

축소모델을 이용한 방사성물질
운반용기의 침수시험 평가

Water Immersion Test for Transport Cask of
Radioactive Material by Using a Scale-Down Model

이주찬, 방경식, 구정희, 주준식, 서기석, *정성환

한국원자력연구소, *원자력환경기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사성물질 운반용기는 국내외의 수송관련 법규에 규정된 기술기준을 만족하도록 설계, 제작되어야 한다. 방사성물질 운반용기의 격납 건전성을 입증하기 위하여 2 MPa의 외압조건에 해당하는 침수시험을 수행하였다. 시험모델을 침수시험용 압력용기에 넣고 압력용기의 내부압력을 2 MPa 까지 가압하여 1시간동안 유지시켰다. 침수시험 이후에 시험모델의 육안검사 및 주요부위의 치수를 측정하였으며, 시험모델은 파손 및 buckling이 발생하지 않고 내부에 물이 유입되지 않아 침수시험조건에서 용기의 격납 건전성이 입증되었다.

Abstract

All shipping cask to transport a radioactive material should be designed and fabricated in accordance with the design criteria prescribed in IAEA standards and domestic regulations. Water immersion test has been performed under 2 MPa external pressure to verify the integrity of containment system for transport cask of radioactive material. The test model was placed inside the vessel, and pressure inside the vessel was increased to 2 MPa during 1 hour. The cask was inspected by measurement of dimension and visual inspection after immersion test. The cask was verified the integrity of containment system without collapse, buckling or inleakage of water under water immersion test condition.

1. 서론

국내 원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료는 현재 각 원전부지내에서 안전하게 저장 관리되고 있다. 중간저장시설 건설이 계속 지연되어 각 원전별로 기존 사용후핵연료 저장조의 저장효율을 극대화하기 위하여 조밀저장대 설치, 건식저장소 건설계획 등으로 저장용량 확장을 도모하고 있다. 또한, 원자력연구소에서 개발한 PWR 사용후핵연료 4다발을 운반할 수 있는 KSC-4 수송용기를 사용하여 인접 발전소로 사용후핵연료를 소내수송 저장하고 있다. 원전 호기간 핵연료 소내수송을 효율적으로 수행하기 위하여 한수원에서는 PWR 핵연료 12다발 용량의 KN-12 수송용기를 개발중이다. 용기설계는 독일 GNB에서, 제작은 두산중공업에서 수행하고 있으며, 원자력연구소에서는 안전성시험을 수행하였다. 본 논문에서는 원자력연구소에서 수행한 수송용기 안전성시험중에서 침수시험에 대하여 기술하였다.

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 및 국내 원자력법규에서 수송용기는 정상수송조건뿐만 아니라 가상사고조건에서도 열적으로 안전하게 설계되어야 한다고 엄격하게 규정하고 있다. 본 연구에서는 법규에서 규정하고 있는 수송용기의 가상사고 시험조건중 침수시험을 수행하여 용기의 건전성을 평가하였다.

IAEA Safety Series No. ST-1 Para. 729[1] 및 국내 과기부고시 제 2001-23호 47조 [2]에서 규정하고 있는 침수시험조건은 시험물을 수두 15 m 이상에서 시험물이 최대의 손상을 받는 방법으로 8시간 동안 침수시키도록 요구하고 있다. 또한, ST-1 Para. 730 및 과기부고시 48조에서 규정하는 강화된 침수시험조건은 방사능량이 A_2 값의 10만배를 초과하는 방사성물질을 운반하는 B형 또는 C형 운반용기의 경우에는 시험물을 수두 200미터 이상에서 시험물이 최대의 손상을 받는 방법으로 1시간 동안 침수시키도록 요구하고 있다. 이 경우, 입증 목적상 최소한 2 MPa 외부울 고려할 수 있다고 규정되어 있다. 10 CFR 71.61[3]에서는 이와 같은 침수시험조건에서 수송용기가 파손이나 buckling이 발생하지 않고 내부에 물이 스며들지 않아야 한다고 규정하고 있다. 또한, 국내 과기부고시 26조에서는 B(U)형 운반용기의 강화된 침수시험에서 격납계통이 파손되지 않아야 한다고 요구하고 있다. KN-12 수송용기는 방사능량이 A_2 값의 10만배를 초과하는 B(U)형 핵분열성 운반물로 구분되며, 따라서 강화된 시험조건인 200 m 침수 시험을 수행하였다.

