KAERI/TR–2417/2003

ISAAC 노드화/붕괴열/휘발성 핵분열생성물 방출 모델 평가

An Evaluation of Nodalization/Decay Heat/ Volatile Fission Product Release Models in ISAAC Code

2003년 3월

한 국 원 자 력 연 구 소

Korea Atomic Energy Research Institute

제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 2002년도 “중수로원전 중대사고 해석코드 개선 및 사고관리 지침서 개발” 과제의 기술보고서로 제출합니다.

2003 년 3 월

보고서명 : ISAAC 노드화/붕괴열/핵분열생성물 방출 모델 평가
(An Evaluation of Nodalization/Decay Heat/Volatile Fission Product Release Models in ISAAC Code)

주 저 자 :
송용만
공 저 자 :
박수용
김동하

요 약 문

1995년부터 1년에 걸쳐 2단계 PSA를 수행하기 위해 개발된 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상에 대한 기본적인 모델 위주로 개발되었고, 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 PSA 수행목적으로 제한되었다. 따라서 기본 모델에 대한 이해를 높이고 사고해석 경험을 축적하기 위해 핵분열생성물 거동과 직.간접으로 연관된 계통의 노드화 모델, 붕괴열 모델 및 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델의 평가를 수행하였다. 연구전략으로 개별 모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에 수행했으며, 모델평가는 불확실 변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하였다.

노심노드화 모델에 대한 민감도 분석 결과, 노심 핵연료의 열수력 거동 및 전체 사고진행, 그리고 핵분열생성물 거동에 큰 영향이 없어 수평 연료관을 12개 (폐쇄회로당 3x3 노심노드화)의 대표 연료관으로 노드화한 기존의 방법이 최적화 방안으로 별 무리가 없다고 평가하였다. 다음으로 발전소 정지후 붕괴열을 예측하기 위한 ANSI/ANS 표준모델은 많은 전산코드에서도 사용되고 ORIGEN 코드를 이용한 계산결과와도 잘 일치하여 별도의 모델 평가를 수행하지 않고 원자로 정지시 시간에 따라 계산된 ISAAC 붕괴열 결과를 예시하였다. 더불어 핵분열생성물의 가열에 의해, 침적된 핵분열생성물의 재증발시 중요한 격납건물내 핵분열생성물의 이송을 예시하였다. 마지막으로 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델 분석 결과, 조기방출의 경우 IDCOR 모델의 노심내 방출가능 옵션을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래하고, 후기방출의 경우 NUREG-0772 모델을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래하며, IDCOR 모델의 노심내 방출제한 옵션을 사용하면 조기 및 후기방출시 보수성이 완화된 계산결과를 초래하였다.

SUMMARY

An ISAAC computer code, which was developed for a Level-2 PSA during 1995, has developed mainly with fundamental models for CANDU-specific severe accident progression and also the accident-analyzing experiences are limited to Level-2 PSA purposes. Hence the system nodalization model, decay model and volatile fission product release model, which are known to affect fission product behavior directly or indirectly, are evaluated to both enhance understanding for basic models and accumulate accident-analyzing experiences. As a research strategy, sensitivity studies of model parameters and sensitivity coefficients are performed.

According to the results from core nodalization sensitivity study, an original 3x3 nodalization (per loop) method which groups horizontal fuel channels into 12 representative channels, is evaluated to be sufficient for a optimal scheme because detailed nodalization methods have no large effect on fuel thermal-hydraulic behavior, total accident progression and fission product behavior. As ANSI/ANS standard model for decay heat prediction after reactor trip has no needs for further model evaluation due to both wide application on accident analysis codes and good comparison results with the ORIGEN code, ISAAC calculational results of decay heat are used as they are. In addition, fission product revaporization in a containment which is caused by the embedded decay heat, is demonstrated. The results for the volatile fission product release model are analyzed. In case of early release, the IDCOR model with an in-vessel Te release option shows the most conservative results and for the late release case, NUREG-0772 model shows the most conservative results. Considering both early and late release, the IDCOR model with an in-vessel Te bound option shows mitigated conservative results.

목 차

제출문
요약문 -- i
Summary -- **ii**
목 차 -- **iii**
표목차 -- **iv**
그림목차 --- **v**

제 **1** 장 서론.. **1**

제 **2** 장 계통의 노드화 모델 분석.. **3**

2.1 발전소 노드화 분석 **3**
2.2 노심 노드화 분석 **5**

제 **3** 장 붕괴열 모델 분석... **24**

제 **4** 장 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델 분석... **29**

제 **5** 장 참고문헌.. **49**

표 목 차

표 1 노심노드화에 따른 노드별 높이 및 출력률(Axial Peaking Factor) 8

표 2 3X3 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (1/4)... 9

표 3 4X4 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (2/4)... 10

표 4 5X5 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (3/4)... 12

표 5 6X6 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (4/4)... 14

표 6 노심노드화에 따른 주요 파손시간 비교 16

표 7 노심노드화에 따른 격납건물내(대기/침적/냉각수조) 주요 FP 누적분율 (사고 72시간후) 16

표 8 원자로 정지후 시간에 따른 붕괴열 변화 28

표 9 ISAAC 코드의 휘발성 핵분열생성물 방출 모델변수 정리 37

표 10 대형냉각재 상실사고 (참조사고)에 대한 ISAAC 입력 38

표 11 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 FP 누적분율 40

표 12 ISAAC 코드의 핵분열생성물 방출 그림변수 정리 41

그 림 목 차

그림 1 3X3 수평 연료관 구조의 ISAAC 일차계통 모의도 17
그림 2 월성원전 격납건물의 격실 모양 및 유로 구성도 17
그림 3 노심노드화에 따른 파단폐회로 핵연료의 평균온도 18
그림 4 노심노드화에 따른 파단폐회로 핵연료의 최고온도 18
그림 5 노심노드화에 따른 건전폐회로 핵연료의 평균온도 19
그림 6 노심노드화에 따른 건전폐회로 핵연료의 최고온도 19
그림 7 파단폐회로내 노심용융물의 질량 20
그림 8 칼랜드리아 탱크내 노심용융물의 질량 20
그림 9 LOCA시 노심노드화에 따른 격납건물내 CsI 누적분율 21
그림 10 LOAH시 노심노드화에 따른 격납건물내 CsI 누적분율 21
그림 11 LOCA시 노심노드화에 따른 격납건물내 TeO_2 누적분율 22
그림 12 LOAH시 노심노드화에 따른 격납건물내 TeO_2 누적분율 22
그림 13 LOCA시 노심노드화에 따른 격납건물내 H_3 누적분율 23
그림 14 LOAH시 노심노드화에 따른 격납건물내 H_3 누적분율 23
그림 15 ISAAC 계산시 원자로 정지후 시간에 따른 노심출력 변화 28
그림 16 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 CsI 누적율 42
그림 17 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 TeO_2 누적분율 42
그림 18 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 CsI 누적질량 [Kg] 43
그림 19 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 TeO_2 누적질량 [Kg] 43
그림 20 휘발성 FP 방출모델별 핵연료관 내부 CsI 잔류분율 44
그림 21 휘발성 FP 방출모델별 핵연료관 외부의 노심용융물내 CsI 누적분율 44
그림 22 휘발성 FP 방출모델별 파단 폐회로 내부 CsI 잔류분율 45
그림 23 휘발성 FP 방출모델별 건전 폐회로 내부 CsI 잔류분율 45
그림 24 휘발성 FP 방출모델별 칼랜드리아 탱크 내부 CsI 잔류분율 46

그림 25 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 (대기/침적/냉각수조 및 노심용융물pool) CsI 누적분율 46
그림 26 NUREG-0772 경우(07-C-R-90), 위치별 분포된 CsI 누적분율 47
그림 27 IDCOR 경우(ID-C-R-90), 위치별 분포된 CsI 누적분율 47
그림 28 NUREG-0772 경우(07-C-R-90), 위치별 분포된 Te/TeO_2 누적질량[Kg] 48
그림 29 IDCOR 경우(ID-C-R-90), 위치별 분포된 Te/TeO_2 누적질량[Kg] 48

제 1 장 서론

1990년대 중반에 월성2/3/4호기의 2단계 PSA 수행목적으로 1년동안 한국원자력연구소 (KAERI)와 FAI (Fauske & Associates, Inc.)가 공동으로 개발한 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상을 모의하기 위하여 기본모델 위주로 작성되었다. 또한 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 2단계 PSA 수행목적으로 제한되어 충분하지 못하며 사용자를 위한 사용설명서 등도 아직 초보적인 상태이다. 따라서 기본 열수력 및 핵분열생성물 모델에 대한 연구를 우선적으로 수행하여 코드를 이해하고 다양한 사고해석 경험을 축적할 필요가 있다. 이를 위해 본 보고서에서는 ISAAC의 여러 모델중 핵분열생성물과 직.간접으로 연관된 계통의 노드화 (Nodalization) 모델, 붕괴열 (Decay Heat) 모델 및 휘발성 핵분열생성물의 방출 (Volatile Fission Product Release) 모델을 주로 핵분열생성물 관점에서 평가하였다. 그리고 핵분열생성물 모델중 비휘발성 핵분열생성물의 방출, 핵분열생성물의 이송 및 침적 모델은 차기년도 (2003년도)의 연구에서 취급될 예정이다. 여기에서 취급한 모델 이외의 기본 열수력 주요 모델인 노심 열전달 모델, 파단유량 모델, 비상노심 주입모델 및 격납건물 살수모델은 다른 기술보고서 [1]에서 다루어질 예정이다.

코드검증 차원에서 살펴보면, ISAAC 전산코드는 경수로와는 달리 CANDU 원전에서의 중대사고 진행 및 현상에 대한 의견수렴이나 실험자료가 아직까지 매우 부족하며 핵연료관 파손과 같은 일부 분야에 대해서만 캐나다의 원자력공사 (AECL)에서 제한적으로 실험을 수행하고 있는데 그 대부분도 COG (CANDU Owner's Group) 소유자료로 외부에서는 관련 실험이나 해석 내용을 파악하기 어려운 실정이다. 이로 인해 ISAAC은 개발 이후 충분한 검증 및 이를 통한 활용기회를 갖지 못하였다. 따라서 본 보고서에서는 개별 모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에

수행했으며, 모델평가는 불확실 변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하는 연구전략을 사용하였다.

본 보고서는 제 2 장에서 다양한 노심 노드화 모델에 대해 민감도 분석 결과를, 제 3장에서는 핵분열생성물의 붕괴시 발생하는 붕괴열 및 이송에 따른 붕괴열의 재배치를, 그리고 제 4장에서는 불확실한 변수에 대한 민감도 분석을 통한 노심으로부터 휘발성 핵분열생성물의 방출에 대한 평가 결과를 기술하였다.

제 2 장 계통의 노드화 모델 분석

2.1 발전소 노드화 분석

ISAAC 전산코드 [2]는 발전소 계통의 노드화 (Nodalization)를 위해 여타 종합코드와 마찬가지로 주요 계통을 분리.구분하며 이는 일차계통, 이차계통, 칼랜드리아, 안전계통, 그리고 격납건물 부분으로 나눌 수 있다. 이러한 각각의 계통에 대해 노드화 또는 구역화된 모델링 방법 및 월성 2/3/4 2단계 PSA [3]에 적용된 노드화 계획을 분석하였다.

ISAAC 코드의 일차계통은 두 개의 독립된 폐회로 (loop)로 구성되며, 각 폐회로에는 두 개의 증기발생기가 존재한다. 두 개의 폐회로는 회로고립밸브 (Loop Isolation Valve)를 통해 가압기와 연결되어 있으며, 폐회로의 과압을 막기 위해 냉각수방출밸브 (Liquid Relief Valve)가 탈기응축탱크 (Degasser Condenser Tank)로 연결되어 있고, 탈기응축탱크는 격납건물로 연결되어 있다. ISAAC은 노심계산을 위하여 폐회로별로 수평 연료관을 따로 구분하고 유로방향, 출력율 (Peaking Factor), 및 높이등을 고려하여 각 폐회로당 최대 37개까지의 대표 연료관 (representative channel)을 모사할 수 있다. 대표된 개수의 실제 연료관 거동은 대표 연료관의 거동에 따라 전체가 동일한 모습으로 이루어지므로 대표된 연료관에 존재하는 다수의 칼랜드라아관(Calandria Tube)/압력관(Pressure Tube)/핵연료(Fuel Rod)도 하나의 칼랜드라아관, 압력관, 및 핵연료처럼 모의되며, 실제 연료관 내부에 포함된 냉각재 및 CO_2 가스도 역시 같은 방식으로 모의된다. 또 대표 연료관은 실제 연료관과 마찬가지로 축방향으로는 최대개수 12개의 연료다발 (Fuel Bundle)로 나누어지며, 이러한 연료다발은 연료 용융 및 파손시 노심 용융물 이송의 기본 단위로 사용된다. 또한 일차계통의 열침원은 평판형태의 2차원 분할 (mesh)로 나뉘어져 구성되는데, 월성원전의 일차계통의 구성을 <그림.1>에 예시하였다. 여기서는 월성 원전의 380개 수평 연료관은 12개

(폐회로당 6개, 3x3 Core Pass)의 대표 연료관으로 그룹되어 연결된 것을 볼 수 있다.

격납건물은 격납건물 공간을 구역 (compartment)으로 나누고, 각 구역을 연결시켜주는 유로를 정의하여 격납건물 내부에서의 유동을 모의할 수 있도록 한다. 각 구역의 경우, 부피, 표면적, 그리고 바닥의 높이를 정의하여 구역간의 관계를 구성하고, 각 유로에 대하여 높이, 유로 면적, 길이, 초기 수위, 그리고 유로에 밸브나 막이 있는 경우 유로 형성 조건등을 정의한다. 대기와 벽 또는 계통간의 열전달을 모의하기 위해 벽이나 바닥 또는 탱크등의 열침원을 구성한다. 월성원전의 격납건물의 구성을 <그림.2>에 예시하였다. 여기서는 격납건물을 다음의 12개의 격실로 구분하였다: 1) 지하실 (basement), 2) 칼랜드리아 볼트, 3) 연료교체방 (F/M 107), 4) 연료교체방 (F/M 108), 5) 감속재 방, 6) 접근 통로 (access area), 7) 보일러 공간, 8) 상부 돔, 9) 살수탱크, 10) Degasser Condenser Tank, 11) 종단차폐체 (Endshield) 1, 12) 종단차폐체 2. 또한 격납건물 격실 사이에는 모두 18개의 유로를 정의하여 격납건물 안에서의 기체 및 냉각수, 그리고 핵연료 물질의 이동을 모사하였다.

이외에 칼랜드리아는 칼랜드리아 탱크를 모의한 하나의 체적 (volume)으로 구성되며 파손판 (rupture disk)을 통해 격납건물과 연결된다. 열침원은 통상 4개로 구분되며 수평연료관 개수의 반씩을 포함하는 폐회로별 구분과 종단차폐체 (End Shield)와 닿아있는 2개의 칼랜드리아 튜브시트 (calandria tubesheet) 벽체로 구분된다. 또한 안전계통은 경수로와 유사하게 안전주입계통 (ECCS), 격납건물 살수계통 (containment spray system), 및 공기냉각기 (local air cooler) 등으로 구성되고, 이차계통은 증기발생기 이차측을 하나의 체적으로 구성하며 입구측의 급수계통 및 출구측의 터빈/응축기/외부환경과 밸브를 통하여 연결된다.

2.2 노심 노드화 분석

이상과 같은 노드화 모델의 분석 결과 노심 및 격납건물의 노드화에 대한 변경이 가능하였으나 격납건물의 노드화는 기존의 경수로 (MAAP코드의 경우)에 비해 이미 상세한 노드계획 (=12개 격실)이 사용되었고 격실간 혼합도 쉽게 이루어지는 것으로 평가되었다. 따라서 노심 노드화 모델에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 여기서는 월성 원전을 대상으로 380개 수평 연료관을 기존의 12개 (폐회로당 6개, 3x3 Core Pass), 16개 (폐회로당 8개, 4x4 Core Pass), 20개 (폐회로당 10개, 5x5 Core Pass)와 24개 (폐회로당 12개, 6x6 Core Pass)의 대표 연료관으로 그룹하여 핵연료관 및 핵분열생성물의 거동 그리고 사고진행에의 영향을 평가하였다.

민감도 분석을 위하여 고압사고경위 및 저압사고경위의 대표사고로서 발전소정전사고 (class IV 외부 전원이 상실된 후 비상 디젤 발전기까지 고장, LOAH) 및 대형냉각재상실사고 (원자로 출구모관 (Reactor Outlet Header)에서 대형파단 (=0.2594 m^2)이 발생, large LOCA)를 각각 참조사고로 이용하였고, 극한의 사고진행을 위하여 증기 발생기 급수계통, 칼랜드리아를 포함한 모든 계통의 냉각 장치, 그리고 공학적 안전장치등은 작동 불능으로 가정하였다.

