

원자력발전소 정지저출력 운전 기간의 물리적방호를 위한 핵심구역파악

곽명웅* · 정우식**† · 이정호*** · 백민***

Vital Area Identification for the Physical Protection of Nuclear Power Plants during Low Power and Shutdown Operation

Myung Woong Kwak* · Woo Sik Jung**† · Jeong-ho Lee*** · Min Baek***

†Corresponding Author

Woo Sik Jung

Tel : +82-2-3408-4413

E-mail : woosjung@sejong.ac.kr

Received : October 10, 2019

Revised : November 28, 2019

Accepted : February 4, 2020

Abstract : This paper introduces the first vital area identification (VAI) process for the physical protection of nuclear power plants (NPPs) during low power and shutdown (LPSD) operation. This LPSD VAI is based on the 3rd generation VAI method which very efficiently utilizes probabilistic safety assessment (PSA) event trees (ETs). This LPSD VAI process was implemented to the virtual NPP during LPSD operation in this study. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) had developed the 2nd generation full power VAI method that utilizes whole internal and external (fire and flooding) PSA results of NPPs during full power operation. In order to minimize the huge burden of the 2nd generation full power VAI method, the 3rd generation full power VAI method was developed, which utilizes ETs and minimal PSA fault trees instead of using the whole PSA fault tree. In the 3rd generation full power VAI method, (1) PSA ETs are analyzed, (2) minimal mitigation systems for avoiding core damage are selected from ETs by calculating system-level target sets and prevention sets, (3) relatively small sabotage fault tree that has the systems in the shortest system-level prevention set is composed, (4) room-level target sets and prevention sets are calculated from this small sabotage fault tree, and (5) the rooms in the shortest prevention set are defined as vital areas that should be protected. Currently, the 3rd generation full power VAI method is being employed for the VAI of Korean NPPs. This study is the first development and application of the 3rd generation VAI method to the LPSD VAI of NPP. For the LPSD VAI, (1) many LPSD ETs are classified into a few representative LPSD ETs based on the functional similarity of accident scenarios, (2) a few representative LPSD ETs are simplified with some VAI rules, and then (3) the 3rd generation VAI is performed as mentioned in the previous paragraph. It is well known that the shortest room-level prevention sets that are calculated by the 2nd and 3rd generation VAI methods are identical.

Key Words : vital area identification, physical protection, low power and shutdown, nuclear power plant

Copyright©2020 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

1.1 VAI 기술 개발 현황

2001년 9월 11일에 미국에서 발생한 테러 이후 전 세계적으로 사보타주의 증가와 점점 더 치밀해지고 의

도적인 인적 위협으로 인하여 다양한 산업시설에 대한 물리적방호(Physical Protection)에 많은 관심을 가지게 되었다. 특히, 원자력발전소에서 잠재적인 공격 대상을 정의하는 것은 물리적방호 설계에 중요한 정보를 제공하는 역할을 한다¹⁾.

*세종대학교 원자력공학과 석사과정 (Department of Nuclear Engineering, Sejong University)

**세종대학교 원자력공학과 교수 (Department of Nuclear Engineering, Sejong University)

***한국원자력통제기술원 연구원 (Korea Institute of Nuclear Nonproliferation and Control)

Table 1. Comparison of VAI methods by generation

VAI method	The method to build a sabotage fault tree			NPP operation status	
	Sabotage fault that has room failures	PSA model reuse	Level of burden	Full power	LPSD
1st generation	Built directly without PSA model	No	Heavy	Ref. ^{5,6)}	N/A
2nd generation	Built from the full PSA model	Yes	Medium	Ref. ⁷⁻¹⁰⁾	N/A
3rd generation	Built from minimal systems in PSA ETs	Yes	Light	Ref. ^{13,14)}	This study

원전의 사보타주는 중요 기기 또는 격실 파손을 유발하기 위한 인위적인 공격을 의미한다. 핵심구역파악(Vital Area Identification: VAI) 방법으로 사보타주로부터 보호받아야 할 격실들을 핵심구역으로 선정하고 보호한다.²⁾ 사보타주로 인해 고준위방사능사고(High Radiological Consequence)를 직접적 또는 간접적으로 유발할 수 있는 기기, 계통, 그리고 핵물질을 가진 구역을 핵심구역으로 정의한다¹⁾. 핵심구역파악은 격실과 괴를 기본사건으로 하는 사보타주 고장수목을 작성하고, 사보타주 고장수목에서 공격집합들(Target Sets)을 계산하고, 공격집합들에서 저지집합들(Prevention Sets)을 계산하고, 저지집합 가운데 가장 효율적으로 물리적 방호설계가 수행될 수 있는 하나의 저지집합의 격실들을 핵심구역으로 설정하고 보호하는 작업이다. 원자력발전소에서의 핵심구역파악은 노심손상에 기인한 방사선 피폭에 의하여 대중을 위협에 노출될 수 있도록 하는 행위를 방지하기 위해서 보호하여야 하는 원자력 시설의 격실을 식별하는 과정이다^{3,4)}.

핵심구역을 파악하는 방법은 이전 세대의 단점을 보완하며, 더욱 효율적으로 수행될 수 있도록 개선되어 왔다. 각 세대별 핵심구역 파악 방법을 비교하면 아래의 Table 1과 같다.

