'03 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

울진4호기 증기발생기세관파단 사고경위전조(ASP) 분석
Accident sequence Precursor Analysis of Ulchin Unit 4 Steam Generator Tube Rupture

오 규명, 김 민철, 류 용호
한국원자력안전기술원

요 약

본 연구에서는 울진 3,4호기 PSA 모델을 토대로 울진 4호기에서 발생한 증기발생기 세관파단사고(SGTR)에 대해 ASP(Accident Sequence Precursor)를 분석하였다. 확률론적 위험도 평가 코드(SAPHIRE 및 GEM)를 사용하여 SGTR 고장수목 및 사건수목을 정량화하였고, 전 출력 및 원자로 정지조건에 대해 정량적인 CCDP 계산값을 토대로 위험도에 중요한 영향을 미치는 Precursors를 평가하였다. 또한 미국 Palo-Verde ASP 프로그램 및 울진 4호기 SGTR 사고 경위를 고려하여 기존 PSA 모델에서 초기사건 빈도, 사건수목 및 운전원 복구조치 실패 확률 변화가 CCDP에 미치는 영향을 비교·검토하였다. 울진 4호기 SGTR 사고는 ASP 프로그램에 따라 Important Precursor로 분류되었다. 아울러, 동 세관파단사고 후 주요 안전계통의 고장을 가정하여 CCDP Profile을 분석함으로써 울진 4호기 증기발생기 세관파단 사고에 대해 위험도 관점에서 주요 사고경위(Accident Sequence)를 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Accident sequence precursor(ASP) analysis was performed for steam generator tube rupture(SGTR) occurred in Ulchin Unit 4 of April 2002. The fault tree and event tree were established and quantified using the PRA Code(SAPHIRE and GEM), and risk important precursors were derived from conditional core damage probability(CCDP) at power and shutdown condition. Impact of initiating event frequency and failure of operator recovery action in the PSA model were investigated referring Palo-Verde ASP model and accident sequence of Ulchin Unit 4 SGTR. This result shows that the SGTR event of Ulchin Unit 4 was identified as an important precursor categorized in the ASP program. Also, important precursors were analysed from the CCDP profile assuming major mitigating system failure during this event.

1. 개요

1.1 일반 개요

일반적으로, 가압경수로형 원전의 증기발생기 세관파단 초기사건에 대한 확률론적 위험도 평가 결과는 총 노심손상빈도에 크게 기여를 하지 않는 것으로 나타났으나, 방사성 방출물이 주증기 안전 밸브 또는 증기우회 대기방출밸브 등을 통해 격납건물을 우회하기 때문에 위험도 관점에서 중요하다. 금번 울진 4호기의 경우에는 방사선 누설을 발생하지 않아 외부 환경으로 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었으며, 실제 발생했던 증기발생기 세관파단사고에 대해 ASP 프로그램에 따라 조건부 노심손상확률(CCDP)에 대한 정량적인 분석을 통하여 주요 노심손상 경위를 평가하였다.[1]

본 연구에서는 울진 4호기에 발생한 증기발생기 세관파단사고에 대해 울진 3,4호기 전출력 및 울진 5,6호기 정지/저출력 PSA 모델을 토대로 ASP 분석을 수행하였다.[2,3] 상기 두 PSA 모델에서는 SGTR에 대한 사건수목의 경우 전출력 조건에서 원자로가 정지되지 않는 ATWS 사고를 고려하는 것을 제외하고 동일한 사고경위를 적용하였다. 그리고, 증기발생기 세관파단 사고시 노심손상빈도는 원자로 정지후 SGTR 초기사건 빈도 변경으로 전출력 조건보다 낮은 노심손상빈도(CDF) 결과가 제시되었다.

