

## 底板一体型キャスク鍛鋼胴の製造技術開発

## Development of Cask Body Integrated with Bottom Plate

吉田 卓志  
Takuji Yoshida佐々木 友治  
Tomoharu Sasaki小山 庸一  
Yoichi Koyama熊谷 保之  
Yasuyuki Kumagai渡邊 雄一  
Yuichi Watanabe高佐 成樹  
Seiju Takasa

## 要 旨

原子力発電所で発生する使用済み燃料を貯蔵および輸送する金属キャスクは、本体胴、中性子遮へい材および外筒から構成される。当社ではこれまで鍛鋼製の本体胴は、「胴体」と「底板」を個別に鍛造し、これらを継手溶接することでコップ型容器として製作されてきた。

この度、本体胴の製造コスト低減、工期短縮及び更なる信頼性向上を目的に、胴体と底板を一体鍛鋼化し、溶接線の無い「底板一体型キャスク鍛鋼胴」の製造技術を開発した。実機サイズの試作体を製造し製品の均一性を確認するとともに、得られた機械的性質は、使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格（JSME S FA1-2007）を満足する結果が得られた。

本稿では、底板一体型キャスク鍛鋼胴の製造技術と得られた諸特性について報告する。

## — Synopsis —

The main parts of a metal cask for storage and transport of spent nuclear fuel consists of main body, neutron shield material and external cylinder. The forged main body has been manufactured as a cup shape by welding of “forged body” and “forged bottom plate” which are independently forged.

JSW has developed the manufacturing technology of “cask body integrated with bottom plate” which has no weld line with the goal of cost reduction, manufacturing period shortening and further reliability improvement.

Manufacturing for the prototype of “cask body integrated with bottom plate” has completed to verify mechanical properties and uniformity of the product which satisfy the specified values stipulated in JSME Code S FA1 2007 edition.

Here, we report the manufacturing technology and obtained properties of “cask body integrated with bottom plate”.

## 1. 緒言

原子力発電所で発生する使用済み燃料は、格納容器内に設置されている貯蔵プールに一時保管され、その後輸送・貯蔵用キャスクに格納、中間貯蔵施設などを經由し最終的に再処理施設へ搬出される。図1に、国内の原子力発電所内における使用済み燃料の貯蔵プール占有率を示す。現時点で使用済み燃料の貯蔵プール占有率は平均7割に達しており、国内原子力発電所の再稼働が進むと更に占有率は増加することが予想される。これに加えて使用済み燃料のキャスクによる乾式保管は安全性の観点から推進される動きが認められ、今後使用済み燃料の貯蔵および輸送用金属キャスクの需要増加が予想されている。

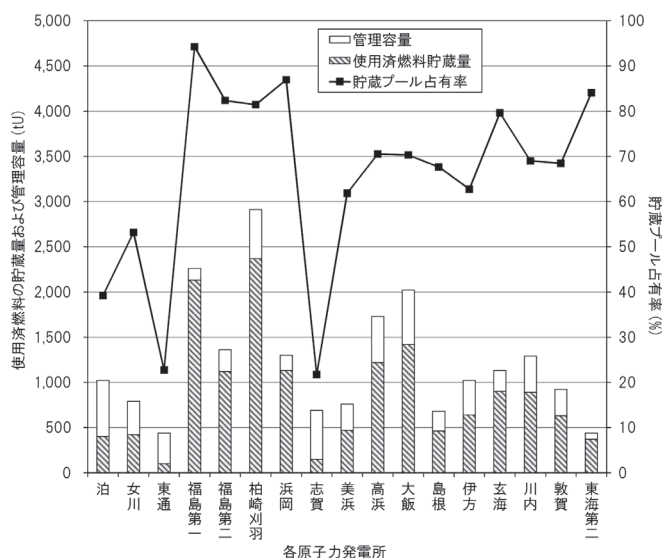


図1 各原子力発電所の使用済み燃料と貯蔵プールの占有率<sup>(1)</sup>

図2に、金属キャスクの模式図を示す。金属キャスクは、本体胴、中性子遮へい材および外筒から構成されるが、鍛鋼製の本体胴は「胴体」と「底板」をそれぞれ個別に製作し、それらを継手溶接することでコップ型容器となる。

