

CANFLEX-NU 핵연료노심에 대한 대형냉각재상실사고 선량 평가

LBLOCA Dose Assessment for CANFLEX-NU Fuel Core

김택모, 최종호, 황해룡

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

월성 2,3,4 호기 격납건물 분석 및 주민 피폭 선량 계산 방법론을 사용하여 CANFLEX-NU 핵연료장전 원자로 사고영향 평가가 수행되었다. 대형냉각재상실사고시 격납건물내 열수력 거동 및 방사성핵종 거동 분석과 방사성 물질의 대기확산 및 주민피폭 해석을 수행하였다. 격납건물내 열수력 거동 분석을 위해 PRESCON2 코드, 방사성핵종 거동 분석에는 SMART 코드 그리고 대기확산 및 주민피폭 해석에는 PEAR 코드가 사용되었다. 월성 1호기 설계자료를 격납건물 모델에 이용하였으며, 기존 37봉 표준연료 노심과 비교하기 위해 월성 2,3,4 호기 선량계산에서 극한값을 보인 100% 원자로출구모관 파단사고를 대상 사고로 선정하였다. 격납건물 부계통의 손상유무에 따라 단일사고와 이중사고로 분류하여 모든 안전계통이 가용한 경우 (단일사고) 와 격납건물 격리계통 손상을 동반한 경우 (이중사고) 에 대하여 분석결과를 요약하였다. 격납건물 경계 손상 유무에 관계없이 모든 경우의 개인 및 주민 피폭선량은 선량 한도를 만족시킨다. 기존 37봉 표준연료 노심과 비교하면 CANFLEX-NU 노심에서의 단일사고시 약 1/2배, 이중사고시 약 1/30배의 작은 선량값을 보였다.

Abstract

Accident analysis of CANDU nuclear power plant with CANFLEX-NU fuel core is accomplished using the analysis methodology of Wolsong 2,3,4 FSAR for thermalhydraulic & radionuclide behaviour in containment, atmospheric dispersion of radionuclide and public dose. PRESCON2 code for the thermohydraulic behaviour in containment, SMART code for the radionuclide behaviour and PEAR code for atmospheric dispersion and the public dose are used. Wolsong 1 design data are used

for containment model. For comparison with the result for 37-rod standard fuel core, 100 % reactor outlet header break is selected as the analysis case since it resulted in the significant public dose in Wolsong 2,3,4 FSAR. Single failure and dual failure cases, which are distinguished whether containment subsystem is working or not, are analyzed. Individual and population doses for all cases are below the acceptance criteria. In comparison with 37-rod standard fuel core, CANFLEX-NU core have a half dose value in single failure and one thirtieth in dual failure.

1. 서론

CANFLEX-NU 핵연료장전에 따른 원자로사고 영향평가 중 대형냉각재상실사고시 격납건물내 열수력 거동 분석과 방사성핵종 거동, 방사성물질의 대기확산 및 주민피폭 해석을 수행하였다. 본 연구의 목적은 CANFLEX-NU 핵연료의 실용화 가능성을 안전해석관점에서 분석하고 기존 핵연료와 비교한 CANFLEX-NU 핵연료의 안전성 정도를 평가하기 위한 것이다.

격납건물 분석을 위한 선행 요건으로, 월성 2,3,4 호기 FSAR 검토 결과 대형냉각재상실사고 (100% 원자로출구모관 파단) 에서 상대적으로 많은 방사능이 누출되어 일반 대중의 방사선 피폭이 허용기준 대비 높은 것으로 확인되어 이 경우를 분석 대상 사고로 선정하였다. 아울러, 월성 2,3,4 호기 FSAR 계산에서 사용된 전산코드와 방법론이 그대로 사용되었다. 100% 원자로출구모관 파단에 대한 열수력 과도분석 결과인 질량 및 에너지 방출 자료와 100% 원자로출구모관 파단시 방사성핵종 누출량 (표 1) 이 격납건물 분석 및 주민피폭 계산의 입력으로 사용되었다. 월성 2,3,4호기 FSAR와 비교하여, 대상 사고시 CANFLEX-NU 핵연료의 heat-up 정도가 낮기 때문에 핵연료 손상율이 낮고 방사성핵종 누출량도 적었다.

본 논문에서는 100% 원자로출구모관 파단시 모든 안전계통이 가용한 경우 (단일사고) 와 격납건물 격리계통 손상을 동반한 경우 (이중사고) 에 대하여 분석결과를 기술하였다.

2. 분석 방법론

2.1 격납건물 열수력 거동 분석

격납건물 열수력 거동 분석에서는 파단으로부터의 질량 및 에너지 방출에 의한 격납건물 압력 및 온도 과도상태를 계산한다. 또, 방사성핵종 누출 평가를 위해 격납건물 압력 과도상태에 의해서 가정된 여러 가지 누설경로 (정상 누설 및 격납건물경계 손상) 를 통한 누설률이 결정된다. 누설 정도에 의해서 주위 대기로 누출되는 방사성핵종량이 결정된다.

