

大型構造物における溶接施工上の最近の問題点

大阪大学溶接工学研究所 木原 博
大阪大学工学部 佐藤 邦彦

1 まえがき

最近の技術革新の急速な進展とこれに加えて経済、社会上の諸変化は工業技術あるいは工学の分野にも大きな影響を及ぼしつつある。このような事情を背景として、各種構造物の溶接施工においてもそこに生ずる問題点は複雑かつ多岐にわたる傾向が認められ、これらの解決には従来とは異なった新たなアプローチが必要となってきた。以上の認識のもとに、本稿では造船を中心とした大型構造物の現在の傾向を示しながら、それらの溶接施工上の問題点と基本的施策のあり方について述べる。

2 溶接施工上の問題点のとらえ方

船舶、橋梁などの各種構造物の建造工程において、溶接施工は工事量として大きな比重を占め、また溶接継手の品質性能は構造物の使用性能に大きな影響を与えるといえる。

構造物の溶接施工に当って考慮すべき問題点は模式的に図1のごとくあらわすことができるであろう。これによれば品質性能、生産性、安全性などは溶接施工に対する周囲条件としてとらえることができ、構造物の溶接施工においてはこれらの要求条件を満足するように素材、設備、人あるいは技術力を整備、充実し、かつ有効に投入していくことが必要である。したがっ

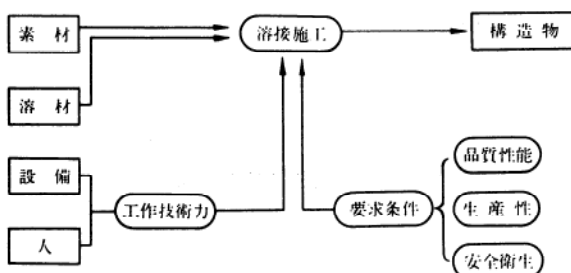


図1 溶接施工のフローチャート

て施工上の問題点を適確に把握し、これに対処していくためには対象とする構造物とその施工上の周囲条件を知りその上で技術力あるいは素材、設備、人などについて検討を加え適切な対策を講じていくことが肝要であろう。

3 各種構造物の傾向とその周囲条件

3.1 構造物の大型化と使用材料の高性能化

最近船舶、貯蔵容器、橋梁などの構造物は大型化へ進みつつあり、また船舶では特殊専用化の傾向も強い。

図2は一般船舶における最近の傾向を示したものである。タンカーを中心とした船体の大型化は急速に進展し現在では47万DWTタンカー（グロービクトウキョウ号）が建造され、さらに100万DWTタンカーの建造が検討されつつある。

また船舶の特殊専用化の例として公害問題からんでLPG船あるいはLNG船への需要が増大している。LNG船についても図3に示すような大型化の傾向が認められる。わが国では現在のところ建造実績はないが、主として13万 m^3 容積のLNG船を目標としてその建造基準体制が現在、着々と整備されつつあり、1974年中に第一船の建造が開始されるはこびになっている。この一環として9%Ni鋼、Al合金など低温用材料とその溶接技術の開発研究が各所で鋭意進められている。

圧力容器の貯蔵容量においても図4に示すように大容量化の傾向をみることができ、HT-60を用いた14,000 m^3 の都市ガス用球形タンクあるいは、Al合金および9%Ni鋼製の60,000 m^3 のLNGタンクが建造されている。

