

Supported by  日本 THE NIPPON  
財団 FOUNDATION

平成 26 年度  
船舶の余剰蒸気を利用した  
高効率 3 段小型蒸気タービンの技術開発  
成果報告書

平成 27 年 3 月

一般社団法人 日本船用工業会



## はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、平成 25 年度、26 年度の 2 年間に一般社団法人日本舶用工業会が実施した「船舶の余剰蒸気を利用した高効率 3 段蒸気タービンの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

20 万トンクラスのばら積み船では、船内で使用される雑用蒸気のうち、約 1.5ton/hr が余っており、有効活用されずに捨てられている。この余剰蒸気を活用するにしても、現状の単段タービンでは約 40kW の出力しか得ることができない。そこで、タービンを 3 段にし、更に排気圧力を真空にして高速回転化させることにより、現状の 2 倍の約 80kW の出力を得ることが可能な、高効率 3 段小型蒸気タービンを、2 年計画で技術開発を行うものである。

本開発は、株式会社シンコーに委託して実施しており、その成果をここにまとめたものである。

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 27 年 3 月

(一社)日本舶用工業会



## 目 次

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1. 事業の目的                        | 1  |
| 2. 事業の目標                        | 3  |
| 2.1 本事業の最終目標（平成26年度の開発目標）       | 3  |
| 2.2 平成25年度開発目標                  | 3  |
| 3. 平成25年度の実施内容                  | 4  |
| 3.1 装置の調査                       | 4  |
| 3.1.1 ㈱放電精密加工研究所と技術事項の協議        | 5  |
| 3.1.2 放電加工の技術的事項                | 5  |
| 3.1.3 将来、3段タービンが量産に入った場合の問題点    | 5  |
| 3.1.4 放電加工方式の断念                 | 5  |
| 3.2 多軸加工機による装置の調査               | 5  |
| 3.2.1 東洋機械㈱へ4軸加工機による試切削依頼       | 5  |
| 3.2.2 タービン翼間4.88mm 試切削図の作製      | 5  |
| 3.2.3 東洋機械㈱・4軸加工機の加工プログラム及び試切削  | 6  |
| 3.2.4 東洋機械㈱との技術的協議              | 8  |
| 3.2.5 タービン翼間6.42mm の試切削図の作製と試切削 | 9  |
| 3.2.6 タービン翼間8.44mm の試切削図の作製と試切削 | 9  |
| 3.3 CFDによる解析                    | 9  |
| 3.4 三井精機㈱の5軸加工機の講習会聴講           | 11 |
| 3.5 三井精機㈱の5軸加工機による翼試切削          | 11 |
| 3.6 設計内容                        | 11 |
| 3.6.1 高効率3段小型蒸気タービンの設計仕様        | 11 |
| 3.6.2 主要部の材質の検討                 | 11 |
| 3.6.3 タービンの断面図及び主要部材質           | 13 |
| 3.6.4 主要部品の説明                   | 14 |
| 3.6.5 タービンの外形寸法                 | 15 |
| 3.7 平成25年度の成果                   | 15 |
| 3.7.1 タービン翼放電加工による方法の断念         | 15 |
| 3.7.2 4軸加工機によるタービン翼切削時間短縮可能性の調査 | 15 |
| 3.7.3 5軸加工機によるタービン翼切削時間短縮可能性の調査 | 16 |
| 3.8 平成25年度の目標の達成状況              | 16 |
| 3.9 参考図面等(含写真)                  | 17 |

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 4. 平成26年度実施内容         | 26 |
| 4.1 蒸気タービン製作          | 26 |
| 4.1.1 蒸気タービンの仕様       | 26 |
| 4.1.2 翼一体型羽根車ディスク     | 26 |
| 4.1.3 検討内容            | 29 |
| 4.1.4 翼一体型羽根車ディスク製作   | 33 |
| 4.1.5 蒸気タービン製作過程      | 49 |
| 4.2 性能評価試験            | 68 |
| 4.2.1 試験負荷用ポンプの性能評価試験 | 68 |
| 4.2.2 蒸気タービンの性能評価試験   | 72 |
| 4.2.3 開放検査            | 81 |
| 5. まとめ                | 83 |
| 5.1 目標の達成状況           | 83 |
| 5.2 課題および今後の予定        | 83 |

## 1 事業の目的

IMO（国際海事機関）は船舶から排出される大気汚染物質を削減するため、燃料中の硫黄分を規制している。硫黄分濃度は、2013年1月から全ての海域で上限4.5%から3.4%に引き下げられており、更に2020年、又は2025年から0.5%へと一気に引き下げられる。

また、近年船舶の燃料が高騰し、高値で推移している。船舶の余剰蒸気を有効利用できれば、燃料費削減に寄与することができる。

このような情勢下において、弊社が所属する船用工業界においても温室効果ガス（中でも特に影響の大きいCO<sub>2</sub>）の排出を削減するための研究・開発が進められている。

例えば、20万トンクラスのバルクキャリアー（以下BCと略す）においては、船内で暖房や燃料の加熱等に使用される雑用蒸気があるが、その余剰蒸気量は、約1.5 ton/hrである。この余剰蒸気は、有効活用されることなく捨てられている。

主機の排気ガスエコマイザーによる発電機タービンは、VLCC又は大型コンテナ船には大手船主により二十数年前から採用されている。これは、主機の排ガス量が十分あることから航行中、蒸気を作り発電機タービンを回すことが可能であった。しかし、20万トン以下のBC又はタンカーでは蒸気発生量が少ないため発電機タービンは搭載されていない。

しかし、今日のように燃料費の高騰そしてCO<sub>2</sub>削減要望が高まってくると、小型タービンについてもコストを勘案しながら、より大きな出力が得られるよう検討する必要性が生じてきた。現状の単段タービンでは40kWの出力を取り出すことが精一杯で、駆動できる機器が見当たらない。この出力を増すためには、3段の蒸気タービンを採用し、排気圧力を真空にして、回転数を上げることにより80kWの出力を得ることができる。この出力アップにより主機の冷却水ポンプの動力として利用することができる。

例えば、蒸気入口圧力を0.6MPaGとして、従来の単段で排気が大気圧、従来型の場合と今回計画した仕様を基に計算して比較すると表1-1の通りとなる。

表 1-1 従来型と高効率型

|      | タービン<br>段数 | 蒸気入口圧力<br>(MPaG) | 入口温度<br>(°C) | 排気圧力     | 回転数<br>(min <sup>-1</sup> ) | 減速機<br>有無 | 定格出力<br>(kW) |
|------|------------|------------------|--------------|----------|-----------------------------|-----------|--------------|
| 従来型  | 1段         | 0.6              | 飽和           | 大気圧      | 3,550                       | 無（直結）     | 40           |
| 高効率型 | 3段         | 〃                | 〃            | -300mmHg | 12,000                      | 1段減速機付    | 80           |

具体的には、20万トン程度のBCの機関室に装備されている主機ディーゼルエンジン用冷却海水ポンプ、ジャケット冷却清水ポンプなどは、現状では電動機で駆動されているが、この余剰蒸気を利用してタービンを運転すれば電動機の代わりとして使用することができ、蒸気の無駄をなくするとともに電動機の消費電力を削減することが出来る。その結果、ディーゼル発電機出力を下げることにより燃料を節減し、CO<sub>2</sub>排出を削減することが出来る。

しかし、このような高効率の小型タービンを開発するためには、従来型の 3 倍近い高速回転を実現させる必要があり、蒸気タービンの構造も見直さなければならない。

従来のタービン翼は、図 1-1 の通り羽根車ディスク外周に設けられた「逆 T 字型溝」に埋め込まれていた。この翼を図 1-2 の通り放電加工して一体型にすることができれば、バランスや精度を向上させることが可能となり、高速回転が可能となると共に、加工工数及び翼植え込み作業工数が大幅に削減できることが期待される。羽根車ディスク板とタービン翼を一体構造にした蒸気タービンは世界初の試みとなる。従来、タービンディスクの外径は最低でも 400mm と大きいため、放電加工機に装着できなかった。今回 3 段タービンを選定することによりディスク外径が 329mm となり放電加工機に装着可能となったが、従来の精度や工数を凌駕するには、加工方法に種々工夫を凝らす必要があり、この技術習得には厳しい困難が伴う。

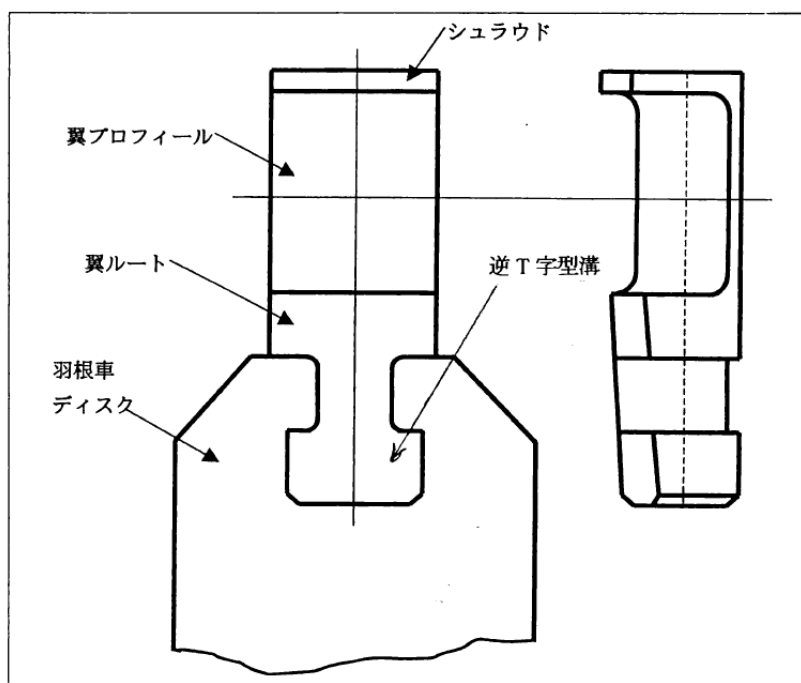


図 1-1 従来の羽根車ディスク板と翼の構造

また、多軸制御加工法も合わせて検討し、この方法が放電加工方法より優れていることが分かれば、この方法を採用することもあり得るが、何れにせよ、羽根車ディスク板とタービン翼を一体構造にした蒸気タービンの製造方法を確立させることが本開発の最重要なポイントである。

更に、コスト低減として羽根車ディスク材料にステンレス鋼を、ケーシング材料としてダクタイル鋳鉄を選定し、諸性能の調査・価格の検討を行い、実用の可能性を検証し、価格を抑えた高効率 3 段小型蒸気タービンを開発することにより、運航コストの削減、CO2 排出削減等の地球環境の保全にも寄与するものである。



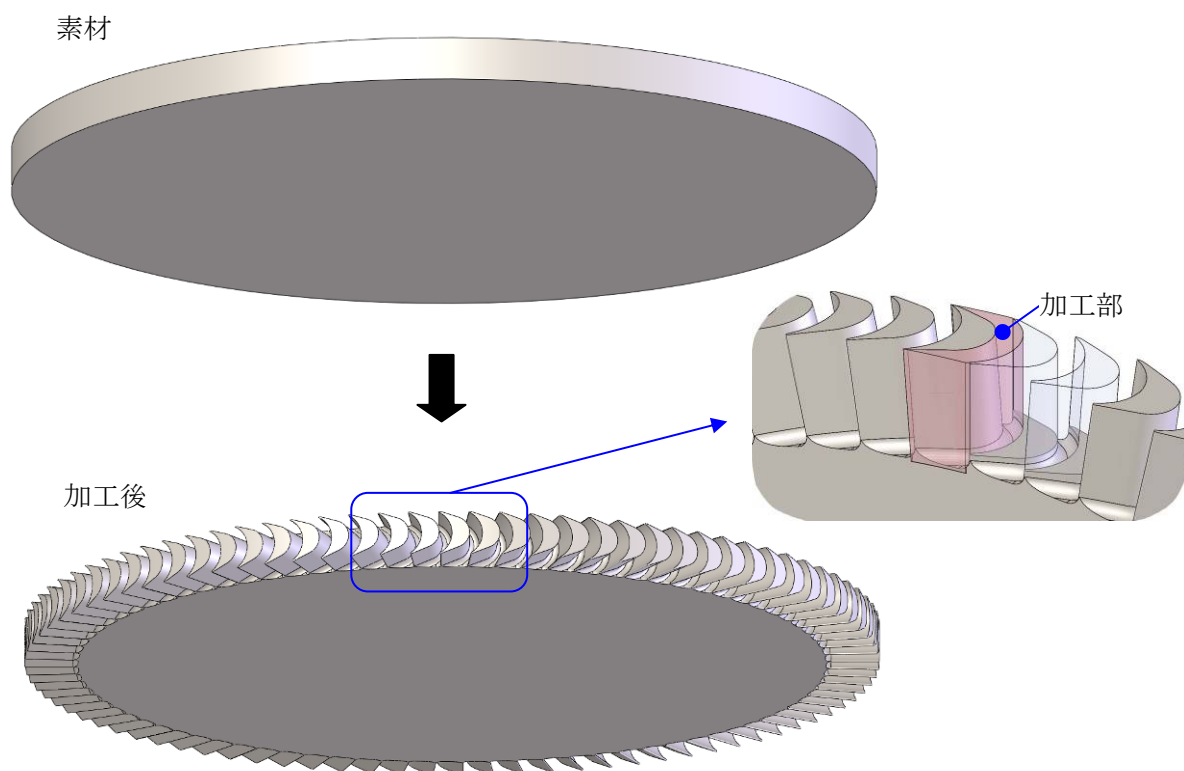


図 1-2 羽根車ディスク板に翼が放電加工をされたイメージ（ハッチングが翼）

## 2 事業の目標

### 2.1 本事業の最終目標（平成26年度の開発目標）

船内の1.5ton/hの余剰蒸気から、80kWの出力を得る高効率3段小型蒸気タービンを開発する。

### 2.2 平成25年度開発目標

加工方法に種々工夫を凝らし、羽根車ディスク板とタービン翼を一体構造にした蒸気タービンの製作方法を確立させる。

### 3 平成25年度の実施内容

#### 3.1 装置の調査

装置の調査をするに当たり、試切削を行う翼型の検討を行った。

本タービンの仕様は蒸気入口圧力が 0.6MPaG、蒸気温度が飽和温度、排気圧力が -300mmHg であるが、客先仕様によっては入口蒸気条件、排気圧力、要求出力が異なる。そこで用途拡大にも柔軟に対応出来るよう、弊社が過去に納入した船用タービンの実績より最大条件も視野にいたした表 3-1 の条件でタービン进行設計し、試切削の翼型を検討した。

表 3-1 RG31タービン設計条件

|        | 開発条件     | 最大条件    |
|--------|----------|---------|
| 蒸気入口圧力 | 0.6MPaG  | 2MPaG   |
| 入口温度   | 飽和       | 300℃    |
| 排気圧力   | -300mmHg | 0.1MPaG |
| 出力     | 80kW     | 200kW   |

これらの仕様範囲を満足するため、弊社標準翼型 70 種類の中から過去小型タービンで多数使用実績のある BP002 翼型を選定した。

図 3-1 の BP002 翼型は、翼巾 20mm で最も翼線図効率が良くなる翼間隙間は 4~6mm である。BP002 翼型を使用した場合、本タービンの翼列は下記の通りである。

又、12,000min<sup>-1</sup>の高速回転で使用するタービンのため翼本数は偶数本の完全バランス設計とした。

ロータの危険速度は定格速度の 12,000min<sup>-1</sup>よりも高い 16,000min<sup>-1</sup>の剛性軸とし対振動特性を高め、操作性の向上を目指した。

以上より表 3-2 の通り翼本数は 60 枚、翼間隙間は 4.88mm で試切削を行う事とした。

表 3-2 RG31タービン翼列

|                  | 1 段 | 2 段 | 3 段 |
|------------------|-----|-----|-----|
| PCD(ピッチ円直径) (mm) | 297 | 303 | 314 |
| 翼高さ (mm)         | 22  | 28  | 39  |
| 翼本数 (本)          | 60  | 60  | 60  |

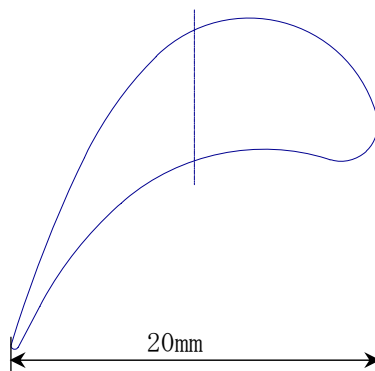


図 3-1 BP002 翼型

### 3.1.1 (株)放電精密加工研究所と技術事項の協議

- (1) 打合わせ日時：2013年6月7日 9:00～18:00
- (2) 打合わせ場所：(株)シンコー本社会議室
- (3) 出席者：(株)放電精密加工研究所 営業部 岩田隆徳氏  
(株)シンコー技術本部 三原本部長、角本部長、白井課長補佐、伊崎主任、  
千田部員、平尾相談役

### 3.1.2 放電加工の技術的事項

- ① 羽根車ディスクの外周に翼(ブレード)が放電加工できることを確認した。
- ② 翼の加工誤差は、1/100～2/100mmであることを確認した。
- ③ 翼の表面粗さは、12.5Sであるとのこと、問題ないことを確認した。
- ④ 翼のバリ取りなどは手仕上げで行う。将来は電解研磨で行うとのこと。

### 3.1.3 将来、3段タービンが量産に入った場合の問題点

- ① シンコーは将来、協力会社に放電加工機を導入してコストダウンを図ることを考えている。しかし、(株)放電精密加工研究所は、成田工場に放電加工機を15台所有しており、製品は自社の委託加工にして、放電加工機の外販は行わないとのこと。
- ② 協力会社に放電加工機を導入する場合、加工効率を上げるため、夜間の無人加工を考えている。しかし、放電加工時、最高温度が摂氏1万度になり切削油に引火すると火災の危険性があるので夜間無人加工はできないとのこと。

### 3.1.4 放電加工方式の断念

放電加工による技術的事項はクリアになったが、(株)放電精密加工研究所の政策により放電加工機の外販は行わないとのことで、放電加工機によるタービン翼の加工は断念することになった。

## 3.2 多軸加工機による装置の調査

### 3.2.1 東洋機械(株)へ4軸加工機による試切削依頼

同社は、戦後旧呉海軍工廠技術者によるタービン翼専門メーカーである。同社は1988年シンコーの関連会社となり、シンコーの全てのタービン翼を製作している。同社が4軸加工機を所有していることが分かり、ディスクと翼一体加工が実際に可能か見極めるため、次の通り計画し、翼の試切削を実施した。

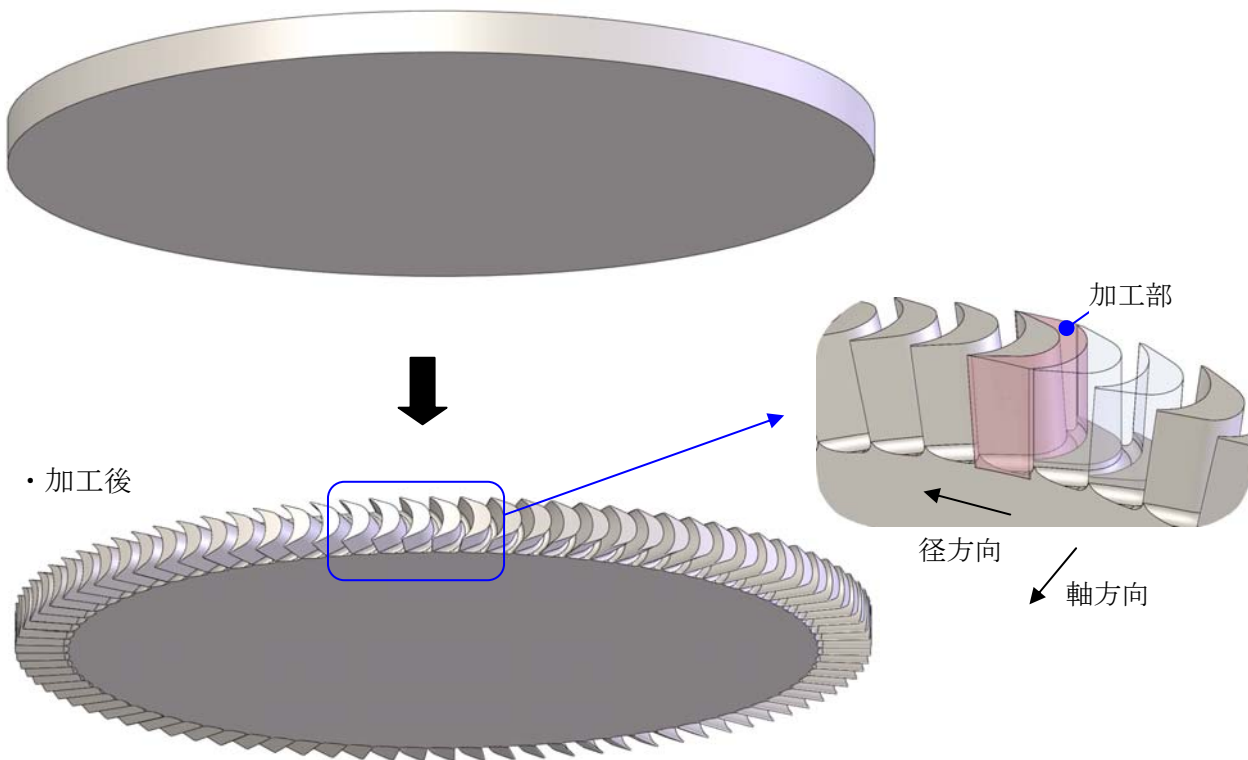
### 3.2.2 タービン翼間4.88mm試切削図の作製

表3-2の通りタービンの翼列は1段から3段まであり、3段の翼高さが最も高い。そこで刃物が長くなるため切削性が悪くなり加工時間がかかる翼高さ39mmの3段で試切削を行う事にした。

### 3.2.3 東洋機械(株)・4軸加工機の加工プログラム及び試切削

東洋機械(株)が4軸加工機用として設計図をもとに加工プログラムを組んだ。加工プログラムは22頁の通りである。図3-4の通り円板状の素材から翼を削り出す。

- ・素材

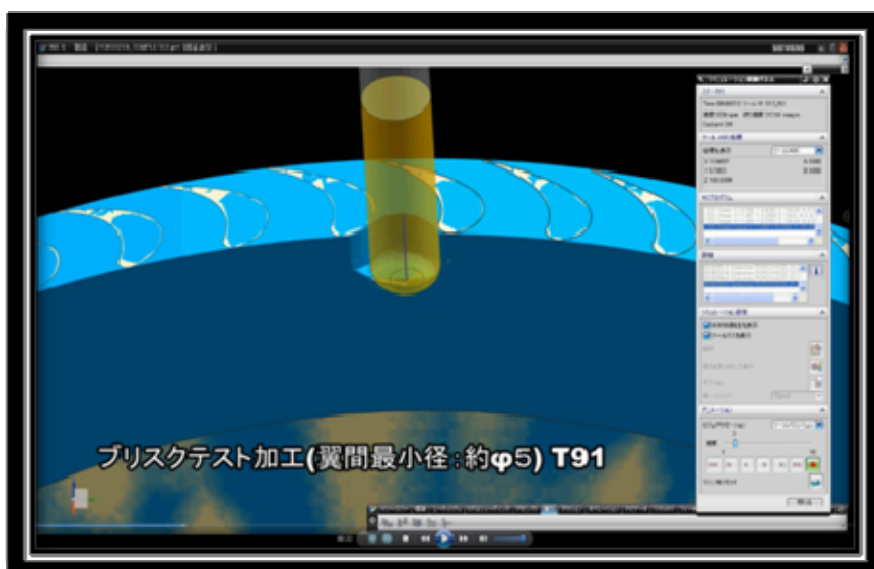


- ・加工後

図 3-4 試切削概念図

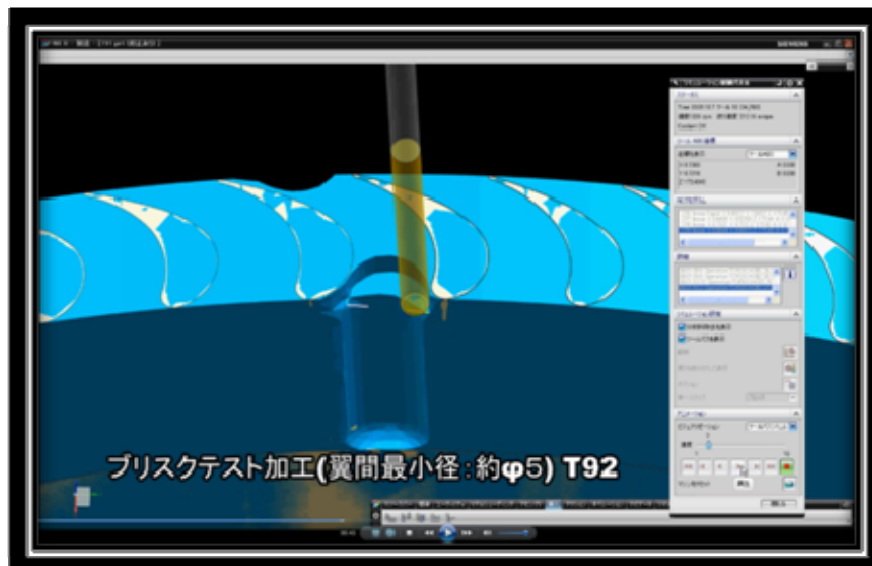
- ・加工手順 1

超硬ラフティングミルで軸方向（翼巾方向）を0.1mm残しで加工する。



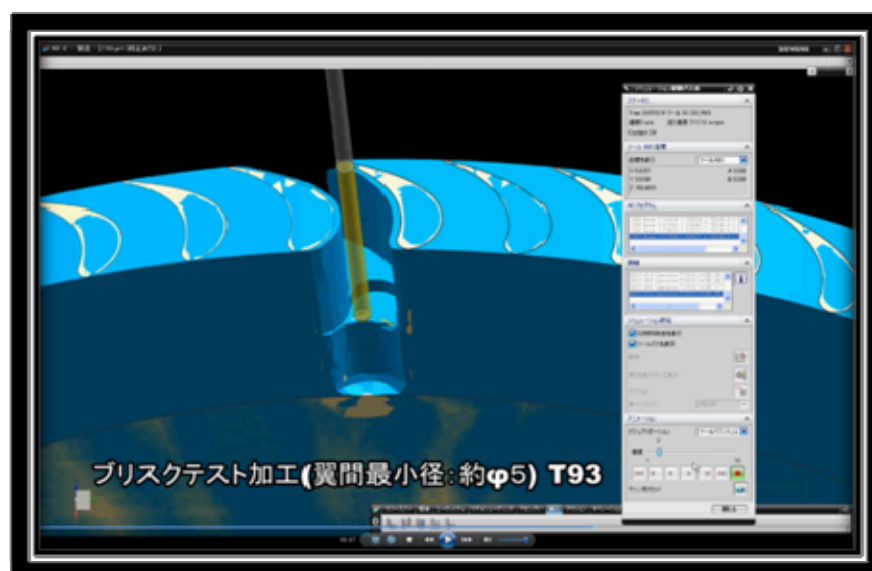
・加工手順 2

超硬エンドミルφ4で翼間の隙間を0.1mm残しで20mmの深さまで加工する。



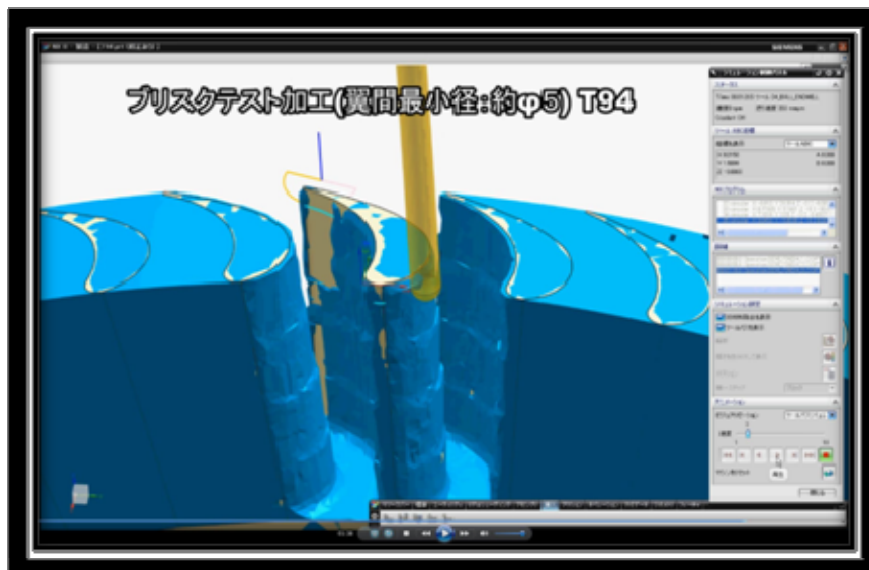
・加工手順 3

ソリッドボールφ3で翼間の隙間を0.1mm残しで20~39mmの深さを加工する。



・加工手順4

ソリッドボールφ4で翼全面を仕上げ加工する。



この加工プログラムで2013年10月2日、同社が4軸加工機を使用して翼3枚の試切削を実施した。刃物が細いため3本の試切削中10本刃物を折損したが、4軸加工機でディスクとの一体加工が可能であることを確認できた。

