

市原八幡埠頭バイオマス発電所木質バイオマス 燃料貯留搬送設備工事報告

Construction Report of Storage and Transportation Equipment of Wood Biomass Fuel at Ichihara-Yawata Biomass Power Plant

石井伸幸* 丸山祥麻** 難波康弘** 新家誠広***
Nobuyuki Ishii Shoma Maruyama Yasuhiro Nanba Masahiro Shinke

持続可能な世界の実現を目的に、国連加盟国 193 カ国により「持続可能な開発目標 (SDGs)」が 2015 年に採択された。特に地球温暖化防止に直結した二酸化炭素排出量の削減、脱炭素化社会の実現は、喫緊の課題であり、再生可能エネルギーの導入が急がれる状況にある。当社もクリモト環境基本方針に基づき、環境負荷低減型製品への移行推進および環境保全機器設備の開発に取り組んでいる。本稿では再生可能エネルギーとして大きなポテンシャルを有するバイオマス発電において、安定した発電に必要なバイオマス燃料の貯留ハンドリング設備に関する実績について、特に当社最大規模の鋼板製燃料貯留サイロの設計および現地施工を中心に報告するものである。

In 2015, 193 member states of the United Nations adopted the Sustainable Development Goals (SDGs) to realize a sustainable world. In particular, reducing carbon dioxide emissions, which directly leads to the prevention of global warming, and realization of a decarbonized society is an urgent issue, and the introduction of renewable energy is urgently needed. Based on the Kurimoto Basic Environmental Policy, we are also working to promote the transition to environmentally friendly products and develop environmental conservation equipment and facilities. In this paper, we report on our achievements regarding biomass fuel storage and handling equipment, which is essential for stable power generation in biomass power generation, of a great potential as a renewable energy source, focusing on the design and on-site construction of the largest steel plate fuel storage silo made by our company.

1 はじめに

再生可能エネルギーには、太陽光発電、水力発電、地熱発電、風力発電、バイオマス発電などがあるが、中でもバイオマス発電は、天候や自然条件に左右されにくい安定な分散型電源として、各国で様々な燃料、形式で増加している。バイオマス発電は、燃料の燃焼熱による蒸気の発生でタービンを回し発電する一般的な火力発電と基本原理は同じであるが、CO₂削減に大きく貢献すると言われている。これは、バイオマス燃料が動植物資源、もしくはこれを起源とする有機廃棄物(化石資源を除く)などの理論上 CO₂を増加させない、カーボンニュートラル燃料であるためである。

当社はこれまで、国内 6 施設のバイオマス発電所向けに、バイオマス燃料、特にチップ、ペレット、PKS (パーム椰子殻)に関する貯留搬送設備を納入してきた実績を有す。この度、国内 6 施設目の実績として、市原八幡埠頭バイオマス発電所設置されるバイオマス燃料貯留搬送設備の新設工事を、2020 年に東洋エンジニアリング殿より受注し、2023 年 12 月に試運転を含む契約役務の完了を滞りなく終了した。本工事は、これまでの工事実績

の中で最も狭い敷地での施工という制約の中、当社として最大規模となる鋼板製燃料貯留サイロの施工を中心とした難易度の高い工事であった。以下に燃料貯留サイロの構造設計に関する概要ならび本工事の概要について報告する。

2 当社実績について

当社はこれまで国内バイオマス発電所向けに 6 施設のバイオマス燃料貯留搬送設備の実績を有する。実績一覧を表 1 に示す。これらの実績の内、No.1 以外はすべて設計、調達、現地工事一式を EPC (Engineering, Procurement, Construction) として一括性能発注により請け負い施工を行ったものである。また、表 1 には記載されていないが、化学工場向け自家発電設備用の実績も有している。

表 1 実績一覧

No.	施設名	納入年月	発電出力
1	A 発電所	2021 年 9 月	75 MW
2	O 発電所	2021 年 4 月	50 MW
3	Y 発電所	2022 年 5 月	50 MW
4	I 発電所	2022 年 12 月	50 MW
5	K 発電所	2023 年 9 月	50 MW
6	市原発電所	2024 年 3 月	75MW

3 工事概要

工事概要を下記に、現場完成後の写真を図1に示す。

工事名：市原八幡埠頭バイオマス発電所建設工事

工事場所：千葉県市原市

工期：2022年4月～2023年12月

(試運転期間含む)

発注者：東洋エンジニアリング株式会社

エンドユーザ

：市原八幡埠頭バイオマス発電合同会社殿

納入設備：バイオマス燃料搬送設備

総重量：4,200 t (サイロ 2,700 t 搬送設備 1,500 t)

サイロ貯留量

：60,000 m³ (20,000 m³/基 × 3基)

