
$$E=mc^2$$

# 핵분열생성물 거동 분과 로드맵 개발

중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵 워크숍  
2015.10.28, 경주

김한철\*, 하광순, 송용만, 김성중, 서미로, 강상호  
이두용, 임희정, 연제원, 조창석  
이종성, 조성원, 김성일

# 발표 순서

---

- 배 경
- 추진경과
- 추진전략
- 핵분열생성물방출수목 개발
- 보고서 작성
- 제안 및 향후 일정

# 배 경 (1/1)

- IAEA “Vienna Declaration on Nuclear Safety” 공포(2015.2.9)
  - 신규 원전: 사고 발생시 소외 장기오염을 초래할 수 있는 방사성물질 방출 저감, 조기방출 및 방사성물질 대량방출 배제
  - 가동 원전: 안전성 향상을 위한 포괄적, 체계적, 주기적 안전평가
- IAEA의 한국의 규제체제 검토 결과, 중대사고에 의한 소외주민의 피폭선량 제한치 설정 등의 권고사항 이행 필요
- 원자력안전법 개정·공포(2015.6.22): 사고관리계획서(중대사고관리계획 포함)를 운영허가 신청서류로 제출
  - 중대사고시 방사성물질 방출에 관한 현상 규명 및 저감방안 개발 시급
- 중대사고 전문가들이 “중대사고 현안 해결을 위한 로드맵” 작성 논의(원자력학회 추계학회 워크숍, 2014.10)
  - 원자력학회 특별위원회로 활동 추진, 핵분열생성물 거동 분과 설립

# 추진 경과 (1/1)

- ❑ **총괄위원회 Kickoff meeting** (원자력연구원, 2014.12.19)
  - 산·학·연의 중대사고 현상 및 쟁점 해결 로드맵 작성 추진
  - 주요 현상의 중요도 측정, 위해도, 현 지식의 부족한 내용 등 규명
- ❑ 분과 1차 회의(2015.1.22)
- ❑ **3개 분과 총괄위원회 2차 회의**(2015.3.12)
- ❑ 분과 2차 회의(2015.3.18)
- ❑ 분과 3차 회의(2015.4.24)
- ❑ **총괄위원회 3차 회의**(2015.6.4)
- ❑ 분과 4차 회의(2015.7.2)
- ❑ 분과 5차 회의(2015.8.13)
- ❑ **총괄위원회 4차 회의**(2015.10.2)
- ❑ 분과 6차 회의(2015.10.22)

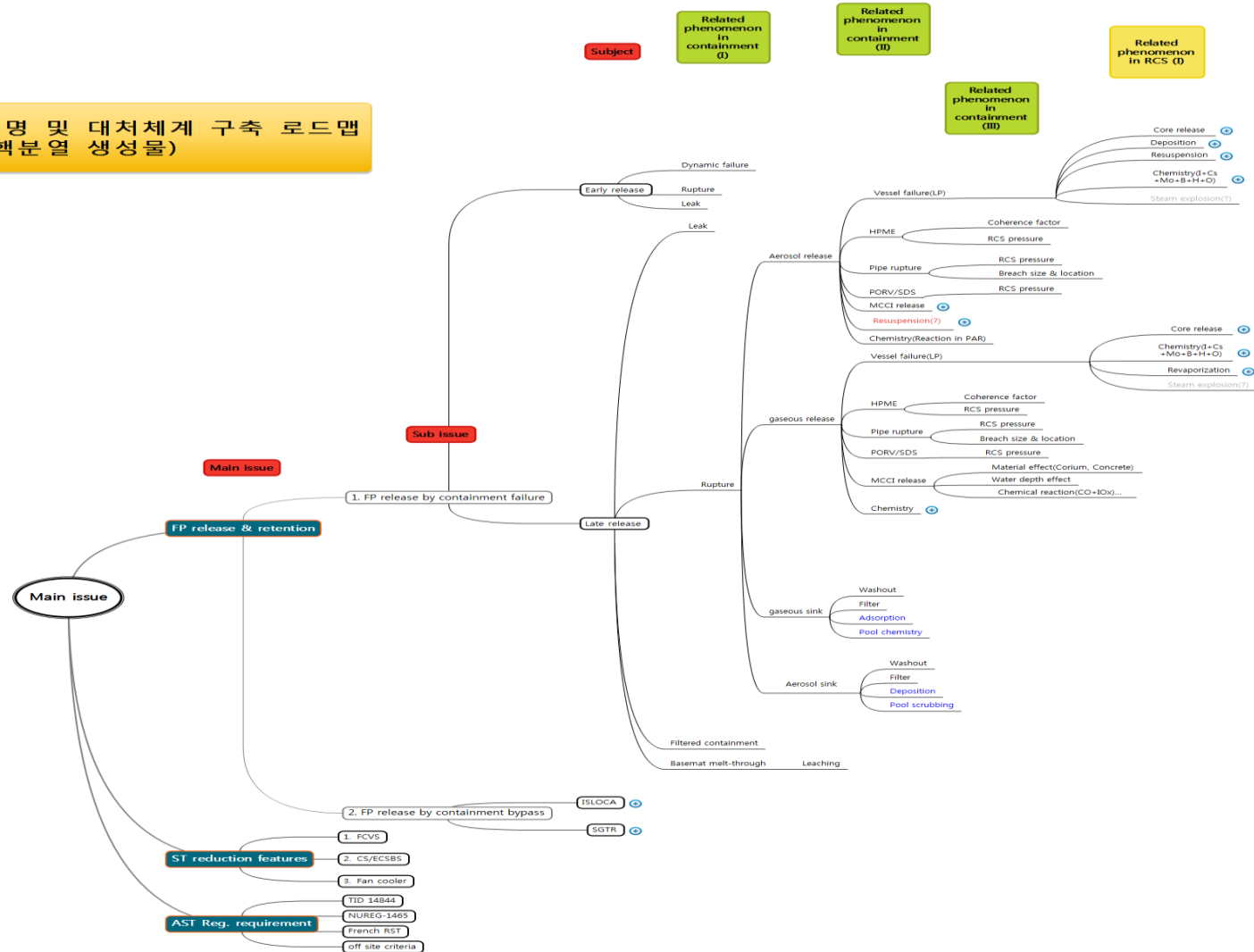
# 추진 전략 (1/1)

