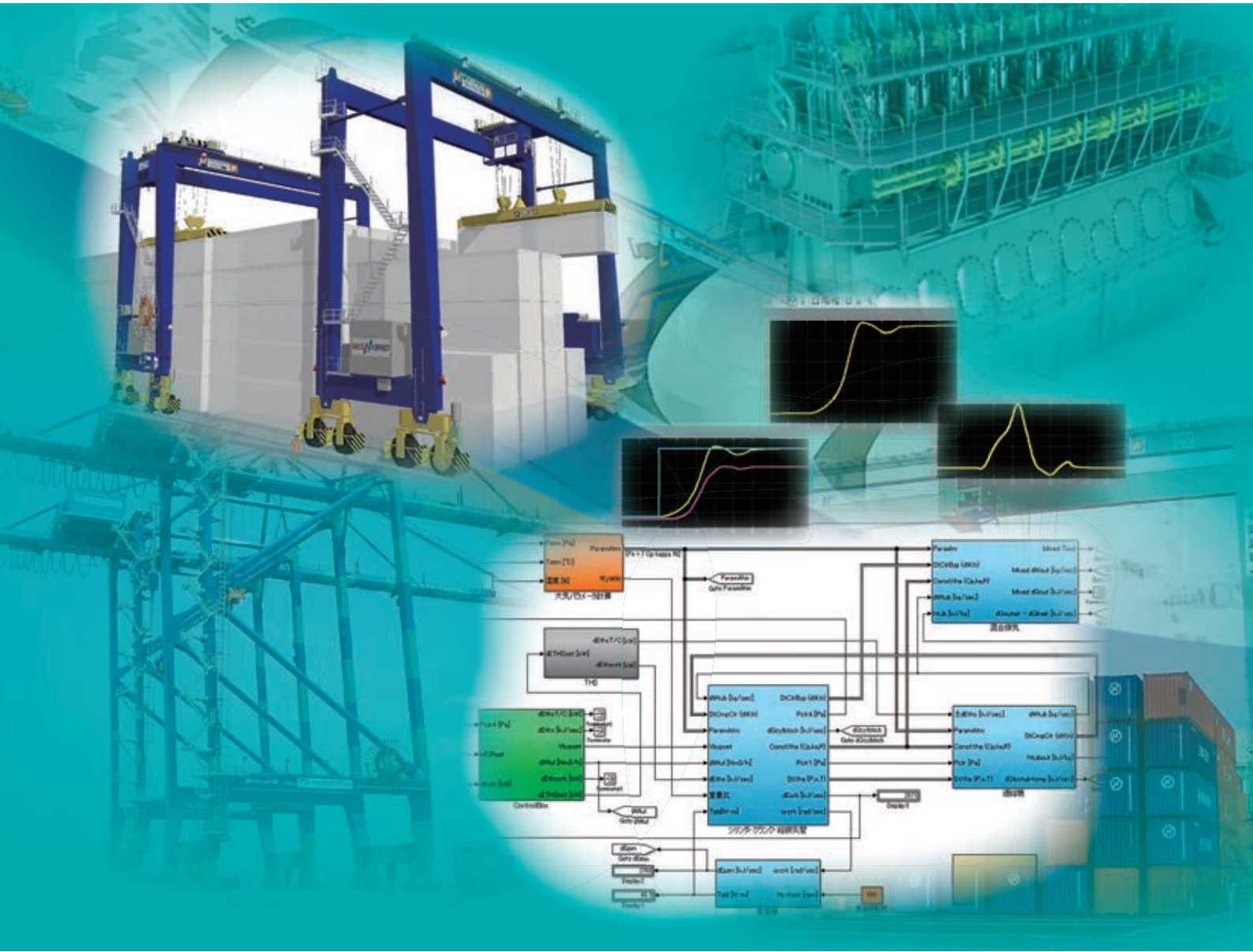


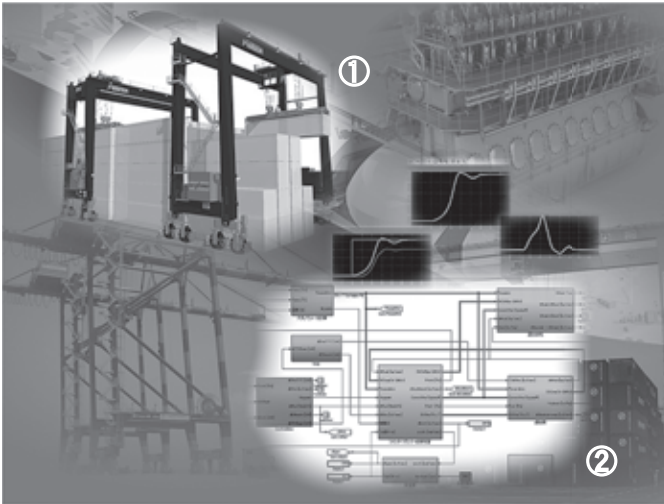
# 三井 造船 技報

平成 26 年 10 月 ■ 第 213 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 213 2014



シミュレーション技術を活用した製品開発



## Cover

### Products Development using Simulation Technology

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) has been developing products using simulation technology and experiments.

Concerning diesel engine development, in order to reduce NO<sub>x</sub>, PM and CO<sub>2</sub> emission, many kinds of apparatus such as Turbo Hydraulic System (THS), Exhaust Gas Recirculation System (EGR), Selective Catalytic Reduction System (SCR) for exhaust gas purification and low temperature energy recovery system Variable Phase Cycle (VPC) as well as turbo compressor are added, and the engine system behavior therefore has become very complicated.

Furthermore, MES has been also increasing the size and the speed of container handling cranes, to meet the demand for CO<sub>2</sub> reduction.

Under such circumstances, simulation technology helps to understand complicated system and shorten development period. After verification by experiments, MES supplies new reliable products to the customers.

- ① Large Battery Management System for port area equipment
- ② Developing lean-burn gas engine simulator with supercharging by THS

## 表紙説明

### シミュレーション技術を活用した製品開発

三井造船では、シミュレーションを活用した性能予測と実験を併用して、効率的な製品開発を進めている。

ディーゼルエンジンにおいては、燃料消費量及び環境負荷を抑制するために、ターボ圧縮機のみならず、油圧式排熱回収システム (THS)、排気ガス浄化のための再循環システム (EGR) や選択式触媒還元システム (SCR)、排熱回収システム (VPC) などの新しい技術と装置の適用が実現しつつあり、そのシステムの振る舞いは複雑になっている。また、港湾荷役設備においても、大型化や高速化を推進する一方で、エネルギー消費量の削減を進めている。

このような状況において目標を短期間で達成するためには、シミュレーションによりシステムの特徴を把握することが重要である。シミュレーション技術を活用して開発した製品を実験により検証し、信頼される製品として迅速に提供する。

- ① 開発を進める大型蓄電システムの搭載を目指す港湾荷役設備
- ② THSの適用を目指す中速リーンバーンガスエンジンのシミュレーションモデル

# 三井造船技報

2014年(平成26年)10月・第213号

## 目次

### 製品・技術解説

- 三井造船の米国における化学プラント建設の取り組み..... 1  
エンジニアリング事業本部 寺澤 慎祐

### 技術論文・報告

- 港湾設備を中心とした産業機械用の大型蓄電システムの開発..... 5  
宮田 淳也 岡 浩司 桐野 睦 青山 直裕

- THSによる過給機アシスト機能を有する  
中速リーンバーンガスエンジンの動特性予測シミュレーション..... 12  
梶谷 哲平 坂入 信之 辻 康之 岡 俊郎

- 太陽熱発電システム(第2報)  
- 蓄熱材の性能評価試験と蓄熱装置の設計手法 - ..... 17  
友保 純直 須山 達夫 佐藤 康光 筒井 伸幸

### 製品・技術ニュース

- 高性能地中レーダシステムによる平城宮跡東方官衙地区の遺跡調査  
- 千三百年前の歴史的構造物遺構を最新テクノロジーで探知 - ..... 24

- 九州自動車道上の橋梁製作・架設工事  
- 小川スマートインターチェンジのEランプ橋他1橋 - ..... 26

# MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 213 OCTOBER 2014

## CONTENTS

<b>Products and Technology Explanation</b> .....	1
<b>Technical Paper and Report</b>	
Development of Large-Scale Battery System for Industrial Machinery with a Focus on Port Facilities.....	5
<i>Junya MIYATA ,Koji OKA ,Mutsumi KIRINO ,Naohiro AOYAMA</i>	
Dynamic Simulation of Lean-Burn Gas Engine with Supercharging Function by Turbo Hydraulic System .....	12
<i>Teppei KAJITANI, Nobuyuki SAKAIRI, Yasuyuki TSUJI, Toshiro OKA</i>	
Concentrated Solar Power( CSP )System( Report #2 ) - Performance Test of Thermal Storage Material and Designing Method for Thermal Storage Facility - .....	17
<i>Yoshitada TOMOYASU, Tatsuo SUYAMA, Yasumitsu SATO, Nobuyuki TSUTSUI</i>	
<b>Products and Technology News</b> .....	24, 26



# 三井造船の米国における化学プラント建設の取り組み

エンジニアリング事業本部 寺澤 慎 祐

## 1. はじめに

1950年頃、単体機器製作に始まった三井造船のプラント関連業務は、石油化学の勃興とともに本格化した。1960年代までは、国内向けプラントメーカー的な色彩が強かったが、1970年代初めの三井石油化学工業株式会社(現三井化学株式会社)との共同によるルーマニア向け高密度ポリエチレンプラントとポーランド向けポリプロピレンプラントの受注、台湾向けDMT(Dimethyl Terephthalate)プラントの単独受注がプラント部門の海外進出の契機となった。1982年に、初めてターンキー契約によるオマーン製油所向け改質装置の納入を経て、EPC(Engineering, Procurement and Construction)コントラクターへと脱皮した。途中、1977年にプラント部門は化学プラント事業部として機械事業本部から独立し、1980年にはプラントエンジニアリング事業部と改称され、石炭、ガスなど、新代替エネルギー関連をはじめとする新規分野へ進出し、業容の拡大を図った。

当社の米国進出のきっかけは、1986年の米国 Exxon Chemical からのポリプロピレン増強工事の受注である。Exxon Chemical は、三井石油化学株式会社からポリプロピレンの技術を導入し、ヒューストン郊外のプラント増強を計画した。その折、同プロセスのプラント建設に多くの実績を有する当社に対して引合いがあり、これを受注した。

同じ時期、米国の Advanced Polypro U.S.A. Resin も、同じく三井石油化学工業株式会社の技術によるポリプロピレンの企業化を計画していた。この時にも三井物産株式会社の援助もあって、1986年3月に当社が受注し、米国のエンジニアリング会社をサブコントラクターとして採用し、1988年8月に工事を完成させることができた。

1985年以降、対米プロジェクトが活発化したのに並行して、当社は積極的に受注活動を展開した。併せて、当社は現地業者の有効活用を図るため、米国のヒューストンに現地法人 MES Engineering (MEI) を設立した。MEI 社は、エンジニアリング能力を高めるため、米国の中堅エンジニアリング会社の Engineers and Constructors International (ECI) を買収し傘下に収め、1992年3月には米国の Kaneka Texas から MBS 樹脂(塩ビ耐衝撃強化剤)製造プラントを受注するなど、その基礎を確かなものにした<sup>1)</sup>。

現在、米国内では、シェールブームにより、米国内企業は言うまでもなく、日本企業を含む米国外の企業が、シェールガスを原料とした化学プラントの計画と建設を進めている。

当社においても、海外顧客からはもちろんのこと、日本国内の顧客からも米国へ建設する化学プラントの見積案件が増加している。

当社の米国における最近の化学プラントの受注実績の一例を紹介すると、

2012年受注の Kuraray America 向け La Porte, Texas のポバールプラントの EPC 工事、

2013年受注の Sasol Chemical Industries 向け Lake Charles, Louisiana の低密度ポリエチレンの FEED (Front End Engineering Design) 作業、

2013年受注の ExxonMobil Chemical 向け Baytown, Texas のエチレンプラント分解炉の EPC 工事

などがある。

これらのプロジェクトはいずれも大規模で、プラントの完成まで長期間を要する。このため、プラント受注の際における見積では、これらのリスク要因を考慮する必要がある。

本報では、米国での化学プラントの見積時に配慮すべき主要な点を当社の経験を基に紹介する<sup>2)</sup>。

## 2. 米国における化学プラントの建設コスト

### 2.1 米国プラントコストインデックスの推移

米国プラントコストインデックスとしては、米国 Nelson-Farrar Refinery Cost Index (NF-RCI)<sup>3)</sup>と米国 Chemical Engineering Plant Cost Index (CH-CI)<sup>4)</sup>が知られている。

NF-RCI は、米国の Oil & Gas Journal に定期的(四半期毎に更新)に掲載されており、リファイナーの代表的なインデックスとして利用されている。

一方、CH-CI は、米国の Chemical Engineering Journal に毎月掲載されており、化学工業界では著名である。

両者の2013年から1990年まで遡った米国プラントコスト

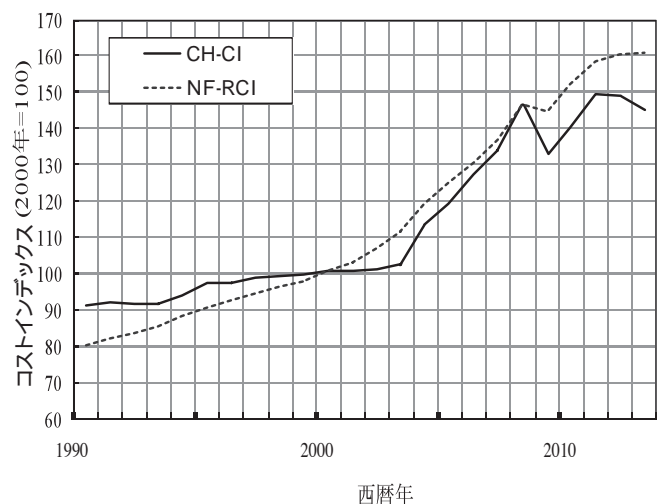


図1 米国プラントコストインデックス「全体」

インデックス「全体」を図1<sup>5)</sup>に示す。2008年9月のリーマンショックで下落したものの、ここ10年間で約1.5倍になっている。平均すると毎年、対前年比4%の上昇となる。

「機器費」に限定した米国プラントコストインデックスを図2<sup>5)</sup>に示すが、「全体」と同じ傾向である。なお、「機器費」には、配管、鉄骨、保温冷、塗装などの工事材料が含まれている。

一方、「建設労働者費」に限定した米国プラントコストインデックスを図3<sup>5)</sup>に示すが、両者で大きく異なっている。NF-RCIでは、ここ10年間で約1.4倍となっているが、CH-CIでは1.1倍程度の増加である。

なお、上記以外にも米国のコストデータとして、Engineering News-Record Magazine (ENR)や、RSMeans Cost Data Books, Spon & Price Booksなどの文献がある。

2.2 シェールブームによる建設労働者の不足

Engineering Business 誌によると、シェールガスによる米国の化学工業投資は約100件であり、大ブームとなっている<sup>6)</sup>。多くの大型プロジェクトに関するPre-FEEDとFEEDが既に進行している。

このブームによる大きな懸念材料は、米国の労働市場、特

に熟練労働者の市場がひっ迫することであり、溶接工、配管工、足場ビルダなどが挙げられる。地域的にはメキシコ湾岸地区が該当する。これらプラントの建設は、2014～2017年がピークとなることが予想されている。

また、ブームの結果、市場が過熱し、プロジェクトを非常に高価にすることも懸念される。コントラクターは、予想される建設労働者の不足を避けるための対策を考えており、プロジェクトのスケジュールを維持するために、プラントをモジュール化し、現地工事量を削減するモジュール工法に向かっている。

当社においても米国向けの化学プラント建設に関し、タイでモジュールを製作する工法を採用しているプロジェクトもある。

一方、発表されたプロジェクトのうち、一部は建設労働者の不足から計画の遅延が懸念されている。

2.3 米国における建設労働者費の将来予想

建設労働者費の将来予想を記述した雑誌、文献などは、なかなか見当たらない。

将来予想の方法として、過去のデータ(グラフ)から延長法で予測することができる。しかし、昨今の建設ブームを考えると、延長法での予想は難しい。

当社が収集した情報によると、今後の建設状況は、3種のシナリオに分けられる。

表1に示すように、最も上昇する場合(現在計画中のプロジェクトがすべてスケジュール通りに進む場合)には、2013年からの4年間で29～35%の上昇を予想している。平均すると毎年、対前年比7%の上昇となる。

一方、いくつかのプロジェクトが中止になるか、海外からの安価な労働者が獲得できる場合には、表2に示すように、中間の上昇の場合として4年間で19～25%の上昇を予想している。

さらに、最も上昇しない場合には、表3に示すように、4年間で12～15%の上昇を予想している。

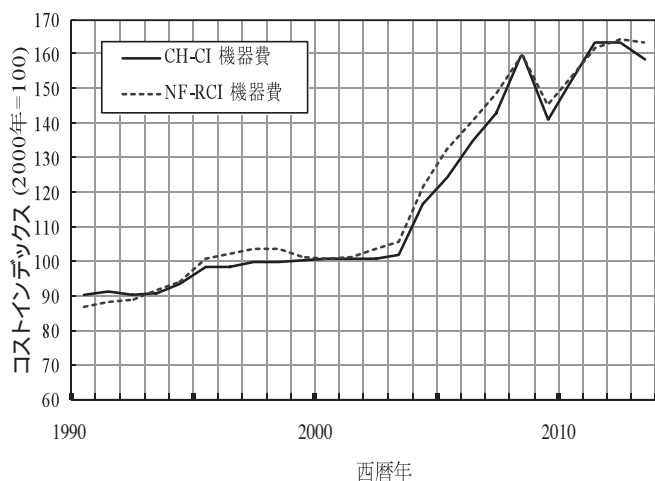


図2 米国プラントコストインデックス「機器費」

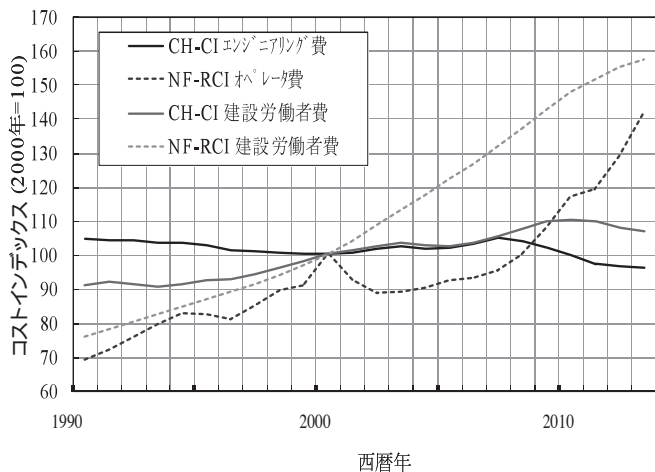


図3 米国プラントコストインデックス「建設労働者費」

表1 米国建設労働者費の将来予想(最大のシナリオ)

	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
対前年比[%]	-	10.7	18.3	1.2	0.5
指数	100.0	110.7	130.9	132.4	133.0

表2 米国建設労働者費の将来予想(中間のシナリオ)

