

海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業のための 調査研究

令和5年3月

一般財団法人 日本海事協会

株式会社 ClassNK コンサルティングサービス

概要

今後、需要拡大が見込まれる LNG 燃料船の LNG 燃料タンクの省 CO2 な製造プロセスの他地域への水平展開を通じた脱炭素化を実現するため、LNG 燃料タンクの製造に必要な設備、環境、人材育成や安全対策等に関する事項、LNG 燃料タンクの省 CO2 な製造プロセス及びこれらの事項に係る他の地域・事業者への展開の方法に関する調査を行い、報告書に取り纏めた。

Summary

In order to achieve decarbonization through horizontal deployment to other regions of the CO2-saving manufacturing process for LNG fuel tanks of LNG fueled ships, for which demand is expected to grow rapidly in the near future, investigation of the following matters is conducted and summarized them in the report:

- facilities, environment, human resources development, safety measures, etc. required for the manufacture of LNG fuel tanks,
- the CO2-saving manufacturing process for LNG fuel tanks,
- methods of deployment to other regions and manufacturers related to these matters.

目次

1.	ガス燃料タンク概説.....	1
1.1	はじめに	1
1.2	貯蔵方式の種類と特徴.....	2
1.3	就航実績データの調査.....	3
1.4	9%Ni 鋼の特徴（取り扱い及び溶接について）	4
1.4.1	9%Ni 鋼特徴と取扱注意事項	4
1.4.2	9%Ni 鋼溶接管理における特徴と注意事項	4
2.	LNG 燃料タンク製造の環境整備に関する調査.....	7
2.1	IGF コードにおける動向調査整理	7
2.1.1	IGF コードの要件	7
2.1.2	LNG 燃料タンクに使用される材料に関する動向.....	8
2.1.3	今後の課題	10
2.2	必要な設備投資.....	10
2.2.1	素材受入（含む運搬・保管）	10
2.2.2	切断・開先加工・曲げ加工.....	10
2.2.3	小組・中組・大組・総組	11
2.2.4	艀装	11
2.2.5	耐圧試験.....	11
2.2.6	タンク内部クリーニング	11
2.2.7	容量計測・ポンプ搭載・タンク外艀装・レベル計搭載	12
2.2.8	塗装・防熱	12
2.2.9	完成検査・出荷準備.....	12
2.3	人材育成.....	15
2.3.1	溶接技術者（施工者）	15
2.3.2	生産設計技術者	15
2.3.3	製造検討技術者	16
2.3.4	曲げ加工技術者（鏡板メーカー）	16
2.3.5	防熱施工者	16
2.4	安全対策.....	16
2.4.1	倒壊・落下による挟圧	16
2.4.2	溶接作業、ガス切断の保護.....	17
2.4.3	墜落	17
2.4.4	酸欠	17
2.4.5	熱中症.....	17

3.	省 CO2 なタンク製造方法に関する整理・検討事項の調査.....	18
3.1	タンク製造環境を整備する上で必要と考えられる製造基準に関する検討.....	18
3.1.1	9%Ni 鋼補修基準	18
3.1.2	9%Ni 鋼溶接前予熱に関する基準.....	21
3.1.3	非破壊試験（RT：放射線透過試験）代替	22
3.1.4	タンク水圧試験における水張要領に関する基準.....	25
3.1.5	タンク内クリーニング基準.....	26
3.1.6	タンク内クリーニング完了後の環境管理基準.....	34
3.2	タンク製造に関する規則要件、検査、ボトルネックの整理・検討.....	36
3.2.1	材料(IGF コード 7.4、16.2)	36
3.2.2	溶接及び非破壊試験（IGF コード 16.3）	40
3.2.3	水圧試験及び漏洩試験（IGF コード 16.5）	43
3.2.4	ガストライアル及び燃料満載試験（IGF コード 16.5）	44
3.2.5	その他のタンク関連機器（IGF コード 2.1）	45
3.2.6	ボトルネックの整理・検討.....	46
3.3	LNG 燃料タンクの防熱に関する調査.....	48
3.3.1	タンク防熱施工業者の施工基準の調査.....	48
3.3.2	施工環境制約（条件）と国内気候環境との関連性（影響）の把握.....	49
3.3.3	LNG 燃料タンク防熱施工能力拡大のための課題調査.....	50
3.3.4	省 CO2 な製造工程の整理・検討.....	51
3.3.5	省 CO2 な製造工程に必要とされる設備の整理・検討.....	51
3.3.6	国内施工環境に適した防熱施工方法	53
3.4	LNG 燃料タンクの製造工程（曲げ・溶接加工工程等）に関する調査.....	53
3.4.1	LNG 燃料タンクの製造工程について	53
3.4.2	省 CO2 な製造工程の検討	61
3.5	現地調査.....	63
4.	他の地域・事業者への展開に係る調査等	67
4.1	はじめに（取り纏めの方法）	67
4.2	省 CO2 な製造プロセスを横展開する際の課題及びその対応策.....	67
4.2.1	製造事業所の立地環境	67
4.2.2	製造設備.....	67
4.2.3	人材・育成	68
4.2.4	原材料・資材.....	68
4.2.5	規制面.....	69
4.2.6	横展開.....	69
4.3	海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業採択事業者における地方自治体との連携	70
4.3.1	今治造船株式会社及び多度津町の事例.....	70
4.3.2	株式会社新来島サノヤス造船及び倉敷市の事例.....	71

4.3.3	その他の事例.....	74
4.4	有識者へのヒアリング.....	76
5.	まとめ.....	78

参考文献

1. ガス燃料タンク概説

1.1 はじめに

世界全体の地球温暖化対策に関しては、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）の下で、温室効果ガス（GHG）排出対策について、議論がなされてきた。

国際海運の分野では、排出される GHG のほとんどが CO₂ であり、世界の海上輸送需要が今後も増加傾向にあることから、国際海運からの CO₂ 排出量も増大すると予測されており、排出削減対策を講じることが求められている。国際海事機関（IMO）においても 2018 年 4 月に「GHG 削減戦略」が採択され、2008 年を基準年として、2030 年までに国際海運全体の燃費効率（輸送量あたりの CO₂ 排出量）を 40% 以上改善し、2050 年までには GHG 排出量を 50%以上削減、さらに最終的には今世紀中なるべく早期に GHG 排出ゼロを目指すことが数値目標として取り決められた。本戦略の最終目標である 2050 年以降のゼロエミッション達成のためには、化石燃料中心の従来燃料から、低・脱炭素燃料への切り替えを進める等の取り組みを加速させることが喫緊に必要と考えられている。

低・脱炭素燃料に関しては、アンモニアや水素等の合成燃料、蓄電池、バイオ燃料等世界中で検討が進められており、それぞれ一長一短あるが、2030 年の目標達成を見据えた当面の短期的解決策としては、技術的に実用化済となっている LNG、LPG、メタノール等に限定される。この中でも LNG は、短期的に最も有望な選択肢であることから、アンモニアや水素燃料等のゼロエミッション燃料が普及するまでのトランジション燃料として注目されており、昨今、LNG 燃料船の建造が増加傾向にある。

これまで LNG 運搬船においては、二元燃料（重油及び天然ガス）に対応したボイラ又はエンジンを装備し、貨物タンクからのボイルオフガス（天然ガス）を燃料として使用しているが、天然ガス燃料船の検討は液化ガス運搬船以外でも天然ガスを燃料として積極的に利用しようとするものである。

Clarksons 社の統計（Alternative Fuels Uptake October 2021）によると、2021 年 10 月現在、LNG 燃料船（LNG 運搬船を含まない）は、世界で 219 隻運航されており、全体の 0.4%を占める。発注残に関しては、全体の 11.7%を占めるに至っている。

2021 年 10 月時点		全体	内、LNG 燃料船（割合）
LNG 運搬船を含まない	船腹量	55,620 隻	219 隻（0.4%）
	発注残	2,967 隻	346 隻（11.7%）
LNG 運搬船を含む	船腹量	56,285 隻	676 隻（1.2%）
	発注残	3,135 隻	512 隻（16.3%）

また、Clarksons 社の予測（September 2021 Shipbuilding & Shipping To 2030 Seminar）によると、LNG 燃料船（LNG 運搬船を含む）は、2030 年時点で約 6,000 隻まで拡大すると見込まれている。これは、世界のフリート（2,000DWT/GT 以上）の約 10.7%に相当する。

世界有数の海運立国であるのみならず、造船国でもある我が国においては、LNG 燃料船の安定的な供給に加え、省 CO₂ な製造方法を確立・普及することにより、海事分野のカーボンニュートラルの実現に寄与する必要がある。

本項では、我が国造船業における LNG 燃料船の安定的な供給の可否を左右する主な要因であるガス燃料タンクに関して、その貯蔵方式の種類と特徴について、概説するとともに、就航船における実績について紹介する。

1.2 貯蔵方式の種類と特徴

LNG 燃料タンクには、液化ガス運搬船における貨物タンクの要件（IGC コード）と同等の規則である、ガス燃料及び低引火点燃料を使用する船舶の安全に関する国際規則（IGF コード）、が適用される。規則で認められているガス燃料タンクの種類は、3 種類の独立型タンク（Type A、B、C）とメムブレタンクの 4 種類であり、上記のタンク型式のうち、大型液化天然ガス運搬船の貨物タンクとして一般に採用されているものは、独立型 Type B（球形モス方式、SPB 等）とメムブレのタンクである。一方、ガス燃料船の燃料タンクとして採用されているのは、ほとんどが独立型 Type C である。

独立型 Type B の球形タンクは積付け効率が悪く、また、メムブレ方式はスロッシングの問題があることから、ガス燃料船で採用される可能性が最も高いのは、独立型 Type C（円筒形）と考えられる。

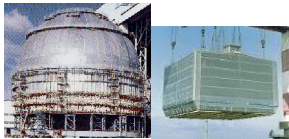
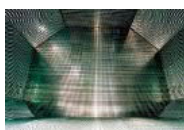
ガス燃料タンクの種類と特徴を表 1.1 に示す。

各種類で長短あるが、まず特徴として挙げることができるものが、タンク容量制限である。大型のタンクとなると、独立型 Type B 又はメムブレ、小型のタンクであれば、独立型 Type C とすることが一般的である。独立型 Type C は、その特性上、容積効率の面から、タンク容量 3,000m³ 程度までとすることが一般的である。ただし、この容量制限は、LNG 燃料タンクを複数配置することで対応可能である。複数タンクとすることで、システムの複雑化や設置スペースを取るというデメリットがある反面、1 つのタンクに問題が起きても残りのタンクで運航継続可能であるという冗長性のメリットがある。

形状について、独立型 Type C は、円筒形のタンクとすることが一般的だが、独立型 Type B やメムブレは、方形のタンクとすることが可能である。このため、船内区画にタンクを配置する場合には、デッドスペースが生じにくい独立型 Type B 又はメムブレが有利になる。

設計圧力について、IMO IGF コードの要件によると、独立型 Type B 及びメムブレに関しては、0.07MPa を超える設計圧を設定することが原則禁じられている。独立型 Type C ではこの制限はなく、1.0MPa までの高圧化が可能である。このタンク設計圧力の上限は、ボイルオフガス（BOG）の処理にも関係を及ぼす。LNG は、-163℃に冷却することで液化され、ガス燃料タンクに搭載されているが、タンク外部からの入熱等により、LNG 燃料タンク内部は、天然ガスが蒸発し続けており、この蒸発した天然ガス（BOG）をタンク内に押しとどめておくと、タンク内圧力が上昇し続ける。独立型 Type C タンクであれば設計圧力を高くすることが可能であるため、一定程度の期間この BOG をタンク内に留めておくことが可能になる。逆に独立型 Type B タンクやメムブレタンクでは、BOG を短期間しかタンク内の保持できず、BOG を燃料として消費する等により処理し続けることが必要となる。

表 1.1 ガス燃料タンクの種類と特徴

種類	独立型 Type A	独立型 Type B	独立型 Type C	メムブレ
形状				
設計蒸気圧	$<0.07\text{MPa}$ (方形タンクの場合)	$<0.07\text{MPa}$ (方形タンクの場合)	高圧化が可能	$\leq 0.025\text{MPa}$
二次防壁の要否	完全二次防壁	部分二次防壁	二次防壁不要	完全二次防壁
LNG 貨物タンク実績	なし	有り (モス球形タンク) (SPB タンク)	有り (蓄圧式)	有り
LNG 燃料タンク実績	なし	有り	有り	有り
積付け効率	良い	球形：悪い 方形：良い	円筒形： 比較的悪い	良い
その他の特徴	コスト大	信頼性大	信頼性大	スロッシングの問題有り

1.3 就航実績データの調査

LNG 燃料船の就航船での実績を調査するために、Clarkson Fleet Data（2023 年 1 月時点）を用いて調査を行った。当該データにおいて、「LNG Bunker Tanks 1 System」に記載のあるタンクの種類を実績とみなして集計を行った。

就航実績データにおけるタンクの種類及び採用数を表 1.2 に示す。

当該就航実績データの集計結果から分かる通り、LNG 燃料船の燃料タンクとしては、独立型 Type C が最も多く採用されている。なお、メムブレ及び独立型 Type B タンクが採用された 30 隻のうち、28 隻は、ここ数年内に就航した船長 350m を超えるメガコンテナ船であり、そのタンク容量も 12,000m³ 以上と大容量のものとなっている。

我が国で LNG 燃料船を安定的に建造するためには、独立型 Type C タンクの安定供給が必要不可欠である。よって、次章以降は、Type C タンクに焦点を当てた調査内容を記載する。

表 1.2 就航実績データにおけるタンクの種類及び採用数(計 290 隻)

タンクの種類	採用数
メムブレ	15
独立型 Type B	11
独立型 Type C	264

1.4 9%Ni 鋼の特徴（取り扱い及び溶接について）

1.4.1 9%Ni 鋼特徴と取扱注意事項

本事業の対象として想定している LNG 燃料は、常圧にて-162℃の極低温状態でありタンクの材料として、この温度に適合した材料を選定する必要がある。

一般的に、結晶構造が面心立方格子（FCC）であるアルミやオーステナイト系ステンレス鋼は極低温環境でも脆性破壊を生じないため、極低温環境での信頼性が高い材料であるが、炭素鋼に比べて強度が低いため、タンクの板厚が厚くなる傾向を示すが、板厚の厚い領域では供給可能なメーカーが限られ、調達性や取り扱いが制限される。これに対し、炭素鋼はアルミやオーステナイト系ステンレス鋼よりも板厚が厚い領域まで市場性があるものの、結晶構造が体心立方格子であるため、低温になる程、脆性破壊し易くなる傾向を示す。

このため、陸上の LNG タンクなどの大型の LNG タンクに対しては、合金元素の添加・不純物の低減・熱処理によって炭素鋼の極低温域までの使用範囲拡大に関する研究開発が進められてきた。この結果、低炭素含有でかつ、Ni を 9%添加させることで LNG 温度のような極低温での脆性破壊のリスクを払拭した 9%Ni 鋼が開発され、陸用の LNG タンクへ適用されてきた。近年ではさらに船用の LNG 燃料タンク材料への適用が進んでいる。

9%Ni 鋼は、製鋼時の Ni 等の添加・不純物の低減、圧延後の熱処理時に強度並びに低温靱性のある組織を生成することにより低温での靱性を実現した鋼材である。

9%Ni 鋼には、磁化し易く、切り欠き感受性が高いという特徴があり、さらに熱処理によって強度と低温環境での靱性を両立させた鋼材であるため、取扱に次のような注意が必要である。

- ①他の炭素鋼材料と混同しないよう注意が必要。
- ②鋼板の表面にキズをつけないよう注意が必要。
- ③熱間での歪取処理が適用不能のため、ストロングバック等の溶接変形防止措置が必要。
- ④溶接前に残留磁気の確認が必要。
- ⑤溶断後に溶断面の Ni リッチ層の除去が必要。
- ⑥吊具、治具等でのマグネットの利用禁止。

1.4.2 9%Ni 鋼溶接管理における特徴と注意事項

極低温で溶接金属の強度と靱性保証のため、溶接材料は、Ni 量 60～70%程度の高 Ni 合金のものをを用いる。9%Ni 鋼用溶接材料は使用実績にもとづいて JIS に規定されている。

被覆アーク溶接棒は JIS Z 3225 に 70Ni-15Cr-Mo-Fe のインコネル系と 75Ni-20Mo-W のハステロイ系がある。ティグ溶接用棒およびワイヤとして Z 3332 に 75Ni-20Mo-W のハステロイ系の規定があり、SAW 用の 75Ni-20Mo-W のハステロイ系ワイヤおよびフラックスが Z 3333 に規定されている。ここで SAW 用フラックスについては成分の規定は無いが、市販のものは機械的性質、耐高温割れ性確保の観点から高塩基性で設計されている。これら溶接材料は日本国内で主に使用されているもので、海外では他にインコネル 625 系なども使用されている。特に 75Ni-20Mo-W のハステロイ系溶接線材は 9%Ni 鋼用として日本で開発されたもので、耐高温割れ性に優れ、極低温でも高い靱性・引張強度を有し、自動溶接に特有の厳しい条

件下においても優れた品質の溶接金属が得られるという特徴を有している。

これら溶接材料は 9%Ni 用とステンレス用のもので外見上非常によく似ているので間違わないよう注意が必要である。万が一 9%Ni 鋼板にステンレス用の溶接材料を使用すると、母材と溶接部の収縮量が異なる為割れが発生するおそれがある。

高 Ni 合金材料による 9%Ni 鋼の溶接に際しては、特に溶接金属は完全オーステナイト組織であるため高温割れが発生しやすいこと。基本的には異材溶接であるため、母材成分による溶金成分の希釈により引張強度、靱性等機械的性質が変化しやすいこと。Ni 基合金は炭素鋼に比較して電気抵抗が大きい為、SAW（サブマージアーク溶接）での適切なワイヤ溶融速度の確保、SMAW（被覆アーク溶接）での棒焼け防止などの観点から、適正溶接電流範囲が炭素鋼よりも低めであることなど高 Ni 合金材料の特徴を理解しておく必要がある。

9%Ni 鋼の溶接は上述した高 Ni 合金材料を使用した異材溶接であり、溶接方法、溶接材料およびサイズ、板厚、継手形状などによって異なるが次のような配慮が必要になる。

① 9%Ni 鋼は磁性を帯びやすいので、溶接部の残留磁気が高いと、特に直流溶接では、磁気吹きが生じやすく溶接不能となる。そのため、鋼板の製造段階で脱磁処理を行い、運搬過程や現地での取扱いでもマグネットリフトなどの使用の禁止や高圧線の下など強磁化環境での保管を避けるなど、着磁させない管理が重要である。また溶接作業中においてキャプタイヤや電線ケーブルを鋼板上で巻いて通電することによる着磁に留意し、加工後においても残留磁気の確認が必要となる。

② 溶接材料に Ni 合金を使うため、高温割れが発生しやすい。高温割れ防止の観点から、特に厚板の溶接では開先角度は大きめにとる。開先面の油や汚れは完全に除去する。溶接速度や溶接電流が過大にならないようにする。水分による溶接欠陥リスク低減を目的とする加熱以外の予熱は基本的には行わず、パス間温度は 175℃程度以下が望ましい。溶接の始末端等のクレータには割れが発生するものとしてグラインダ研削など適当なクレータ処理を行う。特に、初層のクレータに「割れ」が生じやすく、被覆アーク溶接ではビードごとに入念なクレータ処理が必要である。

③ 9%Ni 鋼は調質鋼であるため溶接入熱は低めが好ましく、溶材により溶接入熱が制限されるため作業者への周知が必要である。

④ 機械的性質の特に引張強度確保の観点から、母材成分による溶金成分の希釈が過大にならないよう溶接速度、溶接電流、パス間温度が過大にならないようにする。特に希釈が大きくなりやすい 10mm 以下の薄板の溶接では注意を要する。

⑤ 溶接材料の融点が母材に比べて 100℃以上低く、炭素鋼での一般的な共金溶接よりも開先部での溶込みが浅くなり、融合不良が発生し易い。また同じ理由で上向き、立向きおよび横向き姿勢では溶接ビードが垂れ易く、適切な溶接条件、運棒方法、オシレート条件などの選定とその実現のための適切な溶接施工条件管理が必要である。

⑥ 融合不良、スラグ巻込み、ブローホール等欠陥の無い健全な溶接継手を得るために、吸湿しないような溶接材料の保管・管理および使用前の SAW 用フラックスや被覆アーク溶接棒の乾燥をはじめとして、開先面の水分、錆の除去・清浄化等前処理も必要である。さらに、開先形状の適正化や溶接電流、電圧、速度の選定が重要である。また、SMAW ではアーク長をできるだけ短く保つなどの注意が必要である。溶接材料の乾燥および電流、電圧等溶接条件の詳細については溶接材料ごと異なるの検討が必要となる。

⑦ 母材と溶接金属で放射線の透過度が違うため、放射線透過試験では、調整用マスクの使用が必要である。また板厚が 30mm を超えてくると可搬式の X 線源を用いた場合、必要な照射時間が長時間となる。そのため板厚が 35mm 程度を越してくる場合には、300 kVp 以上の高出力線源の採用が必要となり、それに伴う放射線被爆防止のための十分な安全管理が要求される。

溶接部は異種継手であること、溶接金属の高 Ni 合金はオーステナイト組織であり、以前は超音波探傷試験の適用が欠陥検出能力の面で困難であるとされていた。しかし情報処理技術の高度化による TOFD 法やフェイズドアレイ法といった超音波探傷試験技術の進歩により、ASME 規格に基づいた放射線透過試験代替検査として適用されてきている。

2.1.1 IGF コードの要件

表 GF7.3 設計温度が-55℃より低く、-165℃⁽²⁾までの燃料タンク、二次防壁及びプロセス用圧力容器用の板、型材及び鍛造品⁽¹⁾。ただし、最大厚さ 25 mm^{(3),(4)}とする。

最低設計 温度 (°C)	化学成分 ⁽⁶⁾ 及び熱処理	衝撃試験温度 (°C)
-60	1.5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又はTMCP ⁽⁶⁾	-65
-65	2.25%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又はTMCP ^{(6),(7)}	-70
-90	3.5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又はTMCP ^{(6),(7)}	-95
-105	5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し又は焼入れ焼戻し ^{(6),(7),(8)}	-110
-165	9%ニッケル鋼 - 2回焼ならし後焼戻し又は焼入れ焼戻し ⁽⁶⁾	-196
-165	オーステナイト系ステンレス鋼 - 例, 304, 304L, 316, 316L, 321 及び 347 タイプ, 固溶化処理 ⁽⁹⁾	-196
-165	アルミニウム合金 ⁽¹⁰⁾ - 例, 5083 タイプ 焼なまし	要求せず ^a
-165	オーステナイトF _e -Ni合金 (36%ニッケル鋼) 承認された熱処理	要求せず ^a

引張及び衝撃試験要件

試験頻度:

板 ピースごとに試験

形材及び鍛造品 ロットごとに試験

じん性 (Vノッチシャルピー衝撃試験) :

板 横方向試験片, 最小平均吸収エネルギー値 (KV) 27J

形材及び鍛造品 縦方向試験片, 最小平均吸収エネルギー値 (KV) 41J

それ以外の材料を使用する場合には、IGF コード、すなわち条約の規定外となるため、代替材料を使用した設計として、原則として船級協会の承認だけでなく、主管庁承認が必要である。

-2. 低引火点燃料の装置は、燃料、設備及び配置について、次の(1)又は(2)によって差し支えない。ただし、当該燃料、設備及び配置は、本編の目的及び機能要件に適合し、関連各章に規定される安全性と同等の安全性を確保できる場合に限り、採用することができる。

(1) 本編に規定されるものと異なるもの。

(2) 本編に特に規定されていない燃料を使用する設計とすること。

-3. 代替設計の同等性については、1.1.2 の規定に従って立証され、国会及び主管庁の承認を得なければならない。なお、本編に特に規定される艤装、材料、設備、装置、機器の付着品、機器の部品及びその型式等に代えて、運用上の手段又は方法を採用することは認められない。

2.1.2 LNG 燃料タンクに使用される材料に関する動向

上述の通り、現状 LNG 燃料タンクに使用できる材料は、鋼船規則 GF 編 表 GF7.3 に定める要件に適合したものでなければならず、LNG の輸送時の温度（常圧、 -162°C ）の観点から、一般的に 9%ニッケル鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金、オーステナイト Fe-Ni 合金のいずれかとなる。（ただし、オーステナイト Fe-Ni 合金については、一般的にメンブレンタンク向けの材料で、Type C タンクには使用されない）

その他の材料を LNG 燃料タンクに使用するには、代替設計の船級及び主管庁承認が必要となる。船級及び主管庁の了承を得るためには、上述の規定に従い、その材料使用に関する“同等の安全性”（データを含む）が示される必要がある。

各材料についての性質の特徴を以下まとめる。

<9%ニッケル鋼>

- ・ 強度に優れる。
- ・ 価格については市場の Ni 価格による。
- ・ 強度に優れる分、板厚を薄くすることができるため、タンクあたりの材料を少なくできる。
- ・ 溶接性については、熱処理鋼のため、入熱制限が厳格で現行の高能率溶接が適用できない。また全姿勢に対応した半自動溶接向溶接材料が無く、特に上向き姿勢は SMAW や GTAW で施工する必要がある。加えて、溶接金属の強度が低いアンダーマッチの継手となるため、許容応力が溶接金属強度で決定されてしまう。
- ・ 溶接施工要領はステンレス鋼よりも炭素鋼に近いので、造船所にとっては慣れている溶接作業である。

<オーステナイト系ステンレス鋼>

- ・ 9%ニッケル鋼に比べると強度が低い。
- ・ 同じ設計圧力のタンクを製作するためには、9%ニッケル鋼に比べて板厚を厚くする必要がある。
- ・ 密度は 9%ニッケル鋼と同等のため、タンクあたりの素材重量は大きくなり、その分の材料費も高くなる。
- ・ 溶接性については、9%ニッケル鋼のような入熱制限はない。
- ・ 溶接の際のシールドガスがアルゴン系の不活性ガスということもあり、造船所にとっては慣れない溶接作業である。
- ・ 溶接材料については各姿勢に対応したものが揃っており、9%ニッケル鋼のような制限はない。

<アルミニウム合金>

- ・ オーステナイト系ステンレス鋼よりも更に強度が低い（約 1/3 程度）
- ・ 同じ設計圧力のタンクを製作するためには、強度がオーステナイト系ステンレス鋼の約 1/3 のため、単純にはオーステナイト系ステンレス鋼の約 3 倍の板厚が必要になる。
- ・ 密度はオーステナイト系ステンレス鋼の約 1/3 であるが、タンクの設計圧力を同等にするには約 3 倍の板厚が必要のため、タンクあたりの素材重量はオーステナイト系ステンレス鋼と同等になる。
- ・ 溶接性については、9%ニッケル鋼のような入熱制限はない。

上述の各材料の特性をまとめると、9%ニッケル鋼は強度に優れる一方で、溶接材料の種別が限られることを含めて総合的に溶接性は良くない特性がある。またオーステナイト系ステンレス鋼やアルミニウム合金は、9%ニッケル鋼より溶接についての制限が少ないメリットがあるが、強度が低く、同じ設計圧力のタンクを製作するためには板厚を大きくする必要が生じ、その分の材料費も大きくなるデメリットがある。

そのため、現在 Type-C タンクの材料として最も使用されているのは 9%ニッケル鋼であり、**結論として、当面の間はガス燃料タンクの材料は「9%ニッケル鋼」が主流となると思われる。**

また現在 IGF コードに規定されていない、新しい LNG 燃料タンク材料に関する最新の動きは、以下の通りである。

<7%ニッケル鋼>

- ・ 日本では、9%ニッケル鋼よりも価格競争力のある 7%ニッケル鋼の開発、実船適用が予定されている。
- ・ 現状 7%ニッケル鋼は IGF コードに規定されていない材料であるため、上述の代替設計承認が必要となる。7%ニッケル鋼が国際規格（IGC/IGF コード）として登録されて一般的に使用されるためには、実船での実証試験の結果等を踏まえた上で、今後日本として IMO への提案が必要になる。

<高マンガン鋼>

- ・ 韓国では、国として高マンガン鋼の使用を推進している。
- ・ 既に内航船で実船での適用実績が有り、他にも搭載する船の計画が広がっている。
- ・ 国際規格への登録に関しては、IMO および IACS (Rec. 169) において、高マンガン鋼のガイドラインを作成済み。IMO の海上安全委員会においても高マンガン鋼が承認され、2026 年に IGC/IGF コードに記載される見込みである。正式に IGC/IGF コードに登録後は、上述の主管庁承認なしで LNG 燃料タンク材料として使用できるようになる。その際の規則要件については、ガイドライン MSC Circ.1599 の規定を満足する必要がある。
- ・ 高マンガン鋼については、溶接施工時にマンガンヒュームが発生することから、日本においては厚生労働省が定めたマンガン規制の対象となり、取り扱いに際しては発散抑制措置が必要になると思われる。そのため、発散源を密閉する設備や換気装置などの大規模な設備投資が課題として想定される。

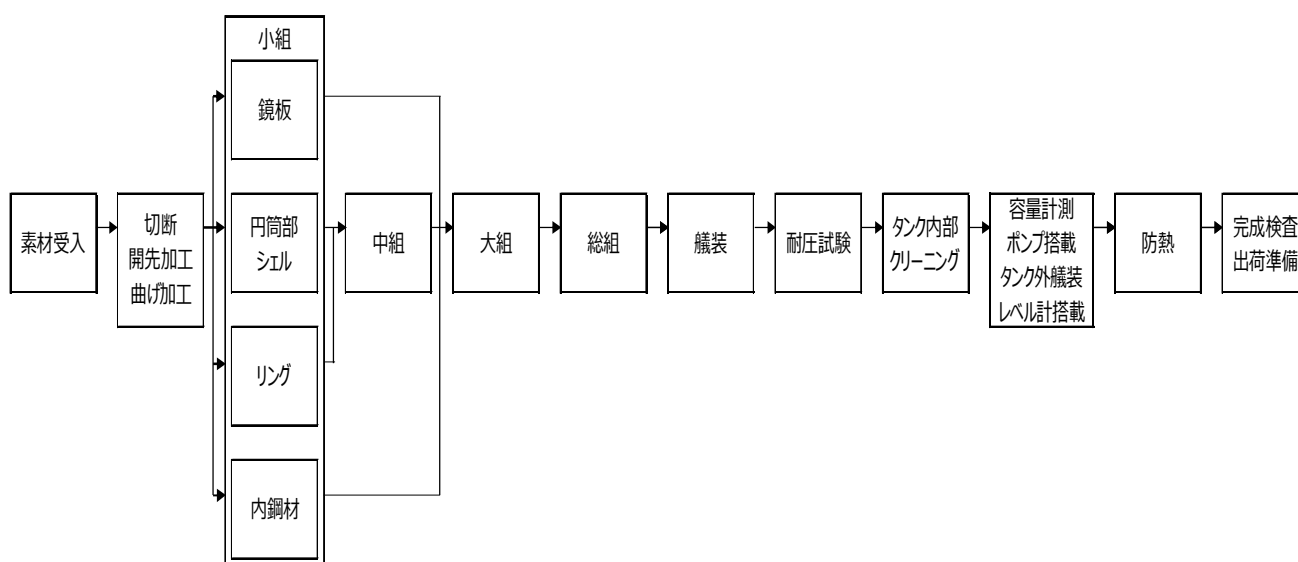
2.1.3 今後の課題

今後 LNG の需要拡大が予想されるが、当面の間、LNG 燃料タンクに使用される材料の主流と思われる 9%Ni 鋼に関して、少なくとも国内で供給できる製鉄会社の材料生産量には限りがあり（現在国内で船用向けに 9%Ni 鋼を供給する製鉄会社は 1 社）、拡大が見込まれる LNG 燃料タンクなどの需要に対して、供給が追いつかなくなる可能性がある。

そのため、今後は国内の製鉄会社が、船用の LNG 燃料タンク用鋼の生産を拡大するための支援や、9%Ni 鋼に代わる新たな代替材料の検討についても、必要になるものと思われる。

2.2 必要な設備投資

ここでは LNG 燃料タンク製造において必要となる工場設備について、以下に示す LNG 燃料タンク製造工程の例に即して述べる。



LNG 燃料タンク製造工程の例

2.2.1 素材受入（含む運搬・保管）

取扱でも述べたが、9%Ni 鋼材は磁化に対して特別な配慮が必要となる。この為鋼材のハンドリングにおいてマグネットリフトは使用できない。鋼材に疵をつけないために無傷クランプやバキュームリフト等の使用を検討する。

コンタミ防止のため他の一般炭素鋼材と区別するため区画の明確化や、可能であれば屋内保管できる環境を準備することが望ましい。重ねおきする際には表面保護の為、間に挟む木材などの枕木が必要となる。

2.2.2 切断・開先加工・曲げ加工

9%Ni 鋼材の切断加工においてガス切断を行った場合、切断面にニッケルリッチ層が析出するため処置が必要となる。

この為プラズマ切断機等、入熱を極力抑えられる切断機材を採用することが望ましい。

切断された部材の**開先加工の為の加工機**が必要となる。

鏡板の部材や円筒部の部材の加工には部材の大きさに合わせた**油圧プレス機**や**ベンディングローラー**が必要となる。

曲げ加工において熱間加工を適用した場合には、加工後の部材に再焼き入れ焼き戻しを行う為、**部材の大きさに適合した炉**が必要となる。

2.2.3 小組・中組・大組・総組

それぞれの部材を組立てるため、**無傷クランプ**が必要となる。

継手の溶接では鏡板のような複雑な形状であると**被覆アーク溶接法**による手溶接の採用となるが、円筒部シェルの長手方向溶接などでは、**自動 TIG 溶接機**や**サブマージドアーク溶接法**を用いた省力化も検討することができる。