## □ [핵분열생성물 거동]분과의 “중대사고 현상규명 및 대처체계 구축” 로드맵 개발 전략

- **현상 규명**: 격납건물 방출부터 Defence-in-Depth 방벽손상을 역추적하는 **핵분열생성물방출수목** (FP Release Tree) 개발
- **대처체계 구축**: 방사선원항 저감설비 및 사고선원항 관련 현안 조사
- **추진 방법**
  - ❖ EU 전문가들이 현안 항목별로 개발한 PIRT(2007) 등 참조
  - ❖ 참여자들의 Brainstorming에 의한 방출수목 작성, 보완
  - ❖ 관련 보고서 작성 후 외부 전문가 검토 예정
    - ✓ 주요 현안 선정, 관련 현재 지식, 향후 중장기연구 필요사항 정의
  - ❖ 업무방향을 총괄모임에 제안, 회의결과의 Feedback
  - ❖ 부수적으로 분과 모임을 관련 최신정보 교류의 장으로 활용

# 핵분열생성물방출수목 개발 (1/18)

중대사고 현상규명 및 대처체계 구축 로드맵  
(핵분열 생성물)



# 핵분열생성물방출수목 개발 (2/18)

| Main issue             | Sub issue                            | Subject(I)   | Issue Description | Subject(II) | Related phenomenon in | Related phenomenon in | Related phenomenon in containment (III) | Related phenomenon in RCS (I) | Related phenomenon in RCS (IL) | Phenomena Description   | Status of Experimental Program |
|------------------------|--------------------------------------|--------------|-------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| FP release & retention |                                      |              |                   |             |                       |                       |   |                               |                                |   |                                |
|                        | 1. FP release by containment failure |              |                   |             |                       |                       |   |                               |                                |   |                                |
|                        |                                      | Late release |                   |             |                       |                       |   |                               |                                |   |                                |
|                        |                                      |              |                   | Rupture     |                       |                       |   |                               |                                |   |                                |
|                        |                                      |              |                   |             | Aerosol release       |                       |   |                               |                                | <p>based on the observations at Fukushima, most of the airborne dose was caused by Cs, I and Te species. Releases seem to be driven primarily by chemical volatility at a given temperature and reduction potential within the containment. Some of the most</p> <p><a href="#">FP release from fuel:</a> ISTP( 2011-2014, CEA)/ VERDON for high burn-up UO2 and MOX fuel. Ruthenium release under oxidant conditions, SASCHA, ORNL HI/VI, CRL, VEGA, HEVA/ VERCORS, PHEBUS PF</p> <p><a href="#">FP transport in the RCS:</a> OECD/NEA STEM (2011-2015, IRSN): Ruthenium transport, deposition and re-volatilization in the RCS,</p> |                                |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (3/18)

| Status of Computer Code | Knowledge Level | Significance on issue | Further Research Needs   | SAMG action  | Regulatory Aspects (Rule making) |
|-------------------------|-----------------|-----------------------|--|--|----------------------------------|
|                         |                 |                       |  | 중대사고관리는 모든 가능한 핵분열생성물 방출 경로에 대하여 언급하여야 한다. 핵분열생성물의 방출 정도 역시 중대사고관리의 주요 입력이다. 이는 방출을 중단시키거나 완화할 수 있는 방사능 피폭을 방지하기 위해 수행하며, 수행조건은 발전소  |                                  |
|                         |                 |                       |  | 안전변수 값(전신선량>30분동안 0.5 mSv/hr 또는 2분간 5 mSv/hr)과   |                                  |
|                         |                 |                       |  | 격납건물 중대위험변수 값(부지경계선량 >전신 10 mSv/hr, 간상선 50   |                                  |
|                         |                 |                       |  | 격납건물 핵분열생성물 경계를 조기에 급속히 위협하는 문제들을 감시하고 평가한 후에는 핵분열생성물 방출을 감시하고 평가하는 것이 다음 순위가 된다. 핵분열생성물 방출 경로는 격납건물, 증기발생기, 보조건물(연료건물 포함) 등 3가지가 있는 데 이 단계에서는 각 방출 경로별로 감시하는 것이 아니라 발전소 부지 경계에서의 선량으로 통합하여 감시하도록 하였다. 방출경로 별로 방사능 감시기가 별도로 있을 경우에는 발전소 부지 경계에서의 선량으로 통합하여 감시하는 대신 방출 경로별로 선량 또는 방출율을 감시할 수도 있다. |                                  |
|                         |                 |                       |  |  |                                  |
|                         |                 |                       | NEA/CSNI/R(2009)5 [State-of-the-art report on nuclear aerosol]에서 제시하고 있는 - RCS 에어로졸 Issue<br>(1) Mechanical resuspension<br>(2) Deposition in singularities and complex structures<br>(3) Particle break-up in highly turbulent flows (4)<br>Influence of chemistry (5)<br>Re-vaporization |  |                                  |



## 핵분열생성물방출수목 개발 (4/18)

[illegible]

