

LNG船におけるタンクとその溶接

川崎重工業株式会社 寺井 清

1. まえがき

メタンを主成分とする天然ガスは、今日のように公害の少ないクリーン・エネルギーが要求される時代のエネルギーとして、また世界的なエネルギー不足を補充するエネルギー源として脚光をあび、その需要は急速に高まりつつある。一方、天然ガスの産地と消費地とは遠隔地になるため天然ガスを -162°C という極低温で冷却、液化して消費地へ輸送することが必要となる。 (図1参照)

このような天然ガスの需要の急増により液化基地および受入基地の建設と同時に、海上輸送手段としての液化天然ガス輸送船 (LNG船) の建造が急務となってきている。

LNG船はタンクの基本構造の面から、独立タンク方式、メンブレン方式およびその中間的な半独立タンク (セミ・メンブレン) 方式の3種に大別することができる。図2はすでに就船したLNG船ならびに建造、計画中のLNG船についてタンク容量を歴年で示したものである。

1958年、容量5000立方メートルのアルミニウム合金製独立タンクによるLNG船「METHANE・PIONEER号」(米国)を皮切りにLNG船の建造実績は昨年9月までに、独立タンク、メンブレンタンクの双方を合せて世界で15隻となっている。タンク容量もすでに最大87,600立方メートルを突破しており、100,000立方メートルを突破するのも時間の問題であり、図からも大型化の傾向がよくうかがえる。

わが国におけるLNG船の建造実績はまだないが、各造船所と125,000立方メートル級のLNG船を標準船として建造体制を確立しつつあり、すでに川崎重工(株)においてアルミニウム合金製 Moss型LNG船の建造が決まっており、将来も、その需要が順調にのびることが予測されるとともに、わが国の造船界にもLNG船建造の気運が本格的におとずれた感がある。

