

Manufacture of Forged Shell Ring for PWR Nuclear Reactor Vessel



朝生 一夫
Kazuo Aso

水島製鉄所 管理部鑄鍛管理室 主査(課長)



安部 直之
Naoyuki Abe

水島製鉄所 厚板鑄鍛部鍛錬課 課長



斎藤 健志
Kenji Saito

鉄鋼研究所 水島研究部第1研究室 主任研究員(課長)



中西 恭二
Kyoji Nakanishi

鉄鋼研究所 プロセス研究部 次長(部長補)・工博



難波 明彦
Akihiko Namba

鉄鋼研究所 プロセス研究部製鋼研究室 主任研究員(課長)



八百 升
Minoru Yao

水島製鉄所 エネルギー部エネルギー技術室 主査(部長)

要旨

原子炉圧力容器用鍛鋼シェルリングの大型化に対応するために250 t 中空鋼塊の切断調査を行った結果、C 偏析は小さくかつ清浄性の優れたものであった。220 t 中空鋼塊による1300 MWe 級加圧水型原子炉圧力容器用鍛鋼シェルリングの製造は、6000 t および4400 t プレスで鍛造、調質熱処理後、大型ターンミラーにより機械加工をした。調質熱処理後の機械試験結果は、強度、じん性とも良好な値を示した。非破壊検査は自動非破壊装置(UT, MT)により実施したが無欠陥であった。さらに中空鋼塊の凝固シミュレーション技術を確認し、320 t までの高品質な大型中空鋼塊を製造している。

Synopsis:

A 250 ton hollow ingot was made for an experimental purposes of which internal properties can be simulated to those of large-sized hollow ingots. The investigation results indicated that this ingot had less C segregation and good cleanliness. Forged shell ring, a component of the 1300 MWe PWR type nuclear reactor vessel, was manufactured from large hollow ingot by using 6000 and 4400 t forging press, large heat treating furnace and large turn miller. Mechanical properties obtained after heat treatment showed good results. Forged shell ring turned out free of defects as the results of UT and MT which were performed by automatic UT and MT equipments. Furthermore, by using solidification simulation techniques, we are manufacturing large hollow ingots up to 320 t for forged shell rings.

1 緒 言

我が国において実用化されている発電用原子炉は、沸騰水型(BWR)あるいは加圧水型(PWR)のいわゆる軽水炉が主体である。現在28基が運転中であり、総発電量の約20%を占めるに至っている。一方、海外においては、運転中は324基であり今後も増加の傾向にある。このような電力需要の増加とともに、発電コスト低減および使用中検査(In-service inspection)の観点から原子炉圧力容器の大型化および鍛鋼品の移行が進められている^{1,2)}。原子炉圧力容器のうち鍛鋼品が採用されつつある部材としては、鍛鋼シェルリング、ヘッドドーム等があり、日本における鍛鋼シェルリングの採用は、PWRでは日本原子力発電株式会社敦賀2号が、BWRでは東京電力株式会社柏崎・刈羽5号が最初となるが、今後とも鍛鋼品の採用が増加すると考えられる。今回、当社では輸出向1300 MWeクラスPWR原子炉圧力容器用鍛鋼シェルリングを、転炉-RH-中空鋼塊のプロセスで製造した。本報告では、中空鋼塊の大型

化のための切断調査および圧力容器用鍛鋼シェルリングの製造結果について述べる。

2 250 t 中空鋼塊切断調査

中空鋼塊の品質を確認するために、これまで20~200 tの鋼塊を切断調査してきた³⁻⁵⁾。この結果をふまえて数多くの高品質中空鋼塊を製造してきた。中空鋼塊はその形状による特長としてザク欠陥、成分偏析、逆V偏析が軽微であり、特に品質レベルの高い原子炉圧力容器用鍛鋼シェルリングとして採用されている。原子炉圧力容器は、大型化をたどり、それに用いられる鋼塊についても中空鋼塊では300 tをこえる鋼塊が必要である。これに先立ち、大型中空鋼塊の品質を確認するため、実工程と同様のプロセスで溶製した250 t 中空鋼塊を使用し、その鋼塊を切断調査した。供試鋼塊の取鍋分析値をTable 1に示す。鋼塊縦断面のマクロ組織の一例をPhoto 1に示す。

中空鋼塊は内面、外面の二方向からの冷却が進み、この冷却速度

* 昭和60年10月29日原稿受付

Table 1 Chemical composition

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Co	Nb	B	As	Sn	Sb	Cu
Ladle analysis	0.16	0.24	1.44	0.004	0.002	0.74	0.19	0.52	0.002	0.003	0.001	0.0001	0.002	0.001	0.0005	0.01

