

月城原電 乾式貯藏施設 運營의 意義



이 유 한
과학기술처 원자력실 계장

원자력의 이용과 개발과정에서 발생되는 중저준위 폐기물과 사용후연료 등의 원자력부산물(방사성폐기물)은 국민보건과 자연환경보전을 위하여 엄격한 관리가 요구되며, 그 중에서도 사용후연료는 미래의 에너지자원으로서의 재활용 가능성이 크게 기대됨에 따라 국가 차원의 장기적 관리가 요구된다.

사용후연료관리

원자력발전소에서 발생하는 사용후연료에는 핵연료 연소도 및 노의 저장기간에 따라 다소 차이가 있지만, 우라늄235와 238 중의 상당량이 핵반응이 이루어지지 않은 잔유물로 존재할 뿐만 아니라 새로 생

성된 핵분열성 물질 등 95% 이상이 재활용될 수 있는 물질이기 때문에 장차의 중요한 에너지자원으로 인식되고 있다.

사용후연료의 관리방안은 미래의 에너지자원 확보 측면에서 중간저장후 재활용하는 방안과 고준위 방사성폐기물 측면에서 그 자체를 영구처분하여 인간생활권으로부터 격리시키는 방안으로 크게 구분할 수 있다.

재활용방안은 사용후연료를 발전소내 저장수조에 임시저장하여 방사능과 붕괴열을 감쇄시킨 후 재처리하여 우라늄과 플루토늄을 발전용 핵연료로 재사용하고, 잔유 부산물은 안정한 형태로 고화처리하여 적절한 심지층에 영구처분하는

방법이다.

반면에 사용후연료를 에너지자원이 아니라 고준위 방사성폐기물로 간주하여 영구처분하는 방안은 해저심지층이나 현재의 적절한 지각층에 처분하는 방법 및 안정된 암석형태를 재현하여 처분하는 방법 등이 연구되고 있으나 아직은 초기 개발단계로서 기술실증이 더 필요한 상태이다.

사용후연료의 관리방안은 에너지의 자립도, 기술개발 수준, 환경문제에의 접근방법 등 각국의 상태에 따라 영향을 받지만 궁극적으로는 그 나라의 실정에 적합한 국가정책에 의하여 결정되고 있다.

관리방안별로 주요 원자력이용국은 다음 세 부류로 나눌 수 있다. 부존에너지자원이 풍부한 미국, 캐나다 등의 첫째 부류는 영구처분방안을 채택하여 처분장시설의 안전성 확보에 중점을 두고 있으며, 부존에너지자원이 부족한 日本, 프랑스 등의 둘째 부류는 사용후연료의 재활용방안을 채택하여 에너지의 자립화 노력을 경주하는 등의 사용후연료관리정책을 견지하고 있다. 그러나 이외 국가인 셋째 부류는 사용후연료의 안전관리를 위한 기술개발 및 각국 정책의 전개방향 등 향후 추이를 전망하는 정책을 채택하고 있다.

부존에너지자원이 절대 부족하고 에너지원의 해외 의존도가 90% 이상을 점유하고 있는 우리나라로서는 국가생존을 위한 에너지원 확보 측면에서 사용후연료의 재활용방안이 바람직할 것으로 생각되나 국민 공감대 형성과 국제적인 추세변화

및 기술개발동향의 치밀한 분석 등을 통한 장기적인 접근방식이 필요할 것이다.

여기에서는 세계 각국이 추진하고 있는 사용후연료 관리시설의 개략적인 현황을 살펴보고 우리나라의 현황 그 중에서도 캐나다형 가압중수로(CANDU-PHWR)를 운영하고 있는 월성원전의 임시 건식 저장시설을 살펴봄으로써 우리 모두의 관심을 촉구하고자 한다.

사용후연료 중간저장방식

지금까지 실용화된 사용후연료의 중간저장방식은 그 저장방법에 따라 습식 및 건식저장방식으로 나뉘며 가압경수로(PWR)와 가압중수로(PHWR)와 같은 원자로형의 차이에 따라 설계 및 관리방식이 조금씩 차이가 난다.

