



大形高品質鍛鋼リング材の製造技術 —大形压力容器への適用—

竹之内 朋 夫*・鈴木 公 明*²

Technology for the Production of High Quality Large Ring Forgings —Application to Heavy Pressure Vessels—

Tomoo TAKENOUCHI and Komei SUZUKI

1. ま え が き

各種機械工業を中心とする産業の高度化と構造変化の中で、素形材としての構造用鋼の果たしつつある役割はますます大きい。

我が国の鉄鋼系素形材¹⁾は鉄鋼業全般の躍進²⁾の一環として発展し、今や世界一流の品質、性能多様化、生産性を達成していることは各位の周知されているところである。

压力容器は電力（火力、原子力）、化学工業、造船等の諸工業の中核をなす機器としてその発展を支えてきた。大形压力容器についていえば、昭和 25 年頃に製造が再開された火力発電用ボイラー、昭和 30 年代までの

肥料合成用の高压反応筒の時代を経て、昭和 30 年代末頃からは重量 300t 級の溶接構造型へと大変化をとげた。その背景としては世界的な原子力発電所と化学工業の定着・発展を挙げることができる。

本稿では最近 20 年間に達成された成果を中心に、大形压力容器用の鍛鋼リング材について設計規格からの要請、製造技術の要点及び品質等について概説する。

2. 最近の大形压力容器とその主要構造用鋼材

2.1 压力容器の用途、サイズ及び性能要件

代表的な大形压力容器の用途と性能要件を表 1 に、またその形状と大きさを図 1 に示す³⁾。これらに続いて、原子力発電では 1100t 級、石炭液化では 1400t ある

表 1 压力容器の用途と必要条件

用 途	設 計 条 件			必 要 条 件, 問 題 点
	設 計 圧 力 (kg/cm ²)	設 計 温 度 (°C)	材 料	
石 油 精 製	150/220	400/470	2 1/4 Cr-1Mo 鋼 3Cr-1Mo 鋼 ほか	1) Cr-Mo 鋼の焼もどし脆化対策 2) ステンレス鋼溶接部のσ相脆化, 水素脆化対策 (水素分圧高し) 3) ノズル取付部, 異材継手部の熱応力低減 4) 配管反力, 地震力などの外部荷重に対する解析 5) クリープと疲労の共存下での極限設計 (>450°Cの場合)
石炭のガス化と液化	175/250	450/550	2 1/4 Cr-1Mo 鋼 3Cr-1Mo 鋼 ほか	
肥 料 合 成	150/380	200/430	2 1/4 Cr-1Mo 鋼 3Cr-1Mo 鋼 ほか	1) カーバイトなどに対する内面耐食性ライニングは Tp 316 ステンレス鋼, またはチタン 1) 極限設計 2) 高強度, 高靱性の材料 3) 精密な機械加工 (シールなど)
石 油 化 学 (例: ポリエチレン用)	~2 200	~300	高 Ni-Cr-Mo-V 鋼	
水晶合成	>1 200	~400		
原 子 力 発 電	80/BWR 140/PWR	290/BWR 340/PWR	Mn-Ni-Mo 鋼	1) 脆性破壊を考慮した設計と材料 2) 疲労を考慮に入れた完全な局部応力解析 3) 大型, 一体化材料による溶接線の低減と供用期間中検査 (ISI) の容易化 4) 最も厳格な QA 体制での製作

(注) このほか、大型火力用ボイラー、3.5Ni 鋼による低温用压力容器、Cu 系合金クラッド鋼による特殊压力容器、チューブラー・リアクターなども重要である。

昭和 61 年 9 月 1 日受付 (Received Sep. 1, 1986) (依頼解説)

* (株)日本製鋼所室蘭研究所鉄鋼研究部課長 工博 (Steel Division, Muroran Research Center, The Japan Steel Works Ltd., Chatsu-cho Muroran 051)

*² (株)日本製鋼所室蘭製作所素形材製品部原子力課課長 (Atomic Energy Department, Material Engineering Department, Muroran Plant, The Japan Steel Works Ltd.)

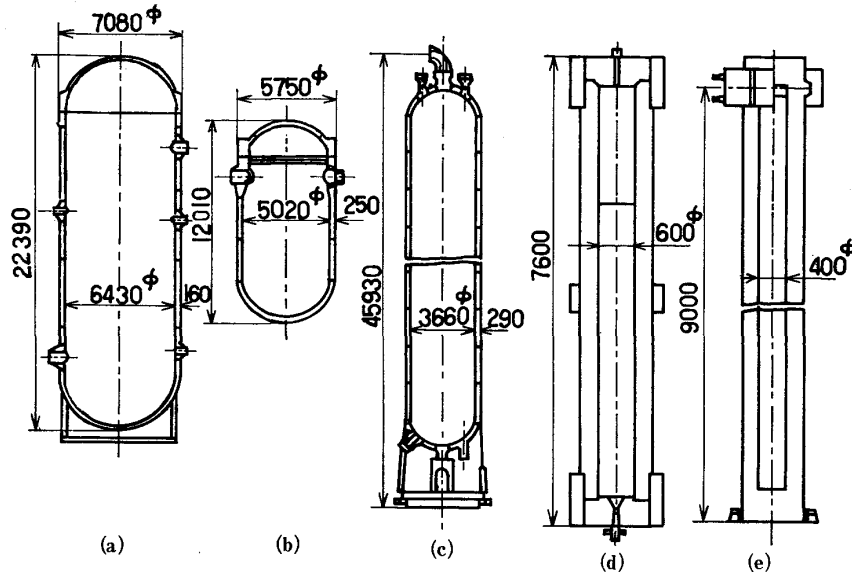
Key words: free forging; steel; large size; pressure vessel; specification; welding; quality assurance; cleanliness; refining; ingotmaking; critical application; nuclear reactor.