	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
対前年比[%]	-	7.3	12.5	0.8	0.3
指数	100.0	107.3	120.8	121.8	122.2

表3 米国建設労働者費の将来予想(最小のシナリオ)

	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年
対前年比[%]	-	4.5	7.7	0.5	0.2
指数	100.0	104.5	112.5	113.1	113.3

いずれも、特に最初の2年間の上昇が大きい。例えば、中間の上昇の場合、対前年比で、2014年は7.3%、2015年は12.5%、2016年は0.8%、2017年は0.3%の上昇となっている。

#### 2.4 米国プラント建設のロケーションファクタ

ロケーションファクタ(LF)とは、ある地域のプラント建設費を異なる地域の建設費に変換するコスト指標であり、プラント建設地域指数、海外立地コスト指数とも呼ばれ、式(1)で表される。

$$LF = (\text{特定地域の建設費} / \text{基準地域の建設費}) \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

特定地域のLFは通常、日本、米国などの基準地域を100とした基準地域通貨(円、米国ドルなど)建てコスト指標で表示される。

表4に示すように、工事費に関しては、日本、米国及びシンガポールにおける当社の最近の工事複合単価から、日本を100とした場合の米国とシンガポールの各工事複合単価の比率を算出した。なお、コンクリート工事、鉄骨工事、保温冷工事及び塗装工事には、工事材料も含まれている。また、為替レートは、100円/米国ドル、78円/シンガポールドルとした。

表5に、当社の標準のプラントコスト構成比率を用いて、ホームオフィスコストと機材費は各国で同じと仮定し、現地工事費を前述の当社の最近の工事種毎の複合単価よりLFを算出した結果を示す。なお、日本の輸送費は日本国内と近隣の韓国からの輸送が多いため、金額では小額となり、表記上は0とした。また、建設管理関係費は、米国とシンガポールを日本の1.5倍とした。

ここで、

ホームオフィスコストは、マンパワーコストとホームオフィス経費、

機材費は、機器、配管材、計装材、電気材及び消防火材、

輸送費は、海上輸送と内陸輸送、

現地工事費は、土建(材料を含む)、据付、配管、計装、

電気、保温冷(材料を含む)及び塗装(材料を含む)、

建設管理関係費は、仮設、建設管理費及び現場事務所経費である。

なお、

機材は世界中から購入する、

輸入関税とアンチダンピング関税は含まない、  
官庁への許認可申請費用は含まない、  
リスクマネー(危険費、予備費、変動費)は含まない、  
一般管理費と利益は含まない  
とした。

これより、LFは、日本を100とした場合、米国は165、シンガポールは116となった。なお、為替レートは、表4と同じく100円/米国ドル、78円/シンガポールドルとした。

### 3. 見積時における米国化学プラント建設のリスク

#### 3.1 建設労働者費の上昇

リスク項目としていくつかあるが、一番大きいのは、2.3に示した建設労働者費の上昇である。

以前は、プラント見積時にサブコントラクタ(工事業者)に対して、建設スケジュール(いつ建設するか)を示せば、建設時までのエスカレーション(変動費)をサブコントラクタが見込んで見積コストを提出してきた。しかし、最近では先が読めないため、サブコントラクタは現時点ベースでのコストしか提出してこないことが多い。

したがって、当社から顧客に建設コスト見積を提出する際には、当社がエスカレーションを推定して加算しなければならない。この傾向は、米国に限らず、最近ではシンガポールやマレーシアのサブコントラクタにも見られる。

#### 3.2 アンチダンピング関税

考慮すべきリスクをもう一つ挙げるとすれば、アンチダンピング関税である。

##### 3.2.1 米国の関税

一般的な米国の関税制度については、日本貿易振興機構(JETRO)のホームページ<sup>7)</sup>に示されているが、その要点を次に示す。

米国の貿易相手国のほとんどは、待遇上「正常貿易関係(Normal Trade Relations: NTR)」として扱われている。NTRは以前、「最恵国(Most Favored-Nation: MFN)」待遇と呼ばれていたが、大部分の貿易相手国がMFN待遇だったことから、特別に最恵国ではないという指摘に基づき、1998年にNTRと呼ばれるようになった。

NTR諸国から米国に輸入される製品は、原則として同率関税が課される。米国が、あるNTR国から輸入する関税率を引き下げ、あるいは関税を撤廃する際は、同じ措置が他のNTR国すべてに適用される。関税率は、米国関税率表(United States Harmonized Tariff Schedule)によって定められて

表4 各国の工事複合単価比率

	日本	米国	シンガポール
コンクリート工事(材工)	100	160	110
鉄骨工事(材工)	100	210	140
据付工事(工)	100	130	80
配管工事(工)	100	360	150
保温冷工事(材工)	100	340	130
塗装工事(材工)	100	210	90
加重平均	100	280	130
為替レート		100JPY/USD	78JPY/SGD

表5 ロケーションファクター(LF)

	日本	米国	シンガポール
ホームオフィスコスト	9	9	9
機材費	52	52	52
輸送費	0	3	3
現地工事費	33	92	43
建設管理関係費	6	9	9
合計(ロケーションファクター)	100	165	116



いる。

関税率は、次の3本建てとなっている。

一般税率：NTR 諸国向けの税率であり、日本も当税率が適用される。

特別税率：FTA (Free Trade Agreement) 相手国や特定の開発途上国に対する一般特惠関税 (Generalized System of Preferences : GSP) など、特惠措置が適用される国からの輸入品に対する税率である。

法定税率：キューバ及び北朝鮮の2カ国に対して適用される税率である。旧来は共産圏諸国向けの税率であったが、対象国が徐々に減り、2001年末にアフガニスタンとベトナムも除外され、適用国はこの2カ国のみになった。

### 3.2.2 アンチダンピング関税とは

1993年に成立したアンチダンピング関税は、米国における不当に低い価格での販売を意図する輸入品に対して賦課される可能性がある追加関税である。このような不当に低い価格は、競合する米国製品に対して輸入品に不当な競争優位を与えるような不正な海外貿易慣行の結果であるとする考え方が、追加関税の根拠となっている。

ダンピング(不当販売)とは、生産者がある商品に対して母国市場で付ける価格よりも低い価格で同一商品を米国内で販売しようとする輸出行為である。アンチダンピング措置は、貿易相手国の企業がダンピングにより、国内販売価格よりも低い価格(またはコスト割れ)の製品を輸出し、それが米国内の産業に損害を与えていれば発動可能となる。

アンチダンピング関税は、通常の関税のように国に掛けるというよりは、ベンダーに掛けられる。見積の際には、事前によく調査しておく必要がある。ベンダーからの見積金額が安価であっても、アンチダンピング関税を加算すると高価になることがある。

なお、アンチダンピング関税の詳細については、次の米国政府機関のホームページに示されている。

- ・ United States International Trade Commission<sup>8)</sup>
- ・ U.S. Customs and Border Protection<sup>9)</sup>

### 3.2.3 関税率とコード

関税率とコードの関係について記述する。各国の関税率は、HSコードで定められている。つまり、HSコードとは、あらゆる物品に固有分類番号を付けて、貿易上それが何であるかを世界各国で共通して理解できるように取り決めた番号のことであり、Harmonized Commodity Description and Coding Systemの略称である。HSコードは6桁の数字で成り立っており、上2桁を「類」、類を含む上4桁を「項」、項を含む6桁を「号」という。国際上は6桁だが、それ以上の細分も可能である。ちなみに、日本では9桁まで記載できる。

ところが、米国ではこれをさらに独自改良したHTS (Harmonized Tariff Schedule)コードを使用している。HSコードは6桁まで世界共通だが、米国のHTSコードはこの6桁に相当する部分が4桁となっている。より正確に言えば、HSコードの基本品目分類番号は6桁だが、HTSコードではこれを4桁に変え、この4桁の末尾に2桁と4桁の拡張コードをつけて品目の確定を行っている。したがって、HTSコードは、サフィックスを含めると10桁番号となる。

HSコードとHTSコードは、番号の振り方が異なるため、互換性がないと言われるが、上4桁と上6桁で見えていくとおおむね同じものがほとんどである。

## 4. おわりに

本報では、見積時における米国での化学プラント建設のコストとリスクについて述べた。

米国における化学プラントの建設は、コストも高く、リスクもある。しかし、シェールガスという安価な原料がある限り、全体での経済評価を考えれば、しばらくは米国での建設ブームは続くものと思われる。

今後も当社は、化学プラントオーナーとの関係を密にし、リスクを避けコストダウンを図りながら、米国における化学プラントの建設を推進していく所存である。

## 参 考 文 献

- 1) 三井造船：三井造船株式会社75年史，(1993-3)
- 2) 寺澤：米国での化学プラント建設のコストとリスク，化学工学会第46回秋季大会，(2014-9-17)
- 3) Oil & Gas Journal，(2013-7-1) p. 94, Penn Well
- 4) Chemical Engineering Journal，(2013-8) p. 56, Elsevier
- 5) 国分・外：2013年PCI/LF報告書，日本機械輸出組合，(2013-10)
- 6) Engineering Business，(2013-7-1)，GLOBAL Report, p. 8, エンジニアリング・ジャーナル
- 7) 日本貿易振興機構：基本的な米国の輸出入制度，[http://www.jetro.go.jp/world/n\\_america/us/trade\\_03/](http://www.jetro.go.jp/world/n_america/us/trade_03/)，(2014-8-27)
- 8) United States International Trade Commission：[http://www.usitc.gov/trade\\_remedy/](http://www.usitc.gov/trade_remedy/)，(2014-8-27)
- 9) U. S. Customs and Border Protection：<http://addcvd.cbp.gov/>，(2014-8-27)

〔問い合わせ先〕

エンジニアリング事業本部 プロジェクト部  
TEL 043 - 351 - 9245 寺澤 慎祐

# 港湾設備を中心とした産業機械用の大型蓄電システムの開発

宮田 淳也\* 岡 浩司\* 桐野 睦\*\* 青山 直裕\*\*

## Development of Large-Scale Battery System for Industrial Machinery with a Focus on Port Facilities

Junya MIYATA , Koji OKA , Mutsumi KIRINO , Naohiro AOYAMA

For reducing environmental impact and energy consumption in the container yard , motorized / hybridization of the container handling machine has been developed . Lithium-ion rechargeable battery of high-capacity and high-performance has been widely used as a battery of such machine .

In order to develop a Lithium-ion battery system optimized for the container handling machine , we have verified the battery specifications by simulation with a load of the actual machine and the actual characteristics of the battery. And we have completed the safe , simple and compact large battery system adaptable to quick load change in high-rate .

コンテナヤードにおける環境負荷低減と省エネ化を目指し、港湾荷役機械の電動化とハイブリッド化が進められている。その蓄電池として大容量で高性能なリチウムイオン電池が普及しつつあるが、港湾荷役機械に必要とされる急速充放電を実現することが課題となっている。

三井造船は、港湾荷役機械に最適なリチウムイオン電池システムを開発することを目的として、まず電池の実特性と実機の負荷を用いた電池適用シミュレーションを行い、電池仕様を確認した。そして、シンプルかつコンパクトな構成でありながら安全性も確保し、港湾荷役機械特有のハイレートで短時間の負荷変動に対応可能な大型リチウムイオン電池システムを製作した。



(a)MES ハイブリッドトランスレーナ



(b)リチウムイオン電池モジュール

図1 港湾荷役機械と蓄電池  
Cargo Handling Machine and Battery

\* 技術開発本部 玉野技術開発センター

\*\* 三井造船システム技研株式会社 電子ソリューション事業部



## 1. はじめに

昨今の環境負荷の低減と省エネ化，運用コストの削減などへの要求の高まりから，コンテナヤードにおいても港湾荷役機械の電動化とハイブリッド化の取り組みがなされており，蓄電池の利用も注目されている．

三井造船では，環境に配慮した RTG (Rubber Tired Gantry Crane) として MES ハイブリッドトランステナ (以下，MES-HybridTT と称す) (図 1 (a)) を製品化しており，港湾荷役機械への電池利用の実績を有する．MES-HybridTT は従来のエンジン型と比較して，約 60% の燃費改善効果がある．

MES-HybridTT をはじめとした港湾荷役機械を低コストで電動化あるいはハイブリッド化し，これらを現状より更に効率よく運用することを考えると，対象とする機器の実負荷及び電池セルの実特性に基づき，最適な電池システムを構築する必要がある．

本報では，実機の負荷に最適なリチウムイオン二次電池 (以下，リチウムイオン電池と称す) システムを搭載することを目的として，まず負荷と電池とのマッチングを把握し，最適な電池構成と仕様を決定するためのシミュレーション技術を紹介する．次に，RTG やヤードシャーシなどの短時間の負荷変動に対応可能なハイレート仕様の大型電池でありながら，シンプルかつコンパクトな構成で港湾荷役機械に必要な耐環境性を実現する新規な電池モジュール (図 1 (b)) を紹介する．

## 2. 港湾荷役機械の電動化とハイブリッド化

### 2.1 港湾荷役機械に求められる電池システムの要件

アジアをはじめ世界的にコンテナ荷動き量は年々増加しており，これに対応するためコンテナヤードの新設や拡張により，港湾荷役機械の導入が盛んになっている．港湾荷役機械が増加する一方，地球温暖化防止のため二酸化炭素など温室効果ガス削減の要求の高まりや原油価格の高騰もあり，燃料使用量や運用コストを大幅に削減することが求められている．ヤード全体として荷役の効率化を行うこともさることながら，荷役機械 1 台当たりの燃料使用量を減らすことが，省エネ化に大きく寄与する．

港湾荷役機械の中では，ディーゼルエンジン発電機方式の RTG とヤードシャーシがコンテナヤードにおける燃料消費量のほとんどを占め，これら荷役機械の燃費を改善することが重要である．対策として，ヤードの新設や大規模改修と拡張の際には RTG ではなく陸電を利用する RMG (Rail Mounted Gantry Crane) を導入することで，燃料を使用しないことも可能となる<sup>1)</sup>．しかしながら，新規荷役機械の導入に際して，レール敷設等で運用中のコンテナヤード荷役を止められないため，電動式あるいはハイブリッド RTG が検討される．電動 RTG は燃料を使用しないクレーンであるが，陸電を利用するためヤードに給電設備やケーブルを設置する必要がある．一方，ハイブリッド RTG は，ディーゼルエンジン発電機と蓄電池を利用し，地上設備の変更が不要なため，

従来のエンジン方式からそのままリプレース可能である．エンジンを使用しているため燃料消費量がゼロにはならないが，大幅な燃費改善が可能である．

ハイブリッド式における大きな燃費改善を考えると，エンジン発電機の負荷あるいは負荷変動を小さくして，巻下げによる回生エネルギーも多く利用できるようにする必要がある．そのため，エネルギーを消費する場合と蓄積する場合の両方向ともに，多くの負荷を蓄電装置に担わせることとなる．クレーンの主要動作である巻上げと巻下げの際には，高出力かつ高速充電が必要なことから，蓄電装置として当初はキャパシタが用いられていたが，近年，性能が向上しコストも下がってきたリチウムイオン電池が多く用いられるようになってきた．

クレーン用のリチウムイオン電池に求められる性能は，頻繁な急速充放電と長寿命である．自動車用や定置型のものは普及しつつあるが，大型のリチウムイオン電池で急速充放電が可能なものはない．産業用途として一部対応しているものがある程度存在するが，クレーン用に最適化されたものではない．現在の荷役時間を維持するためには 15 C を超える充放電レートを有する電池システムが必要と考えられる．ここで，“C” は充放電レートの単位であり，1 C であれば 60 分間で充電または放電が完了する電流値を表し，15 C であれば 4 分で完了することを表す．

また，ヤードシャーシにおいても燃費改善の観点から，電動化あるいはハイブリッド化のメリットがある．重量物を積載して短距離走行で頻繁な加速と減速を行うという運行パターンであるため，電池にはクレーンと同様に頻繁な急速充放電性能が求められる．一般の電気自動車とは負荷が異なるが，できるだけコンパクトに搭載したいという要求があるため，高エネルギー密度が求められる．

以上のことより，クレーンやヤードシャーシなど港湾荷役機械の電動化とハイブリッド化に対しリチウムイオン電池を適用する場合，頻繁な急速充放電が可能な電池システムが必要となる．

### 2.2 リチウムイオン電池の特徴

リチウムイオン電池は，重量と容積の割に電池容量が大きいこと，ノート PC や携帯電話に広く用いられている．近年更に大容量化と高性能化が進み，自動車や産業用途にも普及してきた．

リチウムイオン電池の利点として，(1) 電圧が高い，(2) エネルギー密度が高い，(3) 自己放電が少ない，(4) メモリー効果がない，(5) サイクル寿命が長い，(6) 急速充放電が可能などが挙げられる．一方，欠点として，過充電と過放電に弱い (過充電：発熱と発火，過放電：著しい性能低下) ため，これを防止するための保護回路が必要となる．

リチウムイオン電池の構造と動作原理を図 2 に示す．リチウム遷移金属酸化物などの正極と黒鉛系炭素材料などの負極が，電解液をしみ込ませたセパレータを介して配置される．充放電は，正極材と負極材の間をリチウムイオンが移動することで行われる．充電の際はリチウムイオンが正極から負極へ移動し，放電の際はこの逆となる．

これを薄い層状にして複数積層し，ケースに収めることで

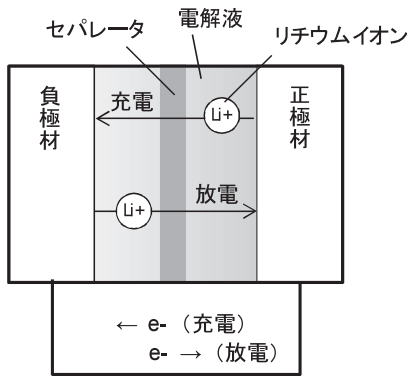


図2 リチウムイオン電池の動作原理  
Principle of Operation of Li-ion Battery

電池セルを構成する。電池セルの形状として円筒型、角型(缶)、ラミネート型があり、特性や用途により選択する。金属ケースを使用する円筒型の構造は、内外の力に強く製作も容易であるが、組電池(モジュール)化した際の体積効率が悪く放熱もしにくい。角型は比較的内外の力に強くモジュール化した際の体積効率が良いが、コストも高く重量も大きい。ラミネート型は比較的軽くて薄い、内外の力により変形しやすい。

リチウムイオン電池の材料は多種のものが、その組み合わせで特性も変わる。特に正極材は電池電圧や安全性、コストに大きく影響する。正極材にはコバルト系、マンガン系、ニッケル系、リン酸鉄系、三元系などがあり、エネルギー密度や電圧が高いコバルト系(LiCoO<sub>2</sub>)が多く使用されている。

しかし、原料のコバルトの資源的制約が大きいことや電池の安全性に対する要求が厳しいことなどから、その他の正極材も注目され開発が進んできた。例えば、リン酸鉄系(LiFePO<sub>4</sub>)の場合は、原料が豊富であり、熱的及び化学的安定性が良く安全性が高い。一方、電圧が低く導電性も低いが、導電性は微粒化などにより改善されている。

