

2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

**HI-STAR 100 시스템에 사용후핵연료
금속전환체 적용을 위한 열해석 평가**

**Thermal Analysis of HI-STAR 100 System
for Application of Metalized Spent Fuel**

이주찬, 방경식, 신희성, 서기석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

Fluent 전산코드를 이용하여 PWR 핵연료집합체 24다발을 저장할 수 있는 기존의 HI-STAR 100 저장시스템에 대한 열해석을 수행하였다. 열해석 결과 저장용기의 안전성분석보고서에 제시된 온도와 비교적으로 잘 일치하였으며, 따라서 해석방법 및 절차 그리고 해석결과에 대한 신뢰성이 입증되었다. 또한, 저장용기에 96다발의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 24개의 금속저장체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. 저장용기에 금속전환체를 적용할 경우 금속봉의 최고온도는 냉각기간 5년 및 10년인 사용후핵연료의 경우 각각 396 °C와 266 °C로 계산되었다.

Abstract

Thermal analysis has been carried out for HI-STAR 100 system loaded with 24 spent PWR fuel assemblies using the Fluent computer code. The calculated temperatures were compared with the proven data presented from the safety analysis report of spent fuel storage cask. It has good agreement between the two results, and it is also found that the feasibility of the analysis method and procedure has been confirmed by the results to estimate the temperature for the spent fuel storage cask. And the temperature distribution of storage cask for application of 24 metalized fuels equivalent to 96 PWR fuels has been also calculated. The maximum metal rod temperatures for 24 metalized spent fuel assemblies inside the cask is calculated at 396 °C, 266 °C in the cases of cooling times of 5 years and 10 years, respectively.

1. 서론

원자력연구소에서는 사용후핵연료 차세대 관리기술의 하나로 현재 가압경수로에서 발생하고 있는 사용후핵연료를 건식 개질함으로서 그 관리부피를 초기대비 1/4로 줄이고 관리 안전상에 문제를 일으키는 고방열성 핵종인 세슘(Cs), 스트론튬(Sr) 등을 선택적으로 제거하여 냉각부하를 1/4로 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 사용후핵연료를 금속전환하여 저장하게 되면 부피, 열부하 및 방사능을 약 1/4로 줄임으로서 저장효율을 증대시킬 수 있을 것으로 판단되며, 금속전환체 저장에 적합한 저장시스템 설정을 위한 연구를 수행하고 있다. 기존 사용후핵연료 저장방식에 금속전환체 적용성을 평가하고 기존 방식을 수정 보완하여 최적 저장방식을 선정할 예정이다.

원자로에서 조사된 사용후핵연료는 장기간 강한 방사선과 붕괴열이 방출된다. 따라서 사용후핵연료를 안전하게 저장하기 위하여 저장용기는 방사선차폐의 건전성, 격납경계의 유지 및 내부 붕괴열의 적절한 방출 등의 설계기준을 만족하도록 설계 제작되어야 한다. 우라늄 금속전환체는 물 또는 수증기와 반응하면 수소 또는 수소화물이 생성되어 반드시 건식 저장방식이 적용되어야 한다. 건식저장에서는 냉각재인 유체의 낮은 대류열전달 특성 때문에 핵연료봉의 온도가 높게 올라가는 단점이 있다. 따라서 핵연료에 대한 열 안전성 평가가 요구된다.

본 연구에서는 범용 열유동 해석 프로그램인 Fluent 코드[1]를 이용하여 PWR 사용후핵연료 저장용기에 대한 열해석을 수행하였으며, 저장용기 내부에 PWR 핵연료 집합체 대신에 금속전환체를 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. HI-STAR 100 시스템 개요

HI-STAR 100 시스템[2]은 미국의 Holtec에서 개발한 저장시스템으로서 PWR, BWR 사용후핵연료집합체, 고준위 방사성폐기물의 저장이 가능하다. 저장용량은 PWR 사용후핵연료집합체 24다발 또는 32다발, BWR 핵연료집합체 68다발을 장전할 수 있다. HI-STAR 100 저장용기는 사용후핵연료 수송 및 저장 겸용용기로 인허가를 획득하였으며, 수송, 저장 및 처분까지 고려하여 설계된 다목적 캐니스터(MPC, Multi Purpose Canister)를 장착하고 있다. 그림 1 및 그림 2는 HISTAR-100 저장용기의 개략도를 나타내고 있다. 저장용기는 HI-STAR 100 용기

