

地熱発電技術研究開発/地熱エネルギーの高度利用化 に係る技術開発/酸性熱水を利用した地熱発電システム 実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発

富士電機(株)
(国)東海国立大学機構
(国研)海洋研究開発機構
(株)ヒロテック(再委託)

問い合わせ先
富士電機株式会社
先端技術研究所 材料基礎技術研究センター
センター長 塩川国夫
E-mail: shiokawa-kunio@fujielectric.com
TEL: 042-586-1071

事業概要

1. 期間

開始 : 2018年11月

終了 : 2021年2月

2. 最終目標

pH5以下の酸性熱水を利用した発電システムの実現を目標として、地上設備の飛躍的な耐食性向上、スケール付着抑制技術を確立する。

1. 樹脂金属接合技術: 腐食寿命 ≥ 12 年
2. 非付着コーティング技術: スケール付着量 $\leq 1/8$
3. ドレン排出構造の最適化: 腐食性凝縮水捕集量 $\geq 10\%$

3. 成果概要

1. 樹脂金属接合技術

接合温度の低温化, 耐食性に優れる樹脂材選定により酸性熱水環境下にて16年の腐食寿命を確認。目標達成。

2. 非付着コーティング技術

炭素膜への他元素添加により、シリカ付着量を $1/25$ に低減可能なことを確認。目標達成。

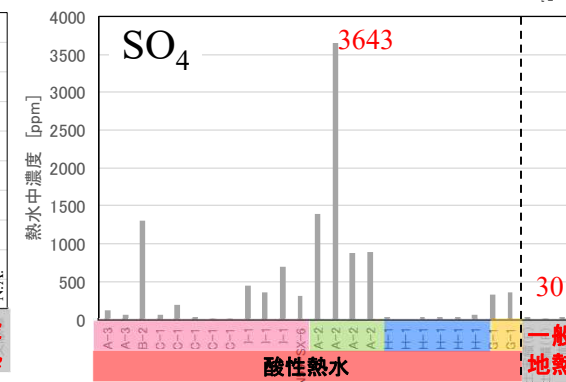
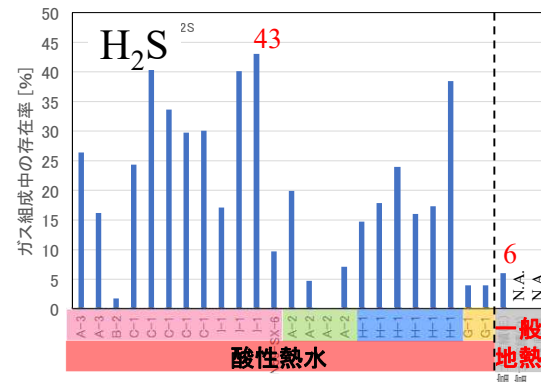
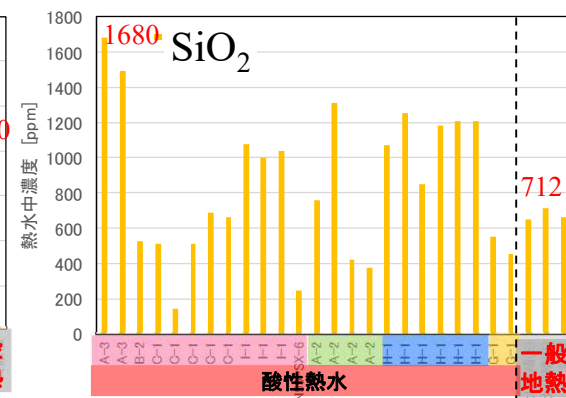
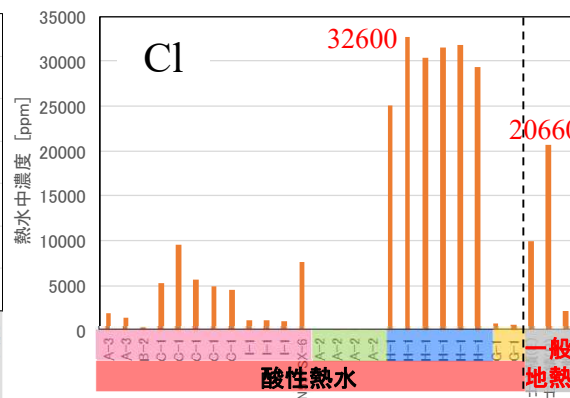
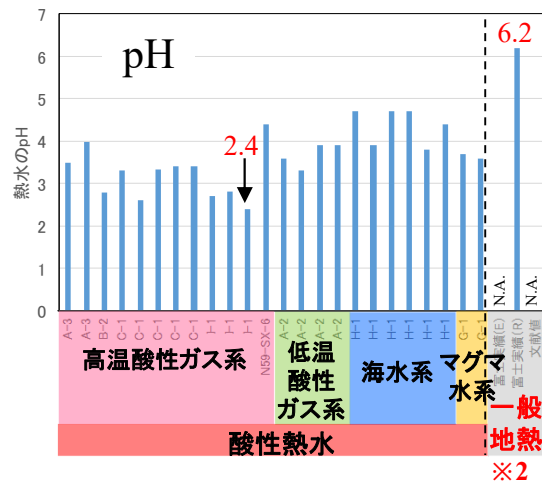
3. ドレン排出構造の最適化

タービン翼端からの水滴飛散の模擬実験および液滴の解析コードを開発により、水滴飛散量を推定。翼前縁から飛散する水滴を捕集することで+57%の水滴捕集効果が得られる可能性があることを確認。目標達成。

