

使用済燃料中間貯蔵に用いるコンクリート製貯蔵容器

Concrete Storage Cask for Interim Storage of Spent Nuclear Fuel

鍋 本 豊 伸 エネルギー・プラント事業本部原子力事業部原燃プロジェクト部
藤 原 寛 明 エネルギー・プラント事業本部原子力事業部原燃プロジェクト部 課長
小 林 俊 二 エネルギー・プラント事業本部原子力事業部建設部 課長
塩 永 亮 介 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部

原子力発電所で発生する使用済燃料を再処理するまでの間、貯蔵する設備として、コンクリートキャスク方式の実用化を目指し、その主要な構成機器の一つである鉄筋コンクリート製貯蔵容器についてコンクリート部の施工法の検討、健全性評価および検査に関する解析評価・試験を行った。施工時の解析評価によって最適なコンクリート施工方法を設定した。さらに、貯蔵時の負荷応力に対する健全性を確認するとともに環境因子による経年劣化に対する長期健全性を示すことができた。

Experiments and analytical evaluation of the fabrication, non-destructive inspection and structural integrity of reinforced concrete body for storage casks were carried out to demonstrate the concrete storage cask for spent fuel generated from nuclear power plants. Analytical survey on the type of concrete material and fabrication method of the storage cask was performed and the most suitable fabrication method for the concrete body was identified to reduce concrete cracking. The structural integrity of the concrete body of the storage cask under load conditions during storage was confirmed and the long term integrity of concrete body against degradation dependent on environmental factors was evaluated.

1. 緒 言

我が国では原子燃料サイクルが推進されており、原子力発電所において発生するリサイクル燃料は、将来再処理工場で再処理される計画である。しかし、リサイクル燃料の発生量は再処理工場の処理能力を上回るため、リサイクル燃料を再処理するまでの間、中間的に貯蔵するための施設（以下、中間貯蔵施設と記す）を実用化することが必要となっている。

当社は中間貯蔵施設の諸方式のうち、経済性に優れた乾式貯蔵方式であるボルト方式およびコンクリートキャスク方式について実用化を検討している。コンクリートキャスク方式は米国で多くの実績をもつ方式であるため、国内向けに改良を加えることで実用化を進めている。1999年度はコンクリートキャスク方式の実用化を進めるに当たり、最初に実物大コンクリートキャスクを試作し、製作性を確認した。2000年度および2001年度には貯蔵時および詰替え時の除熱評価を確立する目的で本試作体を用い、貯蔵時および詰替え時を模擬した熱負荷試験を実施した⁽¹⁾。これらの試験に平行して、当社では1999年度以降、鉄筋コンクリート部の設計技術および検査技術の検討を行っており、

解析および要素試験を実施してきた。本稿ではこれらの成果について報告する。

2. コンクリート製貯蔵容器

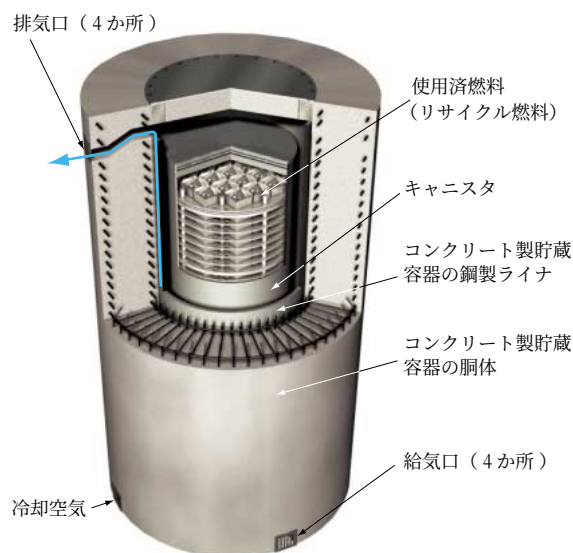
2.1 コンクリートキャスクの構成

第1図に示すように、コンクリートキャスクは、鋼製円筒形容器のキャニスタおよびコンクリート製貯蔵容器から構成される。キャニスタは放射性物質の閉じ込め機能などをもつ。コンクリート製貯蔵容器は鋼製ライナ部および鉄筋コンクリート部から構成され、キャニスタの支持、除熱および放射線遮への機能をもつ。コンクリート製貯蔵容器には胴体下部に給気口、上部に排気口を周方向にそれぞれ4か所設置している。貯蔵中は使用済燃料の崩壊熱による空気の加熱で浮力が生じ、コンクリート製貯蔵容器内で自然対流が発生する。外気より冷却空気を給気口から取り入れ、排気口から排出する自然空冷によって除熱を行う。

