

原子力発第05054号
平成17年6月28日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 大西 淳

伊方発電所第3号機 空調用冷凍機の損傷に係る
報告書の提出について

平成17年5月12日に発生しました伊方発電所第3号機空調用冷凍機の損傷につきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第3号機
空調用冷凍機の損傷について

平成17年 6月
四国電力株式会社

目 次

1 . 件 名	1
2 . 事象発生の日時	1
3 . 事象発生 of 原子炉施設	1
4 . 事象発生時の運転状況	1
5 . 事象発生 of 状況	1
6 . 時 系 列	1
7 . 状況調査	2
8 . 原因調査	3
9 . 推定原因	5
10 . 他 of 空調用冷凍機 of 評価	5
11 . 対 策	5

1. 件名

伊方発電所第3号機 空調用冷凍機の損傷について

2. 事象発生の日時

平成17年5月12日 17時00分(確認)

3. 事象発生の原子炉施設

換気空調設備 空調用冷水設備 空調用冷凍機3D

4. 事象発生時の運転状況

定格熱出力一定運転中(電気出力918MW)

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機(定格電気出力890MW)は、定格熱出力一定運転中(電気出力918MW)のところ、空調用冷凍機の定期点検を実施中、4月27日、28日の空調用冷凍機3Dの試運転において圧縮機の回転音が通常より僅かに大きいことが確認された。

このため、当該機を点検することとし、準備が整った5月12日に分解点検した結果、同日17時、圧縮機の羽根車吸込部とシールリングの一部が損傷していることを確認した。

なお、本事象によるプラント運転への影響、および周辺環境への放射能の影響はなかった。
(添付資料 - 1 ~ 4)

6. 時系列

4月 7日

~ 26日

空調用冷凍機3Dの定期点検(分解点検)実施

4月27日

10:51

自動停止試験のため空調用冷凍機3D起動(無負荷運転)

11:05

自動停止試験実施(空調用冷凍機3D停止)

13:45

空調用冷凍機3D負荷試運転開始

21:45

空調用冷凍機3Dの回転音が通常より僅かに大きいと感じられたため、念のため当該機を停止することとし、空調用冷凍機3Cを起動

21:46

空調用冷凍機3D停止(予備機運用)

4月28日

13:34

空調用冷凍機3D起動

14:24

空調用冷凍機3D負荷試運転終了(予備機運用)

5月12日

9:00頃 空調用冷凍機3D分解点検開始

17:00 空調用冷凍機3D圧縮機の羽根車吸込部とシールリングの一部に損傷を確認

7. 状況調査

空調用冷凍機3Dを分解して各部の外観調査などを行い、損傷状況を確認した。

(1) 外観目視調査

a. 羽根車

吸込部先端の全周に摺動傷および欠損が確認された。吸込部以外の部位に損傷は認められなかった。
(添付資料 - 5)

b. シールリング

シールリングの内表面および外表面に、摺動傷が確認されるとともに一部が破断していた。なお、摺動傷は一様ではなく、ほとんど摺動傷が認められない箇所があった。また、内表面に金属付着物が認められた。
(添付資料 - 6)

c. バネ座金

バネ座金の内側の一部に変色が認められたが、変形、損傷は認められなかった。
(添付資料 - 7)

d. 止め輪

止め輪の変形、変色、損傷は認められなかった。

(添付資料 - 8)

e. 主軸

主軸の変形、変色、損傷は認められなかった。

また、主軸の浸透探傷検査を実施した結果、有意な指示は認められなかった。

(添付資料 - 9)

f. ケーシング

ケーシング(吐出側仕切板、スクロールハウジング、吸込側仕切板)の変形、変色、損傷は認められなかった。
(添付資料 - 10)

(2) 内部調査

圧縮機内部を確認した結果、ベーンコントロール装置部に金属粉が確認されたが、変形、変色、損傷は認められなかった。なお、回収した金属粉をE P M A分析した結果、損傷した羽根車およびシールリングと同じ成分であることが確認された。

また、他の部位(蒸発器、凝縮器等)について目視およびファイバースコープにより内部を確認した結果、変形、損傷は認められなかった。

(3) 破面観察

損傷状況の詳細調査を実施するため、羽根車とシールリングの損傷部分について破面観察を実施した。

a. 羽根車

- ・破面マクロ観察の結果、破面は熱影響を強く受け、黒く変色している。
- ・破面SEM観察の結果、吸込部先端では高温下で強度低下した樹枝状晶（デンドライト）境界および結晶粒界から破壊した破面が確認された。

（添付資料 - 11）

b. シールリング

- ・破面マクロ観察の結果、内表面に瘤状の金属付着物が認められた。なお、金属付着物をEPM分析した結果、損傷した羽根車およびシールリングと同等の成分であることが確認された。
- ・破面SEM観察の結果、高温下で強度低下した樹枝状晶（デンドライト）境界および結晶粒界から破壊した破面が確認された。

（添付資料 - 12）

以上のことから、羽根車とシールリングが接触し、羽根車吸込部およびシールリングの一部が高温となったことで強度が低下し、羽根車とシールリングの摩擦力により損傷に至ったものと推定された。

8. 原因調査

原因究明のため、要因分析図に基づき次の調査を実施した。

（添付資料 - 13）

(1) 製作状況調査

a. 材料調査

羽根車の材料（アルミニウム合金鋳物）を材料証明書により確認した結果、成分はメーカー規格値を満足した適切な材料であった。

シールリング（アルミニウム合金鋳物）について、発光分析等による成分分析を行った結果、設計仕様範囲内であり、問題は認められなかった。

b. 寸法測定結果

シールリング製造時の寸法検査記録を確認した結果、製作公差内であり問題は認められなかった。

(2) 保守状況調査

今回の定期点検における分解組立手順を確認した結果、作業要領書通りに行われており、各部組立時には異物混入のないことを確認していた。また、組立時には羽根車を手動で回転させ羽根車とケーシング内の各部との接触音の有無により羽根車吸込部とシールリングが接触していないことを確認するとともに、シールリング組み込み後にシールリングが可動することを確認しており、組立に問題が

無いことを確認した。

今回の分解点検記録を確認した結果、羽根車の外観点検および浸透探傷検査において、羽根車の疲労割れおよび腐食は認められていなかった。

また、過去の保守履歴を調査した結果、前回の分解点検時に羽根車のバランス修正を行っているが、その後の試運転での振動値等に異常は発生していないことを確認した。

(3) 組立寸法調査

圧縮機の組立状況による羽根車吸込部とシールリングの間隙寸法への影響を確認するため、各部の寸法測定を実施した。

測定の結果、各部とも公差範囲内であったが、各嵌合部隙間等を累積し評価した結果、羽根車吸込部と吸込側仕切板の最大芯ずれ量は0.89mmとなり、最大の芯ずれが生じた状態で組み立てた場合には、羽根車吸込部の許容される振れ量が1.15mmから0.26mmに減少することが判明した。一方、運転中に発生しうる羽根車吸込部の最大振れ量は0.35mmと推定されることから、羽根車の振れ量が大きくなった場合には、羽根車吸込部とシールリングが接触する可能性があることが判明した。

しかし、組立の際、主軸と吐出側仕切板の芯ずれを調整すれば、運転中に発生しうる羽根車の最大振れが発生した場合でも、羽根車吸込部とシールリングの接触が発生しないと評価された。
(添付資料 - 14)

(4) 試運転状況調査

試運転状況において

- ・自動停止試験および負荷試運転の手順、記録を調査した結果、要領書通りに実施されていた
- ・負荷試運転の際、振動値は許容値内であり運転上問題となる値ではなかったが、回転音が通常より僅かに大きいと感じられた

ことが確認された。

このため、自動停止試験および負荷試運転時の手順および圧縮機の動作等が振動、回転音等へどのように影響するかを調査した結果、

- ・自動停止試験時には冷水出口温度の低下で、ベーン開度が全閉となる場合がある
- ・ベーン開度が全閉の流量が少ない状態で圧縮機を運転した場合、圧縮機内の流体に乱れが生じ、羽根車の振動が通常運転時より高くなる

ことが判明した。

このことから、ベーン開度が全閉となった際、羽根車の振動が大きくなり、羽根車とシールリングが接触しやすい状況になっていたものと推定される。

なお、これまでに問題が生じていなかったのは、羽根車と吸込側仕切板の芯ずれが少なかったためと推定される。
(添付資料 - 15)

9. 推定原因

圧縮機の組立の際、羽根車を手動で回転させ羽根車とケーシング内の各部が接触していないことを接触音の有無により確認していたが、この方法では芯ずれの状況を確認し確実に調整することができないことから、わずかな芯ずれが残り、羽根車吸込部とシールリングが接触しやすい状態で組み立てられた。

この状態で組立後の自動停止試験を実施した際、ベーン開度が全閉となり羽根車の振動が通常運転時よりも大きくなったため、羽根車吸込部とシールリングが接触して高温となり強度が低下し、摩擦力により羽根車吸込部とシールリングの一部が損傷したものと推定された。
(添付資料 - 16)

10. 他の空調用冷凍機の評価

3号機の当該機以外の空調用冷凍機3台については、前回点検時において、ベーン開度が全閉となった状態での運転を経験しており、特に問題が認められておらず、その後も問題なく運転できていることから、同様な事象は発生しないと考えられる。また、1、2号機の空調用冷凍機については、構造が異なっており、最大芯ずれ量を考慮しても羽根車吸込部とシールリングが接触しないことを確認していることから、同様な事象は発生しない。

11. 対策

(1) 当該機については、羽根車およびシールリングを新品に交換する。

(2) 当該機については、組立の際、取付位置の調整が可能な吐出側仕切板の取付時に、主軸と吐出側仕切板の芯ずれ量をダイヤルゲージで測定し、芯ずれを調整することにより、羽根車とケーシング各部が接触しないように組立を行う。
(添付資料 - 17)