手溶接の場合は溶接線に対応した作業用の**足場架設**が必要となる。

溶接作業後には順次非破壊検査の実施を行うが使用する **RT 検査器**が必要となる。放射線を遮蔽できる **RT 用の区画**があれば、周囲作業への影響を排除する事ができる。

円筒部シェルの同士をブロック化する際、ブロック化するシェルに対応できる**大型ターニングローラー**の準備ができれば、**自動 TIG 溶接機**や**サブマージドアーク溶接法**を用いた省力化も検討することができる。

シェル接続後の寸法計測の為**トータルステーション**が必要となる。

2.2.4 艀装

タンクシェルにノズル及びサンプウエル用の穴を開けるが、ガス溶断を採用すると切断面に発生する **Ni リッチ層**の除去の為**グラインダ**が必要となる。ある程度の直径迄であれば**ホルソー**など**機械加工**も検討することが望ましい。ノズルの取付けやタンク内配管作業に対してはアクセスのための**足場**をタンク内に架設する必要がある。

ポンプの型式次第では、ポンプサポートの取付けでは芯だしの精度を求められ、**レーザー水準器**や**レーザーポインタ**の使用で精度及び効率の向上が考えられる。

タンク外側に断熱支持材（プレスウッド）の取付けでは、タンク外板と断熱支持材の接着に使用するマスティック材の硬化剤を混ぜるための**攪拌機**及び施工の**為の足場**が必要となる。

2.2.5 耐圧試験

耐圧試験では試験前の漲水及び試験後の排水の**為ポンプ**が必要となる。

また、既定の圧力迄内圧を上昇させるための圧縮空気を供給するため**コンプレッサー**、要すれば**増圧機**が必要である。

2.2.6 タンク内部クリーニング

排水後はタンク内を可能な限り乾燥させるため、**大容量の換気ファン**が必要となる。**大型スポットクーラー**により乾燥した空気を送気することも検討すべきである。

清掃時には、清掃で使用する**掃除機（バキュームポンプ）**や清掃で発生する粉塵をタンク内に滞留させ

ないよう**換気ファン**が必要となる。粉塵を処理するための**集塵機**の準備をしておくことが望ましい。

上述のとおり、タンク内の換気は乾燥及び清掃において重要である為、効率的な換気要領について事前に計画することが望ましい。

錆の除去へブラストを適用する場合には、ブラスト機材（ブラスト窯、ブラストガン等）が必要となる。清掃後のタンク内は乾燥状態を維持するよう管理する必要がある為、乾燥空気を供給できる**ドライヤー**が必要である。**大型スポットクーラー**での代用も可能であると考えるが、供給される露点の確認をしておくことが望ましい。タンク内部の露点を管理する為、**露点計**を用いて状態監視をするといよい。

タンク内清掃中は表面の酸化等により酸素濃度の低下が懸念されるので**酸素濃度計**の準備は安全上必須である。

2.2.7 容量計測・ポンプ搭載・タンク外艀装・レベル計搭載

容量計測では第三者機関が準備した**レーザー計測器**を使用した 3 次元計測を用いる方法が一般的であり、製造者での準備は必要ないと考える。

ポンプ及びレベル計の搭載は、ポンプ及びレベル計の長さ**とタンクの高さを考慮したクレーン**が必要となる点はクレーン設備計画に注意する必要がある。ポンプの搭載には形状によっては**つり天秤**の使用が必要となることもあるので事前に搭載方法をよく検討しておくことが望ましい。

タンク外艀装が生じる場合には工事内容に対応した足場架設が必要である。次工程である防熱工事にも関連するので事前に足場計画を検討しておくことが望ましい。

2.2.8 塗装・防熱

防熱施工前にプライマーの塗布や、防熱施工後の防熱表面の化粧塗装が必要となる為、**下地処理用の設備工具**が必要となる。**ショットもしくはサンドブラスト設備**があると効率よい作業が可能である。

防熱工事では工法に対応した**足場架設**が必要となる。

防熱工事期間中は適切な温度・湿度管理が必要となる。雨や結露水に濡れた面へのウレタン吹付は品質に重大な影響を及ぼす為、**タンク全体を搬入できる建屋**、特に日本の気象条件であると**空調設備のある防熱施工用建屋**が望ましい。

ウレタン吹付を施工する際は**ミストの飛散防止対策**が必要であり、また周辺で火気工事をする場合は引火しないよう安全対策を実施する必要がある。

ウレタン吹付機器は施工メーカーが持参するが、必要な電源およびエア供給については事前に協議をする必要がある。

防熱工事の材料は雨曝しにならないよう注意し、ウレタン原液のドラムはとくに夏場工事の場合、沸騰して品質に影響を及ぼす可能性があるため長時間直射日光に曝される場所を避けて**適切に保管する場所**が必要となる。

2.2.9 完成検査・出荷準備

完成検査における重量計測の為、**ロードセル**が必要となる。

出荷に際し内部をドライエアー又は N2 で置換するための、**ドライヤー**又は **N2 供給設備**が必要となる。

N2 供給設備は都度ローリー等による運搬で供給する方法と、N2 **ジェネレーター**を設備として持つ方法が

考えられる。どちらで対応するかはN2需給の検討を前広に行い計画しておく必要がある。

タンクの出荷の為、タンクの艀装品含めた**揚貨能力のあるクレーン・大型のシャックル**、要すれば**天秤**の準備が必要である。

各工程に限らず、クレーンの設備計画は重要である。各工程におけるハンドリング重量や工場レイアウトをベースに**効率よいマテリアルハンドリングができるクレーン**を装備する事が望ましく、**重量物搬送台車等**の設備を持つことでより効率的な製造ができると考える。

これまでの説明を纏めた設備一覧を次頁に示す。最低限必要な設備に関してもレンタル等で賄うことができるのであれば過剰な設備投資は不要と考える。

LNG燃料タンクの製造に必要な設備一覧

工程	必要な設備	保有すると良い設備
素材受け入れ（含む運搬・保管）	無傷クランプ 保管用の枕木	バキュームリフト
切断・開先加工・曲げ加工	NC プラズマ切断機 ベンディングローラー 油圧プレス機 炉（熱間曲げ加工を行う場合）	開先加工機
小組・中組・大組・総組	被覆アーク溶接機 足場設備 非破壊検査設備 トータルステーション	自動 TIG 溶接機 大型ターニングローラー 非破壊検査用シェルター
艤装	TIG 溶接機（配管用） 水準器 レーザーポインタ	ホルソー
耐圧・気密試験	漲水用ポンプ 排水用ポンプ エアコンプレッサー	規定圧力に上昇させる為の増圧機（工場での供給空気圧力が不足する場合）
タンク内部クリーニング	清掃用パワーツール 大容量換気ファン スポットクーラー 集塵機 ポータブル酸素濃度計	ドライエアー供給設備 バキュームブラスト 露点計
容量計測・ポンプ搭載・タンク外艤装・レベル計搭載		レーザー計測器
塗装・防熱	下地処理用パワーツール 足場設備 ミスト飛散防止カバー 加熱器	ブラスト設備（ショット／サンド） 専用建屋 空調設備
完成検査・出荷準備	ロードセル ドライエアー供給装置	N 2 供給設備／N 2 発生装置
全体	各工程に適したクレーン 揚貨に必要な吊具	重量物搬送台車

2.3 人材育成

LNG 燃料タンク製造に係る人材は、職種によらず、前 1.4 に記載する 9%Ni 鋼の特徴について、把握しておく必要がある。その他、タンクメーカーに聞き取りをした結果、以下の人材育成が必要との意見であった。

2.3.1 溶接技術者（施工者）

LNG 燃料タンクの製造工程の大半を占める溶接作業において、9%Ni 鋼の溶接有資格者の育成及び増員が課題となる。安定的かつ効率的なタンク製造には、9%Ni 鋼溶接の品質を安定させることが重要となる。

LNG 燃料タンク溶接技量士管理について、A 社の一例を下表に示す。

LNG 燃料タンク溶接技量士管理の一例

管理規定
・ 溶接は、日本海事協会（NK）の技量資格を取得した者が施工する。 ・ 有資格者は、ヘルメットに定められたワッペンを貼付する。 ・ 資格有効期限は、品質管理部門で管理する。
溶接士技量認定について
・ 資格区分 1) 母材の種類：ニッケル(NI)、ステンレス(SU) 2) 溶接姿勢：PA（下向き）、PB（水平下向き）、PC（横向き）PD(上向き水平) PE（上向き）、PF（上進）、PH（固定管上進） 3) 溶接法：MW（溶接棒）、SW（CO2 半自動溶接）TW（ティグ溶接） 4) 板厚：3mm以上
溶接士訓練
・ 新規入構時に座学教育を行う。（造船溶接従事者向けの教育も含む） ・ 実技訓練は約 50 時間（任意）実施の上、NK 技量試験合格をもって従事させる。
技量判定と再教育
・ 溶接継手の実施工中における、RT／PT／UT の合格率にて判断する。 ・ RT 合格率の低下及び、タンク製造品質管理基準を満足しない場合に再教育を行う。

また、現在 LNG 燃料タンク製造に向けて準備を進めている B 社において、本報告書に記載する 9%Ni 鋼及び溶接における注意点等を踏まえて、実際に溶接施工を実施した。その結果も踏まえて、B 社にて作成された「9%Ni 鋼に関する取り扱い及び溶接技量士の教育について」を別紙 1 に示す。

なお、電流、電圧、溶接速度等の詳細な溶接条件については、9%Ni 鋼の溶接に関して豊富な知見を有する溶材メーカーの助言を受けて、各社で適切な溶接施工法を作成することが望ましい。

2.3.2 生産設計技術者

製造作業を理解した設計者は不可欠であり、継続的な教育による設計者の確保が必要となる。また、

最近タンク製造を開始したタンクメーカーにあっては、基本設計含めて、設計を外注に頼っている状況であり、細かな変更について、設計見解を速やかに出すことができない。

2.3.3 製造検討技術者

LNG 燃料タンクの需要が高まるにつれて、限られた設備の中で、製造工程の効率化や、設備投資・改良計画等が必要になると思われ、その方面での技術者の育成が課題となる。

2.3.4 曲げ加工技術者（鏡板メーカー）

現在、船用向け燃料タンクの製造を行うメーカーは2社のみであるが、いずれも曲げ加工技術者は熟練まで10年を要するとの回答であった。また、鏡板製造に関して、長年蓄積してきた各社ノウハウによるところが大きいと、未経験の会社が製造に新規参入することは、まず無理であろうとの認識であった。

曲げ加工については、熟練者1名が研修生1名に付き、OJTにて指導していく形となり、一人前まで育成するには、長期間必要となる。今後、急速にLNG燃料タンクの需要が増大すると、本技術者の育成が間に合わなくなる可能性がある。

2.3.5 防熱施工者

タンクメーカーは、外部の防熱施工業者へ外注している。防熱施工に関しては、施工管理者とウレタン吹付作業者の育成が必要になる。熟練者に1名研修生を付け、機械の操作からメンテナンスまで一通り覚えさせ、その中で吹付作業も教育する方法を取っている。両方できるようになって一人前と判断される。吹付作業者は1人前まで約5年前後必要になる。また、吹付作業者を将来の管理者として教育を実施する。

なお、1,750m³のタンク2基を並行で作業すると仮定した場合、必要になる人員は、現場管理者1名、ウレタン吹付作業員5～6名、一般作業員20名弱との回答であった。

ウレタン吹付作業員の育成が、まず重要であるが、教育に用いる分も含めた十分なウレタン発泡機の台数確保が、課題となり得る。

2.4 安全対策

LNG 燃料タンク製造における安全対策について、製造工程の調査および既存事業者への調査結果を踏まえ安全対策としてまとめた。

2.4.1 倒壊・落下による挟圧

LNG 燃料タンクの製造で使用する9%Ni鋼は前述のとおりその物性上、マグネットリフトの使用が制限されたり、無傷クランプの使用が必要であったりと、重量物を取り扱う際に通常時と異なる工法を用いる可能性がある。慣れない工法による倒壊・落下による挟圧災害が懸念され、部材の仮固定時の倒壊対策及び吊上げ時の玉掛け要領の策定や、正しい用具の使用法を含めた作業員への教育が重要である。

2.4.2 溶接作業、ガス切断の保護

LNG 燃料タンクの製造工程において主作業の一つである溶接作業及び鋼材切断時の保護（やけど、目の保護等）が重要である。適切な保護具の装着、特にガス切断時には火災に対する注意が必要である。タンク防熱や配管防熱を実施している際に、溶接・切断作業を極力発生させない工程とすることが基本ではあるが、工期等で止むを得ない場合には専任の防火監視員を配置するなどの特別管理体制を講じる安全管理が必要となる。

2.4.3 墜落

LNG 燃料タンクの製造においては製造工程の各段階において高所作業が必要となる。適切な作業足場の計画と設置、墜落防止設備（手摺、柵）の設置、安全帯の確実な装着と運用が重要である。

2.4.4 酸欠

LNG 燃料タンクの製造工程においては、タンク総組完了後にタンク内での作業が発生する。半密閉区画における作業となる為、酸欠に対する注意が必要である。タンク内の換気対策、タンクへ入る前の酸素濃度の確認、タンク入出管理等、安全対策要領を整備し実行する事が重要である。

特に水圧試験直後やタンククリーニングによる表面研磨時は、タンク鋼材の酸化に伴う酸素濃度の低下などが起きやすい環境となる為注意が必要であり、作業者のポータブル酸素濃度計の装着や定期的な酸素濃度の計測などの安全対策の検討を行うことが望ましい。またタンククリーニング完了後にタンク内へ窒素等の不活性ガスを投入する場合には、マンホールの施錠管理や立入禁止表示をするなど、作業者が誤ってタンク内へ入ることを防止する確実な対策が必要である。

2.4.5 熱中症

LNG 燃料タンク製造を夏場の暴露環境にて施工する場合には、熱中症対策管理が重要である。特にタンク内部は外部環境に対し高温・高湿度となる可能性があり、タンク内部の作業は注意が必要である。換気装置や冷風機設置などで環境改善を行うといった設備面での対策だけでなく、一人作業を避けることや定期的な作業者の安全確認、作業環境に対する作業員への教育など管理面での対策も検討を行うことが望ましい。

重大災害につながるポイントについて上述したが、製造者の設備や LNG 燃料タンク製造工法によって安全対策は異なると考えられる。

通常の工作現場において実施している安全管理に加え、LNG 燃料タンク製造における特有の危険について事前にリスクアセスメントを行い、それに即した安全管理基準を整備し遵守する事が重要である。

3. 省 CO2 なタンク製造方法に関する整理・検討事項の調査

3.1 タンク製造環境を整備する上で必要と考えられる製造基準に関する検討

LNG 燃料タンクの製造においては、規則要件を満足する他、JIS や ASME などの規格を参照する形で製造基準を整備保有することが必要となる。本項では規則・規格等で明確な定義が存在しないものの、省 CO2 なタンク製造方法の検討にあたって必要となる、LNG 燃料タンク製造に関連する基準について整理した。これらの基準を整備することにより、顧客・製造者間の合意基準が明確化され、工程の効率化に繋がり、また、製造されるタンクの品質も安定し、無駄な手直しの工数も減ることとなり、ひいてはタンク製造工程の省 CO2 に資することとなる。

3.1.1 9%Ni 鋼補修基準

-1. 概要

タンク用の 9%Ni 鋼材は、タンクの製造中に、クランプ傷や打痕などが発生する場合があるが、これらの母材表面に発生した傷の補修基準・要領を、タンク製造メーカ、タンク発注者、船級協会の 3 者により事前に取り決めておくことが望ましい。事前に合意しておくことにより実際に発生した場合の処置を速やかに行うことが可能となり、円滑なタンク製造に寄与するものとする。

一方、船級規則には、ミルメーカの鋼材出荷時における、鋼材の表面品質及び欠陥の補修要領は規定されているが、タンク製造メーカに納入された後の鋼材の表面品質及び欠陥の補修要領は特に規定がないため、タンク製造メーカ、タンク発注者、船級協会の 3 者により合意した基準・要領に従って補修を実施することとなる。

ここでは、3 者合意による母材の補修基準・要領制定の参考となる基準例を示すこととする。なお、各メーカにて、すでに合意済みの 3 者合意を否定するものではなく、あくまでも参考例を示すものである。

-2. 参照規則

前述の通り、タンクメーカまたは造船所に納入された後の鋼材の表面品質及び欠陥の補修要領は特に規定がないため、ミルメーカの鋼材出荷時における、鋼材の表面品質及び欠陥の補修要領を準用することとする。日本海事協会規則の場合は以下の規則が該当する。

- ・ 日本海事協会鋼船規則 K 編 3 章 3.1.9 品質及び欠陥の補修（以下、NK K 編）
- ・ 日本海事協会鋼船規則 K 編検査要領 3 章 K3.1.9 品質及び欠陥の補修（以下、NK K 編 検査要領）

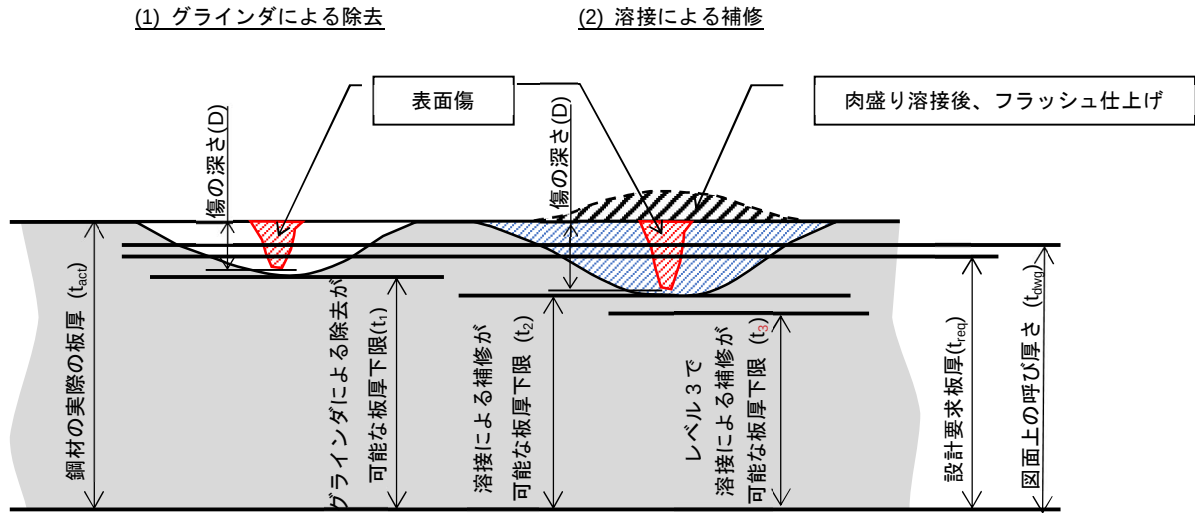
-3. 補修基準の例

NK K 編 3.1.9 は、傷のレベルに応じて、「グラインダによる除去が可能な傷」と「溶接による補修が可能な傷」が規定されているが、実際は「溶接による補修ができない」が存在しうるため、3 つのレベルで補修基準を設定することとなる。

NK K 編 3.1.9 を参考に設定した、クランプ傷や打痕等（以下、「傷」と総称する）の補修基準・要領の例を表 3.1.1 および図 3.1.1 にまとめる。

表 3.1.1 9%Ni 鋼の母材補修基準例

レベル	補修要領	基準	補修後の検査要領
1	グ ラ イ ン ダ に よ る 除去	次の(a)から(e)を満たすことを条件として、グライ ンダにより部分的に除去する。(図 3.xx (1)(2)参照) (a) 傷除去部の厚さは、呼び厚さから 7%又は 3 mm の いずれか小さい方を超えて減少しないこと。 (b) 傷除去部の面積は、0.25 m ² 以下であること。 (c) 各部材の各表面における、傷除去部の面積の合 計は、当該表面の面積の 2%以下であること。 (d) 2 つ以上の傷除去部の端部間の距離がそれらの 幅の平均より小さい場合は、それらを 1 つの除去部 とみなして傷除去部の面積を算出すること。 (e) 傷除去部が厚さ方向で同一線上に存在する部分 (すなわち板の両面に傷がある場合)の厚さは、(a)の 規定を満たすこと。	傷除去部は、浸透探傷試 験を行い、結果を発注 者、船級協会に提出す る。
2	溶 接 に よ る補修	レベル 1 の基準を満足しない傷は、次の(a)から(d) を満たすことを条件として、溶接により補修する。 (図 3.xx (1)(3)参照) (a) 溶接前の状態において、傷除去部の厚さは呼び 厚さの 80%を下回らないこと。 (b) 溶接補修した部分の面積は、0.125 m ² 以下であ ること。また、各部材の表面における、溶接補修した 部分の面積の合計は、当該表面の面積の 2%以下であ ること。 (c) 2 つの溶接補修した部分の端部間の距離は、それ ぞれの幅の平均以上であること。 (d) 溶接は、あらかじめ承認された方法により、船級 協会が定める技量資格を有する溶接士が、船級協会 に認定された溶接材料を用いて行うこと。	傷除去部は、浸透探傷試 験および超音波探傷試 験を行い、結果を発注 者、船級協会に提出す る。
3	船 級 検 査 員 の 判 断 に よ る 補 修 (板切替 を含む)	レベル 2 の基準を満足できない傷の補修要領は、原 則、板切替とする。 ただし、以下の(a)または(b)の場合は、タンク発注者 と合意のもと、溶接による補修を適用してもよい。 (a) 傷除去後の最小板厚が設計要求板厚の 80%を超 える場合。 (b) きず除去部の厚さは呼び厚さの 80%以上あるが、 除去面積がレベル 2 の基準を満足できない場合。	板切替による突合せ溶 接部は、放射線透過試験 または同等の検査能力 を有する代替案 (フェー ズドアレイ超音波探傷 試験など)を行い、結果 を発注者、船級協会に提 出する。



レベル1のグラインダによる除去が可能な板厚下限:

$$t_1 = \max(0.93 \cdot t_{dwg}, t_{dwg} - 3.00)$$

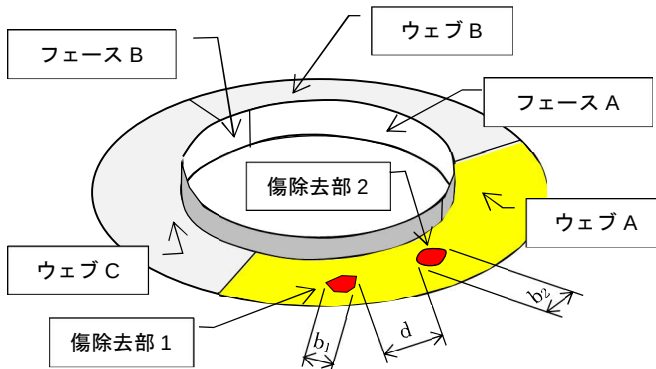
レベル2の溶接による補修が可能な板厚下限:

$$t_2 = 0.8 \cdot t_{dwg}$$

レベル3の(a)に示す溶接による補修が可能な板厚下限:

$$t_3 = 0.8 \cdot t_{req}$$

(3) 傷除去部の面積・幅



例：傷がウェブ A の上面に存在する場合。

A_1 =傷除去部 1 の面積(m^2)

A_2 =傷除去部 2 の面積(m^2)

A_m =当該部材（ウェブ A）の当該表面（上面）の面積(m^2)

b_1 =傷除去部 1 の最大幅(mm)

b_2 =傷除去部 2 の最大幅(mm)

d =傷除去部 1 と傷除去部 2 の端部間の最小距離(mm)

(1) グラインダによる除去の場合

$$A_1 \leq 0.25(m^2), A_2 \leq 0.25(m^2), A_1 + A_2 \leq 0.02 \cdot A_m(m^2)$$

$d < (b_1 + b_2)/2$ の場合は、傷除去部 1 と傷除去部 2 を一つの傷と見直して傷除去部の面積を算出すること。

すなわち、 $A_1 + A_2 \leq 0.25(m^2)$ としなければならない。

(2) 溶接による補修の場合

$$A_1 \leq 0.125(m^2), A_2 \leq 0.125(m^2), A_1 + A_2 \leq 0.02 \cdot A_m(m^2)$$

$$d \geq (b_1 + b_2)/2$$

図 3.1.1 9%Ni 鋼の母材補修基準例

3.1.2 9%Ni 鋼溶接前予熱に関する基準

-1. 概要

9%Ni 鋼は強度や靱性を高めるために、QT（焼入れ焼戻し）または NNT（2 回焼ならし焼戻し）という熱処理により製造された鋼材であることから、タンク製造時の熱処理に関しては、炭素マンガン鋼製タンクとは異なる取り扱いが必要となる。ここでは、溶接前後の熱処理の要否、曲げ加工時の熱処理要否についてまとめた。

-2. 溶接前の準備について

9%Ni 鋼は、オーステナイト組織を呈する Ni 基合金の溶接材料を使用するため、溶接の際に、高温割れが生じやすい材料である。

高温割れの対策として、下記に注意して溶接施工を実施する必要がある。

- ① 開先角度を大きくする
- ② 開先面を清浄にする（錆、スケール、水分、油、塗料等の除去）
- ③ 溶接速度・電流が過大にならないようにする
- ④ 予熱をしない、パス間温度を 175℃以下にする

上記の通り、高温割れの懸念があるため、溶接前の予熱は推奨されていない。

なお、湿度の高い地域では、結露に注意をする必要がある。気温・湿度に応じて、結露が懸念される場合は、除湿する（ウォームアップ等）必要がある。除湿のためにウォームアップ等を実施する場合、上記高温割れ防止の観点より、可能な限り低い温度での加熱に留める必要がある。

-3. 溶接後熱処理の要否

一般的な BCC 構造（Body-centered cubic，体心立方構造）をもつ溶接構造用鋼では脆性破壊のリスクがあるため、溶接後に溶接後熱処理（PWHT：Post Weld Heat Treatment）を行い、溶接残留応力を除去することで脆性破壊の発生リスクを低減することが一般的である。

これに対し、9%Ni 鋼は Ni 添加と組織制御によって脆性破壊のリスクを低減した鋼材であり PWHT を実施しないことが一般である。以下に規則要件と材料的観点による見解を記載する。

① 規則要件について

日本海事協会の鋼船規則検査要領 D 編 D11.3.1 や ASME Boiler Pressure Vessel Code (BPVC) では、板厚 50mm 以下の 9%Ni 鋼に対して溶接後熱処理は要求されていない。

② 材料的観点について

9%Ni 鋼は強度や靱性を高めるために、QT（焼入れ焼戻し）または NNT（2 回焼ならし焼戻し）という熱処理により製造されている。このため、溶接後に製造時の熱処理温度以上で熱処理を実施すると、製造時の熱処理の効果が消失するため、所定の性能（強度や靱性）を発揮できない可能性がある。

また、9%Ni 鋼に対して溶接後熱処理を実施すると、HAZ（溶接熱影響部）の靱性が、焼戻し脆性により低下することが示唆されている。一方、溶接後熱処理（PWHT）を実施しない場合でも、十分

な靱性をもつため、PWHT は必要ない。

上記の結果により、PWHT は基本的には推奨されていないが、実施する場合は、予め PWHT により焼戻し脆性が生じないことを確認する必要がある。

-4. 曲げ加工に対する熱処理要否

熱処理によって製造された 9%Ni 鋼は、製造時の熱処理温度以上に加熱して加工すると熱処理の効果が消失し、性能が低下するおそれがあるため、冷間での加工が推奨される。

一方、冷間加工であっても、加工ひずみが大きいと性能の低下が懸念される。目安として、QT 材（焼入れ焼戻し材）では 5%まで、NNT 材（2 回焼ならし焼戻し材）であれば 3%程度のひずみでは、性能低下は限定的であるとの報告がある。なお、鋼材の承認試験時において、5%の歪みを与えた歪時効シャルピー衝撃試験を実施し、性能に問題ないことを確認している。

上記を踏まえ、冷間加工する場合は、QT 材については 5%まで、NNT 材については 3%までの加工とすることを推奨する。また、これらのひずみを超える場合は、熱間で曲げ加工をする必要がある。ただし、熱間加工する場合は鋼材製造時の熱処理が上書きされ、熱間加工後に鋼材が所定の性能を発揮できなくなるため、熱間加工後には、鋼材製造時と同等の熱処理を実施し、強度および靱性に関する再試験を実施することが推奨される。

3.1.3 非破壊試験（RT：放射線透過試験）代替

-1. 概要

LNG 燃料タンクの製造検査においては、突き合わせ溶接部には 100%の非破壊検査の実施が要求されており、溶接部内在欠陥の検査手法として現在、放射線透過試験（以下 RT）が主流となっている。この RT は放射線を取り扱うことから、周囲から隔離された施設もしくは人払いを行ったうえで実施する必要がある、製造工程におけるボトルネックとなっている。ここでは、RT の代替手段に関する調査を実施し、RT に対する代替手段としての提言を行う。

-2. フェーズドアレイ超音波探傷試験方法の概要

従来の超音波探傷（以下 UT）に用いられる探触子は超音波を送受信する振動子が一つであるのに対し、フェーズドアレイ超音波探傷試験方法（Phased Array Ultrasonic Testing、以下 PAUT）は、複数の振動子に対する励振タイミングを電子制御することで焦点や角度の調整を行い、探触子の走査なしで検査体内部の状況を断面画像として把握することができる非破壊検査技術である。RT 代替の検査手法として注目されており、すでに、各船級協会も、PAUT の適用に関してガイドラインを策定し、適用要件を規定している。

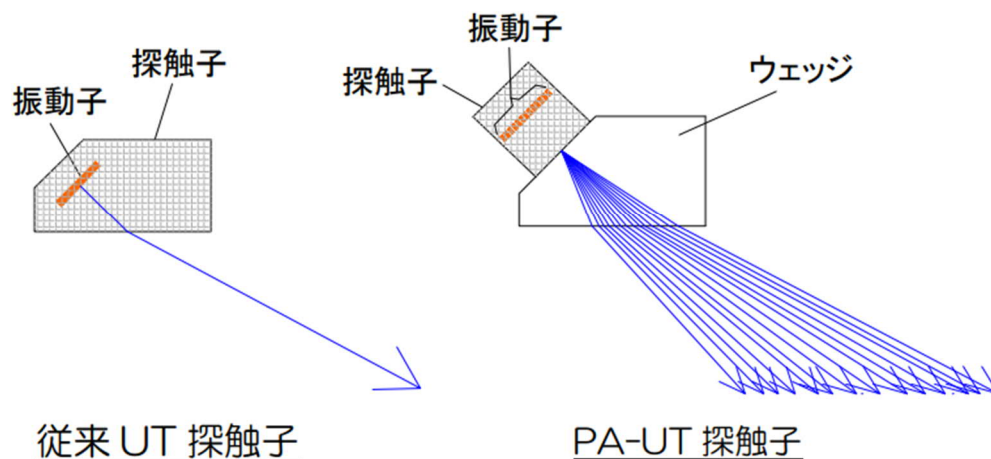


図 3.1.3-1 PAUT の原理

(出典：日本非破壊検査(株)カタログ)

-3. PAUT と RT の比較

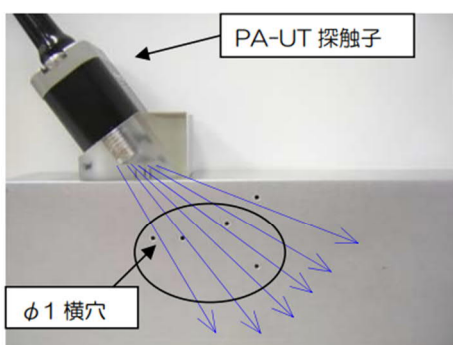
RT は、ブローホール等の球状欠陥の検出能力が優れているが、閉口している溶接割れや融合不良等の面状欠陥では、その方向性によっては板厚差による放射線透過量の差が少ないため、検出しにくいケースがある。

一方、PAUT は溶接継手形状に対して最適化した検査条件を選定することで、特に肉厚方向の面状欠陥の検出に優れた検査を実現できることから、強度面や漏洩防止の観点でクリティカルになり得る欠陥検出性が向上している。

したがって、RT と PAUT を併用することにより、双方が苦手とする球状欠陥、面状欠陥の検出能力を補完した、精度が高い検査が可能となる。

また、RT は放射線にさらされる（被曝）恐れがあるため、検査中の混在作業はできないが、PAUT は放射線を使用しないため、他の業務と並行で検査作業を実施できるというメリットがある。

なお、従来の UT と異なり、PAUT は図 2 に示す通り、検査結果を画像データとして電子的に記録できるため、検査結果の保存性は RT と同等となる。



右図の様に複数のφ1 横穴を一度に検出

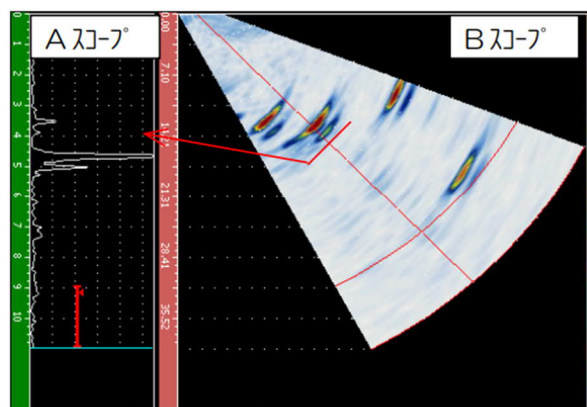


図 3.1.3-2 PAUT 検査結果例

(出典：日本非破壊検査(株)カタログ)

-4. 陸上プラントでの PAUT の適用事例

陸上プラントでは、ボイラー配管の定期検査時の非破壊検査として従来の RT に換え、PAUT を適用した実績が多数ある。表 3.1.3 に示すような高温の蒸気に晒され、クリープ現象等による損傷リスクがある箇所に PAUT が適用されている。

表 3.1.3 ボイラー配管の PAUT 適用箇所の例

適用箇所	材質
再熱器管(出口)	ステンレス
再熱器管・出口管(吊下げ)	低合金鋼
過熱器管 他	低合金鋼・ステンレス
過熱器管、再熱器管、節炭器管、炉壁管	低合金鋼・ステンレス
後部煙道蒸発器管、再熱器管	低合金鋼

(出典：JERA HP より)

-5. PAUT の適用に関する船級協会の規則・ガイドライン

IGF コード 16.3.5.1 (NK 規則の場合は、NK GF 編 16.3.6-1) には以下の記載があり、船級協会の承認が得られれば、RT の代替手法として PAUT を適用することは可能であると考えられる。

IGF コード 16.3.6.1

However, an approved ultrasonic testing procedure in lieu of radiographic testing may be conducted, but in addition supplementary radiographic testing at selected locations shall be carried out to verify the results.