일반적으로 사용후연료를 발전소내 습식저장조내에 보관하는 습식저장방식은 부지 소요면적이 적고 다종의 핵연료 취급이 가능하며 냉각기간이 짧은 장점을 갖고 있는데 반하여, 작업자의 피폭 가능성이 상대적으로 높고 냉각수의 계속적 순환 등에 따른 운영상의 2차 부산물이 많이 발생하는 등의 단점을 갖고 있다. 이에 반하여 건식저장방식은 습식저장조에서 충분히 냉각된 사용후연료를 밀봉용기에 넣어 대기중에 보관하는 방법으로서 저장시설의 운영중에 폐기물이 발생치 않고 용량확장이 용이하며 작업자의 피폭 가능성이 낮으나, 부지 소요면적이 크고 운영경험이 상대적으로 적다는 단점을 갖고 있

다.

원자로형이 상이하면 장전되는 핵연료의 농축도와 방출될 때의 핵연료 연소도가 각기 다르기 때문에 사용후연료의 저장관리유형도 조금씩 차가 난다. 가압중수로는 천연우라늄을 핵연료로 사용하고 핵연료 평균연소도가 8GWD/MTU 정도가 되나 가압경수로는 2~5 w/o의 저농축핵연료를 사용하고 평균연소도가 40GWD/MTU에 달함에 따라 붕괴열 발생량 및 방사능 세기 등 사용후연료의 특성도 차이가 난다.

일반적으로 가압경수로에서 발생한 사용후연료 관리는 가압중수로의 그것보다 붕괴열이나 방사능 세기면에서 더욱 세심한 주의를 요구한다. 건식저장방식으로 두 노형의 사용후연료를 보관, 관리할 경우 경수로의 저장단가가 중수로 핵연료 저장단가보다 3~4배가 더 드는 것으로 알려져 있다.

〈표 1〉은 현재 운영중이거나 건설중인 세계 각국의 사용후연료의 저장방식별 저장시설현황을 나타낸 것이다. 습식저장방식은 대표적인 소외저장(Away From Reactor, AFR)을 나타내었으며 건식저장방식의 유형별 특징은 다음과 같다.

사용후연료 건식저장기술은 1960년대 초에 실험실 규모의 연구로 시작되었으며, 1970년대에는 미국, 영국 등 몇개 국가에서 실증규모의 시설이, 1980년대에는 소내독립저장형태의 상용시설이 출현하였으며, 1990년대에는 소규모 소외시설에 응용되기 시작하였다.

건식저장방식에는 Metal Cask,

Concrete Cask, Vault 방식, Drywell 방식 및 Concrete Silo 방식으로 구분되며 각 저장방식의 특징은 다음과 같다.

Metal Cask의 시설구조는 매우 단순하여 단지 Concrete Pad 위에 저장 Cask를 설치하게 되는데 외부저장건물은 독일의 Ahaus 시설처럼 필요에 따라 설치할 수도 있고 미국의 Surry 시설처럼 외부건물 없이 저장 Cask가 공기중에 노출된 상태로 저장할 수도 있다. 방사성물질의 격납기능은 Cask가 담보하게 됨에 따라 저장 Cask의 밀봉기능, 방사선차폐기능 및 임계조정기능 등은 방사선방호 차원에서 매우 중요하다.

Concrete Cask 개념은 기본적으로 Metal Cask와 유사한데 몸체는 내부가 Steel Lining이 되어 있는 철근 콘크리트로 되어 있다는 점이 Metal Cask와 다르다. Concrete Cask는 Metal Cask에 비해 값이 싸다는 장점은 있으나 냉각성능이 떨어지므로 콘크리트 표면온도가 올라가는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 콘크리트 내부에 Rebar 혹은 열 파이프(Heat Pipes)를 설치하기도 한다. 일반적으로 Concrete Cask는 동일 용량의 Metal Cask보다 중량이 무거우며 Cask 표면 오염제거가 어려워 Metal Cask보다는 실용화가 많이 되어 있지는 못하다.

