2000 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

허용정지시간 변경에 대한 외부사건 위험도 평가

Quantification of Risk on the Allowed
Outage Time Changes considering External Events

강대일, 장승철, 김길유
한국원자력연구소

요 약

본 논문에서는 외부사건을 고려하여 울진 3,4 호기 주요 안전계통의 허용정지시간 변경에 대한 위험도를 평가하였다. 허용정지시간 변경에 대한 위험도 평가 대상 계통은 고압안전주입계통, 격납용기살수계통, 비상 디젤 발전기이다. 평가 결과 계통의 허용정지시간 변경에 대해 내부사건만을 이용해 평가한 결과가 규제기관의 승인 기준치 이하로 평가되고 그 계통이 외부사건에 영향을 크게 안 받는 계통이라면 외부사건을 별도로 분석할 필요가 없을 것으로 판단된다. 둘째, 노심손상빈도 증가 등에 대한 규제 기준치가 기본 노심손상빈도에 대해 상대적으로 설정되어 있으면 내부사건과 외부사건 모두를 고려한 위험도 평가는 일반적으로 사업자에게 득이 되지만 절대적으로 설정되어 있으면 득이 안될 것으로 판단된다. 셋째, 국내 표준 원전의 외부사건 분석은 화재사건 분석으로 충분하다고 판단된다.

Abstract

In this paper, the quantification of risk on the allowed outage time changes for the major safety systems of Ulchin Units 3/4 are performed considering external events. The systems for which the risk on the allowed outage time changes are quantified are high pressure safety injection system, containment spray system, and emergency diesel generator. The results of this study show that the quantification considering external events are not required for the safety systems if the quantification results considering only internal events satisfy the acceptance criteria of regulatory body and the safety systems are not greatly affected by external events. Secondly, it is expected that the quantification of risk including internal and external events is advantageous for the licensee of NPP if the regulatory acceptance criteria for the technical specification changes are relatively set up. However, it is expected to be disadvantageous for the licensee if the acceptance criteria are absolutely set up. Finally, it is expected that the conduction on the quantification of only fire event is sufficient for that of external events for plant changes of Korean standard NPPs

1. 서론

허용정지시간(allowed outage time)을 변경하거나 출력 운전 중 예방정비를 수행하기 위해서는 허용정지시간 변경이나 예방정비 수행이 발전소의 위험도를 크게 증가 시키지 않는 다는 것을 보여야 한다. 미국의 기술지침서 변경 관련 규제 지침서인 RG 1.177[1]에서는 기술지침서 변경 시 수행해야 하는 확률론적 안전성평가(probabilistic safety assessment: PSA) 범위는 내부사건 뿐만 아니라 정지운전, 외부사건 PSA(화재, 내부침수)도 포함한다고 언급하고 있다.

미국 규제지침서의 기본 원칙[1, 2]은 어떤 계통의 기술지침서가 변경이 되어 그 변경이 PSA 결과에 영향을 주면 관련 PSA 에 대한 분석을 해야 하는 것이다. 만일 정량적인 분석을 수행하기 위한 PSA 모델이 없다면, 발전소 변경으로 인한 PSA 영향에 대해 정성적 논의(qualitative arguments), 경계 분석(bounding analysis), 또는 보완 조치(compensatory measures)를 취해야 한다고 언급하고 있다. 그러나 지금까지 기술지침서 변경과 관련해 미국에서 수행되었던 대부분의 PSA 에서는 외부사건에 대해 정량적 또는 정성적인 영향을 평가하지 않았다[3]. 규제 지침서[1]에서는 외부사건 분석을 수행해야 한다고 언급했지만 외부사건분석 자체에 불확실성이 많이 있어 미국의 규제기관 실무자들은 이 분석 결과를 사업자들에게 요구하지 않는 것으로 판단된다. 한편 일부 PSA 전문가들은 원전 사업자가 기술지침서 변경에 대한 위험도 평가 시 외부사건을 포함하여 평가하면 위험도 증가에 대한 기준치 측면에서 내부사건만을 평가할 경우보다 사업자에게 유리하다는 주장을 제기하고 있다.

