
중대사고 연구 현황 및 발전방향

2015. 10. 28

서울대학교
교수 박군철

Contents

- 중대사고 연구 및 규제 경과
- 국내 중대사고 연구 추진 내용
- 국내 중대사고 연구 현황
- 결론

❖ Pre – TMI

- WASH – 2(<1950) – Winscale/SL-1 – WASH-1400
- TMI 사고 -> 노심손상

❖ Post – TMI [중대사고 규제화]

- NRC/유럽 – 중대사고 기초연구(SARP), 안전계통 강화, FCI, MCCI, DCH
- 일본 – small-scale 실험 및 해석, NUPEC, ALPHA
- 한국 – TMI 후속 조치 시행 및 설계반영, KAERI 국제중대사고연구 참여, 대학에서의 소규모 실험

★ **Chernobyl** (1986) - 격납용기 건전성 위협

❖ Post – Chernobyl [안전목표 전환]

- 중대사고 방지 및 완화기술 연구
 - Large-scale 실험 및 해석
- ☞ **Fukushima** 사고 (2011) – 원자력안전 위협

❖ Post – Fukushima [중대사고 연구 재조명]

- 신개념 설비 설계

국내 중대사고 연구 추진 내용

'97~'01

- 연구개발 기본 인프라 구축 및 강화
- 중대사고 실증실험 및 평가기술 개발

'02~'06

- 핵심 기술 개발
- 중대사고 관리 최적방안 수립 및 대처설비 개발

'07~'11

- 국내 중대사고 연구 약화 및 소강상태
- 성과 극대화 및 세계적 리더십 확보

'12~'16

- 선진국형 연구개발 및 세계 선도
- 중대사고 대처 기술 개발

후쿠시마
교훈 반영

❖ 안전성 확보가 최우선 요건

- '사회적 안전성 확보'로의 패러다임 변화
 - 심층방어 개념(DID)의 강화 필요

중대사고 예방 조치 강화

비상냉각 능력 강화를 통한 설계기준초과사건 (bDBA)을 포함하는 확대 설계조건 (DEC)에 대한 중대사고 진입 방지용 대응방안 확보

중대사고 완화 능력 강화

중대사고 대처능력 향상을 통한 중대사고 완화 방안 확보

환경보호 강화

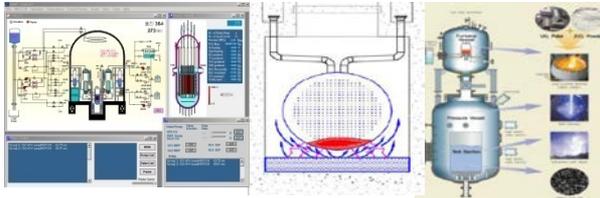
중대사고 발생 시 환경영향 정밀 평가 기술 확보 및 보호대책 강구

원자력기술 개발사업 (중대사고 분야)

MIDAS

ISAAC

TROI



구체적인 연구 성과

중대사고연구기반구축

1997-2002

중대사고실증실험
및 평가기술개발
(~24억/년)

SONATA
- 용융물 실험 장치

국내 원전
중대 사고
관리 전략



2003-2007

중대사고관리최적
방안수립 및 중대
사고대처설비개발
(~28억/년)

MIDAS/ISAAC
- 경수로 및 중수로 중대
사고 해석 코드 개발

TROI (실제 핵연료 물
질 이용 증기폭발실험)

수소 연소 소염망 개발

2007-2011

대과제 없어짐

- 격납건물 수소 및 핵분
열 생성물거동평가 기
술 개발 (~5억/년)
- 노심용융물 위해도 실
증 실험 및 쟁점해결기
술개발 (~15억/년)

중대사고 핵심쟁점 연구
실제 용융물 이용 실험
기술 심화
COSMOS, HERMES
OECD/SERENA -
국내 최초 국제 공동연구



2012-2016

중대사고대처기술
개발

후쿠시마 사고 이후
실제적이고 효과적인
중대사고 대처기술개발

중대사고연구 국제선도

원천기술수준까지 심화

SMART 중대사고 해석
수출 원전 중대사고 대처 설비 개발: VESTA
중대사고 종합 해석 코드 개발

❖ 중대사고 핵심 현상의 실증적 규명 및 해석

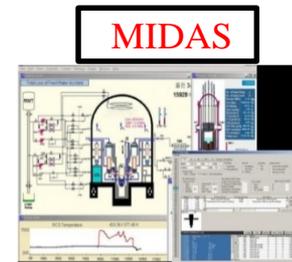
- 원자로 외벽냉각 (IVR-ERVC) 방안의 성능 검증
 - 신고리 3,4호기 원자로용기 보호 개념 분석에 적용
- 실제 핵연료 물질을 이용한 증기폭발 실험 (TROI)
 - 국제공동연구 수행 연계
- 노심용융물 안정화 검증실험 (VESTA)
 - EU-APR1400 원전 Core catcher 설계 검증

