

## Techno Scope

海洋構造物には、港湾施設や交通関連施設、メガフロートなどがあるが、なかでも石油や天然ガスの掘削・生産施設は、海洋構造物の代表といってよい存在である。エネルギー需要の高まりから、ますます重要性が高まっている石油・天然ガスに関わる海洋構造物において、安全性を確保するために優れた鉄鋼技術が活用されている。

# 海洋構造物の信頼性を守る鉄

北海のGraneプロジェクトにおいて、世界ではじめて $-10^{\circ}\text{C}$ 継手CTOD保証のYP500N/mm<sup>2</sup>クラスの鋼板が使用された。(写真提供:新日本製鐵(株))

## より遠く、寒く、深い海域で行われる油田開発

2011年に地球の人口は70億を突破し、エネルギー需要は増加の一途をたどっている。1バレル10ドル以下であった原油価格は、1970年代のオイルショック以降、高騰を続け、現在は1バレル80ドル前後で推移している。これは、油田開発の採算ラインを大きく引き上げることになり、これまでは高コストで開発が困難であった深海域を中心に、新しい油田・天然ガス田の開発が精力的に進められるようになった。これには、陸上や比較的浅い海域で開発が可能な「イージーオイル」が減少しているという背景もある。現在、有望視されている鉱区はブラジル、西アフリカ、メキシコ湾、北極などであるが、2000年以降に開発された新しい油田・天然ガス田は70%が海底油田であり、さらにその50%が1500m以深の深海油田であるという。

これらの油田から原油を掘削・生産する施設は、従来と比較して大型化しているのが大きな特徴である。大型化の理由は、複数の海底油井をひとつの生産施設で処理するようになったことや、1つの坑井から枝状に油層を掘削できるマルチ・ラテラル坑井の開発などの掘削技術の進歩により原油の採掘量が増加したことなどが挙げられる。浮体式の原油生産施設では、大型化と同時

に軽量化も求められる。また、掘削・生産施設の環境がより過酷になっていることも最近の傾向である。北海の「スノービットLNGプロジェクト」やオホーツク海の「サハリン大陸棚石油・天然ガス開発プロジェクト」など、極地での開発も進んでいる。

## 稼働水深に適した様々なリグやプラットフォーム

石油・天然ガスに関わる海洋構造物は、試掘・掘削のための施設と、生産のための施設に大別できる。これらは使用する水深によって、さらに細分される。「リグ」と呼ばれる海洋掘削装置を用い

### 掘削設備の種類



いずれのタイプも、ある鉱区で一定期間の試掘を行った後は、別の鉱区に移動する。そのため、MODU (Mobile Offshore Drilling Unit) と呼ばれることがある。(資料提供:日本海洋掘削(株))

た掘削施設には、比較的浅い水深120m程度の沿岸海域で使用されるジャッキアップ型、水深100m以深の大陸棚などでの掘削を行えるセミサブマーシブル型(セミサブ型)、自走できる船舶であるドリルシップ型等がある。

プラットフォームと呼ばれる生産施設も稼働する海域の深度によって用途が分かれ、固定式のジャケット型以外は浮体式で、セミサブマーシブル型(セミサブ型)、FPSO(浮遊式海洋石油・ガス生産貯蔵積出設備)、FSO(浮遊式海洋石油・ガス貯蔵積出設備)、TLP(緊張係留式プラットフォーム)、Spar(スパー)などが存在する。自走できるドリルシップと着床式のジャケット型以外の設備は、リグもプラットフォームもともに20～30年のサイクルでドックに曳航して保守が必要になる。

## 海洋構造物に求められる高い信頼性

原油などの掘削や生産を行うための海洋構造物は巨大であるために、主要な構造体には厚鋼板が用いられる。例えば水深400ft(約120m)用のリグは、コードと呼ばれる主部材には直径が800mmで板厚35mm、降伏応力が490N/mm<sup>2</sup>クラスの鋼材が使用される。

