JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(3) : 283-292 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.3.283

사용후핵연료 습식저장시설 사고 안전성 평가 연구 현황 및 사고 사례 분석

이신동[1], 김혁재[1], 손건우[1], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis on Study Cases of Safety Assessment and Cases for Spent Nuclear Fuel Pool Accident

Shin Dong Lee[1], Hyeok Jae Kim[1], Geon Woo Son[1] and Kwang Pyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

Abstract Spent nuclear fuel corresponds to high-level radioactive waste that has high decay heat and radioactivity. Accordingly, Spent nuclear fuel withdrawn from the reactor core is primarily stored and managed in a spent nuclear fuel pool in the nuclear power plant to reduce decay heat and radioactivity. In Korea, most nuclear power plant store all spent nuclear fuel in a spent nuclear fuel pool. For wet storage, there are no defense in depth different with reactor core. The study related to spent nuclear fuel pool accident should be carried out to ensure safety. Therefore, it is necessary to analyze previous study cases related to safety of spent nuclear fuel pool and accident cases to build foundational knowledge. The Objective of this study is to analyze study cases of safety assessment and cases for spent nuclear fuel pool accident. For analyzing study cases of safety assessment, possible phenomena when spent nuclear fuel pool accident occurring identified, Subsequently, study cases for safety assessment about each phenomena were investigated, and materials & methods and results for each study are analyzed. For analyzing cases for spent nuclear fuel pool accident, we analyzed accident cases caused by loss of cooling and loss of coolant in spent nuclear fuel pool. Subsequently, causes and change of water level and temperature by each accident case are analyzed. As a result of the analysis on study cases of spent nuclear fuel pool accident, the results of the study conducted by each research institute were vary depending on the computer code, materials & methods of experiment and major assumptions used in the study. As a result of analyzing cases for spent nuclear fuel pool accident, it was found that accident cases for loss of cooling is more than cases for loss of coolant accident. Even though the types of accident in spent nuclear fuel pool were similar, the specific causes were different by each accident case. All the accident cases analyzed did not lead to severe accidents, such as nuclear fuel being exposed to the air. The result of this study will be used as fundamental data for study on spent nuclear fuel pool accident that will be conducted in the future.

Key words: Spent nuclear fuel pool accident, Spent nuclear fuel pool, Spent nuclear fuel

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Kwang Pyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 7 September 2023 **Revised** 15 September 2023 **Accepted** 20 September 2023

1. 서 론

사용후핵연료는 원자로에서 일정기간 연소된 후에 인출된 핵연료를 말한다[1,2]. 인출 직후의 사용후핵연료는 높은 붕괴열과 방사능을 띠며, 국내에서는 사용후핵연료의 냉각 및 방사선 차폐를 수행하기 위하여, 일차적으로 소내에 임시저장하여 관리하고 있다[2-5]. 소내 임시저장방식은 습식저장과 건식저장이 있으며, 현재 대부분의 국가에서는 사용후핵연료를 일차적으로 소내에서 습식저장하여 관리하고 있다[6]. Fig. 1에 전 세계 사용후핵연료 관리방식 점유율을 나타내었다[7]. 사용후핵연료 습식저장시설은 원자로의 노형에 따라 다른 구조 및 형태를 가지지만 일반적으로 8~15 m 깊이에 약 5~8 m 정도의 냉각수로 채워져 있다[9]. 그리고 시설 내 냉각 시스템인 냉각펌프와 열교환기 등을 통해 사용후핵연료를 지속적으로 냉각하면서 운영된다[10]. 사용후핵연료 습식저장시설은 견고한 구조물로서, 사고의 가능성이 낮게 평가되어 왔다[8]. 그러나 2001년 9·11 테러 사건은 원자력발전소 사보타주에 대한 우려를 불러일으켰고, 2011년 후쿠시마 원자력발전소 사고는 당시 국제적으로 대중들의 불안감을 조성하였다. 그리고 해당 사고는 습식저장시설에서 발생한 사고에 대해 장시간 동안 적절한 조치가 이루어지지 않을 경우, 심각한 후속 사고로 이어질 수 있다는 경각심을 불러일으켰다[11].

국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)에서는 사용후핵연료 습식저장시설 사고 분석 연구를 지속적으로 최신화하기 위해 정기적으로 기술회의를 개최한 바 있다. 해당 기술회의를 통해서 세계 각국에서 수행되고 있는 연구 현황을 파악하였으며, 향후 연구 방향을 논의하였다[12]. 그리고 해당 기관에서는 IRS (International Reporting System for Operating Experience)를 통해서 세계 각국의 사용후핵연료 습식저장시설에서 발생한 실제 사고 사례 정보를 제공해 왔다. 원자력기구(NEA, Nuclear Energy Agency)에서는 사용후핵연료 습식저장시설에서 냉각수 상실 및 냉각기능 상실사고가 발생하였을 때, 나타날 수 있는 사고 현상을 분석하여 제시한 바 있다[13]. 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)에서는 사용후핵연료 습식저장시설 안전성 강화를 위하여 습식저장시설 내 사고 발생 빈도를 평가하였다[15]. 그리고 Generic Communication, LERs 시스템을 통해서 사용후핵연료 습식저장시설 사고 사례에 대한 정보를 제공하고 있다. 미국 전력연구소(EPRI, Electric Power Research Institute)에서는 사용후핵연료 사고의 특성 및 사고 현상을 분석하였다. 그리고 사용후핵연료의 안전한 관리를 위해 향후 필요한 연구를 제시하였다[14]. 미국 샌디아 국립연구소(SNL, Sandia National Laboratory)에서는 사용후핵연료 습식저장시설 내 사고로 인한 화재 발생 가능성을 분석하였다[16]. 프랑스의 방사선 방어 및 원자력 안전 연구소(IRSN, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire)에서는 DENOPI 프로젝트의 일환으로 시설 내 사고 모사 시험을 수행 중에 있다[17-19]. 한국원자력연구원(KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute)에서는 사용후핵연료 습식저장시설 사고 모사 실험을 수행한 바 있다. 해당 연구를 통해서 사고 환경에서의 시험자료를 제시하였다[14,20]. 국내의 경우 전병국 등에서는 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각기능 상실사고 시 시설 내 열수력적 거동 특성을 평가한 바 있다[21]. 그리고 오정민 등에서는 MELCOR 전산코드를 통해서 사용후핵연료 습식저장시설에서 핵연료가 공기 중에 완전히 노출되는 사고를 모사하여 민감도 분석을 수행한 바 있다[22].

