

大規模CCSを可能にする液化CO₂タンク用鋼板

Steel Plates for Liquefied CO₂ Tanks Enabling Large-Scale Carbon Dioxide Capture and Storage

臼杵 博一*
Hirokazu USUKI
住谷 早俊
Satoshi SUMIYA

吉村 信幸
Nobuyuki YOSHIMURA
猪狩 玄樹
Haruki IGARI

中西 大貴
Daiki NAKANISHI
奥島 基裕
Motohiro OKUSHIMA

大久保 武史
Takeshi OKUBO

抄 録

CCSにおいて陸上での一時貯蔵や船舶輸送に用いられる液化CO₂タンクに焦点を当て、タンクの現状と今後の見通しを踏まえた上で、タンクの設計要件から鋼板の要求特性を想定し、日本製鉄(株)の鋼板ラインナップを紹介した。中圧大型タンク向け鋼板には日本製鉄規格の溶接構造用高張力鋼WEL-TEN[®]780が、低圧大型タンク向け鋼板には日本製鉄規格の低温用鋼N-TUF[®]490がそれぞれ1つの解になると考えられる。

Abstract

Focusing on liquefied CO₂ tanks for temporary storage on land and ship transportation in the CCS value chain, the current situation and future projection of liquefied CO₂ tanks were described. Assuming the material requirements of steel plate from tank design requirements, Nippon Steel's original brand of steel plate, WEL-TEN[™]780 for high strength with superior toughness steel and N-TUF[™]490 for low temperature use, were introduced. WEL-TEN[™]780 and N-TUF[™]490 are promising solutions for medium-pressure large CO₂ tanks, and for low-pressure large CO₂ tanks, respectively.

1. 緒 言

日本を含め主要な国々が2050年にカーボンニュートラルを掲げている。IEA (International Energy Agency) はカーボンニュートラルの達成のためには2050年に年38億~76億トン規模のCCS (Carbon dioxide Capture and Storage) が必要であると試算している¹⁾。経済産業省のCCS長期ロードマップ検討会がまとめた最終報告でも、このIEAの試算を環境認識の前提とし、2050年に日本で年1.2億~2.4億トンのCCSが必要になると想定している²⁾。以上のようにCCSはカーボンニュートラル達成のための必須技術と考え

られている。

CCSの主要な工程は、CO₂の回収、液化、一時貯蔵、輸送、昇圧、地下貯留である。輸送手段はパイプラインと船舶が考えられるが、CO₂の排出源と貯留地が一定以上離れる場合は、CO₂を液化して船で輸送の方がコスト面で有利との試算がある^{3,4)}。図1に船舶輸送の場合のCCSバリューチェーンの模式図を示す。

本報告では陸上での一時貯蔵や船舶輸送に用いられる液化CO₂タンクに焦点を当て、まずタンクの現状と今後の見通しについて述べる。次に想定される鋼板への要求特性について概説する。最後に大規模CCSバリューチェーンを

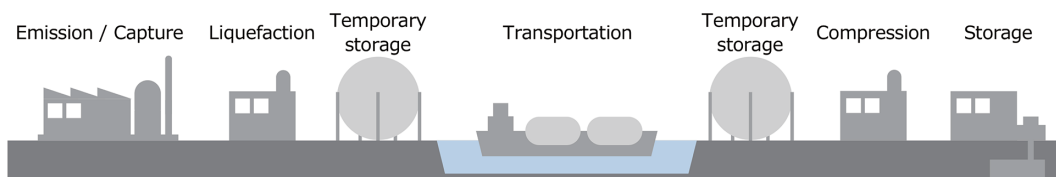


図1 CCSバリューチェーン例の模式図
Schematic diagram showing an example of the CCS value chain with ship transportation

* 鉄鋼研究所 高韧性鋼材研究部 高機能化研究室 研究第一課長 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

可能にする、大型の液化 CO₂ タンク製造に寄与できる日本製鉄(株)の鋼板ラインナップを紹介する。

2. 液化 CO₂ タンクの現状と今後の見通し

2.1 CO₂ の特徴

図 2 に CO₂ の状態図を示す。CO₂ は -56.6℃、0.518MPa で 3 重点を有すること、固体気体の相境界である昇華線を持つことが特徴である。また CO₂ は、LNG や LPG と異なり、大気圧下では液体にならない。LNG は -160℃ 付近、LPG は -42℃ 付近まで温度を下げることで大気圧下で液化するが、CO₂ は 3 重点の圧力である 0.518MPa 以上に加圧しなければ液化しない。このため、液化 CO₂ のタンクは加圧式タンクとする必要がある。

