

# 選択波長赤外線を用いた新規熱処理プロセス - 波長選択ふく射加熱炉 -

令和5年5月12日



日本ガイシ株式会社  
NV推進本部  
近藤 良夫

---

1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

## ◆技術の概要

各種熱プロセスに適用可能な**熱ふく射（赤外線）波長制御システム**の開発/新規プロセスの創出

- ①熱ふく射波長制御に関する各種理論的考察（一部論文化）
- ②具体的なハード技術の新規開発（ヒータ等） ◆業界に先駆けて開発（2012年）
- ③数値解析技術の新規開発
- ④新規プロセス創出に繋がる各種効果の実験的導出

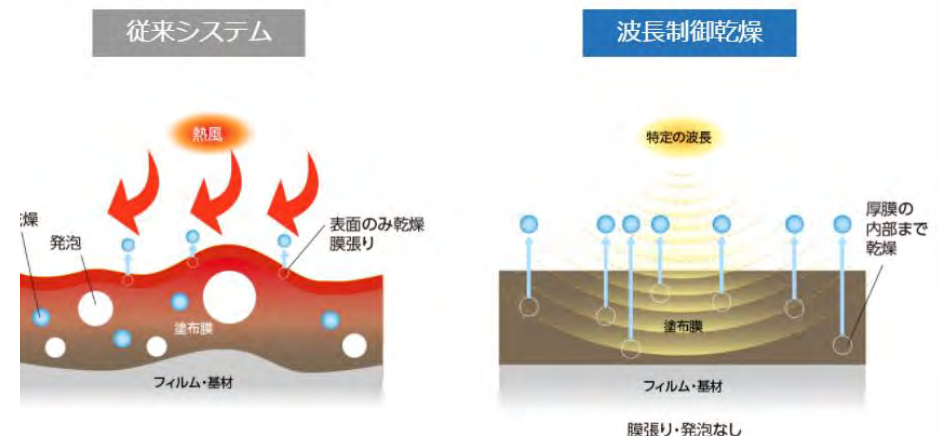
◆様々なプロセス分野で既に多くの納入実績をいただいております  
セラミックセンサー、リチウムイオン電池、各種機能性フィルム 等

<弊社HPより>



### 熱でなく、光で乾燥。

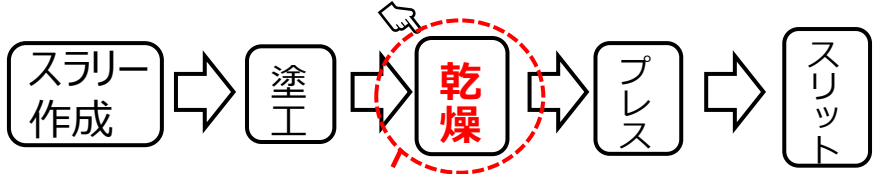
蒸発させたい溶媒が吸収する波長の赤外線を選択的に照射することで、塗布膜や基材の温度を上げずに効率的に乾燥。従来の熱風による乾燥システムに比べ、炉内を低温に保つことができるので、基材へのダメージを与えずに乾燥できます。



