

# 蒸気発生器水室鏡板の一体成形技術の開発

## Development of Wholly Forming Technology for Head Plate of Steam Generator

技術本部 田浦良治\*<sup>1</sup> 益本雅典\*<sup>2</sup>  
 神戸造船所 久利修平\*<sup>3</sup>  
 北海道支社 三浦章\*<sup>4</sup>

1980年代初頭に実施された原子力発電プラントの製法改善の一環として、加圧水型軽水炉の蒸気発生器水室鏡板の材料を鋳鋼から鋼板に変更し、ノズルも含めて一体成形する計画を立てた。水室鏡板は1個で30tにもなる重量物なので、一体成形法の開発を円滑に進めるため、実体成形試験前にあらかじめ縮小モデル試験法で成形条件を把握する方法をとった。その結果、半球成形は2度、ノズル成形は1度の加熱で加工でき、成形した鏡板の機械的性能は設計基準値を満たした。実機適用に際して、回数制限付でプレス能力を上げる改造を行い、半球成形も1度加熱で加工できた。これまですでに40基以上の蒸気発生器に適用した。

As one manufacturing improvement of a nuclear power plant in the early nineteen-eighties, it was proposed that the SG channel head of PWR including nozzles be made by a steel plate instead of by a steel-casting. Because a channel head is very heavy, forming conditions were simulated by a small size model test method before actual manufacture, in order to satisfactorily develop a suitable forming process. As a result of the model tests, it was shown that semispherical forming might be performed by two heatings, and nozzle forming by one heating. The mechanical characteristic of a formed channel head thus achieved optimum design values. Improved press capacity (within pressing time limitations) allows semispherical forming in one heating. More than forty channel heads have already been manufactured by this process.

### 1. ま え が き

1980年代初頭に当社における原子力発電プラント・機器の製作法見直しが図られ、全体的に溶接線低減の方向で検討された。加圧水型軽水炉に特有な蒸気発生器の水室鏡板についても、従来鋳鋼で作られていたのを鋼板に変え、大幅な歩留り向上が図れるように、また、溶接線増加にならないように、ノズル部も含めた一体成形の計画を立てた。本工法は以下の過程を経て1987年から実用化され、十分な実績を残したのでここに紹介する。

対象となる水室鏡板は図1に示すように、 $\phi 800$  mmと $\phi 560$  mmのノズルを2個ずつ有する内径3190 mm、板厚200 mm以上の円筒部付半球形状をしており、1個で30tにもなる重量物である。これを鋼円板から半球成形した後、下穴加工した所をノズル成形して製作する工程を考えたが、社内生産しようとするプレス能力の不足が懸念され、最初から実物の試作に踏み切れなかった。そこで塑性加工技術開発の常とう手段であるプラスチック（油粘土）や鉛を用いた縮小モデル試験で大筋の成形条件を定めた後に、実体成形試験による確認を行うことにした。なお円筒

部付のものを一体成形するのは外国にもない当社独自の技術である。

### 2. モデル試験方法及び結果

前半の半球成形では板厚が十分大きいので、鏡板縁の円周方向しわの問題はない<sup>(1)(2)</sup>。そこでまずプラスチックを用いた1/20スケールモデル試験でノズル成形の形状的条件を把握し、次に鉛を用いた1/10スケールモデル試験で半球成形も含めて負荷的条件を把握した上で、実体成形試験を行った<sup>(3)</sup>。

モデル材と熱間鋼の変形抵抗のひずみ硬化指数やひずみ速度指数がほぼ同じなので、変形についても負荷についてもモデル試験の相似性が成立していると考えた。モデルに対する実体の負荷倍率  $W$  は、変形抵抗比を  $F$ 、スケール比率を  $S$  とするとき、次のように表されるので、これで実機の成形力を推定した。

$$W = F \cdot S^2 \quad (1)$$

#### 2.1 1/20 スケールモデル試験

本試験ではノズル成形に必要な加工条件を得るために、内半径80 mmに球面成形した種々の板厚の白色プラスチックに、各種の下穴をあけ、拘束型とフリー型の2種類の型を用いて成形試験した。成形後、試験体を切断し、球面形状を計測した。2種類の金型形状と、成形後のノズルコーナ半径及びノズル部成長さと素材板厚の関係を図2に示す。成形後のコーナ半径は型の違いや下穴径によらず板厚の増加とともに小さくなって雄型コーナに肉盛り充填され、板厚12 mm以上では完全充填し雄型につけた半径10 mmと同じになる。一方このスケールでは25 mm以上必要なノズル高さを確保するには、下穴径15 mmでは拘束型でも板厚10 mm以上、フリー型では12 mm以上必要である。