いはこれを遙かに超える压力容器が計画されている。

2・2 压力容器の設計と構造の諸様式

内部に高温、高圧、腐食性の流体を収容する压力容器

は長年月にわたって安全に移動しなければならない。このため、我が国、アメリカ、西ドイツ、英国をはじめ各国に压力容器の規格がある。



(a) BWRPV/251 in/GE (1 200 MWe 級)
(b) PWRPV/KWU (1 300 MWe 級)
(c) 重油直接脱硫リアクター (1 200 t)
(d) ポリエチレン用リアクター
(e) 水晶合成用オートクレーブ

図1 代表的な大形压力容器

表2 压力容器の各種構造の特徴

		鍛造リング溶接構造	鋼板成形溶接構造	層 成 構 造
材 料	材料選択	耐水素、照射脆化等環境強度に合った材料選択		内筒：環境強度に合った材料 外層：高強度鋼
	製造設備	鍛造、熱処理、機械加工	圧延（鍛圧）、熱処理	圧延、熱処理
	最大肉厚	～450mm（単肉）	～280mm（単肉）	～600mm（内筒＋外層）
設 計	ライニング	溶接オーバーレイ	溶接オーバーレイ、クラッド鋼板	クラッド鋼板
	サポート構造	鍛鋼削出し	溶接肉盛	鍛造リング挿入
	応力解析	FEM等により可能	FEM等により可能	層間、溶接継手部等について実験による解析必要
	破壊進展	限界き裂を越えた場合の急速進展		緩慢な段階的進展
製 作	成形	不要	熱間成形、熱処理	内筒：冷間成形 外層：巻付
	溶接継手	周継手	長手、周継手	長手、周継手（バタリング必要）
	溶接後熱処理	必要	必要	不要（バタリングビード厚さ等の制限により）
試験・検査	RT	◎	◎	△
	UT	◎	◎	△
	AET	◎	○	○
ISI	メンテナンスの容易性	◎	○	△
適用分野	高温用（石油精製）	◎	○	△
	中温用（原子力、肥料合成）	○	○	◎
	低温用（天然ガス）	○	◎	△
形状（胴体断面）				

◎：優れている ○：良好 △：十分でない

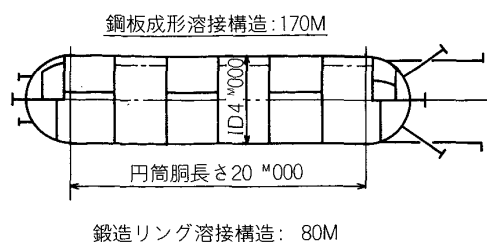


図2 鋼板成形溶接構造と鍛造リング溶接構造の溶接線長さの比較

大型压力容器の現用構造としては鋼板成形溶接構造、鍛鋼リング溶接構造及び層成構造が代表的なもので、それぞれの特徴を比較すると表2⁴⁾のようになる。このように構造によつて一長一短はあるが、最近の压力容器では溶接線を減少することによつて製造と稼動にかかわる安全性を確実にし、また供用期間中検査 (ISI) を有効化かつ減少化して安全性と経済性を向上している。図2は鋼板成形溶接構造と鍛鋼リング溶接構造の場合の溶接線の長さを比較した例⁴⁾であり、後者ではその長さが1/2以下になっている。したがって、とくに高い安全性が要求される石油精製及び原子炉用压力容器には主として鍛鋼リング材が使用されており、本稿で取り上げるのもこれである。

2.3 品質保証

ボイラーや化学工業用压力容器の破壊事故は約120年前からの問題であり、これを解決するためにASME (米国機械学会) やTÜV (西ドイツ、技術検査協会) 等も誕生したのである。ASME, Boiler & Pressure Vessel Code, Sect. III, Nuclear Components が1963年に制定されて以来、世界の压力容器規格には品質保証(QA)条項が設けられるようになった⁵⁾。