❖ 중대사고 실험 결과 및 해석기술 응용

- 중대사고 안전관리 대책 수립
 - APR+, EU-APR1400 등 신형 경수로 개발
 - 중대사고 완화전략의 수립 및 이를 위한 사고 해석
 - 국내 원전 중대사고관리지침서 개발
 - SMART, GCR, SFR 등 신형로 중대사고 안전성 평가
- 경수로 및 중수로 중대사고 해석 코드 개발
 - MIDAS, ISAAC 등

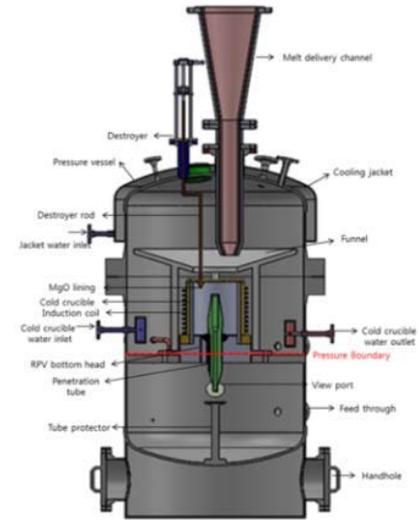
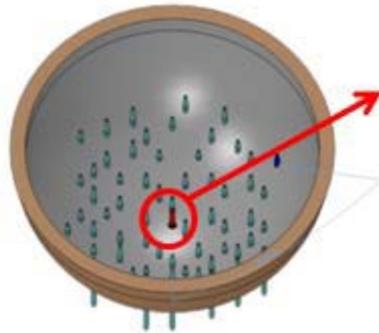
❖ 중대사고 연구의 국제적 리더십 확보

- 한국 최초의 OECD 국제공동연구(SERENA) 공동 주관
 - TROI 실험을 통한 증기폭발 관련 OECD 국제공동연구의 공동 주관

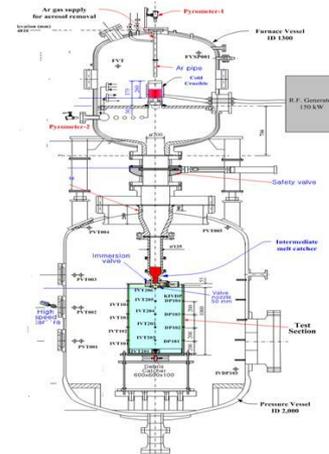
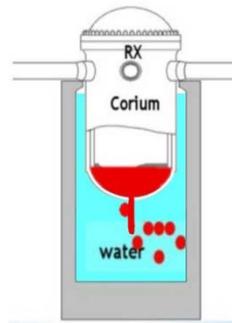
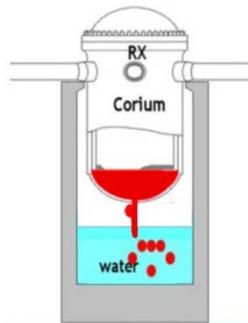


❖ 중대사고 대응 능력

- 노내 노심용융물 냉각성능 평가
 - VESTA 실험장치를 활용한 원자로용기 국부 파손 실험
 - 용접부 및 관통부 시편(APR1400) 침식 실험

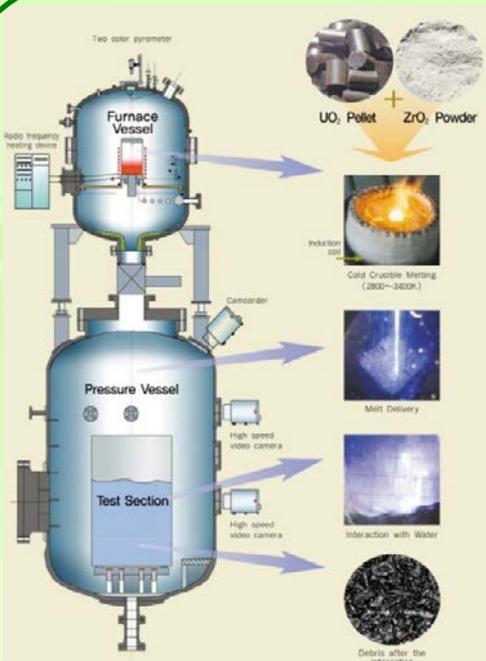


- 원자로건물 건전성 확보 평가
 - TROI 실험장치를 활용한 증기폭발(Steam Explosion) 실험
 - 원자로공동 침수 조건을 고려한 실험자료 생산



국제 수준의 중대 사고 연구 인프라 강화

- 국제 수준의 노심 용융물 이용 실험 시설
TROI (Corium-Water) and VESTA (Corium-Structure) Test facilities
- 중대사고시 격납건물 조건 모의/안전 계통 성능 실험 인프라 구축 (2012-2016)



