

(論文)

# 耐熱性コンクリートを使用した新型コンクリートキャスク

## New Heat Resistant Concrete Casks



下条 純\*  
Jun Shimajo



谷内廣明\*(工博)  
Dr. Hiroaki Taniuchi



萬谷健一\*  
Kenichi Mantani



大脇英司\*(工博)  
Dr. Eiji Owaki



杉原 豊\*\*\*  
Yutaka Sugihara



畑 明仁\*\*\*  
Akihito Hata

Heat resistant concrete containing hydrogen has been developed in the design of a new type of cask that has been modeled on the same concept of metal cask technologies for use under high temperature conditions. The allowable temperature of conventional concrete is limited to 90 because most of its moisture is free water and therefore hydrogen, which is effective for neutron shielding, can be easily lost. Our newly developed concrete uses crystal water and as a result can be used under high temperatures.

まえばき = 国内の電力会社を主体として、2010年ごろの実用化を目指して使用済燃料の中間貯蔵設備の準備が進められている。現状での最有力候補は輸送及び貯蔵の両方で実績がありかつ信頼性の高い金属キャスクであるが、経済性の観点からコンクリートキャスクについても実用化に向けて技術基準の作成が進められている。また、米国では普通コンクリートを使用した貯蔵用コンクリートキャスクが、既に実用化されている。

しかしながら、従来のコンクリート材料は、含有水のほとんどを100以上で蒸発する自由水で保有していることから、通常の使用可能温度として65以下、局所的な高温部でも90以下に制限されていた。これは、自由水が蒸発することにより、中性子遮へいに有効な水素含有量が低減し、更にコンクリート材料の強度が劣化するためである。

したがって、従来型のコンクリートキャスクには、除熱のために図1に示すような吸排気口が必要不可欠であった。すなわち、使用済燃料を装荷した金属製の密封容器であるキャニスタとコンクリートキャスクとの間に外気を自然対流させて除熱することにより、コンクリート材料の温度上昇を防いでいた。しかしながら、これら吸排気口は遮へい体の欠損部となり放射線のストリーミングが発生して局所的に線量当量率が増加すること、また、外気から取込まれる海塩粒子などによるキャニスタの腐食の問題があり、その対策として、例えば、前者に対しては吸排気口を屈曲構造にすることにより、後者に対しては耐腐食性に優れた二相系ステンレス鋼であるSUS329J4L (25Cr-6Ni-3Mo-0.2N-LC) などを使用することにより克服している<sup>1)</sup>。

当社は、吸排気口に起因する技術的な問題を解決するために、150程度の高温でも中性子遮へいに有効な水素含有量を確保することができる耐熱性コンクリート材

料を大成建設(株)と共同で新たに開発した。本材料を使用することで、図2に示すように、従来型コンクリートキャスクに必要な不可欠であった吸排気口をなくすことができ、現在実用化されている金属キャスクと同様の技術概念の新しいコンクリートキャスクの設計製造が可能となった。

### 1. 耐熱性コンクリート材料の特徴

#### 1.1 材料組成

本材料の大きな特徴は、100以上の温度でも中性子遮へいに有効な水素含有量(含水量)を確保することができる点にある。このような高温環境下では、従来の普通コンクリートのように自由水では必要な水素量を確保できない。そこで、水酸化カルシウムを添加して、その結晶水で水分を保持させることにより、100以上の高温でも中性子遮へいに十分な水素量を確保することを可能にした。一方、キャスクの遮へい材としては、ガンマ線に対する遮へい性能も要求される。そのため、本材料では、金属材料(鉄粉及び鉄繊維)を添加することで従来の普通コンクリートと同等以上の密度を維持することで、十分なガンマ線遮へい性能の確保をも可能にした。なお、本材料にはコンクリートとして本来含まれるべき細骨材及び粗骨材を使用していないが、ここでは耐熱性コンクリートと称する。

#### 1.2 材料物性

本材料を使用するために必要と考えられる基礎物性値を測定した。その結果を表1に示す。ここでは、常温及び想定した実際の使用環境温度150での物性値を測定した。ここで、熱伝導率はJIS R 2616「耐火れんがの熱伝導率の試験方法」により、線膨張係数はJIS A 1325「建築材料の線膨張係数測定方法」により、圧縮強度はJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」により、

\*エンジニアリングカンパニー エネルギー本部 高砂機器工場 \*\*大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所  
\*\*\*大成建設(株) エンジニアリング本部 原燃サイクル施設グループ