橋梁の分野では橋梁として初めてHT-80（最大板厚75mm）を大々的に用いた南港連絡橋

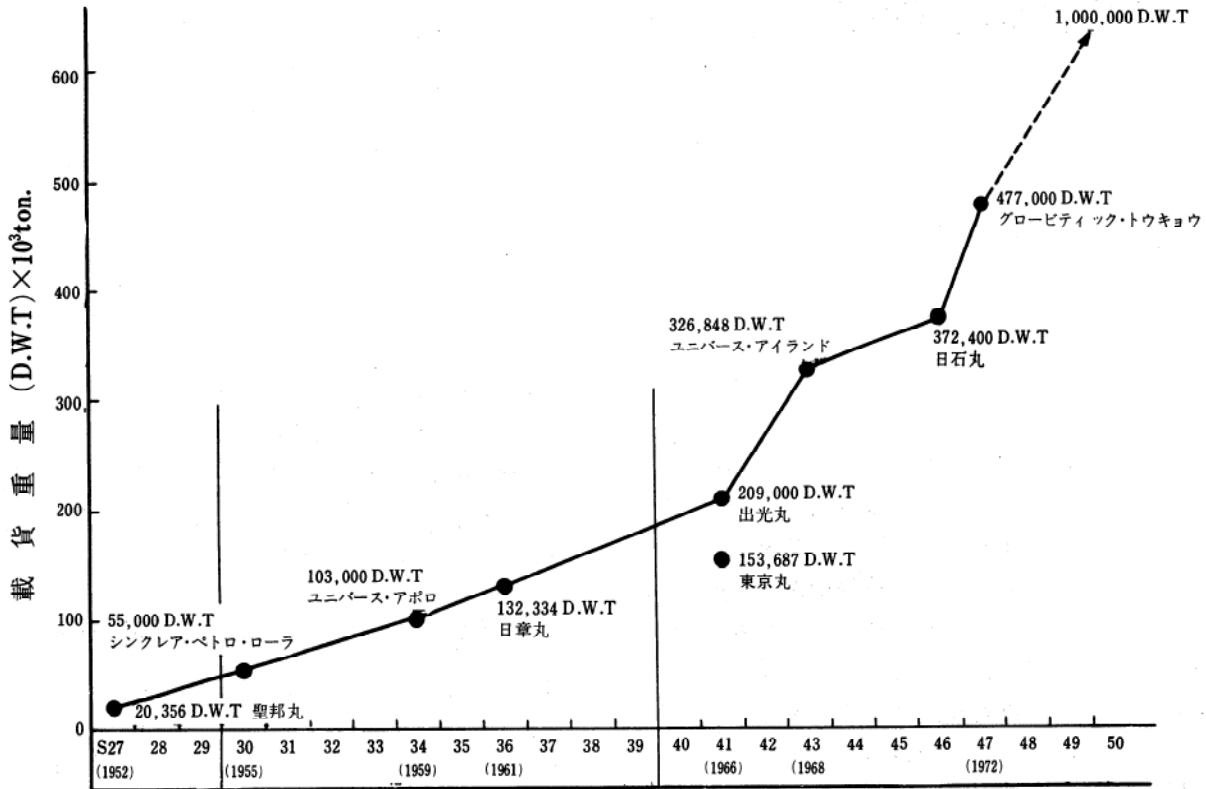


図2 造船におけるタンカーの大型化

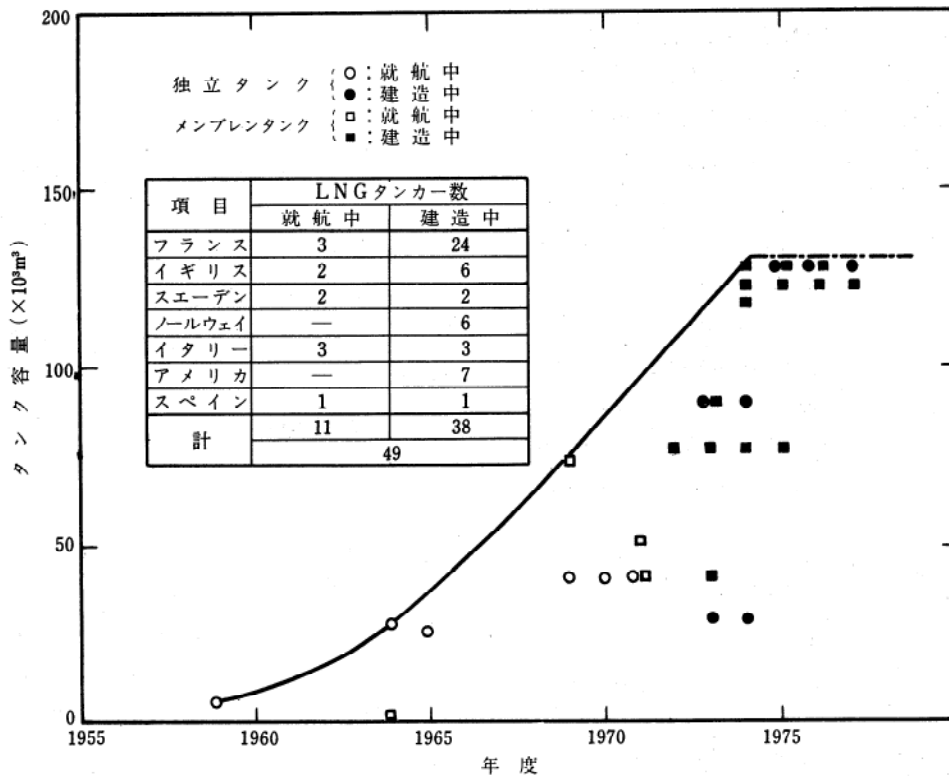


図3 LNGタンカーのタンク容量

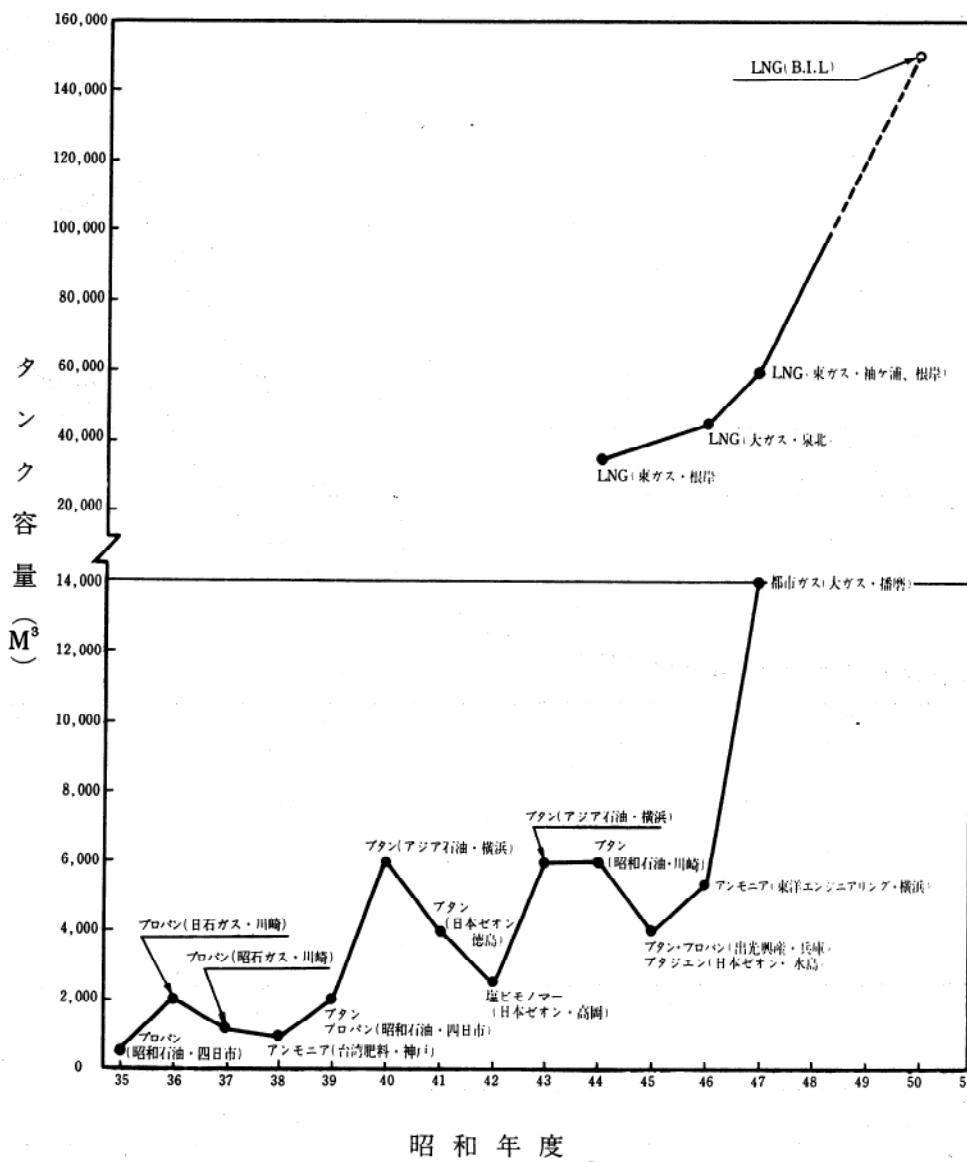


図4 ガス貯蔵タンクの大型化

(港大橋)が本年夏に完成するのに続いて本四連絡橋の建設が具体化されつつある(図5参照)。また海洋開発に関連して潜水深度600M級潜水調査船の建造実績にもとづき、潜水深度1000Mさらには6000M級の深海調査船の建造法の検討とそれらに使用される超高張力鋼の工作技術の開発研究が実施されている。(表1)

なお以上のような各種構造物の大型化と使用性能の向上にともない超高張力鋼あるいは低温用材料の使用量が増しているが、これらの高性能材料に適用しうる溶接法は表2に示すようにMIG溶接あるいはTIG溶接であり、この意味で大型構造物の溶接施工におけるMIG溶接法の実用化は重要な課題であるといえる。

