

2015년도 한국원자력학회 추계학술발표대회 워크숍, 경주현대호텔

사용후핵연료 관리 기술개발 현황

2015. 10. 28

박 주 완



한국원자력환경공단

목 차



사용후핵연료 관리 기술분류



사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향



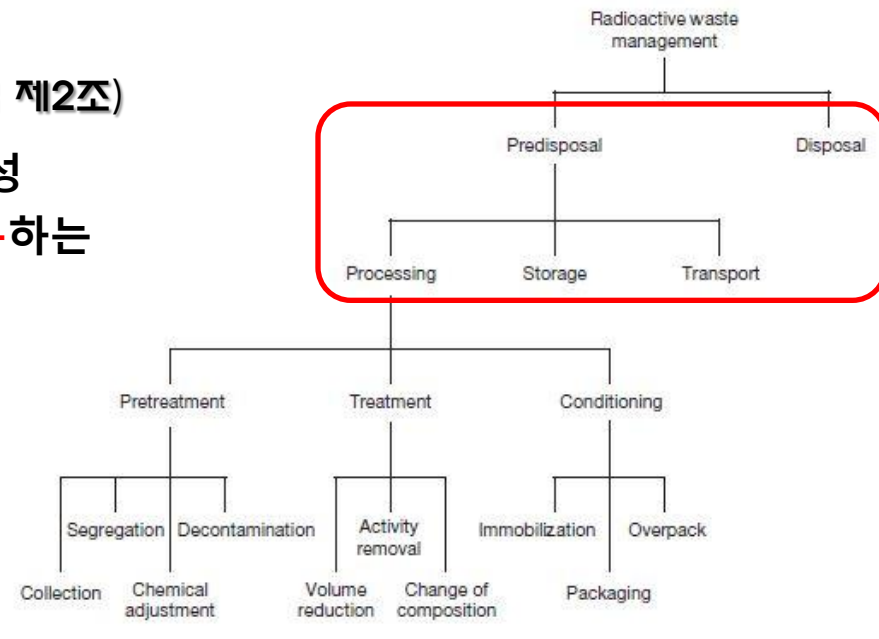
공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향

I. 사용후핵연료 관리 기술분류

방사성폐기물 관리

- 방사성폐기물 (원자력안전법 제2조 제18호)
 - 방사성물질 또는 그에 따라 오염된 물질로서 폐기의 대상이 되는 물질
(폐기하기로 결정한 사용후핵연료를 포함)
- 방사성폐기물 관리 (방사성폐기물 관리법 제2조)
 - 방사성폐기물을 발생시키는 자로부터 방사성 폐기물을 인수하여 운반·저장·처리 및 처분하는 것과 이를 위한 모든 활동

1. All administrative and operational activities involved in the handling, pretreatment, treatment, conditioning, transport, storage and disposal of radioactive waste.



출처 : IAEA, Safety Glossary, 2007

I. 사용후핵연료 관리 기술분류 (계속)

사용후핵연료 관리 기술분류

운반분야

• 사용후핵연료 운반기술

- 운반용기 설계/안전성분석 기술
- 운반위험도 평가기술
- 운반용기 제작기술
- 운반용기 소재개발

저장분야

• 사용후핵연료 저장기술

- 저장시스템 설계/제작기술
- 저장시설 운영기술
- 장기저장 건전성평가기술
- 안전조치 기술
- 안전규제 기술

처분분야

• 사용후핵연료 처분기술

- 부지 평가 기술
- 공학소재 개발 및 성능평가
- 처분장 설계 및 장치개발
- 안전성 평가 및 운영 기술
- 지하연구시설(URL) 개발

처리분야

• 사용후핵연료 재활용기술

- 파이로프로세싱 기술
- 핵변환/분리 기술

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향

사용후핵연료 운반기술-국외

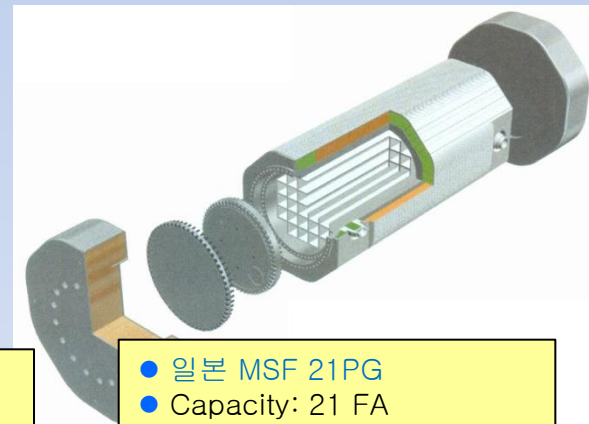
- **사용후핵연료 운반용기의 대형화**
 - 프랑스 TN사는 TN 40으로 사용후핵연료 40 다발을 운반
- **사용후핵연료 운반용기의 저장 겸용화 추세**
 - Hi Star/Hi Storm, NAC UMS, NUHOMS, CASTOR, TN 겸용용기 개발



- 프랑스 TN 40
- Capacity: 40 FA
- Burn-up: 45,000MWD/MTU
- Enrichment: 3.85wt%
- Cooling time: 10yr
- Dual purpose cask



- 독일 va/21
- Capacity: 21 FA
- Burn-up: 75,000MWD/MTU
- Enrichment: 4.65wt%
- Cooling time: 5yr
- Dual purpose cask