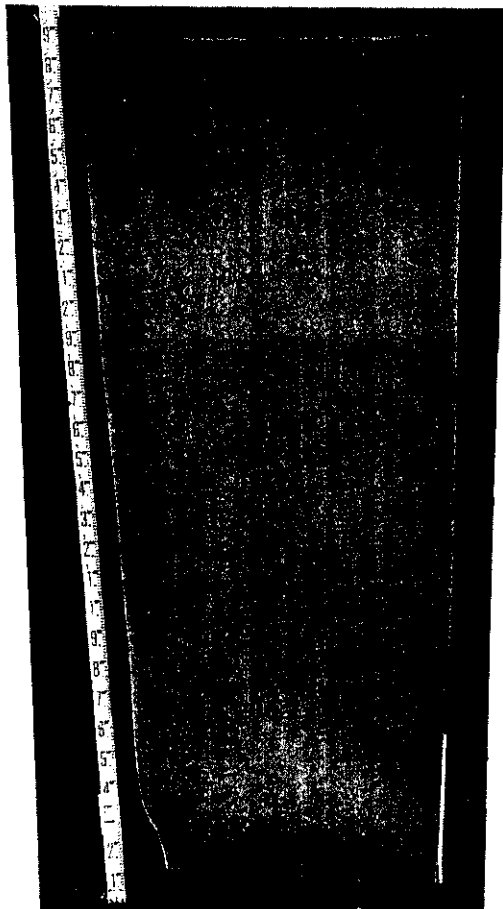
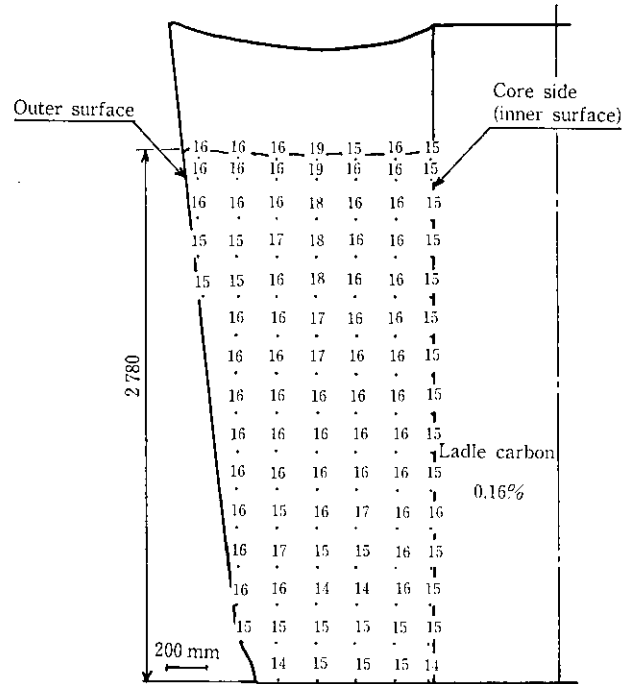


Photo 1 Macro structure of 250 t hollow ingot (longitudinal section)

が鋼塊の品質を左右する。Photo 1 のマクロ組織から明らかなように、凝固は内面側、外面側ほぼ同等に進んでおり、最終凝固部位はほぼ鋼塊中心に位置している。また逆V偏析線の出現は鋼塊中央部に限られ表面部にはない。これは最終製品の内表面に逆V偏析線の出現防止が可能であることを示しており、この鍛鋼シェルリングは内面オーバーレイされるが、内面オーバーレイ時の割れ発生防止に効果的である。溶銑予備処理により脱Sが十分に行われているため鋼塊Sレベルは低く、サルファープリント試験ではサルファーパターンは非常に軽微であった。鋼塊品質を左右するものの一つに成分偏析がある。Cは化学成分のなかでも最も偏析しやすい元素であり、Cを主体に偏析調査を実施した。鋼塊内のC値分布を Fig. 1 に示す。C値は取鍋分析値 0.16% に対して、本体内では +0.03%、-0.02% の範囲にありほぼ均質な鋼塊とすることができる。押湯直下の本体側での +0.03% の範囲は非常に小さく、かつトップ側切捨域に入り、充当される製品のC値は ±0.02% の範囲におさまると推定される。

Fig. 1 Carbon distribution of 250 t hollow ingot ($\times 10^{-2} \%C$)

3 PWR 原子炉圧力容器用鍛鋼シェルリングの製造

原子炉圧力容器用鋼材は Mn-Ni-Mo 鋼であり、引張強度約 60 kgf/mm²、かつじん性の優れたものである。1300 MWe クラスでは肉厚約 290 mm にも及び、均質性、等方性および溶接性にすぐれた鋼材が要求される。製造工程を Fig. 2 に示す。不純物元素が少ない転炉鋼を採用するとともに、前述の 250 t 中空鋼塊の切断調査をふまえて、偏析の小さい内面の清浄性を特長とする 220 t 中空鋼塊を採用した。また鍛造工程では、長さ方向を一度に圧下することにより、鍛造余肉を小さくすることが可能な 4400 t プレスを併用した。

3.1 製 鋼

鍛鋼シェルリング用 220 t 中空鋼塊の製鋼プロセスを Fig. 3 に示す⁷⁾。高炉からの溶銑は、トピード車脱硫および取鍋脱硫により S を 0.003% 以下に低減した後転炉に装入し 1 次吹錬を行う。この 1 次吹錬により溶銑 P は約 0.020% に低減される。最近、前述の溶銑脱硫のみならず溶銑脱磷の技術確立により容易に低磷化が可能となった。その後 2 次吹錬により脱炭、脱磷、昇温を行い、吹錬終了後、取鍋に出鋼する際合金元素を添加する。最終の成分調整は RH 脱ガス中に行う。これらのプロセスをとおして $P \leq 0.006\%$ 、 $S \leq 0.003\%$ 、 $O \leq 20 \text{ ppm}$ 、 $H \leq 1.5 \text{ ppm}$ を確保することができる。一方、転炉鋼としての特長である不純物元素は、スクラップを使用する電気炉鋼と比較して少なく、 $Cu \leq 0.02\%$ 、 $As \leq 0.004\%$ 、 $Sn \leq 0.002\%$ 、 $Sb \leq 0.0005\%$ 、 $Co \leq 0.005\%$ を保証することができる。