背景と目的

酸性熱水の特徴

- ・日本の地熱資源全体に対して、酸性熱水を含むものは最大30%程度と推測されている※1。
酸性熱水の利用により、利用可能な地熱資源量を100%/70%=1.42倍化できる。
- ・pHは**最小2.4**。腐食性成分は従来※2と比較して**Cl: ~1.7倍、SO₄: ~120倍、H₂S: ~7倍シリカ(SiO₂): ~2.4倍**含まれている。
⇒酸性熱水利用のためには、①低pH、種々の腐食性成分に耐えること、②シリカ対策が必須。

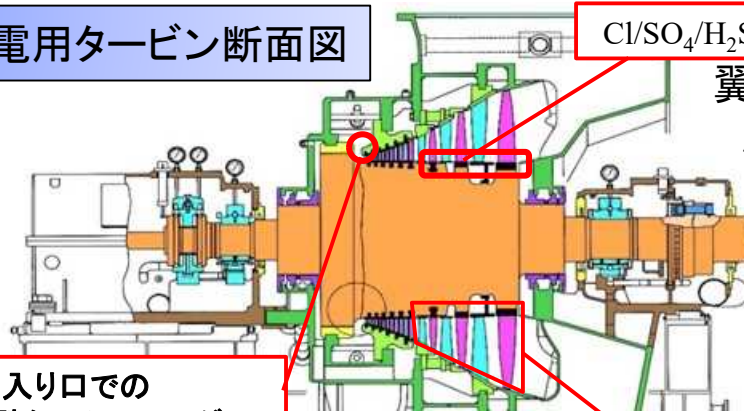


酸性熱水調査地域
森
鬼首
川原毛
松川
小国
奥会津
葛根田
上の袋
滝上
大沼
大湯
伏目
澄川
山葵沢
白水越
下北
栗野・手洗

※1: 酸性熱水の対策技術等に関する調査研究, NEDO, 1993 より抜粋
 ※2: 一般地熱は、富士電機納入案件から引用

開発内容

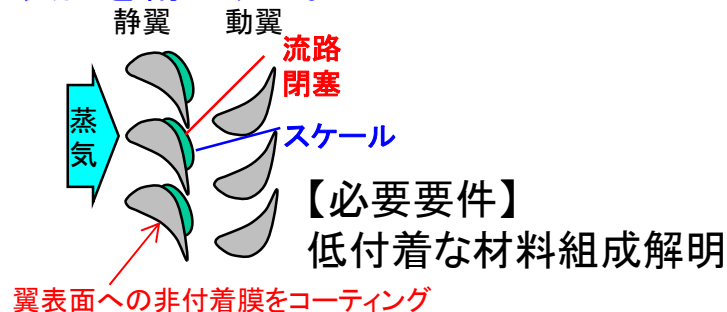
地熱発電用タービン断面図



蒸気入り口での
過酷なスケール

蒸気中の不純物が翼面で析出・堆積
(スケール)により流路が閉塞する。

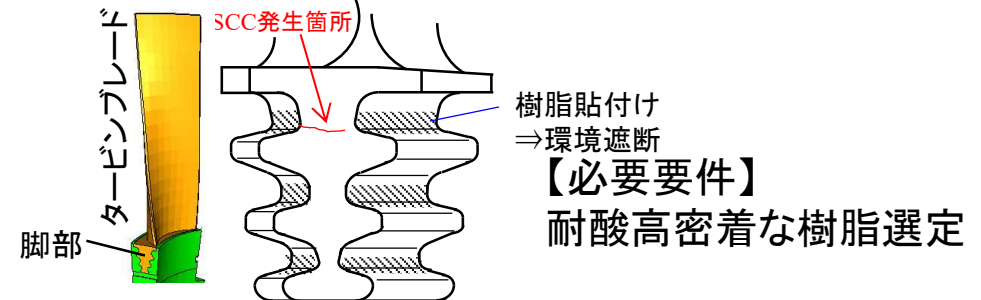
⇒②コーティングによりスケールの非付着な
表面を創生する。



Cl/SO₄/H₂Sの多く低pHの凝縮水によるSCC

翼の脚部嵌合部(スキマ)で
腐食による割れ(SCC)が発生する。

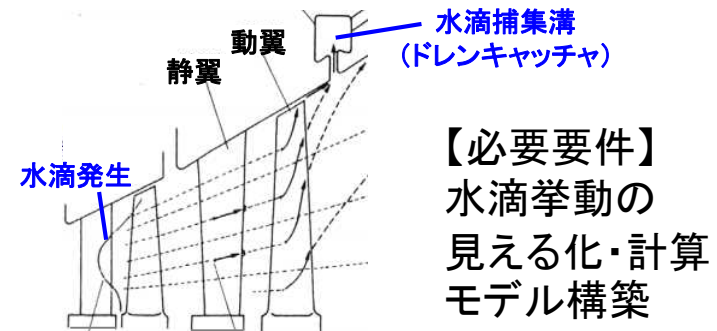
⇒①樹脂を接合し、腐食環境から金属を遮断



Cl/SO₄/H₂Sの多く低pHの凝縮水によるエロコロ