表1 代表的な潜水船の潜航深度、耐圧殻形状および使用材料の例

船名	潜航深度 m	耐圧殻形状			使用材料
		形状	直径(m)	板厚(mm)	
よみうり	300	円筒	2.05	—	高張力鋼
しんかい	600	2連球殻	4.0	36	HT60
開発中DSRS	4,000~6,000	"	2.3	18.8	HY 140

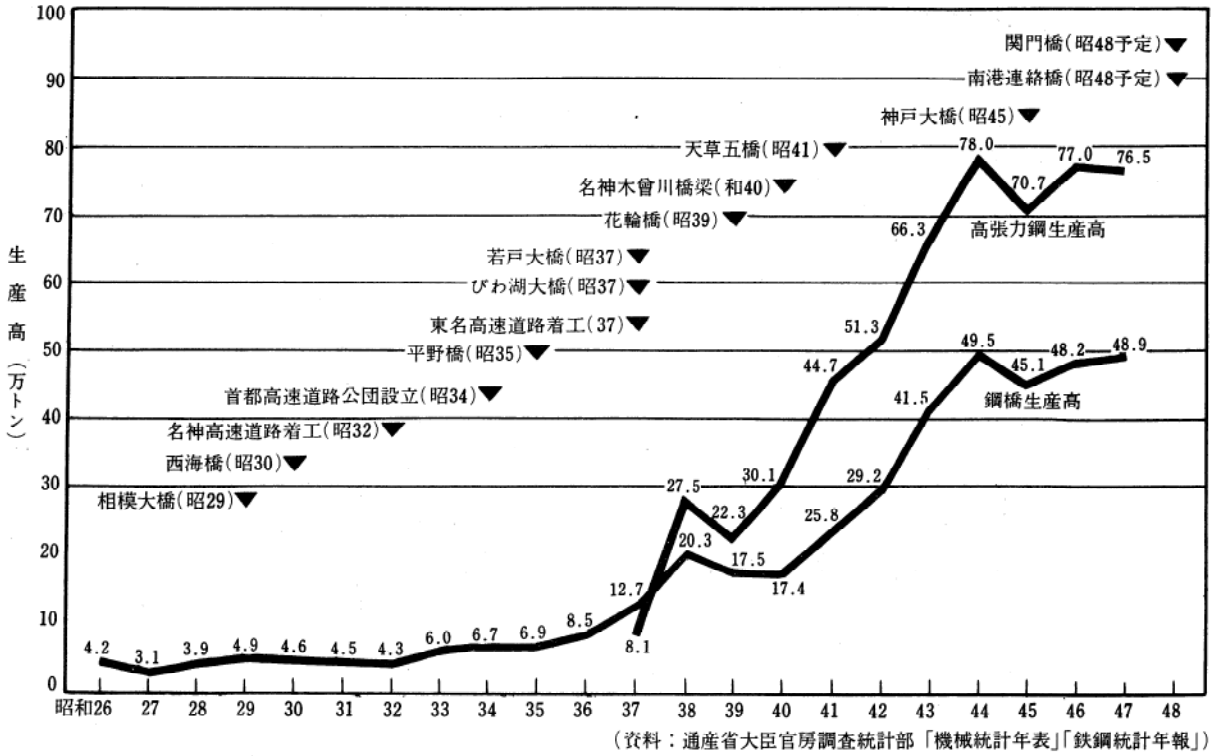


図5 鋼橋生産高と高張力鋼生産高の相関

表2 各種鋼材に対する適用可能溶接法

項目	区分	船体用MSとHT50						低温タンク用材料			高張力鋼					
		A	B	C D	Ds E	CH DH	EH	2.5Ni Al-キルド	9Ni	Al (5083)	HT60	HT80	HT100	HT140 (10Ni)	HT180 (マルエ レンク)	
鋼材	強度 (kg/mm ²)	=41	=41	=41	=41	=50	=50	=41	=70.3	=60	=60	=75	=95	=140	=180	
	靱性 (kg-m)	-	-	=4.8 (0℃)	=4.8(-23℃) =6.2(-10℃)	=4.8 (-7℃)	=6.2 (-17℃)	=5.5 (-50℃)	=3.5 (-196℃)	=2.8 (-50℃)	=2.8 (-50℃)	=10.0 (-70℃)	=7.0 (Esheff)			
各種溶接法の適用性	手溶法	普通型 (MS用)	←			→	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		低水素型 (MS,HT用)	←						×	×	×	×	×	×	×	×
		特殊型	←								×	→			×	×
	サブマージ 溶接	片面	←							×	×	×	×	×	×	×
		単層	←								×	→	×	×	×	×
		多層	←								×	→			×	×
	エレクトロ スラグ 溶接	普通法	←			→	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		CES法	←			→	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	シールド ガス 溶接	OA	←			→	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
		CO ₂	←								×	→			×	×
		MIG	←									→			×	×
		TIG	←									→				

注) ←: 良好 ←→: やや問題あり

3.2 周囲条件

(1) 品質性能の向上

溶接部の品質は構造物の強度を直接的に支配するものであるから、構造物の信頼性向上の為にはそれぞれの構造設計Philosophyに適合した溶接部品質の確保と安定化が必要である。特に各構造分野において上述のような使用材料の厚板化、high grade化の傾向にある現状では、高強度材料厚板の溶接の問題を材料、工作、設計の面から有機的に一体としてとらえる必要性が痛感される。これに対処していくためには品質管理体制の強化、各種構造物に対する品質性能に関する研究体制の強化などが計られなければならない。

まず品質管理(Quality Control)についてはこれまで Proces Controlに feed backする機能のみが強調されるきらいがあったが、最近では Quality Controlのあり方について新たな角度から再検討を加え、Quality Assuranceとの関連で Quality Controlの機能を強化しようとする努力が払われている。

品質性能の評価の問題については、溶接に限らず工学には経験的要素が多分に含まれているが、現在のように技術革新が加速化される時代では構造物の大型化と高性能化の傾向に対して

経験的要素に重きを置く品質性能の評価のあり方には問題が多いといわねばならない。この反省として事故例の調査結果(図6および表3参照)とともに破壊力学、溶接力学、信頼性工学非破壊試験などの研究成果を総合した品質性能の評価基準の再検討が望まれる。

表3 LPGタンクの製作年次別
ワレ発生状況の例

年	ワレのある貯槽数	ワレのない貯槽数	計	ワレ率(%)
34	4	0	4	100
35	3	1	4	75
36	12	12	24	50
37	5	24	29	17
38	2	9	11	18
39	3	8	11	27
40	5	14	19	26
41	2	7	9	22
42	2	2	4	50
43	0	18	18	0
44	7	4	11	63
計	45	99	144	32