- 일본 MSF 21PG
- Capacity: 21 FA
- Burn-up: 60,000MWD/MTU
- Enrichment: 4.5wt%
- Cooling time: 6yr
- Dual purpose cask

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반기술-국외 (계속)

■ 사용후핵연료 운반의 중대사고 평가

- (미국) 유카 마운틴으로의 운반을 염두에 둔 원형크기 실제사고 시험 및 평가, 육상운반 안전성평가, 위험도분석, 차량 및 항공기충돌 등 운반사고 시나리오 연구 수행



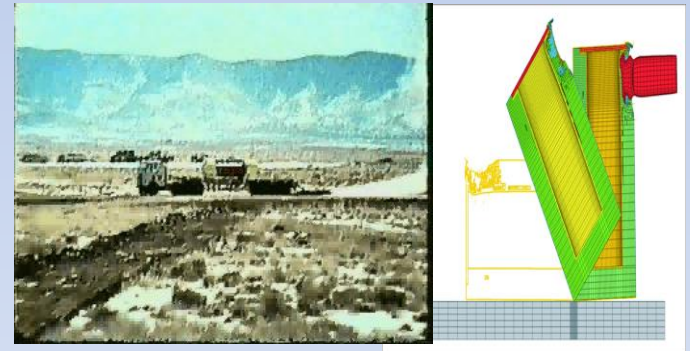
● 원형시험평가 기술



● 원형시험시설(BAM)



● 화재시험



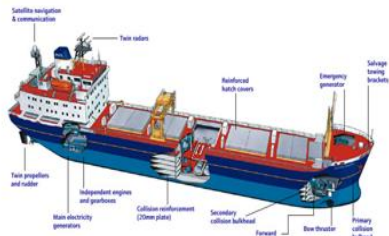
● 중대사고 시험평가 (트레일러 /항공기 고속 충돌)

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반기술-국외 (계속)

■ 국외 사용후핵연료 전용 운반시스템 운영 현황

- PNTL(영국/프랑스/일본이 합작), SKB(스웨덴), NFT(일본) 등 운반회사는 전용 선박 및 항만시설을 구비한 해상운반시스템을 구축, 운영
- (프랑스, 영국, 독일) 철로를 이용한 육상운반시스템 운영



☞ 선박은 항행안전, 방사선안전 및 환경영향을 중시하는 개념으로 특별히 설계, 건조됨



영국의 항만시설



프랑스의 항만시설

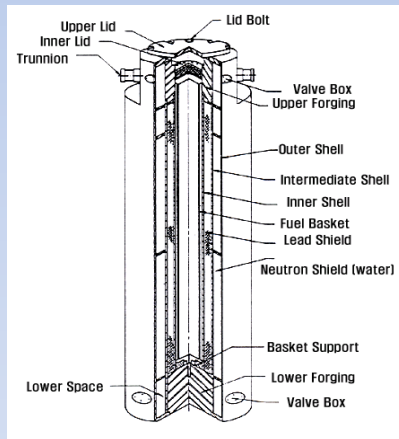


일본의 항만시설

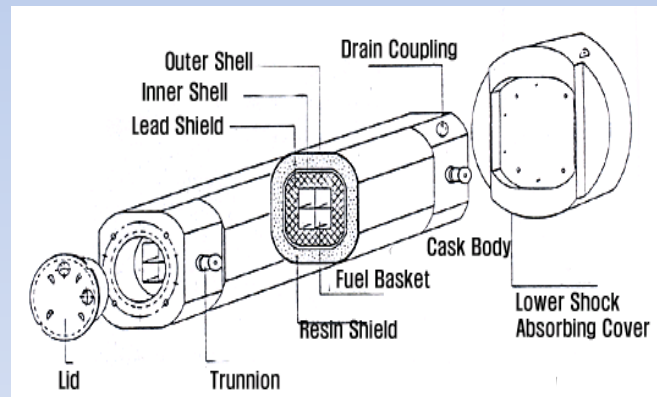
II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반기술-국내

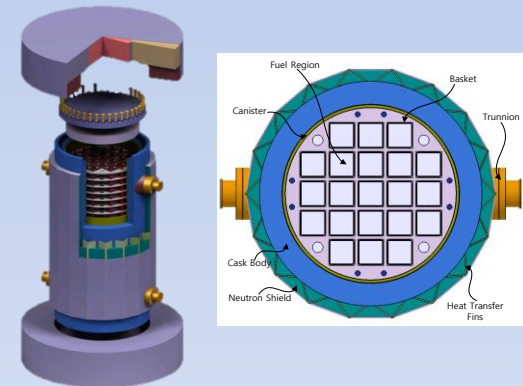
- **사용후핵연료 운반 용기는 연구 및 발전소내 운반용으로 개발**
 - (한국원자력연구원) KSC-1는 사용후연료의 조사후 시험목적으로, KSC-4는 원자력 발전소 소내 운반용으로 개발
 - (한수원) KN-12, KN-18 운반용기는 원자력발전소내 운반용으로 개발
 - (한국원자력환경공단) 경수로형 사용후핵연료 21다발 운반저장 겸용용기 개발 중



- KAERI KSC-1
- Capacity: 1 FA
- Burn-up: 45,000MWD/MTU
- Enrichment: 3.5 wt%
- Cooling time: 1 yr
- Transportation only



