

# 재공론화를 앞둔 사용후핵연료 운반/저장 안전성 확보를 위한 연구노력



2018. 5. 16


한국원자력연구원  
방폐물운반저장기술실 최 우 석


# 사용후핵연료 재공론화를 앞두고...


## ❖ 제1차 공론화

- 2013. 10 ~ 2015. 06 (20개월)
- 공론화위원회 정책적 권고안 (10개 항목)을 정부에 제출
- 이를 바탕으로 관리기본계획발표 (2016. 07)
- 고준위관리절차법(안) 국회제출/계류 (2016. 11. 02)

산업통상자원부
 

경제혁신
 

보도자료
 

http://www.motie.go.kr

2016년 8월 11일(목) 조간부터 보도하여 주시기 바랍니다.  
 (인터넷, 방송, 통신은 8. 10(수) 오전 11시 이후 보도 가능)

배포일시	2016. 8. 9. (화)	담당부서	원전환경과
------	-----------------	------	-------

담당과장	박동일 과장(044-203-5340)	담당자	한대룡 사무관(044-203-5348)
------	----------------------	-----	-----------------------

### 정부 『고준위방사성폐기물 관리절차에 관한 법률』 제정안 입법예고

- 8.11(목)-9.19(월)까지 제정안 입법예고 -

- ◇ 고준위방사성폐기물의 안전한 관리를 위해 부지 및 시설을 확보하기 위한 과학적이고 민주적인 절차와 방식을 담은 법제도적 장치 마련
- ◇ '16. 7. 25일 확정된 "고준위방사성폐기물 관리 기본계획"의 차질 없는 실행을 위해 정부의 책임과 투명성을 높이고 국민의 신뢰 확보

□ 산업통상자원부(장관 주형환)는 8. 11.(수) 행정절차법 제41조에 따라 「고준위방사성폐기물 관리절차에 관한 법률(이하 "관리 절차법"이라함), 제정(안)을 입법예고 했다.

□ 이번 법률안은 지난 7. 25일(월) 확정된 「고준위방사성폐기물 관리 기본계획」을 차질 없이 실행하기 위해 부지선정 절차 등을 중심으로 제도적 장치 마련을 통해 국민의 예측 가능성과 정책에 대한 신뢰를 확보하기 위한 것이다.

○ 특히, 「관리 절차법」은 특정 부지를 예단하지 않고, 원점에서 출발하는 것이며, 향후 부지선정을 위한 단계와 방식, 고준위방폐물 관리시설 확보 등을 위한 절차를 담고 있다.



< 2016.06.17 공청회 >



< 영광군 의회의 규탄성명 >

# 고준위 방사성폐기물 관리 기본계획의 주요내용

## ❖ 동일부지 확보 추진

- 중간저장시설과 영구처분시설을 동일부지에 건설 추진
- 부지선정 (12년), 부지선정 이후 중간저장시설 건설(7년), 영구처분시설 건설(24년) 소요 예정
- 중간저장시설 운영(2035년), 영구처분시설(2053년) 운영 목표

## ❖ 사용후핵연료 원전내저장 (중간저장시설 확보 이전)

- 중간저장시설 가동 이전 불가피한 경우 원전내 사용후핵연료 저장
- 국제적으로 기술 안전성이 입증된 건식저장방식 채택
- 원전소재지역과 합리적인 수준에서 지원규모 협의

## ❖ 관리기술의 지속적 개발

- 운반, 저장, 처리, 처분 등 관리단계별 필요핵심기술 적기 확보
- 정부부처간, 산학연 연구주체간 역할분담과 연계 강화를 통한 효율성 제고
- 국제협력을 통한 취약기술에 대한 기술격차 해소

## 제2차 공론화 필요성 및 핵심쟁점

### ❖ 제2차 공론화 필요성 제기 이유

- 제1차 공론화의 부족했던 점
  - 이해관계자간 이견과 갈등
  - 시민환경단체 불참
  - 일부 원전소재지역 불참
  - 국민적 공감대 형성 한계
- 신정부 정책기조 변화: 탈원전 정책, 제8차 전력수급계획

### ❖ 제2차 공론화 예상 핵심쟁점

- 고준위 방사성폐기물 발생량 및 포화년도 재산정
  - 시설확보 및 부지선정: 영구처분시설 부지요건, 부지선정 절차 장기화, 불확실성  
→ 중간저장 부상
  - 원전내 저장시설: 원전내 저장시설 확충 불가피, 원전지역주민 협의, 추진방향
  - 기술적 측면
    - 단계별 규제기준과 이에 부합하는 기술개발이 체계화되어 있는가?
    - 기술개발 우선순위, 목표, 일정, 수행체계가 잘 정립되어 있는가?
- ➔ **사용후핵연료 운반/저장 기술확보 현황 및 진행사항**

## 목차 - 운반/저장의 안전성

- ❖ 운반용기의 안전성
  - 법적시험조건하의 안전성
    - 정상운반조건(NCT), 가상사고조건(HAC)
- ❖ 저장 안전성
  - 내진 안전성, 열제거 성능평가, 격납건전성 평가
  - 설계기준외 사고 (항공기 충돌)
- ❖ 저장이후 운반안전성 (운반중 사용후핵연료의 건전성)
  - 실제발생 가능한 취급사고조건하의 평가
    - 15m 비완충 충격시험
    - 극한사고조건
  - 복합운반모드에서의 SF 건전성 평가 (미국-스페인-한국 국제공동연구)
- ❖ 맺음말

