

건식저장시설 위험도 평가 체계에 관한 연구

A New Framework to Assess Risk for A Spent Fuel Dry Storage Facility

류정현, 제무성^{1)*}

한양대학교

서울시 성동구 행당동 산 17

정찬우

한국원자력안전기술원

대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

건식저장시설이란 원자력발전소에서 사용한 핵연료를 중간 저장하는 시설로 냉각 방식을 건식형태로 저장하는 시설이다. 사고의 발생가능성은 매우 작으나 방사성물질이 유출될 수 있는 확률이 존재하기에 이에 대한 안전성 평가가 건설 전에 수행되어야 한다. 본 논문에서는 건식저장시설에 안전성 평가에 대한 체계의 수립 및 세부 수행 방법에 대하여 연구를 수행 하였다. 크게 안전성 평가를 3개의 단계로 나누었으며 각 단계로는 바스켓 및 실린더 파손 확률 평가, 건식저장시설 시스템 평가, 마지막으로 지역 평가로 이루어져있다. 세부적으로 바스켓 및 실린더 파손 확률 평가는 스트레스 강도 간섭 이론¹⁾을 기초로 수행할 계획이며, 건식저장시설 시스템 평가의 경우 ETA와 FTA를 사용 하였으며 초기사건의 데이터 분석에는 베이지안 업데이트²⁾를 사용할 계획이다. 마지막으로 지역 모델링에는 원자력발전소 Level 3 PSA에 사용되는 MACCS 코드³⁾를 사용할 계획이다.

Abstract

A spent fuel dry storage facility is a dry cooling storage facility for storing irradiated nuclear fuel and associated radioactive materials. It has very small

* To whom correspondence should be addressed. jae@hanyang.ac.kr

possibilities to release radiation materials. It means a safety analysis for a spent fuel dry storage facility is required before construction. In this study, a new framework for assessing risk associated with a spent fuel dry storage facility is represented. A safety assessment framework includes 3 modules such as assessment of basket/cylinder failure rates, that of overall storage system, and site modeling. A reliability physics model for failure rates, event tree analysis(ETA)/fault tree analysis for system analysis, Bayesian analysis for initial events data, and MACCS code for consequence analysis have been used in this study.

1. 서론

원자로에서 연소가 끝나 인출되어 나온 사용후핵연료는 재활용 또는 영구 처분을 할 수 있는데, 이러한 두가지 방안 중에서 하나를 선택하기 전까지 한곳에 모아 저장을 하는 것을 중간저장이라 한다. 사용후핵연료 건식저장시설이란 이러한 중간 저장을 하는 시설로써 그 냉각을 건식 다시말해 공랭에 의해 보관하는 시설을 가르킨다. 우리나라의 경우 지속적인 원자로의 가동으로 인해 생성된 사용후핵연료가 소내에 저장할 수 밖에 없는 실정이어서 2016년까지 준공을 할 계획에 있다. 표1은 각 발전소별 사용후핵연료 저장 현황과 예상 포화연도를 나타내고 있다. 특히 월성 원전의 경우 2006년이면 지금의 저장 시설로는 발생하는 사용후핵연료를 저장 할 수 없는 실정이다. 따라서 사용후핵연료 중간 저장시설에 대한 안정성 평가를 할 수 있는 기술에 대한 개발이 필요하다. 본 연구에서는 중간저장시설 중 건식저장시설에 초점을 두어 확률론적 안전성 분석에 대한 일반론적인 체계의 수립과 방법론에 대해 연구 하였다. 이러한 제반 기술의 개발을 통해 앞으로 건설 하게 되는 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 안전성 분석의 체계를 마련하고 그 운영의 안전성에도 기여 할 것으로 사료된다.

