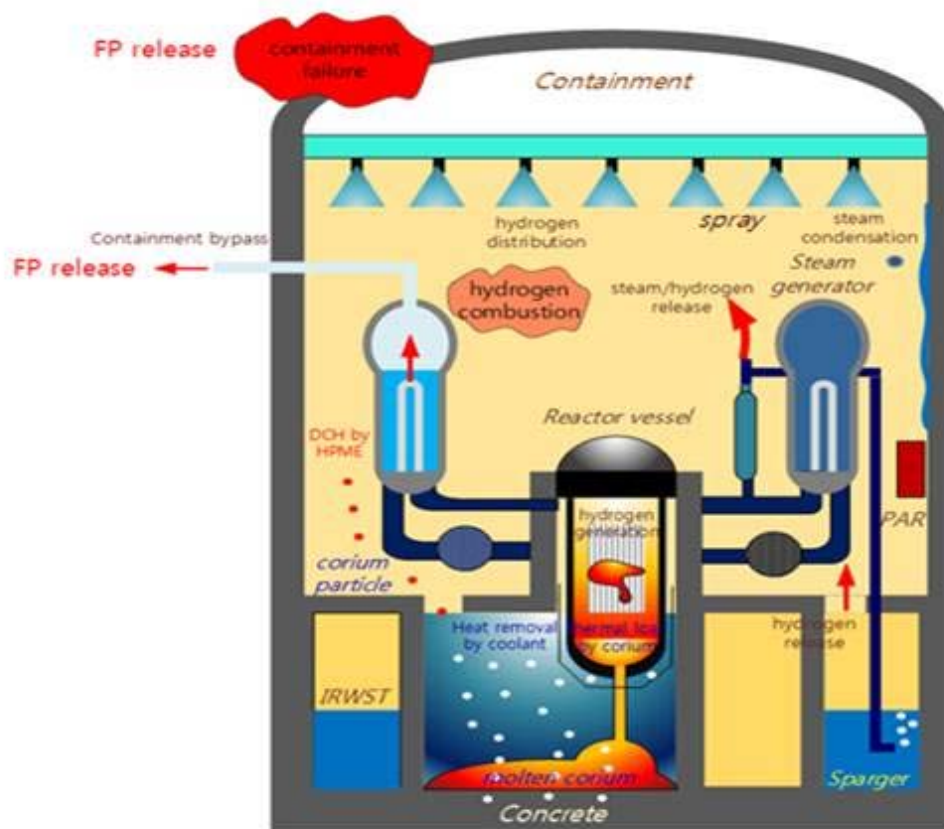


# 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서



2016. 8

중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 작성 특별 위원회



한국원자력학회  
Korean Nuclear Society

## 목 차

제1장 서론 .....	5
제1절 배경 .....	5
제2절 국내 환경 변화 .....	7
제3절 작성 계획 .....	9
제4절 범위 및 내용 .....	10
제2장 로드맵 보고서 구성 .....	13
제1절 일차계통 방호 분과 .....	13
제2절 격납건물 방호 분과 .....	13
제3절 핵분열생성물 거동 분과 .....	13
제3장 중대사고 현상별 기술현안 및 중요도 .....	15
제1절 일차계통 방호 분과 .....	15
제2절 격납건물 방호 분과 .....	17
제3절 핵분열생성물 거동 분과 .....	19
제4장 결론 .....	23

## 분과별 보고서

- 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제 1권 일차계통방호분야)
- 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제 2권 격납건물방호분야)
- 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제 3권 핵분열생성물거동분야)

## 표 목 차

표 1.2.1	결정론적 안전기준 및 확률론적 안전목표치 .....	8
표 1.3.1	특별위원회 3개 분과 및 운영위원 .....	10
표 3.1.1	일차계통 방호 분과 PIRT 결과 .....	16
표 3.2.1	격납건물 방호 분과 PIRT 결과 .....	18
표 3.3.1	핵분열생성물 거동 분과 PIRT .....	21
표 4.0.1	중점 기술현안 종합 .....	24

## 그 림 목 차

그림 1.1.1 중대사고시 발생하는 다양한 현상들 .....	6
-----------------------------------	---

## 제1장 서론

### 제1절 배경

동일부지 다수호기의 전형인 후쿠시마 원전에서 지진해일로 인한 중대사고가 발생하여 노심 용융, 원자로 손상, 격납기능 상실에 의해 다량의 방사성 물질이 환경으로 방출되었다. 이러한 사실은 기술적인 측면에서 현재 원전에 중대사고 대응 방안으로 구비된 대처설비와 사고관리 전략이 예상치 못한 중대사고가 발생하는 경우 효과적이지 않을 수 있으며, 사고 복구를 위한 기술적 결정이 어려울 수 있다는 것을 시사하고 있다.

따라서 국내 가동 중 원전 및 신규 건설 원전에 대해서도 어떠한 경우의 중대사고가 발생하였을 때라도, 적절하게 대응할 수 있는 대처기술의 수립이 국가적으로 시급한 과제라고 할 수 있겠다. 국제적으로도 가동 중 원자로, 신형 원자로에 대해 중대사고 대처능력을 강화하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 중대사고 대처 기술의 확보 여부는 향후 원자력 발전을 지속적으로 채택할 수 있느냐를 결정지을 시금석이 될 것이므로, 이 기술 개발의 경제적 사회적 영향은 수치로 표현할 수 없을 만큼 지대하다.

한편 중대사고 대처가 지나치게 보수적 접근으로 진행될 경우 원자력 발전의 경제적 선호도가 상실될 수 있다. 따라서 원자력 발전의 지속성 관점에서 안전성과 경제성 모두를 달성하기 위해서는 중대사고 현상에 대한 체계적이고 정량적인 이해와 불확실성 저감 노력이 필요하다. 현재 국내 중대사고 대처 기술 수준 및 인프라는 일부 분야를 제외하고는 선진국 수준과 큰 격차가 있어서 국가 차원에서 체계적인 연구 개발 노력이 필요하다.

그 노력의 일환으로 원자력학회 소속 전문가들이 본 보고서를 통해 가동 및 신규 건설 원전의 안전성 향상, 국민의 안전 확보 및 환경오염 방지를 위해 필수적인 중대사고 대처체계 확보에 관한 연구개발 로드맵을 제시하고자 한다. 중대사고 대처체계는 중대사고 규제, 원전 중대사고 대처능력 향상, 중대사고 진행 예측 및 대응 기술을 포함하는 총체적인 기술 체계를 의미하고 있으므로 대처체계 확보를 위해서는 그동안 이루어져 왔던 중대사고 연구 및 현안에 대한 총체적인 검토가 필요하다. 뿐만 아니라 후쿠시마 원전 사고 이후 중대사고 법제화가 국제적인 동향이며, 국제원자력안전협약(Convention on Nuclear Safety)에서도 중대사고로 인한 “대량 방사성 물질 방출량 제한”을 요구하고 있는 실정이므로 우리나라도 원전 수출국의 위상에 맞게 중대사고 현안해결을 위한 로드맵의 제시와 함께 적극적인 이행이 필요하다.

중대사고 현상은 노심 용융, 그로 인한 원자로 파손, 격납건물로의 노심용융물 고압 분

출, 노심용융물과 콘크리트 반응, 핵연료 피복재 산화에 의한 수소 발생 및 연이은 수소 연소, 노심용융물과 냉각수 반응에 의한 증기 폭발, 노외 노심 용융물의 냉각 성능, 노심으로부터의 핵분열생성물 방출, 원자로 및 격납건물 내의 핵분열생성물 이송, 격납건물 손상에 의한 핵분열생성물 환경 방출 등 다양한 물리적 현상을 동반할 수 있다. 이런 현상을 이해하기 위해서는 열수력 뿐 아니라, 수소 연소, 핵분열생성물의 물리 화학적 거동, 노심 용융물, 금속 및 콘크리트의 재료 특성 등 다양한 분야의 지식이 요구된다. 그림 1.1.1에는 위에 언급된 중대사고시 발생하는 다양한 현상이 도시되어 있다.