压力容器用鋼材の製造メーカーもこれらの公的な格付けあるいは压力容器メーカーの格付けの下に品質保証を全うしなければならない。

3. 大形鍛鋼リング材の製造技術

大形鍛鋼リング材の製造シーケンスの一例を図3に示す。以下には製鋼から熱処理までの工程と技術を述べる。

3.1 製鋼技術

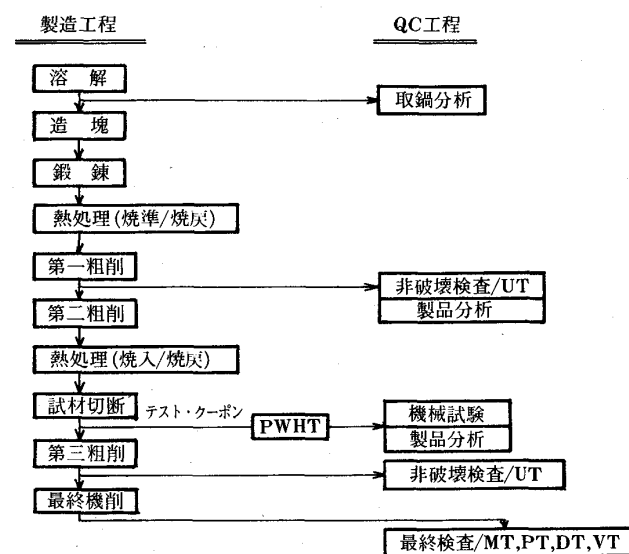
大形鍛鋼リング用鋼塊は電気炉あるいは転炉によつて精錬した溶鋼を必要に応じて取鍋精錬し、流滴脱ガス真空铸造¹⁾あるいは下注ぎ⁶⁾により造塊する。製品の諸特性は表3に示すように鋼塊の品質に大きく依存する。

3.1.1 精錬技術

最近の電気炉及び転炉技術の進歩によりりんと硫黄は低下を続けているが、さらに取鍋精錬との組合せにより図4に示すように $P+S < 0.003\%$ の極低りん、低硫鋼の製造⁸⁾も可能となった。また、従来の精錬では不可能

表3 鋼材特性と鋼塊諸要因との関連性

鋼材特性	鋼 塊 品 質	
延靱性	清浄度	○ 酸化物系介在物 ○ 硫化物系介在物
	ガス成分	○ 水素 (<1 ppm) ○ 酸素 (<30 ppm)
脆化感受性	合金元素	○ Si, Mn
	不純物元素	○ P ○ Sn, As, Sb
不均質性	偏析	○ 逆V偏析 ○ V偏析 ○ 成分偏析 (とくに炭素)
	欠陥	○ ザク (空隙) ○ 大型介在物 ○ 水素割れ



UT: 超音波探傷試験 DT: 寸法検査 MT: 磁粉探傷試験
VT: 目視検査 PT: 染色浸透探傷試験

図3 大形鍛鋼リング材の製造シーケンス

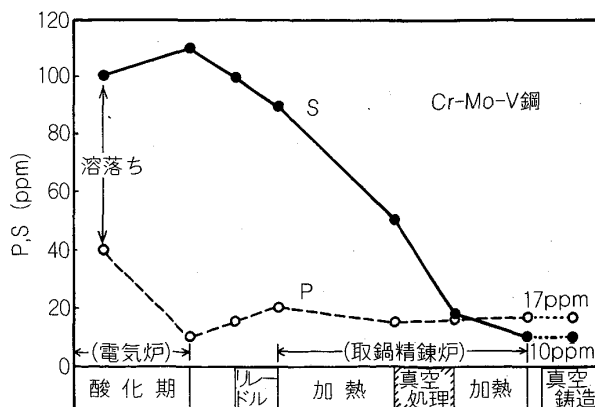


図4 電気炉と取鍋精錬炉による極低りん、低硫鋼の製造プロセス

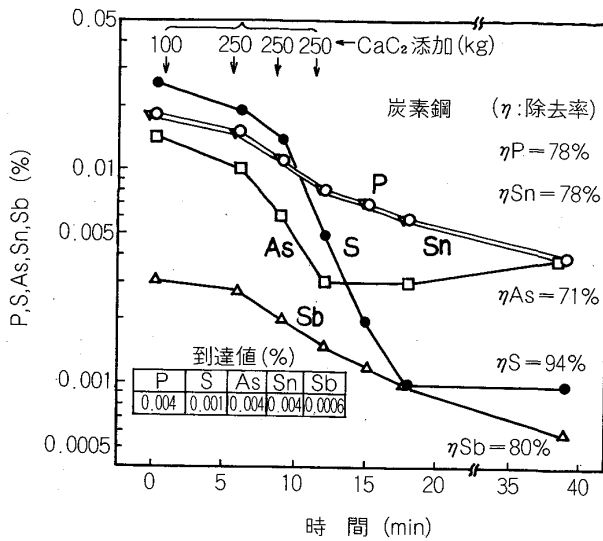
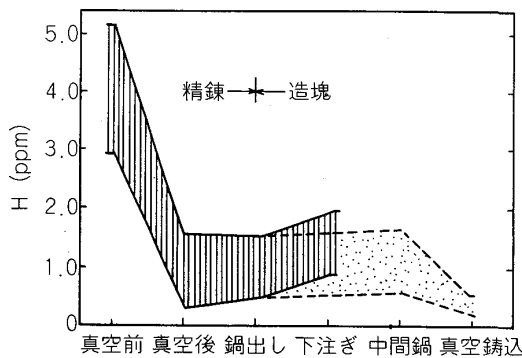
図5 取鍋内 25t 溶鋼の CaC_2 による不純物除去