2.2 鉄筋コンクリート部

(1) 構造と機能

放射線の遮へい要求を満たすため、コンクリート製貯蔵容器胴体のコンクリート厚さは約1 m あるため、コンクリート施工時の温度応力を考慮した設計および



第 1 図 コンクリートキャスク概要
Fig. 1 Concrete cask system

施工が必要となる。貯蔵中、胴体内面のコンクリートは局所的に 90℃近くになる。一方、胴体外面は比較的低い温度となるため、内外面で大きな温度勾配が生じる。温度勾配によって生じる熱応力に対して長期の健全性を保つ必要がある。さらに、我が国ではリサイクル燃料中間貯蔵施設が湾岸沿いに設置されることが想定され、塩害などに対しても長期の健全性が要求される。

実物大試作体の寸法はコンクリート製貯蔵容器で外径約 3.5 m、高さ約 5.8 m、総重量約 120 t であり、キャニスタは外径約 1.7 m、高さ約 4.5 m である。実物大試作体の製作状況を第 2 図に示す。

(2) 規格基準

鉄筋コンクリート製貯蔵容器は想定される異常着床事故などの荷重に対して、基本的な安全機能である除熱機能、遮へい機能およびキャニスタを支持する機能を維持するように設計される。鉄筋コンクリート部は、鋼製ライナ部と併せて、基本的な安全機能を確保するための主要な構造強度部材となる。よって、鉄筋コンクリート部の材料、施工にも高い品質が要求されるため、鉄筋コンクリート部の材料（セメント、骨材、水、混和剤など）は原則的に社団法人日本建築学会「建築工事標準仕様書 JASS 5N」（以下、JASS 5N と記す）⁽²⁾に基づき、水和熱が低く、乾燥収縮の少ない材料を用いることとした。また、最高温度の制限は長時間で 65℃とし、貯蔵期間中 65℃を超えることのある部位については強度の低減を考慮することとした。



第 2 図 コンクリート製貯蔵容器試作体の製作状況（鉄筋組）
Fig. 2 Placing of reinforcement

鉄筋コンクリート部分の設計は、「コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準（通産産業省告示第 452 号）」（以下、通産省告示第 452 号と記す）を参考とし、「鉄筋コンクリート構造設計規準」（RC 規準）に基づいて行うこととした。

3. 鉄筋コンクリート部の健全性評価

3.1 施工時の温度応力評価

コンクリート製貯蔵容器は比較的断面厚の大きい容器構造物であるので、コンクリート打設時の水和発熱に伴う温度応力によってひび割れが発生する可能性が高い。そこで、施工時のひび割れが発生しにくい施工条件および材料条件を選定するため、三次元有限要素法による温度応力解析を行い、温度ひび割れの検討を行った。解析コードはコンクリートの非線形温度応力解析プログラム「ASTEAMACS」を用いた。

(1) 熱物性値および強度物性値

コンクリートの熱物性値（熱伝導率、比熱、密度など）は、社団法人土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編]」（以下、RC 示方書と記す）⁽³⁾などの参考値に準拠した。養生期間中のキャスク表面の熱伝達率については、通常の型枠では 8.0 W/(m²・℃)、保温養生材を使用した場合は 1.0 W/(m²・℃) と設定した。また、コンクリートの強度物性値についても、おおむね RC 示方書の参考値や推定式に準拠した。

(2) 解析ケース

解析ケースを第 1 表に示す。使用セメントとして中庸熱ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを用いた場合の 2 種類、養生方法として保温材

第1表 温度応力評価の解析ケース
Table 1 Specifications of concrete and concrete curing

解析ケース	使用セメント	養生方法
①	中庸熱ポルトランドセメント	型枠の周りに保温材を巻く
②	中庸熱ポルトランドセメント	型枠のみ
③	普通ポルトランドセメント	型枠の周りに保温材を巻く
④	普通ポルトランドセメント	型枠のみ

の有無を考慮した2種類の計4ケースについての検討を行った。

(3) 解析モデル

第3図にコンクリート製貯蔵容器の解析モデルを示す。解析は鋼製ライナ部およびコンクリート部をソリッド要素でモデル化した。また、コンクリートキャスクの対称性を考慮し、全体の1/4モデルとした。