(3) 作業要領書に、吐出側仕切板の取付時に、主軸と吐出側仕切板の芯ずれ量をダイヤルゲージで測定し、芯ずれを調整する手順を追記する。

以上

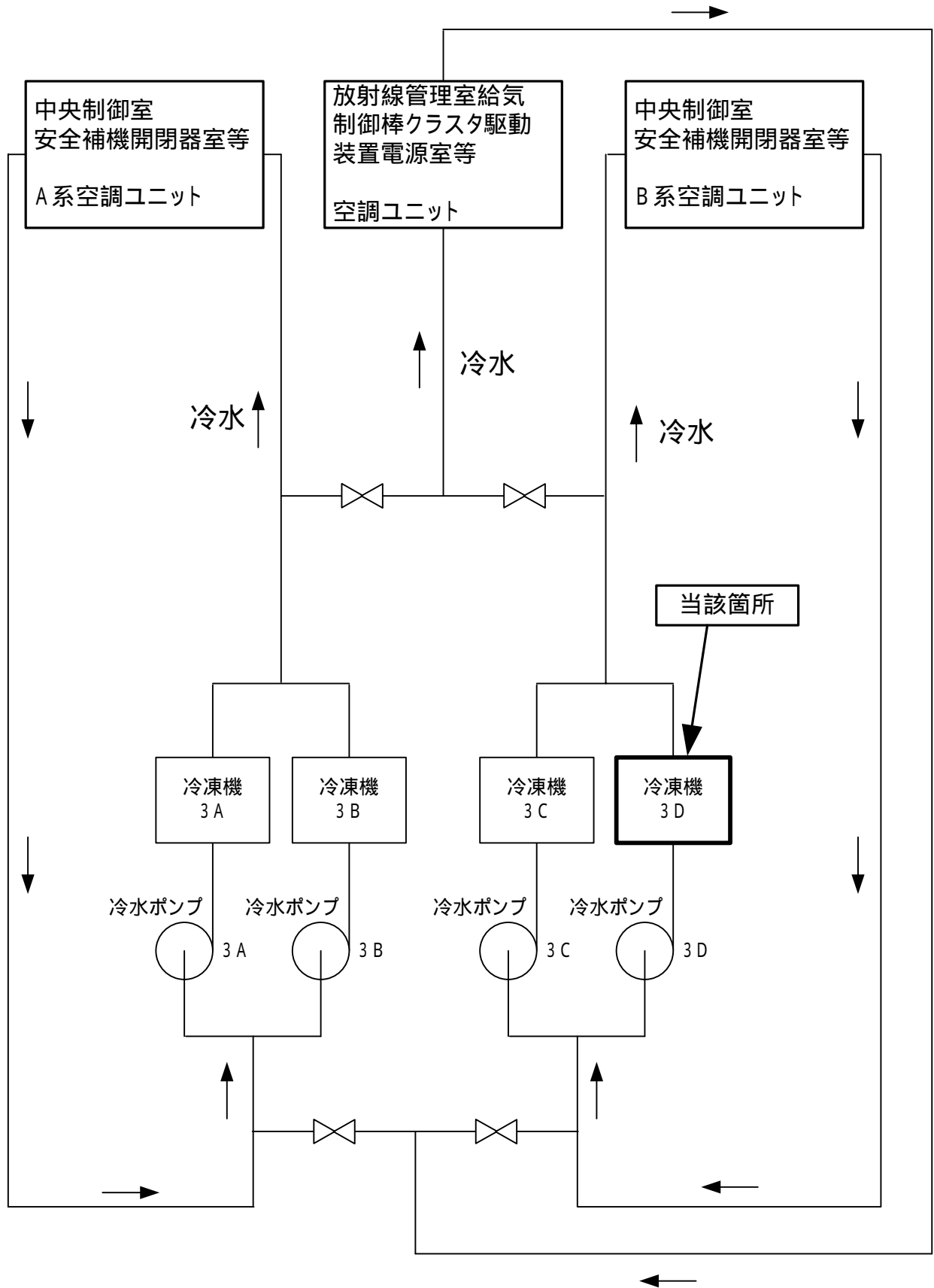
添 付 資 料

- 1 . 空調用冷水系統概略図
- 2 . 空調用冷凍機外形図
- 3 . 空調用冷凍機圧縮機断面図
- 4 . モニタチャート
- 5 . 外観目視調査結果（羽根車）
- 6 . 外観目視調査結果（シールリング）
- 7 . 外観目視調査結果（バネ座金）
- 8 . 外観目視調査結果（止め輪）
- 9 . 外観目視調査結果（主軸）
- 10 . 外観目視調査結果（ケーシング）
- 1 1 . 破面観察結果（羽根車）
- 1 2 . 破面観察結果（シールリング）
- 1 3 . 空調用冷凍機の損傷に係る要因分析図
- 1 4 . 羽根車吸込部とシールリングの接触可能性評価結果
- 1 5 . 圧縮機ベーン開度制御
- 1 6 . 羽根車・シールリング損傷メカニズム
- 1 7 . 主軸と吐出側仕切板の芯ずれ調整要領

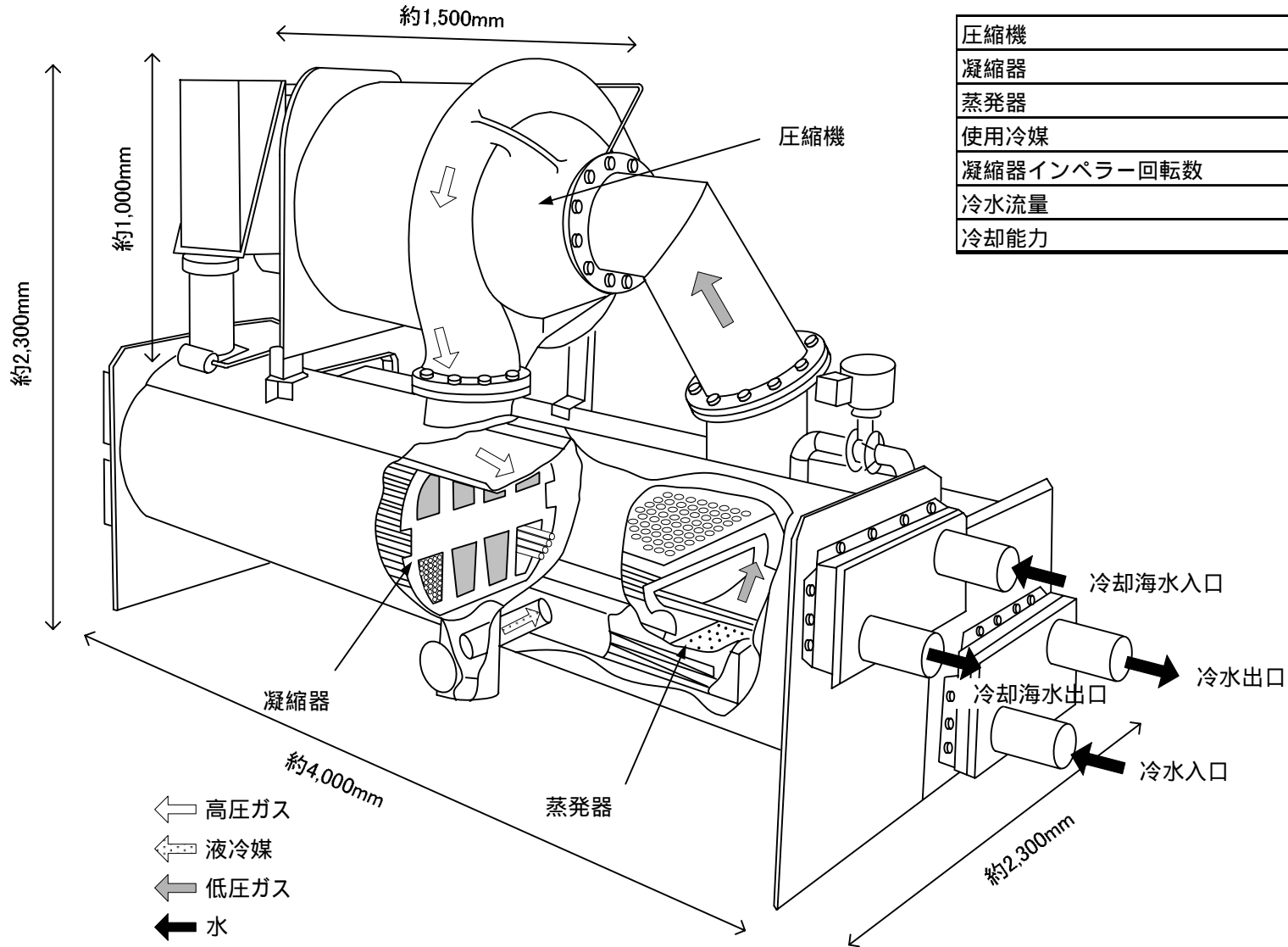
[参考資料]

- 1 . 用語説明

空調用冷水系統概略図

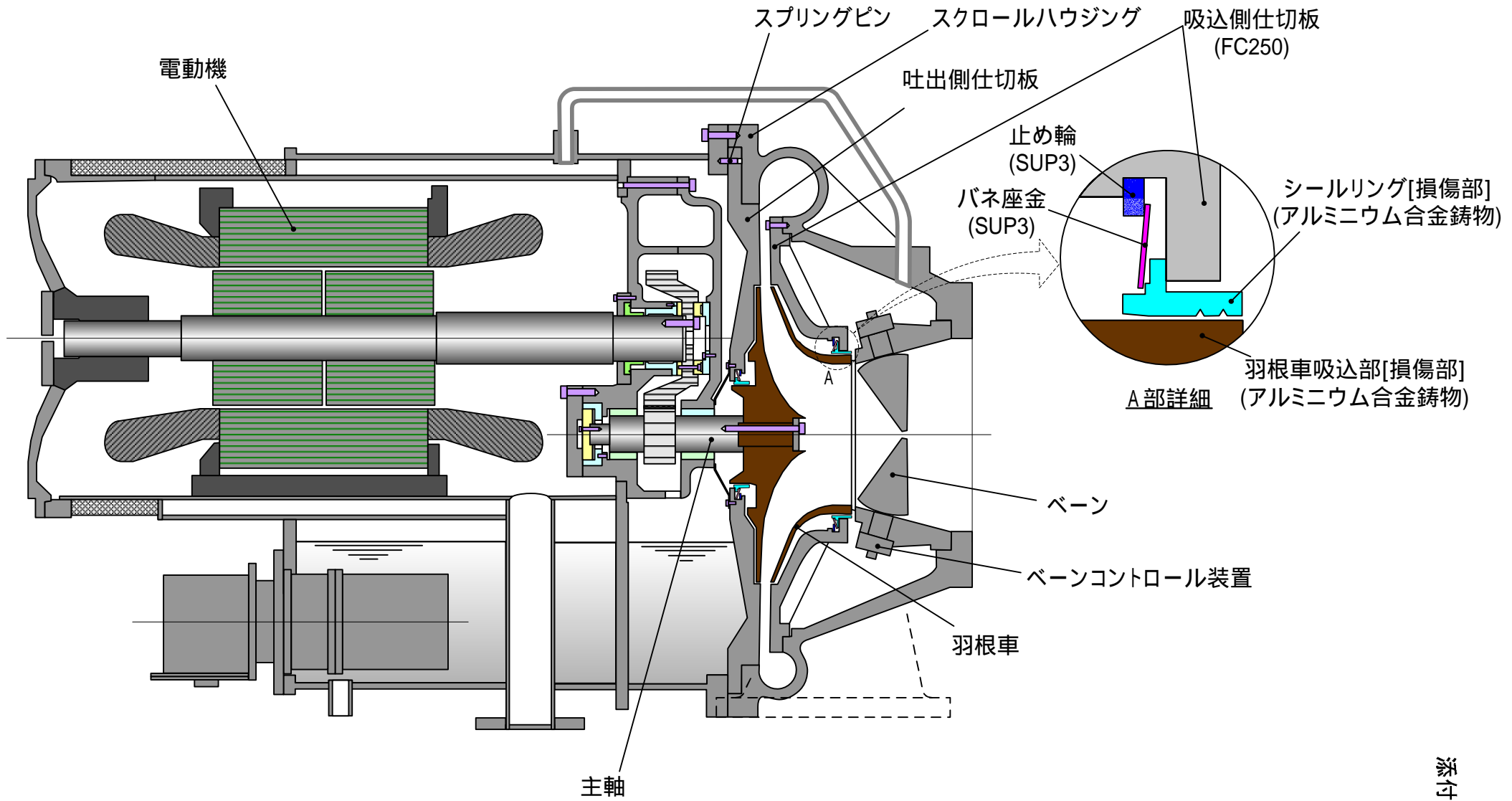


空調用冷凍機外形図



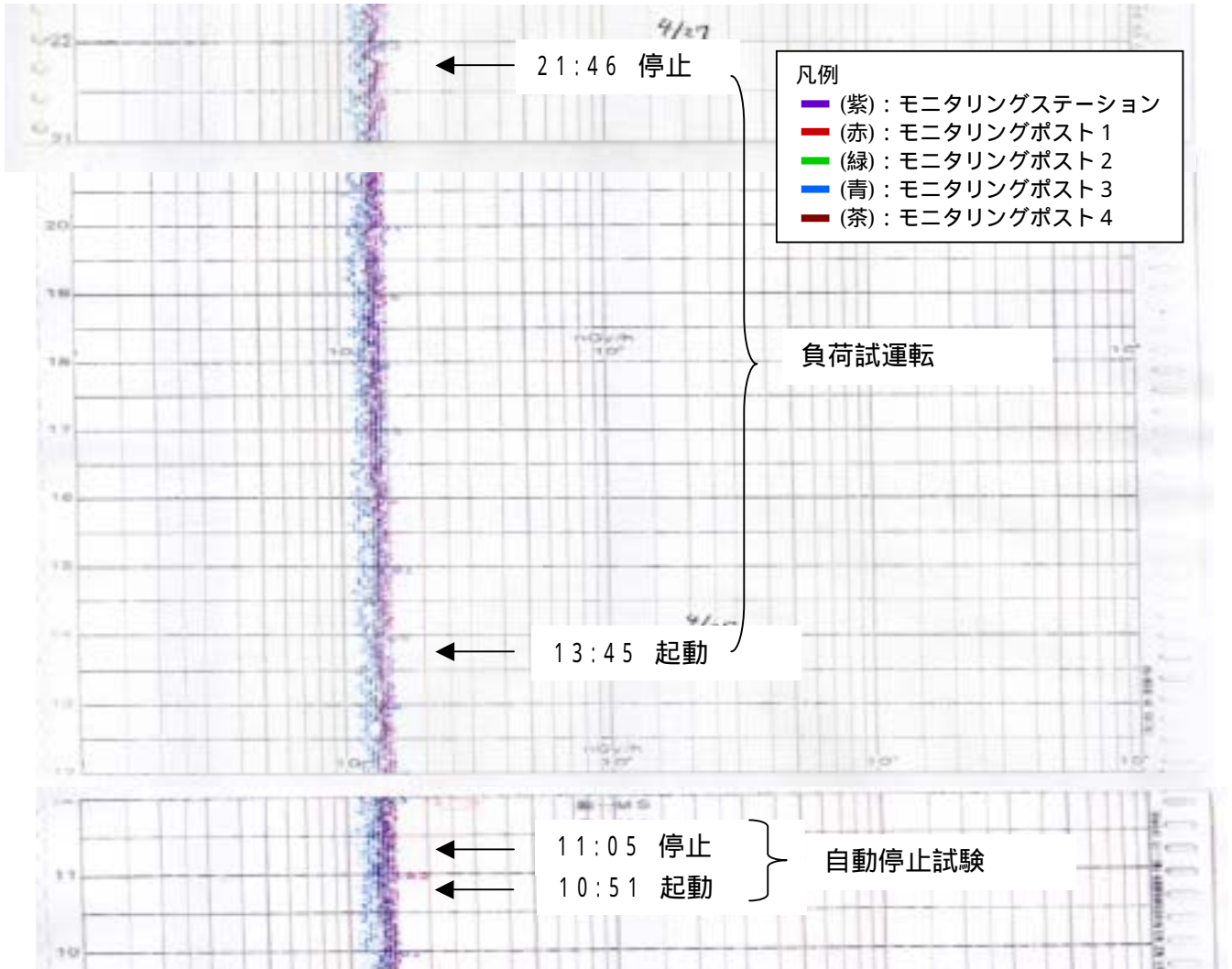
圧縮機	密閉単段片吸込形ターボ冷凍機
凝縮器	シェルアンドチューブ型海水冷却
蒸発器	シェルアンドチューブ型
使用冷媒	R - 123 (代替フロン)
凝縮器インペラー回転数	約10,000rpm
冷水流量	約130m ³ /h
冷却能力	553,000kcal/h

