2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DUPIC 핵연료노심에 대한 대형냉각재상실사고 예비 선량 평가

Preliminary LBLOCA Dose Assessment for DUPIC Fuel Core

김택모, 최종호, 황해룡
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

이보욱, 정창준
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

월성 2,3,4 호기 격납건물 분석 및 주민 피폭 선량 계산 방법론을 사용하여 DUPIC (Direct Use of spent PWR fuel In Candu) 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. 월성2호기 설계자료를 격납건물 모델에 이용하였으며, 천연우라늄 노심과 비교하기 위해 월성 2,3,4 호기 FSAR (Final Safety Analysis Report)에서 상대적으로 높은 피폭선량을 초래한 100% 원자로출구모관 파단사고를 대상 사고로 선정하였다. 격납건물 경계가 건전한 경우에는 피폭선량이 적으나, 격납건물 경계에 물리적인 고장이 있는 경우에는 개인 피폭선량의 감소를 위해서 초기 핵분열생성물 재고량의 감소 또는 계산방법론의 과보수성 제거 등이 필요한 것으로 판단된다.

Abstract

Accident analysis of CANDU (Canadian Deuterium Uranium Reactor) nuclear power plant for DUPIC fuel 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 2 design data are used for containment model. For comparison with the result for natural uranium core, 100 % reactor outlet header break is selected as the analysis case since it resulted in relatively high public dose in Wolsong 2,3,4 FSAR. The reduction of initial fission product inventory or the removal of excessive conservatism in accident analysis methodology is required to reduce the individual dose for the break with a impairment of containment boundary.

1. 서 론

DUPIC 핵연료는 경수로에서 사용하고 방출된 핵연료를 재가공하여 중수로에 사용하는 재활용 개념이다. 경수로에서 연소를 끝내고 방출된 핵연료의 우라늄 농축도가 천연우라늄 농도보다 높은 점을 이용하자는 개념이지만 다량의 핵분열생성물을 함유하고 있으므로 가공실현성 외에 운전중 사고발생시 인허가 선량한도 만족여부가 실용화에 중요한 관건이 된다.

DUPIC 핵연료장전에 따른 원자로사고 영향평가 중 대형냉각재상실사고시 격납건물내 열수력 거동 분석과 방사성핵종 거동, 방사성물질의 대기확산 및 주민피폭 해석을 수행하였다. 본 연구의 목적은 DUPIC 핵연료의 월성원전 적용 가능성을 안전해석관점에서 분석하고 DUPIC 핵연료주기의 타당성 및 경제성을 평가하기 위한 기초자료를 생산하는 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 상대적으로 높은 것으로 확인되어 이 경우를 분석 대상 사고로 선정하였다. 100% 원자로출구모관 파단에 대한 열수력 과도분석 결과인 질량 및 에너지 방출 자료와 1/4-노심 핵연료 간극재고량 (표 1) 이 격납건물 분석 및 주민피폭 계산의 입력으로 사용되었다.

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 누출된 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 부모델을 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.

2.2 격납건물내 방사성핵종 거동 분석

격납건물내 기체 및 액체 연무질의 부유 방사성핵종 거동에 대한 분석은 전산코드 SMART [2] 을 이용하여 수행하였다. 노드간 부유 방사성핵종 이송 및 격납건물로부터의 누설은 PRESCON2 로 예측된 노드간의 유량을 이용해 계산한다. SMART 는 PRESCON2 로 예측한 공기냉각기 및 표면에 의한 증기응축률과 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.

2.3 방사성핵종 대기확산 및 피폭선량 분석

원자력발전소의 가상사고 조건하에서 누출되는 부유 방사성물질로 인한 대중의 피폭선량을 계산하기 위해 PEAR 전산 코드 [3] 를 사용한다. PEAR 코드는 참고문헌 [4]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 (전신) 선량 및 갑상선 선량)
마. 구름내 방사성물질의 흡입 (그리고 삼중수소의 경우 피부 관통) 으로 인한 내부 피폭에 의한 선량 (예탁 유효 (전신) 선량 및 예탁 갑상선 선량)
바. 지표에 침적된 방사성물질로부터의 외부 피폭에 의한 선량 (피부 선량, 유효 (전신) 선량 및 갑상선 선량).

