

日中韓の原発で重大事故が起きた場合の同地域での 放射性物質被害の推定

——HYSPLIT モデルによる推定——

李 秀 澈・Eva Lisowski・周 瑋 生・松 本 健 一
李 態 妍・大 島 堅 一・柳 蕙 琳・Jungmin Kang

要約

本研究は、日本、中国、そして韓国（以下、日中韓）に所在する原子力発電所で重大事故が発生した場合に、放射性物質（本研究ではセシウム 137（以下、Cesium-137）を想定）の拡散範囲と被害人口を定量的に推定することを目的とする。定量的推定のためには、物質の移流・拡散が推定できる HYSPLIT シミュレーションモデルと原子炉内で照射された核燃料の同位体組成を計算する ORIGEN2 が用いられた。日中韓それぞれ 2 つずつ、6 つの原子力発電所を対象としたシミュレーションの結果、放射性物質の放出を伴う重大事故が発生した場合、放射性物質が広範囲に拡散されるため、事故当事国だけでなく近隣の国民の避難をも余儀なくされる可能性があることを示された。特に、シミュレーションされた 6 基の原発の仮想事故のうち、韓国の古里原子力発電所 4 号機での使用済燃料プール火災事故は、近隣諸国に最も大きな被害を与えることが推定された。この事故では、韓国では、強制避難レベルである Cesium-137 濃度 1.5MBq/m^2 以上に汚染された地域から平均 710 万人が避難される可能性がでた。さらに、日本と中国ではそれぞれ 670 万人と 530 万人が Cesium-137 濃度 1.5MBq/m^2 以上の影響を受ける可能性があることが推定された。

1. はじめに

世界の総発電量に占める原子力発電（以下、原発）の割合は、1995 年に 17.6% のピークに達した後、2010 年に 12.8% から 2021 年には 9.8% へと減少した（IEA（2022））。このような原発依存の縮小傾向には、1986 年のチェルノブイリ原発事故および 2011 年の福島第一原発事故の影響があるといえる。しかしながら、今世紀半ばカーボンニュートラルの達成という世界的潮流に伴い、原発が非炭素エネルギーのオプションとして、再び注目を集めることになった。2022 年 7 月に欧州議会は、持続可能な経済活動に貢献する事業のリストである「EU タクソノミー」に、安全と使用済燃料処理場の確

保などの条件付きではあるものの、原発を含めることを可決・承認した。

日中韓でも原発が非炭素エネルギーであるということもあり、重要電源の 1 つとして位置づけられている。日本の総発電量に占める原発割合は 2021 年に 7% にすぎないが、2030 年の電源計画上では 20~22% となっており、2050 年でも原発および CCS 付き火力発電の割合が 30~40% となっている（内閣官房成長戦略会議（2020））。日本は、原発に対して否定的な世論により新規の建設が難しい状況の中、2022 年 12 月に開催された経済産業省の有識者原子力関係閣僚会議では、既設の原子炉の運転期間「最長 60 年」との現行規定を超える運転を可能にした（原子力関係閣僚会議（2022））。

韓国の場合、2022年に文在寅政権を継いだ尹錫悦政権は原発の推進を明らかにしており、総発電量に占める原発の割合は、2020年の25%から2030年に32.4%、2036年には34.6%へと増やす計画である（産業通商資源部（韓国）（2022））。中国の場合、安全確保を前提とした原子力発電の積極的な開発という方針が打ち出されている。カーボンニュートラルに向けた詳細な電源計画は示されていないが、2022年12月末現在、52基の原発が稼働中であり、19基が建設中、24基が建設計画中である（原子力産業協会（2023））。米国では92基の原発が稼働中であり、建設中の2基以外の建設計画はないので、中国は米国と並んで世界最大の原発保有国となる。韓国では稼働中の原発が24基、建設中が4基、日本では稼働可能な原発が33基（うち11基が稼働中）、建設中が3基なので、日中韓の3カ国では、単純計算で将来的に総計159基の原発が稼働することになる。これは世界全体の原発基数555基（稼働・建設中・計画中を含む）の約3割となり、世界で最も原発の密度の高い地域となる（原子力産業協会（2023））。

これまでに炉心溶融が起きた重大事故は、1979年のスリーマイルアイランド原発事故、1986年のチェルノブイリ原発事故、2011年の福島第一原発事故の3回である。日本の総合資源エネルギー調査会発電コスト検証WG(2015)では、原発過酷事故の確率を4,000炉・年に1回の事故を想定している。この想定に従うと、日中韓の3カ国で仮に100基の原発が稼働するとすれば、40年に1回程度は過酷事故が起きる計算となる。この事故頻度は決して無視できるレベルではないだろう。