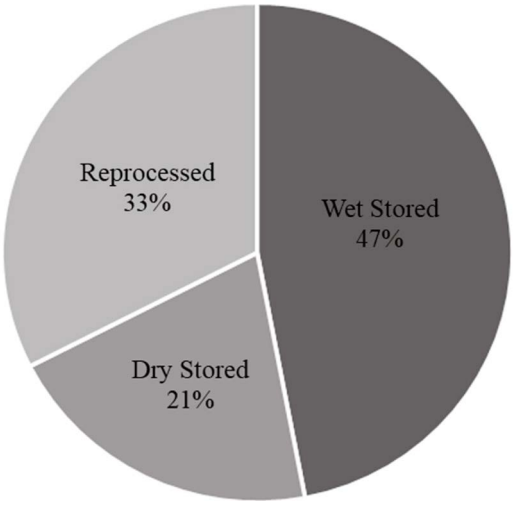

Fig. 1. Share of management method for spent nuclear fuel discharged from NPP.

사용후핵연료 습식저장시설 내 핵연료는 일반적으로 원자로 노심의 핵연료에 비해 매우 낮은 열 발생량을 가지고 있다. 하지만 습식저장시설에는 다중방어 장벽이 없기 때문에 핵연료 파손과 같은 사고가 발생할 경우, 핵연료 피복관이 최후의 방어 장벽이 된다[20]. 국내의 경우 월성 원자력발전소 본부에서 유일하게 건식저장을 수행하고 있으며, 이외의 사용후핵연료는 습식저장시설 내 보관 중에 있다[23,24]. Fig. 1에 따르면 전 세계적으로도 습식저장 방식

이 타 관리 방식에 비해 많은 비율을 차지하였으며, 이에 따라 해당 관리 방식에서의 사고 안전성 평가 연구가 다수 수행되었다. 현재 세계 각국의 연구 기관에서는 실험 및 전산코드 시뮬레이션을 통해 습식저장시설 내 사고를 모사하고, 사고 시 안전성 평가 관련 연구를 다수 수행한 바 있다. 그러나 국내에서는 사용후핵연료 습식저장시설 사고 관련 연구가 국외에 비해 부족하며, 따라서 향후 연구수행을 위한 기반자료 확보가 필요하다. 이를 위해서는 현재 국내·외 사용후핵연료 습식저장시설 사고 연구 현황 및 사례 분석이 선행되어야 한다.

본 연구의 목표는 국내외 사용후핵연료 습식저장시설 사고 연구 현황 및 사고 사례를 분석하는 것이다. 이를 위하여 먼저 국내·외에서 수행된 사용후핵연료 습식저장시설 사고 안전성 평가 연구를 조사하였다. 그리고 국외에서 발생한 사용후핵연료 습식저장시설 사고 사례를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 사용후핵연료 습식저장시설 안전성 평가 연구 현황 및 사고 사례를 분석하였다. 연구 현황 분석을 위하여, 사용후핵연료 습식저장시설 내 발생 가능한 주요 사고 현상(Phenomena)을 조사하고 이에 대해 분석한 연구 사례를 조사하였다. 사고 사례 분석의 경우, 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각수 상실 및 냉각기능 상실사고가 발생한 국외 사례를 분석하였다.

Fig. 2에 시설 내 핵연료의 공기 중 노출 정도에 따라 발생 가능한 현상을 나타내었다. 사용후핵연료 습식저장시설 내 사고 현상은 핵연료가 공기 중에 노출되는 정도에 따라 상이하게 나타난다. 이에 따라 사고 진행 단계를 연료 노출 전, 노출 시작, 연료 손상 단계로 구분할 수 있다. 해당 단계에서 나타날 수 있는 사고 현상은 1) 핵분열 생성물 방출, 2) 열수력적 변화, 3) 핵연료 파손이 있다[13,27]. 본 연구에서는 해당 3가지 현상에 대해 분석하여 안전성 평가를 수행한 연구 사례를 조사하였다. 미국 원자력규제위원회에서는 사고 시 방출 가능한 핵분열 생성물을 전산코드를 통해 분석하였다[27]. 샌디아 국립연구소와 오크리지 국립연구소에서는 사고 시 습식저장시설 내 열수력적 변화를 전산코드를 통해 분석하였다[28]. 그리고 아르곤 국립연구소와 한국원자력연구원에서는 실험을 통해 사고 시 핵연료의 파손 거동을 분석하였다[29]. 본 연구에서는 각 기관에서 해당 연구를 수행하기 위하여 사용한 방법, 주요 가정사항과 결과를 분석하였다.

Fig. 3에 사용후핵연료 습식저장시설 사고 분류체계를 나타내었다[25]. 사용후핵연료 습식저장시설에서는 핵연료 냉각 및 차폐 역할을 수행하는 냉각수가 누출되거나 증발하여 사고가 진행될 수 있다. 이에 따라 국제원자력기구, 원자력기구, 미국 원자력규제위원회 및 전력연구소에서는 사용후핵연료 습식저장시설 사고를 1) 냉각수 상실 및 2) 냉각기능 상실사고로 구분하고 있다[8,12,14,25]. 냉각수 상실사고는 시설의 구조적 손상이나 연결된 시스템 및 배관의 파손 등으로 냉각수가 직접적으로 유출되는 상황이다. 그리고 냉각기능 상실사고는 시설 내 열교환기의 고장이나 냉각 시스템의 고장으로 냉각수 유량이 손실되어 냉각수가 증발하는 상황이다[26].

