

원자력발전소의 화재위험도 평가

김 동 일 (한국화재보험협회 부장)

1. 머리말

핵분열 연쇄반응이 원자폭탄을 만들 수 있을 만큼 강력한 에너지를 갖고있으며, 원자력발전소 또한 이러한 핵분열의 원리를 이용하여 전기를 생산하는 것은 틀림없지만, 우리가 막연히 생각하고 있는 것처럼 원자력발전소에 위험이 존재하는 것은 아니다.

원자력발전소의 화재는 일반 산업시설 등의 화재와는 달리 방사능 오염이라는 치명적인 결과를 초래할 수 있기 때문에, 설계단계에서부터 모든 경우의 사고를 가정하고, 이에 대처할 수 있는 다중성(Redundancy)과 다양성(Diversity)의 기능을 보유하도록 하고 있다. 특히, 화재는 원자력발전소의 정상운전을 저해할 수 있는 여러 요소 중 그 영향이 가장 큰 외부사건 가운데 하나로서, 발전소 내 어느 곳에서 화재가 발생하더라도 발전소를 안전정지시킬 수 있도록 설계하고 또한, 설계개념을 저해하지 않는 수준으로 발전소를 운영, 관리토록 하고 있다.

그러나 화재는 발화원과 가연성물질이 존재하는 곳이라면 언제라도 발생하고 확산될 수 있으므로 원자력발전소의 이러한 심층방어개념에 따른 화재방호 활동에도 불구하고 화재로부터 완전히 자유로울 수는 없다. 이와 같이 원전에서의 화재는 어떠한 형태로든 원자력 안전에 영향을 줄 가능성을 내포하고 있는 것이다.

본 고에서는 원자력발전소의 안전에 관한 사항을 개관하고, 설계기준에 의한 화재위험 또는 특수상황의 화재위험에 대한 정성적·정량적 평가 방법을 고찰하였다.

2. 원자력발전소의 화재안전

○ 원자력 안전의 개념

원자력 안전은 곧 방사선 안전이라고 해도 좋을 만큼 이들은 밀접한 관계가 있다. 화력발전에서는 대부분 화석연료의 연소에 의한 에너지로 전기를 생산하지만, 원자력 발전에서는 핵분열 반응에 의해 에너지를 생산하고 이를 전기로 변환시킨다.

원자력 발전의 원료가 되는 천연 또는 농축 우라늄 원자가 핵분열 할 때는 에너지와 함께 원자핵이 생성되는데, 이들은 α , β , γ 선, 중성자 등과 같은 방사선을 방출하는, 곧 방사성 물질이다.

원자력발전소에서 이러한 방사성 물질을 사용하는 한 이의 유해성 자체를 제어할 수는 없다. 그러므로 방사선에 의한 피폭을 최소화하기 위해서는 방사선을 적절히 차폐하고, 방사성 물질이 원자력 시설로부터 환경으로 유출되는 것을 방지해야 한다.

방사선은 원자력발전과 관련된 거의 유일한 위험요인이다. 원자력발전소는 대형의 폭발 위험이 없고 화학적인 공해를 유발하지도 않으며 대량의 쓰레기를 발생시키지도 않는다. 따라서 원자력에서의

모든 안전활동은 바로 방사선 또는 이를 방출하는 방사성 물질의 외부 누출을 방지하는데 집중되어 있다고 해도 과언이 아니다.

원자력발전소를 비롯한 원자력 관련 시설은 안전성 측면에서 다음과 같은 특성을 지니고 있다.

- 1) 원자로 운전시 많은 양의 핵분열 생성물 즉, 방사성 물질이 생성, 축적된다.
- 2) 원자로를 적절하게 냉각시키지 못하면 방사성 물질이 외부로 누출될 수 있다.
- 3) 원자로가 정지되더라도 붕괴열(Decay Heat)이 계속 발생하기 때문에 상당기간동안 지속적인 냉각이 이루어져야 한다.

