

월성 2 호기 Small LOCA/PHT Leaks 비상운전지침서

이정표, 권중수, 박성훈, 김성래, 나영환

한국원자력연구소

요 약

월성 1호기용 비상운전절차서는 사고별로 세분된 사건대응적 형태의 절차서로 작성되어 있어 발전소 비정상 상태 발생시 운전원이 조치하기 전에 사고진단을 먼저 수행하여야 하며, 또한 다중사고의 경우 적용하는데 난점이 있다. 이러한 결점을 보완하기 위하여 월성 원자력발전소 2호기용 비상운전지침서는 사건 및 징후대응적 판단 방법을 혼합한 형태이며, 운전원 조치사항으로 필수안전변수의 안정화 및 복구를 위한 핵연료 냉각, 열제거원, 원자로건물의 우선순위로 발전소를 안정시키는 방법이 시도되고 있다. 본 논문에서는 현재 월성 원자력발전소 2호기용 비상운전지침서에 고려되고 있는 사건들 중 하나인 소형 냉각재상실 및 냉각재계통 누설 사고 비상운전지침서의 특성을 소개하였다.

1. 서론

비상운전절차서 (Emergency Operating Procedure)는 원자력발전소 운전허가를 받는데 필수조건으로 상업운전 전에 규제기관에 제출되어야 하며, 또한 운전원의 훈련 및 교육용으로 사용된다. 월성 원자력발전소 2호기용 비상운전지침서 (Abnormal Operating Manual)는 비상운전절차서의 작성을 위한 전 단계로 가압경수로의 Emergency Procedure Guideline과 유사하나, 단지 입증 및 검증 (verification and validation)을 하지 않은 비상운전절차서의 수준으로 작성되고 있다. 현재 건설중인 월성 원자력발전소 2호기용 비상운전절차서의 기본방향을 사고진단이 안될 경우 사용하는 징후대응적절차서 (Symptom-Oriented Procedure)와 논리도표와 문장이 혼합된 사건파악적절차서 (Event-Oriented Procedure)로 이루어진 비상운전절차서로 제시된바 있다 [1].

CANDU형 원자로의 구조 특성상 대형냉각재상실사고 (Large Loss of Coolant Accident)에 비하여 소형냉각재상실사고 (Small Loss of Coolant Accident)가 일어날 확률은 약 100 배 이상인 것으로 알려져 있다. 냉각재계통 (Primary Heat Transport System; PHTS)의 소형파단 (small breaks)은 가장 큰 급수관 (feeder)의 파단 크기까지로 정의되어 있다 [2]. 사고해석적 측면에서는 가장 큰 급수관의 내부단면적의 두배 크기의 면적, 즉 2.5% 원자로입구모관 (Reactor Inlet Header)의 파단까지를 소형파단으로 간주하고 있다 [3]. 월성 2, 3, 4 호기용 최종안전분석보고서 (Final Safety Analysis Report) [3]에 따르면 가장 큰 급수관 (feeder) 보다 작은 파단의 경우 핵연료 손상이 발생하지 않으며, 또한 핵연료 냉각도 열제거원으로 증기발생기 및 비상노심냉각계통 (Emergency Core Cooling System)을 통하여 잘 이루어짐을 알 수 있다. 그러나 냉각재로 중수 (D₂O)를 사용하는 CANDU형 원자력발전소의 경우 경수 (H₂O)를 사용하는 비상노심냉각계통의 사용은 냉각재인 중수농도를 저하시키고, 냉각재의 승급 및 교체로 인한 경제적 손실 뿐만 아

나라 안전적 측면에서의 벌칙 (penalty)을 초래할 수 있다. 따라서 소형냉각재상실사고 및 냉각재계통 누설 (Small LOCA/PHT Leaks)사고의 경우 적절한 운전원 조치를 통하여 비상노심냉각계통의 작동을 미연에 방지할 수 있다. 이를 위하여 발전소 비정상 상태 발생시 사고 대처 및 완화를 위한 적절한 비상운전절차서가 필수적이다.

