

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686090

研究課題名(和文) 低温度廃熱の有効利用に向けての検討 - 熱音響現象を応用したエネルギーの効率化 -

研究課題名(英文) A study for the effective use of low-temperature waste heat - Improvement in the efficiency of energy by applying the thermoacoustic phenomenon -

研究代表者

坂本 眞一 (Sakamoto, Shin-ichi)

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：40449509

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,400,000円、(間接経費) 4,920,000円

研究成果の概要(和文)：低温度廃熱の有効利用に向けた熱音響現象を用いたエネルギーの効率化に向けて、(1)音場についてのアプローチ、(2)スタックについてのアプローチ、(3)ヒートリークについてのアプローチを提案し、研究を実施した。(1)についてはフェーズアジャスター、拡大型フェーズアジャスター、サブループ、メンブレン等について検討を行い、プライムムーバーにおいての位相差を進行波に近づけることによって、エネルギー効率が上昇することが分かった。(2)の結果より、無次元量パラメーターの有効性を再認識した。(3)の結果より、熱音響システムのプライムムーバー付近のヒートリークが変換効率に大きく影響していることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have investigated for energy efficiency with thermoacoustic phenomena for the effective utilization of low temperature waste heat. We suggested three approaches. The first is the approach of the sound field. The second is the approach for the stack. The third is the approach for the heat leak. In the first approach, we proposed phase adjuster, expanding phase adjuster, sub-loop, membrane, and etc. It was found that the energy efficiency is increased by close to traveling wave phase difference in the prime mover. In the second approach, we investigated the effect on efficiency for the installation position of the stack and the radius of the stack. We recognized the validity of omega tau of dimensionless parameters. In the third approach, we investigated the heat leak of prime mover. It was found that the heat leak is larger than expected from the results.

研究分野：エネルギー学

科研費の分科・細目：工学 - 総合工学 - エネルギー学 - 6106

キーワード：廃熱 熱音響現象 エネルギーの有効利用 位相 フェーズアジャスター 音エネルギー

### 1. 研究開始当初の背景

熱音響現象についての研究は、国内では、琵琶准教授、矢崎教授のグループ等によって、現象の物理的解釈を中心に進められていた。海外では、スイフト教授らのグループが大型で高圧力の熱音響システムの研究を進められていた。申請者は熱音響現象を応用し、実用化を前提とした熱音響システムの研究を進めてきた。これまでに、熱音響冷却システムの試作器で、室温から氷点下 20°C (一般的な冷凍庫温度) まで約 40°C の冷却に成功していた。また、低温度廃熱 (温度差 200°C 以下) を用いた熱音響現象の発生を導くことに成功していた。熱音響現象を応用すると、廃熱を処理するための新たなエネルギーを必要とせず、それだけでなく、その廃熱をエネルギー源とした冷却システム、エンジンや発電システムを構築することが可能となる。本研究では、低温度差で発生する熱音響現象を詳細に測定し、物理メカニズムを検討する。開始当初、これらに着目した研究は、国内・海外ともに報告されていなかった。

### 2. 研究の目的

低温度の排熱 (300°C 以下) は再利用の方法が限られ、大半が廃熱となる。現在、この廃熱は処理するために新たなエネルギーを投入しているが、再利用し、エネルギー源として有効活用可能となれば、喫緊の課題である「エネルギー資源の有効利用ならびに環境保全・温暖化防止」に大きく貢献する。熱エネルギーと音エネルギーの相互変換現象である熱音響現象を応用すると、廃熱を処理するための新たなエネルギーを必要とせず、それだけでなく、その廃熱をエネルギー源とした冷却システム、エンジンや発電システムを構築することが可能となる。本研究では熱音響現象を用いて、低温度廃熱を効率よく、有効に利用することを目的としている。

### 3. 研究の方法

熱音響現象を用いた低温度廃熱の有効利用に向けて、熱音響現象を用いたエネルギーの効率化に向けて、(1) 音場についてのアプローチ、(2) スタックについてのアプローチ、(3) ヒートリークについてのアプローチを提案し、それらについての研究開発を実施したので報告する。(1) についてはフェーズアジャスター、拡大型フェーズアジャスター、サブグループ、メンブレン等について検討を行った。(2) については、スタックの流路半径や設置位置が効率に与える影響について検討を行った。(3) については熱音響システムのプライムムーバー付近のヒートリークについて検討を行った。

