Journal of Radiation Industry 13(2) : 163~171(2019)

Technical Paper

원전 사고 시 RASCAL과 HYSPLIT 전산코드를 이용한 대기확산 모델별 방사성물질의 지표면 침적농도 분석

이진오[1] · 권 재[1] · 류강우[1] · 장정환[1] · 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis of Surface Deposition Concentration by Atmospheric Dispersion Model Using RASCAL and HYSPLIT Computer Codes for Nuclear Power Plant Accident

Jin O Lee[1], Jae Kwon[1], Gang Woo Ryu[1], Jung Hwan Jang[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University*

Abstract - Introduction of the Lagrangian atmospheric dispersion model was considered instead of the existing Gaussian atmospheric dispersion models for the level 3 probabilistic safety assessment to reduce uncertainty in the atmospheric dispersion. The objective of the present study was to analyze atmospheric dispersion behavior, surface deposition, and atmospheric dispersion models. The study was performed using RASCAL computer code, which employs Gaussian plume model and Gaussian puff model and HYSPLIT computer code, which employs Lagrangian model. For the analysis, long-term station blackout accident was assumed. Released radionuclides included particle type ^{137}Cs and gaseous type ^{131}I, which are dispersed widely and extensively for nuclear accident case. Radionuclide emission rate by time resulting from State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses project was used as a source term. The atmospheric dispersion behavior and surface deposition was analyzed for two case dates, which include a date with average wind speed of more than 3 m·s^{-1} and a date with wind speed of less than 3 m·s^{-1}. For both ^{137}Cs and ^{131}I, atmospheric dispersion directions were roughly similar among three models. However, deposition concentration of ^{131}I compared with ^{137}Cs was higher by about 100 folds for the Gaussian models and by about 1,000 folds for the Lagrangian model. For ^{137}Cs, deposition concentrations were higher for Gaussian plume model, Gaussian puff model, and Lagrangian model, in that sequence. For ^{131}I, deposition concentrations were generally higher for the Lagrangian model. The difference in the deposition concentrations can be attributed to differences in the atmospheric concentration by atmospheric dispersion model and dry deposition velocity of released radionuclides. Therefore, it is required to study the physico-chemical characteristics of the released radionuclides for more realistic prediction of surface deposition concentration in applying the Lagrangian model instead of the existing Gaussian plume models in the level 3 PSA. This study results is expected to contribute as an important base data for more realistic prediction of atmospheric dispersion behavior and surface deposition of released radionuclides in case of nuclear accident.

Key words : Severe accidents, Level 3 probabilistic safety assessment, Atmospheric dispersion, Gaussian plume model, Gaussian puff model, Lagrangian model

* Corresponding author: Kwang Pyo Kim, Tel. +82-31-201-2560, Fax. +82-31-273-3592, E-mail. kpkim@khu.ac.kr

서 론

후쿠시마 원자력발전소 사고 이후 국내에서는 2016년 중대사고를 포함한 사고관리계획서 제출 관련 법안을 개정하였다(원자력안전위원회 고시 제2016-3호). 개정된 법안에 따라 사고관리계획서 작성 시 원자력관계사업자는 사고관리능력을 평가하여 기술해야 한다. 사고관리능력의 평가에는 3단계 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment; PSA)를 포함하고 있다. 3단계 PSA에 있어서 중대사고 시 방사성 물질의 대기확산 및 지표면 침적 평가는 주요 불확실성의 원인 중 하나이다(NRC 2012a; NRC 2016). 대기확산에 의한 대기 중 방사성물질의 농도와 지표면에 침적된 방사성물질의 농도는 방사선 비상의 초기 및 장기 단계에서 직접 외부피폭 및 방사성물질의 흡입 및 섭취로 인한 내부피폭에 직접적인 영향을 미친다.

3단계 PSA 분석을 위한 전산코드 내 대기확산 모델은 각각 다른 특성을 가지고 개발되었다(Kim *et al*. 2016). 유럽연합의 COSYMA 전산코드는 가우시안 플룸 모델과 가우시안 퍼프 모델을 모두 사용할 수 있도록 개발되었고, 일본의 OSCAAR 전산코드는 다중 퍼프 모델을 사용하도록 개발되었다(EC and OECD 1994; Homma *et al*. 2000). 미국의 MACCS 전산코드는 가우시안 플룸 모델을 적용하여 개발되었다(Chanin *et al*. 1990; Chanin *et al*. 1997). 하지만 최근에는 HYSPLIT 전산코드의 라그랑지안 대기확산 모델을 도입한 MACCS 전산코드가 개발되고 있다(Clayton 2017). 국내에서도 3단계 PSA를 위한 전산코드를 개발 중에 있으며, 현재까지는 가우시안 플룸 모델을 적용한 MACCS 전산코드를 이용하여 시범적으로 3단계 PSA 분석을 수행하는 단계에 있다(KAERI 2017).

대기확산 모델은 대기확산에 고려되는 차원의 수를 기반으로 구분할 수 있는데 가장 단순한 모델은 1차원 대기확산 모델이다(Seinfeld and Pandis 2012). 1차원 대기확산 모델은 공기 내 물질의 농도 분포가 정규분포를 띄는 것으로 가정하고 플룸의 수평 및 수직 확산을 계산한다. 그러나 1차원 대기확산 모델에서 플룸의 중심선은 처음 계산된 궤도에서 움직이지 않는다. 하지만 계산속도가 빠르고 하나의 기상탑 자료로 평가할 수 있으며 기존에 가장 널리 사용되어 검증된 방법이라는 장점을 가진다. 2차원 대기확산 모델은 바람의 변화에 따라 플룸의 부피가 커지고 구부러지며 방향을 바꿀 수 있다. 그러나 수직 확산의 계산은 방출된 플룸의 성장을 통해서만 제한적으로 계산되고 플룸의 경로에 장애물을 고려할 수 없다. 3차원 대기확산 모델은 오염원을 나타내는 개별 입자가 모든 방향으로 자유롭게 움직일 수 있으며 장애물과 고르지 않은 지형을 고려하여 계산할 수 있어, 가장 현실적인 평가가 가능하다. 그리고 2차원, 3차원 대기확산 모델의 경우 국지적인 기상장 자료를 활용하여, 1차원 대기확산 모델에 비해서 더 많은 정보를 포함한 평가를 수행할 수 있다.