# 운반용기의 안전성

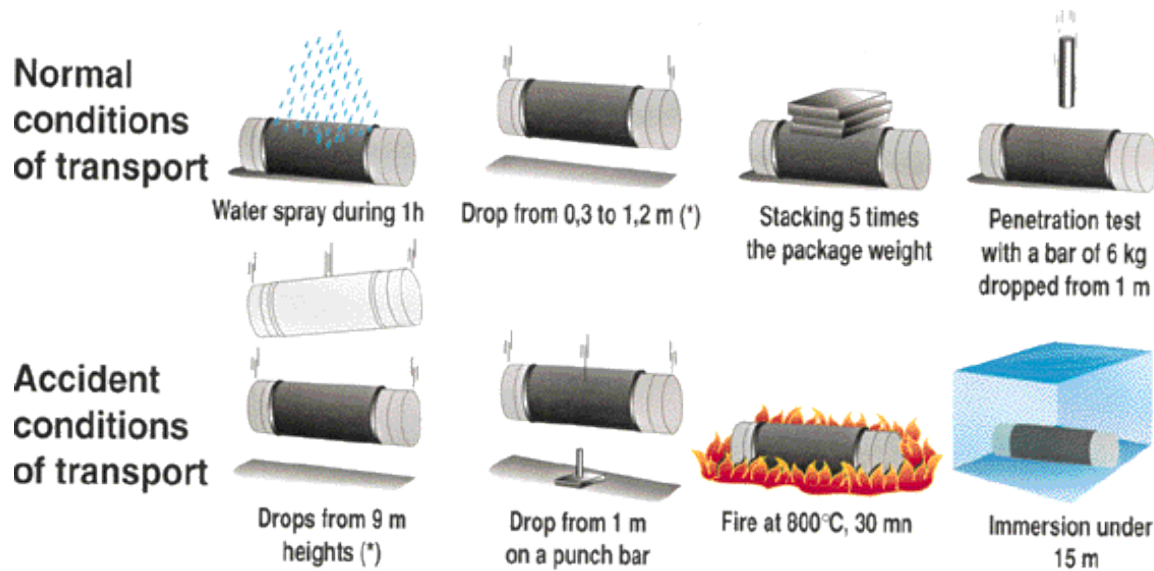
---

# 운반용기의 안전성

## ❖ 적용법규 및 코드

- 원자력안전위원회 제2017-56호, 10 CFR Part 71
- IAEA Safety Series SSR-6, SSG-26

## ❖ 정상운반조건(NCT) 및 가상사고조건



\* On an unyielding surface

## ❖ 평가기술

- NCT 및 HAC 조건에 대한 해석적, 시험적 평가 기술
- 국내 운반용기 안전성 평가체계 및 평가기술은 상대적으로 잘 정립

# 운반용기의 안전성 – 법적시험조건 하의 안전성 평가

## ❖ 정상운반조건(NCT) 및 가상사고조건하의 평가요건

구 분		설계요건	기술기준
구조	정상조건		원안위고시 제2017-56호
	■ 외부환경온도 : 고온/저온조건	38°C/-40°C	
	■ 외압조건 : 증가/감소(절대압)	140kPa/25kPa	
	■ 자유낙하조건	0.3 m	
	가상사고조건		원안위고시 제2017-56호
	■ 9 m 자유낙하조건	- 바닥/뚜껑/수평 - 바닥/뚜껑모서리/경사	
	■ 1m 파열조건	- 바닥/뚜껑/수평	
	■ 화재 : 시간/온도	30분 / 800°C	
	■ 침수조건	200m 침수대체	
열	■ 연료 피복관 온도 : 정상/사고	400°C / 570°C	ISG-11
격납	■ 정상조건	10 <sup>-6</sup> A2/hr	ANSI 14.5
	■ 사고조건	- A2/week (Kr-85제외) - 10A2/week (Kr-85핵종)	ANSI 14.5
임계	■ Max. keff	0.95	10CFR71.55, 59
차폐	■ 정상조건		원안위고시 제2017-56호
	• 용기표면	10 mSv/hr	
	• 운반차량표면	2 mSv/hr	
	• 운반차량표면 2m 이격지점	0.1 mSv/hr	
	■ 사고조건 • 외부표면 1m 이격지점	10 mSv/hr	



# 운반용기의 안전성 – 안전성 평가 시험

## ❖ 운반용기 안전성 평가 시험시설 (KAERI)

- KORAD21, KN-18, KN12 등 사용후핵연료 운반용기 안전성 시험 평가 수행
- 다수의 IP2형, A형, B형 운반용기 성능시험 평가 수행
- 2018년 시험시설 개보수를 통한 시설 리뉴얼 완료



# 저장 안전성

---

# 저장 안전성

## ❖ 저장관련 법규 및 고시

- IAEA Safety Series No. SSG-15 “Storage of Spent Nuclear Fuel”
- 10 CFR 72, NUREG-1536 (저장시스템), NUREG-1567 (저장시설)
- Interim staff guidance (ISG)
- 원자력안전법 (관계시설, 중간저장시설): 국내 세부 기술기준은 현재 제정 중

## ❖ 저장관련 기술기준

- 정상조건
  - 최대/최저 주변온도, 일광조건
  - 자중, 내압/외압, 장전, 운반, 저장, 회수시 가해지는 열하중
- 비정상조건
  - 일광조건, 취급오류, 장비오작동, 정전, 가혹한 날씨 등
  - 정상조건을 벗어나는 온도변화
  - 핵연료봉 파손(10%) + 비정상주변온도
  - 공기흡입구의 부분적 막힘
- 사고조건
  - 캐스크 낙하, 전도, 폭발적인 과압, 화재
  - 핵연료봉 파손
  - 홍수, 토네이도
  - 지진

