

사용후핵연료 수송용기에 금속전환체  
적용을 위한 열전달해석 평가

Thermal Analysis of Spent Fuel Shipping Cask  
for Application of Metalized Fuel

이주찬, 서기석, 신영준, 송요택

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

범용 열유동해석 프로그램인 Fluent를 이용하여 4개의 PWR 핵연료집합체를 운반할 수 있는 사용후핵연료 수송용기에 대한 열해석을 수행하였다. 또한, 수송용기에 16개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 4개의 금속저장체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. 4개의 PWR 핵연료집합체에서의 붕괴열은 2.2 kW, 4개 금속저장체의 붕괴열은 4.4 kW로 고려하였다. PWR 핵연료집합체에 대한 해석결과 수송용기의 안전성분석보고서에 제시된 온도와 잘 일치하였다. 수송용기에 금속전환체를 적용할 경우 연료봉의 최고온도는 사각형 및 육각형 캐니스터 금속전환체의 경우 각각 269 °C, 212 °C로 계산되었다. 따라서 연료봉 밀집화 형태의 육각형 캐니스터 방식이 열 안전성 및 저장효율 측면에서도 유리한 것으로 분석되었다. 용기 내부 cavity에 헬륨 가스를 채울 경우 육각형 금속전환체의 연료봉 온도가 기존의 PWR 핵연료 집합체를 고려할 경우보다 낮게 나타났다.

Abstract

Thermal analysis of spent fuel shipping cask loaded with 4 spent PWR fuel assemblies has been carried out using the Fluent code. And the temperature distribution of cask for application of 4 metalized fuels equivalent to 16 PWR fuels has been also calculated. Total decay heat from 4 spent PWR fuels and 4 metalized spent fuels are 2.2 kW and 4.4 kW, respectively. The calculated temperatures for 4 spent PWR fuels were compared with the proven data presented from the safety analysis report of shipping cask. It has good agreement between two results. The maximum fuel rod temperatures inside the canisters of square and hexagonal types are estimated to be 269°C and 212°C, respectively. Therefore, it is found that the hexagonal canister loaded with metalized fuel rods is more advantageous in aspect of thermal characteristics and storage efficiency. Fuel temperature in the cavity of helium gas for hexagonal canister is lower than the temperature for spent PWR fuel.

## 1. 서론

원자로에서 조사된 사용후핵연료는 장기간 강한 방사선과 붕괴열이 방출된다. 따라서 사용후핵연료를 안전하게 운반하기 위하여 수송용기는 방사선차폐의 건전성, 격납경계의 유지 및 내부 붕괴열의 적절한 방출 등의 설계기준을 만족하도록 설계 제작되어야 한다. IAEA 규정[1] 및 국내 원자력법규[2]에서 수송용기는 정상수송조건 및 가상 사고조건에서 열적으로 안전하게 설계되어야 한다고 엄격하게 규정하고 있다. 수송용기의 열적인 건전성을 유지시키기 위해서 정상조건에서는 핵연료에서 발생하는 붕괴열을 적절하게 전달시켜야 하며, 화재사고조건에서는 외부로부터 유입되는 열을 적절히 차단하여 용기 내부의 온도를 가능한 낮게 함으로써 설계압력 유지 및 차폐체의 건전성을 유지시켜야 하는 양면적인 설계 요구사항을 갖는다.

원자력연구소에서는 사용후핵연료 차세대 관리기술의 하나로 현재 가압경수로에서 발생하고 있는 사용후핵연료를 건식 개질함으로서 그 관리부피를 초기대비 1/4로 줄이고 관리안전상에 문제를 일으키는 고 방열성 핵종인 세슘과 스트론튬을 선택적으로 제거하여 냉각부하를 1/2로 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 관한 연구를 수행하고 있다[3]. 부피를 1/4로 줄이면 저장용량을 4배로 확장할 수 있으나 냉각부하는 약 2배로 커져 핵연료 수송용기 및 저장시스템에 대한 열적 건전성 평가가 요구된다.

본 연구에서는 범용 열유동 해석 프로그램인 Fluent 코드[4]를 이용하여 PWR 사용후핵연료 수송용기에 대한 열해석을 수행하였으며, 수송용기 내부에 PWR 핵연료집합체 대신에 급속전환체를 적용할 경우에 대한 열해석을 수행하였다. Fluent 코드는 미국의 Fluent사에서 개발된 CFD(computational fluid dynamics) 해석코드로서 질량, 운동량, 에너지 그리고 화학종의 보존방정식을 기반으로 하는 범용 유동해석 코드로서 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하고 있다. 이와 같은 CFD 코드는 유동 및 열전달, 물질전달 및 화학반응 문제 등에 대한 해석할 수 있으며, 압축성, 비압축성 유동해석이 가능하고 자동차 산업, 전자장비 냉각계통, 열교환기 및 furnace 등의 해석에 널리 사용되고 있다.