Mitchell 등은 임의의 방사성 물질을 일정하게 방출시키고 대기확산 모델 별로 연간 평균 대기확산 결과를 비교하였는데, 10 mile 이내에서 모델 별로 큰 차이를 보였다(Mitchell *et al*. 2004). Connan 등은 재처리시설에서 방출되는 ^{85}Kr을 장거리(18~50 km)에서 측정하고 대기확산 모델 별 평가 결과와 비교하였는데, 라그랑지안 모델과 가우시안 퍼프의 평가결과는 측정결과와 유사했으나, 가우시안 플룸 모델의 평가결과는 측정결과와 차이를 보였다(Connan *et al*. 2013). Draxler 등은 5가지 라그랑지안 모델 전산코드의 대기확산 평가결과를 비교하였는데, 전산코드 별로 유사한 결과를 나타냈다(Draxler *et al*. 2015). Abbott 등은 가우시안 플룸 모델과 가우시안 퍼프 모델을 결합한 침적결과와 라그랑지안 모델의 침적결과를 비교하였는데, 결합 모델이 라그랑지안 모델에 비해서 높게 침적된 것으로 평가되었다(Abbott 2018). 3단계 PSA 분석에서는 다양한 방사성 핵종에 대해서 평가를 수행하여야 하는 특징을 가지므로 대기확산 모델의 평가에서 방사성 핵종의 특성이 함께 고려되어 비교 분석될 필요가 있다. 하지만 기존 연구에서는 일반적으로 방사성 핵종의 특성과 관계없이 연간 평균 대기확산 결과를 비교하였다. 그리고 3단계 PSA 분석에서 대기확산의 불확실성을 감소시키기 위한 목적에서 가우시안 플룸 모델과 이보다 향상된 대기확산 모델인 가우시안 퍼프 모델 및 라그랑지안 모델이 함께 비교될 필요가 있다. 따라서 본 연구는 중대사고 리스크 평가 시 최적분석 능력의 확보라는 관점에서 분석이 수행되었다.

본 연구 목적은 원전 사고 시 대기확산 모델별 방출 방사성물질의 지표면 침적농도를 분석하는 것이다. 이를 위해 1차원 가우시안 플룸 모델과 2차원 가우시안 퍼프 모델을 모두 적용하고 있는 RASCAL 전산코드와 3차원 라그랑지안 대기확산 모델을 적용하고 있는 HYSPLIT 전산코드를 이용하여 방사성물질의 확산 거동, 지표면 침적, 모델 특성 등을 분석하였다. 평가대상 핵종으로는 원전 사고 시 넓은 지역에 확산될 특성을 가지고 있는 입자형 ^{137}Cs과 기체형 ^{131}I 을 선택하였다.

재료 및 방법

1. 대기확산 모델 및 평가 도구

본 연구에서는 RASCAL 전산코드와 HYSPLIT 전산코드를 사용하여 1, 2, 3차원 대기확산 모델별 방사성 물질의 지표면 침적결과를 비교 분석하였다. RASCAL 전산코드는 1차원 대기확산 모델인 가우시안 플룸 모델과 2차원 대기확산 모델인 가우시안 퍼프 모델을 각각 사용하여 대기확산을 평가할 수 있다(Ramsdell *et al*. 2012; Ramsdell *et al*. 2013).

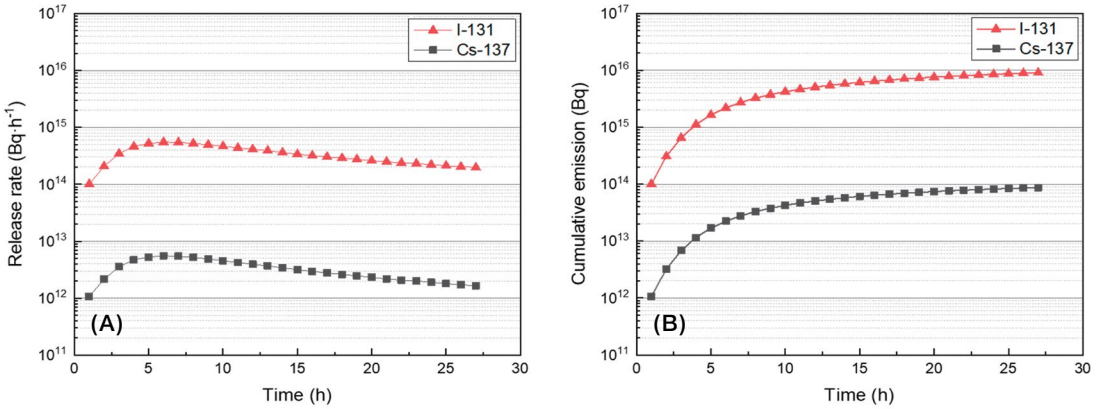

Fig. 1. Release rate (A) and cumulative emission (B) of ^{137}Cs and ^{131}I after 1~28 hour after long-term station blackout (LTSBO) accident.

RASCAL 전산코드는 원자력이용시설 사고 시 주민들의 보호조치 방안을 결정하기 위해 미국 원자력규제위원회(NRC)에서 개발하였다. RASCAL 전산코드는 원자력이용시설에서 대기로 방출된 방사성 물질에 대한 소외 결말을 평가할 수 있다. 이때 평가 대상 원자력이용시설로는 원자로 및 관계시설, 사용후핵연료 중간저장시설, 핵연료주기시설 등이 있으며 설계기준사고 및 중대사고의 대기확산에 모두 적용할 수 있다.

