

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사용후핵연료 금속전환체 저장시스템 열전달해석 평가

Heat Transfer Analysis of Conditioned Spent Fuel Storage System

이주찬, 방경식, 신희성, 서기석, 김호동

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

사용후핵연료 금속전환체의 건식저장을 위한 저장용기 개념을 설정하고 열전달해석을 수행하였다. 금속전환체의 단위저장 캐니스터의 용량은 PWR 핵연료집합체 1개와 같도록 하였고 열전달 효율을 증대시키기 위하여 육각형 형태의 알루미늄 재질을 사용하였다. 저장용기는 7개의 바스켓을 가지며, 28개의 단위저장 캐니스터를 저장할 수 있도록 하였다. 금속저장용기에 대한 열전달해석 결과 정상조건에서 연료봉의 최고온도는 139 °C로 계산되었고 화재사고조건에서는 168 °C로 계산되었다. 이들 온도는 금속전환체의 저장 허용온도로 설정된 150 °C 및 200 °C보다 낮게 나타나 저장용기의 열적 건전성이 입증되었다.

Abstract

Conceptual assessment and heat transfer analysis of storage cask have been carried out for storage of conditioned spent fuel. The unit storage canister of the conditioned spent fuel was considered equal to one spent PWR fuel assembly. In order to increase the cooling efficiency, the storage canister was designed to a hexagon shape and the cavity of the storage unit was filled with aluminum. A metal storage cask has 7 baskets that can load 28 unit storage canisters. Thermal analyses of metal cask were performed for application conditioned spent fuel. The maximum temperatures of the conditioned spent fuel were calculated to be 139 °C and 168 °C under normal and accident conditions. These temperatures were lower than the allowable values for dry storage of conditioned spent fuel.

1. 서 론

원자력의 발전과 더불어 필연적으로 발생하는 사용후핵연료는 직접처분 대상으로 간주하면 고준위 폐기물이지만 효과적으로 재순환할 경우에는 귀중한 미래의 에너지 자원이 될 수 있다. 따라서 원자력발전의 경제성 제고, 에너지 자원 활용의 극대화 및 환경 친화성 증진 측면에서 이러한 사용후핵연료의 효율적인 관리·이용 기술의 개발은 매우 중요하다. 한국원자력연구소에서는 사용후핵연료의 고온 용융염 금속전환공정을 근간으로 하는 사용후핵연료 차세대관리공정에 관한 연구를 수행하고 있으며[1], 이를 통하여 급증하고 있는 사용후핵연료를 효율적으로 관리할 수 있는 종합적이고 체계적인 방안을 제시할 뿐만 아니라 독자적인 핵비확산성 핵연료주기 기술을 구축하고자 한다. 미래 지향적인 사용후핵연료의 관리 방안은 사용후핵연료의 관리에 따른 환경 친화성, 경제성, 핵확산 저항성을 제고함과 동시에 자원의 활용도를 극대화하는 것이다. 세라믹 형태의 PWR 사용후핵연료를 금속전환할 경우 PWR 핵연료와 비교하여 부피 및 발열량, 방사능을 약 1/4로 감소되는 특성을 갖는다. 금속전환체의 특성을 고려하여 기존 사용후핵연료 저장방식에 금속전환체를 적용할 경우, 동일한 저장부피에 최대 4배의 저장용량 증대 효과를 갖지만 내부 핵연료 중량 증가에 따른 구조적 건전성 평가, 금속연료의 저장 허용온도 유지를 위한 열안전성 평가, 연료봉 배열에 따른 핵임계 안전성 평가 및 방사선차폐 안전성 평가 등이 요구된다.

사용후핵연료 저장방식은 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. 본 연구에서는 금속용기 저장방식에 대한 금속전환체 저장개념을 설정하고 열전달 안전성을 분석하였다.

2. 금속전환체 저장용기 모델

사용후핵연료 금속전환체의 건식저장을 위한 기준핵연료는 연소도 48,000 MWD/MTU, 초기 농축도 4.5 wt.%, 냉각기간 10년인 PWR 핵연료를 기준으로 하였다. 표 1은 설계기준 핵연료를 금속전환할 경우 PWR 핵연료 및 금속전환체의 방

사능량 및 붕괴열을 비교하여 나타내었다. 냉각기간이 10년인 PWR 핵연료를 금속 전환할 경우 방사능이 약 1/5, 발열량이 약 1/4 이하로 감소함을 알 수 있다.