대표 연료관의 개수가 달라지면 대표되는 압력관의 개수가 달라지므로 대표 연료관별 출력률 및 열침원 특성치가 영향을 받게 된다. 따라서 본 분석에서는, <표.1>에서 보였듯이, 노심 평균 출력률 (=1.007) 및 높이 등과 같은 전체 열침원 특성치를 동일하게 유지하도록 입력을 조정하여 분석을 수행하였다. 노드화 민감도 분석이 수행된 경우에 대한 ISAAC 입력파일을 <표.2/3/4/5>에 표시하였다. 본 분석에서 특이사항으로, 6x6 노심 노드화 경우, Compaq Fortran V5.3을 이용한 ISAAC 실행파일은 에러 (forrtl: severe (139): array index out of bounds for index 1 (SIGTRAP))가 발생하여 계산수행이 실패했으나 Compaq Fortran Compiler X5.5-2602-48C8L (Compaq

Fortran V5.5-2602)을 이용한 ISAAC 실행파일을 이용하여 에러없이 계산을 성공적으로 수행하였다.

노심노드화에 따른 사고진행의 변화를 살펴보기 위해 주요 파손시간을 고압 (LOCA) 및 저압 (LOAH) 사고경위에 대해 <표.6>에 표시하였다. 파손시간은 노심 노드화에 따른 영향이 직접 나타나는 핵연료관의 파손시작 시점 및 격납건물의 파손 가능성이 가장 먼저 나타나는 칼랜드리아 탱크의 파손시점을 분석하였다.

민감도 분석 결과, 폐회로별 핵연료관 파손시점이 동일한 고압사고경위에 대해서는 노드화에 상관없이 핵연료관 및 칼랜드리아 파손시점이 거의 비슷하였다. 그리고 파단위치에 따른 폐회로별 핵연료관 파손시점이 서로 다른 저압사고경위에 대해서도 핵연료관 및 칼랜드리아 파손시점이 거의 비슷하였다. 다만 4x4 및 5x5 노심노드화 (core bypass)시에 건전 폐회로 (Loop2)의 핵연료관 파손시점이 파단 폐회로 (Loop1) 보다 약간 빨랐는데 이의 원인은 추후 상세 검토가 필요하다.

다음으로 핵연료관내 핵연료의 평균온도 (=TCRAVG) 및 가장 높은 핵연료 온도 (=TCRHOT)를 고압 및 저압 사고경위에 대해 <그림.3> 및 <그림.4>에서 각각 보였다. 이에 의하면 두가지 온도 거동이 거의 비슷하였다. 다만 5x5 노심노드화시에 파단 폐회로 최하단 노드의 핵연료 용융이 조기에 발생하여 후기 노심용융 현상이 발생하지 않는 것으로 나타났다 (<그림.7> 및 <그림.8> 참조). 후기 노심용융은 칼랜드리아 탱크 파손 직전 시점에서 노심출력률이 가장 낮은 핵연료관의 일부에서 주로 발생하며 총 노심용융물의 7-8% 이하여서 전체 노심용융 거동에는 별 영향이 없다. 또한 <그림.5> 및 <그림.6>에서 알 수 있듯이 건전 폐회로의 노심용융에서는 후기 노심용융을 포함하여 별 차이를 보이지 않았다.

마지막으로 노심노드화에 따른 핵분열 생성물의 거동 변화를 살펴보기 위해 계산종료시 (사고시작후 3일) 격납건물내 (대기+침적+냉각수조) 주요 핵분열생성물의 누적분율을 고압 (LOAH) 및 저압 (LOCA) 사고경위에 대해 <표.7>에 정리하였고 <그림.9/10>, <그림.11/12> 및 <그림.13/14>에 CsI, TeO_2 및 H_3(삼중수소)의 시간에 따른 분율을 각각 보였다. 분석결과에 의하면, TeO_2의 경우에 고압 및 저압사고 모두 3x3 노심노드화 경우에 누적분율이 약간 높았으나 CsI의 경우에는 저압사고시는 3x3 노심노드화 경우에 누적분율이 약간 높은 반면 고압사고시는 3x3 노심노드화 경우에 누적분율이 약간 낮아 핵종별로 노드화에 따른 보수성은 일정하지 않았다. 전체적으로 4x4 및 5x5 노심노드화 경우가 경향이 비슷하고 3x3 및 6x6 노심노드화 경우가 경향이 비슷하였으나, 누적분율의 차이는 최대 10% 이내였으며 삼중수소의 경우에는 노심노드화에 따른 차이가 전혀 없어 노심노드화에 따른 핵분열생성물의 거동은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 노심 핵연료의 거동 및 전체 사고진행에 상세 노심노드화에 따른 큰 영향이 없으므로 수평 연료관을 12개의 대표 연료관으로 노드화한 기존의 방법이 최적화 방안으로 별 무리가 없다고 평가된다.

표 1 노심노드화에 따른 노드별 높이 및 출력률(Axial Peaking Factor)

노드	3x3			4x4			5x5			6x6		
	APF	채널	높이	APF	채널	높이	APF	채널	높이	APF	채널	높이
	0.879	(1)	6.542	0.879	(1)	6.542	0.879	(1)	6.542	0.872	(1)	6.542
	1.048	(4)	5.016	1.020	(5)	5.844	0.986	(6)	5.457	0.879	(7)	6.098
	1.079	(2)	4.244	1.048	(2)	5.147	1.017	(2)	4.372	1.048	(2)	5.654
	1.091	(5)	3.382	1.079	(6)	4.449	1.048	(7)	3.287	1.074	(8)	5.210
	1.074	(3)	2.520	1.091	(3)	3.752	1.079	(3)	2.202	1.079	(3)	4.766
	0.872	(6)	1.659	1.074	(7)	3.054	1.091	(8)	5.999	1.091	(9)	4.322
				0.994	(4)	2.357	1.074	(4)	4.914	1.091	(4)	3.879
				0.872	(8)	1.659	1.033	(9)	3.829	1.079	(10)	3.435
							0.992	(5)	2.744	1.074	(5)	2.991
							0.872	(10)	1.659	1.048	(11)	2.547
										0.879	(6)	2.103
										0.872	(12)	1.659
평균	1.007			1.007			1.007			1.007		

참조) 위에서 괄호안의 숫자는 대표연료관의 채널번호이다. 파단폐회로 (Broken Loop, LOCA가 아니더라도 편의상 RIH2와 ROH3을 연결하는 loop을 의미)에 연결되어 있는 채널부터 시작하며, 그 다음에 건전폐회로 (Unbroken Loop, LOCA가 아니더라도 편의상 ROH1와 RIH4를 연결하는 loop을 의미)에 연결된 채널의 번호가 연결된다. 즉, 3x3 노심 노드화인 경우, 채널번호 1,2,3은 Broken Loop에, 채널번호 4,5,6은 Unbroken Loop에 연결되며, 높이로 보면 1,4,2,5,3,6의 순서로 위로부터 정의된다.

표 2 3X3 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (1/4)

```
//      Nodalization parameter change
** ICHMAX(il) :   number of representive channels for loop il
ICHMAX(1)=6.
ICHMAX(2)=6.
** NTUBE(i,il) :   number of pressure tubes in channel i for loop il
NTUBE(1,1)=30.0
NTUBE(2,1)=30.0
NTUBE(3,1)=30.0
NTUBE(4,1)=30.0
NTUBE(5,1)=30.0
NTUBE(6,1)=40.0
NTUBE(1,2)=30.0
NTUBE(2,2)=30.0
NTUBE(3,2)=30.0
NTUBE(4,2)=30.0
NTUBE(5,2)=30.0
NTUBE(6,2)=40.0
** ZFCOR(i,il) :   height of pressure tubes (bottom of inner p.t. from calandria bottom)
                   in channel i for loop il
ZFCOR(1,1)=6.542
ZFCOR(2,1)=4.244
ZFCOR(3,1)=2.520
ZFCOR(4,1)=5.016
ZFCOR(5,1)=3.382
ZFCOR(6,1)=1.659
ZFCOR(1,2)=6.542
ZFCOR(2,2)=4.244
ZFCOR(3,2)=2.520
ZFCOR(4,2)=5.016
ZFCOR(5,2)=3.382
ZFCOR(6,2)=1.659
** ILOOP(i,il) : flag for the channel i for loop il which is connected to
ILOOP(1,1)=0        channel 1 in loop 1 is in broken loop
ILOOP(2,1)=0        channel 2 in loop 1 is in broken loop
ILOOP(3,1)=0        channel 3 in loop 1 is in broken loop
ILOOP(4,1)=1        channel 4 in loop 1 is in unbroken loop
ILOOP(5,1)=1        channel 5 in loop 1 is in unbroken loop
ILOOP(6,1)=1        channel 6 in loop 1 is in unbroken loop
ILOOP(1,2)=0        channel 1 in loop 2 is in broken loop
ILOOP(2,2)=0        channel 2 in loop 2 is in broken loop
ILOOP(3,2)=0        channel 3 in loop 2 is in broken loop
ILOOP(4,2)=1        channel 4 in loop 2 is in unbroken loop
ILOOP(5,2)=1        channel 5 in loop 2 is in unbroken loop
ILOOP(6,2)=1        channel 6 in loop 2 is in unbroken loop
** FPCH(i,il) :   channel peaking factor for the channel i for loop il
FPCH(1,1)=0.879
FPCH(2,1)=1.079
FPCH(3,1)=1.074
FPCH(4,1)=1.048
FPCH(5,1)=1.091
FPCH(6,1)=0.872
FPCH(1,2)=0.879
FPCH(2,2)=1.079
FPCH(3,2)=1.074
FPCH(4,2)=1.048
FPCH(5,2)=1.091
FPCH(6,2)=0.872
END
```

표 3 4X4 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (2/4)

```
//      Nodalization parameter change
            ICHMAX(1)=8
            ICHMAX(2)=8
            NTUBE(1,1)=23
            NTUBE(2,1)=23
            NTUBE(3,1)=23
            NTUBE(4,1)=23
            NTUBE(5,1)=23
            NTUBE(6,1)=23
            NTUBE(7,1)=23
            NTUBE(8,1)=29
            NTUBE(1,2)=23
            NTUBE(2,2)=23
            NTUBE(3,2)=23
            NTUBE(4,2)=23
            NTUBE(5,2)=23
            NTUBE(6,2)=23
            NTUBE(7,2)=23
            NTUBE(8,2)=29
            ZFCOR(1,1)=6.542
            ZFCOR(2,1)=5.147
            ZFCOR(3,1)=3.752
            ZFCOR(4,1)=2.357
            ZFCOR(5,1)=5.844
            ZFCOR(6,1)=4.449
            ZFCOR(7,1)=3.054
            ZFCOR(8,1)=1.659
            ZFCOR(1,2)=6.542
            ZFCOR(2,2)=5.147
            ZFCOR(3,2)=3.752
            ZFCOR(4,2)=2.357
            ZFCOR(5,2)=5.844
            ZFCOR(6,2)=4.449
            ZFCOR(7,2)=3.054
            ZFCOR(8,2)=1.659
            ILOOP(1,1)=0
            ILOOP(2,1)=0
            ILOOP(3,1)=0
            ILOOP(4,1)=0
            ILOOP(5,1)=1
            ILOOP(6,1)=1
            ILOOP(7,1)=1
            ILOOP(8,1)=1
            ILOOP(1,2)=0
            ILOOP(2,2)=0
            ILOOP(3,2)=0
            ILOOP(4,2)=0
            ILOOP(5,2)=1
            ILOOP(6,2)=1
            ILOOP(7,2)=1
            ILOOP(8,2)=1
            FPCH(1,1)=0.879
            FPCH(2,1)=1.048
            FPCH(3,1)=1.091
            FPCH(4,1)=0.994
            FPCH(5,1)=1.020
            FPCH(6,1)=1.079
            FPCH(7,1)=1.074
            FPCH(8,1)=0.872
```

```
    FPCH(1,2)=0.879
    FPCH(2,2)=1.048
    FPCH(3,2)=1.091
    FPCH(4,2)=0.994
    FPCH(5,2)=1.020
    FPCH(6,2)=1.079
    FPCH(7,2)=1.074
    FPCH(8,2)=0.872
END
```

표 4 5X5 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (3/4)

```
//      Nodalization parameter change
            ICHMAX(1)=10
            ICHMAX(2)=10
            NTUBE(1,1)=19
            NTUBE(2,1)=19
            NTUBE(3,1)=19
            NTUBE(4,1)=19
            NTUBE(5,1)=19
            NTUBE(6,1)=19
            NTUBE(7,1)=19
            NTUBE(8,1)=19
            NTUBE(9,1)=19
            NTUBE(10,1)=19
            NTUBE(1,2)=19
            NTUBE(2,2)=19
            NTUBE(3,2)=19
            NTUBE(4,2)=19
            NTUBE(5,2)=19
            NTUBE(6,2)=19
            NTUBE(7,2)=19
            NTUBE(8,2)=19
            NTUBE(9,2)=19
            NTUBE(10,2)=19
            ZFCOR(1,1)=6.542
            ZFCOR(2,1)=5.457
            ZFCOR(3,1)=4.372
            ZFCOR(4,1)=3.287
            ZFCOR(5,1)=2.202
            ZFCOR(6,1)=5.999
            ZFCOR(7,1)=4.914
            ZFCOR(8,1)=3.829
            ZFCOR(9,1)=2.744
            ZFCOR(10,1)=1.659
            ZFCOR(1,2)=6.542
            ZFCOR(2,2)=5.457
            ZFCOR(3,2)=4.372
            ZFCOR(4,2)=3.287
            ZFCOR(5,2)=2.202
            ZFCOR(6,2)=5.999
            ZFCOR(7,2)=4.914
            ZFCOR(8,2)=3.829
            ZFCOR(9,2)=2.744
            ZFCOR(10,2)=1.659
            ILOOP(1,1)=0
            ILOOP(2,1)=0
            ILOOP(3,1)=0
            ILOOP(4,1)=0
            ILOOP(5,1)=0
            ILOOP(6,1)=1
            ILOOP(7,1)=1
            ILOOP(8,1)=1
            ILOOP(9,1)=1
            ILOOP(10,1)=1
            ILOOP(1,2)=0
            ILOOP(2,2)=0
            ILOOP(3,2)=0
            ILOOP(4,2)=0
            ILOOP(5,2)=0
            ILOOP(6,2)=1
```

```
      ILOOP(7,2)=1
      ILOOP(8,2)=1
      ILOOP(9,2)=1
      ILOOP(10,2)=1
      FPCH(1,1)=0.879
      FPCH(2,1)=1.017
      FPCH(3,1)=1.079
      FPCH(4,1)=1.074
      FPCH(5,1)=0.992
      FPCH(6,1)=0.986
      FPCH(7,1)=1.048
      FPCH(8,1)=1.091
      FPCH(9,1)=1.033
      FPCH(10,1)=0.872
      FPCH(1,2)=0.879
      FPCH(2,2)=1.017
      FPCH(3,2)=1.079
      FPCH(4,2)=1.074
      FPCH(5,2)=0.992
      FPCH(6,2)=0.986
      FPCH(7,2)=1.048
      FPCH(8,2)=1.091
      FPCH(9,2)=1.033
      FPCH(10,2)=0.872
   END
```

표 5 6X6 노심노드화 경우 ISAAC 입력 (4/4)

```
//      Nodalization parameter change
            ICHMAX(1)=12
            ICHMAX(2)=12
            NTUBE(1,1)=15
            NTUBE(2,1)=15
            NTUBE(3,1)=15
            NTUBE(4,1)=15
            NTUBE(5,1)=15
            NTUBE(6,1)=15
            NTUBE(7,1)=15
            NTUBE(8,1)=15
            NTUBE(9,1)=15
            NTUBE(10,1)=15
            NTUBE(11,1)=20
            NTUBE(12,1)=20
            NTUBE(1,2)=15
            NTUBE(2,2)=15
            NTUBE(3,2)=15
            NTUBE(4,2)=15
            NTUBE(5,2)=15
            NTUBE(6,2)=15
            NTUBE(7,2)=15
            NTUBE(8,2)=15
            NTUBE(9,2)=15
            NTUBE(10,2)=15
            NTUBE(11,2)=20
            NTUBE(12,2)=20
            ZFCOR(1,1)=6.542
            ZFCOR(2,1)=5.654
            ZFCOR(3,1)=4.766
            ZFCOR(4,1)=3.879
            ZFCOR(5,1)=2.991
            ZFCOR(6,1)=2.103
            ZFCOR(7,1)=6.098
            ZFCOR(8,1)=5.210
            ZFCOR(9,1)=4.322
            ZFCOR(10,1)=3.435
            ZFCOR(11,1)=2.547
            ZFCOR(12,1)=1.659
            ZFCOR(1,2)=6.542
            ZFCOR(2,2)=5.654
            ZFCOR(3,2)=4.766
            ZFCOR(4,2)=3.879
            ZFCOR(5,2)=2.991
            ZFCOR(6,2)=2.103
            ZFCOR(7,2)=6.098
            ZFCOR(8,2)=5.210
            ZFCOR(9,2)=4.322
            ZFCOR(10,2)=3.435
            ZFCOR(11,2)=2.547
            ZFCOR(12,2)=1.659
            ILOOP(1,1)=0
            ILOOP(2,1)=0
            ILOOP(3,1)=0
            ILOOP(4,1)=0
            ILOOP(5,1)=0
            ILOOP(6,1)=0
            ILOOP(7,1)=1
            ILOOP(8,1)=1
```

```
    ILOOP(9,1)=1
    ILOOP(10,1)=1
    ILOOP(11,1)=1
    ILOOP(12,1)=1
    ILOOP(1,2)=0
    ILOOP(2,2)=0
    ILOOP(3,2)=0
    ILOOP(4,2)=0
    ILOOP(5,2)=0
    ILOOP(6,2)=0
    ILOOP(7,2)=1
    ILOOP(8,2)=1
    ILOOP(9,2)=1
    ILOOP(10,2)=1
    ILOOP(11,2)=1
    ILOOP(12,2)=1
    FPCH(1,1)=0.872
    FPCH(2,1)=1.048
    FPCH(3,1)=1.079
    FPCH(4,1)=1.091
    FPCH(5,1)=1.074
    FPCH(6,1)=0.879
    FPCH(7,1)=0.879
    FPCH(8,1)=1.074
    FPCH(9,1)=1.091
    FPCH(10,1)=1.079
    FPCH(11,1)=1.048
    FPCH(12,1)=0.872
    FPCH(1,2)=0.872
    FPCH(2,2)=1.048
    FPCH(3,2)=1.079
    FPCH(4,2)=1.091
    FPCH(5,2)=1.074
    FPCH(6,2)=0.879
    FPCH(7,2)=0.879
    FPCH(8,2)=1.074
    FPCH(9,2)=1.091
    FPCH(10,2)=1.079
    FPCH(11,2)=1.048
    FPCH(12,2)=0.872
END
```