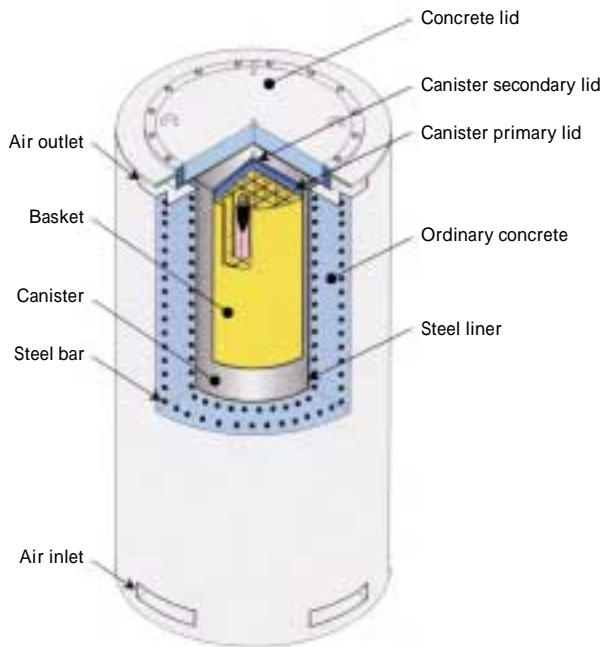


図1 従来型コンクリートキャスク  
Fig. 1 Conventional concrete cask

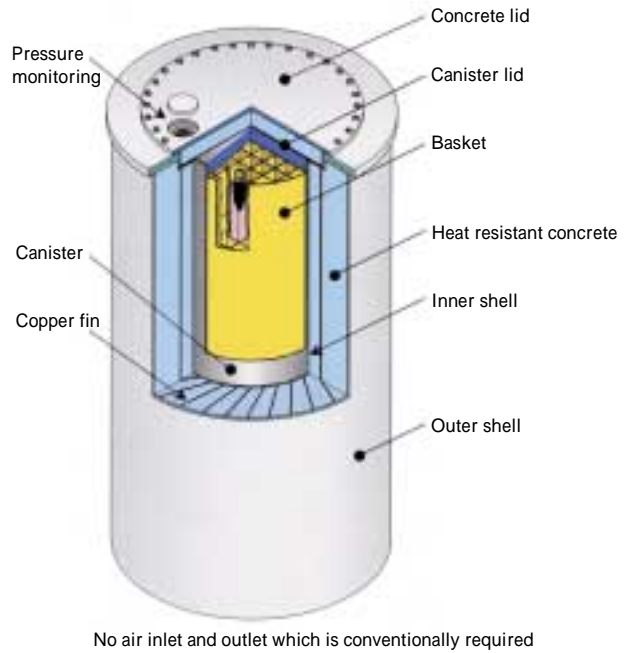


図2 新型コンクリートキャスク  
Fig. 2 New type concrete cask

表1 耐熱性コンクリート及び普通コンクリートの物性値  
Table 1 Properties of heat resistant concrete and ordinary concrete

	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Moisture content (mass%)	Heat conductivity (W/(m·K))	Coefficient of linear expansion (1/K)	Specific heat (kJ/(kg·K))	Compressive strength (MPa)
Heat resistant concrete at room temp.	2.3	16.6	2.0	$1.1 \times 10^{-5}$	0.94	87
Heat resistant concrete at 150	2.17	10.8	1.4	-	-	-
Ordinary concrete at room temp.	2.25 ~ 2.3 <sup>*1</sup>	4 ~ 7 <sup>*2</sup>	2.6 ~ 2.8 <sup>*3</sup>	$1.0 \times 10^{-5}$ <sup>*1</sup>	1.0 ~ 1.3 <sup>*2</sup>	18 ~ 40 <sup>*4</sup>

Note \*1 : According to reference 2 )  
 Note \*2 : According to reference 3 )  
 Note \*3 : According to reference 4 )  
 Note \*4 : According to reference 5 )

比熱は液体混合法により測定し、密度は質量と外形寸法から計算して求めた。また、150 における結晶水の含水率は、サンプル(約 30g)を窒素パージしながら 1 000 で加熱して発生するガス中に含まれる水分をシリカゲルで捕集し、その質量増加量から測定した<sup>6)</sup>。比較のために、普通コンクリートの物性値を参考に併記した。この結果から、密度は普通コンクリートと同等であり、含水率は 2 ~ 3 倍であることが分かった。室温と 150 における含水率に 5 % 程度の差があることから、本材料は加熱により蒸発する自由水を約 5 % 保持しており、これが室温と 150 における密度の差として現れていると考えられる。また、圧縮強度は加熱後において高強度コンクリートに相当することが確認された。

