

# 極厚鋼板を使用した直接脱硫リアクタの製作

## Fabrication of the Hydrodesulfurization Reactor Using Heavy Section Plates

近年、石油精製プラントに設置される直接脱硫用リアクタはますます大形化する傾向にあり、その厳しい使用条件と相まって材料、溶接、熱処理などを中心に、その製作に当たっては多くの問題点を考慮する必要がある。今回、極厚鋼板を使用し種々の製作技術の改良をも含めてリアクタの製作を完了した。製作に当たっては、材料強度と熱処理との関係を中心に十分な事前検討を行ない、その結果を実機の製作に反映させており、この論文は、それらの概略について論述する。

赤塚真之\* *Shinshi Akatsuka*  
河原 稔\* *Minoru Kawahara*  
清水義右\* *Yoshisuke Shimizu*

### 1 緒 言

国内外の石油精製プラントの新增設は目覚ましく、プラント容量の増加と相まって、その需要を満たすべく活況を呈している。これらのプラントにより生産される製品のうち約半量は、燃料として消費される硫黄分を含む重油であり、燃焼によって発生する亜硫酸ガスによる大気汚染を防止するため、種々の低硫黄化の方法が考えられ実施されているが、重油の直接脱硫は有効な手段として、ますます同装置の建設が進むものと考えられる。

重油の直接脱硫装置の心臓部には脱硫リアクタが設置される。このリアクタは胴板の厚さが300mmに達する大形厚肉の圧力容器である。この種のリアクタは、従来、材料の調達と溶接部の信頼性の点より、一体鍛造リングを継ぎ合わせて胴体部を製作する方式が採られていたが、材料メーカーの製作技術、設備能力の向上と併せて原子炉圧力容器を製作したバブコック日立株式会社の製作実績により、今回、すべて鋼板製によるリアクタを完成した。この論文は、現在工場製作中のものも含め、昭和48年10月製作納入した直接脱硫リアクタにつき、その設計から製作にわたる概略について論述するものである。

### 2 直接脱硫リアクタの概要

#### 2.1 リアクタの仕様

直接脱硫法は、常圧蒸留、又は減圧蒸留の残油を脱硫触媒のもとで、水素化脱硫反応によりそのまま脱硫する方式であり、厳しい運転条件が要求される。表1に直接脱硫リアクタ

表1 脱硫リアクタの概略仕様 寸法は目安であり、ますます大形化する傾向にある。

項 目 (単位)	仕 様
設計圧力(kg/cm <sup>2</sup> )	150~180
設計温度(°C)	380~460
内 径 (D)(mm)	2,000~5,000
板 厚 (T)(mm)	150~300
平行部長さ(L)(mm)	~20,000
重 量 (t)	~800
主 材 料	2 1/4Cr-1Mo材 (A387Gr-F22鋼板 A336CL-F22鍛造品)
内面溶接オートバイ	Type 347ステンレス

