

## 連携記事

# 高伝熱チタン板と そのプレート式熱交換器への適用

## High Heat-Transfer Titanium Sheet and Its Application to Plate Type Heat Exchangers

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門  
チタン本部チタン研究開発室  
主任研究員

逸見義男  
Yoshio Itsumi

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門  
チタン本部チタン研究開発室  
室長

大山英人  
Hideto Oyama

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門  
チタン本部チタン研究開発室  
研究員

田村圭太郎  
Keitaro Tamura

(株) 神戸製鋼所 鉄鋼事業部門  
チタン本部チタン商品技術室  
室長

岡本明夫  
Akio Okamoto

### 1 はじめに

純チタンは、他の実用金属材料と比べて海水に対して圧倒的に高い耐食性を示す<sup>1)</sup>ことから、海水を常時使用する熱交換器は、純チタンの主用途の一つとなっている。環境問題、熱エネルギーの有効利用、省エネルギー等の観点から熱交換器の高効率化の要求はますます高まっている。これらの性能は熱交換器の構造そのものに大きく依存するが、伝熱面の熱伝達によっても変化する。著者らは、その構造を構成する素材を置き換えただけでも、熱交換性能が向上する高伝熱チタン板 (HEET™) を開発した。温暖な島嶼において比較的天候に左右され難く安定な再生可能エネルギー源候補として注目されている海洋温度差発電の実証プラントが、沖縄県久米島にて2013年度より連続運転を開始しているが、その熱交換器に採用された高伝熱チタン板の技術を中心に紹介する。

### 2 海水耐食性に優れたチタンと熱交換器

チタンは、冒頭に述べたように他の実用金属材料と比べて海水に対して、圧倒的に高い耐食性を示す。常に海水を流す熱交換器において、予期せぬ時に板が腐食で貫通し、板を隔てた媒体が外海に漏れたり、構造体としても機能しなくなるなどの事態は、重大な事故に繋がる可能性が高く、特に電力などを社会に対して安定供給するような事業においてはあってはならないとされている。そのため、構造材の腐食減量を想定し、定期的なメンテナンス、場合によっては構造材の置き換えを想定した運転が必要となる。但し、突発的な腐食の進行は環境の変化等の影響を受け、正確に予測することは難

しい。しかしながら、耐孔食性、ならびに実海水に巻き込まれた砂、貝殻等の硬質粒子の接触に伴う加速腐食として耐エロージョン性は評価しておく必要がある。海水中での各代表材料の耐孔食性を表1<sup>1)</sup>に示す。表中の孔食電位は、材料にそれ以上の電位がかかれば局所的な腐食としての孔食が始まる電位を示すが、チタンは他の金属材料と比較し飛び抜けて高く、海水中では、事実上孔食は起こらないことを示している。また、耐サンドエロージョン性を図1<sup>2)</sup>に示すが、チタンは、図中の銅合金より軟質材にも関わらず著しく低い腐食速度を示している。

1979年にわが国初の火力および原子力発電所において全チタン復水器が初めて採用されて以来<sup>3)</sup>、現在に至るまで国内96の発電所に、僅か肉厚0.5mm前後で、総重量1万トン、長さにして実に5万kmを超える溶接管が熱交換器の復水管として採用されてきた。20年を優に超えて稼働する発電所が多くある中であっても、チタンの腐食損傷に関わる報告はこれまで一切無く、発電所の安定稼働に貢献している。

このように、熱交換の媒体として海水が用いられ、かつ発電

表1 海水中における各種金属材料の孔食電位<sup>1)</sup>

材料	海水温度(°C)と流速(m/s)	孔食電位 (V vs SCE)	自然電位 (V vs SCE)
アルミニウム	25/0(静止)	-0.76	-8~+10
Al青銅	25/1.5	-0.10	-0.26
70/30 キュプロニックル	25/1.5	-0.08	-0.27
SUS304	25/1.5	+0.3	-0.5
SUS316	25/1.5	+0.5	-0.4
チタン	25/1.5	+8~+10	-0.2~+0.1

