

特集記事・2

我が国のエネルギーを支える鉄鋼技術
【運ぶ・貯める】エネルギーの生産～供給を支える
高機能厚鋼板の技術開発とその動向

Technology Trends of High Performance Plates in Oil and Gas Field

安藤隆一
Ryuichi Ando新日鐵住金(株)
厚板技術部厚板商品技術室
主幹

1 はじめに

石油や天然ガスに代表される一次エネルギーの需要は今後ますます増加する傾向にある。それらの生産～供給を支える海洋構造物、ラインパイプ、エネルギー運搬船、精製・貯槽設備等の主用部材には高い経済性と安全性を兼ね備えた材料として様々な高機能厚鋼板が大量に使用されている。

とりわけ我が国は高度な研究開発と優れた生産技術を駆使して、深海や極地などより操業が困難な地域で必要とされる厚鋼板を先駆的に開発、供給して来ている。ここでは海洋構造物およびLNG貯槽分野における高機能厚板の最近の技術動向を紹介する。

2 高強度、高靱性海洋構造物用鋼

2.1 海洋構造物用鋼の動向

海洋構造物は、その構造から水深300m程度までの海域で使用されるジャケット型やジャッキアップリグ型等の固定型、水深1000m超の深海でも使用されるセミサブ型 (Semi-Submersible) やTLP型 (Tension Leg Platform) に代表される浮遊型、およびそれらの中間の揺動型の3形式に分類される。

いずれも気象や海象の厳しい環境で長期間にわたり使用される大型構造物であることから、使用される厚鋼板には脆性破壊を防止する観点から母材のみならず溶接部に対しても優れた低温靱性が求められる。特に、低温靱性としてシャルピー衝撃特性だけでなく、きわめて局所的な脆化域に支配されるCTOD特性が要求される場合が多い。

また、近年の世界的に旺盛なエネルギー需要を背景に、海洋構造物の大型化やそれに伴う軽量化のニーズから高強度化の要望は高まる一方であり、さらには氷海域開発の活発化などからより低い温度での破壊安全性が求められている。これ

らの要求に対応するため、HAZの組織微細化、脆化組織の低減や生成抑制などを通じた高靱性化と高強度化を両立する高機能厚鋼板がマイクロアロイングとTMCPを駆使して開発され実用化されている。

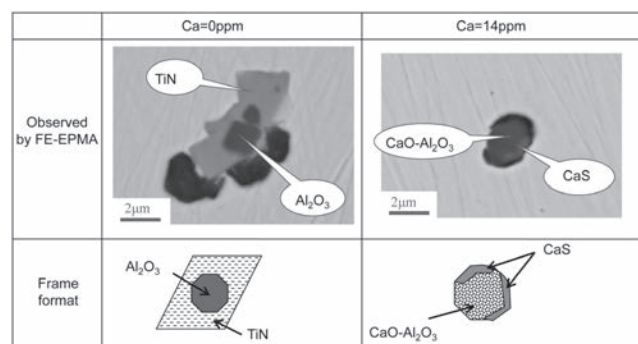
2.2 高機能鋼材の開発と実用化

2.2.1 HAZ靱性向上技術の開発

HAZの破壊安全性の向上には、有効結晶粒径の微細化、HAZ母相の高靱性化、破壊起点となる硬質脆化相 (M-A等) の低減などが有効であることがよく知られている。特に、有効結晶粒径を微細化する技術として、1970年代にTiNを利用した技術が開発され¹⁾、その後、REM²⁻⁴⁾や図1に示すCa⁵⁾を利用する技術や、図2に示す各種の析出物や酸化物をフェライト変態核として利用する粒内変態鋼⁶⁻⁷⁾、さらには図3に示す50nm～200nmのMgやCaを含む酸化物や硫化物の超微細粒子をピンニング粒子とする技術⁸⁻⁹⁾が開発されている。