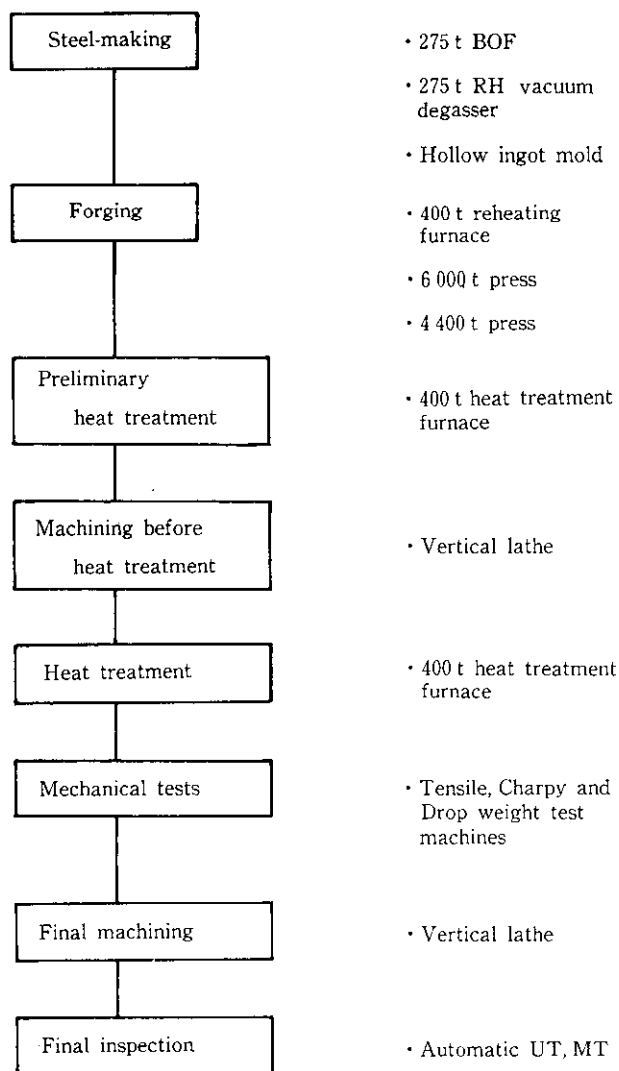


Photo 2 Appearance of 220 t hollow ingot



Photo 3 Forging process by 4 400 t press

Fig. 2 Manufacturing process of forged shell ring

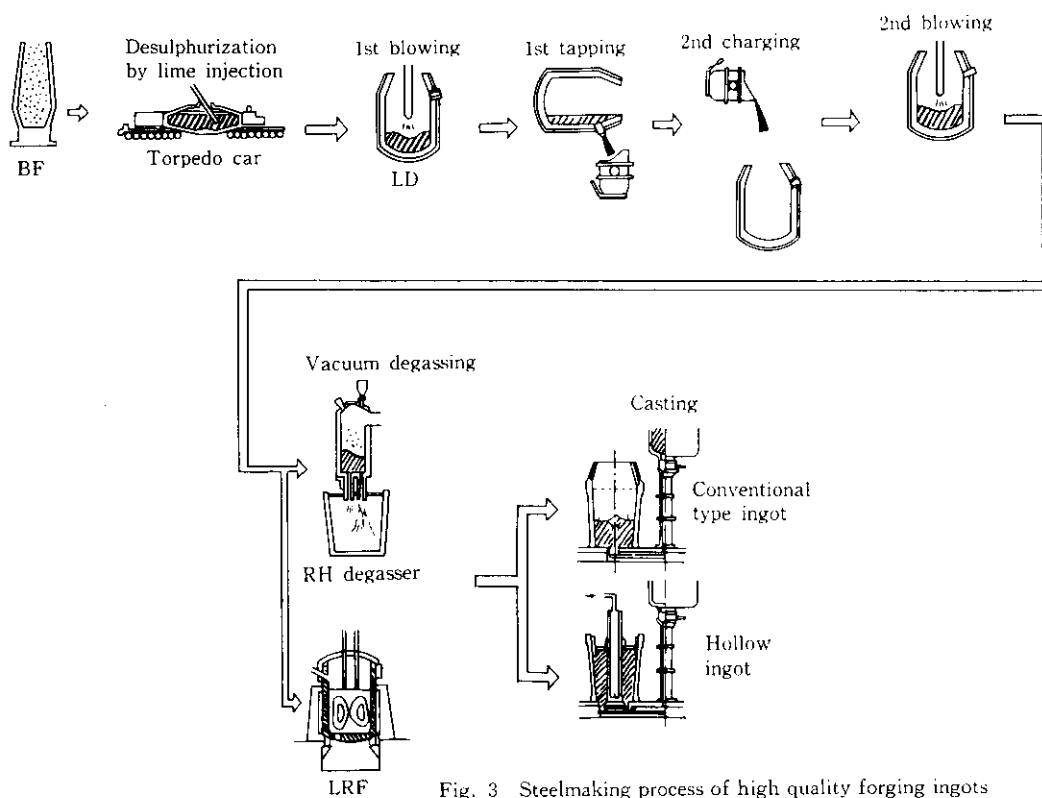


Fig. 3 Steelmaking process of high quality forging ingots

Table 2 Chemical analysis

	(wt %)																	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Al	Co	Nb	B	As	Sn	Sb	H(ppm)
Specification	≤0.20	0.10 ~0.30	1.15 ~1.55	≤0.015	≤0.012	0.50 ~0.80	≤0.25	0.45 ~0.55	≤0.20	≤0.01	≤0.04	≤0.03	—	—	—	—	—	≤1.5
Ladle analysis	0.17	0.25	1.44	0.004	0.002	0.75	0.20	0.51	0.01	0.004	0.016	0.004	0.001	0.0001	0.001	0.001	0.0004	0.9