弊社は、原子力発電所の再稼働後に予想される金属キャスクの高需要に対応する為、製造コスト低減、工期短縮、信頼性向上を目的として、胴体と底板を鍛造一体型とし溶接線の無い底板一体型キャスク鍛鋼胴（以下、一体鍛造型）の製作性に関する机上検討を開始し、次いで実機サイズ試作体製作および確性試験を行い、十分な品質および材料特性を有することを確認し、最終的に製造技術を確立することができた。以下にその開発内容を示す。

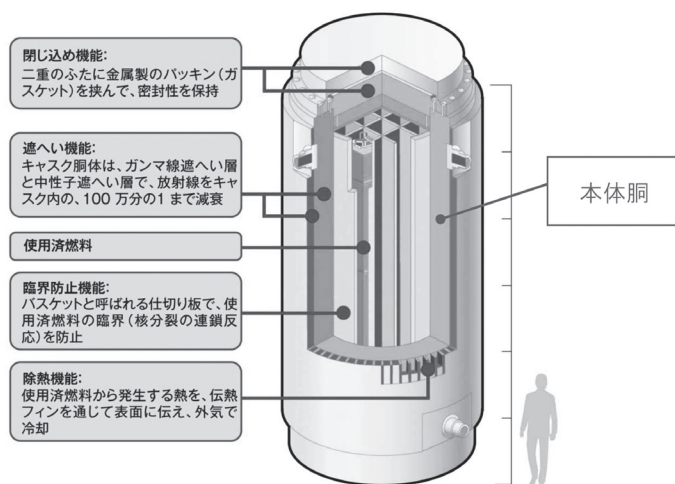


図2 金属キャスクの模式図<sup>(1)</sup>

## 2. キャスク鍛鋼胴の部材レイアウトと製造要領<sup>(2)</sup>

図3に、代表的な鍛鋼製キャスクの部材レイアウトを示す。金属キャスク本体胴は、従来3種類もしくは2種類の鍛鋼品を継手溶接し製造されていた（以下、溶接型）。金属キャスク構造規格（JSME S FA1-2007）では、使用される各々の鍛鋼材料にて機械試験を行う必要があり、この要求に伴い分割数が多いほど機械試験数が増加する。また、溶接部の品質評価を行うために、溶接線に対応した溶接用機械試験板を製作する必要もあることから、溶接線の増加は製造コストの増加とともに工期長期化につながる。そこで、「胴体」と「底板」を一体鍛造化したコップ型の鍛鋼胴製造を考案し、溶接型に実施される溶接、熱処理、検査作業削減を通じて、コスト低減、工期短縮を図ることとした。底板一体型キャスク鍛鋼胴の形状の特異性から、その製造に際しては、特に鍛錬と機械加工において新たな技術開発が必要であった。

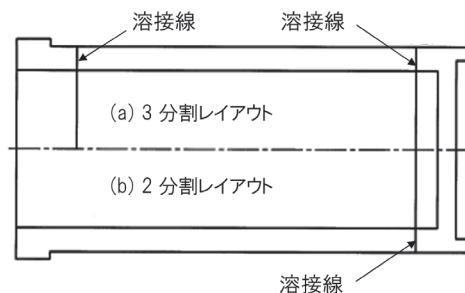


図3 鍛鋼製キャスクの代表的な部材レイアウト

### 3. 底板一体型キャスク鍛鋼胴の製造技術開発

#### 3.1 鍛錬技術開発

鍛錬作業の課題は、コップ形状を成形するために考案したポンチ押込工程において、その成形荷重を弊社所有の自由鍛造プレス最大荷重 14,000tf 以下とすることであった。

完成形状により近い形状に鍛錬成形を行うことが材料歩留改善と機械加工時間改善には必要となる。一方、コップ形状の内径を大きくし、完成形状により近くするためには、大径ポンチでのポンチ押込が必要となり、その成形荷重は 14,000tf を越える問題が生じる。この問題解決のために、実験室規模にて小型プレスを使用し、鉛やプラスチックによる 1/30 サイズの成形試験を繰り返し行い、ポンチ押込前形状の最適化を検討した。さらに、実製品と同じ JSME GLF1 鋼 (Mn 鋼) を使用して 1/3 サイズの成形試験を実施し、鍛錬治具の確認や段取りを含む現場作業の確認、成形荷重の経時変化計測、鍛錬加熱温度での寸法確認を検証した。