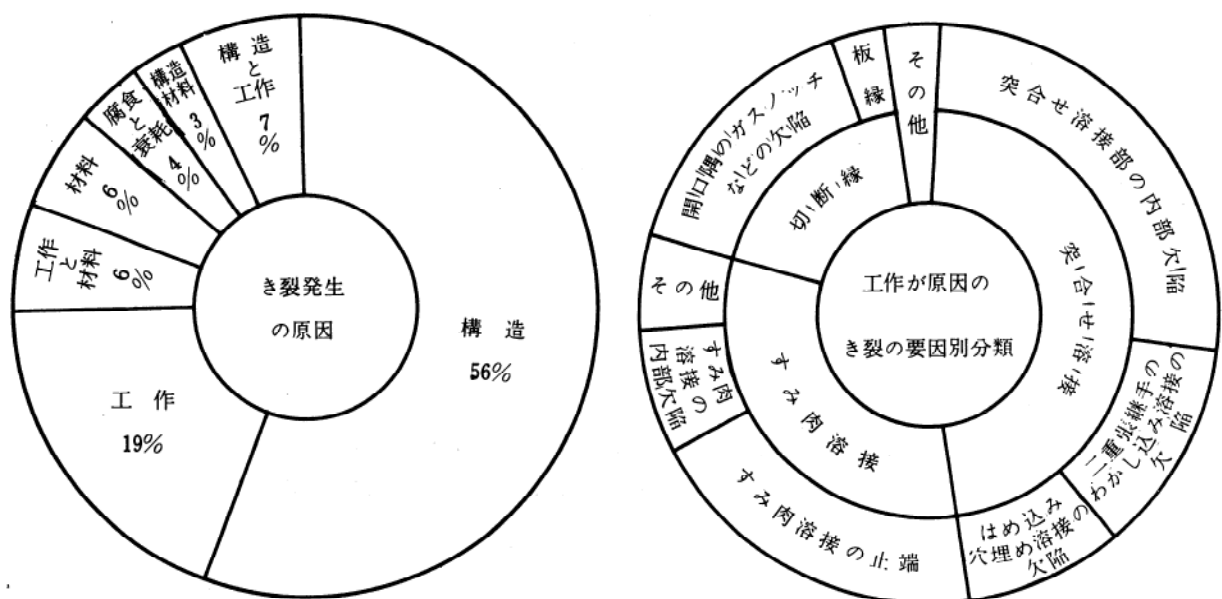


図6 船体における割れの発生原因

(2) 生産性の向上

これまでわが国が高度成長経済を保ってきた要因として生産性の向上が大きな役割りを果たしてきた。たとえば造船における生産性の向上の推移は図7に示すごとくであり、造船建造量の増大は人員数の増加でなく、生産性の向上により図られてきたことがわかる。

従来生産性の向上は経営管理手法の積極的な導入と個別的な生産技術の改善によってなされてきたが、このような方法の効果はすでに限界に達していると考えられ、生産のトータルシステムという観点から問題点とNeedsを明らかにし、そのNeedsから技術開発を図り、生産性の向上をおこなっていくことが必要である。

(3) 作業環境の改善と安全衛生対策の強化

作業環境の改善策としては、現場作業の屋内化、高所の作業床（足場）の改善、防暑対策として換気の改善さらには空調設備の実施などがあげられ、各所でそれぞれの周囲条件に適した対策が実施されているが、新鋭造船所においては、たとえば図8にみるように現場に巨大な移動屋根が設備されている。

つぎに安全衛生対策としてとくに溶接関係者にとっては、溶接フェームの問題が重要である。この溶接フェームの許容量を規定することが検討され、表4に示すような案が関係機関から出されている。この問題の基本的対策としてフェーム発生源の減少対策、作業環境対策および個

