

島根原子力発電所事故を想定した放射性物質飛散の シミュレーションと避難に関する考察

鳥取大学大学院医学系研究科機能再生医科学専攻
遺伝子再生医療学講座遺伝子医療学部門 (主任 汐田剛史教授)

矢倉はるな, 栗政明弘

Computer simulation of nuclear pollutant diffusion from Shimane
Nuclear Power Plant and development of an evacuation strategy in
the event of a nuclear incident

Haruna YAKURA, Akihiro KURIMASA

*Department of Genetic Medicine and Regenerative Therapeutics,
Institute of Regenerative Medicine and Biofunction,
Graduate School of Medical Science, Tottori University Yonago, Tottori 683-8504, Japan*

ABSTRACT

Beginning from Tohoku (northeastern) Earthquake on March 11, an accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant resulted in a substantial release of radioactivity to the environment. The accident forced a large number of residents to evacuate from surrounding areas. Moreover, the nuclear incident was life-threatening for the elderly and for people with serious illnesses who were confined in hospital or nursing homes. Strikingly, the causes of death were not directly attributed to radiation exposure but to problems encountered during evacuation. Using nuclear diffusion data from the Fukushima incident, we simulated nuclear pollutant dispersion using computer software A2C in an area of Tottori and Shimane Prefectures surrounding the Shimane Nuclear Power Plant. We generated a model for the spread of nuclear pollutants around the Emergency Planning Zone, i.e. EPZ. From these findings, we proposed evacuation strategies for residents near the power plant to ensure a safe and reliable escape from nuclear pollutants. Our recommendations include: 1) immediate evacuation from PAZ area (within 5km), 2) securing indoor shelter in the area of the UPZ (from 5km to 30km) and preparations to evacuate further outwards from the nuclear plant site, 3) daytime evacuation within a 30km area after considering wind direction and velocity, and 4) preparation of a planned evacuation strategy that identifies secure facilities for weaker people in the event of a disaster.

(Accepted on April 25, 2012)

Key words : Severe radiation accident, Nuclear Power Plant, Computer simulation,
Nuclear pollutant, Evacuation strategy

はじめに

東北大震災から発生した福島第一原子力発電所の事故は、原子力発電所の安全性に関して多くの問題点が浮き彫りにされた。これまでの国のEPZ: Emergency Planning Zone「防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲」に対する考えは見直され¹⁾、避難範囲も30km程度に拡大となり、日本各地の自治体でその対策に見直しが求められている^{2,3)}。鳥根原子力発電所でも、その30km圏内には、鳥取県の境港市・米子市が含まれ、そこからの避難に関する新たなマニュアルが検討されている。

原子力発電所による災害に関して、周辺住民が最も注意しなければならないのは、排出された放射性物質からの放射線による急性被曝であり、その避難に関してどのように対策をとるかにある。その場合に、排出元からの距離だけでなく、気象条件、特に風によりどのように放射性物質が拡散していくかを把握することが重要である。

本研究では、地表面に放出された放射性物質が、鳥根県東部ならびに鳥取県西部にどのように飛散するかをシミュレーションするために、まず過去の気象観測から風向・風速を検討した。その気象条件に基づき、A2C気象予測ソフトウェアを用いた、放射性物質飛散のシミュレーションを行った⁴⁾。

福島県での原子力発電所事故からの避難は、東北大震災ならびに津波の被災と重なったため、さらにはこれまで検討されたことがないほど広範囲に避難区域が設定されたことなどにより、非常に困難を極めた⁵⁾。その中では、病院重症患者、要介護老人などの災害弱者の避難にはさらに多くの問題が生じている。放射線による健康被害を受けた一般住民の被災者はこれまで確認されていないが、災害弱者の避難に伴い3月31日までに少なくとも50名が死亡している⁶⁾。福島県で行われた避難の現状とその問題点を検証し、また政府の「最悪のシナリオ」の内容をもとに、事故に際してどこまでの放射線被曝を想定すれば良いのか、そしてICRPの緊急時被曝状況に関してどのような勧告が行われているかを検討する。今回のシミュレーション結果とあわせて、どのような避難や行動を取れば良いのかに関して考察を行った。

対象および方法・検討条件

1) 原子力発電所周辺地域の気象条件の検討

鳥根県東部、鳥取県西部の気象条件を把握するため、鳥取県ならびに鳥根県両県の気象庁のアメダスから得られた気象情報のうち⁸⁾、出雲市・松江市・境港市・米子市・倉吉市の5地点の風向、風速(m/sec)を過去5年に渡り抽出し、3-5月(春)、6-8月(夏)、9-11月(秋)、12-2月(冬)の季節ごとに分類した。さらに鳥根原子力発電所周辺の鹿島、および大田市・掛合・塩津・茶屋の5地点の、過去1年間の季節ごとにおける風向と風速を検討した。

また、地表面だけでなく上空の気象条件も飛散に影響を与えることが分かっている。そのため、浜田市と鳥取市で観測されているウインドプロファイラによる観測データの収集も行い⁷⁾、高度1000m、2000mおよび3000mにおける3ヶ月間(2011年11月中旬～2012年2月中旬)の風速と風向を検討した。

2) 福島と鳥根のシミュレーションの比較

福島県における放射性物質放出の実態、特に放出された放射性物質の核種とその絶対量、およびその時間変化に関しては、未だに正確な情報は得られていない。また今後、鳥根原子力発電所でどのような事故が起こるかを想定することは簡単ではない。そのため、今回のシミュレーションではSPEEDI⁹⁾で得られた画像と比較することで、ほぼそれと近似する物質の放出条件を設定し、その条件を基準として、風向、風速、季節の条件を変化させて24時間の経過のシミュレーションを行った。SPEEDIの条件としては、3月12日から4月24日までの外部被曝の積算線量の結果(全放射線核種を対象とし、成人に対する影響を評価したもの)を地図上に表したものをを用いた。A2Cでは、放射性物質は午前0:00から持続的に、鳥根原子力発電所(1, 2号炉)の煙突の高さと同じ120mから、一定の割合で放出(放出量をRateとして表示)されるとした。また、地図上で東西66.5km×南北37.8kmの領域を700m最小区画で区切り、ユリウス日(以下日時): 289日(10月15日, 以下10/15と略記)朝7:00, 風向: 西北西, 風速: 3m/s, 放出Rate(以下Rate): 10Bq/sとして、シミュレーション結果を表示した。

3) 放射性物質の飛散シミュレーションの季節による違い

季節による変化を明らかにするため、ユリウス日の200日(7月18日)における飛散状況と、365日(12月30日)における飛散状況の比較を行った。このときの他のA2C解析条件は、領域：東西56km×南北40km、最小区画：800m、風向：西、風速：1m/s、Rate：10Bq/sで、昼12:00と夜24:00として検討を行った。

4) 放射性物質の飛散シミュレーションの風向による違い

風向の違いによる影響をシミュレーションするため、2つの地域に分けて解析を行った。松江市周辺の影響を見るための、北・北北東・北東による飛散のシミュレーションと、鳥取県西部地域では西・西北西・北西・北北西の比較を行った。このときのA2C解析条件は、松江市周辺では領域：東西52.5km×南北33.6km、最小区画：700m、風向：北・北北東・北東、鳥取県西部地域では、東西66.5km×南北37.8km、最小区画：700m、風向：西・西北西・北西・北北西、であり、その他は日時：289日(10/15)朝7:00、風速：3m/s、Rate：10Bq/sとして検討を行った。

