

2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

산업용 밀봉선원 운반용기의 개념설계 및 열전달해석 평가

Conceptual Design and Thermal Analysis of Transport Package for Industrial Sealed Source

이주찬, 방경식, 신희성, 주준식, 서기석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

4개의 밀봉선원을 저장 또는 운반하거나 선원교체기로 사용이 가능한 산업용 밀봉선원 운반용기에 대한 개념설계 및 열해석을 수행하였다. 운반용량은 Ir-192 밀봉선원 4개로 최대 600 Ci를 운반할 수 있다. 운반용기의 차폐체로는 납 및 감손우라늄을 사용하였으며, 단열재로 폴리우레탄 폼을 사용하여 화재사고조건에서 열적 건전성이 유지되도록 설계하였다. 운반용기의 정상운반조건에 대한 열해석 결과 용기 표면온도가 범규에서 규정하고 있는 허용 온도보다 낮게 나타났다. 또한, 화재사고조건시 차폐체의 최고온도가 113 °C로 계산되어 운반용기의 열적 건전성이 입증되었다.

Abstract

Conceptual design and thermal analysis have been performed for transport package which is designed for use as a source changer, storage container or shipping container for up to four radiography source assemblies. The maximum loading capacity of the package is 600 Curies for Ir-192 sealed source. The package consists of lead and depleted uranium shields which are encased in a stainless steel housing. Polyurethane foam is used as a insulation to maintain the thermal safety under fire condition. In the results of thermal analysis, the surface temperature of package was lower than the allowable value under normal transport condition. The maximum temperature of shielding materials was calculated to be 113°C under fire condition. Therefore, it was shown that the thermal integrity of the package was maintained under normal and fire accident condition.

1. 서론

방사성 동위원소는 의료분야, 산업분야, 기타 농학분야 등 각 분야에서 널리 사용되고 있으며, 국내에서 방사선 및 방사성동위원소 이용 관련업체는 1995년에 1,000 여개 업체에서 2000년에 1,700여개 업체로 증가하였고 앞으로도 지속적으로 증가할 것으로 전망된다[1]. 방사성 동위원소의 수요량 증가와 더불어 동위원소를 안전하고 효율적으로 운반하기 위한 운반용기의 필요성이 대두되고 있다. 국내에서 소요되는 방사성동위원소의 대부분을 수입에 의존하고 있으며, 동위원소 운반용기도 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

하나로에서는 산업용 밀봉선원인 Ir-192, Co-60과 같은 방사성동위원소 생산체계를 확립하여 국내에 공급하고 있으며, 향후 생산량 및 생산종류를 확대하여 국내 공급량을 증대시킬 예정이므로, 빈번한 국내 수송을 위해 운반용기의 안전성 향상과 운반 효율의 증가를 위해 다양한 동위원소를 운반할 수 있는 최적화된 용기의 개발이 필요하다.

방사성동위원소의 운반용기는 운반물의 밀봉 형태에 따라 특수형 방사성물질과 그 외 것으로 구분되고, 핵종의 방사선 세기에 따라 L형, A형, B형 및 C형 운반용기로 구분된다. 방사성동위원소를 관련 법규의 기준에 따라 적합한 운반물로 분류하여 RI 운반용기를 개발하여야 한다. 원자력 관련 법규에 의하면 L형 및 A형을 제외한 특수형 방사성물질, B형 및 C형의 운반용기에 대해서는 인허가를 받아야 한다. 1996년 이후 국제원자력기구의 규정 IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material ST-1[2] 및 국내 과기부고시 제 2001-23호[3]에서는 방사성물질 운반용기에 대한 기술기준을 강화하였다. 개정된 과기부고시 부칙 및 IAEA ST-1의 경과규정에 따르면, 구 규정에 따라 제작되어 사용되어온 설계승인 대상인 B형 운반용기는 2003년 12월 31일 이후에는 다변 승인을 받도록 되어 있다. 따라서, 현재 국내에서 활용 중에 있고 해외로부터 수입된 1000여 개의 운반용기는 2003년 12월 31일까지 사용 가능하며, 그 이후에는 각 국가의 인허가기관으로부터 승인을 다시 받아야 한다. 이와 같이 국내 사용중인 설계승인 대상 운반용기에 대해 해외 수출뿐만 아니라 국내 사용에도 문제가 예상된다. 그리고, 2006년 말 이후에는 현 규정에 따라 설계 및 제작이 되어야 한다. 이에 대비하여, 해외에서는 기존 용기에 대한 이중 용기(overpack) 혹은 새로운 운반용기를 개발하였으며, 국내 RI 생산체계를 확보하는 현시점에서 RI 운반용기는 국내외의 강화된 운반용기 규정에 따라 개발이 필요하다.

