

'96 춘계 학술 발표회 논문집
한국원자력학회

원전 비상대책용 방사선원항 자료 개발

석호, 박성규, 강선구
한국전력기술주식회사

정백순, 이철언
한전전력연구원

요 약

현재 방사선 비상훈련에 사용하는 TID-14844 의 방사선원항은 너무 보수적이고, 각 사고경로별로 방사선원항의 특성을 나타낼 수 없으므로, 원전의 비상사고 발생시 주민의 피폭선량을 최소화하기 위한 발전소 요원의 신속, 정확한 대처능력을 배양하기 위하여 현실적인 방사선원항 평가 자료의 필요성이 대두되어 왔다. 본 연구에서는 보수성을 배제한 최적 분석기법을 이용하여 선정된 사고경로에 대해 MAAP 전산코드로 사고진행 및 방사선원항을 분석하였고, 격납건물내 방사선계측기의 예측치를 평가할 수 있는 방법론을 개발하였으며, 이를 통해 사고경로별 안전변수 및 방사선 계측기 등에서 사고 진행에 따른 예측치 등을 계산함으로써 효과적인 비상대책 수립을 위한 실질적인 방사선원항 데이터 베이스를 구축하였다.

1. 서 론

방사선 비상훈련시 가상사고에 대하여 신속, 정확하게 사실적인 대응을 하기 위해서는 사고에 따른 발전소의 거동을 나타내는 발전소 운전 변수와 방사선원항을 필요로 한다. 방사선 비상훈련용 시나리오 개발시에는 사고경로별 발생확률을 고려하여 노심이 손상, 용융되는 중대사고의 분석결과를 반영하기 위하여 미국 원자력규제위원회는 비상훈련용 시나리오 작성 지침 (NUREG/CR-3365)에서 MARCH, RETRAN, RELAPS 등과 같은 전산 프로그램을 이용한 발전소 고유의 실질적인 데이터 개발을 제시하고 있다.

현재 국내에서는 이러한 사고분석을 수행하지 않고 보수적인 설계기준사고시 방사선원항 (TID-14844 기준), 즉 최대가상사고시의 방사선원항을 비상훈련에 사용하고 있다. 그러나 이러한 방사선원항은 너무 보수적이며, 각 사고경로에 따른 방사선원항 특성을 나타낼 수 없고, 동 방사선원항을 이용하여 계산된 격납건물내 사고후고준위방사선계측기 (RMS : 이하

격납건물내 방사선계측기) 등 기존 발전소 설비에서의 측정값과 사고경로에 대한 최적분석을 통해 계산된 측정값과 현격한 차이를 보이는 문제점이 있다. 또한 과학기술처와 한국 원자력 안전기술원은 1991년 국내 원자력발전소를 대상으로 비상대응설비의 설치현황을 점검하고 발전소에서 사고로 방출될 수 있는 잠재적 방출량 및 방사선원항의 결정이 가능해야 한다고 지적하였다.

따라서 본 연구에서는 연구대상 원전인 고리 2 호기, 영광 1, 2 호기, 울진 1, 2 호기에 대해 노심손상빈도와 방사선원항 측면을 고려하여 노심 용융 사고 시나리오를 선정하고, 사고경로별 방사선원항을 중대사고 분석용 전산코드로 계산하여, 방사선 비상훈련시 훈련 참가자가 가상사고에 충실하게 대응하기 위한 사고시 발전소 안전변수, 발전소내 방사선 계측기에서의 예상측정치에 대한 자료를 개발하였다.