이에 본 연구에서는 기술지침서 변경 등이 외부사건 PSA 에 미치는 영향을 파악하기 위해, 참조발전소인 울진 3,4 호기[4]를 대상으로 외부사건을 고려하여 허용정지시간 변경에 대한 위험도를 평가하였다. 외부사건은 미국의 규제 지침서[1]에서 언급한대로 화재(Fire) 사건과 내부 침수(Internal Flooding) 사건을 평가하고 부수적으로 지진(Seismic) 사건도 평가하였다. 허용정지시간 변경 대상 계통은 고압안전주입계통(high pressure safety injection system: HPSIS), 격납용기살수계통(containment spray system: CSS), 비상 디젤발전기(emergency diesel generator: EDG)이다. 이들 계통의 허용정지시간을 3 일에서 7 일로 변경하였다.

본 논문의 2 에서는 기 수행된 외부사건 분석 결과와 정량화 파일을 KIRAP[5]으로 변경한 것에 대해 기술하였고, 3 에서는 허용정지시간 변경에 대한 위험도 평가 결과를 기술하였다. 끝으로 4 에서는 결과와 토론을 기술하였다.

2. 기 수행된 외부사건 분석 결과와 정량화 파일 변경

2.1 기 수행된 외부사건 분석 결과

기 수행된 울진 3,4 호기의 외부사건 분석 결과[4]를 보면 전체 외부사건에 대한 노심손상빈도는 1.93E-5(/년)이고 그 중 지진사건은 1.462E-5(/년), 화재사건은 4.67E-6(/년), 내부침수사건은 0(/년)로 나타났다. 지진사건이 전체 외부사건 노심손상빈도에 차지하는 비율은 약 75.8%이다. 지진사건 분석 결과 중 기기 이용불능도와 무관한 노심손상빈도는

1.282E-05(/년)로 전체 외부사건 노심손상빈도의 66%이고, 기기 이용불능도와 관련이 있는 노심손상빈도는 1.8E-6(/년)으로 전체 외부사건의 9.3%로 나타났다. 지진사건 분석 결과는 지진 위해도 곡선(seismic hazard curve) 평가에 대한 전문가 판단(expert judgment), 지진으로 발생되는 기기들의 고장 독립성 정도, 인간오류 확률 등에 크게 영향을 받는다. 그 중 지진 위해도 곡선에 대한 전문가 판단이 크게 영향을 준다[4].

이렇게 지진사건 분석 결과에는 다른 외부사건 분석 결과보다 많은 불확실성이 있고, 지진 노심손상빈도에 계통 자체의 이용불능도보다 지진에 의한 기기의 영향 효과가 크기 때문에 규제지침서 1.177[1]에서는 분석하라고 요구하지 않은 것으로 판단된다. 결국 계통 자체의 이용불능과 관련이 있는 외부사건의 노심손상빈도는 전체 노심손상빈도의 약 33.6%인 것으로 나타났다[4].

2.2 외부사건 정량화 파일 변경

기 수행된 외부사건 PSA [4]에서 정량화 시 사용한 전산 파일이 NUPRA[4]이었고, 한국원자력연구소에는 NUPRA가 없기 때문에, NUPRA로 작성된 정량화 전산파일 모두를 KIRAP[5]으로 변경하였다. 본래 정확한 정량화 결과를 얻기 위해서는 NUPRA로 작성된 고장수목 파일을 KIRAP으로 변경하고, 외부사건의 정량화에서 사용했던 가정사항과 조건들을 파악하여 고장수목과 사건수목을 정량화 하는 KIRAP 사용자 파일(user file) 작성시 이들 조건과 가정사항을 포함시켜야 한다. 하지만 이러한 조건과 가정사항을 파악하기 힘들어 이미 이러한 사항들이 고려되어 정량화가 수행된 NUPRA의 계통 방정식 파일(eqn)을 KIRAP 파일(znk)로 변경하여 정량화 했다. 정량화 시 사용된 NUPRA 파일을 KIRAP 파일로의 변경은 다음과 같은 순서로 수행하였다:

1) 각 지역(area/room 또는 level)과 사건수목 분석에 사용된 데이터 파일(bed)을 파악하여 KIRAP에서 사용 가능한 데이터 파일(val)로 변경
2) 각 지역(area/room 또는 level)과 사건수목 분석시 사용되었던 계통의 단절집합(minimal cutsets) 파일(equation)을 KIRAP 파일(znk)로 변경
3) 각 지역의 사건수목에 대한 정량화 파일(user) 작성

