

常圧断熱式縦置円筒形 LNG 貯槽の技術改善

Technological improvement of double shell vertical LNG tank

下津 幸二 Kouji SHIMOTSU
エネルギー事業部
プラント営業部 エネルギープラント営業室長

山本 達也* Tatsuya YAMAMOTO
エネルギー事業部
プラント技術部 LNG・貯蔵プラント室 マネジャー

抄 録

LNG 需要の増加に伴い日本国内に建設されてきたサテライト基地の中核設備である常圧断熱式縦置円筒形 LNG 貯槽は、限られた敷地面積の中で建設されることが多い。そのため、コンパクトでかつ効率的な建設が必須となる。本稿では、これを実現する為に取り組んできた貯槽構造並びに溶接・施工方法の改善について述べる。また、貯蔵大容量化に対応するため、設計・施工面の取り組みについて述べる。

Abstract

Double shell vertical LNG tank which is the core facilities of the satellite base that has been built with the increase of the LNG demand in Japan comparatively is built in narrow site. Therefore with a compact and effective construction become required. We explain the improvement of tank structure and welding and the construction method how we wrestled with till now. In addition, we explain the action from a design side and a construction side for upsizing of this tank.

1 緒言

日本は、年間6,800万 t を超え世界第一位の LNG 輸入国である。今後、世界の LNG 需要は、欧米、東南アジアを中心に20年で3倍程度に LNG 需要が拡大する見通しもある。日本国内においても、発電用燃料としての需要が増加すると予測される重要なエネルギーソースの一つである。

輸入された LNG は、受入1次基地に一旦貯められ、受入1次基地や内航船によって2次輸送された基地から LNG ローターによって、天然ガス導管網の外側の遠隔地に建設される LNG サテライト基地に運ばれる。近年、LNG サテライト基地は、地方の大規模工場の燃料転換が進み大型化するケースも増えてきている。

ここでは、これらのサテライト基地の中核設備となる常圧断熱式縦置円筒形低温貯槽(以下、縦置低温貯槽)に対するこれまでの当社の技術改善及び大

型化への取組について述べる。

2 縦置低温貯槽の構造について

縦置低温貯槽は、従来、液体酸素や液体窒素を貯蔵するために用いられていた貯槽であるが、近年の LNG サテライト基地需要の高まりにより、LNG 貯槽としての用途が増加している。以下、LNG 貯蔵用に当社が建設してきた縦置低温貯槽について説明する。

構造は敷地面積を有効に使用できる縦長の形状であり、容量は法的に防液堤を必要としない1000ton(約2400m³)以下であることが多い。基本構造を図1、主要材質を表1に示す。

(1) 内槽

内槽は LNG を貯蔵する部位で、設計温度は-164℃程度でガス層は0.1MPa 以上の中圧で加圧される。内槽は上部鏡板、胴板、下部鏡板で構成され



写真1 常圧断熱式縦置円筒形低温貯槽 (LNG 貯蔵用)
Photo. 1 Double shell vertical refrigerated tank (for LNG)

る。鏡板の形状は半球形と半楕円形の2種類があり、配置条件、設計条件等によって使い分けられる。

(2) 支持構造部

支持構造部は、基礎上でタンクを支える部位であり、①保冷層内にあり内槽本体を支持する内槽スカート、②保冷層・外槽を含めたタンク全体を支持する外槽スカートで構成される。

(3) 保冷層

内槽はタンク外部からの入熱を抑止するために、保冷材で覆われている。保冷材には真珠岩や黒曜石を熱して多孔質の粉体とした粒状パーライトを使用する。

(4) 外槽

タンクの外面は、保冷材と内外槽間の気密性を保持するための外槽で覆われている。外槽は屋根部、側部、支持構造部と接続するコーン部、底部で構成され、保冷材の吸湿による断熱性能の低下を防止するために、窒素を充填している。

また、貯蔵容量はユーザーの要望によって年々増大する傾向にある。当社が建設したタンクは、当初の容量400~800m³であったが、その後1000~1500m³の時期を経て、近年は国内最大の2400~2700m³にまで達している。以下において、縦置低温貯槽について、これまで実施してきた設計面および施工面での取り組みについて述べる。