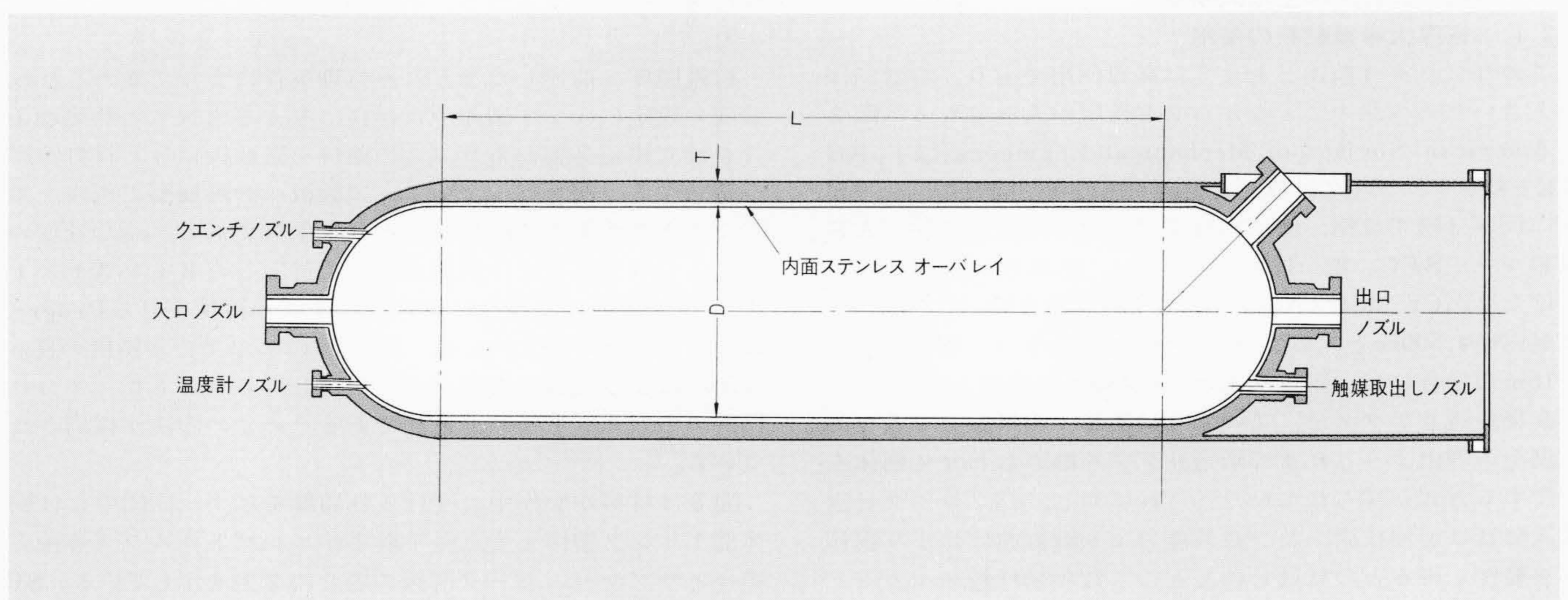


図1 脱硫リアクタの形状 リアクタ内には触媒が充填され、発熱反応となる。

\* バブコック日立株式会社呉工場



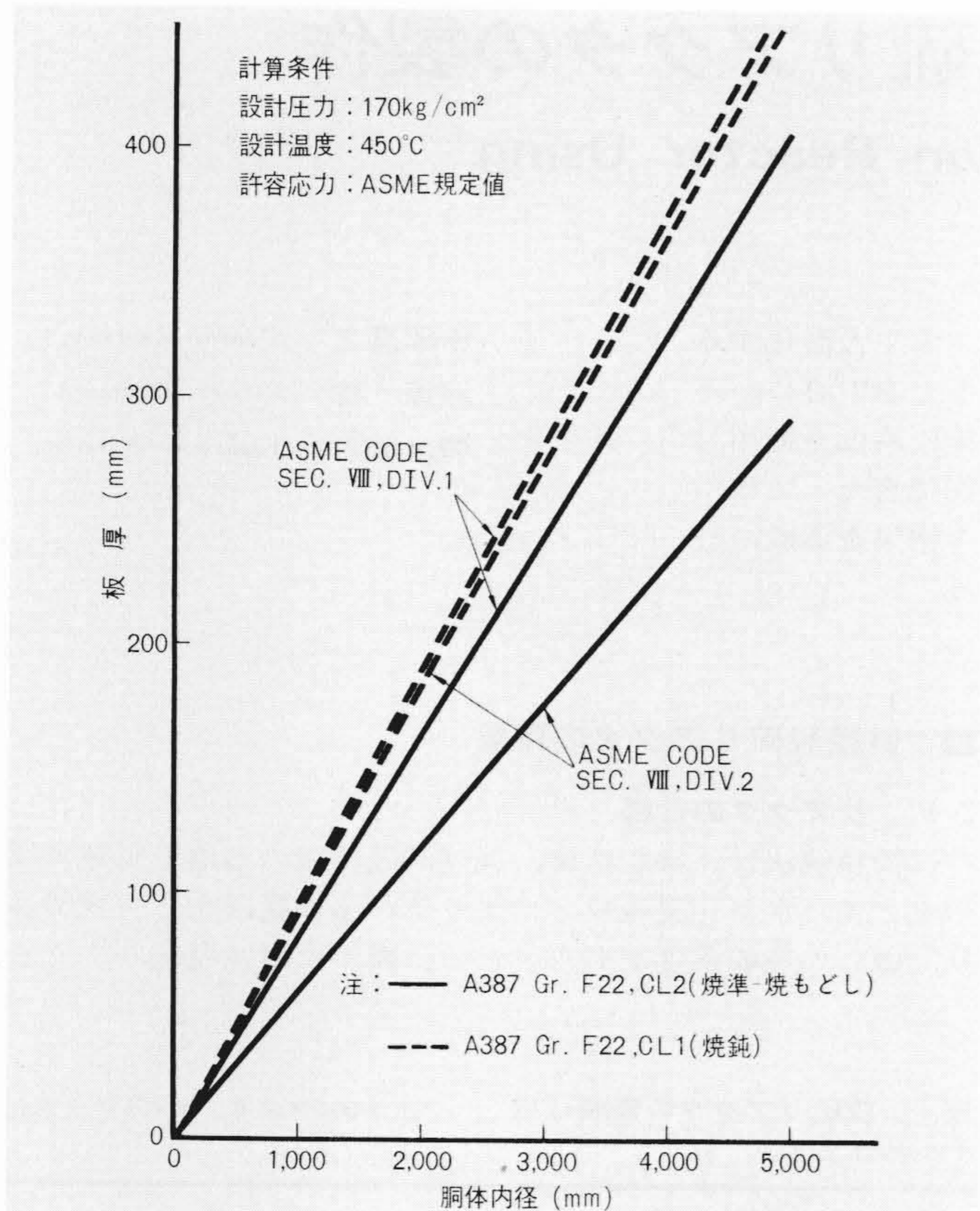


図2 内径と板厚の関係 ASME CODE SEC. VIII, DIV. 2により焼準一焼もどし材を使用した場合が最も板厚が薄くなる。

の概略仕様を、図1にその概略形状を示す。リアクタの容器寸法は、材料製作能力、容器製作能力、現地輸送据付能力などに関係し、これらの技術進歩に合わせてますます大形化する傾向にある。リアクタは硫化水素、水素などの厳しい腐食性環境ふんい気で運転されることから、全内表面にオーステナイト系ステンレスの肉盛が施されており、内部装置は安定化ステンレス鋼を使用している。

## 2.2 設計・製作上の主な問題点

### 2.2.1 極厚大単重材料の使用

このリアクタは前述したように高温使用であり、容器内径が大きいため当然のことながら必要板厚が大きくなる。図2はAmerican Society of Mechanical Engineers(以下、ASMEと略す)コードで計算した場合の内径と、板厚の関係を示す。板厚は適用規格、使用材料強度によって変わるが、ASMEコードSEC. VIII, DIV. 2<sup>(1)</sup>とし、熱処理により強度を上げた2¼Cr-Mo材(A387 Gr. F22, CL2)としても、例えば胴内径4,500mmとすると板厚265mm程度となり、胴体部長さが15mの場合には、胴体部だけで約480tの重量となる。

直接脱硫リアクタは、このように極厚・大単重となるため、製鋼上の理由よりこれまで鍛造リングを継ぎ合わせて胴体を製作する方式が採られていた。これに対し、バブコック日立株式会社は製作技術、及び設備能力より鋼板曲げにより胴体部を製作し得るとの見通しのもとに、数年来材料メーカーと密接な連絡を保ちながら大単重・極厚鋼板の調達計画を進め、現在では鍛造材と同等以上の品質で、寸法的には板厚300mm、単重50tまでの鋼板の入手が可能となっている。

### 2.2.2 使用材料の強度

本体材料には、380～460°Cの温度域で十分な強度をもって

いることと、長時間の使用にも材質的に安定であることが要求されるため、一般にA-387 Gr. F22 Class 2焼準一焼もどし(Normalized and Tempered)材が使用される。この材料の強度についてASMEコードが一つの目安を与えているが、これを満足することは次に述べるように熱処理条件が関係し実際には非常な難かしさがある。

まず、極厚板であるための焼準の効果が少ないこと、及び製作過程中に材料が受ける熱処理条件が強度低下をもたらすことであり、特に溶接後熱処理(以下、SRと略す)時の温度、及び保持時間に注意する必要がある。これに対処するために成分調整をすると同時に、実際には焼準時に水などによる強制冷却を行なっているのが通常である。

このようにこの材料は熱処理条件により敏感に材料特性を変えることから、その製作条件の設定には十分注意を払う必要があり、焼準、焼もどし時の保持温度、冷却速度、溶接後熱処理条件の設定はリアクタの品質を左右する重要な問題である。これらに関しては、極厚板に対する冷却効果の影響をはじめ、成分元素の偏析、非金属介在物の状態などの内部性状、及び機械的性質に及ぼす板厚効果、方向性などを中心に国内外4社の実用サンプル材を用いて事前に詳しく調査研究を行ない、データの蓄積を行なった<sup>(2)-(4)</sup>。

また、使用温度が高温であるため使用中の材料の脆化が重要な問題の一つとなっており、微量元素が大きな影響を与えているとも考えられ<sup>(5)</sup>、現在鋭意各方面で研究が続けられているがまだ十分に究明されていない。これに対しては、原子炉圧力容器に用いられているようなサーベイランス試験板の実機への装入監視も必要と考えている。

## 3 実機脱硫リアクタの製作

以上の問題点を中心に、実機製作時において行なわれた結果について述べる。

### 3.1 材料仕様の設定

使用材の化学成分の例を表2に示す。材料強度との関連で規格元素内で上限をねらって製作されているが、使用中の脆化を考慮し、P, As, Sn, Sbなどの不純物元素は可能な限り少なくしており、Cu, Niも0.2%以下となっている。また鋼板自身の成分のばらつき、不純物の偏析なども設められなかった。

材料強度は前述したように熱処理条件によって変わるため、強度の設定にはまず製作中に材料に与えるすべての熱処理条件を確立する必要がある。この条件を試験板に与え材料強度を確認する方法を採っている。試験板への熱履歴で再現上重要なことは焼準後の冷却速度とSR条件である。冷却速度のシミュレーションには実機と同一条件とした3t×3t×t法、及び減厚した試験板に直接冷却速度を再現させるProgrammed Testing法<sup>(1)</sup>がある。現在ではコントロール精度の良い専用炉による後者の方法が十分信頼し得るものとなっており、材料の歩どまり上よりも有利であるためこの方法が採用されている。