### 4. 研究成果

熱音響システムの効率化に向けての研究成果については上記の (1), (2), (3) について別々に報告する。下記に示した論文や学

会発表などを参考に作成して報告する。

#### (1)

Phase Adjuster (PA) は Fig. 1 に示すような同心円状円柱のデバイスである。熱音響冷却システム内に PA を設置することによって、システム内径を局所的に縮小することが出来る。この PA の内径、長さ、設置位置を変化させることによって、エネルギー変換効率を上昇させることが可能となった。



Fig. 1 Photograph of Phase Adjuster.

ある実験系において、PA 未設置時における  $\Delta I$  は約 150 W/m<sup>2</sup> であることが確認された。一方、内径が 26mm の PA 設置時には、 $\Delta I$  は約 5000 W/m<sup>2</sup> であり、未設置時と比較して約 30 倍に向上したことが確認された。

Phase Adjuster によるエネルギー変換効率向上要因の理解に向けて、熱音響冷却システム内の音場そして  $\Delta I$  がどのように決定されるのか検討を試みた。その手法として、直管型自励発振システム (Fig. 2) を 2 つの部分系に分割した。また、熱音響冷却システム内の音場を決定するパラメーターである周波数とスタック両端温度比を変化させ、分割点における複素音響インピーダンスを計測した。この結果、各部分系で測定された複素音響インピーダンスは、複素平面上で交点を持ち、この交点が示す条件で駆動させた各部分系内に形成される音場や  $\Delta I$  は、自励発振システムのもを Fig. 3 に示すように再現していた。このことから、2 分割したシステム内の複素音響インピーダンス計測は、熱音響冷却システムの  $\Delta I$  決定要因を理解する手法のひとつとして利用可能であると考えられる。

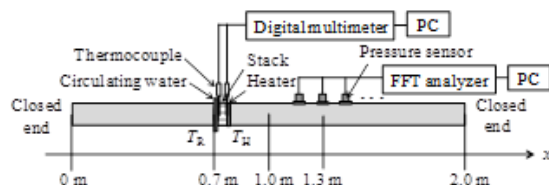


Fig. 2 Experimental setup of the straight-tube type thermoacoustic cooling system.

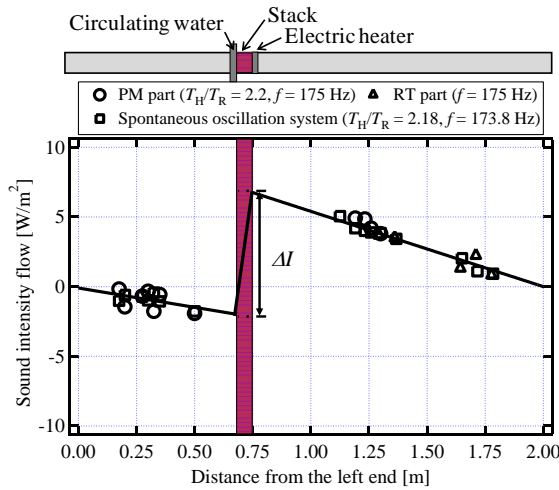


Fig. 3 The distribution of sound intensity flow formed in the PM part and the RT part and the spontaneous oscillation system.

PA 設置部において粘性によるエネルギーの散逸が生じる。そこで我々は内径を局部的に拡大する Expanding Phase Adjuster (EPA) を提案し、その影響について検討した。EPA 設置時と PA 設置時のループ管方式熱音響冷却システムの冷却能力を比較した。Fig. 4 に示すようなループ管方式熱音響冷却システムを対象とした。ループ管方式熱音響冷却システムにおいて、EPA 設置時が  $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  であるのに対し、PA 設置時は  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  となり、PA 設置時の方が低温となった。EPA 設置時は 3 次モードの音響インテンシティ変換量  $\Delta I_{\text{HP}}$  が大きいと、冷却部の温度が PA 設置時に比べ低下しないと考えられる。ループ管方式熱音響冷却システムにおいて更なる冷却能力を得るため、エネルギーの散逸が少ない共鳴モード制御が可能である Expanding Phase Adjuster (EPA) の設置を提案した。しかしながら、EPA 設置時はヒートポンプにおいて熱流が PA 設置時に比べ大きいことがわかった。この点を考慮し、EPA の最適条件を求めることにより、更なる冷却能力の向上が期待される。