4 本工事の特徴

市原八幡埠頭バイオマス発電所では、図2に示す通り、当社が施工する燃料搬送エリアの周囲は客先範囲のボイラ発電エリアと埠頭で囲まれていることから、当社作業エリアがほとんどなく、当初から重機と資材を置くスペースについて困難を極めた。特にサイロの施工については、胴板を地組で作業するために仮設定盤が必要であったが、今回敷地が狭い上に他業者との交錯作業もあ



図1 搬送設備完成外観

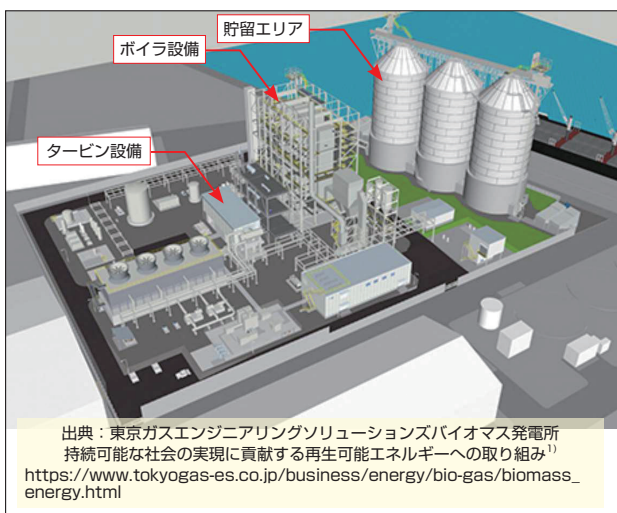


図2 市原八幡埠頭バイオマス発電所全体図

出典：東京ガスエンジニアリングソリューションズバイオマス発電所
持続可能な社会の実現に貢献する再生可能エネルギーへの取り組み¹⁾
https://www.tokiyogas-es.co.jp/business/energy/bio-gas/biomass_energy.html

り、作業エリアが十分に確保できない問題があった。そこで今回は従来の施工方法ではなく、サイロの内側に足場を設け、胴板1枚ごとに積上げるレンガ積み工法を採用することで、作業スペースを確保することができた。

5 鋼板製貯留サイロの設計

5.1 設計方針

本サイロにおいて、本体設計は容器構造設計指針・同解説 2010年改定版(日本建築学会 略称：容器指針)²⁾、アンカー設計は火力発電所の耐震設計規程 JEAC 3605-2004(日本電気協会 火力専門部会)³⁾に基づいて行った。

5.2 設計手順

フローチャートを図3に示す。サイロの基本寸法を決定後、サイロ上の設備の荷重を算出し、槽内の状態や想定する気候条件などを考慮した荷重の組合せを決定した。サイロに作用する荷重条件には貯留物の積載荷重により発生する値や積雪荷重、風荷重、地震荷重などの各応力値の算出を行い、サイロにおける直胴部の座屈や屋根部にかかる許容応力度の評価を行う必要がある。また荷重条件として最も厳しい状態とするため、付帯機器である燃料受入バケットエレベータ、貯留槽供給コンベヤ、集じん器、機器設置架台および昇降階段から生ずる外力についても考慮する必要がある。これらの荷重条件を加味した上、上記評価により直胴部および屋根部が強度上問題ないことを確認した。この結果をもとに引き抜きによる力を算出し、アンカーボルトおよびベースプレートの仕様を決定した。

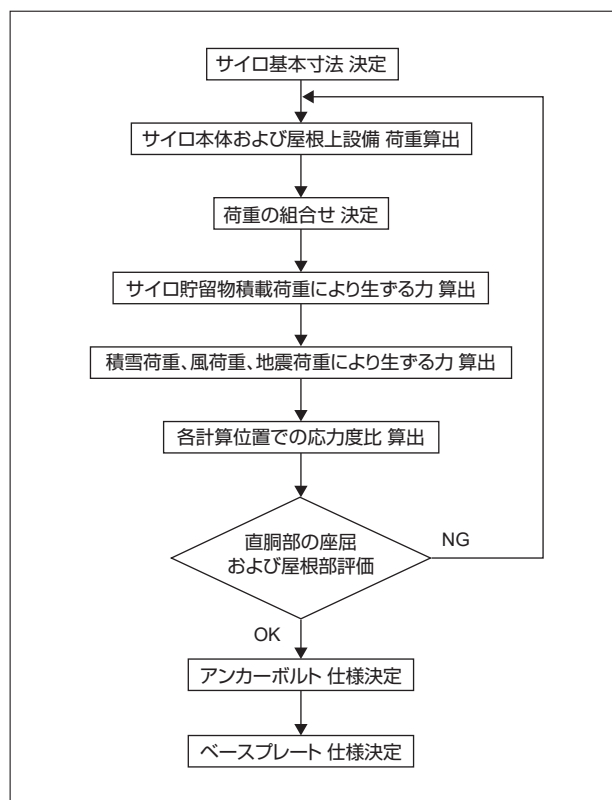


図3 サイロ設計 フローチャート

5.3 設計結果

(1) サイロの基本寸法

サイロの設計概要を表2、サイロの概略図を図4に示す。本設備におけるサイロはRC基礎躯体にアンカーフレームとベースプレートを設置し、その上に胴板18段を積み重ねた直胴部と屋根部で形成される。胴板は製作可能とされる最大定尺幅2400mmとしている。