- KAERI KSC-4
- Capacity: 4 FA
- Burn-up: 38,000MWD/MTU
- Enrichment: 3.2 wt%
- Cooling time: 3 yr
- Transportation only

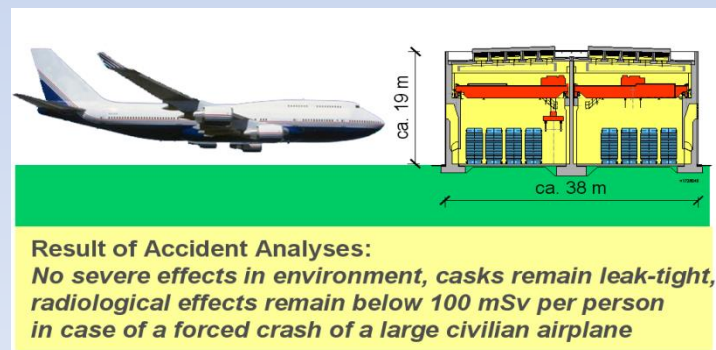
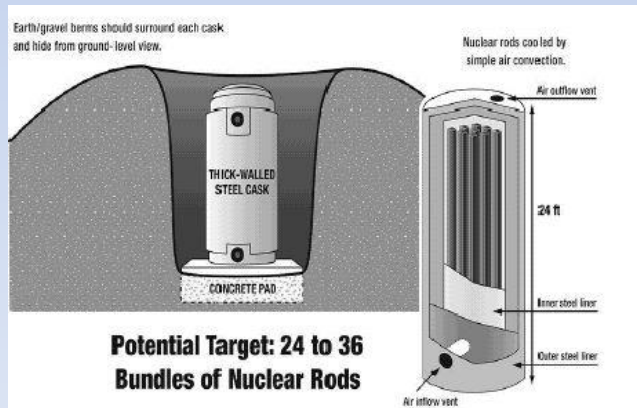


- KORAD-21
- Capacity: 21 FA(WH & CE)
- Burn-up: 45,000MWD/MTU
- Enrichment: 4.5 wt%
- Cooling time: 10 yr
- Transportation & Storage

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 저장기술-국외

- (미국) 지중매설 방식 등 보안성·안전성 강화 및 장기 저장에 대비
 - 9.11 테러사건 이후 항공기 충돌 안전성 평가 수행
 - UFD프로그램을 통해 장기건식저장에 따른 사용후핵연료 건전성 평가 수행 중
- (독일) 고연소도(65GWd/tHM) 연료에 대한 건식저장도 인허가 되었으며, 수송·저장 겸용의 CONSTOR 개발
 - 9.11 테러 사건 이후 대형 민항기 충돌을 고려한 안전성 평가 수행
 - 장기 건식저장에 따른 사용후핵연료 건전성 평가 수행 중

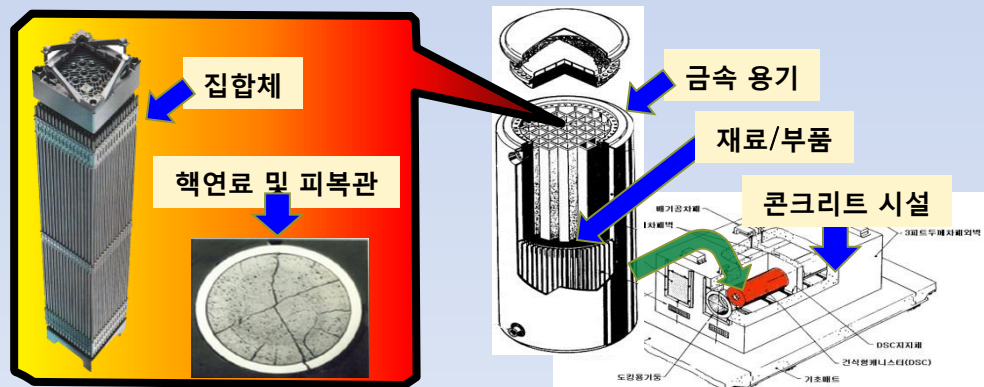
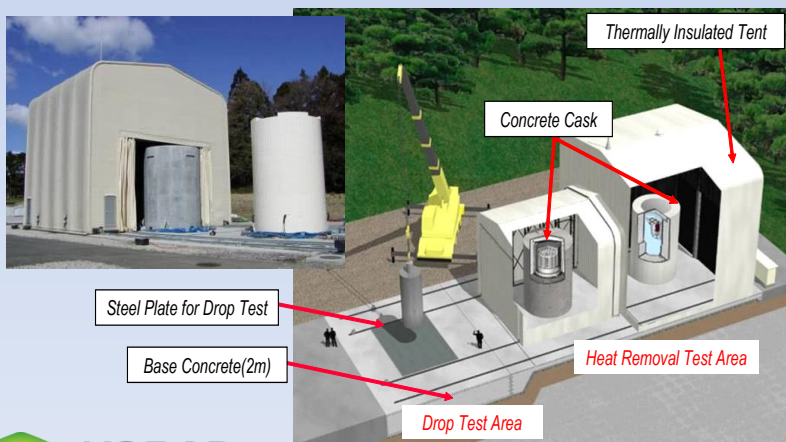


II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 저장기술-국외 (계속)