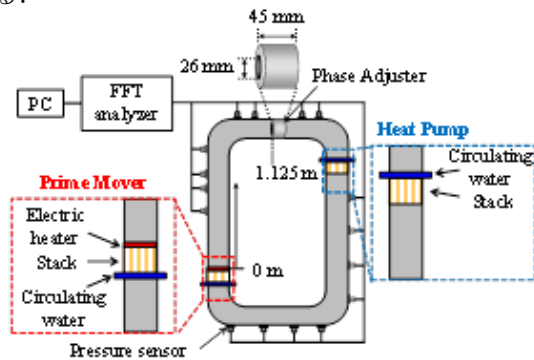


Fig. 4 Experimental setup of the loop-tube type thermoacoustic system.

(2)

エネルギー変換部であるスタックについて検討を行った。スタックの流路径は、作業流体の物性値によって最適値が決定される。しかしながら、急激な温度勾配を持つスタック内では、各地点において物性値が変化しているため、軸方向に対して一定の流路径を持つ従来のスタックはエネルギー変換効率に対して最適でない。製造上の問題から、軸方向に沿ってスタックの流路径を変更することは困難である。そこで、流路径の異なるスタックを積み上げたスタックを作製し、スタック流路の段階的な変化を試みた。また、本スタックを用いて実験的にエネルギー変換効率の検討を行った。

管内の音響インテンシティ流を算出するために、線形理論や伝達マトリクス法を用いて数値解析を行った。熱音響の数値計算には長波長近似、線形近似および理想気体近似を用いた運動方程式と質量保存式を行列表式で表した式を支配方程式として用いる。

測定に用いた実験系を Fig. 5 に示す。全長 2000 mm、内径 42 mm のステンレス管で構成した。管の両端は閉管とした。スタックは、長さ 10 mm のスタックを 5 個積み重ねることでスタック全長を 50 mm とした。このとき、流路径が 0.35 mm, 0.45 mm, 0.55 mm の 3 種類のスタックを組み合わせてスタックを作製した。5 分割されたスタックは、それぞれ低温度端側から I ~ V とし、流路を変更する組み合わせを変更した 4 種類のスタックを用いて実験を行った。また、実験に用いたスタックの組み合わせを Table 1 に示す。

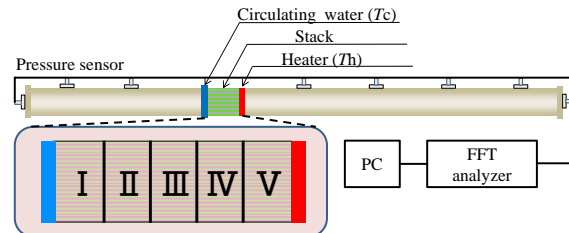


Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Used diameter of a stack channel.

	I	II	III	IV	V
pattern1	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm
pattern2	0.45 mm	0.45 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm
pattern3	0.35 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm	0.55 mm
pattern4	0.35 mm	0.35 mm	0.45 mm	0.55 mm	0.55 mm

それぞれの形状においてエネルギー変換効率に差異が確認された。同一流路径を用いたパターン 1 よりも、流路径を段階的に変更したパターン 2 やパターン 3 のように・I が増加したケースがある一方で、パターン 4 のように・I が減少したケースも確認された。パターン 4 は、各地点において  $\omega\tau_a \approx \pi$  となるように流路径を設定しているにも関わらず、本測定条件下で最も変換効率が低いことが

