2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후핵연료 금속전환체 저장용기의 정상운반조건에 대한 열전달해석 평가

Thermal Evaluation of Storage Cask Loaded with Metallized Spent Fuel under Normal Transport Condition

이주찬, 신희성, 주준식, 서기석, 김호동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료 저장용기에 금속전환체를 적용할 경우 정상운반조건에 대한 열전달 해석을 수행하였다. 전산해석 방법 및 절차에 대한 신뢰성을 입증하기 위하여 전산해석 결과와 열전달 이론에 의한 수계산 결과를 비교하였으며, 두 가지 결과가 서로 잘 일치하였다. 금속전환체의 유효열전도도를 구하여 저장용기 열전달해석의 입력자료로 활용하였으며, 유효열전도도는 2 x 2 및 4 x 4 연료봉 배열에서 각각 2.8 W/m-K, 2.2 W/m-K로 계산되었다. 금속전환체의 냉각기간 및 연료봉 배열에 따른 온도분포를 계산하였으며, 금속봉의 최고온도는 냉각기간 5년 연료의 경우 2 x 2 및 4 x 4 배열에서 각각 359 ℃와 370 ℃로 계산되었다. 따라서 연료봉의 직경을 크게 한 2 x 2 배열이 열 안전성 및 저장효율 측면에서 유리한 것으로 분석되었다.

Abstract

Thermal analysis of dry storage cask has been carried out for application of metallized spent fuel under normal transport condition. Comparisons of computer analysis results with the results by hand calculation based on the heat transfer theory showed very good agreement. Therefore, it was proved that the analysis method and procedure were successfully established to estimate the temperature of storage cask. Effective thermal conductivities of metallized fuels were applied as a input data for the thermal analysis of storage cask. The effective conductivities were decided with 2.8 W/m-K and 2.2 W/m-K for 2 x 2 and 4 x 4 rod arrays. The maximum metal rod temperatures for 2 x 2 and 4 x 4 rod arrays were calculated to be 359℃ and 370℃, respectively. Therefore, it was found that the 2 x 2 rod array metalized fuel was more advantageous in aspect of thermal safety and storage efficiency.

1. 서 론

사용후핵연료 저장방식은 크게 건식 및 습식 저장방식으로 구분되며, 건식 저장방식은 주로 소내 저장시설과 재처리 시설을 연계한 소외 저장시설에서 이용된다. 습식저장은 일정기간 소내 저장시설에서 보관 관리하던 핵연료를 소내 저장시설의 저장용량 한계를 극복하기 위한 수단으로 임시 중간 저장하는 경우에 주로 이용되며, 최근에는 안전성 측면에서 이점이 있는 건식 저장방식이 널리 이용되고 있다. 특히, 사용후핵연료 금속전환체는 물 또는 수증기와 반응하면 수소 또는 수소화물이 생성되어 반드시 건식 저장방식이 적용되어야 한다. 건식저장에서는 냉각재인 유체의 낮은 대류열전달 특성 때문에 핵연료의 온도가 높게 올라가는 단점이 있다. 따라서 핵연료에 대한 열적 건전성 평가가 무엇보다도 중요하다.

원자력연구소에서는 PWR 사용후핵연료를 건식 개질함으로써 관리부피를 줄이고 안전상에 문제를 일으키는 고방사성 핵종인 세슘과 스트론튬 등을 선택적으로 제거하여 방사능 및 냉각부하를 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 대한 연구를 수행하고 있다. 이는 세라믹 형태의 PWR 핵연료를 금속으로 전환시켜 관리하는 방법으로 금속전환체는 PWR 사용후핵연료와 비교하여 체적, 방사능 및 발열량을 약 1/4로 줄일 수 있다[1].

금속전환체의 특성을 고려하면 기존 사용후핵연료 저장시설에 금속전환체를 적용할 경우, 동일한 시설에 최대 4배의 저장용량 증대 효과를 갖는다. 하지만 저장용량을 4배로 증대시 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 연구에서는 Fluent[2] 전산코드를 이용하여 사용후핵연료 저장용기에 금속전환체를 적용할 경우에 대한 열전달해석을 수행하였다.

2. 금속전환체 저장용기 모델

기존의 사용후핵연료 저장용기인 HI-STAR 100 저장용기에 금속전환체 적용성을 평가하였다. HI-STAR 100[3]은 미국의 Holtec International 사에서 개발한 저장용기로 저장용량은 PWR 사용후핵연료 24다발을 장전할 수 있다. 사용후핵연료 수송 및 저장 겸용용기로 인허가를 획득하였으며, 수송, 저장 및 처분까지 고려하여 설계된 다목적 캐니스터(MPC, Multi Purpose Canister)를 장착하고 있다.

표 1은 저장용기의 개요를 나타내고 있다. 저장용기는 용기 본체인 overpack과 핵연료집합체를 장전할 수 있는 캐니스터로 구분된다. Overpack은 뚜껑, 감마선차

폐 및 구조재 역할을 하는 내부, 중간 및 외부 셸과 중성자차폐를 위한 NS-4-FR 등으로 구성되며, 감마선차폐 및 구조재로 탄소강을 사용하고 있다. 저장용기의 중량은 MPC-24 캐니스터를 장착할 경우 약 105톤이고, 충격완충체를 제외한 용기 본체의 길이는 5.2 m, 직경은 약 1.2 m에 이른다. 설계기준 핵연료는 MPC-24 캐니스터의 경우 냉각기간 5년, 연소도 40,000 MWD/MTU, 최대 붕괴열은 26.2 kW로 설계되었다.

