

SMART 개념설계의 냉각재 유량완전상실사고 거동 특성
Transient Characteristics of a Total Loss of Flow Accident
for the SMART Conceptual Design

배규환, 이규형, 황대현, 심석구, 장문희

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

SMART(System-integrated Modular Advanced Reactor) 개념설계의 대표적 설계기준사고 중의 하나인 냉각재유량완전상실사고에 대하여 개발중인 MARS/SMR 및 MATRA를 이용하여 사고시 계통의 열수력 거동 및 고온 노심 수로의 핵비등이탈률(DNBR)을 계산하였다. 보수적인 초기/경계 조건 및 가정을 바탕으로 해석을 수행한 결과, MARS/SMR 및 MATRA 코드는 사고시 나타나는 계통의 압력, 온도, 유량 및 열속 변화와 같은 물리적 현상을 타당하게 예측하였으며, 일차측 및 이차측 냉각재 유량은 자연순환으로 안전하게 전환되어 노심의 잔열을 충분히 제거하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 계통의 압력 및 DNBR은 허용 범위 내에서 변하고 있어서 냉각재유량완전상실사고시 SMART 개념설계의 안전성은 충분히 확보되고 있음을 알 수 있었다.

Abstract

The system thermal-hydraulic responses and the core hot channel DNBR were calculated during a total loss of flow accident for the SMART conceptual design using the developmental version of MARS/SMR and MATRA codes. The analysis results using the conservative initial and boundary conditions show that MARS/SMR and MATRA codes reasonably predict the system's thermal-hydraulic responses such as pressure, temperature, mass flow, and heat flux during the accident. The primary and secondary system flows are safely transferred to the natural circulation modes and the decay heat is sufficiently removed by the passive residual heat removal system. The system pressure and DNBR are remained within the acceptance criteria ensuring the safety of the SMART conceptual design.

1. 서론

한국원자력연구소에서 담수와 전기생산을 목적으로 열출력 330 MW의 일체형원자로로 개발하고 있는 SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor)는 일차계통의 주요 부품들을 하나의 밀봉된 압력용기 안에 설치함으로써 대형 냉각재상실사고의 가능성을 근본적으로 제거한 설계개념을 채택하고 있다 [1]. 또한, 자기제어방식의 저온가스가압기, 관류식 나선형 증기발생기 및 피동잔열제거계통의 설계특성도 기존의 대용량 분리형 발전용 원자로와 다른 점들이다. 이차계통에 설치된 피동잔열제거계통은 이차계통에서의 열 제거 능력 상실 시 또는 원자로 정지 시 운전원의 아무런 조작 없이 72 시간동안 노심에서 발생하는 잔열을 자연순환에 의하여 제거할 수 있도록 설계하였다.

이와 같이 SMART는 기존의 상용 원자로와는 다른 설계개념을 채택하고 있기 때문에 원자로의 설계 시 체계적인 안전성 분석을 통하여 신뢰성 및 안전성의 확보가 요구된다. 이를 달성하기 위해서는 기존 가압 경수로에서의 안전해석 경험을 기초로 SMART에 특이하게 나타나는 안전 현안들에 대한 분석을 통하여 안전규제요건들이 개발되고, 이와 관련된 체계적인 안전해석 방법론과 코드개발이 요구된다. SMART의 안전해석을 위한 코드는 기존 상용로의 안전해석을 위한 열수력 모델뿐 아니라 피동형 기기들 및 SMART 고유 부품에 대한 모델들이 장착되어야 한다.

이와 관련하여 본 연구에서는 SMART 개념설계의 대표적 설계기준사고중 하나인 원자로 냉각재유량완전상실사고에 대하여 최적열수력 계통분석코드인 MARS/SMR [2] 및 부수로 해석 코드인 MATRA [3]로 보수적인 초기조건 및 경계조건을 사용하여 안전성을 평가하였다.