空調用冷凍機 圧縮機断面図

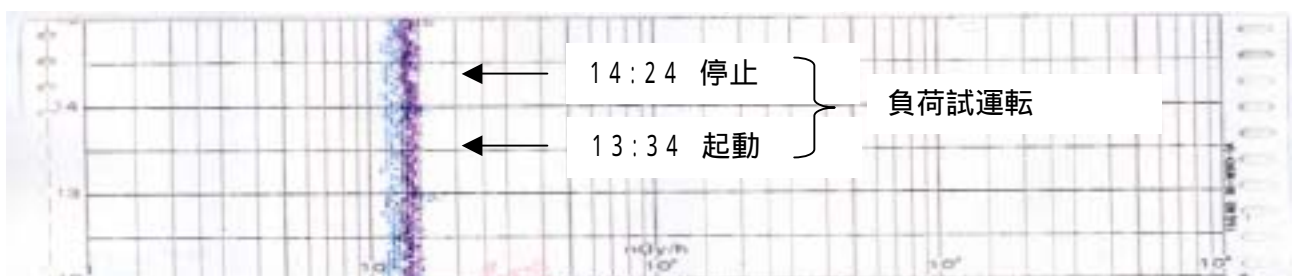


モニタチャート (野外モニタ)

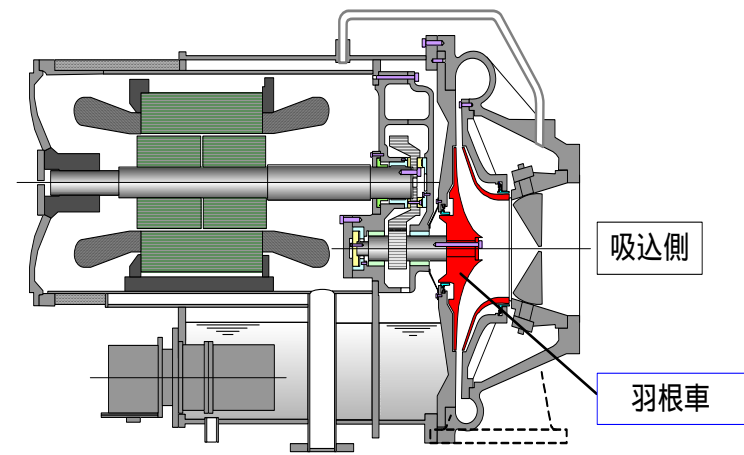
平成17年4月27日



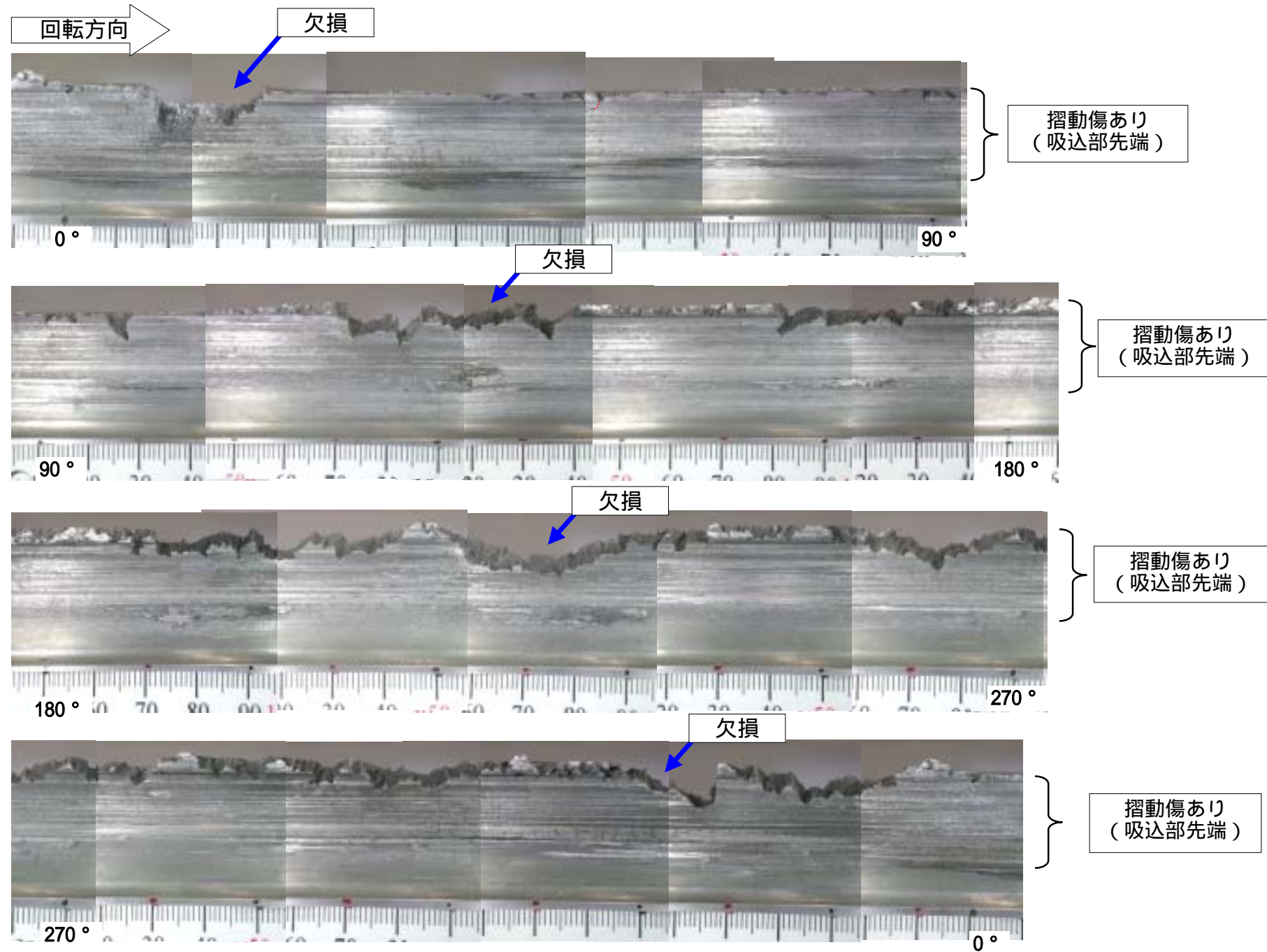
平成17年4月28日



外観目視調査結果(羽根車)

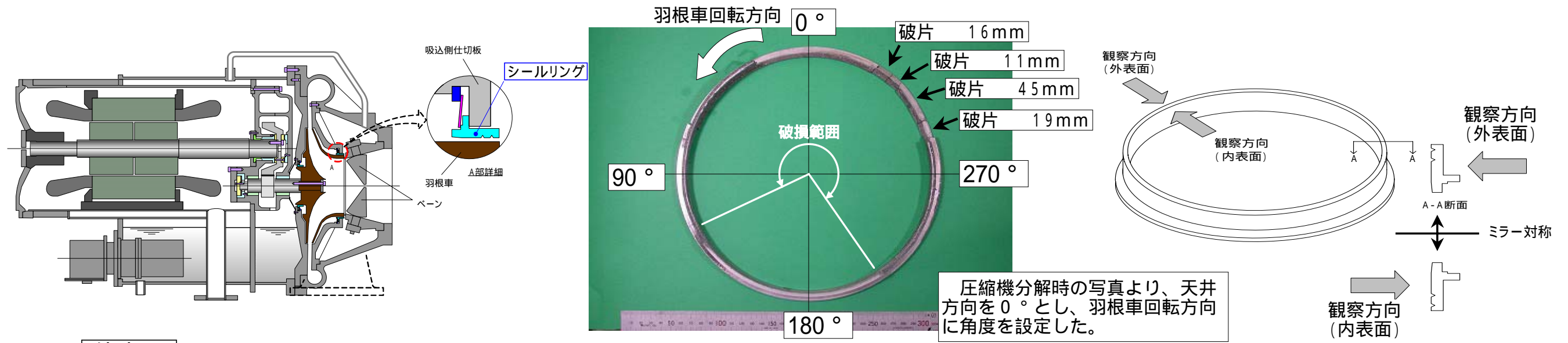


調査用に便宜上、羽根車回転方向に角度を設定した。

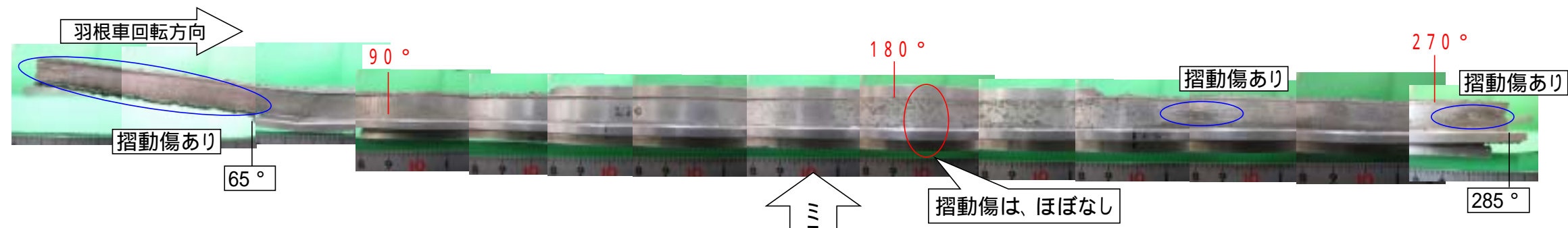


【観察結果】
 ・吸込部先端の全周に摺動傷が確認された。
 ・吸込部先端には欠損が認められた。

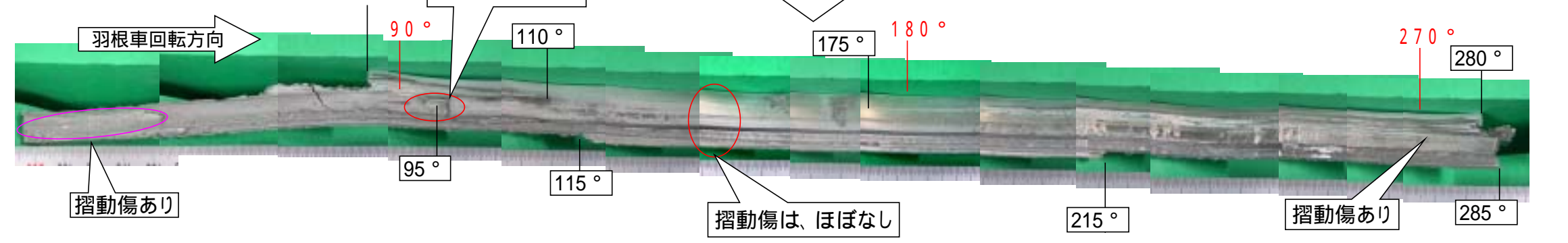
外観目視調査結果(シールリング)