5) 放射性物質の飛散シミュレーションの風速による違い

風速により、飛散状況がどのように変化するかを推測するため、西風時に風速が1m/s、3m/s、5m/sおよび10m/sと変化したときにどのように飛散状況が変化するかを検討した。鳥取県西部地区を中心に、領域：東西56km×南北40km、最小区画：800m、日時：200日(7/18)、風向：西、風速：1・3・5・10m/sec、Rate：10Bq/sで、放出開始を0:00として4時間毎に48時間後まで検討を行った。

6) 放射性物質の飛散シミュレーションの時刻(昼と夜)による違い

夜間と昼間における飛散状況の詳細な違いを明らかにするため、昼間(12:00)と夜間(24:00)における濃度分布を地図上に示した。また、西風1、3および10m/sにおいて、米子市と境港市の24時間の濃度の推移を地表面と上空5000mまでの積算値として定量シグナグラフ化した。さらに、両地点での地表面(0~2m)と高度1020mにおける飛散物質の濃度分布とその推移を定量評価した。また、飛散物質が上空のどの程度まで飛散するかを

明らかにするため、高度0-2m、1020m、1129m、1390m、1590m、1819mにおける濃度の時間による変化を定量解析した。その条件は、領域：東西56km×南北40km、最小区画：800m、日時：200日(7/18)、風向：西、風速：1・3・10m/s、Rate：10Bq/sである。

結 果

1) 原子力発電所周辺地域の気象条件の検討

鳥根県東部、鳥取県西部の気象条件で、風向の頻度(風向別観測割合)とその期間の平均風速を風向別に算定(風向別平均風速)した結果を、風配図として示した(図1 A B)。原子力発電所が立地する鹿島町では、風向別観測割合として冬には西風の頻度が高く秋では東北東の風の頻度が高い。しかしながら、風向別平均風速を見ると、西風・西南西の風が吹くときに風速が5m/s以上の強い風が吹くが、北北東から南南東の東寄りの風が吹くときには、何れの季節でも風速が3m/s以下の弱い風になることがわかる。すなわち、年間を通して風の影響を考慮する際には、西風が最も頻度が高いと考えられる。この風の特徴は、偏西風の影響によるものと考えられ、松江市でも類似した傾向を示している。

鳥取県内の境港市では、冬に西風の頻度が高い。それ以外には、秋に北東の風が多い他は、風向に特徴はあまりない。風向別平均風速では、全季節において西~西南西3~4m/s、夏場を除き北東3m/sの風が観測されている。

米子市では、風向別観測割合では、中国山脈から吹き下ろす南南東の風の頻度が高い。風向別平均風速では、頻度が高い南南東の風は弱く、一方西北西~西~西南西の風が強く平均3~4m/s、北北東~北東の風も3~4m/sで強くなっている。

ウインドプロファイラによる高層(特に上空3km)の風向・風速に関しては、浜田では西風の頻度が高く、そのときの風速も15m/sと速い。鳥取では、西北西の風の頻度が高く、強さは西~西南西~南西の風が15から20m/sである(図1 C)。

2) 福島と鳥根のシミュレーションの比較

福島県におけるSPEEDIの飛散シミュレーションと、A2Cを用いた飛散のシミュレーションの比較を行った(図2)。SPEEDIの図に関しては、現在の土壌汚染地域に類似した予測結果を抽出し、比較のため反時計回りに90度回転させた後に、左

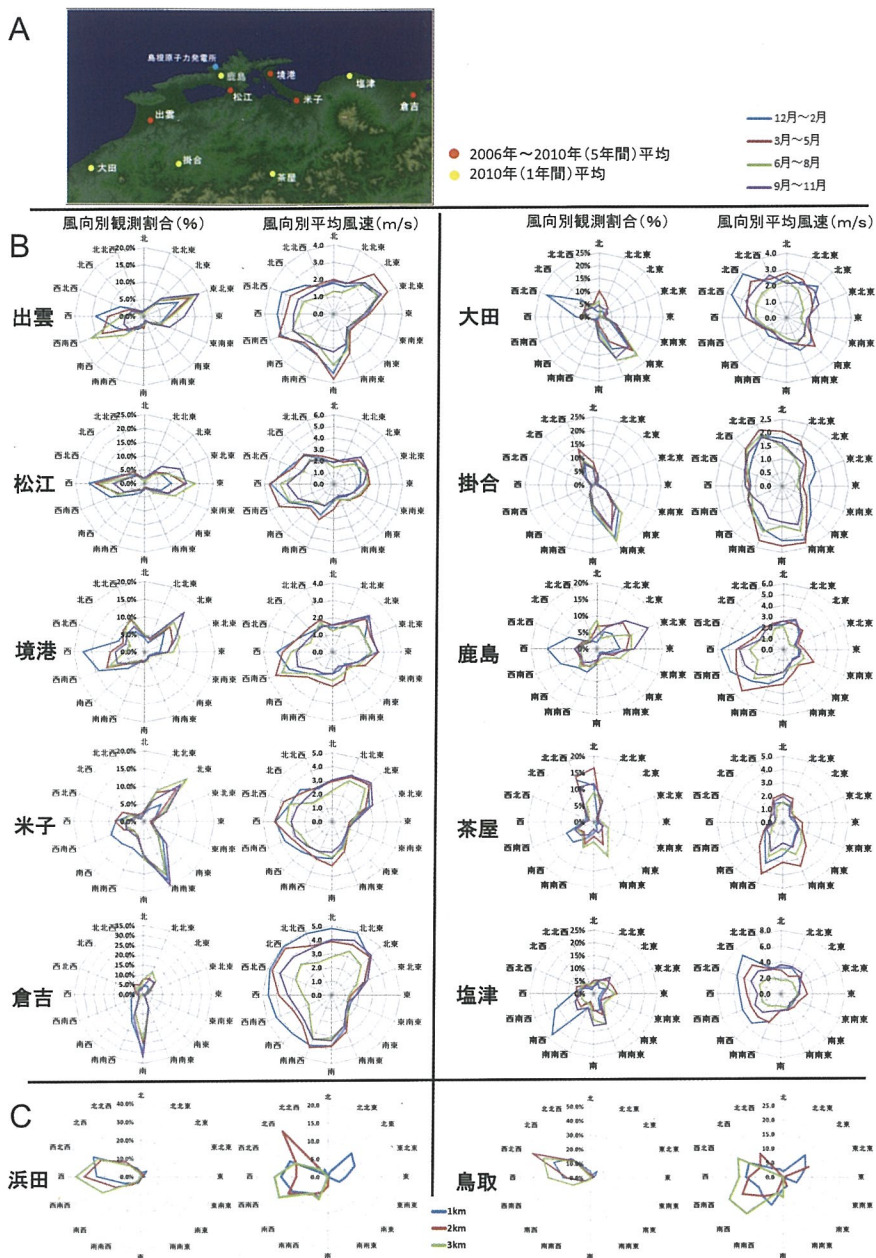


図1 原子力発電所周辺地域の気象条件の検討

島根県東部、鳥取県西部地域 (A, B) の気象条件を把握するため、鳥取県ならびに島根県両県の気象庁のアメダスから得られた気象情報のうち、出雲市・松江市・境港市・米子市・倉吉市の5地点 (Aの赤印、ならびにB左側) の風向、風速 (m/sec) を過去5年に渡り抽出し、3-5月 (春)、6-8月 (夏)、9-11月 (秋)、12-2月 (冬) 季節ごとに分類した。風向の頻度 (風向別観測割合) (左列) と平均風速を風向別に算定 (風向別平均風速) (右列) し、結果を風配図として示した。さらに島根原子力発電所 (Aの水色印) 周辺として鹿島、大田市・掛合・塩津・茶屋の5地点 (Aの黄印、ならびにB右側) の、過去1年間の季節における風向と風速も同様に検討した。