(4) 解析結果

a. 温度解析結果

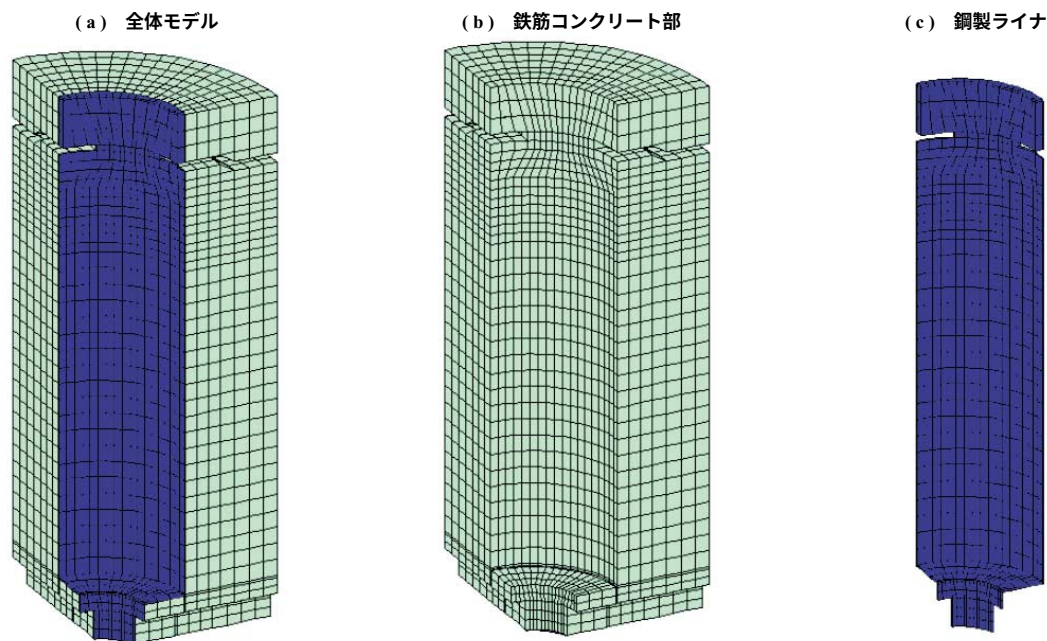
第4図に各ケースでの温度解析結果を示す。本図はそれぞれの点での最高到達温度を表し、白い部分は温度が45℃以上であることを示している。特にケース③では表面から内部まで温度上昇量が大きくなっており、ケース④では内部のみ高い最高温度となっている。第5図にケース①および②におけるキャスク中段温度の経時変化を示す。ここで内部とはコンクリート厚の中心の点とした。ケース①では表面に敷いた保温材の効果によって表面と内部の温度履歴がほぼ等

しく推移しており、コンクリート打設から3日ほどで最高温度が36℃程度となった。それに対しケース②では最高温度は32℃程度と低いものの、保温材がないため表面と内部の温度履歴に10℃以上の温度差が生じた。また、温度が外気と等しくなるまでの期間をみても、保温材を用いた場合は28日にかけてゆっくり低下していくのに対し、保温材がない場合は2週間後にはほぼ外気に等しい温度に落ち着いており温度下降の速度が大きい結果となった。

