

## 사용후핵연료 건식 저장방식에 금속전환체 적용성 평가

### Evaluation for the Application of Metal Fuel in the Spent Fuel Dry Storage System

이주찬, 신희성, 방경식, 서기석, 김호동

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

기존의 사용후핵연료 건식저장방식에 금속전환체 적용성을 평가하여 최적저장방식 선정을 위한 후보저장방식을 도출하였다. 기존의 건식저장방식에 대한 기술현황을 분석하였으며, 금속전환체 건식저장을 위한 기준핵연료를 설정하였다. 기존 저장방식에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 적용할 경우에 대한 안전성해석을 수행하였다. 기존 저장방식에 5년 및 10년 냉각된 사용후핵연료 금속전환체를 적용시 연료봉 최고온도가 약 350 °C 및 250 °C로 계산되었다. 핵임계 안전성측면에서 기존 방식에 금속전환체의 적용이 충분히 가능한 것으로 확인되었다. 금속전환체 적용성 분석 결과 구조적 안전성 측면에서 이점이 있는 금속 저장용기 및 냉각효율이 우수한 모듈형 볼트방식을 후보저장방식으로 도출하였다.

#### Abstract

Evaluation for application of reduced metal fuel in the dry storage system has been carried out for selection of optimum storage method. The state of art has been analyzed for dry storage system of spent fuel. Design basis fuel has been decided with burn-up of 48,000 MWD/MTU for storage of metal fuel. Safety analyses have been carried out for existing dry storage system loaded by reduced metal fuel with storage capacity of four times. Maximum temperatures of metal fuel were calculated about 350 °C and 250 °C for 5 years and 10 years cooling times, respectively. The results of criticality analysis showed that the existing dry storage system has been identified to be adequate for the reduced metal storage. As the results of analysis for application of reduced metal fuel, metal cask and MVDS have the advantages for structural safety respect and cooling efficiency, respectively. Therefore, metal cask and MVDS were selected with optimum storage method.

## 1. 서 론

원자력연구소에서는 후행핵연료주기 정책이 결정되지 않은 상태에서 사용후핵연료 관리기술 개발을 위하여 자원으로 가치가 있는 PWR 핵연료를 건식개질함으로써 그 관리 부피를 줄이고 관리 안전상에 문제를 일으키는 고방사성 핵종인 세슘과 스트론튬을 선택적으로 제거하여 냉각부하를 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 대한 연구를 수행하고 있다[1]. 이는 세라믹 형태의 PWR 핵연료를 금속으로 전환시켜 관리하는 방법으로 금속전환체는 PWR 사용후핵연료와 비교하여 부피 및 발열량, 방사능을 약 1/4로 감소되는 특성을 갖고 있다[2].

금속전환체의 특성을 고려하여 기존 사용후핵연료 저장 시설 혹은 용기에 적용할 경우, 동일한 저장부피에 금속전환체를 저장시킨다면 4배의 저장 효과가 있다. 하지만 4배의 금속연료를 적용시 내부 핵연료 중량 증가에 따른 구조적 건전성 평가, 금속연료의 저장 허용온도를 유지하기 위한 열안전성 평가, 연료봉 배열에 따른 핵임계 안전성 평가 및 방사선차폐 안전성 평가 등이 요구된다.

본 연구의 목적은 금속전환체의 저장을 위해 기존 사용후핵연료 저장용기 혹은 시설의 열전달 효율을 배가시키고, 구조물의 강도를 높여 4배의 저장 하중을 견딜 수 있도록 구조물을 보강하는 등 기존 저장방식의 개선/보완을 통해 금속전환체의 저장에 적합한 저장시스템을 설정하는데 있다.

기존 사용후핵연료 저장방식인 금속용기, 콘크리트 용기, 횡형 콘크리트 모듈 및 볼트 저장방식에 대한 기술현황을 분석하고 이들 방식에 금속전환체를 적용하여 후보저장방식을 도출하였다.