2. KN-12 운반용기의 개요

KN-12 수송용기는 PWR 사용후핵연료집합체 12다발을 운반할 수 있는 용량을 갖도록 설계되었으며, 운반용기의 분류는 B(U)형 핵분열성 운반물로 구분된다. 그림 1은 수

송용기의 단면도를 나타내고 있다. 수송용기는 용기 본체와 충격완충체로 구분되며, 용기 본체는 감마선 차폐 및 구조재 역할을 하는 steel body, 중성자차폐체, 뚜껑 및 핵연료를 담는 12개의 핵연료 basket 등으로 구성된다.

표 1은 KN-12 수송용기의 개요를 나타내고 있다. 충격완충체를 포함한 용기의 총 길이는 약 5,744 mm이며, 용기 본체의 길이는 4,809 mm, 직경은 약 1,942 mm에 이른다. 용기의 중량은 빈 용기가 약 62톤이고 내부에 물을 채우는 습식수송에서 핵연료를 장전할 경우 충격완충체를 포함한 총 중량이 약 84톤에 이른다.

Table 1. Description of KN-12 Transport Cask

Items	Description
Capacity	12 PWR assemblies
Type	B(U)F
Weight	- 62.4 tons (empty, without water and impact limiters) - 84.3 tons (loaded, with water and impact limiters)
Dimensions	- Packaging (including impact limiter) . Outer dia. : 2,450 mm, length : 5,744 mm - Cask body . Outer dia. : 1,942 mm, length : 4,809 mm, thick. : 375 mm . Internal dia. : 1,192 mm, internal length : 4,190 mm
Materials	- Cask body : forged carbon steel - Lid : stainless steel - Neutron shield : polyethylene (72 rods) - Fuel basket : stainless steel, borated aluminum(B+Al) - Impact limiter : wood
Cooling type	Wet / dry type (water or helium gas)
Design basis fuel	- Burn-up : 50,000 MWD/MTU - Initial enrichment : 5.0 % U-235 - Cooling time : 7 years - Max. activity content : 1.39E17 Ci - Decay heat : 12.6 kW (1.05 kW / Ass'y)

용기 본체는 두께 375 mm의 탄소강으로 구성되며, 길이 방향으로 72개의 구멍을 뚫어 중성자차폐체인 폴리에틸렌 봉을 끼워 넣는 구조를 갖는다. 핵연료 바스켓은 스테인레스강으로 구성되며 바스켓 사이에 중성자 흡수재로 보랄 판을 설치하여 열전달을 촉진시키고 핵임계 안전성을 유지하도록 하였다. 수송용기 바스켓 내부에는 냉각재로 물 또는 헬륨가스를 습식, 건식 겸용으로 설계되었다. 운반대상 핵연료의 설계기준은 연소

도 50,000 MWD/MTU, 초기농축도 5.0 w/o U-235, 냉각기간 7년인 PWR 핵연료집합체를 기준으로 설정하여 핵연료집합체 12개에서 발생하는 최대 방사능량은 1.39E17 Ci, 최대 붕괴열은 12.6 kW로 설계되었다.

3. 안전성시험 모델 및 시험장치

침수시험 모델은 KN-12 수송용기의 1/3 scale model이며, 9 m 낙하 및 1 m 파열시험 등을 완료한 시험모델을 사용하였다. 그림 2는 1/3 scale model의 단면도를 나타내고 있다. 시험모델 주요 치수는 외경 647 mm, 두께 124.5 mm, 길이 1,603 mm이며, 총 중량이 약 2.5톤이다. 침수시험시 모델 내부에 있는 dummy fuel을 제거하였으며, 뚜껑 볼트는 40 N·m의 토크로 체결하였다.

