

정전사고에 의한 RCP Seal LOCA 사고시 전원회복시간에 따른
위험도 분석

Risk Analysis with respect to Power Recovery Time for RCP
Seal LOCA Caused by Station Blackout

김명기, 오해철

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자력발전소의 확률론적 안전성평가 분석 결과를 보면 정전사고가 발생할 경우에 냉각재 펌프 밀봉수가 상실되어 원자로 냉각재가 누출됨으로 적절한 시간까지 전원이 복구 안 되면 노심손상사고가 일어나는 것으로 나타나있다. 이런 사고로 인한 노심손상빈도를 정량화하기 위해서는 냉각재 펌프 밀봉수 누출량과 소외전원 전원 복구 시간 등이 고려되어야 하나 현재의 PSA 분석은 이런 인자를 고려하지 않고 보수적인 방법을 사용하고 있다. 본 논문에서는 이런 인자를 정량적으로 고려하여 노심손상빈도를 분석하는 방법을 제시하고 이 방법을 사용하여 최소단절집합에 적용할 수 있는 소외전원 미회복 인자값으로 변환하여 PSA에 쉽게 적용할 수 있도록 한다. 여기에서 제시된 소외전원 미회복 인자 값은 모든 국내 웨스팅하우스 원전에 대한 확률론적 안전성 평가시 냉각재 펌프 밀봉수 상실에 따른 노심손상빈도 평가에 적용될 수 있다.

Abstract

A Probabilistic Safety Assessment shows that where a station blackout accident occurs and the power recovery is not available until appropriate time, core damage occurs in terms of the failure of a reactor coolant pump (RCP) seal, which is a small loss of coolant accident. In order to quantify the core damage frequency for this accident, both a leakage flow rate of RCP seal and a recovery time of offsite power should be considered in the analysis, but, in general PSA, a conservative and simple method is adopted instead. In this paper, the new methodology considering the quantitative effect of a leakage flow rate of RCP

seal and a recovery time of offsite power is introduced and for applying the developed method to minimal cutset generated from PSA quantification, the nonrecovery factor for offsite power is also introduced. The nonrecovery factor for offsite power presented here can be applied to core damage frequency analyses for RCP seal failure due to station blackout accident for all PSA for domestic all Westinghouse reactors.

1. 서론

중대사고 발생시 원자력발전소의 사고추이 중 가장 중요한 사고중의 하나가 발전소 정전사고이다. 발전소 정전사고는 소외전원상실사고와 비상디젤발전기가 동시에 고장이 나는 사고를 말한다. 발전소 정전사고가 발생하면 노심의 잔열은 이차측의 터빈구동 보조급수펌프에 의해서 제거된다. 그러나 정전사고로 인하여 냉각재펌프의 밀봉이 손상되어 일차계통 냉각재는 누출되고 적절한 시간까지 소외전원이 복구가 안 되면 결국에는 노심이 노출 사고까지 도달하게 된다. 현재 PSA 분석은 이런 발전소 정전사고 시 냉각재 펌프 밀봉 상실에 의한 노심손상빈도를 정확하게 분석은 하지 않고 일반적으로 보수성을 고려한 간단한 방법으로 분석을 하고 있다. 그러나 항상 보수성이 있다고 해서 긍정적인 것만은 아니다. 이는 발전소의 위험도분석의 목적 중 하나는 여러 사고 경위를 대상으로 상대적인 위험도를 평가하는 것이므로 어떤 사고경위가 다른 사고경위에 비해 보수적으로 평가된다면 발전소의 위험도 평가는 균형이 깨져 정확한 평가가 이루어지지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 발전소 정전 사고에 의한 냉각재 펌프 밀봉상실에 의한 노심손상빈도를 가능한 한 현실적으로 분석하고자 한다. 이를 위해서는 냉각재 펌프 밀봉수 누출량, 이로 인한 노심노출 시간, 소외전원 회복시간에 따라 노심손상빈도가 좌우되므로 이런 인자를 고려하여 위험도 분석방법을 개발하고자 한다. 그리고 PSA의 분석 결과인 최소단절집합에 개발된 분석방법을 적용하여 새로운 소외전원 미회복인자를 계산하여 간단한 노심손상빈도 정량화 방법을 제시하고자 한다. 여기에서 제시된 소외전원 미회복 인자 값은 모든 국내 웨스팅하우스 원전에 대한 확률론적 안전성 평가 시 냉각재 펌프 밀봉수 상실에 따른 노심손상빈도 평가에 사용될 수 있다.