これらの検証試験の繰り返しと試行錯誤の結果、所定寸法を確保し、成形荷重 14,000tf 以下でのポンチ押込を可能とする実製品の鍛錬要領を決定することが出来た。

#### 3.2 機械加工技術開発

図 4 に、弊社が独自に設計し、新設した内面機械加工装置の概略図を示す。一体鍛造型 (コップ型) を加工するためには、長尺大径の止まり穴加工が必須となるが、貫通した中空形状と比較して機械加工は難しく、現在弊社が所有している中割り加工機では様々な問題から加工が不可能であった。

問題点は、中空形状は両方向の開口部からそれぞれ旋盤による内面旋削加工を実施できるが、一体鍛造型 (コップ型) では 1 つの開口部から全ての内面旋削加工を行うことになった。大型金属キャスクのサイズに対応できる大型加工機は市場にないため、高剛性のラムを持ち、その先端に加工具を装着した大型中割り加工装置を自社で考案、設計、製作し、一体鍛造型内径面および内底面の加工を実現した。

本加工機の特徴は、キャスク内底面を加工するために、ラム突出し量 5m 以上での加工に耐えうる高い剛性を有し、ラム先端の加工具は複数の加工ユニットを着脱可能とし、NC 制御を搭載したことにある。加工ユニットを交換することで、内径面を旋削加工、内底面はミリング加工を適用し、切削速度、送り速度などの適切な切削条件を選定することが可能となる。

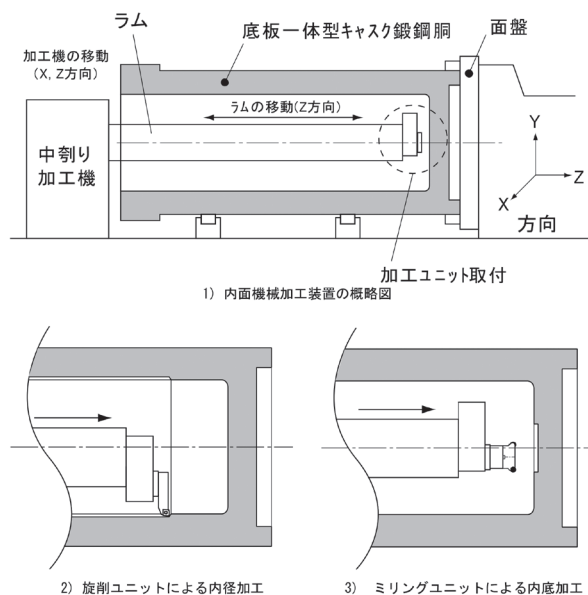


図 4 底板一体型キャスク鍛鋼胴の内面機械加工装置の概略図

### 4. 底板一体型キャスク鍛鋼胴の製造と得られた諸特性

#### 4.1 製造

図 5 に底板一体型キャスク鍛鋼胴の実機サイズ試作体形状を示す。

材質は、使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007) に規定される低合金鋼の 1 つである JSME GLF1 鋼 (Mn 鋼) とした。

図 6 に試作体の製造工程を示す。以下に、主要な製造工程を紹介する。

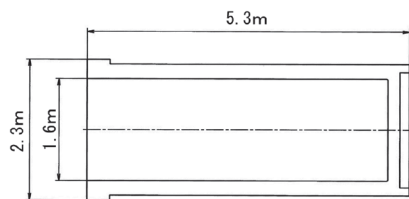


図 5 底板一体型キャスク鍛鋼胴の実機サイズ試作体形状

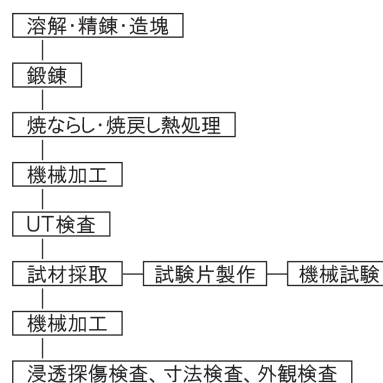


図 6 試作体の製造工程

1) 製鋼

製鋼工程は溶解・精錬・造塊から成る。

大型鍛鋼品の製造には不純物元素や非金属介在物などを低減するとともに、偏析、空隙などの生成を抑制した健全な鋼塊の溶製が品質上のポイントとなる。弊社では、酸素、水素といったガス成分及び非金属介在物低減のために、電気炉と取鍋の2回精錬を行い、取鍋精錬時と casting 時における2回の真空処理を実施している。これらの鋼塊の高清浄度は材料の高靱性化に大きく寄与する。