## 2. 사용후핵연료 건식저장 기술

사용후핵연료 건식저장 방식은 크게 금속 저장용기, 콘크리트 저장용기, 수평/수직 콘크리트 모듈방식 및 모듈형 볼트방식 등으로 구분된다. 표 1은 금속전환체 적용성 분석에서 고려된 주요 건식저장 방식에 대한 설계기준 및 특징을 비교하여 나타내었다. 금속용기 및 콘크리트 저장용기, NUHOMS[3] 방식은 PWR 핵연료의 저장에 널리 사용되며, 저장용량은 캐니스터당 PWR 핵연료집합체를 기준으로 24다발이 주류를 이룬다. 중량은 금속용기인 경우 약 100톤을 상회하고 콘크리트 용기의 경우에는 약 120~140톤에 이른다. 설계기준 핵연료는 연소도 40,000 ~ 45,000 MWD/MTU, 냉각기간 약 5년을 기준으로 설정하여 핵연료로부터 붕괴열은 약 22 ~ 28 kW로 설계되었다.

금속 저장용기는 사용후핵연료를 금속 저장용기에 장전하여 저장하는 방식으로 HI-STAR 100[4] 및 NAC-STC[5] 저장용기는 수송.저장 겸용의 B(U)형으로 인허가를 취득하여 사용하고 있다. 수송.저장을 겸용으로 사용하므로 별도의 운반용기가 필요 없고 발전소 내에 임시 저장하였다가 중간저장시설로 이동할 경우에 유리한 점이 있다. 금속용기 방식은 구조적 건전성 측면에서는 콘크리트 용기방식에 비하여 유리하나 제작비가 다소 많이 드는 단점이 있다.

Table 1. State of Art for Spent Fuel Dry Storage System

Model	Vendor	Storage capacity	Weight (ton)	Burn-up (MWD/MTU)	Cooling time (years)	Decay heat (kW)	Storage type
HI-STAR 100	Holtec	24/32 PWR	105	40,000	5	26	Metal cask
NAC-STC	NAC	26 PWR	107	40,000	6.5	22	Metal cask
HI-STORM 100	Holtec	24/32 PWR	121	45,000	5	28.2	Concrete cask
TranStor™	SNC	24 PWR	135	40,000	5	26	concrete cask
NUHOMS-24P	Vectra	24 PWR	-	40,000	5	24	Concrete module
MVDS	GEC Alsthom	Magnox HTGR	-	-	-	-	Vault

콘크리트 저장용기 방식은 사용후핵연료를 금속제 캐니스터에 담아 사일로 형태의 수직 원통형 콘크리트 구조물에 밀봉 저장하는 방식이다. 콘크리트 온도와 연료 피복관의 온도를 제한하기 위하여 콘크리트 사일로의 상하단에 공기 흡입구 및 배기구를 설치하여 공기 순환에 의한 자연냉각방식을 사용한다. 대표적인 콘크리트 저장용기 방식에는 Holtec Int.사에서 개발한 HI-STORM 100[6] 시스템과 SNC(Sierra Nuclear Corporation)사에서 개발한 TranStor™[7]시스템이 있다.

횡형 콘크리트 모듈방식인 NUHOMS 방식은 콘크리트 저장모듈에 스테인레스강으로 된 건식 차폐캐니스터를 수평으로 저장하는 방식으로서 캐니스터에 사용후핵연료를 넣은 후 밀봉시키도록 되어 있다. 캐니스터는 수송·저장 겸용으로 사용이 가능하고 발전소에서 저장모듈까지 캐니스터 운반을 위하여 별도의 수송용기가 필요로 한다. 콘크리트 모듈이 구조 및 차폐 역할을 하며, 따라서 별도의 콘크리트 건물이 필요없다. 필요에 따라 모듈식으로 증설이 가능하며, 콘크리트 모듈에서 붕괴열을 제거하기 위하여 자연대류 냉각방식을 사용한다. NUHOMS 방식은 크게 연료를 장전할 수 있는 건식 차폐캐니스터(Dry Shielded Canister), 캐니스터를 저장하는 수평 콘크리트모듈(Horizontal Storage Module) 및 발전소에서 콘크리트 모듈까지 캐니스터를 운반할 수 있는 이송용기(On-site transport cask)로 구분된다.

