日本の新たなエネルギー
海洋温度差発電

海には膨大なエネルギーが蓄えられており、その1つが、海水の温度差を利用して発電する海洋温度差発電である。実用化のためには、熱効率の向上と経済性の確保が大きなハードルとなっている。現在、熱交換器用チタン板の開発が進められ、世界をリードする日本のチタン開発技術に期待が集まっている。

2013年4月、世界初の実証実験を開始した海洋温度差発電プラント（沖縄県久米島の沖縄県海洋深層水研究所）。

温かい海水と冷たい海水の温度差を利用

地球は水の惑星と呼ばれるように、地球の表面の7割を海が占めている。海には、波力や潮流などの運動エネルギーをはじめとする豊富なエネルギーがさまざまな形で蓄えられている。このような海洋エネルギーを取り出すことにより、化石燃料に代わるクリーンエネルギーとして利用することができる。

日頃、地上で生活している私たちは、海全体のほんの一部しか目にしていないが、海の中には多くの異なる環境が存在している。例えば、太陽の光は海面に降り注ぐが、海中に入ると太陽光の届くのは深さ200mまでの範囲でしかない。太陽光が届かない200m以深の海は「深海」と呼ばれるが、地球の海全体のじつに98%が深海である。

海では深くなるとともに温度も下がる。海水は、太陽光線をあまり多く通さないため、海面の温かい海水（表層水）と、200m以深の冷たい海水（深層水）との間には10～25℃の温度差がある。この温度差として存在する熱エネルギーを電気エネルギーに変換するのが、海洋温度差発電（Ocean Thermal Energy Conversion、以下OTEC）である。

OTECは、太陽光発電や風力発電など、他の再生可能エネルギーと比べると、昼夜の変動がなく比較的安定したエネルギー源であり、また季節変動が予測可能であるため計画的な発電が可能であるという特徴を持つ。まさに、太陽が海水を温めるかぎり得ることが可能な、無尽蔵なエネルギーなのである。発電できる条件は、海水の温度差が20℃以上あることである。この条件を満たすのは、北緯40°から南緯40°に至るまでの広い海域であり、特に、赤道周辺で、かつ海底が深い海域は海水の温度差が大きく、OTECに適している。

OTECのアイデアは意外に古く、1881年にフランスで発電のアイデアが提案されている。それから約90年を経て1970年代の石油ショックで、代替エネルギーへの世界的な要請が高まるとともに、日本や欧米各国でOTEC研究が始まった。

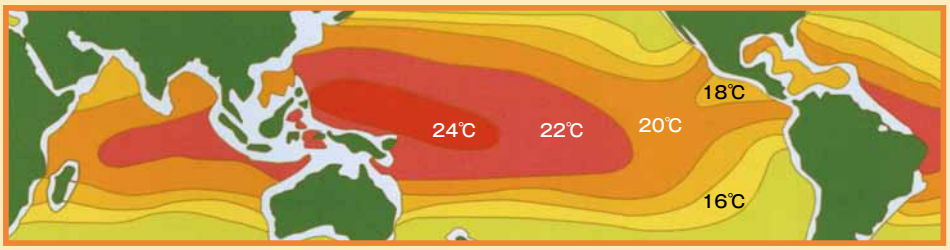
日本では、1973年に佐賀大学がOTEC研究を開始したのが先駆けとなった。1985年には当時世界最大規模となる出力75kwのパイロットプラントを製作、1994年には「佐賀大学方式」と呼ばれる熱効率に優れたシステムを発表した。現在では、出力30kWのOTEC基礎実験装置（佐賀県伊万里市）で、実証的研究が行われている。

プレート式熱交換器でいかに熱効率を高めるか

次に、OTECの発電の仕組みについて紹介しよう。

OTECの発電方式には、オープンサイクル、クローズドサイクル、ハイブリッドサイクルなどの種類がある。ここでは代表的な方式であるクローズドサイクルについて説明する。クローズドサイクルは、蒸発器、タービン、発電機、凝縮器、作動流体ポンプ、表層水ポンプ、深層水ポンプで構成され、各機器はパイプで連結され