1.2 사고 경위

울진 4호기는 계획예방정비를 위해 원자로정지(02.4.5 01:20) 후 증기우회계통으로 냉각 운전중 고온대기조건(158.2kg/cm2, 291℃)에서 증기발생기 세관파단사고가 발생하였다. 동 사고 발생 전 원자로냉각재의 붕산농도가 2300ppm 이상으로 원자로는 미임계 상태를 충분히 유지하고 있었다. 본 사건의 원인은 세관 튜브시트 근처에서 발생된 응력부식균열로 추정되고 있으며, 설계조건에서는 한 개의 세관 파단시 400gpm(실제 최대 ~ 600gpm)이며 총 누설량은 55,128kg으로 확인되었다.[4] 울진 4호기 증기발생기 세관파단 사고의 주요 경위는 다음과 같다.

시간	주요 경위	비고
4.5 17:50	증기우회제어계통로 냉각운전 착수	
18:33:00(0)	가압기 수위 34.6%로 급격 감소(158kg/cm^2) - SGTR 발생 가정	
18:38:00(+5min)	고압안전주입 Reset	
18:42:00(+11min)	가압기 영수위 도달	
18:46:00(+13min)	증기발생기 #2 격리	
18:49:00(+16min)	수동 고압안전주입(103kg/cm^2)	
19:00:00(+27min)	주증기격리밸브 우회밸브로 냉각운전	
19:59:00(+89min)	일·이차계통 압력 평형 도달	*4.6 13:25(+19Hr) 상온정지상태 도달

상기와 같이 울진 4호기 SGTR 발생 이후 가압기 압력이 감소에 따라 안전주입동작 동작을 방지를 위해 운전원이 관련 동작신호를 Reset시켰으며, 이로 인해 가압기 수위가 급격히 감소하였다. 이처럼, 초기 정상적인 안전주입 동작의 우회 조치는 결과적으로 원자로냉각재 재고량을 정상적인 유지를 못하는 결과를 초래하였다. 운전원은 시료채취배관에 설치된 방사선감시기(RE-152) 경보로 증

기발생기 세관파단을 확인하였으며, 격납건물 외부로 방사성물질 방출을 억제하기 위해 세관이 손상된 증기발생기(#2)를 조기에 격리하였다. 이후 고압안전주입 수동 기동으로 가압기 수위를 복구하였으며, 증기우회제어계통 밸브(주증기격리 우회밸브 포함) 및 가압기 주살수와 보조살수로 일·이차측 냉각 및 감압 운전을 수행하여 압력 평형 상태에 도달하였다.

그리고, 복수기 대기방출밸브, 대기덤프밸브 및 주증기 안전밸브 동작없이 주증기격리우회밸브 또는 증기우회밸브 등으로 과도상태 발생 없이 이차측 압력을 유지하였다. 울진 4호기 처럼 원자로 정지 후 노심 붕괴열이 줄어든 상태에서 실제 사고 전개과정은 실제적으로 울진 3,4호기 PSA 모델에 적용된 전출력 SGTR 사고경위와 비교 검토한 결과, 일·이차측 냉각 및 압력제어가 적절히 수행되어 단기 및 장기 Bleeding 운전, 주증기안전밸브 개방 등이 발생하지 않았다. 결과적으로, 실제 동 사고경위는 PSA에서 제시한 일부 사고경위와 상이한 점이 있지만, 대부분 성공기준을 따라 적절히 진행되었다.

2. ASP 적용 모델 및 분석방법

2.1 기존 PSA 모델

울진 4호기 증기발생기 세관파단 사고에 대한 ASP 분석시 울진 3,4호기 전출력 조건의 확률론적 위험도 평가 모델과 울진 5,6호기 저출력/정지(POS 2) 평가 모델을 이용하였다. 울진 3,4호기 전출력 조건에서 증기발생기 세관 초기사건의 노심손상빈도는 $1.14e^{-6}$이며, 총 노심손상빈도의 13.8%로 나타났다. 그리고 울진 5,6호기 정지/저출력 조건(POS 2)에서 동 사고의 노심손상빈도는 $1.47e^{-9}$으로 총 노심손상빈도의 0.13% 기여도를 갖는 것으로 나타났다. 저출력/정지조건에서 증기발생기 세관파단 사고는 노심손상빈도 측면에 기여도가 매우 미미한 것으로 확인되었다. 상기 보고서에 따라 원자로정지불능(ATWS) 배제 및 초기사건에 대한 빈도를 제외하고는 증기발생기 세관파단에 대한 동일한 고장 및 사건수목을 동일하게 적용하였다. 그리고, 정지/저출력조건의 증기발생기 세관파단 사고 발생빈도는 울진 5,6호기 PSA 분석결과를 고려하여 전출력조건의 $4.5e^{-3}$으로부터 계산된 $1.09e^{-5}$값을 선정하였다. 그리고, 기기 고장자료는 울진 3,4호기 PSA 분석에 사용된 자료를 그대로 활용하였다.