# アブストラクション (研究開発のきっかけ)

## ◆当初のターゲット (リチウムイオン電池電極乾燥工程)

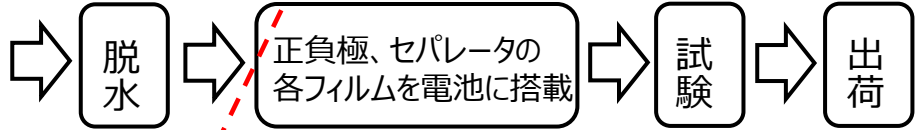
・リチウムイオン電池電極製造工程の概要



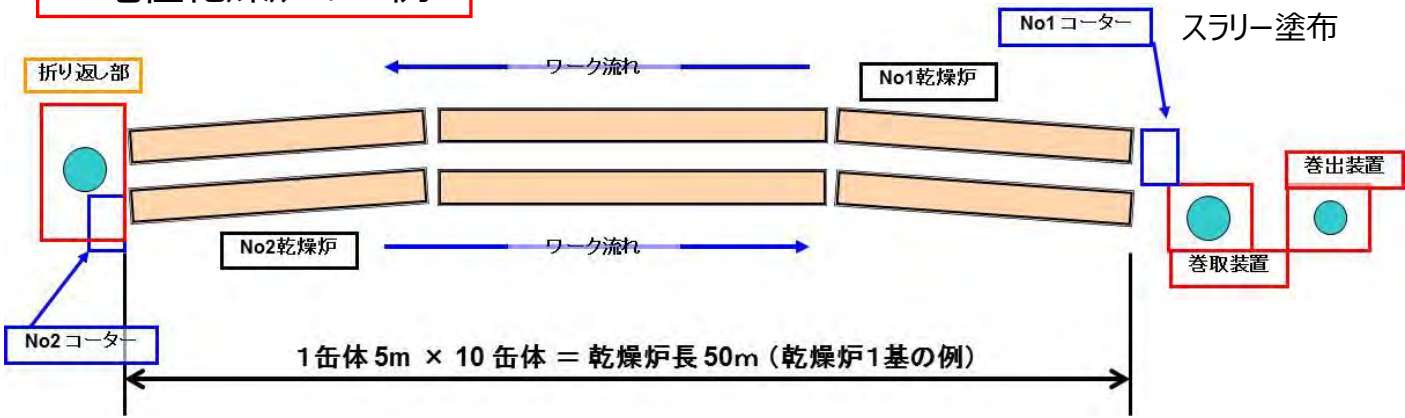
■問題点：塗布乾燥工程において主流である「熱風方式」の効率性に限界

赤外線導入によるプロセス効率化

赤外線 (熱ふく射) の波長制御

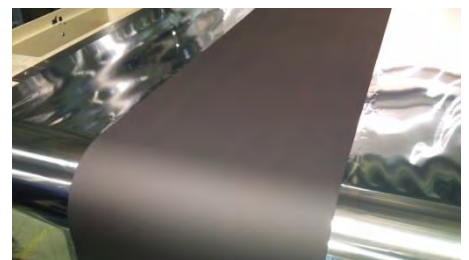


### ◆電極乾燥炉の一例



◆必要熱風量：数百m<sup>3</sup>/min (莫大)

- ◆スラリー：①～③の混合物
- ①活物質 (リチウム酸化物)
- ②溶剤 (NMP等)
- ③バインダー (PVDF等)