# 내진 안전성 평가

## ❖ 금속저장용기 및 콘크리트 저장용기의 해석 및 시험적 내진성능 평가

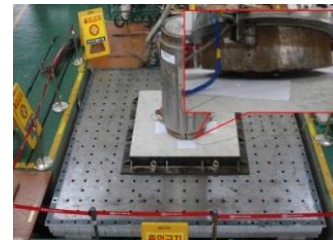
- 지진이 발생하였을 때 전도, 충돌 등으로 인한 안전기능 손상여부 평가
- 관련 근거: 10CFR72, NUREG-1536
- 1/3 축소모델을 활용하여 입증시험 수행
  - 가속도 크기 및 전도현상 재현을 위한 스케일링 기법 개발 및 적용
- 2가지 지진파형 (0.1 g ~ 1.0 g) 고려
- 기계연구원(위탁)과 협업을 통하여 시험 수행 완료
- 대상용기: KORAD21, KORAD21C



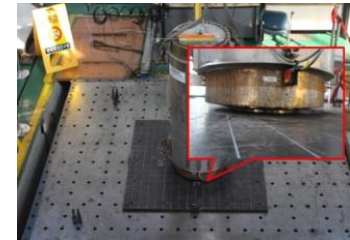
모델본체  
콘크리트패드



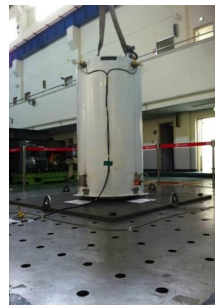
모델본체  
철판패드



하부 철판베드부착모델  
콘크리트패드



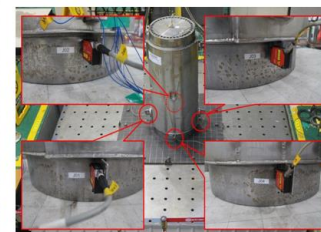
하부 철판베드부착모델  
철판패드



콘크리트 저장용기모델(철판베드부착모델)  
콘크리트패드 vs. 철판패드



가속도계 :  
B&K 4370(9ea)



레이저변위계:  
ILD 1302-200(4ea)



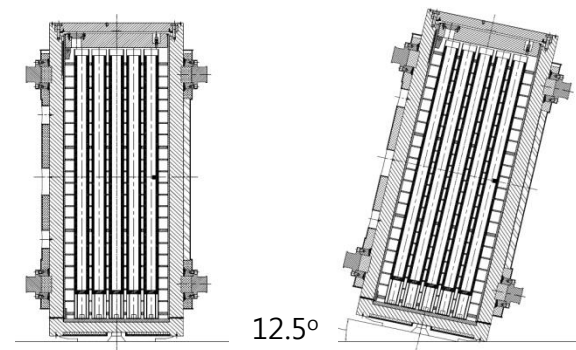
LVDT 변위계:  
SDF-300D : 2ea

< 계측센서 종류 및 부착위치 >

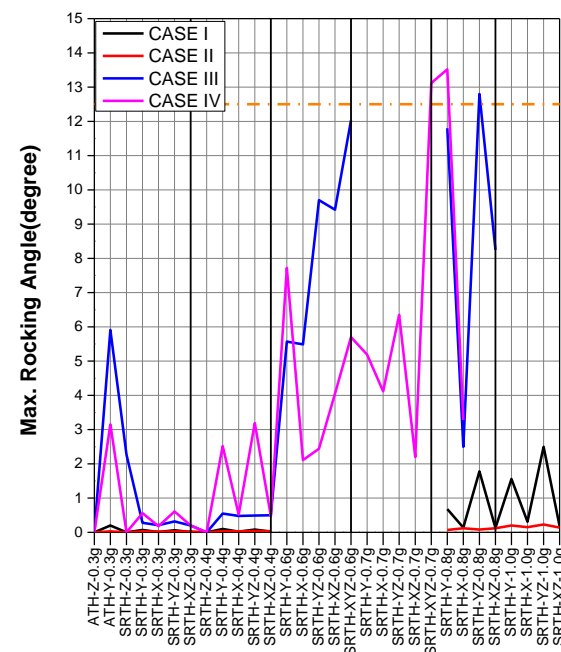
# 내진 안전성 평가

## ❖ 내진시험 결과

- 철판베드 부착하지 않은 모델
  - 콘크리트 패드, 철판패드 위 모두에서 1.0G까지 전도발생 않음
- 철판베드 부착한 모델
  - 콘크리트 패드 위 : 0.7~0.8G에서 전도발생<sup>1)</sup>
  - 철판패드 위 모델 : 0.6~0.8G에서 전도발생<sup>2)</sup>
- 고찰
  - 전도발생 여부와 가진하중의 크기가 절대적으로 비례하지 않음(비선형성)
  - 전도발생 가속도 크기에 해당하는 규모의 지진은 매우 큰 값으로 거의 발생하지 않음



Max. Rocking Angle



- 1) SRTH 0.8G(Y), SRTH 0.7G(XYZ) 전도 발생, SRTH 0.6G(XYZ) 전도 발생않음
- 2) SRTH 0.8G(YZ). SRTH 0.6G(XYZ) 전도 발생
- 3) 0.2g (규모 6.5), 0.3g (규모 7.0), 0.6g (규모 7.5), 0.75g (규모 7.7이상)