법규에서 규정하고 있는 침수시험조건인 200 m의 수두에 해당하는 2 MPa의 외압시험을 수행하기 위하여 시험장치를 제작하였으며, 시험장치는 그림 3과 같이 압력용기, 고압펌프, 충수펌프, 압력계 및 안전밸브 등으로 구성된다. 압력용기는 용기내부에 시험물을 넣고 뚜껑볼트를 체결한 후 물을 충수시킨 후 가압하여 시험을 수행한다. 압력용기의 내부 치수는 직경이 1.2 m, 길이가 2.7 m 이며, 2 MPa 이상의 내부압력에 견딜 수 있도록 설계되었다.

압력용기에는 충수를 위한 배관계통 및 고압펌프를 사용한 가압 배관계통 등의 배관 및 밸브 등이 설치되어 있다. 상부에는 내부압력을 측정할 수 있는 압력계, 내부 기체를 배출하는 vent line, drain line 및 안전밸브 등이 설치되었다. 충수펌프는 압력용기 내부에 물을 충수시킬 때 사용되며, 유량은 250 ℓ/min, 양정은 8 m이다. 고압펌프는 충수 후에 내부압력을 높이기 위한 plunger type 펌프로 유량이 18 ℓ/min, 사용압력은 30 bar이다. 압력계는 압력용기의 내부압력을 측정하기 위한 것으로 0 ~ 30 bar의 압력을 측정할 수 있고 sensitivity는 2% 이내이다. 안전밸브는 압력용기 뚜껑 상단에 설치되어 과도한 내부압력 상승을 방지하기 위해 25 bar의 압력에서 배기시키는 기능을 갖는다. 안전밸브는 control panel에 연결되어 내부압력이 25 bar에 도달하면 고압펌프의 작동을 정지시킨다.

4. 누설시험

누설시험의 목적은 침수시험 전에 용기 뚜껑 O-ring seal의 기밀이 유지되는지 여부를 확인하는데 있다. 누설시험은 유체가 시험체 내부와 외부의 압력차에 의하여 시험체의 결함을 통해 유체가 흘러들어 가거나 흘러나오는 성질을 이용하며, 유체의 종류, 압력 적용 방법 및 누설 감지 방법에 따라 여러 가지로 분류된다. 누설시험에는 시험체의 내부와 외부의 압력차를 만들 때 시험체 내의 압력을 가압하여 높게 하는 가압법과 시험체내의 압력을 감압하여 대기압보다 낮게 하는 진공법이 있으며, 본 시험에서는 진공

누설시험 방법을 적용하였다.

그림 4는 진공누설 시험을 위한 측정장치의 계통도를 나타내고 있다. 누설시험 장치는 진공을 만들기 위한 test device, 진공펌프, 진공 게이지, 표준챔버, recorder, 배관라인 및 밸브 등으로 구성된다. 진공펌프는 Alcatel 사의 rotary vane pump를 사용하였으며, 배기속도는 15.7 m³/h 이고 도달압력은 2.2 x 10⁻³ 까지 가능하다. 진공 게이지는 convectron type을 사용하였고 측정 범위는 0.01 Pa에서 대기압까지 가능하다. Test device는 진공시험을 위한 공간을 만들기 위한 것으로 뚜껑과 용기본체 사이의 틈과 뚜껑볼트 사이의 틈이 포함된다.

누설시험 이전에 시험물의 체적을 계산하였고 누설시험을 수행하여 측정된 누설률과 허용 누설률을 비교하였다. KN-12의 수송용기의 허용누설률은 1x10⁻⁴ ref cm³/s로 설정되었다[4]. 누설률 계산을 위해서는 시험물에 대한 체적을 알아야 하며, 체적을 측정하기 위하여 체적을 알고 있는 표준챔버(reference volume)를 사용하였다. 표준연구소에 의뢰하여 표준챔버의 체적을 측정하였으며, 이 체적은 101.5 cm³이다. 시험물의 체적측정 절차는 다음과 같다.

