

원전의 정지/저출력 운전 중 발생사건 자료 수집 및 데이터베이스 구축

Event Data Collection and Database Development during Plant Shutdown and Low Power Operations at Domestic and Foreign Reactors

김태운, 박진희, 한석중, 임호곤, 장승철
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

초 록

국내 원전의 정지/저출력 운전에 대한 확률론적 안전성평가 (PSA)의 보수성을 줄이고 안전성을 확보하기 위하여 국내외 저출력 및 정지 운전 중에 발생된 사건들을 수집하였다. 수집된 자료는 국내 2건을 포함하여 미국 및 유럽 발전소에서 발생한 총 625건의 사건이력 자료들이다. 본 연구에서는 이들 자료를 효율적으로 이용하기 위하여 데이터베이스 전산프로그램을 구축하고 수집된 자료를 모두 입력하였다. 또한 이 자료를 검토하여 정지/저출력 운전 중 발생할 수 있는 사고에 대한 전반적인 지식을 습득하고 PSA 초기사건 도출을 위한 사건 유형 분류와 사고원인 규명 및 재발방지 대책 수립에 중점을 두고 분석을 수행하였다.

Abstract

To reduce conservatism and to obtain completeness for low power and shutdown (LPSD) PSA of nuclear power plants, total of 625 event data have collected during shutdown and low power operations which have occurred during about 30 years at nuclear power plants of USA and European countries including 2 domestic events. To utilize efficiently these event data, a database program which is called LEDB (Low power and shutdown Event DataBase) was developed and all the event data collected were inserted in that program. By reviewing and analyzing these event data various way, a lot of very useful insights and ideas for preventing similar events from reoccurrence in domestic nuclear power plants can be obtained.

1. 서론

원자력 발전 초기 단계에서는 고온정지를 포함한 발전소의 정지상태를 안전한 상태로 간주하였으며[1], 정지중 사고발생 후에도 정상출력 운전에 비하여 노심에서 발생하는 잔열이 낮고 운전원이 조치를 취할 수 있는 시간이 길다는 등의 이유로 출력운전 중에 발생하는 사고에 비해 위험도가 크지 않다고 판단하였다. 따라서 원자로 정지 이후 발생하는 사고에 대한 안전성에 대한 평가를 간과하여 왔으며, 정지상태에서 붕괴열이나 잔열을 제거하는 정지냉각계통의 중요성이 제대로 인식되지 않아 정지냉각 기능상실에 대한 위험성이 고려되지 않았다.

그러나 원자력 발전소가 상업운전을 시작한 이후 정지냉각 운전기간에 정지냉각 기능이 상실되는 사고가 빈번히 발생하였고, 노심손상과 같은 중대사고로 진전된 사례는 없었으나, 원자로냉각계통의 비등을 초래하는 사고가 발생하는 등 정지냉각 기능 상실과 관련된 많은 사고를 경험하였다. 정지 운전 중에 발생한 사고들 중에는 적절한 조치를 취하지 않을 경우에 궁극적으로는 노심손상을 초래할 수 있는 사건들이 빈번하게 발생함으로써 정지/저출력 운전 중의 안전성에 대한 연구가 정지냉각 기능상실에 초점을 맞추어 80년대 중반부터 수행되기 시작하였다.

원전의 정지/저출력 운전에 대한 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 정지저출력 PSA 에서는 원자로 저출력 운전에서 시작하여 원자로 정지, 감온 감압을 위한 냉각운전, 부분충수

운전, 핵연료 교환 및 발전소 기동 및 출력 증가에 이르는 일련의 운전모드가 모두 포함된다. 정지/저출력 PSA 수행을 위한 초기사건을 선정하기 위해서는 정지/저출력 운전 중에 나타날 수 있는 다양한 운전모드별로 발생할 수 있는 모든 사고에 대한 평가를 수행하여야 한다. PSA 분석을 위한 초기사건 선정은 해당발전소의 공학적 평가를 바탕으로 타 발전소의 경험사례 분석을 반영한 논리적 분류를 통하여 해당발전소에서 발생 가능한 모든 초기사건을 선별하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 정지/저출력 운전 중에 발생할 수 있는 초기사건을 도출하기 위하여 국내외 원전의 경험사례를 수집하여 데이터베이스화하고 각 사건들을 PSA를 수행하기 위한 초기사건별로 나누어 분류를 수행하였다. 수집된 자료원은 미국 원전들에서 정지/저출력 운전 중에 발생한 사건/사고 등을 분석한 보고서에 포함된 사고사례와 일본 원자력연구소의 2차례의 정지 운전 중 사고에 관한 사례분석보고서[6,7]를 중점적으로 검토하고, 미국 원전사업자 사건보고서인 LER(Licensee Event Report)을 검색하여 정지/저출력 운전 중 사고에 대한 자료를 수집하여 데이터베이스화하였다.

2. 정지/저출력 운전 중 사건 자료 수집

가. 자료수집개요

국내 원전의 정지/저출력 PSA를 위한 초기사건 도출을 위한 외국의 참고문헌과 미국의 LER을 검색하였다. 본 보고서에서 언급된 미국의 사례들은 미국 원전의 정지 운전 중 간열 및 붕괴열제거를 위해 운전되고 있던 정지냉각계통의 고장을 일으킨 사건을 분석한 보고서들을 검토하여 관련 사건들을 수집하였다. 외국의 참고 문헌은 일본 원자력연구소가 91년과 94년에 미국 및 외국의 정지중 사건 사례분석을 위한 보고서를 참조하였다. 그 외에 미국의 LER에서 해당사건을 검색하여 사례들을 수집하였으며 본 연구에서 검토된 자료 수집원은 아래와 같다.

- 미국 EPRI의 NSAC-52[8]
- USNRC의 AEOD/C503[6,7]
- USNRC의 AEOD/C702[6,7]
- NUREG-1410[9]
- 일본 원자력연구소 보고서[6,7]
- 미국 LER 자료
- 기타 NRC 및 IAEA, KINS 등에서 수집한 자료

나. 자료 분류 방법

위에서 수집된 자료들을 대상으로 정지/저출력 PSA 초기사건 선정에 이용하기 위하여 각 사건들을 검토하여 분류 항목으로 나누고 항목에 따른 분석을 수행하였다. 각 사건에 대한 분류 항목으로는 발생호기, 발생일, 발전소형태, NSSS 제작사, 발전소 Type, 초기사건을 분류하기 위한 3개의 상세 분류항목, 근본원인, 사고개요, 운전 모드, 정지/저출력 운전중 발전소 운전상태인 POS(Plant Operational States)[10], 정지냉각상실시간, RCS 온도상승, 자료수집에 이용된 자료원 및 기타 항목으로 나누어 분류를 수행하였으며 각 분류 항목에 대한 간략한 설명은 아래와 같다.