そこで本研究は、日中韓に立地している原発で仮定の重大事故が起きた場合、放射性物質がどの範囲までに拡散し、どれほどの人口が避難を余儀なくされるのかについて、本研

究が独自にHYSPLIT（Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory）およびORIGEN2（Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code Matrix Exponential Method）シミュレーションモデルを用いて定量的に推定する。その際に、本研究の推定に用いる放射性物質は、人体への悪影響が大きく、半減期（30年）も比較的長いCesium-137を想定する。

以下、第2節では先行研究レビューを行い、第3節では日中韓で稼働中の原発の中で、稼働年数や地理的条件などを考慮し、仮想事故のシミュレーション対象となる原発を2基ずつ選ぶ。第4節では、仮想事故による放射性物質の放出量と拡散および沈着の推定を行った後、HYSPLITモデルによる放射性物質の拡散および沈着シミュレーションを実施する。第5節は、放射性物質の拡散による避難対象地域と避難人口を算出し、最後の第6節はまとめと結論とする。

2. 先行研究レビュー

原発は、一般国民と現場労働者の両方に対するリスクを低減するための多層保護を意味する「深層防御」の概念に基づいて設計されている。深層防御の目的は、事故防止を優先しつつ、事故が防止できない場合には被害を最小限にするというものである。

1979年に米国で起きたスリーマイル島原発事故では、原子炉の炉心が部分的に溶融し、放射性物質が放出され、深層防御の弱点が露呈した。1986年のチェルノブイリ原発事故においては、深層防御だけでなく、原発の運営において安全文化の必要性が改めて明らかになった。そして、2011年の福島原発事故では、深層防護に基づいて設計されたはずの原発においても、事故防止に失敗する可能性があることが明らかとなった。

スリーマイル島、チェルノブイリおよび福島原発事故に共通するのは、核燃料のジルカロイ（ジルコニウム合金）被覆材火災である。軽水炉での核燃料冷却系の故障は、核燃料の温度上昇につながる。冷却が再開されないと、核燃料は摂氏 1,000 度以上にまで上昇する可能性がある。こうなると、ジルコニウム合金は発熱性化学反応が引き起こされ、水と反応し始める。また、水蒸気が高温のジルコニウム合金と反応して大量の水素が生成される。水素濃度が一定レベルを超えると、水素爆発が起こり、核燃料が損傷し、原子炉から放射性蒸気が放出されるようになる。

気象条件によっては、これらの放射性蒸気は格納容器、原子炉建屋から周囲の環境に放出される。ジルコニウム合金を被覆管の材料として使用する限り、このタイプの重大事故の可能性があることは避けられない。このような重大事故は、人為的ミスや、津波などの自然災害だけでなく、原発の冷却および電力システムを含む安全システムを無力化させる軍事攻撃やテロなどによっても発生する（Kang (2021)）。

Alvarez et al. (2003) は、原子力規制機関内部では 1980 年代から知られていたが、一般研究者レベルではほぼ初めて使用済燃料の稠密湿式貯蔵の危険性を技術的に分析し、使用済燃料プールの脆弱性を示したうえで、事故時に放射性物質の放出を減らすために取り得る措置を提案している。同論文では、使用済燃料の稠密貯蔵が許されて以来、米国ではほぼすべての原発の使用済燃料プールで原子炉の炉心密度に近い密度で使用済燃料集合体を貯蔵することになり、核臨界事故を防止するために中性子吸収材である硼素を含む金属箱が使用済燃料集合体を囲むようになった、と指摘した。その結果、使用済燃料プールの冷却水がなくなると、稠密使用済燃料貯蔵プールで対流による空気冷却ができなくなり、使用済燃料が、ジルカロイ核燃料

被覆材の燃焼温度にまで上昇し、Cesium-137 を含む核燃料中の揮発性核分裂生成物が放出される可能性がある。また、発生した火災が保管されている他の使用済燃料に移る可能性もある。

Hippel & Schoeppner. (2017) は、福島原発事故の際に福島第一原発 4 号機の使用済燃料プールで火災事故が起きた場合にどの程度の影響があるかを検討している。同論文によれば、放出された放射性物質が東京方面に吹く風によって移動すると、約 3,500 万人が強制移住を余儀なくされる可能性があった。

米国原子力規制委員会 (U.S. Nuclear Regulatory Commission) は、米国内の使用済燃料稠密プールで火災が起こった場合、福島原発事故で放出された放射能の 100 倍以上の Cesium-137 が大気中に放出されると推定している。また、米国内でそのような事故が起これば、約 350 万人が強制移住を余儀なくされると推計されている。