표 1 기본 외부사건 정량화 결과 비교

외부사건 종류	NUPRA	KIRAP
지진	1.462E-5(/년)	1.467E-5(/년)
화재	4.67E-6(/년)	4.55E-6(/년)
내부침수	-	-
계	1.93E-5(/년)	1.92E-5(/년)

표 1에는 NUPRA로 정량화 한 결과와 NUPRA 파일을 KIRAP 파일로 변경하여 정량화 한 결과가 나타나 있다. KIRAP으로 변경해 재 정량화 한 결과가 NUPRA보다는 작게 나타났다. 이는 KIRAP과 NUPRA의 소수점이하 수의 처리방식이 다르기 때문인 것으로

판단된다. 본 분석에서는 외부사건에 대한 기본 노심손상빈도를 KIRAP 으로 평가한 1.92E-5(/년, 점 추정치)로 한다.

3. 외부사건을 고려한 위험도 평가

본 절에서는 외부사건을 고려하여 고압안전주입계통(HPSIS)과 격납용기살수계통(CSS), 비상디젤발전기(EDG)의 허용정지시간을 3 일에서 7 일로 변경한 것에 대한 위험도 평가 결과를 기술하였다.

3.1 위험도 평가방법

위험도 평가는 미국의 규제지침서 1.174[2]와 1.177[1]에서 발전소 변경시 수행되는 위험도 평가에 대해 언급한 평가 방법과 척도를 사용하였다. 동 규제 지침서에서는 평가해야 할 위험도로 노심손상빈도 증가(increase of core damage frequency: ΔCDF), 증가된 조건부 노심손상확률(incremental conditional core damage probability: ICCDP), 대량초기누출빈도 증가(increase of large early release frequency: ΔLERF), 증가된 조건부 대량초기방출확률(incremental conditional large early release probability: ICLERP)를 언급하고 있다. 본 연구에서는 발전소 변경이 외부사건 PSA 에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이기 때문에 1 단계 PSA 와 관련된 노심손상빈도 증가(ΔCDF)와 증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP)만을 평가하였다. 노심손상빈도 증가와 증가된 조건부 노심손상확률을 정량화 하는 세부적인 방법과 평가 예는 참고문헌[6]에 기술되어 있다. 이들에 대한 각각의 정의는 다음과 같다;

1) 노심손상빈도 증가: $\Delta CDF = CDF'_B - CDF_B$ .....(식 1)

Δ CDF: 발전소 변경으로 인한 노심손상빈도 증가

CDF'_B : 발전소 변경후의 기본 노심손상빈도

CDF_B : 발전소 변경이전의 기본 노심손상빈도

2) 증가된 조건부 노심손상확률: $ICCDP = (CDF'_1 - CDF'_B) * d$.....(식 2)

CDF'_1 : 발전소 변경시 기기 이용불능으로 인한 노심손상빈도

CDF'_B : 발전소 변경시 기본 노심손상빈도

d: 발전소 변경과 관련된 기기 이용불능시간, 허용정지시간 변경일 경우 기기 평균 수리시간(mean time to repair: MTTR)

위험도 증가나 조건부 확률 등의 위험도 평가 결과는 규제지침서에서 언급했듯이 평균(mean)을 사용해 나타내야 하는데, NUPRA 를 이용한 외부사건 PSA 에는 사용 데이터의 확률분포에 대한 정보가 안 나타나 있기 때문에 평균대신 점 추정치(point value)를 사용해 평가 결과를 나타냈다. 허용정지시간 변경에 따라 영향 받는 불시정지 기기 이용불능도와 공통원인 고장 확률 등은 참고문헌 [1, 6]에 따라 재 평가했다. 내부사건에 대한 평가 결과는 참고문헌 [6]에서 평가한 결과를 사용했다.

3.2 전체 외부사건에 대한 평가

표 2 에는 허용정지시간 변경으로 인한 외부사건의 노심손상빈도 증가가 나타나 있다. 평가 결과를 보면 내부침수 사건에서는 허용정지시간 변경으로 노심손상빈도 증가가 없었다. 고압안전주입계통과 격납용기살수계통 역시 지진사건에 대한 노심손상빈도 증가는 없었지만 비상 디젤발전기는 노심손상빈도 증가를 보이고 있다. 평가 대상 계통 모두가 화재사건에 대해서는 노심손상빈도 증가를 보이고 있다. 평가 대상 계통들 모두의 외부사건에 대한 노심손상빈도 증가는 참고문헌 [6]에서 언급한 선별분석기준치 1.0E-6(/년)미만을 모두 만족하고 있다.

