

(解説)

大型鍛鋼品の製造設計におけるシミュレーションの適用

香川恭徳・木口三知男・谷和人・於久英一

鉄鋼部門・鋳鍛鋼事業部・技術部

Simulation Techniques for Large Forging Manufacturing Process Design

Yasunori Kagawa・Michio Kiguchi・Kazuhiro Tani・Eiichi Oku

Recently, simulation techniques have been applied to large forging manufacturing process design. In this paper, as an illustration of this kind of simulation, a simulation for an nuclear-powered vessel integral type closure head is outlined. Numerical analysis was carried out to simulate carbon segregation in a large ingot, deformation during the forging process, and the forging temperature during heat treatment. Estimated values corresponded well with experimental values obtained from actual production, and the resulting mechanical properties met customer specifications.

まえがき = 大型鍛鋼品の製造条件を確立するためには、数多くの実験や試作を繰返し行なうことが最も望ましいが、経済的、製品納期の観点から非常に困難である。このため大型鍛鋼品の製造設計には、各工程をシミュレーション技術を用いてアプローチすることにより製造条件を決定する事が望ましい。中でも、信頼性を要求される原子力プラント用部材などでは、製造前に内部の機械的性質を予測することが顧客から求められる場合もあり、鍛鋼品メーカーにとってシミュレーション技術は不可欠となっている。当社においても、これまでに様々な部材の製造条件を最適化するためにシミュレーション技術を用いている¹⁾。ただし、シミュレーション技術の適用に際しては、実製品の結果と比較、検討してその有用性を判断することが非常に重要である。

本稿では、当社でこれまでに蓄積されたシミュレーション技術を用いて、製造条件を最適化した一例として、一体型原子炉上蓋²⁾について紹介するとともに、大型鍛鋼品におけるシミュレーション技術の有効性について報告する。

1. 原子炉部材の市場ニーズと一体型原子炉上蓋の技術的課題

原子炉用部材は検査時間の短縮とプラント製造の簡易化の観点から、溶接線を減少させる要求が強い。原子炉上蓋においても例外ではなく、溶接線を減少させるため、従来溶接で接合していたドーム部とフランジ部を一体化する要求が強まり、当社も一体型原子炉上蓋の製造に関して技術的な検討を行なった。

原子炉上蓋は(Closure head)、図1に示した加圧水型軽水炉の炉心断面図³⁾内で制御棒駆動装置が取り付けられている重要な部材である。図2に従来の溶接型と今回製造した一体型の原子炉上蓋の模式図を示す。溶接型では、薄肉のドーム部分と厚肉のフランジ部分を個々に製造し、溶接して上蓋としていたが、一体型上蓋ではドーム部とフランジ部を一体で製造することにより、溶接部が

