

平成 2 0 年度

省エネ型油槽ポンプ駆動用蒸気タービンの技術開発

成果報告書

平成 2 1 年 3 月

(社)日本船用工業会

はしがき

本報告書は、競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成20年度に社団法人日本船用工業会が実施した「省エネ型油槽ポンプ駆動用蒸気タービンの技術開発」事業の成果をとりまとめたものである。

現在、スエズマックス型(15万トン)以下の中・小型タンカーの油槽ポンプ駆動用蒸気タービンは、カーチス単段型タービンが採用されているが、これは機関室のスペースがVLCCと比べて狭く、VLCCに搭載されているような効率の良いラトロー3段型タービンが高さの制約から設置できないためである。

そこで、本事業では、こうした高さ制限を克服する新型の3段型の蒸気タービンを開発し、約13%の効率改善をはかるもので、株式会社シンコーに委託して開発が行われた。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げる次第である。

平成21年3月

(社)日本船用工業会

目 次

1. 技術開発の目的	1
2. 技術開発の目標	2
3. 実施経過	2
3.1 蒸気タービンの仕様	2
3.2 蒸気タービンの設計	2
3.3 試験及び評価	2
3.4 実施期間	3
3.5 実施場所	3
4. 実施内容	3
4.1 蒸気タービンの設計	3
4.1.1 タービンロータ	3
4.1.2 翼	3
4.1.3 軸封装置	3
4.1.4 ノズル	3
4.1.5 タービンケーシング	4
4.1.6 軸受	6
4.1.7 調速弁ケーシングと調整弁	6
4.1.8 調速装置(ガバナ)	6
4.1.9 タービンベッド、配管	7
4.1.10 減速歯車(ピニオン軸、ホイール、ホイール軸).....	7
4.2 蒸気タービンの製作	8
4.2.1 蒸気タービンの重量	8
4.2.2 鋳造品の木型製作	9
4.2.3 機械加工.....	12
4.2.4 水圧試験.....	16
4.2.5 静的歯当試験.....	16

4.2.6	タービンロータ、ピニオン軸締結.....	16
4.2.7	釣合試験.....	17
4.2.8	組立.....	17
4.3	試験	23
4.3.1	蒸気タービンの仕様.....	23
4.3.2	負荷ポンプの仕様.....	23
4.3.3	試験装置.....	23
4.3.4	試験内容.....	26
4.3.5	試験結果.....	27
4.3.6	開放検査.....	31
5	性能検証システムの構築.....	37
5.1	モデル.....	38
5.2	解析条件.....	38
5.3	解析結果.....	39
6	まとめ.....	42
添付図		
1.	外形図 (OUTLINE DRAWING)	43
2.	部品図 (MATERIAL LIST)	44
3.	断面図 (SECTIONAL DRAWING)	45
4.	全高比較図	46

1. 技術開発の目的

現在、スエズマックス型(15万トン)以下のタンカーの油槽ポンプ駆動用蒸気タービンは、カーチス単段型タービンが採用されている。これは機関室のスペースがVLCCと比べて狭く、VLCCに搭載されているような効率の良いラト-3段型タービンが設置できないためである。

90年初めのバブル崩壊後はコストを優先した機器が採用されてきたが、97年の京都会議を転機として世界的に地球温暖化防止への取り組みが本格化し、産業界においてはエネルギー効率の向上が緊急の課題となっている。

又、21世紀になると原油価格の高騰が始まりこの7年間で3倍を超える異常上昇となり、タンカーの運航経費が大幅に上昇して海運業界の収益を圧迫することとなった。このため船主、荷主にはこれまでの価格一辺倒ではなく、イニシャルコストが少し高くなっても燃費の良いタービンのニーズが表面化してきている。

このような背景から、スエズマックス型以下の中・小型タンカーの狭い機関室にも設置可能な、設置高さを抑えた小型の高効率ラト-3段型タービンを新たに開発するものであり、タービン性能を改善し、燃費向上と環境改善を図ることを目的としている。

この3段型タービンは、現在のカーチス単段型タービンに比べ蒸気エネルギーを3段階に最適配分し、ノズル内で効率よく膨張させることで、与えられた熱エネルギーを有効に無駄なく仕事エネルギーに変換し、約13%の性能改善を達成するものである。

その結果、従来型のカーチス単段型蒸気タービンと比較して下記の使用蒸気量が削減できるので、ボイラー燃料の節約によりCO₂排出量を低減して環境改善に寄与する。

No.	船種 (DW)	油槽ポンプ 容量 x 全揚程 m ³ /h x m	駆動用 蒸気タービン 出力 x 回転数 kW x rpm	蒸気条件 (入口蒸気圧 x 温度 x 排気圧、蒸気量)					低減 蒸気量 t/h/隻 (3台)	改善率 (%)	
				従来型蒸気タービン			開発蒸気タービン				
				MPa x	x kPa	t/h/台	MPa x	x kPa			t/h/台
1	パナマックス 7万5千トン	2000 x 140	920 x 1560	1.42 x sat.	x -60	10.5	1.81 x sat.	x -60	9.1	4.2	13.3
2	アラマックス 11万トン	2800 x 135	1250 x 1330	1.42 x sat.	x -60	14.1	1.81 x sat.	x -60	12.3	5.4	12.8
3	スエズマックス 15万トン	3500 x 140	1600 x 1410	1.42 x sat.	x -67	17.1	1.81 x sat.	x -67	14.9	6.6	12.9

2. 技術開発の目標

- 1)13%の効率改善を図ること。
- 2)目標高さを2,300 mmとした小型化を行う。

これは、各船種の建造実績ある造船所に確認したところ、タービン全高が約2,300 mm程度であれば据付可能であることが判明したためである。さらに、船の有効スペースを変更しないで据付、配管できる構造とする。

3. 実施経過

3.1 蒸気タービンの仕様

開発対象としては15万トンスイマックス型外か-用の1600kW蒸気タービンとし、基本仕様を以下のように設定した。

- 1)型式：立形ラト-3段減速式衝動タービン
- 2)機名：RVR-0
- 3)蒸気条件：1.81 MPag × sat(210) × -67 kPa(500mmHgV)
- 4)出力×回転数：1600 kW × 7093/1410 rpm
- 5)蒸気消費量：14.9 ton/h

3.2 蒸気タービンの設計

下記の点に留意して設計を行った。

- 1)目標高さ2,300mm実現のためにタービンケーシング、調速弁ケーシング、減速車室の小型化。
- 2)タービンロータの小型化、及び50～100%の速度範囲で安全に使用可能な剛性・強度の確保。
- 3)性能改善を実現する翼プロファイル形状の決定、及び50～100%の速度範囲で安全に使用可能な堅牢・小型化。
- 4)加工工数低減、性能改善を実現するフィン形状を持つ軸封構造の決定、及び昇速時、連続運転時の安定した運転を実現する隙間決定。

3.3 試験及び評価

製品の油槽ポンプを負荷試験用ポンプとして性能試験を行い、評価を行った。

- 1)定格性能試験
- 2)負荷特性試験
- 3)排気圧力変更試験
- 4)ノズル変更試験
- 5)ラビリンスパッキン変更試験

6)速度変更試験

7)保安装置試験

3.4 実施期間

開始：平成 20 年 4 月 1 日

終了：平成 21 年 2 月 28 日

3.5 実施場所

(株)シンコー、大州工場

4. 実施内容

4.1 蒸気タービンの設計

4.1.1 タービンロータ

- 1)軸と翼車は、翼車厚みを最小にし、全長を短くするとともに剛性を高めるため一体鍛造構造を採用した。
- 2)油槽ポンプは 50～100%の速度範囲で運転されるので、剛性軸を採用した。
- 3)全長を短くするため軸と一体の剛接手にてピニオン軸と締結し、3 点支持軸受を採用した。

4.1.2 翼

- 1)流れ解析ソフト(SCRYU/Tetra)を活用した性能検証システムを構築するため、衝動速度に着目し、ノズルと翼を組み合わせた解析モデルを作成し、段落効率を予測した。
- 2)翼外周に装備するシュラウドは、製造工数低減のため翼と一体構造を採用した。

4.1.3 軸封装置

- 1)軸貫通部からの蒸気漏洩は性能が低下するので、流れ解析によりラビリンスパッキンのフィン形状を最適化した。
- 2)タービンロータは、加工工数低減のため溝がないシール構造を採用し、性能への影響を検証した。

4.1.4 ノズル

- 1)1 段ノズルは、顧客仕様(入口蒸気圧力×温度、排気圧力)の変化に柔軟に対応可能な組立式ノズルを採用するが、量産化をにらんで製造工数が少ない穿孔式ノズルを製作し、組立式ノズルとの性能差を検証した。

2)2、3段ノズルは、引抜き及びプレス成形したノズルピースを鋳込んで製作する鋳込式ノズルを採用した。

4.1.5 タービンケーシング

1)VLCC 用 3 段タービンから全高約 400mm 短くするため、タービンケーシング、蒸気室を一体化した。

VLCC 用では、別々に鋳造・機械加工したタービンケーシングと蒸気室を締結後、中ぐり加工にて仕上げている。

この構造から発生する下記 2 点の課題を解決した。

課題 1 . フランジ締結部があるため、全高が高くなる

課題 2 . 中ぐり加工を含むため、MC での自動加工が不可能

計画時のタービンケーシングの 1 部が、社内の五面加工機に搭載されているアングルヘッドの幅より狭いことが判明し、薄型のアングルヘッドを採用することで 1 部におさめることはできるものの、2 段ノズル嵌込部近傍(2 部)は加工不能と判明した(図 1)。