このようにして得られた溶鋼は Ar シール下注にて 220 t 中空鋼塊用鋳型に注入される。220 t 中空鋼塊の外観を **Photo 2**、取鍋分析値を **Table 2** に示す。P, S および不純物元素の少ない転炉鋼の特長を示している。

3.2 鍛 造

荒鍛造は 6 000 t プレスにて実施し仕上鍛造を 4 400 t プレス⁸⁾を使用した。4 400 t プレスでの鍛造状況を **Photo 3** に示す。この 4 400 t プレスは、サイドハウジング、ベッド、クロスヘッドに相当するスライドビームから構成される新型プレスであり、大径シェルリングの仕上鍛造および超広幅鍛造板(幅最大 7.5 m)に適用されるユニークなプレスである。特長としては、スライドビームにより全長を圧下することができるため、長さ方向の取代均一化がはかれ、以降の機械加工代を削減することが可能である。またレーザー距離計を用いた外径測定装置を有しており、リング形状を 3 次元的に把握することができる。この装置により任意の位置のリング外径を ± 5 mm の精度で測定することが可能である。

3.3 調質熱処理

調質熱処理曲線は 880°C にて 9 h 保持後水冷し、640°C にて 9 h 保持後空冷した。各温度は本体に取りつけた熱電対により管理した。熱処理炉はガス燃焼台車型であり幅 10 m、高さ 6 m、長さ 14 m 有効の 400 t 積載炉である。省エネルギーおよび温度分布の均一化対策として天井はセラミックファイバーを採用しており、炉内温度精度は目標温度に対し $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内が確保されている。一方、焼入水槽は、有効寸法の径 8.5 m、深さ 6.7 m であり、外周と中心に設置したプロペラおよび内径からのスプレー冷却により強制攪拌を実施する。さらに冷凍機、1 000 t 予備水槽を有しており焼入冷却中の水温上昇を抑えることができる。焼入れ状況を **Photo 4** に示す。

3.4 機械加工

鍛鋼シェルリングは、調質熱処理を均一に実施するために調質熱処理前に機械加工される。かつ調質熱処理および機械試験後、仕上形状に機械加工される。これらの大型鍛鋼シェルリングの機械加工のため、大型ターンミラーを設置した。立旋盤とガントリーミラーの機能を兼ね備えた世界でも最大級、最新鋭の複合式立旋盤でガントリー(門型支柱)が前後に 10 m 移動できる。NC 制御付きで 3 次元曲面加工が可能であり、超重切削から仕上加工まで幅広く加工ができる。基本仕様を以下に示す。

加工物最大直径	9 000 mm ϕ
加工物最大高さ	5 000 mm
加工物最大重量	250 t
ガントリーストローク	10 000 mm
テーブル直径	8 000 mm ϕ

大型ターンミラーの機械加工の一例を **Photo 5** に示す。



Photo 4 Heat treatment of forged shell ring

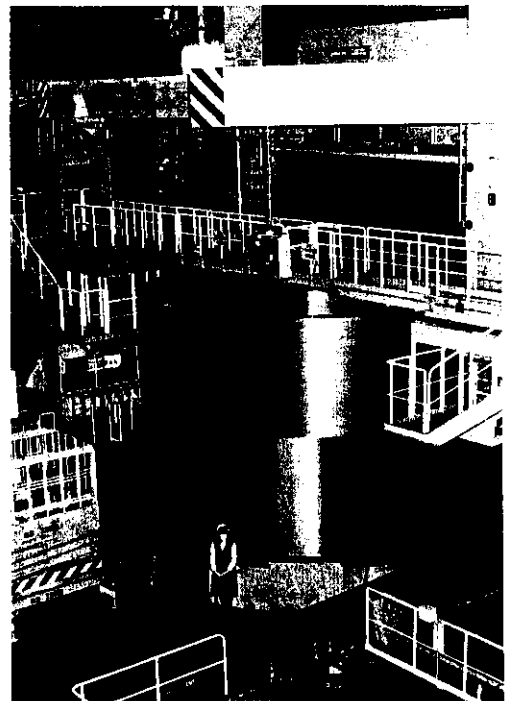


Photo 5 Appearance of large turn miller

3.5 機械試験

調質熱処理により所定の強度、じん性が確保されているかどうかを確認するため鋼塊トップ相当部、ノズル Cut-out 部、鋼塊ボトム相当部から試験片を切り出し機械試験を実施した。試験片採取部位を **Fig. 4**、機械試験結果を要求値と併せて **Table 3** に示す。

いずれの特性も規格を十分満足するとともに、トップとボトムの差も小さく、本製品の均質性を評価することができる。

Table 3 Mechanical properties

		TS (MPa)	YS (MPa)	El (%)	RA (%)	Absorbed energy*1 (daj/cm ²)									RT _{NDT} (°C)
						20°C			0°C			−20°C			
Specification		550/670	≥400	≥20	—	≥11.0			≥9.0			≥7.0			≤0
After Q-T, tangential, 3/4 t	Top	627	489	22	67	28.9	28.0	30.4	28.5	21.8	26.8	21.8	17.2	21.4	
	Nozzle cut out “X”	630	478	24	73	27.1	26.3	26.3	23.4	28.4	27.4	20.8	21.0	20.3	
	Nozzle cut out “Y”	627	482	25	72	28.4	28.4	27.4	29.4	25.9	30.3	22.4	23.3	21.7	
	Bottom	584	456	25	66	32.7	31.5	32.6	29.5	33.6	29.5	19.5	20.0	24.6	
After PWHT, tangential, 3/4 t	Nozzle cut out “X”	620	473	25	73				23.4	21.9	21.1				≤ −12