2. 본 론

2.1 방사선원형 연구 동향

1950년대 이래 가동중인 원전의 가상사고시 발생할 수 있는 방사선원형을 평가하고자 하는 시도가 있어 왔다. 미원자력 에너지위원회에서 1957년 발간한 WASH-740 "대형 원자력발전소 주요 사고의 이론적 가능성과 그 결말"에서는 방사성물질의 누출 및 소의 피폭을 추정하였으며, 1962년에는 최대가상사고를 분석한 TID-14844 가 발간되었으나 이를 모두 체계적인 분석에 근거한 것은 아니었다. 1975년에는 최초로 체계적이고 확률론적인 분석기법을 사용하여 Peach Bottom과 Zion 발전소에 대하여 노심 손상빈도가 높은 중대 사고경로와 이들에 대한 방사선원형 결과를 분석하여 원전 위험도를 종합적으로 평가한 원자로 안전성 연구 (WASH-1400) 가 발간되었다. 통 연구에서 사용된 기법과 절차는 이후 비상계획, 미래질/고유안전성문제 (USI/GSI) 의 우선순위 결정, 환경영향 평가 등과 같은 규제분야에 널리 사용되어 왔다.

그러나 TMI 사고 이전의 방사선원형 평가 연구 및 이를 통하여 도출된 방사선원형은 TMI 사고시의 실제 방사선원형과 현격한 차이를 보였다. 이러한 차이의 원인은 중대사고시 중요 현상 및 핵종 거동에 대한 정확한 지식이 없었기 때문이었다. 따라서 방사선원형에 큰 영향을 미치는 중대사고 현상들을 고려한 현실적 방사선원형을 계산하기 위한 시도로서 방사선원형 거동 평가의 기술적 근거 연구 (NUREG-0772), 경수로에서의 중대사고시 방사성핵종의 방출연구 (BMI-2104), 방사선원형 재평가 연구 (NUREG-0956), 원전 위험도 재평가 연구 (NUREG-1150) 등이 수행되어 왔으며, 최근 지금까지의 중대사고 연구결과를 반영한 경수로형 발전소에 대한 사고 방사선원형 (NUREG-1465)이 발표되어 앞으로 ALWR 등에 적용하려는 경향이 대두되고 있다.

2.2 방사선원형 평가 전산코드

세계적으로 중대사고 및 방사선원형을 분석하는데 널리 사용되는 전산코드는 미국 원자력 규제위원회(NRC) 후원하여 개발된 STCP, MELCOR 및 미국 산업계 중심으로 개발된 MAAP 등이 있다. 본 연구에서는 연구대상원전의 중대

사고시 발전소 및 방사선원형의 거동을 계산하기 위한 전산코드로서 전반적인 중대사고 현상을 모의할 수 있고, 계산 수행 시간이 짧으며, 향후 산업계에서의 활용성 등이 비교적 큰 MAAP 전산코드를 선정하였다.

MAAP 전산코드의 입력자료는 대상 원전의 최종안전성분석보고서, 각종 도면 및 시험자료를 토대로 작성되었으며, 국내 전문가 및 MAAP 전산코드를 개발한 PAI 사의 품질보증절차에 따라 검토 및 검증되었다.

2.3 사고경로 선정

본 연구에서는 고리 2 호기, 영광 1, 2 호기, 울진 1, 2 호기에 대하여 이러한 목적에 부합하는 사고경로들을 선정하기 위한 기준으로서 노심손상빈도 및 방사선원형 측면에서 사고 결과의 심각성 등을 고려하였다.

영광 1,2 호기에 대해서는 기수행된 확률론적 안전성 분석 결과를 바탕으로 노심손상빈도가 높은 7 개의 사고경로를 선정하였으며, 고리 2 호기 및 울진 1,2 호기의 경우 대상 발전소와 유사한 특성, 즉 가압경수로형이며 대형 전식 격납건물을 갖고 있는 영광 1,2 호기, Surry, Zion, Maanshan 등의 발전소에 대한 확률론적 안전성 분석 결과와 NUREG-0772, BMI-2104, NUREG-0956, NUREG-1150 (NUREG/CR-4624), NUREG-1465 등으로부터 중요한 사고경로도 도출된 사고경로를 선정하였다.