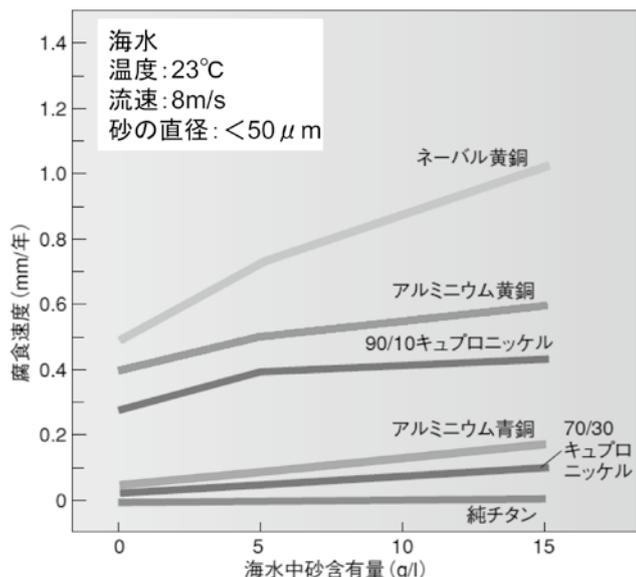


図1 流動海中における耐サンドエロージョン性<sup>2)</sup>

などを対象とした安定稼動が求められるような設備の場合、チタンが熱交換器の主要材料として最も相応しいといえる。

この熱交換器のタイプには、大きく別けて先に示した溶接管を用いたシェル&チューブ方式とプレート方式 (PHE) に分かれる。本稿で述べるPHEは、化学プラント、発電プラント、造水器、セントラルクーリングシステムや船舶でのエンジン冷却など、多くの産業用途で、活用されている。

PHEは単位体積当りの伝熱面積が大きく取れる利点があり、中谷ら<sup>4)</sup>は、冷凍機における熱交換器では、同じ性能においてPHEは重量にして1/3～1/4、冷媒充填量も1/2～1/4になると報告されており、設備のコンパクト化が可能である。海洋温度差発電においても熱交換器が設備面積の過半を占めるため、可能な限りコンパクトな熱交換器を採用することにより初期設備投資コスト圧縮に繋がる。このPHEの構造と原理を図2に示す。チタン等薄板の金属製プレートを挟んで暖かい作動流体と冷たい作動流体を交互に流すことにより熱交換を行う。熱の授受はこのプレートを通して行われる。そのプレートは、複雑な波型形状、例えばヘリンボーン (にしんの骨の意) パターンの形状に成形加工されている。この波型形状が構造体としての剛性を確保するとともに、伝熱面積を増やしかつ流体の流れを妨げることで生じる乱流により効率よく熱伝達を促す役割を果たしている。

プレートは軟質な純チタンの薄板を所望のプレート形状にプレス加工することで製造される。プレートの材料として、一般的には板厚1mm未満の純チタン薄板が用いられるが、チタン板に対する要求特性としては、設計されたプレート形状に成形できるだけのプレス成形性と定格の圧力に耐えるだけの強度を有していることが求められる。

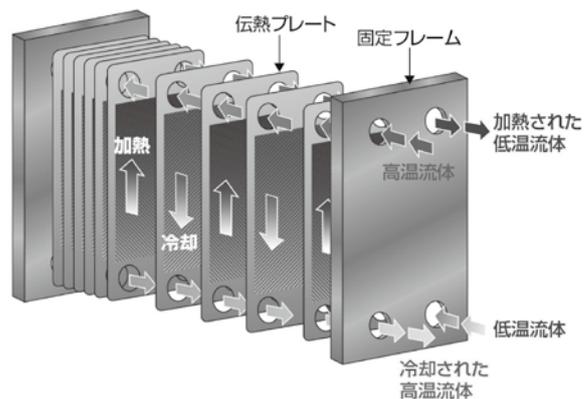


図2 プレート式熱交換器の構造と原理

### 3 素材表面への微細凹凸加工による伝熱促進

金属の表面に微細な加工を加えて伝熱促進の機能を与えることは、シェル&チューブ方式の熱交換器では、伝熱管表面に転造でフィンを立てる方法が銅管などで工業化されている<sup>5)</sup>。しかしPHEでは、微細な金属粒子を溶射する方法など<sup>6)</sup>が提案されているが、表面から脱落した溶射粉がタービンなどに流入すれば機器を損傷する恐れがあり、安定かつ安価に製造できる事例は殆ど無かった。そこで筆者らは、工業的に安定させる方法として薄板表面に微細な凹凸を付与することに着目した。チタン薄板表面に等間隔の微細凹凸溝 (凹部幅200 $\mu$ m, 凸部幅100 $\mu$ m, 深さ30 $\mu$ m) をエッチング法により微細加工を施し、冷媒であるアンモニアの流れに対して溝の向きを変えて沸騰伝熱試験を行い、平滑面を有する従来板と比較した。その結果、微細凹凸溝が施された薄板面の熱伝達係数は、平滑面の場合に比べて上昇した。また、その上昇率は、媒体の流れに対する凹凸溝の向きによって異なり、流れが凹凸溝と直行する場合の従来平滑面に対する熱伝達係数の向上率が22%であったのに対し、流れが平行の場合は10%に留まった。凹凸溝の凹部がキャビティとなり、沸騰核の発泡点となって核沸騰を促進させると考えられるが、流れの方向により熱伝達係数の改善度合いが異なることが示された<sup>7,8)</sup>。