NK GF 編 16.3.6-1

本会は、放射線透過試験に代えて承認された超音波探傷試験の採用を認めることがあるが、本会が指定した箇所について、超音波探傷試験の結果を検証するために放射線透過試験による補足の検査を追加して行わなければならない。

LNG 燃料タンクに対して実際に PAUT を適用する場合は、当該船級協会の規則・ガイドラインに従って適用する必要がある。主な船級協会が発行している PAUT の適用に関する規則・ガイドラインを以下にまとめる。

NK： 「フェーズドアレイ超音波探傷試験による非破壊検査ガイドライン」 March 2020

LR： 「Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials」 July 2022, Section 5.13

ABS： 「Guide for Nondestructive Inspection」 September 2020, Section 4.

DNV： 「DNV-CG-0051, Non-Destructive testing」 January 2022, Section 7.16

BV : 「RULES ON MATERIALS AND WELDING FOR THE CLASSIFICATION OF MARINE UNITS, NR216」 JULY 2022, Ch.14

このうち、NK「フェーズドアレイ超音波探傷試験による非破壊検査ガイドライン」March 2020(以下、NK ガイドライン)では、「NK 鋼船規則 GF 編に規定する低引火点燃料船の燃料タンクにあたっては、NK 鋼船規則 GF 編 16.3.6 の規定により実施される放射線透過試験をすべて PAUT に置き換えることはできない」との規定があるため、船級協会と協議の上、適当な比率で RT と PAUT を併用する必要がある。RT と PAUT の比率については、GF 編には特に記載はないが、N 編検査要領 N6.5.6-2 に以下の規定があるため、RT 10%が一つの目安として考えられる。

NK N 編検査要領 N6.5.6-2

規則 N 編 6.5.6-1 の規定に従って、放射線透過試験に代えて超音波探傷試験を行う場合、本会の認めるところにより、少なくともその総数の 10%に相当する数の当該検査箇所に対して、放射線透過試験を行うこと。

3.1.4 タンク水圧試験における水張要領に関する基準

-1. 概要

独立型 Type-C タンクは、タンク構造の製造完了後、水圧試験・漏洩試験を実施し、圧力容器としての構造健全性を確認しなければならない。本節では、タンク水圧試験の要件の概要と、水圧試験時の漲水量に関する考察をまとめた。

-2. タンク水圧試験の要件

LNG 燃料タンクの水圧試験要領は、IGF コード 16.5.4 に規定されたタンクタイプ別の試験要領に従って実施する。NK GF 編 16.5.4 及び GF 編検査要領 GF16.5.4 の、独立型 Type-C タンクに対する主な要件をまとめると以下の通りとなる。

- (1) タンク頂部で測った圧力が、 $1.5 \times P_0$ (P_0 =設計蒸気圧)以上となる圧力の下で水圧試験を実施する。
- (2) 水圧試験時の、計算上の一次一般膜応力は材料の降伏応力の 90%を超えてはならない。(計算書にて証明することを求めるものであり、試験中の応力計測を求めるものではない)
- (3) 一般的な円筒型 Type-C タンクではなく、バイローブタンクやトリローブタンクのような特殊な形状のタンクの場合は、(2)の計算上の一次一般膜応力が降伏応力の 75%を超える場合は、シリーズの初号機にて応力計測を実施し、降伏応力の 90%を超えないことを確認しなければならない。
- (4) 試験に使用する水温は、タンク材料の無延性遷移温度より少なくとも 30°C 高い温度でなければならない。
- (5) 圧力は、板厚 25mm につき 2 時間保持しなければならないが、いかなる場合でも 2 時間未満としてはならない。

- (6) 燃料タンク頂板まで漲水した場合、船台又は船体構造がこの水圧荷重に耐えられない場合及び水圧試験を行うことにより設計荷重を大きく上回る過大な荷重が燃料タンクの部材又はその隣接構造にかかる想定される場合は、水圧-空気圧試験を(1)(4)(5)の状態で行うことができる。
- (7) 工事完了後、各圧力容器及びその付着品は、漏洩試験を行わなければならない。この試験は、(1)または(6)の試験と同時に進めてもよい。
- (8) プロセス用圧力容器については、圧力容器が完全に水を満たすことができないように設計されている場合、または、これらの容器を乾燥できず、かつ、使用中に試験用媒体の痕跡を許容できない場合にのみ、船級協会が適当と認めれば空気圧試験に代えてもよい。LNG 燃料タンクについては本規定は適用されない。

-3. タンク水圧試験時の水張量に関する考察

前項に記載の通り、LNG 燃料タンクについては、原則、タンク頂部まで水を漲水した「水圧試験」を実施する必要がある。この水圧試験時の漲水に関して、現在の課題と考えられる項目を以下にまとめた。

- (1) タンク製造メーカーの給水能力および排水能力にも依存するが、一般に、水圧試験時の漲水開始から完了、排水開始から完了までは、それぞれ2～3日程度の期間を要している。したがって、水圧試験の時間も含めると、トータルで1週間程度のタンク水圧試験工程が必要となる。
- (2) 9%Ni 鋼製 LNG 燃料タンクは、極低温での使用が保証されたプライマー塗料が存在しないこともあり、タンク内部にプライマー塗装がされていない状態で水圧試験を実施するケースが多い。このため、(1)で示したタンク水圧試験の期間(約1週間程度)の間に、タンク内面は全面的に錆が発生しやすい環境となる。
- (3) タンク水圧試験後は、タンク内のクリーニングを実施するが、(2)で発生した錆を除去する作業が必要となるため、これらの期間も含めて LNG 燃料タンクとして必要な清浄度を確保するためには、粉塵が舞うタンク内という環境で、約1か月程度のクリーニング期間を必要とする場合がある。

3.1.5 タンク内クリーニング基準

-1. タンククリーニングの目的。

タンク構造の水圧試験が終了し、タンクから排水した後、タンククリーニングを実施する。タンククリーニングの目的は、主に以下の2つである。

- ・タンク内部の鋼板、配管および艤装品表面の汚れおよび錆を除去する。
- ・タンク内部のゴミや異物をタンク外に搬出する。

-2. タンククリーニングの要領

(1) タンククリーニング実施中のタンク内環境管理要領

- ① タンクからの排水終了後は、速やかにタンク内にドライエアーを供給する。タンク内の酸素濃度を計測し、安全基準を満たすことを確認の上、タンク内に入り内部の状況を確認する。タンク底部に残水があればタンク外に排出する。ポンプでの排出が難しい場合にはスポンジ等で吸引し残水を処理する。

- ② タンククリーニング作業中は、ドライエアーの供給を継続的に実施し、タンククリーニング作業で発生した粉塵や埃をタンク外に排出するため、排気通風機による強制排気を行う。底部などに滞留した粉塵埃は集塵機を利用してタンク外に排出する。タンククリーニング期間中は、クリーニング作業・休止中も含め、鋼材表面のターニング（錆の再発等）を防止する為、タンク内の湿度管理を行う。タンク内の相対湿度の目安として、文献等では、鋼材表面の錆発生を抑制する基準として、60%RH を一つの指標としている例もあるので、これらを参考に基準を設け管理する事が望ましい。

(2) タンククリーニング作業要領

- ① タンク内部の錆落とし作業の前に、タンク表面に付着した油やグリースを除去する。タンク表面の汚れは、以下のいずれか1つまたは両方の方法により、可能な限り除去することが望ましい。
 - ・ 硬い繊維またはワイヤーブラシによるブラッシング
 - ・ 適切な溶剤または溶液（たとえば、乳剤または中性洗剤）で洗浄後、飲用水で湿らせた布で拭き取る。その後、乾燥した布で水分を除去する。
- ② タンク内部の配管は、表面に付着した錆、溶接スパッタ、油およびグリースを除去した上で、鋼材表面錆除去作業時におけるダメージ防止の観点から、難燃性の養生シート等で養生する。
- ③ タンク表面に積層した錆は、グラインダー、ディスクサンダー、チップングハンマーなどを使用して除去する。鋼板表面のミルスケールも全て除去する。また、溶接スラグや溶接スパッタが残っていれば除去する。
- ④ タンク表面に浮いた（ルーズな）錆やプライマー塗料（タンク構造製作過程で適用した場合）は、電動ワイヤーブラシ、グラインダー、ディスクサンダー、フラップホイール（回転式電動工具の先端に短冊状の研磨布を取付けたもの）などを使用して除去する。
- ⑤ 隅、角あるいは構造の複雑な箇所など、電動工具等で処理しにくい箇所は、手工具による錆落としを併用するなどして、隅々まで十分に処理する。
- ⑥ 金属スラグやその他の研磨くずはすべてタンク外へ搬出する。タンクの研削面に付着したゴミは、清潔な布で拭き取る。粉塵は掃除機で吸引する。
- ⑦ 仕上げのクリーニングとして、粘着性ペーパーローラーで鋼板表面をきれいにし、小さなほこりや除去した錆を取り除く（写真 3.1.5-1 参照）。

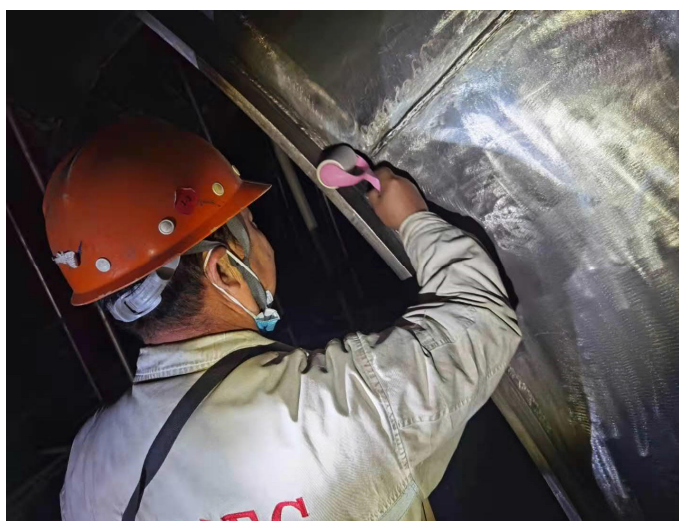


写真 3.1.5-1 粘着性ペーパーローラーによるクリーニング

- ⑧ 除去した錆・粉塵が下に滞留していくので、クリーニングはタンクの上側・上段から実施していくことが望ましい。
- ⑨ タンク製造中に発生した金属粉などがタンク内に多く残留した状態で水圧試験を実施すると、排水後のタンク構造表面の赤錆付着（写真 3.1.5-2）の範囲が広範囲になるなどのリスクがある。このため、水圧試験前にタンク製造中に発生した金属粉などタンク内の清掃を実施するとともに、タンク底部やタンク内の足場を仮設している場合には、足場上の清掃も行っておくことが望ましい。

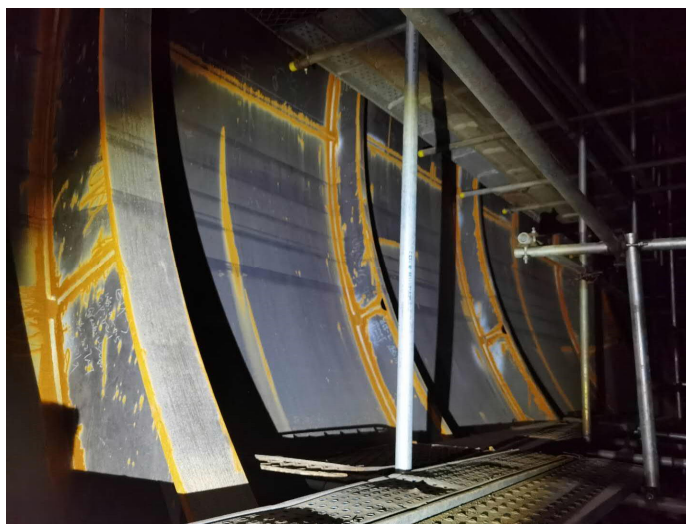


写真 3.1.5-2 タンク水圧試験排水後のタンク構造表面の赤錆付着

タンククリーニングは、手作業による錆の除去に多大な時間と人手を要し、タンク製造工期へのインパクト、および作業者の負担が大きくなる。タンク製造工期への影響や作業者の負担を軽減するため、ブラスト処理による錆の除去が考えられるが、以下のようなリスクがある。

- ・タンク内の配管や配管サポートなどの艤装品にブラストの粒子が当たり、傷付ける恐れがある。
- ・ブラストの粒子が異物としてタンク内に残留することが無いよう、異物検査を注意深く実施する必要がある。
- ・ブラスト粒子が当たることにより、鋼板表面が粗くなり、いわゆるアンカーパターンが形成されるため、ブラストによる錆の除去後、鋼板表面に再度錆が発生した場合、アンカーパターンの凹部に発生した錆を除去するには、その分鋼板を深く削り込む必要があるため、錆の除去に更に時間や人手が掛かる。

ブラストによる錆の除去については、上記のリスクに留意の上、慎重に採否を判断するのが望ましい。

-3. タンククリーニング検査要領

タンククリーニング検査は、以下の要領で実施することが望ましい。

- (1) タンク上部のクリーニング作業終了後、タンク上部を対象にタンククリーニング検査を実施する。
鋼板、配管および艤装品表面の汚れや錆、およびタンク構造や艤装品に付着した埃やゴミ、異物が全て除去されているかを検査する。タンク内の足場上にゴミや埃が残っていないかチェックし、残っていれば清掃後、再度クリーニング検査を実施する。

- (2) タンク上部の検査に合格後、タンク内の足場を上部から順次解体し、タンク外に搬出する。タンク内の足場を全て搬出後、タンク底部を掃除機や粘着性ペーパーローラーで清掃する。
- (3) LNG ポンプやタンク液面計などのタンク内部に装備する機器は、タンククリーニング作業が完了した後に搭載することになるが、搭載据え付け予定の場所および周囲のゴミ、異物が除去されていることを搭載前に事前に検査する。
- (4) タンク鋼材表面、配管、サポート等の艤装品表面の検査を完了後、LNG ポンプやタンク液面計などの機器を搭載・据付の完了後、改めてタンククリーニング最終検査を実施する。タンククリーニング最終検査は、タンク製造メーカ、タンク発注者、およびエンドユーザーの3者（以下、「関係者」とする）間で事前に合意した立会者により実施する。第三者機関による証明が必要な場合もあるので事前に協議しておくことが望ましい。
- (5) 最終検査の立会者によりタンク内にゴミや異物が持ち込まれることを防止するため、立会者の人数は、必要最小限に制限することが望ましい。また、タンクに入る際には、作業靴カバーを履き、首にはタオルを巻くなどしてタンク内の汚れや汗の落下を防止するなどの管理をすることが望ましい。
- (6) 最終検査後は立会者の所持品を全てタンク外に持ち出す。最終点検責任者を決め、責任者以外の全員がタンク外に退去した後、最終点検責任者は、タンク内に残留物が無いかを最終点検した上でタンク外に退去し、タンクへのアクセスマンホールを閉鎖する。

-4. タンククリーニング検査の合否判定基準

タンククリーニング検査の合否判定基準としては、大きく分けて鋼板表面の汚れおよび錆の除去の基準、およびタンク内部のゴミや異物の検査の基準を決める必要がある。

タンククリーニング検査基準は、関係者で事前に検査基準を合意しておくことが望ましい。

本章では、関係者の合意によるタンククリーニング検査基準の参考となる例を示す。

(1) 鋼板表面の汚れおよび錆の除去の基準

鋼板表面の汚れおよび錆の除去程度（除錆度）の基準については、以下の塗装前の素地調整基準などを参考に、関係者間で適用する基準を選択、合意しておくことが望ましい。

・ Steel Structures Painting Council（現 The Association for materials Protection and Performance(AMPP)）: Surface Preparation Specification (SSPC)

・ ISO8501-1

・ 日本造船研究会「塗装前鋼材表面処理基準」（SPSS）

除錆度の各機関規格比較表を表 3.1.5-1 に示す。

表 3.1.5-1 除錆度の各機関規格比較表

除錆方法	SSPC		ISO8501	SPSS
	呼称	基準		
動力工具 または手工具	POWER TOOL CLEANING	SP-3	St3	Pt3
	HAND TOOL CLEANING	SP-2	St2	Pt2
ブラスト	WHITE METAL BLAST CLEANING	SP-5	Sa3	Sh3, Sd3
	NEAR WHITE BLAST CLEANING	SP-10	Sa2 1/2	Sh2, Sd2
	COMMERCIAL BLAST CLEANING	SP-6	Sa2	Sh1, Sd1

(補足) SSPC には、鋼素地への動力工具クリーニングの除錆基準として、ブラストの SP-10 に相当する SP-11 も有る。

(2) 異物検査基準

タンク内部のゴミや異物の検査について、関係者の合意による基準の参考例を以下に記す。

① 異物検査は、目視検査および粘着性ペーパーローラーにより行う（写真 3.1.5-3 参照）。



写真 3.1.5-3 粘着性ペーパーローラーによる異物検査

② 粒状のほこりや異物の付着がある場合は不合格とする。

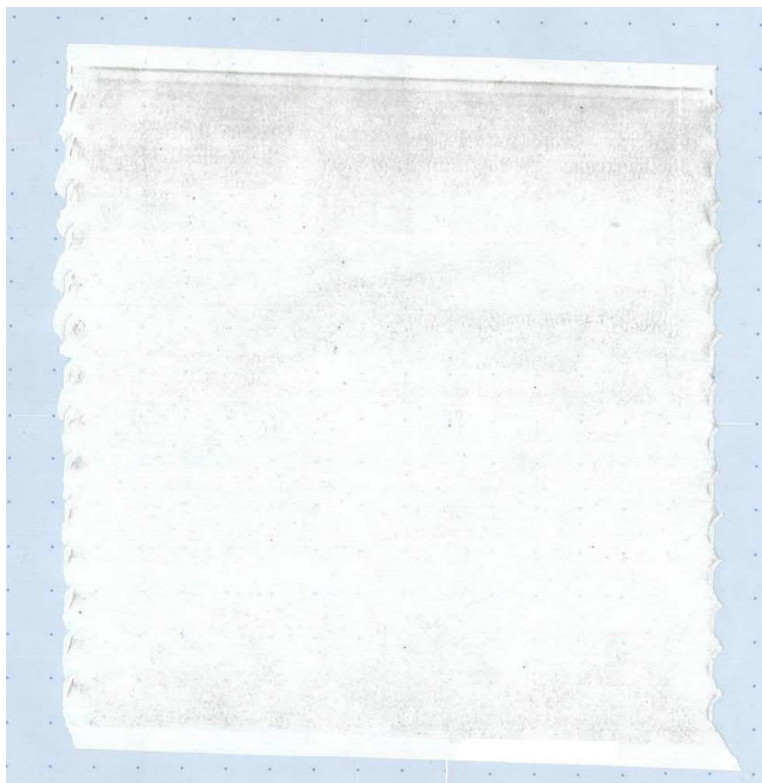
③ 軽い粉末状の汚れの付着については、関係者の合意の下、合否を決定する。異物検査の合格・不合格の基準については、事前に見本（合否サンプル例）等を準備しておくことが望ましい。クリーニング検査の合格・不合格の基準の参考例を添付-3.1.5-1 に示す。

(3) 検査箇所

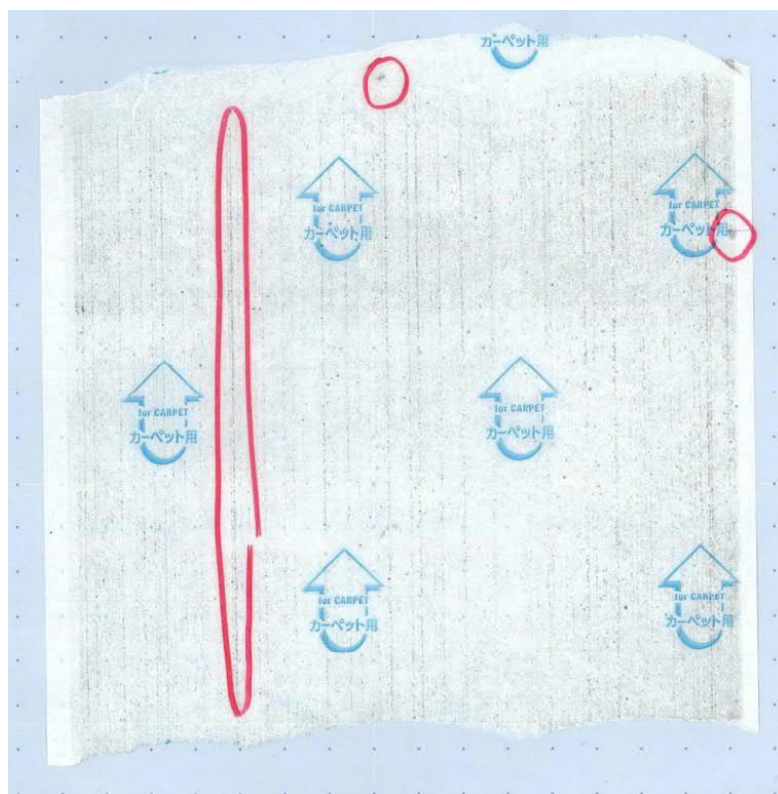
検査箇所についても、あらかじめ検査箇所を示した検査マップなどを作成し、関係者で合意しておくことが望ましい。検査マップの参考例を添付-3.1.5-2 に示す。

【添付-3.1.5-1】タンククリーニング検査の合格・不合格基準の参考例

(1) 合格基準の参考例



(2) 不合格基準の参考例



【添付-3.1.5-2】タンククリーニング検査マップの参考例

(1) タンク上部のクリーニング検査マップ

タンク上部のクリーニング検査マップの参考例を図 A2-1 に示す。

- ① タンク構造全体を漏れなく検査するため、図に示すように検査箇所を区画に分割し、区画毎に検査する。
- ② タンク長手方向は、例えばタンク円筒部の円周方向溶接線で分割すると判りやすい。タンク円周方向は、タンク直径によって、3～5程度に分割すると良い。
- ③ 各区画を目視にて検査後、その区画のタンク表面の代表箇所を写真に撮り、記録として残しておく（写真 A2-1）。
- ④ 粘着性テープローラーによる検査は、各検査区画の中でタンク円筒部表面、補強リングウエブ材表面（両面）およびフェース材表面（上面側）を任意に選び検査する。また、タンク上部全体の中から数か所を選び粘着性テープローラーで検査し、検査後のテープ表面の写真を記録として残しておく（写真 A2-2）。
- ⑤ タンク内の配管、配管サポート、その他の艤装品も全て検査し、代表箇所の写真を記録として残しておく。

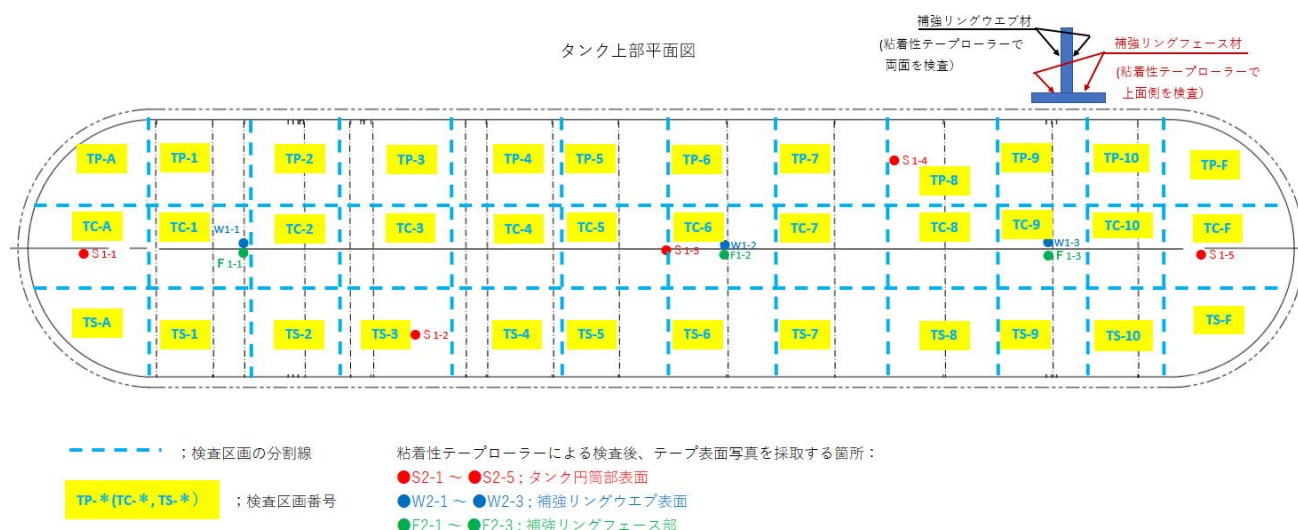
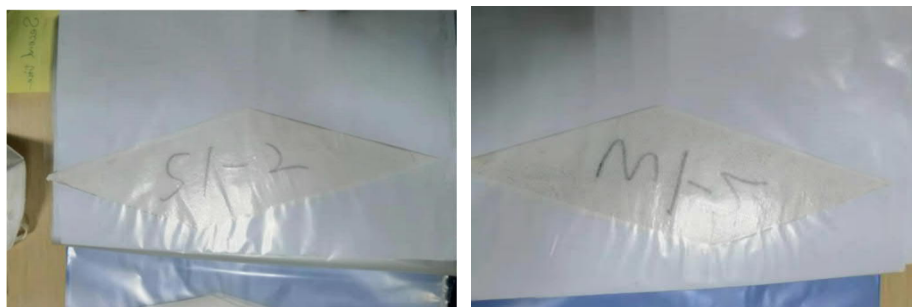


図 A2-1 タンク上部のクリーニング検査マップ（タンク構造）の参考例

写真 A2-1 各検査区画のタンク表面の代表箇所写真の例



写真 A2-2 粘着性テープローラー検査後のテープ表面の写真の例



(3) タンク中段部および底部のクリーニング検査マップ（タンク構造）

タンク中段部および底部のクリーニング検査マップ（タンク構造）の参考例を図 A2-2 に示す。

- ① タンク上部と同様、検査箇所を区画に分割し、区画毎に検査する。
- ② 各区画を目視にて検査後、その区画のタンク表面の代表箇所を写真に撮り、記録として残しておく。
- ③ 粘着性テープローラーによる検査は、各検査区画の中でタンク円筒部表面、補強リングウェブ材表面（両面）およびフェース材表面（上面側）を任意に選び検査する。また、タンク中段部および底部全体の中から数か所を選び粘着性テープローラーで検査し、検査後のテープ表面の写真を記録として残しておく。

タンク中段部および底部平面図

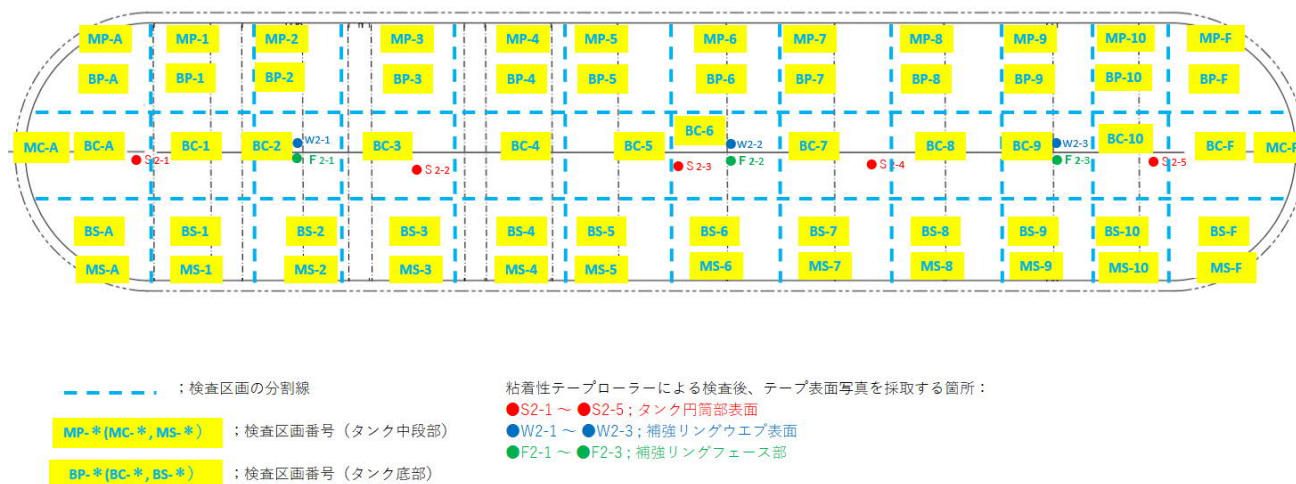


図 A2-2 タンク中段部および底部のクリーニング検査マップ

3.1.6 タンク内クリーニング完了後の環境管理基準

-1. 概要

LNG 燃料タンク用の 9%Ni 鋼材は炭素鋼である為、発錆のリスクを常に考えておく必要がある。タンク内タンククリーニング後に錆が生じるとその除去に多大な労力が再びかかるだけでなく、タンククリーニング後に設置した LNG ポンプやレベル計に“もらい錆”等の品質的な不具合を生じさせる可能性も考えられる。

ここでは、タンク内タンククリーニング後から出荷まで、及び、出荷から造船所で使用を開始するまでの期間において発錆のリスクを低減させる為の環境管理基準についての提言を行う。

-2. 発錆防止手段について

一般に炭素鋼の発錆は相対湿度が 60%を超えると急激に促進されると言われている。

この値を超えると表面上に露を生じ水の薄層が形成され、これが空気中に含まれる酸素との酸化還元反応を増長する為である。

しかしながら、ある温度で一度相対湿度を 60%以下の環境に調整したとしても、内圧の変化が無い状態で温度が下がると相対湿度は上昇することとなり、発錆のリスクは排除できない。

この為、LNG 燃料タンクの湿度管理は相対湿度のみを対象として行うのではなく、保管中に予想される気温変化を考慮した露点も参考にして行うことが望ましい。

露点を下げる方法として、除湿器の設置または乾燥空気による置換が考えられる。

外気温度変化がタンク内部の相対湿度へ与える影響を抑える手段として、タンククリーニング前にタンクの防熱を実施しておくことも検討すべきである。

また錆を発生させるもう一つの要因である酸素についても可能な限り濃度を下げておくことが、発錆のリスクを低減させることになる為には有効な手段と考えられる。酸素濃度を下げる手段として、LNG を積み込む前の状態として行われるタンク内の不活性化作業も考慮すると、窒素を使用してタンク内の酸素濃度を下げておく方法が考えられる。この場合には閉鎖区画における酸欠事故防止といった安全面での管理を行ったうえで実施する必要がある。

他に気化性防錆剤の適用も考えられるが、発生するガスの成分によってはタンク内に艀装された機器に影響を与えることも有り得るので、慎重な判断が必要となる。

-3. 発錆のリスクを低減させる為の環境管理基準について

タンククリーニングから検査完了後のタンク封鎖（以下、タンクファイナル）までと、タンクファイナルから造船所で使用を開始するまでの 2 つの期間について、発錆のリスクを低減させるという観点で考えた環境管理基準の例を以下に記す。実際の運用にあたっては、タンク製作・保管場所、輸送ルート、納入先造船所の環境を反映したうえで策定することが望ましい。

(1) タンククリーニングからタンクファイナルまで

この期間はポンプやレベル計の搭載、タンク計測等で作業等が立入る可能性がある。

この為、タンク内は空気状態を維持し、除湿器の設置や乾燥空気でタンク内を置換することにより露点を下げて発錆を抑制する。露点の目標としては、期間中に予想される最低気温から 10℃引いた値を目安とすることが望ましい。

タンク内の酸素濃度は下げておらず、また作業者の出入りによる外気の流入もある為、設備の継続的稼働とこまめな露点計測を行うことが望ましい。

(2)タンクファイナルから使用開始まで

タンクファイナル後に作業者が立入る可能性が無い場合には、窒素による置換を検討する。

乾燥空気にてタンク内の露点を下げたうえで、窒素により空気を置換する。保管中はタンク内圧を 50 から 100kPa で加圧・保持することが、外からの空気の侵入を防ぐとともに漏洩有無の確認ができる為、望ましい。

期間中の管理は内圧・露点及び酸素濃度を定期的に計測することで行う。

保管期間中に予想される最低気温から 10℃引いた値が露点の目安であるが、寒冷地を除く日本国内の製造場所であれば一律－10℃以下としておけば年間を通じて問題ないと考えられる。

酸素濃度は 5%以下とすることが、LNG を積込む前のタンク内の不活性化ガス置換条件も見据え目安となる。

保管開始直後は漏洩確認の為に日々の計測が望ましいが、数値が安定していることが確認できれば 1 回／週程度の定期的な計測に移行できると考える。

タンク内クリーニング完了後の環境管理基準の例

期間	タンクファイナル以前	タンクファイナル以降
内部雰囲気	乾燥空気	窒素
酸素濃度	約 21%（空気）	5%以下
露点	最低気温から 10℃引いた値	－10℃以下
圧力	大気圧	50kPa～100kPa
計測間隔	日々	1 回/週（初期は日々）