## 2. GA-4 수송용기 개요

GA-4 수송용기는 PWR 사용후핵연료집합체 4다발을 운반할 수 있는 용량을 갖도록 설계되었으며, 그림 1은 GA-4 수송용기의 개략도를 나타내고 있다. 수송용기는 뚜껑을 포함한 용기본체와 충격완충체 및 결속장치 등으로 구분된다. 수송용기 본체는 핵연료를 담은 4개의 핵연료장전통(fuel basket)과 감마선차폐체, 중성자차폐체 및 구조재 그리고 뚜껑(lid) 등으로 구성된다. 표 1은 수송용기의 개요를 나타내고 있다. 충격완충체를 포함한 용기의 총 길이는 약 5.9 m이며, 용기 본체의 길이는 4.8 m, 직경은 약 1.0 m에 이른다. 용기의 중량은 빈 용기가 약 21.2톤이고 핵연료를 장전할 경우는 약 23.9톤에 이른다. 또한, 용기를 트레일러에 상차할 경우 수송용기를 포함한 트레일러, 트랙터의 총 중량이 약 36.3톤으로서 도로교통법에서 규정하고 있는 제한 중량 40톤 이내를 만족한다.

수송용기의 구조재로는 스테인레스강, 감마선 차폐체로는 DU(Depleted uranium), 그리고 중성자 차폐체로는 1%의 보론이 함유된 폴리프로필렌을 사용하고 있다. 또한 충격완충체는 알루미늄 허니콤을 사용하여 중량을 최소화하고 완충효과를 갖도록 하고 있다. 수송용기 바스켓 내부에는 공기를 채우는 건식으로 설계되었다. 운반대상 핵연료의 설계기준은 연소도

18,000 ~35,000 MWD/MTU, 초기농축도 3.0 ~ 4.5 w/o U-235, 냉각기간 10년인 PWR 핵연료집합체를 기준으로 하여 핵연료집합체 4개에서 발생하는 최대 붕괴열은 2,208 W 이다.

Table 1. Description of GA-4 Shipping Cask

Items	Description
Capacity	4 PWR assemblies
Weight	- 21.2 tons (empty) - 23.9 tons (loaded fuel) - 36.3 tons (including tractor and trailer)
Dimensions	- Packaging (including impact limiter) . O.D. : 2.3 m, Length : 5.9 m - Cask body . O.D. : 1.0 m, Length : 4.8 m
Materials	- Structural mat'l : stainless steel - Gamma shield : depleted uranium (64.3 mm) - Neutron shield : polyethylene-1% boron(RX 201-1) (thickness : 114.3 mm) - Impact limiter : honeycomb(aluminum)
Cooling type	Dry type (air cavity)
Design basis fuel	- Burn-up : 18,000 MWD/MTU ~ 35,000 MWD/MTU - Initial enrichment : 3.0 ~ 4.5 % U-235 - Cooling time : 10 years - Decay heat : 2,208 W/ 4 PWR fuels (552 W / Ass'y)

### 3. 열해석 모델링

수송용기의 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 2는 수송용기를 구성하는 주요 재료의 열적 물성치를 나타내고 있다. 중성자 차폐체인 폴리프로필렌은 열전도율이 1.72 W/m-K로서 낮아서 화재사고시에 외부화염의 고온으로부터 내부를 보호하는 역할을 한다. GA-4 수송용기의 열전달해석에서 핵연료집합체는 핵연료봉과 내부 공간의 열전도, 대류 및 복사열전달 효과를 등가열전도율로 고려한 균질화 모델을 사용하였으며, 표 3은 핵연료집합체에 대한 등가열전도율을 나타내고 있다.

Table 2. Thermal Properties of Materials

Materials	Thermal properties		
	k [W/m-K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [J/kg-K]
Uranium oxide (UO <sub>2</sub> )	3.05	-	272
Zircaloy-4	15.6	-	297
304 stainless steel	17.3	7861	461
XM-19 stainless steel	13.9	7889	461-628
Depleted uranium (DU)	25.5	19293	132
Neutron shielding (RX 201-1)	1.72	930	2345
Boron carbide (B <sub>4</sub> C)	119.4	2519	1214
Aluminum alloy 5052	138.5	2685	921

Table 3. Effective Thermal Conductivity of Spent PWR Assembly

Temperature(°C)	Effective thermal conductivity(W/m-K)
38	.091
93	.135
149	.193
204	.268
260	.362
316	.477
371	.615

수송용기 외부표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달계수는 실험적으로 혹은 이미 연구된 결과를 인용하여 얻게 되며, 다음 식으로 정의된다[5].