1세대 핵심구역파악 방법은 미국의 Sandia National Labs.에서 개발하였다^{5,6)}. 이 방법은 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 결과를 변환하여 사용하지 않고, 격실파손을 기본사건으로 하여 노심손상을 유발하는 사보타주 고장수목(Sabotage Fault Tree)을 직접 생성하여 핵심구역을 파악한다. 사보타주 고장수목으로부터 공격집합을 계산하고, 공격집합으로부터 저지집합을 계산하고, 저지집합들 중에 가장 저비용으로 지킬 수 있는 하나의 저지집합을 선택하고, 이 선택된 저지집합의 격실들을 핵심구역들로 선정하는 과정이다.

2세대 핵심구역파악 방법은 전출력 PSA 결과를 변환하여 핵심구역을 파악한다⁷⁻¹⁰⁾. 1세대 핵심구역파악 방법은 사보타주 고장수목을 생성하는데 불확실성이 크고, 원전 친숙화와 기기 및 격실의 정보 등을 취득하는데 많은 시간을 소비할 수밖에 없다. 이러한 문제점

을 보완하기 위하여 한국원자력연구원에서는 전출력 PSA 결과를 활용하여 사보타주 고장수목을 생성한다. 외부사건(화재, 침수) PSA에서 생성된 기기고장 기본사건과 격실과의 매핑정보를 이용하여, Vital area Identification Package EXpert(VIPEX) S/W¹¹⁾가 전출력 PSA 노심손상 고장수목의 기기 고장 기본사건을 격실 파손으로 교체하여 사보타주 고장수목을 생성하고, Fault Tree Reliability EXpert(FTREX) S/W¹²⁾가 사보타주 고장수목에서 공격집합과 저지집합을 계산한다. 공격집합과 저지집합은 PSA의 최소단절집합(Minimal Cut Set)과 최소성공집합(Minimal Path Set)과 동일한 개념이다.

3세대 핵심구역파악 방법은 PSA 사건수목(Event Tree: ET)을 단순화하여 핵심구역을 계산한다^{13,14)}. 2세대 핵심구역파악 방법은 전체 PSA 고장수목의 기본사건을 격실파손 기본사건으로 교체하여 사보타주 고장수목을 생성한다. 사보타주 고장수목의 크기가 방대하여 이의 개발에 많은 자원이 소요되며, 정량화를 통하여 충분한 공격집합과 저지집합의 계산이 불가능한 경우가 발생할 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 PSA 사건수목을 기반으로 한 3세대 핵심구역파악 방법을 개발하였다¹³⁾. 전출력 운전 기간 동안의 사건수목 기반의 핵심구역파악 방법에서는 (1) 핵심구역 파악 규칙(2.3절 참조)을 적용하여 사보타주에 의해 손상되지 않는 계통을 사건수목에서 미리 제거하고, (2) 단순화된 사건수목으로부터 계통수준의 공격집합과 저지집합을 계산하고, (3) 계통수준의 저지집합들 중에 가장 짧은 저지집합을 선택하여 이 저지집합에 속한 계통 고장수목들의 기기 고장을 격실 파손으로 변환하여 사보타주 고장수목을 생성한다. (4) 격실수준의 공격집합과 저지집합을 계산한다. 계산된 저지집합들 중에 가장 저비용으로 지킬 수 있는 하나의 저지집합을 골라 이 안의 격실들을 핵심구역으로 선정하여 보호한다. 본 방법은 전체 PSA 결과를 직접 활용한 핵심구역파악 방법에 비하여 매우 효율적으로 원자력발전소의 핵심구역을 식별할 수 있다. 결과적으로 PSA 결과를 직접 활용한 핵심구역파악 방법과 비교하면, 공격집합은 다르지만 저지집합은 같다는 결과를 얻을 수 있다¹³⁾.

현재 한국수력원자력(주)에서는 이 3세대 핵심구역 파악 방법을 이용하여 국내 원전의 전출력 핵심구역을 재선정 중이다.

1.2 본 연구의 목적 및 구성

지금까지 1, 2, 3세대 핵심구역파악 방법은 전출력 운전 기간에만 적용하여 분석되었다. 현재 한국수력원자력(주)은 전출력 운전 기간의 국내 모든 호기의 핵심구역을 재선정 중이다. 그 결과를 한국원자력통제기술원이 규제 중이고, 향후에는 원자력발전소의 운전 조건을 반영한 정지저출력(Low Power and Shutdown: LPSD) 핵심구역을 사업자에 요구할 계획이다. 본 연구는 최초로 정지저출력 운전 기간에 대하여 3세대 핵심구역파악 방법을 적용한 연구로써 향후 한국원자력통제기술원이 앞으로 수행할 규제연구의 중요한 근거가 될 것으로 예상된다.

처음으로 3세대 핵심구역파악 방법을 정지저출력 운전에 적용한 본 논문에서는 (1) 정지저출력 운전의 특성을 기술하였고(2장 참조), (2) 정지저출력 운전 기간에 대한 원자력발전소의 다양한 운전 상태(Plant Operational States: POS)가 반영된 사건수목 기반의 핵심구역파악 방법을 적용하여 효율적인 핵심구역파악 절차를 제시하였고(2장 참조), (3) 정지저출력 운전 시 핵심구역파악을 위한 절차의 효용성을 입증하기 위해 공격집합과 저지집합을 계산하고, 최종적으로 핵심구역을 계산해 내는 과정을 기술하였다(3장 참조).