# 콘크리트 저장용기 열 제거 성능 시험 평가

## ❖ 시험목적

- 법규에서 규정하고 있는 정상/비정상/사고조건에 대한 건전성 평가

## ❖ 시험모델

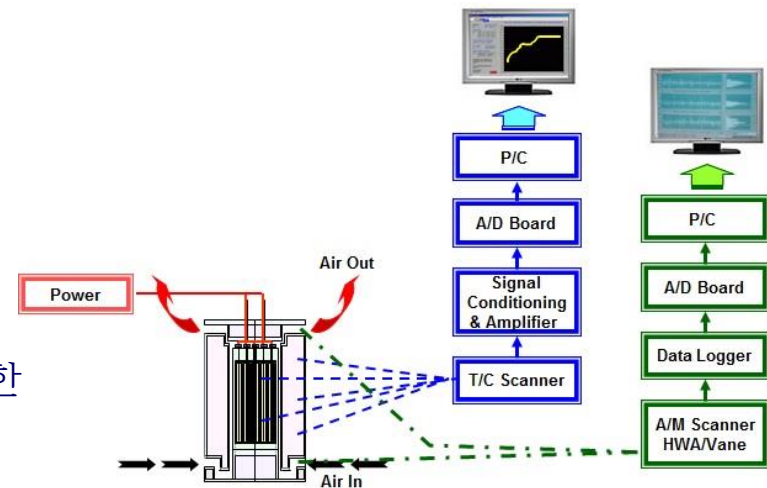
- Full Scale Model (높이: 6,180 mm, 직경: 3,306 mm)
- 전기히터 열 유량 : 16.8 kW (열 유량만 동일하게 모사)
- 열전대: 총 96개 (모델: 77개, 주변: 19개)
- 유속계: 총 6개(입구: HWA type 3개, 출구: Vane type 3개)

## ❖ 시험조건

- 정상 : 온도가 평형상태에 도달한 후 그 상태를 2일간 유지
- 비정상 : 공기 입구 1/2을 막고 온도가 평형상태에 도달한 후 2일 유지
- 사고 : 온도가 평형상태에 도달한 후 공기 입구를 막고 4일간 유지



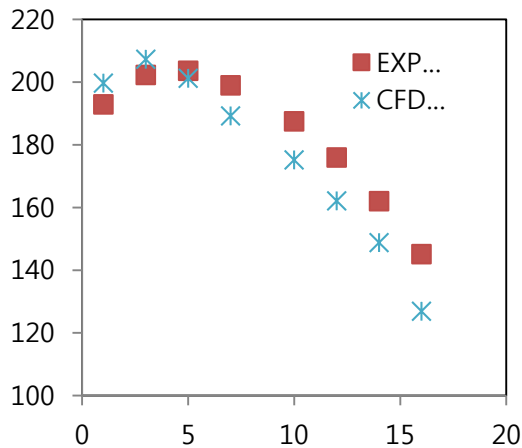
<콘크리트 저장용기 원형크기 시험모델>



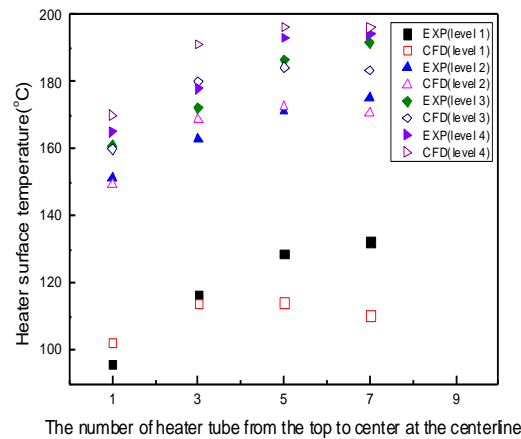
<시험측정계통 개요>

# 캐니스터 유효열전도도 입증시험

- ❖ PWR (Plus7) 모의 연료 1 다발 이용 입증시험
  - 전산유체역학에 기반한 유효열전도도 계산의 검증
  - 시험 조건
    - 히터 용량 : 400, 800, 1200W
    - 히터 방향 : 수직형, 수평형
  - 센서 위치
    - ➔ 온도센서 : 단면 17개 \* 길이방향 4개씩