2.2.2 高強度化、寒冷地仕様への対応

TMCPが実用化される1980年以前は、海洋構造物用鋼は主として焼ならしにより製造されていたが、高強度化や高靱

図1 介在物形態に及ぼすCaの影響⁵⁾

性化に対応するためには合金元素の添加量が増加し、HAZ母相の硬度上昇やM-A等の増加により十分なHAZ靱性が得られないと言う課題があった。このため、1980年以降、TMCPを利用した金属組織制御による母相の高強度化、高靱性化の研究が盛んに行われ、TMCPが本格的に海洋構造物用鋼に適用されるようになった。

世界に先駆けて開発されたTMCPを適用したYP350MPa鋼が、1984年に北海のOseberg鉱区の海洋構造物に使用されて以来、1990年には北海向けYP420MPa鋼¹⁰⁾、2000年にはチモール海向けYP460MPa鋼や北海向けYP500MPa鋼¹¹⁾が相次いで開発され、2004年にはメキシコ湾向けにYP550MPa鋼¹²⁾が、 -10°C のHAZのCTOD値を保証する鋼材として、それぞれ世界に先駆けて供給されている。また、 -40°C でHAZのCTODを保証する鋼として、1999年に粒内変態核にTiOを利用したYP355MPa級鋼が開発され¹³⁾実用化されている。さらに、石油掘削用ジャッキアップリグの最重要部材であるレグ(脚)に適用されるラック材として、世界最大厚となる210mmの -60°C シャルピー保証800MPa鋼¹⁴⁾も開発されている。

3 TMCPを適用した新しいLNG貯槽用鋼

3.1 LNG貯槽用鋼材の動向

液化天然ガス(LNG)は、二酸化炭素の排出量が少なく、

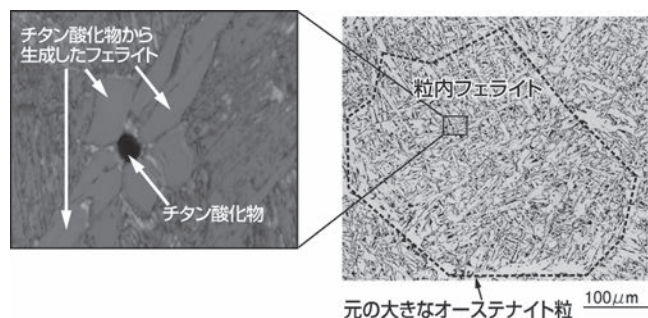


図2 TiO鋼のミクロ組織とIGF観察例

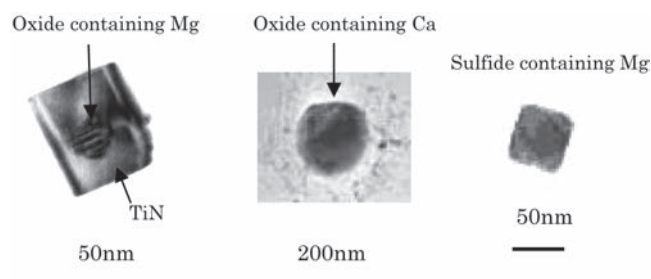


図3 超微細なピン止め粒子の例⁸⁻⁹⁾

かつ硫黄酸化物・窒素酸化物が発生しないクリーンなエネルギーであり、地球環境保護の担い手としてその需要はますます増加する傾向にある。LNGの液化基地・受入基地の貯槽設備の内槽鋼板には、 -162°C という極低温で経済的な強度と破壊事故に対する高い安全性が求められ、約50年に亘りニッケルを9%添加した9%ニッケル(9%Ni)鋼板が世界中で広く使用されている。

我が国は1960年代に9%Ni鋼板の商業生産を開始して以来、鋼板自体の品質向上はもとより、世界的なLNG貯槽の安全性検証¹⁵⁻¹⁷⁾や国内における貯槽容量の拡大に伴う適用板厚の拡大^{18,19)}などを通して、LNG貯槽の安全性や経済性の向上に大きく寄与してきた。