外表面



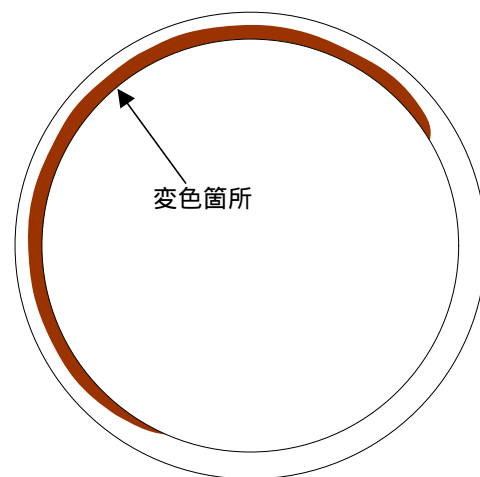
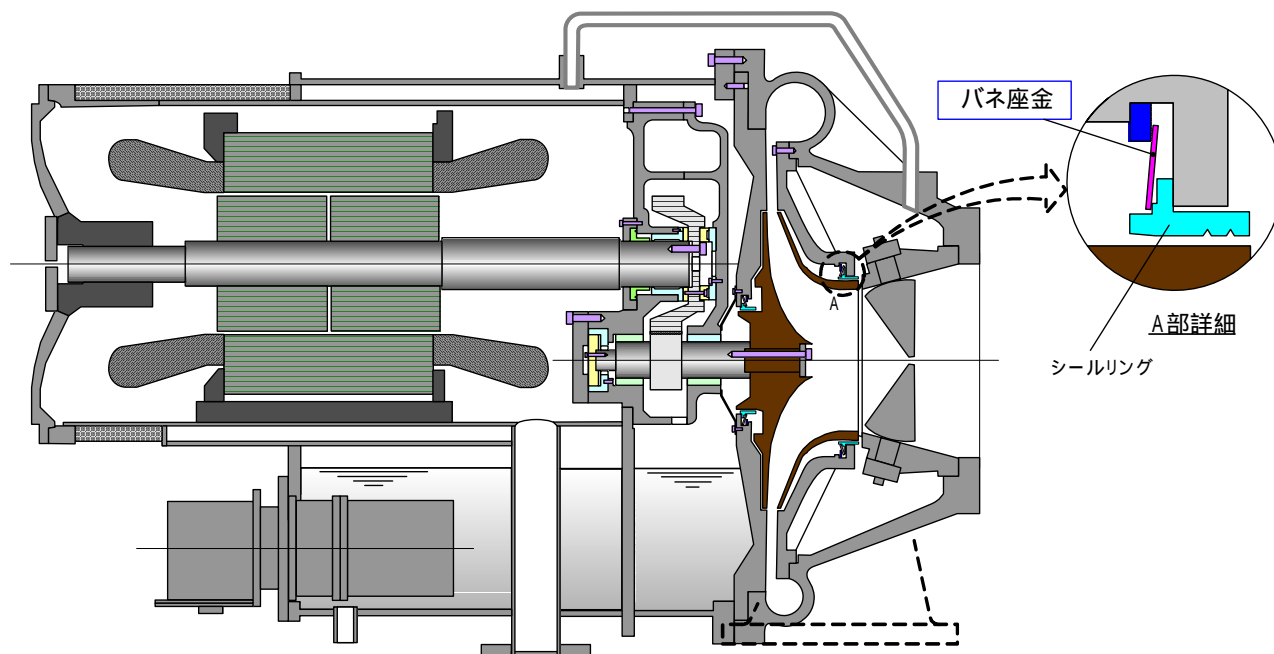
内表面



【観察結果】

- ・シールリングの内表面及び外表面には、摺動傷が確認された。
- ・シールリングの一部は破断していた。
- ・摺動傷は一様ではなく、ほとんど認められない箇所もあった。
- ・シールリングの内表面に、金属付着物が認められた。

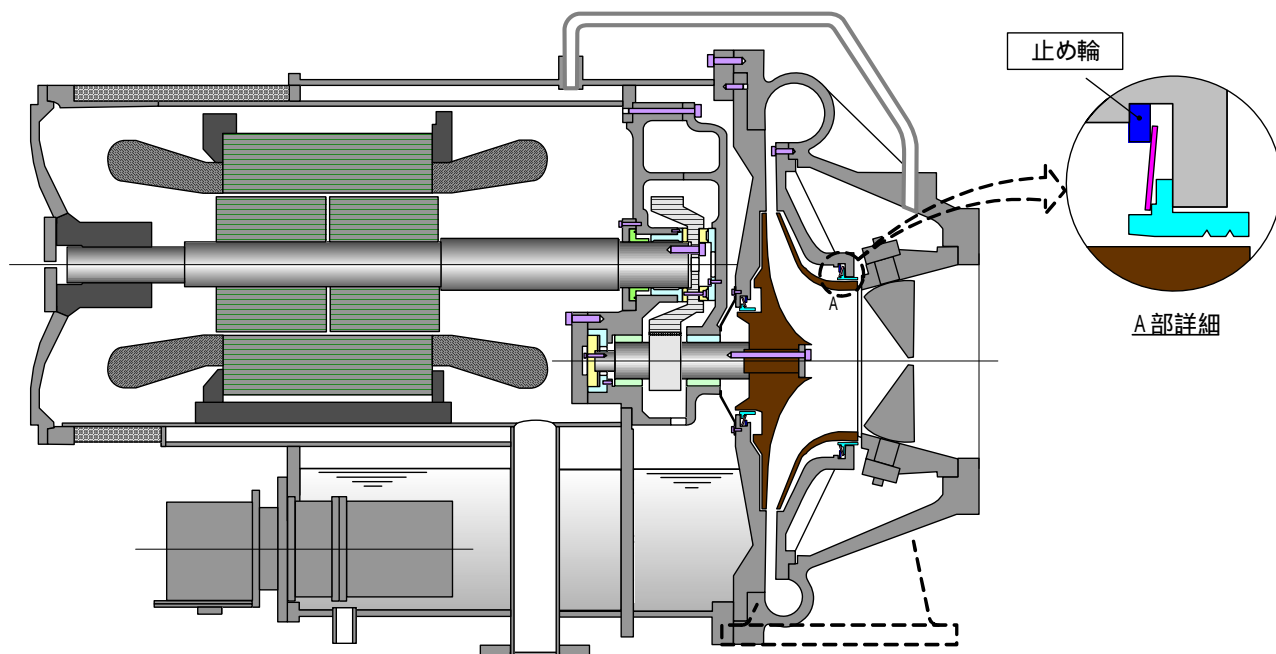
外観目視調査結果(バネ座金)



【観察結果】

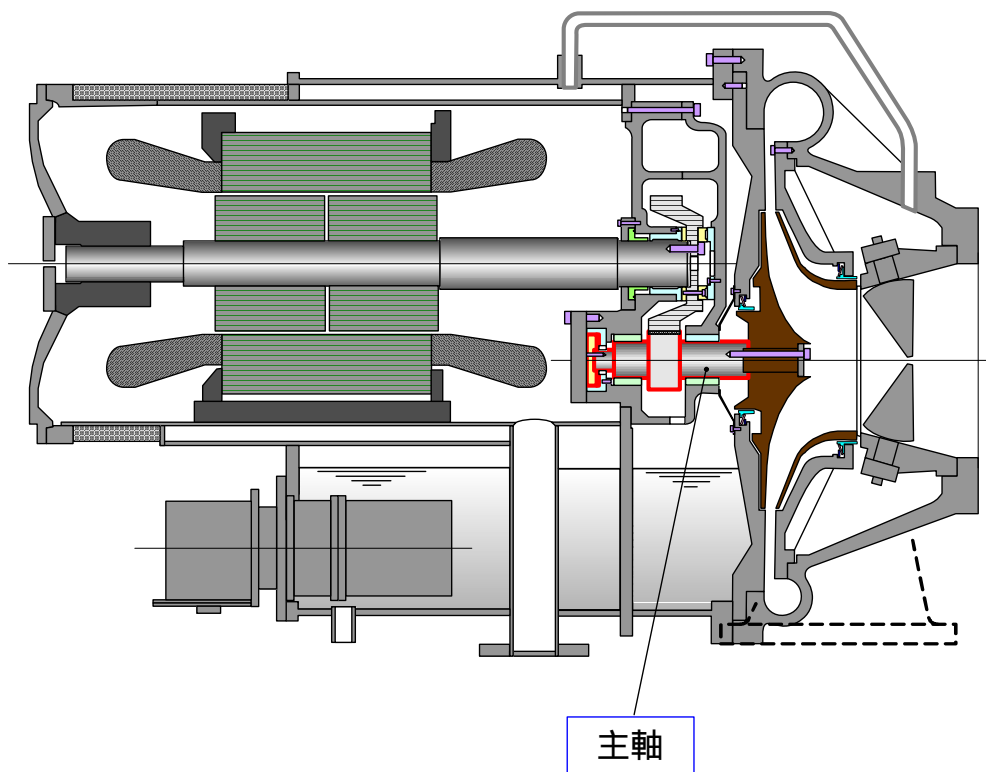
- ・内側の一部に変色が認められた。
- ・変形、損傷は認められなかった。

外観目視調査結果(止め輪)



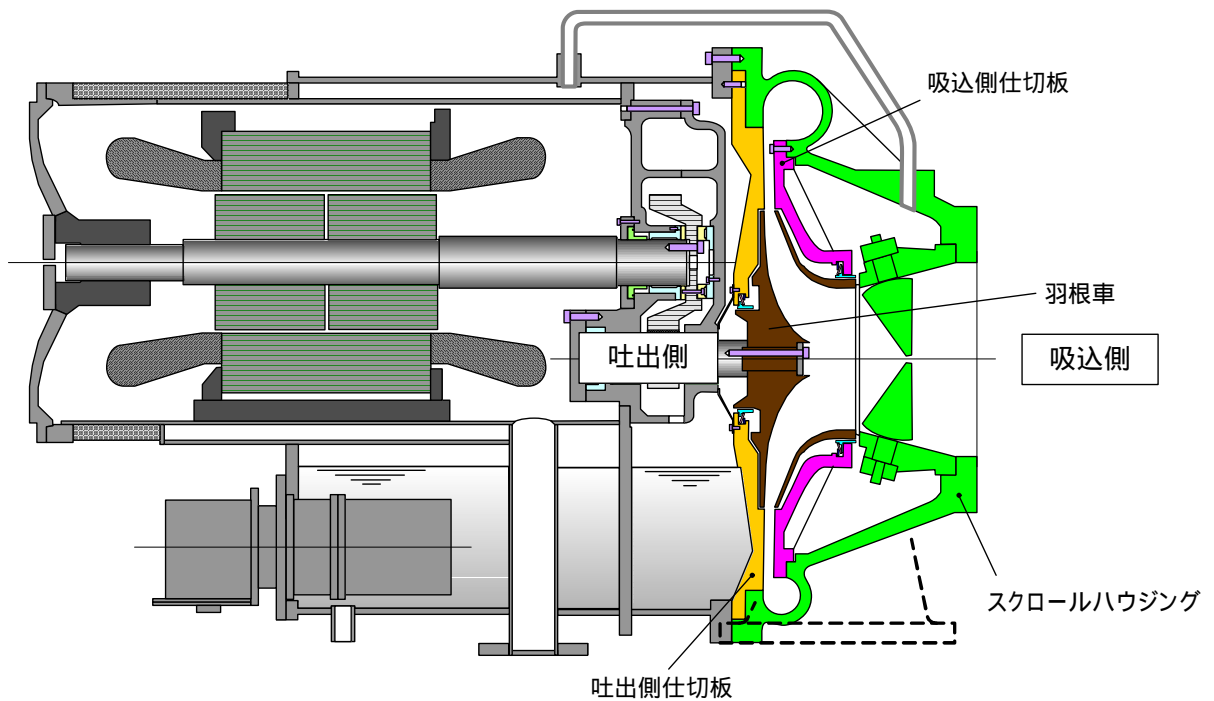
【観察結果】
・変形、変色、損傷は認められなかった。

外観目視調査結果(主軸)



【観察結果】
・変形、変色、損傷は認められなかった。
・浸透探傷検査を実施した結果、有意な指示は認められなかった。

外観目視調査結果(ケーシング)



