

Transient Analysis of Station Blackout While Shutdown for OPR1000 Nuclear Power Plant

- 일시: October 27-28, 2016
- 장소: Gyeongju, Korea



(주)미래와도전
FNC Technology Co., Ltd.

황수현, 김민화
shhwang@fnctech.com



한국수력원자력주
KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD
KHNP 중앙연구원

윤덕주, 이승찬

CONTENTS

I

연구수행 배경

II

정지운전 상태 정의

III

입력 모델

IV

정상상태 조건

V

사고분석 목록

VI

사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

VII

사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

VIII

결론 및 활용 방안

I. 연구수행 배경

■ 후쿠시마 사고 [2011.03.11]

- ▶ 장기 교류전원상실사고시 발전소 취약점 존재
- ▶ FLEX (Diverse and Flexible Coping Strategies) 설비 활용 [NEI 12-06]
- ▶ 국내 원전 스트레스테스트 수행 (월성1호기, 고리1호기)
 - 비상대체설비운영지침서 활용 사고 완화 전략 수립

■ 현행 비상운전절차서는 정상운전(운전모드 1~4) 중에서만 적용가능

- ▶ 정지운전시(운전모드 5~6) 적용 가능하도록 개선 필요
 - 고리 1호기 모든 교류전원 상실시('12.2.9) 적용가능 절차서 부재
 - 감사원 개선요구(전략과제 감사단 1과 - 2714, '12.12.05)
 - 유럽연합 내구성진단 상호점검 최종보고서('12.10) 개선대책
 - 모든 운전모드에서 비상운전 절차서 적용 요구

■ 국내 가동원전에 대하여 모든 운전모드에서 장기 교류전원 상실에 대응할 수 있는 비상대응운전지침서 개발 필요성 대두

I. 연구수행 배경

■ 정지운전모드 비상대응운전지침서 개발

- ▶ Westinghouse Owners Group(WOG), ARG-4, LOSS OF ALL AC POWER WHILE ON SHUTDOWN COOLING, Rev.3, 2014.12
- ▶ Westinghouse, Abnormal Procedure Guideline A1 STATION BLACKOUT WHILE SHUTDOWN GUIDELINE, Revision 0, 2014.12

■ SBO 사고 분석 사례

- ▶ 전출력 상태에서 장기 교류전원상실 사고 연구 수행 [Reactor Coolant System Response to the Extended Loss of AC Power Event for Westinghouse, Combustion Engineering and Babcock & Wilcox NSSS Designs, WCAP-17601-P Revision 0, August 2012]
- ▶ 정지운전 모드에서 장기 교류전원상실 사고 연구 수행 [Supplemental Information for Operator Response to Extended Loss of AC Power in Modes 4, 5 and 6, PWROG-14073-P, Revision 0, March 2015]

■ 국내 원전에 대하여 PWROG 방법론 적용하여 정지운전 SBO 수행

II. 정지운전 상태 정의

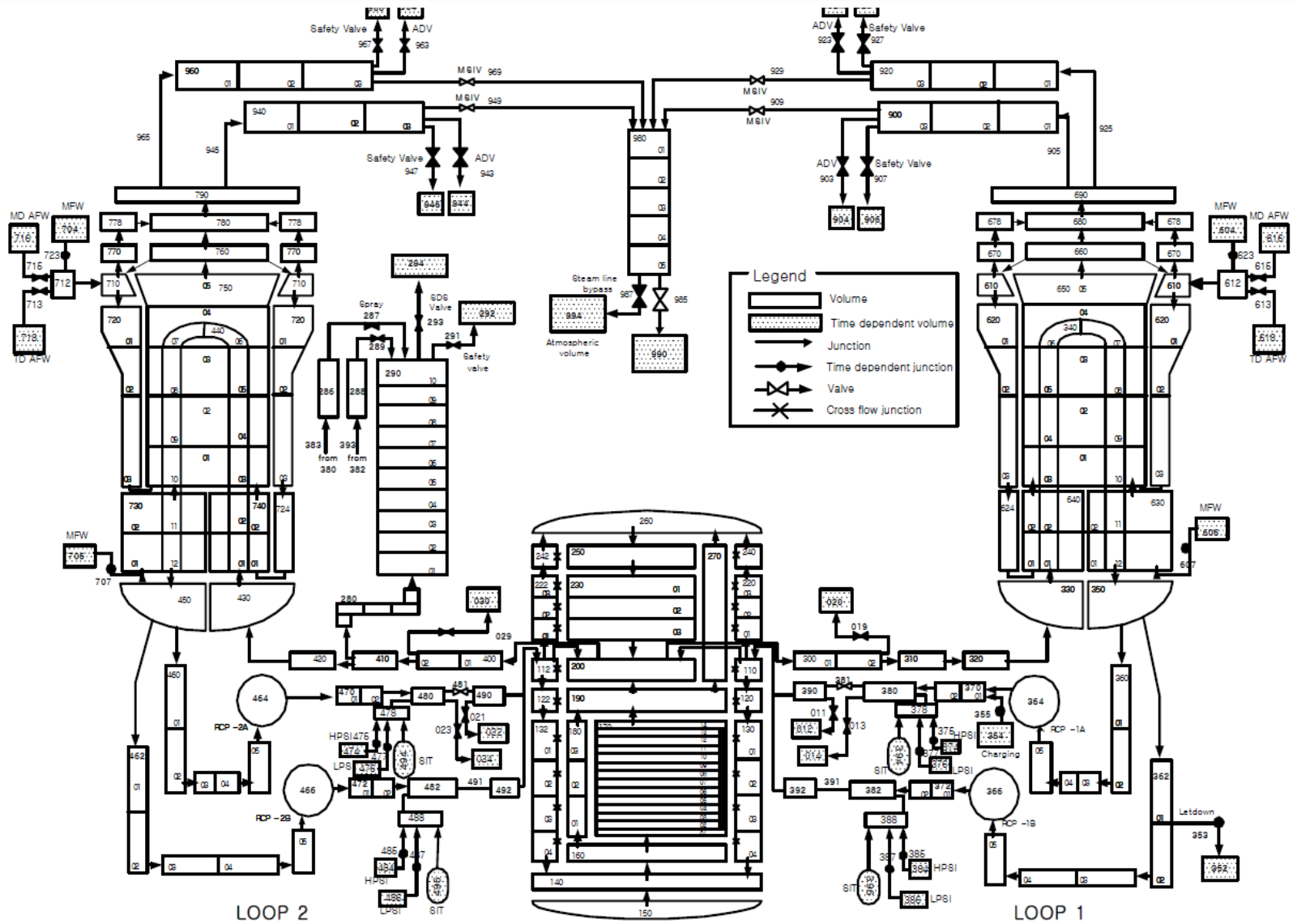
■ 정지운전상태별 운전전략

- ▶ 정지운전상태 A : RCS 건전, 정지냉각계통 운전중
 - SG를 사용한 자연순환 냉각
- ▶ 정지운전상태 B : RCS 배수 운전중
 - SG 사용 역류냉각(RCS 격리), Feed & Bleed(정지운전상태 C로 전환)
- ▶ 정지운전상태 C : RCS 부분충수 운전중
 - Feed & Bleed, SG 최대한 가능토록 오래 유지(SG 역류냉각-보조수단)
- ▶ 정지운전상태 D : RCS 수위-Vessel 플랜지 미만(Rx. Head 제거)
 - Feed & Bleed
- ▶ 정지운전상태 E : 재장전수조 충수 (Rx. Head 제거)
 - Feed & Bleed, 재장전수조를 통한 냉각