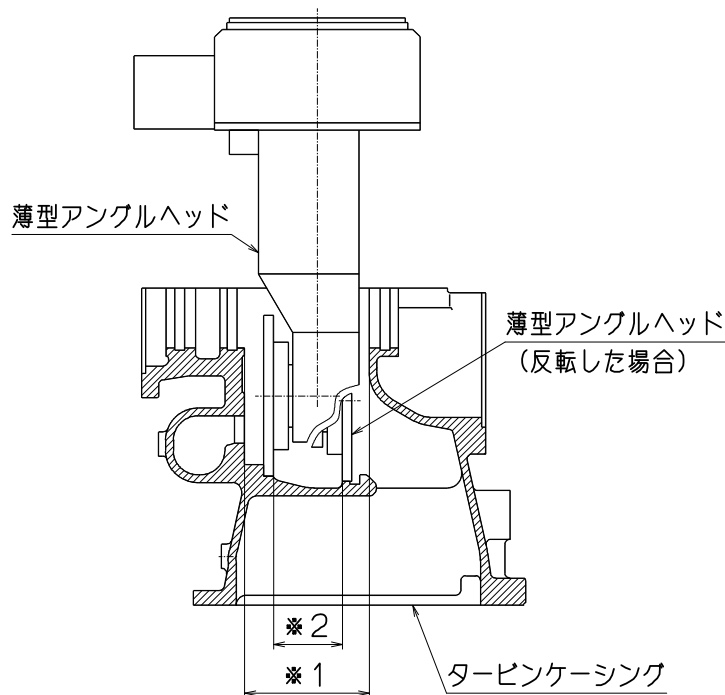


図 1 タービンケーシングとアングルヘッドの関係

そこで、2、3段ノズルはインナーケースに嵌め込む方式を採用し、MCでの自動加工が可能な構造とした(図2)。

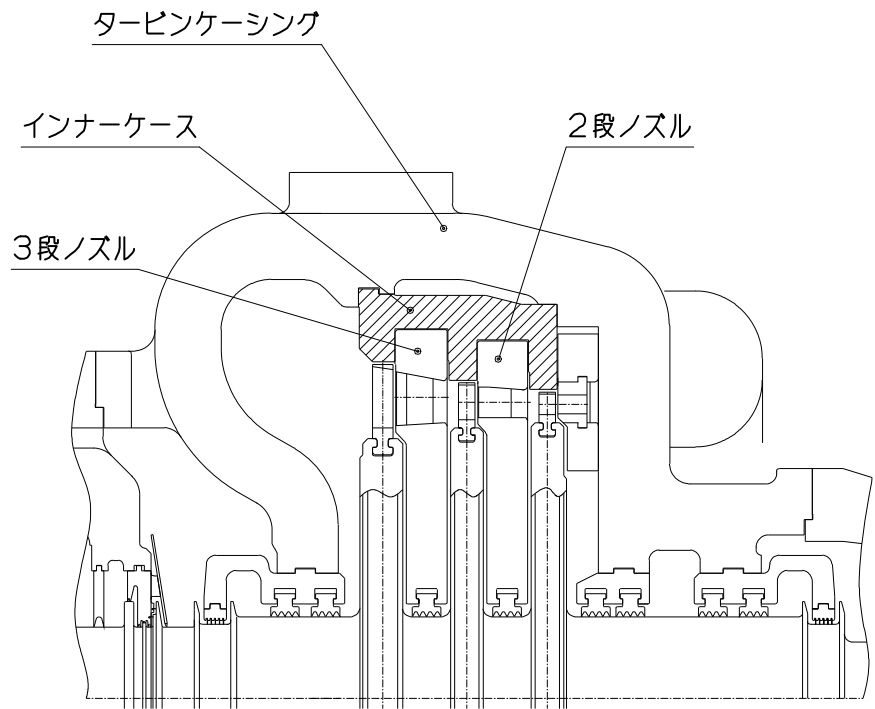


図2 インナーケースの構造

2) 蒸気室内での圧力損失は、利用可能な熱エネルギーが減少し性能が低下するので、流れ解析により蒸気室形状を最適化した。

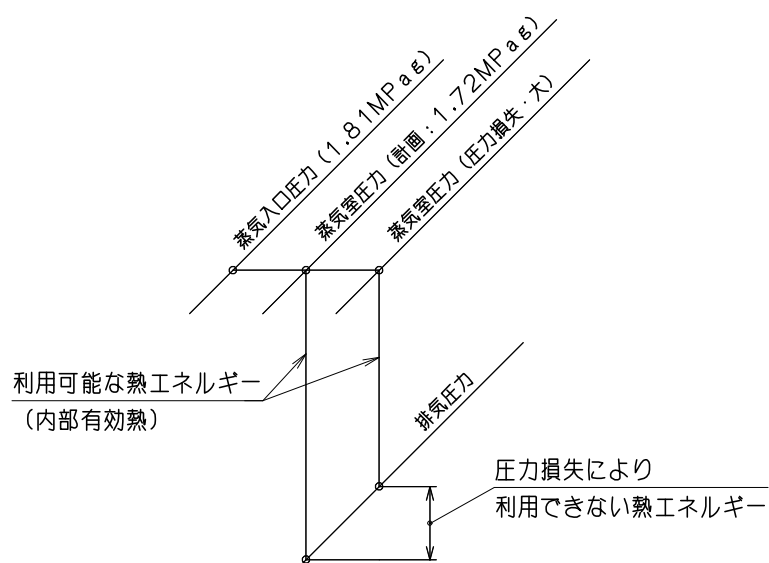


図3 蒸気タービンで利用できる熱エネルギー

4.1.6 軸受

VLCC 用 3 段タービンで実績があるすべり軸受を採用した。

4.1.7 調速弁ケーシングと調整弁

- 1) 船舶機関部配管-標準流速(JIS F 7101)に基づき、蒸気入口口径 150A を採用した。
調整弁ケーシング内の圧力損失が大きくなると性能が低下するので、流れ解析により調整弁ケーシングの形状を最適化した。
- 2) 大きな弁通過面積が確保できる単弁複座式を採用し、全ての運転範囲で安定した制御性を確保するため、蒸気力が常に調速弁・開の方向に作用するよう外弁径を内弁径より大きくしたアンバランス弁を採用した。

4.1.8 調速装置(ガバナ)

全高を低くしたことで調速弁と調速装置の距離が短くなったため、小さなレバー比でも調速できるよう制御力の大きい日本ウッドワードガバナ(株)製 UG25+を採用した。

これまでの調速装置は日本ウッドワードガバナ(株)製 UG10 を使用。

	調速装置	
	UG25+	UG10
制 御 力 (ト ル ク) N・m	37	16

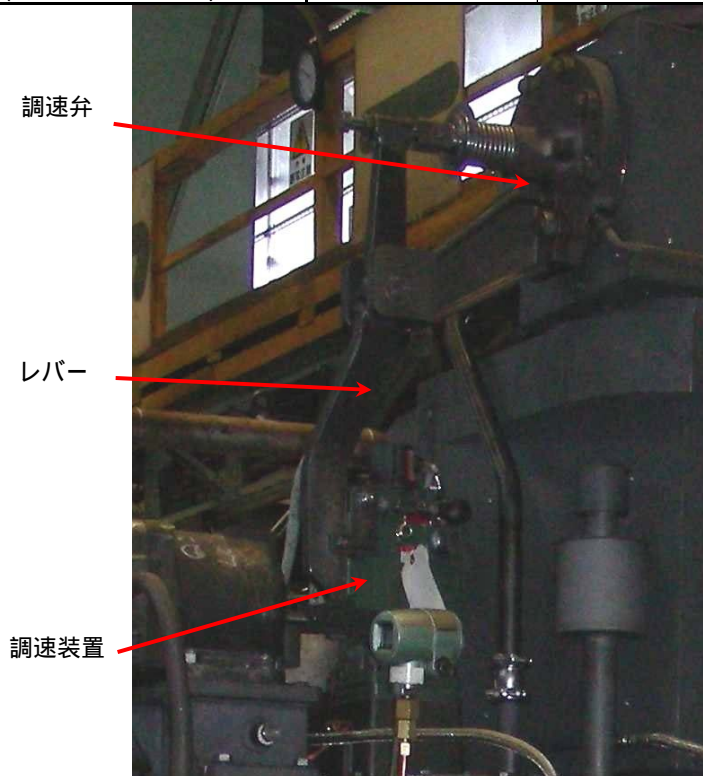


写真 1 調速装置

4.1.9 タービンベッド、配管

カーチス単段型蒸気タービンと据付寸法を同一とし、機内配管は極力タービンヘッドからはみ出ないように設計した。

4.1.10 減速歯車(ピニオン軸、ホイール、ホイール軸)

一段減速のはず歯歯車を採用し、下向きの蒸気スラスト力、及び自重に対向する歯すじとした。

	ピニオン軸	ホイール
種類	シングルヘリカル	
モジュール	5	
圧力角	20°	
ねじれ角	14°、左	
中心間距離 mm	513	
歯幅 mm	260	
歯数	33	166
材質	SNCM439	SF640B
熱処理	調質	
硬度(歯面) H _B	321 ~ 352	201 ~ 248
仕上げ方法	研磨	シェーピング
精度	JIS 1 級	

4.2 蒸気タービンの製作

4.2.1 蒸気タービンの重量

主要部品、及び完成品の重量を計測し、VLCC用3段タービンと比較して重量低減効果を評価した。VLCC用の3段タービンよりコンパクトな構造としたことで、主要部品については平均22%、完成品については17%の軽量化が実現された。

			重量		重量低減率
			試作機 (RVR-0)	VLCC用 (RVR-2)	
			kg	kg	%
主 要 部 品	タービンロータ (ピニオン軸締結後)	-	435	580	25
	タービンケーシング (試作機の重量は、 インナーケース含)	カバー側	312	307	-2
		本体側	622	853	27
	調速弁ケーシング	-	118	203	42
	軸受箱 (カバー側・本体側 一体で計測)	-	92	117	21
	減速車室	カバー側	300	400	25
		本体側	980	1210	19
完成品			5670	6800	17

4.2.2 鋳造品の木型製作

- 1) タービンケーシングは二つ割れ構造とし、調速弁ケーシングは一体構造を採用した。

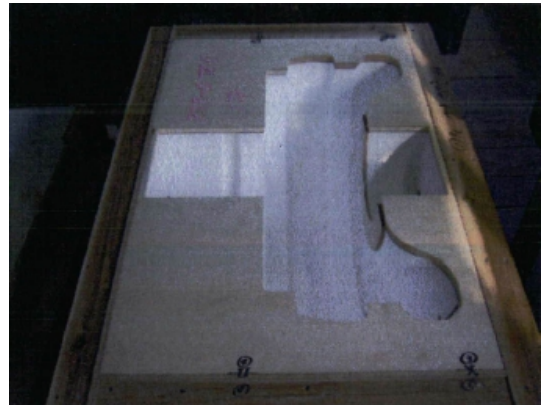
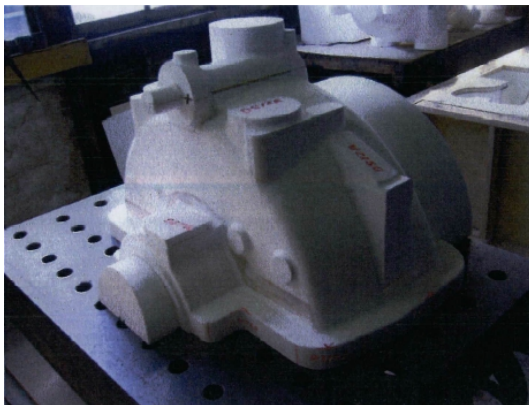


写真2 タービンケーシング

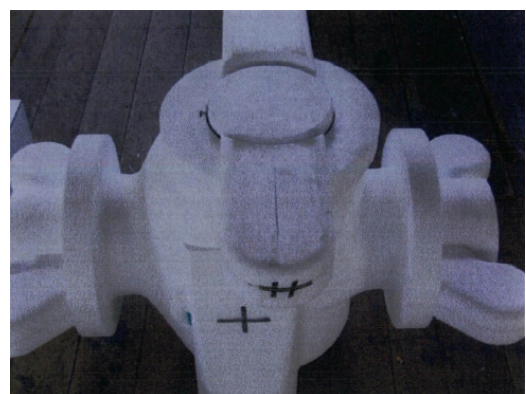
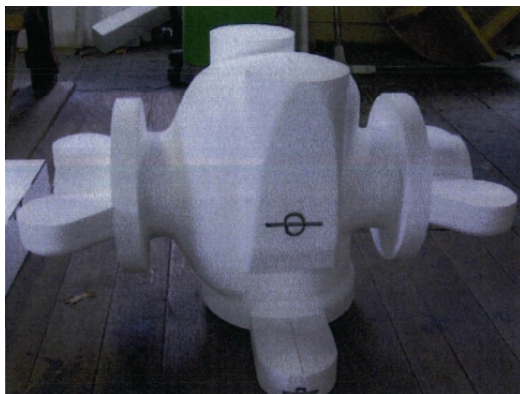