Kang (2020) は、北東アジア諸国でミサイル攻撃などの軍事攻撃があった場合の原子炉炉心溶融事故と使用済燃料プール火災事故による影響を、過去の気象データと HYSPLIT を用いて示している。また、Kang & Lisowski (2022) は、ウクライナ南部のザポリージャ原発 (ZNPP) を 2022 年 3 月 4 日にロシア軍が攻撃したことでチェルノブイリや福島事故と同等の原子力災害が発生する懸念が高まる中、同原発 1 号機の炉心溶融事故および使用済燃料プール火災事故の影響について HYSPLIT を用いて分析した。炉心溶融事故および使用済燃料プール火災による放射能汚染の影響は、ウクライナに限らず、ロシアやトルコ、ルーマニア、ベラルーシ、モルドバなど周辺国にまで大きな影響を及ぼすことが示された。

以上の先行研究結果に基づき、本研究では、日中韓の原発の中で、稼働年数や使用済燃料の貯蔵量、事故時隣国への影響度などを考慮し、

各国で2基の原子力発電所を選定し、炉心溶融または使用済燃料プールでの火災事故が発生した場合の本国および隣国への被害の可能性について HYSPLIT を用いてシミュレーションする。

いくつかの先行研究では、一国の原子炉が対象とされているが、本研究では、原発事故時の被害の影響が隣国にも大きく及ぶと考えられる日中韓3カ国の原子炉を対象とした点、そして各原子力発電所の事故時に12の気象ケースを総合してシミュレーションを行った点が既存研究とは区別できる点である。

3. 仮想事故原子炉の選定

本研究での仮想事故シミュレーションの対象原発は、1. 稼働年数、2. 地理的条件（例えば事故時本国だけでなく隣国への影響程度を考慮）、3. 原発の中で使用済燃料貯蔵量を総合的に考慮して選定した。そして原発の炉型は事故時の被害を比較することを考慮して、すべて加圧水型(Pressurized Water Reactors(PWRs))を選択した。

表1では、以上を総合的に考慮して、シミュレーション対象として選択した原発の情報がまとめられている。仮想的な原発事故は、原子炉の設計の問題（early failure of the

表1 仮想事故シミュレーション対象原発

所在国	原子炉名称	出力 (MWe)	商業運転 開始年	仮想事故類型
中国	紅沿河1号機	1119	2013	メルトダウン
	秦山1号機	330	1994	使用済燃料プール火災
日本	大飯4号機	1180	1993	メルトダウン
	玄海4号機	1180	1997	使用済燃料プール火災
韓国	Hanbit1号機	1026	1986	メルトダウン
	古里4号機	1046	1986	使用済燃料プール火災

注：各原発関連データは、International Atomic Energy Agency (IAEA) (2022) から得られた。
出典：本研究による。



図1 仮想事故シミュレーション対象原発

出典：本研究による。

containment structure) もしくは人的ミス, もしくは災害による重大事故 (メルトダウンを想定), および使用済燃料プールでの火災事故による Cesium-137 の放出事故を想定した。図 1 では, シミュレーション対象の 6 つの原発の概略的な場所が示されている。

4. 仮想事故による放射性物質の放出量, 拡散および沈着の推定

上記 6 基の原発での仮想事故により, Cesium-137 放射性同位元素が放出すると想定するが, 放出量については, Croff (1983) を参考して, 原子炉出力 (the reactor power rating), 核燃料交換期間 (refueling cycle), 燃焼度 (reactor burnup), ウラン濃縮度 (fuel enrichment), 容量因子 (capacity factor), そして定された Cesium-137 核分裂収率 (estimated Cesium-137 fission yield) など考慮した ORIGEN2 モデルにより推定した。

圧力容器の重大損傷により放出される Cesium-137 の量は, 1990 年にドイツの研究

で推定された量の約 50 % と想定した (Ang et al. (1994))。使用済燃料が稠密貯蔵されたプールでの火災事故で放出される Cesium-137 の量は, 米国の原子力委員会 (United States Nuclear Regulatory Commission (2013)) で推定された標準値の 75 % と想定した。以上から, 表 2 では, 仮想事故対象原発のメルトダウンや使用済燃料プール火災事故時の予想される放射性物質の放出量の推定値がまとめられている。

5. HYSPLIT モデルによる放射性物質の拡散および沈着シミュレーション

表 1 で示された 6 基の各原発での仮想事故による Cesium-137 の拡散 (表 2 の推定量) は, US NOAA-ARL (National Oceanic and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory) による HYSPLIT モデルにより推定された (Stein et al. (2015))。各原発での事故時の気象は, NOAA-ARL READY のウェブサイトから得られる 2021 年中の毎月午前零時