원자로는 화력발전소의 보일러와는 달리 정지 후에도 붕괴열을 계속적으로 제거해야 하며, 실제로 대부분의 복잡한 안전설비들은 이와 관련되어 있다.

○ 원자력발전소의 안전해석

원자력발전소에 대한 안전해석, 즉 안전성평가는 안전과 관련되는 중요 기기 및 계통이 설계기준에 만족하는가를 확인하고, 정해진 방사선 선량 및 방사성물질 방출량이 제한 범위 내에 있도록 이를 보장하기 위해 수행된다. 즉, △안전성에 중요한 계통 및 기기의 오작동 또는 고장이 원전의 안전성에 미치는 영향을 평가하여 안전기준에 적정한가를 확인하고, △안전에 중요한 기기 및 계통에 대한 운전제한조건, 기술지침 등을 결정하는데 필요한 정보를 제공하며, △발전소 제한구역 경계와 저인구 구역 경계를 설정하여 대중의 안전성을 확보하는데 필요한 정보를 제공하기 위한 것이다.

원자력발전소에서의 사고는 설계기준사고와 중대사고로 구분하는 것이 일반적이다. 설계기준사고는 안전에 중요한 기기의 설계변수, 운전제한조건, 기술지침 요건 등을 확립하기 위해 해석되는 모든 사고를 통칭하며, 중대사고는 설계기준사고시 이에 대비하는 일련의 안전설비가 정상작동하지 않았을

때 발생할 수 있는 사고로서, 일반적으로는 노심손상사고를 의미한다.

원자력발전소의 안전성평가 방법은 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 구분하고 있다. 설계기준사고는 결정론적 방법으로, 중대사고는 확률론적 방법으로 각각 해석하는 것이 일반적인 관례이지만, 설계기준사고의 해석 중에서 특히 노심냉각계통의 성능 확인을 위한 냉각재상실사고 해석은 보수적인 결정론적 방법과 더불어 확률론적 방법이 이용되고 있으며, 또한 중대사고에 대한 해석에서도 확률론적 방법을 보완하는 결정론적 방법이 도입되는 등 그 구분이 점차 사라지고 있다.

○ 원자력발전소 안전설비의 화재방호 개념

원자력발전소의 안전설계 개념은 다중방호벽에 의한 것으로서, 5종의 방호벽을 설치함으로써 방사능 누출 가능성을 최소화시킬 수 있다. 여기에 부가하여 안전장치들은 다중성(Redundancy)과 다양성(Diversity) 개념을 기초로 설계 및 설치된다.

가압경수로형 원자력발전소의 경우에는 다중성을 부여하기 위하여 A, B 2개의 트레인으로 구분하였고 가압중수로형의 경우에는 다양성을 부여하기 위하여 같은 기능을 수행하는 안전장치를 그룹 1 안전계통과 그룹 2 안전계통으로 각각 분리하여 설치하였다.

가압경수로형과 가압중수로형 원자력발전소의 화재방호 개념도 이와 같은 안전계통 설계 개념 하에서 출발한다. 가압경수로형의 경우에는 화재발생시 원자로를 정지시키고 방사능누출을 방지시키는 안전계통 내의 두개의 계열이 동시에 영향받지 않도록 격리되어 있어야 하고 전력 및 신호를 전달하는 케이블 트레이도 일정한 이격거리를 유지하여야 한다는 것이다.

가압중수로형의 안전설비 화재방호 설계 개념도 이와 동일하다. 단지 두 개의 계열분리 대신 두 개

의 안전그룹 간의 분리가 다를 뿐이다.

○ 원자력발전소 화재방호 기준

국내 원자력발전소의 화재방호계통은「원자력법」과「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」에 법적 근거를 두어 인허가 심사 및 검사를 수행하고 있으며, 화재방호계통의 기술기준은 해당 원전 기술도입국의 기술기준과 국내 소방법 및 관련 법규, 전력산업기술기준에 따라 설계, 설치 및 운영되고 있다.

우리 나라 원전은 두 가지 유형이 있는데 고리, 영광, 울진에 설치된 가압경수로형 원전은 미국에서 도입되었고, 월성에 설치된 가압중수로형 원전은 캐나다에서 도입되었다.

