사용후핵연료 저장 및 운반 기술 개발 현황

서 기 석
한국원자력연구소 사용후핵연료기술개발부 책임기술원

국내 원자력발전소의 사용후핵연료는 고리 원자력발전소 1호기의 경우에 거의 30년 가까이 상업 운전을 함에 따라 사용후핵연료가 적체되어 원자로 건물의 저장조 용량이 부족한 실정이다.

또한 국가 원자력 정책을 결정하는 원자력위원회는 2004년 12월에 253차 회의에서 사용후핵연료 관리에 대해 2016년까지 원자력발전소 부지 내에 저장하며 원자력발전소별로 조밀 저장대 설치, 호기간 이동, 건식 저장소 추가 설치 등 임시 저장 능력을 확충하도록 결정하였다.

국내 상업용 원자로의 사용후핵연료 저장조에서 수 십 년에 걸쳐 사용후핵연료를 저장한 경험을 갖고 있으며, 현재 경수로 사용후핵연료 저장은 부족한 용량을 확장하기 위해 발전소 건물 내의 저장조를 조밀 저장대로 교체하고 있다.

국내 중수로 사용후핵연료는 저장조 이외에 원자력발전소 부지 내에 콘크리트 사일로에 저장하고 있다.

해외 사용후핵연료 저장 경향은 습식 방식에 비해 초기 투자비가 적고 운영비가 싸고 확장성이 좋은 건식 방식을 적용하고 있다.

또한 원자력 선진국은 금속 혹은 콘크리트 용기와 수평 혹은 수직 형태의 모듈 볼트 등 다양한 사용후핵연료의 건식 저장 시설을 개발하여 상용화하였다.

국내 경수로 사용후핵연료 운반은 연구용 목적과 발전소 부지 내 호기 간 운반을 목적으로 개발되었다.

해외 경수로 사용후핵연료 운반 용기는 현재 대형화되어 운반 용량이 증가하는 추세에 있다.

미국, 일본 및 독일은 발전소로부터 중간 저장 시설, 재처리 시설 혹은 처분장으로 운반하는 사용후핵연료 운반 용기에 대해 법규 및 규정에 제시된 기술 기준과 시험 요건을 엄격히 적용하고 있다.

그리고 원자력 개발 선진국들은 실제 운반시 발생 가능한 사고 시나리오를 설정하여 추가적인 평가를 수행하고 있다.

원자력 선진국들은 수송 및 저장 용기에 적용하는 재질을 중량 대비 차폐 효율이 높은 신소재로 개발하고 있으며 수송 저장 처분까지 겸용화시키는 노력을 기울이고 있다.

사용후핵연료 건식 저장 개발 현황

사용후핵연료의 저장 방식은 설치 위치에 따라 사용후핵연료를 원자로 건물에 저장하는 AR(at reactor) 저장 방식 및 사용후핵연료를 원자로 건물 외부에 저장하는 AFR (away from reactor) 저장 방식으로 구분하고 있다.

또한 사용후핵연료 저장을 냉각 매체에 따라 습식 저장 방식은 냉각수를 적용하고 건식 저장 방식은 공기 혹은 불활성 기체를 각각 적용하는 경우로 구분한다.

<표 1> 대표적인 해외 건식 저장 시설 운영 현황

저장 방식	국 가	시설/위치	저장 용량(톤)	비 고
볼트 방식	미 국	Fort St. Vrain	120	MVDS
	영 국	Wylfa	958	MVDS
	프랑스	Cadarache	180	CASCAD
콘크리트 수평 모듈	미 국	Oconee	980	NUHOMS 24P
		Calvert Cliffs	1,200	NUHOMS 24P
	우크라이나	Chornoby1	232 module	Modified NUHOMS
금속 용기	미 국	Surry 1,2	808	CASTOR, TN
		Prairie Island	724	TN-40
		INEL	93	TN-24P
	독 일	Ahaus	3,960	CASTOR V/19
콘크리트 용기/ 사일로	미 국	Palisades	233	VSC-24
		Point Beach	477	VSC-24
		Diablo Canyon	150	HI-STORM 100
	캐나다	Point Lepreau	1,026	Concrete can.
		Gentilly-2	684	CANSTOR
	한 국	Wolsung	140 silos	Concrete can.