Table 1. Radioactivity and Decay Heat for PWR and Conditioned Spent Fuels

	Spent PWR fuel	Conditioned spent fuel	Rate of decrease
Radioactivity	5.461E+05 Ci/tHM	1.128E+05 Ci/tHM	20.7 %
Decay heat	1,724E+03 W/tHM	4.53E+02 W/tHM	26.3 %

PWR 핵연료를 금속전환할 경우 방사능 및 발열량 뿐만 아니라 관리 부피를 줄일 수 있는 이점이 있으며, 금속전환체 체적을 최소화하기 위하여 연료봉 직경을 가능한 크게 하여 밀집 저장하도록 하였다. 연료봉 직경이 크고 및 길이가 길수록 유리하지만 핫셀 내부에서 취급여건을 고려하여 950 mm로 하였으며, 연료봉 직경은 68 mm로 결정하였다.

금속전환체 단위저장 캐니스터는 열전달 효율을 증대시키고 중량을 최소화시키기 위하여 육각형 형태의 알루미늄 봉에 구멍을 뚫어 금속 연료봉을 끼워 넣는 구조로 하였다. 이와 같이 연료봉을 장전할 경우 열전달 효율 측면에서 유리하며, 캐니스터의 구조적 건전성 측면에서도 이점이 있다. 그림 1은 단위저장 캐니스터를 나타내고 있으며, 육각형 알루미늄 봉에 직경 69 mm 깊이 955 mm의 구멍을 뚫어 7개의 연료봉을 장전할 수 있다. 연료봉이 끼워지는 구멍 사이의 간격을 5 mm로 고려하여 체적 및 중량을 최소화하였다. 단위저장 캐니스터 내부에는 불활성 기체인 헬륨 가스를 채우며, 뚜껑은 용접방식으로 체결하여 캐니스터 자체가 1차 격납 경계를 갖도록 하였다.

표 2는 단위저장 캐니스터의 개요이며, 캐니스터의 용량은 PWR 핵연료집합체 1개에 상당하는 금속전환체가 장전된다. 금속 연료봉 1개의 중량은 약 66 kg이고 7개의 연료봉이 장전된 단위저장 콘테이너의 중량은 약 490 kg이다.

Table 2. Description of Fuel Rod and Unit Storage Canister

Fuel rod	
- Diameter	68 mm
- Length	950 mm
- Weight	65.7 kg
Hexagonal canister	
- Width	120 mm
- Total length	1,000 mm
- Hole	Φ69 mm x 955 mm L
- Distance (holes)	5 mm
- Rod pitch	74 mm
- Weight (loaded)	490 kg
- Storage capacity	7 rods (1 PWR) / canister

금속 저장용기는 사용후핵연료를 금속제 용기에 장전하여 저장하는 방식으로 최근에는 수송 저장 겸용용기 방식으로 개발되고 있으며, 저장용량은 24 PWR 핵연료집합체가 주류를 이룬다. PWR 사용후핵연료를 금속전환할 경우 방사능, 발열량 및 체적이 약 1/4로 감소되지만 금속전환체의 저장 허용온도가 PWR 연료에 비하여 훨씬 낮기 때문에 저장용량 4배 증대는 현실적으로 불가능하며, 1개의 저장용기에 28다발의 PWR 핵연료에 상당하는 금속전환체 저장용기 모델을 설정하였다.

그림 2 및 그림 3은 저장용기의 단면을 나타내며, 금속전환체를 담은 저장 캐니스터와 용기 본체로 구성된다. 저장 캐니스터는 fuel basket, base plate, canister shell, 및 뚜껑 등으로 구성된다. 재질은 스테인레스강이며, 뚜껑을 외부 셀에 용접하여 밀봉을 유지하도록 하였다. 저장 캐니스터 내부에는 금속전환체 단위저장 캐니스터를 장전할 수 있는 7개의 바스켓이 설치된다. 바스켓은 육각형 바스켓을 밀집 배열하여 체적을 최소화 할 수 있도록 하였다. 그림 2와 같이 저장용기의 핵연료 바스켓에 금속전환체 단위저장 캐니스터 4개를 4단으로 적재하여 1개의 바스켓에 4개의 PWR 핵연료집합체를 상당하는 금속전환체를 저장할 수 있다.

용기 본체는 구조재 및 감마선 차폐체 역할을 담당하는 단조강, 중성자 차폐재인 NS-4-FR과 스테인레스강 외부 셸로 구성된다. 중성자 차폐체인 NS-4-FR의 열전달 특성이 좋지 않아 중성자 차폐체 층에 탄소강으로 된 전열판을 설치하여 열전달이 잘 되도록 하였다. 격납방식은 용기 본체의 뚜껑 및 용기 내부에 장전되는 캐니스터가 격납경계를 갖는 이중 격납 구조를 갖도록 하였다. 표 3은 저장용기의 개요를 나타내며, 용기의 외형치수는 직경 1,320 mm, 길이 4,730 mm이고 금속전환체