격납건물 압력 및 온도분석은 격납건물 열수력 코드인 PRESCON2 [1]을 사용하여 모사한다. PRESCON2 코드는 살수과정, 국부공기냉각기, 벽으로의 열전달, 계기용 공기 유동, 추가적인 열부하, 격납건물 격리, 파열벽 및 파단방출에 의한 순간기화 등에 대한 부모모델을 포함한다. PRESCON2 코드는 격납건물내 여러 지역에서의 압력 및 온도에 관한 정보 뿐 아니라 방사성핵종 거동을 분석하기 위한 자세한 출력자료도 제공한다.

방사성핵종 누출 계산을 위한 압력과도를 결정하는 평가에서는 공간 노드화에 별로 민감하지 않기 때문에 몇 개의 원자로건물 격실을 결합하여 하나의 노드로 모사한다. 격납건물은

단순하게 9 노드 25 링크로 모델되며 이에 대한 개략도는 **그림 1**에 주어져있다. 격납건물로부터의 방사성핵종 누출 분석에서는 환기 및 중수증기회수 계통 (**그림 2**)을 포함한 14 노드와 37 링크로 구성된 격납건물 모델을 사용한다.

격납건물 격리계통 완전상실시의 격납건물 분석 모델과 가정은 격리계통이 격리 신호 발생 후에도 개방된 상태로 계속 운전되는 것으로 가정하며 운전원이 910 초 후에 수동으로 격납 건물을 격리하는 것을 제외하면 안전계통이 가용한 경우와 같다. 격납건물 열수력 분석은 격납건물 내부압력이 대기압에 도달하면 종료된다.

2.2 격납건물내 방사성핵종 거동 분석

격납건물내 기체 및 액체 연무질의 부유 방사성핵종 거동에 대한 분석은 전산코드 SMART[1]을 이용하여 수행하였다. 노드간 부유 방사성핵종 이송 및 격납건물로부터의 누설은 PRESCON2 로 예측된 노드간의 유량을 이용해 계산한다. SMART는 PRESCON2 로 예측한 공기냉각기 및 표면에 의한 증기응축물과 각 시간단계별 표면적 온도를 사용한다.

SMART 에 직접 모델된 17 종의 방사성핵종들은 다음과 같다 :

- 가. H-3 (냉각재계통 냉각재로부터)
- 나. I-131, I-132, I-133, I-134, I-135 (파손된 핵연료로부터)
- 다. 냉각재계통 냉각재로부터의 요오드 (다른 요오드 동위원소와의 혼합물로 간주)
- 라. Kr-87, Kr-88, Kr-89 (파손된 핵연료로부터)
- 마. Xe-133m, Xe-133, Xe-135m, Xe-135, Xe-137, Xe-138 (파손된 핵연료로부터)
- 바. 냉각재계통 냉각재로부터의 불활성기체 (혼합물)

격납건물이 건전한 경우 방사성핵종 거동 분석은 격납건물 압력이 대기압에 이를 때까지 수행된다. 그러나, 격납건물 격리계통 완전상실 사고시의 방사성핵종 거동 분석은 정상적인 계기용 공기 주입이 끝나는 시간인 16850 초에서 종료된다.

2.3 방사성핵종 대기확산 및 피폭선량 분석

원자력발전소의 가상사고 조건하에서 누출되는 부유 방사성물질로 인한 대중의 피폭선량을 계산하기 위해 PEAR 전산 코드 [1]를 사용한다. PEAR 코드는 참고문헌 [2]에서 권고하는 대로 방사성핵종의 대기확산 및 시간누적 농도를 모델한다. PEAR 코드는 개인 및 주민에 대하여 구름 및 지표 침적물로부터 신체표면, 피부, 갑상선 및 전신에 대한 선량 및 총 선량을 계산한다.

부유 핵종 누출로 인한 선량 평가는 일련의 계산과정을 포함한다. 선량평가는 기상 조건, 부지 특성, 누출 특성 및 피폭자 특성 등의 입력자료를 요구하며 다음 계산을 포함한다 :

- 가. 가정된 기상 조건, 부지 및 누출 특성 하의 어떤 위치에서의 대기 희석인자
- 나. 이 위치에서의 구름내 방사성물질의 시간누적 농도
- 다. 지표에 침적된 방사성물질의 농도
- 라. 구름내 방사성물질로부터의 외부 피폭에 의한 선량 (피부 선량, 유효 (진신) 선량 및 갑상선 선량)
- 마. 구름내 방사성물질의 흡입 (그리고 삼중수소의 경우 피부 관통) 으로 인한 내부 피폭에 의한 선량 (예탁 유효 (진신) 선량 및 예탁 갑상선 선량)
- 바. 지표에 침적된 방사성물질로부터의 외부 피폭에 의한 선량 (피부 선량, 유효 (진신) 선

량 및 갑상선 선량).

안전성 분석의 경우 대중에 대한 선량은 참고문헌 [2] 에서 권고한 모델을 이용해 계산하며 CANDU 원자력발전소 사고등급에 대해 규정된 CNSC 허용기준 (진신 및 갑상선 선량) 과 선량 예측치를 비교한다.