- (일본) 금속 및 콘크리트 용기 개발을 완료하였으며, 원형크기의 시험으로 안전성 확보에 주력
 - 사용후핵연료 건식중간 저장에 사용될 저장용기에 대한 항공기 충돌시험 수행
 - 20년 건식저장된 사용후핵연료에 대한 건전성 평가 후 규제요건 수립 및 시행
- (시스템 및 시설 건전성) 사용후핵연료 저장 시스템과 시설에 대한 건전성 확보를 위한 각종 저장 규제요건을 각국 실정에 맞는 조건* 하에서 개발 중

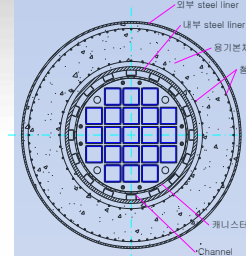
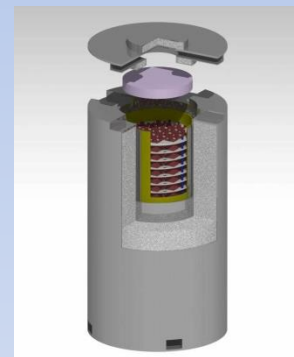
* 저장시 핵연료 온도, 시스템 및 시설의 Aging 등



II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 저장기술-국내

- 한수원(주)을 중심으로 국내유관기관(KAERI, KOPEC, KAIST, 두산중공업 등)과 경수로형 연료 대상 건식저장에 대한 기반 기술 확보를 위한 연구 수행(2002~2008년)
- 한수원(주) 월성 원자력본부에 중수로형 사용후핵연료 저장시설인 콘크리트 사일로 방식이 90년대 초부터 설치되어 운영
- 한수원(주)에서 조밀 건식저장 시설인 MACSTOR/KN-400을 캐나다 AECL과 공동개발, 인허가 완료 후 운영(2010년)
- 2009년 공단 설립 이후, “사용후핵연료 수송저장 시스템 상용화 기술개발” 과제 수행(2009.6~2016.9)
 - 경수로형 사용후핵연료 콘크리트 저장용기(KORAD-21C) 개발 중
- (장기 건전성 평가) 실제 사용후핵연료를 이용한 시험자료 전무, 저장 시스템과 시설에 대한 건전성 관련 연구는 기초연구 수준
 - 저연소도 사용후핵연료 열화기구 및 건전성 평가기술개발 중(2014~2019)



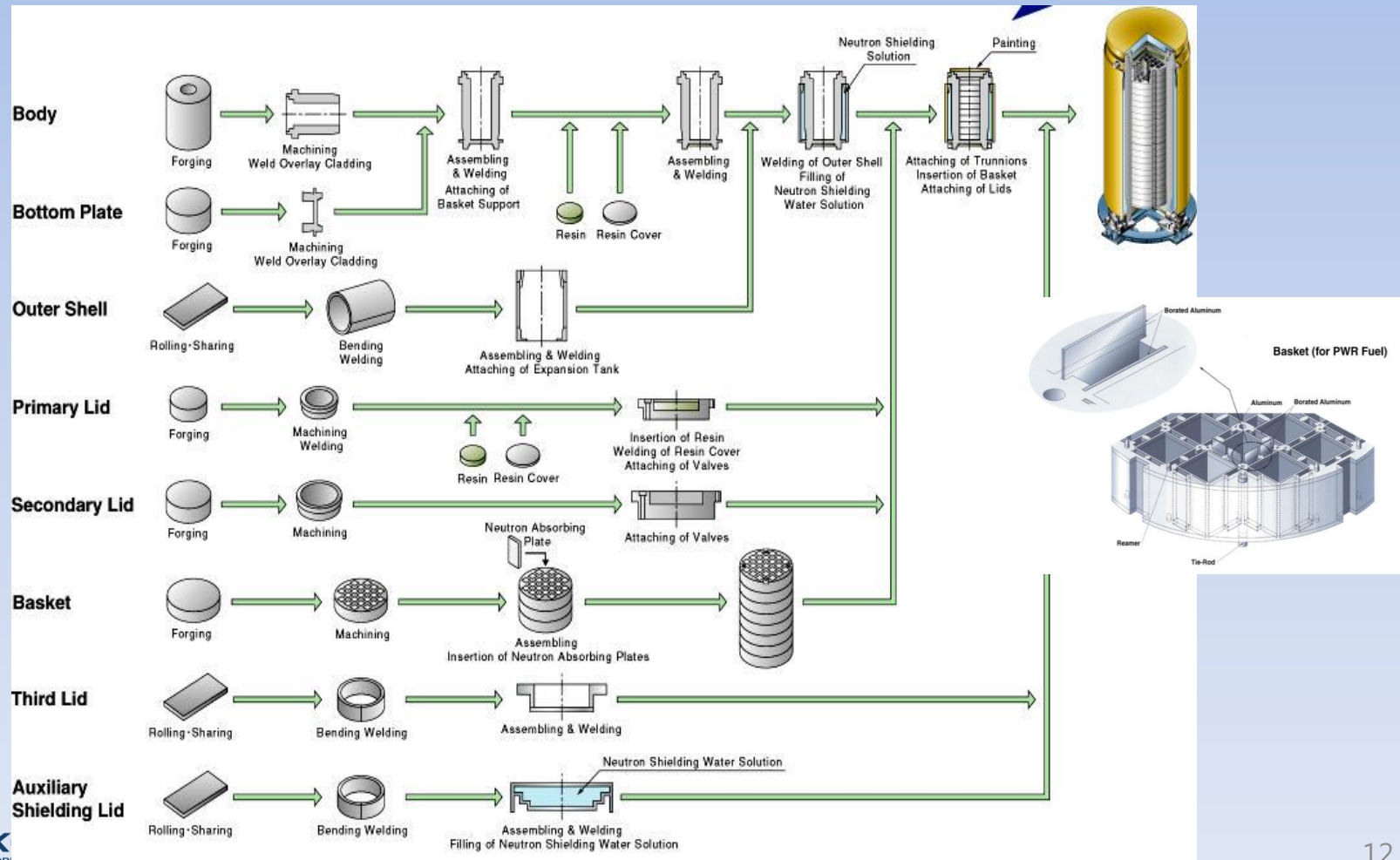
II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반/저장기술-용기제작-국외