写真3 調速弁ケーシング

2)2、3段ノズル、軸受箱、インナーケース、減速車室は二つ割れ構造を採用した。



写真4 2段ノズル

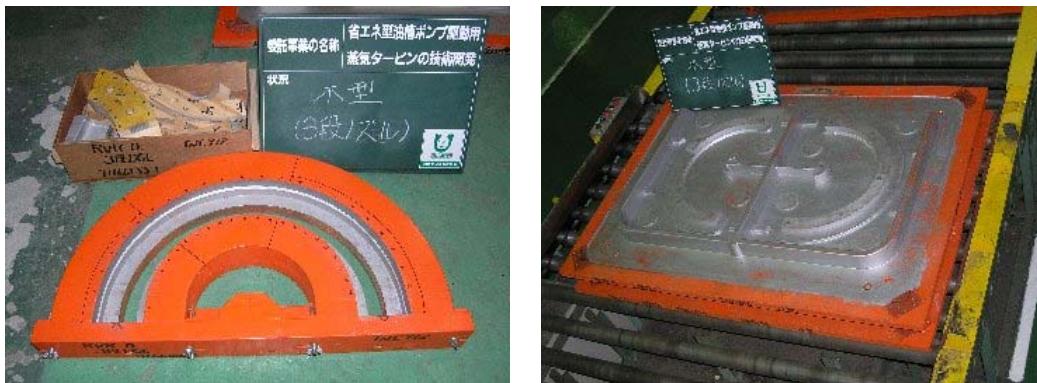


写真5 3段ノズル



写真6 軸受箱



写真7 インナーケース



写真8 減速車室

4.2.3 機械加工

(1) タービンロータ

クロムモリブデン鋼(3%CrMo)を鍛造後、機械加工。

溝加工時間は、段取り 0.5 時間、加工 1 時間で計 1.5 時間短縮できた。



写真9 タービンロータ

(2) 翼

ステンレス鋼(SUS410J1)角材から機械加工。タービンロータ外周溝に植翼後、タービンケーシングとの隙間管理のため、外周を旋盤加工。

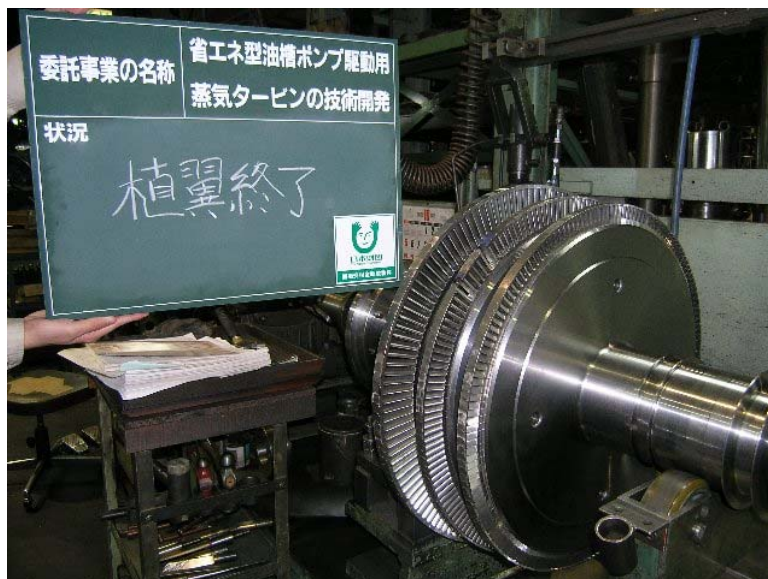


写真10 翼(植翼施工後)

(3) ノズル

組立式ノズルは、炭素鋼(S25C)のノズル板とステンレス鋼(SUS403)のノズルピースを各々機械加工し溶接接合。穿孔式ノズルは、ステンレス鋼(SUS403)のノズル板にリーマ穴を機械加工。

鋳込式ノズルは、引抜き及びプレス成形したステンレス製(SUS403、SUS430)のノズルピースを球状黒鉛鋳鉄(FCD400)で鋳ぐるみ、一体化。



写真 11 組立式ノズル



写真 12 穿孔式ノズル



写真 13 鋳込式ノズル(2段)



写真 14 鋳込式ノズル(3段)

(4) タービンケーシング

高温高圧用鋳鋼(SCPH2)で鋳造後、機械加工。



写真 15 タービンケーシング(加工中)



写真 16 タービンケーシング(加工後)

(5) インナーケース

球状黒鉛鋳鉄(FCD400)で鋳造後、機械加工。



写真 17 インナーケース(加工中)



写真 18 インナーケース(加工後)

(6) 調速弁ケーシング

高温高圧用鋳鋼(SCPH2)で鋳造後、機械加工。



写真 19 調速弁ケーシング (加工中)



写真 20 調速弁ケーシング (加工後)

(7) 減速車室

ねずみ鋳鉄(FC200)で鋳造後、機械加工。



写真 21 減速車室(加工中)



写真 22 減速車室(加工後)

(8) 軸受箱

ねずみ鋳鉄(FC200)で鋳造後、機械加工。



写真 23 軸受箱(加工中)



写真 24 軸受箱(加工後)

(9) 減速歯車(ピニオン軸、ホイール、ホイール軸)

ピニオン軸は、ニッケルクロムモリブデン鋼(SNCM439)を鍛造後、機械加工。
ホイール及びホイール軸は、炭素鋼鍛鋼(SF640B 及び SF540A)を鍛造。
機械加工したホイール軸をホイールに焼きばめ後、機械加工。



写真 25 ピニオン軸



写真 26 ホイール、ホイール軸

(10) タービンベッド

一般構造用圧延鋼板(SS400)を溶接後、機械加工。



写真 27 タービンベッド

4.2.4 水圧試験

試験結果は、20 ページ水圧試験検査記録を参照。

4.2.5 静的歯当試験

試験結果は、21 ページ静的歯当試験記録を参照。



写真 28 静的歯当試験

4.2.6 タービンロータ、ピニオン軸締結

タービンロータとピニオン軸の剛接手にリーマ孔を加工後、締結。



写真 29 タービンロータ、ピニオン軸締結

4.2.7 釣合試験

試験結果は、22 ページ釣合試験記録を参照。

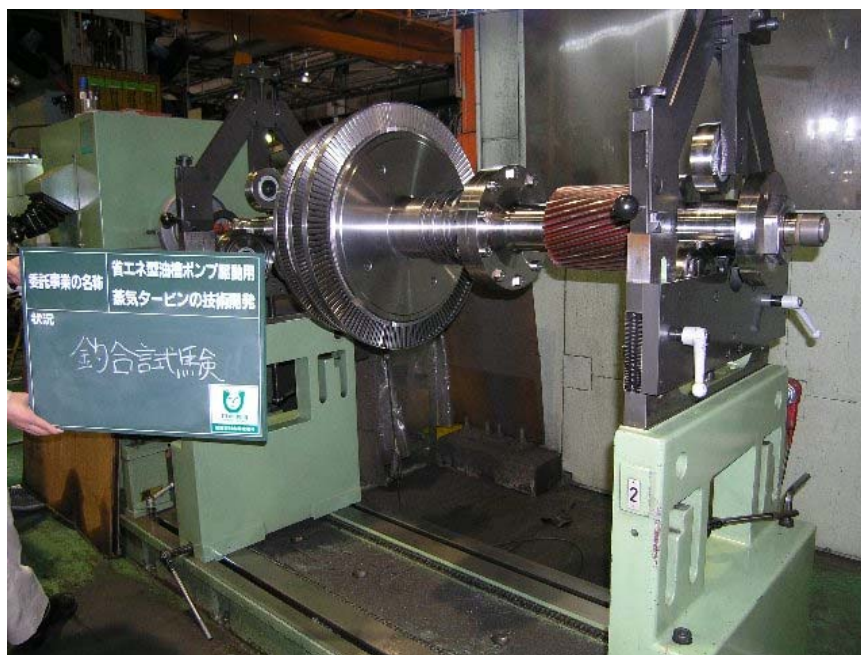


写真 30 釣合試験

4.2.8 組立

機械加工後、各部品を計画通り組み立て、完成。

各部組立隙間は、23 ページ隙間試験記録を参照。



写真 31 调速弁組立完了



写真 32 蒸気タービン・減速機組立中

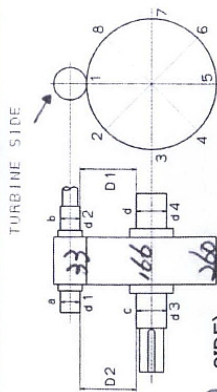


写真 33 組立完了

静的齒当試験記録

08年10月9日
タービン品質管理部

工番	機名	納入先	機番
Tanaka RTR-0	RTR-0	製作所	



軸間 レベル	計 画		実 測	
	D1 a-c	D2 b-d	D1 a-c	D2 b-d
シャフト	±0.02		0	0.01
バックアップ	d1	d2	d1	d2
	8.02	8.02	8.05	8.05
	108.85	108.85	108.85	108.85
	0	1	0	1
		2		2
		3		3
	0.40 ~ 0.63		0.49	0.49

承認	審査	作成

結果 :	確認
	合格

UNIT : mm

1	/
2	/
3	/
4	/
5	/
6	/
7	/
8	/

No.

タービン品質管理部

発行日 08年10月20日

釣合試験記録

タービン課課長殿

向先	船番	規格	仕様	生産本部タービン部		
ソニー	製作機		1600kV 7093/1410rpm	承認	審査	作成
工番	名称	機名	台数	石 08.10.21 堂	吉 08.10.20 山	吉 山
T0000010	CARGO.O.P.T	RTR-0	1			

主要項目

(1) 設定条件 : 右図の通り

(2) 試験回転数 : 920 rpm

(3) 回転体重量 : 435 kg

(4) 駆動用継手 : 25 m k p

(5) 許容不釣合

a. ディスク側 : 2.49 gr

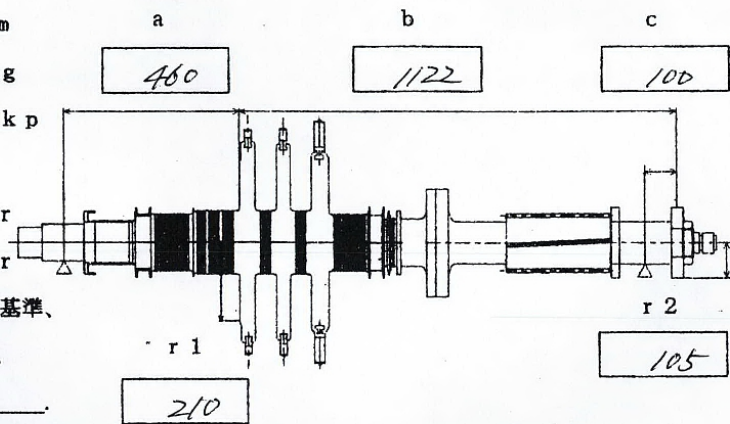
b. トリップ側 : 6.97 gr

(6) 不釣合角度 : 1列動翼止翼基準、
回転方向角度。

(7) 試験機番号 : H500

(8) 試験実施日 : 08年10月15日

(9) 作業者 : 讃岐竜三



試験記録

単位：度及びg r

機番	状況	不釣合量				備考		
		ディスク側		トリップ側			スタティック側	偶力
NO. 1	試験前	6°	27.6g	290°	2.9g	3°	26.2g	
	試験後	218°	0.2g	117°	0.3g	106°	0.2g	
NO. 2	試験前							
	試験後							
NO. 3	試験前							
	試験後							
NO. 4	試験前							
	試験後							

配布先	処 置	合格	付帯条件	タービン品質管理部	
品管		特別採用		承認	審査
合計		不採用		08.10.21	

株式会社ECCO

品質管理部

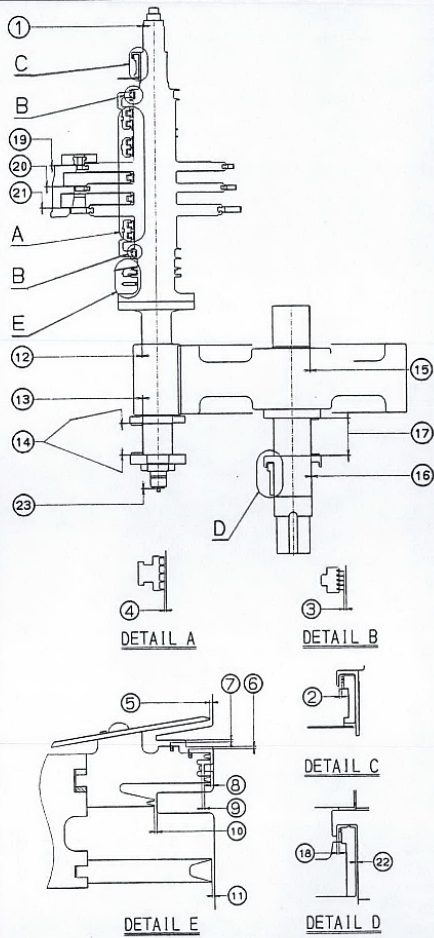
H20年10月17日

隙間試験記録

タービン品質管理部長 殿

生産本部 タービン部

向先	船番	規格	納期	承認部長	審査組長	作成担当
試作機				川崎	若宮	信岡
工番	名称	機名	台数	川崎	若宮	信岡
T0000010		RVR-0	1	08.10.17	08.10.16	08.10.17