이에 따라 본 연구에서는 냉각수 상실과 냉각기능 상실을 사용후핵연료 습식저장시설 내에서 발생 가능한 주요 사고 상황으로 선정하였다. 그리고 해당 사고 상황에서 발생한 사고 사례를 조사하였다. 일본의 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기에서는 소외전원상실사고(LOOP, Loss of Off-site Power)로 인하여 사용후핵연료 습식저장시설 내

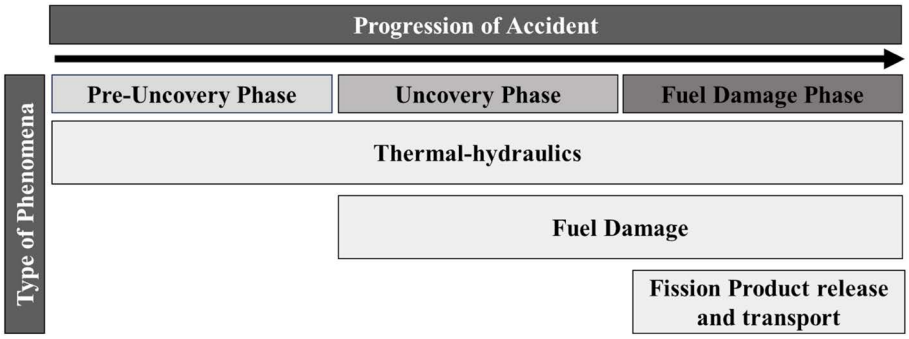

Fig. 2. Phases and phenomena of spent nuclear fuel pool accident.

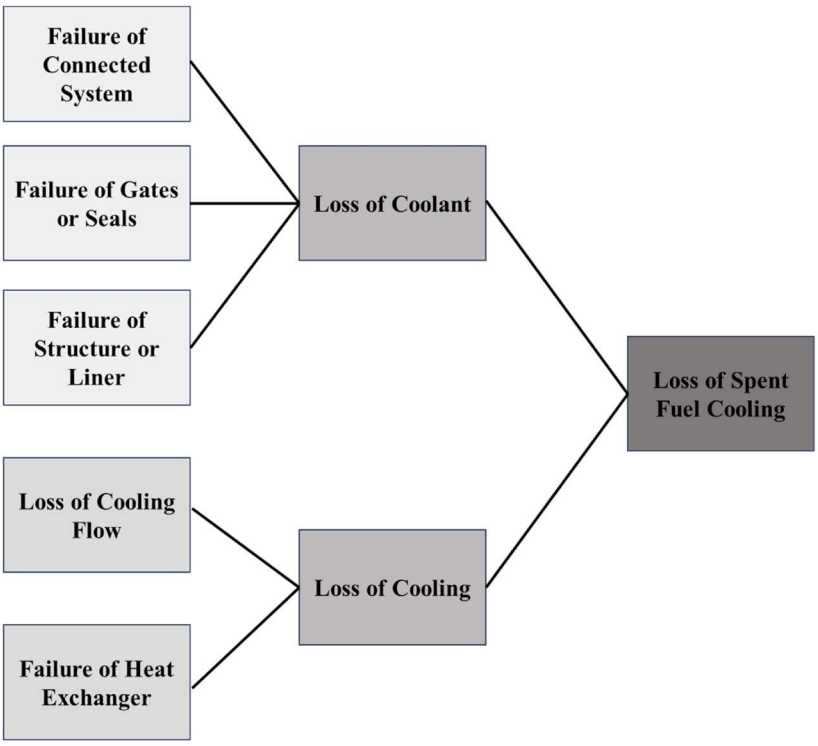

Fig. 3. Schematic classification of the types of accident led to loss of cooling spent nuclear fuel.

냉각기능 상실사고가 발생한 바 있다. 일본의 오나가와 원자력발전소 1~3호기에서는 냉각펌프의 기능 이상으로 냉각기능이 상실되는 사고가 발생하였다. 미국 SONGS 원자력발전소 2호기에서는 원전기기냉각수계통(CCWS, Component Cooling Water System)의 기능 이상으로 냉각기능 상실사고가 발생한 바 있다. 스페인의 Almaraz-2 원자력발전소에서는 노심 교체 작업을 수행하는 동안 원전기기냉각수계통 펌프 A열의 작동이 중단되어 냉각기능 상실사고가 발생한 바 있다. 그리고 우크라이나의 Khmelnitski-1 원자력발전소에서는 작업자의 잘못된 밸브 조작으로 냉각수 상실사고가 발생하였다[8]. 본 연구에서는 각각의 사고 사례별로 사고 원인, 수위 및 온도 변화를 비교·분석하였다.

3. 결 과

3.1. 사용후핵연료 습식저장시설 사고 안전성 평가 연구 사례 조사

3.1.1. 미국 원자력규제위원회(NRC)

미국 원자력규제위원회에서는 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각수 상실사고 상황에서 방출 가능한 핵분열 생성물들을 분석하였다. 미국 원자력규제위원회에서는 사고 시 방출되는 핵분열 생성물 분석에 앞서, ORIGEN 2 전산코드를 통해 습식저장시설의 핵종 재고량을 분석하였다. 이후, CORSOR 전산코드 시뮬레이션을 통하여 방출되는 핵분열 생성물을 평가하였다. 미국 원자력규제위원회에서는 냉각수 상실사고 상황을 시설 내 구조적 손상으로 발생하는 냉각수의 완전 손실 상황으로 가정하였다. 그리고 냉각수 상실로 인하여 발생한 핵연료 피복관의 화재가 시설 내부에 확산되었을 때와 그렇지 않은 경우를 가정하였으며, 각각의 상황에서 사고 발생 후 시간별로 방출되는 핵분열 생성물을 분석하였다. 분석 결과, 핵연료 피복관의 화재가 시설 내 확산되는 경우, 사고 후 30일에 ^{137}Cs, ^{137}mBa이 각각 약 7.47×10^{17} Bq, 7.07×10^{17} Bq로 가장 많은 방출량을 나타낸다고 평가하였다. 그리고 핵연료 피복관 화재가 시설 내에 확산되지 않는 경우, 사고 후 30일에 ^{137}Cs, ^{134}Cs이 각각 약 1.31×10^{17} Bq, 1.05×10^{17} Bq로 가장 많은 방출량을 나타낸다고 평가하였다[27].