2. 본론

일반적으로 발전소 정전사고가 발생하면 발전소내의 거동은 다음과 같다. 소외전원이 상실되면 발전소에 설치되어 있는 비상디젤발전기 (일반적으로 2대)가 작동하여 안전 모션에 전력을 공급한다. 그러나 만약 비상디젤발전기가 고장이 나면 발전소 정전사고로 전개된다. 발전소 정전사고로 진입되면 발전소 이차측은 터빈구동보조급수 펌프에 의해서 일차측의 핵연료 잔열을 제거한다. 그러나 일차측은 정전사고로 인해서 냉각재 펌프 밀봉이 파손되어 일차측 냉각재가 누출되고 냉각재 상실사

고가 발생하게 된다. 일반적으로 냉각재 누출량은 냉각재 펌프 밀봉의 종류에 따라 다르며 노심노출 시간 또한 발전소별로 다르며 특히 비상디젤발전기의 고장 시점 및 유형에 따라 다르게 된다.

발전소 정전사고 시 소외전원 복구는 비상디젤발전기의 고장 원인 즉 발전기가 기동 시 고장이냐 기동은 성공했는데 운전 중에 고장이냐에 따라 다르므로 정확한 노심손상빈도를 계산하기 위해서는 이를 고려하여야 한다. 본 분석에서는 비상디젤발전기의 고장 원인 밝혀져 비상디젤발전기가 복구 될 수 있다 하더라도 확률론적 안전성평가에서는 Mission 시간을 24시간으로 봄으로 이 이내에는 비상디젤발전기의 복구는 할 수 없다고 가정하였다.

원자로 냉각재 펌프 밀봉 누출량 및 확률

웨스팅하우스 및 NRC는 발전소 정전사고 시 원자로 냉각재 펌프 밀봉냉각재 상실 사고에 의한 누출유량과 확률을 분석하였으며(표 1) 본 분석에서는 이 자료를 사용하여 분석하고자 한다.

표 1. 고온 오링을 가진 원자로 냉각재 펌프 밀봉 누출량

누출량 (gpm/펌프) 사고 후 30분 후	확률 (WCAP-15603)	확률 (BNL Model)
21	0.79	0.78
57	0.1442	0.0897
182	0.0533	0.1053
76	0.0100	0.02
480	0.0025	0.005
합	1	1

비상디젤발전기 기동 실패

먼저 비상디젤발전기의 고장원인이 'Fail to start'일 경우이다. 이 경우의 사고는 소외전원이 발생하고 비상디젤발전기가 기동하려하였으나 어떤 원인에 의하여 비상디젤발전기 두 대가 기동고장인 경우로 발전소정전사고가 발생하는 경우이다. 이런 경우에는 비상디젤발전기가 기동 실패하므로 원자로 냉각재 펌프 밀봉수를 공급하는 충전펌프의 전원이 상실되며 원자로냉각재 펌프 밀봉이 손상되고 즉시 냉각재가 누출된다. 냉각재 누출량과 확률값은 표 1에 나타나 있다.

비상디젤발전기 기동 중 정지

다음은 비상디젤발전기가 기동되다가 어느 시점에 발전기의 고장 'Fail to run'으로 전력을 공급 못하는 경우이다. 이런 경우의 사고 진행 과정은 비상디젤발전기가 작동하는 중에는 전력이 공급이 되어 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 파손이 안 되는 데 고장이 발생하면 즉시 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 파손되고 냉각재가 누출이 되어 어느 일정시간 후에 노심이 노출이 된다. 그러나 노심이 노출이 되는 시점에 외부

전원이 복구되면 노심손상은 일어나지 않는다.

