

【課題名】サーモサイホン式熱交換器を用いた高出力省スペース熱電発電システムの開発・実証(委託)

【代表者】ヤンマーホールディングス株式会社 中川修一

【実施年度】平成30~令和2年度

(1)課題概要

①【課題の概要・目的】

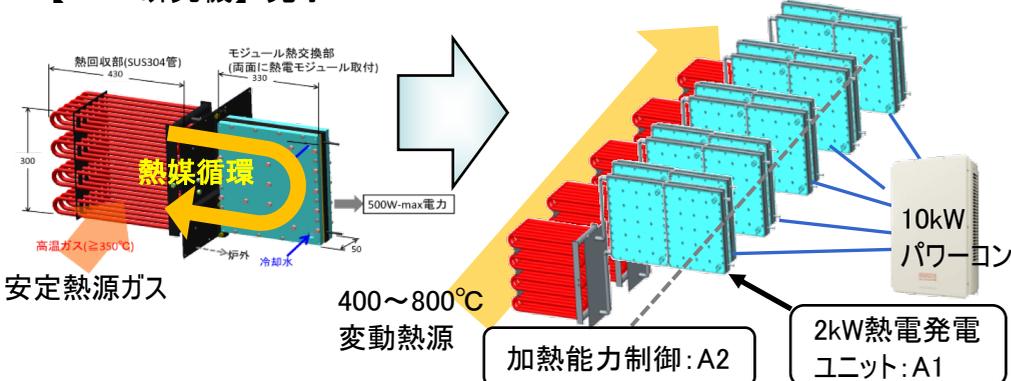
当社は2017年度までに、幅広い熱源温度の排熱から熱電モジュールに熱を伝えるサーモサイホン式熱交換器を開発した。従来は、熱電発電システムの取付面積は、熱電モジュール面積に依存していたが、サーモサイホン式熱交換器を用いることで、取付面積を低減し、500W機の性能評価とフィールド試験を完了し、基盤技術を確立した。

本開発では実用化に向けて課題となる、大型化に伴う加熱温度ムラによる出力低下への対策技術、また変動する熱源に対しても安定した発電出力を得るためのモジュール加熱温度の制御技術を確立し、多様な排熱源に広く展開できる高出力省スペースな熱電発電システムを実現し、CO2排出量削減に貢献する。

(重点課題: 2-①)

【500W研究機】:完了

【10kW実用システム】:B



②【技術開発の内容】

○重要な開発要素

A1.【高出力省スペース熱電発電ユニットの開発】

サーモサイホン熱交換器の高低差やモジュール熱交換部内部流路の適正化により、大型化に伴う加熱温度ムラの発生を抑え、出力低下がなく、500Wユニット同等の取付面積で2kW出力のユニットを開発する。(実用化レベルに2018年度到達)

A2.【熱源変動対応技術の開発】

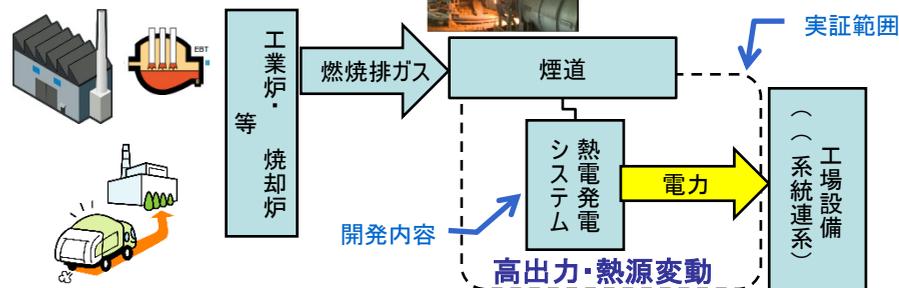
サーモサイホン熱交換器内の熱媒充填量調整等を行う加熱能力制御機構の開発により、モジュール加熱温度の制御技術を確立し、変動する熱源においても安定した出力を得られるシステムを実現する。(実用化レベルに2019年度到達)