장전시 총 중량은 약 44톤이다. 표 4는 금속전환체 저장용기와 기존의 PWR 저장용기의 치수 및 중량을 비교 분석하였다. 비교대상 용기는 PWR 핵연료를 저장할 수 있는 대표적인 금속제 저장용기인 HI-STAR 100[2] 및 NAC-STC[3] 저장용기를 기준으로 하였다. 24, 26 다발 PWR 핵연료 저장용기의 중량이 약 100 톤을 상회하는데 비하여 28다발의 PWR 핵연료에 상당하는 금속전환체 저장용기의 중량이 약 44톤으로 절반 이하로 줄일 수 있었다. 또한, 금속전환체 저장용기의 직경을 기존의 PWR 핵연료 저장용기에 비하여 약 절반으로 줄일 수 있으므로 저장효율성 및 경제성 측면에서 큰 이점이 있는 것으로 분석되었다.

Table 3. Description of Storage Cask for Conditioned Spent Fuel

Item	Description
Capacity	28 conditioned spent fuel (28 PWR fuel)
Dimension	- Cask : O.D. : 1,320 mm x 4,730 mm L - Inner shell : 170 mm - Neutron shield : 90 mm - Outer shell : 15 mm - Cooling fins : 10 mm - Canister : OD. 760 mm x 4,210 mm L (25 mm T) - Fuel basket : 9 mm T
Material	- Cask body : carbon steel, NS-4-FR, stainless steel - Canister(basket) : stainless steel
Weight	- Storage cask : 44 tons (loaded) - Storage canister : 17 tons (loaded)
Cooling type	Dry type (inert gas : helium)
Decay heat	5.835 kW

Table 4. Comparison of Storage Cask

Item	Conditioned spent fuel cask	PWR fuel cask	
		HI-STAR 100	NAC-STC
Storage capacity	28 PWR fuels	24 PWR fuels	26 PWR fuels
Dimension			
- Outer diameter	1,320 mm	2,438 mm	2,516 mm
- Length	4,730 mm	5,159 mm	4,902 mm
Weight (loaded)	44 tons	105 tons	107 tons

3. 열전달해석 모델링

금속전환체 저장용기의 정상조건, 비정상조건 및 화재사고조건에 대한 열전달해석을 수행하였다. 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 5는 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.

Table 5. Summary of Thermal Conductivities of Materials

Materials	Thermal Conductivities (W/m-K)		
	93 °C	232 °C	372 °C
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		

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

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

여기서,

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

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 수직상태로 운전되며, 수직원통 형태에서는 다음의 관계식을 따른다.

$$\text{층류영역 } (10^4 < \text{GrPr} < 10^9) : \text{Nu} = 0.59 (\text{Gr Pr})^{1/4} \text{ ----- (3)}$$

$$\text{난류영역 } (\text{GrPr} > 10^9) : \text{Nu} = 0.10 (\text{Gr Pr})^{1/3} \text{ ----- (4)}$$

식 (2)로 부터 저장용기 표면은 난류영역에 속한다. 따라서 식 (1)과 식 (4)를 이용하여 대류열전달 계수를 계산할 수 있으며, 용기 표면온도 및 주변온도에 따른 대류열전달을 계산하였다.

용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

$$q = A\sigma\epsilon(T_s^4 - T_a^4) \text{ ----- (5)}$$

여기서,

q : Heat flow (W)

A : Heat transfer area (m^2)

σ : Stefan-Boltzmann constant ($= 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

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. 저장용기의 외부 표면을 흰색 페인트로 도색하여 방사율을 높이고 태양열 흡수율을 낮추도록 하였다. 흰색 표면에 대한 방사율은 일반적으로 0.8 ~ 0.98[4] 값을 가지며, 열해석에서 방사율은 0.85로 적용하였다. 또한 탄소강 및 스테인레스강 표면에 대한 방사율은 각각 0.66, 0.36으로 고려하였다.

열전달해석에서 열원은 금속전환체의 붕괴열 및 용기 표면에서의 태양복사열로 구분되며, 28개 금속전환체의 총 붕괴열은 10년 냉각된 연료를 기준으로 5.835 kW를 고려하였다. 태양복사열은 10 CFR Part 71에서 규정하고 있는 용기 형상이 곡면일 경우 하루 24시간중 12시간동안 400 W/m^2 의 열유속을 고려하였다. 따라서 정상상태 해석에서는 200 W/m^2 의 태양복사열을 고려하였고 태양열 흡수율은 0.3[5]을 고려하였다.

정상운전조건의 환경온도는 연평균 대기온도를 기준으로 적용하며, 열해석에서는 보수적으로 가정하여 27°C 를 고려하였다. 비정상조건에서는 대기온도를 38°C 로 고려하였으며, 화재사고조건에서는 38°C 의 초기온도를 갖는 정상상태하에서 800°C 화재가 30분 동안 진행된 후 자연냉각되는 조건을 고려하였다.

