

原子力タービン用ダイアフラムの製造

Manufacture of the Diaphragm for Nuclear Turbine

小野裕* 早川巖*
Hiroshi Ono Iwao Hayakawa
浦辺康隆* 牟田口元堂**
Yasutaka Urabe Mototaka Mutaguchi

要 旨

タービン出力の増大に伴い、最終段ダイアフラムのノズル径およびノズル高さはしだいに増加する傾向にある。今回製作した540MW原子力タービンに用いられるダイアフラムはノズルの有効長さ38"の大形ダイアフラムである。12Cr鋳鋼製仕上げノズル翼を使用し、ダイアフラム材質はNiCr入り特殊鋳鉄である。日立製作所勝田工場ではこの記録的ダイアフラムをきびしい寸法公差のもとで製作するため、種々検討を重ねて慎重な作業を行なった結果、良好な製品を製作することができた。

1. 緒 言

タービン出力の増大に伴い、最終段ダイアフラムのノズル径およびノズル高さはしだいに増加する傾向にある。今回製作した540MW原子力発電用タービンに用いられるダイアフラムはノズルの有効長さ38" (970mm)の大形ダイアフラムで、12Cr鋳鋼製ノズル翼を鋳ぐるむ構造のものである。ダイアフラム材質は原子力タービンの湿り蒸気の浸食に耐えられるようにNi、Crを含有する特殊鋳鉄を使用し、12Cr鋳鋼製ノズル翼は鋳ぐるみ後の仕上げ加工費を減少するため、仕上がり翼を鋳ぐるむなど種々の点から記録的製品であった。勝田工場鋳鉄課ではこの大形ダイアフラムを従来以上にきびしい寸法公差のもとで製作するため、半リングの試作を行ない、鋳物砂の改善、木型製作法の開発など種々検討を重ねて、慎重な作業を行なった結果、満足すべき良品を製作することができた。この経験によりさらにノズル径、ノズル高さの大きな大形ダイアフラムについても製作可能の自信を得た。

2. ダイアフラムの形状とその製作仕様

今回製作したダイアフラムの形状は図1に示すとおりである。図示のように内輪、外輪にノズル翼35枚を鋳ぐるみ一体とした半円形のもので、上部ダイアフラム、下部ダイアフラムを組み合わせ1リングを構成する。蒸気は矢印に示すように流れてタービンロータを回転させる。ノズル翼の蒸気出口側端面は中心に向わずある角度をもっている。したがって、上半ダイアフラムと下半ダイアフラムの接合面も図示のような形状になっている。

これまでに製作した最大のダイアフラムと今回の原子力ダイアフラムの比較を示すと表1のようになる。

ダイアフラムにおいて最も重要な点は蒸気流量を左右するノズル翼のピッチ、スロートおよび落ち込みである。これらの寸法は外輪側、ピッチサークル径、内輪側で測定しきびしい公差内に収めることが必要である。

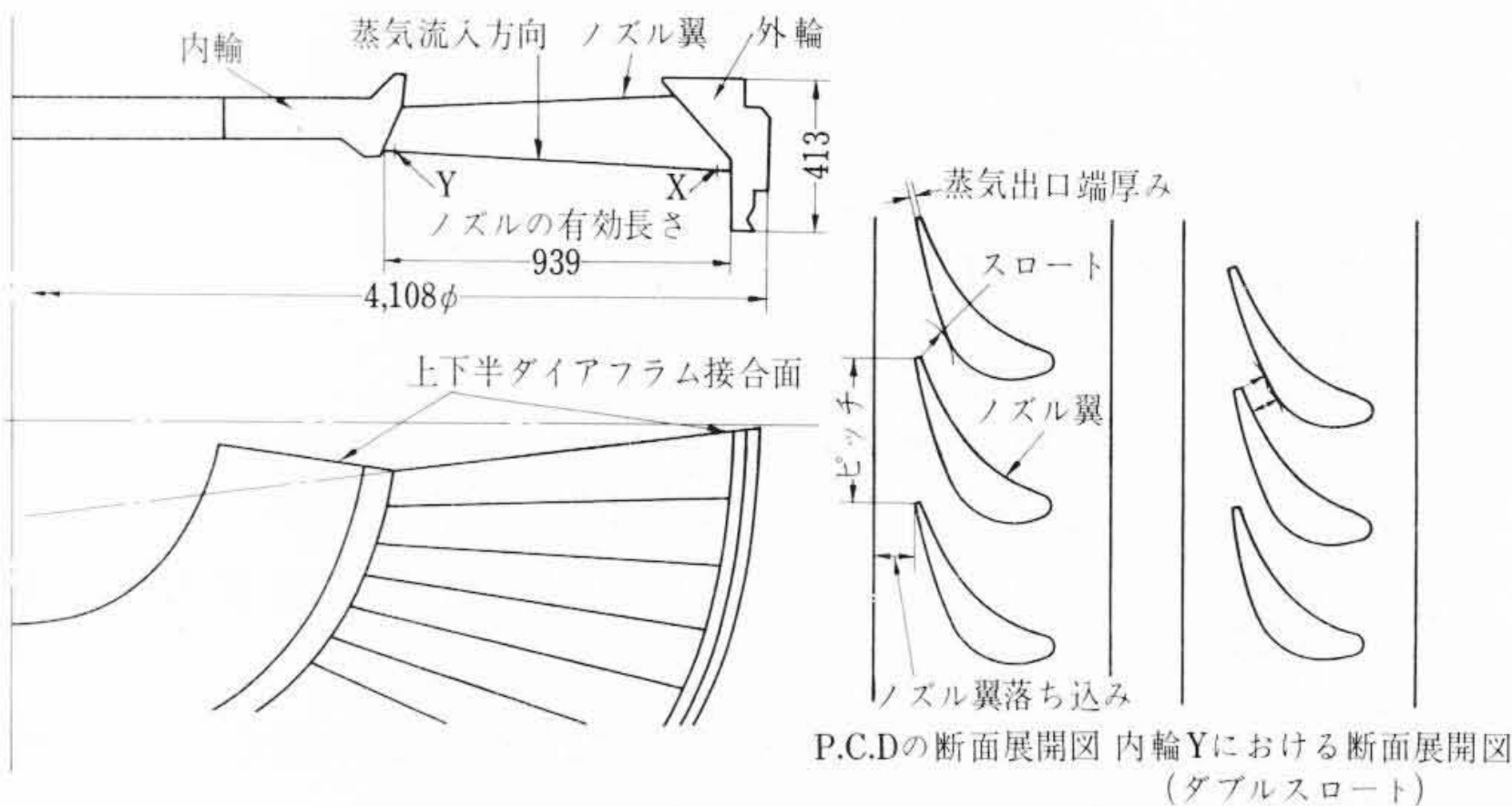


図1 原子力ダイアフラムの形状

表1 原子力ダイアフラムと従来の最大のダイアフラムとの比較

納入先	最大外径 (mm)	ノズル有効長さ (mm)	鋳放し重量 (半リングkg)
火力発電用	3,178φ	653.4	3,510
原子力発電用	4,108φ	939.6	5,140