2. LPSD VAI 방법 개발

2.1 LPSD PSA

전출력 PSA에서는 발전소 상태를 100% 전출력 운전으로 가정하고 분석을 진행하지만 정지저출력 PSA에서는 분석해야 할 발전소 운전 상태 및 배열이 계획 예방정비 공정에 따라 다양하다. 따라서 원자로 정지 후나 일정 출력 이하의 저출력 운전 중에 발생 가능한 초기사건들을 분석한다. 정지저출력 운전 중 원자로 정지는 운전 중 불시 정지된 후 짧은 시간 동안 정지 상태를 유지한 후 재가동 되는 정지가 아닌 핵연료 재장전이나 1차측 기기의 정비를 위한 정지와 같이 장시간 동안 원자로를 정지 상태로 유지하는 것이다. 저출력 운전도 원자로를 정지 또는 기동시키기 위해 원자로 출력을 증가/감소시키는 과정에서 일정 출력 이하의 운전 상태를 의미한다.

정지저출력 PSA에서는 발전소의 여러 계통의 운전 상태가 달라지기 시작하는 운전 상태를 정지저출력 운

Table 2. Plant operational states (POS)

POS	POS Description
POS 1	Low power and reactor shutdown
POS 2	Cooldown with SG from operating temp to 350°F
POS 3	Cooldown with SCS from 350°F temp to 210°F
POS 4	Draining RCS to 1st mid-loop operation
POS 5	1st mid-loop operation
POS 6	Fill for refueling
POS 7	Carry out the fuel
POS 8	Drain for maintenance
POS 9	Refueling
POS 10	Draining RCS to 2nd mid-loop operation
POS 11	2nd mid-loop operation
POS 12	Refill for power operation
POS 13	RCS heatup to 350°F
POS 14	RCS heatup with SGs available above 350°F
POS 15	Startup and low power operations

전 상태의 기준으로 한다. 원자력발전소의 정지저출력 운전 상태는 Table 2와 같다¹⁵⁾.

위에서 제시된 정지저출력 운전 상태 가운데 POS 1, 2, 14, 15는 발전소가 출력운전(저출력) 중이므로 발생 가능한 초기사건 및 이를 완화하기 위하여 요구되는 계통이 전출력 운전 상태와 동일하다. 따라서 전출력 운전에 대한 핵심구역파악 분석을 통하여 계산한 결과를 동일하게 적용하면 된다. POS 7, 8, 9는 원자로 노심에 핵연료가 모두 사용 후 핵연료 저장조로 이송되어 존재하지 않은 상태이므로 현재 정지저출력 PSA에서는 분석대상이 아니다. 따라서 PSA 모델 및 결과를 기본으로 수행하는 본 핵심구역파악 분석에서도 해당 POS는 분석대상이 아니다. 향후 사용 후 연료 저장조에 대한 PSA가 수행되는 경우, 이를 고려하여 핵심구역파악 분석이 필요할 것으로 판단된다.

2.2 LPSD VAI를 위한 가정 사항

가상 원전의 정지저출력 운전 상태에서 핵심구역파악 분석을 위하여 적용한 가정 사항을 아래에 기술하였다. 본 가정 사항은 핵심구역을 파악할 때 일반적으로 적용되는 개념이다. 본 연구인 정지저출력 핵심구역파악에도 아래의 가정 사항을 사용한다.

(가정 1) 미국 10CFR73.55에 따르면 원자력발전소의 주제어실(Reactor Control Room), 사용 후 연료 저장조(Spent Fuel Pool), 중앙 경보시스템 관리소(Central Alarm Station), 보조 경보시스템 관리소(Secondary Alarm Station) 네 개의 격실이나 빌딩은 반드시 핵심구역으로 지정되어야 한다고 명시되어 있다. 이들 핵심

구역에 PSA 기반의 방법을 적용한 핵심구역을 추가로 선정하게 된다.

(가정 2) 사보타주 발생하는 경우 소외전원은 상실을 가정하여 단기간에 전원복구가 불가능한 것으로 가정한다.

2.3 LPSD VAI를 위한 규칙

서론에서 기술한 바와 같이 가상 원전의 정지저출력 운전 기간 중 핵심구역파악 분석을 위하여 이미 개발된 3세대 핵심구역파악 방법을 적용하였다. 3세대 핵심구역파악 방법에서 핵심구역 파악의 단순화를 위한 기본 규칙은 아래와 같다. 본 분석을 위하여 이미 개발된 아래의 기본 규칙을 재사용하였다¹³⁾.

(규칙 1) 사보타주로 손상된 격실의 기기가 파손되면, 기기고장을 격실파손으로 교체하여 사보타주 고장수목에 포함한다.

(규칙 2) 사보타주로 손상된 격실의 기기가 Random하게 고장 나면, 기기고장을 사보타주 고장수목에서 제외한다. 즉, 사보타주에 직접적으로 영향 받는 기기 고장만을 고려한다.

(규칙 3) 사보타주로 손상된 격실의 기기가 Fail-safe 방향으로 작동하면, 기기고장을 사보타주 고장수목에서 제외한다.

(규칙 4) 확률적으로 전파되는 사건(화재나 침수 등)은 사보타주 고장수목에서 제외한다. 즉, 사보타주에 직접적으로 영향 받는 기기고장만을 고려한다.