▪ 재질 spec. 결정

▪ 운반/저장용기 제작기술

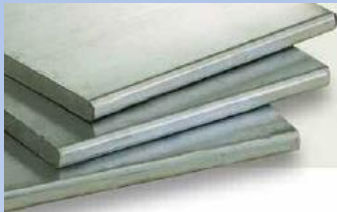
▪ 성능시험 및 검사기술



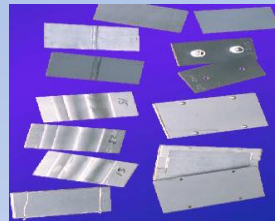
II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반/저장기술-소재개발-국외

■ 중성자 흡수재 개발



Al-B4C MMC
(BorTec, Canada
Ceradyne)

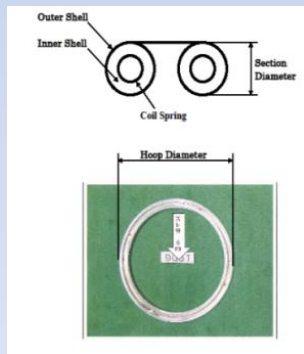


Al-B4C MMC
(METAMIC, US
Metamic)

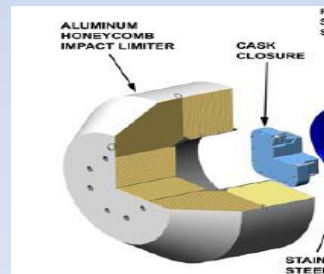


Al-B4C MMC
(Japan, Mitsubishi)

■ O-ring 개발



■ 충격완충재 개발



Urethane Foam



Honeycomb

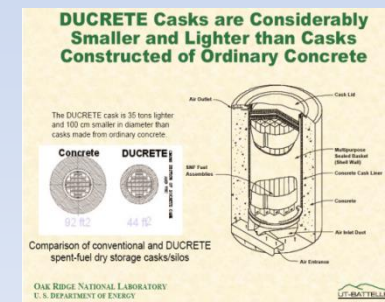
■ 중성자 차폐재 개발



(Borated HDPE 5 wt%, Green)



(Boro-silicone 1 wt%)



(DUCRETE)

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 운반/저장기술-소재개발-국내

■ 기존 운반용기 적용현황

- KSC-1 : 중성자 차폐재로 물 사용, 완충재 (수입)
- KSC-4 : 중성자 차폐재, 흡수재, 완충재 (수입)
- KN-12 : 중성자 차폐재, 흡수재, 완충재 (수입)
- KN-18 : 중성자 차폐재, 흡수재, 완충재 (수입)



KN-12 (두산중공업)

■ 고분자 기반 중성자 차폐재개발 현황

- 에폭시 기반 중성자 차폐재 연구 수행(2010~2013)
- 저장용 보론화합물 분산 알루미늄 복합재 제조기술 개발(2011~2013)
- 나노복합 중성자 차폐재 개발연구 수행(2010~2013)

■ 금속 기반 중성자 흡수재 연구

- 전량 수입의존, 해외특허 의존
- 저장 및 운반용기 적용 중성자흡수소재개발 연구 중(2014~2019)

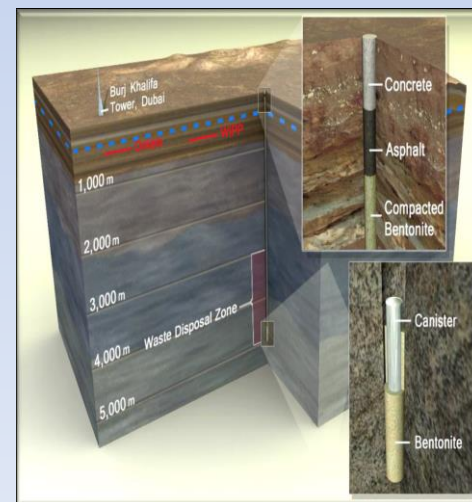
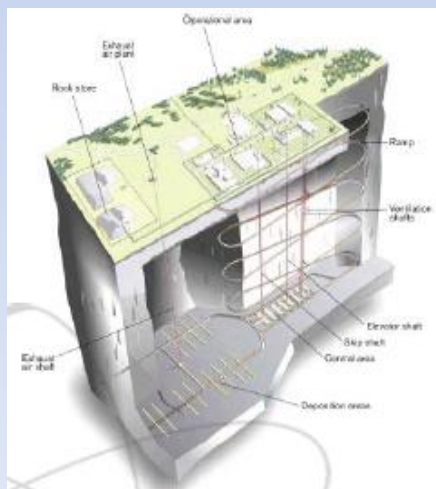