スクロールハウジング



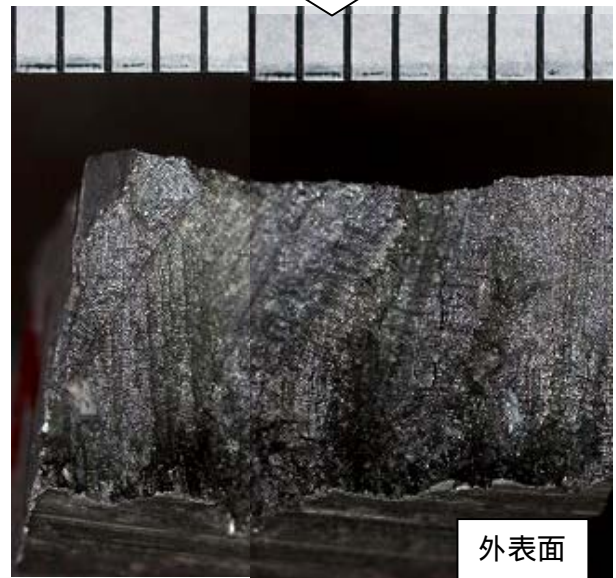
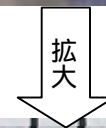
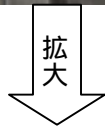
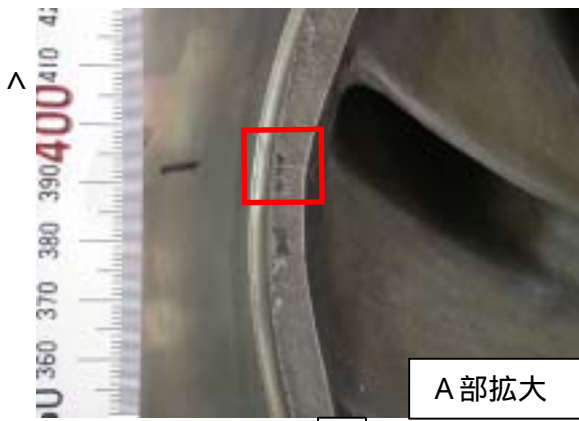
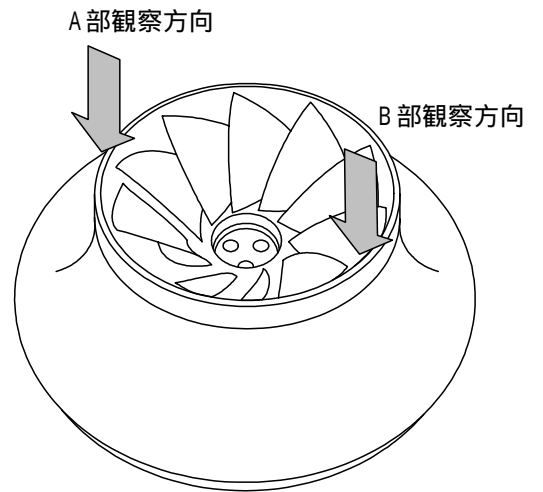
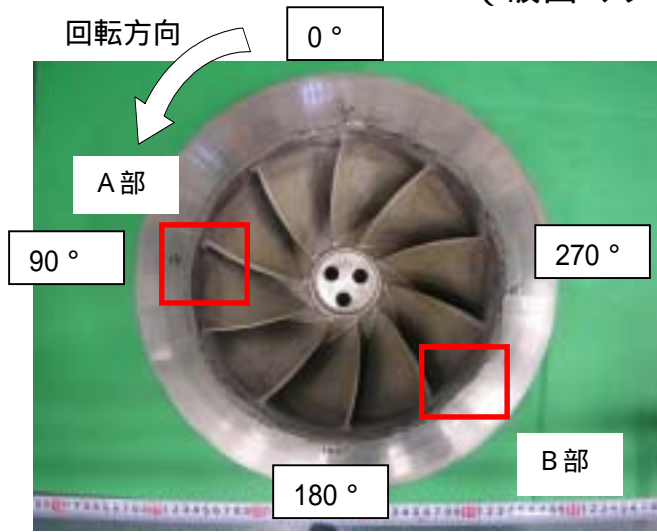
吸込側仕切板



吐出側仕切板

【観察結果】
・変形、変色、損傷は認められなかった。

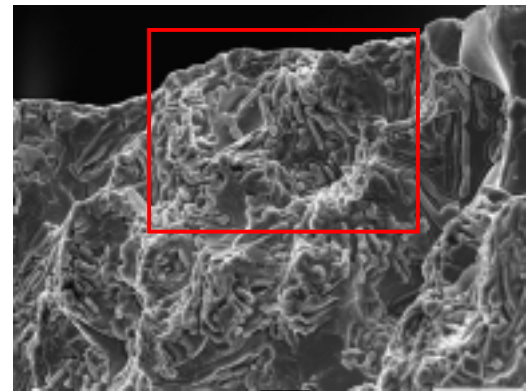
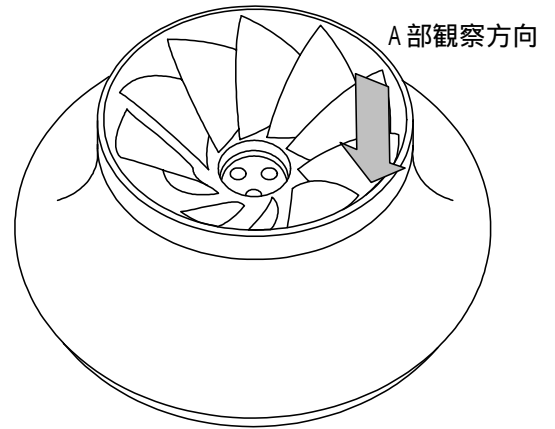
破面観察結果 (羽根車) (破面マクロ観察)



【観察結果】

- ・破面は、熱影響を強く受け、黒く変色している。
- ・割れは平坦ではない。

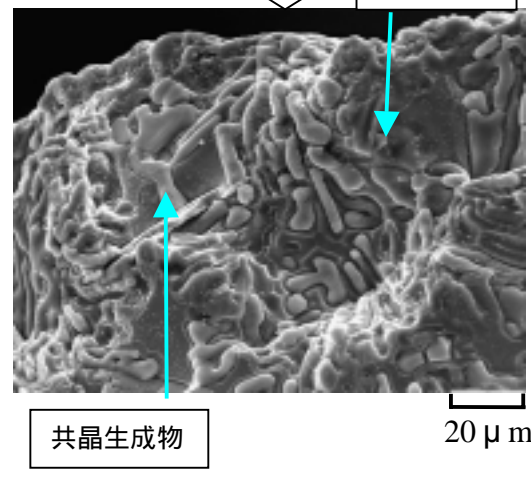
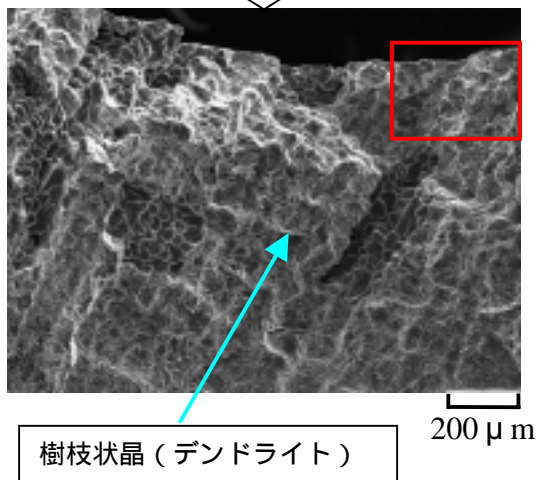
破面観察結果 (羽根車)
(破面SEM観察)



拡大

拡大

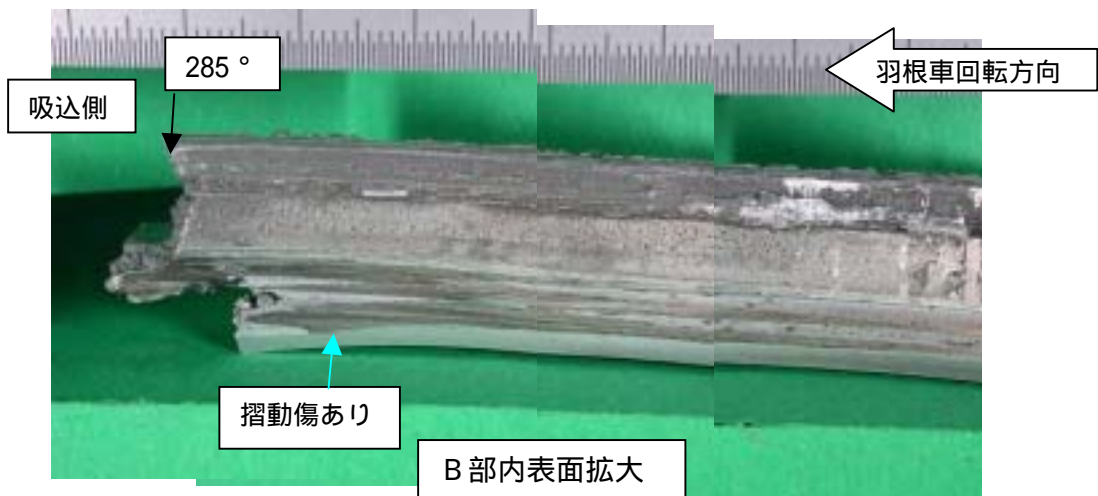
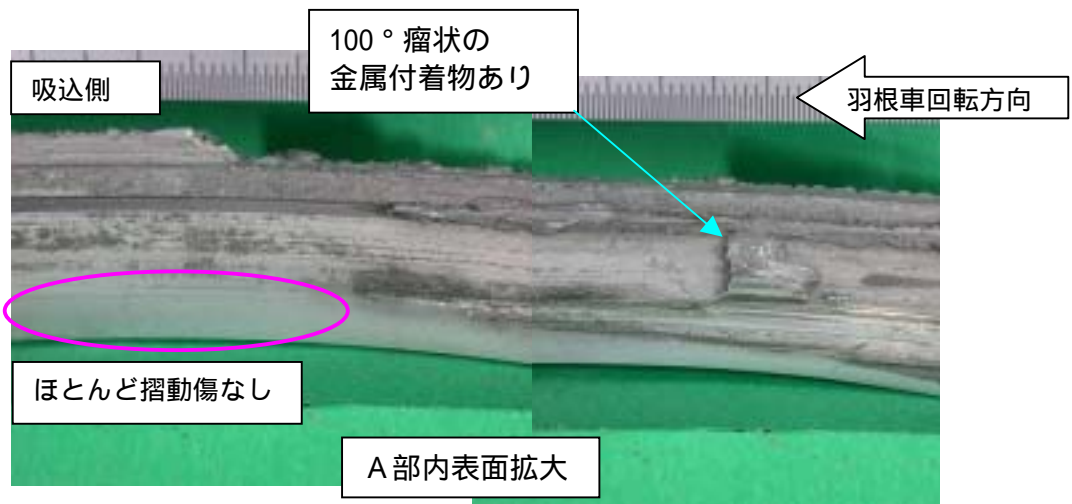
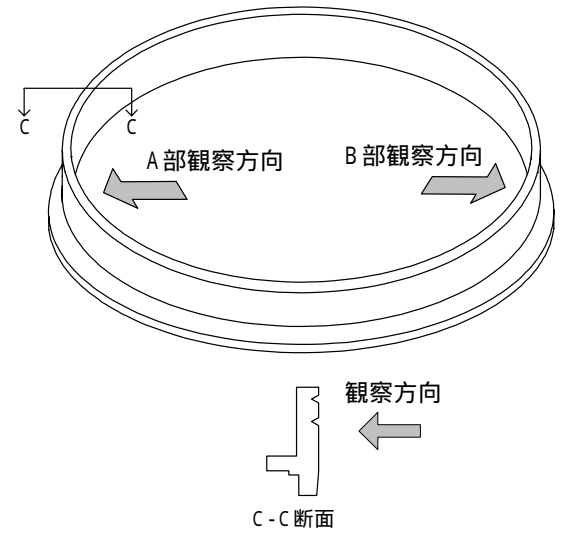
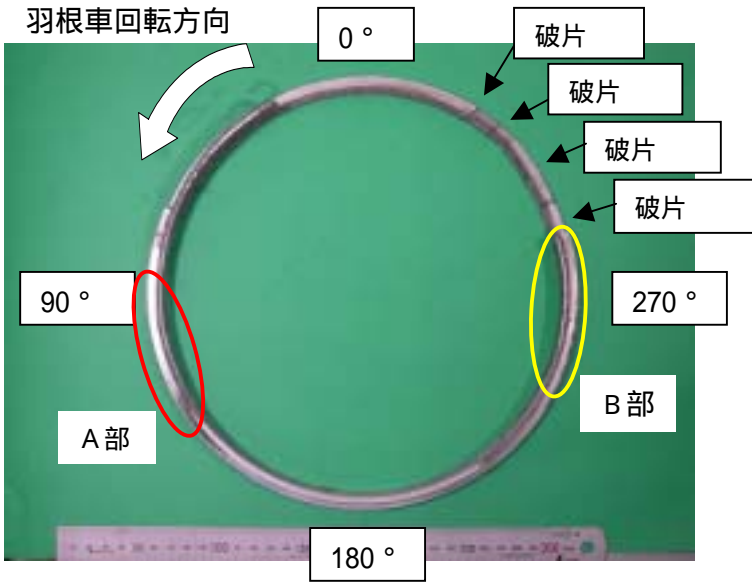
拡大



