

# 日技報

Journal of IHI Technologies

2015 Vol.55 No.4

資源・エネルギー特集号

ISSN 1882-3041 IHI技報 第55巻第4号 平成27年

This document is provided by JAXA.

### 資源・エネルギー特集号

#### ◆巻頭言 Opening Essay

資源・エネルギー特集号の発刊にあたって ……… 取締役常務執行役員 エネルギー・プラントセクター長 堂元 直哉 1 Message for the Special Issue of Resources and Energy

#### ◆見えない資産 Intangible Asset

世代間ギャップを跳び越えて<br/>溶接技術・組立技術の神髄を伝える<br/>Meisters of Welding and Assemblyエネルギー・プラントセクター 相生工場 星尾 保和・岩崎 一秀 2<br/>Meisters of Welding and Assembly2巨大 LNG タンクの建設を支えるさまざまな機材は、遊び心から生まれた……IHI プラント建設株式会社 西浦 功 6<br/>Meister of Tank Construction<br/>後工程から驚かれるほどの機械加工精度で、製品全体の品質向上をリードする…原子力セクター 横浜工場 千田 直樹 8<br/>Meister of Machining8

#### ◆我が社の看板娘 Products

重油を節約 エコボイラ········株式会社 IHI	10
New Burner for Fuel with Low Volatile Content which Can Burn Oil Coke without Assist Combustion	
ガスタービンを最高効率で働かせる株式会社 IHI	12
Advanced Applications of Gas Turbine Power Plant for Achieving High Efficiency in Wide Load Range	
さらなるエコへの挑戦	14
Latest Control Technology for Once-Through Packaged Boilers	
マレーシアの電力安定供給と経済発展に貢献する	16
Ultra Super Critical Boiler Specialized for Sub-Bituminous Coal Firing Contributes Stable Power Supply and	
Economic Development in Malaysia	
ワンランク上の超音波検査 ····································	20
Advance Ultrasonic Testing System " ARM-UT " by Combination of Manual Operation and Automatic Data Acquisition	
石油化学プラントの心臓 直径 6 m, 細管 2 万本の反応器	22
Flow Simulation and Packaging Technology of Large Tubular Reactors Up to 6 Meters of Diameter with 20 000 Tubes Inside	

#### ◆我が社のいち押し技術 Technologies

未利用エネルギーの有効利用 — 二塔式ガス化炉の活用 —	24
Effective Utilization of the "Unused Energy" — TIGAR <sup>®</sup> Technology —	
Ni 基合金が拓く高効率な発電ボイラへの道	28
Utilization of Nickel-Based Alloy for Advanced-Ultra Super Critical Boilers	
低炭素社会に適合した石炭火力発電の実現へ	32
Toward the Realization of Low Carbon Coal-Fired Power Plant	

#### ◆こんなビジネスが面白い Business

発電プラントゼロエミッション化へ大きく前准	36
Carbon Dioxide Capture System with Oxyfuel Technology in the Coal Fired Thermal Power Plants	00
コンパクトリアクターで化学プラントの常識をくつがえす	40
Revolutionize the Plant Industry! Compact Reactor with Hyper Efficiency	
発電事業者だからこそオススメできる太陽光発電所	42
Photovoltaic Power Station Constructed and Operated by Experienced Thermal Power Plant Construction Company	

#### ◆箸休め Essay

お相撲の話	 錦織 貞郎	46
SUMO		

#### ◆技術論文および解説 Technical Papers

高効率褐炭焚きボイラの商業化に向けて花岡 亮, Benedikt Tressner	48
Development of High Efficiency Lignite-Fired Boiler for Commercial Use	
再生可能エネルギー大量導入時の航空転用型ガスタービンと同期調相機による電力系統安定化の検討 西田 怜美 Power System Stabilization by Aero-Derivative Gas Turbine and Synchronous Condenser for Large-Scale Renewable Energy	54
LNG 計装変換器盤全面更新工事と新工法紹介	58
	0.4
リークを伴う管辞の熟流動特性に関する研究	64
大規模太陽光発電所向け蓄電池制御技術の開発小熊 祐司,前田 宗彦,今久保 知史,平尾 俊幸 Development of Control Technologies of Battery for Large-Scale Photovoltaic Power Plants	72
700℃級先進超々臨界圧(A-USC)プラント実現へ向けたボイラ技術開発久布白 圭司,野村 恭兵,松岡 孝昭,中川 博勝,室木 克之 Development of Boiler Technology for 700°C A-USC Plant	81

#### 資源・エネルギー特集号の発刊にあたって

取締役常務執行役員 エネルギー・プラントセクター長 堂 元 直 哉

2014 年 4 月にエネルギー基本計画が閣議決定され,わが国は 2030 年に は原子力,再生可能エネルギー,LNG 火力,石炭火力をほぼ四分した比率 での電源構成を目指すことが示されました.また,続いて提示された CO<sub>2</sub> の削減目標は同年で 2013 年比 26%減としており,発電部門は 30%減を目 標として定められています.このような環境下にあって,IHI グループは以 下のような取り組みを進めています.

原子力は経済性向上と CO<sub>2</sub> 削減のため,安全性を確認されたプラントは 再稼働する方向であり,六ヶ所村(青森県)の核燃料再生設備の試運転も継 続中です.耐用年数を過ぎた設備のリプレースに向け,建設技術を維持して いくとともに,新たに生じる廃炉事業などに向けて幅広い対応をしていきます.



LNG,石炭を含む火力発電は今後も発電量として約 50%を占め,寄せられる期待は変わらず大きいといえま す.IHI グループでは発電用ボイラやガスタービンなどのキーハードを中心に、シェールガスを対象とした LNG 液化プラントを含む燃料供給設備,排煙処理設備などを含む火力発電プラント製品を納入しており、3E + S(安 定供給,経済効率性の向上,環境への適合 + 安全性)の基本的なニーズを高い次元で実現する技術開発を進めて います.特に,石炭火力の CO<sub>2</sub> 削減のために、プラント効率向上を期して A-USC(先進超々臨界圧)ボイラを 実現するニッケル系材料の実用化検証,石炭火力の燃焼システムを最小限の変更でバイオマス燃焼に対応できる 技術, CCS(CO,回収・貯留)技術としての酸素燃焼および化学吸収,の実用化を進めています.

また、中長期的に増大する再生可能エネルギーの系統連系については、系統安定化電源・非常時のバックアップ電源としてリチウムイオン電池、スピニングリザーブ(瞬時予備力)として航空転用型ガスタービンの設置拡大、大型火力の負荷変化機能の拡大を推進しています。

さらにはエネルギー多様化への対応として, 藻による CO<sub>2</sub> 利用技術, パーム油の残渣などの未利用バイオマ スによるエネルギー再生技術, 天然ガス水蒸気改質器を高効率・コンパクト化したコンパクトリアクターの開発 が佳境にあります.

一方,世界に目を転じますと,新興国の電力需要増大により,世界の石炭の半分を占める褐炭の使用が促進されると考えられます.褐炭の利用技術として,ガス化して主に肥料の原料として使用する独自の二塔式ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup> や,火力発電効率向上のため石炭中水分の除去と,その蒸発潜熱を再利用するシステムの検証を進めていますが,褐炭や CCS など,国内では建設の機会が得にくいシステムは海外で検証を行う例が増えてきています.それぞれの国の事情をよく理解して,幅広い取り組みを行ってきた好例であり,今後もよりグローバルな規模の技術開発を進め,得られた技術を国内外のお客さまに提供することを使命と考えています.

## 世代間ギャップを跳び越えて 溶接技術・組立技術の神髄を伝える

東南アジアの新興国を中心に,火力発電所の新設計画が相次いでいる.国内では東日本大震災以降,火力 発電所はフル操業の必要に迫られ,CO<sub>2</sub>排出量低減,熱効率アップのため改修などが続く.こうしたこ とから IHI のボイラ製造の拠点,相生工場も活況を呈している.ボイラ製造に欠かせない,溶接とパネ ル組み立て,二人の匠を訪ねた.



管寄せ



火炉壁パネル(現地据付状況)

#### 全長 800 km もの管がつながる大型発電ボイラ

IHI は、出力 100 万 kW 級の大型火力発電用のボ イラでは世界のトップシェアを争う.昨今、国内外で のボイラ建設の需要増を受け、相生工場(兵庫県) の製造現場では活気にあふれた作業が続いている.

相生工場はボイラを中心とした溶接構造耐圧部製品 の専門工場である. 高効率の超臨界圧ボイラの場合, 600℃, 25 MPa を超える高温高圧の蒸気条件に耐え, 30 年以上にわたる運転に耐え得る合金鋼鋼管を加工し た耐圧部製品によって構成される. 相生工場で製作す る主たるボイラ耐圧部製品は,小口径の管とフラット バーで構成される火炉壁管である「パネル」や,溶接 した小口径管の連続曲げによって作られる「ループ」, および小径管構造の「パネル」や「ループ」とボイ ラ建設現場で溶接される「管寄せ」などであり,「管 寄せ」は部位・蒸気条件によっては管肉厚 100 mm を 超える高クロム鋼鋼管に,小口径の管や厚肉の管台と いわれるノズルによって構成される. 原子力発電に匹 敵する出力 100 万 kW 級の大型石炭火力発電所のボ イラ耐圧部に使われる鋼管の総延長は 800 km にも及 び,東京~広島間の距離に匹敵する長さとなる.

このため、ボイラ製造には溶接をはじめさまざまな ものづくり技術が必要だ.溶接部分は 10 万か所以 上.ボイラの高効率化に伴い、耐熱性・耐久性の高い 材料を用いるために緻密な溶接技術が求められる.ま た、大小の管が組み立てられた部材を、曲げ、隙間を つなぎ、歪みなく組み合わせる組立技術も重要だ.

ボイラ製造を簡単に説明すると,部位によっては曲 げ加工などで立体的に作られた複雑な構造の鋼管部品 を組み立て,その後狭隘な部位,厚肉の鋼管を溶接 し,X線検査などの非破壊検査にてその健全性を確 認するものである.相生工場で製作したボイラ耐圧部 製品は国内外の建設現場に送られ,建設現場にて耐圧 部製品同士の組み立て,溶接を行い,ボイラとして完 成する.国内の建設現場での溶接作業においても,高 度な溶接技能を求められるボイラ耐圧部製品について は相生工場の溶接士を現地に派遣し,その溶接を行っ



ている.また,海外工事においても溶接技術の指導員 として技能溶接士の派遣も行っている.

#### " 熱 " を操り溶接割れを制するボイラ溶接の匠

ボイラ溶接の匠, 星尾保和は現在 63 歳. ボイラ溶 接一筋 44 年のベテランだ. 大小の配管などを手掛け てきたが,現在は肉厚 100 mm,直径 500 mm もある 管に管台を溶接する作業を主に担当している. 太く肉 厚の管に細い管をピタリと合わせて溶接するために, 最も気を使うのは接合する部材の温度管理だという. 特に昨今は高い耐熱性や耐圧性を求めて,これまでよ り加工や溶接が難しい材料が使われるようになってい る. 溶接作業において割れなどの欠陥を防止するた め,管の材質や肉厚によっては溶接前に 200℃を超え る温度まで予熱を行い,溶接後にまた数百℃の温度で 数時間に及ぶ直後熱を行う.特に夏の溶接作業は過酷 であり,作業中の暑さ対策は欠かせない.技術,技能 だけでなく集中力や体力も求められる.

#### 工場内だけでなく,建設現場で溶接できて一人前

星尾が仕事の面白さに目覚めたのは,入社後7,8 年経った頃初めて建設現場に出たときだった.工場で はそれまでに大径管をはじめ一通りの溶接を体験して いたが,現地での作業は全く別ものだった.

「ボイラは,足場を組んだらいちばん上にドラムを 設置して,それに吊り下げるようにして組み立ててい くんよ.地上 50~60mの足場の上で,上から下へ



エネルギー・ブラントセクター 相生工場 製造部 ボイラ製造グループ 宮川 由佳 星尾 保和



管寄せ溶接指導

溶接で組み立てていく.風は吹くわ,雨は降るわ.そ れに鉄骨を避けて体を回してなんとか溶接箇所に届く ようにしたり、工場とは大違いなんや.」

工場では,溶接しにくい箇所は大径管の方を動かし て,安定した体勢で作業することができる.しかし, 建設現場ではそれはできない.

「でも,建設現場に行って初めて,自分たちが工場 で作っているものがどこにどう接続しているのか分 かって面白うなった. ほやから,今工場にいる若手 も,はよ,現場に旅立ってもらいたいね(笑).」

星尾のインタビューに同席した宮川由佳は、女性な がら工業高校で溶接の魅力にとりつかれ、溶接がやり たくて相生工場に入社した気骨ある若手.先日初めて の建設現場出張から戻ったばかりだった.

「自分が担当した配管がどこにどうついているの か、初めて現場で見ました.工場では横向きでしか見 たことがないパイプが現場では縦になっているとか. それにしても、溶接する配管がほかの管と重なって見 えへんし、配管の隙間にどうやって体を入れたらいい のか分からなくて時間も掛かるし…だいぶできるよう になったと思っていましたが、そんな自信はぶち壊さ れてしもた.また、ゼロからスタートです.」

こう語る宮川の横顔を満足そうに眺める星尾. まさ にこうした体験をしてもらいたかったのだろう.

「そんなんの繰り返しやね.私は,現役のときは, ほとんど現場に出とったから.」

ボイラ建設の現場に派遣されると,溶接士は4,5 か月は帰れない.現在も,星尾は現場での指導も含め て1年のうち8か月も現場へ単身赴任している.

#### 溶接士は失敗してもへこまない"ごんた"がいい

ボイラの溶接には, 主に TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接, 被覆アーク溶接, 炭酸ガスアーク溶接が使われ ている. この三つの技術を取得することに加えて, 自 動溶接の機械操作も必要. さらに材質の進化により溶 接の温度や溶材もどんどん変わる. ボイラ溶接士は国 家資格だが, 一度資格を取得しても数年に1度の更 新が必要で, 工場内には自前の技能訓練所があり, 星 尾も指導に加わっている.

「同世代の人ができるのにわしがでけへんのは嫌や んか.だから若いときは失敗を恐れずやらせてもらっ た.忙しいと余裕がなくなってくる.不良品率は低い 方が良いけど,なんでもかんでも完璧を求めると,若 い人らは欠陥を恐れて,新しいことに挑戦せんように なるよ.」

溶接に向いている人物像として,星尾は「"ごん た"がいい」と言う.ごんたとは関西の方言で,い たずらっ子,悪ガキ気質のこと.失敗しても自分なり に再挑戦して乗り越える気概がある人が向いていると 言いたいのだ.

「何よりあいさつができること. 声を出すのが大切 なんよ. 自分の思っていることをきちんと伝えんと.」

溶接作業では、二人組みになって行うことも多い. 普段からお互いに知り合っていれば、自然と息を合わ せることができる.

技術的には、目で良く見ること、危険はないか目配 りできること、また、熱気のこもるなかで気力を保つ には相当な体力も必要な職場だという.このように厳 しいながらも技術を身に付ければ、それは一生ものに なる.星尾は残された2年間の任期で、一人でも多 くの若手を一人前に育てあげようとしている.

#### 複雑な形をピタッと仕上げる組み立ての匠

「パネル」製作工場を歩いていると、パネル製品の なかでも特に複雑な構造をしたシザーズと呼ばれる製 品の組み立て作業に取り組む、組み立ての匠、岩崎一 秀(59歳)の姿に目が行った、聞くところによると シザーズは、管寄せに半分垂直な、半分はヘリカル構 造と呼ばれる斜めになったパネルが複雑な曲げ管に よって組み立てられた構造物である、その組み立てに はとりわけ高度な組立技術が求められ,海外子会社への製作移管が最も進んでいる「パネル」においてさ え製作の難しさから,いまだ相生工場から海外子会社 への製作移管が行われていない製品であった.

岩崎は,入社直後は当時華やかだった造船の部署に 配属された.そこで金属加工,プレスなどの技術を身 に付けた後にボイラ製造部門に移り,10年ほど前か らパネル製造に携わっている.

パネルはボイラの炉壁を構成する主要な部品であ り,管の曲げや溶接が重要な製造技術となる.さら に,管寄せという部品は肉厚の太い配管に多数の細管 を溶接して作られる.

#### さまざまな仕事の経験から応用力を引き出す

「造船をはじめ、ボイラに直接関係ないことまで含 めていろんな部署を経験したことが、今の自分のプラ スになっている.」と岩崎は言う.なかでも、大切な のは曲げの技術だ.大きな板のように見えるパネル も、その実、中空の管と管をフィンというフラット バーでつないだものだ.管をつぶさないように注意し ながら、ピタリと思った角度に曲がるように力を加減 するのは容易でない.

「どれをとっても同じようには仕上がらないので す.いかに修正を少なくして,いい品質に仕上げるか が勝負ですね.」

プレス曲げの結果,図面通りの形状に曲げられな かった場合,修正せざるを得ないことがある.焼き修



エネルギー・ブラントセクター 相生工場 製造部 パネル製造グループ 岩崎 一秀 小林 勇貴





シザーズ組立作業

正といって,バーナーで熱して焼き戻すがこれを何度 も繰り返すと製品が傷んでしまう.部材は巨大で,し かも管と管がつながっている.どこを焼いても良いわ けではない.どこをどのぐらいの温度に熱するのか は,培ってきた経験から決定する.

「そこらへんが自分のもっている感性なんでしょう ね.過去のいろんな仕事の経験のなかに、今この場面 で応用できるヒントがあるんですよ.」

#### 失敗とたまたまの成功の、両方から学ぶ

もちろん, 自らの努力で技術を習得してきた自負も ある. しかしそのうえで, 岩崎は「失敗が大事」と 言う. これは溶接の匠, 星尾の発言にも共通する.

「失敗してそれをリカバーした経験があるから,次 の壁も突き破れる.これをやったらあかんと分かり, じゃあ,どうしようというのが出てくる.一方で,た またまピタッとうまくいくこともある.うまくいくの にも理由がある.それをしっかり紐解いておくか, 『ラッキーやった』で済ませるかで,技術面で発展が 変わる.そういう『なぜ』を求めていくのが,まあ, この仕事の面白いところでしょうねえ.」

ボイラ組み立ての現場でも,若手養成のニーズは高 まるばかりだ.しかし,養成期間を短縮するのは難し いと岩崎は言う.なぜなら,ボイラのさまざまなブ ロックを一通り経験して組み立てのコツを体得するに は時間が掛かるからだ.

「やはり,組み立ての全部を知らないとダメなんで すよ.そして一つひとつを自分のものにしてもらいた い.だから若手には,できるかぎり深く,広く,いろ んな仕事をやらせてあげたいね. それには上司の理解 も必要なんだけど. 」

インタビューに同席した小林勇貴は入社3年目.

「『そろそろ一人前に』と言われますが,まだプレ スもやったことがなくてまだまだです.ベテランのな かでも岩崎さんの知識がいちばん深い.それと,岩崎 さんのやり方をまねるとうまく作業できることが多い んです.」

教え方のコツは「特にない」という岩崎.

「人はそれぞれ違いますから.基本は,自分がやっ て見せて,それを同じように体験してもらう.体で覚 えることで感性も磨かれます.やる前に『失敗する な』とか言って,心配させたくないね.」

岩崎は言う.

「ものづくりに大切なのは失敗しないことではなく て、失敗しても『直せる』技術をもっていること. だから、まねさせるだけでなく、若手が違うやり方を 試したいのなら、よし、それでやってみろと言います よ、」

そのうえで修正の技も習得させたいのだ.

#### 世代間ギャップを越えて技術を伝えたい

星尾と岩崎に共通する悩みは、90年代のバブル崩 壊後の製造業の落ち込みによって職人の採用が激減 し,彼らと後継世代までの間に20年ほどの空白があ ること.いずれの職場も50代、40代の職人はほとん どおらず、若手のなかでいちばん経験を積んでいる人 でも30代.ベテランがもつ技術の全てを伝えるに は、時間が足りない.それに加えて、うれしい悲鳴で もあるのだが、新規受注案件が次々と入るため、「失 敗を恐れず、若手に挑戦させる」余裕がなかなかで きない.

そんななかで高い技術を途切れさせることなく伝え るためには、匠自身が体力を保つことが重要だと二人 とも分かっている.体力のほかには、星尾は「根気 が大切だ」と言い、岩崎は「集中力」と言う.今, 20代、30代の若い職人たちが必死で彼らの後を追っ ている.数年後の相生工場が楽しみである.

## 巨大 LNG タンクの建設を支える さまざまな機材は,遊び心から生まれた

エネルギーを使うには燃料を貯蔵する技術と容器が不可欠だ. IHI は, 原油, 石油, 液化天然ガス(LNG) のタンク, 球形のガスタンク, 高炉のガスホルダーなどあらゆる種類のタンクを手掛けてきた. LNG タンクを中心に, 日本のエネルギー関連のタンク建設で圧倒的なシェアを誇る. タンクの計画から設計, 現場管理で 40 年以上のキャリアをもつ, タンク建設のカリスマを IHI プラント建設株式会社(IPC) の現地事務所に訪ねた.

#### IHI で発展したエアーレイジング工法

臨海工業地帯に並ぶ円筒形の大型タンクや幹線道路 から見える球形ガスタンクをはじめ,高炉の乾式ガス ホルダー,液体窒素・酸素のタンク,あるときはビー ルメーカーの貯蔵タンクまで,さまざまな大型タンク の設計・建設を手掛けてきたのが IPC の西浦功,タ ンク建設のカリスマだ.

「昨今,受注する大型タンクといえば LNG の貯蔵 用がほとんど.都市ガス用の球形タンク,高炉のガス ホルダー,緊急時動力なく給水できる高架水槽などは 需要がほとんどなくなりました.例えば,球形タンク は工場でプレスした部品を現地での調整代なくミリ単 位でつなぎ合わせて作る高度な技術の結晶です.今の 若い人たちがそうした技術に触れる機会がなくなって しまったのはとても残念ですね.」

タンクの形,建設技術,工法は内容物により,また 時代とともに変化,進化してきた.いちばんシンプル なのは油用のコーンルーフと呼ばれる円すい形屋根の タンク.気化性の高い液体に用いられるドーム型や, 液体の表面に屋根が接しており内容液量の変化によっ て料理の落しぶたのように上下するフローティング ルーフタイプもある.

IHI グループで発展した技術として,西浦は「エ アーレイジング工法」を挙げる.タンクの外側壁と 底部を先に建設し,タンクの底で屋根(外槽屋根に 内槽屋根を吊り下げたもの)を作った後,屋根と底 部の間に空気を吹き込み,その力で屋根を持ち上げて 最終的に天井部に固定する工法だ.LNG タンクをは じめ二重殻のタンクの内壁は極低温の液に接するため、温度や媒体によって変化しにくい高価な鋼材を使用する.エアーレイジング工法なら先に屋根ができるため、風雨にさらされることなく、高品質・高効率で内壁を作ることができるのだ.

また,設置する基礎の上で建設できないことがあ る.このようなときに登場する特殊工法が 30 年以上 前からある.ホバークラフトの原理でタンクを浮かび 上がらせて移動する大胆な「エアークッション工法」 である.西浦にとっては 30 年ほど前にアルジェリア の現地で施工したのが最後だった.それがこのほど, 久しぶりに国内のタンク建設で再現する予定で技術を 引き継ぐチャンスになると期待している.

#### コルゲーション技術と 新工法でタンク建設業界をリード

現在 IHI グループの主力製品となっている LNG タ



IHI プラント建設株式会社 福島支援事務所 総合所長 西浦 功



ンクには、地上に設 置する PC (プレス トレストコンクリー ト)というあらかじ め圧縮応力を加えた コンクリートの外槽 を用いる PC タンク と、地面を掘り下げ て建設する地下タン クとがある. どちら も -162 C 以下で液 化している LNG の 状態を保つため、外





地上式 PC タンク

地下式タンク内面

壁と内壁の間に断熱材を入れるか,もしくは真空で断 熱する二重殻構造となっており,LNG タンクは断熱 との勝負である.また,LNG タンクで大切なのは, なんといっても安全に貯蔵できること.地下タンク は,万一LNG が漏えいすることがあっても,周囲の 地盤が凍って液漏れを止めるため,安全性では一歩抜 きんでる.外槽と底版は薄い断熱材と厚いコンクリー トで支持され,タンクの内壁は厚さわずか2mmの ステンレスの膜.風船で液体を包むようなイメージ だ.

IHI の地下タンクの強みを,西浦は「断然,コル ゲーション技術です」と語る.温度変化によって生 じる熱収縮を吸収するために,タンクの内壁には2m 置きに十字状にシワが寄せられているのだが,IPC で は厚さわずか2mmのメンブレン(IHI では内槽ステ ンレス板をメンブレンと呼ぶ)を自動溶接する技術 をもっている.

また, PC タンクでは, 最近 IHI・IPC の若手技術 者が開発した新工法(外槽の完成を待たずに, 内槽 と屋根の製作・ジャッキアップを並行して進め, 建設 工期を1年短縮)による建設が続いていることも誇 らしげに語ってくれた.

「開発と標準化は背中合わせ. コンプライアンスは 重要ですし, いろいろなリスクを考えると標準工法を 選びがちで, 新工法にはなかなか踏み出せません. 新 技術が使えるかどうかの実証実験にもコストが掛かり ます. そうした制約を乗り越えてでも想像力をもって 新工法に挑戦しようとする若者を見るとワクワクしま すね.」

#### 工法や機材づくりの工夫に面白さがある

西浦いわく,

「タンク建設で面白いのは『機材づくり』です.」 普通のビル建設では建造物の全面に足場を組むが, タンク建設ではかえって危険になることもある.そこ で安全かつ効率的に作業するために,西浦はさまざま な「移動足場」を生み出してきた.タンク壁の上端 にレールを付けてゴンドラ状の足場を吊ってそこで作 業するもの,リング状の足場をせり上げる形式…足場 以外の機材も工夫して作った.機材設計のポイントは 三つあり,① どのような環境,状態になったときに 最大の力が掛かるかを見極めた強度設計 ② 輸送の簡

「遊び心なんですよね. 橋のようなほかの大きな構造物と比べると, タンクはどうしても似た外見になる. しかし,工法や機材づくりにも設計者なりに工夫や特色を出す余地はあるのです.」

便性③保管のしやすさ、だそうだ.

アイデアに行き詰まると西浦が必ずやってきたこと がある.それは模型を作ることだ.

「移動足場を作るときも、模型を作りながら機能を あれこれと考えてみます. それが面白いんですよ.」

インタビューの最後に西浦は「実は,一度やって みたいことがありまして,それは営業なんです」と 語り出した.

「いや,もう少し若ければという話ですが(笑). 技術者として自らのエンジニアリング力をお金に替え るということをしてみたいですねえ.」

ものづくりの匠としての自負がにじむ一言だった.

## 後工程から驚かれるほどの機械加工精度で, 製品全体の品質向上をリードする

企画の胎動から 30 年, 夢のエネルギーといわれた核融合エネルギーの国際熱核融合実験炉「ITER」の 運転開始が迫っている. 炉の中心部を構成する超伝導コイルの一部を日本が調達することになり, 現在 IHI 横浜工場でも, その構成部品の一部の機械加工が進んでいる. 実験炉の過酷な環境に耐える部品を作り上げる, 機械加工の匠に迫った.

#### ITER のラジアルプレートを手掛ける

1985 年ジュネーブ (スイス) でのアメリカ・ソ連 (当時)首脳会談をきっかけに,国際熱核融合実験炉 「ITER」のプロジェクトは 90 年代から技術開発がス タート. 2005 年には ITER の建設サイトがカダラッ シュ (フランス)に決定,現在は実験炉の運転開始 を目指して,日本,欧州連合 (EU),ロシア,アメリ カ,韓国,中国,インドが参画し建設が進められてい る.

核融合発電を実現するには、炉の中心にプラズマを 閉じ込める強力な環状磁場発生用コイル(超伝導コ イル)を要する. そのコイルは D 字型のステンレス 鋼製構造体"ラジアルプレート"の溝に超伝導体を 挿入して製作され、さらにそれを 7 層積み重ねてコ イル容器に収めることになっている. 国際協力プロ ジェクトのなかで、日本は、このコイル 9 個および、 コイル容器 19 個の調達を担当しており、そのラジア ルプレートの一部の加工が、今まさに IHI 横浜工場 で開始されている.

前置きが長くなったが、その ITER 用ラジアルプ レートの機械加工を任されているのが、横浜工場の \*世直樹である. 匠として認定されるのはほとんどが 長期間の実績のある人. この道一筋とはいえ、中堅ど ころの千田の匠認定は異例に早い. しかし、入社から これまでに 20 台以上の工作機械のオペレーションを 経験した千田の知識とスキルの豊富さ、仕上げる製品 の品質は群を抜いているため、周囲も納得ずくだ.

#### 6年ぶりの期待の新入社員

千田の入社は平成元年.同部署の機械加工担当職と しては,なんと6年ぶりの,そしてたった一人の新 入社員であった.

「いちばん年が近い人でも6年間この仕事をして いるわけで、当たり前ですが、技能の差は歴然でし た.例えば、組立業務に配属された同期が残業までし て職場に貢献しているのを見て、自分はいつになった ら"戦力"になれるのか?追いつける日がくるの か?と先が見えずつらい日々でした、」

旋盤,ボール盤(穴あけ),歯切り盤などさまざま な工作機械を回って,一対一で指導を受けた.最初の



原子力セクター 横浜工場 第一製造部 製造グループ 千田 直樹



うちは「(金くずを片付ける)ほうきを持って立って いるだけ」という日もあったが、「とにかく見て覚え よう」と目と頭を使った.

「指導員から『何でもメモをとれ』と言われました. ですから,機械に対してどんなふうに立つかから 始まり,段取り,どの刃を使うか,動き方などその人 の癖まで見たことを全てメモし,後でまねして流れを つかみました.」

やがて加工を任されるようになったある日,千田の 後工程の担当者がこんなことを言っていたと耳にし た.「さっき回ってきた製品,すごく品質が良かった よ.芯出し(NC 旋盤などで,工作物の中心軸を明ら かにして機械にセットすること)しやすかった.誰 がやったんだ?」心の中で「俺だよ!」と叫んだと 言う.また,入社5年目に新しい工作機械(横中ぐ り盤)が導入されたときのこと.先輩2人と担当す ることになったが,従来よりも切削スピードが速く勝 手が違うためか,ほかの2人は少しずつ離れてし まった.一方の千田は「なんとか使いこなそう」と 必死で覚えた.「そのころからですかね,仕事が面白 くなっていったのは.」

#### コツは、図面をよく理解すること

「求められた品質以上の製品を当たり前に作ってし まうのが,千田さんのスゴイところなんです.」と職長 の秋成公博は言う.当の千田にそのコツを聞くと,意 識したことがないのだろうか,言葉に詰まっていた.

「うーん. 図面をよく読んで理解すること……です かね?加工する製品の材質,形状を考慮して,どこ から加工を始めるか,工具や刃を選択して,治具を決 めて,段取りを整える…….ある形を作るにしても, そこに至る方法は幾つもあるので…….」

考えながら、朴訥に、しかし丁寧に言葉を紡ぐ.

「機械加工では,目に見えない要素,音や振動など も大切なんですよ.」

最近の工作機械はコンピュータ制御されているため 作業は機械任せのように思うが、製品の出来は作業者 に負う部分も少なくない.「音や振動を頼りに機械の 動きを先読みした値が実際の計測値と違ったら、さじ 加減を変えてみます.よくあるのは熱変形による誤差 ですが、そのほかの要因でも材料が影響を受けま す.」と千田は言う.出来上がってから修正するので



は手間も掛かり,加工不良になりかねない.未然に防 ぐことが機械加工のキモなのだ.

#### 達成感よりも「安全・安心」が大切

しかしながら, ITER のラジアルプレートの機械加 工では,客先承認を得た要領書に沿って実施する必要 があり,現場での「さじ加減」が許されない.材質, 形状だけでなく,使用する工作機械,作業手順などが 仕様のなかで細かく決められているためだ.「こうす ればスムーズに仕上がる」と分かっていても逸脱で きず,千田は「腕の振るいようがない」と苦笑する. それでも任されたのは,制約のあるなかで技術を発揮 できるのは,千田のほかにいないからであろう.

苦労も多い国際的なプロジェクトで,ピタッと製品 が仕上がればさぞ大きな達成感が得られるだろうと思 い聞いてみたところ,意外な言葉が返ってきた.

「達成感よりも, 無事に仕事を終えて安心したいで す.」

製品の高品質と職場の安全・安心を両立すること は、日々の作業や後輩の指導で千田が最も大切にして いることだ.しかし同時に、仕事の原動力になるの は、チャレンジ精神や好奇心だとも言う.「何かを極 めたと思ったことはないです.新しい工具が出たとい う情報があれば、積極的に使ってみますし、工場に新 しい機械が入れば一番に使ってみたい.もっともっと 技術を身につけたいですね」と、若い匠はあくまで も貪欲であった.

## 重油を節約 エコボイラ

### 助燃なしでオイルコークスを燃やせる 低揮発分燃料バーナー

2015 年春, オイルコークスと重油を燃料とするボイラプラントに低揮発分燃料バーナーを導入した. 従来は難しかったオイルコークスを安定燃焼させ, 助燃のための重油を不要とすることで燃料費節約 に貢献する.





オイルコークス(石油コークス)

固体燃料には石炭をはじめとして木質バイオマスや オイルコークスなどといったさまざまな種類があり, その燃焼特性も燃料の種類によって大きく異なる.日 本の石炭火力発電用ボイラでは,石炭のなかでも揮発 分が多く,発熱量も大きい瀝青炭を主な燃料として運 転しており,全石炭消費量に占める瀝青炭の消費割合 は70%を超える.瀝青炭はその取り扱いのしやすさ と熱量の大きさから石炭のなかでも比較的高価な燃料 となっている.

その一方で、燃料中の揮発分の割合が低く、着火性 が劣ることから価格が比較的安価な燃料も発電や工業 炉などに使用されている、オイルコークスは重質油を 熱分解した後の残渣をもとにしており、発熱量は大き いものの揮発分が少ないことから、着火性が悪く、扱 いやすい燃料とは言い難い、オイルコークスを燃料と してボイラプラントで燃焼させる場合には、従来、重 油を用いた助燃が必要となっていた。重油は瀝青炭と 比べても燃料費用ははるかに高く、重油を使用するこ とは燃料費増加の大きな要因となる。

オイルコークスを,重油を使わずに燃焼させること が可能となれば,ボイラプラントを運転するお客さま に大きなコストメリットが生まれることから,揮発分 の少ない燃料を重油による助燃なく燃焼可能な低揮発 分燃料バーナーの開発に着手した.

