Journal of the Korean Society of Safety
Vol. 35, No. 5, pp. 115-120, October 2020
https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2020.35.5.115

ISSN 1738-3803 (Print)
ISSN 2383-9953 (Online)
http://www.kosos.or.kr/jkosos

원자로 이용률 향상을 위한 냉중성자원 시설의 고장모드영향분석 및 정지이력의 원인분석

이윤환*† · 황정식**

FMEA for CNS Facility and Cause Analysis of Shutdown Events to Improve Reactor Availability

Yoon-Hwan Lee*† · Jeong Sik Hwang**

†Corresponding Author
Yoon-Hwan Lee
Tel : +82-42-868-2652
E-mail : yhlee3@kaeri.re.kr

Received : August 4, 2020
Revised : August 31, 2020
Accepted : September 21, 2020

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

Abstract : From 2009 when the CNS facility was installed, the number of reactor failures due to abnormal CNS facility system has increased significantly. Of the total of 19 nuclear reactor shutdowns over the six years from 2009 to 2019, there were 10 nuclear reactor shutdowns associated with the CNS facility, which are very numerous. Therefore, this report intends to analyze the history of nuclear reactor shutdowns due to CNS facility system failure in detail, and to present the root cause and solution to problems. As a result of FMEA implementation of CNS facility system, a total of 76 SPVs were selected. In addition, 10 cases of reactor shutdown history due to CNS facility system abnormalities were analyzed in detailed, and improvement plans for solving the root cause and problem were suggested for each trip history. The results of this study are expected to be able to operate the domestic research reactor and CNS facilities more stably by providing effective measures to prevent recurrence of CNS facilities and reactor trips.

Key Words : FMEA, research reactor, trip, cold neutron source, helium refrigeration system

1. 서 론

본 논문은 국내 연구용원자로 냉중성자원(Cold Neutron Source: CNS) 시설을 대상으로 수행한 고장모드영향분석(Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) 결과 및 FMEA 결과에 기반한 원자로정지 유발기기(Single Point Vulnerability: SPV) 선정 결과를 포함하고 있다. 또한 CNS 시설계통 이상으로 인한 연구로 불시정지 이력을 분석하여 불시정지 저감 방안을 제시하였다. 본 연구용원자로(이하 연구로라 칭함)에서는 1995년부터 2019년까지 여러 가지 형태의 원자로 불시정지가 발생하였다[1]. 운전 초기인 1995년 및 1996년에 전체 불시정지 중 약 46.6%가 발생하였으며, 그 이후 운전경험이 축적됨에 따라 불시정지의 횟수는 크게 감소하였다. CNS 시설이 설치 완료된 2009년부터 2019년까지 6년간 총 19회의 원자로 정지 중 CNS 시설과 관련된 정지가 약 10건으로 많은 비중을 차지하고 있다. 그러나 불시정지 10건 모두 제어봉 및 정지봉이 노심에 자동 삽입되는 안전정지가 이루어졌으며, 그 이후 자연대류에 의한 노심잔열 제거가 원활하게 수행[2]되었으므로, 연구로의 안전성에는 전혀 문제가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 원자로 정지이력 상세분석 수행 이전에 먼저 CNS 시설에 대한 FMEA를 수행하여 원자로 정지에 직접적으로 미치는 요인을 파악하고자 하였다. 또한 CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지 이력을 상세하게 분석하여, 불시정지의 근본

*한국원자력연구원 책임연구원 (Korea Atomic Energy Research Institute, Principal Researcher)
**한국원자력연구원 선임연구기술원 (Korea Atomic Energy Research Institute, Principal Researcher)

원인 및 문제점 해결 방안을 제시하고자 하였다.

2. 냉중성자원 시설

냉중성자원 시설계통에 대한 FMEA 수행 및 냉중성자원 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지이력 분석에 앞서 냉중성자원 시설 및 시설계통에 대해 알아보았으며, 대부분의 자료는 안전성분석보고서[3]를 참고하였다.