표 2 허용정지시간 변경에 대한 외부사건의 노심손상빈도 증가

PSA 범위(Δ CDF , Δ CDF/CDF_B)	고압안전주입계통 B 계열	격납용기살수계통 B 계열	비상 디젤발전기 B 계열
지진사건	0, 0%	0	3.5E-8, 0.24%
화재사건	3.0E-8, 0.66%	3.0E-8, 0.66%	3.5E-8, 0.77%
내부침수사건	0	0	0
계	3.0E-8, 0.156%	3.0E-8, 0.156%	7.0E-8, 0.36%

표 3 에는 허용정지시간 변경으로 인해 증가된 내.외부 사건의 노심손상빈도 증가와 노심손상빈도 증가 비가 기본 노심손상빈도와 함께 나타나 있다. 내부사건에 대한 평가결과는 참고문헌 [6]을 인용하였다. 허용정지시간 변경에 대해 내부사건만을 평가한 경우 보다 내.외부사건 모두를 평가한 경우 절대적인 노심손상빈도 증가는 크지만 그 증가되는 위험도는 모두 참고문헌[6]의 선별분석기준치 1.0E-6(/년)이하를 만족하는 것으로 나타났다. 각각의 기본 노심손상빈도에 대해 증가되는 노심손상빈도 비는, 비상디젤 발전기를 제외하고 내부사건만을 분석한 경우보다 외부사건만을 분석한 것이 작게 나타났고 내.외부사건 모두를 포함한 평가결과 역시 디젤발전기를 제외하고 내부사건만을 평가한 결과보다 작게 나타났다. 그러나 절대적인 노심손상빈도 증가는 내부사건만을 고려해 평가한 경우보다 내.외부사건 모두를 고려한 경 우가 증가한 것으로 나타났다. 그 증가를 보면 고압안전주입계통은 38%, 격납용기계통 243%, 비상디젤발전기는 1100%이다.

표 3 허용정지시간 변경에 대한 내.외부 사건의 노신손상빈도 증가와 비

PSA 범위 (Δ CDF, Δ CDF /CDF_B)	고압안전주입계통 B 계열	격납용기살수계통 B 계열	비상 디젤발전기 B 계열
내부사건	8.7E-8, 1%	2.1E-8, 0.24%	7.0E-9, 0.081%
외부사건	3.0E-8, 0.16%	3.0E-8, 0.16%	7.0E-8, 0.36%
내.외부사건(내부+외부)	1.17E-7, 0.43%	5.1E-8, 0.18%	7.7E-8, 0.28%
내.외부/내부 사건	137.94%	242.86%	1100%

표 4 에는 규제 지침서 1.177[1]에서 언급한 증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP)이 나타나 있다. 표 4 에 나타나 있듯이 모든 계통의 증가된 조건부 노심손상확률은 내부사건만을 평가한 결과가 외부사건만을 평가한 결과보다 크게 나타났다. 내.외부 사건을 모두 포

함할 경우 내부사건만을 평가한 결과와 비교하면 고압안전주입계통은 거의 차이가 없고, 격납용기계통은 2%, 비상디젤 발전기는 약 95% 증가된 노심손상 확률을 보이고 있다. 평가에서 알 수 있듯이 고압안전주입계통을 제외하고 모든 계통은 참고문헌 [6]의 선별분석 기준치 5.0E-7 이하로 나타났다.

