

(平成 25 年度 研究実施報告)

# 国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム)

(研究領域「エネルギー利用の高効率化」)

研究課題名

「鉄鋼業における中低温廃熱の高効率回収・利用に関する研究開発」

平成25年度実施報告書

代表者氏名 坂上 英一

(株式会社 東芝 電力・社会システム技術開発センター ・ 主幹)

## 1. 研究実施内容

### 1-1. 研究実施の概要 公開

#### 【背景及び本研究の概要】

製鉄プラントは大量のエネルギーを必要とし、廃熱も大きい。特に中国はシェア 45%を占める世界最大の鉄鋼生産国であり、この廃熱エネルギーの高効率利用は地球温暖化防止への貢献が大きい。

有効な熱エネルギー利用法の一つに、有機ランキンサイクル(ORC)がある。ORCは沸点の低い作動媒体を高温熱源で加熱・気化し、その体積膨張による圧力でタービンを駆動し発電する。ORCを普及させ廃熱利用を推進するためには、サイクル効率を高める必要がある。それには適正な作動媒体の選定と、その媒体に適した運転条件の設定が重要である。作動媒体には、少ないロスで熱エネルギーを仕事に変換する特性に加え、燃焼・爆発しにくい安全性や、地球温暖化係数(GWP)が低い環境性も要求される。本研究は製鉄所の廃熱を回収・利用した低燃焼性・低 GWP の有機作動媒体を用いた高効率なORC発電システム(図 1)の開発を目的とする。主な開発項目は、1) 低燃焼性・低 GWP の有機作動媒体の選択、2) 前記媒体の特性調査・解析、3) 前記媒体特性に基づいたORCシステム及び機器の設計、である(図 2)。3)でのシステム設計精度を高めるため、2)では、媒体の臨界点付近の高温・高圧の特性を高精度で測定することに主眼を置く。

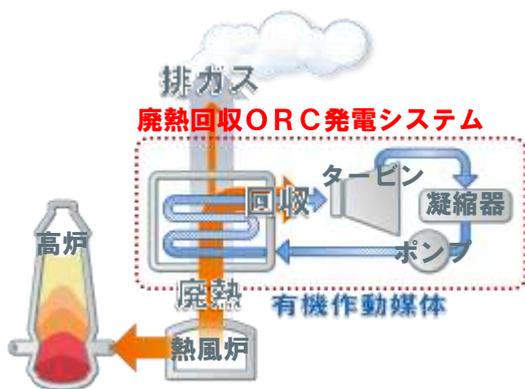


図1 本研究が目指す廃熱回収 ORC の概要

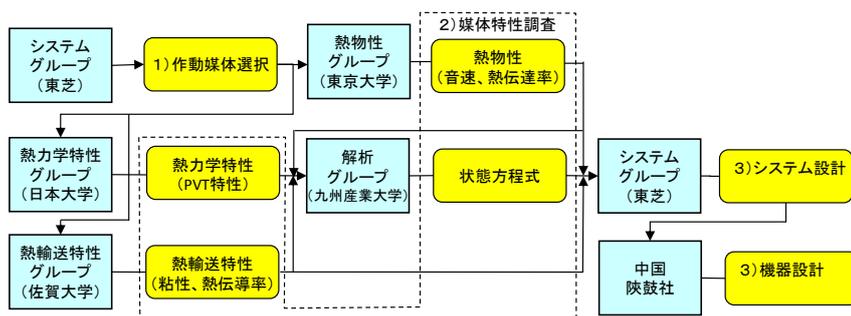


図2 本研究の各研究機関の研究内容概要

#### 【H25年度成果】

平成25年度は上記の1) 低燃焼性・低 GWP の有機作動媒体の選択、に関して低沸点媒体の調査を行い、複数の候補媒体をピックアップした。また2) 有機作動媒体の特性調査・解析、に関して特性測定機器の準備を中心に行い、部分的には媒体の測定及び解析を行った。以下に詳細を記す。

#### 低沸点媒体の調査(東芝)

媒体の仕様は、環境規制などの社会動向なども踏まえ、①不燃、②GWP150 以下、③沸点 35°C以下、とした。文献調査およびメーカーへのヒアリングから、入手可能で仕様を満足する媒体を抽出した。続いて熱力学特性および中国製鉄所の現地調査などから入手した廃熱温度などの条件をもとにサイクル効率を予測するツールを作成し、高効率発電が期待される材料を選択した。このツールはタービン入口圧力などの運転パラメータを探索し、自動で適正化する。これにより媒体選択時間を大幅に短縮した。

#### 媒体の高精度熱力学特性計測・分析(日本大学・田中勝之)

はじめに高温・高圧仕様の熱力学特性(pvT 特性)測定のための装置の製作をおこなった。装置の概念図を図3に示す。測定原理には、等容法を採用し、温度 250°C・圧力 10MPa まで測定可能な仕様とした。この測定結果