경수로 중심의 미국의 원전 화재방호 요건으로는 원자력 규제위원회에서 제정한 10CFR50.48과 이의 부록인 Appendix R, 그리고 이에 대한 세부지침인 BTP CMEB 9.5-1이 있다.

중수로 중심인 캐나다의 원전에 대한 화재방호 요건으로는 CAN/CSA-N293이 있다. 이 요건은 가압중수로형 원전의 특성을 반영하여 설계, 건설, 시운전, 운영, 폐로 단계에서의 화재방호 표준을 제공하기 위하여 1987년에 제정된 후 1995년에 개

정되었다.

3. 원자력발전소의 화재위험도 평가

○ 원자력발전소의 화재사고 분석

AECL, COG, INPO, WANO, American Nuclear Insurance Pool 자료 등에서 수집한 화재사고 182건을 기초로 원자력발전소의 화재사고를 분석하였다. 이 자료가 전세계 모든 원자력발전소의 화재사고를 체계적으로 분석한 것은 아니지만, 원자력발전소 화재사고에 대한 경향을 이해하는 데에는 도움이 될 수 있을 것이다.

▷ 화재의 종류

화재의 종류로서는, 표 1에서와 같이 패널/전기부품 화재가 67건으로 36.8%를 차지하였으며 오일누출화재 22건, 수소화재 21건, 기타 화재 20건, 기계부품 화재 19건, 케이블트레이 화재 9건, 임시가연물 화재 7건, 일반가연물 화재 5건, 소규모 전기화재 4건 및 미상 8건으로 나타났다.

▷ 화재발생 장소

표 1. 화재 종류별 발생건수

구분	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	미상
건수	4	9	7	22	67	19	21	20	5	8
비율(%)	2.2	4.9	3.9	12.1	36.8	10.4	11.6	11.0	2.7	4.4

※ 이 분석에서 사용한 화재의 종류는 다음의 9개 형태로 분류하였다.

- F1 : 소규모 전기화재
- F2 : 케이블트레이 화재
- F3 : 임시 가연물 화재
- F4 : 오일 누출화재
- F5 : 패널 및 전기부품 화재
- F6 : 기계부품 화재
- F7 : 수소 화재
- F8 : 기타 화재
- F9 : 일반가연물 화재

표 2. 발생 장소별 건수

구분	원자로건물	서비스건물	터빈건물	기타	미상
건수	30	28	65	37	22
비율(%)	16.5	15.4	35.7	20.3	12.1

화재가 발생한 장소별로는 (원자로의 형식에 따라 발전소의 배치는 약간의 차이가 있지만), 표 2에서와 같이 터빈건물에서의 화재가 65건으로 35.7%를 차지하였으며 원자로건물 화재 30건, 서비스건물 화재 28건, 기타건물 화재 37건, 미상 22건으로 집계되었다.

▷ 발화 원인

발화원인으로는 표 3에서와 같이 전기가 72건으로 39.6%를 차지하였으며 가스 23건, 유류 20건, 기계장치 17건, 화기작업 18건, 방화 1건, 기타 19건, 미상 12건으로 각각 나타났다.

발화원인으로 가장 높은 비율을 나타내고 있는 전기화재를 세분하여 분석한 결과는 표 4와 같다.

▷ 사고/고장 등급

사고/고장 등급별로는, INES#3 2건, INES#1 1건, INES#0 3건, 미구분 176건으로 나타났으나, 구분되지 않은 사건의 대부분은 0등급으로 추측된다.

원자력발전소에서는 특히, 터빈건물에서 많은 화재가 발생하였고 화재의 종류로는 일반화재에서처럼 전기화재가 많은 비율을 차지하였다. 그러나, 원자력발전소의 사고/고장 등급 분류체계에 의하면 INES#3 이하가 대부분으로서, 원자력 안전에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

원자력발전소의 화재발생빈도를 다른 검토에서

분석한 바에 의하면 가동 연수 6, 7년에 1회 정도의 화재가 발생하는 것으로 나타나고 있다.