2.2 液化 CO₂ タンクの現状と今後の見通し

現在、液化 CO₂ タンクは主に食料品分野等で利用されており、設計圧力が 2MPa 程度のいわゆる“中圧”と呼ばれるタンクである。タンク容積は大きいものでも船用タンクで 1800m³、地上の貯蔵タンクで 900m³ 程度である⁹⁾。

今後の CCS の普及、及びカーボンニュートラル社会の実現には、CCS に係るコストの低減が重要である。このためには、大規模 CCS バリューチェーンを構築し、大量の CO₂ を高効率に輸送し、貯留することが不可欠である。船舶輸送では、一度に大量の CO₂ を輸送できる大型船がトン CO₂ 当たりの CAPEX (Capital Expenditure: 資本的支出) を抑制するとの試算もある⁹⁾。経済合理性を伴う CCS チェーン実現のためには、CO₂ 輸送船と、陸上の払い出し及び受け入れ設備の大型化が必要とされる。このような視点から、船用の輸送タンクと陸上の貯蔵タンクの大型化が求められている。

世界中で船舶輸送を含む CCS の検討が進められている。欧州の CCS プロジェクト Northern Lights の輸送船には、

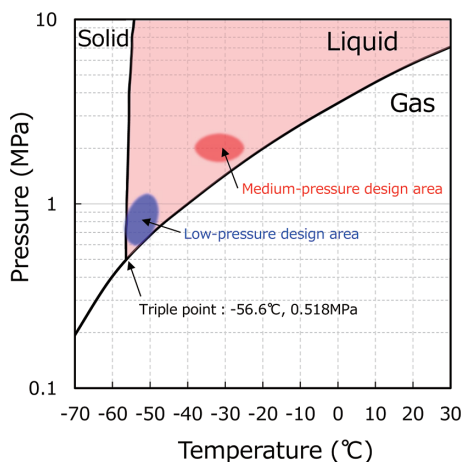


図 2 CO₂ の状態図と液化 CO₂ タンク設計圧力 / 温度範囲の例示

CO₂ phase diagram with an exemplary area of design pressure and design temperature for liquified CO₂ tanks

既に輸送技術として確立している中圧設計が採用される予定である。搭載されるタンクの設計圧力は 1.9MPa の中圧設計であり⁷⁾、中圧設計においてタンク大型化が指向されている。

一方、中圧タンクに対して、圧力を 3 重点直上の 0.7MPa ~ 1.0MPa 程度まで下げたいいわゆる“低圧”タンクが検討されている。大型化の視点では設計圧力は低い方が有利であるため、タンクの更なる大型化を可能にする技術として期待されている。低圧での輸送システムは現時点で未確立の技術であり、意図しない CO₂ の固体化を防ぐ安定操業技術などの技術開発が必要とされる⁹⁾。今後、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の実証プロジェクトで大容量・長距離輸送を目指したシステムの技術開発、実証試験が進められる予定である⁸⁾。

以上まとめると、足元の商用 CCS プロジェクトでは技術確立済みの中圧輸送システムでタンクの大型化が求められ、将来的には更なる大型化が可能な低圧輸送システムでのタンク大型化が求められている。

3. 鋼板に要求される特性

3.1 タンクの設計要件と鋼板特性の関係

タンクの圧力や容積といった設計要件と、鋼板に要求される特性は、種々の規格規定により関係づけられる。ここでは、タンクの設計要件から必要な鋼板特性を検討する考え方を整理する。

(1) 設計圧力と設計温度の関係

図 2 に示す状態図の気液相境界に従い、設計圧力に対応して温度が定まる。

(2) タンクの設計圧力、容積と鋼板の板厚、強度との関係

船用タンクを例に考える。例えば、日本海事協会の鋼船規則⁹⁾によると、内圧を受ける円筒胴板の所要厚さ T_r (mm) は次式で表される。

$$T_r = \frac{PR}{fJ - 0.5P} + \alpha$$

ただし、 f (N/mm²) は許容応力、 α (mm) は腐食予備厚、 P (MPa) は設計圧力、 J は継手効率、 R (mm) は胴の内半径である。タンクの形状を幾何学的に規定すると上式をタンク容積と関連づけることができる。同規則によると、内圧を受ける球形胴板の所要厚さも同型の数式で規定される。LPG や LNG といった地上タンクの液化ガス貯蔵指針にも上式と同型の関係式の記載があり^{10, 11)}、タンクの設計要件と鋼板の特性の関係が規定されている。