# 핵분열생성물방출수목 개발 (5/18)

|  |  |  |  |  |  | Deposition |                  |  |
|--|--|--|--|--|--|------------|------------------|--|
|  |  |  |  |  |  |            | Brownian motion  | 분자 단위의 입자에서 작용하는 물리적인 거동으로 중력침강과 같이 방향성을 가지지 않으며, 모든 방향으로 확산하여 벽면에서 제거됨.   |
|  |  |  |  |  |  |            | Diffusiophoresis | 확산영동이라 고 불리며, 이는 에어로졸 입자의 한쪽면에 부딪치는 기체 분자들이 전달하는 운동량과 반대쪽 면에 부딪치는 기체 분자들이 전달하는 운동량이 서로 다를 경우에 발생함. 확산영동은 수증기의 응축이 벽면에서 활발하게 일어날 때 발생함. 수증기의 응축은 수증기 농도의 농도구배를 유발하며 비교적 크기가 큰 에어로졸 입자의 주요 침적 메커니즘으로 |
|  |  |  |  |  |  |            | Grav. settling   | 0.1micron 보다 큰 입자들은 중력침강에 의해 주로 제거됨.   |
|  |  |  |  |  |  |            | Turbulence       | 난류에 의한 입자의 확산은 Brownian motion과 유사하나 원전 사고 시에는 난류확산이 상대적으로 지배적이며 0.1micron보다 작은 입자에서 발생함. 모든 방향으로 작용함.   |
|  |  |  |  |  |  |            | Impaction        | 배관의 구부러짐이나, 축소, 확장으로 인해 관성을 가지는 에어로졸 입자들이 이송기체의 유선을 따라가지 못하고 유선에서 벗어나 관벽에 부딪혀 제거되는 현상  |
|  |  |  |  |  |  |            | Thermophoresis   | 열영동은 공간 내에 온도구배가 존재할 때 발생함. 따뜻한 쪽의 기체 분자들이 전달하는  |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (6/18)

|  |  |  |  |              |                        |  |  |   |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--------------|------------------------|--|--|---|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  | HPME         |                        |  |  | Conerence ratio is defined by the characteristic dispersal time to the characteristic time constant for blowdown. The Coherence ratio is a function of hole size at vessel failure and cavity geometry. As the entrainment time is short compared with the blowdown time, the coherence ratio is approximately 1. |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |              | Coherence ratio        |  |  |   |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |              | RCS pressure           |  |  | 원자로 압력용기의 하부헤드 파손시 RCS가 고압상태에 있을 경우 노심용융  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  | Pipe rupture |                        |  |  |   |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |              | RCS pressure           |  |  |   |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |              | Breach size & location |  |  | Breach size 및 location에 따라 mass flow rate와 방출 히스토리가 달라  |  |  |  |  | MCCI에 대한 입력을 제공하므로 기존 실험 데이터에 대한 코드 검증이 필요 |
|  |  |  |  | PORV/SDS     |                        |  |  |   |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |              | RCS pressure           |  |  |   |  |  |  |  |  |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (7/18)

|  |                |                      |  |  |  |  |  |  |   |   |
|--|----------------|----------------------|--|--|--|--|--|--|---|---|
|  | Resuspension   |                      |  |  |  |  |  |  | 수소 연소 효과에 의해 침착된 에어로졸의 재부유가 발생하는 현상은 ThAI 실험에서 알려진 바가 있으나, 요오드를 포함한 에어로졸의 화학적 특성에 따라 RCS로부터의 에어로졸 Resuspension 및 sump와 같은 Pool scrubbing 시의 Resuspension에 대한 실험적 연구가 필요함. |   |
|  |                | Shockwave/convection |  | Shock와 Vibration, 유량 증가는 Resuspension 현상에 영향을 줄 수 있음. 이는 RCS에서의 Resuspension과 격납건물 ESF 또는 자연 현상에 의해 에어로졸이 제거되는 현상. ESF에 의한 제거는 격납건물 살수, Suppression pool에서의 Pool |  |  |  |  |   |   |
|  | Aerosol sink   |                      |  |  |  |  |  |  |   |   |
|  | Washout        |                      |  | 격납건물 살수에 의한 에어로졸 제거  |  |  |  |  |   | PRI TBR은 특별히 살수가 격납건물 대기로부터 핵분열생성물을 제거할 수 있는 하나의 유용한 방법임을 확인시켜 주고 있다. 핵분열생성물을 제거하기 위한 다른 가능한 방법은 연속환기팬의 사용이다. 연속환기팬은 격납건물 대기(핵분열생성물 에어로졸이 포함된)를 냉각코일을 통해 강제적으로 순환시킨다. 에어로졸은 냉각코일을 통과하면서 충돌에 의해 코일에 집전된다. 핵분열생성물 제거 기능 측면에서 연속환기팬의 효율은 EPRI TBR에 언급되어 있지 않으나 살수 효과보다는 낮을 것으로 예상된다. |
|  | Filter         |                      |  | HEPA 필터에 의한 에어로졸 제거  |  |  |  |  |   |   |
|  | Deposition     |                      |  | 기기 또는 구조물 표면에서의 에어로졸 제거  |  |  |  |  |   |   |
|  | Pool scrubbing |                      |  | suppression pool (BWR) 또는 원자로 공동물에 의해 에어로졸 제거  |  |  |  |  | stand alone 또는 integral code model은 실험결과를 통해 검증되고 있다.   |   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (8/18)

|                 |  |  |              |  |  |  |   |  |   |   |
|-----------------|--|--|--------------|--|--|--|---|--|---|---|
| gaseous release |  |  |              |  | PHEBUS-FP tests show that significant gaseous iodine amount enters the containment from the RCS during the fuel degradation. For the RCS, the kinetics of the I-O-H system, the influence of fission products (Cs, Mo) and Boron (B) on iodine transport has | FP release from fuel: ISTEP( 2011-2014, CEA)/ VERDON for high burn-up UO2 and MOX fuel. Ruthenium release under oxidant conditions, SASCHA, ORNL HI/VI, CRL, VEGA, HEVA/ VERCORS, PHEBUS-FP FP transport in the RCS: ISTEP(2008-2014, IRSN)/CHIP to develop chemical models of the I, Cs, Mo, B, H, O chemical system for calculation of | During the past 10 years, significant progresses have been made in the modeling of iodine volatility in the RCS and the gaseous phase in the containment. In the RCS, chemical understanding of iodine transport has been improved. | The global "good agreement for the discrepancies between the experiment and the estimation are less than factor 2. The remaining uncertainties in iodine volatility estimation and iodine ST estimations are listed below: | Following a severe accident in a nuclear power plant, iodine is a major contributor to the potential health risks for the public, especially with regard to the thyroid. The phenomenological understanding of iodine | o Re-volatilization and distribution of the Ru (103Ru, 106Ru) released from the core, o IOx Size and composition, and radiolytic stability of deposited IOx, o Iodine adsorption kinetics on representative multi-component aerosols and their radiolytic stability, o Degradation of IOx by CO that is produced from B4C control rod |
|                 |  |  | Core release |  |  |  |   |  |   | (1) 기존 실험결과를 바탕으로 발전소 조건을 고려한 분석 및 평가 필요<br>(2) 노심 및 RCS에서 가스상으   |
|                 |  |  |              | Burnup(irrad. Time)                    | Burnup이 증가하게 되면 fuel에는 "rim effect"를 포함한 변화가 발생  |  |   |  |   |   |
|                 |  |  |              | Fuel/clad type(material)               | MOX fuel로부터 에어로졸 입자는 저농축 UO2 fuel로부터 발생하는 방사성  |  |   |  |   |   |
|                 |  |  |              | Fuel temp.                             |  |  |   |  |   |   |
|                 |  |  |              | Control rod material                   | 핵연료로부터 발생되는 요오드의 60~70%는 격납건물로 유입되며, 이들은 중대사고시 함께 발생하는 다른 원소들의 영향을 받아 기체상 물질 또는 에어로졸 물질은 형성하게  |  |   |  |   |   |
|                 |  |  |              | Core struc. material Chemistry(H, ...) |  |  |   |  |   |   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (9/18)