냉중성자원 연구시설은 냉중성자원, 냉중성자 실험동 및 냉중성자 이용설비 등으로 구분된다. 냉중성자원은 반사체 탱크에 위치한 수직공에 설치되어 냉중성자를 생산하는 설비이다. 생산된 냉중성자는 유도관을 통하여 원자로건물에 인접한 냉중성자 실험동으로 유도되고, 냉중성자 이용연구를 위하여 실험동에 설치되는 냉중성자 산란장치에 공급된다. 이 산란장치와 관련된 일체의 설비를 냉중성자 이용설비라 한다. 아래 Fig. 1에 냉중성자 연구시설의 개략도[3]를 나타내었다.

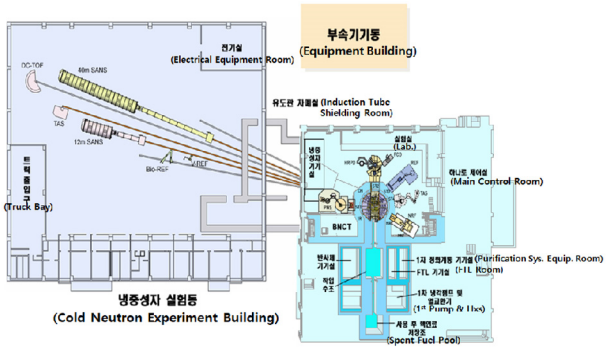

Fig. 1. Schematic diagram of neutron research facility[3].

연구로 반사체에 존재하는 열중성자를 냉중성자로 만들기 위해서는 열중성자의 에너지를 효과적으로 낮출 수 있는 극저온의 중성자 감속재가 필요하며, 본 연구로 냉중성자원에서는 약 20 K의 액체수소를 감속재로 사용한다. 극저온의 감속재 용기와 열교환기는 외부와의 단열을 위해 진공용기 안에 설치되며, 이들과 관련 배관을 포함하여 원자로 수조 내부에 설치되는 기기를 수조내기기(In Pool Assembly: IPA)라 부른다[3]. 수조내기기의 단열 및 열부하 냉각 등에 필요한 진공계통, 수소계통, 헬륨냉동계통, 계측 및 제어계통 등을 냉중성자원 시설 계통이라고 한다.

2.1 냉중성자원 수조내기기(IPA)

수조내기기는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 수소 공급 배관과 진공배기용 배관 그리고 극저온 냉동기로부터의 헬륨 공급 및 배출 배관을 포함해 총 4개로 구성되

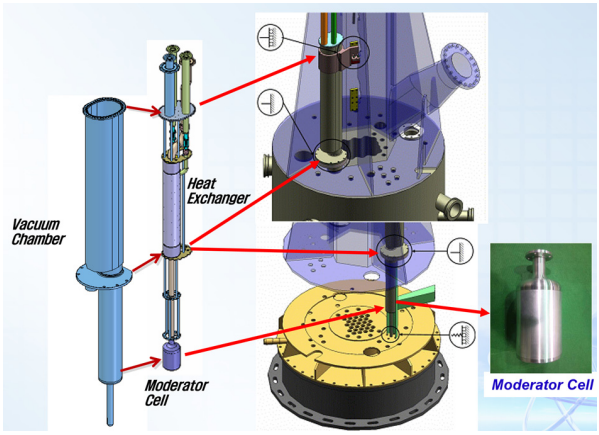

Fig. 2. In pool assembly (IPA)[3].

며, 이들 배관들은 원자로 수조 내벽에 설치되어 있는 플랫폼을 지나 수조 상부의 관통부를 통하여 냉중성자원 기기실의 시설계통 설비로 연결된다[4].

일정한 냉중성자속을 생성하기 위해 감속재 용기 내 액체수소 수위를 일정하게 유지하여야 하며, 이를 위해 냉중성자원에 부하된 열은 열교환기에 공급되는 저온의 헬륨가스에 의해 제거된다. 감속재 용기에서 기화된 수소기체는 감속재 용기와 열교환기 연결배관의 외관을 따라 열교환기로 유입되어 저온의 헬륨 유체와의 열교환에 의해 액화된다. 열교환기에서 액화된 수소는 연결배관의 내관을 따라 감속재 용기 내로 흘러내려 감속재 용기 내에서 일정한 2상 액체 상태를 유지하게 된다.

