巻 頭 言

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

再エネを支える低温排熱利用技術について

Low Temperature Waste Heat Utilization Technology Supporting The Renewable Energy

刑部 真弘*1
OSAKABE Masahiro

現在，温暖化対策のため化石燃料は大きく使用制限され，一方の核燃料はリスク評価および容認が簡単ではなく，それらの代わりに再エネが増加している。かつて大規模集中電源は，数千億のお金が動くので目立ったが，多様な小型分散電源である再エネは少しずつ目立たないように増えている。2020年の再エネ比率は，前年から1.7ポイント上昇し19.8％にもなっていた。このペースだと2030年には40％に迫る勢いだが，再エネを受け入れる需要側の準備や協力が十分でないことも散見される。

2020年末，我が国の太陽光発電容量は，既に大型原発70基分に相当する70GWを超えたと考えられる。2030年には100GW，2050年には200GWまで増加する予想もある。また，風力発電容量は，2013年時点で約2.7GWだったが，2020年末には4.4GWに達し，今後も洋上風力を中心に急激な増加が想定されている。発電容量ポテンシャルとしては1690GWに達し，そのうち洋上風力は1410GWを占める。なお，2018年５月20日昼頃には，原発が止まっていた四国電力管内の需要電力がすべて再エネで賄われた。再エネは二酸化炭素をほぼ出さない素晴らしいものであるが，多くは発電出力が一定していないので，早急な対応が必要となってきた。

不安定な再エネを上手に使うには，最近の電気自動車に搭載されている高性能蓄電池とともに，家庭の給湯器や工場のボイラ等で熱として蓄える蓄熱制御が重要である。さらに，この蓄熱を用いて発電するバイナリータービンの展開が期待される。また，水素等の燃料としてエネルギー貯蔵することも重要である。再エネが豊富なときに蓄え，足りない時に発電する。地域内に熱や水素等の貯蔵エネルギーがあれば，震災等における電源喪失時の電力供給も可能になる。

現状で大規模蓄熱技術が活用されているのは太陽熱発電所である。ラスベガス近郊にある太陽熱発電所は，１基当たり130MWもの発電が可能である。約12万枚の鏡でタワー中央部ボイラに反射光を集め550℃の過熱蒸気を得る。一般的に蓄熱設備はなくても，伝熱の時定数が大きいため太陽光発電よりも発電出力変動は少ない。さらに蓄熱設備を持つことにより，太陽が出ている昼間の熱エネルギーの一部を蓄え，夜間の発電もできるようになる。日没後に10時間程度の発電も可能との試算もある。

太陽熱以外でも，再エネで発電した電力を熱として蓄える蓄熱技術が注目されている。従来技術を用いるので，蓄電池に比べて安価であるという特徴がある。米グーグルが開発するのは，高熱の塩と不凍液を利用したタービン発電システムである。太陽光や風力などの再エネの電力でヒートポンプを動かし，高温と低温空気を作る。この高温空気で溶融塩を加熱し液体にし，低温空気で不凍液を冷やす。電力を取り出す必要が生じると，ヒートポンプを逆に作動させ，両者の温度差を利用してタービンを駆動して発電する。このようなシステムは，従来技術を用いており40年もの長期間使えるとされる。また，現状での蓄熱コストは電池の数十分の１程度であり，電力への最終的な変換効率の低さを踏まえても圧倒的に安いと考えられている。

日本でも，風力を利用して熱をため，後で電気に変換する「風力熱発電」の実証試験が行われたことがある。風車内部に大型の磁石を用いた発熱器を搭載し，発生した熱で溶融塩を循環させ，熱を地下タンクに蓄える。電力が必要な際に熱で蒸気をつくり，タービンを回してエネルギーを取り出す。

さらに，日本各地の温泉で廃棄している低温排熱を発電に利用できることも期待されている。例えば100℃の源泉水がある場合，我々の入浴温度である40℃にするために大量の熱を捨てている。日本一湧出量が多い大分の別府温泉の湯量は１日当たり14万キロリットルもあるので，入浴温度にするのに捨てている熱量は，１時間当たり400MWhにもなる。これに効率10%のタービン発電機を用いると発電量は40MWになる。また，我が国の産業等で捨てられる150℃未満の低温排熱は，年間70 PJ（ペタジュール）にもなり，１時間当たりだと2.2GWhにもなる。この排熱を効率10％のタービンで発電すれば，220MW の電力が得られる。

ウクライナ紛争でロシア産石油や天然ガスが制限され，早急な脱炭素化が期待されている。再エネを補完する低温排熱・蓄熱利用技術が益々重要になると考えられる。

原稿受付　2022年５月16日
＊1　日本ボイラ協会会長
〒105-0004　港区新橋五丁目３番１号
東京海洋大学名誉教授
E-mail: osakabe@kaiyodai.ac.jp

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

下水汚泥焼却設備の未利用廃熱活用技術

Technology for Utilization of Unused Waste Heat in Sewage Sludge Incinerator

松井 威喜[*1]　**井上 堅斗**[*2]　**富永 純一**[*3]
MATSUI Takeyoshi　INOUE Kento　TOMINAGA Junichi

キーワード：下水汚泥焼却炉，蒸気タービン，温室効果ガス削減，N_2O
Key Words：Sewage Sludge Incinerator, Steam Turbine, Greenhouse Gas Reduction, N_2O

１．はじめに

下水道分野では，2005年９月に策定された「下水道ビジョン2100」において，従来の下水道の目的であった下水の「排除・処理」に加えて「活用・再生」が提言され，①処理場のエネルギー100％自立，②新エネルギー等活用のトップランナー，③地域へのエネルギーの積極的供給を目指すことが示された。さらに2014年７月にとりまとめられた「新下水道ビジョン」ではその考え方を進化させて，水・資源・エネルギーの集約・自立・供給拠点化を目指して各種対策が進められてきた。

一方，地球規模の課題である気候変動問題の解決に向けて2015年にパリ協定が採択され，我が国でも2020年10月に2050年カーボンニュートラルの実現を宣言した。さらに，2021年４月には，我が国においても温室効果ガスの排出削減に関する2030年度の中期目標として，従来の2013年度比26％削減の目標を７割以上引き上げる46％削減を目指し，さらに，50％削減の高みに向けて挑戦を続けることとしている。そして，2021年４月に改訂された地球温暖化対策計画では，下水道分野において，2030年度の温室効果ガス排出量を2013年度比で208万t-CO2削減する目標が掲げられている。

このような状況をうけて地球温暖化対策計画の2030年度目標達成，2050年カーボンニュートラルの実現に向け，2021年10月に「脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会」が設置された。そして，脱炭素・循環型への転換を先導する「グリーンイノベーション下水道」目指し，水・資源・エネルギーが集約される下水道が有するポテンシャルの最大活用に向けて，さらなる下水汚泥の燃料化，消化ガス利用，焼却廃熱利用といったエネルギー利用に取り組むべきことが示されている。

２．下水道における資源・エネルギー利用

全国の下水処理水量は年間155億m^3，処理過程で発生する下水汚泥の発生量は年間約230万トンに達している。この下水汚泥が有する有機物の全エネルギーを熱量として換算すると約120億kWhとなり，地域資源の再エネとして脱炭素社会に貢献しうる高いポテンシャルを有している。一方，下水道分野での温室効果ガス排出量は2018年度における約600万t-CO_2に達し，日本全体の排出量約12.4億t-CO_2の0.7％に相当する量となっている。

そこで地球温暖化対策計画の2030目標達成に向けて導入すべき技術として，創エネ・再エネ分野ついては，下水汚泥のエネルギー化に関わる効果的・効率的な技術として，消化ガスを利用したバイオガス発電，下水汚泥の固形燃料化，下水汚泥焼却設備における廃熱発電が挙げられている。

Fig. 1に示すように，下水汚泥に含まれる有機物のエネルギー化率は，近年バイオガス発電施設，固形燃料化施設等の整備により増加して2019年度で24％となっているが，焼却廃熱の利用は３％に過ぎず，さらなる有効利用が求められている。

３．下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）による発電型汚泥焼却技術「OdySSEA（オデッセア）」の実用化

3.1　B-DASHプロジェクトの概要

下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト：Breakthrough by Dynamic Approach in Sewage High Technology Project）は，2011年度より下水道事業における低炭素・循環型社会の構築やライフサイクルコスト

原稿受付　2022年５月20日
＊１　JFEエンジニアリング㈱ 環境本部 アクア事業部
E-mail: matsui-takeyoshi@jfe-eng.co.jp
＊２　JFEエンジニアリング㈱ 社会インフラ本部 原動機事業部
E-mail: inoue-kento@jfe-eng.co.jp
＊３　JFEエンジニアリング㈱ 社会インフラ本部 原動機事業部
E-mail: tominaga-junichi@jfe-eng.co.jp

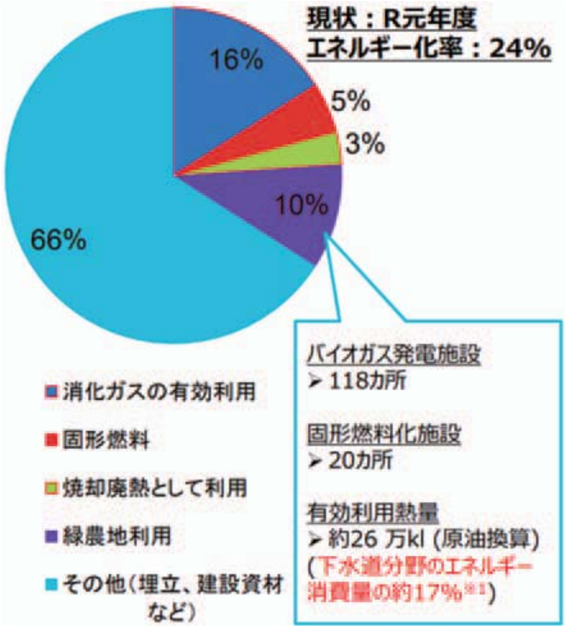


Fig. 1　Utilization of sewage sludge [1]

縮減，浸水対策，老朽化対策等を実現し，併せて，本邦企業による水ビジネスの海外展開を支援することを目的として，国土交通省により実施されている。

B-DASHプロジェクトでは，実証研究成果と専門的知識を有する有識者及び実務に精通した地方公共団体の担当者の意見を踏まえ，技術の普及促進を図るための技術導入ガイドラインを策定している。技術導入ガイドラインは，地方公共団体等の下水道事業者が技術の導入を検討する際に参考にできるよう，技術性能及び技術導入の手順等を詳細に明示している。

3.2　温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術の実用化に関する実証事業について

下水道事業においては，エネルギー消費の削減，施設の運転に伴う処理プロセスからのN_2O排出の削減，及び下水道資源の有効活用による温室効果ガス排出量の削減が求められている。特に下水汚泥焼却設備は消費エネルギーが大きく，排ガス中には温室効果ガスであるN_2Oおよび大気汚染物質であるNOxが多く含まれるため，温室効果ガス削減とともに，大気保全の観点からNOxの削減も求められている。

これらの背景より，下水汚泥焼却設備における未利用廃熱の有効活用と温室効果ガス（N_2O，CO_2），大気汚染物質（NOx）の同時削減は大きな課題である。その解決のために，当社は，日本下水道事業団，川崎市とともに，B-DASHプロジェクトとして，2017，2018年度に「温室効果ガス削減を考慮した発電型汚泥焼却技術」について，焼却廃熱の回収による①高効率発電技術，および温室効果ガスとNOxを同時削減する②局所撹拌空気吹込み（二段燃焼）技術についての性能確認と技術確立を行った。

3.3　実証フィールド

今回設備を設置した入江崎総合スラッジセンターは，川崎市の4つの水処理センターで発生する下水汚泥全てを集約処理している汚泥処理施設である。

実証設備を設置して試験を行う同センターの3系焼却設備の仕様をTable 1に示す。

Table 1　Demonstration field

Demonstration Field	Iriezaki Sludge Center, Kawasaki City
Furnace type	Fluidized bed incinerator
Processing capacity	40DS-t/day
Moisture content of sludge	74.75%（72.5 ～ 77%）
Ignition loss of sludge（volatile total solids）	83.5%（77 ～ 90%）
Low calorific value of sludge（volatile total solids）	23.9MJ/kg-vts
Combustion temperature	850℃

3.4　実証設備概要

Fig. 2に実証設備の概略フローを示す。

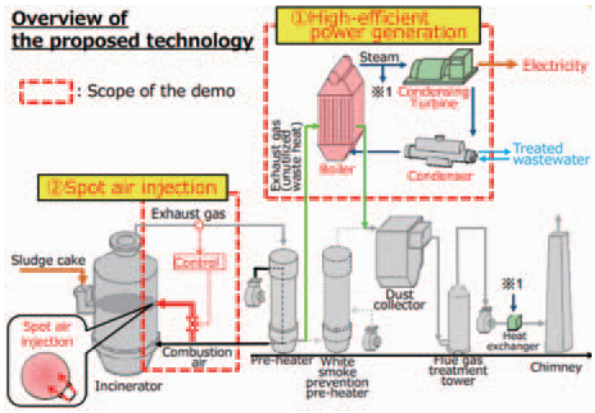


Fig. 2　The flow of power generation type sewage sludge incineration technology [2]

既設の下水汚泥焼却設備に廃熱ボイラ（Fig. 3）と蒸気タービン発電機（Fig. 4）を設置して発電を行うために，既設の従来型焼却設備の排ガスを廃熱ボイラに引き込み，廃熱を回収した後に既設の排ガス処理設備に戻すフローとなっている。蒸気タービン発電機には復水式蒸気タービンを採用し，さらに，下水処理水の冷熱を活用した水冷式復水器を採用することで，高い発電効率を有する設備となっている。また，焼却炉本体には，燃焼空気の一部を分岐してフリーボード部に吹き込むことができる，局所撹拌空気吹込み（二段燃焼）設備を設置してN_2O，NOx排出抑制を図っている。

廃熱ボイラと蒸気タービン発電機を組み合わせた発電の実施例は東京都東部スラッジプラント（300wet-t/日×3基，2,500kW）のように非常に大規模の施設であり，脱水汚泥約52DS-t/日（約200wet-t/日）以下の焼却炉で

Fig. 3 Boiler in demonstration field

Fig. 4 Turbine in demonstration field

は，得られる余剰熱量が少ないため，蒸気タービン発電設備の導入が困難という課題があった。

そこで，今回は豊富な下水処理水を冷却水として活用する小型で高効率の蒸気タービンを新たに設計した。これにより，150～1,000kWの小規模での高効率発電を可能とし，脱水汚泥約12.6～52DS-t/日（約60～200wet-t/日）の焼却炉規模での導入を目標としている。また，本発電設備はダクトを切り回すことで後付けの設置も可能である。

3.5　高効率発電技術：小型復水式蒸気タービン

蒸気タービン発電設備では，その効率を大きく左右する要素として，タービンの熱落差と内部効率がある。タービンの熱落差は入口の蒸気条件を高く，出口を低く設定すれば大きくなり，発電出力を増加させることができる。ここでは蒸気タービンの高効率化の施策として，熱落差を大きくする水冷式復水器とその適用によって必要となるエロージョン対策，さらに，タービン内部効率を向上させる高効率ノズルの適用について紹介する。

3.5.1　水冷式復水器

廃棄物処理施設のごみ焼却発電等では冷却水の確保が課題となって空冷式復水器が一般的に採用されるが，本プロジェクトでは下水処理場の豊富に存在する処理水を冷熱として活用することで水冷式復水器の適用が可能である。空冷式と水冷式の発電効率の比較をFig. 5に示す。空冷式より蒸気の出口圧力を低下させることで入口と出口のエネルギー差が拡大し，発電効率を1.2倍に増加させることを可能とした。

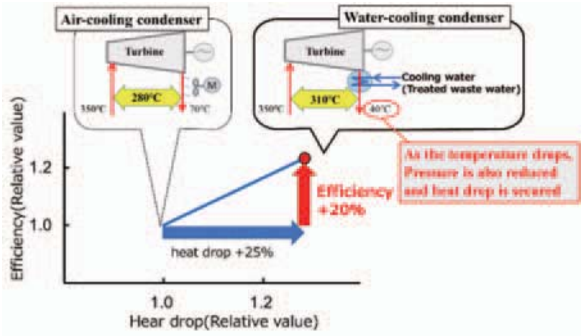


Fig. 5 Effect of air- and water-cooling condenser on efficiency

3.5.2　エロージョン対策

復水タービンの低圧最終段付近では水滴を多数含んだ湿り蒸気中で作動し，特に高速回転する動翼では水滴の衝突によるエロージョンが発生する。その対策として，当社では最終段動翼前縁部にステライト溶接やレーザー焼入れ等を適用している。本設備では水冷式復水器の適用により最終段の圧力が低下し，湿り度が増加してエロージョンが生じやすくなるため，最終段ノズルから離脱した粗大水滴が動翼に衝突するエネルギーを評価し，レーザー焼入れを適用した。Fig. 6に本設備の最終段を示す。

Fig. 6 Last stage including laser-quenched rotating blades

3.5.3　高効率ノズル

蒸気タービンの翼列流路は円弧状に曲げられており，蒸気が通過する際に様々な渦などの主流に対して垂直な流れ成分を有する二次流れが生じ，この二次流れによる損失（二次損失）は蒸気タービンの効率低下の大きな一因となっている。二次損失の低減策の一つとしてノズルを湾曲させることにより，Fig. 7に示すように翼上下端部に向かう流れを作り出して二次流れを抑制し，高効率

領域の流量を増加させることで効率が向上することが確認されている[3]。本設備には，最適な湾曲量を流体解析（Fig. 8）により検討した高効率ノズルを適用した。

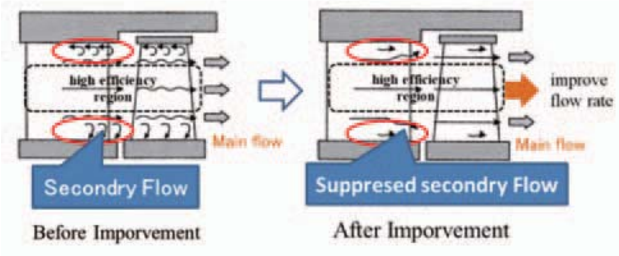


Fig. 7　Effect of bowed nozzle

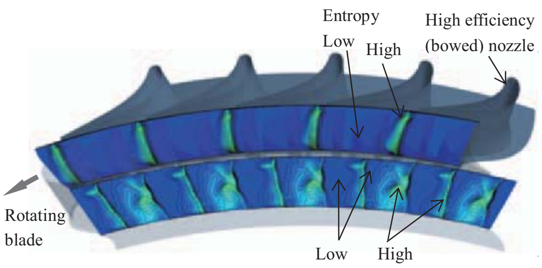


Fig. 8　Loss distribution at high efficiency nozzle and rotating blade downstream from unsteady CFD result

3.6　局所撹拌空気吹込み

今回実証試験を行った焼却炉は気泡式流動焼却炉で，従来は炉底部からのみ燃焼空気を供給している。本開発では，N_2O排出量削減技術として，燃焼空気の一部を分岐して炉上部（フリーボード部）に効率的に吹き込む，局所撹拌空気吹込み（二段燃焼）設備を設置した。局所撹拌空気吹込み技術の適用により，フリーボード部の温度を上昇させ，N_2O排出量を削減するとともに，二段燃焼によるNOx排出量の同時削減を実現した。局所撹拌空気吹込み設備の概略をFig. 9に示す。一般的に，フリーボード部に燃焼空気を吹込む場合は，吹込み口を円周方向に設置するが，本技術はFig. 9に示した通り，炉の一方向からの吹込みで効果を発揮する点が大きな特徴である。

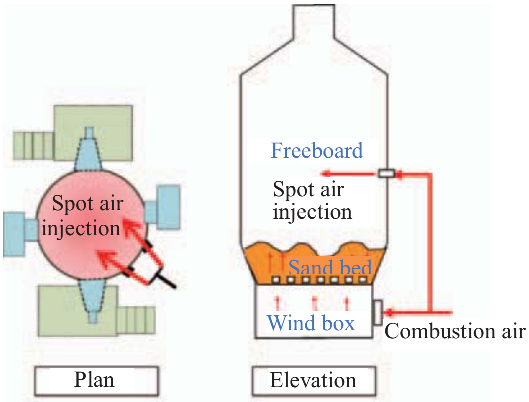


Fig. 9　Spot air injection technology

本設備は，炉付近の限られたスペース（2.5×2.0m程度）に設置可能であり，低コストであるとともに，既設焼却炉付帯機器との干渉が少なく追加設置が容易である。

3.7　実証試験の成果

3.7.1　小型復水式蒸気タービンの実証運転結果

蒸気流量を変化させた場合の発電出力の変化から，タービンの運転可能範囲を確認した結果をFig. 10に示す。

小型復水式タービンの性能に対し，実証運転結果が設計値とよく一致しており，設計通りの能力を発揮していることが確認できる。

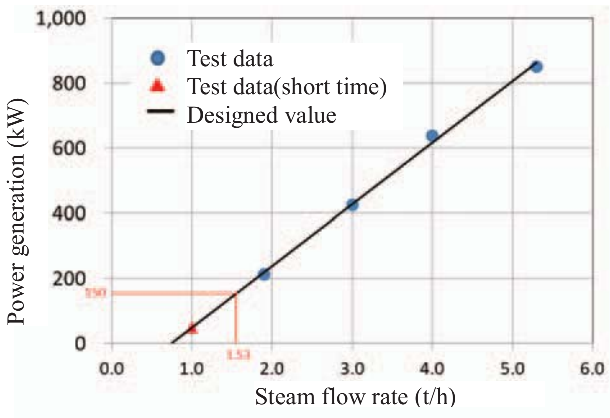


Fig. 10　Steam turbine performance

また，適用範囲の下限と考えられる60wet-t/日（12.6DS-t/日）程度，蒸気流量（1.53t/h）においても，発電量150kWの規模の発電運転が可能であることを確認した。

3.7.2　季節変動に対する安定性評価

各季節の定格焼却量（150wet-t/日）における高効率発電技術の実証運転結果をTable 2に示す。春季，夏季，秋季については低含水汚泥での運転結果も併記した。各季節における含水率（73～76%）等の汚泥性状の変化に伴い，焼却炉への投入熱量が変化し，投入熱量に応じた発電量が得られ，安定した発電運転が可能であることを確認した。特に，低含水試験を実施した全季節において，焼却設備本体以降の消費電力と発電設備消費電力の合計値を発電出力が上回る電力自立を確認した。このような電力自立型の焼却技術は，脱水汚泥焼却量150wet-t/日規模では業界初の技術である。

Table 2 Results of high-efficiency power generation technology

	Spring		Summer		Autumn		Winter
	Rated	Low water content	Rated	Low water content	Rated	Low water content	Low water content
Throughput (wet-t/D)	150	138	150	136	151	140	154
Water content (%)	74.7	71.6	72.9	72.2	75.6	73.1	75.0
Supply heat quantity (GJ/h)	14.9	17.8	16.6	18.8	14.8	15.8	15.4
Power generation (kW)	420	**690**	**605**	**730**	448	**683**	385
Power consumption (kW)	529	559	552	563	567	569	560

(**Bold underlined part** is power independence)

3.7.3 N_2OおよびNOx排出量同時削減

Table 3に焼却炉定格運転における局所撹拌空気吹込み技術の運転条件および結果の一例を示す。ここでN_2O・NOx排出濃度は，局所撹拌空気吹込み実施・停止ともに，約9時間運転した際の煙突出口における測定結果である。

N_2OおよびNOx排出量削減効果の評価方法は以下の通りである。

① N_2O排出量削減効果

・実証運転において測定したN_2O排出濃度および脱水汚泥当たりの排出係数で評価を行った。

・比較対象としては，同一実証期間で局所撹拌空気吹込み技術停止中の平均値を用いた。

② NOx排出量削減効果

・実証運転における排出濃度を用いて評価を行った。

・比較対象としては，局所撹拌空気吹込み技術適用以前の3系焼却炉のNOx平均排出濃度を用いた。

局所撹拌空気吹込みを実施することにより，実証設備においてN_2O排出係数およびNOx排出濃度を同時に50%以上低減させることが可能であった。なお，N_2O排出係数については，「下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等の指針～」（環境省・国土交通省）に示された次世代炉（二段燃焼式循環流動床炉等）のN_2O排出量削減技術と同程度（0.263 kg-N_2O/wet-t）[1]以下に低減できることを確認した。

Table 3 Efficiency of spot air injection

Throughput		wet-t/D	154.0
combustion air	primary air※	Nm^3/h	8,198
	secondary air	Nm^3/h	1,492

N_2O emission factor NOx and N_2O concentration			Spot air injection		Reduction rate (%)
			inactive	active	
N_2O	Conc.	ppm-12%O_2	88	41	53
	Emission factor	kg-N_2O/wet-t	0.494	0.232	
NOx	Conc.	ppm-12%O_2	52	13	75

※air supplied from the wind box to the sand bed

4．OdySSEA（オデッセア）の導入効果

今回開発した「OdySSEA（オデッセア）」を導入した場合のエネルギー使用量削減効果，温室効果ガス排出量削減効果について検討を行った。試算条件をTable 4に示す。

Table 4 Estimated conditions

Moisture content of sludge	%	74.0
Ignition loss of sludge	%-DS	86.4
High calorific value of sludge	kJ/DS-kg	19,890
Capacity	wet-t/day	150
Furnace type		Fluidized bed incinerator

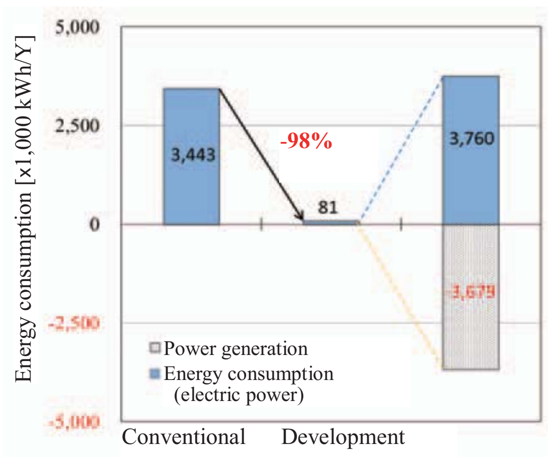


Fig. 11 Comparison of energy

試算にあたっては，実証運転結果より実証設備のエネルギー消費量（電力，補助燃料等），発電によるエネルギー創出量を算出した。この試算条件と同条件における従来の気泡式流動焼却炉のエネルギー消費量を試算したものを従来技術として比較を行った。

エネルギー消費量削減に関する比較結果をFig. 11 に示す。試算の結果，本技術の導入により，消費エネルギー量を98%削減可能であることが確認できた。

エネルギー消費量と同様に，実証設備における消費電

力由来の温室効果ガス排出量，N_2O由来の温室効果ガス排出量，発電由来の温室効果ガス削減量を試算した。この結果を同規模の気泡式流動焼却炉の温室効果ガス排出量を従来技術として比較した。温室効果ガス排出量削減に関する比較結果をFig. 12に示す。

なお，従来型の気泡式流動焼却炉のN_2O排出係数は「下水道における地球温暖化対策マニュアル～下水道部門における温室効果ガス排出抑制等の指針～」（環境省・国土交通省）より0.645 kg-N_2O/wet-t[1] とした。

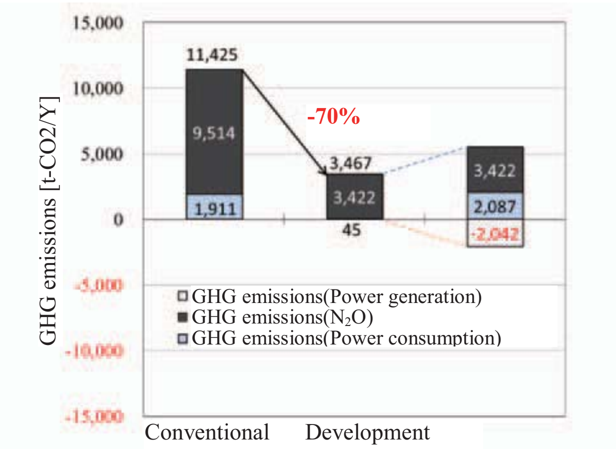


Fig. 12 Comparison of greenhouse gas emission

5．OdySSEA（オデッセア）の普及展開

5.1　国内既設焼却炉における適用可能焼却炉

今回開発した「OdySSEA（オデッセア）」の国内既設焼却炉への適用可否について検討した。国内既設焼却炉の内，高効率発電技術はFig. 13に示すように60wet-t/日以上の焼却炉151基（67％）に，局所撹拌空気吹込み技術はFig. 14に示すように流動床焼却炉213基（91％）に適用可能である。

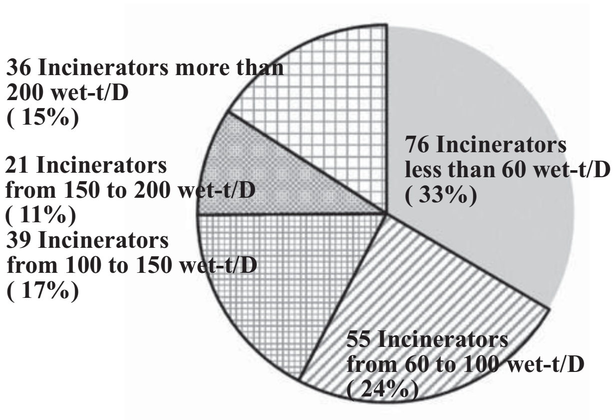


Fig. 13 Incinerator to which high-efficiency power generation technology can be applied

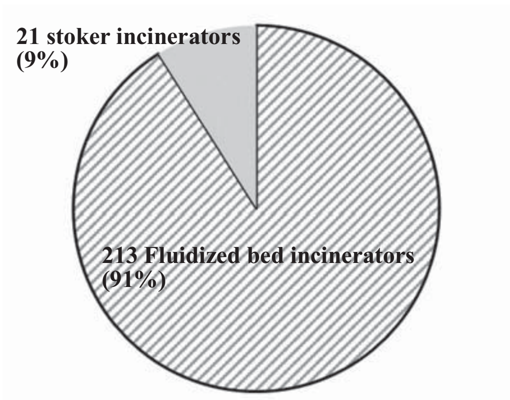


Fig. 14 Incinerator to which spot air injection technology can be applied

5.2　導入実績

2021年10月，JFEエンジニアリングでは今回開発した「OdySSEA（オデッセア）」を採用した，国内初の創エネ型下水汚泥流動焼却システムを川崎市上下水道局より受注した。脱水ケーキ約150wet-t/日の規模でも，運転に必要な電力550kWを大きく上回る約650kWの発電が可能で，ランニングコストを約30％低減できる設備となっている。さらに「局所撹拌空気吹込み技術」も採用することによって，温室効果ガスとしてCO_2の約300倍の影響を及ぼすとされるN_2Oの排出を抑制することが可能となり，入江崎総合スラッジセンターでは年間約7,200トン・従来比約75％のCO_2削減が期待できる。

6．おわりに

発電型汚泥焼却技術「OdySSEA（オデッセア）」の要素である廃熱回収型の①高効率発電技術，および②局所撹拌空気吹込み（二段燃焼）技術について，概要及び実証試験結果を紹介した。

今後，温室効果ガス削減の必要性は高くなることが予想され，下水汚泥焼却炉への発電技術適用は重点施策（「下水道事業におけるエネルギー効率に優れた技術の導入について」国水下事第38号通知）となっている。適用範囲が広く，かつ環境課題，施策に合致した本技術は導入の可能性が高く，これらの特徴を生かして普及を図っていきたい。

参考文献

(1)　国土交通省 第1回脱炭素社会への貢献のあり方検討小委員会資料 <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001466673.pdf>（参照日 2022年4月26日）.

(2)　国土交通省国土技術政策総合研究所 B-DASH Project資料 <http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/english/doc/outline_2017_JFE.pdf>（参照日 2022年4月26日）.

(3)　草野翔，奥村淳矢，大山宏治，川田裕，タービン翼三次元設計翼列の流動と損失低減手法に関する研究，ターボ機械，Vol. 45，No. 6，(2017)，pp. 22-29.