그림 4는 열해석 모델을 나타내며, 2차원 1/4 단면모델을 사용하였다. 금속전환체 연료봉과 연료봉이 끼워지는 구멍사이에는 0.5 mm의 gap을, 단위저장 캐니스터와

육각형 베스켓 사이에 1 mm의 gap을 고려하였다. 이들 gap의 재질은 helium gas이며, gap에서의 열전도 및 복사열전달을 고려하였다. 저장용기 내부 cavity의 자연 대류에 대한 용기내의 유동이 난류영역으로 확대되며, 난류모델은 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다. 용기 본체의 중성자차폐체 층과 구조재인 셸 사이에 0.5 mm의 air gap을 고려하였다. 용기 표면에서는 대류 및 복사열전달을 고려하였다.

금속전환체의 저장 허용온도 기준이 없어서 금속연료의 일종인 Magnox 연료를 기준으로 금속전환체의 허용온도 기준을 설정하였다. Magnox 연료의 정상운전조건에 대한 저장 허용온도는 CO₂ 분위기에서는 365 °C, 공기 분위기에서는 150 °C로 제시하고 있다[6]. 장기저장 동안 완전한 기밀 유지를 보장할 수 없기 때문에 공기 분위기로 가정하여 저장 허용온도를 설정하며, 정상운전조건에서는 150 °C, 비정상 또는 사고조건에서는 200 °C로 적용하고 있다. 정상운전조건 허용온도 150 °C는 마그네슘 피복관의 부식을 방지하기 위하여 설정된 온도이며, 사고조건 허용온도 200 °C는 피복관이 손상되어 우라늄이 노출될 경우 우라늄의 발화온도(포화 공기분위기 250 °C)를 기준으로 보수적으로 설정된 온도이다[7].

금속전환체는 불활성 기체 분위기 상태로 저장된다면 정상운전조건에서 연료봉의 열적 건전성에는 문제가 없을 것으로 판단되나, 장기저장 기간동안 완전한 기밀이 유지된다고 보장할 수 없다. 따라서 불활성 기체 분위기로 저장할지라도 공기분위기로 가정하여 연료의 저장 허용온도 설정이 필요하다. 공기분위기에서 우라늄의 발화온도가 250 ~ 300 °C이므로 사고조건에 대한 허용온도는 보수적인 관점에서 200 °C로 설정하였다. 정상운전조건 허용온도도 공기분위기로 저장한다고 가정하여 150 °C로 설정하였다.

금속전환체의 단위저장 캐니스터 및 저장 컨테이너를 각각 용접방식으로 밀봉하여 2중 격납 구조를 갖도록 설계하여 정상운전 및 사고조건에서 금속전환체는 불활성 기체 상태로 유지가 가능할 것으로 판단되며, 따라서 금속전환체의 저장 허용온도 기준은 아주 보수적인 관점에서 설정된 온도이다.

4. 열해석 결과 및 토의

표 6은 정상 및 비정상 운전조건에 대한 열해석 결과를 나타내고 있다. 정상조건은 대기온도 27 °C, 비정상조건은 대기온도 38 °C에서 각각 태양열유속이 유입되는 조건이다. 비정상조건은 정상조건에 비하여 저장용기 외부온도가 11 °C 높은 조건이며, 저장용기 내부의 온도는 비정상조건에서 정상조건에 비하여 약 9 ~ 10 °C 정도 높게 나타났다. 금속연료봉의 최고온도는 정상조건에서 139 °C로 허용온도 기준으로 설정된 150 °C 이내로 계산되었으며, 비정상조건하에서 허용온도인 200 °C 이내로 계산되어 정상 및 비정상 조건하에서 연료봉의 열적 건전성이 충분히 유지

될 것으로 판단된다.

Table 6. Maximum Temperatures under Normal and Off-Normal Conditions

Location	Calculated temperature (°C)	
	Normal	Off normal
Fuel rod	139	148
Fuel basket	138	147
Canister	96	105
Inner shell	80	90
Neutron shield	72	82
Cask outer surface	58	67

그림 5는 정상조건에 대한 온도분포를 나타내며, 금속전환체의 단위저장 캐니스터 재질을 열전도율이 우수한 알루미늄 재질을 사용하고 바스켓 및 단위저장 캐니스터 내부 공간을 최소화함으로써 육각형 바스켓 내부에서의 온도편차가 거의 발생하지 않았다.