低pHでは、翼材が不働態被膜形成できなくなる。
顕著な減肉が懸念。

⇒③ドレンキャッチャーにより腐食性水滴を捕集

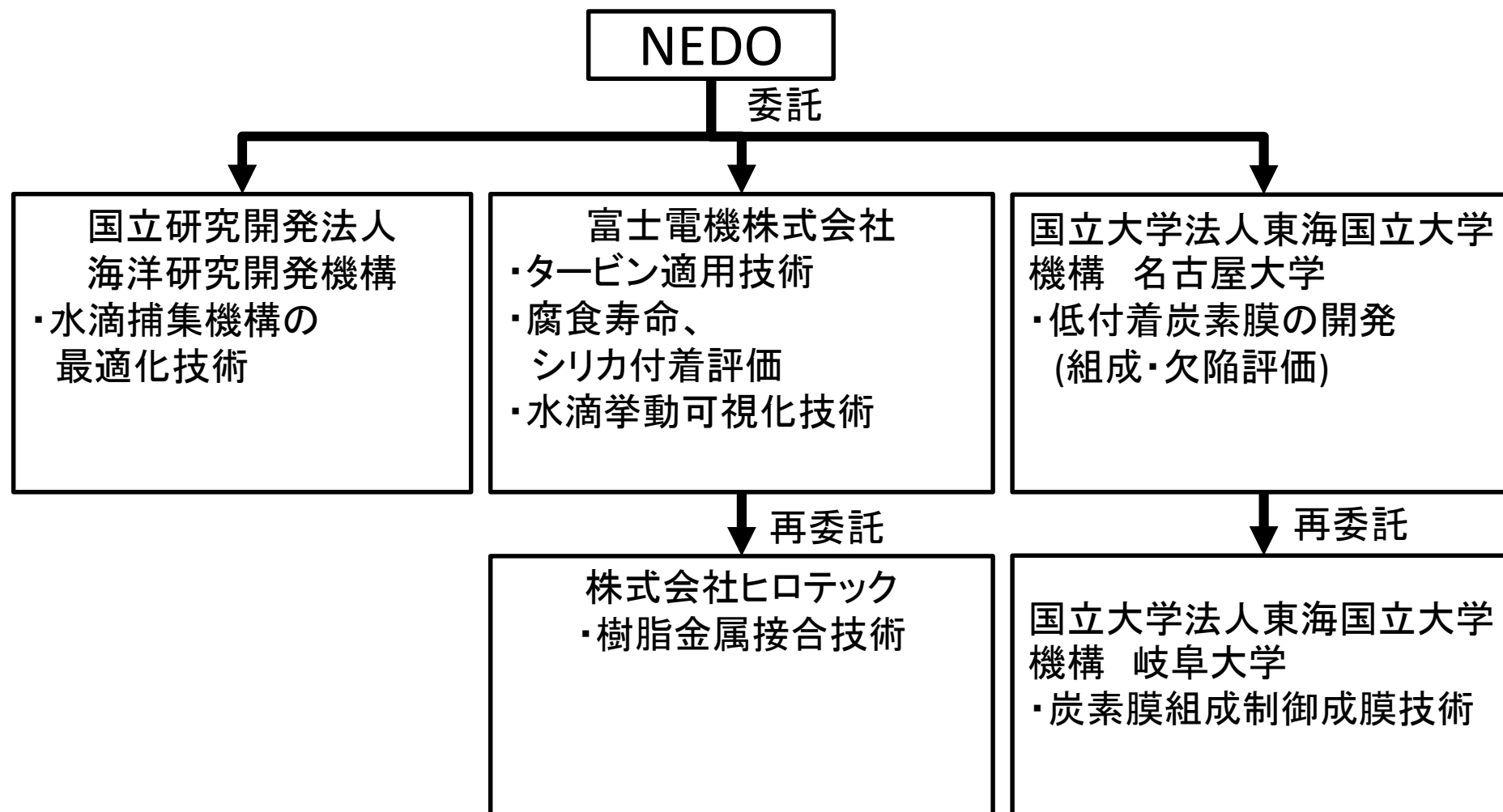


- ・酸性熱水利用における課題である腐食・スケール対策のため、
①樹脂金属接合、②非付着コーティング、③腐食性水滴捕集技術を確立する。

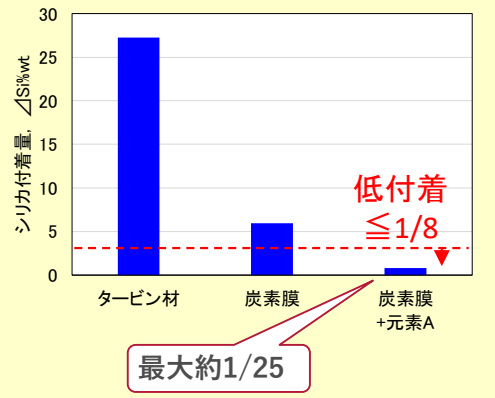
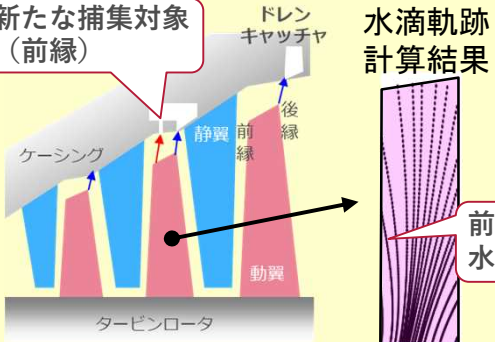
開発スケジュール

研究開発項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
1. 金属/フッ素樹脂接合技術 ①接合候補材の選定 ①-1: 材料調査 ①-2: 接合性評価による材料選定 ②接合高密着化 ②-1: 接合プロセス最適化 ②-2: 耐食性の検証												
2. 炭素系薄膜による低付着表面改質技術 ①炭素膜の可能性見極め ①-1: 水素含有による低付着効果の検証 ②シリカ低付着化技術の開発 ②-1: 水素量と欠陥量の関係解明 ②-2: 欠陥量可変成膜法の確立 ②-3: 炭素膜組成最適化 ②-4: 低付着性能の検証												
3. 粒子法に基づく水滴捕集機構位置の最適化 ①液膜流動と液滴の飛散挙動の計算モデルの構築 ①-1: 性状等の調査 ①-2: 翼の回転と形状に関連する液滴コードの開発 ①-3: タービン翼上の液滴流動コードの開発 ②水滴飛散を模擬した試験評価法の確立 ②-1: 水滴測定法の確立 ②-2: 仕様検討 ②-3: スピンテスト改造 ③ドレンキャッチャの位置最適化 ③-1: 水滴捕集性能の検証												