表 2 仮想事故により放出される放射性物質の量

NPP	Cesium-137 in Core (PBq)	メルトダウンから放出される Cesium-137 ¹ (PBq)	使用済燃料プール保管量 ² (tHM)	使用済燃料の保管年数	使用済燃料の Cesium-137 量 (Bq/tHM)	燃料プールの Cesium-137 インベントリ (PBq)	使用済燃料プールから放出される Cesium-137 量 ³ (PBq)
紅沿河 1	352	176	212	5	4.14E+15	879	659
秦山 1	102	51	661	14	3.36E+15	2,220	1,665
大飯 4	391	196	684	15	3.28E+15	2,247	1,685
玄海 4	373	187	590	13	3.44E+15	2,029	1,522
Hanbit 1	330	165	829	18	3.06E+15	2,540	1,905
古里 4	347	173	960	18	3.06E+15	2,941	2,206

注 1: 50%

2: 2021 年末推定量 (ただし Hanbit 1 号機及び古里 4 号機を除く)。

3: 75% 放出を想定

出典: 本研究における ORIGEN2 シミュレーションにより推定。

表3 HYSPLIT シミュレーションパラメーター

パラメーター	シミュレーションバリュー
気象データ (風速/風向、降水量)	GDAS 1-degree ¹
日時(UTC) ²	2021年1月1日午前0時 2021年2月1日午前0時 ... 2021年12月1日午前0時
場所	多岐
放出高度	0-300 メートル
放出時間	32 時間
単位 Cesium-137 放出量	1e15 (1 PBq)
Total Running Time	336 時間
湿気沈着パラメーター ³	In-cloud (1/s): 8.0E-5 Below-cloud (1/s): 8.0E-5
乾性沈着速度 ⁴	0.002 m/s
出力格子	Spacing: 0.25° Span: 30° Layer Heights: 0 m

注1：気象データは、NOAA Air Resources Laboratory から提供される READY ウェブサイトから得られた。

2：2021年の毎月1日の午前零時における12つの気象データである。また協定世界時（UTC: Coordinated Universal Time）は、世界各国標準時の基礎となるもので、セシウム原子時計によって刻まれる国際原子時を基に国際的に管理されている。

3：HYSPLITの湿気沈着デフォルトパラメーターである。

出典：本研究による。

の12つの気象パターンを想定した（Rolph et al. (2017)）。Cesium-137の放出時間は、高度ゼロから300メートルまでの32時間を仮定した（表3）。

モデルシミュレーションの際に、気象条件によるCesium-137の拡散影響をより正確に反映するために、雨などによる大気湿度も考慮に入れた。気象データは、1-degree resolutionで使用されたが、シミュレーション結果物は0.25-degree gridまで示された。HYSPLITシミュレーションに使用されたパラメーターは表3にまとめられている。

本研究でのシミュレーションと比較の観点から、2011年3月11日に起きた福島第一原発事

故についてのHYSPLITによる簡易シミュレーション結果の考察を行った。この簡易シミュレーションによるCesium-137放出は、2011年3月14日の12時UTCから始まった。

拡散結果は、計算されたCesium-137の沈着データを地図とマッチングさせるために、経度と緯度それぞれ0.05°の間隔で出力された。格子設定とは別途に、シミュレーションパラメーターは、表2と同様なものが用いられた。事故の影響により炉心のCesium-137インベントリの約2%に相当する13PBqのCesium-137が大気中に放出されたと仮定した（Kobayashi et al. (2013)）。