안전성 분석의 경우 대중에 대한 선량은 참고문헌 [4]에서 권고한 모델을 이용해 계산하며 CANDU 원자력발전소 사고등급에 대해 규정된 CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission) 허용기준 (전신 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 3.1 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 9 kPa(g) (해석값) 에 도달되는 7 초경에 살수가 시작된다. 살수가 감소되는 에너지 방출률을 통제할 수 있음에 따라, 20 초경에 67 kPa(g) 의 격납건물 첨두압력이 발생한다. 격납건물이 격리되기 전까지 환기계통 입구 및 출구관을 통해 격납건물 공기 및 증기가 방출되기 때문에, 방사성핵종 거동에 대한 관점에서 보수적인 결과를 초래한다. 살수원이 179 초에 완전히 고갈되면 압력이 다시 증가하기 시작한다. PRESCON2 모델이 700 초에 비상노심냉각계통의 회수단계를 모사하기 시작하고, 압력은 919 초경에 19 kPa(g) 에 이른다. 그후 국부공기냉각기 및 건물 누설효과에 의해 압력은 점점 감소하며 16840 초에 정상 계기용공기 유입이 종료된 후에 격납건물은 더 급격히 감압되어 6.7 일 후 대기압에 이른다. 그림 4 는 안전계통이 가용한 경우의 격납건물 온도 과도상태를 보여준다. 첨두온도 114℃ 는 사고발생 핵연료교환기실에서 16 초경에 발생하며 장기적으로 핵연료교환기실 온도는 42℃ 에 머문다.

3.2 격납건물내 방사성핵종 거동 분석 결과

모든 안전계통이 가용한 경우, 원자로출구모관 100% 파단 사고 후 격납건물내 주요 격실에서의 I-131 과 Xe-133 방사성핵종의 농도 변화는 그림 5와 6에 각각 묘사되어 있다. I-131 과 Xe-133 방사성핵종이 선택된 이유는 다른 핵종과 비교해 다량의 간극재고량이 사고 후 누출되고 반감기도 상대적으로 길기 때문이다. 핵연료로부터의 방사성핵종 누출은 1/4노심 간극재고량이 사고 개시 후 3 초부터 60 초까지 선형적으로 방출된다고 가정하였다. 격납건물 격리는 3.1 초에 발생하기 때문에 격리 전에는 극소량의 누출만이 존재한다. 그러나 대부분의 방사성핵종 누출은 건물 누설을 통해 일어난다. 그림 7과 8은 격납건물로부터 주위 대기로의 I-131 과 Xe-133 의 누적 누출량을 각각 보여준다. 주위대기로 누출된 I-131 과 Xe-133 의 총 방사능은 각각 2.16 TBq 과 3777.6 TBq 이다. 격납건물로부터 누출된 모든 방사성핵종에 대한 자세한 누적 누출 예측치는 표 2 에 주어져 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 3에 주어져 있다. 개인에 대한 전신 및 갑상선 선량합계는 각각 0.4 mSv 및 2.4 mSv 이다. 주민에 대한 전신 및 갑상선 선량합계는 각각 1.4 person-Sv 및 9.9 person-Sv 이다. 개인 및 주민 선량은 모두 허용한도 이내이지만 천연우라늄을 사용하는 월성 2,3,4 FSAR에 비해서는 대략 3배 정도로 증가하였음을 알 수 있다. 이는 표 1 의 DUPIC 핵연료 방사선원항이 천연우라늄 핵연료에 비해서 대략 5배 정도 많음에 기인한다.