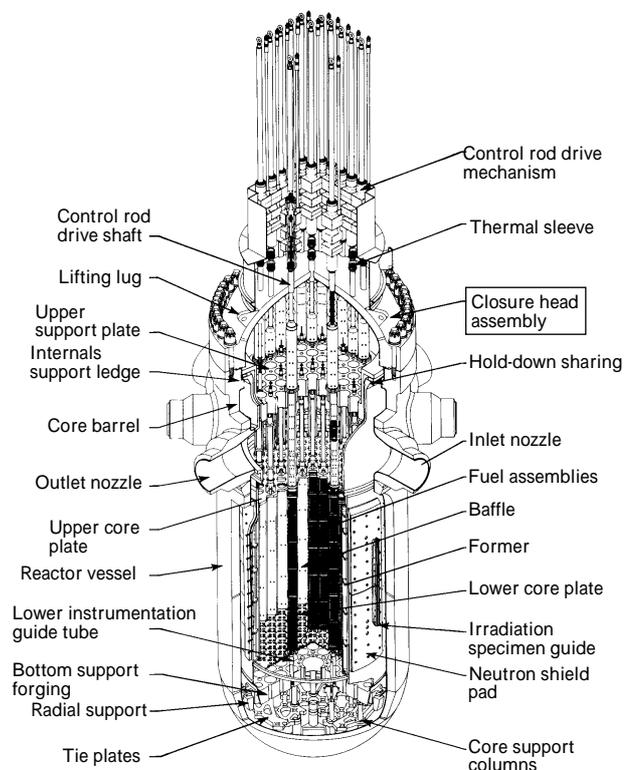


図1 加圧水型軽水炉の炉心断面図
Fig. 1 Sectional view of pressurized water reactor vessel

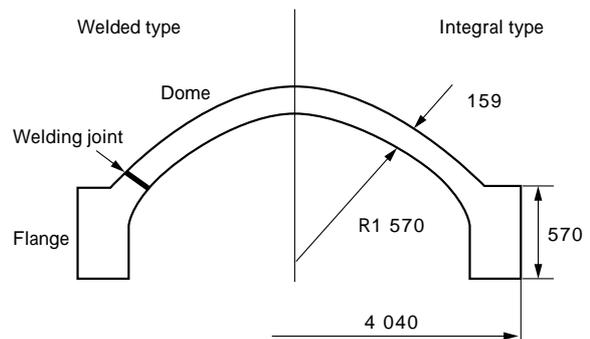


図2 溶接型と一体型原子炉上蓋の模式図
Fig. 2 Sectional welded and integral type closure head

不要となり検査時間の短縮、信頼性の向上が期待される。

しかしながら、一体型原子炉上蓋の製造においては、型入鍛造時の変形挙動を予測し、型入鍛造前の素材形状を決定する。

大型鋼塊から製造される肉厚差異が大きい部材において均一な機械的性質を付与する。

の2項目が主な技術的課題として挙げられる。従って、これら2項目についてシミュレーション技術を用いて事前に最適な製造条件を確立しておく必要がある。

2. 一体型原子炉上蓋の製造工程

図3に一体型原子炉上蓋の製造工程を示す。本製品の材質はJIS SFVQ 1A (Mn-Ni-Mo鋼)である。この中でシミュレーション技術を用いて予測、事前検討を行なった工程は、造塊工程、型入鍛造工程、熱処理工程の3つである。すなわち、造塊工程における成分偏析の予測、型入鍛造工程における変形挙動の予測と型入鍛造前の素材形状の決定、熱処理工程における部材内部の温度履歴の予測である。以下に実施したシミュレーション技術とその具体例を詳述する。

3. 一体型原子炉上蓋へのシミュレーション技術の適用

3.1 型入鍛造

型入鍛造では、その変形挙動を予測して鍛造後に所定の形状が得られるような型入鍛造前の素材形状(以下粗地形状)を決定することが必要となる。

3.1.1 型入鍛造時の変形予測

粗地形状は、表1のように大きく分けて2形状について検討した。粗地形状Aは、フランジ部分が最終形状に近い形のため、粗地の鍛造作業が煩雑になり歩留まりは悪化するが、型入成型ではドーム部分のみを成型するの

表1 部分型入鍛造前の素材形状の比較

Table 1 Comparison with shapes of first forgings

	Shapes of first forgings	Results of semi-die forging simulation
Shape A		
Shape B		

* Values in parentheses show actual part dimensions.