(2) 荷重の組合せ

荷重の組合せを表3に示す。

表2 サイロ設計概要

構造形式	溶接鋼板製	
サイロ形状	円形断面・独立単槽	
高さ	H	57.3 m
内径	d	24.0 m
槽壁板厚	t	19 ~ 36 mm
ベースプレート板厚	t	85 mm
貯留物	バイオマス燃料	
かさ密度	長期	6.37 N/m ³
	短期地震時	5.10 N/m ³ (長期×80%)
安息角	30°	
使用材料	SS400	
設計基準強度	235 N/mm ² (t ≤ 40 mm)	
	215 N/mm ² (t > 40 mm)	

表3 荷重の組合せ

槽内状態	荷重の種類	想定する条件	荷重の組合せ
燃料満載	長期	常時	G+P
	短期	積雪時	G+P+S
	短期	暴風時	G+P+W
	短期	地震時	G+P _E +K
燃料空荷	長期	常時	G
	短期	積雪時	G+S
	短期	暴風時	G+W
	短期	地震時	G+K

記号
 G : サイロ本体および屋根上設備の荷重
 P : サイロの貯留物積載荷重により生ずる力
 P_E : サイロの貯留物積載荷重により生ずる力 (地震時)
 S : 積雪荷重により生ずる力
 W : 風荷重
 K : 地震荷重

設計荷重は、建築物荷重指針・同解説2015年改定版(日本建築学会 略称: 荷重指針)⁴⁾ および容器指針に準拠して算出した。

(3) サイロ屋根上設備の荷重

サイロ屋根上設備の概要図を図5に示す。サイロ屋根部に作用する荷重は図5に示す概念図をもとに構造計算を行い算出した荷重を用いた。

(4) サイロの貯留物積載荷重により生じる力

本荷重は貯留物により生ずる内部圧力が槽壁に作用し発生する摩擦力(鉛直方向荷重)を算出した。

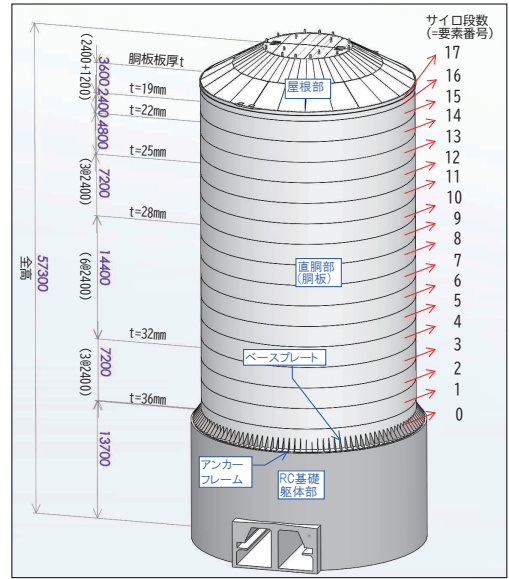
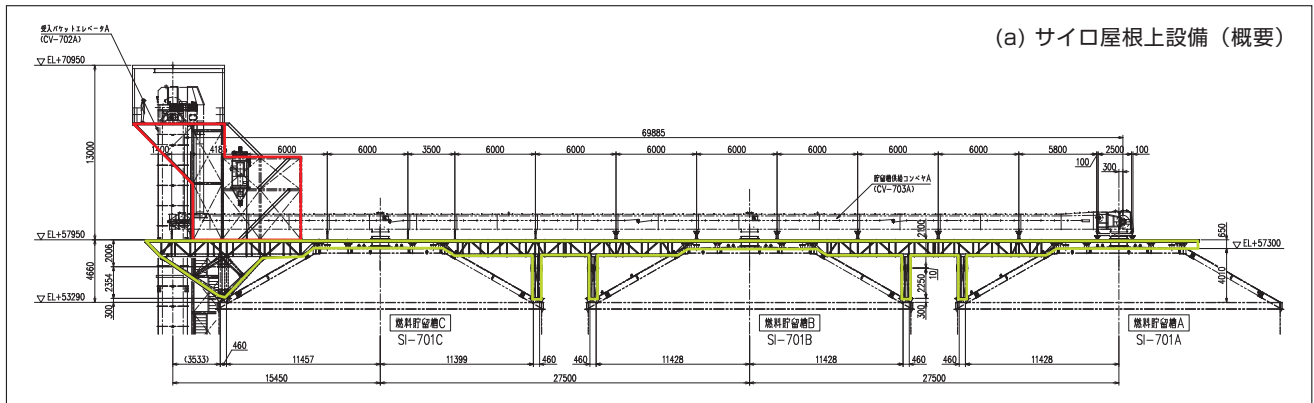