노심손상 빈도 분석 방법

이상과 같이 발전소 정지사고를 두 가지로 고려할 수가 있으며 이들 사고에 대해서는 다음과 같이 최소단절집합으로 표시할 수 있고 발전소 정전사고에 의한 원자로 냉각재 펌프 밀봉 수 누출로 야기되는 사건 경위도 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$F(t) = \sum_n F_{loop} F_j(t)$$

단, F_{loop} : 소외전원 상실사고 빈도

n : 최소단절 집합 개수

F_j : 노심손상을 야기 시키는 j 번째 최소단절 집합의 사고 경위 확률
여기서 F_j 는 다음과 같이 표현 될 수 있다 (j 번째 최소단절집합의 인덱스를 생략함).

$$F_j(t) = F_{loop} \prod_m F_{si}(t_{si})$$

단, $F_{si}(t_{si})$: 단절집합 si 가 시간 t_{si} 에서 고장 날 확률

m : 최소단절 집합에 포함된 기본집합 개수

si : 최소단절 집합 (예, 디젤발전기 혹은 기기 고장)

t_{si} : si 가 고장 난 시간

최소단절집합에 포함되어 있는 기기들은 임의의 시간에 고장이 발생할 수 있는데 이들 중 최대로 늦게 발생한 시간을 t_{max} 라 하자.

$$t_{max} = \max (t_{s1}, t_{s2}, \dots, t_{sm})$$

$$F_j = \prod_m F_{si}(t_{si}) \leq \prod_m F_{si}(t_{max})$$

여기에 소외전원 회복조치를 고려하면 다음과 같다. 소외전원이 회복이 못 될 경우에는 원자로 펌프 냉각재 밀봉이 누출이 되므로 이때부터 노심은 노출로 가게 된다. 그러나 노심 노출로 가는 기간은 냉각재 밀봉 누출량에 따라 좌우되므로 다음과 같은 수식으로 표현 될 수 있다.

$$CDF = \sum_n CDF_j$$

$$CDF_j = F_{loop} (1/T_m) \int_0^{T_m} F_j(t) \int p(x) NR(t+UCT(x)) dx dt \dots\dots\dots (1)$$

단, T_m : 임무시간 (24시간)

$p(x)$: 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 손상되었을 때 누출량이 x (gpm)일 확률

$UCT(x)$: 원자로 냉각재 펌프 밀봉의 누출량이 x (gpm) 일때 노심노출 시간

$NR(t)$: 소외전원이 시간 t 까지 회복되지 못할 확률

$NR(t+UCT(x))$: 시간 t 에서 발전소 정전사고가 발생하고 이때부터 냉

각재 밀봉수가 x(gpm)이 누출되어 UCT(x) 시간 후에 노심이 노출됨. 이때까지 즉, t+UCT(x)까지 소외전원이 회복되지 못할 확률

그러나 실제로는 원자로 냉각재 펌프 밀봉 누설량의 이용 가능한 데이터는 표 1에서 보는 바와 같이 이산적 함수로 표시되기 때문에 이를 고려하면 노심손상빈도 수식은 다음과 같이 표현된다.

$$CDF_j = F_{loop} (1/T_m) \sum T_m F_j(t) \sum L_m p(x) NR(t+UCT(x)) \dots\dots\dots (2)$$

단, L_m : 원자로 냉각재 펌프 누출량

그러나 발전소는 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 누출사고 발생 후 전원이 회복된다 하더라도 소형냉각재 상실사고가 발생할 수 있으므로 이를 고려하면 일반적으로 PSA 분석결과 소형냉각재 상실사고 발생시 노심손상빈도는 0.01 정도이므로 이를 고려한 사고전개는 그림 1과 같으며 이를 고려할 경우 발전소 정전사고 시 RCP Seal 파손으로 인한 노심손상빈도를 완전히 분석할 수 있다.