本稿では、それらのLNG船におけるLNGタンクの概要ならびにその溶接について述べることにする。

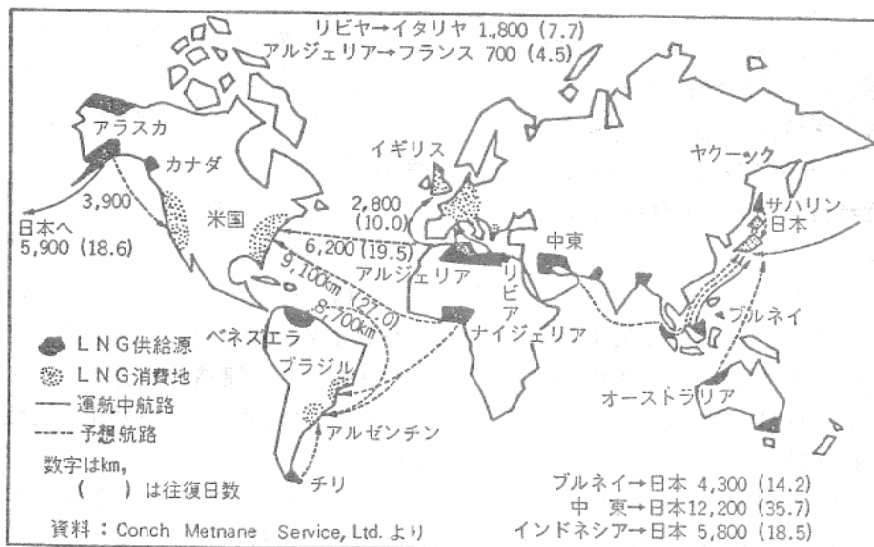


図1 世界のLNG供給源と航路距離

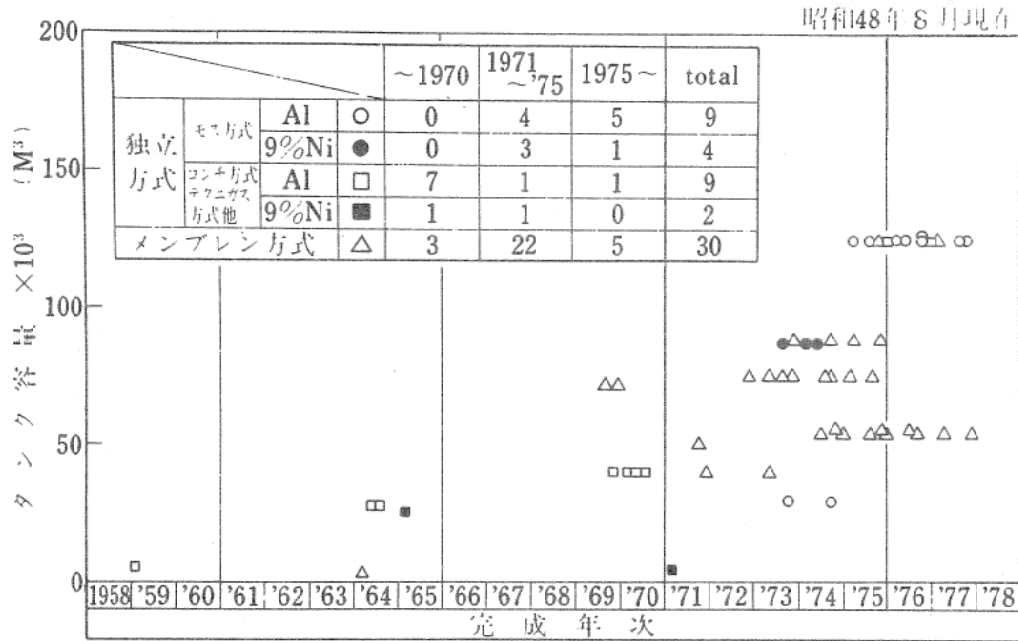


図2 LNG船の建造年とタンク容量

2. LNG船のタンクと使用材料

2-1 LNG船のタンク方式

すでにのべたように、LNG船用のタンク方式は、独立タンク方式、メンブレン方式ならびに半独立タンク（セミ・メンブレン）方式の3種に大別される。その概要は次のとおりである。

I) 独立タンク方式

船体構造と独立して荷重の静的ならびに動的な力をタンク自体の強度で支えようとする方式であり、タンク形状により球形、円筒形の压力容器方式と方形方式とに分けることができる。

II) メンブレン方式

船体内殻をタンク強度部材を利用し、船体内殻の内側に耐圧縮性のある断熱材を施し、さらにその表面に液密を保持する薄い金属膜（メンブレン）を張り、タンク内のすべての荷重はメンブレンおよび断熱材を介して船体構造に伝達させる方式である。

III) 半独立タンク（セミ・メンブレン）方式

独立タンク方式、メンブレン方式両方の特徴の一部ずつ取り入れたものであり、荷重に対する考え方はメンブレン同様であるがメンブレンより板厚の厚い材料を使用することにより、非載荷状態では自立できる構造とし、溶接を確実にこなうとともにタンクの建造を独立タンク同様に船体と別個に行なおうとするものである。

2-2 タンク材料

一般に液化ガスの運搬船については、液化ガスはその種類によって図3に示すごとく沸点が異なるためこれらの液化ガスを貯蔵し移送するタンクの構造用材料はそれぞれの使用温度に適したものでなければならない。

とくに、天然ガスを液化し、 -162°C という極低温に保持して運搬するLNG船の開発にあたっては、単なる造船技術だけの問題ではなく、タンク構造ならびに使用材料に対する要求がきびしいものとなる。したがってLNG船の極低温用タンクの使用材料としては、低温において十分な切欠靱性を有し低温脆化を生じない材料でなければならない。そういった観点から、低炭素鋼にNiを添加して靱性を向上させた9%Ni鋼などの材料、さらにオーステナイト系ステンレス鋼ならびに極低温まで伸び率、減面率が大きく延性破断を示すアルミニウム合金などをタンク材料としてあげることができる。

表1は現在確立されているタンクシステム、使用材料さらに建造体制を示している。なお構造ならびに建造上での特徴をも比較して記している。

以下、それぞれのタンク方式についてタンク材料とその溶接についてのべることにする。

(°C)	(°C)		(空気 比重)	(液体 比重)	
20					キルド鋼
0	0~-5	ブタン	2.01	0.605	低合金鋼
	-5	ブタジエン	1.87	0.621	アルミキルド鋼 (焼きならしまたは調質処理)
-20	-34	アンモニア	0.6	0.817	2.5%Ni鋼
-40	-42	プロパン	1.56	0.580	
-60					
-80	-79	炭酸ガス	1.53	1.107	3.5%Ni鋼
	-90	エタン	1.0494	0.694	
-100	-103	エチレン	0.9780	0.625	
-120					9%Ni鋼
-140					
-160	-162	メタン	0.554	0.415	アルミニウム合金
-180	-183	酸素	1.1053	1.140	
	-186	アルゴン	1.3794	1.402	
-200	-196	窒素	0.9674	0.810	オーステナイト系 ステンレス鋼
-220					
-240	-253	水素	0.0695	0.070	
-260	-269	ヘリウム	0.1368	0.147	
温度	沸点	ガス名	気体	液体	使用鋼材
		液化ガス	比重		