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

여기서,

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

k : Thermal conductivity (W/m°C)

a : Exponent dependent on the flow regime

c : Coefficient dependent on the flow regime and geometry

g : Acceleration of gravity (m/s<sup>2</sup>)

d : Diameter of cask (m)

$\beta$  : Coefficient of volumetric expansion (1/°C)

$\Delta T$  : Temperature difference (°C)

$\nu$  : Dynamic viscosity (m<sup>2</sup>/s)

위와 같은 관계식을 사용하여 자연대류 열전달계수( $h = 3.6 \text{ W/m}^2\text{-K}$ )를 얻을 수 있었다. 운반용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

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

여기서,

- q : Heat flow (W)
- A : Heat transfer area ( $\text{m}^2$ )
- $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant ( $= 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )
- $\varepsilon$  : Emissivity of surface material
- Ts : Surface temperature (K)
- Ta : Ambient temperature (K)

복사열전달은 주로 고온에서 크게 일어나며, 같은 온도에서는 재료의 방사율 (emissivity)에 영향을 받는다. GA-4 수송용기의 외부표면은 스테인리스강으로 구성되며, 용기 표면을 흰색 페인트로 도색하여 표면 방사율을 높이고 태양열 흡수율을 낮춤으로써 열전달 측면에서 유리하도록 설계되었다. 흰색 표면에 대한 방사율은 일반적으로 0.8 ~ 0.98[6] 값을 가지며, 열해석에서는 방사율을 0.9로, 그리고 태양열 흡수율은 0.3으로 적용하였다. 태양복사열은 범규에서 규정하고 있는 수평평면에 대하여  $800 \text{ W/m}^2$ , 수평하지 않은 평면에 대하여  $200 \text{ W/m}^2$ , 그리고 곡면에 대하여  $400 \text{ W/m}^2$ 를 적용하였다. 금속핵연료의 표면 방사율은 현재까지 발표된 자료가 없으므로 우라늄의 방사율 0.5를 고려하였다.

GA-4 수송용기는 반원형 반사각형의 3차원 구조에 속하나 핵연료 장전통 이외에는 내부공간이 없고 용기를 수평상태로 운반하게 되므로 용기 길이 방향으로의 자연대류는 거의 무시될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 2차원 단면 모델을 이용하여 해석을 수행하였으며, PWR 핵연료의 active length를 기준으로 용기 길이를 가정하여 실제보다 보수적인 해석이 되도록 하였다.

먼저, GA-4 수송용기의 검증해석을 위하여 예비안전성분석보고서[7]에 제시된 PWR 핵연료집합체의 균질화 모델에 대한 해석모델을 구성하였다. 그림 2는 PWR 핵연료집합체 해석모델의 단면을 보여주며, 주요 재료 및 치수 등을 나타내고 있다. PWR 핵연료 수송용기에 금속전환체 적용성을 평가하기 위하여 16개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 4개의 금속전환체를 적용할 경우에 대한 해석모델을 구성하였다. 금속전환체는 사각형 캐니스터 및 육각형 캐니스터 두가지 조건을 고려하였다. 사각형 캐니스터인 경우는 PWR 핵연료 모델과 동일한 모델을 사용하여 붕괴열만 2배로 증가시키는 조건으로 하였다. 육각형 캐니스터의 경우는 용기 본체는 사각형 캐니스터 모델과 동일하며, 그림 3과 같이 수송용기 내부에 육각형 캐니스터를 고려하였다. 육각형 캐니스터는 금속 연료봉이 삼각형 배열을 갖는 연료봉 밀집화(rod consolidation) 형태의 구조이며, 표 4와 같이 직경 13.5 mm, 길이 4 m의 금속 연료봉 169개로 구성된다. 그림 4는 PWR 핵연료 및 사각형 금속전환체에 대한 Fluent 해석모델로서 1/4 단면모델로 구성되며, 핵연료집합체를 균질화시킨 모델을 사용하여 열전도만을 고려하였다. 그림 5는 육각형 캐니스터에 대한 Fluent 해석모델을 나타내고 있다. 육각형 캐니스터 해석에서는 수송용기 내부 cavity에 공기를 채우는 경우와 불활성 기체인 헬륨을 채우는 두가지 조건을 고려하였다.

열해석을 위한 해석조건으로는 범규에서 규정하고 있는 정상수송조건, 즉, 핵연료로부터 붕괴열이 최대이고 주변온도가  $38^\circ\text{C}$ 이고 태양열유속이 최대인 고온조건을 적용하였다. 핵연

료로부터 붕괴열은 연소도 35,000 MWD/MTU, 냉각기간 10년인 PWR 사용후핵연료를 기준으로 하여 PWR 핵연료집합체 4개에서의 붕괴열을 2,208 W로 고려하였다. 또한, 4개 급속 전환체의 붕괴열은 PWR 사용후핵연료의 2배인 4,416 W로 고려하였다.

Table 4. Description of Hexagonal Canister for Metalized Fuel

Items	Description
Loading Capacity	4 PWR ass'y / canister
Rod Array	consolidated 169 rods
Rod Diameter	13.5 mm
Rod Pitch	14.0 mm
Length	4 m
Decay Heat	1,104 W / canister
Canister	10 mm(stainless steel)
Inside Canister	helium / air

#### 4. 해석결과 및 고찰

Fluent 코드를 이용한 수송용기 열해석에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 GA-4 수송용기의 보고서에 제시된 해석조건과 동일한 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 4의 해석모델을 이용하여 고온조건에 대하여 해석을 수행하였으며, 표 5에는 열해석 결과와 GA-4 수송용기 보고서에서 제시한 결과를 비교하여 나타내고 있다. 용기 본체의 온도는 1~2 이내의 차이로 두 가지 결과가 서로 잘 일치하였다. 또한, 핵연료의 온도는 Fluent 해석결과가 약 5℃ 정도 높게 나타났으나 전체적으로 만족스러울 정도로 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 해석에서 적용한 해석모델, 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다.