고리 2호기, 영광 1, 2 호기, 울진 1,2 호기에 대해 선정된 사고경로는 교류전원상실을 동반한 대형 냉각재상실사고, 안전주입계통에 의한 주입이 실패 및 재순환으로의 전환이 실패하는 소형 냉각재상실사고, 가압기 동력구동압력방출밸브가 개방 고착되는 발전소 정전사고, 증기발생기류브 파단사고, 증기발생기로의 주보조급수가 상실되는 파도사고, 원자로냉각재 펌프의 밀봉이 파손되는 기기냉각수 상실사고, 발전소 전원상실사고, 저압안전주입계통의 체크밸브 파손을 초기사건으로 하는 저압경계부 냉각재상실사고, 터빈구동펌프가 작동하는 발전소 정전사고 등이다.

2.4 사고현상 분석

본 연구에서 고리 2 호기, 영광 1,2 호기, 울

진 1,2 호기에 대하여 7 개씩 선정된 사고경로를 MAAP 코드를 이용하여 노심, 원자로냉각재 계통, 격납건물 내 열수력학적 및 방사선원항 거동을 분석하였다.

대상 원전에 대한 MAAP 코드의 계산 결과를 검토한 결과 노심손상이 발생하는 중대사고들은 초기사건 발생, 노심노출, 노심손상, 원자로 용기 파손, 격납건물 파손 등의 중요 사건을 거처면서 진행된다. 이러한 사고진행은 사고경로 및 대상 원전에 따라 중대사고 관련 현상이 매우 상이한 시간에 발생하며, 원자로냉각재계통 및 격납건물 압력 등의 중요 사고 관련 변수의 시간에 따른 경향도 상당히 다르게 나타나고 있다. 이것은 사고경로에 따라 공학 적안전계통 운전원 조치 등의 작동 여부, 노심열출력 등과 같은 발전소 고유의 특성이 다르기 때문이다.

또한 MAAP 계산 결과를 보면 사고경로에 따라 다르나 사고 시작 후 노심노출까지는 수십 분 또는 수 시간이 걸리며 이후 노심은 상당히 가열되게 된다. 노심이 손상되기까지는 수십 분의 시간이 소요되고, 노심이 상당부분 손상되고 수 시간 후 원자로용기가 파손되게 된다. 원자로용기가 파손되고 노심용융물이 격납건물 내로 방출되면 증기 생성 또는 노심용융물과 콘크리트의 반응 등 중대사고현상에 의해 수 시간 또는 수십 시간 후 격납건물의 건전성은 위협받게 된다. 또한 초기사건 발생 후 노심노출까지의 시간은 사고경로에 따라 상당한 시간적 차이가 있으나 노심노출 이후 핵연료가 용융 되기까지는 원전에 따라 큰 차이가 없이 수십 분 사이에 이루어진다. 이러한 결과는 TMI 사고 분석 결과 밝혀진 것과 거의 일치하는 것으로서 노심노출 이후 노심용융은 매우 빠른 시간에 진행됨을 알 수 있으므로 환경으로의 방사능 누출을 최소화하기 위해서는 노심노출 이전에 노심 내로 냉각수를 주입하는 것이 필요하다.

2.5 방사선원항 평가 자료의 개발

2.5.1 사고관련 변수 분석

원자력발전소에서의 사고시 발전소의 상태를 파악하는데 중요한 변수들을 선정하기 위하여 본 연구에서는 안전변수지시계통 (Safety

Parameter Display System, SPDS) 을 검토하여 중요 변수를 도출하였다.

사고경로에 따른 발전소의 거동, 즉 앞서 언급한 중대사고시 중요 사건을 개략적으로 파악할 수 있는 사고관련 변수로서는 가압기 압력, 고온관에서의 기체 온도, 안전주입유량, 핵연료재장전수탱크의 수위, 증기발생기의 압력 및 수위, 격납건물 내 압력 및 온도 등이 있다. 그러나 이는 정성적인 분석일 뿐이며 파손 면적 등에 대한 정보를 알 수 있는 정량적인 평가는 아니다. 따라서 초기사건에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있는 정량적 평가를 위한 연구가 필요하며, 사고 후 적절한 조치를 취하기 위해서 초기사건의 종류는 적어도 사고 발생 후 노심노출이 되기 전인 수십 분 이전에 파악되어야 한다.