표 6 노심노드화에 따른 주요 파손시간 비교

사고경위	파손위치	노심 노드화에 따른 파손시간 [초(시간)]			
		3x3	4x4	5x5	6x6
고압사고경위 LOAH	Loop 1/2 핵연료관	22553 (=6.26)	22985 (=6.38)	22642 (=6.29)	21700 (=6.03)
	칼랜드리아 탱크	148560 (=41.3)	147175 (=40.9)	147672 (=41.0)	146926 (=40.8)
저압사고경위 LOCA	Loop 1 핵연료관	9150 (=2.54)	12020 (=3.34)	12014 (=3.34)	9224 (=2.56)
	Loop 2 핵연료관	11166 (=3.10)	11533 (=3.20)	11559 (=3.21)	11293 (=3.14)
	칼랜드리아 탱크	143310 (=39.8)	143536 (=39.9)	144048 (=40.0)	143459 (=39.8)

표 7 노심노드화에 따른 격납건물내(대기/침적/냉각수조) 주요 FP 누적분율 (사고 72시간후)

사고경위	핵종	노심 노드화에 따른 격납건물내 누적분율 [%]			
		3x3	4x4	5x5	6x6
고압사고경위 LOAH	CsI	39.0	40.5	40.8	39.2
	TeO_2	71.1	69.3	69.2	70.4
	Te	20.9	22.6	22.7	21.8
	H3	95.8	95.8	95.8	96.0
저압사고경위 LOCA	CsI	32.2	29.8	29.5	32.0
	TeO_2	27.8	25.5	25.1	27.7
	Te	0	0	0	0
	H3	94.9	94.8	95.0	94.8