B. 開発要素のシステム統合、C. その実証

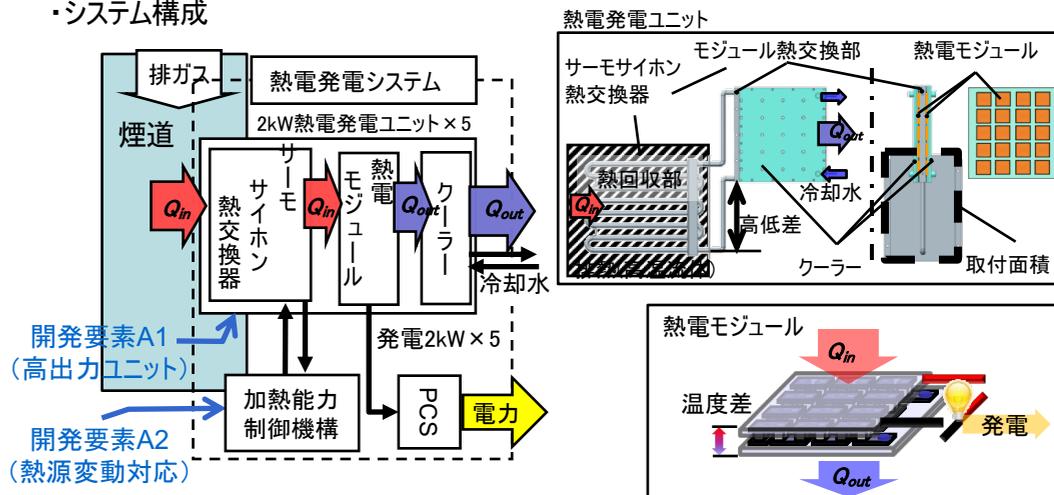
2kWユニットの複数結合方式の確立により、出力/コスト比が最大となるシステムを構築し、10kW級の大規模システムによる、工業炉等での適用実証を実施する。(実用化レベルに2020年度到達)

③【システム構成】

・システム環境



・システム構成



④【技術開発の目標・リスク】

○想定ユーザ・利用価値:

工業炉を有する工場や焼却施設等での省エネ、CO2排出量削減および購入電力削減

○目標となる仕様及び性能:

- 1)システムコスト : 50万円/kW以下
- 2)ユニット取付面積 : 0.1m²/kW以下(従来比1/8)
- 3)熱源ガス温度変動対応 : 発電出力変動幅 30%以内 (発電出力変動抑制) (ガス温度600±100°C)

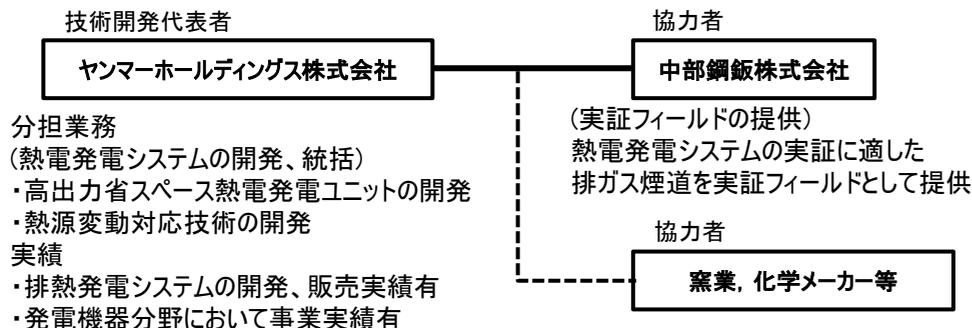
○開発工程のリスク・対応策

リスク: 熱源変動形態によって、導入調整が膨大になるリスクがある。

対応策: 熱源プロファイルを事前に入手することで、調整が不要になる解析ツールを構築する。(Cの実証で解決予定)

(2)実施計画等

①【実施体制】



(株)ヤンマーeスター(ヤンマーGr)