上空の気象条件も飛散に影響を与えるため、浜田市 (C左半分) と鳥取市 (C右半分) で観測されているウィンドプロファイラによる観測データの収集も行い、高度1000m、2000mおよび3000mにおける3ヶ月間 (2011年11月中旬~2012年2月中旬) の風速と風向も同様に検討した。

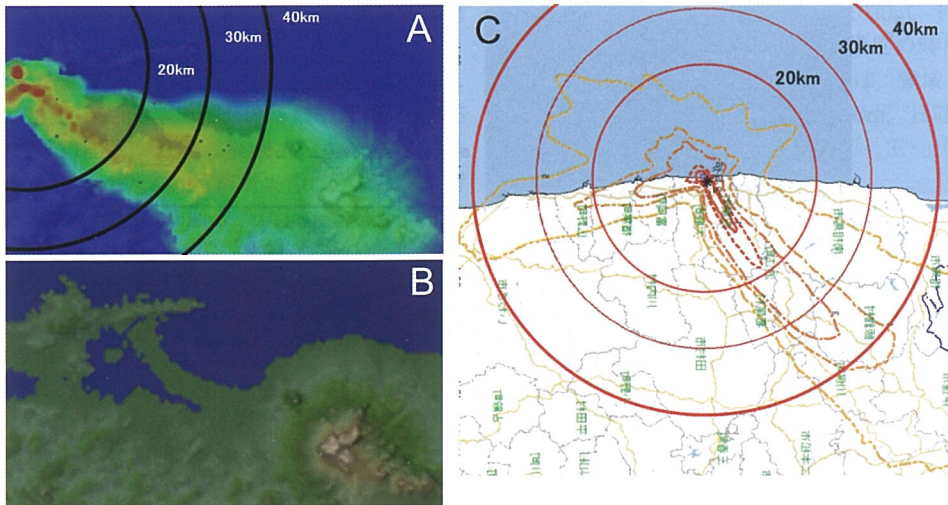


図2 福島 (SPEEDI) と島根 (A2C) のシミュレーション結果の比較

A: 地図上で東西66.5km×南北37.8kmの領域を700m最小区画で区切り、ユリウス日（以下日時）：289日（10月15日、以下10/15と略記）朝7:00、風向：西北西、風速：3m/s、放出Rate（以下Rate）：10Bq/sとして行ったA2Cによるシミュレーション結果を示す。飛散した物質は濃度の高→低の順に赤→黄→緑→水色に描出している。B：Aの地域と全く同一の領域を高度差により色分けした地図で示した。C：同じ縮尺で、福島の原子力発電所事故の際にSPEEDIによって解析されたシミュレーション結果を示す。3月12日から4月24日までの外部被曝の積算線量の結果（全放射線核種を対象とし、成人に対する影響を評価したもの）を地図上に表したものを、比較のため反時計に90度回転し、左右逆転した画像を掲載している。

右の反転画像を提示している（図2 C）。今回の設定において、A2Cのシミュレーション結果と飛散範囲が類似している条件を設定できたと考えられる（図2 A）。特に濃度分布に関しては色分けの尺度は任意に変更できるため、飛散範囲をある程度自由にかえることも可能であるが、その設定を共通化して以下の解析を行っている。

3) 放射性物質の飛散シミュレーションの季節による違い

季節による変化を明らかにするため、西風1m/s、Rate1Bq/sの条件で、ユリウス日の200日（7月18日）における飛散状況と、365日（12月30日）における飛散状況の比較を行った（図3）。その結果、夏では上昇気流のための拡散の影響が大きく、大気が乱れるため発電所近辺の濃度が薄まるとともに、松江市、東出雲町の南方へと広く拡散する（図3 A B）。それに対して、冬では原子力発電所近隣の濃度は高まるが、拡散は抑えられ、松江市中心部大橋川より北側から宍道湖湖上までに限局している（図3 C D）。このような大気の安定度は、原子力防災にも重要であり、既に文部科学省のホ

ームページでも解説されている⁹⁾。昼間と夜間の違いは、この後により詳細に検討を行う。

4) 放射性物質の飛散シミュレーションの風向による違い

風向による影響を明らかにするため、比較的穏やかな3m/sの風速で、風向を変えてシミュレーションを行った（図4）。松江市近郊と鳥取県西部地域では、地図の尺度も異なることもあるが、原子力発電所から東の方角には枕木山山系の比較的高い山がそびえるため、この地形の影響を受けて飛散物質の流れの乱れが顕著である。その中でも、風向きにそって一定の広がり傾向が認められている。特に赤や濃い黄色の地帯がその風向きの際に注意すべき高線量放射線地帯と考えられる。

5) 放射性物質の飛散シミュレーションの風速による違い

風速による違いを明らかにするため、西風の同一条件で、風速のみ1, 3, 5, 10m/sと変化させて飛散状況のシミュレーションを行った（図5）。その結果、1m/sでは、原子力発電所の東側半分をほぼ同心円状に近い形で広がっていく傾向が見

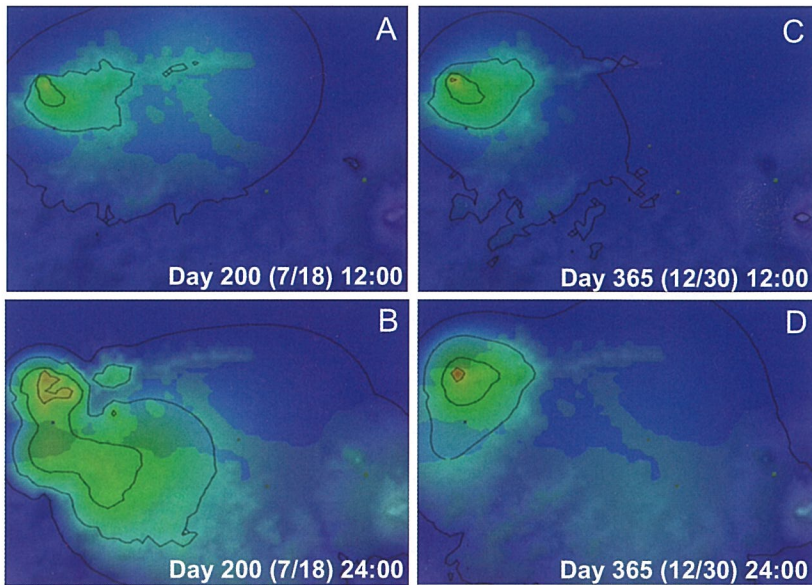


図3 季節による違いのシミュレーション

ユリウス日の200日(7月18日)における飛散状況(A, B)と、365日(12月30日)における飛散状況(C, D)の比較を行った。このときの他のA2C解析条件は、領域：東西56km×南北40km, 最小区画：800m, 風向：西, 風速：1m/s, Rate：10Bq/sで、昼12:00(A, C), 夜24:00(B, D)として検討を行った。

られた。一方、風速が3, 5, 10m/sと増すにつれて風の方角から左右に広がる範囲が次第に狭くなる傾向が見られた。風速3m/sでは、風の方角から左右60度がほぼ最大の拡散範囲であり、また風速10m/sでは、ほぼ30度以内に収まる範囲内であると考えられた。