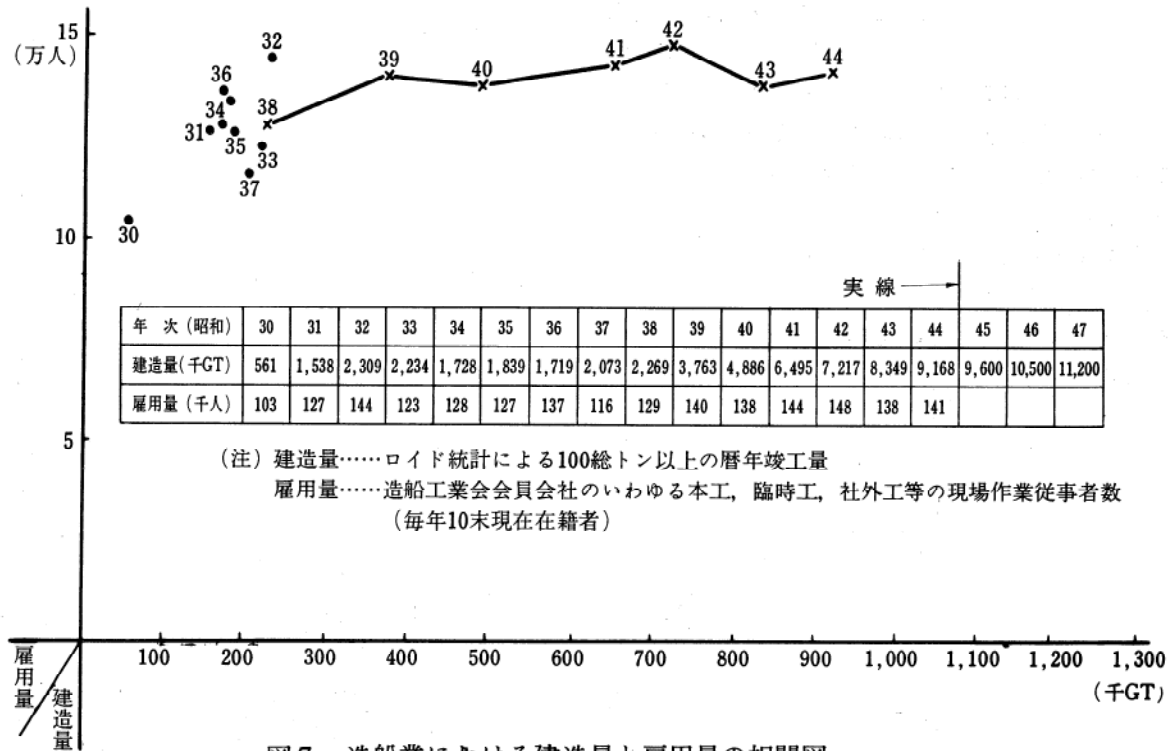


図7 造船業における建造量と雇用量の相関図

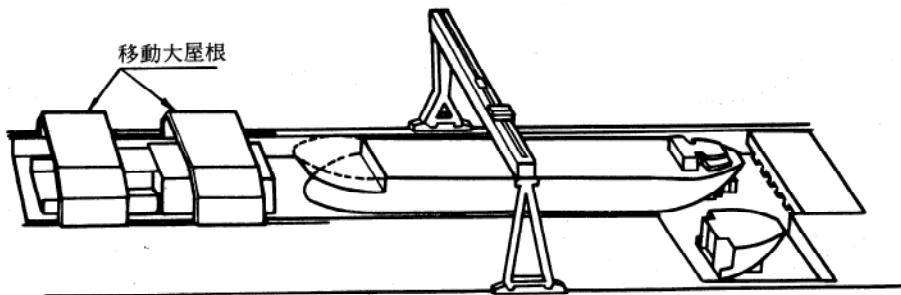


図8 大型ドックと移動屋根

表4 溶接フュームの許容限度

名 称 棒 種	溶接棒の種類とフューム許容値			
	低水素系	低水素系 非低水素系	非低水素系	そ の 他
日本溶接協会	$\leq 10\text{mg}/\text{m}^3$	$\leq 15\text{mg}/\text{m}^3$	$\leq 20\text{mg}/\text{m}^3$	—
国際溶接学会 (I I W)	≤ 10	—	≤ 20	—
A.C.G.I.H. (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)	≤ 12.5	—	≤ 15	(注1. ≤ 2.5)
日本産業衛生協会	—	≤ 15 (注2.)	—	≤ 10 (注3.)
労働省労働基準局 (達1176号)	—	≤ 10 (注4.)	—	≤ 15 (注3.)

注1. ふつ化物

2. 酸化鉄フューム

3. 一般粉じん

4. 遊離珪酸50%以上含んだ粉じん

人防護対策の3つが考えられる。発生源対策としては無害溶接棒の開発、フューム吸引装置、溶接の自動化などがあり、環境対策としては換気の強化と換気方法の改善が実施されなければならない。

4. 問題点とその対策

4.1 構造物の建造における問題点とその対策

(1) 巨大船

現在20万DWTから35万DWTが巨大船の標準であり、さらに前述のように100万DWTのタンカーの建造計画が検討されている。これに対して巨大船の専用工場としては堺（日立造船）、津（日本鋼管）、追浜（住友重機械）、千葉（三井造船）、坂出（川重）、香焼（三菱重工）などの造船所建設あるいは拡張工事がほぼ終り、建造工事が着々と進められており、続いて知多（石播）、有明（日立造船）などの新鋭造船所の建設が遂行されつつある。巨大船の専用工場においては生産システムの近代化と溶接の自動化と装置化が実施され、図9、10に示すような板継ぎ定盤における片面自動溶接装置の

採用、図11の立体ブロックへの新しい組立方式と大型治具の実用化あるいは、現場における自動走行作業床の導入などがおこなわれている。さらに将来の造船所は作業環境の改善を目的とした全作業の屋内化とともに、船体中央部、船首船尾部および上部構造の専用建造工場を設置するような形のものへと進むべきであるとの提案も示されている。

このように生産システムの近代化により、品質の向上、生産性の向上あるいは安全衛生の強化という課題を解決していこうとするのが新鋭造船所の一つの姿といえる

(2) 特殊専用船

現在の造船界の一つの焦点はLNG船の建造であろう。LNG船はそのタンクの方式により表5に示すように独立タンク方式、メンブレン方式、セミメンブレン方式の3つに大別される。LNGタンクの使用温度は -162°C という低温域となるため、表6に示すようにその使用材料は9%Ni鋼、ステンレス鋼、Al合金、INVARなどが考えられ、これらの材料の溶接工作技術

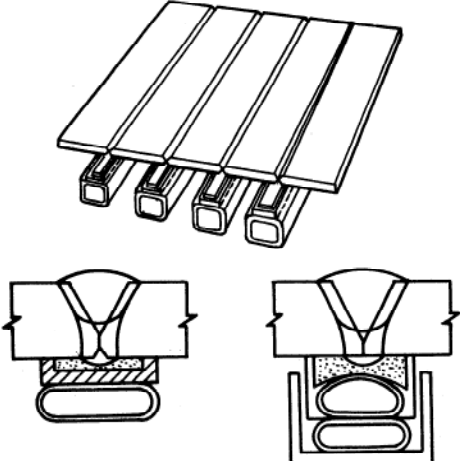
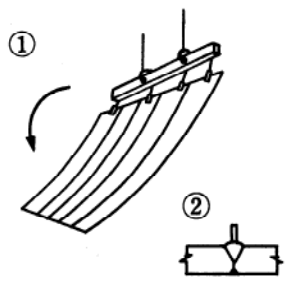
バックング装置	適用効果
 <p>The diagram shows a perspective view of a backing device with four rollers supporting a plate. Below it are two cross-sectional views: the left one is labeled 'FCB法 (ブラックス+鋼板)' and shows a backing block; the right one is labeled 'RF法 (フラックス)' and shows a backing chamber with flux.</p>	 <p>The diagram shows a plate being welded from one side. Step 1 shows the plate being fed into the welding head. Step 2 shows the completed weld joint.</p> <p>① ブロック反転作業を除いて ② 生産高速度を高める</p>

図9 片面自動溶接とその利点

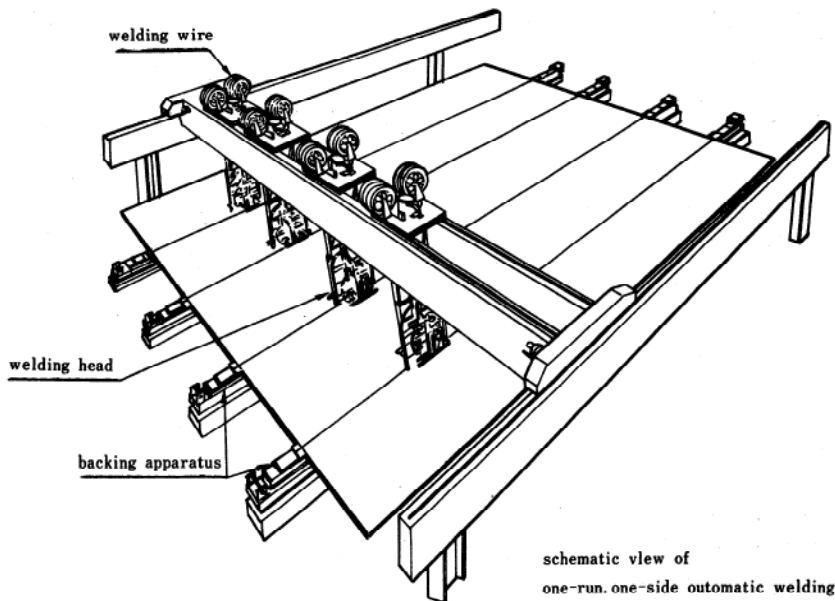


図10 片面自動溶接における板継ぎ (マンモスメルト, 川重・坂出)