### 3. シミュレーションによる電池仕様の検討

#### 3.1 シミュレーションモデルの作成

港湾荷役機械を電動化あるいはハイブリッド化するにあたり、負荷と電池とのマッチングを把握し、最適な電池構成と仕様を決定する必要がある。ここでは、電池適用対象をRTG及びヤードシャーシとし、リチウムイオン電池システムの構成と仕様を検討するシミュレーションについて述べる。

シミュレーションによる電池仕様検討のフローを図3に示す。まず、電池システムに使用する電池の実特性と電池適用対象の実際の負荷特性を取得する。次に、汎用計算ツールを用いて、実特性及び電池制御ロジックを組み込んだ電池モデルと電池適用対象のモデル(物理モデルなど)を作成し、これらを組み合わせることでシミュレーションモデルを構築する。この際、電池モデルは、セルの直列数、並列数などある程度想定される電池構成としておく。

このモデルを用いて、対象に対し実際の負荷特性を示す動きをさせた実負荷シミュレーションを行い、電池の挙動(電

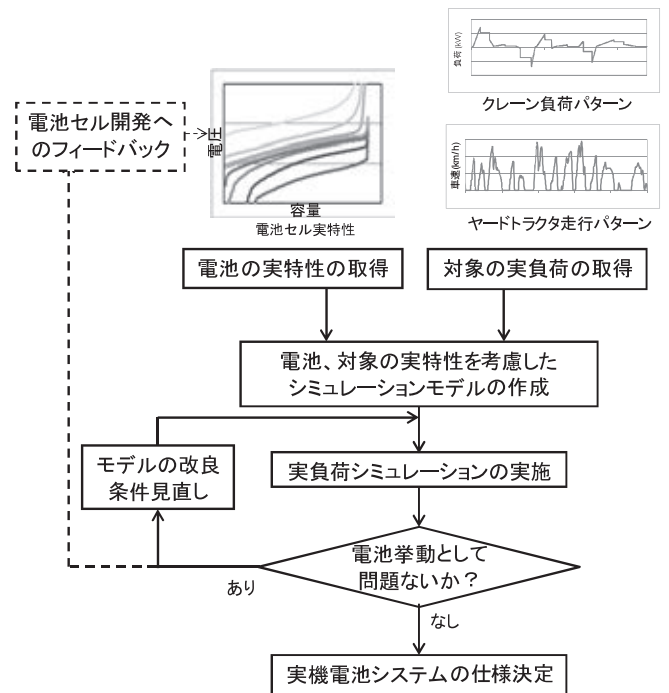


図3 シミュレーションによる電池仕様検討フロー  
Flow of the Battery Specification Study by Simulation

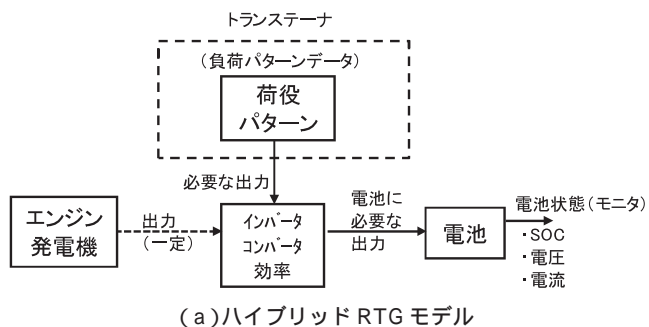
池電圧と電流の変化、インタロック動作の有無など)を確認する。

ここで、想定した電池構成で問題なければその電池システムの仕様が決まることができるが、そうでなければ、電池構成や動作条件など変更して再度シミュレーションを行う。例えば、大きな負荷がかかった際に電池電圧の低下が過大であれば、電池容量を増やしたり、高い充電状態(State of Charge: SOC)を維持するような動作を行うなどして対応する。また、電池セルの開発にも関与できるならば、セル開発にフィードバックすることでセルの特性からアプリケーションまで一貫して最適な電池システムの仕様を決定できる。

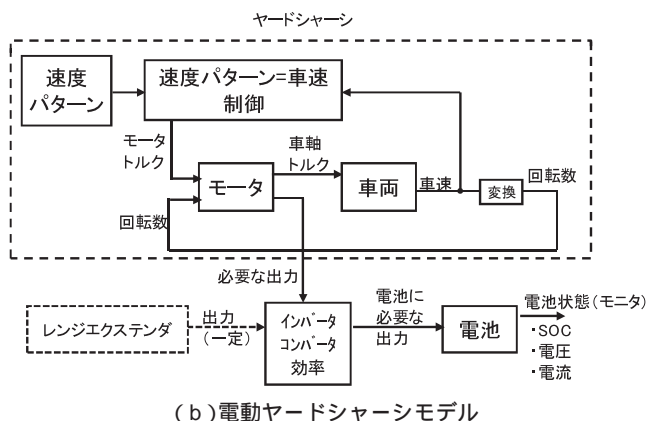
図4に、ハイブリッドRTG及び電動ヤードシャーシのシミュレーションモデルを示す。このうち電池部分は、図5に示すモデルを用いた。シミュレーションモデルは汎用数値計算ツールのMATLAB/Simulinkを用いて作成した。

電池モデルでは、電池に必要な出力(電池が担うべき出力)から、充放電効率を考慮しつつ、そのときのSOC、電流及び電池電圧を求める。セル電圧は、実際のセルの基礎特性(レート特性)を基にしたマップ(Lookup Table)を用いて、現在のSOCと電流値(若しくは充放電レート)と温度より求めている。物理モデルではないが、計算負荷が軽く、仕様検討するには問題ない精度であること、セルの基礎特性(レート特性)が充放電試験により比較的簡単に得られ、そのデータをそのまま利用できることから、このようなマップを用いることとした。このマップを中心に、セルの直列又は並列数設定、充放電制御、SOC計算、リミット判定のロジックを加えることで電池モデルを構成した。

ハイブリッドRTGでは、ある程度荷役パターン(負荷パ



(a)ハイブリッドRTGモデル



(b)電動ヤードシャーシモデル

図4 シミュレーションモデルの概要  
Simulation Models

ターン)が決まっており、図6に示す代表的な負荷パターンを用いることでRTGから電池に要求する出力を模擬できる。そこで、この負荷パターンをそのままモデルに用いることとした。これに電池や発電機などを組み合わせて、シミュレーションモデルを構成した。

電動ヤードシャーシでは、一般の自動車に比較して走行パターンは限定されるものの負荷は様々である。また、得られる実データも出力ではなく、車速データであることが多い。そのため、電動ヤードシャーシについては車両の物理モデルを作成し、これを車速データに当てはめて電池に要求する出力を求めた。この車両モデルに電池やレンジエクステンダ(オプション)を組み合わせて、シミュレーションモデルを構成した。

3.2 シミュレーション結果

3.1で作成したモデルを用いて、ハイブリッドRTGと電動ヤードシャーシについて電池適用シミュレーションを実施した。電池モデルにおけるセルの実特性は、4.2に示すリン酸鉄リチウムイオン電池の特性を使用した。

ハイブリッドRTGのシミュレーション条件及び結果を以下に示す。また、電池挙動(充放電レート、SOC及び電圧の変化)を図7に示す。

(シミュレーション条件)

- ・電池容量：16.7 kWh
- ・発電機出力：35.5 kW 一定  
(SOC50%前後で推移する出力)
- ・負荷：コンテナ荷役数 20 個 /h 相当

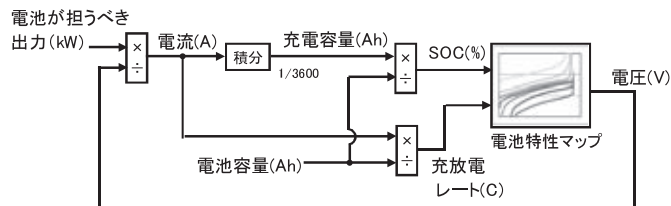


図5 電池モデルの詳細  
Battery Element Model

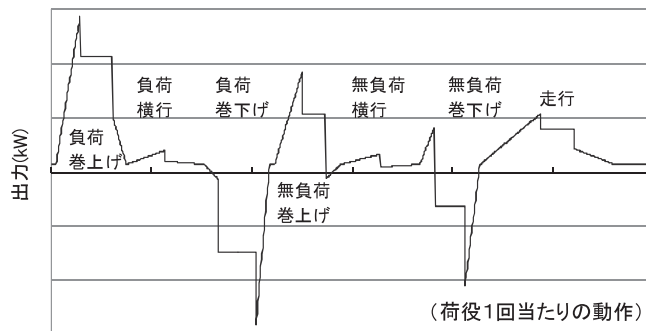


図6 RTGの代表的な負荷パターン  
Typical Load Pattern of RTG

(シミュレーション結果)

- ・充電側(巻下)の最大レート 15 C
- ・放電側(巻上)の最大レート 20 C
- ・セル当たりの電圧変化 2.5 ~ 3.5 V  
(使用可能範囲：2.0 ~ 4.0 V)

巻上げの瞬間に最もハイレートでの放電となるが、その際も電圧は問題ない範囲での変化となることが分かる。

次に、電動ヤードシャーシのシミュレーション条件及び結果を以下に示す。また、電池挙動(充放電レート、SOC及び電圧の変化)を図8に示す。

(シミュレーション条件)

- ・電池容量：44.5 kWh
- ・まず電池のみで駆動し、SOC20%以下でレンジエクステンダ(16 kW)を起動
- ・負荷：平均的な走行パターン(稼働時間、走行距離)及び平均的なコンテナ重量(実計測を基に推定)

(シミュレーション結果)

- ・充電側(回生)の最大レート 2 C
- ・放電側(加速)の最大レート 5.7 C
- ・セル当たりの電圧変化 2.3 ~ 3.3 V  
(使用可能範囲：2.0 ~ 4.0 V)

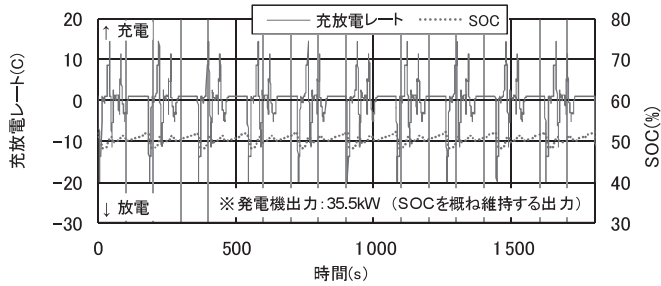
完全電動車とした場合には、途中で充電を行うような運用が必要となる場合も想定される。16 kW程度のレンジエクステンダを搭載すれば、連続稼働時間を延ばすことは可能である。

4. 電池システムの開発

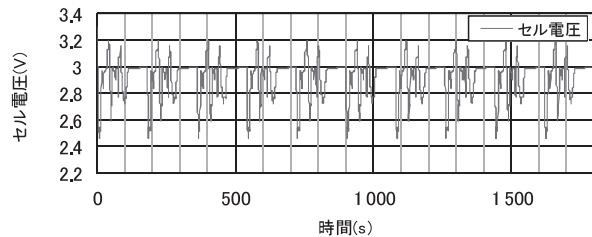
4.1 電池システムについて

電池を搭載するRTGやヤードシャーシなどの港湾荷役機



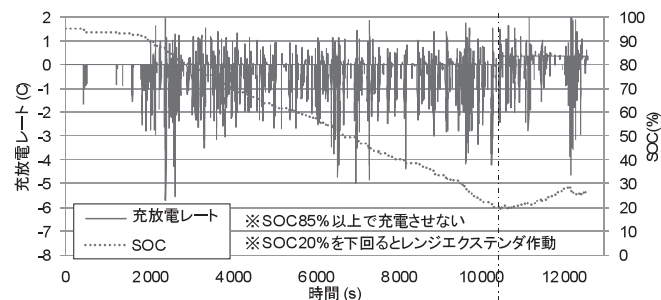


(a) 充放電レートとSOCの変化

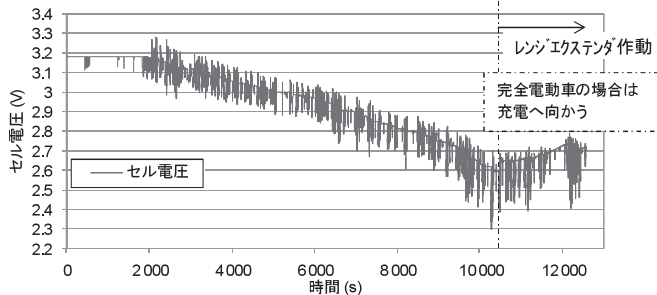


(b) セル電圧の変化

図7 ハイブリッドRTGのシミュレーション結果  
Simulation Result of Hybrid RTG



(a) 充放電レートとSOCの変化

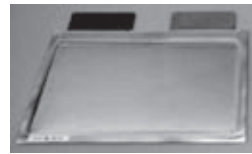


(b) セル電圧の変化

図8 電動ヤードシャーシのシミュレーション結果  
Simulation Result of Electric Yard Chassis

械では、高電圧かつ大電流の入出力がリチウムイオン電池に要求される。一般的に、このようなリチウムイオン電池は、複数の電池セルを接続した電池モジュールを多数連結し、電池の保護や制御を目的としたBMU (Battery Management Unit) と組み合わせた電池システムとして使用される。

また、電池システムとして、電池セル及び電池モジュールを使用する場合には、特性試験や安全性試験といった評価を行い、性能と安全性を担保することを要求される。



公称容量: 5Ah  
公称電圧: 2.9V  
外形寸法: W215 × D140 × t5.6mm  
重量 : 約250g

図9 開発したラミネートセル  
Developed Laminate Cell

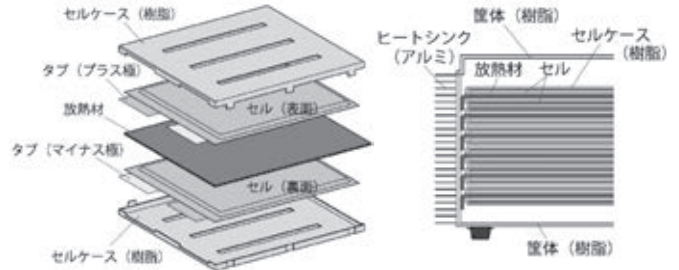


図10 モジュール構造  
Structure of Battery Module

以下に、本研究で開発した電池セル、電池モジュール及びBMUの特長並びに電池モジュールの評価について示す。

#### 4.2 電池セル

港湾荷役機械用に求められる急速充放電、長寿命及び安全性の三つの要件を満たし、正極にリン酸鉄リチウムを用いた電池セルを開発した。

本電池セルは、図9に示すようなラミネートセルである。サブミクロンサイズまで微粒子化した小粒径径のリン酸鉄リチウムを正極活物質に用い、また集電箔や電解液の添加剤を工夫することにより、電池セル単体で最大20C(3分で充放電が完了する電流値)の急速充放電を実現した。また、コンテナクレーン用途の1回荷役の高負荷パターンに相当する20Cで4秒、15Cで10秒(SOC47~53%)の充放電サイクルにおいて、25000サイクルで容量保持率95%以上の長寿命を実現した。さらに、安全性試験として、過充電試験、釘刺し試験を実施し、発火、破裂が無いことを確認し、電池セルの安全性が極めて高いことを確認した。

#### 4.3 電池モジュールの構造

港湾荷役機械用に求められる大出力の電池モジュールは、瞬間的に数百アンペアに及ぶ大電流で充放電することから、内部の電池セルは著しく発熱する。発熱による電池セルの温度上昇は、電池セルや、モジュールを構成する電子部品の劣化や故障などの原因となるため、大電流の充放電下における電池セルの発熱による温度上昇を抑制することが重要な課題となる。

また、本電池モジュールで用いるラミネートセルは、セル本体が薄く表面積が大きいことから一般的に放熱性には優れるが、強度的に弱く変形しやすい。したがって、モジュール化する上で必要な電池セルの固定方法が課題となる。また、タブリードは薄板状であるため接続が難しく、タブリードを

直並列する方法も課題となる。

さらに、港湾荷役機械における電池モジュールの使用環境では、電池モジュール内部の電池セルや電子部品を、塩分や塵埃などの侵入から保護することも課題となる。

これらの課題を解決するために、板状であるラミネートセルの形状を有効に利用して放熱し、かつ、セル固定の難しさを克服できるようにモジュール構造を工夫した(図10)。具体的には、難燃性と絶縁性を持つ放熱材をセル2枚で挟み込み、放熱材の一端をヒートシンクへ接触させ、電池セルから発生する熱を効率よく外部へ逃がす構造とした。本構造を採用することにより、塵埃の侵入を防ぐ密閉型でありながら、図11に示すように放熱材が無い場合に比べ、モジュール内部の上昇温度を最大30%程度抑制できる構造を完成した。また、図12に示すように、薄板状のタブリードをワンタッチで接続するパーツを工夫し、タブリードの接続を安全に、かつ容易にした。

4.4 BMU

電池システムにおいては、必要とする電圧、容量を実現するため、複数の電池セル(電池モジュール)を接続することが一般的である。BMUは、電池システムに内蔵され、充電や放電の適切な管理や異常状態を検出したり、電池システムを保護するといったシステムの安全を確保するための制御、監視を行う。本BMUは、図13に示すように制御ユニット、表示装置、充放電電流を測定する電流センサ、電池システムを保護するためのコンタクタ及び駆動電源から構成される。本BMUが持つ機能を表1に示す。

本BMUの特長は、高電圧、大電流を必要とするコンテナクレーンなどに対応するため、一つのBMUで最大20台の電池モジュールを監視、制御できる。また、隣接するBMU同士を連結する機能を持つことにより、監視、制御できる電池モジュールの数を増やすことを可能とし、大型電池システムにも柔軟に拡張できる。さらに、高電圧入力に対応したBMU駆動電源を持ち、電池モジュールから駆動電力の供給を可能とすることで、駆動電力を外部供給できない環境においても使用できる。