따라서 월성 1호기 비상운전절차서가 각 사고별로 세분된 형태의 절차서로 작성되어 있어 운전원이 조치하기 전에 사고진단을 먼저 수행하여야 하며, 또한 다중사고의 경우 적용하기 어려운 결점을 보완하기 위하여 현재 작성중인 월성 원자력발전소 2 호기용 비상운전지침서는 사건 및 징후대응적 판단 방법을 혼합한 형태이며, 운전원 조치사항으로 필수안전변수의 안정화 및 복구를 위한 핵연료 냉각, 열제거원 및 원자로건물의 우선순위로 발전소를 안정시키는 방법이 시도되고 있다. 본 논문에서는 현재 월성 원자력발전소 2 호기용 비상운전지침서에 고려되고 있는 사건들 중 하나인 소형냉각재상실 및 냉각재계통 누설 사고 비상운전지침서의 특성을 소개하였다.

2. 본론

2.1 Small LOCA/PHT Leaks의 정의

소형냉각재상실사고는 냉각재계통의 가장 큰 급수관의 파단 크기까지의 소형파단으로 정의되며, 이 경우 냉각재 손실이 중수충수계통 (D₂O feed system)의 용량을 초과하게 되어 결과적으로 냉각재계통의 충수를 위한 자동적인 비상노심냉각 운전이 요구된다.

냉각재계통 누설은 냉각재 누설량이 중수충수계통의 용량 범위 이내의 경우로 운전원이 비상노심냉각계통 주입 전에 조치할 수 있다.

2.2 사건개시에 따른 발전소계통의 반응

소형냉각재상실사고 및 냉각재계통 누설사고시 각 발전소계통에 미치는 영향을 다음과 같이 예상할 수 있다.

2.2.1 전원계통

I 급전원에서 IV 급전원까지 모든 전원계통이 가용한 것으로 가정한다.

2.2.2 원자로출력

고려된 파단 크기에서는 원자로조절계통이 증가된 반응도를 보상하기 위한 충분한 반응도를 가지므로 원자로 트립 전까지 일정한 출력을 유지시킬 수 있다. 따라서 원자로는 공정트립 변수에 의해 트립될 것이다.

2.2.3 냉각재계통

소형냉각재상실사고가 일어나면 두 개의 냉각재 회로의 원자로출구모관의 상호연결 밸브가 냉각재계통 압력이 5.5 MPa(a) 이하로 떨어지면 자동으로 격리된다. 냉각재계통 누설의 경우 중수충수계통이 냉각재계통의 재고량 보상 및 압력을 유지하도록 되어 있다.

2.2.4 비상노심냉각계통

소형냉각재상실사고에 따른 비상노심냉각계통의 자동운전은 운전원의 적절한 조치에 달려 있으며, 비상노심냉각계통이 요구될 경우 LOCA + ECC Operation 비상운전지침서를 따르도록 되어 있다.

2.2.5 원자로건물계통 (Containment System)

사고해석 결과에 의하면 0.5% 원자로입구모관 (Reactor Inlet Header) 이하의 파단시는 비상노심냉각계통주입 설정치인 원자로건물 고 압력까지 가압되지 않으므로, 원자로건물 고압력에 의한 자동 원자로건물 격리는 일어나지 않으며, 필요시 운전원이 원자로건물을 격리할 수 있다. 비상노심냉각계통 주입은 원자로출구모관 저 압력 (sustained low PHT pressure)의 냉각재상실사고 조건부 신호에 의하여 작동된다.

2.3 Small LOCA/PHT Leaks 비상운전지침서

2.3.1 개요

전술한 바와 같이 월성 원자력발전소 2 호기용 비상운전지침서는 사건 및 징후대응적 판단 방법을 혼합한 형태로 작성되고 있으며, 발전소 비정상 상태 발생시 핵연료 냉각, 냉각재계통 및 원자로건물의 건정성을 유지하기 위한 조치와 최소한 다음과 같은 필수안전변수 (Critical Safety Parameters)의 안정화 및 변화추이 감시를 우선으로 작성되고 있다.