#### 低揮発分燃料バーナーのしくみ

低揮発分燃料バーナーの特徴は、その内部に燃焼 チャンバーを有しているという点である.燃焼チャン バー内において、燃料を加熱することで着火性の向上

と安定燃焼が可能となる. 燃焼用空気(二次空気) は,エアーレジスターと呼ばれるベーンを通過するこ とで旋回流となり, 燃焼チャンバーの外側から炉内へ 吹き込まれる.その結果,バーナーの近傍では内部循 環流れが形成され,高温となった炉内ガスをバーナー 付近に引き込むことができる.さらに, 燃焼チャン バーの内部下側から燃料と一次空気を吹き込むこと で,燃焼チャンバー内でも炉内ガス循環流れを作るこ とができる.この一次空気と燃焼用空気(二次空気) による循環流れ形成の結果,高温となった炉内ガスを 燃焼チャンバー内まで引き込むことができ,供給され る燃料と混合させることで,燃料を加熱することがで きる.燃焼チャンバー内への高温炉内ガスの引き込み は,チャンバー上部から供給される三次空気の流量に よって最適な量に調整することができる.

#### オイルコークスの専焼化に成功

2015 年春,この低揮発分燃料バーナーを実際のボ イラプラントに3本導入し,オイルコークスの専焼 化に成功した.ボイラ起動時の昇温には依然重油を使 用する必要があるが,昇温後は重油供給を停止して順 次オイルコークスの専焼に切り替え,導入した3本 全てのバーナーにおいてオイルコークスの専焼を達成 した.のぞき窓からは燃焼チャンバー内に炉内ガスが 引き込まれる流れが確認でき,燃焼チャンバーの根元 からは輝度の高い明瞭な火炎が観察された.

オイルコークス専焼後は、低揮発分燃料バーナーを 最適な状態に保つための運転調整を実施した. 燃焼 チャンバーは耐熱性の高い鋳物で製作されているもの の、その表面温度が設計温度を上回ると損傷する可能 性があることから、チャンバーの表面温度が規定値を 超えないよう、内部循環流れを最適な強さとする必要 がある. 燃焼チャンバーの外側表面には、温度監視用 の熱電対を長手方向および周方向に複数取り付けてい る. その温度データを基に三次空気流量を調整し、内 部循環流れの強さをコントロールしている. エアーレ ジスターの開度変更時やボイラ負荷の変更時において も、三次空気流量が制御され、燃焼チャンバー内の循 環流れを適切な状態に維持できることを確認し、お客 さまへの引き渡しが完了した.



実際に納入した低揮発分燃料バーナー



低揮発分燃料バーナーによるオイルコークス専焼時の火炎の様子

#### さらなるエコボイラを目指して

オイルコークス専焼化後のボイラにおける燃焼効率 は、重油混焼時と比較して同程度の高い水準であり、 低揮発分燃料バーナーによって重油混焼時と同等の燃 焼性を維持できることが確認された.また、この低揮 発分燃料バーナーを導入したことで毎時約 2001の重 油消費量を低減させることができている.今後は、お 客さまに長く継続して使っていただけるよう、バー ナーの計画的なメンテナンスを提案していく.また、 低揮発分燃料バーナーを広く提供することで、重油使 用量の削減による経済的な利点のほかにも、これまで 利用されてこなかった燃料種の利用拡大が可能になる と考えられる.これからも限りあるエネルギー源の有 効活用に貢献していく.

問い合わせ先

株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター ボイラ燃焼技術部 電話 (03) 6204 - 7528 URL: www.ihi.co.jp/

## ガスタービンを最高効率で働かせる

### 部分負荷でも高効率を実現! ガスタービン最適運用システム

世界中で導入が増えているガスタービン発電設備. ここ数年, 定格負荷だけでなく部分負荷でも高効率を望む声が増えている. 幅広い運転範囲でもお客さまが常にメリットを享受できる IHI の発電制御システムとは?



LM6000 コンバインドサイクル外観



蒸気吸気加熱コイル

#### 部分負荷運転の効率が事業成否の鍵

近年,エネルギー供給のリスク分散や CO<sub>2</sub> 排出削 減要求,電力自由化などの環境変化により,国内外で 分散型電源のニーズが高まっている.IHI が取り扱っ ているガスタービン発電設備は,これらニーズへの解 決策の一つとして,世界各地で中規模発電事業や自家 発電用途での需要が増加している.

ガスタービン発電設備は、天然ガスや灯油などの燃料を燃やした燃焼ガスでタービンを回して発電する設備である. さらにタービンからの高温排ガスを再利用 するコジェネレーションやコンバインドサイクル化に よって、エネルギーの有効活用が可能であり、環境面 や経済面でのメリットをお客さまにもたらすことがで きる. しかしながら、お客さまによっては当初計画し たとおりのメリットを享受できない場合もある.

通常,発電設備は想定される最大需要を賄える容量 (定格負荷)で計画されるが,中規模発電や自家発電 設備などでは変動する電力需要によって発電負荷を追 従させる場合も多く、実際の運転では発電容量に対し て低い負荷、つまり部分負荷での運転時間が占める割 合も多い.ガスタービンはほかの内燃機関同様、部分負 荷で運転すると効率が落ちるため、このような低負荷域 での運転が多くなると燃料消費率が悪化し、当初の計 画と比べ実際のメリットが低減してしまうことになる.

一般的に発電コストの6~7割を燃料代が占める といわれており,発電効率は事業性を左右する最も重 要な指標である.そのためここ数年,昼夜や平・休日 などで電力需要に大きな差があるお客さまから,部分 負荷での効率を重視する声を聞くことが多くあった. 海外案件ではこのような部分負荷運転が総運転時間の 4割以上を占めるケースがあり,部分負荷での高性能 が事業計画を左右することもある.

部分負荷での高効率を実現する方法として,ガス タービンを複数台導入し,負荷に合わせて運転台数を 変える手法もあるが,発電設備スペースや設備費の増

加などによるデメリットがあり, 台数を増やすことな く, 一つの設備で高負荷から低負荷の広負荷域を高効 率で運用できる発電設備が求められていた.

#### 高効率を維持する IHI の技術

IHI ではこのような声を受け,発電負荷が下がった 場合でも,ガスタービンの運転状態を部分負荷ではな く定格で運転することで,発電設備としての部分負荷 域での高効率を維持する以下のシステムを開発し,お 客さまに提供している.

(1) 吸気加熱システム

ガスタービンは吸気温度によって出力特性が変わ り,吸気温度を下げると出力が増加,吸気温度を上 げると出力が減少する特徴がある.この性質を利用 し,ガスタービンを部分負荷で運転する代わりに, 吸気温度を上げることで,電力需要が少ない場合で もガスタービンを定格で運転することが可能となる.

IHI では、ガスタービン排熱を利用する排熱回収 ボイラからの蒸気を吸気加熱コイルに直接通して吸 気温度を上げるシステムを開発した.この加熱シス テムの技術課題として、吸気加熱コイルは供給する 蒸気量によってコイル表面温度にムラができやす く、吸気加熱量を幅広く計画した場合、つまり蒸気 量を大きく変化させた場合、吸気に要求される一様 な温度分布を実現することが難しい.そこで、要求 される吸気加熱量が変わっても、吸気をムラなく加 熱できる吸気加熱コイルならびに制御システムを開 発し、幅広い負荷に対して、蒸気による最適な吸気 加熱が可能となった.

これにより,蒸気の熱を水を介して利用する従来 の温水加熱システムと比較し,必要な動力が少な く,かつ吸気加熱モードへの移行時間が大幅に短縮 されるなど,吸気加熱のメリットを最大限享受でき るシステムを構築することができた.

#### (2) SPRINT<sup>™</sup> システム

IHI が取り扱っている航空転用型ガスタービンで は、機種によって SPRINT ™(SPRay INTercooling) と呼ばれる出力増強システムを装備している.この システムは圧縮機入口に水を噴霧し、気化熱に よって圧縮機出口温度を下げ、燃料供給量を増やす ことで出力増強を可能とする.電力需要から求めら



れるガスタービン要求出力に合わせて,噴霧水量を 変化させることで,ガスタービンを定格で運用しつ つ,ガスタービン出力をシームレスに制御すること が可能となる.

さらに、これら二つのシステムを有効に活用する ため、電力需要や外気条件、ガスタービン運転条件 などリアルタイムに収集したデータから、吸気加熱 や SPRINT <sup>™</sup> システムの最適な組み合わせを実現 する制御システムを構築した.これにより、時間帯 や季節によって電力需要が低減した場合でも、制御 システムが自動的にガスタービンの運転状態を最適 化することで、部分負荷でも高効率を維持しながら 発電プラントを運用することが可能となり、その結 果、大幅な燃料代の節約を実現することができた.

今後もガスタービンパッケージャー兼 EPC (Engineering, Procurement and Construction) コントラクターである IHI の強みを活かし、ガスタービン特性の深い理解に基づ く発電システム全体の最適化によって、さらなる高効 率化ならびにお客さまニーズの実現を続けていく.

問い合わせ先 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター 原動機プロジェクト統括部 電話(03)6204 - 7701 URL: www.ihi.co.jp/powersystems/

## さらなるエコへの挑戦

### 省エネと使い勝手を追求した小型貫流ボイラ 最新制御技術と各燃料における最新機種の紹介

公的な運転資格を必要としない小型貫流ボイラが一般産業用ボイラの主力となっている. 各メーカーがさまざまな工夫を凝らすなか,特許技術となるガス焚きボイラの燃焼負荷制御方法と, 発停損失を低減した油焚き最新小型貫流ボイラを紹介する.





ガス焚き小型貫流ボイラ K-SEI シリーズ

小型貫流ボイラは公的運転資格が不要であり,一般 産業分野での設置台数が急増している.これらのボイ ラは単機でも使用されるが,複数台設置することによ り大型ボイラ(水管,炉筒煙管型)の代替機種とし ても需要が拡大している.このような背景から,設備 費および設置スペースの低減と省エネルギー化のた め,小型貫流ボイラには大容量化と高効率化が求めら れている.油焚き・ガス焚きそれぞれの小型貫流ボイ ラにおいて,省エネを切り口に,各燃焼負荷制御方法 の特長とその製品を紹介する.

#### 油焚き小型貫流ボイラでの制御技術

小型貫流ボイラの燃焼負荷制御方法は,3位置 (例:OFF-50%-100%),4位置(例:OFF-20%-60%-100%)といった多位置制御が主流である.なかでも 株式会社 IHI 汎用ボイラ(IBK)保有の特許技術に端 を発する4位置制御が,その有効性によりガス焚き 小型貫流ボイラに普及しつつある.しかしながら,油 焚き小型貫流ボイラでは依然3位置制御が多く用い られており、4 位置制御を採用しているのは IBK の みである.3位置制御では熱負荷が最低燃焼負荷 (50%)を下回る場合、50%-OFFを繰り返すことに なり、ボイラ発停時に行われる炉内換気に伴う熱損失 を生じ、実質の運転効率が大幅に低下する、また、小 型貫流ボイラは保有水量が少なく、自己蒸発による蒸 気供給ができないため、いったん燃焼を停止するとす ぐに圧力降下を生じる.従って,蒸気圧力を維持する ためには燃焼を継続することが重要となる. これらの 課題に対し、IBK では中間負荷を設けることにより、 最低燃焼負荷を低下させることができる4位置制御 を開発し、その負荷のさらなる低減(低負荷におけ る燃焼の持続性向上)とボイラ本体の高効率化に注 力してきた. 2014 年度製品化した油焚き X シリーズ (換算蒸発量 1.6~2.5 t/h の機種で展開)では、新開 発バーナーとの組み合わせで定格効率を 96.5%まで 向上. 低燃焼負荷は 25%まで低減している(定格効

4 位置制御の優位性



率,最低負荷とも業界最高値を達成. 定格効率は油燃料による低温腐食を考慮,低燃焼負荷ではエコノマイ ザー給水を一部バイパスすることで排ガス温度の低下 を抑制している).

#### ガス焚き小型貫流ボイラでの制御技術

ガス焚き小型貫流ボイラでは4位置制御が市場の 主流となりつつあるなかで、IBK ではガス燃料の制 御性を活かし、ボイラの効率特性を最大限に有効活用 する新しい制御方法を開発した.長年の4位置制御 の実績より、顕熱領域における中燃焼域では高・低燃 焼時よりボイラ効率が向上することが確認されてい る.新しい制御方法では、燃焼制御方式をPI(比 例・積分)制御される中燃焼域(40~80%)と固定 された高燃焼(100%)、低燃焼(20%)を組み合わ せたものとし、ボイラの実用運転下の効率向上と蒸気 圧力の変動防止、負荷の急変動に対する追従性の向 上、送風機の省電力化を図っている(上記の制御方 法を、以下「中燃焼比例制御」と表記する).

中燃焼比例制御(特許第 5399427 号)の特長を以 下に示す.

高効率領域の有効利用

前述のように顕熱領域におけるボイラ効率の性能 特性は山形のカーブを描くが、位置制御では固定さ れたポイントで燃焼を行うため、効率は固定された 2 負荷の間を直線で結んだ線上を移動することとな る.例として、4 位置制御の場合、中燃焼領域(40 ~80%負荷)における効率は 20%-50%-100%負 荷の固定ポイントを結んだ直線上を推移するが、中



燃焼比例制御ではボイラ本来の性能曲線(中燃焼 領域にピークをもつ山形のカーブ)上を移動する. このため,同じ性能を有したボイラでも,制御方法 の違いにより実際の運転効率に差を生じる.この差 はボイラ1台当たりでみるとわずかなものである が,複数台設置の場合,台数での合計値および稼働 年数を考慮すると無視できない数値となってくる.

省電力効果

ボイラ効率同様,4位置制御と中燃焼比例制御で は消費電力に差を生じる.

そのほかにも、負荷追従性の向上、蒸気圧力の安定 化、既存システムに対応可能などの特長を有してい る. IBK はこの中燃焼比例制御を主としたボイラ制 御を Blue-i SYSTEM と呼称し、ボイラ効率を 98%と した高効率機種との組み合わせを確立、SEI シリーズ として換算蒸発量 1.6~3 th の機種でラインナップ の展開を完了している.

最新の小型貫流ボイラではガス・油それぞれの燃料 に対し、最適な制御方法と組み合わせることで、ボイ ラ効率・運用性能の向上が図られている。今後も工場 の省エネ化への取り組みはさらに加速すると予想さ れ、IBK では幅広い負荷域で高効率運転を成し得る 製品群により、一般産業分野の省エネ化に貢献してい きたいと考えている。

問い合わせ先 株式会社 IHI 汎用ボイラ 技術部 電話(0791)24-2862 URL:www.ibk-ihi.co.jp/

## マレーシアの電力安定供給と 経済発展に貢献する

### 徹底した灰堆積・付着対策を施した 亜瀝青炭焚き超々臨界圧ボイラ

豊富な埋蔵量とその分布エリアの広さ、そして価格の面から、現在も重要な発電用エネルギー源 である石炭、IHI は独自の技術をもって、世界最高水準の高効率化による CO<sub>2</sub> 排出量低減、 低品質炭の利用による資源の有効利用を実現するボイラ設備を世界各国に提供している.



JEP 向けボイラ側面図



JEP 向けボイラ 3D モデル

石炭はほかの化石燃料と比較して可採埋蔵量が豊富 で、地域的にも世界中に広く分布しており、価格が安 い、そのため、石炭を燃料とした火力発電プラント は、現在も日本を含む世界各国で重要な電源としての 役割を担っている.

一方で,石炭は再生可能エネルギーや原子力,ほかの化石燃料に比べて,発電量当たりの CO<sub>2</sub> 排出量が 多いため,地球温暖化防止の観点から石炭火力発電プ ラントの発電効率を高め,CO<sub>2</sub> 排出量を極限まで少 なくすることが求められている. また、埋蔵石炭の有効利用と経済性の観点から、これまでは発電用燃料としての使用が限定的だった低品 質な石炭「亜瀝青炭」を、100%使用可能なプラントの需要が、世界各国で高まっている。

そのような状況下,経済成長に伴う電力需要の伸び が著しいマレーシアにおいて,IHI は株式会社東芝, Hyundai Engineering Co., Ltd. / Hyundai Engineering and Construction Co., Ltd. (韓国)と共同で,世界最高水 準の発電効率と最大級の発電容量を誇る,亜瀝青炭専 焼の火力発電プラントを 2014 年に受注した.

#### プロジェクトの概要

JEP (Jimah East Power Plant)のサイトはマレー半島 の西岸, 首都クアラルンプールの南約 50 km に位置 している. プラントの発電容量は送電端 1 000 MW × 2 基で, 世界でも最大級の石炭火力発電プラントとな る.

IHI は, 亜瀝青炭を燃料として, 高効率発電に必要 な超高温・超高圧蒸気を発生する超々臨界圧ボイラ (USC ボイラ)と, その周辺機器の設計, 製造・調 達, 据付, 試運転を受けもつ.

#### IHI の USC ボイラの特徴

IHI は、これまで国内外に数多くの USC ボイラを 納入しており、豊富な経験と最新の知見に基づいた高 い効率と信頼性を誇っている.以下にその主な特徴を 記載する.

#### (1) 対向燃焼

IHI は石炭ミルで粉砕した石炭(微粉炭)を,火 炉の前後に向かい合わせに配置したバーナーで燃焼 する対向燃焼方式を採用している.これにより,優 れた燃焼効率,燃焼安定性と火炉出口部における均 ーな燃焼温度分布が実現されている.

#### (2) ヘリカル構造の火炉

USC ボイラでは、火炉の壁面を構成する管(火 炉壁管)の局所的な過熱を防ぐため、管内を流れ る流体(水や蒸気)の量や状態を適切に設定、制 御することが必要である。それを実現するため、火 炉下部の管をらせん状に配置するヘリカル構造の火 炉を採用している。各火炉壁の流体状態の平均化が 容易であり、信頼性が高く、長期間の連続運転に対 して耐力のある構造となっている。

#### (3)パラレルパス構造

再熱器から発生する蒸気の温度制御方法として, 給水系統からの低温の水を再熱器系統に注入するス プレーシステムや,排ガスを再循環させて再熱器部 の通過ガス量を制御することで再熱蒸気温度を制御 するシステムがある.しかし,それらのシステムに は,スプレー注入によるサイクル効率の低下や,排 ガス再循環用ファンの動力が必要などのデメリット がある.



JEP サイトの位置



対向燃焼



そこで, IHI ではボイラの後部伝熱部(再熱器パス/過熱器パス)出口部に設置したダンパーにより,再熱器パスに流れるガスの流量をコントロール するパラレルパス構造による制御システムを採用している.この方法により,サイクル効率の向上,発

### 株式会社 IHI



パラレルパス構造

電所内で消費される動力の低減が可能になり、プラ ント全体の効率向上つまりは燃料消費量の低減とい う大きなメリットを提供できる.

#### 亜瀝青炭専焼に対する設計考慮点

JEP 向けボイラの大きな特徴は、一般的な発電用石 炭種である瀝青炭よりも低品質な亜瀝青炭を 100%使 用できることにある. 亜瀝青炭は瀝青炭に比べ、高水 分、高揮発性、低発熱量、低灰融点など発電用燃料と しては利用しにくい特性をもつが、なかでも、低灰融 点に起因する燃焼灰のボイラ伝熱部への付着性の高さ を考慮することが極めて重要である. 一度ボイラの各 伝熱面への過度な灰付着が起きると、伝熱阻害により 運転に重大な支障をきたすため、灰の付着を極力抑 え、付着した灰も運転中に除去しやすいような設計が 必要である. 以下に、JEP における対応を紹介する. (1) 火炉サイズ

石炭焚きボイラでは、火炉ならびに火炉出口下流 伝熱部への灰付着を避けるため、石炭種ごとに異な る灰の付着性を考慮して、火炉の単位面積当たりの 収熱量と火炉出口部のガス温度が適正な値となるよ う火炉のサイズを決定する必要がある、火炉サイズ 選定においては、灰付着性の高い亜瀝青炭を専焼す るために、瀝青炭焚きボイラに比べて 10 ~ 15%程 度火炉を大きくしている、これにより火炉内の温度 を極力抑えながら、火炉出口部でのガス温度も下 げ、溶けた灰が火炉壁内面および火炉出口部付近の





過熱器に過度に付着することを防いでいる。 (2) 火炉スートブロワー

瀝青炭焚きボイラでは、火炉壁面の灰を除去する 装置として、蒸気で火炉壁面の灰を除去する蒸気デ スラッガを使うのが一般的である.しかし、JEP で は、灰付着性の高い亜瀝青炭への対応として、より 灰除去能力の高い水スートブロワーを採用してい る.水スートブロワーでは、ちょうど消防車の放水 のように、高圧の水を火炉壁面に吹き付けて灰を除 去する.また、火炉壁内面各部に設置した熱流束計 の計測値を指標として、噴射範囲と噴射タイミング が決定される.



キャスタブルレスバーナースロートの適用例

(3) キャスタブルレスバーナースロート

灰付着性の高い石炭では、火炉壁面のバーナー開 口部に設置している耐火材を起点として、灰が付 着・成長する場合がある.これを防ぐため、耐火材 の露出範囲を最小限にする火炉壁管の管曲げ構造を 採用している.

#### (4) 過熱器・再熱器の管パネルピッチ

過熱器・再熱器の管パネル間に灰が付着し,ブ リッジングすることを防ぐため,瀝青炭焚きボイラ に比べて管間ピッチ(パネル間ピッチ)を広げた 構造としている.

#### (5) 蒸気スートブロワー配置

過熱器・再熱器への付着灰の除去を目的として設 置する蒸気スートブロワーは, 瀝青炭焚きボイラに 比べてその数を増やすことで, スートブロワーの有 効範囲を拡大している.

#### (6)節炭器

ボイラ伝熱部の最下流・燃焼ガス出口部に設置さ れる節炭器には、瀝青炭焚きボイラでは伝熱効率向 上のためフィン付き管を使用するのが一般的だが、 付着性の高い灰の場合は塊状の灰がその上に堆積す る懸念がある.そのため、フィンのないベア管を節 炭器に採用し、さらに蒸気スートブロワーを設置す ることで、灰堆積防止・除去強化を図っている.

#### プラント性能

超々臨界圧の蒸気条件の適用により、プラントヒー トレート(単位発電量当たりの必要入熱量)は、マ レーシアで従来一般的だった亜臨界圧プラントと比較 して、飛躍的に向上している.プラントヒートレート は、過去に IHI が同国に納入した亜臨界圧プラントと



比較して,相対値で 6%以上改善しており,これは 25 年間の運転期間で試算すると,発電所としておおよそ 1000万 tの石炭量に相当し,7億米ドル以上の燃料コ スト低減(石炭単価 70米ドル/tとして)となる.

また、CO<sub>2</sub> 排出量に関しても、25 年間の運転で 2000万 t 以上が低減されることになる.

#### おわりに

IHI の USC ボイラは,超々臨界圧蒸気条件の世界 最高水準の高効率発電と,低品質な亜瀝青炭の 100% 専焼を両立させることにより,経済的で信頼性の高い 運転を実現する.

JEP プロジェクトは現在, 2019 年の営業運転開始 を目指して,現地工事が進行中である.

IHI の高効率・高信頼性の USC ボイラが, マレー シアの電力の安定供給とさらなる発展に貢献し, さら には世界のエネルギー問題解決の一助となることは間 違いない.

問い合わせ先

株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター ボイラプロジェクト統括部 基本設計グループ 電話(03)6204 - 7525 URL: www.ihi.co.jp/



## ワンランク上の超音波検査

### 原子力の検査を簡単かつ高度にする 新発想の超音波探傷装置「ARM-UT」

先進の検査技術を提供し、原子力設備の安全性と信頼性の確保に取り組んできた IHI. 最高レベルが求められる原子力設備の検査の現場で培われたノウハウを基に、 新型の超音波探傷装置を紹介する.



ARM-UT

原子力発電所では、プラントの運転開始後における 設備の健全性を確認するため、定期的な検査(供用 期間中検査)が行われており、超音波を使った探傷 試験はこの供用期間中検査において中心的な検査であ る.東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故 以降、国内の原子力発電所で、このような定期的な検 査が行われることは少ない、しかし一方で、原子力設 備の検査規程に対しては検査の透明性を高め、社会に 原子力エネルギーの安全性と信頼性を認知していただ くための取り組みが求められており、点検・検査に対 する技術革新の要望は、これまで以上に高まってい る.

#### "いいとこ取り"の装置を開発

超音波探傷試験(UT)には手動と自動の2種類が ある.手動UTは超音波の波形を表示するのみであ り,比較的安価な装置を用いて簡便に実施できること から一般的にも広く普及しているが,探傷中に得られ る超音波波形や欠陥位置などの情報を,検査員がその 場で確認し記録する必要があるため,検査員には大き な負担が掛かることになる.

それに対し自動 UT は,探傷中の超音波波形や欠 陥位置など全てのデータが自動的にコンピューターに 収録され,これらのデータは後になって再確認するこ とができる. 探傷データを後々まで残せることは, 検 査の透明性を確保でき, 探傷現場での検査員の負担軽 減にもつながる. ただし, 自動 UT は自動装置やロ ボットなどを使う必要があることから, 手動 UT と 比較するとコストが高く, その普及は限定的であっ た.

今回開発した ARM-UT (Absolute Recordable Manual Ultrasonic Testing System)は、手動 UT と自動 UT の それぞれのメリットを活かした"いいとこ取り"の 特長を備えており、既存技術を革新する新発想の超音 波探傷装置といえる.

#### これまでの超音波探傷を革新する 「ARM-UT」とは

検査員は、手動 UT と同じように小型・軽量の ARM-UT を携えて現場に向かう.そして、手動 UT とほとんど変わらない慣れた手順で迅速に超音波探傷 を実施する.手動 UT と異なるのは、検査対象物の 表面に位置情報を表すコードが印刷されたシートを貼 り付けるだけ.たったこれだけで、自動 UT と同じ ように超音波波形や欠陥位置などの全てのデータがコ ンピューターに自動収録され、後から探傷時の状況を 再現することが可能になり、検査の透明性が保たれる ようになるのである.

ARM-UT の原理は非常にシンプルであるが,それ 故に実際の現場への適用性が良く,信頼性の高いもの になった.さらに,この原理を活かして従来の手動 UT や自動 UT にはなかった機能を付加することもで きた.例えば,ARM-UT ではシートに印刷された位 置情報コードの上を,超音波センサーが隙間なくト レースしなければ,採取したデータが不完全なものと なってしまうため,欠陥見逃しの原因となる"探傷 漏れ"を原理的になくすことに成功した.さらに, 超音波センサーと一体となった位置情報コードの読み 取り用カメラを利用することで,超音波センサーと検 査面の接触状態が不適切になった瞬間や,超音波セン サーの過度の傾きにより超音波の発振方向が不適切に なった瞬間に,自動的にデータ採取を休止する機能も 搭載することができた.

このように, ARM-UT は現場に適用しやすく, 信 頼性が高く, 検査漏れやデータ採取の失敗が自動的に 防止される機能を備えた装置となった.



本装置は、これまで国内火力発電所の配管点検に適 用された実績があるほか、海外原子力設備の点検案件 も控えており、さらに国内の原子力発電所に向けた PR 活動においても大変高い評価をいただいている。

IHI は、常に最高レベルが求められる原子力設備の 点検・保守工事において高度な技術を開発し、そのノ ウハウを蓄積してきた.超音波探傷装置「ARM-UT」 により、これまでよりも1ランク上の検査サービス を提供し、安心・安全な原子力エネルギー社会を実現 する取り組みに貢献していく所存である.

問い合わせ先 株式会社 IHI 原子力セクター 横浜工場 生産技術部 電話(045)759-2797 URL:www.ihi.co.jp/

## 石油化学プラントの心臓 直径 6 m, 細管 2 万本の反応器

### 多管式反応器の内部流動予測技術と パッケージ化技術

赤ちゃんの肌にやさしい紙おむつ. その肝は高吸水性樹脂と呼ばれるハイテク化学素材だ. これを日々産み出しているのが IHI 製の巨大反応器. 最新の装置に込められた最新の技術とは?



多管式反応器パッケージの模式図



多管式反応器内部を模擬した試験装置

#### 石油化学プラントの中核「反応器」とは

プラスチックをはじめとするさまざまな合成樹脂は 石油を原料としており、石油化学プラントで生成され る.それらプラントには反応を行うためのさまざまな 装置が設置される.今回紹介する多管式反応器は、そ のような石油化学プラントの中核となる巨大な装置で ある.

多管式反応器は直径 6 m を超える巨大な円筒の中 に,内径 2 ~ 3 cm の細管が 2 万本以上取り付けられ ている.全ての細管の内部には触媒が充填されてお り,この触媒の中を製品の原料であるガスが流れる. そのとき,原料ガスが化学変化し,別の物質になって 出てゆく.この化学反応では大量の熱を発生するの で,細管の外側に液体の熱媒を大量に流し,冷却しな ければならない.実際には,細管内部で発生した熱を 除去しながら化学反応に適したある一定の温度に保つ 必要がある.そのため,熱媒を循環させるための大型 ポンプ,除熱のための熱媒クーラー,除熱量を調整す るための調整弁などの周辺機器を反応器本体と組み合 わせた構成となっている.

反応器の運転温度は 300℃を超え,熱媒は溶融塩と いわれる特殊な液体を使用している.この溶融塩は 400℃でも液体で安定しているという利点があるが, 140℃近辺で凝固するため,それを考慮して設計する 必要がある.

このような特徴をもった多管式反応器を使用して生 成されるものとして、アクリル酸、メタクリル酸、メ チオニン酸、塩酸などの基礎的な化学製品がある. IHI 横浜工場では、これらのなかでもアクリル酸用の 多管式反応器を化学会社向けに設計・製造しており、 2011 年以降、新しいタイプの3基の多管式反応器を 設計・製造し、納入した、どのような点が新しいのか を紹介する.



#### 巨大反応器を支える繊細技術

(1)多管式反応器の内部流動の予測技術

運転中の多管式反応器の細管内部では化学反応が 継続しており、大量の熱が発生しているため、それを できるだけ均一に冷却することをお客さまから要求さ れている.一方で、反応器内部の細管の数や発熱の 状況はお客さまによってさまざまである.従って、そ れぞれの要求に応じながら、可能な限り温度が均一 になるように熱媒の流れをオーダーメード的に調整し なくてはならない.調整といっても、実機が完成して から試運転で調整することはできないので、設計段 階で温度分布を正確に予測する技術が不可欠となる.

このため今回, 社内で多管式反応器内部を模擬し た試験装置を作成し, 流れの特性を把握するための 実験を行った. そして, その実験結果と CFD(数 値流体力学)を組み合わせることで, 反応器内部 の温度分布を正確に予測する技術を開発した.

(2) 多管式反応器と周辺機器のパッケージ化

従来は,多管式反応器から適度に離れたところに 熱媒クーラー,調整弁などの周辺機器を配置し,そ れらを配管で結ぶ方式であった.

今回,反応器を中心にして,周辺機器をほぼ直接 接続し,その非常に狭い範囲で熱媒を循環させると いう「パッケージ化」を実現した.パッケージ化 するためには,前述の温度分布の予測だけでなく, 反応器内部に熱媒を流すために必要な動力を精度良 く予測し,その結果を基に熱媒クーラーへ流れる量 も適切になるように設計する必要がある.そして, このような流れの設計をしながら,巨大な多管式反 応器と周辺機器の配置設計や強度設計を同時並行的 に行い,最適となるように設計しなくてはならな い.それがパッケージ化の難しさである.IHIでは 大型反応器の強度設計・製造に関する技術と数多く の実績をもっている.それらと内部流動の予測とい う新しい技術を組み合わせることによって,初めて 実現できたものである.

パッケージ化は,機器や配管物量の削減,専有面積 の縮小,現地工事の削減,運転やメンテナンスがしや すいなど,従来タイプよりも多くの点で非常に優れて いる.そのためお客さまにとってのメリットが多く, 今後の需要も高まっていくと考えられる.今後もお客 さまのさまざまな要求に応えながら進歩し続け,より 高性能,高品質のパッケージ化した多管式反応器を提 供していきたい.

問い合わせ先

株式会社 IHI 原子力セクター 機器設計部 電話(045)759-2639 原子力セクター 海外プロジェクト部 電話(045)759-2293 URL:www.ihi.co.jp/

## 未利用エネルギーの有効利用 — 二塔式ガス化炉の活用 —

### 褐炭・バイオマスなどをガス化し多用途利用を 可能にする「二塔式ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup>」

二塔式ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup> は、ほかのガス化炉と比較して低温・低圧な条件下で運転できる循環流動層技術を応用したガス化炉. 褐炭など未利用燃料のガス化が可能で、運用性、経済性にも優れた魅力あるガス化炉プロセスが特長.実証プロジェクトをスタートさせ商用化へ前進!!

株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター 二塔式ガス化炉プロジェクト部

湯浅 晃一・中澤 亮



インドネシア実証機(50 t/d) プラント全景(中央: TIGAR® ガス化炉架構)

近年,アメリカでシェールガス,カナダでオイルサンドが多量に生産されるようになるなど非在来型のエネルギー資源のニュースが世間をにぎわせている.そもそも,世界で使用されているエネルギー源には石油・天然ガス・石炭といった化石燃料や,原子力,再生可能エネルギーなど複数あるが,エネルギー密度が高く,容易に輸送でき,使い勝手に優れる化石燃料がその多くを担っている.なかでも石炭は最も可採埋蔵量が多く,世界的に偏在性がなく,かつ石油や天然ガスと比較して発熱量当たりの単価が安く価格が安定しているため,多くの国で重要なエネルギー源となっている.しかし,石炭埋蔵量の半分以上を占める褐炭や亜瀝青炭といった低品位炭は,水分や酸素分が多いため発熱量が低い、特に褐炭は自然発火しやすいため.

長距離輸送や貯蔵に向かず,炭鉱近くの発電所燃料な ど限定的な利用にとどまり十分に利用されていない.

従って、これら未利用石炭の利用技術の重要性が高 まっている.このため、褐炭など低品位炭の固体原料 をガス化することで、高効率な発電やガス化ガスであ る一酸化炭素や水素からアンモニア、メタノール、メ タン、ほかの液体燃料などを合成し化学原料として利 用できる技術が重要と考えられる.これら技術の鍵と なるのはガス化技術であり、世界では各種のガス化技 術の研究開発が行われている.

#### 石炭ガス化技術(二塔式ガス化)

ガス化システムとは、固体原料の熱分解とチャーと いう炭化物のガス化反応により固体原料を一酸化炭素



二塔式ガス化炉 TIGAR®の基本構造

や水素などのガスに変換する技術である.ガス化反応 は吸熱反応であり,空気や酸素により部分酸化するこ とでガス化に必要な熱を供給する.ガス化剤として は,酸素,水蒸気,空気などが用いられる.ガス化炉 としては固定床・噴流床・流動層など各種の型式が開 発されており,それぞれ異なる特徴をもっている. IHI では未利用な資源が多く,高効率利用技術の開発 が期待されている褐炭に着目し,2004年から循環流 動層ボイラの技術を応用した二塔式ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup> (Twin IHI Gasifier)の開発を進めている.

二塔式ガス化炉は、高速流動層燃焼炉と気泡流動層 ガス化炉を組み合わせたガス化炉であり、高温の砂の 中で燃料の燃焼やガス化反応を行う流動層技術をベー スとしている.ガス化反応を行うガス化炉と、燃焼反 応を行う燃焼炉の二つの炉から成るため"二塔式" と呼んでいる.褐炭などの固体原料はガス化炉に投入 され、熱分解およびガス化剤との反応により主に一酸 化炭素、水素に変換される.ガス化剤としては水蒸気 を利用し、水蒸気はガス化ガスおよび排気ガスからの 熱回収によって生成される.ガス化炉で発生した未反 応のチャーは循環媒体とともに燃焼炉に運ばれ、空気 によって燃焼し循環媒体に熱を供給する.循環媒体と 排気ガスはサイクロンと呼ばれる装置によって分離さ れ、循環媒体はガス化炉に循環されることでガス化反 応に必要な熱となる.