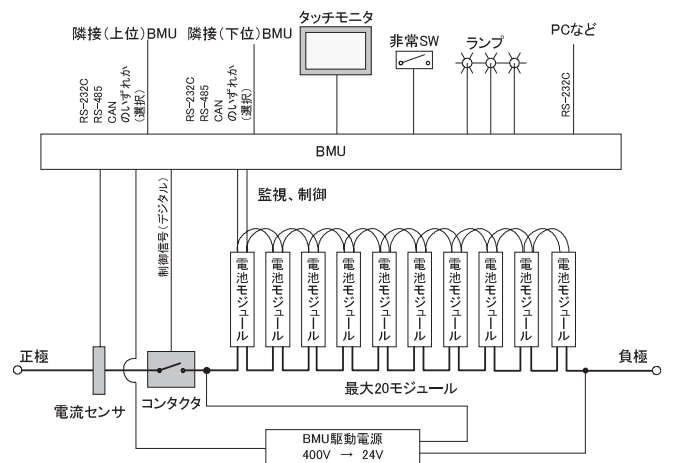


図13 電池システムの構成とBMU Configuration of Battery System and BMU

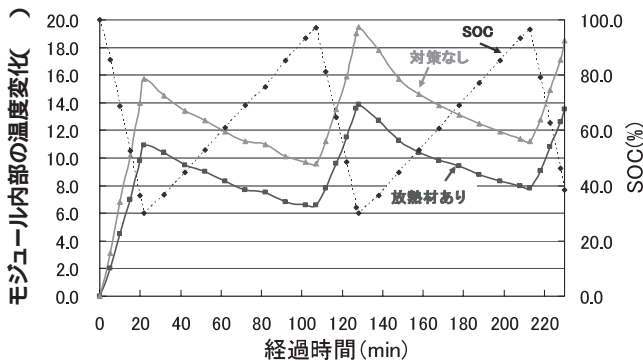


図11 モジュール内部の温度変化 Temperature Rise inside the Module

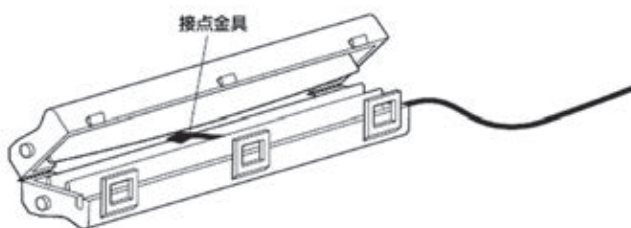


図12 薄板状タブリードの接続パーツ Connection Parts of Thin Plate Tab Lead

表1 BMUの機能 Functions of BMU

機能	概要
バッテリーシステム 総電圧の検出	各セルの電圧を検出し、システムの総電圧を計算する。
電流検出	システムへ入出力される電流を測定する。
セル温度の検出	セル、電池モジュール内部の温度を測定する。
SOCの推定	各セルの電圧などから電池残容量を推定する。
セル電圧の均等化	各セルの電圧を均等に揃える。
システムの保護	電圧や温度、電流から異常状態を検知し、警報を出力したり、電路の遮断を行う。
システムの故障診断	セルの電圧や温度からセルや電池モジュールの故障を検知したり、BMU自体の故障も検知する。
他制御機器との通信	セル、電池モジュールの状態や運転の状況など他制御機器と通信する。



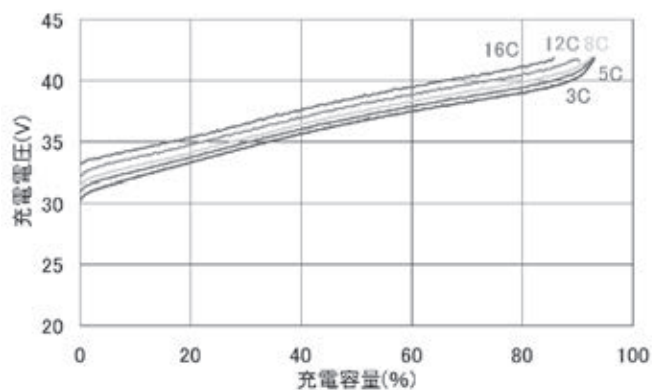


図 14 充電特性試験結果の一例  
Example of the Charge Characteristic Test Results

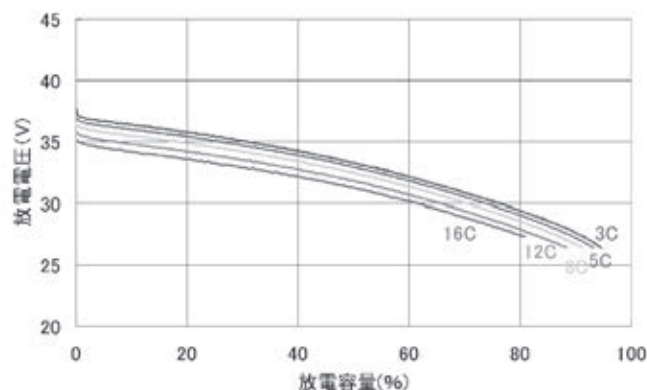


図 15 放電特性試験結果の一例  
Example of the Discharge Characteristic Test Results

#### 4.5 電池モジュールの評価

電池システムとしての性能と安全性を評価するために、充放電における特性試験及び安全性試験を実施した。

充放電の特性試験については、3C ~ 16C までの各充放電電流にて充放電を行い、終止電圧までに確保できる電池容量を調べた。結果を、図 14 と図 15 に示す。16C の急速充放電下でも容量 80% 以上という良好な充放電特性が得られた。また、16C での充放電において、電池モジュール内部の上昇温度は、最大で約 10℃ 以内となり、内部温度の上昇も十分に抑えられた。

安全性については、表 2 に示す国連勧告安全性試験 (UN Manual of Test and Criteria Part 38.3) に則って試験を行い、評価を行った<sup>2)</sup>。

#### 5. おわりに

港湾荷役機械の電動化とハイブリッド化について、電池と機械の負荷のマッチングをシミュレーションで確認しつつ電池システムの仕様を検討し、港湾荷役機械での使用に適した電池システムを開発した。今後、より大容量化した際の特性

表 2 国連勧告安全性試験  
UN Recommendations Safety Test

試験項目	主な内容	要求基準
T1 高度シミュレーション	11.6 kPa 以下, 6 h 以上 20 ± 5	質量減少 液漏れ
T2 温度	75 / - 40 , 6 h 以上保持 10 サイクル	ベント動作 破裂・発火なし
T3 振動	7 ~ 200 Hz ~ 7 Hz 15 分 × 12 回 3 軸	電圧 90% 以上
T4 衝撃	50 G 11 ms × 3 軸 × 正負向き	
T5 外部短絡	100 m 55 ± 2	
T6 圧壊	圧壊速度 15 mm/s 加圧 13 kN	170 を超えない 6 h 発火・破裂なし
T7 過充電	最大電流の 2 倍, 24 h	試験後 7 日間以内
T8 強制放電	最大放電電流, 定格容量	に破裂・発火なし

取得や実機規模での実証を目指す。そして、更に進むであろうリチウムイオン電池の種々の産業への応用に対応していきたい。

最後に、本電池システムの開発にあたり、エルクセル株式会社、株式会社電源設計及び早稲田大学理工学術院紙屋雄史研究室の関係者の方々から多大なるご支援とご協力を頂いたことに厚く感謝の意を表する。なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「リチウムイオン電池応用・実用化先端技術開発事業 (平成 24 年度から平成 26 年度)」において実施したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 栢菅 . 外 : 次世代型高能率自動化コンテナターミナルの開発, 三井造船技報, 209 (2013-7), p. 12
- 2) 松尾 . : リチウムイオン電池の安全性評価方法, 技術情報協会, (2011), p. 189

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 玉野技術開発センター  
TEL 0863 - 23 - 3021 宮田 淳也  
三井造船システム技研株式会社 電子ソリューション事業部  
TEL 0863 - 23 - 3480 桐野 睦



宮田 淳也



岡 浩司



桐野 睦



青山 直裕

# THS による過給機アシスト機能を有する 中速リーンバーンガスエンジンの動特性予測シミュレーション

梶谷 哲平\* 坂入 信之\*\* 辻 康之\* 岡 俊郎\*\*\*

## Dynamic Simulation of Lean-Burn Gas Engine with Supercharging Function by Turbo Hydraulic System

Teppei KAJITANI, Nobuyuki SAKAIRI, Yasuyuki TSUJI, Toshiro OKA

In the situation that environmental protection becomes more important, the development of emission reduction technologies for CO<sub>2</sub>, NOx and SOx has been conducted all over the world. Furthermore, the technology for highly efficient energy utilization is also desired from the point of fuel cost reduction.

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) has promoted the development of environment-friendly energy devices which meet these requirements. As one of such devices, the lean-burn gas engine with Turbo Hydraulic System (THS) has been developed so that it realizes the improvement in energy efficiency and dynamic behavior simultaneously.

In the development stage, MES has built and utilized the simulation system which can predict the dynamic behavior of the complicated whole engine system with THS. In this report, the outline of this simulation system and some results obtained by this simulation system are described. As one of typical simulation results, it became evident that the dynamic response time for rapid load change can be shortened by the supercharging function of the THS.

国際的な環境保全意識の高まりの中で、CO<sub>2</sub> や NOx と SOx の削減技術の開発が進められ、加えて経済的な観点から省エネルギー技術も重要性が高まっている。三井造船では、高効率ガスエンジンやその周辺機器における環境対応技術の開発を推進している。

リーンバーンガスエンジンの燃費向上と負荷応答性の改善を実現するために、油圧式排熱回収システム(Turbo Hydraulic System: THS)を用いることとした。エンジンシステムと THS を含めた複雑な系の挙動を予測するために、リーンバーンガスエンジンに THS を追加したエンジンシステム全体のシミュレーションモデルを構築し、負荷変動時のシステムの挙動を予測した。これより、THS が過給機を良好にアシストし、負荷変動に対する応答性改善効果が期待できることを示した。

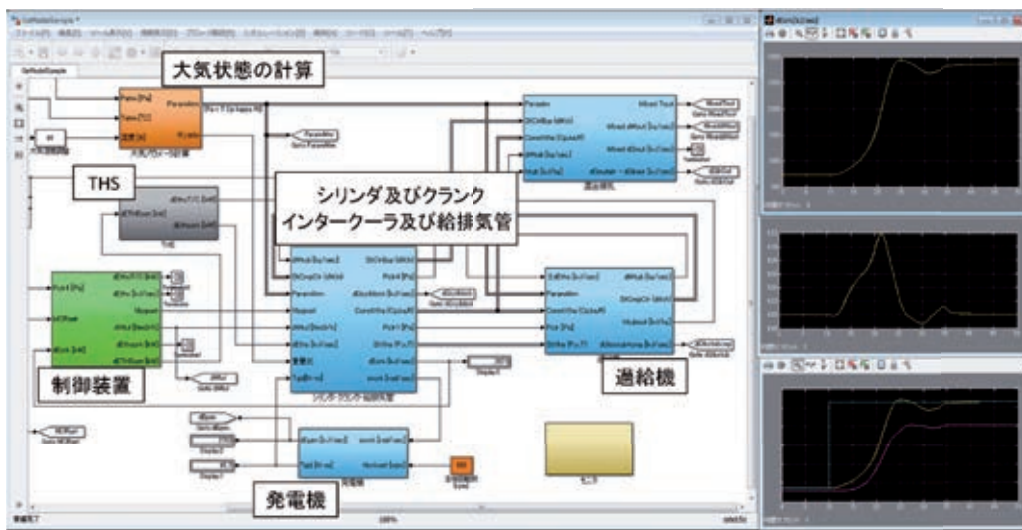


図1 動特性予測シミュレータの出力例

Sample of Engine Simulator Screen(Left Side is Window to Make Model of Engine, Right Side is Result of Simulation)

\* 技術開発本部 玉野技術開発センター

\*\*\* 機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部

\*\* 機械・システム事業本部 機械工場 ディーゼル設計部

## 1. はじめに

### 1.1 高効率ガスエンジンと環境対応技術

地球温暖化や酸性雨の防止など、近年の環境保全への国際的な取り組みの高まりに加え、東日本大震災後の電力供給への不安の高まりから従来型熱機関への期待が大きくなっている。中でも天然ガスを主燃料とするガスエンジンは、クリーンなエンジンとして注目されている。その特長として、石炭や石油に比べて燃焼時に大気汚染や酸性雨の原因となり得る硫黄酸化物( $\text{SO}_x$ )を発生せず、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )は60～80%、二酸化炭素( $\text{CO}_2$ )は20～40%排出量が少ないことが挙げられる。また、石油価格の高騰や北米でのシェールガス革命を背景に経済面からも導入のメリットが高まっている。

三井造船においても、ダイハツディーゼル株式会社と共同で高効率リーンバーンガスエンジン MD-G シリーズを国内コージェネ市場に投入し、その後も性能向上のための研究開発を進めている<sup>1)</sup>。一般的に、熱需要の少ない需要家は発電効率の高さを重視しているため、ガスエンジンコージェネレーションシステムは、この要求に適していると考えられる。また、ガスエンジンは主発電機としての運用もさることながら、非常用の発電装置や太陽光などの再生可能エネルギーを用いる電力の負荷変動をカバーするバッファ電源としての需要もあり、負荷追従性を向上させることによる利点は大きい。これまでに、当社では独自の技術として、船用大型低速ディーゼルエンジン向けに排気ガスのエネルギーを油圧動力として回収し、エンジンの軸動力として利用する油圧式排熱回収システム(Turbo Hydraulic System: THS)を開発した<sup>2)</sup>。このTHSを中速リーンバーンガスエンジンに応用し、発電効率と負荷追従性の向上を図ることとした。

また当社では、ディーゼルエンジンに過給機等の設備を付加した複雑なシステムで最適制御を行うために、シミュレーションモデルを構築して評価を行い、短期間での開発を目指している<sup>3)</sup>。シミュレーションモデルは、Mathworks社の汎用解析ツールMATLAB/Simulinkを用いて作成している。図1はこのモデルの一例である。MATLAB/Simulink環境では、動的なシミュレータをグラフィカルな環境で作成する

ことができ、直感的なプログラミングが可能となることが特長で、ブロック間の変数の受け渡しは同図の配線の接続関係で成り立つため、システムの構成を視覚的に理解することが容易である。

### 1.2 リーンバーンガスエンジンと動特性予測の必要性

リーンバーンガスエンジンは、理論空燃比より希薄側で燃焼させることによって、高出力化と $\text{NO}_x$ 排出量の低減を実現している。この希薄燃焼はその特性上、図2に示すように、空燃比がある一定範囲から外れると失火又はノッキングを引き起こす恐れがあるため、安定な燃焼を実現するためには空燃比を一定範囲に制御することが極めて重要となる。

シリンダに流入する空気量は給気圧力に依存するため、エンジンの出力を変動させる場合には給気圧力を適切な値に制御する必要があるが、給気圧力は過給機のタービン側で回収される排気ガスのエネルギー、すなわちエンジン出力の変動に大きく左右される。このことから、エンジンの出力変動に伴ったシステム全体の挙動は予測が難しく、更に過給機の特長や給排気管と配管の容積、THS等の有無など、エンジン周辺機器の仕様変更によっても大きく変化することが予想される。

### 1.3 シミュレータの特長とTHSを含むガスエンジン発電システムの動特性予測の実現

図1では、ガスエンジン発電システムのモデルはシリンダ、排気管、コンプレッサなど、主要な機能要素ごとに図1左側のブロック群のようにモジュールブロックとして作成した。各モジュールのパラメータを変更することで、多様な条件での動作シミュレーションに対応できる。シミュレーションの結果は、図1右側のように簡便にグラフ化して表わすことができる。

本例では、ガスエンジンにTHSを適用したシステムをベースに作成した。図1の左側中央部近くの灰色ブロックがTHSを示す。THSは、過給機余剰動力回収による燃費向上機能だけでなく、負荷変動時にはクランク軸を動力源として過給機回転をアシストする機能による負荷追従性向上も狙ったものである。エンジンの出力に最適な空燃比とするためには、給気圧力を目標出力に対応する値まで変化させる必要があるが、過給機のコンプレッサ動力はエンジン出力と共に変化する排気ガスのエネルギーに依存しているため、給気圧力の上昇速度には一定の限界がある。そこで、THSを応用してクランク軸の動力エネルギーの一部を過給機に利用し、給気圧を素早く上昇させることでエンジンの負荷追従性を向上させることができる。本シミュレーションモデルを用いてTHSを含むエンジンシステムの負荷変動時の動的な変化をシミュレーションすることで、実証試験前段階のシミュレーションによる動的な挙動の予測が可能となり、中速リーンバーンガスエンジン用THSの実証試験に用いる機器仕様に反映した。

## 2. エンジンシステムのモデル化

### 2.1 シミュレーションモデルの概要

本報で述べるガスエンジンのシミュレーションモデルは、当社のリーンバーンガスエンジン MD-G シリーズのう

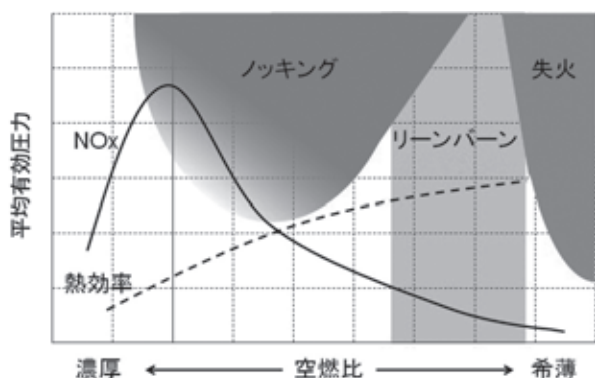


図2 空燃比 - 平均有効圧力と異常燃焼の関係  
Air-Fuel Ratio, Brake Mean Effective Pressure  
and Abnormal Combustion of Lean Burn Gas Engine



表1 リーンバーンガスエンジン 6MD36G の主要目  
Specifications of 6MD36G Engine

出力		2 800 kW
シリンダ	配列	直列
	数	6
	径	360 mm
ストローク		480 mm
回転数		600 min <sup>-1</sup>

表2 エンジンシステムモデルのモジュールと階層構造  
Construction of Function Modules

上位層	下位層
大気状態計算	水蒸気量計算
	大気パラメータ計算
制御装置	バイパスバルブ制御部
	燃料流量制御部
	THS 制御部
インタークーラ(I/C) 給気管	コンプレッサ出口・I/C 入口
	高温 I/C
	低温 I/C
	給気室・給気管
シリンダ	給排気容積・行程容積
	重量流量計算
	平均有効圧・燃焼・冷却
	排気パラメータ計算
クランク軸	回転速度計算
	クランク軸角度計算
排気管	
過給機	過給機ロータ
	コンプレッサ
	タービン
発電機	

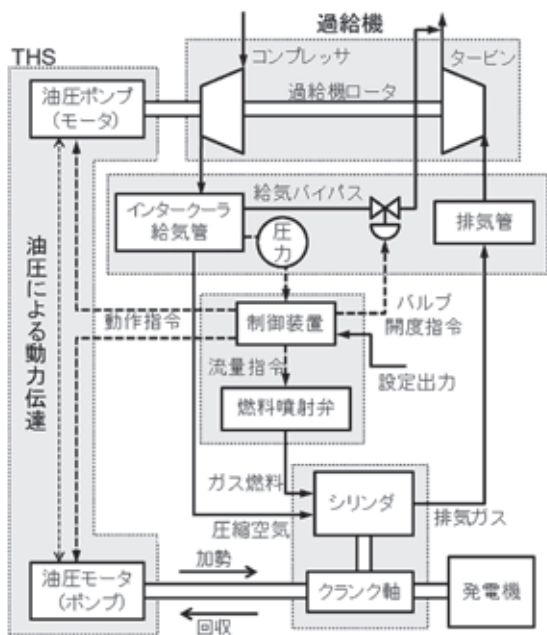


図3 エンジンシステムモデルの概要  
Schematic Diagram of Engine Simulator

ち 6MD36G をベースとして開発したものである。表 1 に 6MD36G の主要目を示す。このエンジンに、THS による油圧系のエネルギー移動を加えたシステム全体をモデル化した。図 3 に作成したエンジンシステムモデルの概要を示す。過給機(タービン、コンプレッサ)、給排気系、シリンダ、クランク軸、発電機などの主要な要素機器、給気圧力と燃料ガス噴射量の制御を行うための制御装置という基本構成に加え、油圧ポンプ、油圧モータなどで構成される油圧機器 (THS) を加えたモデルとした。モデルは 1.1 で述べた MATLAB/Simulink を用いて作成した。