- 발생호기 : 사건이 발생한 호기의 발전소명을 기술
- 발생일 : 사건 발생일을 기술
- 발전소 형태 : 가압경수형(PWR)과 비등경수형(BWR)로 구분
- NSSS 제작사 : NSSS 제작사를 기술
- 발전소 Type : 발전소 형태에 따라 기술, 예) WH 2-Loop, WH 2-Loop
- 3개의 분류 범주 : 초기사건 분류를 위한 대분류, 중분류 및 소분류로 나누어 단계별로 분류를 수행
- 근본원인 : 사건이 발생한 근본원인에 따라 구분, 예) 기기 고장, 운전원 및 절차서 오류
- 사고 개요: 사건 개요를 간략히 설명
- 운전 모드 : 사고가 발생한 시점을 기술지침서 상에 있는 5개 혹은 6개의 운전 모드에 따라 분류
- POS : 각 사고가 발생한 시점을 국내 표준형 원전의 정지/저출력 PSA에서 사용된 17개 POS에 따라 분류[10]
 - 정지냉각 상실 시간 : 사고 개요에 나타난 정지냉각 상실 지속시간을 기술

- RCS 온도상승 : 각 사고별로 사고 발생 후 복구조치가 완료될 때까지의 원자로냉각재의 온도 상승을 기술
- 자료원 : 해당 사건이 기술된 참고 문헌을 기술
- 기타 : 각 사건별로 특이 사항을 기술

위에서 언급한 항목별로 분류를 수행하였지만 각 사건이 추출된 참고자료의 사고 내용에 대한 기술이 충분치 않을 경우에는 일부 항목은 내용을 기술할 수 없는 부분도 상당히 많았다. 특히 정지/저출력 PSA에서 필수적인 POS나 운전모드와 같은 항목은 수집된 자료만으로는 정확한 시점을 파악하기에는 여의치 않은 경우가 많이 있었다. 그 외에 근본원인 등을 파악하기에도 사고내용 만으로 판단하기에는 무리가 있는 사례도 많아서 정확한 판단을 하기가 불가능한 사례도 많았다. 이러한 결점 등은 추후 연구에서 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

1) 초기사건 분류

정지/저출력 PSA 초기사건 선정과 직접관련이 있는 3개의 분류 범주는 따로 분리하여 분류를 수행하였으며 관련된 분류표는 표-1에 기술되어있다. 이 분류항목에서는 수집된 자료를 검토한 후에, 저출력 운전 중에 나타날 수 있는 사건과 발전소 정지 후에 발생할 수 있는 잔열제거 기능상실과 관련된 사건을 분류하여 정지/저출력 PSA 분석시에 고려해야 하는 초기사건에 따라 분류를 수행하였다. 대분류 범주에서는 저출력 및 정지 운전에서 나타날 수 있는 사건들을 전출력 PSA에서 수행되는 초기사건 분류와 유사하게 모든 초기사건을 크게 나누어 냉각재 상실, 과도사건 그리고 정지운전 중에만 나타날 수 있는 정지냉각재 상실과 기타 사건으로 나누어 분류를 수행하였다. 4가지 분류항목에서는 각 초기사건이 발생할 수 있는 발전소 운전모드와 사건이 발생할 수 있는 시점(즉 정지/저출력 운전 PSA를 수행하기 위해 상세히 나누어진 운전 모드인 POS) 등을 구분하기 위하여 세분하여 중분류 및 소분류라는 분류항목으로 다시 나누어 분석을 수행하였으며 각 단계별 설명은 아래와 같다.

2) 정지냉각 상실

정지냉각 상실 사건은 발전소가 정지된 후 증기발생기와 복수기 및 대기를 통한 증기제거운전을 통한 원자로냉각재 계통의 1차 감온 감압과정을 수행한 후, 정지냉각계통을 기동한 후에 정지냉각계통의 고장으로 정지냉각 기능 상실을 일으키는 고장만을 이 범주에 포함시켰다. 기타 전기공급 계통이나 기기냉각수 계통과 같은 정지냉각 기능을 보조하는 계통의 고장으로 인한 정지냉각 기능상실 사건은 해당기기의 고장 등으로 인한 과도사건에 포함시켰다. 각 대분류 항목별 상세 분류는 수집된 자료 검토결과 발생현상에 따라 세 가지의 중분류 항목으로 나누고, 발생원인에 따라 다시 소분류로 나누어 분류를 수행 하였으며 단계별 설명은 아래와 같다.

- 흡입밸브 단힘

수집된 자료의 검토결과나 정지중 정지냉각 기능상실 사건을 분석한 각종 보고서 등의 분석결과에서 나타난 흡입밸브 단힘 사건은 정지냉각계통이 운전되는 모든 운전모드에서 나타날 수 있는 정지냉각 상실 사건의 주요 원인중 하나이다. 정지냉각 흡입 밸브의 폐쇄는 원자로냉각재 계통보다 저압으로 설계된 정지냉각계통의 과압을 방지하기 위해 가압기 고압력 신호에 의해 정지냉각 흡입밸브가 자동으로 닫히게 하는 연동의 고장이나 부적절한 원자로냉각재 계통의 고압력 오신호 등에 의해 발생하고 있다. 특히 발전소 정지중에는 흡입밸브와 관련된 신호 및 구동력을 공급하는 전력 공급계통의 정비 중에 운전원이나 절차서의 오류로 흡입밸브의 단힘이 빈번히 발생하고 있다. 따라서 수집된 사건 이력 증에서 흡입밸브의 단힘으로 인한 정지냉각 기능상실 사건을 초기사건으로 지정하였으며 주요 원인에 의한 소분류 항목은 다음과 같다.

- 오신호 : 전기적인 충격이나 운전원 실수로 인한 정지냉각계통의 폐쇄 오신호로 인한 흡입밸브 단힘 사고
- 전기 기기고장 : 오신호를 제외한 밸브의 구동 및 신호에 공급되는 전력공급계통의 고장으로 인한 흡입밸브 단힘
- 기타 : 기타 원인을 알 수 없는 경우

- 공기흡입

수집된 자료의 검토결과나 정지중 정지냉각 기능상실 사건을 분석한 각종 보고서 등의 분석결과에서 나타난 공기흡입 현상은 원자로 정지 운전 중, 특히 부분충수 운전과 같이 저수위 운전상태에서 원자로냉각재의 수위 감소로 인해 정지냉각 펌프가 공기를 흡입하여 공동 현상이 발생 정지냉각 기능이 상실되는 사건으로 정지냉각 기능상실의 주요 원인 중 하나이다. 정지 운전 중에 수위 감소는 부분 충수 운전을 위한 냉각재 배수 도중에 과도한 배수로 인해 발생하는 사건과 부분 충수 운전 중 수위 유지 실패나 적은양의 냉각재 상실로 인한 저수위 사건으로 구분될 수 있다.

과배수 사건 발생의 주요 원인은 원자로 냉각재 배수 중에 수위 지시계의 이상으로, 실제 수위보다 높게 지시하는 수위 지시계에 의해 운전원이 정지냉각 펌프의 최소 운전 수위보다 낮게 배수하는 경우이다. 이러한 수위 지시계의 이상은 초기사건 발생 이후 운전원 복구 조치에도 영향을 미칠 수 있다. 저수위 사건은 부분 충수 운전 중에는 정지냉각 펌프가 운전될 수 있는 최소 수위와 부분 충수 운전 수위와의 여유치가 작기 때문에 적은 양의 원자로냉각재 누설 등에 의해 발생할 수 있다. 수집된 사건 이력 중에서 부분 충수 운전이 아닌 다른 발전소 운전 모드에서는 적은 양의 누설에 의해 정지냉각 펌프의 기능 상실 발생이 어렵기 때문에 이 사건은 해당이 없으며, 다량의 냉각재 누설에 의해 정지 냉각기능이 상실되는 사건은 LOCA 초기사건으로 취급한다. 이 사건이 발생할 수 있는 상세 원인별 소분류 항목은 아래와 같다.