국내에서 사용되고 있는 B형 운반용기는 비파괴시험 업체에서 방사선투과시험 목적으로 사용되는 source projector가 대부분을 차지하며, 2002년도 현재 1,000개 이상의 운반용기가 수입되어 사용되고 있다. Source projector중에는 amersham 660

model이 전체의 90 % 이상을 차지하고 있으며, 밀봉선원으로는 Ir-192가 대부분을 차지하고 있다. 국내 하나로에서 RI 양산체계가 확립됨에 따라 수출 및 국내용 비파괴검사 선원을 다량으로 적재할 수 있는 밀봉선원 용기가 필요하다. 본 연구에서는 Ir-192 150 Ci 밀봉선원 4개를 운반할 수 있는 B형 동위원소 운반용기의 개념설계로 운반용기의 정상운반조건 및 화재사고조건에 대한 열전달 예비안전성 평가를 수행하였다.

2. 운반용기 개념설계

밀봉선원 대량 운반용기는 비파괴시험용 선원을 보관 또는 운반하여 선원을 교체하는데 사용된다. 그림 1은 Ir-192 150 Ci 밀봉선원 4개를 운반할 수 있는 비파괴 검사용 밀봉선원 대량 운반용기의 개념도를 나타내며, 표 1은 운반용기의 개요를 나타내고 있다.

Table 1. General Description of Package

Item	Description
Loading content	- Ir-192 (4 source assemblies) - 600 Ci (150 Ci/source)
Weight	- Total weight : 95 kg - Shielding assembly : 70 kg
Components	- Shielding materials : lead, DU - Housing : stainless steel - Guide tube : titanium "J" tubes - Shcok absorber : polyurethane foam
Dimensions	- Overpack : O.D 320 mm x 445 mm L - Shield assembly : O.D 176 mm x 301 mm L - Titanium tube : O.D 13.8 mm x 2 t - Polyurethane foam : 69 mm

운반용기는 4개의 밀봉선원 안내관, 납 및 DU 차폐체와 충격완충체, 외부케이스, 밀봉선원 잠금장치와 마개장치 등으로 구성된다. 운반용기의 차폐체로 납을 사용할 경우 용기 체적 및 중량이 증가하는 단점이 있으며, DU 차폐체를 사용할 경우에는 복잡한 형태의 주형제작에 많은 비용이 소요된다. 따라서 DU와 납의 조합형 차폐체를 사용하여 최적설계 및 경제성을 갖도록 설계하였다. 운반용기의 총 중량은 약 95 kg이며, 차폐체의 중량은 약 70 kg 이다. 차폐 형상은 직경 56 mm의 납차폐체

에 4개의 밀봉선원 안내관이 설치되고 그 외부에 27 mm의 DU 및 30 mm의 납이 둘러싸고 있는 형태를 가지며, 용기표면 허용 방사선량률 200 mrem/h 이하가 되도록 차폐체 두께를 결정하였다. 용기의 전체 길이는 455 mm, 직경은 320 mm이며, 밀봉선원 안내관은 외경 13.8 mm, 두께 2mm의 "J" 형상의 티타늄 튜브를 사용하여 작업자의 방사선 피폭을 최소화 할 수 있도록 하였다. 차폐체 외곽에는 69 mm의 폴리우레탄 폼을 사용하여 9 m 자유낙하사고시 충격완충 및 800 °C 가상 화재 사고조건에서 단열효과를 갖도록 하였다.