3.1.2. 미국 샌디아 국립연구소(SNL)

미국 샌디아 국립연구소에서는 사용후핵연료 습식저

장시설 내 냉각기능 상실사고 상황에서 습식저장시설 내 열수력적 변화를 분석하였다. 샌디아 국립연구소에서는 MELCOR 2.1 전산코드를 사용하여 사고 상황에서 시설 내 냉각수의 수위변화, 핵연료 피복관의 온도변화를 분석하였다. 후쿠시마 원자력발전소 사고 당시 4호기 상황을 사고 상황으로 설정하였으며, 냉각기능 상실사고 상황을 MELCOR 2.1 전산코드로 모사하였다. 그리고 해당 시설 내 냉각수의 초기 수온을 301 K으로 가정하였으며, 후쿠시마 사고 당시 해당 시설 내 냉각수 초기 수위의 불확실성에 따라 냉각수의 초기 수위를 11.5 m, 4.96 m로 가정하였다. 분석 결과, 냉각수의 초기 수위가 11.5 m일 경우에 수위가 사용후핵연료 랙 상단까지 도달하는 데에 소요되는 시간은 25일인 것으로 나타났다. 그리고 시설 내 냉각수가 완전히 고갈하는 데에 소요되는 시간은 37일인 것으로 나타났다. 냉각수의 초기 수위가 4.96 m일 경우, 냉각수 수위가 완전히 고갈되는 데까지 소요되는 시간은 16일인 것으로 나타났다. 핵연료 피복관의 온도변화 분석 결과, 사고 발생 이후 31.25일 뒤 핵연료 피복관의 온도는 약 1,900°C에 이르는 것으로 분석하였다[28].

3.1.3. 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)

미국 오크리지 국립연구소에서는 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각기능 상실사고 상황에서 습식저장시설 내 열수력적 변화 및 핵연료의 화재 가능성을 분석하였다. 미국 오크리지 국립연구소에서는 TRACE 전산코드를 사용하여 습식저장시설 내 냉각수의 수위 변화, 핵연료 피복관의 화재 가능성을 분석하였다. 오크리지 국립연구소에서는 후쿠시마 원자력발전소 사고 당시의 4호기 내부에 있는 습식저장시설의 상황을 사고 상황으로 설정하였으며, 냉각기능 상실사고 상황을 고려하였다. 사고 당시 습식저장시설 내 초기 냉각수 수위의 불확실성을 고려하여 초기 냉각수 수위를 11.2 m, 4.73 m로 나누어 가정하였다. 분석 결과, 초기 수위가 11.2 m인 경우에 냉각수의 수위가 사용후핵연료 상단에 도달하는 데에 소요되는 시간은 11일로 나타났다. 초기 수위가 4.73 m인 경우에 냉각수의 수위가 완전히 고갈되는 데에는 최소 5일이 소요되는 것으로 나타났다. 미국 오크리지 국립연구소에서는 사용후핵연료 피복관의 온도가 약 1,000°C에 이르면 수소를 생산하고, 화재의 가능성이 있다고 평가하였다. 그리고 초기 수위가 11.2 m, 4.73 m일 경우, 해당 온도에 도달하는 데에 소요되는 시간은 각각 약 15일, 5일인 것으로 나타났다[28].

3.1.4. 미국 아르곤 국립연구소(ANL)

아르곤 국립연구소에서는 사용후핵연료 습식저장시설에서 냉각수 상실사고 상황에서 핵연료의 파손 거동을 분석하였다. 아르곤 국립연구소에서는 자체적으로 구축한 시험 장비를 통해서 모사한 시험봉을 승온 속도 5 K s^{-1}의 공기 중에 노출시켜 피복관의 Ballooning 파손 온도를 분석하였다. 시험을 위해 ZIRLO 피복관으로 구성된 핵연료봉을 제작하였다. 아르곤 국립연구소에서는 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각수 상실사고로 인하여 핵연료가 수증기 및 공기 혼합 분위기에 노출되는 상황을 가정하였다. 그리고 시험봉의 초기 봉내압을 4.1 MPa, 11.0 MPa로 가정하였다. 분석 결과, 4.1 MPa, 11.0 MPa의 봉내압을 가지는 사용후핵연료의 Ballooning 파손 온도는 각각 약 1,118 K, 988 K으로 나타났다[29].

3.1.5. 한국원자력연구원

한국원자력연구원에서는 사용후핵연료 습식저장시설에서 냉각수 상실 및 냉각기능 상실사고 상황에서 습식저장시설 내 냉각수의 수위변화와 핵연료의 파손거동을 분석하였다. 한국원자력연구원에서는 자체적으로 제작한 시험장비를 통해 제작한 시험봉을 사고 상황의 공기 중에 노출시켜 피복관의 Ballooning 파손 온도를 분석하였다. 시험을 위해 Zircaloy-4 피복관으로 구성된 핵연료 시험봉을 제작하였다. 이때, 핵연료봉의 초기 봉내압을 3 MPa, 10 MPa로 가정하였으며, 핵연료봉의 붕괴열을 20 kW로 가정하였다. 분석 결과, 사용후핵연료의 초기 봉내압에 따라 Ballooning 파손 온도는 각각 상이하게 나타났다. 핵연료봉의 초기 봉내압이 3 MPa, 10 MPa일 경우, Ballooning 파손 온도는 각각 1,012 K, 940 K으로 나타났다[20].

3.2. 사용후핵연료 습식저장시설 사고 사례 조사

3.2.1. 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기

일본의 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기 습식저장시설에서는 냉각기능 상실사고 및 냉각재 공급이 중단되는 사고가 발생하였다. 해당 사고는 2011년 3월 11일에 일어난 규모 9.1의 동일본 대지진에 의해 발생하였다. 지진발생으로 운영 중이던 후쿠시마 원자력발전소 1~3호기는 자동으로 운영 중단되었다. 반면 4호기의 경우, 사고 당시 계획예

방정비로 운전 정지 중에 있었다. 그리고 지진으로 인하여 소외전원이 상실되었다. 이후, 상실된 소외전원을 대신하여 비상디젤발전기(EDG, Emergency Deisel Generator)를 통해서 습식저장시설 및 원자로의 냉각기능을 유지하고 있었다. 하지만 쓰나미로 인하여 비상디젤발전기마저 침수되어 그 기능을 손실하였다. 일부 호기 내 원자로의 냉각기능 상실로 노출된 핵연료는 수소를 생산하였다. 그리고 수소폭발로 인한 원자로 건물의 손상이 발생하였으며, 건물 손상으로 인한 파편은 각 호기 내 습식저장시설에 떨어졌다[30-32].