본체인 overpack과 핵연료집합체를 장전할 수 있는 다목적 캐니스터로 구분된다. Overpack은 뚜껑, 감마선차폐 및 구조재 역할을 하는 내부, 중간 및 외부 셸과 중성자차폐를 위한 NS-4-FR 등으로 구성되며, 감마선차폐 및 구조재로 탄소강을 사용하고 있다. 다목적 캐니스터는 PWR 핵연료집합체 24다발 및 32다발 용량의 MPC-24 및 MPC-32, BWR 핵연료집합체 68다발을 장전할 수 있는 MPC-68 및 방사성폐기물을 장전할 수 있는 MPC-GTCC의 4종의 캐니스터를 사용할 수 있다.

표 1은 저장용기의 개요를 나타내고 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 캐니스터에서 냉각기간이 5년일 경우 연소도를 40,000 MWD/MTU, 냉각기간 8년일 경우 연소도를 47,500 MWD/MTU로 설정하여 다양한 핵연료를 수용할 수 있도록 설계되었다. 핵연료로부터 최대 붕괴열은 MPC-24 캐니스터의 경우 26.2 kW로 설정하였다.

Table 1. Description of HI-STAR 100 System

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	- Burn-up / cooling times . 40,000 MWD/MTU - 5 years (MPC-24) . 42,500 MWD/MTU - 6 years (MPC-24) . 45,000 MWD/MTU - 7 years (MPC-24) . 47,500 MWD/MTU - 8 years (MPC-24) - Initial enrichment : 4.0 wt.% U235 (MPC-24) - Decay heat : 26.2 kW/canister (MPC-24)

3. 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 2는 용기를 구성하는 주요 재료의 열전도율을 온도변화에 따라 나타내었다. 중성자 차폐체인 NS-4-FR은 열전도율이 매우 낮아서 화재사고조건에서 외부화염으로부터 내부를 보호하는 역할을 한다. 중성자차폐체층에 탄소강의 전열판을 부착하여 열전달을 향상시키도록 하였고, 열해석 모델에서는 중성자 차폐체의 등가 열전도율을 고려하였다. 열전달해석 모델에서 핵연료집합체는 핵연료봉과 내부 공간의 열전도, 대류 및 복사열전달 효과를 등가열전도율로 고려한 균질화 모델[3]을 사용하였다.

Table 2. 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
Boral (B ₄ C Core)	83.5	83.1	80.2
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, 다음의 관계식으로 정의된다[4].

Turbulent range :

$$h = 0.19 (\Delta T)^{1/3} \text{ (Vertical, GrPr} > 10^9)$$

$$h = 0.22 (\Delta T)^{1/3} \text{ (Horizontal, GrPr} > 10^7)$$

Laminar range :

$$h = 0.29 (\Delta T/L)^{1/4} \text{ (Vertical, GrPr} < 10^9)$$

$$h = 0.27 (\Delta/LT)^{1/4} \text{ (Horizontal, GrPr} < 10^7)$$

여기에서,

ΔT : Temperature differential between the cask surface and ambient air

L : Cask height or diameter for vertical or horizontal orientation

HI-STAR 100 저장용기의 운전조건은 수직상태이고 용기 내부의 유동이 난류영역에 속하며, 따라서 용기 표면에서의 대류 및 복사열전달계수는 다음의 관계식으

로 표현된다.

$$Q_s = 0.19(T_s - T_a)^{4/3} + \sigma \varepsilon F_{1,a} (T_s^4 - T_a^4)$$

여기에서,

T_s, T_a : Surface, ambient temperature (K)

Q_s : Surface heat flux (W/m²)

σ : Stefan-Boltzmann constant (5.669x10⁻⁸ W/m² K⁴)

ε : Surface emisivity

$F_{1,a}$: View factor between surface and air

복사열전달은 주로 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 낮춤으로써 열전달 측면에서 유리하도록 설계되었다. 흰색 표면에 대한 방사율은 일반적으로 0.8 ~ 0.98[5] 값을 가지며, 열해석에서 방사율은 0.85로 적용하였다. 또한 탄소강 및 스테인레스강 표면에 대한 방사율은 각각 0.66, 0.36으로 고려하였다. 태양복사열은 법규[6]에서 규정하고 있는 곡면에 대하여 387 W/m²을 적용하였다.