で最終形状は容易に得られるものと予測される。一方、粗地形状Bでは、粗地がディスク状のために鍛造作業は容易で歩留まりは良いが、ドーム部の成型に合わせてフランジ部を大きく変形させるために最終形状が得られ難いものと予測される。従って、変形シミュレーションにより粗地形状の選定を実施した。変形解析には当社の開発した剛塑性解析ソフトNASKA⁶⁾を用いた。さらに、1/30スケールの鉛実験による確認実験も合わせて実施した。シミュレーション結果及び鉛実験の結果は表1中に示した通りであり、粗地形状Bではフランジ部の所定寸法を確保することが困難であると予測されたため粗地形状Aを選定した。

図4に、粗地形状Aを用いて実製品の1/4スケールで実験を行なった結果を示す。結果から、フランジ部分が内側に倒れ込み、粗地形状Aをそのまま用いて実製品を製造することは困難であることが確認できた。フランジ部分が倒れ込む原因としては、均一に加熱した素材を型にセットするまでに時間を要し、素材表面の温度が低下

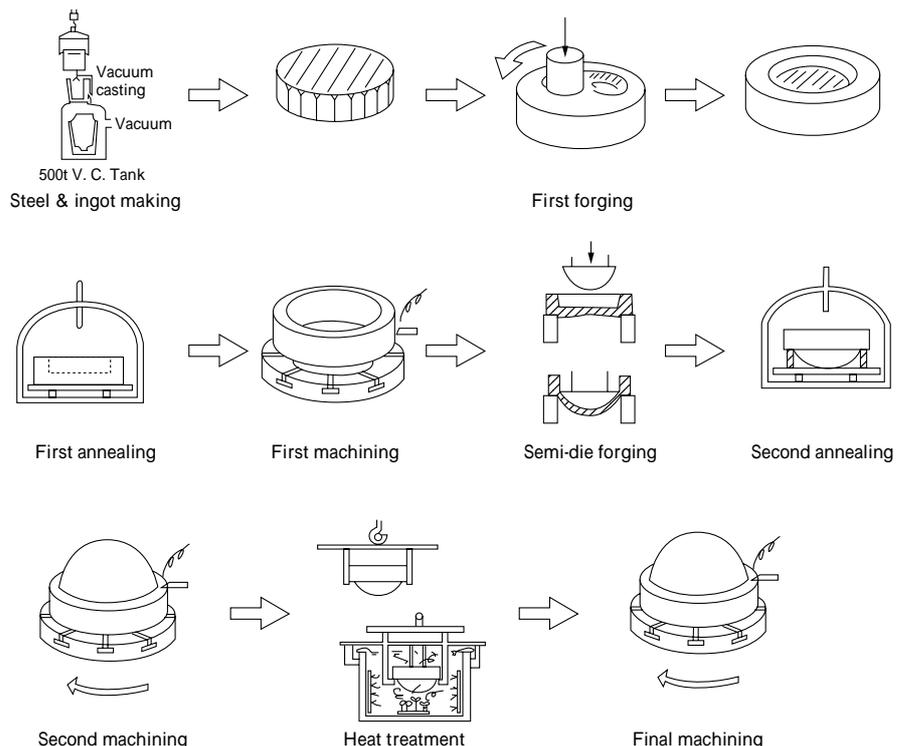


図3 一体型原子炉上蓋の製造工程
Fig. 3 Manufacturing process of the integral type closure head

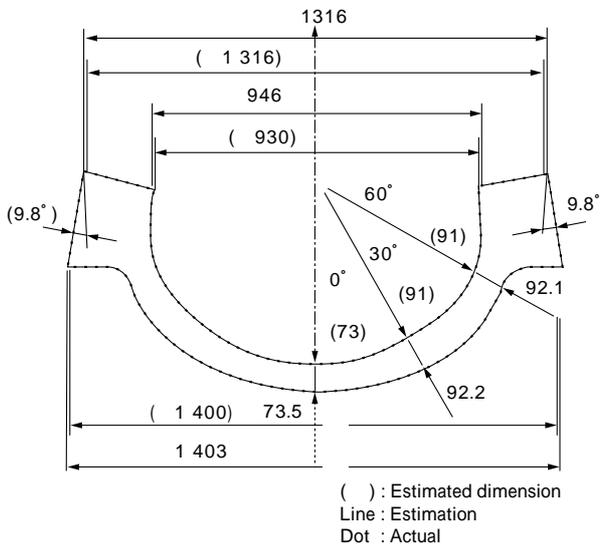


図4 1/4スケール実験で得られた型入後の形状とシミュレーション結果
 Fig. 4 Estimated and actual shape of 1/4 scale prototype after semi-die forging