図1の左側に示す小径管口は、必要なコーナ半径がノズル径に対応して小さく、ノズルコーナ部を大径のものより肉盛り充填さ

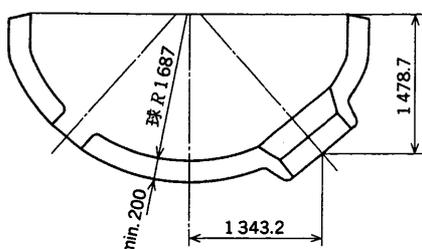
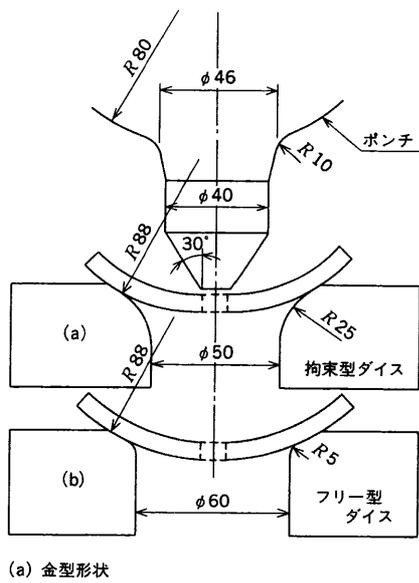
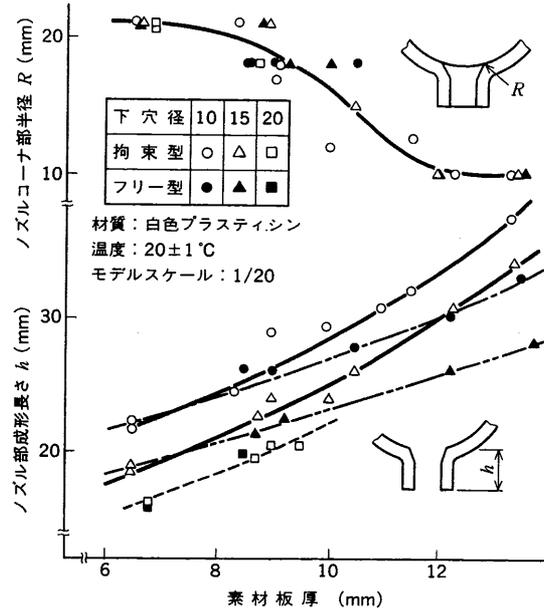