사용후핵연료 저장 시설은 정상 운전과 취급 중 인위적 사고 조건 및 자연 재해로부터 설계 수명 동안 안전성을 유지하여야 한다. 이 안전성은 법규와 규정에서 제시한 기술 기준을 토대로 평가하도록 되어 있다.

해외 기술 기준을 제시한 법규는 IAEA Safety Series No. 116와 US 10CFR72이 있으며, 규격은 설계 하중과 하중 조합을 명시한 ANSI/ANS 57.9 및 안전성 분석 보고서 평가 항목을 기술하고 있는 Regulatory Guide 3.48와 인허가 기관의 검토 기준을 설명한 NUREG-1536 및 1567 등이 있다. 국내의 사용후핵연료 기술 기준은 현재 인허가 기관에서 마련 중에 있다.

NUREG-1536에 따르면 사용후핵연료 저장의 안전성은 정상 조건, 비정상 조건, 자연 재해 및 사고 조건으로 구분하여 평가한다.

정상 조건은 자중, 취급 하중, 정상 압력 및 정상 온도를, 비정상 조건은 비정상 압력, 비정상 온도 및 흡입구 부분 봉쇄를, 자연 재해는 폭풍, 폭풍 비산물의 관통, 지진 및 홍수를, 마지막으로 사고 조건은 용기 낙하, 전복, 사고 압력, 화재 및 흡입구 전체 봉쇄를 각각 고려하여야 한다.

사용후핵연료 저장 시설의 안전성 분석은 상기 조건에 대해 설계 기준을 설정하여 구조, 열, 차폐, 핵미임계, 격납 평가를 수행하며 성능 시험, 방사선 방호, 해체 계획 등을 평가하여야 한다.

사용후핵연료 건식 저장 기술은 미국, 프랑스, 독일, 일본 등에서 1970년대 후반부터 30년을 넘게 연구 개발 수행을 통하여 기술 축적을 이루었으며, <표 1>과 같이 다양한 방식의 건식 저장 시설을 상용화하고 있다.

건식 저장 시설은 <그림 1>과 같이 저장 용기(금속 용기, 콘크리트 용기), 볼트 방식(MVDS), 콘크리트 수평 모듈 방식(NUHOMS) 및 수송·저장 겸용 방식 등으로 구분된다.

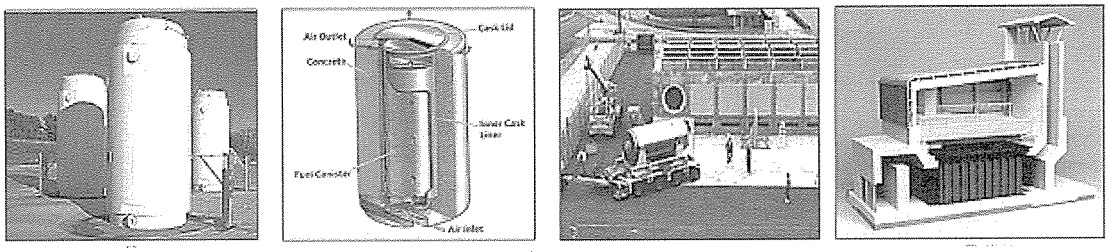
1. 미국

미국의 사용후핵연료 관리 정책에 따르면, 원전 발전 사업자는 2010년 이후의 야카 마운틴 처분 시설의 운영 전까지 사용후핵연료를 발전소 부지 내에 저장하여야 한다.

2006년 2월에 미국의 사용후핵연료 관리에 대한 NRC의 발표 자료에 의하면 AFR 개념의 ISFSI (Independent Spent Fuel Storage Installation)가 25개 주에서 38 개 시설이 인허가 완료되었거나 운전중에 있으며, 2010년까지 50개 시설을 초과할 것으로 예상하고 있다.

ISFSI는 현재 15 종류의 저장 용기와 8 종류의 저장 수송 겸용 용기가 설계 승인되었으며, 750개 건식 저장 용기에 사용후핵연료가 장전되어 있고, 일반적으로 저장 수송 겸용 용기를 사용하거나 계획하고 있다.

