

# 耐熱コンクリートの開発とコンクリートキャスクへの適用

- 高温環境でのコンクリートの中性子遮へい性能の向上 -

大脇英司・畑明仁<sup>\*1</sup>・杉原豊<sup>\*1</sup>・下条純<sup>\*2</sup>・谷内廣明<sup>\*2</sup>・萬谷健一<sup>\*2</sup>

Keywords : concrete cask, heat resistant concrete, radiation shielding, spent fuel storage

コンクリートキャスク, 耐熱コンクリート, 放射線遮へい, 使用済燃料貯蔵

## 1. はじめに

我が国では 1966 年の商業用原子力発電所の営業運転開始以来, 1997 年末までに 12,940tU (トン・ウラン; ウラン換算量) の燃料を使用し, 6,400tU の使用済燃料を貯蔵している<sup>1)</sup>。最近では年間約 900tU の使用済燃料が発生し, 2010 年頃には年間約 1,400tU 程度の発生が見込まれる<sup>1)</sup>。使用済燃料は再処理し, 燃料として再利用する。青森県六ヶ所村に建設中の再処理施設の年間処理能力が 800tU であり<sup>1)</sup>, また, 核不拡散の立場から再処理により得られるプルトニウムの過剰な保有を避けるため, 使用済燃料を再処理まで適正に保管する必要がある。

国内では電力会社を中心に中間貯蔵施設設置の準備が進められている。キャスクを用いた貯蔵方式では, すでに国内で実績がある金属キャスクの採用が有力視されるが, 経済性の観点からコンクリートキャスクについても技術基準の作成が進められている。しかし, 通常のコンクリートは 100 以上の環境では水分を失い, 中性子遮へいに有効な水素の含有量が減少する。これに対処するため吸排気口を設け, 使

用済燃料を装荷した金属製密封容器 (キャニスタ) とキャスクの間に外気を自然対流して冷却している (図-1(a))。しかし, 吸排気口を介した放射線のストリーミング (漏洩) や, 外気の高塩粒子等によるキャニスタの腐食の可能性があります, 対策を施している<sup>2)</sup>。