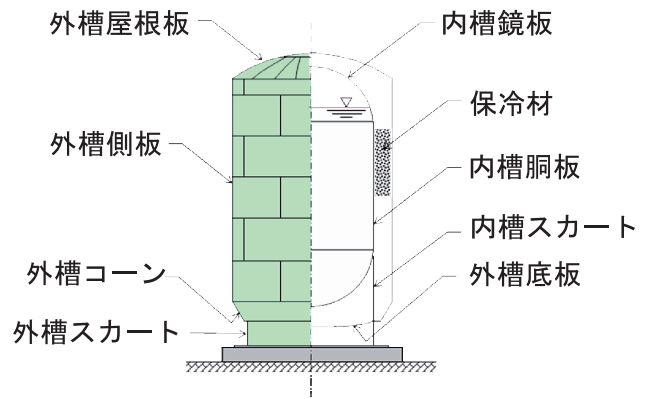


図1 縦置低温貯槽構造図
Fig. 1 Double shell vertical refrigerated tank

表1 主要材質 (LNG 貯蔵用)
Table 1 Main materials (for LNG)

部 位	材 質
内槽本体	SUS304
内槽スカート	SUS304
外槽本体	SS400
外槽スカート	SM400C, SS400
保冷材	粒状パーライト

3 技術改善

3.1. 設計面の改善(支持構造部)

縦置低温貯槽の支持構造部は内容液・内槽・外槽・保冷材の重量を支え、また内槽本体の冷熱がスカートの途中で外気と接する個所でもあり、構造的にも他の部位と比較して複雑な構造となる。縦置低温貯槽に取り組むに当たって、支持構造部の構造について検討を行った。従来、スカート支持の压力容器や真空断熱式低温貯槽(CE)ではスカートの材質は部位によって変えることは無く、同一材である。スカートを同一材とした場合の構造図を図2に示す。この場合、スカート材質は低温材である SUS 304となる。

これに対し、支持構造部を内槽スカートと外槽スカートで分割する構造を新たに考案した。分割した場合の構造図を図3に示す。この分割構造の特徴は以下である。

- ①スカート部は内槽スカートと外槽スカートの2種類に分割する。
- ②内槽スカートの材質は SUS304、外槽スカートの材質は SM400C とする。
- ③内槽スカートと外槽スカートの接続部には放熱板を兼ねたリング状のプレート(外槽アニュ