図3は材料が製作中に受ける熱履歴を示す。同図中には胴体部1リング製作までに長手継手がエレクトロスラグ溶接の場合とサブマージアーク溶接の場合の2例を示している。SRの温度時間はLarson Millerのパラメータによって関連づけられるが、割れ防止を行なうために行なう中間SRを低目とし、最終SRはASMEに規定されている1,250°F(677°C)を満足するように考慮している。

図4は実機使用材の機械的性質の例を示す。板番は表2と



表2 使用材の化学成分(%) 板厚185mm, 270mmの場合のチェック分析の実例であり, 不純物元素は極力抑えられている。

成分規格	成分												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	As	Sn	Sb	
規格	≤0.17	≤0.50	0.27~0.63	≤0.035	≤0.035	1.88~2.62	0.85~1.15	—	—	—	—	—	
板番	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
185mm厚板	1	0.15	0.37	0.59	0.011	0.006	2.41	1.04	0.17	0.18	0.004	0.002	<0.002
	2	"	0.42	0.50	"	0.009	2.36	1.00	0.19	0.15	0.005	"	"
	3	0.14	0.38	0.55	"	0.006	"	1.04	0.16	0.13	0.006	"	"
	4	"	0.37	"	0.010	0.007	"	1.00	0.13	0.15	0.005	0.001	"
	5	0.16	0.44	0.57	"	"	2.40	"	"	"	"	0.002	"
270mm厚板	6	0.14	0.38	0.56	0.011	0.009	2.39	1.04	0.08	0.01	0.003	"	"
	7	"	0.37	0.54	0.009	0.008	2.33	1.00	0.06	0.10	0.005	0.003	"
	8	0.13	0.35	0.53	0.008	0.005	2.34	1.02	0.07	0.09	0.004	0.004	"
	9	0.14	0.38	0.54	0.010	0.006	2.40	1.01	0.10	0.11	0.003	0.002	"
	10	"	0.39	0.56	"	0.007	2.36	1.05	0.13	0.14	0.004	"	"

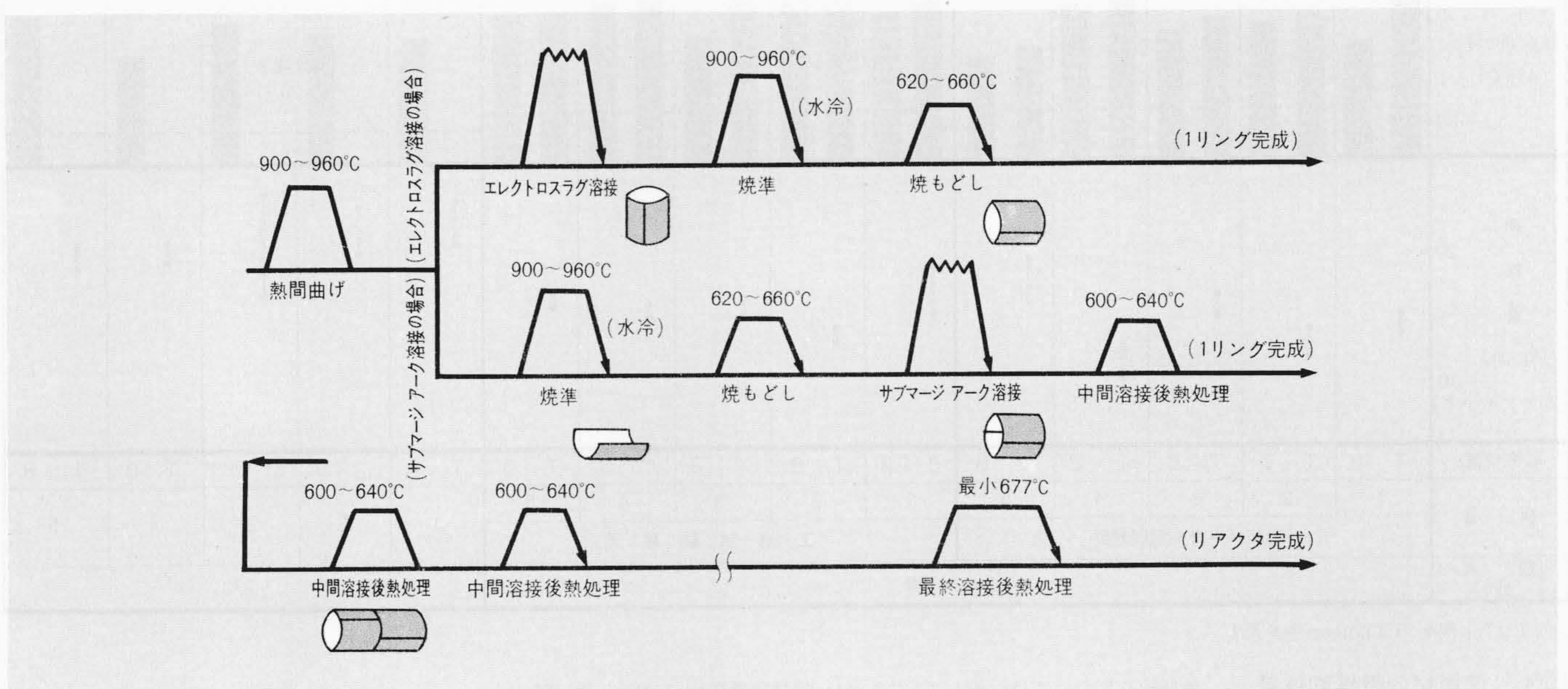


図3 材料が製作中に受ける熱履歴 材料発注時, 製作手順に従った熱処理条件を設定し, 強度保証を行なわせる。

対応しており, 材料発注時の仕様で材料メーカーで行なった試験結果と, 工場では本体に取り付けて行なった熱処理条件で試験結果を示した。強度設計のベースとなる高温引張強さは板厚185mmはASME規格どおり46.8kg/mm<sup>2</sup>とし, 板厚270mmのものはその95%とし44.5kg/mm<sup>2</sup>と設定した。いずれも要求値を十分満足した値を示している。

### 3.2 胴体及び鏡の製作

胴体の製作について, 熱間曲げはベンディングローラによる方法と, プレスによる方法が採られる。両者の使い分けは入手鋼板寸法, 胴板の分割法, 長手溶接法などにより行なわれている。