を基に試料容器の内容積を決定した。次に、製作した装置を用いて既存の媒体である HFC134a の pvT 特性を測定した。図 4 にそれぞれの密度(比体積  $v$  の逆数)における圧力  $p$  と温度  $T$  の関係を示す。なお、この測定結果を基に試料容器の内容積を決定した。

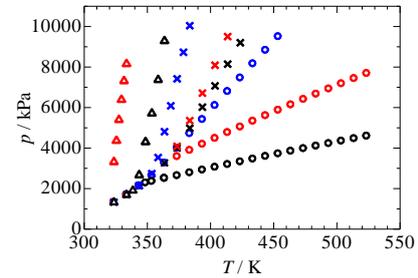
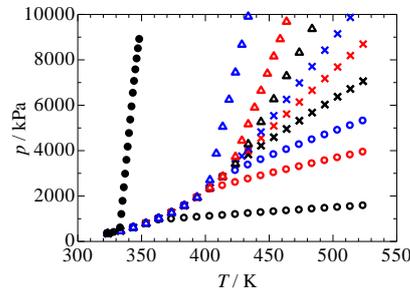
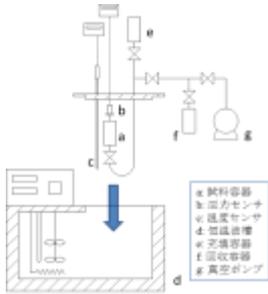


図 3 装置概略図 図 4 HFC134a の pvT 特性(p-T 線図) 図 5 HFC245fa の pvT 特性(p-T 線図)

続いて、本研究のシステムに対して特性が適している既存の媒体 HFC245fa の pvT 特性を測定した。図 5 にそれぞれの密度(比体積  $v$  の逆数)における圧力  $p$  と温度  $T$  の関係を示す。過去の研究例では、165°Cまでのデータしか存在しないため、本研究によってデータ存在範囲を 250°Cまで拡張することができた。

### 媒体の輸送特性(熱伝導率・粘性)の測定(佐賀大学・宮良明男)

熱伝導率は試料媒体に浸した長短2本の白金細線を用いて、非定常細線法により測定する。細線にステップ関数的に電流を流すと媒体の熱伝導率の値に応じて細線の温度応答が異なる。本装置では、ブリッジ回路の中にセンサーとなる白金細線を設置してその温度応答を測定する。

粘度は細管法を基礎とした方法で測定する。細管法は、細管内に試験流体を層流状態で流し、その際の圧力変化から粘度求める方法であり、ハーゲン・ポアズイユの理論式を用いて粘度を計算する最も確立した方法の一つである。なお本研究では、長短2本の細管を用いるタンデム型の細管法を用いて粘度を測定することとし、平成25年度は、高温・高圧仕様の熱伝導率測定装置(図 6)及び粘度測定装置(図 7)の設計・製作を行った。

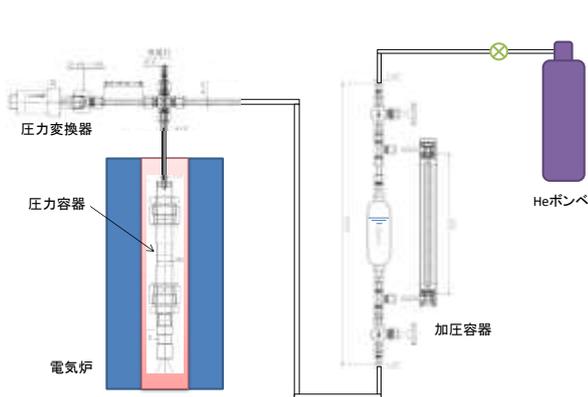


図 6 熱伝導率測定装置の概略図

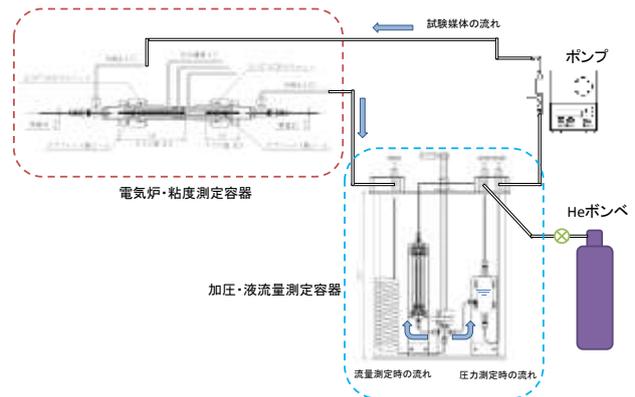


図 7 粘度測定装置の概略図

### 媒体の高精度状態方程式および輸送性質推算式の作成(九州産業大学・赤坂亮)

HFC245fa は GWP が 1,050 と高いが、不燃で ORC 作動媒体として広く使われている。中国側はまずこの媒体で機器を基本設計する予定で、それに向け既存に比べ再現性を向上させた新たな状態方程式を開発した。