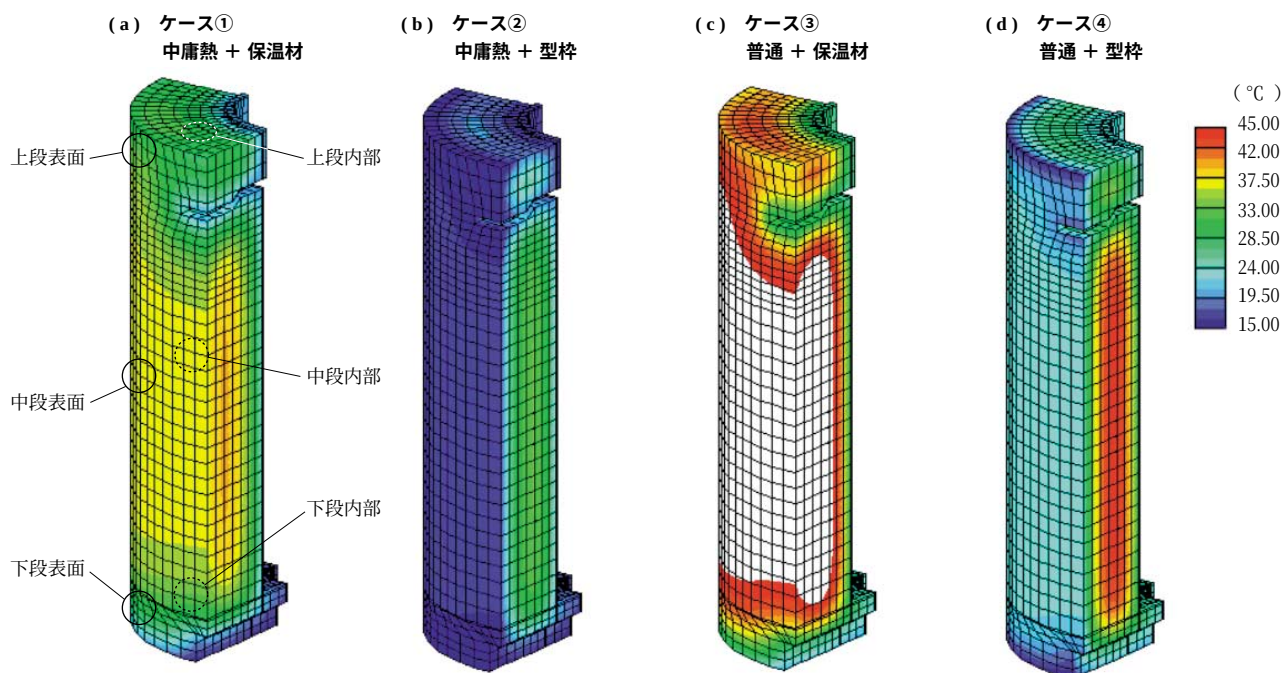
また、ここでは普通ポルトランドセメントを使用したケース③および④の温度履歴は示していないが、対応するケース①および②に比べて最高温度が各点で10℃ほど高い結果となった。

b. 温度応力解析結果

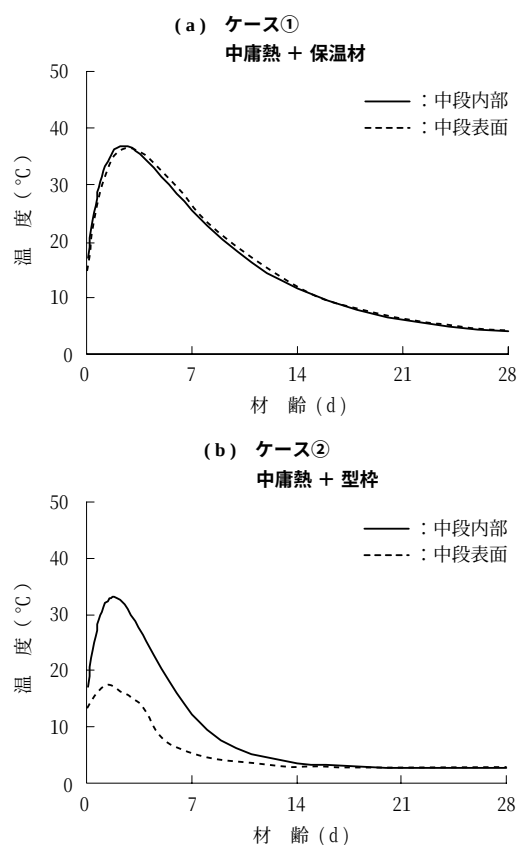
第6図にケース①および②におけるキャスク中段の主応力履歴を示す。ケース①では表面および内部が同じ傾向の温度履歴となったため、熱膨張によるひずみ差は生じず、表面および内部とも0.2 N/mm²程度の引張応力の発生であった。それに対しケース②では表面と内部の温度差より熱膨張ひずみに差がでるため、発熱時は表面で0.5 N/mm²程度の引張応力が発生し、温度降下の過程では内部に0.7 N/mm²程度とさらに大きな引張応力が発生することが分かった。また、普通ポルトランドセメントを使用したケース③および④では、養生方法が同様のケース①および②



