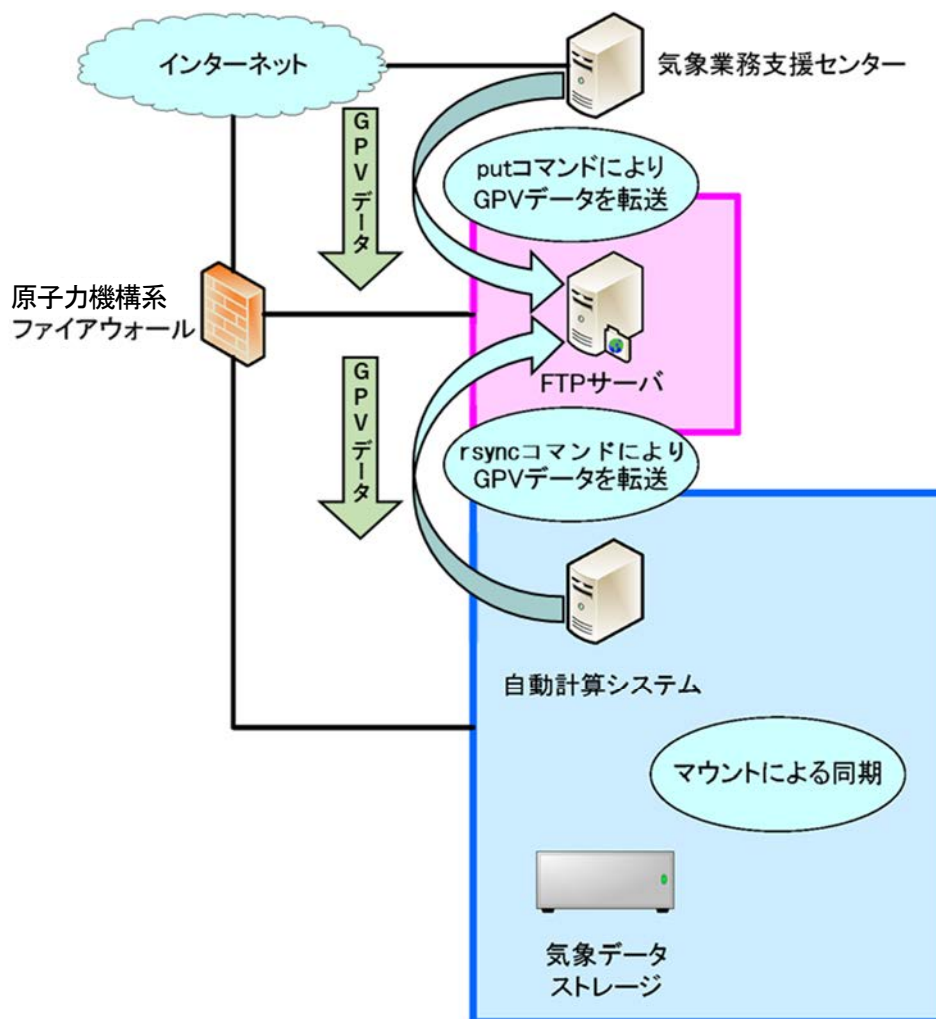


図 3-1 WSPEEDI-II 自動計算システム及びネットワークの論理構成
 (put : 接続元のサーバから接続先にデータを転送するコマンド、
 rsync コマンド : 接続元と接続先のフォルダ間でファイルの同期を行う
 ソフトウェア (rsync) のコマンド)

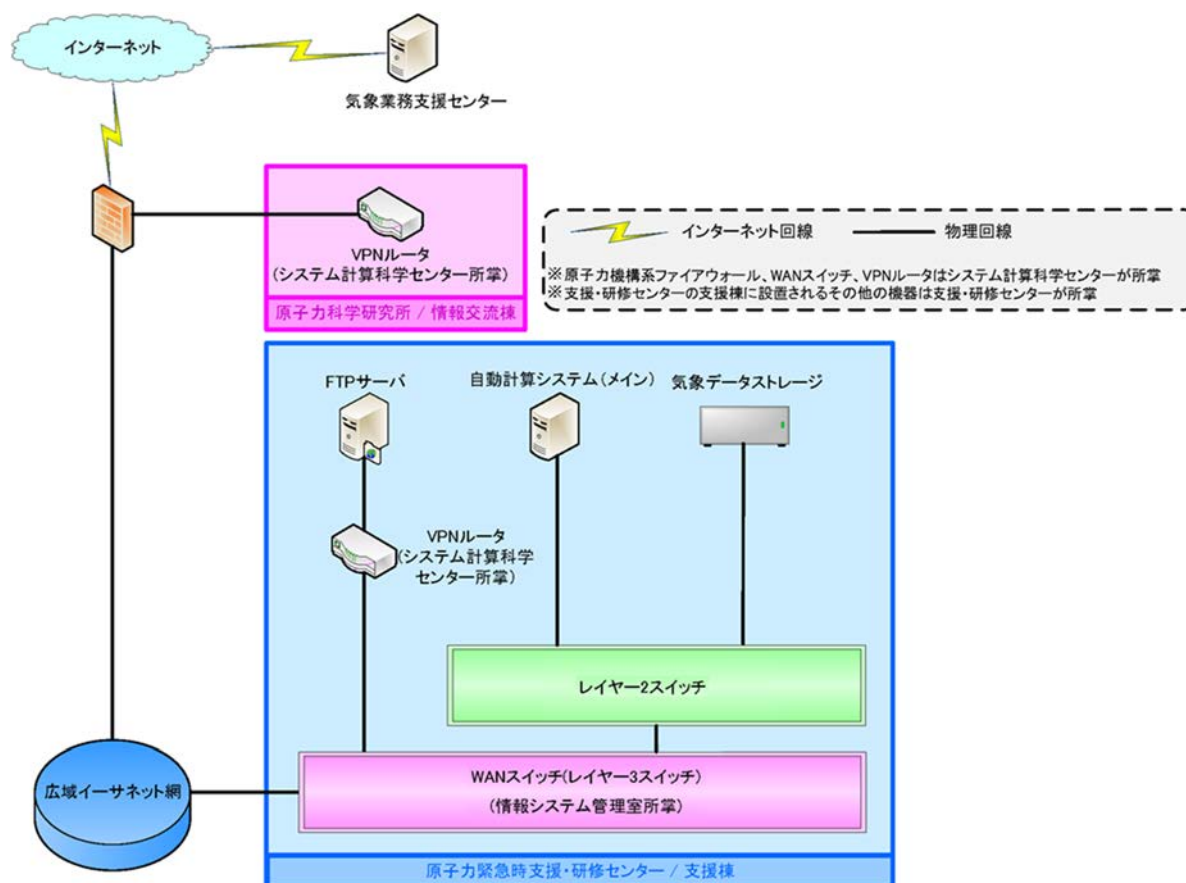


図 3-2 WSPEEDI-II 自動計算システム及びネットワークの物理構成

3.2 自動計算システムを構成するサーバ機器とソフトウェアの整備

図 3-2 の物理構成図に示すように、WSPEEDI-II 自動計算システム及びネットワークを構成する機器として、サーバ 2 台（自動計算用（以下、自動計算サーバという）、気象データ受信用（以下、FTP¹サーバという））、気象データストレージ 1 台、そして、外部機関と接続可能なネットワークに接続するための VPN²ルータを必要とした。サーバ 2 台にはレンタルサーバを用い、気象データストレージには支援・研修センターに既存のものを使用、VPN ルータはシステム計算科学センター所有のものを借用した。レンタルサーバのうち自動計算サーバの処理能力については、基礎工センターの自動計算サーバを参考に、CPU³はコア数 8、クロック周波数 2.1 GHz を 2 つ、メモリは合計 32 GB（16 GB を 2 つ）を実装した。また、システム運用のための冗長性を高める

¹ FTP：(File Transfer Protocol) サーバ等の機器同士でファイル転送を行うための通信方法の一つ。

² VPN：(Virtual Private Network) インターネット上に仮想的な専用回線を作成し、特定のサーバ同士で通信を行う技術。

³ CPU：(Central Processing Unit) コンピュータの演算処理や制御を行う処理装置。
コア数は CPU の中に組み込まれている実際に処理を行う装置の数、クロック周波数は処理を行う速度を表す。