표 4. 허용정지시간 변경에 대한 내.외부사건의 증가된 조건부 노심손상 확률

PSA 범위(ICCDP)	고압안전주입계통 B 계열	격납용기살수계통 B 계열	비상 디젤발전기 B 계열
내부사건	2.34E-06	3.14E-07	1.39E-07
외부사건	1.68E-08	6.83E-09	1.32E-07
내.외부사건	2.36E-06	3.206E-07	2.708E-07
내.외부/내부사건	100.85%	102.1%	194.82%

3. 화재, 내부침수사건에 대한 평가

표 5 에는 화재와 내부침수사건의 외부사건에 대해 허용정지시간 변경으로 인한 기기 이용불능시의 조건부 노심손상빈도와 노심손상빈도 차이, 그리고 기본 노심손상빈도에 대한 비율이 나타나 있다. 외부사건 전체를 고려한 평가 결과인 표 3 과 비교시 디젤발전기만을 제외하고 차이는 없었다. 디젤발전기의 경우, 외부사건의 기본 노심손상빈도에 대해 증가되는 노심손상빈도 비는 표 3 에서는 0.36%, 표 5 에서는 0.18%로 나타났다. 내부사건 분석 결과는 참고문헌 [6]의 결과를 인용하였다. 디젤발전기의 경우, 내부사건만을 고려했을 경우의 노심손상빈도 증가와 내.외부사건 모두를 고려했을 경우의 노심손상빈도 증가에 대한 비율은 표 3 에서는 1100%, 표 5 에서는 600%로 나타났다.

표 5 허용정지시간 변경에 대한 내.외부 사건의 노심손상빈도 증가와 비 – 화재/침수

PSA 범위(Δ CDF, Δ CDF /CDF_B)	고압안전주입계통 B 계열	격납용기살수계통 B 계열	비상 디젤발전기 B 계열
내부사건	8.7E-8, 1%	2.1E-8, 0.24%	7.0E-9, 0.081%
외부사건	3.0E-8, 0.16%	3.0E-8, 0.16%	3.5E-8, 0.18%
내.외부사건	1.17E-7, 0.43%	5.1E-8, 0.18%	4.2E-8, 0.15%
내.외부/내부 사건	137.94%	242.86%	600%

표 6 에는 화재/내부침수 사건에 대한 조건부 노심손상확률이 나타나 있다. 표 4 와 비교시 증가된 조건부 노심손상확률 변화는 고압안전주입계통, 격납용기계통은 거의 변화가 없었고 비상디젤 발전기만이 감소된 노심손상 확률을 보이고 있다. 표 4 와 마찬가지로 증가된 조건부 노심손상확률은 내부사건만을 평가한 결과가 외부사건만을 평가한 결과보다 크게 나타났다. 외부사건만을 평가한 경우에는 모든 계통이 참고문헌 [6]의 선별분석 기준치 5.0E-7 보다 작게 평가되었다. 증가된 조건부 노심손상확률 계산시 내.외부사건 모두를 평가할 경우, 고압안전주입계통과 격납용기계통은 내부사건만을 평가한 경우에 비해 변동이 거의 없는 것으로 나타났고 비상 디젤발전기만이 37% 증가된 것으로 나타났다.

표 6. 허용정지시간 변경에 대한 내.외부사건의 증가된 조건부 노심손상 확률 – 화재/침수

PSA 범위(ICCDP)	고압안전주입계통 B 계열	격납용기살수계통 B 계열	비상 디젤발전기 B 계열
내부사건	2.34E-06	3.14E-07	1.39E-07
외부사건	1.49E-08	5.86E-09	5.05E-08
내.외부사건	2.36E-06	3.19E-07	1.896E-07
내.외부/내부사건	100.85%	101.59%	136.4%

4. 결과와 토론

본 연구에서는 외부사건을 고려하여 울진 3,4 호기의 주요 안전계통인 고압안전주입계통, 격납용기살수계통, 디젤 발전기의 허용정지시간 변경에 대한 위험도를 평가하였다. 위험도 평가시 사용한 전산 코드는 KIRAP[5]이었다. 고압안전주입계통, 격납용기살수계통, 비상디젤발전기의 허용정지시간 변경에 대한 외부사건(화재, 침수) 위험도 평가 결과는 다음과 같다;