4. 결 론

DUPIC 핵연료장전 원자로에서 100% 원자로출구모관 파단 사고시 격납건물내 열수력 거동 분석 및 방사성핵종 거동, 방사성물질의 대기확산 및 주민피폭 해석을 수행하였다. 모든 안전계통이 가용한 경우 개인 및 주민에 대한 전신 및 갑상선 선량이 허용한도의 10%이내이나 격납건물 경계에 물리적인 고장을 포함하는 사고에서는 선량이 크게 증가하므로 초기 핵분열생성물 재고량을 감소시키는 방안 또는 현재의 사고해석 방법론에 존재하는 과도한 보수성을 제거하는 방안 등이 필요한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

[1] M.S. Quraishi, “PRESCON2 VER-0.600 Program Description”, TTR-219, Volume 1, September 1990.

[2] M.S. Quraishi and W.M. Collins, “SMART: A Simple Model for Activity Removal and Transport VER-0.203, Program Description”, TTR-220, Volume 1, September 1991.

[3] R. Moffett, “PEAR-F77 VER-2.00”, TTR-580, 1997 September.

[4] “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 ELESTRES 코드에서 고려된 방사성핵종에 대한 DUPIC 1/4-노심 간극재고량

동위원소	반감기 (초)	1/4-노심 간극재고량 (TBq)
I-131	6.95E+05	28596
I-132	8.23E+03	52311
I-133	7.49E+04	32356
I-134	3.16E+03	10799
I-135	2.37E+04	19649
I-137	2.45E+01	448
Kr-83m	6.70E+03	453
Kr-85m	1.61E+04	1493
Kr-85	3.38E+08	208
Kr-87	4.56E+03	1669
Kr-88	1.01E+04	5357
Kr-89	1.90E+02	650
Xe-133m	1.93E+05	711
Xe-133	4.57E+05	54166
Xe-135m	9.18E+02	425
Xe-135	3.30E+04	4929
Xe-137	2.29E+02	10124
Xe-138	8.52E+02	20115

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

총 누출 (0 에서 600020 초까지)

핵 종	굴 뚝	환기 입구	누 설	구 멍
H-3	2.5228E-03	7.4520E-02	2.3224E+01	0.0000E+00
I-131	5.0940E-11	1.7468E-09	2.1564E+00	0.0000E+00
I-132	9.3203E-11	3.1961E-09	2.8177E+00	0.0000E+00
I-133	5.7624E-11	1.9760E-09	8.4898E-01	0.0000E+00
I-134	1.9233E-11	6.5953E-10	1.5912E-02	0.0000E+00
I-135	3.5000E-11	1.2002E-09	1.8945E-01	0.0000E+00
Kr-87	5.9414E-12	2.0375E-10	3.4691E+00	0.0000E+00
Kr-88	1.9067E-11	6.5387E-10	2.3515E+01	0.0000E+00
Kr-89	2.2883E-12	7.8481E-11	5.4706E-02	0.0000E+00
Xe-133m	2.5326E-12	8.6851E-11	4.7275E+01	0.0000E+00
Xe-133	1.9282E-10	6.6125E-09	3.7776E+03	0.0000E+00
Xe-135m	1.5222E-12	5.2198E-11	1.1971E+01	0.0000E+00
Xe-135	1.7555E-11	6.0201E-10	3.3578E+02	0.0000E+00
Xe-137	3.5876E-11	1.2303E-09	1.1082E+00	0.0000E+00
Xe-138	7.1428E-11	2.4495E-09	8.2617E+00	0.0000E+00
MIXTURE-I	1.3577E-05	4.0105E-04	2.8148E-03	0.0000E+00
MIXTU-N.G	2.6206E-05	7.7474E-04	3.1524E+00	0.0000E+00

표 3 DUPIC 노심과 천연우라늄 (NU) 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	DUPIC 노심	0.4	2.4	1.4	9.9
	NU 노심	0.2	0.7	0.4	2.4