표 7 및 그림 6은 800 °C, 30분 화재사고조건에 대한 열해석 결과를 나타내고 있다. 800 °C 화재사고조건에 대한 초기조건은 주변온도 38 °C의 비정상조건을 고려하였다. 저장용기 표면은 화염과 직접 접촉하여 화재가 진행되면서 700 °C 이상까지 급속히 상승한 후 30분 화재가 끝나면서 급속히 냉각됨을 알 수 있다. 금속전환체 연료봉의 온도는 30분 화재가 끝난 후 약 20시간 이후에 최고 168 °C로 초기온도에 비하여 20 °C 정도 온도가 상승하였다. 이 온도는 금속전환체의 사고조건하에서 저장 허용온도로 설정한 200 °C 이내이므로 800 °C 화재사고조건시 금속전환체 연료봉의 열적 건전성이 충분히 유지됨을 알 수 있다. 이상의 결과로 보아 열안전성 측면에서 저장용기에 금속전환체 단위저장 캐니스터 28개의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 7. Maximum Temperatures under Fire Accident Condition

Location	Calculated temperatures (°C)												
	Initial	Transient time (h)											Max.
		0.25	0.5	0.75	1.0	2	4	6	9	12	18	24	
Fuel rod	148	148	148	148	148	148	152	157	163	167	168	168	168
Fuel basket	147	147	147	147	147	147	152	157	162	166	167	167	167
Canister	105	105	105	105	107	119	133	135	134	131	127	125	135
Inner shell	90	90	92	98	104	122	129	128	123	119	112	109	129
Neutron shield(core)	77	163	192	221	215	166	128	114	105	101	95	92	221
Cask outer surface	67	625	705	336	241	147	108	94	87	84	80	78	705

5. 결 론

금속전환체의 건식저장을 위하여 금속용기에 대한 저장개념을 설정하였으며, 저장용기에 대한 열안전성을 분석하였다. 금속전환체 체적을 최소화하여 열전달 및 저장효율성을 향상시키기 위하여 연료봉 직경은 68 mm, 길이는 950 mm로 설정하였고 육각형 형태의 알루미늄 봉에 구멍을 뚫어 금속 연료봉을 끼워 넣는 구조로 하였다. 1개의 저장용기에 28다발의 PWR 핵연료에 해당하는 금속전환체 저장용기 모델을 설정하였으며, 저장 캐니스터 내부에는 7개의 바스켓을 밀집 배열하여 체적을 최소화 하였고 1개의 바스켓에 금속전환체 단위저장 캐니스터 4개를 4단으로 적재하여 총 28개의 금속전환체 단위저장 캐니스터를 저장할 수 있도록 하였다. 금속전환체 저장용기는 PWR 핵연료 저장용기에 비하여 저장용량을 증대시켰음에도 불구하고 체적 및 중량이 약 절반이하로 감소하여 저장효율성 및 경제성 측면에서 큰 이점이 있는 것으로 분석되었다. 금속전환체의 저장 허용온도를 정상조건에서는 150 °C, 비정상/사고조건에서는 200 °C로 설정하였다. 열해석 결과 금속용기의 경우 연료봉의 최고온도는 정상조건에서 139 °C로 허용온도 기준으로 설정된 150 °C 이내로 계산되었으며, 비정상 또는 화재사조건하에서도 허용온도인 200 °C 이내로 계산되어 연료봉의 열적 건전성이 충분히 유지되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Y.J. Shin et al., Development of Advanced Spent Fuel Management Process, KAERI/RR-2128/00, KAERI (2000).
- [2] Topical Safety Analysis Report for the HI-STAR 100 Cask System, Holtec Report HI-941184, Rev.5, NRC Docket No. 72-1008, September, (1996).
- [3] Topical Safety Analysis Report for the NAC Storable Transport Cask for Use at an Independent Spent Fuel Storage Installation, Rev. 3A, NAC International (1995).
- [4] Kern D.Q., Process Heat Transfer, McGraw Hill Kogakusha (1980).
- [5] GA-A19862, GA-4/GA-9 Legal Weight Truck from Reactor Spent Fuel Shipping Casks, General Atomics (1989).
- [6] Schneider K. J. et al., Foreign Experience in Intended Dry Storage of Spent Nuclear Fuel, PNL-SA-20430, PNL (1992).
- [7] Maxwell E. O. and D. Deacon, Operating Experience of Vault Type Dry Storage and Its Relevance to Future Storage Needs, Paper Prepared for the Specialist Workshop on Techniques for Dry Storage of Spent Fuel Elements, Nuclear Energy Agency (1982).