世界の海水温度差の分布



表層と深層の海水温度差の分布図。例えば、赤道近くでは温度差24℃の海域が広がり、20℃以上は北緯40°から南緯40°に至るまでの広い海域にわたっている。この温度差を利用して、OTECを行う。

（出典:佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料）

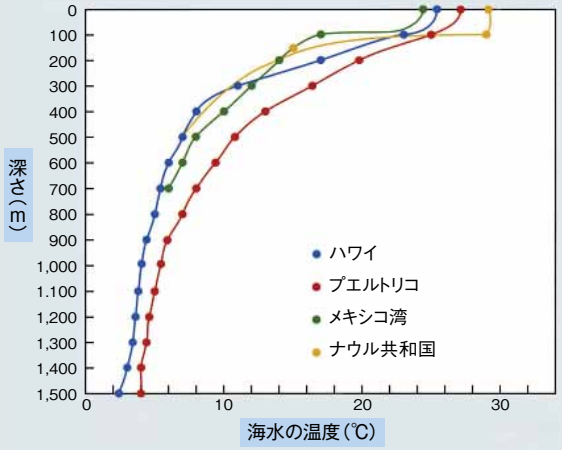
ている（4ページ参照）。

まず、海から汲み上げた表層水を蒸発器に送り、作動流体（後述）と呼ばれる液体の蒸気を発生させ、この蒸気をタービンの羽根に当ててタービンを回して発電する。タービンを出た蒸気は、凝縮器に送られ、冷たい深層水で冷却されて、再び液体にもどる。発電の基本的な仕組みは、火力発電などと同じである。異なる点は、蒸気を得るのに、化石燃料を燃焼させて熱を得るのでなく、表層水の熱で作動流体を気化させ、深層水で液化させることである。OTECは低い温度域を利用するため、作動流体には水よりも沸点の低いアンモニアと水の混合流体が使用される。

表層水と深層水の温度差は20℃と小さく、OTEC実用化の最大の技術的な課題は、いかに熱効率を高めるか、である。ここで重要な役割を果たすのが、プレート式熱交換器である。プレート式熱交換器は、薄いプレートを何層にも重ねて、海水と作動流体とを交互に流す構造をしており、チューブ型熱交換器に比べ、単位体積当たりの伝熱面積を大きくでき、海水と作動流体との間で高い熱伝達効率が実現できる。しかも、分解がしやすくメンテナンス性に優れている、などの特徴を併せ持つ。

熱交換器プレートの材料にはチタンが使用されているが、その理由は、海水に対する耐食性にきわめて優れるからである。実は海外では、熱交換器にアルミニウムなどが使用されており、

海洋の深度による温度の変化



熱帯および亜熱帯の海洋における、海水の垂直方向温度の分布グラフ。表層は20～30℃だが、深くなるにつれ温度が下がり続け、深さ1,000mでは5℃以下にまで下がる。

（出典:佐賀大学海洋エネルギー研究センター資料）

チタン製の熱交換器プレートは、日本の技術的優位性を発揮しているコア技術の1つだといわれている。

ただしチタンは、他素材に比べ高価である。OTECプラントでは、初期コストの内訳は、4分の1がプレート式熱交換器、4分の1が浮体構造物（浮体型OTECの場合）、残りが取水管ほか

OTECプラントで期待される波及効果

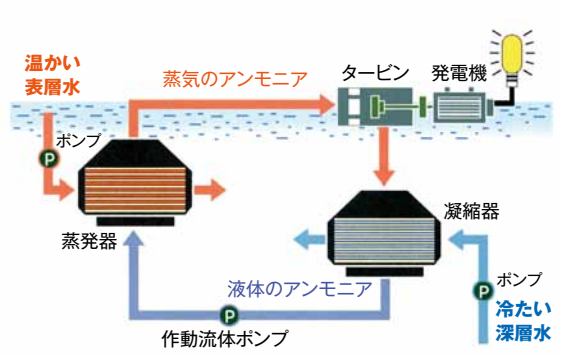
OTECプラントは、発電以外にもさまざまな波及効果が期待される。OTECで利用する温度の低い深層水は200m以深から汲み上げ、多くのミネラル分を含む海洋深層水として注目されている。この中には、植物の育成に役立つ窒素やりんが含まれ、藻類や貝類の成長に役立ち、養殖への利用に有望である。