3.2 タンク製造に関する規則要件、検査、ボトルネックの整理・検討

LNG 燃料タンクの製造に関して、IGF コードにおいて規定されている検査関連の要件を 3.2.1 から 3.2.5 に整理する。必要な検査の種類は、大きく以下に分類される。

- ・ 材料 (3.2.1 参照)
- ・ 溶接及び非破壊試験 (3.2.2 参照)
- ・ 水圧試験及び漏洩試験 (3.2.3 参照)
- ・ ガストライアル及び燃料満載試験 (3.2.4 参照)
- ・ その他のタンク関連機器 (3.2.5 参照)

3.2.1 材料(IGF コード 7.4、16.2)

<材料の要件>

燃料格納設備及び燃料管装置の材料は、次の表に定める要件に適合したものでなければならない。

- (1) 表 GF7.1：設計温度が 0℃以上の燃料タンク又はプロセス用圧力容器用の板、管（継目無及び溶接）、形材及び鍛造品
- (2) 表 GF7.2：設計温度が 0℃より低く -55℃までの燃料タンク、プロセス用圧力容器及び二次防壁用の板、形材及び鍛造品
- (3) 表 GF7.3：設計温度が -55℃より低く -165℃までの燃料タンク又はプロセス用圧力容器及び二次防壁用の板、形材及び鍛造品

表 GF7.1 設計温度が 0℃以上の燃料タンク及びプロセス用圧力容器用の
板、管（継目無及び溶接）^{(1),(2)}形材及び鍛造品

化学成分及び熱処理： 炭素マンガン鋼（細粒キルド鋼とすること） 合金成分を少量加える場合は、本会の承認を得ること。 化学成分の範囲は、本会の承認を得ること。 焼ならし又は焼入れ焼戻し ⁽⁴⁾ 。		
引張及び衝撃試験要件		
試験頻度：		
板	ピースごとに試験	
形材及び鍛造品	ロットごとに試験	
機械的性質：		
引張特性	規格最小降伏応力は、 410 N/mm^2 を超えないこと ⁽⁵⁾ 。	
じん性（Vノッチシャルピー衝撃試験）：		
板	横方向試験片，最小平均吸収エネルギー値（KV）27J	
形材及び鍛造品	縦方向試験片，最小平均吸収エネルギー値（KV）41J	
試験温度	板厚（mm）	試験温度（℃）
	$t \leq 20$	0
	$20 < t \leq 40^{(3)}$	-20

注

- (1) 継目無管及び付着品については、K 編の規定を適用する。縦及びスパイラル溶接管の使用は本会の承認を得なければならない。
- (2) 管に対し、衝撃試験は要求しない。
- (3) 本表は一般に板厚が 40 mm までの金属材料に適用する。それ以上の板厚については本会の適当と認めるところによる。
- (4) 代替として温度制御圧延又は Thermo-Mechanical Controlled Processing（TMCP）を用いることができる。
- (5) 本会は、410 N/mm²を超える規格最小降伏応力を有する材料を特別に承認することがある。これらの材料に対し、溶接部及び熱影響部の硬さに特に注意を払わなければならない。

表 GF7.2 設計温度が、0℃より低く、-55℃までの燃料タンク、プロセス用压力容器
及び二次防壁用の板、型材及び鍛造品⁽¹⁾。ただし、最大厚さ 25 mm とする⁽²⁾。

化学成分及び熱処理：				
炭素マンガン鋼（アルミニウム処理による細粒キルド鋼とすること）				
化学成分（溶鋼分析）				
C	M_n	S_i	S	P
0.16%以下 ⁽³⁾	0.7~1.60%	0.10~0.50%	0.025%以下	0.025%以下
任意の添加元素：合金成分及び細粒化用元素は、一般的に下記による。				
N_i	C_r	M_0	C_u	N_b
0.80%以下	0.25%以下	0.08%以下	0.35%以下	0.05%以下
V				
0.10%以下				
アルミニウムの全含有量は0.02%以上（酸可溶性アルミニウムの場合は0.015%以上）とする。				
焼ならし又は焼入れ焼戻し ⁽⁴⁾ 。				

引張及び衝撃試験要件	
試験頻度：	
板	ピースごとに試験
型材及び鍛造品	ロットごとに試験
機械的性質：	
引張特性	規格最小降伏応力は、410 N/mm ² を超えないこと ⁽⁵⁾
じん性（Vノッチシャルピー衝撃試験）：	
板	横方向試験片，最小平均吸収エネルギー値（KV）27J
型材及び鍛造品	縦方向試験片，最小平均吸収エネルギー値（KV）41J
試験温度	設計温度より5℃低い温度又は-20℃のうち低い方

注

- (1) 鍛造品に対する Vノッチシャルピー衝撃試験及び化学成分の要件は、本会の特別に定めるところによる。
(2) 厚さが 25 mm を超える材料の Vノッチシャルピー衝撃試験は、次のように実施されなければならない。

材厚 (mm)	試験温度 (℃)
25 < t ≤ 30	設計温度より 10℃低い温度又は-20℃のうち、いずれか低い方
30 < t ≤ 35	設計温度より 15℃低い温度又は-20℃のうち、いずれか低い方
35 < t ≤ 40	設計温度より 20℃低い温度
40 < t	本会の特別に定めるところによる

最小平均吸収エネルギー値は、試験片の寸法に応じて、表に定められた値以上としなければならない。

溶接後、熱的応力除去が完全に行われるタンク及びタンクの部品の材料は、設計温度より 5℃低い温度又は-20℃のうちいずれか低い方で試験をする。

熱的応力除去が行われる補強材及びその他の付着品の試験温度は、隣接したタンクの板の厚さに応じて要求される温度と同じでなければならない。

- (3) 設計温度が-40℃か又はこれより高い場合、本会の承認を得たときは、炭素含有量を、0.18%まで増加することができる。
(4) 代替として、温度制御圧延又は TMCP を用いることができる。
(5) 本会は、410 N/mm² を超える規格最小降伏応力を有する材料を特別に承認することがある。これらの材料に対し、溶接部及び熱影響部の硬さに特に注意を払わなければならない。

(備考)

試験温度が-60℃又はそれより低い材料で、その厚さが 25 mm を超えるものに対し、特別に処理された鋼又は表 GF7.3 に従った鋼が必要である。

表 GF7.3 設計温度が-55℃より低く、-165℃⁽²⁾までの燃料タンク、二次防壁及びプロセス用圧力容器用の板、形材及び鍛造品⁽¹⁾。ただし、最大厚さ 25 mm^{(3),(4)}とする。

最低設計 温度 (°C)	化学成分 ⁽⁵⁾ 及び熱処理	衝撃試験温度 (°C)
-60	1.5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又は TMCP ⁽⁶⁾	-65
-65	2.25%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又は TMCP ^{(6),(7)}	-70
-90	3.5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し、焼入れ焼戻し又は TMCP ^{(6),(7)}	-95
-105	5%ニッケル鋼 - 焼ならし、焼ならし後焼戻し又は焼入れ焼戻し ^{(6),(7),(8)}	-110
-165	9%ニッケル鋼 - 2 回焼ならし後焼戻し又は焼入れ焼戻し ⁽⁶⁾	-196
-165	オーステナイト系ステンレス鋼 - 例, 304, 304L, 316, 316L, 321 及び 347 タイプ, 固溶化処理 ⁽⁹⁾	-196
-165	アルミニウム合金 ⁽¹⁰⁾ - 例, 5083 タイプ 焼なまし	要求せず
-165	オーステナイト F_e-N_i 合金 (36%ニッケル鋼) 承認された熱処理	要求せず

引張及び衝撃試験要件

試験頻度:

板	ピースごとに試験
形材及び鍛造品	ロットごとに試験

じん性 (V ノッチシャルピー衝撃試験):

板	横方向試験片, 最小平均吸収エネルギー値 (KV) 27J
形材及び鍛造品	縦方向試験片, 最小平均吸収エネルギー値 (KV) 41J

注

- (1) 限界で使用する鍛造品の衝撃試験の規定は、本会の適当と認めるところによる。
- (2) 設計温度が-165℃より低い場合の要件は、特別に本会の承認を得なければならない。
- (3) 厚さが 25 mm を超える 1.5% N_i , 2.25% N_i , 3.5% N_i 及び 5% N_i 鋼については、衝撃試験を次のように実施しなければならない。

材厚 (mm)	試験温度 (°C)
25 < t ≤ 30	設計温度より 10℃低い温度
30 < t ≤ 35	設計温度より 15℃低い温度
35 < t ≤ 40	設計温度より 20℃低い温度

いかなる場合にも、試験温度は、表 GF7.3 に示す温度よりも高いものであってはならない。

最小平均吸収エネルギー値は、試験片の寸法に応じて、表に定められた値以上としなければならない。厚さ 40 mm 以上の材料については、最小平均吸収エネルギー値を特に考慮しなければならない。

- (4) 厚さ 25 mm を超える 9% N_i 鋼、オーステナイト系ステンレス鋼及びアルミニウム合金の使用については、本会の適当と認めるところによる。
- (5) 化学成分は、本会が適当と認める基準に従ったものでなければならない。
- (6) TMCP により製造された N_i 鋼は本会の適当と認めるところによる。
- (7) 焼入れ焼戻し鋼は、特に本会の承認を得て、さらに低い設計温度に対して使用することができる。
- (8) 特別な熱処理をした 5% N_i 鋼 (例えば 3 回熱処理したもの) は、衝撃試験を-196℃で行う場合に限り、本会の特別な承認を得て-165℃までの設計温度に対して使用することができる。
- (9) 衝撃試験は、本会の承認を得て省略することができる。
- (10) 5083 タイプ以外のアルミニウム合金については、じん性を確認するための試験を要求することがある。

＜引張試験＞

- (1) 引張試験は母材についてはK 編 2 章，溶接部についてはM 編 3 章の規定に従い，実施されなければならない。
- (2) 引張強さ，降伏応力及び伸びの規格値は，承認を得たものでなければならない。降伏点が明らかに示される炭素-マンガン鋼及びその他の材料は，降伏比について考慮する必要がある。

＜衝撃試験＞

-1. 材料試験は，特に定める場合を除き，V ノッチシャルピー衝撃試験を含むものでなければならない。V ノッチシャルピー衝撃試験の要件は，フルサイズ（10 mm×10 mm）の3 個の試験片の最小平均吸収エネルギー値及び個々の試験片に対する単独の吸収エネルギー値である。V ノッチシャルピー衝撃試験片の寸法及び許容公差は，K 編 2 章の規定による。5 mm サイズの試験片より小さい試験片については，適当と認めるところによる。サブサイズ試験片に対する最小平均値は，表 GF16.1 による。3 個のうち1 個の値は，規定の平均値以下であっても差し支えないが，その値が，規定の平均値の70%より小であってはならない。

表 GF16.1

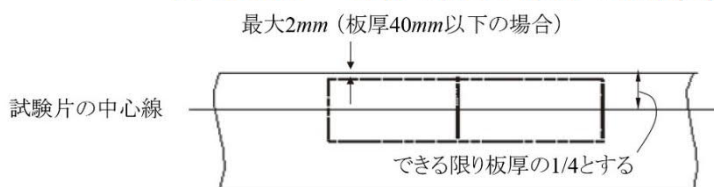
V ノッチシャルピー試験片寸法	3 個の試験片の最小平均値
10×10 mm	KV
10×7.5 mm	5/6KV
10×5.0 mm	2/3KV

(備考)

KV: 表 GF7.1 から表 GF7.4 に定める最小平均吸収エネルギー値 (J)

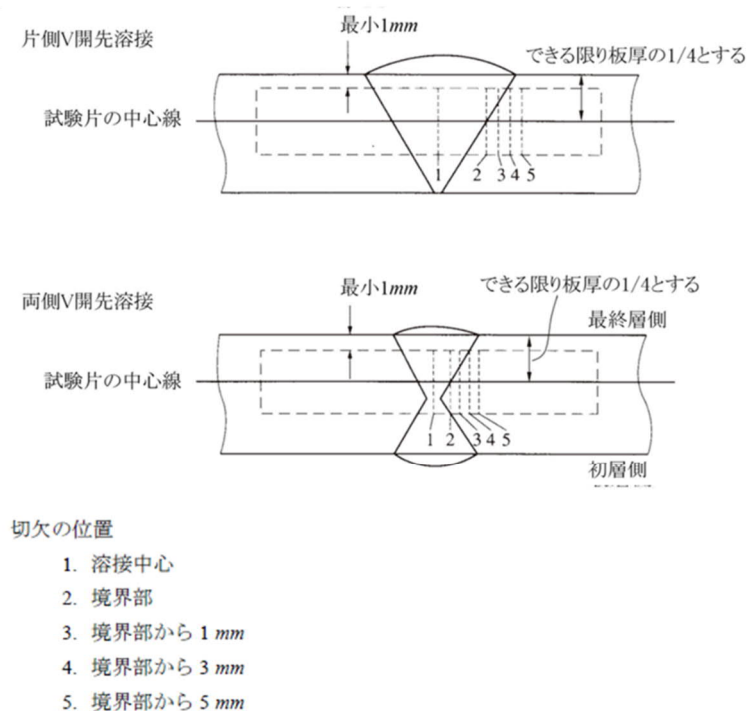
-2. 母材の試験片は，材料の厚さに応じて可能な限り最大寸法のV ノッチシャルピー衝撃試験片を，できる限り表面と厚さの中心線間の中央に近い位置が試験片の中央となるように採取し，切欠の長さ方向が材料表面と垂直になるように機械加工しなければならない。ただし，鋼材の厚さが40mm 以下の場合には鋼材の表面と試験片の端面との間隔が2mm 以下となるように試験片を採取すること（図 GF16.1 参照）。

図 GF16.1 母材の衝撃試験片の採取位置



-3. 溶接部における試験片は，材料の厚さに応じて可能な限り最大寸法のV ノッチシャルピー衝撃試験片を，できる限り表面と厚さの中心線間の中央に近い位置が試験片の中央となるように機械加工しなければならない。また，材料の表面と試験片の縁との距離は，1mm 以上を標準とする。両面V 開先の突合せ溶接では，溶接最終層側の表面に近い方から試験片を採取しなければならない。原則，試験片は図 GF16.2 に規定するように，溶接部の中心，境界部，境界部から1mm，境界部から3mm 及び境界部から5mm のそれぞれの位置から採取しなければならない。

図 GF16.2 溶接部の衝撃試験片の採取位置



-4. 3 個 1 組の吸収エネルギーの平均値が規定の平均値に満たない場合、2 個以上の試験片の値が規定の平均値より低い場合、又は 1 個の試験片の値が個々の試験片に規定される最小値より低い場合は、さらに同じ材料から 3 個の試験片を採取して再試験を行うことができ、結果は先に行った結果と併せて新しい平均値とする。この新しい平均値が規定の平均値以上の場合、合 6 個の試験片のうち、2 個以下の試験片の値が規定の平均値より低く、かつ、1 個以下の試験片の値が個々の試験片に規定される最小値より低い場合でも、ピース又はロットを合格とすることができる。

3.2.2 溶接及び非破壊試験（IGF コード 16.3）

● 一般

本節は船体内殻が二次防壁を形成する場合も含み、一次及び二次防壁に適用する。承認試験は、炭素鋼、炭素マンガ鋼、ニッケル合金鋼及びオーステナイト系ステンレス鋼に適用するが、このほかの材料の承認試験に適用しても差し支えない。ただし、承認によっては、オーステナイト系ステンレス鋼及びアルミニウム合金の溶接に対する衝撃試験は省略してよい。また、必要と認めた場合、本節に規定する以外の試験を要求することがある。

● 溶接材料

燃料タンクの溶接に使用する溶接材料は、特に認めた場合を除き、M 編 6 章の規定に適合したものでなければならない。溶着金属試験及び突合せ溶接継手試験は、特別の承認を得た場合を除き、すべての溶接材料について行わなければならない。引張及び V ノッチシャルピー衝撃試験の成績は、M 編 6 章の規定に適合しなければならない。この場合、溶着金属の化学成分を参考資料として記録しなければならない。

<溶接施工法承認(WPS)>

-1. 燃料タンク及びプロセス用圧力容器のすべての突合せ溶接について、次の-2.から-5.に従い、溶接施工方法承認試験を行わなければならない。

-2. 試験片は次の(1)から(3)に示す施工条件ごとに採取しなければならない。

- (1) 母材ごと
- (2) 溶接材料及び溶接法ごと
- (3) 溶接姿勢ごと

-3. 板の突合せ溶接の場合、圧延方向と溶接方向が平行になるように試験材を用意しなければならない。各溶接施工方法による板厚の範囲は、D 編 11 章及び M 編 4 章の規定によらなければならない。非破壊試験は D 編 11 章及び M 編 4 章の規定によらなければならない。

-4. 次の(1)から(5)に示す燃料タンク及びプロセス用圧力容器の溶接施工方法承認試験を、各試験材ごとに試験片を採取し、16.2 の規定に従い行わなければならない。

- (1) 横方向引張試験
- (2) 縦方向引張試験 (M 編 4 章の規定により要求される場合)
- (3) 横方向試験片による曲げ試験は、M 編 4 章の規定に従い、表曲げ、裏曲げ又は側曲げとする。ただし、母材と溶接金属の強度レベルが異なる場合、この曲げ試験に代えて、縦方向試験片による曲げ試験を要求することがある。
- (4) 3 個 1 組からなる V ノッチシャルピー衝撃試験片は、図 GF16.2 に示すように採取しなければならない。
 - (a) 溶接の中心線
 - (b) 境界部
 - (c) 境界部から 1mm
 - (d) 境界部から 3mm
 - (e) 境界部から 5mm

(5) マクロ試験、ミクロ試験及び硬さ試験を要求することがある。

-5. 試験は以下の要件を満足しなければならない。

- (1) 引張試験：横方向引張強さは使用母材の規格最低引張強さ未満であってはならない。アルミニウム合金材においては、アンダーマッチ（溶接金属強度が母材強度より低い場合をいう）となる場合の溶接金属強度に関する要件として、6.4.12(1)(a)iii)を参照しなければならない。溶接金属が母材より低い引張強さを有する場合、継手の横引張強さを溶接金属の規格最低引張強さ以上とすることを要求することがある。いかなる場合においても破断位置は、参考資料として記録しておかなければならない。
- (2) 曲げ試験：曲げ内側半径を試験片の板厚の 2 倍として 180 度曲げても外側に傷、割れ等を生じてはならないものとする。
- (3) V ノッチシャルピー衝撃試験：V ノッチシャルピー衝撃試験は、溶接される母材に対する規定の温度で行わなければならない。溶接金属の衝撃試験結果のうち、最小平均吸収エネルギー値 (KV) は、27J 未満であってはならない。溶接金属の要件のうち、サブサイズ試験片及び個々の最小吸収エネルギー値は、16.2.2 の規定による。境界部及び熱影響部の衝撃試験結果の最小平均吸収エネルギー値 (KV) は、試験材に応じて縦又は横方向のいずれかの規格に適合しなければならない。また、サブサイズ試験片の最小平均吸収エネルギー値 (KV) は、16.2.2 の規定による。材料の厚さがフルサイ

ズ試験片にも標準サブサイズ試験片にも加工ができないようなものの場合、試験方法及び判定基準は、適当と認めるところによる。

-6. 燃料タンク及びプロセス用圧力容器のすべてのすみ肉溶接について、D 編 11 章及び M 編 4 章に従い、溶接施工方法承認試験を行わなければならない。これらの場合、溶接材料は、十分な衝撃特性を有するものでなければならない。

<製品溶接確認試験>

-1. メンブレンタンクを除くすべての燃料タンク及びプロセス用圧力容器は、原則として突合せ溶接約 50m ごと及び各溶接姿勢ごとに製品溶接確認試験を行わなければならない。二次防壁については、一次防壁に要求されるものと同様の製品溶接確認試験を行わなければならないが、試験の数は、承認を得て減ずることができる。燃料タンク又は二次防壁に対して、次の-2. から-4. に定める要件以外の試験を要求することがある。

-2. 独立型タンクタイプ A 及びタイプ B の製品溶接確認試験は、曲げ試験及び、溶接施工方法承認試験で要求される場合は、3 個 1 組の V ノッチシャルピー衝撃試験を含むものでなければならない。試験は溶接 50 m ごとに行わなければならない。V ノッチシャルピー衝撃試験片は、切欠の位置が交互に溶接中心線と熱影響部（溶接施工方法承認試験の結果において最も小さい値を示す位置）となるように採取しなければならない。オーステナイト系ステンレス鋼については、すべての切欠が溶接中心線となるようにしなければならない。

-3. 独立型タンクタイプ C 及びプロセス用圧力容器については、前-2. に規定する試験に加え、横方向引張試験が要求される。試験要件は 16.3.3-5. の規定による。

-4. 品質保証／管理（QA/QC）システムは、材料製造者の品質マニュアル（QM）を考慮し、製品の溶接部の継続的な適合性を保証するものでなければならない。

<非破壊試験>

-1. 設計者が前提となる設計条件を満足させるために、より高度な基準の適用を明示した場合を除いて、すべての試験方法及び判定基準は、適当と認めるところによる。原則として内部欠陥を検知するために放射線透過試験を実施しなければならない。放射線透過試験に代えて承認された超音波探傷試験の採用を認めることがあるが、指定した箇所について、超音波探傷試験の結果を検証するために放射線透過試験による補足の検査を追加して行わなければならない。放射線透過試験及び超音波探傷試験の結果は保管されなければならない。

-2. 設計温度が-20℃より低い独立型タンクタイプ A 及び設計温度にかかわらず独立型タンクタイプ B にあつては、燃料タンクのタンク板のすべての完全溶込み突合せ溶接は、全長にわたり内部欠陥を検出するのに適した非破壊試験を行わなければならない。前-1. の規定を満たす場合、放射線透過試験の代わりに超音波探傷試験を実施して差し支えない。

-3. 防撓材並びに他の取付け物及び付着品の溶接を含むタンク構造の他の部分は、必要に応じ磁粉探傷法又は浸透探傷法によって検査しなければならない。

-4. 独立型タンクタイプ C の非破壊試験の施工範囲は、D 編 11 章の規定に従って全数又は抜取りとしなければならない。ただし、次に定める要件を下回ってはならない。

(1) 6.4.15-3.(2)(a)iii)の規定による全数非破壊試験:

- 放射線透過試験:

突合せ継手の 100%

- 表面き裂検出のための非破壊試験:

すべての溶接継手の 10%

開口周辺の補強リング、ノズル等の 100%

前-1.の規定により、放射線透過試験の一部を超音波探傷試験に代えることができる。さらに、開口周辺の補強リング、ノズル等の溶接について全数の超音波探傷試験又は内部欠陥に対する非破壊試験を要求することがある。

(2) 6.4.15-3.(2)(a)iii)の規定による抜取り非破壊試験:

- 放射線透過試験:

突合溶接継手の交差部全数及び全長の少なくとも 10%の抜取り

- 表面き裂検出のための非破壊試験:

開口周辺の補強リング、ノズル等の 100%

- 超音波探傷試験:

個々の場合に応じて要求することがある。

-5. 品質保証/管理 (QA/QC) システムは、材料製造者の品質マニュアル (QM) を考慮し、溶接部の非破壊検査の継続的な適合性を保証するものでなければならない。

3.2.3 水圧試験及び漏洩試験 (IGF コード 16.5)

- 建造中の試験及び検査

-1. すべての液化ガス燃料タンク及びプロセス用圧力容器は、タンクタイプに応じて、16.5.2 から 16.5.5 に規定する水圧又は水圧-空気圧試験を行わなければならない。

-2. すべてのタンクは、前-1.の規定による圧力試験と同時に又は別個に、漏洩試験を行わなければならない。

-3. 6.3.1-3.の規定による燃料格納設備のガス密性を確認するための試験を行わなければならない。

-5. 新型式の独立型タンクタイプ B 又は 6.4.16 の規定に基づき設計されたタンクが設けられる船舶では、少なくとも 1 個のプロトタイプタンク及びその支持構造には、16.5.1-1.に規定する試験において、応力レベルを確認するためのひずみゲージ又は他の適当な装置を設置することを要求することがある。タンクの形状並びに支持構造及び付属品の配置によっては独立型タンクタイプ C に対しても、同様の計測装置を要求することがある。

<水圧試験、漏洩試験>

-1. 組立完了時に各圧力容器は、タンク頂部で測った圧力が $1.5P_0$ 以上となる圧力の下で水圧試験を行わなければならないが、いかなる箇所においても計算による一次一般膜応力が試験中に、設計温度における材料の降伏応力の 90%を超えてはならない。単純な円筒形又は球形の圧力容器を除き、計算上この応力が降伏応力の 75%を超える場合、同じシリーズの最初のタンクで歪ゲージ又は他の適当な装置を用いて前記の条件を満足することを確認しなければならない。

- 2. 試験に使用する水温は、組立て状態の材料の無延性遷移温度より少なくとも 30℃高い温度でなければならない。
- 3. 圧力は、板厚 25 mm につき 2 時間保持しなければならないが、いかなる場合も 2 時間未満としてはならない。
- 4. 液化ガス燃料用圧力容器に対して必要な場合、水圧-空気圧試験を前-1.から-3.に示す状態で行うことができる。
- 5. 使用温度に応じてより高い許容応力を用いる圧力容器の試験について、特別の考慮を払うことがある。ただし、前-1.の規定には完全に適合しなければならない。
- 6. 工事完了後、各圧力容器及びその付着品は、適当な漏洩試験を行わなければならない。この試験は前-1.又は-4.のうち該当する規定による試験と同時に行ってよい。
- 7. 液化ガス燃料用タンク以外の圧力容器の空気圧試験は、個々の場合に応じて適当と認めた場合にのみ行うことができる。この試験は、圧力容器が安全に水を満たすことができないように設計されもしくは支持されているか又はこれらの容器を乾燥できず、かつ、使用中に試験用媒体の痕跡を許容できない場合にのみ認められる。

3.2.4 ガストライアル及び燃料満載試験（IGF コード 16.5）

● 建造中の試験及び検査

- 6. 最初に LNG 燃料を補給し、安定した温度状態に到達したとき、燃料格納設備全体としての性能が設計上のパラメータに適合することを、適当と認める要件に従って確認しなければならない。設計上のパラメータを確認するために重要な構成要素及び付属品の性能についての記録は、船上に保管し、かつ、いつでも提示できるようにしておかなければならない。
- 7. 燃料格納設備については、最初に LNG 燃料を補給し、安定した温度状態に到達したとき又はその直後にコールドスポット検査を行わなければならない。目視検査ができない防熱材表面の検査については、適当と認めるところによる。
- 8. 6.4.13-1.(1)(c)及び 6.4.13-1.(1)(d)に従ってヒーティング設備を設ける場合、この設備は要求される熱出力及び熱分布についての試験をしなければならない。

<ガストライアル>

表 GF16.5.1-1.に示す項目について、全ての工事が完了した後に、適当量の燃料液を用いて燃料格納設備、燃料取扱い機器及び計測装置の性能を確認する試験を行うこと。ただし、オペレーション上、クールダウンを行う必要が無く、また、規則 GF 編 6.9.1-1.に規定される方法により燃料の圧力・温度制御を行う必要が無い燃料タンクにおいては、燃料タンク建造者が初めて建造する燃料タンクである場合を除き、表 GF16.5.1-1.の項目 5.及び 6.に掲げる試験対象機器の性能について、製造工場または造船所において代替の媒体による作動試験等により確認することを条件に、ガストライアルの省略を認めることがある。

<燃料満載試験>

すべての工事が完了した後、計画した燃料を満載した状態で燃料格納設備、燃料取扱い機器及び計測

装置が計画された条件を満足していることを確認するための試験を行う。ただし、特に必要と認めた場合を除き、本試験は省略して差し支えない。

- ・ ガストライアル及び燃料満載試験に使用する実燃料液及びガスの種類は、燃料格納、移送設備、再液化装置等の設計条件上、最も厳しい条件を再現できるものとする。また、設計温度に関する確認は、設計温度を決定する基となった燃料をできる限り設計使用温度に近い温度まで冷却した状態で再現して行うこと。
- ・ ガストライアル及び燃料満載試験に使用する実燃料液及びガス量は、定められた諸試験を行うのに十分な量とすること。
- ・ 燃料満載試験は、ガストライアル時に同時に行っても差し支えない。
- ・ 規則 GF 編 16.5.1-7.に規定する燃料タンクの隣接船体構造のコールドスポット検査は、メンブレンタンク及び必要な場合、独立型タンクに対して前-4.に定めるガストライアル時に行うこと。

3.2.5 その他のタンク関連機器（IGF コード 2.1）

● 機器等の承認

天然ガスを燃料として使用する船舶にあっては、当該ガス燃料の利用を目的として備える装置及び機器等については、承認を得たものでなければならない。

LNG 燃料タンクに関連する装置及び機器の例としては、次が挙げられる。

- ・ 燃料格納設備、プロセス用圧力容器並びに燃料及びプロセス用管装置に設ける弁
- ・ 燃料格納設備、プロセス用圧力容器並びに燃料及びプロセス用管装置に設ける逃し弁
- ・ 燃料格納設備及びプロセス用圧力容器並びに液体窒素タンク内の液位を計測する装置
- ・ 燃料格納設備及びプロセス用圧力容器内の圧力を計測する装置
- ・ 燃料格納設備及びプロセス用圧力容器内の温度を計測又は指示する装置
- ・ 燃料格納設備及び燃料管装置に施される防熱材料

これらの機器については、各製造メーカーの出荷時において、必要な試験・検査を受け、承認を得たものである必要がある。

表 GF16.5.1-1. ガストライアルの試験項目

項目	◎本会検査員立会 ○記録提出	主たる試験対象機器	主たる確認内容
1.ドライニング試験	○	・イナートガス発生装置	・露点 ・乾燥度の経時変化 (燃料タンク内、燃料貯蔵ホールスペース内)
2.イナートティング試験	○	・イナートガス発生装置	・イナートガス発生装置の運転状態 ・燃料タンク内雰囲気計測
3.燃料ガスによるイナートガスバージ試験	○	・燃料蒸発器 ・圧縮器	・燃料タンク内 O ₂ /燃料ガス温度経時変化 ・燃料ガス(又は液)供給量 ・蒸発器性能 ・圧縮機性能
4.クールダウン試験	◎/○	・スプレーポンプ ・圧縮機 ・燃料液、ガス管系 ・燃料タンク温度計 ・スプレー管系	・燃料タンク温度降下曲線 ・燃料貯蔵ホールスペース内検/タンク防熱状況 ¹⁾ (クールダウン終了時) ・燃料タンク及び支持構造(外観) ・燃料タンク隣接船体構造(コールドスポット) ・燃料タンク及び支持構造の防熱材性能(コールドスポット) ・スプレー管系の冷却状態 ・燃料液、ガス管系の冷却状態 ・スプレーポンプ性能 ・燃料消費量 ・圧縮機性能 ・燃料タンク温度/圧力 ・燃料タンク収縮量 ²⁾
5.燃料液積込試験	◎/○	・圧縮機 ・積荷関連液、ガス管系 ・液面計/温度計	・燃料タンク温度/圧力/液面 ・燃料貯蔵ホールスペース温度/圧力 ・マニホールド部の燃料液、ガスの温度/圧力 ・燃料液、ガス管系の使用状態
6.燃料ポンプ作動試験	◎/○	・全燃料ポンプ	・燃料ポンプ吐出圧/電流値 ・燃料タンク液面/圧力 ・ストリップング状態
7.圧力/温度制御装置作動試験	◎/○	・制御装置の形式により異なる	・同左

(注)

- 1) 本会は、防熱材の品質管理状況及び建造実績を考慮して省略を認めることがある。
2) 独立型タンクの場合のみを確認する。

3.2.6 ボトルネックの整理・検討

LNG 燃料タンク製造に係る規則要件については、3.2.1 から 3.2.5 に記載したとおりである。これら要件の中で、タンク製造環境を整備する上でボトルネックとなり得る事項を次に記載する。

-1. 材料

前 2.1.2 に記載したように LNG 燃料タンクの材料については、LNG 輸送時の温度（常圧、 -162°C ）を踏まえると、規則要求上、9%Ni 鋼、オーステナイト系ステンレス鋼、アルミニウム合金、オーステナイト Fe-Ni 合金のいずれかを用いる必要がある。鋼材価格、溶接性及び強度の観点からそれぞれ長短あるが、現在のところ、総合的に 9%Ni 鋼が Type C タンクの材料として、最も用いられている。しかしながら、後述するように国内で現在 9%Ni 鋼を供給する製鉄会社が 1 社であること、そのため LNG 燃料船の需要増大に供給量が追いつかない恐れがあること、Ni 原料の価格が高騰していること等から、価格及び物量の面から、安定的な供給が困難となる可能性もあり得る。

物量面に対しては、海外からの輸入に依存している Ni 原料の安定的な確保及び 9%Ni 鋼の国内供給体制の整備が必要になる。

大阪ガス泉北製造所にてすでに実績のある陸上用大型 LNG タンクに用いられている 7%Ni 鋼は、9%Ni 鋼に比べて、Ni の使用量も少なく価格競争力もあることから、これを活用することも有用な解決策となり得る。しかしながら、現在の IGF コード要件では、船用 LNG 燃料タンクにこの 7%Ni 鋼を使用することが認められていない。よって、今後、我が国より IMO にコード要件の改正提案を働きかけることが必要になるものとする。

-2. 非破壊試験

前 3.2.2 に記載したように、LNG 燃料タンクの製造にあたっては、突合せ溶接継手の 100%を放射性透過試験（RT）により、溶接品質の健全性を確認しなければならない。RT は、人体に有害な放射線を照射するため、人払いをする等他の作業者がいない状況で実施する必要がある。そのため、LNG 燃料タンク製造者は、膨大な試験箇所に対して、休み時間や夜間に試験を実施している。概算ではあるが、1,750m³ のタンク 1 つに対し、約 1000 枚撮影が必要であり、1 枚あたり 20 分として、約 300 時間作業工数がかかる。