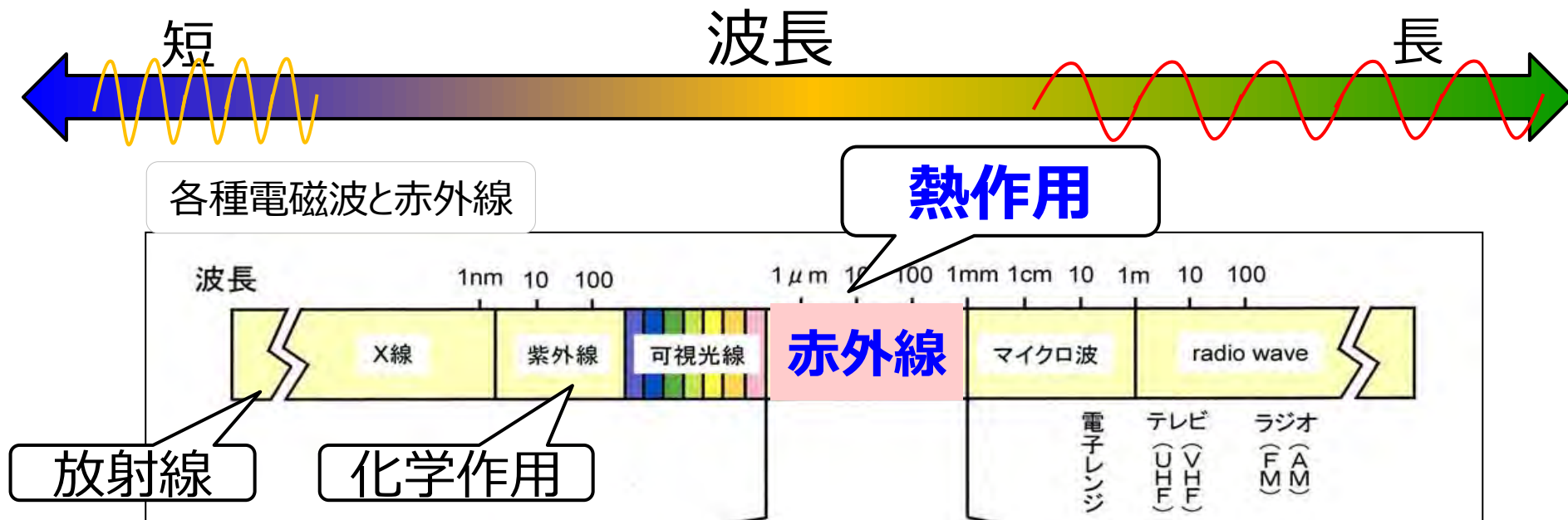


塗布状況 (乾燥後)

1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

# 赤外線（熱く射）について

赤外線は電磁波（光）の一種



工業的に：  $3\mu\text{m}$ 以下⇒近赤外線     $3\mu\text{m}$ 以上⇒遠赤外線

熱く射の特徴 ⇒ 分子の熱振動を起因として放射される電磁波

・熱に変換されやすい「マイルドな電磁波」

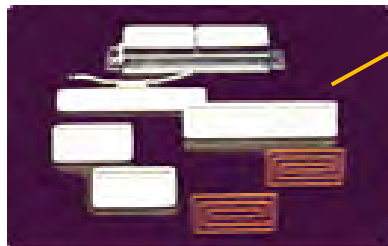
・波長選択性、指向性とも希薄な場合が多い

# 従来赤外線加熱炉の乾燥プロセスにおける問題点

## 問題点①

ヒータ及び空間が**高温化する** ⇒ そもそも（溶剤）乾燥工程では**危なくて使えない**

### 従来型赤外線ヒータの例



・近赤外ランプヒータ

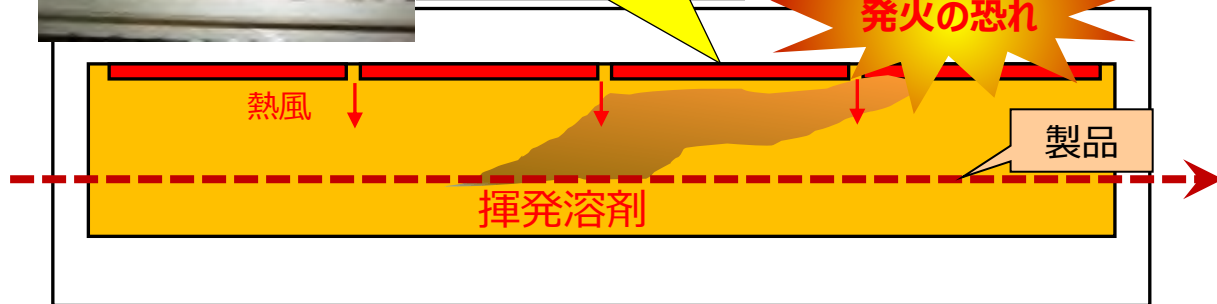
・遠赤外セラミックヒータ

・いずれも加熱（昇温）能力自体は極めて高い

・炉内の実例



左図等のヒータ  
(300~800℃)