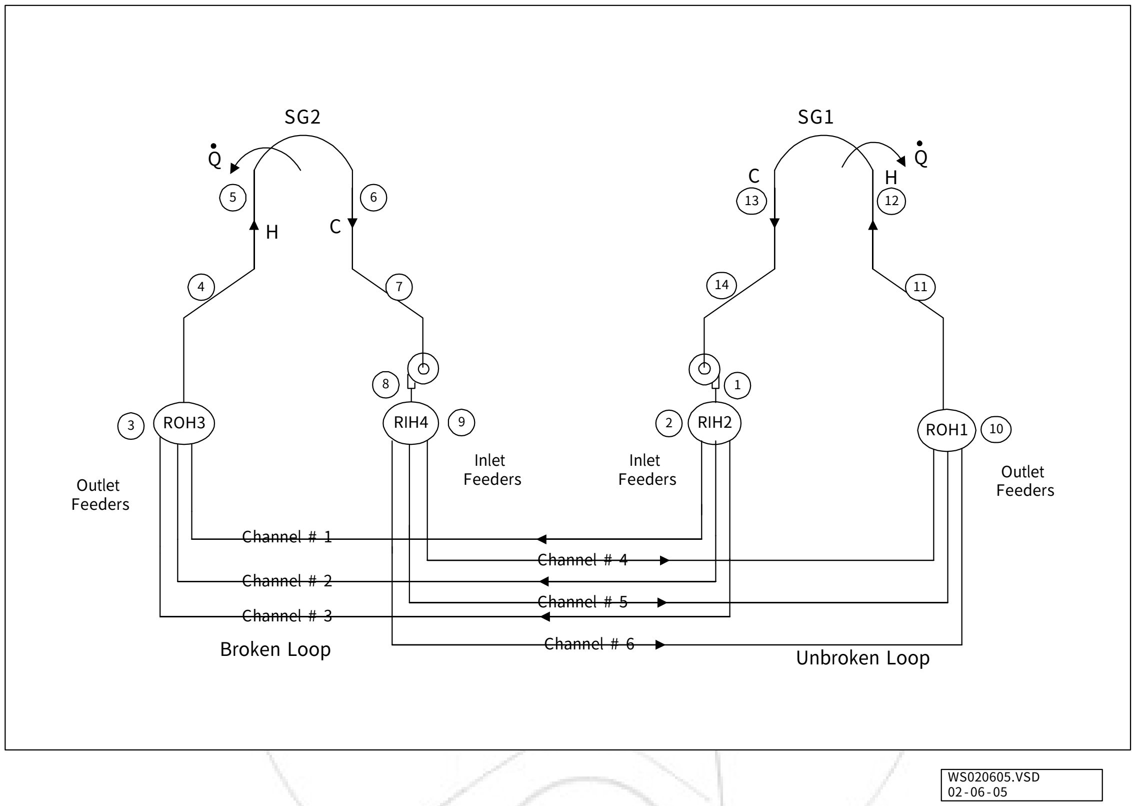


그림 1 **3X3** 수평 연료관 구조의 **ISAAC** 일차계통 모의도

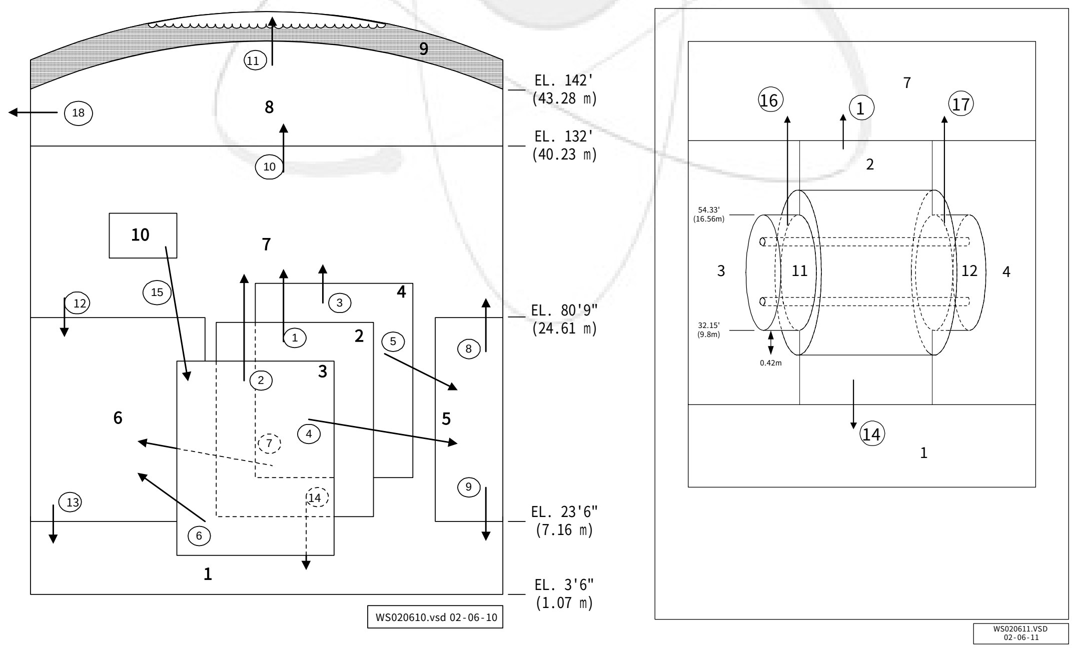


그림 **2** 월성원전 격납건물의 격실 모양 및 유로 구성도

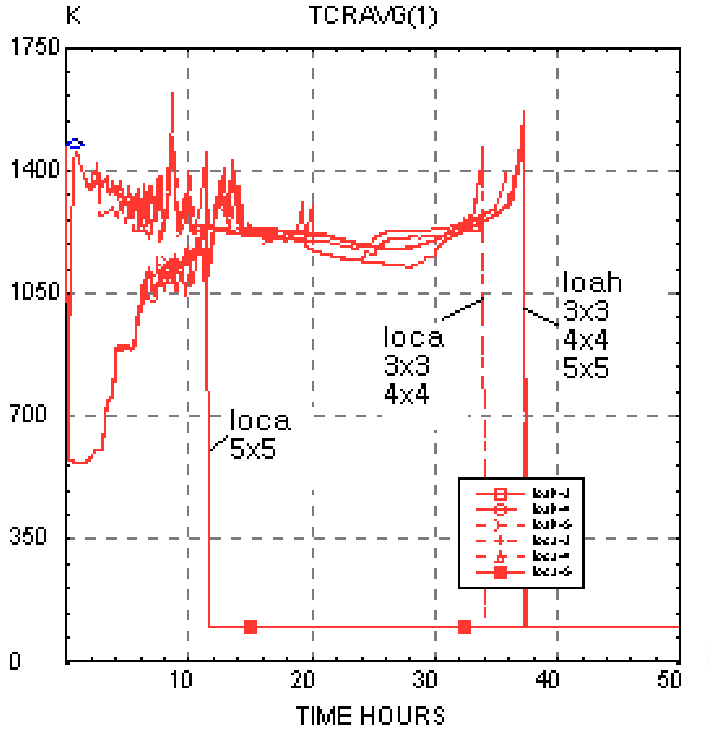


그림 3 노심노드화에 따른 파단폐회로 핵연료의 평균온도

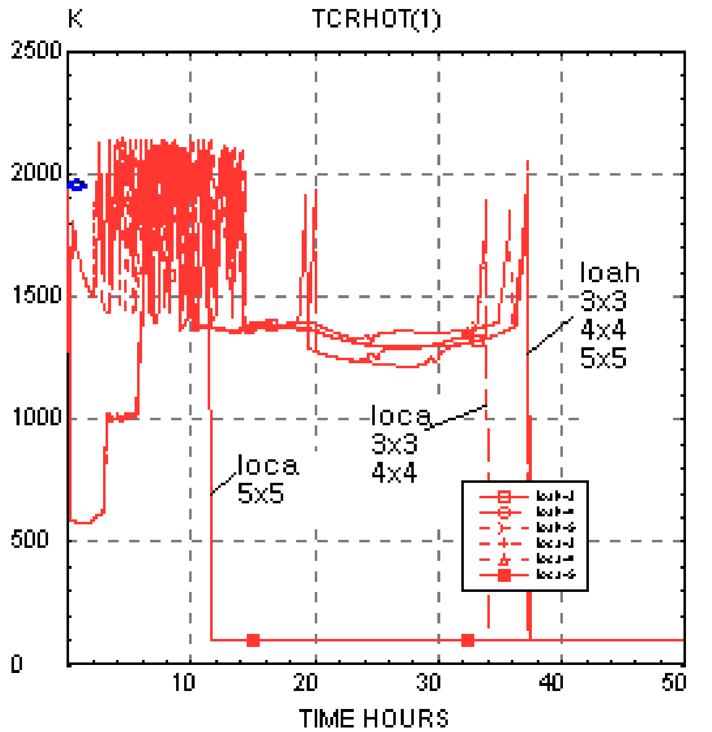


그림 4 노심노드화에 따른 파단폐회로 핵연료의 최고온도

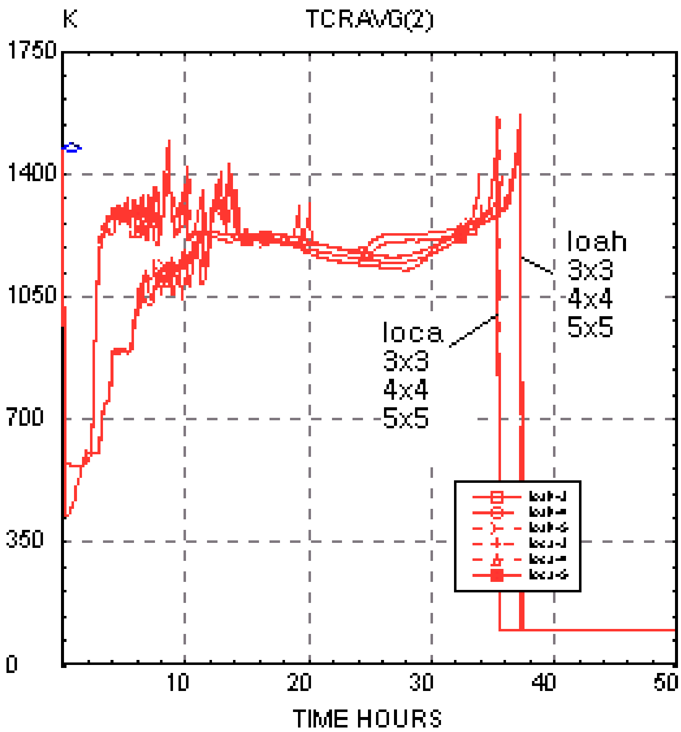


그림 5 노심노드화에 따른 건전폐회로 핵연료의 평균온도

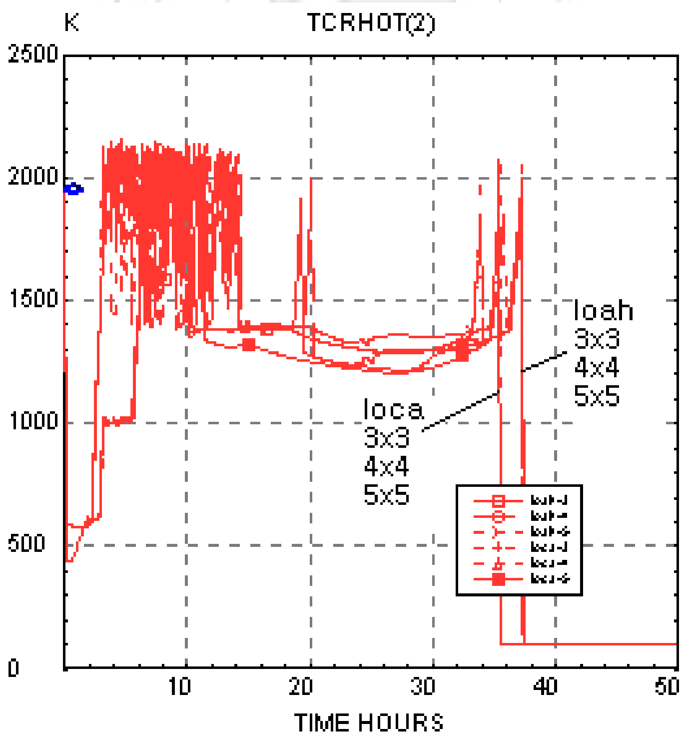


그림 6 노심노드화에 따른 건전폐회로 핵연료의 최고온도

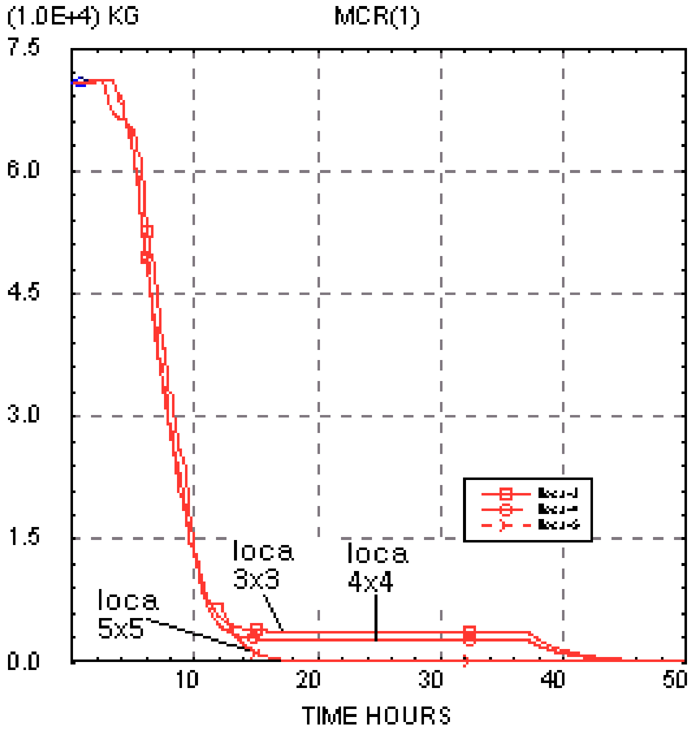


그림 7 파단폐회로내 노심용융물의 질량

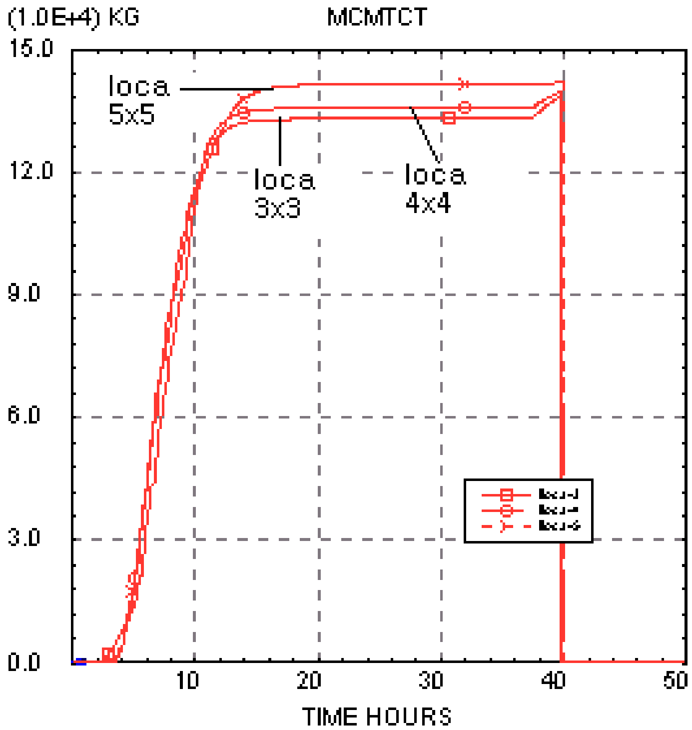


그림 8 칼랜드리아 탱크내 노심용융물의 질량

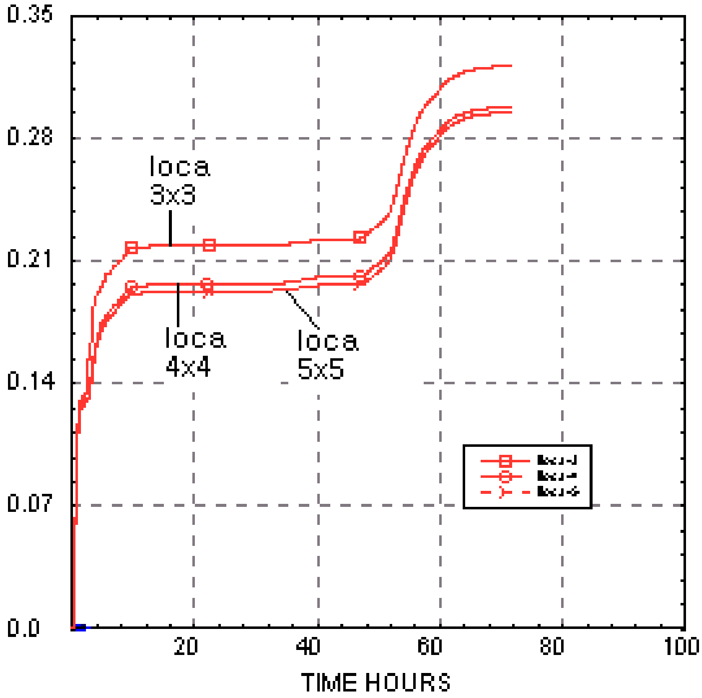


그림 9 **LOCA**시 노심노드화에 따른 격납건물내 **CsI** 누적분율

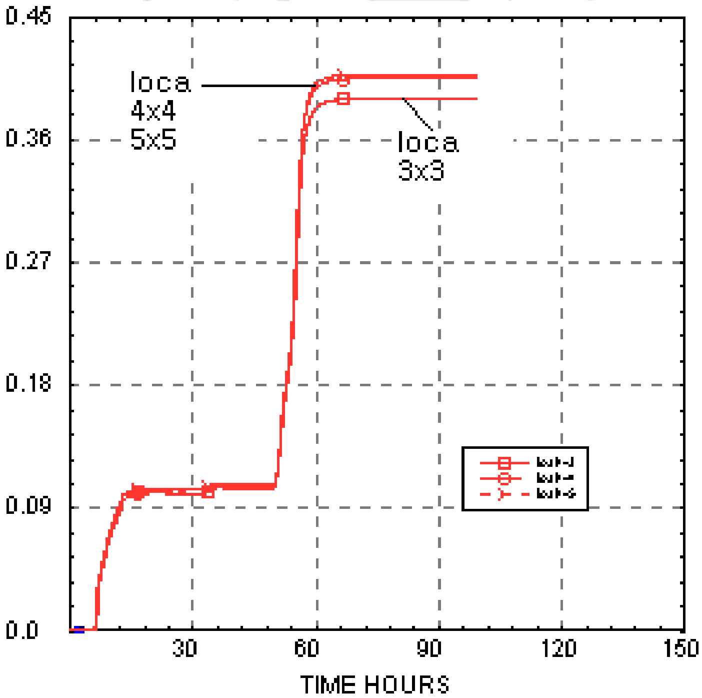


그림 **10** **LOAH**시 노심노드화에 따른 격납건물내 **CsI** 누적분율

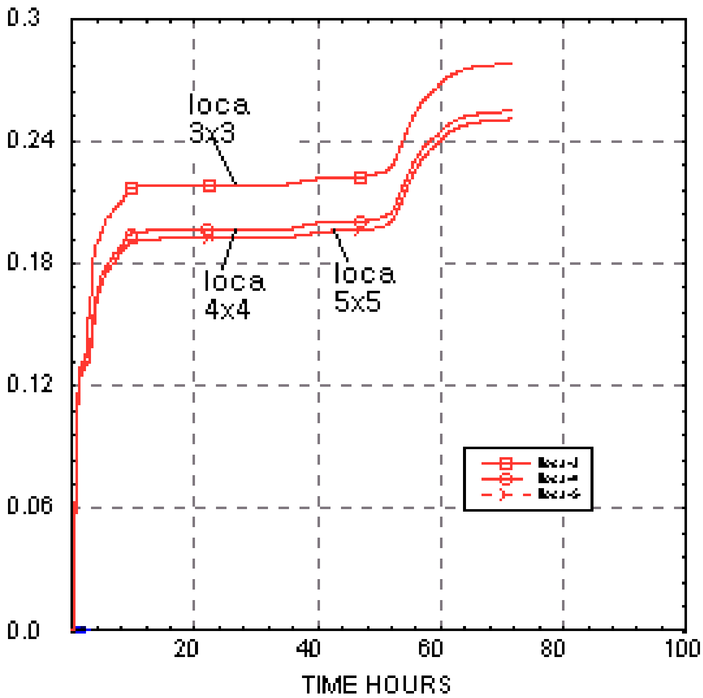


그림 11 LOCA시 노심노드화에 따른 격납건물내 TeO_2 누적분율

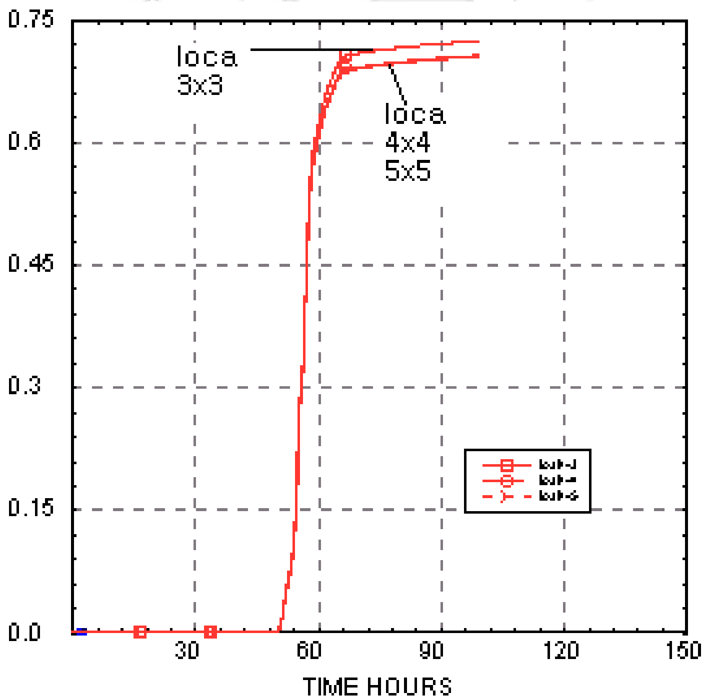


그림 12 LOAH시 노심노드화에 따른 격납건물내 TeO_2 누적분율

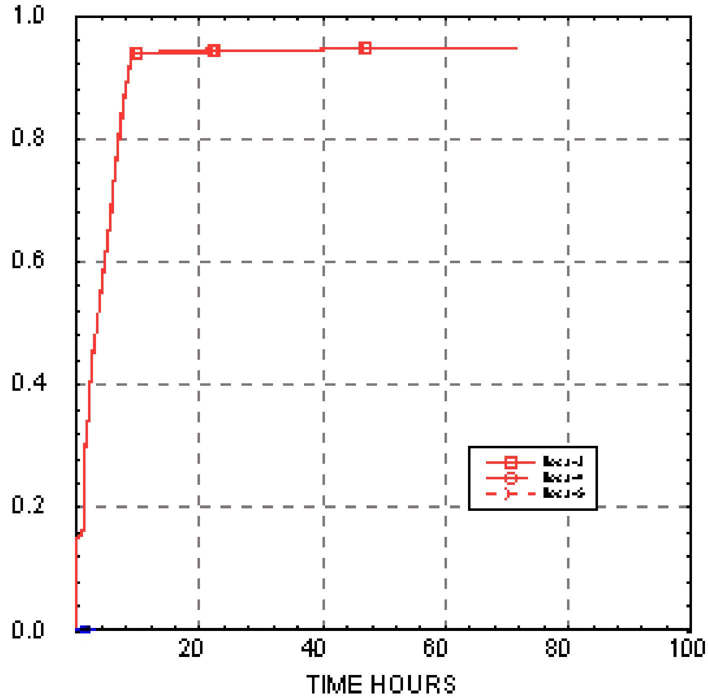


그림 13 **LOCA**시 노심노드화에 따른 격납건물내 H_3 누적분율

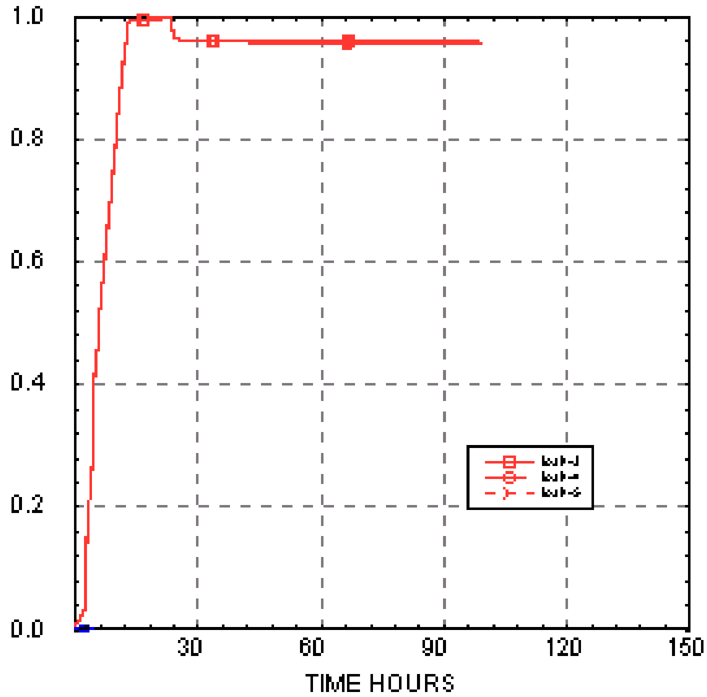


그림 14 **LOAH**시 노심노드화에 따른 격납건물내 H_3 누적분율

제 3 장 붕괴열 모델 분석

ISAAC은 발전소 정지후 붕괴열을 예측하기 위한 모델로서 ANSI/ANS 표준모델 [4]을 사용한다. 붕괴열은 원자로 정지후 시간 t에 관한 함수로 계산되며 235U, 239Pu, 241Pu, 그리고 238U 등에 대한 핵분열 생성물 붕괴를 고려한다. 이 모델은 많은 전산코드에서도 사용되고 있고 ORIGEN 코드를 이용한 계산결과와도 잘 일치하며 검증이 잘 되어 있기 때문에 별도의 모델 타당성이 필요하지는 않을 것으로 판단된다. 사용되는 모델의 유효범위는 전출력 운전시 핵연료의 조사기간 (irradiation time)이 4.6일 이상 4년 미만인 노심에서 원자로정지후 3일까지이다. 붕괴열은 다음식에 의해 계산된다.

$$\frac{P(t)}{P_o} = \frac{1}{200}\left[F_U(t) + F_{NP}(t) + G(t,T)\sum_{i=1}^{3} f_i F_i(t,T)\right] \tag{3-1}$$

위 (1)식에서 F_u 및 F_{Np}는 ^{239}U 및 ^{239}Np 액티나이드 (actinide)의 붕괴열 분율로 다음 식으로 표시되며, ^{239}U 및 ^{239}Np는 핵연료의 조사기간이 4.6일 이상임을 고려할 때 원자로정지시 포화상태이다.

$$F_U(t) = 0.474CR(1+\alpha)e^{-\lambda_U t}$$

그리고,

$$F_{NP}(t) = 0.419CR(1+\alpha)\left\{\left[\frac{\lambda_U}{\lambda_U - \lambda_{NP}}\right]e^{-\lambda_{NP} t} - \left[\frac{\lambda_{NP}}{\lambda_U - \lambda_{NP}}\right]e^{-\lambda_U t}\right\}$$

여기서, λ_U (^{239}U의 붕괴상수) = 4.91 x 10^{-4} [초$^{-1}$] 이고

λ_{Np} (^{239}Np의 붕괴상수) = 3.41 x 10^{-6} [초$^{-1}$] 이다.

다음으로 (1)식에서 F_i는 핵분열성 (fissile) 동위원소인 ^{235}U/^{241}Pu (i=1), ^{239}Pu (i=2), 및 ^{238}U (i=3)의 붕괴열 분율이며 다음 식으로 표시된다.

$$F_i(t,T) = \sum_{j=1}^{23} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} e^{-\lambda_{ij} t}(1 - e^{-\lambda_{ij} T})$$

여기서, α_{ij} 및 λ_{ij}는 3가지 동위원소에 대해 각각 23가지로 표시되며 ANSI/ANS 표준모델로부터 제공된다.

다음으로 (3-1)식에서 G는 핵분열생성물의 방사화 (activation)를 고려한 보정인자로서 다음 식으로 표시되는데, 이는 표준모델은 아니지만 표준모델의 보수적 경계치 (conservative upper bound)를 벗어나지 않는다.

$$G(t,T) = 1.0 + 6.5 \times 10^{-5} (\frac{t}{t + 20000}) T^{0.4} \frac{\beta}{r}$$

여기서, 농축률 대 연소율의 비율 (burnup to enrichment ratio)인 β/r은 초기 핵분열성 원자당 핵분열의 수를 의미한다. 그리고 연소율 β는 연소도 E (Mwd/metric tonne)에 대한 아래의 관계식에 의해 결정된다. 본 식에서는 핵분열 동위원소의 원자량이 238이고, 핵분열당 200MeV의 에너지가 발생하는 것으로 가정하였다.

$$\beta = E / 938000$$

마지막으로, 867일 (=7.5 x 10^7 초) 동안 전출력으로 가동된 노심에서 원자로 정지시 시간에 따라 계산된 붕괴열 (분율)을 <표.8> 및 <그림.15>에 예시하였다. <표.8>는 0초에서 10^6초 동안의 변화를 <그림.15>는 1000초에서 5000초까지의 변화를 보여주고 있다.

한편, 핵분열생성물에서 발생하는 붕괴열은 핵분열생성물의 휘발, 방출 또는 재배치등에 의해 발생위치가 변화한다. 즉, ISAAC 코드에서 열원은 가압기 히터, 붕괴열, 및 화학반응열로 구성되는데, 이중 방사성 핵종의 붕괴로부터 발생되는 붕괴열은 중대사고시 핵종의 이동에 따라 노심, 노심용융물 pool,

대기, 냉각수조 및 벽체등을 가열하게 된다. 중대사고시 핵분열생성물의 핵종군은 다음 4가지 상태중의 한가지로 존재하며 각 상태에서의 이송 및 각 상태간의 전환이 모의된다:

- 증기 (vapor),
- 에어로졸,
- 벽면 또는 수조 (water pool)에 침적 (deposition), 및
- 노심물질에 포함.