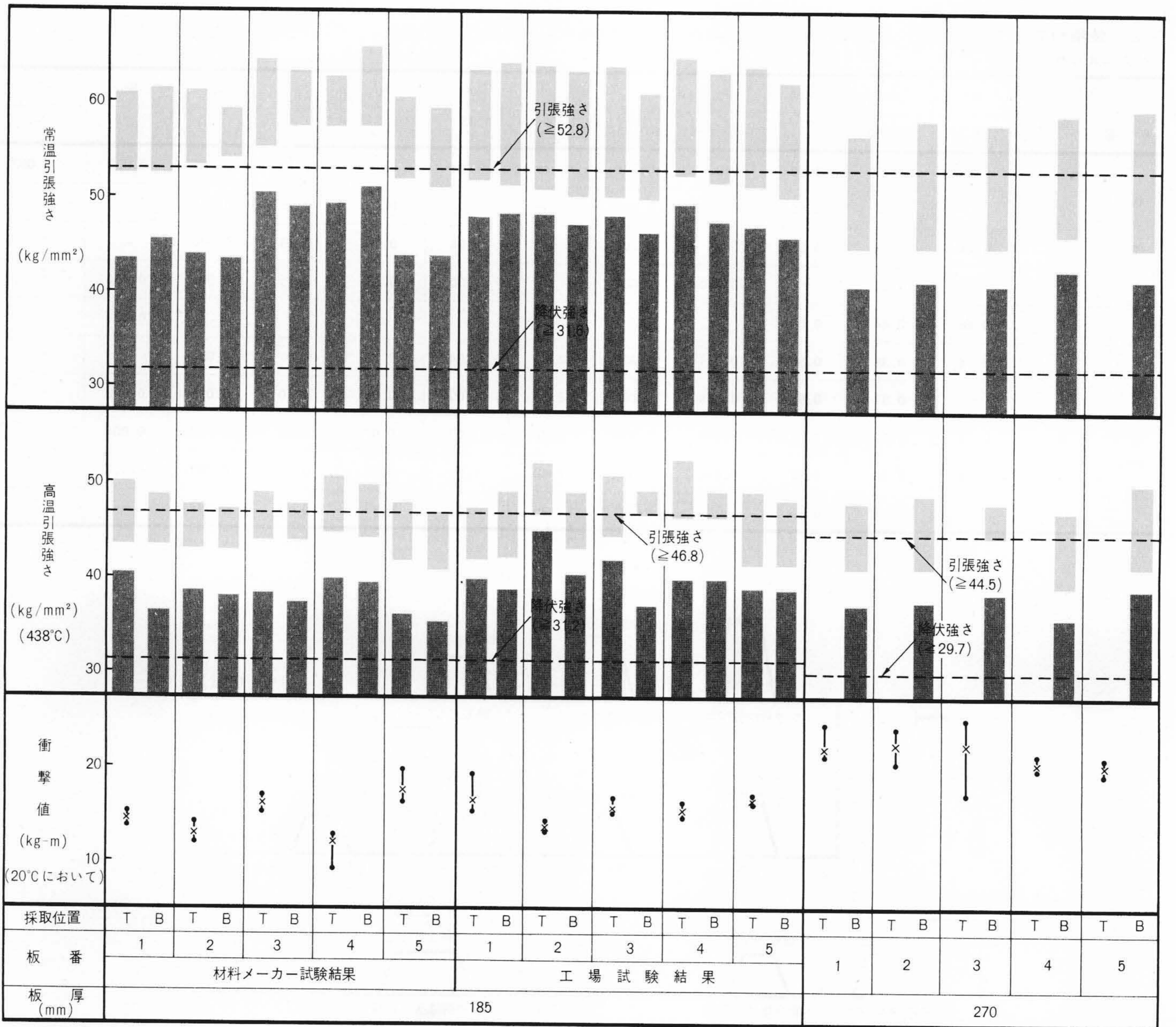
図5に185mm鋼板のベンディングローラによる1リング曲げ作業を, 図6に270mm鋼板の8,000tプレスによる曲げ作業を示す。これらの方法により, 300mmクラスの厚板の曲げ加工は十分可能である。

鏡は従来より入手鋼板の寸法制限と曲げ加工上より, セグ

メント取りと呼ばれる分割板取りした鋼板を, プレス熱間から押し成形した後, 各セグメントを溶接し一体に組み立てられていたが, 新たな製作方法として, 大形鏡の一体絞り化も行なわれるようになった。図7に完成した大形半球鏡を示す。これは内径約4,300mm, 板厚190mm, 重量約45tのもので, 鋼板の中央部をエレクトロslag溶接し熱間絞り後, 焼準するという一連のステップで完成したものである。製品の品質を損なうことなく大幅な作業改善を図ることができたわけであり, このような方法による大形鏡の製作は他に類をみないものであろう。

図8, 図9に胴体, 及び鏡の強制冷却の作業状況を示す。胴体は長手エレクトロslag溶接を行ない1リングにしたものであり, 鏡は図7に示したものである。この種の大物製品の焼入れにはすべてに均一な冷却速度を与えることが重要であり, 製品の焼入れによる変形をも含めて, 冷却水の水温, 循環方法, 炉から焼入れまでに要する時間など関連事項を十





注：TはTop側を、BはBottom側を示す。

図4 使用材の機械的性質 伸び絞りについては、示していないが、伸びは要求値 $\geq 18\%$ に対し23~32%、絞りは要求値 $\geq 45\%$ に対し65~73%であった。