海洋における石油や天然ガスの掘削や生産は、沿岸から遠く離れ、近年は、より極地に近い寒冷な海域で行われている。そこで働く作業員は、施設に居住し、常駐して作業を行うことになる。万一、事故が発生した場合には、容易に救助できない場合もある。施設の安全性を確保するためには、優れた鉄鋼材料と高度

な溶接技術が不可欠であり、なかでも、低温脆性への対策と防食技術が特に重要視されている。

そのため、海洋構造物には一般の厚鋼板と比較してより厳しい安全性が求められている。一般的に、海洋構造物に用いられる厚鋼板の特性として、波浪や強風による繰り返し荷重に対する十分な疲労強度、冬期の低温環境でも低温脆性破壊が発生しない低温靱性、冷間曲げ加工・熱間加工・溶接などによる強度や靱性の低下が起こらないこと、さらに冷間割れ、ラメラテアを生じないことなどが求められる。特に溶接継手については、破壊力学に基づく靱性評価試験であるCTOD(Crack Tip Opening Displacement)が要求されている。現在、海洋構造物用の材料規格には欧州のEN、石油製品・製造設備に関するAPI、ノルウェーのNORSOKなどがある。

その契機となったのは、1980年に北海で発生した掘削施設Alexander Kielland号の転覆事故である。この事故は、低温脆化により鋼製の脚が折れたことが原因であり、海に投げ出された123名が死亡する惨事となり、これ以降、材料の低温靱性確保が強く求められるようになった。

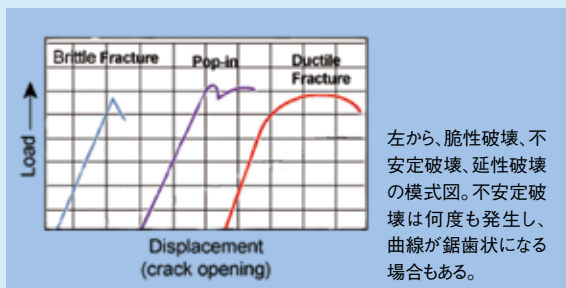
## 溶接性の向上と低温脆性の改善を目指す

海洋構造物にも用いられる厚鋼板には、優れた低温靱性が求められると同時に、溶接施工効率の観点から、高い溶接性も同時に実現する必要がある。しかし、溶接熱影響部(HAZ)の靱

### CTOD(き裂先端開口変位)試験

CTOD(Crack Tip Opening Displacement:き裂先端開口変位)試験は、破壊靱性を評価する試験である。予め欠陥が存在する試験片を温度が一定の環境で曲げ外力を加え、き裂が急速に進展する「不安定破壊(ポップイン破壊)」が起こる直前のき裂先端開口量(CTOD値)を測定する。CTOD値が大きな材料ほど、「粘い(ねばい)」材料であると判断できる。なお、CTOD試験の実施方法は、WES 1108、BS 7448、ASTM E1290などに定められている。

#### ■CTOD試験の測定結果の例



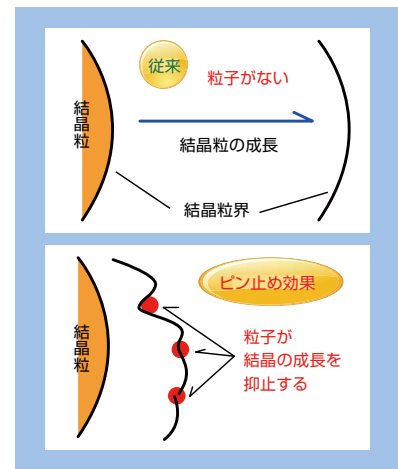
室温で行うCTOD試験の様子(上)。試験には、実際に使用される80mm厚の材料を用い、中央のノッチに取り付けたクリップゲージにより開口変位を測定する。低温試験(下左)は冷媒(白色の液体)中で行われる。-10℃ CTOD試験実施後の試験片(下右)。





