

## コンクリートキャスクの除熱特性評価

丸岡邦男\*1 松永健一\*2 阿部岩司\*2 入野光博\*3 有川浩\*3 玉木光男\*3

コンクリートキャスク貯蔵方式では、使用済燃料をキャニスタに密封収納し、更にキャニスタをコンクリートキャスクに収納し貯蔵する。本報告では、コンクリートキャスクの除熱性能について、実物大除熱モデルを用いた除熱特性試験の評価結果を報告した。

実物大除熱モデルとして製作したコンクリートキャスクの仕様は、PWR用の $17 \times 17\text{UO}_2$ 燃料の中間貯蔵を想定したものであり、キャニスタの発熱量は1基あたり約20kWである。

実験に先立ち行った三次元熱流動解析による事前解析では、キャニスタ及びコンクリートキャスクを構成する鋼板材料の部材温度は、最も高温となる部位でも200程度であり、部材強度は解析評価上問題が無いことを確認した。

定常時の除熱性能確認試験では、実機で想定されるキャニスタの発熱量変化を考慮して設定したキャニスタ発熱量10~30kWの範囲に対して、コンクリートキャスクが十分な冷却性能を持つことを確認した。また、コンクリートキャスク本体の冷却機能喪失時の特性評価として、給気口の半数閉塞を仮想して除熱性能確認試験を実施した。試験では、コンクリートキャスク温度は、閉塞側で全体に10~15程度高くなり、キャニスタ側の表面最高温度は約90となるが、部材の健全性に関わるような温度上昇ではないことを確認した。

**Keywords:** コンクリートキャスク, 使用済燃料, 貯蔵方式, キャニスタ, 除熱性能, PWR

The concrete cask storage system stores spent fuel by first sealing it within canisters and then containing such canisters inside a concrete cask. This report describes the results of a full-size model test performed to examine the heat dissipation characteristics of the concrete cask and to ascertain its ability to deal with elevated temperature.

The specification to which a full-size concrete cask model was fabricated assumed an interim storage of  $17 \times 17\text{UO}_2$  fuel that was burned in PWR, estimating the heating value of spent fuel containing canister to be approximately 20kW apiece. The test, which actually covered canister heating values ranging from 10kW to 30kW per unit to allow for temperature variations likely to be experienced in actual operation, verified that the concrete cask member did not exceed temperature limits. Test condition anticipated highest air temperature inside the spent fuel storage facility to be 30 and, with reference to existing standard, set temperature limits of 65 or less for the main body of concrete and 90 or less for the local part as criteria.

Preliminary 3-D thermo hydrodynamic analysis done prior to the test indicated that the temperature of the local part of the concrete cask member would be below 90. It also confirmed that steel material used as the structural member of the canisters or concrete cask would remain around 200 even in an area where it was highest, validating that the integrity of such material would pose no problem from the analytical point of view.

Heat dissipation performance test conducted in steady state verified that the concrete cask was able to have a sufficient cooling capacity against per-canister heating values in the 10kW to 30kW range which had been chosen in anticipation of temperature variation thought to be encountered in actual service. Also, to examine the consequence of the concrete cask having lost its cooling ability, another heat dissipation test was carried out under condition simulating the closure of half of the cask's air supply ports. The test showed that the concrete cask would increase just 10 to 15 in temperature throughout on the side where such closure occurred and the surface temperature of the canisters would rise to no more than 90, indicating that there would be no such temperature rise that affects the soundness of the members of these components.

**Keywords:** concrete cask, spent fuel, storage system, canister, heat dissipation characteristics, PWR

### 1 はじめに

コンクリートキャスク方式の中間貯蔵では、金属キャスク方式に比べてキャスク及び貯蔵施設が大型化するが、貯蔵キャスク本体が金属キャスクと比較して低コストで製作可能であることがメリットとして挙げられる。貯蔵容器としてのコンクリートキャスクに要求される性能は、除熱性能、遮へい性能、構造強度等があるが、本報告ではコンクリートキャスクの除熱性能について、実物大除熱モデルを用いた除熱特性試験の評価結果を報告する。

### 2 コンクリートキャスクの仕様

#### 2.1 温度評価基準(制限温度)

コンクリートキャスク貯蔵方式では、使用済燃料をキャニスタに密封収納し、更にキャニスタをコンクリートキャスクに収納し貯蔵する。コンクリートキャスクの除熱機能に対しては、原子力発電所内での使用済燃料の乾式キャスク貯蔵と同様に、以下の項目が要求されると考えられる。