PHE内部に流れる媒体は、プレートの起伏に当って、方向を変えながら流れていくため、どの方角から媒体が流れてきても、活性キャビティが生じるように、方向性を有する溝形状から無方向性である微細円柱状突起形状を千鳥に配置する水玉模様デザインとした。

その微細水玉の突起高さとの関係を図3に示す。微細水玉の突起高さが高いほど総括熱伝達係数が向上して

いることがわかる。これは、微細水玉突起部の付け根を沸騰核とする活性キャビティとなるサイズに適合しており、かつ、突起部が高いほど、過熱度も下がることによるものと考えている。

この効果は、沸騰型の伝熱促進についての推定であるが、熱交換器の利用形態である気体状態から液体状態に戻す伝熱として凝縮型、液体同士の伝熱として強制対流型の性能を、同じ微細水玉模様の平板で評価した結果を図4に示す。微細水玉凸凹は、沸騰型伝熱の促進に最も効果的であるが、凝縮型、強制対流型でも効果があることを確認している<sup>9)</sup>。

## 4 高伝熱チタン板の実機試作とPHEでの評価

上記のような表面形状加工を工業的に実現するために、冷間圧延工程においてワークロールに付与した微細凹凸を薄板表面に転写する製造方法を確立し、高伝熱チタン板を開発した。図5に転写圧延で実機製造したコイルの概観、ならびに従来材と転写圧延材の板表面の比較を示す。コイル全面に

わたって均等な凹凸を付与することができている。また、微細凹凸転写による材料特性への影響を評価した結果、従来のPHE材に要求される機械的特性、ならびにプレス成形性の基礎評価からも、従来材と同等であることを確認している。

さらにPHEでは、伝熱効率をあげるためにチタン板は、ヘリンボーンのような形状に成形加工されており、このような実際のPHE構造での伝熱特性の評価を行った。海洋温度差発電実証プラントに搭載されている同型のPHEに、プレス加工された従来材および高伝熱チタン板を組み込んで、それぞれ伝熱性能を評価した結果を図6に示す。この図より、実機で製造した高伝熱チタン板と、従来の表面が平滑な板に対して、それぞれの同形状のPHEを作製し、個々に評価した結果、実機サイズのPHEにおいても高伝熱チタン板は、20%の伝熱促進効果が得られている。次に、現在、沖縄県久米島で連続運転を続けている実証プラントで採取したデータを図7<sup>10)</sup>に示す。これは、高伝熱チタン板を搭載した実証プラントの蒸発器での総括熱伝達係数を、図6のデータに基づき予測される従来材での総括熱伝達係数で除し、高伝熱チタン板の伝熱性能向上効果の経時変化として表した結果である。