本報告では, 高温で十分な水素含有量を保つ耐熱コンクリートの開発と, そのコンクリートキャスク (図-1(b)) への適用について述べる。

## 2. 使用済燃料の中間貯蔵

### 2.1 貯蔵の方法

使用済燃料は再処理や直接処分の前に発電所の敷地内外で一時的に貯蔵 (中間貯蔵) される (図-2)<sup>3)</sup>。貯蔵

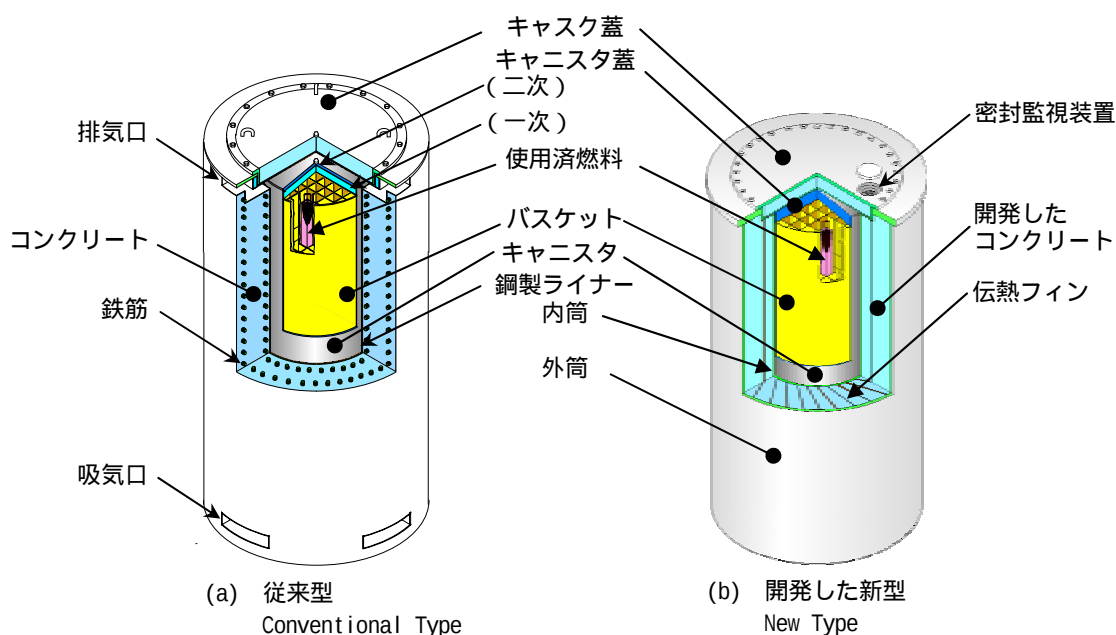


図-1 コンクリートキャスクの概観  
General View of Concrete Casks

\* 1 エンジニアリング本部原燃サイクル施設グループ

\* 2 (株)神戸製鋼所 都市環境・エンジニアリングカンパニー

## 耐熱コンクリートの開発とコンクリートキャスクへの適用

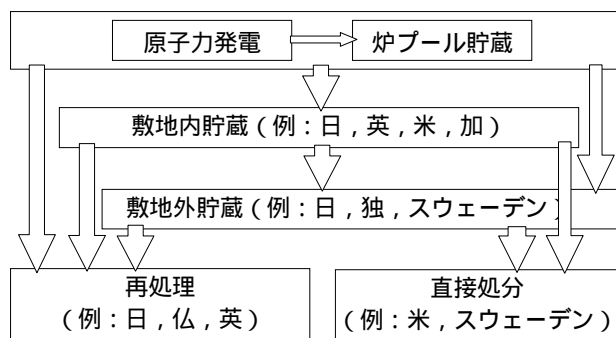


図-2 使用済燃料貯蔵の位置づけ<sup>3)</sup>  
Outline of Spent Fuel Storage System<sup>3)</sup>

設備には臨界防止，密封，除熱，遮へいの機能が求められる．中間貯蔵には湿式のプール貯蔵方式と，乾式の横型サイロ貯蔵，ボルト貯蔵，キャスク貯蔵の各方式がある．プール貯蔵方式では使用済燃料を水中で貯蔵し，水により遮へいと除熱を行う．横型サイロとボルトを用いた貯蔵方式は，使用済燃料をキャニスターと呼ばれる鋼製の容器に不活性ガスとともに封入し，コンクリート製のサイロやボルト（大きな空洞）に貯蔵するものである．キャスク貯蔵方式については次節に示す．

### 2.2 キャスク貯蔵

キャスク貯蔵は我が国をはじめ海外でも実績がある（表-1）<sup>4)</sup>．使用済燃料を鋼製の容器（キャスク）に直接入れる金属キャスク貯蔵と，ヘリウムガスを充填したキャニスタに使用済燃料を密封し，これをコンクリート製容器に入れるコンクリートキャスク貯蔵がある．従来のコンクリートキャスクでは，キャニスタに臨界防止と密封の機能，キャスクに遮へい機能を分担し，キャニスタとキャスクの間に空気を流通し，除熱している．

しかし，吸排気口は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り，自然対流による冷却を妨げることなく吸排気経路を屈曲させる等の対策が採られている<sup>2)</sup>．また，吸排気口のためにキャスクが密閉できないことから，金属キャスクのようにキャスク内部の圧力監視による密封性の確認ができない．さらに外気の導入は，大気中の水分や塩化物イオン等による金属材料の腐食や応力腐食割れの誘因となることが懸念され，従来のコンクリートキャスクのキャニスタには二相系ステンレス鋼の SUS329J4L や，スーパーステンレス鋼と呼ばれる YUS270 等の耐腐食性に優れる高価な材料が使用されている例がある<sup>2)</sup>．