キャスク・キャニスタの構成部材が健全性を保つ温度以下であること。

設計貯蔵期間貯蔵しても燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度以下であること。

我が国では、コンクリートキャスク構造材温度の制限温度の設定が検討段階であるため、本報告の評価では、国内での原子炉格納容器コンクリートの温度制限値および米国コンクリートキャスクの温度制限値を参考とした。コンクリート部材の温度評価基準に関する国内原子力での基準および米国コンクリートキャスクでの適用基準を

Cooling performance evaluation of the concrete cask, by Kunio Maruoka (kunio\_maruoka@hq.mhi.co.jp), Kenichi Matsunaga, Ganji Abe, Mitsuhiro Irino, Hiroshi Arikawa, Mitsuo Tamaki

\*1 三菱重工業株式会社 原子力事業本部 原子力技術センター Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Nuclear Engineering Center, Nuclear Energy System Headquarters

〒220-8401 横浜市西区みなとみらい3丁目3-1

\*2 三菱重工業株式会社 神戸造船所 Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Kobe Shipyard & Machinery Works

〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎1丁目1-1

\*3 三菱重工業株式会社 高砂研究所 Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Takasago Research & Development Center

〒676-8686 高砂市荒井町新浜2丁目1-1

Table1 Temperature criterion of concrete member

Concrete temperature		Domestic Regulation	ACI-349 Appendix A
Normal operation or any other long term period		65	Normal operation or any other long term period
	Local area	90	
Accident or any other short term period		175	Accident or any other short term period
	Local area	350	

Table1 に示す .

2.2 仕様

コンクリートキャスク及びキャニスタの仕様諸元と構造の概略を Table2 及び Fig.1 に示す . 実物大除熱モデルとして製作したコンクリートキャスクの仕様は, PWR 用の 17×17UO<sub>2</sub> 燃料の中間貯蔵を想定したものである .

コンクリートキャスク内に収納されるキャニスタは, 二重の溶接蓋構造を持つ円筒容器である .

キャニスタの寸法及び重量は, 発電所と中間貯蔵施設の間, 及び中間貯蔵と再処理工場の間を輸送する際の制約条件から設計されている . キャニスタは 24 体以上の使用済燃料集合体を密封収納可能であり, キャニスタの発熱量は 1 基あたり約 20kW である .

コンクリートキャスクの構造は鋼板 (充填コンクリート) 構造である . コンクリートキャスクの構造は主に鋼構造に担保されており, 胴部及び蓋/底部に充填されたコンクリートは, 遮へい要求に基づき設計されている .

2.3 除熱設計

コンクリートキャスクの冷却システムは, 動力を必要としない

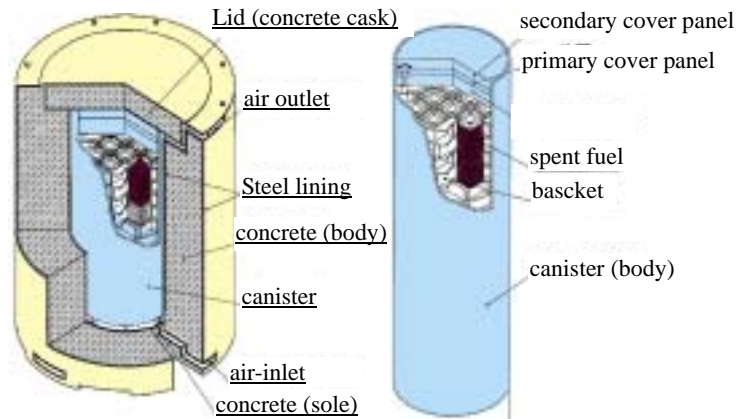


Fig.1 Concept of concrete cask and canister

方式として空気の自然対流による冷却を採用している . コンクリートキャスクに収納されたキャニスタの周囲には, 冷却空気の流路を設けている . 燃料の崩壊熱は, キャニスタ容器を介して底部の空気入口から給気した空気に伝達され, 暖められた空気はコンクリートキャスク上方の出口から排出される . 空気入口と空気出口の双方は, 使用済燃料から発生する放射線のストリーミングを考慮した屈曲構造を採用している .