Table 5. Comparison of Temperatures between the Fluent Analysis and Reference Value

Location	Maximum temperature (℃)	
	Fluent analysis	Reference value (P-SAR)
Fuel rod	191	186
Inner cavity	156	153
Fuel separator structure	144	143
Fuel cavity liner	95	93
Depleted uranium	83	82
Steel body	77	77
Neutron shielding	76	75
Cask surface	62	61
Ambient	38	

PWR 핵연료집합체 4개의 운반용량을 갖는 GA-4 수송용기에 16개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 금속저장체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. 해석모델은 수송용기 내부에 사각형 캐니스터 금속전환체 및 육각형 캐니스터 전환체를 장전하는 두가지 조건으로 하였으며, 사각형 캐니스터의 경우는 PWR 핵연료집합체 모델과 동일한 모델을 사용하여 핵연료로부터의 붕괴열만 2배로 증가시켰다.

표 6은 PWR 핵연료집합체 및 사각형 금속전환체를 고려할 경우의 온도를 비교하여 나타내고 있다. PWR 핵연료집합체의 active length는 3.66 m이고 금속전환체의 경우에는 연료 길이를 3.66 m와 4.0 m 두 가지 조건을 고려하였다. 핵연료봉의 최고온도는 PWR 핵연료집합체의 경우 191 °C에 비하여 금속전환체를 적용할 경우에는 붕괴열이 2배로 증가하여 연료봉 온도가 각각 269 °C, 283 °C까지 상승하는 것으로 나타났다. GA-4 수송용기의 핵연료 장전통 길이가 약 4.2 m 이므로 금속전환체를 적용할 경우에는 연료 길이를 4 m까지 증대시킬 수 있을 것으로 판단되며, GA-4 수송용기에 사각형 캐니스터를 고려할 경우 연료봉의 최고온도는 약 269 °C로 예측되었다. 그림 6은 사각형 금속전환체에 대한 온도분포를 나타내고 있다.

Table 6. Cask Temperatures for the PWR and Metalized Fuels (Square canister)

Location	Maximum temperature (°C)		
	PWR fuel	Metalized fuel	
		L = 3.66 m	L = 4 m
Fuel rod	191	283	269
Inner cavity	156	244	230
Fuel separator structure	144	229	214
Fuel cavity liner	95	142	134
Depleted uranium	83	120	114
Steel body	79	107	102
Neutron shielding	77	105	99
Cask surface	62	78	75
Ambient	38		

\* L : fuel length

그림 5의 해석모델을 이용하여 육각형 캐니스터 금속전환체에 대한 온도분포를 계산하였으며, 그림 7은 온도분포를 나타내고 있다. 표 7에는 사각형 및 육각형 캐니스터에 대한 온도를 비교하여 나타내었다. 두 가지 경우에 대한 해석조건에서 내부 캐니스터를 제외한 열원 및 용기의 재료 및 치수 그리고 외부온도조건 등이 동일한 조건이므로 용기 본체의 온도는 거의 같게 나타났다. 내부 cavity에 공기를 채울 경우 연료봉 최고온도는 육각형 캐니스터의 경우 212 °C로서 사각형 캐니스터의 경우에 비하여 50 °C 이상 낮게 나타났다. 이것은 육각 캐니스터의 경우 연료봉이 밀집되어 있어 내부 공간이 사각 캐니스터보다 훨씬 작음으로써 열전달이 잘되어 나타난 결과이다. 따라서 건식 수송 또는 저장시 연료봉의 온도를 낮추기 위해서는 내부 cavity의 체적을 작게 하는 연료봉 밀집화 (rod consolidation) 방식이

열 안전성 측면에서 더 유리한 것으로 분석되었다.

육각형 캐니스터 모델에서 용기 내부 cavity에 헬륨 가스를 충전할 경우 연료봉의 온도는 162 °C로 공기를 채울 경우의 212 °C에 비하여 훨씬 낮게 나타났다. 이것은 헬륨의 열전도율이 공기에 비하여 약 5배정도 커서 열전달이 잘되어 나타난 결과이다. GA-4 수송용기에 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우 연료봉의 온도가 191 °C인데 비하여 2배의 냉각부하를 갖는 육각형 캐니스터 금속전환체를 적용할 경우에는 162 °C로 더 낮게 나타났다.