#### パイロット炉(6 t/d)による検証

要素研究を経て、2006年度より次期開発ステップ であるインドネシア実証機(50 t/d)プロジェクトに向 けた設計データ、プラント連続安定性能の取得検証を 目的として、褐炭供給量 6 t/d 規模の連続ガス化試験 が可能なパイロット炉を横浜工場に建設した.本プラ ントではガス化するだけではなく、ガス化ガス中に含 まれるタール、窒素分を除去するガス精製機器、ガス 精製の工程で生じる排水を処理する排水処理機器も設 け、ガス化プラントに必要となる構成機器一式を連続 試験評価した.ガス化原料としては石炭中の水分 30 ~45%程度のインドネシア褐炭を使用した.

#### く ガス化ガス組成 >

パイロット炉による褐炭ガス化試験によって得られ た代表的なガス化ガス組成は,水素,一酸化炭素,二 酸化炭素,メタンなどであった.水蒸気ガス化炉の特 徴である高濃度水素を得ることができるとともに,窒 素などのコンタミネーションがほとんどないことも確 認できた.



6 t/d パイロットプラント外観



褐炭ガス化ガス組成(パイロット試験)

#### < 連続運転安定性 >

100 時間以上の連続ガス化運転でのトレンドでは, ガス化炉温度,燃焼炉温度ともにほぼ一定で,安定し たガス化運転が可能であることを確認できた.また, 運転途中で石炭中水分が42.8%の褐炭から,34.3%の 褐炭へ連続的に供給を変化させているが,各部温度や ガス化状態に急激な変動は見られず,装置として高い ロバスト性を有することも確認できた.

2010 年度からは経済産業省の支援を受け、実証機 への課題抽出、要素技術の検証を行い、さらにパイ ロット炉の連続運転試験の成功により、2012 年度か ら次のステップであるインドネシア実証プロジェクト をスタートした.

#### インドネシア実証プロジェクト

実証プロジェクトはインドネシア褐炭給炭量 50 t/d 能力の二塔式ガス化炉実証機をインドネシア国営肥料 統括会社(PIHC)傘下のクジャン工場に建設,実証機 を使ったさまざまなガス化実証検証を 2016 年度末ま で行う計画である.クジャン工場はジャカルタから東 南に約 75 km,また,IHI 海外関係会社である PT. Cilegon Fabricators 工場からも陸送にて 2 時間程度で 輸送できる位置にある.

#### < 実証プロジェクト概要 >

実証機はガス化ガス用途先としてアンモニア肥料工 場を想定した水素製造プロセスの検証を行う.構成は ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup>,ガス化ガス中のタール除去を目的 としたタール分解炉,排熱回収,ガス冷却・除塵,ガ ス化ガス中の一酸化炭素を水素へ変換するガスシフト プロセスおよび,ガス化ガス中の酸性ガス(CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)除去プロセスから成り,アンモニア合成に必要



実証機プロセスフロー



 
 IHI 関係会社工場 (PT. Cilegon Fabricators)
 Easy access for site visit

 Easy access for maintenance
 PIHC (クジャン工場) (ジャカルタから 75 km)

インドネシア実証プロジェクトサイト

な水素を最終製品として製造する.

実証運転で使用する石炭は現地法人である PT. IHI GASIFICATION INDONESIA が東カリマンタン島より 褐炭 (Coal Brand "PKN Coal" 3 400 kcal/kg GAR at 43% moisture)を購入,サイトまで輸送し運用している.今 後はさらに水分含有量の多い褐炭,バイオマスの試験 も計画している.



サイト近傍の港での石炭荷揚げ風景



#### 二塔式ガス化炉 TIGAR® 開発スケジュール

#### < 実証プロジェクト状況 >

2013 年 2 月にインドネシア肥料工場との調印を終 え、同年 10 月より建設工事を開始した.約1 年を 経て工事は終了し、2014 年 12 月から石炭ガス化運 転を兼ねたプラント総合試運転を開始し、2015 年度 より実証運転ステージに入った.実証運転では肥料工 場から派遣されたオペレーターには運転技術の習得 と、将来、商用機の運転指導をしていただくことを期 待している.

実証プロジェクトは今後 2016 年度までの約 2 年 間で数千時間のガス化実証運転を行い,スケールアッ プ設計の確認,長時間運転による保守・耐久性の確 認,肥料工場とともにデモンストレーションを行う.

#### 商用化に向けて

インドネシアは国策として、石炭利用率を現在の 24%から 2025 年には 31%に高める施策を進めている.

一方,天然ガスの産出量は年々減少しており,数年 後には価格が大幅に上昇する見込みで,天然ガスを多 く使用している肥料会社は,早期に天然ガスから石炭 ガス化ガスへの原料転換を図りたい意向をもってい る.以上のことから,インドネシアに豊富にある安価 な褐炭をガス化し,高価な天然ガスを代替できれば, 肥料会社にとっても運転コストを低減することがで き,また,インドネシアとしては余った天然ガスを輸 出に回すことで貴重な外貨獲得源とすることができ る.日本にとってもインドネシアの天然ガス輸出余力 が増すことは,エネルギーセキュリティ上望ましいこ とである.現在,実施している実証プロジェクトは, インドネシアで初めて同国の褐炭を使用した長期運



二塔式ガス化炉 TIGAR<sup>®</sup> 実証設備制御室内 (インドネシア運転員への運転教育)

転・ガス化検証を行うものであり、その結果を商用設 計に反映、さらに信頼性の向上に努め、二塔式ガス化 炉の優れた適用性を示すことで、商用機の早期実現を 目指す.

問い合わせ先 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター 二塔式ガス化炉プロジェクト部 電話(03)6204 - 7521 URL:www.ihi.co.jp/

株式会社 IHI

## Ni 基合金が拓く 高効率な発電ボイラへの道

### 600℃ 級超々臨界圧(USC)から 700℃ 級先進超々臨界圧(A-USC)へ

石炭焚き発電ボイラにおける CO<sub>2</sub> 排出削減に向けた取り組みのなかで,経済性 に優れた対応として,温度が 700℃超の蒸気を発生させて発電の高効率化が図 れることを実証する試験を実施している.

> 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター ボイラプロジェクト統括部

室木 克之



左: 既設ボイラおよび実缶試験設備鳥かん図, 右: 実缶試験用伝熱面構成



700℃級過熱器炉内状況

#### 地球環境負荷低減に有効な A-USC 発電ボイラ

東日本大震災後,調達上の地政学的リスクが低く, 経済性にも優れた石炭燃料を使用する石炭火力発電 が,エネルギーセキュリティーのニーズ(エネル ギー供給源を分散させる観点など)から,安定電源 として再認識されつつある.

一方, 化石燃料のなかで発電量当たりの CO<sub>2</sub> 排出 量が相対的に大きい石炭火力発電においては, 地球環 境負荷低減(温室効果ガス排出削減)のため, CO<sub>2</sub> の回収・貯留(CCS)やバイオマス混焼といったさま ざまな取り組みが進められている.そのなかで,経済 性を確保しつつ, CO<sub>2</sub> 排出量を削減する手段として, 熱効率の向上(少ない投入熱エネルギーで同程度 の電力が得られること)が効果的であるとされてい る.

既存の石炭火力発電設備を高効率化するためには, タービン入口(ボイラ出口)蒸気をさらに高温・高 圧化する必要がある.従来,600℃級であったタービ ン入口蒸気温度を700℃級まで上げることで,送電端 での発電効率を相対値で10%程度上昇させることが 可能となる(CO<sub>2</sub>排出量で10%程度の削減に相当).

蒸気の高温化による効率向上は,従来技術の延長で 対応できるため,実用化の観点からほかの CO<sub>2</sub> 削減 に向けての取り組みと比較して,開発項目が少ないと いったメリットがある.また,従来ボイラと同様に, 幅広い燃料性状にも対応可能で,燃料面からの制約が 少ない特長がある.

#### 実缶試験の取り組み

このような背景から長期的な視野に基づき,国内電 力会社の次期新設・既設石炭火力発電所のリプレース (更新)を念頭に,商業機における 700℃級実証試験 ループ(デモプラント)を設置しての,実缶試験 (事実上の実証試験)を目指した取り組みをすでに進 めている.本取り組みは,その開発規模の大きさか ら,国家プロジェクトとして国内各ボイラ,タービ ン,材料メーカーが中心となり 2008 年に開始し, 2014 年からは電力会社も開発推進体制にアドバイ ザーとして参画している.

2014 年 12 月,国家プロジェクトのメンバーで選定 した株式会社シグマパワー有明の三川発電所(福岡県, 石炭焚きボイラは IHI 納入)にデモプラントを据え付 け,試運転を経て,2015 年 5 月に実缶試験を開始した.

#### 700℃級石炭焚きボイラ実現に必要となる 開発項目

700℃級石炭焚きボイラの実現に当たり,まず必要 となるのが,実績のある高温材料の600℃での許容引 張応力と同程度の許容引張応力を 700℃超の条件で有 する高温材料の開発である.従来の 600℃級ボイラは 9Cr 鋼を開発することで実現されてきた経緯がある が,700℃級となると従来ボイラでは経験がない.こ のため、高温・高圧下においてこれまで使用実績のな い Ni 基合金材料の開発が必須となる.

また,Ni 基合金を使用するうえで,構造面の検討, 製造加工技術の確立および運転中の保守管理といった 面についても課題となる.そのため,こういった開発課 題に対する検討項目・対策を明確にし,材料評価を中 心とした基礎的な要素試験は国家プロジェクトで実施 し,それ以外は各社の独自開発として取り組んでいる.

Ni 基合金をベースとした各種ボイラ候補材料の開 発に当たっては,強度,延性,加工性など,各材料の 特徴を考慮し,材料試験を実施している.ただし,Ni 基合金は非常に高価な材料であるため,コスト競争力 の観点から,適用部位を最小化し,適切な材料選定を 行うことが設計上のポイントとなる.

Ni 基合金特有の課題としては,

- ・素材が硬く、溶接割れが発生しやすい
- ・熱膨張率が高く、熱応力の設計上の配慮が必要
- ・非常に高価な材料

などがある.

Ni 基合金を使用したボイラ耐圧部の製作は,新た な加工技術および溶接技術の確立が必要となる. IHI では,各ボイラ候補材料に対して,







(注) 電力会社(中部電力,電源開発)はアドバイザーとして参画

700℃級実証試験に向けた国家プロジェクト体制



国家プロジェクトスケジュール



各材料の許容引張応力比較



高周波曲げをした Ni 基合金大径管

- ・曲げ/切削加工性の確認
- 熱処理条件の確立
- を実施し、健全性を確認している.

また、溶接技術についても

- ・ 同材, 異材の溶接性の確認
- 熱処理条件の確立
- ・ 溶接部の機械的性質の確認
- 溶接部のクリープ強度の確認

を実施し、健全性を確認している.

#### デモプラントの検証を経て実用化を目指す

前述のとおり,実缶試験用デモプラントでは 2015 年5月から700℃超の蒸気を発生させ,700℃での 10000hの運転時間達成を目標に試験を継続している.

700℃級発電ボイラを実現するためにはさまざまな課 題があり、お客さまの要求を踏まえた対応が必要とな るだけでなく、100 000 h の材料試験を継続する必要が ある. それゆえ、全ての試験結果がそろうまでに時間 が掛かり、実現までの道のりは長いのが実情である.



Ni 基合金過熱器管管寄せ



Ni 基合金再熱器管管寄せ



株式会社シグマパワー有明 三川発電所で稼働している 700℃級実缶試験用設備

しかし,新材料開発のプロセスのなかで新たな知見 を得るなど,主な課題についてはほぼ解決のめどを付 けることができた.また,新材料で製作されたデモプ ラントの現地据え付けは,既設ボイラが IHI 製品で あったこともあり, IHI グループが執り行うなど, IHI グループの技術力を結集して実缶試験に貢献して いる.

700℃級の実用化に向けては、ヨーロッパ、アメリ カ、中国、インドなどボイラ、タービンメーカーを有 する各国で取り組まれている.しかし、実用化達成に ついては世界でもまだ例がなく、現時点で実証の試験 を進めている日本がリードしていると自負している.

また,日本国内においても,石炭火力発電所の老朽



IHI 相生工場で溶接した 700℃級実証試験ループ



700℃級実証試験ループ据付状況

化が進行しており,次世代石炭焚き火力発電に向けた 既設石炭焚きのリプレース用として,700℃級の高温 蒸気条件が採用されることが期待される.

IHI は 700℃級 A-USC 発電ボイラの実用化を目指 して開発を続けていく.

問い合わせ先 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター 営業・マーケティングセンター 国内営業部 電話(03)6204 - 7414 URL:www.ihi.co.jp/

# 低炭素社会に適合した石炭火力発電の実現へ

### 化学吸収法による CO<sub>2</sub> 分離・回収技術の開発

地球温暖化の緩和と電力の安定供給を両立するためには、石炭火力発電所からの CO<sub>2</sub> 排出量低減が重要である.化学吸収法による CO<sub>2</sub> 分離回収技術の実用化に 向けた取り組みについて、最新の成果を踏まえて紹介する.

> 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター 開発部



化学吸収 CO2 回収プラント

高野

健司

#### はじめに

東日本大震災以降の日本やヨーロッパなどにおける 原子力発電計画の見直し,北米発のシェール革命の進 展など,世界のエネルギー供給を取り巻く環境は大き く変化してきている.

燃料調達の安定性や経済性に優れる石炭火力発電 は、世界全体の発電電力量の約4割を占める主要な 電源であり、今後も重要な役割を担い続けることが予 想される、一方、石炭火力を使い続けるうえでは、そ の CO<sub>2</sub> エミッションが解決すべき大きな課題であり, 高効率化,バイオマス混焼とともに, CCS (Carbon dioxide Capture and Storage)の技術開発が鋭意進めら れている.

発電分野における CCS 技術は,酸素燃焼技術,燃 焼後回収技術,燃焼前回収技術の三つに大きく分類さ れる.このうち IHI では,酸素燃焼技術と,燃焼後 回収技術の一つである化学吸収法の開発を実施してい る.これらは,燃焼前回収技術とは異なり,新設およ び既設改造のいずれにも対応することが可能である.

そのなかでも化学吸収法は,排ガス圧力がほぼ常圧で CO<sub>2</sub> 濃度が 15%前後と薄い石炭火力排ガスからの CO<sub>2</sub> 回収に適した方法である.また,発生する排ガ スを全量処理する全量回収だけでなく,排ガスの一部 を処理する部分回収も可能であり,初期投資を抑えて 規制に応じて回収量を増やしていくなど,CCS に対 するニーズに柔軟に対応することができる.

#### 化学吸収法とは

化学吸収法とは、アミンなどのアルカリ性水溶液を 媒体として、この液と  $CO_2$  との化学的な吸収・放出反 応を利用して  $CO_2$  を分離・回収する技術である。発 電所からの燃焼排ガスは、排煙処理装置(脱硝,脱じ ん,脱硫など)で不純物を除去した後、「吸収塔」に 送られる.吸収塔で排ガスと  $CO_2$  分が薄い(リーン な)吸収液を接触させると、化学反応により排ガス中 の  $CO_2$  が選択的に吸収液に取り込まれ、 $CO_2$  分が濃 い(リッチな)吸収液となる。次に、その吸収液を 「放散塔」に送って加熱すると、吸収液から  $CO_2$  が気 体となって分離され、吸収液はリーンな状態に戻る。 発生した高濃度の  $CO_2$  を回収し、このサイクルを繰り 返すことにより、吸収液の損失をほとんど伴わずに連 続して排ガスから  $CO_2$  を分離・回収することができ る。

一方で、本方式ではリッチ吸収液から CO<sub>2</sub> を放散 させる際(再生時)に多量の熱エネルギーが必要と なる.発電所で排ガスから CO<sub>2</sub> を分離・回収する場 合には、熱源としてプロセスの低圧蒸気の一部を抽気 して使用するため、発電出力の低下を生じる.このた め、より少ない熱でプロセスを実現できる高性能吸収 液と熱マネジメント技術が必要となる.



#### 省エネルギー化に向けた技術開発

前述のとおり化学吸収法は、CO<sub>2</sub> 放散に多量の熱(以下,再生エネルギー)を必要とし,そのコストは CO<sub>2</sub> 分離・回収に必要なコストの約半分を占めると される.そのため本技術の普及には,この再生エネル ギーの低減が不可欠である.

再生エネルギーは、吸収液の温度上昇に要する顕熱 損失、吸収液から CO<sub>2</sub> を放出する際の反応熱、およ び、吸収液の水分蒸発による熱損失を補うための潜熱 損失の総和として表現できる.これらのうち、再生エ ネルギーの大半を占める反応熱を低減する技術開発が 特に重要であり、反応熱の低い吸収液を開発する必要 がある.

また,アミン水溶液による CO<sub>2</sub> の吸収は反応速度 が遅いため,吸収塔内には充填材を設置している.一 般に,吸収速度と反応熱はトレードオフの関係にあ り,反応熱低減には従来技術の充填材(以下,市販 充填材)よりも性能が高い充填材が必要となる.

さらには、従来技術では潜熱が有効に回収できてい ないため、これを改善するための熱回収プロセスが必 要となる。

IHI では、これら三つの技術(① 低反応熱の吸収 液、② 高性能充填材、③ 潜熱を有効に回収するプロ セス)に注力し、開発を進めてきた。



#### 20 t-CO<sub>2</sub>/d パイロットプラントでの検証

前述した三つの開発技術を IHI 相生事業所に建設 した 20 t-CO<sub>2</sub>/d 規模の化学吸収法パイロットプラン ト(以下,パイロットプラント)で評価試験した. このパイロットプラントは,熱出力 20 MW 規模の石 炭燃焼試験設備に併設され,連係して石炭燃焼排ガス での運転評価を行うことができ,石炭火力用として国 内最大級の試験設備となっている.

また、パイロットプラントは石炭燃焼排ガスを用いた評価だけではなく、プロパンガス燃焼排ガスを用いた運転も可能であり、回収した CO<sub>2</sub>の一部を吸収塔上流側にリサイクルすることによって、石炭燃焼排ガス相当の CO<sub>2</sub> 濃度にした試験評価を行った.



20 t-CO<sub>2</sub>/d パイロットプラント



20 t-CO2/d パイロットプラント概略系統と検証項目

まず IHI 充填材を評価した.吸収塔には,3段(塔 下部より,下段,中段,上段)のそれぞれ5m ずつ, 計 15mの充填部がある.このうち,下段に IHI 充填 材を設置した. IHI 充填材は,濡れ性の優れた金属の 板を液・ガス流れに対して,垂直に配列したシンプル な構造であることから,有効に充填材両面を反応に用 いることが期待できる.加えて,吸収性能向上のため に金属板の充填量を市販充填材に比べて増やしても低 いガス圧損を維持できることが特徴である.

中段および上段には、市販充填材を設置した. 吸収 液は、成分が異なる 2 種類の IHI 吸収液(ISOL-131 および ISOL-161)を使用した.

試験結果1はそれぞれ異なった充填材条件で,CO<sub>2</sub> 吸収量が約90%を達成する際の再生エネルギーを ISOL-131 および ISOL-161 を用いて比較したもので ある. ISOL-131 を用いた場合では,IHI 充填材5m を用いた際の再生エネルギーは市販充填材10mより 低くなっており,IHI 充填材は市販充填材の2倍以上 のCO<sub>2</sub> 吸収性能を有するといえる.一方,ISOL-161 を用いた場合では,IHI 充填材のCO<sub>2</sub> 吸収性能は, 市販充填材の2倍に達しておらず,吸収液の違いに より性能が向上する割合が異なることが分かった.本



IHI 充填材 吸収性能は2倍 5 ÷ (GJ/t-CO<sub>2</sub>) 4 3 吸収性能は2倍未満 再生エネルギー 2 IHI 1 充填材 (5 m 0 ISOL-131 ISOL-161 市販充填材 市販充填材 (5m)(10 m)試験結果 1: IHI 充填材と市販充填材の比較

IHI 技報 Vol.55 No.4 (2015)
試験結果より,吸収液の物性によって,最適な充填材 構造などが異なることが示唆され,吸収液とのマッチ ングが重要であることが分かった.

なお, 圧力損失についてはいずれの吸収液において も, IHI 充填材 5 m と市販充填材 10 m とは同等と なっている.

次に, IHI 熱回収プロセスの効果を検証した. 試験 結果 2 はそれぞれ異なったプロセス条件で, CO<sub>2</sub> 吸 収量が約 90%を達成する際の再生エネルギーを ISOL-131 および ISOL-161 を用いて比較したもので ある. なお,吸収塔の下段には, IHI 充填材を設置し ている.本試験結果より,いずれの吸収液においても 蒸発潜熱の低減によって,再生エネルギーが低減でき ていることが分かる.

また, ISOL-161 においては, IHI 充填材と IHI 熱回 収プロセスと組み合わせることによって, 世界トップレ ベルとなる再生エネルギー: 2.5 GJ/t-CO, を達成した.

# 低炭素社会の実現に向けて(今後の展開)

石炭火力への導入に際しては、燃焼排ガスに含まれ る酸素、硫黄酸化物、窒素酸化物、そのほか微量成分 および煤塵などが吸収液性能、劣化特性に与える影響 や材料腐食などに与える影響を把握し、これらを管理 するプロセス技術が必要である.この検証は、Brown Coal Innovation Australia (BCIA)の支援の下、オースト ラリアビクトリア州の 30%の電力を供給する Loy Yang A 発電所のオーナーである、AGL Loy Yang Pty Ltd と、 オーストラリア最大の研究機関である Commonwealth



試験結果 2: IHI 熱回収プロセスと従来プロセスの比較



0.5 t-CO2/d 試験装置

Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) との共同研究として実施する. IHI は 0.5 t-CO<sub>2</sub>/d 規 模の試験装置を製作し, IHI 相生事業所での性能確認 を行った. この装置をオーストラリア Loy Yang A 発電 所に移設し, 2015 年度後半より排ガスの一部を試験装 置に導入して,長時間連続運転を行う予定である.

加えて,実用化にはさらなる省エネルギー化が不可 欠であり,国立研究開発法人新エネルギー・産業技術 総合開発機構(NEDO)の「戦略的省エネルギー技術 革新プログラム」支援の下,再生エネルギー低減の ための開発を推進していく.

本技術開発成果と、オーストラリアでの長時間試験 による運用技術を組み合わせて、CO<sub>2</sub>回収量 200 t/d クラスでの実証ならびに、2 000 t/d クラスの商用機の FS (Feasibility Study), FEED (Front End Engineering and Design: FS の後に行われる基本設計業務)につ なげて、開発技術の実用化・市場導入を着実に図り、 低炭素社会の実現に貢献したい。

問い合わせ先

株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター エネルギーシステムセンター 開発部 電話(03)6204 - 7506 URL: www.ihi.co.jp/

# 発電プラントゼロエミッション化へ 大きく前進

# 石炭火力発電所における酸素燃焼技術を用いた CO<sub>2</sub>回収システム

石炭火力発電所からは二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)が大量に排出されており、急激な気候変動の要因の一つとなっている. 石炭火力発電所からの環境汚染物質の排出を効率的にゼロにすべく、長年にわたり研究開発を続けてきた. カライド(オーストラリア)での実証試験を果たし、酸素燃焼は次のステップに向けて動き出す.





酸素燃焼適用発電プラント スケールアップイメージ

# CO<sub>2</sub> 排出抑制と安定電源の確保

急激な気候変動の主要因といわれている CO<sub>2</sub> 排出 は増加の一途をたどっており、2015 年 3 月には、世界 の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が月平均で 400 ppm に達している. 世界の平均気温を産業革命以前から 2℃上昇に抑える には、大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を 450 ppm 程度に抑える必要 があるとの報告があり、そのためには、ここ 10 ~ 20 年のうちに大幅な CO<sub>2</sub> 排出削減を成し遂げる必要があ る.近年、CO<sub>2</sub> 排出削減を推進していくための法制化 が進められており、アメリカやカナダでは、石炭火力 発電所から排出される CO<sub>2</sub> の原単位 (kg-CO<sub>2</sub>/MW·h) を規制する動きがある.

周知のように火力発電所からは CO<sub>2</sub> を大量に排出 しており,特に石炭は単位発熱量当たりの CO<sub>2</sub> 発生 量が高い.一方,電源構成に占める石炭火力発電の割 合は,世界の主要各国において 25~80%と高く,主 要な電源となっている.

そこで、石炭火力発電所からの CO<sub>2</sub> 排出削減が考 えられており、その一つとして CO<sub>2</sub> 回収貯留 ( CCS : Carbon dioxide Capture and Storage ) 技術の開発が進め られている. CCS 技術は世界的に実用段階に入って おり、大規模発電所において着工、実運用が開始され ている. 2014 年には、カナダの Boundary Dam 発電



左:酸素燃焼技術による CO2 回収プロセス,右:空気燃焼と酸素燃焼の排ガス組成の違い

所において, 燃焼後回収による CCS が運用を開始した. 現在, CCS 技術は普及に向けて機運が高まりつつある.

# 酸素燃焼による CO2 回収システム

酸素燃焼とは、空気分離装置 (ASU) で空気から分離した酸素 ( $O_2$ ) で石炭などの化石燃料を燃焼させる技術のことである。酸素で燃料を燃焼することにより、燃焼排ガスは  $CO_2$  と  $H_2O$  が主成分となり、排ガス中の  $CO_2$  濃度を理論的には 90 dry%以上まで高めることができる。そして、 $CO_2$  を回収する過程において、排ガス中の水分や酸素、そのほかの不純物を取り除くことにより  $CO_2$  を回収する方法が、酸素燃焼による  $CO_2$  回収システムである。回収された  $CO_2$  は、貯留サイトにて昇圧、地下の貯留層へ注入される。

酸素燃焼ボイラシステムは、既存の技術・機器の組 み合わせにより構成される技術であり、新設はもちろ ん、既存の空気燃焼発電プラントにも適用できる.ま た、既存のプラントに適用する際に、ボイラ耐圧部、 蒸気タービンの改造を必要としない.また、従来の空 気燃焼ボイラにおける機器設計技術を活用することか ら、空気燃焼と同等の伝熱性能を確保するため、酸素 に再循環した排ガスを混合し燃焼する.さらに将来、 酸素燃焼に特化したボイラを新設する際は、再循環ガ ス量を減らし、ボイラが小型化する可能性がある.

酸素燃焼ボイラシステムは、空気燃焼排ガスのよう な低濃度の CO<sub>2</sub> を分離する必要がないこと、総排出 ガス量が空気燃焼の約 1/5 と少なくなり、CO<sub>2</sub> 回収 プロセスのガス処理系統をコンパクトにできる、など の特長がある.一方で、排ガスが高濃度 CO<sub>2</sub> 雰囲気 となること、水分や腐食性ガス成分が濃縮されるこ と、また排ガスを回収することなどから、以下のよう な事項を考慮したうえでボイラや全体システムの設計 を進めなければならない.

- (1)ボイラプロセスにおける,燃焼・伝熱特性の把握,CO2 濃度や性能の確保,酸素燃焼特有の制御方法,長期間運転における信頼性
- (2) プラント安定運用を考慮した,酸素燃焼時の運 用方法,空気燃焼との運転モード切り替え方法, 緊急停止時の動作,および酸素の安全な取り扱 いなど
- (3)酸素燃焼によって発生した排ガスからの輸送・ 貯留・利用に適した不純物の除去,高純度 CO<sub>2</sub> を回収するためのプロセスの構築
- (4)腐食性ガス,H<sub>2</sub>Oが濃縮することに対する,低 温腐食への考慮

# カライド酸素燃焼プロジェクト

IHI では、1989 年より取り組んできたさまざまな 基礎研究, 燃焼試験, 運用性の検討を経て, 実際の石 炭火力発電所に酸素燃焼を適用すべく技術を積み重ね てきた.そして,オーストラリアのカライドにて,石 炭火力発電プラントに酸素燃焼を適用した, CO<sub>2</sub> 回 収技術の一貫したプロセスの実証プロジェクトを実施 した.商用運転を経験した既設発電プラントを改造 し, CO<sub>2</sub> 回収型酸素燃焼プラントになり得ることを 実証する,世界初の試みであった.

カライド酸素燃焼プロジェクトは 2008 年より開始 され,日豪両政府の支援のもと,日豪の企業が参加し 進められてきた.日本から電源開発株式会社,三井物 産株式会社および IHI の3社が参画し,さらに一般 財団法人石炭エネルギーセンターが技術的支援を行っ てきた.本プロジェクトは発電所での酸素燃焼からの CO<sub>2</sub>回収,発電所から回収された CO<sub>2</sub>を輸送し地中

# 株式会社 IHI



空気燃焼・酸素燃焼の火炎の比較(数値はボイラ持ち込み O2 濃度)

へ注入する、二つのステージで実施された.

第1ステージでは改造工事, 試運転を経て, 2012年 12月より酸素燃焼および CO<sub>2</sub>回収実証運転を開始 し, 2015年3月に運転を終了した. 累積酸素燃焼運 転は10000時間以上, CO<sub>2</sub>回収プラントは5500時 間以上の運転を達成した. また, 酸素燃焼運転におけ るプラントの性能, 機器信頼性に関するさまざまな データを取得してきた. 以下に主な成果を示す.

- (1)既設ボイラプラントへの酸素燃焼適用に際し、 要求される空気燃焼と同等の性能で運転される こと.また、空気燃焼と酸素燃焼との間を自動 切り替えすることを確認した.空気燃焼とボイ ラ持ち込み O<sub>2</sub> 濃度を変化させた、酸素燃焼運転 における火炎を写真に示す.火炎輝度は異なる が、一定負荷においては空気燃焼と同等の性能 を満足している.
- (2) 改造部, 既設流用部それぞれについて, 長期間 運転における機器健全性を確認した.

- (3)大規模商用機において重要な要素となる低負荷 運転,負荷変化,制御性,非常時のプラント動 作(安全な停止,急速減負荷),低負荷での酸素 燃焼への切り替えを確認した.
- (4) CO<sub>2</sub> 回収プラント(CPU)により,回収された CO<sub>2</sub> 濃度はほぼ 100%の純度を確保できた.また,装置の運転性能,排ガス中の大気汚染物質の除去特性,微量成分の挙動を確認することができた.

第2ステージでは、第1ステージで回収した CO<sub>2</sub> の一部を、2014年10月から12月にかけてビクトリア 州に陸送し、CO2CRC (Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies)の Otway Project サイトの 地下に圧入した. 注入設備は CO2CRC によって既に 建設されていたものであり、圧入した CO<sub>2</sub> は貯留層 内における地球化学および地球物理的な挙動の評価に 使われた. これは、石炭火力発電所の酸素燃焼ボイラ で回収した CO<sub>2</sub> が世界で初めて地下に圧入されたも のであり、火力発電所から回収した CO<sub>2</sub> のオースト ラリアで初めての地下圧入となった. またこれによ り、プロジェクトの目標とした CO<sub>2</sub> の回収から圧入 までの一貫実証が達成された.

既存のボイラプラントを改造し酸素燃焼を適用する に当たっては、ASU、CPUの仕様決定のための性能 設計、レイアウトに制約があるなかでの機器追設が求 められた.そのため、改造前に既存設備の状態点検、 性能確認のための試運転を実施し、設計に必要なデー タを集めたうえで改造を進めてきた.また、改造後運 転時のプラントの制御において、設計時に意図しな かった動作が度々発生したため、試運転や実証運転中 も試行錯誤のなかで安定運転のための調整が逐次なさ



回収した CO2 の地中への圧入サイトでの圧入の様子



次期プロジェクトのビジネススキーム案

れた. さらに, 発電所の人員がボイラに加え ASU や CPU といった, 通常の発電所で馴染みのない装置の 運転, 保守をするため, 習熟のための苦労も大きかっ た. このようななか, 機器供給者のバックアップ, 発 電所側の努力の末, 酸素燃焼プラントの長時間運転, CO<sub>2</sub> 回収が達成された.

# 次期プロジェクトに向けて

現在,酸素燃焼プラントからの CO<sub>2</sub> 回収システム の次期商用機実現を目指した,プロジェクト創出に向 けた活動を実施している.

本技術の適用先は発電プラントであるが,近年では CO<sub>2</sub>を回収するだけでなく,CO<sub>2</sub>自体を工業的に利 用する CO<sub>2</sub>回収・利用・貯留(CCUS: Carbon Capture, Utilization, and Storage)が考えられている.CCUS は, 回収 CO<sub>2</sub>の価値を高め,経済的にも効果的な CO<sub>2</sub>回 収を実現させるものである.一例として,生産量が減 少した油田の石油を増産する EOR(Enhanced Oil Recovery)に利用することが挙げられる.さらに酸素燃 焼では,ASU で分離された窒素も得られることから, この利用も経済性向上に寄与することが考えられる. 窒素の利用としては、シェールガス生産(フラクチャリ ング)や肥料生産などが考えられる.これらの生成物 の利用による売却を含めて経済性を高めていくことによ り,酸素燃焼による CO,回収技術の可能性が広がる.

現在,次期案件として,カナダのアルバータ州にあるサンダンス発電所で,300 MWe 級の既設石炭火力

発電所の酸素燃焼適用改造について 検討している.これは、国立研究開 発法人新エネルギー・産業技術総合 開発機構の支援のもと、進めている ものである.

カナダでは CO<sub>2</sub> 排出抑制のため の法規制の整備が進み,2015 年に は 420 kg-CO<sub>2</sub>/MW・h 以 下 の CO<sub>2</sub> 排出量規制が適用された.これによ り,新たな従来式石炭火力発電プラ ント建設が困難となり,さらに利用 年数 50 年以上のプラントは使用停 止を迫られている.一方,アルバー タ州では,産業分野からの CO<sub>2</sub>を

利用する大規模 EOR プロジェクトが計画されている. そこで,石炭火力発電に酸素燃焼を適用した場合,回収した CO<sub>2</sub> を利用することにより経済性を高められる.また,ASU から生成された窒素を工業利用のため売却することで,経済的に有利な CCS システムを提供できるものと考えている.

# おわりに

酸素燃焼ボイラシステムは新設はもちろん,既設の プラントを CO<sub>2</sub> ゼロエミッションプラントへ生まれ 変わらせることができる,重要な技術であることを確 信している.カライド酸素燃焼プロジェクトの実証を 通じて得られた,プラント運転における数多くの経験 を活かし,実運用規模での信頼性のある CO<sub>2</sub> 回収発 電システムを実現していく.また,プロジェクトごと に異なるプロセスの最適化,さらに効率的なシステム の構築を進めていくことも重要な課題である.

今後も,経済的に有効かつ高効率な CO<sub>2</sub> 回収シス テムとして実現できるよう,早期の実用化とさらなる 高度化を進めていく.