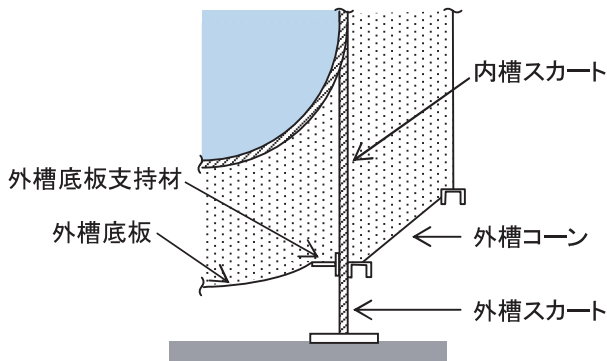


図2 支持構造部一体型
Fig. 2 Unified support structure

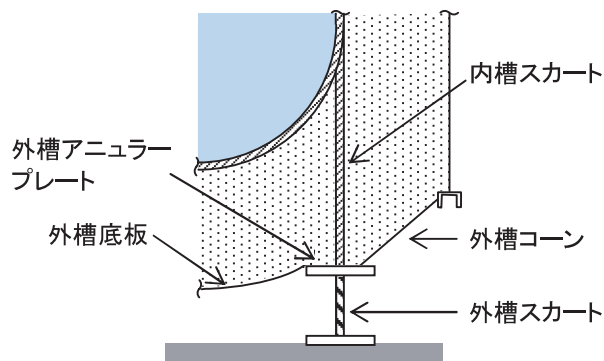


図3 支持構造部分割型
Fig. 3 Divided support structure

ラープレート)を設ける。

- ④外槽アニュラープレートはスカートの内側にも張り出し、外槽底板の支持部を兼用する。

支持構造部を分割することには以下のメリットがある。

- ①外槽アニュラープレートを介して外槽コーン、外槽底板を支持することで、取付部の構造が非常にシンプルとなる。
- ②外槽スカート部を工場で製作し、ブロック化して現地に搬入することで現場工数の削減可能。
- ③外槽スカート材を炭素鋼とすることで、鋼材費の削減可能。
- ④内槽スカート部が荷重低減によって板厚が薄くなり、鋼材費の削減可能。

一方、分割構造を採用するに当たっては、外槽スカート材質が炭素鋼であるため、内槽スカート下端部(外槽アニュラープレートと内槽スカートの接続部)での温度が外気からの入熱によって、常温となることの確認が必要となる。そこで、内槽内径8.9 m、容量800m³縦置低温貯槽の内槽スカート部を中心とした定常温度解析を実施し、温度分布の確認を



写真2 分割構造とした支持構造部外観
Photo. 2 Outside view of divided support structure

実施した。解析は表2に示す従来タイプのスカート一体型/半楕円鏡板のケース①と新たなスカート分割型で鏡板形状を変えたケース②とケース③の3ケースについて行った。

また、境界条件は以下とした。

- ①内槽本体温度は-164℃一定
- ②外気温は15℃一定
- ③内槽(SUS304)の熱伝導率: 16.3W/m・K
- ④外槽(炭素鋼)の熱伝導率: 50W/m・K
- ⑤粒状パーライトの熱伝導率: 0.03377W/m・K

解析結果を図4、図5、図6に示す。また、図7に外槽底板下面の温度解析結果を示す。内槽スカート下端温度はケース①で13.7℃、ケース②で13.9℃、ケース③で14.3℃となり、支持構造部を分割しても温度的に全く問題がないことが確認できた。

3.2. 施工面での改善

3.2.1. MAG 溶接の採用

縦置低温貯槽の内槽溶接に要求される項目は以下である。

- ①-164℃の極低温下での低温靱性
- ②圧力容器としての高品質な溶接継手
- ③現場での溶接

上記を踏まえ、従来ステンレス製タンクの溶接では、被覆アーク溶接が主流であった。しかし、縦置低温貯槽に取り組むに当たり、溶接作業効率の一層の向上を目指して、主として工場溶接で用いられることが多かった半自動 MAG 溶接の採用に取り組んだ。そのために、まず使用するワイヤの選定を行っ