ため RAID5⁴を設定した。

本作業でレンタルしたサーバはハードウェアのみであるため、OS（オペレーティング・システム）、セキュリティ対策ソフト、そして自動計算サーバの場合には **WSPEEDI-II** 自動計算システムの構築に必要なソフトウェアやパッケージ⁵の順にインストールを行った。自動計算サーバ及び **FTP** サーバの OS には、当時 **CentOS6** シリーズで最新版であった **CentOS6.10** を使用した。ウィルス対策ソフトには、システム計算科学センターが管理している **McAfee®** をインストールした。パッケージ管理ツール⁶からインストールできるパッケージは、パッケージ管理ツール用いてインストールを行った。ただし、パッケージのバージョンの合わないものについては手動にてインストールを行った。**FTP** サーバにインストールしたパッケージを表 3-1 に示す。インストール後 **vsftpd** と **rsyncd** サービスを起動し、気象業務支援センターからのアクセス及び自動計算サーバからのアクセスを受けられるようにした。また、後述するネットワーク上のファイアウォールの他に、IP アドレス、ポート番号、通信方法（**ftp**、**rsync** 等）により、アクセス制限を設定してサーバの安全性を高めた。自動計算サーバにインストールしたパッケージの一部を表 3-2 に示す。また、コンパイラにはインテルコンパイラを購入しインストールをした。**WSPEEDI-II** 自動計算システムについては、基礎工センターの自動計算システムのバックアップデータから構築をした。バックアップデータを展開したフォルダ構成を図 3-3、各フォルダの役割を表 3-3 に示す。展開したフォルダのうち、「**SHELL**」フォルダにはシステムを動かすためのシェルスクリプトが、「**TMPL**」フォルダには処理中に使用するテンプレートファイルが格納されている。この 2 つのフォルダに格納されているファイルに記載されているパス⁷等を、支援・研修センターに構築した自動計算サーバのフォルダ構成に合わせて編集し、動作環境を調整した。

⁴ **RAID5**：複数のハードディスクを一つのハードディスクとして認識させて冗長化を図る技術を **RAID** といい、**RAID** コントローラという専用のカードと **HDD** を使用して構築する。データの分散方法、助長可能方法でいくつかのタイプに分かれる。**RAID5** はそのうちの一種類であり、コントローラと 3 台以上の **HDD** を使用して構成する。コントローラで書き込みデータを分割すると同時にその修復用データを作成し、それらを各 **HDD** に分割して書き込むことで、1 台の **HDD** が故障した場合でも継続して運用することができる。

⁵ パッケージ：ソフトウェアに関するファイル一式をまとめたもの。

⁶ パッケージ管理ツール：パッケージのインストールやアンインストールを行うツール。パッケージのインストールを行う際に、そのパッケージを動作させるために必要となる別のパッケージと一緒にインストールできる。
yum や **dnf** など種類が存在する。

⁷ パス：サーバ上でファイルやフォルダの置いている場所までの道筋のこと。

表 3-1 FTP サーバのインストールパッケージ

パッケージ名	機能
vsftp	FTP 通信を使用して安全にデータの転送を行うサーバを構築するためのソフトウェア。 接続先になるサーバは vsftpd サービスを起動して接続可能な状態にしておく必要がある。
rsync	接続元と接続先のサーバ及びファイルやフォルダの同期を行うソフトウェア。 接続先になるサーバは rsyncd サービスを起動して同期可能な状態にしておく必要がある。

表 3-2 自動計算サーバのインストールパッケージ（一部）

パッケージ名	機能
GMT	マップ図を作成するソフトウェア。
Open MPI	計算等の処理を並列で行うためのソフトウェア。 手動でインストールする。
rsync	接続元と接続先のフォルダ間でファイルの同期を行うソフトウェア。
NetCDF	NetCDF 形式ファイルを読み書きするために使用するプログラム。
ImageMagick	画像の加工を行うためのソフトウェア。
Expect	プログラムとのやりとりを自動化するソフトウェア。
httpd	Web サーバを作成するためのソフトウェア。
tcl	プログラミング言語の一つ。 tk と組み合わせて GUI ツールの作成ができる。
tk	GUI を作成するための部品の集まり。
GCC	C、C++、fortran 等複数のプログラミング言語のコンパイラ及びそのライブラリを集めたパッケージ。
GDAL	地理空間データの変換用ライブラリ。

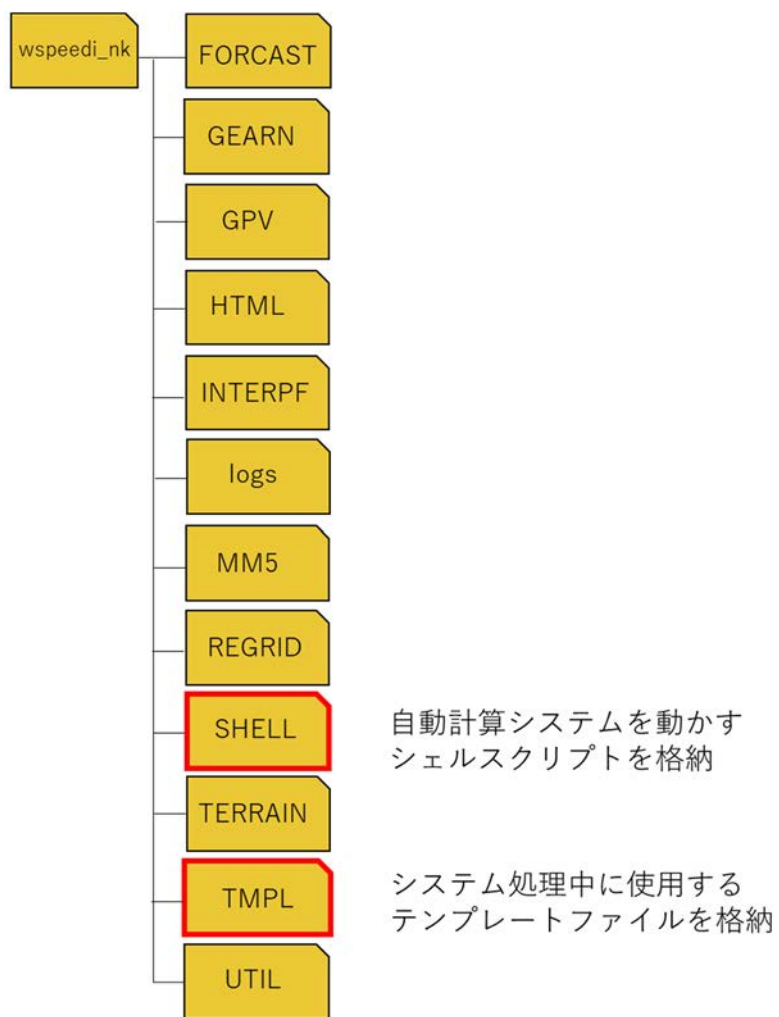


図 3-3 WSPEEDI-II 自動計算システムのフォルダの構成

表 3-3 WSPEEDI-II 自動計算システムの各フォルダの役割 ³¹⁾

フォルダ名	役割
FORCAST	各計算日毎に GEARN と MM5 の計算結果を格納する。
GEARN	大気拡散モデル GEARN により放射性核種の拡散計算を行う。
GPV	入力気象データ（GPV データ）を格納する。
HTML	計算結果を Web 表示するための HTML ファイルと図形ファイルを格納する。
INTERPF	REGRID の気象データから鉛直方向に内挿した気象データを作成する。 （MM5 で使用する。）
logs	システムのログファイルを格納する。
MM5	INTERPF の気象データを用いて大気力学モデル MM5 により気象場を計算する。 （GEARN で放射性核種の拡散計算に使用する。）
REGRID	GPV データから水平方向に内挿した気象データを作成する。 （INTERPF で使用する。）
SHELL	自動計算システムを動かすシェルスクリプトを格納する。
TERRAIN	計算に使用する地形データを格納する。 本計算においては、計算領域の変更がないため、地形データ作成用のプログラムは格納せず、作成された地形データファイルのみ格納している。
TMPL	システム処理中に使用するテンプレートファイルを格納する。
UTIL	ソフトウェアとインストール用のシェルスクリプトを格納する。

3.3 気象データ取得のためのネットワークの構築

気象データ（GPV データ）は、毎日オンラインで気象業務支援センターから配信先となるサーバ（FTP サーバ）に配信される。そのため、FTP サーバは外部機関からアクセス可能である必要がある。原子力機構内ネットワークの情報セキュリティの確保の観点から、当該サーバのネットワークは原子力機構内ネットワーク内ではなく DMZ⁸上に作成され、ファイアウォールに IP アドレス、ポート番号、通信方法（ftp、rsync 等）による制限を設ける必要がある。FTP サーバにおける DMZ の構成を図 3-4 に示す。システム計算科学センターと協議し、当該サーバのネットワークはシステム計算科学センターの管理する DMZ 上に構築した。

外部機関からのアクセスは、原子力機構系ファイアウォールによって振り分けられ、システム計算科学センターの管理する DMZ 上の各サーバに送られる。しかし、当時の支援・研修センターには DMZ が存在しなかった。そこで、システム計算科学センターの協力のもと支援・研修センターに VPN ルータを設置し、システム計算科学センターに設置している VPN ルータと接続することで広域イーサネット上に仮想的な DMZ 専用回線を構築した。