図6 取鍋精錬プロセスおよび造塊過程における水素量の推移

であつた Sn, As, Sb 等の除去が図 5 に示すように CaC_2 を使用する還元精錬法の開発⁹⁾ によつて可能となり、鉄源によるこれらトランプ元素の差の解消が可能となつた。ステンレス鋼のりんも上述の還元精錬¹⁰⁾ あるいは特殊スラグによる酸化精錬¹¹⁾¹²⁾ により 0.010% 以下に低減できるようになり、応力腐食割れ¹³⁾ の改善等に寄与している。

次に、ガス成分の中ではとくに水素の低減が重要である。電気炉-取鍋精錬-造塊プロセスにおける水素の変化⁸⁾ を図 6 に示す。電気炉からの受鋼時に 3~5 ppm あつた水素は取鍋精錬の真空処理により約 1 ppm に低下し、Ar シールして下注ぎすると約 1.5 ppm まで増加するが、上注ぎで真空鑄造すると 0.5 ppm まで低下する。したがつて、水素割れ感受性の高い原子炉用 Mn-Ni-Mo 鋼では二重脱ガス法の採用が望ましい。

3・1・2 造塊技術

大型鋼塊内の偏析を低減するために多くの造塊法が開発され、工業化されてきた¹⁴⁾。著者らは偏析の生成機構と低減に関する多くの研究と製造実績に基づいて、高径比を小さく、テーパを大きくするなど最適鋼塊形状の設計による V 偏析¹⁵⁾ とそれに伴うザク¹⁶⁾ の低減、化学成分のコントロールによる逆 V 偏析^{17)~19)} の低減、Multi-Pouring (MP 法) による炭素偏析²⁰⁾ の低減などの対策を講じて 600 t までの高品質大型鋼塊を流滴脱ガス法により製造している。570 t 鋼塊の外観を写真 1 に、またその鑄込みシーケンスを図 7 に示す。MP 法では合せ湯方式によつていくつかの取鍋からの溶鋼を連続して流滴脱ガスし、各取鍋内の炭素量を順次に変えていくことによつて図 8 に示すように均一な炭素の分布が得られる。

他方、高級鋼の製造を目的として開発された ESR 法

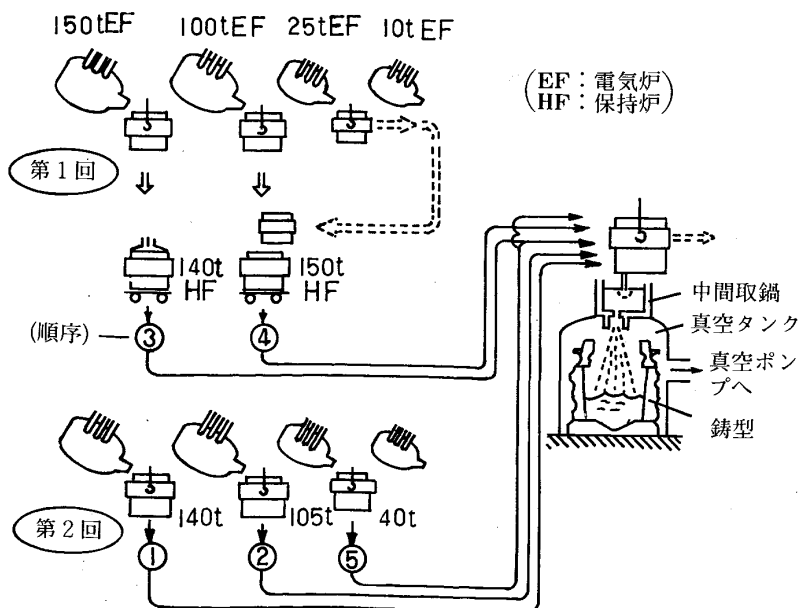


図7 570 t 鋼塊の鑄込みシーケンス

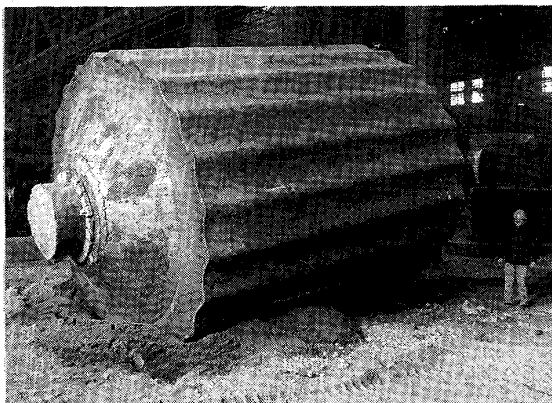


写真1 570t 鋼塊の外観

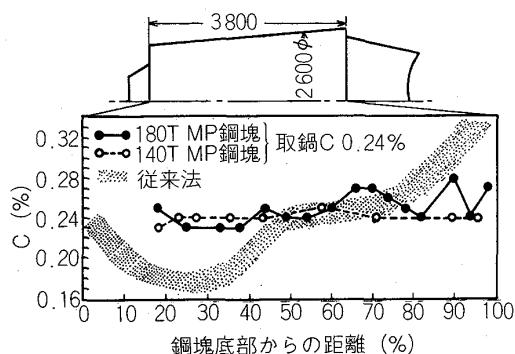


図8 鋼塊軸心部における炭素の分布

(Electro-Slag-Remelting) もしだいに大形化し、2300 mm ϕ , 160 t²¹⁾ や 2800 mm ϕ , 240 t²²⁾ の鋼塊の製造も可能となってきた。しかし、ESR 鋼塊でも大形になると偏析は避けられず、脱水素が不十分である等の問題点もあり、製造コストも高いこともあつて、極厚鍛鋼リング材にはほとんど使用されていない。