福島第一原発事故に関するHYSPLITの簡易

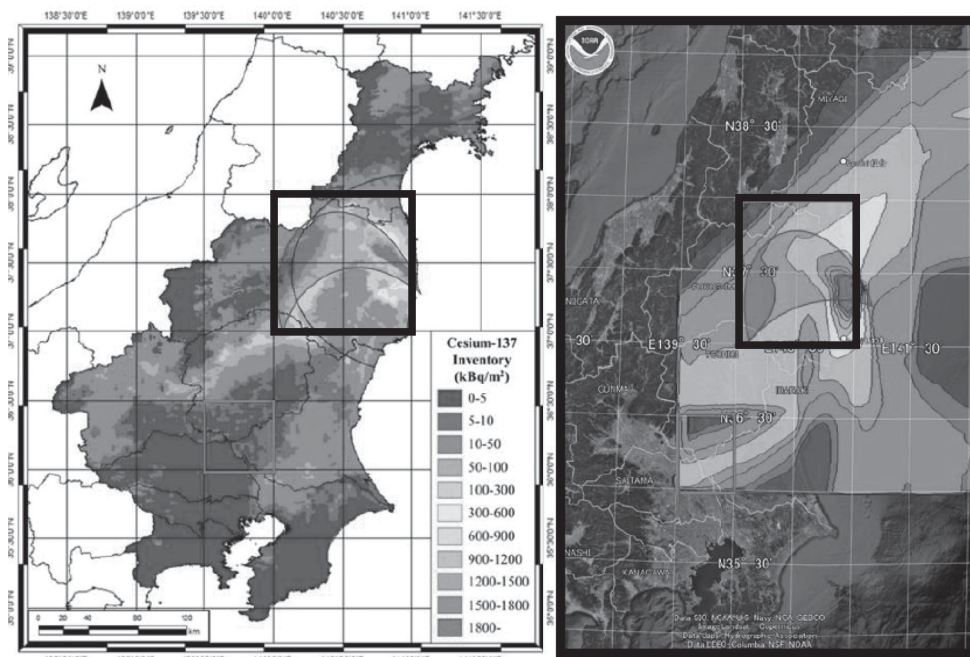


図2 筑波大学のKobayashi et al. (2013) によるCesium-137沈着量マップの再構築（左）と、2011年3月11日の事故に関する本研究のHYSPLITによる簡易シミュレーションの結果（右）比較注：特に、Cesium-137沈着量の最も多い太い枠の中の両シミュレーションによるCesium-137の拡散経路と濃度は近似していることが分かる。

シミュレーション分析は、筑波大学のKato et al. (2019) のCesium-137シミュレーション分析とも比較できる。図2では、HYSPLITによる簡易シミュレーション（右側）と筑波大学のシミュレーション（左側）が並べられている。両シミュレーションのCesium-137拡散経路と濃度は近似していることがわかる。

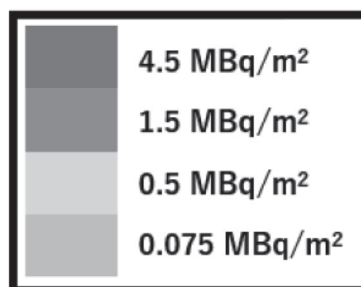


図3 カラー別Cesium-137の汚染レベル
出所：本研究による。

6. HYSPLIT シミュレーションによる避難対象地域と避難人口の算出

本研究におけるCesium-137の汚染レベルは、図3の濃淡コードに従ってマッピングされた。これらの汚染レベルは、稠密使用済燃料プールでの火災をシミュレーションした過去の研究に基づいて選択された。Hippel & schoeppner. (2017) の研究では、汚染閾値は

チェルノブイリ事故と福島第一原発事故後に政府が住民の移転地域を決定するために使用したものをベースにしている。

チェルノブイリ事故後の強制移住のための汚染閾値は、約 1.5MBq/m^2 であった。福島第一原発事故後、初年度の非遮蔽線量は約 2rem (20mSv) が使用され、これはEPAが

推奨する初年度移転線量の制限値と同じである。この限度値は、Cesium-137の汚染閾値 1.5MBq/m^2 に相当する。 0.5MBq/m^2 の閾値は、多くの住民が自主的に避難することを選択した地域に近似している。Cesium-137の汚染閾値 1.5MBq/m^2 以上では、強制避難対象地域となる。ただし、 1.5MBq/m^2 の閾値では、汚染地域の除染が成功した場合、汚染地域に戻られるレベルとなる。一方で、汚染閾値 4.5MBq/m^2 は、除染の努力が行われても多年の間に汚染地域に戻れないレベルとなる。

本研究では、Hippel & Schoeppner. (2017)の研究からの情報に基づいて、 0.075MBq/m^2 の汚染閾値を追加した。 0.075MBq/m^2 は、米国原子力規制委員会が定める、認可された通常の原子炉の運転による一般市民の個人に対する総実効線量換算の限度である、初年度の非遮蔽線量 1mSv にほぼ対応する。ただし、この汚染閾値は、上記の各図の地図上ではマッピングされているが、各表での数値としては出されていない。一方、放射線業務従事者の年間職業性線量限度は 50mSv である。

7. 日中韓原発で仮想事故が起きた場合の放射性物質被害シミュレーション

本研究では、日中韓の被害シミュレーショ

ン対象6基の原発に対して、それぞれ12の気象パターンによるCesium-137の被害面積と被害人口を推定したが、ここでは紙面関係上、自国と近隣国への被害規模が大きな各国の1つのみ、すなわち中国の秦山1号機、日本の大飯4号機、そして韓国の古里4号機における3つの被害シミュレーション結果について図および表として取り上げる。