規則上は、この RT の一部（最低限 10%は RT）を超音波探傷試験に替えることが認められており、代替試験方法が採用されれば、製造工程の効率化に寄与し得ると考えられるが、そのためには、タンク製造者自らが、代替試験方法の技術的妥当性を証明し、船級協会の承認を得る必要がある。代替試験方案承認取得に要する労力を割く余力が無く、代替試験方法の採用をあきらめている製造者もいる。

-3. 水圧試験

前 3.2.3 に記載したように、LNG 燃料タンク（Type C タンク）は、構造安全性の確認のため、タンクに水を満杯まで漲水しての水圧試験の実施が要求される。タンクへの漲排水及び試験後のタンククリーニングに要する時間は、合計 1 か月以上となる。この水圧試験を水圧-空気圧試験にて代替できれば、製造工程の効率化に繋がる。しかしながら、3.4.2-2.に記載のとおり、その適用については、船級協会や監督官庁による慎重な検討と承認が必要になる。

また、水圧試験実施に際しては、十分な強度を有する地盤が必要になるため、製造するタンクの容量によっては、製造者は、地盤改良工事を実施する必要性が生じる可能性もある。

さらに製造所が位置する地域環境によっては、工業用水の使用ができない、夏場の水不足等の問題を抱える可能性もある。

3.3 LNG 燃料タンクの防熱に関する調査

本項は国内タンク防熱施工メーカーからヒアリングした調査結果に基づき LNG 燃料タンク防熱に関して述べる。調査対象のメーカーはいずれも国内 LNG・LPG 船運搬船用の貨物タンク防熱工事で多数実績があり、これらの施工実績をもとに、LNG 燃料タンク用の防熱工事への展開を進めているところである。

3.3.1 タンク防熱施工業者の施工基準の調査

タンク防熱材は硬質ポリウレタンフォームを適用する。ウレタンフォームは原料としてイソシアネート成分とポリオール成分（ポリオールに触媒、発泡剤、整泡剤などを混合したもの）からなり、この2液を一定割合で攪拌すると、化学反応により発泡剤のガス化による体積膨張と樹脂化（重合反応）による骨格形成が並行し、時間経過と共に硬化して発泡ガスを内包した樹脂が形成されるのが特徴である。ポリウレタンは断熱性能に優れ、施工現場での発泡が容易な施工であり、現場発泡（スプレー吹き付け、注入）や成形品加工・取付など、対象物や施工環境等に応じて選択することが可能である。LNG 燃料船向けタンクの施工方法として各社が実施もしくは検討している工法は以下のとおり大別される。なお国内施工メーカーは LNG 運搬船 TYPE-B タンク防熱にパネル工法、タンクドームトップ（暴露部）防熱にスプレー工法を適用し、LPG 運搬船のタンク防熱に注入工法及びスプレー工法を適用した実績がある。

工法	概要
スプレー工法	スプレーでターゲット厚みまで吹付ける。ウレタン発泡完了後、外装材としてポリウレタもしくはFRPを施工する。
スプレー＋注入工法	スプレー吹き付けである程度厚みを出した後、ターゲット厚みとなる高さ位置に一定ピッチでウレタンスラブ（成形品）を配置し、これを橋渡しにして表層材（シート状のポリウレタの、プレファブ品）を仮固定し、表層材とスプレー施工済の間の空間を注入発泡により充填して接着させる。
パネル工法	タンクにスタッドを溶接してパネル（プレファブ成形品、表層材付き）を固定、パネル間の目地部は現場発泡で充填する。

施工基準は、各メーカーとも採用工法、品質リスクに対する考え方の違い、使用する原材料メーカーの推奨値の違いなどにより異なるが、概ね共通して以下を管理項目として設定している。

(1) 施工面

パネル工法以外の現場発泡による工法はタンク施工面にフォームが接着し防熱構造が保持される。施工面に汚れ・油分が付着している場合、施工面温度が低い場合、湿気を帯びている場合は、ウレ

タン反応が阻害され十分な接着力が得られず剥離を起こす原因となる。環境条件は外気温+5℃以上、湿度85～90%以下で設定される場合が一般的である。

(2) 厚さ寸法

LNG 燃料タンク防熱の厚みは一般的に 300～400mm 程度である。所定の断熱性能を確保する為に厚みはターゲットに対してプラスレランスとする。スプレー工法の場合、1 回の吹付厚さは 25～30mm 以下として、ターゲット厚さまで多層吹きする。短時間に一気に部厚く発泡すると発熱反応による熱が内部に蓄積し、スコーチ（焼け）が発生し火災に至る危険性がある。また硬化後の収縮やクラックの発生要因となる。

(3) 密度チェック

ウレタンの密度は、密度は強度や熱性能とも相関があり適切に混合されているか（材料や発泡機に異常がないか）手早く判断する為の指標となる。日々の施工開始時に試し発泡を行ってその密度を確認し記録を残す。試験片はサンプリング用のバッグを準備するなどして同じ条件下で作成し、規定値内に収まっていることを確認する。日々の計測データは温度・湿度などと共に記録を蓄積してバラツキの幅や傾向を把握することが望ましい。また試験片は適当な頻度を設定して施工面からもランダムサンプリングして密度チェックし、施工品質を確認することが望ましい。

(4) ウレタン性状

施工者は寸法や密度といった数値化された基準以外にも、目視や指触によりウレタンの性状を確認する。ここで材料不良や施工環境、発泡機の不備等の兆しをいち早く察知することが品質確保や工程キープするうえで重要となる。

(5) 充填状況検査

注入工法を適用する場合は視認できないため、注入漏れやボイド、充填不良（エアポケット）などが無いかタッピング（打音チェック）を実施する。

(6) 外観検査

外観の目視検査は最終仕上げ状態だけではなく、各工程完了時に実施し、当て傷や落下物などによる防熱部材にダメージがないか確認して補修があれば完了させてから次工程に移る。表層材の割れは防熱内部へ水分侵入を許容し、金属部の腐食や凍結膨張による更なる防熱ダメージ進展のリスクに繋がる。とりわけパイプやサポート周りの防熱端部は確実にシールされているか確認することが重要である。

3.3.2 施工環境制約（条件）と国内気候環境との関連性（影響）の把握

ウレタンフォームの主成分であるイソシアネートは水分と反応するため施工現場の雨除けは必須である。また大気中の水分とも反応する為、原材料メーカーが推奨する相対湿度以下を施工条件として設定している。原材料の入ったドラム缶は封を切った後は出来るだけ速やかに使用し工事が断続する場合は密

閉して保管しなければならない。発泡ウレタンガンや送液ホースは大気中の水分と反応して内部に樹脂が固着すると吐出バランスが崩れに発泡不良の原因となり得る為、日々のメンテ（ガン洗浄・交換、ホース入口の塞ぎ等）は必須である。

LNG/LPG 運搬船の工事経験では雨季など湿度条件を満足しない場合もあったが、別作業やスポットクーラーによる除湿等で対処し、工程進捗に著しく支障を来したことはない。

温度条件については季節ごとに注意が必要である。

冬場の工事は施工面が冷えて反応熱が奪われてしまうことに注意が必要であり、5℃以上を施工基準として設定している。比較的気候の穏やかな工事現場の場合は早朝の工事を避けるなど工程調整で対処できているが、寒冷地の場合はヒーターを設置するなどの対策が必要となる。またスプレー工法の場合、施工面に薄く吹き付けて予熱を与えてから吹き付ける等の工夫が必要である。発泡前の原液の保温については通常発泡機械にヒーターがついており適切にメンテナンスを行っていれば問題にはならない。

夏場の工事は原材料の保管・配材の管理が重要となる。たとえば国内原材料メーカーの発泡剤の主成分として使用されている HFC-245fa の沸点は大気圧下で 16℃程度であり、直射日光に長時間曝すと原液が沸騰してドラムが膨張する。直射日光があたらない倉庫に保管すればエアコン等の設備は必要ないが、配材・施工計画において原材料が長時間直射日光に曝される可能性がある場合はテントやエアコン付きコンテナ倉庫の利用などを考慮する必要がある。

また夏場は施工面が熱を帯びており反応速度が速くなる傾向にある。

施工者はこうした季節ごとの材料の性状の違いを認識して工事に臨む必要がある。材料メーカーによっては施工メーカーと協議して施工時期に応じて反応速度をチューニングした事例もある。

ウレタン発泡中はミストが飛散するため施工現場はシートで囲う必要がある。作業者は安全マスクを着用し換気には十分注意し、夏場の工事は熱中症対策を講じる必要がある。

その他、施工環境制約として気候環境との関連性はないが、ポリウレタンやポリウレアは難燃剤を配合して延焼性を抑制しているものの本質的に可燃物であり、発泡機械設置場所及び発泡工事箇所はもとより、原液保管場所、加工場所、廃材置き場も火気厳禁としなければならない。

3.3.3 LNG 燃料タンク防熱施工能力拡大のための課題調査

LNG 燃料タンク防熱工事は LNG 船や LPG 船に比べて小規模であるが複数の施工現場で並行して工事する機会が多くなると予想される。施工能力拡大のためには設備、工事監督者および作業員の増員が必要となる。設備と専門知識・技術を要する発泡工程がボトルネックになると予想され、今後の建造計画、需要予測に応じて計画的に準備する必要がある。

ウレタン発泡を担う作業者はウレタン性状などから潜在的な問題点を察知する判断できる人材が求められる。こうした経験知は文章化したマニュアルのみでは十分に伝わらず、教育や演練、OJT を通して習熟度をあげていくことが望ましい。

3.3.4 省 CO2 な製造工程の整理・検討

省 CO2 の観点からは以下の取組が考えられる。

(1) 原材料削減

施工開始前の発泡機調整や密度チェックは品質確保するうえで必須の作業であるが、工期が長引いたり発泡工事が断続的に行われたりすると、これらの作業を繰り返す頻度が増えて必然的に材料の歩留まりは悪化する。またポリウレタン発泡は反応開始から膨張、硬化までに時間差があり施工面への適用量を見誤ると大量に溢れ出て削り作業が発生する。こうして無駄にした材料は全て産業廃棄物として処理しなければならない。

歩留まりを改善するには、発泡工事を連続的に実施する工程を組んで機器調整・品質確認の頻度を下げる、原材料の性状を把握し発泡量を適切にコントロールするようスキルアップする、といった取り組みが必要である。

(2) 電力節約

上述の施工効率の改善は、原材料削減のみならずポリウレタンおよびポリウレア施工に使用する発泡機械の稼働時間の短縮につながり電力節約の観点からも重要となる。

(3) ウレタン原液への切り替えによる脱フロン・低炭素化

LNG/LPG 船タンク防熱のポリウレタンにはフロン系発泡剤を使用している。LNG/LPG タンク防熱の黎明期にはクロロフルオロカーボン(CFC)が使用されていたがオゾン層破壊の原因となることが判明して全面廃止が決定し、その代替となるハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)を経て、現在はオゾン層を破壊しないハイドロフルオロカーボン(HFC)が主流となっている。HFCは地球温暖化係数が高いことが課題となっており規制化が進みつつあり、近年、より環境負荷の小さいハイドロフルオロオレフィン(HFO)などノンフロンへ切り替えとなる見通しであり今後の動向に注視する必要がある。フロンは化学的に安定、燃え難く、液化しやすい、人体に毒性がないといった利点があり、切り替えにあたっては断熱性能や施工性といった設計、品質・施工管理のみならず、材料の品質保持期限、燃焼性、毒性など物流や安全管理方法を含めて従来適用してきた手法を踏襲できるのか検証を進める必要がある。

3.3.5 省 CO2 な製造工程に必要とされる設備の整理・検討

省 CO2 な工事を遂行するには前述のとおり発泡工事の施工効率と原材料の歩留まりを向上させて、電力使用や廃棄量を削減することが肝要である。

(1) 足場

高所作業はブームリフト使用も考えられるが、発泡工事を連続的に施工するうえで総組足場の方が効率的である。足場は上下移動や材料搬入ルート、ホース取り回しのスペース確保など施工メーカの意見を聴取して計画するのが望ましい。

(2) スポットクーラー（除湿器）、ヒーター

環境要因（温度・湿度）に左右されず安定した品質を確保して工事を遂行するには、環境を一定に保つべく、スポットクーラーやヒーターを準備することが望ましい。

(3) 物流計画

ポリウレタンに配合する発泡剤 HF0 は HFC に比べて化学的に不安定で分解しやすい（ゆえに地球温暖化係数が低い）ため、品質保持期限(Shelf life)が短くなる（一般的に HFC は 6 カ月程度に対して HF0 は 2～3 カ月程度）。HFC から HF0 への切り替えに伴う発泡機等の設備への影響は無いが、品質保持期限が短くなる点に十分留意し、工事・物流計画を立てる必要がある。

(4) 防熱工事棟

防熱工事は、3.3.6 節に示す通り、温度・湿度の条件を満足しない場合は作業を中断する必要がある。移動屋根のみの建屋にてヒーター、乾燥機等を用いて温度・湿度の環境制御を実施する場合は、効率の悪さから多くのエネルギーを必要とするが、密閉された防熱工事棟を設けて、温度・湿度管理を実施することにより、環境制御に要するエネルギーを削減できるとともに、防熱工事の中断期間をゼロまたは最小化できるメリットがあり、トータルとして省 CO2 に貢献できると考えられる。

実際に環境省補助を受けて、防熱工事棟を設置した新来島サノヤス造船では、移動屋根のみの建屋で必要とされるヒーター・乾燥機類の消費エネルギーを 80%削減できる見込みである。（写真 3.3.5-1）



写真 3.3.5-1 防熱工事棟の例

3.3.6 国内施工環境に適した防熱施工方法

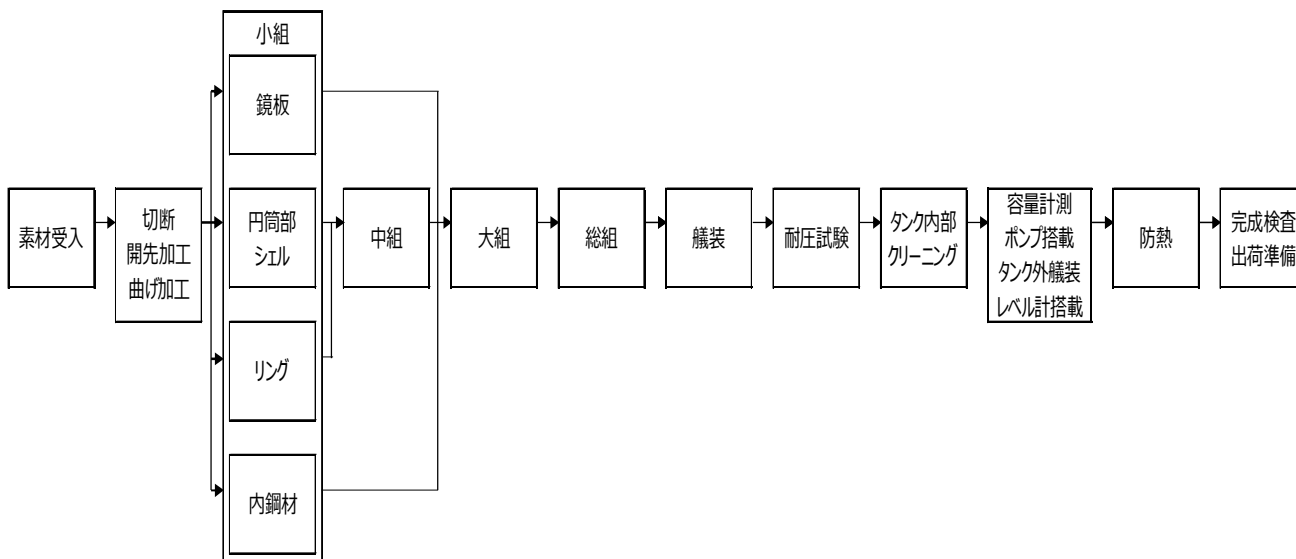
雨除けされた施工環境であれば、国内の気候（温度・湿度）が材料の使用条件に抵触する頻度はそれほどなく、実際 LNG 船・LPG 船でも環境要因の問題は工程調整、除湿器・ヒーター使用などで都度対応できている。従来の経験に基づく施工方法で十分に通用すると言えるが、今後とも品質安定化、施工効率化を追求するうえでは天候に左右されず都度調整作業が発生しない温度・湿度が管理された安定的な環境を準備することが好ましい。

3.4 LNG 燃料タンクの製造工程（曲げ・溶接加工工程等）に関する調査

3.4.1 LNG 燃料タンクの製造工程について

LNG 燃料タンク製造工程の例として次表のとおりに示す。

LNG 燃料タンク製造工程については各製造者の設備などにより異なる点は注意いただきたい。



以下、各工程の概要について述べる。

-1. 素材受入

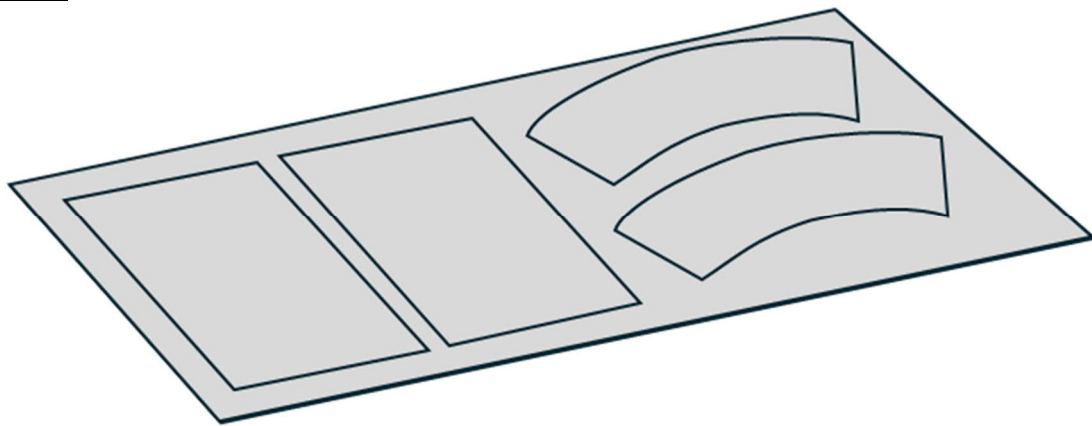
鋼材メーカーへ発注し出荷された 9%Ni 鋼材を受け入れる。

通常、鋼材メーカーにおいて消磁された状態で出荷されるが、受入後磁気の確認を行うことが望ましい。また保管においては、コンタミ防止のため他の一般炭素鋼材との保管区画を明確に区別することや、マグネット等の磁気を発生するものからの隔離、雨水、表面の傷をつけない等の対策を行う必要がある。

-2. 切断・開先加工・曲げ加工

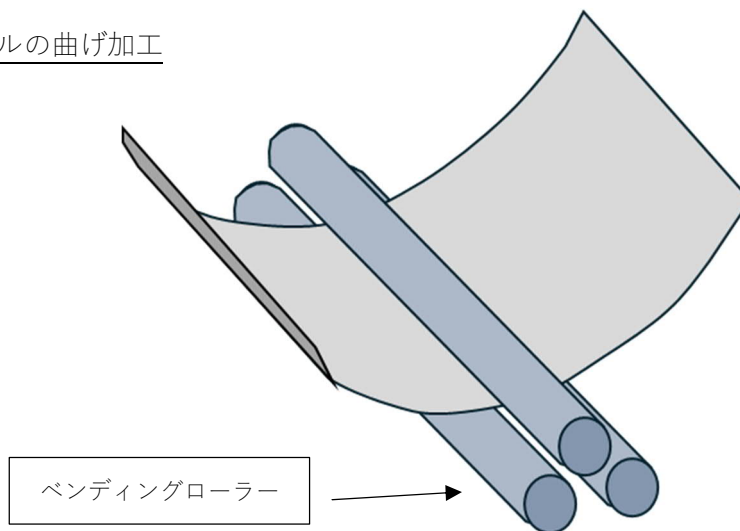
9%Ni 鋼材を鏡板、円筒部シェル、リング、内鋼材それぞれの部材用として、切断、開先加工を行う。材料の歩留まり（端材率）を減らす工夫が必要である。9%Ni 鋼材のガス切断面にはニッケルリッチ層が析出するため、溶接面となる切断面のニッケルリッチ層は機械加工やグラインダ等により除去する必要がある。

鋼板の切断



鏡板や円筒部シェルの曲げ加工には、低温靱性を確保する熱処理を鋼材製造時に実施しているため、熱間加工は行えず（加熱・冷却による歪取もできない）、ベンディングローラーやプレスを用いる冷間加工を行う。やむを得ず熱間加工が必要となる部材は、再度焼入れ焼戻し加工を行い、機械試験が求められる場合がある。

円筒部シェルの曲げ加工



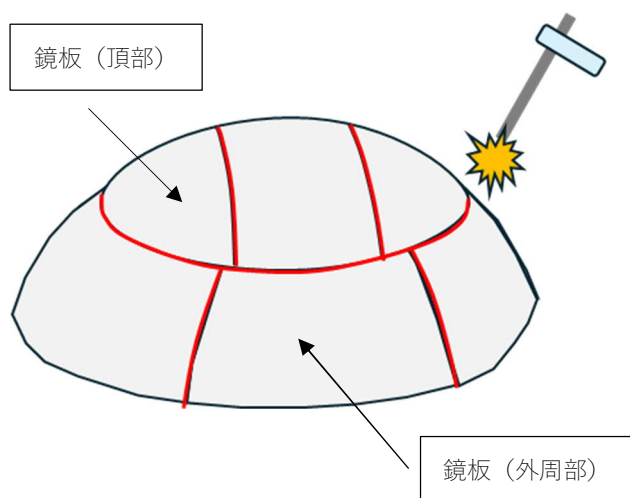
-3. 小組

切断された 9%Ni 鋼材の加工を行う。

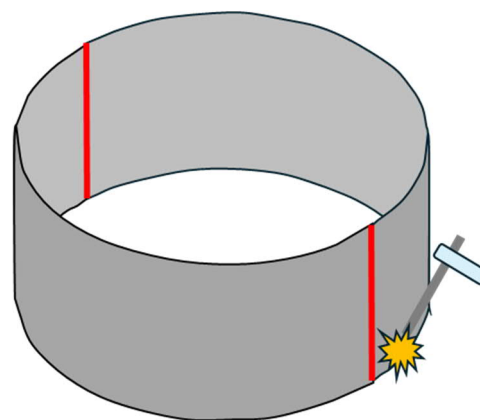
鏡板は曲げ加工された頂部を組立て溶接後、外周部を組立て溶接する。溶接完了箇所は順次非破壊検査を実施する。

円筒部シェルは曲げ加工された円弧状の部材の長手継手の溶接を行い、円筒形に組立てる。溶接完了箇所は順次非破壊検査を実施する。

鏡板の組立

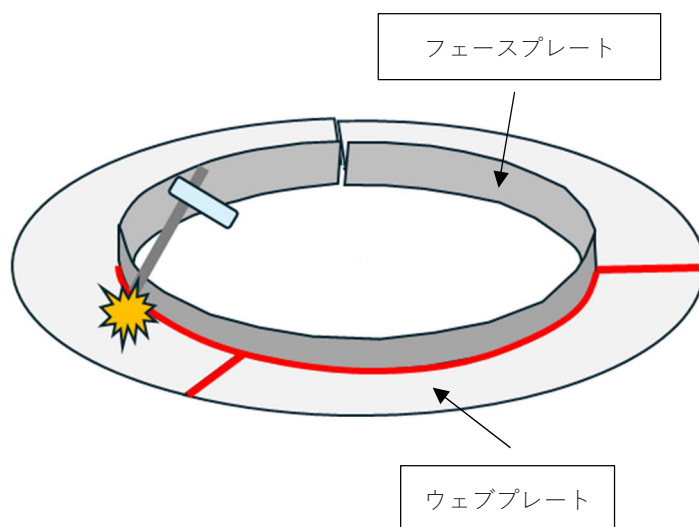


円筒部シェルの組立

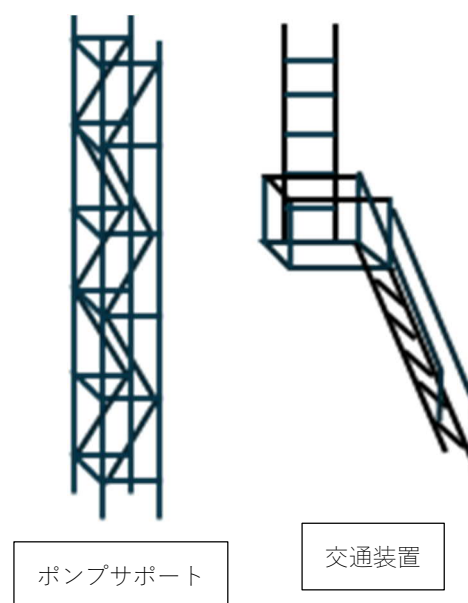


リング（タンク内補強殻材）は、切出されたフェースプレートとウェブプレートを仮組後、溶接を行う。
タンク内の交通装置、ポンプサポート構造等の内鋼材についても組立溶接を実施する。

リングの組立



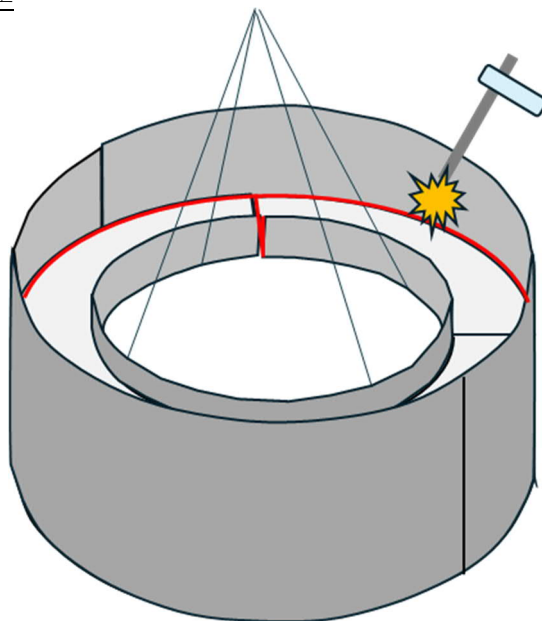
内鋼材の組立



-4. 中組

円筒形に組立てた円筒部シェルのリングを挿入し溶接組立を行う。溶接完了箇所は順次非破壊検査を実施する。

円筒部シェルとリングの組立

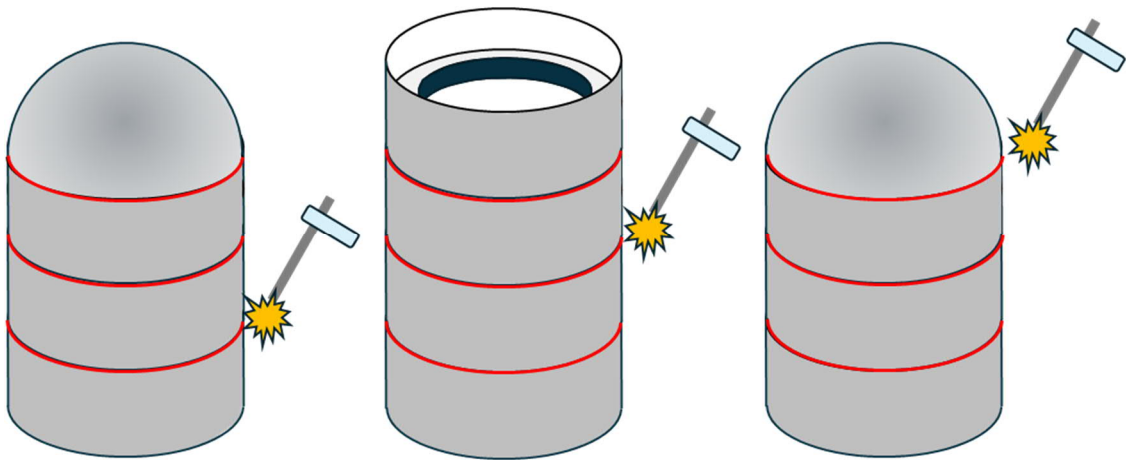


-5. 大組

円筒部シェル及び鏡板をブロックごとに組立て、周継手の溶接を行う。溶接個所は順次非破壊検査を実施する。被覆アーク溶接（SMAW）を適用する場合には円筒部シェルを縦に段積みしながらブロックを組み立てていくことが一般的であるが、大型ローラーの設備があれば円筒部シェルを横向きに並べサブマージアーク溶接（SAW）やガスタンクステンアーク溶接（GTAW）を用いた自動溶接法の適用も検討が可能だと考えられる。

小組段階で製作したタンク内の交通装置やポンプサポートは、部材の配材・溶接機材段取りや換気対策といった作業性の観点からもこの大組段階での取り付けが望ましい。

ブロックの組立

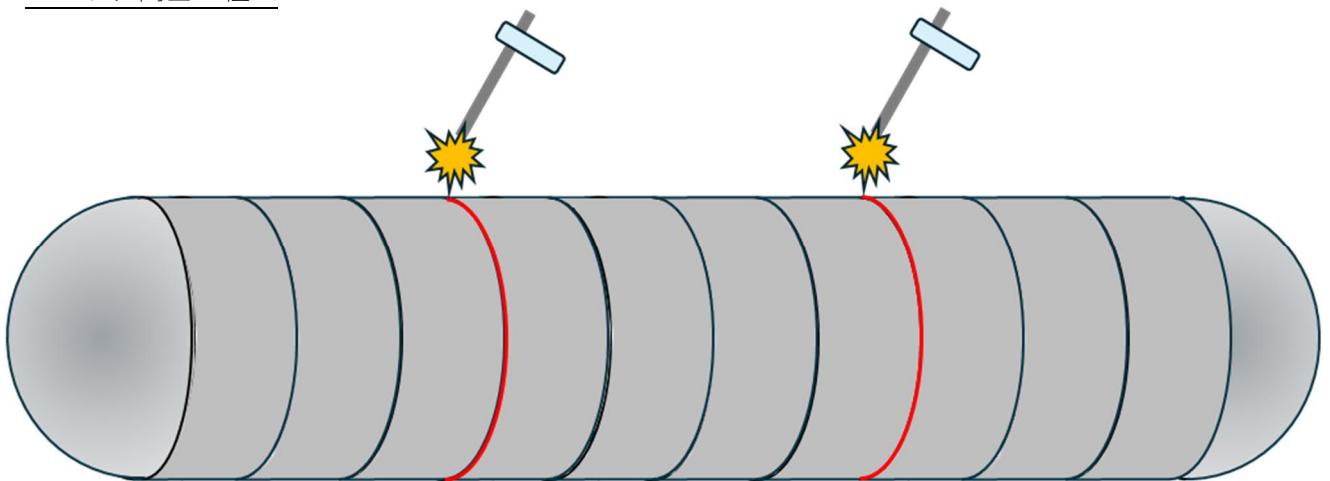


-6. 総組

大組ブロックを組立て、周継手の溶接を行い最終のタンク形状とする。溶接箇所は順次非破壊検査を実施する。組立てる前に内部配管やサポートをあらかじめ配置しておく。先行で取付けられるものは工事を終わらせておくことが作業性確保のためには望ましい。