次に、鍛鋼リング材の製造におけるトピックとして円形中空鋼塊の使用がある。著者らは薄肉大径リング材の製造工程とコストの低減のためにこの古い方法を再度試みて²³⁾、120 個余の製品に適用した。このための鋼塊は内、外径比が 2:3 程度の薄い肉厚で、大形リングミルで加工することによって工程とコストの改善に成果を得た。最近、中空鋼塊 (内外径比約 1:3) を原子力や石油精製用压力容器の極厚リング材に適用する例が報告されている⁷⁾²⁴⁾。しかし、これまでの著者らの経験に基づいて通常の中実鋼塊と比較すると、中空鋼塊には以下のような問題点がある。

(1) 真空 casting ができず、下注ぎするため水素量が高く、湯道れんがや空気酸化に起因した砂疵が発生しやすい。

(2) MP 法が適用できないため頭部肉厚中心における化学成分とくに炭素の偏析が大きい。

工 程		概 略 図
1	鋼塊上下端切捨	下端切捨 上端切捨 3560 ϕ
2	据 込	
3	孔 明	
4	孔 拡 げ	
5	孔拡げ/据込	(繰返し)
6	孔 拡 げ	
7	仕上鍛錬	4515 ϕ 5900 ϕ

図9 大型リング鍛造材の鍛造工程 (400 t 鋼塊からの原子炉用リングの製造例)

(3) 通常鋼塊の高径比に相当する高さと同肉厚の比が大きいため V 偏析部にザク¹⁶⁾が発生しやすい。

さらには、中空鋼塊では製品の内面に逆 V 偏析が発生しにくいというメリットも予想されていたが、中子からの冷却を強化して最終凝固位置を肉厚中心にもつていつたとしても、肉厚中心よりも内側の鋼の体積は外側より遙かに小さく、鍛造、機削りの後では内面に逆 V 偏析が発生する可能性が大きい²⁵⁾。また、中子の作製費用も高く、造塊作業が煩雑な割には歩留りの向上や工程の短縮は顕著ではない。したがって、石油精製や原子力用压力容器の最高級リング材に対しては、前述のより信頼性の高い中実鋼塊を使用するのが著者らの基本的な考えである。

3.2 鍛造技術

鋼塊は図9に示すように押湯と底部を切断したのち、据込み、孔明け、孔拡げ等の鍛造工程を経て製品形状に成形されるが²⁶⁾、この間に鑄造組織の破壊による組織の緻密化、ザクの圧着等内部品質の改善が並行してなされる。

大形鍛鋼リング材の鍛造についての問題点は止まることのない製品寸法の増大への対処である。製品の 600 mm を超える肉厚、10 m に達する外径に対して、現存のプレス能力はコラム内側寸法の最大が 7 m 程度である。他方、リングミルならば外径 9 m、高さ 3 m のものが早くから存在した¹⁾が、この加工方式では 600 mm 級の製品の肉厚中心に必要な鍛造効果を与えることができない。そこで、著者らは現有設備を有効利用して経済的に生産するため、図10に示すような機外鍛造法を工業化した。これにより、外径 10 m 以上、高さ 4.5 m 級

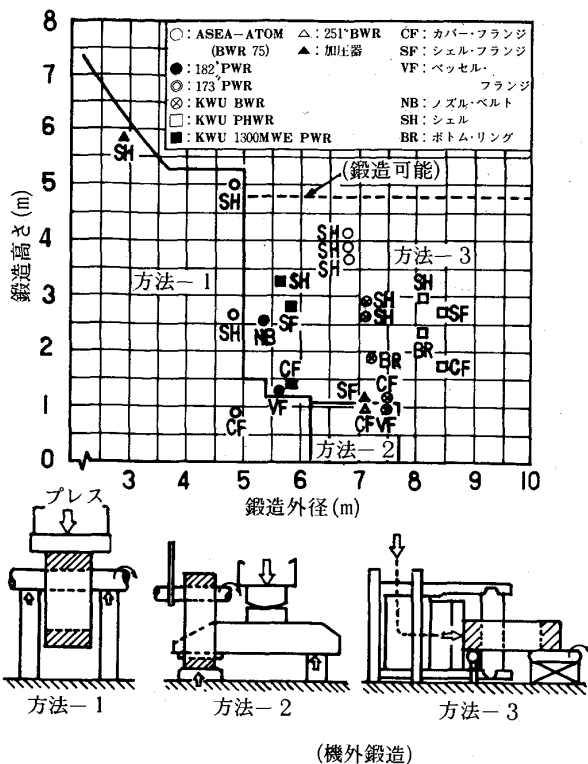


図10 10 000 t プレスによる各種のリング鍛造方式と製造能力 (日本製鋼所)