事業終了後の製品化・販売を担当

ヤンマーエネルギーシステム(株)

自社開発の温排水利用のORC事業と
協業することで拡販

②【実施スケジュール】

	2018年度	2019年度	2020年度
A1.高出力省スペース熱 発電ユニットの開発	技術開発 15,680千円	フィールド試験 15,200千円	
A2.熱源変動対応技術 の開発	1,800千円	技術開発 12,050千円	フィールド試験1件 9,179千円
B.統合システムの最適化		技術開発 4,350千円	17,167千円
C.実証			システム実証1件 11,400千円
その他経費	8,762千円	5,315千円	421千円
合計	26,242千円	36,915千円	38,174千円

③【事業化・普及の見込み】

○事業化計画

事業化を担う主たる事業者	ヤンマー関連会社
--------------	----------

- ・2022年までにモニター商品生産・販売開始(IoT活用による遠隔監視導入)
- ・2023年を目処とし、ヤンマー関連企業における販売ネットワークを核として、販売開始
- ・2025年までに低コスト化を達成し、大規模システムの販売加速

○事業展開における普及の見込み

日本国内では年間約13億トンのCO2が排出され、その40%(5.2億トン)を産業分野が占めている。さらにその25%(1.3億トン)は素形材産業を支える約40,000基におよぶ工業炉から排出されているが、排熱発電技術がなく、手つかずの状態。

- ・対象市場規模 : 国内工業炉市場規模250億円/年
- ・想定事業規模 : 事業規模15億円/年
- ・導入コスト目標 : 50万円/kW(従来品の価格:200万円/kW)
- ・耐久時間(寿命) : 40,000時間以上
- ・製品単純回収年数 : 5年以下

○年度別販売見込み

【提案時当初計画】

年度	2022	2025	2030
目標単年度販売台数(kW)	150	1,000	2,200
目標累積販売出力(kW)	183	2,283	11,283
目標販売価格(千円/kW)	750	500	500

【現時点見込み】

年度	2022 (販売開始年 度を記載)	2023	2030	2050
目標単年度販売台数 (kW)	20	150	2,000	4,000
目標累積販売台数(kW)	20	170	9,070	80,070
目標販売価格(千円/kW)	750	750	500	500

○普及におけるリスク(課題・障害)

- ・事業開始時に設定可能な価格は75万円/kWと見込まれ、初期段階(3年間)においてユーザーの投資回収を5年以下とし広く普及を図るには、補助金などの政策支援が必要となる。

(3)技術開発成果

①【これまでの成果】

- ・最大発電出力2.2kWの発電ユニットを開発
- ・発電ユニットを5台連結し、10kW級発電システムを開発
- ・熱源変動対応機構の開発
- ・投資回収4.8年、システムコスト49.5万円/kW

②【エネルギー起源CO2削減効果】

【提案時当初計画】 ※実施期間中における分科会等で計画変更が認められた場合等はその設定値

開発品(10kW級発電システム)1台当たりの単年度CO2削減量 (ton-CO2/台・年)	37
開発品(10kW級発電システム)法定耐用年数	10年

年度	2025	2030
CO2削減量 万ton-CO2/年)	0.8416	4.1594
累積CO2削減量 万ton-CO2)	1.6154	15.0394
CO2削減コスト (円/ton-CO2) =年間累積電力削減量[kWh]×法定耐用年数[年] *kWあたりの売価[千円/kW]	13,563	13,563

【現時点見込み】

開発品(10kW級発電システム)1台当たりの単年度CO2削減量 (ton-CO2/台・年) ※CO2排出源単位変化に伴い修正 CO2排出源単位:0.579kg-CO2/kWh (2021年度地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック公表値)	42
開発品(10kW級発電システム)法定耐用年数	10年

現時点見込みの年次は固定

年度	2022 (販売開始年 度を記載)	2023	2030	2050
単年度CO2削減量 (万ton-CO2/年)	0.0083	0.0709	3.7811	16.6752
累積CO2削減量 (万ton-CO2)	0.0083	0.0792	12.2479	258.7574
CO2削減コスト (円/ton-CO2) =年間累積電力削減量[kWh]×法定耐用年数[年]÷kWあたりの売価[千円/kW]	17,991	17,991	11,994	11,994