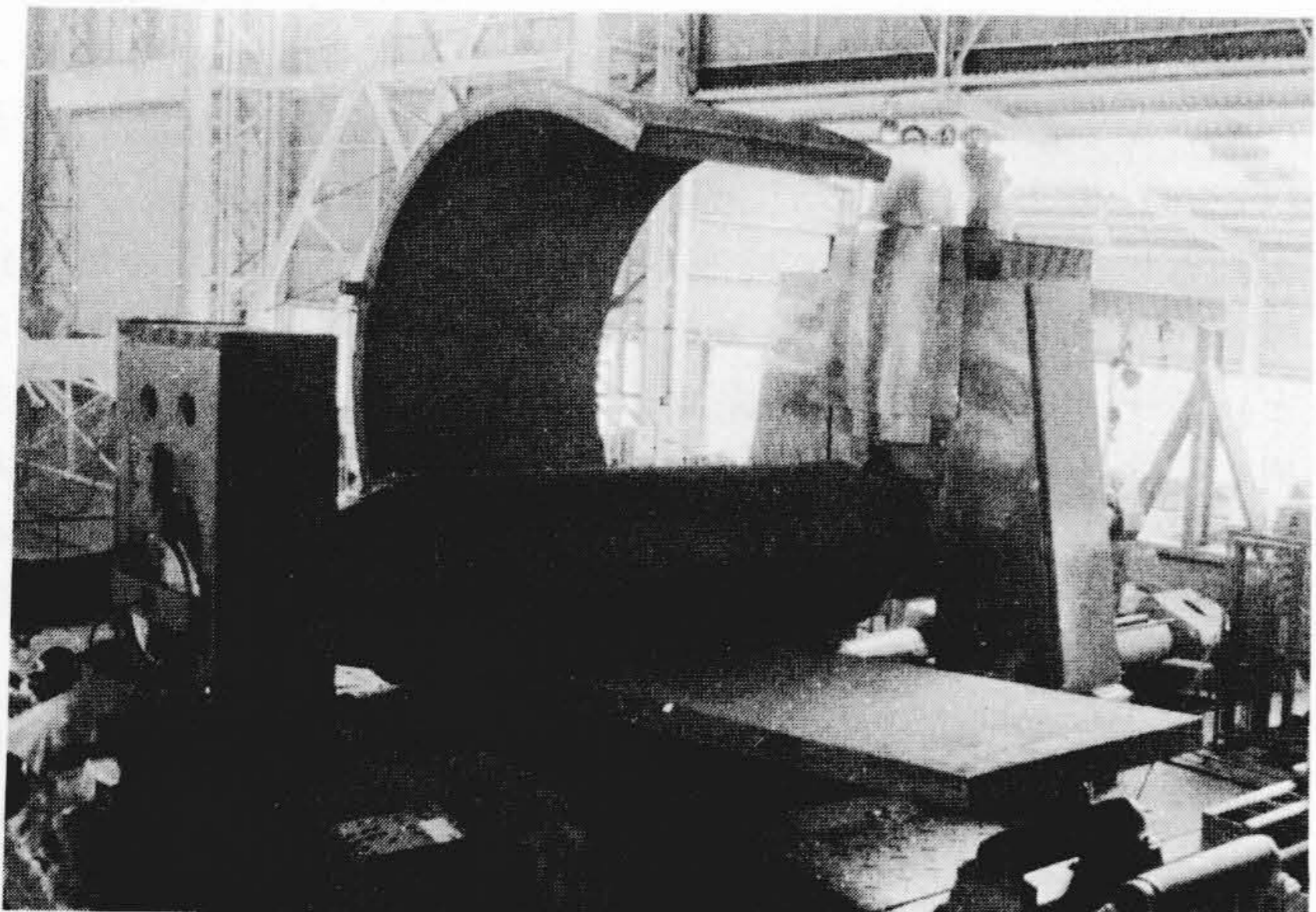


図5 大形ベンディングロールによる熱間曲げ作業 リングに成形され、長手はエレクトロスラッグ溶接が行なわれる。

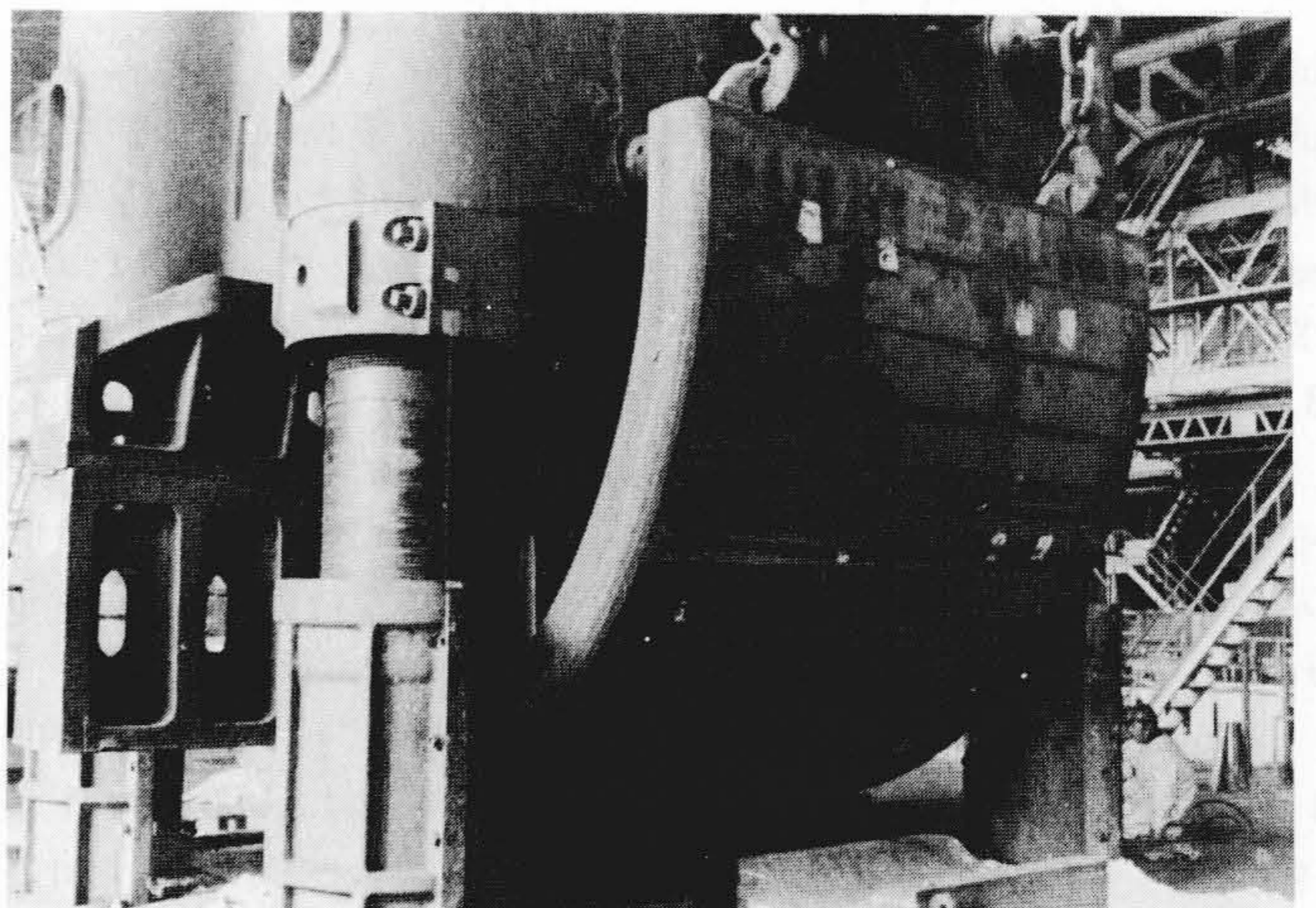


図6 8,000tプレスによる熱間曲げ作業 修正曲げも常温で同様に行なわれる。



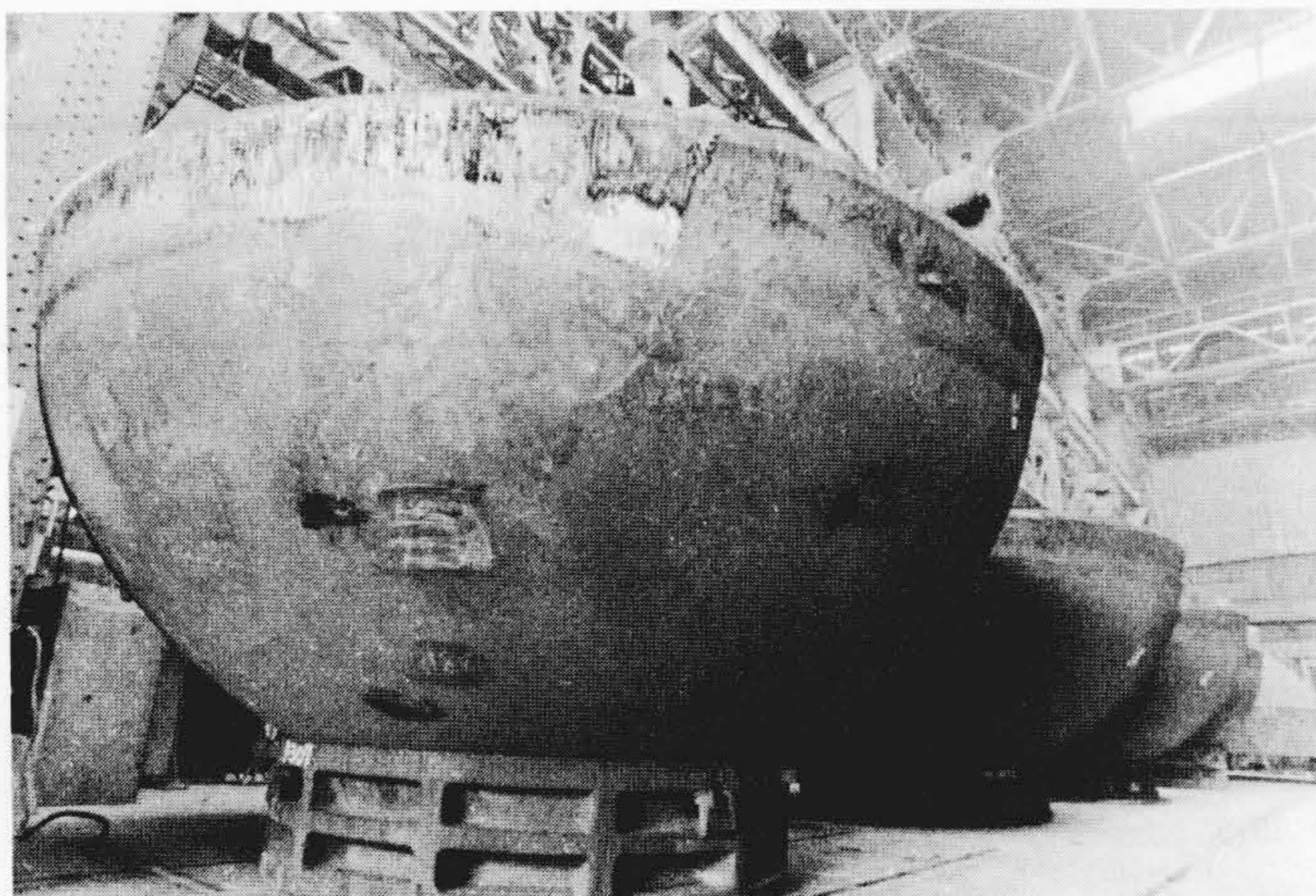


図7 一体絞りにより完成した大形鏡板 鋼板を中央部でエレクトロスラグ溶接を行なった後、熱間絞りを行なっている。鏡内径は約4,300mmである。