Table 1. Description of HI-STAR 100 Storage Cask

Items	Description
Capacity	24 PWR / 32 PWR / 68 BWR assemblies
Weight	- Storage cask : 105.2 tons (with loaded MPC-24) - MPC : 35.8 tons (with loaded MPC-24)
Dimensions	- Packaging (including impact limiter) . O.D. : 3251 mm, Length : 7274 mm - Overpack . O.D. : 2438 mm, Length : 5159 mm - MPC . O.D. : 1737 m, Length : 4839 m
Materials	- Overpack : Carbon steel, NS-4-FR (neutron shield) - MPC : Stainless steel, boral (B4C + aluminum) - Impact limiter : honeycomb
Cooling type	Dry type (inert gas : helium)
Design basis fuel (MPC-24)	- Burn-up : 40,000 MWD/MTU - Cooling times : 5 years - Initial enrichment : 4.0 wt.% U235 - Decay heat : 26.2 kW/canister

금속전환체의 저장을 위한 기준 사용후핵연료는 초기농축도 4.5 wt%와 연소도 48,000 MWD/MTU인 PWR 핵연료로 설정하였으며, 냉각기간은 5년 및 10년 냉각된 연료를 기준으로 하였다. 표 2는 PWR 핵연료집합체를 금속전환할 경우 PWR 핵연료 및 금속전환체의 발열량을 비교하여 나타내고 있다. PWR 핵연료를 금속전환할 경우 발열량이 약 1/4로 감소하여 96다발의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 금속저환체의 전체 붕괴열은 5년 및 10년 냉각된 핵연료를 기준으로 각각 29.6 kW, 17.3 kW로 설정하였다.

Table 2. 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 %

24다발의 PWR 핵연료를 저장할 수 있는 HI-STAR 100 저장용기에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체 적용을 위하여 4개의 PWR 핵연료집합체를 1개의 금속전환체로 만들어 1개의 바스켓에 저장하는 것으로 가정하였다. 금속전환체의 연료봉 배열은 2 x 2 및 4 x 4 사각형 배열을 고려하였다. 그림 1은 4개의 PWR 핵연료집합체를 금속전환하여 1개의 바스켓에 장전한 금속전환체를 나타내고 있다. 2 x 2 배열에서 연료봉의 직경은 90 mm이고, 길이는 기존 저장용기의 핵연료 바스켓 길이를 고려하여 3.8 m로 설정하였다. 4 x 4 배열에 대한 연료봉의 직경은 45 mm이며, 연료봉 보호를 위한 cladding 및 지지격자를 고려하였다. 그림 2는 4 x 4 배열을 갖는 금속전환체 저장 캐니스터를 나타내고 있다.

표 3은 2 x 2 및 4 x 4 배열에 대한 연료봉, 바스켓 및 캐니스터의 주요 치수를 나타내고 있다. 바스켓 내부 폭은 2 x 2 및 4 x 4배열의 경우 각각 200 x 200 mm, 214 x 214 mm로 설정하였고 캐니스터의 외경은 각각 1,434 mm 및 1,524 mm로 설정하였다. 따라서 2 x 2 배열의 경우가 금속전환체 체적을 작게 하여 밀집저장이 가능함으로써 저장효율 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison of Metalized fuel between 2 x 2 and 4 x 4 rod arrays

	Metal rod array		Material
	2 x 2 array	4 x 4 array	
Metal rod			
- Outer diameter	90 mm	45 mm	-
- Length	3,800 mm	3,800 mm	-
- Cladding (O.D x t)	97 mm x 2.5 t	50 mm x 1.5 t	Stainless steel
Fuel basket			
- Inner width	200 x 200 mm	214 x 214 mm	Stainless steel
- Thickness	10 mm	10 mm	
Canister			
- Inner diameter	1,404 mm	1,492 mm	Stainless steel
- Outer diameter	1,434 mm	1,522 mm	
- Thickness	15 mm	15 mm	

PWR 핵연료를 금속전환할 경우 방사능 및 붕괴열은 약 1/4로 줄지만 저장용량을 4배로 증대할 경우 내부 핵연료의 중량이 약 2.8배로 증가하여 기존 저장용기에 금속전환체를 적용시 구조적인 건전성을 만족시키기 위하여 구조재 보강이 필요하다. 따라서 기존의 HI-STAR 100 저장용기의 구조재 두께를 증가시켰으며, 그림 3은 저장용기의 단면을 나타내고 있다. 저장용기의 내부 쉘 및 외부 쉘의 두께를 각각 76 mm 및 32 mm로 증가시켰다. 또한, 외부 쉘의 두께는 12.7 mm에서 15 mm로 증가시켰다. 저장 캐니스터의 외경은 기존 용기가 1,736.7 mm인데 비하여 금속전환체 적용시에는 2 x 2 및 4 x 4 연료봉 배열에서 각각 1,434 mm, 1,522 mm로 축소된다. 용기 외경은 기존 용기가 2,438.4 mm인데 반하여 금속전환체 적용시 각각 2,174 mm 및 2,262 mm로 각각 264 mm, 176 mm 축소시킬 수 있다. 따라서 기존 저장용기에 금속전환체 적용시 저장용량을 4배로 증대시켜도 용기의 체적은 줄일 수 있는 것으로 분석되었다.

3. 금속전환체 유효열전도도 계산

저장용기 열해석에서 24개의 핵연료집합체에 대한 연료봉 전체를 모델링하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구되기 때문에 일반적으로 핵연료에 대한 유효열전도도(effective thermal conductivity)를 적용하여 해석을 수행한다. 즉, 핵연료 바스켓 내부의 연료봉과 내부 공간의 열전도, 대류 및 복사열전달 효과를 유효열전도율로 고려한 균질화 모델[4]을 사용한다.