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

ORC（オーガニックランキンサイクル）発電と低温廃熱回収技術

ORC (Organic Rankine Cycle) Power Generation and Low Temperature Waste Heat Recovery


信太 典治[*1] 井上 慎也[*2]
SHIDA Noriharu INOUE Shinya

キーワード：ORC, オーガニックランキンサイクル, 低温廃熱回収, 大型ヒートポンプ, 地熱発電, CHP
Key Words：ORC, Organic Rankine Cycle, Lower Temperature Waste Heat Recovery, Large Heat Pump, Geothermal Power, CHP

1．はじめに

政府は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言している。また2021年４月の地球温暖化対策推進本部及び米国主催の気候サミットにおいて，「2050年目標と整合的で，野心的な目標として，2030年度に，温室効果ガスを2013年度から46％削減することを目指す。さらに，50％の高みに向けて，挑戦を続けていく」ことを表明した。この宣言は，これまでの2030年度の温室効果ガス削減目標を大幅に引き上げるとともに，カーボンニュートラルの達成時期を大きく前倒ししたものと言える。

2012年より「固定価格買取（FIT）制度」が導入されてから再生可能エネルギー（再エネ）は，加速度的に導入が進んでいる。この先，日本が目指す「2050年カーボンニュートラル」に向けては，再エネ最優先の原則で導入拡大し，再エネを主力電源としていくことが必要となる。だが，最も導入が進んでいる太陽光発電や風力発電は，天候等の自然条件によって出力が変動するため，電力系統の需要・供給に必ずしも一致しない。一方，天候にも左右されず，この電力の需給・供給にも対応できる再生可能エネルギーがバイオマス発電および地熱発電である。バイオマスとは，動植物などから生まれた生物資源の総称である。バイオマス発電では，この生物資源を「直接燃焼」や「ガス化」するなどして発電する。技術開発が進んだ現在では，様々な生物資源が有効活用されている。ただ，国内の木質の有効活用という観点からいくと，収集・運搬・管理にコストがかかるため，小規模分散型の設備にする必要がある。地熱発電においては，地下の地熱エネルギーを使うため，化石燃料のように枯渇する心配が無く，長期間にわたる供給が期待される。高温高圧の地熱蒸気を湧出させるためには，大規模な掘削・開発が必要となる。しかし，蒸気タービンを回すだけの十分な蒸気が得られない場合がある。

上述した再エネの普及が進んでいく一方で，民間事業の脱炭素化への取組も近年加速している。さらに，自社が排出する温室効果ガスの削減や自社で使用するエネルギーに係る温室ガスの削減のみならず，サプライチェーン全体での脱炭素化を図る企業も増加している。例えば，Appleは，2030年までにサプライチェーン全体でカーボンニュートラルを実現することを目標に掲げ，サプライヤーに対して省エネルギー化や再生可能エネルギーの利用を求めている。既存機器の省エネ化はもちろんのこと，より一層の未利用熱回収が求められている。

ここで，再エネおよび未利用熱回収項目として多いに期待されるのが，ORC（Organic Rankine Cycle）と呼ばれる水蒸気の代わりに高分子有機媒体を作動媒体とする発電システムである。熱源温度条件が100℃前後といった比較的低い領域から1,000℃前後といった比較的高い領域まで活用が可能となる。そのため，地熱，廃熱回収，バイオマス，ゴミ焼却，オイル&ガスといった様々なアプリケーションに対応可能となる。このシステムを得意とするのが北イタリアのブレシア市を本拠とするORCの専業メーカであるターボデン（Turboden）社であり，2013年より三菱重工のグループ会社となっている。1980年の創業より，このターボデン社は多様なアプリケーションに対して世界的に豊富な納入実績がある。また，同社は発電のみのシステムだけでなく，大型ヒートポンプ，発電＋蒸気を生み出す高温CHP型ORCシステムなどの新商品の開発にも力を入れている。本稿ではこのターボデン社のORC発電設備の技術的特徴や導入事例について紹介する。

原稿受付 2022年５月９日
＊1 三菱重工業㈱ エナジードメイン エナジートランジション＆パワー事業本部
〒220-8401 横浜市西区みなとみらい３－３－１
＊2 第一実業㈱ プラント・エネルギー事業本部

2．ORC発電技術の原理と特徴

ORC発電は，サイクル的には作動媒体が蒸発と凝縮を繰り返して発電する通常の燃焼ボイラ／蒸気タービンと同じランキンサイクルであり，主要機器構成も同じである。ここでは，比較的小規模そして低温廃熱回収に強みがあるORC発電が蒸気ランキンサイクル発電に比べてどのような理由から高性能となるか等について述べる。

2.1　ORC発電システムの仕組み

Fig. 1にシステム構成図を示す。サイクルを構成する機器は蒸発器，タービン発電機，再生器，凝縮器そして媒体給液ポンプである。本構成図で通常の廃熱回収蒸気サイクルに無いのは再生器である。この機器の目的は，タービン出口の熱回収であるが，この効用については後述する。

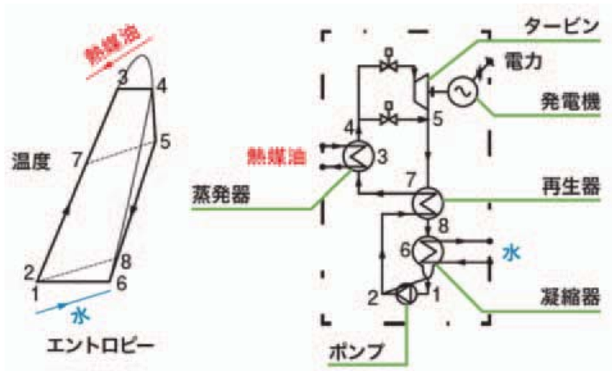


Fig. 1 ORC Cycle Diagram

作動内容を下記に紹介する。

1）予熱（7⇒3）+蒸発（3⇒4）
　加熱源で，蒸発器内の有機媒体を加熱・蒸発させる。

2）膨張（4⇒5）
　この媒体蒸気はタービン内で膨張仕事をし，タービン発電機を駆動する。

3）凝縮（5⇒8⇒1）
　タービンから出た媒体蒸気は再生器に通され液体の作動流体を加熱（2⇒7）した後凝縮器内にて冷却水で冷却され凝縮液化する。

4）加圧（1⇒2）
　作動媒体はポンプで加圧され再生器／蒸発器に供給され，再び同じサイクルを繰り返す。

2.2　サイクル効率と作動媒体

2.2.1　サイクル効率について　高温熱源すなわち，蒸発器側の加熱源の温度をT1（K），低温熱源すなわち凝縮器の冷却源温度をT0（K）とし，高・低温源の温度が一定とすれば，この両熱源の間で作動する理想的熱機関はカルノーサイクルであり，このサイクル効率は次の式で示される。

$$\eta_{cnt}=(T1-T0)/T1 \qquad (1)$$

このカルノーサイクル効率は理想値を示すもので，効率の限界値を知る目安として利用される。しかしながら，熱源が実際は有限であり，何らかの媒体との間に熱交換をしつつ温度を下げていくという熱回収システムにおいては実現し難く，カルノーサイクル効率をもって評価を行うことは妥当ではない。したがって，熱回収システムにおいては，熱交換の過程における無限に分けた微小カルノーサイクルの連続体であると考えるべきである。このように熱源が蒸発器で温度を下げていきこの出口温度をT2（K）とすれば，この高温源と低温源との間で作動するサイクル効率は次式のように表され，これはエクセルギー効率と呼ばれている。

$$\eta_{ex}=1-\{T0/(T1-T2)\} \times \ln(T1/T2) \qquad (2)$$

これら両式の効率を廃熱源の温度に対して示すとFig. 2のようになる。しかしながら，このエクセルギー効率も理想値であり実際には，作動媒体の蒸発特性，供給温度，熱交換器内のターミナル温度差，冷却源の温度上昇，タービン発電機の損失などの影響により，現実に到達できるサイクル効率は低いものとなっている。過去の実績の蒸気サイクルでの実例を同じくFig. 2に示す。

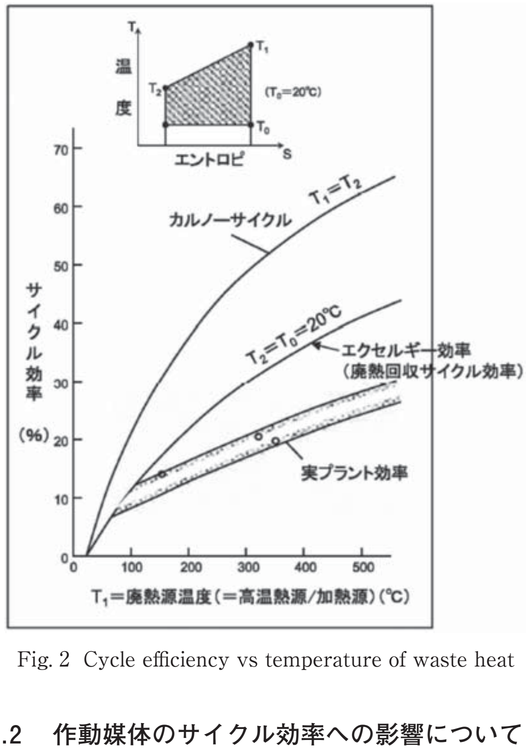


Fig. 2 Cycle efficiency vs temperature of waste heat

2.2.2　作動媒体のサイクル効率への影響について　前項で理想のエクセルギー効率と現実の効率について大きな差があることと，その差の要因について述べた。この要因の中で作動媒体の蒸発特性差が，水蒸気と今回の有機媒体の大きな違いでプラント効率に影響を与えている。

実プラントの効率を向上させるにはFig. 2に示した加熱源の降温特性（T1⇒T2）に媒体の予熱・蒸発温度特

性を近づける必要がある。加熱源（廃熱源）の形態が液体や気体の場合，Fig. 2のように降温特性は温度に対し直線的な特性を有するので，作動媒体も温度に対し直線的であるのが理想である。しかし，媒体は相変化による蒸発部の潜熱を有するので，この潜熱部が小さい，即ち予熱部の顕熱に対する潜熱比が小さい媒体が理想のエクセルギー効率に近づくことになる。水蒸気と有機媒体のこの蒸発特性の違いをFig. 3に示す。この図からわかるように潜熱と顕熱比が小さい有機媒体がより加熱源の降温特性に類似するのでサイクル効率が向上することとなる。

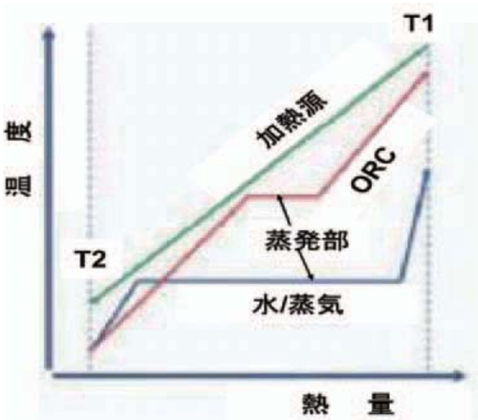


Fig. 3　Heat recovery cycle characteristics

作動媒体はこのサイクル効率だけではなく，取扱い性や経済性等も考慮して総合的に最適な媒体を選定する必要がある。Fig. 4にこの選定条件と最終目的を示す。

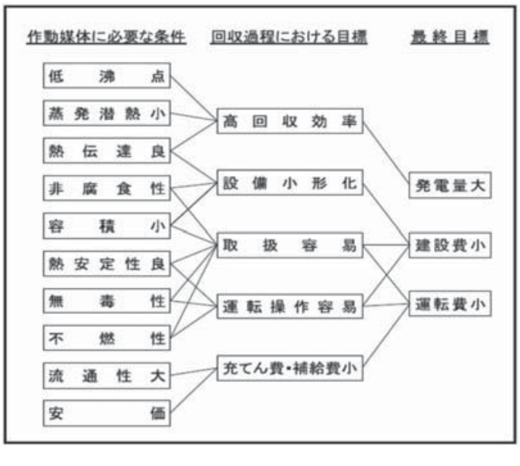
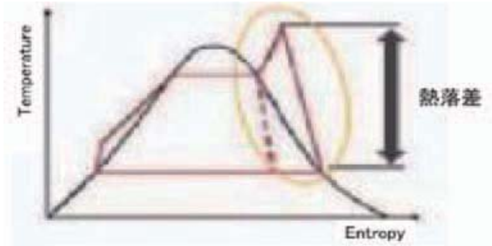


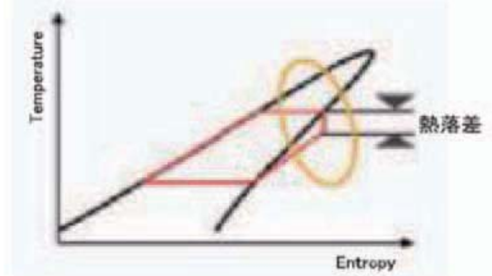
Fig. 4　Required properties for working fluid

2.2.3　ターボデンの作動媒体について　前項のように潜熱と顕熱比が小さい特性に加え，日本では採用実績が無い比較的高温の加熱源でも熱安定性に富み，且つタービンで膨張したタービン出口媒体蒸気が蒸気タービンのように湿り域に入らない様な特性を有するシリコンオイル系や，さらに熱源温度が低い場合には低沸点媒体である炭化水素系やHFO系の媒体をターボデン社は使用する。Fig. 5のT-S線図に水-水蒸気とシリコンオイルのタービン特性を示す。

水蒸気の場合飽和線が右に大きく張り出しており膨張後，特にタービン入口側を飽和蒸気とした場合，湿り域に入っていく。この為，湿り損失増によるタービン効率低下や液滴によるエロージョン弊害がタービン翼に発生する。一方，シリコンオイルは乾き領域に入るので湿りによる効率低下が無いので，蒸気サイクルよりもタービン効率は向上する。但し，タービン出口が乾きで過熱度が高い場合凝縮器へ捨てる熱量が大きくなるのでサイクル効率を低下させることになる 。この対策としてターボデン社は2.1項に記載の再生器をタービン出口 に追設して過熱分の熱量をサイクル内に回収し，効率低下を防止している。炭化水素系やHFO系媒体も同じ特性を持っており，再生器を設置している。



⑵ Steam Rankine Cycle



⑴ Organic Rankine Cycle（ORC）

Fig. 5　T-S characteristic curve for working fluid

2.3　水蒸気サイクルとの違いについて

前述に加え，タービンノズル流出速度の差による違いがある。Fig. 5に示すようにタービンの熱落差がタービン膨張比を水蒸気と同じとしても媒体物性値の特性上，シリコンオイルの熱落差は，水蒸気の熱落差よりも小さくなる。この熱落差の大小がタービンノズルの流出速度に概略比例するので，シリコンオイルの方が水蒸気と比べタービン翼への衝突速度が小さくなる。このことはタービン翼でのプロファイル損失を低減することとなり，蒸気よりも効率が向上する要因となる。またノズル流速が小さいということは，タービン翼の周速も小さくすることが可能なので，タービン回転数を減速機が不要な発電機と同じ回転数にすることが可能である。一方，小容量の蒸気タービ ンは高速回転数となっており減速機が必要である。この結果，減速機による機械損失が蒸気タービンには加わることになる。

これらの事により数MWクラスにおいて，蒸気タービンとターボデン社のORCタービンでは20%程の効率差がつくことになる。この性能差が大きいので欧州ではORCタービンが多く導入されている。Fig. 6にORCタービンの特徴を（水）蒸気タービンと比較してまとめて示す。

更にシリコンオイルや他の低沸点媒体の場合は，水-水蒸気と比べ水処理や水質管理が不要で保守・取扱いが簡単で，初心者でも運転が容易ということもあり欧州では導入が進んでいる。また，蒸気サイクルでは必要なサイクル補給水が全く必要ないので，隣に水源がなくても立地可能であるので，国内の内陸部や山間部での導入に期待が出来る。

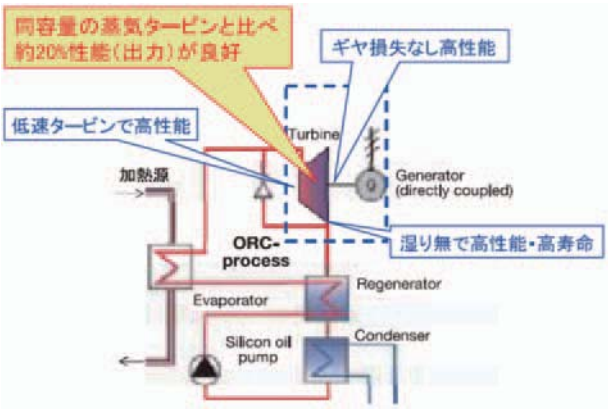


Fig. 6 Features of ORC turbine for performance

3．ターボデン社のORC発電システムについて

欧州等で多数納入されているターボデン社のバイオマスプラント向けORC発電システムと構成機器の特徴等について述べる。廃熱回収や地熱などの低温熱源に対する場合のシステム構成も基本的には同じであり，3.3にてその事例を紹介する。

3.1 システム構成及び特徴

プラント全体のシステム構成をFig. 7に示すが，中心部がターボデン社の標準的な供給範囲であり，Fig. 8にこの供給機器の外観を示す。

燃焼ボイラは，一般的に多種多様な燃料に対応可能な

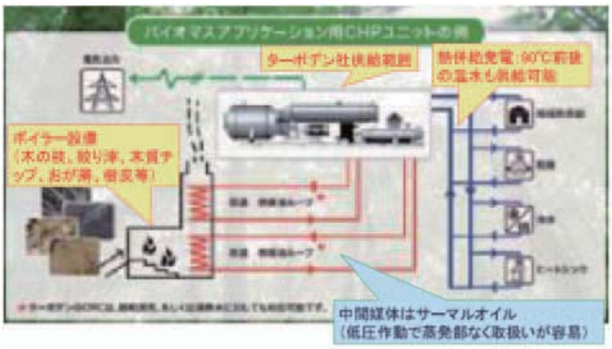


Fig. 7 Outline of ORC biomass plant system

Fig. 8 ORC unit for biomass plant

タイプが採用されている。このボイラの特徴としては，加熱側に水・蒸気ではなくサーマルオイル（熱媒油）という媒体を使用することである。このサーマルオイルを中間媒体としてタービンの作動媒体（シリコンオイル）の加熱源に使用することにより，この1000℃という 高温域の熱回収に適用できている。この中間媒体を使用することにより，タービンの作動媒体が1000℃の高温に直接晒されることがなく，作動媒体の安定性が長期にわたって保たれる。ボイラの熱交換部におけるサーマルオイルは液体のままで水のように蒸発する過程がないので，ボイラーチューブ内の気相成分によるエロージョンの心配はない。このサーマルオイルの圧力レベルは，数barと蒸気で回収する場合と比べ低圧であるので強度的により裕度がある機器となる。また，容量によっては小口径配管が適用できるので国内の場合，溶接関連の申請対象が削減可能である。このサーマルオイルは，必要に応じプロセス側の加熱源としても直接利用可能で，海外では合板の加熱圧着用熱源として利用されている例がある。

もう一つのシステム上の特徴はORC発電ユニットに発電用と熱電併給用の２種類を準備していることである。この熱電併給用の熱は，Fig. 7に示すようにタービン作動媒体が凝縮器にて放熱する熱を温水として取り出すものである。タービン側からすると冷却水系統にあたるものであり，100℃以下の熱水を取り出すことが可能である。蒸気タービンの場合，蒸気を抽気して更に一旦水熱交換器が必要と複雑なシステムとなるが，ORCの場合は非常に簡単なシステム構成となる。欧州の場合は，この熱水の利用先として建屋暖房等の為に熱水の供給パイプラインが整備されているので，熱水の繋ぎ込みが容易である。この為，ターボデン社のバイオマスプラント向け納入ユニットの90%以上がこの熱電併給用である。Fig. 9に発電用と熱電併給用のORC周りの熱バランスを示すが，熱電併給用は凝縮器側から取り出す温度を発電専用時の30℃前後と比べ100℃近くに上げるので，熱出力は増えるがその分電気出力は低下することになる。

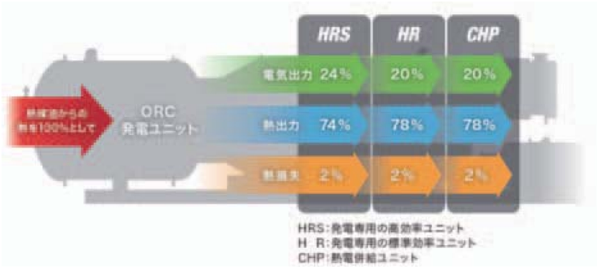


Fig. 9 Heat balance of ORC unit

Fig. 10には欧州で使用されている熱水供給用配管の埋設状況を示す。この配管は放熱損失を最小限とする為，保温材が巻かれている。

Fig. 10 Hot water piping distribution

3.2　プラント概要及び主要機器について

Fig. 11に主要機器の代表的な２MWクラスの島轍図を示す。この配置では，媒体給液ポンプは地下ピットに，それ以外の機器は地上に設置されている。配置上の特徴としては，主要機器が台板上に配管・弁類と共にモデュー ル化されている事であり，現地工事の期間短縮及び工事費低減を図っている 。

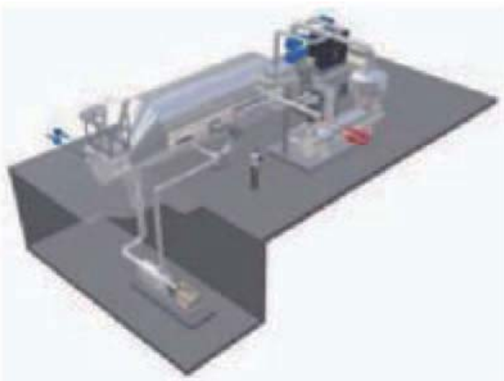


Fig. 11 Bird's eye view of ORC unit

Fig. 12の左に予熱器・蒸発器のモデュールを，右に再生器・凝縮器のモデュールを示す。熱交換器類の形式はシンプルな保守性に優れたシェル＆チューブ式を採用している。再生器・凝縮器は内部では分割されているが外見上は一体型となっており，コンパクトな配置となっている。

Fig. 12 Outline of Heat exchangers

Fig. 13にタービンを示す。タービン型式は実績豊富な軸流多段式を採用している。蒸発器からの媒体蒸気は車室上部の配管よりタービンに供給され，タービンで膨張仕事し，タービン出口蒸気は軸流方向に排気し，排気損失の低減を図っている。発電機はタービン軸と減速機を基本的に介さないで，中間軸にて結合されている。作動媒体が可燃性であるので漏洩対策には万全の構造を期している。車室は壺型構造として水平フランジ部を無くし，ロータ軸の車室貫通部にはメカニカルオイルシールを採用している。現在の単機最大容量は20MWであり，これを発電機の両端に配し40MWまでの発電が可能である。

Fig. 13 Outline of Turbine

Fig. 14に給液ポンプのモデュールを示す。ポンプ形式は遠心多段式を採用している。特徴としては，作動媒体の流量制御をこのポンプの回転数制御にて行っている事である。この為ポンプ駆動用の電動機はインバータ制御方式を採用している。作動媒体量は，廃熱量に応じてポンプ回転数制御にて予熱器・蒸発器へ供給され，その後蒸発してタービンに供給される。この様に，タービン出力はポンプ流量により制御しているので，一般的なタービン入口の制御弁による絞り制御に比べ，絞り損失がなく部分負荷でも高性能である。また，タービン同様,

Fig. 14 Outline of pump

ロータ軸の車室貫通部にはメカニカルオイルシールを採用している。

主要機器の構造とは異なるが，配管フランジ部の漏洩対策についてFig. 15に紹介する。配管フランジ部は基本的に溶接構造を採用しているがメンテナンス等の為に，一部にはボルトフランジを採用している。このボルトフランジ部漏洩対策としてフランジ部を覆うカバーを付けて，このカバーの中を大気圧より常時若干低くなるように排気ファンにて吸引している。この為，万が一フランジ部で漏れが発生しても，フランジ部からは外部に漏洩しない構造となっている。万が一漏洩したガスは，排気ファンを経由して地上より十分高くて拡散性に優れた安全な場所に放出される。この漏洩ガスは，この放散配管中にガス検知器を設置し常時監視されている。万が一漏洩ガスが検知された場合は，自動的に ORCユニットを緊急停止させるインターロック機能を設けている。このような漏洩対策の評価から，作動媒体は可燃性であるがORCユニットは非防爆エリアとして認定されている。

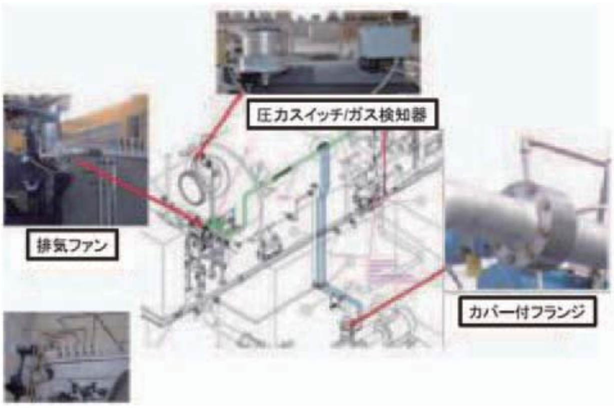


Fig. 15 Leakage gas protection system for piping

3.3　適用事例

3.3.1　竹バイオマス向け1MWプラント　これまで日本では処理が難しいとされていた竹バイオマスを主燃料とする995kWのバイナリー発電設備として，ターボデン社の製品が採用された。これは国内初で，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）のバイオマスエネルギー導入促進プロジェクトに選定されたものである。

Table 1 Main Features of Bamboo Biomass Plant

納入先	日本，熊本県
運開時期	2019年 9 月
アプリケーション	バイオマス（竹，バーク）
発電出力	1,000kW
熱出力	熱水（80℃）
熱の用途	プロセス利用

3.3.2　地熱発電向け29MWプラント　本事業は2020年度JCM設備補助事業として採択されたものである。既設の120MWフラッシュ式地熱発電所に，29MWのバイナリー地熱発電設備を新たに追設するものである。有機ランキングサイクル（ORC）を用い，既設発電所から直接還元井に戻されていた廃熱水を有効活用することにより発電を行う。発電会社として売電事業を行うものであり，化石燃料由来のグリッド電力を再生可能エネルギーで代替し温室効果ガス（GHG）排出量を削減する。

Table 2 Main Features of added ORC binary plant for Geothermal Power

納入先	フィリピン
運開時期	建設中（2023年 4 月予定）
アプリケーション	地熱
発電出力	29,000kW
GHG排出削減量	72,200 tCO_2/年（想定）

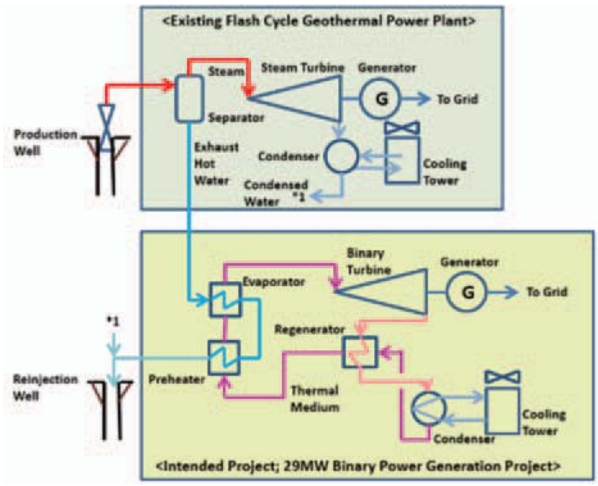


Fig. 16 Added Binary Power Plant

3.3.3　天然ガスパイプラインガスコンプレッサーステーション（GCS）向け28MWプラント　本プラントでは，天然ガスパイプラインにおけるGCSでの，ガスタービンの排熱を有効活用するシステムである。28MWのORCを導入することでGCSの圧縮ガスの能力と全体効率を向上させGHG排出削減に寄与する。

Table 3 Main Features of Waste Heat Recovery from Gas Turbine Exhaust

納入先	エジプト
運開時期	建設中
アプリケーション	コンバインド
発電出力	28,000kW
GHG排出削減量	120,000 tCO_2/年（想定）

3.3.4　ガラス工場向け 1 MWプラント

持続可能なエネルギー還元策を講じてきたが，今日においても製造に必要なエネルギーの30 ～ 35%が未回収のまま大気放散されていた。この問題に対して，600t/日のフロートガラス炉の排ガス熱を用いて，熱媒油に熱交換し，発電と圧縮空気を併給する解決策が採用された。

Table 4　Main Features of Waste Heat Recovery from Glass Manufacturing Process

納入先	イタリア
運開時期	2019年 9 月
アプリケーション	ガラス工場廃熱
発電出力	1,000kW
圧縮空気	$84Nm^3$/min@7bar(G)

4．新製品

4.1　大型ヒートポンプ

ヒートポンプは冷媒を強制的に膨張・蒸発，圧縮・凝縮させながら循環させ，熱交換を行うことにより水や空気などの低温の物体から熱を吸収し高温部へ汲み上げるシステムであり，従来の化石燃料を燃焼して得ていたシステムに比べてエネルギー利用効率が非常に高いことが特長である。そのため，二酸化炭素排出削減に大きく貢献することが期待されている。Fig. 17はEEAによる従来の天然ガスボイラ，電気ボイラ，ヒートポンプ（COPの異なる）を比較したものである。

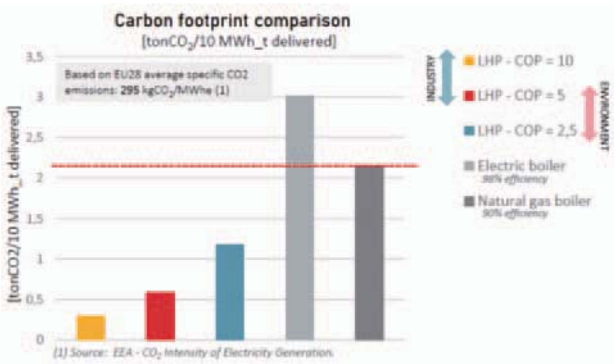


Fig. 17　Carbon footprint comparison

また，欧米ではヒートポンプによる熱利用を再生可能エネルギーとして評価する動きも出てきている。エネルギー供給構造高度化法施行令では，「大気中の熱その他の自然界に存在する熱」が再生可能エネルギー源として位置付けられた。ヒートポンプは，家庭部門でエアコンの空調に多く導入されているが，給湯機器や冷蔵・冷凍庫など様々な製品にも使用されている。また，高効率で大規模施設にも対応できるヒートポンプはオフィスビルの空調や病院・ホテルの給湯などに利用されているが，今後は工場や農場などでも普及拡大が期待されている。

ターボデン社の新商品である大型ヒートポンプは，地下水や廃熱などの低温の熱源から地域熱供給設備や産業プロセスなどの高温熱源を必要とする熱利用者に大量の熱を伝達できる設備となっている。主要な出力レンジおよび特徴を以下に示す。

・熱出力　3 MWth ～ 30MWth
・温度リフト　最大120℃
・供給温度　最大200℃（蒸気も可能）
・地球温暖化係数の低い冷媒を使用

ヒートポンプのCOPは温度リフトに大きく影響するため，ターボデン社の大型ヒートポンプの温度リフトとCOP（成績係数）の関係を示した曲線をFig. 18に示す。Fig. 18より温度リフトを大きくとると，COPは減少し，逆に温度リフトを小さくとると，COPは増加する。実際の導入検討の際には，低温熱源の温度条件とプロセス上必要な高温熱源の必要温度条件を十分に検討する必要がある。

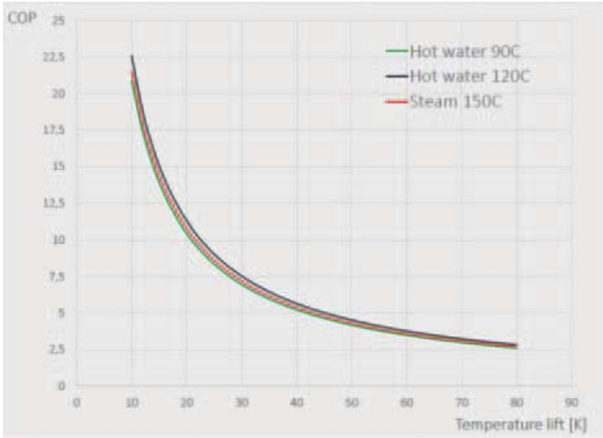


Fig. 18　Temperature lift vs COP

次にターボデン社による大型ヒートポンプの導入事例について説明する。イタリアの鉄鋼メーカに設置されている電炉の冷却で使用していた冷却水を冷却塔で放熱していた。その廃熱をヒートポンプで回収し，温水を生成して地域熱供給会社に供給する設備となっている。Table 5に主要目をFig. 19にシステム概略図を記載する。

Table 5　Main features of Large Heat Pump

納入先	イタリア
運開時期	建設中
アプリケーション	炉廃熱回収水
熱出力	6 MW
熱供給先	地域熱供給会社
低温熱源入口温度	75℃
高温熱源出口温度	95℃（120℃まで可）
COP	8.2

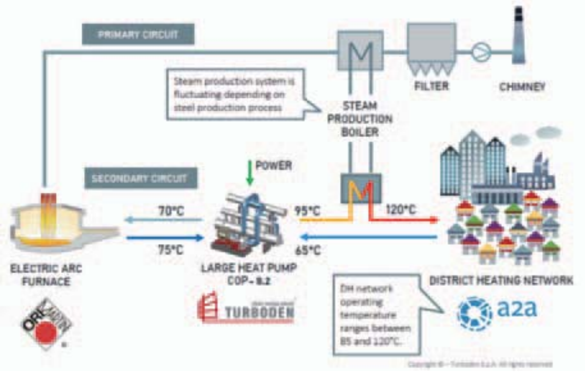


Fig. 19　System overview

4.2　高温CHP型ORCシステム

ターボデン社のORCシステムはタービン媒体が凝縮器にて放熱する熱を100℃以下の温水として取り出すことが可能である。ただ，製造や産業プロセスにおいて温水よりも蒸気が用いられる場合もある。具体的な例を挙げると，紙パルプ産業における紙パルプ化工程や乾燥工程，バイオマス発電で使用される木質チップの乾燥工程，汚泥乾燥設備等に蒸気は使用されている。これらの需要より，ターボデン社は高温CHP型ORCシステムを開発した。主要な出力レンジおよび特徴を以下に示す。

・発電出力　500kWe ～ 6 MWe
・発生蒸気圧力　0.5MPaG ～ 3 MPaG
・発生蒸気量　 5 t/h ～ 40t/h

次に導入が検討できるアプリケーションについて説明する。高温CHP型ORCシステムのサイクル自体は従来のORCシステムと違いはないが，凝縮器に放熱する熱を蒸気として取り出すため，通常のCHP型ORCシステムより100℃程度高い熱源が必要となる。天然ガス，バイオマス，汚泥，産廃等の燃料による燃焼ガスやガスタービンやガスエンジン等の排ガスなどの高温熱源が必要となる。そのため，炉の廃熱回収，ガスタービンの排ガス利用によるコンバインドサイクルが考えられる。また，コージェネレーションシステムにはガスエンジン，ガスタービン等の製品を設置することでも対応が可能である。ORCシステムとの比較表をFig. 20，Fig. 21に示す。個々のシステムが得意とする出力規模，電気と蒸気どちらを重視して出力する必要があるかを導入段階で十分に検討する必要がある。

実際のターボデン社の導入事例を以下に示す。イタリアのブレシアにあるミルク工場において既存の蒸気ボイラを利用してミルクの低温殺菌を実施していた。そこで，ターボデン社は天然ガスボイラ＋高温CHP型ORCシステムを提案し採用された。

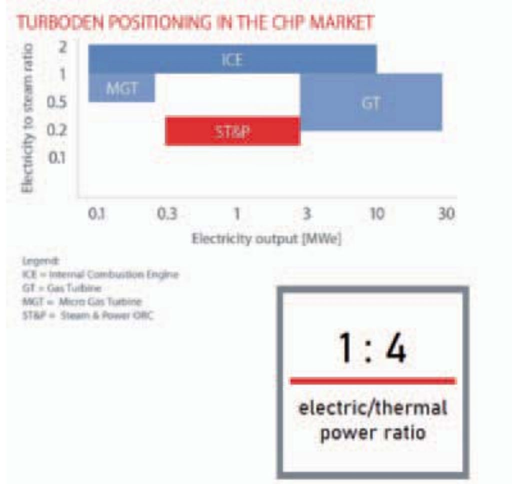


Fig. 20　Turboden positioning in the CHP market

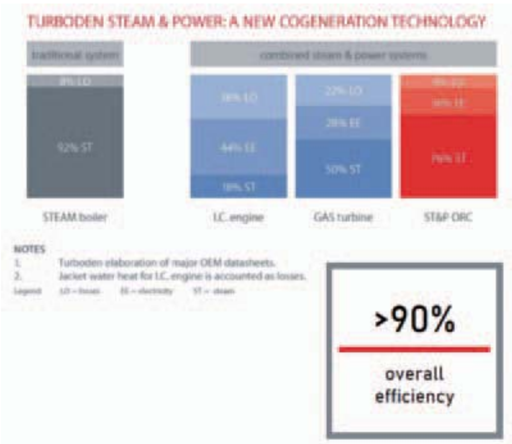


Fig. 21　Turboden steam & power comparison with other technology

Table 6　Plant outline of High CHP plant

納入先	イタリア
運開時期	2021年
アプリケーション	天然ガス焚きボイラ＋高温CHP型ORCシステム
電気出力	700kW
熱出力	蒸気圧力1.5MPaG 蒸気流量　5 t/h
熱利用	ミルクの低温殺菌
燃料	95℃（120℃まで可）

5．おわりに

本論文において，これまでターボデン社が培ってきたORC技術を用いた導入事例や新製品を紹介してきたが，一方で従来の発電設備や他の省エネ機器と比較すると低温熱利用であるが為に経済性を改善していく必要がある。脱炭素社会に向けて，ORC技術を用いた分散低温廃熱発電の普及の一翼を担えるよう，国や地方自治体と一体となり取り組んでいく所存である。

参考文献

(1)　経済産業省 資源エネルギー庁 令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021）＜https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/＞（参照日2022年5月9日）

(2)　小森豊明，小・中規模バイオマス発電プラント向けORC（オーガニックランキンサイクル）発電技術について，日本ガスタービン学会誌，Vol. 45, No.2（2017），pp. 91-97.