【観察結果】

- ・破面には、樹枝状晶 (デンドライト) が認められた。
- ・吸込部先端では、高温下で強度低下した樹枝状晶 (デンドライト) 境界および結晶粒界での割れが認められた。

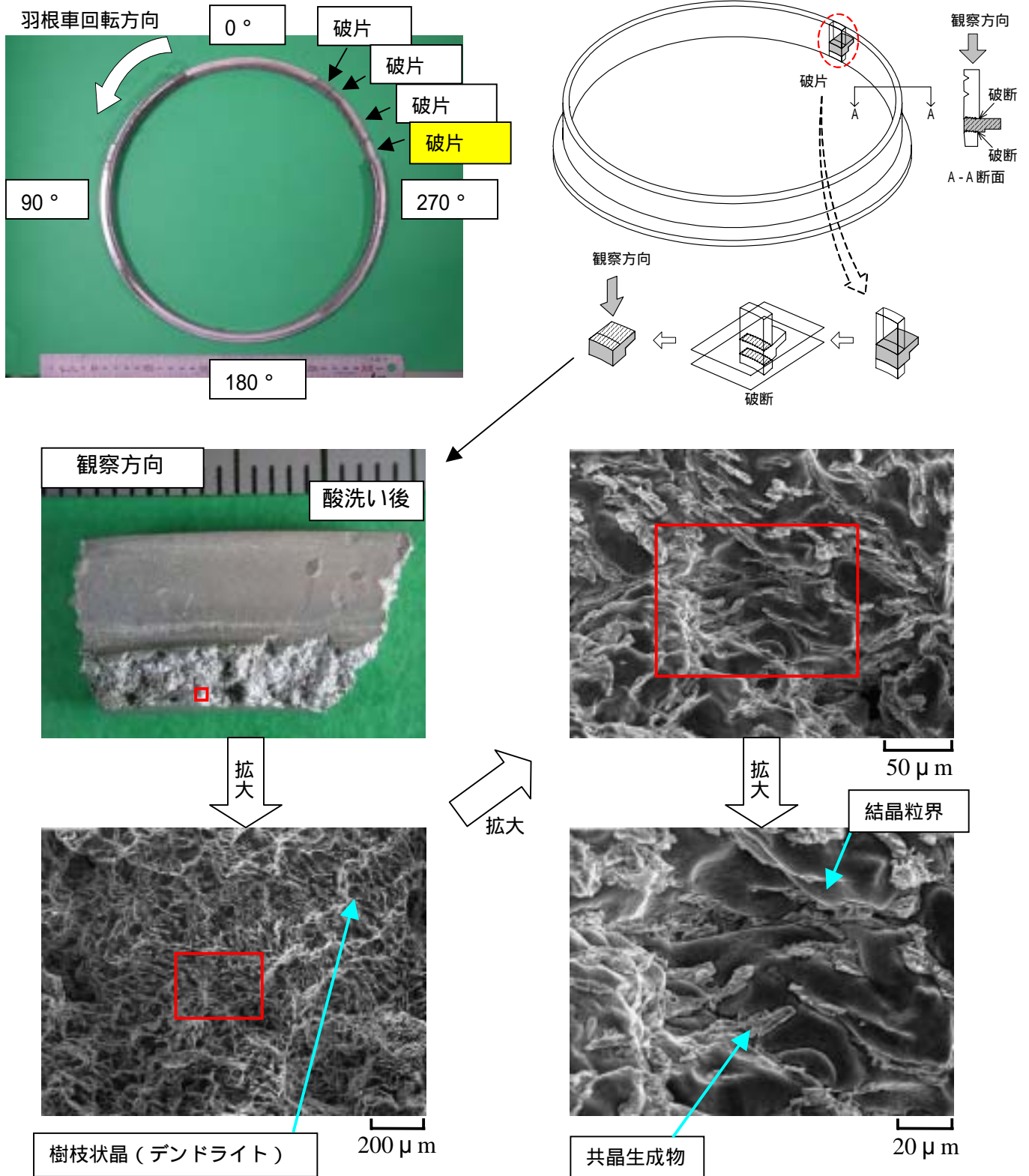
破面観察結果 (シールリング)
(破面マクロ観察)



【観察結果】

- ・ 内表面に瘤状の金属付着物が認められた。
- ・ 破断部近傍に、摺動傷が認められた。
- ・ ほとんど摺動傷がない箇所があるが、吸込側には摺動傷が認められた。

破面観察結果 (シールリング) (破面 S E M 観察)



【観察結果】

・高温下で強度低下した樹枝状晶 (デンドライト) 境界及び結晶粒界での割れが認められた。

空調用冷凍機の損傷に係る要因分析図

事 象	要 因		調 査 方 法	調 査 結 果	評 価
圧縮機の羽根車、シールリング損傷	羽根車、シールリングの材料不良	材料不良	・製作状況調査	・羽根車について材料証明書を確認した結果、成分は規格値内であり、問題は認められなかった。 ・シールリングについては、発光分析等による成分分析を行った結果、設計仕様範囲内であり問題は認められなかった。	×
		シールリングの固着	寸法不良	・製作状況調査	シールリング製造時の寸法検査記録を確認した結果、製作公差内であり問題は認められなかった。
	施工不良		・保守状況調査	今回の分解組立状況を確認した結果、シールリングを吸込側仕切板に取り付け後にシールリングが可動することを確認しており、組立に問題のないことを確認した。	×
	羽根車とシールリングの芯ずれ	製造不良・設計不良	・組立寸法調査	・スクロールハウジング、吐出側仕切板、吸込側仕切板、電動機ケーシング等の各部寸法を測定した結果、寸法に問題のないことを確認した。 ・各部位の嵌合部間隙等を累積し評価した結果、羽根車吸込部と吸込側仕切板の最大芯ずれ量は0.89mmとなり、最大の芯ずれが生じた状態で組み立てた場合には、羽根車吸込部の許容される振れ量が1.15mmから0.26mmに減少することが判明した。一方、運転中に発生しうる羽根車吸込部の最大振れ量は0.35mmと推定されることから、羽根車の振れ量が大きくなった場合には、羽根車吸込部とシールリングが接触する可能性があることが判明した。 ・組立時に主軸と吐出側仕切板の芯ずれを調整すれば、運転中に発生しうる羽根車の最大振れが発生した場合でも、羽根車吸込部とシールリングが接触しないと評価された。	×
		施工不良	・保守状況調査 ・組立寸法調査	・今回の分解組立手順を確認した結果、作業要領書通りに行われており、各部分解点検記録等にも問題は認められなかった。 ・組立手順を調査した結果、羽根車を手で回転させ羽根車とケーシング内の各部との接触音の有無により羽根車吸込部とシールリングが接触していないことを確認していたが、主軸と吐出側仕切板の芯ずれを調整していないことが分かった。	
	振 動	流体振動	・運転状況調査	・ベーン開度が全閉の流量が少ない状態で圧縮機を運転した場合、圧縮機内の流体に乱れが生じ、羽根車の振動が通常運転時より高くなる。 ・自動停止試験でベーン開度が全閉になった際、羽根車の振動が大きくなったと推定される。	
		アンバランス	・保守状況調査	・平成13年の分解点検時に、羽根車のバランス修正を実施していることを確認した。 ・今回の分解点検時に、羽根車の外観点検および浸透探傷検査を実施し、異常は認められなかった。	×
	羽根車劣化	疲労割れ	・保守状況調査	今回の分解点検時に、羽根車の外観点検および浸透探傷検査を実施し、異常は認められなかった。	×
		腐食	・保守状況調査	今回の分解点検時に、羽根車の外観点検および浸透探傷検査を実施し、異常は認められなかった。	×
	異物混入	施工不良	・保守状況調査	・今回の分解組立手順を確認した結果、各部組立時には、異物混入のないことを確認し組立を行っていた。	×

羽根車吸込部とシールリングの接触可能性評価結果 (実機寸法測定結果による評価)

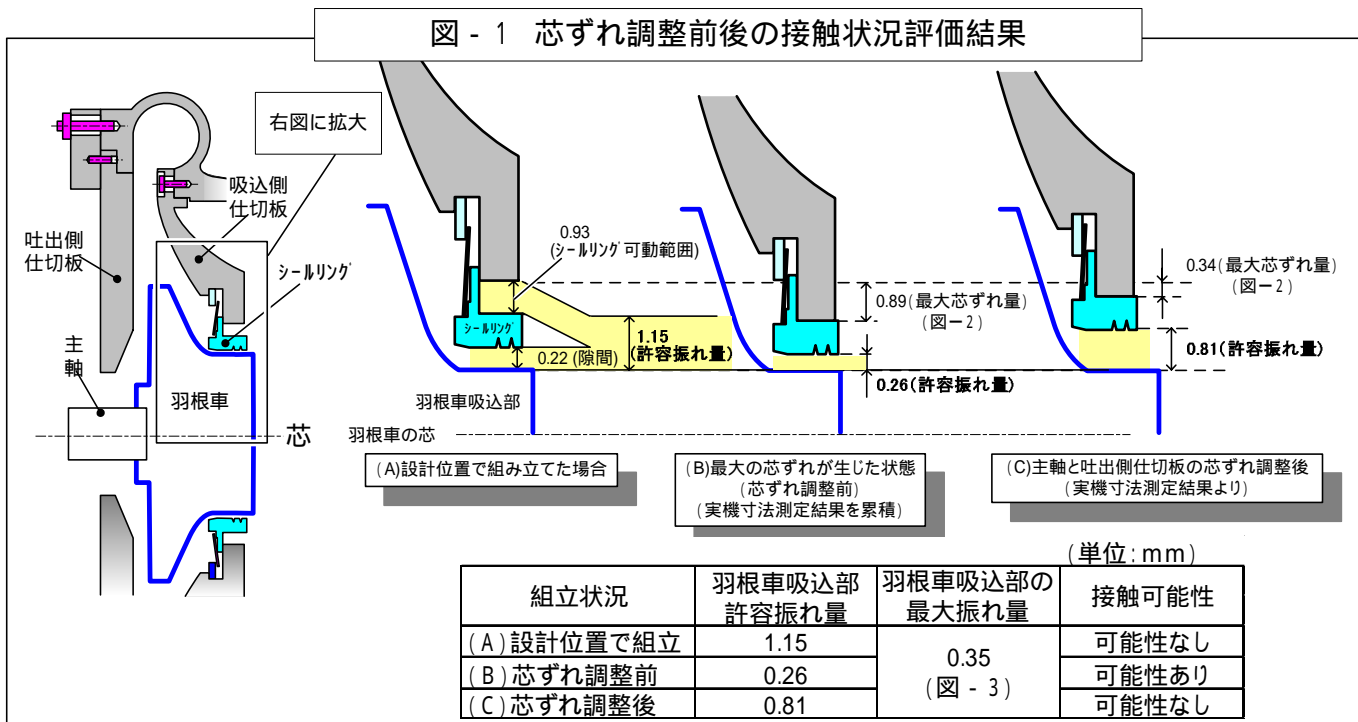


図 - 2 最大芯ずれ量の内訳

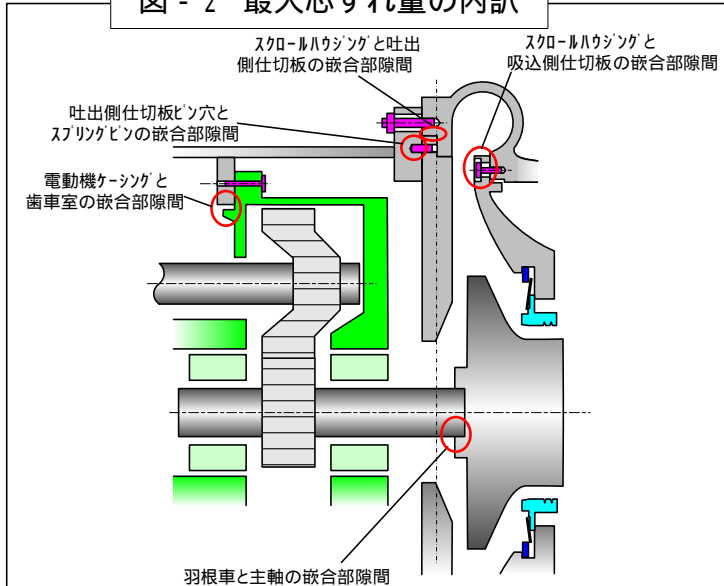
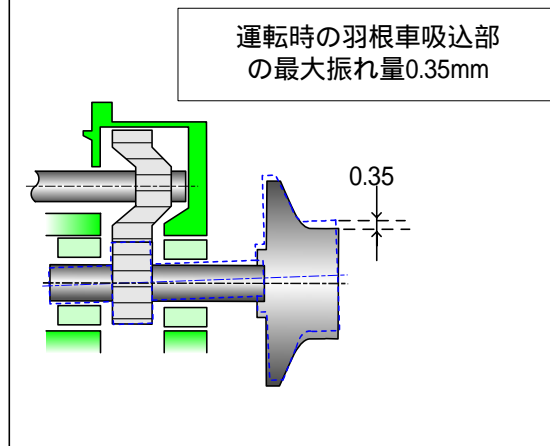