計画値	1	2	3	4	5
機番	0.16~0.20	0.15~0.25	0.15~0.25	0.25~0.35	0.20~0.30
1016609	0.16	0.20	0.20	0.25	0.20
計画値	6	7	8	9	10
機番	0.20~0.50	0.20~0.50	0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30
1016609	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20
計画値	11	12	13	14	15
機番	0.20~0.25	0.16~0.21	0.16~0.21	0.20~0.30	0.16~0.21
1016609	0.20	0.16	0.16	0.25	0.16
計画値	16	17	18	19	20
機番	0.16~0.21	0.20~0.30	0.20~0.30	2.2~2.8	2.2~2.8
1016609	0.16	0.30	0.25	2.3	2.3
計画値	21	22	23	バックラッシュ	
機番	2.2~2.8	0.4~0.6	1.9~2.1	0.40~0.63	
1016609	2.4	0.5	2.0	0.25	
計画値					
機番					

機番	計画値									

配布先	
T品	1
合計	1

処 置

特別採用

再試験

付帯条件

計画機器 : サーチャー No. TS9399
 ダイアルゲージ No. N11033

計画値1, 12, 13, 15, 16 : 直径隙間

品質管理部

承認 課長

審査 主任

08.10.20

株式会社シンコー

4.3 試験

4.3.1 蒸気タービンの仕様

- 1) 型式：立形ラト-3段減速式衝動タービン
- 2) 機名：RVR-0
- 3) 蒸気条件：1.81 MPag x sat(210) x -67 kPa(500mmHgV)
- 4) 出力×回転数：1600 kW x 7093/1410 rpm
- 5) 蒸気消費量：14.9 ton/h

4.3.2 負荷ポンプの仕様

- 1) 型式：立形両吸込うず巻式ポンプ
- 2) 機名：KV450-3
- 3) 吐出量：3500 m³/h
- 4) 全揚程：140 m
- 5) 回転数：1410 rpm

4.3.3 試験装置

系統図を下記に示す。

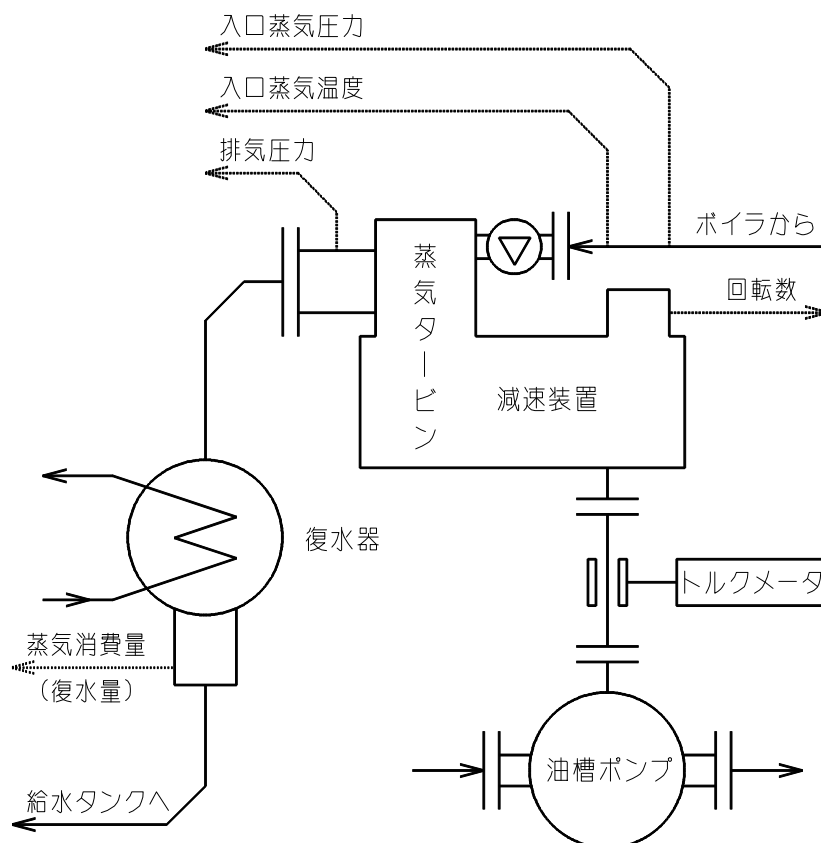


図4 試験装置系統図

蒸気及び冷却水配管を施工し、負荷ポンプと接続し、中間軸上部にトルクメータを設置(写真 34、35、36)。

各計測値は、試運転室のスクリーンに常時表示し、一定時間毎にパソコンに記録(写真 37)。



写真 34 試験中の蒸気タービン(その 1)



写真 35 試験中の蒸気タービン(その 2)

トルクメータ



写真 36 試験中の負荷ポンプ



写真 37 試運転室
(正面スクリーンに計測値を常時表示)

4.3.4 試験内容

1) 定格性能試験

蒸気条件、出力、回転数を仕様に合わせ、1時間の連続運転を行い、蒸気消費量を計測すると共に、各蒸気圧力(入口、蒸気室、1・2段ノズル後及び、排気室)並びに温度を計測。

性能試験結果は計測誤差を含めて設計計画値+3%以下であることを良とした。蒸気タービン出力は、非接触式のトルクメータにて計測。

蒸気消費量は、復水量を計測。

タービンロータ、ピニオン軸の軸振動、軸受箱振動、軸受温度及び騒音を計測。

2) 負荷特性試験

ポンプ吐出弁開度を調整して出力を変更し、各出力時の蒸気消費量を計測し、負荷特性を確認。

3) 排気圧力変更試験

性能確認のため、排気圧力を -60kPa(450mmHgV)、-73.3kPa(550mmHgV)に変更し、蒸気消費量を計測。

4) ノズル変更試験

ノズル形状が性能に及ぼす影響確認のため、1段ノズルは組立式、穿孔式2種類を準備し、蒸気消費量を計測。

5) ラビリンスパッキン変更試験

軸封装置最適隙間確認のため、半径計画隙間 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm の3種類のラビリンスパッキンを製作し、性能への影響、昇速時及び連続運転時の異常振動の有無を確認。

6) 速度変更試験

调速装置(W/W ガバナ UG25+)で、タービン速度が50~100%までなめらかに调速できることを確認。

7) 保安装置試験

保安装置の作動試験を実施し、蒸気タービンが安全に停止することを確認。

4.3.5 試験結果

1) 定格性能試験

項 目	計 測 場 所	単 位	設 計 値	管 理 値	時 刻				平 均		
					10:30	10:50	11:10	11:30			
周 囲 温 度	TA		-	-	5	5	5	6	5		
蒸 気	入口蒸気圧力	P1	MPag	1.81	-	1.82	1.81	1.81	1.81	1.81	
	入口蒸気温度	T1		210	-	210	210	210	210	210	
	蒸気室圧力	P2	MPag	1.72	-	1.72	1.71	1.71	1.71	1.71	
	第1段後圧力	P3	MPag	0.35	-	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	
	第2段後圧力	P4	MPag	0.04	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	排気圧力	P5	-kPa	-66.7	-	-66.2	-66.8	-67	-66.5	-66.6	
軸 受 温 度	軸 受 箱	T2		-	<75	50	50	50	50	50	
	ヒ°ニオ・タービン側	T3		-	<75	57	57	57	57	57	
	ヒ°ニオ・イント側	T4		-	<75	58	58	58	57	58	
	ホイール・タービン側	T5		-	<75	55	55	55	56	55	
	ホイール・イント側	T6		-	<75	45	46	46	45	46	
潤 滑 油 圧 力	P6	MPag	0.15	0.1~0.2	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15		
油 冷 却 器	油 温 度	入口側	T7		-	-	48	49	49	52	50
		出口側	T8		-	<50	39	39	39	38	39
回 転 数	N	rpm	1410	-	1412	1412	1413	1413	1413		
蒸 気 消 費 量	G	kg/h	14900	-	15285	15322	15317	15289	15303		
出 力	P	kW	1600	-	1601	1618	1606	1590	1604		
軸 振 動		μm p-p	-	<80	12.9	13	13.7	15	13.7		
		μm p-p	-	<80	12.9	13	13.5	15	13.6		
軸 受 箱 振 動		μm p-p	-	<30	-	-	-	8	8		
		μm p-p	-	<30	-	-	-	7	7		
		μm p-p	-	<30	-	-	-	6	6		
騒 音		dB(A)	-	<105	-	-	-	95	95		
		dB(A)	-	<105	-	-	-	94	94		
		dB(A)	-	<105	-	-	-	96	96		