- 수위조절 실패 : 부분충수 운전이나 저수위 운전 중에는 적은 유량의 변화에도 정지냉각 계통의 운전에 영향을 받을 수 있으므로 운전원이 수위나 정지냉각 계통의 운전 변수변화에 세심한 주의가 요구된다. 이 운전 모드에서는 원자로냉각재 수위를 적정선에서 유지하지 못하여 정지냉각 기능이 실패한 많은 운전이력이 있으므로 공기흡입으로 인한 정지냉각 기능 상실 사건의 하나로 분류하였다.
- 냉각재 상실 : 부분충수운전이나 저수위 운전 중에는 적은 양의 원자로냉각재 상실 사건으로도 정지냉각 기능을 상실할 수 있다. 실제 사건 이력을 검토한 결과에서도 발전소 정지 운전 중에 다양한 정비작업으로 인하여 원자로냉각재를 상실하여 정지냉각 펌프가 공기를 흡입하여 정지냉각 기능을 상실한 사건이 많이 발생하였으므로 이 항목을 공기흡입으로 인한 정지냉각 기능상실 사건으로 분류하였다.
- 원자로냉각재(RCS) 계통 가압 : 부분충수 운전이나 저수위 운전 중에 원자로냉각재 계통의 이상 가압은 계통내의 압력을 높여 원자로냉각재 배수중에 흔히 쓰이는 Tygon Tube 같은 수위지시계의 수위를 높은 수위로 오지시할 가능성이 있다. 이런 경우 운전원이 오지시된 수위지시계를 이용하여 수위를 낮추고 운전을 수행할 수 있으므로 이 경우 정지냉각계통이 공기를 흡입할 가능성이 있으므로 이런 사건들도 공기흡입 사건으로 인한 정지냉각 기능상실 사건으로 분류하였다.
- 정지냉각 유량증가 : 부분충수 운전이나 저수위 운전 중에는 적은 양의 원자로냉각재 수위 변화에서도 정지냉각 계통 기능을 상실할 수 있으므로, 정지냉각계통의 교체 운전이나 유량조절밸브의 이상 개방 등으로 정지냉각 흡입 유량이 증가하는 방향으로 변화하는 경우에도 원자로냉각재 계통의 수위의 변동이 발생하여 정지냉각계통이 공기를 흡입하여 정지냉각 기능이 상실된 경험이 있으므로 이 항목을 공기흡입으로 인한 정지냉각기능 상실사건으로 분류하였다.

- 정지냉각계통 고장

위에서 언급한 정지냉각상실 사건이외에 정지냉각 기능을 상실하는 경험으로는 정지냉각 계통의 펌프, 흡입밸브를 제외한 유량조절 밸브 등의 고장, 배관의 누설로 인한 고장과 열교환기의 고장 등과 같은 다양한 원인에 의해 발생하고 있다. 이러한 고장은 종류에 따라 계통 운전 에 미치는 영향이 다르기 때문에 이들에 대한 상세 분류가 필요하다. 이 사건이 발생할 수 있는 상세 원인별 소분류는 아래와 같다.

- 정지냉각 펌프고장 : 정지냉각 기능을 수행하던 정지냉각 펌프의 기계적인 고장 등이 발생하는 경우를 정지냉각계통의 고장으로 인한 정지냉각 상실로 분류하였다.
- 열교환기 고장 : 정지냉각 열교환기의 고장으로 냉각기능을 상실하는 경우도 정지냉각계통의 고장으로 인한 정지냉각 기능 상실사건으로 분류하였다.
- 펌프 강제정지 : 정지냉각 운전 중에 운전원이 정지냉각 기능의 이상을 발견하고 펌

프를 보호하기 위하여 펌프를 정지하는 사건도 정지냉각계통의 고장으로 인한 정지냉각 기능상실 사건으로 분류하였다.

- 기타기기고장 : 정지냉각 흡입밸브를 제외한 정지냉각계통과 관련된 밸브의 고장이나 기기냉각수 공급밸브들의 고장도 정지냉각계통의 고장으로 인한 정지냉각 상실로 분류하였다.
- 오신호 : 정지냉각계통의 운전되는 동안 발전소의 정비작업으로 인하여 공학전안전설비작동 계통의 이상 신호가 발생하는 경우에도 정지냉각계통의 운전을 정지하는 사례가 있으므로 이사건도 정지냉각 상실로 분류하였다
- 기타 : 기타 원인 불명으로 인한 정지냉각계통의 고장도 정지냉각계통의 고장으로 인한 정지냉각 상실로 분류하였다.

3) 원자로냉각재 상실사고(LOCA)

정지/저출력 운전 중에는 전출력 운전과는 다르게 원자로냉각재계통의 배열이 순차적으로 변하고, 다양하고 복잡한 정비활동 등이 동시에 수행되므로 원자로냉각재를 상실하는 사고가 여러 경로로 발생하고 있으므로 저출력 및 정지 운전 중에 발생할 수 있는 LOCA 초기사건도 전출력 운전과는 다른 고려가 필요하다.

저출력 운전 중에 발생하는 LOCA 초기사건은 사고 발생 후 전출력 운전과 유사한 거동을 나타내게 되므로 전출력 운전에서와 동일한 형태의 LOCA 초기사건 분류를 이용할 수 있으므로 본 보고서에서는 다루지 않는다.

그러나 정지 중에는 원자로냉각재 계통에 정지냉각계통, 화학 및 체적제어계통 등 여러 계통들이 연결되어 운전되는 동안 다양한 정비작업 중에 운전원이나 절차서의 오류로 인해 냉각재 상실사고가 발생할 수 있다. 실제 수집된 자료에서도 정지 운전 중에 운전원간의 대화 부족으로 인한 인가되지 않은 작업이나, 절차서의 오류로 인하여 원자로냉각재를 다량으로 상실하는 사고가 많이 발생하고 있다. 따라서 본 보고서에서는 출력운전중의 LOCA 보다는 정지중에 발생하는 LOCA 사고에 대한 분석에 중점을 두고 분류를 수행하였다.