ノルウェーのOseberg油田で、1984年に初めてTMCP鋼を適用したプラットフォームが建設された。同油田には複数のプラットフォームが存在しており、写真は1998年にTMCP鋼が適用されたプラットフォームのOseberg Southである。

■微細粒子によるピン止め効果の概念図



性は溶接入熱量の増大とともに劣化するため、高い安全性が要求される海洋構造物用の厚鋼板では、HAZの靱性改善が必要であった。

その対策として、微量のTiの添加によりTiNを析出させ、溶接時のオーステナイト粗大化抑制やフェライト析出核増加を促す方法が、1970年代後半に開発された。

微量元素の添加に加えて、1980年代にはスラブ加熱温度制御とそれに続く制御圧延、加速冷却を組み合わせた熱加工制御プロセスであるTMCP (Thermo Mechanical Control Process) が開発され、溶接性の向上と同時に、鋼板強度や靱性の向上を実現している。

最新の材料では、いっそうの大入熱溶接化、高強度厚肉化、高靱性化の要求に対応するために、材料中に数10nm～数100nmの微細な酸化物や硫化物を密に分散させる手法が開発され、実用化されている。これは、MgやCaを含有する微細粒子が、HAZ組織が粗大化する1400℃以上の高温で結晶粒の成長を阻害するピン止め粒子として作用することを利用している。

現在、海洋構造物に求められるCTOD保証は-10℃が標準とされている。しかし、寒冷地での資源開発は今後も進むと予想され、海洋構造物用に使用される代表的な鋼種であるYP355N-TMCPではCTOD-40℃が実用化されつつある。さらに、YP500N-TMCPの開発も行われている。材料に対する要求は一段と厳しくなり、より低温でのCTOD保証鋼が求められていくであろう。特に極地で用いる材料には、CTOD-60℃が必要とされており、今後の開発課題となっている。

## 設備のライフサイクルに直結する防食技術

海洋構造物は海水という腐食環境に曝されているが、そのメンテナンスは構造物のライフサイクル、運用コストに密接な関連があ

り、防食技術は構造物の信頼性の確保にもつながる重要な技術分野である。

長い海岸線を有する我が国で港湾構造物に鋼材を用いたのは、1876年(明治9年)に神戸港で輸入スクリューパイルを使用したのが、最初であるといわれている。港湾鋼構造物には防食対策が不可欠であり、1981年(昭和56年)に山下埠頭棧橋での陥没事故が発生するまでは、あらかじめ鋼材の肉厚を厚くしておく「腐食しろ」による防食が主な対策であった。

山下埠頭での事故は、当時、使用されていた鋼管杭が「集中腐食」により腐食し、上部構造が陥没するしたことが、原因であった。この事故により、干満部で大きな腐食が発生する「集中腐食」がはじめて明らかになった。そのため、1999年には「腐食しろ」による防食が禁止されることになる。

「腐食しろ」に代わる防食技術には、塗装や電気防食が挙げられる。我が国の港湾鋼構造物に電気防食がはじめて適用されたのは1953(昭和28)年の尼崎港防潮堤が最初とされる。昭和40年代中旬には、性能の優れたアルミニウム合金電極と水中溶接技術が開発され、電気防食の基礎が築かれた。また、塗装による防食では、昭和30年代後半にタールエポキシ樹脂塗料が開発され、大気部の防食として用いられた。

海洋構造物の防食については「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル」としてまとめられており、広く活用されている。

## 海洋資源の開発に不可欠な日本の鉄鋼材料

現在、石油や天然ガスの掘削リグや生産プラットフォームの建造は、中国、韓国、シンガポールなどで行われており、我が国では建造していない。しかし、これらの海洋構造物に供することが可能な高品質の鋼材を提供しているのは、日本と欧州の鉄鋼メーカー数社に限られている。