노심손상을 간접적으로 알 수 있는 계측기로는 고온관에서 물 또는 증기 온도를 측정하는 계측기가 있다. 고온관내 기체온도의 시간에 따른 변화를 살펴보면 매우 급격히 증가하는 시점이 나타나는데 이는 노심 내 온도가 증가하면서 핵분열생성물이 노심 내로 방출되고 지르칼로이와 증기의 산화반응에 의해 노심 내 온도 상승이 급격히 가속되는 것에 기인하므로 고온관 기체온도를 통해 노심손상 유무를 파악할 수 있다.

원자로용기 파손은 그림 1 에서와 같이 가압기 압력, 격납건물 내 압력 및 온도 등의 변화로부터 파악될 수 있으나, 이러한 변화는 파손 발생 후에 알 수 있는 것이며, 안전변수의 추이를 통해 사고진행을 예측하기 위해서는 발생된 사고의 초기사건을 우선적으로 파악하여야 한다.

격납건물 파손은 주로 격납건물 내 압력의 함수로서 알려져 있으므로 격납건물의 파손 여부를 파악하는데 격납건물내 압력이 가장 중요하다. 격납건물 내에서의 압력 상승이 완만한 경우에는 확률론적 안전성 분석 결과중의 하나인 격납건물 파손 곡선(Fragility Curve)으로부터 격납건물 파손을 예측할 수 있다.

2.5.2 격납건물내 방사선계측기에서의 예측치 평가 방법론 개발

격납건물내 방사선계측기에서의 방사선량을

을 계산하기 위해서는 각 방사성 물질들의 초기 노심 재고량, 사고 진행에 따른 발전소 거동, 방사성 물질들의 노심, 일차계통을 통한 격납건물 내로의 이동, 격납건물 내에서의 방사성 물질의 방사능에 의한 격납건물내 방사선계측기의 계측치에 대한 체계적인 계산이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 다음과 같은 방법에 의해 격납건물내 방사선계측기에서의 예측치를 계산하였다.

가. 방사성 핵종들의 초기 노심 재고량 계산 : EOL 시점에서 ORIGEN 2 코드 사용

나. 사고진행에 따른 발전소 및 방사선원항 거동 분석 : MAAP 코드 사용

다. MAAP 코드 계산결과로부터 핵종의 질량 및 방사능 계산 : RUNT-G 코드 사용 (방사능붕괴 고려)

라. 격납건물 내 구조를 고려하여 격납건물내 RMS 위치에서의 방사선량을 계산 : ISOSHLDC 코드사용

마. 격납건물 내 샘플에 녹아 있는 방사성 핵종의 농도 계산 : 다. 와 유사함.

2.5.3 격납건물내 방사선계측기에서의 예측 방사선량을 평가

격납건물내 방사선계측기에서의 방사선량에 대한 한 예를 그림 2 에 나타내었으며, 이러한 방사선량은 핵분열생성물이 노심 내로 방출되는 시점 이후 계속되기 시작하므로 이를 통해 노심손상의 시작 시점을 알 수 있다. 그러나 격납건물내 방사선계측기에서의 방사선량은 격납건물내 방사선계측기가 위치하는 격실의 공기 중 방사성 물질의 총 방사능 양 및 벽 바닥 등에 침적된 방사성 물질의 총 방사능에 의해 크게 영향을 받으므로, 방사선량으로부터 공기 중의 방사성 핵종 분포, 핵종별 방사능 농도 및 환경으로 방출될 수 있는 핵종별 방사능 농도 등을 파악하기는 매우 어렵다.