### 1.3 加熱劣化特性

本材料を遮へい材として使用するためには、使用環境温度で密度低下(水素の減少)の傾向を把握しておくことが必要不可欠である。金属キャスクで使用されている中性子遮へい材(レジン或いはゴム系の材料)では、約 1 年間にわたる加熱試験を実施して、その間の密度減少傾向から使用期間(40 ~ 60 年程度)中の密度減損量を

予測する方法が一般的によく使用されている。今回はその予備的な試験として、開放系の熱風炉を使用し、想定使用環境温度の 150 で最長 30 日間にわたる加熱試験を実施して、本材料の質量の経時変化を調べた。その結果を図 3 に示す。この結果から、加熱初期に約 5 % 質量減

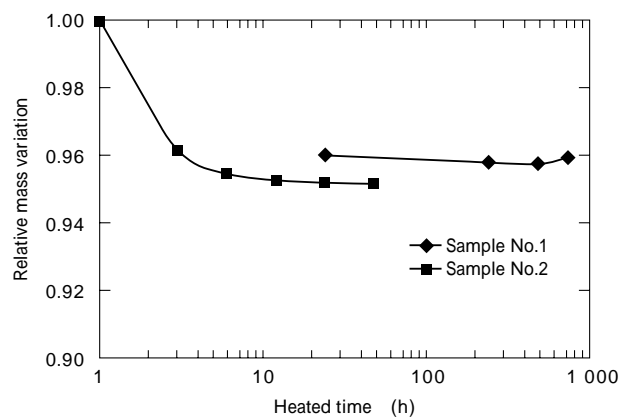


図3 耐熱性コンクリートの加熱による質量変化(加熱温度: 150 )  
Fig. 3 Mass variation of heat resistant concrete during heated time (Heated temperature : 150 )

少しその後ほぼ一定の質量を保持していることが認められた。これは、加熱初期に保有していた自由水を主に放出したためである。水酸化カルシウムの分解温度は約 580 であることから、150 では分解することはなく安定したコンクリート材料であるといえる。

#### 1.4 その他の特徴

本材料の切断サンプルを写真 1 に示す。本材料には骨材として使用される砂利や鉄筋が使用されないため、従来の普通コンクリートと比較して均質な遮へい材料である。また、鉄繊維を添加することで、コンクリートの熱膨張によるひび割れ抵抗性にも優れている。

## 2. 遮へい性能評価

本材料の遮へい性能を確認するために、簡易遮へい計算を行い比較した。

### 2.1 評価方法

計算に使用した燃料仕様を表 2 に示す。この燃料を収納するコンクリートキャスクについて遮へい計算を実施し、耐熱性コンクリート及び普通コンクリートの遮へい性能を比較した。計算モデルは図 4 に示すとおりであり、遮へい体を使用するコンクリートを普通コンクリート及び耐熱性コンクリートの場合の 2 ケースについて計算し



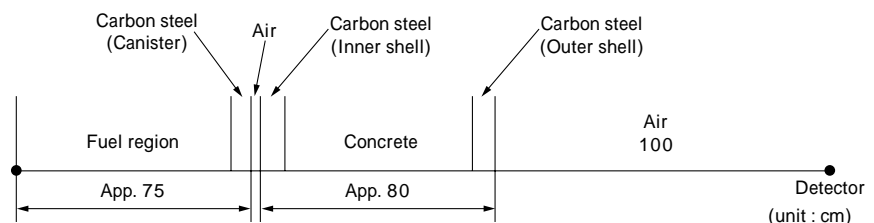
写真 1 耐熱性コンクリートの断面サンプル  
Photo 1 Cut sample of heat resistant concrete

表 2 遮へい計算仕様及び条件

Table 2 Specification and condition of shielding calculation

	Condition	Remarks
(1) Fuel specification		
Fuel type	BWR STEP	
Initial enrichment (%)	3.5	
Average burnup (MWD/MTU)	45 000	
Maximum burnup (MWD/MTU)	55 000	
Specific power (MW/MTU)	25	
Cooling time (year)	10	
Peaking factor	1.3	
(2) Calculation condition		
Number of fuel assemblies	52	
Density of ordinary concrete (g/cm <sup>3</sup> )	2.15*	Note*:According to reference 7)
Density of heat resistant concrete (g/cm <sup>3</sup> )	2.17	