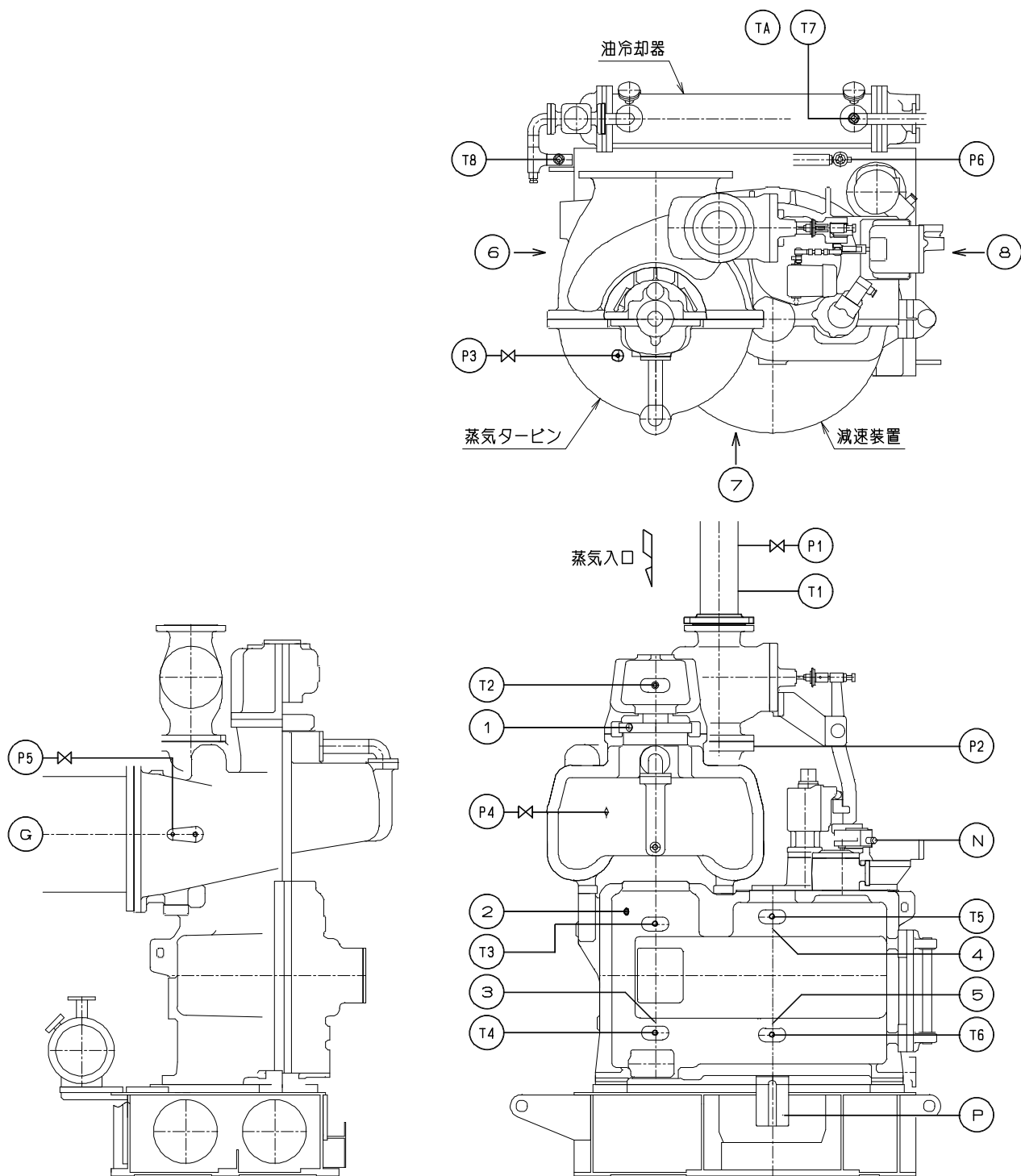


図9 計測位置図

蒸気消費率(単位出力当たりの蒸気消費量)で性能評価を行う。

計 画 : 14900 kg/h / 1600 kW = 9.31 kg/kW-h

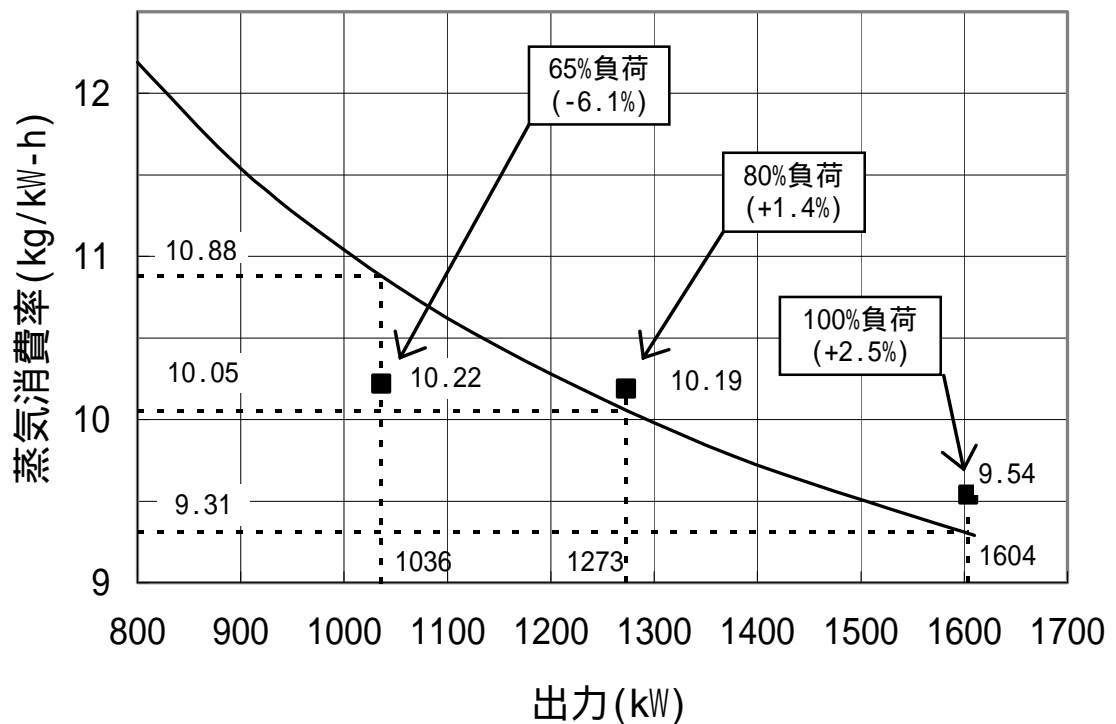
試験結果 : 15303 kg/h / 1604 kW = 9.54 kg/kW-h

計画 9.31 kg/kW-h に対して、試験結果 9.54 kg/kW-h であった。

軸振動は最大 15 μmp-p、軸受箱振動は最大 8 μmp-p、軸受温度は最大 58 、騒音は最大 96 dB(A)であった。

2) 負荷特性試験

負荷を変更した場合の蒸気消費率曲線、及び試験結果より算出した蒸気消費率を下記に示す。



注 1 . 印は試験結果を示す。

2 . ()内の数字は、設計計画値に対する差を示す。

3) 排気圧力変更試験

計画値、及び試験結果より算出した蒸気消費率を下記に示す。

				排気圧力		
				-60 kPa (450 mmHgV)	-67 kPa (500 mmHgV)	-73.3 kPa (550 mmHgV)
蒸気消費率	試験結果	W	kg/kW-h	9.86	9.54	9.42
	計画値	W ₀		9.63	9.31	9.16
W / W ₀			%	2.4	2.5	2.8

4) ノズル変更試験

計画値、及び試験結果より算出した蒸気消費率を下記に示す。

				組立式ノズル	穿孔式ノズル
				蒸気消費率	試験結果
計画値	W ₀	9.31			
W / W ₀			%	2.5	2.7

ノズル形状の違いによる影響は顕著に表れなかった。

5) ラビリンスパッキン変更試験

計画値、及び試験結果より算出した蒸気消費率を下記に示す。

				半径計画隙間		
				0.3 mm	0.2 mm	0.1 mm
蒸気消費率	試験結果	W	kg/kW-h	9.54	9.53	9.51
	計画値	W ₀		9.31		
W / W ₀			%	2.5	2.4	2.1

半径計画隙間が小さくなるにつれて蒸気消費率は小さくなっているものの、計測誤差の範囲内と言える。半径計画隙間 0.1 mm のラビリンスパッキン試験後の開放検査で、タービンロータとの接触跡が見受けられたため、最適半径隙間は 0.2 mm と決定した。

6) 速度変更試験

調速装置(W/W ガバナ UG25+)で、タービン速度が 50 ~ 100% 速度までなめらかに調速できることを確認した。

7) 保安装置試験

保安装置の作動試験を実施し、蒸気タービンが安全に停止することを確認した。

- a) オーバースピードトリップ
- b) 潤滑油圧力低下トリップ
- c) 排気圧力高トリップ

4.3.6 開放検査

性能評価試験後、開放検査を実施した。結果は、写真 38～49 に示す通りきわめて良好であった。



写真 38 タービンケーシングカバー・減速車室カバー取外時

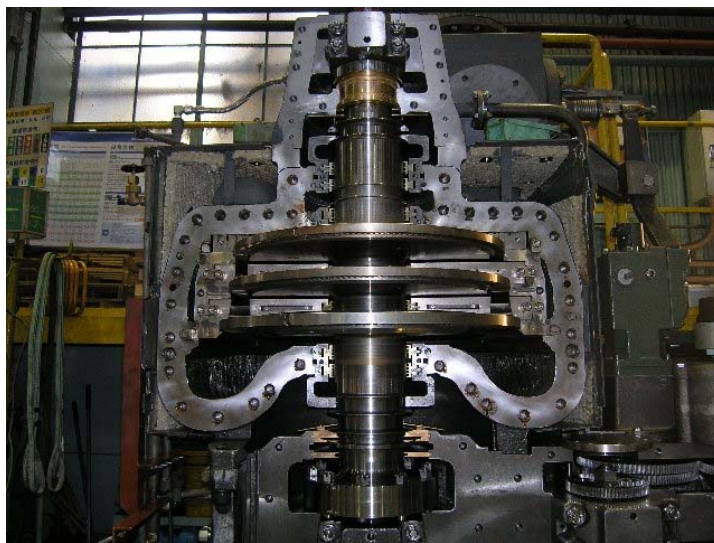


写真 39 タービン側(拡大)

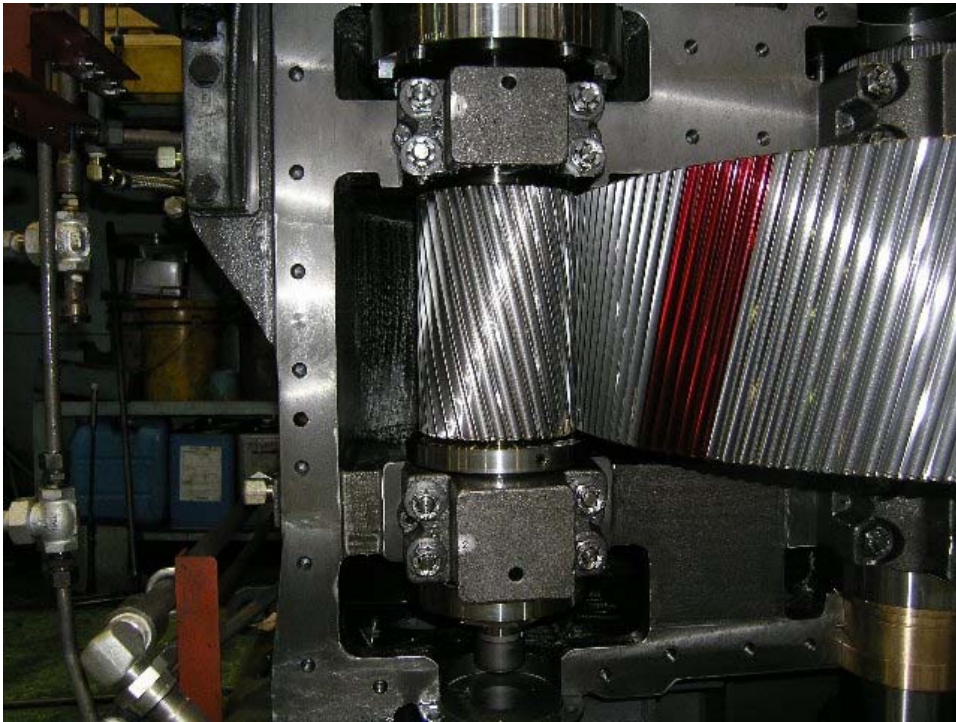


写真 40 ピニオン軸側(拡大)

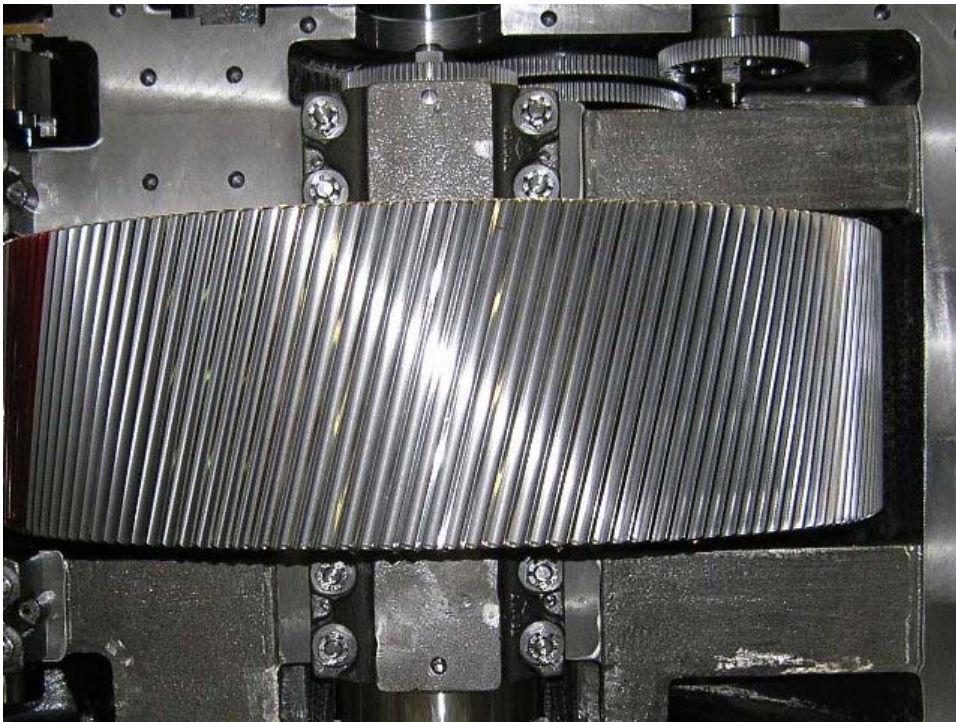


写真 41 ホイール・ホイール軸側(拡大)