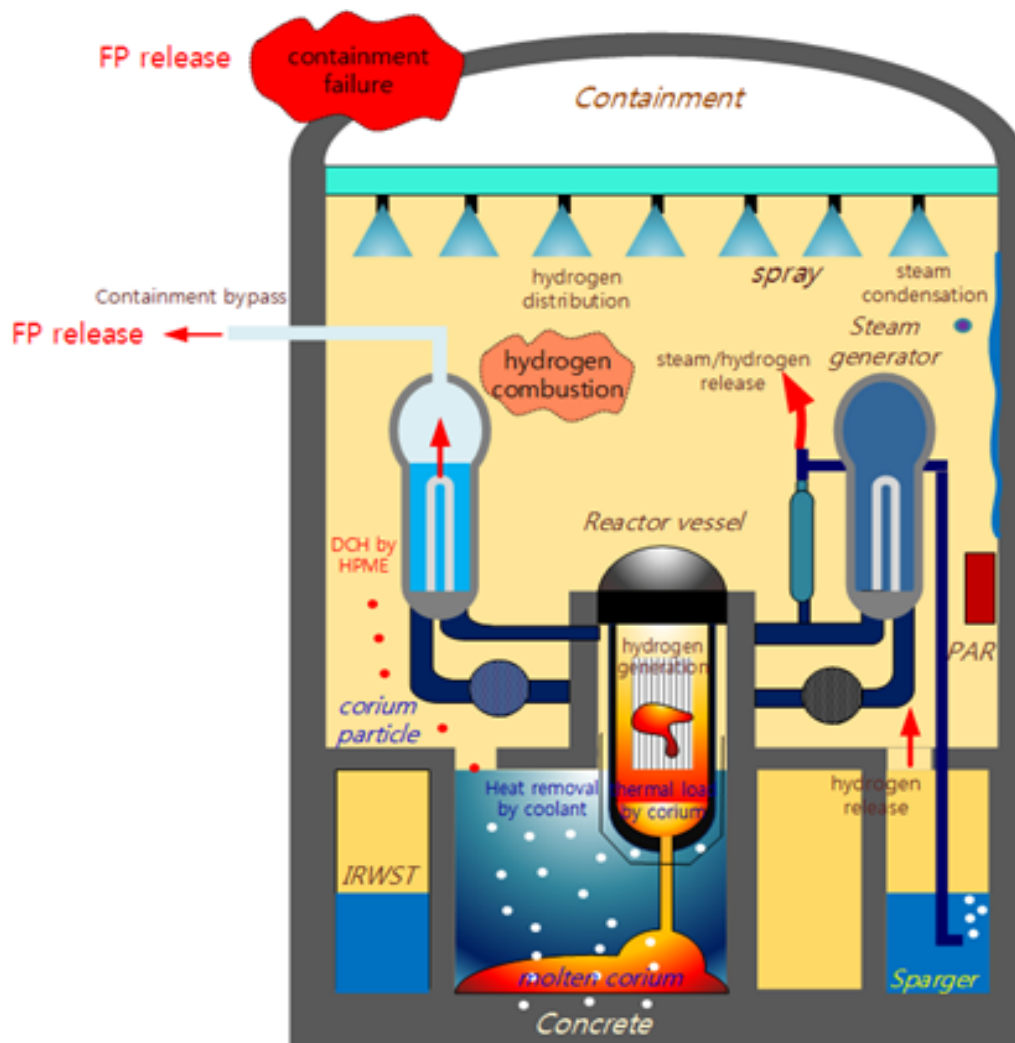


그림 1.1.1 중대사고시 발생하는 다양한 현상들

## 제2절 국내 환경 변화

2015년 중대사고 법제화가 추진되면서 가동 원전 및 신규 원전의 중대사고 규제를 위한 기술기반 확보 및 중대사고 대처능력 향상 방안 도출에 관련된 원천기술 개발 등이 적기에 이루어질 필요에 대해 공감대가 형성되고 있다. 그동안 중대사고 분야에 대해서는 원자력 중장기 과제를 통해 1997년부터 지속적인 연구가 수행되었다. 특히 실제 코륨을 이용하는 중대사고 실증 실험 시설인 TROI<sup>1)</sup>가 원자력연구원에 구축되어 2007년 - 2012년 사이에 OECD/SERENA 증기 폭발 국제 공동 연구를 수행하는 등 일부 분야에서는 세계적인 수준의 연구 능력을 보유하고 있다.

그러나 중대사고 분야가 아주 넓고 또 실증 실험을 위해서는 막대한 재원이 필요하기 때문에 전체적으로는 외국의 기술을 도입 활용하는 수준이었다. 중대사고 대처에 대한 규제가 법제화 되어 있지 않았기 때문에 적극적인 연구 개발이 동력을 얻기 어려웠다. 특히 일본과 미국을 중심으로 한 중대사고 연구 종결 노력의 영향으로 2007년부터 시작된 4차 중장기 계획에서는 중대사고 연구가 대폭 축소되었다. 그 영향으로 대학 및 연구 기관의 중대사고 연구 인프라가 축소되었다.

하지만 APR1400의 UAE 수출과 연이은 해외 시장 원전 수출 노력의 일환으로 APR1400에 대한 중대사고 대처 설비 개발 노력, 해외 원전 수출을 위한 중대사고 해석 기술 자립 노력 등이 산업체를 중심으로 강화되었고, 2011년 후쿠시마 원전 사고 이후에는 정부 주도 중장기 과제에서도 중대사고 연구를 강화하려는 움직임이 일어났다. 이 과정 중에 한수원-한국원자력연구원-산업체를 중심으로 한 국내 독자의 중대사고 해석 코드 개발 연구가 2011년부터 시작되어 현재도 진행되고 있다. 한국원자력연구원에 SPARC (SPray - Aerosol- Recombiner- Combustion) 실험장치가 구축 중이며, 향후 수소연소 성능 실험, 유동장 측정 장치 구축이 완료되면 독일의 THAI, 스위스의 PANDA 등과 대등한 국제 수준의 에어로졸 거동 및 수소 제어기기 성능 실험 기반이 마련될 것이다. 한편 코륨과 구조물의 반응 실험 시설인 VESTA<sup>2)</sup>의 구축으로 코륨을 이용한 연구 기반이 강화되었다. 2014년 관통부 파손 실증실험 장치구축 및 실험 성공으로 일본정부 산하의 IAE로부터 후쿠시마 원전 관통부 파손 실험 요청 받아 2015년부터 본격적인 실험이 진행 중이다.

- 
- 1) Song JH, Park IK, Shin YS, Kim JH, Hong SW, Min BT, Kim HD. Fuel coolant interaction experiments in TROI using a UO<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> mixture. Nuclear Engineering and Design 2003 222: 1-15.
  - 2) S. M. An, K. S. Ha, B. T. Min, H. Y. Kim and J. H. Song, Ablation Characteristics of Special Concrete due to an Impinging Zirconium-dioxide Melt Jet, Nuclear Engineering and Design, Vol. 284, p. 10-18 (2015).

우리나라에서는 2001년 8월, 제17차 원자력안전위원회에서 『원자력발전소 중대사고 정책』이 의결되었고, 이후 현재까지 국내 중대사고 및 PSA 안전규제의 근거로 활용되어 왔다. 후쿠시마 원전사고 이후 중대사고 법제화에 대한 논의가 진행되었고, 2015년 2월 24일 국회는 원자력 안전법 개정안을 의결하여 중대사고가 법제화 되었고 정부는 이를 2015년 6월 22일 공포하였다. 주요 개정내용으로 (1) 사고관리에 대한 정의규정을 통해 기존의 설계기준 사고관리에 추가하여 중대사고 시 사고관리를 포함하도록 규정하여 (2) 운영허가 신청서 첨부서류에 운전에 관한 사고관리계획서를 추가하고, 원자력안전위원회가 이 서류에 대한 허가기준을 마련하도록 함을 들 수 있다. 구체적인 성능 목표는 표 1.2.1과 같다.

표 1.2.1 결정론적 안전기준 및 확률론적 안전목표치

구 분	기준 및 목표치
결정론적 기준 (제8조)	- 250mSv (갑상선) 및 3000mSv (전신)
확률론적 안전목표치 (제9조)	- 사고로 인한 초기사망 위험도 및 암사망 위험도가 각각의 전체 위험도의 0.1% 이하이거나 또는 그에 상응하는 성능 목표치를 만족할 것 - Cs-137 방출량 100 TBq 초과 방출빈도 : $1.0 \times 10^{-6}$ /년 이하

표 1.2.1에서 보는 것처럼 소의 방사선 방출량을 구체적으로 제한치를 명시함으로써 중대사고시 방사성 물질 방출로 인한 개인의 건강 및 환경오염을 최소화하고자 하였다.

설계기준 사고의 경우 안전성과 관련된 핵심 현상들에 대한 지식의 정도, 해석 모델의 정확성이 상당한 수준에 도달해서 핵연료 손상, 원자로 압력 등에 대한 구체적인 목표 달성 여부가 객관적으로 확인 가능하다. 하지만 중대사고의 경우에는 아직까지도 규명되지 않은 중대사고 현상에 대한 부족한 이해, 중대사고 해석 모델의 수백 %에 달하는 불확실성 등으로 앞으로 많은 논란이 야기될 것으로 예측된다.

그렇기 때문에 다양한 중대사고 현상에 대한 정확한 이해, 해석 모델의 개발이 시급한 과제라고 할 수 있다. 한편 그동안 원자로 및 격납건물 안에서 발생하는 다양한 물리 현상에 대한 이해에 연구의 관심이 집중된 경향이 있는데, 법제화 이후 앞으로는 방사성 물질 방출 관점에서 현상의 정확한 이해, 정밀도 높은 해석 모델의 구축에 더 많은 관심이 필요하다.



### 제3절 작성 계획

유럽은 후쿠시마 원전 사고 이전인 2000년대 초반에 이미 SARP (Severe Accident Research Priority)<sup>3)</sup> 라는 중대사고 현상 규명 및 대처 설비 개발을 위한 연구개발 로드맵을 개발하였다. 일본은 후쿠시마 사고 이후 일본의 원자력 학회 중심으로 중대사고 대처 체계 구축을 위한 연구 로드맵을 개발하였다<sup>4)</sup>.

우리나라에서도 후쿠시마 원전사고 이후 한국원자력학회의 원자로 열수력 및 안전 연구부와 중대사고 연구회 회원들 사이에서 중대사고 현안해결 로드맵의 필요성에 대한 공감대가 형성되었으며, 이러한 로드맵을 바탕으로 국내 중대사고 규제기술 개발(규제기관), 국내 원전 중대사고 대처능력 향상기술 개발(산업계), 국제 수준의 중대사고 진행 예측 및 대응방안 개발(학계 및 연구계)을 각 기관의 역할에 맞추어 체계적으로 수행하는 것이 바람직한 것으로 의견이 수렴되었다. 국가 차원의 “중대사고 현상규명 및 대처체계 구축을 위한 연구 로드맵 작성”은 규제 및 산학연 각 고유 분야에서의 필요성이 반영되는 동시에 객관성을 가지는 것이 바람직하므로, 원자력 학회의 특별위원회 형태로 추진하는 것으로 결정하였다.