実施体制



目標達成状況

研究項目	成果	達成度
①レーザを用いた樹脂/金属接合技術の研究開発	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐食性 酸性熱水環境にて腐食寿命を1000時間以上。 ⇒3000hr以上（12年相当） 密着強度：界面剥離なし。 <p>・耐食性：腐食寿命3000hrにて界面剥離なし@樹脂B ⇒樹脂Bで16年</p>	 <p>腐食許容量</p> <p>樹脂B</p> <p>樹脂C</p> <p>9年</p> <p>目標寿命 12年</p> <p>16年</p> <p>腐食長さ, mm</p> <p>加速試験による経過年数(35倍加速), year</p> <p>100%</p>
②炭素膜による低付着表面改質技術の研究開発	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> シリカ付着特性 シリカ付着を従来比1/8とする。 <p>・低付着：炭素膜中に他元素を含有することでシリカ付着量を最大1/25まで低減。</p>	 <p>シリカ付着量, ΔSi%wt</p> <p>タービン材</p> <p>炭素膜</p> <p>炭素膜+元素A</p> <p>低付着 $\leq 1/8$</p> <p>最大約1/25</p> <p>100%</p>
③粒子法による水滴挙動計算技術の研究開発	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 水滴捕集量を10%以上向上させる。 <p>・水滴捕集量：タービン構造を模擬した回転試験および計算にて、水滴飛散量が多い箇所を明確化。水滴捕集量が最大57%向上する可能性あり。</p>	 <p>新たな捕集対象（前縁）</p> <p>ドレンキャッチャー</p> <p>ケーシング</p> <p>静翼</p> <p>前縁</p> <p>後縁</p> <p>動翼</p> <p>タービンロータ</p> <p>水滴軌跡計算結果</p> <p>前縁にも水滴が集まる</p> <p>100%</p>

①レーザを用いた樹脂/金属接合技術の研究開発

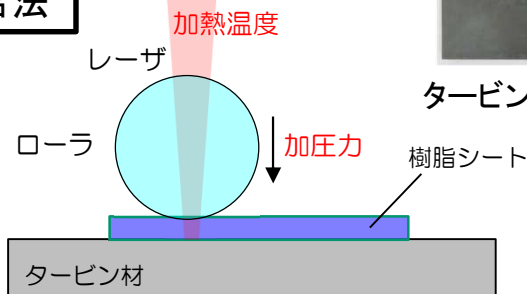
樹脂/金属接合による腐食環境遮断

適用方法

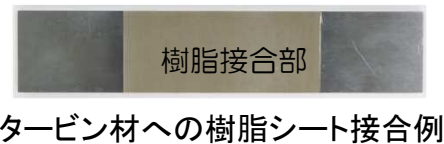


樹脂接合方法と課題

接合法



透明の樹脂シートを加圧し、レーザにて樹脂/金属界面を加熱することで、通常化学的に接合されない樹脂と金属が金属酸化膜を介して接合される。
接合欠陥の少ない良好な接合が可能。

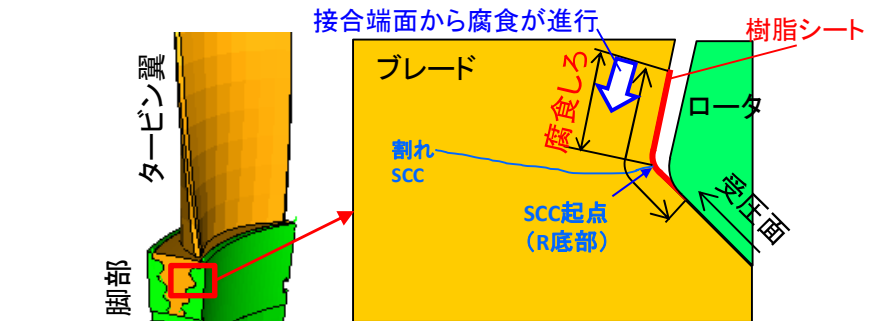


課題



酸性熱水を模擬した腐食環境下において、金属/樹脂界面の腐食が進行し、樹脂シートが剥離した。

⇒接合部の耐食性の向上
(接合低温化)が課題



タービン翼根部嵌合部は高応力、腐食環境に曝されSCC発生リスクが他の部位に比べて高い。

⇒・樹脂シートをSCC発生部に接合し、腐食環境にタービン材が曝露されないようにする。
・幅広く樹脂シートを接合することで腐食しろを設けSCC発生部へ腐食成分が到達しづらくする。

接合低温化による耐食性向上、酸性熱水に耐える樹脂種の選定に取り組む。

【成果】

樹脂/金属接合による耐食性向上

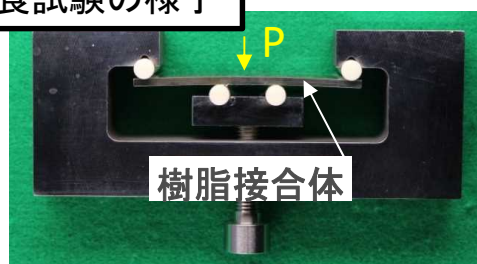
狙い 高耐食接合が可能な候補樹脂材の選定

目標値 腐食寿命 $\geq 3000\text{Hr}$ (12年相当)