3. 분석 결과

3.1 격납건물 열수력 거동 분석 결과

보수적인 방사성핵종 누출 평가 목적으로 100% 원자로출구모관 파단이 극한 파단 경우로 선정되었다. 모든 안전계통이 가용한 경우, 격납건물 열수력 코드인 PRESCON2 와 파단방출 자료를 이용하여 계산한 격납건물 압력 과도상태는 **그림 3** 에 실려있다. 고압에 의한 격납건물격리는 3.2 초에 발생한다. 이 시간은 격리 신호 접수에 따른 격리댐퍼 차단에 요구되는 시간 3 초를 포함한 것이다. 격납건물내 모든 대기분리 파열벽들은 1 초내 파열되고 격납건물 압력이 19 kPa(g) (해석값) 에 도달되는 10 초경에 살수가 시작된다. 살수가 감소되는 에너지 방출률을 통제할 수 있음에 따라, 27 초경에 82 kPa(g) 의 격납건물 침두압력이 발생한다. 격납건물이 격리되기 전까지 환기계통 입구 및 출구관을 통해 격납건물 공기 및 증기가 방출되기 때문에, 방사성핵종 거동에 대한 관점에서 보수적인 결과를 초래한다. 3번의 살수 작동과 정지를 반복한 후 살수원이 962 초에 완전히 고갈되면 압력이 다시 증가하기 시작하여 1578 초경에 16 kPa(g) 에 이른다. 그 후 국부공기냉각기 및 건물 누설 효과에 의해 압력은 점점 감소하며 16840 초에 정상 계기용공기 유입이 종료된 후에 격납건물은 더 급격히 감압되어 6.72 일 후 대기압에 이른다. **그림 4** 는 격납건물 온도 과도상태를 보여준다. 침두온도 117℃ 는 사고발생 핵연료장전실에서 24 초경에 발생하며 장기적으로 핵연료장전실 온도는 42℃ 에 머문다.

격납건물 격리계통 완전 손상시 격납건물 압력 과도상태는 **그림 5** 에 주어져있다. 살수가 10 초경에 시작되고, 침두압력 78 kPa(g) 이 25 초에 발생한다. 살수가 격납건물 저압 신호에 의해 112 초에 정지된다. 국부 공기냉각기, 건물을 통한 누설 및 환기 입구/출구관을 통한 외부 유출 등의 효과로 압력이 점차 감소하여 약 426 초에 대기압에 도달한다. 이때 환기 입구관을 통한 누출은 종료된다. 환기 송풍기의 지속적인 작동으로 인해 426 초 이후 압력이 대기압이하로 유지된다. 그러나 환기 출구관을 통한 누출은 운전원 조치로 환기 송풍기가 정지되는 910 초까지 계속된다. 격납건물로의 계기용 공기 주입으로 인한 추가적인 누출은 환기 입구관을 통한 누출 만을 가정하여 수행되는 방사성핵종 거동 계산에서 평가된다. **그림 6** 은 격납건물 온도 과도상태를 보여준다. 침두온도 116℃ 는 사고발생 핵연료장전실에서 25 초에 발생한다. 장기적으로 핵연료장전실 온도는 42℃ 에 머문다.

3.2 격납건물내 방사성핵종 거동 분석 결과

모든 안전계통이 가용한 경우, 원자로출구모관 100% 파단 사고후 격납건물내 주요 격실에 서의 I-131 과 Xe-133 방사성핵종량의 변화는 **그림 7 과 8** 에 각각 묘사되어 있다. 핵연료로부터의 방사성핵종 누출은 파손되는 핵연료로부터 방출된다. 격납건물 격리는 3.2 초에 발생하기 때문에 격리 전에는 냉각재에 내포된 방사성핵종의 극소량만 누출이 가능하다. 그러나 대부분의 방사성핵종 누출은 건물 누설을 통해 일어난다. **그림 9 및 10** 는 격납건물로부터 주위 대기로의 I-131 과 Xe-133 의 누적 누출량을 각각 보여준다. 주위대기로 누출

된 I-131 과 Xe-133 의 총 방사능은 각각 0.007 TBq 과 9.0 TBq 이다. 격납건물로부터 누출된 모든 방사성핵종에 대한 자세한 누적 누출 예측치는 표 2 에 주어지 있다.

격납건물 격리계통 완전손상 사고 경우, 격납건물내 주요 격실에서의 I-131 과 Xe-133 방사성핵종량은 그림 11 및 12 에 각각 주어지 있다. 그림 13 과 14 는 각각 격납건물로부터 주위환경으로의 I-131 및 Xe-133 의 누적 누출량을 보여준다. 대부분의 방사성핵종 누출은 격납건물 압력이 높은 초기에 발생한다. 환기 입구관을 통한 주위환경으로의 I-131 과 Xe-133 의 총 누출량은 각각 0.252 TBq 과 6.30 TBq 이다. 굴뚝을 통한 주위환경으로의 I-131 과 Xe-133 의 총 누출량은 각각 0.183 TBq 과 6.20 TBq 이다. 계기용공기 주입이 끝나면 누출도 종료된다. 모든 방사성핵종들에 대한 격납건물로부터의 자세한 누적 누출량은 표 3 에 주어지 있다.