발전소 부지 외에 사용후핵연료 중간 저장 시설의 대표적인 경우는



[금속 저장 용기] [콘크리트 저장 용기] [수평 모듈 방식] [볼트 방식(MVDS)]

<그림 1> 사용후핵연료 건식 저장 방식의 종류

private fuel storage 시설이며, 유타주에 콘크리트 저장 용기 4,000개를 설치하여 40,000 tHM를 저장할 계획을 갖고 있고 현재 인허가 진행중이다.

미국에서 저장 연구의 방향은 고연소도 연료 저장 거동, 연소도 이득(Burnup credit) 고려 및 저장 기간 연장에 대한 기술적 향상을 추구하고 있다.

그리고 DOE는 현재 사용후핵연료의 발전소 부지 내 운반, 저장 및 처분을 담당할 TAD(Transport, Aging and Disposal) 캐니스터를 개발하고 있다.

DOE의 지원 아래 SNL 및 INL의 주관으로 최근에 NSNFP(National Spent Nuclear Fuel Program)을 수행하고 있다.

그 연구 내용은 운반, 저장 및 처분이 가능한 다목적 용도의 캐니스터에 대해 재질 노화, 취급 충격 혹은 건조 연구 등을 수행하고 있다.

또한 2001년에 발생한 9.11 테러 사건은 사용후핵연료 저장 방식에 대해 물리적 방호 관점에서 법규에 제시된 기술 기준 이상으로 실제 사고를 중심으로 안전성을 평가하는 계기가 되었다.

사용후핵연료 저장 용기에 보잉 767 항공기가 시속 560km로 충돌하는 조건으로 전산 구조 해석 평가를 수행하였으며, 캐니스터는 파괴되지 않아 방사능 누출이 없는 것으로 평가되었다.

미국 ORNL, 독일 GNSI 및 러시아 VNIIEF laboratory가 감손 우라늄(DU)의 자갈 형상의 DUAGG, DU와 시멘트 혼합물인 DUCRETE 및 DU 산화물과 스테인리스강의 합금인 CERMET 재질 개발과 함께 저장, 운반 및 처분이 가능한 겸용 용기 개발을 공동 연구로 현재 진행하고 있다.

이 다목적 용기의 특징은 일반 철강 혹은 콘크리트 재질의 기존 용기에 비해 크기가 작고, 가벼우며 및 열 전달 성능이 뛰어나다.

2. 일본

일본은 현재 Fukushima 및 Tokai 원자력발전소 부지 내에 금속 저장 용기를 전용 저장 건물 안에 보관하는 AFR 건식 저장 시설을 운영하고 있다.

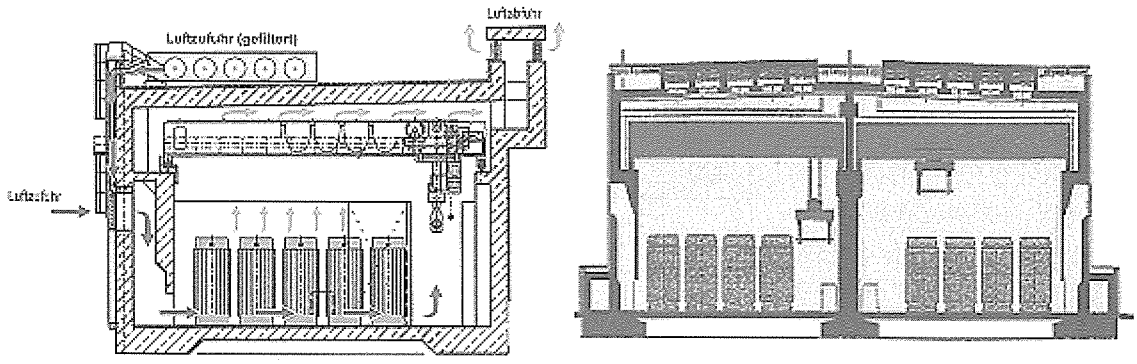
도쿄 전력 회사는 뮤츠시에 금속 저장 용기 방식으로 사용후핵연료 3,000tHM 저장 용량의 중앙 집중식 저장 시설을 건설할 예정에 있다.