본 연구에서는 장기 재순환 냉각운전에 대한 사고완화계통 기능이 노심손상빈도에 미치는 영향이 거의 없고 또한 사고경위 분석결과(절삭치 : e^{-11})에 최소단절군이 포함되지 않아 사건수목 작성시 이를 고려하지 않았다.

사고완화계통에 대한 냉각수계통 등 보조계통의 경우 고장수목내에서 순환논리(Logical Loop)로 구성되어 있어, 본 연구에 적용된 SAPHIRE 코드에서는 분석이 불가능하였다. 이를 해결하기 위해 보조계통에 대한 Simplified train-based 고장수목 모델로 단순화시켜 본 분석에 고려하였으며, 동 보조계통에 대한 고장수목이 고려되지 않은 경우와 계산된 결과와의 민감도를 비교·검토하였다.

2.2 ASP 적용모델

기존 사업자가 제시한 울진 5,6호기 원자로정지 조건에 해당하는 PSA 모델을 고려하고 미국 CE

형 Palo Verde 원전의 증기발생기 세관파단사고에 적용된 ASP 모델을 일부 변형하여 CCDP 분석을 수행하였다. 미국 ASP 모델과 달리 사고완화계통은 사업자가 제시한 전체 고장수목을 고려하였고, 사건수목은 미국 ASP 모델 및 사업자 PSA 모델에 아래 사항을 추가로 고려하여 분석하였다. 아울러 사건수목 작성시 현재 울진 3,4호기 PSA 모델에 반영되어 있지 않는 아래 사항을 추가로 고려하였다. 현재 비상운전절차서에는 증기발생기 취출계통 운전을 권장하고 있으나, 안전주입 이후 일차계통 압력증가에 따른 2차계통 감압 방법으로 주증기격리 우회밸브가 사용되었으며, PSA 모델에서는 동 사항이 고장수목에 반영되어 있지 않았다. 동 사항을 PSA 모델에 반영할 경우 이차계통 압력증가로 인한 감압 및 냉각운전 방법에 대한 다중성이 확보되어 신뢰도가 증가하게 되며, 아울러 주증기안전밸브 개방으로 인해 방사성 물질이 대기로 방출되는 가능성이 줄어든다. 증기발생기 세관파단의 확인시 정상운전과는 달리 원자로정지 상태에서는 주증기배관 방사능감시기가 이용불가능하고, 증기발생기 취출배관 방사능 감시기 또는 취출시료 방사선감시기, 복수기 공기추출기 방사능 감시기가 이용 가능하나, 고압안전주입이 동작한 이후에는 증기발생기 취출배관 측 방사능감시기는 이용불가능하게 된다. 결국, 증기발생기 세관누설에 대한 직접적인 확인은 복수기 공기추출기 방사능감지기에 의존할 수 밖에 없는 경우가 발생할 수 있다. 이처럼 이차계통 방사능 감시기 특성으로, 국외에서 발생한 증기발생기 세관파단사고에 대한 식별이 조기에 확인되지 않아 관련 누설 경로를 격리하는데 걸리는 시간이 비교적 큰 것으로 제시되었다.[5] 그러나, 실제로 울진 4호기 증기발생기 세관파단사고의 경우 취출시료 방사선 감시기 경보에 따라 운전원이 증기발생기 세관파단을 확인하고 해당 증기발생기(#2)를 조기에 격리(+13min)하였다. 그러나, 원자로 정지상태에서는 관련 이차계통 방사선계측기 이용 불능에 대한 가능성이 비교적 높을 것으로 예상되어, 울진 3,4 호기 PSA 모델에 증기발생기 세관파단 식별에 대한 사고완화 계통을 사건수목에 추가로 반영토록 하였다.