| Chemistry(I+Cs+Mo+B+H+O) |                  |   |  |  |  |                            |   |
|--------------------------|------------------|---|--|--|--|----------------------------|---|
|                          | Reflooding       | 액체상 화학반응은 노심 및 RCS로부터의 기체상 방출과 함께 격납건물로 방출되는 기체상 방출의 중요한 방출원임. Reflooding시 높은 농도의 요                                     |  |  |  |                            |   |
| Revaporization           |                  | RCS에 침식된 방사성 물질은 붕괴열로 인해 온도를 올리게 되며, Cs, Iodine, tellurium 및 antimony와 같은 휘발성 핵종의 재증발을 유발하게 됨. 재증발은 매우 오랜 시간동안 격납건물로 방사 |  |  |  | 대표적인 물질에 대한 실험적/모델링 연구가 필요 | 핵분열생성물 재증발 방지와 관련된 현상이 EPRI TBR Vol. II Appendix W에 기술되어 있다. 핵분열생성물이 노심에서 방출되면, RCS의 다른 부분으로 이동된다. 핵분열생성물 에어로졸은 침전, 충돌 등을 통하여 배관 내부 표면에 축적된다. 핵분열생성물이 붕괴됨에 따라 원자로냉각재계통 배관 온도는 증가하게 되고, 증기압이 낮은 에어로졸(Cs, Iodine, CSOH, Sr 등)은 재증발하여 격납건물 우회 또는 누설 등을 통하여 직접 대기로 방출될 수도 있다. 또 하나의 재증발 메커니즘은 원자로 하부용기 외벽면을 통한 외부냉각이 확립된 상태 하에서 발생하는 것이다. 즉 원자로용기 벽을 통하여 붕괴열을 제거하기 위하여, RCS 온도는 대체적으로 올라가게 되고, RCS 온도가 올라감에 따라 배관에 침적되어 있던 핵분열생성물이 재증발되게 된다. 한편 일차계통 배관의 열제거가 가능하면, 배관내 핵분열 |
|                          | depressurization | 서 해조수 고그  |  |  |  |                            | 새서무은 재증발하지 않은 거이다. 일차계통 배관온도가   |
|                          | RuO4 formation   | Ru은 매우 독성이 강한 물질로 UO2가 공기와 접촉하여 발생하게 되며, 1000C 이상의 고온에서 RuO2, RuO3, RuO4와 같은  |  |  |  |                            |   |
| Steam explosion(?)       |                  |   |  |  |  |                            |   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (10/18)

|              |                                   |  |  |   |  |  |  |  |  |
|--------------|-----------------------------------|--|--|---|--|--|--|--|--|
| HPME         | Coherence ratio                   |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | RCS pressure                      |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Pipe rupture | VVBVCCEE asaws                    |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | RCS pressure                      |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | Breach size & location            |  |  |   |  |  |  |  |  |
| PORV/SDS     |                                   |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | RCS pressure                      |  |  |   |  |  |  |  |  |
| MCCI release |                                   |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | Material effect(Corium, Concrete) |  |  | 노심용융물이<br>원자로 공동으<br>로 떨어지면서<br>콘크리트와 반<br>응하여 에어로<br>졸과 함께 가연  |  |  |  |  |  |
|              | Water depth effect                |  |  |   |  |  |  |  |  |
|              | Chemical reaction(CO+IOx)...      |  |  |   |  |  |  |  |  |
| Chemistry    |                                   |  |  |   |  |  |  |  | 아래 연상에 대<br>한 기존 실험/이<br>론적 연구결과<br>검토 및 평가가<br>필요하며 실험<br>과 모델링 연구<br>가 병행되어야<br>함.<br>(1) 벽면 및 기기<br>의 표면<br>(Metallic, paint,<br>aerosol particle)<br>에 adsorption<br>또는 desorption |
|              | Paint + I2 interaction            |  |  | 격납건물 대기<br>중에 존재하는<br>휘발성 요오드<br>는 두 가지 경<br>로를 통해 발생<br>함, 하나는 노<br>심 및 RCS로부<br>터의 방출이며,<br>다른 하나는 격<br>납건물 내 집수<br>조로부터의 방<br>출임. 휘발성<br>요오드는 기기<br>또는 벽면에 흡<br>착되는 분자<br>요오드(I2)는 격납<br>건물 대기 중의<br>오존(O3)와 반<br>응하여 비활성<br>산화요오드<br>(IxOy)를 생성<br>하며 이러한 산 |  |  |  |  | 기존 실험/이론<br>적 연구결과 검<br>토 및 평가가 필<br>요하며 실험과<br>모델링 연구가<br>병행되어야<br>함.   |
|              | IOx behavior                      |  |  | 격납건물 대기<br>중에 존재하는<br>휘발성 요오드<br>는 두 가지 경<br>로를 통해 발생<br>함, 하나는 노<br>심 및 RCS로부<br>터의 방출이며,<br>다른 하나는 격<br>납건물 내 집수<br>조로부터의 방<br>출임. 휘발성<br>요오드는 기기<br>또는 벽면에 흡<br>착되는 분자<br>요오드(I2)는 격납<br>건물 대기 중의<br>오존(O3)와 반<br>응하여 비활성<br>산화요오드<br>(IxOy)를 생성<br>하며 이러한 산 |  |  |  |  | 기존 실험/이론<br>적 연구결과 검<br>토 및 평가가 필<br>요하며 실험과<br>모델링 연구가<br>병행되어야<br>함.   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (11/18)