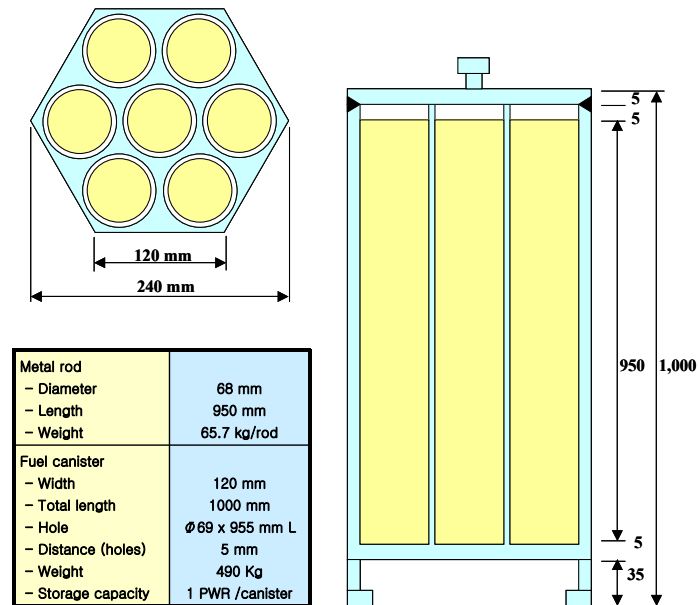


Fig. 1. Unit Storage Canister for Conditioned Spent Fuel.

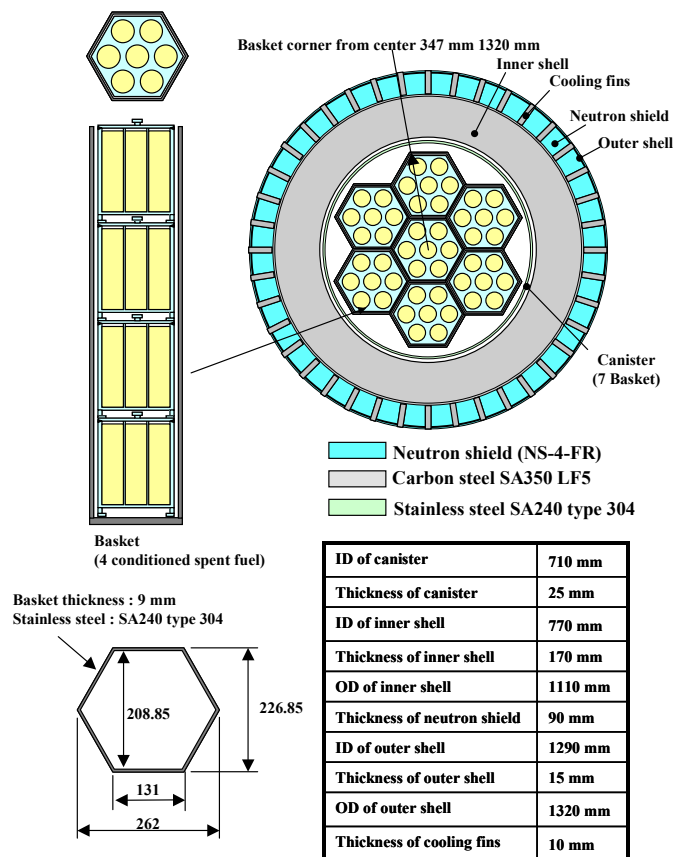


Fig. 2. Cross Section of Metal Cask for Conditioned Spent Fuel.