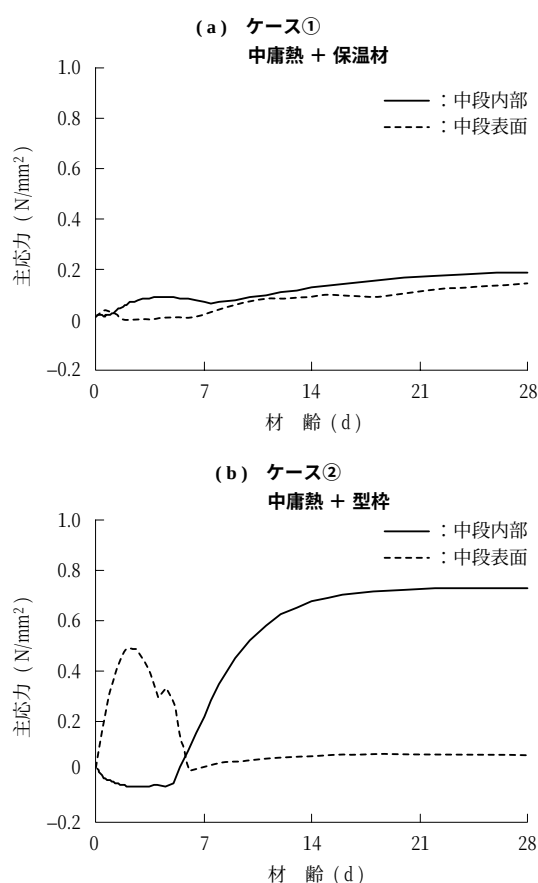
第3図 コンクリート製貯蔵容器の解析モデル
Fig. 3 Elemental model of structural analysis



第4図 温度解析結果（最大温度分布）
Fig. 4 Analysis result of temperature distribution



第5図 温度解析結果（キャスク中段の温度履歴）
Fig. 5 Analysis result of temperature history



第6図 温度応力解析結果（キャスク中段の主応力履歴）
Fig. 6 Analysis result of stress history

に対していずれも2から3割高い引張応力が発生することも解析によって示された。

c. ひび割れ発生確率

温度応力解析結果を基に、コンクリートのひび割れ

発生確率を推定するため、社団法人土木学会および社団法人日本コンクリート工学協会などでは、一般的にひび割れ指数が用いられている。ひび割れ指数の定義

はRC 示方書などで次の(1)式のように定義される.

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma_t(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで,

$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日における熱応力の最大値
(引張主応力) (N/mm²)

$f_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの
引張強度 (N/mm²)

また, ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係については, 既往の多くの実験から経験的に求められており, ひび割れを完全に防ぐためにはひび割れ指数 2.0 以上とすることが望ましいとされている. 第7図に各ケースのひび割れ指数分布を示す. 養生中のひび割れ指数は時間依存性があるが, 本図はそれぞれの点でのひび割れ指数の最小値を表し, 白い部分はひび割れ指数が 10 以上であることを示している. 保温材を用いないケース②および④においてキャスク表面では比較的小さなひび割れ指数であることを示しており, 保温材を用いないとひび割れが発生しやすいことが推察できる. また, 保温材を使用したケース①および③でも, 底面拘束を受けるキャスク下段の方で比較的小さなひび割れ指数となるが, ケース①の中庸熱ポルトランドセメントを用いた場合が, その程度は小さいことが分かった.

以上のことから, 中庸熱ポルトランドセメントを使用し, 保温材を巻く養生方法とするケース①が施工時のひび割れ抑制には効果的であることを確認した.