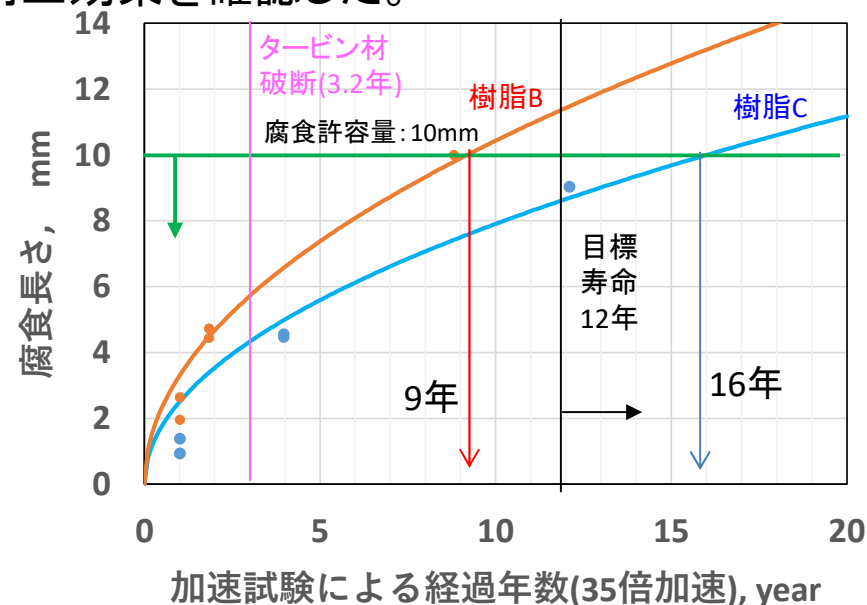
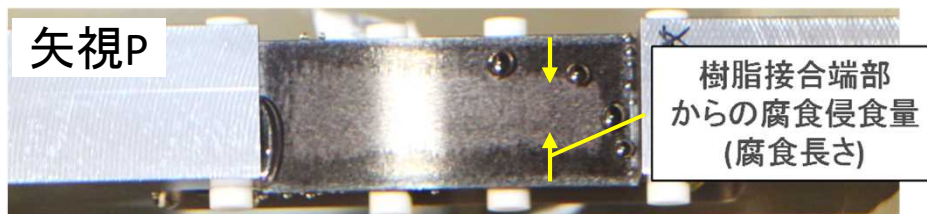
実施内容 候補樹脂材2種における腐食試験(酸性熱水模擬環境下:pH2.5、3000hr)

結果 候補樹脂Bでは9年相当、候補樹脂Cでは16年相当の腐食寿命を得た。
なお、基材では3.2年相当にて破断したため、
候補樹脂Cにおいて5倍程度の寿命向上効果を確認した。

腐食試験の様子



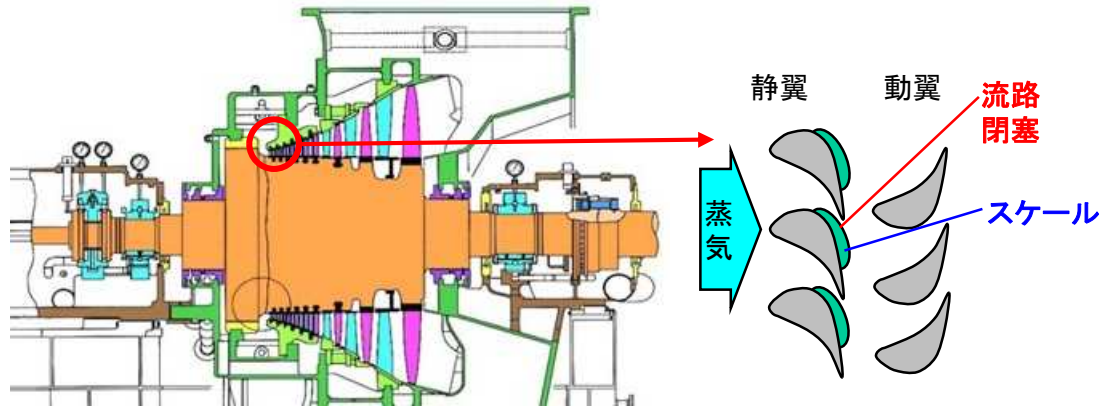
矢視P



- ・耐食性向上のため、接合温度を低温化した接合体において、腐食寿命16年(部品交換間隔12年を想定)を確認。
⇒酸性熱水下において、耐食寿命を満足する接合プロセスを確立。

②炭素膜による低付着表面改質技術の研究開発 炭素コーティングによるスケール低付着化

適用方法

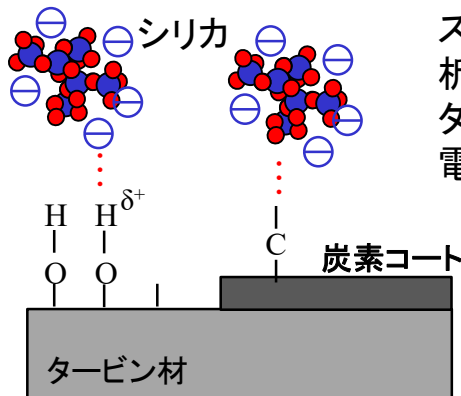


タービンは静翼と動翼が交互に並んだ構造をしており、タービン入口から流入した蒸気は温度・圧力を消費しながら翼の流路を抜けていく。温度・圧力の低下により、蒸気中の不純物が析出・堆積(スケール)する。