표 1. 사용후핵연료 저장 현황[4] (단위 : 톤)

구 분	저장용량	누계 발생량	예상 포화연도
월성 원전	4,807	3,089	2006
고리 원전	1,737	1,288	2008
영광 원전	1,696	895	2008
울진 원전	1,563	710	2007
계	9,803	5,982	-

2. 안전성 평가 체계

본 연구에서는 사용후핵연료 건식저장시설의 안전성 평가 방법을 3가지의 단계로 구분하였다. 첫 번째 단계는 방사성 물질 격납의 주요 요소인 바스켓과 실린더의 파손 확률의 모델링이고, 두 번째 단계는 사용후핵연료 저장시설의 사고 모델링, 마지막으로 세 번째 단계는 주위 지역의 모델링을 통한 결말 분석의 범위로 나누었다. 지금까지의 사용후핵연료 건식저장시설의 경우 대개의 경우 저장시설의 사고 모델링에 국한 되어 있었으며 결정론적인 평가에 치우쳐진 것이 사실이다. 하지만 원자력 분야 사고의 경우 그 피해가 다른 사고에 비해 매우 크기 때문에 결정론적 평가에서 간과 할 수 있는 확률론적 안전성 평가(PSA: Probability Safety Analysis)가 요구된다. PSA이란 원전의 위험성을 확률로 평가하는 방법론으로써 사용후핵연료 건식저장시설의 안전성 평가 시에 기존 원자력 발전소에서 수행되고 있는 PSA의 Level 1, 2, 3에서와 같은 방식을 통해 수행하려고 한다.

첫 번째 단계인 바스켓과 실린더의 파손 확률의 계산은 PSA의 Level 1에 해당하는 CDF(Core Damage Frequency)의 계산에 해당한다. 방사성 물질의 격납을 담당하는 바스켓과 실린더의 모델링을 통해 파손 확률을 정량적으로 계산하는 것이다.

두 번째 단계는 사용후핵연료 건식저장시설의 모델링이다. 이 단계에서는 건식저장시설에서 발생 할 수 있는 내부 사건과 외부 사건을 정량적으로 평가를 해 각 시나리오가 발생 할 수 있는 확률을 계산하는 것이다. 이 단계에서는 첫 번째 단계의 수행에서 나온 결과값을 통해 보다 정확한 사고발생 확률을 계산해 낼 수 있다.

세 번째 단계는 위의 경우에서 고려된 사고로 인한 피해가 어느 정도의 영향을 줄 수 있는가에 대한 평가이다. 따라서 건식저장시설 주위의 지형, 인구 분포, 기상 데이터 등의 고려를 통해 인근 주민 및 저장시설 근무자들에게 미칠 수 있는 방사성 피해를 정량적으로 평가 해 낼 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 제시하는 건식저장시설의 리스크를 평가하는 체계를 나타내고 있다.