사용후핵연료 저장 용기에 대한 일본의 연구는 매우 활발하며, 2010년까지 중간 저장 시설의 운영에 대비하여 운반·저장 겸용 금속 용기와 콘크리트 저장 용기를 개발하고 있다. 일본전력중앙연구소(CRIEPI)는 2000년부터 2003년까지 콘크리트 용기에 대해 원형 크기 저장 용기의 열 제거 시험, 다목적 캐니스터의 낙하 시험과 1/3 축소 모델의 내진 시험 등과 같은 성능 시험을 수행하였다.

최근에는 장기 저장 검증 시험으로 다목적 캐니스터의 응력 부식 균열(Stress Corrosion Cracking), 원형 크기 콘크리트 용기의 내진 시험, 가스켓 부분의 장기 격납 시험, 가스켓 부분의 충격 하중에 대한 격납 시험 및 금속 용기 뚜껑 구조물의 충격 시험 등을 수행하고 있다.

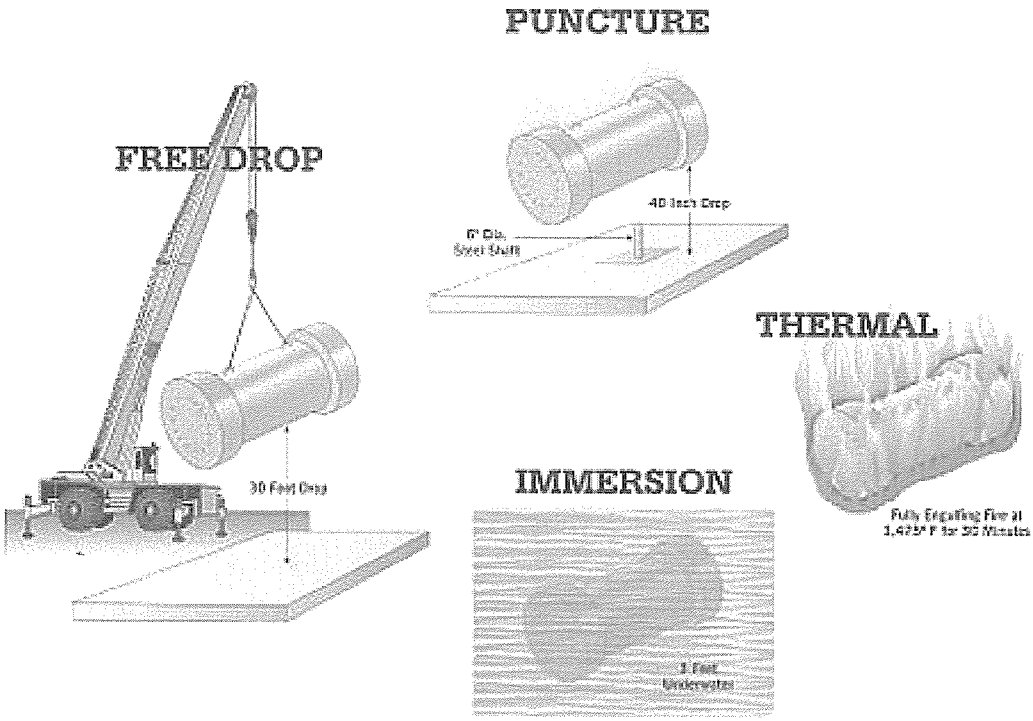
독일은 재처리에서 심지층 처분으로 사용후핵연료 관리 정책을 전환하면서 발전소 부지 내 저장 시설을 확대되고 있으며, 현재 13개 발전소 부지 내에 17개의 AFR 저장 시설을 추진하고 있다.

독일의 주요 특징은 일본과 마찬가지로 저장 용기를 전용 건물 안에



[STEAG방식] [WTI방식]

<그림 2> 독일의 발전소 부지 내 사용후핵연료 저장 시설



<그림 3> 사용후핵연료 운반 용기의 가상 사고 안전성 시험

보관하는 시설을 추진하고 있다.

<그림 2>와 같이 STEAG 방식과 WTI 방식으로 구분하며 발전소는 일반적으로 WTI 저장방식을 채택하고 있다.

독일형 저장 용기는 연성 주철(ductile cast iron) 재질을 적용하고 있으며, 그 밖에 신개념의 콘크리트 운반 저장 겸용 용기 방식인 CONSTOR를 개발하고 있다.