表-1 国内外のキャスクを使った貯蔵実績<sup>4)</sup>

| Introduction of Cask Storage System <sup>4)</sup> |                   |   |
|---------------------------------------------------|-------------------|---|
| 国内の貯蔵施設の例                                         |                   |   |
| 東京電力(株)福島第一原子力発電所                                 |                   | M |
| 日本原子力発電(株)東海第二発電所                                 |                   | M |
| 海外の貯蔵施設の例                                         |                   |   |
| 米国                                                | サリー発電所            | M |
|                                                   | パリセード発電所          | C |
|                                                   | ポイントビーチ発電所        | C |
|                                                   | アーカンソーニュークリアワン発電所 | C |
|                                                   | ハッチ発電所            | C |
|                                                   | ドレスデン発電所          | C |
| ドイツ                                               | ゴアレーベン中間貯蔵施設      | M |
|                                                   | アーハウス中間貯蔵施設       | M |
| スイス                                               | ビューレンリンゲン中間貯蔵施設   | M |

M；金属キャスク，C；コンクリートキャスク

## 3. 耐熱コンクリートの開発

### 3.1 材料開発の方針

キャスクの吸排気口を省略するために，高温での遮へい性能の向上をコンクリートの開発目標とした．高温での中性子とガンマ線に対する遮へい性能を満足するために，水酸化カルシウムを添加して結晶水として水素を保持すること，鉄粉や鉄繊維などの金属材料を添加して通常のコンクリートと同等の密度を高温で確保することを材料開発における基本方針とした．

### 3.2 耐熱コンクリートの性能に関する確認試験

新しく開発した耐熱コンクリートはボルトランドセメントを主体とするペーストに，要求性能に応じて水酸化カルシウムと鉄粉および鉄繊維を添加して構成した．細骨材，粗骨材は使用していないが，ここでは耐熱コンクリートと称する．基本的な物性を試験方法とともに表-2に示す．使用時の環境温度を 150 と想定し，室温の場合および一般的なコンクリートの物性値と比較した．密度は質量と外形寸法からかさ密度として求めた．含水率

表-2 開発した耐熱コンクリートの物性

Properties of Newly Developed Heat Resistant Concrete

| 種類                      | 耐熱コンクリート |                        | 一般的なコンクリート                           | 測定法        |
|-------------------------|----------|------------------------|--------------------------------------|------------|
| 環境                      | 150      |                        | 室温                                   |            |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.17     | 2.30                   | 2.25 ~ 2.30 <sup>5)</sup>            | 見かけ密度      |
| 含水率 (mass%)             | 10.8     | 16.6                   | 4 ~ 7 <sup>6)</sup>                  | 文献 9)      |
| 熱伝導率 (W/(m・K))          | 1.4      | 2.0                    | 2.6 ~ 2.8 <sup>7)</sup>              | JIS R 2616 |
| 線膨張率 (1/K)              | -        | 1.1 × 10 <sup>-5</sup> | 1.0 × 10 <sup>-5</sup> <sup>5)</sup> | JIS A 1325 |
| 比熱 (kJ/(kg・K))          | -        | 0.94                   | 1.0 ~ 1.3 <sup>6)</sup>              | 液体混合法      |
| 圧縮強度 (MPa)              | -        | 87                     | 18 ~ 40 <sup>8)</sup>                | JIS A 1108 |

は所定の温度で乾燥後、1000 に加熱して発生するガスの水分を捕集して求めた<sup>9)</sup>。比熱は 90 に加熱した試料を蒸留水に投入し、蒸留水の温度変化から求めた。密度は 150 加熱後も室温にある一般的なコンクリートとほぼ同等であり、含水率は 2~3 倍であった。水酸化カルシウムに含まれる結晶水の常圧での脱水開始温度は 450 程度であり、150 においても十分な含水量を有しているものと考えられる。

本材料を遮へい材として使用するためには、長期の性能変化を把握する必要がある。金属キャスクでは中性子遮へい材の水素量の減少について約 1 年間の加熱試験を実施し、40~60 年程度の供用期間中の性能変化を予測している。今回は予備的な試験として、乾燥炉を使用して 150 の開放系で 30 日までの加熱試験を実施した(図-3)。初期に約 5%の質量減少があるが、その後は一定の質量であり、長期においても十分な含水量と密度を保つことが示唆された。初期の減量は表 1 において室温と 150 における含水率の差が約 5%であることに相当し、結合していない自由水が蒸発したためである。