3 除熱性能確認

3.1 実物大除熱試験モデル

実物大除熱試験モデルでの除熱試験体系を Fig.2 に示す . コンクリートキャスクの除熱試験は, 実機の設置状況を想定し, 外気の取り入れが可能な風防建屋内に設置した状態で実施した . キャニスタ 1 基あたりの発熱量は, Table3 に示すとおり燃料集合体種と貯蔵期間中の経年変化によって変化する . 試験では, 実機で貯蔵期間中にわたって想定されるキャニスタの発熱量変動範囲を考慮し, キャニスタ発熱量 10~30kW の範囲に対して, コンクリートキャスクの構成部材が過熱して温度制限値を越えないために必要な冷却性能を持つことを確認した .

なお, コンクリートキャスク構造材温度及びキャニスタ発熱分布は, Fig.3 に示す計測点で計測を実施した .

Table2 The main specification of concrete cask

Storage fuel	17×17 UO <sub>2</sub> fuel (PWR)
	Burnup :55GWd/t
	21assembly /canister
	25kW/canister
Canister	Double lid welded construction
Size	4.5m (overall height)
	1.7m (outside diameter)
Weight	15ton (not charge the fuel)
Concrete cask	Steel plate (concrete) structure
Size	6.0m (overall height)
	3.5m (outside diameter)
Weight	120ton

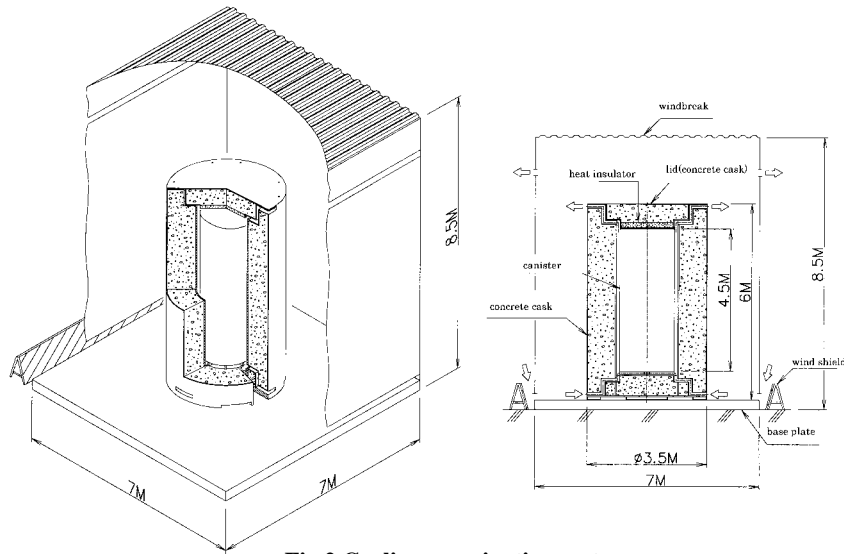


Fig.2 Cooling examination system

Table3 Aging of canister heat generation

Unit: kW

Burnup	Peaking factor	0 year Storage	20 year Storage	40 year Storage
Burnup :50GWd/t	1.0	19.1	12.1	8.7
	1.15	23.4	14.4	10.2
Burnup :55GWd/t	1.0	21.7	13.6	9.7
	1.15	26.7	16.4	11.5

- (condition)
- Fuel type :17 × 17 UO<sub>2</sub> 55GWd/t
  - Cooling term :Ten years in power plant
  - Number of spent fuel :21/canister
  - Peaking factor :midrange 1.15 , upper and lower edge 1.0
  - Decay Heat :based on ORIGEN2 code.