2.2 モデルを構成するモジュールの構造と機能

エンジンシステムを構成する機能要素はモジュールとして機能ごとに独立した形で作成し、視覚的に構造の判別を容易にするとともに、同様の機能を持つ部分にモジュールを複製して利用できるようにした。表 2 に各モジュールの階層構造を示す。上位層は大きくエンジンを構成する機器ごとに分け、下位層は更に分割した機器、又は機器の機能ごとに分けている。

(1) 大気状態の計算

大気の状態(温度、圧力、相対湿度)を入力し、その値から単位体積当たりの大気に含まれる水蒸気量、比熱、気体定

数など、給気する気体の特性を計算した。

(2) 制御装置

実際のエンジンでは、給気圧力の他にも各部の温度、圧力、燃焼状態などをモニタリングしており、制御項目も燃料ガス流量、パイロット燃料の噴射量とタイミングをはじめ、複雑な制御を行っている。本報ではモデルの簡略化のため、センシング対象を給気圧力のみとし、制御対象を給気圧力と燃料ガス流量とした。エンジンの設定出力に対応した目標給気圧力を定め、給気バイパス弁操作による圧力制御と実給気圧力に合わせた燃料流量の制御を簡単な PID 制御にて行った。さらに、THS 稼働時には動力の回収量と加熱量の制御も行った。

(3) インタークーラ、給気管及び排気管

内部を流れる気体は理想気体として扱った。流入・流出する気体の重量流量と比エンタルピから、管内の気体の圧力と温度を計算した。外部との熱交換の発生を考慮したモデルとするため、インタークーラと給気管のモデルは大きく四つのブロックに分けて作成し、配管への熱損失やインタークーラ内でのジャケット水とクーラ水による冷却を計算した。

(4) シリンダ及びクランク軸

シリンダでは、給気空気量と燃料流量から、排気ガス量、排気ガス温度、クランク軸出力などを計算した。給気空気量は、シリンダ容量、給気圧力及び排気圧力の関数とした。メタンスリップ分を除いた燃料ガスは全て完全燃焼するものとし、燃焼後のシリンダ内の排気ガスは全て掃気され、残存はないものとした。燃焼による混合ガスの物性値の変化も計算しており、排気管以降の過程で用いる排気ガスの比熱等を再計算し、排気ガスの温度と圧力の導出や次項に示した過給機

モジュールにおけるタービンでの回収エネルギーの計算に用いた。

主軸回転数は、クランク軸出力と発電機による負荷トルクから求めた。THS 稼働時には、更に THS によるエネルギー収支を加えた計算を行った。

(5) 過給機

過給機モジュールは、タービン、コンプレッサ及び過給機ロータの3要素で構成されている。タービンは臨界ノズルとして扱い、気体流量を計算した。排気ガスから回収するエネルギーは、タービン通過前後の断熱変化により損失するエネルギー、タービン翼とガスの速度比から簡易的に導出する回収効率及びタービンの回転数を用いて求めた。コンプレッサのモデルには、実エンジンで使用している過給機のコンプレッサマップを参照用データ(Lookup Table)として組み込んだ。コンプレッサの体積流量と効率はこのデータを用いて求めた。タービンでの回収エネルギーとコンプレッサでの消費エネルギーから過給機回転軸のエネルギー収支を求め、タービン/コンプレッサ(以下、T/C と称す)軸の回転数を求めた。THS 稼働時には、更に THS によるエネルギー収支を加えた。

(6) 発電機

クランク軸に直結された発電機での発電電力は、負荷トルク、クランク軸回転数及び発電機効率から計算した。

(7) THS

制御器からの信号によって、T/C 軸からクランク軸への加勢、又はクランク軸から T/C 軸への加勢を行った。

3. シミュレーション結果

3.1 定常運転時のシミュレーション結果

ガスエンジンを一定出力で運転させたときの結果について、当社玉野事業所の実証試験機 6MD36G の運転で得られた計測値と作成したシミュレーションモデルの計算値の比較を表3に示す。エンジン出力の設定値は100%、75%及び50%の3パターンとし、各出力で定常状態の値を記録した。いずれの場合においても、計測値に対する計算値の差は±10%以下であり、静特性は良く一致していると言える。

3.2 THS による回収エネルギーの見積もり

THS による排気ガスからのエネルギー回収がどの程度可能なのを見積もるために、エンジン出力と THS によるエ

ネルギー回収量の関係をシミュレーションにより計算した。図4に、この結果を示す。計算では、本来給気圧力を制御する給気バイパス弁を全閉状態にし、THS によるエネルギー回収によって T/C 軸の回転数を抑え、給気圧力を制御させた。これより、各出力時の概略の回収エネルギーを見積もることができ、このデータを THS の仕様検討に用い、THS と過給機の連結部に必要な強度の見積もりを行った。

3.3 THS を含んだシステムの動特性予測

エンジンの出力を変化させるときの挙動の予測として、低出力での定常運転状態から出力を上昇させる場合のシミュレーションを行った。図5及び図6に、この結果を示す。シミュレーションでは、エンジン出力25%の定出力運転状態から出力を上昇させ、出力100%の定常運転に至るまでを計算した。

THS による T/C 軸加勢を行わない場合には、エンジン出力が40%以下の低出力運転時で、T/C 軸の回転数と給気圧力の上昇が非常に遅い。コンプレッサによる給気圧力の維持と上昇に使われるエネルギーは、タービンで回収される排気ガスのエネルギーのみである。しかし、低出力運転時では排気ガスの圧力の低さや流量の少なさ、コンプレッサとタービンの効率の低さから、回収できるエネルギー量が少なく、その大部分は給気圧力の維持に使用され、圧力上昇のために使用できるエネルギーが不足していると考えられる。エンジン出力の上昇と共に排気ガスの圧力上昇と流量増加が進み、エンジン出力が50%を上回る辺りから余剰エネルギーが増加し、給気圧力も素早く上昇している。

負荷上昇時に燃料供給量を最大5%増加させた場合には、

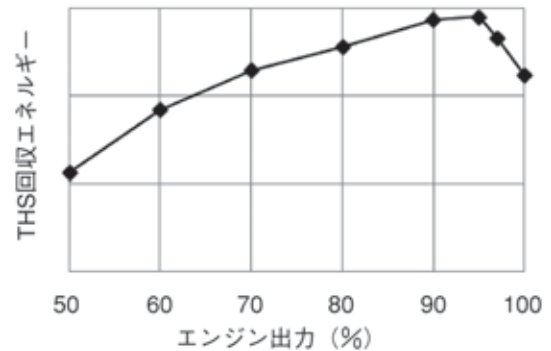


図4 エンジン出力と THS 回収エネルギーの関係  
Engine Power and Energy Recovery of THS

表3 一定出力運転時の実機運転結果とシミュレーション結果の比較  
Simulation Results and Test Operation Data

連続最大出力	100%		75%		50%	
	実機	計算	実機	計算	実機	計算
主機出力(kW)	2 760	2 764	2 070	2 132	1 380	1 373
主機回転数(min <sup>-1</sup> )	600	600	600	600	600	600
過給機回転数(*)	100	98.5	87.3	88.8	66.0	72.0
タービン入口温度(**)	-	- 3.6	-	- 0.7	-	+ 22.7
タービン出口温度(**)	-	- 21.7	-	- 22.8	-	+ 0.9

(\*)実機の出力100%時の値を100とした時の値である。

(\*\*)タービンの入口と出口の温度範囲は、入口で500~600 前後、出口で300~500 前後であり、本表には実機温度との差( )を示す。



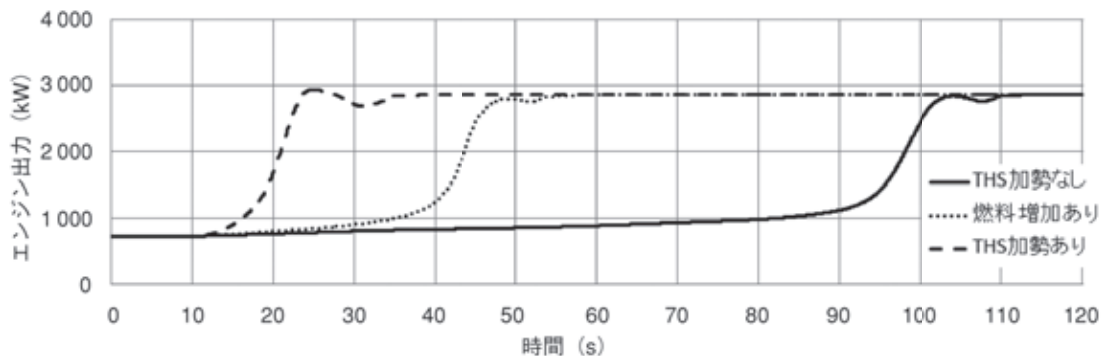


図5 エンジン出力の時間変化  
Simulation Results of Engine Power

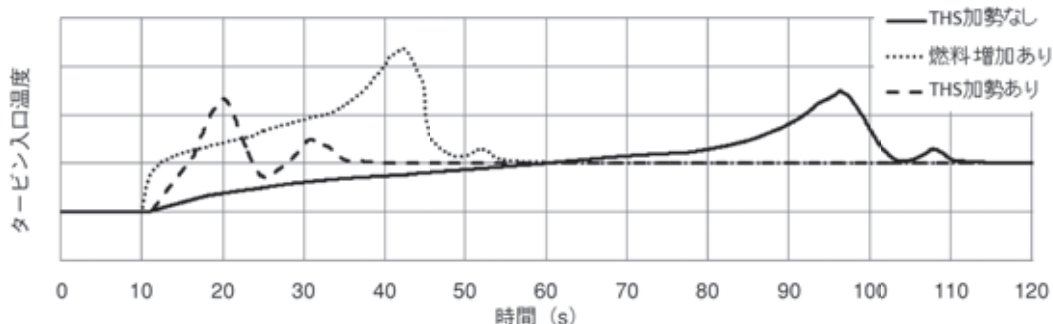


図6 排気ガスのタービン入口温度の時間変化  
Simulation Results of Exhaust Gas Temperature at Turbine Inlet

全体的に所要時間は短くなっているが、燃料を増加したために排気ガスの温度が大きく上昇していることが分かる。あまり急激な温度上昇や最高温度の上昇は、ピストン、シリンダライナなどの燃焼室部品に損傷を与える恐れがあり、空燃比が小さくなり過ぎるとノッキング等の発生が懸念される。

THSを利用して主軸から T/C 軸へ加勢を行った場合には、THS による加勢がない場合に比べて、100% に到達するまでの時間、特に低出力時の出力上昇に要する時間が大きく短縮できていることが確認できた。なお、T/C 軸への加勢エネルギー量は、そのときのエンジン主軸出力の最大 5% とした。これより、THS を介してエンジン出力の 5% 程度のエネルギーを加勢することで、十分な給気圧力の上昇効果が得られ、エンジン出力応答の改善が期待できることが分かった。

#### 4. おわりに

本報では、燃費改善効果と負荷追従性の向上を目的とした THS 付き中速リーンバーンガスエンジンを対象とし、MATLAB/Simulink による数値計算シミュレーションを報告した。本シミュレータを用いた計算から、実証試験前段階の THS を含むガスエンジンシステムの挙動予測が可能となった。この予測結果から、THS による T/C 軸への加勢がエンジンの負荷追従性の改善に有効であることが示され、エンジンシステム的设计にも寄与することができた。

今後は実証試験結果を用いて、シミュレータによる予測の評価を行い、計測結果との乖離について検討し、より精度の高いシミュレータの開発を進める所在である。

なお、本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業による補助を受けて実施したものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 近藤．外：高効率大型ガスエンジンを開発，三井造船技報，191(2007-6)，p. 19
- 2) 大田．外：船用低速ディーゼルエンジン用油圧式排熱回収システム(THS)の開発(第1報) - 構成と基本性能 - ，三井造船技報，205(2012-3)，p. 1
- 3) 辻．外：船用低速ディーゼルエンジンのシミュレーション技術の開発，三井造船技報，204(2011-10)，p.13

〔問い合わせ先〕

技術開発本部 玉野技術開発センター  
TEL 0863 - 23 - 3021 梶谷 哲平



梶谷 哲平 坂入 信之 辻 康之 岡 俊郎

# 太陽熱発電システム(第2報)

## - 蓄熱材の性能評価試験と蓄熱装置の設計手法 -

友保純直\* 須山達夫\*\* 佐藤康光\*\*\* 筒井伸幸\*

### Concentrated Solar Power(CSP)System(Report #2)

#### - Performance Test of Thermal Storage Material and Designing Method for Thermal Storage Facility -

Yoshitada TOMOYASU, Tatsuo SUYAMA, Yasumitsu SATO, Nobuyuki TSUTSUI

Solar power is an extremely important renewable energy, while it requires highly efficient thermal storage system that stores heat during fine weather and produces stable electricity on demand during cloudy weather and night time for its practical use. Solid thermal storage technology using high temperature air as a heat medium is one of the promising candidates for the thermal storage technology, which is being developed world wide.

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) currently works on the research and development of this solid thermal storage system. We carried out the CFD simulations to investigate the thermal storage characteristics on various heat storage materials. They were confirmed with a large sized thermal storage testing facility, which was constructed based on the CFD results. As a result of the tests, MES clarified its concept on selecting suitable material for CSP thermal storage, developed a method to calculate the performance of the material, and confirmed that it accords well with the test result. Furthermore, MES made a provisional design of the commercial scale thermal storage plant using the developed method and proved the feasibility of the solid thermal storage system for CSP.

太陽エネルギーは再生可能エネルギーとして極めて重要なエネルギーであるが、天候不良時や夜間などの時間帯でも、安定なエネルギー源として利用するためには、好天時の太陽熱を蓄熱して、必要に応じて、安定な電力として取り出せる高効率な蓄熱システム技術が必要である。この蓄熱技術の一つに、高温空気を熱輸送媒体とする固体蓄熱技術があり、世界的にその開発が進められている。

現在、三井造船では、この固体蓄熱システムの研究開発に取り組んでおり、各種の蓄熱材についてCFD(Computational Fluid Dynamics)解析を行い、その結果に基づいて大型試験設備を建設して蓄熱試験を行った。この結果に基づいて、太陽熱蓄熱に適合した蓄熱材選定の考え方を明らかにするとともに、選定した蓄熱材の蓄熱特性を計算するための計算手法を開発し、試験結果と良く一致することを確認した。また、この計算手法を用いて実用規模の蓄熱装置の試設計を行い、太陽熱発電施設において固体蓄熱装置の実現が可能であることを確認した。

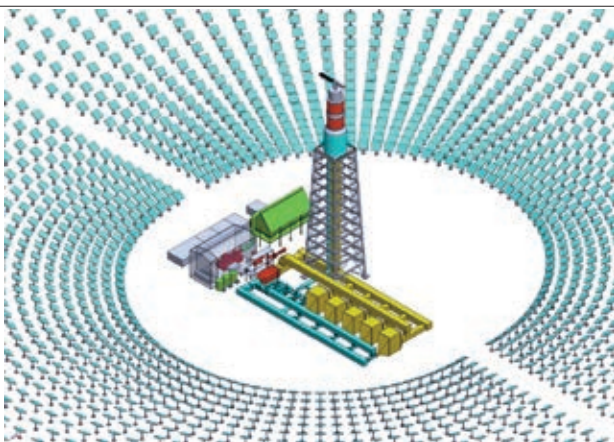


図1 タワー型 CSP の概念図  
CSP Conceptual View

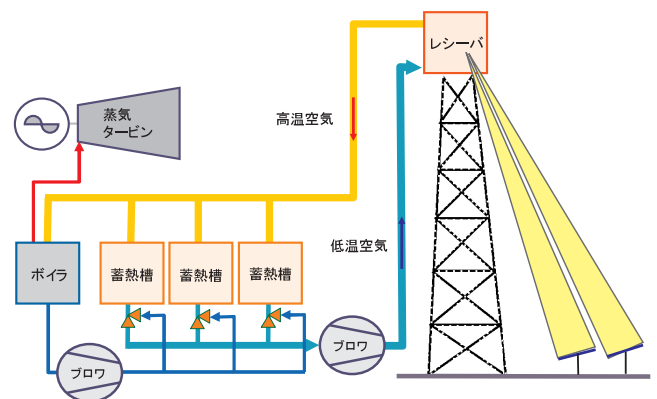


図2 固体蓄熱装置付き CSP のフロー  
CSP Conceptual Flow with Thermal Storage

\* エンジニアリング事業本部 玉野エンジニアリングセンター

\*\*\* エンジニアリング事業本部 企画管理部

\*\* 技術開発本部 基盤技術センター

## 1. はじめに

再生可能エネルギーの一つである太陽エネルギーの有効利用について、現在、世界的な規模で盛んに研究開発が進められている。

米国やスペインなどでは、他の再生可能エネルギーに比べて、発電の安定性に優れると言われている太陽熱発電 (Concentrated Solar Power : CSP) の導入が進んでいる<sup>1)</sup>。

三井造船では 2007 年以降、タワー型 CSP 技術の開発を進めてきており、ヘリオスタットを用いた集光試験で太陽光の熱変換評価技術を取得した<sup>2)</sup>。

しかし、CSP は出力が天候に支配されやすく、また、夜間のエネルギー供給が途絶えるという課題がある。この課題を解決するために、好天時に入射した熱エネルギーを蓄熱し、天候急変時の出力の安定化を図るとともに、夜間も発電することが可能となる蓄熱技術の開発が進められている。この蓄熱技術には、熱輸送媒体として熔融塩を用いた熔融塩蓄熱と、空気を用いた固体蓄熱の二つの大きな流れがある。前者では、250 MW クラスの蓄熱付発電設備が実用化されて稼働中である<sup>3)</sup>。しかし、熔融塩は常温では固化する性質があり、CSP のように環境条件が常時変化する場合には取り扱いが難しい。一方、空気を熱輸送媒体とするシステムはタワー型 CSP での採用が計画されているが、現段階では実証プラントが運転されているものの、本格的な実用プラントは未だ稼働していない<sup>4)</sup>。

当社は、空気を熱輸送媒体とする固体蓄熱システムの研究開発を行い、実用プラント規模の蓄熱設備の設計に必要な手法を開発した。具体的には、2012 年に蓄熱性能把握のため、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析の結果を基に試験装置を建設し、2 種類の蓄熱材のチェッカーブリック (以下、ブリックと称す) とセラミックハニカム (以下、ハニカムと称す) について蓄熱試験を行った。また、その試験条件に合わせた CFD 解析や理論計算を行い、それぞれの結果が一致することを確認した。ここで得られた設計ツールを用いて、5 MW クラスの発電設備を 6 時間稼働するために必要な蓄熱設備の試設計を行い、コンパクトで実現可能であることを確認した。

## 2. 空気を熱輸送媒体とする CSP の蓄熱システム概念

### 2.1 蓄熱システムにおける空気の流れ

当社では、空気を熱輸送媒体とする蓄熱装置付タワー型 CSP の開発を目指している。この基本概念の全体構成を図 1 に、また全体フローの概念図を図 2 に示す。

この蓄熱装置を備えた CSP 発電システムの運転プロセスを、図 3 及び以下の ~ に示す。

ヘリオスタットで集光された太陽エネルギーはレシーバ受熱面で熱エネルギーに変換されて、レシーバに供給される低温空気を加熱し、高温空気として取り出される。

高温空気は、熱回収ボイラと蓄熱装置に導かれ、一部は熱回収ボイラで高温高圧の蒸気の発生に使われ、残りは蓄熱装置の蓄熱に使われる。これを蓄熱運転と呼ぶ。

熱回収ボイラや蓄熱装置内で熱を放出した空気は低温空気となり、一部はレシーバに再循環され、再加熱される。

レシーバからの高温空気量が不足して所定の蒸気量を確保できないとき、あるいは夜間など高温空気が得られないときには、熱回収ボイラ出口の低温空気は蓄熱装置の低温側に導かれる。そして蓄熱装置内の高温蓄熱材によって再加熱され高温空気となって熱回収ボイラに導かれる。これを放熱運転と呼ぶ。