(규칙 2)는 확률적으로 발생하는 기본사건에 해당한다. 예를 들면, 운전원의 조치 실패나 공통원인고장이 있다. (규칙 2)를 사보타주 고장수목에 적용하는 방법은 해당하는 기본사건들을 삭제하거나, False로 처리하면 된다. (규칙 4)를 사보타주 고장수목에 적용하는 방법은 기기고장과 격실파손의 매핑 작업 시 이웃 격실로 전파되는 시나리오를 제외시키면 된다.

2.4 사건수목을 이용한 LPSD VAI

정지저출력 운전 기간 중의 핵심구역파악 방법은 다양한 운전 상태에 해당하는 각 초기사건별 사건수목으로부터 계통수준의 공격집합과 저지집합을 계산한다. 이 때, 정지저출력 PSA 초기사건 가운데 사보타주에 의하여 발생이 불가능한 초기사건을 제외한 나머지 사건수목으로부터 사건수목 계통수준의 공격집합과 저지집합을 계산한다. 정지저출력 운전 기간 중의 사건수목을 이용한 핵심구역파악 절차는 다음과 같다.

(단계 1) 사고완화에 사용되는 설비의 기능적 동일성을 기준으로 M개의 사건수목을 N개로 그룹화하고,

N개의 사건수목에 핵심구역파악 규칙¹³⁾을 적용하여 단순화 작업을 수행한다(3.1절 참조).

(단계 2) 단순화 된 사건수목의 계통수준의 공격집합과 저지집합을 계산한다(3.2절 참조).

(단계 3) 계통수준의 저지집합들 중에서 가장 짧은 저지집합을 선택하여, 이 선택된 하나의 저지집합에 속한 계통들의 고장수목의 기기 고장을 격실 파손으로 변환하여 사보타주 고장수목을 생성한다(3.3절 참조).

(단계 4) 이 사보타주 고장수목에서 격실수준의 공격집합과 저지집합을 계산한다. 계산된 저지집합들 중에 가장 저비용으로 지킬 수 있는 하나의 저지집합을 선택하고 이 선택된 하나의 저지집합에 속한 격실들을 최종 핵심구역으로 선정하고 보호한다(3.4절 참조).

3. 개발된 LPSD VAI 방법의 적용

3.1 (단계 1) LPSD PSA 그룹화 및 단순화

정지저출력 운전 기간 중에는 다수의 발전소 운전 상태별 다양한 초기사건이 존재한다. 본 연구에서는 정지저출력 운전 기간 중 사건수목을 이용한 핵심구역 파악 절차를 통하여 핵심구역을 계산해 내고, 계산된 핵심구역만 원전의 사보타주로부터 방어하면, 모든 정지저출력 운전 상태에서 노심손상이 발생하지 않도록 방지하는데 그 목적이 있다.

정지저출력 운전 기간 중 발생 가능한 초기사건은 발전소의 특성에 따라 다양하다. 본 논문에서는 정지저출력 운전 기간 동안 소외전원 상실사고(Loss of Off-site Power: LOOP), 기기냉각수 한 계열 상실사고(Partial Loss of Component Cooling Water: PLOCCW), 1E급 4.16 kV 교류모선 상실사고(Loss of class 1E 4.16 kV: LOKV), 정지냉각기능 상실사고(Loss of Shutdown Cooling System: LOSCS), 회수불능 냉각재 상실사고(Unrecoverable Loss of Coolant Accident: LOCA-U), 기기냉각수 완전상실사고(Total Loss of Component Cooling Water: TLOCCW)가 발생 가능하다고 가정하였다.

발생 가능한 모든 초기사건의 사건수목을 분석하여 핵심구역을 파악할 수도 있지만, 정지저출력 운전 기간 중 핵심구역파악 (단계 1)을 위의 초기사건들의 사건수목에 적용하여 분석을 수행한다. 분석 대상 초기사건에 대하여 사고경위의 동일성 즉, 사고완화에 사용되는 설비의 기능적 동일성을 기준으로 초기사건을 분류한다. 정지저출력 운전 기간 동안 모든 운전 상태의 사건수목 계통 수준에서 소외전원 상실사고가 기기냉각수 한 계열 상실사고, 1E급 4.16 kV 교류모선 상실사고, 정지냉각기능 상실사고를 대표한다. 그 이유는,

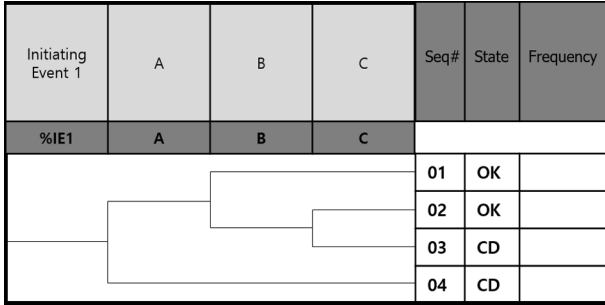


Fig. 1. IE1 event tree.

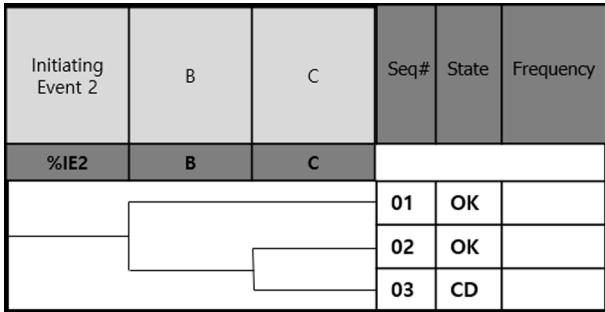


Fig. 2. IE2 event tree.