することに起因する変形抵抗値の上昇が考えられる。素材表面の温度低下を考慮した解析を実施した結果、図4に示すように実測値と最大誤差で10mmと良い一致を示した。上述した理由によりフランジ部分の変形を考慮する必要があるため、図5に示すような粗地のフランジ部の傾斜()と鍛造後形状の関係をシミュレーションにより解析し、の最適化を行なった。すなわち、伝熱解析によって型入鍛造直前の温度分布を予測した後に、その温度に対応する変形抵抗値を用いて変形解析を行なった結果、最終的に = 18°とした。さらに、炉出しから素材をセットするまでの時間は実操業における管理項目として製造することにした。

3.1.2 型入鍛造結果

図6に型入鍛造後の形状を示す。シミュレーション及び1/4スケールの試作から粗地形状を決定し、製品形状を確保することができた。

3.2 機械的性質の予測

大型鍛鋼品の機械的性質には材料の成分偏析、熱処理時の各部位の熱履歴が大きく影響する。従って、図7に示す手順で機械的性質の予測を行なった。本材質におけるC量、焼入れ時の冷却速度、焼戻しパラメータの変化に伴う機械的性質の変化を図8に示す。図8よりC量、焼入れ時の冷却速度、焼戻しパラメータがわかれば、機械的性質を予測できることがわかる。以下シミュレーションを適用した部分について詳述する。

3.2.1 鋼塊内部のC偏析の予測

鋼塊はその凝固過程において不可避免的に成分偏析が生じる。一体型原子炉上蓋では、従来の溶接型に比べて必然的に大型の鋼塊を使用しなければならない。鋼塊が大型化すると偏析が助長されるために、均一な機械的性質を得ることが困難になる。当社ではこれまでに、大型鋼塊における成分偏析を予測してきた実績があり⁴⁾、この技術をもとにしてSFVQ 1A鋼のC分布を予測した。しかし今回の予測は、液相から固相に変態する際の溶質の