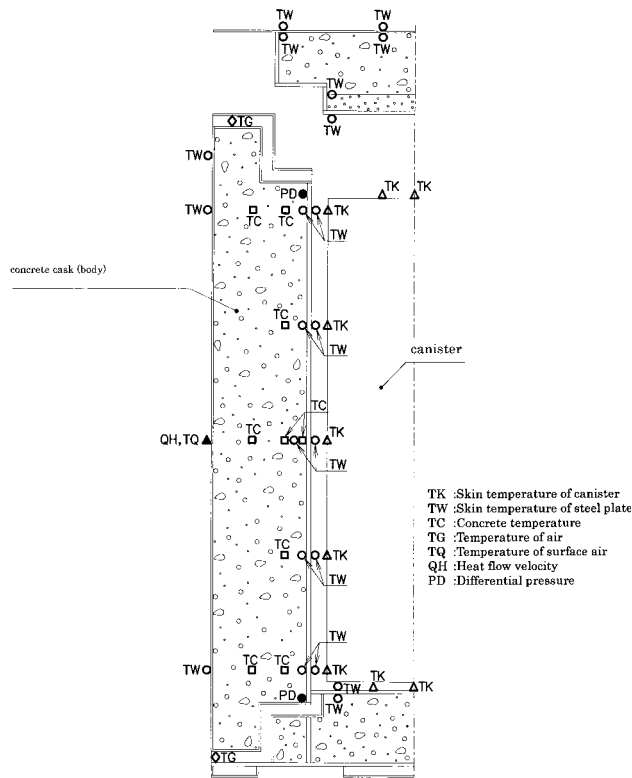


Fig.3 Temperature distribution measurement point

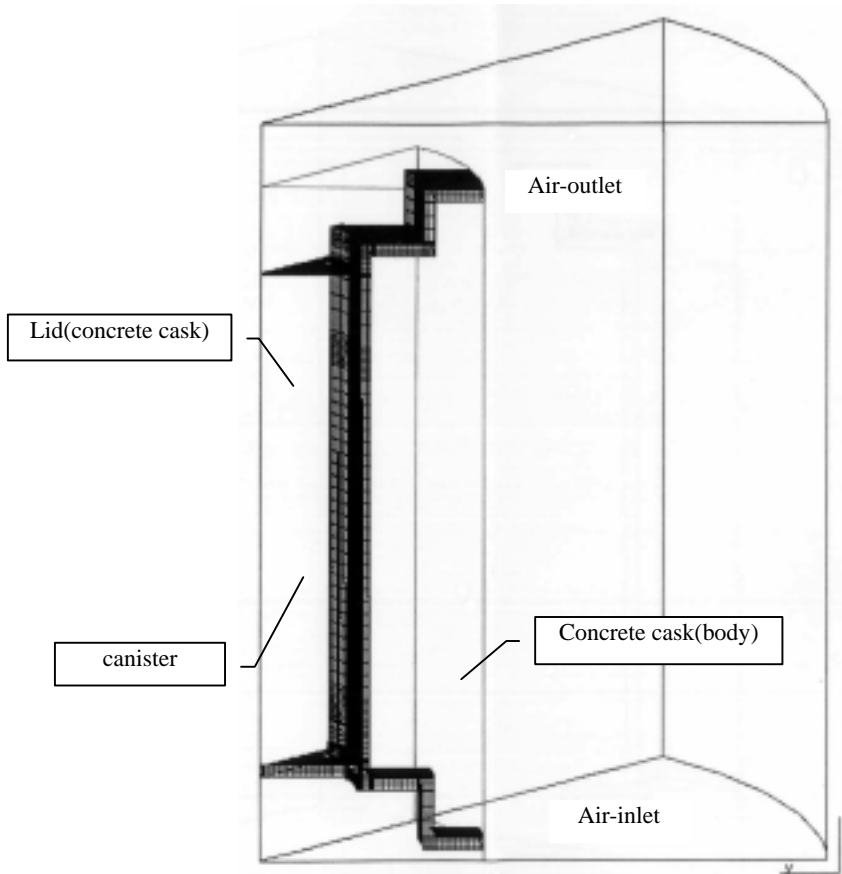


Fig.4 Three dimension thermal hydraulics analysis model

(条件)

- ・燃料タイプ : 17x17UO<sub>2</sub> 55Gwd/t
- ・冷却期間 : 10年
- ・体数 : 21体
- ・ピッキング : 中央部 10/12:1.15 上下  
端部各 1/12:1.0

以上, ORIGEN2 コードより算出した核種割合を  
基に算定

3.2 解析による事前検討

実物大コンクリートキャスクの除熱試験条件を基に, 3次元熱流動解析を用いて部材温度分布を求めた.

使用した解析コードは, 3次元熱流動解析コード「SCRYU」であり, 解析モデルではキャニスタ及びコンクリートキャスクの対称性を考慮して, 縦割り8分割(45°)の形状を模擬した. 解析メッシュは合計約20万のメッシュで構成され, 冷却風路については, Fig.4に示すとおりモデル化を行った.