3.3 방사성핵종 대기확산 및 피폭선량 분석 결과

모든 안전계통이 가용한 경우, 임계연령군의 개인 및 주민에 대한 선량은 기존의 증기발생기세관 누설로 인한 기여분을 포함하여 표 4 에 주어지 있다. 개인에 대한 전신 및 갑상선 선량합계는 각각 0.131 mSv 및 0.410 mSv 이다. 주민에 대한 전신 및 갑상선 선량합계는 각각 0.203 person-Sv 및 0.916 person-Sv 이다. 개인 및 주민 선량은 모두 허용한도 이내이다.

격납건물 격리계통 완전 손상 경우의 선량이 표 4 에 주어지 있다. 개인에 대한 전신 및 갑상선 선량 합계는 각각 3.79 mSv 와 27.4 mSv 이다. 주민에 대한 전신 및 갑상선 선량 합계는 각각 1.76 person-Sv 와 18.06 person-Sv 이다. 개인 및 주민 선량은 모두 허용한도 이내이다.

4. 결론

CANFLEX-NU 핵연료장전 원자로에서 100% 원자로출구모관 파단사고시 격납건물내 열수력 거동 분석 및 방사성핵종 거동, 방사성물질의 대기확산 및 주민피폭 해석을 수행하였다. 모든 안전계통이 가용한 경우 (단일 사고) 와 격납건물 격리계통 손상을 동반하는 경우 (이중사고) 에 대한 분석결과를 요약하였다. 각 경우의 개인 및 주민에 대한 전신 및 갑상선 선량 합계는 표 4 에 주어지 있다. 표 4 는 같은 사고에 대한 CANFLEX-NU와 기존 핵연료 노심(월성 2,3,4호기 FSAR)의 분석 결과를 비교하여 보여주고 있다.

격납건물 경계 손상 유무에 관계없이 모든 경우의 개인 및 주민 선량 분석 결과가 선량 한도 아래에 있어 인허가 요건을 만족시킨다. 그리고 선량 한도와의 여유도가 더욱 확대되어 CANFLEX-NU 핵연료 노심의 안전성이 기존 핵연료 노심에 비해 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

5. 참고문헌

- [1] Wolsong NPP Units No. 2/3/4, "Final Safety Analysis Report", 1995 May.
- [2] "Guidelines for Calculating Radiation Doses to the Public from a Release of Airborne Radioactive Material under Hypothetical Accident Conditions in Nuclear Reactors", CSA Standard N288.2-M91, 1991 April.

표 1 100% ROH 파단시 파손 핵연료로부터의 방사성핵종 누출량

동위원소	반감기 (초)	CANFLEX-NU 누적 누출량 (TBq)	W234 FSAR 누적 누출량 (TBq)
I-131	6.95E+05	92.	5526.
I-132	8.23E+03	135.	9997.
I-133	7.49E+04	93.	5927.
I-134	3.16E+03	71.	3705.
I-135	2.37E+04	72.	3754
I-137	2.45E+01	28.	587.
Kr-87	4.56E+03	22.	588.
Kr-88	1.01E+04	32.	960.
Kr-89	1.90E+02	38.	802.
Xe-133m	1.93E+05	2.	119.
Xe-133	4.57E+05	126.	9917.
Xe-135m	9.18E+02	9.	212.
Xe-135	3.30E+04	9.	569.
Xe-137	2.29E+02	52.	1093.
Xe-138	8.52E+02	53.	1201.

표 2 안전계통이 가용한 경우의 100% 원자로출구모관 파단 후
여러 누출경로를 통한 방사능 누출량 (TBq)

총 누출 (0 에서 581020 초까지)

핵종	굴뚝	환기 입구	누설	구멍
H-3	4.8733E-03	1.9193E-01	2.3279E+01	0.0000E+00
I-131	0.0000E+00	0.0000E+00	6.9779E-03	0.0000E+00
I-132	0.0000E+00	0.0000E+00	7.6476E-03	0.0000E+00
I-133	0.0000E+00	0.0000E+00	2.4748E-03	0.0000E+00
I-134	0.0000E+00	0.0000E+00	1.6032E-04	0.0000E+00
I-135	0.0000E+00	0.0000E+00	7.0222E-04	0.0000E+00
Kr-87	0.0000E+00	0.0000E+00	4.6455E-02	0.0000E+00
Kr-88	0.0000E+00	0.0000E+00	1.4245E-01	0.0000E+00
Kr-89	0.0000E+00	0.0000E+00	3.6993E-03	0.0000E+00
Xe-133m	0.0000E+00	0.0000E+00	1.3546E-01	0.0000E+00
Xe-133	0.0000E+00	0.0000E+00	8.9996E+00	0.0000E+00
Xe-135m	0.0000E+00	0.0000E+00	1.1901E-01	0.0000E+00
Xe-135	0.0000E+00	0.0000E+00	7.2668E-01	0.0000E+00
Xe-137	0.0000E+00	0.0000E+00	6.4612E-03	0.0000E+00
Xe-138	0.0000E+00	0.0000E+00	2.2487E-02	0.0000E+00
MIXTURE-I	2.6200E-05	1.0319E-03	2.8373E-03	0.0000E+00
MIXTU-N.G	2.5305E-05	9.9770E-04	3.1760E+00	0.0000E+00