3.2 コンクリート部かぶり厚さの設定

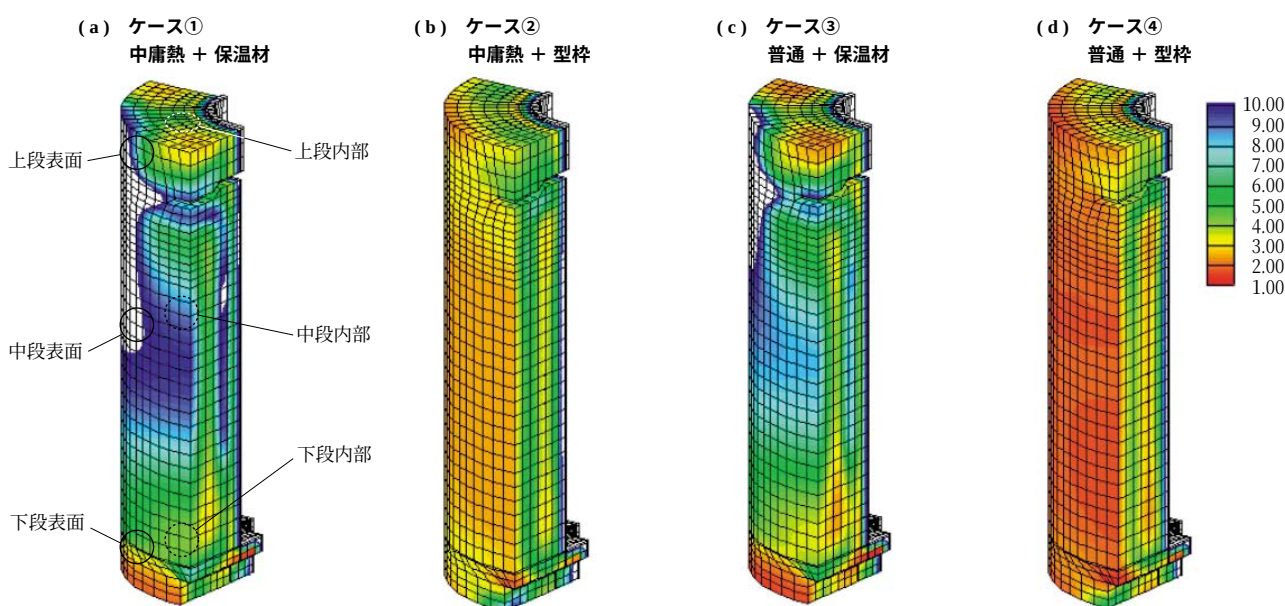
コンクリート製貯蔵容器コンクリート部の外面かぶり厚さを設定するに当たっては, 下記を考慮した設計が必要とされた.

① 貯蔵期間中のコンクリートの中性化に対する耐久性照査

② 貯蔵期間中の熱応力に対するコンクリートの耐力照査

① は, コンクリートの劣化要因の一つである中性化に対するかぶり厚さの照査である. コンクリートは大気中の二酸化炭素と反応し, 表面から中性化が進行する. 中性化深さが内部鉄筋位置まで達すると鉄筋が腐食膨張し, ひび割れが発生し耐久性が大きく低下する. このことから, 設計的には経年的な中性化速度を予測し, できるだけかぶり厚さを大きくとることが望ましい.

② は, 内部の使用済燃料による熱荷重に対する鉄筋コンクリートの耐力照査である. キャスク胴体板厚方向には温度勾配によって生じる熱応力で外面側に大きな引張応力がはたらく. この場合, かぶり厚さを大きくすると胴体の外形が増し, キャスク外面における引張応力が増大することによってひび割れ発生の確率が高くなる傾向となる. よって, 両者のバランスを考慮して適宜なかぶり厚さを設定する必要がある. そこで, かぶり厚さをパラメータとして貯蔵時のコンクリート部の熱応力を評価するとともに RC 示方書に基づき中性化の評価を行った. この結果, 適宜なかぶり厚さの値を 60 mm に設定した.



第7図 ひび割れ指数の分布
Fig. 7 Distribution of crack index

4. 鉄筋コンクリート部の非破壊検査

コンクリート製貯蔵容器の実用化に当たっては、製造時の品質検査に加え、供用期間中の定期点検や詳細点検の実施が必要である。コンクリート構造物のひび割れやはく離に対しては一般的に弾性波を用いた検査法が利用されている。一方、コンクリートキャスクが設置される区域は管理区域であり、ある程度線量が高いため、点検も可能な限り自動化・無人化することが好ましい。以上のことから、供用時の点検を想定したコンクリート製貯蔵容器の鉄筋コンクリート部に対する非破壊検査技術の適用性について検討する目的で、実物大試作体を用いて、超音波探傷試験（以下、UT と記す）を実施した。なお、実物大試作体には、事前に通常貯蔵時の範囲を超える事故時を想定した過大な熱付加を加え、ひび割れを人工的に付与した。

(1) 方 法

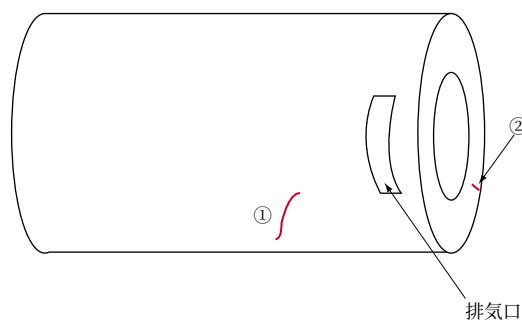
日本パナメトリックス株式会社製の超音波パルサ／レシーバと 250 kHz の超音波探触子、SONIX 社製波形採取装置を用い第 8 図中に赤線部分のひび割れ深さおよび排気口の鋼板の密着性を測定した。