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

低温熱源向けバイナリー発電の概要
Outline of Binary Power Generator for Low Temperature Heat Sources

三好 一雄*1　松山 良満*1　和田 大輔*1
MIYOSHI Kazuo　MATSUYAMA Yoshimitsu　WADA Daisuke

キーワード：バイナリー発電，有機ランキンサイクル，低GWP冷媒，斜流タービン
Key Words：Binary power generator, Organic rankine cycle, Low-GWP refrigerant, Diagonal flow turbine

1．はじめに

地球温暖化による気候変動対策のため，CO_2排出量削減の取り組みが多くの分野で推進されている。SDGs(1)においてもクリーンエネルギーの普及や気候変動対策が盛り込まれ，企業活動にも取り込まれつつある。

日本はCOP21において，2030年までにCO_2排出量を2013年比で46%削減することを目標とした。このためには地熱やバイオマス，さらには未利用の産業排熱を有効利用する必要がある。産業分野の排熱実態調査(2)においては150℃以下の排ガスが排熱の40%以上を占めると推定されている。

80℃未満の熱源に対しては，効率よく発電できるシステムは少なく，ほとんどの排熱は利用せずに放出されている状況である。80℃未満の低温の熱源に対してバイナリー発電の効率を高める，あるいは出力を増やすことができれば，利用できる熱源の裾野が一挙に広がり，CO_2排出削減や省エネ，創エネに貢献することが期待できる。

Fig. 1 IHI Heat Innovator (100kW-class)

2．開発方針

市場にある既存のバイナリー発電装置は，95℃程度の熱源を想定して設計されているものが多い。これらのバイナリー発電装置に80℃以下の熱源を用いると，その出力は大きく低下し，広く用いられている作動流体HFC-245faでは，発電出力が定格出力よりも40%低下すると推測される。

80℃以下の熱源を有効活用するには，熱源条件に適した新規作動流体を選定する必要がある。

バイナリー発電の基本構成をFig. 2 に示す。動作フローは以下のとおりである。

①循環ポンプが作動流体（液）を送出

②作動流体（液）が蒸発器で加熱され作動流体（蒸気）となる

③作動流体（蒸気）がタービン発電機を回して発電

④作動流体（蒸気）が凝縮器で冷却され作動流体（液）となる

このサイクルは，Organic Rankine Cycleとも呼ばれる。

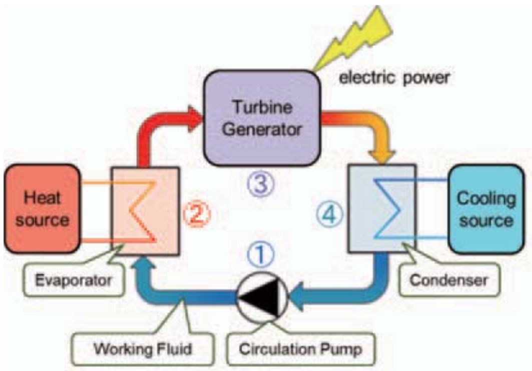


Fig. 2 Basic cycle of binary generator

熱機関の基本となるカルノーサイクルでは，熱力学的な出力Pは，温度THの高熱源からの入熱量Qに比例し，$P = Q \times (1 - TL/TH)$ と表すことができ，低熱源の温度TLが一定の時，THが低いと出力Pは減少する。Fig. 2 に示すサイクルにおいても同様に，取り出せる出力Pは蒸発器での入熱量Qに比例し $P = \eta \cdot Q$，その比例係数η（サイクル効率）は熱源温度THの低下に伴い減少する。

現在，多くのバイナリー発電は，作動流体としてHFC-245faを使用したランキンサイクルである。その理由は，HFC-245faの特性として①不活性で電気事業法の規制緩和（そのほかに作動流体圧力2MPaG未満，熱源温度250℃未満などが求められる）を受けら

原稿受付　2022年６月１日
＊1　㈱IHI 技術開発本部　技術基盤センター
〒235-8501　横浜市磯子区新中原町１番地
E-mail: miyoshi4375@ihi-g.com
E-mail: matsuyama0877@ihi-g.com
E-mail: wada0407@ihi-g.com

れる，②オゾン破壊係数ODP=0でオゾン層を破壊しない，③地球温暖化係数GWPがHFC類では比較的小さい（GWP=1,050），および④蒸発温度が80～120℃程度（熱源温度は95℃～200℃程度になる）のとき，バイナリー発電としての効率が高い，などが挙げられる。しかし熱源温度THの低下に伴い蒸発温度が低下すると，出力も大幅に減少し，経済性が低下するため，サイクル効率ηを上げるか，入熱量Qを増やすことのできるシステムが必要になる。

3．熱サイクルと作動流体の選定

検討する熱サイクルは，ランキンサイクルとローレンツサイクルを対象とした。

ランキンサイクルは，蒸発/凝縮過程で相変化温度が一定のサイクルで，ローレンツサイクルは，蒸発/凝縮過程で相変化温度が変わるサイクルである。蒸発過程の違いをFig. 3 に示す。

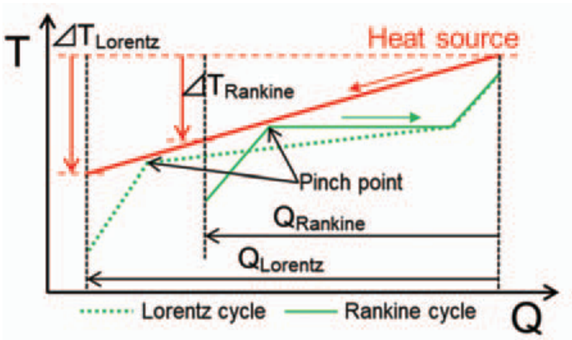


Fig. 3 Differences in evaporation processes

ローレンツサイクルでは，非共沸混合流体を用いることで，蒸発熱交換器のピンチポイントの温度を低下させることができ，熱源の入口温度と流量が同じであっても，熱源の出口温度が低下する。その結果，ランキンサイクルよりも大きなQを確保することができる。回収する熱量が増加することで，作動流体の循環流量はランキンサイクルよりも増加する傾向となる。

3.1　低GWPの作動流体選定

作動流体は，以下の制約のもとに選定した。

1）地球温暖化係数 GWP<150（欧州F-gas規制対応）
2）オゾン破壊係数 ODP=0（実質的にゼロも含む）
3）安全性の担保（暴露許容濃度，変異原性等）

検討候補となる作動流体をTable 1 に示す。

Table 1 Candidate refrigerants

No.	Refrigerant	GWP	Mutagenicity
0	HFC-245fa	1050	○
1	HFO-1234yf	4	△
2	HFO-1234ze	6	○
3	HCFO-1233zd	1	○
4*	HFC-152a	140	○
5*	HFC-32	677	○

*4 and 5 are used to adjust Lorenz cycle.

作動流体の選定手順の概要をFig. 4 に示す。

検討に必要となる作動流体の物性値（熱物性，機械物性）は，REFPROPなどの物性推算ソフトウェアを用いて入手した。サイクル計算には，IHIで開発したバイナリー発電の性能計算ツールを修正して使用した。

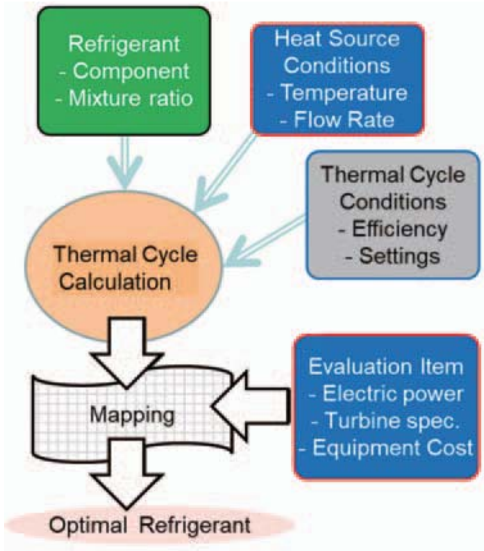


Fig. 4 Refrigerant selection procedure

3.2　ランキンサイクルの作動流体

ランキンサイクルについて，IHIの性能計算ツールを用いて候補冷媒の比較検討を行った結果をFig. 5に示す。

熱源条件は，温水70℃，冷却水25℃である。HFC-245faの場合を100%として対比基準とした。

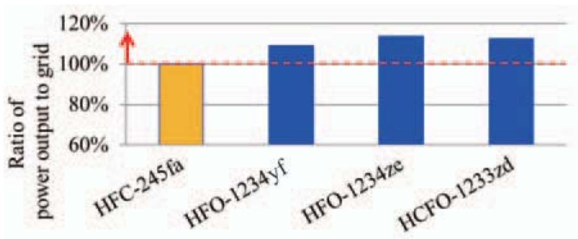


Fig. 5 Ratio of power output to grid

Fig. 5 に示す送電端出力は，バイナリー発電サイクルの補機動力（主に作動流体循環ポンプが消費する）を差し引いた，実用に供される電力出力である。HFO-1234zeを作動流体とした場合が最大となり，HFC-245fa比で＋14%の電力が利用可能となる。

Fig. 6 に示す回収熱量は，温水熱源からバイナリー発電サイクルに取込んだ熱量である。作動流体を比較検討する際の温水流量は同一値なので，回収熱量が大きいほど，温水の熱利用率が高いサイクルと言える。

Fig. 7 に冷媒流量の比較を示す。冷媒流量は，①循環ポンプサイズおよび消費動力，②蒸発器サイズ，③凝縮器サイズ，④タービン-凝縮器間配管径に影響を及ぼす。初期コストには①②③，発電出力には③④が主に関与する。

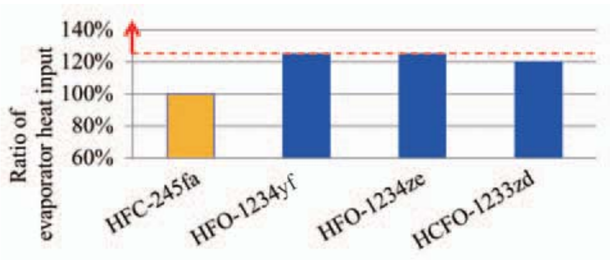


Fig. 6 Ratio of evaporator heat input

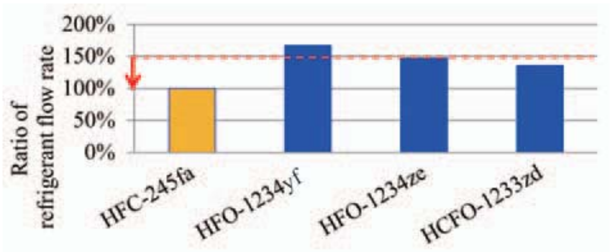


Fig. 7 Ratio of refrigerant flow rate

これまでのIHIでの知見（コスト，仕様等）から，冷媒流量増加は150%までを許容範囲とした。

以上の評価から，HFO-1234zeが最もバランスの良いランキンサイクルを構成できる作動流体である，との結論が得られた。

3.3 ローレンツサイクル

ランキンサイクルの検討結果をもとに，HFO-1234zeにTable 1 の候補冷媒を添加する非共沸混合冷媒を設定し，ローレンツサイクルの性能推定を行った。

HFO-1234zeとHFC-32の組み合わせにおいて，サイクル効率が改善される結果を得た。Fig. 8 に蒸発器の回収熱量，Fig. 9 に送電端出力の検討結果を示す。

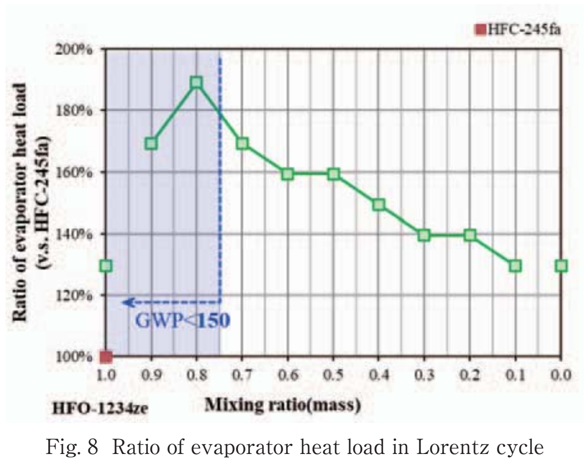


Fig. 8 Ratio of evaporator heat load in Lorentz cycle

HFC-32の混合率を増加させると，蒸発器の回収熱量は上に凸の傾向を持ち，作動流体の蒸発温度勾配が熱源の温度勾配よりやや低い領域で最大となる。送電端出力も同様の傾向を示す。

欧州のF-gas規制を考慮し，混合冷媒のGWP<150とするため，検討範囲はHFO-1234ze:HFC-32=75:25（wt%）までとなる。また，HFC-32の混合によりサイクルの圧力比が増し，循環ポンプ動力が増加することで発電量増

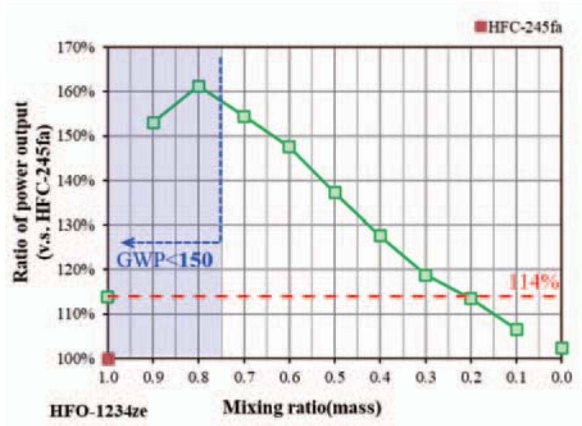


Fig. 9 Ratio of Power output in Lorentz cycle

加を相殺するため，HFC-32の混合比は低いほうが望ましい。

発電機端出力を同一として試算したランキンサイクルとローレンツサイクルの比較をTable 2 に示す。

温水流量，熱交換器コスト，送電出力はランキンサイクルを100とする比である。ポンプ動力は各サイクルの出力に対する割合で示した。

Table 2 Comparison of thermal cycles

Thermal cycle	Rankine cycle	Lorentz cycle
Working fluid	HFO-1234ze	HFO-1234ze HFC-32
GWP of working fluid	6	＜150
Ratio of Hot water	100	77
Heat-exchanger cost	100	150
Ratio of power output to grid	100	98
Pump power	8%	10%
Turbine specification	Equivalent	

同等仕様の発電機を装備する装置を想定した場合，ローレンツサイクルのメリットは，必要温水量が少ない点に集約される。ランキンサイクルは，必要温水量を除けば，同等もしくは若干優れる（送電出力，ポンプ動力）ことがわかった。以降の検討はランキンサイクルで行った。

4．大容量タービン

低温熱源に対応した新冷媒を適用するにあたり，低膨張比，大流量に対応したコンパクトタービンホイールの開発が必要である。通常小型タービン発電機はラジアルタービンを採用するが，低温熱源で発電する都合，温度差に起因した熱回収が難しく，より高比速度の状況下でタービンを作動させる必要がある。この場合，タービンとしては軸流タイプに近い特性が必要とされる[3]が，オイルフリー，完全密封タイプ，省スペースをターゲットとした発電機では，全てを軸流タービンで成立させることは困難である[4]。

低温熱源用新冷媒に適応させるため，軸流タービンの

特性も有しつつ，省スペースにレイアウト可能なラジアル形式を両立させるため，斜流タービンホイールの開発を行った。

斜流タービンの基本構造は，ラジアルタービンとほぼ同等である。但し，入口流路をラジアルより斜めとすることで，低温熱源特有の大流量特性に対応させることが可能である（Fig. 10，11）

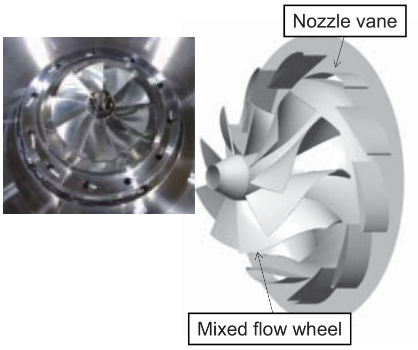


Fig. 10 Mixed flow turbine

Fig. 11 Turbine generator

斜流ホイールに加え，上流の固定ノズルベーンも新規に調整することでマッハ数分布を最適化した結果，通常のラジアルタービンに対して，約4%の効率向上を確認した。

5．オイルフリー軸受

低温熱源に対応した新冷媒を適用するにあたり，低膨発電機は全長約1m，両端は左右対称のタービンホイール及びタービンスクロールを組込んだ形状とした。中央内部に発電機を搭載し，コネクター部も密封式とすることで，冷媒の漏洩が無い完全密閉式の発電機としている（Fig. 11）。また，軸受は，後述する磁気軸受を採用することによって，オイルやグリス等が不要なメンテフリー構造とした。

オイルフリー，メンテフリーのコア技術となる磁気軸受については，将来，普及しやすく且つ低コストで製造しやすい，ヘテロポーラ型の磁気軸受(5)（Fig. 12）を採用し，IHI社内にて新規開発した。

本形式をベースとして，要求される荷重に対応したコイルターン数，コア厚さ等を検討し，制限温度以下となるよう損失発熱量を設定した。損失発熱量は電流密度の最大値をもって代用し，その範囲内でロータ軸を保持するに必要十分な吸引力を得られるか試作検証を行った。

検討の結果，電流密度60%以上の使用範囲で必要十分な吸引力を発生できることを確認した。

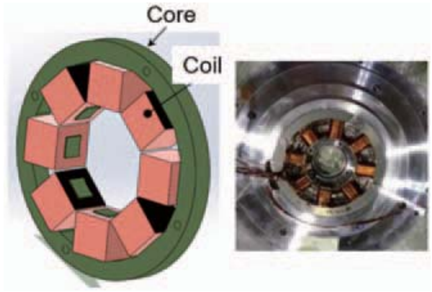


Fig. 12 Heteropolar magnetic bearing

6．熱交換器

低温熱源向けバイナリー発電は，温水と冷却水の温度差が小さいサイクルの性質上，熱交換器（蒸発器および凝縮器）については低温度差で加熱・冷却を行う必要があり，また，高圧側と低圧側の圧力差が小さいため，圧力損失を通常のバイナリー発電よりも小さく抑える必要がある。このため，自社にてシミュレーションソフトを作成し，適合する熱交換器を設計した。

設計条件をTable 3に示す。Table 3の条件で，バイナリー発電のモジュール端発電量が100kW以上を目標として設計した。

Table 3 Design condition of heat exchanger

Hot water temperature	℃	70
Hot water flow rate	t/h	212
Cooing water temperature	℃	25
Cooling water flow rate	t/h	282

設計の基本とする熱サイクルを，Fig. 13に示す。

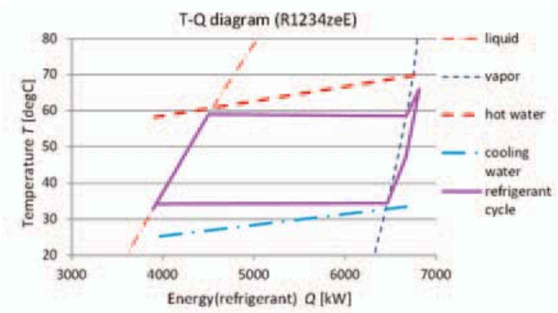


Fig. 13 T-Q diagram

熱交換器は，他の形式に比べて小型・軽量で低コストであるブレージングプレート熱交換器を採用することとした。また，配管が複雑になることを避け，バイナリー発電のモジュールをコンパクトに収めるため，蒸発器・凝縮器それぞれ２台を上限とした。

以上の条件のもとで，市販のブレージングプレートを用いて蒸発器・凝縮器共に２台で構成する設計とした。

設計した熱交換器の概要をTable 4に，実機写真をFig. 14に示す。

設計した熱交換器を採用したバイナリー発電システムにおいて試験を行い，設計条件の温水・冷却水にて100kWの発電が可能であることを確認した。（発電性能

に関する詳細は次項）圧力損失についてもTable 5のように設計値以下の値が得られ，設計が妥当であることを確認できた。

Table 4 Designed heat exchanger

evaporator	heat exchange rate	kW	2907
	units	−	2(parallel)
	size	mm	537x923x1232
	wight	kg	856(1 Unit)
condenser	heat exchange rate	kW	2778
	units	−	2(parallel)
	size	mm	537x881x1232
	wight	kg	895(1 Unit)

（Evaporator）　（Condenser）

Fig. 14 Heat exchanger

Table 5 Pressure drop of heat exchanger

	Design[kPa]	Test[kPa]
Evaporator	38	20.7
Condenser	22	9.5

7．確定仕様

確定した低温熱源向けバイナリー発電のサイクル構成図を，Fig. 15に示す。

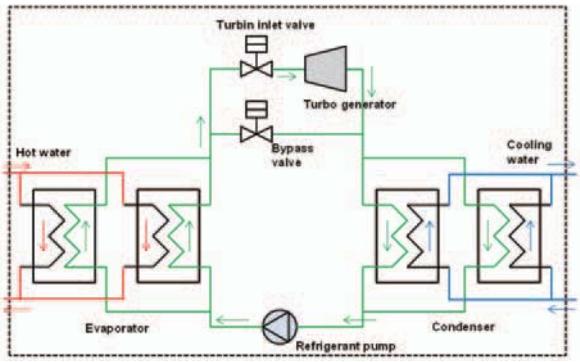


Fig. 15 Flow diagram of binary power generator system

冷媒ポンプには漏洩リスクのないキャンド型ポンプを採用し，タービン入口弁およびバイパス弁は，空気駆動式のボールバルブを採用した。

試作機の性能試験を行い，設計どおり，モジュール端100kW以上の性能が得られることを確認した。試験結果をTable 6に示す。なお，この時の定格の温水，冷却水の条件は，Table 3を参照のこと。

Table 6 Test results

Power output(generator)	kW	136
Power output(module)	kW	103
Auxiliary power(pump et al.)	kW	33
Heat input	kW	2905
Heat output	kW	2778

8．低温熱源を利用した現地実証試験

80℃の低温熱源を用いた100kW級バイナリー発電システムの性能・耐久信頼性評価及び制御ロジックの有効性確認のため，実際の温泉水を利用した現地実証試験を実施した。湧出する温泉水の量は常に変動（Fig. 16）しており，ほぼ20分周期で，70～80t/h程度の変動が見られた。また，冷却水の得られない環境のため，凝縮器は水を用いない空冷凝縮器とした。電気系統は外部の系統には接続せず，必要な電力はディーゼル発電機によって供給し，バイナリー発電システムによって発電した電力は負荷抵抗器にて熱として消費することとした。システムフロー図をFig. 17，外観をFig. 18に示す。

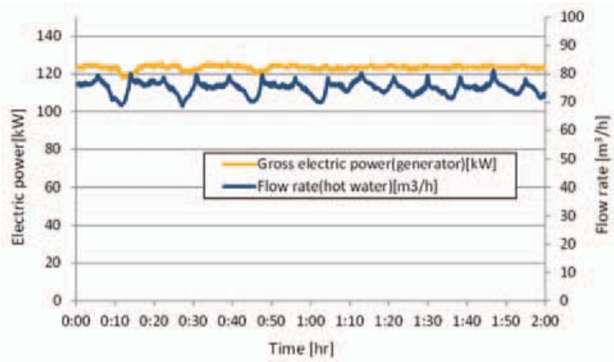


Fig. 16 Fluctuations in hot water flow

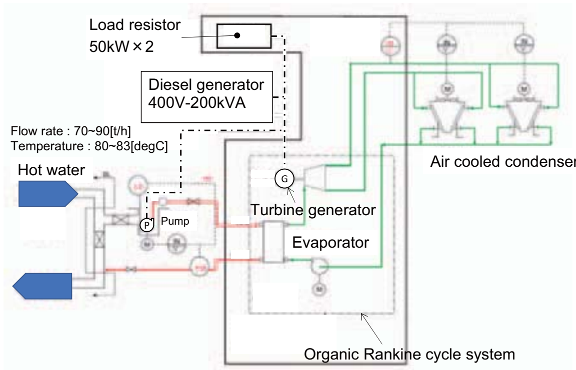


Fig. 17 System flow diagram

本条件において，発電機端にて最大126kWの出力を確認するとともに，70～80[t/h]程度の温水変動が生じても問題なく連続運転を継続でき，システム制御ロジックの有効性を確認した。

耐久信頼性に関しては，熱的に厳しい起動停止運転

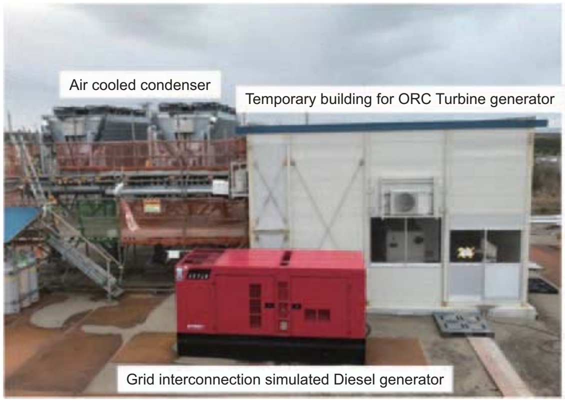


Fig. 18 Schematic view of power generation system

Fig. 19 ORC in gas engine co-generation power plant

(Daily Start and Stop) を合計31回，累積運転時間として260hr問題なく稼働し，基本的な信頼性に問題がないことを確認した。

9．適用市場の検討

低温熱源向けバイナリー発電の市場として有望な領域を検討した。調査の結果，産業未利用熱源（ガスエンジン，バイオマス発電排ガス，焼却炉排熱，等々）が，設置に際して追加費用が少なく，CO_2削減ポテンシャルが高く，潜在顧客数が多い領域と想定される。特に，冷却水を利用している産業機器では，新たな冷却水ポンプ動力や冷却源動力が不要（もしくは最小限の増加）のため，利用可能出力が最大限取り出せる利点がある。

CO_2削減量で評価した市場規模を，例としてTable 7 に示す。低温熱の排熱源にバイナリー発電を適用できれば，CO_2削減ポテンシャルは，31万トン／年が見込まれる。

Table 7 Market size evaluated by CO_2 reduction in JAPAN

Market area	CO_2 reduction [10^3 ton/year]	Total market size
Hot spring	3	314×10^3 ton/year
Biomass	22	
Incinerator	143	
Diesel engine	81	
Gas engine	65	

投資回収年は設置条件への依存が大きく定量化が難しいが，Fit ／ Fip制度を利用した売電や，国および自治体の導入補助金などを活用することで5~8年での投資回収が可能と推定される。

10. おわりに

低温熱源向けバイナリー発電について，開発経緯や仕様などの概要を紹介した。低温熱源はエネルギーポテンシャルが低いため，投資回収が難しく未利用であったが，気候変動対策の一分野として今後も注目していく必要がある。今回の開発が，創エネルギーや省エネルギーの一助となることを期待したい。

なお，IHI横浜事業所のガスエンジン導入に合わせ，ジャケット水（低温熱源）を利用して本開発の技術展開を行った機種を導入することができ，2021年4月より運転を継続している[(6),(7)]。導入に際してご協力いただいた関係者の皆様に感謝いたします。

謝辞

本バイナリー発電装置の開発は，環境省平成29年度低温熱源活用発電技術実用化推進事業（未利用低温熱源を利用したバイナリー発電システムの開発）の補助を受けて実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

(1) 国際連合広報センター SDGsとは？ 17の目標ごとの説明，事実と数字＜https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/31737/＞(参照日 2022年4月12日)
(2) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 産業分野の排熱実態調査報告書2019年3月＜http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/HainetsuReport.pdf＞
(3) O. E. BALJE, A Study on Design Criteria and Matching of Turbomachines, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Power, Jan (1982), pp. 83-102.
(4) 環境省，平成29年度 低温熱源活用発電技術実用化推進事業（未利用低温熱源を利用したバイナリー発電システムの開発）委託業務 成果報告書，(2017)，pp. 2-11 - 2-15.
(5) 我妻隆夫，金光陽一，高橋直彦，福島康雄，松下修己，回転機械設計者のための磁気軸受ガイドブック，日本工業出版，pp. 40-42.
(6) IHI技報 第61巻 第2号（2021年6月発行）特集 カーボンニュートラルに向かって＜https://www.ihi.co.jp/ihi/technology/review_library/review/2021/61_02.html＞(参照日 2022年4月12日)
(7) 一般財団法人コージェネ財団 機関紙「コージェネット」2021年第29号コージェネ導入事例＜https://www.ace.or.jp/web/publication/cogenet_0010/vol29/pdf/cogenet29_19.pdf＞

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

LAES液化空気エネルギー貯蔵技術
Liquid Air Energy Storage


中村 駿介[*1] 伊藤 一芳[*1]
NAKAMURA Shunsuke ITO Kazuyoshi

キーワード：エネルギー貯蔵，液化空気，廃熱利用
Key Words：Energy storage, Liquid air, Waste heat

1．緒言

従来の化石燃料を主とした電力システムは，現在，大きな転換期を迎えている。地球温暖化対策の必要性は広く認識され，化石燃料主体の電力システムから，再生可能エネルギーへの転換が進められている。Fig. 1に示すように，先進国を中心に世界の再生可能エネルギーによる発電量は急増を続けており，水力発電を除けば，その主役は太陽光発電と風力発電である。各国，2050年頃のカーボンニュートラル達成を目標に掲げており，その先陣を切る欧州では，既に電源比率に占める再生可能エネルギーの比率が４割を超える国もあるなど，再生可能エネルギーが主要なエネルギー源となっている。国内においても，2011年の東日本大震災以降，固定価格買い取り制度を追い風とし，再生可能エネルギーの導入が急速に拡大している。2021年に閣議決定された第６次エネルギー基本計画では，2030年における再生可能エネルギーの電源構成比率は36-38％と設定された。今後より一層の普及が期待される。

一方，カーボンニュートラルに向けたこの大きな転換は，電力システムにいくつかの課題をもたらしていることも事実である。これまでの火力発電を中心とした電力システムでは，需要と供給の乖離を火力発電によって調整することで，系統の安定化を図ってきた。太陽光発電や風力発電といったいわゆる変動型電源は，常に同時同量を原則とする電力系統の安定化の観点で，次のような特徴を持つ。①発電量が季節や１日の時間帯の中で需要によらず変動する。②広い敷地面積や日射・風況等の発電に適した建設地は電力需要地から離れることが多く，送電容量の制限を受ける。③系統安定化の役割を担う慣性力・同期性を持たない。これらの特徴を持つ太陽光発電や風力発電を主力電源化していくためには，合わせて系統の安定性を維持するための対策を進めることが必要になる。この点，世界各国で系統安定化に向けた様々な対策が進められているが，その中で，本報で取り上げるLAESを含むエネルギー貯蔵設備には，次のような役割が期待されている。

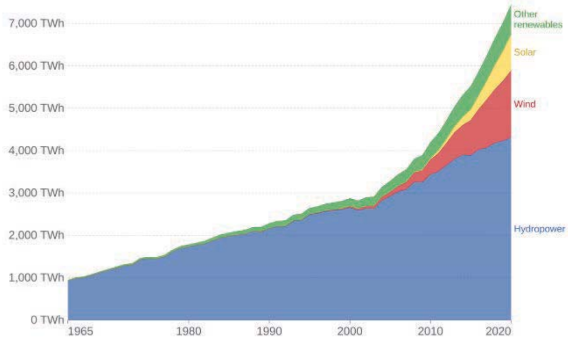


Fig. 1 Renewable energy generation, World.(1)

第一に，余剰電力への対応である。再生可能エネルギーの発電量が大きくなる時間帯と需要の落ち込む時間帯が重なると，火力発電の負荷下げ等では調整しきれず余剰電力が発生する。日中に偏って大きな発電量をもつ太陽光発電の場合，需給一致のためやむを得ず太陽光発電所の出力制御を行うことが考えられる。実際，九州地方や中国地方では，太陽光発電の出力制御が発生しているが，他方で，今後太陽光発電のさらなる拡大が進む中で，出力制御は極力避けるべき方策でもある。資源エネルギー庁は2030年断面での再エネ出力抑制算定を公表しているが，その中では九州地方や中国地方で高い出力制御が予測されること，それに対し蓄電設備の増強を含む軽減策により，出力制御は緩和可能であることが示されている(2)。このことからも，エネルギー貯蔵設備には，将来的に大きな電力量となる余剰電力を受けいれ，夕方や翌日以降の高需要時間帯に放電する機能が求められていることがわかる。このようなエネルギー貯蔵設備による調整は，今後，再生可能エネルギーを最大限活用するうえで，必須の方策と言えよう。

原稿受付 2022年５月16日
＊１ 住友重機械工業㈱ エネルギー環境事業部
E-mail: shunsuke.nakamura@shi-g.com

また，日中の時間帯に偏った発電は，スポット市場価格に大きな影響を与える。昨今の太陽光発電の増大により，３～５月の日中にスポット市場のシステムプライスがほぼ0円/kWhとなる現象が多く発生している。例として，2022年４月17日のシステムプライスをJEPXより引用し，Fig. 2に示す。この日は朝の７時頃から16時頃まで0円/kWhに近い価格で推移した。エネルギー貯蔵設備の収益性の観点から見ても，価格が極端に低い時間帯に充電を行い，夕方のプライス上昇時に放電をするサイクルが重要であることがわかる。

Fig. 2　Spot market system price example[3]

第二に，天候の変化や設備トラブル等による予定外の需給ギャップに対する，調整力としての役割である。電力需要や変動型電源の供給力は天候次第で変動するため，事前の需給予測と実需給には少なからず乖離が生じる。2021年に開設された需給調整市場は，調整力を予め用意しておくことで，効率的に需給調整を行うシステムである。需給調整市場では，数秒単位の迅速な応動が求められる調整力から，数時間単位の継続時間が求められる長時間の調整力まで，カテゴリー分けをして対応している。調整力としては，火力発電やエネルギー貯蔵設備，デマンドレスポンスなど様々である。エネルギー貯蔵設備には，蓄電池のような応動時間の早いエネルギー貯蔵設備から，LAESのような大規模かつ長時間の運転に対応可能な調整力まで，各技術の特性を生かした貢献が期待されている。

このような背景から，世界的にも，エネルギー貯蔵設備の導入が加速することが予測される。実際に，Fig. 3に示すように，2050年には世界の電力設備容量の８％をエネルギー貯蔵設備が占めるとするレポートもある[4]。すなわち，現在から2050年にかけて，約1,500GWのエネルギー貯蔵設備が導入されるという試算である。

当社は，エネルギー貯蔵分野への取り組みとして，2020年２月に液化空気エネルギー貯蔵（Liquid Air Energy Storage：LAES）技術の開発者である英国ハイビューエンタープライズ社（HVP社）に投資した。現在は，HVP社，当社子会社のSumitomo SHI FW（SFW）と共に，LAESの社会実装に向けて注力している。そこで本報では，LAESの技術概要とエネルギー貯蔵設備としての特徴，今後の展望について述べる。その中で，LAESにおける外部廃熱利用（LNG冷熱やボイラ廃熱など）がもたらす効果についても触れたい。

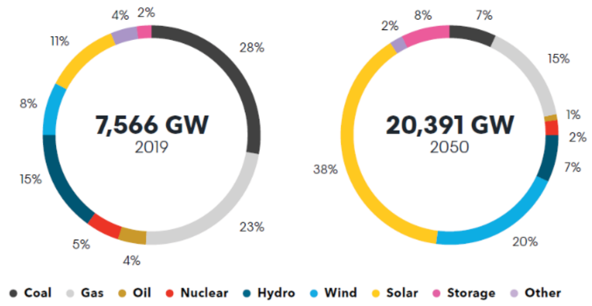


Fig. 3　Global power capacity forecast[4]

2．LAESの技術概要とエネルギー貯蔵設備としての特徴

2.1　LAESの全体像

LAESプラントは，電力を液化空気の状態で貯蔵し，電力の必要な際に液化空気を気化させ，膨張タービンを駆動することで放電する蓄電システムである。Fig. 4に示す通り，システムは，充電・貯蔵・放電の３つの工程に分けられる。充電工程は，さらに空気圧縮工程と空気液化工程に分けることができる。系統の電力によって大気中の空気を圧縮する圧縮工程と，膨張機とJT（Joule-Thomson）バルブから成るクロードサイクルによって空気を冷却して液化させる液化工程である。これらの過程で消費される電力が，LAESにより貯蔵される電力と言うことができる。貯蔵工程では，液化した空気，圧縮過程で発生した高温熱，また，放電工程で発生する冷熱を貯蔵する。放電工程では，ポンプにより昇圧した液化空気を気化させ，タービン発電機へと導いて発電を行う。この際，貯蔵していた高温熱をタービン手前で気化したプロセス空気に与えることで，プラントの充放電効率を高めている。また，液化空気の気化時に得られる冷熱は，次の充電工程において空気を冷却する冷熱として利用し，液化動力の低減を実現する。このように，発生した高温熱や冷熱の利用はLAESにとって欠かせないコンセプトであり，プラント内での熱利用を無駄なく効率的に行えるよう設計される。

各工程については，主要な機器を取り上げながら詳細を説明する。Fig. 5に，主要機器とプロセスフローを示す。

2.2　充電工程

充電工程は，系統の電力によって，取り込んだ大気を圧縮・冷却し，液化空気を製造する工程である。

大気はまず，遠心式の圧縮機により一定圧力まで昇圧される。この圧縮機はMain Air Compressor（MAC）と呼ばれる。圧縮により温度が上昇したプロセス空気は熱媒体と熱交換をして冷やされ，高温となった熱媒体は貯蔵タンクへと送られる。HVP社のLAESで用いられるMACは，一般的な圧縮機より高い吐き出し温度を求め

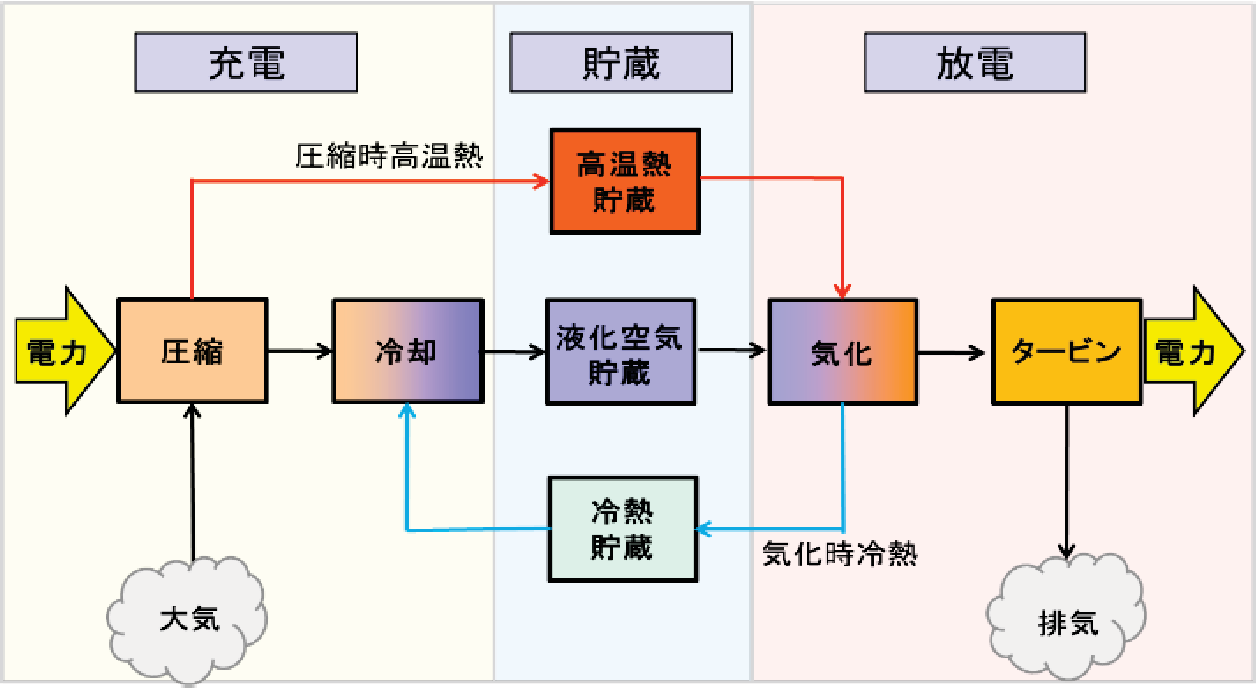


Fig. 4　LAES overview

る点が特徴と言える。圧縮機により発生した熱を極力捨てることなく，最大限回収・利用するコンセプトである。大気温度程度まで冷却されたプロセス空気は，Air Purification Unit（APU）にて水分とCO_2の吸着・除去を行う。後段の冷却過程にて，水分とCO_2が固化し各所の閉塞をもたらすことのないよう，十分に低い濃度まで低減する必要がある。その後，プロセス空気はRecycle Air Compressor（RAC）によりさらに昇圧され，再度熱回収をしたのち，主熱交換器をもつ保冷箱へと送られる。プロセス空気は主熱交換器にて，冷熱源と熱交換を行うことで液体となり，液化空気タンクにて貯蔵される。冷熱源としては，膨張機（Expander）により減圧された低温空気，放電時に回収した気化冷熱，加えて，後述するLNG等の外部冷熱が挙げられる。以上の充電工程は，空気の圧縮や冷却のプロセスが空気の深冷分離プラント（ASU）と一部重複するため，APUや保冷箱といった主機は，十分な実績のある技術を採用することができる。