図4 サイロ設計 基本寸法



(a) サイロ屋根上設備 (概要)

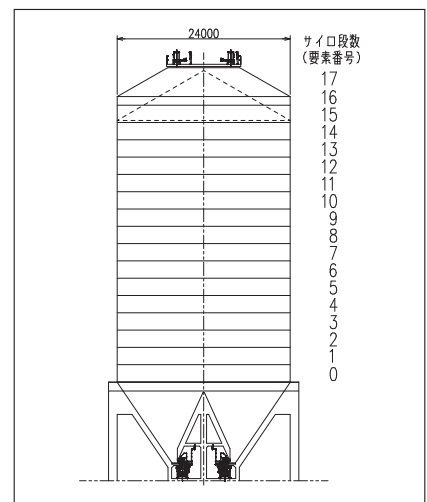
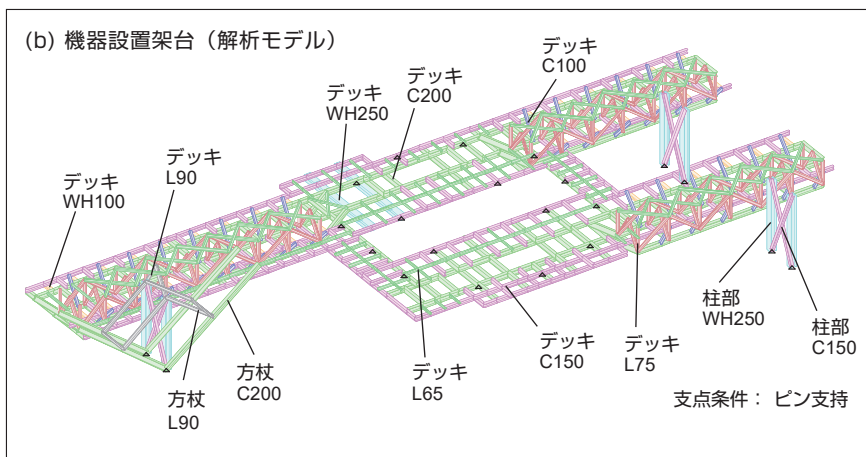


図5 サイロ屋根上設備 概要図

(5) 積雪荷重

屋根の形状、建設地の冬季平均風速をもとに屋根形状係数を求め、地上積雪重量（同重量算出に必要な垂直積雪量は建設地で定める建築基準法等施行細目に準ずる）に乘じ、更に付帯設備から受ける鉛直荷重を加え算出した。

(6) 風荷重

建設地の基本風速、風土側地域表面状況およびサイロ形状を勘案した設計速度圧と係数を乘じ、更に付帯設備から受ける水平方向荷重を加え算出した。

(7) 地震荷重

構造物を n 質点振動系とみなした場合の i 質点直下に加わる設計水平せん断力を解析（モード法解析モデル図 5(b)）し求め、更に付帯設備から受ける水平方向荷重を加え算出した。

5.4 直胴部の評価

直胴部は容器指針に基づき、鋼構造設計基準 - 許容応力度計算法⁵⁾に規定された以下の式を満たすことで評価を行った。評価結果を表 4 に示す。

$$\sigma_c / f_{cr} + \sigma_b / b f_{cr} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \tau / s_{cr} \leq 1$$

記号 (N/mm²)

σ_c : 平均圧縮応力度 σ_b : 圧縮側曲げ応力度

τ : せん断応力度 f_{cr} : 許容圧縮応力度

$b f_{cr}$: 許容曲げ応力度 s_{cr} : 許容せん断応力度

以上より、屋根梁および屋根鋼板共に設定した部材において強度計算上問題ないことを確認した。

表4 地震時の直胴部評価結果（燃料満載時）

サイロ段数 (要素番号)	応力度比 (-)				判定 (-)
	圧縮 σ_c / f_{cr}	曲げ $\sigma_b / b f_{cr}$	せん断 τ / s_{cr}	圧縮+曲げ $\sigma_c / f_{cr} + \sigma_b / b f_{cr}$	
17	0.05	0.04	0.17	0.09	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
16	0.05	0.04	0.13	0.09	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
15	0.05	0.11	0.71	0.16	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
14	0.04	0.14	0.74	0.18	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
13	0.03	0.17	0.68	0.20	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
12	0.05	0.24	0.81	0.29	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
11	0.04	0.25	0.69	0.29	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
10	0.05	0.32	0.76	0.37	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
9	0.06	0.39	0.84	0.45	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
8	0.06	0.34	0.65	0.40	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
7	0.07	0.40	0.70	0.47	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
6	0.08	0.48	0.73	0.56	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
5	0.09	0.55	0.76	0.64	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
4	0.10	0.63	0.77	0.73	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
3	0.11	0.70	0.79	0.81	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
2	0.10	0.63	0.60	0.73	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
1	0.12	0.70	0.60	0.82	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
0	0.10	0.76	0.64	0.86	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$