Table 7. Cask Temperatures of Square and Hexagonal Canisters for Metalized Fuels

Location	Maximum temperature (°C)		
	Square canister (air cavity)	Hexagonal canister	
		Air	Helium
Fuel rod	269	212	162
Canister	-	150	148
Depleted uranium	114	116	116
Steel body	102	103	103
Neutron shielding	99	100	100
Cask surface	75	75	75
Ambient	38		

## 5. 결 론

본 연구에서는 4개의 PWR 사용후핵연료 집합체를 운반할 수 있는 GA-4 수송용기에 금속전환체를 적용할 경우에 대한 열해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존의 PWR 핵연료 수송용기에 대한 열해석 결과 용기의 안전성분석보고서에 제시된 온도 값과 서로 잘 일치하였으며, 따라서 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다.
- 2) PWR 핵연료 수송용기에 4배의 운반용량, 즉 2배의 냉각부하를 갖는 금속전환체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다.
- 3) 수송용기 내부 cavity에 공기를 채울 경우 연료봉 온도는 사각형 및 육각형 캐니스터 금속전환체를 적용할 경우 각각 269 °C, 212 °C로 나타났다. 따라서 연료봉 밀집화 방식의 육각형 캐니스터 전환체가 열 안전성 측면뿐만 아니라 저장밀도를 높임으로써 경제성 측면에서도 유리한 것으로 나타났다.
- 4) 육각형 캐니스터 금속전환체를 적용할 경우 수송용기 내부 cavity에 헬륨 가스를 충전하면 연료봉 온도가 기존의 PWR 핵연료 집합체를 고려할 경우보다 오히려 낮게 나타났다. 따라서 PWR 핵연료 수송용기에 4배의 운반용량을 갖는 금속전환체의 적용이 가능할 것으로 분석되었다.



## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 참고문헌

- [1] IAEA Safety Series No.ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," 1996.
- [2] 과학기술부, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정," 과학기술부고시 제 96-38호, 1996.
- [3] 노성기 외, "사용후핵연료 차세대관리 공정개발," 한국원자력연구소, KAERI/TR-994/98, 1998.
- [4] "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5," Fluent Inc., 1998.
- [5] J. P. Holman, "Heat Transfer," International Student Edition 5th Ed. (1985).
- [6] Kern D.Q., "Process Heat Transfer," McGraw Hill Kogakusha, 1980.
- [7] GA-A19862, "GA-4/GA-9 Legal Weight Truck from Reactor Spent Fuel Shipping Casks," General Atomics, September 1989.

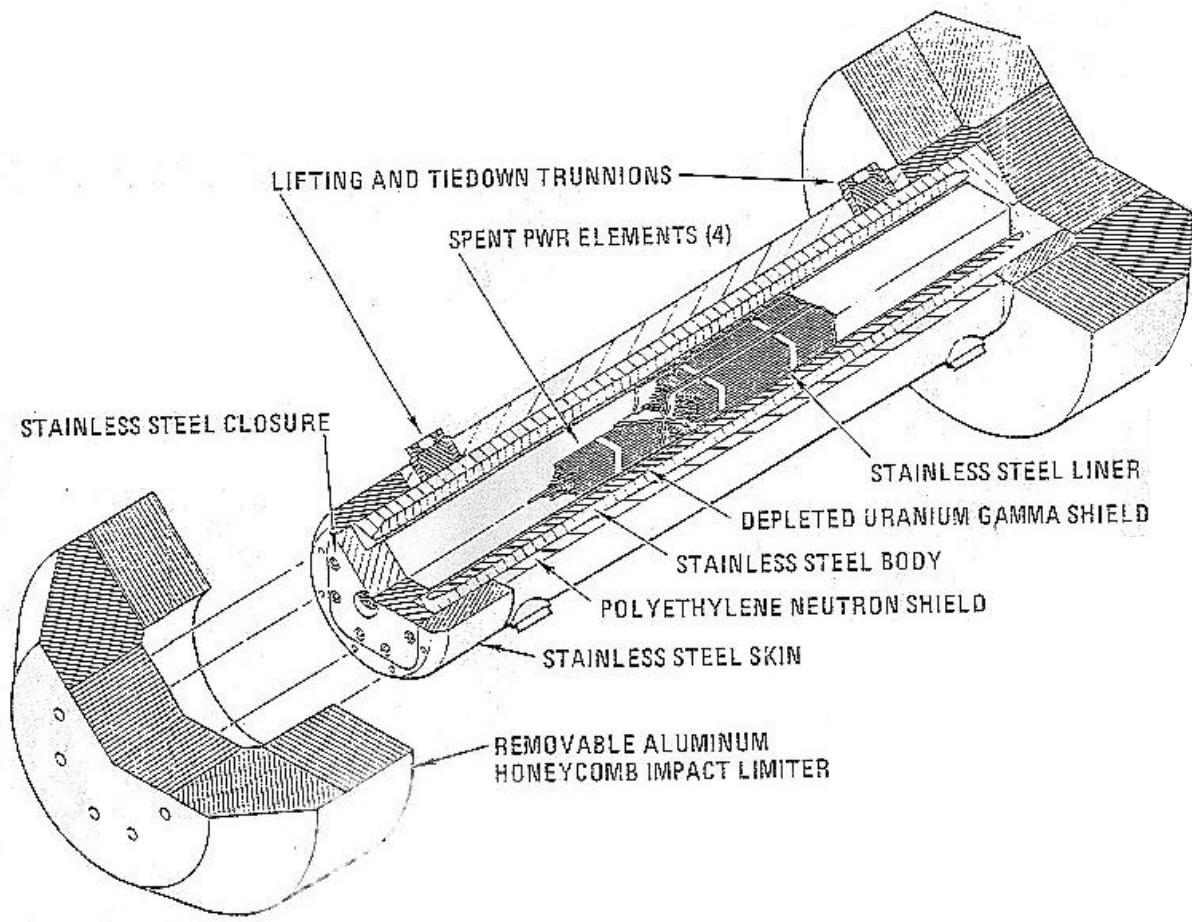


Fig. 1. Overview of GA-4 Shipping Cask.