写真 42 ラジアルメタル(軸受箱)



写真 43 ラジアルメタル(ピニオン軸・反負荷側)



写真 44 ラジアルメタル(ピニオン軸・負荷側)



写真 45 ラジアルメタル(ホイール軸・負荷側)



写真 46 スラストメタル(ピニオン軸・反負荷側)



写真 47 スラストメタル(ピニオン軸・負荷側)



写真 48 スラストメタル(ホイール軸・反負荷側)



写真 49 スラストメタル(ホイール軸・負荷側)

5. 性能検証システムの構築

蒸気タービンの性能を製作前に予測するためには、翼プロファイル形状の違いが性能に与える影響を把握する必要がある。そこで、ノズルと翼を組み合わせた解析モデルを段落毎に作成し、流れ解析を活用した性能検証システムを構築することを試みた。

速度三角形は、蒸気と翼の速度関係を表すベクトル線図で、蒸気が翼に作用する力を求めるのに使用する。ノズルから出た蒸気が、周速度 U で回転している翼に絶対速度 C_1 、相対速度 W_1 で流入し、絶対速度 C_2 、相対速度 W_2 で流出する場合の速度三角形を下图に示す。

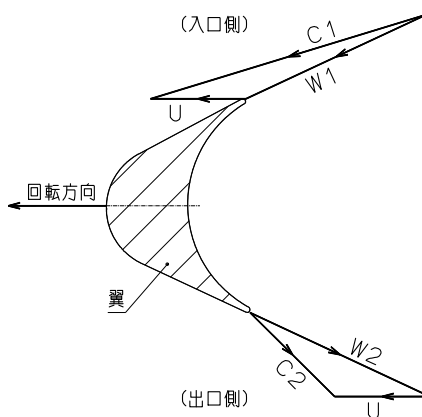


図 10 速度三角形

翼に作用する力は下記の式で表される。

$$(\text{翼に作用する力}) = (\text{蒸気量}) \times (\text{衝動速度})$$

図 10 の速度三角形を書き換え、翼に作用する蒸気の衝動速度を求めると下图となる。

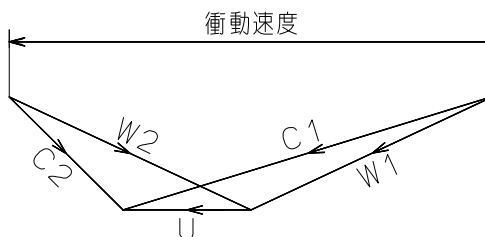


図 11 衝動速度

5.1 モデル

ノズルと翼を組み合わせた 3 次元 CAD を作成後、流路を抽出し解析モデルとした。

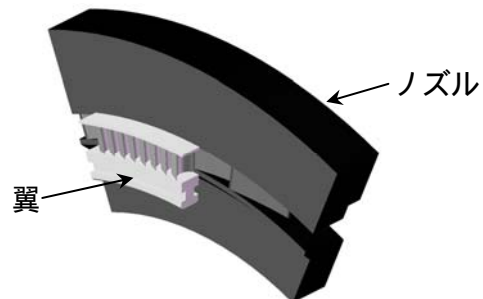


図 12 3次元 CAD で作成した部品図

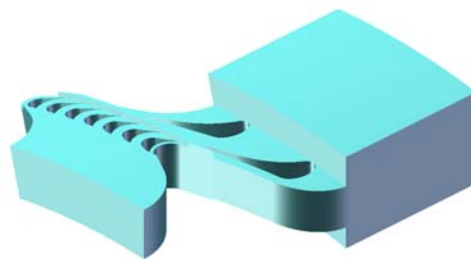


図 13 解析モデル図

5.2 解析条件

- a) ノズル入口 : 1.72 MPag x 208
- b) 翼 出 口 : 0.35 MPag
- c) 回 転 数 : 7093 rpm
- c) 側 面 : 周期境界(円周方向流れは連続)
- d) 壁 面 : 静止壁(滑らかな壁)

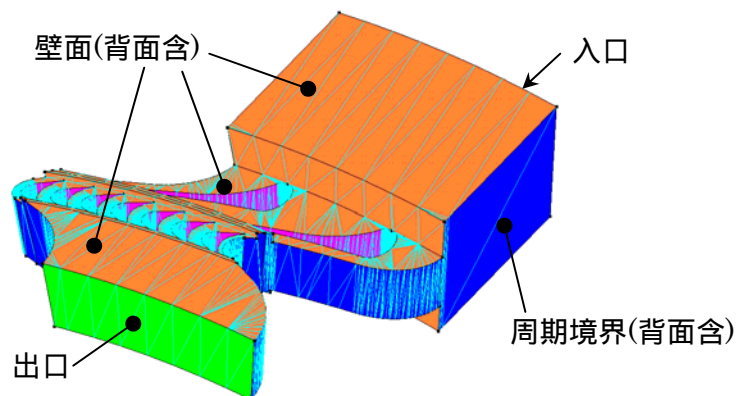


図 14 解析条件図

5.3 解析結果

速度分布を下記に示す(翼の回転は図の右側から左側の向き)。

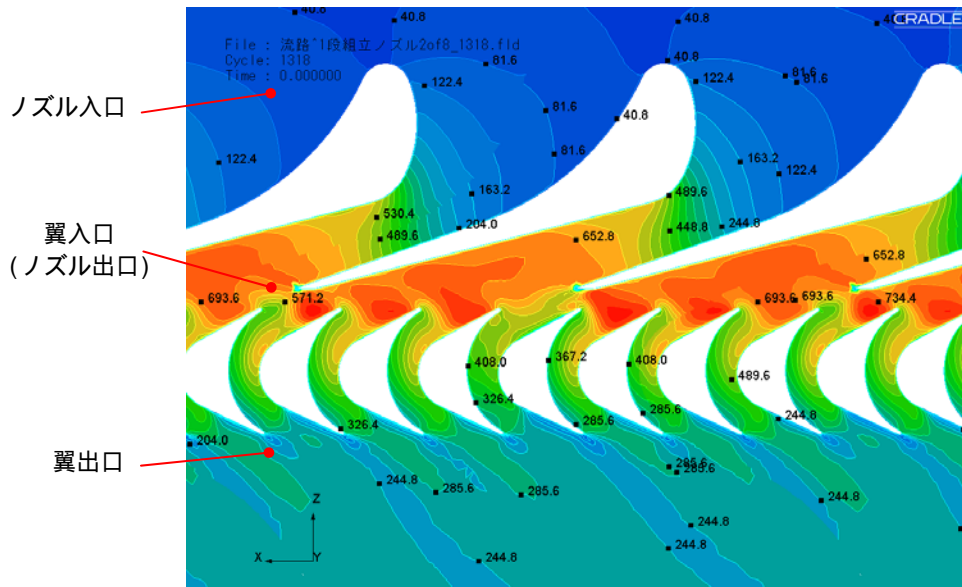


図 15 速度分布 (単位: m/s)

1) h-s 線図の検証

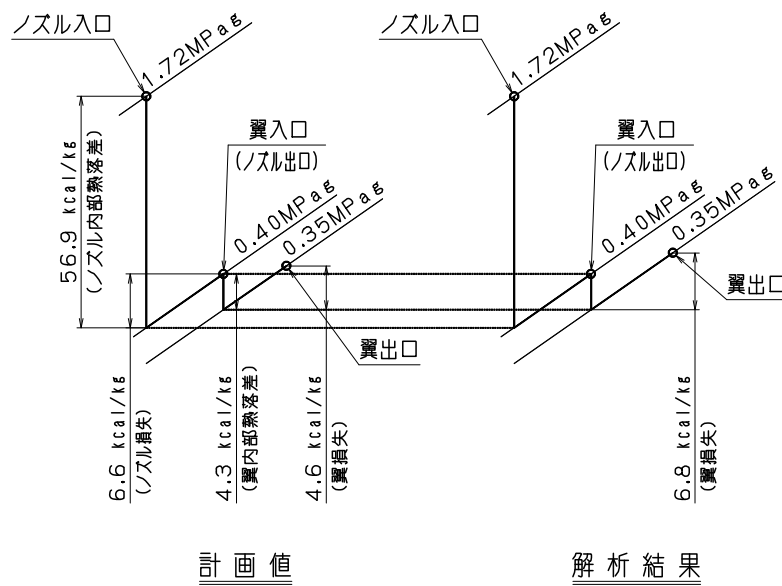
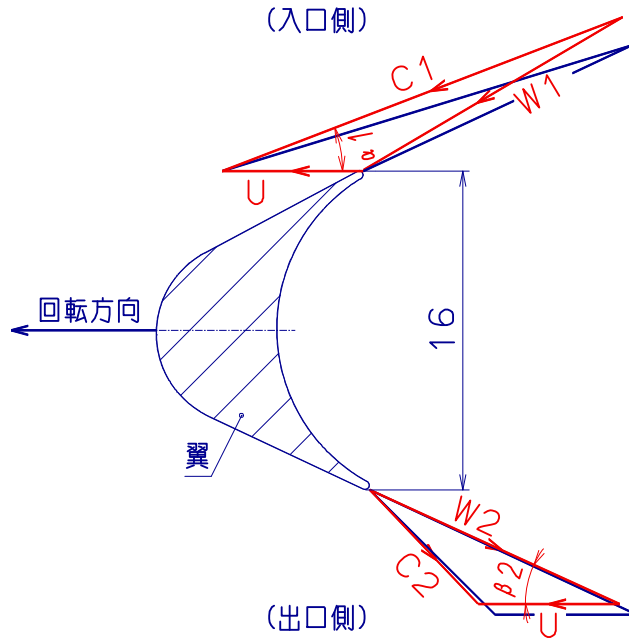


図 16 h-s 線図

翼損失は、計画値 4.6 kcal/kg に対して解析結果 6.8 kcal/kg となった。損失増加の理由については、今後の検討課題とした。

2)速度三角形の検証

翼平均直径(PCD)における計画値、及び解析結果の速度三角形を下図に示す。



注1 . 実線(青)は計画値、実線(赤)は解析結果を示す。

			計画値	解析結果
			X_0	X
周速度	U	m/s	213.9	
入口	絶対速度	C_1	648.6	
	相対速度	W_1	448.4	455.3
	絶対速度角	β_1	deg	17
出口	絶対速度	C_2	267.5	238.3
	相対速度	W_2	445.6	415.7
	相対速度角	β_2	deg	25

図 17 翼平均直径(PCD)における速度三角形

a) 角度

入口絶対速度角 α_1 は、計画値 17 deg に対して解析結果 21 deg となった。
ノズルは、蒸気出口端に対して一定の傾斜角を有する構造となっている。
図 18 の蒸気通過部において、右側を通過する蒸気は B 点に達すると膨張を終えるが、左側を通過する蒸気は A 点に達しても膨張が終了せず、C 点に達するまで膨張し続ける。A-C 間の圧力変化の影響により流れが右側に偏る“蒸気流れの偏向”の影響が考えられる。