なお、実際のプラントでは蓄熱運転と放熱運転が共存する状況もあり得る。

### 2.2 蓄熱装置の設計に関する基本的なプロセス条件

蓄熱運転時の蓄熱媒体を充填した容器 (以下、蓄熱槽と称す) の入口空気温度は、常に一定値に制御される。この制御は、時々刻々変化するレシーバ入熱に応じて空気流量を調整することによって行われる。この温度は基本的には熱回収ボイラで高温蒸気を発生するために必要な値に設定されるが、レシーバにおける放熱損失の低減やレシーバ材質の保護の観点から極力低い温度であることが望ましい。

一方、放熱運転では、必要電力負荷に応じて熱回収ボイラを通過する空気流量が制御される。すなわち、蓄熱装置の運転状態は、そのときのレシーバ入熱や必要負荷に応じて蓄熱運転や放熱運転に切り替わる。

蓄熱運転では、蓄熱槽出口空気温度は運転時間の経過とともに上昇する。この空気はレシーバに再循環されるため、レシーバ入口温度の許容上限温度以下でなければならない。

また、放熱運転では、蓄熱槽出口空気温度は時間の経過とともに下降するが、この温度はボイラの蒸気温度を確保するために必要な温度以上でなければならない。すなわち、蓄熱運転と放熱運転の両方で蓄熱槽出口温度の許容変化幅が規定される。

さらに、蓄熱槽中の蓄熱媒体 (以下、蓄熱層と称す) の容量を決定するための要因として蓄熱時間と放熱時間がある。蓄熱時間は一日の日照時間に応じて決まる値であり、放熱時間は太陽光入射のない間の放熱運転が可能な時間として決まる値である。

また、蓄熱装置では運転動力低減のために、圧力損失を極力低く抑える必要がある。

以上のことより、蓄熱装置の設計に関する基本的なプロセス条件は、蓄熱運転及び放熱運転のそれぞれにおける空気流量、蓄熱槽入口及び出口空気温度と、槽出口温度変化の許容幅及

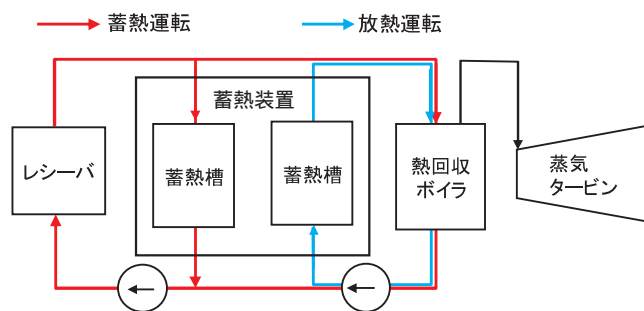


図 3 蓄熱運転及び放熱運転フローの概念図  
Air Flow Concept of Charging and Discharging Process



び最大許容圧力損失などによって決まる。これらの条件のうち、温度に関する代表的な設計条件を図4に示す。

### 2.3 蓄熱装置の性能に関する影響因子

実際の蓄熱装置の設計においては、2.2に記載の諸条件を満足することは必須であるが、この他に、性能に関する影響因子として、蓄熱材の蓄熱特性の把握が必要である。また、実用プラント設計において蓄熱材を評価する際に重要な因子は、蓄熱材のコスト、蓄熱材によって決まる蓄熱層の容積や重量、蓄熱材の熱的安定性、据付工事等における取り扱いの容易さなどが上げられる。すなわち、蓄熱装置の総コストと寿命が評価の対象となる。

## 3. 蓄熱材の性能評価試験装置

### 3.1 蓄熱試験の目的

性能評価試験は各種の蓄熱材の特性を把握し、蓄熱装置の設計手法を確立すること、適切な蓄熱材を選定すること、蓄熱設備の運転や設備のコストに与える影響を把握することなどを目的として実施した。

### 3.2 蓄熱材の選定

CSP用固体蓄熱材として用いられる材料は砂利等の天然物、各種レンガ類、セラミックボール類、ハニカム類、セラミック充填物、金属片充填物など多岐にわたるが、参考文献<sup>5)</sup>なども調査した上で、蓄熱材として使用実績のあるブリックとハニカム(写真1)の2種類の蓄熱材を選び、性能確認試験を実施した。

ここで選んだブリックは製鉄高炉熱風炉用として多くの実

績に裏付けられた蓄熱材であり、ハニカムはRTO(Regenerative Thermal Oxidizer)用蓄熱材として多く用いられているものである。

### 3.3 試験装置及び試験条件

蓄熱試験は、図4に示すCSP実用プラントの蓄熱装置の温度条件に近い条件で行うため、写真2の試験装置を使って実施した。このための蓄熱槽の大きさ等は、実用プラントに近い結果を得るという観点から決めた。

蓄熱材としてブリックやハニカムを用いた場合に、所定の温度条件を実現するために必要な試験装置の設備規模、蓄熱・放熱時の空気流量、試験時間などをCFD解析で予測した。ここで採用したCFD解析手法については5.1で述べる。

試験装置の全体フローを図5に示す。蓄熱運転時の高温空気は、灯油を燃料とする熱風発生炉によって650の温度まで昇温した高温流体で代替した。また、放熱運転時の低温流体は、常温に近い外気空気をを用いた。

蓄熱層内流体の偏流を抑えるために、蓄熱運転時の高温流体は蓄熱槽上部から下部に向かって流れ、放熱運転時の低温流体は、蓄熱槽下部から上部に向かって流れるように配置し、更に蓄熱層の入口部と出口部に偏流防止用の抵抗体を設置した。本試験で実施したブリックとハニカムに関する試験条件を表1に示す。蓄熱・放熱運転時の空塔速度は原則として

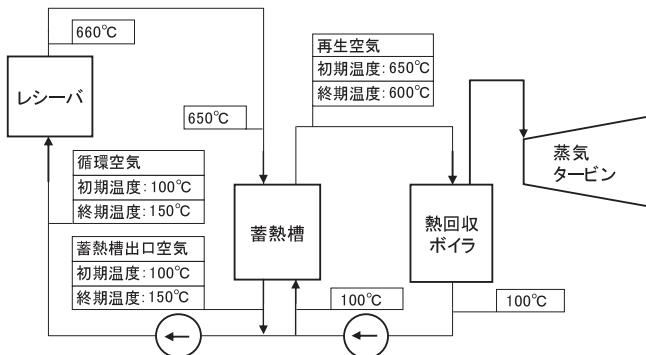
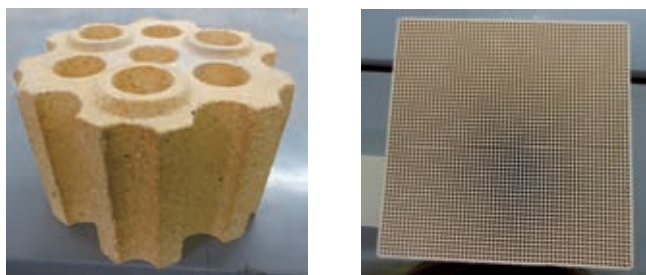


図4 蓄熱槽周りの空気温度設計条件  
Air Temperature Condition around Thermal Storage



写真2 蓄熱試験装置の外観  
Thermal Storage Test Facility



(a)チェッカーブリック (b)セラミックハニカム

写真1 蓄熱材の外観  
Thermal Storage Materials used for the Tests

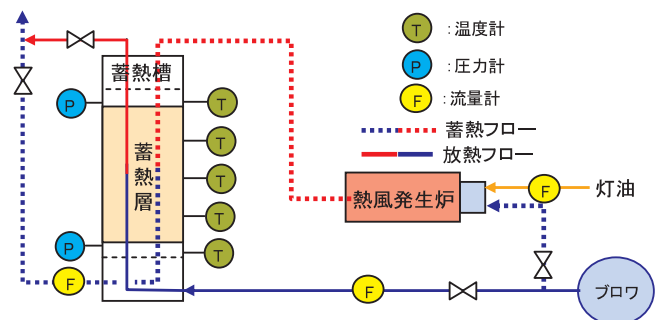


図5 蓄熱試験装置フロー  
Schematic Flow of Test Facility

表1 試験条件  
Test Conditions

項目	ブリック	ハニカム
空気空塔速度(Nm/s)	0.16	0.18
空気温度		
蓄熱時入口( )	650	650
蓄熱時出口( )	150 以下	150 以下
放熱時入口( )	常温	常温
放熱時出口( )	570 以上	570 以上

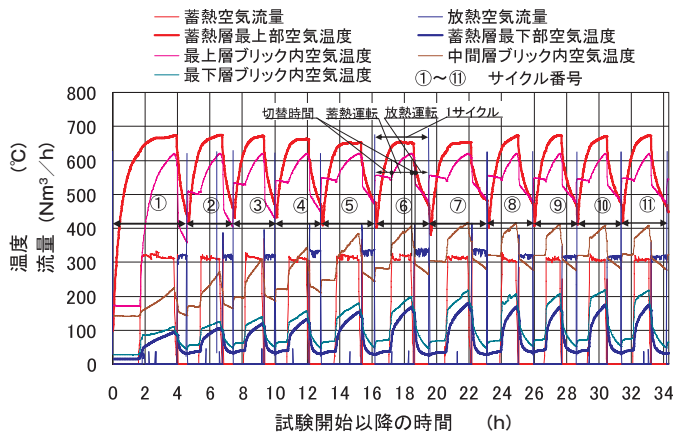


図6 ブリック試験時の空気温度と空気流量の変化  
Temperature Change of Checker Brick during Test

同一とした。

空気流量の計測はサーマル式流量計を用いた。また、空気温度及び固体温度の測定は熱電対を用いた。その測定位置は、蓄熱層入口部、出口部及び中間部とし、各断面において断面中央部と蓄熱層壁面近傍の位置とした。

#### 4. 試験方法と試験結果及び考察

##### 4.1 試験方法

表1に示す条件を目標条件として設定した。蓄熱・放熱の繰り返し時の温度変化のパターンがほぼ同一パターンを示すようになった時点を静定状態とみなして、各条件における試験を終了した。結果的に、蓄熱・放熱時の蓄熱層出口は表1の条件を越えることとなったが、これは成り行きとした。

##### 4.2 ブリックの試験結果

ブリック試験の測定結果の一例を図6に示す。図中の丸付き数値は蓄熱と放熱の繰り返しサイクル番号を示している。蓄熱層最上部空気温度は、蓄熱運転時には蓄熱空気の入口温度を、放熱運転時には放熱空気の出口温度を示す。蓄熱層最下部空気温度はこれの逆となる。

初回の蓄熱運転では蓄熱体の温度が常温であるため、この熱容量分の昇温のために蓄熱時間が長くなっているが、回を重ねるにつれて蓄熱時間が短くなり、蓄熱時間と放熱時間の長さが近づいている。蓄熱時の入口空気温度を一定としても、蓄熱層中間部及び最下部空気温度は運転サイクルの繰り返しによって徐々に上昇し、最終的には一定値に静定している。

10 サイクル程度繰り返し後、蓄熱・放熱の時間と温度パ

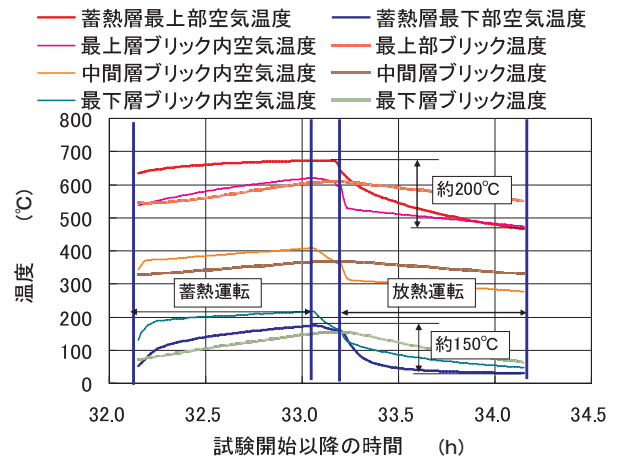


図7 運転モードによる空気温度とブリック温度の変化の詳細  
Detail of Air and Solid Temperature under Charge and Discharge

ターンがほぼ等しくなった時点で静定したとみなした。

図6の サイクル目の流体温度とブリック温度の時間変化に注目し拡大したものを図7に示す。ブリックでは伝熱特性上、流体と固体温度の温度差が大きくなり、その結果として、蓄熱槽入口及び出口における流体温度の最大温度差が150～200程度にもなっている。詳細は4.4で述べるが、この温度差が大きいということは、レシーバや熱回収ボイラを対象とする蓄熱材としては極めて不適切である。

##### 4.3 ハニカムの試験結果

ハニカムの試験結果を図8に示す。ハニカムでは3回の蓄熱・放熱の繰り返しで、ほぼ静定状態に達したとみなして試験を終了した。静定状態に達するまでの繰り返し回数の違いは、ブリックとハニカムの蓄熱特性の違いによるものである。

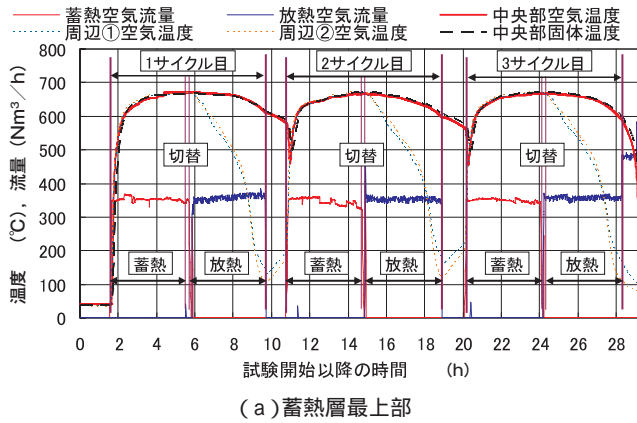
また、図8から明らかなように、ハニカムの場合、流体温度と固体温度の差が非常に小さいということが特徴であり、これが両者の蓄熱特性の違いをもたらす原因の一つである。

図8において、蓄熱時と放熱時で温度変化のパターンが中央断面位置と周辺位置(壁に近い位置)で異なる。これは蓄熱層断面を通過する流体の偏流の発生状況が、蓄熱時と放熱時には異なることが原因であると推定している。

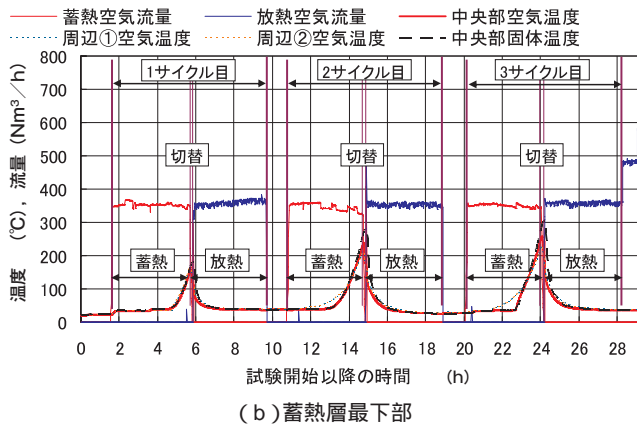
図8(b)の最下段面部の温度は蓄熱運転時の蓄熱層出口流体温度の変化を示しているが、目標温度150を大幅を超えて、さらに第2回目、第3回目と徐々に高くなっている。これは、所定の空気流量に対して蓄熱時間が若干長過ぎたことによる。蓄熱時間の調整によって、目標温度以内に保持することは可能である。

図9に蓄熱層内各高さ位置における放熱開始から放熱終了の間のハニカム温度変化の測定値を示す。比較のためにブリックの場合について、放熱開始から放熱終了の間の固体温度の変化を図9に併せて示す。ブリックでは同一高さにおける温度の変化幅は小さいのに比べて、ハニカムでは温度変化の幅が大きく、多くの部分で蓄熱・放熱の入口温度の全温度範囲で変化している。蓄熱量はこの温度差と蓄熱材の熱容量の積によって決まるが、温度変化幅が大きいことは少量の蓄熱材で多くの熱を蓄熱することができることを意味している。





(a)蓄熱層最上部



(b)蓄熱層最下部

図8 ハニカム試験時の空気及び固体温度と空気流量の変化  
Temperature Change of Honeycomb Ceramics during Test

また、本試験で得たハニカム層の圧力損失の測定結果を図10に示す。蓄熱層内空気温度分布が時間とともに変化するため、空気流量は一定でも圧力損失は変化する。

#### 4.4 ブリックとハニカムの蓄熱特性の評価

ハニカムでは固体温度と流体温度の温度差が非常に小さいのに対し、ブリックでは図7に示したようにこの差が大きい。

放熱終了時の熱回収ボイラ入口流体温度を所定の温度以上に保持するという蓄熱装置の必須条件を満たすためには、ブリックではハニカムに比べて、蓄熱時の入口流体温度を大幅に高く設定する必要がある。例えば図7の例では、蓄熱時の蓄熱層入口流体温度の最高値と放熱時の蓄熱層出口の流体温度の最低値の差は200程度もあるため、その差だけ蓄熱層入口の蓄熱流体温度を高くしなければならない。

これは、レシーバの運転温度をそれだけ高温側に設定する必要があることを意味している。その結果、レシーバの受熱面温度が高くなり、放熱損失を大幅に増加させ、更にレシーバを構成する材料はより高い耐熱性が要求される。