図3 各種液化ガスの沸点とその低温用材料

表1 LNG船用タンク方式と建造体制

タンク方式	独立タンク方式						メンブレン方式		セミメンブレン方式		
	球形(円筒形)			方形							
船体横断面											
	moss-kvaerner type			conch type			gaz-transport type		BS type		
技術保有者	moss-kvaerner	technigaz	gaz-transport	conch	esso (一重タンク)	esso-conch (二重タンク)	techni-gaz	gaz-transport	B.S.液化ガス	石 播	
日本の提携会社	川重 三井 三菱	住 重	三 井	三 菱 住 重	日 立		三 菱 鋼 管 住 井	鋼 管 住 井	佐世保 川 重	石 播	
材 質	primary	9%Ni, Al	9%Ni	9%Ni	Al	9%Ni	Al	ステンレス	36%Ni (インバー)	9%Ni	Al
	secondary	不 要	—	—	合板および ポリウレタン 表皮	—	Al	合 板	36%Ni	合 板	合 板
	防 熱	ポリウレタン ポリスチレン フォーム	—	—	バルサおよび ポリウレタン フォーム	—	ポリウレタン スラブ張り 付け	バル サ	合板箱入り バーライト	ポリウレタン フォーム	フェノールフォーム ポリウレタン
特 徴	1. 構造解折が完全にできる。 2. 設計面から二次防壁が不要である。 3. タンク部と船体部を別個に製作しうるため船台期間を大巾に短縮できる。 4. 防熱費用が最も安い。			1. 球形にくらべ、船体内のスペースを有効に利用できる。 2. 球形同様船台期間を短縮できる。 3. 防熱費用はメンブレンより安い。			1. 船体内のスペースが最も有効で、容積効率が最もよい。 2. 構造的にタンクの大型化が可能である。 3. タンクの構造材料が少なくすみ、材料費も最も安い。		1. メンブレン同様、船体内のスペースが有効に利用できる。 2. タンクの大型化も可能である。 3. 材料費が独立タンクより安い。		
備 考											

3. 独立タンク方式のタンク材料と溶接

独立タンク方式には、すでにのべたごとく、球型と方型とがある。いずれのタンクにもタンク材料として現在用いられているのはアルミニウム合金5083-O材 (Al-Mg系合金) と9% Ni鋼とである。ここではアルミニウム合金と9% Ni鋼の溶接についてそれぞれのべることにする。

3-1 アルミニウム合金の溶接

球形独立タンクに使用されるアルミニウム合金の板厚は35mm程度のものから超厚板で200mmを超えるものまでである。一方、方形タンクの場合は15~30mm程度の板厚のアルミニウム合金が一般に使用されているようである。

これらのアルミニウム合金の溶接には、溶接材料として母材5083-O材と同系のA5183材を用いて、一般にMIG (パルスアークを含む) アーク溶接、TIGアーク溶接が行なわれている。現段階においてはMIG溶接が中心であり、自動溶接がかなり広範囲にまで適用されてきている。

下向突合せ溶接では一般的に2.4~3.2mmφの溶接ワイヤによる大電流MIG溶接が採用されている。溶接施工上、9% Ni鋼にくらべ割れなどの溶接欠陥もほとんどなく、かなり大入熱溶接が可能で、溶接継手品質も安定している。なお実験的には、さらに太径のワイヤ (4.0mmφ以上) を用いた大電流MIG溶接により板厚70mmをこす厚板材の両面一パス溶接なども報告されている。大電流MIG溶接の今後の課題として、ソフトウェアの面から太径ワイヤ (40mmφ以上) の使用による溶接速度の向上、さらに、He等のガス混合による溶接継手品質の改善、安定をはかるとともにハードウェアの面から溶接機本体の軽量、小型化を促進する必要がある。(写真1参照)