■ 사고해석

- ▶ 증기발생기를 사용하여 냉각하는 정지운전 상태 A와 일방관류냉각을 사용하여 냉각하는 정지운전 상태 C에 한해서 사고분석을 수행
- ▶ 정지운전 상태 B는 정지운전 상태 A 및 C 중 하나 혹은 두 가지의 열제거원이 가능하며, 노심 노출 및 손상 시간은 정지운전 상태 A에 제한됨
- ▶ 정지운전 상태 D 및 E는 정지운전 상태 C와 동일한 열제거원이 주어진나, 노심 노출 및 손상 시간은 정지운전 상태 C에 제한됨

III. 입력 모델



IV. 정상상태 조건

■ 정지운전 상태 A

▶ 원자로 정지 후 22.6시간(운전모드 4)

- 노심 붕괴열 : 18.033 MWt

▶ 원자로냉각재계통 상태

- 원자로냉각재계통 수위 : 정상운전 수위 (가압기 수위 48.9%)
- 원자로냉각재계통 압력 : 2.75 MPa
- 저온관 온도 : 145°C
- LTOP 밸브들은 자동운전모드
- 원자로냉각재펌프 유로당 1대 운전중 (Loop-1A, Loop-2A)
- 정지냉각계통 1계열 운전중

▶ 증기발생기 이차측 상태

- 압력 : 0.463 MPa
- 수위 : 습식보관 수위 (협역수위 44%)
- 주급수 및 보조급수 차단상태
- 주증기격리밸브(MSIV)와 대기방출밸브(ADV)는 차단상태

IV. 정상상태 조건

■ 정지운전 상태 C

▶ 원자로 정지 후 79.5시간(운전모드 5)

▶ 노심 붕괴열 : 12.183 MWt

▶ 원자로냉각재계통 상태

- 원자로냉각재계통 수위 : 고온관 중심 수위
- 원자로냉각재계통 압력 : 0.1013 MPa (대기압)
- 저온관 온도 : 40°C
- 가압기 Manway 개방
- 루프 1과 2의 증기발생기 입구측 Manway 개방
- 원자로냉각재 기체배기계통(RCGVS) 개방
- LTOP 밸브들은 자동운전모드
- 원자로냉각재펌프 정지상태
- 정지냉각계통 1계열 운전중

▶ 증기발생기 이차측 상태

- 압력 : 0.136 MPa
- 수위 : 배수상태
- 주급수 및 보조급수 차단상태
- 주증기격리밸브(MSIV)와 대기방출밸브(ADV)는 차단상태

V. 사고분석 목록

■ 사고분석 목록

Case	사건전개 및 가정사항
A1	초기조건 : 정지운전 상태 A Time=0에서 SBO 발생 운전원 조치 없음
A2	초기조건 : 정지운전 상태 A Time=0에서 SBO 발생 운전원에 의한 ADV 개방 (4,000초)
A3	초기조건 : 정지운전 상태 A Time=0에서 SBO 발생 운전원에 의한 ADV 개방 (4,000초) + 운전원에 의한 이차측 외부주입 (6시간)
C1	초기조건 : 정지운전 상태 C Time=0에서 SBO 발생 운전원 조치 없음
C2	초기조건 : 정지운전 상태 C Time=0에서 SBO 발생 운전원에 의한 RWST 중력급수 (4,000초)

■ 외부주입

- ▶ 이동형 펌프차 토출압 : 15kg/cm^2
- ▶ 일차측 외부주입 : 21.71kg/sec
- ▶ 이차측 외부주입 : 12.83kg/sec - 증기발생기당

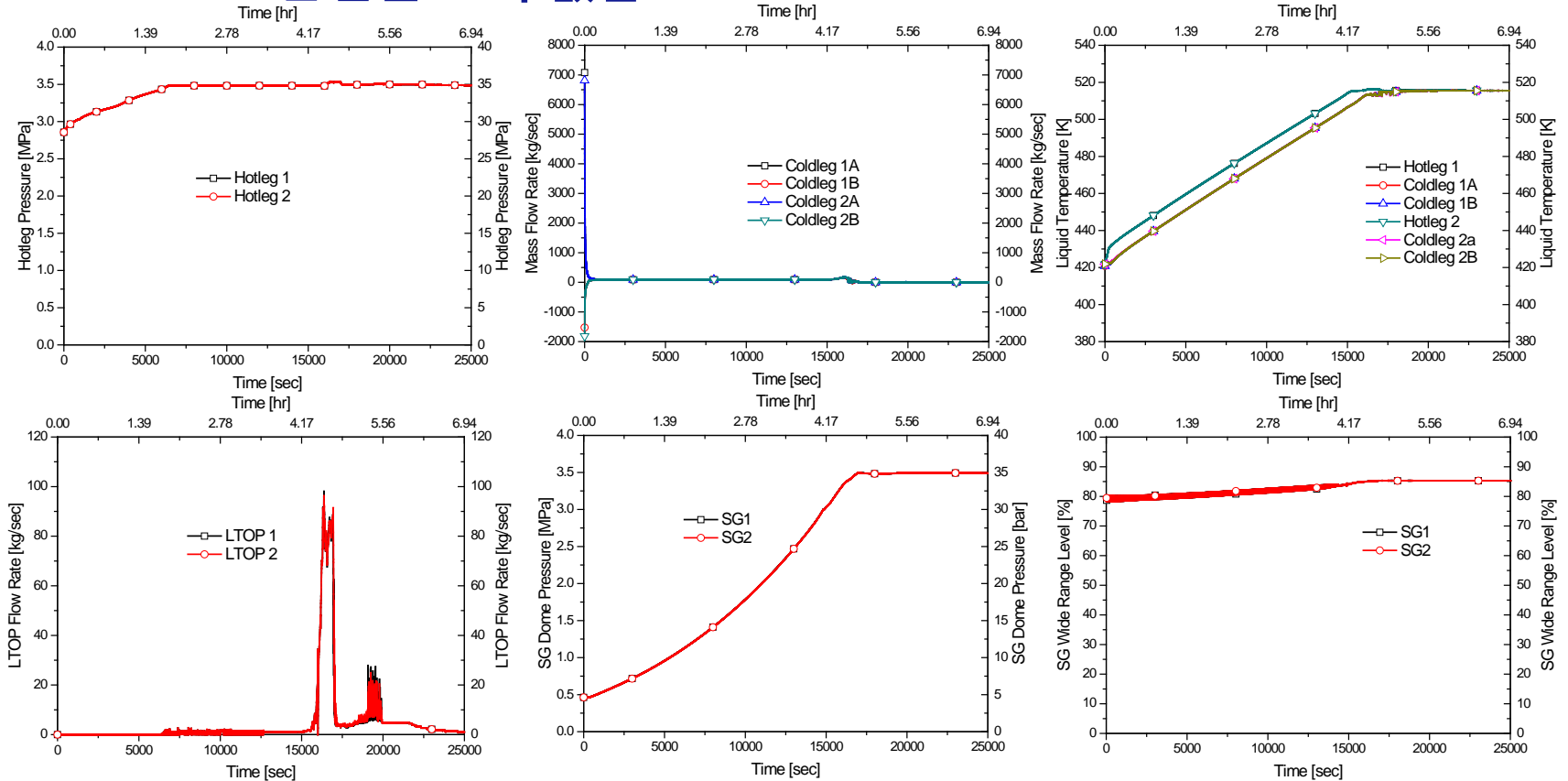
VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