수평형 해석-시험결과 비교



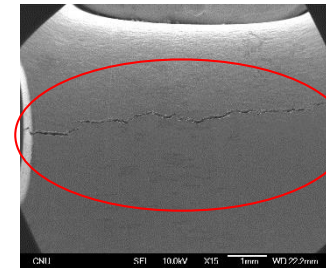
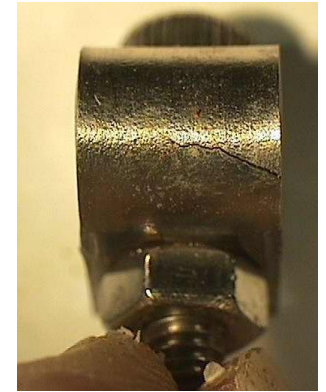
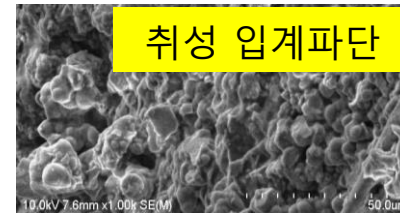
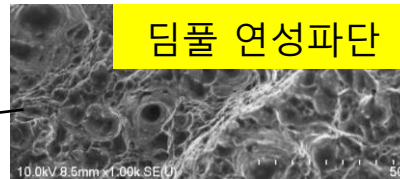
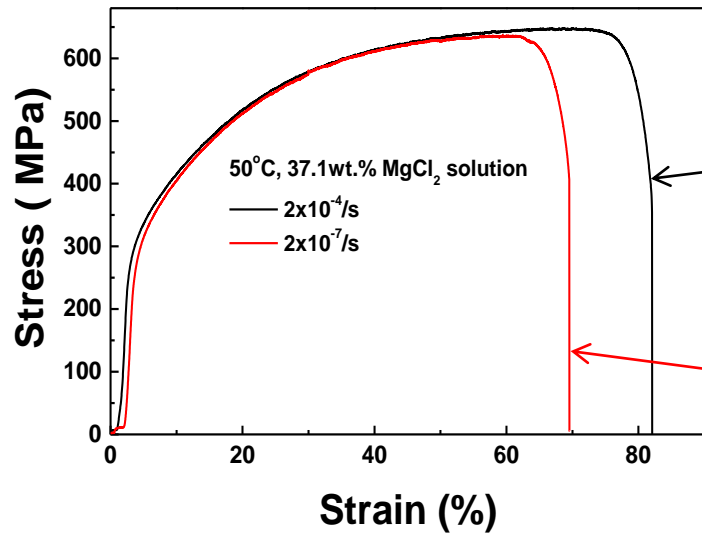
수직형 해석-시험결과 비교



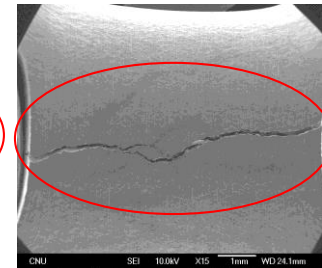
유효열전도도 시험모델 (수평, 수직)

# 캐니스터 용접부 응력부식균열(SCC) 영향평가

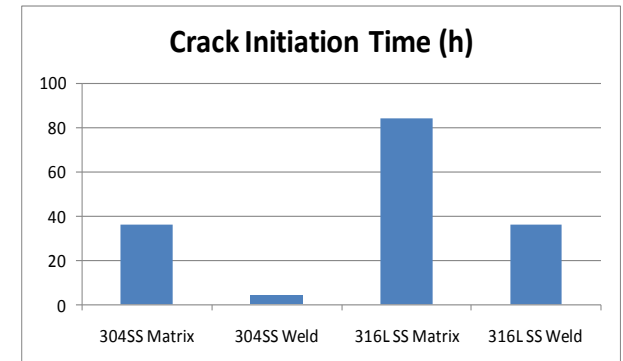
- ❖ 염해분위기로 인한 스테인리스강재의 응력부식균열 영향평가
  - 304, 316L 강재에 대한 SCC 취약성 평가
  - SCC 개시속도 및 성장속도에 대한 실험실 규모 시험 및 평가
  - 염소유기 SCC의 기전 규명을 위한 변형률속도 조절시험
  - 316L 스테인리스강의 염소유기응력부식균열은 저변형속도에서 작동하는 (수소) 취성기구로 일어난다는 것을 규명



304 SS 36h



316L SS 84h





# 금속저장용기 메탈씰 격납건전성 평가

## ❖ 연구목적

- (장기)저장기간 중 메탈씰의 격납건전성 평가
- 메탈씰의 열적 열화 (thermal ageing) 현상 확인

## ❖ 시험방법

- 고온가속화 시험 수행
- Larson Miller Parameter(LMP)에 근거 설계수명과 등가인 시험조건 수립

$$LMP = T(C + \log_{10} t) \quad T: \text{온도(K)}, t: \text{시간(h)}$$

등가 시험 조건 (128 °C, 50 년, C=16)		
	시험 온도	시험 시간
1차	180 °C	9주
2차	165 °C	39주

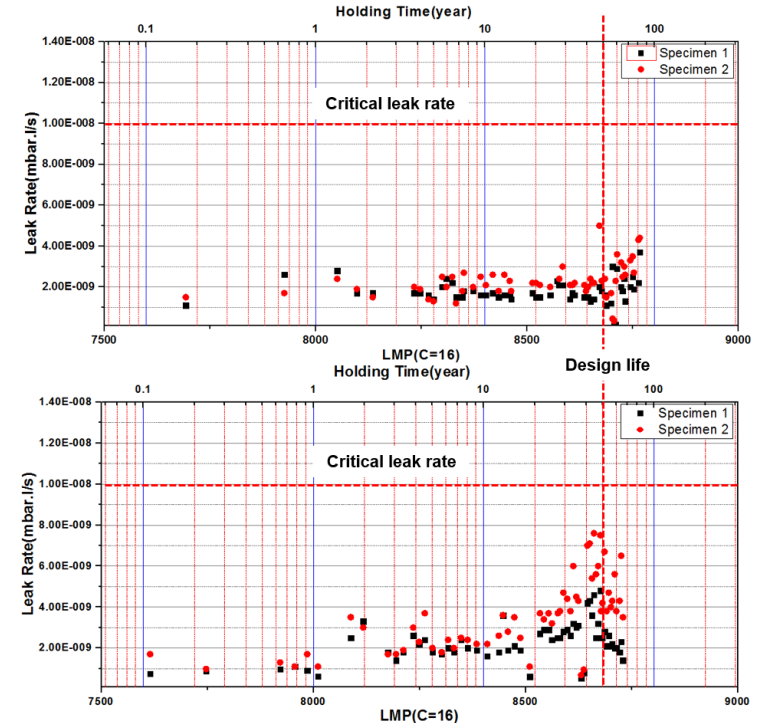
- 주기적 메탈씰 사이의 헬륨 누설을 측정  
→ 메탈씰의 설계수명 내 건전성 평가