**TROI : OECD/SERENA
Steam Explosion**



**VESTA: Corium-
Structure Interaction
Experiment**

**LIFE (Laboratory for Innovative
Mitigation of Threats from
Fission Products and Explosions)**



**Containment Integrity:
Hydrogen, Filtered Venting,
Fission Product Transport**

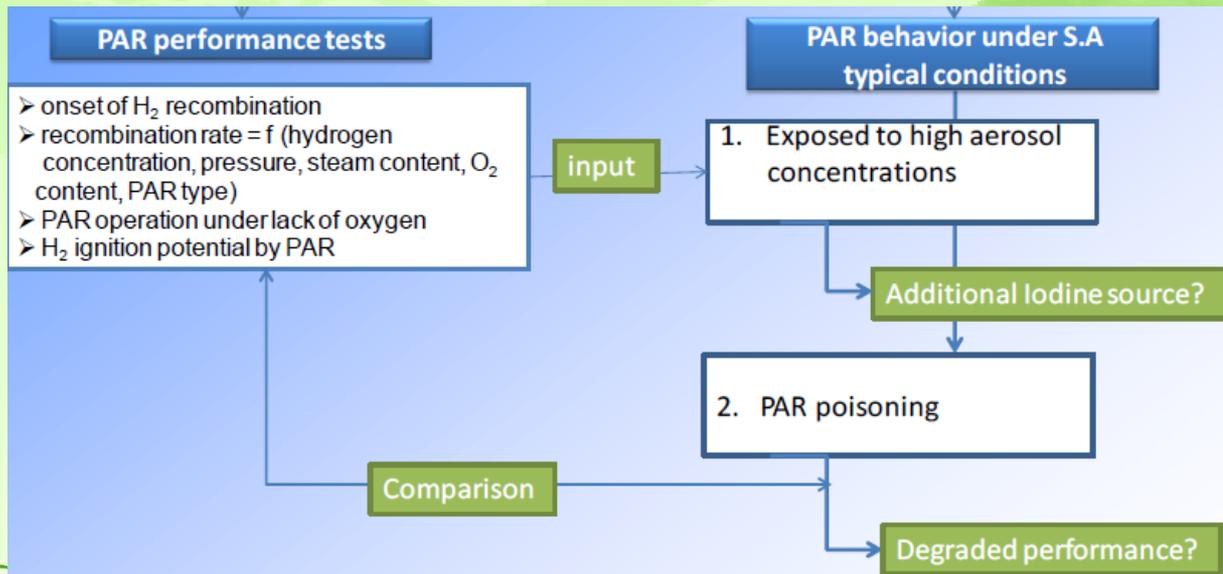
격납건물 안전계통 성능실험 인프라

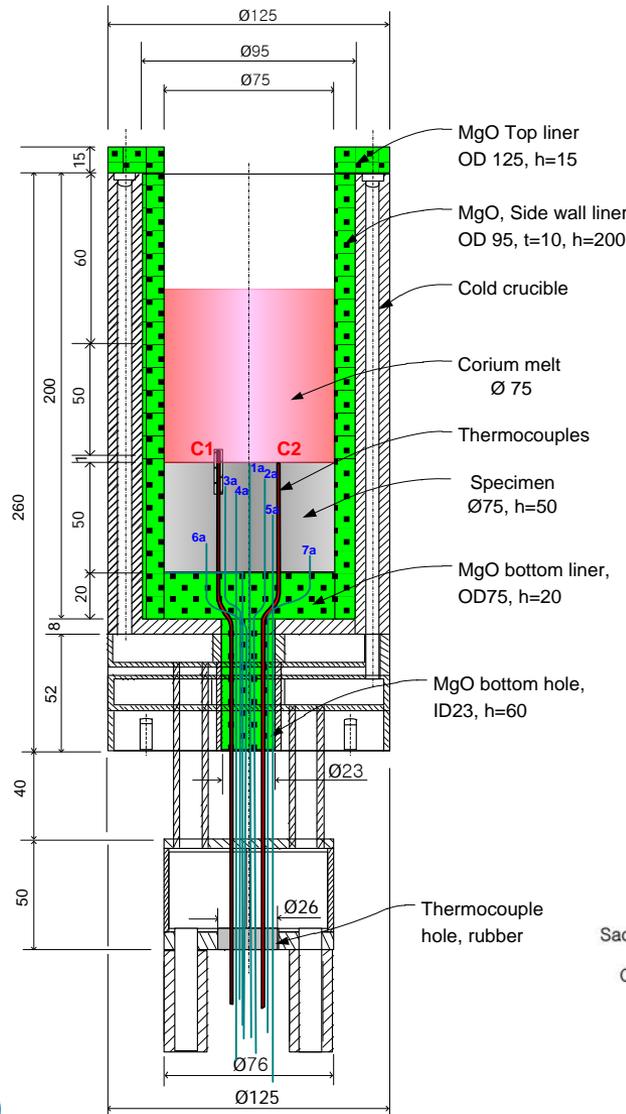
중대사고 조건 모의 실험 용기 SPARC (SPray-Aerosol-Recombiner-Combustion):

(내경 3.4 m, 높이, 9.5 m, 1.5 MPa, 450 K) 제작/설치: 독일의 THAI, 스위스의 PANDA에 수준으로 수소제어 및 안전설비, 계측 장치 구축 후 PAR 성능실험에 활용 예정