3. 열해석 모델링

운반용기에서의 열전달은 전도, 대류 및 복사 등 3가지 열전달 모드로 이루어지며, 원통형 좌표에 대한 열전도 지배방정식은 다음과 같이 표현된다[4].

$$\frac{1}{\alpha(T)} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \text{ ----- (1)}$$

여기에서, $\alpha(T)$ 는 열확산율(thermal diffusivity)을 나타내며, 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha(T) = \frac{k(T)}{\rho(T)c_p(T)} \text{ ----- (2)}$$

식 (1), (2)에서와 같이 비정상상태의 열전도에 영향을 미치는 재료의 물성치로는 열전도율, 밀도 및 비열이 있으며, 표 2는 운반용기에 사용된 주요 재료의 상온에서 열적 물성치를 나타내고 있다. 이들 물성치는 온도에 따라 값이 달라지며, 해석에서는 온도에 따른 물성치를 적용하였다. 단열재로 사용된 폴리우레탄 폼은 열전도율이 0.08 W/m-K로 단열 특성이 우수하며, 차폐체로 사용된 납 및 DU는 열전도성이 비교적으로 좋지만 납의 경우에는 용융온도가 327 °C로 낮은 단점을 갖고 있다.

Table 2. Thermal Properties of Materials

Material	Thermal properties		
	Conductivity (W/m-°C)	Density (kg/m ³)	Specific heat (W-h/kg-°C)
Depleted uranium	25.5	19,290	132
Lead	35.3	11,340	129
Polyurethane foam	.08	320	1760
Stainless steel	16	7860	477
Titanium	22	4500	522
Air	0.026	1.22	1006

운반용기 외부표면에서 대기에 의한 자연대류 열전달은 다음과 같이 표현된다.

$$q = H_{nc}A(T_s - T_a) \text{ ----- (3)}$$

$$H_{nc}(\text{surface}) = Nu_d \frac{k}{d} \text{ ----- (4)}$$

여기서,

$$Nu_d = c(Gr Pr)^a, Gr_d = g \beta (\Delta T)d^3/\nu^2 \text{ ----- (5)}$$

k : Thermal conductivity of ambient air (W/m-K)

a : Exponent dependent on the flow regime

c : Coefficient dependent on the flow regime and geometry

g : Acceleration of gravity (m/sec²)

d : Diameter of cask (m)

β : Coefficient of volumetric expansion (1/K)

ΔT : Temperature difference between cask surface and ambient air (K)

ν : Dynamic viscosity of ambient air (m²/s)

위와 같은 관계식을 사용하여 운반용기 외부표면에서의 대류열전달계수($H_{nc} = 4.0 \text{ W/m-K}$)를 얻었다.

운반용기 외부표면에서 복사열전달이 일어나며, 복사열전달은 다음 식으로 설명된다.

$$q = A\sigma\varepsilon(T_s^4 - T_a^4) \text{ ----- (6)}$$

여기서,

q : Heat flow (W)

A : Heat transfer area (m²)

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)

이와 같은 복사열전달은 주로 고온에서 크게 일어나며, 같은 온도에서는 재료의 방사율(emissivity)에 영향을 받는다. 운반용기의 외부 표면은 스테인레스강으로 구

성되고 스테인레스강의 방사율은 0.36 ~ 0.44[5]의 범위를 가지며, 열전달해석에서는 0.4로 적용하였다. 또한, 화재사고조건에서는 IAEA Safety Ser. No. 37[6]에서 규정하는 표면 방사율(ϵ)을 0.9로 외부화염으로부터의 흡수율(α)을 0.8로 적용하였다. 따라서, 화재사고조건에서 용기표면의 유효방사율(effective emissivity)은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{1}{(1/\epsilon - 1/\alpha - 1)} = 0.735$$

태양복사열은 법규에서 규정하고 있는 운반용기 형상이 곡면일 경우의 태양열유속 400 W/m²을 고려하였다. 밀봉선원인 Ir-192 600 Ci에서 발생하는 붕괴열은 5.2 W로 고려하였으며, 범용 열유동해석 프로그램인 Fluent[7] 코드를 이용하여 해석을 수행하였다.