나노융합 방사선차폐재 제조기술개발
산업체 기술이전, 2011
(한국원자력연구원)

II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 처분기술-국외

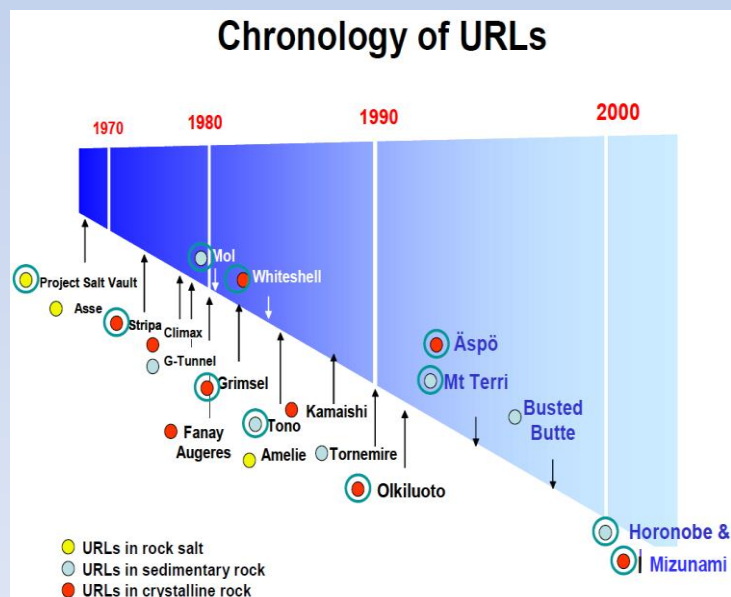
- (부지평가기술) 자국 고유의 지질특성 평가기술을 확보하여, 지하연구시설을 건설하여 자국 지질특성에 기초한 처분 연구를 수행
- (공학소재 개발/성능평가) 프랑스, 일본, 스위스, 스웨덴 및 핀란드는 심지층 현장시험을 통한 공학적방벽 시스템의 장기 성능 검증
- (처분장 설계/장치개발) 처분공 배열, 정치 기술 등의 설계 기술 및 필요 장치 개발/ 미국 SNL 중심으로 심부시추공처분(Deep Borehole Disposal) 기술 실증프로그램 추진 중
 - 프랑스, 일본, 스위스, 스웨덴, 핀란드는 심지층 현장시험을 통한 장치 성능확인



II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 처분기술-국외 (계속)

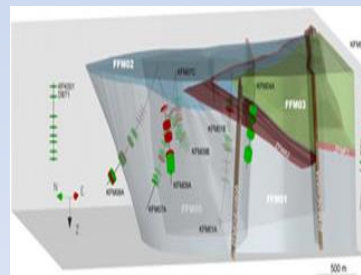
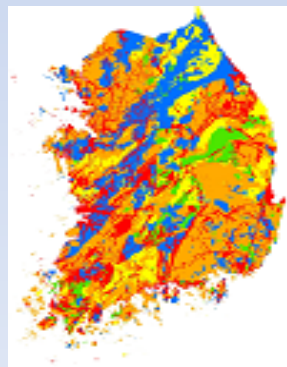
- (안전성 평가 및 운영 기술) 불확실성을 포함한 다양한 안전성평가가 권고되는 추세이며, 심지층 처분장의 효율적인 운영을 위하여 처분 시설 운영 및 관리에 관한 절차나 지침 제정(미국, 스웨덴)
- (지하연구시설 개발 기술) 주요 국가들은 공학적 방법의 실규모 성능실증 및 폐쇄실증연구를 목적으로 추진(스웨덴, 프랑스, 핀란드, 일본 등 10개국에서 20여개 URL운영 중)



II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 처분기술-국내

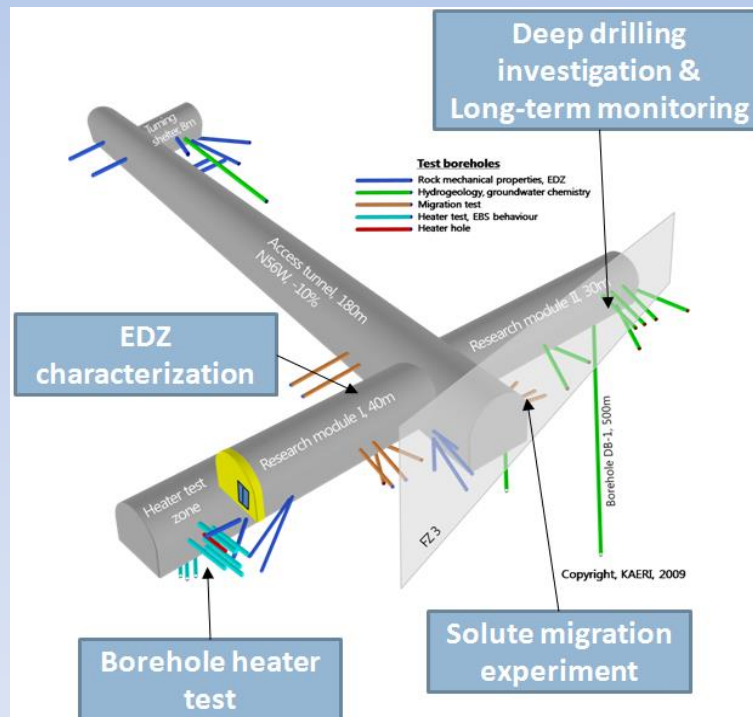
- (부지평가기술) 공단 주도하에 한반도 지질환경 특성 평가 및 장기 지질 안정성 요소 평가기술 확보 추진 중(2010~2015년)
- (공학소재 개발/성능평가) 한국의 대표 지형조건을 기준으로 처분용기 및 완충재 등 공학적방벽 개념 설정 중
- (처분장 설계/장치개발) 한국원자력연구원에서 직접처분 기준처분시스템 (KRS) 제안(2006년) 및 선진핵주기 고준위 처분시스템(A-KRS) 개발 중
 - 실규모 공학적방벽과 처분용기, 완충재 취급장치와 처분공 굴착 장비활용 경험부족
- (안전성 평가 및 운영 기술) 한국원자력연구원에서 고준위폐기물 처분장 중 합안전성평가시스템 개발 중이며, 운영 및 폐쇄기술 등은 미비