## 耐用年数100年を実現する防食・防錆技術

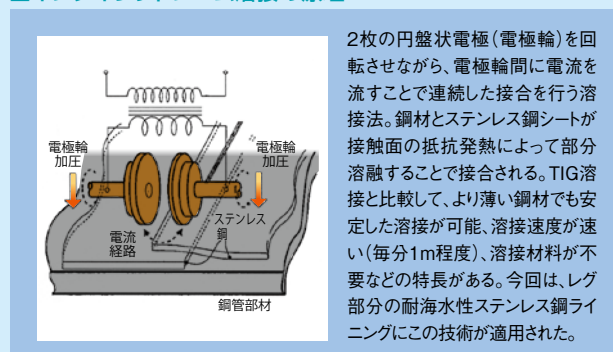
2010年(平成22年)10月21日より、羽田空港の4本目の滑走路(D滑走路)の供用が開始された。D滑走路は、既存の空港の沖側に新設され、滑走路および誘導路等から構成される(詳細は連携記事参照)。

D滑走路の建設には、多摩川の河口付近の流れを妨げないという、計画上の制約があった。そのため、埋立部分と栈橋部分を併用するハイブリッド方式が採用された。栈橋部分はジャケット方式により建設され、長さ63m、幅45m、高さ32m、重量約1,300tのジャケットが198基使用されている。海面付近の流れへの影響を最小限にとどめるため、プレス構造は海底付近に取り付けるなどの配慮がなされている。

海洋構造物の期待供用年数は長期化する傾向にあり、構造物のライフサイクルコストの低減は重要な課題である。D滑走路の期待供用年数は100年であり、その実現のためには、防食・防錆技術が重要な役割を担う。栈橋部分の防食には、上部にはチタン天板(カバースレート)、海中部分には電気防食が採用されている。酸素と塩分を含んだ水膜の形成により最も厳しい腐食環境となる飛沫・干満部にさらされるレグ部分には、耐海水性ステンレス鋼ライニングを採用している。耐食性に優れた金属を利用するため、大規模補修がほとんど必要なく、メンテナンスコストの低減が期待されている。

なお、耐海水性ステンレス鋼ライニングに使用されたステンレス鋼の面積は11万m<sup>2</sup>、重量500t、チタンカバースレートに使用されたチタンは重量1,000tで、その面積は57万m<sup>2</sup>におよんでいる。

### ■インダイレクトシーム溶接の原理



再拡張工事竣工後の羽田空港。手前がD滑走路。

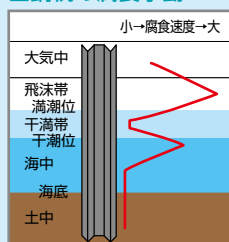


据え付け前のジャケット。下部のプレス構造に取り付けられた銀白色の部品がアルミニウム合金の犠牲陽極で、1つの質量は約200kgである。



施工中のジャケット。「低頭起重機船」と呼ばれる特殊な作業船によって、杭にジャケット構造を接続していく。

### ■鋼杭の腐食挙動



鋼杭の部位ごとに腐食環境を比較すると、飛沫部と干満部が波浪や干満により酸素や塩分を多く含んだ水膜が鋼材表面に形成されるため、もっとも腐食速度が大きくなる。

近年は、大水深や極地の資源開発に加えて、従来は比較的水深が浅い場所で使われていたジャッキアップリグやジャケット式プラットフォームを水深が深い場所に適用できるような技術も求められている。また、新しいエネルギー源として、深海域のメタンハイドレートへの注目が高まっており、石油や天然ガスの開発と同様、採取・貯蔵・運送等に用いる機材には優れた性能を持った鋼材の存在が不可欠である。さらに、深海には豊富な金属資源が存在

することが明らかになっており、今後の資源開発が期待されている。このような海洋資源の開発に用いられる海洋構造物用鋼材開発の分野で大きなアドバンテージを持っている我が国は、今後もこの分野で不可欠な材料を供給し続けていくことで、国際的な存在感と優位性を確立していくべきであろう。

- 取材協力 新日本製鐵(株)、新日鉄エンジニアリング(株)
- 文 杉山 香里