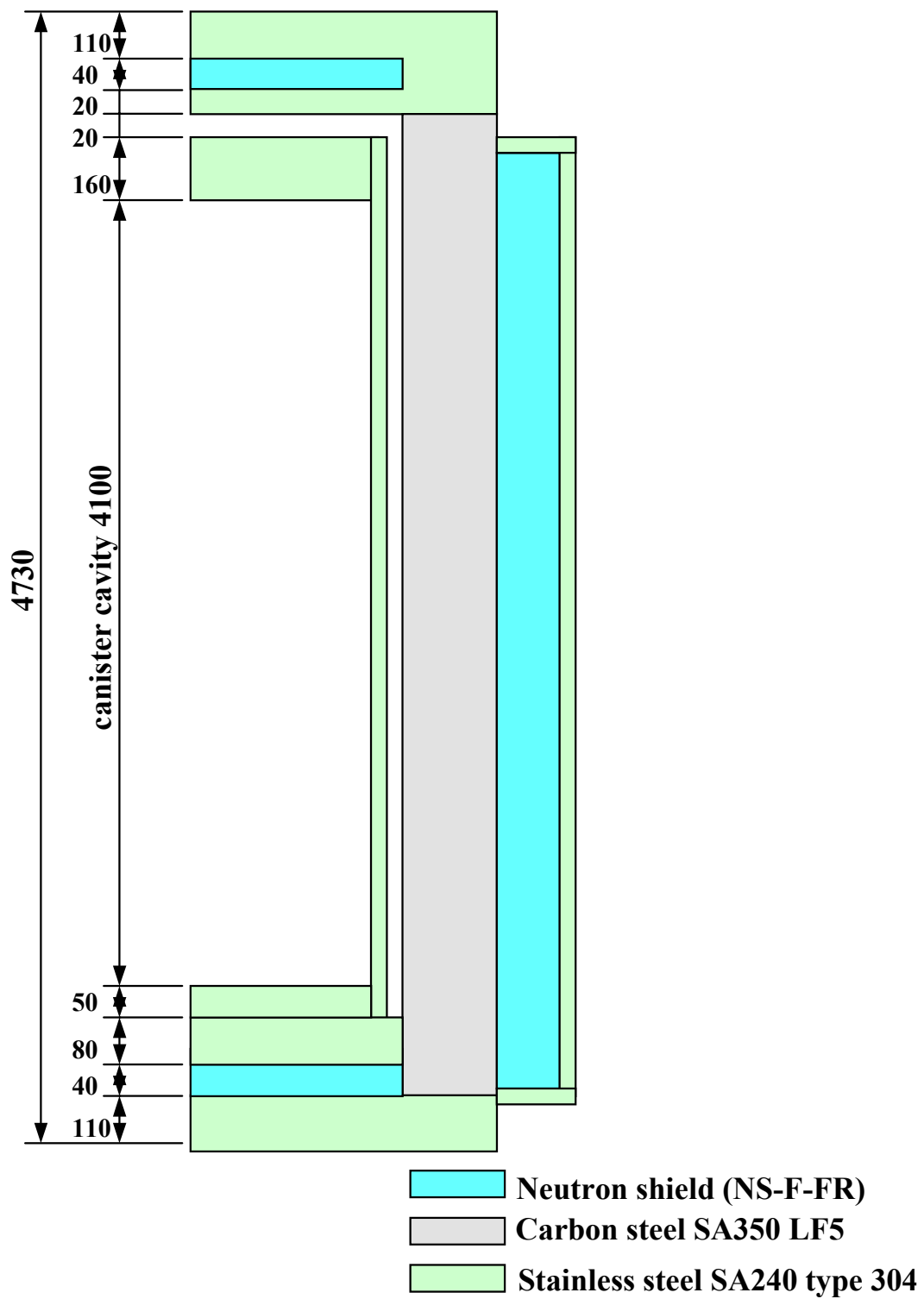


Fig. 3. Vertical Section of Metal Cask.

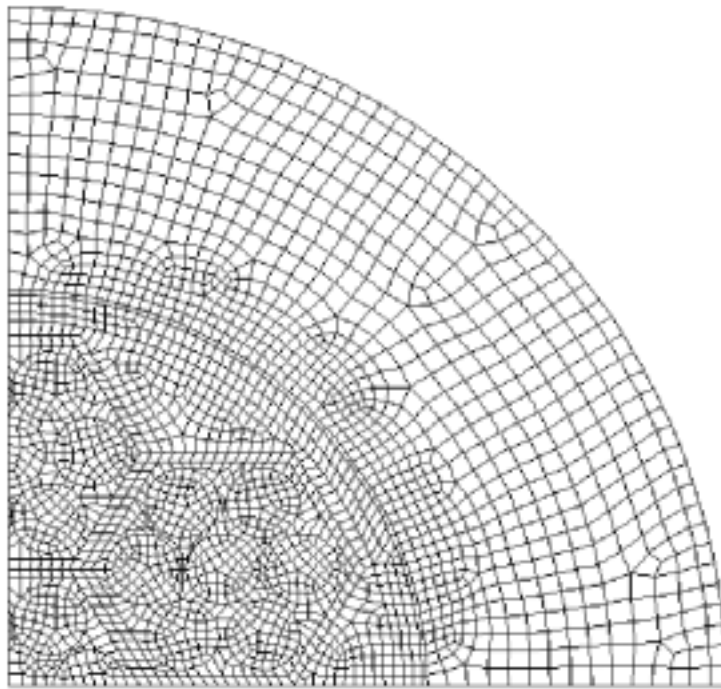


Fig. 4. Thermal Analysis Model for Metal Cask.