II. 사용후핵연료 관리 국내·외 기술동향 (계속)

사용후핵연료 처분기술-국내 (계속)

- (지하연구시설 개발 기술) ‘06년 말 국내 최초로 원자력(연) 부지 내 지하 처분연구터널(KURT)을 건설하여 수리특성 조사, 장기부식시험, 공학적방벽 장기성능시험(In-DEBS) 등 소규모 현장 시험을 수행 중



III. 공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향

공단의 임무 (방사성폐기물 관리법)

제9조

방사성폐기물 관리사업 (범위)

1. 방사성폐기물의 운반 · 저장 · 처리 및 처분
2. 방사성폐기물 관리시설의 부지 선정, 건설, 운영 및 폐쇄 후 관리
3. 방사성폐기물 관리를 위한 자료의 수집 · 조사 · 분석 및 관리
4. 방사성폐기물 관리에 관한 홍보
5. 제1호부터 제4호를 위한 대통령령으로 정하는 부대사업(영 제3조)
 - ① 방사성폐기물 관리를 위한 연구개발, 전문 인력 양성 및 국제협력
 - ② 방사성폐기물 관리시설의 주변지역 주민과의 상호 협력
 - ③ 방사성폐기물 관리시설의 주변지역에 대한 환경 조사
 - ④ 방사성폐기물 발생자에 대한 방폐물관리 관련 기술 지원 및 정보 제공



- 경주방폐장의 안정적 운영기술 보유 및 최적 활용기술 적용
- 선진국과 수출경쟁이 가능한 사용후핵연료 운반/저장체계 확립
- 국민 수용성 확보와 함께 사용후핵연료 처분기술 자립
- 원전해체에 대비한 해체폐기물 관리기술 확보

III. 공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향 (계속)

핵심기술 확보방안 – 사용후핵연료 운반/저장

● 목표

- 선진국과 수출경쟁이 가능한 사용후핵연료 운반/저장체제 확립

● 주요 핵심기술

- 운반 및 저장 시스템 설계 기술, 안전성 평가기술, 건전성 평가 및 모니터링 기술, 핵심소재 개발 및 제작 기술

● 기술확보 방안

- 사용후핵연료 운반/저장기술의 단계적 확보
 - 사용후핵연료 저장 안전성해석 및 평가기술 등의 요소기술과 설계 기초자료를 확보
 - 국내 독자 사용후핵연료 저장시스템 국산화로 국내 저장시설에 적용
 - 소재 개발, 제작기술 고도화 및 장기 건전성 기술개발
- 공단은 사업추진에 대비한 운반/저장용기 상용화 및 저장시설 안전성평가, 운영시스템 개발에 주력하고, 기타 분야는 국내 산·학·연 협업 및 국제협력을 통해 핵심기술을 확보
 - 공단과 국내 관련 분야 산·학·연의 적극적인 협업과 업무분장을 통한 효율적 기술개발 추진
 - 선진기술 확보 국가와의 공동연구 및 기술전수 등 국제협력을 통한 기술개발 추진

III. 공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향 (계속)

핵심기술 확보방안 – 사용후핵연료 처분

● 목표

- 국민 수용성 확보와 함께 사용후핵연료 처분기술 자립

● 주요 핵심기술

- 지질환경 평가 및 정량화 기술, 심지층 처분장 설계 및 성능평가 기술, 사용후핵연료 특성평가/공학소재개발 및 실증기술, 지하처분연구시설 개발

● 기술확보 방안

- 사용후핵연료 처분기술의 단계적 확보
 - 지질환경평가 및 부지확보기술은 해외 기술의 도입이 불가능한 분야로 국내 자체 기술개발 추진
 - 공단주도로 부지평가 및 처분시스템 핵심기술개발을 추진하되, 기초기술을 보유하고 있는 국내연구기관 및 민간 기관의 적극 참여를 주도하여 심지층 처분시스템 성능평가기술 조기 확보
 - 국외 URL보유기관과의 공동연구를 통하여 자료확보 및 경험습득
- 국내 고유 처분시스템 확보 및 처분장 유사환경 조건의 지하처분연구시설 구축
 - 사용후핵연료 처분시스템 (대안기술 포함) 격리·지연성능 및 취급장비 성능 실규모 실증·시연
 - 대국민 신뢰성을 확보하고 이를 최종 처분장 후보부지선정 업무와 연계하여 접근