|              |                |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------|----------------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| gaseous sink |                |  |  |  |  |  |  |  |  |
|              | Washout        |  |  |  | 격납건물 살수에 의한 기체상 요오드의 제거는 기체상 요오드 물질의 중요한 제거 매커니즘이다.  |  |  |  | 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가가 필요하며 실험과 모델링 연구가 병행되어야 한다.   |
|              | Filter         |  |  |  | 흡착을 위해 TEDA 첨착 활성탄(Charcoal)을 필터로 일반적으로 사용한다.  |  |  |  | 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가가 필요하며 실험과 모델링 연구가 병행되어야 한다.   |
|              | Adsorption     |  |  |  | partitioning과 함께 I2(aq)은 물속의 잠겨있는 기기 또는 벽면의 표면과도 반응할 수 있으며, 이는 Irreversible chemical adsorption으로 정의됨. 이는 액상 요오드의 총량을 줄여주는 역할을 하여, 격납건물 내 I2(aq)은 방사성 핵종에 흡착되어 있다. |  |  |  | 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가가 필요하며 실험과 모델링 연구가 병행되어야 한다.   |
|              | Pool chemistry |  |  |  | 이들은 대부분의 조건에서 휘발성 요오드 이온인 I-와 휘발성 형태인 I2(aq), 또는 IO3-로 존재함. 이들 사이에는 화학적 형태의 변화가 발생하나 일반적인 조건에서는 이들 과정이 매우 느림. 방사성 환경에서는 화학적 변화가 중요하다.                              |  |  |  | 기존 실험/이론적 연구결과 검토 및 평가가 필요하며 실험과 모델링 연구가 병행되어야 한다.<br>(1) Iodine partitioning<br>- 액체상으로부터 휘발성 요오드의 생성률<br>- Pool 수면에서의 요오드 핵종간 mass transfer rate |



# 핵분열생성물방출수목 개발 (12/18)

|               |  |                      |          |  |  |  |  |  |  |  |  |   |
|---------------|--|----------------------|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|---|
|               |  | Leak                 |          |  |  |  |  |  |  |  |  | (1) 액준열 생성물의 Leak path를 통한 이동에 대해서는 모델의 개발 및 검증을 위해 시나리오와 현상에 대한 실험적 연구 (Sensata) |
|               |  | Filtered containment |          |  |  |  |  |  |  |  |  |   |
|               |  | Basemat melt-through |          |  |  |  | 노심 용융물이 Basemat 아래 cavity의 물과 반응하는 현상으로 이는 추가적인 핵분열생성물 방출 경로로 작용함. |  |  |  |  | 가용한 모델이 충분한지 확인이 필요하며 실험적 연구가 필요함.  |
|               |  |                      | Leaching |  |  |  |  |  |  |  |  |   |
| Early release |  |                      |          |  |  |  |  |  |  |  |  | Crack 영역 권공부에서의 누설 및 격납건물 동전 기동은 비타   |
|               |  | Dynamic failure      |          |  |  |  |  |  |  |  |  |   |
|               |  | Rupture              |          |  |  |  |  |  |  |  |  |   |
|               |  | Leak                 |          |  |  |  |  |  |  |  |  |   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (13/18)

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| <p>2. FP release by containment bypass</p> |  |  | <p>증기발생기 튜브가 파손되면 주증기관의 대기덤프밸브 등을 통하여 핵분열생물이 대기로 직접 방출될 수 있다. 증기발생기 튜브는 제작되었을 때에 약 2.5mm 두께 밖에 안 되며, 시간이 지남에 따라 튜브 벽의 감육과 크랙이 생김으로 인하여 튜브의 두께가 감소될 수 있다. 다음과 같은 원인으로 튜브의 온도가 높아지고 증기발생기 1차측과 2차측의 압력차이가 커지면 (즉, 튜브의 온도가 815 °C(1500 °F) 이상으로 높고 증기발생기 1/2차측과의 압력 차이가 약 34.45 bar 이상이면 크립 파손 발생 가능) 튜브는 소성 변형되어 크립 파손으로 손상될 수 있다.</p> <p>. RCS 내에서의 자연순환으로 인하여 노심에 있던 고온의 기체가 증기발생기로 이동하여 튜브의 온도를 상승시킨다.</p> <p>. 노심의 하부에서 생성된 증기는 노심의 상부에 있던 고온의 증기를 증기발생기로 밀어내어 튜브의 온도를 급격히 증가시킨다.</p> <p>&lt;참고&gt; 통상, 튜브의 온도가 약 815 °C (1500 °F)에 도달될 때 튜브가 크립 파손되는 것으로 가정한다. 증기발생기 튜브가 급수로 차 있으면 튜브 표면에서의 핵비등을 통한 튜브의 열전달 능력 때문에 튜브의 온도는 상승하지 않는다. 급수가 채워져 있는 증기발생기로 노심의 고온 기체가 흘러와도 튜브 벽을 통한 열전</p> |
|--|--|--|---|