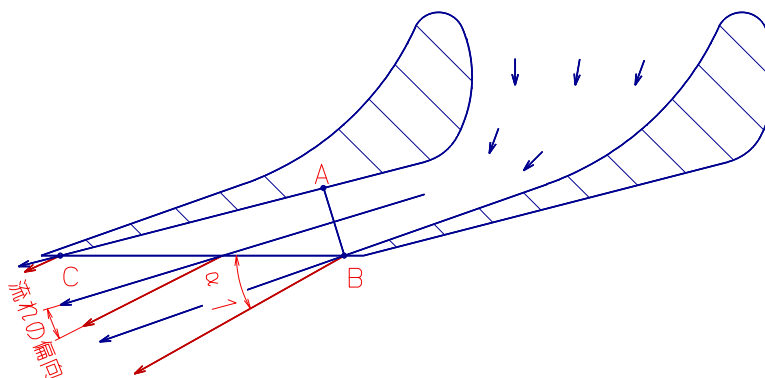


図 18 蒸気流れの偏向

b) 速度

出口相対速度 W_2 は、計画値 445.6 m/s に対して解析結果 415.7 m/s となり、損失増加により蒸気速度が遅くなっている。

3) 衝動速度の検証

衝動速度は、計画値 810 m/s に対して解析結果 770 m/s となり、4.9%減少している。

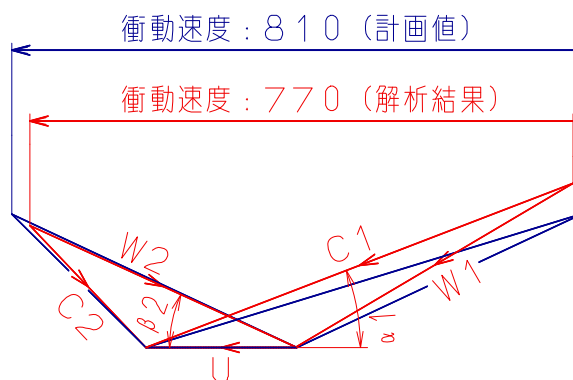


図 19 衝動速度

以上の検証結果をもとに、計画衝動速度が得られる翼のプロファイルを設計することで性能改善が期待できる。

今後、試験結果をフィードバックし、本システムの精度を高めていく。

6. まとめ

本開発は、以下の2つの目標を設定して行った。

- (1) 13%の効率改善を図ること。
- (2) 目標高さを2,300mmとした小型化を行う。

これは、タービン全高が約2,300mm程度であれば据付可能であることが判明したためであり、船の有効スペースを変更しないで据付、配管できる構造とする。

効率改善については、試験結果の燃料消費量は15.3t/h(1600k 負荷にて)であり、現状の17.1t/hに対して、10.5%の改善となっている。但し、目標として設定した14.9t/h、すなわち12.9%の改善に対しては、2.4ポイント届いていない結果となった。

その原因としては、流れ解析を活用して翼内部流れを検証した結果、損失増加により出口相対速度が減少し、蒸気が翼に作用する力(衝動速度)が計画通りでないことが判明しており、今後、計画衝動速度が得られるように翼のプロファイルを一部修正することで性能改善がはかりたいと考えている。

目標高さについては、結果として2,400mmとなっているが、これは、本開発の要求元である造船所との協議に基づくもので、実質的に造船所の要求に応えたもので、目標を達成していると言える。

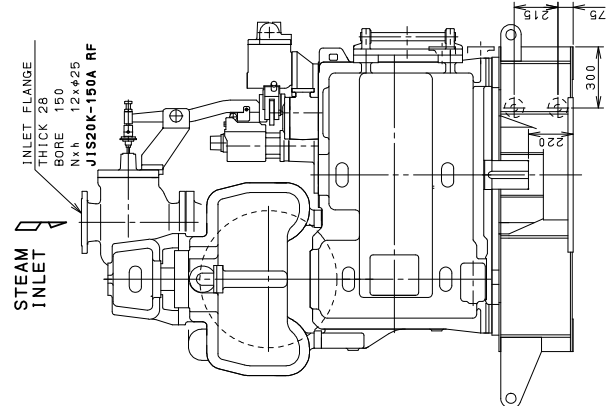
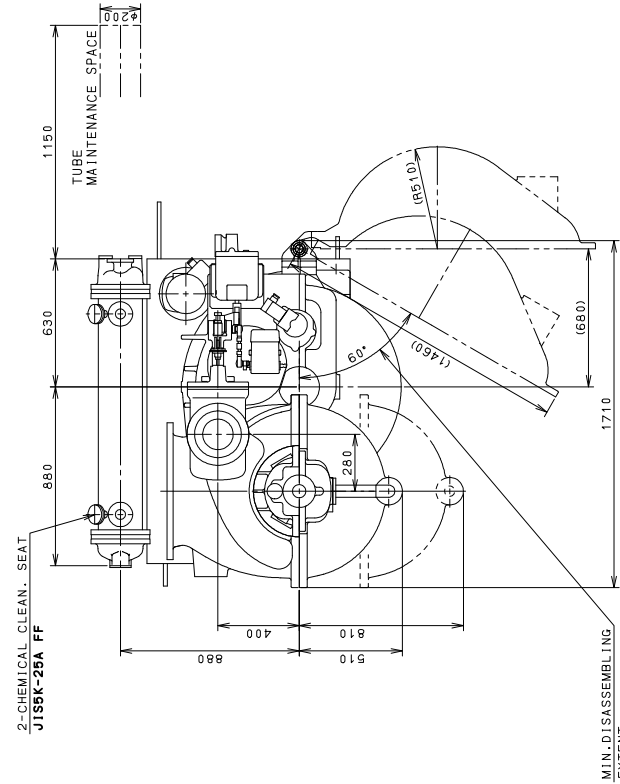
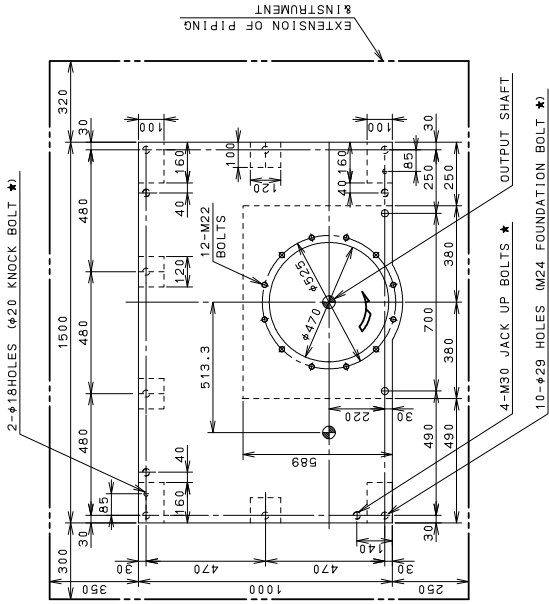
高さ寸法を抑えることができたのは、小型化によりケーシング内部の圧力損失が増加し、性能が低下することが懸念されたため、流れ解析により形状の最適化をはかったことの結果と思われる。

また、構造面でも種々工夫を行っており、タービンケーシングは、2、3段ノズルをインナーケースに嵌め込む方式を採用し、MCでの自動加工が可能な構造とした。また、タービンロータは一体鍛造構造とし、軸と一体の剛接手にてピニオン軸と締結し、3点支持軸受を採用した。

各部品は問題なく組み立てられ、タービン速度が50～100%の速度範囲で安定した運転ができることを確認できた。

従来に比べて性能が良くなることから、信頼性を検証しつつ早期の市場投入をはかっていたと考えている。

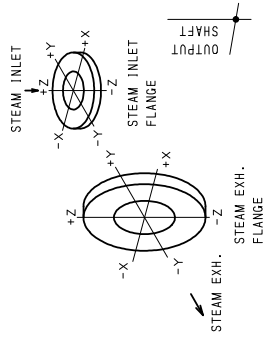
★ : YARD SUPPLY
 ☆ : SHINKO SUPPLY



CAUTION

1. Steam inlet & exhaust piping must be provided with suitable supports & bends where necessary so that undue force may not be given to turbine by piping weight and thermal expansion of turbine & piping.

MOVEMENT DURING RUNNING



Steam inlet flange

Temp.	ΔX	ΔY	ΔZ
200℃	0.6	0.9	1.9
250℃	0.8	1.1	2.4

Steam exhaust flange

Temp.	ΔX	ΔY	ΔZ
100℃	0.0	0.7	0.2

Max. PERMISSIBLE FORCE & MOMENT (any direction)

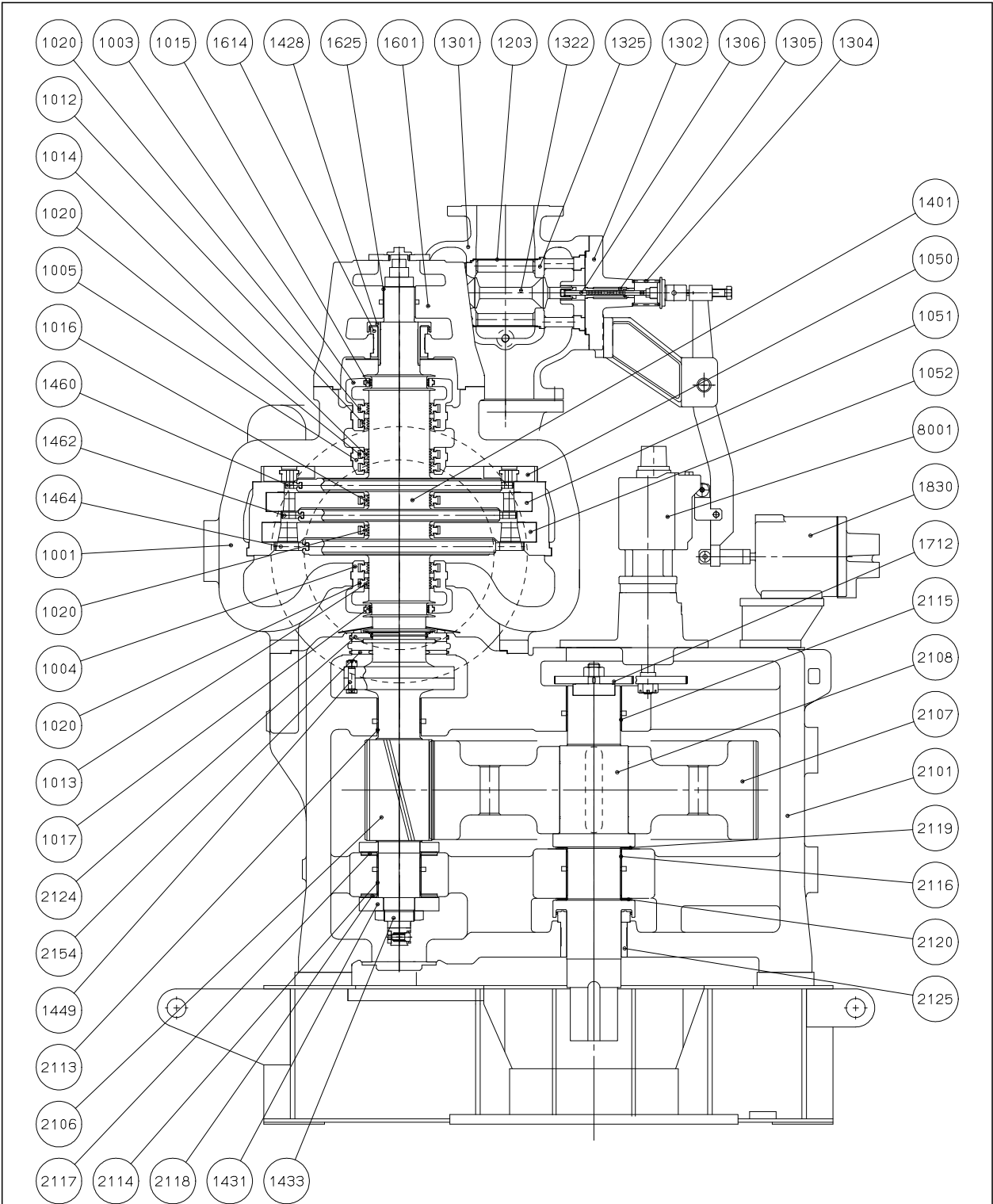
Steam inlet flange	F	M
exhaust flange	700kg	350kg-m
	700kg	350kg-m