국내에서 사용후핵연료 건식 저장 시설은 월성 원전의 중수로 사용

후핵연료 저장 시설인 콘크리트 사일로 방식이 있으며, 2001년도부터 조밀 건식 저장 시스템인 MAC-STOR/ KN-400 모듈을 AECL과 공동으로 개발하여 월성 원전에 적용하기 위해 상세 설계 및 인허가를 추진하고 있다.

경수로 사용후핵연료의 건식 저장 시스템 기술 개발은 산업자원부와 한국수력원자력(주) 주관으로 2002년부터 2005년까지 1단계 연구를 수행하였으며, 콘크리트 저장 용기 방식에 대하여 고연소도 PWR 사용후핵연료 24다발 용량에 대한 기본 설계, 안전성 해석 및 시험 등을 수행한 바 있다.

사용후핵연료 운반 용기 개발 현황

사용후핵연료는 핵분열성 물질을 포함하고 있으므로 운반 용기는 법규의 기술 기준을 엄격하게 적용하고 있다.

과학기술부 고시 제2001-23호와 IAEA ST-1에 명시되어 있는 사용후핵연료 운반 용기의 기술 기준과 시험 절차는 운반물의 방사능 크기가 커짐에 따라 엄격한 기술 기준과 시험을 요구하고 있다.

사용후핵연료 운반 용기의 안전성 평가는 정상 운반 조건으로 살수, 낙하, 적층 및 관통 시험을 수행해야 하며, <그림 3>과 같이 가상 사고 조건으로 낙하, 파열, 화재 및 침수 시험을 추가하고 있다.

<표 2> 해외 방사성 물질 운반 용기 안전성 시험 시설 현황

국가	기관	낙하 시설	화재 시설	침수 시설	열 환경
미국	SNL	11톤, 9m	Open	91 m	-
	ORNL	9톤, 9 m	-	-	-
	DURATEK	11.8톤,9m	Gas	200 m	77/-68 °C
일본	CRIEPI	120톤, 20m	LPG	5000 m	38 °C
독일	BAM	200톤,30m	Open	-	-
	GNS	20톤,12m	-		
프랑스	COGEMA	10톤, 9m	5 x 5 m	-	-
	CEA / CESTA	32톤, 17m	Open/gas	600 m	-60 °C
영국	AEA	90톤, 30m	Open/gas	-	-
	Croft	5톤, 9m	Open	200 m	-
한국	KAERI	10톤, 9m	Open	200 m	38 °C

시험 평가의 초점은 결국 시험 전후에 운반 용기의 격납 경계에 대한 누설 여부와 방사선 차폐체의 건전성이다.

운반 용기의 낙하 충격에 대한 구조 해석은 탄소성 동적 거동을 평가하는 전산 해석을 수행하고 시험을 통해 해석 검증을 한다.

낙하 충격의 해석 검증 자료는 변형율과 가속도이며 볼트 토르크의 변화 측정을 통해 격납 설계 자료를 생산한다.

화재 조건에 대한 열 평가는 운반 용기의 단열 능력에 대한 열 전달 성능 평가가 중요하며, 열 시험의 해석 검증 자료는 시간에 따른 온도 분포 결과이다.

따라서 원자력 선진국들은 전산 해석 평가와 더불어 <표 2>와 같이 주로 낙하와 화재시험을 중심으로 방사성 물질 운반 용기 안전성 시험 시설을 보유하고 있다.

사용후핵연료 운반 용기의 안전성 평가는 평가 기준에 대한 적합성을 판단하기 위한 자료 생산이 되도록 수립한다. 안전성 시험은 운반 용기 건전성 평가와 설계 해석 검증을 목적으로 한다.

해외 선진국에서는 여러 종류의 사용후핵연료 운반 용기를 개발하여 사용하고 있으며, 최근에는 24다발 이상의 PWR 사용후핵연료 운반 용량이 주류를 이루며, <표 3>과 같이 수송 저장 겸용 용기로 개발하여 사용후핵연료 중간 저장에 적용하는 추세이다.