## ❖ 시험결과

- 1, 2차 가속화 시험을 통해 메탈씰의 격납건전성 확인



<금속오링 가속화시험장비>



<1,2차 가속화시험시 누설률 측정결과>

# 내충격 성능 평가 (설계기준외 사고)

## ❖ 금속검용용기 및 콘크리트 저장용기 내충격 성능평가

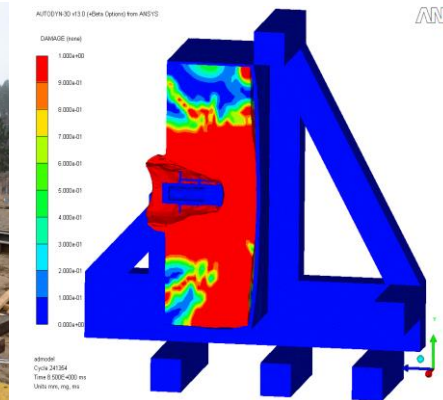
- 고속 비행체 충돌시 금속용기의 격납건전성 평가
- 콘크리트 오버팩의 파손 평가체계 수립
- 항공기 충돌과 같은 설계기준외사고 평가에 대비한 기초연구
- 금속용기 축소모델 및 콘크리트 오버팩의 분할모델로  
대형민항기 충돌 조건을 고려하여 수행
- 국방과학연구원과 기술용역을 통하여 협업



금속검용용기 내충격 성능시험



KORAD21C 오버팩 시험 결과



해외 N사 오버팩 시험 및 해석결과

# 저장 이후 운반안전성

---

# 저장 이후 운반안전성 - 15m 비완충 낙하시험 (BDBA)

## ❖ 시험 목적

- 저장 후 사용후핵연료 취급/운반 시나리오 도출
- 법적사고조건을 초월한 사고 시나리오로 15m 높이 낙하조건 고려

## ❖ 시험 조건

- 15m 높이에서 운반용기를 충격흡수체 없이 콘크리트 패드에 낙하

## ❖ 시험 준비

- 콘크리트 패드: 철근과 콘크리트로 구성, 4m x 2m x 0.3m, 모서리 부분만 고정 (Flexible Concrete Pad)
- 모의핵연료 집합체: 길이 1/3, 추가중량 장착
- 운반용기: 원형규모 대비 1/3 축소모델

## ❖ 평가 대상

- 피복관 건전성, 캐니스터 및 핵연료집합체 회수성, 격납 상실 유무



< 1/3 축소 운반용기 및 모의 핵연료집합체 >



<콘크리트 패드>



< 15m 낙하시험 전경 >

# 저장 이후 운반안전성 - 15m 비완충 낙하시험 및 해석비교

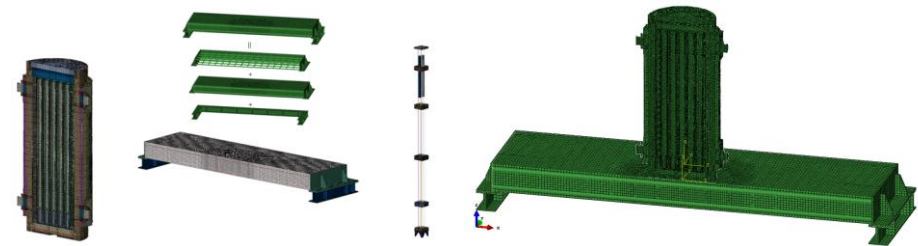
## ❖ 시험결과

- 피복관 파손 발생하지 않음
- 캐니스터 회수 가능
- 헬륨누설검사 결과 누설 발생하지 않음

## ❖ 해석결과

- 모의 사용후핵연료 피복관 소성변형 발생하지 않음
- 캐니스터 회수 가능
- 격납유지 평가 결과: 캐스크 볼트 하중평가 결과 파손이 발생하지 않음