⇒スケールの付着しにくい表面改質を行い、スケールが析出しても付着せず、後段へ流れてくれるようにする。

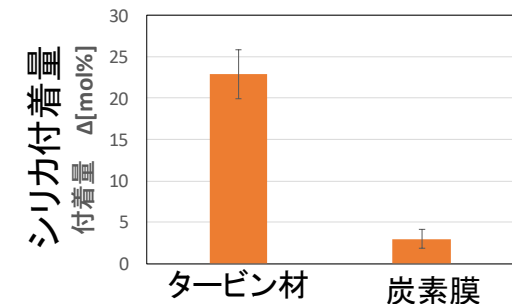
スケール低付着コート構成と課題

スケール低付着構成



スケールの主要因であるシリカは析出の過程で電荷を帯びることがありタービン材(金属)表面の官能基等と電氣的に引き合う可能性がある
⇒引力が働きにくい
炭素コートによる低付着化を狙う

課題



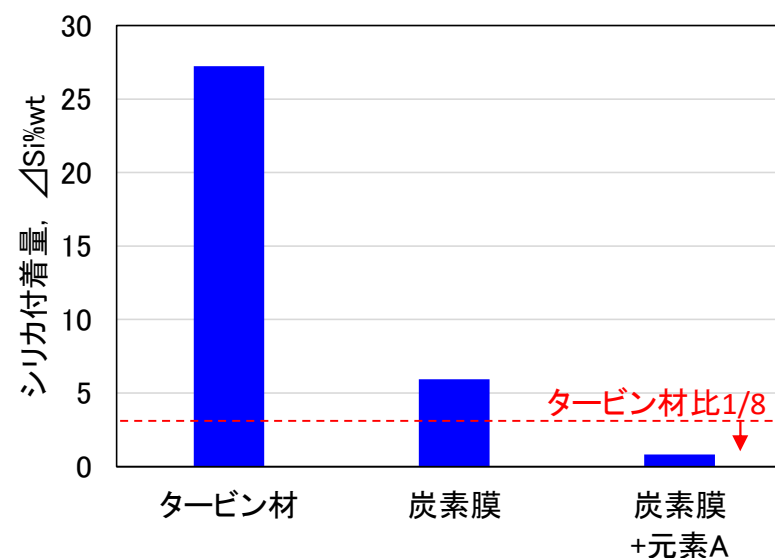
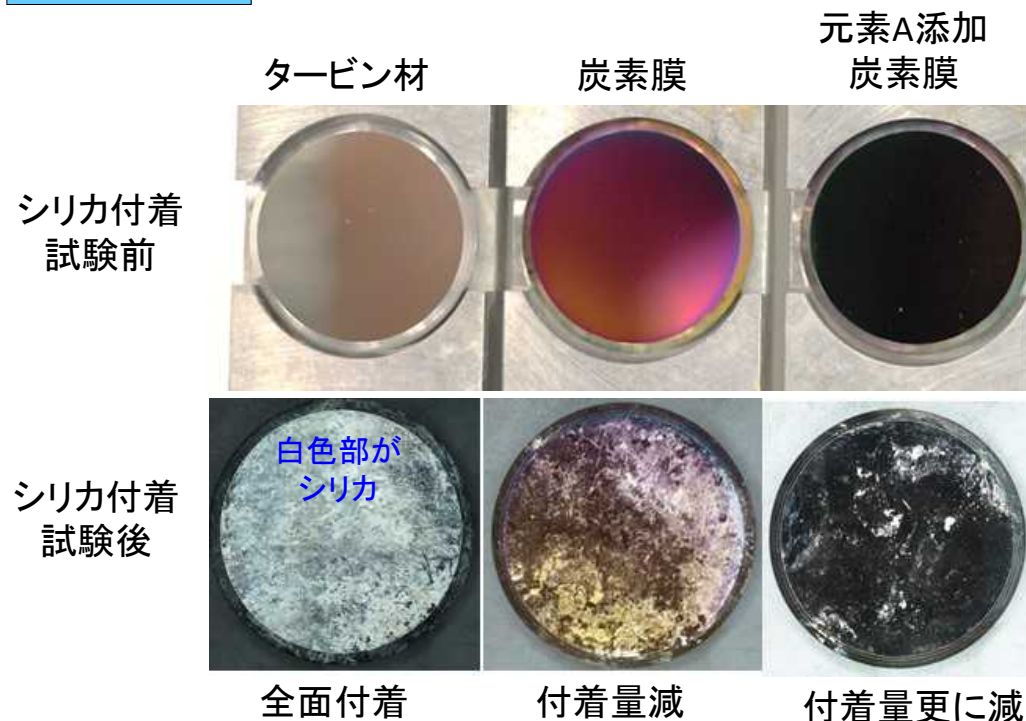
炭素膜によりシリカ付着量が低減。
シリカ付着低減に必要な炭素膜組成は未解明
⇒十分な低付着効果が得られる
炭素膜組成を解明する。

炭素膜に他元素を添加することで、目標の低付着効果が得られる炭素膜組成を解明する

【成果】

炭素コーティングによるシリカ付着抑制効果

狙い	シリカスケールの付着抑制効果が得られる炭素膜組成の解明
目標値	シリカ付着量 $\leq 1/8$ @タービン材比較
実施内容	タービン材(13Cr鋼)、炭素膜におけるシリカスケール付着性評価
結果	炭素膜に特定の元素を添加することでシリカ付着量がより低減。目標値を満足。



・シリカ低付着効果が得られる炭素膜の適切な組成を明らかにした。(特許出願)

【成果】

(参考)出願特許概要

No	出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
2	2020/12/1	PCT/JP2020/044606	蒸気タービン部材	富士電機株式会社、国立大学法人 東海国立大学機構