ノズル翼は12Cr鋳鋼の精密鋳造品であり、鋳造後700°Cのひずみ取り焼鈍を行なってから仕上げ加工を施したものである。普通ノズル翼は図1に示す蒸気出口端厚みに余肉をつけて荒仕上の状態で鋳造し、最終機械時に仕上げ加工をするのであるが、今回製作したダイアフラムは鋳ぐるみ後のノズル翼の機械加工を省きプロフィール精度を向上するため、あらかじめ先端まで完全に仕上げられたノズル翼を鋳ぐるむ構造である。表2はノズル翼の成分、図2は組織の一例を示したものである。

ダイアフラムの材質はNi、Crを含有する特殊鋳鉄であり、接種剤の添加が要求されている。鋳造後はひずみ取り焼鈍を実施することが規定されている。

表2 ダイアフラムノズル翼成分の一例

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Sn
実績 (%)	0.09	0.38	0.77	0.012	0.006	0.14	0.65	11.63	0.10	0.03	0.023	0.024

* 日立製作所勝田工場
** 日立製作所日立研究所 工学博士

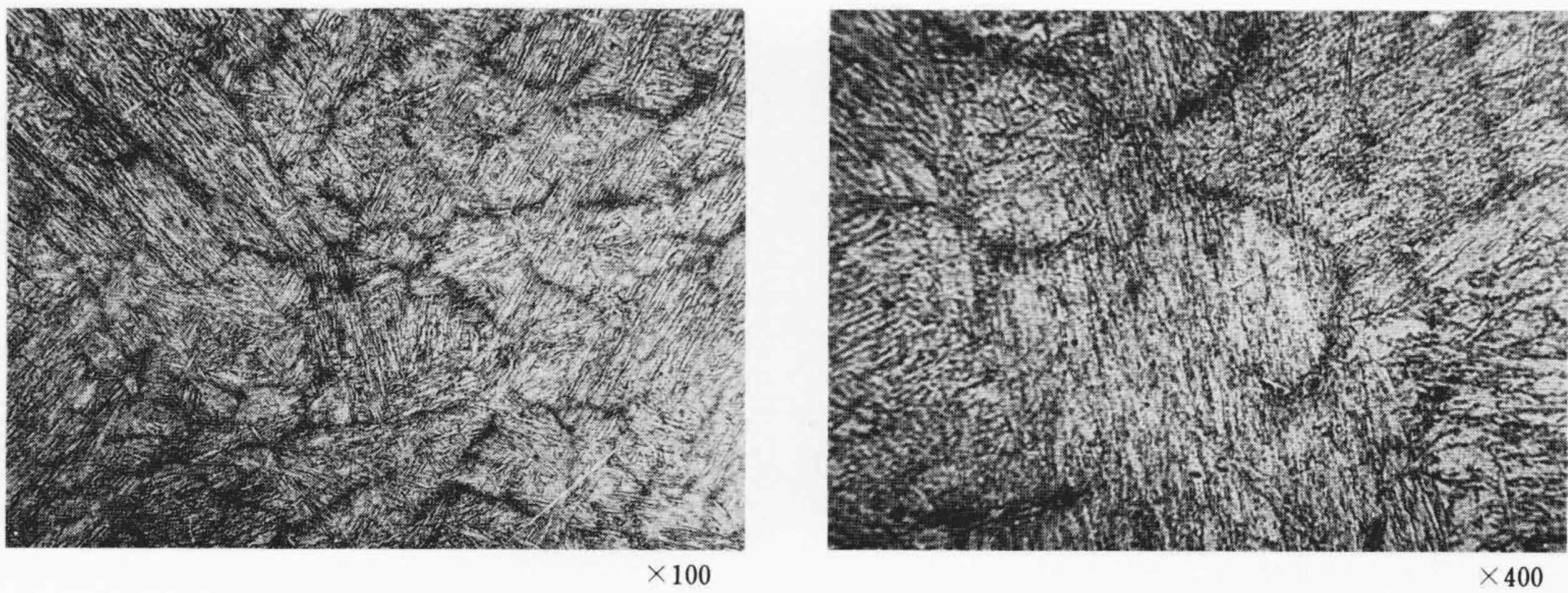