나머지 초기사건의 공격집합이 소외전원 상실사고의 공격집합의 부분집합이므로, 나머지 초기사건을 대표하여 소외전원 상실사고만 분석하면 된다. 초기사건을 분류하여 그룹화 하는 작업에 관한 설명을 위해 Fig. 1 과 같은 IE1 초기사건의 사건수목과 Fig. 2와 같은 IE2 초기사건의 사건수목을 생성하였다.

IE1 초기사건의 사고완화 설비는 A, B, C이고, IE2 초기사건의 사고완화 설비는 B, C이다. 두 초기사건의 공격집합을 비교하면, IE1의 공격집합은 A 혹은 B * C 이고, IE2의 공격집합은 B * C이다. IE2의 공격집합이 IE1의 공격집합에 포함된다. 결과적으로 IE1과 IE2를 그룹화 하여 초기사건 IE1의 사건수목만 대표적으로 분석하면 된다.

소외전원 상실사고에 포함되지 않는 회수불능 냉각재 상실사고, 기기냉각수 완전상실사고의 사건수목은 별도로 분석을 수행한다. 정지저출력 운전 기간 중 핵심구역파악 (단계 1)을 위의 초기사건들의 사건수목에 적용한 결과, 6개의 초기사건 중 3개의 초기사건만 분석하면 모든 운전 상태에서의 핵심구역을 파악할 수 있다. 실제 핵심구역파악에서는 3개의 초기사건을 모두 분석하여 핵심구역을 선정한다. 본 논문에서는 3개의 초기사건 중 소외전원 상실사고와 기기냉각수 완전상실사고의 사건수목에 대해서만 분석을 수행하여 핵심구역을 파악하였다.

실제 원전의 정지저출력 운전 기간 중에는 POS 1, 2,

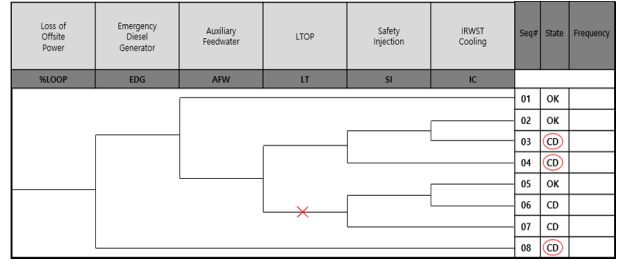


Fig. 3. LOOP event tree (POS 3).

7, 8, 9, 14, 15를 제외한 모든 발전소 운전 상태를 고려하여야 하겠지만, 본 논문에서는 보조급수계통이 사용 가능한 발전소 운전 상태인 POS 3과 보조급수계통이 사용 불가능한 발전소 운전 상태인 POS 5에 대한 사건수목을 구성하여 분석하였다.

첫 번째 그룹의 대표 초기사건은 소외전원상실사고이다. Fig. 3은 POS 3의 소외전원상실사고 사건수목이다.

본 사건수목의 표제 LT는 앞에서 제시된 정지저출력 운전 기간 중의 사건수목을 이용한 2.3절의 핵심구역파악 (규칙 2)의 적용이 가능하다. LTOP(Low Temperature Overpressure Protection) 밸브의 개방고착은 기기의 무작위적 고장이므로 사보타주에 의한 기능의 즉각적인 손상이 불가능하다. 위의 사건수목에서 LT는 성공으로 처리 후 분석하면, 노심손상이 발생하는 사고경위번호는 3, 4, 8임을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 POS 5의 소외전원상실사고 사건수목이다.

POS 5의 소외전원상실사고는 핵심구역파악 규칙의 적용이 필요하지 않으므로, 단순화 작업이 불필요하다.

두 번째 그룹의 대표 초기사건은 기기냉각수 완전상실사고이다. Fig. 5는 POS 3의 기기냉각수 완전상실사고 사건수목이다.

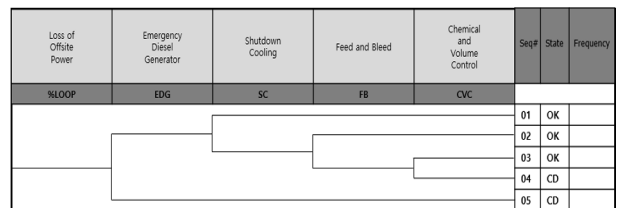


Fig. 4. LOOP event tree (POS 5).

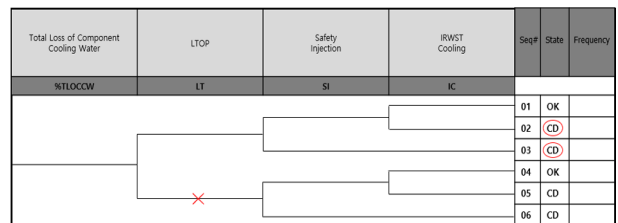


Fig. 5. TLOCCW event tree (POS 3).