### 3.2.4 東洋機械(株)との技術的協議

- (1) 打合わせ日時：2013年10月3日 13:00～17:00
- (2) 打合わせ場所：東洋機械(株)(呉市)会議室
- (3) 出席者：東洋機械(株) 川崎社長、久保技術部長、垣井技術係長、迫田技術課員  
(株)シンコー 筒井会長、技術本部 三原本部長、角本部長、白井課長補佐、伊崎主任、千田部員、平尾相談役

上記の通り(株)シンコーが東洋機械(株)を訪問し、翼切削現場を見学した後、次の通り関係者が意見交換を行った。

- ① 3段目は翼数が60枚あり翼高さが最も高いため、翼1枚当たりの加工時間は3.24時間を要し、3段目のみで約194時間、1日24時間とすると、8日を要し単純に1台分3段の加工日数は24日掛かることが分かった。但し、翼高さは表3-2の通り1段目が低く、2段目、3段目と高くなるため実際は24日より少なくなる。
- ② 加工時間が長時間掛かる要因として、翼の1枚目と2枚目の最小隙間が4.88mmであるため、切削刃物の直径が4mmと小さく折損し易いため切削スピードを上げられないことが判明した。対策として、工程毎に適切な刃物を使用する事、剛性の高い太い刃物を使用することが考えられる。

- ③ 翼の面租度は、14S で若干の手仕上げが必要である。
- ④ 上記の試切削は、第 1 回目であるため、更に改良すればまだまだ、加工時間の短縮は可能と思われ、今後の実施内容は次の通り実行することに決めた。
- ⑤ 切削性を上げるため剛性の高い 6mm か 8mm の刃物で加工する場合、タービンの翼間隙間を広げる必要がある。その場合現状の翼型 BP002 では効率が低下するため 80kW を確保出来るか否かの検討を行う必要がある。
- ⑥ 4 軸加工機の時間短縮ができるよう加工プログラムの見直しを行う。
- ⑦ 5 軸加工機メーカー(三井精機㈱)へ依頼して加工時間短縮の見極めを行う。

### 3.2.5 タービン翼間 6.42mm の試切削図の作製と試切削

6mm の刃物で試切削を行うため翼間 6.42mm の試切削図を作製した。東洋機械㈱が 23 頁の様に加工プログラムを見直し、使用する刃物の種類を増やし適切な刃物で、適切な切削が行えるよう工程を見直し、刃物の折損の対策、切削時間短縮を行った。2013 年 10 月 16 日、同社が 4 軸加工機を使用して翼の試切削を実施した。

タービン翼間を最小隙間の 6.42mm(翼数 50 枚)とした場合、切削スピードが上げられ、翼 1 枚当たりの加工時間が約 1.77 時間、3 段目 50 枚の総加工時間が約 89 時間となった。面租度は 12.5S 以上確保でき良好であった。切削工程数が 4 → 7 と増えたが刃物の折損も無く、無人化での切削の可能性もでた。

### 3.2.6 タービン翼間 8.44mm の試切削図の作製と試切削

8mm の刃物で試切削を行うため翼間 8.44mm の試切削図を作製した。東洋機械㈱が 24 頁の様に加工プログラムを見直し、2013 年 10 月 27 日、同社が 4 軸加工機を使用して翼の試切削を実施した。剛性の高い 8mm の刃物を使うことで 6mm の刃物の切削工程より 1 工程を削減できた。

タービン翼間を最小隙間の 8.44mm(翼数 42 枚)とした場合、切削スピードが更に上げられ、翼 1 枚当たりの加工時間が約 1.1 時間、3 段目 42 枚の総加工時間が約 47 時間に短縮することができた。面租度は 12.5S 以上確保でき良好であった。また刃物の折損も無く、無人加工が可能と思われた。

## 3.3 CFD による解析

翼間隙間を 4.88mm、6.42mm、8.44mm に変更して翼の切削性の検討を行う共に、翼間隙間が効率に与える影響に関して CFD 解析を行った。

図 3-5 は翼の速度三角形を示す。また、図 3-6 は翼線図効率を示す。縦軸は翼入口相対速度角、横軸は翼間隙間である。

結果は、翼間隙間 4.88mm が 0.944、6.42mm が 0.937、8.44mm が 0.918 の翼線図効率となり、翼間隙間 6.42mm は 4.88mm に比べ-0.7%、8.44mm は-2.8%となった。

翼切削性と翼線図効率を考慮した結果、本タービンは翼間隙間 6.42mm で設計を行う事が最も経済的であると考えられる。

但し、翼入口相対速度角、翼プロファイル形状を見直すことにより、効率向上が期待出来るため CFD 解析で翼・ノズルプロファイルの最適形状化を行い詳細設計に反映する。

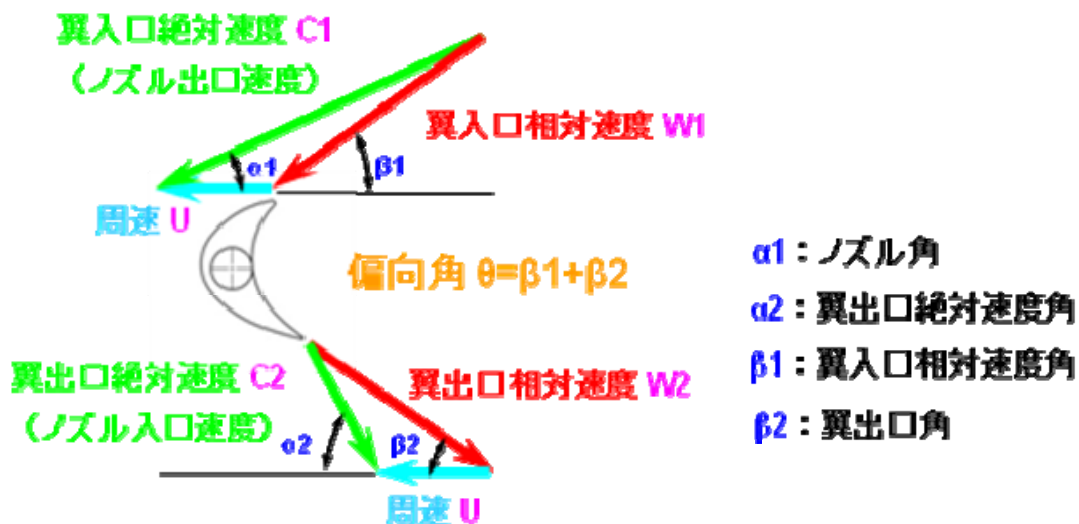


図 3-5 翼の速度三角形

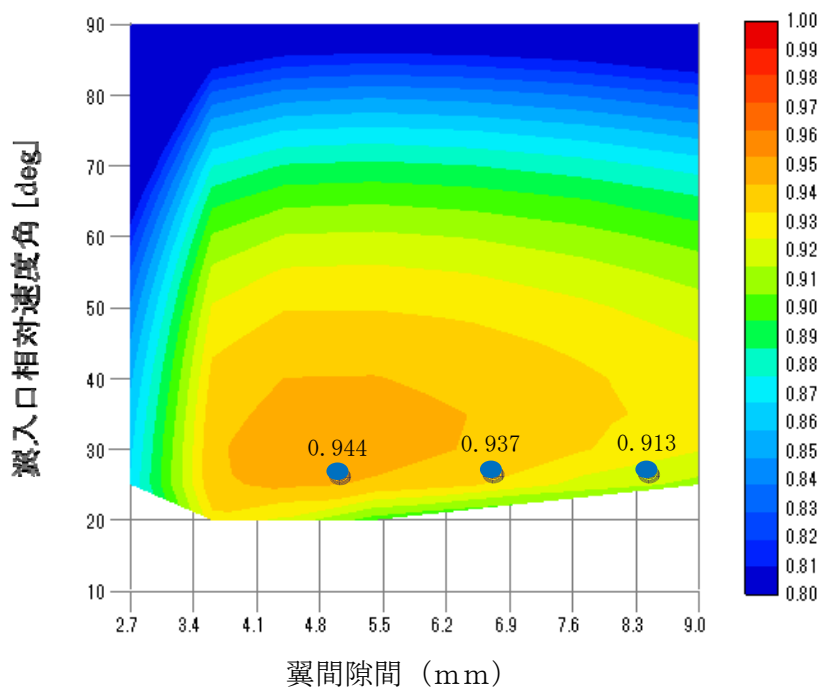


図 3-6 CFD 解析による翼型 BP002 の翼線図効率



### 3.4 三井精機(株)の5軸加工機の講習会聴講

広島市工業技術センター主催の5軸加工機講習会に出席して同加工機と4軸加工機とを比較して格段の優位さがあることを習得した。

(1) 開催日時：2013年10月18日 13:00～17:00

(2) 講習会会場：広島市工業技術センター

(3) 出席者：東洋機械(株) 川崎社長、久保技術部長、垣井技術係長、迫田技術課員  
(株)シンコー 平尾相談役

### 3.5 三井精機(株)の5軸加工機による翼試切削

5軸加工機の講習会を機に同社へ5軸加工機による翼試切削を2013年12月10日に実施した。比較対象の翼間は上記CFD解析結果より6.42mmの翼とした。その結果、翼1枚当たりの加工時間が0.25時間、3段目50枚の総加工時間が約13時間と格段に時間短縮に成功した。但し、表面粗度が4軸加工機に比べて粗くなったが、送り速度を見直すことで4軸加工機相当の面粗度が確保できる。その場合、総加工時間は約17時間となり、4軸加工機の翼間6.42mmの約89時間に対して約1/5となり大幅な時間短縮が可能となった。

## 3.6 設計内容

### 3.6.1 高効率3段小型蒸気タービンの設計仕様

- ① 蒸気供給量：1.5 ton /h
- ② タービン出力：80kW
- ③ タービン回転数：12,000min<sup>-1</sup>
- ④ タービン羽根車ディスク：3段
- ⑤ 蒸気入口圧力：0.6MPaG
- ⑥ 排気圧力：-300mmHg

### 3.6.2 主要部の材質の検討

- ① 翼車(部番：1402)はディスクと翼が一体で加工され、極めて高い222m/secの外周速度に耐えうる強度が材料に要求される。弊社標準翼材は表3-3の通りはステンレス鋼SUS403、同SUS410J1及び耐熱ステンレス鋼SUH616Mの3種類がある。通常、低速タービンでは翼車と翼は別々に加工されるため、翼車は安価なSF540A鍛鋼が使用され、翼に上記3種類のステンレス鋼の中から条件により選定される。本タービンは翼車と翼が一体のため3種類の中から材料を選定し信頼性を得る必要がある。そこで、まず最もリーズナブルな価格のSUS403で試切削を行う事にした。結果は上記で報告済みの通り切削性、面粗度等の仕上がりに全く問題は無かった。またSUS403の外周速度の許容値は253m/secであるため強度上も問題無く、本タービンにSUS403を採用する事にした。

表 3-3 翼材に使用される材料選定表

| 項目    |          | 区分                      | ①           | ②           | ③           |
|-------|----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|
|       |          | 材質記号                    | SUS403      | SUS410J1    | SUH616M     |
| 機械的性質 | 引張強さ     | (kg/mm <sup>2</sup> )   | ≧60         | ≧70         | ≧85         |
|       | 0.2%耐力   | (kg/mm <sup>2</sup> )   | ≧40         | ≧50         | ≧70         |
|       | 伸び       | (%)                     | ≧25         | ≧20         | ≧15         |
|       | 絞り       | (%)                     | ≧55         | ≧60         | ≧45         |
|       | シャルピー衝撃値 | (kg-m/cm <sup>2</sup> ) | ≧15         | ≧10         | ≧4          |
|       | 硬さ       | (HB)                    | ≧170        | ≧192        | 248 ~ 302   |
| 化学成分  | C        | (%)                     | ≦0.15       | 0.08~0.18   | 0.15~0.25   |
|       | Si       | (%)                     | ≦0.50       | ≦0.60       | ≦1.00       |
|       | Mn       | (%)                     | ≦1.00       | ≦1.00       | ≦1.00       |
|       | P        | (%)                     | ≦0.040      | ≦0.040      | ≦0.040      |
|       | S        | (%)                     | ≦0.030      | ≦0.030      | ≦0.030      |
|       | Ni       | (%)                     | ≦0.60       | ≦0.60       | ≦1.00       |
|       | Cr       | (%)                     | 11.50~13.00 | 11.50~14.00 | 11.50~13.50 |
|       | Mo       | (%)                     | —           | 0.30~0.60   | 0.75~1.25   |
|       | W        | (%)                     | —           | —           | 0.75~1.25   |
|       | V        | (%)                     | —           | —           | 0.20~0.40   |

② タービンケーシング（部番：1001）及びスチームチェストは当初、ダクタイル鋳鉄 FCD400 で計画したが、様々な客先仕様や用途拡大に柔軟に対応できるよう高温高压用鋳鋼 SCPH2 に変更した。

表 3-4 は SCPH2 の主要化学成分及び機械的性質を示す。

表 3-4 高温高压用鋳鋼 SCPH2 の主要化学成分及び機械的性質

| 材質<br>記号 | 主要化学成分 (%) |       |       |       |       | 機械的性質                        |                             |           | 備考 |
|----------|------------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|-----------------------------|-----------|----|
|          | C          | Si    | Mo    | P     | S     | 引張強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏点<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 伸び<br>(%) |    |
| SCPH2    | <0.30      | <0.60 | <1.00 | <0.04 | <0.04 | >480                         | >245                        | >19       |    |

### 3.6.3 タービンの断面図及び主要部材質

タービンの断面図及び主要部材質は図 3-7 及び表 3-5 の通りである。

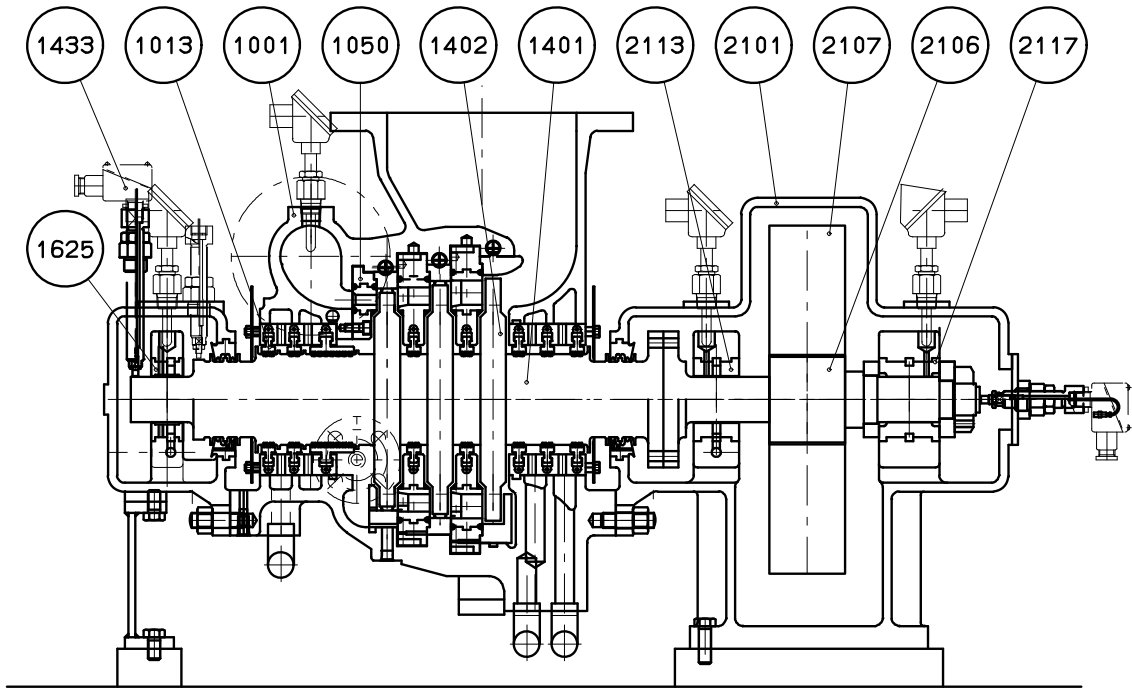


図 3-7 3段小型蒸気タービンの組立断面図

表 3-5 3段小型蒸気タービンの主要部品表

| 部番   | 部品名称         | 材料         | J I S    | 数量    |
|------|--------------|------------|----------|-------|
| 1001 | タービンケーシング    | 高温高压用铸钢    | SCPH2    | 1     |
| 1013 | ラビリンスパッキン    | Ni-Br 铸物   | —        | 8     |
| 1050 | ノズル          | ステンレス钢     | SUS403   | 3組    |
| 1401 | タービンシャフト     | 鍛钢         | SF540A   | 1     |
| 1402 | 翼車 (羽根車ディスク) | ステンレス钢     | SUS403   | 3組    |
| 1433 | オーバースピード装置   | —          | —        | 1     |
| 1625 | ベアリングメタル     | ホワイトメタル    | WJ2(25C) | 1     |
| 2101 | 減速歯車ケーシング    | 铸铁         | FC200    | 1     |
| 2106 | ピニオン         | Ni-Cr-Mo 钢 | SCM439   | 1     |
| 2107 | ホイール (減速歯車)  | 鍛钢         | SF640B   | 1     |
| 2108 | 出力軸          | 鍛钢         | SF540A   | 1     |
| 2113 | ベアリングメタル     | ホワイトメタル    | WJ2(25C) | 2 + 2 |
| 2117 | スラストメタル      | ホワイトメタル    | WJ2(25C) | 1     |

### 3.6.4 主要部品の説明

- ① タービンケーシング(部番：1001)は、タービンロータ(部番：1401)の解放点検を容易にするため今回も上下2つ割れ構造とした。
- ② スチームチェストは、タービン翼へ蒸気供給の役目を果すもので高温蒸気へ対応するためタービンケーシングと一体とした。
- ③ ノズル(部番：1050)は、高速の蒸気をタービン翼に吹き付けタービンロータに回転力を与える。
- ④ 減速歯車ケーシング(部番：2101)、ピニオン(部番：2106)及びホイール(部番：2107)(減速歯車)は、タービンの回転数  $12,000\text{min}^{-1}$  を被駆動機の回転数  $1,800\text{min}^{-1}$  まで減速する装置である。被駆動機は冷却海水ポンプであったり、発電機などの場合、回転数は  $1,800\text{min}^{-1}$  のため、タービンを直結にして低速にすると  $80\text{kW}$  を確保することができないことから減速装置が必要となる。ピニオン軸及びホイールの緒言は、表 3-6 の通りである。

表 3-6 ピニオン軸及びホイールの詳細

| 項目           | ピニオン軸         | ホイール    |
|--------------|---------------|---------|
| 種類           | シングルヘリカル      |         |
| モジュール        | 2.5           |         |
| 圧力角          | $20^\circ$    |         |
| ねじれ角         | $14^\circ$ 、左 |         |
| 中心間距離 mm     | 287.28        |         |
| 歯幅 mm        | 40            |         |
| 歯数           | 29            | 199     |
| 材質           | SNCM439       | SCM440  |
| 熱処理          | 調質            |         |
| 硬度(歯面) $H_B$ | 321~352       | 269~302 |
| 仕上げ方法        | 研磨            | シェービング  |
| 精度           | JIS 1 級       |         |

### 3.6.5 タービンの外形寸法

タービンの外形寸法は図 3-8 の通りである。

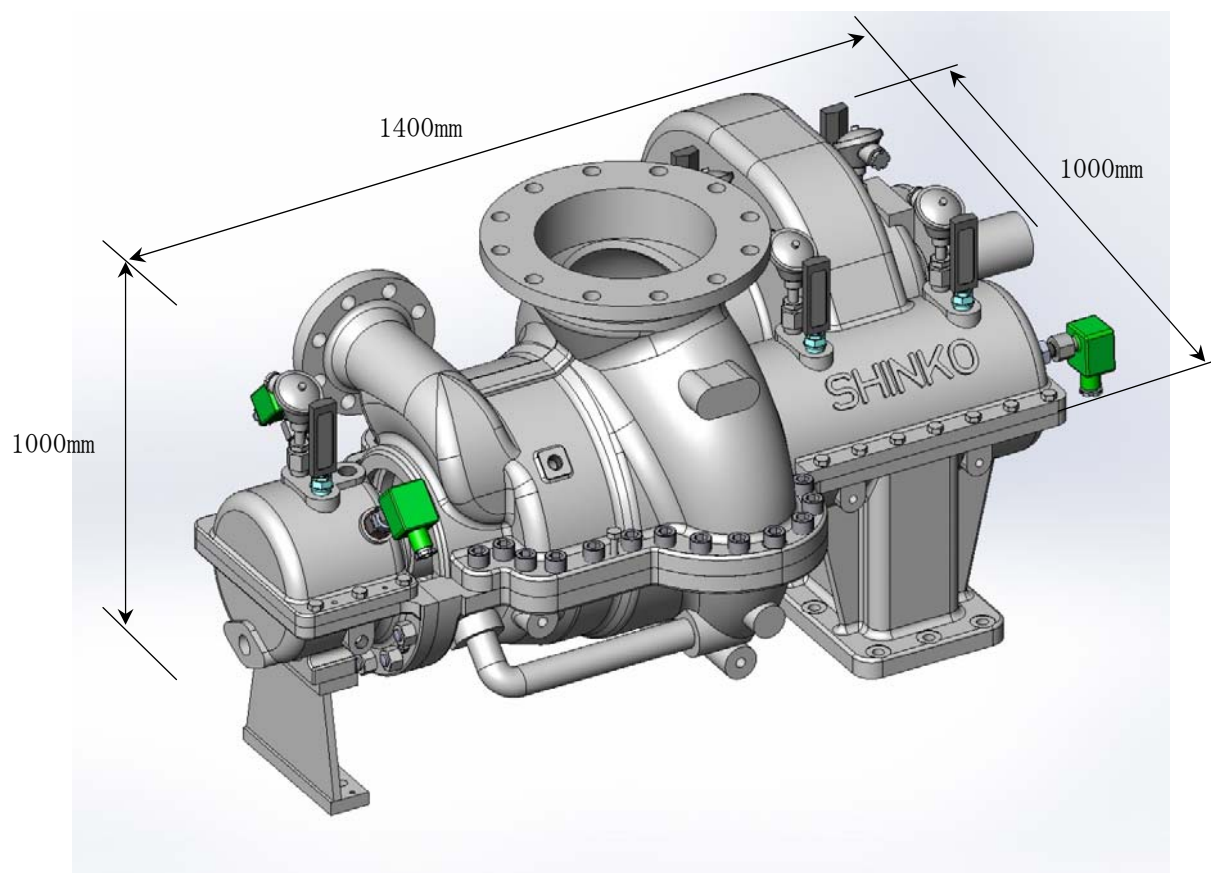


図 3-8 3 段小型蒸気タービンの外形寸法図

## 3.7 平成 25 年度の成果

### 3.7.1 タービン翼放電加工による方法の断念

放電加工機メーカーが放電加工機の外販を行わないこと、そして放電加工機運転時最高使用温度が摂氏 1 万度になるため夜間の無人運転は火災に繋がる危険性があることからタービン翼放電加工による方法は断念することにした。