열해석 모델은 PWR 사용후핵연료 24다발 용량의 MPC-24 다목적 캐니스터를 장착한 HI-STAR 100 저장시스템을 적용하였다. 해석조건은 24다발 PWR 사용후 핵연료 및 96다발의 PWR 사용후핵연료를 금속전환 시킨 24다발 금속전환체를 장전시키는 경우로 하였다. HI-STAR 100 저장용기의 설계기준 핵연료는 연소도 40,000 MWD/MTU, 냉각기간 5년인 PWR 핵연료집합체를 기준으로 하여 24개의 PWR 핵연료집합체에서의 붕괴열은 26.2 kW로 적용하였다. 또한 금속전환체에 대한 기준 핵연료는 국내에서 발생하는 고연소도 핵연료를 고려하여 연소도 48,000 MWD/MTU로 설정하였다. 표 3은 연소도 48,000 MWD/MTU, 초기농축도 4.5 wt%를 갖는 PWR 핵연료집합체를 금속전환할 경우 PWR 핵연료집합체 1다발에 대한 붕괴열을 나타내고 있다. PWR 핵연료집합체를 금속전환할 경우 발열량이 약 1/4로 감소함을 알 수 있다. 금속전환체 적용해석에서 96다발의 PWR 핵연료에 상당하는 금속저장체의 붕괴열은 5년 및 10년 냉각된 핵연료를 기준으로 각각 29.6 kW, 17.3 kW로 적용하였다.

Table 3. Decay Heat Generation for PWR and Metalized Fuels

Fuel type	Cooling time	
	5 years	10 years
Spent PWR fuel	1179 W	778 W
Metalized fuel	308 W	180 W
Rate of decrease	26 %	23 %

그림 3은 해석모델의 단면을 나타내고 있다. 저장용기의 핵연료집합체 및 핵연료 장전통, 밀봉 캐니스터, overpack 등을 하나의 해석모델로 구성하기 위하여 단순화시킨 모델을 사용하였다. 밀봉 캐니스터 내부에는 24개의 핵연료 및 핵연료를 장전하기 위한 장전통이 설치되며, 해석모델에서는 24개의 핵연료 및 장전통과 동일한 체적을 갖도록 등가반지름으로 환산하여 핵연료 및 장전통 영역을 설정하였다. 밀봉 캐니스터 내부에는 불활성 기체인 헬륨 가스를 고려하였으며, 헬륨 가스가 핵연료 장전통 내부를 순환하여 자연냉각 되도록 하였다. 밀봉 캐니스터와 overpack 사이에도 헬륨가스로 인한 자연대류가 일어나도록 하였다. 그림 4는 Fluent 해석모델을 나타내며, 2차원 축대칭 모델을 사용하였다. 용기 내부 및 외부에서는 대류 및 복사열전달이 일어나는 것으로 모델링 하였다. 저장용기의 자연대류에 대한 용기내의 유동이 난류영역으로 확대되며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 용기 주변의 대기온도는 고온조건인 38 °C로 하였으며, 용기 표면에서 최대 태양열유속이 유입되는 조건을 고려하였다.

4. 해석결과 및 고찰

열해석 방법 및 절차에 대한 신뢰성을 평가하기 위하여 HI-STAR 100 저장용기의 보고서에 제시된 조건에 대하여 열해석을 수행하였다. 그림 5는 PWR 핵연료집합체를 고려할 경우의 온도분포를 나타내며, 용기 내부 공간의 헬륨가스에 의한 자연대류에 의한 영향으로 용기 상부에서 더 높은 온도분포를 보이는 경향을 보이고 있다. 표 4에는 열해석 결과와 HI-STAR 100 저장용기 보고서에서 제시된 결과를 비교하여 나타내고 있다. Overpack의 외부 표면온도 및 증성자 차폐체의 온도는 2~3 °C 차이로 두 가지 결과가 서로 잘 일치하였다. 또한, 핵연료의 온도는 Fluent 해석결과가 약 18 °C 정도 높게 나타났으나 전체적으로 서로 잘 일치하였다. 따라서 본 해석에서 적용한 해석모델, 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다.

Table 4. Temperatures between the Fluent Analysis and Reference Value

Location	Maximum temperature (°C)	
	Fluent analysis	Reference value (P-SAR)
Fuel rod	362	346
MPC basket	360	345
MPC outer shell surface	218	211
MPC/overpack helium gap	172	167
Neutron shield inner surface	155	152
Overpack outer surface	125	123
Ambient	38	

HI-STAR 100 저장용기에 96개의 PWR 핵연료를 금속전환시킨 24개의 금속저장체를 적용할 경우에 대한 온도분포를 계산하였다. 기준 핵연료는 연소도 48,000 MWD/MTU인 핵연료를 기준으로 하여 붕괴열은 5년 및 10년 냉각된 금속전환체의 경우 각각 29.6, 17.3 kW로 고려하였다. 해석모델은 PWR 핵연료집합체 해석모델과 동일한 조건으로 하여 내부의 연료에서 발생하는 붕괴열만 변화시켰다.