図5 部分型入前の素材形状
 Fig. 5 Cross section before semi-die forging

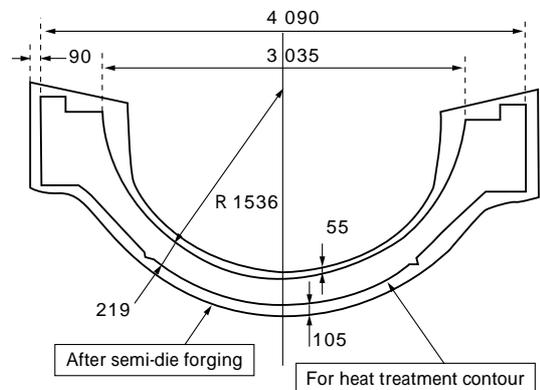


図6 部分型入鍛造後の予測形状と製造結果
 Fig. 6 Estimated and actual shape after semi-die forging

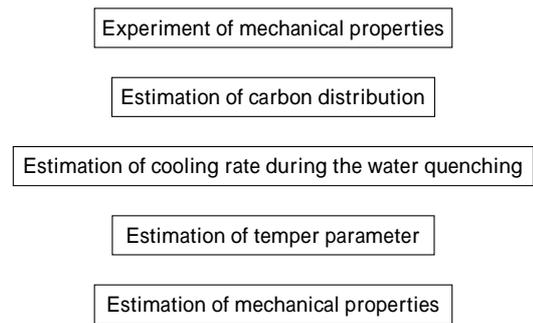


図7 機械的性質の予測手順
 Fig. 7 Sequence to estimate mechanical properties

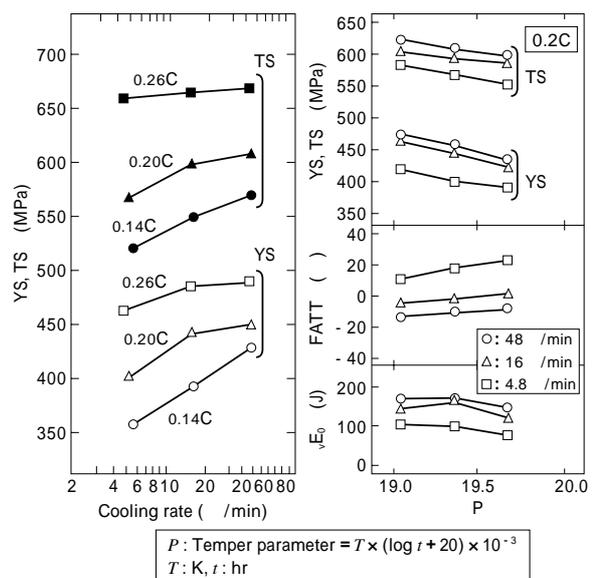


図8 C量、冷却速度、焼戻しパラメータの違いによる機械的性質の変化
 Fig. 8 Variation in mechanical properties as a function of C wt%, cooling rate and temper parameter

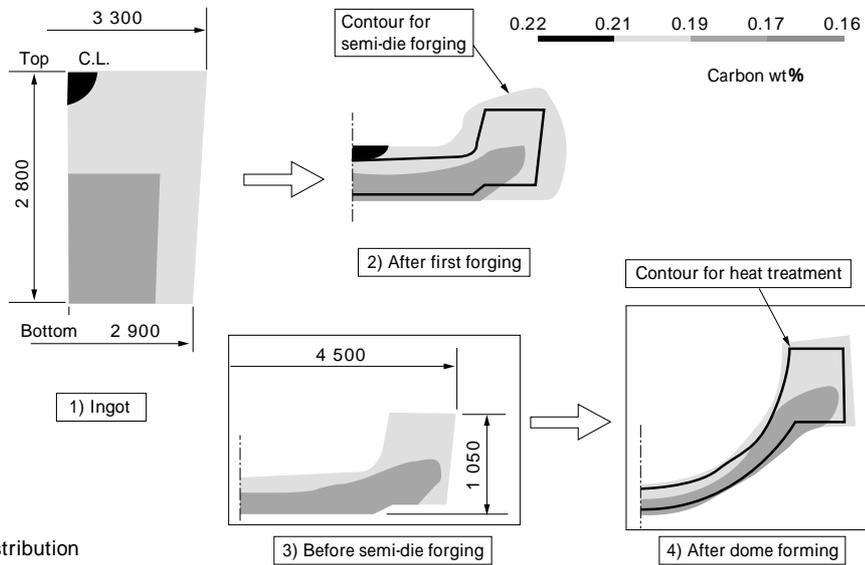


図9 C分布の予測
Fig.9 Estimated carbon distribution

分配を元にしたモデルを用いており、溶鋼の流動や固相と液相の密度差に起因する鋼塊底部の負偏析帯は考慮できない。従って、負偏析帯はこれまでの実測データを元に検討を加えた。

一体型原子炉上蓋は肉厚の差異が大きい部材を同一の条件で熱処理を施すことになるので、均一な機械的性質を得るためには十分な検討が必要となる。具体的には、熱処理によって強度を得易い部位にはCの濃化する正偏析部を避け、逆に強度を得難い部位には負偏析部を避けることを検討しなければならない。そのため、鋼塊の形状における偏析の予測のみでは不十分であるので、変形解析を組み合わせ最終製品の形状とC分布を合わせた形で検証した。C偏析の予測にはThermo-Calc.と当社の開発した凝固解析ソフトCASTEMを用いた。Cの平衡分配係数はThermo-Calc.により求めた。図9に、上記の方法により予測したC分布に実測データを元にして負偏析帯を考慮した結果を示す。肉厚で強度が得られ難いフランジ部には負偏析帯を避け、かつ薄肉で強度の得られ易いドーム部には鋼塊Top部の正偏析帯を避けていることが確認される。このように鋼塊におけるC分布を予測し、かつ鍛造時の変形を組み合わせることにより視覚的に最終形状におけるC分布を把握することができる。