2) 鍛錬工程

鍛錬の目的は鋼塊の粗い凝固組織を高温拡散と塑性変形を利用して微細化させるとともに、鋼塊内部に形成される空隙を圧着し健全な内部性状を得ること、および所定の形状に造形することである。

図7に底板一体型キャスク鍛鋼胴の鍛錬工程を示す。写真1に、試作体の鍛錬作業状況と鍛錬後の外観写真を

示す。試作体の鍛錬作業は弊社製 14,000tf 自由鍛造プレスにて実施した。大型鋼塊に据込鍛錬および実体鍛錬を適用することで、鋼塊中の空隙を圧着し、健全な内部性状を得ることが出来た。

工程番号3に示すように、ポンチ押込前形状を下金型にセットし、上部からポンチを押込むことによってキャスク底部をコップ形状に成形することが可能となった。これらは、事前検討によって導かれた形状である。さらに、ポンチ押込時の成形荷重は弊社自由鍛造プレスの最大荷重 14,000tf 以下であることを確認した。

ポンチ押込工程が完了した後、開口部側から鍛錬芯金治具を挿入し中空鍛錬によって長手寸法を伸ばし、一体鍛造型を得る鍛錬工程を完了した。材料歩留改善のために、外径側には段付鍛錬を適用した。

鍛錬後の内径、外径、内底面には、完成形状に対して適切な鍛錬取代が付与されていることを確認した。

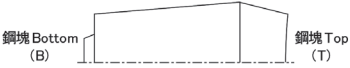
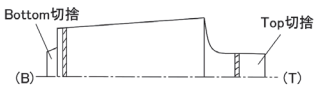
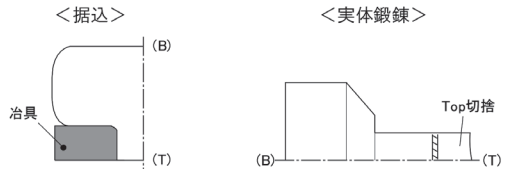
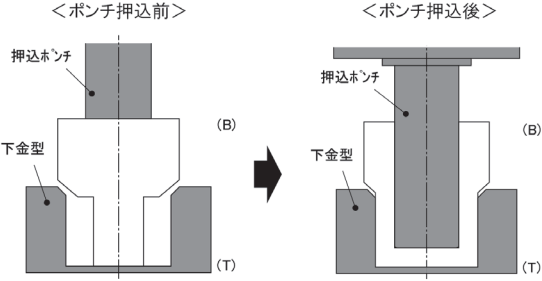
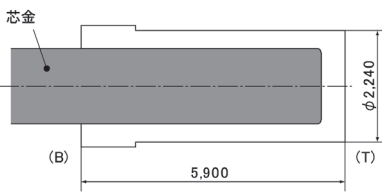
| 番号 | 工程                                    | スケッチ (単位:mm)   |
|----|---------------------------------------|--|
| -  | 鋼塊                                    |  |
| 1  | 鋼塊 Top 側のつかみ製作<br>鋼塊 Top と Bottom の切捨 |  |
| 2  | 据込<br>実体鍛錬<br>鋼塊 Top 切捨               |  |
| 3  | ポンチ押込 (底部仕上)                          |  |
| 4  | 中空鍛錬 (胴部仕上)                           |  |