➔ 결론: 낙하 후 모의 사용후핵연료 집합체 내의 피복관 파손 없으며, 캐니스터 회수 가능하고 격납 유지됨



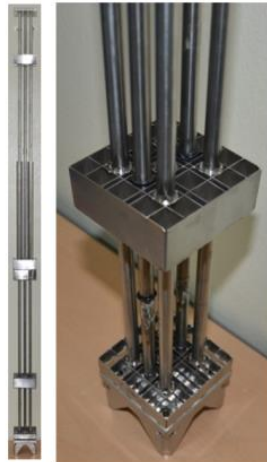
< 운반용기, 핵연료집합체, 콘크리트 패드 해석모델 >



< 낙하시험 후 운반용기 >

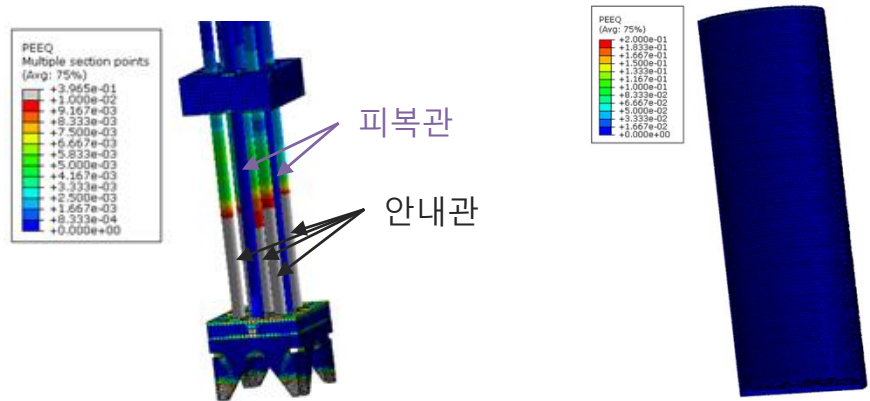


낙하전

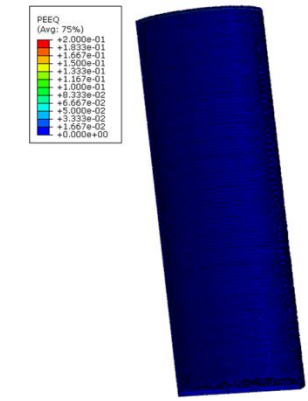


낙하후

< 핵연료 집합체 시험 전/후 >



< 핵연료집합체 소성변형 >

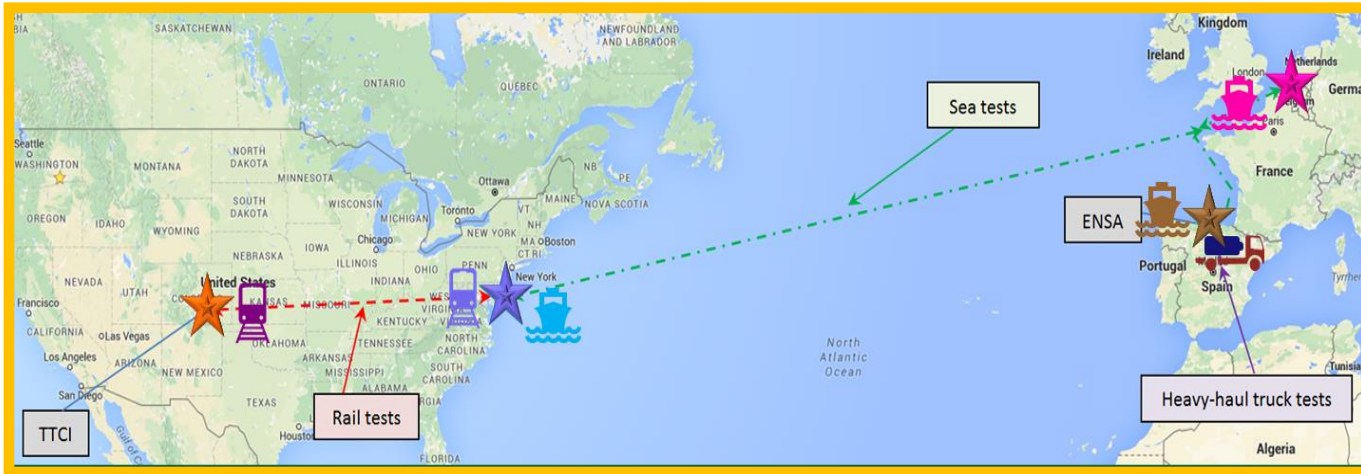


< 캐니스터 소성변형 >



# 국제공동연구 복합모드 운반시험

## ❖ 2017년 미국-스페인-한국 Multi-modal Transportation Test



- ENSA ENUN 32P Cask
- Fuel Assembly(3set)
  - SNL, ENSA, KNF 17ACE7
- Travel Time: 54 Days
- Distance: 9,458 miles
- Heavy-Haul Truck, Ships, Rail
- 8 Terabytes Data Collections
- 77 sensors

### <Test Route and Time Schedule>

- ★ Cask handling tests at ENSA, Santander/Spain (JUN 2017, 1 day)
- 🚛 Heavy-haul truck tests in northern Spain (JUN 2017, 2 days, 245 miles)
- 🚢 ★ Ocean transport from Spain to Belgium (JUN 2017, 4 days, 939 miles)
- 🚢 ★ Ocean transport from Belgium to Baltimore (JUL 2017, 14 days, 4222 miles,)
- 🚂 Rail shipment from Baltimore to Pueblo (AUG 2017, 6 days, 2000 miles)
- ★ Testing at Transportation Technology Center, Inc., Pueblo (AUG 2017, 9 test days; 8 types of tests; 125 tests)
- 🚂 Rail shipment from Pueblo to Baltimore (OCT 2017, 43 travel days, 18 test days, 1125 test miles)
- 🚢 Ocean transport from Baltimore to Spain (DEC 2017, no data collected)

# 국제공동연구 복합모드 운반시험

## ❖ 복합모드 운반시험 개요

### ❖ 복합모드운반시험

- Heavy-Haul Truck Test, Intercoastal Ship Test, Transoceanic Ship Test, Rail Test