표 5는 5년 및 10년 냉각기간의 금속전환체를 적용할 경우에 대한 해석결과를 나타내고 있다. 5년 냉각된 금속전환체의 경우 금속봉 온도가 396 °C까지 상승하지만 10년 냉각된 금속봉의 경우는 266 °C로 나타났다. 용기 표면온도는 5년 및 10년 된 금속전환체의 경우 각각 134 °C, 102 °C로 나타났다. 금속전환체 저장을 위한 기준 핵연료는 잠정적으로 10년 냉각된 핵연료로 설정하였으며, 따라서 기존의 PWR 핵연료 저장용기에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 저장할 경우 금속봉의 온도는 최고 266 °C로 예측되었다.

Table 5. Summary of Temperatures for Metalized Fuels

Location	Maximum temperature (°C)	
	Q = 29.6 kW (5 years cooling time)	Q = 17.2 kW (10 years cooling time)
Fuel rod	396	266
MPC basket	393	265
MPC outer shell surface	235	164
MPC/Overpack helium gap	183	131
Neutron shield inner surface	166	121
Overpack outer surface	134	102
Ambient	38	

5. 결 론

본 연구에서는 Fluent 코드를 적용한 저장용기의 열해석 방법을 검증 평가하기 위하여 24개의 PWR 핵연료집합체 저장용량을 갖는 HI-STAR 100 저장용기에 대한 열해석을 수행하였다. 열해석 결과 PWR 핵연료집합체를 장전할 경우 저장용기 안전성분석보고서에서 제시하는 온도 값과 서로 잘 일치하였으며, 따라서 해석방법 및 절차에 대한 신뢰성이 입증되었다. 기존의 HI-STAR 100 시스템에 4배의 저장용량을 갖는 금속전환체를 적용할 경우 금속봉의 최고온도는 10년 냉각된 연료의 경우 266 °C로 계산되었다. 따라서 금속전환체에 대한 저장 허용온도가 266 °C 이상일 경우 열안전성 측면에서 볼 때 기존의 저장용기에 4배의 저장용량을 갖는 금

속전환체의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 금속전환체에 대한 열안전성 평가를 위해서는 금속전환체의 저장 허용온도가 가장 중요한 변수가 되며, 이에 대한 연구를 지속적으로 수행하여야 할 것이고 향후에는 기존의 다른 저장방식에 대한 금속 저장체 적용성을 평가할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] "FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5", Fluent Inc., 1998.
- [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] Wooton, R.O. and Epstein, H.M., "Heat Transfer from a Parallel Rod Fuel Element in a Shipping Container", Battelle Memorial Institute, 1963.
- [4] Jakob, M. and Hawkins, G.A., "Elements of Heat Transfer", John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [5] Kern D.Q., "Process Heat Transfer", McGraw Hill Kogakusha, 1980.
- [6] U.S. Code of Federal Regulations, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", Title 10, Part 71, 1997.