### 3.7.2 4 軸加工機によるタービン翼切削時間短縮可能性の調査

関連会社の東洋機械㈱が 4 軸加工機を有していることが分かりタービン翼間寸法を 4.88mm、6.42mm 及び 8.44mm の 3 種類の設計を㈱シンコーが行い、東洋機械㈱が加工プログラムを組んで同社の 4 軸加工機を使用して翼の試切削を行ったところ加工時間が表 3-7 の通り時間を要するものの、4 軸加工機で翼加工が可能であることが判明した。

表 3-7 4 軸加工機による翼加工時間

| No. | 翼間寸法<br>(mm) | 翼 1 枚当たりの<br>加工時間 (時間) | 3 段側翼の枚数 | 3 段側翼の<br>総加工時間 (時間) | 切削工具の径<br>(mm) |
|-----|--------------|------------------------|----------|----------------------|----------------|
| 1   | 4.88         | 3                      | 60       | 180                  | Φ4             |
| 2   | 6.42         | 1.77                   | 50       | 約 89                 | Φ6             |
| 3   | 8.44         | 1.1                    | 42       | 約 47                 | Φ8             |

この 3 種類の翼間について CFD 解析を行ったところ前記 3.3 項のとおり、翼間寸法 6.42mm が 4.88mm より翼線図効率が僅か 0.7% 低下するも翼切削時間が約 2 倍も速く効率的であることが判明したので翼間寸法 6.42mm を取り上げ更に時間短縮を行うことにした。

### 3.7.3 5 軸加工機によるタービン翼切削時間短縮可能性の調査

三井精機(株)に 5 軸加工機による翼の加工を翼間寸法 6.42mm について加工を依頼し、同社が加工プログラムを組み、同社の 5 軸加工機を使用して翼の試切削を行ったところ表 3-8 の加工時間の通り飛躍的な時間短縮である 4 軸加工機の約 5 分の 1 を得ることができ大きな成果を挙げる事ができた。

表 3-8 5 軸加工機による翼加工時間

| No. | 翼間寸法<br>(mm) | 翼 1 枚当たりの<br>加工時間 (時間) | 3 段側翼の枚数 | 3 段側翼の<br>総加工時間 (時間) | 切削工具の径<br>(mm) |
|-----|--------------|------------------------|----------|----------------------|----------------|
| 1   | 6.42         | 0.33                   | 50       | 約 17                 | Φ6             |

## 3.8 平成 25 年度の目標の達成状況

当初、タービン翼の加工は放電加工機によることを本命に考えていたが、放電加工機の購入が困難であること又、夜間無人加工を行って製品のコストダウンを図ることを考えていたが、放電加工機は最高温度が摂氏 1 万度に達することから火災の危険性を伴うことが分かり断念することになった。

次に多軸加工機の調査に入ったところ、弊社の関連会社である東洋機械(株)が 4 軸加工機を所有していることが分かり、(株)シンコーがタービン翼を設計、東洋機械(株)が加工プログラムを組んで同社の 4 軸加工機を使用して翼の試切削を実施したところディスクに翼が切削できることが判明した。

しかし、翼間 4.88mm が狭いため加工カッターの径が 4mm と小さく翼 1 枚の加工に 3 時間を要し、3 段側 60 枚の翼加工に 180 時間と余りにも長時間を要することが大きな課題となった。

この解決策として翼間 6.42mm 及び 8.44mm の翼を設計し、翼枚数を 50 枚、42 枚と減じてカッター径も 6mm 及び 8mm と大きくして加工時間の短縮を考慮した。東洋機械㈱も加工プログラムの見直しを行い、同社の 4 軸加工機を使用して試切削を実施したところ、翼 1 枚当たりの加工時間は翼間 6.42mm が 1.77 時間、翼間 8.44mm が 1.1 時間に短縮することができた。又懸案事項であった刃物の折損も無くなり、無人加工の目処がたった。

一方、3 種類の翼間についてタービン翼線図効率を CFD により解析を行ったところ、翼間 4.88mm、6.42mm 及び 8.44mm の翼線図効率は夫々 94.4%、93.7%そして 91.3%で翼間寸法が小さいほど翼線図効率が高いことが分かった。しかし、1 位と 2 位の差は僅か 0.7 ポイントでタービン性能に殆ど影響を与えないため、翼間寸法 6.42mm を採用することに決定した。

そして更なる翼加工時間の短縮を図るため、三井精機㈱の 5 軸加工機の講習会に出席して同社の意見を聴取したところ、4 軸加工機に対して 5 軸加工機の性能は、格段の進歩を遂げアメリカを始めカナダの航空機メーカーへ多く輸出しているとのことであった。

そこで翼間寸法 6.42mm の図面を三井精機㈱に渡し、同社が 5 軸加工機のプログラムを組み、翼の試切削を実施したところ翼 1 枚当たりの加工時間が 0.33 時間、3 段側 50 枚の加工時間は約 17 時間と 4 軸加工機のそれと比較して約 1/5 の時間となり、驚異的な成績を収めることができた。これは通常のディスクに単体の翼を埋め込む場合と同等な価格となり、目標を達成することができた。

### 3.9 参考図面等(含写真)

1. 4 軸加工機によるディスク板へのタービン翼「試切削」写真
2. 3 段翼車（翼間Φ4.88mm）の設計図(図番 RG31-B3-1)
3. 3 段翼車（翼間Φ6.42mm）の設計図(図番 RG31-B3-2)
4. 3 段翼車（翼間Φ8.44mm）の設計図(図番 RG31-B3-3)
5. プリスクテスト加工(翼間最小径：Φ4.88mm)東洋機械㈱による 4 軸加工機
6. プリスクテスト加工(翼間最小径：Φ6.42mm)東洋機械㈱による 4 軸加工機
7. プリスクテスト加工(翼間最小径：Φ8.44mm)東洋機械㈱による 4 軸加工機
8. 3 段プリスク (RG31) (翼間最小径：Φ6.42mm)三井精機㈱による 5 軸加工機

4軸加工機によるディスク板へのタービン翼「試切削」



写真1 三井精機製4軸加工機外観



写真2 上記A部の拡大写真





記

※5.42 翼間最小径

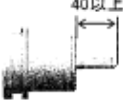
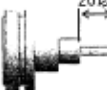
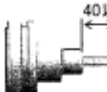
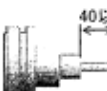
|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 標準寸法展開加工 振盪寸法径との差にふる          |                            |
| 径が寸法 mm                       | 許容差 mm                     |
| 12L                           | 0.075                      |
| 6R2                           | 0.075                      |
| 14.04                         | 0.075                      |
| 30K2                          | 0.12                       |
| 120K2                         | 0.15                       |
| 315M7                         | 0.18                       |
| 450M7                         | 0.20                       |
| 630M7                         | 0.25                       |
| 810M7                         | 0.30                       |
| 1000M7                        | 0.35                       |
| 1200M7                        | 0.40                       |
| 1500M7                        | 0.45                       |
| 1800M7                        | 0.50                       |
| 2250M7                        | 0.60                       |
| 2800M7                        | 0.70                       |
| 3500M7                        | 0.80                       |
| 4500M7                        | 1.00                       |
| 5600M7                        | 1.20                       |
| 7100M7                        | 1.50                       |
| 9000M7                        | 2.00                       |
| 11200M7                       | 2.50                       |
| 14000M7                       | 3.00                       |
| 17500M7                       | 3.50                       |
| 22500M7                       | 4.50                       |
| 28000M7                       | 5.50                       |
| 35000M7                       | 7.00                       |
| 45000M7                       | 9.00                       |
| 56000M7                       | 11.00                      |
| 71000M7                       | 14.00                      |
| 90000M7                       | 18.00                      |
| 112000M7                      | 22.00                      |
| 140000M7                      | 28.00                      |
| 175000M7                      | 35.00                      |
| 225000M7                      | 45.00                      |
| 280000M7                      | 55.00                      |
| 350000M7                      | 70.00                      |
| 450000M7                      | 90.00                      |
| 560000M7                      | 110.00                     |
| 710000M7                      | 140.00                     |
| 900000M7                      | 180.00                     |
| 1120000M7                     | 220.00                     |
| 1400000M7                     | 280.00                     |
| 1750000M7                     | 350.00                     |
| 2250000M7                     | 450.00                     |
| 2800000M7                     | 550.00                     |
| 3500000M7                     | 700.00                     |
| 4500000M7                     | 900.00                     |
| 5600000M7                     | 1100.00                    |
| 7100000M7                     | 1400.00                    |
| 9000000M7                     | 1800.00                    |
| 11200000M7                    | 2200.00                    |
| 14000000M7                    | 2800.00                    |
| 17500000M7                    | 3500.00                    |
| 22500000M7                    | 4500.00                    |
| 28000000M7                    | 5500.00                    |
| 35000000M7                    | 7000.00                    |
| 45000000M7                    | 9000.00                    |
| 56000000M7                    | 11000.00                   |
| 71000000M7                    | 14000.00                   |
| 90000000M7                    | 18000.00                   |
| 112000000M7                   | 22000.00                   |
| 140000000M7                   | 28000.00                   |
| 175000000M7                   | 35000.00                   |
| 225000000M7                   | 45000.00                   |
| 280000000M7                   | 55000.00                   |
| 350000000M7                   | 70000.00                   |
| 450000000M7                   | 90000.00                   |
| 560000000M7                   | 110000.00                  |
| 710000000M7                   | 140000.00                  |
| 900000000M7                   | 180000.00                  |
| 1120000000M7                  | 220000.00                  |
| 1400000000M7                  | 280000.00                  |
| 1750000000M7                  | 350000.00                  |
| 2250000000M7                  | 450000.00                  |
| 2800000000M7                  | 550000.00                  |
| 3500000000M7                  | 700000.00                  |
| 4500000000M7                  | 900000.00                  |
| 5600000000M7                  | 1100000.00                 |
| 7100000000M7                  | 1400000.00                 |
| 9000000000M7                  | 1800000.00                 |
| 11200000000M7                 | 2200000.00                 |
| 14000000000M7                 | 2800000.00                 |
| 17500000000M7                 | 3500000.00                 |
| 22500000000M7                 | 4500000.00                 |
| 28000000000M7                 | 5500000.00                 |
| 35000000000M7                 | 7000000.00                 |
| 45000000000M7                 | 9000000.00                 |
| 56000000000M7                 | 11000000.00                |
| 71000000000M7                 | 14000000.00                |
| 90000000000M7                 | 18000000.00                |
| 112000000000M7                | 22000000.00                |
| 140000000000M7                | 28000000.00                |
| 175000000000M7                | 35000000.00                |
| 225000000000M7                | 45000000.00                |
| 280000000000M7                | 55000000.00                |
| 350000000000M7                | 70000000.00                |
| 450000000000M7                | 90000000.00                |
| 560000000000M7                | 110000000.00               |
| 710000000000M7                | 140000000.00               |
| 900000000000M7                | 180000000.00               |
| 1120000000000M7               | 220000000.00               |
| 1400000000000M7               | 280000000.00               |
| 1750000000000M7               | 350000000.00               |
| 2250000000000M7               | 450000000.00               |
| 2800000000000M7               | 550000000.00               |
| 3500000000000M7               | 700000000.00               |
| 4500000000000M7               | 900000000.00               |
| 5600000000000M7               | 1100000000.00              |
| 7100000000000M7               | 1400000000.00              |
| 9000000000000M7               | 1800000000.00              |
| 11200000000000M7              | 2200000000.00              |
| 14000000000000M7              | 2800000000.00              |
| 17500000000000M7              | 3500000000.00              |
| 22500000000000M7              | 4500000000.00              |
| 28000000000000M7              | 5500000000.00              |
| 35000000000000M7              | 7000000000.00              |
| 45000000000000M7              | 9000000000.00              |
| 56000000000000M7              | 11000000000.00             |
| 71000000000000M7              | 14000000000.00             |
| 90000000000000M7              | 18000000000.00             |
| 112000000000000M7             | 22000000000.00             |
| 140000000000000M7             | 28000000000.00             |
| 175000000000000M7             | 35000000000.00             |
| 225000000000000M7             | 45000000000.00             |
| 280000000000000M7             | 55000000000.00             |
| 350000000000000M7             | 70000000000.00             |
| 450000000000000M7             | 90000000000.00             |
| 560000000000000M7             | 110000000000.00            |
| 710000000000000M7             | 140000000000.00            |
| 900000000000000M7             | 180000000000.00            |
| 1120000000000000M7            | 220000000000.00            |
| 1400000000000000M7            | 280000000000.00            |
| 1750000000000000M7            | 350000000000.00            |
| 2250000000000000M7            | 450000000000.00            |
| 2800000000000000M7            | 550000000000.00            |
| 3500000000000000M7            | 700000000000.00            |
| 4500000000000000M7            | 900000000000.00            |
| 5600000000000000M7            | 1100000000000.00           |
| 7100000000000000M7            | 1400000000000.00           |
| 9000000000000000M7            | 1800000000000.00           |
| 11200000000000000M7           | 2200000000000.00           |
| 14000000000000000M7           | 2800000000000.00           |
| 17500000000000000M7           | 3500000000000.00           |
| 22500000000000000M7           | 4500000000000.00           |
| 28000000000000000M7           | 5500000000000.00           |
| 35000000000000000M7           | 7000000000000.00           |
| 45000000000000000M7           | 9000000000000.00           |
| 56000000000000000M7           | 11000000000000.00          |
| 71000000000000000M7           | 14000000000000.00          |
| 90000000000000000M7           | 18000000000000.00          |
| 112000000000000000M7          | 22000000000000.00          |
| 140000000000000000M7          | 28000000000000.00          |
| 175000000000000000M7          | 35000000000000.00          |
| 225000000000000000M7          | 45000000000000.00          |
| 280000000000000000M7          | 55000000000000.00          |
| 350000000000000000M7          | 70000000000000.00          |
| 450000000000000000M7          | 90000000000000.00          |
| 560000000000000000M7          | 110000000000000.00         |
| 710000000000000000M7          | 140000000000000.00         |
| 900000000000000000M7          | 180000000000000.00         |
| 1120000000000000000M7         | 220000000000000.00         |
| 1400000000000000000M7         | 280000000000000.00         |
| 1750000000000000000M7         | 350000000000000.00         |
| 2250000000000000000M7         | 450000000000000.00         |
| 2800000000000000000M7         | 550000000000000.00         |
| 3500000000000000000M7         | 700000000000000.00         |
| 4500000000000000000M7         | 900000000000000.00         |
| 5600000000000000000M7         | 1100000000000000.00        |
| 7100000000000000000M7         | 1400000000000000.00        |
| 9000000000000000000M7         | 1800000000000000.00        |
| 11200000000000000000M7        | 2200000000000000.00        |
| 14000000000000000000M7        | 2800000000000000.00        |
| 17500000000000000000M7        | 3500000000000000.00        |
| 22500000000000000000M7        | 4500000000000000.00        |
| 28000000000000000000M7        | 5500000000000000.00        |
| 35000000000000000000M7        | 7000000000000000.00        |
| 45000000000000000000M7        | 9000000000000000.00        |
| 56000000000000000000M7        | 11000000000000000.00       |
| 71000000000000000000M7        | 14000000000000000.00       |
| 90000000000000000000M7        | 18000000000000000.00       |
| 112000000000000000000M7       | 22000000000000000.00       |
| 140000000000000000000M7       | 28000000000000000.00       |
| 175000000000000000000M7       | 35000000000000000.00       |
| 225000000000000000000M7       | 45000000000000000.00       |
| 280000000000000000000M7       | 55000000000000000.00       |
| 350000000000000000000M7       | 70000000000000000.00       |
| 450000000000000000000M7       | 90000000000000000.00       |
| 560000000000000000000M7       | 110000000000000000.00      |
| 710000000000000000000M7       | 140000000000000000.00      |
| 900000000000000000000M7       | 180000000000000000.00      |
| 1120000000000000000000M7      | 220000000000000000.00      |
| 1400000000000000000000M7      | 280000000000000000.00      |
| 1750000000000000000000M7      | 350000000000000000.00      |
| 2250000000000000000000M7      | 450000000000000000.00      |
| 2800000000000000000000M7      | 550000000000000000.00      |
| 3500000000000000000000M7      | 700000000000000000.00      |
| 4500000000000000000000M7      | 900000000000000000.00      |
| 5600000000000000000000M7      | 1100000000000000000.00     |
| 7100000000000000000000M7      | 1400000000000000000.00     |
| 9000000000000000000000M7      | 1800000000000000000.00     |
| 11200000000000000000000M7     | 2200000000000000000.00     |
| 14000000000000000000000M7     | 2800000000000000000.00     |
| 17500000000000000000000M7     | 3500000000000000000.00     |
| 22500000000000000000000M7     | 4500000000000000000.00     |
| 28000000000000000000000M7     | 5500000000000000000.00     |
| 35000000000000000000000M7     | 7000000000000000000.00     |
| 45000000000000000000000M7     | 9000000000000000000.00     |
| 56000000000000000000000M7     | 11000000000000000000.00    |
| 71000000000000000000000M7     | 14000000000000000000.00    |
| 90000000000000000000000M7     | 18000000000000000000.00    |
| 112000000000000000000000M7    | 22000000000000000000.00    |
| 140000000000000000000000M7    | 28000000000000000000.00    |
| 175000000000000000000000M7    | 35000000000000000000.00    |
| 225000000000000000000000M7    | 45000000000000000000.00    |
| 280000000000000000000000M7    | 55000000000000000000.00    |
| 350000000000000000000000M7    | 70000000000000000000.00    |
| 450000000000000000000000M7    | 90000000000000000000.00    |
| 560000000000000000000000M7    | 110000000000000000000.00   |
| 710000000000000000000000M7    | 140000000000000000000.00   |
| 900000000000000000000000M7    | 180000000000000000000.00   |
| 1120000000000000000000000M7   | 220000000000000000000.00   |
| 1400000000000000000000000M7   | 280000000000000000000.00   |
| 1750000000000000000000000M7   | 350000000000000000000.00   |
| 2250000000000000000000000M7   | 450000000000000000000.00   |
| 2800000000000000000000000M7   | 550000000000000000000.00   |
| 3500000000000000000000000M7   | 700000000000000000000.00   |
| 4500000000000000000000000M7   | 900000000000000000000.00   |
| 5600000000000000000000000M7   | 1100000000000000000000.00  |
| 7100000000000000000000000M7   | 1400000000000000000000.00  |
| 9000000000000000000000000M7   | 1800000000000000000000.00  |
| 11200000000000000000000000M7  | 2200000000000000000000.00  |
| 14000000000000000000000000M7  | 2800000000000000000000.00  |
| 17500000000000000000000000M7  | 3500000000000000000000.00  |
| 22500000000000000000000000M7  | 4500000000000000000000.00  |
| 28000000000000000000000000M7  | 5500000000000000000000.00  |
| 35000000000000000000000000M7  | 7000000000000000000000.00  |
| 45000000000000000000000000M7  | 9000000000000000000000.00  |
| 56000000000000000000000000M7  | 11000000000000000000000.00 |
| 71000000000000000000000000M7  | 14000000000000000000000.00 |
| 90000000000000000000000000M7  | 18000000000000000000000.00 |
| 112000000000000000000000000M7 | 22000000000000000000000.00 |
| 140000000000000000000000000M7 | 28000000000000000000000.00 |
| 175000000000000000000000000M7 | 35000000000000000000000.00 |
| 225000000000000000000000000M7 | 45000000000000000000000.00 |
| 280000000000000000000000000M7 | 5500000000000000           |



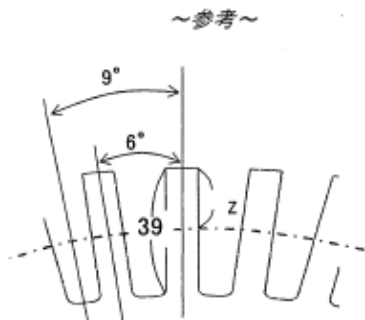
ブリスケット加工(翼間最小径:  $\Phi 4.88$ )

2013年10月17日

東洋機械(株) 生産技術部

| 客先名       | 社内テスト加工                                   |   | 品名         | 翼車(60本)    |            |             |            | 使用機械           | MCH1            |              |   |
|-----------|---|---|------------|------------|------------|-------------|------------|----------------|-----------------|--------------|---|
| 図面番号      | RG31-B3                                   |   | 型式         | BP002      |            |             |            | 加工者            | 長沢              |              |   |
| 加工原点      | X-424. Y-623 Z-724                        |   | 段落         | 3          |            |             |            | プログラマー         | 追田              |              |   |
| 工具(T) No. | 工具名称                                      | 工具形状  | 工具長<br>工具径 | 長補正<br>(H) | 径補正<br>(D) | 周速<br>m/min | 回転数<br>RPM | 送り量<br>mm/min  | 切込量             | 残し量          | 工具、プログラム、備考等  |
| T91       | 超硬ラフィング<br>エンドミル<br>$\phi 12$ R2<br>(4枚刃) |  |            | H91        | D91        | 50          | 1326       | 212<br>(0.04)  | 軸:10<br>径:0.5   | 軸:0<br>径:0.1 | 日立エボック $\phi 12$<br>PRG : 03010<br>Z10mmピッチで4回<br>Z0~Z-39まで                                     |
| T92       | 超硬エンドミル<br>$\phi 4$ R0.5<br>(2枚刃)         |  |            | H92        | D92        | 45          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:4<br>径:0.25   | 径:0.1        | 日進工具超硬エンドミル<br>$\phi 4 \times R0.5 \times 24$<br>PRG : 03020<br>Z4mmピッチで4回<br>Z0~Z-20まで         |
| T93       | ソリッドボール<br>$\phi 3$ R1.5<br>(2枚刃)         |  |            | H93        | D93        | 33          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:1~3<br>径:0.25 | 径:0.1        | OSGソリッドボール<br>WXL-LN-EBD R1.5 $\times 40 \times 6$<br>PRG : 03030<br>Z3mmピッチで8回<br>Z-20~-39まで   |
| T94       | ソリッドボール<br>$\phi 4$ R2<br>(2枚刃)           |  |            | H94        | D94        | 45          | 3600       | 300<br>(0.042) | 軸:0.5           |              | OSGソリッドボール<br>WXL-LN-EBD R2 $\times 40 \times 6$<br>PRG : 03040<br>Z0.5mmピッチで78回<br>Z-39まで仕上げ加工 |

## 加工時間



|        | 1R(22)  | 2R(28)  | 3R(39)  |
|--------|---------|---------|---------|
| T91    | 0:03:27 | 0:05:01 | 0:07:53 |
| T92    | 0:13:02 | 0:25:42 | 1:05:52 |
| T93    | 1:32:57 | 1:32:57 | 1:35:52 |
| T94    | 0:12:49 | 0:16:11 | 0:24:09 |
| 1本当たり  | 2:02:15 | 2:19:51 | 3:13:46 |
| 1段落当たり | 約123時間  | 約140時間  | 約194時間  |

想定値

実測値

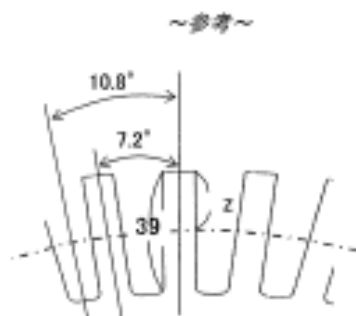
※3段落合計加工時間：約457時間

ブリスケット加工(翼間最小径:  $\Phi 4.88$ mm) 東洋機械(株)による4軸加工機

ブリスケット加工(翼間最小径:  $\phi 6.42$ )

| 客先名          |   | 社内テスト加工   |            | 品名         |            | 翼車(50本)     |            |                |               | 使用機械         | MCH1   |
|--------------|---|---|------------|------------|------------|-------------|------------|----------------|---------------|--------------|--|
| 図面番号         |   | RG31-B3   |            | 型式         |            | BP002       |            |                |               | 加工者          | 長沢   |
| 加工原点         |   | X-424. Y-609.8 Z-723.7  |            | 段落         |            | 3           |            |                |               | プログラマー       | 迫田   |
| 工具(T)<br>No. | 工具名称  | 工具形状  | 工具長<br>工具径 | 長補正<br>(H) | 径補正<br>(D) | 周速<br>m/min | 回転数<br>RPM | 送り量<br>mm/rev  | 切込量           | 残し量          | 工具、プログラム、備考等   |
| T91          | 超硬ラフィング<br>エンドミル<br>$\phi 8$ R0<br>(4枚刃)    |    |            | H91        | D91        | 45          | 1800       | 288<br>(0.04)  | 軸:10<br>径:0.6 | 軸:0<br>径:0.1 | 国産精工 $\phi 8 \times R0$<br>PRG : 03001 (03010)<br>Z10mmピッチで2回<br>Z0~Z-20まで   |
| T92          | 超硬ラフィング<br>ボールエンドミル<br>$\phi 8$ R4<br>(3枚刃) |    |            | H92        | D92        | 59          | 2387       | 288<br>(0.04)  | 軸:10<br>径:0.6 | 軸:0<br>径:0.1 | HANITA $\phi 8 \times R4$<br>PRG : 03002 (03015)<br>Z10mmピッチで2回<br>Z-20~Z-39まで   |
| T93          | 超硬エンドミル<br>$\phi 5$ R0.5<br>(2枚刃)           |    |            | H93        | D93        | 56          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:5<br>径:0.4  | 径:0.1        | 日進工具超硬エンドミル<br>$\phi 5 \times R0.5$ 5 $\times$ 20<br>PRG : 03003 (03020)<br>Z5mmピッチで4回<br>Z0~Z-20まで                        |
| T94          | 超硬エンドミル<br>$\phi 4$ R0.5<br>(2枚刃)           |    |            | H94        | D94        | 45          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:4<br>径:0.3  | 径:0.1        | 日進工具超硬エンドミル<br>$\phi 4 \times R0.5$ 5 $\times$ 32<br>PRG : 03004 (03030)<br>Z4mmピッチで3回<br>Z-20~-32まで                       |
| T95          | 超硬エンドミル<br>$\phi 4$ R0.5<br>(2枚刃)           |   |            | H95        | D94        | 45          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:4<br>径:0.3  | 径:0.1        | 日進工具超硬エンドミル<br>$\phi 4 \times R0.5$ 5 $\times$ 40<br>PRG : 03005 (03030)<br>Z4mmピッチで1回<br>Z-32~-36まで                       |
| T96          | フリットボール<br>$\phi 4$ R2<br>(2枚刃)             |  |            | H96        | D94        | 45          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:3<br>径:0.3  | 軸:0<br>径:0.1 | 050フリットボール<br>KOL-LN-EED R2 $\times$ 40 $\times$ 6<br>PRG : 03006 (03030)<br>: 03008 (03050)<br>Z3mmピッチで1回<br>Z-36~-38.7まで |
| T97          | フリットボール<br>$\phi 6$ R3<br>(2枚刃)             |  |            | H97        | D97        | 45          | 2387       | 191<br>(0.04)  | 軸:0.5         |              | 日進工具超硬フリットボール<br>$\phi 6 \times R3$ $\times$ 40<br>PRG : 03007 (03040)<br>Z0.5mmピッチで78回<br>Z-39まで仕上げ加工                     |