概要

地熱蒸気タービン翼などのスケール付着の激しい部材表面に炭素コーティングを設ける
⇒スケール付着を抑制し、発電能力を
長期維持可能な地熱蒸気タービンを提供する。

権利範囲

【構成】母材上に炭素膜を設けた蒸気タービン部材

【構造】炭素膜の化学状態や組成を規定

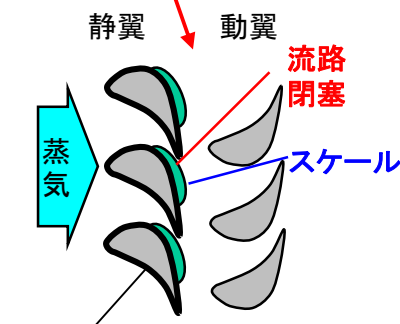
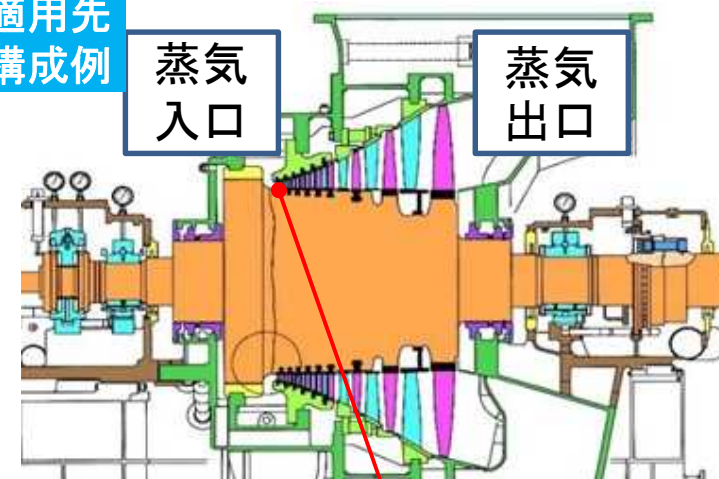
解決課題

地熱発電における発電出力低下やタービン停止要因となるスケールの付着を抑制可能な部材を提供する

解決手段/効果

蒸気タービン部材表面に炭素膜を設けることで、スケールの付着量を1/8以下に低減する。

適用先 構成例



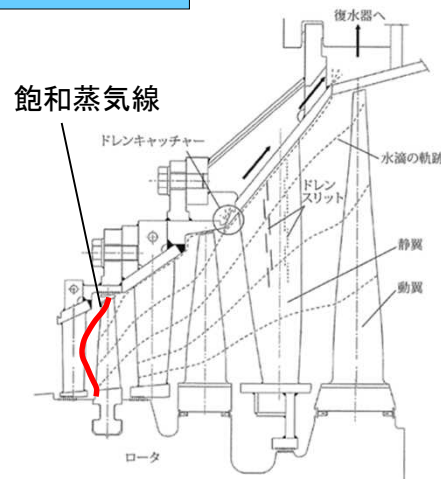
スケール付着の激しい段のタービン翼
表面を全面コーティング

③粒子法による水滴挙動計算技術の研究開発

タービン内のドレン生成と排出方法について

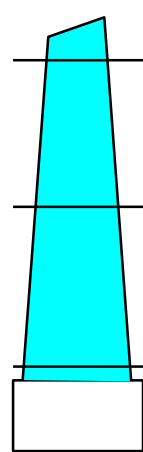
適用方法

水滴発生



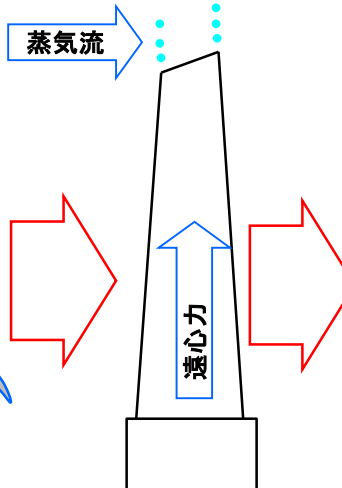
蒸気温度・圧力低下により、飽和蒸気線の後段で水滴が発生

水膜形成



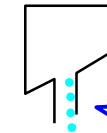
水滴が翼に付着
水膜・水脈を形成

水滴飛散



遠心力と蒸気流に
運ばれ翼端のどこ
かから飛散する

水滴捕集



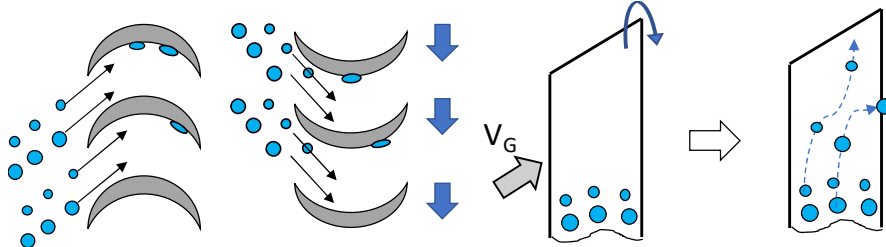
水滴飛散に応じた箇所に設置することで水滴収集量を最大化する。

飛散した水滴を捕集し、系外へ排出する。
捕集水滴量が多いほど、腐食寿命向上、発電効率向上が見込める。

水滴飛散位置推定方法

水滴飛散推定方法

水滴が翼に付着、翼面を流れる経路の流体計算手法を確立する。



課題

- ・タービン翼の計算モデルの構築
- ・計算精度検証のためのタービン内の水滴挙動可視化実験手法の構築

タービンを模擬した計算モデル、タービン内水滴挙動可視化手法を確立し、水滴捕集量を推定することで、最適な水滴捕集構造を明らかにする。

【成果】

タービン内の水滴挙動可視化手法

狙い

計算モデルの精度検証のための実機を模擬した水滴飛散状態の可視化

目標値

水滴捕集量 $\geq +10\%$ (従来比)