図2 鋳鋼製ダイアフラムノズル翼の組織

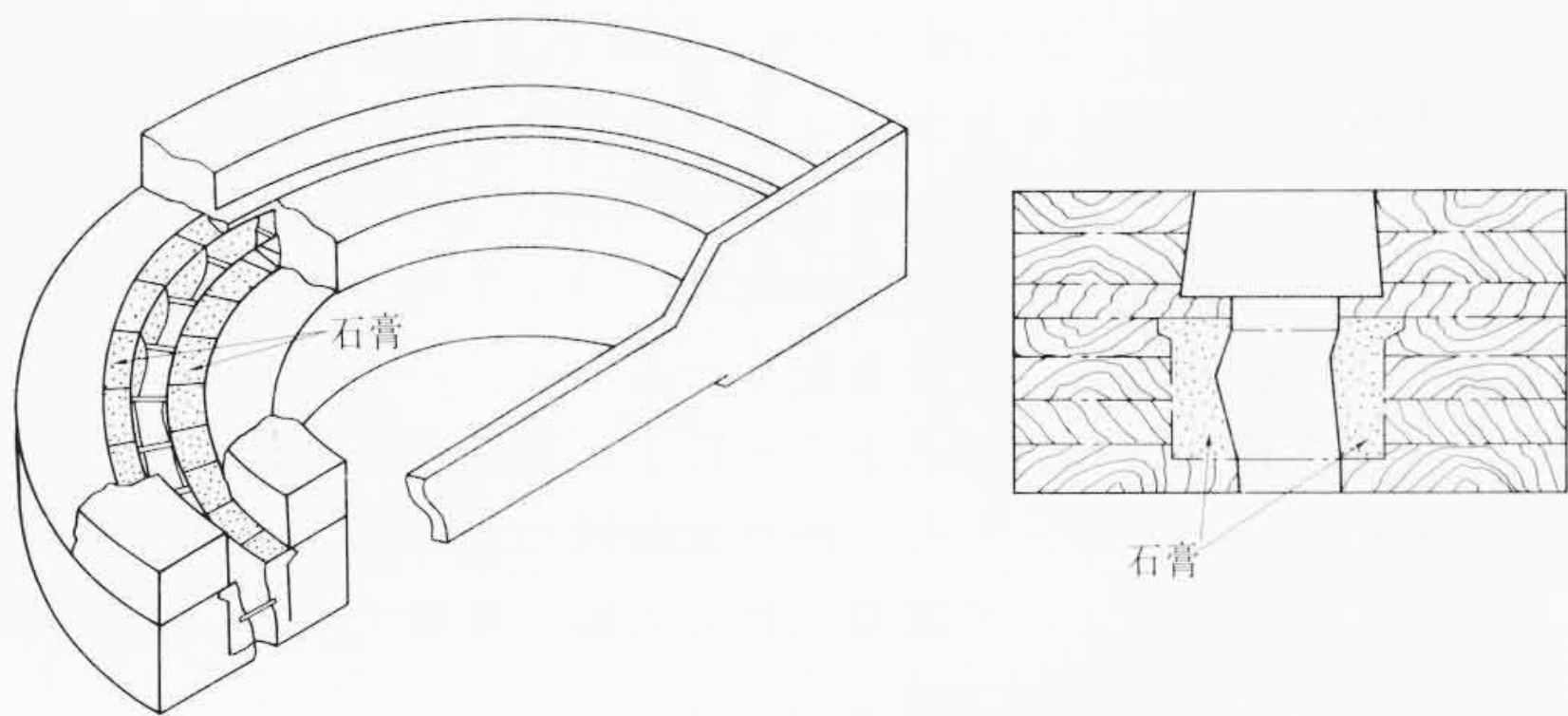


図3 蒸気通路部の石膏型

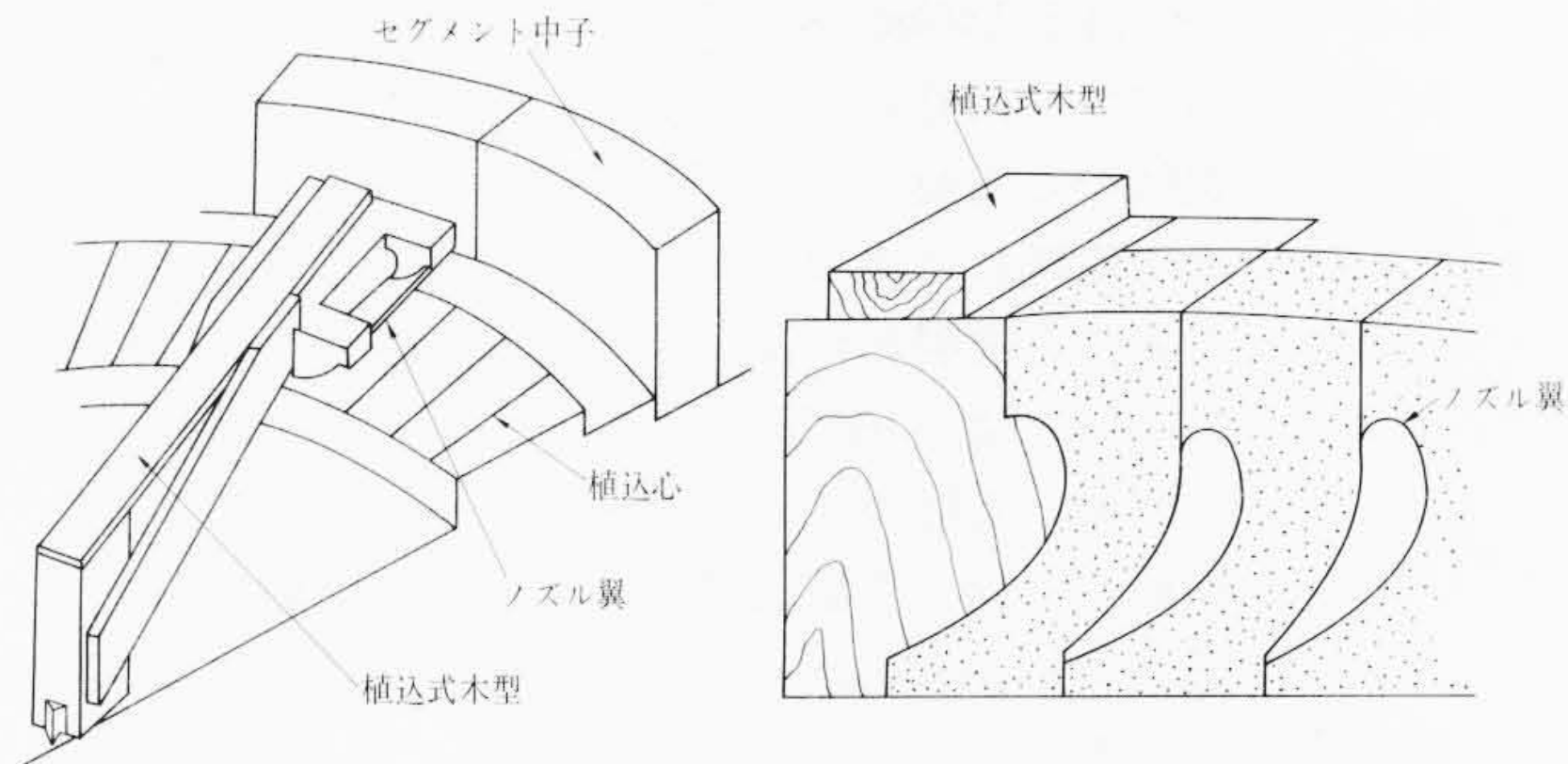


図4 植込式木型による蒸気通路部造型法

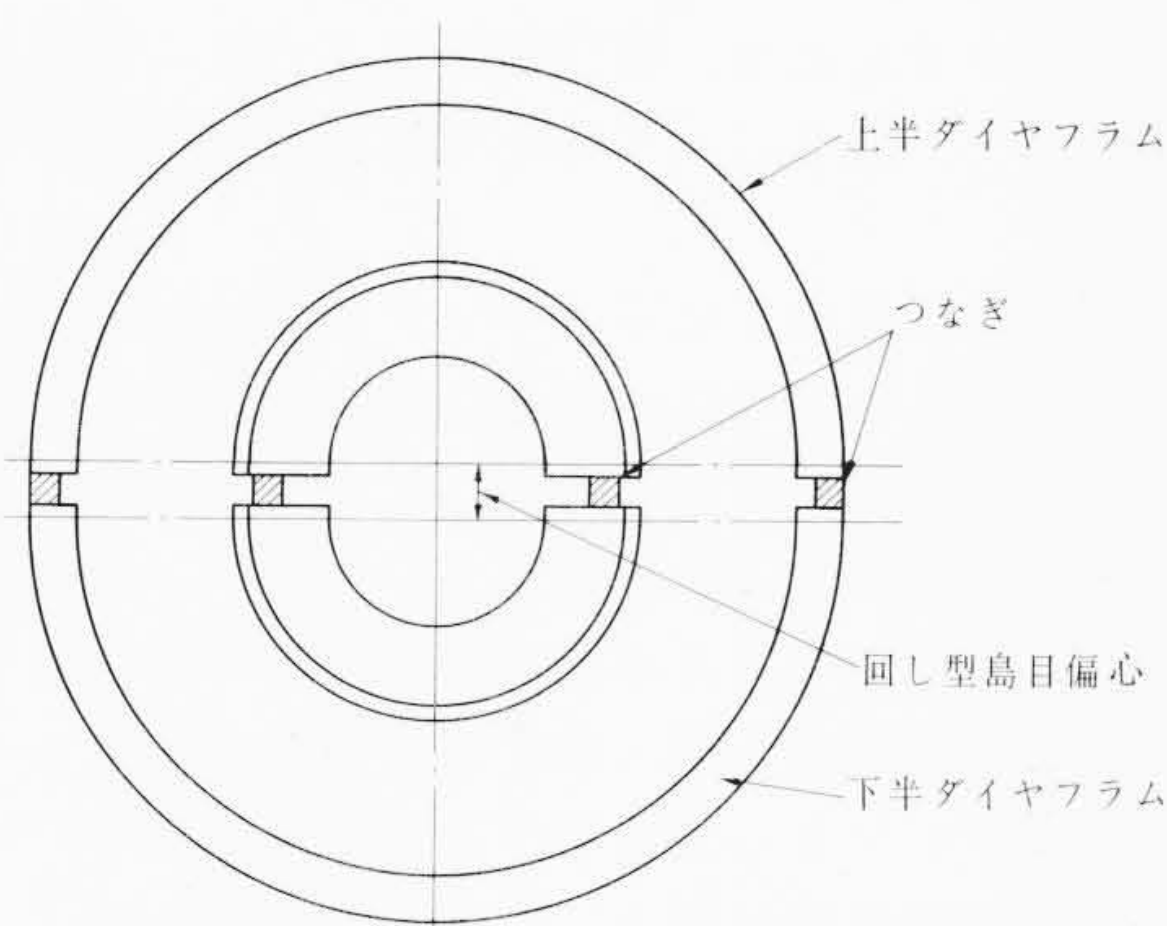
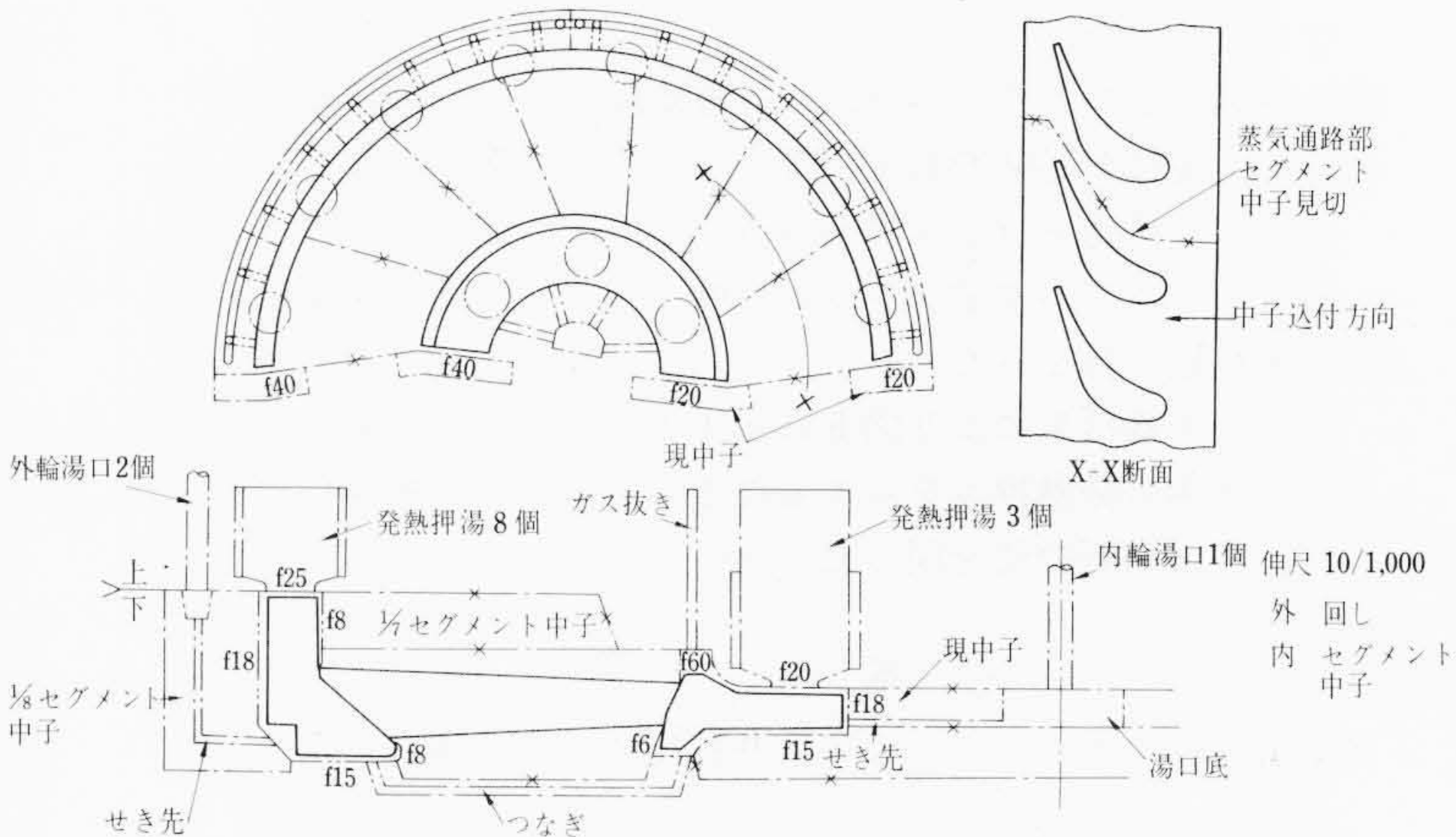