WSPEEDI-II 自動計算システムの運用を開始後、気象業務支援センターから配信されたデータが受信できないという問題が発生した。原因は、支援・研修センターで使用している広域イーサネット回線の性能では、気象データの配信と支援・研修センター内で使用している多数の PC の Windows の定期的なアップデートが重なった場合に、処理が間に合わなくなってしまうことだった。気象データは、1 日 132 個のファイルが 5 回に分けて配信される。配信時間及びファイル数と容量を表 3-4 に示す。5 回の配信のうち 12 時 30 分から配信される 1 回だけ就業時間内となっている。また、支援・研修センターでは毎月特定の日に Windows のアップデートを行うようにしており、アップデートを行うため外部へのアクセスが集中し、その日は自動計算システムの運用前から通信が遅くなる傾向が見られた。そこに約 848 MB の気象データが配信されることとなった結果、12 時 30 分から配信されるデータだけ受信サーバに届くまで時間がかかり送信ができなくなるという状態となった。この問題は、令和元年（2019 年）9 月にシステム計算科学センターにより支援・研修センターへの回線の増設が行われたこと、令和元年（2019 年）10 月に支援・研修センターのシステム担当者により Windows アップデート用のサーバが構築されたことにより改善した。

⁸ DMZ : (DeMilitarized Zone) 社内ネットワークなどの内部ネットワークを守るため、内部ネットワークとインターネットなどの外部ネットワークの中間に作成するネットワーク。内部・外部両方のネットワークから DMZ に構築したサーバへアクセスが可能となるが、DMZ に構築したサーバから内部ネットワークへのアクセスはできない。そのため、もし、DMZ に構築したサーバが外部から攻撃を受けて乗っ取られてしまっても内部ネットワークへのアクセスはできないため内部ネットワーク上の情報は守られる。

表 3-4 配信時刻毎の気象データのファイル数と容量

気象データの配信時刻	配信される気象データ	
	ファイル数	容量 (MB)
0 時 30 分	25	824.5
3 時 30 分	26	788.1
6 時 30 分	27	848.0
12 時 30 分	27	848.0
18 時 30 分	27	848.0

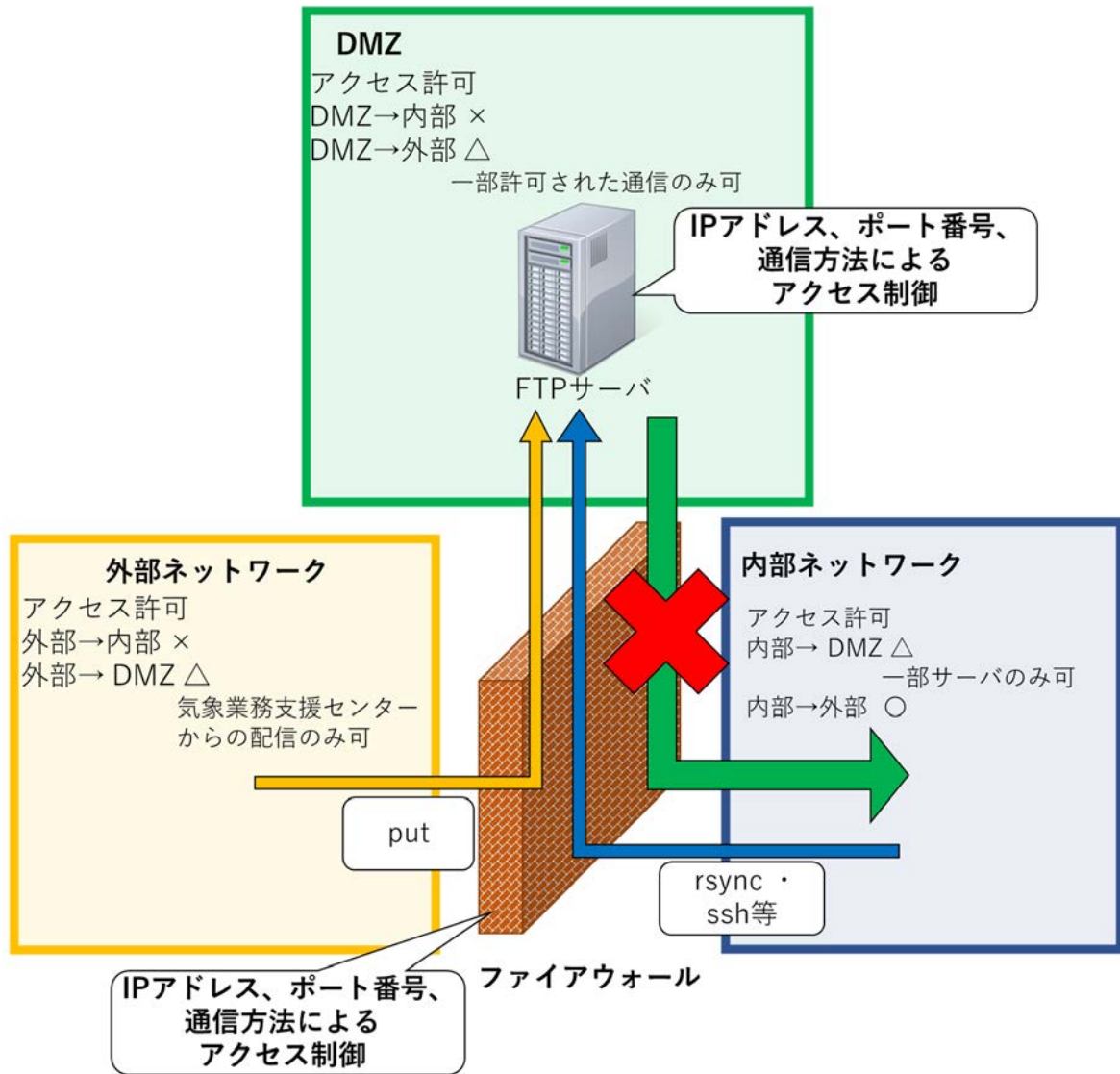


図 3-4 FTP サーバにおける DMZ の構成
(ssh : 接続元のサーバから接続先のサーバを遠隔操作するための接続コマンド)

3.4 移管・整備した自動計算システムの機能確認

支援・研修センターに移管・整備した **WSPEEDI-II** 自動計算システムと基礎工センターに整備されていた自動計算システムの計算結果のうち、放射性核種の拡散が確認できる図を選出して両者を比較した。一例として、図 3-5 に、令和元年（2019 年）6 月 19 日 6 時に放出が開始された場合（放出継続時間は 24 時間）の令和元年（2019 年）6 月 20 日 18 時における上空 1,000 m のヨウ素 131 の大気中濃度分布図を示す。放出点から北東に弧を描くように分布しているが、両図に差異は見られない。また、他の計算結果についても差異は見られなかった。これにより、支援・研修センターに構築した自動計算システムが正常に稼働していることが確認できた。

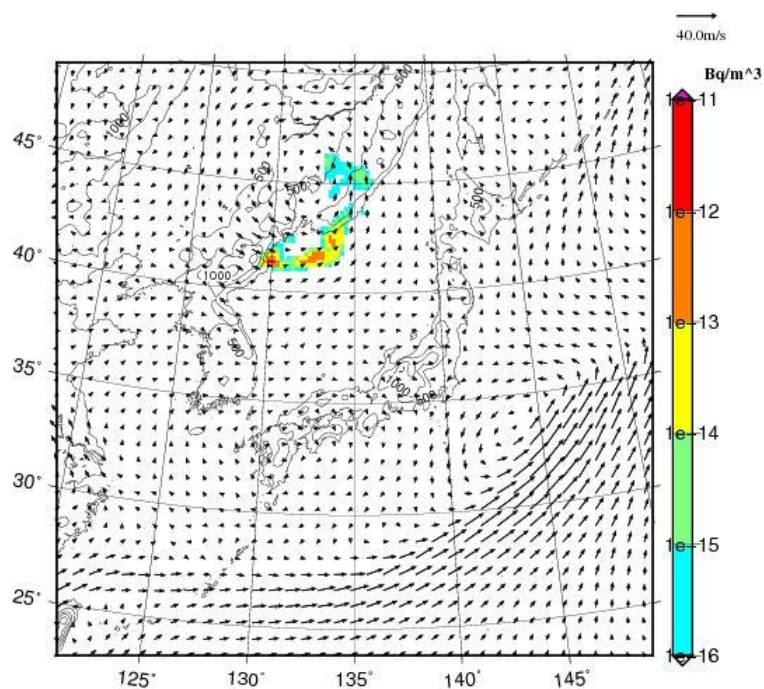
移管・整備した自動計算サーバの計算工程ごとの計算時間の一例を表 3-5 に示す。気象計算（MM5）約 15 分、拡散計算（GEARN）約 20 分となっており、この例では図の作成工程の時間の測定はされていないが、現在稼働している **WSPEEDI-II** 自動計算システムにおいて図の作成工程が約 11 分であることから、多少計算時間が前後してもおよそ 1 時間ほどで計算が行われたと推測される。