図7 底板一体型キャスク鍛鋼胴の鍛錬工程

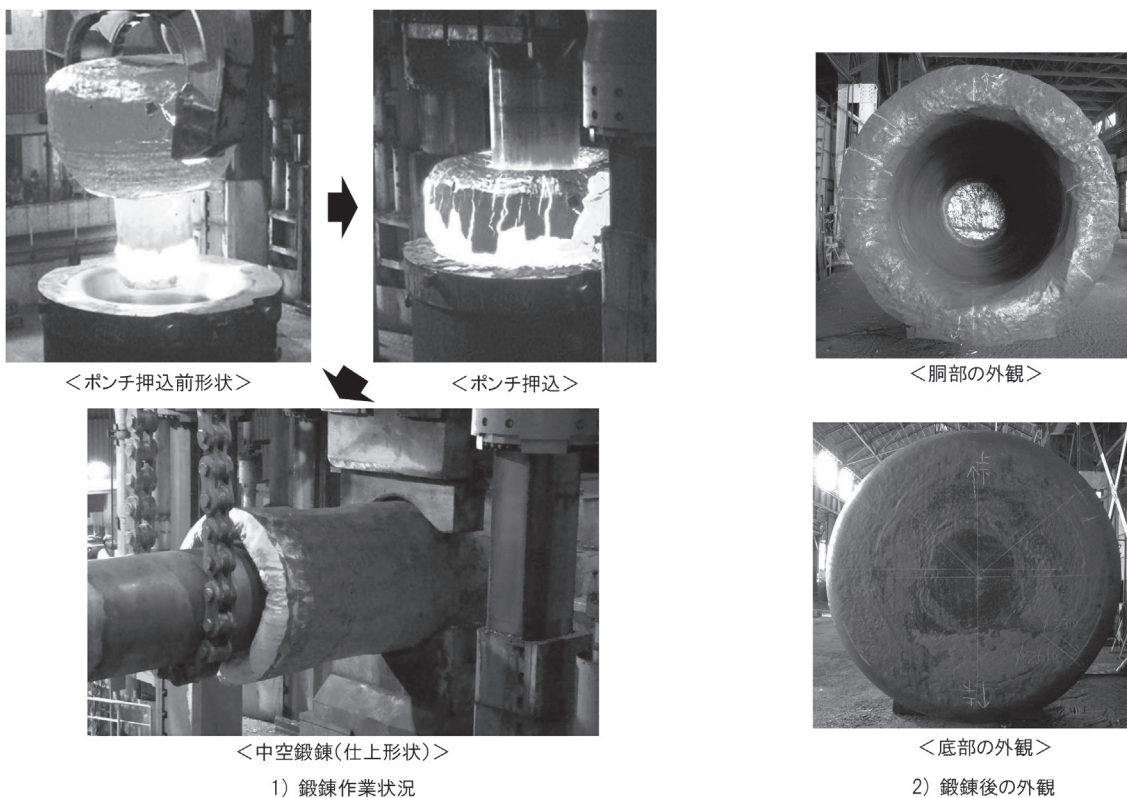
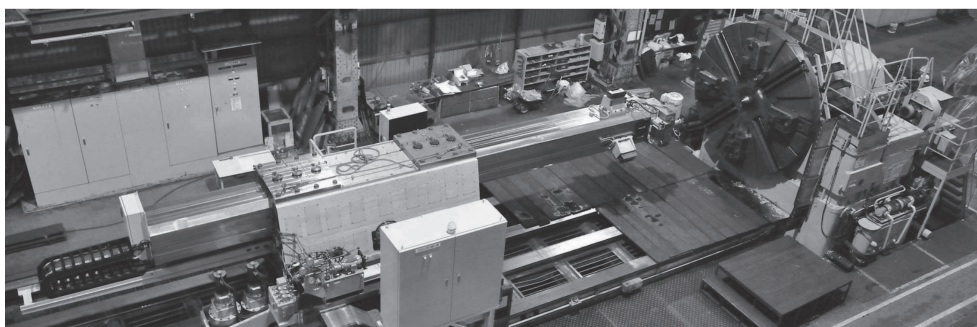
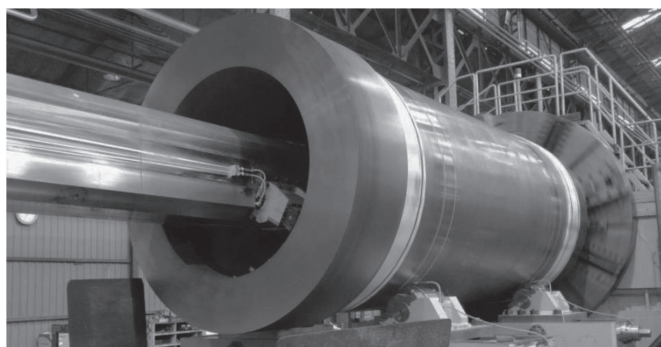