금속전환체의 등가열전도율을 계산하기 위하여 앞에서 설정한 2 x 2 및 4 x 4 배열에 대한 해석모델을 설정하였다. 그림 4는 4 x 4 연료봉 배열 및 균질화 모델에 대한 해석모델을 나타내고 있다. 모든 연료봉에서 열이 발생하여 집합체의 중앙의 연료봉으로부터 주변 연료봉으로 열전달시키기 위하여 온도차가 발생한다. 핵연료집합체의 횡방향 열전달은 복사열전달과 연료봉 사이의 헬륨가스를 통한 대류열전달에 의해 일어난다. 4 x 4 연료봉 배열 모델에서는 바스켓 내부의 연료봉에 의한 열전달, 유체에 의한 대류열전달 및 연료봉과 연료봉, 연료봉과 바스켓을 통한 복사열전달을 고려하였다. 바스켓 내부의 냉각 유체로는 헬륨가스를 고려하였으며, 금속전환체 1개에서의 붕괴열은 5년 냉각된 연료를 기준으로 1,233 W로 고려하였다. 연료봉 균질화 모델에서는 바스켓 내부의 유체 및 연료봉이 균질화된 단일 물질로 가정하여 유효열전도도를 고려하였으며, 붕괴열은 4 x 4 배열 모델과 같이 1,233 W로 고려하였다. 바스켓의 온도는 300 ℃로 가정하였다.

그림 5는 열해석 결과를 나타내며, 좌측 그림에서 최대 연료봉 온도는 311.1 ℃로 계산되었다. 균질화 모델을 이용하여 열전도율을 변화시켜 가면서 해석을 수행한

결과 금속전환체의 최대 온도가 311.1 ℃가 되는 유효열전도도는 2.2 W/m-K로 계산되었다. 또한, 이와 같은 방법으로 2 x 2 배열에 금속전환체의 유효열전도도는 2.8 W/m-K로 계산되었다. 2 x 2 배열의 경우 4 x 4 배열에 비하여 복사열전달 효과가 더 커서 유효열전도도가 더 높게 나타났다. 따라서 2 x 2 배열의 경우에 열안전성 측면에서 이점이 있을 것으로 판단된다.

4. 저장용기 열해석 모델링

저장용기의 열전달은 용기 내부 cavity의 냉각 유체에 의한 대류 및 복사열전달, 용기 본체를 통한 열전도, 그리고 용기 외부표면에서의 대류, 복사열전달 등 3가지 열전달 모드로 구성된다. 표 4는 용기를 구성하는 주요 재료의 열전도율을 온도변화에 따라 나타내었다. 중성자 차폐체인 NS-4-FR은 열전도율이 매우 낮아서 탄소강의 전열판을 부착하여 열전달을 향상시키도록 하였고, 열해석 모델에서는 중성자 차폐체의 등가 열전도율을 고려하였다. 금속전환체는 앞에서 구한 유효열전도율로 고려한 균질화 모델을 사용하였다.

Table 4. Summary of Thermal Conductivities of Materials

Materials	Thermal Conductivities (W/m-K)		
	93 ℃	232 ℃	372 ℃
Helium	0.169	0.223	0.273
Air	0.023	0.039	0.047
Stainless steel	14.54	16.96	19.04
Carbon steel	50.5	46.9	42.6
Neutron shield (k_{eff})	3.38	3.14	2.85
Neutron shield (NS-4-FR)	0.645		
Metallized fuel (2x2 array)	2.8		
Metallized fuel (4x4 array)	2.2		

저장용기 외부표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달계수는 실험적으로 혹은 이미 연구된 결과를 인용하여 얻게 되며, 다음 식으로 정의된다.

$$h_{nc}(\text{surface}) = Nu_d \frac{k}{d} \quad \text{---------- (1)}$$

여기서,

$Nu_d = c(Gr\ Pr)^a$, $Gr_d = g\ \beta\ (\Delta T) d^3/\nu^2$ ---------- (2)

k : Thermal conductivity (W/m-K)

a : Exponent dependent on the flow regime

c : Coefficient dependent on the flow regime and geometry

g : Acceleration of gravity (m/s^2)

d : Diameter of cask (m)

β : Coefficient of volumetric expansion (1/K)

ΔT : Temperature difference between cask syrface and ambient(K)

ν : Dynamic viscosity (m^2/s)

저장용기는 수송조건에서 수평상태로 운전되며, 수평원통 형태에서는 다음의 관계식을 따른다.

$$Nu = 0.53\ (Gr\ Pr)^{1/4}\ (10^4 < Gr\ Pr < 10^9) \text{ ---------- (3)}$$

$$Nu = 0.13\ (Gr\ Pr)^{1/3}\ (Gr\ Pr > 10^9) \text{ ---------- (4)}$$

식 (2)로 부터 저장용기 표면에서 Gr Pr = 2.0 x 10^{10}으로 계산되어 유동이 난류 영역에 속한다. 따라서 식 (4)와 식 (1)을 이용하여 용기 외부표면에서의 자연대류 열전달계수(h = 5.0 W/㎡-K)를 얻었다.

용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

$q = A\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_a^4)$ ---------- (5)

여기서,

q : Heat flow (W)

A : Heat transfer area (㎡)

σ : Stefan-Boltzmann constant (= 5.669x10^{-8} W/㎡ K^4)

ε : Emissivity of surface material

T_s : Surface temperature (K)

T_a : Ambient temperature (K)

복사는 고온에서 크게 일어나며, 같은 온도에서는 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. HI-STAR 100 저장용기의 외부 표면은 탄소강으로 구성되며, 용기 표면을 흰색 페인트로 도색하여 방사율을 높이고 태양열 흡수율을 낮추도록 설계되었다. 흰색 표면에 대한 방사율은 일반적으로 0.8 ~ 0.98[5] 값을 가지며, 열해석에서 방사율은 0.85로 적용하였다. 또한 탄소강 및 스레인레스강 표면에 대한 방사율은 각각 0.66, 0.36으로 고려하였다.