表 3-5 自動計算サーバの計算時間

計算工程	計算時間 (時間：分：秒)
GPV データの変換	0:02:18
気象計算（MM5）	0:15:05
拡散計算（GEARN）	0:19:56

自動計算システム（支援・研修センター）

I-131 concentration at 1000m JST= 2019-06-20_18h00m



自動計算システム（基礎工センター）

I-131 concentration at 1000m JST= 2019-06-20_18h00m

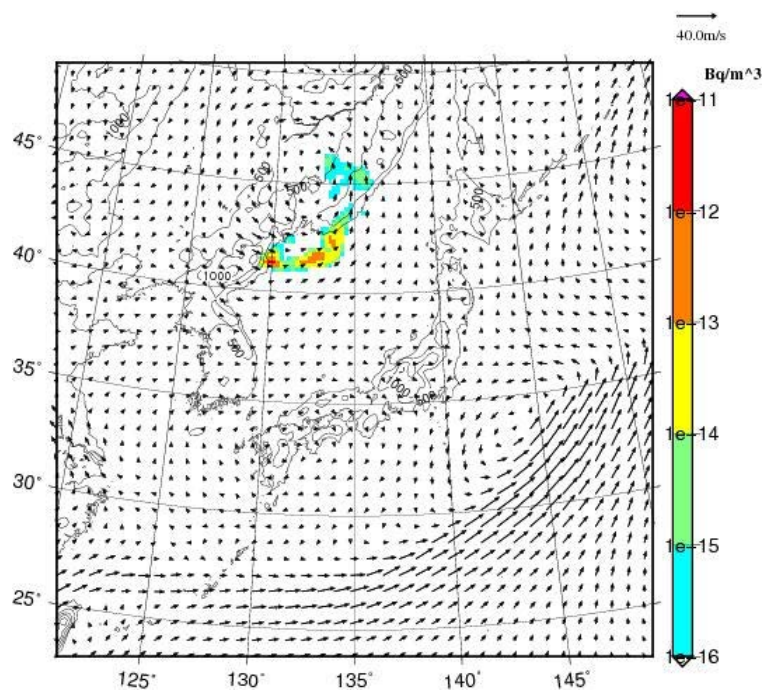


図 3-5 WSPEEDI-II 自動計算システムの出力の比較

（上図：支援・研修センター所有システム、下図：基礎工センター所有システム）

（放出開始日時：令和元年（2019年）6月19日6時（24時間放出継続）、

出力：令和元年（2019年）6月20日18時、上空1,000m、ヨウ素131）

4. WSPEEDI-II 自動計算システムの保守と運用

4.1 OS（オペレーティング・システム）の更新

支援・研修センターに WSPEEDI-II 自動計算システムの移管・整備を行った際は、基礎工センターで動作していた自動計算システムと同じシステムとなることを重視してシステムの構築を行った。これは、支援・研修センターに自動計算システムを構築することを基礎工センターに相談した時点では、より迅速にシステムの構築を行うことが可能となること、同じシステムを構築することにより両者の計算結果の比較・検討が容易になること、さらに最新の OS を使用した場合に自動計算システムが正常に動作しない可能性があることが喚起されたためである。しかし、自動計算システムのサーバにインストールした OS である CentOS6.10 は、令和 2 年（2020 年）11 月 30 日をもってサポートが終了することが決定していた。そのため、基礎工センターと再度協議をし、サーバを構築した次の年度に OS の更新作業を行った。更新する OS は CentOS の中でも最新となる CentOS8 系統とした。OS の更新作業は以下の手順と方法で行った。

(1) OS 更新用のインストールメディアの作成

CentOS6 から CentOS8 に更新を行う方法について調べた結果、更新用のツールなどの公開はされておらず、現行のシステムを維持して OS の更新を行うことは困難であった。そのため、サーバに CentOS8 を新規インストールして、再度 WSPEEDI-II 自動計算システムを構築することとした。OS の新規インストールのため、CentOS8 のインストール用 DVD を作成した。使用する OS は、インストールメディア作成時点で最新版となる CentOS8.1.1911 とした。CentOS8 のイメージファイルは、CentOS7 までのように最低限のシステムのみを同梱したイメージファイル（minimal）の提供はなく、約 7 GB のすべての提供システムが組み込まれたイメージファイルの提供となっている。ファイルの大きさから片面一層式の DVD（約 4.7 GB）に作成することはできなかったため、片面二層式の DVD（約 8.5 GB）を使用して作成した。

(2) FTP サーバの更新

OS の更新作業は、サーバの構成要素が少ない FTP サーバから行った。更新期間中の WSPEEDI-II 自動計算システムの構成を図 4-1 に示す。更新期間中は気象業務支援センターから支援・研修センターへの GPV データの配信を停止し、基礎工センターから GPV データを取得して計算を行うことで、自動計算システムを停止することなく作業を行った。

CentOS7 以降ではパッケージ管理ツールが yum からその後継となる dnf に変更されている。FTP サーバは、外部ネットワークへのアクセスを制限し、運用に必要なソフトウェアの通信のみ可能であるようにファイアウォールを設定している。CentOS8 のインストール後、FTP サーバ構築に必要なパッケージのインストールを可能とするためには通信可能なソフトウェアに dnf を追加する必要がある。そのため、ファイアウォールのアクセス制限の設定変更をシステム計算科学センターに依頼した。自動計算サーバの更新の際に使用するサーバ（以下、仮サーバという）からもアクセスが可能となるように設定をした。

OS 更新後のファイアウォールの設定について、ファイアウォールの設定上 CentOS8 で使用しているパッケージ管理ソフトからの外部ネットワークへの接続のみを接続可能とするこ

とができないため、外部ネットワークへのアクセスは常時行えないように設定し、必要に応じてシステム計算科学センターに連絡し、一時的に設定の変更を依頼することで対応することとした。

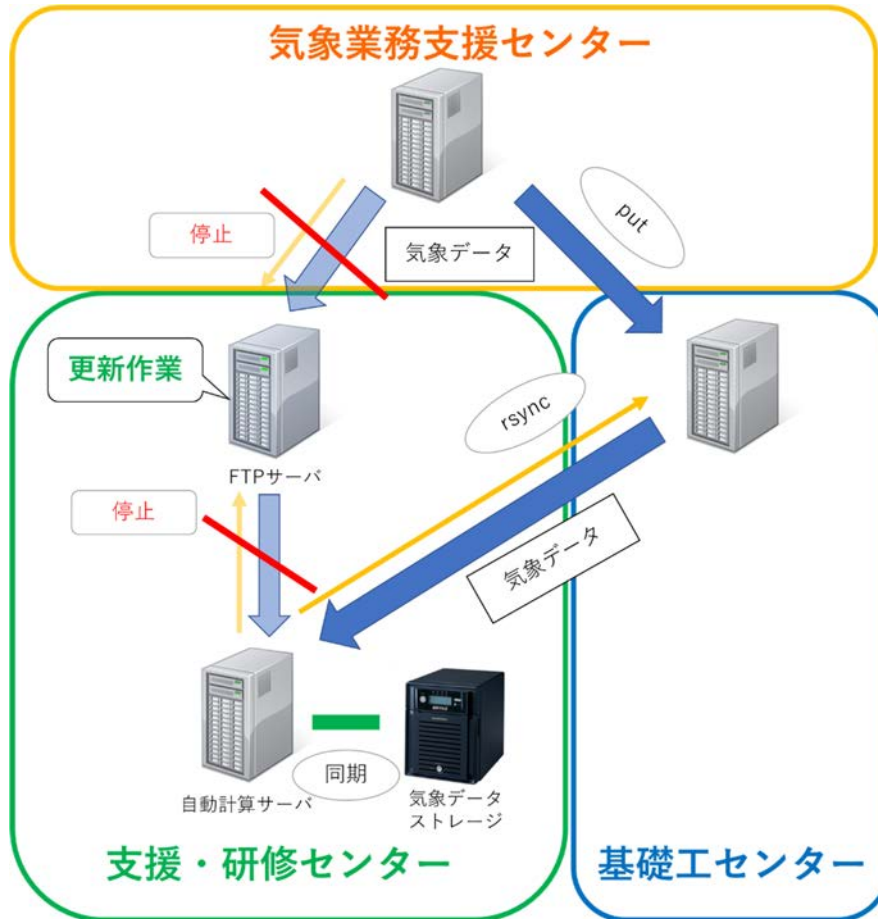


図 4-1 FTP サーバの更新期間中の WSPEEDI-II 自動計算システムの構成

(3) 自動計算サーバの更新

自動計算サーバの更新は、北朝鮮地下核実験対応の計算を停止させないため、また、WSPEEDI-II 自動計算システムを構築する手順・方法及び OS 変更による計算結果の差異の有無を事前に確認することができるメリットがあるため、下記の 3 段階の手順と方法で行った。更新作業手順・方法の構成を図 4-2 及び図 4-3 に示す。

- ① 仮サーバに現行自動計算サーバと同じシステムを構築する。
- ② 仮サーバの OS を CentOS8 に更新する（OS のバージョンは CentOS8.1.1911）。
- ③ 自動計算サーバの OS を CentOS8 に更新する。