미국 해양대기청에서 개발한 HYSPLIT 전산코드는 3차원 대기확산 모델인 라그랑지안 모델을 이용하여 입자의 전후방 궤적을 계산함으로써 방사성 물질의 이동을 예측할 수 있다(Draxler and Hess 1998; Roland *et al*. 2013). 그리고 방사성 물질의 확산을 계산하여 지표면에서 방사능 농도를 예측할 수 있다. HYSPLIT 전산코드는 확보된 기상장 데이터를 사용하거나 관측데이터를 이용하여 기상장 데이터를 생성할 수 있다. 기상장 데이터를 바탕으로 단일 또는 다수 개의 배출원에서 배출된 입자의 확산을 계산한다. HYSPLIT 전산코드는 방사성 물질, 황사, 산불재, 화산재, 공기 오염의 확산 등 다양한 분야에서 사용되고 있다(Stein *et al*. 2015).

2. 사고 시나리오 및 선원항 설정

평가 대상 부지는 기상자료 확보가 가능하고, 중대사고 시 선원항이 분석된 미국의 Surry 원전 부지로 설정하였다. 미국의 Surry 원전에서는 838 MWe 용량의 가압경수로가 운영되고 있으며, 원자로 사고결말 분석(State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses; SOARCA) 프로젝트를 통해서 중대사고 시 선원항이 분석되었다(NRC 2012b). 본 연구에서 사고의 시나리오는 후쿠시마 원전 사고 시나리오와 가상 유사한 장기정전사고를 가정하였다. 장기정전사고는 초기 0.3~0.5 g 최대지반 가속도의 지진에 의해 소내 비상 발전기 및 댐 발전소의 고장으로 발전소 정전이 일어나고 이에 따라 소내와 소외 직류 전원이 복구 불가능한 사고이다. 그리고 격납건물의 스프레이와 같은 격납건물 계통을 사용하지 못하는 상황의 시나리오이다.

평가대상 핵종으로 입자형 ^{137}Cs과 기체형 ^{131}I을 설정하였다. ^{137}Cs과 ^{131}I 핵종은 모두 휘발성을 가지고 넓은 지역에 확산될 수 있는 특성을 가지고 있다. ^{137}Cs의 경우 비교적 반감기가 길고, 전신에 분포되는 특성이 있어 일반적으로 장기단계에서 방사선학적 영향이 가장 크게 나타난다(Aarkrog 1997). ^{131}I의 경우 후쿠시마 원전 사고에서 가장 많이 방출된 핵종이며, ^{131}I은 갑상선에 축적되는 거동특성을 가지고 있다(Povinec 2013).

Fig. 1에 Surry 원전의 장기정전사고 시나리오에서 시간에 따른 ^{137}Cs과 ^{131}I의 방출률 변화와 누적방출량 변화를 나타내었다. ^{137}Cs과 ^{131}I은 장기정전사고 시나리오에 따라 방사성 물질이 처음 방출된 이후 28시간 동안 지속된 것으로 가정하였다. ^{137}Cs의 경우 방출률은 시간에 따라 지속적으로 증가하여 방출 6시간 이후에 최대로 5.6×10^{12} Bq·h^{-1}이었으며, 그 이후에 시간에 따라 감소하여, 28시간 동안의 평균 방출률은 3.1×10^{12} Bq·h^{-1}이었다. ^{137}Cs의 총 방출량은 8.7×10^{13} Bq이었고, 방사성물질 방출 약 10시간 이후에 총 방출량의 49%가 방출되었다. ^{131}I의 경우 방출률은 시간에 따라 지속적으로 증가하여 방출 7시간 이후에 최대로 5.5×10^{14} Bq·h^{-1}이었으며, 그 이후에 시간에 따라 감소하여, 28시간 동안의 평균 방출률은 3.3×10^{14} Bq·h^{-1}이었다. ^{131}I의 총 방출량은 9.2×10^{15} Bq이었고, 방사성물질 방출 약 10시간 이후에 총 방출량의 46%가 방출되었다.

3. 방사성 물질 대기확산 모델링

RASCAL과 HYSPLIT 전산코드에서 가상사고를 모델링하기 위해서는 평가일에 대한 기상데이터가 필요하다. 본 연구에서는 Surry 원전부지 부지의 기상데이터를 사용하였다. 해당 기상데이터에는 1시간 단위로 시간별 풍향, 풍속, 대기안정도 데이터와 계절별 혼합층 고도 정보가 포함되어 있다.

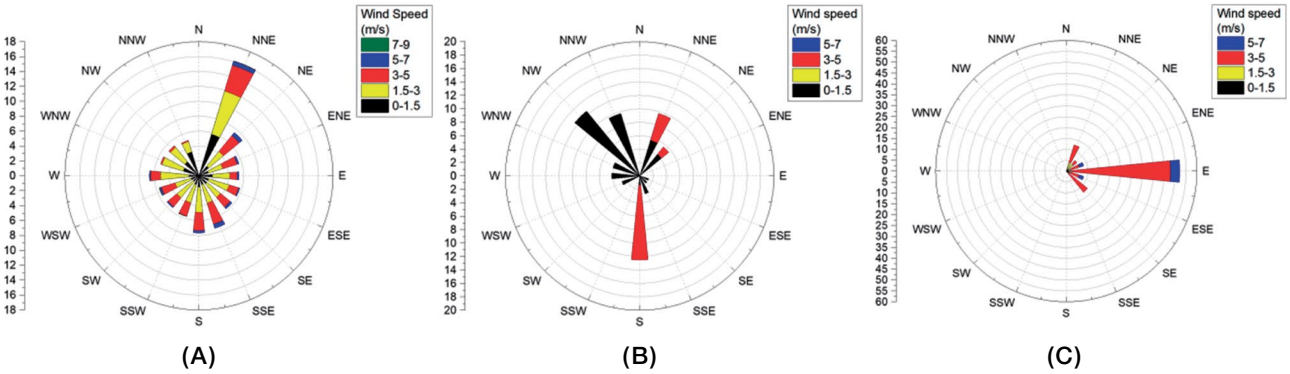

Fig. 2. Wind rose at the Surry nuclear site: one-year (A), case A date (B), and case B date (C).

대기확산 평가기간은 방사성 물질이 28시간 동안 방출되어 충분히 확산되고, 중대사고 시 조기 건강영향을 확인할 수 있는 72시간으로 설정하였다.