図1 水室鏡板の形状 ノズル部分を半径方向に開いた断面図。  
Shape of channel head

\*1 広島研究所工作機械研究推進室主務 \*3 プラント工作部重機器工作課長  
 \*2 広島研究所機構技術グループ \*4 原動機課



(a) 金型形状



(b) ノズルの成形形状

図2 1/20スケールモデルノズル成形試験を示す図と、成形後のノズル形状。1/20 scale model forming test of nozzle

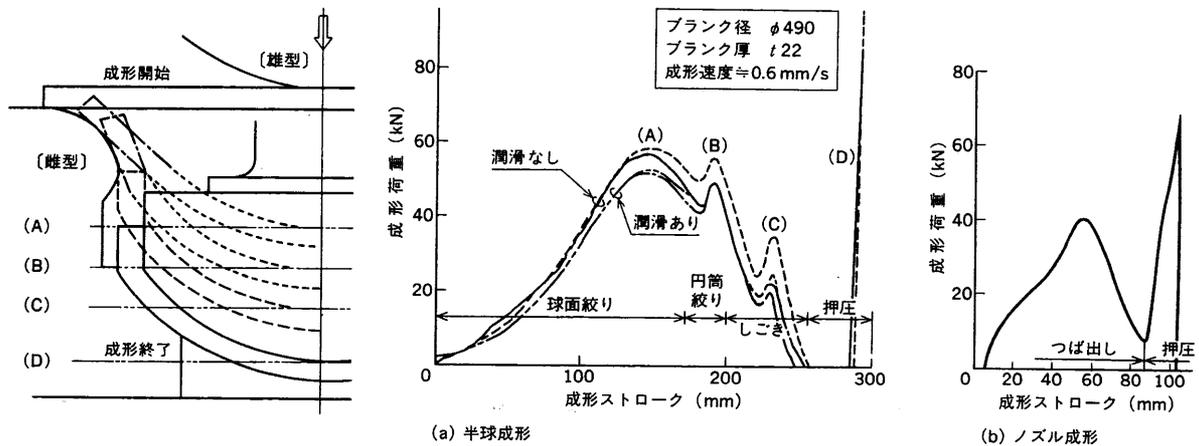


図3 1/10スケール鉛モデルにおける成形力 1/10スケール鉛モデル試験で測定された半球成形・ノズル成形双方の成形力。Punch force in 1/10 scale lead model test

せなければならない。このような小径の場合でも、一度つば出しした後、つばを逆に押込むことにより、ノズルコーナ部の充満が進みノズル形状を成形できるが、成形工具の動きが複雑で実機での実現性に乏しい。したがって、小径管口はノズル成形を行わず、板の厚みを十分とり外側球面を平面に削り出してフランジ面を形成することにした。

2.2 1/10スケールモデル試験

本実験では、半球成形とノズル成形双方の負荷条件を得るために、鉛を用いて試験を行った。半球成形の雄型は鏡板の内側形状を転写した形状とした。雌型は鏡板外径より若干大きい内径で、半径がその1/5程度の滑り込み面を持つリング形状とし、最後に鏡板外面を押圧できる面を底部に持つようにした。ノズル成形型は拘束型とした。ポンチの成形力と変位をそれぞれロードセルと変位計を用いて測定した。ノズル成形時のコーナ部は完全には充満しなくてもよいとしてプラック板厚を22mmとした。予備的な成形試験の結果から、円筒部長さが所定量確保できるように、プラック直径を490mmとした。半球成形後、下穴径30mmを

切削加工し、ノズル成形試験を行った。半球成形後もノズル成形後も、供試体を切断し、断面形状を測定して所定どおりのものであることを確認した。ただし、成形形状の精度を確保するには、半球成形後の下穴をあける位置や方向の補正は不要とした。その代わり素材の型への位置合せ精度を1mm以内に収める施策を講じた。特にノズル成形型の場合、半球を斜めに保ちつつ下穴位置を型の中心に合わせるため、下穴ピンと鏡板縁押えを新たに設置した。また、モデル試験に必要なストロークやデイトから実機を推定するとプレス能力が不足する事態が予想され、半球成形の雌型の分割・かさ上げやノズル成形の雄型の分割・ピンによる設定法などの手段を考案し、モデル試験で確認した。

半球成形力及びノズル成形におけるポンチストロークと成形力の関係を図3に示す。半球成形は球面の絞り成形、円筒部の絞り成形、円筒部のしごき成形、及び球面の押圧成形の4種類、ノズル成形はつば出し成形とコーナ部の押圧成形の2種類の形態に分けられる。各成形において最大荷重を示すストロークは、半球成形ではそれぞれ145mm, 190mm, 232mm, 290mm、ノズル