그림 4의 측정계통에서 밸브 1과 밸브 2를 연 상태에서 게이지의 압력이 150 ~ 200 hPa의 범위로 펌프를 가동한다. 펌프의 가동을 중단하고 밸브 2를 차단하여 초기압력 P₁을 읽고 표준챔버 입구의 밸브 1을 닫는다. 밸브 2를 열고 압력이 10 Pa 이하까지 진공 펌프를 다시 가동한다. 펌프 입구쪽의 밸브 2를 닫고 밸브 1을 열어 최종압력 P₂를 측정한다. 이와 같이 측정된 P₁ 및 P₂ 값을 이용하여 아래의 계산식에 의하여 시험물의 체적을 계산하였다.

$$V_{\text{Test}} = V_{\text{ref}} (P_1/P_2 - 1)$$

여기에서,

V_{Test} : Volume of test space (cm³)

V_{ref} : Reference volume (101.5 cm³)

P₁ : Initial pressure (hPa)

P₂ : Final pressure (hPa)

측정오차를 최소화하기 위하여 3차례 시험을 수행하여 체적을 계산한 다음 평균값을 고려하였다. 표 2는 체적 측정결과를 나타내며, 진공 누설시험을 위한 시험물의 체적은 683 cm³로 계산되었다.

Table 2. Test Results the Measuring of the Volume for Test Space

	P ₁ (hPa)	P ₂ (hPa)	V _{Test} (cm ³)
First test	186.65	24.13	683.6
Second test	191.98	24.66	688.7
Third test	183.98	23.99	676.9
Average	-	-	683.1

그림 4에서 밸브 1을 닫고 밸브 2를 연 상태에서 압력이 1 Pa 이하까지 떨어지도록 진공 펌프를 가동하였으며, 그림 5는 누설시험 장면을 나타내고 있다. 밸브 2를 잠그고 펌프 가동을 중단한 후 압력을 측정하여 매 15분 간격으로 누설률을 계산하였다. 표 3은 침수시험 전에 실시한 누설시험 결과를 나타내고 있다. 측정된 누설률이 허용 누설률인 1×10^{-4} ref cm³/s에 비하여 훨씬 낮게 나타났으며, 따라서 시험모델 뚜껑 부위의 기밀이 유지됨을 확인하였다.

Table 3. Results of Measuring the Leakage Rate

Start time (t _{start}), s	End time (t _{end}), s	Start pressure (P _{start}), Pa	End pressure (P _{end}), Pa	Leakage rate (L _R), Pa	Standard leakage rate (ref cm ³ /s)
0	900	0.28	0.72	0.33	3.30E-6
900	1800	0.72	1.17	0.34	3.37E-6
1800	270	1.17	1.64	0.36	3.52E-6

5. 침수시험

누설시험이 완료된 시험모델을 침수시험용 압력용기 내부에 안착시킨 후 충수펌프를 이용하여 압력용기 내부를 충수시켰다. 침수시험은 200 m의 수두에 해당하는 2 MPa의 외압조건으로 수행하였으며, 압력용기 뚜껑을 체결한 후 고압펌프를 이용하여 압력용기를 법규에서 요구하는 2 MPa보다 약간 높은 2.1 MPa로 가압하였다. 압력이 일정상태로 유지될 때까지 약 10분 정도 압력변화를 관찰한 후 압력을 측정하였으며, 이때 압력은 2.07 MPa로 측정되었다. 보수적인 시험을 수행하기 위하여 시험시간을 법규에서 요구하는 1시간보다 약간 긴 1시간 10분 동안 시험을 수행하였다. 1시간 10분 이후의 압력도 초기압력과 같은 2.07 MPa로 측정되었다. 그림 6은 침수시험 장면을 나타내고 있다. 압력용기 상단의 배기밸브를 열어 내부압력을 대기압 상태로 만든 후 압력용기 내부의 물을 배수시키고 시험모델을 외부로 인출하였다. 시험모델의 뚜껑부위의 틈새를

진공 누설시험 장비를 이용하여 완전히 건조시켰다.