大組と同様に設備次第では自動溶接の適用も考えられる。

ブロック同士の組立



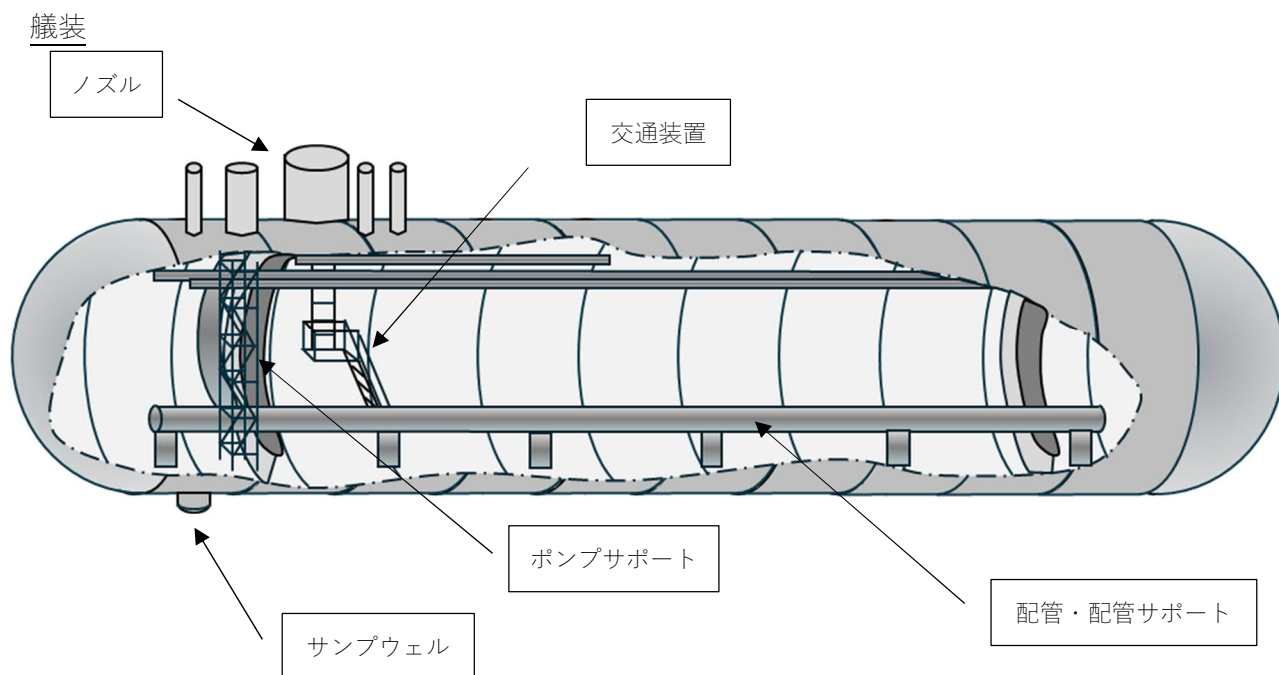
-7. 艀装

タンクシェルにノズル及びサンプウェル用の穴を開け、溶接を行い取付ける。特にノズルに関してはフランジ面の水平度やノズル自身の垂直度に対し注意が必要となる。

総組前にタンク内へ配置した配管サポートの溶接工事を行い、配管を行う。

交通装置やポンプサポートの取付けをブロック段階でできていなければ、この工程で実施する。

内部の艀装と並行してタンク外側に断熱支持材（プレスウッド）を取付ける。



-8. 耐圧試験

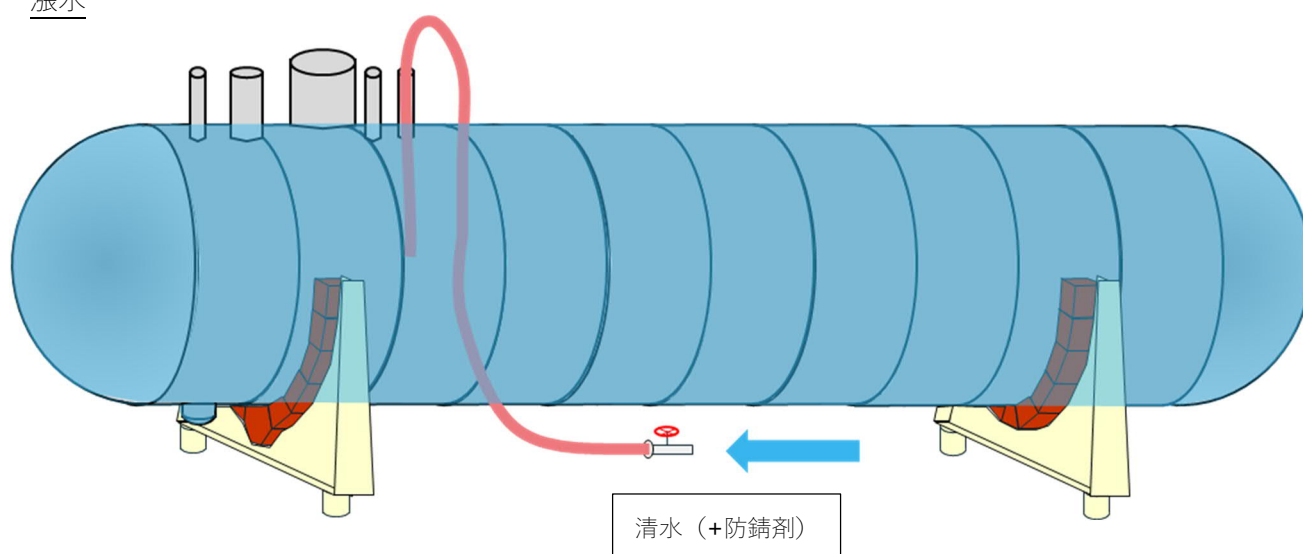
耐圧試験用漲水の前に、タンク組立やタンク内艦装工事にて発生した残材や粉塵等の清掃を行う。併せて、タンク内の配管内部への異物混入を防止する処置を行っておくことが望ましい。

耐圧試験は清水を利用し、耐圧試験要領書で定められた規定レベルまで漲水する。漲水後設計圧力の 1.5 倍迄加圧し耐圧試験を実施する。

耐圧試験では圧力降下、各溶接継手部からのリーク、タンクシェル変形の有無を確認する。

耐圧試験に使用する清水には防錆剤を添加することでタンク内面の発錆を抑制し、耐圧試験後のタンク内清掃の負荷を低減することが期待される。同様の発錆抑制の理由から、耐圧試験終了後はすみやかに排水することが望ましい。

漲水



-9. タンク内部クリーニング

耐圧試験で使用した清水の排水後、換気によりタンク内部を乾燥させる。

タンク内部乾燥後は、耐圧試験で発生した錆の除去を行う。

錆はパワーツールにて除去し粉塵は掃除機及び換気等によりタンク外へ排出する。ノズル内へ粉塵が侵入しないよう養生等の処置を実施して行う。

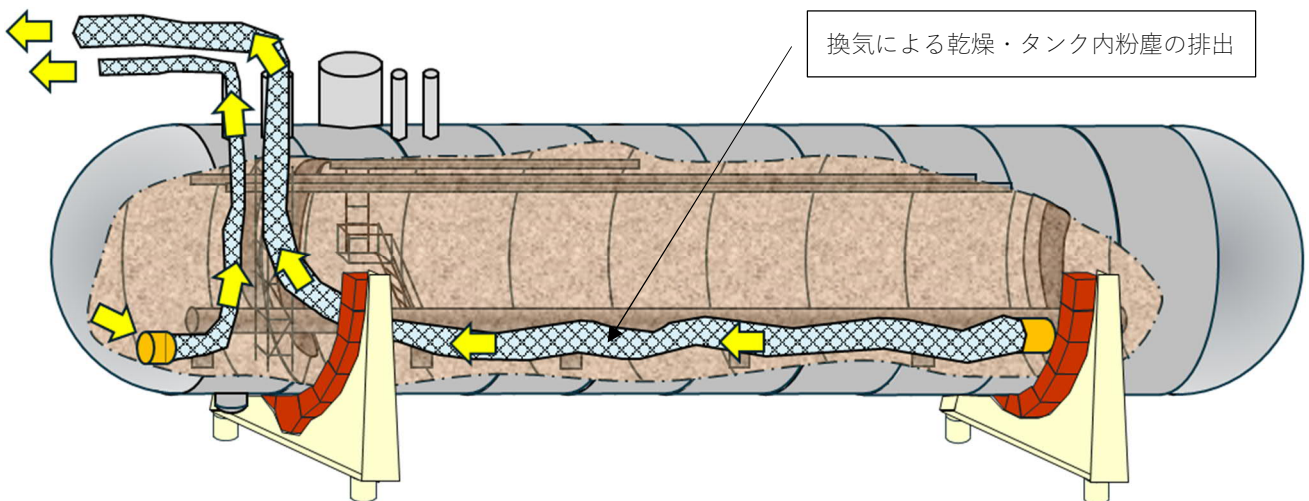
上述のとおり、タンク内の換気は乾燥及び清掃において重要である為、効率的な換気要領について事前に計画することが望ましい。

錆の除去へのブラストの適用も考えられるが、タンク内部の艀装品へのダメージ対策が難しいことや、グリッド回収の困難さも考え、適用は慎重に判断すべきである。

完了後にはタンク内部クリーニング検査を実施する。タンク内部に養生材取り忘れ等、異物を残さないよう入念に確認を行う。

錆除去後の状態を維持するために、タンク内は乾燥状態を維持するよう管理する必要がある。

タンク内部クリーニング



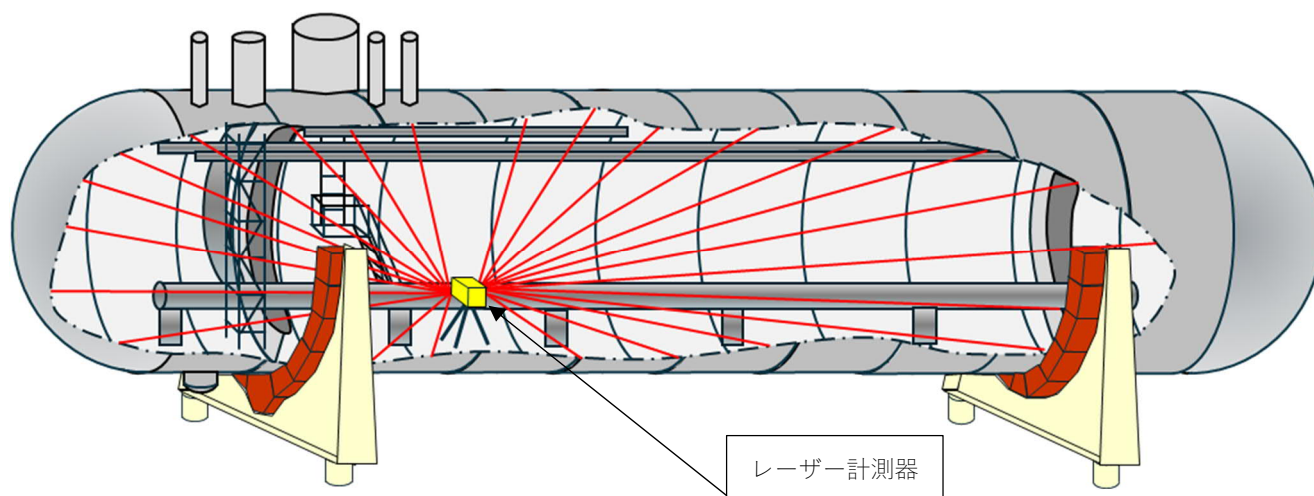
-10. 容量計測・ポンプ搭載・タンク外艀装・レベル計搭載

タンク内部のクリーニング検査完了後に第三者機関によるタンクの容量計測を行う。レーザー計測器を使用した 3 次元計測を用いる方法が一般的である。艀装品が取付けられた状態であっても計測には差し支えない。

ポンプ及びレベル計の搭載は、耐圧試験時の清水及びその後のタンククリーニング時の粉塵の影響を考え、タンククリーニング後に行う。

搭載はそれぞれの支給メーカー要領書に従い実施する。特にタンクに対する垂直度、サポートに対するアライメントに対し管理し作業を行う。支給メーカーによっては搭載時に指導員が派遣されるため、日程等の調整を前広に行う必要がある。

タンク容量計測

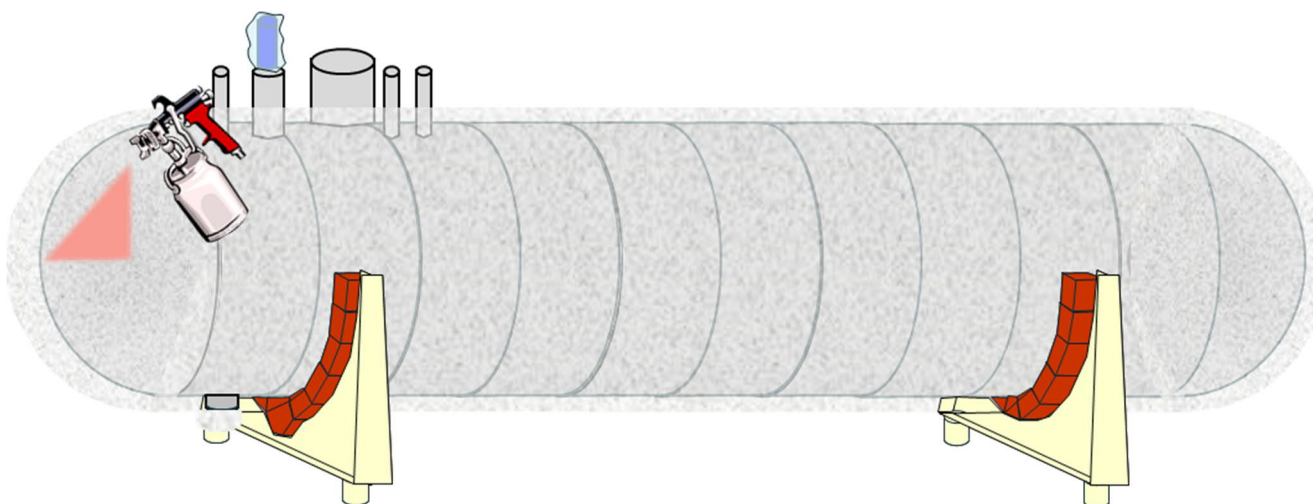


-11. 防熱

タンク防熱作業前の準備として、ノズルやポンプ、レベル計等の艀装品に対し厳格な養生を実施する。タンク防熱は一般的に断熱性能の高い PUF (Polyurethane foam) を主材料として使用し、工法は防熱施工業者によってパネル工法・スプレー工法・注入発泡工法などがあるが、LNG 燃料タンク製造ではスプレー工法が適用されることが多い。スプレー工法では PUF の接着性を高めるためにタンク外面に対しサンドブラストとプライマー塗装を行う。スプレー吹き付けは一層あたりの吹き上げ厚さは 30mm 以下程度を目安とし、ワイヤーゲージ等で随時測定しながらターゲットとする防熱厚さまで複数回繰り返す。LNG 燃料タンクの防熱総厚さは通常 300～400mm 程度であり中間に PUF の割れ防止対策としてグラスファイバーなどのメッシュ材を挟む。防熱外表面には防湿・防火性能を有する表層材（ポリウレタ、GRP、FRP など）を適用し、その上に仕上げ塗装をして完成となる。

防熱工事中、使用材料の仕様に依じて適切な温度・湿度管理を維持する必要がある、その他にも換気、雨水対策、ミスト対策などの施工環境管理が必要である。また防熱工事は総組足場を組んで行うのが一般的であり、これら施工環境について防熱施工業者と事前調整を行う必要がある。

タンク防熱



-12. 完成検査・出荷準備

全ての工事が終わったことを確認し、完成検査を実施する。完成検査では最終的な外観検査とともに重量計測を行う。重量計測はロードセルにより行うことが一般的である。

タンクの出荷後、船上への搭載を経てタンクを使用するまでの期間における内部防錆の為、完成検査と前後しドライエア又はN2によるタンク内部置換を行う。防錆の観点から露点を管理することが好ましく、タンクを使用するまでの期間において定期的に計測し管理することが必要である。

3.4.2 省CO2な製造工程の検討

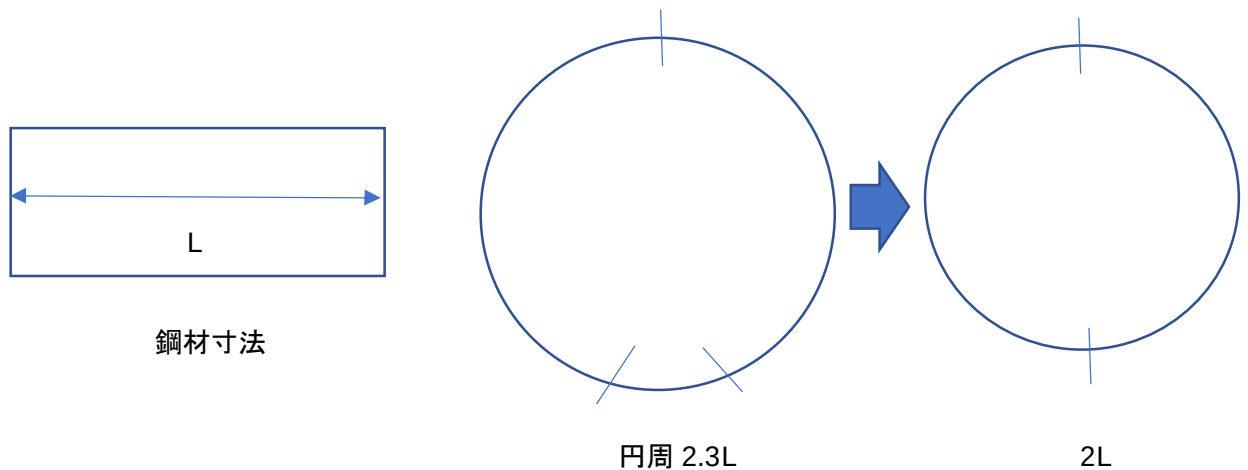
前項で述べたLNG燃料タンクの一般的な製造工程をもとに省CO2な製造工程を実現する為のポイントを以下に述べる。

-1. 組み立て工程（切断～総組）

本工程においては溶接作業を如何に効率良く行うかが重要である。溶接作業の効率化に最も効果的な手段は溶接長を減らすことである。LNG燃料タンク製造において溶接長を減らすためには溶接しなければならない部材点数を減らすことである。タンクの設計段階から以下のような検討を行うことで、溶接長を低減できる可能性がある。

① 板割の最大化

鋼材メーカーの製造最大板寸法をできる限り利用した設計とすることで溶接長を削減できる可能性がある。例えば最大板長さの板を円弧上に曲げ加工して円筒形状を造り出す場合、複数枚の板を曲げ溶接して製造するが、板寸法をベースにタンクの直径を設定することで無駄を排除することもできる。



板最大サイズを意識したタンク設計例

② 内部補強部材やトラス構造部材へのビルトアップ材（型鋼）の採用

現時点では9%Ni鋼材の型鋼を提供するメーカーは調査した限りでは存在しないが、型鋼の供給体制が整えば、型鋼を採用することで溶接長を減らすことができる可能性もある。型鋼の場合には円筒状の曲げ加工が困難な点はあるがトラス構造材への適用は十分考えられる。

③ 円筒タンク専用ベンディングローラー導入による継手削減

造船所の現有設備のベンディングローラーは、おもに、船のビルジ外板（船側と船底をつなぐ湾曲部の外板）を曲げるための設備であり、鋼材の短辺(4m 程度)を、比較的小さな曲げ半径（1m～2m 程度）で曲げることを想定したものである。このため、このベンディングローラーを使ってタンクの円筒部を曲げると、周長が短い板を 6～12 枚程度、溶接により接続する必要がある。

一方、鋼材の長辺（15m 程度）を、比較的大きな曲げ半径（7m～16m 程度）で曲げることができる円筒タンク専用のベンディングローラーを導入できれば、周長が長い板を 2～3 枚溶接するだけで円筒部の組立が可能となり、溶接線の削減による工期短縮効果を図ることが可能と考えられる。

実際に環境省補助を受け、円筒タンク専用のベンディングローラーを導入した今治造船によると、溶接線の本数削減により約 67%の CO2 削減が見込まれるとのことである。（写真 3.4.2-1）



造船用ベンディングローラー



円筒タンク用専用ベンディングローラー

写真 3.4.2-1 ベンディングローラーの例

また、組み立て工程においては、溶接部の非破壊検査の実施が必要であるが、この非破壊検査として現在は RT（放射線透過試験）が採用されているが、RT 実施の際には他の作業との混在作業ができない為、LNG 燃料タンク製造者では休み時間や夜間の時間を活用して検査を実施するか、RT 専用の区画に移動させて検査を実施しているのが実情である。また LNG 燃料タンクの溶接長を考えた場合、膨大な検査時間を要していると考えられる。

PAUT を適用する事ができれば、製造の工程の整流化が図られ、以下の観点より製造工程の短縮により製造工程における CO2 排出の削減にもつながる可能性がある。

- ・ 休み時間・夜間作業照明などの電力低減
- ・ 混在作業（非破壊検査との平行作業）による燃料タンク製造期間の短縮
- ・ RT 専用区画と溶接作業区画間の移動時間や、RT 専用区画の待ち時間の削減

-2. 耐圧試験及びタンク内仕上げ工程（水圧試験およびタンク内クリーニング）

前述の通り、タンク水圧試験及びそれに続くクリーニング作業を合わせて合計 1 か月以上の期間が必要となる。タンク全体の建造工程が約 1～2 年程度であることを考えると、少なくない期間をこれらの工程に費やし、その期間、工場にて CO2 を排出することとなる。

この期間を可能な限り削減する方法として、タンクの耐圧試験を「水圧試験」から「水圧-空気圧試験」または「空気圧試験」に代えて、できるだけ漲水量を減らして、試験工程及びクリーニング工程の期間および作業環境の改善を図ることが考えられる。

水を全く使用しない空気圧試験を行う場合は、少なくとも排水時間は大幅に短縮できることと、タンク内の錆の発生を抑える事ができるため、クリーニング工程が大幅に短縮できる可能性がある。これにより、タンク製造プロセスの省CO2化を図ることが可能になると考えられる。

一方、そもそも独立型 Type-C タンクに水圧試験が要求されている理由は、Type-C タンクは圧力容器であり、試験圧力が非常に高いためである。水は非圧縮性であるため、万一、試験中にタンクにき裂が発生したとしても、漏水が始まると圧力は急激に減少し、大規模な事故につながる可能性は低い。一方、空気は圧縮性であり、タンク容量の数倍の容積をタンクに注気しているため、タンクに亀裂が発生しても圧力の低下が小さく、空気が持つエネルギーにより大規模な破壊、破片の飛散、噴き出した空気による周辺設備の破壊などが発生する可能性がある。

したがって、IGF コードに規定されていない空気圧試験の適用については、過去に発生した空気圧試験での事故（新しいものでも 1980 年代ごろと思われる）や、その後の材料・溶接技術、非破壊検査技術の進化を考慮した上で、監督官庁により個別承認について検討が必要となる。

3.5 現地調査

以下に記載する会社を訪問し、ヒアリングを実施した。

【タンクメーカー】

- ・ 今治造船株式会社（香川県）
- ・ 株式会社新来島サノヤス造船（岡山県）
- ・ 泉鋼業株式会社（香川県）
- ・ 株式会社大島造船所（長崎県）

【鏡板メーカー】

- ・ 厚板プレス工業株式会社（大阪府）
- ・ 徳機 株式会社（山口県）

【防熱施工会社】

- ・ アスク・サンシンエンジニアリング（神奈川県）
- ・ 株式会社日本冷熱（長崎県）
- ・ 明星工業株式会社（大阪府）・・・アンケート回答のみ

主な意見は以下のとおり。

【タンクメーカー：4 社】

-1. タンク製造工程における課題

- ・ 切断・曲げ工程：ベンディングローラー、油圧プレス等の専用設備が保有できないため外注での加工が必要。（2 社）
- ・ 鏡板製作：対応可能な外注業者が限定されるため、他案件との工程調整が困難。
- ・ RT：人払い環境で実施する必要がある、夜間や昼休み等を実施しなければならない。時間的・場

所的制約が大きく製造工程のボトルネック。また検査会社の人材も限られている。(2社)

- ・ 水圧試験：工場の立地の問題で上水を使用しているが、タンク容積が大きいと大量の上水が必要となり取水制限の問題や、耐荷重のための地盤改良が必要になるなど試験費用、設備投資費用が拡大する懸念がある。

-2. タンク製造工程の効率化

- ・ RTの代替としてフェーズドアレイ超音波試験(PAUT)の採用検証を実施中。
- ・ タンク内部のクリーニング方法について、パワーツールによる手作業(劣悪な作業環境での人海戦術)から他の施工方法により効率化・作業環境の改善を図れないか検討中。(2社)

-3. 資材調達

- ・ 9%Ni鋼の国内ミルメーカーの生産量が限られており、使用量が増大した際の供給体制が確立されていない。(3社)
- ・ ロシアへの制裁の関係でニッケル価格が高騰、9%Ni鋼・溶接材料ともに価格暴騰・リードタイム長期化。
- ・ タンク防熱の素材も海外からの輸入に頼っているとの事でありリスクがある。
- ・ 艀装配管部品(特に安全弁)は製造元が限られ集中化しており調達困難。
- ・ 木ライナーも海外製品に依存しており、ロシアへの制裁の関係で材料入手困難につき価格暴騰、リードタイム長期化。

-4. 必要と考える人材育成

- ・ 生産設計技術者(2社)
- ・ 溶接技術者(施工者)(2社)
- ・ 製造検討技術者
- ・ 品質管理技術者

-5. タンク製造過程における安全対策

- ・ タンク製作時は、LNGを封入しないので、通常の船舶建造に対する安全対策と特段の差異はない。

-6. LNG燃料タンク製造において脱炭素化に効果が期待できると思われるもの

- ・ 自動溶接の採用による溶接工程短縮(工期短縮による削減)
- ・ 溶接長の低減(定尺板サイズの拡大等)(3社)
- ・ 非破壊検査(RT)に変わる代替検査方法の採用(製造工程の効率化)
- ・ タンクサイズの標準化(部材形状及び板厚含めた標準化によるスクラップ率低減等)
- ・ タンク内清掃作業の効率化(2社)

-7. その他

- ・ 燃料タンクのサイズや使用される板厚種類の標準化が進むと製造メーカーにおける効率化に寄与すると思われる。
- ・ 設備投資に要する費用負担を少しでも減じるための税制面での優遇・補助金等の措置を自治体に期待したい。
- ・ 9%Ni鋼の板幅サイズを拡大すれば製造メーカーでの製造効率化に寄与すると思われる。(溶接線の減少)

【鏡板メーカー：2社】

-1. 製造全般

- ・ 9%Ni 鋼の供給は、国内では日本製鉄 1 社だが、少なくとも 2 社は必要と考える。
- ・ 鏡板に関しては、他社が独自で新規参入することは無理だろう。これまで積み上げてきた技術であり、他社へ技術供与するつもりはない。
- ・ 鏡板の内製化に関しては、鋼材の供給が一番のボトルネック（生産量・価格高騰）だと考えている。造船に限らず、日本の製造業全体の問題。
- ・ ケープサイズバルクキャリアの 1 タンク方式の大きなタンクは、国内で製造できるようになっておくことが大事だと考える。台湾有事が起きたら、中国からの流通や実習生等止まってしまうリスクがある。
- ・ 製造可能な最大サイズは、自社のクレーン能力による。ただし、分割して製作して、造船所持ち込み後に溶接する等であれば、より大きなサイズも製作は可能。
- ・ 直径が大きく変わると、その都度、金型をいちから作る必要が出てくる。径が標準化できれば生産効率も上がり、コストも下がる。
- ・ 9%Ni 鋼は溶接もプレスもかなり難しい。
- ・ 鏡板では、プレス作業に一番時間がかかる。生産量を上げるためには、プレスの機械を増強する必要があるが、事業再構築補助金（申請はしている）等で補助金が入らないと設備増強は難しい。
- ・ 設備が増強されれば、鏡板の増産はなんとかなる。ただし、現状は問題ないが、増産となると人材が厳しくなるだろう。
- ・ 自社で鏡板の増産が出来たとしても、タンクメーカーの製造能力が各社現状年間 5 隻～6 隻が限界なので、そちらのほうの問題になるだろう。
- ・ 今後ネックとなることは、設備・場所・人材であり、またタンクメーカーが今後どういう形で進めていくのか（製造を外注する量とその方針）、もある。鏡板メーカーとして増産しようと思えば可能ではあるが、タンクメーカーの製造能力や計画次第のため、今は様子見の状況。

-2. 人材育成

- ・ 人材育成の課題は、育成に時間がかかること。（2 社）
- ・ 日本のものづくりは外国人に頼らざるを得なくなっているが、外国人実習生の場合、戦力にはなるが熟練前に 5 年で帰国となる。（2 社）
- ・ 状況を見ながら、今後人は順次増やしていく予定。溶接は 5 年あれば一人前には育つが、曲げ加工はものになるまで 10 年は必要。（2 社）

【防熱施工会社：3 社】

-1. 防熱工事における CO2 排出削減目標実現の取組・課題

- ・ 施工効率を上げ、高効率な施工を行う。（原料削減等）
- ・ 工期短縮・施工効率化による工場電力等の節約。
- ・ 次世代ウレタン原液（HFO 触媒）への切り替えによる脱フロン・低炭素化。（3 社）
- ・ HFC から HFO に変更することで材料費が倍になる。

- 2. 防熱施工の潜在的なボトルネック
 - ・ 施工環境（温湿度）不良。（2 社）
 - ・ 吹付機械トラブル。（2 社）
- 3. 作業員増員を検討する上で想定される課題
 - ・ 監督員・作業員の育成。（3 社）
 - ・ 吹付ウレタン発泡機台数の確保。（3 社）
 - ・ 吹付作業員を将来の管理者として教育を実施している。
- 4. 工期短縮化のアイデア
 - ・ 足場組立等の事前工程の前倒し作業の実施。
 - ・ 複数タンクでの並行作業の実施。
 - ・ 足場に替わる高所作業車での施工。
 - ・ 施工開始前のタンクメーカー側の対応（計画：タンク気密試験、足場設置、安全対策は施工開始前に完了しておく）。
- 5. 国内体制整備のための課題
 - ・ 材料や機械の安定供給。機械もアメリカから購入しており 4～5 か月要する。
 - ・ 適切（妥当）な発注価格
 - ・ 監督・作業員の育成・確保

4. 他の地域・事業者への展開に係る調査等

4.1 はじめに（取り纏めの方法）

LNG 燃料タンクは 9%Ni 鋼という取り扱いが難しい素材を材料とする。よって、通常鋼とは、保管の方法、運搬、溶接、曲げ加工等あらゆる面で扱いが異なる。また省 CO2 な製造プロセス達成のためには、可能な限りの製造工程の効率化が必須となり、工場設備のみならずそのレイアウトも重要な要因となる。そこで、前「2. LNG 燃料タンク製造の環境整備に関する調査」において、タンク製造に必要となる設備について取り纏め、前「3. 省 CO2 なタンク製造方法に関する整理・検討事項の調査」において、製造にあたり最低限把握しておくべき基準等、重要事項を取り纏めた。LNG 燃料タンク製造を検討するに際しては、まず、はじめにこれらを一読頂くことを推奨する。必要となる対応（設備・人材教育等）について、把握することが可能であり、タンク製造の可否が判断できるものと思慮する。

4.2 省 CO2 な製造プロセスを横展開する際の課題及びその対応策

省 CO2 な製造プロセスを確立するための方策について、これまで述べてきたが、製造に必要となる設備や最低限把握しておくべき基準等の重要事項を他の地域・事業者へ横展開するにあたり、課題となり得る事項等について、本項に記載する。

4.2.1 製造事業所の立地環境

LNG 燃料タンク製造には、9%Ni 鋼板のような大型の材料を受け入れし、事業所内にて組立・防熱施工等の工程を経て、搭載予定の船舶が建造される造船所へ納品することになる。完成する船用タンクは、陸上では輸送できない大きさであり、海上輸送される。そのため、事業所は海に面していること、船舶及びバージが接岸できる岸壁を有していること、またその岸壁には搬出入のため十分な能力のあるクレーンが設備されていることが必要となる。省 CO2 な製造プロセスのためには、効率的な製造が必要である。材料の受け入れ、切断・曲げ加工、組立、艤装、耐圧試験、タンク内部クリーニング、防熱、出荷という順に工程が流れていくが、各工程は異なる建屋で施工される。そのため、自動車工場の生産ラインのように無駄のない流れで製作されることが理想となる。また、製品出荷のタイミングは、受け入れ先の造船所の工程に左右されることから、ある程度の期間完成品をストックしておく場所を確保できることが望ましい。

このような立地環境を全て整えるとなると、いちからタンク製造に特化した工場を新設することが最善ではあるが、場所・費用・人材の問題もあり現実的ではないため、タンク製造に新たに取り組む事業所は、既存の立地環境の中で、外注業者の活用も含めて、可能な限り上手にやりくりするしかなく、省 CO2 効果も限定的になるものと思われる。

4.2.2 製造設備

タンク製造に新たに取り組むとはいえ、事業所は、既存の設備を出来る限り活用することが予想される。省 CO2 な製造プロセスのためには、大型のベンディングローラーの導入や防熱棟の建設等効果的な方策があるが、設置場所の問題や多大な設備投資費用が必要になるため、参入を考える事業者全てに一律に適用できるわけではない。自治体や国による設備投資助成が望ましい。

オーダーメイド品である船舶に搭載される LNG 燃料タンクは、主要寸法すら一律ではなく、製造に際して、各タンク寸法に応じた作業用の足場を都度作成・設置・撤去が必要となり、製造の効率化を阻害する一因となる。これに対しては、タンクの標準化によるか、もしくは足場の再設置、撤去を不要にするような面積の広い工場（足場の水平移動が可能）であれば対応可能である。

4.2.3 人材・育成

9%Ni 鋼という取扱の難しい材料を用いる LNG 燃料タンクの製造に関して、国内造船事業者は、これまで経験を有しておらず、製造のみならず人材育成に関しても、これから実際の製造を通じて知見を積み上げていかざるを得ない。

課題	対応策
・ 9%Ni 鋼は特殊な素材であり、造船業界では、ほぼ未経験のため、1 から経験を積む必要がある。 ・ LNG 燃料タンク製造に関して、必要な育成プログラムを有しておらず、トライ＆エラーで進める必要がある。 ・ 技能工に関しては、OJT により現場で指導する他なく、急速に人材を増やすことが難しい。 ・ 日本人技能工の確保が困難。若い新人を確保してもすぐに辞めていく。 ・ 外国人実習生は、5 年まで、と期限が限られる。 ・ 台湾有事の恐れがあり、中国人実習生を用いることは、有事の際のサボタージュや緊急帰国等のリスクがある。 ・ 皿型の鏡板の曲げ加工に関しては、熟練に 10 年は必要。会社が積み重ねたノウハウが必要なため、新規参入は非現実的。 ・ LNG 燃料船の需要予測が読めないため、施工者を考えなく増やすことはできない。(継続的に必要な仕事量が確保できる見込みがないと人材増員に踏み切れない。)	・ 本報告書を教育に有効活用する。 ・ 溶接技能者に関しては、可能な限り、溶接ロボットや自動化により対応可能。 ・ 日本人技能工と外国人実習生とで役割を明確に区別する。 ・ 中国以外の実習生を採用。 ・ 現在、船用タンク向けの鏡板製造は、国内は 2 社のみのため、標準化や鏡板製造の一部外注化により、製造効率を上げる。

4.2.4 原材料・資材

ここ最近の世界情勢を受けて、あらゆる資材が高騰している。また、9%Ni 鋼材及びその溶接材料は、通常鋼とは異なり用途が限られることから、ほぼ受注生産に近い扱いとなっており、納期にも影響を及ぼしている。