모듈형 볼트 저장방식(MVDS)[8]은 콘크리트 구조물로 건설된 독립 건물 내에 사용후핵연료 저장 캐니스터를 수직으로 저장하는 방식으로 저장관에 1개씩의 연료를 저장하도록 되어 있다. 시설계통은 사용후핵연료 저장 컨테이너를 포함한 저장계통, 연료 취급계통, 구조설비 계통, 공정설비 및 보조계통, 기타 특수 장비 및 부대시설 등으로 구성된다. 이 방식은 미국, 영국, 헝가리 등에서 인허가를 받아 사용중인 방식으로 현재 운영중인 시설은 MAGNOX, HTGR 및 VVER 연료 등 다양한 핵연료를 대상으로 하고 있다.

### 3. 기존방식에 금속전환체 적용성 평가

기존의 PWR 사용후핵연료 건식저장방식에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 고려할 경우 열전달, 핵임계, 방사선차폐 및 구조안전성 측면에서 적용성을 검토하였다.

#### 3.1. 기준핵연료 및 연료봉 배열

금속전환체의 저장안전성 연구분야에서 기준 사용후핵연료는 초기농축도 4.5 wt%와 연소도 48,000 MWD/MTU인 PWR 핵연료로 설정하여 점차적으로 증가하는 고연소도 핵연료를 고려하였으며, 냉각기간은 5년 및 10년 냉각된 연료를 기준으로 하였다. 표 2는 연소도 48,000 MWD/MTU, 초기농축도 4.5 wt%를 갖는 PWR 핵연료집합체를 금속전환할 경우 PWR 핵연료 및 금속전환체의 방사능량을 비교하여 나타내고 있다. 냉각기간이 5년인 연료의 경우 금속전환할 경우 방사능이 약 1/4로 감소하고 10년인 경우에는 1/5 이하로 감소함을 알 수 있다. 표 3은 PWR 핵연료를 금속전환시 발열량을 나타내고 있다. 발열량도 약 1/4로 감소함을 알 수 있다.

Table 2. Radioactivity for PWR and Metalized Fuels

Fuel type	Cooling time	
	5 years	10 years
Spent PWR fuel	7.471E5 Ci/MTHM	5.348E5 Ci/MTHM
Metalized fuel	1.768E5 Ci/MTHM	1.014E5 Ci/MTHM
Rate of decrease	24 %	19 %

Table 3. Decay Heat Generation for PWR and Metalized Fuels

Fuel type	Cooling time	
	5 years	10 years
Spent PWR fuel	2,564 W/MTHM	1,691 W/MTHM
Metalized fuel	670 W/MTHM	391 W/MTHM
Rate of decrease	26 %	23 %

기존 저장방식에 금속전환체 적용평가에서 저장시스템에 대한 치수, 재질 등의 변경 없이 PWR 핵연료 바스켓에 금속전환체를 적용하였다. 바스켓의 치수는 기존의 PWR 핵연료 바스켓과 같은 222 x 222 mm로 하였고 금속전환체의 치수는 PWR 핵연료와 같은 214 x 214 mm, 길이는 3,800 mm로 하였다. 연료봉 배열은 4x4 ~ 14x14 배열을 고려하였으며, 그림 1은 4개의 PWR 핵연료를 금속저장체로 전환시켜 1개의 기존 바스켓에 장전하였을 경우의 연료봉 배열을 나타내며, 연료봉 직경은 4x4 배열인 경우 45 mm, 14x14 배열인 경우 13 mm로 설정하였다.