2.3 ASP 분석방법

본 연구에서는 확률론적 위험도 평가 코드인 SAPHIRE(Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations, Ver 6.58)를 사용하여 고장 및 사건수목을 정량화하였다.[6] 울진 3,4호기 사업자 확률론적안전성 분석(KIRAP 코드) 결과로부터 기본사건 고장확률, 불확실도, 고장수목 등의 자료원을 SAPHIRE 형식으로 변환하여 사용하였으며, 사건수목은 관련 자료를 토대로 직접 작성하여 분석을 수행하였다. 우선 고장 및 사건 수목을 정량화하고, 운전원 회복조치, 비최소단절군 등에 Rule-based Recovery로 불필요한 단절군을 삭제하였다. CCDP(Conditional Core Damage Probability)는 증기발생기 세관파단 초기사건의 발생빈도를 1로 지정하고 노심손상 위험도에 미치는 영향을 확률로 평가할 수 있다.[7] 또한, 운전이 불가능한 기기에 대해 주어진 이용불능 시간을 고려하여 특정시간의 운전상태 및 발전소 조건에서 조건부노심손상확률(CCDP)에 대한 정보를 취득할 수 있다.[8,9] SAPHIRE 코드로 고장 및 사건수목을 정량화한 후, Graphical Evaluation Module (GEM)을 이용하여 초기사건 발생 및 고압안전주입계통 고장을 가정하여 시간대별 CCDP 변화 추이를 분석하였다. 전 출력 및 원자로 정지조건에 대해 사건수목을 분석한 후 정량적인 CCDP 계산값을 토대로 위험도에 중요한 영향을 미치는 Precursor를 분석하였다. 아울러, 동

분석결과로부터 안전계통 고장을 가정하여 시간대 별 CCDP Profile을 얻을 수 있었다. 그러나, 본 결과는 실제 SGTR 사고경위와는 달리 가정에 의한 분석으로 CCDP Profile을 얻었기 때문에 관련 사항을 본 내용에 포함을 하지 않았다.

3. 분석내용

3.1 고장 및 사건수목 분석

울진 3,4호기 및 울진 5,6호기 확률론적안전성 평가보고서를 토대로 고장수목 및 사건수목을 작성하였다. 사건수목은 전출력 조건, 정지조건(POS 2)으로 구분하여 작성 분석하였으며, CE형 Palo-Verde 원전의 ASP 프로그램에 따른 증기발생기 세관파단 사건수목을 고려하여 기존 사건수목을 일부 변형하였다. 사건수목은 전출력조건, 정지조건(POS 2), ASP 모델 조건 등 총 4개의 사례로 구분하여 조건부 노심손상확률(CCDP)을 계산하였다. 각 사고완화계통에 대한 성공기준은 Palo-Verde 사건수목 작성시 급수계통 및 증기발생기 감압조치 사항을 일부 변경한 것을 제외하고는 대부분 울진 3,4호기 PSA 모델과 동일하게 처리하였다. 고장수목 및 사건수목을 분석한 결과 보조계통의 고장에 의해 발생할 수 있는 최소단절군(기기냉각수펌프 공통원인고장 등)이 누락된 것을 제외하고는 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 보완하기 위해 보조계통에 대한 Simplified train-based 고장수목 모델을 고려한 결과 일부 기기냉각 및 전력계통을 제외하고는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 그러나, 전체 CCDP 측면에서 비교적 우선 순위가 높은 기기냉각수계통 펌프 공통원인고장 관련 최소단절군이 포함되도록 관련 고장수목에 반영하였다. 실제로 기기냉각수계통, 전력계통을 반영하여 분석한 결과 CCDP(또는 CDF) 값은 다소 증가하는 것으로 확인되었으나, 실제로 전체 CCDP값에는 큰 영향을 주지 않았다.