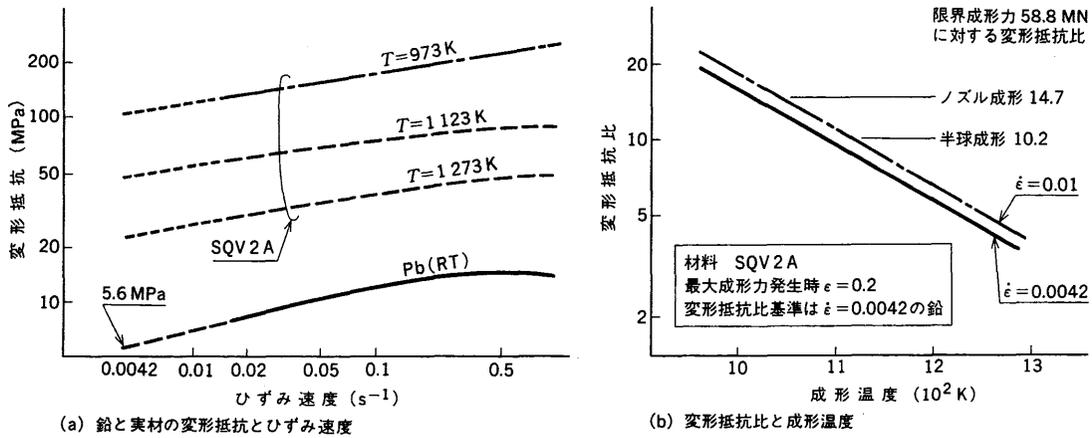


図4 成形力最大時の鉛に対する実材の変形抵抗比 成形力が最大になるときのひずみにおける変形抵抗を測定して算出した変形抵抗比。  
Flow-stress ratio to lead at maximum forming force

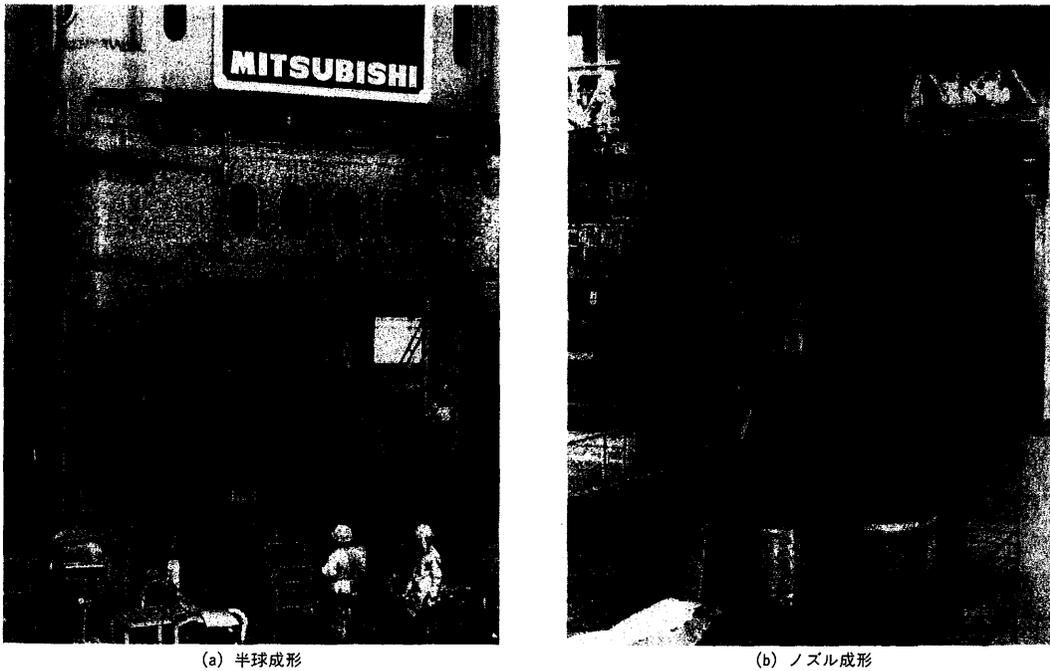


図5 実機水室鏡板の成形状況 実機水室鏡板の半球成形及びノズル成形の状況。  
Hot forming of actual channel head

成形ではそれぞれ 55 mm, 105 mm であり, 潤滑・ブランク径にかかわらずほぼ一定である。

半球成形の場合, 押圧成形を除く最大値は球面紋りに要する負荷で, 無潤滑 58 kN である。潤滑を施すと最大値は同じストロークで現れるが, 約 6 kN 小さい。ノズル成形の場合は, 押圧成形を除いて 40 kN の負荷となる。モデル試験の結果, 押圧力が大きすぎると押圧周辺部に余分な変形を生じさせることが分かり, 逆に押圧成形を実施しなくても, 半球成形では内面形状を十分精度良く得ることができ, ノズル成形ではコーナ部の若干の欠肉も性能上問題ないものと判断されるので, 押圧成形は行わないことにした。

実機はいずれにしる熱間加工となり, 温度条件に若干の差はあるにしても半球成形の方がノズル成形より負荷が 1.5 倍近く大きいと考えられる。したがって, 使用するプレス能力の範囲内で成形加工できるかどうかは半球成形の可否にある。半球成形での最大荷重を示すストロークでの供試体直径とブランク径の比から, このときの最大ひずみを 0.19 とした。ひずみ速度は近似的にブ