증기 및 에어로졸 상태의 핵분열생성물은 수증기, 수소, 및 여타가스와 함께 일차측 및 격납건물내로 이송된다. 이를 모의하기 위해 일차측에서의 대류유동 (convective flow) 및 격납건물 격실간의 이송에 관한 모델이 사용된다. 침적된 핵분열생성물의 이송은 격납건물 격실간에 수조가 존재할 때만 가능하게 모의되어 있다. 즉, 격납건물내 침적된 핵분열생성물은 과유동 (overflow)시와 같이 이용가능한 수조가 있으면 용해된다고 가정한다. 일차측에는 대부분의 경우 이러한 수조가 존재하지 않으므로 침적물의 이송이 모의되지 않으며, 증기발생기내 대류유동에 의한 침적물의 이송도 고려하지 않는다.

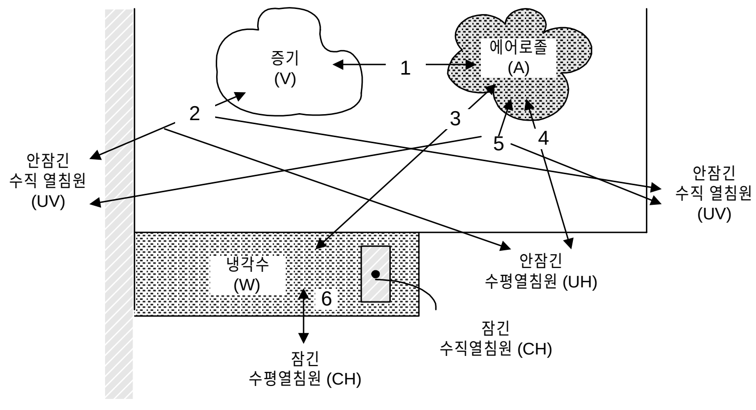
핵분열생성물 초기 보유량중 일부 및 노심구조물의 일부는 핵연료 및 피복재의 용융시 용융물과 함께 노외로 이송된다. 여기에는 방출되지 않은 Te 및 비휘발성 핵종군등이 포함된다. 이 노심물질은 원자로용기로부터 고압방출 또는 유출에 의해 격납건물내 여러 격실로 이송되도록 모의된다. 또한 노심용융물-콘크리트 반응시 잔존 핵분열생성물의 일부 및 콘크리트 에어로졸의 방출도 역시 모의된다.

핵연료집합체 및 노심용융물로부터 방출된 핵분열생성물은 증기, 에어로졸, 및 침적물의 형태를 가지는데, 이들 형태사이의 전환이 모의된다. 여기서는 중력에 의한 에어로졸의 정착 (gravitational settlement), 주위와의 열교환

(thermophoresis)에 의한 에어로졸의 침적, 수증기 응축시 에어로졸의 농도차에 의한 확산 (diffusiophoresis) 침적, 주위와의 충돌 (impaction)에 의한 에어로졸의 침적, 그리고 벽면에서 증기의 응축 및 재증발과 같은 기제가 모델되어 있다. 그리고 팬냉각기 (PWR 대형 건식 격납건물의)에서의 열교환에 의한 에어로졸의 침적 및 수조에서의 세정 (scrubbing) 효과에 의한 에어로졸 제거 기제가 모의 가능하다.

핵분열생성물에 의한 가열은 침적된 핵분열생성물의 재증발이란 측면에 그 중요성이 있다. MAAP 에서는 침적된 핵분열생성물은 수조에 떨어지거나 주위의 열침원 표면에 부착된다고 가정한다. 따라서 핵분열생성물로부터 발생된 붕괴열은 수조 또는 열침원의 온도상승에 기여하며, 수조 또는 열침원 표면의 온도가 재증발 여부를 결정하게 된다.

참고로 MAAP 에서 모의하는 격납건물내 핵분열생성물의 이송을 그림으로 예시하면 다음과 같다.



1. 증기 — 에어로졸 (equilibrium evaporation),
2. 증기 — 안잠긴(Uncovered) 수직표면 (equilibrium evaporation),
3. 에어로졸 — 냉각수 (diffusiophoresis, sedimentation, thermophoresis),
4. 에어로졸 — 안잠긴 수평표면 (sedimentation, thermophoresis),
5. 에어로졸 — 안잠긴 수직표면 (impaction, thermophoresis), 및
6. 냉각수 — 잠긴(Covered) 수평표면 (dissolution/precipitation)

표 8 원자로 정지후 시간에 따른 붕괴열 변화

시간 [초]	P(t)/P0 [%]
0	6.53
1	6.09
10	4.81
100	3.28
1,000	2.05
10,000	1.04
100,000	0.571
1,000,000	0.234

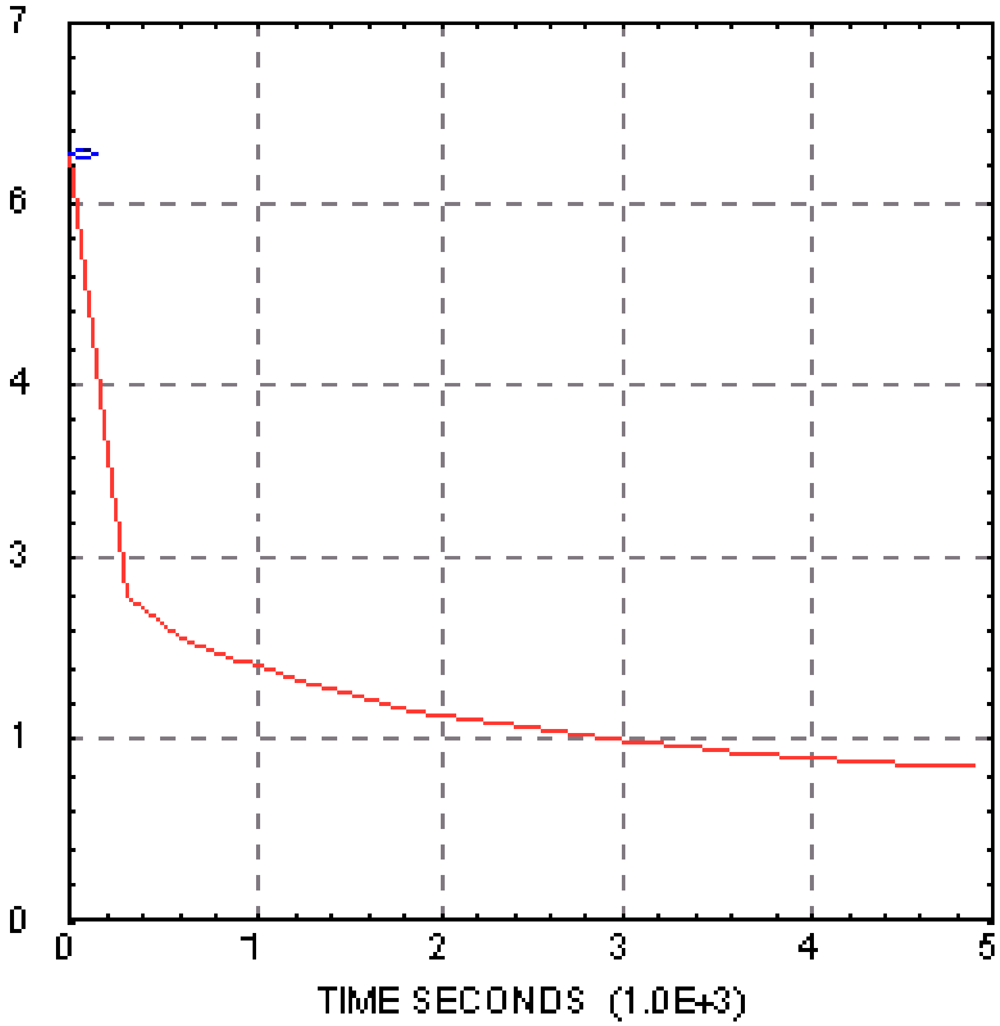


그림 15 ISAAC 계산시 원자로 정지후 시간에 따른 노심출력 변화

제 4 장 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델 분석

ISAAC 코드의 핵분열생성물 방출 계산은 Jaycor에 의해 개발된 FPRAT 상세모델 [5]에 기반하고 있는데, 노심으로부터 핵분열생성물 (FP)의 방출은 핵연료봉에서의 FP 방출률, 방출된 노심의 FP를 일차계통으로 운반할 기체 유동, 및 화학적 열역학 평형에 의한 FP 포화증기압에 의해 결정된다. 중수로 고유의 삼중수소는 중수내에서만 생성된다고 가정하였으며, 중수내의 삼중수소 비율은 사용자에 의해 입력으로 제공된다. 즉, 초기단계 (ICALL=0 모드)에서 삼중수소량은 전체 중수량의 일정 질량비로 결정되며 이후 과도기간중 중수의 분포를 추적하여 (물 또는 수증기 형태) 중수의 분포에 비례하여 삼중수소량을 가정하게 된다.

휘발성 FP 방출율 계산과 관련하여 Cubicciotti의 수증기에 의한 산화 상관식 [5] 또는 NUREG-0772 상관식 [6]이 사용되었으며 사용자가 옵션으로 선택할 수 있다. 한편 추후에 분석될 비휘발성 FP 방출에서는 Kelly 상관식 [7]을 우선 사용하며, 사용자의 선택에 의해 전유동 (bulk flow)에서 각 FP의 분압이 해당 노드의 온도에서의 포화압력을 초과하지 않도록 방출률이 제한되기도 한다.

휘발성 핵분열 생성물의 방출과 관련한 주요가정은 다음과 같다:

1. 핵분열생성물은 핵연료의 피복재의 손상시 방출을 시작한다. 여기서 피복재의 손상은 부풀음 (ballooning)에 의한 파손 또는 사용자 입력인 손상온도 기준에 의해 결정된다.
2. 휘발성 FP인 Xe, Kr, Cs, I, 및 Te 핵종의 방출은 방출 관계식에 의해서만 결정되며 이송질량의 제한은 없다.
3. 휘발성 핵종의 (분자)유량은 비휘발성 핵종의 포화 계산을 위한 수소 및 수증기 유량에 합해진다.

4. Te 핵종은 사용자의 옵션선택에 의해 피복재에 Telluride로서 묶여 방출되지 않을 수 있다.
5. 노심내에서 에어로졸의 형성 및 침착은 발생하지 않는다. 또한 13개 핵종군 이외의 핵종 및 우라늄(UO_2)핵종의 노심방출은 모의하지 않는다.

코드에서 추적되는 13가지의 핵종은 아래와 같고, 앞서 언급하였듯이, 이러한 핵종 중 삼중수소는 칼랜드리아 탱크내의 중수에서만 생성되므로 노심으로부터 추적되는 핵종에는 포함되지 않는다. 따라서 노심으로부터 추적되는 휘발성 핵종은 1/2/3/6/11번 핵종이다.

1.	Xe, Kr	7.	BaO
2.	CsI	8.	La_2O_3
3.	TeO_2	9.	CeO2
4.	SrO	10.	Sb
5.	MoO_2	11.	Te_2
6.	CsOH	12.	UO_2
		13.	H^3

Cubicciotti의 수증기에 의한 산화 상관식 (IDCOR/EPRI 증기산화 모델)에서는 핵분열 가스 및 휘발성 FP의 방출은 UO_2가 수증기내에서 가열시 핵연료의 산화 역학(Kinetics)에 상관된다는 가정을 사용한다. 이러한 가정하에 원통형 펠렛에서의 확산에 대한 근사치가 시간과 온도의 함수로서 휘발성 FP의 방출을 예측하는데 직접 사용된다. 이를 식으로 표시하면

$$F = 1 – 1[1-4(\tau_h/\pi)^{1/2}]\ [1 - 4(\tau_\theta/\pi)^{1/2} + \tau_\theta] \qquad (4-1)$$

여기서, F = 휘발성 FP의 방출 분율,

τ_h = $D_c t/h^2$, τ_θ = $D_c t/r^2$,

h = 핵연료 펠렛 높이 (h), r = 핵연료 펠렛 반경 (r) (m),

t = 시간 (초), 그리고

D_c = UO_2 내부로 산화체 (oxidant)의 침투정도를 표시하는 화학적 확산상수이다.

한편, 수증기내 에서의 UO_2에 대한 확산상수는 온도(K)에 관한 다음 식으로 계산된다

$$D_c\ (m^2/s) = 9.9 \times 10^{-3}\ e^{(-28600/T)}$$

이와는 다르게 NUREG-0772 상관식 (경험적 상관식)은 넓은 온도범위에서 휘발성 FP에 적용가능한 실험식이다. 이는 저자가 이용가능한 FP 방출 데이터를 조사하고 이로부터 온도에 따른 FP 방출율을 일군의 피팅 그래프로 도출한 것이다. 이러한 그래프는 아래의 함수 형태로 근사되었다.

$$k(T) = A\ e^{BT} \tag{4-2}$$

여기서, k(T)는 방출분율 상수로서 온도만의 함수이며, T는 온도[℃] 이고, A,B는 핵종 및 온도에 따라 아래의 표처럼 주어지는 상수이다.

FP	1000℃ < T < 2200℃		T > 2200℃	
	A	B	A	B
Xe, I, Cs	1.65×10^{-7}	0.00667	1.89×10^{-5}	0.00451
Te	2.96×10^{-8}	0.00667	1.17×10^{-5}	0.00404

다음으로 휘발성 FP 방출시의 제한점을 검토하였다. 앞서 언급했듯이 노심으로부터 추적되는 휘발성 핵종은 1/2/3/6/11번 핵종이다. 이중 3번 Te 핵종은 피복재에 Telluride로서 묶여 방출되지 않을 수 있다. 이러한 현상은 Zr의 산화율이 70-90% 이하인 실험들에서 발견되었으며, 이 경우에 Te는 휘발성 핵종의 거동을 보이지 않는다. 이러한 현상을 모의하기 위해 ISAAC 코드에서도 사용자 옵션 (FTEREL 입력변수, IDCOR/EPRI 모델에 적용)을

제공하고 있다. IDCOR/EPRI 산화 상관식 옵션에서 FTEREL 입력변수의 값으로 “0”이 선택되면 Te핵종은 방출되지 않고 노심에 남아 노심온도 상승시 붕괴열을 제공하며 노심 재배치시에 Zr과 함께 이송된다. 이후 노심용융물-콘크리트 반응시 (MCCI) Zr이 급격히 산화되면 Te이 방출되게 된다. 만약 NUREG-0772 옵션이 선택된 상태에서 FTEREL 입력변수의 값으로 “0”이 선택되면 NUREG-0772 상관식에 의해 계산된 방출율의 40%만이 방출되게 된다 (단, 피복재내 Zr의 산화분율이 사용자 입력변수인 FTENUR (기본값= 90%)값 이하일 때).

따라서 본 연구에서는 이상과 같은 휘발성 FP 방출모델에 대해 사용자 옵션을 이용해 (<표.9> 참조) 민감도 분석을 수행하였다. 수행방법은 휘발성 FP 방출 모델 (IDCOR 산화 해석모델 및 NUREG-0772 경험 모델)간의 결과 차이를 우선 분석하였다. 그리고 IDCOR 해석 모델의 경우, 노심내 유로제한 (blockage)의 영향 여부를 살펴보았다. 그리고 지금까지 알려진 바에 의하면 Te 핵종은 피복재에 Telluride로서 묶여 방출되지 않을 수 있다. 이러한 현상은 Zr의 산화율이 70-90% 이하인 실험들에서 발견되었으며, 이 경우에 Te는 휘발성 핵종의 거동을 보이지 않는다. 따라서 이러한 현상을 코드에서 제공되는 노심내 Te 방출제한에 대한 사용자 옵션 (IDCOR 모델은 “FTEREL” 옵션, NUREG-0772 모델은 “FTENUR” 옵션)을 사용하여 분석하였다.

참조사고는 대형냉각재상실사고후 완전급수상실을 포함한 극한의 조건 (bounding conditions)을 부여하였다. 초기조건으로 원자로 출구모관 (Reactor Outlet Header)에서 대형파단 (=0.2594 m^2)이 발생하였고, 비상안전주입계통과 감속재 및 쉴드 냉각계통, 격납건물 살수계통, 그리고 국부공기냉각기등 대부분의 안전계통은 작동불능으로 가정하였다. 증기발생기의 주급수 계통은 원자로의 정지시점 (=0.87초)까지 가동되나, 정지후에는 보조급수계통의 고장을 가정하여 완전급수상실을 가정하였다. 원자로의 정지시점은

FSAR에서 계산된 결과를 이용하여 0.87초에 수동 정지하도록 했다. 그리고 1차 계통에서 발생되는 파단 사고의 경우 비상 노심 냉각 계통을 일찍 작동시키기 위해 증기발생기의 안전밸브 (MSSV)를 열어 2차 계통을 급속하게 냉각 (crash cooldown)시키도록 하고 있다. 이를 모의하기 위하여 LOCA 신호가 접수되고 30초 후에 MSSV가 열리고, 계속 열린 상태를 유지하도록 하였다. 또한 LOCA 신호가 발생하면 가압기로 연결되어 있는 두 개의 폐회로는 가압기 격리 밸브를 잠금으로 서로 격리되도록 하였다. 이 사고의 경우, LOCA 신호는 1차 계통의 압력이 5.56 MPa 이하로 감소하는 3.3초에 발생하며, 가압기 격리밸브는 약 23초에 닫히고, 약 33초에 MSSV는 개방된다. 참조사고에 대한 ISAAC 입력파일을 <표.10>에 수록하였고 참조사고시 상세 사고진행 및 열수력 해석결과는 기술보고서 [8]를 참조하면 된다.