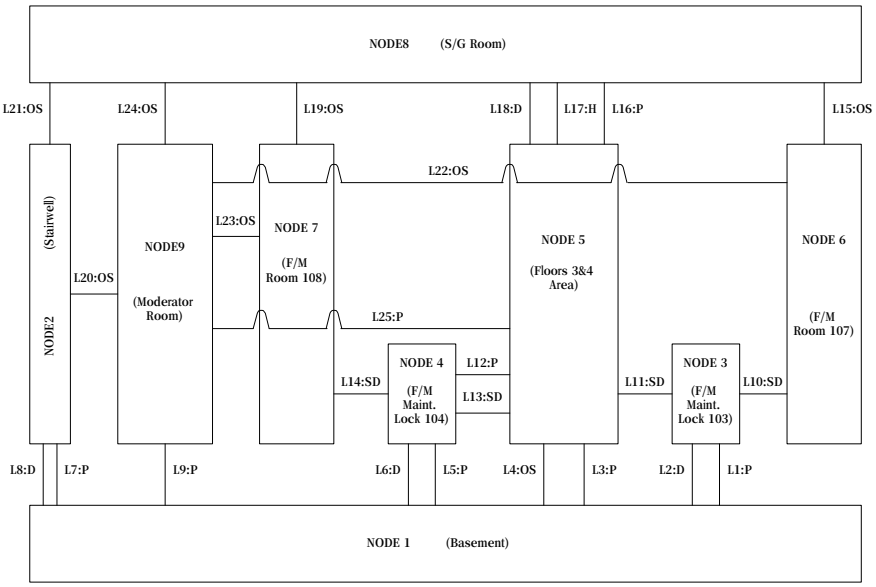

그림 1 격납건물 9 노드 25 링크 모델

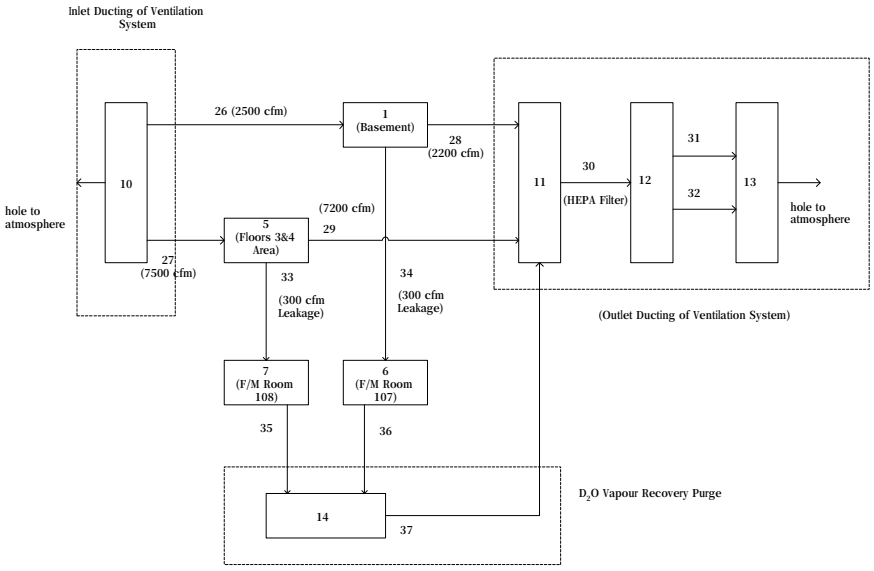

그림 2 환기 및 중수증기 회수 계통 모델

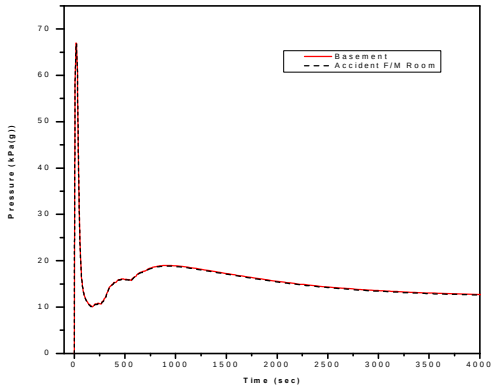

그림 3 안전계통 가용한 경우의 격납건물 압력 과도상태

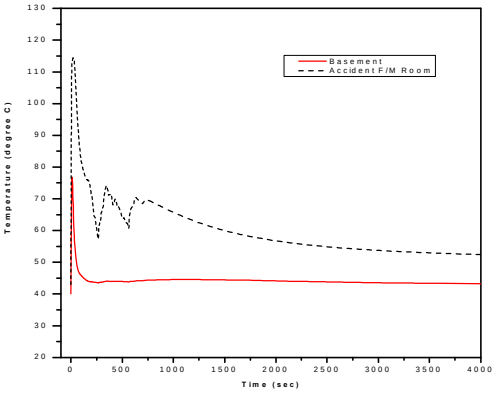

그림 4 안전계통 가용한 경우의 격납건물 온도 과도상태