問い合わせ先
 株式会社 IHI
 エネルギー・プラントセクター
 営業・マーケティングセンター 国内営業部
 電話(03)6204 - 7414
 URL: www.ihi.co.jp/

# コンパクトリアクターで 化学プラントの常識をくつがえす

# 最新の化学反応理論によって実現した, 小さく軽く,手軽に運べ,製造も運転も安い, 驚きの高効率スチームリフォーマー

安価な原料ガスから高付加価値品を製造するプラントは、今後ますます中小規模化、 地産地消化が進む. さらなる高効率、低コストが求められるこの市場で、IHI の コンパクトリアクターは、わずか 1/10 の大きさで期待に応える最新の技術だ.



### コンパクトスチームリフォーマー

# 開発の背景

昨今,シェールガスを由来とする安価な天然ガスを 利用した化学製品プラントや,シェールオイルを原料 とする中小規模の石油化学プラントの新増設が北米を 中心に活発化している.

これらシェールガス・オイルは地産地消型の利用が 主流で、内陸奥地に中小規模のプラントを建設するこ とが求められる。それには、ランニングコストを低く 抑えられる効率の良い運転による、建設コストの早期 回収が重要な課題となっている。

これらの課題を解決するプラント技術を市場投入す るため,独創的な先進技術により小型化と高効率化を 同時に実現するリアクター,すなわち「コンパクト リアクター」を,IHIで開発中である.

# コンパクトな技術がもたらす、大きなメリット

「コンパクトリアクター」とは、従来の技術による 大型反応器(リアクター)が、高さ数十m、質量数 百 $t \sim ft$ 以上を必要とするのに対し、高さ数m、質 量数+tという、従来比 1/10 程度のボリュームで、 従来と同等以上の性能を実現可能とするマイクロ反応 (数十 $\mu$ m ~数 mm 単位の幅で形成される極めて狭隘 な流路内で起きる、理想的な反応現象)工学に基づ く原理を用いた、最新の技術である.

この技術をベースに,開発中の水素製造プラント向 けのコンパクトスチームリフォーマー(コンパクト SMR:Steam Methane Reformer)を商用プラントに適 用した場合,次のようなメリットが期待される.





出 典: U.S. Energy Information Administration (Oct 2015)

全米の主要なシェールオイル・ガス田へ

(1) 小型化によるメリット

プラントを小型化することで,用地面積や建設費 を可能な限り小さくすることができる.

また,これまで大型プラントの建設が困難で あった北米内陸部の主要なシェールオイル・ガス田 向けとして,コンパクト SMR を搭載したモジュ ラープラントをプレハブ形式で製作し,輸送ト レーラーで現地へ陸送して,短期間にプラントを建 設することが可能となる.

(2) 高効率化によるメリット

社内試験の結果,熱効率の極めて高い「コンパク トリアクター技術」により,従来に比べ燃料消費量を 1/3 程度にまで削減でき,プラント全体の運転コス トを大幅に低減することができる見通しを得ている.

(3) プラント稼働率の向上

従来は大型の SMR 1 基で運転していたため, SMR のメンテナンス期間はプラント全体を停止す る必要があったが, コンパクト SMR では複数基を 並列して運転するため, プラント全体を停止するこ となく順次個別にメンテナンスでき, プラントの稼 働率を向上することができる.





# コンパクトリアクターの将来性

これまで、コンパクト SMR を例に、「コンパクト リアクター」の高い有効性を紹介した.この技術は、 来るべき水素社会への対応も視野に、具体的には、都 市ガスなどの原料ガスから現場で水素を製造するオン サイト型水素ステーションへの適用も可能である.

また,石油化学会社向けの各種化学品プロセスや, 天然ガスから液体燃料を製造するGTL (Gas To Liquids)への適用可能性が高いことも確認している.

IHI では, さまざまな化学品プロセスを対象に, 適 用先の検証と開発を継続的に拡大する計画である.

問い合わせ先 株式会社 IHI エネルギー・プラントセクター プラントプロジェクトセンター プロジェクト企画部 電話(03)6204 - 7424 URL:www.ihi.co.jp/

# 発電事業者だからこそ オススメできる太陽光発電所

# 太陽光発電所の安定運営を支える 大規模発電所建設の自負

30 年以上大規模火力発電所や多くのプラントの設備施工を手掛けてきた IHI プラント建設株式会社は, その技術と経験を活かし,再生可能エネルギー事業を展開している.太陽光発電所建設をお客さまから 安心して任せていただくために,自社発電所の運営を始め経験を積んでいる.

さらに,設備診断技術,新モジュールの検討,再生可能エネルギーを組み合わせた新エネルギー供給シ ステムを目指した取り組みを行っている.



# 自社発電所の運営で知見を高める

IHI プラント建設株式会社(IPC)では,長年電力会 社向けに発電所設備の建設(工事設計,現地工事, 試運転調整など)を手掛けてきた.なかでも電気計 装の総合力を活かし,再生可能エネルギー固定価格買 取制度(FIT 制度)の波に乗り,太陽光発電システ ムでもマンションや工場への納入,2013年以降は複 数の太陽光発電所を含め,多くの設備建設の実績があ る.その IPC が,3年前より自社発電所を建設し,売 電事業に乗り出した.同時に,自らが発電事業主と なって太陽光発電所の運営全般に関する各種データを

竜野碇岩太陽光発電所 1734 kW

集め、知見を高めるという目的もあった.

2013 年 3 月に,兵庫県たつの市に自社設備として 太陽光発電パネル(以下,パネル)数1776枚,発 電量 462 kW の太陽光発電所を開設・竣工したのを皮 切りに,2014年,隣接地に1200枚(312 kW)増設 した.2015年3月には兵庫県相生市に,さらに4月 には兵庫県たつの市碇岩の採石場跡地を利用した自社 発電所を開設した.現在に至るまでに,一般家庭の電 力使用量に換算して1000世帯相当を太陽光で発電し ている.また2016年には,長野県に1800 kW 級の 自社太陽光発電所を開設する計画も進行中である.



パネル取付

竜野碇岩太陽光発電所のできるまで

# 太陽光発電所のできるまで

上図は周りが切り立った崖といったロケーションの 「竜野碇岩太陽光発電所」建設状況であるが、太陽光 発電所の稼働までには大きく三つのステップがある.

STEP1:建設予定地の調査

STEP2:設計仕様決定から部品調達まで

STEP3:工事開始から電力会社との系統連系まで

最も IPC が実力を発揮するのは STEP3 である. 架 台基礎・土木工事,架台設置,パネル設置,電気計装 工事など,電力会社や発電所の建設に関わった技術, 経験,ノウハウがものをいう.なかでも IPC の真骨 頂は電気計装技術だ.人間に例えると,血液としての 動力源に相当する電力系統.そして脳や神経に相当す る計装制御系統.これらプラントになくてはならない エンジニアリングを受けもつ.

# 自社発電所の運営から見えてきたこと 「建設予定地確保と手続きの苦労」

発電所を建設する場合,いちばん重要なのが発電効 率である.もちろんこれまでも,パネルをどのように 並べるか,どのように配線するかなど,設計図段階で 綿密なシミュレーションを重ねてきた.パネルを並べ る土地の特徴,風の強さなどでパネルを載せる架台の 種類も検討した.しかしながら,どの部品を使ってど のように組み立てるといちばん効率良く,つまり高い コストパフォーマンスで発電できるのかといった実際 の値を突き止めるには,自社で発電所を建設して運用 する試行錯誤のなかからようやく見えてくるものがあ る.

具体的に分かってきたことは幾つもあるが, 意外 だったのは太陽光発電所の工事着手するまでの官公庁 への手続き関係であった.

FIT 制度は,経済産業省・電力会社の許認可が必要 であることは,良く知られていることだが,「都市計 画法」,「砂防法」,「森林法」,「河川法」,「景観法」, 「県の条例」などさまざまな法令があり,この協議, 手続きが必要なことはあまり知られていない.自社太 陽光発電所を建設するにあたり,この法令をクリアす るために土木事務所や市役所などに何度も足を運び, 協議・手続きに苦労したことで,お客さまへ太陽光発 電設備の設置や建設の提案をするときに役に立つ知見 を得ることができた.

なお,2015 年 4 月 1 日から経済産業省により設備 認定提出時に設置場所に係わる法令の手続きを行って いないことによるトラブル防止のため,「再生可能エ ネルギー発電設備の設置場所に係る関係法令手続状況 報告書」の提出が義務化されている.

パネルを載せる架台の種類にも注目している. 直接 土の中に杭を打ち込むもの, コンクリートの基礎に台

# IHI プラント建設株式会社

を載せるものなど,据え付け方法がそれぞれ異なる5 種類の架台を自社発電所内にそろえており,これらの 違いをお客さまにお見せしつつ説明することができ る.架台の下に防草シートを敷設する場合と,しない 場合とではどのように異なるかの比較確認も行うな ど,自社発電所は実機を見て,話して,お勧めできる 場所でもある.

# 東北復興への協力

太陽光発電設備に関する事業は,福島そして宮城の 復興にも積極的な活動を展開している.発電所の建設 実績として,福島で4か所,宮城で2か所,総設備 容量は9 MW となる.特に福島では,居住制限区域 に指定された場所であっても太陽光発電設備設置は可 能であり,このような土地の有効利用プラス売電収入 を得られる.また,発電所としての役目を終えた 20 年後には,農業を再開することもできる.この撤 去作業についても比較的に容易であることが,太陽光 発電のメリットである.



福島·宮城太陽光発電所設置実績

# 電気計装の実績やコストダウンへの取り組み

IPC が他社への優位性を保つための最大の強みは、 やはり長年 IHI と連携して大手電力会社の電気計装 を手掛けてきた実績だろう.「工事設計」→「調達」 →「現地工事(安全,施工,品質)管理」→「試験 調整」→「引き渡し」までの一連の流れができてお り、各ステップへのフィードバックを行っている.

ユニット・パネルの配線のつなぎ方も従来工法のま ま直列につなぐだけでなく、互い違いにつないだり、 横置きのものを縦置きにしたりして、ケーブルが短く なるつなぎ方を試行錯誤している。当たり前のことだ が、ケーブルの距離が短くなればなるほど抵抗が少な くなりシステム全体の発電効率が上がる。さらに、配 置設計として現状 1 枚当たり 260 W のパネルを並べ ているところに、サイズが多少異なる 310 W のパネ ルを並べるとコストおよび効率はどうなるかなども検 討している。

太陽光発電に限らずプラント建設ではケーブルの布 設を行うが、この何気ない工事にも豊富な知識と経験 が必要である.ケーブルの保護管は何がよいか、どの 箇所ではどのような保護管が必要か、保護管ではなく トレーに載せたり、はわせたりするのがふさわしい か、それぞれの部品の耐久年数はどのぐらいかなどで ある.この知識と経験が太陽光発電設備の設置・建設 に応用されている.

新しい工法や部品を試すことができるのも、工期が 4~6か月と短く、設計の結果が数か月後には出る太 陽光発電ならではである。

また、電気専門の企業では対応が難しい耐風設計に 重点を置いて取り組んでいる.昨今,耐風設計に関す る JIS が厳しい値に見直される動きがあり,JIS 改訂 までは業界の自主規制となる見通しだが,IPC では, 現在においても、ビルの屋上など、より耐風に考慮が 必要と考える場合は、JIS より厳しく設計している. 例えば、最近納入したマンション屋上設置の場合,設 置場所を加味した必要十分な強度をもつ架台を設計・ 施工しつつコストを抑える構造を採用した.

さらに新技術として、従来製法とは異なる製法によ るウエハーを組み込んだモジュールの採用を検討して いる.「Direct Wafer<sup>®</sup>」と呼ばれるこのウエハー製法 は、アメリカのベンチャー企業 1366Technologies 社



相生佐方太陽光発電所全景



竜野太陽光発電所全景

の技術であり、商用化すれば設備コストの 1/3 以上 を占める太陽電池モジュールの大きなコスト削減が見 込める. IHI/IPC において本モジュール 20 枚を搭載 した試験設備により運転試験を開始し、次のステップ として 1 MW 実証設備を計画している.

# 電力を安定供給してこその太陽光ビジネス 設備診断技術の開発

自社発電所を建設・運転して痛感したのは設備診断 の重要性である.つまり売電するお客さまの電力の安 定供給と設備の安全性まで提供してこその太陽光ビジ ネスである.

現在注目して進めている評価手段に「EL(Electro Luminescence)による検査」がある. EL は検査のた めパネルに直接通電したときに発生する赤外光を撮影 することにより,劣化して発光強度が低下したパネル を可視化する方法であり,パネルのレントゲン検査と 呼ばれている.

IPC で採用しているパネルの劣化試験として,現在,暴露試験が進行しており,パネルの経年変化についてのデータ収集をしている.

また、高温環境での運転および熱サイクルを与える ダンプヒート試験などの加速試験を計画中である. さら に、2012 年を境に「PID (Potential Induced Degradation) 劣化対策品」と称するモジュールがメーカーから出 荷されているが、社内で加速試験を行い、現象の理解 を進め、自らチェックすることも忘れていない. ちな みに、PID 劣化とは高電圧で運用中に大幅な出力低下 が起きる現象であり、原因はガラス基板から拡散する ナトリウムイオンと考えられている.

まだまだ,乗り越えるべき課題は現時点でさえ幾つ もある.FIT 制度以降,太陽光発電の導入が急激に伸 びる一方,電力系統への接続が制限されたり,不可と なったりするケースが増えている.こうした問題も受 け, 蓄電池設備併設による運用システムの検討を IHI グループで取り組んでいる.

設計から調達,建設までを一括して行う事業で実績 をあげてきた IPC.細かいデータ採取,細部へのこだ わりが次なる事業につながっているのだ.

IPC は、今後も太陽光発電所建設の経験を積み重 ね、再生可能エネルギーを基に未来を考え、歩みを緩 めず進んでいく.

問い合わせ先 IHI プラント建設株式会社 営業部 電話(03)4553-1007 再生可能エネルギー部 電話(03)4553-1033 URL:www.ipc-ihi.co.jp/ 「はっけよ~い(発気揚々),のこった,のこった!」

実に快活で心地良い響きを感じます.おそらく日本人な ら知らない人はいないでしょう.そう,大相撲の行司の掛 け声です.

幼少の頃,家によく出入りしていた電気屋さんが運転す るダイハツミゼットで,祖父に連れられて大相撲を初めて 見に行った時のことを今も鮮明に覚えています.時の横綱 は大鵬,柏戸.目の前のお相撲さんの大きさ,立ち合いの 低い声,体がぶつかり合う音,何もかもが圧倒的な迫力に 驚きつつ,皆が NHK の実況放送にくぎ付けだったと記 憶しています.きっと,横綱や大関のまねをして力比べを した方々も多いことでしょう.

さてさて、今回の執筆を機に「相撲」についていろい ろ調べてみますと、大学や研究機関においてさまざまな学 術分野から多くの論文が報告されていることに驚きます。 例えば、相撲と文化・学芸、江戸期の古典相撲、文化史を 踏まえた現代の事情と国際化、さらには力士の大銀杏や、 和服・雪駄を絡めながら、庶民の美意識から読み取る 「力士の粋さ」について考察を深めたものもあるようで す.論文検索の連単語もエンジニアの学術用語と比べとて も庶民的でなじみやすく,例えば「力士&スポーツ栄養 学」「ゲン担ぎ&ちゃんこ鍋の具材」,ご興味をもたれた 方々は,ぜひ,さらなる「箸休め」のお時間をもたれる とよいでしょう.

ではここで、少し視点を変えて相撲を運動科学の分野か ら調べてみましょう.大学の体育系,教育系を中心に 「スポーツバイオメカニクス」という学術的な視点から相 撲の技の合理性を論じている論文が多いことに気が付きま す. 「スポーツバイオメカニクス」, 初めて耳にした用語 でしたが、その定義とは「力学、生理学、解剖学および 運動学の基礎知識を応用し、スポーツ活動時の身体運動の 仕組みを理解する学問」であり、その研究実績も豊富で す. 今日, 世界レベルの競技選手の間では高地トレーニン グが広く普及していますが、これらは常圧低酸素環境ト レーニングに関する研究成果によることはご存じの方も多 いでしょう.スポーツ科学の有識者らによると、1991年. 東京での「第3回世界陸上競技選手権大会」のマラソン で、谷口浩美選手が日本人初の金メダルを獲得した快挙の 裏には、開催地が日本に決まった時点で、日本の研究者が 夏季マラソンに「勝つ」ための科学的対策の重要性を提 言し. 現場とスポーツバイオメカニクスの強い結びつきを 図ったことが隠されていたそうです. もう四半世紀も前 に,日本代表選手のトレーニング中の体温,発汗量,飲水

# お相撲の話

技術開発本部 **錦織 貞郎** 





三所攻め

量などを科学的に分析・評価し、「勝つ」ためのシナリオ を練る.ゴール直後の谷口選手自身もこの科学的サポート に感謝を示しています.日本の研究水準はとても高く,短 距離走者のカール・ルイス選手をはじめ世界のトップアス リートの「動き」を分析し、脚全体を素早く動作させる ための筋力強化への指針をいち早く示しています.ここか ら「歩行能力の改善」に関する研究が発展して、高齢者、 低体力者にも合理的で効果的な身体の使い方を身に付ける ことを可能としています.なんとも心強い研究です.「秩 父宮記念スポーツ医・科学賞」にはわが国の素晴らしい 研究功績が示されています.日本体育協会の熱意も踏まえ ると、これからのスポーツ界の発展を大いに期待し、また 応援したくなります.

少し横道にそれてしまいましたので、また相撲の話に戻 りましょう.相撲の決まり手は 82 手あり、高頻度の決ま り手には寄り切り、押し出し、節き込みを中心とした基本 技や投げ技が多いようです.一方で、一方で、一方で、たいない と数年に1度の決まり手や、これまでに使われたことの ない幻の決まり手も数手あるようです.豪快で速さに富む 技を織り込み、立ち合いから数々の技の流れを美しく組み 立てられる力士には、勝ち星も多いように思います.ま た、勝つためには「立ち合いの厳しさ」も重要な要素で す.この立ち合い動作の分析では、優勝回数で大鵬を上



櫓投げ

回った白鵬の最高速度は 4.0 m/s と, これは陸上 100 m の世界記録保持者のウサイン・ボルト選手に匹敵するそう です. ちなみに大学相撲部の選手のそれは 2.0 m/s 前後に 過ぎません. 白鵬は過去 30 年間に分析した力士のなかで 最も速く, 2 位は千代の富士, さらにその衝撃力は力士の 平均値の 1.35 倍に当たる約 600 kg にもなります. 歴代 の横綱クラスはスポーツバイオメカニクス的にもなんとも 援まじい破壊力と柔軟性の持ち主のようです.

相撲特有の稽古として西般, 腰割り, 鉄砲があります が, 現在, それぞれの稽古が柔軟性, 筋力あるいは筋持久 力の何に重点を置いた強化なのか, スポーツバイオメカニ クスに基づいて効率的な稽古への提案が進められていま す. 加えて, 俊敏さとより重い体重とのバランス管理も重 要な要素でしょう. しかしながら, 多くのスポーツで管理 栄養士が科学的な介入をしているにも関わらず, 相撲界で はそれが全くというほど介在していないようです. 相撲の 伝統や風習にある「女人禁制」と, さしずめ管理栄養士に 女性が多いことに何らかの因果関係があるやも知れません.

戦前の女流作家,田村俊子氏が読んだ「両國といふ角 力(すもう)恋して春残し」.この句のように,たとえ科 学のメスが入りつつある平成の力士でも、今も伝統的な相 撲文化を守り,精進する力士への造詣が深まれば,一日千 秋の思いで好取り組みを待ち望むことになるでしょう.

# 高効率褐炭焚きボイラの商業化に向けて

# Development of High Efficiency Lignite-Fired Boiler for Commercial Use

花 岡 亮 エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンターボイラプロジェクト統括部 主査 Benedikt Tressner<sup>(1)</sup> Steinmüller Engineering GmbH Project Manager Consulting

今後の石炭焚き発電設備用の燃料として、低品位炭利用の拡大が予想されている。特に現時点で未利用であるこ とから燃料コスト低減が期待されること、および地産地消の観点から低品位炭のなかでも褐炭を燃料とした褐炭焚き 発電設備市場の拡大が予想されている。当社としても、この褐炭焚き発電設備市場に参入するため、褐炭焚きボイラ 技術の確立と高効率・低コスト化が可能となる予乾燥褐炭焚き設備による差別化技術の開発を行っている。このなか で、ヨーロッパで褐炭焚きボイラ設備に関する知見を豊富にもつ Steinmüller Engineering GmbH 社(SE 社)をグ ループ会社とした。本稿では高効率褐炭焚き発電設備市場参入に向けた IHI グループの取組みについて紹介する。

The utilization of low grade coal is expected to increase in the future as the main source of coal fuel for coal fired power plants. The market for low grade coal firing power station equipment is expected to expand especially with the spread of the use of lignite-firing due to the low fuel cost, as it is not being utilized at the moment, and because it can be produced locally for mine-mouth power plants. IHI has a market entry strategy for lignite-fired power plants. That is why IHI is developing distinctive technologies to establish lignite firing technology and develop high efficiency/low cost lignite-fired power plants. As part of our strategic plan, IHI became shareholders of Steinmüller Engineering GmbH, a German company with rich experience in lignite-fired boilers in Europe. This paper introduces IHI's strategy for entering the market of lignite-fired power plants.

# 1. 緒 言

世界の可採石炭の半分は褐炭を含めた低品位炭であり, 燃料コスト低減・地産地消の観点から褐炭焚き発電設備市 場の拡大が予想されている.

褐炭は炭化度の低い(若い)石炭であるため高水分, 低炭素含有量,高酸素含有量,低発熱量などの特性があ り,乾燥すると低温酸化による発熱・自然発火するため輸 送に適さず,山元発電として利用されることが多い.低融 点の灰分を多く含むこともあり,燃焼設備設計には特別な 配慮が必要である.

拡大が期待される褐炭焚き発電設備市場に向けて,当社 は、これまで培ってきた瀝青炭,亜瀝青炭焚き USC (Ultra Supercritical:超々臨界圧)ボイラの設計,製作, 据付けのコア技術に基づき,高効率褐炭焚きボイラの確立 に取り組んでいる.褐炭焚きボイラ技術の確立に際して は、当社の保有する国内最大級の燃焼試験設備を活用した 試験や,最新の CFD (Computational Fluid Dynamics)技 術による評価に加え,褐炭焚きボイラの知見を豊富にもつ ドイツの Steinmüller Engineering GmbH 社(以下 SE 社,詳細は後述)が 2014 年 6 月に IHI グループの一員 となり、この知見を最大限活用し、褐炭焚きボイラの設計 信頼性を確保することにしている.

また,主要な褐炭焚き発電設備市場であるヨーロッパお よび東南アジアにおいて,これまで適用されている褐炭焚 き燃焼技術は,大型ボイラ用としては,高温の火炉内の燃 焼ガスと遠心ファンタイプのミルを用いて褐炭の乾燥と粉 砕を同時に行う褐炭生焚きシステム,中小型ボイラ用とし ては,循環流動層燃焼システムとなっている.これらの従 来技術は,褐炭中の高水分による熱損失が大きいことに よって,発電設備として高効率を実現することが難しいと いう点が最大の課題となっていた.このため,高水分の褐 炭を燃焼前に予乾燥することができれば発電設備の高効率 化が可能となることから,褐炭予乾燥技術の開発が多くの メーカで取り組まれている.

当社としても,自社のもつ流動層技術を応用した褐炭予 乾燥システムの開発を進めており,発電設備の高効率化の ための差別化技術とするため,精力的に取り組んでいる.

本稿では、この褐炭焚き発電設備市場に向けた、IHI グ ループの具体的活動の詳細と進捗について紹介する.

# 2. 褐炭焚きボイラ技術の信頼性確保

当社は,信頼性の高い褐炭焚きボイラ技術を早期に確立 するため,褐炭焚きボイラに関する豊富な経験をもつエン

ジニアリング会社である SE 社を,2014 年 6 月 Siemens AG 社から IHI グループに迎えた.SE 社の概要は以下の とおりであり,SE 社と当社との間で進められている褐炭 焚きボイラ技術に関する協業の概要について紹介する.

## 2.1 SE 社概要

SE 社は、ドイツ Köln 近郊の Gummersbach に本社を 構えるエンジニアリング会社であり、2003 年 4 月に設立 された. 主な事業は発電用ボイラ、化学プラント向け熱交 換器,発電用ボイラ向けバーナなどの燃焼設備および脱 硫・脱硝装置などの環境装置に関する、① コンサルタン ト事業 ② エンジニアリング事業 ③ エンジニアリング + 主要機器供給事業であり、ドイツのみならず東欧・トル コ・南アフリカほか、世界各国で事業を展開している.

褐炭焚きボイラ技術は褐炭炭鉱のあるドイツを中心に技 術開発が進められてきており、ドイツのボイラメーカで あった旧 L. & C. Steinmüller GmbH 社(以下,旧 LCS 社)は、ドイツ国内外に多くの褐炭焚きボイラの納入実 績がある.SE 社は多くの旧 LCS 技術者を有しており、 褐炭焚き発電設備に対する豊富な技術・ノウハウを踏まえ て、後述するような褐炭焚きボイラのバーナ改造などを実 施している.

また,当社のボイラ事業部門(SBU)とSE社とは,旧 LCS 社の時代から構築されてきた人的交流があり,切磋 ない ない ない を ない を ない ちお互いの技術力向上に注力してきた.当社が 遂行したドイツ国内の発電設備プロジェクト(Trianel社 Lünen 発電所向け 813 MWe ボイラ)のサポートを SE 社が実施するなど,技術・人材双方で継続して協調を図っ ている.

# 2.2 SE 社の褐炭焚きプロジェクト実績

ヨーロッパには,発電設備に対する褐炭利用の長い歴史 があり,褐炭使用において運用率 90%以上,プラント効 率 43%(低位発熱量ベース)を達成できるまでになった. 褐炭の広大な市場ポテンシャルは東南アジアにもあるが, 発電設備での有効利用はまだ不十分な状況である.

前述のとおり,SE社は,褐炭焚き発電設備に強みを もった会社である. 第1表にSE社の主な褐炭焚きプロ ジェクト実績を示す.特に燃焼設備関連には,累積 18 000 MWthermal 相当の発電設備に対し,Steinmüller RSM<sup>®</sup>バーナを適用した褐炭燃焼技術を用いて,最新環境 基準に適合するための改造工事を数多く請け負っている.

本項では, 第1表の2番目に記載の Maritsa East 3(4× 227 MWe)向け褐炭焚き燃焼システム供給と,3番目に記

第1表 SE 社の主な褐炭焚きプロジェクト実績 Table 1 Steinmüller Engineering's track record with lignite technology

Tuble I Stellinger Engineerings due	i recora wia inginice technology
プロジェクト所掌	依頼主
320 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO <sub>x</sub> 化燃 焼システム改造工事 Kostolac PS B1, PE Industry, Serbia	PE ElectricPower Industry, Belgrade, Serbia
4 × 227 MWe 褐炭焚きボイラ褐炭燃焼 システム改善工事 Maritsa East 3 PS Unit 1-4, Maritsa, Bulgaria	Contour Global,Sofia, Bulgaria
2 × 600 MWe 褐炭焚きボイラ燃焼シス テム改造工事 Niederaußem PS Unit G and H, Germany	RWE AG, Essen, Germany
11 × 250 MWe 褐炭焚きボイラウォール エアシステム詳細設計 Jänschwalde PS, Germany	Vattenfall Europe Generation AG & Co KG, Cottbus, Germany
11×250 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO <sub>x</sub> 燃焼システムの基本計画 Jänschwalde PS, Germany	Vattenfall Europe Generation AG & Co KG, Cottbus, Germany
500 MWe 褐炭焚きボイラ見積計画 Turow PS, Poland	Doosan Babcock Energy Ltd, West Sussex, UK
2×640 MWe 褐炭焚きボイラ低 NO <sub>x</sub> バーナ改造概念設計 Neurath PS, Unit D and E, Germany	RWE Power AG, Essen, Germany
345 MWe 褐炭焚きボイラ NO <sub>x</sub> 低減可 能性検討 Sostanj PS Unit 5, Slovenia	Siemens d.o.o. Bratislavska 5, SI-1000, Ljubljana, Slovenia
330 MWe 褐炭焚きボイラ見積検討 Turceni PS Unit 6, Romania	Doosan Babcock Energy Ltd, West Sussex, UK

載の Niederaußem PS Unit G and H (2×600 MWe)向け エンジニアリングサービスについて紹介する.

# 2. 2. 1 Maritsa East 3

Maritsa East 3 発電所は、ブルガリア南東部に位置し、 4 × 227 MWe の発電設備を有するブルガリア国内最大級 の発電設備であり、ロシア製ボイラが 1970 年代後半に建 設された. 燃料は近接する Maritsa East 炭鉱の褐炭を使 用しているが、褐炭のなかでも比較的高水分、高 S 分、 高灰分かつ低発熱量といった特徴をもち、ボイラ計画・性 能評価に十分な配慮が必要な炭種である.本発電所は今世 紀初頭に民営化され、その後大規模改修工事が計画され た. そのなかで環境規制値(Directive 2010/75/EU で規 定)を見越した NO<sub>x</sub> 排出量低減が掲げられた.本工事で のお客さまからの具体的な技術要求と目的は以下である<sup>(2)</sup>.

- NO<sub>x</sub> 排出濃度を 400 mg/Nm<sup>3</sup> から 180 mg/Nm<sup>3</sup>
   に低減する(ともに 6% O<sub>2</sub>, ドライベース).
- (2) ボイラ効率向上のため、ボイラ出口空気比を 1.2 から 1.15 に低減する.
- (3) CO 排出濃度は 180 mg/Nm<sup>3</sup> 以下を維持する.
   (6% O<sub>2</sub>, ドライベース)
- (4) 火炉腐食を避ける.
- (5) 火炉の灰付着(スラッギング)を避け,蒸気条 件などの各プロセス値は燃焼改善前と同等とする.

上記目標を達成するために, SE 社は燃焼システムを抜 本的に見直した.

バーナについては, Steinmüller RSM<sup>®</sup> バーナを適用し, 燃焼用空気と石炭の混合を促進させるため両者の流速差を 大きく取れるような計画にするとともに, 保炎板による燃 焼安定性を確保できるものとした. さらに over-fire-air シ ステムを適用することで, これら CO 濃度上昇を抑制し つつ, NO<sub>x</sub> 低減を図った. また各壁面に新たな空気供給 ノズル (Side-wall-air system : SWA )を設置することに よって火炉壁腐食, スラッギング抑制を図っている.

これらの新燃焼システムの導入では、バーナ近傍の1 次燃焼ゾーン高さ低減と、バーナ上の2次燃焼ゾーンの 高さ拡大によって石炭の滞留時間の適正化を図り、NO<sub>x</sub>低 減と CO 上昇抑制(燃え切り性確保)の両立を達成した.

バーナへの燃料供給系統に対してはダクト形状の見直し, および新たなスワラやダンパの設置によって,石炭流の吹 込み状況を最適化した. 第1図に新スワラおよび新ダンパ を示す.この計画には,発電用・産業用ボイラの燃焼シ ミュレーション(以下,燃焼 CFD)に豊富な実績をもつ RECOM Service GmbH 社(以下,RECOM 社)と協調 を行い,燃焼 CFD を実施,計画の適切性を確認するとと もに,設備の最適化を実施した.

また,設計の最適解を得るため,3D CFD とモデルバー ナ(10 分の1 サイズ)を適用し,CFD 上の解をモデル バーナでの試験で実証した.このモデルを**第2図**に, CFD の結果を**第3図**に示す.モデルの試験結果とCFD



第1図 新スワラおよび新ダンパ Fig. 1 New PF concentrator and vapor dampers

計算結果は良く一致しており,計画段階だけでなく実機試 運転での各種調整による燃焼挙動の事前把握においても有 用であった.

以下に燃焼 CFD 結果の例を示す. 第4図にバーナレ ベルでの炉内ガス温度等温面の比較を示す. 改造後(第4 図-(b))、ガス温度分布が均一化されることが確認できる.

また第5図に CO 濃度分布を示す.一般に空気過剰率 を低減すると CO 濃度は上昇することが知られているが, 本改造を実施することによって空気過剰率を 1.2 から 1.15 に低減しても,改造前と同等レベルの CO 濃度を確

# (a) 微粉炭管 (バーナ入口部) (b) 外形図 (c) スワラ 2 (d) スワラ 1 (e) スワラ 2 (f) スワラ 1 (f) スワラ 1 (f) スワラ 1 (g) スワラ 1 (h) スワ 1 (h) スロ 1 (h)

第2図 微粒炭管(バーナ入口部)試験用モデル(単位:mm) Fig. 2 Physical model (unit:mm)



第3図 新スワラおよび新ダンパの CFD 結果 Fig. 3 CFD results for the new PF concentrator and the vapor dampers



第4図 炉内ガス温度等温面の比較 Fig.4 Comparison of isosurface temperature

(a) 改造前



(b) 改造後



第5図 CO 濃度比較 Fig. 5 Comparison of CO-production

保できることが確認された.

本改造工事は,契約から工事開始までが5か月と非常 に短納期であったものの,問題なく完了し,所定の性能を 満足することが確認できた. **第2表**に改造前と改造後の ボイラ性能比較を示す.

# 2.2.2 Niederaußem PS Unit G and H

Niederaußem 発電所はドイツ中西部に位置し,ドイツ 4 大電力会社の一つである RWE AG 社(以下 RWE 社) が所有・運営する発電所である.燃料は近隣で産出される Rhenish lignite(ライン川流域褐炭)を用いており,燃料

Table 2 Boner performance parameters before and after revailip				
項目	単 位	改造前	改造後 (目標値)	改造後 (実績値)
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3 *1</sup>	$350 \sim 400$	< 180	$150 \sim 180$
СО	mg/m <sup>3 *1</sup>	< 60	< 180	$30 \sim 80$
空気比(火炉出口)	—	1.2	1.15	1.1
ボイラ効率	%	$\sim 83.5$	-	$\sim 83.5 + 1.0$
火炉壁近傍におけ る O <sub>2</sub> 濃度 0.5%未 満領域の割合	%	_	30	< 5

第2表 改造前と改造後のボイラ性能比較 Table 2 Boiler performance parameters before and after ro

(注) \*1:標準状態, 6% O2 ドライベース

代が安価であることから重要な電源の一つと位置付けられている.

従来, 褐炭焚き発電設備はベースロード電源と位置付け られていたが, 昨今の再生可能エネルギーの台頭によっ て, 中間負荷運用を余儀なくされつつある.

Niederaußem PS Unit G and H は発電出力 600 MW と 比較的規模の大きな褐炭焚き発電設備であるが,計画時の 空気過剰率が 1.35 と比較的高いことが NO<sub>x</sub> 濃度高,火 炉内での燃焼遅延の要因となっており,定格負荷運転時の NO<sub>x</sub> 濃度高,スラッギングによる頻繁な停缶・灰除去作 業,NO<sub>x</sub> 濃度高による部分負荷運転制約といった課題を 抱えていた.