1) 허용정지시간 변경으로 인한 노심손상빈도 증가(ΔCDF)는 비상디젤발전기를 제외하고 내부사건만을 고려해 평가했을 경우보다 외부사건만을 고려해 평가한 경우가 낮게 나타났다. 비상디젤발전기에 대한 노심손상빈도 증가는 외부사건만을 고려한 평가 결과가 내부사건만을 고려한 평가 결과보다 5 배 높게 나타났다. 하지만 그 증가는 선별분석 기준치 1.0E-6(/년) 보다 매우 작은 3.5E-8(/년)로 평가 되었다.
2) 각 계통에 대해 내부사건과 외부사건 모두를 고려했을 경우의 노심손상빈도 증가는 선별분석기준치 1.0E-6(/년)보다 매우 작은 1.17E-7(/년)로 나타났다.
3) 외부사건 분석 결과를 상세히 보면 허용정지시간 변경으로 인한 내부침수 사건 PSA 의 영향은 없는 것으로 나타났다.
4) 각 계통의 허용정지시간 변경에 대한 증가된 조건부 노심손상확률은 내부사건만을 평가한 결과보다 외부사건만을 평가한 결과가 작게 나타났다.
5) 고압안전주입계통과 격납용기살수계통의 증가된 조건부 노심손상확률은 내.외부사건 모두를 포함했을 경우, 내부사건만을 갖고 평가한 경우보다 약 5%미만 증가한 것으로 나타났고 비상 디젤 발전기는 약 40% 증가한 것으로 나타났다.

전체적인 위험도 평가결과를 보면 고압안전주입계통과 격납용기살수계통은 외부사건에 대한 영향이 작지만 디젤발전기는 영향이 큰 것으로 나타났다. 디젤발전기에는 윤활유 등이 있어 화재사건 등에 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다.

위의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있다;

1) 일반적인 계통의 허용정지시간 변경에 대한 노심손상빈도 증가(ΔCDF)와 조건부 노심손상확률(ICCDP)은 내부사건만을 이용하여 평가한 결과가 위험도에 대한 승인 기준치 이하로 평가되고 그 계통이 외부사건에 영향을 크게 안 받는 계통이라면 분석할 필요가 없을 것으로 판단된다.
2) 노심손상빈도 증가 등에 대한 규제 기준치가 기본 노심손상빈도에 대해 상대적으로 설정

되어 있으면 내부사건과 외부사건 모두를 고려한 위험도 평가 결과는 일반적으로 사업자에게 득이 되지만 절대적으로 설정되어 있으면 득이 안될 것으로 판단된다.

3) 국내 표준형 원전의 발전소 변경에 대한 위험도 평가시 외부사건을 고려한 노심손상빈도 증가(ΔCDF)에 대한 평가는 내부사건만의 평가결과가 승인 기준치의 10%이상일 경우에만 수행하는 것이 바람직스럽다고 판단된다. 증가된 조건부 노심손상확률(ICCDP)은 승인기준치의 50%이상인 경우에만 수행하는 것이 바람직스러운 것으로 판단된다.

4) 국내 표준 원전의 외부사건 분석은 화재사건 분석으로 충분하다고 판단된다. 발전소 변경에 대해 내부침수 사건 평가 결과는 그 영향이 거의 없고, 지진 사건 평가 결과에는 다른 외부사건보다도 불확실성(지진 위해도 분석 등)이 크기 때문이다.

본 연구에서 수행한 결과에는 외부사건에 대한 상세분석을 재 수행하지 않았기 때문에 일정부분 한계가 있을 수 있다. 그러나 상세분석을 하더라도 상세 분석한 결과와 본 연구결과 사이에는 커다란 차이가 없을 것으로 판단되기 때문에 이러한 한계점들이 본 연구 결론에 커다란 영향을 미치지 않을 것이다. 본 연구 결과는 원전의 규제기관과 사업자 모두에게 발전소 변경이 외부사건 PSA 에 미치는 영향을 파악하는데 유용하게 사용되리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] “An Approach for Plant-Specific, Risk-Informed Decisionmaking: Technical Specifications”, Regulatory Guide 1.177, NRC, 1998

[2] “An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis “, Regulatory Guide 1.174, NRC, 1998

[3], “Reviewing PSA-Based Analyses to Modify technical Specifications at Nuclear Power Plants”, 1995, NRC

[4]. “Final Probabilistic Safety Assessment Report for Ulchin Units 3 & 4”, KEPCO, 1997

[5]. 김태운, 한상훈 외,“KIRAP 을 이용한 사고경위 정량화 방법”, KAERI/TR-848/97, 한국원자력연구소, 1997

[6] 강대일 외, “위험도 정보를 이용한 울진 3,4 호기의 허용정지시간 변경”, 한국원자력연구소, 2000 년, 기술보고서 발간 예정