課題	対応策
・ あらゆる資材費が高騰（暴騰）している。 ・ 9%Ni 鋼及び溶接材料も受注生産のため、納期に時間がかかる。(2023 年 1 月時点で溶材納期が 11 か月との情報有) ・ Ni が海外頼み ・ 国内で 9%Ni 鋼を販売している製鉄会社が、1 社のみ。 ・ LNG 燃料タンクの需要が増えたとしても、鋼材・溶接材料・防熱材料等を製造する国内メーカーの供給量が限られており、対応できない恐れがある。	・ 国主導による資材の安定供給に向けた対策を検討する。(関係省庁に認識頂き必要な措置を講じて頂く) ・ 前広にタンク製造スケジュールを立て、必要な資材を発注する。 ・ 供給元を複数地域にする。

・ プレスウッド材の赤ブナは、ドイツとウクライナでしか取れない。ロシアによるウクライナ侵攻後は世界的にも取り合いになっている。価格も高騰。 ・ 防熱材原料も海外頼み（過去には、コロナによる中国のロックダウン、アメリカのハリケーン被害の影響により、輸入がストップしたことがある）。	リスクの分散。 ・ 赤ブナに替わる代替材料（樹脂材等）の開発。 ※大半の原材料・資材が海外頼みであることについては、現時点で抜本的な対策はない。
--	--

4.2.5 規制面

省 CO2 な製造プロセスの確立に繋がる生産性向上や低コスト化を達成する上で、クリアしなければならない規制面の課題もある。

課題	対応策
・ 防熱に関して、フロン冷媒に対する規制が、日中韓で日本が一番厳しい。HFC から HFO への変更（日本は 2024 年度施行）。この変更により材料費が倍になる。 ・ タンク製造効率化のため、検査工程の効率化を図る際に規制要求の壁がある。（例：水圧試験、非破壊検査等）	・ 製造経験を積み重ね、船級協会・国と事業間で協議を行い、安全面で問題が生じない範囲で、現行規制を改善する可能性を模索する。

4.2.6 横展開

他地域・自治体への横展開にあたっては、自治体だけでは実施は困難であり、情報を発信する側の事業者の協力が必須となる。

課題	対応策
・ 自治体や事業者の規模、造船業がその自治体において中核を担う産業なのか、単なる 1 業種に過ぎないのか、にもよって、自治体の対応に温度差が生じる。 ・ 事業者は、基本的に競争相手を利する情報を出すことは避けたい。そのため、情報発信は、協調領域に限定される。 ⇒ 一方向の情報発信が主な手段となる。 ・ 自治体職員では、LNG 燃料タンク製造に関する説明を行うことは難しい。事業者の協力が必須。 ・ LNG 燃料タンク製造に関する人材育成については、現時点で横展開可能な資料がない。	・ 自治体が事業者間を繋ぐ役割を担う。 ・ 自治体が県や国と連携し、可能な協力を引き出す。 ・ 新規参入する事業者の自助努力。 ・ 業界団体主導による、人材育成プログラムの作成。

4.3 海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業採択事業者における地方自治体との連携

国土交通省が環境省と連携し公募した、地域と海事分野の脱炭素化に向けて、ガス燃料船の重要構成部品である燃料タンクの省 CO2 な製造に資する設備投資を支援する事業（海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業）の採択事業者、連携する自治体及び事業名は下表のとおり。

事業者	連携自治体	事業名
今治造船株式会社	多度津町	曲げ・溶接加工工程における燃料タンクの省 CO2 製造プロセスの確立事業
株式会社新来島 サノヤス造船	倉敷市	防熱施工工程における燃料タンクの省 CO2 製造プロセスの確立事業

4.3.1 今治造船株式会社及び多度津町の事例

-1. 連携協定

2022 年 3 月、今治造船株式会社と多度津町は、脱炭素化への連携・協力に関する協定書を締結した。次の事項について、相互に役割に応じて連携・協力するものとされている。

- (1) 地域の脱炭素化の実現に向けた実証事業の推進に関すること
- (2) 海事産業が立地する関連市区町村を中心とした情報発信に関すること
- (3) 環境教育及び環境施策の推進に関すること
- (4) その他前文の目的を達成するために必要な事項に関すること

今治造船は、海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業の実施を通じ、省 CO2 な製造を推進する、多度津町は、町民等への環境教育を実施すること、が方針とされている。今後、両者協力の下、工場見学を通じての環境教育の実施が見込まれる。

-2. 多度津町の脱炭素化への取り組み

2019 年 3 月に発行された多度津町第 4 次地球温暖化対策実行計画によると、多度津町では、地球温暖化に対する国内外の取り組みも踏まえ、2020 年に「環境のまち宣言」を行い、継続して地球温暖化の取り組みを行っている。現在は、多度津町第 3 次地球温暖化対策実行計画を基に、施設や公用車の運用改善等の「ソフト的取り組み」を主体に、行政事務・事業を起源とする温室効果ガスの排出削減を図っている。また、より削減効果が見込まれる、施設の設備機器における省エネ対策の強化を図ることとされている。

- ・ 2000 年：環境のまち宣言
- ・ 2002 年：環境に関する ISO14001 認証取得
- ・ 2003 年：「多度津町第 1 次地球温暖化対策実行計画」策定
- ・ 2008 年：「多度津町第 2 次地球温暖化対策実行計画」策定
- ・ 2014 年：「多度津町第 3 次地球温暖化対策実行計画」策定
- ・ 2019 年：「多度津町第 4 次地球温暖化対策実行計画」策定
- ・ 2022 年 3 月：「ゼロカーボンシティ」宣言
- ・ 2022 年 3 月：今治造船株式会社との連携協定締結

基本方針1として、職員による COOL CHOICE（＝賢い選択）の実践（省エネに寄与する諸々の行動の実践）が挙げられ、基本方針4として、町民・事業者への「COOL CHOICE」の促進（省エネに関する意識向上を図る）、再生可能エネルギー導入推進等が挙げられている。既存の取り組みでは、住宅用太陽光発電システム設置補助、公共施設の太陽光発電設置、及び広報、町HP等で随時啓発記事掲載、が為されている。多度津町が今治造船に期待する工場見学を通じた環境教育は、この基本方針4に合致するものといえる。

また、令和4年度施策方針には、「国の「2050年カーボンニュートラル宣言」に賛同し、昨年2月に同様の取り組みを表明しております県と連携するとともに、本町においても、地球温暖化対策は喫緊の課題であり、豊かな自然や特色のある産業・文化を未来の世代に引き継ぐため、「多度津町ゼロカーボンシティ宣言」を行い、町民や事業者の皆様と協働しながら、2050年までに本町の二酸化炭素排出量実質ゼロの実現に向けた取り組みを進めてまいります。」と記載されており、町長主導による脱炭素化に向けた取り組みが進められている。

このような状況の下、今治造船株式会社が、海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業の採択事業者となったことを受け、同社との連携協定締結に到った。

-3. 協力体制、要望、課題等

連携協定締結後、お互いにコンタクトパーソンを指名し、必要に応じて連絡を取りあうこととされている。両者に協力体制等につき、話を伺ったところ、以下のような意見であった。

- ・ 事業者をお願いすることは、工場見学を通じての環境教育の実施。
- ・ 予算も限られる中、多度津町として事業者へ出来ることは限られている。
- ・ LNG燃料船が入港できる港湾が多度津町に無い等、多度津町の脱炭素に直接つながらないという面もある。
- ・ 2022年より香川県が関連企業の上層部を含めた協議会を作り、脱炭素に向けたロードマップ、工程表作成を進めている。ここで方針が決まり、県主導で何か実施する可能性もある。その場合、多度津町では、役場の人員も少なく、十分に対応できない恐れもあり得る。
- ・ 横展開に関して、他市町村へのつなぎという役割であれば、町として協力はさせて頂く。ただし、資料は事業者にて作成頂く必要がある。
- ・ 新たな設備投資にかかる償却資産に対する減免措置の制度（企業立地促進条例に基づく固定資産税に対する助成制度）はある。多度津町として、事業者にできる資金面でのサポートはこの制度のみ。
- ・ 事業者として自治体へ要望することは、資金面でのサポート。

4.3.2 株式会社新来島サノヤス造船及び倉敷市の事例

-1. 連携協定

2022年3月、株式会社新来島サノヤス造船と倉敷市は、カーボンニュートラル社会の実現に向けた包括連携協定を締結した。連携項目は以下のとおり。

- (1) 地域のカーボンニュートラル社会の実現に関すること
- (2) 地域のカーボンニュートラル社会の実現に向けた実証事業の推進に関すること
- (3) 海事産業が立地する関連市町村へのカーボンニュートラルに資する情報発信に関すること
- (4) SDGs 推進全般に関すること

(5) その他両者が協議し合意した事項

倉敷市では、-2.に後述する脱炭素化への取り組みを自治体主導で進めており、新来島サノヤス造船による LNG 燃料タンク製造の省 CO2 化に関する取り組みが自治体の方針に合致すること、またその波及効果として、水島港に入港する LNG 燃料船が増えることにより、地域の脱炭素化ひいては海事分野でのカーボンニュートラル社会の実現が期待できることから、本包括連携協定に到る。

本協定に基づき、今後、新来島サノヤス造船の工場見学を水島コンビナート企業対象に実施すること、また同社の有する研修所等を活用してのセミナー開催が検討されている。これにより、地域内企業が、脱炭素化に向けて相互に連携し繋がっていく素地となることが期待されている。

-2. 倉敷市の脱炭素化への取り組み

倉敷市では、市の産業の基幹となる水島コンビナートの活性化に向けて立地企業と倉敷市が広く協議し、地域産業の発展に寄与することを目的に、「倉敷市水島コンビナート活性化検討会」を 2005 年 8 月に設立した。構成企業は、旭化成(株)、ENEOS(株)、(株)クラレ、JFE スチール(株)、三菱ガス化学(株)、三菱ケミカル(株)、三菱自動車(株)の計 7 社、事務局を倉敷市文化産業局労働部商工課が務め、原則テーマごとに WG を設置し、必要に応じて市の関係部局も参加して運営される。主な実績として、既存企業の競争力強化に向けた市の支援策の検討があげられる。

2021 年 6 月に「2050 年ゼロカーボンシティ」へチャレンジすることを宣誓。電気自動車や V2H 充放電設備、ZEH 等の普及促進に向けた取り組みを進めるほか、カーボンニュートラルに向けた官民連携を推進することにより、持続可能なまちづくりを進めることとしている。

その後、倉敷市水島コンビナート活性化検討会の活動の下、2022 年 4 月 1 日に「水島コンビナートカーボンニュートラル研究会（CN 研究 WG）」を設置した。概要は以下のとおり。倉敷市は事務局として、岡山県との情報共有・連携を、また国、他地域、大学等から情報収集を行う役割を担っており、自治体主導により、域内事業者に働きかけ脱炭素化に向けた取り組みを進めている。

【水島コンビナートカーボンニュートラル研究会】2022 年 4 月 1 日設置

趣旨：水島コンビナートにおける 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、水島コンビナートの現状把握や、国の動向・技術開発等に関する情報収集を行い、今後の脱炭素化に向けた連携の在り方や取組等について研究する。

構成：倉敷市、企業 7 社、オブザーバー：岡山県

R4 事業：

- ① 有識者を招いた勉強会（国の研究会の委員など）：2022 年 6 月キックオフセミナー開催
- ② カーボンニュートラルに資する工場等の見学：2022 年 9 月会員企業の工場見学実施
- ③ 先進地視察：2022 年 11 月 川崎市・横浜市

備考：事業の進捗状況等を見て、県の理解を得ながら県事業との連携を図っている。

倉敷市に立地する水島コンビナートは、岡山県産業にとっても中核を担う西日本最大の素材供給拠点であることから、県の重点施策として、水島コンビナートの国際競争力強化が掲げられている。岡山県においても、水島コンビナートのカーボンニュートラルの取り組み推進を目的として、「水島コンビナート発展推進協議会カーボンニュートラルネットワーク会議」が設立され（2022 年 11 月）、倉敷市もメンバとして参加し、倉敷市の取り組みについても情報発信している。同会議メンバには、銀行、学識経

験者、国土交通省中国地方整備局も含まれており、企業相互又は産学官連携が期待され、倉敷市及び水島コンビナート企業にとって、理想的な体制が構築されていると言える。

-3. 協力体制、要望、課題等

連携協定締結後、お互いにコンタクトパーソンを指名し、必要に応じて連絡を取りあうこととされている。双方に話を伺ったところ、新来島サノヤス造船が自治体に期待することは、資金面での支援であり、倉敷市が要望することは、水島コンビナート企業向けの工場見学やセミナーの実施とのことであった。また、双方で認識する役割は以下のとおり。

【新来島サノヤス造船】

- ・ LNG 燃料タンクの省 CO2 な製造プロセスの確立
- ・ 倉敷市の要望に応じ、工場見学を通じて、若者向けの地元定着に向けた啓発・環境意識醸成に向けた協力

【倉敷市】

- ・ 環境教育・啓発活動の実施（地元若者の環境意識醸成）
- ・ 工場見学やセミナー実施による域内の企業連携
- ・ 環境対策に関する情報共有
- ・ 地域への情報発信（地元企業と地域を繋げる）
- ・ 事業者の設備投資に対する支援（倉敷市設備投資促進奨励金：固定資産税・都市計画税相当額の 50% × 3 年間）

また、以下について、課題と思われる。

- ・ 事業者に対する資金面で適用される支援は、前述の設備投資促進奨励金のみで、金額的にも多いものではない。また、本制度は、今般の連携協定がなくとも提供はされるものであった。これに対し、事業者が要請される工場見学の実施等に伴う手間が増えることが予想される。今般の連携により、環境省「海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業」の事業者に採択されたことにより十分なメリットを享受することができたが、倉敷市の支援だけであったならば、事業者として連携するメリットがないと判断され、継続的な協力関係の維持に支障をきたす恐れがある。
- ・ 倉敷市は、市や県の重要施策である水島コンビナートへの対応が第一となる。そのため他地域への横展開には消極的であった。地元企業である新来島サノヤス造船へはできる限り協力はする意向。
- ・ 倉敷市と岡山県がともに水島コンビナートを重要施策と位置づけ、同じ方向を向いて、連携していることは理想的と言えるが、自治体の支援には限りがあるため、今後の課題となる恐れもある。よって、事業者は、LNG 燃料タンク製造による脱炭素化の取り組みだけでなく、例えば、将来のアンモニア燃料や水素燃料船の建造による更なる脱炭素化への貢献を検討する等、自治体における自社のプレゼンスを高めていくことを模索する必要もあるのではないかと思慮する。

4.3.3 その他の事例

-1. 厚板プレス工業株式会社（本社：大阪府八尾市）

特殊曲げ加工を得意とする同社は、曲げ加工・鏡板製造から事業を開始し、ダムの水門、船舶のベルマウス・バルバスバウ製造等業務を拡げてきた。LNG 燃料船の燃料タンクに用いる鏡板の生産体制強化のため、2022 年に兵庫県淡路市の淡路島に新工場を設立した。工場新設の際、兵庫県の産業立地条例による産業立地促進制度を活用し助成を受けている。

②促進地域（但馬地域、丹波地域、淡路地域、西脇市、多可町、神河町、赤穂市、たつの市（旧新宮町の区域に限る）、宍粟市、上郡町、佐用町）					
区 分		工 場 等	研 究 開 発 施 設	事 務 所	本 社 機 能
税 軽 減	不動産取得税	1／2軽減・2億円限度			
		【要 件】県内居住新規従業員6人以上		【要 件】新規従業員6人以上	
	※指定拠点地区は要件なし ※土地の範囲は立地促進事業家屋の垂直投影部分に限る。居抜物件及び既存敷地での増築等は軽減対象外。				
	法人事業税	1／2軽減（5年間）			
【要 件】①投資額が1億円以上（中小企業：0.5億円以上） ②県内居住新規従業員6人以上		【要 件】新規従業員6人以上			
※既存企業の既存敷地の場合、新展開事業必要（事務所及び本社機能除く） ※軽減額は立地促進事業に従事する従業員を県内全従業員で課税標準額を按分して算出					
補 助 金	設 備 補 助	【補助率】投資額の5％以内	【補助率】投資額の7％以内	【補助率】投資額の5％以内	【補助率】投資額の7％以内
		【要 件】投資額が1億円以上 ※既存企業の既存敷地の場合、新展開事業必要（事務所及び本社機能除く）			
	【限度額】上限なし【交付方法】補助額1億円未満は一括交付、1～5億円は5年分割、5億円以上は10年分割				
	雇 用 補 助	【補助額】県内居住新規従業員：60万円／人 【限度額】3億円 新規非正規雇用（県内住所必要、1年以上の継続雇用必要）：30万円／人			
【要 件】県内居住新規従業員6人以上 ※既存企業の既存敷地の場合、新展開事業必要（事務所及び本社機能除く）					
融 資	拠 点 地 区 進 出 資 付	【利 率】年0.75%（国定金利）		【限度額】100億円（融資対象事業費の80%以内）	
		【期 間】15年以内（据置期間2年以内）		【要 件】①指定拠点地区 ②県内常用雇用6人以上	

兵庫県パンフレット「産業立地条例」による産業立地促進制度概要より抜粋

-2. 長崎県

長崎の造船業は、長崎港を中心として、大手造船所と中小造船所が共存しながら発展してきた。また、これら造船所・事業所を支える多くの協力企業や関連企業が集積している。長崎県では、造船・プラント産業を県の基幹産業の 1 つと位置付けており、県内産業や雇用を下支えするとともに今後の成長産業の礎の強化を図る目的で、企業への助成を実施している。

脱炭素化に関連する制度として、グリーン対応型企业成長促進事業費補助金を令和 4 年度予算で実施している。対象分野は、①半導体、②ロボット（産業用機械）、③造船・プラント、④医療であり、LNG 燃料タンク製造に取り組んでいる株式会社大島造船所も採択事業者採用されている。その他、新型コロナウイルスの影響によるサプライチェーンの見直しや新たな需要の獲得に向けた取組を支援する目的で、①半導体、②ロボット（産業用機械）、③造船・プラント、④医療、⑤航空機を対象として、「長崎県成長産業ネクストステージ装置促進補助金」制度をこれまでに 5 回実施し、県内製造業及び機械設計業を営む事業者を支援している。この 2 つの制度は、LNG 燃料タンク製造に新たに参入する長崎県内事業者であれば、両方とも申請可能なものであり、市町村レベルの自治体に比べると手厚い制度であると言える。都道府県レベルの自治体であり、かつ造船が基幹産業に指定されていることが条件にはなるが、新規参入を模索する事業者にとっては理想的な環境と言える。

グリーン対応型 企業成長促進事業費補助金

募集期間	令和4年 7月11日(月)～ 令和4年 8月19日(金)
要件	・グリーン成長戦略の分野別実行計画の推進に寄与する事業計画 ・「第2次 長崎県地球温暖化（気候変動）対策実行計画」の目標達成に資する取組を実施（または計画） ・5年間で付加価値20%以上増加する事業計画（企業間連携のみ）
採択方法	審査会の意見を参考に予算の範囲内で採択決定します。

	企業間連携支援タイプ ^o	技術開発支援タイプ ^o
補助対象	県内で製造業または機械設計業を営む中小企業及び大企業3社以上で構成するグループ	県内で製造業または機械設計業を営む中小企業及び大企業
対象分野	①半導体 ②ロボット(産業用機械) ③造船・プラント ④医療	①半導体 ②造船・プラント
補助率	2分の1以内 ※DXの取組については、3分の2以内	①半導体 2分の1以内 ②造船・プラント 3分の2以内
補助上限	1グループ5,000万円（2年間）	100万円
対象経費	・研究開発費 ・設備投資費 ・人材育成費 ・営業活動費	・技術導入等にかかる経費（開発人件費、原材料費、工具器具費、備品費等）
加点措置	環境省「脱炭素化促進計画」の策定「Nびか」認証企業	※2タイプの併願申請可能です。



長崎県産業労働部企業振興課 申請書 download

想定する申請事例

造船・プラント分野

グリーン成長戦略
「②水素・燃料アンモニア」分野

カーボンニュートラルのキーテクノロジーである脱炭素燃料（水素・アンモニア）を使用する燃料供給システムや燃料タンクの開発、実装



CO2を排出しない次世代燃料は高い技術力が必要

次世代燃料の輸送・貯蔵技術の
早期商用化

グリーン成長戦略
「⑦船舶」分野

環境汚染物質を排出しないゼロエミッション船の開発に県内企業が参入し、実装、商用化に向けた設計、製造サプライチェーンを形成



(国土交通省資料)

ゼロエミッション船の将来イメージ

省エネ・省CO2排出船舶の導入・
普及を促進

長崎県パンフレット「グリーン対応型企業成長促進事業費補助金」より抜粋

長崎県の成長産業は、コロナの先へ。次の舞台へ。

長崎県成長産業 ネクストステージ 投資促進補助金 (第5回)

募集期間 令和4年2月1日(火)～令和4年4月15日(金)

対象分野 ① 半導体、② ロボット(産業用機械)、③ 造船・プラント、
④ 航空機、⑤ 医療

採択方法 審査会の意見を参考に予算の範囲内で採択決定します。

新型コロナウイルス感染症の影響によるサプライチェーンの見直しや新たな需要の獲得に向けた取組を支援します。

	事業再構築促進タイプ	県内調達拡大タイプ	基幹産業牽引タイプ
補助対象	県内で製造業または機械設計業を営む中小企業	県内で製造業または機械設計業を営む中小企業及び大企業	県内で製造業または機械設計業を営む中小企業及び大企業
補助率	3分の2	3分の2 ※大企業の場合は、2分の1	3分の2 ※大企業の場合は、2分の1
補助上限	100万円 ※下限は、30万円	1億円 ※下限は、6千万円	3億円 ※下限は、1億円
対象経費	① 研究開発費 (開発人件費 等) ② 設備投資費 (機械設備費 等) ③ 生産効率化経費 (DX研修等) ④ 販路開拓費 (営業活動費 等) ※①は、①～④と併せて実施のみ	設備投資費 (建物、機械設備 等) ※コロナ禍の影響による国内回帰を含めたサプライチェーンの変化に対応するもの等	設備投資費 (建物、機械設備 等) ※コロナ禍の影響による国内回帰を含めたサプライチェーンの変化に対応するもの等
認定要件	① 雇用維持計画の策定	① 雇用維持計画の策定 ② 補助後2年間の県内調達計画の策定 ③ 県・県産業振興財団のマッチング支援の活用	① 基幹産業の創出・強化に資する取組に関する計画の策定 ② 補助後2年間の県内調達計画の策定 ③ 県・県産業振興財団のマッチング支援の活用

長崎県パンフレット「長崎県成長産業ネクストステージ投資促進補助金」より抜粋

4.4 有識者へのヒアリング

本章の調査内容につき、有識者として、長崎総合科学大学工学部工学科船舶工学コースの松岡和彦教授のご協力を賜り、ヒアリングを実施した。頂戴したご意見は以下のとおり。

- 人材育成及び横展開に関して、全国6カ所（東日本、相生、因島、今治、大分、長崎）に設立された技能研修センターを活用するのが良いのではないかと。初等講座に少し取り込むか中級講座として広域的に実施したら良い。その場において、今般の事業者である2社には、講師派遣も含む講座構築に協力頂く。また、地方自治体においては、講座を受講するタンクメーカ職員に対して、受講中の休業補償の意味合いの補助金を支給する制度を実施することにより、講座受講を促進させることも可能であろう。

（備考）日本中小型造船工業会が、国土交通省、日本財団の支援のもと、平成16年に造船技能開発センターを設置し、全国6カ所（東日本、相生、因島、今治、大分、長崎）に設立された技能研修センターの支援を行ってきた。各技能センターは、各地域の造船会社や自治体等が協力して運営しており、新人研修のほか、中堅技能者を対象にした、「溶接」「配管・塗装」「塗装」「船殻組立」「機関仕上」等の専門技能研修が行われている。（一般社団法人 日本中小型造船工業会ホームページより抜粋）

- 9%Ni 鋼の溶接が難しいとのことであるが、溶接技能工に対してアディショナルな資格を付与することができ、その資格を取得することにより手当も付けることができれば、技能工のモチベーション向上にも寄与すると思われる。
- 技能工のみならず管理者育成も必要であろう。
- 教育に際しては、3D プリンタを活用し、タンク模型を作る等、受講者の理解を促進させる方策も検討すべき。
- 鏡板の生産能力がボトルネックになることに関して、中国はぎょう鉄のノウハウがないであろうから、ヨーロッパの機械（3次元立体プレス）を使っているのではないかと。
備考：皿型の曲げ加工は難しいかもしれないが、半球型であれば機械加工で人材不足を賄える可能性はある。
- 皿型の鏡板の曲げ加工に関して、現状のメーカーだけで手に負えないのであれば、国等が主導し、造船所有志による加工センターのようなものを設立して対応するしかないのではないかと。
- 木ライナー（プレスウッド材の赤ブナ）の原材料不足に対しては、樹脂材等の代替材料を検討したらどうか。昔は高コストという問題があったが、昨今プレスウッド材が高騰しているのであれば、検討の余地があるのではないかと。
- 日本人技能工の確保に関して、長崎では、三菱造船香焼工場が新造船建造を止めるとなったときに廃業や他地域へ流れる等で関係業者がいなくなった。そうなるから人を戻そうとしても難しく、人材をいちから育成する必要があるだろう。また、長崎のケースでは、半導体工場に人材が流れ、造船では人を確保することすら困難になることが予想される。今の若年層のメンタリティであれば、同じ賃金なら、多くが造船所ではなく半導体工場に流れることが予想される。

5. まとめ

今般の調査及び報告書作成にあたっては、海事分野におけるカーボンニュートラル支援事業採択事業者である、今治造船株式会社及び株式会社新来島サノヤス造船と連携し、多大なご協力を頂き、実施した。また、その他タンクメーカ、防熱施工会社、自治体等にもヒアリングやアンケートにおいて、ご協力を頂いた。ここに全ての関係者に深い謝意を表したい。

LNG 燃料タンクの省 CO2 な製造プロセスの確立のためには、以下のとおり、少なくない課題があることが判明した。主要因は、立地環境、製造設備、人材確保・育成、資材不足及び高騰、が挙げられるが、個々の事業者では対応が不可能な課題も存在する。そのため、事業者、地方自治体、国、船級協会及び業界団体といった関係者が、連携・協力し、対応策を検討していくことが必要と思料する。

- LNG 燃料タンクの省 CO2 な製造プロセスのためには、製造事業所の立地環境（海に面しており自社岸壁を有する、十分な広さを有する）及び効率的な製造を可能とする設備の導入のようなハード面での課題をクリアする必要がある。既存の設備の流用では、効率的すなわち省 CO2 な製造の達成は困難であり、新たな設備や工場建屋等の導入が必要になる。
- 新たにガス燃料タンクの製造に参入しようとする事業者にとって、まずこのハード面での課題、言い換えると資金面での負担が、最初に立ちはだかる障壁となる。このため、地方自治体にあつては、これら壁の高さを少しでも減じることが可能となるよう、設備導入時の税制面での優遇及び省 CO2 に資することに対する補助金施策の導入等について、すでに当該制度のある自治体にあつては、事業者に対し制度活用を促すこと、また制度がない自治体にあつては、当該制度の早急な導入が強く望まれる。また、省 CO2 の目標達成に応じた減税措置等、事業者に脱炭素への取り組みを促す動機付けを行うことも重要であると思料する。
- 財政規模の小さい自治体の場合、上層の自治体若しくは国へ補助の働きかけを行い、縦の連携も模索することも重要であると考えられる。これにより、省 CO2 に関する当該地域内事業者の取り組み事例を当該地域内で展開することにより、他地域の省 CO2 対応を促進する役割を担うことも容易となり、また、他地域での有効な省 CO2 の取り組みを事業者へ紹介することにより、相互補完を行うことで、省 CO2 を促進することが理想と言える。
- 往々にして、我が国造船所は、立地する自治体の規模が小さい傾向にあり、自治体内に LNG 燃料タンクを搭載する船舶が来航するような港湾を有していないことが多い。この場合、LNG 燃料タンクの製造により、当該タンクを搭載した省 CO2 な船舶が領内の港湾に来航することにより得られる直接的に大きな省 CO2 効果は見込めず、事業者への補助に関して及び腰になる可能性もある。この場合は、その自治体に留まるのではなく、都道府県レベルで総合的に省 CO2 効果を考え、事業者へのサポートを検討することが望ましい。
- 自治体及び事業者の取り組み事例について取り纏め、以下に向けて、情報発信を行う。興味を持った自治体や事業者が現れた際には、事例の説明等を事業者と協力して実施する。
 - 海事産業の未来を共創する全国市区町村長の会
 - 自治体ホームページ、事業者ホームページ

- 人材育成及び横展開に関して、前 4.4 に記載の造船技能開発センターの活用を検討することが望ましい。
- また、効率的な製造のためには、そのような設備の稼働率を上げ、製造工程に遊びが出ないような連続的な製造が望まれる。LNG 燃料タンクの発注者は、造船所であるが、可能な限り標準化されたタンクを採用することとし、かつ、タンクメーカーの製造工程を最大限効率化できるよう、発注等において複数社で連携することが望ましい。

参考文献

一般財団法人日本溶接協会ウェブサイト 溶接情報センター/接合・溶接技術 Q&A/Q-09-04-03

一般財団法人日本溶接協会ウェブサイト 溶接情報センター/接合・溶接技術 Q&A/Q-06-04-05

一般社団法人溶接学会 溶接学会誌 第 82 巻 (2013) 第 1 号 タンク (日本産業機械工業会タンク部会) -LNG 貯槽の溶接施工と日本におけるものづくり力-

一般社団法人表面技術協会 金属表面技術 現場パンフレット 10 巻(1963)7 号 さびについて(4) どんな環境がさびやすいか

一般社団法人日本高圧力技術協会 圧力技術 第 48 巻 第 6 号, P334
圧力容器及び配管の耐圧試験の危険性と試験要領の改善について

一般社団法人日本高圧力技術協会 圧力技術 第 14 巻 第 2 号, P97
大型高圧力容器の圧力試験に対する考察

一般財団法人日本溶接協会ウェブサイト 溶接情報センター/接合・溶接技術 Q&A/Q-09-04-09

日本造船研究協会 塗装前鋼材表面処理基準

ISO 8501-1 Preparation of steel substrates before application of paints and related products -- Visual assessment of surface cleanliness -- Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings

Steel Structures Painting Council SSPC-SP11, Bare Metal Power Tool Cleaning

Steel Structures Painting Council SSPC-SP10, Near-White Metal Blast Cleaning

Steel Structures Painting Council SSPC-SP6, Commercial Blast Cleaning

Steel Structures Painting Council SSPC-SP5, White Metal Blast Cleaning

Steel Structures Painting Council SSPC-SP3, Power Tool Cleaning

Steel Structures Painting Council SSPC-SP2, Hand Tool Cleaning

関西ペイント株式会社ウェブサイト 防食塗料/技術資料/素地調整について

日本ペイントマリン株式会社ウェブサイト テクニカルガイドライン/表面処理

日本非破壊検査株式会社ウェブサイト 特殊技術/超音波探傷試験 UT/フェイズアレイ UT

溶接学会 溶接・接合便覧 IV 章 6.4 節, P888

ASME BPVC Sec.VIII Div. 2

日本海事協会 会誌 No.189 及び No.313

溶接学会 溶接・接合便覧 IV 章 6.4, P890

日本溶接協会 鉄鋼部会 9N 委員会 9%Ni 鋼の溶接・加工に関する共同研究, P127

一般社団法人日本高圧力技術協会 圧力技術 第 43 巻 第 2 号, 2005, 上林ら
“ LNG 地上式タンク 9 %Ni 鋼溶接継手への UT 法の実用化に関する研究 ”

一般社団法人溶接学会 溶接学会論文集 第 25 巻, 第 1 号, 2007, 西川ら
“ ニッケル基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係 ”

9%Ni 鋼に関する取り扱い及び溶接技術者の教育について

B 社

1. 概要

LNG 燃料タンクには 9%Ni 鋼を使用しており、一般的な鋼船の建造で使用されている軟鋼や高張力鋼に比べると取り扱いに気を付けなくてはならず、溶接においても欠陥の発生などに注意しなければならないことがわかっている。そのための技術者育成のための教育を計画し、実施を進めている。9%Ni 鋼用は手棒溶接、CO₂ 溶接、サブマージ溶接、TIG 溶接用の船級承認された各溶材が製品化されている。当社は造船における CO₂ 溶接の経験が豊富であること、社内試験での結果から CO₂ 溶接（FCW）をメインに使用し、一部の上向き溶接や補修溶接で箇所へ手棒溶接（SMAW）を適用する。

2. 教育内容

9%Ni 鋼の溶接における注意点として、取り扱い及び溶接時における注意点をまとめ（末尾に貼付の参考資料参照）、対象となる技術者に教育を実施する。また 9%Ni 鋼の教育訓練を行い、教育完了後、船級協会の溶接技量試験を受験し合格を目指す。可能であれば上記教育期間中に RT を実施し、習得状況を確認する。

2-1. 取り扱い及び溶接時における注意点

取り扱い及び溶接時における注意点をまとめたものの概要を以下に示す。

2-1-1. 9%Ni 鋼とは

9%Ni 鋼の概要と化学成分及び機械試験の数値について説明。また磁性を帯びやすく、磁性を帯びると溶接欠陥が発生することや熱間加工の禁止などを注意している。

2-1-2. 9%Ni 鋼用溶接材料

極低温容器の溶接継ぎ手にも極低温靱性が求められるため、9%Ni 鋼の溶接材料には 70%Ni 系溶接材料が適用される。そのため、溶接金属と母材は化学成分や組織が異なり、異材金属溶接部として以下のような問題点がある。

- 母材による希釈により、溶接金属の強度・靱性が低下する恐れがある。
- 溶接金属は高温割れが発生しやすい。
（溶接終了のクレータ部にはほぼ高温割れが発生する）
- 母材と溶接金属の融点が異なるため、溶け込み深さが浅くなり融合不良などの溶接欠陥が生じやすい