또한 격납건물을 우회하는 사고경로시에는 노심손상에 의해 노심 내로 방출된 핵분열생성물의 대부분이 격납건물을 우회하여 보조건물 및 환경으로 직접 방출되므로 원자로용기 파손 전에는 격납건물내 방사선계측기에서 방사능이 계측되지 않으며, 노심손상이 대부분 진행된 후인 원자로용기가 파손되는 시점 이후에 격납

건물 내 방사능이 계측된다. 우회사고경로시 격납건물내 방사선계측기에서의 방사선량을 통해 원자로용기 파손 여부를 알 수 있다.

2.5.4 사고후시료채취계통에서의 핵종농도 분석

본 연구의 대상 원전인 영광 1,2 호기, 울진 1,2 호기, 고리 2 호기의 사고후시료채취계통(Post Accident Sampling System, PASS)은 원자로냉각재계통(고온관), 격납건물비상집수정(잔열제거계통), 격납건물 공기(가연성기체제거계통) 으로부터 시료를 채취한다.

본 연구에서는 MAAP 코드에 잔열제거계통내의 방사선원항 거동을 평가하는 모델이 포함되어 있지 않으므로 잔열제거계통의 채취원은 격납건물 샘플로 가정하였다. 고온관으로부터의 시료 분석은 MAAP 코드 모델의 한계, 액체시료만을 채취하는 점, 고온관에 물이 존재할 경우 노심은 노출이 되지 않는 점 등 때문에 본 연구에서는 계산되지 않았다. 본 연구에서 격납건물 대기 및 비상집수정내 방사성 핵종의 농도는 격납건물 상부 및 동격실내 방사성 핵종 및 비상집수정이 있는 격납건물 격실내 물속에 녹아있는 핵종농도로부터 계산하였다.

핵분열생성물은 노심의 온도가 상승함에 따라 핵종의 휘발성에 따라 서로 다른 방출율로 유출되며, 사고경로에 따라 노심이 손상되는 정도가 다르므로 핵분열생성물의 방출량도 그에 따라 다르다. 핵분열생성물 중 가장 높은 휘발성을 갖는 핵종은 불활성기체(Kr, Xe), 요오드(I), 세슘(Cs), 텔루리움(Te) 이다. 이들 중 불활성기체만이 기체 또는 증기의 상태로 원자로냉각재계통 내에 침적되지 않고 대부분 격납건물 대기로 이동한다. 그러나 CsI, CsOH, Te 는 물을 지나게 될 때 감쇄될 수 있으며, 에어로졸 형태로 존재할 경우에는 노심의 상부 구조물, 고온관, 밀립관 등의 원자로냉각재계통내에 상당 부분 침적될 수 있다. 이러한 차이는 주로 사고경로에 따라 원자로냉각재계통내에서의 핵종별 거동 특성이 다르기 때문이다.

소형 냉각재상실 사고경로의 경우 노심으로부터 방출된 핵종들은 다른 사고경로에 비해 노심으로부터 격납건물로의 유출경로가 짧으며 연속적으로 격납건물로 유출되므로 원자로냉각

계통 내에서의 방사성 물질의 침적이 적고, 발전소정전 사고경로의 경우에는 소형 냉각재 상실 사고경로에 비해 격납건물 내로 유출되기 전에 방사성 핵종들이 원자로냉각계통 내에서 긴 시간동안 존재하게 되므로 원자로냉각계통 내에 우선적으로 침적되기 때문이다. 따라서 이 두 사고경로에 대한 Xe 의 농도는 비슷하나 I 의 농도는 매우 다르게 나타나고 있다. 따라서 불활성기체가 노심손상 시점에서 격납건물 내 공기 중 방사성 핵종의 가장 큰 부분을 차지하며 노심손상의 정도를 파악할 수 있는 가장 신뢰할 수 있는 변수이다.