この水はOTECプラントに海水淡水化装置を組み合わせることで、飲料水用のミネラルウォーターや、農業用の真水を得ることができる。このように、電力供給と水問題の解決につながるため、シーアセアンと呼ばれる東南アジア諸国や離島、発展途上国などでOTECの導入の検討が進んでいる。またOTECで汲み上げた海水に含まれるリチウムを回収して、リチウムイオン電池の材料として利用することができ、諸外国からも注目されている。

OTEC技術を利用した海水淡水化プラント船

2007年4月、インド国立海洋技術研究所は、OTEC技術を利用した海水淡水化装置の洋上実証実験に世界で初めて成功したと発表した。これはインド洋で深さ500mから深層海水を汲み上げ淡水化するもので、淡水製造能力は1,000t/日に達する。このようにアジア諸国ではOTECの導入に大きな期待を寄せ、日本との共同研究も盛んに行われている。

OTECのクローズドサイクルの仕組み



蒸発器では、温かい表層水(25～30℃)により作動流体が加熱され気化する。作動流体の蒸気によりタービン発電機を駆動し、発電する。その後、蒸気は凝縮器に送られ、冷たい深層水(5℃前後)により冷却され液化する。

の設備費である。ランニングコストの点では、海水の汲み上げに必要なエネルギーは自前の電力で賄うことができ、設備の補修などのメンテナンス費用も少なくてすむ。したがって、経済性を左右する要因は、プラント建設時の初期コストにかかっている。

つまり、プレート式熱交換器の高性能化及び小型化は、全体コスト低減を図るための重要な要件となる。そのためには、チタン製プレートの熱伝達性能を向上することが必要となる。さらに熱交換器プレートとしての性能を確保するため、チタン材料には素材の高強度化、プレート形状のプレス成形性向上、なども同時に確保することが求められた。

微細な突起を転写して熱伝達性能を向上

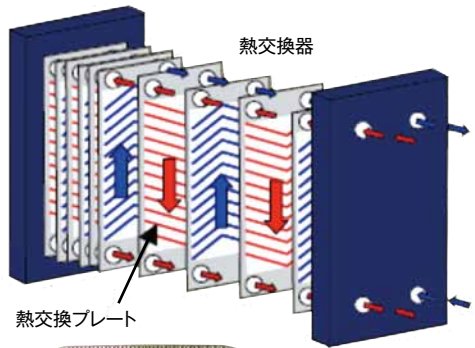
このような課題に対応して開発されたのが高伝熱チタン板である。このチタン板には、表面に高さ数十μmの微細な突起が成形されている。

蒸発器の熱交換器プレートでは、プレートの片側に温かい表層水、もう一方の側に作動流体が接しており、作動流体はプレートを介して伝わった熱により気化する。作動流体の気化を促進するためには、沸騰の起点となる発泡核が形成しやすいようにする必要がある。検討の結果、プレート表面に微細な突起を設けるのが効果的であることが明らかになった。

微細な突起は、高速加工が可能な冷間圧延工程での転写圧延(ワークロールに凹凸形状を付与し、チタン板を2本のロールで圧下するときに凹凸形状を転写する)で成形される。チタン板表面に凹凸を付与するには、酸洗によるエッチングなどの方法も考えられるが、生産性や加工コストなどを考慮し転写による成形が採用された。製造にあたっては、伝熱特性と圧延転写性を考慮した凹凸形状や、圧延条件などの工程の最適化が図られた。

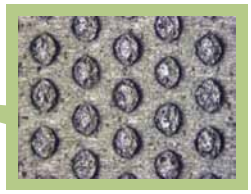
この高伝熱チタン板をプレート式熱交換器に使用した場合の性能は、平滑板を使用した場合と比較して沸騰熱伝達性