2012 年にこれを解決するため, SE 社は RWE 社から改 善案・改造案の検討, 燃焼 CFD の実施を依頼された.

SE 社は燃焼性改善を図るため, Steinmüller RSM<sup>®</sup> バー ナによるバーナの適正化を実施,併せて, over-fire-air シ ステムのポート流速の適正化による空気・燃焼ガスの混合 促進,ポート配置の適正化などの対策を立案した.

本結果に基づき, RWE 社で Unit G の改造工事を実施, 所定の効果を確認することができた. またその後, RWE 社で同対策を同型缶である Unit H に対しても実施してい る<sup>(3)</sup>.

# 2.3 SE 社との褐炭焚きプロジェクトにおける協業

# 2.3.1 ドイツ国内向け案件に対する試設計

次に,当社の褐炭焚き発電設備に対する取組みの一例と して,ドイツ国内向け案件に対しての試設計について,以 下に示す.

本案件では、お客さまからプラント効率向上を目的とし て、USC 蒸気条件を求められるとともに、燃料中の水分 による損失を抑制できる予乾燥褐炭の混焼が計画条件とし て提示された.

前述のとおり、当社と SE 社は、SE 社が IHI グループ となる以前から技術協力関係にあり、本案件についても協 調して試設計を実施した.

USC ボイラであるとともに、生褐炭および予乾燥褐炭の複合燃料条件への対応が必要であったため、本プロジェクトでは、各々が得意とする SE 社の褐炭生焚き技術と当社の USC ボイラ技術に加え、当社がそれまでに開発完了していた予乾燥褐炭バーナ(TBK バーナ)を組み合わせる構成とした. TBK バーナの概略図を第6図に示す. また、生褐炭バーナ(RBK バーナ)との配置関係を第7図に示す.

この新設計条件に適合したバーナ配置,および火炉計画 は、生褐炭・予乾燥褐炭の混焼特性を蓄積しているデータ を基に想定し、また、両社のボイラ設計技術を基盤として 十分な協議を行った.さらに、本計画炭は灰障害に対する 十分な配慮が必要であり、当社と SE 社の知見を共有し て伝熱面配置などの基本計画を固めた.

知見の乏しい生褐炭・予乾燥褐炭混焼時の燃焼特性については、RECOM 社と協調して燃焼 CFD を実施し、想定した基本計画・設計との整合性を確認しながら計画の検証を実施した。適切な均一性が確認できるとともに、ガス温度特性も計画と合致していることを確認できた.**第8** 



**第6図**予乾燥褐炭バーナ(TBK バーナ) **Fig.6** Burner for pre-dried lignite (TBK burner)



第7図 予乾燥褐炭バーナと生褐炭バーナの配置図Fig. 7 Arrangement of burners for pre-dried lignite and burner for raw lignite



**第8図** 生褐炭・予乾燥褐炭混焼 燃焼 CFD 結果一例 **Fig.8** Example of CFD result for raw/pre-dried lignite mixed combustion

図に生褐炭・予乾燥褐炭混焼燃焼 CFD 結果の一例を示 す.

### 2.3.2 東南アジア案件に対する試設計

褐炭の性状は、産地・石炭層によって発熱量・水分・灰 分・灰特性という基本条件が大きく異なる.このため、瀝 青炭発電設備のように、標準的な機器構成で計画できるも のではなく、計画案件によって計画炭性状・範囲に適切な 機器構成を採用することが重要である.

当社と SE 社は、当面の東南アジア褐炭焚き案件に対 して、東南アジア褐炭性状を踏まえた生褐炭焚きボイラに も取り組むため、最適となる機器構成、ボイラ構造などの 試設計を実施している、生褐炭焚きボイラの全体組立図を 第9図に示す。

# 3. 褐炭乾燥機の開発

褐炭焚き発電設備高効率化の最大のメニューは予乾燥褐 炭焚き技術であり、ボイラのみならず、より高効率・低コ スト化が可能な予乾燥褐炭乾燥設備が重要である.

当社では褐炭予乾燥による効率改善を最大化できるよう,熱源となる蒸気の潜熱回収を行うなどの特長をもった 褐炭乾燥機の開発を行っている.

# 4. 結 言

今後, さらなる利用拡大が見込まれる褐炭に対し, SE



**第9図** 生褐炭焚きボイラ全体組立図(単位:mm) **Fig. 9** Overall boiler arrangement for raw lignite firing (unit:mm)

社の褐炭焚きボイラ技術と当社の高効率・高品質ボイラ技術との融合を図り,信頼性の高いボイラ計画を確立し,東南アジア案件を中心とした褐炭焚きプロジェクトへの早期参入を目指す.全世界的要求である CO<sub>2</sub> 削減に寄与するため,高効率褐炭焚きプラントである予乾燥褐炭焚きプラントの実現に向けて,予乾燥褐炭設備も含めた技術開発を平行して精力的に推進し,信頼性確保・経済性向上に取り組んでゆく.

# 参考文献

- B. Tressner, T. Iwasaki, H. U. Thierbach, T. Will, B. Zimmermann and R. Kriegeskotte : Application of European lignite-fired boiler technology into Southeast Asia market Paper ID: ICOPE-15-1159, Proceedings of the International Conference on Power Engineering-15 (ICOPE-15)
- (2) R. Kriegeskotte, Q. D. Ferdinando, H. U. Thierbach and B. Zimmermann : Modernisation of a lignite-fired steam generatator – Reduction of NO<sub>x</sub> emissions VGB POWERTECH Vol. 93 (2013. 10) pp. 47 – 50
- (3) D. Sommer, P. Olkowski, D. Rüsenberg and H. J.
  Wüllenweber : Furnace-based optimisation of a lignite-fired steam generator VGB POWERTECH Vol. 92
  (2012. 10) pp. 64 68

# 再生可能エネルギー大量導入時の航空転用型ガスタービンと 同期調相機による電力系統安定化の検討

# Power System Stabilization by Aero-Derivative Gas Turbine and Synchronous Condenser for Large-Scale Renewable Energy

西 田 怜 美 エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンター原動機プロジェクト統括部 博士(工学)

近年, CO<sub>2</sub> 削減の観点から再生可能エネルギーへの注目が高まっている.特に太陽光や風力発電の伸びが著しい が,これらの発電方式は天候に左右され出力が不安定で,かつ同期化力をもたないインバータによって連携される ため周波数調整能力がない.よって電力系統に大量接続した場合に系統を不安定にする恐れがある.系統安定化の ために,起動性と負荷追従性に優れた航空転用型ガスタービンと発電機の同期調相機運転の組合せが北米で多く適 用されている.本稿では日本で同期調相機がどのように系統安定に貢献してきたか,また今後どのように貢献でき るかを述べる.

Supplying electricity with renewable energy has been attracting more and more attention because of the potential for  $CO_2$  reduction. The number of solar and wind power generation facilities has been increasing rapidly due to the relatively low equipment cost. However, the power output of solar and wind power is unstable because it depends on the weather, and they do not have frequency control ability because they generate direct current electricity. Consequently, connecting large-scale renewable energy to the electricity grid would deteriorate the power quality. In North America, aero-derivative gas turbines and synchronous generators are operated as synchronous condensers to stabilize the power grid system. In this report, we discuss the contributions of synchronous condensers and how they will contribute to the grid system in Japan.

# 1. 緒 言

近年,燃料節減や二酸化炭素排出量削減の観点から再生 可能エネルギーへの注目が高まっている.特に初期投資が 比較的安価な太陽光と風力発電の設備増加が著しい.太陽 光・風力発電は発電量が天候に左右されるため出力が不安 定であり周波数調整能力をもたず,また,回転部をもたな い非同期の発電方式のため,電力系統の過渡安定度の低下 をもたらす.出力の安定している地熱,バイオマスといっ た電源の増加が望まれるが,これらの総設備容量は太陽 光・風力と比較すると小さく,さらに地熱発電は立地条件 などの制約から今後の増加も多くは見込めない.このよう な不安定な電源が大量に電力系統に接続された場合,再生 可能エネルギーの出力変動によって系統の安定性が保てな くなる恐れがある<sup>(1)</sup>.

電力供給は、電圧・周波数の安定した良質な電気を安定 して供給することが求められる.電気は光速に近い速さで伝 わるため、常に使用する分だけを発電する必要がある.現在 は発電側が需要を予測し、発電量が余裕をもつように運転 する発電機を決めて需要に対応している.負荷の急増/減 に発電機が対応できなければ電圧・周波数が低下/上昇す る.電圧・周波数が規定値以上変動すると電力設備が機器 保護のために解列され,停電の原因となる.また,現在の 電力系統では多くの同期発電機が運転しているため,その 回転の慣性力によって周波数変動はあまり問題とならない が,再生可能エネルギーの発電量増加によって運転する同 期発電機が減少すれば負荷の増減が周波数の低下/上昇に 与える影響が大きくなる.この出力変動を補うために蓄電 池の開発が現在盛んに行われているが,出力当たりの価格 が高価で,また決められた電力量しか放出できないという 欠点がある.さらに出力変動に対応して細かい充放電を繰 り返すと寿命が短くなってしまう.

また,これまでは基幹系統から末端へほぼ一方向に流れ ていた電力が,各地に設けられた太陽光・風力の発電設備 から系統へ供給されるようになった.これらの発電施設は 曇天・夜間や無風時には電力を供給できないため,時間帯 によって電力潮流の著しい変動を招く.潮流の変動は需要 家端の電圧変動の原因となる.

当社では、この問題に対応するため航空転用型ガスター ビンと、タービンにクラッチ接続した発電機セットの系統 安定化電源としての導入を提唱している. この方式は現 在、すでに大量の再生可能エネルギーが系統に接続されて いる北米で調整電源として多く採用されている<sup>(2)</sup>. 第1 図に航空転用型ガスタービンの一つで、アメリカで多く運 用されている GE LM6000 ガスタービンのカット図を示 す. 航空転用型ガスタービンは、航空機用ジェットエンジ ンを陸上用に転用したエンジンで、起動性・負荷追従性に 非常に優れているという特長をもつ. 提唱している発電機 セットは、需要が大きい時間帯には航空転用型ガスタービ ンを運転して負荷調整を行い、発電需要が少ないときには 発電機をガスタービンから切り離し、同期調相機 (Synchronous Condenser)として運転して無効電力を供給 することで、電圧を安定させることができる発電設備であ る. なお本稿においては、特に断らない限り無効電力とは 遅れの無効電力を指すことにする.

現在,日本国内では航空転用型ガスタービンは工場電源 や非常用ポンプ電源などに多く採用され,また,電力小売 の自由化対象拡大に伴い特定規模電気事業者と電力購入契 約をする発電事業者へも導入されている.同期調相機はご く一部の変電所にのみしか設置されていない.航空転用型 ガスタービンの高い性能については既報で詳細に報告され ているため<sup>(3)</sup>,本稿では同期調相機に焦点を当て,今後 の再生可能エネルギー大量導入時の系統安定化対策とし て,同期調相機が有効な手段かどうかを検討した.**第1** 表に,航空機ジェットエンジンの大手3社が航空転用型 ガスタービンとして販売しているエンジンを示す.エンジ ン出力が25~100 MW であるため,本稿では航空転用 型ガスタービンとセットにする同期調相機として,無効電 力供給容量が小型のもので約+18~-8 Mvar,大型のも ので+70~-30 Mvar 程度(+が遅相)を想定した.



(注) IHI ホームページから

第1図 GE LM6000 ガスタービンエンジン Fig. 1 GE LM6000 gas turbine engine

第1表	航空機ジェッ	トエンジン大手	3 社の航空転用型ガスタ	-
	ビン			

 Table 1
 Aero-derivative gas turbines of the three top manufacturers

エンジン型名	会 社	出 力 (MW)	転用元エンジン
LM2500	GE	25	CF6-6
LM6000	GE	50	CF6-80C2
LMS100	GE	100	なし(航空転用型ガスター ビンの派生エンジン)
FT8	PWPS	25	JT8D
FT4000	PWPS	60	PW4000
RB211	RR	$25 \sim 32$	RB211
Trent60	RR	$53 \sim 66$	Trent700/800

(注) GE : General Electric Company (アメリカ)
 PWPS: PW Power Systems, Inc. (アメリカ)
 RR : Rolls-Royce Holdings (イギリス)

# 2. 同期調相機

送電においては機器を適正に使用できる電圧範囲に保つ よう運用の上下限電圧と基準電圧を定め、電圧・無効電力 を調整するのが一般的である<sup>(4)</sup>.力率の進み・遅れ過ぎ はそれぞれ電圧の上昇・降下を招くため、無効電力を適切 に消費・供給することが求められる.現在は系統への無効 電力供給には主に電力用コンデンサが用いられているが、 コンデンサの信頼性が低い時代は同期調相機が使われてい た.本章では同期調相機の概要を述べる.

# 2.1 同期調相機による電圧安定

同期調相機は電動機を無負荷運転するもので,固定子の 励磁強度を変更することで進み・遅れの無効電力を発生さ せることができる.無効電力の高速かつ無段階の制御が可 能で,回転による慣性と誘導起電力をもっているため自ら が電圧源であり,系統電圧が大幅に低下した場合でも系 統電圧を回復することができる<sup>(5)</sup>.これは,電力用コ ンデンサや静止型無効電力補償装置(SVC:Static Var Compensator)にはない同期調相機の最も大きな長所であ る.しかし,大きな回転体であるために設備が高価かつ保 守・取扱いが難しく,また機械的ロスが比較的大きいとい う短所をもつ.

### 2.2 日本における同期調相機運用の歴史

系統の電圧安定には無効電力が大きく影響する.また, 長距離送電において送電損失を少なくするためには力率の 調整が重要であることは古くから言われており,同期調相 機や進相コンデンサを用いた進相調整が行われてきた<sup>(6)</sup>. 発電機と電動機の構造が同じであることを利用し発電機を 同期調相機として運用する試みは日本では 1930 年ごろか ら活発化し<sup>(7),(8)</sup>, 1960 年ごろまで多くの発電所で調相 機運転が実施された記録が残っている<sup>(9)~(12)</sup>. 講演会に おける質疑討論<sup>(7)</sup>によれば、1910年ごろから東京市内 ではすでにこのような運転が行われていたようである.

このころは、水力発電の発電量が減少する冬季にのみ運 転する火力発電所設備が夏季に稼働しないことに着目し, 夏季の間のみ火力発電所を同期調相機として運転した。こ れによって、電力の消費地から遠い水力発電所からの送電 効率が向上した.発電機を同期調相機として運転するとき には、発電機と原動機のカップリングを切り離して始動用 の電動機で同期速度まで加速する方法がもっぱら採られて いた.

その後、コンデンサの信頼性向上と大容量化によって、 送電網の力率調整には安価で経済的なコンデンサ・リアク トルとタップの組合せが使われるようになり<sup>(13)</sup>,同期調 相機の新設は途絶えた、しかし、工場などにおける機器の 大型化によって電圧安定性問題が顕在化した 1980 年代に 即応可能な無効電源として注目され、再び設置されるよう になった<sup>(4),(14)</sup>. 1980 年ごろには原動機と発電機を回 転したまま嵌脱できる同期クラッチが開発され、ピーク運 転用のガスタービン発電機を運転したまま発電機から同期 調相機に切り替える方法も提案されている(15).

1980年代の終わりには半導体技術の進化に伴い SVC が開発された.第2表に各調相設備の特徴<sup>(4)</sup>を示す.現 在の調相設備の配置は経済性を考慮して決定されており、 大部分ではコンデンサ・リアクトルを用い、電圧安定性に 問題がある系統での SVC の設置が増えている.同期調相 機は電圧維持の必要性が特に高い一部の高圧変電所にのみ 設置されている<sup>(4)</sup>.発電機の調相機運転については、現 在は水力発電所や揚水発電所の一部で行われているが、火 力発電所では行われていない。

# 再生可能エネルギー大量導入時の同期調相機

**第2表**から、同期調相機はコンデンサ・リアクトルと 比較し、① 無効電力の発生・吸収の両方が可能 ② 過渡安 定効果をもつ、という優れた調相機能をもっていることが 分かる. さらに SVC と比較しても過負荷能力でまさって いる。しかし、現在は設備費・運用コストが高いために採 用されていない、高コストな同期調相機が必要となる理由 として以下が挙げられる.

- 再生可能エネルギーの急激な出力変化に対応する必 要性
- 太陽光・風力発電のような非同期電源の増加による 周波数維持能力の低下に対する効果

前項で述べたコンデンサ・リアクトルによる力率調整で は、予測可能な比較的ゆっくりとした需要の変化に対応 し、タップ切替で接続設備の容量を変える.対して同期調 相機では固定子の励磁強度を変更、つまり固定巻線に流す 電流の量を変更するだけで消費・供給する無効電力の量を 調整できる.よって、負荷の急変動への即応性をもつ.

さらに同期調相機は優れた電圧安定性をもち、電圧制御 の下限範囲を超えても内部誘起電圧によって運転電圧 80%程度までは一定の無効電力を供給し続ける<sup>(16)</sup> この 性質から、負荷変動によって系統電圧が低下した場合でも 電圧を回復させ、停電の発生やその拡大を防ぐことができ る. 周波数維持能力については、機器サイズと慣性力の定 量的な効果の算定方法をこれまでの調査では見つけること ができなかった. 今後も引き続き調査を続けていく.

航空転用型ガスタービンに対応する発電機サイズでは, 同期調相機として運転したときの無効電力供給力は +70~-30 Mvar 程度と見込まれる. よって, 従来のよう な高圧変電所への設置ではなく、需要家側や再生可能エネ ルギーの発電設備に近い場所への設置が適していると考え られる. また、再生可能エネルギー発電設備の近くへ設置 すると、負荷変動の激しい分散型電源が増えることによる 電力潮流の大きな変化を防ぐ効果が見込まれる.よって、 狭い範囲の系統でどのような性能が求められるかを検討し ていく必要がある.

### 言 4. 結

本稿においては、再生可能エネルギー大量導入時の同期

第2表 各種調相設備の特徴(*)					
Table 2         Characteristics of phase modifying equipment (4)					
設備種類	無効電力	過渡安定効果	設備費	電力損失	過負荷能力
コンデンサ	発 生	なし	1	小さい	_
リアクトル	吸収	なし	$0.3 \sim 1$	小さい	_
SVC	発生·吸収	あり	$4\sim 6$	大きい	不 可
同期調相機	発生·吸収	あり	$8 \sim 9$	中位	短時間過負荷能力あり

調相機による系統安定化について、その有効性を検討した.まず、同期調相機が日本においてどのように使われ始め、また使われなくなったかを調査した.将来、再生可能 エネルギーが大量に系統に接続された際に、同期調相機は 無効電力制御の即応性、大きな電圧降下時の電圧回復性 能、回転エネルギーによる周波数維持能力によって系統安 定に貢献できると考えられる.

また,今回は同期調相機としての能力のみを述べたが, 発電機として運転し有効電力を供給する場合も併せて系統 安定に貢献できる運用方法を検討する必要がある.今後 は,電力系統の過渡的な安定性も含めたより詳細な検討を 実施し,航空転用型ガスタービンと同期調相機のセットを どこに設置するのが効果的かを探っていく.

# — 謝 辞 —

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総 合開発機構(NEDO)の支援を受け、エネルギー・環境新 技術先導プログラムの一環として実施しています.ここに 記し、謝辞といたします.

## 参考文献

- (1) 餘利野直人,佐々木 豊,藤田将輝,造賀芳文, 奥本芳治:自然エネルギー電源大量導入に対する系 統解析・計画・運用技術の課題 – ロバスト信頼度 – 電気学会論文誌 B 第 131 巻 第 8 号 2011 年 8 月 pp. 670 - 676
- (2) 米澤克夫,高村 薫:航空機転用 GT 運用における系統安定化制御技術(パネルディスカッション報告) 日本ガスタービン学会誌 第43巻第1号2015年1月 pp.56 61
- (3) 高村 薫:アメリカにおける航空転用型ガスター
   ビン市場の特性と日本での展開の期待 IHI 技報
   第 52 巻第4号 2012 年11月 pp. 30 33
- (4) 電力系統の電圧・無効電力制御調査専門委員会:
   電力系統の電圧・無効電力制御 電気学会技術報告 第 743 号 1999 年 9 月
- (5) 井上俊夫, 矢郷昌三: 同期調相機の最新技術 富士時報 第66巻第7号 1993年7月 pp.450

- 453

- (6) 安藏彌輔:長距離送電線に於ける同期進相機の使用に就て
   1921年3月
   195 179
- (7) 中澤眞二:火力發電所の發電機を進相機としての
   利用に就て 電氣學會雜誌 第 50 巻 第 504 号
   1930 年 7 月 pp. 737 757
- (8) 渡辺和也:東京電燈千住火力発電所発電機の調相
   機兼用改造とその影響(第1報) 電気学会論文
   誌A 第121巻第1号 2001年1月 pp.20 24
- (9) 山根了釋:東邦電力名古屋發電所のタービン發電
   機を調相機としての使用に就て 電氣學會雜誌
   第 58 巻第 600 号 1938 年 7 月 pp. 521 528
- (10)小柳美一:国鉄川崎発電所のターボ発電機の調相
   機運転について 電力 第34巻第4号 1950年
   4月 pp.8-10
- (11)加賀貞広:火力発電所とタービン発電機 附
   タービン発電機の調相機運転 三菱電機 第 25 巻
   第 3 号 1951 年 7 月 pp. 63 67
- (12)長嶋儀治:赤羽発電区タービン発電機のタービン
  起動調相機への改造について 電気鉄道 第7巻
  第3号 1953年3月 pp.1902 1904
- (13)村岡隆,松本義明:電力用コンデンサの歴史
  -そのコンパクト化と低ロス化の歩み 日新電機技報第55巻第2号2010年10月 pp.43 53
- (14)高橋 満:C. 同期電動機および同期調相機
   電氣學會雜誌 第96巻第5号 1976年5月
   pp. 373 374
- (15)村山孝夫,吉鶴睦男,大井柾雄:ガスタービン発 電設備調相運転用オーバランニングクラッチの開発 日立評論 第62巻第10号 1980年10月 pp.47 - 50
- (16)宮田明則,道上 勉:大規模電力系統から観た大容量同期調相機導入の系統運用面の効用に関する総合的な評価と実証 電気学会論文誌 B 第 119 巻第 6号 1999年6月 pp. 727 734

# LNG 計装変換器盤全面更新工事と新工法紹介

# Introduction of a New Method of Signal Converter Board Exchange Construction in LNG Plant Facilities

木 原 光 樹 エネルギー・プラントセクタープラントプロジェクトセンターエンジニアリング部 主査

2015 年 4 月から,中国電力株式会社柳井発電所において,LNG 計装変換器盤の全面更新工事が開始された.工 事スペースが限られているため,従来の工法が採用できないことや,LNG 設備が長時間停止できないなどのさまざ まな運用制約のなか,現在進行している工事の内容と今回採用した新たな工法について紹介する.

We started signal converter board exchange construction in April 2015 in the Yanai Power Station of Chugoku Electric Power Co., Inc. We ran into some problems such as too little space and inability to stop the facilities for long periods of time. Here we introduce the construction method that we are using now and a new method of construction.

# 1. 緒 言

近年,エネルギー源のバランス変化や窒素酸化物などの 大気汚染物質の発生が少ないことから,液化天然ガス (LNG)への依存度が高まっている.このような状況下で 過去に建設されたLNGプラントが高稼働率で運転を続 け,部品や機器の更新時期を迎えている.タンク本体や周 辺機器はもとより電気・計装設備も例外ではない.

本稿では最近更新時期を迎えた中国電力株式会社柳井発 電所(山口県)の計装機器の更新工事の状況と、今後の 工事でも適用が期待される新工法のあらましを紹介する.

# 2. 計装変換器盤

計装変換器盤は、電源部分、計装変換器、モニタスイッ チ、アレスタから構成されている. 第1図に計装変換器 盤のイメージを示す.現場に設置される圧力・差圧式流量 の発信器や熱電対といった温度センサなどからのプロセス 信号を変換して主制御装置に出力するとともに、モニタス イッチの接点信号を補助リレー盤に送る役割をもつもので ある.

これらの信号を用いて, 主制御装置では LNG 基地内の プロセス/ユーティリティー設備の自動運転による自動制 御, 監視を行っている. また, 補助リレー盤では設備を保 護するための警報監視, インタロック監視を行っている.

以上のことから,計装変換器盤は主制御装置と同様に LNG 基地の計装システムにおいて重要な装置であり,盤 の設計・製作ならびに現地工事において高い品質と安全性 が要求されている.

# 3. 柳井発電所における工事概要

中国電力株式会社柳井発電所の LNG 計装変換器盤は, 設置後 25 年以上経過し,変換器などの構成部品の経年劣 化が進行している. さらに,構成部品が製造中止となり今 後部品交換ができなくなること,また,変換器メーカによ る保守期限が近づいていることから,今回大規模な更新工 事を実施することになった.

今回の更新工事の対象となる LNG 計装変換器盤の構成 は下記のとおりである。

受入母管設備	電源盤 1 面,	変換器盤 2 面
貯蔵設備	電源盤 4 面,	変換器盤 12 面
BOG ( Boil Off Gas )	電源盤 2 面,	変換器盤9面
設備		
払出設備	電源盤 2 面,	変換器盤 11 面
ユーティリティー設備	電源盤 2 面,	変換器盤3面
防災設備	電源盤 2 面,	変換器盤2面

工事は 2015 年 4 月から開始され, 2016 年 12 月に上 記のすべての変換器盤が更新される予定になっている.

### 4. 更新工事における制約

該当する機器を工事期間中すべて停止することができれ ば、設備を停止した状態で既設の盤を撤去し、新設の盤を 設置してケーブルをつなぎ込むことが可能となるので、比 較的に短期間で工事を完了できる.しかし、現実には設備 を長期間停止することは不可能であり、特に LNG 設備は 一度 LNG を受け入れて運転を開始すると、設備全体を停 止することができないという特徴があり、以下の事を留意



第1図 計装変換器盤のイメージ図 Fig.1 Schematic of the signal converter board

する必要がある.

# 4.1 稼働中の設備内での工事

昨今の発電事情で発電所側は高い稼働状態にあり,それ に伴い燃料供給設備である LNG 設備も高い稼働状態にあ る.そのため,設備の稼働状態を維持しながら更新工事を 行う必要があり,稼働状態の設備に影響を与えないように 十分な予防措置を行い,細心の注意を払って施工すること が求められる.

払出および貯蔵設備の盤の一部は冗長化されている (複数台あって予備機がある)ことから,該当する設備部 分を停止して工事を行うことが可能である.しかし,ユー ティリティー設備や受入母管設備,BOG 設備や防災設備 といった共通系の盤は冗長化されていないため,長時間の 停止ができないことを考慮しなければならない.

# 4.2 盤構成

たとえば、受入母管の計装変換器盤は以下の理由から盤

群のなかにある一つの盤だけを停止して更新工事を行うの ではなく,盤群単位での工事を考慮する必要があった.

- 2 面ある電源盤から変換器盤 2 面に盤間を渡って 電源が供給されていること.
- (2) 盤単位で電源 OFF することができない構成と なっていること.

# 4.3 工事スペース

LNG 計装変換器盤を設置している LNG 電気室には, 新たな盤を設置するスペースが数面分しかないため,後に 述べる新設盤をまず設置し,配線を分岐して工事を行うと いう従来方式での施工ができない状況にあった.

このほかにも、変換器メーカの縛りをなくすために既設 と異なる変換器メーカを選定することや、盤構成を見直 し、盤単位で電源停止が可能な構成にすることなどを考慮

し, 計画を進めていく必要があった.

# 5. 施工方法の検討

第2図に従来方式による施工例を示す.従来の計装変 換器盤の更新方法としては、図に示すように系統ごとまた



(注) ①~④:工事施工順序



は更新対象のすべての新設盤を事前に設置し,順次既設盤 から配線を切り替えていく方式が採用されてきた.

この方法の場合,万一新設盤に不具合があった場合に は,既設盤に戻して運転することができるというメリット があるが,新設盤を事前に設置するために十分なスペース が必要となる.

今回の工事の場合,先に述べたように,系統ごとに新設 盤を設置するための十分なスペースがないことから,従来 方式での実施は難しいということが,設計を始める前から 明らかであった.

そこで最初は、既設盤1面に設置される電源部や計装 変換器の数量や構成を見直し、集約していくことで、新設 の計装変換器盤の面数を減らすことに主眼をおいて、以下 の施工方法を検討した. **第3図**に更新工事における盤集 約のイメージを示す.

(1) 冗長化構成となっている払出設備の計装変換器盤 を順次更新する.夏の重負荷期を除けば,払出設備



**第3回** 更新工事における盤集約のイメージ **Fig. 3** Outline of the new construction method

はある程度の期間停止することが可能であることか ら、停止させた盤の外線ケーブルを外して撤去し、 新たな盤を据付け、ケーブル結線を行うことで盤の 更新を実施する.

- (2) 払出設備の更新がすべて終われば,次に,冗長化 構成されている貯蔵設備や BOG 設備の盤を同様な 方法で更新する.
- (3) 上記の更新によって既設盤の空きスペースができていくので、冗長化構成されていない設備の盤については、その空きスペースを用いて従来方式で更新工事を実施する.

しかし,現地調査を実施していくなかで上記の更新方法の実現が困難なことが判明した. 第4図に現地調査結果を示す.

(1) レジン(樹脂)除去の障壁

計装変換器盤への外線ケーブルは、床下のケーブ ル処理室から盤の下部を通って各装置に接続されて いる.この盤下面のケーブル通過部が延焼防止用の レジンで固められており、ケーブルを傷つけること なく、レジンを取り除くことが難しいことが分かっ た.レジンを取り除いて外線ケーブルを移設するこ とができなければ、盤面数を集約することができな いことになる.

# (2) 既設盤撤去の障壁

この更新方法の場合には、外線ケーブルを取り外 した後、既設の盤をきょう体ごと撤去し、新たな盤 を設置する必要がある.しかし、この既設盤の撤去 と新設盤の設置が非常に難しいことが問題となった. 天井と盤との隙間が十分にないため、盤を上に吊っ て移動する方法は採用できない.一方、ころ引きす る方法を採用しても、すべての盤を1面ずつ更新し ながら入れ替えることは現実的ではなかった.

# 6. 新たな工法への挑戦

ではこのような問題点をどう解決したのか?

レジンで固められていてケーブルが外せないなら,外さ ない方法を,盤をきょう体ごと撤去するのが難しいなら, 撤去しない方法は何かを模索していき,既設盤のきょう体 は撤去しないで,盤内機器の交換だけを行う既設盤流用方 式にたどり着いた.

この方法は、既設盤のきょう体と外線ケーブルがそのま ま流用できるため、廃棄する部品が減量され、新規にきょ う体を作る必要もないことから、環境にも優しい方法であ る.**第5図**に更新方法の概要(冗長化されている計装変



第4図 現地調査結果 Fig.4 Result of the site survey





③ 内部機器撤去

① 仮設計装変換器盤設置 ② 仮設計装変換器盤ヘループ切替え



**第6図** 更新方法の概要(冗長化されていない計装変換器盤) **Fig.6** Outline of the new construction method

換器盤)を示す.

ただし、最初に既設盤内の機器を取り外し・撤去し、そ の後新設の機器を取り付ける「スクラップ・アンド・ビ ルド方式」であるため、万一、新設機器に不具合があっ た場合には、既設側に戻して運転することができないリス クのある方法でもある。

そのため、関係者一丸となって設計時点から問題点の洗 出しを行い、工場検査の段階までにすべての問題を解決し て、出荷できるよう努力している.

なお,払出設備や貯蔵設備のように冗長化されている計 装変換器盤の場合には,既設機器の撤去,新設機器の設 置、新設機器のループチェック、新設機器の運用開始までの流れの間、設備の停止が可能となるので、この方法を採用することが容易にできる。しかし、受入母管設備やユーティリティー設備のように冗長化構成されておらず、長時間の停止を許容できない盤の場合には、そのままこの既設盤流用方式を採用することはできない。

④ 新設機器取付 · 配線

⑤ ループチェック後、設備を復旧

そこで、仮設電源盤1面、仮設計装変換器盤2面を準備し、更新工事中は計装変換器盤の役割を仮設盤側で代用 するという方法を採用することにした.**第6図**に更新方 法の概要(冗長化されていない計装変換器盤)を示す. 本工事は、お客さまである中国電力株式会社、計装変換 器メーカなど多くの関係者の協力を得て進めている.

現在,受入母管/ユーティリティー設備の計装変換器盤の更新が完了し,2015 年 12 月には,BOG 設備の計装変換器盤の更新が完了している予定である.

今回採用した工法は、以下のことから今後同様の工事に おける有効な選択肢の一つとして、お客さまへ提案を行っ ていきたいと考えている.

(1) スペースの制約があっても工事が可能であること.

- (2) きょう体部分や外線ケーブルを流用することか ら,廃棄物が削減でき,環境に優しいこと.
- (3) 質量のある大量の盤の輸送・搬入ではなく、中身の機器を必要な大きさに分割して輸送・搬入することが可能となるため、輸送・搬入の作業性/安全性が良くなること。

また、本方法による更新を前提とすれば、従来方式に比べて、計装変換器盤を設置するスペースを小さくすること が可能になることから、建屋スペースの縮小化の提案にも 展開していく.

# Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of a Bank of Tubes with Tube-to-Baffle Leakage

水 野 昌 幸 技術開発本部基盤技術研究所熱·流体研究部 主査 博士(工学) 藤 原 浩 介 技術開発本部基盤技術研究所熱·流体研究部

シェル&チューブ熱交換器の管外側の主要流動要素のうち、管とバッフル孔が形成する環状隙間からのリーク流 れと、リーク流れを伴う管群直交流の圧力損失特性を実験的に調べた。二つの損失係数に及ぼす隙間形状係数 Z の 影響は 29 < Z < 55 では比較的小さく、リーク比 R の影響も 0.4 < R < 0.75 では無視できることが分かった。また、主 流と直交方向にリーク流れの流入がある場合の管群損失係数は、リーク流れの流出がある場合よりも小さいことが、 実験および RANS 解析の実施によって明らかとなった。

This study investigated pressure drop characteristics of a bank of tubes with tube-to-baffle leakage and that of baffle-to-tube spacing itself by conducting experiments on various orifice shape factors Z and leakage ratios R. The results show that the two pressure drop factors depend neither on the orifice shape factor for Z = 29 - 55 nor on the leakage ratio for R = 0.4 - 0.75. Also, the pressure drop factor when the leakage flows into the bank of tubes is lower than the factor when the leakage flows out. This result is obtained not only experimentally, but also numerically by RANS simulation.

# 1. 緒 言

シェル&チューブ型の熱交換器や反応器では,管群直交 方向の流れが主流となるが,管とバッフル孔が形成する環 状隙間からのリーク流れが存在するために,複雑な熱流動 場となることが知られる.特にディスク&ドーナツ型バッ フルを用いる場合には,流路断面積の拡大・縮小に伴っ て,流れの減速・加速の効果も重なることから,その熱流 動特性を把握することは設計上極めて重要である.