HI-STAR 100 용기는 수송·저장 겸용용기이며, 열안전성 측면에서 수송조건이 더 보수적인 기술기준을 갖는다. 따라서 해석조건은 수송법규[6]에서 규정하고 있는 정상수송조건중 고온조건을 고려하여 용기 외부의 대기온도를 38 ℃로 하였고 최대 태양복사열을 고려하였다. 태양복사열은 법규에서 규정하고 있는 용기 형상이 곡면일 경우 하루 24시간중 12시간동안 400 W/㎡의 열유속을 고려하였다. 따라서 정상상태 해석에서는 200 W/㎡의 태양복사열을 고려하였고 태양열 흡수율은 0.3[7]을 고려하였다. 금속전환체의 1다발의 붕괴열은 5년 및 10년 냉각된 연료의 경우 각각 금속전환체 1233 W, 720 W로 고려하였다.

그림 6은 열해석 모델을 나타내며, 2차원 1/4 단면모델을 사용하였다. 용기 내부 및 외부에서는 대류 및 복사열전달이 일어나는 것으로 모델링 하였다. 저장용기의 자연대류에 대한 용기내의 유동이 난류영역으로 확대되며, 난류모델은 표준 k-ε모델을 사용하였다. 핵연료 바스켓과 바스켓을 고정하는 bracket 사이에는 보수적인 해석을 위하여 5 mm의 gap을 고려하였고 또한, 캐니스터와 용기본체 사이에도 5 mm의 helium gap이 있는 것으로 모델링하였다. 금속전환체는 균질화 모델을 사용하여 2 x 2 및 4 x 4 연료봉 배열의 경우 유효열전도도를 각각 2.8, 2.2 W/m-K로 고려하였다. 용기 주변의 대기온도는 38 ℃로 하였으며, 용기 표면에서 최대 태양복사열이 유입되는 조건을 적용하였다.

5. 해석결과 및 고찰

HI-STAR 100 저장용기에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. 금속전환체의 냉각기간은 5년 및 10년된 연료를 기준으로 하였고 연료봉 배열은 2 x 2 및 4 x 4 배열에 대한 해석을 수행하였다.

전산코드를 이용한 해석결과에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 Fluent 해석결과와 수계산 결과를 비교하였다. 검증해석에서는 대류열전달 효과에 의한 온도분포 비대칭성을 제거하기 위하여 용기 내부 cavity에서의 대류열전달 효과를 고려하지 않고 열전도 및 복사만을 고려하였다.

저장용기 외부표면에서의 자연대류 및 복사열전달에 의한 열전달은 다음식으로 표현된다.

$$q/A = h\,(T_s - T_a) + \sigma\varepsilon(Ts^4 - Ta^4) \quad \text{---------- (6)}$$

금속전환체의 총 붕괴열은 29.6 kW 이고 저장용기의 외경이 1.133 m, 길이가 3.8 m 일 때 외부 표면적은 27.05 ㎡이다. 따라서 금속전환체 붕괴열에 의한 용기표면에서 단위 면적당 열량은 1,094 W/㎡이다. 또한 용기 표면에서 태양열에 의한 열유속은 200 W/㎡에 흡수율 0.3을 곱하면 60 W/㎡이 된다. 따라서, 용기표면에서 외부로 열전달 되는 총 열량은 1,154 W/㎡ 이다. 용기표면에서 대류열전달 계수가 5 W/㎡-K, 주변온도가 38 ℃, 표면 방사율이 0.85이므로 식 (6)에 의하여 용기표면 온도는 122.2 ℃로 계산되었다.

용기의 반경 방향으로만 열전달이 일어난다고 가정하면 원통형 좌표계에서 용기 본체를 통한 열전도는 다음 식으로 계산할 수 있다[8].

$$q = 2\pi kL\,(T_i - T_o) / \ln(R_o/R_i) \quad \text{---------- (7)}$$

식 (7)에 의하여 용기본체를 통한 열전도를 수계산으로 구하여 전산해석 결과와 비교하였으며, 표 5에는 두가지 계산결과 나타내었다. Fluent 코드를 이용한 전산해석 결과와 수계산 결과가 1 ℃ 이내로 서로 잘 일치하여 전산해석 결과에 대한 신뢰성이 입증되었다.

Table 5. Comparison of Temperatures between Computer Analysis and Hand Calculation

Location	Calculated temperature (℃)	
	Fluent analysis	Hand calculation
Inner shell inside	169.8	169.7
Intermediate inside	166.8	166.8
Neutron shield inside	160.3	161.3
Outer shell inside	123.0	122.6
Cask outer surface	122.5	122.2
Ambient	38	

표 6은 저장용기의 정상운반조건에 대한 냉각기간 및 연료봉 배열에 따른 열해석 결과를 나타내고 있다. 5년 냉각된 금속전환체를 장전할 경우 용기 표면의 온도가 2 x 2 배열의 경우에 4 x 4 배열에 비하여 6 ℃ 높게 나타났다. 이것은 2 x 2 배열의 경우 총 발열량은 같지만 용기의 외경이 4 x 4 배열의 경우보다 작아서 열전달 면적이 더 작기 때문에 나타난 결과이다. 용기 본체의 온도도 2 x 2 배열의 경우에 6 ~ 10 ℃ 정도 더 높게 나타났다. 반면, 연료봉 온도는 4 x 4 배열의 경우에 10 ℃

더 높게 나타났다. 이것은 4 x 4 배열의 경우 2 x 2 배열의 경우에 비하여 금속전환체의 유효열전도도 값이 작고 체적이 커서 나타난 결과이다. 저장용기에서는 용기 본체의 온도보다는 연료봉의 온도가 중요한 변수가 되므로 연료봉의 직경을 크게 하여 밀집 저장하는 2 x 2 배열의 경우가 열안전성 측면에서 이점이 있는 것으로 분석되었다.