③【成果発表状況】

- ・論文発表
 - ①「熱電モジュールの特性に適する熱電発電システムの検討」平成28年6月30日、日本機械学会環境工学シンポジウム
 - ②「ループ型サーモサイホン式熱交換器を用いた熱電発電システムの発電量に関する考察」平成30年5月30日、日本伝熱学会シンポジウム
 - ③「複数のループ型サーモサイホン式熱電発電装置間での発電量偏差の抑制」令和3年10月10日、日本機械学会 熱工学コンファレンス
- ・展示会出展 2020年1月29日～31日に開催された「ENEX2020」にて本技術を出展
- ・講演 「サーモサイホン式熱交換器を用いた高出力熱電発電システムの開発」2021年1月14日(Web開催)、第43回排熱発電コンソーシアム会合
- ・特許 8件出願完了

④【技術開発終了後の事業展開】

○量産化・販売計画

- ・2021年までに、量産部品サプライヤーおよび生産拠点を確定。
- ・2021年までに、商品化に向けた品質評価を完了し量産仕様を確定。
- ・2022年までに、工業炉向けモニター販売を開始 (IoT活用による遠隔監視導入)
- ・2023年までに、事業化担当のヤンマーeスター株式会社より販売開始

○事業拡大シナリオ

年度	2022	2023	2025	2030 (最終目標)
投資回収性向上 (低コスト化、高寿命化)	発電出力向上→	ユニットあたりの出力密度の向上	耐用年数拡大	補助金不要化
市場拡大		排ガス性状への対応 400°C以下の低温ガス対応		民生用途適合
生産体制および販売・サービス網拡大	協力会社による委託生産準備	ヤンマーグループ会社販路へ展開		国内拠点販売・サービス体制確立

○シナリオ実現上の課題

- ・熱電モジュールメーカーとの連携強化 (低コストおよび超長寿命化、低温の熱源ガス対応)
- ・腐食性熱源ガスに対応可能な熱交換器の開発と長期間評価実施
- ・導入対象の熱源ガスに応じたシステム設計ツール、マニュアルの整備
- ・販売拡大に向け、中核となるエンジニアリング、サービススタッフの育成

○参考資料1 CO2削減効果について

※前提条件, 計算方法

- ①市場: 産業分野(鉄鋼/化学/窯業等の工業炉)
- ②工業炉の年間平均稼働時間: 7,200時間(年間平均稼働日: 300日)
- ③システム1台あたりの発電出力: 10kW
- ④法定耐用年数: 10年
- ⑤開発機器(10kW級発電システム)1kW当たりのCO2削減量[ton-CO2/年]=1kW当たりの電力削減量[kWh]×CO2排出係数[ton-CO2/kWh]
- ⑥当該年度における稼働容量[kW]=累積普及量[kW]-累積普及量のうち法定耐用年数を超過したもの[kW]
- ⑦年間CO2排出削減量[ton-CO2/年]=⑤×⑥
- ⑧開発機器(10kW級発電システム)1台当たりのCO2削減量[ton-CO2/年]=10kW当たりの電力削減量[kWh]×CO2排出係数[ton-CO2/kWh]
- ⑨累積CO2削減量=⑦の累積値
- ⑩CO2削減コスト[円/ton-CO2]=kWあたりの売価[円/kWh]÷(⑤×法定耐用年数[年])

○販売開始年(2022年)時点の削減効果 (試算方法パターン B-a, II-i)

※販売前のため, 実績値ではなく予測値を記載.