원자로 냉각재유량완전상실사고는 원자로 냉각재 유량의 감소를 유발시키는 사고로, 출력 운전모드에서 예상치 않게 모든 주냉각재펌프 (MCP)로 공급되는 전원이 상실되어 고속 또는 저속으로 운전 중인 4 대의 MCP가 동시에 정지됨으로써 일차측 강제순환유량이 완전히 상실되는 사고이다. 이 사고는 어떠한 냉각재 유량 상실사고보다 더 심각한 최소 핵비등이 탈률 (DNBR)을 발생시킨다. 모든 MCP로 공급되는 전원이 동시에 상실될 수 있는 유일하고 확실한 원인은 소외전원상실이다. 소외전원상실은 터빈 트립을 유발시키고 소내 부하에 전기 공급이 안되어 복수기 작동 불능 및 급수유량 상실 등도 동시에 발생한다. 이로 인하여 주냉각재펌프 저속도, 주급수 저 유량, 주증기관 고 압력 등의 비상보호 설정치 도달로 원자로 비상정지 신호가 발생하고, 이 신호에 의하여 제어봉이 삽입되어 원자로를 정지시킨다. 원자로 정지 신호 발생과 동시에 증기발생기는 터빈과 격리되어 피동잔열제거계통에 연결되고 그 후, NSSS의 냉각은 자연대류에 의하여 이루어지게 된다.

2. 해석모델 및 초기/경계조건

본 안전해석에 사용된 전산코드는 MARS/SMR version 1.4 [2]이다. MARS/SMR은 이상 유동에 대하여 6개의 지배방정식을 이용하는 최적 열수력 계통분석 코드이다. 이 코드는 피동형 부품들의 물리적 특성과 관련된 모델들이 반영된 RELAP5/MOD3.2 [4]를 바탕으로 하여 원자로용기의 다차원 해석 기능 등 여러 가지 모델들이 보완 개선된 MARS 코드 [5]를 기초로 SMART의 안전해석을 위하여 SMART 고유의 설계특성을 고려한 모델들을 추가하여 한국원자력연구소에서 개발하고 있는 코드이다.

그림 1과 2는 각각 SMART의 개략도와 원자로 냉각재유량완전상실사고를 해석하기 위한 MARS/SMR의 Nodalization을 보여 준다. 주요 계통으로 노심과 주냉각재펌프 및 증기발생기를 포함하는 일차계통, 증기를 터빈으로 공급하는 이차계통, 원자로 보호를 위한 비상노심 냉각계통 및 피동잔열제거계통 등이 있다. 노심은 57 개의 핵연료 집합체로 구성되어 있으며, 56개의 핵연료 집합체를 묶은 평균채널 (Volume-200)과 한 개의 고온채널 (Volume-210)로 모델하였고, 핵연료의 축방향은 10 개의 노드로 모델하였다. 4 대의 주냉각재펌프는 각각 독립적으로 평행하게 모델하였다. 12 개의 증기발생기 카세트는 사고 시 4 Section의 피동잔열제거계통에서 발생할 수 있는 비대칭 특성을 고려하기 위하여 4 개의 그룹으로 모델하였다. 가압기는 외곽공동(Volume-300), 중간공동(Volume-310), 중앙공동 (Volume-320, 330) 및 이들을 연결하여 주는 연결배관으로 모델하였다. 비응축성가스가 있는 중앙공동 (End cavity)은 8 개의 세부 노드로 하여 수직 성층류 (Stratification)를 고려할 수 있도록 하였다. 이차계통 및 피동잔열제거계통은 대칭을 이루는 4 개의 그룹으로 모델하여 이들 중 하나가 작동불능인 경우 및 비대칭 열 제거 현상을 고려할 수 있게 하였다. 증기발생기의 나선형 세관은 17 개의 세부 노드로 하여 긴 나선형 세관에서 형성되는 과냉, 비등 및 과열영역에서의 열수력 과도현상을 예측할 수 있게 하였다.

MARS/SMR 코드에 내장된 핵비등이탈률 (DNBR) 관련 상관식과 입력자료로는 고온 부수로에서의 정확한 최소 DNBR 값을 계산할 수 없기 때문에 본 계산에서 DNBR 여유가 충분하지 않으면 부수로 해석 코드인 MATRA [3]를 이용하여 보다 세밀한 분석을 수행하였다. MATRA 코드를 사용한 고온 부수로에서의 DNBR 계산시 시간에 따른 노심 압력, 노심 입구 냉각재 온도 및 유량, 노심 출력 값들은 MARS/SMR 코드로 계산한 것을 사용하고, CHF 상관식은 AECL-86 CHF Look-up table을 사용하였다.