2.3　貯蔵工程

貯蔵工程では，液化空気，400℃程度の高温熱，200℃程度の低温熱，および液化空気の気化冷熱が貯蔵され，必要に応じて使用される。

液化空気は，空気液化工程にて製造・分離された後，液化空気貯蔵タンクへと送られる。タンクは低温を維持するため，保温材により断熱性を高めた仕様である。

400℃級の高温熱は，充電工程にて発生し，回収され

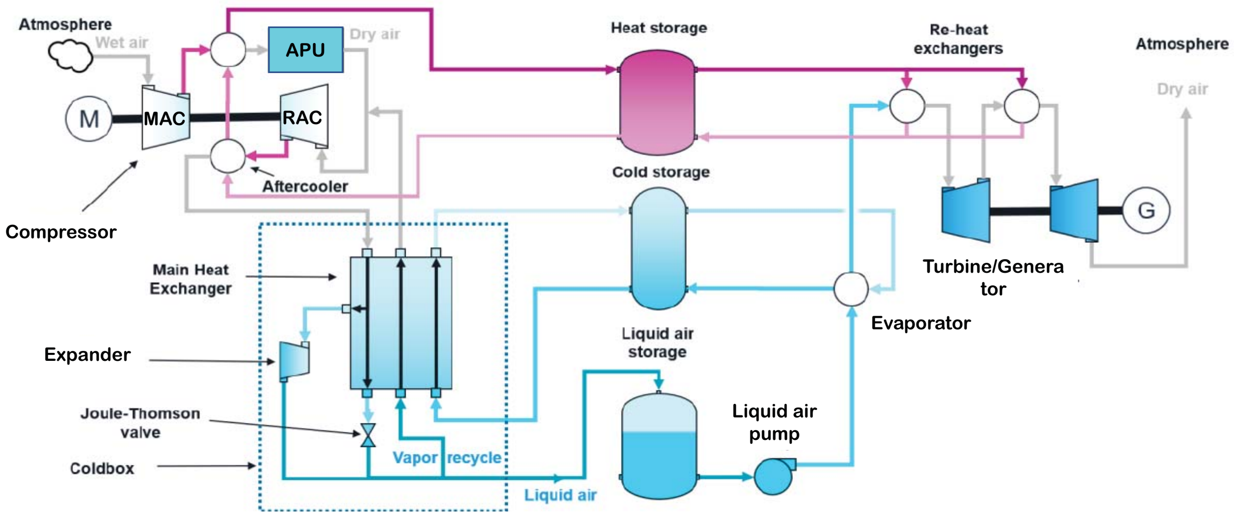


Fig. 5　Main equipment and process flow

る熱である。プロセス空気から溶融塩に熱を与えて，溶融塩を熱貯蔵媒体として熱を貯蔵する仕組みである。溶融塩による熱貯蔵は，海外の太陽熱利用プラント等で実績のあるシステムである。充電時に回収・貯蔵された高温熱は，放電時に空気を昇温するために用いられる。この高温熱の貯蔵システムはHigh Temperature Thermal Storage（HTTS）と呼ばれる。

400℃級の熱に加えて，200℃級の低温熱も充電工程にて回収される。プロセス空気から熱貯蔵媒体に熱を与え，タンクに貯蔵される。高温熱と同様に，充電時に貯蔵し，放電時に空気を昇温するために用いられる。この低温熱の貯蔵システムはLow Temperature Thermal Storage（LTTS）と呼ばれる。

冷熱は，放電工程の液化空気の気化時に回収される冷熱である。液化空気を気化する気化器（Evaporator）にて冷熱を回収し，冷熱タンクに貯蔵する。貯蔵された冷熱は，次の充電時にプロセス空気を冷却するための冷媒として用いられる。この冷熱の貯蔵システムはHigh Grade Cold Store（HGCS）と呼ばれる。

2.4 放電工程

放電工程では，まず，液化空気ポンプにより液化空気を100～150barまで昇圧する。液化空気ポンプは，高いヘッドが求められ，オイル＆ガスの分野で用いられるサブマージドポンプが想定される。昇圧された液化空気は気化器により常温まで昇温された後，空気タービンへ導かれる。空気タービンは，再熱方式を持った複数段のタービンで構成される。タービンの各段入口には，貯蔵していた200℃級，400℃級の熱をプロセス空気へ与える熱交換器が設置される。これにより，充電工程で発生した熱が放電工程にて利用され，プラントの充放電効率が高められる。タービン発電機にて生み出された電力から発電時の所内動力を除いた電力が，系統へ送電可能な電力量となる。最終タービンを出た空気は，大気へと放出される。

2.5 LAESのエネルギー貯蔵設備としての特徴

先述のシステムを有するLAESは，エネルギー貯蔵設備として下記の特徴をもつ。

① 立地の制約なく，数十～数百MW級の規模が可能

LAESは，Fig. 6に示すプラントイメージからわかるように，回転機械やタンク類が主機となる。これらは様々な既存分野で実用化・大型化を遂げてきた機器であり，その組み合わせによって成立するLAESにとって，大型化に大きな技術的障壁はないと言える。また，揚水式水力や地下空間利用型CAESと異なり，プラントの設置場所に制限がない。建設に必要な面積さえあればどこにでも設置をすることが可能であり，電力需要の大きな都市近郊を選択することもできる。

② 数時間から数日間の貯蔵期間を持つ

LAESは，充電時に消費した電力を液化空気と熱の状態で貯蔵する。液化空気タンク，熱貯蔵タンクに適切な断熱を施すことで，数時間から数日間の貯蔵期間に対応することができる。このことから，日中に太陽光の余剰発電により液化空気を製造し（充電），夕方や翌日以降の高需要時間帯に放電するといった，時間的なエネルギーシフトの能力を有する。

③ 数時間の放電継続時間を持つ

LAESは，貯蔵・放電系統のサイジング次第で，放電継続時間を比較的自由に設計することができる。緒言で述べた通り，2021年に開設した需給調整市場は，応動時間や継続時間により５つのカテゴリーに分けられている。そのうち３次調整力①および②は最も長い３時間の商品ブロック時間が設けられており，LAESはこの放電継続

Fig. 6 Plant image(5)

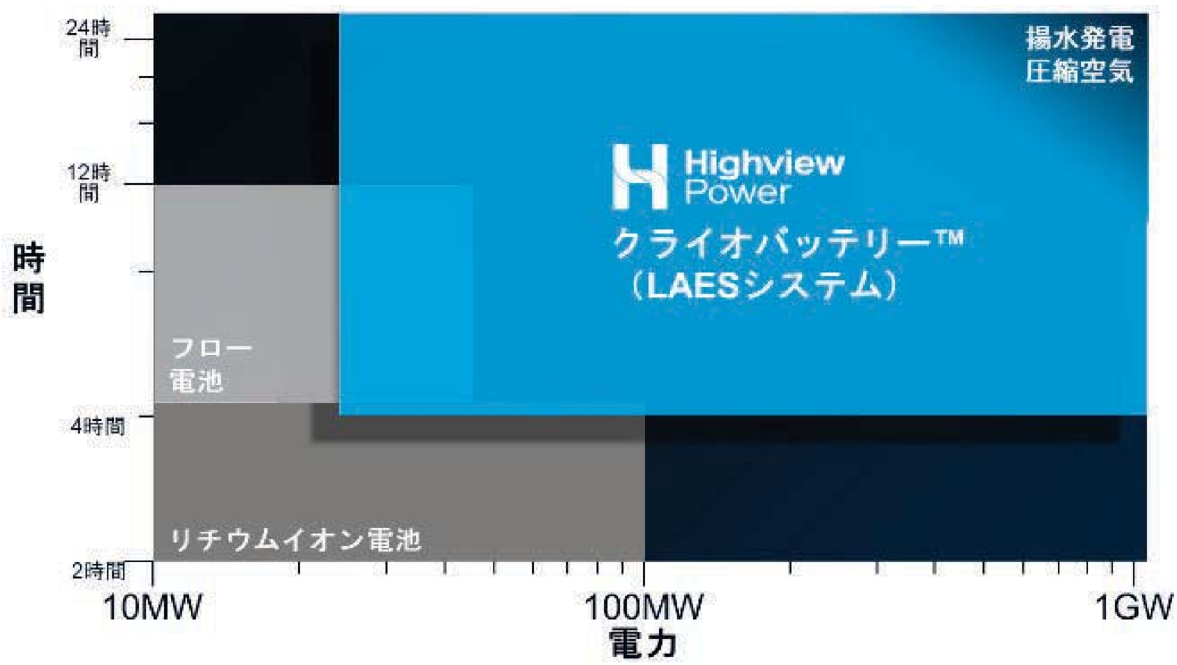


Fig. 7　Positioning of LAES in terms of discharge scale and discharge time

時間（もしくはそれ以上）に対応することが可能である。放電継続時間と出力の観点から，LAESのエネルギー貯蔵設備としての位置づけをFig. 7に示す。

④　系統へ慣性力を提供する

LAESは，そのシステムにタービンと発電機を有し，発電機周波数と系統周波数を同期させて発電を行う。タービン発電機の回転エネルギーは，系統の周波数が変動した際にその変化速度を抑える慣性力として機能する。再生可能エネルギーの導入が進む地域では，系統安定性を保つ上での慣性力の重要性と確保の方策について議論されている。

⑤　燃焼反応や有害な排ガスの発生を伴わない

LAESは，電力により空気を液化して貯蔵し，気化・膨張させることで放電をする。LAESはそのプロセスに一切の燃焼反応・化学反応を持たず，タービン発電機からの排ガスは，酸素と窒素を主成分とする乾燥空気である。空気を取り込み，空気を排出する極めてクリーンなプラントと言うことができる。

⑥　外部の冷熱・高温熱によりプロセス効率を向上可能

LAESは，外部からの冷廃熱および高温廃熱を受け入れ，利用することで熱利用効率の向上を見込むことができる。LNG等の冷熱，ボイラ等の高温廃熱を有するプラントに隣接・熱的接続をすることで，現状は有効利用をできていない廃熱をLAESにて利用する仕組みである。外部からの熱利用については，次章にて詳細を説明する。

3．LAESにおける外部廃熱利用の意味

LAESでは，そのプロセスで発生する高温熱や冷熱を廃棄せずに，いかに利用するかがプロセス効率を左右する。その特性から，外部からの廃熱を受け入れて，LAESのプロセスにおいて有効に利用することも可能である。未利用の冷廃熱や高温廃熱を持つ工場は，LAESと組み合わせることで廃熱を有効利用することができる。

現状では有効利用ができていない廃熱をいかに利用していくか，という視点は，2050年にかけて脱炭素社会を目指すうえで省エネルギーの観点から重要である。LNGの保有する冷熱，もしくは高温のボイラ廃熱等，有効利用が期待されるエネルギーは少なくない。LAESでは，冷廃熱は充電工程に，高温廃熱は放電工程に利用することができる。以下では，LAESにおける外部からの冷廃熱と高温廃熱の利用について，それぞれプロセスの視点から紹介する。

3.1　冷廃熱の利用

LAESでは，空気の液化に必要な冷熱をクロードサイクルと呼ばれる圧縮機と膨張機を用いたサイクルで生み出すことは先述の通りである。圧縮と膨張を繰り返す冷熱生成プロセスは大きな電力消費を必要とし，その際に発生する機械損失や，回収しきれない低温熱の損失等は小さくない。LNG等の外部冷熱は，この冷熱生成プロセスの負荷を低減させることに利用することができる。それにより，単位動力当たりの液化空気製造量の向上が見込まれる。LAESのプラント充放電効率の改善幅としては，LNG等の冷熱から回収可能な熱量とLAESのプラント規模に依存するが，数ポイント～10ポイント，もしくはそれ以上の向上効果が期待できる。

3.2　高温廃熱の利用

外部からの高温廃熱は，放電側での利用が想定される。タービン入り口にてプロセス空気の昇温のために用いることで，タービン発電機の単位液化空気量当たりの発電量を高めることができる。ここで想定される外部廃熱は

150℃程度であり，それ以上の温度では，より高い充放電効率が得られる。また，安定的に外部より高温廃熱が提供される場合は，充電工程から熱を回収して貯蔵するシステムを省略することも考えられる。その場合，設備コストや敷地，運転性にもメリットが出るだろう。

さらに，高温廃熱と冷廃熱の双方の利用が可能である場合，より高い充放電効率の実現が可能となる。

4．まとめと今後の展望

緒言で述べたように，電力システムは現在，大きな転換期を迎えている。再生可能エネルギーの迅速な拡大を進めるためには，エネルギー貯蔵設備を含む系統安定化の対策を合わせて進める必要がある。

LAESは，数十～数百MWの出力で数時間の放電継続が可能であり，建設地の地理的な制約を受けることもない。また，本報で述べたように，外部の冷廃熱・高温廃熱をLAESで利用できることは，LAESの大きな特徴と言えるだろう。このことから，比較的需要地に近い立地で，隣接した工場からの冷廃熱・高温廃熱を活用する形が，LAESの特徴を生かしたモデルと考える。

HVP社はこれまで，実証試験機を用いて英国のグリッドシステムにおいて，調整力として有効に機能することを確認してきた。今後，まずは既に再生可能エネルギーの普及が進む英国で，実機の稼働による系統安定化を実現していく計画である。

参考文献

(1) Our World in Data,（参照日2022年５月９日）＜https://ourworldindata.org/renewable-energy＞
(2) 経済産業省資源エネルギー庁 再エネ出力制御の長期見通しについて 2022年３月14日
(3) JEPX 取引情報 ＜http://www.jepx.org/market/＞
(4) Bloomberg NEF, New Energy Outlook 2020, Executive summary, P11.
(5) Highview Power ホームページより ＜https://highviewpower.com/technology/＞

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

ヒートポンプ関連技術の最新動向

Latest Trend of Heat Pump Related Technologies

齋藤 潔[*1]
SAITO Kiyoshi

キーワード：ヒートポンプ，性能，冷媒，DX，高温取り出しヒートポンプ
Key Words：Heat pump, Refrigerant, DX, Higher temperature heat pump

1．はじめに

2050年カーボンニュートラル実現に向けて，世界が大きく動き出したところである。徹底した省エネ，機器の性能向上，資源循環システム等ありとあらゆることをやらなければ実現できないものである。

エネルギー利用の観点から見れば，供給側では分散再エネの導入が必須となる。需要側では，すでに車に関しては，電化に向けて大きく動き出したところである。一方で，エネルギー最終利用の50％は熱といわれており[1)]，ヒートポンプ導入をはじめとした熱利用技術の転換が求められている。

ヒートポンプ技術は，電化や燃焼転換を可能とする技術であり，カーボンニュートラル実現に向けた最重要技術の一つである。例えば，国際再生可能エネルギー機関からは，2050年までにヒートポンプの普及量を10倍にすべきとの提案もなされている。ヒートポンプの普及を図ることによってCO_2排出量を１億トン以上削減するとの試算もあるほどである。

ヒートポンプ技術は，もともとは，冷凍技術から始まった技術であり，空調機器へと広がりを見せ，わが国では，家庭用給湯機への導入もいち早く進められてきた。この20年余りで700万台を超える家庭用ヒートポンプ給湯機が市場に導入された。

ヨーロッパにおいては，ヒートポンプは，再生可能エネルギー利用技術として明確に認定されたこともあり，環境対応機器として今後さらに大幅な導入が進められる状況である。いずれにしてもこれらの展開は，ヒートポンプのその優れた省エネ性によるものである。

わが国の民生用のヒートポンプの性能や普及台数は，世界的に見ても群を抜いており，ヒートポンプ先進国となっている。しかし，その加熱量は，まだわずかであり，相変わらず大半が燃焼機器に頼っている。この数倍は市場投入が可能ではないかと個人的には考えている。

産業用については，ヒートポンプは，大型化や高温化が容易ではなかったため，導入に対しては多くの制約があったが，これらの課題もクリアーされつつある。しかし，その導入はまだわずかである。通常工場における高温の熱利用では，８気圧の蒸気供給網が設置されている。温度に換算すれば，180℃近い温度となる。このレベルの温度まで取り出せるようにできるとその用途も一気に広がることとなるため，現在，200℃を目指したヒートポンプの開発も進められている。いずれにしても，民生用，産業用ともにヒートポンプの導入をさらに促進する施策を検討すべきであろう。

このようにヒートポンプ関連技術は，多方面で非常に重要な技術ではあるが，多くの問題も抱えている技術ともいえる。その一つが動作流体である冷媒の問題である。もともとは冷媒がオゾン層破壊物質として，オゾンホールを生成し，人間や動植物に有害な紫外線の量を急増させ，大きな社会問題となった。その後，オゾン層を破壊しない冷媒への転換がほぼ実現されたが，現在では，温室効果（GWP）ガスとして問題となり，二酸化炭素に比べると数千倍もの温室効果がある物質であることがわかってきた。このため，低GWP冷媒への転換が進められているところである。

また，機器の大幅な性能向上も求められている。すでに述べてきたように燃焼転換する技術としては，非常に重要技術であるが，空調，冷凍といった分野においては，エネルギーの多消費技術であることも間違いない。このため，トップランナー制度等によって大幅な性能向上が求められていることところである。

多様な技術開発も進められ，DXに向けたヒートポンプのデジタル化についても検討が進められている。これらヒートポンプ関連技術の最新の動向について解説したい。

原稿受付 2022年５月10日
＊１ 早稲田大学
〒169-8555 新宿区大久保３－４－１
E-mail: saito@waseda.jp

2．動作流体である冷媒の課題

冷媒については，長年この分野での最大の課題となっており，カーボンニュートラルを実現するためにも早急に解決すべき課題の一つである。もともとは，Fig. 1の冷媒の変遷に示すようにオゾン層破壊を防止するために，特定フロンとしてのCFC, HCFC系冷媒の消滅を図り，代替フロンとしてのHFC系冷媒への転換を進めてきた。

しかし，このHFC系冷媒ですら地球温暖化物質であることが判明し，削減対象となっている。政府は総量規制を実施するとともに，ユーザーにも冷媒回収違反に直罰をかけ，その削減に取り組んでいる。モントリオール議定書キガリ改正によって，2036年までの85%削減達成に向け，激しい駆け引きが展開されている。

現状では，冷媒については，可燃性のあるHFO系冷媒を中心として検討が進み，HFO系冷媒の弱点を補うために冷媒の混合も進んでいる。この次世代冷媒は，比体積が大きかったり，非共沸化するため，圧力損失が増大したり，伝熱性能が低下するなど，基本的に熱力学的性質がよくない物質が多く，機器が大型化する等の大きな問題を有している。冷媒の低GWP化と機器の性能向上が相反するような状況となってきており，機器開発側を非常に悩ませているところとなっている。

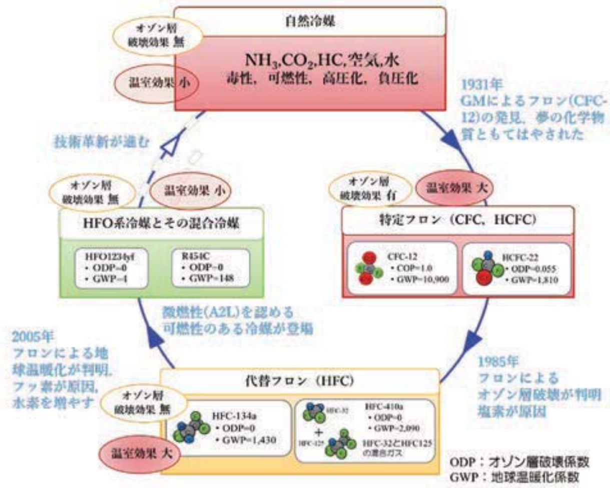


Fig. 1　Transition of refrigerant

一方で，冷媒量そのものの 規制は順調に進んできたが，冷媒の回収がなかなか進んでいかない。機器自体が冷媒回収を意識した設計と十分にはなっていない中でノウハウに頼りながら，手作業で冷媒を回収している状況であり，2030年までに現状の40%程度から70%にまで回収量を増大させることは困難である。

機器側でも冷媒回収が行いやすい機能を導入しようとしても製品の販売促進に直結するところではないため，開発へのモチベーションもわきづらい。冷媒の回収を容易とするような開発へ政府からの規制やインセンティブが必要とされるところである。

3．機器性能の評価方法の課題

エアコンにおいては，熱交換器や圧縮機といったデバイスの性能向上だけではなくオンオフ運転されていた圧縮機へのインバーター技術の導入により，運転条件に見合った機器の連続運転制御が可能となり，大幅な性能改善がなされてきた。すでにデバイスでの性能向上は限界に達している中で，制御性能については，まだ大幅な改善の余地がある。

例えば，空調負荷が小さい場合には，インバーターで圧縮機の連続的な駆動ができず断続運転となり，機器性能は大きく低下する。建物の断熱化も進んできたことにより，空調負荷が低下し，断続運転の発生頻度が大幅に増大している。

このようにエアコンの使用実態が大きく変わり，機器の性能向上への課題がデバイスから制御へと変化しているにもかかわらず，いまだ機器の使用実態や実使用下における実運転性能はよくわかっていない。機器の実運転性能を評価する手立てがないことが本質的な性能向上を妨げている状況である。

このような状況の中，ドイツからは，機器の実運転性能を把握する動的性能評価法が提案されてきた。ドイツからの提案では，性能評価を簡素化するために，現行の規格で採用されているような圧縮機の回転数を固定することなく，機器の性能を評価することが求められている。これによって機器の本質的な性能が見えてくる。一方で，機器の動的性能は，建物の熱容量等に強く影響を受けるため，建物の状態を同様にしなければならないが，機器性能を測定する環境試験室は，大きさや壁の厚さ等が大きく異なったものとなる。ドイツからの提案でも機器の再現性ある実運転性能を把握することは困難であることが分かってきている。

早稲田大学からは，Fig. 2に示すように空調負荷をエミュレーター で仮想的に計算しながら機器の実運転性能を把握するハイブリット実運転性能評価装置が提案されている。ここでは，エアコンの吹き出し空気の状態を入力として，エアコンの吸い込み空気の状態を計算し，その状態を条件発生器で瞬時に生成し，エアコンの吸い込み側に送る。この吸い込み空気条件のもと機器性能を

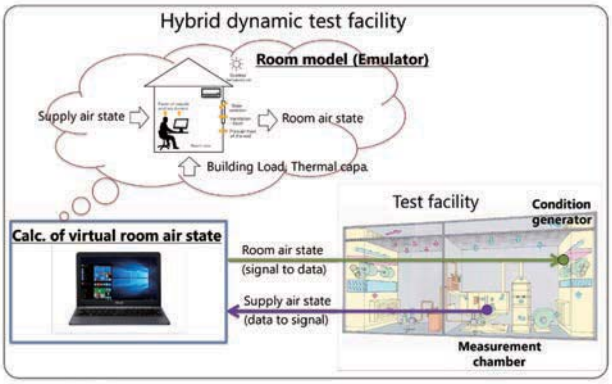


Fig. 2　Concept of actual dynamic performance test

測定する。これを時々刻々と繰り返していけば，仮想的な空調空間の中での機器の非定常な実運転性能の把握が可能となる。

この最大のメリットは，仮想空調空間の計算を行うエミュレーターを共有すれば，構造が異なるどのような環境試験室を用いても，再現性ある形で機器の非定常な実運転性能評価が可能となることである。世界の生活様式や気象条件にも合わせた評価も容易に可能となる。

これによって，Fig. 3に示すように機器が低負荷で断続運転している運転状態や性能が取得できることが確認できている。これについては，NEDOプロジェクトにおいて現在進行形で検討を進めているところである。

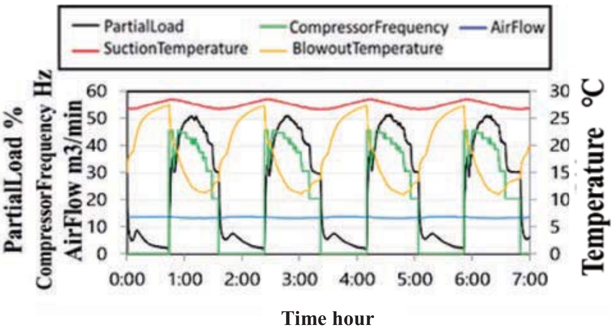


Fig. 3　Intermittent driving of air-conditioner

このように機器の実運転性能の解明が進み，低回転数領域でも連続運転が可能となるような圧縮機や圧縮機を複数台接続すること等による圧縮機の連続運転可能域の増大の検討等が進み，機器の大幅な性能が実現されることが期待されている。

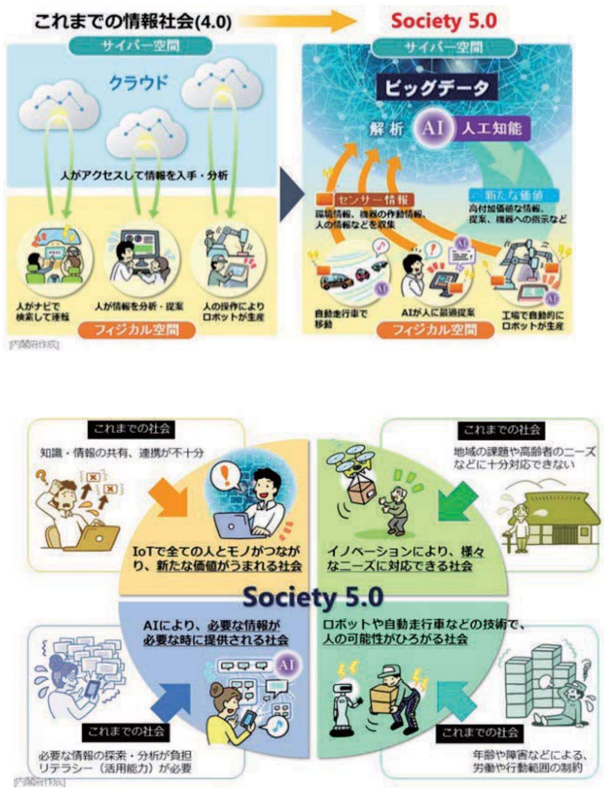
4．デジタルトランスフォーメーション

各方面でデジタル化に向けた動きが一気に加速している。我が国は，インターネット技術等で他国に大きな後れを取った。そこで，AI化やIoT技術導入に対しては遅れをとらないように政府としてもFig. 4に示すような「Society5.0」実現のために様々な支援を進めているところである。

エネルギー関連では，HEMS, BEMS, CEMS等エネルギーマネージメントのサービスも多様化している。これによって，多様な機器の運転が集約された形で，効率よく運用されることが可能となってきている。一方で，省エネ性や利便性がうたわれてもその有効性を検証する手立てがない。このような状況が続くと結局，本当に良いエネルギーマネージメントサービスが広がらず，結果的に国際競争力を失っていくと考えている。早急に対策を立てることが必要だと考えている。

ヒートポンプ関連技術においては，空調や給湯分野においてすでに学習制御や，人感センサーの導入も進み，自動運転も確実に進化している。一方で，ほとんどのエアコンで使い勝手の悪い従来型のリモコンで機器を運転制御する方式はなんら変わっていない。スマートフォンを活用した機器運転等簡単な技術の革新が進んでいないことも事実である。

ヒートポンプ技術のようなアナログ的なハードウエアを必要とされる領域では，我が国は引き続き世界に対して強い競争力を維持できると期待している。一方で，ソフトやシステム化のところでは常に後塵を拝してきた。ヒートポンプ関連技術のような熱利用技術とデジタル化は一見結びつかないようなところかもしれないが，デジタル化やIoTなどが機器の技術革新をけん引するとも考えている。



内閣府ホームページより
Fig. 4　Society 5.0

例えば，AIの活用によって冷媒漏えいを早急に探知することが可能となれば，機器ごとに冷媒管理をすることも可能となるであろう。複数設置されているヒートポンプ関連機器の統廃合や再エネ導入を促進させることも可能であろう。食品物流において食品を低温に保つ技術群としてのコールドチェーンの中では，流通のデジタル化とともにエネルギーや冷媒に関連する情報も付加できれば，サプライチェーン全体としてのCO_2排出量の削減や冷媒の低GWP化にも結び付くと考えている。

日本が得意としてこなかったシステム化技術こそがカーボンニュートラル実現のキーとなるため，乗り遅れることがないよう技術開発を進めることが必要である。

5．家庭用ヒートポンプ

2000年初頭から販売がスタートした家庭用ヒートポンプ給湯機は，すでに700万台が市場投入されてきた。一方で，家庭用の給湯では，相変わらず80％以上が燃焼による加熱である。ヒートポンプ給湯機のさらなる普及促進が期待されているが，現状の二酸化炭素を冷媒とした給湯機がコスト高であること，さらには現行のタンクが大きすぎることや加熱速度が遅いこと等でマンションには導入できないことが，普及促進を妨げている。これらの状況を打破する新しいヒートポンプ給湯機の開発が進められることが期待されている。

二酸化炭素排出量を削減するために各方面で努力されているのになぜ冷媒に二酸化炭素を用いるのかと疑問を持たれる方もいるかもしれない。エアコンで用いられているフロン冷媒は，GWPが二酸化炭素の数千倍にもなるものが多く，自然冷媒としての二酸化炭素を用いることは，好ましいこととなる。

ただし，二酸化炭素を冷媒として用いると高圧側が超臨界状態となるため，10MPaを超える高い圧力となる。この圧力に耐えうるように機器を開発する必要があるが，エアコンなどでは，このような高圧にはならないため，技術開発が容易ではなかった。このため，その技術開発にいち早く成功した日本でこの技術が一気に発展してきたところである。

冷媒として二酸化炭素を用いると高低圧差がエアコンと比較すると非常に大きくなる。このため，従来のエアコンの圧縮機をそのまま用いることができない。形態としては，エアコンと同様にスクロール型やロータリー型が用いられるが，多くの技術開発がなされ，Fig. 5に示すようなコンパクトで高性能な機器が開発されてきた。同様に高温側は，超臨界となるため，冷媒側も大きな温度変化を伴うこととなる。このため，新しい熱交換器も多々開発されたところである。

一方で，二酸化炭素を冷媒とした給湯機器にこだわりすぎると，ガラパゴス化し，世界の給湯市場に乗り遅れるのではないかと心配されている。このため，二酸化炭素以外の新しい冷媒を探すことも重要となっている。

ここにきて家庭用ヒートポンプ給湯機の使い方が大きく変わるかもしれない。再生可能エネルギーの導入が急速に進み，九州では電力の80％近くが再生可能エネルギーで賄われた日も出てきている。しかし，あまりにも急激に導入が進んでいるために，その変動を揚水発電で吸収しようとしたが，限界を迎えつつあるようである。

再生可能エネルギー導入を制限すらしなければならない状況になりつつある。ヒートポンプ給湯機は，これまで安価な夜間電力を活用するために貯湯槽を設け，夜間にお湯の生成と貯湯が行われてきた。今後の再生可能エネルギーの急激な導入に対しては，ヒートポンプ給湯機によるお湯の生成と貯湯を昼間に行えば，その急激な増加を吸収することが可能となる。

https://www.denso.com/jp/ja/products-and-services/consumer-products/ecocute/technology02/
Fig. 5 Scroll type compressor for CO_2 heat pump water heater

需給変動は，蓄電池に期待されているが，電気自動車や蓄電池の急激な導入が進むと，材料費のコストアップ等を招き，導入が困難になることすら予想されている。貯湯であれば，それほどのコスト高を招くこともないため，電力需給安定化の切り札ではないかと考えられている。

ヒートポンプは，熱源温度と出湯温度の差が大きいと消費電力が大きくなる欠点があり，同時に，急な沸き上げも苦手としている。このような欠点を補い，ヒートポンプ給湯機とガス給湯器の長所を生かしたハイブリッド機も開発されている。ここでは，冷媒として炭化水素やR32を用いたヒートポンプ給湯機器も開発され，高い効率を実現している。電力とガスの自由化が進んでいる中では，このような発想の転換も必要であろう。

6．産業用ヒートポンプ

産業用のヒートポンプでは，下記のような理由から，これまでなかなか導入が進んでこなかった。

- ヒートポンプ自体の大型化が容易ではないこと
- 高温の熱を取り出すことができないこと
- 空気熱源では不十分であるため，何らかの熱源が必要なこと
- 熱源と取り出し温度の昇温幅が大きすぎれば，かえって増エネにもなりうること
- ボイラーと比較してコスト高であること

しかし，産業用にも高効率なヒートポンプを導入することの重要性がようやく認識され始め，様々な動きが始まっている。

例えば，未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合が設立され，Fig. 6に示すように200℃を取り出すことができるヒートポンプの研究開発が進められている[2)]。ここでは，冷媒の探索から始まり，新規の遠心式圧縮機の開発まで進められている。ヒートポンプでは，これまで圧縮機冷凍機油の特性や冷媒の耐熱温度等の課題により，サイクルとしては，120℃程度までしか取り出すことができなかったが，200℃まで取り出すことができれ

ば，その適用範囲は大きく広がる可能性がある。

ヒートポンプ高温化実現のカギは，やはり圧縮機ということになる。ヒートポンプでは，非常に広範囲の負荷変動に対して，高性能に機器を駆動することが求められる。圧縮機は，小型の分野では，スクロール型，ロータリー型がよく用いられるが，大型では，スクリュー式や遠心式が用いられてきた。このような高温取り出しに必要な圧縮機が開発される必要があり，現在，Fig. 7に示すように高温ヒートポンプ向けの新たな遠心式圧縮機の開発が進められている。

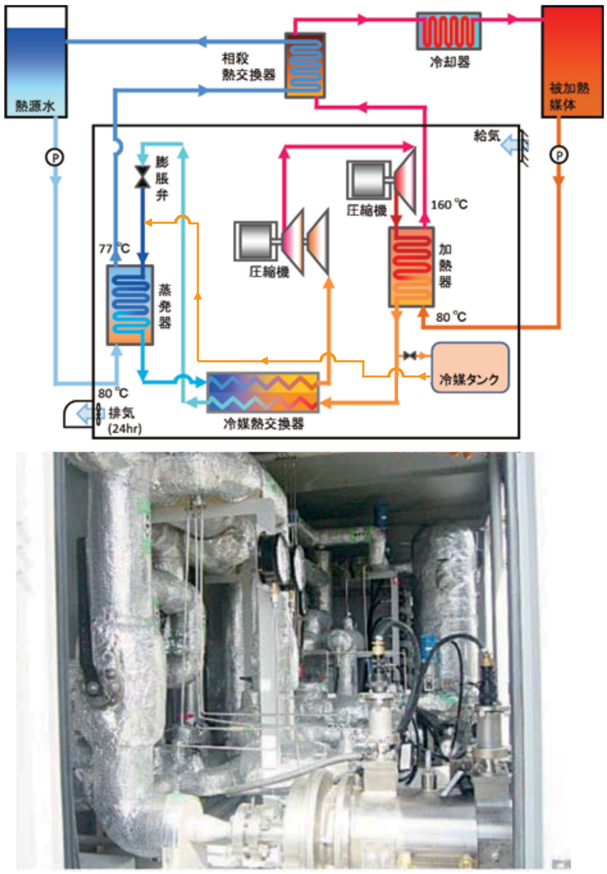


Fig. 6 Higher temperature heat pump

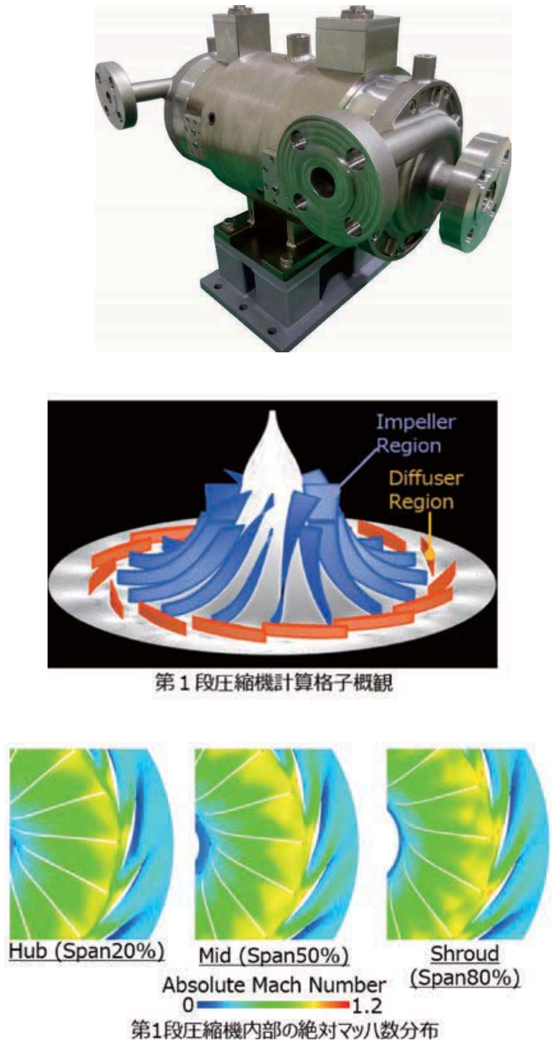


Fig. 7 Development of centrifugal compressor

これらは，蒸気圧縮式のヒートポンプに関するものである。ヒートポンプには，吸収式と呼ばれるものがある。こちらは，圧縮機で冷媒を圧縮するのではなく，吸収溶液の化学反応を熱的に操作することにより，事実上の冷媒の圧縮操作の役割を果たす機器である。