図 4 遮へい計算モデル  
Fig. 4 Shielding calculation model



た。この計算モデルは、普通コンクリートを使用した場合にキャスク側部中央表面から 1 m における合計線量当量率が 100  $\mu$ Sv/h<sup>8)</sup> となるように設定したものである。ここで、ガンマ線及び中性子の線源強度は燃焼計算コード ORIGEN2<sup>9)</sup> により求め、遮へい計算には一次元輸送遮へい計算コードである ANISN<sup>10)</sup> を用い、各元素の断面ライブラリは DLC23/CASK ライブラリ<sup>11)</sup>、線量当量率変換係数は ICRP Publ.74<sup>12)</sup> を基にした値を使用した。また、計算に用いた各コンクリート材料の原子個数密度を表 3 に示す。耐熱性コンクリートの原子個数密度の算出には、150 加熱後の密度 (2.17g/cm<sup>3</sup>) を使用した。

上記の条件で遮へい計算を行い、コンクリートキャスク側部中央表面から 1 m における線量当量率を求めた結果を表 4 に示す。この結果から、本材料は特に中性子の遮へい性能に優れており、この計算例では中性子の線量当量率は約 70%、合計線量当量率でも約 30% 低減することができた。この計算結果から、耐熱性コンクリート材料が従来の普通コンクリートと比較して優れた遮へい材であることが確認された。

## 3. 打設試験

一般的にコンクリート材料は型枠に流し込んで打設されることから、フレッシュコンクリートの状態での施工性（流動性）を確認しておくことが重要である。ここでは、本耐熱性コンクリートの打設性を確認するために、

表 3 コンクリート材料の原子個数密度

Table 3 Atomic density of concrete material

Element	Heat resistant concrete (atoms/barn·cm)	Ordinary concrete* (atoms/barn·cm)
H	$1.6 \times 10^{-2}$	$5.34 \times 10^{-3}$
C	-	$4.11 \times 10^{-2}$
O	$2.0 \times 10^{-2}$	-
Mg	-	$6.13 \times 10^{-5}$
Al	-	$2.14 \times 10^{-4}$
Si	$6.9 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-2}$
Ca	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.22 \times 10^{-3}$
Fe	$8.1 \times 10^{-3}$	$6.35 \times 10^{-4}$

Note \*: According to reference 7)

表 4 キャスク表面から 1 m における線量当量率

Table 4 Dose equivalent rate at 1m from surface of cask

	Dose equivalent rate ( $\mu$ Sv/h)		
	Gamma	Neutron	Total
Heat resistant concrete	56	13	69
Ordinary concrete	58	42	100



写真2 1/3スケールモデル試験体の外観  
Photo 2 Outer view of 1/3 scaled model

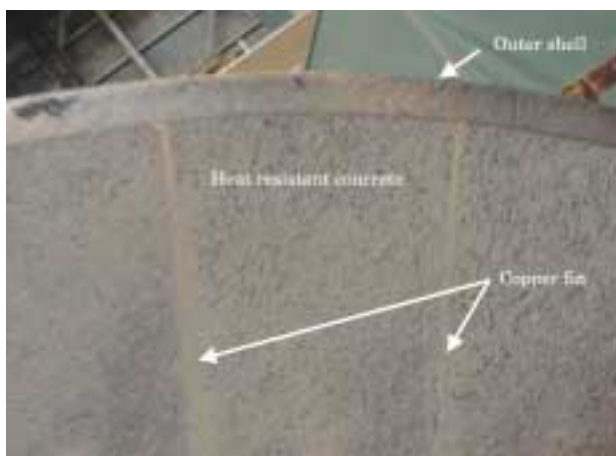


写真3 1/3スケールモデル試験体の切断面  
Photo 3 Cross section of 1/3 scaled model

表5 密度のばらつき  
Table 5 Dispersion of concrete density

	Measured data
Sampling number	23
Average density (g/cm <sup>3</sup> )*	2.35
Relative standard deviation (%)	2.5

Note \*: Density data are measured at room temperature without heated.

