

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	ふく射の波長制御と熱光起電力発電への展開に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	熊野智之
Author(English)	tomoyuki kumano
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4194号, 授与年月日:2023年3月31日, 学位の種別:論文博士, 審査員:花村 克悟,平井 秀一郎,末包 哲也,伏信 一慶,野崎 智洋
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4194号, Conferred date:2023/3/31, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論文要旨

(和文2000字程度)

Dissertation Summary (approx. 2000 characters in Japanese)

報告番号 For administrative use only	乙 第 号	氏 名 Name	熊野 智之
(要 旨) (Summary) 本論文では、近赤外域における狭帯域でのふく射輸送に着目し、加熱・乾燥工程における省エネルギーや、高温物体から放射される未利用のふく射による熱光起電力 (TPV) 発電の実現に貢献できる実用的な波長選択手法の確立を目的とする。特に既存設備へ実装しやすいことを重視し、加熱・乾燥では任意形状のセラミックヒーター表面へコーティング可能な選択放射性を有する釉薬を提案する。発電では、製鉄所の高温スラブなどの放射体近くに発電素子であるTPVセルを設置することを想定し、選択透過とTPVセルの温度上昇抑制のために間に挿入するガラスフィルターを提案する。GaSbやInGaAsSbセルを用いたTPV発電への応用を前提とするため、波長は1.5~1.8 μm付近の領域を対象とする。釉薬中に分散させる希土類元素やフィルター基板である石英ガラスの光学特性から、水や有機溶媒の乾燥に有効な3 μm付近での波長選択も可能である。釉薬基板であるセラミックスは発電に寄与しない長波長域のふく射を放射するため、フィルターを用いることでより理想的な波長制御が実現できる。近赤外の狭帯域エミッターは、ふく射熱流束を高めるために高温で用いる必要がある。そこで、フィルター単体では熱損失となるガラスに吸収されるふく射エネルギーを回収しエミッターの加熱に供する手法について、燃焼駆動式TPV発電システムを例として提案する。 第2章では、波長選択セラミックエミッターとしてEr酸化物を含んだ釉薬をアルミナ表面にコーティングした構造を提案し、その有効性について検証している。原料として用いる石灰釉とEr₂O₃の質量比が1:1程度である時、1.55 μmにおける1000℃での垂直放射率は最大(約0.75)となる。半透過性材料の放射率は温度分布に依存するため単純な比較はできないが、選択放射性は従来のEr系エミッターと同程度と言える。本研究の希土類酸化物膜は、従来の多結晶・多孔質希土類酸化物膜と比べ機械的強度が高く付着性に優れている点が特徴である。また、表面が滑らかで空孔のない膜を得るためには、質量比は2:3、焼成温度は1250℃以上が適切であることが分かった。放射率を向上させるためには、石灰釉との反応によって生成される数μm サイズのCaEr₄(SiO₄)₃O粒子による散乱を抑制する必要がある。そこで、反応自体を抑制し粗大なEr₂O₃粒子を残すことやCaEr₄(SiO₄)₃Oと異なるナノサイズのEr化合物を生成させる方法が有効であることが分かった。さらに、散乱と温度分布がない理想膜を仮定し、1次元数値解析によりこの種のエミッターにおける放射率の上限を調べている。その結果、1.5 μm帯の放射率は膜-空気界面での反射損失により1には到達しないが、最大0.95が見込めることが明らかとなった。 第3章では、2, 3層の反射防止膜を両面にコーティングした石英ガラス板を多数並べた積層石英ガラスフィルターを提案し、拡散光源に対する有効性について検証している。まず偏光特性を考慮して膜の			