- 정지냉각 상실사고 : 본 분석에서는 전출력 PSA에서 취급하는 LOCA의 범주에 대한 상세분석은 수행하지 않고, 정지운전 중에 발생한 LOCA 사고를 중점적으로 검토하여 분류를 수행하였다. 정지운전 중에는 발전소에서 여러 가지 다양한 정비활동으로 관련 계통의 배수 등을 수행하는 도중에 운전원 및 절차서의 오류로 인하여 원자로냉각재를 다양한 누설경로로 누설시킨 경험들을 LOCA로 분류하였다. 국내 표준형 발전소의 정지/저출력 PSA에서는 원자로냉각재의 누설 경로에 따라 원자로냉각재가 격납건물 집수구나 재장전수 탱크 등으로 누설되어 안전주입계통 등을 이용하여 회수할 수 있는 경우와 그 외 보조건물 등으로 누설되어 회수할 수 없는 경우에 따라 LOCA 사건을 두개의 범주로 나누고 있다. 따라서 본 LOCA 항목으로 분류된 사건들은 회수 가능한 경우만 이 범주로 분류하였다.
- 저압경계부 냉각재상실 사고(Interfacing LOCA) : 저압 경계부 냉각재 상실사고는 격납건물 외부의 저압 배관에 고압이 걸려 파단이 발생 원자로냉각재가 격납건물 외부로 누출되는 사고이다. 이러한 사건은 정상 출력운전 중에는 원자로냉각재 계통이 정상운전 압력을 유지하고 있을 때 저압 배관을 격리하고 있던 격리 밸브들의 고장에 의해 발생하며, 사건의 성격상 파단의 크기는 대형 냉각재 상실사고의 범주에 해당된다. 이때 파단이 격납건물 외부에서 발생하기 때문에 원자로 냉각재를 보충하여도 보충된 냉각재가 모두 격납건물 외부로 누출되어 재순환 운전이 불가능하게 되며 궁극적으로 노심손상을 유발시킨다. 정지/저출력 운전 시 원자로냉각재계통의 압력이 높게 유지되는 저출력 운전 중에는 출력운전과 동일한 저압 경계부 냉각재 상실사고가 일어날 수 있지만 현재까지 발생 이력은 없다. 따라서 이 항목 분류에서 취급하는 사건들은 발전소 정지운전 중에 발생하는 냉각재 상실 중에 연계된 계통 등을 통하여 냉각재가 누설되어 회수가 불가능한 사건들만을 취급한다. 원자로 정지중에는 원자로 냉각재계통의 냉각, 배수나 핵연료 교환 등을 위하여 정지냉각 계통이나 화학 및 체적제어계통과 같은 계통 들이 원자로냉각재 계통에 연결되어 운전되고 있다. 또한 여러 가지 다양한 정비 활동중에 운전원이나 절차상의 오류로 인하여 원자로냉각재가 연계된 계통을 통하여 격납용기 밖으로 상실되는 사건이 발생할 가능성이 있으며, 이 경우 누설된 냉각수는 안전주입 등과 같은 계통을 이용하여 회복이 불가능하므로 이

런 사건들을 이 항목으로 분류하였다.

- 증기발생시 세관 파열 : 증기발생기 세관파열은 원자로 냉각재 누설량에 의해서는 소형 냉각재 상실사고의 범주에 들지만, 일차측 냉각재가 격납건물 외부인 이차측으로 직접 누출되는 등의 요인에 의해 독립적으로 취급되는 초기사건이다. 증기발생기 세관파열은 일차측과 이차측의 압력차이에 의해 압력 경계인 증기발생기 세관에 파열이 발생하는 것으로 전출력 PSA에서는 충전 유량을 초과하는 누출량을 발생시키는 파열크기 이상을 증기발생기 세관파열로 정의하며, 주로 1개 세관의 양단 파열(double ended rupture)을 초기사건으로 취급하며 정지/저출력 운전 중에 발생하는 사건도 동일한 특성을 가지므로 이 범주로 분류하였다.

4) 과도사건

저출력 운전 중이나 증기발생기 및 복수기를 이용하여 열제거가 이루어지는 발전소 운전 상태에서는 급수계통 등 일부 계통의 운전만 제외하면 대부분의 계통이 전출력 운전 시와 유사한 상태로 운전되고 있다. 따라서 전출력 PSA에서 고려한 과도사건들이 저출력 및 일부 POS에서도 동일한 초기사건으로 적용될 수 있다. 이같은 과도사건들은 저출력 운전 상태와 원자로 정지 이후, 열제거를 저해할 가능성이 있는 사건들을 파악하여 몇 개의 사건으로 분류한다. 본 분석에서는 과도사건을 아래와 같은 분류를 이용하여 분석을 수행하였다.

- 일반과도사건 : 본 분석에서는 초기사건 발생 이후 발전소의 운전에 미치는 영향에 따라 다음과 같은 전출력에서 분리하여 취급되는 일반 과도사건, 주급수 상실 과도사건, 터빈 우회 복수기 밸브 상실 과도사건, 및 주급수 및 터빈 우회밸브 상실 과도사건을 하나로 묶어 일반과도사건으로 분류하였다.
- 소외전원상실 사건 : 소외전원 상실사고는 여러 가지 원인에 의해 원자력 발전소로 공급되는 외부 전원이 상실되는 사고이다. 저출력 운전 중의 소외전원 상실사고는 전출력 운전과 유사한 사고경위를 보이므로 전출력과 동일하게 초기사건으로 선정하였으며, 정지 운전 중에도 정지냉각계통의 운전을 불가능하게 하므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 발전소 정전사고 : 발전소 외부로부터 공급되는 외부 전원이 차단되는 소외전원 상실 시 비상 디젤발전기가 이용 불가능하여 발생하는 사건이다. 발전소 정지 운전 중에는 대개 한계열의 비상 디젤발전기에 대한 정비가 수행되므로 소외전원 상실후 발전소 정전사고로 발전할 가능성이 출력 운전보다는 상대적으로 높다. 1990년 미국 Vogtle 1호기에서 발생한 정지중 소외전원 상실 후 디젤발전기가 초기 기동에 실패한 소외전원 상실 사고도 정지/저출력시 원전의 안전성 문제를 부각시킨 사건이다. 발전소 정전 사고가 발생하면 일부 축전지를 통해 전력을 공급받는 제어, 계측기기 등 일부 기기를 제외한 전력을 이용하는 모든 기기가 이용이 불가능하게 된다. 따라서 발전소 정전 사고를 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 4.16kV 모선 상실사고 : 원전에서 4.16kV 안전모선은 일반적으로 한 계열의 고압안전주입, 저압안전주입, 격납건물 살수, 1차 기기냉각수, 보조급수와 필수 냉각수 계통에 전력을 공급하며, 480V AC 모선을 통해 한 계열의 안전 계통에 480V 교류 전력을 공급한다. 정지냉각 계통운전은 통상 한 계열의 저압안전주입 펌프를 이용하여 수행되며 운전되는 계열에 전력을 공급하는 전력 계통의 고장은 직접적으로 정지냉각 기능 상실을 유발시키며, 상실된 전력계통에서 전력이 공급되는 다른 기기들의 운전에도 영향을 미치기 때문에 정지냉각 기능 상실 이후의 사고 완화에도 영향을 미치게 된다. 따라서 정지냉각 계통이 운전 중인 계열의 안전 등급 4.16kV 교류 모선의 전력 상실을 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 125V 직류모선 상실 : 안전등급 125V 직류 모선은 4.16kV 안전모선과 480V LC(Load Center)에서 전력을 공급받아 한 계열의 비상 노심냉각, 격납건물 살수, 보조급수와 1차 기기냉각 계통 등에 제어 전력을 공급한다. 정지냉각 운전 중에는 125V 전력 계통의 고장은 제어 전력을 공급받는 기기들의 제어를 불가능하게 하고 120V Vital Bus에 영향을 줄 수 있으므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 120V 필수 모선 전원상실 : 안전등급 제어용 120V 교류 전력계통은 원자로 보호계통, 공학적 안전설비 작동계통 및 발전소 제어계통 등의 여러 캐비닛에 전력을 공급한다. 이들에 공급되는 전력이 상실되면 원자로 보호계통, 공학적 안전설비 작동계통의 오동작으로 저출력 운전시 원자로 정지나, 정지 운전 중에 정지냉각 기능 상실을 일