表2 温度解析ケース
Table2 CASE of temperature analysis

ケース	鏡板形状	スカート形状
①	半楕円	一体型
②	半楕円	分割型
③	全半球形	分割型

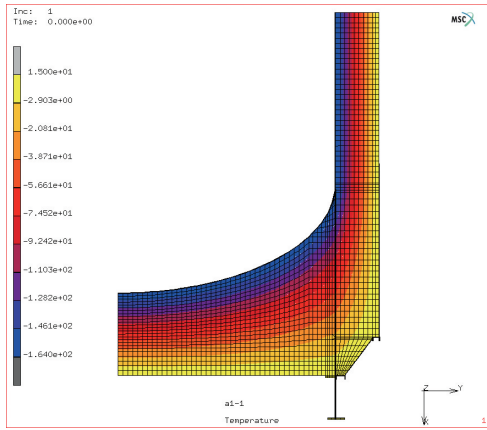


図4 ケース1温度解析結果
Fig. 4 Temperature analysis result of CASE 1

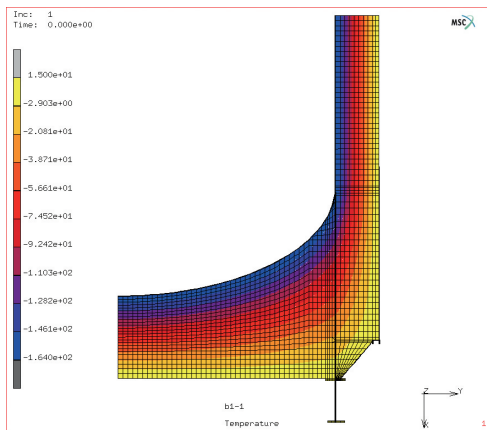


図5 ケース2温度解析結果
Fig. 5 Temperature analysis result of CASE 2

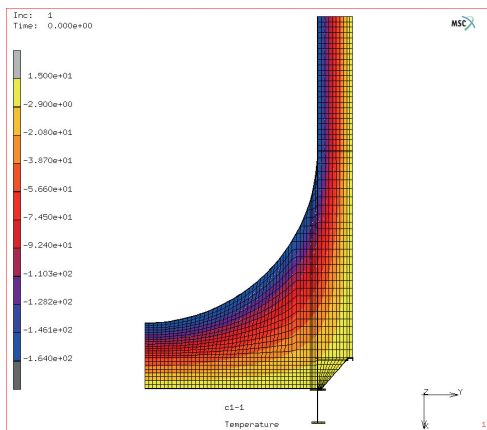


図6 ケース3温度解析結果
Fig. 6 Temperature analysis result of CASE 3

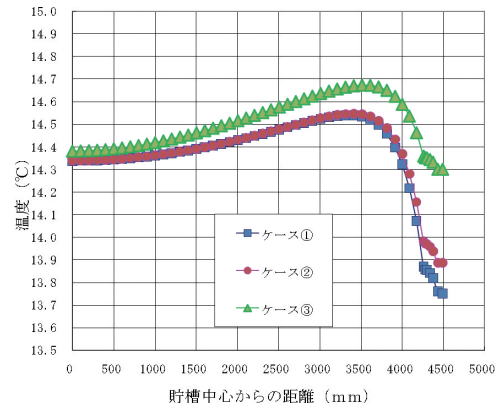


図7 外槽底板下面温度
Fig.7 Surface temperature of the outside tank bottom plate

た。候補として、日鐵住金溶接工業(株)製のステンレスフラックス入りワイヤSF-308LPの表3に示す化学成分の異なるタイプD, E, Hの3タイプについて比較検討を行った。

ステンレス鋼溶接部の低温靱性を確保するには、溶接金属のフェライト量を低減するか溶接金属中の介在物・酸素量を低減する手法が考えられる。しかし、フェライト量を減らすことで却って高温割れが発生する可能性があるため、介在物・酸素量を低減することで低温での靱性値を改善・安定させることが有効である。D, E, Hタイプでは、Dタイプのフェライト量が少なく、Hタイプの酸素量が少ない。そこで低温靱性を比較するため、シャルピー衝撃試験を実施した。結果を表4に示す。これより、低温時ではHタイプのシャルピー衝撃特性が優れていることが分かった。次にHタイプの溶接性の確認を行った。フラックス入りワイヤでは、主に形成されるスラグによって、溶接金属の垂れやビードの酸化を防止しているため、溶接性や作業性(ビード形状)はスラグ形成状況の確認が重要となる。そこで、高い技量が必要となる立向き姿勢においてHタイプを用いて実験を行った。その結果、スラグ形成を含めて溶接安定性及び効率面においても優れていることが確認された。以上から、半自動MAG溶接のワイヤとしてHタイプを採用することとした。

更に、MAG溶接ではシールドガスが風の影響を受けた場合、溶接部に割れやブローホール等の欠陥が発生しやすいため、風速を変化させて実験を行い、溶接部に与える影響を確認した。その結果、表5に示すように、風速3m/sでは溶接金属の窒素量が

風速 1 m/s の約10倍となりフェライト量も急減し、放射線透過試験の結果においても割れ・ブローホールが発生することがわかった。そこで、施工時は風養生を実施し、風速 3 m/s 以上での作業を制限し、溶接品質を確保することとした。