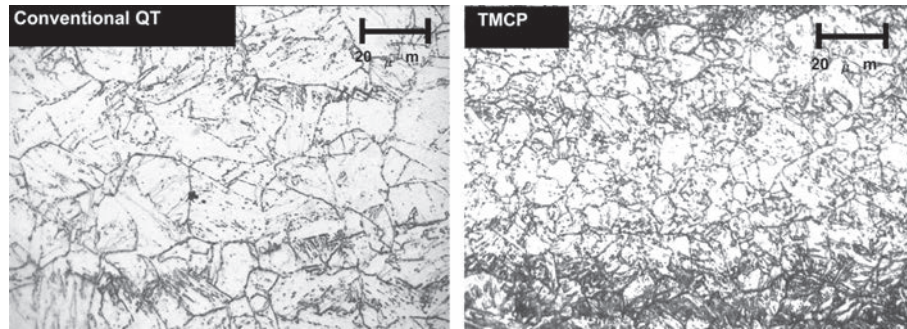
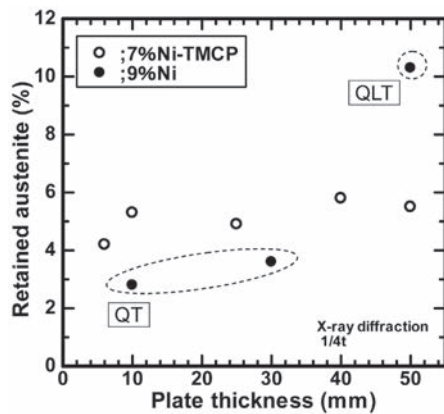
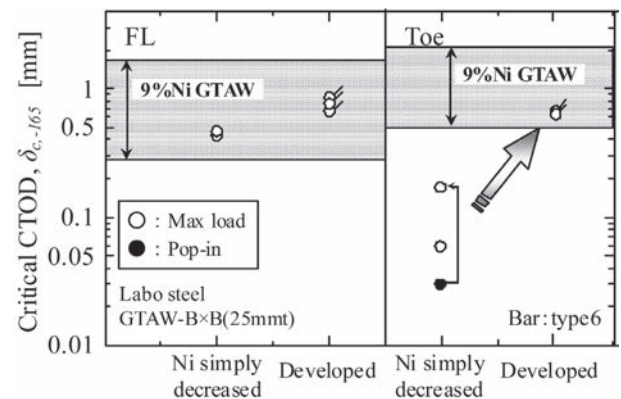
国内では1969年に初めて地上式LNGタンクが建造され、その容量は容量4.5万klであったが、需要増加に伴いタンクの大容量化が進み、最大板厚は容量4.5万klで20mmであったものが、8万klで30mm、14万klで40mm、18万kl以上では50mm程度となった。この板厚拡大に対応するため、二相域熱処理^{20,21)}の実用化²²⁾や、Siを低減し、Moを添加した高靱性9%Ni鋼²³⁾が開発され実用化されてきた。

3.2 新しい低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板の開発と実用化

ニッケルは可採年限が約40年とされる高価で希少な金属である。過去にニッケル価格の高騰を受けてLNGタンクの建造が中止や延期になった経験から、ニッケルの価格変動リスクを軽減する事が望まれていた。このような観点から、ニッケル量を低減しながら9%Ni鋼と同等の破壊安全性を有する材料の開発が行われ、1970年代には二相域熱処理を適用しニッケルを5.5%に低減した鋼材が開発されている²⁴⁾。一方、直接焼入れを利用する研究が進められ、近年、TMCPを利用してニッケル量を6.0-7.5%とした低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板が開発されている²⁵⁻³¹⁾。

LNGタンクの内槽用鋼材には、 -162°C における脆性破壊の発生および伝播に対する高い抵抗性と脆性き裂の停止性能が求められる。一般的にこれらの性能は残留オーステナイト量に影響されるが、金属組織の微細化が残留オーステナイト量の増加に有効である事が知られている³²⁾。開発鋼ではTMCPの活用により、焼入焼戻し(QT)で製造された従来の9%Ni鋼と比較して約1/3に結晶粒径を微細化し(図4)、併せてSi、Cr、Moの添加量を最適化することで9%Ni鋼と同等の残留オーステナイトが得られている(図5)。また、破壊の起点となりやすい最終溶接パス近傍のHAZ(toe)においても従来の9%Ni鋼と同等の限界CTOD値が得られている(図6)。