Vault 저장개념은 콘크리트 구조물내에 사용후연료가 밀봉된 금속 튜브를 수직 설치하여 저장하는 방식으로서 저장튜브내에는 저장되는 핵연료 특성에 따라 공기, 질소 혹

〈표 1〉 사용후연료 저장방식별 저장시설현황

저장방식	국 명	시설/위치	원전유형	용량(톤)	운영현황	
습 식 (AFR 저장)	스웨덴	CLAB	LWR	3,000	86	
	프랑스	La Hague	LWR	10,000	76	
		Marcoule	GCR	800	80	
	영 국	Sellafield	MAGNOX, GCR, LWR	13,500	64	
	핀란드	TVO - KPA	LWR	1,270	87	
	불가리아	Kozloduy	LWR	600	92	
	日 本	Aomori	LWR	3,000	운영예정(95)	
Tokai - mura		LWR	237	77		
건	Vault	미 국	Fort St. Vrain	HTGR	120	91
		영 국	Wylfa	MAGNOX	700	71
		프랑스	CASCAD	GCHWR	180	90
	Concrete Silo	미 국	Oconee	PWR	900	90
			Brunswick	PWR	150	-
			Calvert Cliffs	LWR	1,400	-
		캐나다	Gentilly	CANDU	67	85
			Douglas Point	CANDU	298	87
			NPD	CANDU	67	87
	Metal Cask	미 국	Point Lepreau	CANDU	필요에 따라 증설	91
			Surry	PWR	811	86
			Rancho Seco	PWR	필요에 따라 증설	운영예정(93)
		독 일	Prairie Island	PWR	필요에 따라 증설	운영예정(93)
Ahaus			THTR	1,500	92	
스위스			Wuerenlingen	LWR	600	운영예정(96)
헝가리			Dukovany	VVER	1,800	운영예정(94)
Concrete Cask	미 국	Palisades	PWR	필요에 따라 증설	92	

은 헬륨가스를 채울 수 있다. 현재 상용화된 시설로는 미국 Fort St. Vrain 원전의 MVDS, 프랑스의 CASCAD, 영국의 Wylfa 시설 등이 있다.

Drywell 저장개념은 지표면에 우물 형태의 콘크리트 용기를 설치한 후 핵연료집합체가 밀봉된 캐니스

터를 장입하여 저장하는 방식으로서 이 개념은 미국 HNEL 등에서 실증시험 또는 특수 핵연료저장 목적으로 채택한 경험이 있으나 상용 저장경험은 없는 실정이다.

마지막으로 우리나라의 월성원전에서도 채택하고 있는 Concrete Silo 방식은 지상의 콘크리트 구조

물 내부에 캐니스터를 저장하는 방식으로 콘크리트 구조물 외벽에는 냉각기능을 수행하기 위한 Inlet/Outlet Duct가 설치되어 있다. 현재까지 개발된 개념으로는 캐나다 원자력공사(AECL)의 CANDU용 Concrete Canister, AECL社와 Transnuclear社의 MACSTOR, 미국 Nutech社의 NUHOMS 방식 등이 있다.

월성원전의 임시저장시설

1. 개 요

우리나라의 방사성폐기물 처리 및 처분에 관한 사항은 원자력법에서 규정하고 있으며 총괄적인 관리 정책은 원자력위원회에서 심의, 결정한다. 원자력법에서는 방사성폐기물을 안전하게 관리하기 위한 사업을 정부가 실시토록 하고 있으며 이에 필요한 비용은 발전용 원자로 설치자 및 핵연료주기 사업자 등 방사성폐기물을 발생시킨 발생자가 부담토록 규정하고 있다(원자력법 제85조).