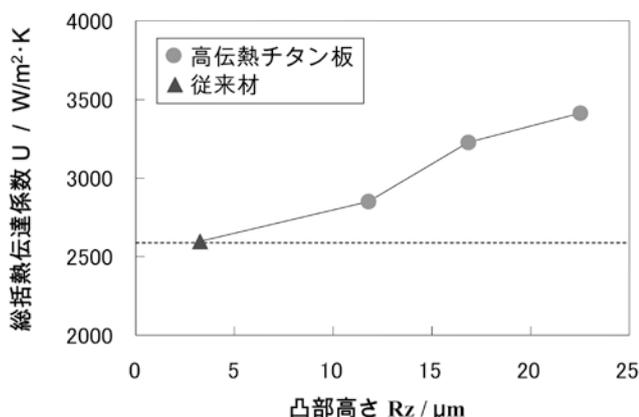


図3 総括熱伝達係数に及ぼす凸部高さの影響

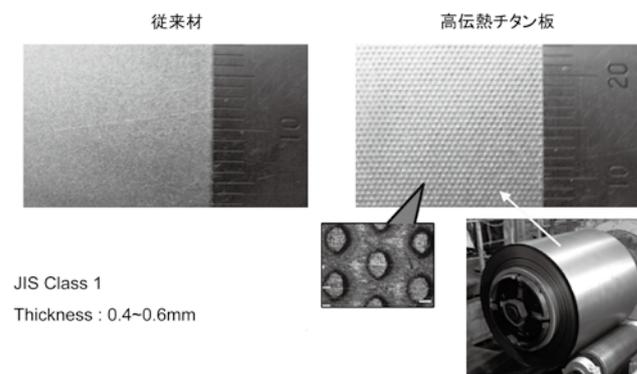


図5 高伝熱チタン板の転写圧延後のコイル概観と板面拡大写真

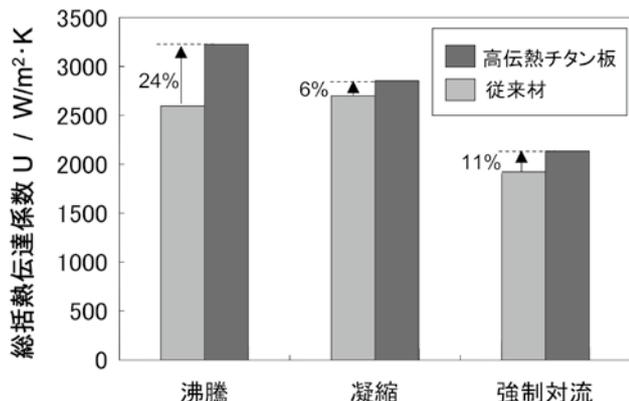


図4 高伝熱チタン板の各種伝熱形式での伝熱特性

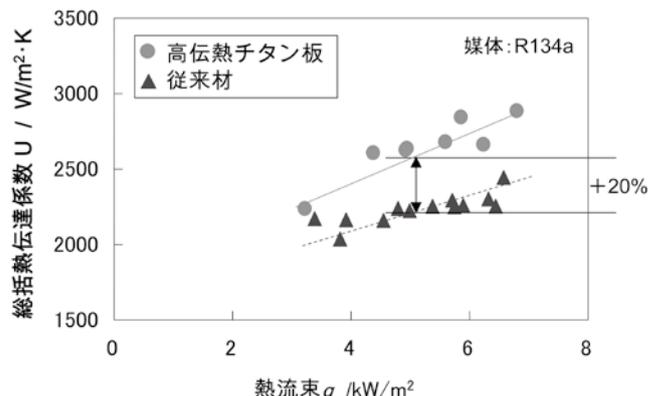


図6 大型PHEに組み込んだ状態での高伝熱チタン板の沸騰伝熱特性

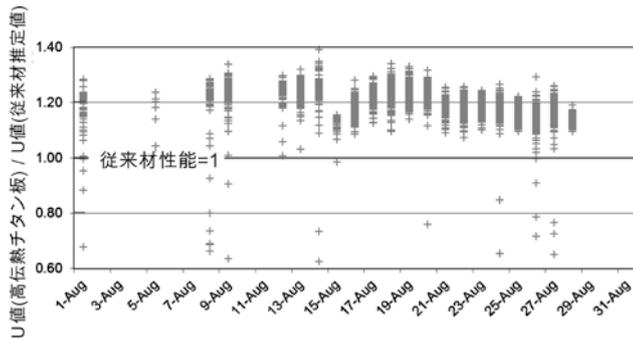


図7 海洋温度差発電実証機の2013年8月における蒸発器のU値高伝熱チタン板/U値(従来材推定値)の時間推移(データポイント: 10分間の平均値)

資料提供: 株式会社ゼネシス

時々の水量、表層の海水温等が異なるため、日、時間により変動はあるが、平均として20%向上が実証されている。

## 5 おわりに

本報では、高伝熱チタン板の特徴等について紹介した。

海洋温度差発電実証プラントは、順調に、熱サイクルの安定性・制御性の検証や熱交換器の性能を評価中であり、次なる1MW/10MWクラスの大型実証プラントの早期実現が待たれる。また、本技術は、様々なタイプの熱交換器への適用

が可能であり、エネルギープラントや造船向けなど、広範囲な用途で利用されることを期待する。

### 参考文献

- 1) 佐藤廣士: 日本海水学会誌, 44 (1990) 3, 200.
- 2) 神戸チタン総合カタログ, 18.
- 3) 里卓郎: R&D 神戸製鋼技報, 49 (1999) 3, 2.
- 4) 中谷清裕: 冷凍, 70 (1995) 812, 646.
- 5) 高橋宏行, 佐伯主税: 伸銅技術研究会誌, 40 (2001) 1, 223.
- 6) 池上康之, 新郷正志, 坂口俊之, 江頭正和, 平尾泰博: 日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2000), 825.
- 7) 岡本明夫, 有馬博史, 池上康之: R&D 神戸製鋼技報, 60 (2010) 2, 60.
- 8) 有馬博史, 松尾伸彦, 執行啓太, 岡本明夫, 池上康之: OTEC, 15 (2010) 19.
- 9) 田村圭太郎, 逸見義男, 大山英人, 有馬博史, 池上康之: 2013年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2013), 339.
- 10) A.Okamoto: Titanium 2013, ITA 29th Annual Conference, (2013)

(2014年3月10日受付)