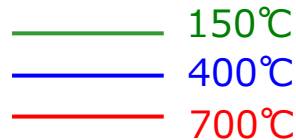


## 問題点②

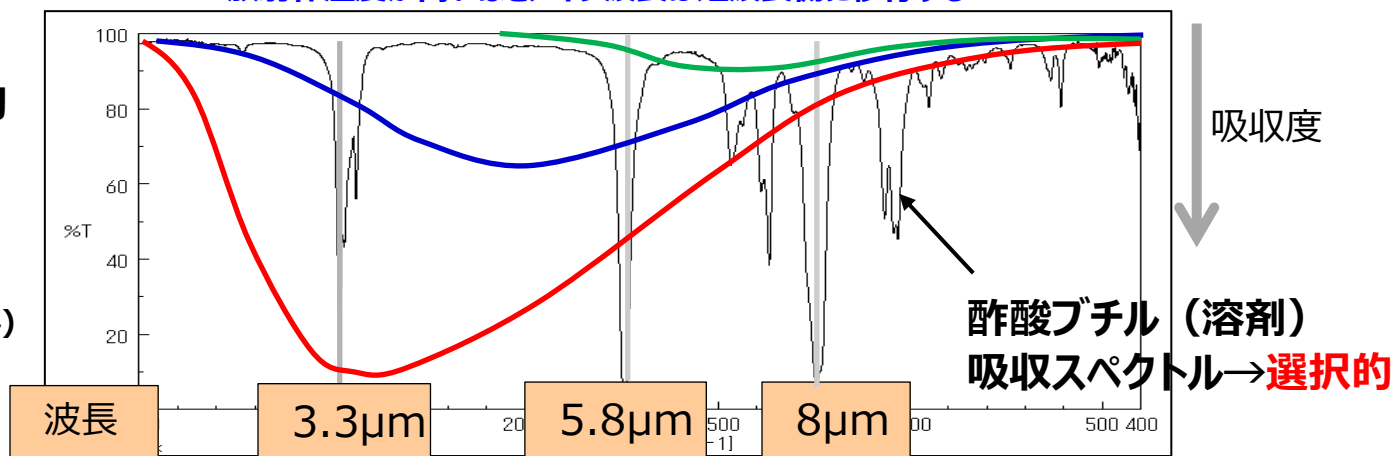
**特定波長域を狙えない!** ⇒ 放射エネルギーの多くはロスになってしまう

・放射体温度が高いほどメイン波長は短波長側に移行する

### セラミックヒータの放射スペクトル → 包括的



・Planck放射（黒体の放射スペクトル）に類似形状となる





1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
- 3. 波長制御システム**
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

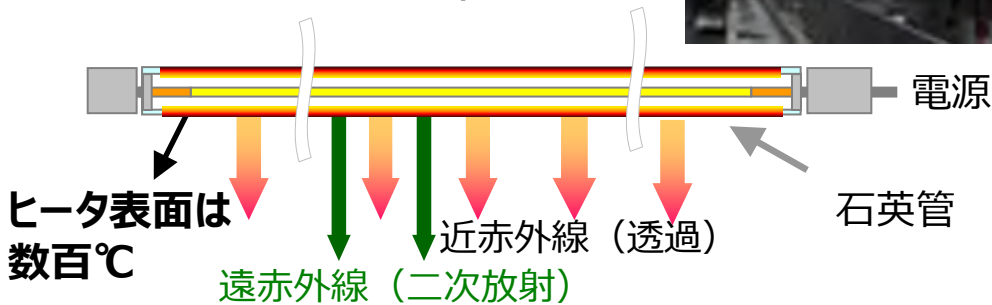
# 近赤外線波長制御ヒータ（NIR型）

- 技術思想
  - ▶ 石英管を光学フィルターとして使用
  - ▶ エア冷却の導入による不要波長のカット

## 従来技術

通称ランプヒータ

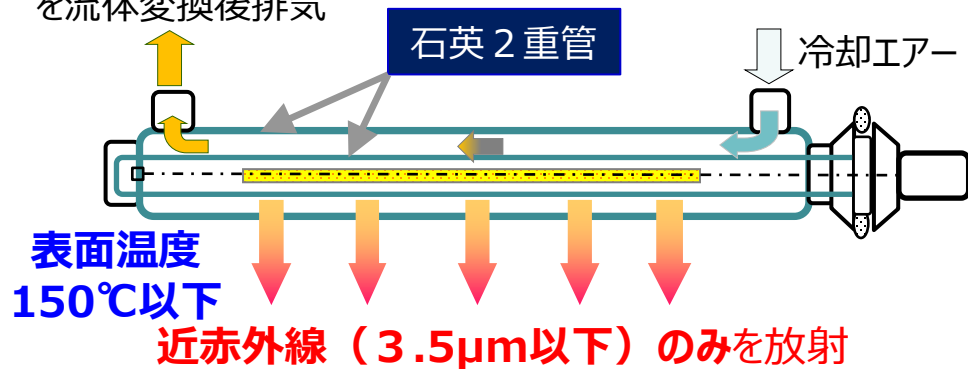
(タングステンフィラメント)