결과에 의하면 휘발성 핵종은 핵연료의 피복재 파손이후 방출되기 시작하여 핵연료관 파손이후 감속재에 떨어져 냉각되기 이전까지 조기 방출 (early release)을 계속한다. 이후 방출이 정지되었다가 칼랜드리아 탱크 파손이후 칼랜드리아 볼트에서 노심용융물-콘크리트 반응 (MCCI)이 시작되면 후기 방출 (late release)을 시작한다. 믹마도 분석은 휘발성 대표핵종인 CsI 와 Zr 산화율 (후기방출 직전 Zr 산화율=75%)에 큰 영향을 받는 Te 핵종에 대해 수행되었다. 조기방출이 완료되고 격납건물의 파손가능성이 높은 (칼랜드리아 탱크내 노심용융물이 칼랜드리아 볼트내의 냉각수로 떨어져 증기spike가 발생하므로) 시점인 칼랜드리아 탱크 파손시점과 계산종료시점 (사고시작후 3일)에서의 격납건물내 (대기+침적+냉각수조) 누적분율을 민감도 계산 옵션별로 <표.11>에 정리하였고 ISAAC 코드의 그림변수 (<표.12> 참조)를 사용하여 <그림.16/17> 및 <그림.18/19>에 CsI 및 Te의 시간에 따른 누적분율 및 누적질량을 각각 보였다.

두 가지 모델의 CsI 방출 특성의 분석 결과, CsI 조기방출은 IDCOR 모델 (그림에서 “ID")이 매우 많았고 (약 5배) 후기방출은 NUREG-0772 모델 (그림에서 “07") 경우가 매우 급격히 발생하여 사고 3일째 누적분율은 오히려 약 1.5배 많았다 (<그림.16> 참조). 주요한 방출은 핵연료의 용융온도에서 발생하는데 IDCOR 모델의 방출율이 용융온도 근처에서 민감하게 변화되는 것으로 예상된다. NUREG-0772 실험 상관식은 핵연료가 1000°C 이상에 도달하면 FP가 방출되기 시작하여 용융온도인 2200°C 이상까지 온도에 따라 지수승 (exponentially)으로 방출율이 증가하는데 1700°C-1800°C 근처에서 1-2%의 방출률을 보인다. Te 방출의 경우, IDCOR 모델중 노심내 방출제한 옵션 (FTEREL=0, 그림에서 “B")이 선택되지 않은 경우는 상당량 (약 20%)이 조기에 방출되었으나 NUREG-0772 모델 및 IDCOR 모델중 노심내 방출제한 옵션이 선택된 경우는 조기방출이 발생하지 않았다. 그리고 사고 3일째 누적분율은 NUREG-0772 모델, IDCOR 모델중 노심내 방출가능 옵션 (FTEREL=1, 그림에서 “R"), 및 IDCOR 모델중 노심내 방출제한 옵션 순으로 약간씩 많았다 (<그림.17> 참조). 한편 중수로의 노심 특성상 노심용융물의 candling에 의한 blockage 현상 (그림에서 “C"(=candling) 및 "NC"(=no candling))은 이 현상의 불확실성 때문에 고려되지 않아 경수로와 다르게 노심내 유로제한 (blockage)의 영향은 IDCOR 모델에서도 거의 나타나지 않았으며, NUREG-0772 모델의 Te 노심내 방출제한을 완화하여도 조기방출은 거의 나타나지 않았다.

다음으로 휘발성 핵종중 CsI의 위치별 분포를 분석하였다. 이를 위해 핵연료관 내부 (노심용융물), 핵연료관 외부 (노심용융물), 파단폐회로 내부, 건전폐회로 내부, 칼랜드리아 탱크 내부 (노심용융물), 및 격납건물 (칼랜드리아 볼트 포함, 대기/침적/냉각수조 및 노심용융물pool) 내부의 CsI 분율 (초기량에 대한)을 <그림.20>, <그림.21>, <그림.22>, <그림.23>, <그림.24>, 및 <그림.25>에 각각 표시하였다. 이에 의하면 핵연료관 내부의 핵연료는 용융 및 핵연료관의 파손에 따라 10시간 이내에 거의 모두 칼랜드리아

탱크로 이송되며 이에 따라 노심용융물내 CsI는 (사용자 선택모델 옵션에 따라) 25%-80%가 칼랜드리아 탱크로 이송되고 방출된 CsI는 파단 및 건전 폐회로 내부에 10%-25% 및 7%-30%의 CsI가 잔류한다. 칼랜드리아 탱크로 이송된 CsI는 노심용융물 내부에 존재하며 칼랜드리아 탱크 파손시 격납건물 (즉, 칼랜드리아 볼트)로 전부 이송되어 칼랜드리아 탱크 내부에는 잔류량이 거의 없다. 한편, 격납건물 내부에는 냉각재 파단부위를 통해 사고초기에 누출된 (사용자 옵션에 따라) 4%-20%의 CsI가 존재하며 <그림.16> 및 <그림.18>에서 알 수 있듯이 MCCI 반응시작후 급격히 증가한다. 다음으로 사용자 옵션별 NUREG-0772 모델 (07-C-R-90) 및 IDCOR 모델 (ID-C-R-90) 대표사고시 위치별 CsI의 분포(분율)를 <그림.26> 및 <그림.27>에 각각 표시하였다. 이에 의하면, 사고가 진행되어 칼랜드리아 볼트내에서 MCCI 반응이 시작되면 노심용융물 내부 (25%-80%)의 CsI는 급격히 방출되어 사고시작후 50여시간에는 격납대기(및 냉각수조)와 노심용융물 내부의 CsI 양이 거의 비슷해진다. 이후 격납대기(및 냉각수조)의 양은 늘고 노심용융물 내부의 양은 줄어 사고시작 3일후에는 칼랜드리아 볼트내 노심용융물 내부에는 약 15%-40%의 CsI가 잔류한다. 한편, 본 분석에서는 격납건물내 대기 및 냉각수조에 존재하는 CsI의 양을 분리하여 추적하지 못하고 있으며 이는 추후 분석이 필요하다 (격납건물 실패시 외부환경으로의 방출량은 격납건물의 대기내의 핵분열 생성물의 양에 비례하기 때문이다).

다음으로 사용자 옵션별 NUREG-0772 모델 (07-C-R-90) 및 IDCOR 모델 (ID-C-R-90) 대표사고시 위치별 Te/TeO_2 분포(질량)를 <그림.28> 및 <그림.29>에 각각 표시하였다. 이에 의하면, NUREG-0772 모델의 경우, 칼랜드리아 볼트에서의 MCCI 반응이후에 Te는 TeO_2의 형태로 급격히 방출되기 시작하는 반면, IDCOR 모델 (노심내 방출 옵션)의 경우, 노심에서 상당량이 TeO_2의 형태로 방출되어 일차계통 및 격납건물에 잔류하며 MCCI 반응이후에는 NUREG-0772 모델에 비해 방출률이 작은 것을 알 수 있다.

이상의 분석에서 CsI 조기방출은 IDCOR 모델이 매우 보수적으로 계산하는 것으로 평가된다. Te의 경우는, IDCOR 모델에서 노심내 방출제한 옵션이 선택되면 NUREG-0772 모델과 마찬가지로 Te핵종은 조기방출이 이루어지지 않고 노심에 남아 노심온도 상승시 붕괴열을 제공하며 노심 재배치시에 Zr과 함께 이송된다. 이후 MCCI 반응시 Zr이 급격히 산화되면 Te의 후기방출이 이루어지게 된다. 그리고 CsI 후기방출은 NUREG-0772 모델이 매우 보수적으로 계산하는 것으로 평가된다. Te의 경우는 NUREG-0772 모델과 IDCOR 모델의 노심내 방출제한 경우가 보수적으로 계산되는데 이중 NUREG-0772 모델이 후기방출 시작시점이 약간 빠르고 방출률도 약간 큰 것으로 평가된다. 따라서 휘발성 핵종의 조기방출의 경우 IDCOR 모델의 노심내 방출가능 (FTEREL=1) 옵션을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래하며, 후기방출의 경우 NUREG-0772 모델을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래한다. 이에 반해 IDCOR 모델의 노심내 방출제한 (FTEREL=0) 옵션을 사용하면 조기 및 후기방출시 보수성이 완화된 계산결과가 예상된다.

표 9 ISAAC 코드의 휘발성 핵분열생성물 방출 모델변수 정리

1. FPRAT

+1 OR -1 : NUREG-0772 MODEL

+2 OR -2 : IDCOR/EPRI STEAM OXIDATION MODEL (Cubiciotti)

- + sign: release rates defined by correlations
- - sign: releases further limited by saturation vapor pressure for nonvolatiles and structure

The + sign is useful when the IDCOR blockage model is selected (ICANDL=0), since flow in core compts can go to zero during blockage, thus stopping releases. The - sign is useful when no blockage is allowed (ICANDL=1) and there is always bulk flow. The + sign also is useful for sensitivity. The - sign allows the physical mechanism of saturation to be considered for release. However, diffusion coefficients, vapor pressures and geometry are quite uncertain.

2. FTEREL 0

- 1 : TELLURIUM (TE) IS RELEASED IN-VESSEL;
- 0 : TE IS TO BE TOTALLY BOUND UP WITH ZIRCALLOY (0 IS BEST-ESTIMATE)

This applies to Cubiciotti (IDCOR/EPRI) fission product releases calc's only. (see model parameter FPRAT above) Experimental evidence has shown that significant amount released Te tends to bind with unoxidized Zr. This parameter is not to be confused with model parameter FTENUR below.

3. FTENUR 0.9 Oxidized Zr mass fraction limit.

This applies to NUREG-0772/Kelly fission product releases calc's only. (see model parameter FPRAT above) If calculated oxidized Zr nodal mass fraction is less than this limit, then the Te release rate is limited, otherwise the Te release rate is not limited, as recommended in NUREG-0956. Experimental evidence has shown that significant amount of released Te tends to bind with unoxidized Zr. This parameter is not to be confused with model parameter FTEREL above.

표 10 대형냉각재 상실사고 (참조사고)에 대한 ISAAC 입력

```
// FN=loca5.inp
        SENSITIVITY ON

        TITLE
LLOCA BREAK AT ROH 3(100%), 0.2594 M2
NO ECC & NO AFW, SG CRASH COOLING AVAILABLE, SPRAYS UNAVAILABLE, LAC UNAVAILABLE
MANUAL SCRAM AT 0.87 SEC, NO MODERATOR COOLING, NO END SHILED COOLING
        END                    // TITLE CARD SHOULD END WITH "END"

        START TIME IS 0.       // KEY WORD

        END TIME IS 72 hours

        PRINT INTERVAL IS 7200.

        PARAMETER CHANGE    // KEY WORD
       XWRB0(11)=4.0            // TO PREVENT THE END SHIELD FROM BECOMING SOLID
       XWRB0(12)=4.0            // TO PREVENT THE END SHIELD FROM BECOMING SOLID
         FBB(1)= 3      // BREAK LOCATION IS LOOP1 ROH
         ZBB(1)=10.696   // BREAK ELEVATION
         ABB(1)=0.2594 // ROH GUILLOTINE BREAK SIZE
        PFFJ(18)=0.419E7   // Containment failure pressure
   //      FPRAT=+1                 // NUREG-0772 model
           FPRAT=+2                 // IDCOR Oxidation model
   //      FTEREL=0                 // Te bound up with Zr (as Telluride)
          FTEREL=1                  // Te released in-vessel
   //    NFN=6 : NO. OF LOCAL AIR COOLER
   //    NCHILL=6 : NO. OF CHILLER
        END

        INITIATORS
           PS BREAK(S) FAILED
   // SPRAY OFF
           IEVNT(432)=1
   // ECCS OFF
           IEVNT(422)=1
           IEVNT(424)=1
           IEVNT(426)=1
   // CLOSE ALL MSIV'S
           IEVNT(439)=1
           IEVNT(440)=1
           IEVNT(441)=1
           IEVNT(442)=1
    // END SHILED COOLING OFF
           IEVNT(460)=1
    // LAC forced OFF at first
           IEVNT(428)=1
           IEVNT(430)=1
        END
         IF TIM >= 0.87

//            TRIP TIME FROM FSAR
              MANUAL SCRAM

//            STOP MAIN & AUX FEEDWATER AFTER SCRAM
              IEVNT(455)=1
              IEVNT(456)=1
              IEVNT(457)=1
              IEVNT(458)=1
```

```
            END

// LOCA SIGNAL OCCURS, SG MSSVS OPEN AFTER 30 SECONDS
//                             and LAC manually ON
           IF PPS(1) < PLOCA
              SET TIMER 1
 //             IEVNT(428)=0
 //             IEVNT(430)=0
 //             IEVNT(427)=0
 //             IEVNT(429)=0
           END

           WHEN TIMER 1 > 30.
              IEVNT(465)=1
              IEVNT(466)=1
              IEVNT(467)=1
              IEVNT(468)=1
           END

          FUNCTION
               FDECAY = (QDECAY(1)+QDECAY(2))/QCR0*100.0
               FMFCSIC = MFPCOT(2)/MFP0(2)
               FMFTEO2C = MFPCOT(3)/MFP0(3)
               FMFTE2C = MFPCOT(11)/MFP0(11)
               FMFH3C = MFPCOT(13)/MFP0(13)
               FMFCSICM = MFPCMT(2)/MFP0(2)
               FMFTEO2CM = MFPCMT(3)/MFP0(3)
         END

          PLOTFIL 91        // THERMAL HYDRAULIC general plot file (SYM)
              PPS(1), TGPS(1), TWPS(1), MWPS(1), MSTPS(1)
              PPS(2), TGPS(2), TWPS(2), MWPS(2), MSTPS(2)
              WWBRK(1), WGBRK(1), WWSB(1), WGSB(1), MFSTSB(1)
              WWBRK(2), WGBRK(2), WWSB(2), WGSB(2), MFSTSB(2)
              PPZ, MWPZ, WWSR(1), WGSR(1)
              PUS(1), PBS(1), ZWUS(1), ZWBS(1), TGBS(1), TWBS(1), QSGTOT(1)
              PUS(2), PBS(2), ZWUS(2), ZWBS(2), TGBS(2), TWBS(2), QSGTOT(2)
            FDECAY, TCRHOT(1), TCRHOT(2), MWCT, MWRB(2), MACUM, PRB(8)
            MCR(1), MCR(2), MCMTCT, MCMTB(1), MCMTB(2)
            MFCSIP, MFCSICT, MFCSIC, MFCSIPS(1), MFCSIPS(2), FREL(2)
            FMFCSIC,FMFTEO2C,FMFTE2C,FMFH3C,FMFCSICM,FMFTEO2CM
            MFPPST(2),MFPCTT(2),MFPCRT(2),MFPCOT(2),MFPCMT(2),MFPREL(2)
            MFPPST(3),MFPCTT(3),MFPCRT(3),MFPCOT(3),MFPCMT(3),MFPREL(3)
            MFPPST(11),MFPCTT(11),MFPCRT(11),MFPCOT(11),MFPCMT(11),MFPREL(11)
            MFPPST(13),MFPCTT(13),MFPCRT(13),MFPCOT(13),MFPCMT(13),MFPREL(13)
         END

          WHEN TIM > 50000. S
           TTPRNT=10000.
          END
          WHEN TIM > 100000. S
           TTPRNT=20000.
          END
          WHEN TIM > 5000. S
           TDFQMX=100.
          END
          WHEN TIM > 10000. S
           TDFQMX=300.0
          END
```

표 11 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 FP 누적분율

■ LLOCA 경위시 격납건물내 누적분율 (MFPCOT/MFP0) ➢ CT 파손 = 140000여초(IDCOR) 120000여초(NUREG-0772) ➢ CCI직전(=40hr) (total) Zr 산화율 = 75%			IDCOR Model (산화역학식)				NUREG-0772 Model (경험/실험상관식)	
			Blockage allowed (ICANDL=0)		No Blockage allowed (ICANDL=1)		Blockage=N/A	
			CsI [%]	TeO_2 [%]	CsI [%]	TeO_2 [%]	CsI [%]	TeO_2 [%]
ZrO_2 Limit (FTENUR) =90%	In-Vessel Te bounded (FTEREL=0)	CT파손 직후	20.7	0.0	22.4	0.0	5.0	0.0
		사고3일째	30.9	22.8	32.7	23.3	44.5	30.9
	In-Vessel Te released (FTEREL=1)	CT파손 직후	22.3	22.3	22.3	22.3	FTEREL=0 와 동일	
		사고3일째	32.1	27.8	32.2	27.8		
ZrO_2 Limit (FTENUR) =70%	FTEREL=N/A	CT파손 직후	N/A				4.9	0.0
		사고3일째					44.5	30.9
ZrO_2 Limit (FTENUR) =1%	FTEREL=N/A	CT파손 직후					4.8	0.7
		사고3일째					44.2	30.6