管 群 直 交 流 の 熱 流 動 特 性 に つ い て は, Kays and London <sup>(1)</sup>, Zukauskas <sup>(2)</sup>, Zukauskas and Ulinskas <sup>(3)</sup> が 詳細に報告しているが,これらはいずれも断面積一定の単 段流路で実験取得されたものであり,リーク流れは考慮さ れていない.断面積が変化する管群流れについては,熊谷 ら<sup>(4)</sup>が拡大方向の流れに関して実験を行っているが,縮 小流れについての言及はない.

一方,環状隙間のリーク流れについては,Bell and
 Bergelin<sup>(5)</sup>が円管内面(内径 *D*)とその内部に挿入した円
 盤(直径 *d*,厚さ *t*)の外周面に形成される環状隙間に対して,隙間形状係数 *Z* = 2*t*/(*D*-*d*)を導入し,0.1 < *Z* < 33</li>
 の範囲で流量係数との関係を実験的に整理している.

管群直交流と環状隙間からのリーク流れが重畳する系で は、Sullivan and Bergelin<sup>(6)</sup>と Bergelin et al.<sup>(7)</sup>が、セ グメンタルバッフルを用いたシェル&チューブ熱交換器の 圧力損失と熱伝達特性を、やはり Z < 33 の領域で調べている.ここで、バッフル 1 枚当たりの総リーク量は、単位流路長さ当たりのリーク量を管群直交方向に積分した値となるため、流れ方向の管列数が増加するとリーク量も増加し、温度分布の不均一化を生じやすい、今後、機器が大容量化していくと、Z > 30 での特性を理解しておく必要性が高まるが、従来の研究視野には入っていない.

管群流れの数値解析に関しては, LES モデル<sup>(8),(9)</sup>や,レ イノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS)<sup>(10)~(13)</sup> を用いた研究が行われている.しかし,筆者らが知る限り においては,リークを伴う管群直交流の熱流動特性に関す る詳細な研究報告は見当たらない.

そこで本研究では、対向流を形成する上下二段の管群流路において、管とバッフル孔が形成する環状隙間を Z > 30としたときの、主流である管群直交流の流動特性に及ぼすリーク流れの影響、および隙間をリークする流れ自体の流動特性を実験と数値解析によって調べた.さらに、流路の拡大あるいは縮小が管群直交流の損失係数に与える影響についても数値的・実験的に調べ、評価した.

# 2. 実 験

# 2.1 バッフルリーク実験

第1図に実験装置の概略図を,第2図にバッフルリー ク供試体の略図を示す.供試体はアクリル製で,矩形断面



第1図 実験装置 Fig.1 Overall experimental system





流路(189 mm×105 mm)を上下二段に配置した流路に, センタレス加工後に研磨して直径をそろえた円柱群を配置 している.上下の流路間はバッフルで仕切られ,また, バッフルには各円柱に対応する位置に円柱貫通孔を設け て,管−バッフル孔間の環状隙間を模擬した.

実験流体の水は**第 2 図**の下段流路の右側から流入し,円 柱群と直交する方向に流れた後,中間配管を経て,今度は 上段流路の左側から対向して再流入する.下段流路を流れ る流体の一部は円柱–バッフル孔隙間から上段流路へリー クし,バッフル 1 枚の総リーク量は,下段流路の上流側に 設置した電磁流量計で計測される流量  $Q_1$  と中間配管の流 量  $Q_2$  との差で得る.ここで,リーク比  $R = (Q_1 - Q_2)/Q_1$ は,中間配管に設置したブースタポンプによって調整する.

供試体の側面には、上下段の各々13か所に ¢2.0の静 圧孔を設けたほか、円柱群のうち上下段の流路中央列にあ る各々7本の円柱のよどみ点位置に ¢2.0の全圧孔を設け た.なお、圧力分布は上段流路の出口静圧を基準として整 理している.

円柱群は、流れ方向段数 N = 14、これと直交する方向 に 5 列、円柱ピッチ p = 1.26 の正三角形配列とし、流路 側面に沿う位置には半割円柱を配置した。円柱直径 d = 29.95 mm とバッフル厚さ t = 15 mm を固定し、バッ フル孔直径を D = 30.5、30.6、30.7、31.0 mm(隙間形状係 数 Z = 55、48、40、29)として、リーク比 0.4 < R < 0.75 の範囲で流動実験を実施した。

# 2.2 セクタ実験

第3図にセクタ供試体の略図を示す. 流路内の円柱群は 直径 d = 10 mm, ピッチ p = 1.26の正三角形配列とし, 流 路側面には半割円柱を設置している. 供試体はアクリル製 で, 断面 A (48 mm × 105 mm)から断面 B (240 mm × 105 mm)にかけて広がり角 30°のセクタ流路を形成して いる. 実験流体の水はバルブ操作によって, 拡大または縮 小方向に流動の向きを変化させることができる. 流路の下 面には  $\phi$ 2.0 の静圧孔を 23 点設置しており, 拡大・縮小



流れ方向のそれぞれについて流量を変化させた場合の静圧 分布を計測した.

# 3. 実験結果と考察

# 3.1 バッフルリークを伴う管群直交流

**2.1 項**に示したバッフルリーク実験装置における円柱群 直交方向(主流)の損失係数fとレイノルズ数 $Re_{max}$ の 関係について, 第4図に下段流路の結果を,第5図に上 段流路の結果を示す.レイノルズ数には、各段とも流路出 入口の平均流量 ( $Q_1+Q_2$ )/2 を、円柱間の最小隙間基準の 流路断面積で除して求めた平均速度  $U_{max}$ で定義した  $Re_{max}=U_{max}d/v$ を用いる.ただし、dは円柱径(m)、vは 動粘性係数(m<sup>2</sup>/s)を表す.ここで、主流の損失係数fは 次の(1)式のように表す.



Fig. 5 Re<sub>max</sub> vs. f in upper section

$$\Delta P = 4f\left(\frac{1}{2}\rho U_{max}^2\right)N \quad \dots \qquad (1)$$

- ΔP : 圧力損失 (Pa)
- f : 主流の損失係数 (-)
- $\rho$  :流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- Umax:円柱間の最小断面積基準の流速(m/s)
- N : 円柱の流れ方向段数 (-)

実験パラメータには隙間形状係数 Z をとったが,下段 流路の結果を見ると,今回の Z の範囲においては明瞭な 差異は確認できなかった.リークなしの結果を含めて,い ずれの隙間形状係数 Z についても,破線で示した Zukauskas and Ulinskas<sup>(3)</sup>の式とほぼ同等か,若干下回 る程度となっている.

一方,上段流路の場合は,下段流路の結果と同様に隙間 形状係数 Z の影響は僅少であるが,Z が無限大とみなせ るリークなしの結果がやや高めの値を示した.ほかの有限 の Z 条件ではやや低く,Zukauskas and Ulinskas<sup>(3)</sup>の式 との乖離が下段流路の結果と比べても大きくなっているの が特徴である.

上記の二つの実験結果は、主流と直交する方向にリーク 流出(分岐)がある場合とリーク流入(合流)がある場 合で、主流の損失係数fが異なることを示唆している. この理由については、各円柱の前縁への主流の到達速度を 考えてみると分かりやすい.ここでは単純化して、下段流 路の各円柱前縁には分岐直前の流速をもって到達するのに 対して、上段流路の円柱前縁には合流直前の遅い流速で到 達するものとみなす.このことから、各円柱前縁への到達 速度が小さければ、円柱周りの圧力抗力も小さくなるの で、上段流路(合流側)の流動抵抗も全体として小さく なることが分かる.

なお、本研究では中間配管のブースタポンプを用いて、 リーク比を 0.4 < *R* < 0.75 の範囲で変えた実験も実施した が、既報<sup>(14)</sup>に示したように、主流の損失係数に及ぼす リーク比 *R* の影響が小さいことから、**第 4 図**および**第 5** 図ではリーク比 *R* については区別せずにプロットしたこ とを述べておく.

続いて、**第6図**にリーク流れの損失係数  $\zeta$  とレイノル ズ数  $Re_L$  の関係を示す.レイノルズ数には、総リーク流 量  $Q_1-Q_2$  を管-バッフル孔隙間の総面積で除して求めた 速度  $U_L$  と、環状隙間の水力直径  $D_{eq.}$  で定義した  $Re_L = U_L D_{eq.}/v$ を用いている.ここで、リーク流れの損失係数  $\zeta$ は次の(2)式のように表される.





 $\Delta P = \zeta \frac{1}{2} \rho U_L^2 \dots (2)$   $\Delta P : E$  力損失 (Pa)  $\zeta : リーク流れの損失係数 (-)$ 

 $\rho$  :流体密度 (kg/m<sup>3</sup>)

UL:環状隙間の平均流速(m/s)

このとき、 $\Delta P$ には下段流路と上段流路の平均圧力差 (Pa)を用いた. 隙間形状係数が 29 < Z < 55 の範囲にお いて、実験値は Z によらず比較的まとまりの良い結果と なっている. 比較のため、Kukral and Stephan <sup>(15)</sup>による 整理式において、その適用範囲(0.1 < Z < 30)の上限付 近である Z = 29 を与えて求めた結果を実線で示す. 今回 の実験値は整理式とは必ずしも一致していないが、この整 理式から層流項( $\propto$  1/*Re*)のみを取り出して表した破線 の結果と比べてみると、傾きはほぼ同じとみなせるため、 環状隙間の圧力損失特性は層流の特徴をもっているとみな しても差し支えないようである.

なお、リーク流れの損失係数  $\zeta$ に対してもリーク比 Rの影響が小さいことを既報<sup>(14)</sup>で明らかにしており、**第6** 図においてもリーク比 R については区別せずにプロット している.

# 3.2 流路の拡大・縮小を伴う管群直交流

第7図に、2.2項で示したセクタ実験装置において、 流路断面積が変化する場合の損失係数fとレイノルズ数  $Re_{max}$ の関係を示す。ここでレイノルズ数は、円柱群コア の中間地点  $r_m = (r_{in} + r_{out})/2$ での円柱間最小隙間基準の流 路断面積における平均速度  $U_{max}$  と円柱直径 d で定義した  $Re_{max} = U_{max}d/v$ を用いている。ただし、 $r_{in}$ は円柱領域の 内半径、 $r_{out}$ は円柱領域の外半径を表す。



第7図 流路の拡大縮小を伴う管群損失係数 Fig. 7 Re<sub>max</sub> vs. f of a bank with expansion or contraction

拡大・縮小流れの実験値はともに Jacob<sup>(16)</sup>の式と Zukauskas and Ulinskas<sup>(3)</sup>の式の間に入り,  $Re_{max}$ で整理 できることが分かった. 拡大流れと縮小流れの実験値を比 較すると, 縮小流れの損失係数の方がやや大きいことが見 てとれるが, これは流れが加速されたことによって, 円柱 後流の速度回復が早くなったことが原因であると考えてい る. また, 標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた二次元 CFD の結果も 併せてプロットしたが, 計算結果は実験値と良く一致して いる. なお, 本計算では ANSYS FLUENT 6.3 を使用した.

**第8図**に拡大流れ(-(**a**)),縮小流れ(-(**b**))にお ける管群出口付近の速度分布を示す.解析条件は *Re<sub>max</sub>* = 1.5×10<sup>4</sup> とした. 熊谷ら<sup>(4)</sup>は拡大流れの場合に, 管群出口において速度分布に偏りが見られたと報告してい るが,本研究で実施した計算ではそのような偏りは観察さ れない結果となった.

# 4. 数值解析

### 4.1 解析モデルと手法

本項では、流れ場の構造を詳しく把握するため、2.1項 のバッフルリーク実験系を模擬して実施した数値解析の説 明をする. 第9図に解析領域を示す.解析対象とした円 柱群の流れ方向段数は実験と同じN = 14段,これと直交 する方向には円柱1ピッチ分(p = 1.26)とした.このと き円柱とバッフル孔の中心軸は一致させている.流路の側 面境界( $y = \pm W/2$ )には半割円柱が配置され、半割円柱以 外の境界面は対称境界として扱う.下段流路の入口では一 様流入、上段流路の出口を圧力境界として計算した.下段 流路から上段流路へ折り返す中間部には、計算の都合上、 多孔質ゾーンを設け、実験装置の中間配管における圧力損



脾(レイノルズ数) =  $1.5 \times 10^4$ 

第8図 速度分布 Fig. 8 Velocity magnitude obtained by CFD



**第9**図 解析領域 Fig. 9 Top and cross-sectional views of numerical domain

失値から,単位長さ当たりの抵抗係数として与えている. この多孔質ゾーンは,上段流路への折り返しに伴う速度分 布の非一様性を解消し,上段の円柱群領域手前での整流の 役割を果たしている.

本解析では、レイノルズ応力を k-e モデルで定式化しているが、狭い環状隙間でのリーク流れが層流とみなせることを考慮して、壁近傍の扱いには Enhanced Wall Treatment (EWT)に基づく二層モデルを適用している. 非圧縮・定熱物性を仮定し、汎用コード ANSYS FLUENT 14.0 を用いて有限体積法に基づく定常 RANS 解析を行った.総セル数は約 250 万個、管近傍における y<sup>+</sup> は 1 以下とした.対流・拡散項の離散化に QUICK スキームを採用し、速度場と圧力場のカップリングには SIMPLE 法を用いている.

# 4.2 解析結果と考察

解析の実施に先立って、過去に本研究と比較的良く似た 系で取得された実験値をベンチマークとして、解析モデル の妥当性を検証しておく.この分野における従来の解 析<sup>(8)~(13)</sup>にならって、リークのない二次元管群直交流 を対象とした Simonin and Barcouda (S&B)<sup>(17)</sup>の実験条 件( $U_0 = 1.06$  m/s, Re = 18000, d = 21.7 mm)と測定結 果を用いる.**第 10 図**に主流方向の X 軸座標 x = 11 mm における速度分布  $U/U_0$  の比較結果を示す.本解析結果は S&B の実験値と良く一致していることから、本研究での EWT を用いた  $k-\varepsilon$  モデル の採用は十分な精度を与え得 るものとみなした.

次に, 第9図に示したリークを伴う系での解析結果を 説明する. 第1表に解析条件を示す. 隙間形状係数が



第10図 速度分布の比較 Fig. 10 Comparison with S&B's experimental data

Table 1         Analytical Conditions				
ケース	隙間形状係数 Z (-)	入口流速 (m/s)	レイノルズ数 Re <sub>max</sub>	
1	- 29	0.08	$8.08 \times 10^3$	
2		0.10	$1.00 \times 10^4$	
3		0.15	$1.48 \times 10^4$	
4		0.20	$1.98  imes 10^4$	
5	- 67	0.08	$8.97 \times 10^3$	
6		0.10	$1.12 \times 10^4$	
7		0.15	$1.70 \times 10^4$	
8		0.20	$2.28 \times 10^4$	

**第1表** 解析条件 Table 1 Analytical Condition

Z = 29 と 67 の場合について,それぞれ 4 種類の入口流 速を一様に与えて計算した. 第 11 図および第 12 図は, それぞれ,リークを伴う円柱直交方向(主流)の損失係 数 f の実験値を示した第 4 図および第 5 図の結果に,そ れぞれ下段流路と上段流路での解析結果をプロットしたも のである.双方とも,解析結果と実験値は良く一致し,ま た,上段流路の損失係数が下段流路の損失係数を下回ると



**第 11 図** 下段流路の損失係数 Fig. 11 *Re<sub>max</sub>* vs. *f* in lower section



いう実験値の傾向も良く捉えていることが分かる.

第13図にケース2における円柱背後の速度分布を示 す.下段流路と上段流路の双方の流れについて,流れ方向 には着目円柱と下流側に最も近い円柱との軸間中心位置を



とり、高さ方向には流路の中心位置をとった.比較対象と した円柱は、下段流路の流入側から数えて7本目、上段 流路の入口側からは8本目の同一円柱としている.流速 はそれぞれの流路の上流側に最も近い円柱の最小隙間での 平均流速 *u*<sup>i</sup> で無次元化している.それぞれの速度分布か ら、上段側(リーク流れの流入側)の方が下段側(リー ク流れの流出側)よりも速度回復が早いことが分かる. また、上段側の流速がピークとなる位置がY座標の中心 側に寄るという結果は、円柱背後の死水領域の矮小化を意 味している.上段流路における圧力抵抗の減少は、簡易モ デルによる考察から円柱前縁への到達速度が小さいためと 前述しているが、本解析結果では前記に加えて、円柱背後 においても死水領域の矮小化が少なからぬ影響を与えてい ることを示唆するものである.

# 5. 結 言

対向流を形成する上下二段の管群流路において,主流で ある管群直交流の流動特性に及ぼす管-バッフル孔隙間か らのリーク流れの影響,および,リーク流れ自体の流動特 性を実験と数値解析の両面から調べるとともに,流路断面 の拡大あるいは縮小が管群直交流の流動特性に及ぼす影響 についても考察を試み,以下の結論を得た.

- (1) バッフルリークを伴う管群直交流の損失係数 f は、分岐側で Zukauskas and Ulinskas<sup>(3)</sup>の相関式と 一致し、合流側ではそれよりも小さな値をとる。合 流側の損失係数 f が小さくなるのは、円柱前縁への 到達速度が小さいことと、円柱後流域の矮小化に起 因することが示唆された。
- (2) リーク流れの損失係数 ζは、隙間形状係数が
   29 < Z < 55 の範囲では、Z に大きく依存しない。</li>
- (3) 流路断面の拡大・縮小を伴う管群直交流の損失係 数は,管群領域内の最小隙間基準平均流速に基づく *Re<sub>max</sub>*で整理できる.

# 参考文献

- (1) W.M. Kays and A.L. London : Compact Heat Exchangers McGraw-Hill 2nd Edition (1964)
- (2) A. Zukauskas : Advances in Heat Transfer
  Academic Press Vol. 8 (1972.10) pp. 93 –
  160
- (3) A. Zukauskas and R. Ulinskas : Heat TransferDesign Handbook Hemisphere Publishing

(1983) Sec. 2. 2. 4

- (4) 熊谷博道, 猶原信幸: FBR 用中間熱交換器の熱流 動解析コードの開発 - 伝熱管群の流動抵抗について 電力中央研究所報告 T90058 (1991年6月)
   pp.1 - 31
- (5) K. J. Bell and O. P. Bergelin : Flow Through Annular Orifices Transaction of the ASME Vol. 79 (1957.4) pp. 593 - 601
- (6) F. W. Sullivan and O. P. Bergelin : AIChE Chemical Engineering Progress Symposium Series Vol. 52 No. 18 (1956) pp. 85 - 94
- (7) O. P. Bergelin, K. J. Bell and M. D. Leighton : Heat Transfer and Fluid Friction During Flow Across Banks of Tubes - VI The Effect of Internal Leakages Within Segmentally Baffled Exchangers Transaction ASME Vol. 80 (1958.1) pp. 53 - 60
- (8) S. Benhamadouche and D. Laurance : LES, coarse LES, and transient RANS comparisons on the flow across a tube bundle International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 24 (2003. 10) pp. 470 479
- (9) P. Rollet-Miet, D. Laurance and J. Ferziger : LES and RANS of turbulent flow in tube bundles International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 20 (1999.6) pp. 241 254
- (10) R. W. Johnson : Modeling strategies for unsteady turbulent flows in the lower plenum of the VHTR Nuclear Engineering and Design Vol. 238
  (2008.3) pp. 482 - 491
- (11) R. Artit and T. Akira : Benchamark Simulation of Turbulent Flow through a Staggered Tube Bundle to Support CFD as a Reactor Design Tool Part I: SRANS CFD Simulation Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 No. 12 (2008) pp. 1 293 - 1 304
- (12) R. Artit and T. Akira : Benchamark Simulation of Turbulent Flow through a Staggered Tube Bundle to Support CFD as a Reactor Design Tool Part II: URANS CFD Simulation Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 45 No. 12 (2008) pp. 1 305 - 1 315
- (13) L. Xiaowei, W. Xinxin and H. Shuyan : Numerical
Investigation of the Turbulent Cross Flow and Heat Transfer in a Wall Bounded Tube Bundle International Journal of Thermal Sciences Vol. 75 (2014) pp. 127 - 139

- (14)藤原浩介,水野昌幸:リークを伴う管群直交流の
   流動特性 第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文
   集 CD-ROM (2014 年 5 月) H213
- (15) R. Kukral and K. Stephan : The Effect of Internal Leakage on Steady – State and Transient Behaviour of Shell-and-Tube Heat Exchangers Proceedings of

the 10<sub>th</sub> International Heat Transfer Conference (1994.8) pp. 393 - 398

- (16) J. P. Holman : Heat Transfer McGraw-Hill 8th Edition (1997) p. 313
- (17) O. Simonin and M. Barcouda: Measurements and prediction of turbulent flow entering a staggered tube bundle Proceedings of the 4th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics (1988) (オンライン)入手先 < http://cfd.mace.manchester.ac.uk/> (参照 2015-10-06)

大規模太陽光発電所向け蓄電池制御技術の開発

#### Development of Control Technologies of Battery for Large-Scale Photovoltaic Power Plants

小	熊	祐	司	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 博士(工学)
前	$\mathbb{H}$	宗	彦	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部 主査
今ク	、保	知	史	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部 課長 技術士(電気電子部門)
平	尾	俊	幸	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部

近年,日本では電力安定供給とエネルギー自給率向上のため,再生可能エネルギーの活用が提唱されており,特 に大規模太陽光発電所(メガソーラー)の建設・系統連系が活発である.しかし,太陽光発電は日の陰りなど天候 の影響を受けて発電電力が大きく変動するため,その大量導入に伴う系統の電圧や周波数への悪影響が懸念されて いる.本稿では,この課題を受け筆者らが開発に取り組んでいる,発電所から系統へ安定的に電力を供給するため の蓄電池制御技術と,今後の展開について述べる.

Recently, the utilization of renewable energies has been proposed for the stable supply of electricity and improvement of the energy self-sufficiency ratio in Japan. Especially, large-scale photovoltaic power plants called "mega-solars" have been constructed one after another, and several of them have already begun supplying electricity to the commercial power grid. The amount of photovoltaic generation drastically fluctuates depending on weather conditions such that the sunlight is obscured by clouds, however. This has caused concern about the negative impacts on the voltage and frequency of the commercial power grid. In this paper, we describe control technologies of battery that we have developed for the stable supply of electricity from power stations to the commercial power grid, and future works for the application of this research.

#### 1. 緒 言

近年、日本国内のエネルギー自給率向上と電力安定供給 維持のため、再生可能エネルギーを積極的に活用すること が提唱されており、再生可能エネルギー固定価格買取制 度<sup>(1)</sup>といった法制度による支援を追い風として、特に大 規模太陽光発電所(メガソーラー)の建設・系統連系が活 発である<sup>(2)</sup>.しかし、太陽光発電は、天候の影響を受けて 短時間で発電電力が大きく変動する不安定な電源であり, その大量導入に伴い、系統の電圧や周波数に悪影響を及ぼ すことが懸念されている<sup>(3)</sup>.これに対して、発電所内に蓄 電池などの電力貯蔵設備を併設し、太陽光発電の発電電力 変動に合わせて充放電を行うことで、系統供給電力の変動 を緩和(平滑化)するという運転方式が数多く提案されて いる(4)~(7).太陽光発電所の建設において, 蓄電池の設 置はコスト的に無視できるものではなく、太陽光発電事業 の採算性に大きく影響するため、ここで導入する蓄電池は、 求められる平滑化に対して十分な性能をもちつつも、その 導入コストを可能な限り抑えられることが望まれる.

当社では、以前から再生可能エネルギーの有効活用と普及に向けた技術開発に注力しており<sup>(8),(9)</sup>、そのなかで

筆者らは前述の課題に対して,

- (1) メガソーラーの系統供給電力を平滑化するための 蓄電池制御技術の開発
- (2) 同制御技術を用いたメガソーラーの系統供給電力 の平滑化に必要な蓄電池の容量と,最大充放電電力
  - (以下,必要蓄電池性能)の評価手法の開発

を進め,系統供給電力の平滑化という本来の技術課題の解決のみならず,制御の観点から,この目的のため導入される蓄電池の仕様検討を行うことを目指している.

本稿では、上述の蓄電池制御技術と、必要蓄電池性能評価手法について説明するとともに、太陽光発電システムの 実際の発電データに基づく必要蓄電池性能評価結果の一例 を示す.

本稿の構成を以下に述べる.まず,2章において,蓄電 池を備えたメガソーラーのシステムモデルと系統供給電力 平滑化のための蓄電池制御モデルについて述べる.3章で は、2章で述べた蓄電池制御モデルに基づく,系統供給電 力平滑化に必要な蓄電池性能の評価手法を示す.4章では, 必要蓄電池性能評価の一例として,太陽光発電システムの 実際の発電データに基づく,想定した複数の平滑化制約条 件のもとでの必要蓄電池性能評価結果を示す.最後に

5章では課題と今後の展望について述べる.

## 2. メガソーラーのシステムモデルと系統供給電力 平滑化のための蓄電池制御モデル<sup>(10)</sup>

2.1 メガソーラーのシステム構成

一般の蓄電池をもたないメガソーラーでは、太陽光パネ ルを用いて発電した直流電力を、パワーコンディショナで 交流電力に変換し、これをそのまま商用系統へ供給する. したがって、日の陰りなどによって太陽光パネルの発電電 力に変動が生じた場合、系統供給電力もこれに連動して変 動する.そこで本稿では、発電所内に蓄電池を併設し、そ の充放電制御によって系統供給電力平滑化を実現する方法 を考える.

本稿で想定する,蓄電池が併設されたメガソーラーのシ ステムモデルを第1図に示す.本モデルにおいては,系 統への供給電力を太陽光パネルの発電電力にゆだねるので はなく,その制御目標値を逐次定め,系統供給電力が制御 目標値に追従するよう,制御目標値に対する太陽光発電電 力の過不足を蓄電池の充放電によって補償する.これに よって,太陽光パネルの発電電力に急激な変動があった場 合でも,蓄電池の充放電によって系統供給電力の変動を抑 えることが可能になる.なお,このようなシステムを実現 するためには,リチウムイオン電池など,高速な充放電が 可能な蓄電池を利用する必要がある.

第1図において、本システムモデルにおいて主要な役 割を演じるのは蓄電池システムおよび電力平滑化システム の二つのサブシステムである。

蓄電池システムは,後述する電力平滑化システムから系 統供給電力制御目標値を受信し,メガソーラーの系統供給 電力が所与の制御目標値に追従するように蓄電池の充放電 を行う. 蓄電池システム内のコントローラは, 電力計 B で計測した系統連系点 B の電力と制御目標値が一致する よう, 蓄電池のフィードバック制御を行う.

電力平滑化システムは、電力計 A で計測した至近の太陽光発電電力のトレンドと、蓄電池システムから受信した 蓄電池の充電残量に基づき、前述の制御目標値を定める。 電力平滑化システムは、一定間隔 *ΔT* ごとに、① 太陽光 発電電力および蓄電池充電残量値取得 ② 制御目標値の計 算 ③ 蓄電池システムの制御目標値更新、を行う. なお、 以下では、電力平滑化システムの動作するタイミングを時 刻 *k*=0,1,2,...で表す.

#### 2.2 蓄電池制御モデル

第2図に、電力平滑化システム内で蓄電池の充放電制 御に用いられる系統供給電力制御目標値の計算モデル (以下、蓄電池制御モデル)を示す.図中に示す平滑化処 理としては、さまざまな手法が考えられるが、本稿では、 その一例として、実装が比較的簡便であり、かつ広く用 いられている移動平均法<sup>(4),(5),(7)</sup>を用いたものを述べ る.

移動平均法を用いた平滑化では,系統供給電力の制御目 標値として,現時刻から過去に遡って一定期間の太陽光発 電電力の平均値を用いるというのが基本的な考えになる. 本稿では,移動平均による制御目標値算出をベースとしつ つ,実運用上重要となる次の2点

- (1) 想定されるメガソーラー運転上の制約条件を確実 に遵守できること
- (2) 蓄電池の充放電に伴うエネルギーの損失を最小化 すること

を考慮して蓄電池制御モデルを構築した.



Fig. 1 System configuration of a mega-solar with a battery





(1)に関して、本稿では、①系統供給電力変化率の制限② 蓄電池の充電は太陽光発電電力からのみとし、系統 電力による充電禁止、の二つの制約を想定することにした。① は系統供給電力の急激な変動による系統の電圧、 周波数への悪影響を緩和することを目的としたものであ る.また②は、メガソーラーから系統へ供給する電力の 売電価格は再生可能エネルギー固定価格買取制度による優 遇を受けていることから、制度の適正な運用のため、系統 から購入した電力と太陽光パネルで発電した電力が蓄電池 内で混在しないよう配慮したものである。

(2)に関して、蓄電池は充放電の過程でインバータの 直流/交流変換などによってエネルギーの損失が発生し、 またその総量は運転期間に比例する.したがって、メガ ソーラーの長期的運転を考慮する場合、制御モデルにはエ ネルギーの損失を最小化するための工夫が必要になる.

具体的な系統供給電力の制御目標値計算の手順を以下に 述べる.まず,現時刻 k の太陽光発電電力を p(k) とし, 現時刻から至近 M 点の発電電力の移動平均値 p(k; M) を,

$$\overline{p}(k;M) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} p(k-m) \dots (1)$$

によって求め、制約条件考慮前の制御目標値 u(k) を、

 $u(k) = \bar{p}(k; M) - K(q_{target}(k) - q(k))$  …… (2) で計算する. (2) 式の右辺第 2 項は, 充放電に伴うエネ ルギー損失を最小化するために設けられたフィードバック 項であり,  $q_{target}(k)$  は蓄電池充電残量目標値, q(k) は蓄電 池充電残量現在値, K はフィードバックゲインである.  $q_{target}(k)$  は適当なアルゴリズムによって時変的に定めても よいが, 本稿 **4 章**におけるシミュレーションでは定数と 設定している.

次に, (2)式で計算した u(k) に対し, 上述した二つの 制約条件にそれぞれ対応するリミッタ

(2) 
$$\mathcal{L}_2$$
:系統からの電力購入禁止リミッタ

 $w(k) = \mathcal{L}_2(v(k)) = \max(0, v(k))$  ………… (4) を  $\mathcal{L}_1$ ,  $\mathcal{L}_2$  の順番で作用させる. (3)式において, v(k) は 系統供給電力変化率リミッタ通過後の制御目標値,  $\gamma$  は平 滑化制約条件を定める系統供給電力変化率制限値,  $P_{\text{max}}$ は太陽光発電パネルの定格発電電力である. また, (4) 式において, w(k) は最終的な系統供給電力制御目標値で ある.

本システムでは、(4)式で求めた系統供給電力制御目 標値を実現するよう、太陽光発電電力の変動に応じて蓄電 池の充放電が行われる.時刻 k における蓄電池充電残量 q(k)は、計算周期  $\Delta T$  が発電電力の変動周期に対して十 分に短いとして、近似的に、

$$q(k) = \sum_{k=0}^{k-1} e'(k) \Delta T + q(0) \quad \dots \quad (5)$$

で計算できる. ただし,

であり、ここで e(k) は蓄電池充放電電力(正が充電、負が放電)、e'(k) は蓄電池側からみた、損失を考慮した充放電電力、 $0 < \beta < 1$  はインバータ効率を含めた充放電効率である。本システムにおける蓄電池充放電制御シミュレーションを行う際は、太陽光発電電力 p(k)、(k = 0, 1, 2, ...)に対して、(1)~(4)式を用いて系統供給電力を、(5)~(7)式を用いて蓄電池の充電残量と充放電電力を求める。

なお,以降の議論では,q(0) = 0とし,これが蓄電池 SOC(充電割合)の 50%に相当することにする.した がって,初期時刻 k = 0のときよりも充電残量が低い値を とるとき,q(k)は負の値をとることに注意されたい.

## 3. メガソーラーの系統供給電力の平滑化に必要な 蓄電池性能の評価手法

2章で述べた制御モデルによってメガソーラーの系統供 給電力の平滑化を実現するためには、一定以上の蓄電池容 量(蓄電池がどれだけのエネルギーを貯蔵できるかを示 す.単位:kW·h)と最大充放電電力(蓄電池が瞬間的に どれだけの電力の充放電が可能かを示す.単位:kW)が 必要になる.緒言でも述べたとおり、太陽光発電所の建設 において、蓄電池の設置コストは無視できるものではな く、そのコストには容量と最大充放電電力が大きく影響す る.そこで本稿では、これら二つ(容量および最大充放 電電力)を蓄電池性能と定義し、本章では、2章で述べた 制御モデルに基づくシミュレーションからメガソーラーの 供給電力平滑化に必要な蓄電池性能を評価する手法につい て述べる.

系統供給電力平滑化に必要な蓄電池容量を  $Q_{max}$ ,最大 充放電電力を  $E_{max}$  とする. 2 章で述べた制御モデルは, リミッタの効果によって,蓄電池の容量と最大充放電電力 が十分であれば平滑化制約条件は自動的に満足される. つ まり,平滑化に必要な蓄電池の容量と最大充放電電力は, 蓄電池の充電残量と充放電電力がとり得る上下限から求め ることができる.そこで,保守的な必要性能評価手法とし ては,蓄電池容量と最大充放電電力を無限大と仮定した蓄 電池充放電制御シミュレーションをまず行い,得られた蓄 電池充電残量と充放電電力の推移から,必要な蓄電池容量  $Q_{max}$  と最大充放電電力  $E_{max}$  を,それぞれ

$$Q_{\max} = 2 \times \max\left(\max_{k} q(k), -\min_{k} q(k)\right) \dots (8)$$

$$E_{\max} = \max\left(\max_{k} e(k), -\min_{k} e(k)\right) \quad \dots \quad (9)$$

によって求める方法が考えられる. ここで,  $\max_k q(k) \ge \min_k q(k)$  は, それぞれシミュレーション期間全体を通じ ての蓄電池充電残量の最大値および最小値であり,  $\max_k e(k) \ge \min_k e(k)$  は, それぞれシミュレーション期 間全体を通じての蓄電池充放電電力の最大値(最大充電 電力)および最小値(最大放電電力)である. なお, (8) 式右辺の2倍の部分は, **2章**で述べた, q(k) = 0 が SOC50%に相当するという前提を考慮したものである.

(8)および(9)式を用いた必要蓄電池性能評価は、比較的直観的であり、かつ保守的な評価となるため、必要性能や蓄電池設置コストの概算には適している。しかし、

- (1) ほかのメガソーラーと合わせた「ならし効果<sup>(11)</sup>」
   による系統安定化効果を考慮しておらず、過度に保 守的な性能評価になる。
- (2) 必要容量,最大充放電電力が最大になる特定日の 発電パターンにのみ依存した評価結果になり、ふだん の運転で蓄電池性能がどの程度必要か評価できない。

といった課題があり、プラントの規模や系統事情を考慮し た実際のメガソーラー設計の際には必ずしも有用ではない と考えられる.そこで本稿では、平滑化制約条件を絶対的 なものとして捉えず、必要性能に寄与する特定少数日の太 陽光発電パターンのみならず、1年間全体の発電傾向を踏 まえたうえで、「蓄電池性能がどの程度あれば、どの程度 の割合の日で平滑化制約条件を遵守できるか」を評価す る方法を示す.具体的には、Dをシミュレーション全日 数、Sをシミュレーション全日数のうち日中の全時刻で平 滑化制約条件を遵守できた日の数(以降,遵守日数)と して、

$$R(Q_{\max}, E_{\max}) = 100 \times \frac{S(Q_{\max}, E_{\max})}{D} \quad (\%)$$

.....(10)

で定義される平滑化制約条件遵守日率 R (以降,遵守日 率)を、さまざまな蓄電池容量  $Q_{max}$  と最大充放電電力  $E_{max}$  に対して評価していくことで、蓄電池性能と遵守日 率の関係を明らかにする、遵守日数 S と遵守日率 R は、 蓄電池容量  $Q_{max}$  と最大充放電電力  $E_{max}$  に依存すること から、(10)式ではそれぞれ  $S(Q_{max}, E_{max}), R(Q_{max}, E_{max})$ と表記している.