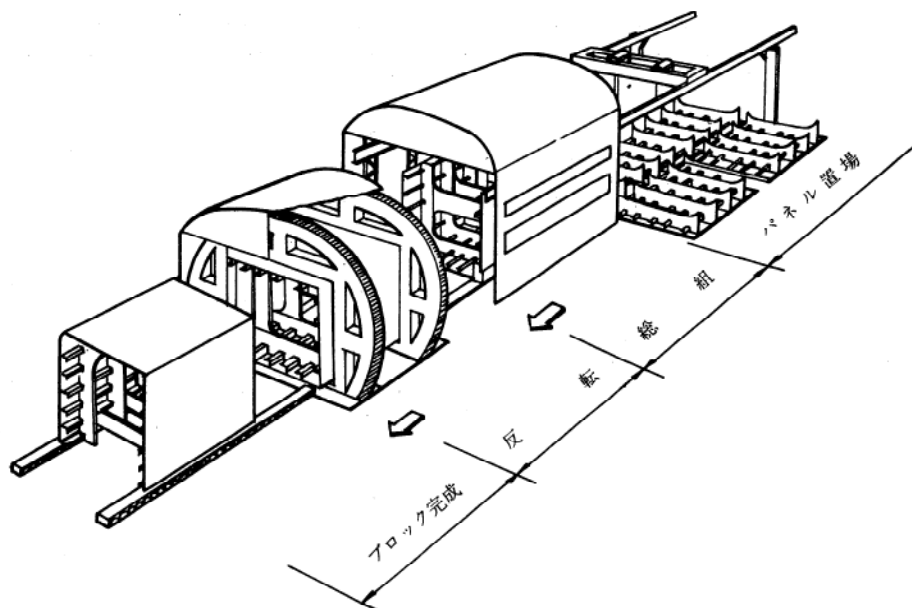


図11 新しい建造法の1例 (ロータシステム, 三井・千葉)

表5 LNG船のタンク構造


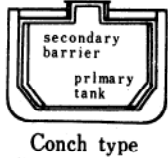

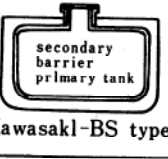
タンク方式	ライセンサー	タンク構造	材 料
独立 タンク方式	Moss-Kvaerner	 <p>primary tank (secondary barrier)</p>	アルミ合金 (45mm~200mm) 9% Ni (20mm~80mm)
	Conch	Moss-Kvaerner type	アルミ合金
	ESSO-日立	 <p>secondary barrier primary tank</p> <p>Conch type</p>	9% Ni
メンブレン 方 式	Gaz-Transport	 <p>primary tank secondor barrier</p> <p>Gaz-Transport type</p>	Invar(36Ni) (0.5mm~ 1.0mm)
	Technl-Gaz		ステンレス鋼 (1.5mm)
セミ・メン ブレン方式	川重- ブリヂストン	 <p>secondary barrier primary tank</p> <p>Kawasaki-BS type</p>	9% Ni (6mm~14mm)
	IHI		アルミ合金 9% Ni

表6 各種液化ガスの沸点とその低温用材料

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

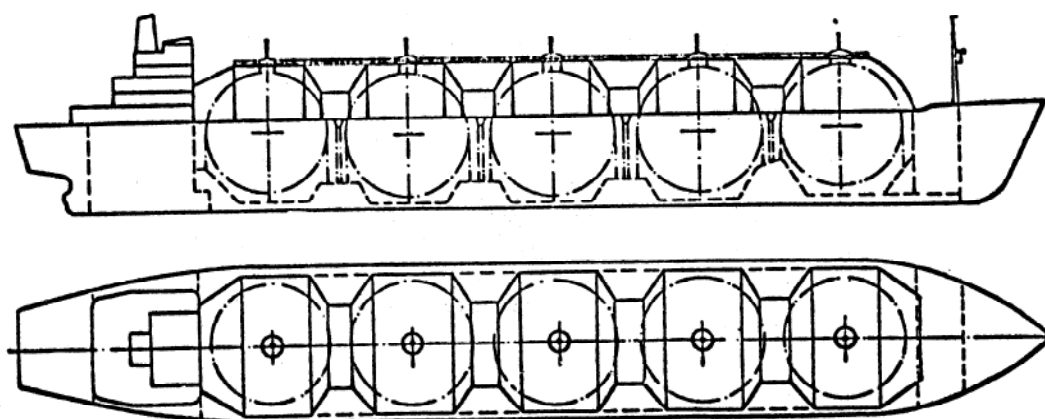


図12 モス方式LNGタンカー

(タンク容量 : 87.000M³, L_{pp} : 23.700M, B : 40.00M,
D : 23.00M, d = 10.50M, C_B : 0.712)

の開発研究が熱心におこなわれ、ほぼ実用化の域に達している。

LNG船において重要な点はタンクの使用時の安全性の評価と確保ということであろう。とくに独立タンク方式のモス球形タンク構造(図12参照)には“LEAK BEFORE FAILURE”の設計概念が導入され、この概念に基づき種々の実験と破壊力学的解析を積み重ねることによって、材料、設計、工作上の見地から検討が加えられ、構造物の安全性を評価する上に重要な役割を果しつつある。

次に潜水船については、HY90鋼(H T 75相当)が実用化され、続いてHY 110~130鋼(H T 100)の実用化の見通しが得られるように

なっており、わが国は高張力鋼とその溶接工作技術についてはいまや欧米各国を大きくリードしているといっても過言ではない。その他深海艇についてはHY 200~240の超高張力鋼と溶接工作技術の開発が鋭意進められている。(図13)

上述のように特殊船の建造に関しては、材料溶接、工作技術、安全性の評価などの重要な問題は技術開発に依存することが大きいといえる。

(3) 貯蔵容器、橋梁など

陸上用LNG貯蔵容器などに関しては、LNG船のタンクとほぼ同様な事情にある。また、橋梁においては厚板高張力鋼の溶接工作技術が

一つの焦点といえる。これに関連して溶接割れ現象に対する溶接力学の導入あるいは工作上の欠陥の評価に対する破壊力学の適用が試みられ、これらの成果をもとに工作基準、材料基準設計基準などが整備されつつあり、新たな压力容器の建造あるいは長大橋の建設に対する溶接工作技術面での準備体制が確立されつつあるといえる。

4.2 研究分野における問題点と対策

溶接構造物の施工上の大きな問題点は施工時の溶接割れの問題と施工中および使用中での溶接欠陥から生じる脆性破壊や疲労破壊の問題である。これらの問題に関して各分野で多数の研究が行なわれ、その成果が施工法に生かされつつある。

(1) 溶接割れの研究

溶接施工時に生ずる割れ防止は、従来から個々の因子の影響の研究は行なわれてきたが、問題が複雑なために最終的には経験的に処理される面が多々あった。しかし最近のように高張力鋼および低温用鋼の使用が増大し、また要求性能が高くなってくると従来の施工法の延長線として問題をとらえることができなくなり、施工法を学問的総合的な面から検討する必要が生じてきた。これを解決するために、たとえば、図14に示すような溶接割れ防止施工条件の決定用フローチャートが提案されている。