중대사고 조건 국산 PAR 성능 평가 필요: AECL, AREVA, NIS 제품에 대해 OECD/THAI-1, 2 진행됨. THAI-3 진행 중 캐나다 RTF 설비에서 AECL PAR 성능 실험

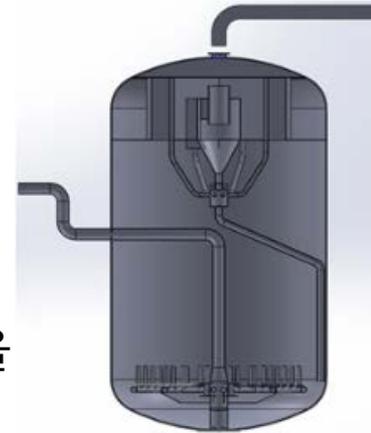
에어로졸·수소제어연구 분야 국제적인 연구시설로 활용 도모



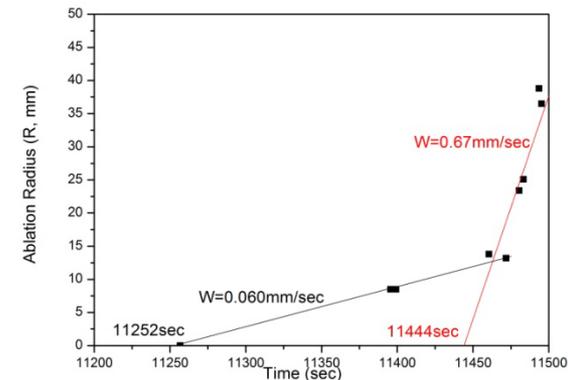
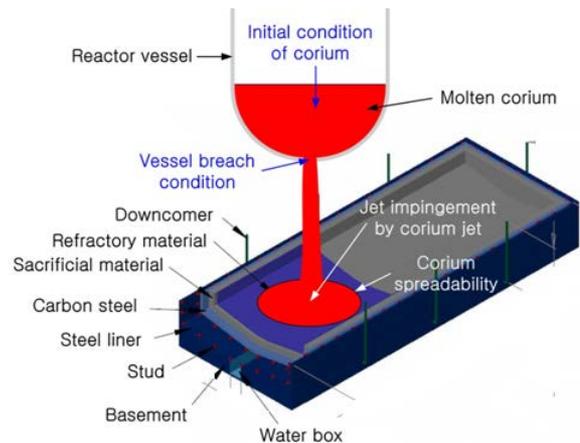


1. 원자로건물여과배기계통 (CFVS) 개발

- 중대사고 방사선원항 방출 저감 기술
- 국내원천기술의 대외경쟁력 확보를 위한 국산화기술 개발 추진
- 기기성능 및 종합성능시험을 위한 설비 구축



2. Core Catcher Development for EU-APR1400



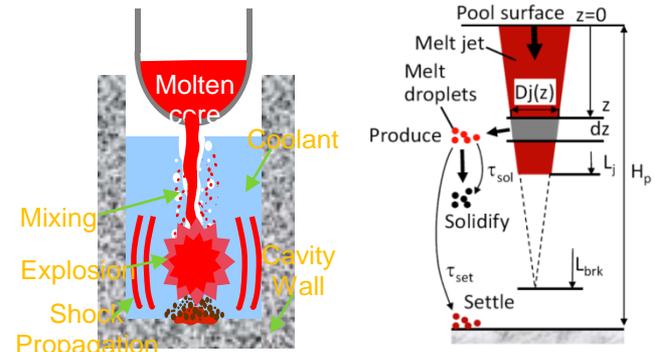
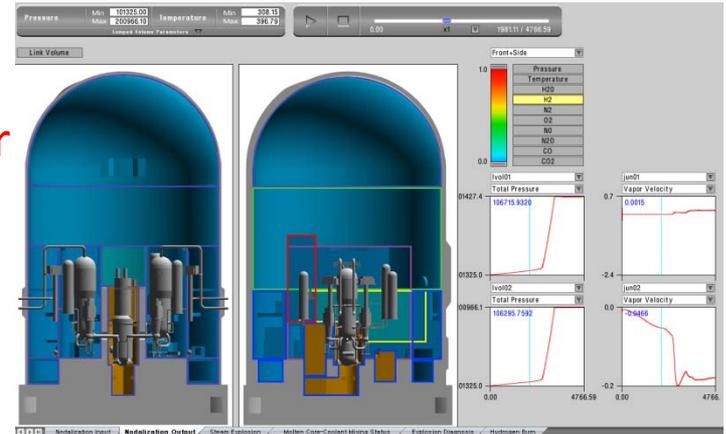
❖ 중대사고 해석 코드

● Limitations using MAAP4 & MELCOR for SA Analysis

- Cost Burden due to Code Import and Technical Support
- Limited Access to the Source Codes
- Obligation to NPP Export

● 중대사고 종합해석 코드 개발

- 중대사고의 전 사고경위 및 현상을 종합적으로 평가할 수 있는 종합해석코드 개발
- 해외 중대사고 해석코드(MELCOR, MAAP 등)의 해석능력 수준 확보
- 국내원천기술로 개발하여 지적재산권 확보