열해석 모델은 운반용기의 반경방향에 대한 열전달 영향을 평가하기 위하여 그림 2와 같이 2차원 단면모델을 사용하였다. 해석조건은 정상운반조건 및 화재사고조건을 고려하였으며, 정상조건은 주변온도 38 °C 및 최대 태양열유속이 유입되는 고온조건을 적용하였고 화재사고조건은 정상조건 상태에서 800 °C 화재가 30분동안 진행된 후 자연냉각 조건을 고려하였다.

4. 열해석 결과 및 평가

B형 운반용기의 화재사고조건은 운반용기가 800 °C의 화염에 30분간 노출된 후 자연냉각 되는 조건이다. 화재사고조건은 초기조건은 주변온도 38 °C 및 태양복사열이 유입되는 고온조건이며, 고온조건은 정상상태 온도를 구한 후에 화재사고조건에 대한 시간의 변화에 따른 과도상태(transient state)에 대한 해석을 수행하였다.

표 3은 주변온도 38 °C의 고온 정상운반조건에 대한 열전달해석 결과를 나타내고 있다. 용기 표면온도는 태양복사열을 고려할 경우 63 °C, 태양복사열이 없을 경우 42 °C로 계산되었다. 따라서 태양복사열을 고려할 경우 용기표면 온도가 63 °C로 상승한 것은 동위원소에서 발생된 붕괴열보다는 용기 표면에서의 태양복사열에 의한 결과임을 알 수 있다. 수송 관련 법규에서 항공 운반시 운반용기의 표면온도는 태양복사열을 고려하지 않은 38 °C의 주변온도의 환경에서 섭씨 50 °C를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 정상운반조건에서 태양복사열이 없을 경우 용기 표면 온도가 42 °C로 계산되어 운반용기의 항공운반 기준을 만족한다. 또한, 태양복사열을 고려할 경우의 용기 표면온도도 법규에서 규정하고 있는 허용치 85 °C보다 낮은 63 °C로 계산되었다. 고온조건에서 용기 내부의 차폐체의 온도는 84 ~ 85 °C, 동위원소

밀봉선원의 온도는 92 ℃로 계산되어 정상운반조건에서 운반용기의 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.

Table 3. Summary of Calculated Temperatures for Normal Transport Condition

Location	Calculated temperature (℃)	
	with solar heat flux	without solar heat flux
RI source	92	77
Titanium tube	87	72
Lead shield (core)	85	70
DU shield	84	69
Lead (intermediate)	84	69
Polyurethane (core)	72	53
Cask surface	63	42

표 4는 800 ℃ 화재사고조건에서 과도시간에 따른 용기 주요 부위의 온도를 나타내고 있다. 차폐체, 밀봉선원 안내관 및 동위원소 밀봉선원 등 운반용기의 내부온도는 30분 화재가 진행된 후 약 5시간 이후에 최고온도를 나타내고 있다. 이것은 단열재로 사용된 폴리우레탄폼의 열전도율이 낮고 단열재 두께가 충분히 두꺼워 외부 화염으로부터 유입되는 열을 충분히 차단하여 줌으로써 나타난 결과이다. 화재사고조건에서 납차폐체의 최대온도가 113 ℃로 납의 용융온도보다 훨씬 낮으므로 납차폐체의 건전성이 유지됨을 알 수 있다. DU 차폐체의 경우에도 최고온도가 113 ℃로 용융 온도보다 훨씬 낮고 공기분위기에서 연소온도보다도 낮으므로 DU 차폐체에 대한 건전성도 유지될 것으로 판단된다. 밀봉선원 안내관 및 밀봉선원의 최대 온도도 이들 재료의 용융온도보다 훨씬 낮으므로 정상운반조건 뿐만 아니라 화재사고조건에서도 운반용기의 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다. 그림 3은 800 ℃ 30분 화재사고조건에서 과도시간에 따른 운반용기의 온도분포를 나타내고 있다. 화재가 시작되면서 용기 표면온도가 급격히 상승한 후 서서히 내부로 열전달되어 내부온도는 화재가 끝난 후 약 5시간 이후에 최대 온도분포를 보이고 있다.