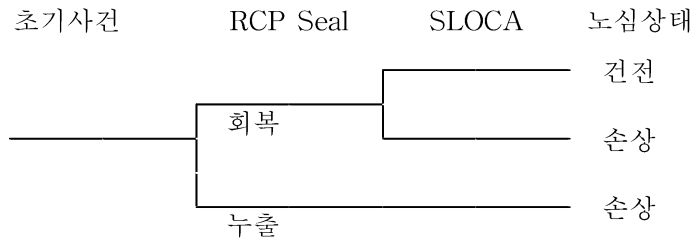


그림 1. 소외전원 회복 후 소형냉각재상실사고를 고려한 사고 추이

최소단절집합 적용

이상의 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 누출시 소외전원 회복 시간 및 확률을 고려한 수식을 다음과 같은 PSA의 결과물인 최소단절집합에 적용하면 다음과 같다.

$$\text{노심손상빈도 단절집합} = ILOP \times DGAFT \times DGBFR + ILOP \times DGAFR \times DGBFR$$

- 단, ILOP : 소외전원 상실사고
- DGAFR, DGBFR : 비상디젤발전기 A, B 'Fail to run'
- DGAFT : 비상디젤발전기 A 'Fail to start'

이상과 같은 최소단절집합에 소외전원 회복조치를 각각의 최소단절집합은 다음과 같이 표현된다.

ILOP × DGAFT × DGBFR × NR1,
ILOP × DGAFR × DGBFR × NR2

(1) 첫 번째 최소단절집합 적용

‘ILOP × DGAFT × DGBFR × NR1’의 사고 진행은 다음과 같다. 소외전원상실사고가 발생하고 비상디젤발전기 A는 ‘fail to start’로 인하여 기동이 안 되고 비상디젤발전기 B는 기동에 성공하여 동작하다가 임의의 시간 후 고장으로 정지되는 사고이다. 이런 상태가 되면 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 상실되어 얼마 후 노심이 노출된다. 이때까지 소외전원이 회복되지 않는다면 노심노출을 막을 수가 없게 된다. 이런 사고 추이를 수식 (2)를 적용하여 노심손상빈도를 계산하면 다음과 같다.

표 2. 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 누출에 의한 노심손상빈도

시간	Power Non-Recovery	CUT, gpm	DG 이용불능도 (fails to run) (a)	High Temperature O-Rings					RCP Seal 손상 시 노심노출 확률(b)	(b)에 SBO를 고려한 확률값	LOOP시 노심손상빈도 (a) × (b)
				0.0025	0.0533	0.0100	0.1442	0.7900			
				480 gpm	182 gpm	76 gpm	57 gpm	21 gpm			
1	0.62	480	1.75E-04	1.325E-03	2.025E-02	2.900E-03	3.756E-02	1.771E-01	2.391E-01	2.47E-01	4.32E-05
2	0.44	300	3.50E-04	9.500E-04	1.492E-02	2.100E-03	2.761E-02	1.291E-01	1.747E-01	1.83E-01	6.40E-05
3	0.32	200	5.25E-04	7.000E-04	1.119E-02	1.605E-03	2.084E-02	9.701E-02	1.313E-01	1.40E-01	7.35E-05
4	0.24	140	7.00E-04	5.250E-04	8.528E-03	1.215E-03	1.579E-02	7.292E-02	9.897E-02	1.08E-01	7.56E-05
5	0.18	106	8.75E-04	4.000E-04	6.396E-03	9.450E-04	1.233E-02	5.680E-02	7.687E-02	8.61E-02	7.53E-05
6	0.14	85	1.05E-03	3.000E-04	4.824E-03	6.950E-04	8.940E-03	4.076E-02	5.552E-02	6.50E-02	6.82E-05
7	0.1	70	1.23E-03	2.263E-04	3.838E-03	5.600E-04	7.282E-03	3.306E-02	4.497E-02	5.45E-02	6.68E-05
8	0.081	59	1.40E-03	1.800E-04	2.985E-03	4.350E-04	5.696E-03	2.489E-02	3.418E-02	4.38E-02	6.14E-05
9	0.063	51	1.58E-03	1.400E-04	2.345E-03	3.450E-04	4.470E-03	1.936E-02	2.666E-02	3.64E-02	5.73E-05
10	0.049	45	1.75E-03	1.100E-04	1.866E-03	2.750E-04	3.533E-03	1.541E-02	2.119E-02	3.10E-02	5.42E-05
11	0.039	40	1.93E-03	8.750E-05	1.466E-03	2.200E-04	2.834E-03	1.225E-02	1.685E-02	2.67E-02	5.14E-05
12	0.031	36	2.10E-03	6.875E-05	1.173E-03	1.700E-04	2.221E-03	9.480E-03	1.311E-02	2.30E-02	4.83E-05
13	0.024	32	2.28E-03	5.500E-05	9.594E-04	1.415E-04	1.846E-03	7.900E-03	1.090E-02	2.08E-02	4.73E-05
14	0.02	30	2.45E-03	4.500E-05	7.729E-04	1.140E-04	1.485E-03	6.320E-03	8.737E-03	1.86E-02	4.57E-05
15	0.016	27	2.63E-03	3.625E-05	6.130E-04	9.300E-05	1.211E-03	5.135E-03	7.088E-03	1.70E-02	4.47E-05
16	0.013	25	2.80E-03	2.875E-05	4.877E-04	7.300E-05	9.517E-04	3.950E-03	5.491E-03	1.54E-02	4.32E-05
17	0.01	23	2.98E-03	2.288E-05	4.024E-04	6.050E-05	7.931E-04	3.279E-03	4.557E-03	1.45E-02	4.32E-05
18	0.0083	22	3.15E-03	1.888E-05	3.305E-04	5.000E-05	4.903E-04	2.686E-03	3.576E-03	1.35E-02	4.27E-05
19	0.0068	20	3.33E-03	1.550E-05	2.718E-04	4.150E-05	4.038E-04	2.212E-03	2.945E-03	1.29E-02	4.29E-05
20	0.0056	19	3.50E-03	1.275E-05	2.239E-04	2.300E-05	3.317E-04	1.817E-03	2.408E-03	1.24E-02	4.33E-05
21	0.0046	18	3.68E-03	1.050E-05	1.866E-04	1.900E-05	2.740E-04	1.501E-03	1.991E-03	1.20E-02	4.40E-05
22	0.0038	17	3.85E-03	8.750E-06	1.572E-04	1.600E-05	2.307E-04	1.264E-03	1.677E-03	1.17E-02	4.49E-05
23	0.0032	16	4.03E-03	7.375E-06	7.196E-05	1.350E-05	1.947E-04	1.067E-03	1.354E-03	1.13E-02	4.56E-05
24	0.0027	15	4.20E-03	3.375E-06	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	3.375E-06	1.00E-02	4.20E-05
소계											5.29E-05
노심손상빈도 (소외전원정전사고빈도 : 2.91E-02, DG Fail to start가 고장일 때)											1.54E-06