## 加工時間



|          | 1R(22)  | 2R(28)  | 3R(39)  |
|----------|---------|---------|---------|
| T91      | -       | 0:05:00 | 0:08:12 |
| T92      | 0:06:50 | 0:06:50 | 0:06:50 |
| T93      | 0:04:00 | 0:07:00 | 0:11:34 |
| T94      | 0:20:08 | 0:20:08 | 0:20:08 |
| T95      | 0:07:44 | 0:07:44 | 0:07:44 |
| T96      | 0:07:48 | 0:07:48 | 0:07:48 |
| T97      | 0:24:00 | 0:28:00 | 0:40:05 |
| T96(産仕上) | 0:03:30 | 0:03:30 | 0:03:30 |
| 1本当たり    | 1:14:00 | 1:26:00 | 1:45:51 |
| 1段落当たり   | 約62時間   | 約72時間   | 約89時間   |

想定値

実測値

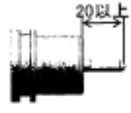
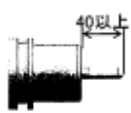

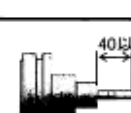
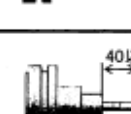

※3段落合計加工時間: 約223時間

ブリスケット加工(翼間最小径:  $\Phi 6.42$ mm) 東洋機械(株)による 4 軸加工機

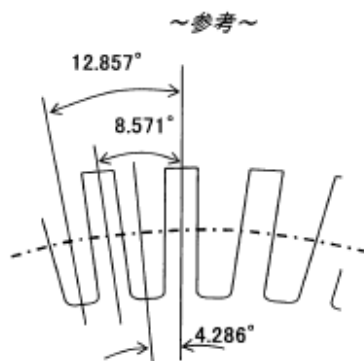
## ブリスケット加工(翼間最小径: φ8.44)

2013年10月28日

東洋機械(株) 生産技術部

| 客先名       | 社内テストカット                              |   | 品名         | 翼車(42本)    |            |             |            | 使用機械           | MCH1           |                |   |
|-----------|---------------------------------------|---|------------|------------|------------|-------------|------------|----------------|----------------|----------------|---|
| 図面番号      | RG31-B3                               |   | 型式         | BP002      |            |             |            | 加工者            | 長沢             |                |   |
| 加工原点      | X-424. Y-609.8 Z-723.7                |   | 段落         | 3          |            |             |            | プログラマー         | 迫田             |                |   |
| 工具(T) No. | 工具名称                                  | 工具形状  | 工具長<br>工具径 | 長補正<br>(H) | 径補正<br>(D) | 周速<br>m/min | 回転数<br>RPM | 送り量<br>mm/min  | 切込量            | 残し量            | 工具、プログラム、備考等  |
| T91       | 超硬ラフィング<br>エンドミル<br>φ8 R0<br>(4枚刃)    |    |            | H91        | D91        | 45          | 1800       | 288<br>(0.04)  | 軸:10<br>径:0.6  | 軸:0<br>径:0.1   | 岡崎精工 φ8×R0<br>PRG: 03001 (03010, 03015)<br><br>Z10mmピッチで2回<br>Z0~Z-20まで                                       |
| T92       | 超硬ラフィング<br>ホールエンドミル<br>φ8 R4<br>(3枚刃) |    |            | H92        | D92        | 59          | 2387       | 288<br>(0.04)  | 軸:10<br>径:0.6  | 軸:0<br>径:0.1   | HANITA φ8×R4<br>PRG: 03002 (03020)<br><br>Z10mmピッチで2回<br>Z-20~Z-39まで  |
| T93       | 超硬エンドミル<br>φ6 R0.5<br>(2枚刃)           |    |            | H93        | D93        | 68          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:5<br>径:0.4   | 径:0.1          | SECO超硬エンドミル<br>141VL060R050TNZ4<br>φ6×R0.5×30<br>PRG: 03003 (03030)<br><br>Z5mmピッチで2回<br>Z-20~Z-30まで          |
| T94       | 超硬エンドミル<br>φ5 R0.5<br>(2枚刃)           |    |            | H94        | D94        | 56          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:6<br>径:0.4   | 径:0.1          | 日進工具超硬エンドミル<br>φ5×R0.5×40<br>PRG: 03004 (03040)<br><br>Z6mmピッチで1回<br>Z-30~-36まで                               |
| T95       | ソリッドホール<br>φ4 R2<br>(2枚刃)             |   |            | H95        | D95        | 45          | 3600       | 180<br>(0.025) | 軸:2.7<br>径:0.3 | 軸:0.3<br>径:0.1 | OSGソリッドボール<br>WXL-LN-EBD R2×40×6<br>PRG: 03005 (03050)<br>: 03007 (03070)<br><br>Z2.7mmピッチで1回<br>Z-36~-38.7まで |
| T96       | 超硬エンドミル<br>φ8 R3<br>(4枚刃)             |  |            | H96        | D96        | 45          | 1800       | 288<br>(0.04)  | 軸:0.5          |                | 日立エポック φ8×R3<br>PRG: 03006 (03060)<br><br>Z0.5mmピッチで78回<br>Z-39まで仕上加工   |

## 加工時間



$$360/42 = 8.57142$$

$$\approx 8.571^\circ$$

|          | 1R(22)  | 2R(28)  | 3R(39)  |
|----------|---------|---------|---------|
| T91      | -       | 0:07:31 | 0:13:00 |
| T92      | 0:09:10 | 0:09:10 | 0:09:10 |
| T93      | 0:03:34 | 0:03:34 | 0:03:34 |
| T94      | 0:02:15 | 0:02:15 | 0:02:15 |
| T95      | 0:03:10 | 0:03:10 | 0:03:10 |
| T96      | 0:17:00 | 0:21:00 | 0:29:14 |
| T95(底仕上) | 0:05:22 | 0:05:22 | 0:05:22 |
| 1本当たり    | 0:40:31 | 0:52:02 | 1:05:45 |
| 1段落当たり   | 約29時間   | 約38時間   | 約47時間   |

想定値

実測値

※3段落合計加工時間: 約114時間

ブリスケット加工(翼間最小径: Φ8.44mm) 東洋機械(株)による4軸加工機

3段翼ブリスク (RG31) 機種: Vertex550-5X #167 BT40 25,000min<sup>-1</sup> 2013/12/10 ドライエア-ブロー加工

三井精機工業(株)

| No.  | 加工内容   | 使用工具             | 使用ホルダー       | 回転数  | 送り  | ap   | ae   | 残し代  |       | 加工時間<br>(1翼) |       |
|------|--------|------------------|--------------|------|-----|------|------|------|-------|--------------|-------|
|      |        |                  |              |      |     |      |      | ブレード | コーナーR |              | ハブ    |
| 1    | 荒1     | φ6×2° 7-ハ-EM     | Corochuck930 | 3103 | 239 | 18   | 0.3  | 0.5  | *     | 40           | 02:31 |
| 2    | 中仕上1   | φ6×2° 7-ハ-EM     | Corochuck930 | 3103 | 239 | 18   | 0.47 | 0.03 | *     | 40           | 00:33 |
| 3    | 荒2     | φ6×2° 7-ハ-EM     | Corochuck930 | 3103 | 239 | 18   | 0.3  | 0.5  | *     | 40           | 02:31 |
| 4    | 中仕上2   | φ6×2° 7-ハ-EM     | Corochuck930 | 3103 | 239 | 18   | 0.45 | 0.05 | *     | 40           | 00:34 |
| 5    | ハブ中仕上1 | 2R×1.5° 7-ハ-ホ-EM | BT40NC2009SM | 9549 | 450 | 1.5  | *    | 0.05 | 0.05  | 40           | 02:13 |
| 6    | ハブ中仕上2 | 2R×1.5° 7-ハ-ホ-EM | BT40NC2009SM | 9549 | 450 | 1.45 | *    | 0.05 | 0.05  | 40           | 01:28 |
| 7    | ハブ仕上   | 2R×1.5° 7-ハ-ホ-EM | BT40NC2009SM | 9549 | 450 | 0.05 | *    | *    | 0.05  | 40           | 01:47 |
| 8    | コーナー仕上 | 2R×1.5° 7-ハ-ホ-EM | BT40NC2009SM | 9549 | 450 | 0.05 | *    | *    | 0     | 40           | 02:44 |
| 9    | 翼仕上    | φ6×2° 7-ハ-EM     | Corochuck930 | 3103 | 239 | 36   | 0.03 | 0    | *     | 40           | 00:36 |
| 1翼合計 |        |                  |              |      |     |      |      |      |       | 14:57        |       |



3段ブリスク (RG31) (翼間最小径: Φ6.42mm) 三井精機(株)による5軸加工機

## 4 平成26年度の実施内容

### 4.1 蒸気タービン製作

#### 4.1.1 蒸気タービンの仕様

当蒸気タービンは表 4-1 に示す仕様とし、下記項目を満足するものとした。

- (a)平成 25 年度に本事業において加工技術を確立した翼一体型羽根車ディスクを採用する。
- (b)スペースに制約のある船舶で採用できる筐体寸法となるように、各部の小型化を目指す。
- (c)運転操作性を良くするため、対振動特性を考慮してタービンロータには剛性軸を採用する。
- (d)用途拡大を視野に入れ、蒸気条件や出力などの顧客要求に柔軟に対応できるようにする。

表 4-1 蒸気タービン仕様(計画)

|              |                             |
|--------------|-----------------------------|
| 形式           | 3 段落衝動減速機付復水式               |
| 機名           | RG31                        |
| 定格出力         | 80kW                        |
| 回転数(高速側/低速側) | 12114/1780min <sup>-1</sup> |
| 入口蒸気条件       | 0.6MPaG × SAT.              |
| 排気圧力         | -40kPaG (-300mmHg)          |
| 蒸気消費量        | 1.5ton/h                    |

#### 4.1.2 翼一体型羽根車ディスク

蒸気タービンの効率を向上させるために、タービン回転数を高速化することは有効な手段である。しかしながら、高速化することで動翼に大きな遠心力が負荷されることから、強度上の制約が生じる。蒸気タービンで一般的に採用される植翼型の動翼は、構造上、特に翼根の接触部に大きな応力が生じやすいため、高速化を妨げる一因となっている。そこで平成 25 年度の本事業において、翼一体型羽根車ディスクの加工方法を検討し、多軸加工機による加工技術を確立した。

図 4-1 に当タービンの翼一体型羽根車ディスクの加工図を示す。組み立て容易化と加工時の段取り時間短縮のため、1~3 段の羽根車ディスク一体の構造とした。羽根車ディスクの諸元は表 4-2 の通りである。機械加工容易化のため、各段異なる箇所は翼高さのみである。翼型は、平成 25 年度事業の当初の計画通りとした。翼枚数は、平成 25 年度事業の結果からコスト、加工性、性能のバランスを検討して決定した。翼高さは、1~3 段全てについて平成 25 年度事業の当初の計画よりも低いものに変更した。これは、翼高さとノズル個数の増減による加工・製作コストを比較すると、翼加工数の方がノズル加工数より大きいことから、翼高さを低くしノズル個数を増加させることでノズル面積を確保したためである。



翼一体型羽根車ディスクは、タービンシャフトに焼き嵌めによって取り付ける構造を採用した。通常、ディスクとシャフトの間には回転方向の滑りを防止するためキーを取り付けるが、アンバランスの原因となるため、回転速度が速く伝達トルクの小さい当蒸気タービンでは焼き嵌めによる締付け力のみで固定した。締め代は、遠心力による拡がりや瞬時トルクを考慮し、伝達可能トルクについて約 16 倍の裕度を付けて決定した。焼き嵌め接触面は、軸方向に軸径の変化をつけることで組立性を向上させた。



表 4-2 翼一体型羽根車ディスク諸元

| 段落     |    | 1 段  | 2 段 | 3 段 |
|--------|----|------|-----|-----|
| PCD    | mm | 290  | 293 | 302 |
| 翼高さ    | mm | 15   | 18  | 27  |
| 翼枚数    | 枚  | 50   |     |     |
| 翼間最小寸法 | mm | 6.42 |     |     |

#### 4.1.3 検討内容

図 4-2、4-3 にそれぞれ蒸気タービン外形図、蒸気タービン断面図を示す。当蒸気タービンは、ポンプ駆動用として計画した。蒸気タービンおよび周辺機器は、弊社の多くの蒸気タービンと同様に共通台板上に取り付け、ユニット化とすることで据え付けや取り扱いを容易にしている。

蒸気タービン本体は、顧客の様々な蒸気条件、要求出力に 대응できるように、蒸気流量増加に伴う蒸気入口の増設、高圧化に伴う 3 段落から 4 段落への増段、背圧タービンと復水タービンの選択などに対応している。

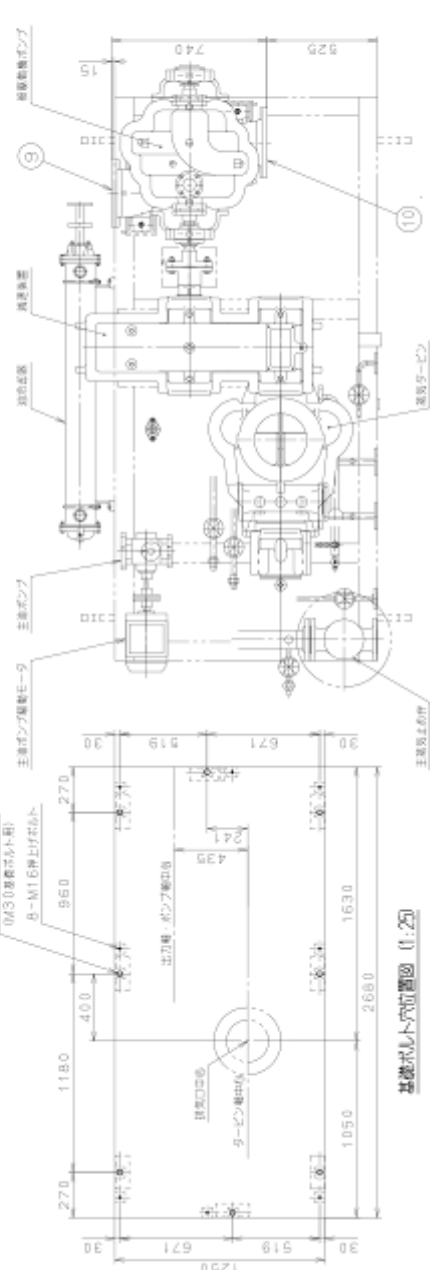
当蒸気タービンはタービン回転速度が  $12114\text{min}^{-1}$  に対して、ポンプ回転速度  $1780\text{min}^{-1}$  であるため減速機を有している。表 4-3 に減速機の諸元を示す。

周辺機器として通常の蒸気タービンには、蒸気流量を調整し回転速度を制御する蒸気加減弁を取り付けるが、蒸気タービン自体の性能評価には不要なため省略した。ただし、蒸気流量の調整は、社内試験設備の蒸気供給元弁を使用して手動にて行った。他、安全装置として蒸気を瞬時に遮断する主蒸気止め弁を設けた。タービン回転速度の超過や潤滑油の異常低下などを検出した時にこの弁は作動する。

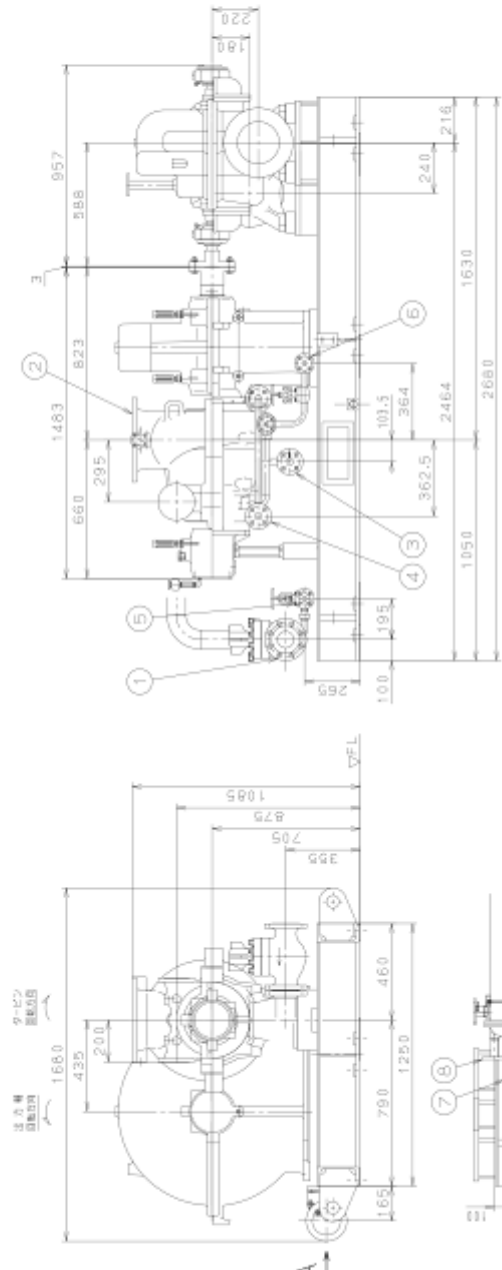
図 4-3 の断面図に主要部の使用材料を記載している。通常、翼の材質には耐熱鋼を使用することが多いが、当蒸気タービンは翼一体型の羽根車ディスクを採用したことにより強度的裕度が生まれたため、ステンレス鋼を使用してコスト低減を図った。前述のように様々な蒸気条件に対応するために、タービンケーシングの材質には高温高圧用炭素鋳鋼 SCPH2 を採用した。

改訂

| 番号               | 取 合 名 称     | 接続方法及び口径       |
|------------------|-------------|----------------|
| 1                | 主蒸気入口       | JIS20K 80A RF  |
| 2                | 排気口         | JIS10K 250A FF |
| 3                | シーリング蒸気入口   | JIS10K 25A FF  |
| 4                | クラントドレン出口   | JIS10K 25A FF  |
| 5                | 主蒸気止動弁ドレン出口 | JIS20K 15A RF  |
| 6                | 排気止動弁ドレン出口  | JIS10K 15A RF  |
| 7                | 排気冷却器冷却水入口  | JIS5K 32A FF   |
| 8                | 排気冷却器冷却水出口  | JIS5K 32A FF   |
| 9                | 凝縮動機ポンプ吸込口  | JIS5K 200A FF  |
| 10               | 凝縮動機ポンプ吐出口  | JIS10K 200A FF |
| 機器質量表 (概略)       |             | K 6            |
| 蒸気タービン           |             | 4000           |
| メンテナンスタブ質量表 (概略) |             | K 6            |
| タービン上半庫室         |             | 220            |
| タービンローター         |             | 150            |
| 高速機上半庫室          |             | 250            |
| ホイール輪            |             | 400            |



基礎ボルト穴位置図 (1:20)



矢視 A

|            |          |
|------------|----------|
| TAG. NO.   | -        |
| 工事番号       | T0000093 |
| 蒸気タービン 外形図 |          |
| 機 名        | RG31     |
| 機 番        | TH85001  |

尺 寸 1:20

株式会社リノコ

図 4-2 蒸気タービン外形図



表 4-3 減速機諸元

|       |    | ピニオン     | ホイール    |
|-------|----|----------|---------|
| 方式    | —  | シングルヘリカル |         |
| モジュール | —  | 3        |         |
| 圧力角   | —  | 20°      |         |
| ねじれ角  | —  | 14° , 左  |         |
| 中心間距離 | mm | 434.78   |         |
| 歯幅    | mm | 120      |         |
| 歯数    | 枚  | 36       | 245     |
| PCD   | mm | 111.306  | 757.501 |
| 材質    | —  | SNCM439  | SF640B  |
| 熱処理   | —  | 調質       |         |
| 硬度    | —  | 321~352  | 201~248 |
| 仕上げ法  | —  | 研磨       | シェービング  |
| 精度    | —  | JIS 1 級  |         |

#### 4.1.4 翼一体型羽根車ディスク製作

平成 25 年度の試切削で得られた成果にコストと納期を考慮し、弊社関連会社の東洋機械(株)が所有している 4 軸加工機（三井精機製）で加工を試みた。

加工手法について、詳細を以下に述べる。

図 4-4 に示すように、翼一体型羽根車ディスクの加工は、エンドミルによって外周方向から翼を削り出す。そのため、使用工具の径を決定する上で、図 4-5 に示す翼と翼の間の最小隙間が重要となる。当加工では、図 4-6 に示すようにトロコイド加工を行った。青の曲線は、工具歯先の軌跡であるトロコイド加工とは、回転するエンドミルが円弧状の軌跡を描きながら切削する加工法である。通常の直線加工に比べ、被削材との接触長さが短く工具への切削負荷が小さいため、高速切削が可能となる。トロコイド加工が加工断面全てにおいて可能な条件は、

$$\text{判定値（最小隙間/工具径）} \geq 1.6$$

である。ただし、最小隙間による判定のため、不可判定であっても部分的なトロコイド加工は可能である。表 4-4 に各翼断面高さにおける判定値を示す。工具径  $\phi 8$  および  $\phi 6$  ではどの断面においてもトロコイド加工で切削しきれないが、 $\phi 5$  では Z(断面高さ)=20~27 程度まで、 $\phi 4$  では全ての断面において切削可能であることが分かる。この判定に従って径の異なる工具を複数使用することで、効率的な加工を可能にした。

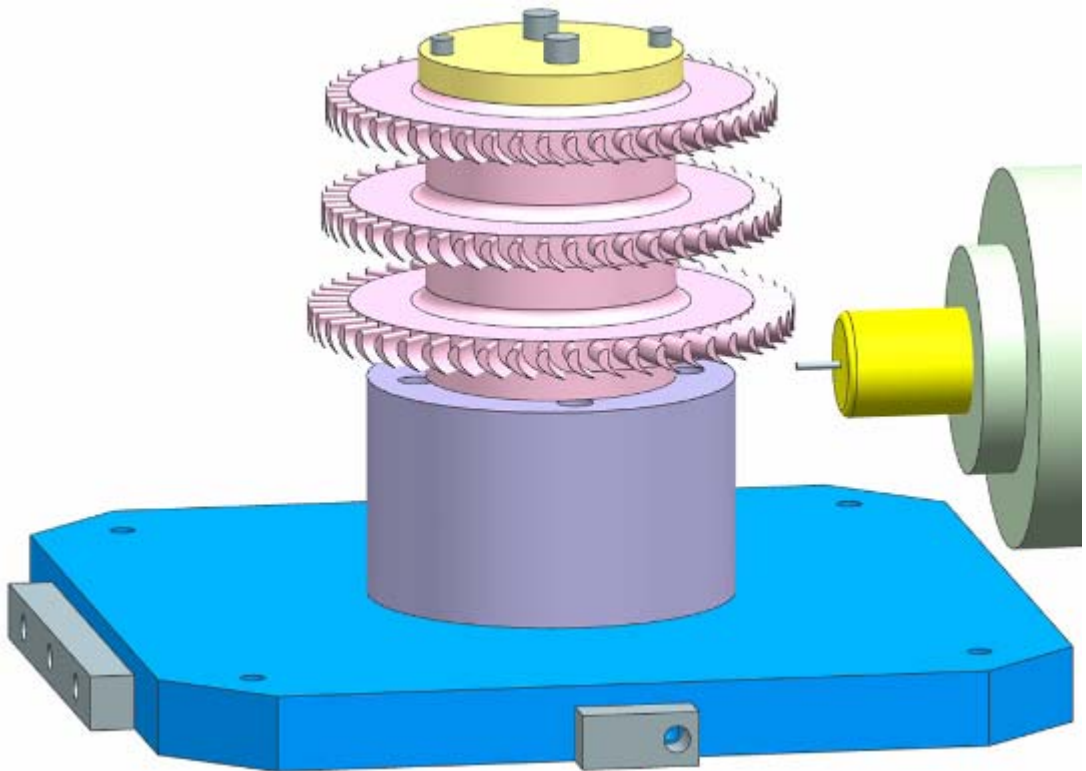


図 4-4 翼一体型羽根車ディスクの加工

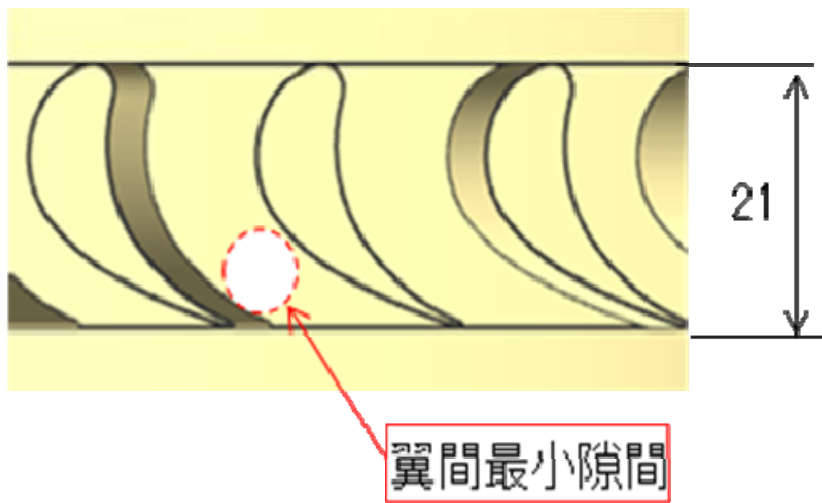


図 4-5 最小隙間

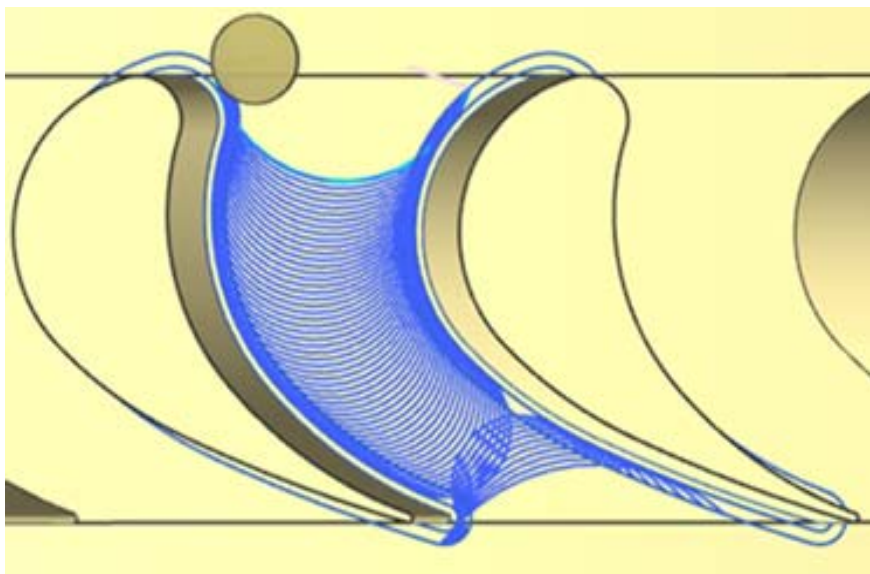


図 4-6 トロコイド加工



表 4-4 トロコイド加工可能判定

| 断面高さ | 最小隙間 | 判定値(最小隙間/工具径) |        |        |        |
|------|------|---------------|--------|--------|--------|
|      |      | 工具径 φ8        | 工具径 φ6 | 工具径 φ5 | 工具径 φ4 |
| Z=0  | 6.41 | 0.80          | 1.07   | 1.28   | 1.60   |
| Z=3  | 6.64 | 0.83          | 1.11   | 1.33   | 1.66   |
| Z=10 | 7.16 | 0.90          | 1.19   | 1.43   | 1.79   |
| Z=15 | 7.54 | 0.94          | 1.26   | 1.51   | 1.89   |
| Z=20 | 7.94 | 0.99          | 1.32   | 1.59   | 1.99   |
| Z=27 | 8.49 | 1.06          | 1.42   | 1.70   | 2.12   |