운반용기에 사용되는 폴리우레탄 폼은 밀폐된 steel casing 내부에 위치하여 화재사고조건에서 연소는 발생하지 않을 것으로 판단된다. 하지만 일반적인 폴리우레탄 폼은 200 ℃ 내외에서 용융이 발생할 수 있으므로 난연재 층을 추가하거나 난연성 또는 내열성이 우수한 폴리우레탄 폼의 적용이 필요하다. 국내의 Basf Korea에서 개발한 PIR 폼은 일반 폴리우레탄 폼에 비하여 난연성 및 내열성이 우수하며, 특히

화재조건에서도 용융이 발생하지 않고 탄화되어 초기 형태가 유지된다고 알려져 있다. 이와 같이 용융이 발생하지 않고 탄화되어 숯 형태로 유지된다면 단열 기능을 유지할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 연구에서는 단열재에 대한 절연, 내연 및 내열성 특성시험을 통하여 적절한 단열재를 선정할 예정이다.

Table 4. Summary of Calculated Temperatures for Lead Cask under Fire Accident Condition

Location	Calculated temperatures (°C)										
	Steady state	Transient time (hour)									Max.
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	
RI source	92	92	94	101	108	113	116	119	120	120	120
Titanium tube	87	87	90	97	104	109	112	115	115	115	115
Lead shield (core)	85	85	89	96	103	108	111	113	113	113	113
DU shield	84	84	89	96	103	108	111	113	113	113	113
Lead (intermediate)	84	85	89	96	103	108	111	113	113	113	113
Polyurethane (core)	72	187	246	207	169	142	124	104	104	90	246
Cask surface	63	791	261	140	111	95	86	75	75	68	791

5. 결 론

Ir-192 150 Ci 밀봉선원 4개를 운반할 수 있는 B형 동위원소 운반용기의 개념설계 및 열전달해석을 수행하였다. 운반용기의 차폐체로 납과 DU의 조합형 차폐체를 사용하여 용기의 중량 및 체적을 최적화하였다. 구조재로는 3 mm 두께의 스테인레스강을 사용하였으며, 충격완충 및 단열재로 폴리우레탄 폼 69 mm를 고려하였다.

운반용기의 정상운반조건에 대한 열전달해석 결과 태양 복사열을 고려하지 않을 경우 운반용기 표면온도가 40 °C로 계산되어 법규에서 규정하고 있는 항공운반시 제한치인 50 °C 이내로 만족하였다. 또한, 태양복사열을 고려할 경우의 용기 표면온도도 허용치인 85 °C보다 낮게 나타났다. 운반용기의 단열재로 폴리우레탄 폼 69 mm를 사용할 경우 화재사고조건에서 납 및 DU 차폐체의 최대온도가 113 °C로 계산되어 차폐체의 용융 또는 연소가 발생하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 운반용기는 정상조건 뿐만 아니라 화재사고조건에서도 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 과학기술부, “2000년도 제 6회 원자력산업 실태조사”, 2001.
- [2] IAEA Safety Series No. ST-1, “Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,” 1996.
- [3] 과학기술부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정, 2001.
- [4] J. P. Holman, “Heat Transfer,” International Student Edition 5th Ed., 1985.
- [5] A.F. Mills, “Basic Heat and Mass Transfer”, University of California, 1995.
- [6] IAEA Safety Series No 37, “Advisory Material of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material”, 3rd Ed., 1985.
- [7] “FLUENT Computational Fluid Dynamics Software Version 5”, Fluent Inc., 1998.