写真1 底板一体型キャスク鍛鋼胴の鍛錬作業状況と鍛錬後の外観



1) 内面機械加工装置外観



2) 底板一体型キャスク鍛鋼胴の加工状況

写真2 内面機械加工装置外観および底板一体型キャスク鍛鋼胴の加工状況

### 3) 熱処理

熱処理は、大型熱処理炉にて焼きならし、焼きもどし熱処理を実施した。

### 4) 機械加工と寸法検査

写真2に、弊社が開発した内面機械加工装置の外観および底板一体型キャスク鍛鋼胴の加工状況を示す。写真3に、機械加工後の試作体外観写真を示す。

新たな加工機によって試作体の機械加工を実施し、使用加工工具、切削速度、送り速度等を検証した結果、適切な切削条件を選定することで要求寸法精度と面粗度を満足することが出来た。

### 5) 非破壊検査 (超音波探傷試験、浸透探傷試験)

垂直法および斜角法を用いた超音波探傷による内部品質の確認を実施した。また、浸透探傷試験による製品表面の品質確認を実施した。

### 6) 試験片採取および機械試験

材料の余長部から試験片を採取し、室温引張試験、シャルピー衝撃試験、落重試験を実施した。なお、一体鍛造型では溶接部が無くなることから、機械試験片に与える熱処理 (PWHT) は、実施していない。

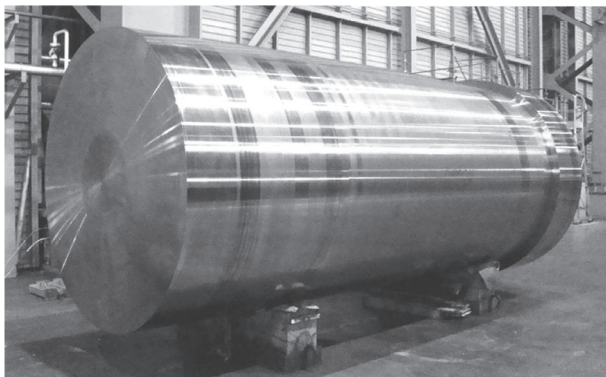
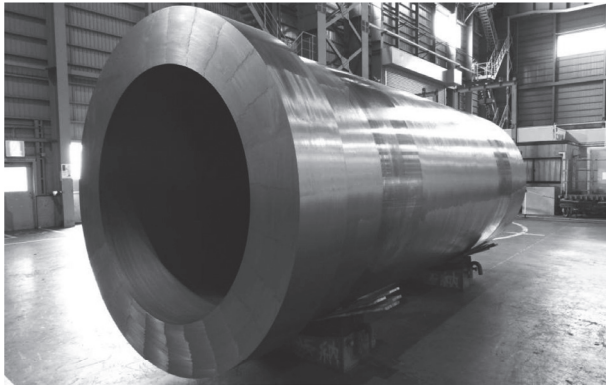


写真3 底板一体型キャスク鍛鋼胴の外観

## 4.2 得られた諸特性

### 1) 機械的性質

図8に、底板一体型キャスク鍛鋼胴の熱処理形状および試験片採取位置を示す。一体鍛造型の場合、JSME規格要求の試験片は、熱処理時の最大板厚となる底部からのみ採取される。試作体では、複数の異なる位置にて均一性を評価することを目的に、製品両端 (胴部と底部) から試験片を採取した。

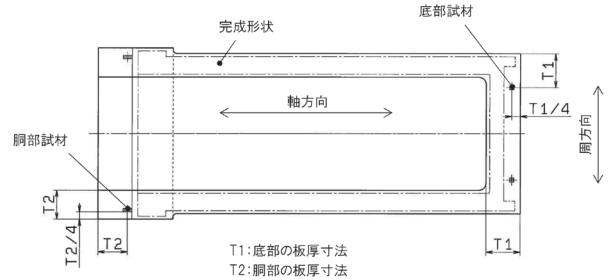


図8 底板一体型キャスク鍛鋼胴の熱処理形状と試験片採取位置

表1に、溶鋼分析結果及び引張試験、落重試験及びシャルピー衝撃試験結果を示す。関連温度 ( $RT_{NDT}$ ) の要求値については  $-25^{\circ}\text{C}$  以下と仮定した。