Fig. 8 に示すように冷媒は蒸発器において駆動熱源である90℃程度の温水により加熱され蒸発し，吸収器で吸収される。吸収器ではこの冷媒が吸収されるが，吸収熱により被加熱流体が加熱され，120℃程度の蒸気を生成することが可能となる。冷媒を吸収した吸収溶液は，希溶液となる。吸収溶液を予熱するために，溶液熱交換器が設置されている。

再生器では，駆動熱源となる温水により吸収溶液を加熱し，希溶液から冷媒を再生する。そして再生された冷媒蒸気は凝縮器に送られ，冷却流体により冷却され，凝縮する。再生された濃溶液は吸収器に送られる。再生器から吸収器へ吸収溶液が送られるときにポンプが用いられる。冷媒である凝縮液もポンプによって高圧側の蒸発器へ送られる。このようにして吸収サイクルが成立している。

これは，第二種吸収ヒートポンプと呼ばれるものであり，結果的には，わずかなポンプ動力で90℃程度の温水から120℃程度の水蒸気を生成することが可能となる。NEDOのプロジェクトとして早稲田大学と荏原製作所が開発を行った最新機では，90℃程度の温排水から，180℃の水蒸気の生成が可能となっている。

7．今後のヒートポンプの展開

家庭用のヒートポンプの給湯機器の導入が頭打ちになりつつある。また，産業のヒートポンプの導入もまだまだ不十分な状況である。ヒートポンプは，ボイラーに比べれば圧倒的に二酸化炭素排出量が少ないため，積極的な導入が期待されるところである。何らかの国からの支援も必要な状況であろう。

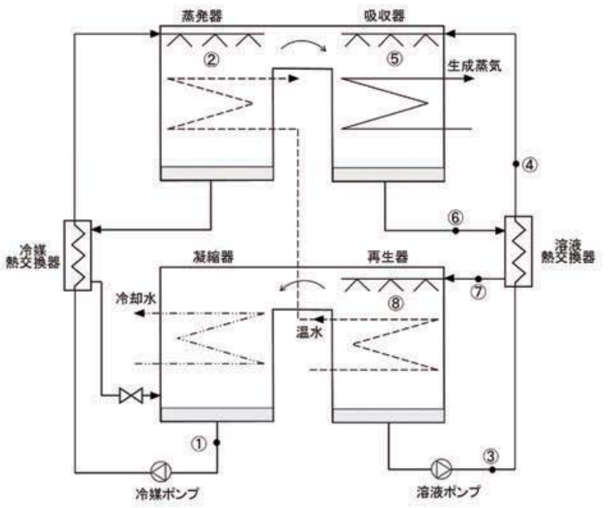


Fig. 8　Absorption heat transformer

また，ヒートポンプの導入事例の積極的な情報提供も必要であろう。産業界では，導入された機器の運用情報の開示をためらうことがしばしばあるが，ヒートポンプの普及促進を図るには必要不可欠な情報である。皆様のご協力をお願いしたいところである。

ヒートポンプとしては，蒸気生成，温水生成，温風生成が進んできているが，今後さらに次のような使い方を広めていくことが重要であろう。

・冷温熱同時取り出し

食品プロセス等で冷却と加熱が必要なプロセスが存在する場合，従来であれば，チラーとボイラーが別々に導入されてきた。ヒートポンプは，一台の機器で冷却と加熱を同時に行うことができる。このようにヒートポンプを活用すれば，二酸化炭素排出量の削減効果をもたらす。冷却負荷と加熱負荷のバランスをどのように取るのかが課題となるが，蓄熱等によりこれがうまくできれば，究極のヒートポンプの使い方ともいえる。

・地中熱利用ヒートポンプ

ヒートポンプを導入する際には，熱源をどのようにするのかたびたび課題となる。地中熱を使うことができれば，ヒートポンプの可能性を大きく広げることとなる。あまり無理に使おうとすると，かえって増エネになることもありうるので，引き続き十分な検討が必要である。

・システム統合化

給湯機や冷蔵庫，暖房，地中熱を水配管で接続して，ヒートポンプ給湯機や暖房の熱源や冷蔵庫の放熱減として一括して有効に用いるシステムも提案されている。ここでは，昼は太陽エネルギーからの電力でヒートポンプを駆動し，余剰分は，地中に蓄熱する。夜は，地中熱を活用してエアコンやヒートポンプ給湯機を駆動するシステムである。単体のシステムでは，効率向上に限界も見えてきているため，このようにシステムを統合してエネルギーマネージメントシステムにより，省エネルギーにつなげることがますます重要となる。

8．おわりに

ヒートポンプの導入が国内では，積極的に進められてきたが，まだ，大きな市場拡大の余地が残されている。今後求められる地球温暖化物質排出削減量は，想像を絶するものである。従来の延長線上ではない新たな方法を検討していかなければ，2050年にカーボンニュートラルは実現しないであろう。

ヒートポンプについてもその開発だけでなく，活用方法も含めて産官学での取り組みが必要不可欠である。スマート化も進められている。ヒートポンプ単体としての運転だけでなく，住宅や産業プロセストータルとして総合的にその最適な運用も考えていくことが求められるであろう。

2050年は，まだ先のようですぐそこであるとの認識を持つことが必要であると考えている。研究開発だけではなく，ユーザーの皆様がヒートポンプの導入や地球温暖化物質排出量削減に必要な情報を積極的に提供していく予定である。

参考文献

1）NEDO, 熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて,技術戦略研究センターレポート，Vol. 101, 2020年11月.

2）工藤瑞生, 産業用高効率高温ヒートポンプの開発，冷凍, 第96巻第1121号, 2021年５月号, pp. 214-218

論説◆解説

特集：カーボンニュートラルに向けた低温排熱利用技術

CO_2脱着に低温排熱を有効利用するCO_2回収技術（Kawasaki CO_2 Capture）の開発

Development of Kawasaki's CO_2 Capture Technology Applying Low-temperature Heat for CO_2 Desorption

沼口 遼平＊1
NUMAGUCHI Ryohei

キーワード：低温蒸気再生，固体吸収材，二酸化炭素回収・貯留，燃焼後排ガス回収，直接空気回収
Key Words：Low-temperature steam regeneration, Solid sorbent, Carbon capture and storage（CCS）, Post-combustion capture, and Direct air capture（DAC）

1．緒言

二酸化炭素（CO_2）に代表される温室効果ガスの排出抑制は，あらゆる産業において求められる喫緊の課題である。我が国においても，2020年10月26日の菅首相の所信表明演説にて「2050年カーボンニュートラル，脱炭素社会の実現を目指す」ことが宣言され，これまで以上に脱炭素の流れが加速している。

CO_2の排出削減は，省エネ技術の導入や，化石資源から再生可能エネルギーへの転換によって進んではいるものの，2050年までの脱炭素社会の実現のためには，既設の産業プラントから排出されるCO_2の回収・貯留（Carbon capture and storage, CCS）も行う必要がある[1]。特に，燃焼後排ガス回収技術（Post-combustion capture, PCC）は既設の設備の排ガス出口に後付けでCO_2回収設備を設置可能な技術であり，炭素排出量の少ない燃料への代替や純酸素燃焼技術よりも適用が容易であることから，火力発電所，製鉄所などの大規模排出源に対しては，今後広く普及すると期待される。一方，近年新たに注目されているCO_2回収技術として，直接空気回収（Direct air capture, DAC）が挙げられる。これは，すでに大気中に排出され，温室効果を発現させているCO_2を直接的に除去する技術であり，大気中のCO_2の減少（ネガティブエミッション）を実現可能である。本技術の適用方法の一つとして，空気中からのCO_2除去量を炭素排出権取引に利用することで，工場等で排出されるCO_2を相殺することが可能である。分散的な排出源，例えば小規模工場における熱電併給タービン等に対しては，個々にCO_2回収設備と，液化器，配送ローリーまたはパイプラインを設置するとコスト上の不利が大きく，PCCの適用は難しい。そのため，排出権取引を利用したDACによるCO_2排出量の相殺は，小規模な燃焼設備に対する脱炭素の有力な手法となりうる。現在，欧米で複数のスタートアップ企業がDAC技術の実用化を進めている[2]。

当社は現在，PCCおよびDACの両方をターゲットとして，固体吸収材を用いたCO_2回収技術（Kawasaki CO_2 Capture, KCC）を開発している[3-5]。KCCにおいては，60℃程度の低温排熱を用いた運転が可能な点が特徴であり，従来よりも省エネなCO_2回収が可能である。本稿では，KCC技術の概要と開発状況を説明する。

2．Kawasaki CO_2 Captureの概要

当社では，1980年代よりKCC技術の開発を進めてきた。当初は，宇宙船などの閉鎖環境用において，呼吸により空気中に排出され，健康被害の原因となるCO_2（濃度1000-5000ppm）を除去することが目的であった。2000年代からは地球温暖化対策として，本技術をPCC（CO_2濃度５-30％）に適用すべく開発を進めてきた。そして2019年からはさらに，DAC向け（CO_2濃度400ppm）にも開発を進めている。ターゲット毎に回収するCO_2の濃度が異なるが，いずれにおいても固体吸収材と呼ばれる材料を用い，これに吸着させたCO_2を取り出す際に低温蒸気を用いる点が共通している。本章では固体吸収材および低温蒸気再生について紹介する。

2.1　固体吸収材について

従来のCO_2回収技術では，アミンと水からなる吸収液が用いられており，吸収液に排ガスを吹き込んでCO_2を液中に溶かしこんだ後，CO_2含有吸収液を加熱してCO_2を液中から放散させ，気体として回収する。

一方，当社KCCシステムで用いる固体吸収材は，アミンを多孔質基材の細孔内部に担持させた材料である（Fig. 1a）。アミンはアミノ基を持つ物質群の総称であり，CO_2回収目的で用いられるものの多くは液体であ

原稿受付　2022年５月17日
＊1　川崎重工業㈱　技術開発本部　技術研究所　エネルギーシステム研究部
〒673-8666　明石市川崎町１-１
E-mail: numaguchi_ryohei@khi.co.jp

る。固体吸収材においては，アミンは細孔の表面張力で細孔内部に安定に保持されているため（Fig. 1b），自発的にアミンが流出することはなく，見かけ上はドライな固体である。そのため，一般的な吸着材と同様の乾式プロセスを構築可能である。また，CO_2の吸収機構として，吸収液と同様にアミンとCO_2の化学反応を利用しているため，活性炭などを用いる物理吸着プロセスと比べ高いCO_2回収純度を実現可能である。

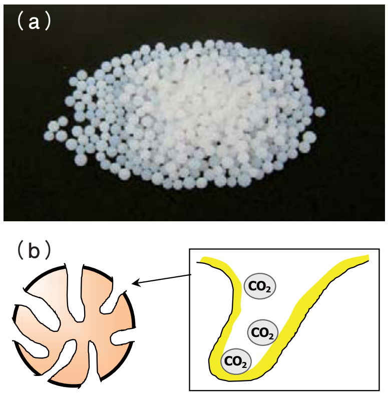


Fig. 1 （a）Solid sorbent particles　（b）structure of sorbent

2.2　低温蒸気再生について

固体吸収材を用いたCO_2回収は，吸収工程と脱離工程の２工程からなる（Fig. 2）。吸収工程では排ガスまたは空気などのCO_2含有ガスを，固体吸収材を充填したカラムに通気させることで，アミンとの反応によりCO_2を選択的に吸収させ，固体吸収材に十分なCO_2を蓄積させる。その後の脱離工程において，減圧蒸気を供給することで吸収材を加熱し，CO_2をアミンから放散させ，気体として回収する。ここで使用する減圧蒸気は20 kPa（abs）程度でよく，60℃程度の熱源で生成できる。

従来の吸収液法でCO_2脱離に用いる熱源は120℃程度の温度であり，火力発電所に適用した場合は，発電サイクルの中段から蒸気を抽気する必要があることから，発電効率の低下を招くことになる。一方，KCCシステムでは60℃の熱源でよいことから，復水器で冷却・液化される直前の蒸気を利用でき，発電効率低下を抑制できる。また，火力発電以外の産業についても，低温熱源ほど未利用のまま廃棄されているのが現状であるため，KCC技術は排熱の利用ポテンシャルの高いCO_2回収といえる。

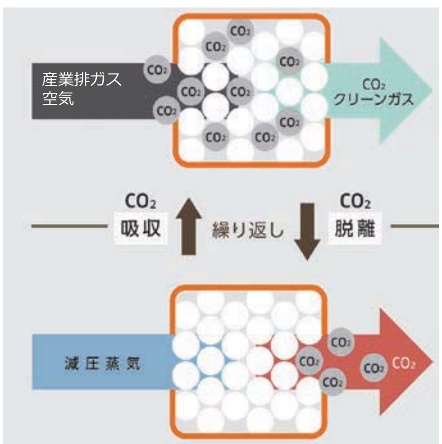


Fig. 2　CO_2　capture operation using solid sorbent

3．燃焼後排ガス回収技術の開発

3.1　移動層システム開発

固体を用いる乾式プロセスとしては，固定層，移動層，流動層などのシステムが考えられるが，当社では，燃焼後排ガス回収向けには移動層システムを採用し開発を進めている（Fig. 3）。

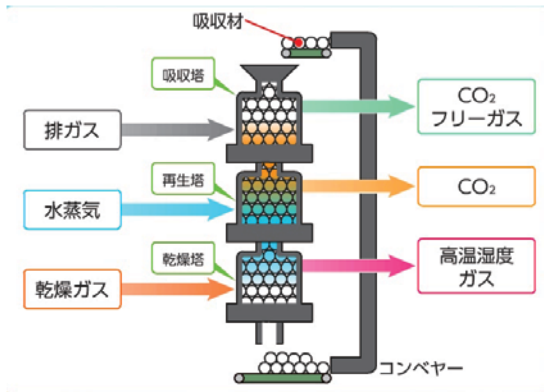


Fig. 3　Schematic diagram of KCC moving-bed system

まず吸収塔においては，固体吸収材が頂部から供給され，塔底へと一定速度で降下する。そして排ガスが底部から頂部へと流れることで，気固が対向流で接触し，気相中のCO_2が固体吸収材へと吸収される。固体吸収材は底部から排出され，再生塔へと輸送される。再生塔内では蒸気との接触によりCO_2が固体吸収材から脱離し，塔頂から高純度CO_2ガスとして回収される。そして，再生塔で水分を吸収した固体吸収材を乾燥塔へ輸送し，乾燥空気に接触させることで水分を除去する。最後に乾燥塔から排出された固体吸収材をコンベアで持ち上げ，再び吸収塔に供給する。

このような運転方式をとることで，固体のプロセスで採用されることの多い固定層システムと異なり，定常運転が可能である。また，使用する固体吸収材は劣化により交換が必要となる部材だが，その交換も循環する吸収材の一部の抜き出し・補充をすればよいことから容易である。また，火力発電所は出力調整のため発電量が一日の中でも変動する。そのような変化に対しても，固体吸収材の循環速度を変えることで容易に追従できる利点を持っている。

本システムの開発にあたり，ベンチ試験設備を当社明石工場内（兵庫県明石市）に設置し，試験を実施している（Fig. 4a）。典型的な試験結果をFig. 4bに示す。約

13％のCO_2を含む排ガスからCO_2が回収され，吸収塔出口では３％程度にまで低減されていることがわかる。また，1.5時間にわたって一定速度でCO_2が回収できており，安定的な運転が可能なことも確認できた。

本システムは，社内での開発を進めつつ，並行して国からの委託事業内での開発を進めている。以降はその事業の概要および進捗状況について説明する。

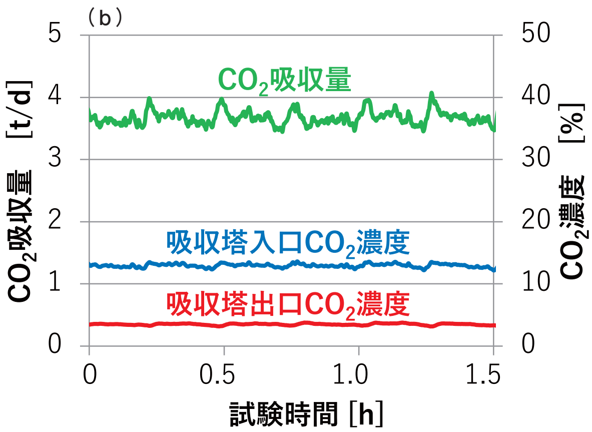


Fig. 4 Bench-scale test equipment of KCC moving-bed system
（a）test site （b）typical CO_2 capture result

3.2 舞鶴発電所における実証試験

当社では，2012年にKCC移動層システムのベンチ試験設備を明石工場内に設置し，自社にて開発を進めるとともに，2015年度からは経済産業省事業「二酸化炭素回収技術実用化研究事業」（2018年度から新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に移管）において，地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発した高性能吸収材を本機に導入した試験を実施してきた。そして，2020年度からは，NEDO委託事業である「先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」において，パイロットスケール試験設備の詳細設計を行い，現在は関西電力株式会社の舞鶴発電所内に試験設備を建設中である（Fig. 5）。2022年度に建設および試運転を終了し2023-2024年度にCO_2の分離回収の実証試験を実施する。

Fig. 5 Schematic and picture of KCC pilot-scale test facility (Picture by Kansai Electric Power Co., Inc.)

3.3 米国ワイオミング州における環境影響評価試験

吸収液法では，処理ガスに帯同して，吸収液のミストや，出口ガスに含まれる揮発成分として，アミンやその分解生成物が流出することが知られている。固体吸収材におけるアミン流出の有無について調査するため，環境省から一般財団法人石炭フロンティア機構（JCOAL）と当社が委託された「環境配慮型CCUS一貫実証拠点・サプライチェーン構築事業」の一部として，揮発成分の評価及び環境影響評価を実施している。

アミンは水に溶解して水生生物への毒性を発現するなど，それ自身として環境負荷を示す。また，ガス中の不純物との反応により，ニトロソアミン等の発がん性物質等を生成すると言われている。そこで，KCCシステムから排出される微量成分について，化学種の同定および揮発量の定量を目指し検討を進めている。

本事業では，KCCシステムをアメリカ合衆国ワイオミング州にあるIntegrated Test Center（ITC）に試験設備を建設し，ここでCO_2回収試験を実施しつつ，テールガスの分析を行って飛散物の成分分析を行う（Fig. 6）。また，ITCの施設近辺で環境モニタリングを行い，広域での分析も実施する。2022年度に建設を開始し，2023年度に試験を実施する予定である。

Fig. 6 Integrated Test Center annexed coal-fired power station

4．直接空気回収技術の開発

当社は2019年よりDAC技術の開発を開始し，2021年度までの３年間にわたり環境省より委託を受け，「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業委託業務（低濃度二酸化炭素回収システムによる炭素循環モデル構築実証）」を実施した。本章では環境省事業の成果と，今後の実用化の展望を説明する。

4.1 環境省事業における検討

環境省事業においてはDACを用いてCO_2を回収し，得られたCO_2から有価物を生成する，炭素循環社会のモデル構築を実施した。

DACの実現のためには，まず，400ppmという低濃度のCO_2を効率よく回収できるアミンの開発が重要となる。また，燃焼排ガス回収（CO_2濃度5-13%）と比べ，同量のCO_2を回収するために100倍以上のガスを処理する必要があるため，アミンの揮発性抑制が必要となる。そこで当社は，早稲田大学先進理工学部化学・生命化学科鹿又研究室と共同で，新規な構造を持つDAC用アミンの開発を行った。

また，システムについては，まず当社が燃焼排ガス向けで採用していた低温蒸気再生がDACにも適用可能か，その概念実証を行った。CO_2回収規模0.5 kg/dの概念検証機（Fig. 7a）を作製し，新規開発した固体吸収材を用いて試験を実施した。その結果，DACのCO_2濃度においてもCO_2吸収工程と再生工程からなるサイクル運転を行うことで，目標回収量が得られることを確認でき，60℃の低温蒸気でCO_2回収が可能なことを実証した。先行するDAC技術においては，再生の熱源は90℃以上が必要とされているため，KCC技術はDACにおいても省エネ性に優れることが確認できた。そして，本試験で得られたデータをもとに5 kg/dayスケールの小型実証機（Fig. 7b）を2021年度に当社明石工場（兵庫県明石市）に作製し，外気を組成，温湿度の調整なしにそのまま実証機に供給した試験を実施した（Fig. 8）。1000時間にわたり，継続してCO_2を回収できていることがわかる。吸収量が外気温変化に連動しているものの，システムとしては安定に運転できることが実証できた。

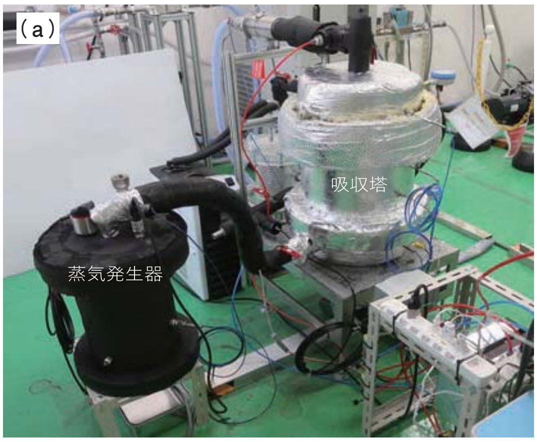


Fig. 7 (a) Proof-of-concept test equipment (0.5 kg/d)
(b) lab-scale demonstration equipment (5 kg/d)

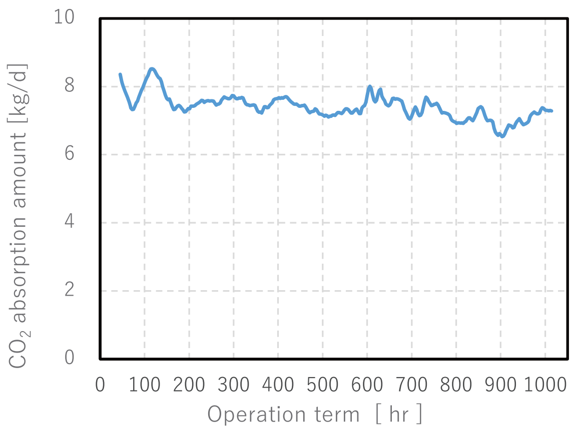


Fig. 8 Test results of DAC demonstration

さらに，炭素循環社会の実現のために，DACに適したCO_2有効利用方法を調査した。メタンやメタノール，液体燃料，ポリカーボネートなどの化学品・燃料へ変換させる方法，コンクリートや骨材などの鉱物化，農作物・微細藻類等に吸収させ食品やバイオ燃料，サプリメント，化粧品に変換させる方法など，有効利用法は多岐にわたるが，その中でも当社は農業への適用に着目した。ビニルハウス内の農地にCO_2を施用すると，光合成の促進により作物の成長速度や収穫量が増大することが知られている。現在は化石燃料の燃焼や，液化炭酸の購入によりCO_2施用が行われているが，いずれも化石燃料由来のCO_2を使用することから，農業の脱炭素化を目指すうえではDAC由来のCO_2に置き換えることが望ましい。また，DACによる炭素排出削減を行うためには，再生可能エネルギー由来電力を用いて運転する必要がある。農業でCO_2を必要とするのは日差しが強く光合成が盛んな時間帯であるため，太陽光発電由来の余剰電力とは需給のタイミングが合致するため，太陽光発電の適用実現性は高いと考えている。

DACによるCO_2排出削減効果は，装置が回収したCO_2量そのものから，DAC装置の作製時や運転時の電力製造時に排出したCO_2量を差し引いて評価する必要がある。また有効利用する際にもロス（農業利用であれば光合成に利用されずハウス外に散逸した分）が存在する。炭素循環モデル全体で，真に削減できた炭素量を評価するための手法をライフサイクルアセスメント（Life cycle assessment, LCA）と呼ぶ。本事業ではLCAをみずほリサーチ＆テクノロジーズ㈱に委託し実施した。な

お，LCA評価は小型実証機のデータをベースとしているため，商用化時の性能とは異なる。

まず，DAC設備のCO_2削減効果の評価結果をFig. 9aに示す。事業終了時点では，系統電力を用いてDACを行った場合，1 kgのCO_2を回収するために10 kgのCO_2が排出されており，炭素除去が実現できていないことを意味する。しかし，将来的に再生可能エネルギーを用いてDACを行った場合には，0.72 kg/kgの排出量となり，ネガティブエミッションが達成されていることがわかる。なお，農地施用の比較対象として，オンサイトで化石燃料を燃焼させた場合の排出係数が1.13 kg/kgであり，これよりも低炭素となっていることが確認できた。

また，本DAC技術を，きゅうりを栽培するハウス農地へ適用したケースの評価結果をFig. 9bに示す。事業終了時点では，きゅうり1 kgを収穫するのに排出したCO_2量が，DACで回収したCO_2を施用するケースで3.1 kg，施用しないケースで1.1 kgとなり削減効果が得られないが，再生可能エネルギーを利用することで，CO_2を施用した場合のほうがCO_2排出量を低減可能との試算が得られた。これは，CO_2の施用により，肥料・農薬の使用量が抑制されたことによる。

以上より，当社DAC技術と農場へのCO_2施用を組み合わせた社会モデルにより，炭素循環が実現できることが確認できた。

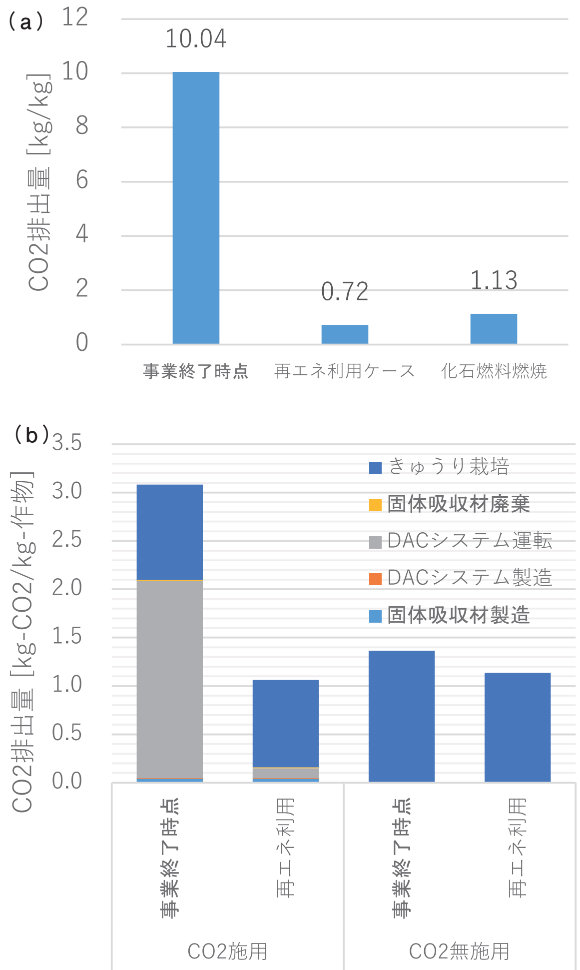


Fig. 9　LCA results　(a) DAC part (b) whole social model including CO_2 fertilization at farmland

4.2　将来の実用化について

環境省事業においては，近い将来での実用化を見据え農業適用の有効性を評価した。今後，農地などのCO_2利用サイトへのDAC適用をビジネスモデルとして検討していく予定である，また同時に，さらなる未来においては，DACによる炭素固定を大規模に実施する必要があり，そのためにはDACで回収したCO_2を貯留する，大規模なDACCS（Direct air carbon capture and storage）の実現が必要不可欠である。DACCS技術の実証はアイスランドにて進められているが，回収量は10 t/d程度で，全世界的な脱炭素を進めるためにはスケールアップが必要不可欠である。当社はこれまでにも大規模な産業プラントの設計・建設を担っており，大規模DACCSを実現する上で先行するスタートアップ企業にはない強みを有する。そのため今後はDACCS技術の確立に向け，他社との協業・自社での更なる技術改良を進める予定である。

5．結言

当社は産業の脱炭素化に向け，燃焼後排ガス回収（PCC）および直接空気回収（DAC）のための技術である，Kawasaki CO_2 Captureを開発している。本技術は60℃程度の低温排熱を利用可能という，従来技術にはない優位点を持つ。

PCCの実現に向けて，舞鶴発電所における実排ガスからのCO_2回収実証と，米国ワイオミング州における環境影響評価実証を実施し，商用化のための技術を確立する。また，DACの実用化に向け，農業などへの適用ビジネスを探索するとともに，大規模DACCS実現に向けた技術開発を進める予定である。

これら技術の実用化を通じ，当社は持続可能な社会の構築に貢献していく所存である。

謝辞

本技術を開発するにあたり，経済産業省事業「二酸化炭素回収技術実用化研究事業」（2018年度から新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）に移管），NEDO委託事業「先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」，環境省委託事業「環境配慮型CCUS一貫実証拠点・サプライチェーン構築事業」において支援を賜った。ここに御礼申し上げる。

参 考 文 献

(1)　World Energy Outlook 2019 <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>, International Energy Agency（2022年5月9日参照）

(2)　Orca: the first large-scale plant <https://climeworks.com/roadmap/orca>（2022年5月9日参照）

(3) Okumura, T., Yoshizawa, K., Nishibe, S., Iwasaki, H., Kazari, M., and Hori, T., Parametric testing of a pilot-scale design for a moving-bed CO_2 capture system using low-temperature steam, Energy Procedia, Vol. 114, (2017) pp.2322-2329.

(4) Okumura, T., Yoshizawa. K., Numaguchi, R., Nishibe, S., Kanou, A., Hasegawa, Y., Inoue, S., Tsuji, K., Fujita, S., Nabeshima, M., Yamada, H., Yamamoto, S., Takayama, N., and Yogo, K., Demonstration Plant of the Kawasaki CO_2 Capture (KCC) System with Solid Sorbent for Coal-Fired Power Station, Proceeding in GHGT-14 (2019).

(5) Numaguchi, R., Okumura, T., Nishibe, S., Yoshizawa, K., Furushima, Y., Nohara, T., Kato, M., Saito, A., Masuda, T., Hako, R., Sato, Y., Kanomata, N., and Tanaka, K., Towards the Carbon Circulation Society: Direct Air Capture by Kawasaki CO_2 Capture Technology and CO_2 utilization, Proceeding in GHGT-15 (2021).

技術論文

ジルコニア系連続繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの開発

Development of Oxide/Oxide Composites Using Continuous Zirconia Fiber as a Reinforcement

長谷川 良雄*1 HASEGAWA Yoshio
秦 青*1 QIN Qing
鉄井 利光*1 TETSUI Toshimitsu

ABSTRACT

Development of the ceramics matrix composites (CMC) which can be used at higher temperature than SiC/SiC composites is being advanced. It is expected that oxide/oxide composites bring performance improvements of a jet engine. In this research, the heat-resistance of continuous zirconia fiber by dry-spinning was improved through molecular design of the precursor polymer and optimization of the calcinating condition. Then the uni-directional reinforced composites (1D-CMC) using improved fiber with $BaZrO_3$-matrix or YSZ-matrix were prepared, and the flexural strengths were measured. By evaluation of the relationship between the flexural strengths and the properties of fiber/matrix interface and the improved fibers, the applicability to super environment resistant and high strength CMC as reinforcements of developed zirconia fiber was estimated.