공기중 핵종별 방사능 농도의 한 예를 그림 3 와 4 에 나타내었으며, 이러한 농도는 격납건물 대기내의 핵종 분포 및 핵종의 방사능 농도에 대한 자세한 정보를 제공하므로 격납건물 파손 시 환경으로 방출될 수 있는 핵종 및 방사능 량을 제공하며, 격납건물 대기 내 불활성기체의 농도, 즉 핵연료봉으로부터 격납건물로 방출된 불활성기체의 양을 알 수 있으므로 사고 초기의 불활성기체의 양을 알면 노심이 어느 정도 손상되었는지를 대략 계산할 수 있게 된다. 따라서 격납건물 공기중 핵종별 방사능 농도는 노심손상의 시작, 노심손상 진행 정도 및 격납건물 파손 시 환경으로 방출될 수 있는 방사능 등에 대한 자세한 정보를 제공하는 매우 유용한 변수이다.

섬프 내 핵종별 방사능 농도 또한 노심손상 시점을 알려주는 변수이나 격납건물 섬프 내 물이 존재하지 않는 사고나 공학적안전계통이 재순환 운전에서 실패하여 저압안전주입계통이 작동하지 않는 사고경로에서는 얻을 수 없는 정보이다.

3. 결론

사고시 발전소 및 방사선원항 거동 평가 기술 수준이 높아짐에 따라 현실적인 방사선원항 평가를 하려는 시도가 꾸준히 지속되어 왔으며, 비상대책시 사용되는 TID-14844 방사선원항의 비현실적인 가정과 그에 따른 방사선원항의 문제점을 개선하기 위해 본연구에서는 최적분석 방법으로 대상원전에 대한 중대사고시 현실적인 방사선원항 자료를 구축하였다.

본 연구에서는 대상 원전에 대하여 사고경로 별로 수행한 MAAP 코드 분석 결과를 이용하여 주요 사고관련 변수를 도출하였고, 격납건물내 방사선계측기의 방사선량을 및 사고후시료채취계통에서의 격납건물 대기 및 섬프에서의 핵종별 방사능 농도를 계산하였으며, 이러한 분석 결과를 근거로 중대사고시 원전에서 발생하는 주요 사건 및 중대사고 현상을 파악할 수 있는 변수로서 가압기 압력, 고온관에서의 온도, 저온관으로의 안전주입유량, 핵연료재장전수탱크의 수위, 증기발생기의 압력 및 수위, 격납건물내 압력 및 온도, 격납건물 섬프가 있는 격실의 수위, 격납건물내 방사선계측기에서의 방사선량을 및 방사능 농도 등을 도출하였다.

사고경로에 대한 MAAP 코드 분석 결과 초기사건 발생 후 노심노출까지는 사고경로에 따라 수십 분 또는 수 시간이 소요되나, 노심노출이후 노심이 용융까지는 수십 분의 빠른 시간 안에 진행되는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 사고후시료채취계통에서의 격납건물 공기중 핵종별 방사능 농도는 노심손상의 시점, 노심손상 진행 정도 및 격납건물 파손 시 환경으로 방출될 수 있는 핵종별 방사능 등에 대한 자세한 정보를 제공하는 변수일 뿐만 아니라 비상대책, 격납건물내 방사선원항 거동 평가, 노심손상정도 평가 및 중대사고 분석 등과 같은 분야에 매우 유용하게 사용될 수 있는 변수로서 파악하였다.

본연구결과 보다 효과적인 비상대책을 위해서는 원전 고유의 광범위한 사고에 대한 체계적인 분석이 요구되며, 이를 위하여 확률론적 안전성 평가 (PSA) 또는 개별원전평가 (IPE) 등의 수행이 필요하다. 또한 사고 발생 후 사고 진행을 예측하고 노심으로부터 환경으로의 방사능 방출량을 계산하는 통합적인 도구, 즉 사고 발생 후 발전소의 거동, 방사능의 방출 시점, 환경으로의 방출량 등을 신속히 계산하고 그 결과를 인식하기 쉬운 형태로 비상요원에게 제공하며, 운전원의 조치를 입력받아 그에 따른 사고 결과의 변화를 제공하여 적절한 조치를 파악할 수 있는 전산 코드와 같은 도구의 개발도 필요하다.