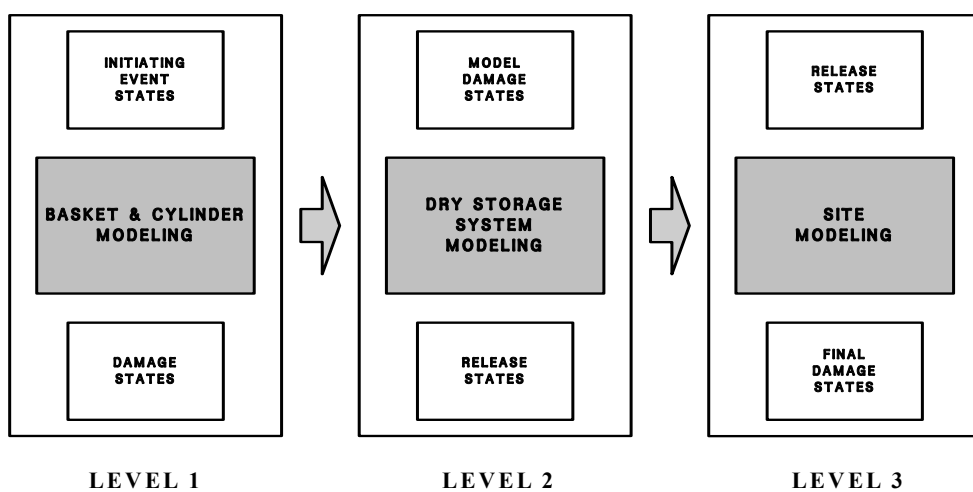


그림 1. 사용후핵연료 건식저장시설 안전성 평가 체계

3. 안전성 평가 방법

1. 바스켓 실린더 파손 모델링

사용후핵연료 건식저장시설 안전성 평가 체계의 첫 번째 단계는 방사선 물질 격납의 기본 요소인 바스켓과 실린더에 대한 평가이다. 기존의 안전성 평가의 수행에서는 각각의 사고 시나리오에서 이러한 요소들이 사고를 견디어 낼 수 있는지에 대한 평가를 하였다. 하지만 바스켓과 실린더의 파손 확률의 계산의 수행은 두 번째 단계인 건식저장시설 모델링에 사용해야 하는 중요 데이터이므로 정량적 계산이 수행 되어야 한다. 기본적으로 바스켓과 실린더의 파손 확률에 사용된 방법은 신뢰도 분야 및 재료 분야에서 고장율을 평가하는데 사용되는 스트레스 강도 간섭 이론을 적용하려고 한다. 간단히 스트레스 강도 간섭 이론을 설명하자면 어떠한 요소가 가질 수 있는 강도(최대수용량)와 가해질 수 있는 스트레스를 분포의 도출하여서 스트레스가 강도를 초과하는 부분의 확률을 정량적으로 계산해내어 고장율의 값을 도출 할 수 있다. 따라서 기본적으로 바스켓과 실린더의 재료에 해당하는 물질의 강도 내지는 최대수용량의 분포가 필요하고 바스켓 및 실린더에 가해지는 스트레스의 분포가 필요하다. 바스켓 및 실린더의 파손 확률의 계산에는 크게 3가지의 분포를 이용하는 것이 적합하다. 3가지의 분포로는 인성 피로, 인장 특성, 크리프(Creep) 파단 강도이다⁵⁾. 그림 2는 바스켓과 실린더 파손 확률 정량화에 사용된 모델을 나타낸다.