図 - 3 羽根車吸込部の最大振れ量

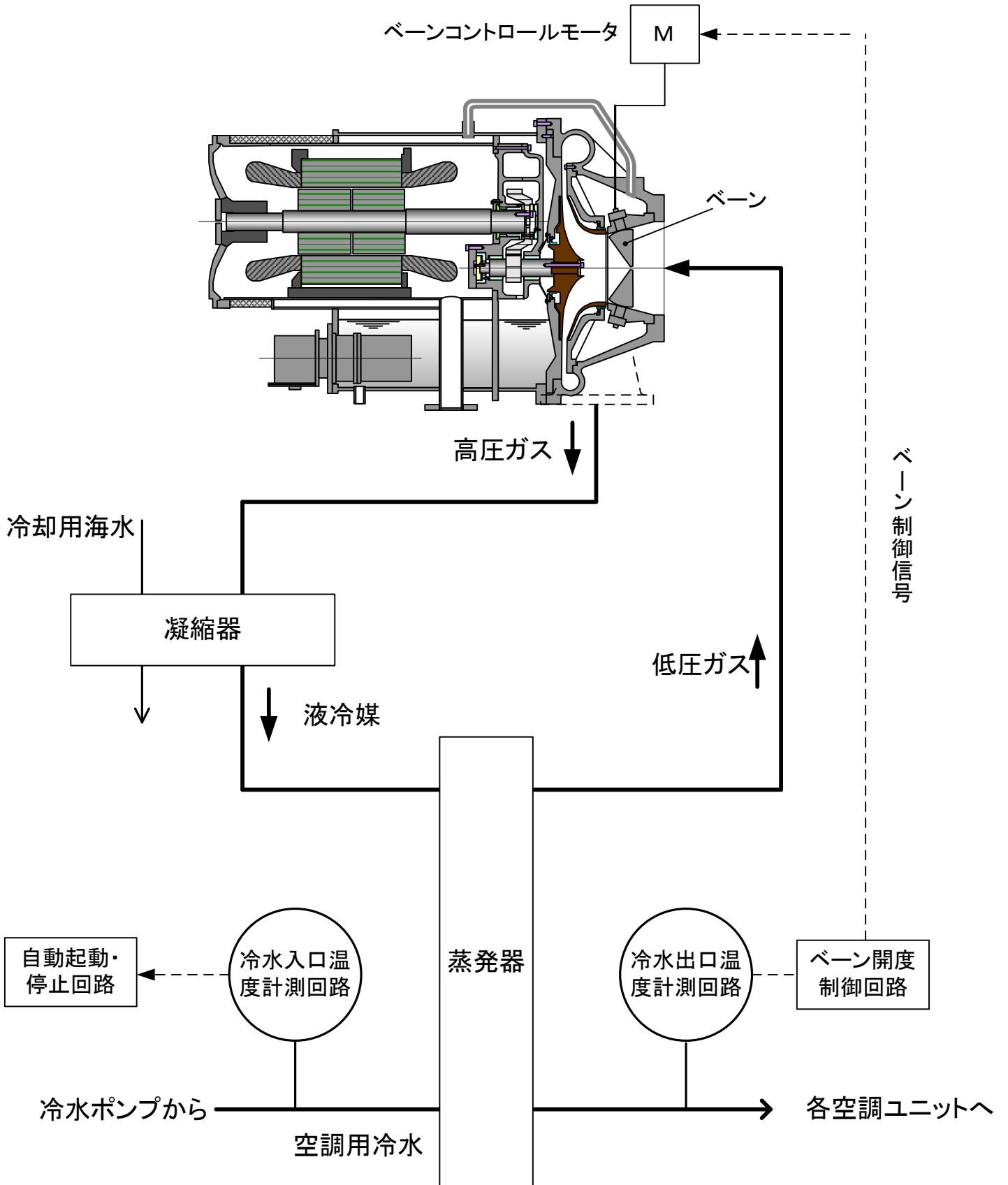


項目	最大芯ずれ量(単位: mm)	
	調整前	調整後
(1) 羽根車取付によるずれ	0.02 (羽根車と主軸の嵌合部隙間)	0.02 (同左)
(2) 吐出側仕切板取付によるずれ	0.67 〔電動機ケーシングと歯車室の嵌合部隙間 吐出側仕切板ピン穴とスプリングピンの嵌合部隙間 他〕	0.12 〔主軸と吐出側仕切板の 芯ずれ調整誤差 他〕
(3) スクロールハウジング取付によるずれ	0.20 〔スクロールハウジングと吐出側仕切板の嵌合部隙間 スクロールハウジングと吸込側仕切板の嵌合部隙間〕	0.20 (同左)
合計	0.89	0.34