7.1 中国で原発仮想事故の被害シミュレーション

秦山1号機の使用済燃料プールでの火災事故を想定する場合には、Cesium-137の汚染被害は、中国だけでなく、日本と韓国にも影響を与えることがシミュレーションによって判明された。表4では、2021年の毎月1日午前零時の12の気象条件における被害シミュレーションの平均値の結果が示されている。自主移住対象となるCesium-137閾値 0.5MBq/m^2 以上 1.5MBq/m^2 未満の被害に当たる人口は5,000万人、強制移住対象となるCesium-137閾値 1.5MBq/m^2 以上が3,800万人、 4.5MBq/m^2 以上が2,800万人に当たるが、日本の場合、自主避難対象となるCesium-137閾値 0.5MBq/m^2 以上 1.5MBq/m^2 未満の被害に当たる人口が52万人、韓国の場合が86万人の人口が該当される結果となった。図4は、12つの気象パター

表4 秦山1号機における稠密使用済燃料プール火災仮想事故によるCesium-137の被害推定値

	MBq/m^2	0.5	1.5	4.5
中国	千人	50,000	38,000	28,000
	千 km^2	110	70	45
日本	千人	520	1	0
	千 km^2	4	1	0
韓国	千人	860	16	0
	千 km^2	3	0.1	0

注：表の数値は、12つの気象条件における被害シミュレーションの平均値である。

出典：本研究の推定による。

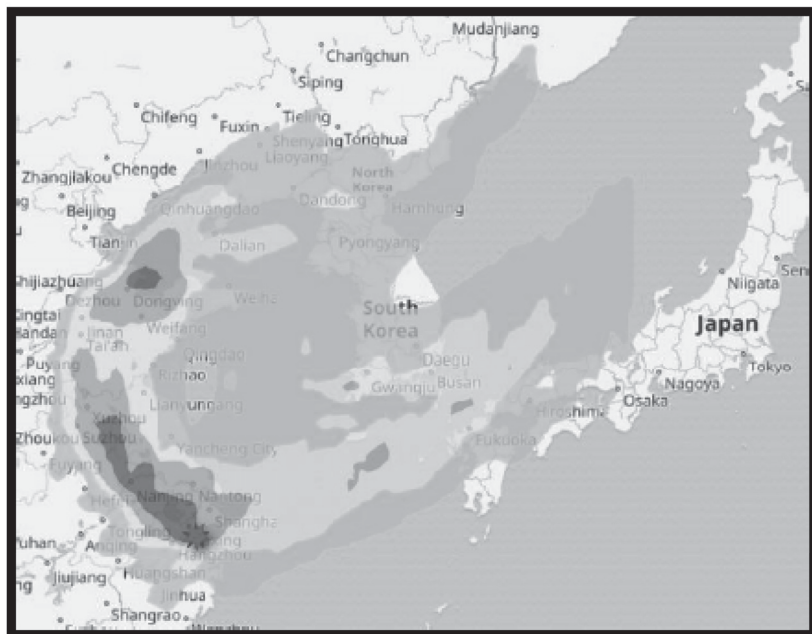


図4 秦山1号機における稠密使用済燃料プール火災による Cesium-137 の被害推定値

注：上記図は、2021年6月1日午前零時の気象条件でのシミュレーションを示している。
出典：本研究の推定による。

表5 大飯4号機における炉心溶融仮想事故の Cesium-137 の被害推定値

	MBq/m ²	0.5	1.5	4.5
中国	千人	0	0	0
	千 km ²	0	0	0
日本	千人	2,000	540	450
	千 km ²	15	6	5
韓国	千人	2,500	100	0
	千 km ²	17	3	0

注：表の数値は、12の気象条件における被害シミュレーションの平均値である。

出典：本研究の推定による。

ンの中で、被害の最も大きく表れた2021年6月1日午前零時の気象条件時の被害シミュレーションの結果を示したものである。

7.2 日本で原発仮想事故の被害シミュレーション

仮想事故の対象とした日本の原発は、前述のように大飯原発4号機と玄海原発4号の2基で

ある。大飯4号機でシミュレーションした仮想事故は、格納容器システムの早期機能喪失に続いて起こる深刻なメルトダウン事故である。

そして、この事故の場合、2021年毎月1日の午前零時で起きる事故を想定した12の気象パターンにおける被害シミュレーションの平均値は、Cesium-137 閾値 1.5MBq/m² および 4.5MBq/m² 以上の人口は99万人、そして



図5 大飯4号機における炉心溶融仮想事故のCesium-137の被害推定値

注：上記図は、2021年7月1日午前零時の気象条件でのシミュレーションを示している。

出典：本研究の推定による。

Cesium-137 閾値 $0.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 以上 $1.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 未満の人口は200万人と推定された(図5および表5)。また韓国にはCesium-137 閾値 $0.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 以上の被害人口は、260万人であった。この気象条件では、中国への被害はほとんどなかった。