3.2.2 熱処理時の素材内部温度の予測

熱処理時における素材内部の温度履歴の予測には、当社で開発した伝熱解析ソフトCAHT⁵⁾を用いた。解析結果に最も影響を与える熱的境界条件は、リング形状の製品で得られた実測結果を元に決定した。なお実製品の製造においては、リング品と一体型原子炉上蓋では形状が大きく異なるため、焼入れ時には気泡の表面付着による冷却効果が阻害されないよう十分に攪拌できる様に工夫している。

図10に主要部位における、焼入れ時及び焼戻し時の温度履歴を示す。冷却速度はフランジ部のT/4位置と試験片採取位置で20倍以上異なる。焼戻しにおいても、肉厚のフランジ部と薄肉のドーム部では保持温度に到達する時間が異なることがわかる。これらの熱処理条件の差異は、製品の機械的性質に大きな影響を及ぼす。

3.2.3 機械的性質の比較

図9で予測したC分布及び図10で予測した各部位の熱履歴から、図8を用いて各部位の機械的性質を予測した。予測値と製品より採取した実測結果を表2に示す。C量予測値と実製品の分析結果は同一の値が得られている。

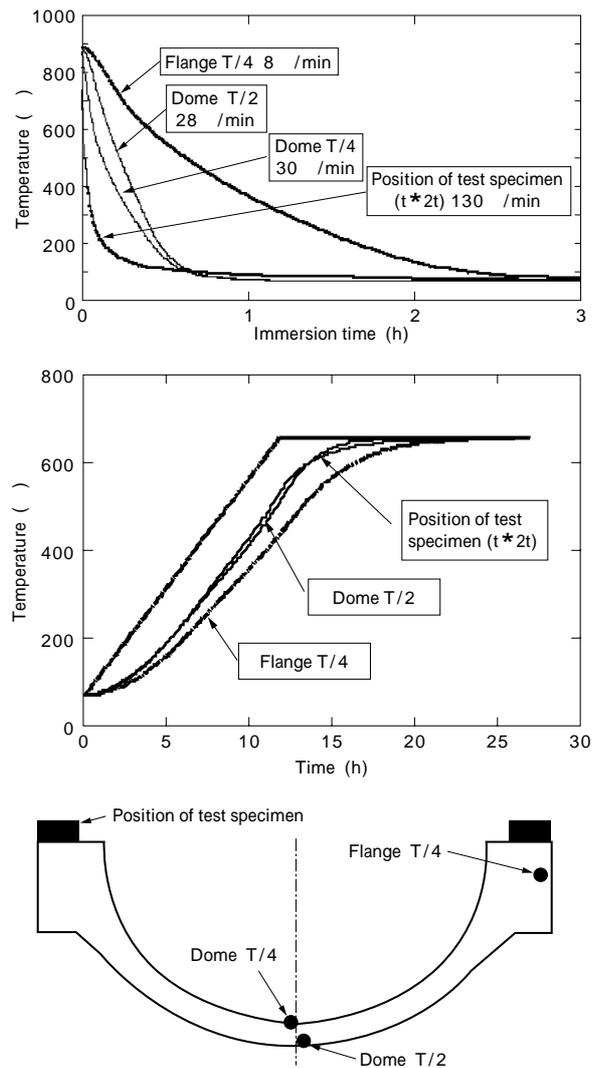
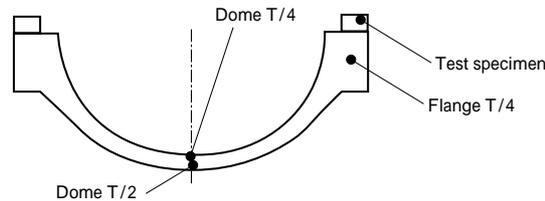