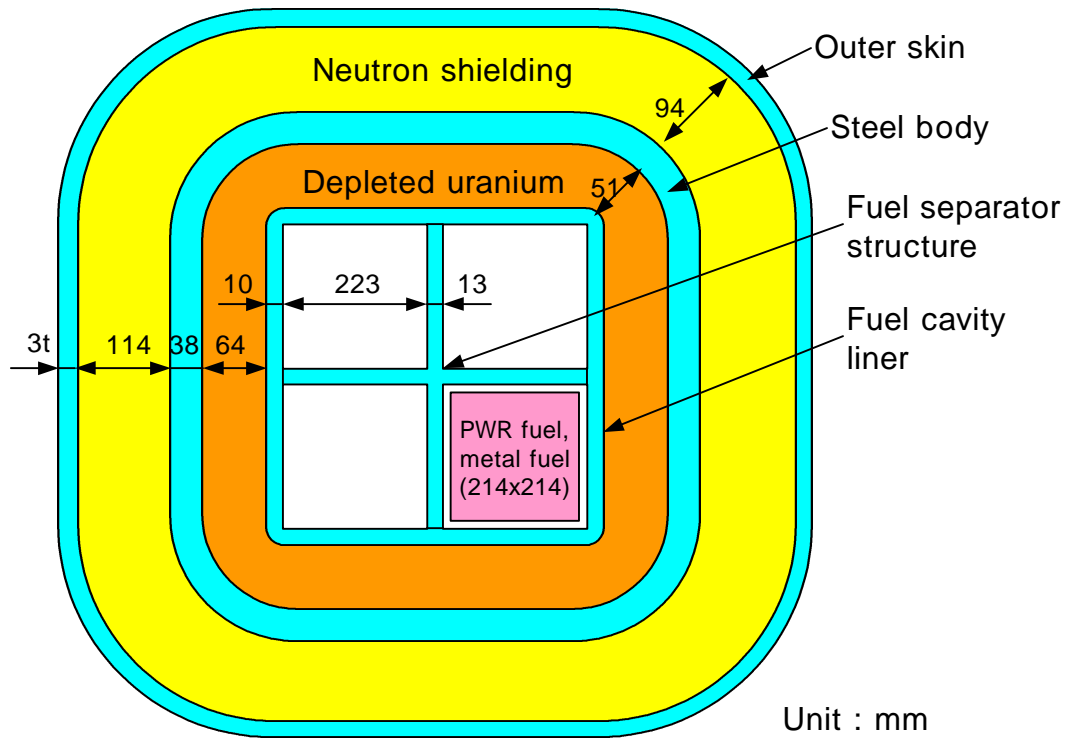


Fig. 2. Cross Section of GA-4 Cask(PWR, square canister).

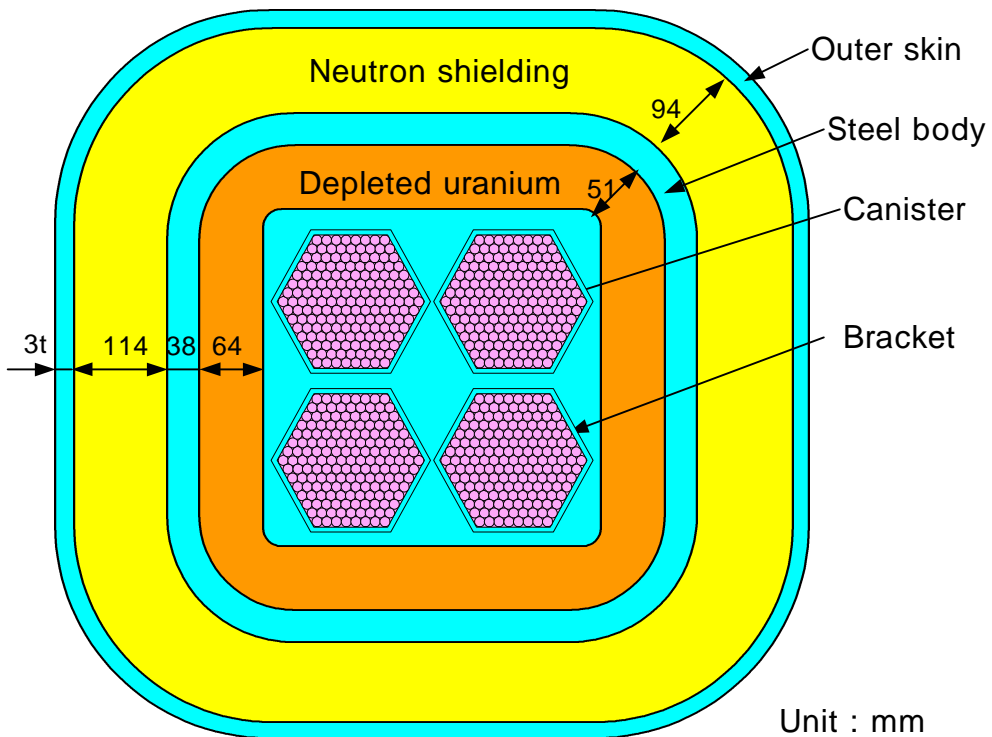


Fig. 3. Cross Section of GA-4 Cask(hexagonal canister).