また、溶接補修を行った場合、熱履歴によって溶接部の靱性に影響を与える可能性が考えられるため、溶接補修無し、溶接補修 1 回、溶接補修 2 回について実験を行い、溶接補修の影響の比較を行った。その結果、表 6 に示すように、溶接補修によるフェライト量の変化は認められず、シャルピー衝撃特性は、溶接補修の再熱効果により改善傾向を示し、溶接品質上問題がないことが確認できた。

3.2.2. ブロック工法の適用

大型鋼構造物の建設においては、一般的に現地工事の作業量が多く、品質・工程が作業環境の影響を受け易い。そこで、現地作業量の低下を目的とし、加工工場で上下鏡板を一体組した工法を検討しプロジェクトに適用した。

ブロック化した箇所は、図 8 に示す通り溶接量が多く現地工事の負荷が高い内槽上部鏡板、下部鏡板、外槽スカート部の 3 箇所とし、プレハブ化率についても表 7 の通り、42% となった。

設計段階においては、内槽内径を海上輸送で使用する 499 船のハッチサイズで設定するなど、輸送条件及びブロック組立が効率的に実施できるよう計画

表 3 全溶接金属の化学成分一例 (%)

Table 3 Example of chemical composition of weld metals

タイプ	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	O	フェライト量
D	0.030	0.43	1.04	0.024	0.003	10.6	19.6	0.029	0.116	10%
E	0.036	0.61	1.57	0.026	0.008	10.6	20.1	0.039	0.099	11%
H	0.030	0.48	1.15	0.024	0.003	10.6	19.8	0.030	0.095	11%

表 4 全溶接金属での機械的性能一例

Table 4 Example of mechanical properties of weld metals

タイプ	引張強度			吸収エネルギー (J)		
	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	-196°C	-100°C	0°C
D	402	560	38	35, 31, 29	42, 37, 40	54, 59, 54
	396	556	41	平均 32	平均 40	平均 56
E	448	608	38	17, 17, 17	35, 35, 35	59, 61, 59
	449	610	38	平均 17	平均 35	平均 60
H	415	568	40	40, 42, 35	47, 47, 49	59, 59, 54
	405	561	41	平均 39	平均 48	平均 57

表 5 風の影響によるフェライト量と窒素量の変化

Table 5 Change in ferrite content and amount of nitrogen by wind effect

試験片記号	試験条件	母材	HAZ	BOND	DEPO	N 量 (%)
TP 1 A	標準条件	0.6, 0.2, 0.1	2.8	4.0	10.0	0.0229
TP 2 B	風速 1 m/s	—	2.5	5.4	11.0	0.0223
TP 2 C	風速 2 m/s	—	1.8	3.6	7.5	0.0590
TP 2 D	風速 3 m/s	—	1.2	—	0.1	0.2358

表 6 補修溶接と靱性の関係

Table 6 Relationship between toughness and weld repair

試験片記号	試験条件	ノッチ位置	試験温度 °C	吸収エネルギー (J)		横膨出量 (mm)	
				個々	平均	個々	平均
TP1A	標準	DEPO ①	-196	35, 42, 35	37	0.56, 0.64, 0.57	0.59
		HAZ ③	-196	82, 90, 82	85	0.95, 1.05, 1.05	1.02
TP3B	溶接補修 1 回	DEPO ④	-196	44, 44, 44	44	0.51, 0.51, 0.49	0.50
		HAZ ③	-196	76, 79, 69	75	0.83, 0.79, 0.74	0.79
TP3C	溶接補修 2 回	DEPO ④	-196	42, 49, 42	44	0.64, 0.67, 0.59	0.63
		HAZ ③	-196	76, 79, 69	75	0.76, 0.93, 0.68	0.79

した。また、海上輸送に伴うステンレス製品のシート養生や、輸送時の変形防止用の補強または専用輸送架台等様々な検討を行い細心の注意を払い実行することで、無事ブロック輸送作業を完了することができた。

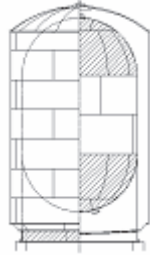


図8 プレハブ適用箇所
Fig. 8 Parts in prefab

表7 従来工法とブロック工法との溶接量比較(内槽)
Table 7 Comparison of amounts of welding with conventional construction method and block construction method (inner tank)