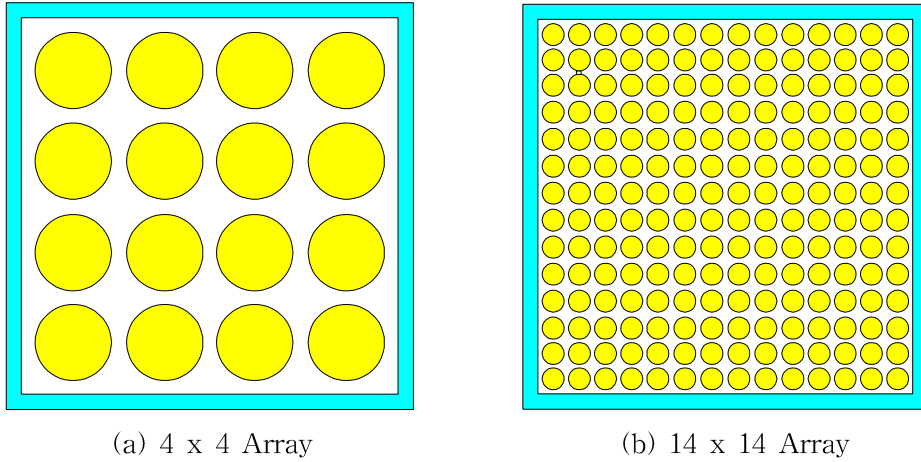


Fig. 1. Rod Array Packed with Metallized Fuel for 4 PWR Assemblies.

### 3.2. 금속전환체 적용을 위한 열해석 평가

범용 열유동해석 코드인 Fluent[9]를 사용하여 열해석을 수행하였으며, 금속전환체 연료봉 배열이 연료봉 온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 4x4 배열 및 14x14 배열을 고려하였다. 기존 저장방식에 금속전환체를 적용할 경우 열해석을 수행하였으며, 기준핵연료는 연소도 48,000 MWD/MTU인 PWR 핵연료를 기준으로 하여 5년 및 10년 냉각 금속전환체의 붕괴열을 각각 29.6 kW, 17.2 kW로 설정하였다.

표 4에는 24다발의 PWR 핵연료를 저장할 수 있는 HI-STAR 100 금속용기 및 HI-STORM 100 콘크리트 용기에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체 적용시 연료봉의 최대온도를 나타내었다.

Table 4. Maximum Fuel Temperatures for Reduced Metal Fuel

Storage type	Maximum fuel temperature (°C)			
	5 years (Q=29.6 kW)		10 years (Q=17.2 kW)	
	4×4 Array	14×14 Array	4×4 Array	14×14 Array
Metal cask (HI-STAR 100)	342	391	243	272
Concrete cask (HI-STORM 100)	327	371	234	260

금속용기 및 콘크리트 저장용기는 냉각기간 5년인 PWR 핵연료를 기준으로 연료봉의 최대온도가 350 °C 내외로 설계되었으며, 비슷한 열원을 5년 냉각된 금속전환체를 적용할 경우 금속 연료봉 온도도 350 °C 내외로 계산되었다. 캐니스터 내의 연료봉 배열이 4x4 배열의 경우 연료봉 온도가 14x14 배열의 경우에 비하여 약 10% 이상 낮게 나타났다. 따라서 연료봉 배치시 직경을 크게 할 수록 복사열전달 효과가 커져 연료봉 온도가 낮아지는 이점이 있는 것으로 분석되었다. 금속전환체의 저장 허용온도는 300 °C 이내로 추정되며, 따라서 기존의 금속용기에 5년 냉각된 금속전환체의 적용은 불가능 할 것으로 판단된다. 10년 냉각

연료의 경우에는 연료봉 최대온도가 300 °C 이내로서 연료봉 및 금속전환체의 적절한 배열을 통하여 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

수평콘크리트 모듈방식인 NUHOMS 방식의 설계기준 핵연료 및 연료봉 설계온도가 금속용기 및 콘크리트 용기와 비슷하게 설계되었으므로 금속전환체 적용시 연료봉 온도도 이들 방식과 비슷한 분포를 보일 것으로 예측된다.