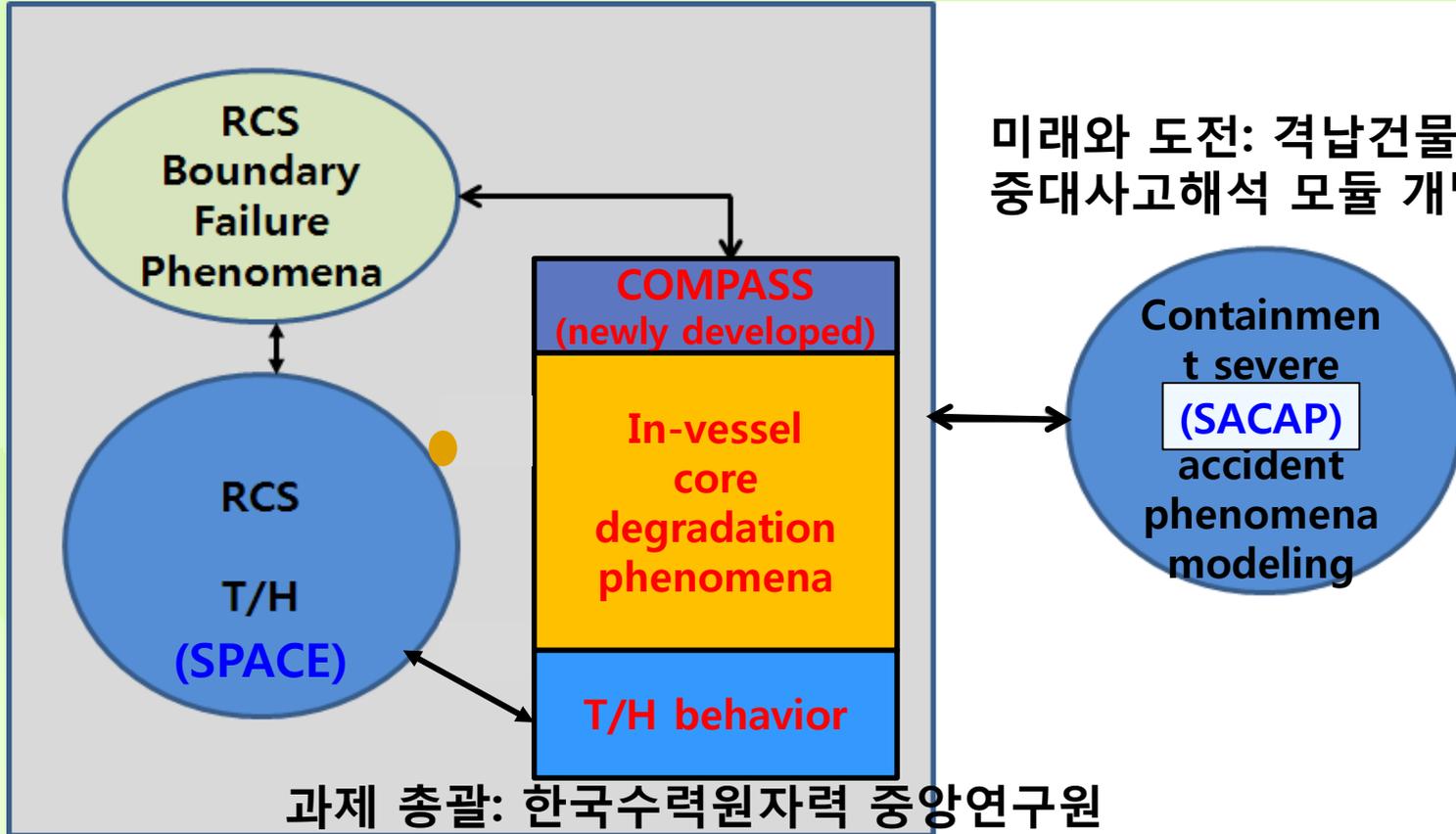


❖ To Complete the Integrated Safety Analysis Systems with the addition of Severe Accident Analysis Code