표 3 격리논리 완전상실시 100% 원자로출구모관 파단 후
여러 누출경로를 통한 방사능 누출량 (TBq)

총 누출 (0 에서 16850 초까지)

핵 종	굴 덕	환기 입구	누 설	구 명
H-3	6.4381E+01	1.4283E+02	2.0488E+02	0.0000E+00
I-131	1.8349E-01	2.5231E-01	1.0237E-05	0.0000E+00
I-132	2.6444E-01	3.5936E-01	1.5035E-05	0.0000E+00
I-133	1.8232E-01	2.4846E-01	1.0322E-05	0.0000E+00
I-134	1.9716E-01	2.7683E-01	1.1477E-05	0.0000E+00
I-135	1.4095E-01	1.9311E-01	7.9709E-06	0.0000E+00
Kr-87	1.0040E+00	8.3165E-01	2.3557E-03	0.0000E+00
Kr-88	1.5273E+00	1.3590E+00	3.4796E-03	0.0000E+00
Kr-89	3.6754E-01	5.0251E-01	2.3274E-03	0.0000E+00
Xe-133m	9.8441E-02	9.9035E-02	2.1996E-04	0.0000E+00
Xe-133	6.2319E+00	6.2720E+00	1.3871E-02	0.0000E+00
Xe-135m	4.9146E-01	4.7593E-01	1.0320E-03	0.0000E+00
Xe-135	4.7898E-01	6.0015E-01	1.0167E-03	0.0000E+00
Xe-137	6.7497E-01	8.4732E-01	3.6706E-03	0.0000E+00
Xe-138	1.7174E+00	1.4763E+00	5.0405E-03	0.0000E+00
MIXTURE-I	3.4881E-01	7.7128E-01	4.3824E-06	0.0000E+00
MIXTU-N.G	2.8120E+00	3.9276E+00	4.1128E-03	0.0000E+00

표 4 CANFLEX 노심과 기존 핵연료 노심에 대한 선량 결과 비교

선량 한도 및 사고 경우		개인 선량		주민 선량	
		전 신	갑상선	전 신	갑상선
단일 사고 선량 한도		5 mSv	30 mSv	100 p-Sv	100 p-Sv
안전계통 가용한 경우	CANFLEX 노심	0.131	0.410	0.203	0.916
	기존 37봉 핵연료 노심	0.2	0.7	0.4	2.4
이중 사고 선량 한도		250 mSv	2500 mSv	10000 p-Sv	10000 p-Sv
격납건물 격리논리 완전 상실 경우	CANFLEX 노심	3.79	27.4	1.76	18.06
	기존 37봉 핵연료 노심	92	757	61	727