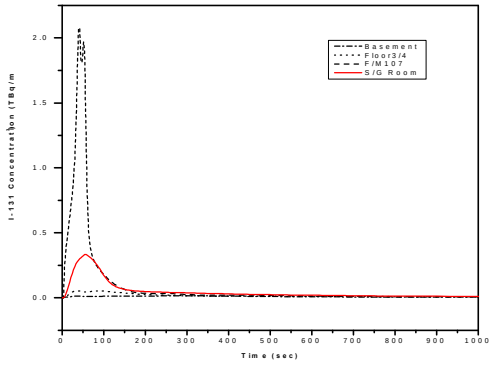

그림 5 안전계통 가용한 경우의 격납건물내 I-131 농도

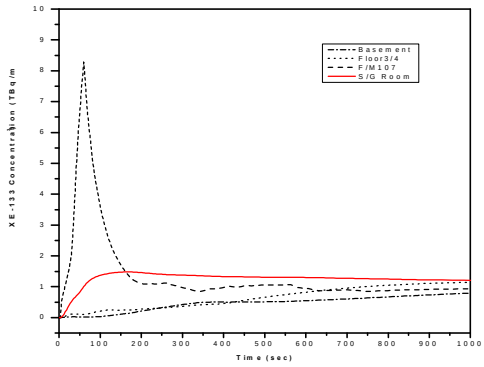

그림 6 안전계통 가용한 경우의 격납건물내 XE-133 농도

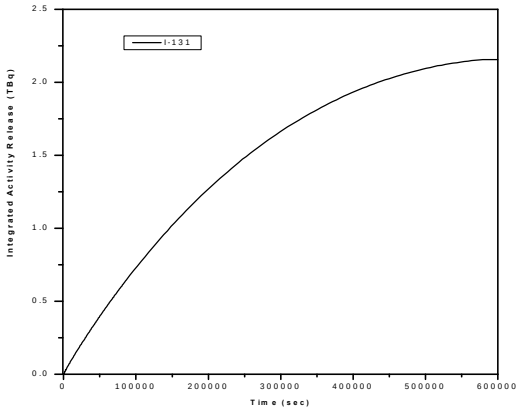

그림 7 안전계통 가용한 경우의 I-131 누적누출량

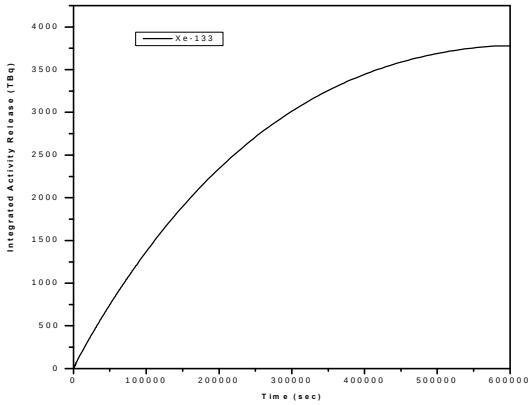

그림 8 안전계통 가용한 경우의 XE-133 누적누출량