つぎに全姿勢 (立向、上向、水平) の突合せ溶接であるが、簡単なものとして半自動溶接トーチを走行装置に付け自動化する方法が一般的にとられている。さらに三角形、台形、扇形などの特殊なウィーピング機構などを設けて高能率化をはかるとともに、タンク構造に合った専用化装置の開発も進められ実用に供されている。

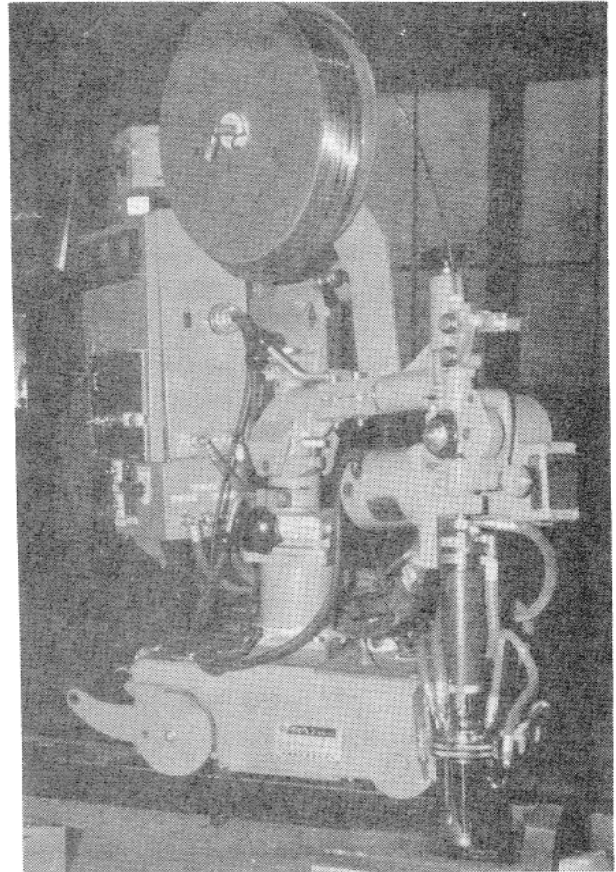


写真1 二重シールドノズル付のアルミニウムの
大電流MIG溶接機

(写真2参照) また、超厚板の全姿勢溶接についても、溶接トーチなどに改良、工夫を加えて溶接の高能率化が計られているようである。溶接上の問題としては、とくに水平姿勢などの多層溶接で、溶接層間のクリーニング不十分による融合不良が発生することがあるので、層間のクリーニングには十分に留意して溶接する必要がある。またアルミニウムの溶接で発生しやすい欠陥にブローホールがある。これについてもその発生原因のうち影響の大きいと思われるものについて種々検討がなされ、実工事では良好な結果が得られているようである。

今後、このような厚板のアルミ溶接の課題のひとつとして全姿勢溶接の高能率化があげられる。その対策として全姿勢MIG溶接の大電流化を進める一方、アルミニウムの新しい溶接法として登場してきた、エレクトロガスアーク溶接、ハイパルス法、DCSP・TIG溶接さらに電子ビーム溶接法などの実用化を積極的に推進する必要があると思われる。

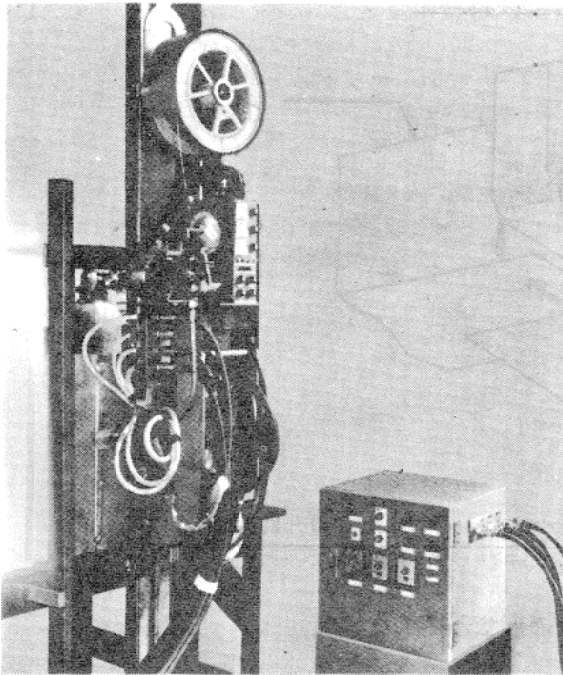


写真2 三角形オシレート付立向自動溶接機

3-2 9% Ni 鋼の溶接

球形タンク用材料として使用される9%Ni鋼の板厚は20~75mm t 程度のものである。方形タンクでは8~15mm t 前後のものである。この9% Ni の溶接溶接には一般的に、手溶接をはじめとし、MIGの半自動・自動アーク溶接、全自動TIG溶接ならびに潜弧自動溶接などが適用されている。