*1 Charpy impact test: Axial direction

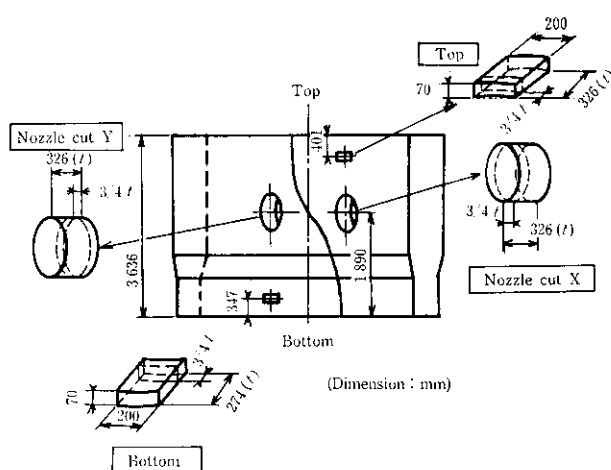


Fig. 4 Sampling position for mechanical tests

4.3 破壊じん性試験

破壊じん性試験は Fig. 5 に示す 25 mm CT 試験片を用いて実施した。試験片は、肉厚の 1/4 t および 3/4 t 部位から主鍛造方向に平行に採取した。疲労クラックは Stress intensity factor ($K_{I\max}$) が 70 kgf/mm^{3/2} をこえない条件で実施した。サイドグループは、疲労クラックを付与した後機械加工した。試験中の荷重-荷重線変位曲線を記録し、ASTME813 による除荷コンプライアンス法により J_{IC} を測定し (1) 式により $K(J_{IC})$ を求めた。

$$K(J_{IC}) = \sqrt{E J_{IC} / (1 - \nu^2)} \quad (1)$$

E: 弾性係数

 ν : ポアソン比

Fig. 6 に破壊じん性試験結果を示す。ASME コードによる K_{IC} および K_{IR} カーブを併せて記入したが、得られた結果は十分安全サイドにありかつ 1/4 t と 3/4 t で採取した試験片での差も小さい。

3.6 非破壊検査

鍛鋼シェリングの完成状況を Photo 6 に示す。完成時には非破壊検査として超音波探傷、磁気探傷を実施した。

今回超音波探傷、磁気探傷用に自動装置を導入⁹⁾したので、その一例を示す。自動超音波探傷の全景を Photo 7 に示す。走査方式

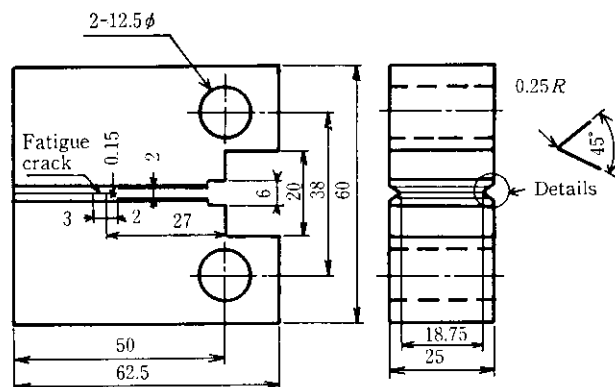
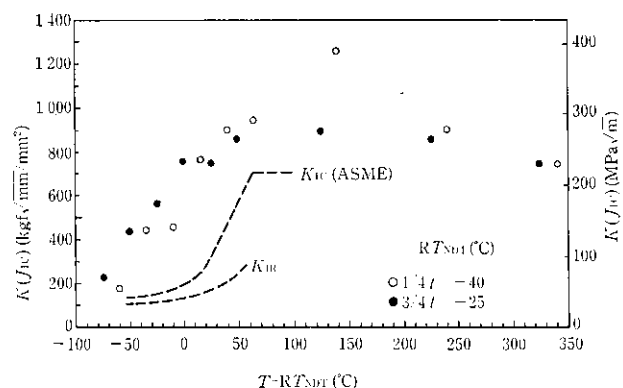


Fig. 5 1 TCT specimen-geometry (mm)

Fig. 6 Plot of $K(J_{IC})$ vs. $T-RT_{NDT}$

は、らせん連続走査であり、被検材最大重量 200 t、最大外径 7.5 m、最大高さ 5 m、旋回速度 0~0.888 rpm (無段変速)、周速 0~150 mm/s (外径 3.5 m) である。探触子ヘッドは 6 チャンネルから構成され、配列は 3 ビーム×2 列型、6 ビーム×1 列型のいずれも実施することが可能である。ヘッドの接触は探触子シューによる油膜厚保持方式を採用した。探傷結果はプリンタにより打ち出される。欠陥があった場合、汎用型探傷器により手探傷で再試験し、その結果により評価する。このような自動探傷装置の採用により、効率よく非破壊検査を実施することが可能となった。この装置により探傷した結果、超音波探傷、磁粉探傷とも無欠陥であった。