(解析条件)

- ・解析コード : 3次元熱流動解析コード SCRYU
- ・解析モデル : 縦割り8分割(45°)モデル
- ・解析メッシュ : 約20万メッシュ

温度一定状態でのコンクリートキャスク除熱性能解析結果に関して, 温度分布を Fig.5 に, 主要部材の到達温度を Table4 に示す. キャニスタ及びコンクリートキャスクを

Table4 Result of Cooling performance analysis with normal condition

		Canister heat generation condition			Note
		10kW	20kW	30kW	
Air Temperature and velocity	Outlet Temperature	Inhalation+25	Inhalation +44	Inhalation +54	
	Flow rate	0.331kg/s	0.426kg/s	0.485kg/s	
Canister/Cask Temperature	Canister body	88 (108 )	138 (158 )	172 (192 )	( ): Inhalation of 30 air.
	Cask steel lining	31 (51 )	44 (64 )	52 (72 )	
	Concrete body	30 (50 )	43 (63 )	47 (67 )	

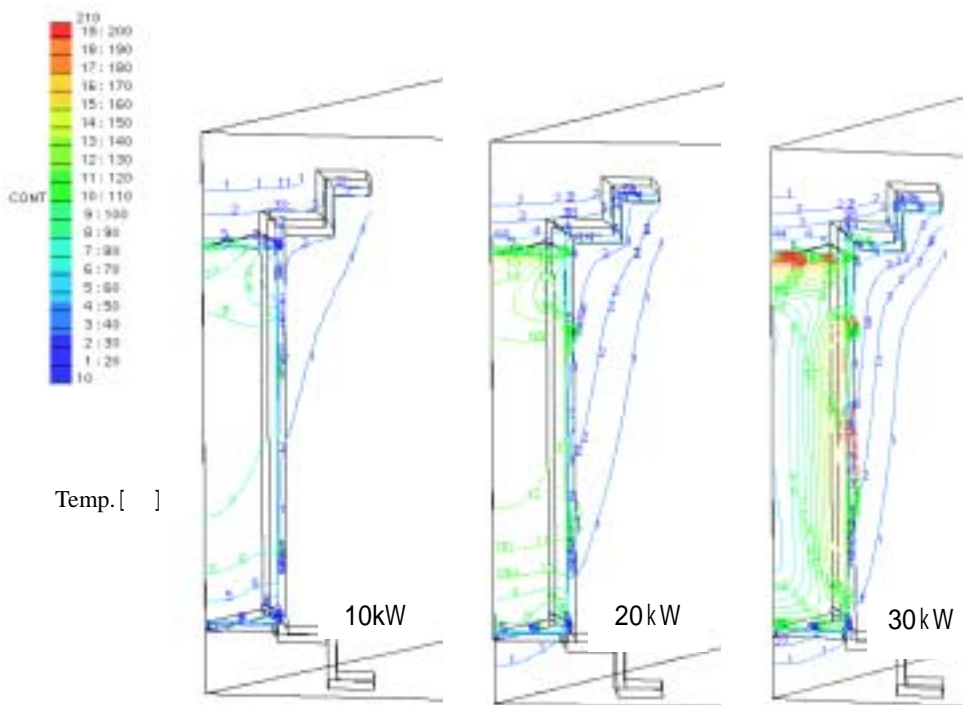


Fig.5 result of thermohydrodynamic calculation

構成する鋼板材料の部材温度は、最も高温となる部位でも 200 程度であり、金属材料の強度に及ぼす熱的影響を特に考慮する必要は無いと考えられる。また、コンクリートの部材温度は、キャニスタ発熱量が高い条件 (30 kW) において一部の部材が主要部到達最高温度 65 以上(67) となるが、局所の制限温度 (90) には達しておらず、構造健全性は確保できる結果を得た。

3.3 除熱性能確認試験

(1) 定常時の除熱性能確認試験

定常時の除熱性能確認試験では、キャニスタの発熱量をパラメータとして、コンクリートキャスクの除熱状況を測定することで冷却性能の裕度を確認した。

a. 試験条件

- ・キャニスタ発熱量 : 10 kW ,20 kW ,30kW (ヒータ出力値)
- ・給排気口の開口 : 入口,出口とも 4 箇所全て開放

b. 試験結果

キャニスタ発熱量 10 kW ,20 kW ,及び 30 kW での試験結果をまとめて Table5 に示す。

排気温度・風路圧力損失

Fig.6 に示すとおり、給排気温度差はキャニスタ発熱量に対して線形に変化する。給排気温度差は、キャニスタの定格発熱量 (20 kW) 時に +44 である。排気温度は局所のコンクリート制