また溶接材料が非常に高価であるため、無駄にしないための取り扱いについても注意をしている。

2-1-3. 開先形状

9%Ni 鋼用溶接材料における突き合わせ溶接の注意点と開先形状について記載している。

2-1-4. 溶接準備

9%Ni 鋼の切断面の処置方法や溶接継ぎ手の磁気帯の対応などについて記載している。

2-1-5. 本溶接

溶接作業における注意点を 10 箇条として簡単にまとめている。また溶接ワイヤーの突き出し長さや CO₂ ガス流量に注意しておかないと溶接欠陥が発生しやすいことなどの注意をしている。溶接速度、狙い位置、ウィービング及びウィービング幅、パス間温度などにも注意をしている。

1
9%Ni鋼の溶接における注意点
2023/1/00 作成
2
目次
1. 9%Ni鋼とは
2. 9%Ni鋼用溶接材料
3. 開先形状
4. 溶接準備
5. 本溶接

2-2. 9%Ni 鋼の教育訓練及び非破壊検査の確認

CO2 溶接 (FCW) と手棒溶接 (SMAW) の教育訓練の実施を予定している。手棒溶接 (SMAW) については CO2 溶接の技量の高い作業員から選抜する。

教育訓練では 9%Ni 鋼は鋼材、溶接材料が共に非常に高価であるため、各溶接方法で、まずは比較的 9%Ni 鋼の溶接に近い SUS 用溶接材料を用いて炭素鋼を溶接することとして、最終日に 9%Ni 鋼の溶接材料を用いて 9%Ni 鋼を溶接することとした。以下教育訓練の概要とスケジュールは以下の通り。

2-2-1. CO2 溶接(FCW)

教育期間

3 週間 (15 日×8 時間)

溶接姿勢

下／立／横突き合わせ溶接

水平／立／上隅肉溶接

教育用溶接材料

1～4 日目：SUS 用溶接材料

5 日目：9%Ni 鋼用溶接材料

溶接用鋼材

1～4 日目：炭素鋼

5 日目：9%Ni 鋼

(教育日程イメージ)：(突き合わせ)／(隅肉)

	月	火	水	木	金	土	日
1W	下／水平	下／水平	下／水平	下／水平	下／水平		
2W	立／立	立／立	立／立	立／立	立／立		
3W	横／上	横／上	横／上	横／上	横／上		

2-2-2. 被覆アーク溶接(SMAW)

教育期間

2 週間 (10 日×8 時間)

溶接姿勢

下／立／上突き合わせ溶接

水平／立／上隅肉溶接

教育用溶接材料

1～2 日目：SUS 用溶接材料

3 日目：9%Ni 鋼用溶接材料

溶接用鋼材

1～2 日目：炭素鋼

3 日目：9%Ni 鋼

(教育日程イメージ)：(突き合わせ)／(隅肉)

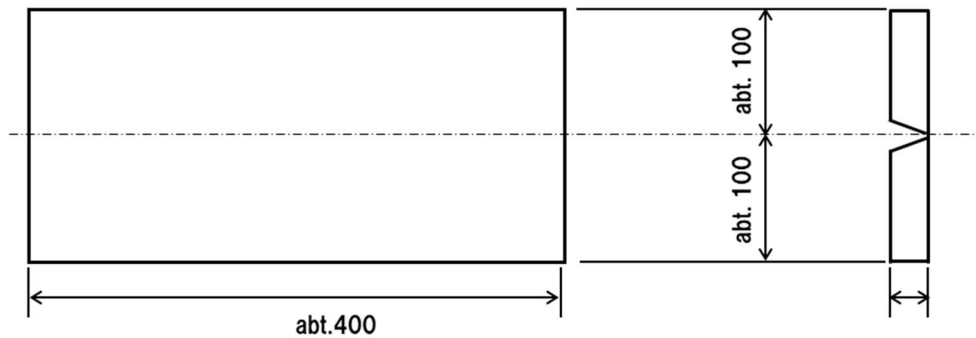
		月	火	水	木	金	土	日
1W		下／水平	下／水平	下／水平	立／立	立／立		
2W		立／立	上／上	上／上	上／上	予備日		

2-3. 9%Ni 鋼溶接 非破壊検査

以下の要領で、9%Ni 鋼の非破壊検査の確認テストを実施した。

- ・ 非破壊検査対象鋼材 9%Ni 鋼 (SL9N590Q)、板厚 10mm
- ・ 溶接テストピース 故意に欠陥が入るように溶接した

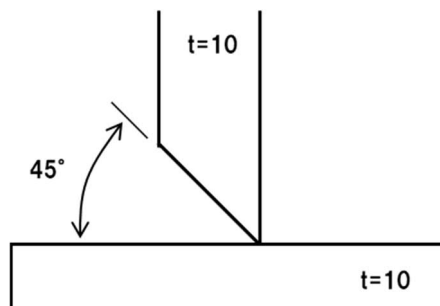
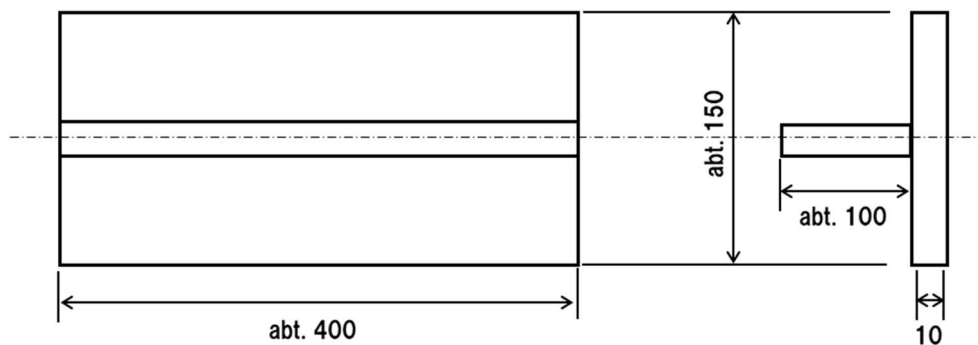
1) 突き合わせ溶接継ぎ手



開先形状 60°V 開先、裏堀裏溶接

非破壊検査 RT/UT

2) 隅肉溶接継ぎ手



非破壊検査 UT

故意に入れた欠陥を適切に探知して、上記テストピースでの検査が問題無く実施されたことが確認された。

9%Ni鋼の溶接における注意点

目次

1. 9%Ni鋼とは
2. 9%Ni鋼用溶接材料
3. 開先形状
4. 溶接準備
5. 本溶接

1. 9%Ni鋼とは

1. 9%Ni鋼とは

9%Ni鋼は、炭素鋼にニッケル (Ni) を約9%含有させ焼入れ・焼き戻しを行うことにより、優れた強度・靱性が得られる鋼であり、LNGタンクの材料として多く用いられている。

※靱性＝材料の衝撃に対する強さや粘り強さ。破壊されにくい性質。

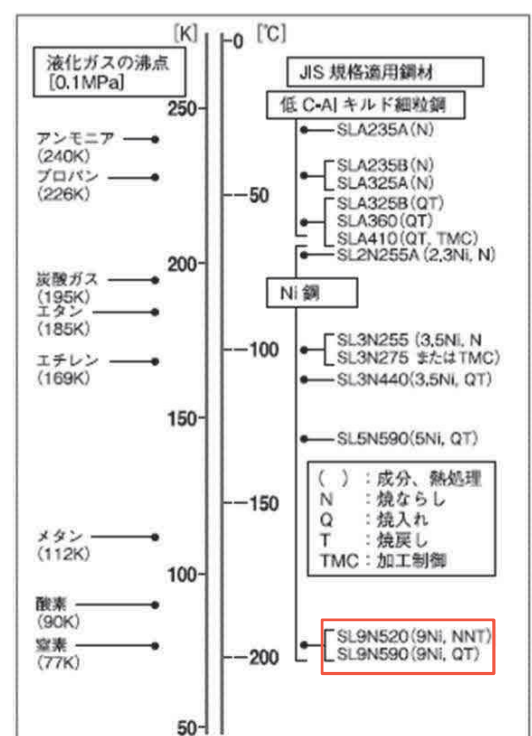


図.各種液化ガスの沸点と対応する低温用鋼

1. 9%Ni鋼とは

表. 9%Ni鋼の化学成分（規格値）

材料記号	C	Si	Mn	P	S	Ni
KL9N60						
規格値	≦0.10	≦0.30	≦0.90	≦0.025	≦0.025	8.50～9.50

表. 9%Ni鋼の熱処理及び機械的性質

材料記号	熱処理	引張試験			衝撃試験 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾		
		降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び ⁽³⁾ ($L = 5.65 \sqrt{A}$) (%)	試験温度 (°C)	最小平均吸収 エネルギー値 (J)	
						L	T
KL9N53	2 回焼ならし	520 以上	690~830	18 以上	-196	41	27
KL9N60	後焼戻し, 焼入れ焼戻し 又は TMCP ⁽²⁾	590 以上					

出典: NK鋼船規則K編

1. 9%Ni鋼とは

磁石使用禁止！！

9%Ni鋼は磁性を帯びやすいため、運搬する際にはマグネットリフターは使用せず、バキュームやハッカーなどを使用する必要がある。

そのため、溶接簡易台車もマグネットを使用しない特殊タイプを適用しなければならない。



参考写真.バキュームリフト(左)、ハッカーフック(右)

1. 9%Ni鋼とは

磁気吹きによる溶接欠陥を防止するため溶接前には帯磁していないか、ガウスメータで確認し50ガウス以上となっていれば脱磁する必要がある。



参考写真:ガウスメータ(左)、ハンド脱磁器(右)

1. 9%Ni鋼とは

加熱禁止！！

9%Ni鋼は熱処理を行う製造方法により、優れた強度・靱性を得ているため、線状加熱や歪み取りなどの熱間加工は不可となっている。

曲げ加工などは冷間加工にて実施することとなる。

溶接継ぎ手付近に湿気、油などある場合はバーナーで炙って除去することは可能だが、100～150℃程度で収まるよう加熱する。

2. 9%Ni鋼用溶接材料

2. 9%Ni鋼用溶接材料

極低温容器の溶接継ぎ手にも極低温靱性が求められるため、9%Ni鋼の溶接材料には70%Ni系溶接材料が適用される。

そのため、溶接金属と母材は化学成分や組織が異なり、異材金属溶接部として以下のような問題点がある。

- ①母材による希釈により、溶接金属の強度・靱性が低下する恐れがある
- ②溶接金属は高温割れが発生しやすい
(溶接終了のクレータ部にはほぼ高温割れが発生する)
- ③母材と溶接金属の融点が異なるため、溶け込み深さが浅くなり融合不良などの溶接欠陥が生じやすい

2. 9%Ni鋼用溶接材料

①母材による希釈により、溶接金属の強度・靱性が低下する恐れがある

・「溶接電流が高い」、「溶接速度が速い」と母材の希釈が大きくなるため、適正な溶接条件で施工する

※溶接入熱量 $\leq 35\text{kJ/cm}$ を守ること！

溶接入熱量(kJ/cm)=電流(A)×電圧(V)×60÷速度(cm/min.)

例) 200A、30V、20cm/min.での溶接入熱量は18kJ/cm

※希釈＝溶着金属が溶け込んだ母材から合金成分を薄められる現象

2. 9%Ni鋼用溶接材料

②溶接金属は高温割れが発生しやすい (溶接終了のクレータ部にはほぼ高温割れが発生する)

・クレータ部は全てグラインダ施工+PT(カラーチェック)必須！



2. 9%Ni鋼用溶接材料

③母材と溶接金属の融点が異なるため、溶け込み深さが浅くなり融合不良などの溶接欠陥が生じやすい

・溶け込み深さが浅いので、アーク狙い位置や溶接速度に注意！



溶け込み深さ
約1mm



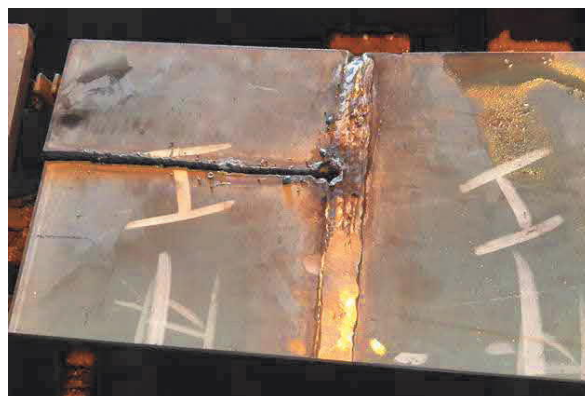
溶け込み深さ
約3mm

写真：断面マクロ試験（左：9%Ni鋼、右：炭素鋼）

2. 9%Ni鋼用溶接材料

ガス切断不可！！

9%Ni鋼溶接金属はステンレス同様にガス切断は不可。溶接金属を切断する場合は、グラインダもしくはガウジングにより実施しなければならない。



溶接金属のガス切断
はできない！

2. 9%Ni鋼用溶接材料

下進隅肉溶接不可！！

9%Ni鋼の溶接は溶込深さが浅く、熔融金属も垂れやすい。また、溶接材料の船級認定でも承認取得されていないため立向下進隅肉溶接は不可！

Table 1 Welding Positions and Max. Diameter of Wire

Butt Weld 突き合わせ溶接		Fillet Weld 隅肉溶接	
Flat:	1.2mm	Flat:	1.2mm
Horizontal:	1.2mm	Horizontal Vertical:	1.2mm
Overhead:	1.2mm	Horizontal:	1.2mm
Vertical Upward:	1.2mm	Horizontal Overhead:	Not Applicable
Vertical Downward:	Not Applicable	Overhead:	Not Applicable
		Vertical Upward:	1.2mm
		Vertical Downward:	Not Applicable

資料：NK溶接材料認定(FC-9Ni)

2. 9%Ni鋼用溶接材料

非常に高価なためムダにしない！！

9%Ni鋼用溶接材料はニッケル含有量が高いため、非常に高価となっている。

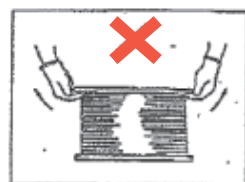
溶接材料単価は1kg当たり約数万円のため、12.5kg巻1個で数十万円にもなる！

ムダな廃棄が出ないように、持ち運び注意！終業時の溶接材料保管の徹底！

2. 9%Ni鋼用溶接材料

非常に高価なためムダにしない！！

スプールを正しく持たないと変形し、溶接ワイヤの整列巻きが乱れ、食い込みなどの原因になります。
また、スプールを転がして移動するのも厳禁です。



出典: (株)神戸製鋼所殿及び日鉄溶接工業殿資料

2. 9%Ni鋼用溶接材料

非常に高価なためムダにしない！！

溶接ワイヤを送給装置にセットする際、手の位置が間違っているとばらけてしまい使用不可となります。



出典: (株)神戸製鋼所殿資料

2. 9%Ni鋼用溶接材料

非常に高価なためムダにしない！！

- ・送給装置の留め具を装着していないと溶接ワイヤの逸脱の原因となります。



- ・送給装置のカバーを溶接ワイヤにかけるとばらけ防止となります。



出典: ㈱神戸製鋼所殿資料

2. 9%Ni鋼用溶接材料

姿勢別溶接材料使用区分

		突き合わせ溶接				隅肉溶接		
		下向	立向	横向	上向	水平	立向	上向
SMAW (被覆アーク溶接)	NITTETSU WELD196 (日鉄溶接工業)	○	×	×	○	○	○	○
FCW (CO2溶接)	DW-N609SV (神戸製鋼)	○	○	×	×	○	○	×
	FC-9Ni (日鉄溶接工業)	○	○	○	△	○	○	×
	CS-LNG (世亜エサブ)	△	△	△	△	○	○	○

× = 施工不可

△ = 船級承認はあるが適用しない

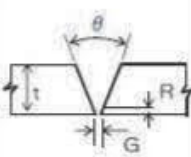
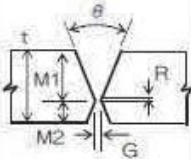
資料: LNG燃料タンク製造に使用する溶接材料使用区分

3. 開先形状

3. 開先形状

突き合わせ溶接

9%Ni鋼用溶接材料で片面溶接を行うと、初層に割れが入りやすいためすべて両面溶接を行う。

開先形状 Groove Design	溶接継手条件 Edge Preparation					溶接姿勢 Position
	t(mm)	$\theta(^{\circ})$	G(mm)	M(mm)	R(mm)	
	$10 \leq t \leq 15$	60 ± 10	0~1	-	0~1	下向/立向 Flat/ Vertical Upward
	$15 < t \leq 40$	60 ± 10	0~1	$M1=2/3t$ $M2=t/3$	0~1	下向/立向 Flat/ Vertical Upward

※上記範囲外の場合、JSQSに従う
If outside the above range, according to the JSQS

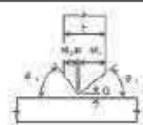
資料: 溶接施工要領書(WPS)の開先形状
(CO2溶接、突き合わせ溶接継ぎ手)

3. 開先形状

隅肉溶接

完全溶込(フルペネ)隅肉溶接では、裏ガウジング有での溶接を行う。

4-4) 完全溶け込み隅肉溶接

Full Penetration Fillet Welding						
開先形状 Groove Design	溶接継手条件 Edge Preparation					溶接姿勢 Position
	t(mm)	$\theta(^{\circ})$	G(mm)	M(mm)	R(mm)	
	$10 \leq t \leq 15$	50 ± 5	$0 \sim 1$	-	$0 \sim 1$	下向/水平/立向
	$15 < t \leq 40$	$\theta 1 = 50 \pm 5$ $\theta 2 = 60 \pm 5$	$0 \sim 1$	$M1 = 2t/3$ $M2 = t/3$	$0 \sim 1$	Flat/ Horizontal/ Vertical/ Vertical Upward

※上記範囲外の場合、JSQSに従う

If outside the above range, according to the JSQS

資料: 溶接施工要領書(WPS)の開先形状
(CO2溶接、完全溶け込み隅肉溶接継ぎ手)

4. 溶接準備

4. 溶接準備

開先面のグラインダ

9%Ni鋼を切断すると、切断面に不純物(皮膜)が非常に取れにくい状態に残っている。

突き合わせ溶接を行う際は、溶接前に切断面をグラインダし不純物を除去する必要がある。



4. 溶接準備

溶接継ぎ手の磁気計測

先に述べた通り、9%Ni鋼は帯磁しやすいため溶接前にはガウスメータで磁気計測を実施する。

50ガウス以上となっていれば脱磁する。



50G(ガウス) =
5mT(ミリテスラ)

5. 本溶接

5. 本溶接

溶接作業10箇条

《溶接作業10箇条》

1. アースは確実に取る
母材へのアース接続不良は電圧低下を起こす危険大
ケーブルが過熱し、火災を起こす危険もある

2. 弧先内の不純物除去、弧先形状の成形
錆やベンキ・・・ブローホール発生
開先形状不良・・・溶け込み不良・割れ発生

3. ノズル、チップ、送給装置の手入れ
ノズルの形状不良・・・シールドガスが不安定
チップ径の拡大・・・溶接狙い位置の不安定
送給装置の不良・・・電流・電圧の調整不良

4. 風速2m以上は風防対策を行う
ブローホールの発生を防ぐ

5. ワイヤ突き出し長さは20mm以下に保つ



突き出し量はノズル
から20mm以下

- ・20mm以上になると乱流になり、ガスシールドが不完全になりブローホールが発生しやすくなる
- ・ワイヤ突き出し長さが変動すれば電流・電圧も変動し、溶け込み深さや溶着量が変化する。

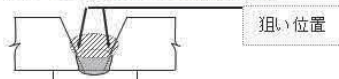
6. 適度のウィーピングは質物
振り幅が大きくなりすぎると目が粗くなり、ピッチの
合間に溶け込み不足が生じやすくなる。



この個所に溶け込み不足
が生じやすくなる

《溶接作業10箇条》

7. ワイヤの狙い位置
狙い位置・・・前層の両端部までワイヤ先端を持って
いくようにウィーピングする
(溶融プールで溶かそうとしても溶け込み深さが浅く
溶け込み不良、スラグ巻き込み等の危険大！)



※トーチ角度やワイヤの曲がりでも溶け込みの向きが
変わるので注意！

8. 溶接速度は適度な速度で！
遅すぎると溶接金属が先行、溶け込みが浅くなる
溶融金属が先行しないよう適度な溶接速度で
溶融プールの先端にアークを持って行く



アークは溶融金属の上で発生するた
め母材まで溶け込まなくなる

9. 各層の溶接スラグは確実に除去
スラグが残ったままではスラグ巻き込みの危険性大
各層毎にチップを使い確実に除去すること
※溶接ビードと開先面との角に残りやすいので要注意
特に1層目は残りやすいので確実に除去のこと！

**10. 層が高くなると溶接部中央に割れが発生しやすい
溶接条件に注意！**

溶接の層が高くなるとビード
中央に低融点介在物が偏析し、
割れの原因となりやすい
溶接電流が高すぎたり遅すぎ
たりしないよう注意する

CO₂ガス溶接の溶接割れ

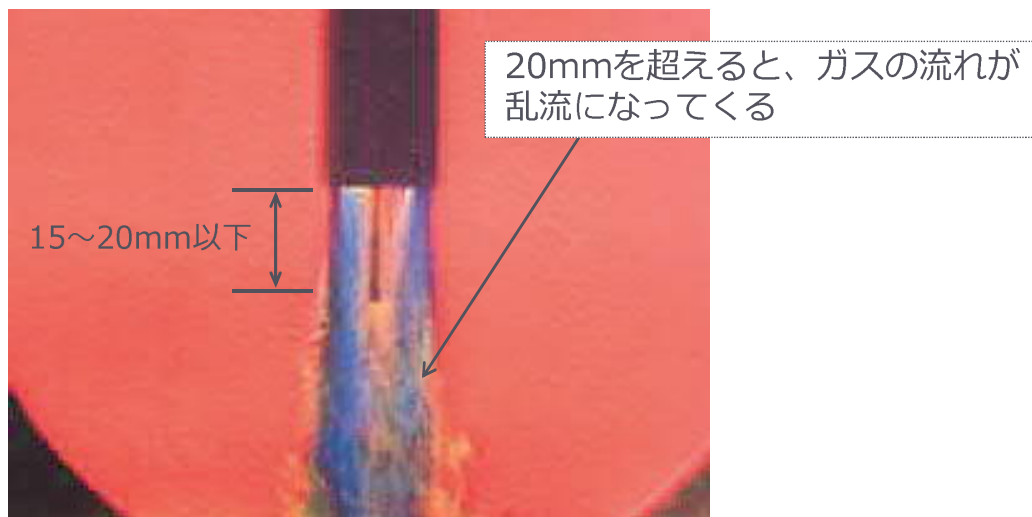


施工者の一回で通すという気持ちが一番大事

5. 本溶接

突き出し長さ

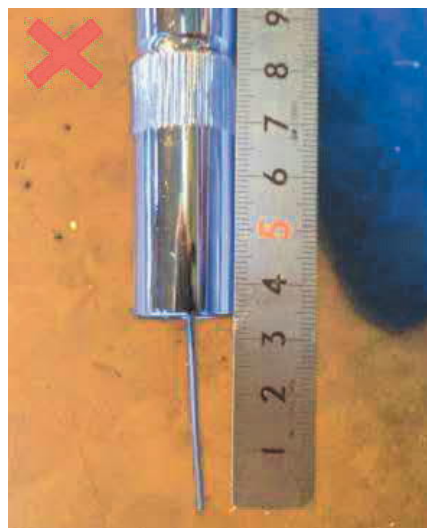
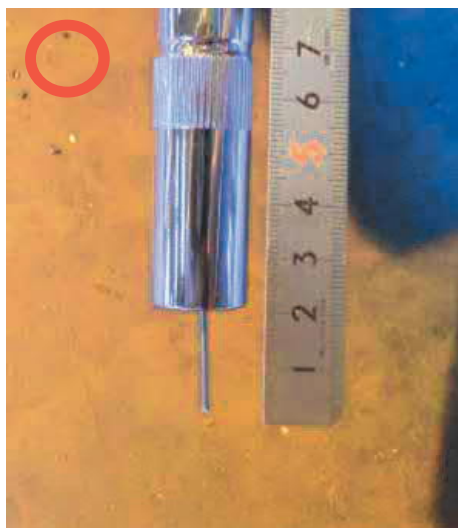
突き出し長さが20mm以上になると乱流になり、ガスシールドが不完全になりブローホールが発生しやすくなるため、突き出し長さは短くキープする。



5. 本溶接

突き出し長さ

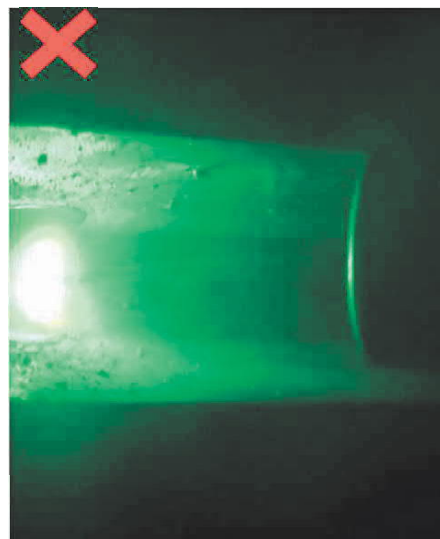
突き出し長さが20mm以上になると乱流になり、ガスシールドが不完全になりブローホールが発生しやすくなるため、突き出し長さは短くキープする。



5. 本溶接

突き出し長さ

突き出し長さが20mm以上になると乱流になり、ガスシールドが不完全になりブローホールが発生しやすくなるため、突き出し長さは短くキープする。



5. 本溶接

CO2ガス流量

CO2ガス流量が20L/min.未満もしくは、過剰な流量になるとブローホールが発生しやすくなるため、20～25 L/min.となるように流量計を調整する。



流量少ない！



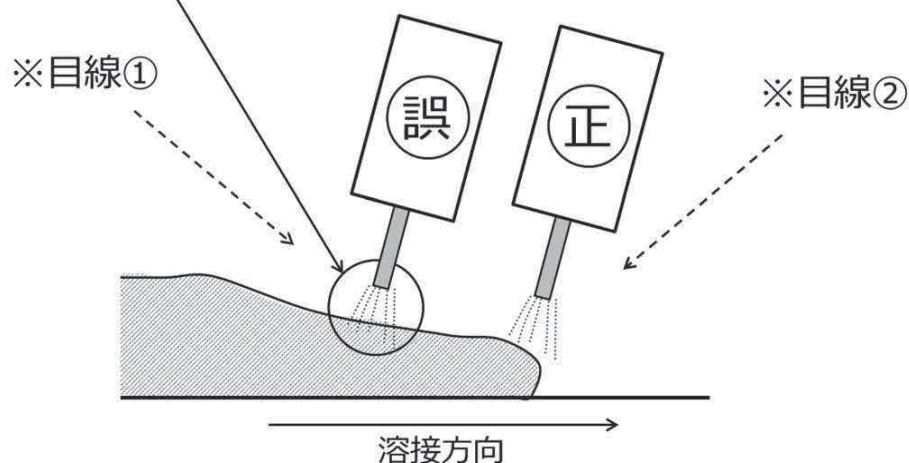
流量多すぎ！

5. 本溶接

溶接速度

溶融金属が先行しないよう適度な溶接速度で溶融プールの先端にアークを持って行く

アークが溶融金属の上で発生するため
母材まで溶込まなくなる

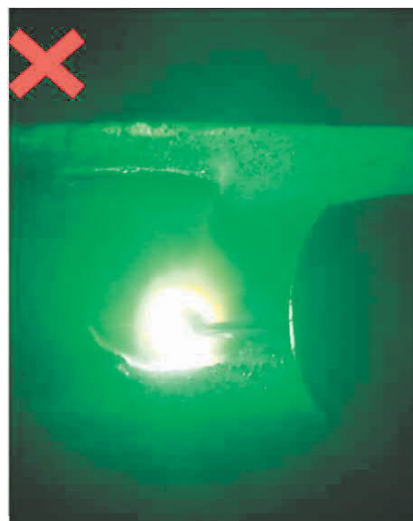
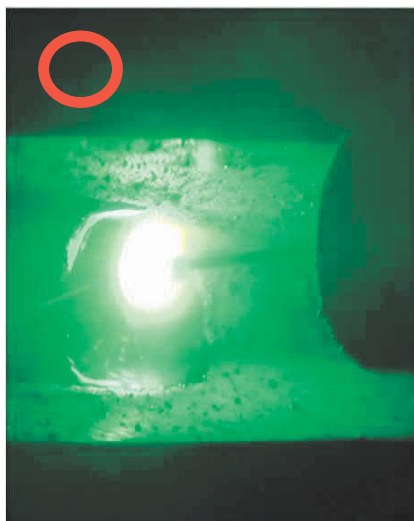


5. 本溶接

溶接速度

溶融金属が先行しないよう適度な溶接速度で溶融プールの先端にアークを持って行く

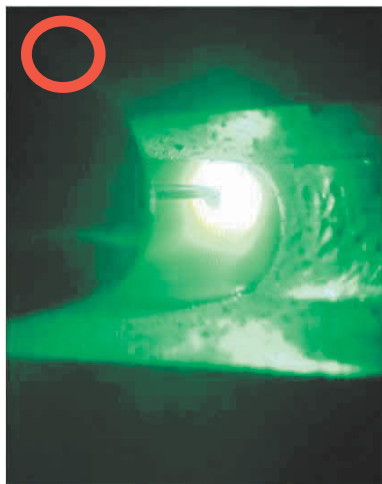
(目線①)



5. 本溶接

溶接速度

溶融金属が先行しないよう適度な溶接速度で溶融プールの先端にアークを持って行く
(目線②)

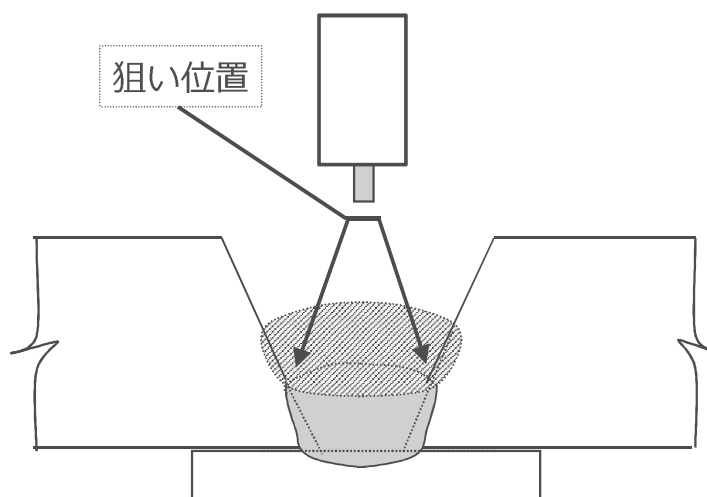


5. 本溶接

狙い位置

狙い位置・・・前層の両端部までワイヤ先端を持っていくようにウィービングする

(溶融プールで溶かそうとしても溶け込み深さが浅く溶け込み不良、スラグ巻き込み等の危険大！)

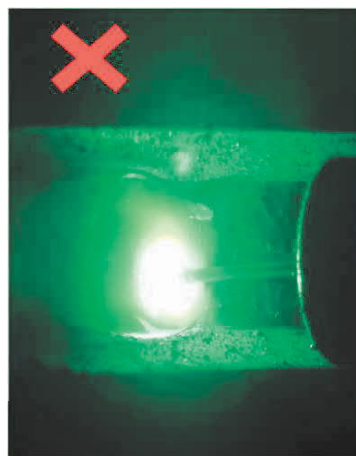
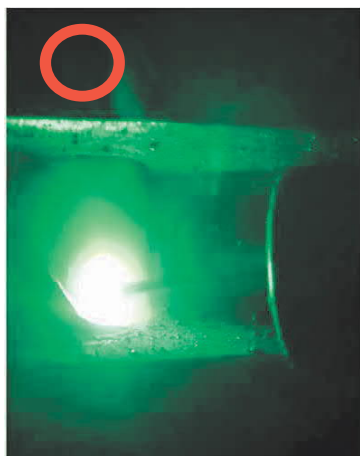


5. 本溶接

狙い位置

狙い位置・・・前層の両端部までワイヤ先端を持っていくようにウィービングする

(溶融プールで溶かそうとしても溶け込み深さが浅く溶け込み不良、スラグ巻き込み等の危険大！)



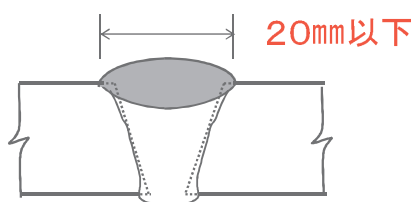
5. 本溶接

ウィービングおよびウィービング幅

滑らかな溶接ビード形状となるよう、ストレート運棒は避け、ウィービングを行い溶接欠陥を防止する。

また、溶接入熱量 $\leq 35\text{kJ/cm}$ を守るためウィービング幅は15mm程度とし、1パスのビード幅は20mm以下を標準範囲とする。

(20mmを超えるようであれば、2パス以上の多パス施工とする)



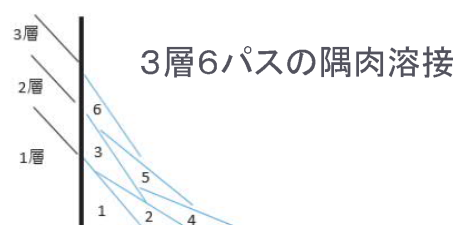
5. 本溶接

パス間温度

高温割れを防止するため、パス間温度は 150°C 以下とし、溶接開始前には温度計測を実施する。
また、板厚が薄い場合などはより低い温度で制限する必要がある。

※パス間温度＝

複数のパスで溶接する際に、次のパスを開始する前のパス（溶接ビード）の最低温度



終