確認された。以上の結果より、スタック全体に亘って $\omega\tau\alpha \approx \pi$ は最適でないことが示唆される。このような結果は以下の要因によって説明される。第1に、低温度端において $\omega\tau\alpha \approx \pi$ となるようなスタック流路を設定するために、流路が狭くなり粘性散逸が増加したことが挙げられる。つまり、熱交換が向上したことによるエネルギー生成量よりも粘性によるエネルギー散逸量が大きかったために、 $\Delta I$ が小さくなったと考えられる。第2に、スタック低温端における熱交換の向上がエネルギー生成にあまり寄与しなかったことが考えられる。低温端では、作業流体とスタック壁面の温度差が小さいため、授受する熱量が小さく、エネルギー生成量が少ない。したがって、スタック全体でのエネルギー生成量はあまり向上しなかったと考えられる。以上より、スタック全体に亘って $\omega\tau\alpha \approx \pi$ に設定することが抜本的なエネルギー変換効率の向上にはならないと結論づけられる。しかしながら、パターン2のように同一流路スタックと比較して10%以上の $\Delta I$ の値が向上した条件もあることから、今回実験で用いたような流路を変更したスタックの検討は今後とも必要であると考えられる。

(3)

ループ管の駆動には熱を利用するが、この熱は、熱伝導や熱伝達によって、システムを構成する金属管や内部の作業流体へと散逸する。これをヒートリークといい、システムの効率低下を引き起こす。また、質量流である対流や音響流もヒートリークの原因となる。効率改善に向けて、ヒートリーク抑制を目的とした厚み数十マイクロメートルの膜を挿入した。膜がヒートリークおよび管内の音場に与える影響について検討する。

ループ管は、内径42 mmのステンレス鋼製の管をループ状にしたもので、全長は3.3 mである。内部は空洞で、大気圧(0.1 MPa)の空気で満たした。プライムムーバーにおけるヒートリークに着目するため、ヒートポンプは非設置とした。入力を3通り、膜の位置を3通り、膜の種類を5種類とした。膜の位置は、スタックの上端を基準とした。

Fig. 6は、ヒーターに電力を供給して、600 s後の表面の温度分布である。膜により質量流が抑制され、結果、熱伝達によるヒートリークが減少した。また、減少の様子は膜により異なることが明らかになった。

Fig. 7は、膜の非挿入時および0.35 mへの挿入時における音圧の空間分布である。膜の挿入により、分布がループ管の時計回り方向にシフトしている。また、膜の種類により、値が異なっている。

ループ管の効率改善に向けて、ヒートリーク抑制のための膜を挿入した。この結果、ヒートリークの抑制が確認された。一方、膜の挿入により、ループ管内の音場が時計回り方向にシフトした。しかしながら、プライムム

ーバーにおける熱から音へのエネルギー変換効率の低下も確認された。膜により、音場の空間分布が変化したことが原因と考えられる。以上より、膜による空間分布の変化を調整することで、効率低下の改善および、膜非挿入時以上の効率の実現を期待する。

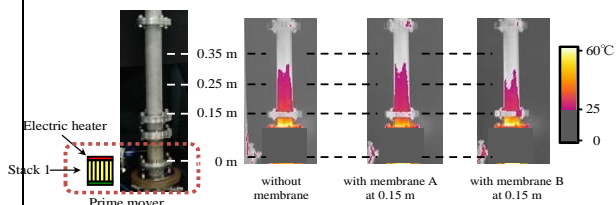


Fig. 6 : Photograph and thermographs of prime mover.

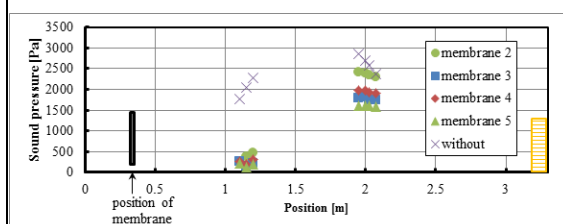


Fig. 7 : Distribution of sound pressure.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