- ・国内潜在市場規模: 1 GW((財)省エネルギーセンター, 工場群の排熱実態調査研究要約集(2001)の内, 工業炉の排熱量より推計)
- ・販売開始年度までに期待される最大累積普及量: 20 kW(生産計画に基づく最大生産台数)
- ・開発機器(10kW級発電システム)1台当たりのCO2削減量: 42 ton-CO2/年
- ・削減原単位: CO2排出係数0.000579 ton-CO2/kWh(地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック公表値)
- ・累積CO2削減量: 0.0083 万ton-CO2
- ・CO2削減コスト: 17,991 円/ton-CO2

○2023年時点の削減効果 (試算方法パターン B-a, II-i)

- ・国内潜在市場規模: 1 GW((財)省エネルギーセンター, 工場群の排熱実態調査研究要約集(2001)の内, 工業炉の排熱量より推計)
- ・2023年度までに期待される最大累積普及量: 170 kW(生産計画に基づく最大生産台数)
- ・開発機器(10kW級発電システム)1台当たりのCO2削減量: 42 ton-CO2/年
- ・削減原単位: CO2排出係数0.000579 ton-CO2/kWh(地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック公表値)
- ・累積CO2削減量: 0.0792 万ton-CO2
- ・CO2削減コスト: 17,991 円/ton-CO2

○2030年時点の削減効果 (試算方法パターン B-a, II-i)

- ・国内潜在市場規模: 1 GW((財)省エネルギーセンター, 工場群の排熱実態調査研究要約集(2001)の内, 工業炉の排熱量より推計)
- ・2030年度までに期待される最大累積普及量: 9,070kW(生産計画に基づく最大生産台数)
- ・開発機器(10kW級発電システム)1台当たりのCO2削減量: 42 ton-CO2/年
- ・削減原単位: CO2排出係数0.000579 ton-CO2/kWh(地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック公表値)
- ・累積CO2削減量: 12.2479 万ton-CO2
- ・CO2削減コスト: 11,994 円/ton-CO2

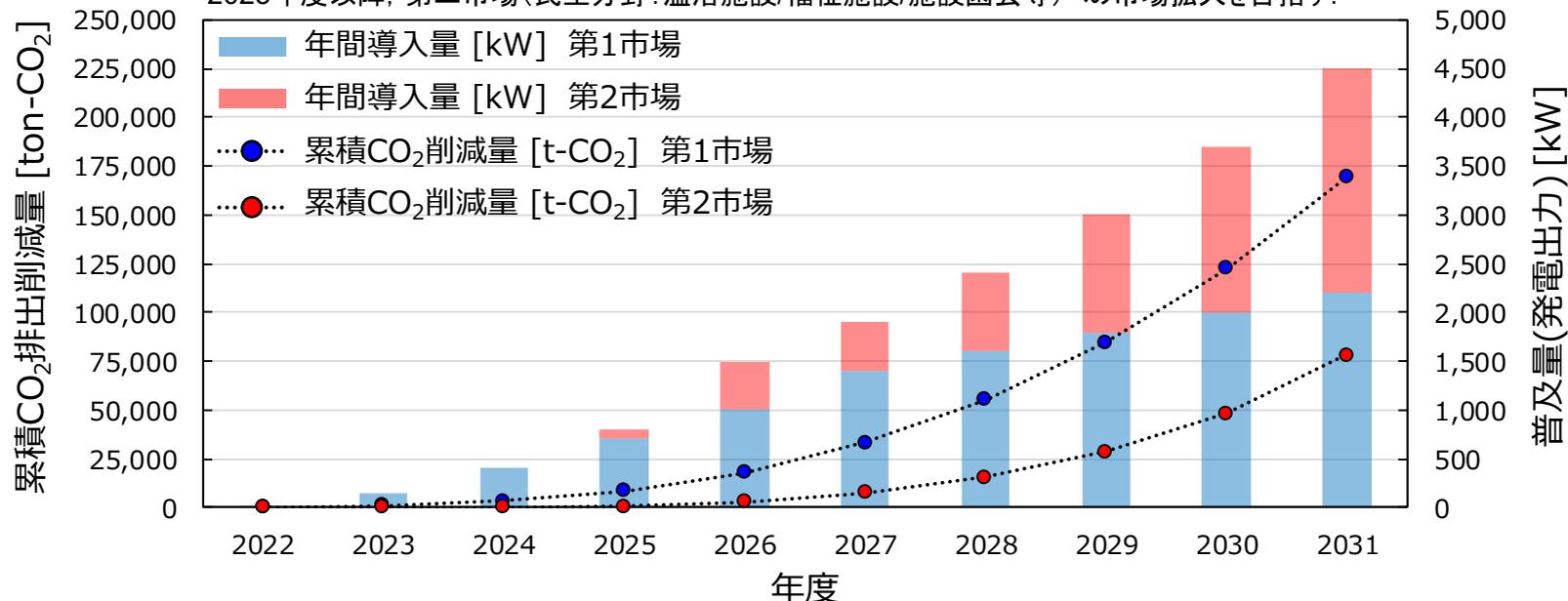
○2050年時点の削減効果 (試算方法パターン B-a, II-i)