MVDS 방식은 MAGNOX 연료와 같은 금속연료 혹은 HTGR 핵연료의 저장에 적용되고 있으며, 냉각효율 측면에서 타 방식에 비하여 우수한 것으로 알려져 있다. 특히, GEC Alsthom의 개념설계 보고서에 따르면 MVDS 저장방식에 PWR 핵연료 저장시 연료봉의 최대온도를 260 °C 이내로 제한이 가능하다.

### 3.3. 핵임계 안전성 평가

기존의 HI-STAR 100 금속용기와 HI-STORM 100 콘크리트 저장용기 방식에 금속전환체의 저장에 적용에 대한 핵임계 안전성 평가를 수행하였다. HI-STAR 100을 대상으로 핵임계 안전성 분석을 수행하면서 용기구조물을 보수적인 관점에서 물로 간주하여 동일한 내부 구조를 갖는 콘크리트용기인 HI-STORM에 대한 안전성 평가에도 적용할 수 있도록 하였다. HI-STAR 100 저장용기의 핵연료 basket 1개에 PWR 사용후핵연료 집합체 4다발을 금속전환한 금속전환체가 저장되는 것을 가정하였다. 금속전환체는 PWR핵연료와 동일한 길이를 갖는 것으로 가정하고, 기준 사용후핵연료로부터 생산된 금속전환체의 연료봉 배열은 그림 1과 같이 4x4 및 14x14 배열을 고려하였다. 그림 2는 4x4 배열에 대한 MCNP 코드[10]의 계산모델을 나타낸다. 바스켓 외부의 용기부분은 무시하였고, 저장용기가 저장시설 내에 배열된 상태를 보수적으로 모사하기 위하여 저장용기가 무한배열된 것으로 가정하여 저장용기가 저장시설 내에 배열된 상태를 보수적으로 모델링하였다

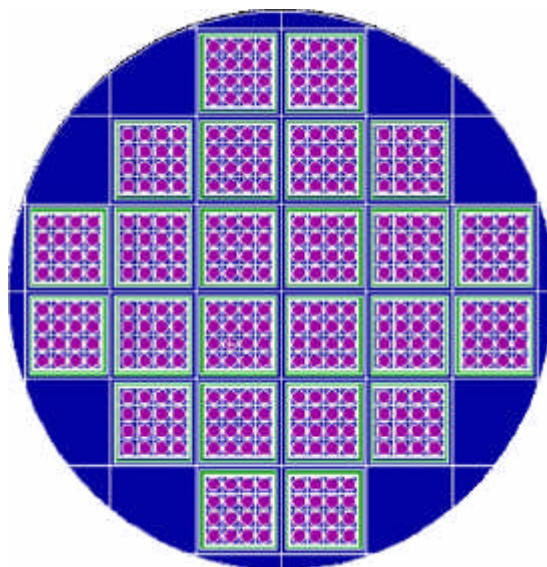


Fig. 2. MCNP Calculation Model for 4×4 Array of Reduced Metal Fuel.

저장 바스켓이 침수된 가상사고를 가정하였고, 수분밀도에 따라 핵임계 계산을 수행하였다. 5년 냉각되는 경우에 두 모델에 대한 계산 결과는 표 5와 같다. 이 표에서 볼 수 있듯이 두 모델 각각의 경우에 최대 핵임계도값은 각각 0.861 및 0.789로서 사용후핵연료의 저장시설의 핵임계도 기준값( $k_{eff}=0.95$ )보다 매우 작게 나타났다. 이를 통하여 금속전환체를 HI-STAR 금속용기 혹은 HI-STORM 콘크리트 용기에 장전하여 저장했을 때, 가상사고조건에서도 미임계 상태를 유지함을 확인하였다. 10년 냉각된 경우에는 5년 냉각의 경우보다 핵임계도 값이 더 작게 나타났으므로, 역시 핵임계 관점에서 안전성 확보가 가능함이 확인되었다.