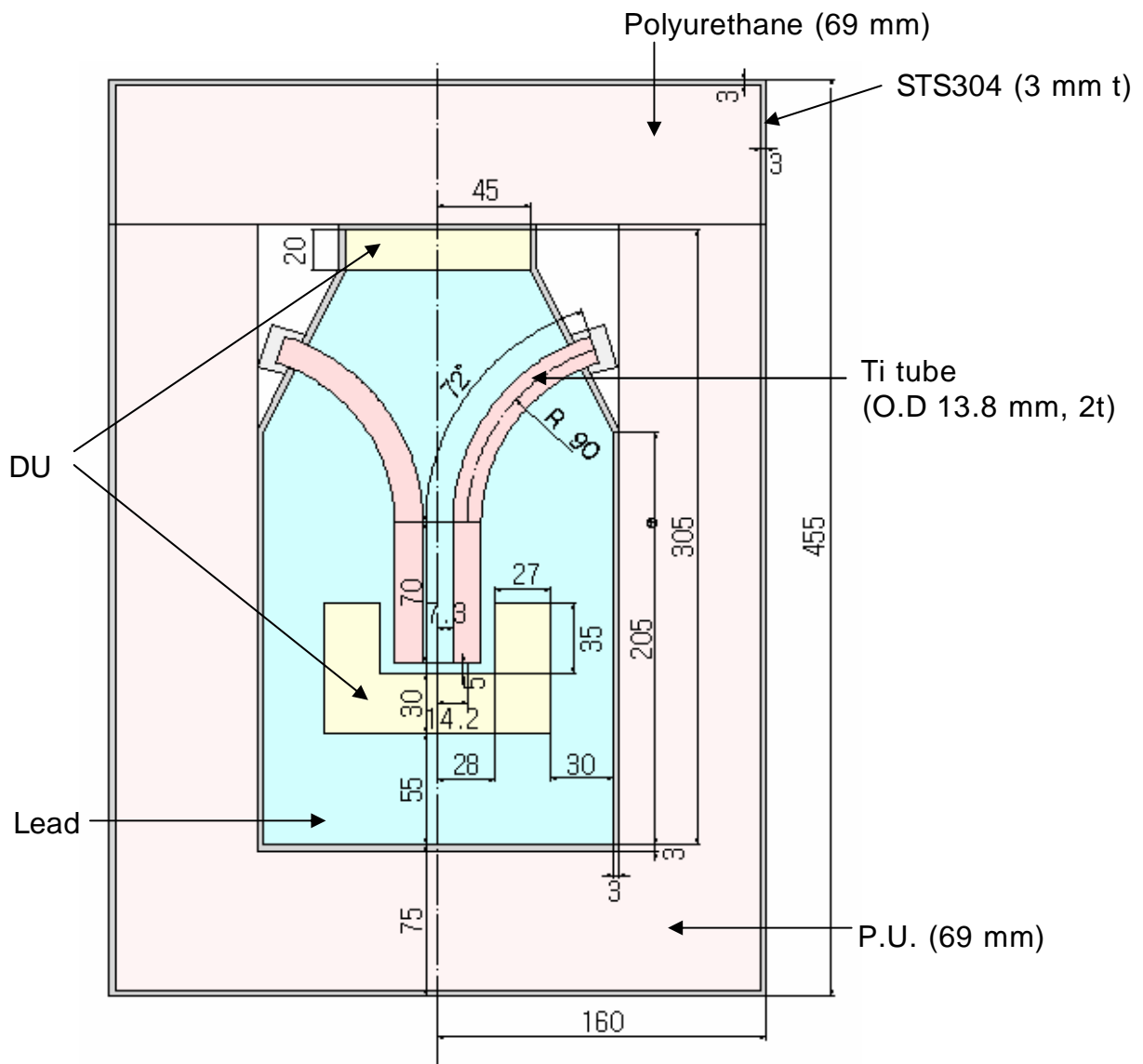


Fig. 1. Conceptual Drawing of RI Transport Cask.