飛散物質の地表面における濃度に関しては、風速が弱いときに高濃度の領域の面積が最大であり、風速が増すにつれて高濃度に表される領域は小さくなっている。

6) 放射性物質の飛散シミュレーションの時刻(昼と夜)による違い

夜間と昼間における飛散状況は、昼間では風の向きに対して左右の広がりが大きく、全体的に濃度が薄くなる傾向がある(図6 A)。一方夜間では、海から陸の方向への風を受けて、西北西から東南東に向けての流れを示している。その方向の中心部は比較的濃度が高くなっている。また、原子力発電所近隣の濃度も高くなっている。

また、地表面と高度5000mまでの積算した飛散物質の濃度の違いを定量評価した結果、風速3m/s以上では夜間と昼間の濃度差が明らかになる(図

6 B)。地表面において、真西にある境港市周辺では、3m/s, 10m/sともに昼間と夜間の濃度差は顕著になっている。昼間は、拡散物質の通り道になっていない米子でも、夜間は海風の影響を受けて濃度の上昇が認められる。また、米子で10m/sのときには、ほとんど飛散物質は通過していない。

昼間に濃度が低下している要因を明らかにするため、高度1020mの上空の変化を見ると、地表面と逆のパターンを示している(図6 C)。これは、その近隣に飛散がないわけではなく、上空に拡散して相対的に地表面が少なくなっていると考えられるべきである。上空は昼間に濃度が上昇する一方、夜になると低下していく傾向がある。すなわち、昼間は拡散が激しく上空まで飛散するが、夜間は地表面を濃い濃度で通り過ぎると考えられる(図6 D)⁹⁾。

考 察

1) A2Cを用いたシミュレーションについて(特徴とSPEEDIとの差異)

A2CはYSA corporationの山田哲司博士により開発された気象予測のソフトウェアであり、3次

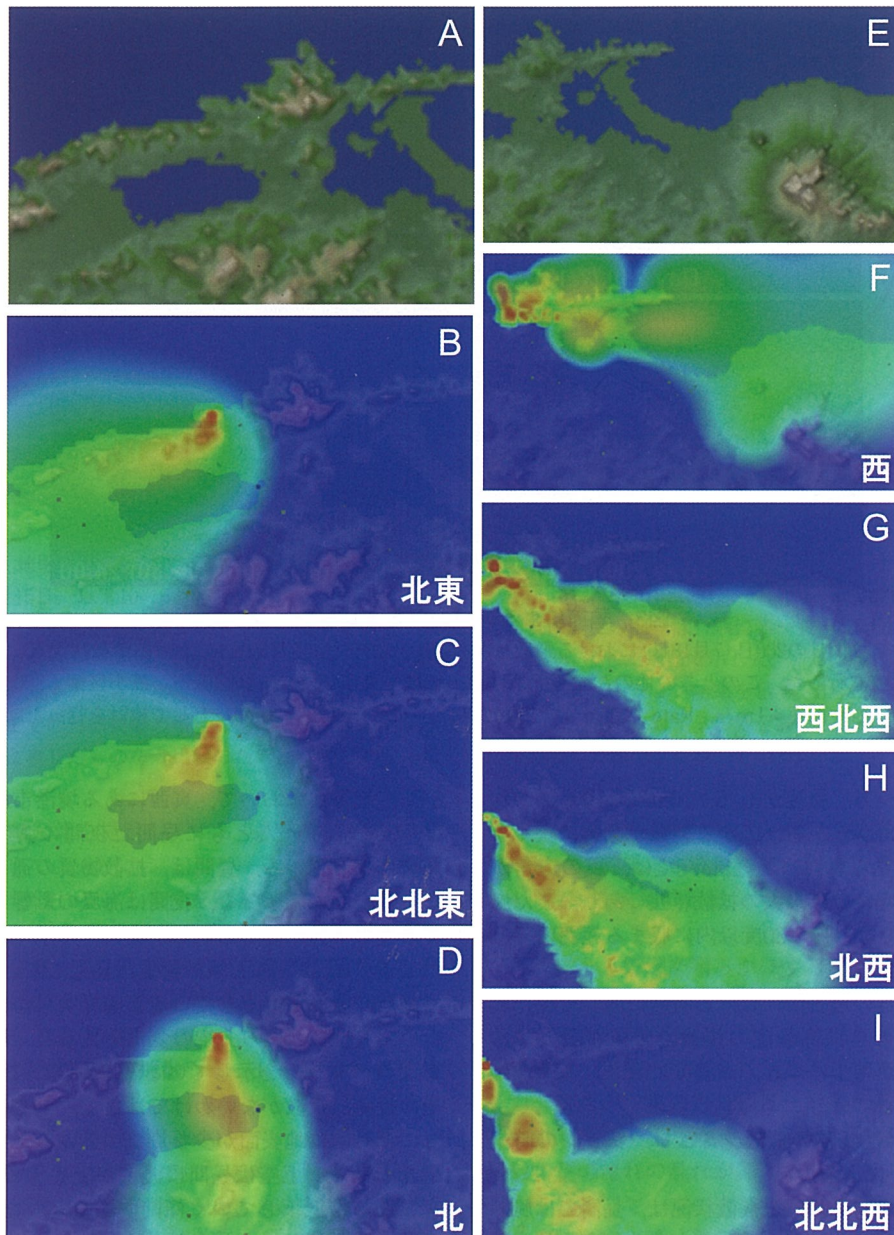


図4 風向の違いによるシミュレーション

松江市周辺 (A) の影響を見るための、北東 (B)、北北東 (C)、北 (D) による飛散のシミュレーションと、鳥取県西部地域 (E) では西 (F)、西北西 (G)、北西 (H)、北北西 (I) の比較を行った。このときのA2C解析条件は、松江市周辺 (B, C, D) では領域：東西52.5km×南北33.6km，最小区画：700m，鳥取県西部地域 (F, G, H, I) では、東西66.5km×南北37.8km，最小区画：700m，であり、その他の条件は日時：289日 (10/15) 朝7:00，風速：3m/s，Rate：10Bq/sとして検討を行った。松江市周辺と鳥取県西部地域では地図の尺度が異なっている。