仮サーバには支援・研修センターの既存サーバを使用した。

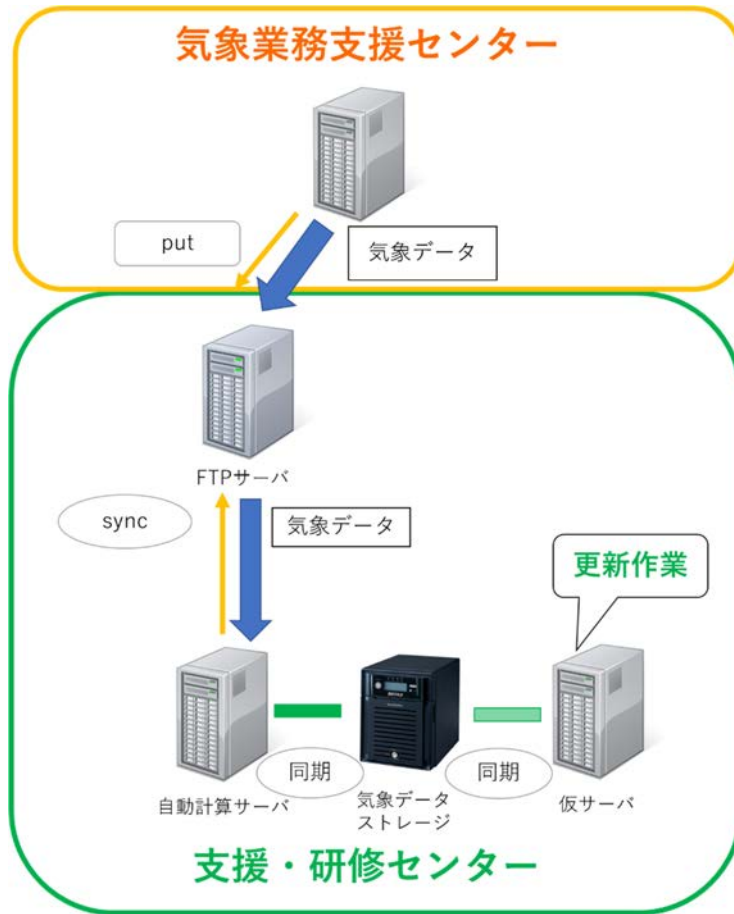


図 4-2 自動計算サーバの更新作業手順・方法①及び②の構成

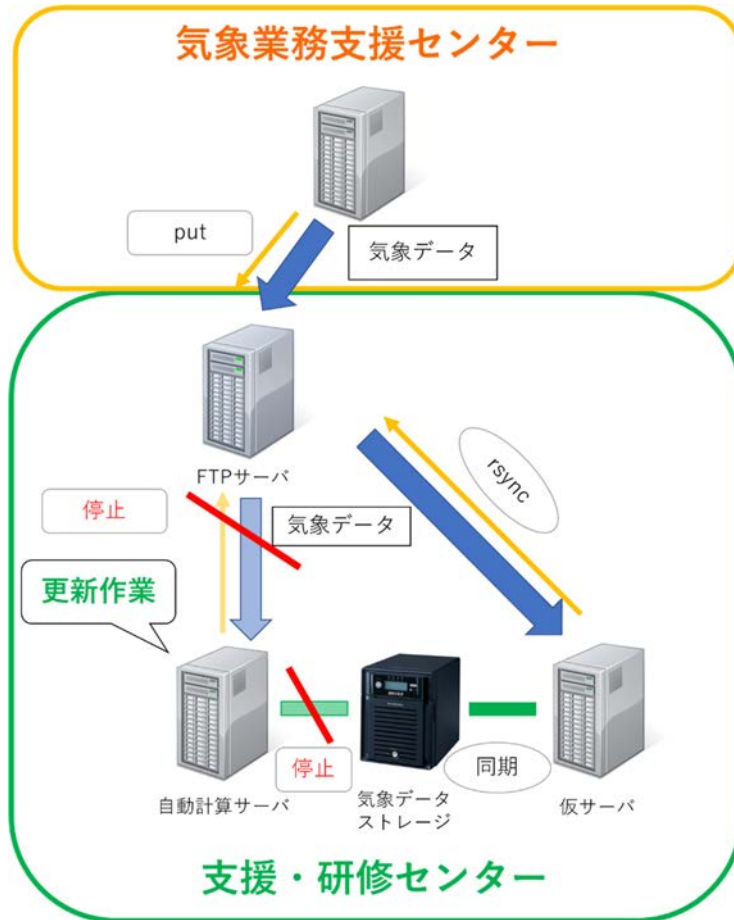


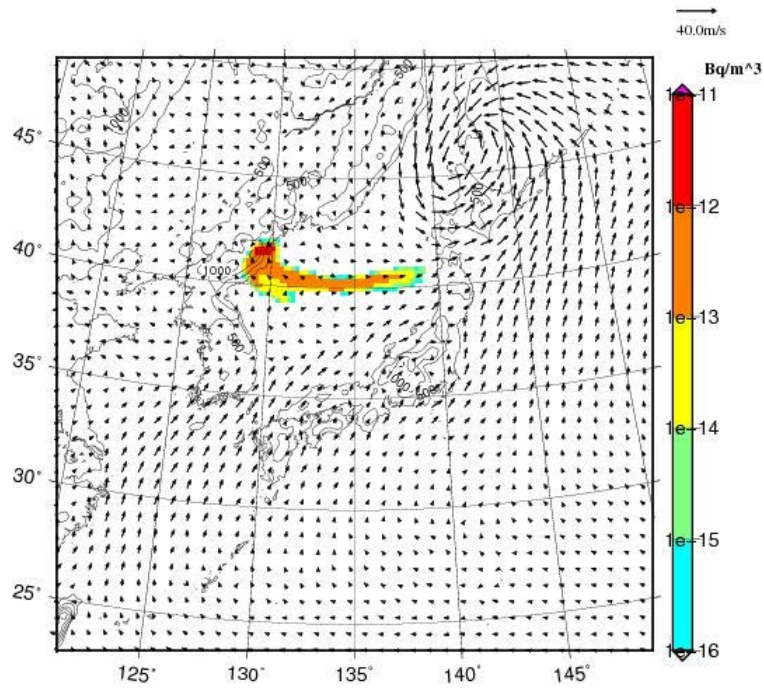
図 4-3 自動計算サーバの更新作業手順・方法③の構成

① 仮サーバに現行自動計算サーバと同じシステムを構築する。

第 1 段階として、自動計算サーバと、OS 及びパッケージのバージョンが同じである WSPEEDI-II 自動計算システムを仮サーバに再現した。自動計算サーバと仮サーバの計算結果のうち、放射性核種の拡散が確認できる図を選出して両者を比較した。一例として、図 4-4 に、令和 2 年（2020 年）8 月 6 日 6 時に放出が開始された場合（放出継続時間は 24 時間）の、令和 2 年（2020 年）8 月 7 日 18 時における地表面のキセノン 133 の大気中濃度の分布図を示す。放出点から東にゆるいカーブを描くように分布しているが、両図に差異は見られない。また、他の計算結果についても差異は見られなかった。これより、仮サーバに構築した自動計算システムが正常に稼働していることを確認した。

自動計算サーバ

Xe-133 concentration at surface JST= 2020-08-07_18h00m



仮サーバ

Xe-133 concentration at surface JST= 2020-08-07_18h00m

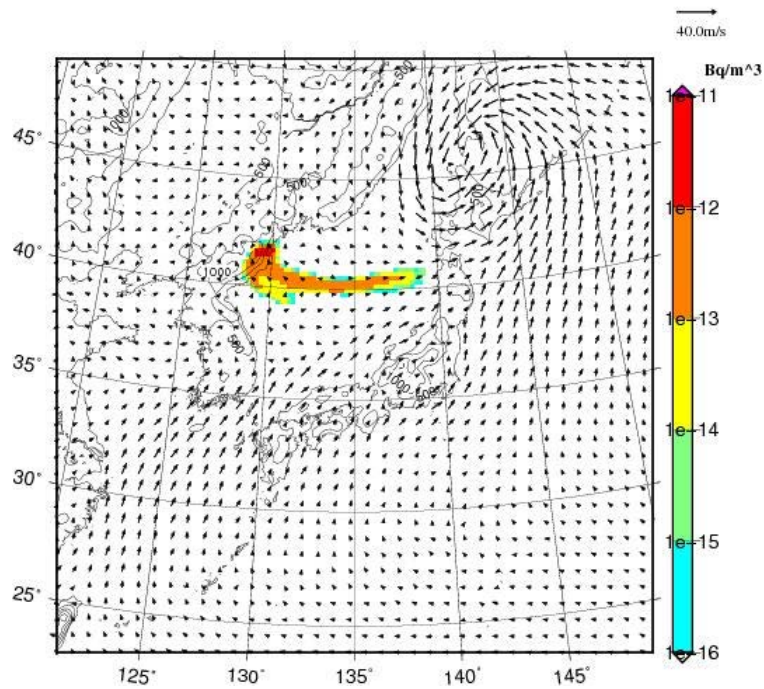


図 4-4 自動計算サーバ (CentOS6) と仮サーバ (CentOS6) の出力の比較
(放出開始日時：令和 2 年 (2020 年) 8 月 6 日 6 時 (24 時間放出継続)、
出力：令和 2 年 (2020 年) 8 月 7 日 18 時、地表面、キセノン 133)