- 오킨 사례가 있으므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 기기냉각수 및 필수냉각수 상실 : 기기냉각수 계통은 정지냉각 열교환기, 격납건물 열교환기, 필수 냉방수계통의 냉각기 등에 냉각수를 공급한다. 저출력 운전 중에는 전출력 운전과 동일한 사고 특성을 보일 수 있다. 특히 정지 운전 중에 운전 중인 정지냉각 열교환기에 대한 기기냉각수 공급중단은 정지냉각 기능상실 사고를 유발하며, 사고 후 사고완화 계통으로 고려될 수 있는 동일 계열의 고압안전주입 펌프나 격납건물 살수 펌프 등의 운전에도 영향을 미칠 수 있다. 기기냉각 열교환기에 냉각수를 공급하는 필수냉각수의 상실이 발전소 운전 에 미치는 영향은 기기냉각 상실 사건과 동일하므로 두 가지 상실 사건을 하나의 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 공기조화계통 상실사건(Loss of HVAC) : 공기조화계통은 안전 등급 기기들이 있는 방의 온도를 조절하여 계속적으로 기기의 운전을 가능케 하며 기능과 각 방에 공기를 공급하는 기능을 수행한다. 공기조화 계통은 단순히 기기실에 외부공기를 공급하고 배기하는 설비와 기기실로 필수 냉방수 계통에서 공급되는 냉방수에 의해 냉각된 공기를 공급하는 설비로 나뉘어진다. 전자에는 비상 디젤 발전기실 공기조화 계통이 대표적이며, 후자로는 비상노심 냉각계통 공기조화 계통이나, 공학적 안전 설비 스위치 기어실 공기조화 계통 등이 있다. 공기조화 계통의 기능 상실로 정지 운전 에 영향을 미칠 수 있을 가능성이 있으므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 압축 공기 상실 : 압축공기 계통은 안전 및 비안전 등급 계통의 공기구동 밸브 등에 압축공기를 공급하며 압축공기가 상실되면 대부분의 공기구동 밸브들에게 영향을 줄 수 있다. 저출력 운전 중에는 압축공기를 상실하면 출력운전과 동일한 결과를 보일 것이고, 정지운전 중에는 공기구동 밸브의 영향은 다양하게 나타날 수 있으므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.
- 480V 모션 및 전동기 제어반 전원상실 : 안전등급 480V 교류 전력은 크게 부하 센터(LC : Load Center)와 전동기 제어 센터(Motor Control Center)로 나누어지며 LC에서는 용량이 큰 전동기와 전동기 제어센터 등에 전력을 공급한다. LC의 전력 상실은 하위의 전동기 제어 센터와 전동기, 히터, 축전지 충전기 등의 기기에 전력공급이 중지되어 운전을 불가능하게 한다. 480V 교류 안전 모션에서 공급되는 전력을 공급받는 기기들은 전출력 운전 중에는 충분한 다중성이 고려되어 있으며, 밸브들의 경우 전력이 상실되어도 상태를 계속 유지하기 때문에 운전 에 직접적인 영향을 미치지 않을 수도 있으나 정지 운전 중에는 정지냉각계통의 운전 에 영향을 준 사례들이 있으므로 독립된 초기사건으로 분류하였다.

5) 기타사건

기타 사건은 4개의 중분류 범주로 나누어 분류를 수행하였으며 상세내용은 아래와 같다.

- 반응도 사고 : 최근 프랑스를 중심으로 미국 및 독일 등지에서 국부적 또는 급속 붕소희석(Local or Rapid Boron Dilution, 이하 단순히 “붕소희석”으로 기술)에 의한 반응도 사고에 대한 연구를 활발히 수행하고 있으며, 그 결과 발전소가 정지/저출력 상태일 경우 붕소희석에 의한 반응도 사고로 노심이 손상될 확률도 무시될 수 없는 수준이라는 것이 밝혀졌다. 특히 정지중 붕소희석사고는 RCS 내부의 유동이 적기 때문에 냉각재의 흐름이 적고, 각 계통의 정비 중에 사용되는 순수가 원자로 냉각재 계통으로 유입되어 일정 위치에 정체구간이 형성될 가능성이 있기 때문에 국부적인 붕소희석이 핵연료 손상을 유발할 가능성이 상대적으로 높다. 따라서 반응도 사건을 독립적인 초기사건으로 분류하였다[11].
- 저온과압사고(LTOP; Low Temperature Overpressurization): 저온과압 사고는 발전소 정지 운전 중에 수행되는 가압기 만수위 운전과 같은 운전상태에서 일차측에 예기치 못한 질량 혹은 에너지가 유입됨으로서 발생할 수 있다. 저온과압사고는 적절한 사고완화 조치를 수행하지 않는 경우에는 원자로냉각재 계통의 파손을 가져옴으로써 냉각재를 상실하여 궁극적으로는 노심손상을 유발할 가능성이 있다. 특히 정지 운전 중에는 원자로냉각재 내의 기체를 배기하기 위한 가압기의 만수위 운전이 2회 정도 수행되므로 이 운전상태에서 고압안전주입계통의 오동작이나 화학 및 체적제어계통의 충전 조절 밸브의 오동작 등에 의한 질량 유입으로 인한 LTOP 사고가 발생할 가능성이 있다. 또한 가압기의 가열기가 오동작으로 기동되거나 2차측의 열이 1차측으로 유입되는 에너지 추가로 인한 저온과압사고가 발생할 수 있다. 질량 유입에 의한 저온과압사고의 발생 가능성이 에너지 유입에 의한 과압 사고보

다는 발생 가능성이 크며 그 진행 속도가 빠름으로 인하여 사고를 완화하기도 쉽지 않다. 따라서 저온고압사고를 독립적인 초기사건으로 분류하였다.

- 정지냉각기동 실패 : 발전소 정지운전 중에 증기발생기를 이용한 1차 감온 및 감압이 끝난 후 원자로냉각재 계통이 정지냉각 진입조건에 도달하면 정지냉각계통을 기동하여 기기냉각수를 이용한 냉각을 시작하게 된다. 그러나 수집된 자료를 검토한 결과 정지냉각계통이 기동되지 않는 사건이 발생한 경우가 종종 발생하고 있다. 이 사건도 본 보고서에서는 독립적인 초기사건으로 분류하였다.
- 기타 : 원인이 불명하거나 사고로 진행할 가능성이 없는 사건도 참고사항으로 수집하였다.

다. 자료 전산화

본 연구에서는 수집된 저출력 및 정지사건 이력을 전산화하기 위한 전산프로그램을 구축하고 이 프로그램을 이용하여 사건 자료를 입력하고 사용자가 필요한 정보를 적절하게 분류 및 분석할 수 있게 하였다. 저출력 및 정지사건 데이터베이스 전산프로그램은 기본적으로 미리 저장된 사건이력의 발생 일시와 분류코드, 사고개요, 각 발전소의 사양이나 정지/저출력 PSA에서 수행되는 운전 모드 및 POS 정보와 자료출처 등을 제공해 줄 수 있다. 또한 각 초기사건의 종류나 사용자의 요구에 따라 적절한 분류 항목에 따라 분석결과를 제공하는 방법을 적용하여 사용자가 쉽게 분석결과를 검색하고 검색결과를 텍스트 형태로 제공할 수 있도록 구현하였다.

3. 정지/저출력 운전 중 사건/사고 자료 분석

정지/저출력 PSA 초기 사건 선정을 위한 자료 수집은 미국 및 일본의 참고자료와 미국 원전에서 보고된 LER을 검색하여 총 625건의 자료를 수집하였다. 자료 수집 대상 기간은 1973년부터 1999년도까지의 미국 원전에서 발생한 정지/저출력 운전 중 사건이력이 대부분이고, 국내 원전에서 발생한 사건 2 건과 유럽 발전소에서 발생한 건수가 8 건이 수집되었으며 수집된 자료들을 검토하여 사전에 분류된 각 항목별로 분류하여 전산프로그램에 입력을 하였다. 각 자료의 입력내용은 사건개요를 바탕으로 작성하였으나 일부 자료들의 사건개요 등이 충분하지 못해 일부 항목들은 채우지 못한 것도 있었다. 그리고 각 원전의 운전연수나 정지 이력 등에 관한 자료가 충분치 않아 발생빈도 등의 분석은 수행할 수가 없었다. 따라서 본 보고서에서는 정지/저출력 운전 중에 발생한 사건이력들을 각 사건별 건수를 중심으로 몇 가지 간단한 분석만을 수행하였다.