図5 上半下半ダイアフラム一体铸造様式



注：f○は仕上しろ○mmを示す。

図6 セグメント中子方式を用いたダイアフラムの製造方案

3. ダイアフラムの製造方案

ダイアフラム製作において最も重要な点は寸法精度のきびしい蒸気通路面、すなわちノズル翼铸ぐるみ部の造型方法である。従来この部分の木型様式としては蒸気出口側を下型にして造型する方式を採用し、ノズルの有効長さにより表3に示すように区分してきた。

石膏(セッコウ)型半リング現型は蒸気通路部を石膏型によって成形したもので図3はその中子型を示したものである。

植込式木型方式はノズルの有効長さが300mm以上の場合、ノズル翼の重量が増し石膏型としては木型の強度上むりがあるので採用された方法で図4はその造型法を示したものである。この方法は回し型で下型を作り、ピッチ割出しゲージで植込心をけがき、ノズル翼を固定した盛付木型をけがき線に合わせてセットし造型する。ノズル翼を1枚ごとに同じ手順を繰り返して造型するものである。

石膏型半リング現型、植込式木型いずれの方式の場合も図5に示すように外型を半リングずつ島目を偏心して回し型で造型し、

表3 模 型 様 式

ノズルの有効長さ (mm)	外 型	蒸 気 通 路 部
300 以下	回 し 型	石膏型半リング現型
300 以上	回 し 型	植 込 式 木 型

接合面につなぎをつけて上半、下半ダイアフラムをリングにして铸造する方式を採用してきた。

今回製作した原子力ダイアフラムはノズル翼の長さが全長1,119mm単重45kgという超大物であるため、従来の植込式木型方式では寸法精度の確保が困難であり、また後述のように铸物砂にフラン樹脂を粘結剤とした自硬性砂を使用するため造型能率上にも問題点があった。

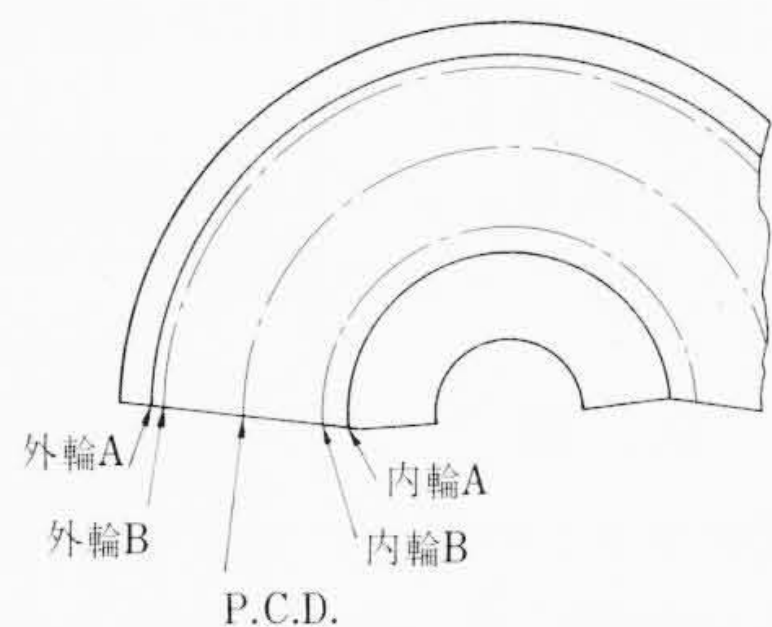
これらの点を考慮して原子力ダイアフラムの製造方案を図6に示すように計画した。

(1) 木型方案

- (A) 伸尺は従来のダイアフラムと同様10/1,000を使用した。
- (B) 蒸気通路部は半リングを7等分するセグメント中子方式を

表5 原子力ダイアフラムノズル翼寸法チェック基準

	測定位置	測定時期		
		木型	造型	製品
ピッチ	外輪 A		$\bigcirc \pm 1\%$	
	外輪 B			$\bigcirc$
	P. C. D.	$\bigcirc \pm 0.5\%$	$\bigcirc \pm 1\%$	$\bigcirc$
	内輪 B			$\bigcirc$
	内輪 A		$\bigcirc \pm 1\%$	
スロート	外輪 A		$\bigcirc \pm 1\%$	
	外輪 B	$\bigcirc \pm 1.5\%$		$\bigcirc$
	P. C. D.	$\bigcirc \pm 1\%$	$\bigcirc \pm 1\%$	$\bigcirc$
	内輪 B 1	$\bigcirc \pm 1\%$		$\bigcirc$
	" B 2	$\bigcirc \pm 1\%$		$\bigcirc$
	" A 1			
	内輪 A 2			



注：○印寸法チェック位置

+x%は限界ゲージの図示寸法に対する公差を示す
-y

×100



×400

図9 NiCr入り特殊鉄製ダイアフラム本体組織

6. 溶解および鑄込

前述のようにこのダイアフラムの材質はNi約1%、Cr約0.3%を含む特殊鉄である。溶解時の目標成分は、ノズル翼の鑄ぐるみ状況をよくするため、C、Siは規格の高目をねらい、材料配合も鋼くずをできるだけ少なくして新銑を用いるように計画した。出湯時には0.3%のFe-Siの接種を行なった。

鑄込は外輪と内輪の湯口をかけぜきでつなぎ、必要湯量をあらかじめかけぜきにためた後、ストッパを抜いて本体の注湯を行なった。鑄込温度はノズル翼の肉厚、寸法の大きいことを考慮して鑄ぐるみをよくするため従来より15°C高目の1,325°Cを採用した。温度の測定はすべてとりべ内でイマージョンパイロメータを使用して行なった。

鑄造したダイアフラムの成分、機械的性質および組織の一例を示したのが表6、図9である。

なお成分と引張強さのばらつきを32個のデータについて調べた結果は図10に示すとおりである。低周波溶解炉を使用しているので、そのばらつきは非常に少なくキュボラの場合の約1/2の範囲にはいっている。

7. 鑄仕上および熱処理

フラン樹脂を用いたノーベークサンドの砂落としは非常に良好であった。ただし、ノズル翼の先端は最終仕上げの厚さに仕上げられているので鑄仕上げ作業および運搬時の取り扱いについては、曲り、き裂の防止に十分の注意を要する。