溶接材料の成分としては70% Ni のインコネル系が最も多く、50% Ni など最近多く使用されるようになってきている。いずれにしても、アルミニウムの場合のように、同系材での溶接とは異って、9% Ni の場合の溶接は、かなり高Ni量の溶接材料で行なうことになり、継手として異材となっている。

溶接の自動化についてみるとアルミニウムの溶接にくらべると多少低いだが、それでもLNGタンクの場合には他のものにくらべて自動化は進んでおり、主要部材のほとんどに自動溶接が採用されている。全姿勢（下向、上向、立向、水平）溶接に手溶接、MIGの半自動パルスアーク、全自動パルスアーク溶接法が実用化されており、また下向、水平には潜弧自動溶接なども適用されている。

溶接上の課題としては、9% Ni 鋼の溶接材

料がいずれも高Ni系であるため、クレータのごとに溶接割れを生ずるので必ず削除する必要がある。しかも9% Ni 鋼そのものが熱サイクルに敏感であるため溶接による熱影響に左右されやすいので溶接入熱管理を十分に実施することが必要である。さらに9% Ni 鋼自体、残留磁気を帯びやすい性質であるため、溶接に際して磁気吹きの影響をうけ、溶接部は凸の山形になりやすくなる。したがってとくに多層溶接の場合に、コーナー部に融合不良が発生しやすくなるので、ビードの成形に十分留意する必要があることなどがあげられる。

今後、9% Ni 鋼の溶接については、溶接法として、MIG立向自動溶接専用特殊ウィーピング機構を有する溶接機も開発され実用化されているが、アルミニウムの溶接の場合と同様、新しい溶接法としてのハイパルス法や、電子ビーム溶接法などの実用化を促進する必要があると同時に、9% Ni の共金系の溶接材料による溶接施工の確立を強力に押し進めていく必要があるだろう。

4. メンブレン方式のタンク材料と溶接

メンブレンタンク用材料として現在用いられているのは、オーステナイト系ステンレス鋼ならびに36% Ni 鋼（インパー材）である。これらの材料はいずれも薄板になるため、溶接法としては一般にTIG溶接（溶加材なし）、プラズマ溶接、抵抗シーム溶接法などが用いられる。

いずれのメンブレン材料も、独立ならびに半独立式のタンク材料とちがって、きわめて薄板になる。すなわちステンレス鋼の場合は1.0~1.2mm t、さらにインパー材の場合0.5mm t という極薄板のものになる。したがって溶接上の一番のポイントはいかにして液密性を保つような溶接をするかという点にある。

ステンレス鋼のメンブレンの溶接は添加溶加材なしのTIG溶接が行なわれる。なお一部、プラズマ溶接も適用されている。熱伸縮に十分対応できるように、図4に示すようなワッフルドメンブレンと呼ばれる形状が採用されており、継手重なり部形状が複雑になる。したがってとくに、図示のような重ね部の溶接は、液密性を十分保ちうるよう留意する必要がある。