수집된 자료의 분포를 보면 국내 원전인 고리 2, 3 호기를 포함하는 PWR 79개 호기에서 422건, BWR 39개 호기에서 203건의 자료를 수집하였으며 유럽 발전소의 사건 발생 건수는 8건이다. 수집결과로는 PWR과 BWR과의 발전소 수와 사건수를 상호 비교해 볼 때 유사한 사고발생 분포를 보이고 있어 발전소 형태에 따른 사건 발생 빈도 차이는 없으므로 판단된다. 각 초기사건별 사고이력은 표-1에 나타난 것처럼 PWR과 BWR 모두 정지냉각 상실 사고가 가장 많이 발생했으며 발생 건수별로는 과도사건, 기타 및 LOCA 순으로 나타났다. 각 분류 항목별 사건발생 건수를 PWR과 BWR로 나누어 표-2에 정리하였다.

PWR에서의 정지냉각 상실 사건은 발생건수로는 흡입밸브 단힘, 공기흡입 및 흡입밸브를 제외한 정지냉각 계통의 고장 순으로 나타났다. 흡입밸브 단힘으로 인한 정지냉각 상실 사건은 흡입밸브와 관련된 LTOP 방지 기능과 저압 재순환 관련 신호들의 오동작이나 발전소 정비 중에 각종 신호관련 시험이나 정비 등을 수행하던 중에 운전원의 오류로 인한 사건 발생이 주요 원인인 것으로 나타났다. 공기흡입으로 인한 정지냉각 상실 사건은 원자로 냉각재 저수위이나 부분 충수 운전 중에 수위조절 실패로 인하여 운전 중인 펌프가 공기를 흡입하는 사건이 주요원인으로 나타났다. 그 외 정지냉각계통의 고장은 정지냉각 펌프의 고장과 흡입밸브를 제외한 유량조절 밸브 등의 고장이 주요원인으로 나타났다.

BWR에서의 정지냉각 상실 사건은 발생건수로는 흡입밸브 단힘, 정지냉각 계통의 고장 및 공기흡입 순으로 나타났다. 흡입밸브 단힘으로 인한 정지냉각 상실 사건은 PWR과 동일하게 흡입밸브와 관련된 재순환 관련 신호들의 오동작이나 발전소 정비 중에 각종 신호관련 시험이나 정비 등을 수행하던 중에 운전원의 오류로 인한 사건 발생이 주요 원인으로 나타났으며, 특히 격납용기의 격리신호 오동작으로 인한 사건이 많았다. 그 외의 사건들은

PWR과 비교하여 발생 건수가 적었다.

그리고 냉각재 상실사건, 과도사건 및 기타 사건에 대한 분류 결과는 표-2에 나타난 것과 같이 출력 운전 중에 발생하는 고전적인 개념의 냉각재 상실 사건이 아닌 정지운전 중에 각종 보수 작업 중에 운전원 오류나 질차서의 미비 등으로 인하여 원자로냉각재가 RWST 혹은 격납건물 집수구로 전이되는 되는 사건 등이 대부분이었다. 본 분석에서는 냉각재 상실사건을 LOCA, 증기발생기 세관파열 및 저압경계부 냉각재상실(Interfacing LOCA) 세 가지의 중분류 항목으로 나누어 분석을 수행 하였다.

PWR 자료검토 결과 총 28건의 LOCA 사고 중에 27건은 정비수행 중에 원자로 냉각재가 상실되거나 타 계통으로 전이되는 사고로 이 항목으로 분류된 사건들은 상실된 냉각재를 안전주입계통 등을 이용하여 회수가 가능한 사고들이었다. 저압 경계부 상실로 분류된 LOCA 사고는 정지중 원자로냉각재 계통에 연결되어 운전 중인 정지냉각계통이나 화학 및 체적제어계통의 배관 파열 등으로 인한 사고로 격납건물 밖으로 상실된 냉각재를 회수할 수 없는 경우였다. BWR 자료검토 결과는 PWR과는 유사하게 15건은 LOCA로 분류하였고 1건은 저압경계부상실로 분류하였다. 발전소 저출력 및 정지 운전 중에 발생한 증기발생기 세관파단 사고는 본 보고서를 위한 이력수집서는 없었다.

과도사건은 PWR이 BWR보다 사건발생 건수 면에서 많은 이력을 보이고 있으며 발전소 정지중 각종 정비작업 중에 전기공급계통의 상실로 4.16kV 모선과 120V 필수 안전 모선의 상실 사건이 많이 발생 한 것으로 판단된다. PWR 이력에서는 공기조화계통의 상실과 압축 공기계통의 상실로 인한 과도사건 발생은 없었으며 BWR 이력에서는 압축공기상실로 인한 과도사건 발생은 없었다.

수집된 자료 들을 이용하여 사고발생 시점을 국내 표준형 발전소를 대상으로 수행된 정지/저출력 PSA에서 고려된 POS를 이용하여 정리하였으며 결과는 표-3에 나타났다. 앞에서 언급한 것과 같이 수집된 자료들의 사건내용에 관한 기술이 부족하여 모든 자료에 대한 POS 항목에 대한 선정을 하지 못했으며, PWR 120건과 BWR 17건 만이 POS를 분석하였으나 BWR 건수는 제외하였다. PWR에 대한 POS 별 사건발생 건수 분석결과 부분충수 운전 상태인 POS 5에서의 정지냉각 상실 사건이 가장 많은 건수를 보이고 있다.

수집된 자료들의 근본 원인별 사고발생에 대한 정보는 표-4에 나타났다. 모든 건수에 대한 분석은 하지 않고 분류가 가능한 사건만을 분석한 결과 기계적 고장과 운전원 및 질차서 오류로 인한 사고 발생 건수가 비슷한 사고발생 근본 원인으로 나타났고 부분충수 운전 중에 수위시계통의 고장도 주요원인의 하나이다.

분석결과 정지/저출력 운전 중 사고이력은 사건발생 건수 면에서는 노형 차이는 무관하다고 판단되며 부분충수 운전 상태에서 사고발생 건수가 많은 것으로 판단된다. 그리고 사고 발생 근본 원인은 정지/저출력 운전 중 다양한 정비활동 중에 운전원 간의 정보공유 부족으로 인한 인가되지 않은 작업, 운전원의 미숙한 운전 등으로 인한 사고발생이 주종을 이루고 있다.

본 보고서에서 분류된 각 초기사건은 정지/저출력 운전 중에 안전성 확보 방안 등을 위한 연구에 사용될 수 있을 것이며, 국내 발전소에서 수행될 정지/저출력 PSA 수행을 위한 초기사건을 선정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되나 발생빈도 평가 등을 위해서는 외국 발전소의 운전연수나 정지이력 등에 대한 자료수집 등의 연구가 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

정지/저출력 PSA 초기 사건 선정을 위하여 미국 및 일본의 참고자료와 미국 원전에서 보고된 LER을 검색하여 자료를 수집하고 이 자료를 이용하기 위하여 데이터베이스 전산프로그램을 구축하였다. 1973년부터 1999년도까지 수집된 자료는 미국 원전에서 발생한 정지/저출력 운전 중 사건이력이 대부분인 615건과 국내 원전에서 발생한 사건 2 건과 유럽 원전들에서 발생한 6건을 포함하여 총 625건이다.