原子力ダイアフラムのひずみ取り焼鈍曲線は図11に示すとおりである。焼鈍前後の内輪、外輪の残留応力をグナート法により測定した。その結果は図12に示すとおりである。ひずみ取り焼鈍により各部の残留応力は大幅に減少している。

ダイアフラムの外観写真は図13に示すとおりである。

表6 原子力ダイアフラム成分および機械的性質

試番	成分 (%)							抗張力 (lbs/in ²)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	
H 26800	3.20	2.14	0.55	0.095	0.083	0.86	0.26	39,800
H 27700	3.20	2.12	0.54	0.092	0.047	1.05	0.29	38,700
K 49700	3.20	2.19	0.56	0.055	0.053	0.87	0.35	36,700
K 48300	3.19	2.06	0.56	0.055	0.054	0.91	0.36	41,400

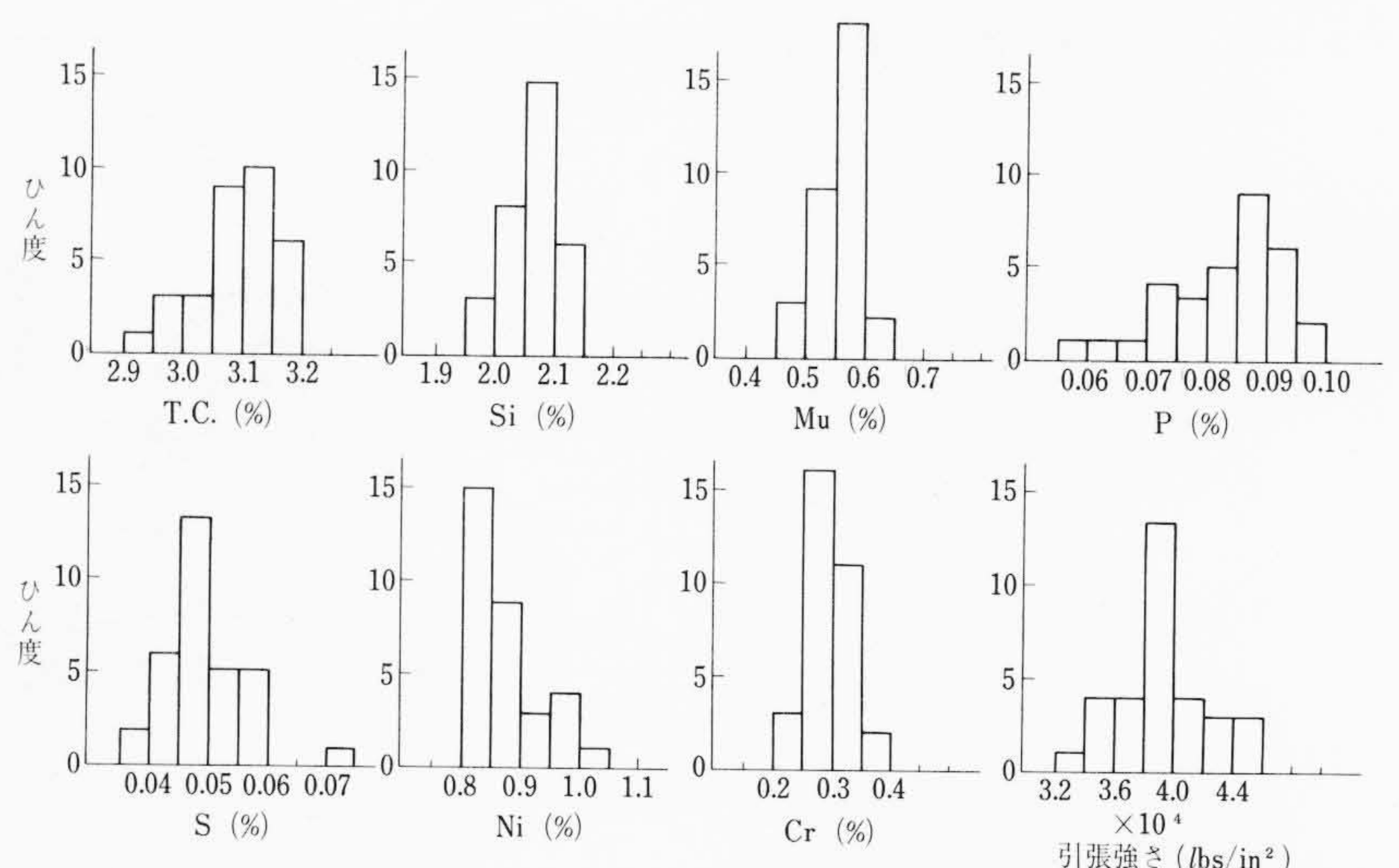


図10 ダイアフラム成分と引張強さのばらつき

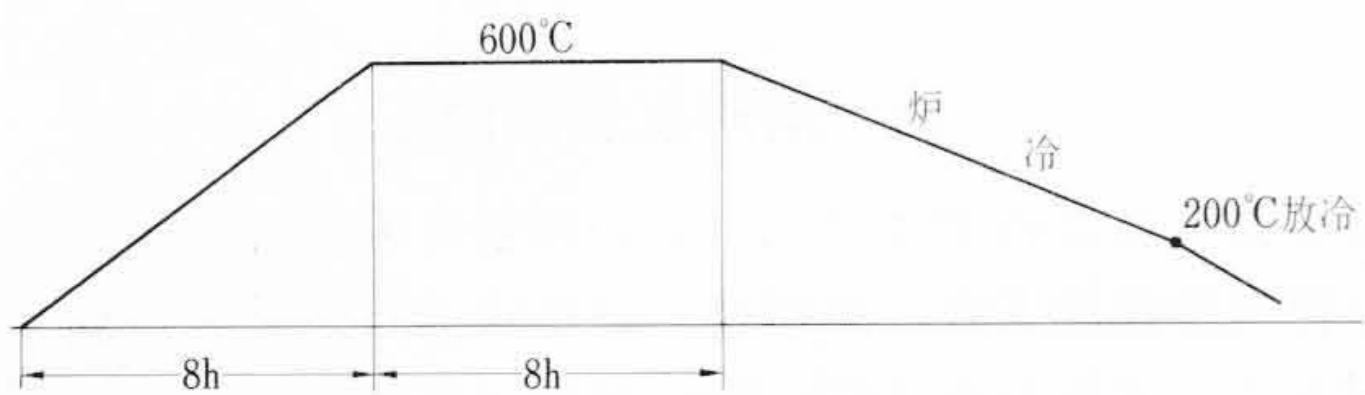
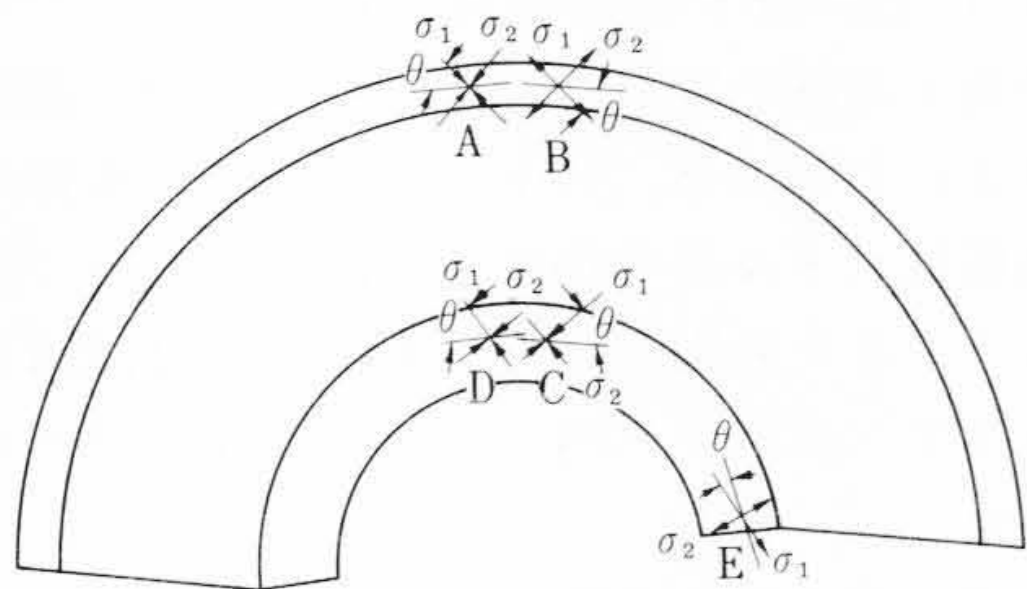


図11 ダイアフラム焼鈍曲線