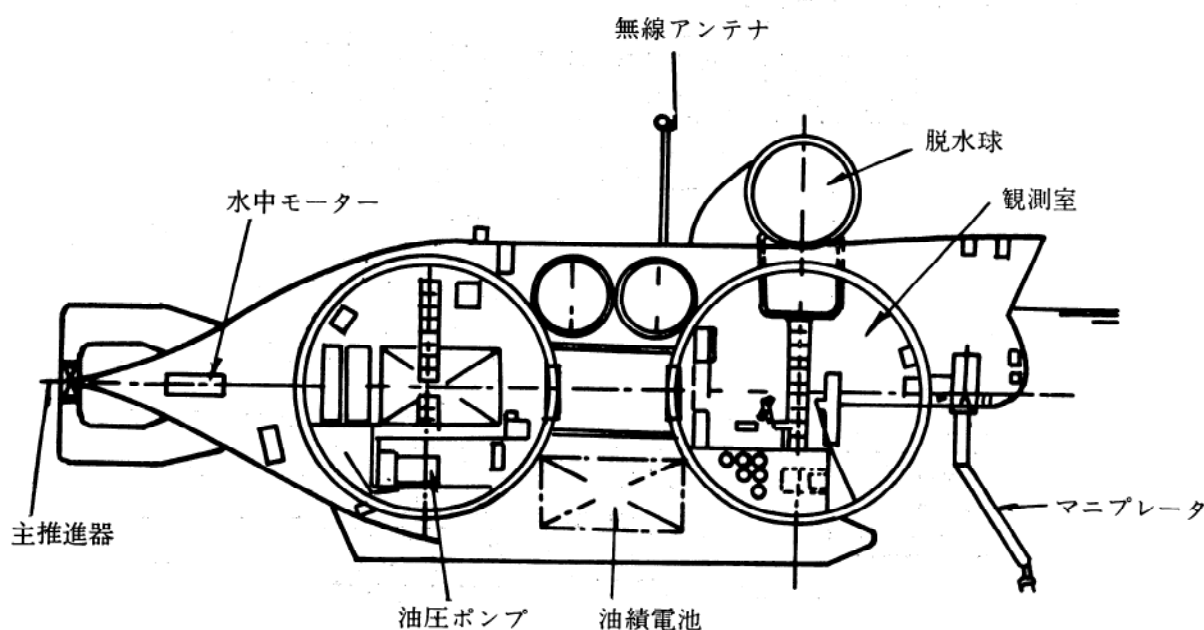


図13 深海調査船(しんかい)