뚜껑볼트를 풀면서 볼트 토크 측정결과 38 ~ 40 N·m로 볼트 체결시 토크와 거의 같게 나타났으며, 따라서 시험도중 뚜껑볼트의 풀림이 발생하지 않음이 확인되었다. 용기 뚜껑을 제거하고 내부를 육안으로 확인결과 시험모델 내부로 물이 전혀 유입되지 않았으며, 파손 및 buckling 등이 발생하지 않았다. 침수시험 전후에 용기의 주요 부위의 치수를 측정하여 변형여부를 확인하였다. 표 4는 침수시험 전후에 용기의 치수측정 결과를 나타내고 있다. 침수시험 전후의 치수측정 결과에서 최대 0.8 mm의 차이를 보였지만 이것은 측정오차로 볼 수 있으며, 침수시험 이후에 용기의 변형이 발생되지 않음을 알 수 있다. 따라서 KN-12 수송용기는 법규에서 규정하는 침수시험조건에서 용기의 건전성이 입증되었다.

Table 4. Results of Dimension Measurement before and after Water Immersion Test

Location	Dimension (mm)	
	Before immersion test	After immersion test
(a) Lid thickness	67.2	67.1
(b) Lid thickness	30.0	30.2
(c) Cask outer diameter	584.8	585.2
(d) Cask outer diameter	612.2	612.3
(e) Cask outer diameter	648.2	647.9
(f) Cask outer diameter	612.3	612.5
(g) Cask outer diameter	602.0	602.8

Lid
Top side
Bottom side

* Measuring direction : 0 - 180°

6. 결 론

12다발의 PWR 핵연료집합체를 운반할 수 있는 KN-12 수송용기의 1/3 scale 모델을 이용하여 법규에서 요구하는 200 m 침수시험을 수행하였으며, 본 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 침수시험 이전에 시험모델에 대한 진공누설 시험결과 누설률이 $3.52E^{-6}$ ref cm³/s로 허용 누설률인 1×10^{-4} ref cm³/s에 비하여 훨씬 낮게 나타났으며, 따라서 O-ring seal의 기밀이 유지됨을 확인하였다.
- 2) 침수시험 완료 후 시험모델 뚜껑 볼트의 토크를 측정된 결과 볼트의 풀림이 발생하지 않았다.
- 3) 침수시험 과정에서 시험모델의 파손 또는 buckling이 발생하지 않았고 시험모델 내부로 물의 유입되지 않았다.
- 4) 시험모델 주요부위의 치수측정 결과 침수시험 과정에서 용기의 변형이 발생하지 않았다.
- 5) 따라서 KN-12 수송용기는 법규에서 요구하는 가상사고 시험조건인 200 m 침수시험 조건에서 격납 건전성이 입증되었다.

참고문헌

- [1] 과학기술부 고시 제2001-23호, 방사성물질등의 포장 및 운반에 관한 규정, 2001.
- [2] IAEA, "IAEA Safety Standard Series No. ST-1 : Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996.
- [3] U.S. NRC, 10 CFR Part 71, Packaging and Transportation of Radioactive Material , 1997.
- [4] GNB, "Safety Analysis Report for Castor/KN-12 Transport Cask", GNB B 002/2002, Rev.0, 2002.