以下に加工手順を述べる。

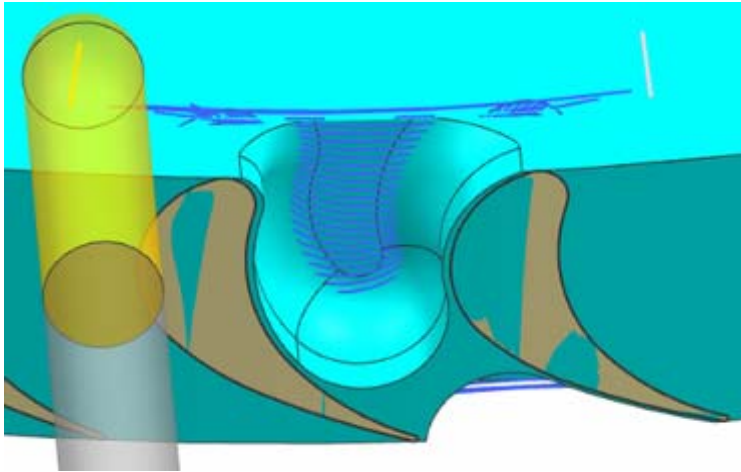
① 荒加工 1

φ8 の工具を使用し、トロコイド加工が可能な範囲を加工する。大径の工具を使うことで切込み量を増やせるため、加工効率向上に寄与する。

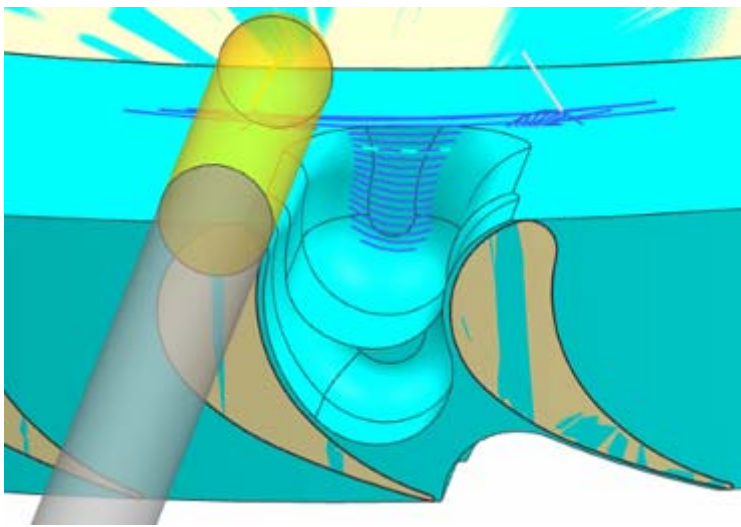
表 4-5 に加工条件、図 4-7 に加工イメージを示す。

表 4-5 荒加工 1 加工条件

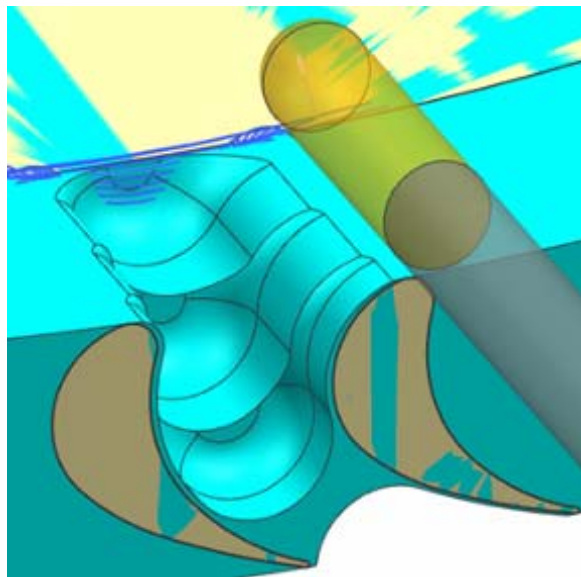
| 使用工具    |        |                   | 超硬ラフティング<br>ボールエンドミル<br>(φ8, R4, 3 枚刃) |
|---------|--------|-------------------|--|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min             | 59                                     |
|         | 工具回転速度 | min <sup>-1</sup> | 2387                                   |
|         | 送り速度   | mm/min            | 288                                    |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm                | 0.6                                    |
|         | 工具軸方向  | mm                | 10                                     |
| 加工断面(Z) |        | mm                | 20, 10, .03                            |



(a)  $Z=20$



(b)  $Z=10$



(c)  $Z=0.3$

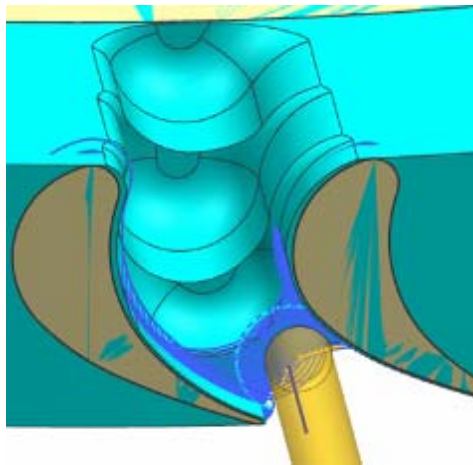
图 4-7 荒加工 1

② 荒加工 2

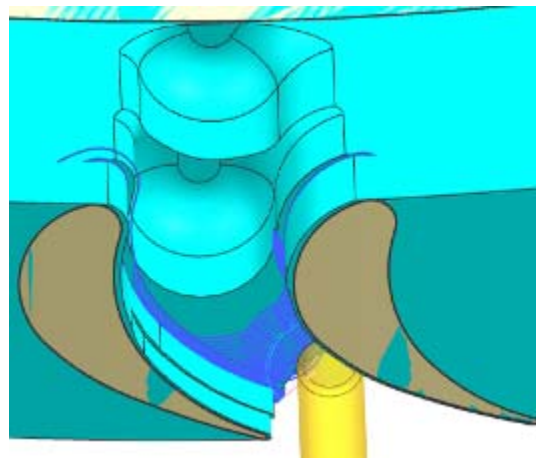
φ5 の工具を使用し、前工程で切削できなかった部分をトロコイド加工する。  
表 4-6 に加工条件、図 4-8 に加工イメージを示す。

表 4-6 荒加工 2 加工条件

| 使用工具    |        |                   | 超硬エンドミル<br>(φ5, R0.5, 2 枚刃) |
|---------|--------|-------------------|-----------------------------|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min             | 56                          |
|         | 工具回転速度 | min <sup>-1</sup> | 3600                        |
|         | 送り速度   | mm/min            | 180                         |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm                | 0.4                         |
|         | 工具軸方向  | mm                | 3~4                         |
| 加工断面(Z) |        | mm                | 24, 20                      |



(a) Z=24



(b) Z=20

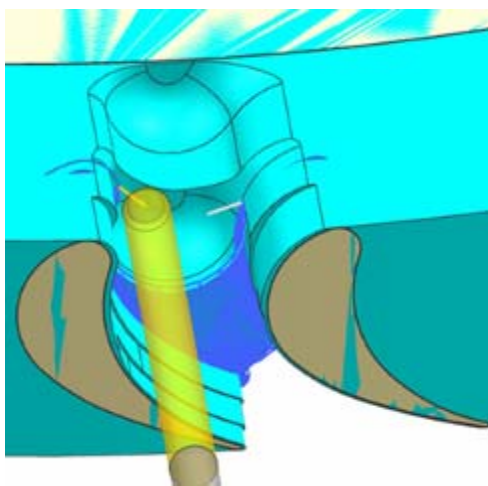
図 4-8 荒加工 2

### ③ 荒加工 3

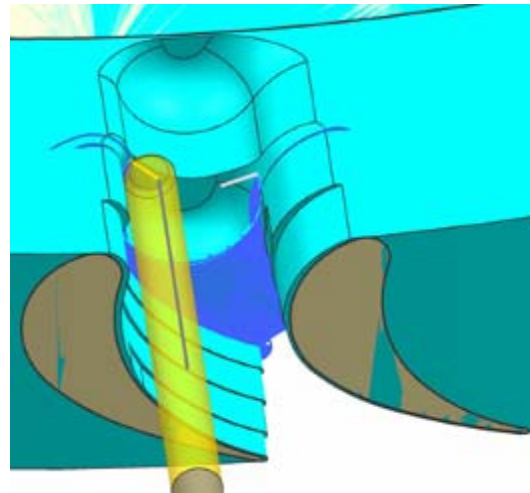
φ4 の工具を使用し、前工程で切削できなかった部分をトロコイド加工する。  
表 4-7 に加工条件、図 4-9 に加工イメージを示す。

表 4-7 荒加工 3 加工条件

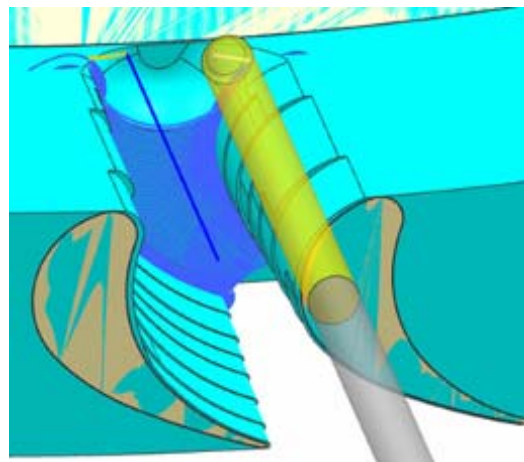
| 使用工具    |        |                   | 超硬エンドミル<br>(φ4, R0.5, 2 枚刃) |
|---------|--------|-------------------|-----------------------------|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min             | 45                          |
|         | 工具回転速度 | min <sup>-1</sup> | 3600                        |
|         | 送り速度   | mm/min            | 180                         |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm                | 0.3                         |
|         | 工具軸方向  | mm                | 3~4                         |
| 加工断面(Z) |        | mm                | 16, 13, 10, 6, 3            |



(a) Z=16



(b) Z=10



(c) Z=3

図 4-9 荒加工 3

④ 荒加工 4

φ4 の工具を使用し、前工程で切削できなかつた部分をトロコイド加工する。  
表 4-8 に加工条件、図 4-10 に加工イメージを示す。

表 4-8 荒加工 4 加工条件

| 使用工具    |        |                   | 超硬<br>ボールエンドミル<br>(φ4, R2, 2 枚刃) |
|---------|--------|-------------------|----------------------------------|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min             | 45                               |
|         | 工具回転速度 | min <sup>-1</sup> | 3600                             |
|         | 送り速度   | mm/min            | 180                              |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm                | 0.3                              |
|         | 工具軸方向  | mm                | 3                                |
| 加工断面(Z) |        | mm                | 0.3                              |

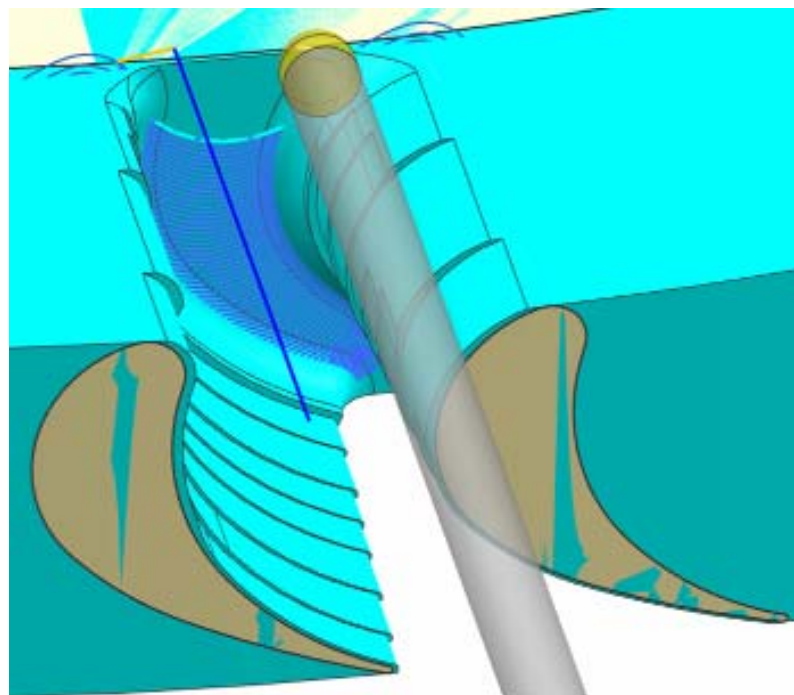
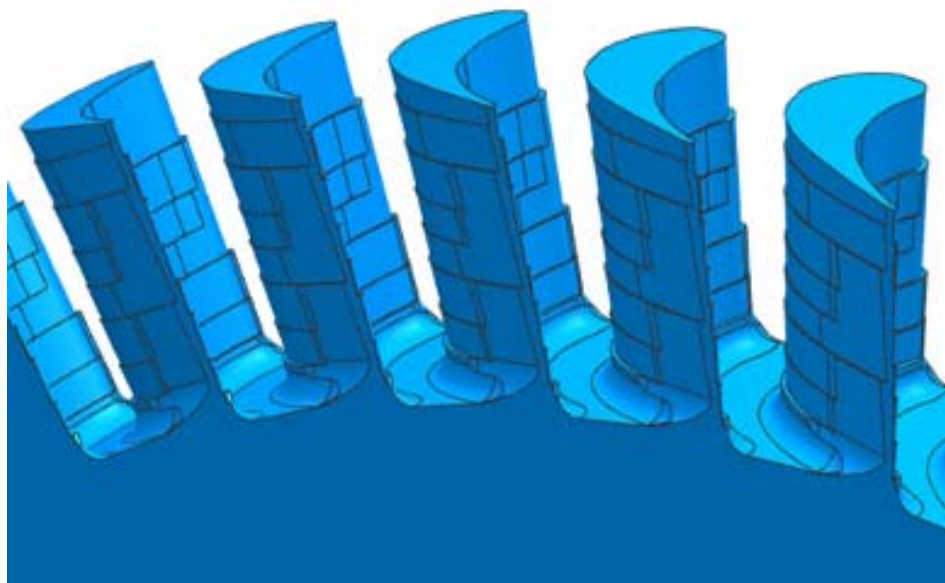
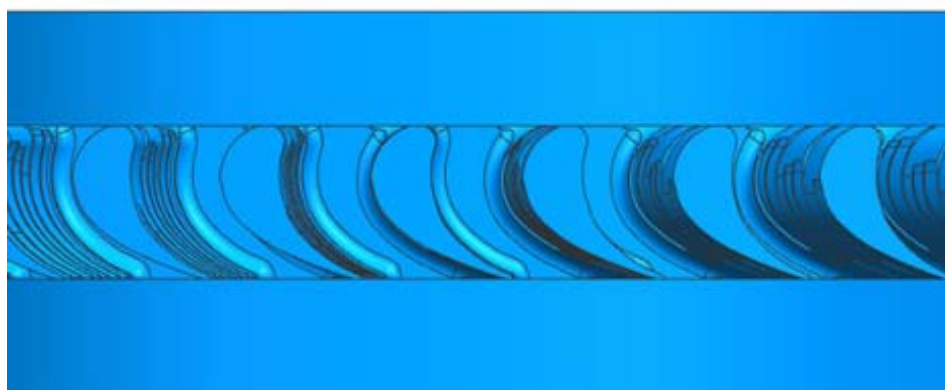


図 4-10 荒加工 4

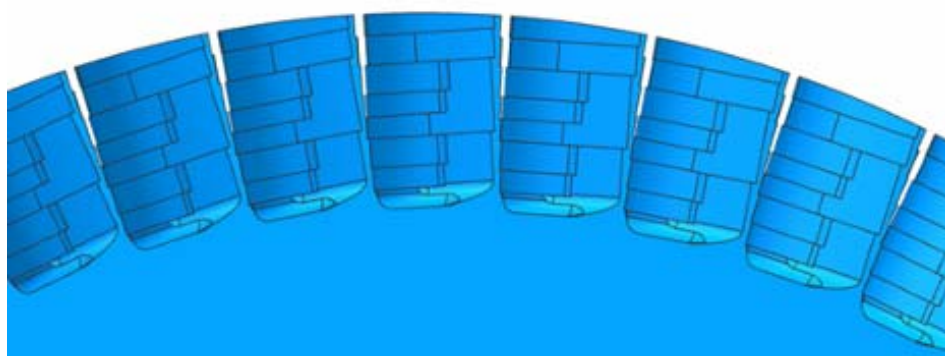
図 4-11 に荒加工後の被削材形状イメージを示す。



(a)



(b)



(c)

図 4-11 荒加工後の翼一体型羽根車ディスクの形状

### ⑤ 翼面仕上加工

φ6 の工具を使用し、翼面を等高線加工する。等高線加工は、図 4-12 に示すように、工具が各断面ごとに軌跡を描きながら加工する方法である。

表 4-9 に加工条件を示す。図 4-13、4-14 にそれぞれ翼面仕上加工、翼面仕上後の被削材のイメージを示す。

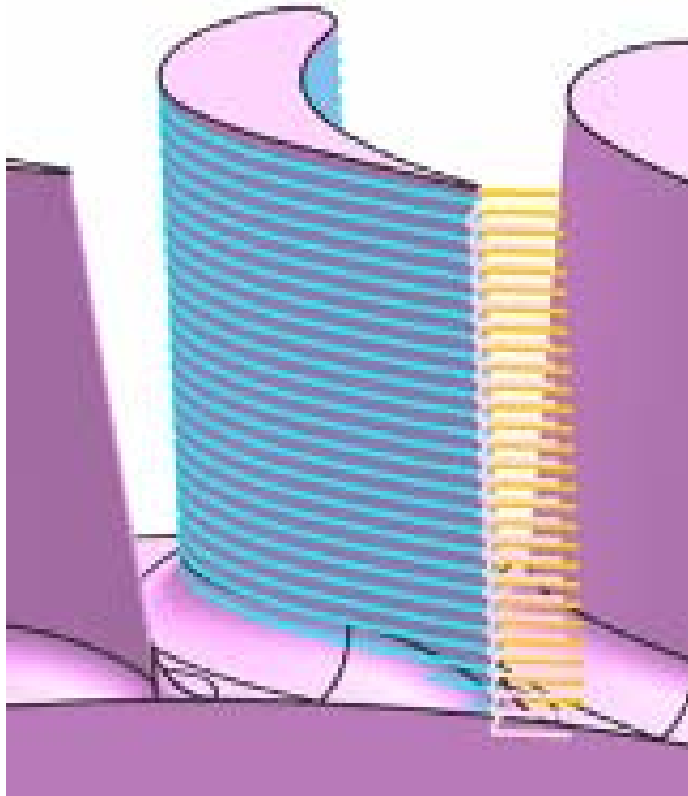


図 4-12 等高線加工

表 4-9 翼面仕上加工 加工条件

| 使用工具    |        |        | 超硬<br>ボールエンドミル<br>(φ6, R3, 2 枚刃) |
|---------|--------|--------|----------------------------------|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min  | 45                               |
|         | 工具回転速度 | min-1  | 2387                             |
|         | 送り速度   | mm/min | 191                              |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm     | -                                |
|         | 工具軸方向  | mm     | 0.5                              |
| 加工断面(Z) |        | mm     | 27~0                             |

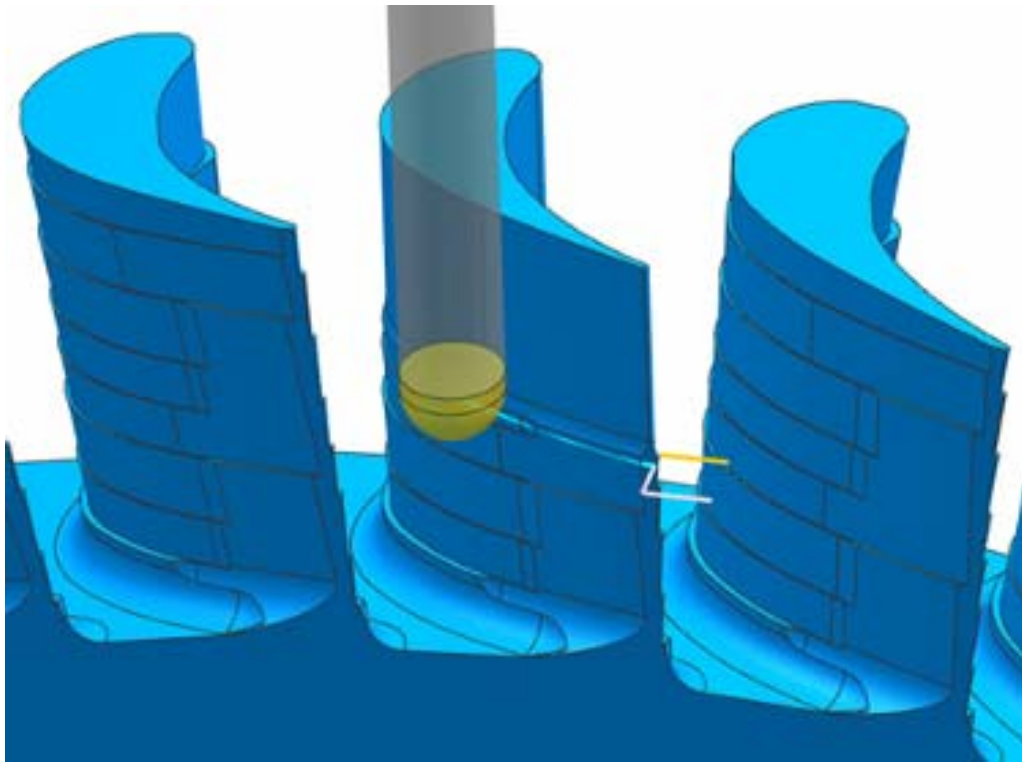


图 4-13 翼面仕上加工

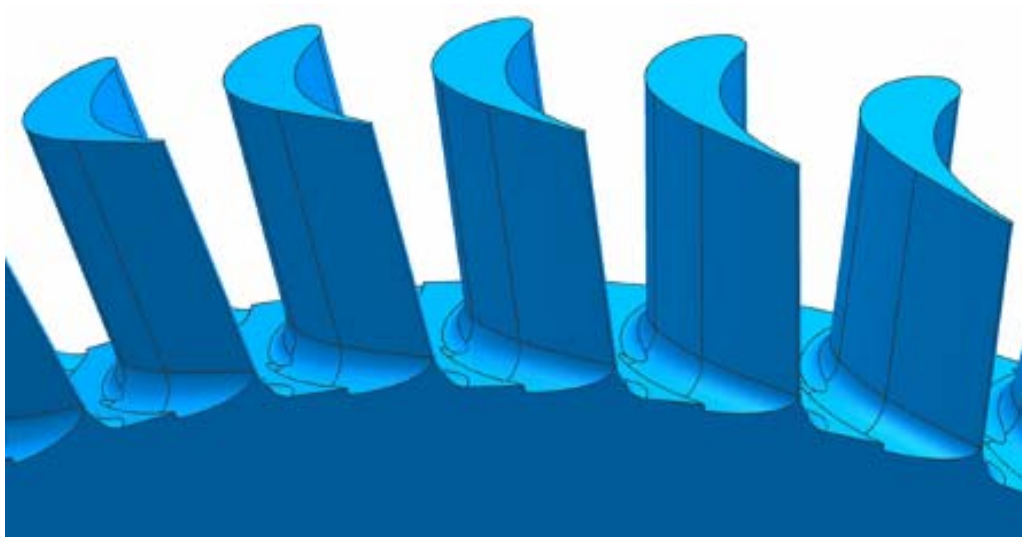


图 4-14 翼面仕上加工後



⑥ 底面仕上加工

φ4 の工具を使用し、底面を微加工（図 4-15）して仕上げる。  
表 4-10 に加工条件を示す。

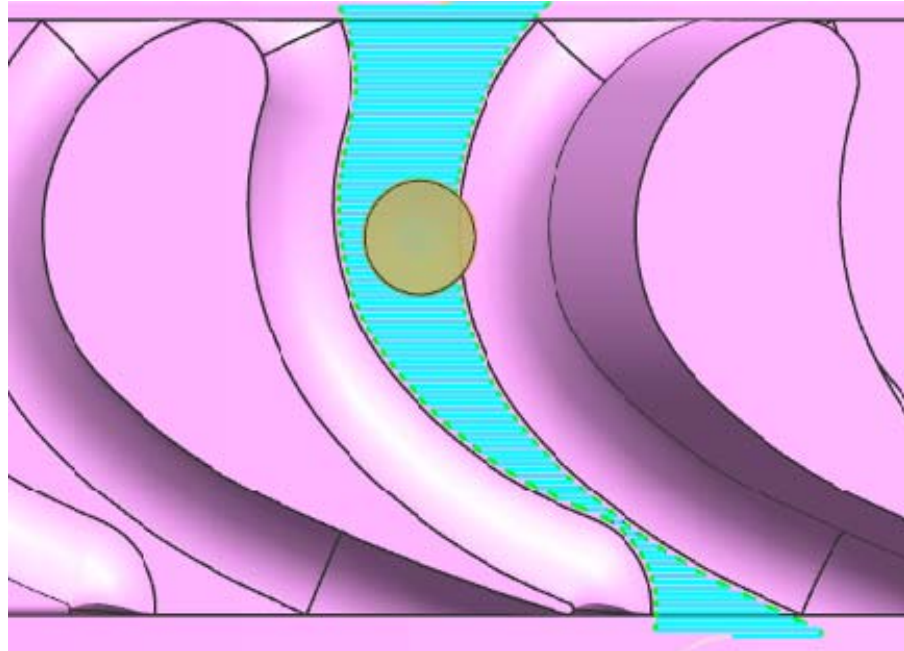


図 4-15 底面仕上加工

表 4-10 底面仕上加工 加工条件

| 使用工具    |        |                   | 超硬<br>ボールエンドミル<br>(φ4, R2, 2 枚刃) |
|---------|--------|-------------------|----------------------------------|
| 加工条件    | 切削速度   | m/min             | 45                               |
|         | 工具回転速度 | min <sup>-1</sup> | 3600                             |
|         | 送り速度   | mm/min            | 180                              |
| 切込み量    | 工具径方向  | mm                | 0.2                              |
|         | 工具軸方向  | mm                | -                                |
| 加工断面(Z) |        | mm                | -                                |