(3) 鋼板の要求特性を検討するフローチャート

(1)、(2) で述べた関係をまとめ、図 3 にタンクの設計要件と鋼板に要求される特性の関係を示す。タンク設計圧力とタンク容積が定めれば、鋼板の特性、即ち板厚、強度、韌性保証温度が決まる。

タンクに対し PWHT (Post-Weld Heat Treatment: 溶接後

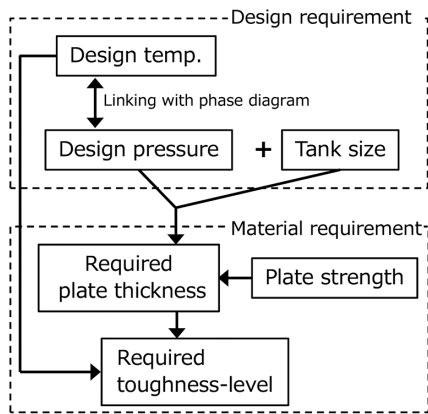


図3 タンクの設計要件と鋼板要求特性の関係

Flow chart showing the relationship between tank design requirements and material requirements for steel plate

熱処理) が求められる場合がある。船用では船級規則¹²⁾により設計温度が-10℃より低いIMOタイプCタンクの場合、陸上では関連法規¹³⁾により板厚が38mmより厚い場合、タンクにPWHTが求められる。これに伴い、鋼板もPWHT後に所定の材料特性を満足することが要求される場合がある。

3.2 鋼板特性の検討例

図3に示すフローに従い、必要な鋼板特性を検討した一例を以下に示す。

まず中圧を想定し、例えば設計圧力2.0MPaの場合を考える。設計温度は-30℃~-35℃程度と考えられる。高強度鋼ほど3.1(2)に示す式の許容応力 f は高くなるため、一定の鋼板厚において高強度鋼ほどタンク内半径、すなわちタンクの容積を大きくすることができる。Northern Lightsプロジェクトでは板厚50mm、TS770MPa級のEN10028 P690QL2鋼により、容積3750m³(設計圧1.9MPa、設計温度-35℃)の液化CO₂タンク製造が検討されている⁷⁾。

次に低圧を想定し、例えば設計圧力0.7MPaの場合を考える。設計温度は-50℃~-55℃程度まで低温化する。設計次第では、鋼板の靱性保証温度はより低温が求められる可能性がある。

図4に鋼板の強度と靱性保証温度の視点で、大型液化CO₂タンク用の鋼板に期待される特性をまとめた。強度範囲はTS500MPa~900MPa程度、靱性保証温度の範囲は-30℃~-100℃程度と想定される。強度、板厚、低温靱性、そしてコストを高度にバランスさせた最適な鋼板が求められる。

表2 WEL-TEN[®]780の化学成分規格値(板厚50mmの場合)
Specification of the chemical composition for WEL-TEN[™]780 with a thickness of 50mm

(mass%)												
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	B	Ceq
≤0.16	≤0.55	≤2.00	≤0.020	≤0.015	≤0.50	0.40-2.00	≤0.80	≤0.60	≤0.10	≤0.05	≤0.005	≤0.60

Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14
When necessary, additional elements may be added.

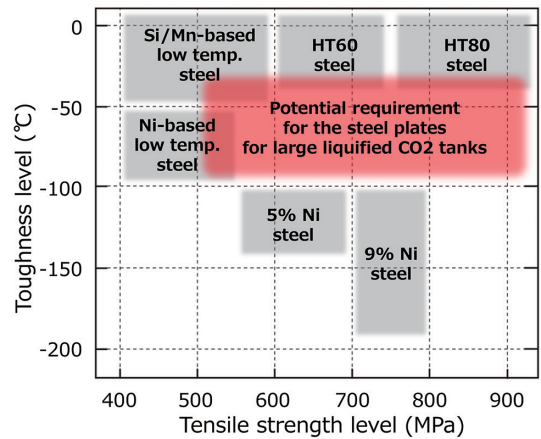


図4 液化CO₂タンク用鋼板に期待される強度及び靱性保証温度の範囲

The range of tensile and Charpy impact properties expected for the steel plate for large liquefied CO₂ tanks, compared with the conventional steel