이에 따라 1988년 7월 제220차 원자력위원회에서 방사성폐기물 관리에 대한 기본방침을 확정하였는데 원전의 운영 및 방사성동위원소의 이용과정에서 발생하는 중저준위 폐기물을 관리하기 위한 영구처분시설을 1995년 12월까지 건설하고, 사용후연료는 재처리 또는 영구처분에 대한 국가정책이 결정될 때까지 중간저장관리를 하며, 이를 위한 시설을 1997년 12월까지 건설하기로 의결하였다. 그리고 이 시설이 가동되기 전까지 원전에서 발

생되는 중저준위 폐기물과 사용후 연료는 한국전력공사(이하 한전)가 원자력발전소내에서 관리하도록 결정하였다.

그후 1988년 12월 개최된 제221차 원자력위원회에서 동 기본방침에 따른 장기사업계획을 확정하였으나 그후 추진과정에서 민주화, 개방화에 따른 지역적인 이해와 원자력에 대한 막연한 불안감이 방사성폐기물관리시설의 설치 반대로 연결되어 부지선정 조차도 지연되고 있는 형편이다.

현재 원자력발전소에서 발생하는 사용후연료는 각 발전소별로 내진 설계된 철근구조물의 자체 저장수조에서 안전하게 저장관리되고 있으나 기존 원자력발전소의 소내 저장현황은 <표 2>에서 볼 수 있듯이 1990년대 중반 이후에는 포화에 이를 것으로 예상된다.

이에 따라 각 원전에서는 국가관리시설이 완공되기 전까지의 사용후연료 저장능력 포화에 대비하여 고밀도 저장대 추가설치, 부지내 다른 호기로의 이송저장 등 각각의

원전에 적합한 소내저장방식을 도입하고 있으며, 이의 일환으로 월성원전에서도 캐나다형 가압중수로 특성에 부합되는 사용후연료 저장 시설로서 건식저장시설의 하나인 콘크리트 사일로로 설치, 운영하고 있다.

2. 콘크리트 캐니스터

캐나다형 가압중수로인 월성원자력 1호기는 1983년 상업운전에 들어간 이후 매년 약 5,000다발의 사용후연료를 방출하고 있으며, 이 연료들은 사용후연료 습식저장조에서 물로 냉각된다. 그러나 이러한 기존의 사용후연료 습식저장조의 저장능력이 1992년 12월말에 포화상태에 이를 것으로 예상됨에 따라 새로운 저장시설의 증축이 요구되었다. 국가관리의 중간저장시설이 건설되기 전에 발생하는 사용후연료는 원전부지내에 임시보관, 관리키로 한 제220차 원자력위원회의 결정에 따라 한전은 건식저장시설(Concrete Silo)을 월성부지내에 건설키로 하고 이를 AELC社에 발주

하였다.

AELC社는 1970년대 초에 CANDU형 핵연료의 건식저장시설에 관한 기술개발에 착수하여 그동안 캐나다의 Douglas Point, Gentilly 원전 등에 콘크리트 사일로(Canister) 저장시설을 건설하여 운영하고 있다.

건식저장방법은 기존의 습식저장조에 보관되어 있던 사용후연료를 저장조내에서 스테인리스 강철용기에 담아 건조밀봉작업후, 발전소 부지내에 별도로 설치된 콘크리트 캐니스터에 저장하는 방식이다.

월성원전에서 건설된 콘크리트 캐니스터는 직경 3m, 높이 6.2m의 원통형으로 내부에는 핵연료집합체 60다발을 넣은 밀폐된 보관용기(Basket)를 9단으로 쌓아 올리고 뚜껑을 닫는 형태이다. 설치자인 한전은 콘크리트 사일로 60개를 건설하여 약 6.5년분의 사용후연료 37,800다발을 저장할 계획이다.