지진 및 쓰나미로 인하여 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각기능은 손실되었다. 일본의 도쿄 전력(TEPCO, Tokyo Electric Power COmpany)에서는 대체 냉각 시스템을 구축하기 전까지 콘크리트 펌프 트럭 등의 방법으로 각 호기의 습식저장시설에 물을 주입하였다. 대체 냉각 시스템을 구축하기 전까지 1~4호기에는 각각 578 ton, 1,122 ton, 6,167.5 ton, 5,700 ton의 물이 주입되었다. 그리고 해당 시스템을 구축하기 전까지 1~4호기의 습식저장시설 수온은 각각 47°C, 70°C, 62°C, 75°C였다. 대체 냉각 시스템을 구축한 뒤, 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기 습식저장시설의 수온은 각각 30°C, 30°C, 30°C, 40°C로 일반적인 사용후핵연료 습식저장시설의 허용 온도보다 낮게 유지되었다[31]. 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기의 수위는 지진 등의 이유로 약간 감소하였지만 콘크리트 펌프 트럭 등의 물 주입을 통해 이틀 이내에 회복되었으며, 핵연료 노출 및 손상 등의 사고는 발생하지 않았다. 사고 이후 습식저장시설의 냉각수 분석 결과, 습식저장시설 내에서 검출된 핵종은 습식저장시설에서의 사고로 발생했다기 보단 원자로 건물 내 사고로 발생했을 가능성이 높게 평가되었다[33].

3.2.2. 오나가와 원자력발전소 1~3호기

일본의 오나가와 원자력발전소 1~3호기에서 2011년 3월 11일, 4월 7일에 사용후핵연료 습식저장시설 내에서 냉각기능 상실사고가 발생하였다. 당시 일본 도호쿠 지방에서 발생한 동일본 대지진의 여파로 발생한 강진은 해당 사고의 주요 원인이었다. 대지진 및 강진의 진도는 각각 9.1, 7.4였다. 지진 및 강진으로 인하여 오나가와 원자력발전소 내 사용후핵연료 습식저장시설의 구조적 손상은 발생하지 않았지만 지진 및 강진으로 인한 충격으로 습식저장시설이 흔들렸다.

해당 사고로 인하여 오나가와 원자력발전소 1~3호기 내 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각수가 일부 유출되었다. 그리고 사용후핵연료 습식저장시설의 흔들림으로 시설 내 냉각 시스템 중에 하나인 냉각수 냉각펌프의 기능이 정지되었다. 이에 따라 오나가와 원자력발전소 내에서 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각기능이 상실되는 사고가 일정 시간 동안 발생하였다. 해당 사고가 지속되는 동안 냉각수의 수위 변화 및 수온 변화는 발생하지 않은 것으로 판단된다[34,35].

3.2.3. SONGS 원자력발전소 2호기

미국의 SONGS 원자력발전소 2호기의 사용후핵연료 습식저장시설에서 2009년 12월 23일에 냉각기능 상실사고가 발생하였다. 당시 SONGS 원자력발전소 2호기 습식저장시설 냉각계통 A열의 해수 냉각(SWC, Salt Water Cooling) 저유량 경보 및 원전기기냉각수계통 열교환기에 고압 경보가 발전소 통제실에 수신되었다. 해수 냉각 저유량 경보 및 원전기기냉각수계통에서 발생한 고압 경보의 원인은 해당 계통 내 열교환기에 유입된 인근 해양 부산물이 원인이었다. 사고 발생 17분 뒤, 발전소 내 작업자는 해수 냉각펌프의 작동을 중지시켰으며, 습식저장시설 냉각계통 A열의 작동불능을 선언했다. 당시 습식저장시설 냉각계통 A열의 기능을 대체할 수 있는 냉각계통 B열은 정기 유지보수 작업 중이었기 때문에 대체 냉각이 이루어지지 못했다.

해당 사고로 인하여 작업자는 비정상 운영 지침(AOI, Abnormal Operating Instruction) 및 열교환기 이상 시 운영지침에 따라 해수 냉각펌프의 작동을 중단시켰다. 그리고 열교환기를 통과하는 해수 냉각 밸브의 방향을 달리 하였고 원전기기냉각수계통 열교환기 내 유입된 해양 부산물을 제거하였다. SONGS 원자력발전소 2호기 내 습식저장시설의 냉각기능 상실은 1시간 19분 동안 지속되었으며, 이후 냉각펌프를 다시 정상 작동시켰다. 사고가 진행되는 동안 습식저장시설의 수온 변화는 미미했다. 해수 펌프가 작동하지 않는 동안 습식저장시설의 수온은 25.6°C까지 상승하였으며, 사고 전에 비해 약 2.3°C 증가하였다. 해당 수온은 발전소 기술 지침서에 명시된 71.1°C보다 낮은 수준이었으며, 습식저장시설 내 냉각수의 수위는 7 m로 기술 지침서를 만족하는 수준이었다. 이에 따라 해당 사고는 핵연료의 공기 중 노출 등 심각한 결과로 이어지지 않았다[8].

3.2.4. Almaraz-2 원자력발전소

스페인의 Almaraz-2 원자력발전소에서 2007년 11월 4일에 사용후핵연료 습식저장시설에서 냉각기능 상실사고가 발생하였다. 해당 사고는 당시 Almaraz-2 원자력발전소에서 노심 교체 작업을 진행하는 동안 일어났으며, 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각 시스템 중 하나인 원전기기냉각수계통 펌프 A열의 작동이 중단되어 발생하였다. 원전기기냉각수계통 펌프 A열의 작동 중단으로 인하여 Almaraz-2 원자력발전소 내 원자로 및 사용후핵연료 습식저장시설의 강제 냉각 기능이 7시간 동안 중단되었다.