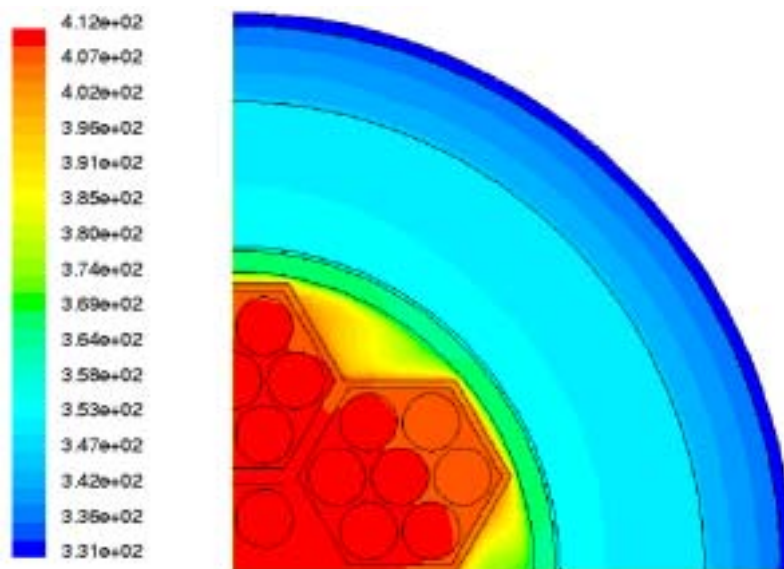


Fig. 5. Temperature Contour for Normal Condition.

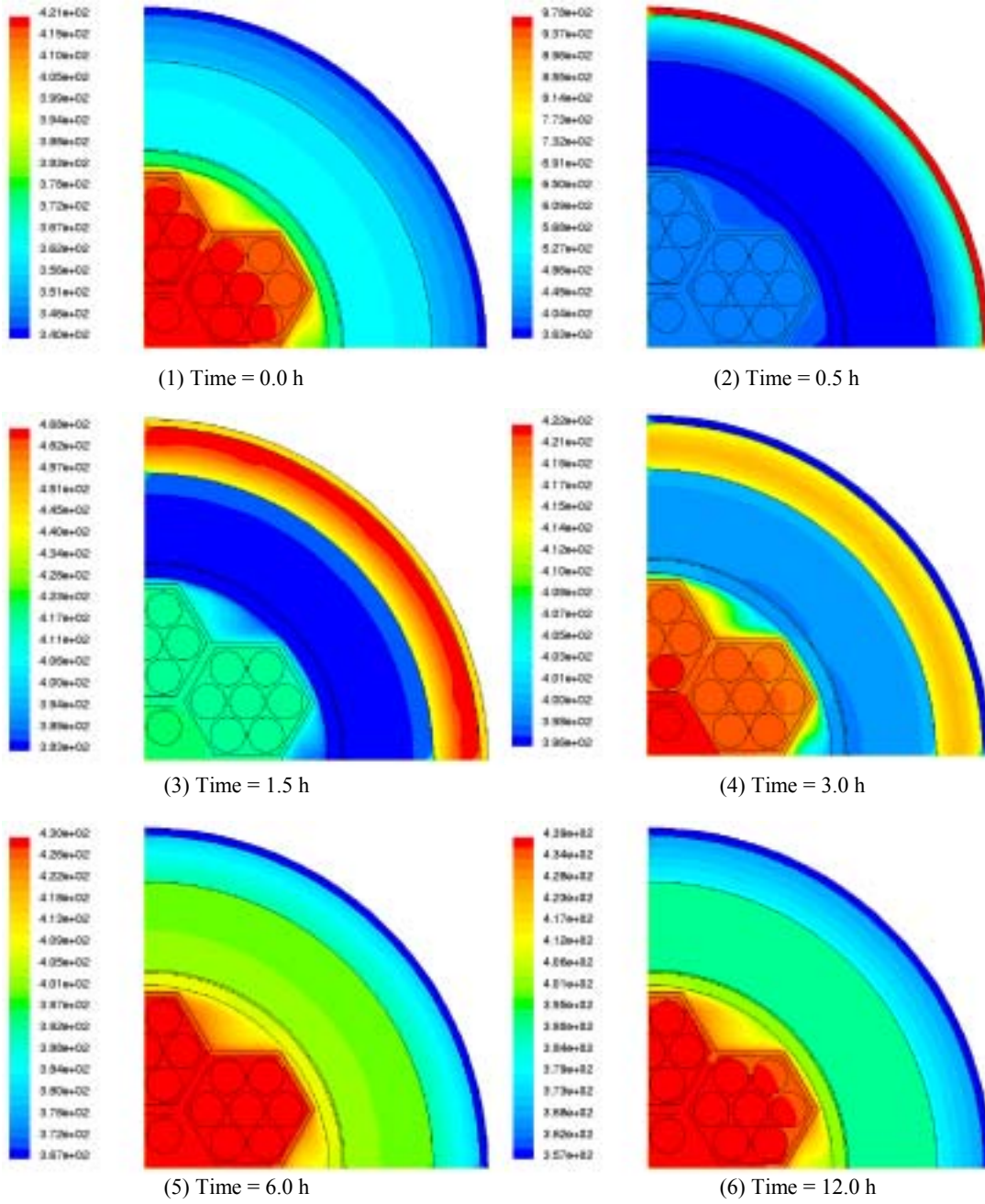


Fig. 6. Temperature Contours under Fire Accident Condition.