RASCAL과 HYSPLIT 전산코드에서 방사성물질의 대기확산 거동과 지표면 침적농도를 평가하기 위해 장기정전사고 시 방출되는 ^{137}Cs과 ^{131}I의 시간별 방출량 변화를 고려하였으며, 방출높이는 10 m로 가정하였다. 건침적 속도의 경우 RASCAL 전산코드에서는 평가대상 방사성 핵종과 대기안정도 및 풍속에 따라 기상데이터의 시간 간격 별로 결정된다. HYSPLIT 전산코드에서는 침적과 관련된 인자로 Draxler 등의 연구에서 제시된 값을 권고하고 있다(Draxler and Rolph 2012). Draxler 등에 의하면 ^{137}Cs의 경우 건침적 속도는 0.001 m·s^{-1}, 공기 역학적 평균직경은 0.1 μm, 입자의 밀도는 1.0 g·cm^{-3}를 제시하고 있다. ^{131}I의 경우 건침적 속도는 0.01 m·s^{-1}, 공기 역학적 평균 직경과 밀도는 기체이므로 각각 0 μm과 0 g·cm^{-3}을 제시하고 있다. HYSPLIT 전산코드에서 충분히 많은 입자가 방출되도록 시간당 10,000개의 입자가 방출되도록 설정하였다.

결 과

본 연구에서는 RASCAL, HYSPLIT 전산코드를 이용하여 원전 중대사고 시 대기확산 모델 별 방사성물질의 확산거동, 지표면 침적, 모델특성 등을 비교 분석하였다. 이를 위해 평가 대상 부지 및 평가 사례일의 기상 특성을 분석하였다. 그리고 평가 사례일에 대하여 대기확산을 평가하여 지표에 침적된 방사능 농도를 비교 분석하였다.

1. 평가 대상 부지 및 평가 사례일 기상 특성 분석

대기확산 평가를 위해서는 평가 대상 부지에 대한 기상특성을 파악하고 평가 기간 동안 기상의 변화를 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 Surry 원전 부지의 1년치 기상데이터를 분석하여 부지에 대한 기상 특성을 파악하였다. 그리고 평균 풍속이 3 m·s^{-1} 이하로 부는 사례일과 평균 풍속이 3 m·s^{-1} 이상으로 부는 사례일을 선택하고 평가를 수행하였다. 편의상 두 사례일을 사례일 A, B로 명명하였다. 사례일 A는 풍속이 대체로 3 m·s^{-1} 이하로 부는 상태이고, 방출 초기에 대기가 비교적 안정한 상태를 나타내었다. 사례일 B는 풍속이 대체로 3 m·s^{-1} 이상이고 방출 초기에 대기가 비교적 불안정한 상태를 나타내었다.

Fig. 2에 Surry 원전 부지의 1년간 풍배도와 사례일 A, B의 48시간 동안 풍배도를 나타내었다. Surry 원전 부지의 1년간 기상데이터에서 북북동풍이 전체 풍향의 16%로 가장 높게 나타났고 풍속은 3 m·s^{-1} 이하의 풍속범위가 전체 풍속의 72%로 나타났다. 각 풍속범위는 0~1.5 m·s^{-1}가 29%, 1.5~3 m·s^{-1}이 43%, 3~5 m·s^{-1}가 25%, 5~7 m·s^{-1}가 3%, 7~9 m·s^{-1}가 0.2%를 차지하였다.

사례일 A에서는 남풍과 북서풍이 각각 전체 풍향의 13%로 높게 나타났다. 풍속은 3 m·s^{-1} 이하의 풍속이 전체 풍속의 73%를 차지하였고 방사성 물질 방출초기(방출 이후 9시간)에 비교적 대기가 안정한 상태(대기안정도 E)에서 남풍이 주로 불었다. 방사성 물질 방출 10시간 이후부터는 대기가 불안정한 상태(대기안정도 A~D)에서 풍향이 남풍, 동풍, 서풍의 순서로 10시간 동안 변하였다.

사례일 B에서는 동풍이 전체 풍향의 52%로 가장 높게 나타났다. 풍속은 3 m·s^{-1} 이상의 풍속이 전체 풍속의 87%를 차지하였고 방사성 물질 방출초기(방출 이후 4시간)에는 비교적 대기가 불안정한 상태(대기안정도 B~D)로 남동풍이 불었다. 방사성 물질 방출 5시간 이후부터는 대기가 안정한 상태에서 동풍계열이 11시간 지속되었다.

2. 대기확산 및 지표면 침적농도

Fig. 3에 사례일 A에서 가우시안 플룸 모델, 가우시안 퍼프 모델, 라그랑지안 모델의 ^{137}Cs 및 ^{131}I 대기확산 결과를 나타내었다. 사례일 A에서 방출초기(9시간) 남풍의 영향으로