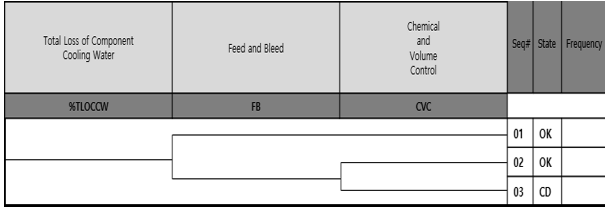


Fig. 6. TLOCCW event tree (POS 5).

본 사건수목의 표제 LT는 앞에서 제시된 정지저출력 운전 기간 중의 사건수목을 이용한 2.3절의 핵심구역과 약 (규칙 2)의 적용이 가능하다. LTOP 밸브의 개방고착은 기기의 무작위적 고장이므로 사보타주에 의한 기능의 즉각적인 손상이 불가능하다. 위의 사건수목에서 LT는 성공으로 처리 후 분석하면, 노심손상이 발생하는 사고경위번호는 2, 3임을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 POS 5의 기기냉각수 완전상실사고 사건수목이다.

POS 5의 기기냉각수 완전상실사고는 핵심구역과 약 규칙의 적용이 필요하지 않으므로, 단순화 작업이 불필요하다.

3.2 (단계 2) 사건수목 계통수준의 공격집합 및 저지집합 계산

첫 번째 초기사건 그룹(소외전원 상실사고)에 대하여, 사보타주에 의해 발생 가능한 PSA 사건수목 계통수준의 공격집합을 계산한다. POS 3의 소외전원상실 사고에 해당하는 Fig. 3의 계통수준의 공격집합은 아래의 Table 3과 같다.

Table 3. Target sets of LOOP event tree (POS 3)

No.	Initiating event	System 1	System 2
1	%LOOP	EDG	
2	%LOOP	AFW	SI
3	%LOOP	AFW	IC

POS 5의 소외전원상실사고에 해당하는 Fig. 4의 계통수준의 공격집합은 아래의 Table 4와 같다.

Table 4. Target sets of LOOP event tree (POS 5)

No.	Initiating event	System 1	System 2	System 3
1	%LOOP	EDG		
2	%LOOP	SC	FB	CVC

POS 3의 기기냉각수 완전상실사고에 해당하는 Fig. 5의 계통수준의 공격집합은 아래의 Table 5와 같다.

Table 5. Target sets of TLOCCW event tree (POS 3)

No.	Initiating event	System
1	%TLOCCW	IC
2	%TLOCCW	SI

POS 5의 기기냉각수 완전상실사고에 해당하는 Fig. 6의 계통수준의 공격집합은 아래의 Table 6과 같다.

Table 6. Target sets of TLOCCW event tree (POS 5)

No.	Initiating event	System 1	System 2
1	%TLOCCW	FB	CVC

Table 3, 4, 5, 6의 공격집합을 모두 합치면 아래의 Table 7과 같다.

Table 7. Target sets of LOOP and TLOCCW event trees

No.	Initiating event	System 1	System 2	System 3
1	%LOOP	EDG		
2	%LOOP	AFW	SI	
3	%LOOP	AFW	IC	
4	%LOOP	SC	FB	CVC
5	%TLOCCW	IC		
6	%TLOCCW	SI		
7	%TLOCCW	FB	CVC	

정지저출력 운전 시 핵심구역과 약을 위한 (가정 2)를 적용하면, 사보타주에 의한 발전소 손상 시 소외전원상실이 항상 발생하므로 %LOOP는 TRUE로 설정하여야 한다.

기기냉각수계통(Component Cooling Water System)이 많은 격실을 지나가기 때문에 이 모든 격실을 물리적으로 방호할 수 없다. 또한 기기냉각수계통과 이를 보조하는 기기냉각해수 계통, 이의 보조를 받는 냉수계통 및 공조계통이 설치된 구역을 모두 핵심구역으로 선정하여 물리적방호를 수행하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이 이유로 (1) %TLOCCW 초기사건은 기본적으로 발생한다고 가정한다. (2) 기기냉각수계통은 기본적으로 실패한다고 가정한다. (3) 보조급수계통(Auxiliary Feedwater System)의 기기냉각수계통의 냉각을 필요로 하는 펌프는 사용이 불가능하고 보조급수계통의 터바인구동펌프(Turbine Driven Pump)는 사용이 가능하다고 가정한다. (4) 기기냉각수계통의 냉각을 필요로 하는 비상디젤발전기(Emergency Diesel Generator: EDG)는 실패한다고 가정한다.

많은 격실을 지나가는 기기냉각수계통의 물리적방

호가 불가능하다고 가정하였으므로, 기기냉각수계통의 냉각기능이 필요한 EDG는 기본적으로 물리적방호가 불가능하다. 대신 자체 냉각이 가능한 대체교류발전기 (Alternate AC Power: AAC)가 있는 발전소라고 가정하면 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$EDG \Rightarrow AAC \quad (1)$$

Table 7에서 정지냉각(Shutdown Cooling: SC) 계통 또는 안전주입(Safety Injection: SI) 계통을 이용하여 주입 및 방출(Feed and Bleed: FB) 운전을 수행한다. 그래서 FB는 SC * SI로 교체할 수 있다.

$$FB \Rightarrow SC * SI \quad (2)$$

그리고 정지냉각(SC) 계통을 사용하여 원자로건물 내장전수탱크(In-containment Refueling Water Storage Tank: IRWST) 냉각(IC)을 수행한다. 그러므로 IC는 SC로 교체할 수 있다.

$$IC \Rightarrow SC \quad (3)$$

위의 분석 내용을 적용하면 Table 7의 공격집합들이 아래 Table 8과 같이 변환된다.