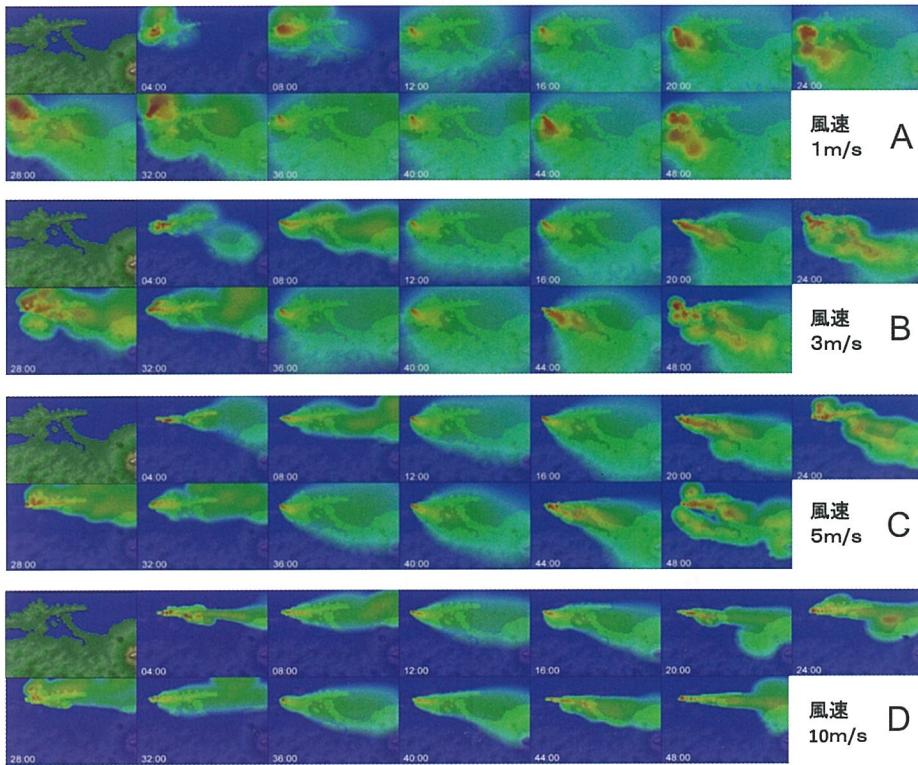


図5 風速の違いによるシミュレーション

風向を西風として、風速を1m/s (A)、3m/s (B)、5m/s (C) および10m/s (D) に設定したときの飛散状況を、放出開始時点(0:00)から4時間毎に48時間後まで検討を行った。鳥取県西部地区を中心に、領域：東西56km×南北40km、最小区画：800m、日時：200日(7/18)、風向：西、Rate：10Bq/sで検討した。

元上で複雑な地表面上での、風、温度、湿度、雲・霧、乱気流を予測するHOTMACと、その結果から得られた風と乱気流から、放出された汚染物質の拡散と分布を立体的に計算するRAPTADから構成されている⁴⁾。OSとしてWindowsのコンピューターで稼働し、比較的簡単な操作法でシミュレーションが可能のため、最近では高層ビルなどによる乱流やヒートアイランド現象の解析などに利用されている。

一方、福島原子力発電所事故の様な放射線の飛散を高精度に予測する目的として、1985年から運用開始し、ネットワークの拡張、計算モデルの更新を経て現在の形となっているSPEEDI(緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム：System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information)がある⁸⁾。国の「防災基本計画」でも、このシステムを平常時から適切に整備・維持するとともに、対策拠点施設への

接続等必要な機能の拡充を図るとされており、この予測線量を防護対策の判断に用いることが、原子力安全委員会の指針に記載されている¹⁾。

SPEEDIは気象庁で発表される風向・風速などの気象予測値を用いて、地上4000mまでの空間を升目に区切り、3次元風速場を計算し、さらに放出源情報として放出開始時刻、放出持続時間、希ガス・ヨウ素などの核種ごとの1時間当たりの放出量を入力し、濃度分布ならびに線量が計算される¹⁰⁾。福島の事故では、地震・津波被害の影響も大きく、放出量の算定ができなかったために正確な予測ができなかった。そのため、3月23日までその情報を避難指示に利用するため一般に公表されることがなく、放射線量が高い地域に1次避難をしていたなどの問題が指摘されている¹¹⁾。

A2CはSPEEDIと異なり、気象庁の気象予測を用いない点で、実際に起こっている地域毎の複雑な気象状況を反映するものとはならない。従っ

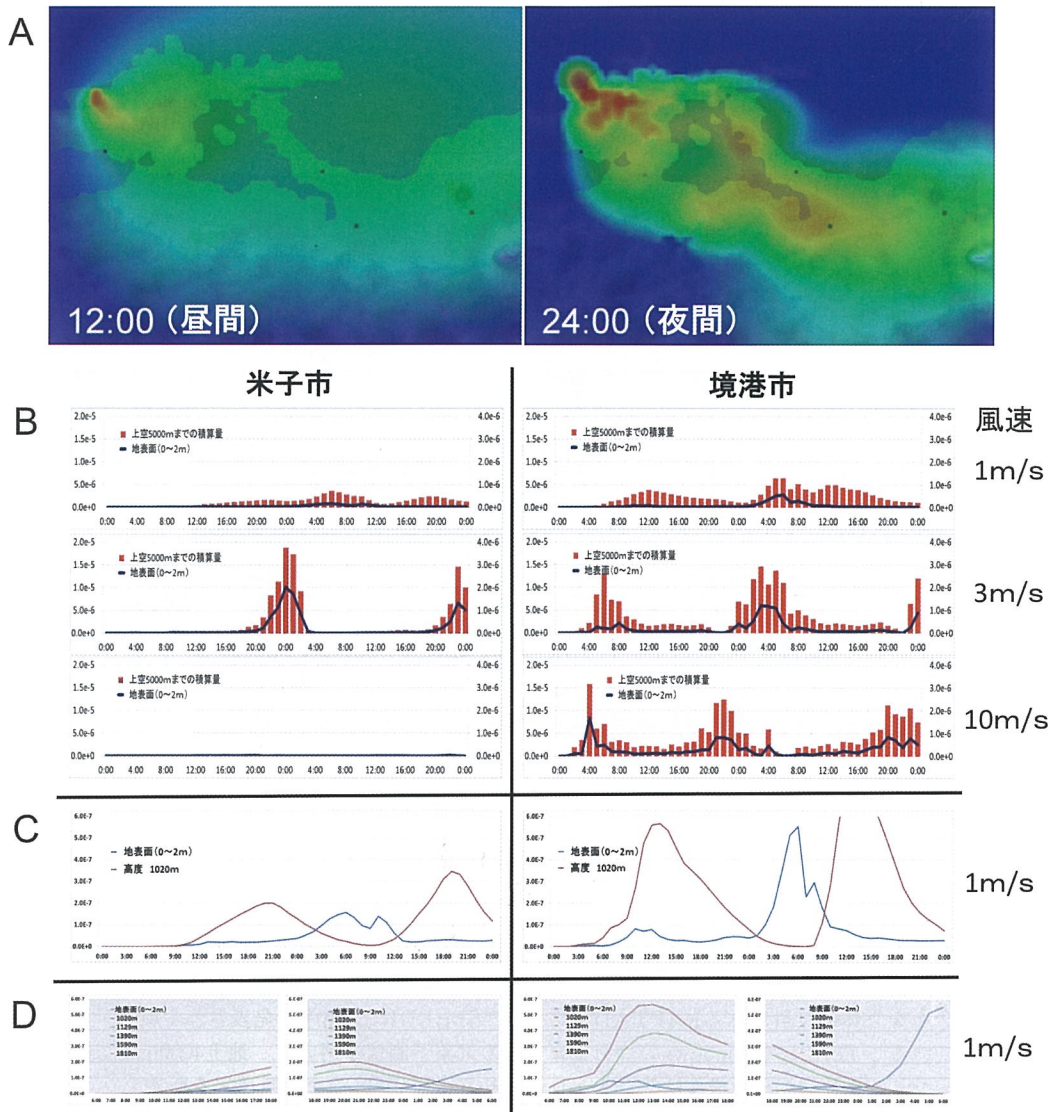


図6 放射性物質の飛散シミュレーションの時刻（昼と夜）による違い

A : 昼間 (12:00) (左側) と夜間 (24:00) (右側) における濃度分布を地図上に示した. B : 西風1m/s (上段), 3m/s (中段) および10m/s (下段) において, 米子市 (左側) と境港市 (右側) の48時間の濃度推移を地表面 (青の折れ線, y軸は左側) と上空5000mまでの積算値 (赤の棒グラフ, y軸は右側) として定量しグラフ化した. C : 米子市 (左側) と境港市 (右側) の2地点での地表面 (0~2m) (青の折れ線) と高度1020m (赤の折れ線) における飛散物質の濃度分布とその推移を48時間で定量評価した. D : 飛散物質が上空のどの程度まで飛散するかを明らかにするため, 米子市 (左側) と境港市 (右側) の2地点の高度0-2m (青の折れ線), 1020m (赤), 1129m (緑), 1390m (紫), 1590m (水色), 1819m (橙) における濃度の時間変化 (x軸は左6:00~18:00と右18:00~翌朝6:00の2つのグラフに分けている) を定量解析した. いずれも解析条件は, 領域: 東西56km×南北40km, 最小区画: 800m, 日時: 200日 (7/18), 風向: 西, 風速: $1 \cdot 3 \cdot 10$ /sec (グラフの右に記載), Rate: 10Bq/sである.