② 仮サーバの OS を CentOS8 に更新する。

第 2 段階として、仮サーバに下記条件の WSPEEDI-II 自動計算システムを構築した。

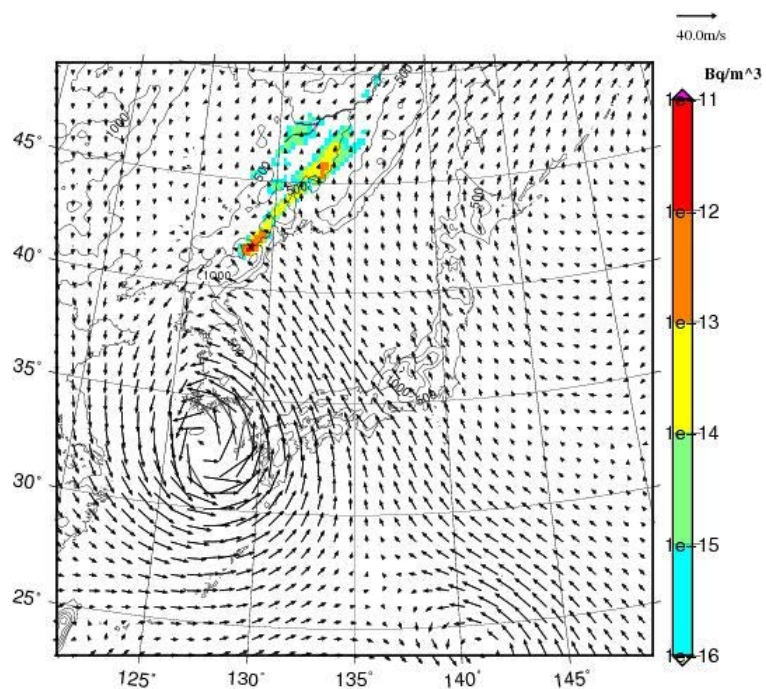
- ・ OS を CentOS8.1.1911 とする。
- ・ パッケージに関して可能な範囲で最新のバージョンを使用する。

パッケージについて、最新版にすることで自動計算システムのソースプログラムに変更が必要となるもの等は、最新版の使用の対象外とした。また、インテルコンパイラについても、現行の自動計算サーバで使用しているバージョンは CentOS8 に対応していないため、令和 2 年（2020 年）に公開された CentOS8 に対応しているバージョンを使用した。

自動計算サーバと仮サーバの計算結果のうち、放射性核種の拡散が確認できる図の一例を図 4-5 に示した。図 4-5 は、令和 2 年（2020 年）9 月 1 日 6 時に放出が開始された場合（放出継続時間は 24 時間）の、令和 2 年（2020 年）9 月 2 日 18 時における上空 1,000 m のキセノン 133 の大気中濃度の分布図である。放出点から北東に向かってほぼ直線状に分布する部分とその分布の北側に沿うように点在する分布が存在する。両図は大部分が同じ分布をしているが、特に点在している分布に多少の差異が見られた。これらの差異は、OS またはコンパイラの変更により、計算数値の末端の数値の処理にわずかな差異が生じたためと推測される。しかし、本計算の目的は、北朝鮮地下核実験が行われた際に自衛隊が航空機を飛行させる位置と高さの目安に関する参考資料とすることである。このため、両者の大部分が一致しており、差異が生じている部分についても不自然な位置に点在しているわけではないと考えられることから、ここで見られた差異は許容範囲と判断し、OS の変更には問題はないとした。

自動計算サーバ

Xe-133 concentration at 1000m JST= 2020-09-02_18h00m



仮サーバ

Xe-133 concentration at 1000m JST= 2020-09-02_18h00m

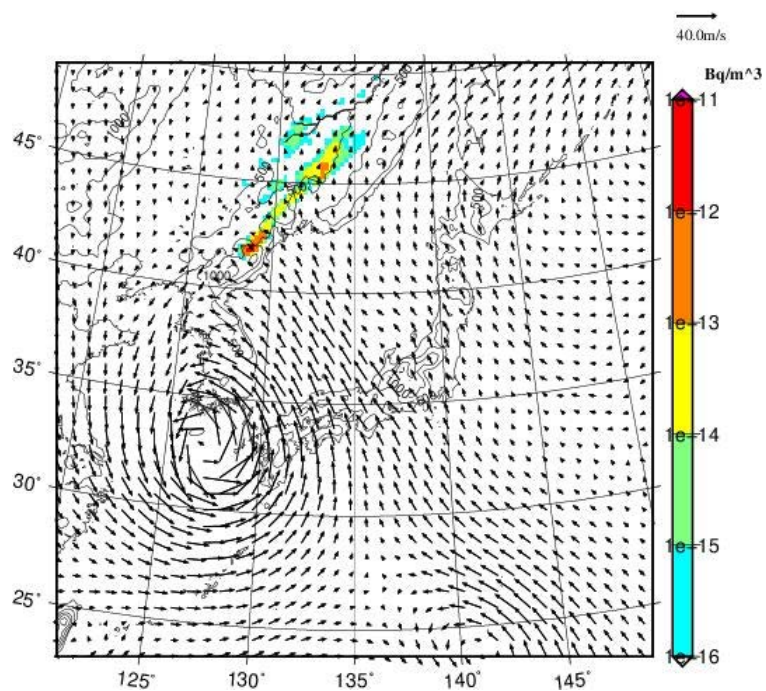


図 4-5 自動計算サーバ (CentOS6) と仮サーバ (CentOS8) の出力の比較
(放出開始日時：令和 2 年 (2020 年) 9 月 1 日 6 時 (24 時間放出継続)、
出力：令和 2 年 (2020 年) 9 月 2 日 18 時、上空 1,000 m キセノン 133)

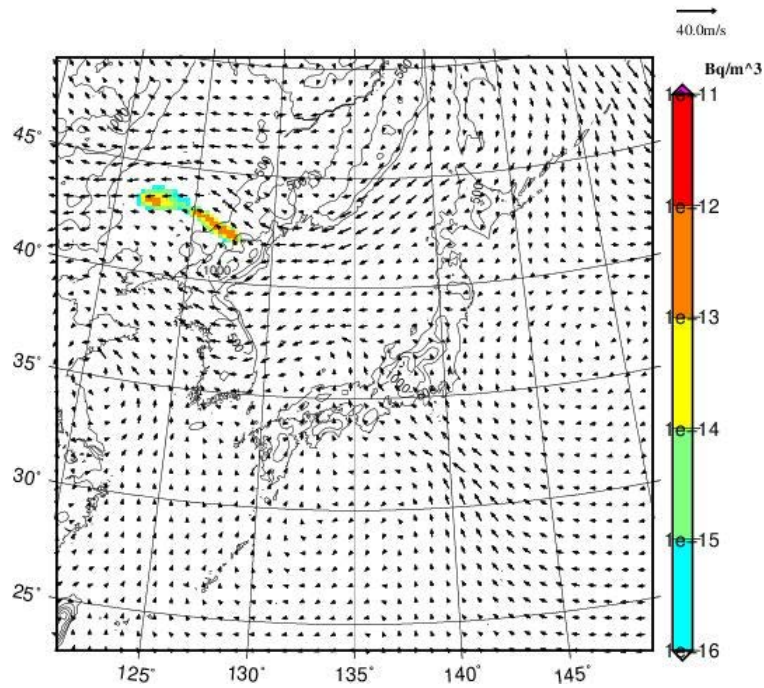
③ 自動計算サーバの OS を CentOS8 に更新する。

第 3 段階として、自動計算サーバの OS を CentOS8.1.1911 に更新した。自動計算サーバが行っている処理を仮サーバが行うようにシステムの処理構造を移管し（図 4-3）、サーバの更新作業は手順・方法②と同様に行った。

自動計算サーバと仮サーバの計算結果のうち、放射性核種の拡散が確認できる図の一例を図 4-6 に示した。図 4-6 は、令和 2 年（2020 年）9 月 10 日 6 時に放出が開始された場合（放出継続時間は 24 時間）の、令和 2 年（2020 年）9 月 11 日 18 時時点における上空 1,000 m のキセノン 133 の大気中濃度の分布図である。放出点から北西に直線状に進み先端部分が広がる形で分布しているが、両図に差異は見られない。また、他の計算結果についても差異は見られなかったことから、構築した自動計算サーバが正常に稼働していることを確認した。