3.2 조건부노심손상확률(Conditional Core Damage Probabilities) 분석

울진 3,4호기 및 울진 5,6호기 확률론적안전성 평가보고서 및 Palo-Verde ASP 결과 등을 고려하여 CCDP를 분석한 결과는 그림 1.1~3에 제시하였다. 울진 3,4호기 PSA 결과와 울진 3,4호기 PSA 결과를 고려하고, Palo-Verde ASP 모델을 일부 변경하여 분석한 결과는 서로 CCDP가 유사하게 나타났으나, 원 Palo-Verde 사건수목 만을 고려한 결과와는 대략 e^{-1} 정도 차이가 발생하였다. 원 Palo-Verde ASP 모델만을 적용한 결과 SGTR 누설확인 실패 및 정지냉각계통 고장 경로 등 3개가 Important Precursors로 분류되었다. 그러나, 동 Palo-Verde ASP 모델에 울진 3,4호기 PSA 모델중 장기 원자로냉각재계통 Bleeding 및 이차측 열제거 사고완화 계통을 고려한 경우 관련 Precursors가 포함되지 않았으며, 원 울진 3,4호기 PSA 모델 결과와 Important Precursors가 동일하게 나타났다.

그리고, 그림 2에 제시된 것처럼 울진 4호기 SGTR 사고에 대한 모든 CCDP 계산결과는 ASP 프로그램에 따라 Important Precursor ($1.0e^{-4}$ < CCDP < $1.0e^{-3}$)로 분류되었다.[10]

울진 3,4호기 및 울진 5,6호기 확률론적안전성 평가보고서에 따라 CCDP에 대해 분석한 결과, 증

기발생기 세관파단 사고시 CCDP에 크게 영향을 미치는 기본사건으로 운전원이 원자로냉각재계통 압력을 저압안전주입계통이 운전가능한 조건으로 강제 냉각 조치를 수행하지 못하는데서 기인하였다. 아래는 동 사고경위에 대한 최소단절군 및 관련 CCDP 값을 제시하였으며, 전체 CCDP의 80%에 해당하였다.

사고경위	최소단절군	CCDP
SGTR-26(Failure of HPSI * Failure of Dep. RCS for LPSI)	IE->SGTR, HSMVWGHDR, MXOPHDPLI	8.400E-5
	IE->SGTR, HSMPW00102, MXOPHDPLI	3.115E-5
	IE->SGTR, HSMPK00102, MXOPHDPLI	2.982E-5
		1.45E-4

증기발생기 세관파단 사고에 대해 노심손상에 크게 영향을 미치는 사고경위는 고압주입계통 고장 및 안전주입을 위해 원자로냉각재계통 감압 실패로 나타났다. 특히, 원자로냉각재계통 감압 지연에 적용된 인적회복 조치모델 및 일반(Generic) 고장자료가 CCDP 결과 값에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 동 영향을 분석하기 위해 저압안전주입을 위한 RCS 감압 실패 확률을 변화시켜 CCDP 변화 추이를 알아보았다. 그림 3에서 제시한 것처럼 동 기본사건의 회복조치 실패 확률을 e^{-2}으로 낮춘다면 울진 4호기 증기발생기 세관파단 사고는 e^{-5} 이하로 CCDP 값이 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서, 회복조치 시간에 대한 평가를 고려한 운전원 조치실패 확률에 대한 재분석을 통하여 CCDP(또는, CDF)가 완화될 수 있을 것으로 판단된다. Palo-Verde 증기발생기 세관파단 사고의 ASP 모델에는 동 운전원 회복조치 실패 확률은 울진 3,4호기 PSA 일반 자료보다 10배 이상 낮은 값이 선정되었다. 아울러, 울진 3,4호기 PSA에는 증기발생기 세관파단 사고발생 후 고압안전주입계통 고장시 15분 이내에 원자로냉각재계통 감압에 착수하도록 규정하고 있으며, 울진 5,6호기에서는 30분으로 완화되었다. 일반적으로 CCDP는 적용된 모델 및 고장확률에 따라 큰 불확실도를 갖을 수 있으며, 실제적으로 울진 3,4호기 초기사건빈도, 인적오류 등 일반고장 자료원, 고장 및 사건수목 모델 선정 등에 따라 CCDP 계산값에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서, 동 증기발생기 세관파단에 대한 신뢰할 만한 CCDP 분석을 위해 운전원 조치실패 확률에 대한 검토, 사건수목에 현재 비상운전절차를 적절히 고려할 필요가 있었다.