開発鋼の実用化に当たっては、ガス事業者およびタンク製造業者と共同で、 -196°C での大型破壊試験などタンクの安全性を検証する様々な試験が行われ、世界最大級の容量23

図4 9%Ni鋼と開発鋼のミクロ組織²⁵⁾図5 開発鋼と9%Ni鋼の残留オーステナイト量²⁶⁾図6 開発鋼の溶接部CTOD特性²⁷⁾

万klの地上式LNGタンクへの適用が検討された。その結果、平成22年度のガス工作物の技術基準への適合性評価委員会において、評価に供された開発鋼はJIS G 3127の9%Ni鋼板と同等の性能を有し、関連の技術基準に適合していると評価され³³⁾、最大厚47mmの鋼板が使用された。

3.3 開発鋼の標準化

開発鋼は2013年3月に種類の記号をSL7N590としてJIS G 3127 (低温圧力容器用ニッケル鋼鋼板) に登録された。2013年8月には圧力容器の設計規格であるASMEにCode Case登録された。ASTMでも、A841 Grade Gとして規格化がすすめられており、今後の国内外案件への適用拡大が期待される。

4 まとめ

一次エネルギーの海外依存率が96%と極端に高い我が国にとって、海外から石油、石炭、天然ガス等の化石燃料を安定的に確保する事は極めて重要な課題である。資源の保全は元より、設備の大型化や深海開発に伴う板厚の増大や高強度化、さらには寒冷地仕様への対応等、厚鋼板への要求はますます高度化するものと思われるが、我が国のエネルギー政策

の一翼を担う材料として、今後も先駆的な技術開発の継続が望まれる。

参考文献

- 1) 金沢正午, 中島明, 岡本健太郎, 金谷研: 鉄と鋼, 61 (1975), 2589.
- 2) 谷川治, 石井裕昭, 板倉教次, 天野慶一, 中野善文, 川端文丸: 川崎製鉄技報, 25 (1993) 1, 13.
- 3) 久田光夫, 三宅孝則, 川端文丸: 川崎製鉄技報, 30 (1998) 3, 142.
- 4) M.Hisata, F.Kawabata, N.Itakura, T.Orita, O.Yamamoto and J.Kudo: Proceedings of the 18th Int. Conf. OMAE. Newfoundland, (1999), ASME, MAT-2099.
- 5) 加藤拓, 佐藤進佑, 太田裕己, 塩飽豊明: 溶接学会全国大会講演概要, 86 (2010), 92.
- 6) M.Imagumbai: Proc. Int. Conf. HSLA Steels '85, Beijing, ASM, (1985), 557.
- 7) Y.Tomita, N.Saito, T.Tsuzuki, Y.Tokunaga and K.Okamoto: ISIJ Int., 34 (1994) 10, 829.
- 8) 児島明彦, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 市川和利: まてりあ, 42 (2003), 67.