### ❖ 한국측 참가 기관

- KAERI, KORAD, KNF, KINS

### ❖ 센서

- 가속도계와 스트레인게이지 총 77채널



< Heavy-Haul Truck Test >



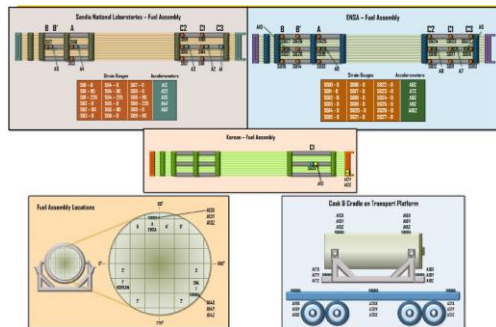
<Intercoastal Ship Test>



<Transoceanic Ship Test>



< Rail Test >



<가속도계 및 스트레인게이지 위치>



### Cask Test Participants

- U.S. Department of Energy
- Equipos Nucleares Sociedad Anónima (ENSA)
- Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. (ENRESA)
- ENUSA Industrias Avanzadas S.A.
- Coordinadora Internacional de Cargas, S.A.
- Sandia National Laboratories (SNL)
- Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)
- Transportation Technology Center, Inc.
- Korea Radioactive Waste Agency (KORAD)
- Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)
- Korea Nuclear Fuel Company Ltd. (KNFC)
- Argonne National Laboratory (ANL)



<MMTT 기념사진>

<참여기관>

# 국제공동연구 복합모드 운반시험

## ❖ 복합모드 운반시험 1차 결과(Preliminary Results)

### ❖ 정상운반조건 복합모드운반시험

- 저연소도 뿐만 아니라 고연소도 사용후핵연료 피복관은 항복응력 및 피로한도 이내의 응력과 변형률을 받는다. → 피복관은 정상운반조건 진동 및 충격하중에 파손되지 않음

### < Preliminary Results of MMTT presented in NEI Conference >

#### 1) Heavy-Haul Truck Test Data

- Max. Fuel Assembly Acceleration=0.74g
- Max. Fuel Assembly Strain = 86 $\mu\epsilon$

#### 2) Intercoastal Ship Test Data

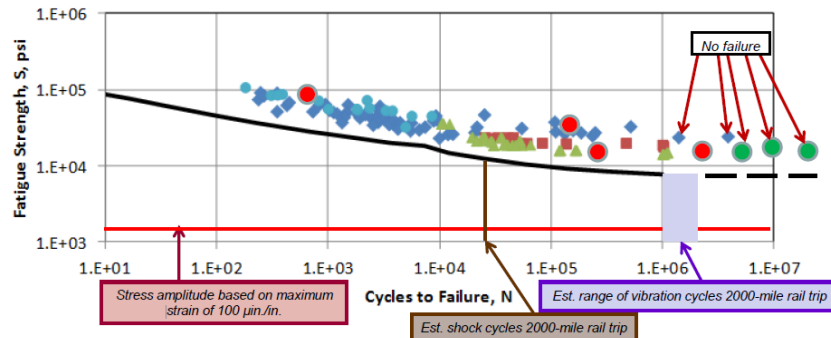
- Max. Fuel Assembly Acceleration  $\leq 0.3g$
- Max. Fuel Assembly Strain  $\leq 20\mu\epsilon$

#### 3) Transoceanic Ship Test Data

- Max. Fuel Assembly Acceleration  $\leq 0.2g$
- Max. Fuel Assembly Strain  $\leq 20\mu\epsilon$

#### 4) Cross-Country Rail Test Data

- Max. Fuel Assembly Acceleration=1.3g
- Max. Fuel Assembly Strain=47 $\mu\epsilon$



Fatigue design curve (—): O'Donnell and Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components," Nucl. Sci. Eng. 20, 1, 1964. (cited in NUREG-0800, Chapter 4)

Data plot courtesy of Ken Geelhood, PNNL. The large circles are ORNL HBR data

### 1차 발표논문

Sylvia Saltzstein, Paul McConnell, Steve Ross, Doug Ammerman, Brady Hanson, Elena Kalenina, Alejandro Palacio, **Woo Seok Choi**, et al., "ENSA/DOE Multi Modal Transportation Tests Preliminary Results", **NEI Used Fuel Management Conference, May 1-3, 2018**, Savannah, GA

*Realistic stresses fuel rods experience due to vibration and shock during normal transportation below yield and fatigue limits for cladding.*



맺음말



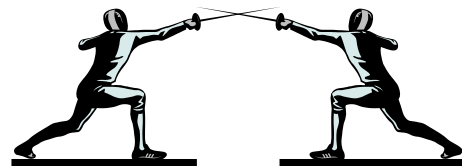
## □ 재공론화를 앞두고...

- 이전 공론화의 문제점(소통 부족)을 극복하고 국가적 대계를 위한 협력 필요
- 예상 핵심쟁점에 대한 철저한 준비



## □ 단기저장-처분전저장-영구처분 시스템 연계성 고려 필요

- 원전내 단기저장은 한수원이, 처분전저장 및 처분은 환경공단이...
- 환경공단은 사용후핵연료 21다발을 운반 저장하는 용기 개발 및 인허가 진행중
- 한수원은 시급성으로 인해 해외 저장시스템 도입 예정
- 저장용기 및 처분용기의 표준화 및 연계성 고려 필요



## □ 국내 운반저장 기술현황

- 운반/저장용기개발 기술 확보, 안전성 시험평가 기술 및 시설 준비 완료
- MACSTOR 운영 및 소내운반 경험 등 기술기반 확보
- 그러나, 경수로 SF 저장시설 건설·운영 경험 없음
- 관련된 규제기술 적기 제공 필요
- 핵심요소기술 개발, 국내유관기관간 협업 및 국제 공동연구 확대 필요

---

**감 사 합 니 다.**