以上のことから、本試験に用いたハニカムはブリックに比べて蓄熱特性が大幅に優れていると言える。

### 5. 蓄熱材の蓄熱性能の計算方法

#### 5.1 CFDによる計算法

蓄熱試験装置の計画にあたって、蓄熱層の必要な大きさ、圧力損失などを決めるために、まずブリックやハニカムの蓄

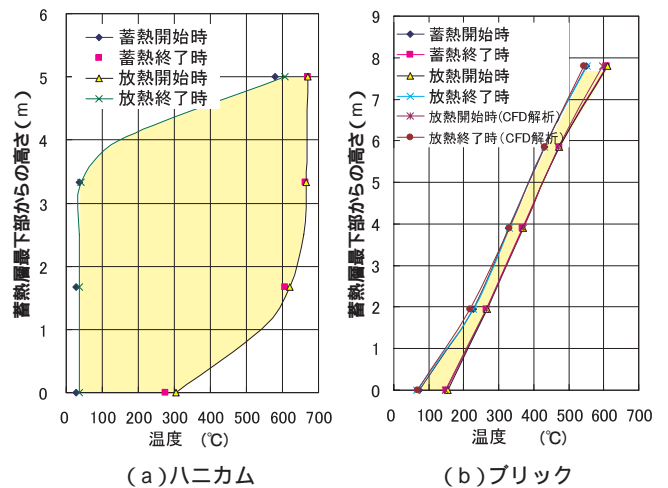


図9 放熱開始時から終了時までの固体温度の変化  
Solid Temperature Distribution at Start-up and Stop

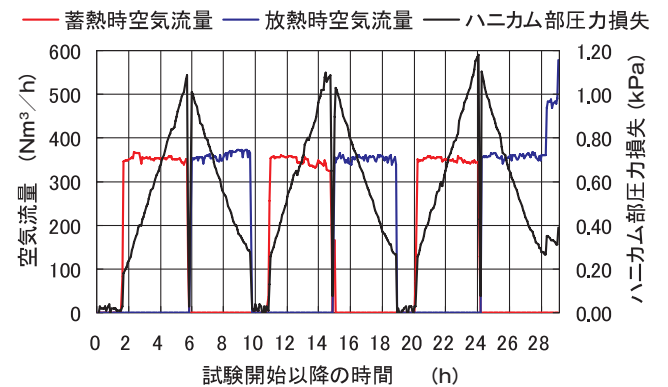


図10 ハニカム蓄熱層の圧力損失の変化  
Pressure Difference Change of Honeycomb Layer during Test

熱特性についてCFD解析を行った。

解析では、内部流路を流れる空気の流れと熱対流、熱伝導及び固体領域の熱伝導を考慮した。作動流体の密度は理想気体の状態方程式に従うとし、CFD解析は汎用熱流動解析コードとしてFLUENTを用いて非定常解析を行った。

#### 5.2 蓄熱理論式の近似解による計算法

CSP用蓄熱装置の基本設計を行う際には、最適化の検討や、日照時間や入熱変動などの運転条件を考慮した検討のために、短時間に多くのケーススタディーを行う必要がある。しかし、CFD解析では計算時間等の制約があることから、伝熱理論に基づいた計算手法を導き出した。なお、4.4の蓄熱特性の評価結果より、解析の対象はハニカムのみとした。

ハニカムの計算モデルとして図11に示す微小区間について式(1)の非定常伝熱の基礎式を考える。蓄熱槽内の空気の熱容量は、ハニカムに比べて十分小さいので無視する。

ハニカムの壁厚さ $L$ は、考慮する蓄熱時間に対して十分に薄いため厚さ方向の温度は均一であるとする。なお、多くの文献によれば、ピオー数( $Bi = L/\delta$ )が0.1以下であれば計算誤差は5%以下であり、試験に用いたハニカムのピオー数は0.09前後であるため、本仮定は妥当と考えられる。

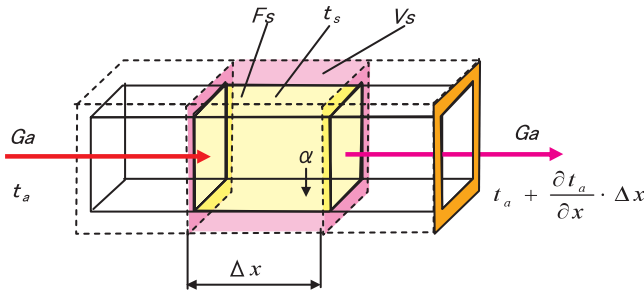


図11 ハニカム層の蓄熱計算モデル  
Calculation Model for Thermal Storage on Honeycomb

$$Cp_s \cdot \rho_s \cdot \frac{t_s}{h} = \rho_s \cdot \frac{2t_s}{x^2} \cdot \frac{F_s}{V_s} \cdot (t_s - t_a) \dots\dots(1)$$

式(1)の右辺第1項はハニカム長手方向の隣り合う  $x$  区間の熱移動を考慮した計算項であるが、ハニカムでは  $\frac{F_s}{V_s}$  に比べて十分に小さい ( $< 1/1000$ ) ため、この項を無視すると式(2)となる。

$$Cp_s \cdot \rho_s \cdot V_s \cdot \frac{t_s}{h} = F_s \cdot (t_a - t_s) \dots\dots(2)$$

さらに、 $x$  区間の空気側の熱バランスから式(3)が得られる。

$$Cp_a \cdot Ga \cdot \frac{t_a}{x} = F_s \cdot (t_a - t_s) \dots\dots(3)$$

- ここに、 $Cp_s$  : ハニカム比熱 (J/gK),
- $\rho_s$  : ハニカム密度 (g/m<sup>3</sup>),
- $V_s$  : ハニカム体積 (m<sup>3</sup>/m),
- $h$  : 熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>K),
- $F_s$  : ハニカム伝熱面積 (m<sup>2</sup>/m),
- $x$  : ハニカム高さ (m),
- $h$  : 経過時間 (s),
- $t_a$  : 空気温度 (K),
- $t_s$  : ハニカム温度 (K),
- $\alpha$  : ハニカム熱伝導率 (W/mK),
- $Cp_a$  : 空気比熱 (J/gK),
- $G_a$  : 空気流量 (g/s)

である。

式(2)及び式(3)の連立微分方程式に差分法を適用することにより、微小区間  $x$  及び微小時間  $h$  経過後の  $t_a$  と  $t_s$  の値を求めることができる。

本計算式中の熱伝達率及び圧力損失は、蓄熱層内の空気流れが十分に発達した層流であるとして求めた。

この方法によれば、入射熱量が時間によって変化する場合の  $h$  経過後の空気流量の変化や、空気や固体の温度変化時の物性値の変化も考慮することができる。

6. 試験結果と計算結果の比較による計算方法の検証

ハニカムについて、蓄熱層高さ方向の流体と固体温度分布に関する試験値とCFD解析値及び伝熱理論に基づいた計算

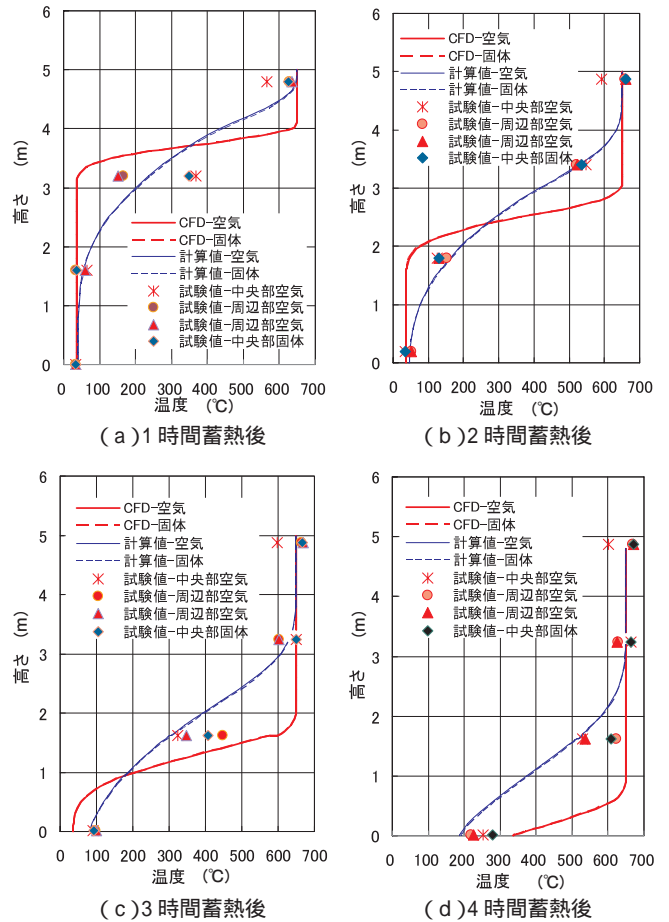


図12 ハニカム層の空気及び固体の温度分布に関する試験値、CFD解析値及び理論計算値の比較  
Comparison between Experimental Data, CFD Data and Calculation Data on Honeycomb Layer Temperature

値(以下、理論計算値と称す)を比較した一例を図12に示す。このうち周辺部の空気温度については、場所の異なる2点について測定を行なった。

図から明らかなように、空気温度と固体温度の差はほとんど無く、CFD解析値と理論計算値は、若干の傾向の違いはあるが、いずれも試験値と良い相関を示している。

また、図10に示した圧力損失についても、同じ条件で求めた圧力損失の理論計算結果を図13に示す。図10と図13を比較してみると、圧力損失についても試験値と計算値はよく一致している。

以上より、5.2で導いた計算方法は妥当な結果を与えると言える。したがって、本計算方法を用いて実機プラント用蓄熱層の設計が可能であると判断した。

7. 実用規模のCSP用蓄熱装置の試設計

5.2で求めた理論計算手法を用いて、発電出力5MWで6時間連続運転を可能とするための蓄熱装置を試設計した。

発電出力を5MW一定とするための熱回収ボイラの入口空気の温度条件は図4に示す値とした。このときの必要空気流量は、ボイラや蒸気タービン発電機の設計条件によって変わってくるが、ここでは放熱運転時の運転時間は6時間と

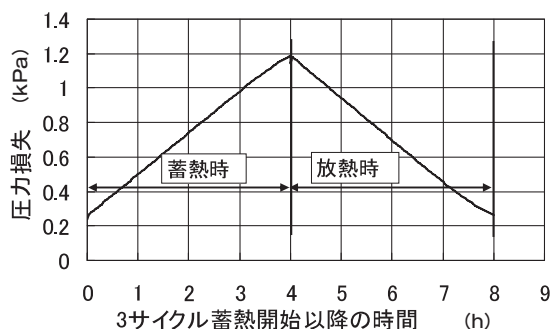


図13 ハニカム蓄熱層の圧力損失に関する理論計算結果  
Calculation Results on Pressure Drop in Honeycomb Layer

し、必要空気流量を 140 000 kg/h とした。

蓄熱運転時には、実際の設備では地域、季節、時刻、天候などによって、日照時間や DNI (Direct Normal Irradiation) が変化するため、蓄熱装置入口の空気流量は時々刻々変化する。5.2 の計算法では、この変化の状況を入力することによって蓄熱状況を把握することが可能である。

ここでは簡略化のために、蓄熱時間もほぼ 6 時間とし、空気流量は放熱時の空気流量と同じ 140 000 kg/h で一定として必要蓄熱層サイズを求めた。

実際のプラントでは蓄熱時の空気流量の変化に対応しやすくすること、装置の圧力損失をできるだけ小さくすることなどを考慮して、蓄熱槽を 4 槽に分割し、1 槽当たりの空気流量を 70 000 kg/h、蓄熱・放熱の各時間を 3 時間とした。また、各蓄熱層の許容圧力損失を 2 kPa 以下という条件で計算した。

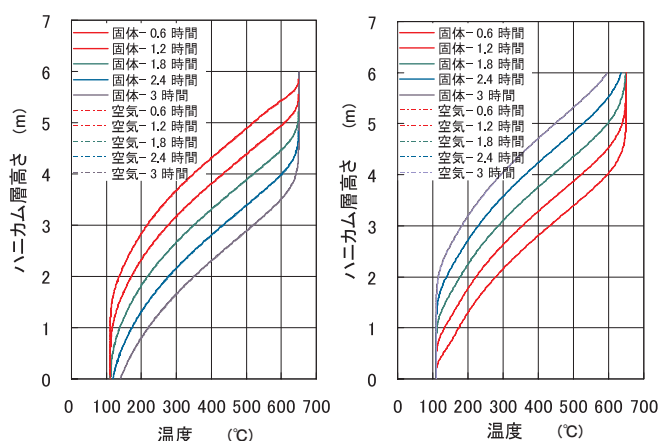
この条件で求めた蓄熱槽の外寸法の大きさは 9 mW × 9 mD × 9 mH × 4 槽で、ハニカムの必要容積は約 400 m<sup>3</sup> × 4 槽 = 1 600 m<sup>3</sup> となり、コンパクトな蓄熱装置で対応可能であることが分かった。

蓄熱・放熱の静定時の蓄熱層内温度分布の時刻変化を図 14 に示す。同図ではハニカム温度及び空気温度を表示しているが、その温度差は小さく、図では読み取れない程度の差である。

## 8. おわりに

太陽エネルギーから安定した電力を得るためには、蓄熱技術の確立が必須である。そのために実機性能に近いデータが得られる試験装置を建設し、2 種類の蓄熱材について蓄熱特性を把握するための試験を行った。その結果に基づいて、実用規模のプラントに必要な蓄熱装置を設計する手法を確立することができた。

本報の検討では、太陽エネルギーを蓄熱するための熱輸送媒体は空気とした。これを可能にするための高性能の空気レシーバの技術については、既に確立済みの蒸気レシーバ技術<sup>2)</sup>を基に検討を進めている。さらに、今後、本空気システムに蒸気発電システムを組み合わせた CSP プラントの全体システムについても種々検討が必要となるが、当社のエンジニアリング技術で対応可能である。今後、蓄熱システムを含む全体システムの構築、構成装置の低コスト化などに取り組み、CSP 技術の実用化・普及に貢献していきたい。



(a) 蓄熱運転時 (b) 加熱運転時

図14 試設計によるハニカム蓄熱装置の蓄熱層内温度分布の変化  
Temperature Distribution Change in the Honeycomb Layer  
of Provisional Design Plant

## 参考文献

- 1) J. Forrester : The Value of CSP with Thermal Energy Storage in Providing Grid Stability, Proc. of the SolarPACES 2013 International Conference, 49,( 2014 ) p. 1632
- 2) 安藤 .外:太陽熱発電システム(第1報)-集熱レシーバの性能実証試験 - ,三井造船技報 ,206(2012-7) , p. 7
- 3) National Renewable Energy Laboratory : [http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=23](http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=23)
- 4) S.Zunft, et al. : Jülich Solar Power Tower- Experimental Evaluation of the Storage Subsystem and Performance Calculations, Journal of Solar Energy Engineering, 133(2011-8) , p. 1049
- 5) S.Zunft, et al. : A Design Study for Regenerator-type Heat Storage in Solar Tower Plants-Results and Conclusions of the HOTSPOT Project, Proc. of the SolarPACES 2013 International Conference, 49,( 2014 ) p. 1088

〔問い合わせ先〕

エンジニアリング事業本部 企画管理部  
TEL 043 - 351 - 9020 塚田 純



友保 純直 須山 達夫 佐藤 康光 筒井 伸幸



## 高性能地中レーダシステムによる平城宮跡東方官衙地区の遺跡調査 - 千三百年前の歴史的構造物遺構を最新テクノロジーで探知 -



写真1 遺跡計測に使用したレーダと準備状況

株式会社三造試験センターでは、高性能地中レーダシステムを使用して路面下空洞調査やコンクリート構造物の調査を実施している。この地中レーダは、送信エレメントから送信されたマイクロ波が地中を透過し、地中の電気的性質が異なる部位で発生する反射波を受信エレメントで受信して、地中の構造を調査する非破壊検査装置であり、道路やトンネルの空洞探査、コンクリート中の配筋調査、コンクリート製橋梁の施工状況調査など様々な分野で適用されている。

### 新たな調査対象の依頼

平城宮は今から約千三百年前の奈良時代の首都平城京の北端に位置し、平城宮跡は国の特別史跡に指定されている。歴史的にも貴重なため世界遺産にも登録されており、現在も未確認の埋蔵文化財が多数存在することが知られている。また、ここは長期間保全地域であったため、多様な動植物が生息し、重要種の貴重な植物も多く確認されている。

地中の調査は、マイクロ波帯域の電磁波を使用する調査手法が適用できると考えられることから、奈良文化財研究所と東北大学の依頼により、平城宮跡東方官衙(かんが)地区の遺跡の試計測を実施することになった。この調査には、道路下の空洞探査にも使用されている当社の一度に2.5mの幅が計測できるFMCWシングルパスリニアアレイレーダを用いることが最適と判断した(写真1)。FMCWとは、周波数変調連続波(Frequency Modulated Continuous Wave)の英語の頭文字を取ったもので、地中レーダに用いられる方式の一つである。本調査は、本レーダを考古学の分野に適用した最



写真2 東方官衙地区の全景と遺跡調査状況

初の事例である。

### 調査フィールドと結果

測定箇所は平城宮史跡の中の、東西約60m、北約16mの範囲である。現地は整地されておらず、植物が生い茂る環境で、通常のレーダ調査と異なっていたが、レーダを2名で牽引してデータを取得することができた(写真2)。取得したデータの解析作業は、現地作業と合わせて1週間程度で終了した。

得られたデータの解析は、埋設物が多く発掘されている30cm以上の深さとした。本レーダの検出限界は150cmであるが、現地の測定環境を考慮すると100cm程度の深さまでは調査可能であると考えた。

測定後、取得データを地表面下約34cm～85cmまでの範囲を三つの深さの地層(図1)に分け描画した。解析の結果、地表から約68cm～85cmのところ縦横に規則的に配置された物体からの反射波が確認でき、観測結果を描画することに成功した(図2)。最深部の地層は、これより浅い地層と顕著な違いが表れている。この地層からスポット的な強い反射が規則的に認められており、同一深さに計画的に配置された人工構造物の遺構と考えられる(図3)。

本非破壊調査により、埋設物の広範囲なスクリーニング情報が得られることが実証された。今後、同様の発掘調査の計画や、試掘箇所の削減など、発掘調査の効率化に繋がるものと期待される。

### 特長

- (1)特別史跡で、植生をできるだけ傷めず、かつ遺構の発掘を行わない調査のため、当社の可搬型FMCWシングル



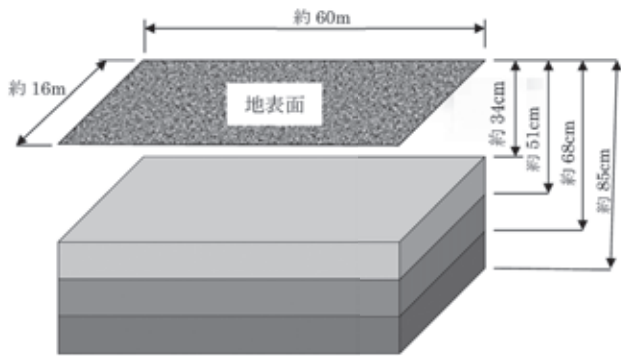


図1 測定データ分析モデル

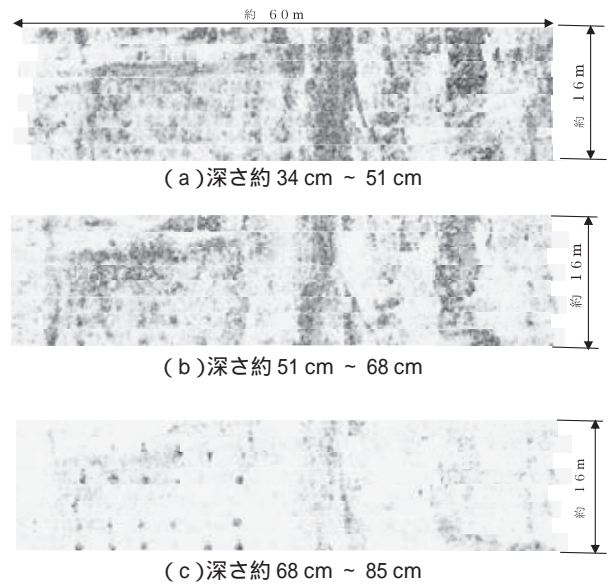


図2 地中レーダ解析結果(平面表示)