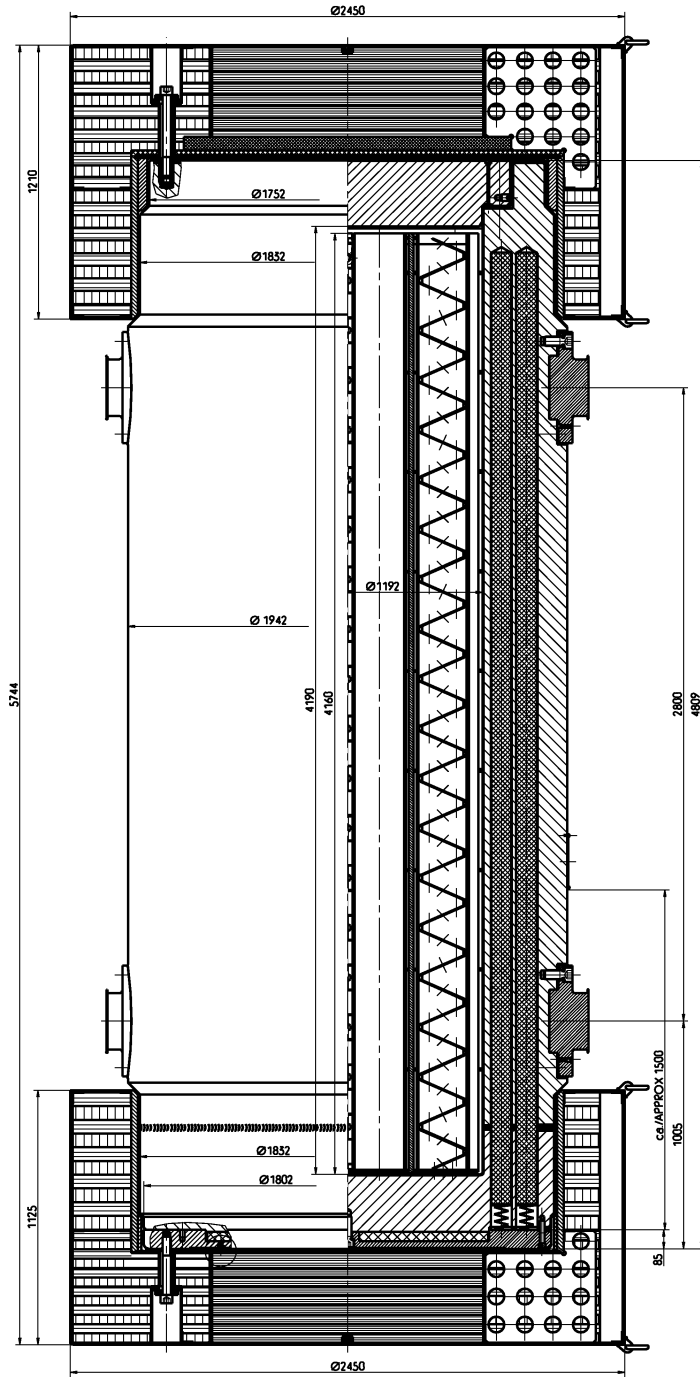


Fig. 1. Vertical Section of KN-12 Transport Cask.