5.5 屋根部の設計

(1) 屋根部の解析モデル

屋根部は梁による骨組みに屋根鋼板を溶接する構造とした。モデル図を図 6 に示す。

(2) 屋根梁と屋根鋼板の強度評価

地震時（最大応力度比）での計算結果を表 5 に示す。

また屋根鋼板における地震時（最大応力度比）の計算結果を表 6 に示す。

以上より、屋根梁および屋根鋼板共に設定した部材において強度計算上問題ないことを確認した。

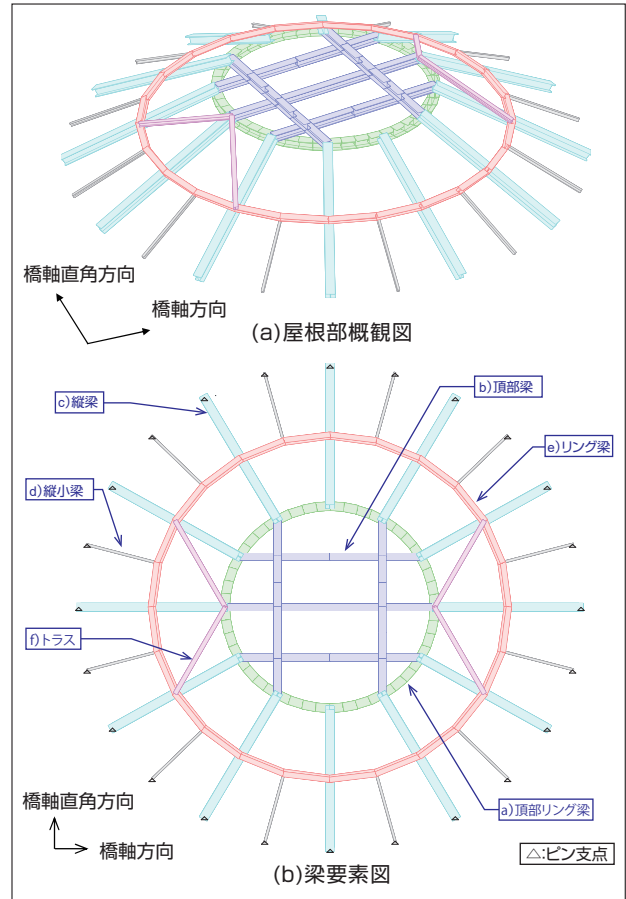


図6 屋根部モデル図

表5 屋根梁の応力度結果

部材名	最大合計応力度比 (-)				判定 (-)
	橋軸方向		橋軸直角方向		
	正	負	正	負	
a) 頂部リング梁	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
b) 頂部梁	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
c) 縦梁	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
d) 縦小梁	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
e) リング梁	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$
f) トラス	0.86	0.68	0.43	0.33	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$

表6 屋根鋼板の評価結果

地震方向	発生応力度 a (N/mm ²)	許容応力度 b (N/mm ²)	応力度比 a/b (-)	判定 (-)
Y 方向	228.1	235	0.97	$\leq 1.0 \therefore \text{OK}$

5.6 脚部の設計

(1) アンカーボルトの設計

火力発電所の耐震設計規程 JEAC 3605-2014⁴⁾ に準拠、算出した地震時の反力を使用し、アンカーボルト仕様(呼び径 M80、長さ 1400 mm、240 本) を決定した。

(2) ベースプレートの設計

容器指針に準拠、算出した地震時の反力を使用し、ベースプレート仕様(板幅 1020 mm、板厚 85 mm) を決定した。

表7 サイロ設計仕様

機器名称	燃料貯留槽 A/B/C	
ItemNo.	SI-701A/B/C	
数量	3基	
主要項目 (1基当たり)	形式	鋼板溶接式丸型自立
	材質	一般構造用圧延鋼材 SS400
	内径	φ 24 m
	全高	57.3 m (RC 基礎 13.7 m+ 鋼板製貯留槽 43.6 m)
	板厚	直胴部 t19-36 mm 屋根部 t9 mm
	貯留量	20,000 m ³ (レベル計管理値)
	重量	898,200 kg
付属品	レーダー式レベル計 熱電対 ガス検知器	