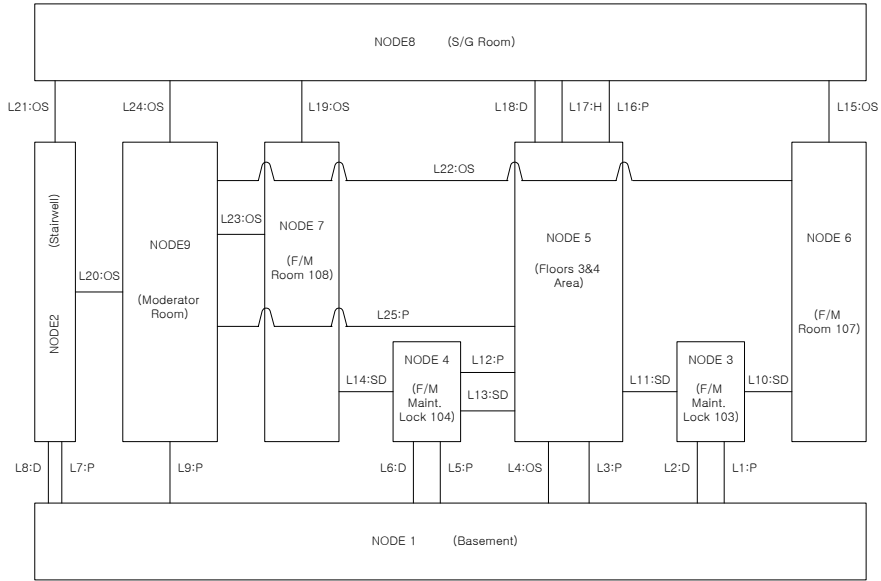


그림 1 격납건물 9 노드 25 링크 모델

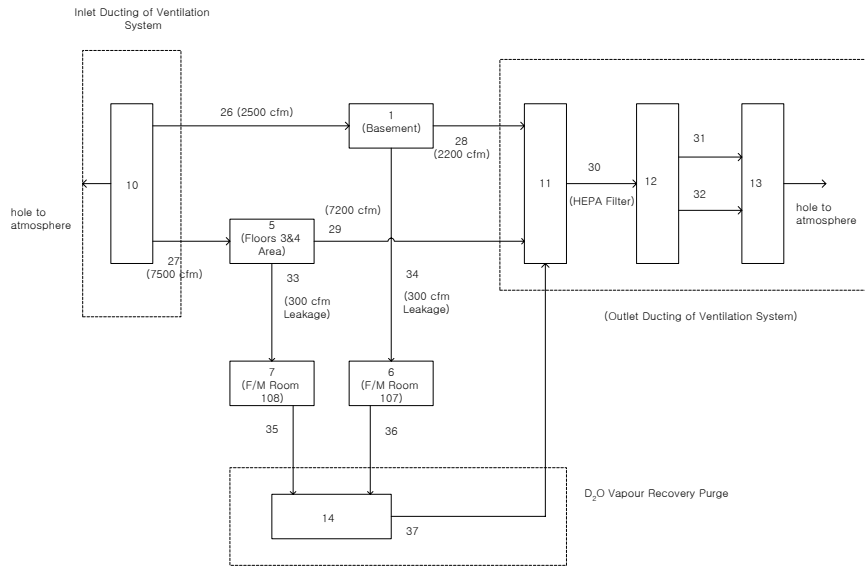


그림 2 환기 및 증수증기 회수 계통 모델

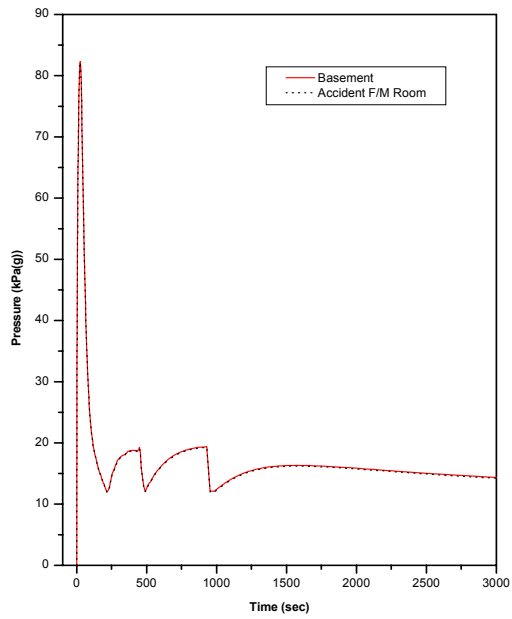


그림 3 안전계통 가용한 경우의 격납건물 압력 과도상태

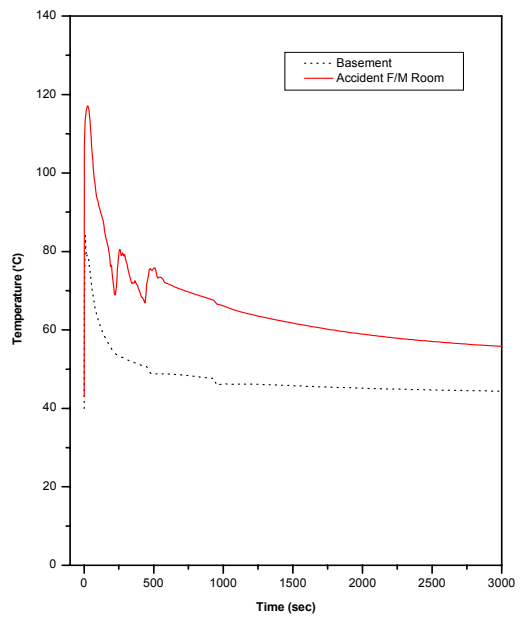


그림 4 안전계통 가용한 경우의 격납건물 온도 과도상태

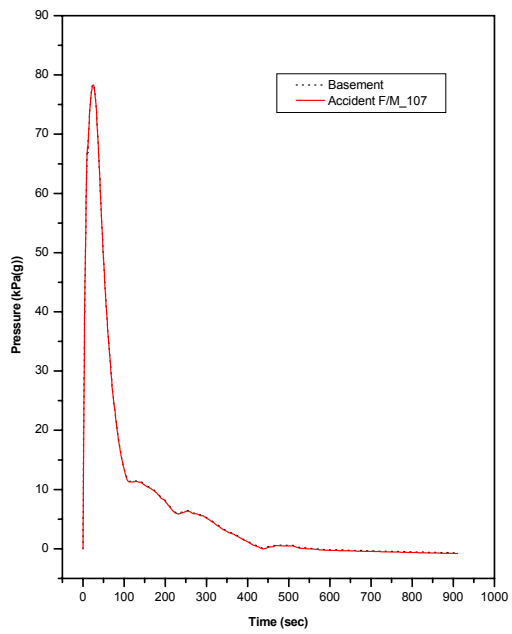


그림 5 격리계통 손상 경우의 격납건물 압력 과도상태