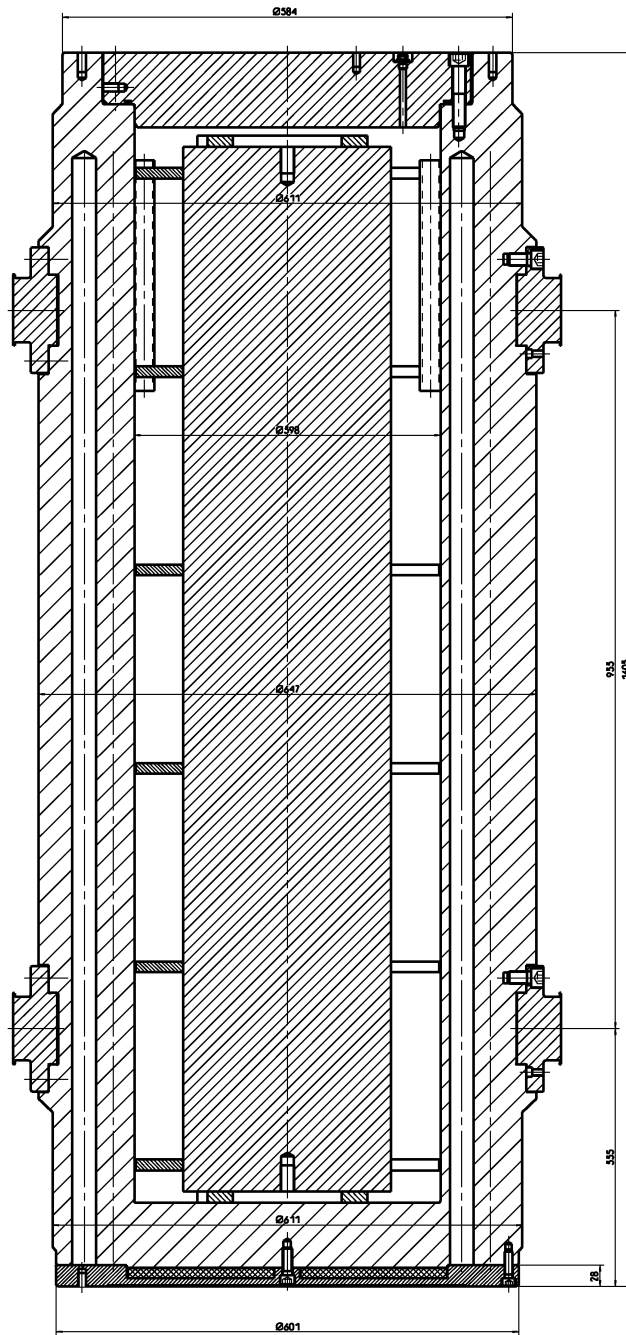


Fig. 2. Vertical Section of 1/3 Scale- Down Model.

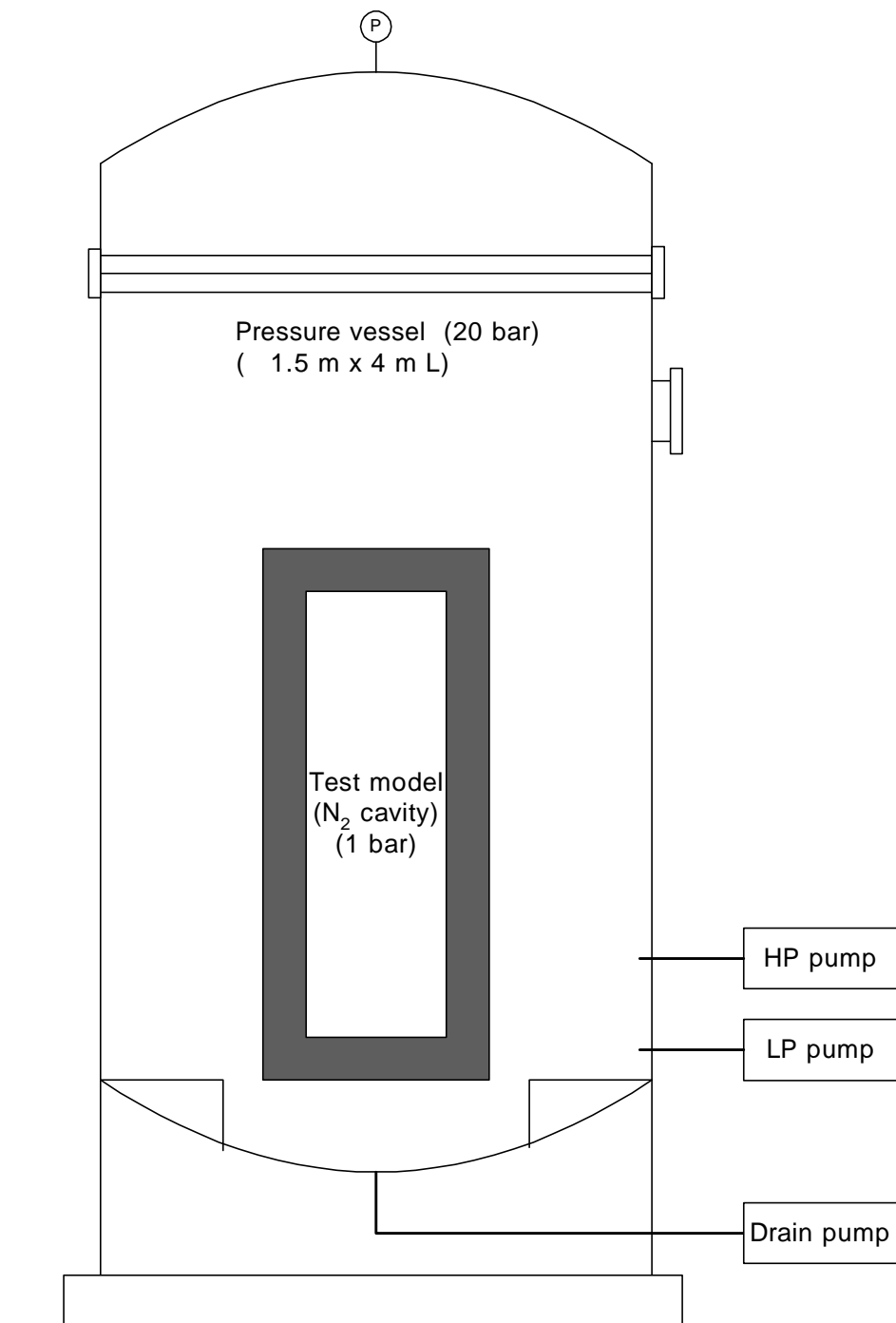


Fig. 3. Schematic Drawing of Water Immersion Test.