この事故の場合、12の気象条件の中で、自国での被害人口が最も多いケースは、気象パターン2021年7月1日のケースであった(図5)。

7.3 韓国で原発仮想事故の被害シミュレーション

韓国では、Hanbit1号機と古里4号機の2つの原発について仮想事故のシミュレーション分析を行った。Hanbit1号機については格納容器システム故障の初期復旧失敗による深刻な炉心溶融事故が発生した場合を想定してシミュレーション分析を行った。

一方、古里4号機では、稠密使用済燃料プー

ルを想定し、その使用済燃料プールでの火災事故の被害についてシミュレーションを行った。この仮想事故ケースの12つの気象パターンにおける被害シミュレーションの平均値は、表6に示されている。古里4号機の事故では、特に日本への被害が大きかった。すなわち、 $0.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 以上 $1.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 未満レベルの被害人口が9.6百万人、 $1.5\text{MBq}/\text{m}^2$ レベル以上 $4.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 未満の被害人口が5.5百万人に達することが示された。 $4.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 以上の被害人口も百万人以上に達することが推定された。

韓国も人口が集中している釜山などへの地域に放射性物質が拡散され、 $4.5\text{MBq}/\text{m}^2$ 以上の被害人口が4百万人にのぼることが予想された。その中でも、気象条件2021年9月1日午前零時の場合、日本への被害が最も多く、韓国の南の方から、西日本の全域に広がり被害が拡散されていることが推定された(図6)。

表6 古里4号機における稠密使用済燃料プール火災仮想事故による Cesium-137 の被害推定値

	MBq/m ²	0.5	1.5	4.5
中国	千人	4,700	4,500	780
	千 km ²	15	11	3
日本	千人	9,600	5,500	1,200
	千 km ²	48	25	8
韓国	千人	1,100	3,100	4,000
	千 km ²	5	9.8	9

注：表の数値は、12つの気象条件における被害シミュレーションの平均値である。

出典：本研究の推定による。



図6 古里4号機における稠密使用済燃料プール火災による Cesium-137 の被害推定図

注：上記の図は、2021年9月1日午前零時の気象条件でのシミュレーションを示している。

出典：本研究の推定による。

8. まとめと結論

近年、日中韓を中心とした東アジア地域において、原発の新增設と既存原発の老朽化が進んでおり、その分当事者国だけでなく、隣国への放射性物質拡散と被害を伴う事故が起きる確率

も高くなっている。その中で、本研究では、日中韓3国において2基ずつの原発を選び、それぞれの原発で重大事故が起きることを想定した放射性物質の拡散シミュレーションを行った。

その結果いずれの原発においても、放射性物質の放出・拡散に伴う重大事故が起きた場合に

は、事故原発の所在地国だけでなく、放射性物質の越境拡散により、隣国の国民においても強制移住もしくは自主避難を余儀なくされる可能性があることが示された。特に、仮想事故シミュレーションの対象になった合計6基の原発仮想事故の中で、韓国古里原発の使用済燃料プールで火災事故のケースが、隣国(特に日本)への被害が最も大きかった。

本研究では、仮想事故時の気象パターンについて、原発当たり2021年の毎月初日午前零時の12の気象パターンを想定してシミュレーションを行ったが、気象パターン次第では、越境拡散が大きく変化し、本研究で推定した以上に被害規模が拡大される可能性もあるといえる。

欧州では、原発重大事故による放射性物質の越境拡散のリスクを最小化するために、いち早くWENRAや欧州原子力規制者グループ(ENSREG; European Nuclear Safety Regulators Group)を通じて、会員国間の原子力安全基準の共通化(Harmonization)や組織の透明性に軸をおいた活動を展開してきた。日中韓を中心とした東アジアにおいても、原子力リスクから安全な社会に向かうために、日中韓の情報交換レベルにとどまっている既存のTRMを再構築するなどを通じて、安全基準の3カ国間相互検証や共通化努力、安全関連人材育成と交流、ハイレベルでの情報交換と共有、安全関連技術移転および供与のためのプラットフォーム(例えば、東アジア原発安全保障枠組)の構築は喫緊の課題といえよう。