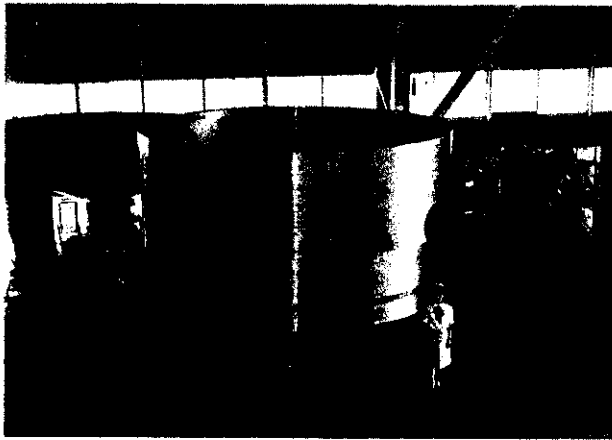


Photo 6 Forged shell ring produced by 220 t hollow ingot

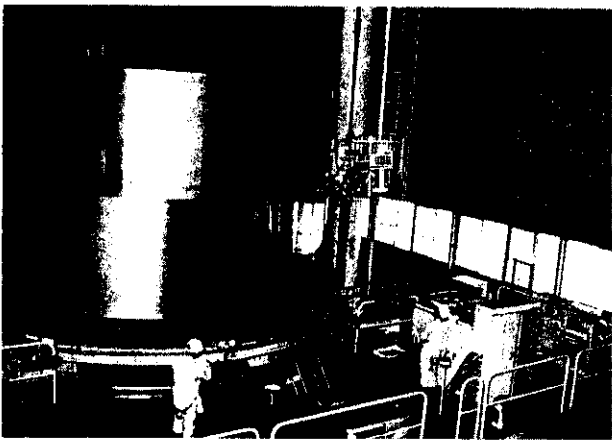


Photo 7 Automatic ultrasonic equipment for large forged shell ring

4 考 察

4.1 中空鋼塊の均質性の評価

中空鋼塊は、同程度の中実鋼塊と比較して偏析が小さく、かつ内面が清浄であるという特長がある。250 t 中空鋼塊の切所調査でも明らかなように C で代表される偏析は非常に小さい。今回の 220 t 中空鋼塊の押湯直下の C 分析値を Fig. 7 に示す。サンプルは 20 mm ピッチにて 7 mm ϕ ドリルにて採取し分析を実施した。取鍋 C 分析値 0.17% に対し最大 0.19% となっている。このように 220 t の大型鋼塊にもかかわらず C のマイクロ偏析は非常に軽微であった。

これらの偏析と機械的性質の関係をみるために鋼塊部位と機械的性質の関係を調査した。Fig. 8 に引張強度と鋼塊部位の関係を示す。偏析が小さいため鋼塊部位での差は非常に小さい結果となっている。また方向差による特性変化も均質性の観点から重要な要因で

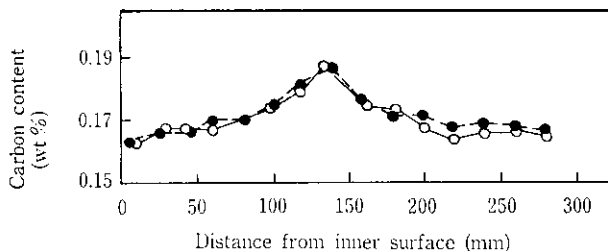


Fig. 7 Carbon distribution of forged shell ring made from 220 t hollow ingot (top sample-corresponding to top of the ingot)

あり、ノズル Cut-out 部を使用して各方向による引張強度を調査した。その結果は Fig. 9 に示すとおり A (Axial), T (Tangential), R (Radial) の方向差は非常に小さく、均質であることを立証することができた。