Table 5. Criticality Analysis Results for Reduced Metal Fuel

Moisture density (g/cm <sup>3</sup> )	4x4 Array, 5 Yr Cooling		14x14 Array, 5 Yr Cooling	
	$k_{eff}$	$\sigma$	$k_{eff}$	$\sigma$
0.1	0.67718	0.00196	0.65890	0.00210
0.2	0.70239	0.00234	0.65506	0.00247
0.3	0.72482	0.00257	0.67108	0.00241
0.5	0.77589	0.00232	0.71243	0.00212
0.7	0.80457	0.00267	0.74907	0.00245
0.9	0.82535	0.00280	0.77356	0.00260
1.0	0.83518 (0.82783)*	0.00267 (0.00318)*	0.78101 (0.77302)*	0.00279 (0.00263)*
Maximum $k_{eff}^{**}$	0.861		0.789	

\*10 years cooling

\*\*Maximum  $k_{eff}=k_{eff} + 2\sigma + 0.02$  (Calculation Error & Uncertainty)

### 3.4. 방사선차폐 및 구조해석 평가

PWR 사용후핵연료를 금속전환할 경우 금속전환체의 방사능은 사용후핵연료 방사능의 약 1/4에 해당된다. 기존의 PWR 핵연료 건식저장시스템의 기준핵연료가 대부분 5년 냉각된 연료로 설정되어 있으므로 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 저장할 경우 방사능은 사용후핵연료를 저장한 경우와 거의 동일한 방사능을 갖게 된다. 따라서 금속전환체를 기존 저장용기에 장전하는 경우에 대한 차폐해석 결과는 기존의 사용후핵연료의 장전시와 큰 차이가 없을 것으로 추정된다. 기존 저장시스템은 인허가시 차폐분야에 대해서 검증되었기 때문에, 이 용기에 금속전환체를 저장한 경우에는 차폐 관점에서는 큰 문제가 없을 추정된다. 단지 본 연구에서의 기준 사용후핵연료는 HI-STAR 100에서 인허가 받은 사용후핵연료보다 연소도가 약간 높기 때문에 차폐체를 약간 보강해야 할 것으로 생각되지만, 현재 연구 목표인 적합한 저장용기의 도출의 목적을 달성하는데 있어서는 차폐분야가 큰 관건이 되지 않을 것으로 판단된다.

저장용량을 4배로 증대시 내부 핵연료의 중량이 약 2.8배로 증가하여 모든 저장방식에서 구조적인 건전성을 만족시키기 위해서는 구조재 보강이 필요하며, 중량 증가에 따른 구조 안전성에 중요한 조건을 대상으로 기존 방식의 치수 및 구조변경에 따른 예비 안전성분석이 요구된다.

#### 4. 후보저장 방식의 도출

기존의 금속용기, 콘크리트 저장용기 및 NUHOMS 방식에서 연료봉의 온도는 대부분 300 ~ 350 °C로 설계되어 있으며, 이들 방식에 금속전환체 적용시에도 연료봉 온도가 서로 비슷한 분포를 보였다. 따라서 열적인 안전성 측면에서 이들 3가지 방식은 공통된 문제점을 갖고 있다. 방사선차폐 및 핵임계 안전성 측면에서도 기존 저장방식이 최적화 설계에 주안점을 두었으며, 금속전환체 적용시 차폐체 또는 중성자흡수재 보완 및 금속전환체의 적절한 배열을 통하여 4배의 저장용량 증대가 가능할 것으로 판단된다. 구조적 건전성 측면에서는 대형 저장용량을 4배로 증대시 내부 핵연료 중량 증가로 인하여 전체 기존 저장방식에 구조적 보강이 요구된다.