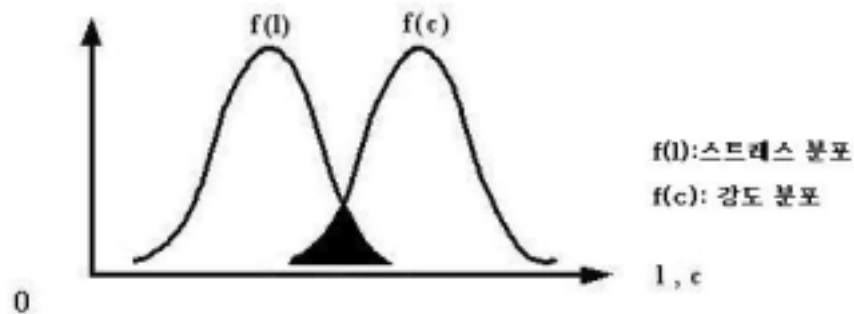


그림 2. Phase 1에 사용되는 스트레스 강도 간섭 모델

2. 건식저장시설 모델링

건식저장시설 모델링이란 개연성 있는 사고 시나리오들에 대한 확률론적 정량성 평가를 말한다. NUREG-1567⁶⁾에서의 기준 사고로는 캐스크 낙하, 홍수, 화재 및 폭발, 번개, 지진, 차폐체 상실, 온도 상승, 태풍 및 비산물등이 있다. 이 중 본 논문에서는 5가지의 중요 사건을 기준 사고로 상징 하였으며 각각에 대한 시나리오를 도출 하였다. 5가지 사고로는 공기 입구 막힘 사고, 지진 사고, 태풍에 의한 사고, 홍수에 의한 사고, 항공기 충돌에 의한 사고가 있다. 이러한 사고 시나리오를 바탕으로 각각의 사고 발생 확률을 정량적

으로 평가 할 수 있다. 하지만 이때 사고 시나리오의 노드를 이루는 요소들의 데이터들의 불확실성이 많으므로 각각의 데이터에 대한 분석이 필요하다⁷⁾. 따라서 베이지안 업데이트를 통해 좀더 개연성 있는 데이터의 정립이 수행 되어야 한다. 그림 3은 사고시나리오를 이루고 있는 공기 입구 막힘 사고에 관한 사고 수목(Event Tree)이다.