본 보고서 작성을 위한 작업그룹은 심층방호 개념에 따라 일차계통 방호, 격납건물 방호, 핵분열생성물 거동 등 세 분과로 나누어져 전문성에 입각해 규제기관과 산학연의 전문가들이 참여하면서 주로 각 분과를 중심으로 활동하였다. 표 1.3.1에 특별위원회의 구성과 참여원들에 대해 기술하였다.

---

3) D. Magallon, A. Mailliat, J.-M. Seiler, K. Atkhen, H. Sjövall, S. Dickinson, J. Jakab, L. Meyer, M. Buerger, K. Trambauer, L. Fickert, B. Raj Sehgal, Z. Hozer, J. Bagues, F. Martín-Fuentes, R. Zeyen, A. Annunziato, M. El-Shanawany, S. Guentay, C. Tinkler, B. Turland, L.E. Herranz Puebla, European expert network for the reduction of uncertainties in severe accident safety issues (EURSAFE), Nuclear Engineering and Design 235 (2005) 309 - 346

4) Shoichi Suehiro, Jun Sugimoto, Akihide Hidaka, Hidetoshi Okada, Shinya Mizokami, Koji Okamoto, Development of the source term PIRT based on findings during Fukushima Daiichi NPPs accident, Nuclear Engineering and Design 286 (2015) 163 - 174

표 1.3.1 특별위원회 3개 분과 및 운영위원

구분	구성	운영 위원
위원장	1명	류용호 (한국원자력안전기술원)
부위원장	1명	송진호 (한국원자력연구원)
일차계통 방호	19명	김동하(한국원자력연구원:분과장), 손동건(한국원자력연구원:간사), 김군태(한국원자력안전기술원), 김상백(한국원자력연구원), 김환열(한국원자력연구원), 김희동(한국원자력연구원), 박래준(한국원자력연구원), 박종운(동국대학교), 안광일(한국원자력연구원), 윤선희(한국전력기술), 이결우(한전원자력연료), 이영승(한국수력원자력), 임국희(한국원자력안전기술원), 정법동(한국원자력연구원), 정용훈(한국과학기술원), 조용진(한국원자력안전기술원), 최유정(한국수력원자력), 하광순(한국원자력연구원), 홍성완(한국원자력연구원)
격납건물 방호	20명	박현선(포항공과대학교:분과장), 나영수(한국원자력연구원:간사), 김군태(한국원자력안전기술원), 김병조(한국전력기술), 김상백(한국원자력연구원), 김종태(한국원자력연구원), 김형택(한국수력원자력), 김환열(한국원자력연구원), 김희동(한국원자력연구원), 류인철(한국전력기술), 모리야마 키요푸미(포항공과대학교), 문영태(한국전력기술), 박래준(한국원자력연구원), 박종운(동국대학교), 방광현(한국해양대학교), 이두용(미래와도전), 이정재(한국원자력안전기술원), 임국희(한국원자력안전기술원), 조용진(한국원자력안전기술원), 홍성완(한국원자력연구원),
핵분열 생성물 거동	15명	김한철(한국원자력안전기술원:분과장), 김성일(한국원자력연구원:간사), 강상호(한국전력기술), 김성중(한양대학교), 서미로(한국수력원자력), 송용만(한국원자력연구원), 연제원(한국원자력연구원), 윤종일(한국과학기술원), 이두용(미래와도전), 이종성(한국원자력안전기술원), 임희정(한국원자력연구원), 조창석(한전원자력연료), 진영호(한국원자력연구원), 하광순(한국원자력연구원), 조성원(자문위원),

#### 제4절 범위 및 내용

본 보고서의 작성 목적은 중대사고 현안 해결을 위한 로드맵을 수립하는 것이며, 주요 기술현안을 정리하고, 특히 취약한 부분의 확인과 함께 해결 방법론 수립, 일정 제시 등을 포함하기로 하였다. 그러나 분야별 위원들이 모여 보고서 작성의 목적과 활용처, 일정 및 참여 가능성 등을 논의하는 과정에서 로드맵 작성에 필요한 기술요소 도출을 우선시하여야 한다는 의견이 대두되어 PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) 작성에 주력하는 것으로 결정이 이루어졌다. 즉, 중대사고 현상에 대한 정보를 간략하게 잘 정리하여 연구 뿐 아니라 규제 및 산업체 등에서 활용할 수 있는 내용을 PIRT 형태의 표에 포함하도록 결정되었다.

## 1. 일차계통 방호 분과

일차계통 방호 분과에서는 일차계통에서의 전반적인 중대사고 현상에 대하여 원자력 유관기관의 관심 내용을 PIRT 형태로 정리하였다. 원자로용기와 일차계통에서의 건전성 상실을 큰 제목으로 하여, 원자로용기에서는 노심과 하부 및 상부 반구에서의 건전성 상실 원인, 일차계통에서는 고온과 고압에 의해 발생할 수 있는 경계파손과 초기 사건에 의한 파손 원인을 기술하였다. 또한 건전성을 유지하기 위한 운전원 조치로 계통 감압, 노내 및 노외로의 냉각수 주입 전략에 대해서도 언급하였다. 이외에도 후쿠시마 사고 이후 관심이 높아진 사용후 연료저장조에서의 냉각재 상실로 인한 중대사고와 중수로에서의 적용 등도 추가하였다.

작성된 보고서의 궁극적인 활용을 위해 국내에서 가장 우선순위로 연구가 필요한 분야에 대한 의견을 제안하였다. 가장 우선순위가 높은 분야는 사고관리 차원에서 중요하면서도 또한 지식이 부족한 항목으로, 하부반구 용융물 냉각가능성이 채택되었다. 이는 냉각가능성에 따라 하부반구의 건전성이 결정되며, 건전성이 유지되면 더 이상의 사고진행이 없기 때문이다. 따라서 이 분야에 대한 실험이나 수치적 해석을 위해 전문가들이 문제를 정의하고 해결해야 할 필요성이 강조되었다.

상세한 내용은 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제1권 일차계통 방호분야)에 제공되어 있다.

## 2. 격납건물 방호 분과

격납건물 방호 분과에서는 원자로심의 핵연료가 용융되어 압력용기로부터 방출되면서 격납건물의 건전성을 위해할 수 있는 중대사고 전개를 고려하여 관련 현상(Phenomena description)에 대한 개요와 함께, 지식 현황(Status of Knowledge), 수준 및 중요도(Knowledge and significance level)를 지식적 측면, 사고관리적 측면 그리고 규제적 측면에서 검토하고, 관련 현안 및 향후 연구수요(Related issues and future research needs) 등에 관해 검토한 의견을 제시하였다. 또한 중대사고 대처체계 구축 측면에서 격납건물 내 완화설비 및 사고관리전략에 대하여 격납건물 내 관련 현상(Related phenomena), 현안의 중요성(Significance on issue), 중대사고 관리지침서 조치(SAMG action), 규제측면(법제화 포함) (Regulatory aspects including rule-making)을 기술하였다. 이어 후쿠시마 후속조치의 현황을 기술하고 향후 국내 원자력계에서 필요한 사항을 제안하였다.

상세한 내용은 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제2권 격납건물 방호 분야)에 제공되어 있다.

### 3. 핵분열생성물 거동 분과

핵분열생성물 거동 분과에서는 원자력발전소 중대사고시 핵분열생성물의 방출 및 이동 관련 제반 현상을 개관하여 주요 현안을 선정하고 위해도, 안전규제 함의 등의 측면에서 그 중요도를 평가하며, 실험 및 해석능력 측면에서 현재의 지식수준을 판단하여 현 지식의 부족한 부분을 규명하고, 향후 중장기적 연구, 중대사고 관리 전략과 중대사고 대처 설비 및 규제요건 측면에서 필요사항을 정의하여 제안하였다.

원자로심의 핵연료로부터 원자로냉각재계통, 격납건물, 환경으로의 단계별 방출 특성과 핵분열생성물의 에어로졸 및 기체상 거동 특성을 고려하여 현상 설명(Phenomena description), 실험프로그램 현황(Status of experimental program), 전산코드 모델링 현황(Status of computer code modeling), 지식수준 및 중요도(Knowledge and significance level), 관련 현안 및 향후 연구수요(Related issues and future research needs) 등에 관해 조사한 내용을 제시하였다. 또한 대처체계 구축 측면에서 격납건물 내 완화설비와 격납건물우회사고 완화전략에 대하여 현상, RCS 및 격납건물 내 관련 현상(Related phenomena), 현안 중요성(Significance on issue), 중대사고 관리지침서 조치(SAMG action), 규제측면(법제화 포함)(Regulatory aspects including rulemaking)을 기술하였다. 이어 사고 선원항 및 소외피폭 관련 허용기준에 대한 현황을 기술하고 향후 국내 원자력계에서 필요한 사항을 제안하였다.

상세한 내용은 중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 보고서 (제3권 핵분열생성물 거동 분야)에 제공되어 있다.