후보저장방식 도출은 안전성 및 경제성, 적용성 등을 고려하였으며, 표 6에는 저장방식별 특징 및 장단점을 비교하여 나타내었다.

Table 6. Comparison of Characteristics for Dry Storage System

Item	Metal cask	Concrete cask	NUHOMS	MVDS
Containment system	cask / canister	canister	canister	canister
Cooling system	natural convection	air circulation	air circulation	air circulation (high efficiency)
Safety	structural safety	radiation shield	radiation shield	radiation shield
Application case	PWR/BWR	PWR/BWR	PWR/BWR	Magnox/HTGR
Transport cask	unnecessity	necessity	necessity	necessity
Cost	high	low	low	high
Design fuel temperature	309 ~ 346 °C	321 ~ 333 °C	366 °C	260 °C

금속용기는 용기 자체가 격납경계를 가지며, 밀봉 캐니스터를 장착할 경우 2중 격납구조를 갖는 반면 콘크리트 용기 및 모듈방식 등은 밀봉 캐니스터 자체에서만 격납경계를 가지므로 격납 건전성 측면에서는 금속용기 방식이 유리한 것으로 분석되었다. 냉각방식은 금속



용기의 경우 밀폐 공간내의 자연대류 방식이므로 냉각효율 측면에서 콘크리트 용기 또는 모듈방식에 비하여 떨어지며, 특히 볼트 저장방식의 경우 공기 순환을 위한 덕트가 설치되어 타 방식에 비하여 냉각효율이 우수한 것으로 분석되었다. 구조적 안전성 측면에서는 금속용기가 유리하나 수송·저장을 겸용으로 하기 때문에 차폐체를 증가시킬 경우 중량이 증가하는 문제점이 있으므로 방사선 차폐측면에서는 콘크리트 방식이 유리할 것으로 판단된다. 적용 사례를 보면 금속용기, 콘크리트용기 및 NUHOMS 방식은 PWR 핵연료의 건식 저장에 널리 적용되고 있으나 MVDS 방식은 금속연료 또는 단기냉각 연료에 적용되고 있다. 금속용기 방식은 별도의 운반용기가 필요 없으나 콘크리트 용기 및 모듈방식은 별도의 용기가 필요로 한다.

경제성 측면에서는 저장용량이 저장규모가 클 경우에는 콘크리트 용기 또는 NUHOMS 방식이 유리할 것으로 판단된다. 금속용기, 콘크리트 용기 및 NUHOMS 방식은 연료봉의 최대온도가 약 350 °C로 설계되었으나, GEC Alsthom의 개념설계 보고서에 따르면 MVDS 방식에 PWR 핵연료 적용시 연료봉 온도를 260 °C로 제시하고 있으며, 따라서 냉각효율 측면에서 MVDS 방식이 장점이 있는 것으로 분석되었다.

4가지 저장방식 중 모듈형 볼트저장방식(MVDS)를 제외한 나머지 3개의 저장방식에 금속전환체 적용시 연료봉의 저장 허용온도 제한에 따른 문제점이 있으며, 저장용량을 4배로 증대시 구조적 건전성 측면에서 금속용기 방식이 타 방식보다 유리할 것으로 판단되어 금속용기방식인 HI-STAR 100 시스템을 후보저장방식으로 선정하였다. HI-STAR 100 시스템은 최근에 개발된 수송·저장 겸용용기로서 수송, 저장, 처분을 위한 다목적 캐니스터를 장착하고 있다.