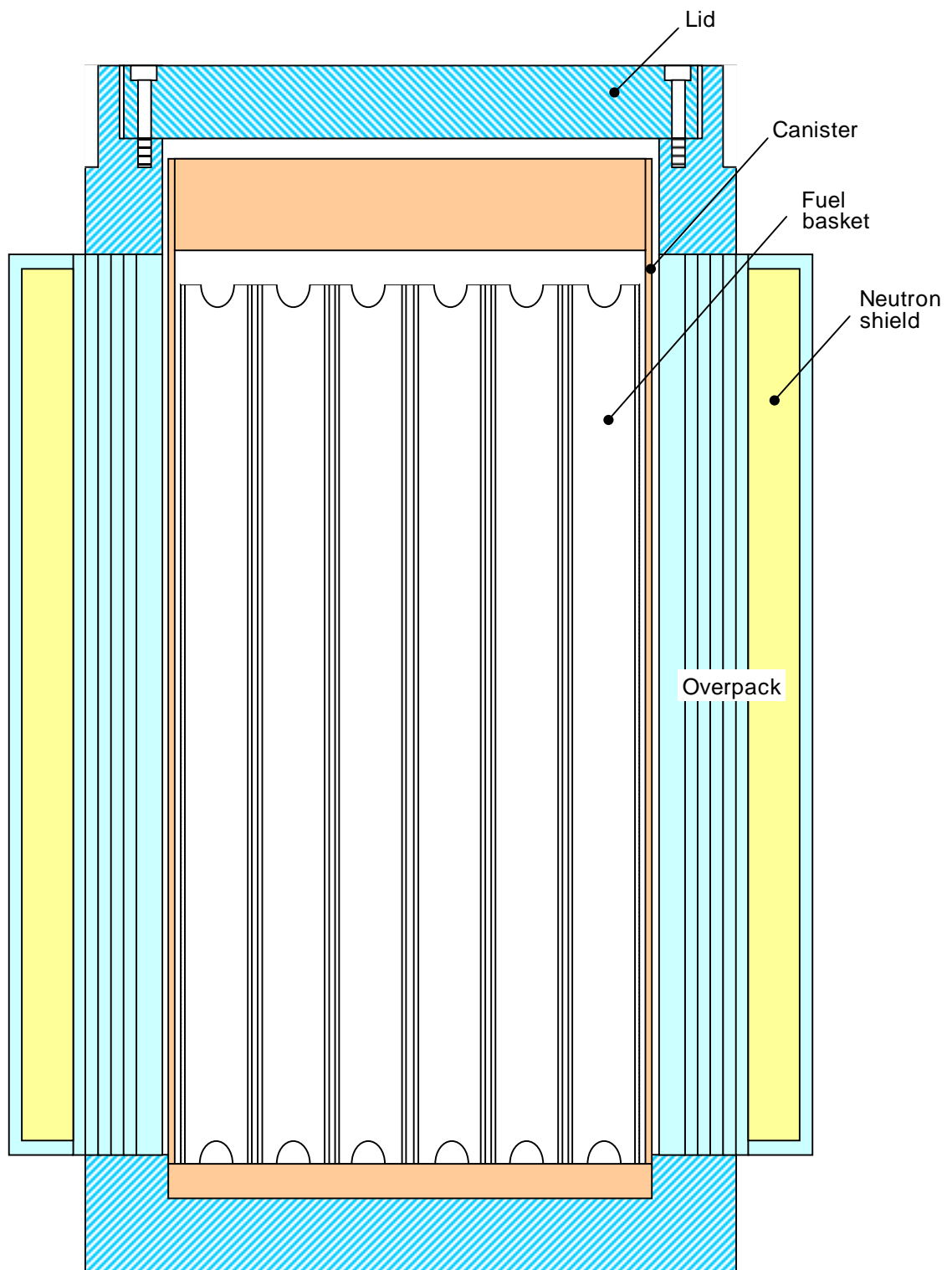