원자력발전소에서는 일반건물이나 산업시설보다 엄격하게 화재사고를 다루고 있기 때문에 상대적으로 화재발생빈도가 높게 집계될 수 있으며 또한, 화재의 영향이 대부분 경미한 결과로 나타나고 있기는 하지만, 상황에 따라서는 TMI 사고와 유사한 사고가 다시 발생하지 않는다는 보장은 없을 것이다. 화재위험도를 분석하여 이에 따른 조치를 수행하는 것도 그런 이유에서이다.

○ 화재위험도 평가 개요

원자력발전소의 화재위험도 평가는 ▲화재위험도분석(FHA, Fire Hazard Analysis)과 ▲화재안전정지분석(FSSA, Fire Safety Shutdown Analysis) 및 ▲확률론적안전성분석(PSA, Probability Safety Analysis) 등 크게 3분야로 나누어 수행하고 있다.

화재위험도분석은 화재발생시 발전소 안전정지 기능의 수행 여부 및 환경(대기)으로의 방사능 누출을 최소화할 수 있는지 여부를 분석하는 것으로서, △발화 위험, △연소확대 위험, △화재방호 시설, △화재방호 프로그램 등이 포함된다.

화재안전정지분석은 임의의 방호구역 내에서 설계기준 화재가 발생하였을 때 그 외의 장소에서 발전소의 안전정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기

표 3. 발화원인별 건수

구분	가스	기계	기타	전기	유류	화기	방화	미상
건수	23	17	19	72	20	18	1	12
비율(%)	12.7	9.4	10.5	39.6	11.1	9.9	0.1	6.7

표 4. 화재의 종류별 발생건수

구분	전기기기	케이블	정전기	지락	단락
화재발생건수	45	9	5	6	7
비율(%)	62.5	12.5	6.9	8.4	9.7

능이 보존되는지에 관하여 분석하는 것으로서, 안전정지 기능에 따른 계통 및 기기와 안전정지관련 케이블의 격리요건 및 화재의 영향 등을 평가하는 것이다.

확률론적 안전성평가는 기기의 신뢰도 사고추이 분석 및 고장확률 등을 통하여 각각의 시나리오에 의한 중대사고를 정량화하는 것이다. 즉, 확률론적 방법으로 노심손상빈도 및 격납건물의 손상확률을 정량화하고 방사능 누출로 인한 주민건강, 재산피해 및 주변환경에 미치는 결과를 종합적으로 분석하는 기술이다.

○ 화재위험도 및 화재안전정지 분석

화재위험도 분석은 화재위험으로부터의 안전을

보증하기 위한 것으로 △화재로 인한 피해를 감소시키고, △화재시 발전소를 안전하게 정지시키며, △방사선 물질이 대기로 누출되는 것을 최소화하기 위하여, 설계 이전이나 설계과정 중에 이를 시행함으로써 화재위험을 충분히 고려하도록 하는 과정이다.

그림 1은 원자력발전소의 화재위험도 분석 개념을 나타낸 것이며, 그림 2는 원자력발전소의 화재위험도 분석 절차를 나타낸 것으로서 이는 DOE/NE-013의 화재안전정지능력 분석 절차 내용을 우리 실정에 맞추어 작성한 것이다.

원자력발전소의 화재위험도분석 절차는 일반건물의 화재위험도 분석 절차와 대동소이하다. 우선 건물 설계자료를 수집하여 먼저 화재구역을 정의하고 각 화재구역에서의 화재위험요소와 안전정지기