■ 정지운전 상태 A 가정사항

- ▶ 정지운전 상태 A에서 SBO가 발생함에 따라 정상상태에서 운전중이던 다음의 계통 및 기기는 작동이 불가능하게 된다.
 - 원자로냉각재펌프
 - 정지냉각계통
 - 보조급수펌프(전동기구동)
 - 충수 및 배수 계통
 - 가압기 스프레이
- ▶ 정지운전 상태 A에서 SBO 발생시 가용한 계통은 다음과 같다.
 - 저온과압보호(LTOP)
 - 증기발생기 대기방출밸브(SG ADV)
 - 이차측 외부주입
- ▶ 이 외의 피동계통인 주증기안전밸브(MSSV), 가압기안전밸브(PSV)는 실제로 가용하다고 하더라도, 사고분석에는 사용되지 않았음.
- ▶ 터빈구동보조급수펌프는 이차측의 압력이 낮아서 가용하지 않음.
- ▶ ADV 개방시 대기압까지 5,700초에 걸쳐서 서서히 감압시키는데, 운영기술지침서 상의 최대 냉각률 제한치인 55.6°C/hr(100°F/hr) 이하인 44°C/hr(72°F/hr)로서 냉각함.
- ▶ RCP Seal LOCA 미고려

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

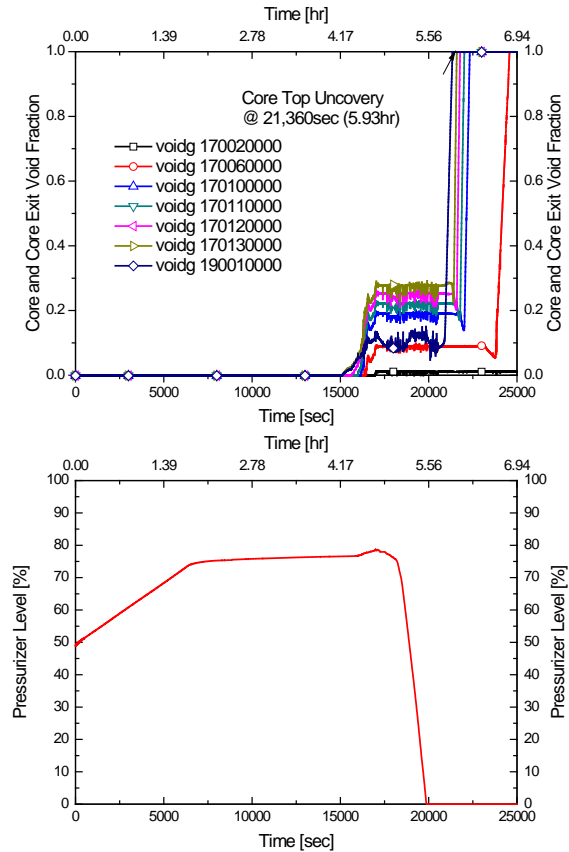
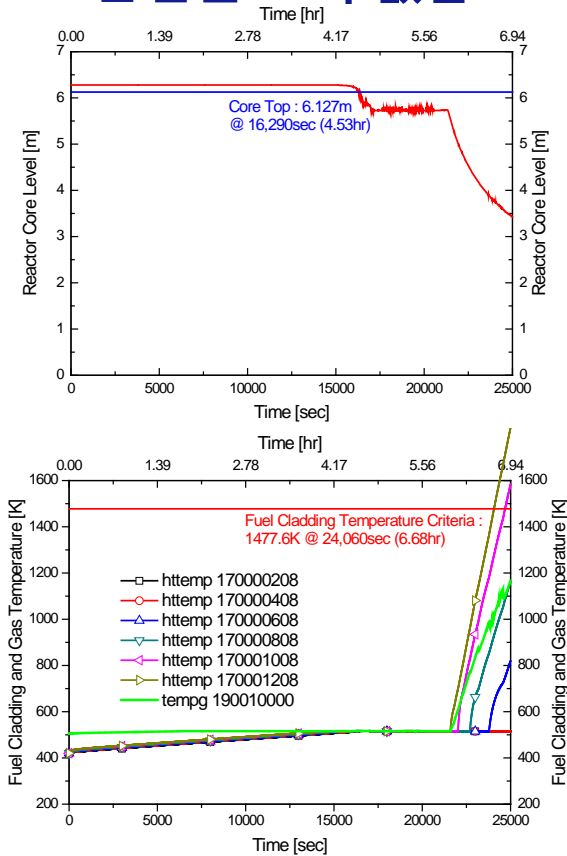
■ Case-A1 : 운전원 조치 없음



- ▶ 15,110초(4.20시간) 이전에는 단상자연순환이, 그 이후에는 이상자연순환이 형성되다가, 16,290초(4.53시간) 경에 유동이 정체
- ▶ LTOP 밸브 방출유량은 6,400초(1.78시간) 경부터 발생하기 시작하며, 16,290초(4.53시간)에 첨두값을 보임
- ▶ 사고분석 기간 동안 LTOP 밸브를 통해서 총 232 톤의 냉각재가 방출