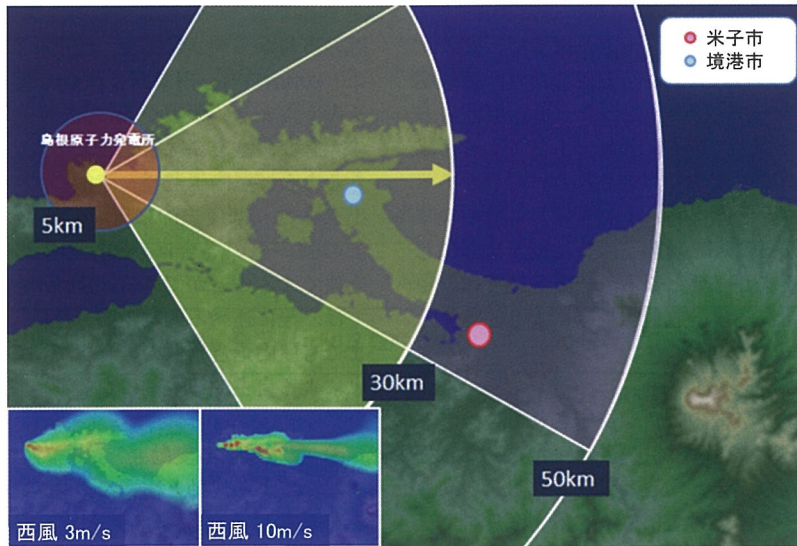


図7 風向と風速から、高線量放射線地帯の設定のための試案

風の方角のベクトル軸から両側に30度、60度の線を引き、中心より30kmの同心円で囲まれた60度と120度の扇型を考えたとき、風速が5m/s未満であれば、120度の大きな扇型を高線量放射線地帯と考え、状況が回避できるならば屋内退避で一時的にしのぐか、それが出来なければ優先的に素早く避難する。5m/s以上の強い風の場合は、60度の扇型までこの地帯を狭くすることができる。30kmから50kmの帯域に関しては、発電所からの距離から計画される範囲としては、あくまでも屋内退避措置のエリアであるが、個人的意思による自主的に避難になる可能性は否定できない。左下の二つの濃度分布図は、領域：東西56km×南北40km、最小区画：800m、風向：西風、日時：200日（7/18）、Rate：10Bq/s、風速3m/sは8:00、10m/sは4:00の時間帯のものを使用した。

て、実際におこっている状況下で、そのすぐ近未来を予測するには不相当であり、その目的ではSPEEDIが優れていると考えられる。しかしながら、一般的にその地域で起こりうる可能性の高い気象条件を入力することで、これからの避難計画を策定・立案する際には十分に役に立つと考えられる。

また、放出される放射性核種はきわめて多種にわたり、事故の際の排出量も定量予測しがたく、詳細な放出条件を現実設定できる可能性は少ないと考えられる。また、核種それぞれによって最終的な外部・内部被曝線量は異なってくる¹²⁾。例えば、ある地点のヨウ素の同位体の単位体積当たりのベクレルが算定されても、その場所に存在するヒトの呼吸数が異なれば内部被曝線量は異なってくる。このようにシミュレーション結果を被曝線量として計算することは容易ではなく、また多様な条件をすべて得られない状況下では現実的なシミュレーションはできない。その点で、今回の

シミュレーションでは、あくまでも肉眼的な飛散のイメージを基本として表示し、そのイメージを一般市民の避難意識の確立や、避難に際してのノウハウ作りに役立てるようなものとしている。

また、A2Cにおいて降水・降雪による放射性物質の沈降の予測は含まれていない。あくまでもシミュレーションからわかることは、ある時点でのその地点の空気中の濃度である。現在福島県で問題となっている汚染地帯の分布に関しては、ブルームと呼ばれる放射性物質を含む雲がある場所で、降雨・降雪が伴ったときに、浮遊中の放射性物質が地表面に落ちることで生じると考えられる¹³⁾。空中の濃度が高くても、降雨・降雪がなく通り過ぎてしまえば、地表面の汚染はおこりにくい。

2) シミュレーション結果から分かること

a) 季節による変動

冬期は、日照時間も短く、地表面上昇気流が

起きにくい場合、大気は安定し拡散は抑えられて、中心部の濃度は高くなる。一方夏期では、強い太陽光により暖められ大気が不安定になり、拡散範囲も大きくなっている⁹⁾。このことは、夏期における避難に際して、着衣が軽装であることも考慮すると、皮膚が直接的に汚染される可能性がある地域が広がると考えられる。夏期では放射性物質飛散が広がることを理解し、また皮膚を露出しないような工夫が必要となる。一方冬期では、中心部における高線量の放射線被曝により注意する必要がある。

b) 風向による変動

風向きにより飛散の方角が決定されるのは、どの地域から避難を優先的に行うかを決定する上で、最も重要な要因となると考えられる。西向きといえども、真西の方角に直線的に流れるのではなく、煙突から放出された煙が上下左右にふらつくと同じように、ある程度の幅を持って流れることがわかる。

風向はいつも一定とは限らないために、この図で示される領域のみが危険地帯であることは断定できない。しかし、避難区域の優先頻度を決定する際には、きわめて重要な因子となる。避難に色々な準備が必要で時間がかかる災害弱者に対して、とりあえず自宅待機を促して準備時間を確保し、また風向きが変わるのを待ち、より安全な状況下で避難を行うことを考慮する必要がある。

c) 風速による変動

風速が遅い場合と、次第に速くなるにつれて観察される現象は、次のようにまとめられる。1) 中心部は、風速が遅いときには濃度が高くなる傾向がある。これは、滞留する物質が増えることと、移動して飛び去る物質質量が減ることが要因である。2) 風速が1m/sの様に遅い場合、比較的同心円に近い形で、広範囲に広がっている。3) 風速が増えるに従って、風の向きの軸に対して飛散範囲が収束されていく。4) 図からだけでは判断できないが、風速が増えれば放射線物質が飛び去る速度も速くなり、被曝を受ける時間も短くなる。シミュレーションでは持続的に放出されているという条件で行っているが、現実には放出は爆発的に放出されるピークが観察される可能性が高く、その場合では一時屋内退避をすることで十分に被曝を防ぐことができる可能性がある。