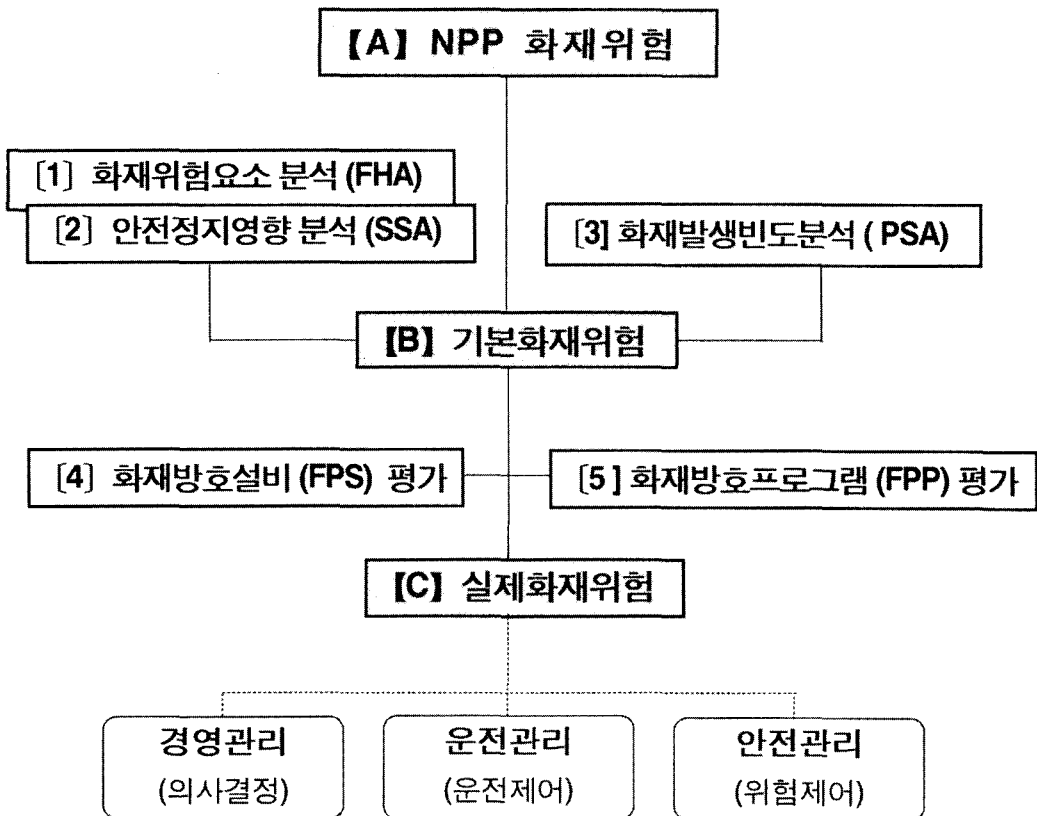


그림 1. 원자력발전소 화재위험도 분석 개념

능을 파악한 다음, 이를 바탕으로 화재위험도를 분석한다. 이 때 화재 시뮬레이션이 이용될 수 있다. 다음으로 화재방호상의 문제점을 도출하고 이에 따른 개선방안을 수립하는 것이다.

단지 차이가 있다면 원자력발전의 안전계통에 관련된 사항이 추가된다는 점이다. 그림 2에 정리된 화재위험도분석 절차 내용을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

(1) 발전소 자료수집

분석을 수행하기 전에 분석에 필요한 발전소 자료를 수집한다. 각종 도면, 절차서, 기기 목록, 계통 설명서 및 DM(Design Manual) 등과 같은 각종 문서가 해당된다. 발전소 현장조사 등의 단계에서 자료가 추가로 수집된다.