ここで、ひび割れ深さ d の測定原理を第 9 図に示す。ひび割れ深さは探触子間の表面直下を伝播する波とひび割れによって回折した波との伝播時間差から測定する。また、鋼板とコンクリートの密着性の測定原理を第 10 図に示す。鋼板とコンクリートの境界面がはく離している場合、鋼板を伝播する板波が発生する。これを検出することで密着性を測定する。

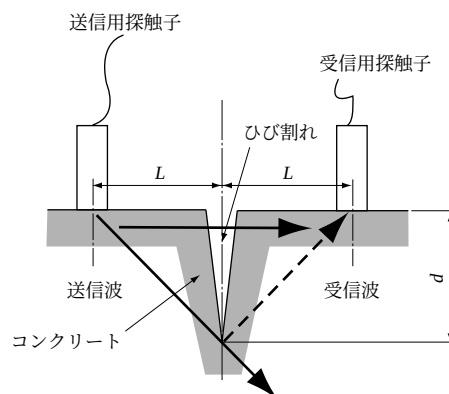
ひび割れ状況と測定状況を第 11 図および第 12 図に示す。

(2) 測定結果

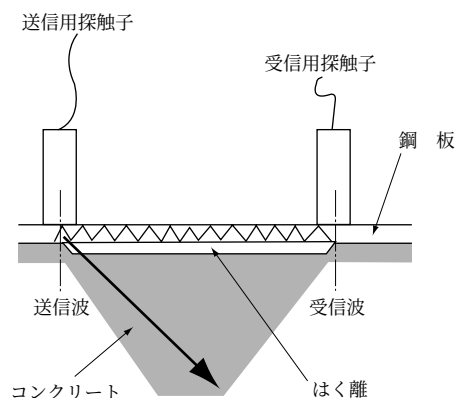
第 8 図①のひび割れ深さを UT によって検査した結果、第 13 図に示す波形を得た。ひび割れ部で得ら



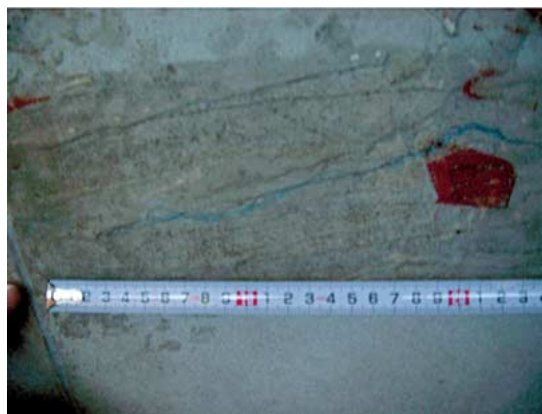
第 8 図 キャスク試作体の測定箇所
Fig. 8 Measurement point



第 9 図 ひび割れ深さの測定原理図
Fig. 9 Measurement principle of crack search



第 10 図 密着性評価の測定原理図
Fig. 10 Measurement principle of detachment search



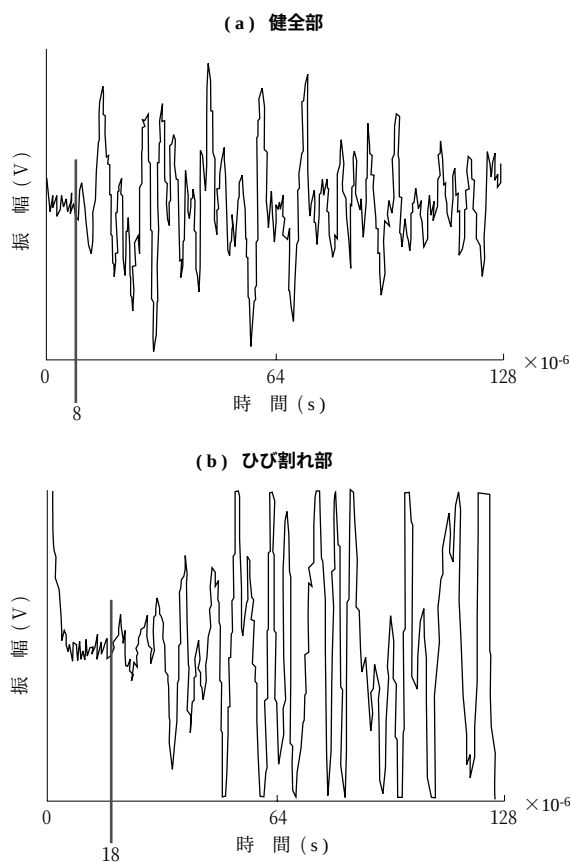
第 11 図 キャスク側面に発生したひび割れの状態
Fig. 11 Appearance of crack