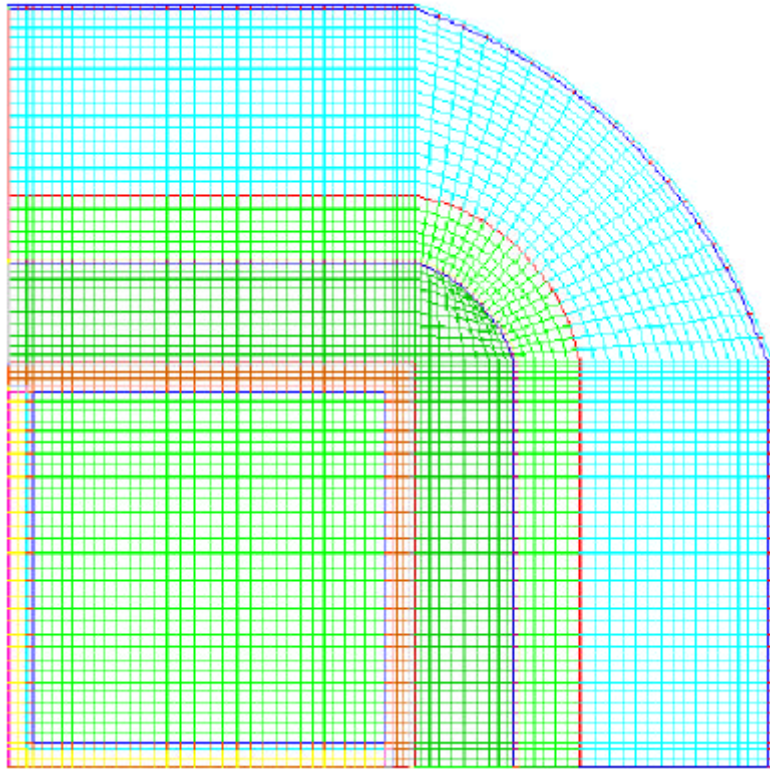


Fig. 4. Analysis Model for Square Canister.

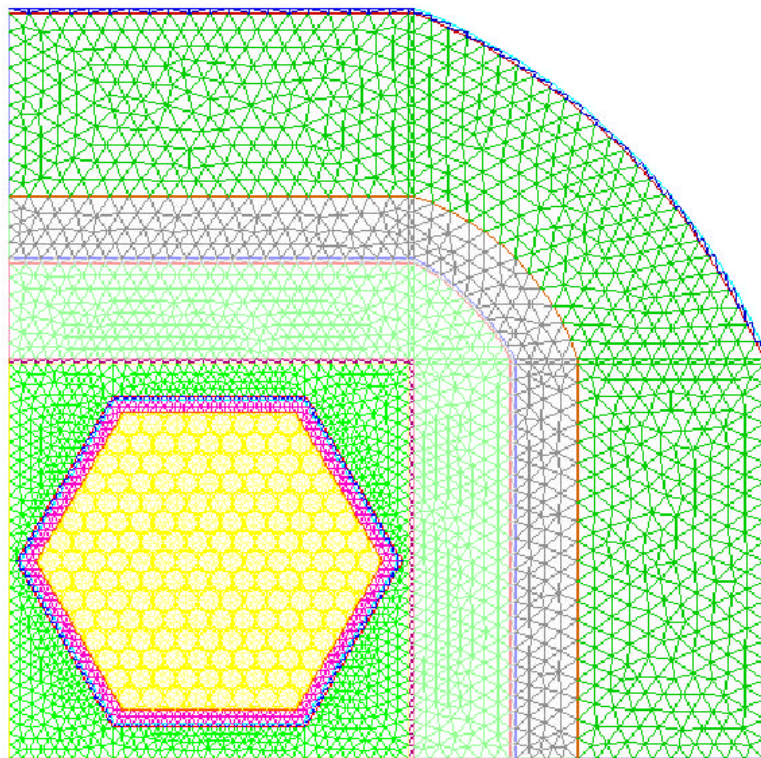


Fig. 5. Analysis Model for Hexagonal Canister.