項目	従来工法	ブロック工法
溶接線長	工場 7m	工場 164m
	現地 376m	現地 219m
プレハブ化率	1.8%	42.8%



写真3 船積み
Photo. 3 Shipping



写真4 水切り後の陸上輸送
Photo. 4 Ground transportation



写真5 上部鏡板搭載
Photo. 5 Installing of the upper head plate

3.3. 大型化への対応

3.3.1. 外槽底板構造

縦置低温貯槽の外槽底板は底部保冷材を保持する部位であり、外槽底板には内外槽間圧力と底部保冷材の重量が作用する。タンク容量が1500m³以下では、外槽底板の構造は図9に示すように、井桁状に梁を設け、この梁の上に平板状の底板を配置して、平板の4辺を梁上で溶接する構造としていた。この構造の場合、工場ブロック加工が可能で、現地での組み立て、溶接、検査を削減できるメリットがあった。一方、荷重に対して底部をフラットな状態に保つためには、梁のサイズとピッチにはある程度の制限があり、容積1000m³の貯槽ではHW150の梁が1mピッチで必要であった。他方、2400m³の縦置低温貯槽では、内槽内径は12m以上でかつ保冷材の荷重も大きくなることから、従来の梁を用いた外槽底板構造では、部材サイズが非常に大きくなることが判明した。そこで、新たに図10に示すように、外槽底板に曲率を持たせる構造を採用することとした。この構造では、荷重は曲率をもった外槽底板の内面側で受け、梁は施工時に外槽底板を上架する際の受け台としてのみ使用されるため、L75×75程度で十分となる。この構造の採用により、梁の

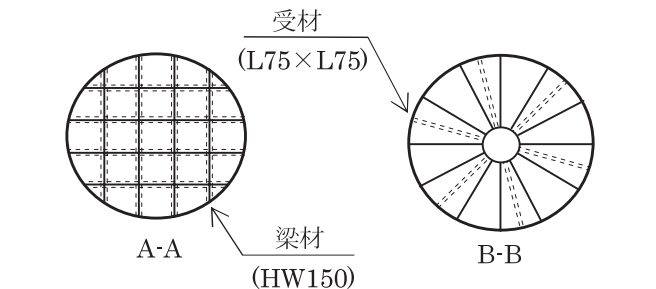
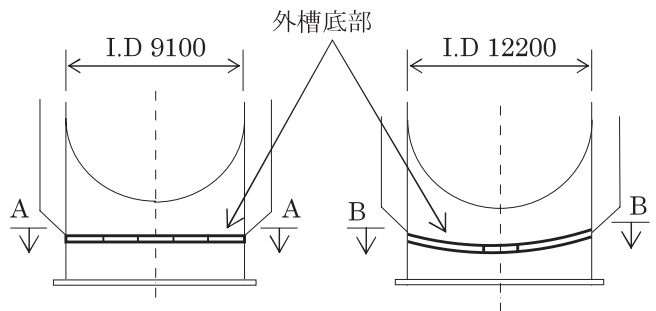


図9 外槽底部平板構造
Fig. 9 The outside tank bottom plate of flat structure

図10 外槽底部曲板構造
Fig. 10 The outside tank bottom plate of curvature structure

数量とサイズは大幅に低減することが可能となった。2400m³縦置低温貯槽でのフラット構造と曲板構造の底部重量の比較を表8に示す。

3.3.2. 下部鏡板組立工法の改善

縦置低温貯槽は、内槽、外槽の2つの容器からなる複雑な構造であり、タンク組立においては溶接・検査の作業内容や建設エリア・重機配置等を総合的に検討する必要がある。特に鏡板の組立は、工事全体工程に直接影響を与えることから、様々な工法に取り組んできた。下部鏡板の工法の遍歴を図11に、特徴と課題を表9に示す。ここで、ステップⅠはタンク容量800m³以下の時期、ステップⅡはタンク容量1000~1500m³の時期、ステップⅢはタンク容量2400m³以上の時期を表す。