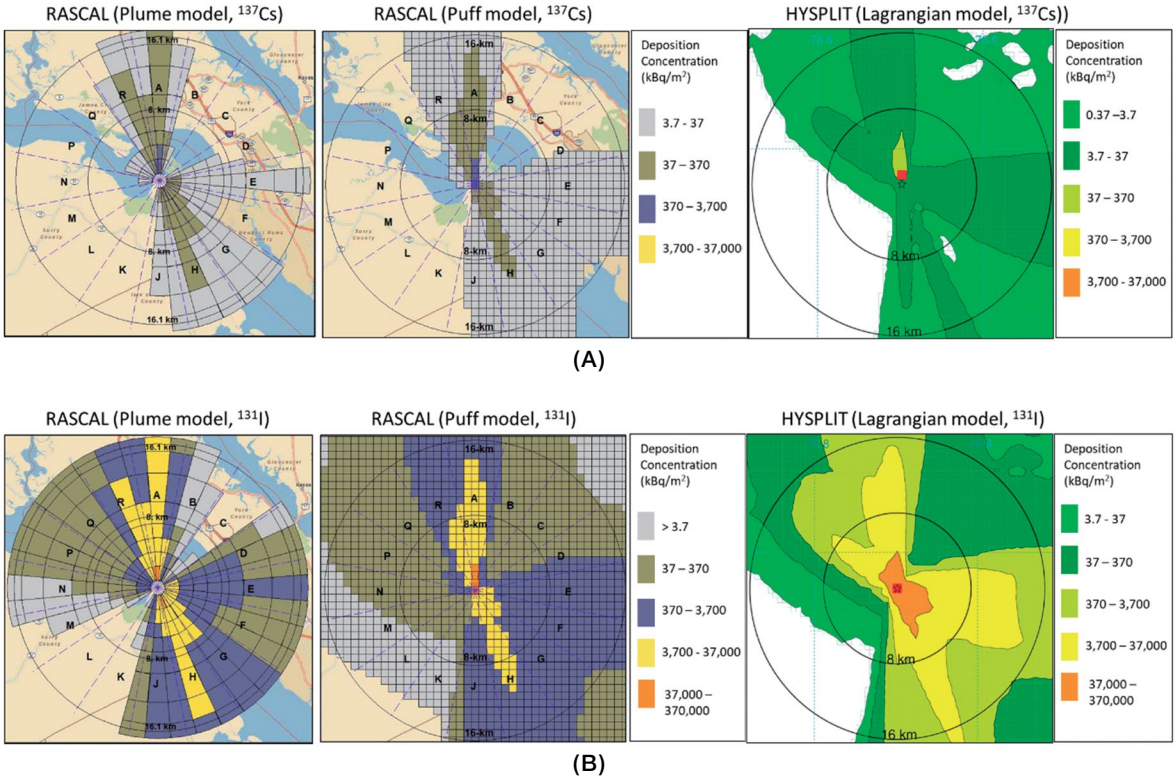

Fig. 3. Surface deposition concentration of ^{137}Cs (A) and ^{131}I (B) by atmospheric dispersion model (Case A date).

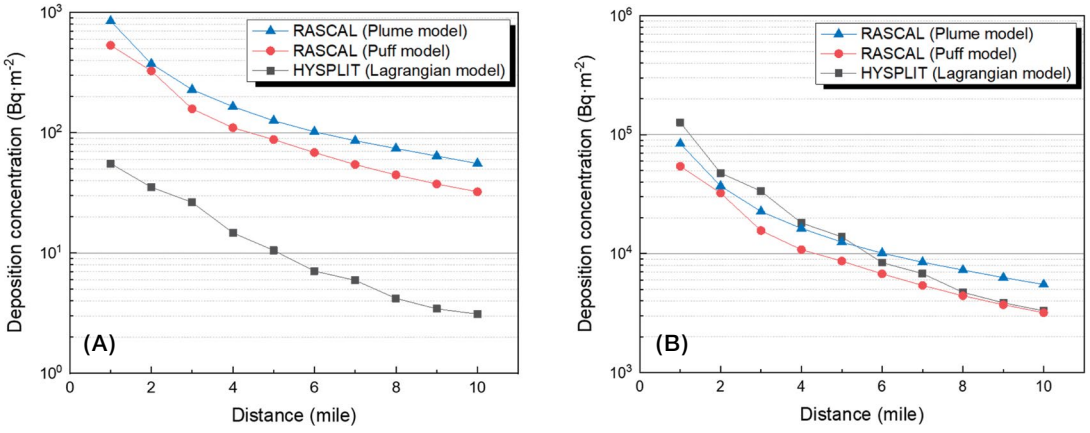

Fig. 4. Surface deposition concentration of ^{137}Cs (A) and ^{131}I (B) in a northern direction by atmospheric dispersion model (Case A date).

북쪽으로 길게 확산되었고, 서풍과 북서풍이 발달한 날의 영향으로 동쪽, 남동쪽으로 방사성 핵종이 확산되었다. 침적 범위에 대해서는 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프, 라그랑지안 모델로 갈수록 침적의 범위가 세부적으로 평가되었다. 라그랑지안 모델에서는 가우시안 플룸 모델과 다르게 일부 지역에 방사성 물질이 밀집되는 현상이 나타났다. ^{137}Cs와 ^{131}I의 침적 방향은 일반적으로 유사한 경향을 보였다 (Fig. 3 참조). 침적 방사능 농도는 ^{131}I가 ^{137}Cs에 비해 가우시안 모델의 경우에는 대략 100배 높게 나타났고, 라그랑지안 모델의 경우에는 대략 1,000배 높게 나타났다.

Fig. 4에 사례일 A에서 방사성 물질의 침적이 주로 일어난 북쪽 방향에 대해 1.6~16 km (1~10 mile) 사이에서 가우시안 플룸 모델, 가우시안 퍼프 모델, 라그랑지안 모델의 ^{137}Cs, ^{131}I 침적농도 비교하여 나타내었다. ^{137}Cs 평가에서는 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프, 라그랑지안 모델의 순서로 침적농도가 높게 나타났다. 라그랑지안 모델의 경우 가우시안 플룸 모델과 비교하여 평균 15 (9~23)배 정도 낮게 침적되었다. 가우시안 퍼프 모델과 비교해서는 평균 10 (6~12)배 낮