- ・国内潜在市場規模: 1 GW((財)省エネルギーセンター, 工場群の排熱実態調査研究要約集(2001)の内, 工業炉の排熱量より推計)
- ・2050年度までに期待される最大累積普及量: 80,070 kW(生産計画に基づく最大生産台数)
- ・開発機器(10kW級発電システム)1台当たりのCO2削減量: 42 ton-CO2/年
- ・削減原単位: CO2排出係数0.000579 ton-CO2/kWh(地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック公表値)
- ・累積CO2削減量: 258.7574 万ton-CO2
- ・CO2削減コスト: 11,994 円/ton-CO2

○参考資料2 事業化計画について

1) 数量計画

2022年度より、第一市場(産業分野:鉄鋼/化学/窯業等の工業炉)へ本事業開発品を導入予定。
2025年度以降、第二市場(民生分野:温浴施設/福祉施設/施設園芸等)への市場拡大を目指す。



第一市場: 投資回収≤5年 設置スペース低減→適合対象拡大 補助金不要化
第二市場: 排ガス性状への対応, 短い年間稼働時間での投資回収実現

2) サプライヤー

本事業での試作品製造メーカーのうち、十分な量産能力を有する以下の各社を主サプライヤーとして想定。

- ① ガス側熱交換器 : A株式会社(滋賀県)
- ② ヒーター : 株式会社B(滋賀県)
- ③ クーラー : C株式会社(三重県)
- ④ 熱電モジュール : D社 (中国, 江西省), 株式会社E(神奈川県)
- ⑤ パワーコン : F株式会社(東京都)

4) 事業化想定ユーザー(国内)

- ① 汚泥処理施設
- ② 廃棄物処理施設メーカー
- ③ バイオマスボイラーメーカー
- ④ 工業炉ユーザー(鉄鋼業, 化学工業等)

5) 営業, サービス

事業化当初 : 株式会社ヤンマーeスターが担当(滋賀県米原市)
2024年以降(想定) : ヤンマーグループ会社販売網へ展開

3) 生産拠点

事業化当初 : ヤンマー株式会社中央研究所内(滋賀県米原市)

2023年以降(想定) :

ヤンマーホールディング傘下の既存生産拠点へ展開(岡山県または滋賀県内)
又は、ヤンマー協力会社への生産委託(滋賀県内)