図10 焼入れ及び焼戻し時の内部温度の履歴
Fig.10 Estimated cooling curves of quenching and heating curves of tempering

表2 シミュレーションによる
予測値と製造結果の比較

Table 2 Comparison with estimated
and actual value on the
integral type closure head



	C (wt%)	Cooling rate (/min)	P 1/1000	Mechanical properties							
				0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EI. (%)	RA (%)	$\sqrt{E_0}$ (J)	T-NDT ()		
Specification	-	-	-	345	550 ~ 730	16	38	Ave. 40J	- 12		
Position of test specimen t * 2t(t:25mm)	Estimated value	0.19	127.2	19.3	492	635	27	75	226	-	
	Actual	No.1	0.19	-	-	497	639	26	72	227, 239, 225	- 32
		No.2	0.19	-	-	472	620	25	72	222, 241, 229	- 32
Flange T/4	Estimated value	0.19	7.8	19.1	474	620	28	73	157	-	
	Actual	No.1	0.19	7.4	19.2	445	602	23	72	119	-
		No.2	0.19	-	-	458	607	25	71	112	-
Dome T/4	Estimated value	0.19	28.8	19.4	469	614	28	75	179	-	
	Actual value	0.19	33.0	19.1	-	-	-	-	-	-	
Dome T/2	Estimated value	0.18	26.6	19.4	461	604	29	75	197	-	
	Actual value	0.18	27.0	19.1	-	-	-	-	-	-	
Remarks				*					**	N/A	

Legend : Evaluation of correspondence between expectation and actual.

	Good correspondence	Note)
	Almost same	*: Lower position of the furnace is lower temperature than the temperature of our expectation.
	Little difference	* *: Charpy impact test would vary widely.
x	Different	C : Carbon wt%
N/A	Not applicable	P : Temper Parameter

また、熱処理時の冷却速度の予測誤差は最大でも 4.2 /min であり非常に良い一致を示した。従って、機械的性質の予測値と実測結果は非常に良く一致する結果が得られている。

写真1に製造後の一体型原子炉上蓋を示す。以上、シミュレーション技術を適用することにより短期間で製造し、予測値と良い一致を示す良好な内部品質を確認した後に出荷を完了した。

むすび=これまで当社で蓄積されてきたシミュレーション技術を適用し、一体型原子炉上蓋を製造した結果、シミュレーションによる予測値と実測値は非常に良く一致することが確認され、機械的性質、鍛造後の形状の予測には本技術が十分に信頼できることが確認できた。また、製造工程を事前に最適化し、製造上の管理項目を設けることで初めて製造する大型異形状品を実機大の試作をすること無しに製造することができた。

今後も、さまざまな大型鍛鋼品の製造設計に本技術を適用し、信頼性の高い製品を製造していきたいと考えている。さらに、今後は現在予測が困難な現象にもシミュレーション技術を取入れ、一層の工程最適化を図っていきたいと考えている。



写真1 仕上加工後の一体型原子炉上蓋
Photo 1 Integral type closure head after final machining

参考文献

- 1) 森啓之ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.50, No.3 (2000) p.41.
- 2) M. Kiguchi et al.:14th International Forgingmasters Meeting，(2000) p.65.
- 3) 日本機械学会編：機械工学便覧，(1986)，丸善(株).
- 4) 坂本浩一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.47, No.1 (1997) p.62.
- 5) H. Kikuchi et al. :10th international Forging Conference，(1985) p.38.
- 6) 豊島史郎ほか：第39回塑性加工連合講演会予稿集，(1988)，p.347.