4. 결론

울진 3,4호기 PSA 모델을 토대로 울진4호기에서 발생한 증기발생기 세관파단 사고(SGTR)에 대해 확률론적위험도평가 코드인 SAPHIRE 및 GEM을 활용하여 Accident Sequence Precursor(ASP)를 분석하였다. 울진 4호기 SGTR 사고는 ASP 프로그램에 따라 분석한 결과 Important Precursor로 분류되었다. 고압안전주입계통 고장 후 운전원에 의한 원자로냉각재계통 감압 조치실패 기본사건이 CCDP 증가에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 울진 3,4호기 PSA 보고서에는 안전주입계통 고장이후 운전원이 원자로냉각재계통 감압 착수시간이 비교적 보수적으로 설정되어 있는 것을 감안할

때 운전원 회복조치 오류에 대한 재평가를 통하여 관련 CCDP값이 감소될 수 있을 것으로 판단된다. 그리고, 동 세관파단사고 후 주요 안전계통의 고장을 가정하여 CCDP Profile을 분석함으로써 울진 4호기 증기발생기 세관파단 사고에 대해 위험도 관점에서 주요 사고경위(Accident Precursor)를 평가할 수 있었다.

5. 참고문헌

[1] Reliability Engineering and System Safety 57 (1997) 281-297, Accident Sequence Precursor Analyses for Steam Generator Tube Rupture Events That Actually Occurred

[2] Ulchin Units 3&4, Final Probabilistic Safety Assessment Report, Rev.1

[3] 울진 5,6호기 확률론적 안전성평가(II 단계 연구) : 정지/저출력분석 최종보고서(2002)

[4] KINS/ER-056, 울진4호기 증기발생기 세관파단사고에 대한 열수력 거동 평가(2003)

[5] NUREG/CR-4674(Vol. 21), Precursors to Potential Severe Core Damage Accidents: 1994, A Status Report A.15 LER No. 529/93-001 Steam Generator Tube Rupture

[6] NUREG/CR-6532, Systems Analysis Programs for Hands-on Integrated Reliability Evaluations(SAPHIRE) Version 6.0

[7] Reliability Engineering and System Safety 59 (1998) 299-307, Calculating Conditional Core Damage Probabilities for Nuclear Power Plant Operations

[8] The Use of PSA to Support NPP Accident Management(2000) : Case Studies for Davis-Besse Loss of Feedwater Scenario & GataWa Loss of Power Scenario

[9] Insights from Using Influence Diagrams to Analyze Precursor Events

[10] SECY-02-0041, Status of Accident Sequence Precursors and SPAR Model Development Programs

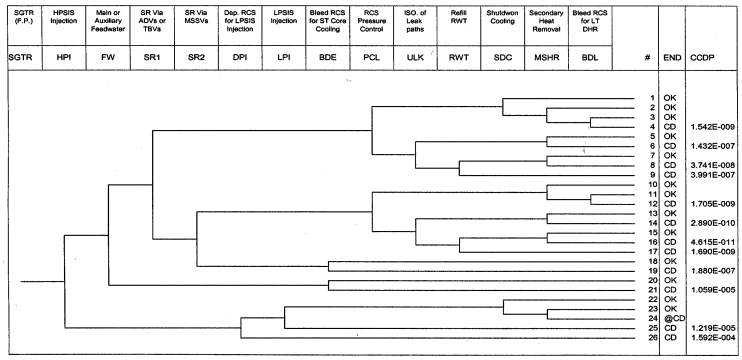

그림 1-1. 울진 3,4호기 사건수목 결과(F.P.)