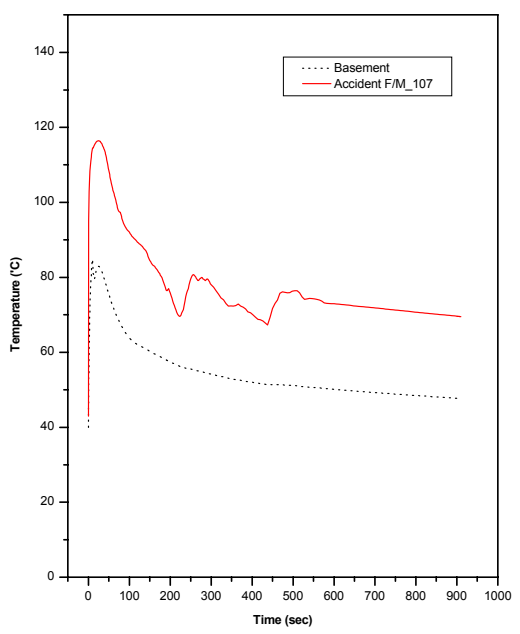


그림 6 격리계통 손상 경우의 격납건물 온도 과도상태

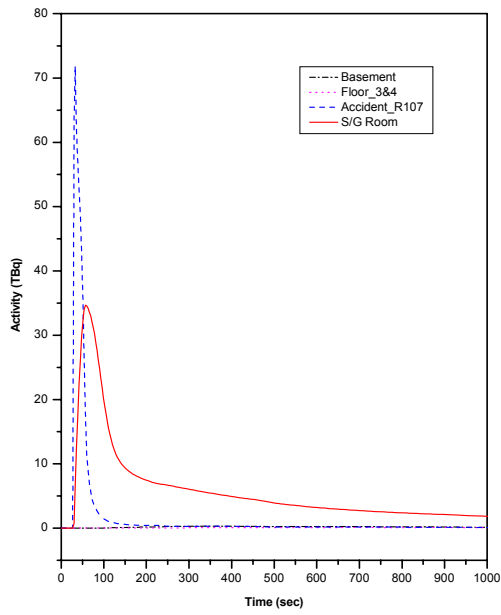


그림 7 안전계통 가용한 경우의 격납건물내 I-131 방사성핵종량

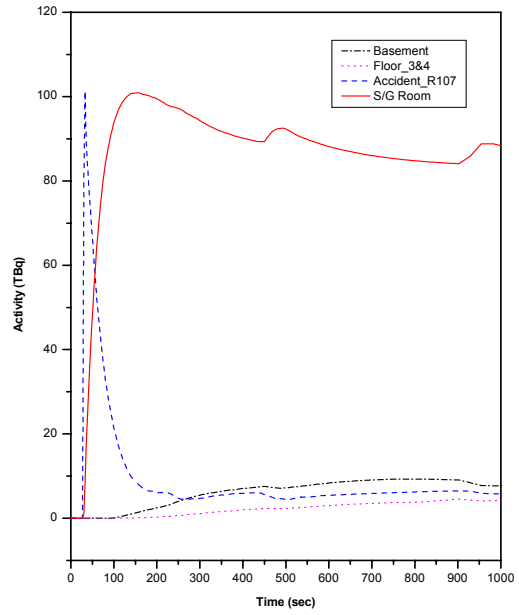


그림 8 안전계통 가용한 경우의 격납건물내 XE-133 방사성핵종량

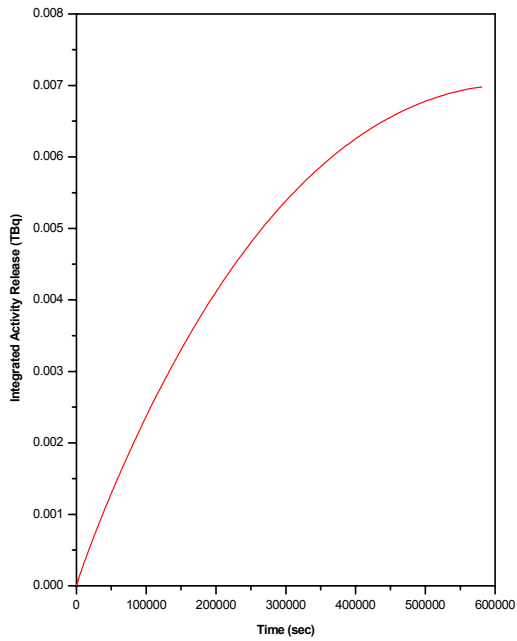


그림 9 안전계통 가용한 경우의 I-131 누적누출량

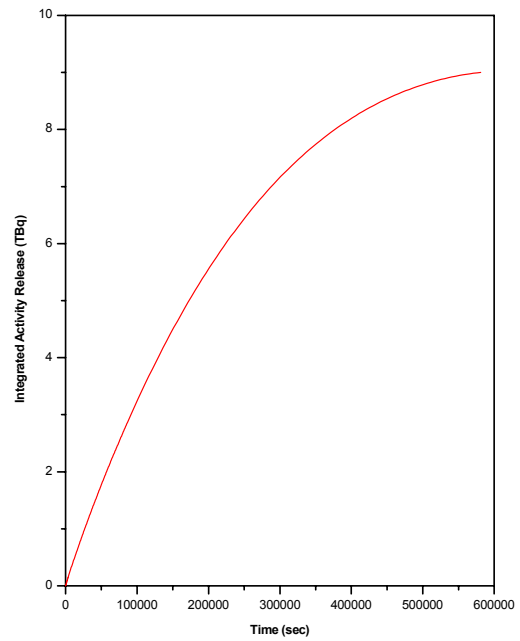