遵守日数 S(Q<sub>max</sub>, E<sub>max</sub>) は, 蓄電池容量と最大充放電電 力を無限大と仮定した蓄電池充放電制御シミュレーション により得られた蓄電池充電残量と充放電電力の推移から,

$$S(Q_{\max}, E_{\max})$$

$$= \left\| \left\{ d \middle| \begin{array}{c} 2 \times \max\left(q_{\max}^{d}, -q_{\min}^{d}\right) < Q_{\max} \\ \cap \max\left(e_{\max}^{d}, -e_{\min}^{d}\right) < E_{\max}, \\ d = 1, \dots, D \end{array} \right\} \right\| \dots \dots \dots (11)$$

で求める.ここで、 $q_{max}^d$ 、 $q_{min}^d$ はそれぞれ d 日目(d=1, …, D)の蓄電池充電残量の最大値および最小値、 $e_{max}^d$ 、  $e_{min}^d$ はそれぞれ d 日目の充放電電力の最大値(最大充電電 力)および最小値(最大放電電力)である.また記号 ॥・॥ は集合の要素数を意味する.**第3**図に、(11)式の概 念図を示す.**第3**図は 4 章で行うシミュレーション結果 (条件については 4 章を参照)の一部であり、2 章の制御 モデルのもと、太陽光発電システムの実際の発電データを 用いた蓄電池充放電制御シミュレーション結果から、1 年 のうち各日の蓄電池の充電残量の最大値および最小値 (-(a))、最大充電電力および最大放電電力(-(b))の 推移を示したものである.緑色の枠線は所与の蓄電池容量



測定日 (年/月/日)

第3図 遵守日数の計算概念図



(-(a)),最大充放電電力(-(b))を示しており,第3図の場合は、Q<sub>max</sub>=0.4 pu·h(-(a))、E<sub>max</sub>=0.6 pu(-(b))としている.ここで pu(per unit)とは、太陽光パネルの定格出力を1としたときの電力の割合を示し、pu·hは1 pu で1時間充放電したときの電力量に相当する.各図中、各日の最小(最大)充電残量、最大充放電(充電)電力がともに緑色の枠線の内側に収まっている日が制約遵守日である.

以上の考え方に基づく必要蓄電池性能評価の流れを以下 に示す.

手順 1 蓄電池充放電制御シミュレーションの実行

- 2 章で述べたシステムモデルと制御モデルに基づ く、長期間(たとえば1年間分)の太陽光発電デー タを用いた連続的な蓄電池充放電制御シミュレーショ ンによって、シミュレーションの各時刻 k における蓄 電池充電残量 q(k) と蓄電池充放電電力 e(k) を求め る.ここで、「連続的」とは、連続する2日の間で蓄 電池の充電残量を引き継がせることをいう、また、シ ミュレーション中の q(k) と e(k) には特に制約を考え ないこととする.
- 手順 2 各日における充電残量・充放電電力の最小値お よび最大値の計算

シミュレーション期間中の d 日目 (d = 1, ..., D)
 における蓄電池充電残量の最大値 q<sup>d</sup><sub>max</sub>,最小値 q<sup>d</sup><sub>min</sub>
 と充放電電力の最大値 e<sup>d</sup><sub>max</sub>,最小値 e<sup>d</sup><sub>min</sub>を求める.
 手順 3 蓄電池性能に対する遵守日率の計算

手順 2 で得た  $q_{max}^d$ ,  $q_{min}^d$ ,  $e_{max}^d$ ,  $e_{min}^d$  (d = 1, ..., D) を基に, さまざまな蓄電池容量  $Q_{max}$  と最大充放電電 力  $E_{max}$  に対して, (10)式と(11)式を用いて, 遵 守日数  $S(Q_{max}, E_{max})$  と遵守日率  $R(Q_{max}, E_{max})$  を求 める.

手順 4 蓄電池性能に対する遵守日率の関係の整理

手順3で得た、 $Q_{\max} \ge E_{\max}$ に対する $R(Q_{\max}, E_{\max})$ の関係を整理する.

上述の評価方法を用いることで,たとえば,

(1) ならし効果を期待し、多少の制約逸脱が許される と仮定したとき、どの程度の性能が求められるのか、

(2) 年間を通じて蓄電池がどの程度動作するのか,

など,実際のメガソーラー設計の際の検討材料として広く 有用な評価結果を得ることができる.また本手法を用いた 場合でも,(8)および(9)式に相当する,すべての日で平 滑化制約条件を遵守するための必要性能評価も可能である.

なお、メガソーラーの系統供給電力平滑化に求められる 蓄電池の性能は、平滑化制約条件や太陽光発電パターンの ほか、制御モデルやそのパラメータにも依存する。本稿で は一例として簡易的な制御モデルを用いているが、蓄電池 性能の合理化を目指す場合、制御モデルの高度化やそのパ ラメータ最適化も重要な課題となることを付記しておく.

## 4. 太陽光発電システムの実際の発電データに基づ く必要性能評価の例

#### 4.1 評価条件

本章では、3章で示した手法による、系統供給電力平滑 化に必要な蓄電池性能の評価結果の一例を示す.第1表 および第2表に、本評価で用いた太陽光発電データの諸 元と蓄電池制御モデルのパラメータ設定<sup>(10)</sup>をそれぞれ 示す.また第4図に、太陽光発電データを採取した、IHI 横浜事業所内の太陽光発電システムの外観を示す.本評価 では、検討結果の比較性を考慮して、発電電力の値を、定 格出力が1puとなるように規格化している.なお、シ ミュレーション期間(1年間:365日)のうち、全部で 7日間のデータ欠測日があるが、シミュレーションではこ れらの日の太陽光発電電力は1日を通してゼロであると し、代わりに(10)式の遵守日率の計算式の分母 Dを、 D=365-7=358 とした.

今回用いた太陽光発電データは、メガソーラーと比較し て規模の小さい太陽光発電システムによるものである。天 候の変動に伴う発電電力の変動はシステムの規模に依存 し、規模が小さいシステムであるほど、発電電力の定格出 力に対する変動は大きくなる。したがって、以下で示す評 価結果は、メガソーラーの系統供給電力平滑化を考えるう えでは保守的なものであると考えられる。

## 4.2 蓄電池性能と遵守日率の関係(容量/最大充放電 電力を個別に評価)

まず, 蓄電池の容量と最大充放電電力の大小が, それぞ れどの程度平滑化性能の向上に寄与するかを把握するた め, ① 容量と遵守日率の関係 ② 最大充放電電力と遵守日 率の関係, を個別に評価する. 具体的には, ①の場合は 最大充放電電力を, ②の場合は容量を無限大と仮定して それぞれ遵守日率を求めた.

**第5図**および**第6図**に, 蓄電池制御シミュレーション の結果から個別評価の考え方に基づき得られた, 蓄電池容 量と遵守日率の関係, および蓄電池最大充放電電力と遵守 日率の関係をそれぞれ示す.

蓄電池容量に関して、第5図から、大きな容量の蓄電

**第1表**太陽光発電データ諸元 **Table 1** Photovoltaic power generation data

所	在	地	神奈川県横浜市磯子区(IHI 横浜事業所内)
パネル方	位角	(度)	151.820
パネル傾斜	斜角	(度)	10.0
定格出	力	( kW )	10
データ其	月間	(年/月/日)	$2013/1/1 \sim 2013/12/31$
データ欠済	則日	(月/日)	5/3, 5/4, 5/5, 7/19, 7/28, 9/12, 9/20(7日間)
データ間	目隔	(s)	60 (内挿によって 1 s 間隔のデータを用意)

**第2表** 蓄電池制御モデルのパラメータ設定<sup>(10)</sup> **Table 2** Parameter settings of the battery control model<sup>(10)</sup>

				8		
名			称	パラメータ	単 位	値
計	算	周	期	$\Delta T$	s	1.0
移動	平均に用い	いるサン	プル数	М	-	1 201 ( 20 min )
系統	供給電力	変化率	制限值	γ	min <sup>-1</sup>	0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.10
フィ	ードバ	ックケ	『イン	K	$h^{-1}$	1.0
太陽	光パネル	定格発	電電力	$P_{\rm max}$	pu	1.0
蓄電	池充電	残量目	標値	$q_{\text{target}}(k)$	pu·h	0.0 ( constant )
蓄電	1 池 充	放 電	劾 率	β	-	0.95



**第 4 図** IHI 横浜事業所 太陽光発電システム Fig. 4 IHI Corporation Yokohama office photovoltaic generation system

池を用意することで、遵守日率を高くすることができると 分かる.また、系統供給電力変化率制限値  $\gamma$ の値が大き い場合、すなわち制約が緩い場合、同様に遵守日率は高く なることが分かる.本シミュレーションによれば、シミュ レーション全期間において平滑化制約条件を遵守するため には、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ の場合では約 0.5 pu·h、 $\gamma = 0.10 \text{ min}^{-1}$ の場合、約 0.1 pu·h の容量が必要である.

また, **第5**図から, 蓄電池容量を大きくするに従い, 容 量増加分に対する遵守日率の増加は鈍くなることが分かる. これは, 大きな蓄電池容量を必要とする太陽光発電パター ンの日が発生する頻度はまれであるということを意味してい る. **第7**図に, 本シミュレーションのうち, γ=0.01 min<sup>-1</sup> としたケースにおいて, 蓄電池充電残量の変動が最大と なった日の各種電力と充電残量の推移を示す.**第7** 



第5図 蓄電池容量と遵守日率の関係 Fig. 5 Relationship between battery capacity and the rate of days satisfying the smoothing constraint





図-(a)において、太陽光発電電力は、午前10:00ごろ までは低く推移しており、その後急激に上昇したのち、正 午から大きく急落している.この間、平滑化制約条件を遵 守するため、蓄電池の充放電がなされており、その結果と して蓄電池充電残量(第7図-(b))が大きく変動して いる.蓄電池充電残量の変動量は、太陽光発電電力と系統 供給電力の差の積分で与えられるため、大規模な発電電力 変動があった場合でも、一時的に日が陰るなど、それが短 周期の変動であれば、充電残量の変動に対する寄与は小さ くなる.しかし、第7図のケースのように、晴れから曇 り(あるいは曇りから晴れ)といった天候の急変による 発電電力の大変動が起こり、かつ変動後の発電電力レベル が長時間継続するようなケースでは、充電残量の変動は大 きくなり、結果として平滑化のために大きな蓄電池容量が 必要となる.

なお,前述のとおり,第7図のような大規模な発電電 力変動が発生する日は1年を通してもまれであり,なら



第7図 蓄電池充放電電力と充電残量の推移 Fig. 7 Transition of the battery charge and discharge power and charged energy

し効果などを見積もったうえで, 遵守日率をたとえば 95%としてよいのであれば, γ=0.01 min<sup>-1</sup>の場合, **第5** 図から, 必要な蓄電池容量は約 0.35 pu·h (100%遵守の 場合と比較して -0.15 pu·h)まで引き下げることが可能 であることが分かる. その場合でも, 1 年を通して約半分 の日では 0.1 pu·h 程度の容量があれば十分である.

次に、蓄電池の最大充放電電力に関して**第6図か**ら、 容量と同様に最大充放電電力の大きな蓄電池を用意するこ とで、遵守日率を高めることができると分かる.ただし、 最大充放電電力と遵守日率の関係は、容量と遵守日率の関 係とはやや傾向が異なり、遵守日率が約100%となるま で、最大充放電電力にほぼ比例するかたちで遵守日率が高 くなることが分かる.これは、蓄電池の充電残量変動量が 大きくなる第7図に示すような発電パターンがまれなも のであるのに対して、日の陰りなどによる一時的な発電電 力の急変は、1年を通じて日常的に生じているためである と考えられる.

また, 第6図から,系統供給電力変化率制限値  $\gamma$ の値 は,遵守日率にほとんど影響しないことが分かる.本稿の 蓄電池制御モデルにおいて,太陽光発電電力変動の際の蓄 電池の充放電電力は,系統供給電力の制御目標値と太陽光 発電電力の差で与えられるが,今回試行したパラメータの 範囲 0.01 min<sup>-1</sup>  $\leq \gamma \leq 0.10$  min<sup>-1</sup> では,系統供給電力の制御 目標値の変化は太陽光発電電力の変動と比較すると僅かな ものとなる.したがって, $\gamma$ が小さい場合,蓄電池の必要 最大充放電電力は $\gamma$ にほとんど依存せず,起こり得る太 陽光発電電力の変動幅にほぼ等しいものとなる.本シミュ レーションによれば,シミュレーション全期間において平 滑化制約条件を遵守するためには $\gamma$ の値によらず,約 0.8 pu の最大充放電電力が必要である.

4.3 必要な蓄電池の容量と最大充放電電力の同時評価

4.2節では,容量と最大充放電電力について,個別に必要性能を評価したが,本節では,より現実的な蓄電池の必要性能を評価するため,(10)式を用いて遵守日率を求める際に容量と最大充放電電力を同時に考慮したうえで蓄電池性能と遵守日率との関係を評価する.ここでは,蓄電池の

容量と最大充放電電力のそれぞれの値の組合せに対して遵 守日率を評価することとなる.本稿では,蓄電池の容量と 最大充放電電力の比として最大充放電電力容量比 *C* を,

$$C = \frac{E_{\max}}{Q_{\max}} \cdots (12)$$

で定義し(CはCレートとも呼ばれる.), これを用いて 容量と最大充放電電力の関係を整理する. Cの単位は時 間の逆数の次元で任意にとることが可能であり,本稿では h<sup>-1</sup>とし,1時間当たり蓄電池容量のどれだけの割合を充 放電できるかを示すものとする.

第8図に、複数の最大充放電電力容量比 C の値に対し て、蓄電池容量と遵守日率の関係を評価した結果を示す. 各図中には、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$  ( $C = \infty$ )の系列を併せてプ ロットしてある.これは、4.2節で評価した容量のみを考 慮した個別評価の結果に等しいものである.第8図から、 容量と最大充放電電力を同時に考慮した場合、容量のみを 考慮した場合と比較して、同じ蓄電池容量に対する遵守日 率は低くなっており、特に C の値が小さいケースにおい てその傾向が顕著であることが分かる.また全体的に、系



第8図 最大充放電電力を同時に考慮した場合の蓄電池容量と遵守日率の関係

Fig. 8 Relationship between the battery capacity and the rate of days satisfying the smoothing constraint simultaneously considering the battery maximum charge and discharge power

統供給電力変化率制限値 γ による遵守日率の違いはほぼ ないことが分かる.これは,遵守日率の決定に関して最大 充放電電力が支配的であり,4.2節で考察した最大充放電 電力と遵守日率の関係に強く影響を受けているためと考え られる.

本シミュレーションによれば、シミュレーション全期間に おいて平滑化制約条件を遵守するためには、 $\gamma = 0.01 \text{ min}^{-1}$ の場合、 $C = 2.0 \text{ h}^{-1}$ のとき約 0.5 pu·h、 $C = 1.5 \text{ h}^{-1}$ のと き約 0.6 pu·h、 $C = 1.0 \text{ h}^{-1}$ のとき約 0.8 pu·h の容量が必 要である.

これらの評価結果は、実際のメガソーラーの蓄電池性能 設計の概算に利用することもできる. その場合、上述の評 価結果に対象のメガソーラーの定格出力を乗ずればよい. たとえば、C = 2.0 h<sup>-1</sup> のとき約 0.5 pu<sup>-</sup>h という上述の結 果を 4 MW のメガソーラーに適用する場合、必要容量は 2 MW<sup>-</sup>h となる. ただし、4.1 節で言及したとおり、本稿 の評価結果は実際の想定されるメガソーラーと比較して規 模の小さい太陽光発電システムに基づくものであり、その 評価結果は保守的なものとなる. また、メガソーラーの発 電パターンは設置地域の気象条件にも依存し、たとえば、 冬場の寒冷地では、太陽光パネルへの積雪の影響によっ て、発電量が低下するなどの事実が知られている. ただ し、これらの要素がどの程度必要性能に寄与するかについ て、現時点では知見がなく、今後、実証試験などを通じて 確認していく必要がある.

## 5. 結 言

本稿では、メガソーラーの系統供給電力を平滑化するた めの蓄電池制御技術と、同制御技術の実現に必要な蓄電池 性能の評価手法について述べ、性能評価結果の一例とし て、想定した複数の平滑化制約条件に対する必要蓄電池性 能を、太陽光発電システムの実際の発電パターンに基づく シミュレーションによって求め、その結果を示した.

今後の課題としては、本稿で示した系統供給電力平滑化 システムに関して、実機を用いた実証を行うことが挙げら れる.このほか、平滑化に必要な蓄電池の仕様合理化のた めの蓄電池制御モデルの改良を考えている.

今後も,筆者らは蓄電池制御技術の高度化を通じて,太 陽光発電をはじめとする,再生可能エネルギーのさらなる 普及に貢献していく所存である.

#### 参考文献

- (1) 経済産業省 資源エネルギー庁:再生可能エネル ギー固定価格買取制度ガイドブック 2015(平成 27)
   年度版 2015年3月
- (2) 経済産業省 資源エネルギー庁:平成 26 年度エネ ルギーに関する年次報告(エネルギー白書 2015)
   2015 年7月
- (3) 桑山 顕: 稚内メガソーラープロジェクト(1)
   系統安定化技術の開発について 北海道電力 研究年報 Vol. 41 2010 年 10 月
- (4)奥田靖男,木村 操:太陽光発電システムの出力
   変動抑制技術 東芝レビュー Vol. 65 No. 9
   2010年9月 pp. 10 14
- (5) 橋本 勉, 栗田章央, 南 正明, 吉岡正博, 小林 克明, 橋本雅之: リチウムイオン二次電池を用いた再 生可能エネルギーの系統連系円滑化システムの開発 三菱重工技報 Vol. 48 No. 3 2011 年 pp. 52 -59
- (6) 宮崎裕一,由本勝久,井上俊雄,七原俊也:蓄電 池を用いた太陽光発電の出力変動抑制制御手法の開 発 一変化速度制限を用いた出力変動抑制制御手法の 提案 一 電力中央研究所報告 2011年5月 R10034 pp.1 - 27
- (7) 直井伸也,野呂康宏,奥田靖男:出力変動抑制機
   能付き太陽光発電システムの実証試験 東芝レ
   ビュー Vol. 67 No. 1 2012 年 1 月 pp. 14 17
- (8) 磯本 馨: IHI の再生可能エネルギーへの取組み
   IHI 技報 第52巻第4号 2012年11月
   pp. 16 22
- (9) 技術開発本部総合開発センター: 賢い電気の使い 方 スマートエネルギーネットワーク技術 IHI 技 報 第 53 巻 第 2 号 2013 年 6 月 pp. 22 - 25
- (10)小熊祐司,前田宗彦,平尾俊幸,今久保知史,原
   亮一,北 裕幸:大規模太陽光発電所における系統
   供給電力変動抑制のための必要蓄電池性能評価
   平成 27 年電気学会 C 部門大会講演論文集 2015 年
   8 月
- (11)大関 崇,高島 工,大谷謙仁,菱川善博,輿水 源太郎,内田恵久,荻本和彦:太陽光発電の広域的 ならし効果に関する分析・評価 電気学会論文誌
   B Vol. 130 No. 5 2010 年 5 月 pp. 491 - 500

# 700℃級先進超々臨界圧 (A-USC) プラント実現へ向けた ボイラ技術開発

#### Development of Boiler Technology for 700°C A-USC Plant

久才	日可	圭	可	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主查 博士(工学)
野	村	恭	兵	技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 博士(工学)
松	尚	孝	昭	技術開発本部生産技術センター溶接技術部 主査
中	Ш	博	勝	エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンターボイラ設計部 部長
室	木	克	之	エネルギー・プラントセクターエネルギーシステムセンターボイラプロジェクト統括部 主査

当社では、700℃級先進超々臨界圧(A-USC)発電技術の実用化に向けて、2008 年から 2013 年までボイラ要素技術開発を実施してきた.特に、候補材料である Ni 基合金配管の溶接技術および曲げ加工技術について検討した. その結果、材料間において溶接条件は異なるものの、すべての候補材料について溶接手法を確立した.また冷間曲 げなどの曲げ加工技術についても、加工条件を確立した.確立した条件で、管寄せおよびループ管のモックアップ を製作し、実機を想定した施工が可能であることを確認した.溶接部については、高温長時間における信頼性を検 証するため、100 000 h を目指したクリープ破断試験を実施中である.

For the purpose of putting 700°C Advanced-Ultra Super Critical (A-USC) power generation technology into practical use, IHI developed fundamental technologies for boilers from 2008 to 2013. In particular, IHI examined the welding technology and bending technology of Ni-based alloy piping of the candidate materials. In the end, IHI established welding methods for every candidate material, even though the welding conditions are different for each material. Regarding bending technologies including cold bending, IHI also established the optimal machining conditions. Based on these conditions, IHI manufactured mockups of header pipes and loop pipes and verified that construction of an actual machine was possible. 100 000 h creep rupture tests are being conducted on welded parts to verify their long-term durability at high temperatures.

#### 1. 緒 言

近年、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)などの温室効果ガス排出削減 の観点から、石炭火力発電の高効率化が強く望まれてい る.これまで国内では、発電効率の向上を目的に世界に先 駆けて蒸気温度の向上を実現させてきた. 第1図に国内 における火力発電技術の蒸気条件の変遷を示す.1990年 代に入り、まず蒸気温度 593℃を実現し<sup>(1)</sup>、その後さら なる蒸気温度の向上を実現させ、2009年には 620℃まで 到達した.この蒸気温度は商用のボイラとして、当時世界 最高温度であり、現在も破られていない<sup>(2)</sup>.石炭火力の 発電効率向上は、ここ 20年で飛躍的に向上したにも関わ らず、ほかの発電技術と比べると CO<sub>2</sub>排出量が高いこと から、さらなる高効率化、CO<sub>2</sub>回収技術が求められてい る.そのさらなる高効率化を実現する方法の一つとして、 700℃級先進超々臨界圧(Advanced-Ultra Super Critical : A-USC)発電技術が注目されている<sup>(3)~(5)</sup>.本技術は、





現用の 600℃ 級 USC 発電技術をベースに蒸気温度を 100℃向上させた技術である.そのため,新規発電プラン トのみならず,既存施設の改造もしくはリプレースにも適 用可能な技術として期待されている.また,現用の USC 技術と比べ,発電効率が 4%以上向上すると予想されるこ とから, CO<sub>2</sub> 排出量の 10%程度の削減が期待できる技術 である.

A-USC 技術は、ヨーロッパにおいて 1998 年から開発 がスタートし、近年ではアメリカ、インド、中国、ロシア など世界中で開発が活発に行われている<sup>(6)~(9)</sup>.特に ヨーロッパおよびアメリカにおいては、実缶試験などもす でに着手されており、先行しているといえる. インドおよ び中国においては、現在要素技術開発の段階である、ロシ アにおいては、独自の材料開発などを進めているものの、 実缶試験までの開発にはまだ時間が掛かるものと予想され る. 国内においても、2008 年から経済産業省・資源エネ ルギー庁の補助事業として「先進超々臨界圧火力発電実 用化要素技術開発」が開始され, 国内の材料メーカ, タービンメーカ、弁メーカおよびボイラメーカが参画して いる. 当社は、ボイラメーカとして参画し、ボイラ要素技 術の開発を実施してきた. A-USC 要素技術の開発プラン を第2図に示す. A-USC 技術には、ボイラ配管として Ni 基合金を適用することから、溶接技術、加工技術の確 立が必要となる. これら製造技術の確立に向けて、2008年 から 2013 年まで取り組んできた. 2014 年からは、実缶

試験に向けた設計・製造および運転を実施している.また,ボイラ材料の高温での長時間信頼性が重要となることから,2010年から部材の長時間クリーブ破断強度の検証を継続して実施している.A-USCの設計技術の動向については,既報<sup>(10)</sup>で報告したとおりである.

本稿では、要素技術として開発してきた Ni 基合金の溶 接施工および曲げ加工技術に重点を置き報告する。併せ て、溶接部および曲げ部のクリーブ破断強度についても検 証中の結果を報告する。溶接技術については、まず板材な どのサンプル材を用い、溶接条件の検討を実施した。その 後実機相当規模での施工技術を開発し、最後に実機モック アップによって検証した。

#### 2. A-USC 候補材料の特徴

まず, A-USC 候補材料の特徴について述べる. ボイラ 材料の 100 000 h 破断強度を**第 3 図**に示す. 併せて USC 技術で適用されている材料についても示す. 現状の USC 発電の高温域では,大径管にフェライト鋼(Gr.91,Gr.92), 伝熱管にステンレス鋼(SUPER304H,HR3C)を用いてい る. これらの高温強度は,600℃から650℃近傍で100 MPa 程度を示す.材料の特徴として,フェライト鋼は焼戻しマ ルテンサイト組織であり,高温強度を高めるために,微細 な炭・窒化物を析出させている. この高い高温強度を得る ためには,使用前に熱処理で調整することが特徴である. また,オーステナイトステンレス鋼(SUPER304H,HR3C)



第2図 A-USC 要素技術の開発プラン Fig. 2 The development plan of A-USC technology





は、固溶化熱処理を施した材料であり、使用中に微細な炭・ 窒化物を析出させて高温強度を得ている.すなわち、運転 中に高温強度が得られる組織に変化していく材料である.

一方, A-USC 候補材料である Ni 基合金 (Alloy740, Alloy263, Alloy617, HR35, HR6W)の 100 000 h 破断 強度は, 650℃から 750℃近傍で 100 MPa 程度であり, フェライト鋼およびオーステナイト鋼に比べ,ボイラ材料 として使用温度を 100℃向上させることが可能となる.こ れらの合金は,金属間化合物相を強化相として用いること で高い高温強度を得ていることが特徴であり,高温強度が 高い合金ほど金属間化合物の体積率が高い.一般に金属間 化合物は,熱処理中の析出が早いものが多いこと,室温強 度を著しく向上させるため溶接および加工性を低下させる ことが予想される.このように A-USC 候補材料は,現用 の USC 材料と強度も異なるのはもちろんのこと,材料の 強化機構も異なることから,その特徴を十分に理解したう えで適用することが求められる.次にここで示した候補合 金である HR6W<sup>(11)</sup>, HR35<sup>(12)</sup>, Alloy617, Alloy263, Alloy740H<sup>(13)</sup>について, 溶接性および加工性を検討した 結果を報告する.

#### 3. 溶接技術の確立

#### 3.1 溶接施工技術の検討

溶接性を確認するとともに溶接条件を確立するため、板 材および鍛造管を用いて、溶接施工試験を実施した. その 結果を第1表に示す.継手の確証試験は、溶接部の側曲 げ試験, 引張試験, シャルピー衝撃試験を実施した. ま た、溶接継手のクリープ破断強度を確認するため、最大 10 000 h のクリープ破断試験を実施した. 代表例として, HR6W 溶接継手の断面マクロ写真を第4図に示す.いず れの合金においても、 側曲げ試験から溶接時の溶接欠陥な どがないこと、ミクロ組織観察からも溶接部に微細な割れ がないことを確認した. ボンド部および溶接熱影響部 (HAZ)のシャルピー衝撃値は、いずれの合金においても 100 J/cm<sup>2</sup> と高い値を示した. また, 引張強さはいずれの 合金についても母材と同等であることを確認した. 溶接継 手のクリープ破断強度は、約10000hの試験において、 母材と同等であることを確認した、以上の結果、板材およ び鍛造管で確立した溶接条件が問題ないと判断し、次に実 サイズの配管について溶接性を検証する.

#### 3.2 配管の溶接施工技術の確立

母材のクリープ破断強度および配管の製造性の観点から、A-USC の大径管候補材料として Alloy617, HR6W, HR35 の 3 合金を選定した. また,小径管候補材料とし て Alloy617, HR6W, HR35, Alloy263, Alloy740H の 5 合金を選定した. これらの合金について配管を用いた溶 接施工試験を実施した. その結果をまとめて**第 2 表**に示 す.

溶接方法は, GTAW および SMAW である. SMAW に よる溶接試験は, HR6W 大径管のみ実施した. Alloy617

試 料 形 状 (mm)	材質	溶接材料	溶接方法	溶接部の割れ ミクロおよび曲げ試験	シャルピー特性 ボンド部, HAZ (J/cm <sup>2</sup> )	引 張 強 さ (室温, 高温)	クリープ強度
	HR6W	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	100 以上	母材と同等	母材と同等
・板材	HR35	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	100 以上	母材と同等	母材と同等
t(厚さ)=25 ・鍛浩穴ぐり管	Alloy617	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	100 以上	母材と同等	母材と同等
$\phi 80 \times 20 (t)$	Alloy263	NIMONIC Filler Metal 263	GTAW	なし	100 以上	母材と同等	母材と同等
	Alloy740H	NIMONIC Filler Metal 263	GTAW	なし	100 以上	母材と同等	母材と同等

第1表 板材および鍛造管の溶接試験結果 Table 1 List of welding tests for plates and forged pipes for A-USC boilers

(注) GTAW: Gas Tungsten Arc Welding



第4図 HR6W 溶接継手の断面マクロ写真 Fig.4 Cross-section of the macrostructure of HR6W welds

大径管については, B(ほう素)添加量の調整によってク リープ強度が異なるとの報告もあるため<sup>(14)</sup>,クリープ強 度に及ぼす Bの影響についても検討した.溶接後の継手 の評価は、シャルピー衝撃試験、曲げ試験、引張試験およ びクリープ破断試験を実施した.併せて、大径管溶接部に ついては、SR(Stress Relieving:応力除去焼なまし)処 理についても検討した<sup>(15)</sup>.

代表として, HR6W 配管について溶接後の断面マクロ 観察結果を第5図に示す.

側曲げ試験およびミクロ組織観察から, B 添加量が高 い Alloy617 大径管についてのみ高温割れが一部発生して いることが明らかになった.よって Alloy617 大径管につ いては,溶接性の観点から B 量を含めた微量元素を調整 した Alloy617 を選定するか,溶接可能な条件を再選定す る必要がある.そのほかの大径管および小径管について は,いずれの合金においても側曲げ試験およびミクロ組織 観察結果からも溶接部に割れが発生していないことを確認 した.

クリープ破断強度については、代表例として、HR6W 溶接継手部のクリープ破断強度試験結果を第6図に示す. この結果は、3.1節で実施した板材のクリープ破断試験結



第5図 HR6W 溶接継手の断面マクロ写真 Fig.5 Cross-section of the macrostructure of HR6W welds







試 料 形 状 (mm)	材 質	溶接材料	溶接方法	溶接部の割れ	引 張 強 さ	クリープ特性評価
	HR6W	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	母材と同等	試験中
1 177 6-6-	HR6W	WEL117	SMAW	なし	母材と同等	試験中
大径管 <i>d</i> 350 × 40 ( <i>t</i> )	HR35 WEL-AUTO-TIG-617		GTAW	なし	母材と同等	試験中
<i>φ</i> 550 / 10 (1)	Alloy617(高B)	NIMONIC Filler Metal 263	GTAW	高温割れ	母材と同等	母材と同等
	Alloy617	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	母材と同等	試験中
	HR6W	WEL-AUTO-TIG-617		なし	母材と同等	試験中
1 172 6-6-	HR35 WEL-AUTO-TIG-617		GTAW	なし	母材と同等	試験中
小径管	Alloy617	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	なし	母材と同等	試験中
	Alloy263	NIMONIC Filler Metal 740H	GTAW	なし	母材と同等	試験中
	Alloy740H	NIMONIC Filler Metal 740H	GTAW	なし	母材と同等	試験中

第2表 大径管および小径管の板材および鍛造管の溶接試験結果 Table 2 List of welding tests for A-USC boiler pipes and tubes

(注) SMAW: Shielded Metal Arc Welding

果も含まれている. 実線で母材の平均クリープ破断強度, 破線で母材の 99%下限強度を示す<sup>(16)</sup>.

溶接継手のクリープ破断データは、すべて母材の強度の 範囲内にプロットされる.小径管の溶接継手が 10 000 h 未満で母材の平均強度よりも低かった理由は、短時間にお ける小径管母材のクリープ破断強度が低いためである. 10 000 h 以上では、小径管材の溶接継手においても、母 材の平均強度とほぼ同じ強度が得られている.現在 10 000 h 破断強度を検証するため、試験を継続中である.

次に,板材溶接継手についてクリープ破断後の断面マク ロ観察結果を**第7図**に示す.温度700~800℃において 300~18 000 h で破断した試験結果である.いずれの破 断材においても,溶接ボンド部から10 mm 以上離れた領 域で破断していた.すなわち,溶接金属および HAZ で破 断せず,母材で破断していた.野村<sup>(17)</sup>らは破断したサ ンプルを詳細にミクロ観察し,HAZ ではマイクロクラッ クおよびクリープボイドについても発生していないことを 確認している.よって,HR6W 溶接部のクリープ破断強 度は,いずれの条件においても溶接金属 > HAZ > 母材と なると考えられる.

溶接金属の強度が高い理由は,溶接金属に Alloy617 を 用いており, HR6W よりも高温強度が高いためである. HAZ が母材よりクリープ破断強度が高かった原因につい ては,ミクロ組織の違いによって**第8** 図<sup>(17)</sup>に示す模式



**第8図** HAZ と母材におけるクリープ前後のミクロ組織の模式図 Fig. 8 Schematic illustrations showing the precipitates of HR6W welds before and after creep

図のように説明できる.

クリープ試験前は、ボンド部近傍の HAZ やボンド部から 10 mm 離れた母材でも析出物は観察されず、硬さおよび転位密度のみ異なっていた<sup>(18)</sup>. クリープ破断後の組織を観察したところ、HR6W のクリープ強度を向上させるラーベス相の大きさは、結晶粒内、粒界ともにボンド部からの距離によらず一定であった.一方、HR6W のもう一つの強化相である M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 炭化物は、HAZ の結晶粒内および粒界ともに、母材に比べ微細に析出していた.結晶粒内



第7図 板材 HR6W 溶接継手クリープ破断材の断面マクロ観察結果 Fig.7 Cross-sections of the macrostructure of ruptured specimens in HR6W welds

に着目すると、ボンド部から約 10 mm 離れた領域では、 $M_{23}C_6$ 炭化物はほぼ同じであったが、ボンド部に近づく ほど、微細化していた.結晶粒界では、ボンド部から 10 mm 以上離れた領域に比べ、HAZ では結晶粒界に  $M_{23}C_6$ 炭化物が多く析出していた.このように、析出物 の分布が HAZ と母材では異なり、これら結晶粒内および 粒界での  $M_{23}C_6$ 炭化物の析出の違いが HAZ および母材 のクリープ強度に現れたと考えた.よって、フェライト鋼 で生じる溶接部のクリープ強度の低下<sup>(19)</sup>および HAZ による破壊<sup>(20)~(23)</sup>は、HR6W では生じないと予想され る.