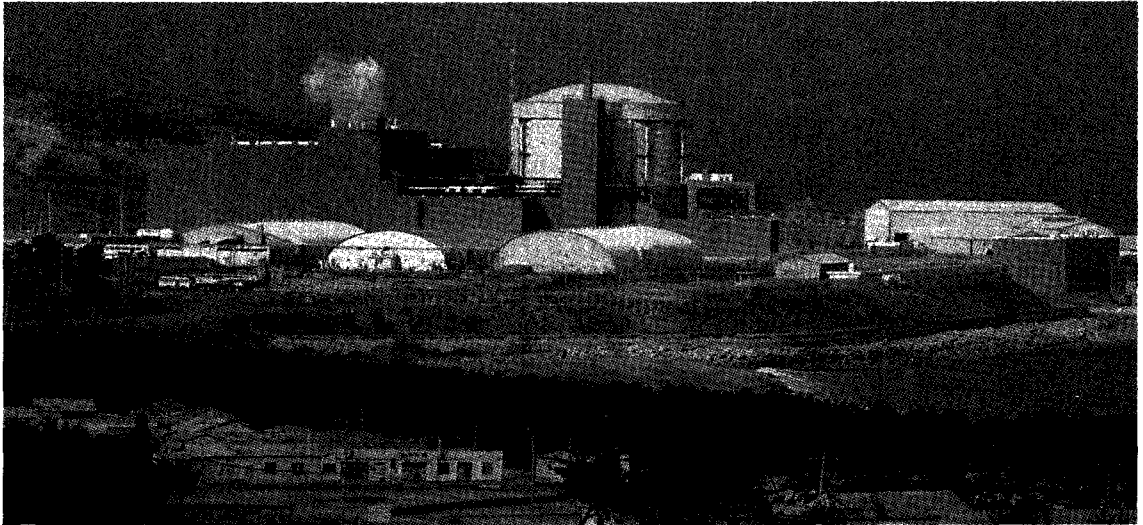
사용후연료 관리방식으로 건식저장을 선택할 경우 가장 중요한 점을 사용후연료가 저장기간 동안 안전하게 보관, 관리되어야 한다는 점이다. 핵연료의 건전성에 가장 민감하게 영향을 미치는 인자는 핵연료의 온도로서 이는 핵연료의 산화에 직접적인 영향을 준다.

건식저장방식으로 사용후연료를 저장하는 동안 핵연료의 온도는 핵연료의 붕괴열에 의한 열생성과 핵연료다발, 바스켓, 캐니스터 간의 열적특성의 함수이다. 사용후연료의 붕괴열 생성률은 핵연료의 연소도에 따라서 증가하며 조사(Irradiation)후 냉각기간에 따라서 감

<표 2> 각 원전별 소내저장능력

(단위 : 톤, 우라늄)

부 지	호기	저장용량	기존시설용량 포화년도	저장능력확장	예상포화년도 (부지별)
고 리	1	225	1994	#3으로 이송저장	1999
	2	376	2001	-	
	3	316	1993	고밀도 저장대 추가설치 예정	
	4	316	1997	-	
월 성	1	1,526	1992	건식저장시설 건설	1997
영 광	1	316	1997	-	1998
	2	316	1998	-	
울 진	1	200	1994	고밀도 저장대로 교체 예정	1998
	2	378	2003	고밀도 저장대로 교체	



소하게 된다. 붕괴열은 냉각 초기에는 급격히 감소하나 냉각 후기에는 느리게 감소한다. 일반적으로 사용후연료의 온도가 일정 온도 이상이 되면 산화의 속도가 증가하게 되어 UO_2 가 U_2O_5 로 변환되고 핵연료의 부피를 30% 가량 증가시켜 핵연료 Sheath에 응력을 주게 되고 결국 핵연료봉의 파손 가능성을 초래하여 바스켓의 내부를 오염시킬 확률이 커지게 된다.

그러나 월성원자력발전소에 보관될 사용후연료는 캐니스터 안에 저장되기 전에 최소한 7년 동안 습식 냉각되며 핵연료의 건전성 등을 사전점검하는 등 사용후연료의 보관, 관리에 따른 안전성 확보에 만전을 기하고 있다. 일반적으로는 콘크리트 캐니스터는 저장기간을 50년으로 가정하여 설계, 제작된다.