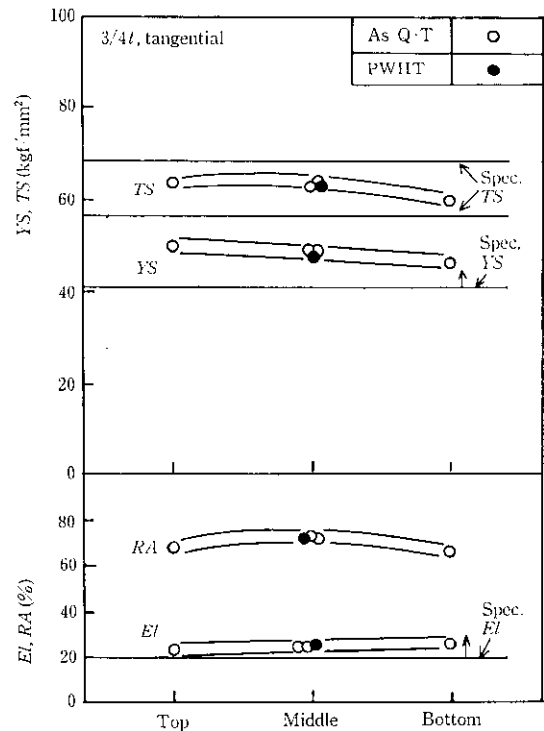


Fig. 8 Distribution of mechanical properties

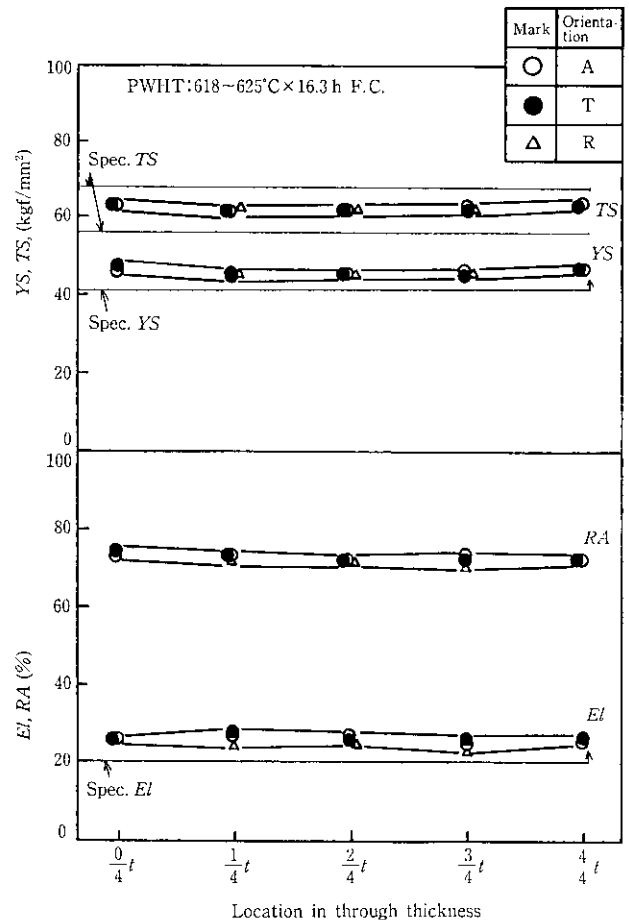


Fig. 9 Distribution of mechanical properties

中空鋼塊製鍛鋼シェルリングは、上記の調査でも明らかなように偏析が小さいため、鋼塊部位による各特性変化が小さく均質性が優れていることが明らかとなった。

4.2 凝固シミュレーション

原子力圧力容器用素材としての中空鋼塊の内部品質を確保するため、コンピュータシミュレーションによって凝固過程を予測するために、250 t 鋼塊の破断調査を行い、破断調査結果との対応を以下に検討した。

凝固シミュレーションは直接差分法によって非定常熱伝導方程式、

$$C_p \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

T : 温度

t : 時間

C_p : 比熱

ρ : 密度

λ : 熱伝導率

を数値的に解き、温度場を求めた。

計算対象となる鋼塊および鋳型形状は Fig. 10 のように 1000 個程度のメッシュに分割されモデル化される。そして、得られたモデ

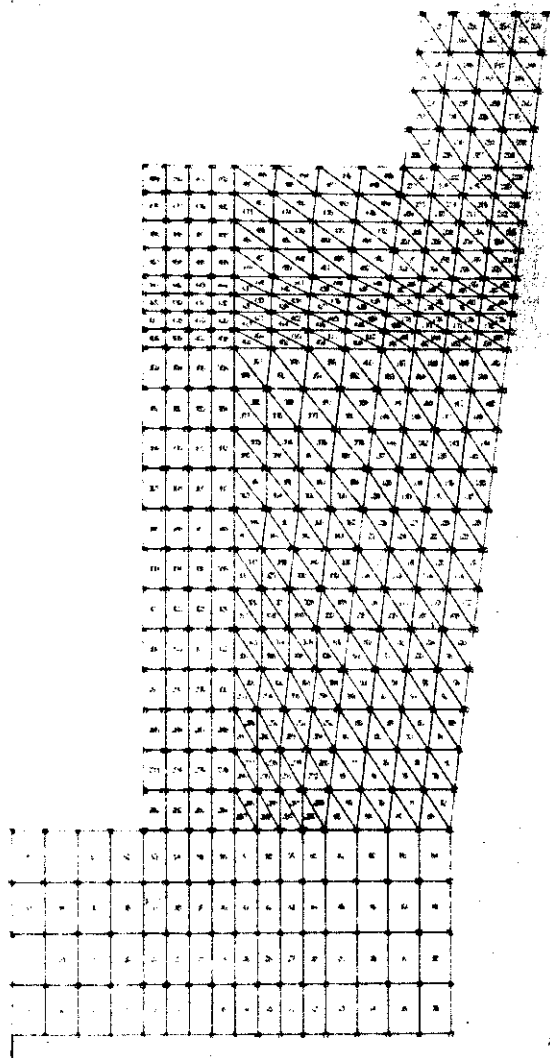


Fig. 10 Mesh divides of ingot and mould

ルの各節点ごとに外心領域で、熱バランスを取ることにより、熱伝導方程式は次のように差分化される。

$$\rho \cdot C_p \frac{T'_i - T_i}{\Delta t} = \frac{1}{A_i} \sum_N \lambda \frac{D_{iN}}{R_{iN}} (T_N - T_i)$$

T'_i : Δt 時間後の温度

A_i : 外心領域の体積

$\sum_N$: 節点 i に隣接する節点に関する和

D_{iN}, R_{iN} : 節点 $i-N$ 間の界面面積および距離

この差分式はコンピュータを用いて解かれたが、複雑な形状でも高精度でかつ短時間に解を求められるのが本手法の特徴である。境界条件として、鋼塊トップ部、中子接触面（内径側）、鋳型接触面（外径側）は、過去の測温実績をもとにそれぞれ被覆剤をとおした自然放冷、強制冷却、鋳型冷却（放射熱伝導）の熱伝達係数を使用した。本手法を用いて鋼塊内の凝固過程を詳細に把握することが可能であり、凝固前面における温度勾配、部分凝固時間、Cの拡散を定量化することによって、ザク、逆V偏析、マクロC偏析など種々の鋳造欠陥予測を行って、最適な鋳造方案が決定される。

250 t 中空鋼塊における凝固プロファイルのシミュレーション結果を Fig. 11 に示す。これは、Photo 1 に示す実績とよく一致しており、中子側と鋳型側からの冷却により肉厚中心に向かって凝固が徐々に進行していく様子が見える。