設計を行い、光線追跡法による1次元数値解析により半球量としての透過率、反射率、吸収率スペクトルを計算した。その結果、対象入射角度は 30° 、膜は2層の $1/4$ 波長膜間に高屈折率の $1/2$ 波長膜（不在層）を挿入した3層構造が最適であることが判明した。このフィルターでは、膜の条件が決まれば、ガラス1枚の厚みと枚数によってスペクトル効率や透過帯効率を制御することができる。厚み1 mm程度の薄いガラスを30枚設置した場合、90%以上のスペクトル効率（透過帯効率は45%程度）が達成でき、入射する全ふく射エネルギーの約75%が有効利用できることが分かった。このスペクトル効率の値は従来の誘電体多層膜フィルター（40～85%）よりも高い。また、膜の屈折率や厚み、エミッター温度が変化しても性能が低下しにくいことが示された。さらに、フィルターを8枚設置した場合の半球入射－半球透過率スペクトルを測定し、反射防止膜とガラス積層の相乗効果により対象とする $1.8\text{ }\mu\text{m}$ 付近で選択的に高くなっていることが確認された。

第4章では、多孔質体による往復流動超断熱燃焼を用いたエネルギー循環型TPV発電システムを提案し、達成可能な発電効率について検証している。発泡状のセラミックス多孔質体を灰色体エミッターとして系中央に据え、左右両側に無垢の石英ガラス多孔板を多数設置した構造である。ガスを周期的に流動方向が左右反転するように供給しエミッターに流入する直前で加熱すると、下流側/上流側のガラス部においてガス顕熱の回収/ガスの予熱が行われる。定常状態ではエミッター付近の温度が局所的に高く、TPVセルに近い両端付近のガラス温度は低くなる。この際、ガラスに吸収される発電に不要なふく射も熱循環に寄与している。数値解析によって、エネルギー循環と波長選択は厚みが薄い石英多孔板を多数積層した場合より効果的になることが判明した。パラメータの最適化により、ガス顕熱の56%を波長が $2.2\text{ }\mu\text{m}$ よりも短いふく射のエネルギーに変換できることが示されている。本システムのふく射輸送にはエミッターよりも石英ガラスの光学特性が大きく関与するため、ガラスに反射防止膜を施しかつエミッターに選択放射性を付加することでさらなる変換効率の向上が見込める。さらに、ガスを燃焼させて用いる実験装置において、実際に理論燃焼温度以上の温度場を局所的に形成し、そこからのふく射を（装置の制約上僅かではあるが）波長選択しながらGaSbセルに導いて電力へ変換することに成功している。

第5章では、本研究で得られた結果を総括している。

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論文要旨 (英文)

(300語程度)

Dissertation Summary (approx. 300 words in English)

報告番号 For administrative use only	乙 第 号	氏 名 Name	熊野 智之
(要 旨) (Summary) In order to utilize near-infrared radiation effectively for actual dry process and thermophotovoltaic (TPV) generation of electricity, practicable spectral controlling methods in narrow band were investigated. An alumina plate coated with a glaze-based Er oxide film was suggested as a selective emitter. In the film, $\text{CaEr}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ was formed via the reaction sintering between Er_2O_3 particles and melted glaze. The optimum weight ratio of Er_2O_3 to the glaze is approximately 2:3 to realize both smooth film and high emittance (0.75) in the wavelength of 1.55 μm, which is the main emissive peak of Er. Numerical results showed that the emittance approached to 0.95 when the film had no scattering and was heated uniformly. On the other hand, piled quartz glass plates with a few layer anti-reflection coatings was suggested as band-pass filter for diffuse irradiation. Once the coating design is optimized, spectral performance of the filter can be controlled by changing the individual thickness and the number of the plates. On the basis of ray-tracing simulation, it was found that spectral efficiency in the wavelength range from 1.4 to 2.2 μm could exceed 90% under the condition of 1 mm thick and more than 30 plates. Spectral hemispherical transmittance of the filter expected from the simulation was demonstrated. In addition, a novel TPV generation system using super-adiabatic combustion in stacked porous quartz glass plates, which was capable of including both the emitter and filter, was developed. Through numerical analysis, 56~63% of the input thermal energy could be converted into radiant energy in the wavelength range less than 2.2 μm using a number of thin porous quartz glass plates. In experiment, distributions of solid temperature and spectral radiation indicated that both energy recirculation and spectral control was achieved. Modest electric power was obtained using GaSb cells. If the system is under one-dimensional configuration, the total conversion efficiency over 10% can be expected.			

備考：論文要旨は、和文2000字と英文300語を1部ずつ提出するか、もしくは英文800語を1部提出してください。

Note: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.