測定位置		焼	鈍	前	焼	鈍	後
		σ_1 kg/mm ²	σ_2 kg/mm ²	θ	σ_1 kg/mm ²	σ_2 kg/mm ²	θ
外輪	A	-10.0	-8.9	40° 55'	—	—	—
	B	—	—	—	+2.0	+0.4	42° 10'
内輪	C	-8.9	-5.3	43° 45'	—	—	—
	D	—	—	—	-0.2	-0.8	41°
	E	—	—	—	+2.1	+1.6	4°

図12 ダイアフラム残留応力測定結果

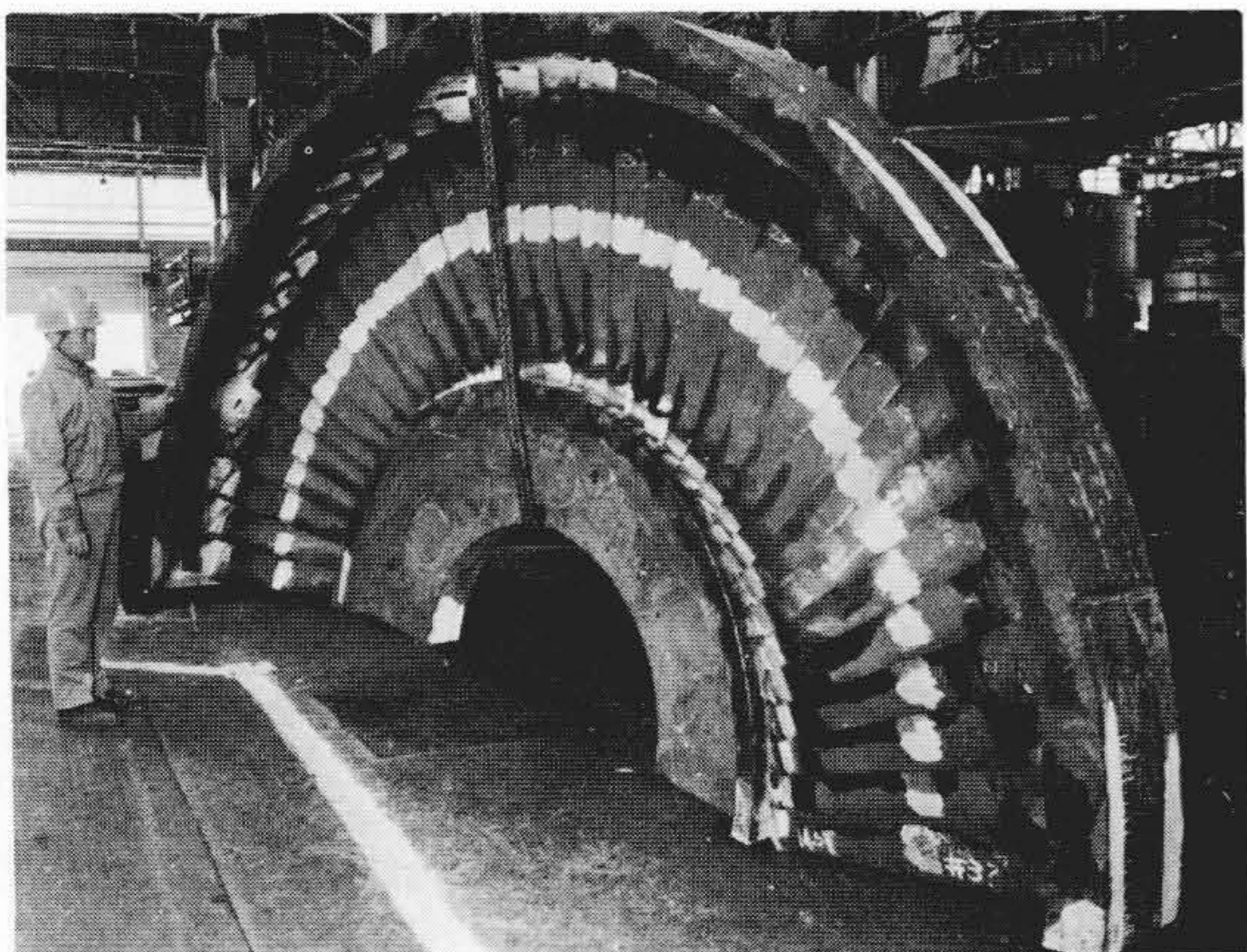


図13 原子力タービン用ダイアフラム外観

8. 造型方法の改善

上記に示す作業により欠陥の少ない良好なダイアフラムを製作できたが、さらに製作過程における鑄造実績を検討し、造型能率

の向上、寸法精度の向上を図り、専用金わくの製作、蒸気通路部の新造型法の開発を行なった。

(1) 専用金わくの製作

原子力ダイアフラムの造型能率を向上し、鑄物砂の使用量を節減するため専用金わくを製作した。金わくの大きさはノズル高さ38"ダイアフラム半リングを造型するのに必要な大きさとし、上型用金わくは押湯に相当する部分は棧を避けて、わくの高さをできるだけ低くして製作した。その結果、上型の綱金、つり棒は不要となり、必要な押湯高さは押湯周辺にN砂を盛り上げて造型することにより砂使用量を節約するとともに造型能率を向上することができた。