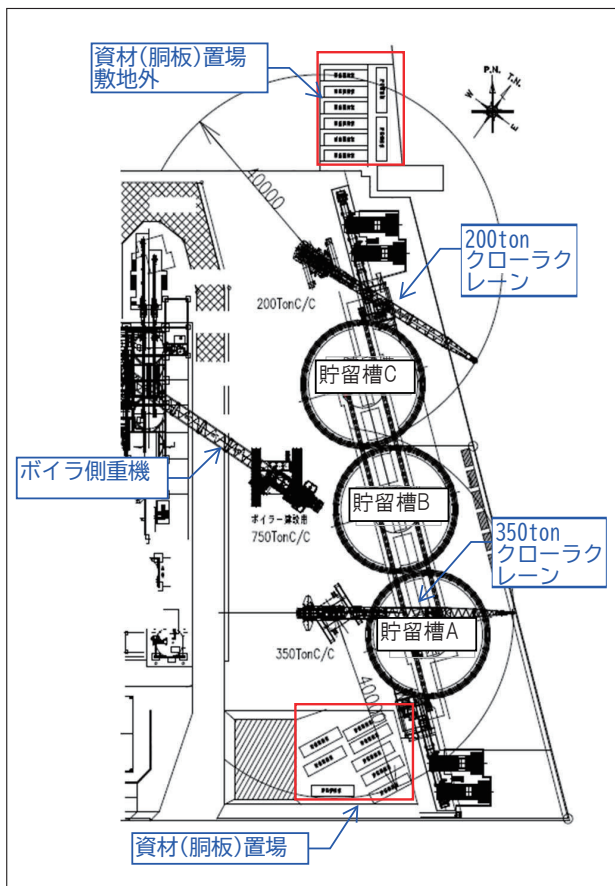


図7 サイロ施工における重機と資材置場の配置

5.7 鋼板製貯留サイロ最終決定仕様

上記設計に基づき、サイロの最終仕様を決定した。詳細について表7に示す。

6 鋼板製貯留サイロ現地施工

6.1 施工場所ロケーション

サイロ施工時の重機および資材の置き場所について図7に示す。当社が作業するエリアは燃料エリアとボイラエリア間のスペースにしか重機と資材を配置することができなかった。またこのスペースはボイラ側の別業者も重機を配置するため、作業が交錯しないよう日常的に資材場所の変更や作業予定を調整する必要があった。そこで当社は施工場所を貯留槽 A/B と貯留槽 C の2カ所に分け、それぞれ時期ごとに重機を配置し、重機が作業できるエリア内に資材を置けるよう配慮しながら施工を行った。貯留槽 C のサイロ施工においては客先より資材を一時的に敷地外に置くことができたため、作業が交錯することなくサイロ施工に注力できた。

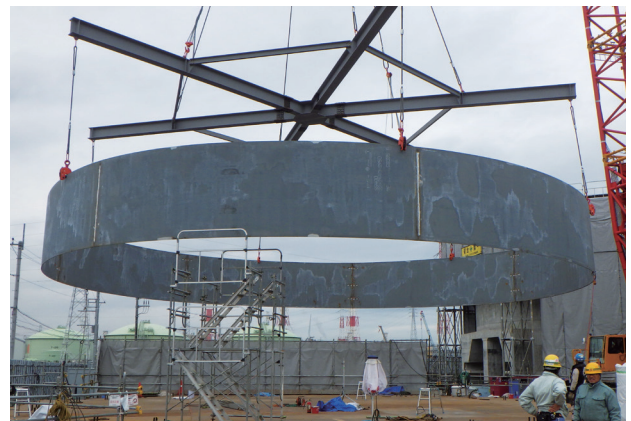


図8 胴板地組工法



図9 レンガ積み工法

6.2 施工方法および工程

(1) 従来サイロ施工法（胴板地組工法）

従来のサイロ施工方法として仮設定盤上に胴板をリング状になるよう溶接を行い、クレーンで上架して積上げていく胴板地組工法（図8）を採用していた。この方法の場合、地組で作業できるだけでなく、クレーン上架時に仮設の作業用の足場も設置できるため、サイロ内部に足場を設置する必要がなく作業効率が良い。しかし本設備では地組するスペースが確保できなかったため別方法で検討する必要があった。



図10 芯出し調整用特殊治具

(2) レンガ積み工法

今回、作業スペースを確保するためにレンガ積み工法を採用した。レンガ積み工法とは図9のように胴板を1枚ずつクレーン上架し積み重ねていく工法である。従来工法とは異なり、作業に時間がかかる他、胴板同士の継目である肌合わせと芯出しの調整が難しい。そこで、図10に示す特殊治具を用い、肌合わせと芯出しが容易にできるよう工夫して施工した。図11に胴板（16段）目の溶接完了後のサイロ内部状況を示す。