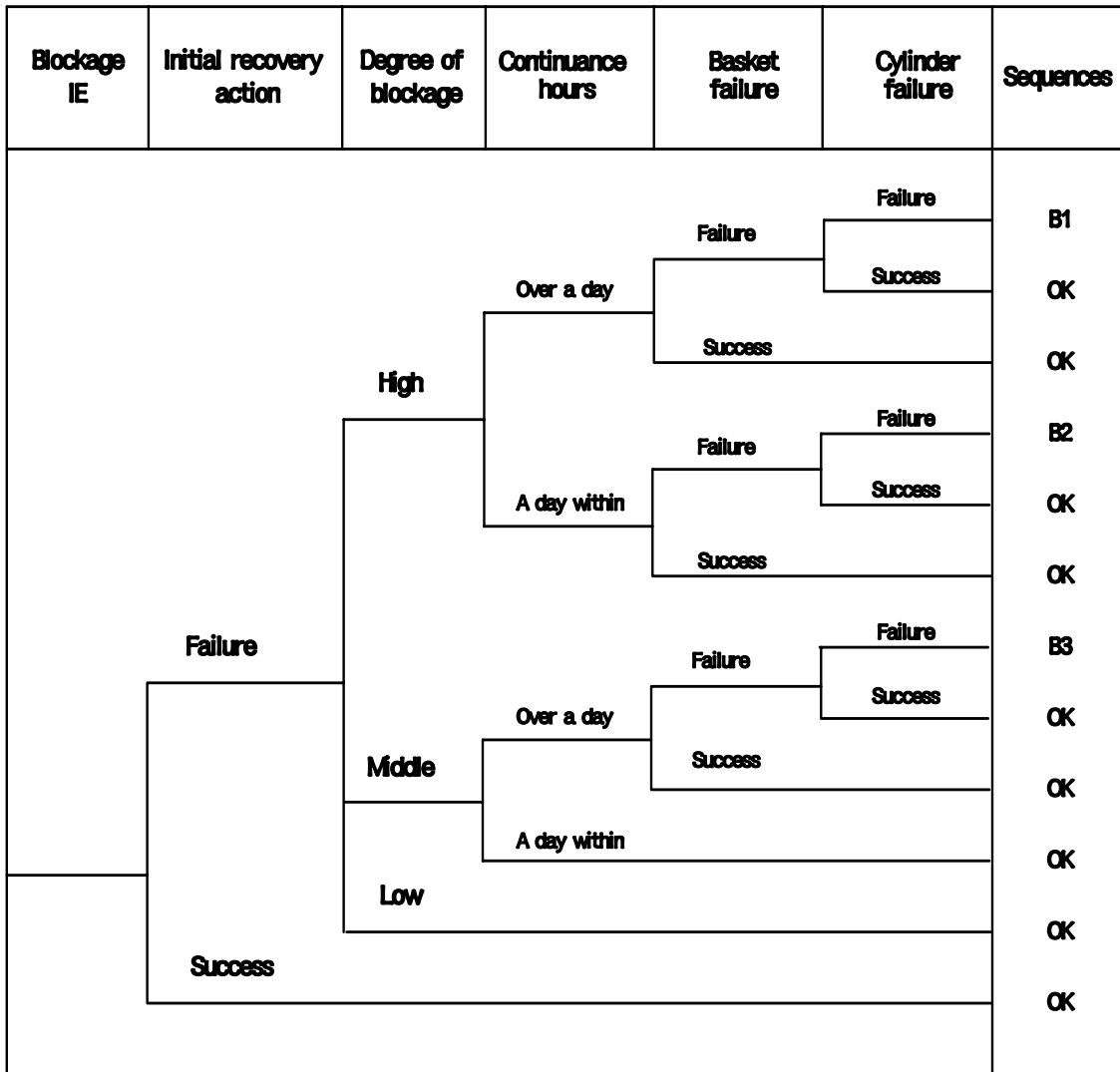


그림 3. Phase 2의 시스템 평가 모듈

3. 지역 모델링

원자력 발전소에 대한 PSA(Probability Safety Analysis)의 경우 3가지로 구분하여 마지막 단계에서는 방사성 물질 유출 시 그 영향에 대한 평가를 수행한다. 건식저장시설의 경우 설계적 특성으로 인해 방사성 물질이 유출 되었다고 해도 바스켓과 실린더 내의 압력이 대기압 정도이므로 내부의 방사성물질이 외부로 급격히 누출되지는 않는다⁸⁾. 하지만 방사성물질이 누출 될 수 있는 여지가 있으므로 결말분석의 수행이 요구 되어진다. 결말

분석에 사용할 코드는 MACCS이다. MACCS (MELCOR Accident Consequence Code System)는 누출된 방사성동위원소로 인해 야기되는 발전소 주변의 환경 및 인체에 미치는 영향을 평가하는 사고결말분석코드이다. MACCS는 미국 SNL(Sandia National Laboratory)에 의해서 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 중대사고 리스크 평가를 위해 개발된 코드이다. 이 코드는 전 세계적으로 광범위 하게 쓰이고 있으며, 모델 자체의 복잡함과 입력 자료의 방대함으로 인한 문제를 해결하기 위한 Benchmark 연구가 진행 중이며, 국제적으로 사용자 그룹도 구성되어 있다. 따라서 참조 시스템 주위의 지형 데이터와 기상 데이터, 인구 데이터에 대한 조사가 수행되어야 하고, 방출 분율과 바스켓 재고량에 대한 자료 수집이 선행되어야 한다. 이를 통해 건식저장시설의 방사성 물질 누출 사고에 대한 결말 분석을 수행 할 수 있다. 그림 4의 Source Term 평가에 본 연구의 주요한 불확실성이 존재하여 상세한 분석이 요구된다.