금속용기와 더불어 모듈형 볼트방식인 MVDS 방식을 후보저장 방식으로 도출하였다. 이 방식은 PWR 핵연료에 대한 적용 사례는 없지만 MAGNOX 연료와 같은 금속핵연료 저장에 적용되고 있다. 특히, 냉각효율이 타 방식에 비하여 우수하므로 금속전환체의 건식저장에서 중요한 변수가 되는 연료봉의 온도제한 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

금속전환체의 저장요건에 따른 기존 건식 저장방식에 금속전환체 적용성을 분석하고 후보 저장방식을 도출하였다. 최근에 개발된 금속 저장용기, 콘크리트 저장용기, 수평 콘크리트 모듈방식 및 모듈형 볼트 저장방식에 대한 기술자료 분석하였으며, 이들 저장방식에 금속전환체 적용을 위한 열해석 및 핵임계 안전해석을 수행하였고 차폐, 구조안전성 측면에서 적용성을 검토하였다.

열안전성 측면에서 기존 금속용기, 콘크리트 저장용기 및 NUHOMS 저장방식이 대부분 냉각기간 5년인 핵연료를 설계기준으로 설정되었고 연료봉 온도가 350 °C 내외로 설계되었으며, 5년 냉각된 금속전환체를 적용시 연료봉 온도도 350 °C 내외로 예측되었다. 연료봉 배열이 4x4 배열의 경우 14x14 배열의 경우에 비하여 연료봉 온도가 약 10% 이상 낮게 나타났으며, 따라서 연료봉 직경을 크게 할 수록 열안전성 측면에서 이점이 있는 것으로 분석되었다. 금속전환체의 저장 허용온도는 300 °C 이내로 추정되며, 10년 냉각 연료의 경우에는

연료봉 및 금속전환체의 적절한 배열을 통하여 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다. MVDS 저장방식은 PWR 핵연료 적용시 연료봉 온도가 260 °C로 설계되어 타 방식에 비하여 열안전성 측면에서 유리할 것으로 분석되었다.

핵임계 안전성 측면에서는 기존 용기에 금속전환체를 적용할 경우 가상사고조건하에서도 미임계 상태를 유지하여 핵임계 관점에서 안전성이 입증되었다. 방사선차폐 측면에서도 PWR 핵연료를 금속전환시 방사능이 약 1/4로 감소하므로 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 저장용량을 4배로 증대시 내부 핵연료의 중량이 약 2.8배로 증가하여 모든 저장방식에서 구조적인 건전성을 만족시키기 위해서는 구조재 보강이 요구된다.

4가지 저장방식중에서 금속전환체 후보저장방식으로 구조안전성 측면에서 타 방식에 비하여 유리한 금속용기 및 냉각효율이 뛰어난 모듈형 볼트저장방식을 후보저장방식으로 도출하였으며, 향후에는 후보저장방식으로 도출된 2가지 저장방식에 금속전환체 적용에 대한 예비 안전성 연구를 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Y. J. Shin, etc., "Development of Advanced Spent Fuel Management Technology", KAERI/RR-2128/2000, 2000.
2. J. C. Lee, etc., "Thermal Analysis of HI-STAR 100 System for Application of Metalized Spent Fuel", Proceeding of KNS Autumn Meeting, 2001.
3. "Safety Analysis Report for the Horizontal Modular Storage System for Irradiated Nuclear Fuel", Vectra Technologies Inc., 1996.
4. Holtec Report HI-941184, "Topical Safety Analysis Report for the HI-STAR 100 Cask System", , Rev.5, NRC Docket No. 72-1008, September, 1996.
5. "Topical Safety Analysis Report for the NAC Storable Transport Cask for Use at an Independent Spent Fuel Storage Installation", Rev. 3A", NAC International, 1995.
6. Holtec Report HI-951312, "Topical safety analysis report for the HI-STORM 100 system," Rev. 1, 1997.
7. "Safety Analysis Report for the TranStor™ Storage Cask System", Sierra Nuclear Corporation, 1996.
8. "Conceptual Design Materials for Korea Power Engineering Co. Inc for a MVDS", Gec Alsthom Engineering System, 1997.
9. "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 6", Fluent Inc., 1998.
10. Briesmeister, J. F., "MCNP-4B Monte Carlo N-Particle Transport Code Sytem", CCC-200, 1993.