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

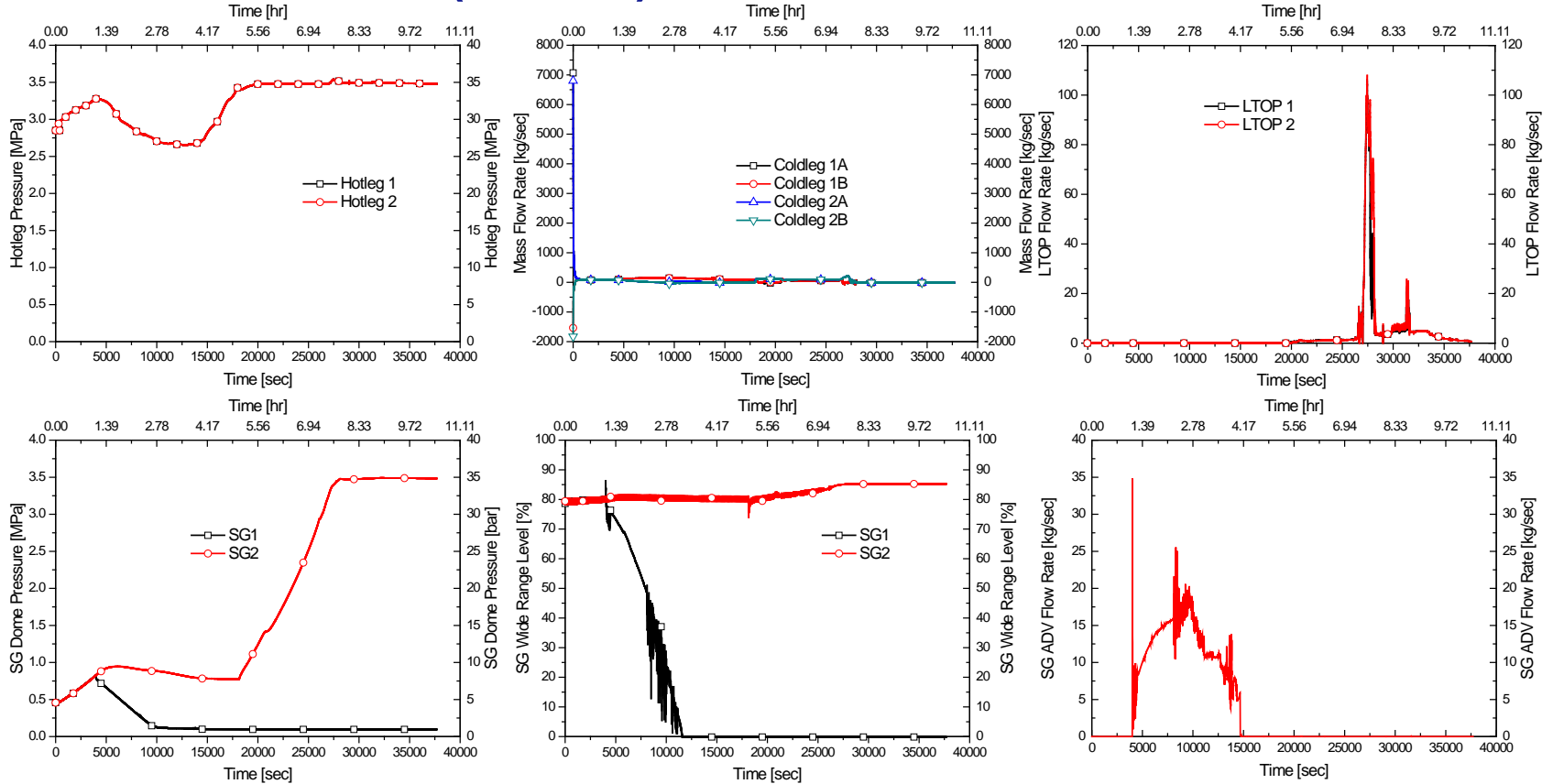
■ Case-A1 : 운전원 조치 없음



- ▶ 15,110초(4.20시간) : 원자로 노심에서 기포가 발생
- ▶ 16,290초(4.53시간) : 노심 상부 노출 (수축 수위 기준)
- ▶ 21,360초(5.93시간) : 노심 상부 완전 노출
- ▶ 24,060초(6.68시간) : 노심손상

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

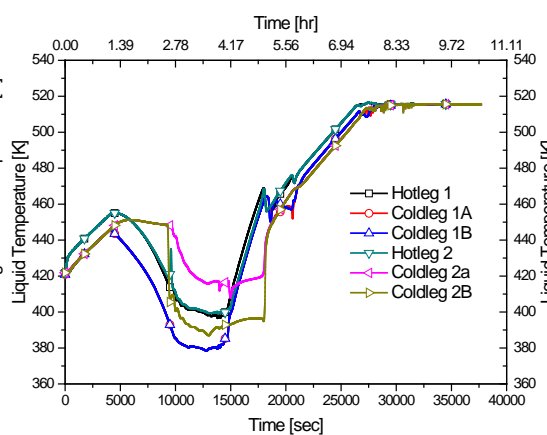
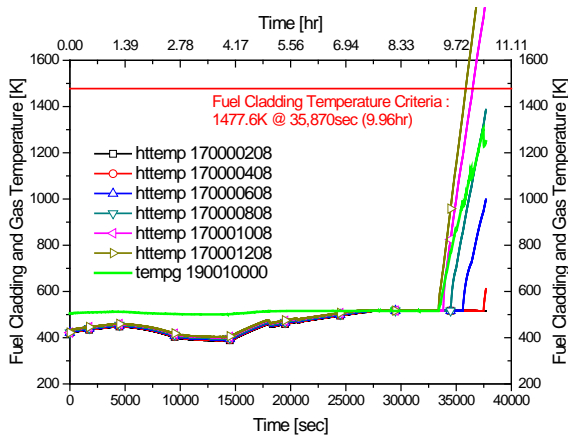
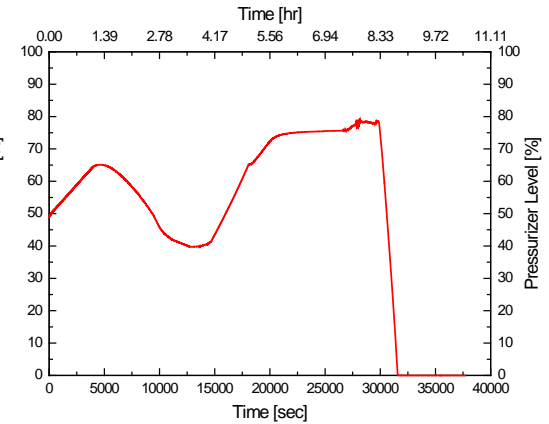
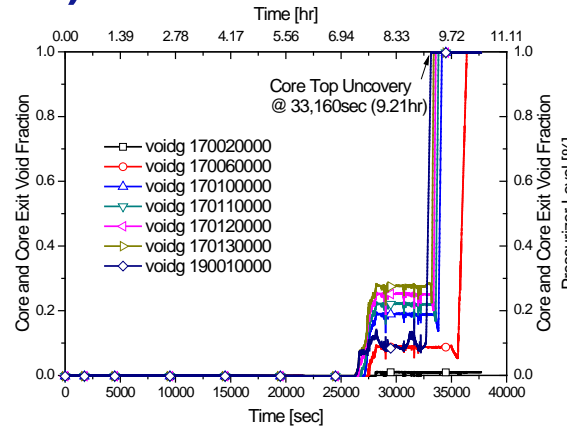
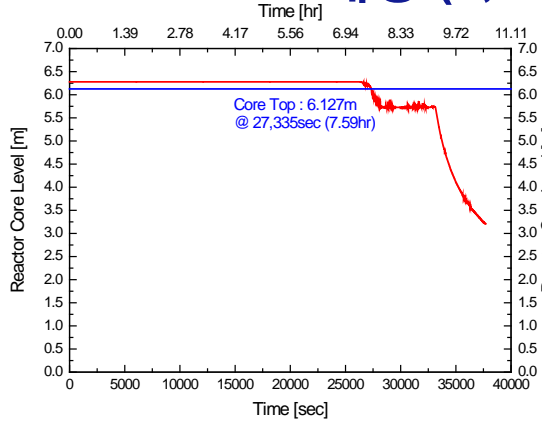
■ Case-A2 : ADV 개방 (4,000초)



- ▶ 26,300초(7.31시간) 이전에는 단상자연순환이, 그 이후에는 이상자연순환이 형성되다가, 27,335초(7.59시간) 경에 유동이 정체
- ▶ 사고분석 기간 동안 LTOP 밸브를 통해서 총 230 톤의 냉각재가 방출