10년 냉각된 연료의 경우에도 5년 냉각된 연료와 비슷한 경향을 보이고 있다. 금속 연료봉의 최대 온도는 5년 냉각된 연료의 경우 359, 370 ℃로 계산되었으며, 10년 냉각된 연료의 경우에는 243 ℃, 249 ℃로 계산되었다. 그림 7은 5년 냉각된 4 x 4 배열의 경우 온도분포를 나타내고 있다.

Table 6. Thermal Analysis Result under Normal Transport Condition

Location	Calculated temperature (℃)			
	5 years cooling time		10 year cooling time	
	2x2 array	4x4 array	2x2 array	4x4 array
Fuel rod	359	370	243	249
Canister (outside)	212	200	150	142
Inner shell (inside)	181	171	128	122
Neutron shield (inside)	170	161	122	116
Cask outer surface	128	122	97	93
Ambient	38			

6. 결 론

본 연구에서는 24개의 PWR 핵연료집합체를 장전할 수 있는 저장용기에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 적용할 경우 열전달해석을 수행하였다. 용기가 수송·저장 겸용용기이며, 열안전성 측면에서 보수적인 수송조건에 대한 해석을 수행하였다. 금속전환체의 유효열전도도는 2 x 2 연료봉 배열의 경우 2.8 W/m-K, 4 x 4 배열의 경우 2.2 W/m-K로 계산되어 2 x 2 배열의 경우가 열전달 측면에서 이점이 있는 것으로 분석되었다. 전산해석 결과와 수계산을 통하여 얻어진 결과를 비교하였으며, 두가지 해석결과가 서로 잘 일치하였다. 따라서 전산해석 결과에 대한 신뢰성이 입증되었다. 금속전환체의 연료봉 배열을 2 x 2 및 4 x 4 배열에 대한 해석결과 연료봉의 온도는 2 x 2 배열의 경우가 약간 낮게 나타났다. 따라서 연료봉 직경을 크게 하여 밀집 저장하는 것이 저장효율 측면뿐만 아니라 열안전성 측면에서도

유리한 것으로 분석되었다. 금속 연료봉 최대온도는 5년 냉각된 연료의 경우 359, 370 ℃로 계산되었으며, 10년 냉각된 연료의 경우에는 243, 249 ℃로 계산되었다. 금속전환체의 저장 허용온도는 300 ℃ 이내로 추정되며, 10년 냉각 연료의 경우에는 금속전환체의 적절한 배열을 통하여 4배의 저장용량을 증대가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] J. C. Lee, etc., "Evaluation for the Application of Metal Fuel in the Spent Fuel Dry Storage System", Proceeding of KNS Spring Meeting, 2001.

[2] "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5", Fluent Inc., 1998.

[3] "Topical Safety Analysis Report for the HI-STAR 100 Cask System", Holtec Report HI-941184, Rev.5, NRC Docket No. 72-1008, September, 1996.

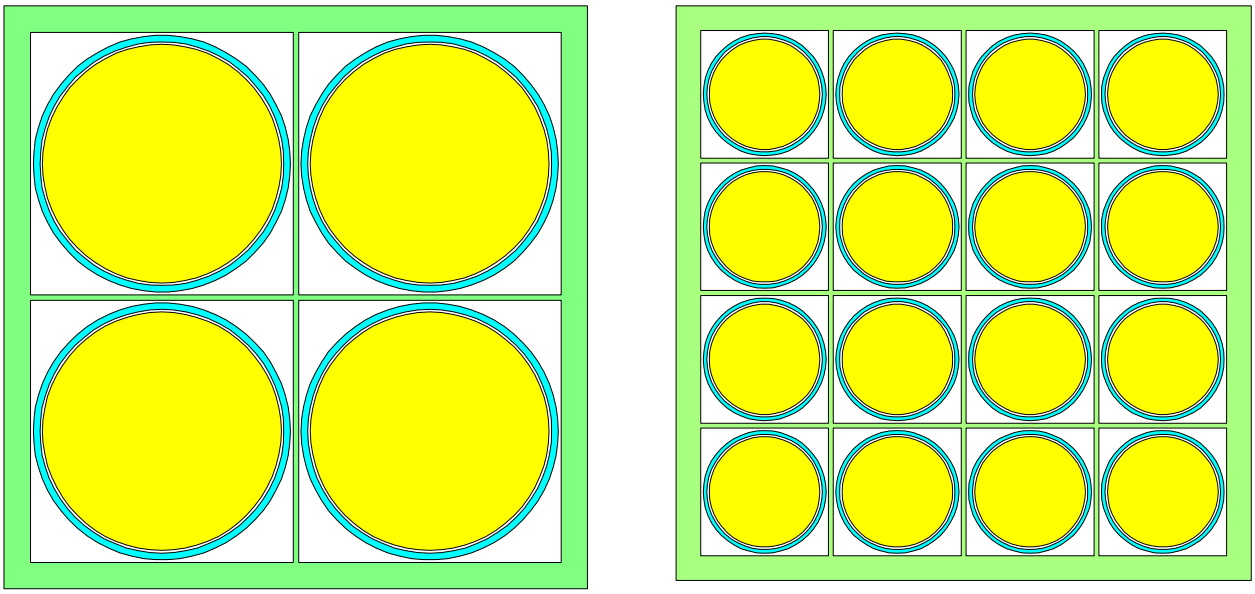
[4] Wooton, R.O. and Epstein, H.M., "Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping Container", Battelle Memorial Institute, 1963.