ランク縁の引込み速度を半径で除して表すことができるので, 縁の傾きを考慮して約 0.0042/s とした。

鉛と実機用材料(SQV2A)の引張試験を行い, ひずみが 0.19 時点での変形抵抗とひずみ速度の関係を図 4(a)に示す。鉛モデルでのひずみ速度は引張試験より小さいが, 外挿して変形抵抗を求めた。実機でのひずみ速度を, 鉛モデル試験並みの 0.0042/s とした場合と約 2.5 倍の 0.01/s とした場合の 2 ケースについて成形温度と変形抵抗比の関係をとり図 4(b)に示す。使用するプレス能力 58.8 MN と鉛モデル成形力 58 kN との比率 1.029 及びスケール比 10 を式(1)に代入すれば限界変形抵抗比は 10.2 となり, 成形温度が 1100 K 以上で成形できることになる。

ノズル成形の場合は最大荷重を示すときのひずみもひずみ速度も半球成形より 2.5 倍程大きい, 鉛モデル試験並みの実機加工時間をとる場合をひずみ速度 0.0042/s で代表させるとすれば, プレス能力と鉛モデル成形力 40 kN との比率 1.470 から限界変形抵抗比は 14.7 となり, 図 4(b)から成形温度が 1020 K 以上で成形できることになる。

### 3. 実機の成形加工

スケールモデル試験を通じて得られた加工条件を用いて、実機成形加工を実施した。使用した装置は常用 58.8 MN (確認試験当時の最大)、最大 88.2 MN (実機適用に当たって能力向上) の油圧プレスであり、荷重は油圧シリンダの圧力で、変位はプレスヘッドの位置で計測した。加工は以下の手順で行った。供試体を大気炉中で加熱し、途中でプレスのストローク不足を補う雌型のかさ上げを行いながら半球成形を実施し、室温まで空冷する。その後所定の位置に下穴を切削加工し、再び加熱しノズル成形を行う。半球成形とノズル成形の実機成形加工状況を図5に示す。

半球成形、ノズル成形とも熱間の加工となるが、ハンドリング時間も考えると、加熱温度は高いほど成形力を低く抑えることができるので、冶金的性質で決められる最高加熱温度 1203 K とした。ノズル成形の場合は同じプレス能力に対しては低温で成形できるので加熱温度は 1173 K とした。ハンドリング時間は大物部材なので 10 min は考える必要があり、加圧停止までの時間を 15 min と設定した。この加工時間予想と最高加熱温度での成形加工可能性を探るため鋼板の加熱冷却試験を実施した結果を図6に示す。鋼板の平均を示すと考えられる板厚の 1/4 位置での温度は 10 min 後に 1120 K、15 min 後に 1080 K であった。鉛モデルより短時間の成形を考え図4からそれぞれに対応する変形抵抗比を読取ると 9.7、12.2 であり、半球成形の限界を超えることが予想された。したがって、試験としては2度加熱を採用してモデル試験並みの加工時間にすることにした。図6には実体の成形試験の加工時間実績も合わせて示しているが、加熱2回目はハンドリング不調で加工が進まなかったため実質的に当初予定していた2度加熱で所定の形状に加工できた。半球成形力はプレス能力一杯で 58.8 MN であった。実機適用に当たってプレス能力向上の改造を行った後は1回加熱で加工できるようになり、その成形力は図7に示すように最大 88 MN になった。

図7に同時に示した変形抵抗比を一定とした推定値と比較するとストローク後半で実測値の方が大きくなるが、雌型肩半径が相似的に小さく円筒絞り力が大きくなったためピークが一つになり、材料温度が想定より低いものと推定される。温度低下の原因は型との接触が大きくなり、図6の冷却曲線での表面温度のものが代表値となったと考え、15~20 min の温度での変形抵抗比 17.2 と、鉛モデルでの成形力 50 kN とから推定される 86 MN が最大成形力の測定値とほぼ一致する。

ノズル成形の場合は最初の設定がうまくいけばストロークは小さいので、10 min 経過後の表面温度 1080 K を代表値として、変形抵抗比 10.5 からの推定成形力が 42 MN なのに対して、測定成形力は約 39 MN と十分にプレス能力内に収まった。減肉がやや大きかったが、機械加工で製品形状を削り出せることを確認できた。