自動計算サーバ

Xe-133 concentration at 1000m JST= 2020-09-11_18h00m



仮サーバ

Xe-133 concentration at 1000m JST= 2020-09-11_18h00m

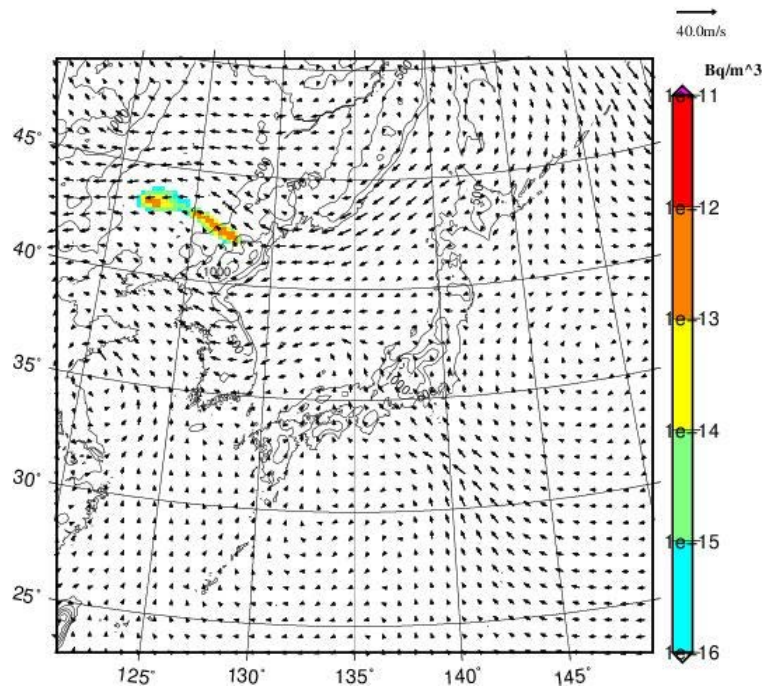


図 4-6 自動計算サーバ (CentOS8) と仮サーバ (CentOS8) の出力図の比較
(放出開始日時: 令和 2 年 (2020 年) 9 月 10 日 6 時 (24 時間放出継続)、
出力: 令和 2 年 (2020 年) 9 月 11 日 18 時、上空 1,000 m、キセノン 133)

4.2 その他の保守・運用作業

WSPEEDI-II 自動計算システムは、毎日定時に自動計算を行い当日の計算結果を出力するように運用する必要がある。このため、自動計算サーバに「FTP サーバからのデータ取得」と「自動計算システムの実行」を定時に行うように設定を行い、作業者の有無にかかわらず日々の運用を行うものとした。

WSPEEDI-II 自動計算システムの保守について、年毎に行う必要がある作業として次の(1)及び(2)、随時行う作業として(3)、及びレンタルサーバ更新時の作業として(4)が挙げられる。

(1) レンタルサーバのレンタル契約の更新

本システムで使用している FTP サーバ及び自動計算サーバにはレンタルサーバを使用しており、契約仕様において 5 年間同一サーバを使用可能としているが、1 年毎にレンタル契約の更新を行う必要がある。

(2) GPV データの購入契約の更新

GPV データ（気象データ）の購入契約は 12 ヶ月毎となっているため、1 年毎に気象業務支援センターとの購入契約を更新する必要がある。

(3) サポートが終了するソフトウェアの更新

サーバにインストールしたソフトウェアのうち、サポート期間が終了を迎えるソフトウェアについては、終了後は情報セキュリティの確保が困難となる恐れがあるため、終了期間を迎える前に当該ソフトウェアのバージョンを更新する必要がある。

(4) レンタルサーバ更新時

レンタルサーバは毎年レンタル契約更新を行っていても、レンタル開始から 5 年後には現行サーバを返却しなければならない。このため、運用を継続するには WSPEEDI-II 自動計算システムの構成等の検討をした上で、3.2 節に示した手順と方法により、新規サーバに自動計算システムの構築を行う必要がある。

5. 今後の課題

5.1 最新の計算モデル及び新規の大気拡散予測システムの導入の検討

図 2-1 に示したように、支援・研修センターに整備された **WSPEEDI-II** 自動計算システムでは、大気力学モデルとして **MM5** が導入されている。しかし、基礎工センターでは大気力学モデルとして **WRF**³²⁾を採用して **WSPEEDI-II** を更新した。**WRF** は、既に開発が終了した **MM5** の後継かつ次世代の大気力学モデルという位置付けであり、米国大気研究センター（NCAR）が中心となって開発プロジェクトが進められている。**WRF** は **MM5** と比較して、異なった鉛直座標系の採用、数値計算スキームの精度向上、最新の物理モデル（放射、乱流、雲物理、地表面等に関する各モデル）の導入、より高度のデータ同化システムの利用という特徴を有している。また、幅広い領域設定に対応可能であることも特徴の一つである。さらに、大規模並列計算機で効率良く計算が行えるようにソースコードが設計されており、ユーザーは比較的容易に並列計算を実施することができる。これらの特徴から、降水の再現精度が高くなるとともに、豪雨や突風などを引き起こす局地気象の予測と解析に適したモデルやツールになると期待されている^{33)・36)}。

さらに基礎工センターでは、これまでの **WSPEEDI-II** の開発及び適用の経験を基にして、**WSPEEDI-DB**^{37),38)}という新たな大気拡散データベースシステムを開発した。**WSPEEDI-DB** は、原子力事故等により大気中に放出された放射性物質を対象として、様々な気象条件と放出源情報に対する大気拡散予測計算結果を即座に取得することができる数値シミュレーションシステムである。大気力学モデル及び大気拡散モデルは、**WSPEEDI-II** の各モデルを更新、改良したものである。最初に、大気力学モデル **WRF** により気象場を計算し、これを入力として大気拡散モデル **GEARN** により放射性物質の移流・拡散・沈着を計算して、大気中濃度と地表沈着量のデータベースを事前に作成しておく。次に、このデータベースに対して指定した放出条件を適用することにより、任意の放出条件の大気拡散予測計算結果を即座に取得することができる。

現在、支援・研修センターで運用している **WSPEEDI-II** 自動計算システムは、従来の **WSPEEDI-II** を基盤としており、計算モデルに最新の知見が反映されていない。また、北朝鮮地下核実験対応に特化したシステムであることから、他の原子力事故等に適用することは限定的かつ困難である。最新の計算モデルや他の原子力事故等への対応の必要性がある場合、**WSPEEDI-II** 更新版あるいは **WSPEEDI-DB** が利用できるかどうかを検討する必要があるだろう。その際には、自動計算システムの使用目的と適用範囲、最新モデルの予測精度と汎用性、原子力機構内外からのニーズや要請の可能性、新規システムの特徴と適用性、最新モデルや新規システムを導入するメリット、最新モデルや新規システムの導入に要する労力と時間などを考慮することが必要である。

5.2 今後の北朝鮮地下核実験対応のあり方

北朝鮮が平成 18 年（2006 年）10 月から平成 29 年（2017 年）9 月までに実施した全 6 回の地下核実験のうち、原子力機構は **WSPEEDI-II** または **WSPEEDI-II** 自動計算システムを用いて 4 回の地下核実験に対応してきた。5 回目及び 6 回目の地下核実験対応で使用した自動計算システムを原科研から支援・研修センターへ移管して整備したことにより、それまで自動計算システムに生じていた諸問題をすべて解決することができた。これらの対応経験及び自動計算システムにより安定した運用により、北朝鮮地下核実験に対しては原子力機構における対応体制及び対応方法は最適化され確立されたとと言えるだろう。

北朝鮮地下核実験対応の今後のあり方や動向等について原子力規制庁と意見交換を行った結果、地下核実験対応は当面の間は継続する必要があると認識された。また、対応終了については原子力規制庁のみで判断できるものではなく、放射能対策連絡会議によって決定されるものである。原子力機構は、放射能対策連絡会議や原子力規制庁の方針や要請に従って、地下核実験対応に使用する **WSPEEDI-II** 自動計算システムの保守と運用を今後も確実に継続するとともに、最新の計算モデルへの更新及び新規の大気拡散データベースシステムの導入等を検討する必要があるだろう。

北朝鮮地下核実験の他に、地下核実験場を掘削した岩盤等の崩落による放射性物質の大気中への漏洩、平成 29 年（2017 年）9 月に北朝鮮外相が示唆した太平洋での洋上核実験の実施等の恐れも否定できない。これら新たな事象では、地下核実験と比較すると、より大量の放射性物質が大気へ放出されることや放出状況が複雑となることが想定される。これらに対応するためには、地下核実験対応の場合のような特定の放射性物質の一定単位放出率（1 Bq/h）を仮定した大気拡散予測計算だけではなく、より現実的な放出源情報（放出核種の組成、核種放出率、放出継続時間、放出高度等）を使用した予測計算の実施が必要となるだろう。

6. おわりに

本報告書では、まず北朝鮮による地下核実験対応の経緯とそれに対する国や原子力機構の対応、及び対応に使用する **WSPEEDI-II** 自動計算システムとその支援ツールの開発経緯と概要について説明した（第2章）。次に、自動計算システムの支援・研修センターへの移管と整備（第3章）、及び同センターにおけるその後の保守と運用（第4章）について記述した。さらに、北朝鮮地下核実験対応における今後の課題について記載した（第5章）。

平成25年（2013年）2月、平成28年（2016年）9月及び平成29年（2017年）9月に北朝鮮によって実施された地下核実験の対応後、北朝鮮地下核実験対応に特化するために開発され原子力機構に設置されていた **WSPEEDI-II** 自動計算システムにおいて、いくつかの保守及び運用上の問題が生じていた。それらの問題を解決するため、自動計算システムを支援・研修センターへ移管して整備する作業を実施した。また、支援・研修センターでは、OSの更新、情報セキュリティ対策など自動計算システムに関する保守と運用を行っている。これら一連の作業により、自動計算システムに関するすべての問題を解決することができ、自動計算システムをより安定して運用することができるようになった。自動計算システムを使用した北朝鮮地下核実験対応について、原子力機構における対応体制及び対応方法は最適化され確立されたと言えるだろう。自動計算システムの保守と運用に関する今後の技術的な検討課題としては、最新の大気力学モデルへの更新や新規の大気拡散データベースシステムの導入などが挙げられる。これらの検討課題については、北朝鮮の情勢や近隣諸国の動向等を考慮しながら優先順位を付けて順次検討・解決していく必要があるだろう。本報告書に記載した自動計算システムの支援・研修センターへの移管と整備、及び同センターにおけるその後の保守と運用に関する作業の内容とノウハウは、将来サーバ機器の交換及び汎用ソフトウェアの更新を実施する場合に、非常に有用な情報となるだろう。