2.2 냉중성자원 시설계통

냉중성자원 시설 계통은 반사체에 설치된 냉중성자원 수조내기기와 연결되어 냉중성자를 안전하고 원활하게 생산할 수 있도록 한다[4]. 수소계통은 수조내기기 열교환기 상부의 수소 배관으로부터 수소 버퍼탱크까지 연결된다. 수소계통과 진공계통의 격리를 위해 극저온 부품이 있는 위치에 헬륨가스를, 상온부품이 있는 위치에는 질소가스를 블랭킷가스로 사용한다. 냉중성자원의 제어는 2중화 구조의 디지털 컴퓨터 제어개념을 구현하며, 냉각수계통은 헬륨냉동계통에서 발생하는 열을 제거하는 기능을 수행한다[4].

3. 냉중성자원 FMEA

3.1 CNS 시설계통 FMEA

3.1.1 FMEA 방법론

고장모드영향분석(FMEA)이란 분석 대상 계통의 구성 요소에 대한 고장모드를 식별하고, 이러한 고장모

드 발생시 그 결과를 평가하는 체계적인 분석방법이다. FMEA는 신뢰성 방법론 분야에서 가장 흔히 사용되고 또한 잘 알려진 방법이다. FMEA의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- FMEA는 시스템을 구성하는 한 요소의 고장이 시스템 전체에 미치는 영향을 해석하는 대표적인 정성적 분석 기법이다.
- FMEA의 기본적인 기능은 각 계통의 주요 구성 기기들이 어떻게 고장날 수 있으며, 고장으로 인한 계통상의 영향이 어떠한 가를 분석하여 계통의 신뢰도 향상을 위한 다양한 방안을 수립하기 위한 기초 자료로 활용하기 위함이다[5].
- 설계된 제품에서 발생할 수 있는 가능한 고장모드와 원인을 부품 수준에서 파악하여 그 원인을 알아내는데 유용하다. 주로 제품개발 또는 공정 개발시 많이 사용한다.
- 사고의 발생으로부터 그 사고원인을 찾아가는 연역적 방법인 고장수목분석(Fault Tree Analysis; FTA)[6]과는 달리 시스템 고장원인에서 시작하여 결과 방향으로 해석해 가는 bottom up 방식의 귀납적 방법이다.
- FMEA를 이용하면 시스템의 한 요소에 고장이 발생하였을 경우, 이로 인한 결과를 분석하여 위험도를 구하고 순위를 부여하여 순위가 높은 것부터 개선해 나갈 수 있다.

3.1.2 CNS 시설계통 FMEA

CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지의 구체적인 원인을 파악하고자, CNS 시설계통에 대한 FMEA를 수행하였으며, CNS 시설계통 FMEA 결과를 바탕으로 CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지를 유발시키는 원자로정지유발기기를 선정하였다.

본 분석에서는 CNS 시설계통 내 분석대상 계통의 선정 및 친숙화, 계통별 분석대상 기기 및 고장모드 식별, 그리고 기기 고장모드별 원자로정지 유발 가능성 평가 등의 순서로 분석하였다. 본 CNS 시설계통 FMEA에서 고려된 계통은 계측제어계통, 수소계통, 진공계통, 냉각수계통, 압축공기계통, 헬륨냉동계통 및 전력계통 등이다. 참고로 원자로정지를 직접적으로 유발시키지 않는 계통, 예를 들면 가스블랭킷계통 등은 분석에서 제외하였다.

본 분석에서 사용된 FMEA 형식은 아래 Table 1에 나타낸 바와 같으며, FMEA 결과 중 일부를 나타내었다. FMEA 표의 항목은 분석대상 계통별 기기, 기기번호, 기능, 고장모드, 고장영향, 고장감지 방법, 원자로정지유발 최소기기 개수 및 관련 원자로정지 변수 등이다.