キーワード：ジェットエンジン, 乾式紡糸, ジルコニア連続繊維, 界面層, 酸化物系複合材料, 曲げ強度
Key words：Jet Engine, Dry-Spinning, Continuous Zirconia Fiber, Fiber/Matrix Interface, Oxide/Oxide Composites, Flexural Strength

1．はじめに

金属材料では使用困難な高温部位用の耐熱材料としてセラミックス基複合材料（CMC）が注目を集めており，すでにジェットエンジンにSiC/SiC複合材料が使用されはじめた[(1),(2)]。しかしながら，SiC/SiCは，高温強度は良好であるが，酸化するため耐環境性には限界がある。そのため最高使用温度は1400℃程度にとどまっている。したがって，更なるジェットエンジンの性能向上をもたらすために，より高温で使用できるセラミック複合材料の開発が求められている。

そこで，1400℃を超える超高温域においては，本質的に耐環境性が良好な酸化物系材料の適用が考えられるが，例えばアルミナ系複合材料[(3),(4)]は繊維そのものの耐熱性がSiC繊維より低く，したがって，SiC/SiCより高温では強度が大幅に低下するため，超高温部位への使用には適さない。このような状況を解決するため，アルミナ系より耐熱性が期待できるジルコニア系複合材料の開発が進められてきた。

筆者らは，すでにこれまでの研究において，$BaZrO_3$の超高温強度が従来の酸化物と較べると著しく高いことを見出し[(5)-(7)]，また，この$BaZrO_3$を複合材料のマトリックスとした場合，超高温においてもマトリックスと融合しにくい維維材料としてジルコニアが有望なことを見出している。実験室レベルで少量ではあるがジルコニア連続繊維の基本的な製造技術も開発している[(5)]。さらに，市販のジルコニア短繊維に界面層を導入して試作した$BaZrO_3$をマトリックスとするセラミック複合材料[(5)]は，1700℃での大気酸化試験で酸化増量が0であるなど，耐環境性はSiC/SiC複合材料より著しく優れるとともに，室温において一定の塑性変形的な挙動を示すことを確認した。

これらの結果から，大幅な耐熱性向上が期待できる酸化物系複合材料の実用化を目指すために，まず，その第一歩として，強化繊維として期待されているにもかかわらず，いまだ工業的に生産されていない超耐熱性ジルコニア連続繊維の開発を目指し，研究開発を進めてきた[(8)]。ジルコニア連続繊維が工業的に生産されていない理由は，繊維前駆体ポリマーの紡糸性の低さによる連続繊維の製造が困難なことや，ジルコニア繊維は高温で結晶成長が進展し，少なくとも1300℃程度以上では強度の著しい低下が起こることなどである。これまでに，これらの課題を克服するため，ジルコニア連続繊維および量産化のための基本プロセスの開発，さらに，複合化に必須の，ジルコニア連続繊維に最適なコーティング技術を検討した。まず，高温強度に優れたジルコニア系連続繊維の開発のために，前駆体の分子設計を行い，高温での結晶成長を抑制する添加物の効果を検証し，さらにアルミナ系複合

原稿受付 2021年10月17日
査読完了 2022年４月18日
＊1 国立研究開発法人物質･材料研究機構 構造材料研究拠点
〒305-0047 つくば市千現１丁目２‐１
E-mail: HASEGAWA.Yoshio@nims.go.jp

材料で実証されている炭素コーティングによるC界面層から，最終的にこれを焼失させて生成させるギャップを利用する界面層の効果を，ミニコンポジットを作製し検討を進めてきた[8]。

本研究では，ジルコニア系連続繊維の製造プロセスの最適化を行い，得られた繊維束を用い，ミニコンポジットを作製し，曲げ強度などの特性と繊維および界面層の関係を検証した結果について報告する。

2．実験方法

2.1　ジルコニア連続繊維の前駆体の合成

ジルコニア連続繊維は，すでに報告した前駆体ポリマーの乾式紡糸法で行った[8]。

本研究では，複合材料化に適した，すなわち従来より耐熱性に優れたジルコニア連続繊維を合成するため，すでに見出している高温でも結晶成長が抑制される紡糸可能な無機高分子の分子設計をさらに進める目的で，以下の方法[8]で前駆体の合成を行った。

ジルコニアの出発原料は，ジルコニウムテトラ-n-ブトキシド，$Zr(OC_4H_9)_4$，を用い，n-ブトキシ基の１部を3-オキシブタン酸エチルでキレート化し，部分的に耐加水分解性を付与し，過度な分岐によるポリマーの三次元化を抑制し，Zr-O結合から形成されるポリジルコノキサンとした。ポリジルコノキサン中には，焼成後，部分安定化あるいは安定化ジルコニアを生成させるため，Y_2O_3を生成するイットリウムトリ-n-ブトキシド，$Y(OC_4H_9)_3$，を原料としたY-O結合からなる構造ユニットを共加水分解縮合させて組み込んだ。

1400℃以上での焼成でも，繊維内の強度低下の原因となる過度な結晶成長を抑制する成分は，SiO_2，Al_2O_3とし，前駆体中にALCH（アルミニウムエチルアセトアセテートジイソプロピレート），$C_{12}H_{23}AlO_5$，テトラエトキシシラン，$Si(OC_2H_5)_4$，からのAl-O，Si-O結合からなる構造ユニットを所定の割合で，加水分解縮合させて組み込んだ[8]。B_2O_3は結晶成長抑制効果がないことをすでに報告している[8]ので，本検討では除外した。

また，SiC成分をジルコニア結晶粒界に生成させる目的で，乾式紡糸SiC繊維の前駆体であるポリカルボシラン（PCS）[9]を所定の割合で，合成した前駆体に添加した。前報でXRD測定によりSiO_2成分がジルコンを形成することが明らかとなっており[8]，粒界にSiO_2成分を存在させるため，まずSiC成分を確実に存在させ，CMC化した後の大気中焼成でSiO_2に転換することを目指した。すなわちジルコンを形成しないと推測できるPCSを添加した。また，後述するように，繊維中に微量の炭素を残すことは，高温での焼成時に起こる繊維間の融着の抑制に効果的であることが明らかとなり，非酸化物のSiCを残すことも繊維間の融着抑制に有効と推定した。

前駆体ポリマーは，添加元素（M）の種類と合成Lot No.を用いて，Zr-M1・M2・M3- Lot No.と表記する。また，必要に応じて各元素のZrに対する原子数比を（　）内に記載して，Zr-M1(M1/Zr)･M2(M2/Zr)･M3(M3/Zr)-Lot No.と表記した。また，PCSを添加した紡糸用前駆体は，例えばZr-M1(M1/Zr)-Lot No. +PCS(Si/Zr)のように表記した。

繊維の前駆体としてのキャラクタリゼーションは，以下で述べる，紡糸した繊維を焼成して得られたジルコニア系連続繊維の評価で行った。

2.2　前駆体の紡糸，ジルコニア系繊維への転換

得られた前駆体を，ノズル径が100 μmのモノホールノズルによる乾式紡糸を行い[8]，繊維の高温特性の改良を行うために，以下の方法での検討を行った。

紡糸溶液は，溶媒を従来のトルエンに代えキシレンとした。トルエン溶液の場合，紡糸した繊維の断面が楕円形になることがあり，繊維の強度測定の際に不都合である。トルエン溶液を紡糸した場合，前駆体と極性の大きいトルエンの相溶性が大きく，繊維表面が乾燥しても繊維内部からの溶媒の揮発が遅く，形成された鞘の内部の収縮により断面が変形すると推定できる。トルエンよりも極性の小さいキシレンの場合，紡糸された繊維と表面と内部からのキシレンの揮発速度にトルエンほど差がなくなり，繊維断面がほぼ真円に近くなることが確認できた。

巻き取られた繊維束は，水蒸気不融化，焼成工程を経てジルコニア系繊維へと転換された[8]。

不融化は飽和蒸気圧の水蒸気雰囲気で，所定温度で所定時間保持する方法で最適条件を検討した。焼成は，不融化した繊維束を，大気雰囲気あるいは窒素，Arガス雰囲気中で実施し，焼成雰囲気の影響を検討した。

得られた繊維のキャラクタリゼーションは，モノフィラメント引張試験，破断面のSEM観察，結晶構造と結晶子サイズの測定で行った。モノフィラメント引張試験はJIS R 7606に準拠して繊維長10mm ～ 30mmで実施した。

2.3　ミニコンポジットの作製

合成したジルコニア系繊維束を用いた複合材料は，１方向強化複合材料であるミニコンポジット（1D-CMC）をFig. 1に示した方法で作製した。

ジルコニア系連続繊維を複合材料用強化繊維として用いるためにはマトリックスと繊維表面との強固な結合を起こさないようにすることが重要である。アルミナ系連続繊維を用いたアルミナ系複合材料では，繊維表面への炭素コーティングによるC界面層，および，炭素を焼失させて得られるギャップを利用する界面層の効果が確認されており[4]，ジルコニア系繊維についても繊維表面への炭素コーティングが有効であることをすでに確認している[8]。本検討でのジルコニア系繊維への界面層もC界面層を採用した。

繊維表面への炭素コーティングは，ヘキサンバブル法[8]で行った。従来，管状炉中でジルコニア系繊維束を

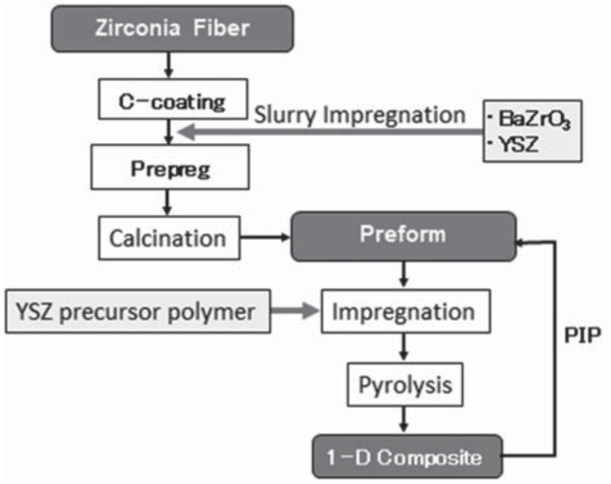


Fig. 1 Fabrication process of 1D-composites by PIP method

1200℃まで加熱昇温しながら，窒素ガスを100mL･min^{-1}でヘキサン中にバブリングさせ発生させた飽和ヘキサン蒸気を，管状炉中に導入し，1200℃で１時間保持する方法で行っていた。しかしながら，窒素ガスを150mL･min^{-1}でヘキサン中にバブリングさせ発生させた飽和ヘキサン蒸気を，150mL･min^{-1}の窒素ガスで希釈しながら管状炉中に導入し，1000℃で１時間保持する方法に変更した。保持後は，窒素ガスを300mL･min^{-1}の導入のみに切り替え，自然放冷した。飽和蒸気圧の1/2の蒸気圧でのコーティングの方が繊維間への炭素析出による結合が起こりにくく，1000℃でも界面層として十分寄与するC層が得られることが，SiC/SiCの場合に確認できたことを参考にした。C層の生成状態はSEM観察により確認した。

次に，C界面層を付与したジルコニア系繊維束に，$BaZrO_3$あるいは８mol.% Y_2O_3 安定化 ZrO_2（8YSZ）微粉末を75wt%になるように３wt%のPolyvinyl alcohol（PVA）水溶液と混合してスラリーに調製したものを繊維束に含浸させ，直径２φ，長さ約100mmの丸棒に成型し，乾燥後，Arガス雰囲気中，1000℃で焼成してプリフォームを作製した。$BaZrO_3$はニッキ㈱製のZB-103JM-A, 8YSZはスターファイヤー社製のSL-455を用いた。

その後，５mol％ Y_2O_3を含有するように分子設計して合成した5YSZ前駆体ポリマーの80wt%キシレン溶液を用いて前駆体の含浸と焼成を行うPIP（Polymer Impregnation and Pyrolysis）法で一次元強化CMCであるミニコンポジット（1D-CMC）を作製した。前報[8]ではPIPに8YSZ前駆体ポリマーを用いたが，本検討では，高温でも結晶成長が抑制されることが確認されている5YSZ前駆体ポリマーとし，溶媒は，減圧含浸工程でトルエンより減圧下での蒸気圧の小さいキシレンを用い，溶媒の沸騰を抑制し含浸の効率化を図った。減圧下で前駆体溶液を含浸させた後，85℃の飽和水蒸気雰囲気中で0.5時間前駆体のゲル化を促進させた後乾燥する工程を４回繰り返したのち焼成するというプロセスを２回繰り返す方法でミニコンポジット内部に5YSZ前駆体から生成するマトリックスを形成させた。本検討ではミニコンポジットの直径が前報に比し小さいため，ゲル化時間を１時間[8]から0.5時間に短縮し，プロセスを短時間化した。焼成温度はすべて1000℃で焼成する方法とした。また，焼成雰囲気は，今回すべてAr雰囲気とし，1D-CMC中にごくわずかに炭素を残留させる効果を検討した。本検討では，焼成後にもC界面層を残し，繊維と同様マトリックス化した前駆体中にも炭素を残留させ結晶化を抑制し，すなわちマトリックスの焼結に伴うクラックの生成の抑制を行った。本検討では1000℃で生成するミニコンポジットの基本的特性を確認することを目的とし，より高温での焼成は今後検討予定である。

また，本複合材料の評価用としての有効性を確認するために，同様の作製方法で，NGSアドバンストファイバー㈱のSiC繊維，Type S，を用いて1D-CMC（SiC/SiC）を作製した。以後，Type S/SiCと呼ぶ。

またジルコニア系ミニコンポジットについては，プリフォーム作製時に用いたマトリックス用微粉末，$BaZrO_3$，8YSZに関連付けて，それぞれCMC(ZB)，CMC(YSZ)と呼ぶ。

得られたミニコンポジットの評価は，室温での３点曲げ試験（支点間距離40mm），断面のSEM観察で，強度と繊維の引き抜けの有無の関係などを評価することで行った。

３．実験結果および考察

3.1　ジルコニア系連続繊維

本検討では，すでに報告している繊維強度が結晶成長により低下しないと予想される前駆体[8]の改良を行い，それらのキシレン溶液の乾式紡糸で得られる前駆体繊維の水蒸気による不融化条件，焼成雰囲気の検討を行い，耐熱性の向上した繊維合成を目的とした。その結果，強度が改良された繊維について，複合材料化を実施した。

Table 1に，従来の最適化された前駆体とPCSを添加した前駆体の乾式紡糸条件を示す。比較のために現在工業的製造プロセスの開発が行われている超高分子量で不融性のポリカルボシラン（PCS-UUH）の乾式紡糸データも示した。紡糸性値は，Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.01)

Table 1 Dry-spinning condition and the spinnability

Precursor	Concentration/wt%	Temperature/℃	Spinnability
Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.1)-061	77.5	(RT)	4278
	78.0	(RT)	1168
Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.01)-070+PCS(0.1)	78.0	5	748
	81.0	35	40
Zr-Y(0.1)-077+PCS(0.05)	78.0	30	680
PCS-UUH	56	(RT)	168

-070+PCS(0.1)の81wt%の濃度の場合を除き，各前駆体溶液に対してPCS-UUH以上の値が得られ，紡糸性は良好であることを確認した。

紡糸後の繊維は，飽和水蒸気処理（以後不融化処理，Curing，と称する）により繊維を構成する前駆体ポリマーの一層の高分子量化が進められる。すなわち，不融化処理とは，さらに前駆体ポリマーの加水分解縮合を進め，溶媒不溶，不融化を実現するゲル化処理のことで，加水分解により前駆体中に残存する有機残基を加水分解により分離し繊維外に放出する役割がある。したがって，有機残基量は不融化温度と保持時間に依存して減少する。

Fig. 2に，窒素雰囲気中1000℃で得られた繊維の不融化温度と繊維の引張り強度および結晶層であるTetragonal相のWilliamson-Hall法で計算した結晶子サイズ[8]との関係を示す。この結果，不融化温度は95℃以上で繊維の強度が向上し，高温ほどさらに強度は大きくなることが示唆された。低温，すなわち不融化不足で繊維強度が小さい原因は，まず，Fig. 3に示すように繊維にき裂が生ずるためと考えられる。高温で不融化した場合はこのようなき裂は観測されなくなる。さらに，繊維強度はジルコニア結晶層（Tetragonal相）の結晶子サイズと相関しており，不融化温度の上昇，すなわち結晶子サイズの増加は繊維強度を増加させる。その理由は，前駆体の分子間縮合が促進され，繊維中で結晶子の連結が起こり結晶粒の絡み合いが起きているからであると推定でき，今後の繊維の高強度化に示唆を与えるものであることが確認できた。

以上の結果から，強化材用繊維のための不融化条件は，125℃で１時間保持とした。

このように，不融化温度を最適化して，繊維中に微量の炭素成分を残し焼成を行った場合には，1300℃程度以上での高温でも繊維間の融着を回避することができた。

繊維中に残留する炭素成分は，不融化後の繊維の熱重量分析と，これまでに得られている前駆体ポリマーの不

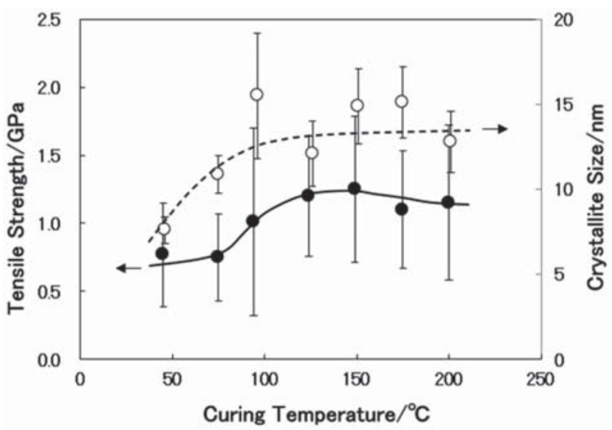
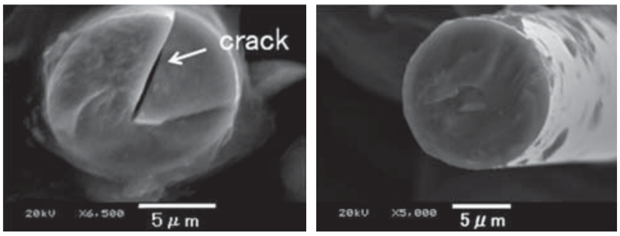


Fig. 2　The relationship between the curing temperature and the tensile strength (●) and the zirconia crystallite size (○) of zirconia fibers from Zr-Y(0.1)・Al(0.1)・Si(0.01)-070+PCS (0.1) heat-treated at 1000℃ in N_2



(a)　　(b)

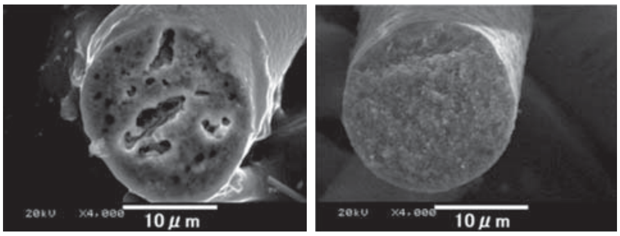
Fig. 3　SEM photographs of zirconia fibers from Zr-Y(0.1)・Al (0.1)・Si(0.01)-070+PCS(0.1) cured at (a) 45℃ and (b) 125℃ followed by heat-treating at 1000℃ in N_2 atmosphere

融化後の，大気中での熱重量分析結果（セラミック収率およそ67wt%)[8]との比較から推定できた。125℃で不融化した繊維の窒素雰囲気中でのセラミック収率は熱重量分析から，1000℃で73wt%であり，残留する炭素成分は，高々６wt%程度と推定できた。したがって，基本的には，繊維は酸化物系セラミックスで構成されていると考えてよいと判断した。

一方，前駆体中に存在するAlおよびSi成分は，1300℃以上の高温で繊維の構造に大きな影響を与え，さらに炭素成分の存在下では，繊維の高温処理に伴う結晶成長，構造変化に対して焼成雰囲気に敏感になることが分かった。

Fig. 4に示すように，大気中で焼成した炭素が残留しない繊維では，繊維断面の観察から大量の空孔が生成すること，一方，窒素雰囲気中焼成では空孔は観察されず，繊維は微粒子の集合体のままであることが確認された。

しかしながら，一方で，窒素中焼成では，ウィスカー生成とともに微細な空孔の生成が観察された。Fig. 5に，(Zr-Y(0.1)・Al(0.1)・Si(0.01)-070 +PCS(0.1)) から窒素中焼成で得られた繊維束上のウィスカーのSEM写真を示す。ウィスカーは，現在のところSi_3N_4の可能性が高いことが分析の結果示唆されているが，Al成分，Si成分の関与の仕方は不明である。ウィスカーの生成とともに繊維間の融着も起こった。この原因は現在検討中であるが，Zr-Y(0.1)・Si(0.01)-077 +PCS(0.075) では全く観察されなかった。したがってAl成分を含む場合には低融点でなおかつ窒化が起こりやすい成分の生成が考えられ，CMCの強化繊維としては不適であることが示唆された。



(a)　　(b)

Fig. 4　SEM photographs of zirconia fibers from Zr-Y(0.1)・Al (0.1)・Si(0.1)-061 heat-treated at 1400℃ in (a) air and (b) N_2 atmosphere

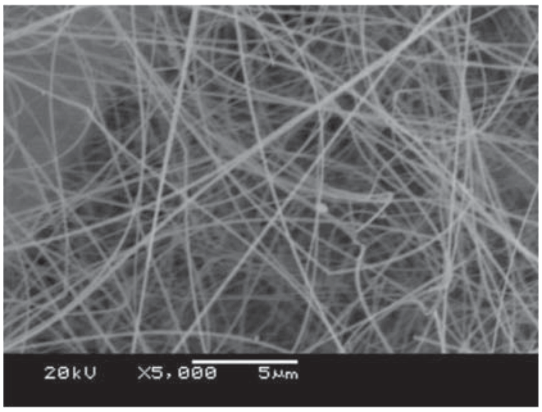


Fig.5 SEM photograph of the whisker formed on the zirconia fiber strand ((Zr-Y(0.1)･Al (0.1)･Si (0.01)-070 +PCS (0.1))

本検討では，繊維の焼成をAr雰囲気中で行った場合には，焼成後の繊維間の融着および空孔の生成，ウィスカーの生成は全く観察されず，CMC用強化繊維としてはAr雰囲気中焼成繊維が最適であると結論付けた。しかしながら，窒素中焼成繊維も1000℃焼成であればAr中焼成と同等の特性の繊維であると判断し，室温での特性評価用のCMCの強化繊維としては使用することとした。

1D-CMC作製用に合成した繊維の製造条件および物性をTable 2に示す。比較のために大気中焼成した従来の前駆体Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.1)-061から得られた繊維についても示した。繊維径も，Table 2に誤差範囲とともに示した。各ジルコニア系繊維はいずれも10μm程度を示しており，各繊維間で著しい差のないことが分かった。比較用Type Sは幾分大きな値を示すが，コンポジットの特性等に関する繊維径の影響の議論は本論文では特に行わなかった。

また，1D-CMC製作法の有用性を確認するために用いたType Sの引張り強度も示した。ジルコニア繊維はSiC繊維より強度が低く，強度向上が今後の課題であることが分かる。その理由は，Table 1に示したように，ジルコニア系繊維の前駆体溶液の濃度がSiC繊維の前駆体であるPCS-UUHの場合よりかなり大きく，これは紡糸に適した粘度に調製するためであるが，すなわち，ジルコニア系繊維前駆体分子量がかなり小さいことを示している。前駆体分子は基本的には分子に相当するサイズの微結晶を形成し，それらが絡み合った凝集体として強度を発現する。ジルコニア系の場合は結晶子間の絡み合いが形成されにくく低強度と推定される。今後，前駆体の分子量をPCS-UUHと同程度の濃度での粘度になるように高分子量化し，強度向上を検討する。

3.2　ミニコンポジット

本研究のミニコンポジット作製方法として，まず，強化繊維としてのジルコニア系繊維に，すでに報告した装置と方法（ヘキサンバブルフロー法）[8]で，Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.01)-070+PCS(0.1) およびZr-Y(0.1)-077+PCS(0.05)から得られた繊維束の繊維表面に1000℃でCをコーティングした。Type Sにも同様の方法でCコーティングした。

Cコーティングした繊維のSEM写真を，Fig. 6に示す。およそ1～2μmの厚みのCコーティングが生成していることを確認した。

Table 3に，Cコーティングを実施していない繊維を用いたCMCも含め作製した1D-CMCの繊維含有率（V_f）および3点曲げ強度を示す。

CMCのV_fは，使用した繊維の質量を繊維の密度で除して求めた繊維体積を，得られたCMCの最終的な寸法から算出した体積で除して求めた。ジルコニア系繊維の

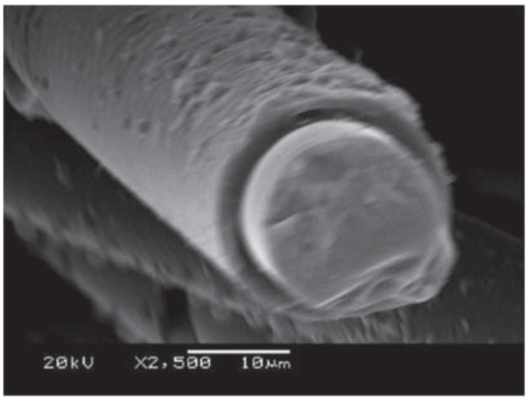


Fig. 6 SEM photograph of C-coated zirconia fiber obtained from Zr-Y(0.1)-077+PCS(0.05)

Table 2 The preparation conditions and the tensile strengths of zirconia fibers as reinforcements

Precursor	Curing temperature/℃	Calcination temperature/℃ (atmosphere)	Fiber diameter/μm (Standard deviation)	Tensile strength/GPa (Standard deviation)
Zr-Y(0.1)･Al (0.1)･Si(0.1)-061	85	1000 (Air)	10.91 (1.79)	1.11 (0.41)
Zr-Y(0.1)･Al(0.1)･Si(0.01) -070+PCS(0.1)	95	1000 (N_2)	9.08 (2.98)	1.01 (0.69)
	125		8.75 (1.87)	1.20 (0.44)
	150		8.06 (1.67)	1.25 (0.54)
	200		8.28 (1.88)	1.15 (0.57)
Zr-Y(0.1)-077+PCS(0.05)	125	1000 (Ar)	10.64 (2.94)	0.95 (0.29)
Type S	−	−	12.49 (0.98)	3.18 (0.87)

Table 3 Characteristics of 1D-CMC

1D-CMC	Precursor	Interphase	V_f*	Flexural Strength /MPa
CMC(ZB)-1	Zr-Y(0.1)・Al(0.1)・Si(0.1)-061	–	0.24	149
CMC(YSZ)-2	Zr-Y(0.1)・Al(0.1)・Si(0.01)-070+PCS(0.1)	–	0.29	62
CMC(ZB)-3	Zr-Y(0.1)-077+PCS(0.05)	C	0.22	199
CMC(YSZ)-4		C	0.26	137
Type S/SiC	PCS	C	0.31	674

密度は，各成分がそのまま酸化物として繊維中に含まれるとして，各成分の理論密度[10]を用いると，全て5.3～5.6の範囲内になる。これらは，本研究での焼成温度が低いことから，もう少し小さい値となることが予想され，本報告では繊維の密度は5g･cm^{-3}と仮定した。Type Sの密度は文献値[11]である3.1g･cm^{-3}とした。これにより，各CMC間で相対的にV_fが比較できる。一方，CMCの気孔率は，Fig. 1に示したように，作製過程でPIP法による緻密化する手法をとっており，マトリックスを形成するスラリー成分である無機粉末と含浸成分の前駆体からの無機成分の混合物の密度は測定できておらず，算出できていない。しかしながら，CMCの気孔率もCMCの特性におよぼす重要な因子であり，繊維の密度も含め，今後検討を進める。

まず，本研究の1D-CMCの作製方法および評価の妥当性を1D-SiC/SiCの曲げ試験で検討した。Fig. 7に，Type S/SiCの外観写真を示す。他の1D-CMCも同様に作製できた（Fig. 7）。3点曲げ試験用試料は2 mmϕ×100mmの試料から2 mmϕ×50mmの試料を2本切り出して作製した。ジルコニア系CMCでは試料直径は1.6-1.7mmに収縮していることを確認した。ジルコニア系CMCで収縮が起きたのは，プリフォーム作製用スラリーのマトリックス用微粉末の体積含有率が低いこと，前報[8]で明らかにしたように，PIPプロセスでミニコンポジット中に含浸し焼成してマトリックス化する前駆体のセラミック収率が，45%程度でPCSの1/2程度であること，に起因する。すなわち，ミニコンポジットを形成するジルコニア系マトリックスの密度は5g･cm^{-3}程度であると推定され，体積残留率は，密度が小さいSiC系と比べ格段に小さくなり，繊維軸方向には収縮できないため，直径方向の収縮になると考えられる。

Fig. 7 Photograph of 1D-CMC

Fig. 8に，1D-SiC/SiCの3点曲げ試験の応力-歪曲線を示す。最大曲げ強度は，従来PIP法SiC/SiCで報告されている曲げ強度[11],[12]と同等以上の値である700MPa以上を示し，繊維の引き抜けも十分起きていることを示している。すなわち，本研究におけるミニコンポジットの作製方法は1D-CMCの特性を評価するために適した方法であると言える。

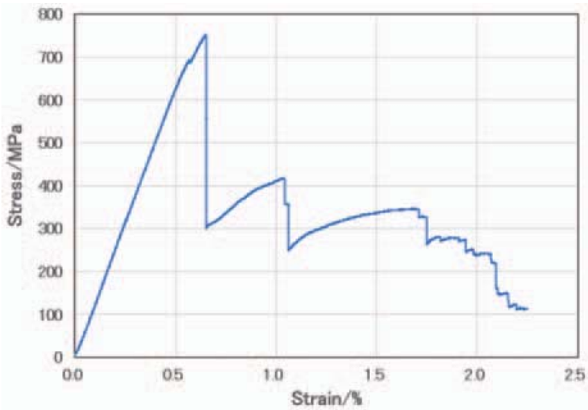


Fig. 8 Stress-strain curve of Type S/SiC

ジルコニア系繊維による1D-CMCの曲げ試験結果をFig. 9およびTable 3に示した。曲げ強度はType S/SiCと比較すると，かなり低い値を示しているが，その理由は以下のように考えられる。

まず，開発中のジルコニア連続繊維は，Type Sと比べ，繊維束のかさ密度が小さく（使用した連続繊維束は微小応力下で焼成して繊維の捲縮を修正する工程が未実施のためである），ミニコンポジット中のV_fを大きくすることが困難であり，実際，Table 3に示したように小さい値となっている。さらに大きな原因として，ジルコニア系繊維の強度がType Sと比べ，まだかなり小さいことも原因の一つと考えられ，今後，さらに繊維の強度改善を進めることが重要であることを示している。

しかしながら，本検討では，初期の目標であるジルコニア系CMCの曲げ強度300MPaに近い値を得ることができた。この達成のためには，繊維強度を2 GPa以上とすることと，界面層として炭素界面層を高温では消失させてギャップ界面層あるいは多孔質セラミックス層として機能させること[8]が必要であるが，ここで作製した

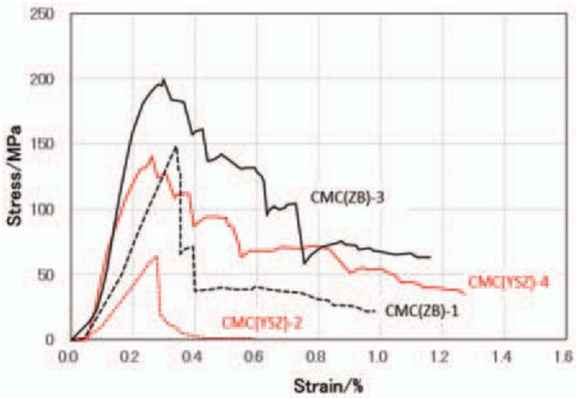


Fig. 9 Stress-strain curve of 1D-CMC using zirconia fibers as reinforcements

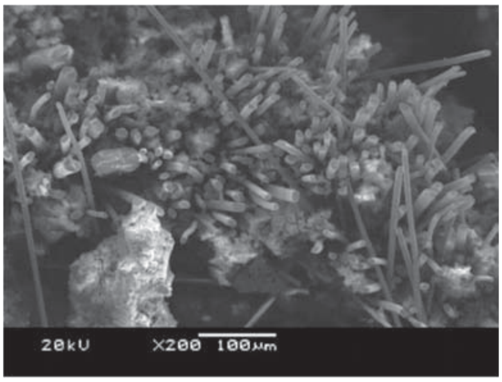
1D-CMCの曲げ試験から，C界面層の有効性が確認できた。

Fig. 10に，各1D-CMC の曲げ試験後の破断面のSEM写真を示す。C界面層を有するCMC(ZB)-3およびCMC(YSZ)-4では破断面に繊維の引き抜けが明瞭に観測でき，Fig. 9の応力-歪曲線の挙動とよく一致している。マトリックスも繊維間に十分充填されている。

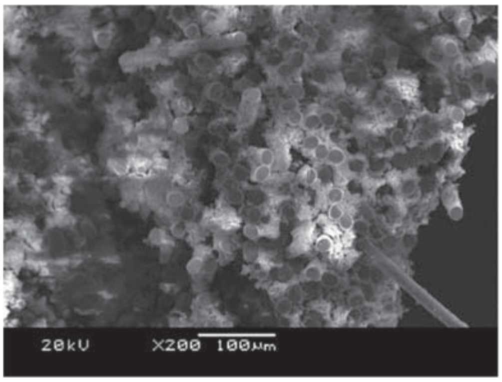
一方，C界面層なしのCMCでは，マトリックスの粉末に依存して繊維とマトリックスの間の固着の程度に差異が認められる。CMC(ZB)-1では，比較的繊維の引き抜けが観測され，これは，Table 3，Fig. 9で，比較的高強度であることと関係しているように見える。

CMC(YSZ)-2では繊維の引き抜けは観測されず，低強度で，破壊は脆性的であることと一致する。この現象は，きわめて興味深い。Fig. 11に示すように，繊維とマトリックス間の状態をもう少し詳しく観測すると，CMC(ZB)-1では繊維表面とマトリックスの境界は固着せず，むしろギャップができているように見える。一方，CMC(YSZ)-2では，繊維表面とマトリックスの境界では，YSZおよびYSZ前駆体ポリマーの熱分解物で形成されるマトリックスが繊維表面に固着していることがわかる。反応しているかどうかは判断できないが，脆性破壊の原因であると言える。

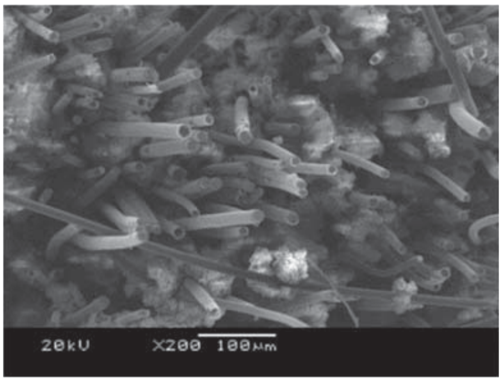
これらの結果は，上述したように，今後，SiC/SiCより耐熱性に優れた酸化物系CMCの開発の一つの方向性を示すギャップ界面層，あるいは多孔質界面層の開発にとって，きわめて有用な情報を与えた。すなわち，$BaZrO_3$が，ジルコニア系繊維と固着しにくいことを利用し，C界面層の存在下でより高温でマトリックスを焼結させたのち，ギャップ界面層，多孔質界面層に移行することで，高温でより高強度酸化物系CMCの開発が可能であると予想される。



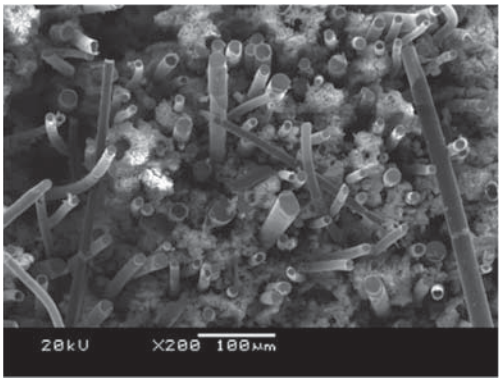
CMC(ZB)-1



CMC(YSZ)-2

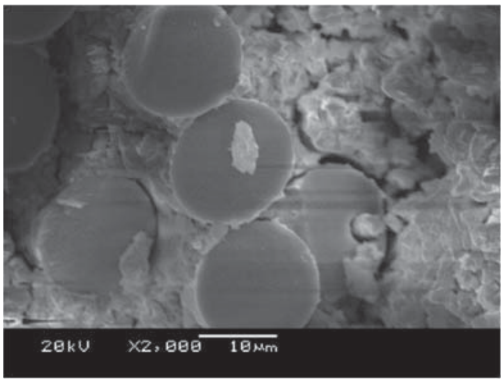


CMC(ZB)-3

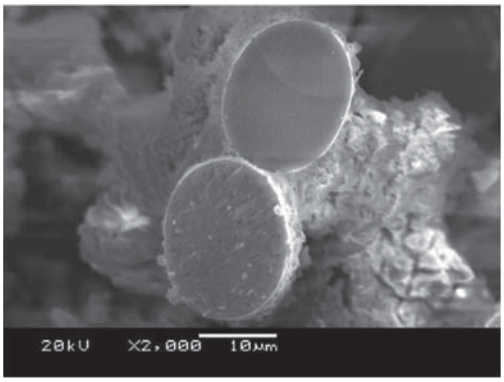


CMC(YSZ)-4

Fig. 10 SEM photographs of fracture surfaces of zirconia fiber 1D-CMCs



CMC（ZB）-1



CMC（YSZ）-2

Fig. 11　SEM photographs of fiber/matrix interface of CMC (ZB)-1 and CMC（YSZ）-2

4．まとめ

超耐熱性酸化物系CMCの酸化物系強化繊維として開発中の乾式紡糸によるジルコニア系連続繊維の耐熱性の改善を，前駆体の分子設計および，不融化処理，焼成雰囲気などの最適化を行うことにより実施した。

この改良した繊維を用いて，1D-CMCであるミニコンポジットを，$BaZrO_3$(ZB)あるいは8YSZ微粉末（YSZ）スラリーとYSZ前駆体ポリマーを用いるPIP法により作製し，曲げ試験による評価を行い，以下の点を明らかにした。

・1D-SiC/SiCの曲げ強度が，従来報告されている結果以上の値を示し，本研究におけるミニコンポジット作製法の妥当性を確認した。

・C界面層を付与し，$BaZrO_3$およびYSZ前駆体ポリマーを用いるPIP法でマトリックスを形成した1D-CMC，CMC(ZB)，で室温曲げ強度200MPaを達成した。

・C界面層なしのCMC(ZB)で繊維とマトリックスの境界での固着が抑制されることを見出し，耐熱性CMCの実現の可能性を見出した。

今後は，より高温での繊維の耐熱性を実現し，マルチホールノズル紡糸での高強度繊維量産プロセス開発を実施し，1D-CMCおよび2D-CMCの作製と特性評価を行い，ジルコニア系繊維を強化繊維とする酸化物系CMCの実用性評価を行う予定である。

謝辞

本研究は，防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度JPJ004596の支援を受けたものである。

参考文献

(1)　倉持将史，大田祐太朗，小谷正浩，南大基，ジェットエンジン用高性能材料の開発，IHI技報，Vol. 60, No. 2（2020），pp. 29-34

(2)　新井優太郎，香川豊，Siボンドコート層の融解･凝固現象に基づくSiを含むセラミックス基材上の耐環境コーティング組織の変化，日本ガスタービン学会誌，Vol. 46, No. 1（2018），pp. 57-61.

(3)　戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「革新的構造材料」研究開発成果報告書，C45 酸化物系軽量耐熱部材の開発，(2019)，pp. 139-142.

(4)　長谷川良雄，越坂亜希子，新関智丈，牛田正紀，西川紘介，粂田和弘，垣澤英樹，ポリアルミノキサン系無機高分子PIP法によるアルミナ系繊維強化CMCの開発（3），第37回無機高分子研究討論会講演要旨集（2018），pp. 77-78.

(5)　鉄井利光，原田広史，長谷川良雄，超高温用酸化物系CMCの開発，第43回日本ガスタービン学会定期講演会（米子）講演論文集（2015），A-12.

(6)　鉄井利光，原田広史，超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料の開発，第46回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集（2018），A-7.