# 핵분열생성물방출수목 개발 (14/18)

## □ 방사선원항 저감설비

| ST reduction features |  |   |   |  |  |  |  |
|-----------------------|--|---|---|--|--|--|--|
|                       | FCVS   | 중대사고시 격납건물의 건전성이 위협을 받을 정도의 압력이 상승하게 되면 최후의 수단으로 FCVS를 개방하여 격납건물의 배기를 수행하게 되며, 이 때 격납건물 내부의 핵분열물질은 FCVS에서 필터링됨. | FCVS efficiency is currently being studied in the European PASSAM project and French MIRE program with the objectives to estimate their efficiency under irradiation and better evaluate the iodine and |  |  |  | 해외 선형설비사에서는 1980년대 후반부터 설비를 개발하고 이를 가동원전에 설치하여 운영중임. 국내에서도 2013년부터 설비 개발과 관련한 연구가 진행되고 있으며, Filtration component 및 계통을 포함하는 설계 및 실험  |
|                       | CS/ECSBS   |   |   |  |  |  |  |
|                       | SG (2ndary) coolant injection<br>(송유만 추가함)       |   |   |  |  |  | <p>중대사고가 진행되는 동안 증기발생기 급수주입은 몇 가지 장점이 있다.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 증기발생기로의 급수 주입은 증기발생기 튜브를 냉각할 수 있고, RCS의 고온 기체로 인한 온도 상승으로 발생할 수 있는 튜브의 크립 파손을 방지할 수 있다.</li> <li>· 증기발생기 튜브 파손(SGTR) 사고가 발생하였을 때 파단부를 급수로 채우는 것은 노심 손상 이후 발생된 핵분열생성물이 증기발생기를 통하여 방출될 때 세정(scrubbing)할 수 있다.</li> <li>· 증기발생기 튜브 파손 사고 발생시 증기발생기로의 급수 주입은 파손부를 통하여 RCS 내에 냉각수를 공급할 수 있다.</li> </ul> <p>즉, 증기발생기를 빨리 재충수 시켜야 하는 것과 증기발생기에의 열용력을 최소화하여야 되는 두 가지 문제를 잘 조합시키는 것으로써 주입량을 10 m3/hr 이하로 주입하는 기간을 10분 정도로 하는 것을 제안한다.</p>  |
|                       | (Turbine bypass) steam dump in SGTR<br>(송유만 추가함) |   |   |  |  |  | <p>EPRI TBR에 따르면 증기발생기 수위가 2~3 m만 되면 제염계수가 최대치에 이르러 수위를 더 이상 올려도 제염계수는 별 변화가 없다. 따라서 증기발생기 최소 필요수위는 튜브가 손상된 증기발생기로부터 복수기로 증기를 덤프하는 것은 핵분열생성물의 대기 방출을 감소시킬 수 있는 하나의 효과적인 방법이 될 것이다. 그러나 증기덤프가 핵분열생성물의 방출을 감소시키지 못하는 경우도 있다. 만일 손상된 증기발생기가 충수되어 있다면, 휘발성 핵분열생성물은 튜브 상부의 물에 의해 효과적으로 세정될 것이며, 방출되는 대부분의 핵분열생성물은 불활성기체일 것이다. 이 경우 불활성기체는 복수기에서 세정될 수 없기 때문에 터빈후회 증기덤프의 확립은 핵분열생성물방출을 감소시키지 못할 것이다. 또한 튜브가 파손된 증기발생기가 완전히 격리되어 있다면(즉, 증기발생기 2차측 압력경계의 고장이 없고, 압력이 주증기 안전밸브의 설정치 이하인 경우), 복수기로의 증기덤프 확립은 핵분열생성물의 방출을 증가시킬 것이다. 따라서 비상기술지원실은 발전소상태를 근거로 하여 터빈후회 증기덤프의 확립 여부를 평가해야 한다.</p> |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (15/18)

## □ 사고방사선원항

|                      |                   |  |  |  |
|----------------------|-------------------|--|--|--|
| AST Reg. requirement |                   |  |  |  |
|                      | TID 14844         |  |  |  |
|                      | NUREG-1465        |  |  |  |
|                      | French RST        |  |  |  |
|                      | off site criteria |  |  |  |
|                      |                   |  |  |  |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (16/18)

## □ 핵분열생성물 방출 거동 요약

| Main issue             | Sub issue                            | Subject(I)    | Issue Description | Related phenomenon in containment (I) | Related phenomenon in RCS (I) | Significance on issue | SAMG action  | Regulatory Aspects (Rule making) |
|------------------------|--------------------------------------|---------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|----------------------------------|
| FP release & retention |                                      |               |                   |                                       |                               |                       | 중대사고관리는 모든 가능한 핵분열생성물 발산 주인의 방사능 피폭을 방지하기 위해 수행하며, 수해조건을 격납건물 핵분열생성물 경계를 조기에 급 |                                  |
|                        | 1. FP release by containment failure |               |                   |                                       |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      | Late release  |                   |                                       |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   | Aerosol release                       |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Core release                  |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Deposition                    |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Resuspension                  |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Chemistry(I+Cs+Mo+B+H+O)      |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Steam explosion(?)            |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   | Aerosol sink                          |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   | gaseous release                       |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Core release                  |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Chemistry(I+Cs+Mo+B+H+O)      |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Revaporization                |                       | 핵분열생성물 재증발 방지와 관련된 현상이   |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | Steam explosion(?)            |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   |                                       | VVBVCCEE asaws                |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   | gaseous sink                          |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      |               |                   | Leaching                              |                               |                       |  |                                  |
|                        |                                      | Early release |                   |                                       |                               |                       |  |                                  |
|                        | 2. FP release by containment bypass  |               |                   |                                       |                               |                       | 증기발생기 튜브가 파손되면 주증기관의 대   |                                  |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (17/18)