のリング材や外径 8 m 級の円板とその球面成形品の製造が可能となった。また、新型原子炉 FBR (高速増殖炉) の原形炉である「もんじゅ」に使用される上蓋部径 8.7 m、胴体内径 7.2 m、高さ 17.8 m のステンレス容器用各種リング材を世界で初めて縦方向に溶接線のない一体型で製造することに成功した。なお、最近リング鍛造専用機⁷⁾ (容量 4 400 t) が設置された例がある。

鍛造作業は数回の加熱と加工を繰り返して行われるが、素材の割れ防止、寸法精度の確保及び品質の改善に対しては多くの作業因子が影響する。これらは加熱条件、金敷の形状、材料温度、圧下量、材料のハンドリング等であり、それぞれの適正条件での作業が重要である。

鋼塊に発生する欠陥のうち鍛造過程での改善に依存するのはザクである。大形回転軸材のような中実製品の場合には、ザク圧着のために鍛造比を 3 程度とするのが一般的である。リング材の場合には、中実鋼塊では中心部のザクを伴う V 偏析帯は除去されるので、プレス力量が大きく、1 回の圧下量を大きくとることができれば鍛造比は 2 程度でよく、機械的性質も満足される²⁶⁾。鍛造法は鋼塊の種類、プレス力量、製品肉厚を考慮して決定する。

3.3 熱処理技術

大型鋼材の内部品質と機械的性質は熱間加工後の熱処理によって大きく左右される。熱処理工程は焼ならし・

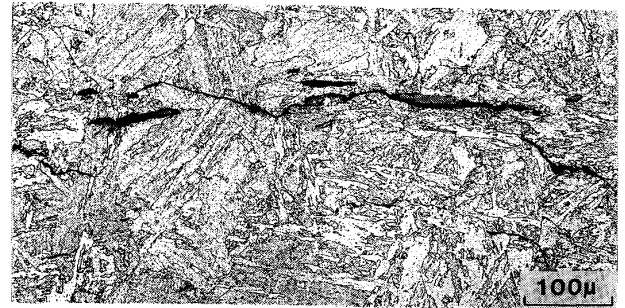


写真2 水素に起因した偏析部の毛割れ

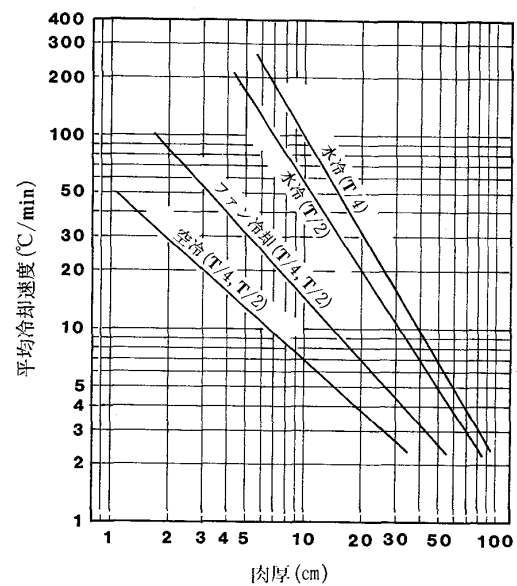


図11 各種冷却法によるオーステナイト温度から 450°C までの平均冷却速度

焼もどしと焼入れ・焼もどしの 2 段階で行われるのが一般的であり、鋼種、質量効果、残留応力、偏析、水素割れ、脆化等を考慮して条件が決定される。

第 1 段階の焼ならし・焼もどしは内部品質の調整を目的とするもので、結晶粒の整粒化と微細化、水素割れの防止、超音波透過性の改善等が達成される。とくに、鋼中の水素が高い場合には写真 2 に示すように偏析部で MnS を縫った割れが発生することがあるので、前述のように鋼塊中の水素の低減が極めて重要となる。

第 2 段階の焼入れ・焼もどしは所定の強度や延靱性等の機械的性質の付与を目的とするもので、これらは化学成分や結晶粒度及び冷却速度等の関数として決定される。図 11 は冷却速度に及ぼす冷却方法の影響²⁷⁾を示したもので、厚肉材では攪拌水槽中で焼入れするのが一般的である。

なお、溶接構造用鋼では試験片に想定溶接後熱サイクル (PWHT) をあらかじめ与えてから、機械的性質の

試験をするのが通例である。化学成分もこの観点から最終決定されるが、詳細は省略する。

4. 大形鍛鋼リング材の品質

大形鍛鋼リング材の品質については多くの報告^{7)28)~30)}があるが、著者らが最近製造した図12に示す3個のリング材の例を述べる。これらのリング材に接続されるフランジ材はさらに大形であるが、詳細は別の論文²⁶⁾にゆずる。