## 제2장 로드맵 보고서 구성

### 제1절 일차계통 방호 분과

일차계통 방호분과 보고서는 중대사고 진행 특성 및 중대사고 실재 사례소계와 일차계통 내 중대사고 주요 현상 및 평가로 구성되어 있다. 중대사고 진행 특성 및 실재 사례 소개는 노내 고압과 저압 중대사고 경위에 대해 기술하였고, TMI와 후쿠시마 사고경위를 소개하였다. 일차계통 내 중대사고 주요 현상 및 평가에서는 원자로용기 건전성 상실, 일차계통 경계 건전성 상실 그리고 사용후연료저장조에서의 냉각 상실 현상을 기술하였고 중수로에 적용하여 현상을 평가하였다. 원자로용기 건전성 상실은 노심 건전성 상실, 하부 및 상부헤드 건전성 상실 그리고 운전원 조치의 항목으로 구성되었다.

### 제2절 격납건물 방호 분과

격납건물 방호 분과 보고서는 중대사고 현상 해석, 중대사고 대처 체계 그리고 격납건물 방호 관련 규제 현황 등 세 부분으로 구성되어 있다. 격납건물 방호 관련 중대사고 현상 해석은 현상 현황과 해석방법론 현황으로 구분되어 다루어졌다. 현상 현황 부분에서는 격납건물 고온과압, 노심용융물 고압분출 및 직접가열, 가연성기체 연소폭발, 노심용융물-냉각수반응, 노심용융물-콘크리트반응 등 주요 현상에 대한 개요 및 지식수준을 기술하였다. 해석방법론 현황에서는 결정론적 해석방법론과 확률론적 해석방법론에 대한 설명과 MELCOR, MAAP, SCDAP-RELAP, ASTEC, SAMPSON 등 중대사고 분석코드 현황과 현재 진행 중인 국내개발코드에 대한 현황도 기술하였다.

대처체계 항목에서는 중대사고 완화전략 제시와 함께 PCCS, CFVS, PAR 및 점화기, 급속감압설비, 살수, 코어캐처, 원자로공동 충수설비 등 완화설비에 대하여 설명하였다. 또한 후쿠시마 후속조치 현황과 중요 사항을 검토하였고 향후 계획을 제시하였다.

규제현황측면에서는 중대사고 정책성명, 원자력안전법, 하위법령 등 국내원자력안전법에 대하여 현황을 설명하였고, 미국, 일본, 유럽 등의 국외 격납건물 중대사고 규제에 대하여 기술하였다.

### 제3절 핵분열생성물 거동 분과

중대사고시 핵분열생성물의 거동을 핵연료로부터 생성 및 방출부터 소내에서의 거동을 기체상과 에어로졸상으로 구분하여 기술하였다. 핵연료로부터 방출된 핵분열생성물이 격납건물 내부로 방출되는 경로를 원자로용기 손상, 고압용융물 방출, 배관 파손 및 개방, 노심용융물과 콘크리트간의 반응으로 나누어 검토하였고, 환경으로 방출되는 경로로는 격납건물

손상과 격납건물 우회사고에 대하여 기술하였다.

핵분열생성물 거동에서는 에어로졸의 형성, 성장, 침착 현상에 대하여 설명하였고, 세정, 수조여과, 재부유 등에 의해 재생성 및 제거되는 기체에 대해서도 기술하였다. 요오드 등 기체상 핵분열생성물의 거동에 대해서는 별도의 항목으로 화학적 거동, 흡착, 재휘발 등으로 나누어 기술하였다.

핵분열생성물 방출량 저감을 위한 대처체계 설비 및 전략을 제시하였고, 참조 선원항 및 평가기준을 검토하였다. 완화설비로는 여과배기계통, 살수계통, 격납건물 우회사고 완화 전략을 고려하였고 구체적으로 기술하였다. 참조 선원항으로는 TID 14844, NUREG-1465, 프랑스 참조선원항 등을 고려하였고, 최종적으로 선원항 관련 향후 연구 제안사항을 기술하였다.

## 제3장 중대사고 현상별 기술현안 및 중요도

### 제1절 일차계통 방호 분과

일차계통 방호 관점에서의 중대사고 주요 현상을 PIRT 형식으로 정리하였다. 크게 원자로용기와 그 외 일차계통 경계에서의 손상으로 구분하고, 각각에서 세부 손상단계를 정의하여 주요 현상과 지식수준 및 중요도, 현안 및 중요성, 사고관리방안, 규제관점에서의 중요성, 그리고 노내 손상 거동이 원자로건물과 핵분열생성물 거동에 미치는 현상 순서로 표 3.1.1에 정리하였다. 이 표는 일차계통에서의 중대사고 진행과정에 따른 주요 현상을 노심, 하부반구, 그리고 일차계통 경계에 따라 정리함으로써, 일목요연하게 사고현상과 그에 관련된 여러 관점을 제공해준다.

추후 필요한 연구 항목 선정을 위해 평가 항목 중에 지식수준 및 중요도를 추가하였고, 특히 중요도는 사고대응과의 밀접성을 기준으로 상, 중, 하로 구분하였다. 전문위원들 사이의 논의와 투표를 통해 가장 우선적인 연구 분야를 다음과 같이 도출하였다.

- 1) 원자로용기 하부반구에서의 용융물 냉각 성능: 이 현상은 원자로용기 하부반구의 건전성과 가장 밀접하게 연관되어 있지만 그 중요성에 비하여 지식수준이 낮기 때문이다.
- 2) 일차계통 내에서의 고온고압 수증기로 인해 발생할 수 있는 증기발생기 세관파손: 이는 노심에서 발생한 핵분열생성물이 세관의 파손부위를 통해 일차계통을 거쳐 원자로건물 외부로 직접 방출되기 때문이다.

보고서에 언급된 주요 현상에 대한 정확한 지식수준과 중요도에 대해서는 전문가들의 공감이가 필요하며, 이를 바탕으로 국내외 연구 현황 및 협력 방안을 고려한 좀 더 구체적인 연구 내용과 수행 일정 등이 제안되고 보완될 것이다.

표 3.1.1 일차계통 방호 분과 PIRT 결과

일차계통 손상 단계	세부 손상 단계	주요 현상	지식 수준/ 중요도*	현안 및 중요성	사고관리 방안	규제관점 중요성	원자로건물 건전성 관점	핵분열생성을 거동 관점
원자로 손상	원자로심 건전성 상실	노심가열 (피복재 산화)	상/중	붕괴열, 노심냉각가능성 (재충수), 피복재산화, 산화열	증기발생기냉각온전, 냉각수주입	붕괴열 수준 및 FP 방출 평가, 산화열/수소생성량 평가	노심가열속도에 따른 영향	피복재파손, 방출량
		노심용융 (유로 막힘)	중/중	촉농현상 (candling), 유로 막힘	증기발생기냉각온전, 냉각수주입	수소농도 제한, 용융, 재배치 및 재고화에 따른 노심물질구성비	수소연소, 용융물조성비	피복재파손, 방출량
		노심 파편층/ 용융물 풀 형성	중/중	용융물의성장, 용융물 조성 형성, 냉각수로의 FP 용해 및 재증발	증기발생기냉각온전, 냉각수주입, 수소 감시	사용모델의 가정 및 불확실성,고체파편 및 용융물 풀 형성 양상, 노심용융진행을 막기 위한 냉각재 주입량, 유택틱, 용융물형성모 델검증	수소방출, 용융물 조성 (FCI)	용융물 풀 온도에 따른 FP 방출
		용융물 냉각가능성	하/중	재임계는 가능성 희박, 유로변형 이후의 충수주입효과, 일부 건전노심 에 순수물주입시 재임계 가능성	조기외벽냉각조치, 수소감시 및 제어	재충수 냉각효과 및 부작용 (재임계, 수소 및 FP 발생 등) 평가	재충수로인한 추가적인 수소 생성효과	재충수로인한 FP 제거효과
		용융물 재배치 (이송)	하/중	용융물 재배치전개(시점, 온도), 노심 용융 및 재배치 지연효과	증기발생기냉각온전, 냉각수주입	하반구에 재배치되는 용융물 형태/질량/열 하중 평가	노내 증기폭발 여부	없음
	원자로 상하부구조물 건전성 상실	용융물 냉각가능성	하/상	불확실한 용융물 형성, 불확실한 열전달기재, 재임계조건, 재임계에따 른 출력증가및용융가속화	감압, 냉각수 주입, 원자로공동충수	노내 냉각재에 의한 냉각효과 평가 (용융물 풀 상부 및 gap-cooling), 재임계가능성 평 가, 재충수 냉각효과 및 부작용(재임계, 수 소 및 FP 발생 등) 평가	추가적인 수소생성, 저압에서의 증기폭발가능성	재충수로인한 FP 제거효과
		하반구 가열 및 용발 (ablation)	중/상	용융물층 초기형상, 증상화, 자연대류열전달, 열하중집중현상, 용융물층간열전달, 외벽냉각열전달	원자로용기외벽냉각, 용기내냉각수주입	열적파손기준에 따른 외벽냉각전력 성공 가능성 평가	없음	없음
		하반구 파손 모드	중/상	용융물 냉각여부, 외벽냉각 조건에서의 용기파손	감압, 원자로공동충수	종합적 파손모드를 고려한 하반구 건전성 평가	원자로건물건전성 초기조건 제시(온도/조성/방출물/방출량)	고압파손모드인경우 다량의 FP추가방출
		고압방출 (HPME)	상/하	격납건물 건전성 위협 여부, 파손크기, 방출량	감압(2MPa이하)	HPME 대처 완화 수단 및 안전등급의 감압설비 구비	원자로건물건전성위협, 수소생성	고압파손모드인경우 다량의 FP추가방출
		상부구조물 파손	상/하	노심손상지연효과 (열점원, 금속물질증가)	없음	구조물 하반구 재배치량 평가	용융물조성영향,초기조건변화	
일차계통 경계손상	고온고압 기인 경계상실	증기발생기 세관 파손	중/상	고온고압환경에서의 자연순환, 물성 치 부재, 2차측조건, 핵분열생성을 방출	HPME 예방을 위한 일차계통 감압	고압 중대사고 시 증기발생기 세관 파손 확 률 평가, 증기발생기 입구 플레넘 혼합 평 가	수소 성층화 및 혼합에 의한 건전성 위협	방출기준 초과 가능
		밀림관/고온관 파손	상/하					
	초기사건 기인 경계상실	ISLOCA/SGTR	상/상	중대사고시 대기로의 FP 직접 방출	감압, 2차측 Feed&bleed	체크밸브 및 보조계통 건전성 보장	보조건물로의 방출	FP 조기방출
		PORV/배관 파손	상/중	PORV의 주기적 운전에 따른 고착	일반 LOCA와 동일	운전원 판단요류 배제	수소방출	FP 방출