중대사고 코드 개발 체계



원자력연구원: 원자로 중대사고현상 해석 모듈 개발



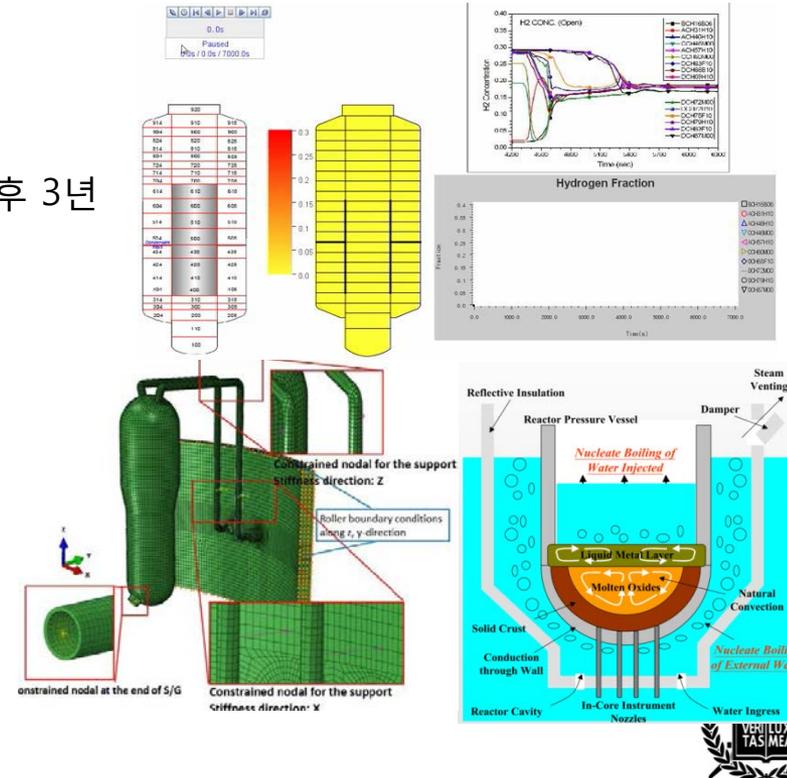
열수력 모델 SPACE 활용, 표준 문제들에 대한 코드 모델 검증
차기 단계는 종합적인 검증 및 인허가 추진

□ 원자력안전법 개정 (2015.6.23)

- **제2조(정의)** : 25. "사고관리"란 원자로시설에 사고가 발생하였을 때 사고가 확대되는 것을 방지하고 사고의 영향을 완화하며 안전한 상태로 회복하기 위하여 취하는 제반조치를 말하며, 원자력안전위원회에서 정하는 설계기준을 초과하여 노심의 현저한 손상을 초래하는 사고(이하 "중대사고"라 한다)에 대한 관리를 포함한다.
- **제20조(운영허가)** : ②제1항의 허가를 받으려는 자는 .., 사고관리계획서 (중대사고관리계획을 포함한다), 운전에 관한 품질보증계획서, ... 제출하여야 한다.
- **제21조(허가기준)** : 6. 제20조제2항에 따른 사고관리계획서의 내용이 위원회규칙으로 정하는 기준에 적합할 것
- **부칙**
 - 공포후 1년 이내 시행
 - 운영중 또는 운영허가 신청한 원전 : 시행후 3년 이내 제출

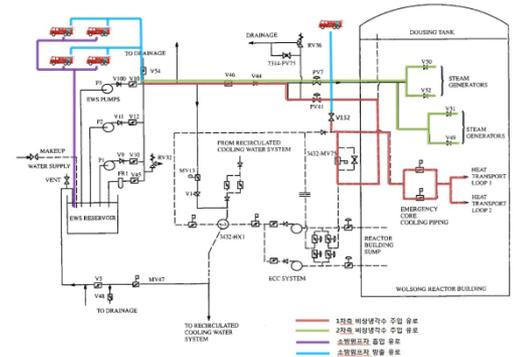
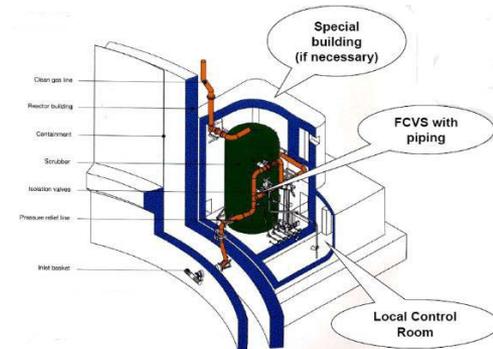
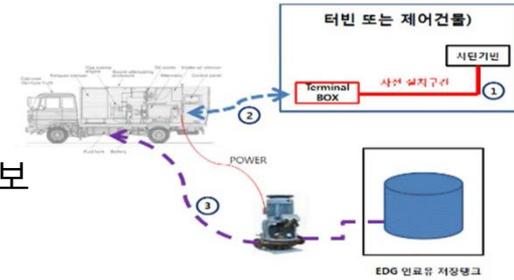
❖ 중대사고 규제 연구

- 중대사고 안전현안 평가기술 개발
 - 증기폭발 및 IVR-ERVC 평가방법론
 - 원자로건물여과배기계통(CFVS) 평가방법론
 - APR1400형 원전의 정전 사고 시 자연순환 및 주요 사고관리전략의 분석모델 개발
- 중대사고 핵분열생성물 거동



❖ 산업체의 중대사고 현안 대응 및 연구 계획

- 중대사고 분야 주요 후쿠시마 원전 사고 후속조치
 - 비상전원 침수 및 장기 소내 정전사고 대비 이동형 발전차량 확보
 - 다수호기 동시사고 대비 비상전원설비 보강
 - 원자로건물여과배기계통(CFVS) 설치
 - 비상냉각수 외부 주입유로 설치
 - 정지·저출력 확률론적안전성평가(PSA) 모델 개발
 - 정지·저출력 모드 중대사고관리지침서(SAMG) 개발
 - 광역손상완화지침서(EDMG) 개발
 - 중대사고 시 사고대응 및 수습관리를 지원할 수 있는 비상대응조직 운영
- 중대사고 연구개발 추진 계획
 - 최신기술을 적용한 PSA Level 2&3 평가기술 개발
 - 중대사고 대처능력 적절성 평가 및 대응전략 수립
 - 수소점화기 설치 필요성 검토
 - 사용후연료저장조(SFP) 균열 및 파손을 가정한 냉각 방안 연구



| 대학 | 연구내용 |
|-----|---|
| 서울대 | <ol style="list-style-type: none"> 증기폭발 실험 및 해석코드개발 <ul style="list-style-type: none"> 해석모델 개발 α mode failure의 확률 계산 혼합 및 폭발실험 수소 거동 분석 |
| 과학원 | <ol style="list-style-type: none"> 격납용기 해석 Source term 계산 확률론적 평가 전산코드 개발 Debris bed coolability 연구 |
| 포항대 | <ol style="list-style-type: none"> 격납용기 해석 <ul style="list-style-type: none"> CORCON 코드, condensation heat transfer DCH Experiment Aerosol Transport |
| 홍익대 | <ol style="list-style-type: none"> Fuel Coolant Interaction <ul style="list-style-type: none"> 해석 및 실험 |

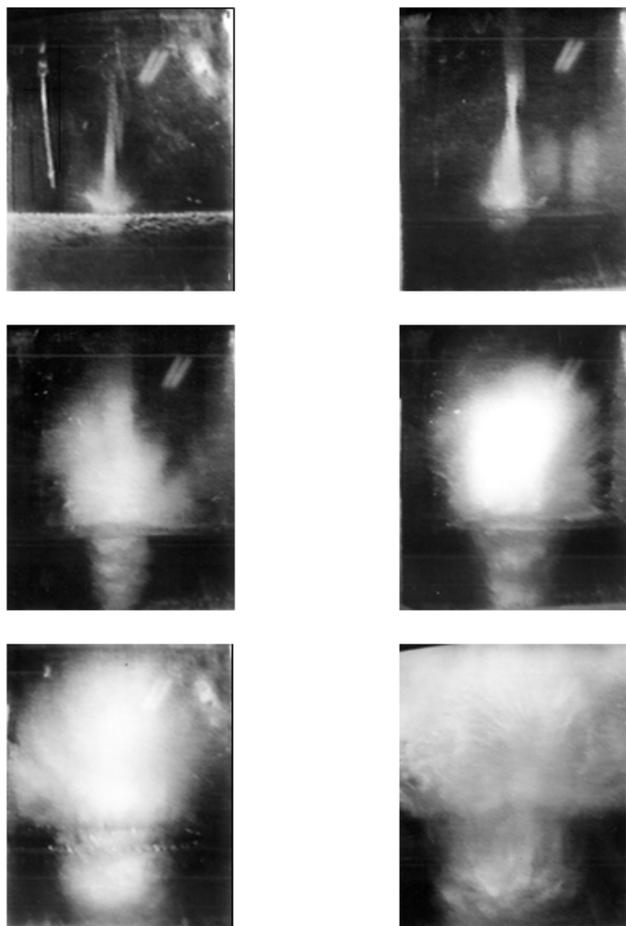


Figure 2-7, The Photographs of Vapor Explosion Process of Water/R22, Which Obtained By High Speed Camera

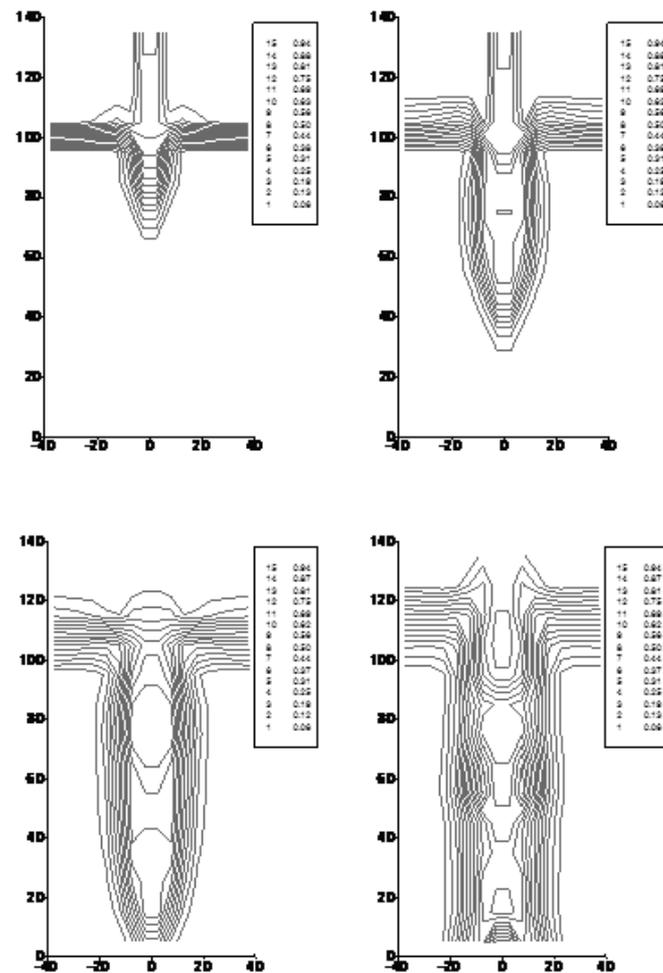


Figure 4-7,b Predicted Vapor Volume Fraction Contours of QUEOS-32 Test

❖ 세계적 수준의 실증실험 체계 구축

- TROI, VESTA, SPARC 등
- 고부가 가치의 실험 데이터 생산
- 중대사고 안전성 평가기술 향상에 필요한 기반 확보

❖ 선진형 연구기반 구축 및 연구성과의 국제적 활용

- OECD 국제공동연구(SERENA) 주관 및 성공적 수행
- 국내 중대사고 연구의 국제적 리더십 강화
- 과거의 수혜적 위치에서 벗어나 시혜적 위상 확보

❖ 가동 원전 중대사고 대처 능력 강화(신형 원전 수준까지):

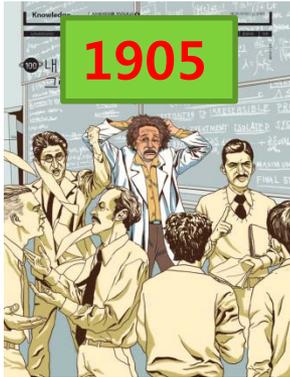
- 방사성 물질의 대량 방출 배제 달성: 실제적/효과적인 중대사고 관리 전략, 중대사고 대처 설비 성능 확보 위한 실험 및 해석 기술 개발:
- 동북아 지역 중대사고 연구의 중심: 중대사고 실증 실험 시설, 중대사고 코드 국산화 등의 원천 기술 확보

❖ 문제점

- TMI, 체르노빌 및 후쿠시마 사고를 통해 현안 위주 연구
- 체계적인 접근과 기초적인 연구 미흡
 - ▶ 원천/기반기술이 다른 선진국보다 상대적으로 열세
- 연구주체 및 연구비 감소
- 종합 개발 프로그램 및 역할 부담 미흡
- 학·연·산 연계 미흡
 - ▶ 체계적인 중대사고 연구 우선순위 설정

❖ 국내 중대사고 연구의 방향

- 중대사고 해석 기술의 국제적 비교우위 확보 노력 필요
- 국산화가 아닌 선도적 중대사고 대처 기술 개발 및 국제적 리더십 확보
- 미래형 원자력시스템(예, SFR)의 중대사고 연구 수행 노력 확대
- 산업체의 중단기적 기대에 부응하는 중대사고 연구 수행 노력 확대
- 체계적인 규제기관, 대학, 연구원, 산업체 간 안전연구 역할 분담/공조체제 구축



1905



1938



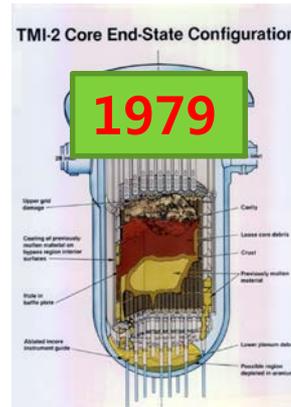
1945

TABLE 6-3 INDIVIDUAL RISK OF EARLY FATALITY BY VARIOUS CAUSES (U.S. Population Average 1969)

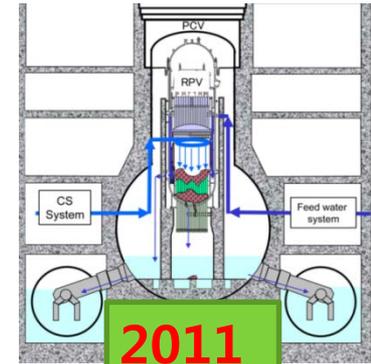
| Accident Type | Total Number for 1969 | Approximate Individual Risk Early Fatality Probability/yr ^(a) |
|----------------------------------|-----------------------|--|
| Motor Vehicle | 55,791 | 3×10^{-4} |
| Falls | 17,627 | 9×10^{-5} |
| Fire and Hot Substances | 451 | 4×10^{-5} |
| Machinery (1968) | 2,054 | 1×10^{-5} |
| Water Transport | 1,743 | 9×10^{-6} |
| Air Travel | 1,770 | 9×10^{-6} |
| Lightning | 116 | 5×10^{-7} |
| Tornadoes | 116 ^(b) | 4×10^{-7} |
| Hurricanes | 90 ^(c) | 4×10^{-7} |
| All Others | 8,695 | 4×10^{-5} |
| All Accidents (from Table 6-1) | 115,000 | 6×10^{-4} |
| Nuclear Accidents (100 reactors) | — | 2×10^{-10} |

WASH-1400(1975)
CDF :1/20,000

(a) Based on total U.S. population, except as noted.
 (b) (1950-1971 avg.)
 (c) (1961-1972 avg.)
 (d) Based on a population at risk of 15×10^6 .



1979



2011

Never "Nuclear Winter"