Table 1에 나타낸 FMEA 결과를 정리하면 다음과 같다.

Table 1. Part of FMEA result of CNS facility system

Sys	Type	Component name	Function	Positi-on	Failure mode	Failure effect	Detect	Means	No.	Trip variable
H2 Sys	IPA	772-IPA	- Low-temperature helium supplied from helium refrigeration system and hydrogen vaporized in moderator container are liquefied again in the heat exchanger and stored in the moderator container - IPA is installed in the vertical hole of the reflector tank in the reactor pool	ON	Fail to function	- If leaks are detected, the reactor can be manually stopped at the operator's discretion - In case of abnormality, hydrogen system pressure problem occurs → RRS hydrogen HI/LO pressure reactor stop signal generation	Nearby I&C	none	1	RRS TRIP DUE TO CNS H2 HIGH/LO PR
	AOV	HAN-CNS-772-XCV-001A	AOV to safely isolate the hydrogen gas charged in the hydrogen system (SOV-001A)	Close	Fail closed	- XCV-001A remains closed when compressed air is lost of power is turned off. Therefore IPA hydrogen pressure remains unchanged. - Even if XCV-001A release button is pressed due to an operator error, it cannot be opened due to comparison logic with hydrogen capacity the hydrogen system	Nearby I&C	none	-	-
	PT	HAN-CNS-772-PT001A/PT001B/PT001C	- After measuring hydrogen system pressure, it is transmitted to the following 2 places: 1) CNS shutdown Panel, 2) CNS control computer - PT measurement value is transmitted to the 2 places - 3 channel (A/B/C) pressure values delivered to the CNS shutdown panel and control computer implement 2 out 3 logic in each - RRS hydrogen HI/LO pressure reactor stop signal generation	ON	Fail to function	- Transmission of imaginary value in case of pressure transmitter failure - When two or more channels of the pressure transmitter fail, incorrect measurement values are transmitted to the 2 places - RRS hydrogen HI/LO pressure reactor stop signal generation → Power off of magnetic clutch for driving RRS control rod → Control rod drop	PT 002	none	2	RRS TRIP DUE TO CNS H2 HIGH/LO PR
	PT	HAN-CNS-772-PT002	- Pressure transmitter for pressure measurement and instruction of hydrogen system - Signal provided to control refrigeration capacity of helium refrigeration system (pressure signal PC3591 of PT002)	ON	Fail to function	PT-002 failure → Hydrogen system pressure cannot be transmitted to refrigeration system → Failure to control helium temperature and hydrogen system pressure problem	PT001A /B/C	manual	1	RRS TRIP DUE TO CNS H2 HIGH PR
	H2 Box MV	HAN-CNS-772-V001/V002/V003	Separation and maintenance for each compartment for hydrogen system	Open	Fail Closed	- Normally open valve - Even if it is closed due to stem failure, hydrogen pressure in IPA can be maintained - Independent of hydrogen system	Nearby I&C	none	-	-

- 냉중성자원 수조내기기는 상기 2.1에 설명된 바와 같이 냉중성자를 생산하기 위한 CNS 시설계통 중 가장 중요한 설비로서, 수소계통의 압력 문제가 발생될 경우, CNS 수소 고압력/저압력에 의한 원자로정지신호가 발생됨.
- 수소계통 공압격리밸브 XCV-001A는 수소계통 내 충전된 수소가스를 안전하게 격리하는 공압격리 밸브로서, 이 밸브의 고장은 CNS 수소 고압력/저압력에 의한 원자로정지와는 무관함.
- 수소계통 압력전송기 PT-001A/001B/001C는 수조내기기 수소계통 압력을 계측하고 계측값을 CNS 정지반 및 제어컴퓨터에 제공함. 두 개 채널 이상 고장 발생시 CNS 수소 고압력/저압력에 의한 원자로정지신호가 발생됨.
- 수소계통 압력 전송기 PT-002는 수소계통 압력 지시 및 헬륨냉동계통 냉동용량 제어용이며, 고장시 헬륨 온도 조절 실패 및 수소계통 압력문제가 발생하여 CNS 수소 고압력/저압력에 의한 원자로정지신호가 발생됨.