표 12 ISAAC 코드의 핵분열생성물 방출 그림변수 정리

FREL(1)	mass fraction of noble/inert aerosol released from containment to environment	-
FREL(2)	mass fraction of CsI released from containment to environment	
FREL(3)	mass fraction of TeO2 released from containment to environment	
FREL(4)	mass fraction of SrO released from containment to environment	
FREL(5)	mass fraction of MoO2 released from containment to environment	
FREL(6)	mass fraction of CsOH released from containment to environment	
FREL(7)	mass fraction of BaO released from containment to environment	
FREL(8)	mass fraction of La2O3/etc released from containment to environment	
FREL(9)	mass fraction of CeO2 released from containment to environment	
FREL(10)	mass fraction of Sb released from containment to environment	
FREL(11)	mass fraction of Te2 released from containment to environment	
FREL(12)	mass fraction of UO2/etc released from containment to environment	
FREL(13)	mass fraction of tritium released from containment to environment	
MAIRC	airborne mass of gas/aerosol (w/o noble gas) in containment	kg
MFCSIC	mass fraction of CsI in containment (including calandria vault) (which exists in both containment atmosphere and corium pool)	
MFCSIP	mass fraction of CsI left in fuel channel	-
MFCSICT	mass fraction of CsI left in calandria tank	-
MFCSIPS(IL)	mass fraction of CsI left in primary system loop IL	-
MFPCOT(IG)	total mass of released fission product IG in containment excluding unreleased fission product mass from corium	kg
MFPPST(IG)	total mass of released fission product IG in primary system excluding unreleased fission product mass from corium	kg
MFPCMT(IG)	total mass of unreleased fission product IG in corium located in containment (= outside fuel channel)	kg
MFPCTT(IG)	total FP mass released in calandria tank	kg
MFPCRT(IG)	total mass of unreleased fission product IG in corium located in-vessel (= inside fuel channel)	kg
MFPBST(IG)	total released fission product mass into broken SG	kg
MFPREL(IG)	total FP mass released from containment	kg

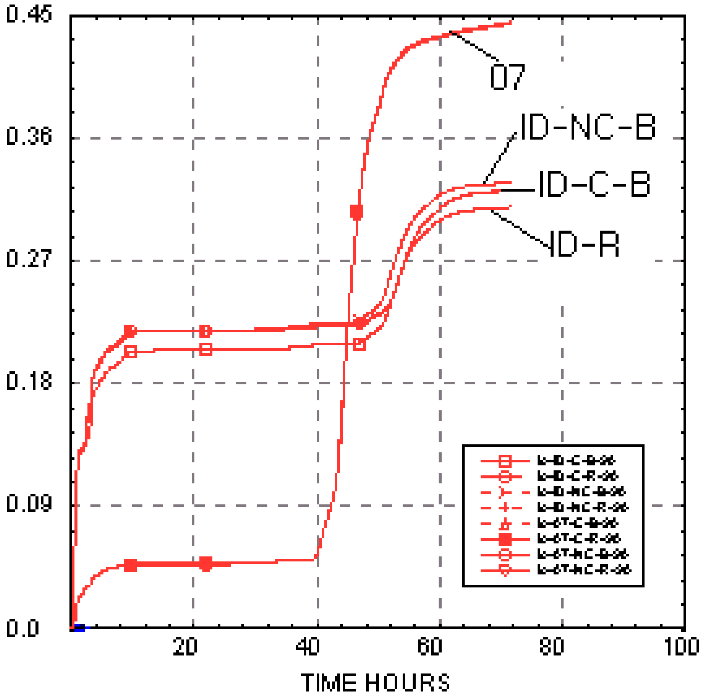


그림 16 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 CsI 누적율

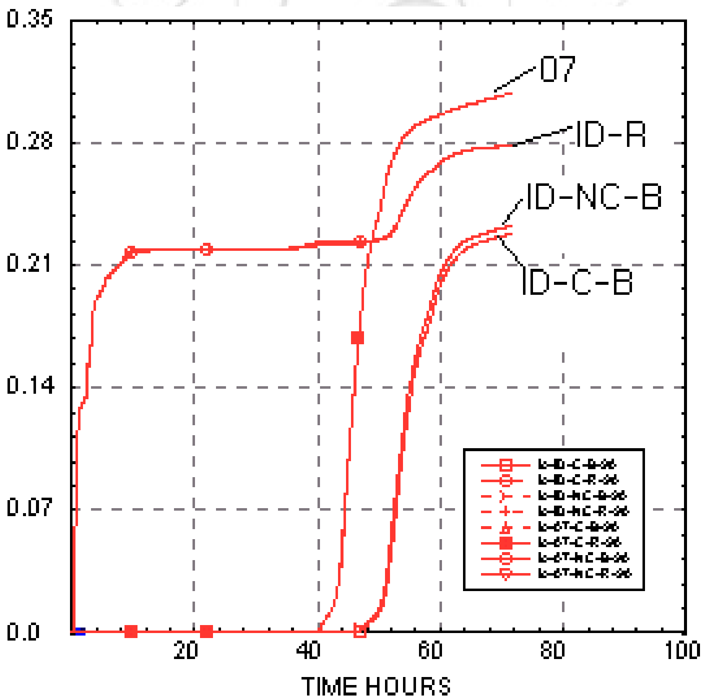


그림 17 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 TeO_2 누적분율

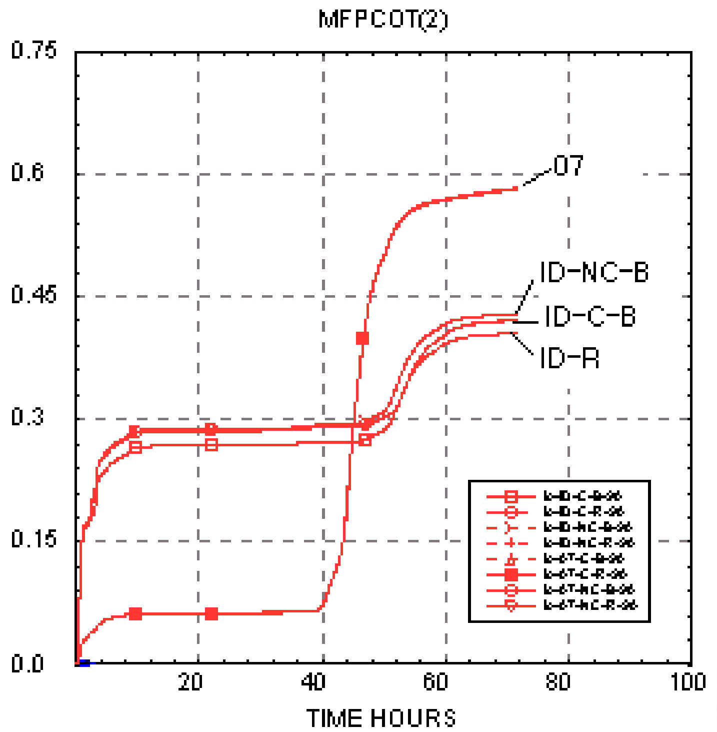


그림 18 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 CsI 누적질량 [Kg]

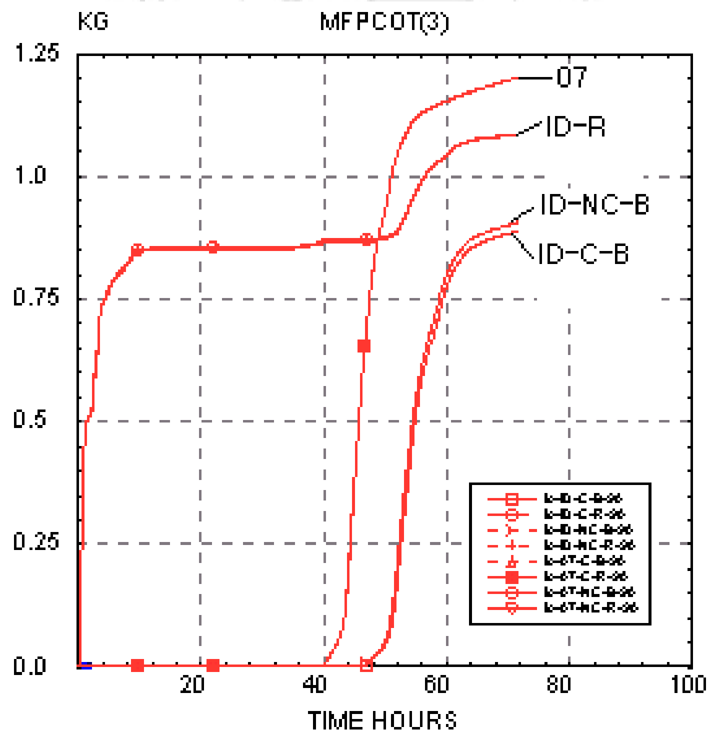


그림 19 휘발성 FP 방출모델별 격납건물내 TeO_2 누적질량 [Kg]