限温度と比較しても十分低く保たれている。

風路の圧力損失は、空気入口部および出口部の圧力損失を微圧計での連続計測値を基に経時変化によるドリフトを補正して求めた。20 kW 定格時の自然通風の圧力損失は、約 45Pa(0.45mmAq)である。

除熱バランス

自然通風による除熱量は、コンクリートキャスクの空気出入口温度と空気流量から求めた。キャニスタの定格発熱時には、自然通風による除熱量は 15.4kW であり、全発熱 20 kW に対して 77%となった。

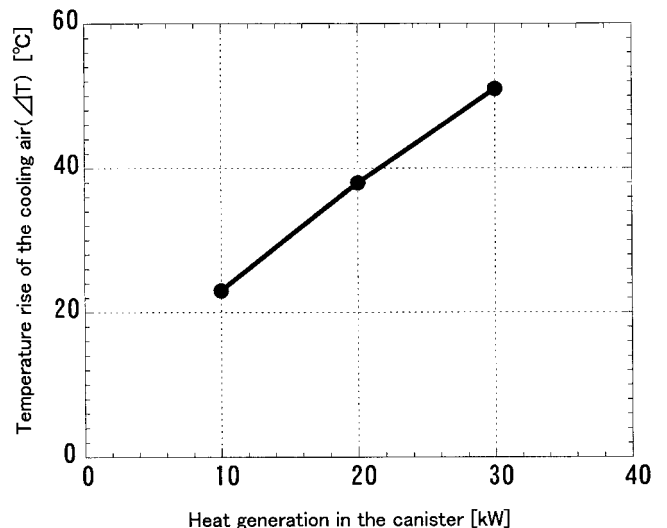


Fig.6 Temperature rise of the cooling air

Table 5. Result of Cooling performance test result with normal condition

		Canister heat generation			Note
		10kW	20kW	30kW	
Air Temperature and velocity	Outlet Temperature	+23	+38	+51	
	Flow rate	0.33kg/s	0.40kg/s	0.44kg/s	
	Velocity in cask	0.50m/s	0.64m/s	0.73m/s	
	Fluidic resistance	0.28mmAq	0.46 mmAq	0.53 mmAq	
Heat Flux	For Air	7.5 kW (77%)	15.4 kW (77%)	23.1 kW (77%)	
	For cask lid	0.8 kW	1.6 kW	2.4 kW	
	For cask body	1.7 kW	3.0 kW	4.5 kW	
Canister/Cask temperature	Canister body	111	167	207	Inhalation of 30 air.
	Cask steel lining	52	75	96	
	Concrete body	47	63	79	
	Outlet Temperature	30	30	30	

キャスク表面放熱量は、キャスク側面および上蓋表面に熱流束計を取り付け計測した。キャスク側面の熱流束は、高さ方向に分布が大きく上部は下部の約3倍であった。上蓋の熱流束は、側面と比較してさらに大きい。定格時のキャスク放熱量は、キャスク側面が、3.33kW、上蓋が11.8kW、合計5.1kWであり、胴下部の熱流束は0.2kW程度で非常に小さい。キャスク表面放熱量の計測値は、自然通風除熱量とヒータ入力との差(4.6kW)とほぼ等しい。

#### 主要部材の到達温度

主要部材の到達温度は、除熱試験での計測値を外気温度が30の場合を想定して補正した値を示した。

#### ・キャニスタ温度

キャニスタ表面温度は、温度範囲が約90～167であり、上蓋部の温度は胴部最高温度よりも低く、最高温度は胴部(167)で計測された。胴部は高さ方向に温度分布があり、全高約4.5m内で中間より若干上部(3.3m)近辺で最高温度を測定した。

#### ・コンクリートキャスク鋼製ライナ温度

鋼製ライナ底部の温度は給気による冷却効果で外気温度に近い。鋼製ライナ胴部は、約40～75の範囲で分布を持っており(Fig. 5)、キャニスタが高温となる部位近辺で最高温度を計測した。また、周方向の温度差は少なく、除熱風路内での空気は十分に混合されていると評価できる。なお、上蓋部は