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

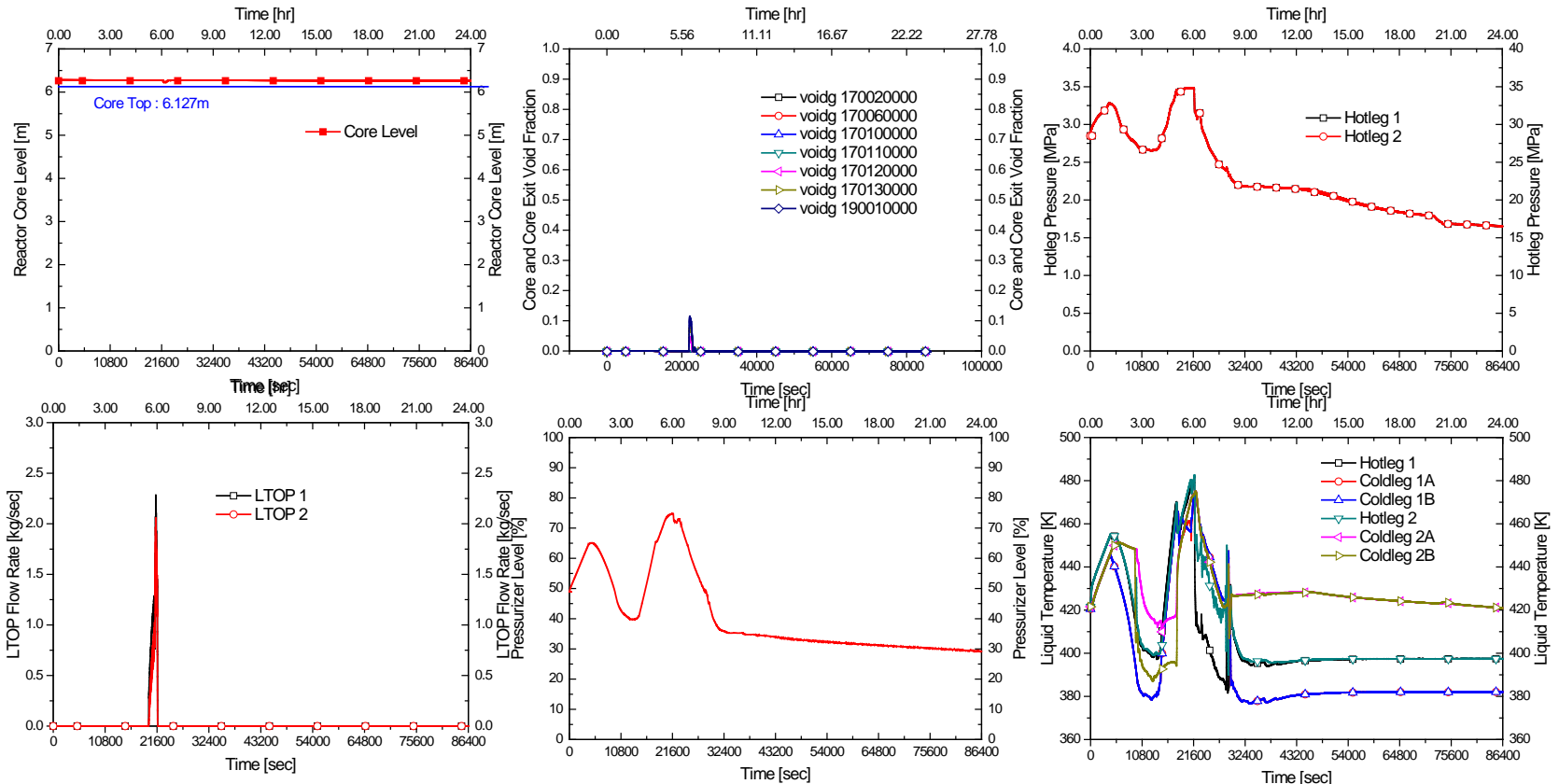
■ Case-A2 : ADV 개방 (4,000초)



- ▶ 26,300초(7.31시간) : 원자로 노심에서 기포가 발생
- ▶ 27,335초(7.59시간) : 노심 상부 노출 (수축 수위 기준)
- ▶ 33,160초(9.21시간) : 노심 상부 완전 노출
- ▶ 35,870초(9.96시간) : 노심손상

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

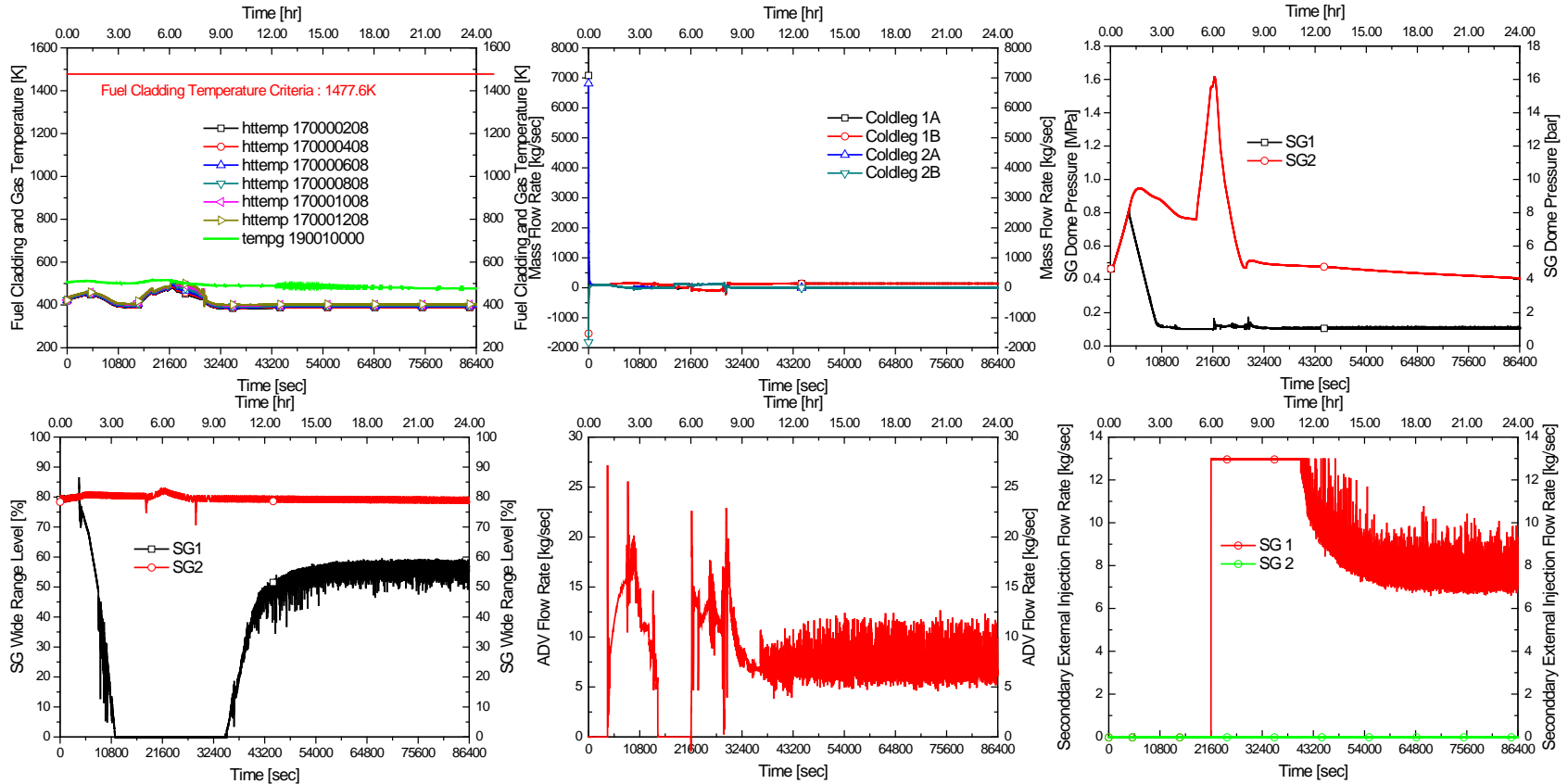
■ Case-A3 : ADV 개방 (4,000초) + 이차측 외부주입(6시간)