(3) 施工スケジュール

図12にサイロ施工に関するスケジュールを示す。他業者と輻輳が多く、作業スペースに制約のある現場であったが、重機や資材置場の配置の工夫ならびに各社との密な連携により、客先が要求する納期までに滞りなく工事を完遂することができた。

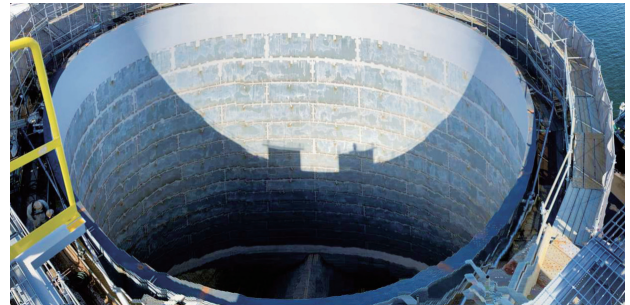


図11 胴板溶接完了後（16段）のサイロ

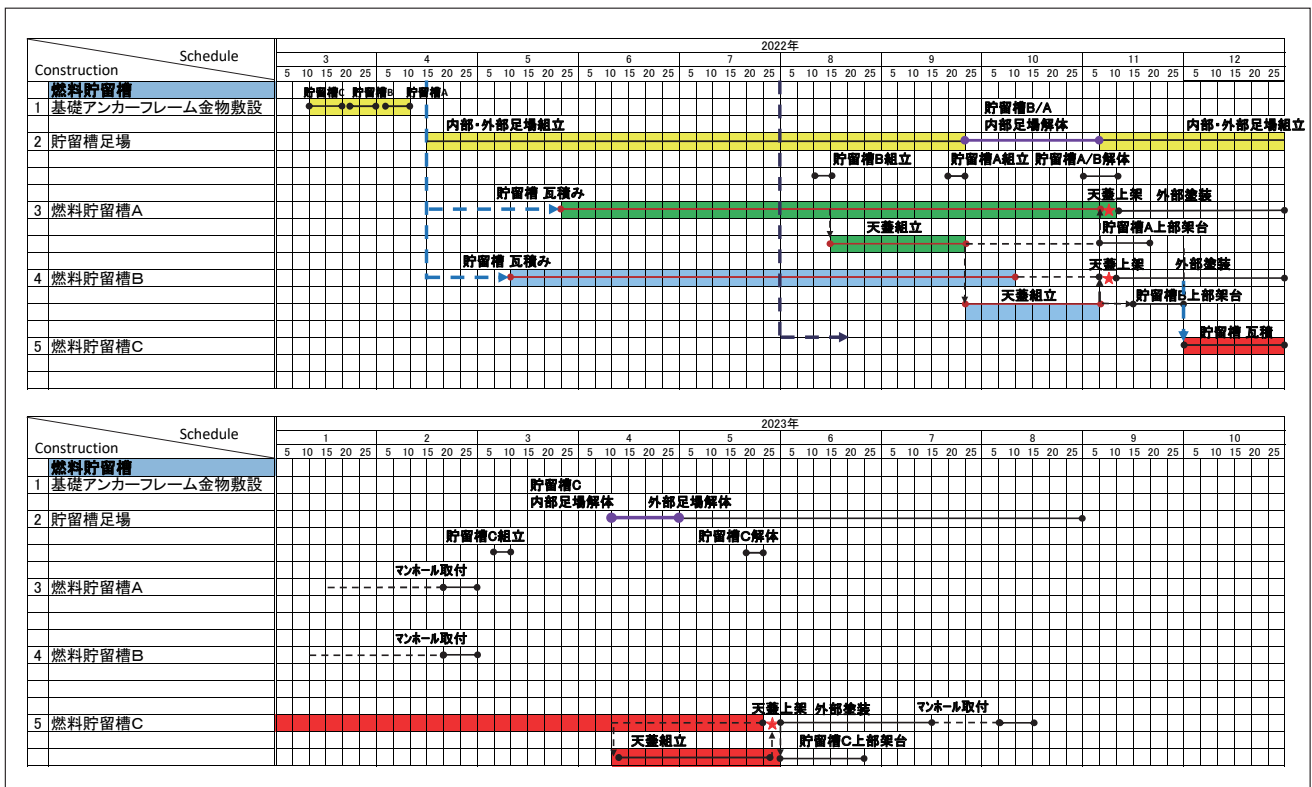


図12 工事工程表

6.3 サイロ施工状況

サイロにおける各作業の施工状況を以下に示す。

(1) アンカーフレーム据付

図 13 に示すように、サイロ 1 基当たりアンカーフレームは 8 分割それぞれを基礎躯体部（客先土建）の上に上架し、据付を行った。

(2) ベースプレート据付

アンカーフレーム設置後、図 14 に示すように、客先土建業者にてコンクリート打設後、ベースプレートを設置した。

(3) 天蓋の組立および上架

天蓋（屋根梁+屋根板）については図 15 に示すように胴板組立完了後、地組で屋根梁と屋根板を据付し、750 t クレーンにて上架した。

7 まとめ

本工事の鋼板製サイロについては、直径 24 m × 全高 57.3 m（鋼板部 43.6 m）となり、当社実績としては最大規模のサイズであり、鋼構造物としても総重量 2,500 t を超える規模の設備となった。設計に際しては、強度、経済性等を重視し、これまでの実績を踏まえ各種指針に基づき最適なデザインを目指した。また、これまでの実績工法を見直し、状況に応じた適切な工事工法を採用することで、厳しい工事条件下にも関わらず、効率的な工事施工を達成することが出来た。



図 13 アンカーフレーム据付

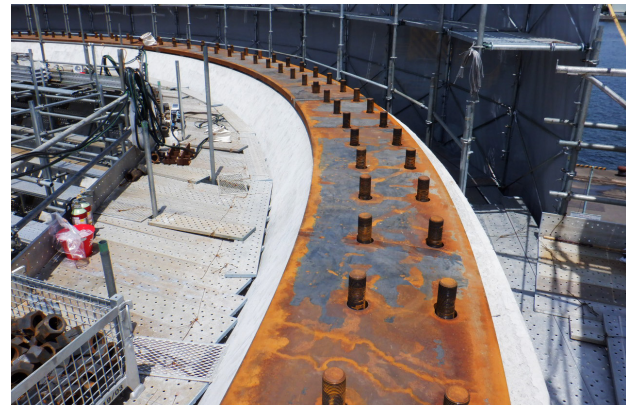
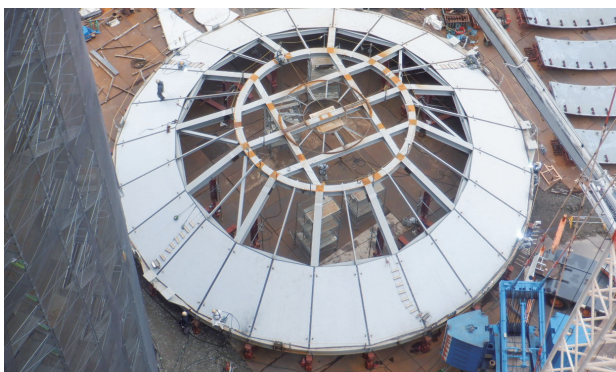