원전기기냉각수계통 펌프 A열의 작동 중단으로 인한 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각기능 손상에 대처하기 위하여 작업자는 고장난 펌프를 Almaraz-2 원자력발전소 펌프 A열을 공용펌프, 원전기기냉각수계통 펌프 B열, Almaraz-1 원자력발전소의 펌프 A 및 B에 연결할 수 있었다. 당시 Almaraz-2 원자력발전소 작업자는 가장 단순한 방법인 공용펌프에 원전기기냉각수계통 펌프 A를 연결하여 습식저장시설 내 냉각기능을 복구시켰다. 냉각 펌프 A의 기능이 복구되는 동안 습식저장시설 내 수온은 34°C에서 46°C까지 약 12°C 상승하였다. 해당 사고는 시설 내 핵연료가 공기 중에 노출되는 등의 심각한 사고 결과로 이어지지 않았다[8].

3.2.5. Khmelnitski-1 원자력발전소

우크라이나의 Khmelnitski-1 원자력발전소에서는 2002년 5월 20일에 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각수가 상실되는 사고가 발생하였다. 당시 Khmelnitski-1 원자력발전소에서는 냉각 펌프와 냉각수 공급조 사이의 1TG12S06 밸브 유지보수 작업을 위해 해당 밸브를 작동시키지 않고 있었다. 유지보수 작업의 안전성을 위해 제어회로를 분리하고 1TG12S06 밸브와 사용후핵연료 습식저장시설 사이의 1TG12S04 밸브를 잠그는 등의 조치를 취하였지만 1TG12S06 밸브와 냉각재 공급조 사이에 존재하는 1TG12S04 밸브의 압축공기는 작동을 멈추지 않고 있었다. 유지보수 작업을 마무리한 뒤, 밸브 1TG12S04의 압축공기가 작동 중임을 인지하지 못하고 있었던 작업자는 밸브 1TG12S06와 제어회로를 연결하였다. 연결작업이 마무리된 후, 작동 중이었던 압축공기에 의해 냉각수 공급조의 냉각수가 예기치 않게 유입되었으며 밸브 연결관을 통해 냉각수가 원자로 건물로 유출되었다. 해당 사고의 원인은 유지보수 작업 전 밸브 시험 수행의 부족함으로 인한 인적 오류로 판단되었다.

Khmelnitski-1 원자력발전소에서 발생한 냉각수 상실사고의 원인은 습식저장시설 내 밸브의 유지보수 작업 중 발생한 인적 오류였다. Khmelnitski-1 원자력발전소에서는 사고에 대응하기 위하여 유지보수 작업 절차를 수정하였으며 훈련 절차를 강화하는 등의 조치를 취하였다. 해당 사고로 인하여 냉각수 공급조의 수위는 36.1 m에서 34.1 m로 약 1.9 m 떨어졌으며, 사용후핵연료 습식저장시설 내 냉각수의 수위 변화는 발생하지 않았다. 냉각수 공급조의 냉각수 유출로 인하여 최대 1.18×10^{13} Bq L^{-1}의 방사능을 가지는 붕산수가 원자로 건물로 유출되었으며, 원자로 건물 내 안전장비를 일부분 침수시켰다. 해당 방사능 준위는 참조 준위를 초과하는 수준은 아니었으며, 핵연료가 공기 중에 노출되는 등의 심각한 사고로 이어지지 않았다[8].

4. 고 찰

Table 1에 발생 가능한 사고 현상별로 각 기관에서 수행한 연구를 비교하여 나타내었다. 미국 원자력규제위원회에서는 습식저장시설 내 핵연료 화재 시 방출가능한 핵분열 생성물을 분석하였다. 핵연료에서 발생한 화재가 시설 내에 확산될 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였으며, 분석 결과, ^{137}Cs 핵종의 방출 분율이 공통적으로 가장 크게 나타났다. 사용후핵연료의 붕괴열은 핵연료에 포함되어 있는 방사성 핵종의 방사성 붕괴에 의해 발생하며, 적절한 냉각이 이루어지지 않을 경우 화재로 이어지는 원인 중에 하나이다. ^{137}Cs 핵종은 장반감기 핵종으로서 오랜 기간 동안 사용후핵연료 내 방사성 붕괴의 40%를 차지한다. 이에 따라 화재로 인한 핵분열 생성물 방출 시 가장 큰 방출 분율을 차지하는 것으로 판단된다[14,36]. 미국의 샌디아 국립연구소와 오크리지 국립연구소에서는 사고 시 습식저장시설의 열수력적 변화를 분석하였다. 두 기관에서는 공통적으로 후쿠시마 원자력발전소 4호기의 사고 상황을 가정하였지만 분석 결과는 상이하게 나타났다. 미국 샌디아 국립연구소는 오크리지 국립연구소의 분석 결과와 달리 냉각수의 수위가 낮아지는 데 더 오랜 시간이 소요된다고 분석하였다. 이는 두 기관에서 사고 시뮬레이션에 사용한 전산코드가 상이하기 때문이다. MELCOR 2.1 전산코드

Table 1. Comparison of study cases for safety assessment of spent nuclear fuel pool accident

Type of phenomena	Research Institute	Material & Method	Main assumptions		Results of analysis
Fission product release	NRC	CORSOR	Propagated Cladding Combustion Only Cladding Combustion		^{137}Cs, ^{137m}Ba[a] ^{137}Cs, ^{134}Cs[a]
Thermal-hydraulics	SNL	MELCOR 2.1	Initial water level	11.5 m	25 days[b] 37 days[c]
				4.96 m	16 days[c]
	ORNL	TRACE	Initial water level	11.2 m 4.73 m	11 days[b] 5 days[c]
Fuel behavior	ANL	Experiment with ZIRLO cladding	Initial internal pressure	4.1 MPa 11.0 MPa	1,118 K[d] 988 K[d]
	KAERI	Experiment with Zircaloy-4 cladding	Initial internal pressure	3 MPa 10 MPa	1,012 K[d] 940 K[d]

[a]Fission products with the most release fractions
[b]Time taken for water level to reach the below of the fuel racks
[c]Time taken to completely drain down of SFP coolant
[d]Temperature generated ballooning breakage on cladding

Table 2. Summary of past accident cases related to spent nuclear fuel pool

Type of event	Nuclear power plant	Causes	Results
Loss of cooling	Fukushima NPP Unit 1~4	- Earthquake & Tsunami - Loss of Off-site Power (LOOP)	No significant impact
	Onagawa NPP Unit 1~3	- Earthquake & Aftershock - Failure of Coolant pump	No significant impact
	SONGS NPP Unit 2	- Obstructing CCWS by ocean debris - SWC's low flow	No significant impact
	Almaraz-2 NPP	- Failure of CCWS pump	No significant impact
Loss of coolant	Khmelnitski NPP Unit 1	- Inappropriate valve maintenance activities	No significant impact