- 원자로출력
- 냉각재계통 압력 및 수위
- 냉각재계통 온도
- 증기발생기 압력
- 급수/기기냉각수 방사능
- 원자로건물 방사능
- 원자로건물 압력

2.3.2 구성

비상운전지침서는 주논리도 (main logic diagram)와 기술배경서 (technical basis document)로 구성되어 있다. 주논리도에는 진입조건 (entry condition), 운전목적 (operating objectives), 필수안전변수의 변화추이 감시 및 안정화를 위한 운전원 조치사항으로 구성되어 있으며, 운전원 조치사항에는 조치를 수행하기 위한 필요한 기기 및 지시계 등의 모든 정보가 포함되어 있다. Fig. 1은 현재 작성중인 월성 원자력발전소 2 호기용 소형냉각재상실사고 및 냉각재계통 누설 비상운전지침서의 주논리도의 한 예를 도시한 그림이다. 기술배경서는 사고 발생에 따른 발전소계통의 반응과 예상되는 사건전개, 발전소 복구에 관련된 필수안전변수의 변화추이에 대한 판단, 단계별 운전원 조치사항에 대한 배경 및 적합성에 대한 사항 등이 기술되어 있다.

3. 결과 및 고찰

월성 1 호기용 비상운전절차서는 사고별로 세분된 서술적 형태의 절차서로 작성되어 있어 발전소 비정상 상태 발생시 운전원이 조치하기 전에 사고진단을 먼저 수행하여야 하며, 또한 다중사

고의 경우 적용하는데 난점이 있다. 표 1은 월성 1 호기 소형냉각재상실사고 비상운전절차서의 세부 사고 분류를 나타낸 것이다 [4]. 또한 최근에 작성된 Point Lepreau 소형냉각재상실사고 (수동 비상노심계통 주입 포함)의 비상운전절차서의 경우 징후대응적 판단 방법을 일부 사용하고 있으나, 12개 항목의 진단 및 조치논리와 상세조치사항을 기술한 22개의 task procedures로 구성되어 있으며, 특정사고 진입을 판별하는 변수로 구성된 지배조건 (governing conditions)에 따라 세분된 항목의 조치를 수행하는 복잡한 사고대응적 형태의 절차서로 작성되어 사용하기에 어려움이 따른다 [5]. 따라서 사건대응적절차서의 결점을 보완하기 위하여 징후대응적 판단 방법을 혼합한 형태의 비상운전지침서의 작성을 시도하였다.

Fig. 2는 월성 원자력발전소 2 호기용 소형냉각재상실사고 및 냉각재계통 누설 비상운전지침서의 주논리의 개략도를 도시한 그림으로, 월성 2 호기용 비상운전지침서는 발전소 비정상 상태가 발생하면 운전원은 진입조건에 해당되는 사고별 비상운전지침서를 이용하여 사고에 대처하도록 되어 있으며, 운전원 조치사항으로 핵연료 냉각, 열제거원, 원자로건물의 우선순위로 발전소를 안정시키는 방법의 주논리도가 작성되고 있다. 따라서 운전원이 사고별 사고징후에 대한 진단 능력만 있으면, 발전소 비정상 상태 발생시 월성 2 호기용으로 제시된 방법의 절차서를 이용하여 적절한 사고 대처 및 완화를 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

월성 원자력발전소 2 호기용 소형냉각재상실사고 및 냉각재계통 누설 (Small LOCA/PHT Leaks) 사고에 대한 비상운전지침서는 운전원 조치사항으로 핵연료 냉각, 열제거원, 원자로건물의 우선순위로 발전소를 안정시키는 방법의 사건 및 징후대응적 판단 방법을 혼합한 형태로, 발전소 비정상 상태 발생시 제시된 방법을 이용하여 적절한 사고 대처 및 완화를 할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- (1). S.R. Kim의 4인, "Review of Emergency Procedures for CANDU Reactors", J. of the KNS, Vol. 27, No. 4, 1995, August.
- (2). AECB Consultative Document C-6, "Requirements for the Safety Analysis of CANDU Nuclear Power Plants", 1980, June.
- (3). KEPCO, "Wolsong 2, 3&4 Final Safety Analysis Report", 1995, May.
- (4). KEPCO, "Wolsong 1 Small LOCA EOP", Rev. 1, 1991.
- (5). E. Sawatzky, "Small (Manual ECC Initiation) Loss of Coolant Accident Abnormal Plant Operating Procedures", Point Lepreau Generating Station Operating Manual, Rev. 1, 1990.