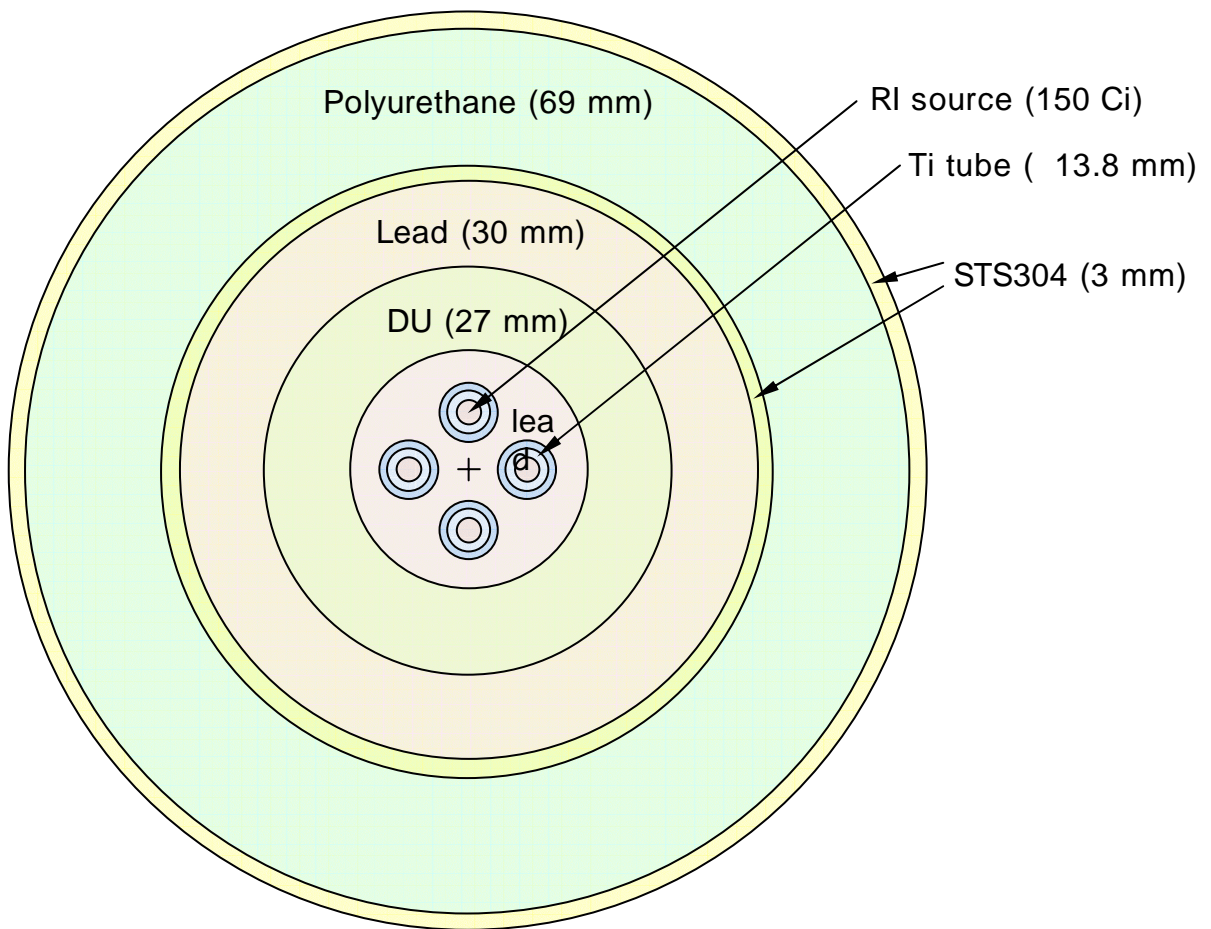


Fig. 2. Thermal Analysis Model.