(2) 蒸気通路部新造型法の開発

ノズル高さ38"ダイアフラムにおいては、蒸気通路部に1/8セグメント中子組立方法を採用したが、この造型法の欠点を補うために新造型法を開発した。新造型法は下型面にゲージを置き、これを案内にしてノズル翼をセットし、下型面上に直接蒸気通路部を造型する方式で表7に示すようにセグメント中子方式の欠点を補うように計画された。図14は新造型法を適用した場合の方案図を示したものである。

新造型法を適用した結果、ノズル翼各部寸法誤差は非常に減少し造型能率も向上することができた。

9. 結 言

以上、原子力ダイアフラムの製造についてその概要を記述した。従来のダイアフラムに比較して、格段に大きなピッチサークル径、ノズルの有効長さの設計、仕上げノズル翼の採用、NiCr入りの特殊鑄鉄の使用など、種々の点から記録的製品であったが、従来のダイアフラム製造技術に基づき、試作品の鑄造、鑄物砂の改良、蒸気通路部の新造型法の開発などを行ない慎重な作業を実施した結果、良品を製作することができた。

表7 セグメント中子方式と新造型方式との比較

セグメント中子方式	新 造 型 方 式
(1) セグメント中子の合せ目のノズル翼のピッチ、スロートの寸法精度が悪い。	連続造型を行なうことによって寸法精度が向上した。
(2) フラン砂が硬化する間作業が中断する。	砂の硬化時間を加味して連続造型を可能にした。
(3) 中子の運搬、取扱いが必要である。	盛付方式のため中子の運搬取扱いがなくなり、破損などの事故がなくなった。

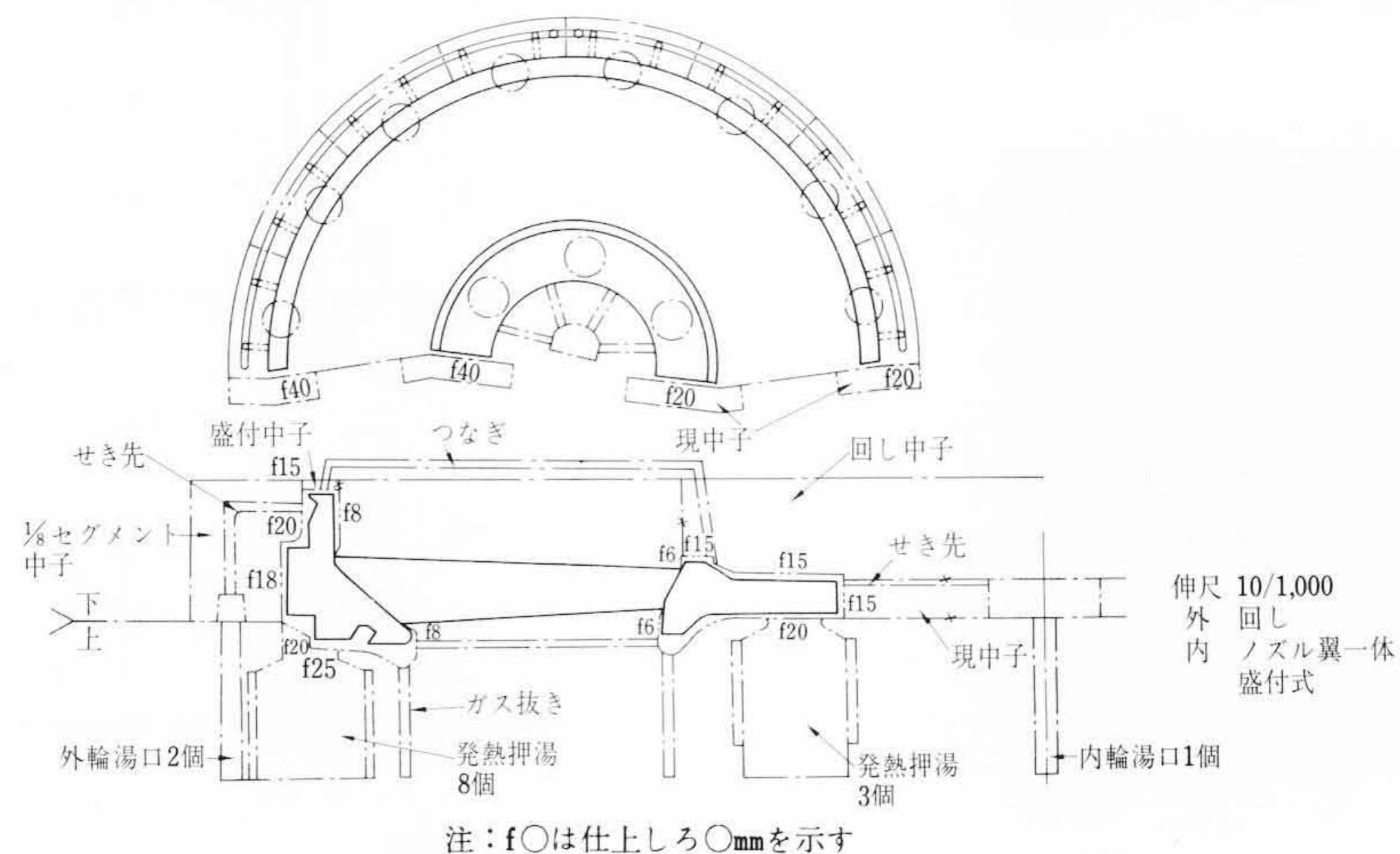


図14 蒸気通路部新造型方式を用いたダイアフラムの製造方案