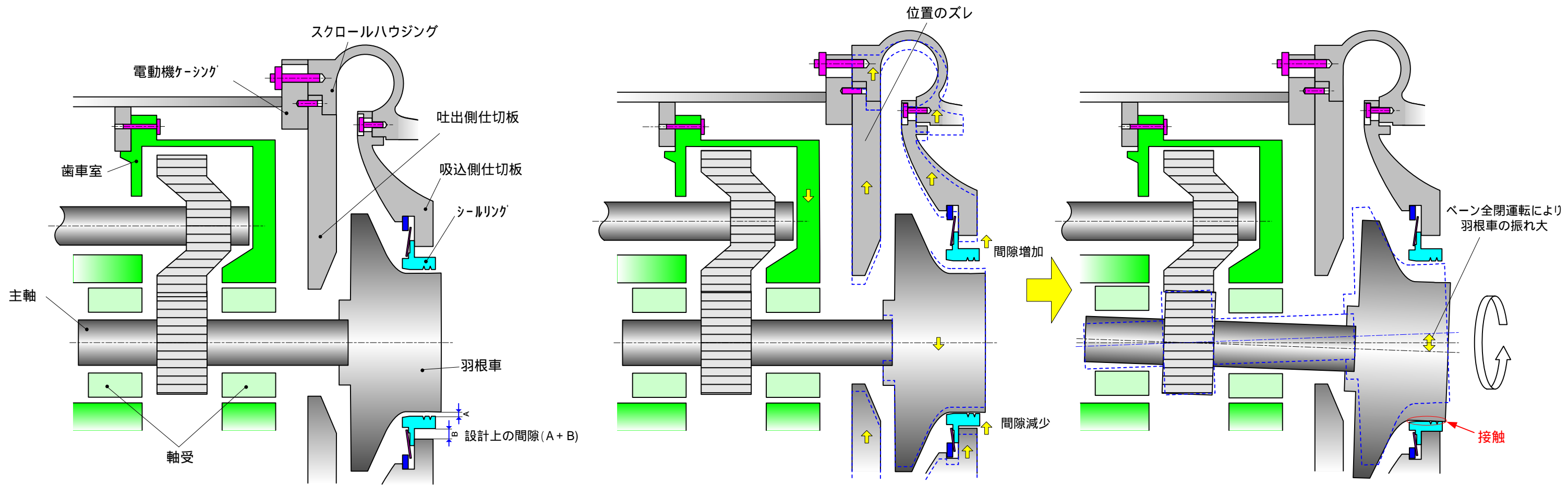
()内は、芯ずれ要因箇所を示す。

圧縮機ベーン開度制御

冷水出口温度低下 → ベーン閉動作
冷水出口温度上昇 → ベーン開動作



羽根車・シールリング損傷メカニズム



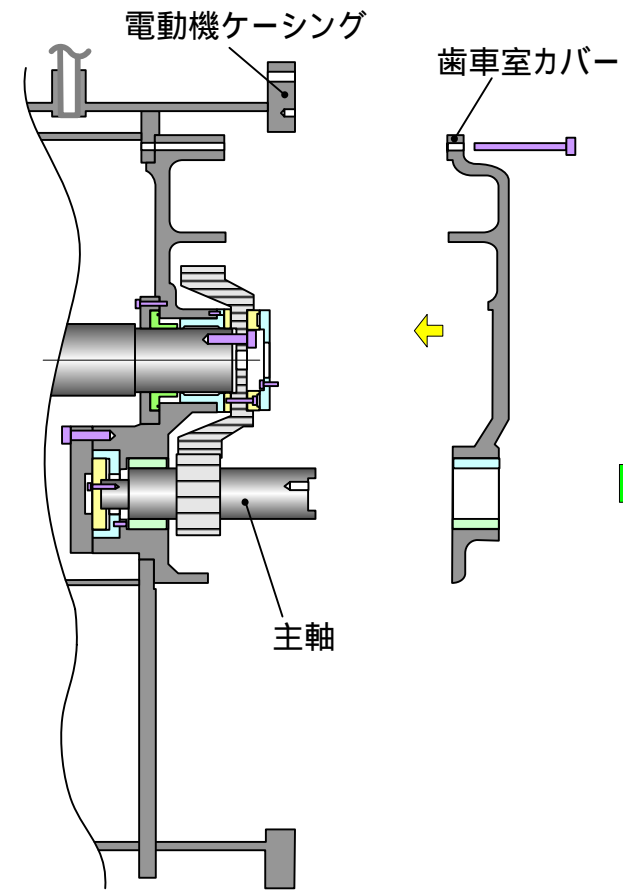
吐出側仕切板位置ズレ等によるシールリング他の位置ズレ発生

設計位置

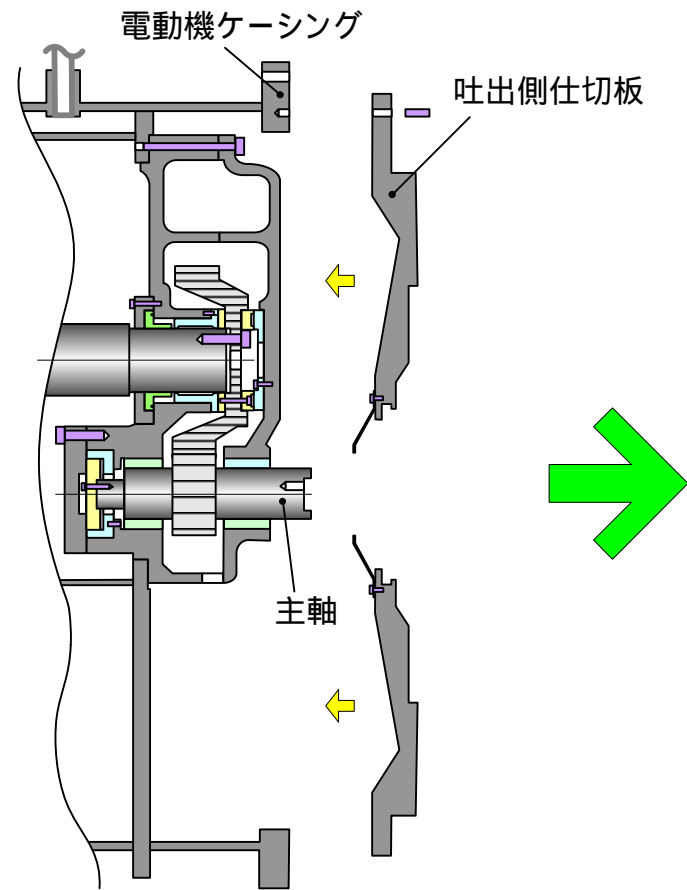
今回組立時

自動停止試験時

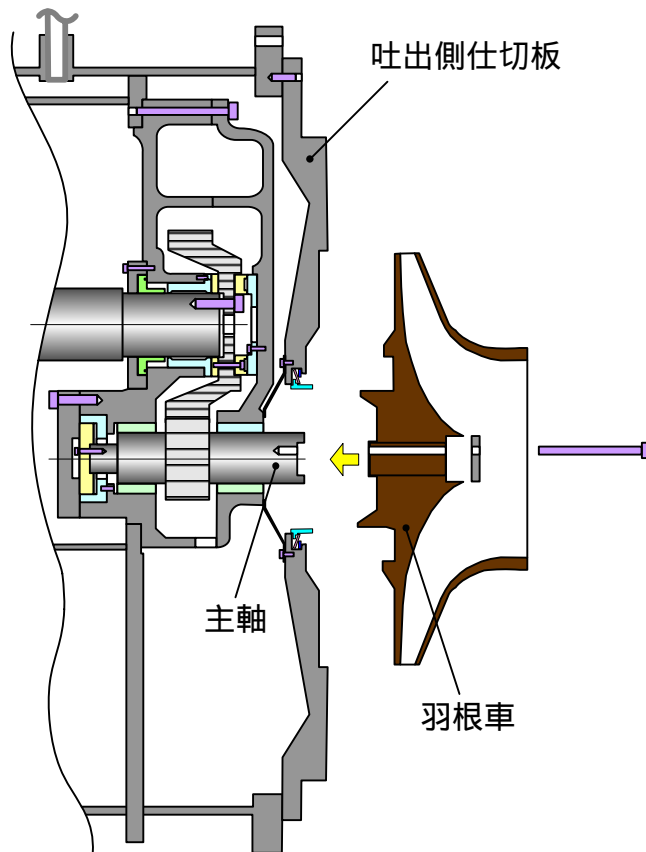
主軸と吐出側仕切板の芯ずれ調整要領



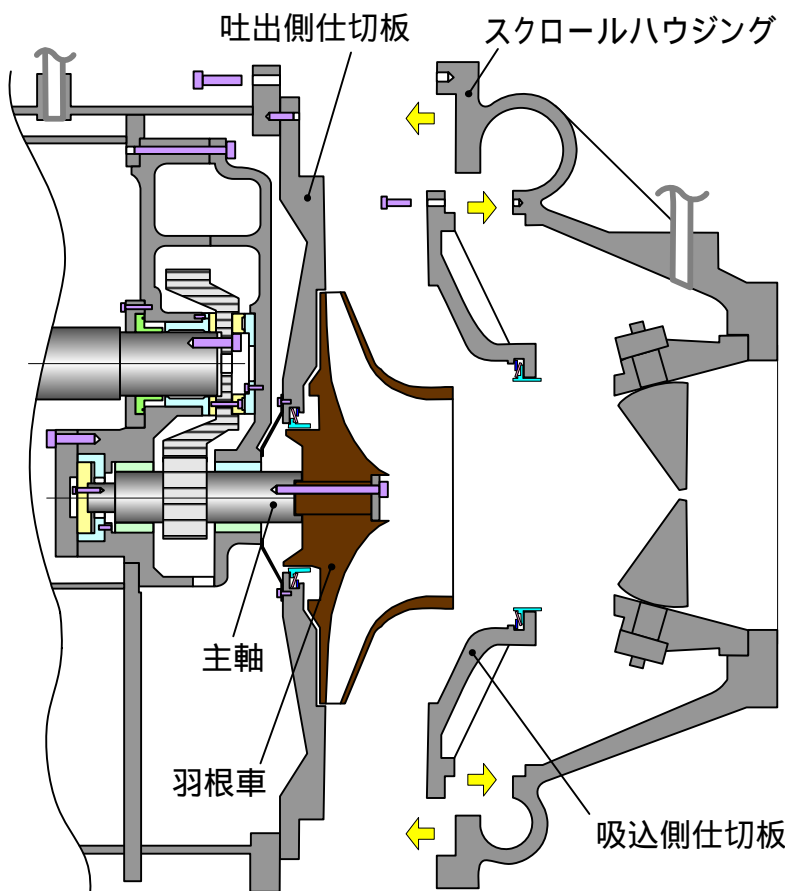
歯車室組付



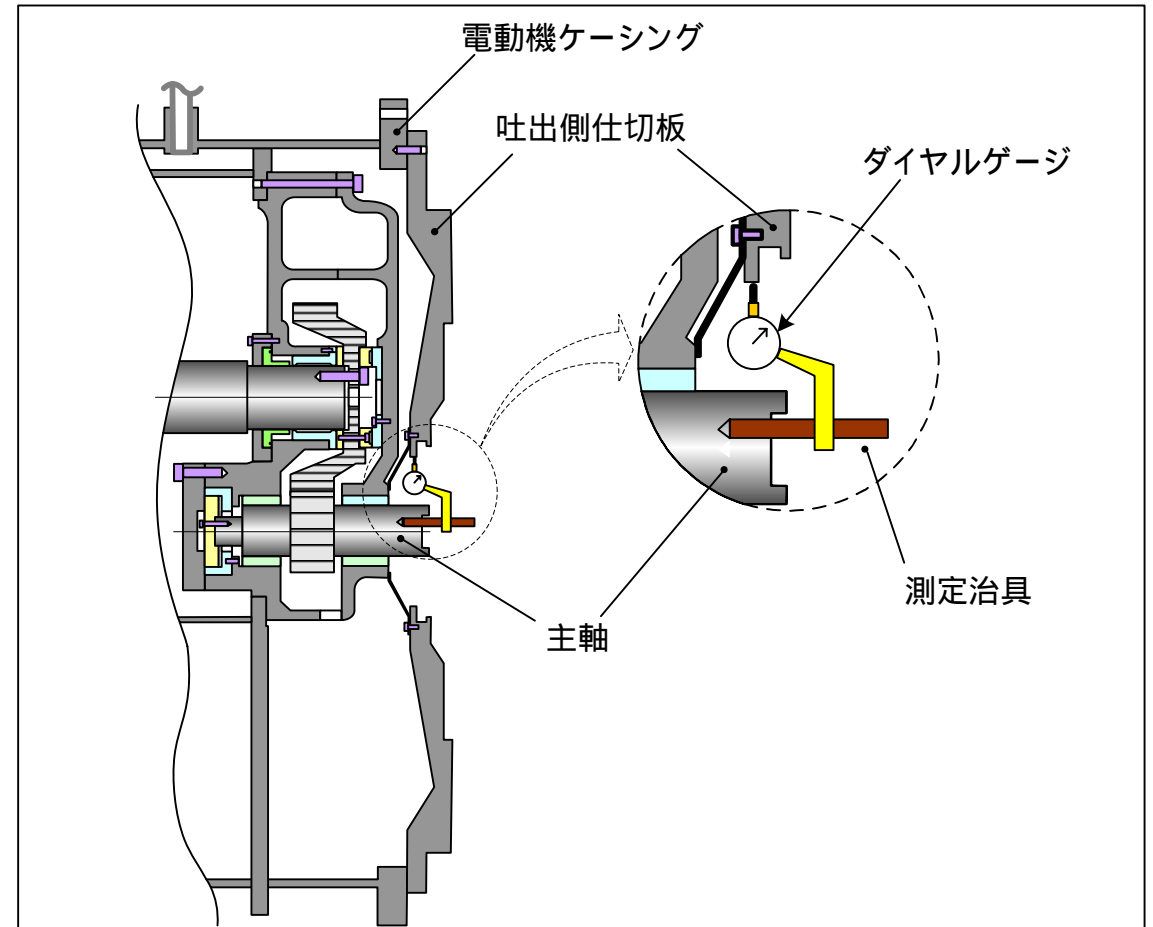
吐出側仕切板組付



羽根車組付



スクロールハウジング組付



[調整要領]

1. 主軸に芯ずれ測定治具を取り付け、吐出側仕切板の内径にダイヤルゲージをセットする。
2. 主軸を回転させ、上下左右4カ所のダイヤルゲージ指示値より、芯ずれ量を求める。
3. 必要に応じ、吐出側仕切板を移動させ、芯ずれ量を調整する。

用語説明

空調用冷凍機

空調設備で使用される冷水を供給する設備。冷媒が蒸発するときに回りから奪う潜熱を利用して中央制御室やECCS系機器の電源遮断器室等の空調用ユニットに供給する冷却水を冷やす。伊方3号機では4台設置している。

圧縮機

空調用冷凍機の一部で蒸発器にて蒸発した冷媒ガスを吸入し、高速回転する羽根車により圧縮して凝縮器に吐出する装置。

羽根車

圧縮機内部に取り付けられた流体に強制的に運動エネルギーを与える羽根を持つ回転体。インペラとも呼ぶ。

シールリング

羽根車と吸込側仕切板との間隙をできるだけ少なくして冷凍機効率を高めるため、吸込側仕切板に取り付けられたリング状構造物。

バネ座金

シールリングを吸込仕切板に押さえ付けている座金。止め輪とシールリングとの間でバネとしての役割を果たす。シールリングはバネ座金により吸込側仕切板に押し付けられているが、ある程度の力を加えることでシールリングは半径方向に移動することができる。

止め輪

バネ座金を吸込仕切板に固定するために用いる部品。

主軸

電動機から与えられたトルクを先端部に取り付けられた羽根車に伝達する回転軸。

浸透探傷検査(PT)

供試体表面に開口している傷を目で見やすくするため、蛍光物質または可視染料の入った高浸透性の液(浸透液)を浸透させた後、余分な浸透液を除去し現像剤により浸透指示模様として観察する方法。

ケーシング

羽根車を覆うカバー。吐出側仕切板、スクロールハウジング、吸込側仕切板などの部品で構成される。

スクロールハウジング

羽根車室とも言い、羽根車にて加圧された冷媒ガスの通過口を形成する。羽根車を覆うカバーである吸込側仕切板、ベーンなどが取り付けられる。

ベーン

圧縮機入口に設けられた羽根。自動的に開度を調節することにより羽根車に入る冷媒ガスの流量を制御する。

EPMA (Electron Probe Micro Analyzer: 電子線マイクロアナライザー)

非常に細く絞った電子線を試料表面に照射し、分析エリアから発生する各元素に特有なX線(特性X線)を検出することで、試料表面の微量分析(元素同定、定量分析及び化合物特定等)を行う装置。

破面マクロ観察

材料の損傷部位を調べることにより、損傷原因に関する情報を得る為、損傷部位の表面状態、模様等を観察すること。

破面SEM観察

損傷部位の破面を走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)にて観察することにより、割れがどのような応力下で生じたかを調べる調査(破面形状、割れ先端形状の確認)。

樹枝状晶(デンドライト)

溶融金属が凝固する際、通常見られる結晶であり、樹木の形に見えることからこう呼ばれる。

要因分析図

事象の原因を特定するために、考えられる要因を抽出し評価を行うための図。

発光分析

原子にエネルギーが加えられると、原子はより高いエネルギー状態(励起状態)となるが、ごく短時間で元のエネルギー状態(基底状態)に戻る。基底状態に戻る時に原子固有の波長の光が放出されるため、これを検出することで元素毎の定量分析ができる。通常励起エネルギーには熱源(アーク、プラズマ)などが用いられる。

製作公差(寸法公差)

製作上許容される寸法の幅。

共晶生成物

2成分以上を含む単一の液体から、ある温度以下で同時に晶出する2種以上の固相(結晶)の混合物。

結晶粒界

多結晶体における結晶粒どうしの境界。

塑性変形

ある荷重状態のもとで、外から力を加えると大きく変形し、外からの力を取り除いても元に戻らない変形。

FC250

ねずみ鉄で、引張強さ(引張って破断させる時に生じる最大の応力)が 250N/mm^2 以上のもの。ハンマーで叩き割った時に見える破面がねずみ色に見えることから名付けられた。JIS G 5501で規定されている。

SUP3

ばね用として使用される鋼材の一種。JIS G 4801で規定されている。