れる波形の伝播時間を測定し、コンクリートの音速を 5 000 m/s として計算した場合、① のきずは深さ約 43 mm と計測できた。一方、第 8 図②のきずは深さ 17 mm と計測された。

また、排気口の鋼板とコンクリートの密着性を UT によって検査した結果、第 14 図に示す波形を得た。第 14 図 - (b) には鋼板を伝播した波の多重反射エコー



第 12 図 ひび割れ深さの測定状況
Fig. 12 Measurement operation



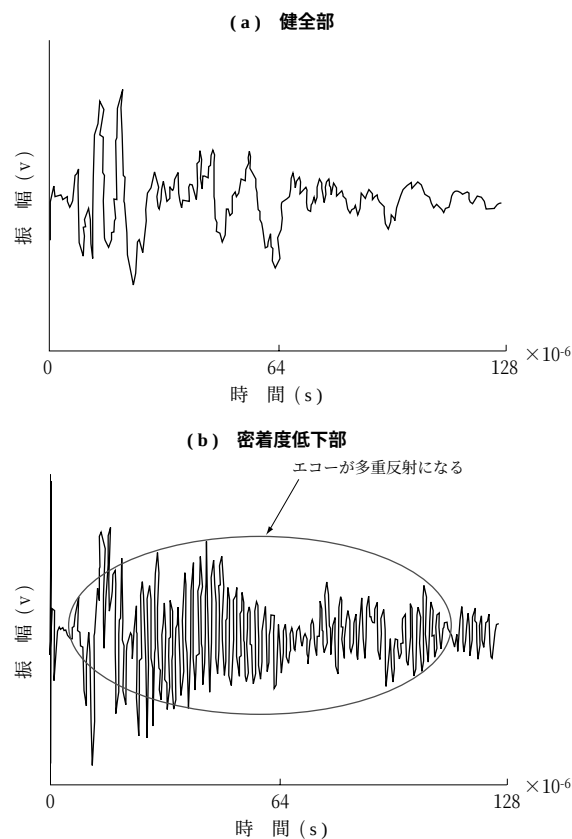
第 13 図 ひび割れ深さの測定結果（部位①）
Fig. 13 Wave profile of UT for crack search

一が得られており、該当部分の密着度が低下しているもしくは、はく離しているものと考えられる。

本試験によって、コンクリート製貯蔵容器のひび割れ深さおよび密着性検査への UT 適用性に対する見通しを得た。今後破壊検査を実施し、精度および信頼性を評価する必要がある。

5. 結 言

当社は、これまで国内の遮へい要求、設置環境、既存の



第 14 図 排気口の鋼板とコンクリート界面密着度測定結果
Fig. 14 Wave profile of UT for detachment search

コンクリート品質基準を満足するよう、コンクリートキャスクの開発を行ってきた。鉄筋コンクリート部は構造強度のみならず遮へい体としても重要な部位であり、長期の健全性を確保するため、材料、設計、施工、検査には特別な配慮が必要である。一連の検討によって、設計、施工、検査について、実現性に対する見通しを得た。

今後は、検査の精度をさらに上げること、設計手法の合理化を課題として、改良を図っていく方針である。

参考文献

- (1) 酒井幹夫, 藤原寛明, 高橋秀夫, 酒谷忠嗣: コンクリートキャスク方式によるリサイクル燃料中間貯蔵技術の開発 — 伝熱特性の評価 石川島播磨技報 第 42 巻第 1 号 2002 年 1 月 pp.47—55
- (2) 社団法人日本建築学会: 建設工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事 2001 年
- (3) 社団法人土木学会: コンクリート標準示方書 [施工編] 2002 年 pp.22—34, 41—54