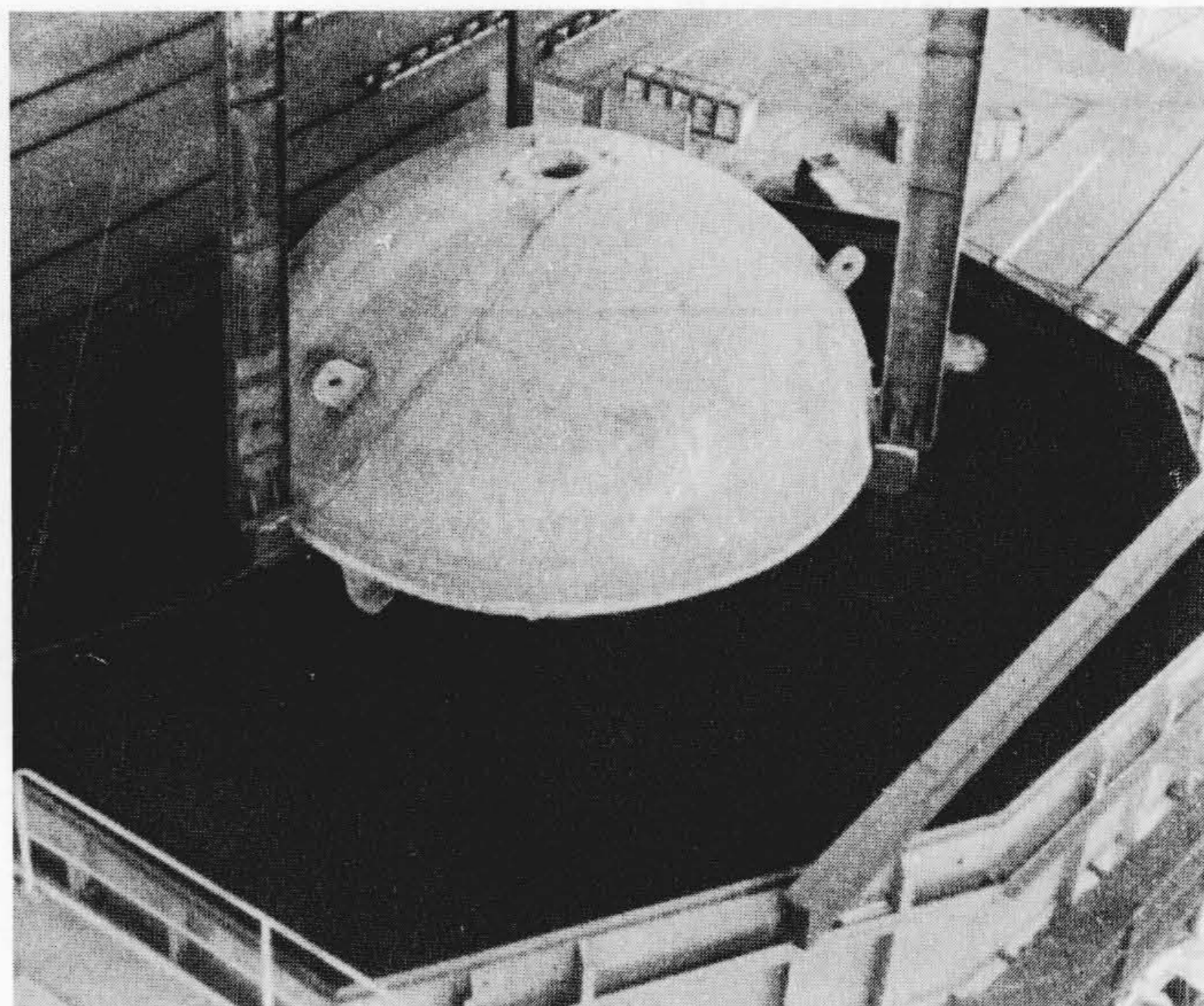


図9 大形一体鏡の焼入れ作業 中央部には、ノズル取付用の穴を事前に空けている。

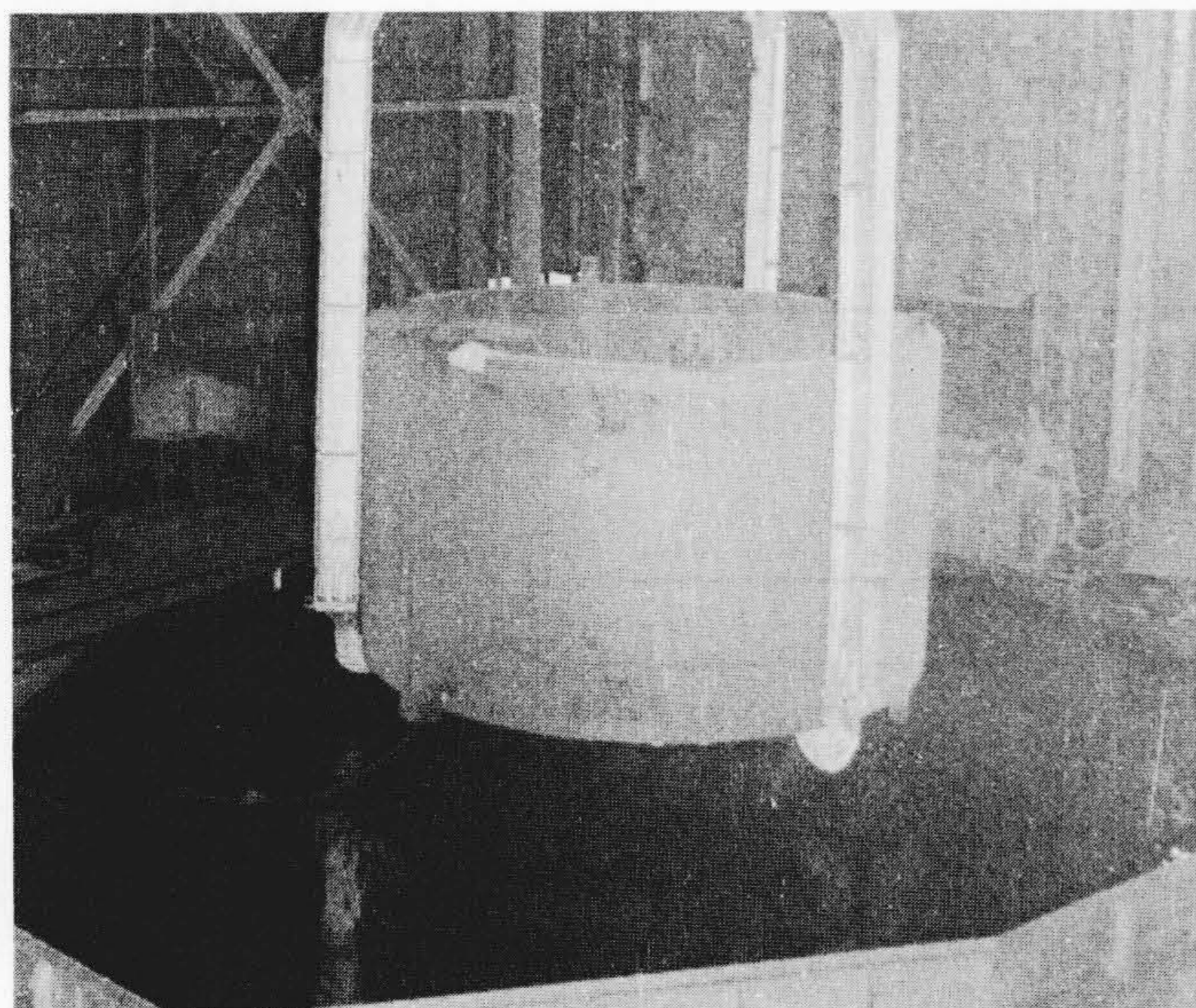


図8 胴体リングの焼入れ作業 サーモカップにより冷却速度の確認を行なっている。

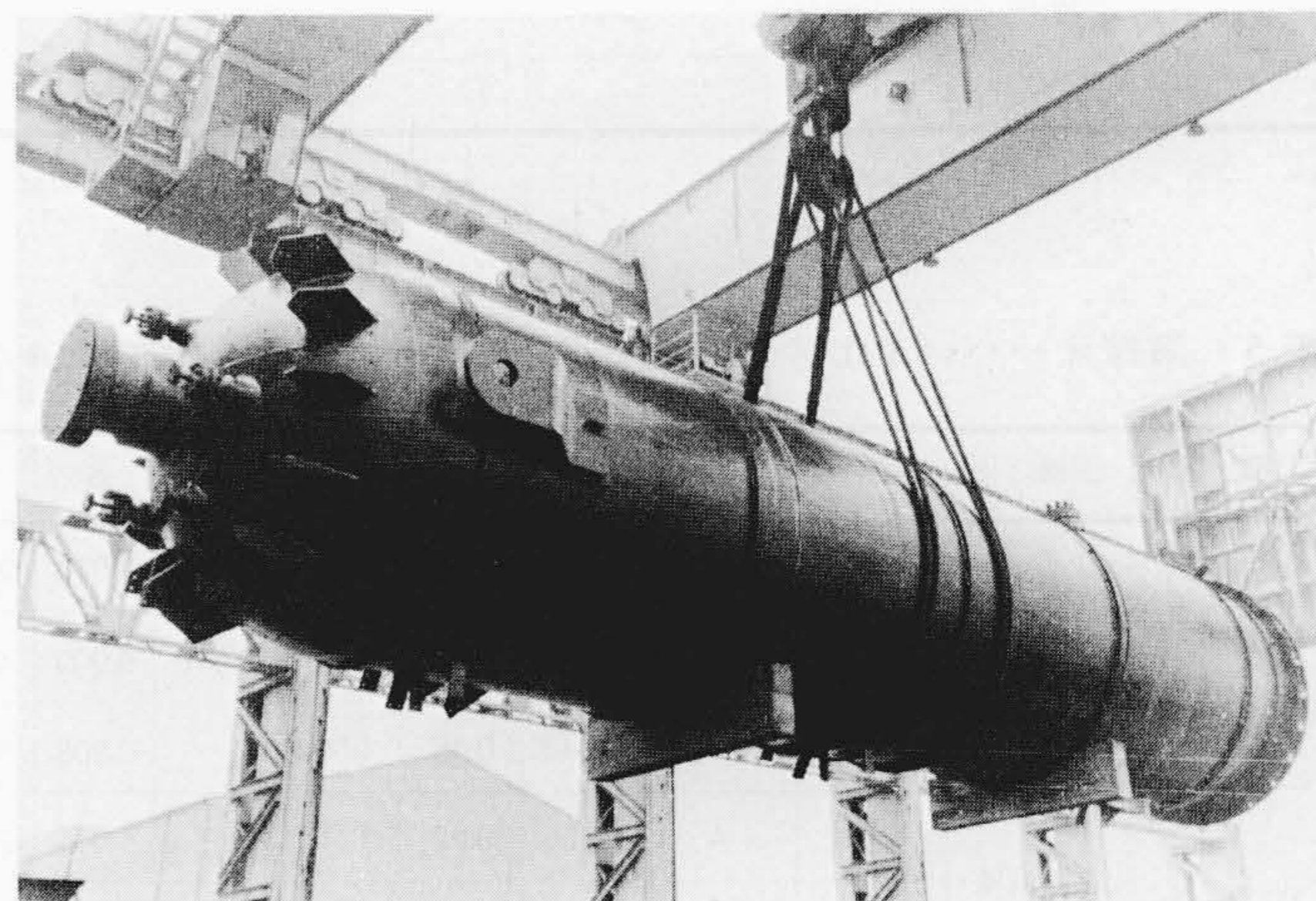


図10 完成した脱硫リアクタ 工場専用岸壁より、天井クレーンにて直接船積みされる。

表3 溶着金属の化学分析結果(%)

実機よりサンプルを採取し、分析した結果例について示す。

元素名 溶接区分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Ni	As	Sn	Sb
エレクトロスラグ溶接	0.14	0.30	0.82	0.011	0.011	2.38	1.01	0.14	0.12	0.003	0.004	0.004
サブマージアーク溶接	0.10	0.25	0.59	0.010	0.007	2.42	1.05	0.075	0.035	0.004	0.005	tr.