Table 8. Target sets of LOOP and TLOCCW event trees

No.	System 1	System 2	System 3
1	AAC		
2	AFW	SI	
3	AFW	SC	
4	SC	SC*SI	CVC
5	SC		
6	SI		
7	FB	CVC	

Table 8의 공격집합들에서 Subsuming을 수행한다. Superset에 속한 Subset을 제거하는 과정이다. 예를 들어, Subset AFW * SI는 Superset SI의 부분집합으로 미리 제거한다. 이러한 Subsuming을 적용한 최종 계통수준의 공격집합은 아래의 Table 9와 같다.

Table 9. Target sets (system level)

No.	System
1	AAC
2	SC
3	SI

위에서 계산한 Table 9의 계통수준의 공격집합으로부터 계통수준의 저지집합을 계산하면 아래의 Table 10과 같다.

Table 10. Prevention sets (system level)

No.	System 1	System 2	System 3
1	/AAC	/SC	/SI

계통수준의 저지집합들이 한 개 이상인 경우, 가장 경제적인 하나의 계통수준의 저지집합을 선정하여 다음 3.3절의 (단계 3)의 절차를 수행한다.

3.3 (단계 3) 사보타주 고장수목 생성

사보타주 고장수목 생성에 대한 설명을 위해 Fig. 7과 같이 가상의 원전을 생성하였다. 실제의 원자력발전소에서는 다양한 발전소 상태가 존재하고 그에 따라서 고장수목의 모델이 다양하다. 본 논문에서는 정지저출력 운전의 발전소 상태 중 한 가지로 가정하여 사보타주 고장수목을 생성하였다.

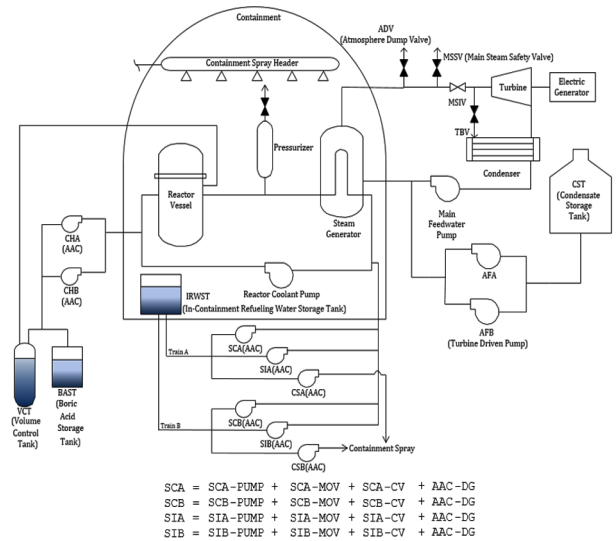


Fig. 7. Virtual nuclear power plant for LPSD VAI.

정지저출력 운전 기간 중 3.2절의 최종 저지집합에 해당하는 정지냉각계통과 안전주입계통만을 지키면 원전의 사보타주로부터 노심손상을 방지할 수 있다. 결과적으로 정지냉각계통과 안전주입계통을 OR 논리로 연결한 고장수목으로부터 사보타주 고장수목을 만들 수 있다. 정지냉각계통과 안전주입계통을 OR 논리로 연결한 고장수목은 Fig. 8과 같다. 이 고장수목의 기본사건들을 Table 11의 매핑된 격실들로 대체하면 Fig. 9의 사보타주 고장수목을 생성할 수 있다.

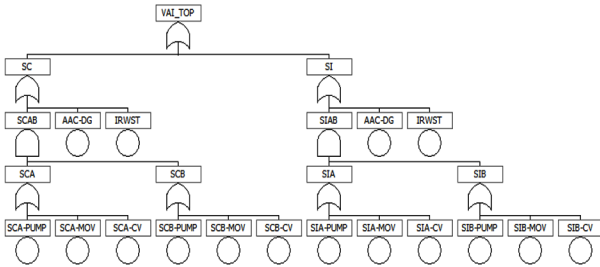


Fig. 8. Fault tree for shutdown cooling (SC) system and safety injection (SI) system.

Table 11. Mapping components to rooms

Rooms	Components
R1	SCA-PUMP
R2	SCA-MOV, SCA-CV
R3	SCB-PUMP
R4	SCB-MOV, SCB-CV
R5	SIA-PUMP, SIA-MOV, SIA-CV
R6	SIB-PUMP, SIB-MOV, SIB-CV
R7	AAC-DG
R8	IRWST

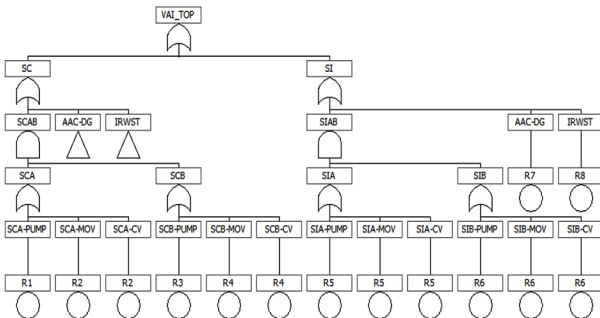


Fig. 9. Sabotage fault tree.