2. Lifting weight for disassembling
 Turbine casing cover : 350kg (approx.)
 Turbine rotor & pinion : 450kg
 Gear wheel with shaft (max.) : 1050kg
 Oil cooler : 200kg

3. Calculated total weight : 5500kg

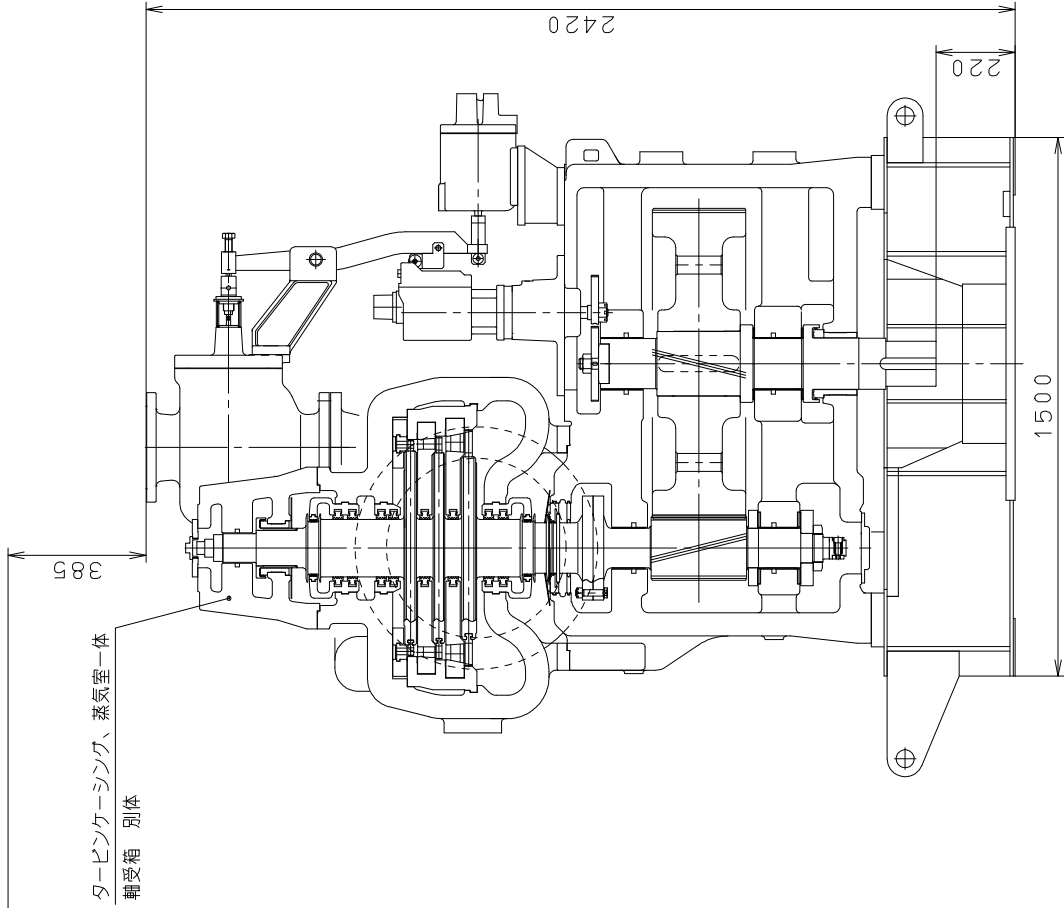
ITEM NO.	SW/FW 共通クーラー
SHIP NO.	
OUTLINE DRAWING	
MODEL	RVR-0
DRAW. NO.	TH66000

PART NO.	NAME OF PART	MATERIAL		REQ.NO. FOR 1 TURBINE	PART NO.	NAME OF PART	MATERIAL		REQ.NO. FOR 1 TURBINE
		NAME	JIS				NAME	JIS	
1001	TURBINE CASING /STEAM CHEST	CAST STEEL	SCPH2	1 SET	2120	THRUST BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET
1003	PACKING CASE	DUCTILE CAST IRON	FCD400	1	2124	OIL GUARD	BRONZE BRASS PLATE	CAC406 C2801P	1 SET
1004	PACKING CASE	DUCTILE CAST IRON	FCD400	1	2125	OIL GUARD	BRONZE	CAC406	1 SET
1005	PACKING CASE	CARBON STEEL	S35C	1	2154	OIL GUARD	BRONZE	CAC406	1 SET
1012	LABYRINTH PACKING	NI-BRASS CASTING	-	2 SETS	8001	SPEED REGULATING GOVERNOR	-	-	1 SET
1013	LABYRINTH PACKING	NI-BRASS CASTING	-	2 SETS					
1014	LABYRINTH PACKING	NI-BRASS CASTING	-	2 SETS					
1015	STEAM GUARD	BRASS PLATE WITH STEEL	C7521P S35C	1 SET					
1016	LABYRINTH PACKING	NI-BRASS CASTING	-	2 SETS					
1017	STEAM GUARD	BRASS PLATE WITH STEEL	C7521P S35C	1 SET					
1020	SPRING	STAINLESS STEEL	SUS304	32					
1050	NOZZLE	STAINLESS STEEL CARBON STEEL	SUS403 S25C	1 SET					
1051	NOZZLE	STAINLESS STEEL DUCTILE CAST IRON	SUS403 FCD400	1 SET					
1052	NOZZLE	STAINLESS STEEL DUCTILE CAST IRON	SUS430 FCD400	1 SET					
1203	STEAM STRAINER	STAINLESS STEEL	SUS410	1					
1301	GOVERNOR VALVE CASING	CAST STEEL	SCPH2	1					
1302	COVER	CAST STEEL	SCPH2	1					
1304	SPRING	STAINLESS STEEL	SUS316	1					
1305	BUSH	STAINLESS STEEL	SUS420J2	1					
1306	GOVERNOR VALVE STEM	STELLITE	-	1					
1322	GOVERNOR VALVE	STAINLESS STEEL	SUS420J2	1					
1325	GOVERNOR VALVE SEAT	STAINLESS STEEL	SUS403	1					
1401	TURBINE ROTOR	Cr-Mo STEEL	-	1					
1428	FLINGER	STEEL	SS400	1					
1431	THRUST COLLAR	CARBON STEEL	S35C	1					
1433	OVERSPEED TRIP SHAFT	CARBON STEEL	S35C	1					
1449	COUPLING BOLT	Cr-Mo STEEL	SCM435	10 SETS					
1460	MOVING BLADE	STAINLESS STEEL	SUS410J1	1 SET					
1462	MOVING BLADE	STAINLESS STEEL	SUS410J1	1 SET					
1464	MOVING BLADE	STAINLESS STEEL	SUS410J1	1 SET					
1601	BEARING HOUSING	CAST IRON	FC200	1 SET					
1614	OIL GUARD	BRONZE	CAC406	1 SET					
1625	BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET					
1712	DRIVING GEAR	CARBON STEEL	S45C	1					
1830	TRIP SERVO-MOTOR CYLINDER	CAST IRON	FC200	1					
2101	REDUCTION GEAR CASING	CAST IRON	FC200	1 SET					
2106	PINION & SHAFT	Ni-Cr-Mo STEEL	SNM439	1					
2107	WHEEL	FORGED STEEL	SF640B	1					
2108	OUTPUT SHAFT	FORGED STEEL	SF540A	1					
2113	BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET					
2114	BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET	SHIP NO.		MATERIAL LIST		
2115	BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET					
2116	BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET					
2117	THRUST BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET					
2118	THRUST BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET	MODEL	RVR-0			
2119	THRUST BEARING METAL	WHITE METAL WITH STEEL	WJ2 S25C	1 SET	DRAW.NO.	TH 66001			

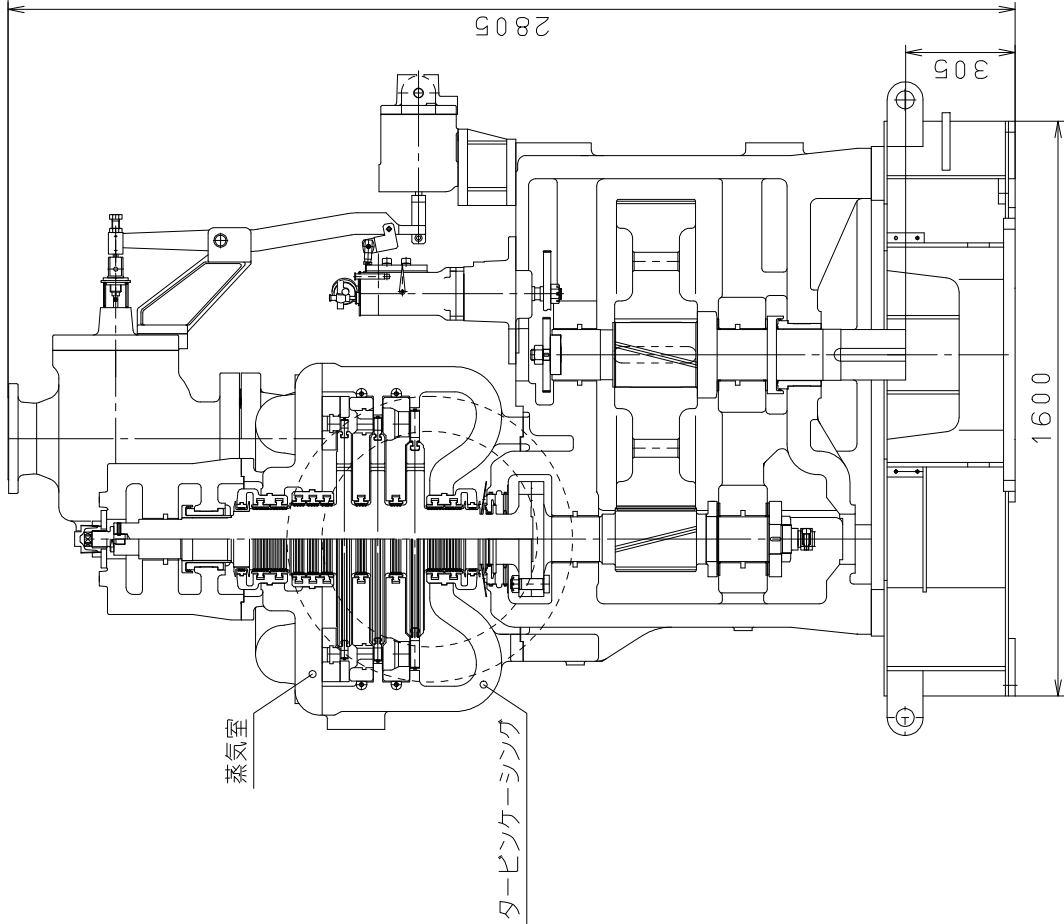


SHIP NO.	
SECTIONAL DRAWING	
MODEL	RVR-0
DRAW. NO.	TH66002

新型タービン
(型式：RVR-0)



VLCC用タービン
(型式：RVR-2)





「この報告書は競艇の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目15番16号(海洋船用ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>