図 4-16～4-20 に実際の加工の様子を示す。

加工結果を表 4-11 に示す。加工時間は、全段翼高さを低いものに設計変更をしたため、試切削時の 3 段合計約 223 時間（想定含む）から 168 時間に大幅に削減されている。翼 1 枚あたりの加工時間に注目して、翼高さとの関係をグラフに表すと図 4-21 のようになる。試切削時の値を含め翼高さが高くなるに従って加工時間が増加する傾向が見ら

れる。しかし、ある決まった関係性は確認できない。そこで、詳細に検証したところ本切削3段落の翼面仕上加工時に工具に原因不明のビビリが発生し、0.42時間（25分）の工程を2回実施したことが分かった。よって、計画加工時間は実加工時間よりも0.42時間（25分）短く、計画通り施工されれば、翼高さと加工時間の関係は図4-21に破線で示すようにおおむね線形関係となる。今後、ビビリ発生の原因の解明と加工工程の見直しをする必要がある。



図 4-16 翼一体型羽根車ディスク加工中

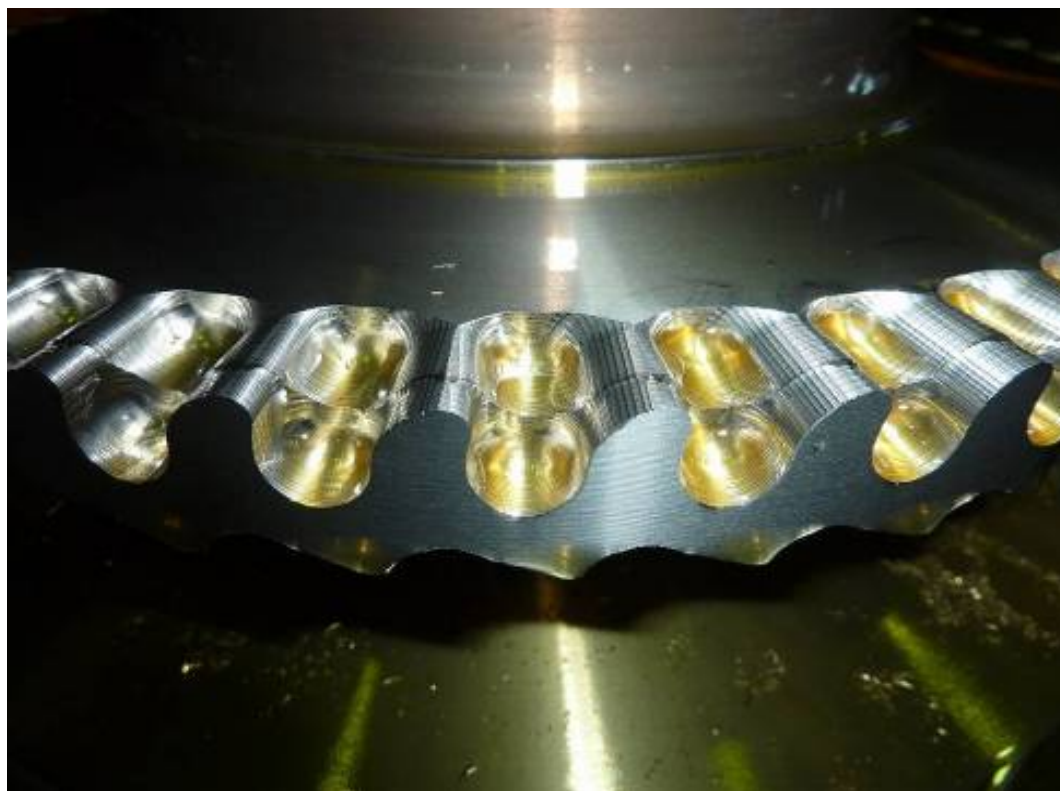


図 4-17 翼加工中 (2 段)



図 4-18 翼形ゲージによる翼形確認



図 4-19 翼一体型羽根車ディスク加工後



図 4-20 翼詳細 (1 段)

表 4-11 翼一体型羽根車ディスク加工結果

|                  | 工具径 | 断面高さ(Z) | 適用             |                |                | 翼1枚あたりの加工時間    |                |                |
|------------------|-----|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  |     |         | 1段<br>(翼高さ=15) | 2段<br>(翼高さ=18) | 3段<br>(翼高さ=27) | 1段<br>(翼高さ=15) | 2段<br>(翼高さ=18) | 3段<br>(翼高さ=27) |
| 荒加工1             | φ8  | 20      | -              | -              | ○              | -              | -              | 0:03:58        |
|                  |     | 10      | ○              | ○              | ○              | 0:03:32        | 0:03:32        | 0:03:32        |
|                  |     | 0.3     | ○              | ○              | ○              | 0:02:30        | 0:02:30        | 0:02:30        |
| 荒加工2             | φ5  | 24      | -              | -              | ○              | -              | -              | 0:02:15        |
|                  |     | 20      | -              | -              | ○              | -              | -              | 0:02:05        |
| 荒加工3             | φ4  | 16      | -              | ○              | ○              | -              | 0:04:51        | 0:04:51        |
|                  |     | 13      | ○              | ○              | ○              | 0:04:34        | 0:04:34        | 0:04:34        |
|                  |     | 10      | ○              | ○              | ○              | 0:04:18        | 0:04:18        | 0:04:18        |
|                  |     | 6       | ○              | ○              | ○              | 0:06:10        | 0:06:10        | 0:06:10        |
|                  |     | 3       | ○              | ○              | ○              | 0:05:47        | 0:05:47        | 0:05:47        |
| 荒加工4             | φ4  | 0.3     | ○              | ○              | ○              | 0:04:47        | 0:04:47        | 0:04:47        |
| 翼面仕上             | φ6  | 27~0    | ○              | ○              | ○              | 0:14:20        | 0:17:00        | 0:50:00        |
| 底面仕上             | φ4  | 0       | ○              | ○              | ○              | 0:02:30        | 0:02:30        | 0:02:30        |
| <b>翼1枚あたりの合計</b> |     |         |                |                |                | <b>0:48:28</b> | <b>0:55:59</b> | <b>1:37:17</b> |

| 翼枚数       | 50        | 50       | 50       |
|-----------|-----------|----------|----------|
| 1段落あたりの合計 | 40:23:20  | 46:39:10 | 81:04:10 |
| 3段落合計     | 168:06:40 |          |          |

1段 : 15  
2段 : 18  
3段 : 27

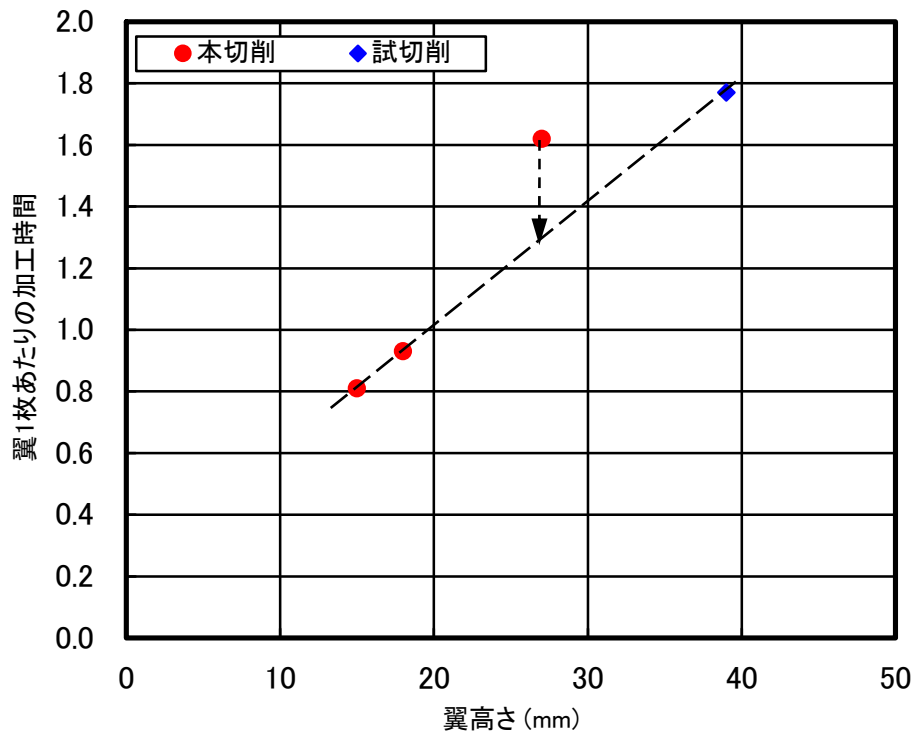


図 4-21 翼1枚あたりの加工時間と翼高さの関係

多軸加工機による翼一体型羽根車ディスクの製作について本事業で分かったことをまとめると、以下の通りになる。

- ・翼間隙間は、使用可能な工具径に制約を与えるため、加工時間を決める主な要因である。
- ・翼間隙間は、加工コストとタービン性能とのバランスにより決定する必要がある。
- ・翼間隙間は加工位置によって異なるので、複数の径の異なる工具を使用することで、効率的に加工することができる。
- ・4軸加工機よりも自由度の高い5軸加工機を使用することで、加工時間を短縮することができる。

#### 4.1.5 蒸気タービン製作過程

以下に蒸気タービン製作の様子を示す。

##### (a) 機械加工工程

図 4-22～4-25 に機械加工工程の様子を示す。

機械加工工程では、小型であるがゆえの困難があった。特にタービンケーシングについては、工具を入れる間口が小さく工具ヘッドが干渉するため、加工速度を上げられない長軸および小径の工具を使用しなければならず効率的な加工ができなかった。今後、設計、加工方法ともに再検討して加工効率の向上を図りたい。



図 4-22 タービンケーシング



図 4-23 減速車室加工中



図 4-24 軸受箱加工中





図 4-25 歯車歯切加工中

(b) 水圧試験

図 4-26 にタービンケーシング水圧試験の様子を示す。水圧試験は、各部の設計圧力の 1.5 倍の試験圧力にて実施した。

資料 1 にタービンケーシング水圧試験記録を示す。各部、試験圧力にて水の漏洩はなく、問題はなかった。



図 4-26 タービンケーシング水圧試験中



### (c) 歯車静的歯当検査

図 4-27 に歯車静的歯当検査の様子を示す。

歯車静的歯当検査とシェービングを繰り返して、歯当たりを調整した。

資料 2 に静的歯当検査記録を示す。歯幅全体が当たっており、良好な状態である。

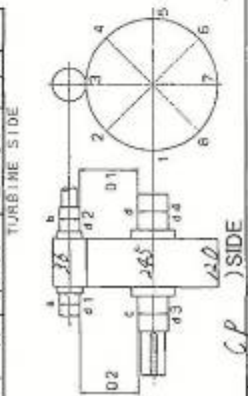


図 4-27 歯車静的歯当検査

# 静的齒当試験記録

14年12月13日

|      |          |         |
|------|----------|---------|
| 工番   | T0000023 |         |
| 機名   | RG31     |         |
| 納入先  |          |         |
| 機番   |          |         |
| ホイール | 社内       | ピニオン 7A |



|           |          |
|-----------|----------|
| タービン品質管理部 | タービン製造課  |
| 承認        | 審査       |
| 74.12.13  | 74.12.13 |
| 74.12.13  | 74.12.13 |
| 74.12.13  | 74.12.13 |

|    |          |
|----|----------|
| 結果 | 790~C100 |
| 処置 |          |
| 確認 | 合格       |

UNIT : mm

| 軸間    | 計 画      |        |        |        | 実 測  |      |      |      |
|-------|----------|--------|--------|--------|------|------|------|------|
|       | D1       | D2     | D1     | D2     | D1   | D2   | D3   | D4   |
| レベル   | 368.93   | 368.93 | 368.93 | 368.93 | a-c  | b-d  | a-c  | b-d  |
| シフトル  | I.C. 0.2 |        |        |        |      |      |      |      |
| ハブマシユ | d1       | d2     | d3     | d4     | d1   | d2   | d3   | d4   |
|       | 0        | 1      | 2      | 3      | 0    | 1    | 2    | 3    |
|       | 0.25     |        |        |        | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |

|   |  |
|---|--|
| 1 |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| 6 |  |
| 7 |  |
| 8 |  |

資料 2 静的齒当検査記録 (メッシング台)

#### (d) タービンロータ組立工程

図 4-28～4-30 にタービンロータ組立工程の様子を示す。

翼一体型羽根車ディスクは 4.1.3 翼一体型羽根車ディスクで述べたように、タービンシャフトに焼き嵌めによって取り付けられた（図 4-28）。翼一体型羽根車ディスクを取り付けたタービンシャフトを、芯ブレのないようピニオンシャフトと締結しタービンロータを組み立てた（図 4-29）。高速で回転するタービンロータはアンバランスが許されないため、動的釣合試験によりアンバランス修正量を計測し、羽根車ディスクの一部を切削しバランスをとった（図 4-30）。資料 3 に動的釣合試験記録を示す。試験および修正後は許容値に収まっている。



図 4-28 タービンシャフト焼き嵌め後

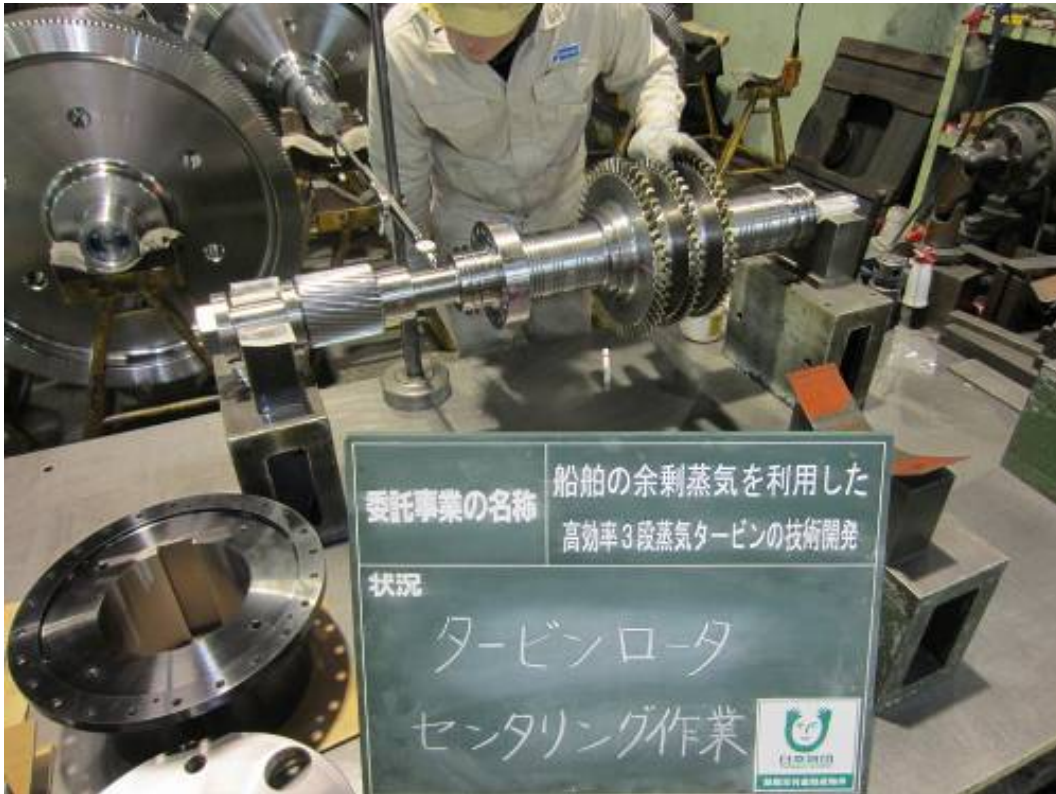


図 4-29 タービンロータ締結およびセンタリング作業



図 4-30 タービンロータ動的釣合試験

No. 1  
発行日 2015年1月8日

タービン品質管理部  
釣合試験記録

タービン課課長殿

|        |    |      |                                 |            |             |    |
|--------|----|------|---------------------------------|------------|-------------|----|
| 向先     | 船名 | 規格   | 仕様                              | 生産本部タービン部  |             |    |
|        |    |      | 80KW<br>12011/17651/17651/17651 | 承認         | 審査          | 作成 |
| 工番     | 名称 | 機名   | 台数                              | 751-3<br>山 | 751.08<br>山 | 山  |
| T00093 |    | RG31 | 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 : 130 kg

(4) 駆動用継手 : 25 mkp

(5) 許容不釣合

a. ディスク側 : 1.00 gr

b. トリップ側 : 1.00 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 : 14年12月22日

(9) 作業者 : 山本博仁

試験記録 単位: 度及びE.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 | 4°    | 4.8%  | 19°     | 3.0% |    |
|      | 試験後 | 349°  | 0.1%  | 171°    | 0.2% |    |
| NO.2 | 試験前 |       |       |         |      |    |
|      | 試験後 |       |       |         |      |    |
| NO.3 | 試験前 |       |       |         |      |    |
|      | 試験後 |       |       |         |      |    |
| NO.4 | 試験前 |       |       |         |      |    |
|      | 試験後 |       |       |         |      |    |

|     |   |      |            |             |
|-----|---|------|------------|-------------|
| 記布先 | <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 5px; display: inline-block;">合格</div> | 付帯条件 | タービン品質管理部  |             |
| 品管  |   |      | 承認         | 審査          |
| 廻   |   | 特別採用 | 751-3<br>山 | 751.08<br>山 |
| 置   | 不採用   |      |            |             |
| 合計  |   |      |            |             |

株式会社ECCO

資料 3 動的釣合試験記録

### (e) タービン組立工程

図 4-31～4-46 にタービン組立工程の様子を示す。

この工程において困難であった点は、軸受箱-タービンケーシング間およびタービンケーシング-減速機間のフランジ締結部位置決めピンの施工である。この位置決めピンは、タービン運転時の熱膨張によるフランジ締結部のズレを制限するために施工する。当蒸気タービンは小型であるので、位置決めピン施工スペースが確保しづらい。ここでは、比較的施工スペースが確保できるフランジ外周方向から、放射状に平行ピンを 3 箇所施工する方法（図 4-33）を採用した。この方法は、弊社他機種に採用実績があるが、タービンケーシングと減速機が独立していない当蒸気タービンのような構造では、図 4-34 に示すように歯車の歯当たり調整後に、減速機と一緒に位置決めピン施工のための移動をする必要があり、歯当りに再現性があるか不安視された。結果、今回は特に細心の注意を払って作業したことで、良好な歯当たりの再現を確認できた（資料 4）。しかし、一度調整したものを取り外して移動させることは、一般的に良策とはされない。今後、この懸念を払拭するために改善したいと考える。



図 4-31 タービン組立開始





図 4-32 ケーシングのセンタリング作業

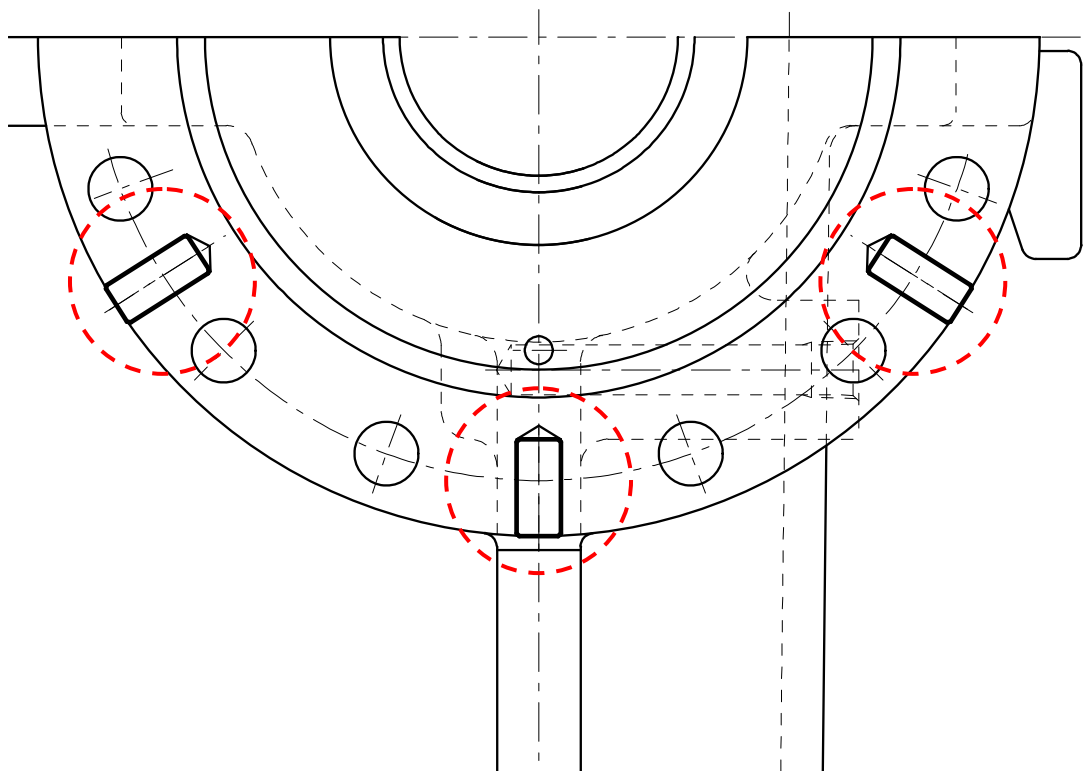


図 4-33 タービンケーシング-減速機間フランジ（減速機側）



図 4-34 位置決めピン施工のための取り外しおよび移動

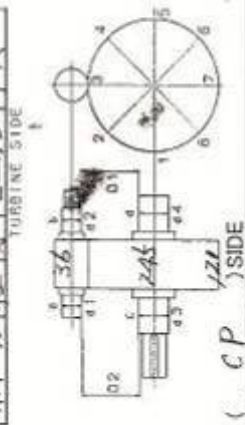


図 4-35 歯車静的歯当検査（組立時）

# 静的齒当試験記録

車室内蓋当り

|        |            |
|--------|------------|
| 工番     | T 00000093 |
| 機名     | RG 31      |
| 納入先    |            |
| 根番     |            |
| ホイール社名 | ピニオンアハ     |



14年12月22日

|           |    |  |
|-----------|----|--|
| タービン品質管理部 | 審査 |  |
| タービン製造課   | 審査 |  |
| 承認        | 作成 |  |

|      |    |
|------|----|
| 結果:  |    |
| 処置:  |    |
| 現認者: | 山中 |
| 確認   | 合格 |

| 軸間      | 計 画 |     |     |     | 実 測 |     |     |     |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|         | D1  | D2  | D1  | D2  | D1  | D2  | D1  | D2  |
| レベル     | a-c | b-d | a-c | b-d | a-c | b-d | a-c | b-d |
| シヤナル    | d1  | d2  | d3  | d4  | d1  | d2  | d3  | d4  |
| バックラッシュ | 0   | 1   | 2   | 3   | 0   | 1   | 2   | 3   |

|   |  |
|---|--|
| 1 |  |
| 2 |  |
| 3 |  |
| 4 |  |
| 5 |  |
| 6 |  |
| 7 |  |
| 8 |  |

UNIT : mm

資料 4 静的齒当検査記録 (組立時)