그림 10 안전계통 가용한 경우의 XE-133 누적누출량

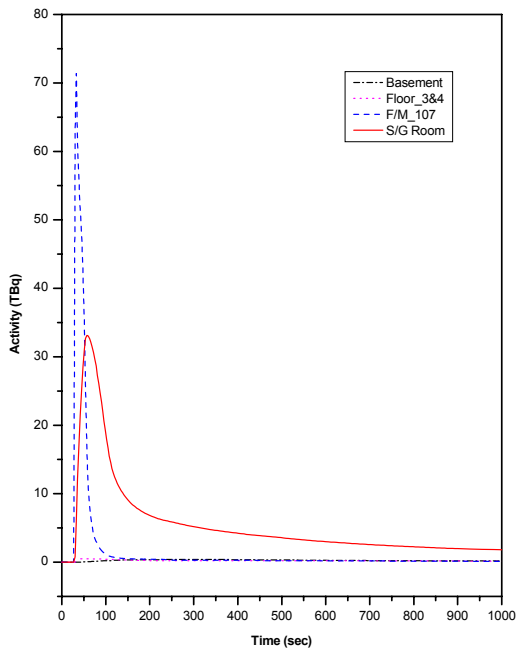


그림 11 격리계통 손상 경우의 격납건물내 I-131 방사성핵종량

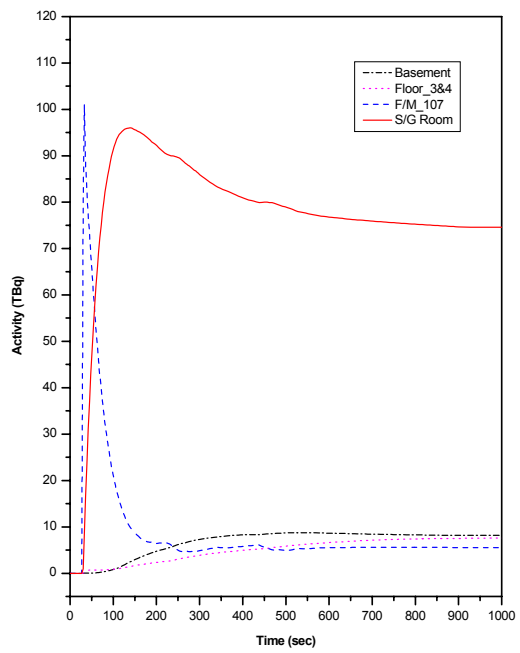


그림 12 격리계통 손상 경우의 격납건물내 XE-133 방사성핵종량

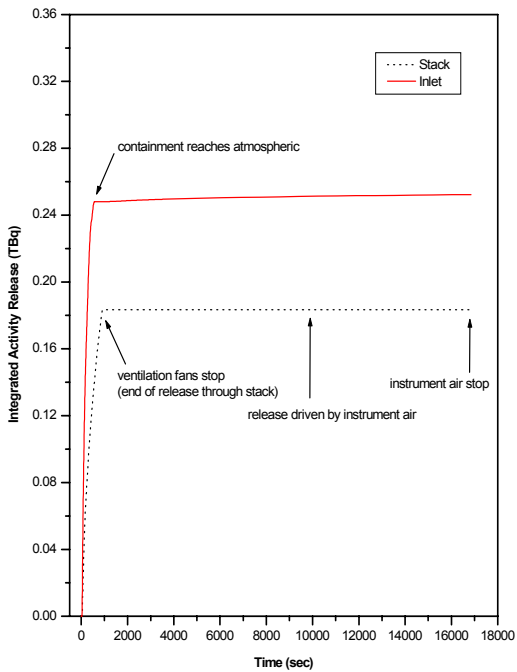


그림 13 격리계통 손상 경우의 I-131 누적누출량

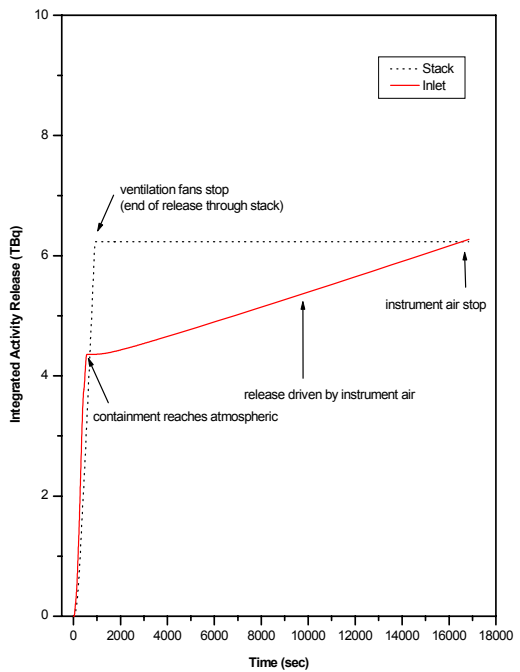


그림 14 격리계통 손상 경우의 XE-133 누적누출량