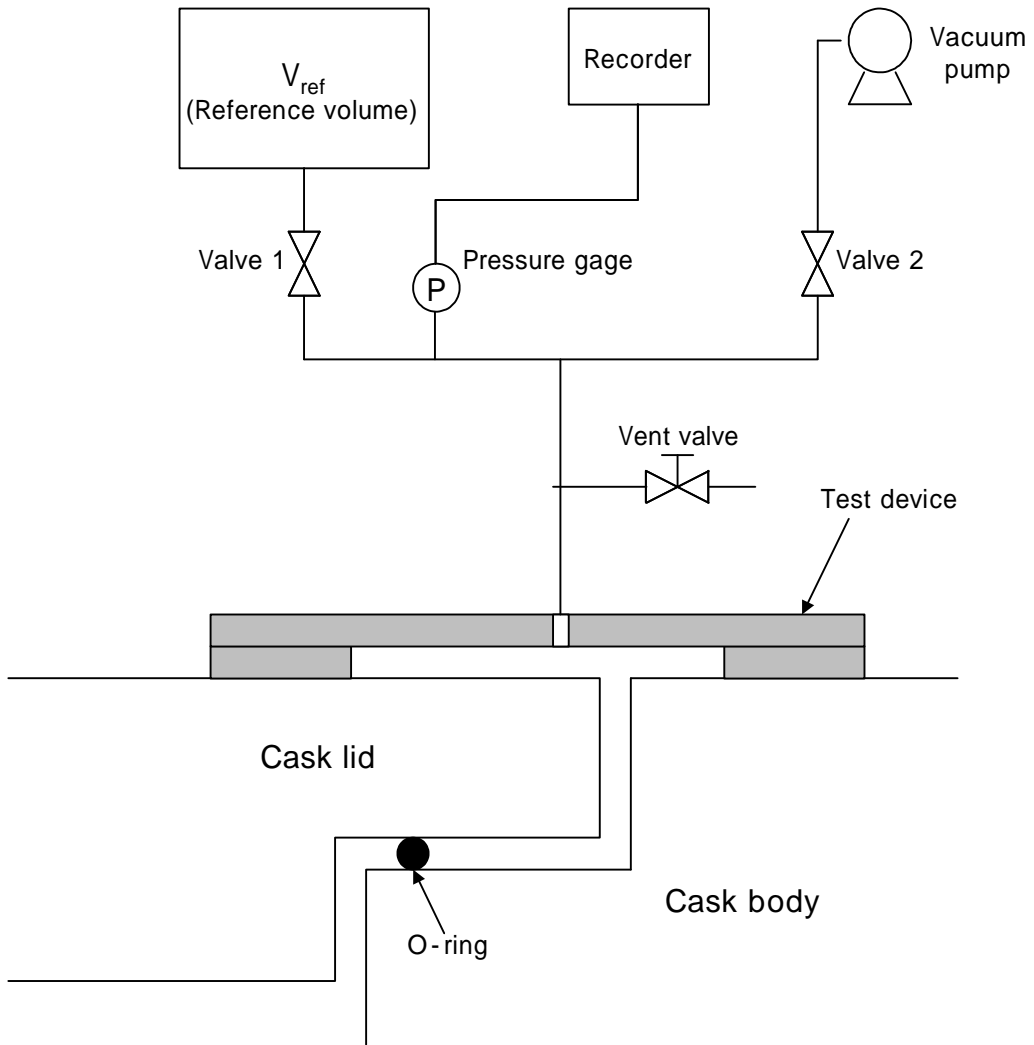


Fig. 4. Schematic Drawing of Leak Test.



Fig. 5. Leak Test before Water Immersion.



Fig. 6. Water Immersion Test.