\*중요도 판단근거: 사고대응과의 밀접성



## 제2절 격납건물 방호 분과

원자로심의 핵연료가 용융되어 압력용기로부터 방출 격납건물의 건전성을 위해할 수 있는 중대사고 전개를 고려하여 관련 현상(Phenomena description)에 대한 개요 및 중대 사고 대처체계 및 설비, 규제에 대한 동향 그리고 후쿠시마 후속조치 현황등을 간략히 서술하고, 지식현황 및 수준(Status of Knowledge) 그리고 중요도(Knowledge and significance level)를 사고관리 측면 그리고 규제 측면에서 검토하였다.

주요핵심현안을 도출함에 있어서 전문가들의 의견을 수렴하여 현안의 중요성과 지식수준을 고려하여 핵심현안 (지식수준 하/중요도 상), 주요현안 (지식수준 중상/중요도 상), 관심현안 (지식수준 하/중요도 중하), 해결현안(지식수준 하/중요도 하)로 구분하였다.

이를 기반으로 주요핵심 현안 및 향후 연구수요(Related issues and future research needs)을 도출하고 국내전문가들이 검토한 의견을 제시하였다. 그리고 향후 국내 원자력계에서 필요한 사항을 제안하였다. 국내 전문가에 의해 도출된 핵심/주요 현안은 아래 표 3.2.1과 같다. 지식수준이 낮으면서, 중요도가 높은 경우의 주요 쟁점들을 정리하자면 아래와 같다.

- 여과배기 성능평가 및 사고관리 전략
- 피동축매결합기(PAR)를 포함한 수소제어 계통의 성능평가 실험 및 해석검증(산소회석조건, 에어로졸에 의한 성능저하, 역방향 유동)
- 용융물 재료에 따라 산화반응이 발생할 경우의 냉각성 영향
- 장기 냉각으로 연계 시 용융물 파편화 현상
- 파쇄입자 침적에 따른 침적층 형성과정(입자층, Cake) 및 파편 잔해층 열전달 모델
- 증기폭발방지를 위한 대처설비 기술개발
- 충수공동에서의 다공성 노심용융물 냉각성(파편층 형상, 열전달 모드, 파편층 내 물 유입, 충수깊이 및 용융물 냉각 가능성)
- 국내 가동원전에 대한 MCCI 대처능력 평가 및 결말 분석을 통한 사고관리방안

이상의 주요 쟁점으로 정리된 사항에 대해서는 전문가들의 지속적인 논의가 있을 것이며, 이러한 과정에서 국내외 연구 현황 및 협력 방안을 고려한 좀 더 구체적인 연구 내용과 수행 일정 등이 제안되고 보완될 것이다.

표 3.2.1 격납건물 방호 분과 PIRT 결과

격납건물손상단계	세부손상 단계	주요 현상	지식 수준 /중요도*	Issue description (중요한 현상, 불확실한 현상 등 설명)	SAMG action /mitigation actions	Regulatory significance (action/Law/needs)	Related phenomenon in RCS	Related phenomena in FP
격납건물 내 거동	격납건물 건전성 상실고온과압	격납건물 고온과압, 격납 건물 내안능력, 재가열, 국부고온, 누설 및 여과배 기 설비	중/상	격납건물 내안능력분석 (구조손상거동)	격납건물 감압	격납건물 손상 (구조 물, 관통부, 관련 배관 등)에 미치는 영향	원자로 손상 및 일차계 통 경계손상에 미치는 현상전반	핵분열생성물 생성/성 장/반응/제정 및 수조 여과 전과정
			중/중	핵분열생성물 이송침전에 따른 주요기기 재가열				
			중/상	수소연소/폭발등에 따른 국부고온영향				
			중/상	관통부의 이음새, 밸브 패킹등의 누설				
			하/상	여과배기계를 통한 사고관리 전략				
			중/상	여과배기설비의 감압능력				
	HPME / DCH	노실용용출 분출, 확산, 이송 및 방출저감, 제어 감압계통	중/하	노실용용출 분출 모델	RCS 감압, 냉각수 주 입, SG주입, ERVC	상부대기르 이송되는 고온의 노실용용출물의 양 및 그에 의한 온도 및 압력증가량 다른 현상과 중복하여 발생하는 경우의 압력 증가량 평가 (수소연소 등) 감압사고 경위에 대한	원자로 손상에 미치는 현상전반	핵분열생성물 생성/방 출/이송, (비 휘발성) 에어로졸 생성
			중/하	격납건물 공동 내 용출물 확산 모델				
			중/하	격납건물 상부로의 용출물의 이송모델				
			중/하	격납건물 공동 내 증수 모델에 따른 용출물 방출 특성 및 저감설계				
			상/하	격납건물 대기와의 열전달 및 연소모델				
			상/하	격납건물 내부 구조물로의 열전달 모델				
	가연성기체 연소 및 폭발	수소 연소 생성 방출, 확 산 및 가속, 수소제어	상/하	격납건물 공동 내 증수냉각수의 영향 (상효작용, 냉각 및 산화반응)				
			상/상	감압계통의 설계 및 사고관리 전략의 개발				
			상/상	감압사고 경위에 대한 Low Cut-off Pressure				
			중/중	수소생성모델 (노내냉각과 고온 증수기와의 산화반응)	격납건물 감압, 수소제 어	중대사고 조건하에서 의 수소 제거능력 FA, DDT 가능성 평가 및 폭발시 격납건물 손 상가능성	원자로 손상 및 일차계 통 경계손상에 미치는 현상전반	아이오딘 화학종으 반 응, 흡착 (PAR 의 영 향)
			상/중	수소방출모델 (RCS파단부, 감압장치)				
			중/상	수소확산분포모델 (방출수소의 혼합기체 형태, 격실이동 및 확산, 수소성중화)				
			중/중	수소연소모델 (국소적인 수소농도에서 가연조건하에 열원과 접촉한 수소연소)				
			중/중	수소화염가속모델 (수소 화염의 난류가속)				
			하/중	DDT (압력파와 화염면의 충돌에 따른 Detonation, 강한 연소 충격파의 전파모델)				
격납건물 내 거동	노실용용출-냉각 수 반응 (FCI)	FCI에 의한 급격한 증기 의 발생, 노실용용출의 파 괴화, 증기폭발 및 압력파 의 전파 및 주변구조물과 의 상호작용, 노실용용출 파괴화 및 침전에 따른 냉각성	중/상	피동적매결합기(PAR)를 포함한 수소제어 계통의 성능평가 실험 및 해석검증	원자로 공동 냉각수 주 입, 격납건물감압	증기폭발시 충격량에 의한 격납건물 손상가 능성 격납건물 Dynamic Fragility Curve	원자로 손상에 미치는 현상전반	핵분열생성물, (비휘발 성)에어로졸 생성
			상/중	용출물제트 냉각수 유입특성(공기중용출물제트파쇄, 용출물냉각수 유입속도, 용출물제트의 유입직경등)에 따른 영향				
			중/중	용출물 제트의 파쇄에 따른 용출물 평균입자, 입자분포 및 증기분포분포 (비등열전달) 모델				
			중/중	혼합과정에서의 증기분포가 폭발과정에 미치는 영향				
			중/중	혼합과정에서의 냉각수의 화학적 특성이 폭발과정에 미치는 영향 (해수, 보름수, 핵분열생성				
			중/중	혼합과정에서의 용출물 고화, 산화, 수소생성 거동 및 영향				
	MCCI / 노실용용 출 냉각성	MCCI에 의한 지속적 기 체 생성, 휘발성 핵분열생 성물 방출에 따른 격납건 물 가압, 공동콘크리트의 침식 및 용탈, 노실용용출 냉각	하/중	용출물제트 파쇄에 대한 스케일링 효과	원자로 공동 냉각수 주 입, 격납건물감압	원자로 공동에서의 노 실용용출 냉각 가능성 MCCI 정지 일계온도 평가에 의한 MCCI 중 지시점 결정	원자로 손상에 미치는 현상 전반	지속적기체생성 및 휘 발성 핵분열생성물 방 출 및 에어로졸 생성
			중/중	증기폭발 기폭 및 폭발 모델				
			하/중	복합현상 체계에서의 증기폭발 전파 모델 (벽/바닥의 영향, 복합구조)				
			중/중	용출물 재료의 영향 (금속성분의 열유체역학적 영향, 산화반응)				
			하/상	용출물 재료에 따라 산화반응이 발생할 경우의 냉각성 영향				
			하/상	장기 냉각으로 연계 시 용출물 파괴화				
	MCCI / 노실용용 출 냉각성	MCCI에 의한 지속적 기 체 생성, 휘발성 핵분열생 성물 방출에 따른 격납건 물 가압, 공동콘크리트의 침식 및 용탈, 노실용용출 냉각	하/상	파쇄입자 침전에 따른 침전층 형성과정(입자층, Cake) 및 열전달 모델	원자로 공동 냉각수 주 입, 격납건물 감압(상 수, 여과배기), 수소제 어, Core catcher	원자로 공동에서의 노 실용용출 냉각 가능성 MCCI 정지 일계온도 평가에 의한 MCCI 중 지시점 결정	원자로 손상에 미치는 현상 전반	지속적기체생성 및 휘 발성 핵분열생성물 방 출 및 에어로졸 생성
			중/상	사고조건 (용출물온도, 증수깊이등)을 고려한 원전스케일의 불확실성 분석을 통한 평가 방법				
			하/상	증기폭발발지를 위한 대처설비 기술개발				
			중/상	다차원 용발현상, 용출물퍼짐, 용출물 분출				
			중/상	비용출기체 및 가연성기체 생성 (콘크리트유형의 영향)				
			중/상	핵분열생성물 방출				
	MCCI / 노실용용 출 냉각성	MCCI에 의한 지속적 기 체 생성, 휘발성 핵분열생 성물 방출에 따른 격납건 물 가압, 공동콘크리트의 침식 및 용탈, 노실용용출 냉각	중/상	사후 상부 증수 시 냉각거동 (파전증냉각, 상부금속증효과 냉각수주입, 냉각수주입모드 영향)	원자로 공동 냉각수 주 입, 격납건물 감압(상 수, 여과배기), 수소제 어, Core catcher	원자로 공동에서의 노 실용용출 냉각 가능성 MCCI 정지 일계온도 평가에 의한 MCCI 중 지시점 결정	원자로 손상에 미치는 현상 전반	지속적기체생성 및 휘 발성 핵분열생성물 방 출 및 에어로졸 생성
			하/상	사전습식공동에서 용출물 및 냉각수 조건에 따른 용출물 거동 (파괴화 정도, 입자크기분포)				
			중/상	습식공동에서의 노실용용출 침전 및 퍼짐현상 (증수 깊이에 따른 연구 포함)				
			중/상	증수공동에서의 다공노실용용출 냉각성 (파전증냉각, 열전달모드, 파전증냉 내 용유입, 증수깊이 및 용출물 냉각가능성)				
			하/상	증수후 방출된 노실용용출물의 냉각거동에 대한 현상의 다양한 불확실성으로 인해 냉각가능성 및 격납건물 과압				
			하/상	국내 가동원전에 대한 MCCI 대처능력 평가 및 결말 분석을 통한 사고관리방안 용출물 냉각을 유도할 수 있는 전용 설비(코어캐처) 개발				