図 4-36 1段ノズル



図 4-37 2段ノズル



図 4-38 3段ノズル

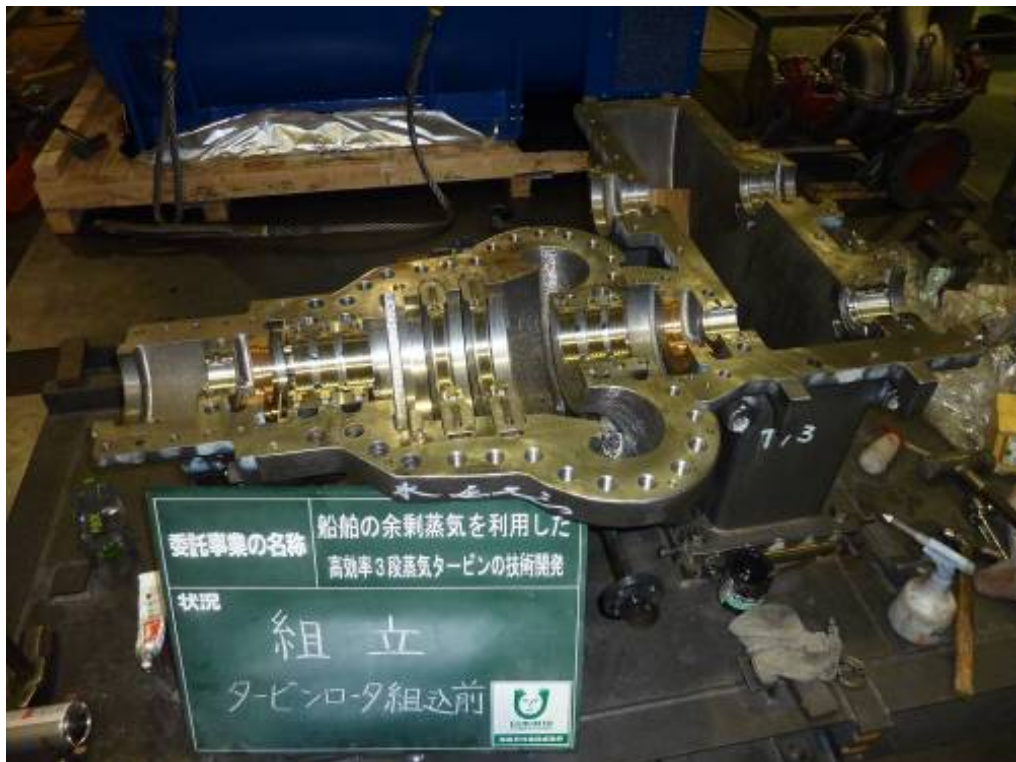


図 4-39 タービンロータ組込前



図 4-40 タービンロータ組込後



図 4-41 タービンケーシングカバ取り付け



図 4-42 負荷用ポンプ取り付け



図 4-43 配管施工前



図 4-44 配管施工 (LO 配管仮付け)



図 4-45 配管施工 (蒸気配管仮付け)





図 4-46 蒸気タービン組立完了

## 4.2 性能評価試験

性能既知の負荷用ポンプを、当蒸気タービンにて駆動することで性能を評価した。

### 4.2.1 負荷用ポンプの性能評価試験（予備試験）

当蒸気タービンの性能評価試験で用いる負荷用ポンプの性能評価試験を実施し、予め性能を確認した。

#### (1) 試験方法

電動機駆動により負荷用ポンプを駆動し、締切から最大流量まで計 8 点の条件で電動機の消費電力を計測した。計測した消費電力と電動機効率から軸動力を算出し、全揚程-軸動力の関係を導出した。試験全般については、JIS で示される方法に準じて行った。

表 4-12、4-13 に負荷用ポンプの仕様、電動機の仕様をそれぞれ示す。

図 4-47、4-48 にそれぞれ試験装置概念図、試験装置外観を示す。

表 4-12 負荷用ポンプの仕様

|      |                       |
|------|-----------------------|
| メーカー | シンコー                  |
| 形式   | 横形 2 段水平割れうず巻き式       |
| 機名   | CHP200L               |
| 吐出量  | 200m <sup>3</sup> /h  |
| 揚程   | 100m                  |
| 回転数  | 1780min <sup>-1</sup> |

表 4-13 電動機の仕様

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| メーカー | 現代重工業                         |
| 形式   | 横形全閉外扇 4 極 3 相誘導式             |
| 機名   | MNB                           |
| 電源   | AC 440V × 144.8A × 3 φ × 60Hz |
| 定格出力 | 90kW                          |

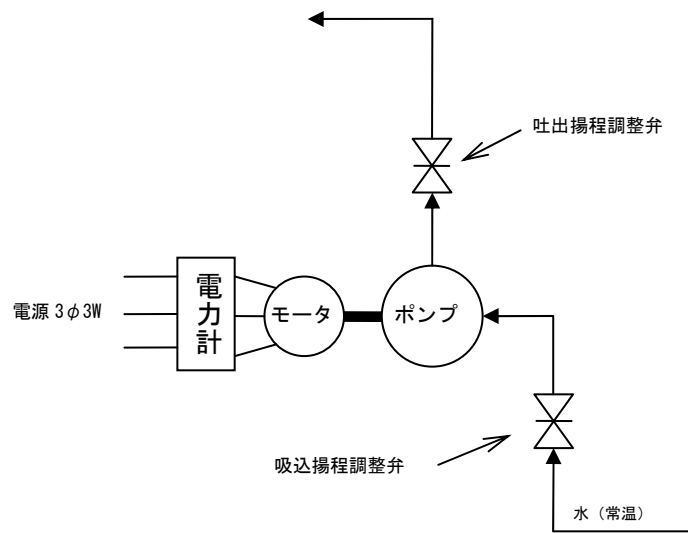


図 4-47 試験装置概念図



図 4-48 試験装置外観

## (2) 試験結果

振動等の異常はなく、運転は極めて良好に行われた。

図 4-49 に試験データを示す。

図 4-50 に試験データをもとに作成した軸動力-全揚程の関係を表すグラフを示す。全揚程の増加とともに軸動力が減少していることが分かる。近似曲線を数式で表すと、

$$P = -0.06474H^2 + 13.23643H - 584.19996 \quad \dots\dots\dots(式1)$$

$P$  : 軸動力(kW)

$H$  : 全揚程(m)

となる。この関係を用いて、タービン出力を導出する。

# TEST RECORDS FOR



Hiroshima Japan

高効率3段小型蒸気タービンの負荷用ポンプ

Working No. T0000094

Messrs. \_\_\_\_\_ APPROVED BY M. Tanaka  
 Ship No. \_\_\_\_\_ Date of Test 2014/12/19 TESTED BY M. Sato

| Pump         |                        |                   |                      | Motor             |                        |             |              |
|--------------|------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|------------------------|-------------|--------------|
| Model        | CHP200L                | Bore              | Suc 200 × Del 200 mm | Output            | 90.0 kW                | Frequency   | 60 Hz        |
| Capacity     | 200 m <sup>3</sup> /h  | Water temperature | 常温 °C                | Revolution        | 1765 min <sup>-1</sup> | Maker       | HYUNDAI      |
| Total Head   | 100 m                  | Water Level       | mm                   | Voltage           | 440 V                  | Machine No. | 2D018J06-001 |
| Suction Head | m                      | No. of stage      | 1                    | Full Load Current | 144.8 A                |             |              |
| Revolution   | 1780 min <sup>-1</sup> | Machine No.       | T0000094             |                   |                        |             |              |

## Measurement

| Test No. | TIME  | Pump                  |                            |                  |                             |               |          |                 |           | Motor     |          |         |           |         | Pump Effi. % |
|----------|-------|-----------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|---------------|----------|-----------------|-----------|-----------|----------|---------|-----------|---------|--------------|
|          |       | Rev min <sup>-1</sup> | Capacity m <sup>3</sup> /h | Manometric Heads |                             |               |          | Theo'l Power kW | Voltage V | Current A | input kW | Effi. % | Output kW |         |              |
|          |       |                       |                            | Del. MPa         | Suc. × 10 <sup>-2</sup> MPa | Corre-ction m | Vel. H m |                 |           |           |          |         |           | Total m |              |
| 1        | 13:00 | 1792                  | 0.0                        | 1.265            | -1.0                        | 0.0           | 0.0      | 130.0           | 0.00      | 443       | 78.9     | 44.6    | 92.2      | 42.7    | 0.0          |
| ②        |       | 1789                  | 102.0                      | 1.184            | -1.2                        | 0.0           | 0.0      | 122.0           | 33.89     | 443       | 104.2    | 64.0    | 93.5      | 65.5    | 51.7         |
| 3        |       | 1785                  | 150.0                      | 1.149            | -1.3                        | 0.0           | 0.0      | 118.5           | 48.43     | 443       | 119.3    | 75.8    | 93.6      | 76.3    | 63.5         |
| 4        |       | 1785                  | 171.8                      | 1.125            | -1.4                        | 0.0           | 0.0      | 116.1           | 54.33     | 442       | 126.9    | 81.5    | 93.5      | 81.1    | 67.0         |
| 5        |       | 1785                  | 180.0                      | 1.109            | -1.4                        | 0.0           | 0.0      | 114.5           | 56.16     | 443       | 128.6    | 83.2    | 93.5      | 82.6    | 68.0         |
| 6        |       | 1784                  | 200.3                      | 1.077            | -1.5                        | 0.0           | 0.0      | 111.3           | 60.74     | 442       | 135.3    | 88.0    | 93.4      | 86.9    | 69.9         |
| 7        |       | 1784                  | 220.5                      | 1.045            | -1.5                        | 0.0           | 0.0      | 108.1           | 64.93     | 442       | 138.7    | 90.6    | 93.3      | 89.1    | 72.9         |
| 8        | 13:30 | 1783                  | 240.0                      | 0.990            | -1.6                        | 0.0           | 0.0      | 102.6           | 67.09     | 443       | 144.1    | 94.8    | 93.2      | 92.8    | 72.3         |

| Temperature (°C) |       |                      |          | Vacuum Pump |                     |            |                |
|------------------|-------|----------------------|----------|-------------|---------------------|------------|----------------|
| Atoms.           | Water | Bearing (after 1hr.) |          | Max. Vacuum | Max. Capacity       | Durability | Action         |
| 11               | 15    | Coup. 23             | Oppo. 22 | hPa         | m <sup>3</sup> /min |            | ON OFF MPa MPa |

Continuous Running Test 1hr.

## Performance curve

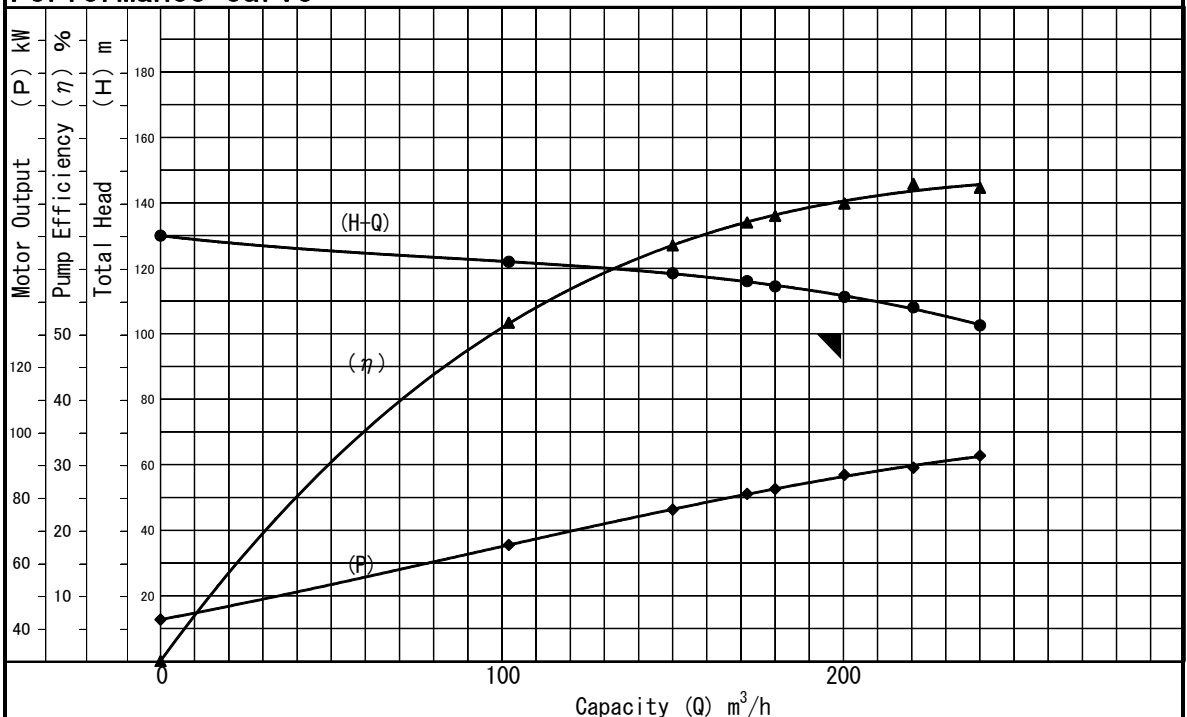


図 4-49 負荷用ポンプ性能評価試験データ

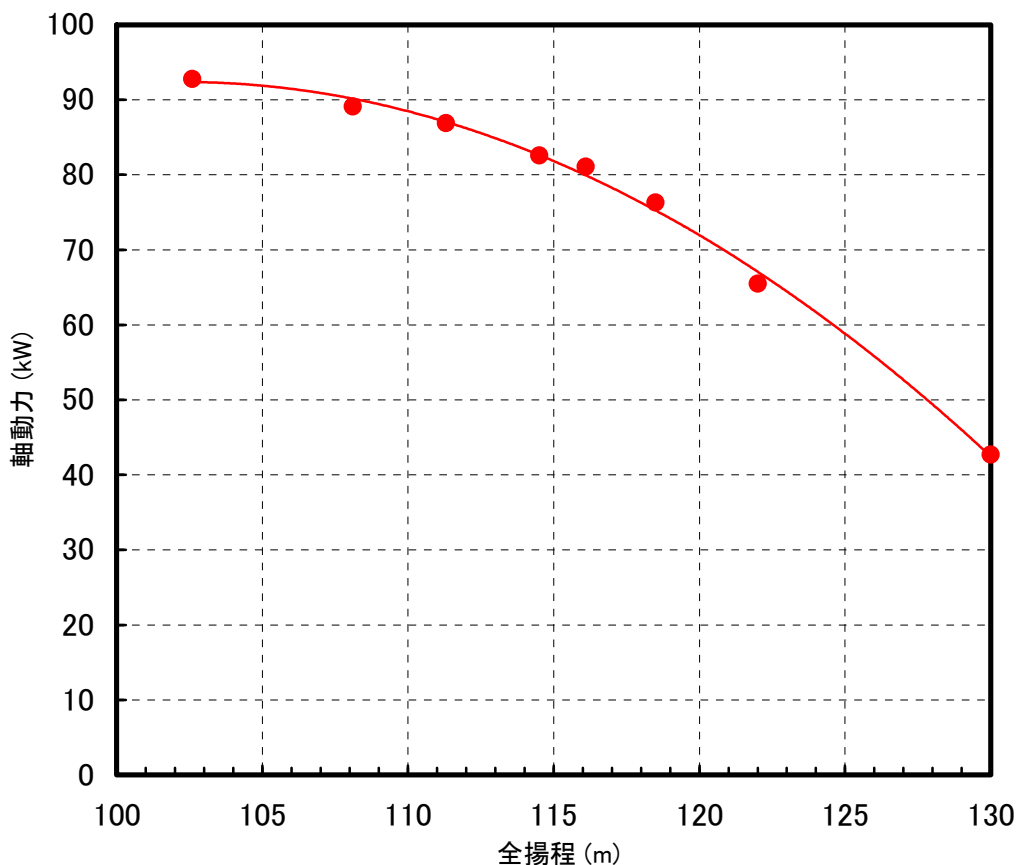


図 4-50 軸動力-全揚程の関係

#### 4.2.2 蒸気タービンの性能評価試験

予備試験により性能既知となった負荷用ポンプを被駆動機として、当蒸気タービンの性能評価試験を実施した。

##### (1) 試験方法

タービン駆動によりポンプの運転を行い、全揚程計 7 点（締切状態を除く）におけるタービン蒸気消費量を計測した。図 4-51 に試験装置概念図を示す。

表 4-14 に計測項目を示す。性能評価に必要な項目に加えて、タービンの運転状態の健全性を確認するために、各部の温度、振動、騒音を計測した。

図 4-52～4-54 の蒸気配管系統図、油配管系統図、計測位置図にて、計測箇所を示す。

図 4-55、4-56 に試験装置外観を示す。

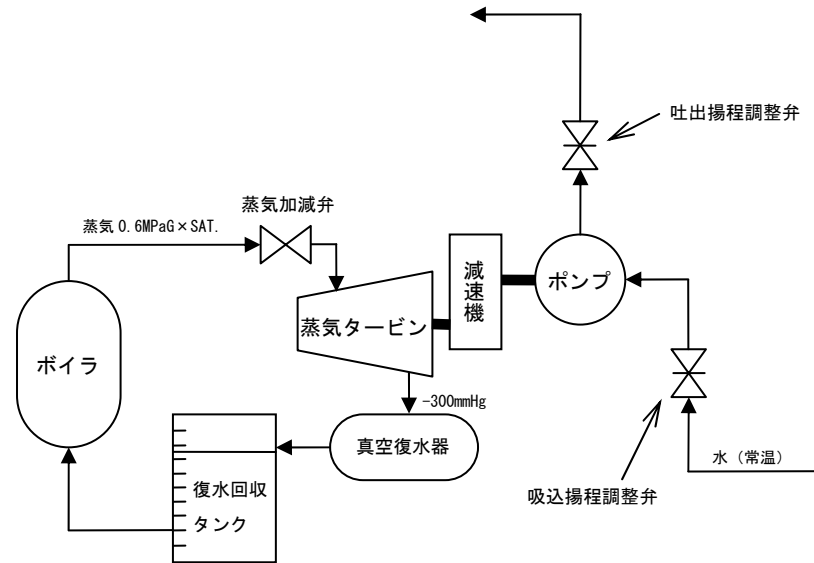


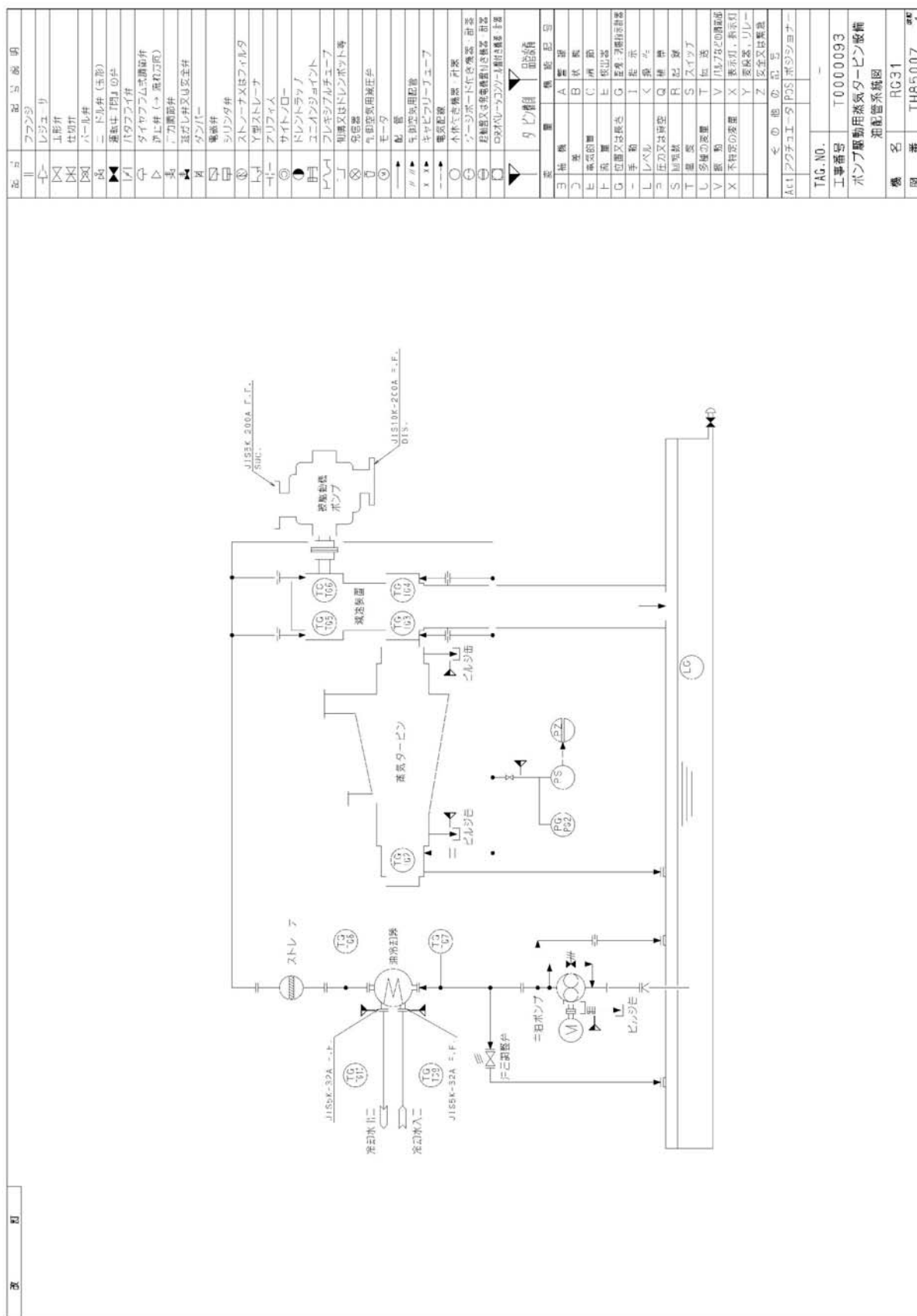
図 4-51 試験装置概念図

表 4-14 計測項目

| 項目        |           | 計測機器記号 |
|-----------|-----------|--------|
| 圧力        | 入口蒸気      | PT1    |
|           | 蒸気室       | PT2    |
|           | 1 段後      | PT3    |
|           | 排気        | PT4    |
|           | ポンプ吸込     | PT5    |
|           | ポンプ吐出     | PT6    |
|           | シーリング蒸気   | PG1    |
|           | 潤滑油       | PG2    |
| 温度        | 入口蒸気      | TE1    |
|           | 排気        | TG1    |
|           | タービン前部軸受  | TG2    |
|           | ピニオン前部軸受  | TG3    |
|           | ピニオン後部軸受  | TG4    |
|           | ホイール前部軸受  | TG5    |
|           | ホイール後部軸受  | TG6    |
|           | 油冷却器入口潤滑油 | TG7    |
|           | 油冷却器出口潤滑油 | TG8    |
|           | 油冷却器入口冷却水 | TG9    |
| 油冷却器出口冷却水 | TG10      |        |
| 出力軸回転速度   |           | SE     |







| 記号 | 記号説明              |
|----|-------------------|
| ≡  | ファンシ              |
| →  | レギュリ              |
| △  | 工形弁               |
| ◇  | 仕切弁               |
| ⊗  | バルブ               |
| ⊙  | ニードル弁 (玉形)        |
| ⊕  | 通気弁 (玉形)          |
| ⊖  | バクワイズ弁            |
| ⊘  | ダイヤフラム式調節弁        |
| △  | カニ弁 (→ 蒸気弁)       |
| ⊕  | 力調節弁              |
| ⊗  | 蒸気弁又は安全弁          |
| ⊙  | タンパー              |
| ⊖  | 噴霧弁               |
| ⊕  | シリンダ弁             |
| ⊗  | ストレーナー又はフィルタ      |
| △  | Y型ストレーナ           |
| ◇  | アライケス             |
| ⊕  | サイトロー             |
| ⊗  | ドレントラップ           |
| ⊙  | ユニオンジョイント         |
| ⊖  | フレキシブルジョイント       |
| ⊗  | 別標又はドレンホット等       |
| ⊕  | 免震器               |
| ⊗  | 汽相空留用減圧弁          |
| ⊙  | モーダ               |
| →  | 配管                |
| ≡  | 汽相空留用配管           |
| ≡  | キャビテリドニュー         |
| ○  | 電気配管              |
| ○  | 小体気体機器 計器         |
| ○  | ボイラードレイン機器 計器     |
| ○  | 超熱度又は超熱度計測機器 計器   |
| ○  | ロッドレバーリフター-自動調整装置 |