1. S. Sakamoto, K. Sahashi, Y. Watanabe: "Applying Sub-Loop Tube to Control the Sound Field in Loop-Tube-Type Thermoacoustic System" Jpn. J. Appl. Phys. 50. 07HE20-1-5 (2011), 査読有
2. K. Sahashi, S. Sakamoto, Y. Watanabe: "Fundamental study for a working mechanism of Phase Adjuster set on the thermoacoustic cooling system" International Congress on Ultrasonics 2011 Proceedings 1433. 613-619 (2011), 査読有 CrossRef
3. S. Sakamoto, K. Shibata, Y. Kitadani, Y. Inui, Y. Watanabe: "One factor of resonant wavelength shift from onewavelength to two-wave length resonance in loop-tube-type thermoacoustic cooling system" International Congress on Ultrasonics 2011 Proceedings 1433. 628-631 (2011), 査読有
4. Y. Kitadani, S. Sakamoto, K. Sahashi, S. Komiya, Y. Watanabe: "Long-Term Drive in Loop-Tube Using Solar Heat Energy-Basic Study for Practical Use of Thermoacoustic Cooling System-" J Journal of Power and Energy Systems 1. 1-5 (2011), 査読有
5. K. Sahashi, S. Sakamoto, K. Kuroda, and Y. Watanabe, "Relation between Acoustic Impedance and Sound Intensity Amplification in a Stack of Standing-Wave Thermoacoustic Prime Mover", Jpn. J. Appl. Phys., 07GE02, 2012, 査読有
6. K. Kuroda, S. Sakamoto, K. Shibata, Y. Nakano, T. Tsuchiya, and Y. Watanabe, "Fundamental study for the solution of thermoacoustic phenomenon using numerical calculation - Relation between the stack installation position and heat flow -", Jpn. J. Appl. Phys., 07GE01, 2012, 査読有
7. K. Shibata, S. Sakamoto, Y. Nakano, and Y. Watanabe, "Relationship between Quality Value and Temperature Ratio for Step-Shape Thermoacoustic System", Jpn. J. Appl. Phys., 07HE06, 2013, 査読有

[学会発表] (計 56 件)

1. 坂本眞一: "環境に優しい熱音響システムの応用とその課題について" 日本セラミックス協会関西支部学術講演会.

- (20100716). 滋賀県立大学
2. S. Sakamoto, Y. Kitadani, S. Komiya, Y. Watanabe: "Fundamental study of a loop-tube-type thermoacoustic cooling system using heat energy from condensed sunlight" Renewable Energy. (20100729). Pacifico Yokohama
3. S. Sakamoto, Y. Kitadani, S. Komiya, Y. Watanabe: "Effect of Sub-Loop Tube on Energy Conversion Efficiency of Loop-Tube-Type Thermoacoustic System" International Conference on Acoustics 2010. (20100823). Sydney
4. 坂本眞一, 佐橋一輝, 北谷裕次, 石野貴廣, 渡辺好章: "サブループチューブが熱音響プライムムーバーの音場に与える影響についての基礎検討" 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会. (20100914). 関西大学
5. 坂本眞一, 佐橋一輝, 石野貴廣, 渡辺好章: "熱音響システムにおけるサブループチューブを用いた音場制御に向けた検討" 第 31 回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム. (20101206). 明治大学
6. 佐橋一輝, 坂本眞一, 渡辺好章: "熱音響システムの実用化に向けて-局所的な管材質変化がエネルギー変換に与える影響-" 第31回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム. (20101206). 明治大学
7. 坂本眞一, 佐橋一輝, 北谷裕次, 柴田健次, 渡辺好章: "サブループチューブが熱音響プライムムーバーの音場に与える影響についての基礎検討" 日本音響学会 2011 年春季研究発表会. (20110309). 早稲田大学
8. 坂本眞一, 佐橋一輝, 北谷裕次, 石野貴廣, 渡辺好章: "熱音響システムの低温度駆動に向けた検討-サブループチューブが音響インテンシティ分布に与える影響-" 応用物理学会. (20110324). 神奈川工科大学
9. S. Sakamoto, D. Tsukamoto, Y. Kitadani, Y. Inui, Y. Watanabe: "One factor of resonant wavelength shift from one-wavelength to two-wavelength resonance in loop-tube-type thermoacoustic cooling system" International Conference on Ultrasonics 2011. (20110907). University of Gdansk
10. K. Sahashi, S. Sakamoto, Y. Watanabe: "Fundamental study for a working mechanism of Phase Adjuster set on thermoacoustic cooling system" International Conference on Ultrasonics 2011. (20110907). University of Gdansk
11. 坂本眞一, 佐橋一輝, 石野貴廣, 渡辺