- ▶ 21,900초(6.08시간)에 노심 수축 수위가 일시적으로 조금 감소했다가 다시 회복하는 것을 볼 수 있는데 이는 6시간에 이차측 외부주입에 의한 냉각으로 인하여 일차측 압력이 감소되어 순간적으로 기포가 생성되었다가 다시 없어지는 것에 기인
- ▶ LTOP 밸브는 19,810초(5.50시간) 경에 개방되어 21,740초(6.04시간)에 닫혀서 다시는 열리지 않음. 사고분석 기간 동안 LTOP 밸브 방출 냉각재는 3.14톤에 불과

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

■ Case-A3 : ADV 개방 (4,000초) + 이차측 외부주입(6시간)



- ▶ ADV가 개방되는 유로는 자연순환이 활발히 발생하게 되나, 그렇지 않은 유로는 자연순환이 28,200초(7.83시간) 이내의 일부 구간에서 간헐적으로 생성되는 것을 제외하고는 거의 형성되지 않음.
- ▶ 사고분석 기간 동안 주입되는 이차측 외부주입량은 총 622톤으로, 재장전수탱크 용량인 573,744 gal (2,171,8 m³)의 대략 29%에 해당
- ▶ 수계산에 의하여 요구되는 외부주입유량 = 7.3 kg/sec

VI. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 A

■ 사고 시나리오 분석 결과 요약

사건	Case-A1 (운전원조치 없음)	Case-A2 (ADV 개방)	Case-A3 (ADV 개방, 이차측 외부주입)
SBO 발생	0초	0초	0초
ADV 개방	-	4,000초(1.10시간)	4,000초(1.10시간)
증기발생기 완전 고갈	-	14,680초(4.08시간)	-
LTOP 밸브 개방	6,400초(1.78시간)	19,810초(5.50시간)	19,810초(5.50시간)
이차측 외부주입	-	-	21,600초(6.00시간)
노심 비등 발생	15,110초(4.20시간)	26,300초(7.31시간)	21,900초(6.08시간)
노심 노출 [노심 수축 수위 기준]	16,290초(4.53시간)	27,335초(7.59시간)	-
노심 노출 [상부 노심 완전 노출 기준]	21,360초(5.93시간)	33,160초(9.21시간)	-
노심손상 (핵연료피복재온도 > 1,477K)	24,060초(6.68시간)	35,870초(9.96시간)	-
계산종료 시간	25,883초(7.19시간)	37,696초(10.47시간)	86,400초(24.00시간)

- ▶ ADV 개방시 노심 노출 및 손상시간 3시간 정도 지연
- ▶ 운전원이 ADV를 수동으로 개방하고, 노심에서 비등이 발생하기 전인 6시간에 이차측에 의한 외부주입을 수행할 경우, 노심 비등은 일시적으로 잠시 발생하고 노심의 건전성도 잘 유지됨

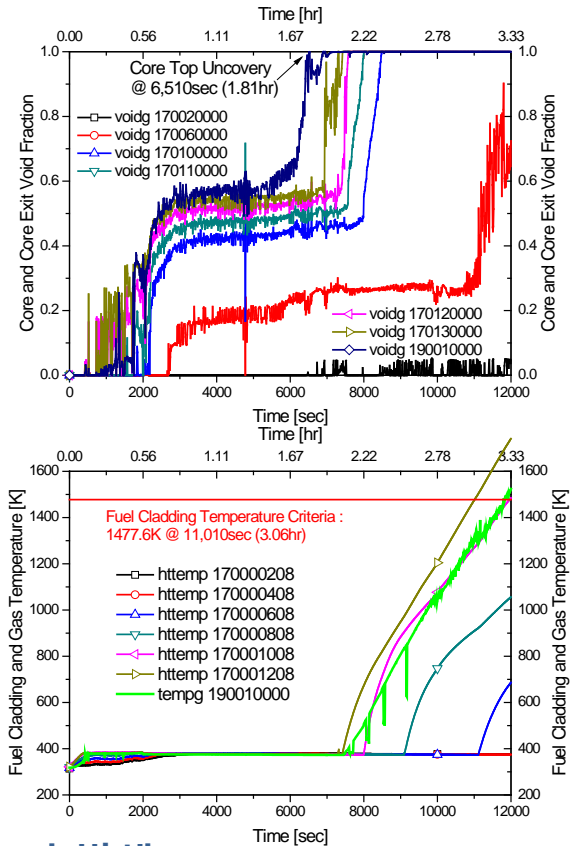
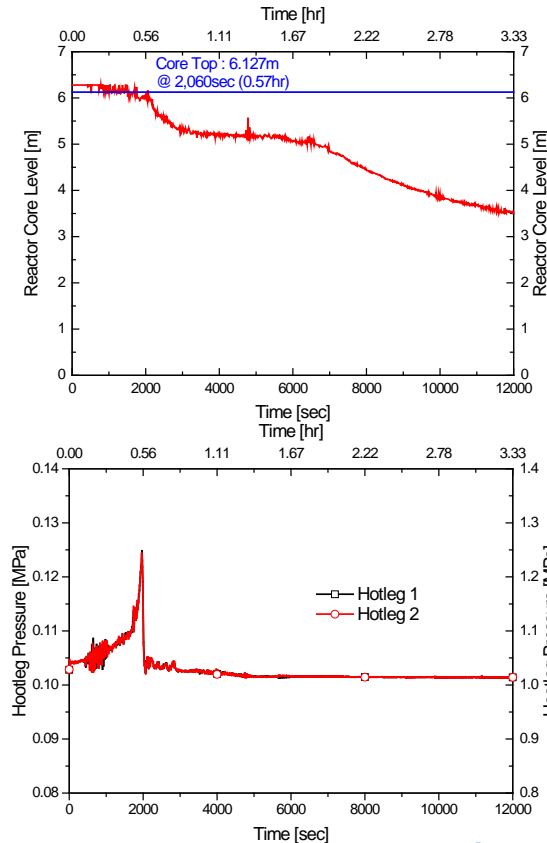
Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

■ 정지운전 상태 C 가정사항

- ▶ 정지운전 상태 C에서 SBO 발생시 가용한 계통은 다음과 같다.
 - 저온과압보호(LTOP)
 - RWST 중력급수 - 운전원 수동 구동
 - 일차측 외부주입 - 운전원 수동 구동
- ▶ 이 외의 피동계통인 주증기안전밸브(MSSV), 가압기안전밸브(PSV)는 실제로 가용하다고 하더라도, 사고분석에는 사용되지 않았음.
- ▶ 증기발생기는 배수되어 가용하지 않음.
- ▶ 운전원에 의한 RWST 중력급수는 SBO 발생 후 4,000초에 가용하다고 가정하였음. 4,000초는 노심 노출 및 손상을 방지하기 위한 시간임.

Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

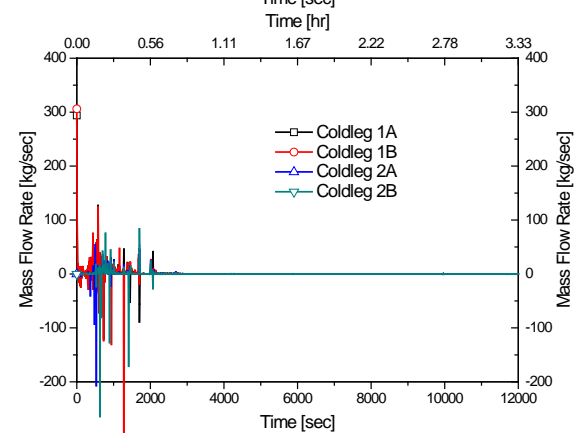
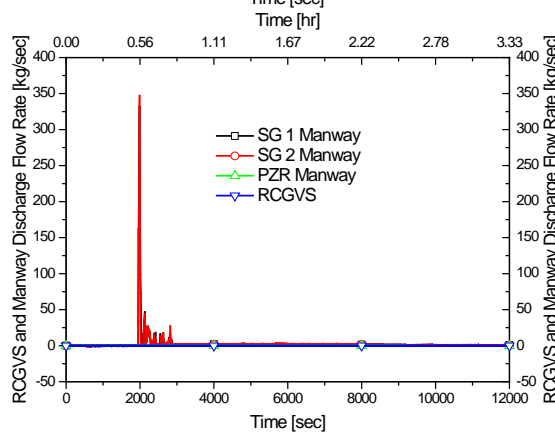
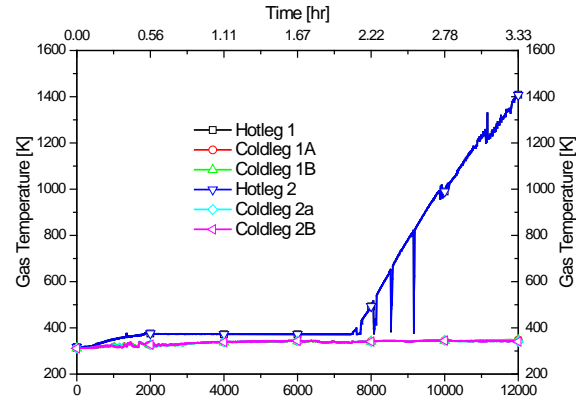
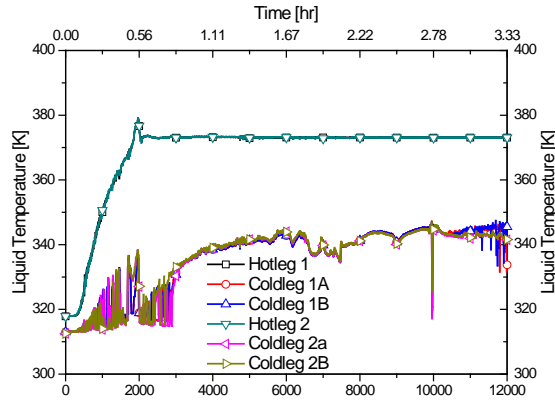
■ Case-C1 : 운전원 조치 없음



- ▶ 420초(0.12시간) : 원자로 노심에서 기포가 발생
- ▶ 2,060초(0.57시간) : 노심 상부 노출 (수축 수위 기준)
- ▶ 6,510초(1.81시간) : 노심 상부 완전 노출
- ▶ 11,010초(3.06시간) : 노심손상

Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

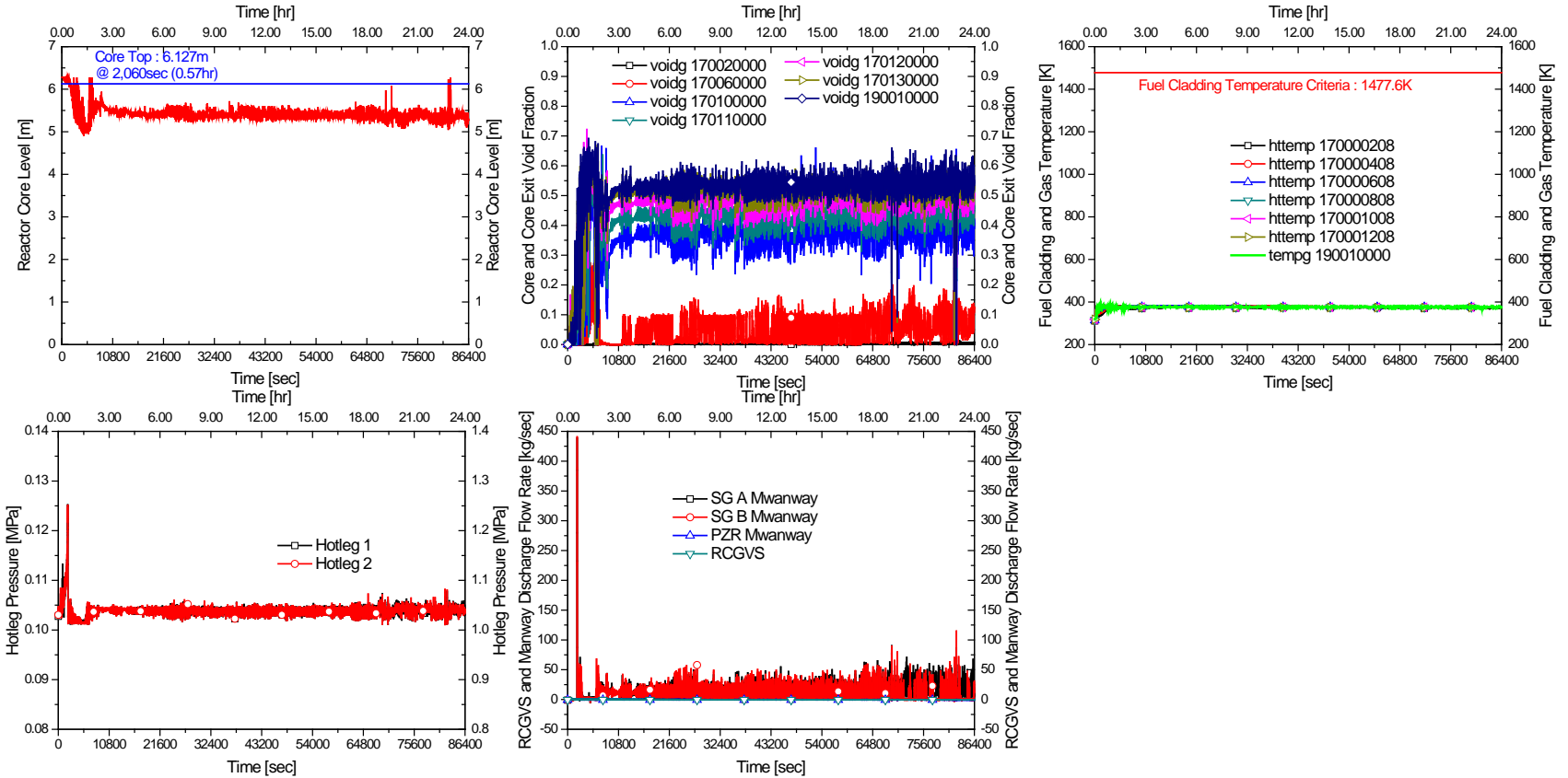
■ Case-C1 : 운전원 조치 없음



▶ 대부분의 원자로냉각재는 증기발생기 Manway를 통하여 방출되며 가압기 Manway 및 RCGVS를 통한 방출량은 극히 일부분에 불과함. 사고분석 기간 동안 가압기와 증기발생기 Manway 및 RCGVS를 통해서 총 70 톤의 냉각재가 방출됨.

Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

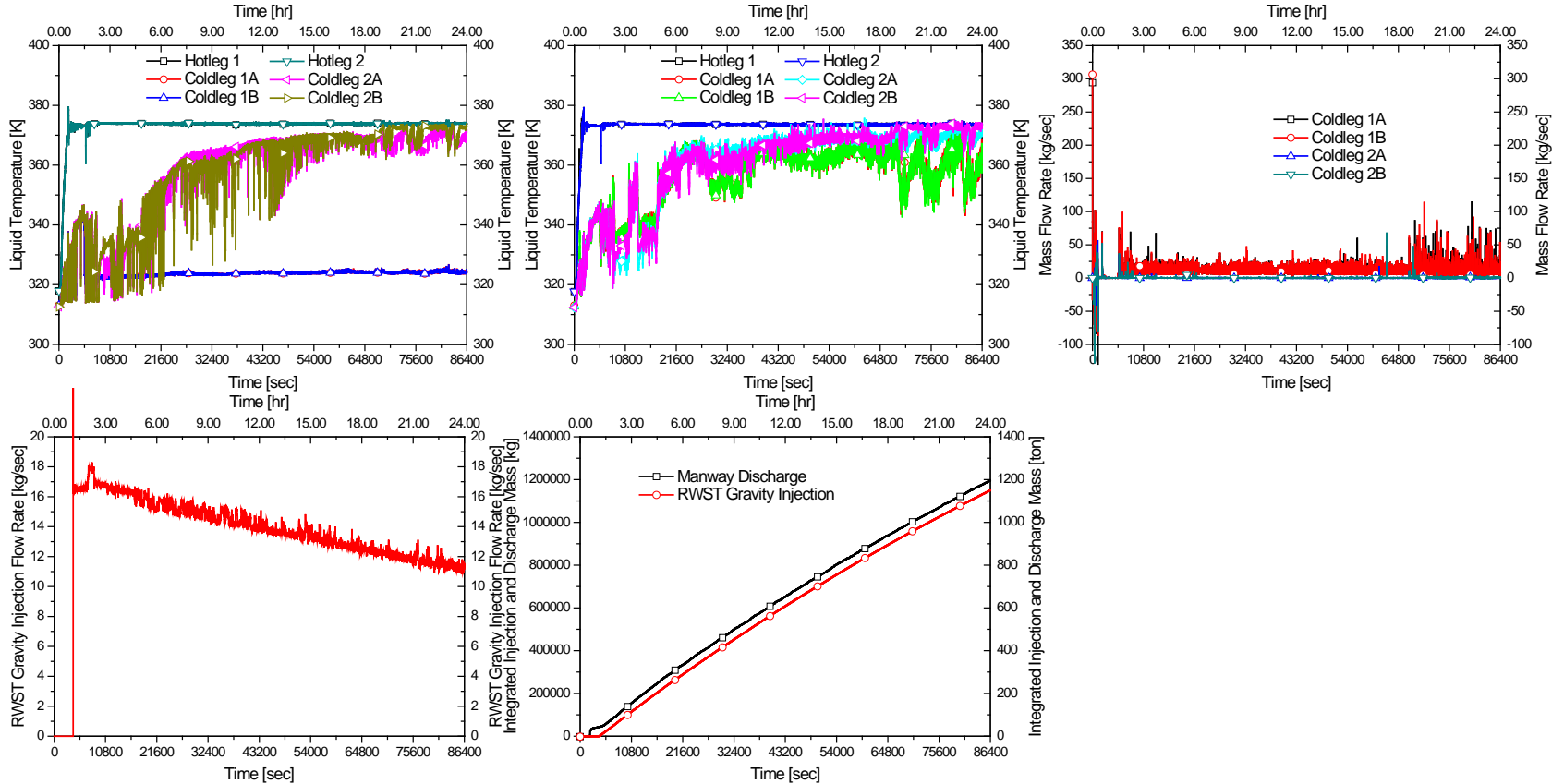
■ Case-C2 : RWST 중력급수 (4,000초)



- ▶ 420초(0.12시간) : 원자로 노심에서 기포가 발생
- ▶ 2,060초(0.57시간) : 노심 상부 노출 (수축 수위 기준)
- ▶ RWST 중력급수가 개시되더라도 노심 내 기포는 사라지지 않고 계속 유지됨
- ▶ 사고분석 기간 동안 가압기와 증기발생기 Manway 및 RCGVS를 통해서 총 1,198 톤의 냉각재가 방출

Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

■ Case-C2 : RWST 중력급수 (4,000초)



- ▶ 일차측으로 주입되는 총 주입량은 1,198 톤으로, 재장전수탱크 용량인 573,744 gal (2,171,8 m³)의 대략 53%에 해당
- ▶ 수계산에 의하여 요구되는 외부주입유량 = 4.95 kg/sec
- ▶ 실제 주입되는 유량은 평균유량은 대략 14 kg/sec로 실제 요구되는 유량의 2.8배에 달하는 것을 볼 수 있다. 이는 주입되는 냉각재가 모두 비등하여 외부로 나가는 것이 아니라 일부는 액체 상태를 유지하면서 증기발생기 Manway를 통해서 빠져나가는 것에 기인함.

Ⅶ. 사고분석 결과 - 정지운전 상태 C

■ 사고 시나리오 분석 결과 요약

사건	Case-C1 (운전원조치 없음)	Case-C2 (RWST 중력급수)
SBO 발생	0초	0초
노심 비등 발생	420초(0.12시간)	420초(0.12시간)
노심 노출 [노심 수축 수위 기준]	2,060초(0.57시간)	2,060초(0.57시간)
RWST 중력급수	-	4,000초(1.11시간)
노심 노출 [상부 노심 완전 노출 기준]	6,510초(1.81시간)	-
노심손상 (핵연료피복재온도 > 1,477K)	11,010초(3.06시간)	-
계산종료 시간	13,578초(3.77시간)	86,400초(24.00시간)

- ▶ 운전원 조치가 전혀 없는 경우에는 노심 상부의 완전노출은 6,510초(1.81시간)에, 노심 손상은 11,010초(3.06시간)에.
- ▶ 여기에서 알 수 있는 것은 노심 상부의 완전 노출을 방지하기 위해서는 최소한 1.8시간 이내에는 일차측 충수가 요구된다는 점임.
- ▶ 운전원이 노심이 노출되기 전인 4,000초에 RWST 중력급수를 수행할 경우, 노심 상부의 완전 노출은 발생하지 않으며 노심의 건전성도 잘 유지됨
- ▶ 하지만 기존에 존재하는 노심내 기포는 제거되지 않으며, 상당량의 기포가 노심 내에 존재하는 이상 유동 상태가 노심 내에서 형성됨.
- ▶ 장기 노심냉각은 일차측 외부주입에 의하여 이루어짐. (24시간 이후에는 RWST의 보충 혹은 흡입수원의 변경이 필요함.)

Ⅷ. 결론 및 활용방안

■ 결론

- ▶ 정지운전 상태 A에서는 노심 비등시까지 **6시간**의 여유시간 존재
- ▶ 부분충수 운전시에는 노심 상부 완전 노출을 방지하기 위해서는 **4,000초에 RWST 증력급수**가 개시되어야 함
- ▶ 안전주입탱크에 의한 일차측 충수, 재장전수탱크에 의한 증력충수가 외부주입 이전에 가용할 경우는 일차측 외부주입개시 시점의 연기가 가능함.

■ 활용 방안

- ▶ 정지운전 SBO 사고에 대한 Insight 제공
- ▶ PSTG(Plant Specific Technical Guideline) 작성에 활용
- ▶ 지침서 유효성 평가에 활용
- ▶ 중대사고진입전(혹은 노심 노출전) 외부주입까지의 여유 시간 제공

THANK YOU





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**