*CUT: Core Unrecovery Time

이상의 분석에서 계산된 노심손상빈도를 가지고 역으로 회복조치 인자를 구할 수 있다. 이를 위해서 비상디젤발전기가 24시간 임무시간 중 평균하여 12시간에 'fail to run'이 발생한다고 하고 미회복 인자를 구한다.

$$\begin{aligned} 1.54E-06 &= ILOP \times DGAFT \times DGBFR \times NR1 \\ &= 2.91E-02 \times 1 \times \lambda \cdot T \times NR1 \\ &= 2.91E-02 \times 1 \times 1.75E-04 \times 12 \times NR1 \end{aligned}$$

따라서 NR1은 2.52E-2 이 된다.

이 값은 보수적으로 보면 12시간에 해당되는 소외전원 미회복 확률값에 해당된다.

2) 두 번째 최소단절집합 적용

'ILOP × DGAFT × DGBFR × NR2'의 사고 진행은 다음과 같다. 소외전원상실사고가 발생하고 비상디젤발전기 A와 B는 둘 다 기동에 성공하여 동작하다가 임의의 시간이 지난 후 정지되는 사고를 의미한다. 이런 상태에서 원자로 냉각재 펌프 밀봉이 상실되어 얼마 후 노심이 노출이 된다. 이때까지 소외전원이 회복되지 않는다면 노심노출을 막을 수가 없게 된다. 이런 사고 추이를 수식 (2)과 표 2의 결과를 사용하면 노심손상빈도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 3.06E-09 &= ILOP \times DGAFT \times DGBFR \times NR2 \\ &= 2.91E-02 \times \lambda \cdot T \times \lambda \cdot T \times NR2 \\ &= 2.91E-02 \times 1.75E-04 \times 12 \times 1.75E-04 \times 12 \times NR2 \end{aligned}$$

따라서 NR2은 2.35E-2 이 된다.