[5] Kern D.Q., "Process Heat Transfer", McGraw Hill Kogakusha, 1980.

[6] IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996.

[7] GA-A19862, "GA-4/GA-9 Legal Weight Truck from Reactor Spent Fuel Shipping Casks", General Atomics, September 1989.

[8] J. P. Holman, "Heat Transfer", International Student Edition 5th Ed., 1985.



(a) 2 x 2 rod array

(b) 4 x 4 rod array

Fig. 1. Fuel Basket Packed with Reduced Metal Fuel for 4 PWR Assemblies.

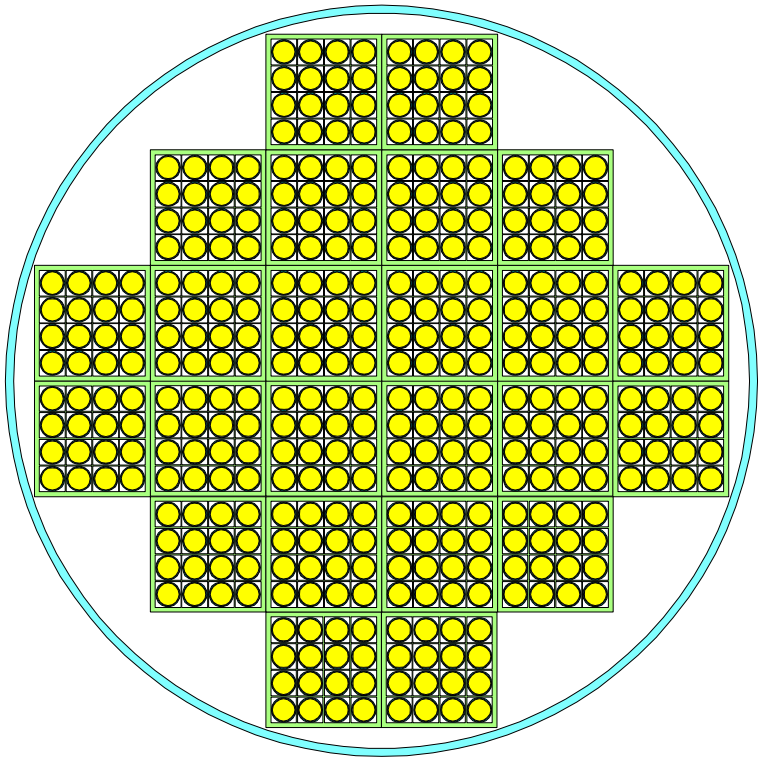
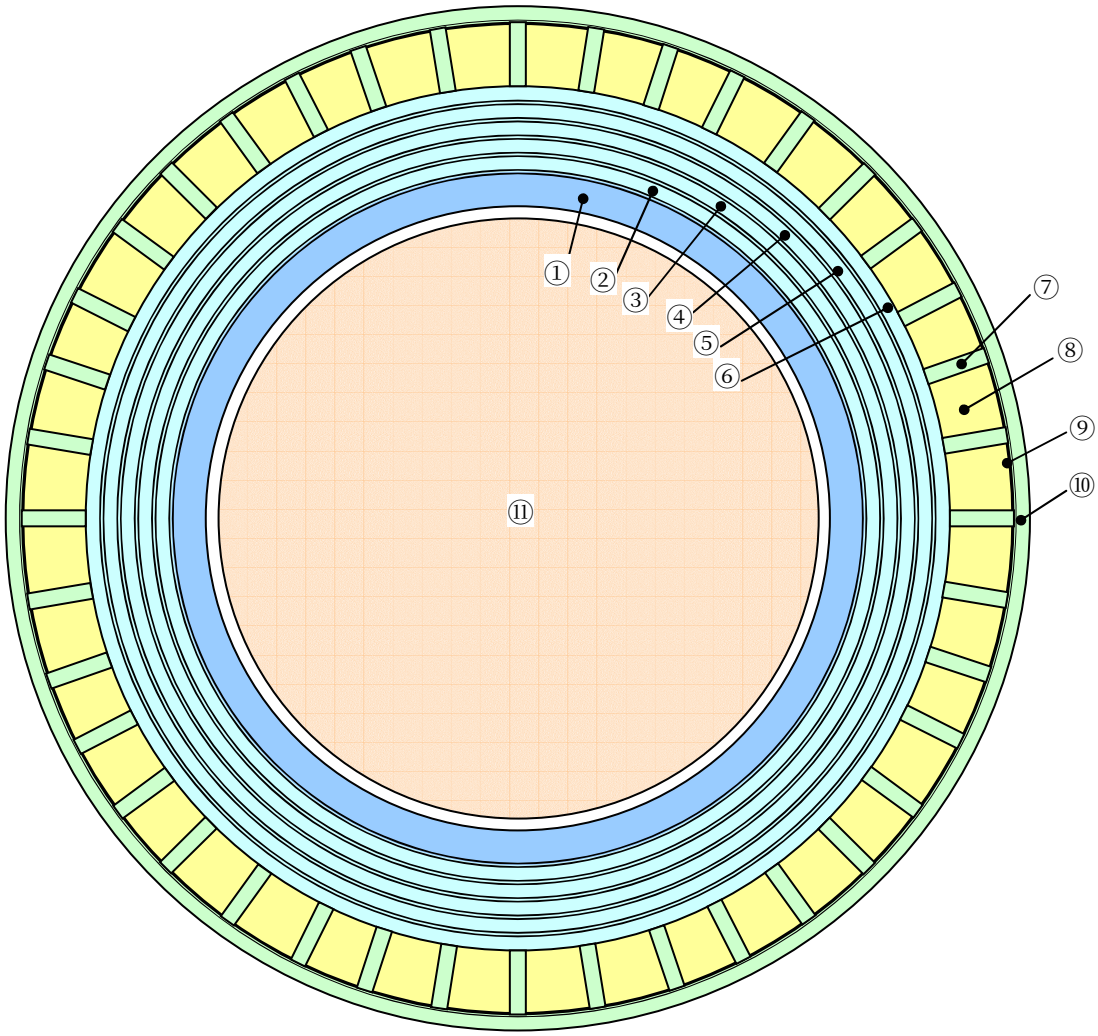
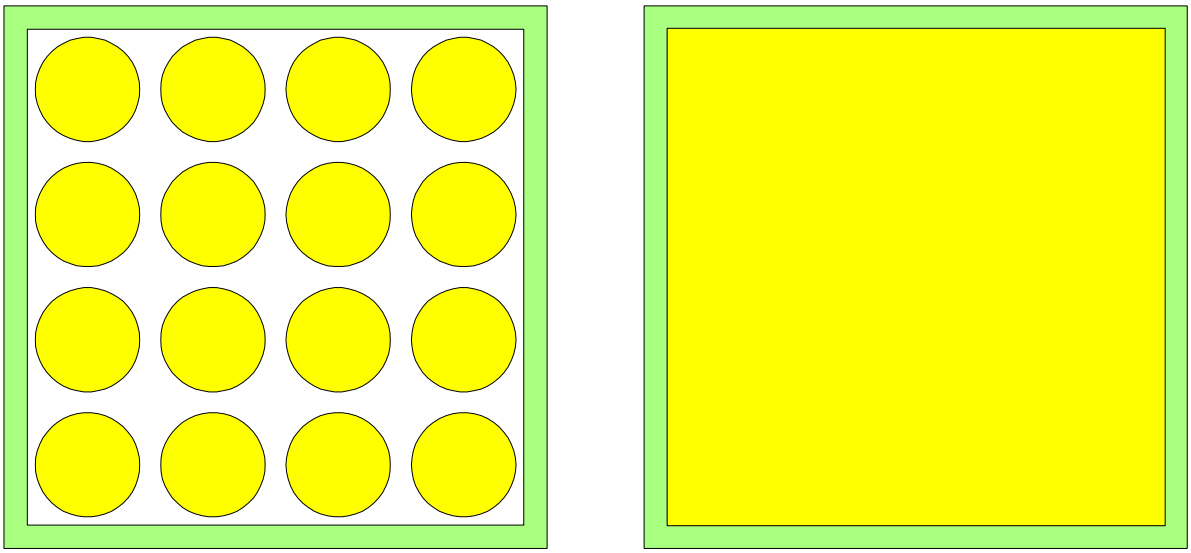