III. 공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향 (계속)

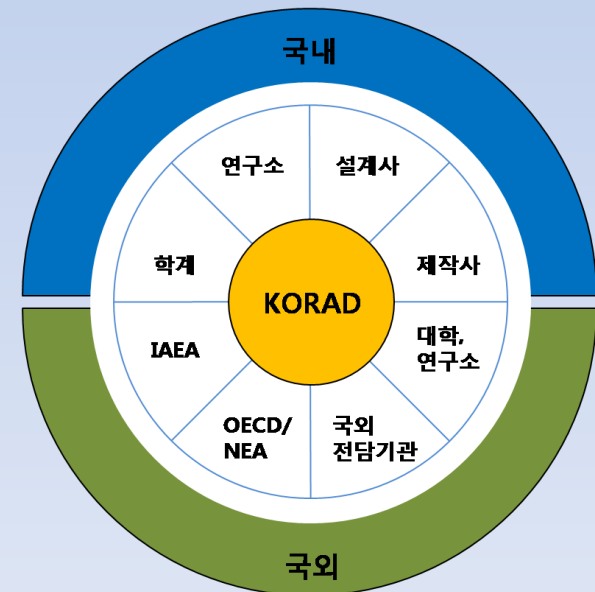
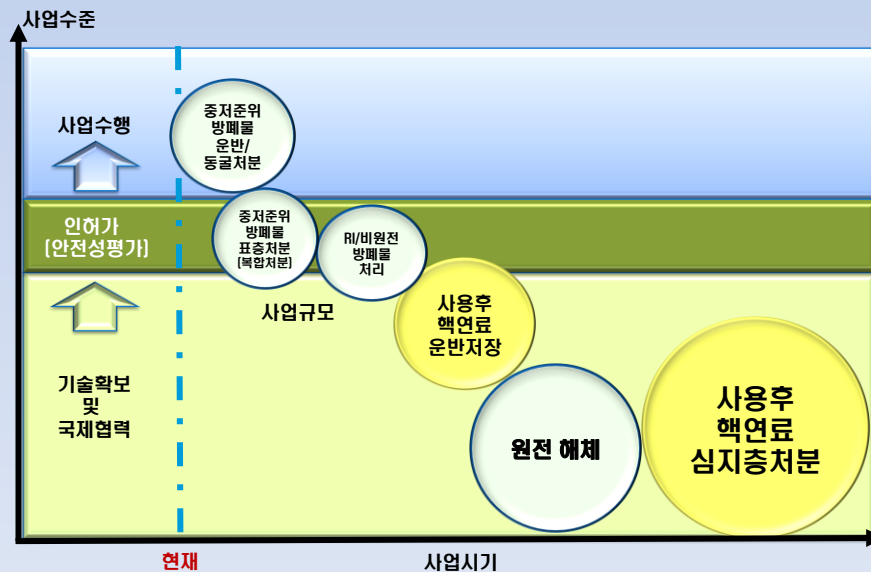
핵심기술 확보 로드맵(안) – 단계별 목표 및 과제

구분	단기(2015~2018)	중기(2019~2023)	장기(2024~2030)
사용후핵연료 운반·저장	국내 기술개발 기반 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 대형/고연소도 용기 설계기술 - 운반/저장 안전성 평가기술 - 건전성 평가 및 모니터링 기술 - 핵심소재 제작 기술 	국내 독자기술 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 대형 및 고연소도 모델 개발 - 운반시스템 평가 체계 구축 - 중대사고 평가 기술체계 확립 - 건전성 평가 및 모니터링기술 	국내 상용화 및 해외사업 진출 <ul style="list-style-type: none"> - 독자모델 성능평가/제작검사 - 안전성 평가 체계 검증 - 건전성 평가 및 모니터링 기술검증 - 중성자 흡수재, 차폐재, 완충재 제작, 성능평가
사용후핵연료 처분	심층처분 지질환경평가 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 지질환경 정량화 기술 및 부지 선정 기준, 절차 개발 - 공학소재 개발 및 성능평가 - 국내고유 처분시스템 설계 - URL시설 부지확보 프로그램 개발 	고유 심층처분시스템 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 심부 환경특성 상세 조사 - 공학적방벽 설계 및 제작기술 - 처분시스템 성능 평가기술 - 지하처분연구시설 실증 프로그램 및 기초기술 	URL 확보 및 심층처분시스템 성능 실증 <ul style="list-style-type: none"> - 심지층 처분장 부지확보 - 실규모 공학적방벽 제작 및 성능 실증 - 실규모 처분시스템 성능실증 - 지하처분연구시설 건설 및 운영

III. 공단의 사용후핵연료 관리 기술확보 추진방향 (계속)

핵심기술 확보전략

- 사용후핵연료 관리사업의 원활한 추진을 위해 **사업연계성** 소요기술 **적기개발**
- 국내외 **산·학·연** 협업을 통한 핵심기술 국산화 선도
↳ 기술개발 Control Tower 역할 수행
- 사업(단계)별 공단 특유의 **인허가 대응 기술확보** 및 **핵심기술 통합관리형 시스템 구축**에 주력



감사합니다 !