건식저장시설의 안전심사

신청자인 한전이 1990년 10월

월성원자력 1호기 기사용 연료저장조의 저장능력 포화에 대비하여 사용후연료의 임시저장시설 설치와 관련된 허가를 신청해 음에 따라 본 시설에 대한 안전성평가가 수행되었다.

월성원자력 1호기 사용후연료 건식저장시설의 건설에 따른 안전심사는 사용후연료 건식저장시설에 관한 안전성분석보고서(Project Safety Analysis Report), 캐니스터 저장부지의 부지조사보고서, 관련설비의 기술사양서 및 설계보고서 등의 허가서류를 국내 원자력법 및 관련규정 그리고 캐나다의 기술기준 등을 근거로 검토, 평가되었다.

월성원전 건식저장시설의 안전성 평가는 부지 및 사용후연료 특성, 콘크리트 캐니스터 및 관련설비의 기계, 구조적 설계안전성, 방사선방호 및 비정상상태에서의 안전성, 품질보증요건의 적합성의 확인 등을 중심으로 심층적으로 추진되었다.

안전심사를 수행한 결과 기상, 수문, 지진, 지질 등 부지로서의 전반적인 특성은 건식저장시설의 건설, 운영에 적합한 것으로 평가되었고, 천연우라늄을 사용하는 중수로의 특성을 고려할 때 사용후연료의 공기중 임계 가능성이나 핵연료 산화에 의한 급격한 부피증가를 초래하는 상변화는 발생치 않을 것으로 판단되었다.

또한 콘크리트 캐니스터 및 서비스건물 확장구조물의 구조적 안전성, 바스켓 등 관련설비의 설계안전성이 입증되었고, 핵연료 수송과정에서의 작업자에 대한 피폭선량 등 방사선방호에 관련된 평가, 태풍과 홍수 등의 자연재해와 핵연료 바스켓 추락사고 등의 인위적 재해, 품질보증요건 등도 관련기준 및 요건을 만족하는 것으로 평가되었다.

본 월성원전의 건식저장시설의 안전성평가에는 원자력안전규제전문기관인 한국원자력안전기술원 규

제요원 및 국내의 관련전문가들이 참여하였으며, 심층적이며 종합적인 심사수행을 위하여 안전심사과정에서 원자력위원회 산하 원자력 안전전문위원회의 심의를 거치기도 하였다.

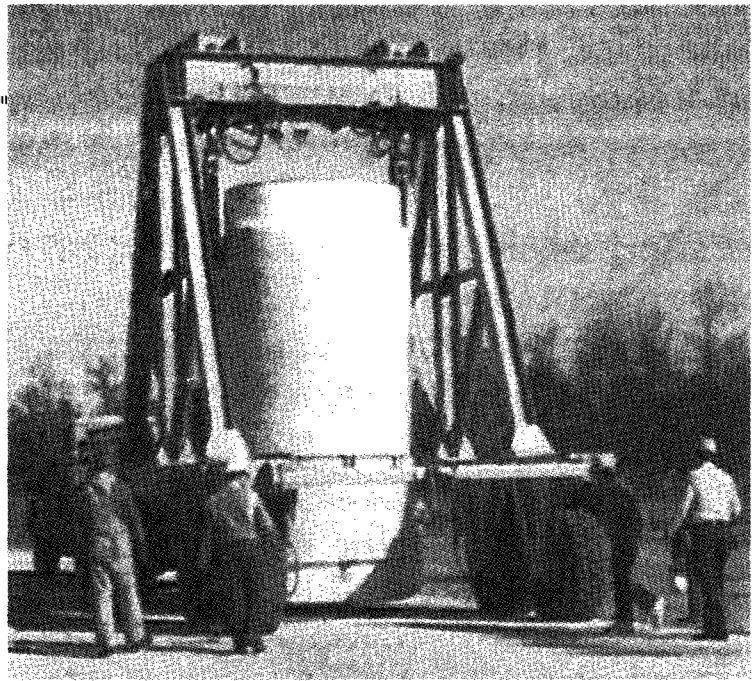
사업자의 신청 이후 18개월 동안의 종합적인 심사결과를 바탕으로 기존 저장조에서 7년 이상 냉각된 사용후연료 중 건전성이 입증된 것의 이송 등을 조건으로 1992년 4월 월성원전의 건식저장시설에 대한 운영허가를 발급하였다.