風向と風速から、次のように高放射線地帯を設

定することができると思われる。図7のように、風の方角から両側に30度、60度の線を引き、中心より30kmの同心円で囲まれた60度と120度の扇型を考えたととき、風速が5m/s未満であれば、120度の大きな扇型を高線量地帯と考え、状況が回避できるならば屋内退避で一時的にしのぐか、それが出来なければ優先的に素早く避難する。5m/s以上の強い風の場合は、60度の扇型までこの地帯を狭くすることができる。30kmから50kmに関しては、後に述べる避難距離の範囲としては、あくまでも屋内退避措置のエリアであるが、個人の意思による自主的に避難になる可能性は否定できない。

d) 昼夜による変動

季節による変動と同様に、昼夜の違いでも太陽光の日照による影響は大きく、昼間は拡散し地表面の濃度が下がるのに対して、夜間は地表面の濃度はかなり高くなると考えられる⁹⁾。今回さらに詳細に解析した結果、西風の時には地表面と上空で濃度が逆転する現象が観察されている。北風で松江市中心方向へと南に飛散する時には、この逆転は発生していない。単純に昼間の大気不安定性による拡散現象だけではこの現象は説明できない。島根原子力発電所の東側の境港市との間に、澄水山(標高507.3m)、三坂山(同536.7m)、枕木山(同453m)からなる枕木山系があり、そこからほぼ海拔0mに近い境港市につながっている。このため、発電所から発生したブルームは一度山に沿って上昇気流で上空に輸送されると思われる¹³⁾。昼間はそこから広く拡散するのに対して、夜間は山肌に沿って拡散することなく地表面を滑り降りていると考えられる。このように、島根原子力発電所より東側に進むブルームは、地形の影響で複雑な様相を呈する可能性があり、境港市周辺での飛散の予測には注意を要する。

避難をより安全に行うためには、日中の明るい時間帯にのみ行動を限定する方がよいと考えられる。とくに、緊急で生命に危険が迫っている状況下でなければ、地震・津波との複合災害で電力が失われたなかで、暗闇で行動を起こすよりは、夜間に周到な準備を進め明るくなってから行動する方が適切と考えられる。

また、昼夜の数値の差は、モニタリングポストの放射線量を評価する際にも重要な要因である。モニタリングポストは地上から数メートル以内に

表1 想定された事象において指標線量を超える領域の発電所からの範囲とその時間経過

指標線量	水素爆発	格納容器破損	使用済燃料プール（4号）	
			1炉心分	2炉心分
10mSv （屋内退避）	15 km	10 km	50 km	70 km
50mSv （避難）	7 km	6 km	15 km	18 km
100mSv	5 km	4 km	9 km	10 km
放出の時間経過	事象発生より10日程度まで		事象発生より14日以降	

- 1) 線量は7日間の放射性プルームからの外部被曝、地表沈着からの外部被曝および吸入による内部被曝による実行線量の合計
- 2) 福島原発事故 独立検証委員会 調査・検証報告書の「最悪シナリオ」の作成に関する経緯から引用（一部改変）

設置されていることから、昼間は低値しか検出されない可能性がある。この値だけをもとにして、放射性物質の飛散が収まったと判断して行動を開始したが、実は上空をまだ多くの放射性物質が通りすぎていて、危険は持続しているという事態が起こりうる。またそのときに雨が降った場合、水滴に含まれる放射性物質により被曝してしまう可能性があることも考慮する必要がある。

3) 福島での避難上の問題点

福島原子力発電所事故による避難では、3月11日夜から24時間以内に、2km圏内（福島県指示）からはじまり、3km, 10km, 20km圏内へと4回も住民避難区域が広がっている。これは主として予防的な避難であったが、その結果は多くの住民の放射線被曝を予防することができた¹²⁾。

現在、原子力安全委員会は新たな原発防災地域として、PAZ: Precautionary Action Zone（予防防護措置区域：原発の半径5km圏内）、UPZ: Urgent Protective action Planning Zone（緊急防災措置区域：30km圏内）、およびPPZ: Plume Protection Planning Area（プルーム通過時の被曝をさけるための防護措置、すなわち放射性ヨウ素対策区域：50km圏内）を定めている²³⁾。避難に関しては、PAZとUPZが重要であり、PAZは特定の事故発生で直ちに避難がもとめられ、UPZではまず屋内回避等で準備をし、モニタリング情報をもとに地域毎に屋内退避、避難、安定ヨウ素剤の予防服用等の各種の防護措置を実施するとし

ている。

事故に際して、重大事故時は予測が不確実なためSPEEDIには頼ることができず、被曝による急性放射線障害を防ぐためにも、まず5km圏内から退避することが重要となる。そのために、まず警察・消防・自衛隊による積極的な支援はこの地域を中心に行われるであろう。その範囲は限定的であり、また特に島根原子力発電所の周辺5kmは比較的人口が少ないことから、相対的に容易な避難と考えられる。

しかし次の段階として30km圏内が避難となった場合は、状況は複雑となる。この地域には、松江市・安来市と境港市・米子市一部などの大きな都市を含んでいる。想定避難者数は、およそ46万人であり、そのうち鳥取県側ではおよそ6.5万人（境港市3.5万人、米子市の一部3万人）と見積もられている¹⁵⁾。これまでに経験したことがない避難規模になると考えられる。この30km圏内の住民を一度に退避させることは交通渋滞を招き、かつ避難のための交通手段を確保することもきわめて困難となる。これを回避する方法としては、モニタリングや気象予測により、避難地域を分割して優先順位をすみやかに決定し、かつその地域に優先的に人材ならびに交通手段を投下することにある。

福島原子力発電所事故に際して、政府が作成した「最悪のシナリオ」¹⁶⁾では、1) 水素爆発、2) 格納容器破損、ならびに3) 使用済み燃料プール（4号炉）での放出を検討している（表1）。前2者の

表2 ICRP勧告による緊急時被曝状況における防護基準 (ICRP 2007, Publication 103 より抜粋)

	介入レベル ¹⁾	参考レベル ¹⁾
職業被ばく		
— 救命活動 (情報を知らされた志願者)	線量制限なし ²⁾	他のものへの利益が救命者のリスクを上回る場合は線量制限なし ³⁾
— 他の緊急救助活動	~500 mSv ; ~5 Sv (皮膚) ²⁾	1,000 又は 500 mSv ³⁾
— 他の救助活動	...	≤ 100 mSv ³⁾
公衆被ばく		
— 食料	10 mSv/年 ⁵⁾	
— 安定ヨウ素の配布	50 ~500 mSv (甲状腺) ^{4,5)}	
— 屋内退避	2日で5~50 mSv ⁵⁾	
— 一時的な避難	1週間で50~500 mSv ⁵⁾	
— 恒久的な避難	初年度100mSv又は1,000mSv ⁵⁾	
— 1つの全体的な防護戦略に統合されたすべての対策	...	計画では、状況に応じ一般的に 20 mSv/年から 100 mSv/年の間 ⁶⁾

1) 別に指定されていなければ実効線量を意味する

2) Publication 60 (ICRP, 1991b)

3) Publication 96 (ICRP, 2005a) 1000mSv以下の実効線量は重篤な確定的影響を回避できるはずである。500mSv以下では、他の確定的影響を回避できるはずである。

4) 等価線量

5) Publication 63 (ICRP, 1992)