4. 日本製鉄の鋼板ラインナップ

4.1 中圧大型タンク向け WEL-TEN[®]780

日本製鉄の独自規格であるWEL-TEN[®]シリーズは、溶接性に優れた高張力鋼として、これまでに圧力容器、ペンストック、橋梁、鉄骨、建産機等、幅広い用途に適用されてきた。表1にWEL-TEN[®]780の規格(板厚50mmの場合)を示す。母材強度はTS780MPa級で、母材靱性は-25℃を満足する。WEL-TEN[®]780と規格要求が整合する範囲で、EN10028 P690QL2、KE690、ASTM A517等の公的規格としての製造も可能である。

表2にWEL-TEN[®]780の化学成分の規格値(板厚50mmの場合)を示す。TS780MPa級の強度と良好なシャルピー衝撃特性を両立させるため、添加合金元素の最適化、焼き入れ性の調整を行った。TS780MPa級鋼では一般にPWHT後の脆化が懸念される。タンクのPWHTが求められる場合に対応するため、脆化抑制を狙い不純物であるP、Sの

表1 WEL-TEN[®]780の規格
Specification of mechanical properties for WEL-TEN[™]780

Spec.	Tensile test (1/4t-Transverse)			Charpy impact test (2mm-V)	
	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)
WEL-TEN [™] 780 (Ex.: thickness 50mm)	≥685	780/930	≥16	-25	≥47

低減を図った。

板厚 50mm の鋼板において、PWHT 後の母材の引張試験結果とシャルピー衝撃試験結果の例を表 3 に示す。上記成分対策に加え、適切な製造プロセスによる金属組織の最適化も併せて行い、中圧タンクの想定設計温度 (-30℃ ~ -35℃ 程度) より低い -40℃ でのシャルピー衝撃特性を確保した。

表 4 に PWHT 後のガスメタルアーク溶接継手 (K 型開先) のシャルピー衝撃試験結果の例を示す。溶接金属並びに Fusion line (FL) 位置で良好な試験結果が得られている。以上のように -40℃ で良好な強度、靱性を有することから、中圧大型タンクに適した鋼板と考えられる。

4.2 低圧大型タンク向け低温用鋼 N-TUF[®]490

日本製鉄の独自規格である N-TUF[®] シリーズは、低温・極低温環境下においても優れた靱性を有する鋼板として、これまでに液化石油ガスなどの貯蔵運搬容器、化学工業装置及び圧力容器等に使用されてきた。表 5 に N-TUF[®]490 の規格 (板厚 50mm の場合) を示す。母材強度は TS610MPa 級で、母材靱性は WES3003 を満足する。N-TUF[®]490 と規格要求が整合する範囲で、ASTM A738, ASTM A841, JIS SPV490 等の代表的な公的規格としての製造も可能である。

表 6 に N-TUF[®]490 の化学成分の規格値を示す。良好なシャルピー衝撃特性を得るため、添加合金元素の最適化、適切な製造プロセスによる金属組織の最適化を行った。板厚 50mm の鋼板において、PWHT 後の母材の引張試験結果とシャルピー衝撃試験結果の例を表 7 に示す。規格要求強度を満足し、想定設計温度 (-50℃ ~ -55℃ 程度) 以下の -60℃ で良好なシャルピー衝撃特性が得られている。

表 8 に PWHT 後の手棒溶接継手 (X 型開先) のシャルピー衝撃試験結果の例を示す。-60℃ において良好な試験結果

が得られている。以上のように -60℃ で良好な強度、靱性を有することから、低圧大型タンクに適した鋼板と考えられる。

5. 結 言

CCS において陸上での一時貯蔵や船舶輸送に用いられる液化 CO₂ タンクに焦点を当て、タンクの現状と今後の見通しについて述べた。タンクの設計要件から鋼板要求特性を想定し、日本製鉄の鋼板について紹介した。中圧大型タンク向け鋼板には日本製鉄規格の溶接構造用高張力鋼 WEL-TEN[®]780 が、低圧大型タンク向け鋼板には日本製鉄規格の低温用鋼 N-TUF[®]490 がそれぞれ 1 つの解になると考えられる。日本製鉄は、大型液化 CO₂ タンクを実現する鋼板の提供を通じて、大規模 CCS の実現と日本そして世界のカーボンニュートラルに貢献していく。

表 5 N-TUF[®]490 の規格
Specification of the mechanical properties for N-TUF[™]490

Spec.	Tensile test (1/4t-Transverse)			Charpy impact test (2mm-V)	
	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J)
N-TUF [™] 490 (Ex.: thickness 50mm)	≥490	610/740	≥21	According to WES3003	

表 6 N-TUF[®]490 鋼の化学成分規格値
Specification of the chemical composition for N-TUF[™]490
(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
≤0.16	0.15-0.35	0.90-1.60	≤0.030	≤0.030	≤0.60	≤0.40	≤0.30	≤0.08

When necessary, additional elements may be added.