이 값은 보수적으로 보면 13시간에 해당되는 소외전원 미회복 확률값에 해당된다.

소외전원 미회복 인자 도출

이상은 소외전원상실 사고 시 원자로 냉각재 펌프의 밀봉수 누출로 인한 노심노출과 이에 대한 소외전원 복구 확률을 고려하여 PSA 분석시 최소단절집합으로 표현되는 노심손상빈도의 경위에 대하여 웨스팅하우스의 냉각재 펌프 누설 확률값을 사용하여 분석하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 BNL에서 제시한 냉각재 펌프 누설 확률값을 사용하여 같은 방법으로 분석하면 다음과 같다.

먼저 첫 번째 최소단절집합일 경우는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 1.57E-06 &= ILOP \times DGAFT \times DGBFR \times NR1 \\ &= 2.91E-02 \times 1 \times \lambda \cdot T \times NR1 \\ &= 2.91E-02 \times 1 \times 1.75E-04 \times 12 \times NR1 \end{aligned}$$

따라서 NR1은 2.57E-2 이 된다.

다음은 두 번째 최소단절집합일 경우는 다음과 같다.

$$3.10E-09 = ILOP \times DGAFT \times DGBFR \times NR2$$

$$= 2.91E-02 \times \lambda \cdot T \times \lambda \cdot T \times NR2$$

$$= 2.91E-02 \times 1.75E-04 \times 12 \times 1.75E-04 \times 12 \times NR2$$

따라서 NR2은 2.42E-2 이 된다.

이상의 분석에 의하여 발전소 정전사고로 인하여 원자로 냉각재 펌프의 밀봉수 누출로 인한 노심손상빈도 계산은 PSA 분석시 최종 결과로 나오는 최소단절집합에 적용할 때 기기의 이용불능도를 12시간으로 정하고 소외전원 미회복 인자를 2.5E-2로 정하면 노심손상빈도를 계산할 수 있다. 그러나 원자로 냉각재 펌프 누출량의 불확실성과 확률값의 불확실성이 존재하므로 본 논문에서는 소외전원 미회복 인자를 2.5E-2의 두 배인 5.0E-2를 소외전원 미회복 인자 값으로 제시하고자 한다. 또한 이보다는 덜 보수적이지만 기기의 이용불능도를 12시간으로 정하고 12시간에서의 소외전원 미회복 확률값 0.031을 미회복 조치값으로 사용하는 방안도 있을 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 발전소 정전사고 시 원자로 냉각재 펌프의 밀봉수가 누출되어 노심손상으로 사고가 전개될 때 이로 인한 노심손상빈도를 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 누출량과 소외전원의 회복 시간에 따라 분석하는 방법을 제시하였다. 분석에 사용된 밀봉수 누출량 및 이에 대한 확률값은 웨스팅하우스와 BNL에서 제시한 값을 사용하였다. PSA 분석에 쉽게 사용할 수 있도록 개발된 분석방법을 PSA 분석 결과인 최소단절집합에 적용하여 노심손상빈도 분석방법을 제시하였는데 이는 소외전원 미회복 인자 값을 매개로 하여 노심손상빈도 값을 구하는 방법이다. 분석에 의하면 소외전원 미회복 인자 값은 최소단절집합에 기기의 임무시간을 12시간으로 하고 12시간에서의 소외전원 미회복 확률값 5.0E-2을 사용하면 되는 것으로 나타났다. 아울러 덜 보수적이지만 원자로 냉각재 펌프 밀봉수 고장과 관련되 최소단절집합에 포함되어 있는 기기의 이용불능도를 계산할 때 임무시간을 12시간으로 하고 12시간에서의 소외전원 미회복 확률값 0.031을 사용하는 방안도 제시되었다.

참고문헌

1. "고리 1호기 확률론적 안전성평가", 중간보고서, 2001. 11, 전력연구원
2. "WOG 2000 Reactor Coolant Pump Seal leakage Model for W/H PWRs," WCAP-15603, Dec., 2000
3. "Reactor Coolant Pump Seal Performance Following a Loss of All AC Power," WCAP-10541, Nov., 1986
4. "Guidance Document for Modeling of RCP Seal Failures," BNL, Aug., 1999