鋼塊底部側の試材と鋼塊胴部側試材のいずれの部位においても引張特性と関連温度 ( $RT_{NDT}$ ) は要求値を満足しており、良好な機械的性質が得られた。

### 2) 非破壊検査結果

超音波探傷試験、浸透探傷試験、寸法検査を行い、全ての要求品質を満足する結果が得られたことを確認した。

表1 底板一体型キャスク鍛鋼胴の諸特性

| 溶鋼分析 | 化学成分         |  | C     | Si        | Mn    | P      | S      |
|------|--------------|--|-------|-----------|-------|--------|--------|
|      | 規格値[mass%]   |  | ≤0.30 | 0.15/0.30 | ≤1.35 | ≤0.035 | ≤0.040 |
|      | 溶鋼分析値[mass%] |  | 0.14  | 0.25      | 1.30  | 0.005  | 0.001  |

| 室温引張試験 | 採取位置             | 方向<br>(採取深さ)     | 降伏点 [MPa] | 引張強さ [MPa] | 伸び [%] | 絞り [%] |
|--------|------------------|------------------|-----------|------------|--------|--------|
|        |                  |                  | ≥207      | 414/586    | ≥25    | ≥38    |
|        | 底部               | 周<br>(T1 × T1/4) | 293       | 482        | 36     | 75     |
|        |                  |                  | 323       | 517        | 35     | 72     |
| 胴部     | 軸<br>(T2 × T2/4) | 259              | 460       | 40         | 77     |        |
|        |                  | 262              | 454       | 40         | 75     |        |

| シャルピー衝撃試験結果および関連温度 | 採取位置 | 方向<br>(採取深さ)     | 試験温度 [°C] | 吸収エネルギー [J] |      | 横膨出量 [mm] | 延性破面率 [%] | 関連温度RT <sub>NDT</sub> [°C] |
|--------------------|------|------------------|-----------|-------------|------|-----------|-----------|----------------------------|
|                    |      |                  |           | 個別値<br>≥68  | 平均値  |           |           |                            |
|                    | 底部   | 径<br>(T1 × T1/4) | 8         | 211         | 189  | 2.42      | 85        | ≤-25                       |
|                    |      |                  |           | 190         |      | 2.39      | 80        |                            |
|                    |      |                  |           | 165         |      | 2.33      | 80        |                            |
|                    |      |                  |           | 171         | 172  | 2.43      | 80        |                            |
|                    |      |                  |           | 167         |      | 2.23      | 80        |                            |
|                    |      |                  |           | 179         |      | 2.45      | 80        |                            |
|                    | 胴部   | 周<br>(T2 × T2/4) | 8         | 302         | 264  | 2.43      | 100       | ≤-25                       |
|                    |      |                  |           | 249         |      | 2.31      | 85        |                            |
| 242                |      |                  |           | 2.47        |      | 80        |           |                            |
| 303                |      |                  |           | 304         | 2.40 | 100       |           |                            |
| 299                |      |                  |           |             | 2.35 | 100       |           |                            |
| 309                |      |                  |           |             | 2.34 | 100       |           |                            |

T1: 底部の板厚寸法

T2: 胴部の板厚寸法

## 5. 結 言

新たな開発技術を適用した底板一体型キャスク鍛鋼胴の試作体を製作し、複数箇所での機械試験による均一性評価を行うとともに、超音波探傷試験、浸透探傷試験、寸法検査などの非破壊検査による健全性評価を行い、全ての要求値を満足する結果が得られた。また、これらの開発技術を適用することで、従来の溶接型と比較して、製造コストの低減、3ヶ月程度の製造工期短縮が可能になることを確認した。

今後、大量生産による習熟度向上により、更なるコスト低減および工期短縮の可能性もあり、見込まれる使用済み核燃料処分に関する問題解決に貢献していく所存である。

## 参 考 文 献

- (1) (一財) 日本原子力文化振興財団：原子力・エネルギー図面集 (2017年3月27日更新),  
[http://www.ene100.jp/map\\_7](http://www.ene100.jp/map_7),
- (2) 佐々木, 小山, 吉田, 和田：底付き一体型キャスク胴の開発, (社) 火力原子力発電技術協会, 火力原子力発電 2015年5月号 (Vol.66 No.704)