참 고 문 헌

1. 한국전력기술(주), 원전 비상대책용 방사선원항 평가, KEPRI-93N-J08, 1996.
2. J.J. Dinunno et al., "Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites," Technical Information Document (TID)-14844, U.S. Atomic Energy Commission, 1962.
3. L. Soffer, et al., "Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants," NUREG-1465, June 1992.
4. Y.S. Hur, et al., "Level I Probabilistic Safety Assessment For Younggwang Units 1&2," Vol.1,2, prepared for KEPCO by KOPEC, August 1992.

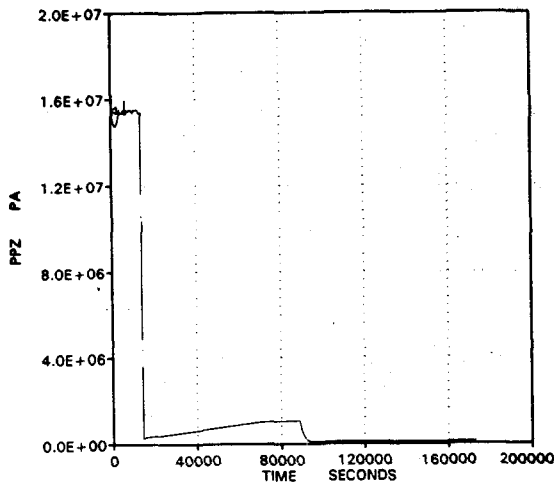


그림 1. 고리 2 호기 TMLB 사고경로시
가압기 압력

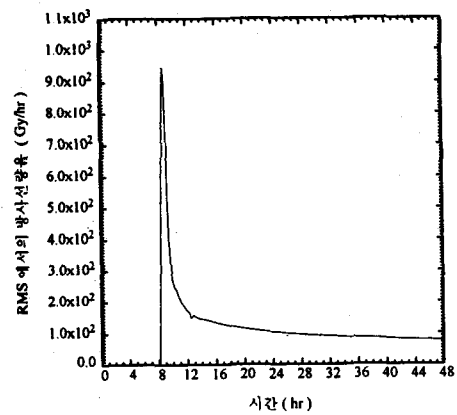


그림 2. 울진 1,2 호기 S2H2 사고경로시
RMS에서의 방사선 계측치

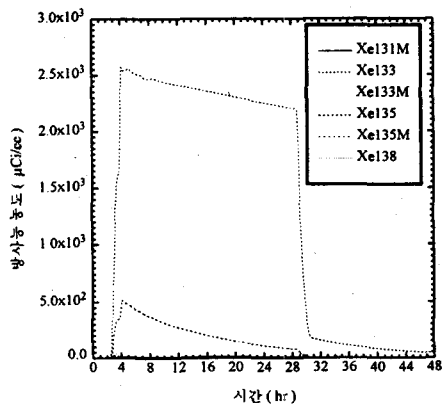


그림 3. 영광 1,2 호기 TMLB 사고경로시 격납건물
상부에서 Xe 동위원소의 방사능 농도

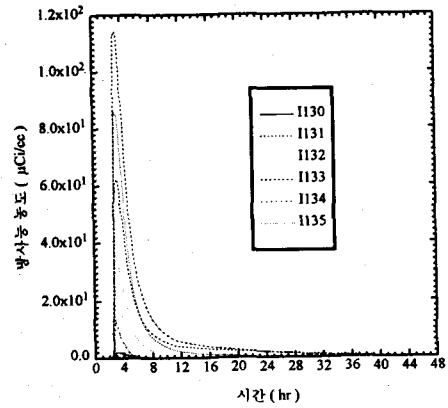


그림 4. 영광 1,2 호기 TMLB 사고경로시 격납건물
상부에서 I 동위원소의 방사능 농도