■ プレート式熱交換器の構造

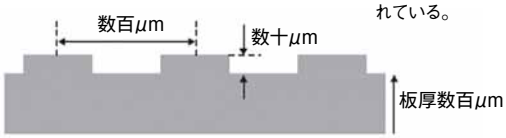


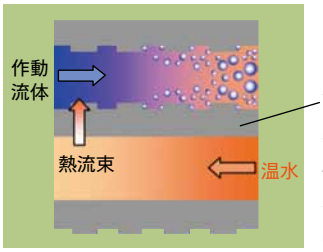
チタン製プレートのプレス成形例
(資料提供:佐賀大学海洋エネルギー研究センター)

■ 高伝熱チタン板の表面形状



チタン板表面には高さ数十μmの微細な突起が均一に成形されている。





高伝熱チタン板
熱伝達の仕組み。微細な突起の側面が、流体を沸騰させる発泡核の役割を果たしている。
(資料提供:(株)神戸製鋼所)

OTEC基礎実験装置（佐賀大学海洋エネルギー研究センター）

OTEC基礎実験装置（出力30kW）（左）とプレート式熱交換器(右)。緑色の装置がプレート式熱交換器であり、内部にはチタン製熱交換器プレート26枚が積層されている。

能が約20%向上することが明らかになった。高伝熱チタン板を使うことで、プレート枚数を従来より少なくでき、システム全体の機器の小型化、低コスト化を図ることができた*。

2013年4月、世界に先駆けてOTEC発電利用実証事業（沖縄県久米島、出力50kW）が電力会社への電力供給を開始した。この久米島のプラントには、新しく開発された高伝熱チタン板が使用され、熱伝達性能の向上が発電プラントでも実証された。

商用運転を目指す各国の取り組み

再生可能エネルギーの導入を考えるとき、経済性は大きな課題である。太陽光発電や風力発電では、運転が自然条件に左右されやすく、出力が不安定、などの点から発電コストを安くするのが難しい。これに対し、OTECプラントの稼働率は80～90%と高く、比較的安定した運転が可能である。そのため、家庭用などの小規模分散型の発電にとどまらず、比較的出力規模が大きいプラントでの商用運転への期待が高まっている。

現在、日本では1MW以上のOTECプラントを、米国やフランスなどに先駆けて建設することを目指している。そのためには、今後1MW級の実証試験を行って性能を確認し、さらに商用運転には10MW以上の出力が必要だといわれる。このような大規模なプラントを建設するには、例えば出力10MWでは建設コストが数百億円規模となり、発電コストは20円/kWh程度かかるといわれている。

1970年代にOTEC研究を行っていた諸外国では、その後原油価格が安くなったため化石燃料にシフトして、OTECの研究を中断してしまったという経緯があった。2000年代になり、原油価格の高騰や環境問題などの社会的背景により、米国やフランスなどでOTEC研究への取り組みが再開したのである。また最近数年では、経済成長とともにエネルギー需要が高まる中国やインドでもOTECへの期待が高まり、特許件数が飛躍的に伸びている。

先ごろ、米国大手メーカーが中国の投資会社との間で、中国に世界最大級のOTECプラントの建設に関する契約に調印した、と発表した。これにより、OTECの商用運転への道筋は、いよいよ現実味を帯びてきた。

各国が実用化研究を本格化させ、どの国も1基目は国家プロジェクトとして立ち上げることになるが、その後は新しいビジネスとして成り立つかどうかが鍵となる。

日本では2007年に海洋基本法が策定され、国として海洋エネルギー開発への戦略的な取り組みが始まった。海洋エネルギーの有効利用は、エネルギー問題だけでなく地球温暖化対策にも大きな効果が期待できる。海とともに生きてきた島国、日本。大海原に眠る豊富な海洋エネルギーは、将来、社会に大きなインパクトを与えるかもしれない。

*NEDOによる平成23～26年度次世代海洋エネルギー発電技術研究開発による研究成果

●取材協力　佐賀大学海洋エネルギー研究センター、(株)神戸製鋼所
●文　杉山香里