4.1 石油精製反応塔用リング材

図12の(a)は偏析と脆化の防止の目的で低Si-VCD (Vacuum Carbon Deoxidation) を適用した180tの2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼塊から製造したリング材である。本鋼種は焼入れ時の冷却速度が5°C/min以上の時にベイナイト変態することが知られているが、図11から水冷時における中心部の冷却速度は8°C/minである。得られた機械的性質は表4に示すようにいずれの位置及び試験温度でも良好な強度と延靱性が得られている。とくに、脆化処理後の遷移温度のシフト量は中心部でも13°Cと低くなっている。

4.2 原子炉 (PWR) 用リング材

図12の(b)は水素の低減の目的で取鍋精錬した溶鋼をMP法によりさらに真空鍛造した400tのMn-Ni-Mo鋼塊から製造したリング材である。リング材内外面のチェック分析の結果、炭素の偏析は取鍋分析値0.18%に対して±0.01%と少なく、酸素量は20

ppm以下である。図13は肉厚方向における引張り性質と衝撃値の分布を示し、中心部では質量効果により若干低下するが、全体的には良好な結果が得られている。また、低温靱性の評価値である RT_{NDT} は-45°C、軸方向のVノッチシャルピー遷移温度は-15~-20°Cと良好であり、優れた破壊靱性値 K_{IC} 、 K_{Id} も得られている。

4.3 高速増殖炉「もんじゅ」用ステンレスリング材

図12の(c)は取鍋精錬に続いて真空鍛造した260tのSUS304鋼塊から製造したステンレス製リング材で

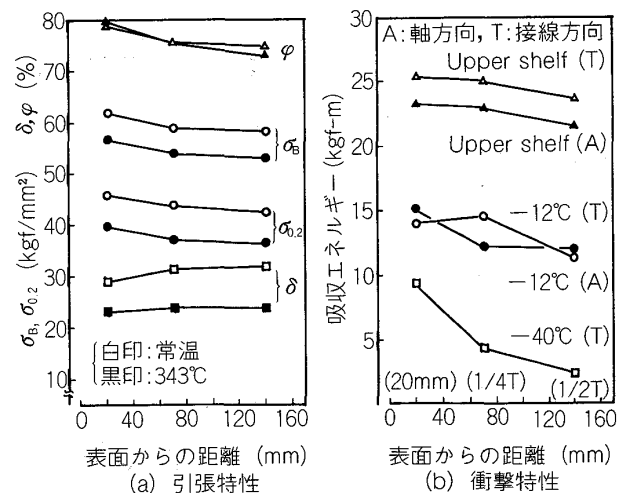
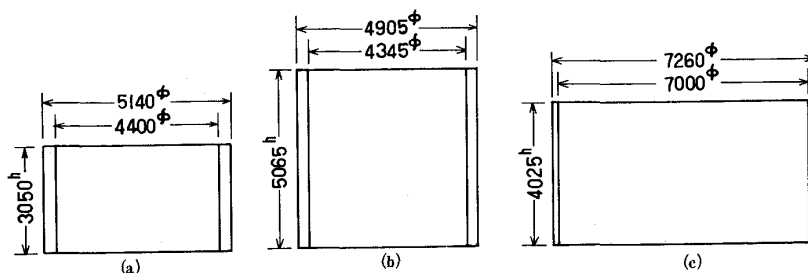


図13 原子炉リング材の肉厚方向における引張りおよび衝撃特性



(a) 石油精製反応塔
(b) 原子炉 (PWR)
(c) 原子炉 (高速増殖炉)
図12 調査した各種圧力容器用鍛鋼リング材の形状と寸法 (機削り前)

表4 300 mm 肉厚 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 鍛造リングの機械的性質

位 置	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	抗張力 (kgf/mm ²)	伸 び (%)	絞 り (%)	T_{rs} (°C)		
						AS-tempered	Step-cooled	Sift
表 面	25	43.1 43.2	57.1 57.1	30.6 30.8	80.1 80.1	-63	-58	5
	450	34.7 34.8	45.0 44.3	19.8 19.5	76.9 77.3			
$1/4-T$	25	43.0 42.5	56.9 56.5	29.6 29.2	80.6 79.9	-49	-43	6
	450	34.7 34.3	44.7 44.2	19.2 19.4	76.8 77.4			
$1/2-T$	25	40.7 40.7	56.4 57.0	31.3 30.6	80.1 78.5	-60	-47	13
	450	33.8 33.5	44.1 44.0	19.6 19.8	75.4 76.8			

表5 「もんじゅ」用ステンレスリング材の機械的性質

		0.2%耐力 (kgf/mm ²)	抗張力 (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
室温	仕様	>21.0	>53.0	>45.0	>50.0
	実績	22.8	54.0	70.4	81.3

ある。本鋼塊は取鍋精錬により硫黄を0.001%と著しく低減させており、全体の非金属介在物は0.040% (JIS, 清浄度) と良好であつた。また、オーステナイト結晶粒度 No. は1.0~1.5であり、厚肉ステンレス材としての仕様を十分に満たす値であつた。リング材の端面における引張り性質は表5に示すように仕様を満足する値であつた。