図 4-53 油配管系統図

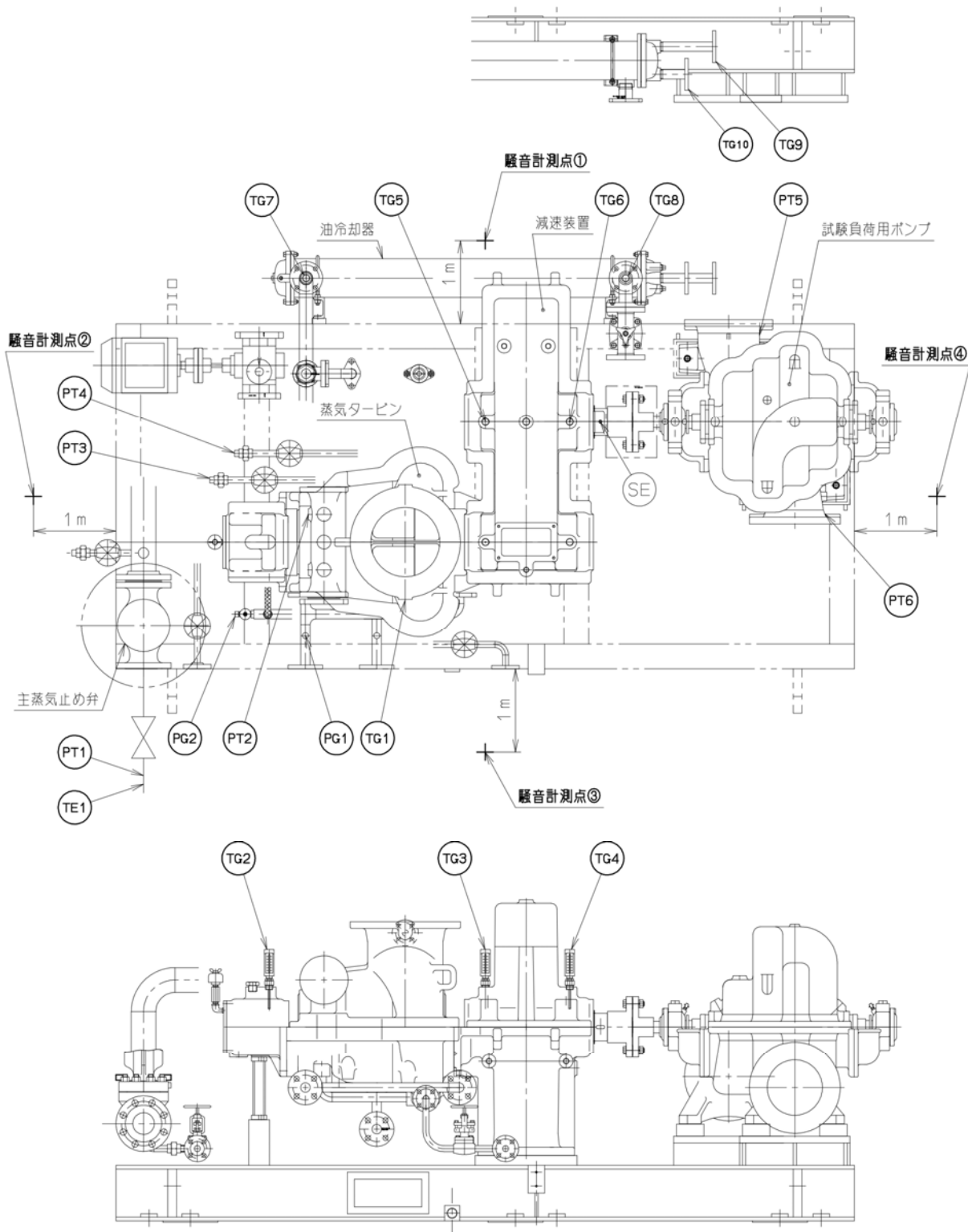


図 4-54 計測位置図

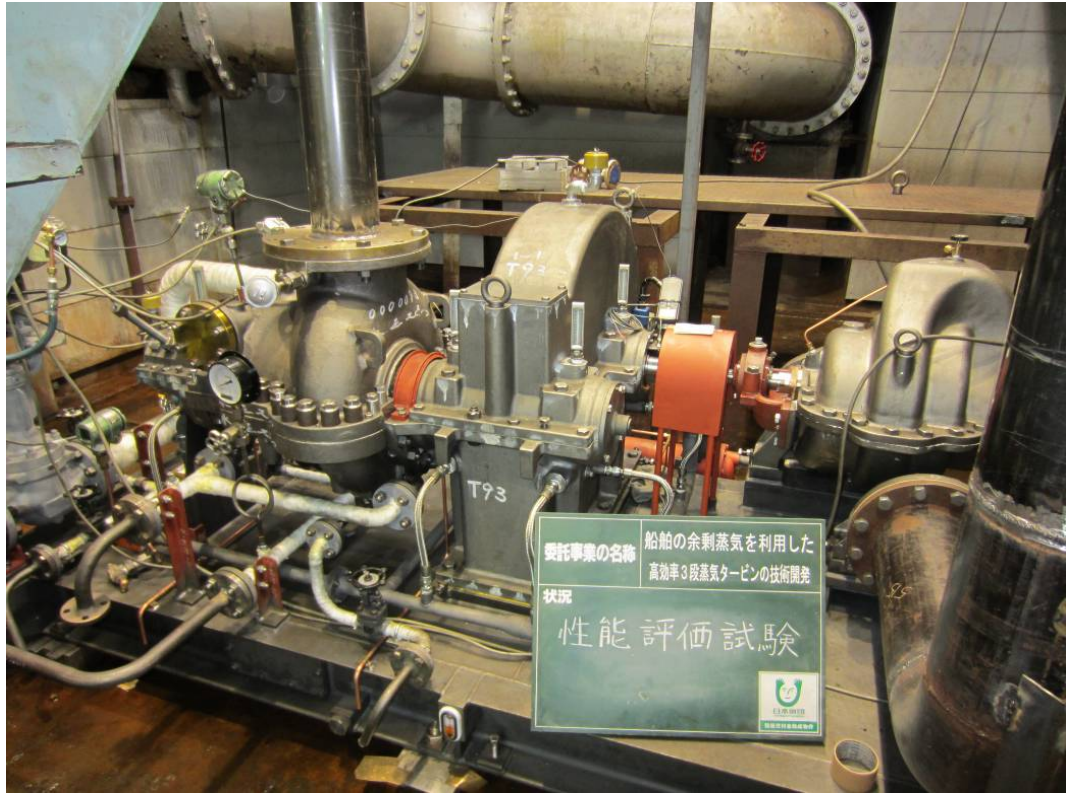


図 4-55 試験装置外観 1



図 4-56 試験装置外観 2

## (2) 試験結果

表 4-15 に蒸気タービン性能評価試験の計測データ、表 4-16 に各軸受箱の振動計測データ、表 4-17 に騒音計測データを示す。軸受温度、軸受箱振動、騒音すべて許容値内であった。試験中終始、蒸気タービンの状態に異常は見られず、安定した運転ができることを確認した。

図 4-57 に当試験により得られた蒸気消費量-全揚程の関係を示す。蒸気消費量は、式 2 によってノズルの面積とその前後差圧から算出した。

$$G = S \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left\{ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right\}} \times 0.36 \times C \quad \dots\dots\dots(式2)$$

$G$ : 蒸気流量( $t/h$ )

$P_1$ : 1次蒸気圧力( $MPaA$ )

$P_2$ : 2次蒸気圧力( $MPaA$ )

$$\left( P_2 \geq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_1 \text{ の時は, } P_2 = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} P_1 \right)$$

$v$ : 比体積( $m^3/kg$ )

$S$ : 蒸気流路面積( $cm^2$ )

$k$ : 比熱比 (飽和 = 1.135, 過熱 = 1.3)

$C$ : 流量係数 (飽和 = 0.95, 過熱 = 0.97)

蒸気条件が計画と試験では異なるので、上記計算式で算出された値を熱落差について補正した。

全揚程は、式 3 によってポンプの吸込口と吐出口の差圧から算出した。

$$H = \frac{P_D - P_S}{g} \times 1000 \quad \dots\dots\dots(式3)$$

$H$ : 全揚程

$P_D$ : 吐出圧力( $MPaG$ )

$P_S$ : 吸込圧力( $MPaG$ )

$g$ : 重力加速度(=  $9.80665m/s^2$ )

前述の式 1 を用いて全揚程を軸動力に換算した蒸気消費量-軸動力の関係を図 4-58 に示す。蒸気消費量と軸動力の間には、ほぼ線形の関係があると分かる。この関係から蒸気消費量 1.5t/h に対する軸動力を読み取ると 85.6kW という結果が得られる。すなわち、目標 80kW に対して 107%の出力を達成した。

表 4-15 蒸気タービン性能評価試験データ

試験実施日:2015/1/29

試験場所:株シコータービン試運転場

|           |           |     | 計画   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 平均        | 許容値  |      |
|-----------|-----------|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|------|------|
| 周囲温度      |           |     | °C   | -     | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12    | 12        | -    |      |
| 圧力        | 入口蒸気      | PT1 | MPaG | 0.6   | 0.65  | 0.627 | 0.615 | 0.602 | 0.683 | 0.652 | 0.622     | -    |      |
|           | 蒸気室       | PT2 |      | 0.51  | 0.469 | 0.476 | 0.517 | 0.534 | 0.551 | 0.566 | 0.59      | -    |      |
|           | 1段後       | PT3 |      | 0.18  | 0.124 | 0.124 | 0.124 | 0.124 | 0.124 | 0.124 | 0.124     | -    |      |
|           | 排気        | PT4 | kPaG | -40   | -41   | -42   | -43   | -43   | -43   | -42   | -41       | -    |      |
|           | ポンプ吸込     | PT5 | MPaG | -     | 0.011 | 0.011 | 0.01  | 0.01  | 0.01  | 0.009 | 0.008     | -    |      |
|           | ポンプ吐出     | PT6 |      | -     | 1.194 | 1.17  | 1.15  | 1.131 | 1.114 | 1.087 | 1.015     | -    |      |
|           | シーリング蒸気   | PG1 | kPaG | 16    | 20    | 20    | 20    | 20    | 20    | 25    | 20        | -    |      |
|           | 潤滑油       | PG2 | kPaG | 150   | 130   | 130   | 130   | 130   | 130   | 130   | 130       | -    |      |
| 温度        | 入口蒸気      | TE1 | °C   | 165   | 168   | 167   | 166   | 165   | 169   | 168   | 166       | -    |      |
|           | 蒸気室       | TE2 |      | 162   | 162   | 162   | 163   | 163   | 165   | 165   | 165       | -    |      |
|           | 排気        | TG1 |      | 87    | 82.3  | 81.4  | 81.6  | 81.5  | 81.3  | 81.7  | 83.1      | -    |      |
|           | タービン前部軸受  | TG2 |      | -     | 47    | 47    | 47    | 47    | 47    | 48    | 47        | 47.1 | 75以下 |
|           | ピニオン前部軸受  | TG3 |      | -     | 51    | 50    | 50    | 49    | 49    | 49    | 50        | 49.7 | 75以下 |
|           | ピニオン後部軸受  | TG4 |      | -     | 47    | 47    | 47    | 47    | 46    | 48    | 47        | 47.0 | 75以下 |
|           | ホイール前部軸受  | TG5 |      | -     | 38    | 38    | 38    | 38    | 37    | 39    | 38        | 38.0 | 75以下 |
|           | ホイール後部軸受  | TG6 |      | -     | 39    | 39    | 39    | 39    | 40    | 39    | 39        | 39.1 | 75以下 |
|           | 油冷却器入口潤滑油 | TG7 |      | -     | 47    | 47    | 47    | 47    | 45    | 47    | 47        | 46.7 | -    |
|           | 油冷却器出口潤滑油 | TG8 |      | -     | 36    | 36    | 36    | 35    | 36    | 37    | 36        | 36.0 | 50以下 |
|           | 油冷却器入口冷却水 | TG9 |      | -     | 10    | 10    | 10    | 10    | 10    | 11    | 10        | 10.1 | 32以下 |
| 油冷却器出口冷却水 | TG10      | -   | 30   | 30    | 30    | 30    | 31    | 31    | 30    | 30.3  | -         |      |      |
| 蒸気消費量     | 算出        | t/h | -    | 1.322 | 1.331 | 1.424 | 1.453 | 1.539 | 1.533 | 1.580 | 式2より算出+補正 |      |      |
| 全揚程       | 算出        | m   | -    | 120.6 | 118.2 | 116.2 | 114.3 | 112.6 | 109.9 | 102.7 | 式3より算出    |      |      |
| 軸動力       | 算出        | Kw  | -    | 70.4  | 75.9  | 79.6  | 82.9  | 85.4  | 88.5  | 92.4  | 式1より算出    |      |      |

表 4-16 各軸受箱の振動計測データ (定格時)

| 計測箇所 |           | 垂直方向 | 軸方向 | 水平方向 | 許容値 |      |
|------|-----------|------|-----|------|-----|------|
| 減速機  | タービン前部軸受箱 | μm   | 5   | 4    | 5   | 40以下 |
|      | ピニオン前部    |      | 5   | 5    | 4   |      |
|      | ピニオン後部    |      | 5   | 5    | 4   |      |
|      | ホイール前部    |      | 4   | 6    | 4   | 55以下 |
|      | ホイール後部    |      | 5   | 8    | 5   |      |

表 4-17 騒音計測データ (定格時)

| 計測点 | 騒音値 | 許容値  |
|-----|-----|------|
| ①   | 88  | 95以下 |
| ②   | 87  |      |
| ③   | 89  |      |
| ④   | 93  |      |

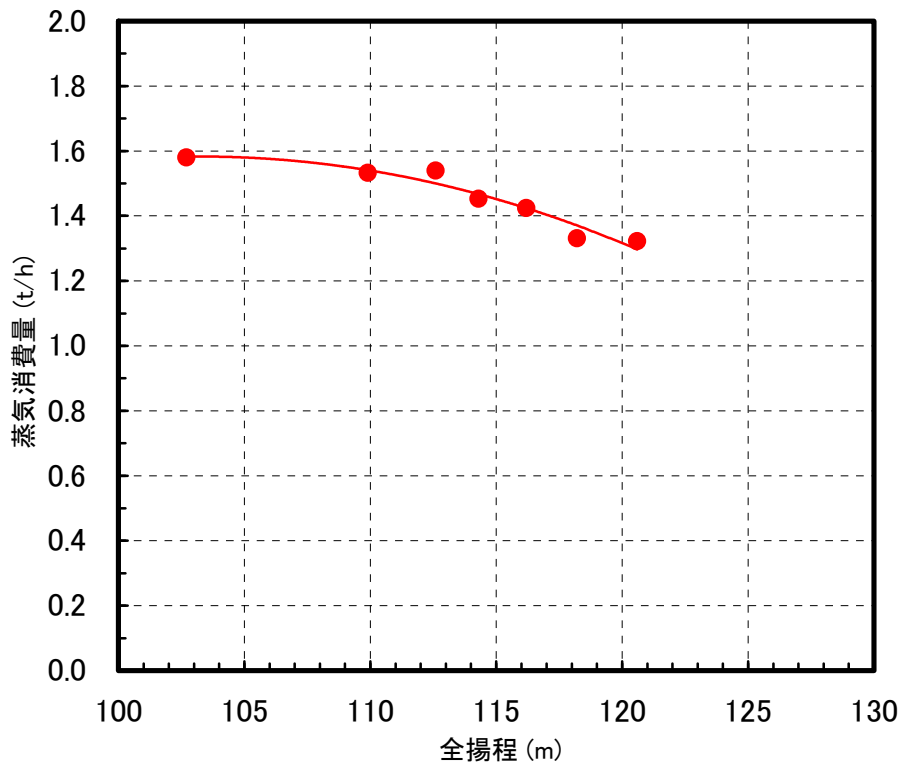


図 4-57 蒸気消費量-全揚程の関係

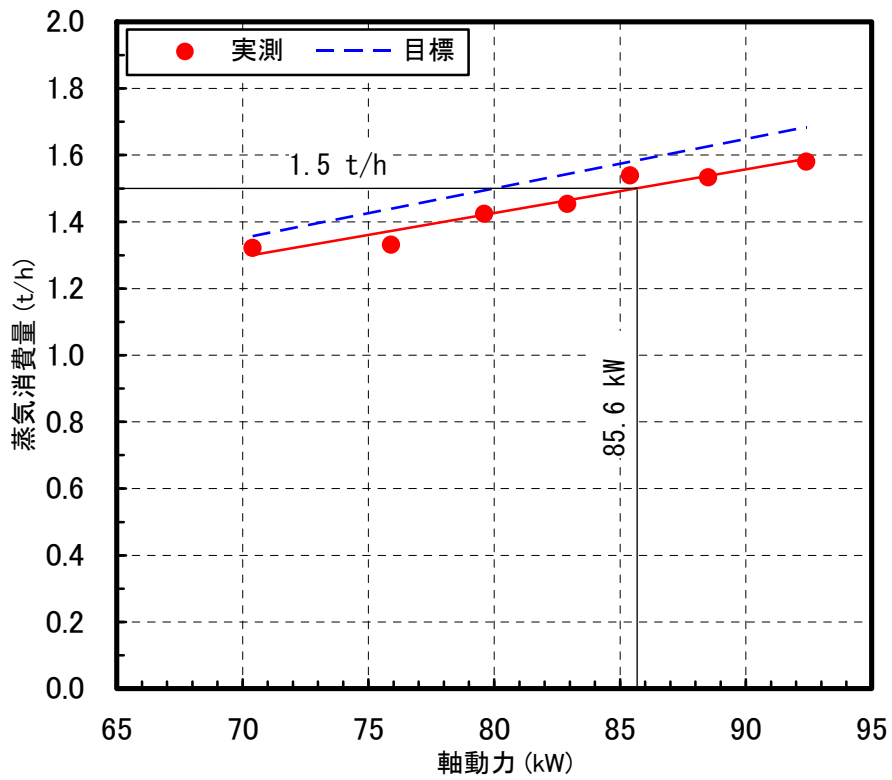


図 4-58 蒸気消費量-軸動力の関係

### 4.2.3 開放検査

性能評価試験後、開放検査を実施した。

各部様子を図 4-59～4-62 に示す。損傷等の異常はなく、良好な状態であることを確認した。

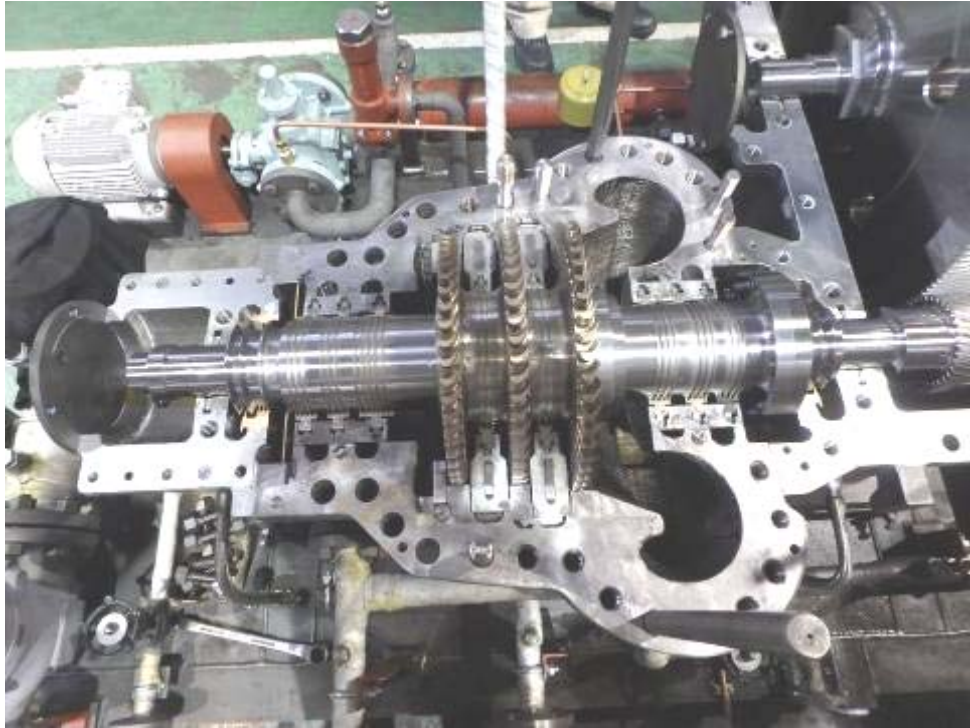


図 4-59 カバを取り外した状態

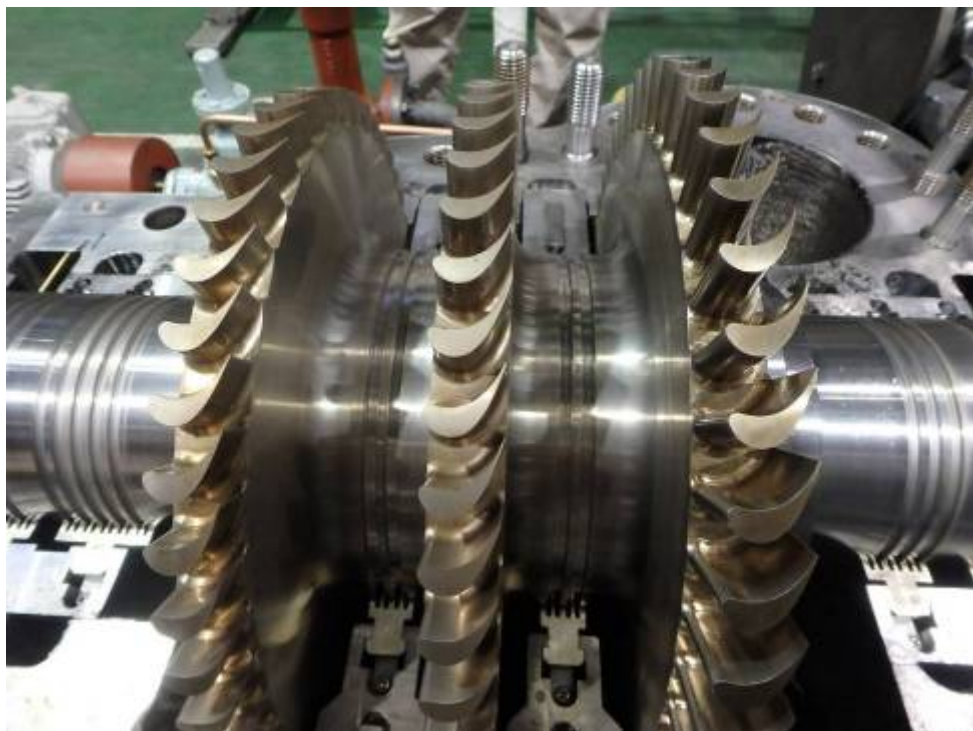


図 4-60 翼一体型羽根車ディスク

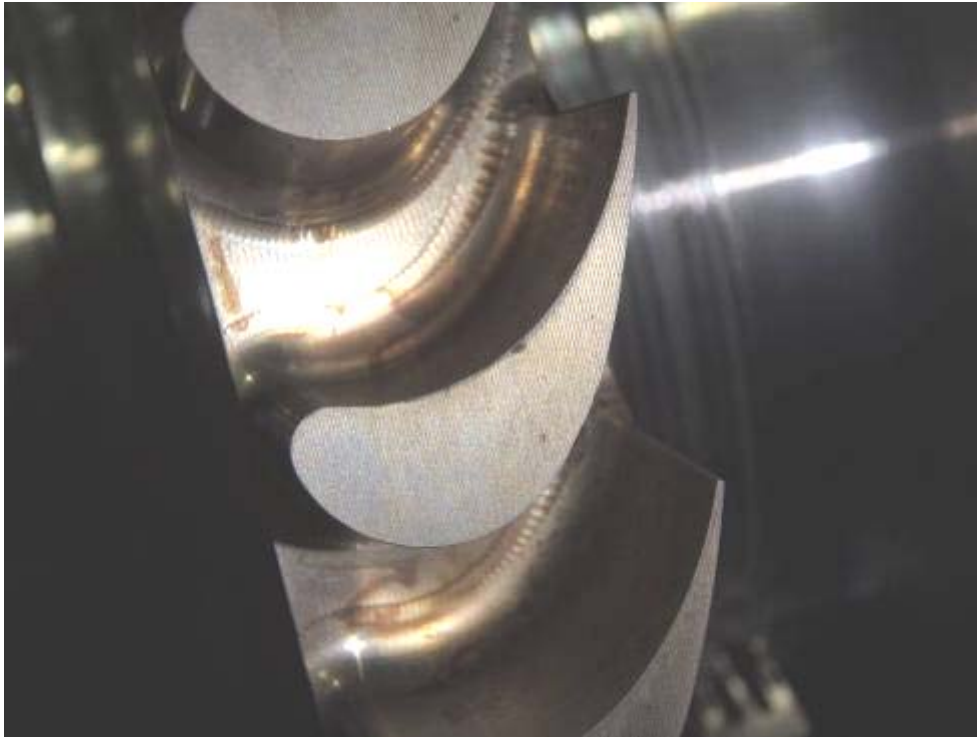


図 4-61 タービン翼端部



図 4-62 減速歯車



## 5 まとめ

### 5.1 目標の達成状況

平成 26 年度は「蒸気消費量 1.5ton/h においてタービン出力 80kW」という目標を掲げ、翼一体型羽根車ディスクを採用した高効率 3 段小型蒸気タービンの設計・製作を行った。

その結果、翼一体型羽根車ディスクを採用したことにより、タービン回転数約 12000min<sup>-1</sup> という高速回転を実現させた蒸気タービンを開発することに成功した。表 5-1 に弊社従来型と当事業開発の高効率蒸気タービンの比較を示す。当事業開発の高効率蒸気タービンは、「蒸気消費量 1.5ton/h においてタービン出力 80kW 以上」という数値目標に対して +5.6kW の 85.6kW を達成した。弊社従来型蒸気タービンと比較して+45.6kW の出力改善である。

表 5-1 従来型と新開発型の比較

|       | 弊社従来型の<br>蒸気タービン      | 当事業開発の<br>蒸気タービン            |
|-------|-----------------------|-----------------------------|
| 段落数   | 1 段                   | 3 段                         |
| 蒸気圧力  | 0.6MPa                |                             |
| 蒸気温度  | 飽和温度                  |                             |
| 蒸気消費量 | 1.5t/h                |                             |
| 排気圧力  | 大気圧                   | -300mmHg                    |
| 回転速度  | 3550min <sup>-1</sup> | 12148/1785min <sup>-1</sup> |
| 定格出力  | 40kW                  | 85.6kW                      |

### 5.2 課題および今後の予定

本事業では、翼一体型羽根車ディスク製作方法の確立し、その技術の採用により性能を向上した高効率小型蒸気タービンの開発に成功した。翼一体型羽根車ディスクは、強度面においてタービンの高速化、ひいては高効率化を実現させる技術である。加工コストに関する課題がクリアになれば、今後の新規開発機種への採用も見込まれる。

一方で、高効率小型蒸気タービンの製品化を進めるにあたり課題もある。

#### (a) 翼一体型羽根車ディスクの製作課題

当初予定していた放電加工に代わって多軸加工機による加工を本事業では採用した。そのため、試算していたよりも加工コストが増加する結果となった。しかし、本事業を進める中で、工具の送り速度や周速の最適化および使用工具や加工工程の見直しを行うことで加工時間の短縮をする目処がついている。今後の工夫次第で、加工方法の違いによる当蒸気タービン価格差は数%以内に収まると想定している。

また、構造についても再検討すべき点があると分かった。組立性を考慮して翼一体型羽根車ディスクを1～3段一体構造とした。組立時に1～3段を一度にタービンシャフトに焼き嵌めできることや、アンバランスが発生しにくいことなどのメリットがある一方で、万が一の加工ミス発生時のやり直しのリスクは大きい。製品化する際は各段分割構造にする方が賢明であるという意見が、加工を実施した東洋機械(株)からのヒヤリングで得られた。

#### (b) 小型化に対する課題

当蒸気タービンは、弊社製品のラトー型蒸気タービンでは実績のない80kWという低出力である。このような低出力に見合ったサイズにタービン筐体を小型化するにあたり、様々な課題が見えてきた。

まず設計上の課題は、部品配置および配管の最適化である。船用として開発した当蒸気タービンは、限られた船内スペースに設置しなければならない。したがって、タービンの機能を満足させつつさらなる小型化を達成するために、過去実績にとらわれない設計の見直しが必要であると考えている。

また製作上の課題は、工作機械等の設備の問題である。工作機械や工具には効率的な加工ができる工作物のサイズがあり、弊社の既存設備は当蒸気タービンよりも大きなタービンに最適化されたものである。ゆえに、生産性向上のためには、既存設備に適した製作方法の検討が必要である。

今後は、省エネ効果・CO2削減効果等の期待に応えるべく、平成28年度中の製品販売開始に向けて、上記に述べた課題の解決に取り組んでいく予定である。



「この報告書は BOAT RACE 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」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目13番3号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話：03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

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