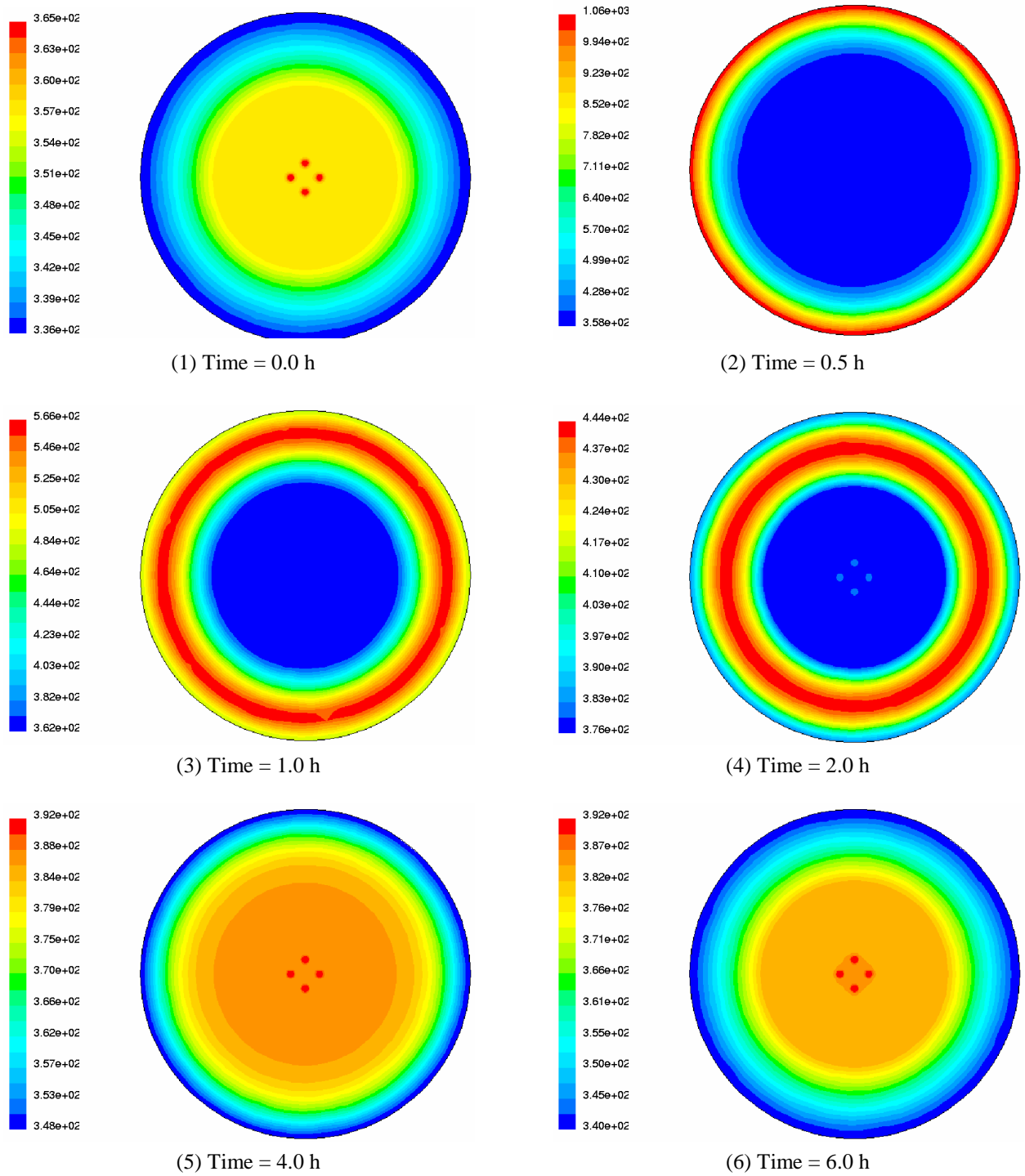


Fig.3. Temperature Contours under Fire Accident Condition.