### 제3절 핵분열생성물 거동 분과

핵연료로부터 환경으로의 단계별 방출 특성과 핵분열생성물의 에어로졸 및 기체상 거동 특성을 고려하여 현상, 실험프로그램 현황, 전산코드 모델링 현황, 현재의 지식수준 및 중요도, 관련 현안 및 향후 연구수요 등에 관해 조사하였다. 또한 대처체계 구축 측면에서 격납건물 내 완화설비와 격납건물우회사고 완화전략에 대하여 현상, 현안의 중요성, 중대사고 관리지침서 조치, 규제측면(법제화 포함)을 고려하였다. 아울러 사고 선원향 및 소외피폭 관련 허용기준에 대한 현황과 향후 관련 연구 제안사항을 정리하였다. 표 3.3.1에는 핵분열 생성물의 거동 및 방출 완화방안에 대한 PIRT를 각각 제시하였다.

참여자들의 의견을 수렴한 결과, 핵분열생성물 거동에 관한 국내 기술수준은 전반적으로 국제수준에 크게 미달하고 있으며, 공통적으로 가장 중요하고 우선순위가 높은 것으로 평가한 기술현안은 다음과 같다.

- 1) 노심 구조물(주로 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선
- 2) 산화조건에서 핵연료부터 Ru 에어로졸의 방출 등 거동에 대한 실험데이터 확보
- 3) 원자로냉각재계통으로부터 격납건물로의 Cs, I 방출 모델
- 4) 에어로졸의 형성, 성장, 그리고 침착에 관한 현상(응결과 응축에 의한 성장: 격납건물 표면에서의 응축에 의한 에어로졸의 거동 포함)
- 5) 다음 현상에 대한 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링: (1) 벽면 및 기기의 표면에 흡탈착되는 아이오딘 핵종의 이동 (2) 기체상에서 침착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기아이오딘의 형성
- 6) MCCI Pool로부터 에어로졸 방출
- 7) Pool Scrubbing: 격납건물 내 Pool로부터의 재유입, 포화상태까지 확장된 수조 Scrubbing 실험, 수조 표면 위 고압 조건, 물의 pH가 에어로졸 및 아이오딘 기체 역류에 미치는 영향, 잘 정의된 중대사고 환경조건에서 재부유 현상을 규명하기 위해 대표적인 에어로졸 물질을 사용하는 Scrubbing 종합효과시험
- 8) CFVS 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 : 가동시점 또는 개방압력, SAMG 범주에서 CFVS 운전(개방지속/개폐반복), 격납건물 감압성능, 에어로졸과 기체상 아이오딘에 대한 제거효율, 피동 운전시간, 소내 및 소외선량
- 9) 실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원향 결정

그 밖에도 다음 사항들도 비교적 중요하고 우선적인 현안으로 관심을 모았다.

- 1) 기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 노심으로부터의 핵분열생성물 기체

의 방출 분석, 평가

- 2) 아이오딘 분리: 액체상으로부터 휘발성 아이오딘의 생성율, Pool 수면에서의 아이오딘 핵종 간 물질 전달률, Pool이 고갈되면서 유기 아이오딘을 방출하는 메커니즘
- 3) 침적물 재증발, 노심으로부터 방출되는 루테튬(Ru-103, Ru-106)의 재휘발 및 분포, RCS 온도 및 기체 조성에 따른 루테튬 핵종의 재휘발 거동 및 재휘발 분율, 루테튬 이외의 다른 핵종이 침착되었을 때의 영향, 침착된 물질의 산화상태에 대한 표면상태 분석

이들 대부분은 중장기적인 연구가 필요할 것으로 판단되었으나, 단기적인 연구로 국제 수준에 도달할 수 있을 것으로 예상한 항목은 Pool Scrubbing 부분효과에 관한 실험적 연구이다.

본 분과에서는 구조를 유지하거나 손상된 핵연료로부터의 핵분열생성물 방출과 환경 방출 이후 핵분열생성물의 거동에 대해서는 자세히 다루지 못했거나 전혀 다루지 못하였다. 이러한 부분은 향후에도 본 보고서를 지속적으로 최신화하는 과정을 통해 보완해 나갈 수 있을 것이다.