その点、ステンレス鋼よりさらに熱伸縮の小

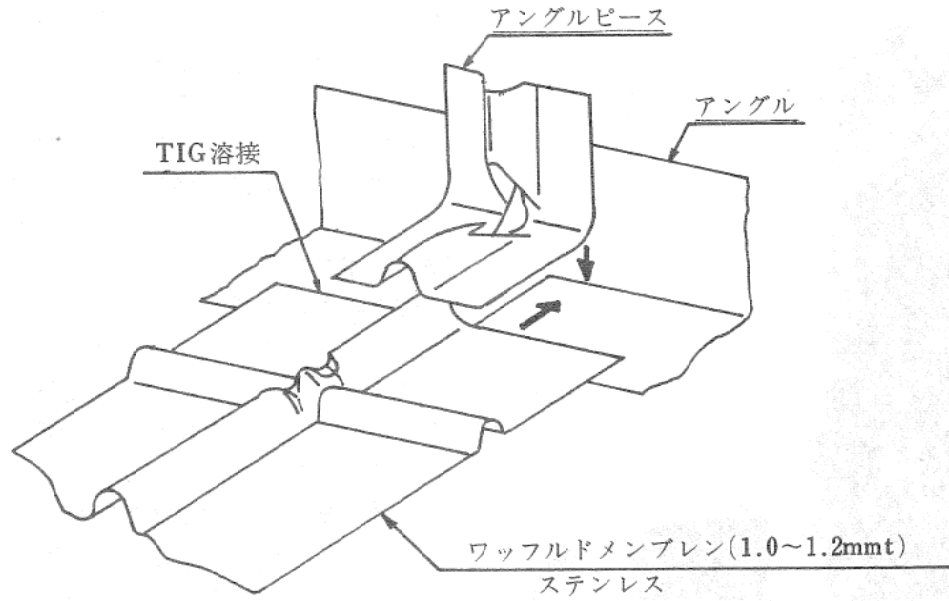


図4 ワッフルドメンブレンの形状とTIG溶接

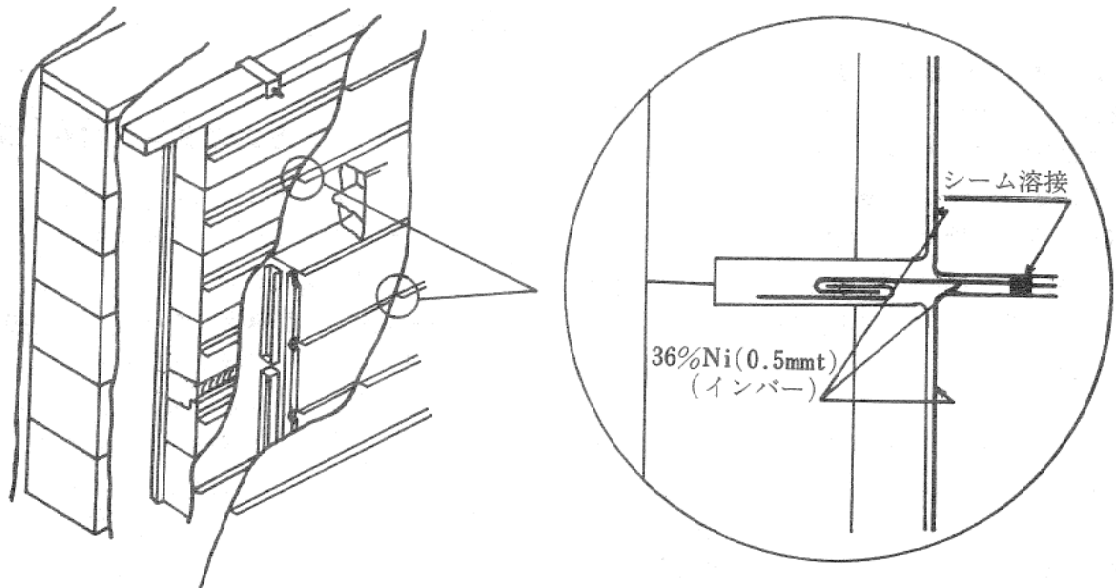


図5 インバーメンブレン構造とシーム溶接

さいインバー材を使用したメンブレンタンクは図5に示す構造である。使用材に平板を使用することができるため、図示のような三枚重ねの平板のシーム溶接も自動化しやすい。(写真3参照)