■ 結局 遠・近赤外双方を放射

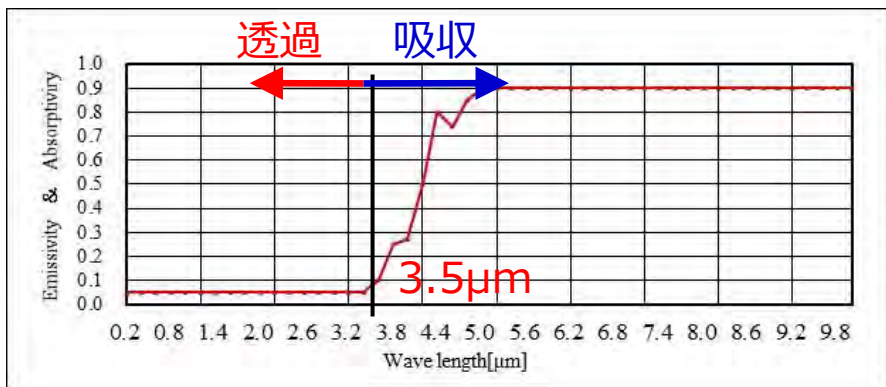
## NIR波長制御ヒータ（特許取得）

遠赤外線エネルギーを流体変換後排気

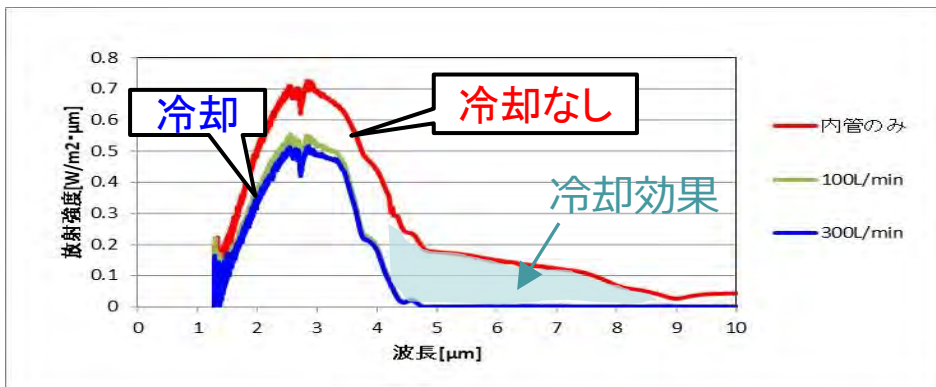


石英管: 3.5μm以下 (近赤外線) は透過  
以上 (遠赤外線) は吸収

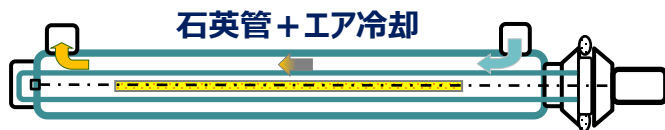