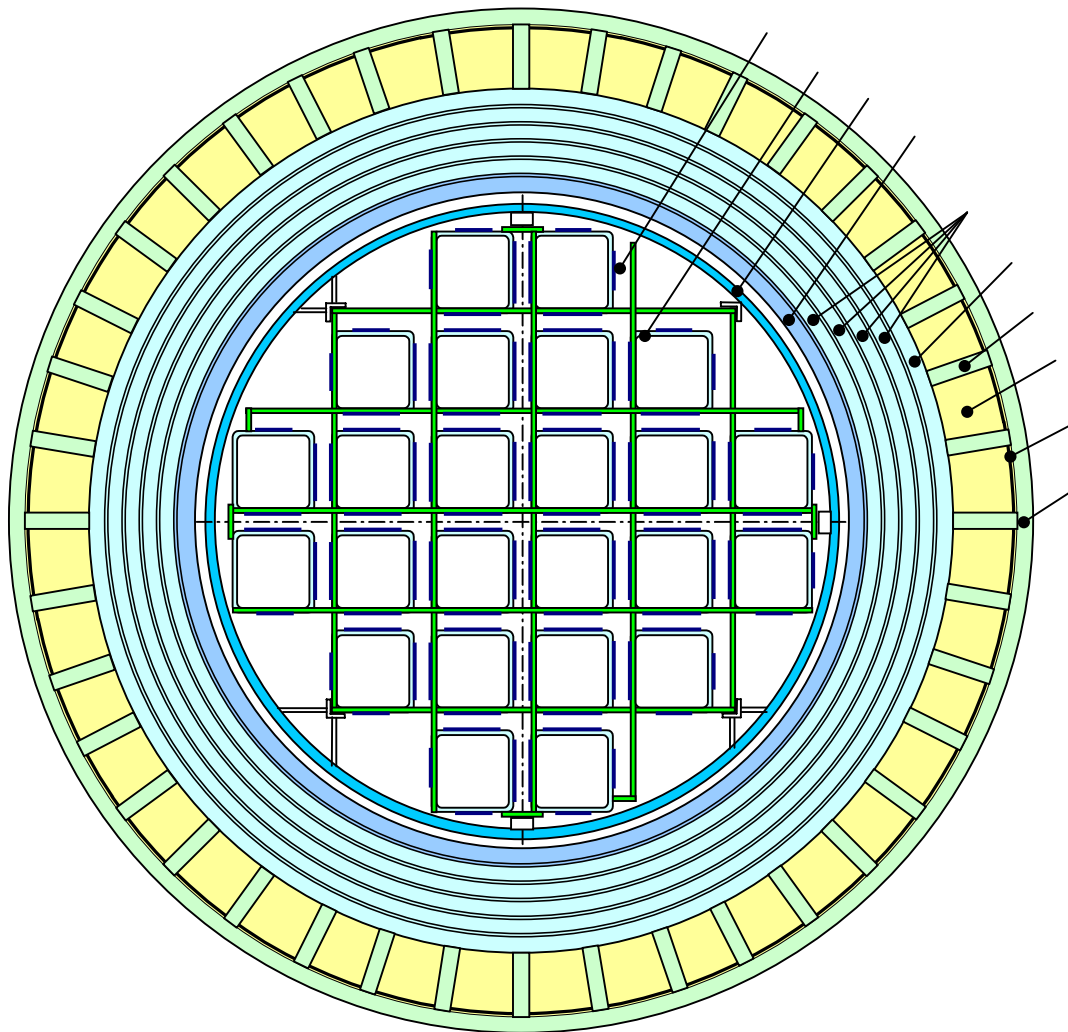