簡易遮へい計算を行い耐熱コンクリートの遮へい性能を評価した。表-3 に示す燃料のガンマ線及び中性子の線源強度を燃焼計算コード; ORIGEN2<sup>10)</sup>により求め、コンクリートキャスクの側部中央をモデル化し(図-4)、一次元輸送遮へい計算コード; ANISN<sup>11)</sup>を用いて線量当量率を計算した。このモデルは通常のコンクリートを使用した場合、キャスク表面から 1m における評価点での合計線量当量率が  $100 \mu\text{Sv/h}^{12)}$ となるように設定されている。計算に用いた耐熱コンクリートの原子個数密度を表-4 に示す。密度は  $2.17\text{g/cm}^3$ (表-2)とした。断面積ライブラリは DLC23/CASK ライブラリ<sup>13)</sup>、線量当量率変換係数は ICRP Publ.74<sup>14)</sup>に基づいた。計算結果を表-5 に示す。耐熱コンクリートは中性子の線量当量率の約 70%、合計線量当量率の約 30%を低減できた。

## 4. コンクリートキャスクへの適用

### 4.1 新しいタイプのキャスクの設計

耐熱コンクリートの基本的な物性と遮へい性能に基づき、吸排気口を省略した新しい形式のコンクリートキャスクを設計した例を図-1(b)に示す。全高および外径はそれぞれ約 6m と約 3m である。従来のコンクリートキャスクは鉄筋コンクリート構造であるが、本キャスクは骨材として使用される砂利や鉄筋を用いないので、より均質な構造となっている。

除熱を促すために内部に伝熱フィンを配した。また、

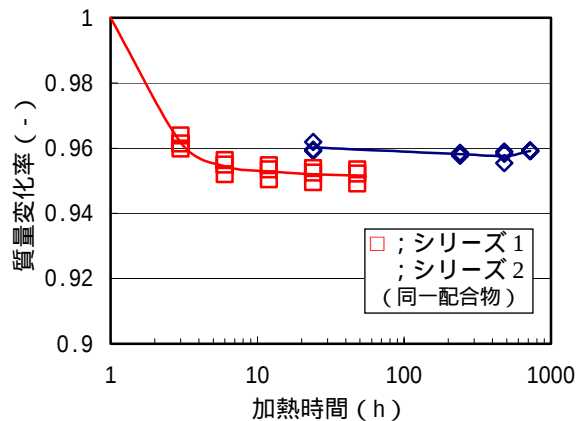


図-3 加熱による耐熱コンクリートの質量変化  
Change in Mass of Heat Resistant Concrete during Heating

表-3 使用済燃料の仕様

Specification of Spent Fuel for Shielding Calculation

| 項目             | 仕様          |
|----------------|-------------|
| 燃料タイプ          | BWR<br>STEP |
| 初期濃縮度(mass%)   | 3.5         |
| 平均燃焼度(MWD/MTU) | 45,000      |
| 最大燃焼度(MWD/MTU) | 55,000      |
| 比出力(MW/MTU)    | 25          |
| 冷却期間(年)        | 10          |
| ピーキング係数(-)     | 1.3         |
| 燃料収容体数(体)      | 52          |

表-4 耐熱コンクリートの原子個数密度

Atomic Density of Heat Resistant Concrete

| 元素 | 原子個数密度<br>(atoms/barn・cm) |
|----|---------------------------|
| H  | $1.6 \times 10^{-2}$      |
| O  | $2.0 \times 10^{-2}$      |
| Si | $6.9 \times 10^{-4}$      |
| Ca | $1.1 \times 10^{-2}$      |
| Fe | $8.1 \times 10^{-3}$      |

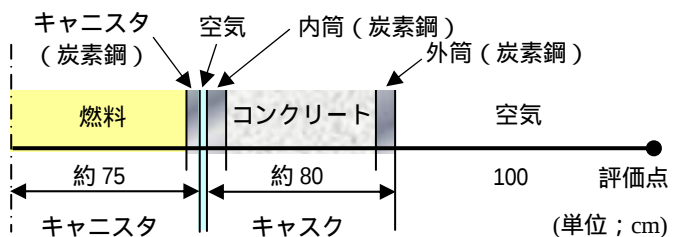


図-4 遮へい計算モデル  
Shielding Calculation Model

表-5 遮へい計算結果

Result of Shielding Calculation

|           | 線量当量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) |     |     |
|-----------|----------------------------|-----|-----|
|           | ガンマ線                       | 中性子 | 合計  |
| 耐熱コンクリート  | 56                         | 13  | 69  |
| 通常のコンクリート | 58                         | 42  | 100 |