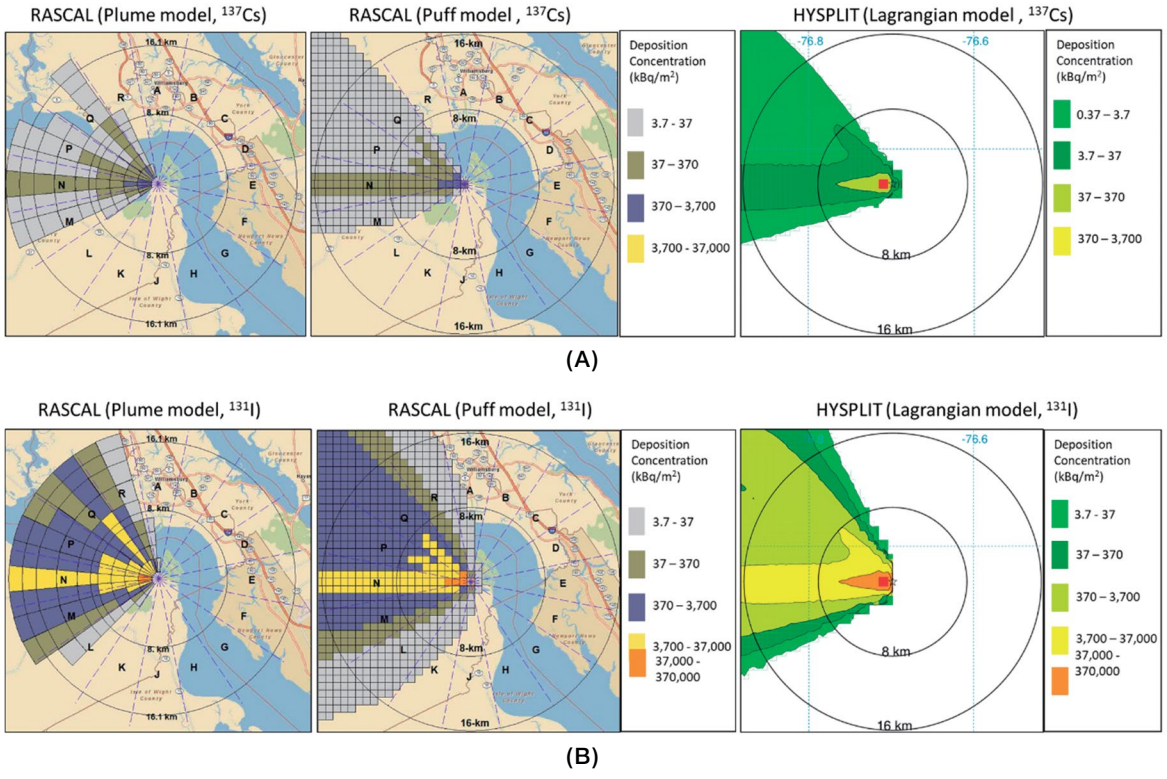

Fig. 5. Surface deposition concentration of ^{137}Cs (A) and ^{131}I (B) by atmospheric dispersion model (Case B date).

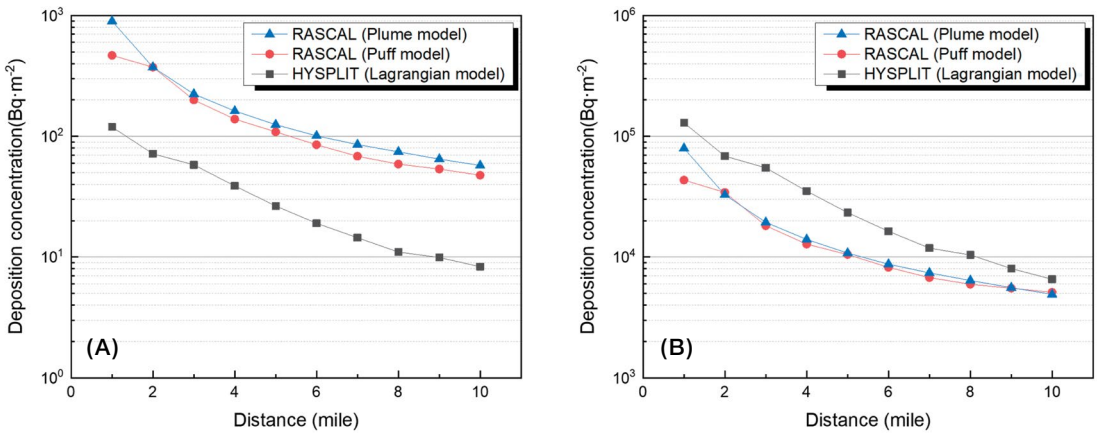

Fig. 6. Surface deposition concentration of ^{137}Cs (A) and ^{131}I (B) in a western direction by atmospheric dispersion model (Case A date).

게 침적되었다. ^{131}I 평가에서는 8.0 km (5 mile)까지는 라그랑지안 모델이 높게 평가되었고, 8.0 km (5 mile) 이후에서는 가우시안 플룸, 라그랑지안, 가우시안 퍼프 모델의 순서로 높게 나타났다. 라그랑지안 모델의 경우 가우시안 플룸 모델과 비교하여 8.0 km (5 mile)까지 평균 1.3배 더 높게 침적되었다.

Fig. 5에 사례일 B에서 가우시안 플룸 모델, 가우시안 퍼프 모델, 라그랑지안 모델의 ^{137}Cs 및 ^{131}I 대기확산 결과를 나타내었다. 사례일 B에서 방출초기 (5시간) 남동풍의 영향으로 북서쪽으로 일부 확산되었고, 동풍이 발달한 날의 영향으로 서쪽으로 방사성 핵종이 대부분 확산되었다. 사례일 B에서는 사례일 A와 다르게 풍향이 많이 변하지 않았기 때문에 방사성 핵종이 침적된 범위에서 큰 차이를 보이지는 않았다. ^{137}Cs와 ^{131}I의 침적 방향은 일반적으로 유사한 경향을 보였다. 침적 방사능 농도는 ^{131}I가 ^{137}Cs에 비해 가우시안 모델의 경우에는 대략 100배 높게 나타났고, 라그랑지안 모델의 경우에는 대략 900배 높게 나타났다.

Fig. 6에 사례일 B에서 방사성 물질의 침적이 주로 일어난

북쪽 방향에 대해 1.6~16 km (1~10 mile) 사이에서 가우시안 플룸 모델, 가우시안 퍼프 모델, 라그랑지안 모델의 ^{137}Cs, ^{131}I 침적농도 비교하여 나타내었다. ^{137}Cs 평가에서 가우시안 플룸 모델, 퍼프 모델, 라그랑지안 모델의 순서로 침적농도가 높게 나타났다. 라그랑지안 모델의 경우 가우시안 플룸 모델과 비교하여 평균 6 (4~7)배 정도 낮게 침적되었다. 가우시안 퍼프 모델과 비교해서는 평균 5 (3~6)배 낮게 침적되었다. ^{131}I 평가에서는 라그랑지안 모델, 가우시안 플룸 모델, 퍼프 모델 순으로 침적농도가 높게 평가되었다. 그리고 라그랑지안 모델이 가우시안 플룸 및 퍼프 모델보다 평균 2배 더 높게 침적되었다.