表 3 WEL-TEN[®]780 の母材機械特性の例
An example of the mechanical properties of the base metal for WEL-TEN[™]780

Condition	Plate thick. (mm)	Tensile test (Round, φ14mm)			Charpy impact test (2mm-V, 1/2t-Trans.)	
		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J) (Each-Ave.)
After PWHT	50	758	811	24	-40	103/103/123-110

表 4 溶接継手シャルピー衝撃試験結果の例
An example of the Charpy impact property of the welding joints for WEL-TEN[™]780

Condition	Plate thick. (mm)	Charpy impact test (2mm-V, Surface)		
		Test temp. (°C)	Weld metal (Each-Ave.)	Fusion line (Each-Ave.)
After PWHT	50	-40	98/104/89-97	202/180/137-173

表 7 N-TUF[®]490 鋼の母材機械特性の例
An example of the mechanical properties of the base metal of N-TUF[™]490

Condition	Plate thick. (mm)	Tensile test (Round, φ14mm)			Charpy impact test (2mm-V, 1/2t-Trans.)	
		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Test temp. (°C)	Absorbed energy (J) (Each-Ave.)
After PWHT	50	579	669	30	-60	60/110/163-111

表 8 溶接継手シャルピー衝撃試験結果の例
An example of the Charpy impact property of the welding joints for N-TUF[™]490

Condition	Plate thick. (mm)	Charpy impact test (2mm-V, Surface)		
		Test temp. (°C)	Weld metal (Each-Ave.)	Fusion line (Each-Ave.)
After PWHT	50	-60	120/100/119-113	112/76/110-99

参考文献

- 1) IEA: World Energy Outlook (2021)
- 2) 経済産業省：CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ、2023 年 3 月
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/20230310_report.html
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)：「CCUS 研究開発・実証関連事業 / 苫小牧における CCUS 大規模実施試験」将来計画の検討・準備等の報告書, 2021 年 3 月
https://www.nedo.go.jp/koubo/EV2_100225.html
- 4) 経済産業省：CCS 長期ロードマップ検討会, 第 3 回 CCS 事業コスト・実施スキーム検討 WG, 資料 4 CCS バリュチェーンコスト (RITE), 2022 年 10 月
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/jisshi_kento/003.html
- 5) 山地憲治：二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 技術の最新動向. シーエムシー出版, 2022 年 6 月
- 6) BEIS: Shipping CO₂; UK Cost Estimation Study (2018)
- 7) Northern Lights FEED Project RE-PM673-00057 (2020)
- 8) 田中太一 ほか：三菱重工技報. 59 (2), (2022)
- 9) 日本海事協会：鋼船規則・同検査要領 D 編 (2022)
- 10) 日本ガス協会：LPG 貯蔵指針. JGA 指 -106-21
- 11) 日本ガス協会：LNG 地上式貯蔵指針. JGA 指 -108-19
- 12) 例えば 日本海事協会：鋼船規則 N 編 (2022)
- 13) 例えば 特定設備検査規則 別添 1 特定設備の技術基準の解釈



臼杵博一 Hirokazu USUKI
鉄鋼研究所 高靱性鋼材研究部
高機能化研究室 研究第一課長
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



住谷早俊 Satoshi SUMIYA
東日本製鉄所 品質管理部
君津厚板管理室 主査



吉村信幸 Nobuyuki YOSHIMURA
東日本技術研究部 鋼材研究室
主幹研究員 工博



猪狩玄樹 Haruki IGARI
厚板・建材事業部 厚板技術部
厚板商品技術室 主幹



中西大貴 Daiki NAKANISHI
鉄鋼研究所 高靱性鋼材研究部
高機能化研究室



奥島基裕 Motohiro OKUSHIMA
厚板・建材事業部 厚板技術部
厚板商品技術室 上席主幹



大久保武史 Takeshi OKUBO
東日本製鉄所 品質管理部
鹿島厚板管理室 主幹