### ■ 石英管の分光吸収率



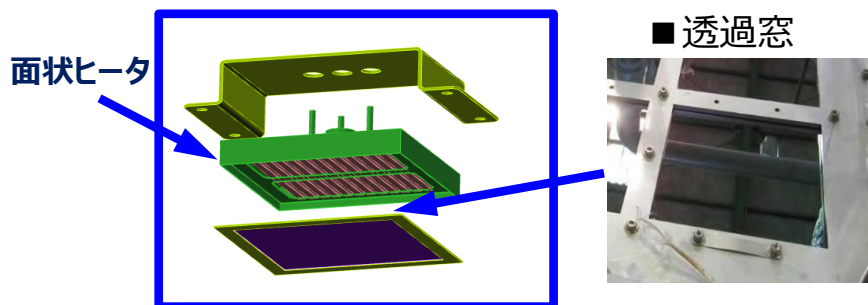
### ■ 冷却の効果



## ヒータ NIRタイプ (短波長)

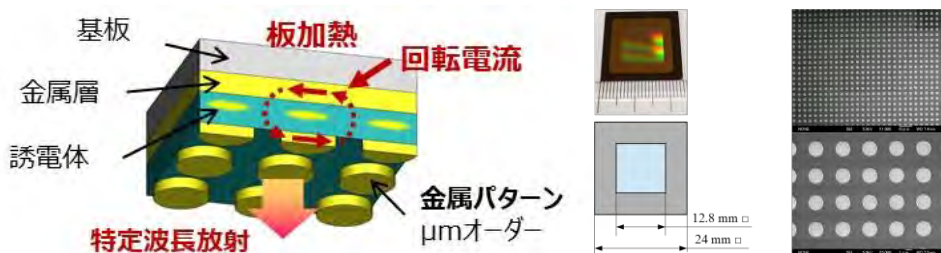


## ヒータ FIRタイプ (長波長)

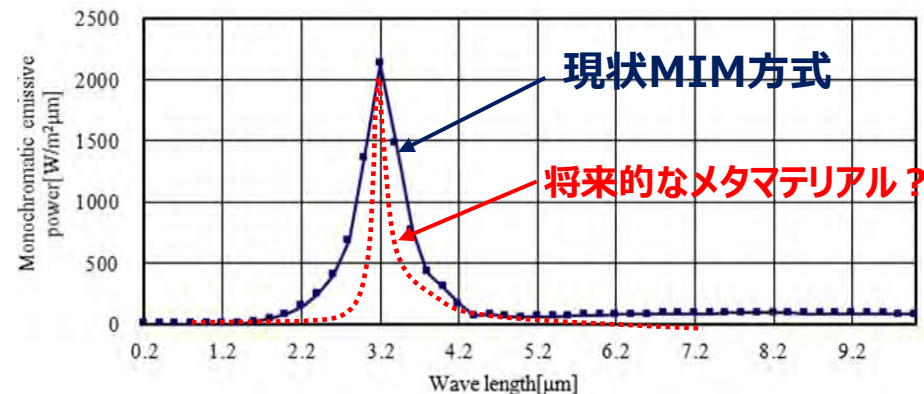
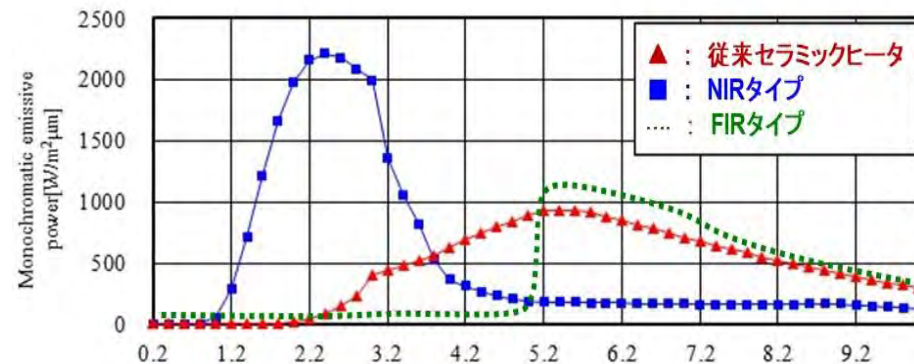