第2章で述べた通り、我が国における原子力災害への対応は、国内で発生した場合と国外で発生した場合とで異なる枠組みとなっている。国内で発生した原子力災害への対応は、福島第一原発事故を受け、関連法令等の改正、原子力災害対策指針の策定、これらの法令・指針を受けた原子力防災体制の整備等が進められた。一方、国外で発生した原子力事故等への対応は、広く緊急事態全般を対象とした「緊急事態に対する政府の初動対処体制について」に基づき、特に放射性物質等の影響が想定される事象については、内閣官房副長官を議長とする放射能対策連絡会議による対応が行われる。これまでの北朝鮮による地下核実験についても放射能対策連絡会議の対応活動として実施された。

近年東アジア沿岸地域の近隣諸国（韓国、台湾及び中国）において既に多数の原子力発電所等が稼働しており、さらに新規建設も進められている状況である。これらの原子力発電所等において万一事故が発生した際には、偏西風等により我が国に放射性物質の影響が及ぶ可能性も考えられる。近隣諸国における原子力事故等に対しては、支援・研修センターに整備された北朝鮮地下核実験対応に特化した **WSPEEDI-II** 自動計算システムを適用することは困難であるため、新たな対応体制及び対応方法の確立の検討が必要だろう。

謝辞

北朝鮮による地下核実験対応に特化した **WSPEEDI-II** 自動計算システム、及びそのオリジナル版で世界中の任意の地点からの放射性物質の大気放出に適用できる **WSPEEDI-II** は、基礎工センター環境・放射線科学ディビジョン環境動態研究グループで開発されたものです。環境動態研究グループの方々には、自動計算システムを支援・研修センターで使用させていただいたこと、並びに自動計算システムの移管・整備及びその後の保守・運用に当っては多大なご協力をいただいたことに感謝いたします。

WSPEEDI-II 自動計算システムの移管・整備作業のうち、気象データを毎日オンラインで気象業務支援センターから支援・研修センターに直接取得するネットワークを構築するための手続きと作業において、システム計算科学センターの佐藤智彦氏及び久野哲也氏には、多大なご協力やご助言等をいただきました。この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 「災害対策基本法」(昭和 36 年法律第 223 号, 平成 30 年改正),
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336AC0000000223> (accessed on 2021-06-02).
- 2) 「武力攻撃事態等及び存立危機事態における我が国の平和と独立並びに国及び国民の安全の確保に関する法律」(平成 15 年法律第 79 号, 平成 27 年改正),
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=415AC0000000079> (accessed on 2021-06-02).
- 3) 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).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 中央防災会議: 「防災基本計画」(昭和 38 年 6 月, 令和 3 年 5 月修正),
http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf (accessed on 2021-06-02).
- 8) 「武力攻撃事態等における国民の保護のための措置に関する法律」(平成 16 年法律第 112 号, 平成 30 年改正),
<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=416AC0000000112> (accessed on 2021-06-02).
- 9) 首相官邸: 「閣議案件(平成 15 年 11 月 21 日): 緊急事態に対する政府の初動対処体制について」,
<http://www.kantei.go.jp/jp/kakugi/kakugi-200311219.html> (accessed on 2021-06-02).
- 10) 外川織彦, 早川剛, 田中忠夫, 山本一也, 奥野浩: 「国際原子力機関の緊急時対応援助ネットワークへの原子力機構の登録と関連活動」, JAEA-Review 2020-017 (2020), 36p.
- 11) 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)」,
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/konkyo.html> (accessed on 2021-06-02).
- 12) 内閣官房: 「国外における原子力関係事象発生時の対応要領(平成 17 年 2 月 23 日放射能対策連絡会議決定)」,
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/050223taiou.pdf> (accessed on 2021-06-02).

- 13) 内閣官房：「国外における原子力関係事象発生時の「モニタリング強化」の実施について（平成 17 年 2 月 23 日放射能対策連絡会議幹事会申合せ，平成 30 年 3 月 22 日一部改正）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/060310jissi.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 14) 内閣官房：「北朝鮮による地下核実験実施発表に伴う当面の対応措置について（平成 18 年 10 月 9 日放射能対策連絡会議代表幹事会申合せ）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/061009soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 15) 内閣官房，放射能対策連絡会議：「北朝鮮による地下核実験実施発表に伴う当面の対応措置について（平成 18 年 10 月 9 日放射能対策連絡会議代表幹事会申合せ，平成 18 年 10 月 12 日改正）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/061012soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 16) 内閣官房：「北朝鮮による地下核実験実施発表に伴う当面の対応措置について（平成 21 年 5 月 25 日放射能対策連絡会議代表幹事会申合せ）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/090525soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 17) 内閣官房：「北朝鮮による地下核実験の可能性に伴う当面の対応措置について（平成 25 年 2 月 12 日放射能対策連絡会議申合せ）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/130212soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 18) 内閣官房：「北朝鮮による核実験に伴う当面の対応措置について（平成 28 年 1 月 6 日放射能対策連絡会議申合せ）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/160116soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 19) 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 28 年 9 月 9 日杉田内閣官房副長官指示）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/160909soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 20) 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）」，
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/housyanou/170903soti.pdf> (accessed on 2021-06-02).
- 21) 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 21 年度）」，
<https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring5/H21.html> (accessed on 2021-06-02).
- 22) 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.
- 23) 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 24 年度）」，
<https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/monitoring5/h24.html> (accessed on 2021-06-02).
- 24) 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.
- 25) 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）」，
<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11235834/www.nsr.go.jp/activity/monitoring/h280909.html> (accessed on 2021-06-02).

- 26) 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）」，
<https://www.nsr.go.jp/activity/monitoring/h290903.html> (accessed on 2021-06-02).
- 27) G.A. Grell, J. Dudhia and D.R. Stauffer: "A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research (1994), 121p.
- 28) 古野朗子，茅野政道，山澤弘実：「世界版緊急時環境線量情報予測システム（WSPEEDI）モデルコード（II）－広域用濃度・線量予測モデル GEARN－」，JAERI-Data/Code 99-044 (1999), 68p.
- 29) 気象業務支援センター：「オンライン気象情報：全球数値予報モデル GPV（全球・日本域）」，
<http://www.jmbse.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html> (accessed on 2021-06-02).
- 30) A. Furuno, M. Chino, A. Otsuka, T. Watanabe, M. Matsumura and Y. Suzuki: "Development of a Numerical Simulation Model for Long-Range Migration of Rice Planthoppers", Agricultural and Forest Meteorology, Vol.133, No.1-4, pp.197-209 (2005).
- 31) 中西千佳，佐藤宗平，古野朗子，寺田宏明，永井晴康，武藤重男：「原子力緊急時対応のための WSPEEDI-II システムユーザーズマニュアル」，JAEA-Technology 2011-005 (2011), 141p.
- 32) W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J.G. Powers, M.G. Duda, D.M. Barker and X.-Yu Huang: "A Description of the Advanced Research WRF Version 4", NCAR/TN-556+STR, NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Research (2019), 145p.
- 33) 日下博幸，A. Crook, J. Dudhia, 和田浩治：「非静力 WRF と MM5 の比較検討－平成 16 年新潟・福島豪雨のシミュレーション－」，東京大学海洋研究所共同利用研究集会「非静力数値モデルの現状と将来展望」－第 7 回非静力学モデルに関するワークショップ－，講演予稿集，pp.21-22，東京（2005）.
- 34) 辰巳賢一，竹見哲也，石川裕彦：「WRF モデルを用いた高解像度気象シミュレーションシステムの構築：豪雨の事例解析」，京都大学防災研究所年報，第 51 号 B，pp.437-448 (2008).
- 35) 日下博幸：「領域気象モデル WRF について」，ながれ，Vol.28，pp.3-12 (2009).
- 36) 鈴山勝之，柴木秀之，尾形竹彦：「WRF の計算特性に関する幾つかの検討」，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 67，No. 2，pp.I_426-I_430 (2011).
- 37) 寺田宏明，都築克紀，門脇正尚，永井晴康，田中孝典：「過去解析から短期予報まで任意の期間及び放出源情報に対する大気拡散計算結果を即座に提供可能な大気拡散データベース計算手法の開発（共同研究）」，JAEA-Data/Code 2017-013 (2018)，31p.
- 38) H. Terada, H. Nagai, A. Tanaka, K. Tsuduki and M. Kadowaki: "Atmospheric Dispersion Database System that can Immediately Provide Calculation Results for Various Source Term and Meteorological Conditions", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.57, No.6, pp.745-754 (2020).

This is a blank page.