#### 4. 曲げ加工技術の確立

ボイラ製造時には、多数の曲げ加工が施される.小径管 については加工度に応じて、熱間曲げおよび冷間曲げが選 定される.また、大径管については高周波曲げが選定され る.そこで小径管については、候補合金として HR6W, HR35, Alloy617, Alloy263, Alloy740H について冷間曲 げおよび熱間曲げ特性を検証した.大径管候補材料である HR6W, Alloy617, HR35 の3合金については、高周波 曲げ特性を評価した.

熱間曲げと高周波曲げを施した部位は,一般的に曲げ加 工時の熱によってクリーブ破断強度が低下するため,曲げ 施工後にクリープ強度を回復させる熱処理を施す.一方, 冷間加工した部位については,クリープ強度が低下しない 加工度であればそのまま使用することができる.よって, 熱間曲げおよび高周波曲げした後に,熱処理を施した部位 についてクリープ破断強度を検証する必要がある。冷間加 工については,加工度とクリープ破断強度の関係を明らか にする必要がある。そこで,高周波曲げ後の合金について は曲げ後に熱処理した合金のクリープ破断強度を,小径管 については,冷間加工後のクリープ強度を評価した。

#### 4.1 曲げ加工試験

HR6W 曲げ加工後の外観を第9図に示し、大径管および小径管の曲げ試験結果を第3表に示す.ここでは、代表的な HR6W の曲げ後の写真を示している.小径管では、すべての合金において熱間曲げおよび冷間曲げは、従来の製造設備で曲げ施工が可能なことを確認した.曲げ後



(c) 高周波曲げ



第9図 HR6W 曲げ加工後の外観 Fig. 9 Appearance of an HR6W bent pipe and tubes

Table 5 List of bendning tests for A-OSC boner pipes and tubes						
試 料 形 状 (mm)	材 質	曲げ施工方法	曲げ角度 (度)	曲げ <i>R</i> (DR)	曲げ特性	クリープ強度評価
	HR6W		180	1.7	良 好	_
	HR35	劫明曲ルギ	180	1.7	良 好	_
	Alloy617(高B)	怒回曲り	180	1.7	良 好	-
	Alloy263		180	1.7	良 好	-
小径管 <i>d</i> 45×88( <i>t</i> )	HR6W		180	2.8	良 好	冷間加工によってクリープ強度向上
$\psi$ +5 × 0.0 ( $i$ )	HR35		180	2.8	良 好	冷間加工によってクリープ強度向上
	Alloy617(高B)	冷間曲げ	180	2.8	良 好	冷間加工によってクリープ強度向上
	Alloy263		180	2.8	良 好	冷間加工の影響なし
	Alloy740H		-	_	-	7.5%以上でクリープ強度低下
大径管 <i>φ</i> 350×40( <i>t</i> )	HR35		90	4	良 好	母材と同等
大径管 <i>φ</i> 510×40( <i>t</i> )	圣管 HR6W		60	3	良 好	実施中
大径管 <i>φ</i> 350×40( <i>t</i> )	HR6W	同问仪面印	30	4	良 好	実施中
大径管 <i>φ</i> 350×72( <i>t</i> )	Alloy617		30	4	良 好	実施中

第3表 大径管および小径管の曲げ試験結果 able 3 List of bending tests for A-USC boiler pipes and tube

の寸法計測および断面調査によって,曲げ後のだ円化率, へん平率および肉厚などが許容範囲内であることを確認し た.大径管の高周波曲げについても,現状の設備の範囲内 で加工を実施し,曲げ後のだ円化率およびへん平率などが 許容範囲内であることを確認した.また,大径管のサイズ および肉厚が異なる配管においても,問題なく加工できる ことを検証した.

#### 4.2 HR6W 大径管の曲げ加工後のクリープ破断強度

次に高周波曲げを実施した後,溶体化処理を施した HR6W のクリープ破断強度を第10 図に示す.曲げ後の HR6W のクリープ破断強度は,HR6W の平均強度と 99%下限強度の範囲内であった.現在,最大 100 000 h の検証を継続して実施中である.このように曲げ後の熱処 理を施すことによってクリープ破断強度が母材の平均強度 を示した理由は,第11 図に示すように曲げ加工中に析出 した炭化物が,曲げ後の熱処理によってすべて固溶したた めである.よって,クリープ強度を低下させる粗大な析出 物が消失し,新たにクリープ中に微細な炭化物が析出した ため,強度が回復したと考えられる.









#### 4.3 クリープ破断強度に及ぼす冷間加工の影響

次にクリープ破断強度に及ぼす冷間加工の影響を明らか にするため、予ひずみとクリープ破断強度の関係を調査し た.予ひずみとクリープ破断強度の関係を第12図に示 す<sup>(24)</sup>.縦軸は、予ひずみなしのクリープ破断時間を基準 とした寿命比であり、横軸に予ひずみ量を示した.クリー プ破断強度に及ぼす予ひずみの影響は、合金によって大き く異なる.HR6W、HR35および Alloy617 のクリープ破 断強度は、予ひずみの増加とともに増加した.Alloy263 のクリープ破断強度は、予ひずみによらずほぼ一定であっ た.一方、Alloy740/740H のクリープ破断強度は、予ひ ずみが 5%までは一定であるが、7.5%以上では約 1/3 に まで低下した.これらクリープ破断強度に及ぼす冷間加工 の影響の違いは、材料のミクロ組織の違いに起因する.

HR6W は、岡田らの報告<sup>(25)</sup>にあるように、加工度が 増加するとともに Cr 炭化物が粒内に微細析出するため、 クリープ破断強度が増加する. HR35 についても同様であ ると考えられる. Alloy617, Alloy263, Alloy740/740H の 冷間加工度に対するクリープ破断強度の変化は、結晶粒界 近傍のミクロ組織の違いに起因すると考えられる. 第13 図に結晶粒界の析出物の違いを模式的に示す. Alloy617 については、冷間加工を施すと、粒界における Mo 系炭 化物および Cr 炭化物が増加する. 一般的に粒界の析出物



第 12 図 小径管候補材料のクリープ強度に及ぼす冷間加工の影響Fig. 12 The effect of cold work on the creep rupture strength of A-USC boiler tubes



第13図 冷間加工によるクリープ破断後のミクロ組織の違いFig. 13 Schematic illustrations showing the precipitates of cold worked Ni alloys after creep

が増加するとクリープ強度は上昇すると考えられているた め、加工度の増加によって炭化物の増加に伴い、クリープ 破断強度が増加したと考えられる. Alloy263 については、 冷間加工度によらず、粒界炭化物量は一定である. そのた め、クリープ強度も一定であったと考えられる. Alloy740 については加工度 7.5%以上では、粒界の炭化物が大きく 減少していた. この粒界炭化物の低下がクリープ強度を低 下させたと考えられる<sup>(26)</sup>.

現在, Alloy617 および Alloy263 については, 加工度

30%まで施した際の強度について評価中である<sup>(27),(28)</sup>. Alloy263 については、冷間加工を施すとわずかに加工無 に比ベクリープ強度が増加した.これは、粒内析出物であ る γ<sup>,</sup>が加工で導入された転位によって微細析出したため である.今後は、長時間においても強度低下が生じないか 長時間クリープ試験によって検証を進めていく.

#### 5. 実機モックアップ試験

前項までは、溶接施工および曲げ加工技術を確立し、施 工後のクリープ破断強度について検証してきた.これまで 確立した施工法が実機を想定した部材製作において有効か 確認するため、実機モックアップを製作した.製作した モックアップは、ループ管、主蒸気管管寄せおよび再熱器 管管寄せである.モックアップ材料の仕様と溶接方法およ び曲げ加工条件を第4表、第5表に示す.また、モック アップ製作時の様子を第14図に示す.モックアップに使 用した材料は、候補材料の一つである HR6W である. モックアップ製作後の外観を第15図に示す.非破壊検査 の結果、曲げ施工および溶接部はすべて合格であった.配



(b) スタブ管の溶接



第 14 図 モックアップ製作時の様子 Fig. 14 Preparing for the mock up trial

Table 4         The mock up mate		erials and welding meth	SH and RH header		
材 質	大 径 管 (mm)	溶接金属	溶接方法	小 径 管 (mm)	
UDOW	\$ 559 × 129 (4)	WEL AUTO TIC (17	CTAW	$450.8 \times 11.5(4)$	

第4表 主蒸気管管寄せおよび再熱器管管寄せモックアップ材料の仕様と溶接方法

	. ,			
HR6W	φ 558 × 138 ( t )	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	φ 50.8 × 11.5 ( <i>t</i> )
HR6W	$\phi 635 \times 72(t)$	WEL-AUTO-TIG-617	GTAW	φ 63.5 × 11.5 ( <i>t</i> )
			(	注) SH: Superheat
				RH: Reheat

**第5表** ループ管,主蒸気管管寄せおよび再熱器管管寄せモックアップ材料の仕様と曲げ加工条件 **Table 5** The mock up materials and bending conditions used for SH and RH header and loop

材質	モックアップ	形 状 (mm)	曲げ方法	曲げ角度 ( 度 )	曲げ <i>R</i> (DR)
HR6W	ループ管	小径管	熱間曲げ	180	1.7, 2.4, 2.9
HR6W	主蒸気管管寄せ	小径管	冷間曲げ	30, 60, 80, 90, 100	2.5
HR6W	再熱器管管寄せ	小径管 <i>φ</i> 63.5×11.5( <i>t</i> )	冷間曲げ	30, 60, 80, 90, 100	2.4
				( )计	) CII · Cumanhaat

(注) SH: Superheat RH: Reheat







**第 15 図** モックアップ製作後の外観 **Fig. 15** Appearance of the mockups

管溶接部の断面マクロ写真を**第 16 図**に示す.主蒸気管サ イズである 138 mm まで溶接可能であることを確認でき た.

#### 6. 結 言

A-USC ボイラ実現に向けて,配管候補材料の Ni 基合 金について,大径管および小径管の曲げ加工および溶接技 術を確立した.

大径管候補合金については,GTAW および SMAW に よる溶接方法の確立,高周波曲げ加工技術の確立を行っ た.また,Alloy617 については,溶接性に及ぼす B の微 量成分の違いについても明らかにした.すべての合金につ いて,溶接部のクリープ破断強度を検証した.今後は 100 000 h を目指したクリープ破断試験を継続して実施し ていく.

小径管候補合金については,GTAW による溶接方法の 確立,冷間曲げおよび熱間曲げ手法の確立を行った.ま た,冷間加工後のクリーブ破断強度についても調査し,合 金ごとに冷間加工の影響を明らかにした.

以上の確立した施工技術について,実缶試験の製作を実施し,2015年4月29日に,三川発電所(福岡県)において実缶試験をスタートさせた.現在蒸気温度700℃で運転中であり,2016年度には,抜管後サンプル調査を実施する予定である.



第 16 図 モックアップ管寄せ周溶接部の断面マクロ写真Fig. 16 Cross-section of the macrostructure of HR6W circumferential welds

#### 参考文献

- (1) 馬木秀雄, 梶谷一郎, 国広孝徳, 戸塚丈博, 中代 雅士, 粂 亮一: Super9Cr 鋼大径板巻溶接鋼管の 700 MW 石炭専焼ボイラへの適用 石川島播磨技 報 第 31 巻 第 5 号 1991 年 9 月 pp. 339 -345
- (2) 牧野啓二:電力エネルギーにおける石炭火力の重
   要性 火力原子力発電 第65巻第10号 2014
   年10月 pp.713 721
- (3) K. Nicol : Status of advanced ultra-supercritical pulverised coal technology IEA CCC/229, ISBN978-92-9029-459-5 (2013.12)
- (4) 福田雅文ほか: A-USC 先進超々臨界圧火力発電
   技術 火力原子力発電 第 62 巻 第 10 号 2011
   年 10 月 pp. 731 741
- (5) M. Fukuda, E. Saito, H. Semba, J. Iwasaki, S. Izumi, S. Takano, T. Takahashi and T. Sumiyoshi : Advanced USC technology development in Japan Proceeding the 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013.10) pp. 24 40
- (6) J. Shingledecker, R. Purgert and P. Rawls : Current status of the U.S. DOE/OCDO A-USC materials technology research and development program. Proceeding the 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2013. 10) pp. 41 52
- (7) A. Mathur, O. P Bhutani, T. Jayakumar, D. K.
   Dubey and S. C. Chetal : India's national A-USC mission plan and progress Proceeding the 7th International Conference on Advances in Materials

Technology for Fossil Power Plants (2013. 10) pp. 53 - 59

- (8) R. Sun, Z. Cui and Y. Tao : Progress of china 700°C
  USC development program Proceeding the 7th
  International Conference on Advances in Materials
  Technology for Fossil Power Plants (2013. 10)
  pp. 1 8
- (9) V. Skorobogatykh. Martensitic and Austenitic steels for Application in A-USC Thermal Power Plants.2nd AUSC Workshop (2014. 10) presentation only
- (10)高野伸一,青木 裕,久布白圭司,冨山信勝,中 川博勝:700℃級先進超々臨界圧(A-USC)ボイラ技 術の開発 IHI 技報 第 49 巻 第 4 号 2010 年 2
   月 pp. 185 - 191
- (11) 仙波潤之,岡田浩一,浜口友彰,石川茂浩,吉澤満:先進超々臨界圧(A-USC)発電用ボイラ鋼管の 開発 新日鉄住金技報 第 397 号 2013 年 11 月
   pp. 71 - 77
- (12) H. Semba, H. Okada, M. Igarashi, H. Hirata and M. Yoshizawa : Development of Fe-Ni and Ni-base alloys without  $\gamma$ ' strengthening for Advandced USC boilers Proceeding of 9th Liege Conference on Materials for Advanced Power Engineering (2010.9) pp. 360 – 369
- (13) B. A. Baker and R. D. Gollihue : Optimization of INCONEL<sup>®</sup>740 for Advanced Ultra Supercritical Boilers Proceeding the sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2010.3) pp. 96 - 109
- (14) D. Tytko, P. Choi, J. Klöwer, A. Kostka, G. Inden and D. Raabe : Microstructural evolution of a Ni-based superalloy (617B) at 700°C studied by electron microscopy and atom probe tomography Acta Materialia 60 (2012.2) pp. 1731 - 1740
- (15) K. Kubushiro, K. Nomura, K. Tokuda and H. Nakagawa : Effect of Stress-Relief Treatments on Microstructure and Mechanical Properties in Weld Joints of 23Cr-45Ni-6W alloy (HR6W) Proceeding 3rd International ECCC Conference (2014.5)
- (16)発電設備技術検査協会:平成 22 年度火力関係設備効率化技術調査報告書 2011 年 2 月

- (17)野村恭兵,久布白圭司,中川博勝,村田純教:
  23Cr-45Ni-7W 合金溶接継手のクリープ破断強度
  日本金属学会誌 第79巻第7号 2015年7月
  pp. 348 355
- (18)野村恭兵,久布白圭司,中川博勝,村田純教:
   EBSD 法および XRD 法を用いた HR6W 溶接継手のひずみ評価
   日本鉄鋼協会第 170 回秋季講演大会概要集 2015 年 9 月
   p. 912
- (19) K. Kimura, M. Tabuchi, Y. Takahashi, K. Yoshida and K. Yagi : Long-term Creep Strength and Strength Reduction Factor for Welded joints of ASME Grades
  91, 92 and 122 Type Steels Proceeding of the IIW International Conference (2008.7) pp. 51 - 58
- (20) S. J. Brett, D. J. Oates and C. Johnston : In-Service Type IV Cracking in a Modified 9Cr (Grade91) Header Proceeding of ECCC Creep Conference (2005.9) pp. 563 - 572
- (21) A. Shibli : Performance of Modern High Strength Steels (P91, P92) in High Temperature Plant Proceedings of CREEP8 (2007.7) CREEP2007-26058
- (22) K. Yoshida : Regulatory Review Results on Allowable Tensile Stress Values of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels Proceedings of CREEP8
  (2007. 7) CREEP2007-26512
- (23) J. Parker and S. Brett : Creep performance of a grade 91 header International Journal of Pressure Vessels and Piping (2013. 11 12) pp. 82 88
- (24) K. Kubushiro, K. Nomura and H. Nakagawa : Effect of Cold Work on Creep Strength of Nickel-Base Alloys Proceedings of the "10th Conference on Materials for Advanced Power Engineering" (2014.9)
- (25)岡田浩一,仙波潤之,石川茂浩,吉澤満:
   23Cr-45Ni-7W 合金のクリープ特性に及ぼす冷間加工の影響
   日本鉄鋼協会第 163 回春季講演大会概
   要集 2012 年 3 月
   p. 405
- (26) K. Kubushiro, K. Nomura, S. Takahashi, M. Takahashi and H. Nakagawa : Effect of Pre-strain on Creep properties of Alloy740 Proceeding the sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants (2010.8)

pp. 164 - 170

- (27)環野直也,久布白圭司,野村恭兵,中川博勝:冷間加工を施した Alloy263 のクリープ変形挙動 日本鉄鋼協会第 169 回春季講演大会概要集 2015 年3月 p.259
- (28)環野直也,久布白圭司,野村恭兵:予ひずみを導入した Alloy263 のクリープに伴う組織変化 日本 鉄鋼協会第170 回秋季講演大会概要集 2015 年 9月 p.908

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~		~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
【企画委員会】						
委員長	館野 昭					
委員	石丸 康裕	馬場 正	大島千佳子	成清 勉	金津 和徳	神山 賢一
	佐久間 章	中島 喜之	佐分 茂	山口 諭	松岡 秀樹	小池上 一
	船渡川 治	池田 英人				
【編集事務局】						
	笠 俊司	内田 博幸	河合 理文	德重圭之助		
	小野塚正一	徳田 直明				
	正木みゆき	三島 宏行	小沼直由美	大石 祐可		

お知らせ

・本文中の商品名やソフトウェア名は一般に各社の商標または登録商標です。

IHI技報	発行責任者 笠 俊 司
<b>第 55 巻 第 4 号</b> (通巻 第 304 号)	発 行 所 株式会社   H   技術開発本部技術企画部 〒135-8710東京都江東区豊洲三丁目   番   号
平成 27 年 11 月 20 日 印刷 平成 27 年 12 月 1日 第11 年 4 回発行 定価 1 部 350円 (本体 324 円)	電 話 (03 )6204 - 7092 http://www.ihi.co.jp/ E-mail : TY9776@ihi.co.jp
[無断転載を禁じます.]	印 刷 所 富士ゼロックスシステムサービス株式会社 (発売元) 〒135-0061東京都江東区豊洲三丁目1番1号 電 話 (03)6204 - 8422 FAX (03)6204 - 8877

# 「IHI 技報」第 55 巻総目次

第 55 巻第 1 号 (通巻第 301 号, 平成 27 年 3 月) ~ 第 55 巻第 4 号 (通巻第 304 号, 平成 27 年 12 月)

●第1号( 通巻 301 号 ) 新技術・新製品・新事業特集号	
<巻頭言>	
新技術・新製品・新事業特集号の発刊にあたって伊東 章雄	(1)
くトップが語る>	
10 年後, 20 年後の社会に大きく貢献するビジネスの芽をつかみ, 新しい事業に展開する石戸 利典	(2)
<センター長が語る>	
世界最高峰のフィールドで航空エンジンの 30 年後を見据える金津 和徳	(4)
<てくのすこーぷ>	
てくのすこーぷで視た内視鏡消毒機の発明知的財産部	(8)
くこんなビジネスが面白い>	
宇宙の視点から農業生産を支援する 株式会社 IHI	(10)
藻類バイオ燃料で持続可能な社会への貢献を 株式会社 IHI	(12)
バルブを配管に付けたまま透視して迅速点検 株式会社 IHI	(14)
く我が社の看板娘>	
建設機械の騒音を逃がさず消し去る消音器 株式会社 アイ・エヌ・シー・エンジニアリング	(16)
" 廃熱 "から新たな電力を生み出す IHI プラント建設 株式会社	(18)
揺れに備え, 揺れを凌ぐ 明星電気 株式会社	(20)
<我が社のいち押し技術>	
小型軽量インバーターで電動化を加速!!株式会社 IHI	(24)
<箸休め>	
誰にあげる?	(28)
<技術論文および解説>	
舶用デュアルフューエル機関「28AHX-DF」の開発	<i>か</i> (30)
マイクロ波電力伝送技術の電動飛行機への適用小澤雄一郎 ほ	か (34)
PIV 技術の開発と実機への適用	か (39)
酸素燃焼発電プラントの商用化への取組み山田 敏彦 ほ	.か (50)

— 1

## ●第2号(通巻302号)ものづくり特集号

<	券頭	言>	
~	- 2- 2- A		

ものづくり特集号の発刊にあたって	釜	和明		(1)
<巻頭記事>				
IHI のものづくり系譜	編集事	幕務局		(2)
航空宇宙事業本部が目指すものづくり	須貝	俊二		(6)
<見えない資産>				
世界最古の金属加工技術「鋳造」の DNA を世界に引き継ぐ	安武	寛晴		(12)
部品の製作精度を上げ、機械加工を国内に取り戻せ!	畠山	利雄		(14)
職場改善で工期を短縮し、大型受注を目指せ!	瑞穂コ	匚場		(16)
<我が社の看板娘>				
大型セグメントの計測も一人で楽々!	株式会社 IHI 建材	才工業		(20)
<我が社のいち押し技術>				
電力エネルギーの基盤を担う至高の熱交換器	株式会社 IHI			(22)
未来型の溶接は金属を溶かさず火花も飛ばしません	株式会社 IHI			(26)
ICT で現場の実績を簡単記録「ものづくり力」を強くする!	株式会社 IHI			(30)
くこんなビジネスが面白い>				
最新技術と匠の技を融合する	株式会社 IHI			(34)
金属 3D プリンターによるものづくりの技術革新	株式会社 IHI			(36)
<箸休め>				
生きている単結晶······	吉澤	廣喜		(40)
<技術論文および解説>				
IHI グループのものづくり改革の推進		仁奈		(42)
東南アジアにおける「ものづくり支援」	二宫	和之	ほか	(46)
設計アイデアに及ぼすチームワークと機能本位思考の効果	牧野	公一	ほか	(52)
液化アルゴンタンク( 角型メンブレンタンク )の建設報告	降駒	導爵	ほか	(58)
LM6000 ガスタービンパッケージ組立工期短縮活動	鸠	雄一郎	ほか	(63)
道路インフラ老朽化の現状と今後の取組み — 首都高速八重洲線汐留高架橋の架替工事を踏まえて —	·······宮田	明		(68)
大径管全姿勢自動 TIG 溶接の開発と適用	横山	成就	ほか	(75)

#### ●第3号(通卷303号)特集 IHI 力

#### <巻頭言>

特集「 IHI 力 」 号の発刊にあたって		(1)
<社長が語る>		
研究開発から成長するビジネスへつなぐ過渡期に立つ宇宙開発事業木内 重基		(2)
キーワードは"成長!" 独自のセンシング&コミュニケーション技術で打って出る 世界へ, 宇宙へ…石井 潔		(4)
機械システムの製造販売のみならず、アフターサービスやプロセス技術できめ細かくサポート瓦谷 立身		(6)
<てくのすこーぷ>		
てくのすこーぷで視たターボチャージャーの発明		(8)
く我が社の看板娘>		
次世代過給機はモーターの力で加速株式会社 IHI		(10)
宇宙の謎 暗黒物質の起源に迫る株式会社 IHI エアロスペース		(12)
小惑星探査の第一撃を撮影せよ!明星電気 株式会社		(14)
全遠隔操作による難工事 ガラス溶融炉解体設備完工株式会社 IHI		(18)
無人建設機械が実現するより安全で確実な災害復旧工事		(22)
水密ゴムの改良で開閉装置のコストダウン株式会社 IHI インフラシステム		(24)
<我が社のいち押し技術>		
油の流れを整え 真空浸炭の品質アップ株式会社 IHI 機械システム		(26)
雪でも定刻 < かがやき 500 号 > 東京行き新潟トランシス 株式会社		(30)
くこんなビジネスが面白い>		
IT 資産マネジメントのパートナー株式会社 IHI エスキューブ		(34)
ジェットエンジン部品用工具の製作工程計画自動化で増産対応株式会社 IHI ジェットサービス		(36)
<箸休め>		
レールと車輪のお話(前編)小野塚正一		(38)
<技術論文および解説>		
ハンドガイドによる人・産業用ロボット協働システムの生産ラインへの適用性検討藤井 正和	ほか	(41)
橋梁技術の進歩と溶接技術	ほか	(48)
複合材サンドウィッチパネルへのシェアログラフィ法の適用	ほか	(54)
パルス電流波形による溶込み形状の制御	ほか	(58)
ロボット車両と技術	ほか	(66)
<箸休め>		
レールと車輪のお話 (後編)小野塚正一		(74)
— 3 —		

#### ●第4号 (通巻304号) 資源・エネルギー特集号

#### <巻頭言> (1)<見えない資産> 世代間ギャップを跳び越えて溶接技術・組立技術の神髄を伝える…………………………星尾 保和・岩崎 一秀 (2) 巨大 LNG タンクの建設を支えるさまざまな機材は、遊び心から生まれた …………………………西浦 玏 (6) (8) く我が社の看板娘> 重油を節約 エコボイラ……………………………………………………………………………… 株式会社 IHI (10)ガスタービンを最高効率で働かせる…………………………………………………………………………………株式会社 IHI (12)(14)マレーシアの電力安定供給と経済発展に貢献する…………………………… 株式会社 IHI (16) (20)石油化学プラントの心臓 直径 6 m, 細管 2 万本の反応器………………………… 株式会社 IHI (22) <我が社のいち押し技術> 未利用エネルギーの有効利用 — 二塔式ガス化炉の活用 —………………… 株式会社 IHI (24) Ni 基合金が拓く高効率な発電ボイラへの道……………………………………………………………………………株式会社 IHI (28) 低炭素社会に適合した石炭火力発電の実現へ……………………………………… 株式会社 IHI (32) くこんなビジネスが面白い> 発電プラントゼロエミッション化へ大きく前進…………………………………… 株式会社 IHI (36) コンパクトリアクターで化学プラントの常識をくつがえす……………… 株式会社 IHI (40) (42)く箸休め> (46)<技術論文および解説> 高効率褐炭焚きボイラの商業化に向けて………………………………………………………………………………………花岡 亮 ほか (48)再生可能エネルギー大量導入時の航空転用型ガスタービンと同期調相機による電力系統安定化の検討…西田 怜美 (54) 光樹 (58) リークを伴う管群の熱流動特性に関する研究…………………………………………………………………………水野 昌幸 ほか (64)(72)

— 4 —

700℃級先進超々臨界圧 (A-USC) プラント実現へ向けたボイラ技術開発…………………………久布白圭司 ほか

(81)

# IHI 技報 第 55 巻 4 号 アンケート用紙

「IHI技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。年4回発行しておりますが、より内容を充実させ、分かりやすい技報にしたいと考えております。つきましては、お手数ですがご意見・ご感想をいただきたく、下記の アンケートにご回答いただければ幸いです。ご記入後は、FAX にてご返送くださいますようお願いいたします。

Q1. 本号の特集でどれが良かったですか? 関心が持てましたか?
 □①見えない資産 □②我が社の看板娘 □③我が社のいち押し技術
 □④こんなビジネスが面白い □⑤技術論文および解説 □⑥箸休め

Q2. 上記「Q1」で①~⑤を選択した方にお聞きいたします。その中でどの記事が良かったですか? 面白かったですか?社名または製品名・技術名をご記入ください(複数回答可)

□①見えない資産	(	) (	) (	) (	)
□②我が社の看板娘	(	) (	) (	) (	)
□③我が社のいち押し技術	(	) (	) (	) (	)
□④こんなビジネスが面白い	(	) (	) (	) (	)
□⑤技術論文および解説	(	) (	) (	) (	)

Q3. 「 I H I 技報 」を読む頻度はどの程度ですか? □①毎号欠かさず読む □②ときどき読む □③ほとんど読まない

Q4. 上記「Q3」で「③ほとんど読まない」を選択した方にお聞きします。
その理由は何ですか?(複数回答可)
①①興味のある記事がないから □②自身の業務に必要な記事がないから □③内容が難しすぎるから
□④内容がやさしすぎるから □⑤専門用語が多く内容が分かりにくいから
□⑥一冊のボリュームが多く読む時間がないから
□⑦読みにくい誌面構成だから(文字が小さい、写真が見にくいなど) □⑧入手方法が分からないから
□⑨その他()

Q5. 上記「Q3」で「①毎号欠かさず読む」「②ときどき読む」を選択した方にお聞きします。
読む理由は何ですか?(複数回答可)
□①あなたのかかわるビジネス・研究に直接関係する情報が載っているから
□②あなたのかかわるビジネス・研究には直接関係ないが、興味のある情報が載っているから
□③ | H | グループの製品・技術について知りたいから
□④御社・または貴殿のお取引先などに紹介情報が載っているから
□⑤上司などから読むように指示されているから
□⑥その他(

Q6. どのような「IHI技報」ならもっと読みますか?
 □①もっと論文として権威ある内容であれば
 □②技術情報が分かりやすく書いてあれば
 □③特集テーマが面白そうなら
 □④製品紹介が沢山あれば
 □⑤IHI関係者の語り(歴史、開発苦労話、プロマネの思い、topの思い)が書いてあれば
 □⑥その他(

□ H I 技報 」の送付先の登録・変更・取消について
 □ 登録 □ 変更 □ 取消(該当項目に レ をつけてください)
 該当事項をご記入のうえ、ご連絡くださいますようよろしくお願いいたします。
 住 所: 〒

会社∕≐	学校名:	所属名:	役職名:	
<u>氏</u>	名:		TEL:	

<u>封筒表面の宛名下に印刷されている場合 コード No.:</u>

お手数ですが、アンケートにご記入 の上、FAX にてお送りください。 ご協力ありがとうございます。 株式会社 IHI 技術開発本部 技術企画部行

FAX: 03 - 6204 - 8650

)

)

# 株式会社【】】

支社			
小海海子社	〒080_002 北海道北崎市中内水二名五4 1(北海湾ビル)		
北伊涅义社		電話(UTT)221-8121 FAX(UTT)221-5229	a/74070074107
宋北又社		電話(022)262-3688 FAX(022)227-6252	
秋田オフィス	〒010-0001 秋田県秋田市中通2-3-8(秋田アトリオンヒル)	電話(018)835-8815 FAX(018)835-8816	
福島オフィス	〒963-8005 福島県郡山市清水台2-13-23(郡山第1ビル)	電話(024)938-0131 FAX(024)938-0145	
新潟オフィス	〒950-0087 新潟県新潟市中央区東大通1-3-10(三井生命新潟ビル)	電話(025)245-0261 FAX(025)243-5474	
北陸支社	〒930-0004 富山県富山市桜橋通2-25(富山第一生命ビル)	電話(076)441-4808 FAX(076)441-3196	
中部支社	〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-24-20(名古屋三井ビルディング新館)	電話(052)565-7700 FAX(052)565-7709	
静岡オフィス	〒420-0853 静岡県静岡市葵区追手町2-12(静岡安藤ハザマビル)	電話(054)255-8961 FAX(054)255-7137	
浜松オフィス	〒430-7712 静岡県浜松市中区板屋町111-2(浜松アクトタワー)	電話(053)457-5611 FAX(053)457-5613	
豊田オフィス	〒471-0833 愛知県豊田市山之手4-46(三井住友海上豊田ビル)	電話(0565)29-2331 FAX(0565)29-7279	THE FEEL Autor
関西支社	〒541-0053 大阪府大阪市中央区本町4-2-12(東芝大阪ビル)	電話(06)6281-2075 FAX(06)6281-2011	
中国支社	〒730-0051 広島県広島市中区大手町2-7-10(広島三井ビル)	電話(082)246-2280 FAX(082)246-2100	
山口オフィス	〒745-0036 山口県周南市本町1-3(大同生命徳山ビル)	電話(0834)31-8100 FAX(0834)32-2456	
四国支社	〒760-0023 香川県高松市寿町2-4-20(高松センタービル)	電話(087)821-5031 FAX(087)822-7893	
九州支社	〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通2-1-82(電気ビル北館)	電話(092)771-7241 FAX(092)751-6416	ennennen Ga
沖縄オフィス	〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地2-14-3(朝日生命沖縄ビル)	電話(098)862-7758 FAX(098)863~7122	
工場			
相馬第一工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-1	電話(0244)37-3712 FAX (0244)37-3731	
相馬第二工場	〒976-0001 福島県相馬市大野台1-2-3	電話(0244)37-3712 FAX (0244)37-3731	
瑞穂工場	〒190-1297 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229	電話(042)568-7000 FAX (042)568-7012	/********
横浜工場	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2717 FAX (045)759-2603	PRODUCTION AND
愛知工場	〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1	電話(0562)31-8000 FAX (0562)31-8010	
相生工場	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206 FAX (0791)24-2268	
相生鋳造部	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2701 FAX (0791)24-2692	
<b>呉第二工場</b>	〒737-0027 広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105 FAX (0823)26-2170	

#### 研究所(技術開発本部)

 基盤技術研究所	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2227
 生産技術センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2225
総合開発センター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2226
 インキュベーションセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2224
 R&Dテクノセンター	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2311

#### 事務所

Concernation of the Concernation of the Concernation			
	本社	〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1(豊洲HIビル)	電話(03)6204-7800
	横浜エンジニアリングセンター(1、2号館)	〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1	電話(045)759-2002
	昭島事務所	〒196-8686 東京都昭島市拝島町3975-18(1日昭島ビル)	電話(042)500-7250
	相生総合事務所	〒678-0041 兵庫県相生市相生5292	電話(0791)24-2206
	呉総合事務所	〒737-0027広島県呉市昭和町2-1	電話(0823)26-2105

#### 海外事務所・海外支社

.

Paris, Alger, Moscow, Bahrain, New Delhi, Bangkok, Kuala Lumpur, Hanoi, Jakarta, Beijing, Shanghai, Taipei, Seoul, Singapore



# Heat Recovery HRシリーズ 小型バイナリー発電装置

最新のCFD技術により設計されたタービンインペラを搭載した、 高効率タービン発電機を新開発。小型化・高効率化を実現しました。

未利用熱から 発電 最大発電出力 20kW(送電端) 系統連系装置を 標準装備(低圧)





# 熱源のある様々な場所

温水や蒸気がある、工場・焼却施設・ 温泉など、様々な場所に設置可能です。 すでに多くのお客様にご使用いただき ご好評をいただいております。

# 株式会社||||

回転機械セクター 営業部 バイナリー発電システムグループ 〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 (KDX豊洲グランスクエア2F) TEL:03-6219-5072

E-mail: IHI\_ORC@ihi.co.jp URL: www.ihi.co.jp/compressor/binary/