표 3.3.1 핵분열생성물 거동 분과 PIRT

핵분열생성물 방출/이동 단계	거동 특성	주요 현상	지식 수준 /중요도	Issue description	SAMG action	Regulatory significance	Related phenomenon	Related phenomena
				(중요한 현안, 불확실한 현상 등 설명)	/mitigation actions	(action/Law/needs)	in RCS	in containment
노심손상 방출	노심 가열	핵분열생성물의 간극 방출	상/중 중/상 하/하	핵연료로부터 방출: 핵연료 유형과 연소도에 따른 FP 방출 Cs 및 I 방출모델 High burnup(연소도 $\geq 60$ MWd/kgU)/MOX 핵연료의 재관수 및 수소 생성의 영향	SAMG 진입조건 연계	사고선원할(간극방출) 설정	취발성 핵종의 에어로졸 생성/성장, 기체상 화학반응	취발성 핵종의 에어로졸 생성/성장, 아이오딘 화학종의 반응, 세정, 수조여과
	노심 용출	핵연료 및 노심 구조물의 손상, 핵분열생성물의 용출 방출	하/상 중/상 하/상	노심 구조물(주르 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선 기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 분석 및 평가 핵연료 산화조건에서 Ru 에어로졸 거동에 대한 실험 데이터 확보	SAMG 진입조건 연계	사고선원할(in-vessel 방출) 설정	에어로졸 생성/성장, 기체상 아이오딘 화학 반응	에어로졸 생성/성장, 아이오딘 화학종의 반응, 세정, 수조여과
원자로냉각재계통 내 거동	증기/에어로졸의 이동	에어로졸 생성/성장/침착/재취발, 수증기 또는 수소 환경에서 Mo, B, (Cd, Ag, In), Cs, I, O, H 간 화학반응	하/상 하/중 하/중 하/중 하/중 하/중	RCS 내 아이오딘의 이동에 미치는 제어봉 물질의 영향 B <sub>4</sub> C 제어봉의 손상시 발생하는 CO에 의한 IxOy의 분해 전열적인 다성분 에어로졸에서의 아이오딘 흡착 반응속도와 방사선 조사시 안정성 특이성(Singularities) 및 복합구조물로의 침적 강한 난류 유동시 입자 파쇄 RCS를 따라 부착된 금속성 아이오딘화물의 재분발 가능성 증기발생기냉각유전, 냉각수주입	RCS 감압 및 주입 전략 연계	사고선원할(아이오딘의 화학적 형태, 핵종별 방출분율) 설정		격납건물 내 에어로졸/아이오딘 거동, 세정, 수조 여과, FCVS
		기체상 아이오딘 등의 화학반응(Mo, B, (cd, Ag, In), Cs, I, O, H 화학체계)	하/중	RCS 내 기체상 아이오딘 생성 및 방출				
원자로냉각재계통 손상 방출	원자로용기 손상	RPV 크립파열, ICI 관통 손상, 핵분열생성물 기체상 및 에어로졸 방출	하/상	Ru (Ru-103, Ru-106) 침적물의 RCS 내에서 재취발 (다른 핵종 또는 산화상태의 영향)	RCS 감압/냉각수 주입, SG 주입, ERVC	사고선원할에 RuO <sub>4</sub> 고려 가능성		MCCL, FCVS, ECSBS
	배관 파열 / 개방	핵분열생성물 기체상 및 에어로졸 방출						
	HPME	용융물 중 UO <sub>2</sub> 미세입자의 격납건물 내 산포 및 산화(발열반응), 취발성 핵분열생성물 방출						
격납건물 내 거동	에어로졸 거동	에어로졸 생성/성장/침착/재부유	중/상 하/하 하/중 하/상 하/중 하/중 하/중 하/중	에어로졸의 열성, 성장 및 침착에 관한 현상(용융물 유출에 의한 성장, 격납건물 표면에서의 유출에 의한 에어로졸의 거동 포함) 전하 효과 용융물 대기 조건에서의 혼합 에어로졸 Pool로부터의 재유입 (집수조와 같은 Pool에서 세정시 재부유 포함) 수소재결합기의 영향 수소연소가 부유 에어로졸에 미치는 영향 화재 에어로졸 격납건물 내 에어로졸 재부유(Mechanical resuspension) 모델의 개선 및 추가적인 검증 노심 용출물 분출: 난류 효과에 의한 에어로졸의 이동 및 침착	격납건물 감압(살수, Fan Cooler 작동, 여과 배기)	에어로졸 제거	증기/에어로졸 거동	세정, 수조여과, FCVS, ECSBS
	아이오딘 등의 화학적 거동	아이오딘 화학종의 반응, 흡탈착	하/상 하/상 하/중 하/중 하/중 하/상 하/상	벽면 및 기기의 금속 또는 페인트 표면이나 에어로졸 입자에 흡착되는 아이오딘 화학종의 이동 기체상에서 흡착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기 아이오다이드의 비균질 생성/페인트 열화가 아이오딘 취발성 및 방사선원할에 미치는 영향 기체상에서 방사능에 의한 유기 아이오딘의 분해 증기유출에 의한 취발성 아이오딘의 흡착 수조 내부에서 취발성 아이오딘의 생성 및 소멸(방사선 환경의 영향) 아이오딘의 분리(partitioning): 액체상으로부터 취발성 아이오딘의 생성물 / Pool 수면에서의 아이오딘 화학종간 질량전달률 / Pool이 고갈되면서 취발성 아이오딘을 방출하는 메커니즘 IxOy의 크기, 조성 및 격납건물 표면에 흡착된 IxOy의 방사선하에서의 안정	격납건물 감압(살수, 여과배기), 수소제어	사고선원할(기체상 핵종의 화학적 형태) 설정	증기/에어로졸 거동	세정, 수조여과, FCVS, ECSBS

격납건물 내 거동	MCCI	지속적 기계 생성 및 휘발성 핵분열생성물 방출	하/중 하/중	MCCI 관련 기존 실험결과에 대한 재평가 및 코드 추가검토, 콘크리트 기반의 에어로졸 특성 정량화 노심-콘크리트 상호작용 결과 생성물 기체에 의해 이송되는 핵분열생성물과 비방사성 에어로졸의 양	원자로공동 냉각수 주입, 격납건물 감압(삼수, 여과배기), 수소제어, Core catcher	사고선원형(용기의 방출) 설정		
	세정(Washout)	삼수에 의한 대기중 핵분열생성물 제거	하/상 하/중	삼수에 의한 에어로졸 제거 모델의 개선 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 연구	격납건물 감압(삼수)	에어로졸 및 원소형 아이오딘 제거	중기/에어로졸 거동	중기/에어로졸 거동
	수조여과(Pool scrubbing)	수조에서의 핵분열생성물 제거	하/상 하/상 하/상 하/상	기존 실험보다 더 높은 기계 온도와 중기유량, 이송가스 내 수소를 포함시킨 실험 표화상태까지 확장된 수조 실험 및 과냉각상태 수조의 제염능력과 비교 수조 표면위 고압 조건, 물의 pH가 에어로졸 및 아이오딘 기체 역류에 미치는 영향 조사 필요 잘 정의된 중대사고 환경조건에서 재부유 현상을 규명하기 위해 대표적인 에어로졸 물질을 사용하는 종합효과시험 Stand-alone 또는 integral code model의 검증용 위한 체계적 실험 데이터Stand-alone 또는 integral code model의 검증을 위한 체계적 실험 데이터베이스 구축	원자로공동 냉각수 주입, 격납건물 감압(삼수, 여과배기)	에어로졸 및 원소형 아이오딘 제거	중기/에어로졸 거동	중기/에어로졸 거동
	FCVS	핵분열생성물 방출 저감	중/상	기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 연구: - CFVS 가동시험 또는 CFVS 개발안역, - SAMG 범주에서 CFVS 운전 (개발지속 또는 개발반복), - 격납건물 감압성능, - 에어로졸과 기체상 아이오딘에 대한 제거효율(DF), - 피동 운전시간, - 소내 및 소외선량	격납건물 여과배기 감압(삼수 및 수소 제어 연계)	격납건물 감압 에어로졸 및 원소형/유기 아이오딘 제거	중기/에어로졸 거동	MCCI, 격납건물 장기 과압
	ECSBS	대기중 핵분열생성물 저감	중/중	감압효과, 가동시험, 가동시간	격납건물 삼수 감압, 수소제어	격납건물 감압 에어로졸 및 I <sub>2</sub> 제거	중기/에어로졸 거동	MCCI, 격납건물 장기 과압
	원자로공동충수	MCCI 완화, 노심파괴를 냉각				핵분열생성물 제거	원자로용기 손상	MCCI, 노심파괴를 냉각, FCI, 수조여과
격납건물 손상 방출	Containment failure	격납건물 관통부 등 경계 손상	하/중	격납건물 Crack 형성 관통부에서의 누설 및 격납건물 동적 거동을 바탕으로 환경으로 누설되는 핵분열생성물의 정량화	격납건물 감압, 삼수, 원자로용기내 외부 냉각수 주입, Core catcher	소의 방사선 영향	원자로용기 손상, HPME 배관 파열/개방	MCCI, 중기/에어로졸 거동
	Leaching	핵분열생성물의 침출	하/중 하/중 하/중 하/중	냉각수로의 에어로졸 방출 (FP (Sr, Cs, Ba, Sb, Ce/Pr, Eu and actinides) 방출경로상에서 분자 및 유기 아이오딘의 제거율(흡착율)에 대한 분석모델 개발 핵분열생성물의 Leak path를 통한 이동: 모델 개발 및 검증을 위한 시나리오와 현상에 대한 실험적 연구(Separate, Integral) 노심 용융물과 Basemat 아래 지하수와 반응: 가용한 모델이 충분하지 확인 및 실험적 연구 필요		소의 방사선 영향	원자로용기 손상, 중기/에어로졸 거동	
격납건물 우회 방출		중기발생기 전열관 손상 또는 ISLOCA	하/상	중기발생기 내 에어로졸의 역류	SG 감압/급수 및 격리, 터빈우회중기방출, PSV 방출 회수	소의 방사선 영향	중기/에어로졸 거동, SG 여과세정	
			중/중	ISLOCAL나 SGTR 시 방사선영향 완화수단 및 전략 개발	보조건물 여과배기	소의 방사선 영향		
대기환경에서의 거동		대기중 핵분열생성물의 확산, 침착 등	하/하	대기 환경에서의 이동 중 아이오딘 화학종(기체-입자)의 변화	격납건물 내 삼수, 여과배기, SG 격리	방사선 영향(주민피폭/토양오염)	중기/에어로졸 거동	에어로졸 생성, 성장/아이오딘 화학, 세정, 수조여과, FCVS, ECSBS, 격납건물 손상, Leaching 방출
선원형 평가	사고선원형		중/상	실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원형을 결정하기 위한 산학연의 종합적인 연구	삼수, FCVS	사고시 방사선영향 평가	기체상/에어로졸 핵분열생성물 거동	기체상/에어로졸 핵분열생성물 거동, FCVS 나 ECSBS 작동에 의한 핵분열생성물 제거, Leaching
	평가방법론		하/상 하/상 하/상	방사선원형 종합 모델링 개선 방사선원형 평가시 불확실성을 확인하고 해결할 수 있는 분석 방법: 격납건물에서 부유화된 아이오딘의 화학적 형태, 중대사고시 삼수 및 자연 침적 등 제거 메커니즘 FP 거동 불확실성을 파악하기 위한 Fukushima 상세자료 분석	삼수, FCVS	사고시 방사선영향 평가	기체상/에어로졸 핵분열생성물 거동	기체상/에어로졸 핵분열생성물 거동, FCVS 나 ECSBS 작동에 의한 핵분열생성물 제거, Leaching

## 제4장 결론

후쿠시마 원전 사고는 중대사고가 발생하였을 경우에도 국민의 건강을 지키고 환경오염을 방지하기 위해 “대량 방사성 물질 방출량을 실제적으로 배제”하여야 함을 시사하고 있다. 이러한 목표는 국내외에서 중대사고 법제화를 통해 추진되고 있다.