## □ 핵분열생성물 방출 관련 현안 요약

| Related phenomenon in RCS (I) | Related phenomenon in RCS (IL)   | Phenomena Description                                  | Status of Experimental Program              | Status of Computer Code Modeling | Knowledge Level (international, domestic) | Significance on issue | Further Research Needs                        |
|-------------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|---|-----------------------|---|
|                               |                                  | Based on the observations at                           | FP release from fuel: ISTP/ 2011-2014 CFAI/ |                                  |   |                       | NEA/CSNI/R(2009)5 [State-of-the-art report on |
| Core release                  |                                  |  |   |                                  |   |                       | 핵분열 생성물의 방출 매커니즘에 대한 기초 실험 데이                 |
|                               | Fuel/clad type(material, enrich) | MOX fuel로부터 발생하는 에어로졸 인자는 저농축                          |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Fuel temp.                       |  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Burnup(irrad. Time)              | Burnup이 증가하게 되면 fuel에는 "rim effect"를 포                 |   |                                  |   |                       | High burnup/MOX 핵연료 oxidation 및 수소 생성에 대      |
|                               | Control rod material             | 제어봉 물질(Ag-In-Cd 또는 B4C)의 성분에 따라 노                      |   |                                  |   |                       | 제어봉 손상 및 핵분열 물질 방출에 대한 모델링 연구 필               |
|                               | Core struc. material             | 비방사성 에어로졸 생성원 중 하나임                                    |   |                                  |   |                       | 노심 구조물 손상 및 물질 방출에 대한 모델링 연구 필요               |
|                               | Chemistry(H, ...)                |  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Aerosol nucleation               | 에어로졸의 nucleation은 에어로졸이 생성과 관련되                        |   |                                  |   |                       |   |
| Deposition                    |                                  |  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Brownian motion                  | 분자 단위의 입자에서 작용하는 무리적인 거동으로 확산영동이라고 불리며, 이는 에어로졸 입자의 하중 |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Diffusiophoresis                 | 비교적 크기가 큰 에어로  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Grav. settling                   | 졸 입자의 중력 침전 메커   |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Turbulence                       | 니즘에 의한 입자의 확산  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Impaction                        | 은 Brownian motion과, 즉                                  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Thermophoresis                   | 매커니즘의 구분임이나, 즉   |   |                                  |   |                       |   |
|                               |                                  | 소 화장으로 인해 과열을  |   |                                  |   |                       |   |
|                               |                                  | 열영동은 공간 내에 온도  |   |                                  |   |                       |   |
|                               |                                  | 구배가 존재할 때 발생함  |   |                                  |   |                       |   |
| Resuspension                  |                                  |  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | depressurization                 | 하부헤드나 벽면에 침적된  |   |                                  |   |                       | RCS로부터의 에어로졸 Resuspension 및 sumn와             |
| Chemistry(I+Cs+Mo+B+H+O)      |                                  |  |   |                                  |   |                       |   |
|                               | Reflooding                       | 노심손상시 Zr 혼합물 (U-Zr-O)의 상하는 reflooding                  |   |                                  |   |                       | Reflooding에 의한 수소생성                           |
| Steam explosion(?)            |                                  | 원자로 공동에서 노심 용  |   |                                  |   |                       | 및 사화에 대한 더 더 시드                               |
|                               |                                  | 융물과 냉각재 바움에 이  |   |                                  |   |                       |   |

# 핵분열생성물방출수목 개발 (18/18)

## □ 핵분열생성물 방출 관련 현안 요약

|                |                                   |  |  |  |
|----------------|-----------------------------------|--|--|--|
| HPME           |                                   |  |  |  |
|                | Coherence ratio                   |  |  | Coherence ratio is defined by the            |
|                | RCS pressure                      |  |  | 원자로압력용기의 하루헤<br>드 파손시 RCS가 고압상태              |
| Pipe rupture   |                                   |  |  |  |
|                | RCS pressure                      |  |  |  |
|                | Breach size & location            |  |  | Breach size 및 location에 따라 mass flow rate와 방 |
| PORV/SDS       |                                   |  |  |  |
|                | RCS pressure                      |  |  |  |
| MCCI release   |                                   |  |  |  |
|                | Material effect(Corium, Concrete) |  |  | 노심용융물이 원자로 공동으로 떨어지면서 콘크리트 원자로 공동에 불이 손재     |
|                | Water depth effect                |  |  | 하는 경우에는 노심 용융                                |
|                | Chemical reaction(CO+IOx)...      |  |  | Limestone 콘크리트는 Basaltic에 비해 MCCI에 의         |
| Resuspension   |                                   |  |  |  |
|                | Shockwave/convection              |  |  | Shock와 Vibration, 유량증가는 Resuspension 현상에     |
|                |                                   |  |  | ESF 또는 자연현상에 의해 에어로졸이 제거되는 현상.               |
| Washout        |                                   |  |  | 격납건물 살수에 의한 에어로졸 제거                          |
| Filter         |                                   |  |  | HEPA 필터에 의한 에어로졸 제거                          |
| Deposition     |                                   |  |  | 기기 또는 구조물 표면에 서의 에어로졸 제거                     |
| Pool scrubbing |                                   |  |  | Suppression pool (BWR) 또는 원자로 공동 물에 의        |

# 보고서 작성 (진행중) (1/4)

중대사고 현안해결을 위한 로드맵 작성

보고서번호: #

## 중대사고 현안해결을 위한 로드맵(핵분열생성물) 작성보고서

2015. 10. .

작성자 : 김한철(한국원자력안전기술원)  
하광순(한국원자력연구원)  
김성중(한양대학교)  
이종성(한국원자력안전기술원)  
서미로(한국수력원자력주식회사)  
조창석(한전원자력연료주식회사)  
강상호(한국전력기술주식회사)  
이두용(주식회사미래와도전)  
송용만(한국원자력연구원)  
연제원(한국원자력연구원)  
임희정(한국원자력연구원)

간 사 : 김성일(한국원자력연구원)