また、Fig. 12 に逆V偏析線発生領域の予測と実績との比較を示す。両者はよく対応しており、シミュレーションにより大型鋼塊の品質予測が可能となっている。

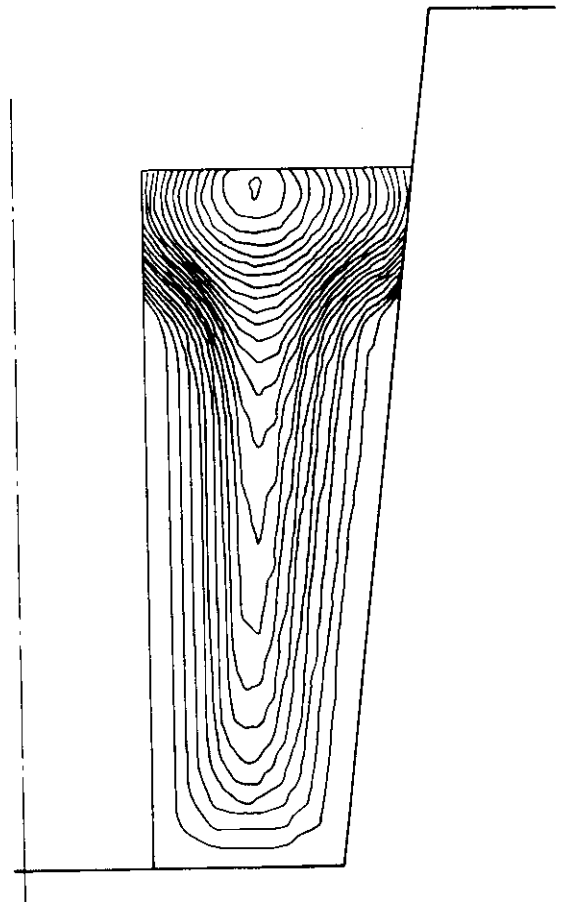


Fig. 11 Simulation result of solidification profile for 250 t hollow ingot

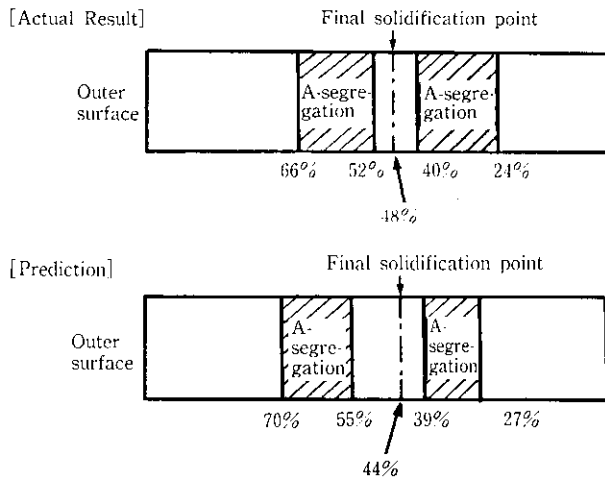


Fig. 12 Comparison of actual result and prediction concerning final solidification point and A-segregation

5 結 言

転炉-RH-220 t 中空鋼塊製 13000 MWe クラス原子炉圧力容器用鍛鋼シェリングを製造した。製品は偏析が小さく、内面の清浄性が優れていた。大型化を目標とした 250 t 中空鋼塊の切断調査においても、鋼塊段階での偏析、清浄性の優秀なことが確認できた。

このあと、これらの結果を反映させて、1100 MWe クラス BWR 用鍛鋼シェリングを 320 t 中空鋼塊により製造したが、ここでも中空鋼塊の特性を十分に発揮した均質な製品が得られている。このように転炉-RH-中空鋼塊製鍛鋼シェリングは、原子炉圧力容器用に最適のプロセスと考えられ、鍛鋼化のうす勢と呼応し、Fabricator に安心して使用していただけると確信する。

参 考 文 献

- 1) 日本原子力産業会議：原子力発電所一覧表，(1984) 12
- 2) 古平恒夫：「転水炉圧力容器に関する最近の話題 (3)」，原子力工業，30 (1984) 5, 73
- 3) 飯田義治，山本武美，山浦茂義，朝生一夫，松野淳一，西岡武三郎：「鍛造用大型鋼塊の製造方法と内部性状」，川崎製鉄技報，12 (1980) 1, 27
- 4) 飯田義治，山本武美，松野淳一，山浦茂義，朝生一夫：「鍛造用大型鋼塊の製造方法と内部性状」，川崎製鉄技報，12 (1980) 1, 27
- 5) 小沢三千晴，岡野 忍，飯田義治，山本武美，朝生一夫，宮井直道：「中空鋼塊の凝固と偏析」，鉄と鋼，64 (1978) 11, S682
- 6) 朝生一夫，和中宏樹，山本武美，小沢三千晴，松野淳一：「LD-RH プロセスにより製造された大型中空鋼塊の性状」，鉄と鋼，65 (1979) 4, S137
- 7) 永井 潤，大西正之，山本武美，難波明彦，橘 林三，小島信司：「転炉-RH 脱ガスの組合せによる高品質鍛造用素材の製造」，川崎製鉄技報，15 (1983) 2, 66
- 8) 高田政記，和中宏樹，朝生一夫，荒川幸雄，袋 宏之，難波明彦：「4400 t プレスの概要と大径シェリングの製造」，川崎製鉄技報，14 (1982) 4, 20
- 9) S. Koishi, S. Matsui, K. Aso, T. Watanabe, Y. Fukutaka "New Manufacturing Process and Inspection Techniques of Large Forged Shell Ring", 3rd Japan-Deutch Seminar, Stuttgart, (1985)