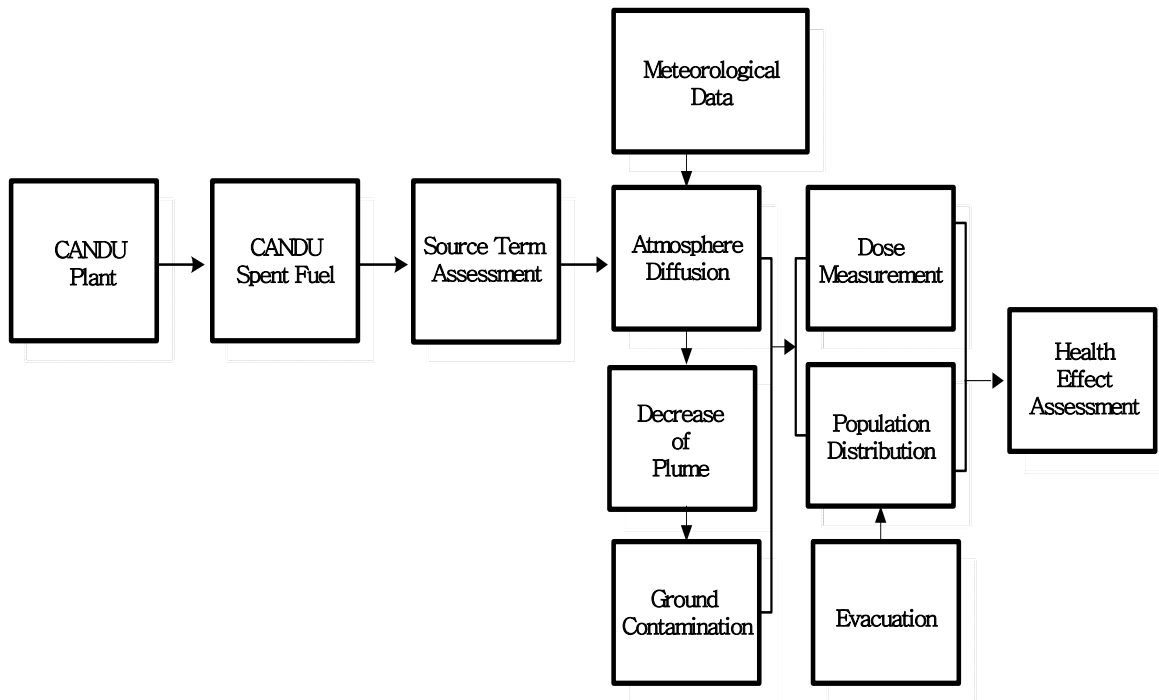


그림 4. Phase 3의 재난 평가 모듈

4. 결 론

원전의 지속적 운영으로 사용후핵연료의 양이 계속해서 늘어가고 있다. 따라서 사용후 핵연료 중간저장의 형태인 건식저장시설에 대한 추가 건설이 필요하다. 본 논문에서는 건식저장시설의 안전성 평가에 대한 개괄적인 체계를 수립하였다. 첫 번째로 바스켓 및 실

린더 파손 모델링이고 두 번째로 건식저장시설 모델링, 마지막으로 방사성 물질의 누출과 평가에 관련된 지역 모델링으로 나눌 수 있다. 이러한 방법을 통해 건식저장시설 자체의 사고 확률과 주위 주민에 대한 피해까지의 종합적인 안전성 평가를 수행 할 수 있는 건식저장시설의 위험도 평가 체계를 개발하였다. 특히 건식저장시설의 열적 안전성과 상관 관계를 가진 공기 입구 막힘 사고와 방사성물질이 누출 되었을 때 이를 계측하는데 실패 하는 사건에 대해 정량적 평가를 하였다. 이밖에도 사고의 개연성이 있는 지진, 항공기 충돌, 태풍에 대한 시나리오를 도출하였다. 그러나 경위의 정량화를 위한 데이터의 확보 수준은 미흡하다고 할 수 있다. 본 연구의 결과물은 앞으로 건설 예정에 있는 건식저장시설의 설계와 운영을 위한 예비 평가에 도움을 줄 수 있으리라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 중장기 연구사업(“방사선 안전규제 기술개발”)과 iTRS의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

1. Boris Gnedenko, Igor Ushakov and James Falk, "Probabilistic Reliability Engineering", JOHN WILEY & SONS (1995)
2. Finn V. Jensen, "Bayesian Networks and Decision Graph", Springer (2001)
3. D. I. Chanin, J. L. Sprung, L. T. Richie, and H. N. Jow, "MELCOR Accident Consequence Code System(MACCS)", NUREG/CR-4691, SAND86-1562, Sandia National Laboratories, February (1990)
4. 과학 기술처, 원자력 백서 (2003)
5. Cayetano Santos, Douglas Kalinousky, Christopher Ryder, Lee Abramson, Syed Shaukat, Jason Schaperow, and Alan Rubin, "A Probabilistic Failure Assessment of a Dry Cask Storage System", Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) (2003)
6. U. S. Nuclear Regulatory Commission, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities,, NUREG- 1567, (2000)
7. 한국원자력연구소. 원자력환경관리센터, "사용후핵연료 관리기술 개발 : 사용후핵연료 저장기술 개발", KAERI-NEMAC/RR-157/95 (1995)

8. 한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 고연소도 PWR 사용후연료 건식저장 기술개발 (2003)
9. Seok Won Hwang, Moosung Jae, "A Study on Risk and Organ Dose Assessments Using the MACCS Code During Severe Accident in a Nuclear Power Plant", Proceeding of ISORD-2, Tohoku Univ, Sendai, Japan, (2003)