# 보고서 작성 (진행중) (2/4)

중대사고 현상규명을 위한 로드맵(핵분열생성물) 작성 보고서(보고서 번호:00), Rev.00

쪽번호: 3/16

## 목 차

|   |   |
|---|---|
| 제1장 서론 (김한철)                                    | 6 |
| 제1절 배경 및 필요성                                    | 6 |
| 제2절 목적 및 내용                                     | 6 |
| 제2장 중대사고시 핵분열생성물 거동                             | 7 |
| 제1절 핵분열생성물방출                                    | 7 |
| 1. RCS 내부로의 방출(하광순)                             | 7 |
| 가. 노심 방출  | 7 |
| (1) Phenomena description                       | 7 |
| (2) Status of experimental program              | 7 |
| (3) Status of computer code modeling (조창식, 하광순) | 7 |
| (4) Knowledge level (international, domestic)   | 7 |
| (5) Related issue                               | 7 |
| (6) Further research needs                      | 7 |
| 2. 격납건물 내부로의 방출(송용만)                            | 7 |
| 가. 원자로용기 파손(송용만)                                | 7 |
| (1) Phenomena description                       | 7 |
| (2) Status of experimental program              | 7 |
| (3) Status of computer code modeling            | 7 |
| (4) Knowledge level (international, domestic)   | 7 |
| (5) Related issue                               | 7 |
| (6) Further research needs                      | 8 |
| 나. HIPIE (하광순)                                  | 8 |
| 다. 배관 파손 (서미로)                                  | 8 |
| 라. 펌프 개방 (서미로)                                  | 8 |
| 마. MCCI (서미로)                                   | 8 |
| 제2절 핵분열생성물 거동(김성중)                              | 9 |
| 1. 에어로졸 거동                                      | 9 |
| 가. Deposition (김성중)                             | 9 |
| (1) Phenomena description                       | 9 |
| (2) Status of experimental program              | 9 |
| (3) Status of computer code modeling            | 9 |
| (4) Knowledge level (international, domestic)   | 9 |
| (5) Related issue                               | 9 |
| (6) Further research needs                      | 9 |
| 나. Chemistry (?)                                | 9 |
| 다. Washout (강상호, 김한철)                           | 9 |
| 라. Filter (강상호, 김한철)                            | 9 |

# 보고서 작성 (진행중) (3/4)

|   |    |
|---|----|
| 마. Pool scrubbing (연계원, 임희정) .....                  | 9  |
| 바. Resuspension (이두용) .....                         | 9  |
| 2. 기체 거동 .....                                      | 10 |
| 가. Chemistry (이종성) .....                            | 10 |
| (1) Phenomena description .....                     | 10 |
| (2) Status of experimental program .....            | 10 |
| (3) Status of computer code modeling .....          | 10 |
| (4) Knowledge level (international, domestic) ..... | 10 |
| (5) Related issue .....                             | 10 |
| (6) Further research needs .....                    | 10 |
| 나. Washout (장상호, 김한철) .....                         | 10 |
| 다. Filter (장상호, 김한철) .....                          | 10 |
| 라. Adsorption (연계원, 임희정) .....                      | 10 |
| 마. Pool chemistry (연계원, 임희정) .....                  | 10 |
| 바. Revaporization (조창석) .....                       | 10 |
| 제3장 현안 및 평가 .....                                   | 11 |
| 제1절 격납건물 파손 (서미로) .....                             | 11 |
| 1. 격납건물 후기파손 (서미로) .....                            | 11 |
| 가. Rupture .....                                    | 11 |
| (1) Phenomena description .....                     | 11 |
| (2) Related phenomena in containment .....          | 11 |
| (3) Related phenomena in RCS .....                  | 11 |
| (4) Significance on issue .....                     | 11 |
| (5) SAMG action .....                               | 11 |
| (6) Regulatory aspects(Rule making) .....           | 11 |
| 나. Leak .....                                       | 11 |
| 다. Filtered containment .....                       | 11 |
| 라. Basemat melt-through .....                       | 11 |
| 2. 격납건물 조기파손 (서미로) .....                            | 11 |
| 가. Dynamic failure .....                            | 11 |
| 나. Rupture .....                                    | 11 |
| 다. Leak .....                                       | 11 |
| 제2절 우회사고 (서미로) .....                                | 12 |
| 제3절 제거철비 .....                                      | 13 |
| 1. 여과배기 시스템 (이두용) .....                             | 13 |
| (1) Phenomena description .....                     | 13 |
| (2) Related phenomena in containment .....          | 13 |
| (3) Related phenomena in RCS .....                  | 13 |
| (4) Significance on issue .....                     | 13 |

# 보고서 작성 (진행중) (4/4)

|  |    |
|--|----|
| (5) SAMG action .....                            | 13 |
| (6) Regulatory aspects(Rule making) .....        | 13 |
| 2. ECSBS (장상호) .....                             | 13 |
| 3. SG coolant injection (서미포) .....              | 13 |
| 4. Turbine bypass steam dump in SGTR (서미포) ..... | 13 |
| 제4절 평가도구(장상호) .....                              | 14 |
| 1. TID 14844 .....                               | 14 |
| 2. NUREG-1465 (조창석, 장상호) .....                   | 14 |
| 3. French RST (또는 EU RST) .....                  | 14 |
| 4. Off site Criteria .....                       | 14 |
| 제4장 결론 ( ) .....                                 | 15 |
| 제5장 참고문헌 (전원) .....                              | 16 |

# 제안 및 향후 일정 (1/2)

## □ 예상되는 향후 주요 연구 수요

- (High burnup/MOX 핵연료 산화조건에서의 FP 방출)
- RCS 내 화학반응 모델링
- RCS 및 격납건물에서의 (특히 Ru) 에어로졸 부착, 재부유, 재증발 및 모델링
- $IO_x$ 의 표면 및 공기중 방사분해, CO와의 반응
- 페인트의 경년열화가 요오드 휘발에 미치는 영향
- Pool scrubbing 현상 규명
- 격납건물 우회사고 시 핵분열생성물 방출 거동
- 방사선 환경에서 FCVS의 효율성
- Leaching에 의한 핵분열생성물의 이동
- 격납건물 누설부위에서의 핵분열생성물의 누설 평가
- 핵분열생성물 선원항 분석방법론 개선 및 평가 불확실성 저감

# 제안 및 향후 일정 (2/2)

---

- 핵분열생성물방출수목 포함 보고서 작성
  - 현안, 관련 현재 지식수준 및 향후 연구필요사항 파악
  - 보고서 초안 작성(~2015. 12 예상)
  - 총괄위원회와 전문가 검토 및 보완(~2016. 3 예상)
- 원자력학회에 최종보고서 제출 (~2016. 4 예상)
- 로드맵, 연구주제, 우선순위 등에 대한 원자력계 적용 논의(2016 중반~)