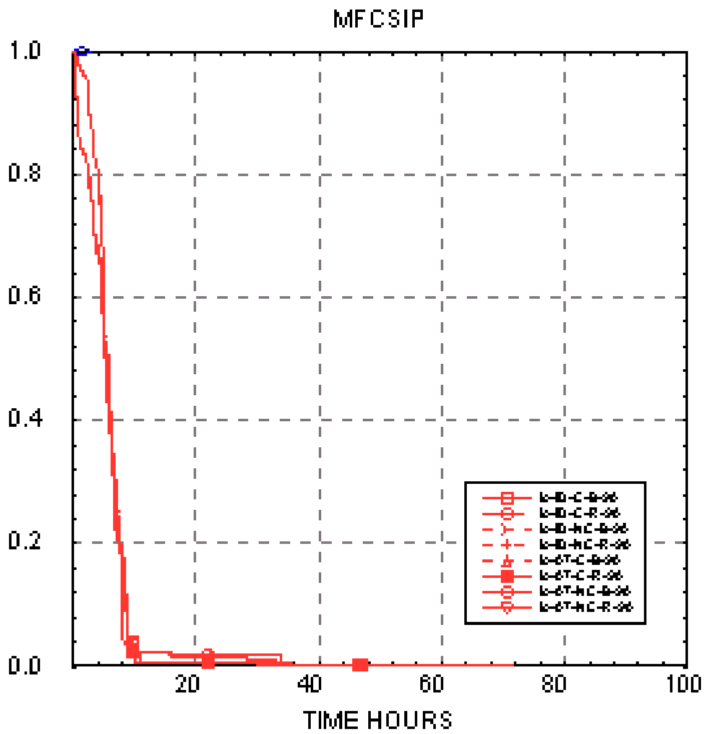


그림 20 휘발성 FP 방출모델별 핵연료관 내부 CsI 잔류분율

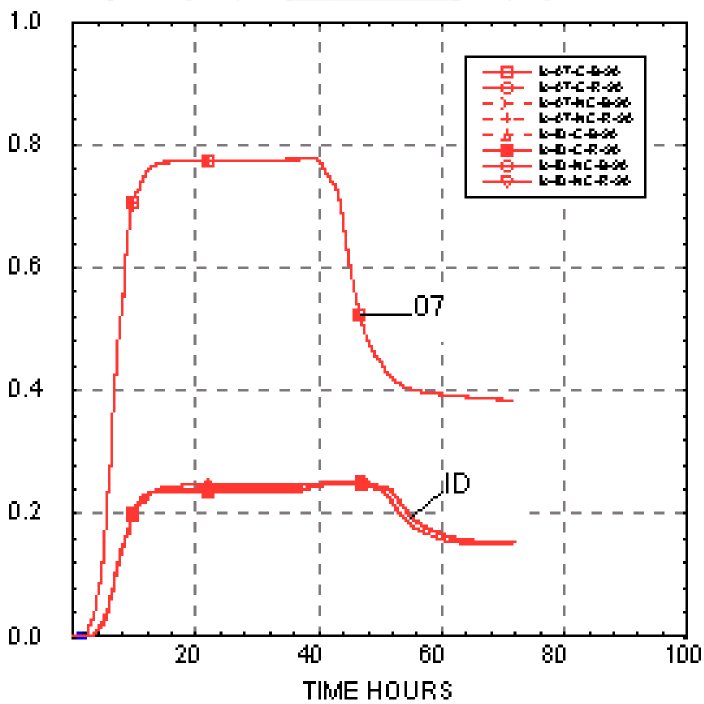


그림 21 휘발성 FP 방출모델별 핵연료관 외부의 노심용융물내 CsI 누적분율

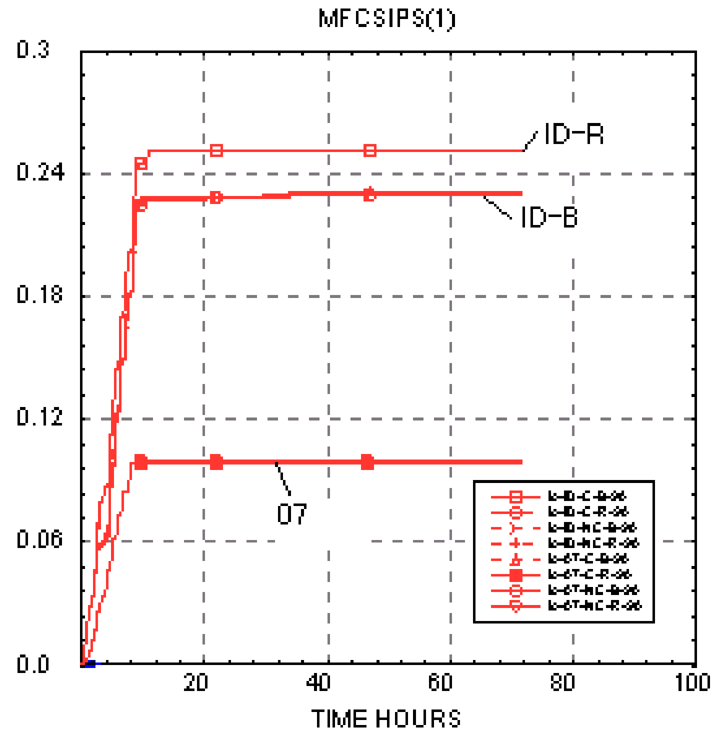


그림 22 휘발성 **FP** 방출모델별 파단 폐회로 내부 **CsI** 잔류분율

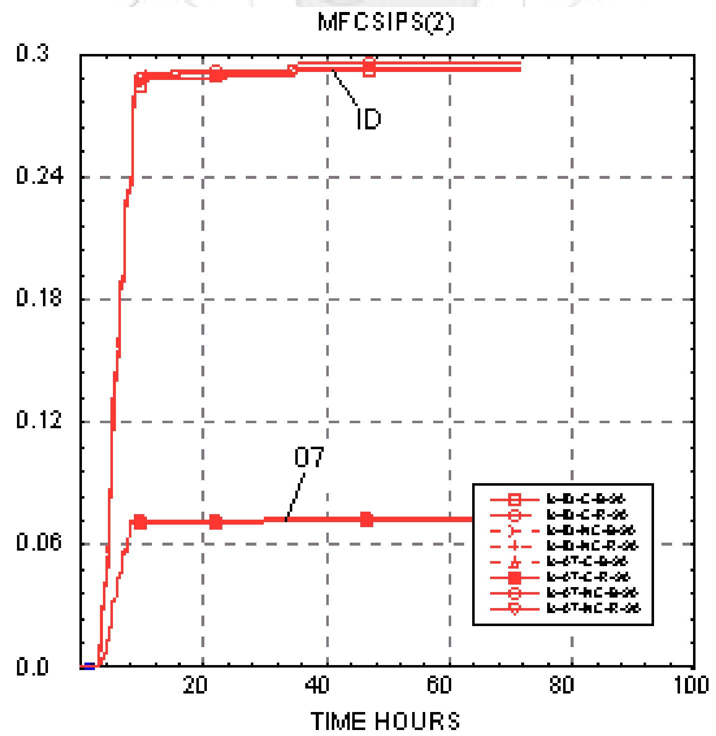


그림 23 휘발성 **FP** 방출모델별 건전 폐회로 내부 **CsI** 잔류분율

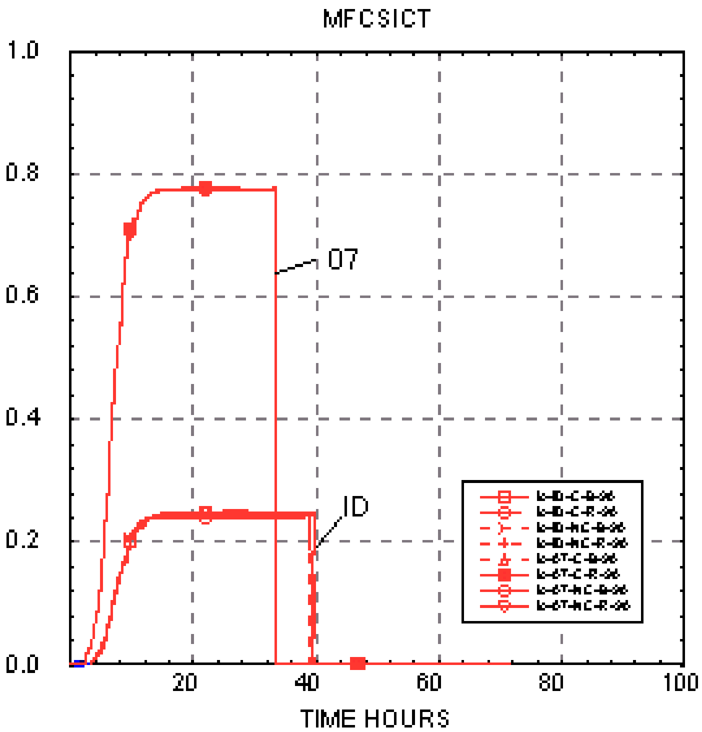


그림 24 휘발성 **FP** 방출모델별 칼랜드리아 탱크 내부 **CsI** 잔류분율

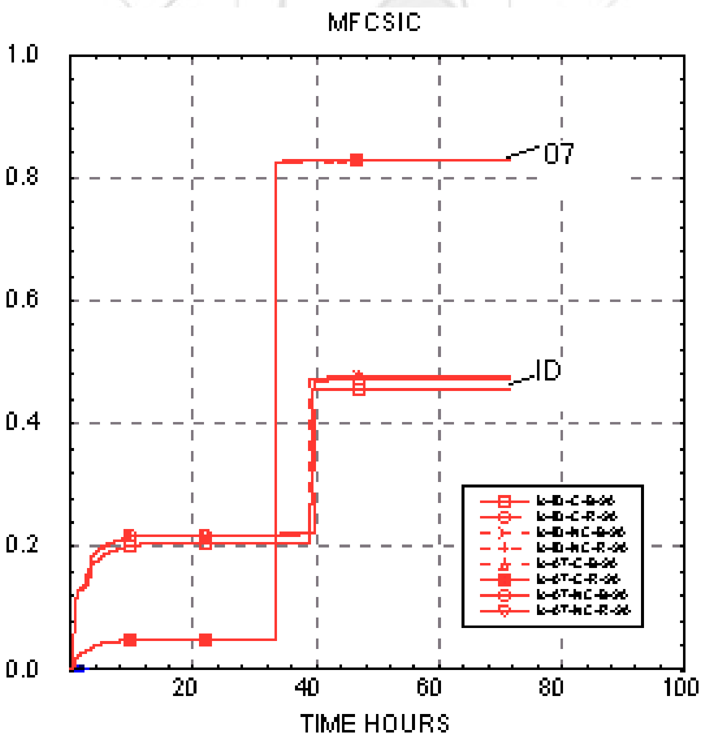


그림 25 휘발성 **FP** 방출모델별 격납건물내 **(**대기/침적/냉각수조 및 노심용융물**pool) CsI** 누적분율

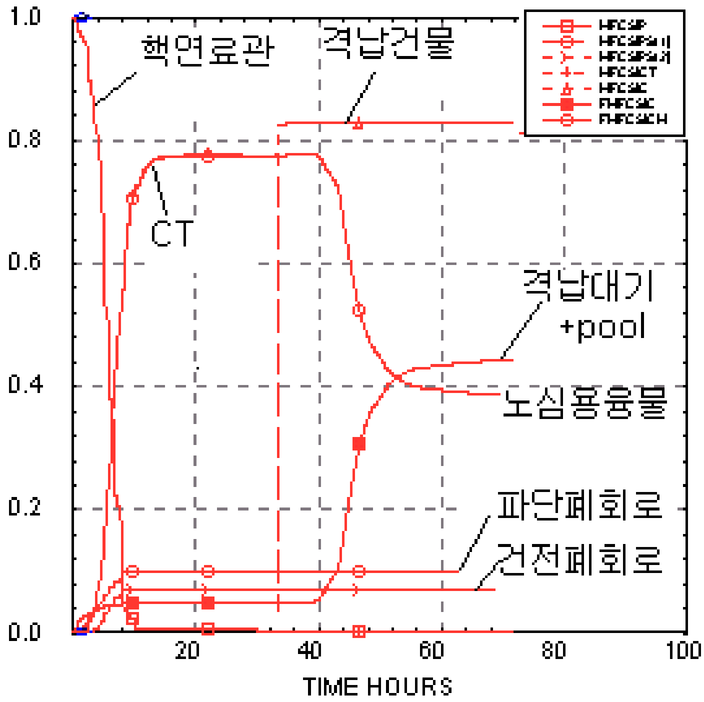


그림 26 **NUREG-0772 경우(07-C-R-90), 위치별 분포된 CsI 누적분율**

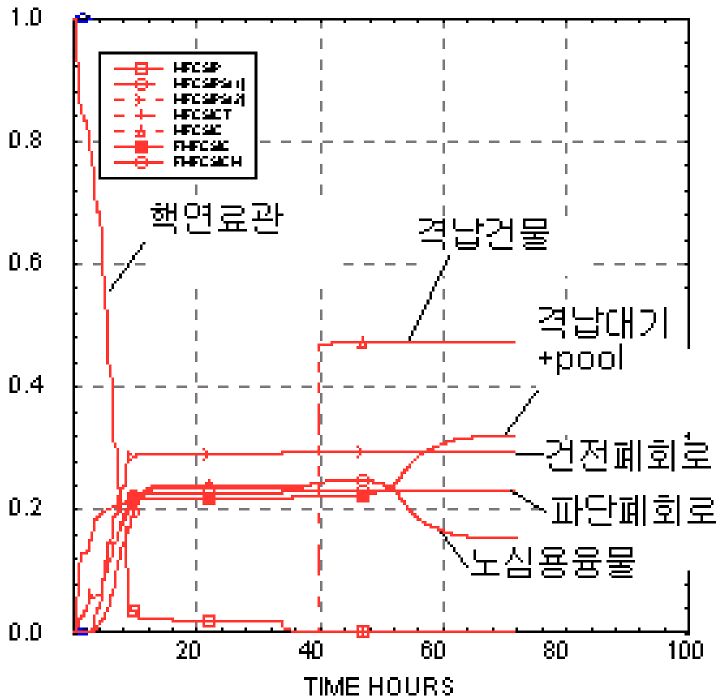


그림 27 **IDCOR 경우(ID-C-R-90), 위치별 분포된 CsI 누적분율**

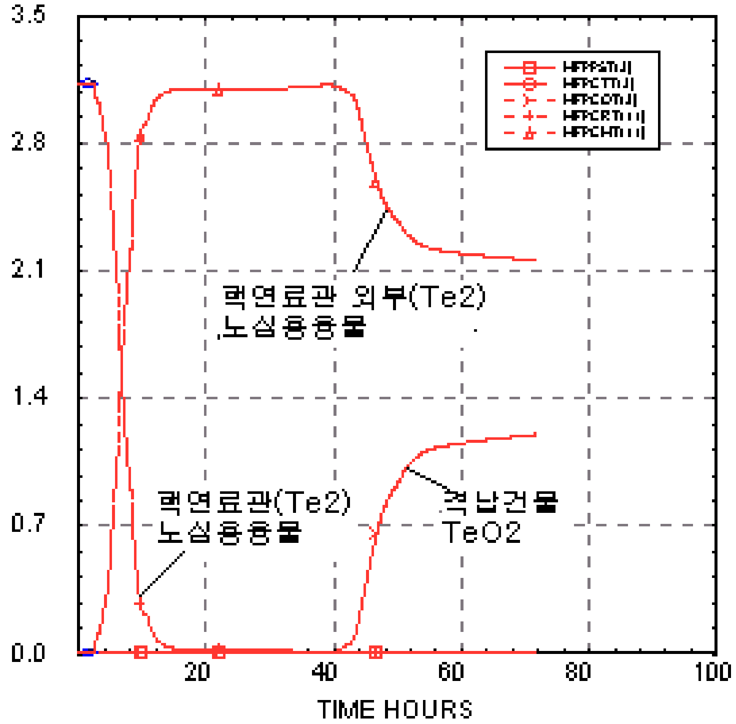


그림 28 NUREG-0772 경우(07-C-R-90), 위치별 분포된 Te/TeO_2 누적질량[Kg]

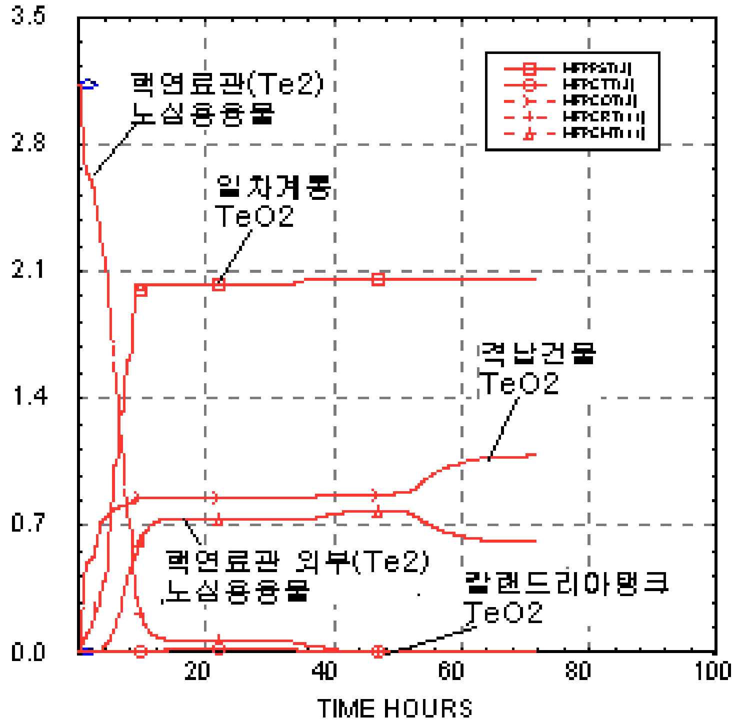


그림 29 IDCOR 경우(ID-C-R-90), 위치별 분포된 Te/TeO_2 누적질량[Kg]

제 5 장 참고문헌

1. 김시달외(2003 발간예정), ISAAC 노심열전달/파단유량/비상노심주입/격납건물살수 모델 평가.

2. 한국원자력연구소(1995), 가압중수로형 원자력발전소의 2단계 PSA를 위한 ISAAC 전산코드 개발.

3. 전력연구원 (1997), 가압중수로 원전 2단계 확률론적 안전성 평가, TR.93NJ10.97.67-2.

4. "Decay Heat Power in Light Water Reactors," Revised American National Standard, ANSI/ANS-5.1-1979, 1979.

5. KAERI(1995), MAAP-WS: Severe Accident Program for Wolsong Plant, FAI/95-76.

6. Industry Degraded Core Rulemaking Program(1983), Analysis of In-Vessel Core Melt Progression, IDCOR Report 15.1B.

7. USNRC(1981), Technical Bases for Estimating Fission Product Behavior During LWR Accidents, NUREG-0772.

8. 김시달(2002), 월성발전소의 대형 냉각재 상실사고에서의 국부공기 냉각기와 격납건물 살수의 영향, KAERI/TR-2350/2002.

서 지 정 보 양 식			
수행기관보고서번호	위탁연구기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드
KAERI/TR-2417/2003			

제 목 / 부 제	ISAAC 노드화/붕괴열/휘발성 핵분열생성물 방출 모델 평가
주 저 자	송용만 (한국원자력연구소, 열수력안전연구부)
공 저 자	박수용, 김동하 (한국원자력연구소, 열수력안전연구부)

발행지	대 전	발행 기관	한국원자력연구소	발행일	2003년 3월
면 수	58p	도 표	유 (O), 무 ( )	크 기	A4

참고사항	2002 중장기과제

비밀여부	공개 (O), 대외비 ( ), -----비밀	보고서종류	기술보고서
위탁연구기관		계약번호	

초 록

1995년부터 1년에 걸쳐 2단계 PSA를 수행하기 위해 개발된 ISAAC 전산코드는 CANDU 고유의 중대사고 현상에 대한 기본적인 모델 위주로 개발되었고, 본 코드를 이용한 사고 시나리오 해석경험도 PSA 수행목적으로 제한되었다. 따라서 기본 모델에 대한 이해를 높이고 사고해석 경험을 축적하기 위해 핵분열생성물 거동과 직.간접으로 연관된 계통의 노드화 모델, 붕괴열 모델 및 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델의 평가를 수행하였다. 연구전략으로 개별 모델에 대한 내용 분석과 모델 평가를 동시에 수행했으며, 모델평가는 불확실 변수 또는 사용자 옵션에 대한 민감도 계산결과를 이용하였다. 노심노드화 모델에 대한 민감도 분석 결과, 노심 핵연료의 열수력 거동 및 전체 사고진행, 그리고 핵분열생성물 거동에 큰 영향이 없어 수평 연료관을 12개 (폐쇄회로당 3x3 노심노드화)의 대표 연료관으로 노드화한 기존의 방법이 최적화 방안으로 별 무리가 없다고 평가하였다. 다음으로 발전소 정지후 붕괴열을 예측하기 위한 ANSI/ANS 표준모델은 많은 전산코드에서도 사용되고 ORIGEN 코드를 이용한 계산결과와도 잘 일치하여 별도의 모델 평가를 수행하지 않고 원자로 정지시 시간에 따라 계산된 ISAAC 붕괴열 결과를 예시하였다. 더불어 핵분열생성물의 가열에 의해, 침적된 핵분열생성물의 재증발시 중요한 격납건물내 핵분열생성물의 이송을 예시하였다. 마지막으로 휘발성 핵분열생성물의 방출 모델 분석 결과, 조기방출의 경우 IDCOR 모델의 노심내 방출가능 옵션을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래하고, 후기방출의 경우 NUREG-0772 모델을 선택하면 가장 보수적인 계산결과를 초래하며, IDCOR 모델의 노심내 방출제한 옵션을 사용하면 조기 및 후기방출시 보수성이 완화된 계산결과를 초래하였다.

주제명 키워드	ISAAC, CANDU, 중수로, 중대사고, 노심노드화, 붕괴열, 핵분열생성물

<table>
<tr><td colspan="8">BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET</td></tr>
<tr><td colspan="2">Performing Org.
Report No.</td><td colspan="2">Sponsoring Organization
Report No.</td><td colspan="2">Standard Report No.</td><td colspan="2">INIS Subject Code</td></tr>
<tr><td colspan="2">KAERI/TR-2417/2003</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Title/Subtitle</td><td colspan="7">An Evaluation of Nodalization/Decay Heat/Volatile Fission Product Release Models in ISAAC Code</td></tr>
<tr><td>Main Author</td><td colspan="7">Yong-Mann Song (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)</td></tr>
<tr><td>Author</td><td colspan="7">Soo-Yong Park, Dong-Ha Kim (KAERI, Thermal-hydraulic Safety Research)</td></tr>
<tr><td>Pub. Place</td><td>Taejon</td><td>Pub. Org.</td><td colspan="2">KAERI</td><td>Pub. Date</td><td colspan="2">March 2003</td></tr>
<tr><td>Page</td><td>58p</td><td>Fig. & Tab.</td><td colspan="2">Yes (O), No ( )</td><td>Size</td><td colspan="2">A4</td></tr>
<tr><td>Note</td><td colspan="7">2002 Mid-Long Term Project</td></tr>
<tr><td>Classified</td><td colspan="4">Open (O), Outside ( ), ----- Class</td><td>Report Type</td><td colspan="2">Technical Report</td></tr>
<tr><td>Sponsoring Org.</td><td colspan="4"></td><td>Contract No.</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>Abstract</td><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td colspan="8">An ISAAC computer code, which was developed for a Level-2 PSA during 1995, has developed mainly with fundamental models for CANDU-specific severe accident progression and also the accident-analyzing experiences are limited to Level-2 PSA purposes. Hence the system nodalization model, decay model and volatile fission product release model, which are known to affect fission product behavior directly or indirectly, are evaluated to both enhance understanding for basic models and accumulate accident-analyzing experiences. As a research strategy, sensitivity studies of model parameters and sensitivity coefficients are performed. According to the results from core nodalization sensitivity study, an original 3x3 nodalization (per loop) method which groups horizontal fuel channels into 12 representative channels, is evaluated to be sufficient for a optimal scheme because detailed nodalization methods have no large effect on fuel thermal-hydraulic behavior, total accident progression and fission product behavior. As ANSI/ANS standard model for decay heat prediction after reactor trip has no needs for further model evaluation due to both wide application on accident analysis codes and good comparison results with the ORIGEN code, ISAAC calculational results of decay heat are used as they are. In addition, fission product revaporization in a containment which is caused by the embedded decay heat, is demonstrated. The results for the volatile fission product release model are analyzed. In case of early release, the IDCOR model with an in-vessel Te release option shows the most conservative results and for the late release case, NUREG-0772 model shows the most conservative results. Considering both early and late release, the IDCOR model with an in-vessel Te bound option shows mitigated conservative results.</td></tr>
<tr><td>Subject Keywords</td><td colspan="7">ISAAC, CANDU, PHWR, severe accident, core nodalization, decay heat, fission product</td></tr>
</table>