수집된 자료들을 검토하여 사전에 분류된 각 항목별로 분류하여 전산프로그램에 입력을 하였다. 저출력 및 정지사건 데이터베이스 전산프로그램은 기본적으로 미리 저장된 사건이력의 발생 일시와 분류코드, 사고개요, 각 발전소의 사양이나 정지/저출력 PSA에서 수행되는 운전 모드 및 POS 정보와 자료출처 등을 제공해 줄 수 있다. 또한 각 초기사건의 종류나 사용자의 요구에 따라 적절한 분류 항목에 따라 분석결과를 제공하는 방법을 적용하여 사용자가 쉽게 분석결과를 검색하고 검색결과를 텍스트 형태로 제공 할 수 있도록 구현하였다.

각 자료의 입력내용은 사건개요를 바탕으로 작성하였으나 일부 자료들의 사건 개요 등이 충분하지 못해 일부 항목들은 채우지 못한 것도 있었다. 그리고 각 원전의 운전 연수나 정지 이력 등에 관한 자료가 충분치 않아 발생빈도 등의 분석은 수행할 수가 없었다. 따라서 본 보고서에서는 정지/저출력 운전중에 발생한 사건이력들을 각 사건별 건수를 중심으로 몇 가지 간단한 분석만을 수행하였다.

수집결과 PWR과 BWR과의 발전소 수와 사건수를 상호 비교해 볼 때 유사한 사고발생 분포를 보이고 있어 발전소 형태에 따른 사건 발생 건수 면에서는 차이는 없는 것으로 평가되었다. 정지냉각 상실 사건은 PWR과 BWR 공히 흡입밸브와 관련된 LTOP 방지 기능과 저압 재순환 관련 신호들의 오동작이나 발전소 정비 중에 각종 신호관련 시험이나 정비 등을 수행하던 중에 운전원의 오류로 인한 사건 발생이 주요 원인인 것으로 나타났으며, 부분 충수 운전중에 수위조절 실패로 인하여 운전중인 펌프가 공기를 흡입하는 사건이 주요 원인으로 나타났다. 그 외 정지냉각계통의 고장은 정지냉각 펌프의 고장과 흡입밸브를 제외한 유량조절 밸브 등의 고장이 주요원인으로 나타났다.

냉각재 상실사건은 고전적인 개념의 냉각재 상실 사건이 아닌 정지운전 중에 각종 보수 작업중에 운전원 오류나 절차서의 미비 등으로 인하여 원자로냉각재가 RWST 혹은 격납 건물 집수구로 전이되는 되는 사건 등이 대부분이었으며 저압 경계부 상실로 분류된 LOCA 사고는 정지중 원자로냉각재 계통에 연결되어 운전중인 정지냉각계통이나 화학 및 체적제어계통의 배관 파열 등으로 인한 사고로 격납건물 밖으로 상실된 냉각재를 회수할 수 없는 경우였다.

과도사건은 PWR이 BWR보다 사건발생 건수 면에서 많은 이력을 보이고 있으며 발전소 정지중 각종 정비작업 중에 전기공급계통의 상실로 4.16kV 모선과 120V 필수 안전 모선의 상실 사건이 많이 발생 한 것으로 판단된다. PWR 이력에서는 공기조화계통의 상실과 압축 공기계통의 상실로 인한 과도사건 발생은 없었으며 BWR 이력에서는 압축공기상실로 인한 과도사건 발생은 없었다.

POS 항목에 대한 분석은 PWR 120건에 대한 분석만을 수행했으며 분석결과 부분충수 운전 상태인 POS 5에서의 정지냉각 상실 사건이 가장 많은 건수를 보이고 있다.

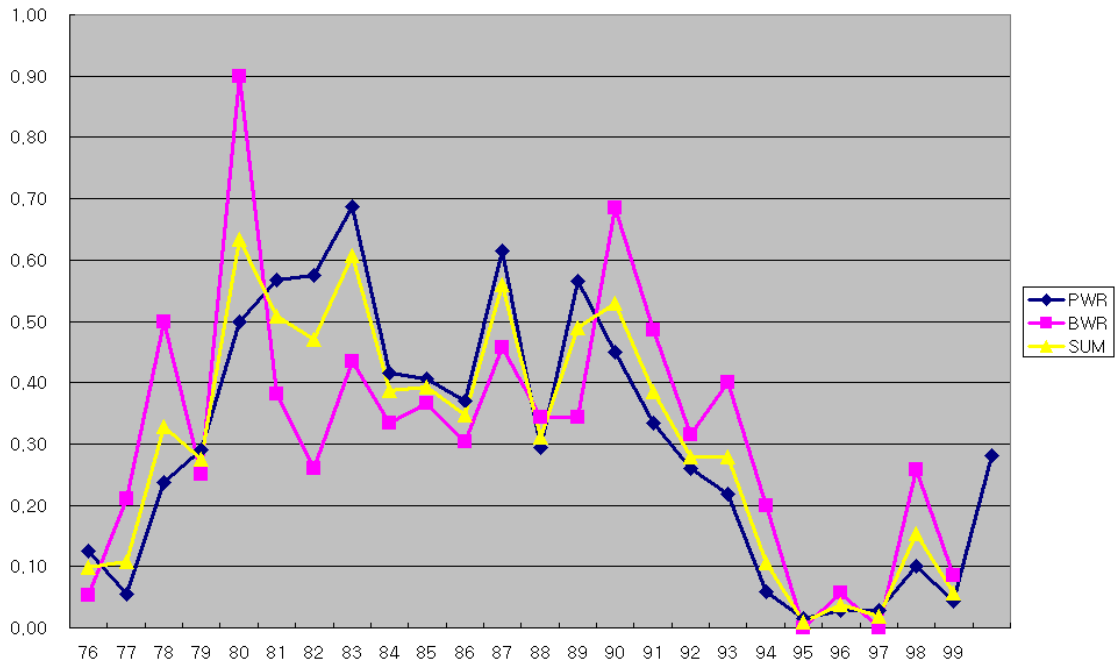
근본 원인별 사고발생에 대한 분석에서는 기계적 고장과 운전원 및 절차서 오류로 인한 사고 발생 건수가 비슷한 사고발생 근본 원인으로 나타났고 부분충수 운전 중에 수위지시계통의 고장도 주요원인의 하나이다.