(7)　鉄井利光，原田広史，ジルコニア連続繊維と酸化物系セラミックスからなる複合材料とその製造方法，特許6327512号.

(8)　長谷川良雄，秦青，鉄井利光，超耐環境性高強度酸化物系セラミック複合材料用強化繊維の開発，日本ガスタービン学会誌，Vol. 49, No. 3（2021），pp. 75-82.

(9)　長谷川良雄，鈴木将，小堀武夫，非電子線不融化による第4世代SiC繊維（2），第39回無機高分子研究討論会講演要旨集（2020），pp. 31-32.

(10)　Yibin Xu, Masayoshi Yamazaki, and Pierre Villars: Inorganic Materials Database for Exploring the Nature of Material, Jpn. J. Appl. Phys., Vol 50（2011）11RH02.

(11)　梅澤正信，PIP法によるSiC連続繊維/SiCマトリックス複合材の開発，セラミックス，Vol. 34, No. 4（1999），pp. 294-297.

(12)　佐藤光彦，チラノ繊維の開発とセラミックス基複合材料への応用，日本複合材料学会誌，Vol. 25, No. 1（1999），pp. 9-15.

早稲田大学太田・藤澤研究室における圧縮機関連の研究

Studies Related to Compressor at Ohta and Fujisawa Lab, Waseda University


藤澤 信道[*1]
FUJISAWA Nobumichi

太田 有[*1]
OHTA Yutaka

キーワード：軸流圧縮機，遠心圧縮機，旋回失速，サージ，CFD
Key Words：Axial Compressor, Centrifugal Compressor, Rotating Stall, Surge, CFD

1．緒言

本研究室では，ターボ機械の高負荷運転時において発生する不安定現象の解明を目的に，試験と解析の両面から調査を行っている。Fig. 1に本研究室が保有する主な試験設備を紹介する。(i)：羽根なし・羽根付きディフューザを切り替え可能な過渡現象試験用遠心圧縮機，(ii)：入口ディストーション流入条件下における動翼形状の効果を調査する軸流圧縮機，(iii)：サージ・旋回失速共存状態の模擬や3段まで拡張可能な小型軸流圧縮機，(iv)：ウインドミル状態を模擬する過大流量条件で試験可能な軸流圧縮機を保有している。詳しい研究結果は参考文献[(1)-(5)]を参照されたい。本稿では（i）と（ii）の研究例を中心に本研究室の活動の一端を紹介する。

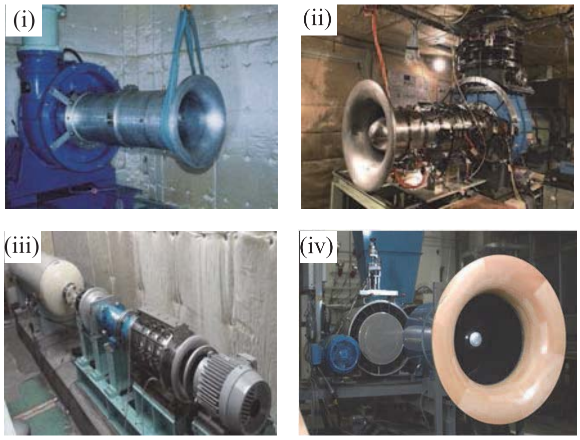


Fig. 1　Test rigs at Waseda University

2．遠心圧縮機の羽根なしディフューザに発生する旋回失速の構造について

2.1　供試圧縮機および解析手法

供試遠心圧縮機は船舶用ディーゼルエンジンに用いられる過給機用遠心圧縮機を過渡現象試験用に改造したものである。供試羽根車はインデューザを有する長羽根短羽根各7枚から構成される開放型羽根車である。ディフューザには流路幅B_4 = 19.55mmの平行壁である羽根なしディフューザを採用した．また，圧縮機の回転数はN = 6000min^{-1}として実験を行った。羽根車の回転周波数はf_{rev} = 100Hz，羽根車周速はu_t = 103m/sである。質量流量は全長17mの吐出管出口に設置されたバタフライ調節弁によって制御し，オリフィス流量計の差圧から算出した。また，圧縮機出口静圧は渦型室出口直後に設置された差圧発信器によって測定した。

圧縮機内部に発生するディフューザ失速の非定常挙動を調査するために数値流体解析を実施した。乱流モデルにはLES/RANSハイブリッドモデルであるDES を採用した。本研究では，Strelets[(6)]が提案したSST k-ω乱流モデルに基づくDESを採用しており，局所的な乱流の渦スケールに応じてRANS/LES領域を自動的に切り替えることが可能である。相対系には慣性力として遠心力およびコリオリ力を考慮した。

解析格子の外観図をFig. 2に示す。計算領域は，渦型室を含めた供試遠心圧縮機全体であり，総格子点数は羽根付ディフューザ設置時に約8000万点，羽根なしディフューザ設置時に約6500万点である。入口境界には全圧・全温を固定し，出口境界には流量固定条件を採用した。

2.2　羽根なしディフューザ内部流れの可視化および旋回失速の発生構造

実験および数値解析から得られた圧縮機性能をFig. 3に示す。丸が羽根なしディフューザ設置時の試験結果，四角が数値解析の結果である。ϕ = 0.24はN = 6000min^{-1}運転時における供試圧縮機の最高効率点である。また，ϕ = 0.08は羽根なしディフューザ設置時にディフューザ失速が発生する失速点である。Fig. 3より，数値解析結果は実験結果と比べて設計点から失速点より

原稿受付　2022年5月9日
＊1　早稲田大学基幹理工学部機械科学・航空宇宙学科
〒169-8555　新宿区大久保3－4－1
E-mail: nobumichi-fuji@waseda.jp

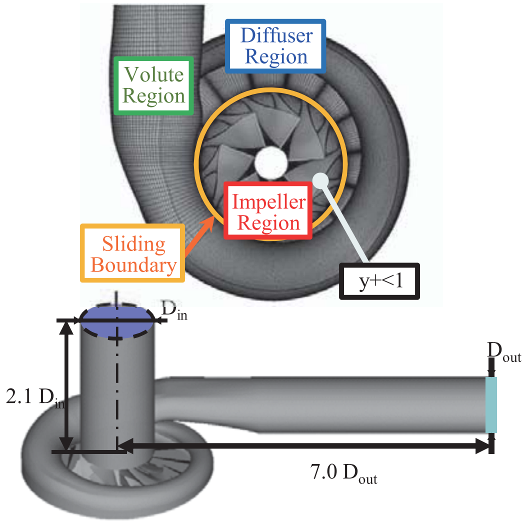


Fig. 2 Computational grid of centrifugal compressor

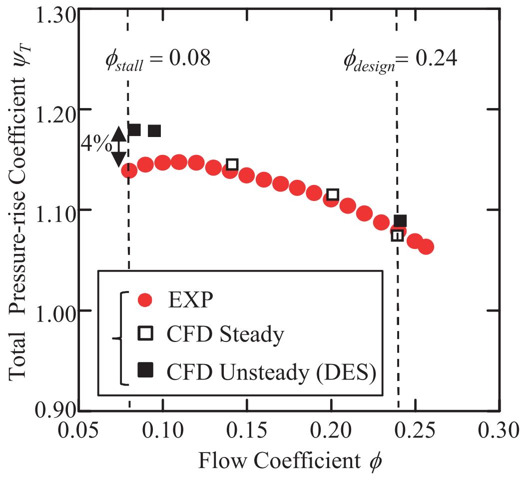


Fig. 3 Performance curve of centrifugal compressor

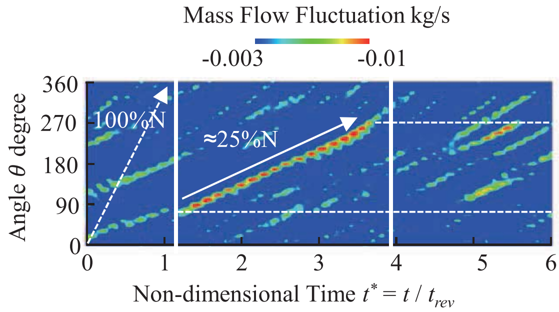


Fig. 4 Mass flow fluctuation at diffuser exit（ϕ = 0.08）

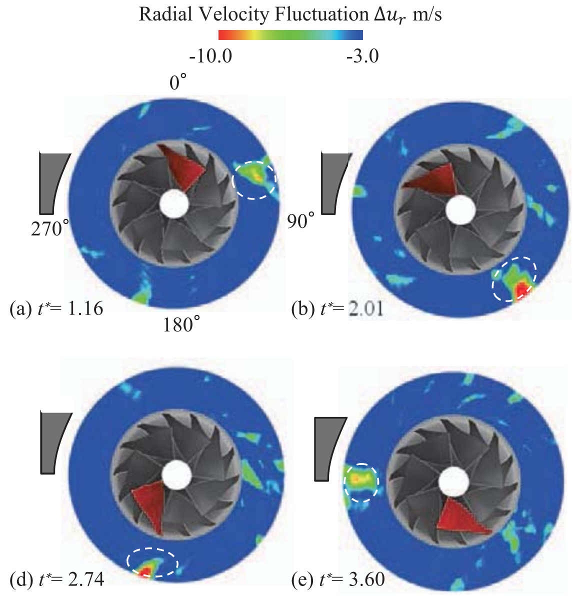


Fig. 5 Radial velocity fluctuation within vaneless diffuser（ϕ = 0.08）

低流量側まで良く一致している。また，ディフューザ失速の旋回速度は羽根車回転速度の約25%である。

次に，数値解析より得られたディフューザ出口部における質量流量変動の結果をFig. 4に示す。数値解析においても周方向に低速で伝播する低流量域が確認され，その旋回速度は羽根車回転速度の25%程度であった。変動の大きさは周方向で異なり，周方向45度付近から変動が強くなり，舌部直前（270度）まで強い変動が維持されている。また，舌部通過後は減衰していることが確認できる。ディフューザ失速の非定常挙動を調査するために，ディフューザ内部流れの半径方向流速の変動を可視化した。Fig. 5に数値解析より得られたディフューザ内部の半径方向流速変動の時間変化を示す。白破線で示す半径方向流速変動が負となる領域が逆流域に対応し，これは失速セルにあたる。また，各時間は羽根車１周に要する時間を基底とした無次元時間であり，各位置における時間平均値からの差異を変動値としている。Fig. 5より，t^* = 1.16において45度付近から見られる白の破線で囲まれた逆流領域が初生し，時間経過とともに舌部に向かって半径方向および周方向に拡大しながら旋回している様子が確認される。また，t^* = 1.16以降の失速セルが90度を過ぎた後は，ディフューザ出口側からの逆流が増大している。その後，t^* = 3.60以降の失速セルが舌部を通過して以降，Fig. 4より失速セルの規模は縮小することがわかる。

Fig. 5から，ディフューザ失速セル内の半径方向流速変動の大きさが，90度を過ぎた後に出口部側で増大し，これに伴い失速セルが拡大している。そこで，ディフューザ流路からスクロール入口部までの子午面流速分布をFig. 6に示す。90-135度付近を可視化し，失速セルの流動構造を調査した。Fig. 6には，子午面流速分布とともに，半径方向流速V_r = -10 m/sの等値面を可視化したものを付記している。Fig. 6から，Hub壁面で発生した境界層剥離が集積・拡大し，90度付近からHub，Shroud両壁面に 交互の大規模な剥離領域が形成されていることが確認される。また，ディフューザ出口とスクロール入口の接続部にあたる曲がり部のShroud側に低速領域が形成され 始めている。ハブ・シュラウド壁面で交互に発生する境界層剥離や渦型室からの逆流によって失速セルが形成されるメカニズムや，失速セルの前縁

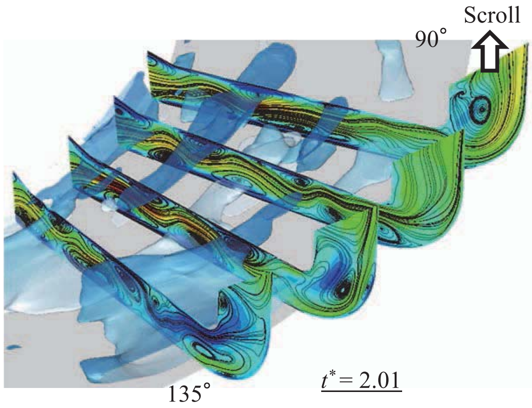


Fig. 6 Internal flow field within diffuser stall（$\phi = 0.08$）

側で低圧領域が，後縁側で高圧領域が形成されるセル構造については，既に著者らが示した試験による可視化結果[2]ともよく一致している。

3．入口ディストーション流入条件下における軸流圧縮機の失速初生現象について

3.1　供試圧縮機および実験手法

試験に用いた単段低速軸流圧縮機の半断面図をFig. 7に示す。動翼クリアランスには動翼コード長の0.5%に相当する0.25mmとした。またFig. 8に本試験で使用した２種の動翼の写真を示す。積重線を翼前縁へと傾斜させ，前方スイープ形状を施した動翼（Sweep動翼），積重線を半径方向に積み上げた非スイープ動翼（Radial動翼）の２種類を用いた。Sweep動翼では，積重線をスパン70%から２次曲線で前方へ移動させることで，前方スイープ形状を付加した。両動翼にはスイープ形状の有無以外の差異はない。

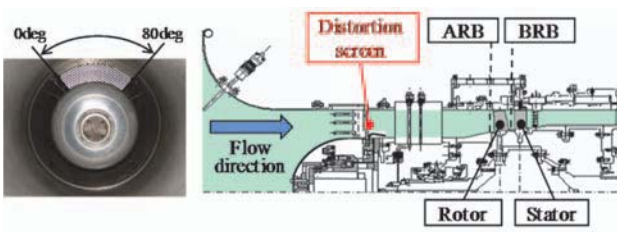


Fig. 7 Distortion Screen and Cross-sectional view of axial compressor

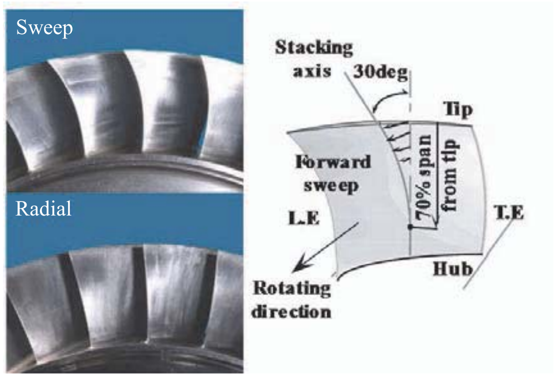


Fig. 8 Sweep/Radial rotor design

流量測定は，動翼より上流側に設置されている３点櫛形ピトー管により計測した。Fig. 7のようにディストーションスクリーン（以下DS と略記）を動翼積重線から約５翼弦長上流に設置し，局所的な全圧損失を生じさせることで入口ディストーション（以下IDと略記）を模擬した。DSは中心角80degで全スパンに渡り，流路占有率は14.62%である。また，動翼回転方向に対して，DS突入部を０deg，離脱部を80degとする。計測には熱線流速計および圧力センサを使用し，回転数4000rpmにて試験した。周方向計測点数は動翼列前方（ARB）で圧力センサ：５点，動翼列後方（BRB）で熱線流速計：３点である。圧力センサを周方向に60degまたは120degの間隔で複数個設置することで，失速初生時における変動の周方向への伝播をとらえた。

3.2　供試圧縮機の失速特性と失速初生現象に対するSweep動翼の効果

Fig. 9に一様流入およびID条件下における全圧上昇係数を示す。流量係数 $\phi = 0.45$が本圧縮機の設計点である。最も低い流量の点は旋回失速が発生する直前の作動点（NS）である。一様流入条件下では，$\phi = 0.36$より低流量側にてSweep動翼の方がRadial動翼より全圧上昇が低い結果となった。一方，ID条件下では，Sweep動翼の方がRadial動翼より全圧上昇が高くなることが分かる。また，失速余裕は，両流入条件においてSweep動翼により改善している。ここで，ID条件下における失速初生現象と失速余裕がSweep動翼により改善した要因を調査する。

Fig. 10にID条件下における失速初生形態について調査するために，壁圧の周方向の多点同時計測を行った結果を示す。上段に失速初生時の壁圧時間変動波形および下段に離散空間フーリエ解析の結果を示す。縦軸は周方向位置を示し，横軸は動翼回転時間で無次元化した無次元時間 t^*を表す。離散空間フーリエ解析は，Garnierら[7]が圧力波形を用い，Modal振動の検知を目的に用いた手法である。式(1)にDSFSに用いる式を示す。

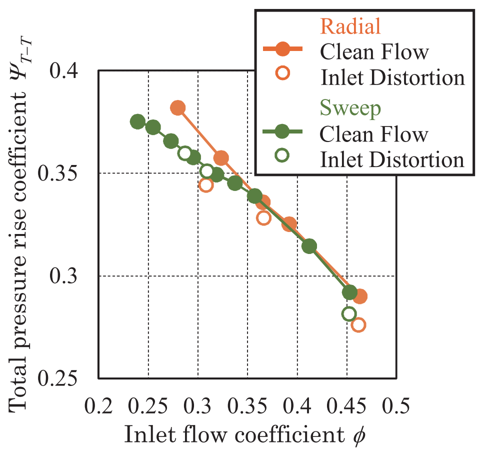


Fig. 9 Compressor curve of axil compressor

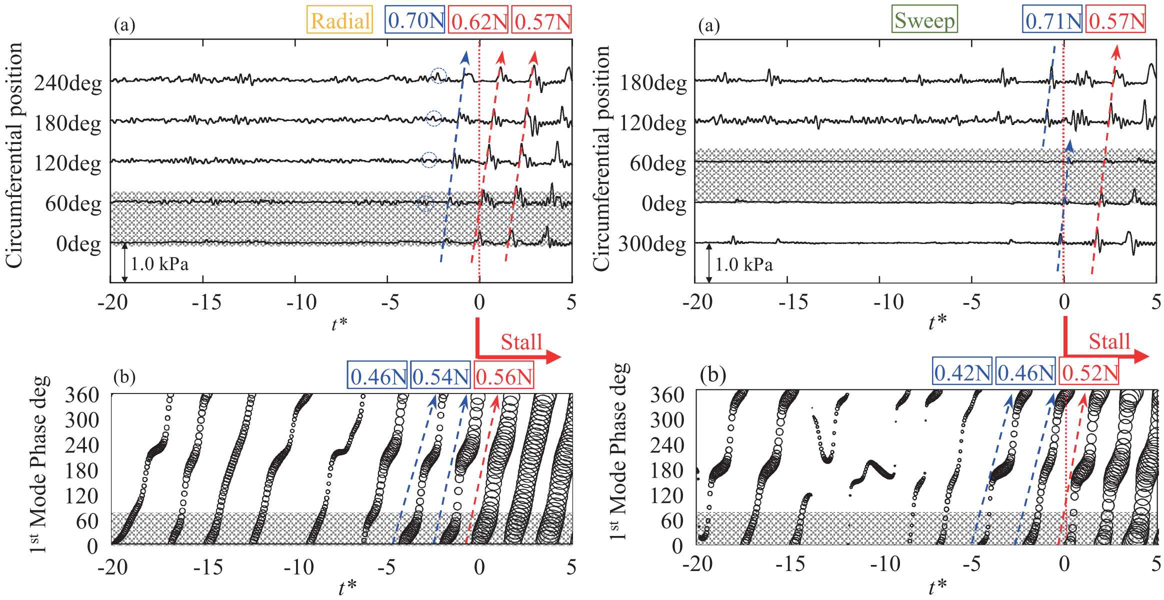


Fig. 10 Stall process results of Radial/Sweep blade (a) pressure trace (b) DSFS 1st mode phase distribution

$$a_k(t) = \frac{1}{N_{sum}} \sum_{n=0}^{N_{sum}-1} p(\theta_n, t) e^{ik\theta_n} \tag{1}$$

式中の$p(\theta_n, t)$は，基準位置からθ_n［rad］の位置にある圧力トランスデューサから得られた圧力時間データである。両動翼とも青矢印で示すようにt^* = −2付近から0.7N程度で伝播するSpike擾乱が発生していることが分かる。その後擾乱は減速するとともに失速セルへと成長する様子が確認される。さらに下段の１次のモード推移（Unwrapped phase）図より，両動翼ともにt^* = −5付近から緩やかに失速セルへと成長する変動が確認される。伝播速度は約0.3NとSpike擾乱に比べて低速な変動であることがわかる。Spikeと比べて低速で緩やかに成長するのはModal変動の特徴である。またモード分布図では，t^* = −1付近から伝播速度0.6NのSpike擾乱が確認された。以上から，ID条件下では両動翼ともにSpikeが発生する前にModalが存在するModal-Spike型失速初生形態と考えられる。

動翼に前方スイープ形状を施すことによる，内部流れと失速余裕の関連性について考察を行う。Sweep 動翼は流れをチップ側に引き寄せる効果を持つため，局所的に失速セルが形成されても非DS領域でセルを消滅させることができ，Radial動翼と比較して失速直前流量を絞ることができたと考えられる。詳しくは参考文献(3)に譲る。以上より，ID条件下ではRadialおよびSweep動翼ともにModal-Spike型失速初生となるが，Sweep動翼の負荷分散効果によりTip側の流れが改善し失速余裕が改善することが明らかになった。

4．まとめ

非設計運転時において遠心および軸流圧縮機に発生する不安定現象について，解析・試験を用いて調査した例を紹介した。このような不安定現象の解明に加えて，本研究室ではターボ機械に発生する騒音の低減化や数値流体解析コードの高度化にも取り組んでいる。今後もターボ機械の発展のために，基礎的な現象解明に重きを置き，産業界とも連携を取りながら研究活動を続けて行く。

参考文献

(1) Fujisawa, N., Inui, T. and Ohta, Y., Evolution Process of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 141 (2018), pp. 041009.

(2) 藤澤信道，三井田弘，田島健太，太田有，遠心圧縮機の羽根なしディフューザで発生する旋回失速の非定常挙動と構造，日本機械学会論文集，Vol. 87, No. 894 (2021), DOI: 10.1299/transjsme.20-0036410.

(3) Hamguchi, K., Sakata, Y., Fujisawa, N., Ohta, Y. and Kato, D., Effect of Forward-Swept Rotor on Stall Margin in an Axial Flow Compressor at Distorted Inflow Condition, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 11, No. 4 (2020), pp. 13-21.

(4) Zhang, W., Fujisawa, N., Ohta, Y., Goto, T., and Kato, D., Rotor Performance of an Axial Flow Compressor at Free and Highly Loaded Windmilling Conditions, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 11, No. 2 (2020), pp. 17-26.

(5) Sakata, Y. and Ohta, Y., Coexisting State of Surge and Rotating Stall in a Two-stage Axial Flow Compressor using a Double-phase-locked Averaging Technique, Journal of Thermal Science, Vol. 26, No. 1 (2017), pp. 38-46.

(6) Strelets, M., Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows, AIAA Paper, (2001), 2001-0879.

(7) Garnier, V. H., Epstein, A. H. and Greitzer, E. M., Rotating Waves as a Stall inception Indication in Axial Compressors, Transactions of the ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 113 (1991), 290-301.

株式会社理研鼎業（りけんていぎょう）の産業連携活動について

Industry-Academia Collaboration of RIKEN Innovation Co., Ltd.

油谷 好浩*1
ABURATANI Yoshihiro

1．はじめに

昨今，日本の科学技術力低下が指摘され，またこのVUCAの時代において日本企業の多くが将来の事業展望，ビジョンが描けず，資金が豊富な企業も何に投資すべきか見えなくなっています。また一方で大学や大学院の優秀な人材も，これまで多くが大企業に就職するのが普通であった時代とは異なり，キャリア選択に大変悩んでいる状況です。本来なら大企業に変わる受け皿としてベンチャー業界が機能すべきところ，日本の場合はまだその状況にはありません。この中で，日本が世界の中で確たる地位を維持し生き残っていくためにはアカデミア（大学や公的研究所）との連携，そして企業間も含めたオープンイノベーションの実現が必須となっています。

理化学研究所（理研）は，日本で唯一の自然科学の総合研究所として，物理学，工学，化学，計算科学，生物学，医科学など広い分野で研究がなされている国立研究開発法人ですが，この研究成果をイノベーションに繋げ，また将来の新たなイノベーションの種を企業と創出していくことを目的として2019年12月に株式会社理研鼎業が理研の100%出資子会社として設立されました。この会社の理念，目的と活動内容について簡単に紹介をさせていただきます。

2．株式会社理研鼎業の活動

2.1 理念

株式会社理研鼎業の理念は「研究成果を最大化し，その社会還元を加速することにより，まだ見えぬ水平線の向こうに豊かな社会を実現させる」です。この意味するところは，今ある理研の研究をイノベーションに結びつけること加え，将来に向けて新たな領域の研究を企業とともに創出し，その研究成果を社会還元していく活動も含まれています。

2.2 活動内容

「理念」を実現するために理研鼎業は４つの機能を有しています。即ち，企業共創活動，共同研究促進活動，ライセンス活動，ベンチャー支援活動であり，これらの機能全てを有している会社は日本で初めてとなります。

まず企業共創活動ですが，企業の目指す10～20年後の事業展開の中で，今から行うべき研究は何か，その研究に対し理研が貢献できることは何かを企業のトップCTOレベルの方にも参加してもらい議論し，新たな研究を創出する活動です。理研鼎業は将来のマーケット創造を含めた企業の中長期戦略の実現のために，理研との研究連携を創出します。また，大企業だけでなく高い技術力を有する中堅・中小企業との連携構築活動も行っています。

２つ目が共同研究促進活動です。理研と企業との組織対組織の共同研究発掘を行い，企業との契約折衝，共同研究契約締結を支援します。また共同研究遂行段階においては，企業が目指す出口に向けて方向性を見極め，コーディネートします。リスクの高い研究投資については政府機関からの大型競争的資金獲得活動も行います。なお，複数の企業やアカデミアによるコンソーシアムや研究会を経て社会実装に繋げるためにこれらの取り纏めも重要な活動となっています。

３つ目がライセンス活動です。理研の研究者の研究成果が論文で公開される前に，特許発明発掘と登録要否検討を行い，市場調査を含めた戦略的知財の権利化と，企業へのライセンス活動を行います。このライセンス活動はベンチャーを含め産連活動の主な出口になります。

４つ目がベンチャー支援活動です。研究成果をスタートアップとして社会実装する場合，その会社が成長プロセスを実現していくために，マーケット視点でのビジネスモデル・事業計画策定，資本政策等，立上前の支援を行います。また事業を開始したベンチャーに対する資金調達のためのキャピタル紹介や理研との連携（共同研究等）支援を行います。

以上，簡単ではありますが理研鼎業の活動についてご理解いただければ幸いです。

原稿受付　2022年６月９日
＊１　㈱理研鼎業
〒351-0106　和光市広沢２－１
Tel: 048-235-9308（代表）
E-mail: contact@innovation-riken.jp

第34回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

本年も下記の通り，学生およびガスタービン開発に関わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムを開催します。会員・非会員を問わず積極的にご参加ください。

1．**日時**：2022年９月８日㈭，９日㈮
2．**場所**：（国研）宇宙航空研究開発機構（JAXA） 調布航空宇宙センター
（東京都調布市深大寺東町７-44-１）
3．**プログラム**：
・ガスタービン概論
・ガスタービンと流体工学／伝熱工学／燃焼工学／材料工学／制御工学
・JAXA特別講演
・見学会：JAXA 調布航空宇宙センター（ガスタービン関連施設等）
※最終プログラムはホームページにてご確認下さい。
4．**対象者**：大学，高等専門学校，大学院在籍者，ならびにガスタービン初心者の社会人
5．**定員**：40名程度 ※定員を超えた場合，お断りすることがございます。
6．**参加費（税込）**：学生（会員：￥4,400／非会員：￥7,700），社会人（会員：￥16,500／非会員：￥27,500）
参加費にはテキスト（「ガスタービン工学」）の代金が含まれております。
「ガスタービン工学」は10月以降に改訂を予定しています。本シンポジウムの参加者には，後日，改訂版の「ガスタービン工学」を郵送します。
7．**参加費の支払い**：事前振込
8．**受講証の発行**：２日間の講義を受講された方には「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
9．**申込方法**：学会ウェブサイト（https://www.gtsj.or.jp/）よりお申込みください。
◆申込締切：2022年８月17日㈬（必着）
注：外国籍の参加者には，申込書に記載した情報の他に滞在期間等を別途お伺いいたします。詳しくは，申込受付後にご連絡いたします。

○昼食：各自ご準備下さい。
○宿泊施設：斡旋はいたしませんので，必要な方は各自手配願います。
※開催場所案内図および詳細については，学会ホームページをご覧ください。（https://www.gtsj.or.jp/）
★今年度は関西地区における教育シンポジウムは開催いたしません。
（注）延期・中止について
新型コロナウィルス感染症の蔓延状況により，延期または中止になる場合があります。延期・中止について決定し次第，学会ホームページ上でアナウンスするとともに申込者にメールでご連絡いたします。

第50回日本ガスタービン学会定期講演会（福岡）・見学会のお知らせ

第50回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。プログラムなどの詳細は，決まった時点で学会ホームページに掲載します。また，学会誌９月号にも掲載予定です。

なお，新型コロナウイルス感染症状況により，オンライン開催とする場合があります。

主　　催：公益社団法人 日本ガスタービン学会
協　　賛：協賛団体は，学会ホームページ（https://www.gtsj.or.jp/）をご覧ください。

開 催 日：
・講演会　2022年10月12日㈬，13日㈭
・見学会　2022年10月14日㈮

開催場所：
・九州大学医学部　百年講堂
〒812-0054　福岡県福岡市東区馬出３－１－１
https://www.med.kyushu-u.ac.jp/100ko-do/
Tel：092-642-6257

講 演 会：
・一般講演：空力，燃焼，システム，伝熱，材料，タービンなど
・企画講演／特別講演：未定

参加登録費：

日本ガスタービン学会正会員	13,000円（不課税）
協賛団体会員	14,300円（税込）
非会員（上記以外）	19,800円（税込）
日本ガスタービン学会学生会員	無料（50回記念特別キャンペーン）
協賛団体学生会員	3,300円（税込）
非会員学生	6,600円（税込）

懇 親 会：
・新型コロナウイルス感染対策を考慮した形で開催を予定。状況により中止する場合もあります。

学生による優秀発表の表彰：
・学生による「研究報告」で，講演申込時にエントリーがあったものの中から，特に優秀な発表に対して表彰を行います。

見 学 会：
・新型コロナウイルス感染対策を考慮した形で，現地開催を予定。状況により中止する場合もあります。
・日時：10/14㈮
・見学先：九州大学 水素エネルギー関連施設（HyTReC，HYDROGENIUS）などの見学を予定しています。
・定員：40名程度，先着順，講演会への参加登録者に限ります。
・参加費（税込）：6,600円（予定）

参加申込方法：
・プログラムなどの詳細が決まった時点で，学会ホームページに掲載します。
・ホームページから登録されるか，９月号掲載の参加申込書に必要事項をご記入のうえ，学会事務局宛にお申し込みください。参加登録は，受付の混乱を避けるため，事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

関連情報：
・講演会前日の10月11日㈫に，ガスタービン市民フォーラム（会場：九州大学伊都キャンパス　稲盛ホール）を開催する予定です。参加自由・無料です。こちらもあわせてご予定ください。

2022年度見学会のお知らせ

2022年度見学会を下記のように計画しております。

詳細につきましては，決まり次第，当学会webページでお知らせいたします。

1．**日時**：2022年11月11日㈮

2．**場所**：防衛装備庁千歳試験場（北海道千歳市駒里1032）

3．**参加資格**：大学生以上

4．**参加要領**：参加費，申込方法などは後日当学会webページに掲載いたします。

（注）延期・中止について

新型コロナウィルス感染症の蔓延状況により，延期または中止になる場合があります。延期・中止について決定し次第，当学会webページ上でアナウンスするとともに申込者にメールで連絡いたします。

次号予告　日本ガスタービン学会誌2022年９月号（Vol. 50 No. 5）

特集　ガスタービン材料開発と保証技術の最新動向

論説・解説

巻頭言　川岸 京子（物質・材料研究機構）

ジェットエンジン圧縮機用耐熱Ti合金　御手洗 容子（東京大学）

航空エンジン用Ni基合金ディスク素材の製造方法とその特徴　松井 孝憲（日立金属），長田俊郎，川岸京子（物質・材料研究機構）

ディスク用Ni-Co基超合金の粉末冶金プロセス技術開発とその動向

今野 晋也（三菱重工業）長田 俊郎，川岸 京子（物質・材料研究機構）

航空機エンジン用タービン翼材料の開発動向　関根 伸仁（IHI）

次世代ボイラ用耐熱鋼および耐熱合金の開発　浜口 友彰（日本製鉄）

ミクロ組織制御によって進化を続けるMoSiBTiC合金（仮題）　吉見 享祐（東北大学）

航空機エンジン開発における材料認定の概要と事例　陳内 鉄生，穴藏 道秀（本田技術研究所）

航空業界における材料試験所認定取得への取り組み　稲田 将人（キグチテクニクス）

チタンアルミの微視組織および機械的特性と加工技術の最前線　水田 和裕，後閑 一洋（AeroEdge）

見聞記「2022年ASME国際ガスタービン会議」

執筆者…加藤 大（IHI）／浅子 知昭（IHI）／若園 進（三菱重工業）／ 関 亮介（三菱重工業）濱崎 浩志（IHI）／林 良洋（三菱重工業）／宮澤 弘法（東北大学）／大北 洋治（JAXA）／ Daniel KRONIGER（川崎重工業）／古澤 卓（東北大学）／谷 直樹（IHI）

※タイトル，執筆者は変更する可能性があります。

◯本会協賛行事◯

主催学協会	会合名	協賛	開催日	詳細問合せ先
可視化情報学会	第50回可視化情報シンポジウム	協賛	2022/8/8-10	URL : https://www.vsj.jp/symp2022/
日本機械学会	2022年度計算力学技術者（CAE技術者）資格認定事業（固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者）	協賛	2022/9/17, 9/25, 12/2, 12/8, 12/9	URL：https://www.jsme.or.jp/cee/
日本マリンエンジニアリング学会	第92回（令和4年）マリンエンジニアリング学術講演会	協賛	2022/10/26-28	URL：https://www.jime.jp
日本機械学会 関西支部	第381回講習会「熱応力による変形・破壊の評価方法と対策事例」	協賛	2022/10/26-27	URL：https://jsmekansai.org/
日本機械学会	No.22-60「第33回内燃機関シンポジウム」	協賛	2022/11/21-24	URL：http://www.jsme.or.jp/conference/ICES2022/
日本流体力学会	第36回数値流体力学シンポジウム	協賛	2022/12/14-16	URL：http://www2.nagare.or.jp/cfd/cfd36/
第52回国際騒音制御工学会議 組織委員会	第52回国際騒音制御工学会議（INTER-NOISE2023）	協賛	2023/8/20-23	URL：https://internoise2023.org/

▷入 会 者 名 簿◁

〔正会員〕

石村 祐宜（川崎重工業）
山積 弘信（本田技術研究所）
松浦 周太郎（三菱重工業）

〔学生会員〕

加藤 千裕（岩手大学大学院）
坂本 祥汰郎（九州大学大学院）
岩崎 一聖（東京都立大学大学院）
田中 美紀子（東京都立大学大学院）
青山 慧士（早稲田大学大学院）
前澤 裕俊（早稲田大学大学院）
佐々木 優大（岩手大学大学院）
堀 歩稀（九州大学大学院）
後藤 峻友（東京都立大学大学院）
土方 優太（東京都立大学大学院）
河野 雅大（早稲田大学大学院）
錦戸 竣平（関西大学大学院）
河村 栞奈（東京大学大学院）
白石 和也（東京都立大学大学院）
徳山 好紀（東北大学大学院）
中村 圭吾（早稲田大学大学院）

2022年度役員名簿

会長 福泉 靖史（三菱重工）
副会長 山本 誠（東京理科大）
法人管理担当執行理事 猪亦 麻子（東芝エネルギーシステムズ），餝 雅英（川崎重工），黒木 英俊（三菱重工）（兼務），鈴木 雅人（産総研），辻田 星歩（法政大）
公益目的事業担当執行理事 石坂 浩一（三菱重工），及部 朋紀（防衛装備庁），桂田 健（JALエンジニアリング），黒木 英俊（三菱重工），鈴木 雅人（産総研）（兼務），高橋 徹（電中研），寺本 進（東大），山本 悟（東北大），渡邊 裕章（九州大），渡邉 啓悦（荏原）
理事 岩井 裕（京大），清野 幸典（東北電力），仲俣 千由紀（IHI），藤原 仁志（JAXA），柳内 秀之（本田）
監事 今成 邦之（IHI），二村 尚夫（JAXA）