고 찰

본 연구는 중대사고 리스크 평가 시 최적분석 능력의 확보라는 관점에서 분석이 수행되었다. 따라서 중대사고 시 다양한 대기확산 모델의 평가가 가능한 RASCAL, HYSPLIT 전산코드를 이용하여 분석을 수행하였다. 각 모델의 대기확산 범위는 대체로 유사하였으나 각 대기확산 모델 별 방출되는 방사성 물질의 확산 매체의 영향으로 플룸, 퍼프, 입자의 모양을 따라 침적범위의 차이가 나타났다. 가우시안 플룸 모델은 극좌표의 구역을 따라 확산되었고, 가우시안 퍼프 모델은 대체로 다소 굴곡진 형태로 확산되었다. 라그랑지안 모델은 입자의 침적을 모사하면서 대기확산 범위를 세부적으로 평가가 가능하였으며 난류의 영향을 모사하여 일부 지역에서 입자가 밀집되는 현상이 나타났다. 3단계 PSA 분석에서 라그랑지안 모델이 일부 지역에서 입자가 밀집되는 현상은 다른 지역보다 해당 지역에 인구밀집도가 높을 경우 집단선량 평가결과에 영향을 미칠 것으로 예측된다.

^{137}Cs의 평가에서 주로 침적된 방향에 대해 가우시안 모델이 라그랑지안 모델보다 높게 평가되었고, ^{131}I의 평가에서는 라그랑지안 모델이 대체로 높게 평가되었다. 그러므로 3단계 PSA 분석에서 가우시안 플룸 모델 대신에 라그랑지안 모델을 적용할 경우 ^{137}Cs의 침적농도는 라그랑지안 모델이 대체로 더 낮게 평가될 것으로 예측되고, ^{131}I의 침적농도는 라그랑지안 모델이 대체적으로 더 높게 평가될 것으로 예측된다.

지표면 침적농도의 차이가 발생한 이유는 모델별 대기확산에 의한 공기 중 농도의 차이와 방출된 방사성핵종의 물리 화학적 특성에 의한 건침적 속도의 차이 때문이었다. 가우시안 플룸 모델과 퍼프 모델은 가우시안 분포로 확산된 농도에 건침적 속도를 고려하고 침적된 농도를 계산한다. 라그랑지안 모델의 경우에는 풍속에 의한 이류와 랜덤 변수가 고려된 난류를 고려하여 무수히 많은 입자를 방출시키고 관심 격자 내에 도착한 입자의 수를 세어 공기 중 농도를 계산한다. 그리고 공기 중 농도에 건침적 속도를 고려하여 최종 침적된 방사능 농도를 계산한다. 그러므로 평가지점의 공기 중 농도와 건침적 속도에 따라 침적된 방사능 농도가 결정된다.

Table 1. Dry deposition velocity of RASCAL and HYSPLIT computer codes

Nuclides	Evaluation case	Dry deposition velocity ($m \cdot s^{-1}$)	
		Gaussian model	Lagrangian model
Particle type ^{137}Cs	Case A date[a]	0.006	0.001
	Case B date[b]	0.007	
Gaseous type ^{131}I	Case A date[a]	0.007	0.01
	Case B date[b]	0.008	

[a]Average wind speed 3 $m \cdot s^{-1}$ or less
[b]Average wind speed 3 $m \cdot s^{-1}$ or more

Table 1에 평가 사례일과 평가 핵종별 RASCAL의 가우시안 모델 및 HYSPLIT의 라그랑지안 모델의 건침적 속도를 나타내었다. RASCAL의 가우시안 플룸 모델과 퍼프 모델의 경우 건침적 속도는 풍속 및 대기안정도에 따라 변한다. 하지만 HYSPLIT의 건침적 속도는 ^{137}Cs, ^{131}I에 대해 단일한 값을 적용하여 평가를 수행한다. ^{137}Cs의 경우 사례일 A에서 RASCAL 전산코드의 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프 모델에서 계산된 건침적 속도는 평균 0.006 $m \cdot s^{-1}$, 사례일 B에서 평균 0.007 $m \cdot s^{-1}$로 계산되었다. 하지만 HYSPLIT 전산코드의 라그랑지안 모델에서는 건침적 속도가 0.001 $m \cdot s^{-1}$로 설정되어 계산되었다. ^{131}I의 경우 사례일 A에서 RASCAL 전산코드의 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프 모델에서 계산된 건침적 속도는 평균 0.007 $m \cdot s^{-1}$, 사례일 B에서 평균 0.008 $m \cdot s^{-1}$로 계산되었다. 하지만 HYSPLIT 전산코드의 라그랑지안 모델에서는 건침적 속도가 0.01 $m \cdot s^{-1}$로 설정하여 계산되었다.

가우시안 대기확산 모델이 라그랑지안 대기확산 모델에 비해서 간단하면서 보수적인 계산 방법이지만, 지표면 침적속도는 모델 별 평가 결과의 차이를 보였다. 따라서 3단계 확률론적 안전성 평가에서 가우시안 플룸 모델 대신에 라그랑지안 모델을 적용하여 대기확산을 평가할 시에는 중대사고 시 방출되는 방사성 핵종들의 건침적 속도와 같은 방사성핵종의 물리 화학적 특성파악이 필수적으로 선행되어야 할 것이다.

결 론

원자력발전소 중대사고 시 3단계 확률론적 안전성 평가에 있어서 방출 방사성물질의 대기확산 및 지표면 침적 평

가가 필요하다. 대기확산에 의한 대기 중 방사성물질의 농도와 지표면에 침적된 방사성물질의 농도는 방사선 피폭에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 RASCAL 전산코드와 HYSPLIT 전산코드를 이용하여 원전 사고 시 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프, 라그랑지안 모델별 방사성물질의 확산 거동, 지표면 침적, 모델특성 등을 분석하였다.