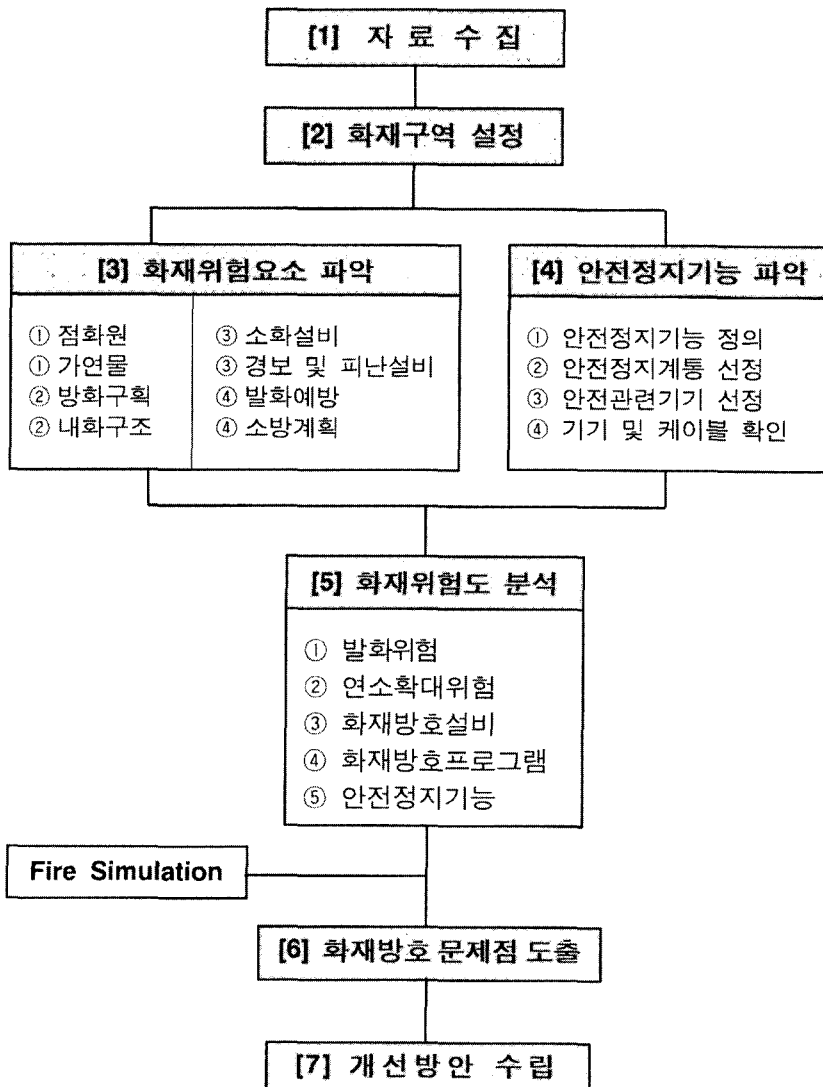


그림 2. 원자력발전소 화재위험도 분석 절차

(2) 화재구역 설정

화재발생과 연소확대 위험을 감소시키기 위하여 발전소 계통과 구역의 내부 또는 그 사이의 공간 또는 구조체에 의한 화재 격리를 하고 있다.

이와 같은 격리 단위로 화재구역(Fire zone)을 설정하게 되는데, 화재구역은 설계초기에 화재격리 개념(Fire separation concept)에 의해 설정하여야 하며, 설계과정에서 나타나는 화재위험요소 분석을 통하여 구체화된다. 또한, 적절한 화재위험평가 방법에 의해 안전성을 확보하거나 보완될 수 있다.

화재구역을 설정하기 위해서는 점화원과 가연물에 의한 화재가능성과 피해정도를 고려하여야 하며, 안전정지에 대한 화재격리 개념에 따라 정하여야 한다.

(3) 화재위험요소 파악

화재위험요소는 일반건물과 같으며, 이의 항목을 대별하면 다음과 같다.

- ① 발화 위험 : 점화원 및 가연물
- ② 연소확대 위험 : 방화구획 및 내화구조
- ③ 화재방호 시설 : 화재경보설비, 소화설비 및 피난설비
- ④ 화재방호 프로그램 : 소방계획 및 발화예방

(4) 안전정지 기능 파악

- ① 발전소 안전정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기능을 정의한다. 이 기능은 다음 단계인 원자력발전소 정지 계통을 선정하는 기준이 된다.
- ② ①에서 정의된 안전정지 기능을 수행하는데 필요한 계통을 선정한다. 안전정지 계통에는 직접 안전정지 기능을 수행하는 계통뿐만 아니라 이들을 보조하는 계통도 포함된다.
- ③ ②에서 선정된 안전정지 계통을 기준으로 안전정지에 필요한 기기를 선정하고 이와 관련

된 전원 및 제어 케이블을 파악하여 목록을 작성한다. 이 단계에서 안전정지에 직접 관련되지 않은 회로의 손상으로 인한 2차적인 영향도 평가한다.