Table 1. Small LOCA (Wolsong-1 EOP) [4]

1. Leaks into Secondary Sides of Heat Exchangers
Steam Generator Tube Leakage
Purification Cooler (3335-HX2) Tube Leak
Degasser Cooler (3332-HX1) Leak
PHT Pump Gland Cooler (3334-HX1/2/3/4) Leak
2. Internal Leakages through Valves associated with P& IC
PHT Liquid Relief Valve Fail Open
PZR Steam Bleed Valve Fail Open
PZR Relief Valve Fail Open
Both Feed Valve Open and Feed Valve Close
Both Bleed Valve Open and Feed Valve Close
3. External Leaks into the Reactor Building
4. Leakages through D ₂ O Collection System

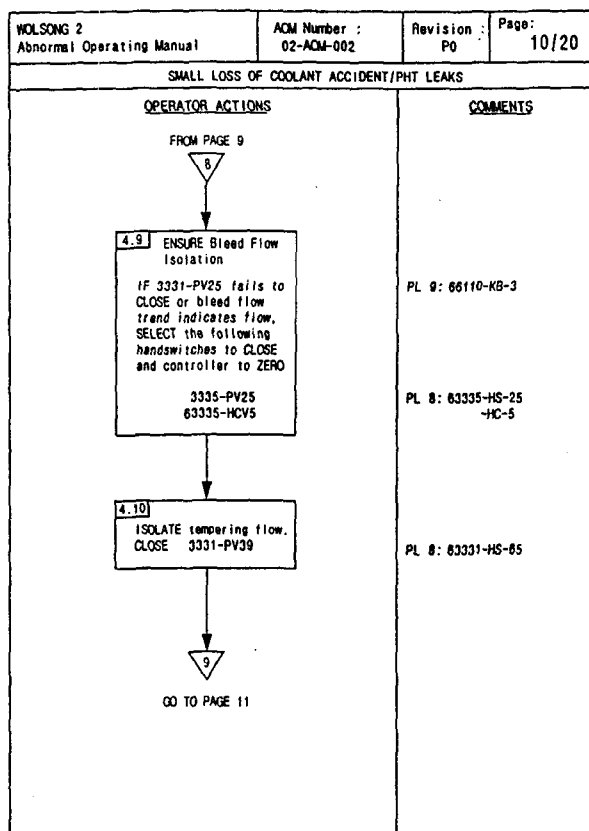


Fig. 1 Operator Actions of Small LOCA/PHT Leaks AOM

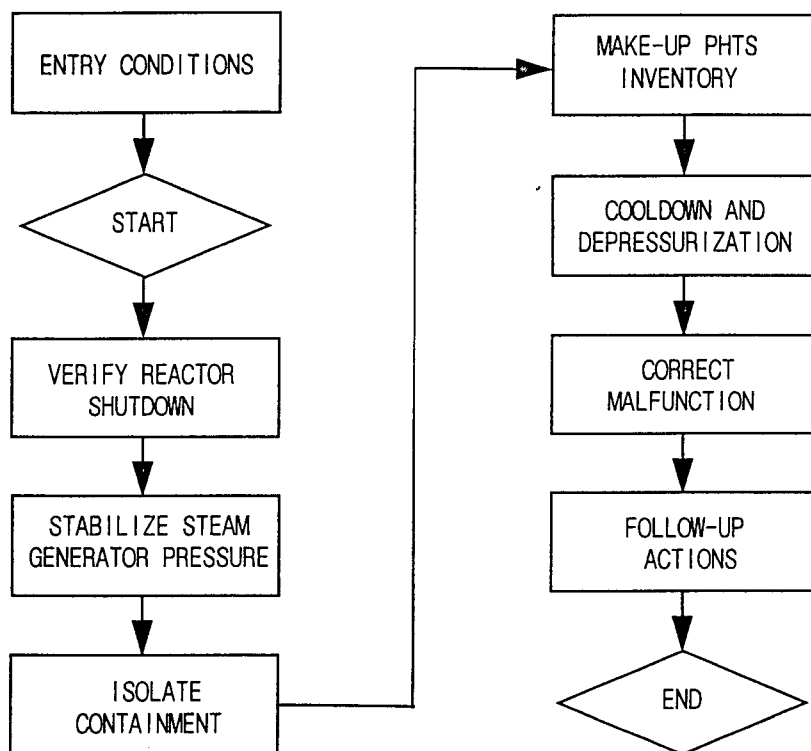


Fig. 2 Schematic Main Logic Diagram of Small LOCA/PHT Leaks AOM