5. む す び

以上、石油精製や原子力発電用の大形圧力容器のための大形鍛鋼リング材の製造技術と品質の現状について概説した。超大形鋼塊を含む精錬・造塊法、既存のプレス能力を拡大活用する機外鍛造法、水素割れを防止する諸対策、260t 鋼塊から一体鍛造した超大径薄肉ステンレスシェル等、その多くはこの20年余の間に我が国で開発されたものである。これらの技術は同じく世界一流の水準にある我が国で製造される大型圧力容器の信頼性を高め、さらには国の内外のエネルギー関連産業の発展を支えてきたものと信ぜられる。

これらの圧力容器はさらに大型化し、使用条件もいっそう苛酷になりつつある。著者ら鉄鋼素形材の製造者としてはいつその技術開発と品質の向上に努めて、従前以上の寄与を続けたいと願う。

なお、本稿では紙幅の関係上、圧力容器の信頼性、寿命と材料特性との関係等の点に触れなかつたが、最近取り上げられつつある課題として記しておく。

終わりに、平素格別の御指導を賜っている多くの研究、規制、検査機関の方々、国の内外の顧客各位に深謝申し上げるとともに、(株)日本製鋼所の本社技監小野寺真作博士、室蘭製作所の岩波義幸、塚田尚史博士、田原隆康諸氏の指導と協力に感謝する。

文 献

- 1) 館野万吉: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 1631
- 2) 鉄と鋼, **71** (1985) 3
- 3) 小野寺真作: 日本機械学会誌, **84** (1981年1月) 746, p. 40
- 4) 田原隆康: 日本機械学会第611回講演会教材 (1985年11月)
- 5) 藤岡慶一, 綿谷基樹, 石塚紀雄, 進藤弓弦: 日本製鋼所技報, **38** (1978), p. 18
- 6) K. D. HAVERKAMP, K. FISCHER, K. FORCH and K. H. PIEHL: Proc. 10th Int. Forging Conf., Sheffield, England (1985)
- 7) 朝生一夫, 安部直之, 斉藤健志, 中西恭二, 難波明彦, 八百 升: 川崎製鉄技報, **18** (1986), p. 30
- 8) K. SUZUKI, K. KITAMURA, T. TAKENOCHI, M. FUNAZAKI and Y. IWANAMI: I & SM (1982年7月), p. 33
- 9) 北村和夫, 竹之内朋夫, 岩波義幸: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 220
- 10) K. KITAMURA, M. FUNAZAKI, Y. IWANAMI and T. TAKENOCHI: Trans. ISIJ, **24** (1984), p. 631
- 11) T. YAMAUCHI, S. MARUKASHI, M. KINUGASA, K. YAMADA, H. AZUMA, T. HIYAMA and N. NISHIMAE: 10th Japan-USSR Joint Symp. on Physical Chemistry of Metallurgical Processes, Tokyo (1985年7月), p. 175
- 12) 松尾 亨, 亀川憲一: 融体精錬反応の物理化学とプロセス工学 (日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会融体精錬反応部会) (1985年5月), p. 321
- 13) 小若正倫, 富士川尚男: 日本金属学会誌, **34** (1970), p. 1047
- 14) 中川義隆: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 1223, **64** (1978), p. 1771
- 15) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **59** (1973), p. 431, p. 1540
- 16) 山田人久, 桜井 隆, 竹之内朋夫: 学振19委-No. 10721 (昭和61年5月)
- 17) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1571
- 18) 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1581
- 19) K. SUZUKI, K. TANIGUCHI and J. WATANABE: Proc. 6th Int. Conf. on Vac. Met. San Diego, USA (1979)
- 20) 鈴木是明: 日本金属学会第IV総合分科シンポジウム—合金凝固の基礎的諸問題—(1978), p. 13
- 21) R. JAUCH, A. CHOUDHURY, F. TINCÉ and W. R. LEMOR: Ironmaking and Steelmaking (1979), p. 75
- 22) Z. JUE, L. HAIHONG, S. SHUYE, Z. JIANKE and L. CHUANLIN: 8th Int. Conf. on Vac. Met. Linz, Austria (1985), p. 1053
- 23) (株)日本製鋼所: 特許第814442号
- 24) J. P. BADEAU, Ph. DOR, I. POITRAULT and A. de BADEREAU: 10th Int. Forging Conf. Sheffield, England (1985)
- 25) S. ONODERA, H. TSUKADA, K. SUZUKI and I. SATO: IAEA Specialists' Meeting on—Recent Trends in Development of Reactor Pressure Circuit Technology—, Madrid, Spain (1985)
- 26) 藤岡慶一, 鈴木公明, 関村和義, 大西敬三, 塚田尚史: 日本製鋼所技報, **38** (1978), p. 51
- 27) Y. MURAKAMI, T. NOMURA and J. WATANABE: Special Technical Publication 755, ASTM (1982), p. 383
- 28) R. PALENGAT, A. VIGNES, A. de BADEREAU and P. BOCQUET: 10th Int. Forging Conf., Sheffield, England (1985)
- 29) 大泉治喜, 高野正義, 石原鉄朗: R & D 神戸製鋼技報, **25** (1975) 4, p. 16
- 30) 牧岡 稔, 高野正義, 原田 豊: R & D 神戸製鋼技報, **26** (1976) 3, p. 24