본 CNS 시설계통을 구성하는 총 7개 대상 계통을 대상으로 FMEA를 수행하였으며, CNS 수소 고압력/저압력에 의한 원자로정지신호를 발생시키는 기기를 확인하였다.

3.2 원자로정지 유발기기 선정

CNS 시설계통 FMEA 분석 결과를 토대로 CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로정지를 유발시키는 원자로정지 유발기기(SPV)를 선정하였다[5]. 국내외 원자력발전소에서는 기기 고장으로 유발되는 발전소 불시정지 횟수를 줄이기 위하여 중요한 설비에 대해서 SPV로 선정하여 관리하고 있다[5]. 여기에서 SPV란 단일 고장 또는 기기간의 고장 조합으로 원자로 정지, 터빈발전기 정지 또는 50% 이상 출력감발 등을 유발하는 기기 또는 기기 조합을 말한다. 본 분석에서는 원자력발전소의 SPV 개념을 적용하여, CNS 시설계통 중 원자로의 불시정지를 야기하는 기기를 파악하고자 하였다.

CNS 시설계통 SPV는 아래 기술된 내용에 해당된다.

- Table 1과 같은 FMEA 표에서 '최소기기수' 항목이 '1' 또는 특정 숫자로 표시된 경우로서
  - FMEA 표에서 '최소기기수'가 '1'로 표시된 경우는 해당 단일 기기의 고장이나 오작동으로 인해 직접적으로 원자로 불시정지가 발생하는 경우
  - FMEA 표에서 '최소기기수'가 '2'로 표시된 경우는 2개 기기의 공통원인고장으로 인해 원자로 불시정지가 발생하는 경우, 보통 다중성(redundancy)을 확보한 경우가 여기에 해당됨

CNS 시설계통SPV를 원자로정지에 미치는 영향 정도 측면에서 나누었으며, 원자로정지에 미치는 영향 정도를 '기기 중요도'라는 항목으로 정의하였다. 이는 FMEA 결과 중 '원자로정지유발 최소기기수' 결과를 기반으로 나타내었으며, 기기고장에 따른 원자로정지중요도(Trip Criticality: TC)[5]를 다음과 같이 분류하였다.

- 최소기기수가 1인 경우는 원자로정지중요도(TC)에 따라 TC-1,
- 최소기기수가 2인 경우는 TC-2,
- 최소기기수가 3 이상인 경우는 TC-3으로 등급을 정의함

상기와 같은 CNS 시설계통 FMEA를 통해서, 총 76개 SPV가 선정되었으며, 그 결과 일부를 아래 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Part of SPVs causing reactor shutdown by CNS H2 high/low pressure

Component ID	Name	System	No.
772-PT001A/PT001B/PT001C	Pressure Transmitter	Hydrogen	2
772-PT002	Pressure Transmitter	Hydrogen	1
773-M-P001/P002	High Vacuum Pump	Vacuum	2
773-PT002	Pressure Transmitter	Vacuum	1
771-C2110	Helium Compressor	Helium Refrigeration	1
771-X3130	1st Turbine	Helium Refrigeration	1
771-MCB	Logic Controller	Helium Refrigeration	1
771-PT2240	Pressure Transmitter	Helium Refrigeration	1
771-CV2160	Air Operated Valve	Helium Refrigeration	1
710-M-P001/P002	2nd Cooling Pump	Cooling Water	2
795-M-C001/C002/C003	Compressor	Compressed Air	3
531-EA-H001	6.6kV SWGR	Electricity	1

CNS 시설계통 FMEA 결과에 기반한 CNS 계통별 SPV 분포를 아래 Fig. 3에 나타내었다. CNS 헬륨냉동계통의 SPV가 전체 중 약 51.3%이었으며, 냉각수계통과 압축공기계통이 각각 15.8% 및 10.5%를 차지하는 것으로 나타났다.