謝辞

本研究は、科研費(基盤研究(B)、課題番号:21H03678、研究代表:李秀澈)の支援により行われた。

参考文献

- Alvarez, Robert et al.; Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States, *Science and Global Security*, 11 (2003), pp. 1-51.
- Ang, M.L. et al; A Comparison of World-Wide Uses of Severe Reactor Accident Source Terms, SAND, 94-2157, September (1994).
- Croff, Allen G.; ORIGEN2: A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristic Cesium of Nuclear Materials (1983).
- Hippel, Frank N.von & Michael Schoeppner; Economic Losses From a Fire in a Dense-Packed U.S.Spent Fuel Pool, *Science & Global Security*. Informa UK Limited (2017). <https://doi.org/10.1080/08929882.2017.1318561>.
- International Atomic Energy Agency (IAEA); Power Reactor Information System (PRIS). Last modified (2022). <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>.
- International Energy Agency (IEA); Data and Statistics on Cesium (2021).
- International Energy Agency (IEA) (2022) World Energy Outlook2022
- Kang, Jungmin; Understanding and Reducing Military Vulnerabilities of Civilian Nuclear Plants: The Case for the Northeast Asia, Nonproliferation Policy Education Center, June 4 (2020).
- Kang, Jungmin; Better nuclear fuel could reduce the likelihood and severity of nuclear power plant accidents, *Bulletin of the Atomic Cesium Scientists*, March 11 (2021). <https://thebulletin.org/2021/03/better-nuclear-fuel-could-reduce-the-likelihood-and-severity-of-nuclear-power-plant-accidents/#post-heading>.
- Kang, Jungmin, and Eva Lisowski; Could an attack on Ukrainian nuclear facilities cause a disaster greater than Chernobyl?, *Bulletin of the Atomic Cesium Scientists*, March 23 (2022). <https://thebulletin.org/2022/03/could-an-attack-on-ukrainian-nuclear-facilities-cause-a-disaster->

- greater-than-chernobyl-possibly-simulations-show/#post-heading.
- Kato, Hiroaki, Yuichi Onda, Xiang Gao, Yukihiya Sanada, and Kimiaki Saito; Reconstruction of a Fukushima Accident-Derived Radiocesium Fallout Map for Environmental Transfer Studies, *Journal of Environmental Radioactivity*, Elsevier BV (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.105996>.
- Kobayashi, Takuya, Haruyasu Nagai, Masamichi Chino, and Hideyuki 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*. Informa UK Limited (2013). <https://doi.org/10.1080/00223131.2013.772449>.
- Rolph, Glenn, Ariel Stein, and Barbara Stunder; Real-Time Environmental Applications and Display System, READY, *Environmental Modelling & Software*, Elsevier (2017). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F.; NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull.Amer.Meteor.Soc.*, 96, (2015), pp. 2059–2077.
<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1.2013.772449>.
- U.S.Nuclear Regulatory Commission; Regulatory Analysis for Japan Lessons-Learned Tier 3 Issue on Expedited Transfer of Spent Fuel, November 26 (2013). [https://www.nrc.gov/doCesium/\(ML13273A628\)](https://www.nrc.gov/doCesium/(ML13273A628)).
- 原子力関係閣僚会議（2022）「今後の原子力政策の方向性と行動指針（案）」。
- 原子力産業協会（2023）「世界の最近の原子力発電所の運転・建設・廃止動向」。
- 産業通商資源部（韓国）（2022）「第10次電力需給基本計画（2022～2036）」。
- 資源エネルギー庁（2022）「総合エネルギー統計」。
- 総合資源エネルギー調査会発電コスト検証WG（2015）「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」。
- 内閣官房成長戦略会議（2020）「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（案）」。
- 日本原子力産業協会；世界の原子力発電開発の動向 2022年版（2022）。

Radioactive Matter Leakage Impact on China, Japan, and South Korea in the case of
Nuclear Power Plant Accidents in this Region:
Analysis using HYSPLIT Simulation Model

Soocheol Lee, Eva Lisowski, Weisheng Zhou, Ken'ichi Matsumoto,
Tae-Yeoun Lee, Kenichi Ohshima, Hyelim You, Jungmin Kang

Abstract

This study aims to determine the extent of spread of radioactive materials (cesium-137 is considered in this study) and number of people to be evacuated if a major accident occurs at a nuclear power plant that is located in China, Japan, or South Korea. The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) simulation model and Isotope Generation and Depletion Code-Matrix Exponential Method (ORIGEN2) were used for quantitative predictions. The results show that, in the event of a major accident involving the release of radioactive materials at a nuclear power plant, the citizens of neighboring countries may be forced to evacuate owing to the widespread regional dispersion of radioactive materials. In particular, among the six hypothetical accidents that were simulated, the spent fuel pool fire accident simulated at Unit 4 of the Kori Nuclear Power Plant in South Korea caused the maximum damage to neighboring countries. Such an accident may result in an average of 7.1 million people being mandatorily evacuated from a region of South Korea contaminated by 1.5 MBq/m^2 or larger values of cesium-137. Moreover, on average, 6.7 and 5.3 million people in Japan and China, respectively, may be affected by 1.5 MBq/m^2 or larger values of cesium-137 radiation and may require evacuation.