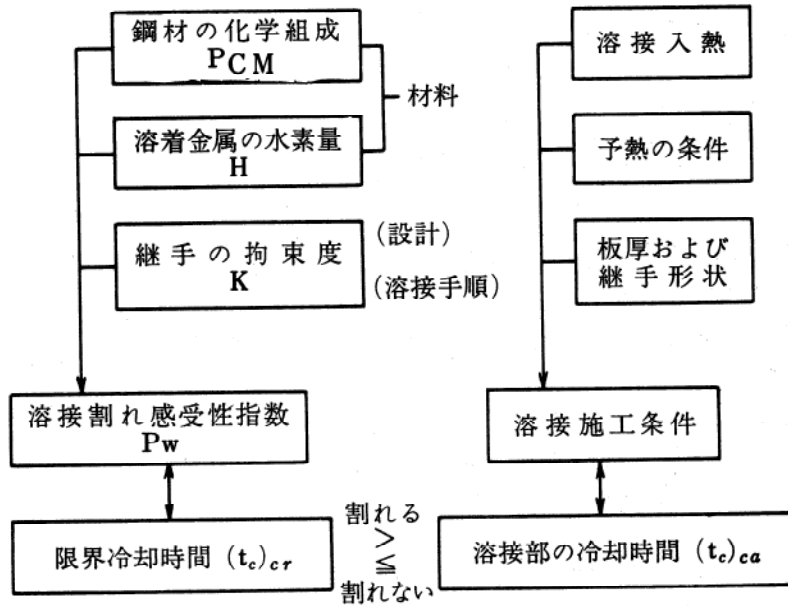


図14 割れ防止対策の考え方のフローチャート

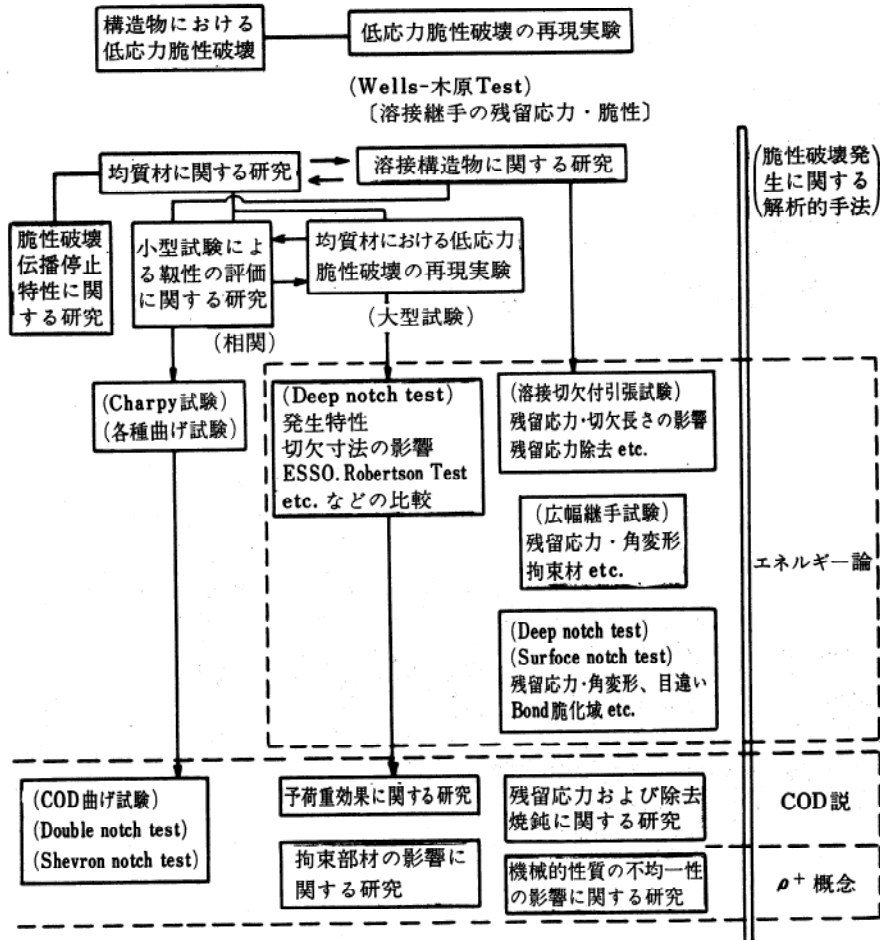


図15 日本における脆性破壊の研究

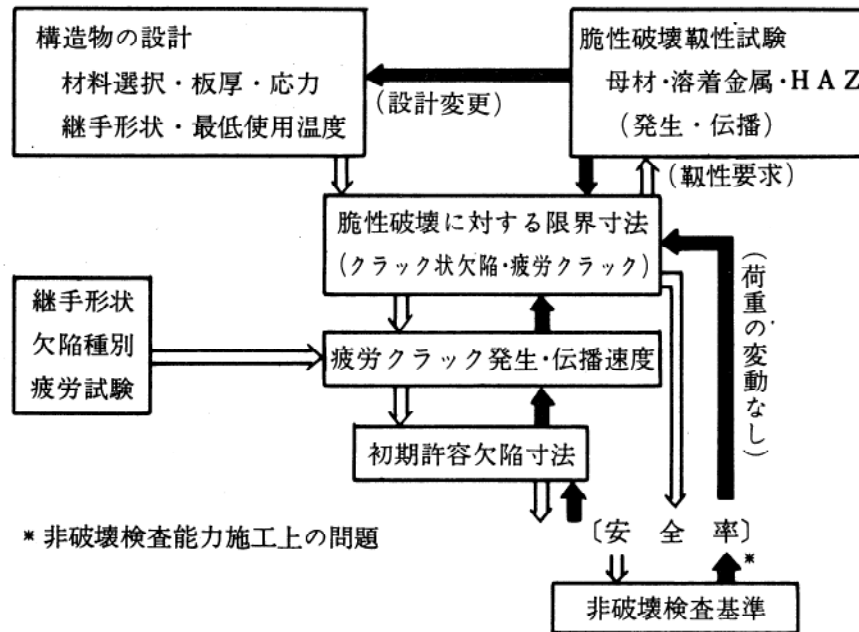


図16 構造設計への破壊力学の適用

(2) 破壊力学を応用した研究

溶接構造物の脆性破壊や疲労破壊の問題は古くからの重大な問題で事故防止のために様々な努力がなされている。日本における破壊力学とくに脆性破壊の研究に関する流れは図15に示すように広範囲に行なわれており、その成果が各分野で利用されている。たとえば各種鋼材や溶接継手の規格は従来と同じくシャルピー試験の結果で規定しているが、その根拠は破壊力学から求められる、いわゆるK-Valueに基づくようになってきている。さらに最近ではCOD値の規格化が検討されている。このような破壊力学の展開によって応力の作用状況、残留応力、角変形、溶接欠陥、線状加熱などの影響因子が破壊強度におよぼす影響は実験的、解析的に明らかにされつつある。いっぽう、これらの個々の因子を総合的にとらえて構造設計や工作施工までフィードバックするシステムについては、図16に示すようなプロセスなどが提案されて国際的に精力的な研究が行なわれつつある段階でこれを实际的に工業的に利用するには資料の集積と解析あるいはCriterionの設定などのまだ解決しなければならぬ課題が残されている。

5. あとがき

以上現在の溶接施工上の問題点と基本的施策について述べてきたが、その中から今後、とく

に留意すべき課題について以下に記す。

(1) 自主技術の開発

わが国の工業は、技術導入により発展してきたが、先進各国との技術格差が解消されるに従い、今後自主技術の開発がますます必要となってくる。すでに高張力鋼、巨大船の建造技術などに関してはすぐれた自主技術を有しているがLNG船、特殊材料、海洋開発機器あるいは圧力容器などの高加工度製品については外国技術に依存しているところが大きい。しかし、このような付加価値の高い製品こそ、わが国が指向すべき工業分野であり、この意味からも自主技術の開発が強く望まれる。このためには企業あ

るいは中立機関の研究体制を技術導入型から技術開発指向型にもっていくことが必要である。

(2) 溶接自動化と装置化の推進

溶接施工上の大きな課題である品質性能の向上、生産性の向上あるいは作業者の安全衛生の強化に関して抱格的に対処していくためには、溶接の自動化と装置化の推進を行なわなくてはならない。大型構造物ではまだ溶接自動化の比率は20%前後であり、自動化の余地が残されている。

溶接の自動化は今後生産システムの改善とともに溶接の前後工程さらに生産ライン全体の専用装置化という形で進められるであろうが、

これに対処してハードウェア面では専用自動溶接装置のモジュール化を進めることが課題であろう。

(2) 品質保証体制の確立

今後構造物の大形化と高性能化がさらに進展するにともない、品質、性能面での問題はより重要視され、施工者側でもその努力は大いにおこなわれようが、最終的には中立機関による品質の確認あるいは保証の必要性が増してくるものと考えられる。前述のごとく品質性能の評価という問題は高度の専門的知識、それも一つの分野のみでなく多数の分野にわたって必要である。また、ふつうのは迅速な判断処理を要するものである。この点に関してはわが国の現状は十分といえず、広い視野からの検討と対策を要するものと考えられる。

参考文献

1. 日本溶接協会溶接施工委員会年次報告資料「日本主要造船所における溶接材料および設備に関する総合調査報告」
2. 山本、寺井、栗岡、造船溶接の近代化 関西造船協会誌第12号 (1967)
3. 竹沢；将来の造船所における自動化の展望 造船界第33号
4. 竹沢；造船工業の近代化に関する研究 大阪大学提出学位論文 (1973)
5. 吉田；“LNGタンカーの現状と将来の需要” 造船界No36 (1972) P 27~47

6. PTENGE, O.SOLLI ;

“9 PER CENT NICKEL STEEL IN LARGE SPHERICAL TANKS FOR MOSS-ROSENBERG 87600 M³ LNG-CARRIER. A FRACTURE MECHANICAL APPROACH TO TESTING AND DESIGN”, IIW (1971) PUBLIC SESSION

7. 日本船用機器開発協会資料 「6000m 深海調査船の開発研究事業報告書」 (1971)
8. 折井、“大量建造と労働問題” 造船界 No 22 (Mar. 1971) P. 27~32
9. 日本鋼構造協会 “橋梁鉄骨構造物の溶接割れに関する調査報告” JSSC vol. 6 No 60 (1970)
10. 低温構造用鋼板判定基準. 日本溶接規格 WES-136
12. 金沢、町田、宮田、“各種欠陥の破壊力学評価について” 日本造船学会溶接研究委員会資料 (1972)
12. 日本鋼構造協会 “鋼構造物における溶接割れ防止のための予熱条件の選定について” JSSC vol. 8 No 80 (1972)
13. 賀来、“船体損傷に影響をおよぼす溶接欠陥と非破壊検査” 溶接欠陥の評価と継手強度に関するシンポジウムテキスト (1972)
14. 木原、佐藤、豊田、“日本における溶接構造物の脆性破壊発生に関する研究 (その1)” 溶接学会誌第42巻、第2号 (1973)