キャニスタとキャスクによる二重密閉方式とし、両者の間隙に充てんしたヘリウムガスの圧力測定によりキャニスタとキャスクの密封性を監視する装置を設けた。

コンクリートの耐熱性の向上により完全密封型の構造が可能となり、放射線のストリーミングを考慮する必要がなく、放射線の遮へい性能が非常に優れる。また、密封監視装置の設置が可能で、放射能の封じ込め性能が非常に優れる。さらに外気と遮断されるため、金属材料の腐食などの心配がなく、通常の炭素鋼でキャニスタを設計、製造することが可能であり、キャニスタの低コスト化を図ることができる。

#### 4.2 新しいキャスクの製造性に関する確認試験

試設計したコンクリートキャスクは内部に伝熱フィンを持ち、複雑な断面形状をしている。開発した耐熱コンクリートの実規模での製造性および施工性について、写真-1 に示すキャスクの胴体部分の 1/3 スケールモデルを用いて検証した。

容量  $1\text{m}^3$  の強制 2 軸練りミキサーを用いて同一配合の耐熱コンクリートを約 10 バッチ製造し、スランプフロー約 70cm の良好な流動性を持つコンクリートを安定して製造できることを確認した。

胴体の上部から耐熱コンクリートを打設した。耐熱コンクリートは自己充てん性を示し、締め固め作業を必要としなかった。試験体の切断面を写真-2 に示す。耐熱コンクリートは隅々まで空隙なく充填されており、このコンクリートが複雑な断面形状を持つキャスクに対して十分な施工性および充てん性を持つことが示された。

コンクリートの硬化後、試験体から無作為に試料を採取し、室温における密度を測定した。23 点の試料の平均密度は  $2.35\text{g}/\text{cm}^3$ 、変動係数は 2.5%であった。密度のばらつきは小さく、材料分離や打設時の空気の巻き込みなどの影響のない、遮へい材として十分な均一性を有するコンクリートであった。

#### 5. まとめ

100 以上の高温でも中性子遮へいに有効な水素を保持できる耐熱コンクリートを開発した。この材料を用いることにより、従来のコンクリートキャスクで

は不可欠であった吸排気口を省略して、金属キャスクと同じ概念を持つ安全性の高いコンクリートキャスクを設計、製造できることを示した。

今後は新しいキャスクの実用化に向けてさらに長期間の加熱試験を実施するとともに、耐熱コンクリートの高密度化および高熱伝導化を図り、貯蔵用だけでなく輸送用キャスクについても検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 資源エネルギー庁総合エネルギー調査会：リサイクル燃料資源中間貯蔵の実現に向けて、原子力部会中間報告，1998.
- 2) 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、原子力安全研究協会，2002.
- 3) 原子力安全研究協会：軽水炉燃料のふるまい、原子力安全研究協会，1998.
- 4) 関西電力：http://www.kepco.co.jp/recycle/results.htm，2003.
- 5) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [ 構造性能照査編 ]，pp.29-49，2002.
- 6) 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，p.143，1986.
- 7) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [ 施工編 ]，p.46，2002.
- 8) JIS A 5308-1998 レディーミクストコンクリート.
- 9) 金野正晴ほか：コンクリート中に含まれる結晶水，結合水の測定方法，日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集，第 分冊，p.122，2002.
- 10) A.G.Croff：ORIGEN2 - A Revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Depletion Code, ORNL-5621, 1980.
- 11) R.G.Soltész：Revised WANAL ANISN Program User's Manual, WANL-TMI-1967, 1969.
- 12) 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.
- 13) ORNL-RSIC, CASK-40 Group Coupled Neutron and Gamma-ray Cross-section Data, DLC-23, 1973.
- 14) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, Publication 74, 1995.



写真-1 1/3 スケールモデル試験体の外観  
Outer View of 1/3 Scaled Model



写真-2 1/3 スケールモデル試験体の切断面  
Cross Section of 1/3 Scaled Model