6) Publication 103 (ICRP, 2007) 5.9節と6.2節参照

1) 2) は事故発生後1週間以内におこる可能性を指摘しているが、放射線量50mSvを避難の指標線量としても、想定避難範囲は7km, および6kmであり、PAZの5km圏よりやや広い程度である。この段階では、放出される放射性物質量は相対的に多くないと考えられている。一方、3) の事故後14日以後に起こるとされる使用済み燃料プールが露出し、燃料破損、溶融、溶融後のコンクリートとの相互反応により起こる放射性物質の放出は大きく見積もられ、2炉心分で18kmまでおよぶと想定された。PAZの5km避難では対応できず、UPZ内での避難が必要となる。「最悪のシナリオ」で、屋内退避として放射線量10mSvを指標線量とした場合、それぞれの屋内退避圏内は15km, 10km, および70kmとしている。

ICRP2007年の勧告において、緊急時被曝状況での公衆被曝の一時的避難の指標線量が1週間で50~500mSv, 屋内退避が2日間で5~50mSvである (表2)¹⁾。先の算定に用いた避難指標が50mSv, 屋内退避指標が10mSvは、急性放射線被曝のみならず低線量被曝を考えると、かなり余裕をもった安全度の高い避難計画である。

これらからも、事故後1週間以内では最悪の事態にはまだ至らず、十分余裕を持って避難が可能であることがわかる。決して慌てることなく、落ち着いて気象条件を把握しながら、30km圏内のUPZ地域を分割し優先順位を決定して避難を行うことが、可能かつ重要であることを理解する必要がある。2週間目から始まるとされる、燃料プールからの放出が始まれば、当然より早急な避難が必要となる。

4) 災害弱者を含めた避難誘導にどのように役立てるか

以上をまとめると、避難計画は次のようになると考えられる。1) 事故発生直後では、まずPAZの5km圏内の避難を安全かつすみやかに進める。2) 5kmから30km圏内では、慌てずにまず屋内退避を行い、今後の避難のためのモニタリング、SPEEDIの予測を行う。3) 30km圏内から自主的に避難する場合は、夜間ではなく昼間に行い、また風向きと自分のいる地域をしっかりと確認し、十分な情報を得てから指示に従って行動する。4) 「最悪のシナリオ」に至るまでには10日前後の余裕はあることから、特に災害弱者 (重病人、要

介護老人、身体障害者など）は事前の十分な避難計画と、計画である程度確保されている避難先の施設を確認してから、落ち着いて医療従事者、警察・消防・自衛隊の十分なサポートを受けながら避難を行う¹⁸⁾。地震や津波など、他の災害が絡む複合災害の場合は、別途考慮しなければならない事情は増えてくるが、慌てず慎重に行動することは、特に災害弱者の安全確保に重要であると考えられる。

結 語

島根原子力発電所において放射線が飛散する事故を想定し、そのときにどのように飛散が起こるかを、コンピューターシミュレーションを用いて解析を行った。さらに、福島第1原子力発電所事故での「最悪のシナリオ」、災害弱者の避難の実態を考察し、山陰地方でどのように対処するかの検討を行った。必ずしもこの検討が実際の役に立つかどうかは明らかではなく、また想定外の事象はいずれかの段階でも起こりうるであろう。また、いかに地方公共団体が綿密な避難計画を策定しようとも、地域住民の理解と行動が伴わなければ、実際の避難は破綻してしまう。それを防ぐには、地域住民を巻き込んだ避難教育と実地の訓練が必要となる。その際に、このようなシミュレーションを目にして、具体的なイメージを持ち、個人個人の行動に活かしていただければと考えている。

稿を終えるにあたり、コンピューターソフトウェアA2Cの開発者でありアメリカ在住の気象研究者山田哲司博士には、鳥取大学米子キャンパスまでお越し頂き、解析の詳細なご指導・校閲を頂きました。また研究内容の検討や論文の校閲に関して、所属研究室の汐田剛史教授、宮野佳子・岡田茜・矢野亜里沙の各研究員、堀田絵里香大学院生の多大な協力を得ることができました。また、この研究の切掛けとなりました鳥取大学付属病院北野博也病院長のご指導と、ソフトウェアプログラム購入に関して鳥取大学林喜久治理事、井藤久雄理事より鳥取大学理事裁量経費のご支援を頂きました。これらの皆様のご協力に感謝いたします。

文 献

1) 原子力安全委員会「原子力施設等の防災対策について」昭和55年6月策定（平成22年8月改

訂）第3章 防災対策を重点的に充実すべき地域の範囲

- 2) 原子力安全委員会「原子力発電所に係る防災対策を重点的に充実すべき地域に関する考え方」（案）平成23年10月20日 防災指針検討ワーキンググループ 防WG第6-3号
- 3) 原子力安全委員会「原子力発電所に係る防災対策を重点的に充実すべき地域に関する考え方」平成23年11月1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 防専第23-1号
- 4) A2C (atmosphere to cfd: computational fluid dynamics) software to simulate airflows and dispersion for meso to microscale forecasting system. by Yamada Science and Art (YSA), Santa-fe, NM, USA <http://www.ysasoftware.com>
- 5) 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書 第5章「現地における原子力災害への対応」第5節「地方自治体における原子力災害への準備と実際の対応」p197-210 特別寄稿「原発事故の避難体験記」p211-218 第1刷（2012年3月11日）一般財団法人 日本再建イニシアティブ
- 6) 国土交通省気象庁（Japan Meteorological Agency）ホームページ<http://www.jma.go.jp/jma/index.html> 過去の気象データ検索より
- 7) 国土交通省気象庁（Japan Meteorological Agency）ホームページ<http://www.jma.go.jp/jp/windpro/> ウインドプロファイラ（上空の風）
- 8) 文部科学省 原子力安全課 原子力防災ネットワーク 環境防災Nネット トップページ>原子力防災に関する取組>防災技術開発> SPEEDI <http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/index0301.html>
- 9) Weblio辞典 大気安定度 <http://www.weblio.jp/content/大気安定度> 環境省環境アセスメント用語集 文部科学省原子力防災基礎用語集 http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/ta03.html
- 10) 文部科学省編 SPEEDIに関するパンフレット（pdf版）平成17年1月http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/download_data/speedi

- pdf
- 11) 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書 第5章「現地における原子力災害への対応」第3節「SPEEDI」p171-186 第1刷（2012年3月11日）一般財団法人 日本再建イニシアティブ
 - 12) ICRP publication 103「国際放射線防護委員会の2007年勧告」4.4.「放射線被曝の評価」p34-39 4.5.「不確実性と判断」p39-41 社団法人 日本アイソトープ協会
 - 13) 文部科学省 原子力安全課 原子力防災ネットワーク 環境防災Nネット トップページ>情報BOX > Q & A >原子力防災Q & A もしも放射性物質がもれたらどうなるのですか？放射性プルーム（放射性雲）について <http://www.bousai.ne.jp/vis/box/qa/05.html>
 - 14) 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書 最終章「福島原子力発電所事故の教訓—復元力を目指して」p392 第1刷（2012年3月11日）一般財団法人 日本再建イニシアティブ
 - 15) 鳥取県危機管理局の資料より抜粋
 - 16) 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書 資料「最悪のシナリオ」の作成に関する経緯 p89 および 巻末の資料 第1刷（2012年3月11日）一般財団法人 日本再建イニシアティブ
 - 17) ICRP publication 103「国際放射線防護委員会の2007年勧告」6.2.「緊急時被ばく状況」p68-70 および 表8 p75-76 社団法人 日本アイソトープ協会
 - 18) 福島原発事故独立検証委員会 調査・検証報告書 特別寄稿「原発周辺地域からの医療機関の緊急避難 p220-236 および 第6節「現地の被曝医療体制」p238-244 第1刷（2012年3月11日）一般財団法人 日本再建イニシアティブ