自然通風が少ないため、コンクリートキャスク鋼製ライナの温度は胴部に比べて高温となる。

#### ・コンクリート温度

キャニスタ直下では、構造体からの伝熱により約50となるが、コンクリートの温度制限値に対しては裕度を保っている。コンクリートキャスク胴部は、上側ほど部材温度が高くなるが、周方向の温度分布はなく、歪み等の構造への影響も少ないと考えられる。鋼製ライナ近傍のコンクリート温度は、最高温度部で約75である(Fig. 5)が局部温度制限(90)を下回っている。

以上、キャニスタ発熱量20kWでの冷却状況を纏めた。また、実機で想定されるキャニスタの発熱量変化を考慮した10～30kWの発熱に対する冷却性能についても同様に、コンクリートキャスクが十分な冷却性能を持つことを確認している(Table 5)。

#### (2) 給気閉塞時の除熱性能確認試験

米国ではコンクリートキャスクを屋外に設置するため、飛来物・降雪等による空気入口全閉塞を除熱機能喪失事象として設定している。一方、我が国のコンクリートキャスク貯蔵方式では、専用の貯蔵建屋内にコンクリートキャスクを収納する方式が考えられており、適切に管理された貯蔵施設では、貯蔵中のコンクリートキャスクに対して冷却性能を害する様な外部からの飛来物等は考え難いが、本試験ではコンクリートキャスク本体の

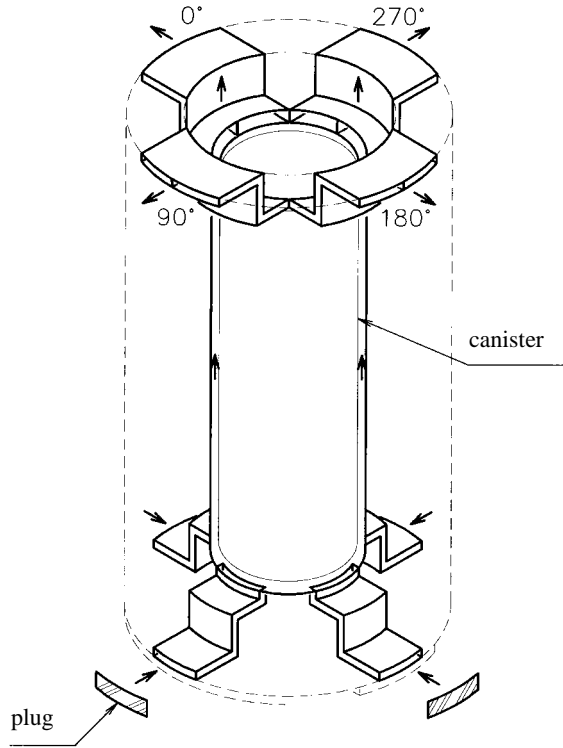


Fig.7 Examination system –half of air inlet in blockage-

冷却機能喪失時性能評価のための事象として給気口の半数閉塞を仮想し、除熱性能確認試験を実施した。なお、キャニスタの発熱量は、定格の 20kW とした。

a. 試験条件

- ・キャニスタ発熱量 : 20kW ( 定格値 )
- ・給排気高の開口 : 入口 2 箇所閉塞,

出口 4 箇所全て開放 ( Fig.7 )

b. 試験結果

周方向に均等に配された 4 つの空気入口の内、2 箇所を閉塞した状態でのコンクリートカスクの除熱性能を確認した。キャニスタ発熱量 20kW での給気口閉塞有無の差異を Table6 に示す。

排気温度・自然通風力

自然通風による冷却空気量は、給気抵抗が増大するため無閉塞の状態に比べて約 70% ( 0.29kg/s ) に減少する。冷却空気量は減少するが、排気温度は約 30% ( 12~13 ) 増加しており、自然通風による除熱量としては数%の低下に留まる。

風路の圧力損失は、閉塞のない定格除熱状態のほぼ倍の値、約 8Pa ( 0.8mmAq ) となった。

除熱バランス

自然通風除熱量のバランスは、閉塞状態で 4% ( 77% 73% ) 減少し、カスク胴部および上蓋表面の熱流束 ( 放熱量 ) は、カスク構造材温度の上昇に伴って増大し、閉塞のない定格除熱状態に比べて数 10% 増加した。