는 TRACE 전산코드와 달리 사고 시뮬레이션 시에 원자로 건물의 재장전 수조를 고려하여 평가한다. 재장전 수조 내 물은 사용후핵연료 습식저장시설 상단에 수증기를 증가시키고, 냉각수 증발 속도를 늦춘다. 이에 따른 영향으로 사용후핵연료 습식저장시설의 수위가 낮아지는 데 오랜 시간이 소요되는 것으로 판단된다[26]. 아르곤 국립연구소와 한국원자력연구원에서는 사고 시 핵연료의 파손 거동을 분석하였다. 두 기관에서는 공통적으로 핵연료 피복관의 Ballooning 파손 온도 시점을 분석하였다. 두 기관의 분석 결과는 상이하게 나타났으며, 아르곤 국립연구소에서는 핵연료 피복관의 Ballooning 파손 온도를 한국원자력연구원의 분석 결과에 비해 더 높게 평가하고 있었다. 이는 두 기관에서 분석 대상으로 선정한 피복관의 재료가 다르고 설정한 초기 봉내압이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2에 조사한 사고 사례를 상황별로 구분하여 원인 및 결과를 요약하여 나타내었다. 사고 사례 조사 및 분석을 수행한 결과, 사고의 원인은 사례별로 상이하게 나타났다. 이는 원자력발전소의 위치와 원자로의 노형에 따라 달

라지는 사용후핵연료 습식저장시설의 설계, 냉각 시스템의 다양성 때문인 것으로 판단된다. 그리고 사용후핵연료 습식저장시설에서 발생한 대부분의 사고는 시설 내 핵연료가 공기 중에 노출되거나 핵연료가 손상되는 등의 심각한 사고로 이어지지 않았다. 이는 사용후핵연료 습식저장시설 내 대량의 냉각수가 제공하는 높은 열 질량(Thermal Mass) 때문이다. 높은 열 질량은 냉각수가 증발되어 핵연료가 노출되는 상황을 지연시키며, 작업자가 투입되어 사고 완화 조치를 취하는 데에 충분한 시간을 제공한다[8]. 사고 유형 분석 결과, 사용후핵연료 습식저장시설의 냉각기능 상실사고와 냉각수 상실사고는 각각 4가지, 1가지로 나타났다. 냉각수 상실사고는 사용후핵연료 습식저장시설의 구조적 손상, 냉각수와 연결된 시스템 등의 손상으로 냉각수가 유출되어 발생할 수 있다. 하지만 사용후핵연료 습식저장시설은 일반적으로 2 m 두께의 콘크리트 벽과 스테인리스 라이너로 견고하게 구성되어 있다. 그리고 습식저장시설 설계 시, 냉각수가 연결된 시스템 등을 시설 상단에 높게 설치하기 때문에 손상이 발생해도 냉각수 유출이 적다. 이에 따라 냉각수 상실사고의 발생 빈도수는 냉각기능 상실사고의 빈도수보다 적은 것으로 판단된다[8,37].

5. 결 론

국내 대부분의 사용후핵연료는 붕괴열 및 방사능을 낮추기 위해 일차적으로 습식저장하고 있다[6]. 사용후핵연료 습식저장시설은 원자로의 노심과 달리 다중 방벽이 존재하지 않으며, 핵연료 피복관이 유일한 방어장벽의 역할을 수행한다. 따라서 사용후핵연료 습식저장시설 안전성 확보를 위한 연구가 필요하다. 이에 따라 사용후핵연료 습식저장시설 안전성 평가 연구사례를 조사하여 전반적인 연구의 방법과 결과를 비교·분석하였다. 그리고 국외 사용후핵연료 습식저장시설 사고 사례 조사를 통하여 사고의 원인, 결과에 대한 비교·분석을 수행하였다.

국내·외에서 수행된 사용후핵연료 습식저장시설 사고 연구 현황 조사 결과, 동일한 사고 현상을 대상으로 연구를 하여도 사용된 전산코드, 실험의 재료 및 방법, 주요 가정사항에 따라 분석 결과는 상이하게 나타났다. 사고 시 핵분열 생성물 방출을 분석한 미국 원자력규제위원회에서는 가정한 상황에 따라 핵분열 생성물의 방출 분율을 상이하게 분석하였다. 사고 시 사용후핵연료 습식저장시설의 열수력적 변화를 분석한 샌디아 국립연구소와 오크리지 국립연구소는 연구에 사용한 전산코드의 차이로 습식저장시설 내 냉각수 증발속도를 상이하게 분석하였다. 사고 시 핵연료 피복관의 파손 거동을 분석한 샌디아 국립연구소와 한국원자력연구원에서는 실험에 사용한 피복관의 재료, 초기 봉내압 설정 값의 차이로 핵연료 피복관의 Ballooning 파손 거동을 상이하게 분석하였다.

사용후핵연료 습식저장시설 사고 사례 분석 결과, 사용후핵연료 습식저장시설 사고로 인하여 시설 내 냉각수의 수온 및 수위가 변화하였지만 핵연료의 공기 중 노출이나 핵분열 생성물 방출 등의 심각한 결과로 이어지지는 않았다. 그리고 사용후핵연료 습식저장시설 사고는 원자력발전소마다 사용후핵연료 습식저장시설의 구조에 따라 세부적인 원인이 상이하게 나타났다. 후쿠시마 원자력발전소 1~4호기 내 습식저장시설에서 발생한 사고는 지진 및 쓰나미에 의한 소외전원상실로 냉각기능이 상실된 사고였다. 오나가와 원자력발전소 1~3 호기에서 발생한 사고는 지진 및 강진으로 인한 흔들림 및 냉각 시스템의 정지가 원인이었으며 이로 인하여 냉각기능이 상실된 사고였다. SONGS 원자력발전소 2호기에서 발생한 습식저장시설 사고는 인근 해양 부산물이 냉각 시스템으로 유입되어 냉각수 유량이 줄어든 냉각기능이 상실된 사고였다. Almaraz-2 원자력발전소에서 발생한 사고는 노심 교체 작업 중 냉각펌프의 고장으로 인하여 발생한 냉각기능 상실사고였다. Khmelnitski 원자력발전소 1호기에서 발생한 사고는 냉각수 공급조와 습식저장시설 사이 밸브 유지보수 작업 중 인적 오류로 인하여 냉각수가 일부 상실된 사고였다.