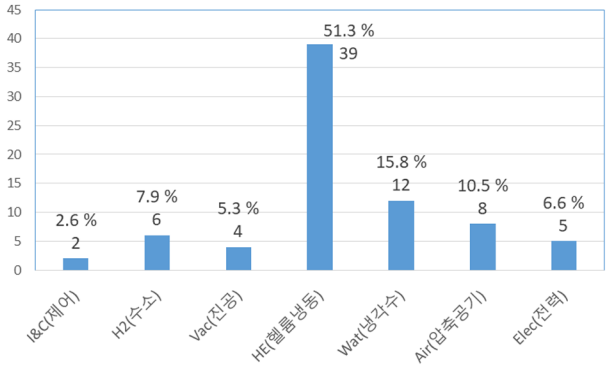

Fig. 3. SPV distribution by CNS system.

Table 3. Trip criticality(TC) of SPVs by systems

	I&C (제어)	H2 (수소)	Vac (진공)	HE (헬륨)	Wat (냉각수)	Air (압축공기)	Elec (전력)	Total
TC-1	2	2	3	39	4	5	5	59
TC-2	0	4	2	0	8	0	0	14
TC-3	0	0	0	0	0	3	0	3
Sum	2	6	4	39	12	8	5	76

CNS 시설계통 FMEA에 기반하여 분류한 원자로정지중요도를 Table 3에 나타내었다. 특이하게도 헬륨냉동계통 SPV로 선정된 39개 기기는 모두 단일기기 기능상실에 의한 TC-1에 해당되는 것으로 확인되었다. 이는 헬륨냉동계통의 운전이 CNS 시설계통 및 원자로 운전에 매우 큰 영향을 미치고 있음에도 불구하고, 헬륨냉동계통 내 중요 기기들은 계통 및 CNS 시설의 안정적인 운전을 위한 다중성을 확보하지 못한 것으로 확인되었다.

4. CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로정지 이력 분석

CNS 시설이 설치된 2009년부터 2019년까지 CNS 시설계통 운전과 관련된 원자로 정지는 총 10회이며, 연도별 불시정지 원인을 CNS 시설계통별로 나누어 아래 Table 4에 나타내었다.

CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지 횟수는 상기 Table 4에 나타낸 바와 같이 2009년에는 압축공기계통 고장으로 인한 1회, 2010년에는 헬륨냉동계통 이상으로 인한 원자로 정지 2회를 포함한 총 4회, 2012년에는 인적오류에 기인한 1회를 포함한 총 2회, 2013년에는 CNS 냉각수계통 이상으로 인한 원자로 정지 1회, 2018년에는 헬륨냉동계통 이상으로 인한 1회 그리고 2019년에는 인적오류에 기인한 원자로 정지 1회씩

Table 4. Analysis result of reactor shutdown history caused by CNS

	Air (압축공기)	Wat (냉각수)	Elec (전력)	HE (헬륨)	Human (인적 오류)	합계
2009	1					1
2010		1	1	2		4
2012				1	1	2
2013		1				1
2018				1		1
2019					1	1
합계	1 (10%)	2 (20%)	1 (10%)	4 (40%)	2 (20%)	10 (100%)

각각 발생하였다. 또한 CNS 헬륨냉동계통 이상으로 인한 원자로 정지는 Table 4에 나타난 바와 같이 총 10회 중 40%인 4회가 이에 해당한다. 이는 CNS 시설계통 중 헬륨냉동계통 이상이 CNS 운전 및 원자로 정지에 가장 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

4.1 정지이력별 근본원인분석

각 정지 이력별로 원자로 정지 원인을 추적하고 확인하고자 근본원인분석을 수행하였다. 일련의 10회 원자로 정지는 CNS 수소계통 고압력/저압력 정지변수에 기인하였으며, 근본적인 원인은 크게 계측기 및 기기의 고장 또는 오작동, 제어로직 문제, 정전, 그리고 운전원 오류 등으로 나타났다. 총 10회의 불시정지 원인 및 개선 방안을 정리하여 Table 5에 나타내었다.