이후 신청자인 한전은 국제원자력기구(IAEA) 사찰관의 입회하에 기존 습식저장조에서 건식저장시설로의 사용후연료의 이송을 시작하여 1992년 6월말 현재 캐니스터 10개분(핵연료 5,400다발)의 이송을 완료하였으며, 향후에도 매년 캐니스터 10개분의 사용후연료를 이송할 예정이다.

월성원전에서는 임시 건식저장시설의 안전성 확보를 위하여 보안설비 및 방사선방호설비를 지속적으로 운영하고 있으며 캐니스터의 건전성 점검을 위한 분기별 누설검사 및 연간 1회씩 콘크리트 표면검사를 실시하고 있다. 또한 지표수 및 지하수를 주기적으로 채취하여 환경방사능 등을 측정함으로써 캐니스터의 설치, 운영에 따른 환경에의 영향 여부를 지속적으로 감시, 평가하고 있다.

월성원전 건식저장시설 의의

월성원전의 건식저장시설의 설치, 운영은 국내 원자력환경을 고



려할 때 1992년에 일어난 의미있는 일 중의 하나라고 할 수 있다. 임시저장시설의 건설 자체가 월성원전의 사용후연료 저장조의 포화에 대비한 안정된 저장시설 확보라는 측면에서 추진되었지만, 기술외적 관점에서는 기존의 습식저장방식에서 벗어나 공기중에서의 사용후연료 저장방식을 국내 최초로 현실화시킴으로써 사용후연료 저장시설을 물밑에서 지상으로 끌어올려 그 저장시설을 일반에게 공개하고 안전성을 과시하는 선연적 의미를 지니고 있다고 하겠다.

이번 캐나다형 가압중수로의 사용후연료 보관시설의 안전한 설치, 운영을 출발점으로 하여 향후 국내 원전의 70% 이상을 차지할 가압중수로형 원전의 사용후연료 건식저장시설에 대한 설계개념 및 운영관리방향 등에 대한 심층적인 연구개발이 병행 추진되어야 할 것이며, 더 나아가 기존 사용후연료 저장조의 포화에 능동적으로 대처하기 위해서는 월성원전의 건식저장시설 등과 같은 임시적인 저장능력확보

계획보다는 국민의 이해와 신뢰를 바탕으로 체계적이며 지속적으로 방사성폐기물을 연구관리할 수 있는 방사성폐기물 처분장시설의 적기 건설이 더욱 절실하다 하겠다.

월성원전의 사용후연료 건식저장시설의 운영허가가 발급된지 어언 1년이 되었다. 임시저장시설의 안전성 확인을 위하여 시설검사와 환경방사능평가를 주기적으로 실시하고 있으며 아직까지 특별한 안전성 저해사유 없이 원래의 사용후연료 저장역할을 충실히 수행하고 있다.

향후에도 기술적 신뢰성을 바탕으로 본 시설의 안전한 운영이 지속될 때 원자력에 대한 국민이해기반 구축에 일조하리라고 생각된다. 원자력은 원자력가족만의 관심속에서가 아니라 우리 모두의 이해와 협력이라는 토양속에서 투명하게 자랄 때에 비로소 그 열매를 더욱 알차게 맺을 것이다. 끝으로 건식저장시설의 심사, 설치, 운영과정에서 보여준 한국원자력안전기술원 및 한국전력공사 담당자들의 숨은 노력에 늦게나마 감사를 표한다. ▣