Fig. 2. Canister for Storage of Metal Fuel Assemblies.



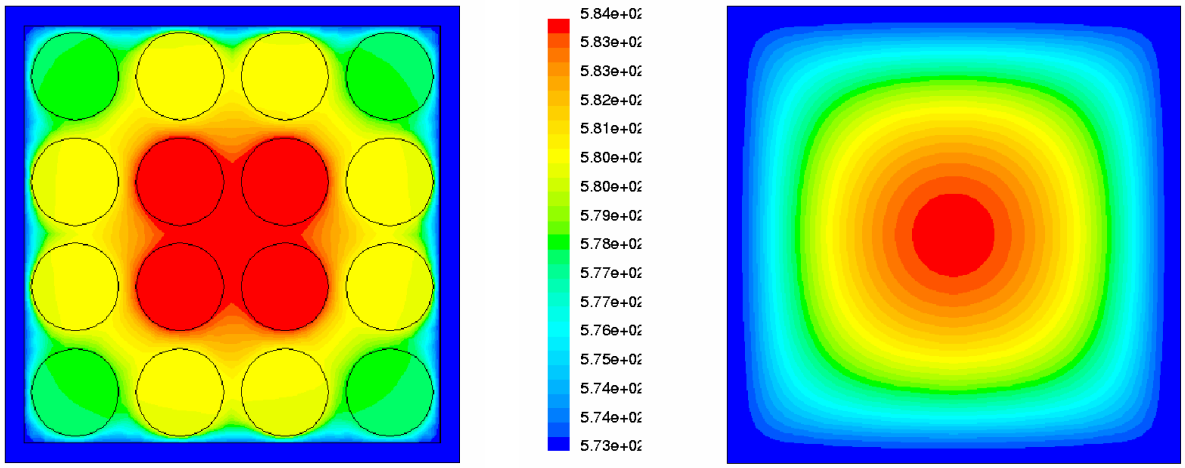
Item No.	Nomenclature	Dimension			Material
		HI-STAR	2x2 Array	4x4 Array	
1	Inner shell	I.D. 1746.7 63.5t	I.D. 1,444 76t	I.D.1,532 76t	Carbon steel
2	Intermediate shell	31.75t	32t	32t	“
3	Intermediate shell	31.75t	32t	32t	“
4	Intermediate shell	31.75t	32t	32t	“
5	Intermediate shell	31.75t	32t	32t	“
6	Intermediate shell	25.4t	32t	32t	“
7	Radial channel (fin)	12.7t	12.7t	12.7t	“
8	Neutron shield	109.5t	110t	110t	Ns-4-FR
9	Thermal exp. Form	3.2t	4t	4t	Silicone form
10	Outer shell	O.D.2438.4 12.7t	O.D.2174 15t	O.D.2262 15t	Carbon steel
11	Canister	O.D.1736.7 12.7t	O.D.1,434 15t	O.D.1,522 15t	Stainless steel

Fig. 3. Cross Section View of Cask for Storage of Metal Fuel.