分検討の後行なわれた。冷却速度はこれまでの検討結果<sup>(2)</sup>より20°C/min以上になることを目標としており、実測値は板厚の1/4のところでは185mmで約40°C/min、270mmで約20°C/minであった。

### 3.3 溶接

熱処理と同じく溶接は重要作業の一つであるが、紙数の制約上その一部のみを紹介する。表3に各溶接方法による溶着金属の化学分析結果を、また表4に機械的性質の試験結果について示す。いずれも十分な強度を示していることが分かる。また硬さについては詳細なデータは省略するが、母材、熱影響部、溶着金属ともBrinell Hardness (HB):185~210を示し

ていた。

表5に溶接オーバレイの化学分析結果を示す。オーバレイはER-309、及びER-347の二層盛である。フェライト量は、フェライトインジケータで5~15%の範囲となっている。

これらの溶接部については、あらかじめ定められた放射線検査、超音波探傷検査などを完全に行ない<sup>(6)</sup>、問題のないことを確認した後、次の作業ステップに進む方式を採っている。

図10に完成した直接脱硫リアクタを示す。このリアクタは既に1万時間以上の運転を好調に続行しておりなんら問題を生じていない。

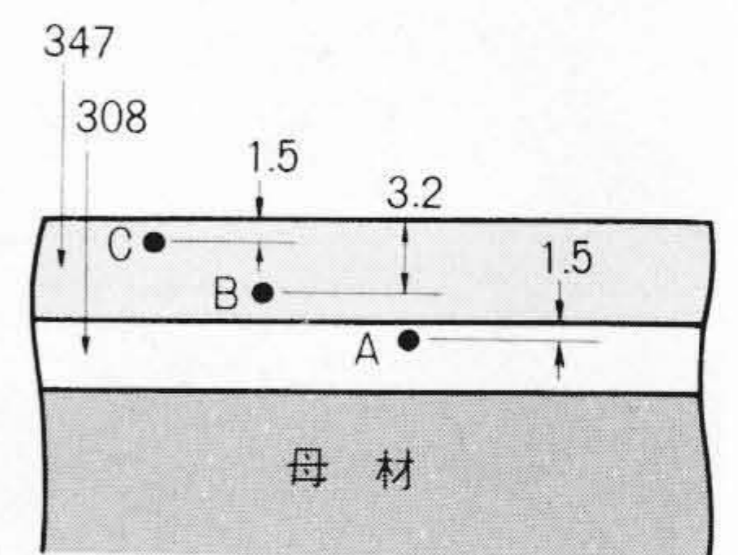


表4 溶接部機械性試験結果 継手引張試験片は、ASMEに基づく角形断面試験片であり、溶着金属引張試験片は1/2inの丸棒試験片である。

溶接方法	試験方法	試験項目 要求値	常温引張り (kg/mm <sup>2</sup> )		高温引張り (438°C)		伸び (%)	絞り (%)	破断位置	衝撃試験20°Cにおいて5.6kg-m (平均)
			引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	引張り強さ (kg/mm <sup>2</sup> )	降伏強さ (kg/mm <sup>2</sup> )				
			52.7~70.3	231.6	246.8	231.2				
エレクトロスラグ溶接	継手引張り	1-1	63.3	—	—	—	—	—	溶着金属	(溶着金属) 15.1 } 15.5 (平均) 14.8 } 16.6 }
		1-2	63.5	—	—	—	—	—	"	
		1-3	64.1	—	—	—	—	—	"	
		1-4	64.4	—	—	—	—	—	"	
	溶着金属引張り	2-1	63.2	49.5	—	—	25.6	71.6	"	(熱影響部) 16.9 } 17.6 (平均) 15.9 } 20.1 }
		2-2	63.2	49.4	—	—	27.6	71.5	"	
		2-3	—	—	48.2	36.9	—	—	"	
		2-4	—	—	49.7	39.7	—	—	"	
サブマージアーク溶接	継手引張り	3-1	65.8	—	—	—	—	—	"	(溶着金属) 18.6 } 18.8 (平均) 18.6 } 19.3 }
		3-2	64.7	—	—	—	—	—	"	
		3-3	65.4	—	—	—	—	—	"	
		3-4	62.7	—	—	—	—	—	"	
	溶着金属引張り	4-1	64.8	52.5	—	—	25.5	68.8	"	(熱影響部) 20.0 } 20.5 (平均) 21.0 } 20.5 }
		4-2	64.0	49.5	—	—	26.0	70.5	"	
		4-3	—	—	51.8	44.4	—	—	"	
		4-4	—	—	51.0	44.1	—	—	"	

表5 溶接オーバーレイ化学分析結果(%) 初層ER-309, 2層目ER-347で溶接を行なっている。

部署	溶接方法	層	分析位置*2	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Cb	α <sub>I</sub> *1	α <sub>S</sub> *1
胴体内面	自動溶接 (ストリップ)	1層目	A	0.043	0.50	1.69	0.018	0.010	20.10	9.38	0.03	—	10~15	7.5
		2層目	B	0.041	0.43	1.49	0.016	0.009	19.42	9.67	0.04	0.69	7.5~10	6.5
			C	0.038	0.48	1.50	"	0.008	19.28	9.64	"	0.70	"	7.0
鏡内面	自動溶接 (ストリップ)	1層目	A	0.055	0.52	1.55	"	0.010	20.28	9.62	0.05	—	10~15	7.5
		2層目	B	0.045	"	1.43	0.010	"	19.02	9.44	"	0.71	"	8.0
			C	0.042	0.51	1.42	0.014	0.008	19.17	9.63	0.04	0.73	"	8.5
ノズル内面	自動溶接 (ワイヤ)	1層目	A	0.050	0.40	1.70	0.008	0.009	19.90	9.60	0.03	—	"	7.5
		2層目	B	0.040	0.45	1.65	0.006	0.008	19.20	9.50	0.02	0.6	7.5~10	6.5
			C	"	0.52	1.67	"	0.007	19.25	9.48	0.01	"	"	7.0



注：表中\*1のα<sub>I</sub>はフェライトインジケータより求めたフェライト量を、α<sub>S</sub>はシェフラー線図により求めたフェライト量を示す。  
\*2は採取位置を示す。

#### 4 結 言

大形直接脱硫リアクタに関し、必要となる極厚・大単重鋼板の特性究明と同時に、エレクトロスラグ溶接の採用など新技術も折り込み、我が国で初めての鋼板リアクタを完成した。

このリアクタの製作過程で確立された技術は、今後この種の大形圧力容器の製作に対し有効に活用し得るものと考えている。この論文では紙数の都合で全般的な技術紹介のみにとどまったが、個々の詳細については多くの興味ある問題が残されており別の機会に紹介したい。

#### 参考文献

- (1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2
- (2) 野中, 丸山: 「圧力容器用極厚2 1/4Cr-1 Mo鋼の熱処理とその溶接継手性能」 日立評論 55, 812 (昭48-8)
- (3) 沢田, 松宮, 野中: 「水添脱硫リアクタ用ASTM A387 Gr. D材について」 川崎製鉄技報 6, 2 (昭49-4)
- (4) 佐藤, 榎本ほか: 「ASTM A387 Gr. D極厚鋼板について」 川崎製鉄技報 4, 3 (昭47-7)
- (5) 例えば, Robert Bruscatto "Temper embrittlement and Creep embrittlement of 2 1/4Cr-1 Mo shielded metal-arc weld deposits" Welding research supplement, 148S-156S (April 1970)
- (6) 桑山, 北野ほか: 「圧力容器の品質管理」 特殊鋼 20, 7 (昭46-7)