2022年度委員名簿（順不同）

2022年7月1日現在
○は委員長

倫理規定委員会 ○猪亦 麻子（東芝ESS），餝 雅英（川崎重工），桂田 健（JALエンジニアリング），黒木 英俊（三菱重工），辻田 星歩（法政大）

自己点検委員会 ○猪亦 麻子（東芝ESS），餝 雅英（川崎重工），桂田 健（JALエンジニアリング），黒木 英俊（三菱重工），辻田 星歩（法政大）

運営委員会 ○辻田 星歩（法政大），猪亦 麻子（東芝ESS），餝 雅英（川崎重工），桂田 健（JALエンジニアリング），黒木 英俊（三菱重工），後藤 尚志（IHI），酒井 義明（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），塚原 章友（三菱重工），寺本 進（東大），松岡 右典（川崎重工），松沼 孝幸（産総研），村田 章（東京農工大），山本 悟（東北大）

企画委員会 ○黒木 英俊（三菱重工），猪亦 麻子（東芝ESS），太田 有（早大），桂田 健（JALエンジニアリング），鈴木 雅人（産総研），塚原 章友（三菱重工），辻田 星歩（法政大），村田 章（東京農工大），安田 聡（三菱重工），山本 悟（東北大），輪嶋 善彦（本田），渡辺 紀徳（東大）

国際委員会 ○谷 直樹（IHI），伊藤 優（東大），岡井 敬一（JAXA），岡村 泰博（IHI），風見 秀樹（本田），岸根 崇（三菱重工），渋川 直紀（東芝ESS），鈴木 雅人（産総研），都留 智子（川崎重工），福田 雅文（高効率発電システム研究所），船崎 健一（岩手大），山本 誠（東京理科大），渡辺 紀徳（東大）

学術講演会委員会 ○岡本 光司（東大），糟谷 宏樹（東芝ESS），富永 純一（JEFエンジニアリング），中山 健太郎（川崎重工），范 勇（産総研），平川 香林（IHI），平野 孝典（拓殖大），藤澤 信道（早大），古澤 卓（東北大），水野 拓哉（JAXA），三戸 良介（三菱重工），山積 弘信（本田），渡邊 裕章（九大）

集会行事委員会 ○桂田 健（JALエンジニアリング），石坂 浩一（三菱重工），尾崎 喜彦（川崎重工），河上 誠（日立），小島 充大（富士電機），澤 徹（東芝ESS），泰中 一樹（電中研），高山 祐輔（三井E&Sマシナリー），仲俣 千由紀（IHI），中村 織雄（本田），西村 英彦（三菱重工），久枝 孝太郎（IHI），堀 友香（防衛装備庁），吉田 征二（JAXA）

ガスタービン技術普及委員会 ○高橋 徹（電中研），石田 克彦（川崎重工），井筒 大輔（三菱重工），岡村 直行（JAXA），小田 豊（関西大），垣内 大紀（IHI），窪谷 悟（東芝ESS），多田 暁（JALエンジニアリング），寺本 進（東大），西田 啓之（電中研），林 明典（三菱重工），林 明宏（富士電機），姫野 武洋（東大），村田 章（東京農工大），山本 誠（東京理科大），渡辺 紀徳（東大）

学会誌編集委員会 ○新関 良樹（徳島文理大），壹岐 典彦（産総研），岩井 裕（京大），加藤 千幸（東大），金子 雅直（東京電機大），黒瀬 良一（京大），阪井 直人（川崎重工），佐藤 哲也（早大），渋川 直紀（東芝ESS），清野 将人（東北電力），清野 幸典（東北電力），高橋 俊彦（電中研），田尻 敬次（荏原エリオット），田中 望（IHI），中野 賢治（IHI回転機械エンジニアリング），西江 俊介（三井E&Sマシナリー），野原 弘康（ダイハツディーゼル），原 浩之（三菱重工），平野 篤（防衛装備庁），福谷 正幸（本田），松崎 裕之（元東北発電工業），三ヶ田 一裕（JALエンジニアリング），村上 秀之（NIMS），森澤 優一（東芝ESS），柳内 秀之（本田），山下 一憲（荏原），山本 悟（東北大），渡邉 啓悦（荏原）

論文委員会 ○山本 誠（東京理科大），青塚 瑞穂（IHI），壹岐 典彦（産総研），岩井 裕（京大），大北 洋治（JAXA），小田 剛生（川崎重工），鈴木 雅人（産総研），田頭 剛（JAXA），寺本 進（東大），中谷 辰爾（東大），姫野 武洋（東大），山田 和豊（岩手大），山本 武（JAXA），吉岡 洋明（東北大）

ガスタービン統計作成委員会 ○村田 章（東京農工大），飯塚 清和（IHI），井田 真澄（ターボシステムズユナイテッド），恵比寿 幹（三菱重工エンジン＆ターボチャージャ），澤 徹（東芝ESS），前田 泰宏（ヤンマーパワーテクノロジー），眞鍋 壮（三菱重工），矢嶋 理之（川崎重工），山上 展由（三菱重工）

産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳（東大），壹岐 典彦（産総研），今村 満勇（IHI），岡崎 正和（長岡技科大），餝 雅英（川崎重工），岸部 忠晴（MHI原子力研究開発），北山 和弘（東芝ESS），幸田 栄一（電中研），西澤 敏雄（JAXA），野崎 理（高知工科大），原田 広史（超合金設計研究所），松崎 裕之（元東北発電工業），山根 秀公（防衛装備庁），輪嶋 善彦（本田）

広報委員会 ○寺本 進（東大），壹岐 典彦（産総研），酒井 義明（東芝ESS），多田 暁（JALエンジニアリング），谷 直樹（IHI），藤澤 信道（早大），山本 誠（東京理科大），吉田 征二（JAXA）

表彰委員会 ○山本 誠（東京理科大），猪亦 麻子（東芝ESS），桂田 健（JALエンジニアリング），黒木 英俊（三菱重工），山本 悟（東北大）

将来ビジョン検討委員会 ○高橋 徹（電中研），小田 豊（関西大），賀澤 順一（JAXA），酒井 義明（東芝ESS），柴田 貴範（岩手大），柴田 良輔（本田），寺本 進（東大），仲俣 千由紀（IHI），半澤 徹（東北電力），姫野 武洋（東大）

男女共同参画推進委員会 ○森川 朋子（三菱重工），池田 亜矢子（NIMS），猪亦 麻子（東芝ESS），川岸 京子（NIMS），川澄 郁絵（本田），都留 智子（川崎重工），山上 舞（IHI）

調査研究委員会 ○川岸 京子（NIMS），大北 洋治（JAXA），岡崎 正和（長岡技科大），岡田 満利（電中研），長田 俊郎（NIMS），筧 幸次（東京都立大），金久保 善郎（IHI），岸部 忠晴（MHI原子力研究開発），東部 泰昌（川崎重工），野上 龍馬（三菱重工航空エンジン），日野 武久（東芝ESS），輪嶋 善彦（本田）

創立50周年記念事業実行委員会 ○渡辺 紀徳（東大），太田 有（早大），佐藤 哲也（早大），鈴木 伸寿（東芝ESS），高橋 徹（電中研），新関 良樹（徳島文理大），姫野 武洋（東大），船崎 健一（岩手大），松沼 孝幸（産総研），山本 誠（東京理科大）

IGTC2023実行委員会 ○太田 有（早大），大石 勉（IHI），小田 豊（関西大），岸根 崇（三菱重工），黒瀬 良一（京大），酒井 祐輔（川崎重工），鈴木 正也（JAXA），玉井 亮嗣（川崎重工），塚原 章友（三菱重工），寺本 進（東大），姫野 武洋（東大），平川 香林（IHI），武藤 昌也（名城大）

IGTC2023総務委員会 ○姫野 武洋（東大），小田 豊（関西大），鈴木 正也（JAXA），藤澤 信道（早大）

IGTC2023論文委員会 ○黒瀬 良一（京大），井上 智博（九大），岩井 裕（京大），岡井 敬一（JAXA），齋藤 敏彦（三菱重工），酒井 英司（電中研），佐藤 彰洋（IHI），柴田 貴範（岩手大），鈴木 正也（JAXA），田頭 剛（JAXA），高橋 徹（電中研），谷 直樹（IHI），都留 智子（川崎重工），寺本 進（東大），堀川 敦史（川崎重工），武藤 昌也（名城大），山本 誠（東京理科大），渡邊 裕章（九大）

IGTC2023行事委員会 ○岸根 崇（三菱重工），石川 智貴（東芝ESS），風見 秀樹（本田），佐藤 賢治（三菱重工），塚原 章友（三菱重工），堂浦 康司（川崎重工），中村 龍司（三菱重工），平川 香林（IHI）

IGTC2023展示委員会 ○酒井 祐輔（川崎重工），川澄 郁絵（本田），庄司 烈（JAXA），須原 亮（川崎重工），竹田 敬士郎（川崎重工），玉井 亮嗣（川崎重工），原田 純（川崎重工），廣瀬 彬（GE），藤木 貴子（IHI），前田 大輔（三菱重工），森澤 優一（東芝ESS）

IGTC2023財務委員会 ○大石 勉（IHI），平川 香林（IHI）

日本ガスタービン学会　賛助会員のご紹介

本コーナーでは，賛助会員各社の紹介をいたします。ガスタービン・エネルギー関連企業間の連携や情報交換を促進する場としてもご活用いただけるものと考えております。今回は 58 団体からご寄稿いただきました。御礼を申し上げます。

三菱重工

三菱重工業株式会社

三菱重工業は、CO_2排出などの環境負荷低減を実現する発電技術の開発を行っています。GTCCの核となるガスタービンは、航空転用・発電事業用・産業用で30MW級から1330MW級まで幅広い出力範囲に対応可能です。また、中小型から大型まで100%水素燃焼ガスタービン開発を進めています。三菱重工は、革新的な発電技術とソリューションにより、エネルギーの脱炭素化と電力の安定供給に世界中で貢献し、持続可能な未来の実現に取り組みます。

三菱重工パワー事業スペシャルサイト：power.mhi.com/jp

IHI Realize your dreams

株式会社 IHI　航空・宇宙・防衛事業領域

弊社における航空機用ガスタービンエンジンとの関係は，旧海軍の試作機「橘花」搭載の日本初のターボジェットエンジン「ネ２０」の製造に始まります。
以来，この国産開発エンジンを通して培った技術を生かし，戦後 自衛隊で運用される各種航空機用ガスタービンエンジンのライセンス国産製造、並びに国産開発に参画して来ました。
また、海上自衛隊艦艇に搭載される航空機転用型艦艇用ガスタービンのライセンス国産製造・開発を担当し、主機・発電機を提供しています。
民間エンジン事業においても，小型、中型から大型、超大型クラスまで，世界の民間航空機用エンジンの国際共同開発事業に主要なパートナーとして参画し，エンジンのモジュールや部品を開発、設計、製造しています。
さらに弊社では，各種エンジン部品の開発、設計、製造の他、航空機用エンジン・陸舶ガスタービンエンジンの整備や部品修理も担当しており，国内外と官民に広く信頼していただける技術力と高い品質・信頼性で，お客様の運用支援に貢献しております。

取扱製品：航空用エンジン，艦艇用ガスタービン 他
〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1番1号 豊洲IHIビル
株式会社IHI　航空・宇宙・防衛事業領域
防衛システム事業部 営業部 営業グループ
TEL：03-6204-7663, FAX：03-6204-8797
https://www.ihi.co.jp/

Kawasaki

川崎重工業株式会社

川崎重工の航空機用エンジン事業は，1942年にジェットエンジン（ネ−0～4）の研究試作に取り組んだことが始まりです。今日では，防衛省向けのヘリコプター用エンジンを製造するとともに，大形旅客機用エンジンの国際共同開発・分担製造を行っています。また，航空機用エンジンで磨いた技術を発電機や機械の駆動源として活かそうと，1972年，自社技術で産業用ガスタービンの開発に着手し，「カワサキガスタービン」を完成しました。現在，150kW級の小形機から3万kW級の大形機までシリーズ化を図り，これを駆動源とした非常用発電設備，コージェネレーションシステムは国内外で高く評価されています。
〒105−8315東京都港区海岸一丁目14番5号
TEL：03−3435−2533　FAX：03−3435−2592

TOSHIBA

東芝エネルギーシステムズ株式会社

～将来のエネルギーをデザインする～

東芝エネルギーシステムズ株式会社は、「電気をつくる、おくる、ためる、かしこくつかう」ための機器･システム･サービス
を提供しています。

電力需要の増加や環境への配慮が求められる中、電力の安定供給と環境との調和を目指して持続可能な社会の実現に貢献するとともに、これからのエネルギーのあり方を見据えながら、お客様や事業パートナーの皆様と一緒に価値を創造していきます。

〒212-8585川崎市幸区堀川町72番地34
https://www.global.toshiba/jp/company/energy.html

株式会社 本田技術研究所
先進パワーユニット・エネルギー研究所

https://www.honda.co.jp/aeroengine/

GE Honda HF120 Engine

当研究所では世界No.1の航空機エンジンの創出を目指し、小型、軽量、高性能かつ環境性にも優れたガスタービンエンジンの開発を行っています。設立以来、GE社と共同で開発を行ってきたHF120エンジンは、2013年12月に米国連邦航空局より型式認定を取得し、現在では北米、中南米、欧州、アジア、中東などで計200機以上が運用されています。今後はお客様から更なる信頼を得られるよう、高品質なサービスを継続すると共に、環境性の向上など革新技術の研究にも継続して取り組んでいきます。

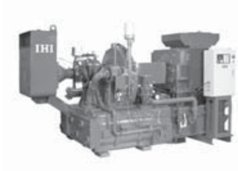
MITSUI E&S
Mitsui E&S Machinery Co., Ltd.

株式会社三井E&Sマシナリー

三井 E&S マシナリーは、2018 年 4 月の三井造船のホールディングス化に伴い、機械関連の事業会社として設立され、三井造船のガスタービン事業をそのまま継承しております。
1950 年からガスタービンの開発に着手し、1954 年に 1 号機を納入。以後、お客様の様々なご要望に合わせたガスタービンシステムを提案しております。

・MSC シリーズ（米国ソーラー社ガスタービン）：3MW ～ 15MW
・SB シリーズ（三井自社開発ガスタービン）：1MW ～ 24MW

〒104-8439
東京都中央区築地５丁目６番地４号
Tel. 03-3544-3951 Fax. 03-3544-3055
https://www.mes.co.jp/



開発建材株式会社

弊社はガスタービンコンバインドサイクルに於ける吸気フィルター用のアルミ製「ウェザールーバー」「遮音防水ルーバー」の製作を行っております。有効開口率が50%ありながら、台風時を上回る降水量と強風を用いた性能試験でも防水効率は99.9%。通気性にも優れたコストパフォーマンスの高い製品です。
会社創立は1973 年。自社にて製作、性能試験も実施しております。
取扱業種：アルミ防水ルーバー、遮音防水ルーバーの製造、販売、施工。
〒124-0006 東京都葛飾区堀切1-40-8
TEL：03-3695-4821、FAX：03-3693-0660
https：//www.kaihatsu-kenzai.co.jp

株式会社 関西電熱

弊社では、高温、高風圧タイプに対応した最高吐出熱風温度1000℃、本体耐圧5.0MPaの電気式熱風発生用ヒータの設計製作をおこなっています。
この熱風発生用ヒータは、主に熱機関に使用されている熱交換器、燃焼器、圧縮機、出力タービン、圧縮機タービン等の耐熱、耐久、ベンチテスト用として各研究機関等に多く使用されています。
採用例として、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 航空エンジン技術開発センター様にも、排出ガスのよりきれいな航空機用エンジンの開発を目的としたジェットエンジンの燃焼機技術開発の設備にて、セクタ形態で燃焼器の性能試験をおこなうためのエンジン内部の高温、高圧模疑環境作成用として導入いただいています。
http://www.kansaidennetsu.co.jp

MTC
Metal Technology Co. Ltd.

金属技研株式会社

ニア・ネット・シェイプ工法
Y字型製品

金属技研株式会社（MTC）は 1960 年に設立し、今では金属加工業界のリーディングカンパニーに成長しています。

ガスタービンや航空宇宙分野などあらゆる業界ニーズに応えるべく、HIP･熱処理･拡散接合･機械加工･ろう付け･溶接･金属積層造形などの技術を駆使し、金属部品の一貫生産サービスを提供しています。

近年では NNS（ニア･ネット･シェイプ）工法と呼ばれる素材量削減、耐久性・製品寿命向上が達成できる環境に優しい技術にも対応しています。

また、国内 6 工場の他、中国･スウェーデンの子会社とも連携し、グローバルにビジネスを展開しています。

世界最大サイズを誇る
Giga-HIP装置

〒164-8721　東京都中野区本町 1-32-2　ハーモニータワー 27 階
TEL: 03-5365-3035　E-mail: info@kinzoku.co.jp　会社 HP:

Nadcap

ケンブリッジフィルターコーポレーション株式会社

2022年1月 近藤工業株式会社と日本ケンブリッジフィルター株式会社は合併し、「ケンブリッジフィルターコーポレーション株式会社」となりました。
製販一体となったメリットを最大限活かして、様々なガスタービン用吸気フィルターを皆様へご提案してまいります。
普段、お使いのフィルタ性能にご満足頂けていないお客様、あるいは今以上のコストパフォーマンスをご希望のお客様は、ぜひ一度私たちの製品をご検討ください。
私たちは" Collective Flow"「燃える集団」となり、ケンブリッジブランドを世界中に広めてまいります。

〒105-0014
東京都港区芝3-14-2芝ケンブリッジビル
環境エンジニアリング部
TEL:03-6400-5005,FAX:03-6400-5006
https://www.cambridgefilter.com/

酒田共同火力発電株式会社

弊社は、石炭（一部、木質バイオマス燃料使用）を使用した火力発電による発電事業を行い、東北電力㈱に全量販売しています。発電出力は1･2号機合わせて70万kWで、山形県内の電力消費量の約50%に相当します。
弊社の使命である「電力の安定供給」と「適正かつ低廉な販売電力料金の達成」を目指し、また企業理念でもある「地域と共生するエネルギー企業」として地域社会との繋がりを密にし、地域貢献・環境保全に向けた諸活動を積極的に展開しています。

〒998-8622　山形県酒田市宮海字南浜1番19
TEL 0234-34-2321（代表）
FAX 0234-33-1677
https://www.sakata-power.co.jp/

CRE
株式会社シーアールイー

弊社は、航空機・宇宙機器に関する設計開発に特化しており、国内の主要な航空宇宙プロジェクトのほぼ全てに関与しております。
構造設計にはじまり、解析、電装設計、ソフト開発及び品質管理に至る設計開発に於ける幅広いサポートが可能です。
また、国際規格の認証を取得した組織によるバックアップ体制と共に各ユーザ様に合された各ユーザー様の要望に応えた当社オリジナルの教育システムを有しております。
〒460-0022 名古屋市中区金山 1 丁目 2-2 クマダ第 2 ビル
TEL 052-323-7731　　https://www.cre-nagoya.com/

SIEMENS energy シーメンス・エナジー株式会社

当社は、数MWの小型産業用から600MW級の大型事業用の幅広いラインアップを有するガスタービンメーカーです。
水素を始め様々な燃料への対応を可能とし、環境負荷低減に取り組むグローバルなリーディングカンパニーです。またガスタービン、蒸気タービン、発電機、ガスエンジン、プラント制御装置、排熱回収ボイラー等発電における主要機器OEMまたEPCとしての実績、知見に加え、蓄電、蓄熱装置等を取り揃え、大型事業用の集中型電源から分散型電源にいたるまで、省エネ・脱炭素に取り組むお客様に最適なトータルソリューションをご提案いたします。

シーメンス・エナジー株式会社 営業本部
〒141-0021 東京都品川区上大崎 3-1-1 JR 東急目黒ビル 4F
お問合せ： sekk_inquiry.jp@siemens-energy.com
TEL 03-6756-5300（代表）
http://www.siemens-energy.com/apac/en.html

常磐共同火力 株式会社

弊社は勿来発電所を持つ発電事業者であり、1955年、常磐炭鉱の低品位炭を活用するために創立されました。現在7～9号機、3ユニットで1,450MWの発電を行ない、東北電力㈱と東京電力エナジーパートナー㈱に販売しています。現在は主に海外炭を使用しており、既に使用炭種は100を超えました。隣接地では、525MWの最新鋭のIGCC（石炭ガス化複合発電）発電所が2021年から商用運転を行っており、弊社はO&M（運転・保全）等でこの事業に参画しています。

発電所：福島県いわき市佐糠町大島20
本　社：東京都千代田区神田須田町1-1
　　　　神田須田町スクエアビル7F
ホームページ：http://www.joban-power.co.jp/

ClassNK

一般財団法人 日本海事協会

日本海事協会（ClassNK）は、海上における人命と財産の安全確保及び海洋環境の汚染防止を使命に活動する船級協会です。ClassNKは120年以上に渡って培った知見より、独自に制定された技術規則や国際条約に基づき、建造中と就航後の船舶がこれらの規則等に適合していることを証明する検査を実施しています。

〒102-8567　東京都千代田区紀尾井町4番7号
Tel: 03-5226-2047, Fax: 03-5226-2039
e-mail: eod@classnk.or.jp
https://www.classnk.or.jp/hp/ja/

日本無機株式会社

弊社は、エアフィルタ事業のリーディングカンパニーとして常に新しい価値を創造し続け、お客様の要求されるクリーン環境作りのお手伝いを続けています。
ガスタービンに用いられるエアフィルタは空気圧縮機の汚れを抑制し、発電効率の低下抑制に貢献しています。
エアフィルタは高効率・長寿命が要求されており、弊社は多様なラインナップと豊富な経験に基づき、ご使用環境に最適なフィルタシステムをご提案します。

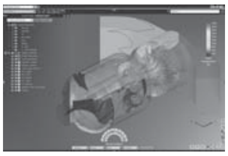
事業内容：エアフィルタ、クリーン機器、
ガラス繊維応用品（耐熱繊維、断熱・吸音材等）

〒110-0045　東京都台東区東上野 5-1-5 日新上野ビル
TEL:03-6860-7500 , FAX:03-6860-7510
https://www.nipponmuki.co.jp/

cādence

NUMECA Japan

日本ケイデンス・デザイン・システムズ社（旧・NUMECAジャパン株式会社）



ケイデンス社は、数値流体力学（CFD）、メッシュ生成、マルチフィジックスシミュレーション、最適化の分野で業界をリードするNUMECA社を買収し、システム解析ラインアップにCFDソリューションを追加しました。
NUMECAのソフトウェアは、流体の流れと熱伝達に関するシミュレーション、設計、最適化に利用され、開発コストを削減しながら、製品の優れた品質や性能を実現させるため、特にガスタービンの分野では多くの製品開発者、設計者、研究者の方々にご活用いただいております。

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜2-100-45新横浜中央ビル16階
TEL: 045-475-2221（代）/ FAX: 045-475-2451
https://www.numeca.com

jaec

一般財団法人日本航空機エンジン協会

当協会は、民間航空機用ジェットエンジンの開発を促進し、もって航空機工業の向上発展を図り、産業経済の健全な繁栄に寄与することを目的として、経済産業省の指導の下に（株）IHI、川崎重工業（株）、三菱重工業（株）の協力を得て1981年に設立されました。
現在、日本が参加する民間航空機用エンジンの開発・量産に係る国際共同事業であって、国家プロジェクトとして位置付けられる事業を推進するための日本側の事業主体で、V2500エンジンやPW1100G-JM事業などを遂行しています。
http://www.jaec.or.jp/

JICEF

日本内燃機関連合会（日内連）

弊会は，1954年に創立以来我が国の燃焼機関工業即ち内燃機関工業の振興と技術の向上に寄与するため，CIMAC関係事業，標準化事業，及び技術普及・広報活動事業の３事業について活発な活動を続けております。
CIMAC（国際燃焼機関会議）に関しましては、日本の代表機関としての諸事業を行い，また，国際標準化機構（ISO）の事業中，内燃機関に関する専門委員会［ISO/TC70（往復動内燃機関）及び ISO/TC192（ガスタービン）］に関し，日本産業標準調査会に協力すると共に，その他内燃機関に関連し当会で行う必要ありと認められる諸事業を行い，もって我が国内燃機関工業の振興に寄与することを目的としております。

〒105-0004 東京都港区新橋1-17-1 内田ビル7階
TEL: 03-6457-9789　FAX: 03-6457-9787
URL:　https://www.jicef.org

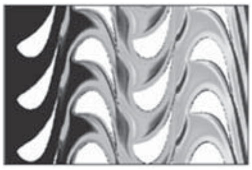
PULSTEC

パルステック工業株式会社

https://www.pulstec.co.jp/

弊社は、「研究開発型モノづくり企業」であり、主力製品は『ポータブル型X線残留応力測定装置』『3Dスキャナ』『光ディスク評価装置』『ヘルスケア関連製品』などで、特に光学系の技術については各業界から高い評価を得ています。
弊社が最も注力している『ポータブル型X線残留応力測定装置（μ-X360s）』は、世界最小・最軽量を実現し、操作も非常に簡単で、高精度、高速測定、低価格を実現した画期的な装置です。
各製品の詳細は、弊社ホームページをご覧ください。

B&B-AGEMA



https://www.bub-agema.de/

B&B-AGEMAは、発電プラントのエンジニアリングとターボ機械の設計サービスを専門的に行う会社で、本社はドイツのアーヘン市にあります。

1995年にDieter Bohn教授が設立して以来、エネルギー変換機械とプラントの設計、解析計算、専門技術に関する革新的なサービスを提供しています。
また、ガスタービン、蒸気タービン、その他のターボ機械全般について総合的な設計サービスも提供しています。

当社は、プラントの監視と予防保全、デジタルツイン・アプリケーション用の高度なソフトウェアを開発しています。さらに、水素の発生・貯蔵・利用に関する研究開発にも深く関わり、革新的で実用的な純水素燃焼バーナーについても開発・試験を行っています。

窓口：　info@bub-agema.de

Hitz

Hitachi Zosen

日立造船株式会社

弊社では、３～ 6MW クラスガスタービン発電設備の製造販売を行う他、100MW クラス発電所の建設保守運営事業も展開しております。茨城県では 113.6MW、112.3MW ガスタービンコンバインドサイクルを自社運営し電力卸売事業を実施しております。毎日起動停止という厳しい条件にもかかわらず高い稼働率を誇っており、発電所建設から保守運営まで含めたノウハウを蓄積しております。今後発電事業をご検討されるお客様へのトータルソリューション提供を目的とし活動しております。
取扱業種：発電設備の製造販売、発電設備の保守運営事業、電力の卸売事業
〒140-0013　東京都品川区南大井６丁目 26 番３号
大森ベルポート D 館 15 階
TEL:03-6404-0842、FAX:03-6404-0849
https://www.hitachizosen.co.jp

日本ガスタービン学会入会のご案内

日本ガスタービン学会は，「エネルギー」をいかにして効率よく運用し，地球規模の環境要請に応えるかを，ガスタービンおよびエネルギー関連分野において追求する産学官民連携のコミュニティーです。

会員の皆様からは，「ガスタービン学会に入会してよかったと思えること」の具体例として次の様な声が寄せられています：

- タテ（世代）とヨコ（大学，研究機関，産業界）の交流・人脈が広がった。
- 学会誌が充実しており，学会・業界・国外の専門分野の研究動向や技術情報が効率的に得られた。
- ガスタービンに熱い思いを持った人達と，家族的雰囲気で階層を意識せず自由な議論ができ，専門家の指導を得られた。

学会の概要（2022年３月現在）

会員数：1,782名（正会員 1,755名，学生会員 27名）　　賛助会員：105社

会員の出身母体数：企業・研究機関・官公庁等 約300，学校 約100

会員のメリット

個人会員（正・学生会員）：

学会誌無料配布（年６回），学術講演会の論文発表・学会誌への投稿資格，本会主催の行事の参加資格と会員参加費の特典，本会刊行物の購入資格と会員価格の特典，調査研究委員会等への参加

賛助会員：

学会誌の無料配布，学会誌広告・会告掲載（有料），新製品・新設備紹介欄への投稿，本会主催行事参加および出版物購入について個人会員と同等の特典

入会金と会費

会員別	入会金	会費（年額）	後期入会時 会費（初年度のみ）
正　会　員	500円	8,000円	4,000円
正　会　員（65才以上※）	500円	5,000円	2,500円
学生会員	500円	2,500円	1,250円
賛助会員	1,000円	一口 70,000円とし，一口以上	一口 35,000円

※当該年度３月１日現在　　後期・・・９月１日～翌２月末まで

入会方法

学会ホームページにて入会手続きができます（https://www.gtsj.or.jp/index.html）。

学会事務局にお電話いただいても結構です。申込書を送付致します。

GTSJ 公益社団法人 日本ガスタービン学会
Gas Turbine Society of Japan

〒160-0023 東京都新宿区西新宿７－５－13 第３工新ビル402

電話番号：03-3365-0095

E-mail:　gtsj-office@gtsj.or.jp

編集後記

梅雨の本番は７月だから，今はまだまだ中休みだと思っていたところが，関東甲信地方では６月27日に，統計史上最も早く，また，梅雨入りから最短記録での梅雨明け宣言となりました。１年中で最も日射の強い時期に，それを遮る雨雲が消え去ったことで連日猛暑日となり，電力需要が著しく増加し，供給量がひっ迫しています。そんな中，特に午後３時以降の節電が呼びかけられることに，なぜ？と首をかしげましたが，太陽光発電からの電力供給が減少する時間帯に最も厳しくなることに合点し，再エネ発電の定着を実感しました。

天候気象を相手にする太陽光や風力利用が，カーボンニュートラル社会実現の主役と目されていますが，今回の特集では，もう一面から見た主役として，低温排熱利用や蓄エネを利用したシステムの最前線記事を集めました。ガスタービン学会誌の解説記事ですので，読者の皆さまの技術領域の外辺をなぞりながら，周辺技術を紹介する編集に苦心しました。執筆の皆さまは，必ずしもガスタービンや，そのプラントを活動の中心とされている方々ばかりではありませんでしたが，本号に向けて分かりやすい記事をいただけまして，大変感謝しております。設備の廃熱や再エネ余剰電力を利用した低沸点媒体サイクル，ヒートポンプ，液化空気貯蔵，CO_2吸着などの記事から，“使う気になればいつでも準備OK”の状態にあることを再認識しました。航空機電動化，燃料電池を備えた複合発電，再エネによる水素製造と活用，送配電の分散配置等々，原動機であるガスタービンや蒸気タービン，燃焼器や熱交換器の姿や利用法，求められる技術が変化していくのは自明だと感じております。高温化，高効率化とともに両輪を担う，“低温利用”を取り上げた今回特集を，ガスタービン関連の新技術が進む方向付けのご参考としていただけると幸いです。

最後に，特集アイデアの創出，執筆記事と筆者のご紹介，編集，校正にご協力いただきました，７月号編集チームの皆さまに，深く感謝いたします。ありがとうございました。

（渋川 直紀）

●７月号アソシエイトエディタ
渋川 直紀（東芝エネルギーシステムズ）
●７月号担当委員
黒瀬 良一（京都大学）
阪井 直人（川崎重工業）
原 浩之（三菱重工業）
室岡 武（IHI）

（表紙写真）
今回の表紙については，【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。
詳細については，下記記事をご参照ください。
・「下水汚泥焼却設備の未利用廃熱活用技術」 ……………………………………………（P.220 ～ 225）
・「低温熱源向けバイナリー発電の概要」…（P.234 ～ 239）
・「ヒートポンプ関連技術の最新動向（前川製作所と早稲田大学 太田・藤澤研の共同研究の成果）」 ……………………………………………（P.246 ～ 251）
・「CO_2脱着に低温排熱を有効利用するCO_2回収技術(Kawasaki CO_2 Capture)の開発」 ……（P.252 ～ 257）

☘事務局（だより）✉☘

今年もまた暑い季節がやってきました。この夏は電力需給のひっ迫も心配されていて，冷房を我慢（-_-;）なんてこともあるかもしれませんので，体調管理に気を付けながら，夏を乗り切りたいですね。

コロナ禍での運動不足解消のため昨年からジョギングを始めたのですが，なんと自分でも驚くことに，１年以上続いています。といっても，週に１～３回程度のゆるいペースなのですが・・。でも，運動嫌いで，何事も形から入って続かないタイプの私にしては，快挙なのです。おかげで新調したランニングウェア一式，今回は無駄にならずに済んでいます(笑)。肝心のジョギング効果は，残念ながら１年たっても体感できていないのですが，とりあえず続けることを目標に細々とがんばります。

さて，ようやくコロナの感染状況も落ち着き，各所で人の集まるイベントも開催されるようになってきました。本会でも，９月以降は３年ぶりに各種行事の対面開催を予定しております。この２年，慣れないオンライン開催で頭を悩ませることが多かったのですが，いざ対面に戻るとなると，どんな風にやっていたのかすっかり忘れていて，まずは思い出すことから始めています。無事にイベントが開催され，また皆様にお会いできることを楽しみにしております。

（山本 由香）

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2018年７月13日改定

1．本会誌の原稿はつぎの３区分とする。

A．依頼原稿：学会誌編集委員会（以下，編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下，会員）外でもよい。

B．投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。

C．学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告，会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。

1.2．技術論文の投稿については，「技術論文投稿要領」による。

1.3．英文技術論文の投稿については，Instruction to Authors, JGPP（International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems）による。

2．依頼原稿および投稿原稿は，論説・解説，講義，技術論文，寄書（研究だより，見聞記，新製品・新設備紹介），随筆，書評，情報欄記事の掲載欄に掲載することとし，刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説，講義	6ページ以内
技術論文	「技術論文投稿要領」による
寄書，随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内

3．原稿の執筆者は，本会誌の「学会誌原稿執筆要領」に従って原稿を執筆し，編集委員会事務局（以下，編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記１に示す。

4．依頼原稿は，編集委員会の担当委員が，原稿の構成，理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて，執筆者への照会，修正依頼を行う。

5．投稿原稿のうち技術論文以外のものは，編集委員会が審査し，本会誌への掲載可否を決定する。

6．投稿原稿のうち技術論文の審査，掲載については，「技術論文投稿要領」に従う。

7．依頼原稿の執筆者には，学会事務局から原則として「学会誌の執筆謝礼に関する内規」第２条に定めた謝礼を贈呈する。

8．非会員の第一著者には掲載号学会誌１部を贈呈する。

9．本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」による。

10．他者論文から引用を行う場合，本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記１　原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
ニッセイエブロ㈱ 企画制作部
学会誌担当：高橋 邦和
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17 明産西新橋ビル
TEL：03-5157-1277
E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2021年７月11日改定

1．本学会誌に投稿する和文技術論文（以下和文技術論文）およびJGPPに投稿する英文技術論文（以下英文技術論文）は次の条件を満たすものであること。

1）和文技術論文の責任著者は，論文投稿時および論文掲載時に，本学会の正会員または学生会員であること。英文技術論文についてはこの限りではない。

2）ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。

3）和文技術論文は「学会誌原稿執筆要領」に従って執筆された日本語原稿，英文技術論文は「Instruction to Authors」に従って執筆された英語原稿であること。

4）一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし，以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。

- 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
- 特許および実用新案の公報，科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
- 他学協会の講演要旨前刷，社内報・技報，官公庁の紀要等の要旨または抄録

2．技術論文のページ数は，和文技術論文は原則として刷り上がり８ページ以内とする。ただし，「学会誌の掲載料に関する内規」第２条に定めた金額の著者負担で４ページ以内の増ページをすることができる。英文技術論文は「Instruction to Authors」に定める。

3．和文技術論文のカラー図は電子版と本学会ホームページ上の「技術論文掲載欄」に掲載し，冊子体にはモノクロ変換した図を掲載する。著者が「学会誌の掲載料に関する内規」第３条に定めた金額を負担する場合には，冊子体もカラー印刷とすることができる。

4．投稿者は，「学会誌原稿執筆要領」「Instruction to Authors」に従って作成された原稿電子データを，「技術論文原稿表紙」とともに技術論文投稿システム（Editorial Manager）から提出する。

5．投稿された論文は，論文委員会が「論文査読に関する内規」に従って査読を行い，掲載可否を決定する。

6．論文内容についての責任は，すべて著者が負う。

7．和文技術論文の著作権に関しては，別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程」，および「学会誌編集および発行要領」第５章第16条を適用する。英文技術論文の著作権に関しては，別途定める「日本ガスタービン学会著作権規程（Copyright Regulations of the Gas Turbine Society of Japan）」，および「英文論文集発行要領」第６章を適用する。

日本ガスタービン学会誌
Vol. 50　No. 4　2022.7
発行日　2022年７月20日
発行所　公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者　新関 良樹
発行者　福泉 靖史
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
第３工新ビル402
Tel. 03-3365-0095　Fax. 03-3365-0387
郵便振替 00170-9-179578
銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
㈳ 1703707
印刷所　ニッセイエブロ㈱
〒105-0003 東京都港区西新橋1-18-17
明産西新橋ビル
Tel. 03-5157-1277