본 연구의 결과는 국내외 사용후핵연료 습식저장시설 사고 연구 현황과 사고 사례의 원인 및 결과를 파악하는 데에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 향후 사용후핵연료 습식저장시설 사고 연구 시에 기반자료로 활용될 수 있을 것이라 판단한다.

사 사

본 연구는 한국에너지기술평가원에서 주관하는 에너지기술 개발사업의 일환으로 수행된 연구입니다(No. 20211710200001B).

참고문헌

1. NEA. 2020. Storage of Radioactive Waste and Spent Fuel.
2. KORAD. 2016. Story about Spent Nuclear Fuel 70.
3. KORAD. Management of High Radioactive Waste. https://www.korad.or.kr/korad/html.do?menu_idx=144
4. Park WJ and Suk TW. 1996. Present Status and Future of Spent Fuel Management (1) - National Strategies and Their Implementations. *J. Radiat. Prot.* **21**(1):59-72. https://www.jrpr.org/journal/view.php?number=273
5. Na HJ, Kim HJ, Kim KH, Nam HW and Kim KP. 2021. Analysis of Domestic and Foreign Spent Fuel Storage and Final Management Policies. *J. Radiat. Ind.* **15**(4):301-309. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.301
6. KINS. 2003. Development of Safety Evaluation Method for Dry Storage of Spent Nuclear Fuel. KINS/RR-197.
7. IAEA. 2022. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. No. NW-T-1.14 (Rev.1).
8. NEA. 2015. Status Report on Spent Fuel Pools under Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accident Conditions. NEA/CSNI/R(2015)2.
9. NRC. Spent Fuel Pools. https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage/pools.html
10. Xiong Z, Ye C, Wang M and Gu H. 2015. Experimental Study on the Sub-atmospheric Loop Heat Pipe Passive Cooling System for Spent Fuel Pool. *Prog. Nucl. Energy* **79**:40-47. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.10.015
11. Bang JG, Kim DH, Jeon TH and Kim SG. 2016. Discussion of Major Safety Issue in the Spent Nuclear Fuel Pool Accident. *Abstract of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society AUTUMN* **2016**:103-104.
12. IAEA. 2021. Phenomenology, Simulation and Modeling of Accidents in Spent Fuel Pools. IAEA-TECDOC-1949.
13. NEA. 2018. Phenomena Identification and Ranking Table. NEA/CSNI/R(2017)18.
14. EPRI. 2013. Spent Fuel Pool Accident Characteristics. 3002000499.
15. NRC. 1989. Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, "Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools". NUREG-1353.
16. SNL. 1979. Spent Fuel Heat Up Following Loss of Water During Storage. NUREG/CR-0649.
17. Mutelle H, Tamburim I, Tillard S, Tregoures N, Toutant A, Mermoux M, Peres V and Buscail H. 2014. A New Research Program on Accidents in Spent Fuel Pools: The DENOPI Project. Proceeding of WRFPM 2014.
18. Gestin M, Mermoux M, Coindreau O, Duriez C, Pijolat M, Peres V and Favergeon L. 2019. Experimental Study of Oxidation in Oxygen, Nitrogen and Steam Mixtures at 850°C of Pre-oxidized Zircaloy-4.
19. Saux ML, Brachet JC, Vandenberghe V, Rouesne E, Urvoy S, Ambard A and Chosson R. 2021. Effect of A Pre-oxide on the high temperature Steam Oxidation of Zircaloy-4 and M5 alloys.
20. KAERI. 2017. Investigation of Nuclear Spent Fuel Failure Behavior in Spent Fuel Pool Air Ingress Accidents. KAERI/RR-4195/2016.
21. Jeon BG, Kim KH, Kim BJ, Kim JR, Park JK and Moon SK. 2016. Analysis of Thermal Hydraulic Behavior in Spent Fuel Storage Pool Under Loss of Cooling Accident. *Abstract of Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society* **2016**:2859-2862.
22. Oh JM and Pack JW. 2015. Analysis of Severe Accident for the SFP under the Condition of Complete Drainage using MELCOR.
23. Yang YS. 2006. Evaluation of Dry Storage Criteria for PWR Spent Nuclear Fuel and Its Applicability in Korea. *Abstract of Proceeding of the Korean Radioactive Waste Society* **2006**:91-92.
24. KAERI. 2009. Analysis on Storage of Spent Nuclear Fuel. KAERI/TR-3784/2009.
25. NRC. 1997. Operating Experience Feedback Report. NUREG-1275.
26. EPRI. 2014. PWR Spent Fuel Pool Risk Assessment Integration Framework and Pilot Plant Application. 3002002691.
27. NRC. 1987. Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82. NUREG/CR-4982.
28. SNL. 2012. Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012). SAND2012-6173.
29. ANL. 2004. Air Oxidation Kinetics for Zr-Based Alloys. ANL-03/32.
30. TEPCO. 2012. Fukushima Nuclear Accident Analysis Report.
31. KNS. 2013. Analysis on Fukushima Nuclear Power Plant Accident.
32. The National Academy Press. 2016. Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety and Security of U.S Nuclear Plants Phase 2.
33. IAEA. 2015. The Fukushima Daiichi Accident.
34. Park WM, Son SM, Choi DK, Lee KH, Kang HS, Choi C. 2019. A Novel Method to Estimate the Amount of Coolant Overflow in the Spent Fuel Pool During an Earthquake. Abstract of The KSFM Journal of Fluid Machinery Winter 2019.
35. IAEA. 2012. IAEA Mission to Onagawa Nuclear Power Station to Examine The Performance of Systems, Structures and Components Following The Great East Japanese Earthquake and Tsunami.
36. NRC. 2001. Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants. NUREG-1738.
37. Strucic M. 2016. Possible Accident Scenarios related to the Spent Fuel Pool Operating Events. *J. Energy* **65**(2):79-89.