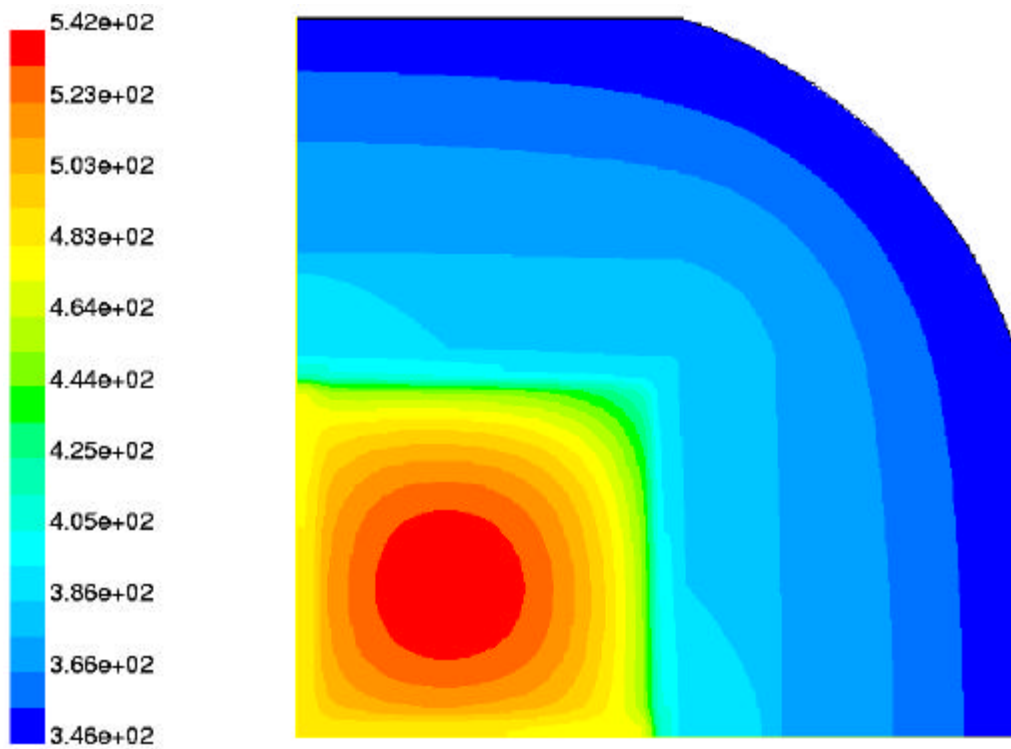


Fig. 6. Contours of Cask Temperature for Square Canister(K).

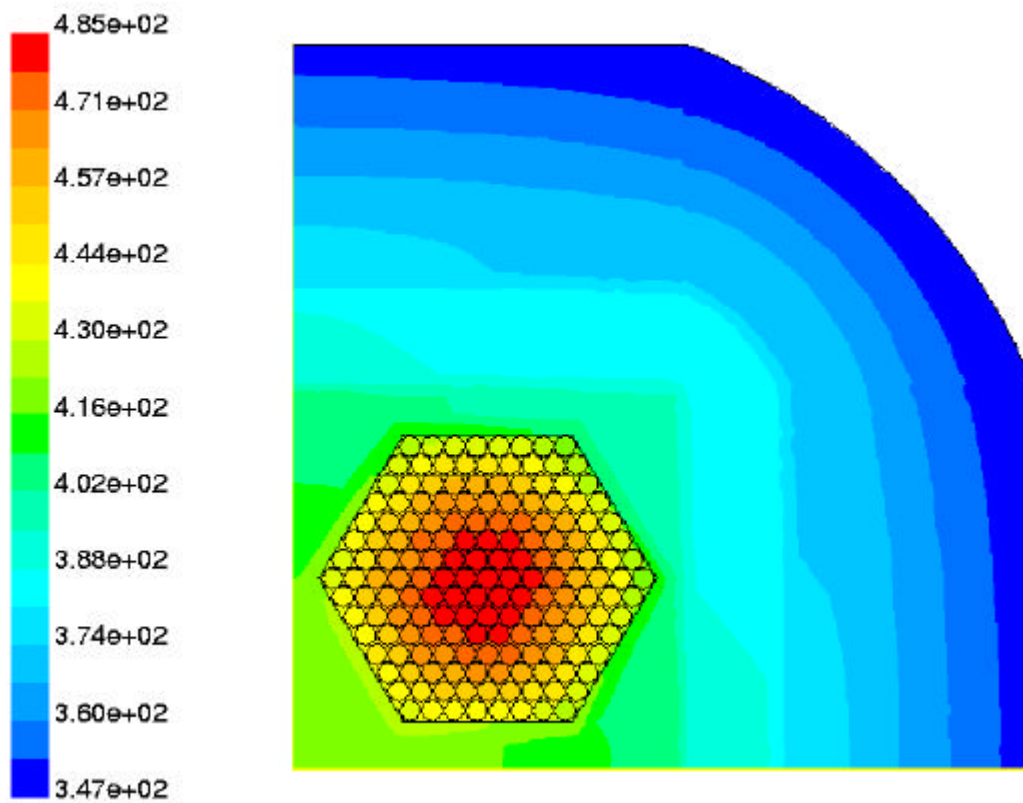


Fig. 7. Contours of Cask Temperature for Hexagonal Canister(K).