미국은 <그림 4>와 같이 NAC의 납 차폐 운반 용기를 사용하였으나 최근에 Holtec에서 다중 쉘 차폐 용기로 고강도 운반 용기를 개발한 바

<표 3> 대표적인 대형 사용후핵연료 수송 용기 현황

Nation	Model	Type	Weight(ton)	Capacity	Remarks
USA	NAC-STC	B(U)F	118	26 PWR	DPC
	HI-STAR 100	B(U)F	128	24 PWR/ 68BWR	DPC
	NAC-UMS	B(U)F	116	24 PWR/ 56 BWR	DPC
	TS-125	B(U)F	126	21 PWR/ 64 BWR	
England	NTL 11	B(M)F	80	MAGNOX	
	NTL	"	29	"	
	NTL 15	"	"	"	
	EXCELLOX 6	B(U)F	94	7 PWR	
France	TN 24 D	B(U)F	117	28 PWR	DPC
	TN 24 XL	"	119	24 PWR	DPC
	TN 24 XLH	"		24 PWR	DPC
	TN 24 G	"	135	37 PWR	DPC
	TN 52 L	"	118	52 BWR	DPC
	TN 24 DH	"		28 PWR	DPC
	TN 24 SH	"	107	37 PWR	DPC
	TN 24 BH	"	135	69 BWR	DPC
Japan	NFT-38B	"	119	39 BWR	
	NFT-14P	"	115	14 PWR	
Germany	CONSTOR V/32	B(U)F	125	32 PWR	DPC
	CONSTOR V/69	"	125	69 BWR	DPC
	CASTOR V/21A	"	106	21 PWR	DPC
	CASTOR V/52	"	103.8	52 BWR	DPC

*DPC : Dual Purpose Cask for transportation and storage

가 있다.

미국의 사용후핵연료 운반 관련 연구 동향을 살펴보면, NRC가 원형 크기의 운반 용기 사고 조건 시험인 PPS(Package Performance System)를 2012년까지 수행할 예정이며, 그 결과에 따라 DOE는 Yucca Mt. 처분장을 위한 운반 용기를 선정할 예정이다.

영국의 운반 용기는 저장과 겸용화하지 않고 있는 이유는 재처리 정책으로 저장 필요성이 타국가에 비해 적으며, MAGNOX 핵연료의 낮은 저장 온도 때문에 MVDS 저장 방식을 채택하고 있다.

프랑스의 운반 용기는 주로 단조강으로 차폐 및 구조재를 적용하고 있으며 Transnuclear가 다양한 모델을 보유하고 있으며 세계적으로 적용 사례가 많은 것으로 알려져 있다.

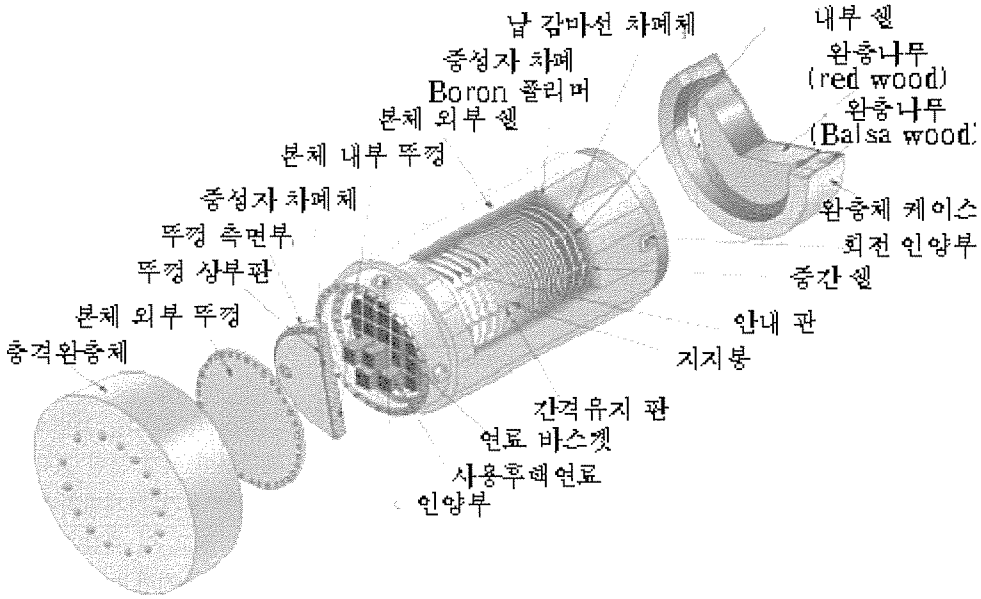
일본은 프랑스와 영국에 위탁 재처리를 위해 해상 운반이 빈번하며, 독자 모델의 사용후핵연료 운반 용기를 보유하고 있고, 최근에는 금속 용기를 저장 겸용화하고 있다.