표 1은 해석에 가장 보수적인 결과를 유발할 수 있도록 조정된 주요 변수들의 초기조건 및 가정을 요약한 것이다. 노심 출력은 측정계기의 오차를 고려하여 정격출력의 103 %로 하고 유량과 온도 등은 출력 증가에 해당하는 정도만큼 변화된 값을 사용하였다. 그리고 급수유량은 원자로 출력 증가량만큼 증가된 유량을 사용하였다. 잔열곡선은 ANS73 곡선에 계수 1.2를 곱한 보수적인 값을 사용하였다. 노심에서 발생하는 잔열 제거 능력 관점에서 피동잔열제거계통 한 트레인이 단일고장에 의해 작동되지 않는 것으로 가정하였다.

3. 해석결과

표 2는 냉각재유량완전상실사고의 사고진행상황을 요약한 것이고, 그림 3에서 8까지는 MARS/SMR 및 MATRA로 계산한 주요 변수들의 거동을 나타낸 것이다.

103 % 정격 출력 운전 중에 소외 전원이 상실되면 터빈 트립, 주급수 유량상실, 복수기 작동불능, 그리고 고속으로 운전 중인 4 대의 모든 주냉각재펌프들의 coastdown 등이 동시에 발생하면서 노심 유량이 급격히 감소한다 (그림 3). 이로 인하여 노심의 평균 냉각재 온도가 상승하고 (그림 4) 밀도는 감소한다. 냉각재 밀도의 감소로 무봉산 노심의 큰 부반응도가 주입되어 핵연료의 평균 온도는 감소한다. 핵연료 온도 감소로 양의 Doppler 반응도가 주입되나 이 값은 냉각재 밀도 감소에 의한 반응도가 감소량 보다 상대적으로 작기 때문에 과도 초기에 총 반응도가의 값은 부의 값을 가지게 되어 (그림 5) 노심 출력은 줄어들게 된다 (그림 3). 사고 후 0.3 초, 0.45 초 및 1.45 초에 각각 주급수 저 유량 비상보호 설정치 (정격치의 10 %), 주증기관 고 압력 비상보호 설정치 (4 MPa) 및 주냉각재펌프 저속 비상보호 설정치 (2 대 이상의 주냉각재펌프 속도가 정격치의 80 %)에 도달하게 된다. 최초의 비상보호 설정치 도달 후 총 1.15 초의 시간 지연 후인 1.45 초에 원자로 비상정지 신호가 발생하고, 트립 차단기 열림 및 제어봉구동계통의 코일 감쇠 시간으로 가정된 0.5 초의 시간 지연후인 1.95 초에 제어봉이 낙하하기 시작하여 초당 약 250 mm의 속도로 총 8 초 동안 노심으로 삽입되면 부의 정지 제어봉 반응도가가 주입됨으로써 노심 출력은 급격히 줄어들게 된다 (그림 3).

소외전원상실 후 0.3 초만에 터빈정지밸브가 닫히고 주급수 유량이 완전히 상실되면 이차계통의 압력과 온도가 증가하게 된다. 이는 일차계통에서 이차계통으로의 열전달을 감소시키게된다. 이와 더불어 일차측 냉각재 유량이 감소함으로써 일차측 냉각재의 온도 및 압력은 상승하게 된다 (그림 6, 7). 가압기가 일차계통 유체의 팽창을 충분히 보상해주지 못함으로 인하여 계통의 압력은 계속 상승하고 5.9 초에 가압기 안전밸브 개방 설정치인 17.51 MPa에 도달하게 된다. 안전밸브의 개방으로 일차계통의 압력상승은 둔화되나 피동잔열제거계통 및 안전밸브를 통한 원자로의 열 제거가 충분하지 않음으로 인하여 조금씩 상승하여 7.2 초에 최대 압력인 18.17 MPa에 도달한다. 이후 제어봉 삽입에 의한 충분한 부 반응도가로 노심 출력 및 열속이 급격히 줄어들게 되면 (그림 3) 일차계통의 압력은 감소하게 된다.

원자로 정지신호 발생과 동시에 주급수 및 증기 격리밸브가 닫히고 피동잔열제거계통의 증기, 급수조절밸브가 열리면서 증기발생기는 피동잔열제거계통에 연결된다. 증기발생기 하단으로 유입되는 급수는 나선형 세관을 따라 올라 가면서 쉘측으로 흐르는 일차측 냉각재의 열을 흡수하여 과열증기가 되고, 이는 피동잔열제거계통의 열교환기로 유입되어 응축된 후 다시 증기발생기 급수관으로 되돌아오는 자연순환 유로를 형성하게 된다. 그러나, 작동 초기 단계에서는 피동잔열제거계통 내 배관 및 열교환기에 채워져 있던 물의 영향으로 원할한 유

로가 형성되지 않는다. 이로 인하여 이차계통의 압력은 계속 상승하여 41 초경에 최대치인 8.98 MPa에 도달한다 (그림 6). 압력 상승으로 인한 열전달 감소로 증기발생기 출구에서의 일차측 냉각재 온도도 상승하게 된다 (그림 7). 그 후 이차계통 내에서는 자연순환 유량이 충분히 형성되어 이차측의 압력은 다시 감소하게 되고 (그림 6) 증기발생기 출구에서의 일차측 냉각재 온도도 감소하게 된다 (그림 7).

사고 후, 150 초경에 피동간열제거계통을 통한 자연대류 유량은 정상상태 급수유량의 약 5.7 % 수준인 9 kg/s로 형성되고, 증기발생기에서 일차측의 열을 제거시키면서 생성된 과열 증기는 피동간열제거계통의 열교환기를 거치는 동안 과냉의 액체로 충분히 응축된 후 다시 증기발생기 세관으로 유입된다. 이때부터 일차측의 냉각재 온도는 시간당 약 90 K의 비율로 냉각되고 (그림 7) NSSS의 압력도 단순 감소하게 됨을 알 수 있다 (그림 6).

이 사고시 주요 관심변수는 핵연료 손상의 판단기준이 되는 노심 고온 부수로에서의 최소 DNBR 값이다. 국부 DNBR 값의 감소를 일으키는 주요 인자는 국부 열속 증가, 노심 냉각재의 온도 상승 및 압력 감소와 노심유량 감소이다. 그림 3은 MARS/SMR에 내장된 AECL Look-up table을 사용하여 계산한 Hot channel에서의 사고 초기 DNBR 거동을 주요 관심 변수인 노심 압력, 노심 출력 및 노심 유량 거동과 함께 그린 것이다. 주냉각재펌프 정지로 노심 유량이 감소하게되면 노심의 평균 냉각재 온도가 상승하게되어 DNBR이 초기치인 1.69에서 감소하기 시작하고, 사고 후 6.5 초에 최소 DNBR인 1.53에 도달한다. 그 후 냉각재의 압력상승 및 부의 감속재온도계수와 제어봉 삽입으로 인한 노심 출력 및 국부 열속이 줄어들면 DNBR은 다시 상승하다가 제어봉이 충분히 삽입되는 약 7 초경부터 급격히 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 부수로 해석코드인 MATRA로 상세 계산한 [6] 고온 부수로의 DNBR 거동을 보인 것으로, MARS/SMR의 계산 결과와 유사한 거동을 보이고 있다. 냉각재 순환유량이 감소하게되면 노심의 평균 냉각재온도가 상승하게되어 DNBR이 초기 치인 1.914에서 감소하기 시작하고, 사고 후 6.5 초에 최소 DNBR인 1.654에 도달한 다음 약 7 초경부터 급격히 증가함을 알 수 있다.

4. 결 론

한국원자력연구소에서 담수와 전기생산을 목적으로 개발하고 있는 SMART는 일차계통의 주요 부품들을 하나의 밀봉된 압력용기 안에 설치하고, 안전계통에 피동형 설계 개념을 도입하는 등 기존의 상용 원자로와는 다른 설계개념을 채택하고 있다. 따라서 원자로의 설계 시 체계적인 안전해석 방법론 및 코드개발을 통하여 안전성분석이 수행되어야 한다. 이와 관련하여 본 연구에서는 SMART 개념설계의 대표적 설계기준사고중 하나인 원자로 냉각재 유량완전상실사고에 대하여 MARS/SMR 및 MATRA 코드로 보수적인 초기 조건 및 경계 조건을 사용하여 안전해석 방법론과 안전성을 평가하였다.

해석 결과, MARS/SMR 및 MATRA 코드는 사고시 나타나는 계통의 압력, 온도, 유량 및 열속 변화와 같은 물리적 현상을 타당하게 예측하였다. 일차측 냉각재 유량은 자연순환으로 안전하게 전환되어 냉각이 이루어지고 4 트레인의 피동잔열제거계통 중 3 트레인만이 작동하더라도 노심의 잔열은 충분히 제거되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 일차측 및 이차측 최고 압력은 사고 후 각각 7.1 초 및 32 초에 18.03 MPa과 9.14 MPa로, 허용기준치인 18.7 MPa보다 낮게 유지되고, 최소 DNBR은 1.654로 예비 설계 제한치인 1.3보다 높게 유지되어 DNB에 의한 노심 손상은 없을 것으로 판단된다.

이러한 개념설계 해석 결과를 바탕으로 향후 이루어질 기본설계 단계에서의 안전해석은 설계 최적화를 통하여 얻어진 보다 상세하고 신뢰성 있는 설계 자료들을 사용하여 수행되어야 할 것이다. 또한, 안전규제요건 설정에 따른 관련 코드 및 모델들을 개선하고 해석 방법론 및 가정들을 명확히 설정한 후 SMART의 안전성 확보를 입증해야 할 것이다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행된 것이다.

5. 참고문헌

- [1] 한국원자력연구소, "일체형원자로 계통설계기술개발", KAERI/RR-1883/98, 1999.
- [2] 정법동, "MARS/SMR 1.4 fixed version", E-mail from Chung Bub-Dong, 1999. 1. 5.
- [3] Y. J. Yoo and D. H. Hwang, "Development of a subchannel analysis code MATRA (version alpha)", KAERI/TR-1033/98, KAERI, 1988.
- [4] RELAP5 development team, "RELAP5/MOD3 code manual", NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, INEL, 1995.
- [5] 이원재, "Development of a multi-dimensional realistic thermal-hydraulic system analysis code, MARS 1.3 and its verification", KAERI/TR-1108/98, KAERI, 1998.
- [6] 전태현, "SMART의 DNBR관련 사고에 대한 상세 분석 결과 재송부", SMART-CA-99-13, 1999. 8. 4.

표 1 해석 초기조건 및 가정

변수	값
노심 출력 (정격치의 103%), MWt	339.9
급수 유량 (정격치의 103%), kg/s	157,075
일차측 냉각재 유량, kg/s	1544
가압기 압력, MPa	15.0
일차측 냉각재 SG 입출구 온도, K	583.0/543.0
급수/증기 온도, K	430.0/552.1
SG 증기 압력, MPa	3.0
SG 관막음, %	10
원자로정지 지연시간, 초	1.15
CEDM 지지코일 감쇠 시간, 초	0.5
감속재 밀도/도플러 반응도가	least/most negative
최대 축방향/반경방향 첨두계수	1.563/1.807
제어봉반응도가 (최대 반응도 제어봉고착), % $\Delta \rho$	- 8.9
제어봉 낙하 시간, 초	8.0
가압기 가스 실린더	폐쇄
단일 고장	PRHRS 1트레인 고장
터빈 제어 밸브 닫힘 시간, 초	0.3
MPIV/MSIV 닫힘 시간, 초	2.0/3.0
PRHRS 급수/증기 차단 밸브 개방 시간, 초	2.0/3.0

표 2 냉각재유량완전상실사고 사고진행 상황

시간, 초	과도전개 사항	설정치 및 값
0.0	소외전원상실, 터빈 트립, 주급수 상실 주냉각재펌프 4대 정지	
0.3	주급수 저유량 비상보호 설정치 도달	정격치의 10 %
0.45	주증기관 고압력 비상보호 설정치 도달	4.0 MPa
1.45	주냉각재펌프 저속 비상보호 설정치 도달	
1.45	원자로 비상정지 신호 발생 증기, 급수 격리밸브 잠김 피동잔열제거계통 증기, 급수차단밸브 열림	비상보호설정치 도달 후 1.15 초
1.95	제어봉 삽입 시작	원자로비상정지신호 발생 후 0.5 초
5.9	가압기 안전밸브 열림	17.51 MPa
6.5	최소 DNBR 도달	1.654 (초기치:1.914)
7.2	일차측 압력 최대치 도달	18.17 MPa
20	가압기 안전밸브 닫힘	13.85 MPa
41	증기관 증기 압력 최대치 도달	8.98 MPa
1000	사고계산 종료	

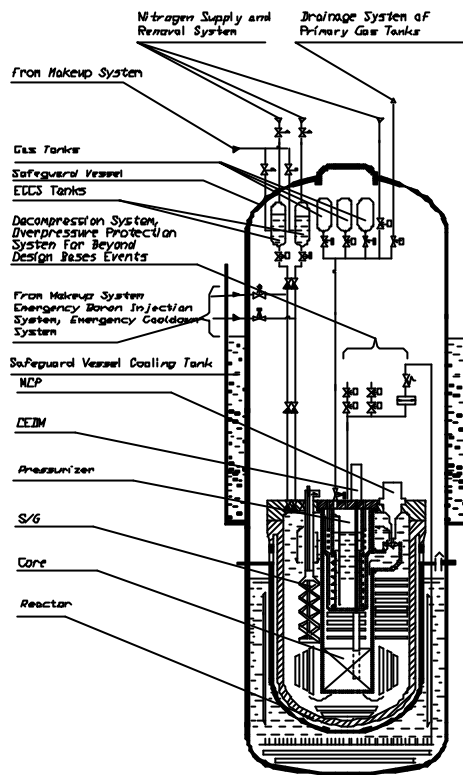


그림 1. SMART 계통 개략도

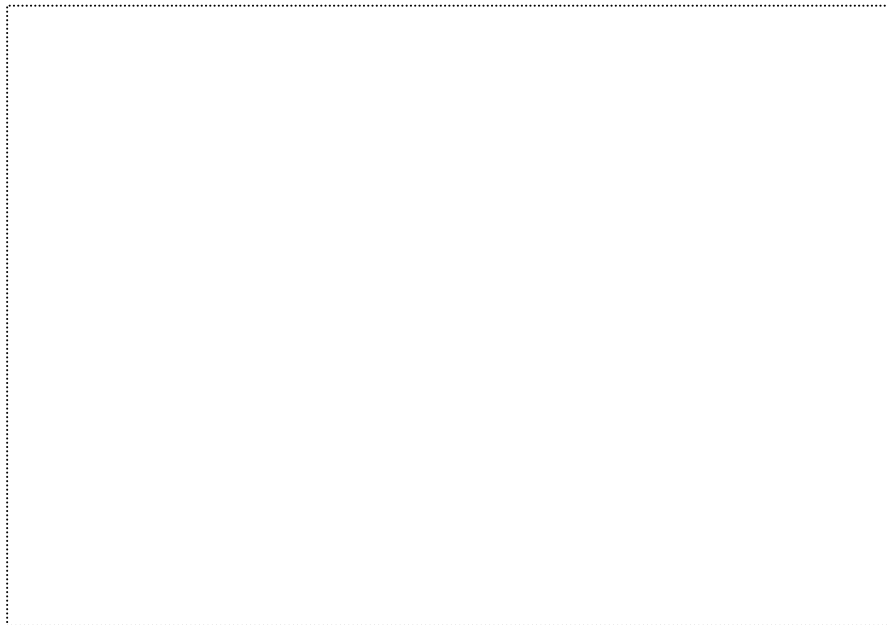


그림 2 MARS/SMR Nodalization

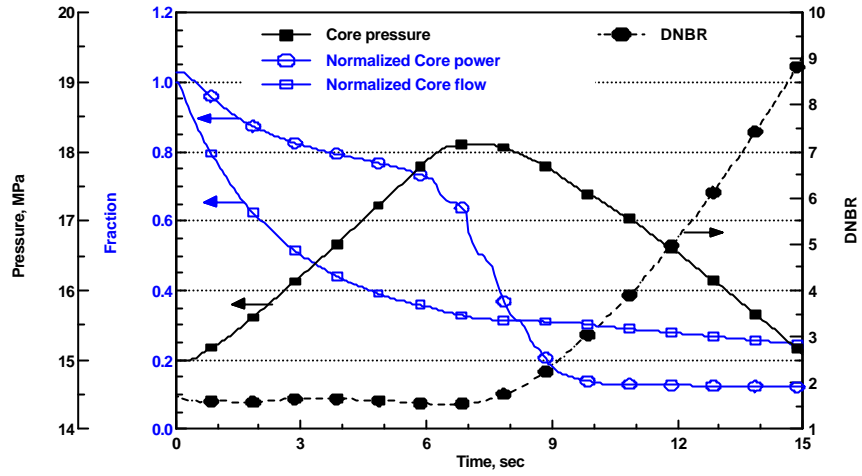


그림 3 사고 초기 주요변수 거동

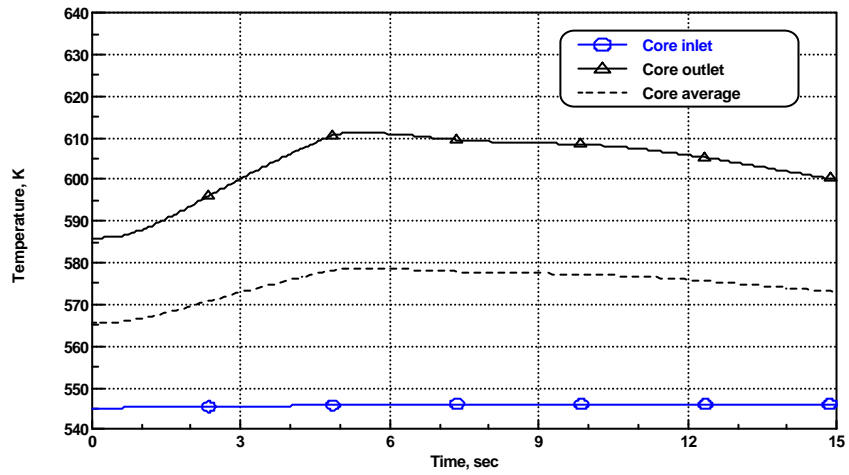


그림 4 노심 평균 냉각재 온도

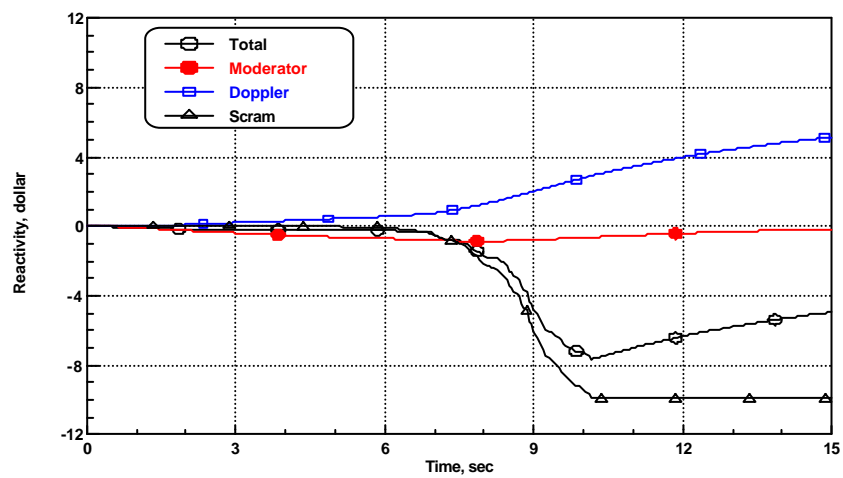


그림 5 반응도 거동

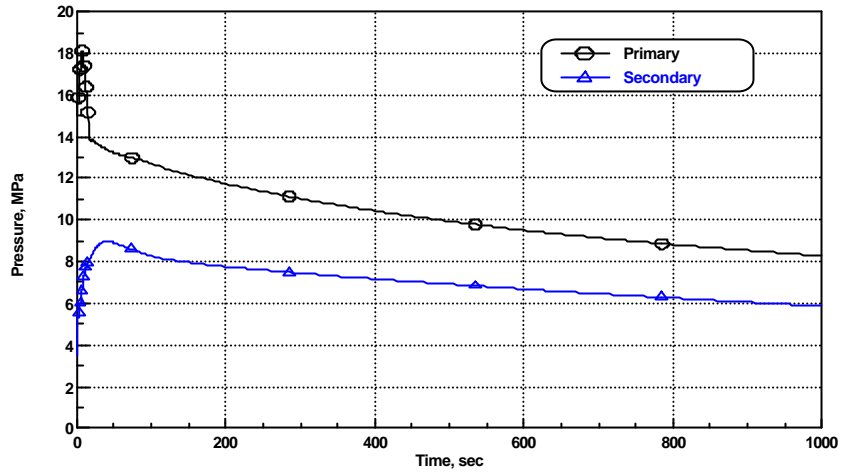


그림 6 계통 압력 장기 거동

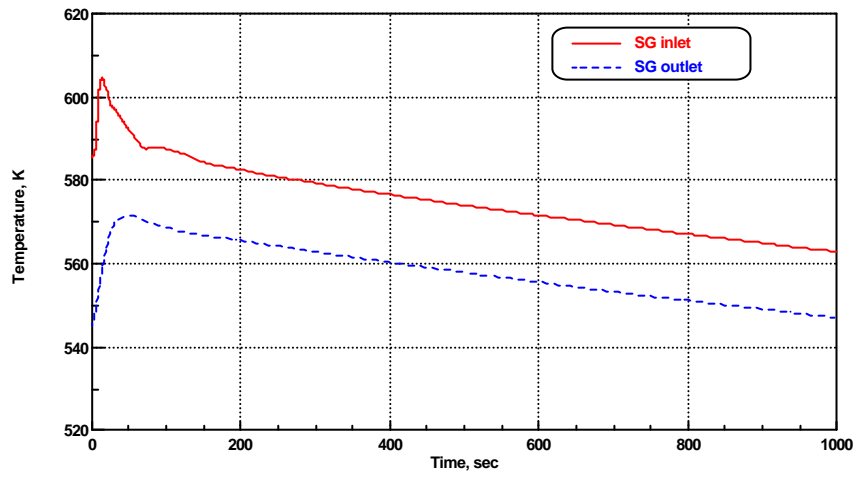


그림 7 계통 온도 장기 거동

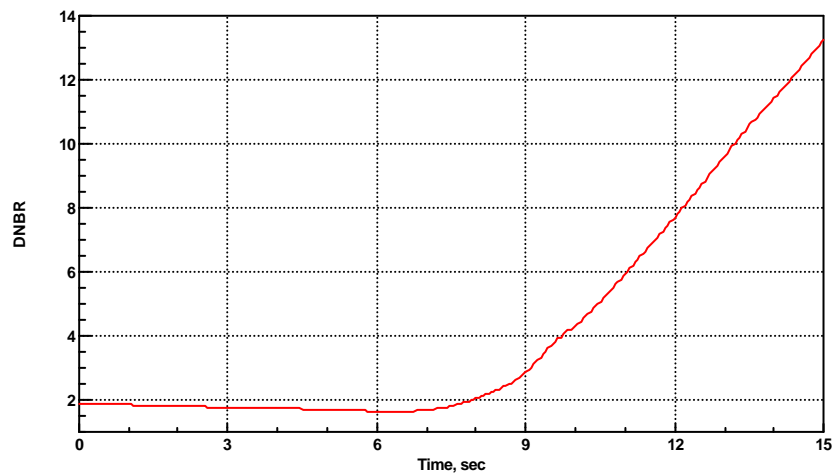


그림 8 MATRA 고온 부수로 핵비등이탈률