- 9) 児島明彦, 清瀬明人, 植森龍治, 皆川昌紀, 星野学, 中島隆雄, 石田浩司, 安井洋二: 新日鉄技報, (2004) 380, 2.
- 10) Y.Yoshida, H.Tamehiro, R.Chijiwa, K.Funato, N.Doi, K.Tanaka and M.Kibe: Proceedings of the 12th Int. Conf. OMAE. Glasgow, (1993), ASME.
- 11) 長井嘉秀, 深水秀範, 井上肇, 伊達昭宏, 中島隆雄, 児島明彦, 足達智彦: 新日鉄技報, (2004), 380, 12.
- 12) T.Kamo, T.Urabe, K.Ohnishi, H.Nakamura, S.Okaguchi, M.Hamada and S.Suzuki: Proceedings of the 23rd Int. Conf. OMAE. Vancouver, (2004), ASME.
- 13) S.Aihara, T.Tomita, T.Tsuzuki, N.Saitoh, Y.Yoshida, S.Ohkita and I.Imai: Proceedings of the 18th Int. Conf. OMAE. Newfoundland, (1999), ASME.
- 14) 大谷幸三郎, 服部恵一, 村岡寛英, 川副文宏, 鶴田早苗: 新日鉄技報, (1993) 348, 10.
- 15) Consortium of Five Japanese Companies of Osaka Gas Co., Ltd., Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., Toyo Kanetsu K.K., Nippon Steel Corporation and Sumitomo Metal Industries Ltd.: Final Research Report on Crack Arrest Properties of 9%Ni Steel and Relation Between Crack-Initiation and Crack-Arrest Tests to Gas Research Institute., (1986), 89.
- 16) H.Miyakoshi, N.Ishikura, T.Suzuki and K.Tanaka: Proceedings for Transmission Conf. Atlanta, (1981), American Gas Association.
- 17) N.Ishikura, T.Kohno, H.Maeda, K.Arimochi and K.Tanaka: International Conference "Transport and Storage of LNG & LPG", Brugge, (1984)
- 18) 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 萩原行人, 有持和茂: 厚肉9%Ni鋼板の脆性破壊特性と大形LNGタンクへの適用性, 圧力技術, 29 (1991) 6.
- 19) 町田進, 石倉則義, 久保尚重, 片山典彦, 村本聖一, 萩原行人, 有持和茂: 厚肉9%Ni鋼板の破壊特性と大形LNGタンクへの適用性, 圧力技術, 31 (1993), 348.
- 20) Y.Yano, H.Sakurai, H.Mimura, N.Wakita, T.Ozawa and K.Aoki: Transactions ISIJ, 13, (1973), 133.
- 21) 矢野清之助: 学位論文 6%Ni鋼の靱性と α - γ 二相共存域熱処理法に関する研究, (1977)
- 22) 斎藤直樹, 山場良太, 村岡寛英, 佐伯修: 新日鉄技報, (1993) 348, 25.
- 23) 星野学, 斎藤直樹, 村岡寛英, 佐伯修: 新日鉄技報, (2004) 380, 17.
- 24) Nippon Steel Corp.: Development of a New 5 1/2 Ni Steel for Cryogenic Service (N-TUF-CR196), (1974)
- 25) 久保尚重, 山下真輝, 高田昌典, 有持和茂, 川畑友也, 萩原行人: 日本高圧力技術協会平成20年度秋季講演会概要集, (2008)
- 26) 久保尚重, 淵元洋一, 山下真輝, 清水翼, 高田昌典, 坂戸直和, 山田安廣, 村本聖一, 密本巨彦, 平井秀一, 廣瀬仁志, 加茂孝浩, 有持和茂, 川畑友弥, 大西一志, 安藤隆一, 萩原行人: 日本高圧力技術協会平成22年度春季講演会概要集, (2010)
- 27) T.Kamo, K.Arimochi, T.Kawabata, K.Onishi, R.Ando, M.Yamashita, H.Iwahashi, N.Kubo, Y.Fuchimoto, M.Takata, N.Sakato, M.Mitsumoto, S.Hirai, H.Hirose and Y.Hagiwara: Proceedings of the 30th Int. Conf. OMAE. Rotterdam, (2011), ASME.
- 28) 古谷仁志, 斎藤直樹, 高橋康哲, 樽林勝己, 井上健裕, 植森龍治, 奥島基裕: 日本高圧力技術協会平成22年度秋季講演会概要集, (2010)
- 29) H.Furuya, N.Saitoh, Y.Takahashi, K.Kurebayashi, Y.Kayamori, T.Inoue, R.Uemori and M.Okushima: Proceedings of the 30th Int. Conf. OMAE. Rotterdam, (2011), ASME.
- 30) K.Onishi, T.Kawabata, T.Kamo, Y.Tanino, M.Yamashita, A.Iida, M.Kusagawa, H.Nishigami, N.Sakato, M.Mitsumoto, S.Hirai, H.Hirose and Y.Hagiwara: Proceedings of the 31th Int. Conf. OMAE. Rio de Janeiro, (2012), ASME.
- 31) 仮屋崎誠, 泉学, 宮脇淳: 日本高圧力技術協会平成24年度春季講演会概要集, (2012)
- 32) 斎藤直樹, 豊福昭典, 矢野清之助: 製鉄研究, (1985) 318, 43.
- 33) 平成22年度ガス工作物安全解析等調査報告書, 財団法人日本ガス機器検査協会, (2011)

(2013年10月23日受付)