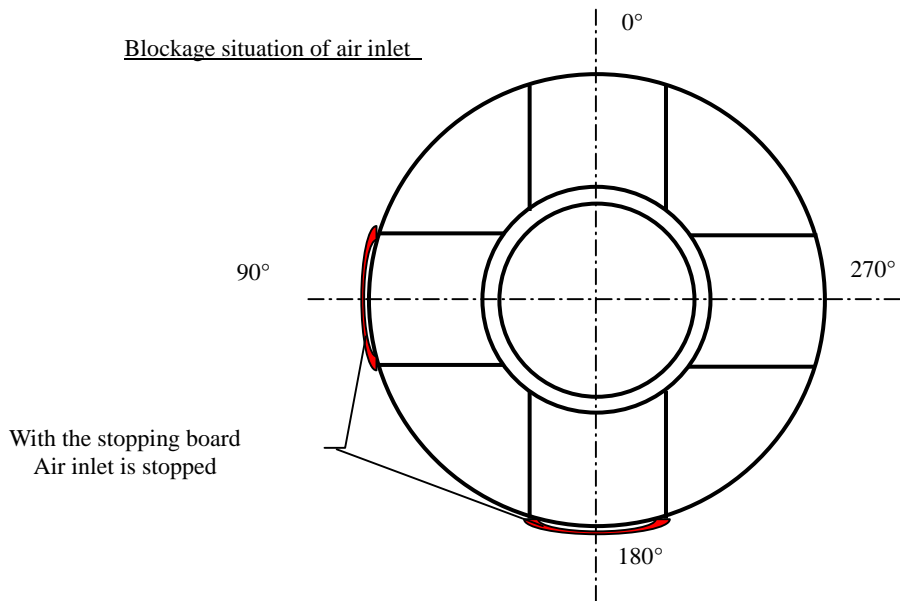
主要部材の到達温度は、閉塞が無い除熱状態に比べて全体に高くなり、給排気の非対称性により周方向に温度分布が生じる。キャニ

Table6 Influence of charge blockage on cooling performance

Measurement item		20kW of canister heat generation		Note
		Normal condition	Plug half air-inlet	
Air Temperature and Velocity	Outlet Temperature	Inhalation +38	Inhalation +51	
	Flow rate	0.40kg/s	0.29kg/s	
	Velocity in Cask	0.64m/s	0.46m/s	
	Fluidic resistance	4.6Pa (0.46mmAq)	7.7Pa (0.77mmAq)	
Heat Flux	For Air	15.4kw (77%)	14.6kw (73%)	
	For cask lid	1.6kW	1.7kW	
	For cask body	3.0kW	3.7kW	
Canister/Cask temperature	Canister body	167	178	Inhalation of 30 air.
	Cask steel lining	75	94	
	Concrete body	63	79	

**Table7** Airflow velocity and thermometry result - half of air inlet in blockage -

Direction	Air inlet		Air outlet	
	Temperature	Flow velocity		Temperature
0°	27.5	1.6 m/s	0°	27.5
90°	Blockage		77	90°
180°	Blockage		77	180°
270°	27.5	1.7 m/s	270°	27.5



スタの上蓋温度は、通常除熱時と比較して約 15 高くなっており、胴部の表面最高温度は約 180 である。

給気口の半数閉塞の影響により、空気出口での排気流速・温度が各排気口で不均一となることを確認した。空気入口が閉塞した直上の空気出口では、流量・排気温度ともに減少し、除熱量が低下した。コンクリートキャスクの給気口閉止方向を Fig.8 に、各給排気口の通気流速及び温度を Table7 に示す。コンクリートキャスク内側は、閉塞側で全体に 10 ~ 15 程度高くなり、キャニスタ鋼板の表面最高温度は排気温度（約 90 ）とほぼ等しくなるが、部材の構造強度低下に関わるような温度上昇ではない。コンクリート部材温度は、閉塞のない状態と比較して全体的に 10 程度高くなる結果を得た。

以上、コンクリートキャスク本体の冷却機能喪失時性能評価として給気口の半数閉塞を仮想した除熱性能確認試験を実施し、キャニスタの発熱量が定格の 20kW の条件で、コンクリートキャスクが十分な冷却性能を持つことを確認した。

#### 4 まとめ

定常時の除熱性能に関して、実機で想定されるキャニスタの発熱量変化を考慮して設定したキャニスタ発熱量 20kW（定格出力）に対して、コンクリートキャスクが十分な冷却性能を持つことを確認した。

また、コンクリートキャスク本体の冷却機能喪失時の除熱性能に関して、給気口の半数閉塞を仮想して除熱性能確認試験を実施し、コンクリートキャスクの部材の健全性に関わるような温度上昇ではないことを確認した。