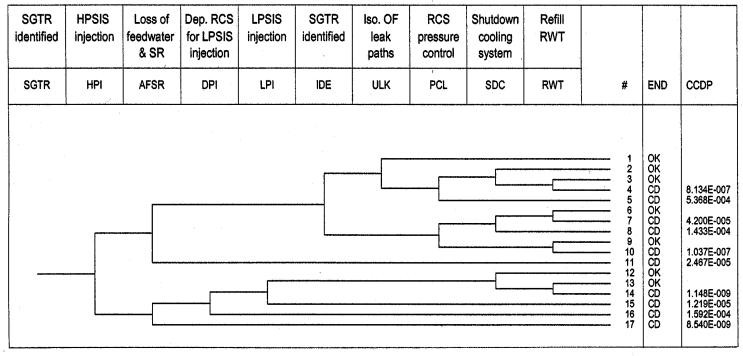

그림 1-2. Palo-Verde ASP 사건수목 결과(POS2)

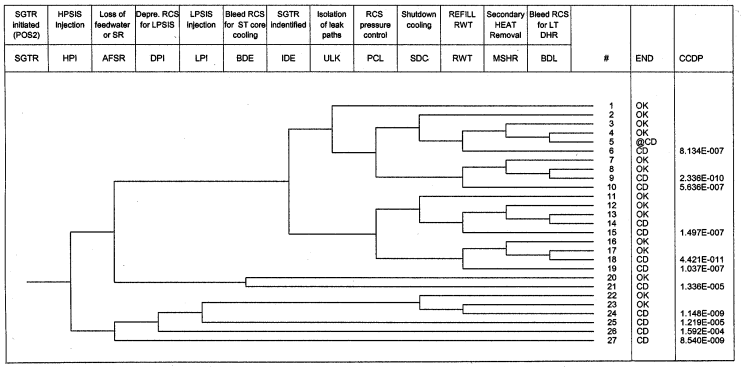

그림 1-3. 울진 3,4호기 및 ASP 사건수목 결과(POS2)

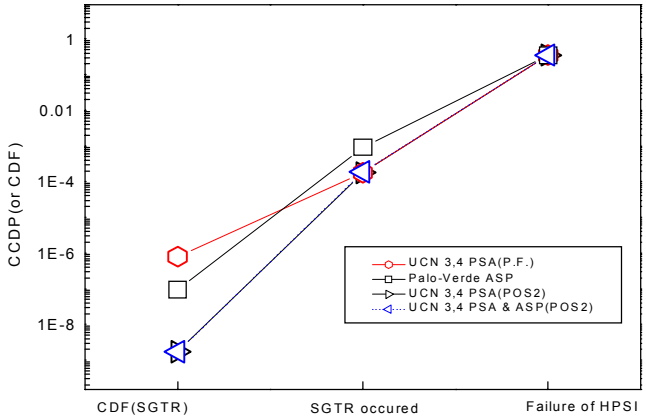

그림 2. 각 조건별 CCDP에 계산결과

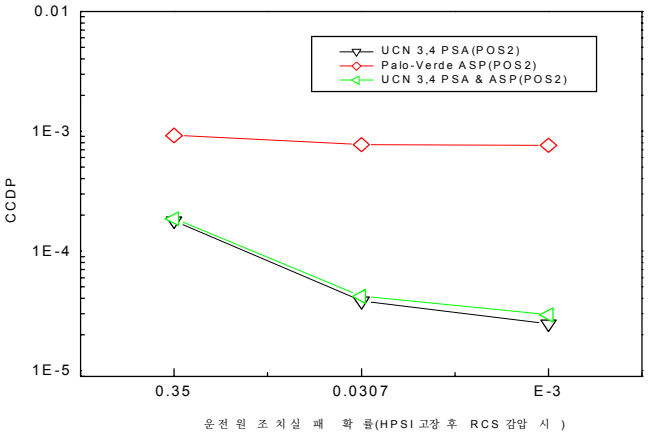

그림 3. 운전원 조치실패 확률에 따른 CCDP 계산결과