Fig.1. Cross Section Elevation View of Hi -Star 100 System.



Item no.	Nomenclature	Description	Material
1	Outer enclosure shell	12.7t	Carbon steel
2	Thermal expansion form	3.2t	Silicone form
3	Neutron shield	110t	NS -4 -FR
4	Radial channel (fin)	12.7t x 40 ea	Carbon steel
5	Intermediate shell	25.4t	Carbon steel
6	Intermediate shell	31.75t x 4 ea	Carbon steel
7	Inner shell	63.5t	Carbon steel
8	Canister (MPC)	ϕ 1736.7 x 4838.7 L	Stainless steel
9	Fuel basket	7t	Silicone form
10	Boral and sheathing	1.9t boral + 1.15 S.S	Boral / S.S

Fig. 2. Cross Section View of Hi-Star 100 System.

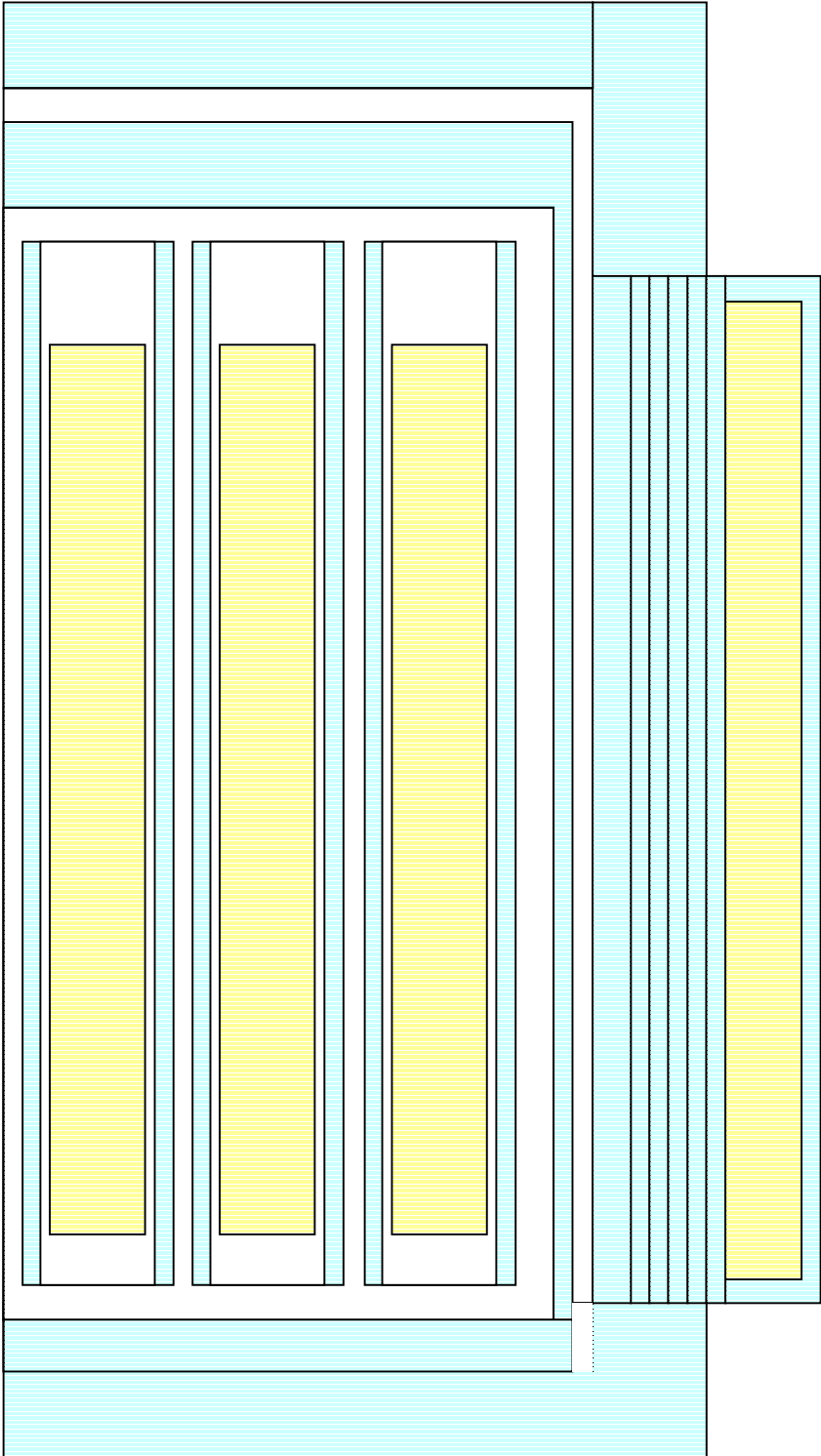


Fig. 3. Thermal Analysis Model.