- 好章：“熱音響システムにおけるサブ  
 ループチューブを用いた低温度駆動に向  
 けた基礎検討”日本音響学会 2011 年秋  
 季研究発表会。(20110920). 島根大学
12. 坂本眞一：“熱音響システムを用いたエ  
 ネルギーの有効利用に向けた検討”日  
 本セラミックス協会。(20111216). 京都  
 工業繊維大学
  13. 佐橋一輝, 坂本眞一, 井上学, 渡辺好  
 章：“熱音響システムにおける  
 Phase Adjuster 動作メカニズム解明に向  
 けて-音響インピーダンスに着目した効  
 率決定要因の実験的検討-”超音波研究  
 会。(20120126). 関西大学
  14. 黒田健太郎, 坂本眞一, 柳本浩平, 中  
 野陽介, 渡辺好章：“熱音響システム  
 の実用化に向けた研究～スタック流路  
 に関する検討～”超音波研究会.  
 (20120126). 関西大学
  15. 坂本眞一：“熱音響現象を用いたシス  
 テムの応用とその課題について”機  
 械学会。(20120316). 関西大学
  16. 川本暁, 坂本眞一, 折野裕一郎, 乾義  
 尚, 渡辺好章, “熱音響システムの熱  
 から音へのエネルギー変換効率の上昇  
 に向けて-プライムムーバー付近のヒー  
 トリーク観測-, ”音響学会講演論文集,  
 pp. 1371-1372, 日本音響学会日本音響学  
 会(20120920), 信州大学
  17. 坂本眞一, 渡辺好章, “熱音響技術のこ  
 れまでとこれからの課題について(招待  
 講演),”日本音響学会講演論文集, pp.  
 1541-1542, 日本音響学会日本音響学  
 会
  18. 坂本眞一, 佐橋一輝, 渡辺好章, “熱音  
 響システムの効率向上に向けた研究-  
 フェーズアジャスター内の音場の測定  
 -, ”第 33 回超音波エレクトロニクスの  
 基礎と応用に関するシンポジウム講演  
 論文集, pp. 215-216, 第 33 回超音波エ  
 レクトロニクスの基礎と応用に関する  
 シンポジウム, (20121114), 千葉大学
  19. 坂本眞一, “音響技術の新たな展開-熱  
 音響現象への期待-(招待講演),”第 15  
 回日本音響学会関西支部若手研究者交  
 流研究会, (20121209), 産業技術総合研  
 究所 関西センター
  20. 折野裕一郎, 坂本眞一, 乾義尚, 池之上  
 卓己, 渡辺好章 “熱音響システムにお  
 ける Phase Adjuster の特性に関する実  
 験的検討”電子情報通信学会技術研究  
 報告, vol. 112, No. 387, US2012-99,  
 pp. 63-67, (20130124), 同志社大学
  21. 坂本眞一, “熱音響技術の可能性と実用  
 化に向けた取り組み(招待講演),”日本  
 機械学会, フィロソフィ談話会,  
 (20130206), 大阪産業大学
  22. 坂本眞一, 井上学, 中野陽介, 渡辺好章,  
 “熱音響システムの実用化に向けた研  
 究-様々な位相調整デバイスによるエ  
 ネルギー変換効率向上に向けて-, ”第

60 回応用物理学会春季学術講演会 講  
 演予稿集, p. 141, 2013 年 第 60 回応用  
 物理学会春季学術講演会, (20130327),  
 神奈川工科大学

〔図書〕(計 2 件)

1. 坂本眞一, 渡辺好章, “熱音響システム  
 技術の現在とその可能性, “次世代自動  
 車, EV/HEV 対応省エネ「熱」マネー  
 ジメント~排熱回収技術から断熱・遮熱材  
 料まで~, 情報機構, pp. 127-139, 2013.
2. 坂本眞一, 渡辺好章, “熱音響シス  
 テムの動作メカニズムと簡易設計コ  
 ンセプトについて, “未利用工場排熱  
 の有効活用技術と実用展開~要素技  
 術の開発・高性能化と導入事例・シ  
 ステム~, サイエンス&テクノロジー,  
 pp. 210-225, 2014.

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本眞一 (滋賀県立大学・工学部・准教授)

研究者番号: 40449509

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( ) 研究者番号: