

# *Long Term Core Cooling Analysis on Loss of Ultimate Heat Sink for APR1400*

- **일시:** May 17-19, 2017
- **장소:** Jeju, Korea



**(주)미래와도전**  
FNC Technology Co., Ltd.

**황수현**, 서동운, 정순일  
shhwang@fnctech.com



**한국원자력안전기술원**  
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

김남석, 김윤일



# CONTENTS

**I**

**연구수행배경**

**II**

**Nodalization 모델**

**III**

**LOUHS 분석시 가정사항**

**IV**

**LOUHS 분석 결과**

**V**

**결론**

# I. 연구수행배경

## ■ 국외 현황

- ▶ 미국에서는 2001년 9월 11일에 발생한 항공기테러 사건을 계기로 신규 원전에 대해 인위적인 항공기충돌 평가를 요구하는 규정(10 CFR 50.150)을 2009년 6월 12일에 제정하였음
- ▶ 프랑스 등 유럽의 국가에서도 신규원전에 인위적인 항공기충돌에 의한 영향을 평가하고 있음

## ■ 10CFR50.150

### ▶ 요구사항

- 원자로건물 건전성 유지 또는 원자로 노심 냉각기능 유지
- 사용후연료저장조 건전성 유지 또는 사용후연료 냉각기능 유지

### ▶ 고려사항

- 설계기준초과사건
- 대형민항기 충돌속도 및 충돌각도

## ■ 국내 현황

- ▶ 신고리 5,6호기가 설계단계에서부터 항공기충돌 영향을 고려하여 반영하고 있지만 이의 타당성 평가를 수행하기에는 무리가 있는 상황
- ▶ 국내 신규 도입 원전에서 항공기충돌 영향에 대한 규제의 마련이 시급

# I. 연구수행배경

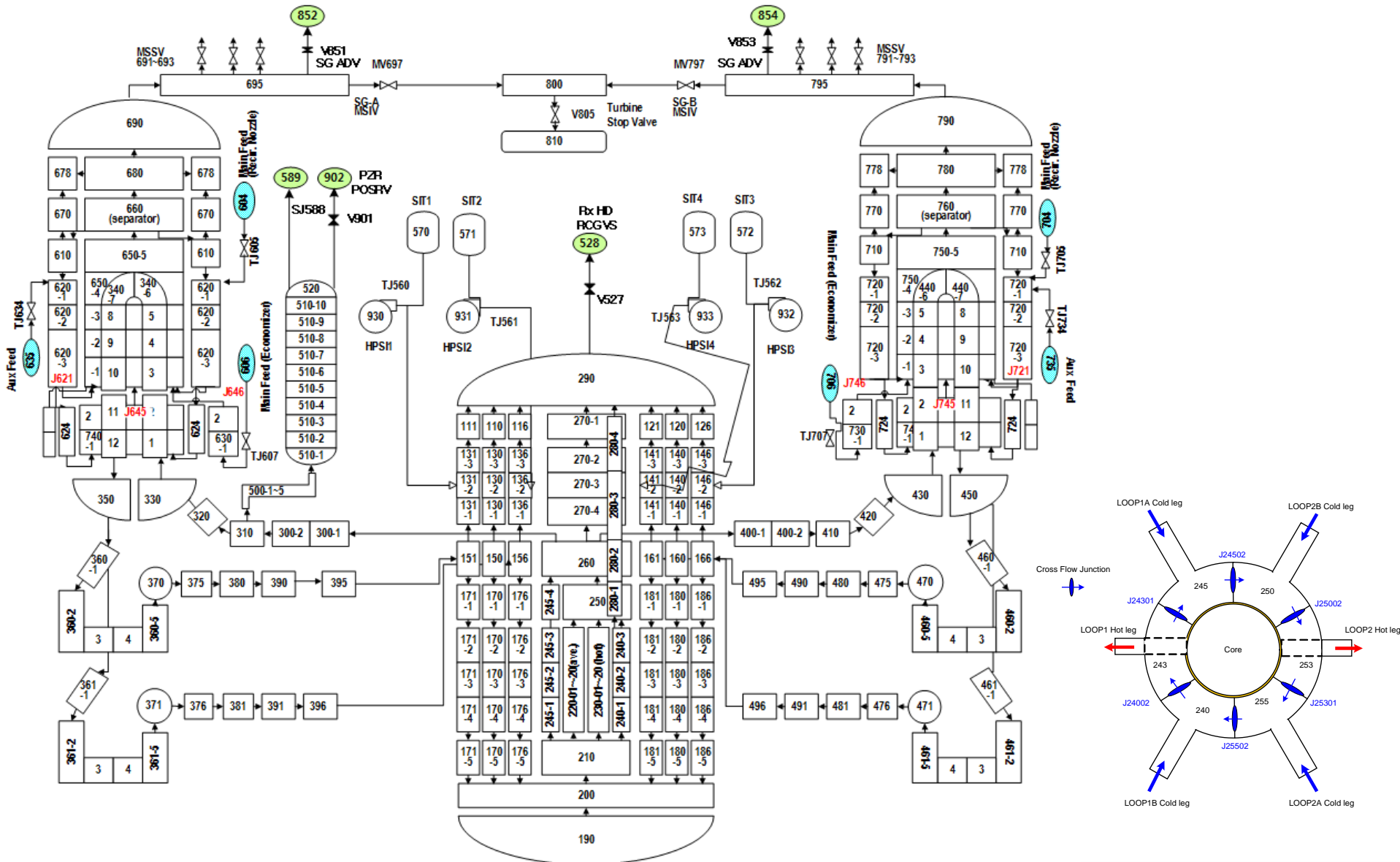
## ■ 신고리 5,6호기 CCW(Component Cooling Water, 기기냉각수) 기능상실시 장기노심냉각 분석

- ▶ 한국전력기술(주), 2015년 10월에 KINS에 제출
- ▶ 항공기충돌에 의한 CCW 기능 상실 시 장기노심냉각 분석을 위해 NEI 07-13 에서 발전소 정상운전 시(전출력 운전 시) 발생한 사건경위(POS-1)와 발전소 정지운전 시 발생한 사건경위(POS-6)를 고려
  - 24시간 이내에 원자로를 고온대기 상태로 냉각 : 성공기준(NEI 07-13)
  - 24시간 이후에도 지속적으로 발전소를 냉각시켜 저온정지 상태에 도달할 수 있는지에 대한 분석결과 제시 요구 : KINS
- ▶ MAAP 5.03(Modular Accident Analysis Program Version 5.03) 전산프로그램을 사용
  - 원자로냉각재계통과 원자로건물 모두 모의
- ▶ 전출력 및 정지운전시 장기노심냉각 분석
  - 항공기 충돌시 노심 냉각(고온정지 혹은 상온저지) 가능함을 보임

## ■ 사업자 분석결과를 RELAP5 코드를 사용 독립적인 검증 수행

- ▶ 사업자 평가 결과의 유효성 확인
- ▶ 장기노심냉각 기능 확보를 위한 규제요건(안) 개발에 활용

# II. Nodalization 모델



# II. Nodalization 모델

## ■ 원자로건물 다중분할모델

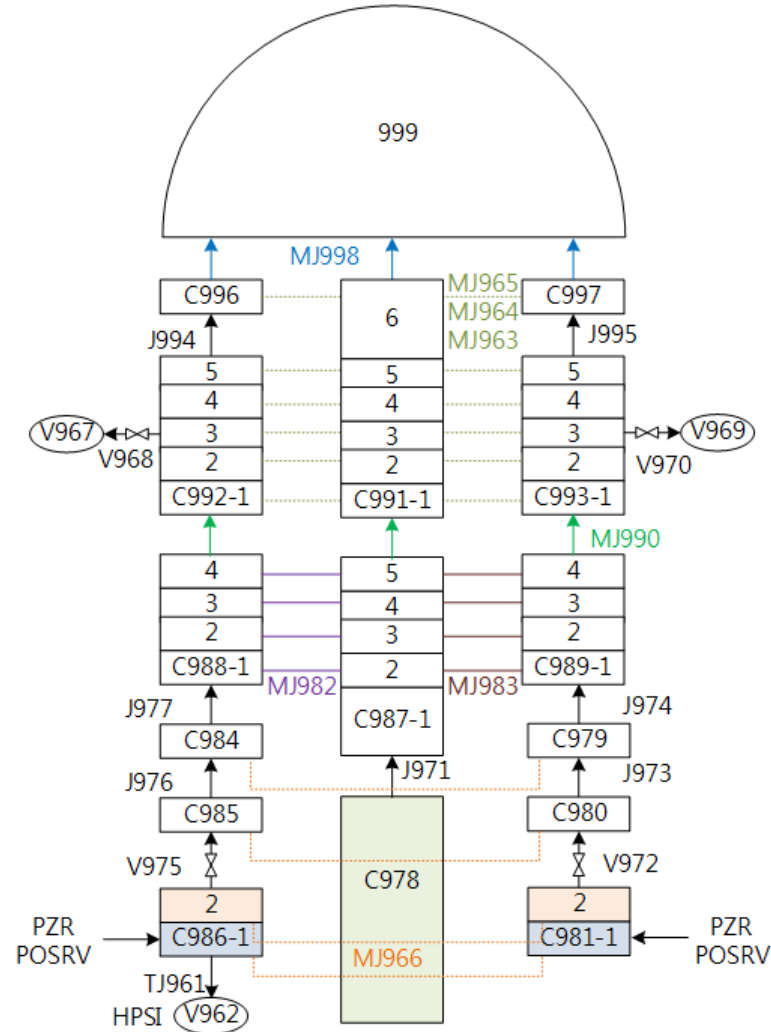
### ▶ 기존 부산대 모델\*에서 변경사항

- 신고리3,4 FSAR 열침원 데이터 적용
- Sump, IRWST 모델 추가
- Crossflow multiple junction 추가
- RCGVS, POSRV가 IRWST로 가도록 RCS에 가상의 volume 추가

### ▶ 실제 원자로건물 실측 데이터 미반영

- 여기에서는 TDV를 사용하지 않고 대략적인 원자로건물 거동을 예측하기 위하여 multiple volume 사용
- 원자로건물 온도/압력 예측결과는 단지 참고자료이며 정확한 예측 값은 아님

\*배성환 외, MARS-KS1.3을 이용한 피동원자로건물 냉각계통 열수력 성능 예비분석, 에너지공학, 제24권 제3호 (2015) 참조



# III. LOUHS 분석시 가정사항

## ■ LOUHS(Loss Of Ultimate Heat Sink) 분석 시 가정사항

### ▶ Realistic Analysis

- 100% 출력
- 붕괴열 모델 : ANS79-1
- Fission product yield factor=1.0

### ▶ 기기냉각계통 기능상실

- RCP 정지 / 주급수펌프 정지
  - 원자로트립 (RCS 저유량) / 터빈 정지
- 1대의 SIP는 지속적으로 가용하다고 가정 (교체 운전)

### ▶ 사고후 30분

- 운전원 조치에 의한 SG ADV 개방
  - RCS 냉각률 50°F/hr 준수하며 6bar(터빈구동보조급수펌프 운전가능 압력 5.1bar)까지 SG 압력 감소
- 터빈구동보조급수펌프 기동

# III. LOUHS 분석시 가정사항

## ■ LOUHS 분석 시 가정사항

### ▶ 사고후 24시간

- SG를 대기압까지 감압 (RCS 냉각률 50°F/hr 준수)
- 터빈구동보조급수펌프 정지
- 이차측 외부주입개시

### ▶ 사고후 3일

- 원자로용기상부 RCGVS 개방

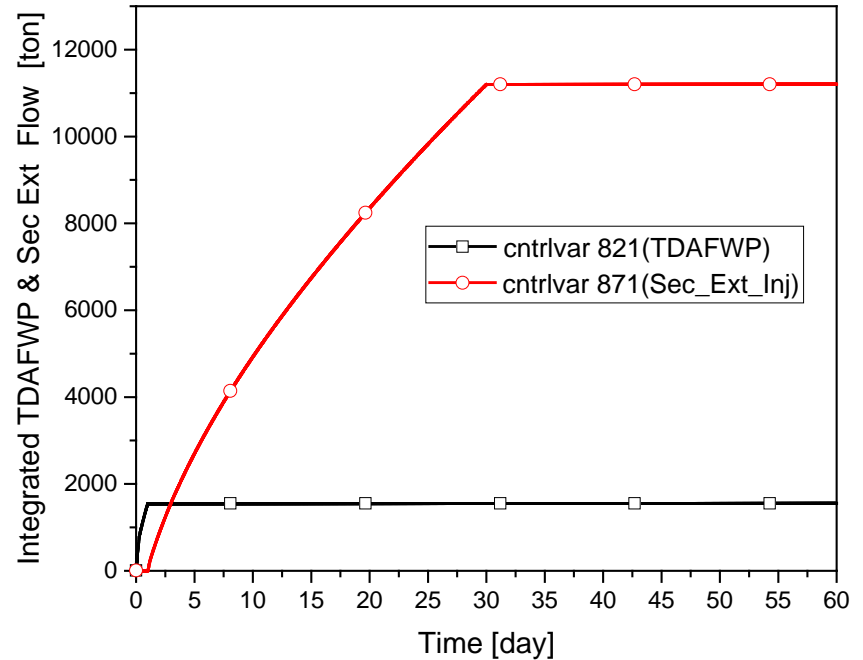
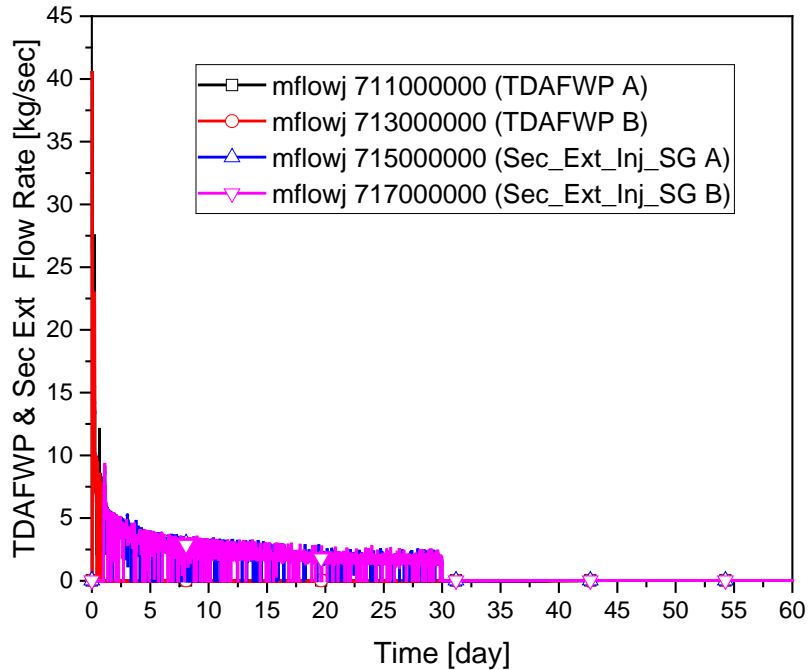
### ▶ 사고후 30일

- POSRV 2/4개 개방
- 2차측 외부주입 정지
- 1차측 외부주입 개시
- IRWST 물의 원자로건물 배수 (1차측 외부주입 유량 동일하게 가정)



# IV. LOUHS 분석 결과

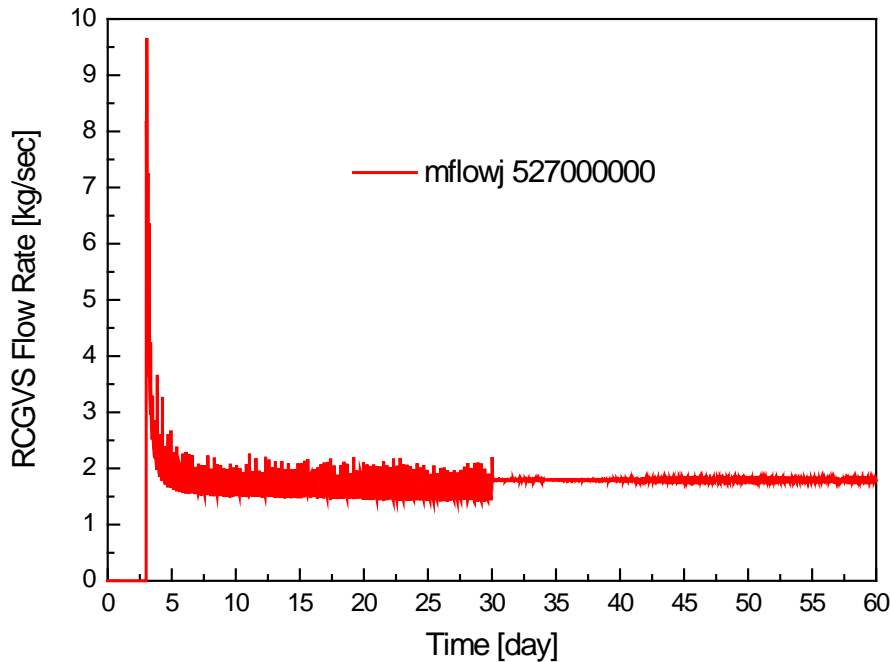
## 터빈구동보조급수펌프(1일) 및 이차측외부주입 유량(1일~30일)



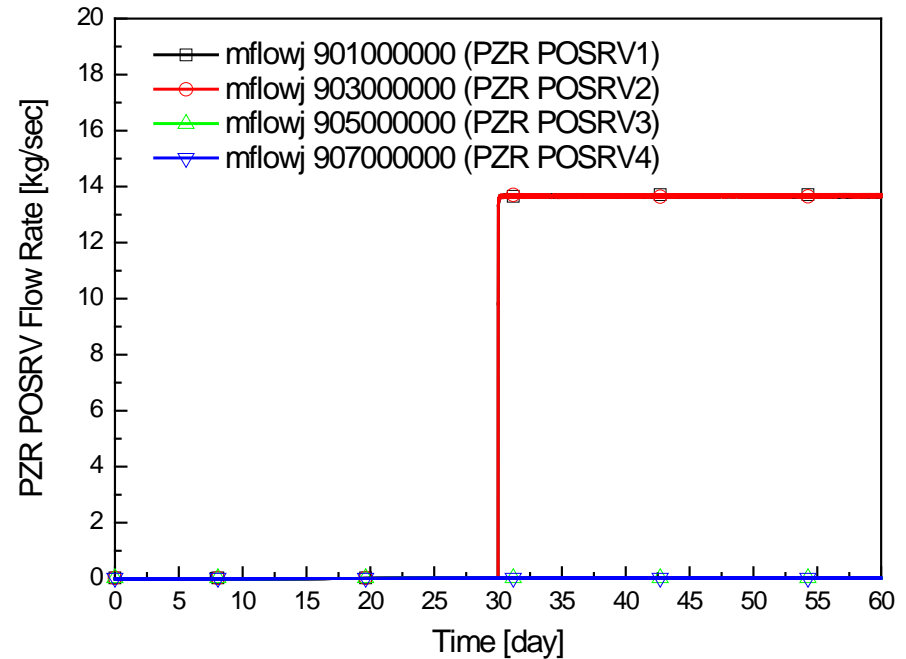
- 수위제어 로직 : 수위에 따른 유량 제어
- 펌프당 최대 유량 : 40.5kg/sec (TDAFWP)  
: 17.6 kg/sec (이차측 외부주입)

# IV. LOUHS 분석 결과

## RCGVS 방출량



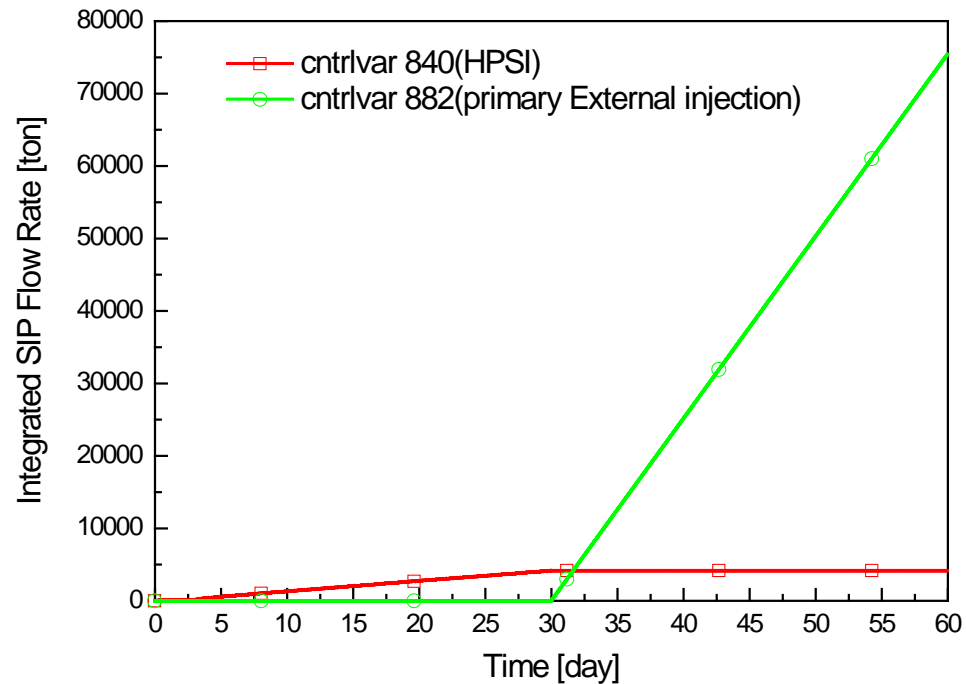
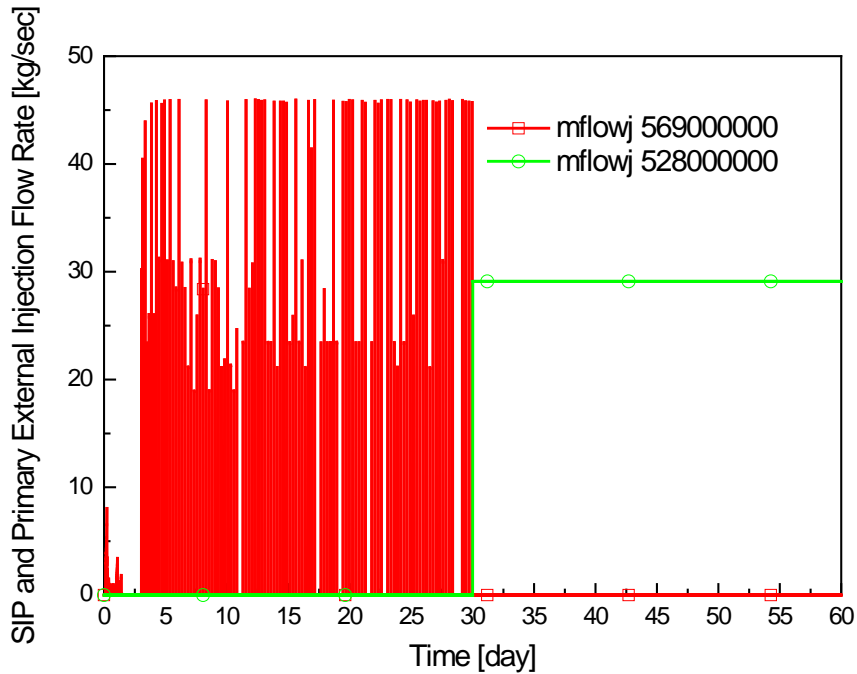
## 가압기 POSRV 방출량



- RCGVS 3일에 수동 개방
- 가압기 POSRV : 30일에 수동 개방

# IV. LOUHS 분석 결과

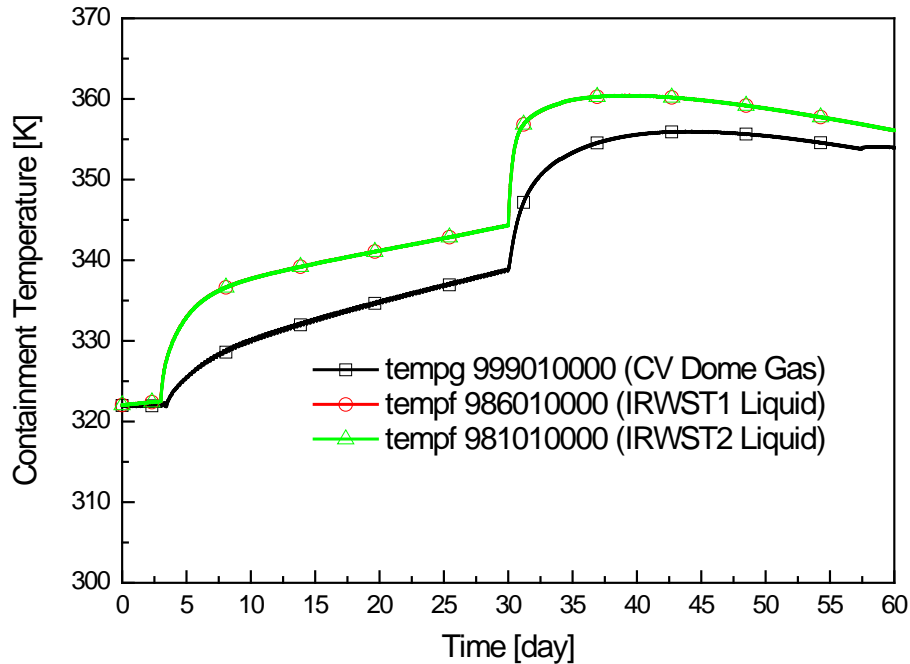
## 안전주입 유량 및 일차측 외부주입유량 (29.1 kg/sec)



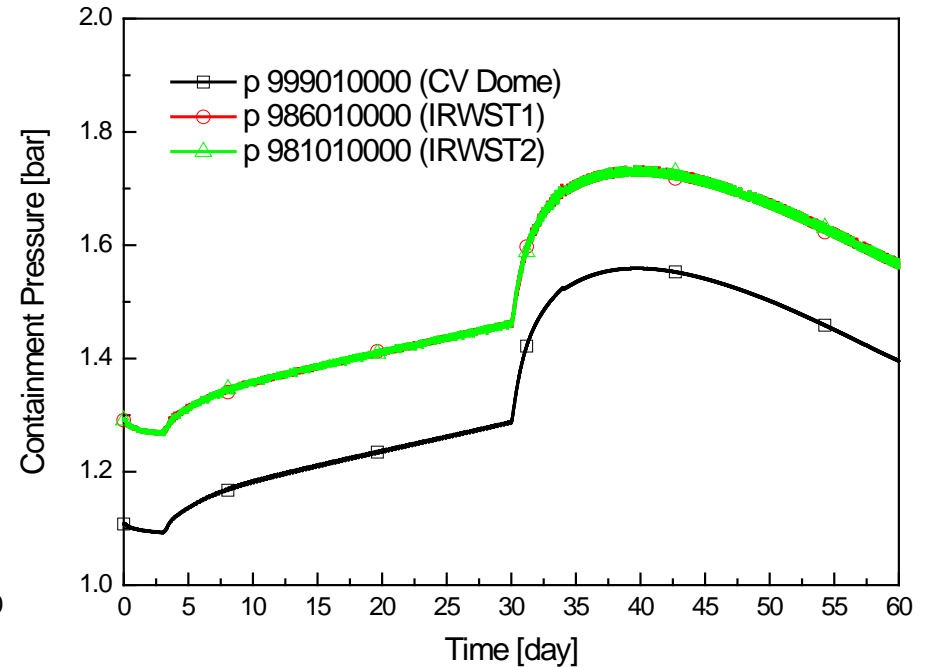
- 안전주입펌프는 초기 30시간 연속 동작
- 초반 3~6일 구간에는 총 15회(0.8시간 지속 동작)
- 후반부의 27~30일 구간에는 총 10회(0.6시간 지속 동작) 작동
- 30일 이후 가압기 만수위로 SIP 미작동
- 30일에 일차측 외부주입 개시(주입온도 30°C)

# IV. LOUHS 분석 결과

## IRWST 온도



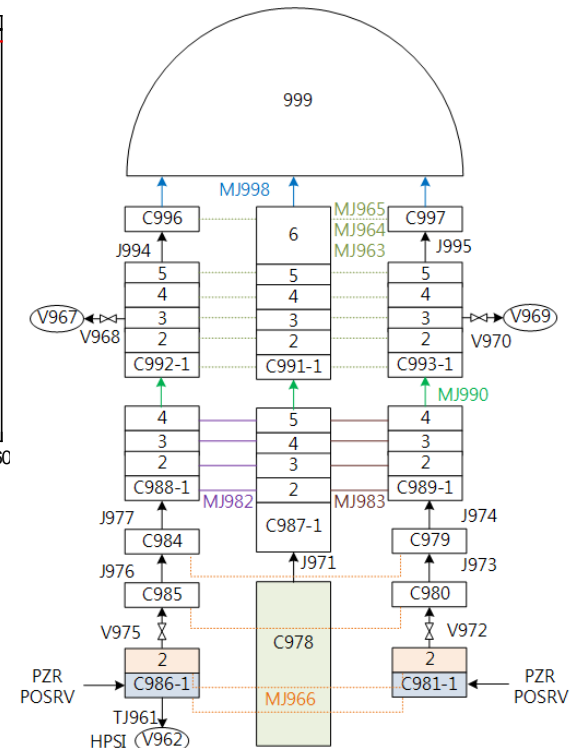
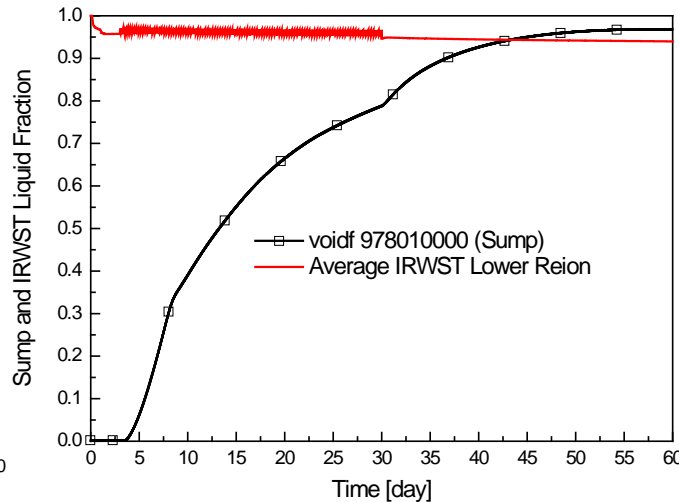
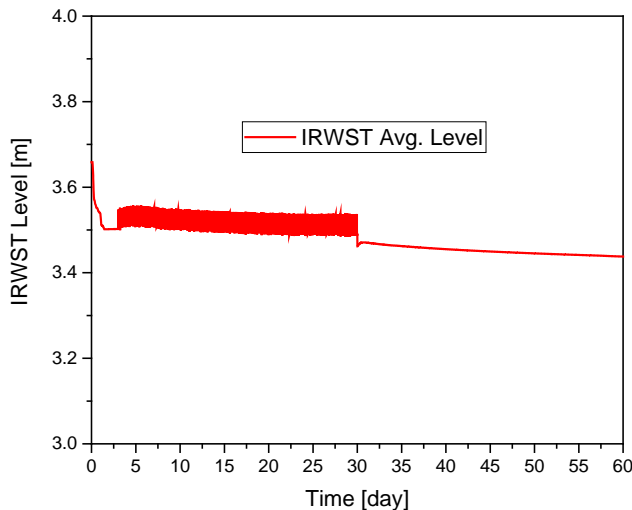
## IRWST 압력



- 30일에 PZR POSRV 개방시 IRWST 온도 급격히 증가
- 이후 일차측 외부주입으로 인한 온도 감소
- 압력 거동도 온도 거동과 유사함

# IV. LOUHS 분석 결과

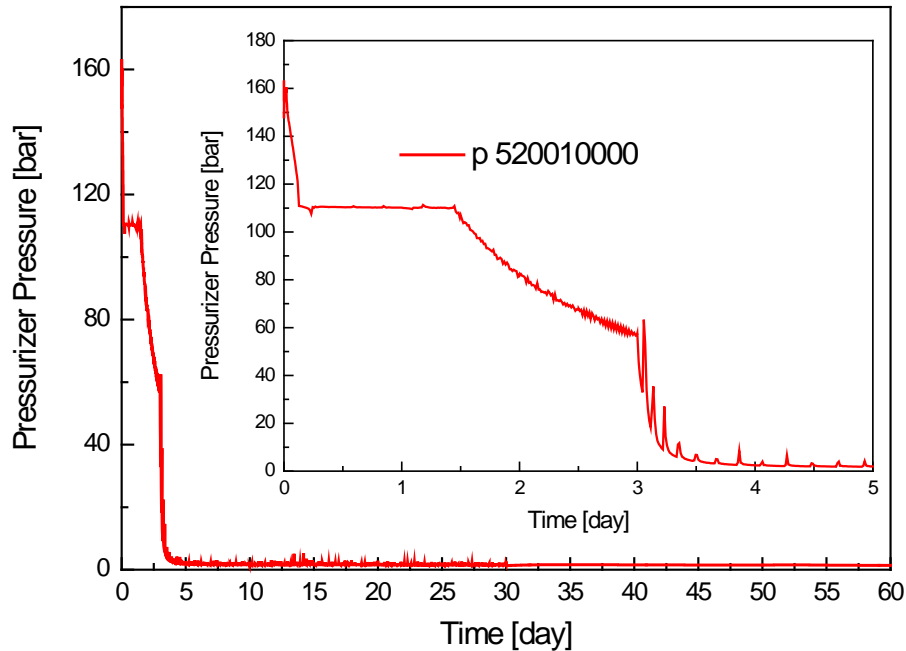
## IRWST 수위



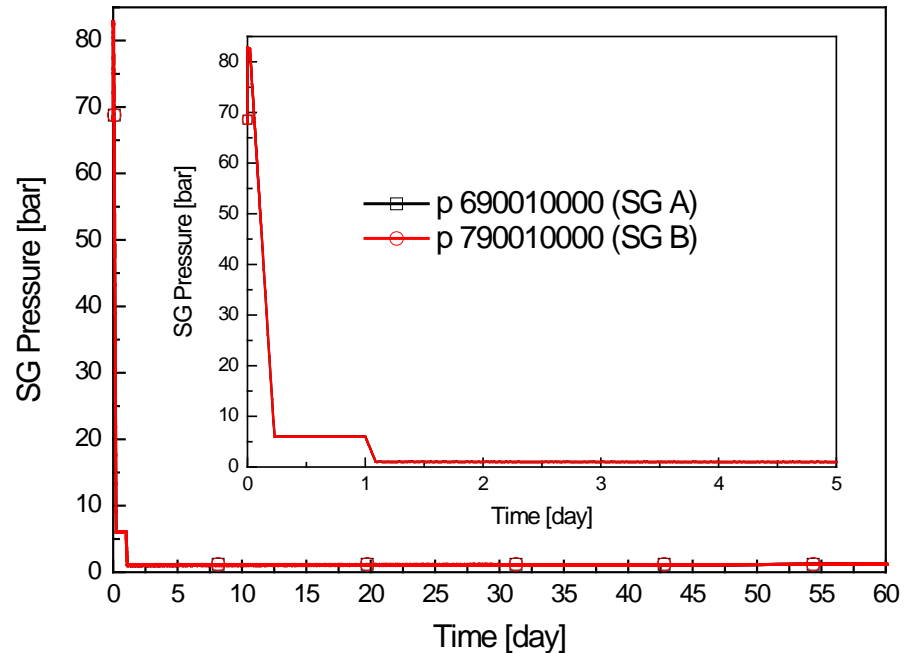
- 장기간 계산 동안 IRWST 물의 미소량이 Sump 노도로 이동하는 결과를 보임
- 실제 본 계산에서는 비등이 발생하지 않으므로 이는 비현실적인 결과
- 원자로건물에 특화되지 않은 RELAP 코드의 한계로 보임

# IV. LOUHS 분석 결과

## 가압기 압력



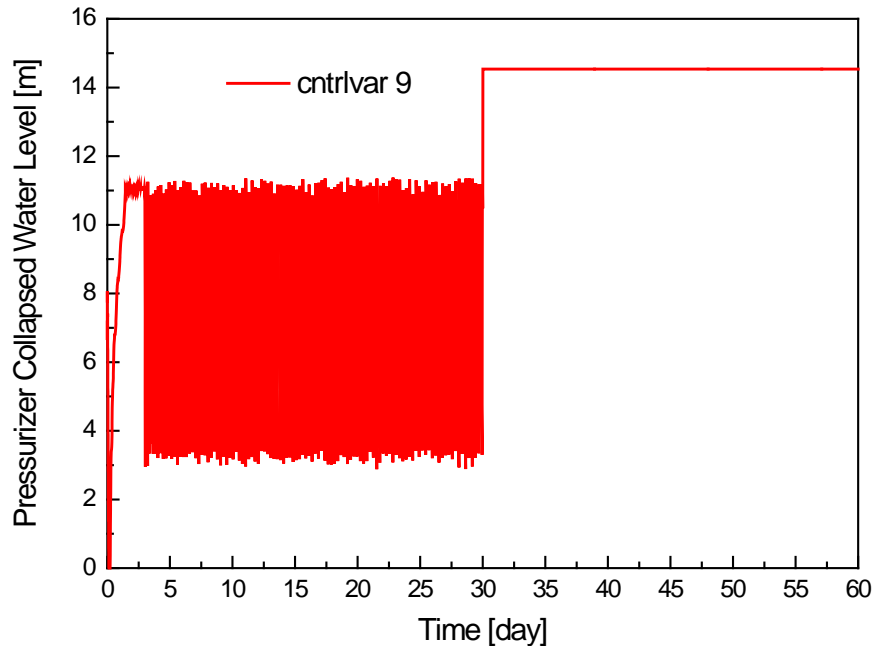
## 증기발생기 압력



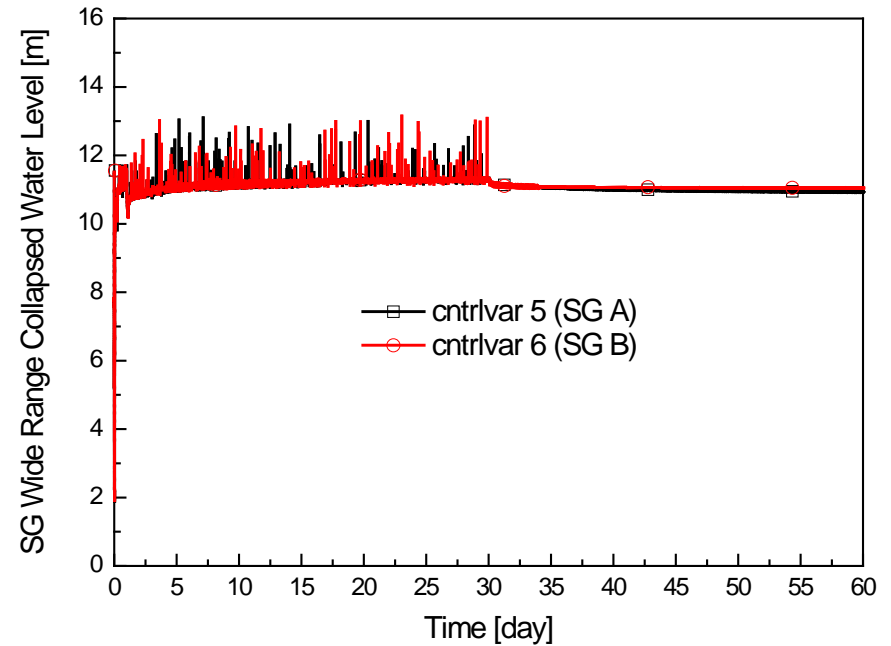
- ADV 개방 (30분) : RCS 냉각률  $50^{\circ}\text{F}/\text{hr}$  준수, 6bar까지 감압
- TDAFWP 동작 (30분~1일) / 이차측 외부주입 (1일 ~ 30일)
- RCGVS 개방 (3일~60일)
- 일차측 외부주입 (30일~60일)

# IV. LOUHS 분석 결과

## 가압기 수위



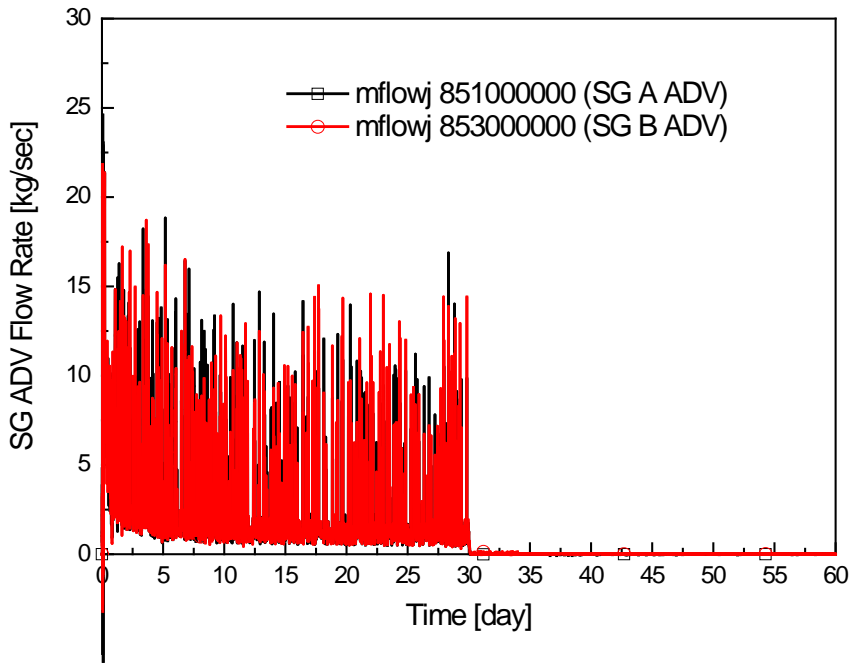
## 증기발생기 수위



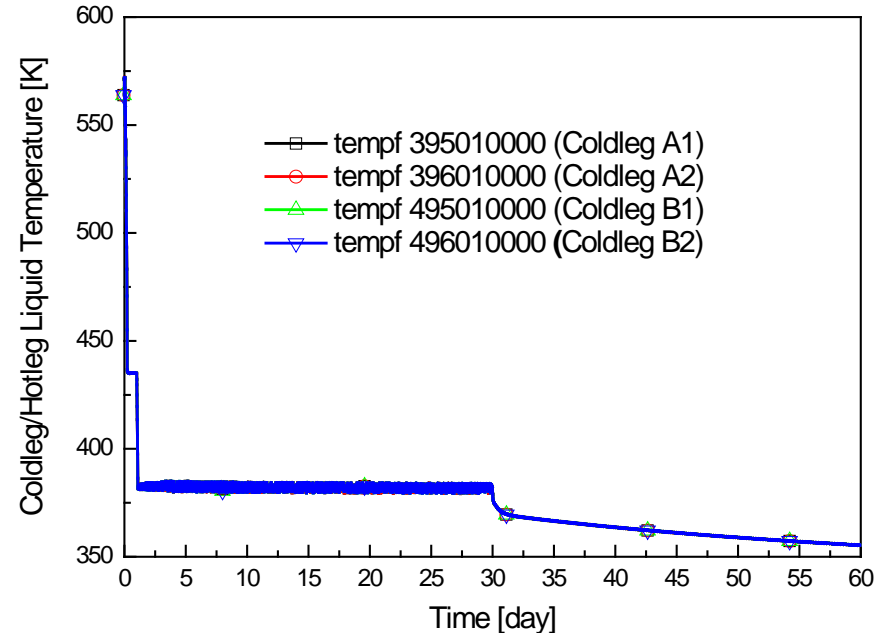
- 30일 이후 가압기 POSRV 개방시 가압기 만수위 유지
- 안전주입펌프 동작에 따른 가압기 수위 거동
- 30일 이후 이차측 외부주입 중지

# IV. LOUHS 분석 결과

## 증기발생기 ADV 방출유량



## 저온관 온도



- 30일까지 주입된 유량만큼 방출됨 / 30일 이후 ADV 통한 방출 없음
- 24시간 이내 고온정지(177°C 이하) 도달
- 30일 이전에 상온정지(99°C 이하) 미도달
- 30일 이후 일차측 외부주입을 통한 상온정지 도달 : IRWST 원자로건물 외부 배수



# V. 결론

## ■ 분석 결과 요약

- ▶ 최종 열제거원 상실시 2차측 냉각을 통해서 원자로 냉각재계통은 고온정지 상태에서 장기간 냉각이 가능함
- ▶ 터빈구동보조급수펌프 사용시는 1차측을 터빈구동보조급수펌프 동작을 보장하는 압력(6bar)에 해당되는 포화온도(159°C) 이하로는 냉각을 시킬 수 없음
- ▶ 2차측 외부주입의 경우 터빈구동보조급수펌프 사용시보다는 1차측을 더 냉각시킬 수 있지만(저온관 온도를 최대 107°C까지는 냉각이 가능) 상온정지(99°C)에는 도달할 수 없고 고온정지 상태에서 머무르게 됨
- ▶ 상온정지까지 도달하기 위해서는 반드시 1차측 외부주입이 동반해야 하며, 이 경우에는 1차측 물을 원자로건물 외부로 배수해야 함
  - 배수시 발생하는 방사능 영향평가 및 사회적 수용성 고려

## ■ RELAP5 코드의 장기노심냉각 평가 능력

- ▶ 일부 원자로건물 거동에 있어서 비현실적인 거동 보임
- ▶ 원자로건물 열수력 거동 이외에는 사업자의 MAAP5 분석결과와 유사함
- ▶ 전반적인 열수력 거동은 합리적으로 평가함

**THANK YOU**





[www.fnctech.com](http://www.fnctech.com)

**본 사 : 경기도 용인시 기흥구 흥덕1로 13, 32층(영덕동, 흥덕아이티밸리 타워동) 우)16954  
TEL. 031-8065-5114 / FAX. 031-8065-5111**

**연구소 : [본관] 경기도 용인시 기흥구 탑실로 46 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084  
TEL. 031-8005-6010 / FAX. 031-8005-6014  
[신관] 경기도 용인시 기흥구 탑실로 44 (주)미래와도전 부설 미래에너지기술연구소 우)17084  
TEL. 031-8005-5939 / FAX. 031-8005-7377**

**경주 지사 : 경북 경주시 화랑로 90, 4층 우)38154  
TEL. 054-749-6085 / FAX. 054-749-6089**