図3 拡大した深さ約 68 cm ~ 85 cm の遺構観測部

- パルスリニアアレイレーダを使用した。
- (2) 調査方法には、一度に調査する範囲が幅 2.5 m，深さ 1.5 m が可能となるエレメント構成システムを選定した。
- (3) 取得データの解析ソフトで平面スライス処理を行うことにより，実際の遺跡に近い平面透視画像が得られた。
- (4) さらに，高速画像処理が可能なシステムを採用することにより，取得データの判定を容易にした。

**主要目**

レーダ方式 : FMCW シングルパルスリニアアレイレーダ  
 主要寸法 : 625 × 2 346 × 170 mm

アンテナ数 : 16  
 探査幅 : 2.5 m  
 最大探査深度 : 約 1.5 m (乾燥した最適条件時)  
 最大計測速度 : 50 km/h (計測ピッチ 40 mm の場合)

(株式会社三造試験センター)

[問い合わせ先]

西部事業所 新事業企画部  
 TEL 0863 - 23 - 2364 井上 勝美  
 東部事業所 営業グループ  
 TEL 0436 - 43 - 8931 小原 治之

九州自動車道上の橋梁製作・架設工事  
- 小川スマートインターチェンジのEランプ橋他1橋 -



写真1 架橋後の全景



写真2 一括架設の施工状況

スマートインターチェンジは、高速道路のSA、PA、バス停などに設置されているETC専用のインターチェンジである。現在、全国で70箇所が開通し、59箇所が設置中であり、徐々に増加している。

本工事は九州自動車道の松橋ICと八代ICの間に新設される小川スマートインターチェンジの九州自動車道の上に架かるEランプ橋及び他1橋(稲川高塚橋)の製作・架設工事である(写真1)。

**特長**

本工事の主な特長を以下に示す。

- (1)合成床版採用による現地工事の軽減
  - ・鋼・コンクリート合成床版は、底鋼板とコンクリートとをズレ止めで一体化させた床版で、鋼部材が型枠と支保工の役割を果たすため、現地施工の安全性の確保とともに、工期短縮が図れるなどの特長を持つ。
  - ・稲川高塚橋の鋼・コンクリート合成床版は、当社製品である“MESLAB(エムイースラブ)”を採用した。
- (2)FRP合成床版による軽量化
  - ・ポータルラーメン構造のEランプ橋はFRP合成床版を採用し、鋼材の使用量を削減することにより、橋梁の重量を軽量化した。
- (3)架設工法
  - ・軽量化されたEランプ橋は、大型クレーンによる大ブロック一括架設工法を採用した(写真2)。これにより、桁地組

立時に合成床版のFRPパネル部を桁上に搭載し、一括架設を行うことを可能とした。

- ・稲川高塚橋は、多軸台車による送り出し工法で架橋した。本橋合成床版には、当社のMESLABを採用した。送り出し架設前に底鋼板パネルを桁上に搭載し、塗装完了後に送り出すことで、橋下高速道路の通行規制を不要とした。

**主要目**

工事名：九州自動車道 小川スマートインターチェンジ  
Eランプ橋他1橋(鋼上部工)工事  
工事場所：熊本県八代郡氷川町大字高塚  
発注者：西日本高速道路株式会社 九州支社  
請負者：三井造船鉄構エンジニアリング株式会社  
工期：平成24年8月9日～平成25年11月1日  
工事範囲：鋼橋上部工  
鋼ポータルラーメン橋(Eランプ橋)  
鋼2径間連続合成鉄桁橋(稲川高塚橋)  
工事延長：35.0m(Eランプ橋), 89.0m(稲川高塚橋)  
鋼重：約75.3t(Eランプ橋), 120.1t(稲川高塚橋)  
床版面積：約549m<sup>2</sup>(Eランプ橋), 774m<sup>2</sup>(稲川高塚橋)

(三井造船鉄構エンジニアリング株式会社)

[問い合わせ先]

西部建設本部 工事部  
TEL 06-6446-3101 笹本 英樹

## お詫びと訂正

三井造船技報 第 212 号 (2014-7) 表紙裏面の表紙説明文に誤りがありましたので、お詫びして訂正いたします。

(誤)

日本最初のポーターナ(神戸港摩耶埠頭向け)  
最新の大型ポーターナ(マレーシア/ケラン港向け)  
日本最初のトランスターナ(神戸港摩耶埠頭向け)  
ケーブルリール給電方式の電動型トランスターナ  
(清水港新興津埠頭向け)

The first PORTAINER® in Japan( Maya, Port of Kobe )  
Recent large size PORTAINER®( Port Kelang, Malaysia )  
The first TRANSTAINER® in Japan( Maya, Port of Kobe )  
TRANSTAINER® with cable reeled shore power system  
( Shinokitsu, Port of Shimizu )

(正)

日本最初のトランスターナ(神戸港摩耶埠頭向け)  
ケーブルリール給電方式の電動型トランスターナ  
(清水港新興津埠頭向け)  
日本最初のポーターナ(神戸港摩耶埠頭向け)  
最新の大型ポーターナ(マレーシア/ケラン港向け)

The first TRANSTAINER® in Japan( Maya, Port of Kobe )  
TRANSTAINER® with cable reeled shore power system  
( Shin-okitsu, Port of Shimizu )  
The first PORTAINER® in Japan( Maya, Port of Kobe )  
Recent large size PORTAINER®( Port Kelang, Malaysia )

### 三井造船技報編集委員会

委員長 中谷 龍 男  
委員 木澤 厚 夫  
神 永 肇  
倉山 潔  
速水 礼  
佐野 健 一  
鎌田 勤 也  
穴倉 進  
兼本 浩

### 三 井 造 船 技 報

第 213 号

2014 年(平成 26 年)10 月 31 日発行  
(年 3 回発行)

発行人 土井 宣 男  
発行所 三井造船株式会社 技術開発本部  
〒104 - 8439 東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号  
TEL 03 - 3544 - 3266  
<http://www.mes.co.jp>  
印 刷 株式会社 三造ビジネスクリエイティブ  
〒261 - 7128 千葉県千葉市美浜区中瀬 2 - 6 - 1

三井造船技報に関するお問い合わせは、e-mail : [gihojim@mes.co.jp](mailto:gihojim@mes.co.jp) まで。

万一、落丁・乱丁がありました節は、お取り替えます。

(非売品、無断転載を禁ず)



## 三井造船株式会社

<http://www.mes.co.jp/>

本 社	〒 104-8439	東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号	TEL 03-3544-3147
幕張センター	〒 261-7128	千葉県千葉市美浜区中瀬 2 丁目 6 番 1	TEL 043-351-8000
北海道支社	〒 060-0807	札幌市北区北七条西 4 丁目 5 番地 1(伊藤 110 ビル)	TEL 011-736-0036
東北支社	〒 980-0811	仙台市青葉区一番町 2 丁目 7 番 17 号(朝日生命仙台一番町ビル)	TEL 022-262-3481
中部支社	〒 450-0003	名古屋市中区名駅南 1 丁目 24 番 30 号(名古屋三井ビル)	TEL 052-582-0145
関西支社	〒 550-0004	大阪市西区靱本町 1 丁目 11 番 7 号(信濃橋三井ビル)	TEL 06-6447-2001
中国支社	〒 730-0051	広島市中区大手町 2 丁目 7 番 10 号(広島三井ビル)	TEL 082-248-0311
呉営業所	〒 737-0045	広島県呉市本通 3 丁目 5 番 18 号(メゾンロイヤル)	TEL 0823-25-7837
九州支社	〒 812-0011	福岡市博多区博多駅前 1 丁目 1 番 1 号(博多新三井ビル)	TEL 092-411-8111
東九州支店	〒 870-0027	大分県大分市末広町 1 丁目 1 番 18 号(ニッセイ大分駅前ビル)	TEL 097-537-9260
沖縄支店	〒 900-0033	沖縄県那覇市久米 2 丁目 4 番 16 号(三井生命那覇ビル)	TEL 098-869-3135
玉野事業所	〒 706-8651	岡山県玉野市玉 3 丁目 1 番 1 号	TEL 0863-23-2010
千葉事業所	〒 290-8531	千葉県市原市八幡海岸通 1 番地	TEL 0436-41-1112
大分事業所	〒 870-0395	大分県大分市日吉原 3 番地	TEL 097-593-3111

### 技術開発本部

玉野技術開発センター	〒 706-0014	岡山県玉野市玉原 3 丁目 16 番 1 号	TEL 0863-23-3001
千葉技術開発センター	〒 290-8531	千葉県市原市八幡海岸通 1 番地	TEL 0436-41-1110
基盤技術センター	〒 706-0014	岡山県玉野市玉原 3 丁目 16 番 1 号	TEL 0863-23-3101
昭島研究センター	〒 196-0012	東京都昭島市つつじが丘 1 丁目 1 番 50 号	TEL 042-545-3111
つくば研究センター	〒 104-8439	東京都中央区築地 5 丁目 6 番 4 号	TEL 03-3544-3266

海外事務所 北京, ジャカルタ, ハノイ, クアラルンプール

海外現地法人 三井造船ヨーロッパ株式会社(ロンドン)

三井造船(U.S.A.)株式会社

三井造船(上海)商貿有限公司

三井造船アジア株式会社(シンガポール)

# 三井造船技報 第 213 号の発行に当たって

「三井造船技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。

本誌は、当社が平素ご指導いただいている方々へ、最近の当社の新製品や、それを支える技術についてご紹介するものです。本誌の内容につきましては、更に充実を図る所存ですので、忌憚のない御意見を賜りましたら、大変幸甚です。

送付先の貴組織名、ご担当部署、所在地などにつきましては正確を期しておりますが、変更などがございましたら、以下にご記入の上、FAX または e-mail でお知らせ頂きたいお願い申し上げます。

敬具

キ リ ト リ 線

FAX : 03 - 3544 - 3125

e-mail : gihojim@mes.co.jp

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行(TEL. 03 - 3544 - 3266)

## 三井造船技報 送付先の確認と第 213 号へのご意見等について

1. 送 付 先 : 従来通り 変更 削除 (いずれかに V を付けてください)

a) 旧送付先

所在地 〒 \_\_\_\_\_

組織名称 \_\_\_\_\_

担当部署 \_\_\_\_\_

旧送付先は、現在の宛先ラベルのコピーをここに貼付して  
頂いても構いません。

b) 新送付先

所在地 〒 \_\_\_\_\_

組織名称 \_\_\_\_\_

担当部署 \_\_\_\_\_

ご担当者 \_\_\_\_\_

TEL No. \_\_\_\_\_

FAX No. \_\_\_\_\_

2. 今後の編集に反映させていただくため、下記アンケートにご協力をお願いします。

(1) 本号で興味があった記事をお知らせください。(最初のページ No. で可。複数回答可)

技術論文・報告では .....

製品・技術ニュースでは .....

その他の記事では .....

(2) その他、ご意見・ご要望あれば、お聞かせください。

キ  
リ  
ト  
リ  
線

# 主要営業品目

## 船舶・艦艇事業本部 TEL 03-3544-3318 FAX 03-3544-3031

液化天然ガス（LNG）運搬船、液化石油ガス（LPG）運搬船、原油輸送船、石油精製品運搬船、ばら積貨物船、オープンハッチ型貨物船、鉍石運搬船、石炭運搬船、コンテナ船、自動車運搬船、FSO、FPSO、超高速貨物船、超高速カーフェリー、各種特殊船

修繕船、各種改造船工事、M & R エンジニアリング

護衛艦（DD）、潜水艦救難母艦（AS）、潜水艦救難艦（ASR）、音響測定艦（AOS）、輸送艦（LST）、補給艦（AOE）、掃海母艦（MST）、海洋観測艦（AGS）、巡視船、練習船、海洋気象観測船、漁業調査船、漁業取締船、海洋調査船、研究調査船、物理探査船、環境整備船、視察船、測量船、交通艇、消防艇、高速旅客船、深海探査ロボット（AUV、ROV）、小型水中ロボット、水道管点検ロボット

自動艦位保持装置（DPS）、システム操船装置、艦橋情報表示装置（ABS / IBS）、舵減揺装置、船体運動状態表示装置（SMACS）、航海情報表示装置、フィンスタビライザー、中折式デッキクレーン、赤外線低減装置、弾薬搭載機材、補機制御表示装置、機関操縦装置、水中放射雑音シミュレータ、防火防水実習場、各種訓練水槽、操船シミュレータ

橋梁、ハイブリッド構造物（浮防波堤、浮消波堤、浮桟橋、浮体式係船岸、ケーソン）、海洋構造物（シーバース、ケーソン、沈埋函、ジャケット）、浮体式海洋設備

船舶運航支援のポータルサービス

## 機械・システム事業本部 TEL 03-3544-3950 FAX 03-3544-3055

船用ディーゼル機関

往復動圧縮機、バイナリー発電設備、蒸気タービン、炉頂圧回収タービン、軸流・遠心式圧縮機

鍛造前誘導加熱装置（ピレットヒータ、バーヒータ、ピンヒータ他）、鉄鋼・非鉄分野向誘導加熱装置（薄板加熱装置、銅管焼鈍装置、線材加熱装置）、高周波電源装置（PWM インバータ、サイリスタインバータ、トランジスタインバータ、ゾーンコントロール用電源）

遠隔操作マニピュレータおよびその周辺機器、センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ、太陽追尾採光システム、複合材剥離検査器）、レーダ探査サービス、水理実験設備、塔、槽、熱交換器、回転式乾燥機

IT を活用した各種設備・機器のリモートモニタリングサービス・診断サービス・情報サービス、各種設備・機器の包括／一括メンテナンスサービス、各種技術サービス（運転及びメンテナンスにかかわる技術指導・工事指導・工事施工）、LSS（ライフサイクルソリューションサービス：陸・船用ディーゼルエンジン、各種ボイラ、プロセス用圧縮機、ガスタービン発電設備、ガスエンジン発電設備、蒸気タービン発電設備、炉頂圧タービン発電設備、プロセス機器、誘導加熱装置、各種クレーンの保守、改適用部品・機器の供給、性能改善・改造工事・延命工事などのエンジニアリング・サービスと施工）

SiC ウェハ、CVD-SiC コーティング、SiC 製半導体装置用部品

岸壁用コンテナクレーン、ヤード用コンテナクレーン、船用ガントリークレーン、ローダー、アンローダー（連続式、グラブバケット式）、ジブクレーン、天井クレーン、コンテナターミナルマネジメントシステム

次世代リチウムイオン電池正極材

## エンジニアリング事業本部 TEL 043-351-8000 FAX 043-351-8111

プラントのエンジニアリング及び建設工事（石油化学、化学繊維、合成樹脂、石油精製、ガス製造・精製、無機化学、化学肥料、石炭化学、発酵関連、ファインケミカル、代替エネルギー関連）、プラント要素技術（加熱炉、分解炉、分解ガスクエンチャー、高粘度流体脱揮装置）、エンジニアリング支援システム、フィージビリティスタディ、プラントメンテナンス、SDM 工事

海外土木・建築工事全般、特殊構造物、風力発電設備工事、海外橋梁

ディーゼルエンジン発電設備、太陽熱発電設備、バイオマス発電設備、各種コージェネレーションプラント、バイオエタノール設備

三井リサイクリング 21（キルン式ガス化溶解システム）、廃棄物処理関連（流動床式焼却炉、粗大ごみ処理施設、リサイクルセンター、加熱脱塩素化装置、ダイオキシン分解触媒、炭化炉、PCB 処理）、ガス処理関連（脱塩、集塵）

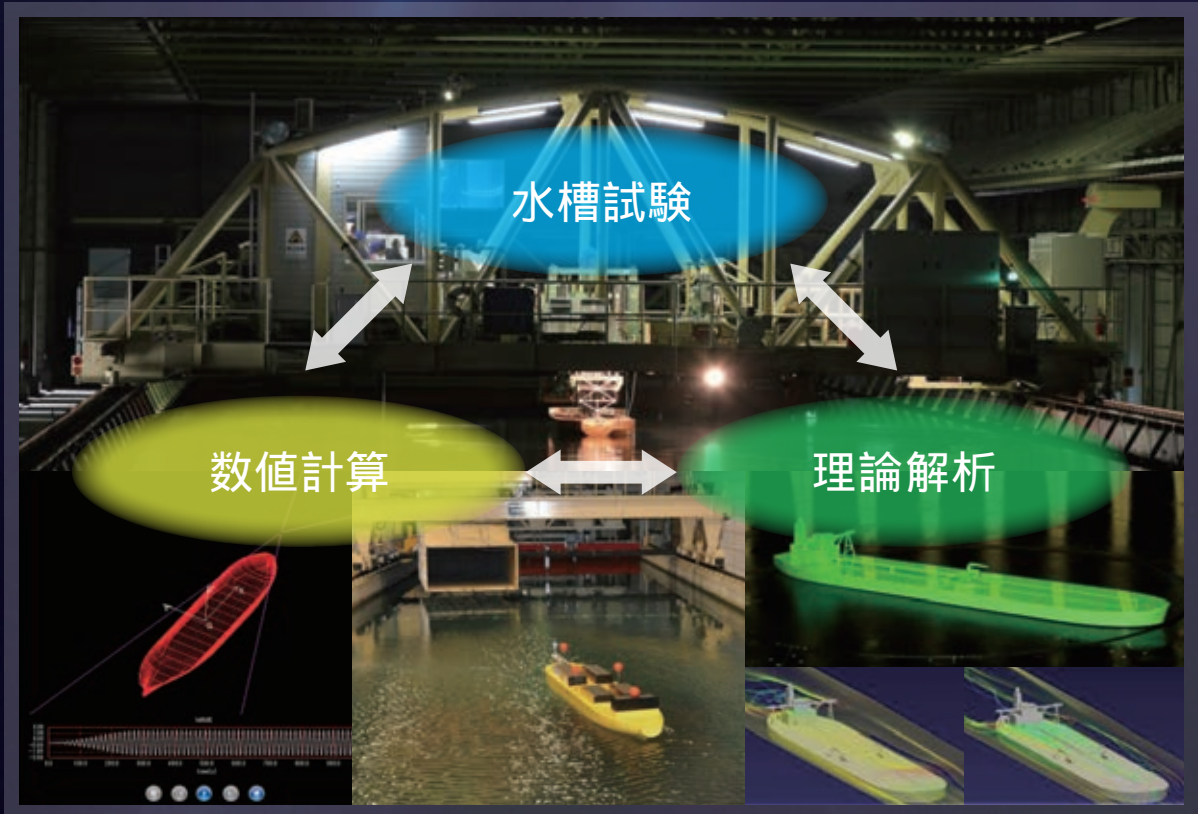
水処理関連（産業排水、汚泥）、ガス処理関連（排煙脱硫、排煙脱硝、脱臭）、廃棄物再資源化システム（焼酎廃液、有機性廃棄物からのメタン発酵、コンポスト及び乾燥装置）、バイオガスプラント（生ごみ・汚泥バイオガスプラント、油温減圧乾燥式食品廃棄物再資源化システム、家畜糞尿再資源化システム）



# 創造と挑戦

私たちは皆様のお役に立ち  
「期待され信頼される研究企業」を  
目指しております。

高度な試験計測技術、理論解析技術、数値計算技術により、  
船舶・海洋構造物に関する様々なニーズにお応えします。



三井造船昭島研究所は、昨年度、おかげさまで創立 35 周年を迎えました。