본 보고서에서 분류된 각 초기사건은 정지/저출력 운전중에 안전성 확보 방안 등을 위한 연구에 사용될 수 있을 것이며, 국내 발전소에서 추후 수행될 정지/저출력 PSA 수행을 위한 초기사건을 선정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되나 발생빈도 평가 등을 위해서는 외국 발전소의 운전연수나 정지이력 등에 대한 자료수집 등의 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 저출력 및 정지냉각운전 관련 규제동행 및 사건사례 분석보고서, KIN/AR-771, 2001. 3. KINS

2. Shutdown and Low-Power Operation at Commercial Nuclear Plants in the United States, NUREG-1449, USNRC, Feb. 1992.
3. Probabilistic Safety on French 900MWe Plants, EPS 900, CEA/IPSN, 1990
4. Probabilistic Safety on French 900MWe Plants, EPS 1330, CEA/IPSN, 1990
5. Evaluation of Potential Severe Accidents During Low Power and shutdown Operations at Surry, Unit1, NUREG/CR-6144 USNRC, Jun.1994.
6. 원자력발전소 사건/고장 사례의 분석 “원자로 정지중 붕괴열 제거 기능 상실에 관한 사례”, JAERI-M91-143, JAERI. 1991.
7. 가압경수형 원전 원자로 정지시 붕괴열 제거 기능 상실사례의 수집/분석, JAERI, 1994.
8. Residual heat Removal Experience and Safety Analysis, Pressurized Water Reactors, EPRI, Jan. 1983.
9. Loss of Vital AC Power and Residual Heat Removal System during Midloop Operation at Vogtle Unit 1 on March 20, 1990, NUREG-1410, USNRC, Jun. 1990.
10. 영광 5,6 호기 확률론적 안정성 평가, 정지/저출력 분석보고서, 전력연구원, 2000. 11.
11. 표준 원전에서의 붕소희석 반응도 사건에 대한 정성적 분석, KAERI/TR- 2436/2003, KAERI. 2003. 3



1

표 1. 노형별 초기사건별 발생 현황

	(LOSC)	(LOCA)	(GTRN)	(ETC)	
PWR	183	28	114	97	422
BWR	119	16	46	22	203
	302	44	160	119	625

표 2. 초기사건별 분류

대분류	중분류	소분류	PWR		BWR	
			건수	총계	건수	총계
정지냉각 상실 사건	흡입밸브 단협	오신호(SIGFAIL)	36	68	57	68
		전기기기고장(ELEFAIL)	16		26	
		기타(ETC)	16		9	
	공기흡입 (AIRINS)	수위조절실패(LOLEV)	38	60	0	2
		냉각재상실(LOINV)	10		0	
		RCS 가압(RCSPR)	2		0	
		정지냉각유량증가(FLINC)	5		2	
		기타(ETC)	5		0	
	정지냉각계통 고장 (SCSFAIL)	정지냉각 펌프고장(PPFAIL)	15	53	1	18
		열교환기 고장(HXFAIL)	3		0	
		강제정지(PPOP)	7		0	
		기타 기기 고장(SDFAIL)	14		3	
		오신호(SIGFAIL)	5		10	
		기타(ETC)	9		4	
냉각재 상실 (LOCA)	냉각재 상실(LOCA)	27	28	15	16	
	증기발생기 세관 파열(SGTR)	0		0		
	저압경계부 냉각재상실사고(INTLOCA)	1		1		
과도사건 (GTRN)	일반과도사건(GTRN)	33	114	9	46	
	소외전원 상실사고(LOOP)	12		6		
	발전소 정전사고(SBO)	0		0		
	4.16kV 모선 전원 상실사고(LO416)	41		10		
	직류모선 전원상실 사고(LODC)	3		1		
	필수모선 전원상실사고(LOVIT)	14		11		
	기기냉각수 및 필수냉각수 상실 사고(LOCCW)	4		1		
	공기조화계통 상실사고(LOHVAC)	0		2		
	압축공기 상실사고(LOIA)	0		0		
	480V 모선 및 전동기 제어반 전원 상실사고(LO480)	7		6		
기타	반응도 사고(REACT)	59	91	9	22	
	저온과압사고(LTOP)	8		0		
	정지냉각기동실패(SCIN)	12		7		
	기타	16		6		

표 3. 발전소 운전상태(POS)별 사건발생 건수

POS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	N/A	N/A	4	4	47	3	0	2	0	3	2	2	1	N/A	N/A	68
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	4
	4	5	2	2	5	2	1	1	0	0	0	0	1	1	3	27
	2	9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	21
	6	14	12	8	52	5	1	3	0	3	2	2	3	6	3	120

표 4. 근본 원인별 사건발생 건수

	PWR		BWR			
	건수	비율	건수	비율		
	34	10.46%	0	0.00%	34	7.11%
	79	24.31%	33	21.15%	112	23.43%
	155	24.31%	81	21.15%	232	23.43%
	57	17.54%	42	26.92%	100	20.92%
SUM	325	100.00%	156	100.00%	478	100.00%

표 5. 미국의 정지 운전 중 발생한 주요 사건 관련 NRC 문서 발행현황

U.S.NRC 규제관련문서	주요 내용	대상 발전소명	발생년월일
IN 80-20		Davis Besse 1	80.04.19
Bulletin 80-12		Davis Besse 1	80.04.19
IN 81-09		Beaver Valley 1	81.03.05
GL 84-23	BWR 원자로 용기 수위계측기의 부정확성 문제에 대해 경고함.		
IN 86-101		Catawba 1	85.04.22
		San Onofre 2	86.03.26
		Sequoyah 1	85.10.09
		Zion 2	85.12.14
IN 87-12		Diablo Canyon 2	87.04.10
IN 87-23		Diablo Canyon 2	87.04.10
GL 88-17		Waterford 3	88.05.12
		San Onofre 3	88.07.07
		Sequoyah 1	88.05.23
IN 89-67		Salem 1	89.05.20
IN 90-06	전원상실	Comanche Peak 1	89.07.18
IN 90-25S1 NUREG-1410	전원상실	Vogtle 1	90.03.20
IN 90-55		Catawba 1	90.06.11
		Braidwood 2	90.03.18
		Maine Yankee	90.06.04
IN 91-22	전원상실	Diablo Canyon 1	91.03.07
	냉각재 상실	Oconee 3	91.03.08
	전원상실	Oyster Creek*	91.03.09
	냉각재 상실	Calvert Cliffs 2	91.03.12
IN 92-16		Vogtle 1	91.10.26
IN 92-16S1		Prairie Island 2	92.02.20
N/A LER 92-105	고압주입계통의 정지시험 수순 및 전원계통의 보수작업관리가 부적절했기 때문에 RHR 유량 제어 조절밸브의 전원이 상실되고 동조절밸브가 완전 열렸음		
NUREG-1449	정지 운전 중에 발생함 사건에 대한 위험도 분석		
IN 92-13	소외전원상실	Diablo Canyon 1	91.03.07
		Palo Verde 3	91.11.15
		Fermi 2	91.12.12
IN 95-03		Wolf Creek	94.09.17
	발전소 정지중 냉각재 상실과 사고완화계통의 잠재적인 이용불능에 대한 경고		
ACRS-440169	Establishing a benchmark on risk during low-power and shutdown operations		
ACRS-446173	Proposed Final GL "Loss of Reactor Coolant Inventory and Associated Potential for Loss of Emergency Mitigation Functions While in a Shutdown Condition"		
GL 98-02	Loss of reactor coolant inventory and associated potential for loss of emergency mitigation functions while in a shutdown condition		
IN 94-36	RCS에서의 비응축성 가스 축적사건에 대한 경고	Sequoyah 1	93.09.
IN 96-37		Surry 1	95.09.13
IN 96-65		Haddam Neck	96.08.28
SECY-00-07	정지냉각기능상실, 냉각재 재고량상실, 전원상실, 화재, 침수 등 22건의 다양한 양상의 사건 유형이 90년대 후반에도 지속적으로 발생하고 있음을 경고함		
SECY-01-0067	Report on Support to the American Nuclear Society for the Development of Standard on Probabilistic Risk Assessment for Low Power and Shutdown		