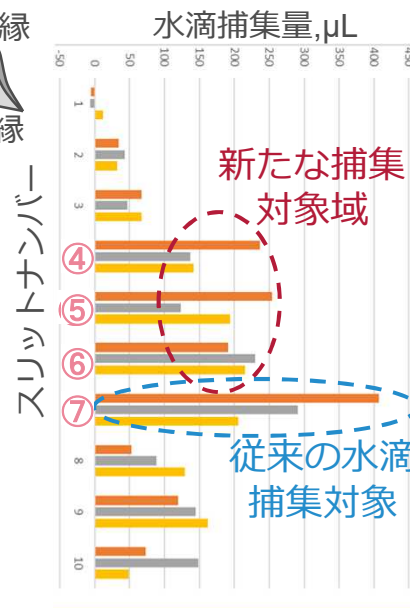
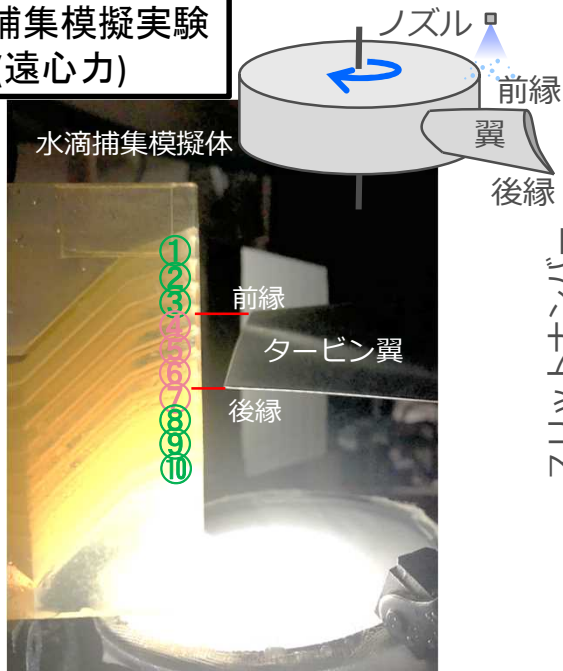
実施内容

タービン模擬体 × 高速回転試験および計算モデルによる水滴軌跡の推定。

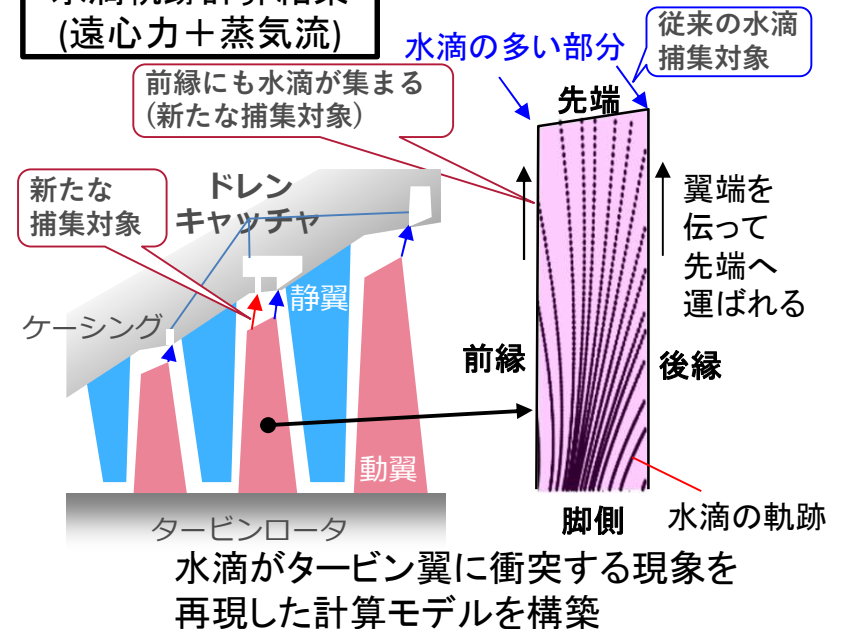
結果

タービン翼から飛散する水滴量、水滴の軌跡の計算から、新たな水滴捕集位置候補の明確化および水滴捕集量向上効果を算出。

水滴捕集模擬実験
(遠心力)



水滴軌跡計算結果
(遠心力 + 蒸気流)



- ・翼後縁(⑦)で最も水滴が多い(従来の捕集対象)。
- 次いで、計算モデルから前縁(④)が多いものと推察(遠心力 + 蒸気流)
- ⇒ $(④ + ⑦) / ⑦ = 1.57$ 。最大57%の捕集量向上の可能性あり。

実用化にむけた課題・取組

1. レーザを用いた樹脂/金属接合技術の研究開発

【課題】

実翼の複曲面形状における接合プロセスの確立

【取組】

実翼形状を模擬した形状における接合手法の確立
(樹脂シート加圧、接合加熱温度手法)

2. 炭素膜による低付着表面改質技術の研究開発

【課題】

実翼曲面に対する均一成膜プロセスの確立

【取組】

実翼形状を模擬した形状における成膜検証、成膜治具構造による成膜均一化

3. 粒子法による水滴挙動計算技術の研究開発

【課題】

タービン全体の水滴捕集効率の検証

【取組】

- ・水滴飛散挙動の2因子(蒸気流と遠心力)の複合モデルの高精度化
- ・タービンサイズの大規模モデル化への拡張による全体の水滴捕集効果を見える化