- ④ 발전소 기기배치도 및 계통 도면을 이용하여 각 화재구역에 존재하는 안전정지 기기 및 케이블을 파악한다. 케이블 위치 확인을 위하여 도면, 배선데이터베이스 또는 추적장치가 이용된다.

(5) 화재방호 문제점 도출

①~④ 각 화재구역별 화재 방호상의 문제점, 즉 발화방지·경보·소화·피난·소방계획 등에 대한 문제점을 도출한다.

⑤ 각 화재구역에서 화재가 발생하였을 경우 안전정지 능력에 미치는 영향을 분석한다. 이 때, 해당 화재구역에 있는 모든 기기와 케이블은 손상되는 것으로 가정하고 안전정지 성공 여부를 판단하며, 또한 화재방호 수준을 검토하여 화재가 인접 구역으로 전파될 가능성을 평가한다.

(6) 개선방안 수립

5단계에서 파악된 문제점에 대하여 이행 가능한 개선방안을 도출한다.

○ 확률론적 화재위험도 분석

확률론적 안전성 분석(PSA) 기법의 목적은 원자력 시설로 인한 위험도를 정량적으로 계산하는 것이다. 이 기법은 1960년대 후반 영국에서 개발되었으나 1970년대 중반 미국의 Rasmussen 등에 의해 발전되었으며 WASH-1400으로 흔히 알려져 있다.

확률론적 안전성 평가에 의해 계산되는 개별 원전의 위험도가 아주 정확하지는 않지만, 안전성에 관한 균형 잡힌 통찰을 가능하게 하였고, 원자력 발전소의 전반적인 안전성을 다른 발전 수단이나 산

업시설과 비교하는데도 이용되었다. 또한 전원계통이나 냉각회로 등에서 계통간의 상호 독립성이 중요함을 부각시켰다. WASH-1400에서는 다양한 예방조치에도 불구하고 중대사고의 가능성이 그때까지의 예상보다 크다는 점과, 그렇지만 그 피해는 일반적인 생각보다 훨씬 작다는 사실을 밝혀주었다. PSA는 다음의 3단계로 구분하여 수행한다.

▷ Level 1 PSA (계통신뢰도 분석) : 사고 요인 별로 노심 손상에 이를 수 있는 사고경위를 파악하고, 노심 손상 발생빈도를 추정

▷ Level 2 PSA (격납건물 분석) : 노심 손상 시 방사성물질의 거동을 분석하고, 격납건물의 건전성과 파손시 방사능 방출량 평가

▷ Level 3 PSA (결말 분석) : 사고로 인한 격납건물 파손시 대기 중으로 방출되는 방사성 핵종의 대기중 이송을 평가하고, 피폭으로 인해 대중에게 미치는 건강상 영향과 경제적 손실 평가

2단계 PSA와 관련되는 열 수력현상 및 방사선원의 불확실성이 크기 때문에, 실제 발전소에 대해 3단계 PSA까지 수행되는 경우는 거의 없다.

4. 맺는 말

원자력발전소는 어떠한 시설보다 안전하게 설계, 건설되어 있으며 유지 보수에 있어서도 완벽을 추구하고 있어 시설의 경년에 따른 노후화에도 불구하고 사고의 개연성은 매우 낮다. 그러나 원자력 사고의 직·간접적 원인은 기술적, 공학적 결함에 서보다는 운전원의 실수 즉, 휴먼에러(Human Error)와 안전규정의 무시에 의한 경우가 많다.

따라서 원자력발전소의 화재위험도 평가에 있어서는 휴먼에러 분야의 적용 비중이 커져야할 것이며, 더불어 각 분야의 평가기준 세분화에 우선하여 누락된 분야를 최소화하는 일이 중요할 것이다.