胴体の1/3スケールモデルの試験体の打設試験を実施した。試験体の外観を写真2に示す。また、試験体の切断面を写真3に示す。切断面を確認したところ、伝熱フィンと内外筒とのコーナ部分にも本材料が充填されていた。この結果、コンクリートの流動性などの打設性能に問題が無いことが確認できた。

また、打設された材料の均一性を確認するために、打設試験体からランダムに切出したサンプルの密度を測定し、そのばらつきを調べた。その結果を表5に示す。材料の均一性を損ねる原因としては、添加される原材料の不均一性及び打設時の空気の巻き込みなどが考えられ、こ

れらは材料密度のばらつきとして現れると考えられる。この結果から、ばらつきの誤差は約2.5%であり、混合されている材料が分離することなく硬化後においても安定した材料が得られていることが確認された。

#### 4. 新型コンクリートキャスク

図2は新型コンクリートキャスクの例を示している。図1に示される従来型コンクリートキャスクではコンクリートの耐熱温度が低いため、吸排気口を設けて空気による除熱が必要不可欠であった。本材料は100以上の温度においても中性子遮へいに有効な水分(水素)を結晶水の形で確保することができるため、金属キャスクと同じ密封構造のコンクリートキャスクが設計可能となった。このことにより、本コンクリートキャスクの特徴として以下の点が挙げられる。

##### 4.1 放射線のストリーミング対策

従来この吸排気口の部分が遮へい体の欠損部となるために、放射線のストリーミング対策が必要であった。例えば、ダクトを屈曲させるなどの対策が必要であり、一方で流路抵抗を考慮した除熱性能を確保する必要があった。しかし、本コンクリートキャスクは材料の耐熱性の向上により完全密封型の構造が可能となったため、放射線のストリーミングを考慮する必要がなくなった。このことから、本コンクリートキャスクは遮へい性能の点から非常に優れた容器であるといえる。

##### 4.2 密封監視機能

従来型コンクリートキャスクで使用されるキャニスタには、密封監視用の圧力センサを取付けることができず、また、コンクリートキャスク自体も密封構造でないため内部の圧力監視をすることができなかった<sup>注)</sup>。本コンクリートキャスクは本体を密封型にできるため、キャニスタとキャスク間の空間の圧力監視が可能であり、密封性能の面からも非常に優れた容器である。

##### 4.3 キャニスタの耐食性

従来型のコンクリートキャスクでは吸排気口から外部の空気が流入するため、大気中に含まれる腐食性の粒子(例えば、塩素イオンなど)がキャニスタの外表面に付着して腐食及びこれに伴う応力腐食割れを起こす可能性があった。そのために、二相系或いはスーパーステンレス鋼と呼ばれる耐腐食性に優れた高級なステンレス鋼を使用する必要があった。しかし、本コンクリートキャスクではその心配がないため、通常よく使用される炭素鋼でキャニスタを設計製造することが可能となり、キャニスタの低コスト化が可能となった。

むすび= 当社は大成建設㈱と共同で、100以上の高温でも中性子遮へいに有効な水分(水素)を保持可能な耐熱性コンクリート材料を新たに開発した。この材料を用いることにより、従来型では必要不可欠であった吸排気口をなくすことができ、これにより、金属キャスクと全

注) 金属キャスクでは蓋が二重構造になっており、1次蓋と2次蓋の蓋間の空間圧力を監視することにより、密封機能が維持されていることを連続的に確認することができる。



く同じ概念の安全性の高いコンクリートキャスクを設計製造することが可能となった。

今後は、本材料の実用化に向けて1年間の長期加熱試験を実施するとともに、更なる遮へい性能向上に向けて高密度化及びコンクリート材料自体の除熱性能を上げるために高熱伝導化を図り、貯蔵用だけでなく輸送用キャスクについての検討も進めていく予定である。

#### 参 考 文 献

- 1) 中澤正治ほか：コンクリートキャスク貯蔵方式を中心としたキャニスタ系使用済燃料中間貯蔵施設の安全設計・評価手法について(2002), (財)原子力安全研究協会。
- 2) 岡村 甫ほか：コンクリート標準示方書 [ 構造性能照査編 ] (2002), p.29, (財)土木学会。
- 3) 関口 晃ほか：再処理施設の放射線遮蔽安全ガイド資料, JAERI-M-86-060 (1986), p.143.
- 4) 岡村 甫ほか：コンクリート標準示方書 [ 施工編 ] (2002), p.46, (財)土木学会。
- 5) JIS A 5308-1998 レディーミクストコンクリート。

- 6) 金野正晴ほか：日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, 第分冊 (2002), p.122.
- 7) 小佐古敏荘ほか：核燃料施設遮蔽安全ガイド資料 実際編, JAERI-Tech-96-001 (1996), p.92.
- 8) 原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について, 原子力安全委員会 (1992)。
- 9) A.G.Croff : ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621 (1980)。
- 10) R.G.Soltesz : Revised WANAL ANISN Program User's Manual, WANL-TMI-1967 (1969)。
- 11) ORNL-RSIC, CASK-40 Group Coupled Neutron and Gamma-ray Cross-section Data, DLC-23 (1973)。
- 12) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74 (1995)。