많은 중대사고 현상들에 대해 아직 이해가 부족하고, 노심, 원자로 및 격납건물의 손상, 연이은 방사성 물질의 방출을 포함하는 중대사고 해석 모델의 불확실성이 아주 높아서 중대사고 대처 설비 개발, 사고관리 전략 수립, 규제기준 설정 등에서 어려움이 예상된다. 이를 해결하고 국가 차원의 중대사고 대처체계 확보를 위해서는 그동안 이루어져 왔던 중대사고의 연구 및 현안에 대한 총체적인 검토가 필요하다. 이를 위한 첫 번째 단계로 본 특별위원회에서는 중대사고 주요 현상에 대한 PIRT를 작성하고 중대사고 규제기술 구축, 가동 및 건설 원전의 원전 중대사고 대처능력 향상, 중대사고 진행 예측 및 대응을 위한 원전 기술 확보 측면에서 우선순위가 높은 과제를 도출하고자 하였다.

작업은 심층방호 개념에 따라 일차계통 방호, 격납건물 방호, 핵분열생성물 거동 등 3개 분과로 나누어 수행되었다. 각 분과의 PIRT에서는 필요한 연구 항목 선정을 위해 평가 항목 중에 지식수준 및 중요도를 추가하였고, 특히 중요도는 사고대응과의 밀접성을 기준으로 상, 중, 하로 구분하였다. 각 분과별 주요 내용은 다음 표 4.0.1과 같다.

일차계통 방호 분과에서는 우선적인 연구가 필요한 기술현안으로 1) 원자로용기 하부반구에서의 용융물 냉각 성능 평가, 2) 일차계통 내에서의 고온고압 수증기로 인해 발생할 수 있는 증기발생기 세관파손 등이 도출되었다.

격납건물 방호 분과에서는 우선적인 연구가 필요한 기술현안으로 1) 여과배기 성능평가 및 사고관리 전략, 2) 피동축매결합기(PAR)를 포함한 수소제어 계통의 성능평가 실험 및 해석검증, 3) 용융물 재료에 따라 산화반응이 발생할 경우의 냉각성 영향, 4) 복합형상 체계에서의 증기폭발 전파 모델, 5) 장기 냉각으로 연계 시 용융물 파편화 현상, 6) 파쇄입자 침적에 따른 침적층 형성과정(입자층, Cake) 및 파편잔해층 열전달 모델, 7) 증기폭발방지 및 용융물 냉각을 위한 대처설비 기술개발, 8) 충수공동에서의 다공성 노심용융물 냉각성, 9) 국내 가동원전에 대한 MCCI 대처능력 평가 및 결말 분석을 통한 사고 관리 방안 등이 도출되었다.

표 4.0.1 중점 기술현안 종합

연구분야	중점 기술현안	연구기간		
		단기 (3년)	중기 (5년)	장기 (10년)
일차계통 방호	원자로용기 하부반구에서의 용융물 냉각성능 평가		○	
	일차계통 내에서의 고온고압 수증기로 인해 발생 할 수 있는 증기발생기 세관 파손		○	
격납건물 방호	여과배기 사고관리 전략		○	
	피동축매결합기(PAR)를 포함한 수소제어계통의 성능 평가 실험 및 해석 검증		○	
	용융물 재료에 따라 산화반응이 발생할 경우의 냉각성 영향		○	
	복합형상 체계에서의 증기폭발 전파 모델		○	
	장기 냉각으로 연계 시 용융물 파편화 현상		○	
	파쇄입자 침적에 따른 침적층 형성과정 및 파편 잔해층 열전달 모델		○	
	증기폭발방지 및 용융물 냉각을 위한 대처설비 기술개발		○	
	충수공동에서의 다공성 노심용융물 냉각성			○
	국내 가동원전에 대한 MCCI 대처능력 평가 및 결말 분석을 통한 사고 관리 방안			○
핵분열생성물 거동	노심 구조물 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선		○	
	산화조건에서 핵연료로부터 Ru 에어로졸 방출 거동		○	
	원자로냉각재계통으로부터 격납건물로의 Cs, I 방출모델		○	
	에어로졸의 형성, 성장, 침착 현상		○	
	격납건물 내 아이오딘 핵종 이동 및 유기아이오딘 형성		○	
	MCCI Pool로부터 에어로졸 방출		○	
	Pool Scrubbing 효과	○		
	격납건물여과배기계통(CFVS) 실험과 모델링		○	
	사고경위들을 포괄하는 선원항 결정		○	

핵분열생성물 거동 분과에서는 동 분야의 국내 기술수준이 전반적으로 국제수준에 크게 미달하고 있으며, 그 중에서도 공통적으로 가장 중요하고 우선순위가 높은 것으로 평가한 기술현안은 1) 노심 구조물(주로 제어봉) 손상 및 에어로졸 등 물질 방출 모델 개선, 2) 산화조건에서 핵연료로부터 Ru 에어로졸의 방출 등 거동에 대한 실험데이터 확보, 3) 원자로 냉각재계통으로부터 격납건물로의 Cs, I 방출 모델, 4) 에어로졸의 형성, 성장, 그리고 침착



에 관한 현상, 5) 벽면 및 기기의 표면에 흡탈착되는 아이오딘 핵종의 이동 및 기체상에서 침착 아이오딘과 페인트의 반응에 의한 유기아이오딘의 형성, 6) MCCI Pool로부터 에어로졸 방출, 7) Pool Scrubbing: 격납건물 내 Pool로부터의 재유입, 포화상태까지 확장된 수조 Scrubbing 실험, 수조 표면 위 고압 조건, 물의 pH가 에어로졸 및 아이오딘 기체 역류에 미치는 영향, 잘 정의된 중대사고 환경조건에서 재부유 현상을 규명하기 위해 대표적인 에어로졸 물질을 사용하는 Scrubbing 종합효과시험, 8) CFVS 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가, 실험과 모델링 : 가동시점 또는 개방압력, SAMG 범주에서 CFVS 운전(개방지속/개폐반복), 격납건물 감압성능, 에어로졸과 기체상 아이오딘에 대한 제거효율, 피동 운전시간, 소내 및 소외선량, 9) 실제적으로 고려해야 할 사고경위들을 포괄하는 선원항 결정 등이다.

막대한 연구리소스가 요구되는 중대사고 현상에 대한 이해, 중대사고 진행 및 방사성 물질 방출 예측 능력의 확보를 위해서는 다양한 전략이 필요하다. 최우선으로 추진되어야 할 것은 중대사고 핵심현상을 모의할 수 있는 국제 수준의 해석도구 개발이라 할 수 있겠다. 갈수록 주요 중대사고 해석 코드의 상업화 및 기술 보호 측면이 강화됨에 따라, 원전 해석 기술의 개발 없이는 중대사고 관련 기술이 해외에 종속되고 국내 원전의 안전성을 독자적으로 판단할 수 없게 될 것이다. 두 번째로 강조되어야 할 부분은 활발한 국제협력의 참여 및 추진이다. 중대사고 연구는 범위가 넓고 특히 실험적인 연구는 막대한 예산이 투입되어야 하기 때문에, 한 국가가 모든 현상 연구를 수행할 수 없다. 현재 국제적인 경향은 상호 협력 틀 안에서 각국이 역할을 나누고 특정 분야의 연구에 집중하고 그 연구 결과를 서로 공유하고 있다. 마지막으로 강조되어야 할 부분은 산업체-규제기관-연구계가 서로 견제하고 보완하는 가운데 균형 있는 기술 개발을 추진해야 할 것이다. 지나치게 산업 혹은 규제 혹은 연구 등 특정 분야만 강조되어 절름발이가 되어서는 안 될 것이다. 유럽, 미국 등은 특정한 중대사고 현상을 규명하고 대응 방안을 개발할 경우 규제기관-산업체-연구계가 적극 협력하는 좋은 모델을 보이고 있다.

이상과 같이 각 분과에서 제시한 기술현안에 대해서 구체적인 연구내용과 수행일정은 실제 연구기획단계에서 국내 각 기관의 역할 및 가용자원, 국제협력 계획을 고려하여 작성할 수 있을 것이다. 그리고 SMART 개발, 소듐냉각 고속로의 개발, 중수로 안전성 확보 등의 분야에서도 중대사고 연구가 수행되어야 하지만 이번 보고서에서는 그 내용을 다루지 못하였음을 밝힌다. 끝으로 국내외적으로 관련된 연구가 향후 지속적으로 진행될 예정이므로 이 보고서를 학회 차원에서 정기적(3년 주기)으로 보완하고 개정하는 후속 노력이 필요함을 강조한다.