Table 5. RCA for trip histories and improvement ways

No	System	Causes	Improvement ways
1	Compressed air	Logic controller	• Design change of OWS • Installation of Buffer tank air conditioner
2	Cooling water	Level transmitter	• Procedure amendment
3	Electricity	Blackout	• Additional income line
4	Helium refrigerator	Pressure transmitter	• Procedure amendment (periodic test)
5	Helium refrigerator	Relay	• Procedure amendment (periodic test)
6	CNS shutdown Panel	Human error	• Procedure amendment • Operator education and training
7	Helium refrigerator	Heat exchanger	• Procedure amendment (regular washing)
8	Helium refrigerator	Flow switch	• Procedure amendment (periodic test)
9	Helium refrigerator	Air operated valve	• Procedure amendment (periodic test)
10	CNS computer	Human error	• Procedure amendment • Operator education and training

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 CNS 시설에 대한 FMEA를 수행하여 원자로 정지에 직접적으로 미치는 요인을 파악하고자 하였으며, CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지 이력을 상세하게 분석하여 불시정지의 원인 및 문제점 해결 방안을 제시하고자 하였다.

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- CNS 시설계통에 대한 FMEA 수행 결과, 총 76개 SPV가 선정되었음.
- 헬륨냉동계통이 CNS 시설계통 및 원자로 운전에 매우 큰 영향을 미치고 있음에도 불구하고, 헬륨냉동계통 내 중요 기기들은 계통의 안정적인 운전을 위한 다중성을 확보하지 못한 것으로 확인됨.
- CNS 시설계통 이상으로 인한 원자로 정지 총 10회 중 4회가 CNS 헬륨냉동계통 이상에 기인한 것으로 파악되었음.
- CNS 수소계통 고압력/저압력에 의한 원자로 정지의 근본 원인은 기기 고장, 제어로직 문제, 정전, 그리고 운전원 오류 등에 기인한 것으로 분석되었음.
- CNS 시설계통 이상에 의한 불시정지 예방을 위해 정주기 시험 등을 포함하는 절차서 개선, 운전원 교육 및 훈련 강화, 안정적인 전원 공급을 위한 추가 전력망 확보 및 SPV의 다중화 등이 제시됨.

향후 상기와 같은 문제점 해결 및 개선을 통해서 수소압력 불안정으로 인해 발생될 수 있는 잠재적인 불시정지를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 원자로 이용률 향상을 위해 CNS 시설계통의 성능 유지에 지속적이고도 집중적인 관리가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement: This work was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea grant, funded by the Korean government, Ministry of Science and ICT

References

1) Y. H. Lee, “Analysis of Initiating Event Frequencies for PSA based on the Unexpected Reactor Trip Events at a Research Reactor”, Spring Conference of the Korean Society of Safety 2020.
2) Y. H. Lee, “Aspects of Preliminary Probabilistic Safety Assessment for a Research Reactor in the Conceptual Design Phase”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 34, No. 3, pp. 102-110, 2019.
3) KAERI, Safety Analysis Report of HANARO, Chapter 11, Korea Atomic Energy Research Institute, 2020.
4) S. Wu et al., “Development of Cold Neutron Research Facility and Utilization Technology”, KAERI/RR-3158/2009, Korea Atomic Energy Research Institute, 2009.
5) J. W. Hyun et al., “Failure Mode Effective Analysis for Selection of Single Point Vulnerability in New Type Nuclear Power Plant”, Transaction of Korean Society of Pressure Vessel and Piping, Vol. 10, No. 1, pp. 31-36, 2014.
6) Y. H. Lee, “A Study on the Final Probabilistic Safety Assessment for the Jordan Research and Training Reactor,” J. Korean Soc. Saf., Vol. 35, No. 3, pp. 86-95, 2020.