インバーの溶接の場合、やはり36% Ni という高 Ni 材であるため、ナゲット部に割れを生じやすくなるので、十分留意する必要がある。

溶接法としてはシーム溶接以外にTIG溶接もコーナー部に採用されている。

5. 半独立タンク方式のタンク材料と溶接

半独立タンク方式の場合のタンク材料は独立タンク同様、9% Ni 鋼もしくはアルミニウム合金5083-0材が考えられている。(建造実績

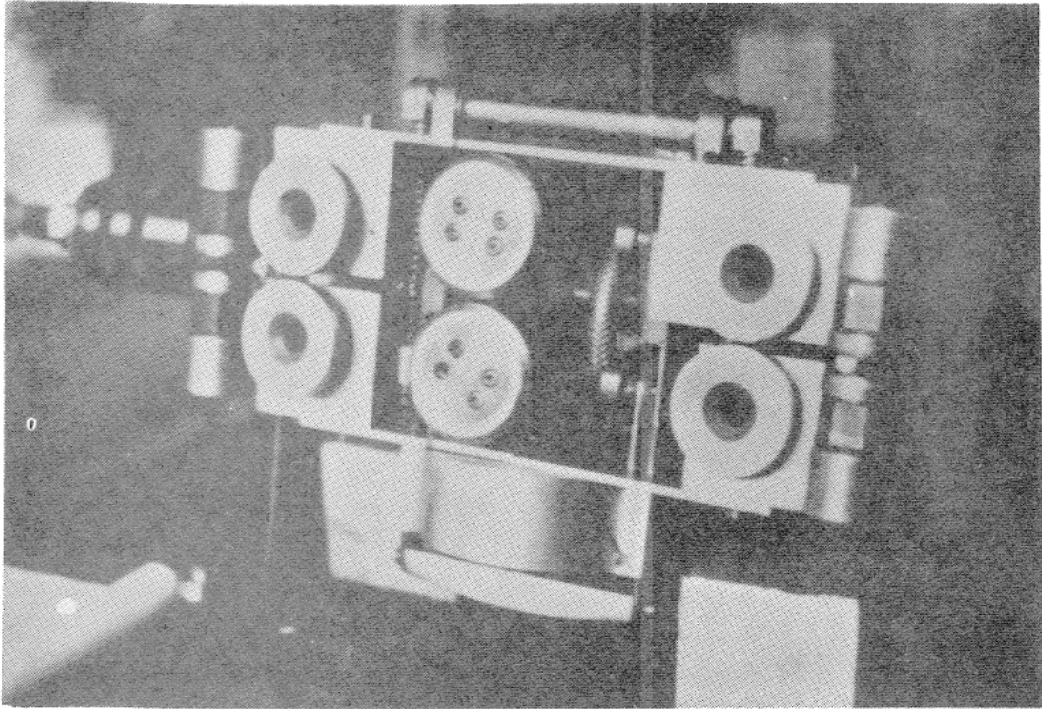


写真3 軽量小型化された自動シーム溶接機
(ローラー部)

はまだない。)ただ独立タンクの場合とちがって、使用板厚がアルミニウム合金の場合で15~25mm t、9% Ni 鋼の場合で6~14mm t程度とかなり薄い板厚になっているだけである。

したがって溶接法は独立タンクで適用したものが、ほぼそのまま適用できる。

6. あとがき

以上、LNG船のタンクならびにその溶接の概要をのべるとともに、課題についても少しふれた。

はじめにのべたように、すでに世界で十数隻建造され就航しているLNG船も、わが国のLNG船の建造は“これからスタート”という状況である。建造、計画中のLNG船はいずれも12万立方メートルをこえるクラスの船が主体であり、今後、LNGの需要の増加とともに大型化していくことが予測されている。そこで、単に建造技術にとどまることなく、さらに新しい高能率な溶接も含め、総合的に建造システムの技術革新のテンポを早める必要があると考える。

参考文献

- (1) 住友重機械工業株式会社「メンブレン方式液化天然ガス貯槽の溶接」、化学機械研究委員会資料、1972年、5月
- (2) 養田「LNG運搬船におけるアルミニウム合金厚板の溶接に関する諸問題」、日本造船学会誌、第530号
- (3) 亀谷「川崎重工業におけるLNG船の開発」、造船技術、'73、3
- (4) 土井「住友重機械工業におけるLNG船の建造体制の現状」、造船技術、'73、4
- (5) 石川島播磨重工業株式会社「IHIのLNG船と建造体制」、造船技術、'73、7
- (6) 萩原「川崎モス方式LNGタンカー」、ペトロケミカル・エンジニアリング、1 1973 第5巻、8号
- (7) 木谷、脇野、大麻「アルミニウム合金の厚板の溶接について(第9報)」、溶接学会全国大会講演概要、第13集
- (8) 寺井、須清「アルミ合金 Moss型LNG船の構造と溶接技術、1973、10月号
- (9) 中村「CONCH方式によるLNG船の構造とその溶接」、溶接技術、1973、10月号

- (10) 三浦「9% Ni 鋼によるLNG極低温タンクの溶接」、溶接技術、1973、10月号
- (11) 木谷、渡辺、脇野「アルミニウム合金大電流MIG溶接部の性能」、溶接冶金委員会資料、1973、11月号
- (12) 酒井「LNG開発プロジェクトの現況」ペトロケミカル・エンジニアリング、1973 vol 5, No8