成形した鏡板の各部の機械的性質を、テストピースによる試験を通じて調査した結果、0.2%耐力、引張強さ、伸び、遷移温度ともに設計要求値を満足していることを確認できた。

以上のように、水室鏡板の素材を鋳鋼から鋼板に変更することにより、大幅な歩留りの向上を果たし、その結果としてコスト低減にも寄与した。

### 4. ま と め

溶接線低減の方向で検討された原子力発電プラント・機器の見

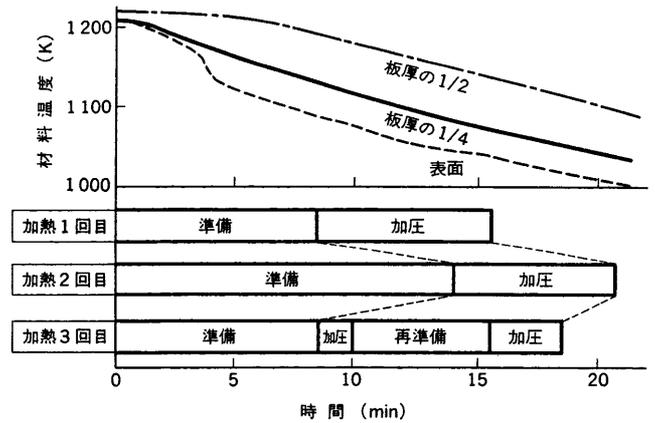


図6 材料冷却曲線と加工時間実績 材料の炉出し後の温度変化と実体半球成形試験における実際の加圧成形時間。  
Cooling curve and processing hour of actual material

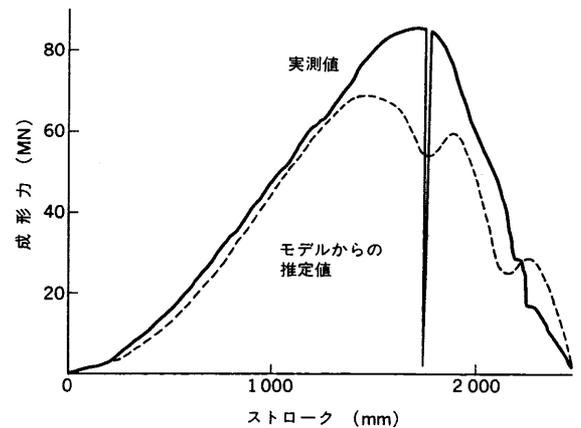


図7 実機半球成形の成形力 1回加熱成形での半球成形における成形力。  
Forming force in actual hemispherical hot forming

直しの一環として、従来の鋳鋼に代わり、鋼板からノズル付き大径鏡板への一体成形加工技術の開発を、各種の縮小サイズモデル試験を通じて行った。加工は、高温に加熱したブランクを半球成形し、下穴を切削加工した後、再び加熱しノズル成形を行うものである。ノズルの高さが下穴径と板厚に依存することを明かにするとともに、最適な板厚を設定した。また、半球成形後ノズル成形に必要な板厚を確保でき、かつ製品形状の得られるブランク形状を決定した。次いで、スケールモデル試験の加工力と、高温での変形抵抗を用いて、実機の半球成形及びノズル成形に必要な加工温度と回数を決定した。さらに最大プレス能力を上げる改造により半球成形を1度の加熱で可能とした。以上のようにスケールモデル試験で加工条件を決定し、実機の成形を行った結果、狙った形状に成形できること、成形した鏡板の機械的性能が設計基準値を満たしていることを確認した。これにより大幅な歩留りの向上を果たし、その結果としてコスト低減にも寄与した。1987年以降多くのプラントで40基以上の蒸気発生器に適用してきた。

### 参 考 文 献

- (1) 三浦ほか、半割れ中空円環体のプレス成形加工、平成6年度塑性加工春期講演会論文集 (1994) p.213~216
- (2) 太田ほか、压力容器・配管の塑性加工へのシミュレーション技術の適用、三菱重工技報 Vol.32 No.6
- (3) 三浦ほか、ノズル付き大型鏡板の一体成形加工法の開発、第45回塑性加工連合講演会論文集 (1994) p.551~554