○参考資料3 その他

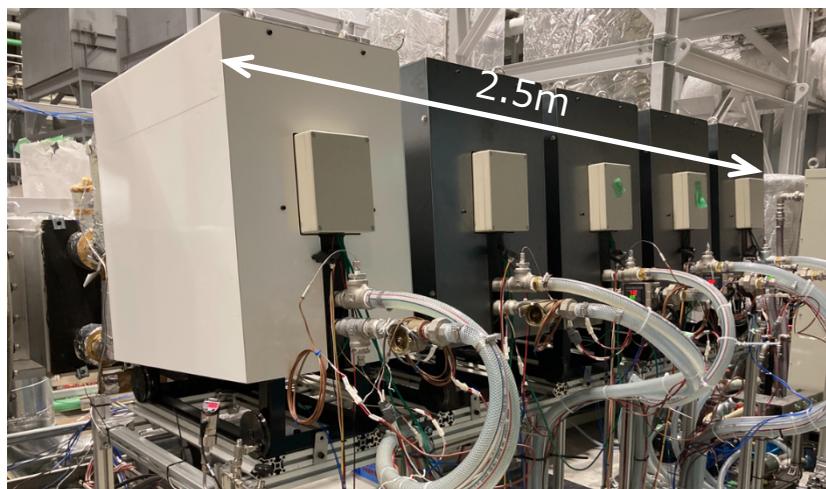
- 1) 中部鋼鉄株式会社様への実装
2018年度より、2kW級発電ユニット並びに熱源変動対応機構の実証試験を実施。



○参考資料3 その他

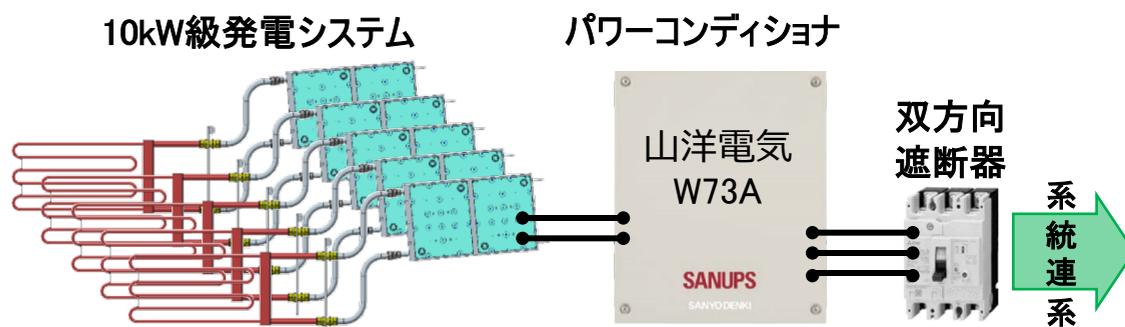
2) 10kWシステム商品化開発

ヤンマーホールディングス(株)中央研究所内の試験用熱風炉を用いて、10kW級システムの実証試験を実施。システム制御の開発等、商品化に向けた評価試験を実施中。



3) 系統連携認証

熱電発電ユニットとパワーコンディショナーの組み合わせシステムで系統連系実証試験を実施。2020年6月26日付で認証を取得。(関西電力送配電株式会社 滋賀支社 電力本部)



CO2排出削減対策技術評価委員会による終了課題事後評価の結果

- ・ 評価点 6.5点（10点満点中。（10点：特に優れている、8点：優れている、6点：問題ない、4点：多少問題がある、2点：大きな問題がある））
- ・ 評価コメント

[評価された点]

- 熱電発電システムは工業分野の廃熱回収の可能性拡大に重要なテーマであり、開発において競合技術との比較も含め所期の技術開発目標をほぼ達成している点は評価できる。

[今後の課題]

- 本技術導入に関心のある事業者等の評価、モニター商品の運用評価を技術開発・事業化に反映させることにより、市場開拓に努める必要がある。
- まずは2022年の販売目標を達成することを期待する。普及には補助金が必要であるとのことだが、価格を下げるとともにカーボンニュートラル施策やカーボンプライシングによる付加価値向上など、追加的な価値の向上を検討することが望まれる。

[その他特記事項]

- コスト削減とともに海外市場の可能性の検討も望まれる。

[事業化に向けたコメント]

- ユーザーにとってメリットとなるCO2削減効果であるため、価格低減などによりシステム受容性を高めるとともに、CO2削減効果の向上を追求し続けることが望まれる。
- 技術課題の抽出とその対応が進められており、省エネ技術である開発技術の工業分野におけるニーズも高いものの、具体的な導入先市場がまだ不明確であるので、更なる検討を進めることを期待する。