독일은 GNSI-GNB사의 주도로 DCI(Ductile Cast Iron) 금속 용기를 개발하였고 독일과 동유럽에 많은 적용 사례를 갖고 있다. 최근에 CONSTROIT라는 특별한 차폐체를 개발하여 저장 운반 겸용인 CONSTOR 용기를 개발하여 인허가를 획득하였고, 이 재질은 중정석과 강철 입자를 기반으로 한 중 콘크리트이며 50년 동안 조사 시험을 하였다.

국내 사용후핵연료 운반 용기 개발 현황을 살펴보면, 원자력연구소는 PWR 사용후핵연료 1개 집합체 용량의 KSC-1 운반 용기를 개발하여 조사후 시험 시편 운반 목적으로 현재 활용 중이고, 4개 집합체 운반 용량의 KSC-4 운반 용기는 고리 원자력발전소 소내 운반에 활용한 경험이 있다.

한국수력원자력(주)에서는 원전 호기 간 사용후핵연료 운반 저장이 빈번하게 발생할 것에 대비하기 위해 2002년에 PWR 사용후핵연료 집합체 12개를 운반할 수 있는 KN-12 수송 용기 2기를 설계/제작하여 소내 운반에 활용하고 있다.

또한, 한국형 원자력발전소 사용후핵연료를 운반할 수 있는 용기의 개발을 추진하고 있다.



<그림 4> 미국 NAC의 사용후핵연료 운반 용기 구조

국내에서는 방사성 물질 운반 용기의 시험 절차가 수립되어 2003년부터 산업자원부 기술표준원으로부터 국제 공인 시험 기관으로 인정받아 ISO 시험 품질 보증 체계를 운영하고 있다. 이 시험 체계를 통해 시험 결과의 신뢰성과 정확성을 향상시키고 있다.

또한 방사성 물질 운반 용기 시험 기술에 대해 과학기술부로부터 2004년에 원자력안전마크를 획득하였다.

맺음말

사용후핵연료 저장에 대한 해외 현황은 건식 방식을 적용하는 추세이며 금속 용기, 콘크리트 용기, 수평 콘크리트 모듈 저장 및 수직 건물 모듈형 볼트 저장 방식을 이미 상용화하여 사용하고 있다.

원자력 선진국의 저장 개발 방향은 현재 장기 저장에 따른 재질 열화 및 누설 평가, 차폐 및 중량 감소 효율이 높은 저장 용기 개발을 진행하고 있다. 국내 현황은 저장 용기 분야에서 개발 단계로 모델 시험에 의한 해석 검증 평가로 안전성 분석의 초기 단계를 완료하고 있다고 판단된다.

사용후핵연료 운반 용기의 해외 현황은 이미 대형화되어 24 다발 이상의 경수로 사용후핵연료 용기를 상용화하고 있으며 운반과 저장을 겸용화하는 방식을 채택하고 있다.

해외 운반 용기 관련 개발 현황은 실제 사고 평가를 묘사하는 원형 크기에 대한 안전성 시험 평가가 일반적인 추세이다.

내부 캐니스터는 운반 저장 겸용화에 따라 두 분야의 기술 기준을 공통으로 만족하도록 기술 개발을 진행하고 있다.

운반 용기 국내 현황은 안전성 평가와 시험을 통한 인허가 획득 자료 생산으로 독자적인 개발 능력의 기반을 확보하고 있다고 판단된다.

하지만 사용후핵연료 관리 정책에 유연성을 갖도록 하기 위해서는 사용후핵연료 운반 저장 겸용 용기 개발이 필요하다고 생각되며, 추가로 다목적 캐니스터 개발과 아울러 차폐 효율이 높은 차폐 재질 및 완충 재질 개발도 중요한 개발 항목으로 사료된다.