既存の代表的な状態方程式は米国立標準技術研究所(NIST)の Lemmon らが 2006 年に発表し、広く普及し

ているデータベース REFPROP にも収録されているものであるが、360K 以上の飽和蒸気圧実測値に対して比較的大きな偏差(最大 0.5%程度)を示すことがわかっている。このような高温域における飽和蒸気圧の再現性は、ORC の性能解析にも少なからず影響すると予想される。また 2010 年以降、高压下(70MPa)における液体密度や 400K までの飽和液密度等が新たに報告されたが Lemmon らの状態方程式には反映されていない。

そこで、近年報告された実測値情報を精査し、信頼性が高いと判断される値を抽出した。状態方程式の最適化アルゴリズムも従来法に比べ改良した。これらの実測値と最適化アルゴリズムとを組み合わせ、広い温度および圧力の範囲において高い再現性と熱力学的一貫性とを両立させた状態方程式を開発した。その結果飽和蒸気及び液密度が、高温域の実測値に対し、既存の Lemmon らの式よりも再現性が向上していることを確認できた。今回改良した最適化アルゴリズムは、次年度以降に開発予定の低 GWP 媒体の状態方程式にも適用できる。

### 【研究交流】

1. 日本側研究チーム 研究進捗／成果レビュー会 3回開催
2. 日本側研究チーム・中国側研究チームとのキックオフ兼技術交流会 1回開催
3. ORC に関する中国企業との合同技術調査 1回開催
4. 中国製鉄所の中国企業との合同現地調査 1回開催

## 2. 研究実施体制 公開

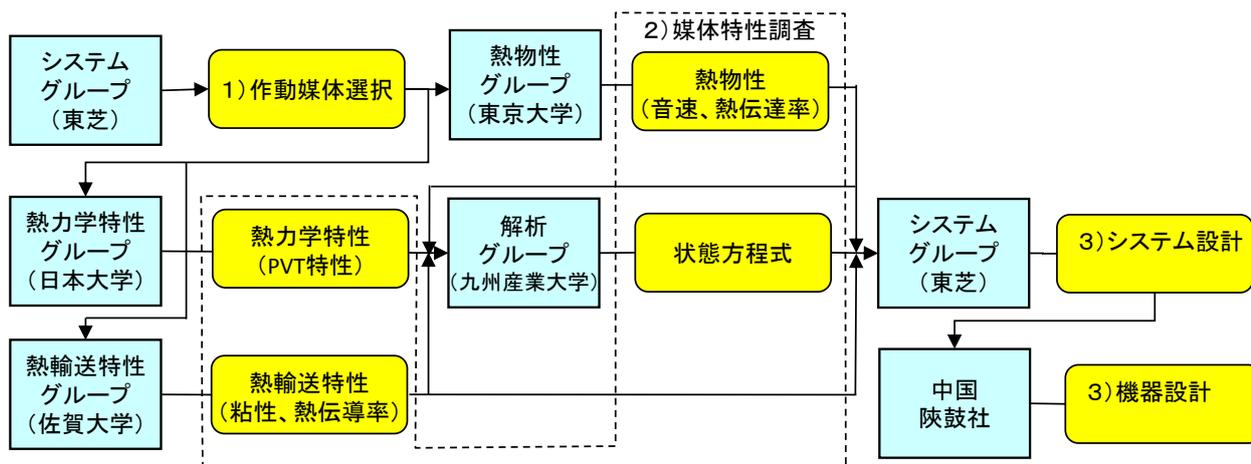
### 2-1. 日本側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	坂上 英一	株式会社 東芝	電力・社会システム技術開発センター	主幹
主な共同研究者	飛原 英治	国立大学法人 東京大学	大学院新領域創成科学研究科	教授
主な共同研究者	宮良 明男	国立大学法人 佐賀大学	大学院工学系研究科	教授
主な共同研究者	赤坂 亮	学校法人 中村産業学園 九州産業大学	工学部 機械工学科	教授
主な共同研究者	田中 勝之	学校法人 日本大学	理工学部 精密機械工学科	助教

### 2-2. 相手側の研究実施体制

研究代表者/ 主な共同研究者	氏名	所属	所属部署	役職
研究代表者	姜 国棟	陝鼓動力 株式会社		CTO

### 2-3. 両国の研究実施体制



### 3. 原著論文発表 公開

#### 3-1. 原著論文発表

##### ① 発行済論文数

	うち、相手側チームとの共著(※)
国内誌 0 件	( 0 件)
国際誌 0 件	( 0 件)
計 0 件	( 0 件)

※本共同研究の相手側チーム研究者との共著に限る

##### ② 未発行論文数

	うち、相手側チームとの共著(※)
国内誌 0 件	( 0 件)
国際誌 0 件	( 0 件)
計 0 件	( 0 件)

※本共同研究の相手国チーム研究者との共著に限る

以上