침적 범위에 대해서는 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프, 라그랑지안 모델로 갈수록 침적의 범위가 세부적으로 평가되었다. 라그랑지안 모델에서는 가우시안 플룸 모델과 다르게 일부 지역에 방사성 물질이 밀집되는 현상이 나타났다. ^{137}Cs와 ^{131}I의 침적 방향은 일반적으로 유사한 경향을 보였으나, 침적 방사능 농도는 ^{131}I가 ^{137}Cs에 비해 가우시안 모델의 경우에는 대략 100배 높게 나타났고, 라그랑지안 모델의 경우에는 대략 1,000배 높게 나타났다. ^{137}Cs 평가에서는 가우시안 플룸, 가우시안 퍼프, 라그랑지안 모델의 순서로 침적농도가 높게 나타났으며, ^{131}I 평가에서는 라그랑지안 모델이 일반적으로 높게 평가되었다. 지표면 침적농도의 차이가 발생한 이유는 모델별 대기확산에 의한 공기 중 농도의 차이와 방출된 방사성핵종의 물리 화학적 특성에 의한 건침적 속도의 차이 때문이었다.

향후 3단계 PSA 분석에서 라그랑지안 모델이 적용되는 경우 피폭선량에 영향을 미치는 주요 인자인 지표면의 침적농도는 현재 적용되는 가우시안 모델에 비해 ^{137}Cs의 경우에는 더 낮게 평가될 것이고, ^{131}I의 경우에는 더 높게 평가될 것으로 예측된다. 라그랑지안 모델이 일부 지역에서 입자가 밀집되는 현상은 다른 지역보다 해당 지역에 인구밀집도가 높을 경우 집단선량 평가결과에 영향을 미칠 것으로 예측된다. 그리고 그러므로 3단계 확률론적 안전성 평가에 현실적인 지표면 침적농도를 예측하기 위해서는 방사성핵종의 물리 화학적 특성파악이 필수적으로 선행되어야 할 것이다. 본 연구의 결과는 원전 사고 해석 시 현실적인 대기확산 평가 및 지표면 침적 분석의 기반자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국원자력안전재단 원자력안전연구 프로그램(No. 1705001)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

KAERI. 2017. 한국 고유 3단계 코드 개발을 위한 기반 기술 연구.

Aarkrog, A, Baxter, MS, Bettencourt AO, Bojanowski R, Bologa A, Charmasson S and Jeffree R. 1997. A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food: A major international study. *J. Environ. Radioact.* **34**(1):69-90.

Abbott ML. 2018. Comparison of US NRC'S RASCAL emergency response code with NOAA's hyrad dispersion model and tracer experimental data. *Health Phys.* **115**(4):448-457.

Chanin DI, Sprung JL, Ritchie LT, Jow HN and Rollstin JA. 1990. MELCOR accident consequence code system (MACCS). volume 2: Model description. SAND86-1562, Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA.

Chanin DI, Young ML and Randall J. 1997. Code manual for MACCS2: volume 1, user's guide. SAND97-0594, Sandia National Laboratories, Albuquerque, USA.

Clayton DJ. 2017. MACCS-HYSPLIT atmospheric transport and dispersion model benchmarking. SAND2017-9714PE. US NRC.

Connan O, Smith K, Organo C, Solier L, Maro D and Hébert D. 2013. Comparison of RIMPUFF, HYSPLIT, ADMS atmospheric dispersion model outputs, using emergency response procedures, with ^{85}Kr measurements made in the vicinity of nuclear reprocessing plant. *J. Environ. Radioact.* **124**:266-277.

Draxler RR and Hess GD. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Aust. Meteorol. Mag.* **47**(4):295-308.

Draxler RR and Rolph GD. 2012. Evaluation of the transfer coefficient matrix (TCM) approach to model the atmospheric radionuclide air concentrations from Fukushima. *Journal of Geophysical Research* **117**(D5).

Draxler RR, Arnold D, Chino M, Galmarini S, Hort M, Jones A and Saito K. 2015. World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.* **139**:172-184.

EC and OECD. 1994. International Comparison: Second International Comparison. Overview Report: a Joint Report. OECD.

Homma T, Inoue Y and Tmmita K. 2000. OSCAAR calculations for the hanford dose reconstruction scenario of BIOMASS theme 2. JAERI-Research-2000-059, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Japan.

Kim S, Min BI, Park K, Yang BM and Suh KS. 2016. Study on the code system for the off-site consequences assessment of severe nuclear accident. *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.* **14**(4):423-434.

Mitchell JA, Molenkamp C, Bixler NE, Morrow CW and Ramsdell JV. 2004. Comparison of average transport and dispersion among a Gaussian model, a two-dimensional model and a three-dimensional model. Probabilistic Safety Assessment and Management. 1th ed. pp. 3224-3230. Springer, London.

NRC. 2012a. State-of-the-art reactor consequence analysis report. NUREG-1935.

NRC. 2012b. State-of-the-art reactor consequence analyses project volume 2: Surry integrated analysis (vol. 2). NUREG/CR-7110.

NRC. 2016. State-of-the-art reactor consequence analyses project: Uncertainty analysis of the unmitigated long-term station blackout of the Peach Bottom atomic power station. NUREG/CR-7155.

Povinec P, Hirose K and Aoyama M. 2013. Fukushima accident: radioactivity impact on the environment. 1th ed. 400pp. Elsevier. Amsterdam.

Ramsdell JV, Athey GF and Rishel JP. 2012. RASCAL 4: Description of models and methods. US NRC, Office of Nuclear Security and Incident Response. NUREG-1940.

Ramsdell JV, Athey GF and Rishel JP. 2013. RASCAL 4.3 user's guide (draft). US NRC.

Roland D, Barbara S and Glenn R. 2013. Hysplit4 user's guide. US NOAA.

Seinfeld, JH, and Pandis SN. 2012. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. 2nd ed. 1232 pp. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.

Stein AF, Draxler RR, Rolph GD, Stunder BJ, Cohen MD and Ngan F. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **96**(12):2059-2077.

Received: 27 May 2019
Revised: 15 June 2019
Revision accepted: 20 June 2019