3.4 (단계 4) VAI 결과

Fig. 9의 사보타주 고장수목을 계산하면 Table 12의 격실수준의 공격집합과 Table 13의 저지집합을 계산할 수 있다. 격실수준의 저지집합들 중에 가장 경제적인

Table 12. Target Sets (room level)

No.	Room 1	Room 2
1	R7	
2	R8	
3	R1	R3
4	R1	R4
5	R2	R3
6	R2	R4
7	R5	R6

Table 13. Prevention Sets (room level)

No.	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5
1	R1	R2	R5	R7	R8
2	R1	R2	R6	R7	R8
3	R3	R4	R5	R7	R8
4	R3	R4	R6	R7	R8

로 물리적방호가 가능한 하나의 저지집합을 선정하고, 이 저지집합에 속한 격실을 핵심구역으로 선정하고 물리적방호를 수행하면 사보타주로부터 노심손상을 방지할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 최초로 정지저출력 운전 기간에 대하여 3세대 핵심구역파악 방법인 사건수목기반의 핵심구역파악 방법을 사용하여 가상의 원자력발전소에 적용하였다.

본 논문에서는 정지저출력 운전의 특성을 설명하고, 정지저출력 운전 기간 중 가상의 사건수목을 이용하여 가상 원전에 대한 핵심구역파악 절차를 적용하여, 사건수목 계통수준의 공격집합과 저지집합을 계산하였다.

최종적으로 계산한 사건수목 계통수준의 공격집합에 해당하는 계통의 고장수목을 사용하여 격실수준의 공격집합과 저지집합을 계산하고 최종 핵심구역을 선정하였다.

본 논문에서 제안한 정지저출력 핵심구역파악 방법은 다양한 발전소 운전 상태와 다수의 복잡한 격실을 가진 사보타주 고장수목의 크기를 획기적으로 감소시키는 매우 효율적인 핵심구역파악 방법이다.

본 논문에서 제시한 방법은 향후 원자력발전소의 운전 조건을 반영한 핵심구역파악 규제연구의 중요한 출발점이 될 것이라고 확신한다.

전출력과 정지저출력의 핵심구역을 분리하여 동적으로 핵심구역을 보호할 것인지, 전출력과 정지저출력의 두 가지 핵심구역을 합쳐서 하나의 핵심구역으로 선정하여 운전 상태와 관계없이 동일하게 보호할 것인지에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것이다.

Acknowledgments: This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation of Nuclear Safety (KOFONS), granted financial resource from the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC), Republic of Korea (No. 1075000910).

References

- 1) IAEA, Nuclear Security Series No. 13 - Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities, INFCIRC 225/Rev. 5, 2011.
- 2) IAEA, Nuclear Security Series No. 16 - Identification of Vital Areas at Nuclear Facilities, 2012.
- 3) G.B. Varnado and D.W. Whitehead, Vital Area identification for U.S. Nuclear Regulatory Commission Nuclear Power Reactor Licensees and New Reactor Applicants, SAND-5644. Sandia National Laboratories, 2008.
- 4) EPRI, Probabilistic Consequences Analysis of Security Threats - A Prototype Vulnerability Assessment Process for Nuclear Power Plants, 1007975, Final Report, 2004.
- 5) G. B. Varnado and N. R. Ortiz, Fault Tree Analysis for Vital Area Identification, NUREG/CR-0809, SAND79-0946, USA: Sandia Laboratory; 1979.
- 6) D. W. Stack and K. A. Francis, Vital area Analysis using SETS, NUREG/CR-1487, SAND80-1095, USA: Sandia Laboratory; 1980.
- 7) C. K. Park, W. S. Jung, J. E. Yang and H. G. Kang, "A PSA-based Vital Area Identification Methodology", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 2(2), 133-140, 2003.
- 8) J. Ha, W. S. Jung and C. K. Park, "The application of PSA Techniques to the Vital Area Identification of Nuclear Power Plants", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 37, Issue 3, pp. 259-264, 2005.
- 9) W. S. Jung, Y. H. Lee and J. E. Yang, "Development of a New Quantification Method for a Fire PSA", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 94, Issue 10, pp. 1650-1657, 2009.
- 10) Y. H. Lee, W. S. Jung, M. J. Hwang and J. E. Yang, "Vital Area Identification of Nuclear Facilities by using PSA", J. Korean Soc. Saf., Vol. 24, No. 5, pp. 63-68, 2009.
- 11) Y. H. Lee, W. S. Jung and J. H. Lee, "Vital Area Identification Analysis of A Hypothetical Nuclear Facility Using VIPEX", J. Korean Soc. Saf., Vol. 26, No. 4, pp. 87-95, 2011.
- 12) W. S. Jung, "ZBDD Algorithm Features for an Efficient Probabilistic Safety Assessment," Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 2085-2092, 2009.
- 13) W. S. Jung, M. J. Hwang and M. H. Kang, "Vital Area Identification Rule Development and Its Application for the Physical Protection of Nuclear Power Plants", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 3, pp. 160-171, 2017.
- 14) W. S. Jung, "An Efficient Vital Area Identification Method", Korean Nuclear Society, 2017.
- 15) NRC, Evaluation of Potential Severe Accidents during Low Power and Shutdown Operations at Surry - Unit 1, 1995.