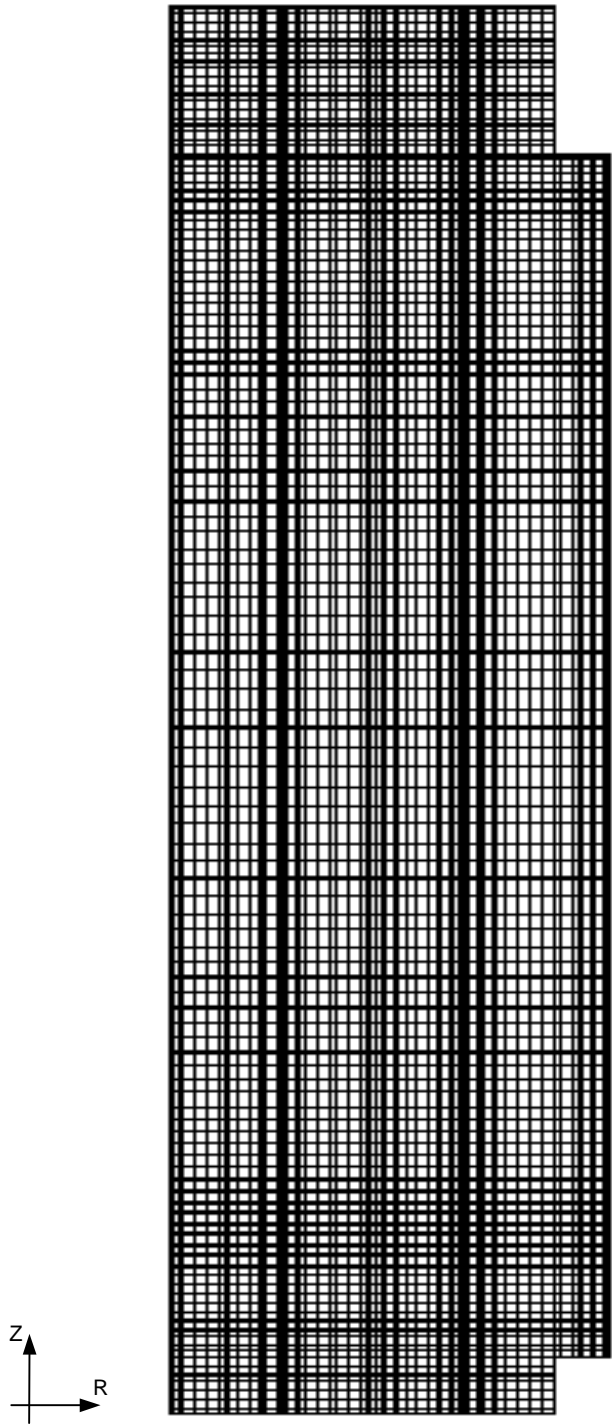


Fig. 4. Fluent Analysis Model.

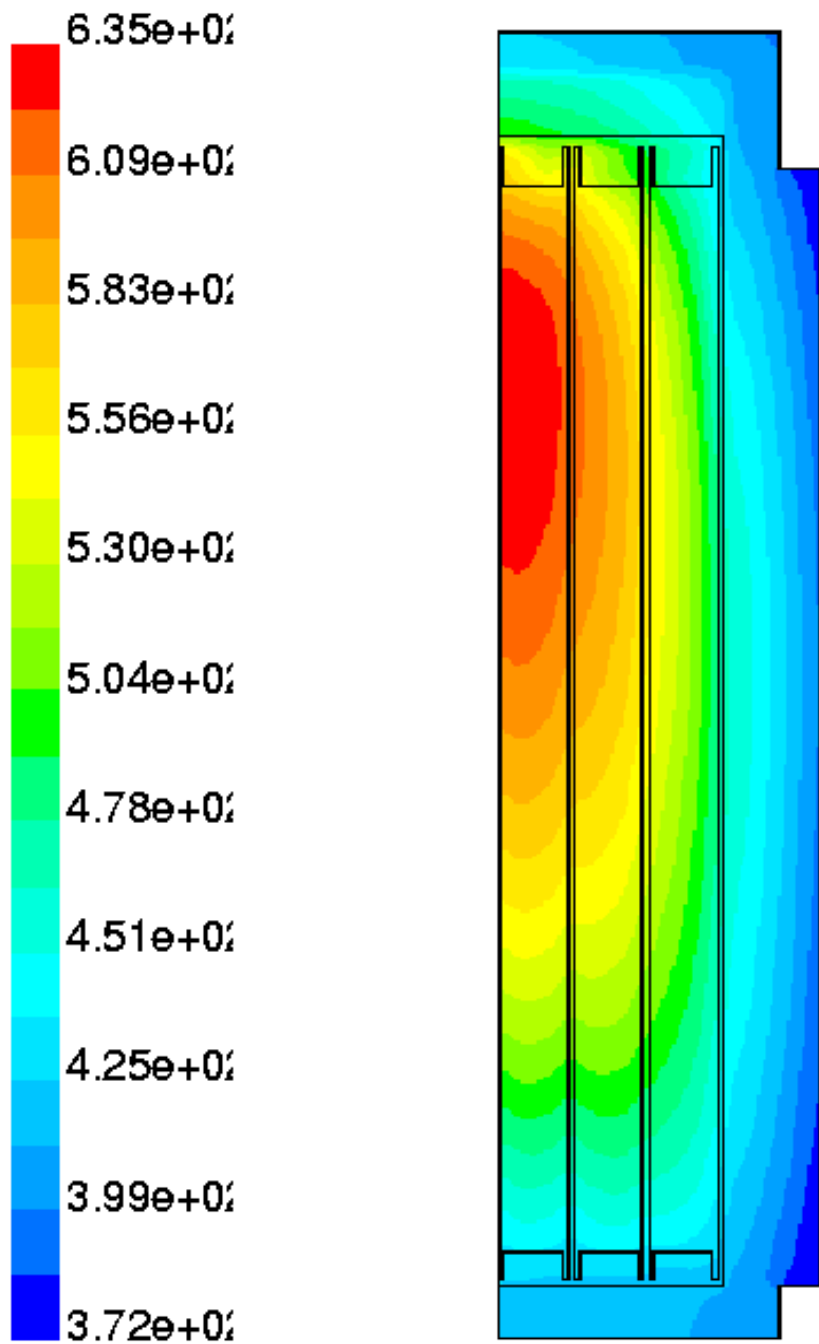


Fig. 5. Temperature Contour for PWR Fuels[K].