(a) 4 x 4 rod array (b) Homogenized fuel

Fig. 4. Thermal Analysis Model for Calculation of Effective Conductivity.



(a) 4 x 4 rod array (b) Homogenized fuel

Fig. 5. Temperature Contour for Metallized Fuel.

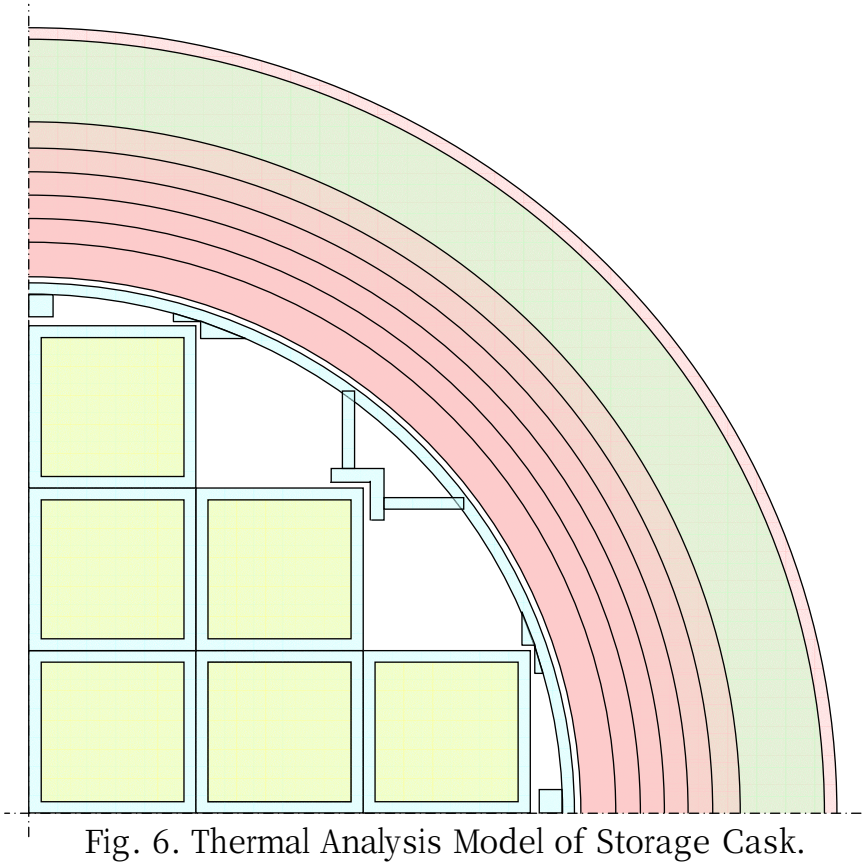


Fig. 6. Thermal Analysis Model of Storage Cask.

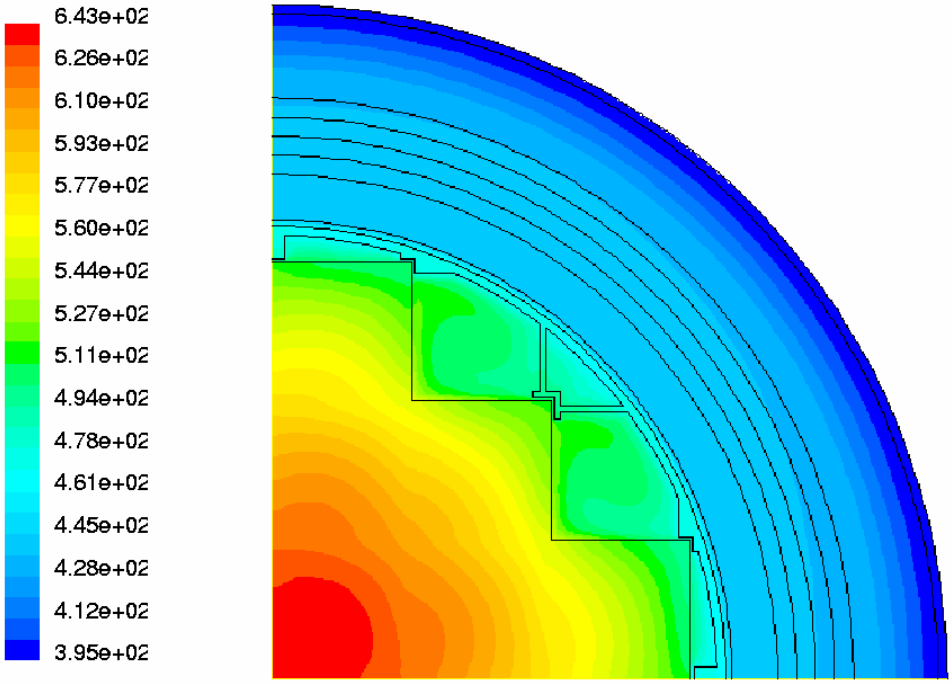


Fig. 7. Temperature Contour (4x4 array, 5 years cooling time)[K].