図 14 ベースプレート据付



(a)組立中



(b)組立完了



(c)上架時

図 15 天蓋（屋根梁+屋根板）施工状況

8 おわりに

鋼板製燃料サイロの設計、施工を中心に本工事の概要および現地施工について概要を述べた。実績を超える大型のサイズならび施工場所の制約等、条件的にも難しい工事であったが、構造設計会社による協力ならびこれまでの知見の集約、工事関係者の日々の努力により、無事完成、引き渡しに至った。

この実績をもとに、バイオマス発電を含めた再生エネルギーのさらなる普及の一旦を担うべく、クリモト環境基本方針に基づき、環境負荷低減型製品への移行推進および環境保全機器設備の開発に取り組んでいく所存である。

謝辞

本工事の施工にあたり、ご指導、ご協力を頂いた市原バイオマス発電合同会社殿をはじめ、構造設計協力いただいた関西設計株式会社殿、ならび工事関係者を含めた関係各位に熱く感謝の意を表します。

参考文献：

- 1) 東京ガスエンジニアリングソリューションズ “バイオマス発電所 持続可能な社会の実現に貢献する再生可能エネルギーへの取り組み”
https://www.tokyogases.co.jp/business/energy/bioas/biomass_energy.html, (2024年7月10日閲覧)
- 2) 日本建築学会 容器構造設計指針・同解説 2010年改訂
- 3) 日本電気協会 火力発電所の耐震設計規格 JEAC 3605-2014
- 4) 日本建築学会 建設物荷重指針・同解説 2015年改訂
- 5) 日本建築学会 鋼構造設計基準－許容応力度計算法 2005年

執筆者：

石井伸幸

1992年入社
工事業務に従事



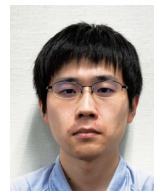
丸山祥麻

2015年入社
プラント設計に従事



新家誠広

2017年入社
粉体機器の設計に従事



難波康弘

2012年入社
プラント設計に従事