初期のタンク容量800m³以下の時期(ステップⅠ)では、下部鏡板は、上部鏡板との架台共通化、施工精度確保の容易化のために、上に凸(反おわん型)の形で組立ていた。この工法では、搭載前に重機2台を使用して下部鏡板を反転する必要があった。この反転には作業用の敷地面積が必要となり、また鏡板は板厚12mm程度の薄板構造なので、反転中の変形防止のための補強が必要であった。このため、タンクサイズが大型化した場合、対応が困難であった。

タンク容量が1000m³を超えた時期(ステップⅡ)から、最初から凹(おわん型)の形で組立てられないか検討を進めた。精度確保と仮設材低減の観点から、製品スカート上で組立てる工法とした。しかし、内槽スカートと鏡板との狭隘部での溶接・検査となるため作業性が悪く、施工効率が落ちる問題が生じた。

生じた。

そのため、タンク容量が2400m³に達した時期(ステップⅢ)では球形タンクの組立を応用し、地組ヤードにて仮支柱を建てて下部鏡板を組立てる工法に取り組んだ。この工法を採用するに当たっては、①仮支柱構造②仮支柱強度確認③組立精度の確保が重要なポイントとなる。仮支柱の検討に当たっては、レ



写真6 ステップⅠにおける下部鏡板反転
Photo. 6 Lower head plate reversing in step 1



写真7 ステップⅢにおける仮支柱上の下部鏡板
Photo. 7 Lower head plate on temporary prop in step III

表8 外槽底部重量比較
Table 8 Comparison of the outside tank bottom weight

構造	外槽底部重量(底板+補強材)
平板	19.2ton
曲板	7.3ton

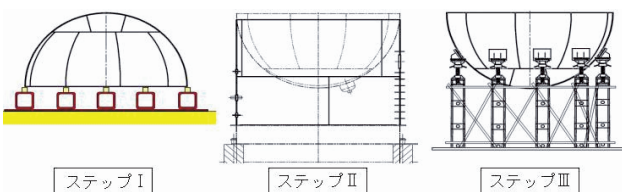


図11 下部鏡板組立工法の遍歴
Fig. 11 Construction method of lower head plate

表9 下部鏡板工法の変遷表(特徴/長所/課題)
Table 9 Comparison of lower head plate construction method

	ステップⅠ	ステップⅡ	ステップⅢ
概要	重機による反転工法	スカート上での直接組立法	仮支柱固定方法
特徴	重機2台を使用し、鏡板を反転させた後搭載する。	製品スカートを支持材として本設用地で組み立てる。	球形タンクの組立方法を応用し、先に仮支柱を立て組立てる。
長所	鏡板地組が効率的に作業できる。	・仮設資材が減 ・重機が減	並行作業が可能となる。 ・重機が減
課題	重機能力及び鏡板剛性から反転できる限界がある。	・並行作業が実施できず工程が延びる。 ・スカートに切り欠きを入れそこで、溶接・検査する箇所が発生する。	・仮支柱精度保持。

ベル調整方法や施工上の支持方法の検討に加えて、強風時及び地震時の強度の確認も行い、施工中の安全性にも配慮した。これらを確実に確認し実施することで、工程面・安全面の一層の向上にも繋げることができた。その結果、課題となっていた更なる大型化への対応が可能となり、国内最大級の2400m³のタンクにも適用することが出来た。

4 結言

縦置低温貯槽に対する当社の技術改善及び大型化へ向けた取組について述べた。技術改善では設計面と施工面の両面で取り組み、設計面では支持構造の改善を行い、構造の簡素化による施工性の向上と鋼材重量の削減を行った。施工面では、半自動MAG溶接の適用による溶接効率の向上とブロック工法による現地工事量の低減を成し遂げた。また、タンク大型化に対応すべく、外槽底板構造変更や鏡板組立工法の改善を実施し、国内最大級の縦置低温貯槽の建設を達成した。この縦置低温貯槽は、水素や二酸化炭素の液体貯蔵タンクとして応用できる可能性も秘めており、今後とも更なる技術改善を進めていく所存である。