## ヒータ MIMタイプ (任意波長)

■ メタマテリアルの1種を用いた選択放射



## 各タイプの放射スペクトル比較 (概略)



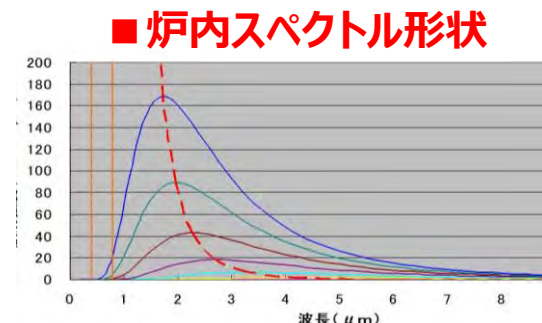
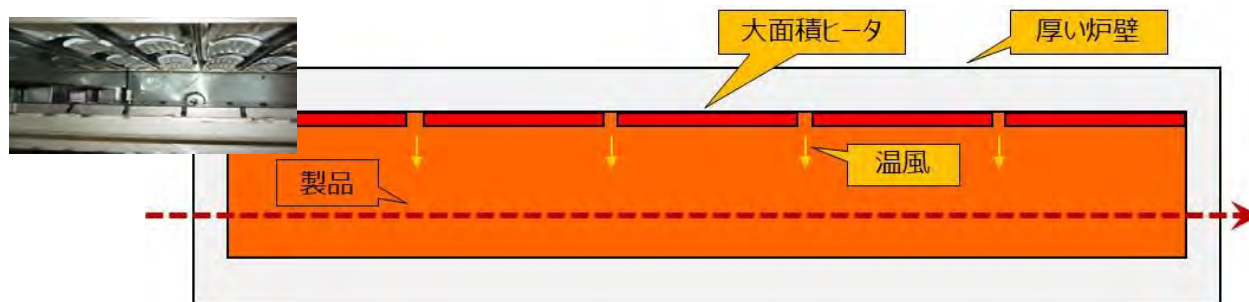
Atsushi Sakurai et al., Prediction of the Resonance Condition on Metamaterial Emitters and Absorbers using LC Circuit Model, Proceeding of the 15<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, IHTC15-9012, 2014.

※ Tsuyoshi Totani et al., The 1<sup>st</sup> Pacific Rim Thermal Engineering Conference, PRTEC March 13-17, 2016

# 基礎理論；非平衡閉空間の形成

## 〔従来赤外炉(の多く)〕

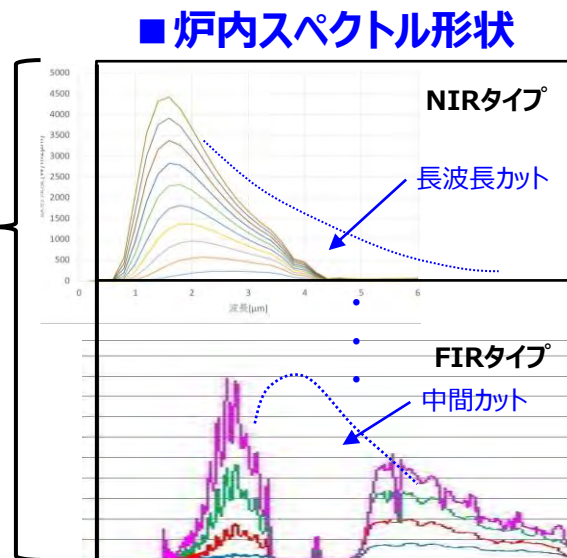
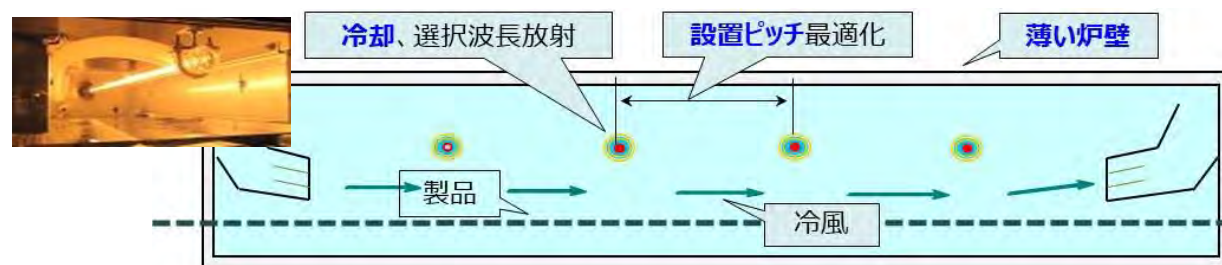
“Y.Kondo, H.Yamashita, 射度法を用いた熱ふく射平衡に関する一考察.”  
日本伝熱学会論文集 TSE Vol.19, No.1, pp.17-24, Jan. 2011.



プランク分布に限定  
(温度のみに依存)

- 高熱気密性により内部**温度均一化** → **平衡系形成**
- 急速加（熱昇温）には最適なシステム

## 〔波長制御乾燥炉（一例）〕



様々な形状が実現！

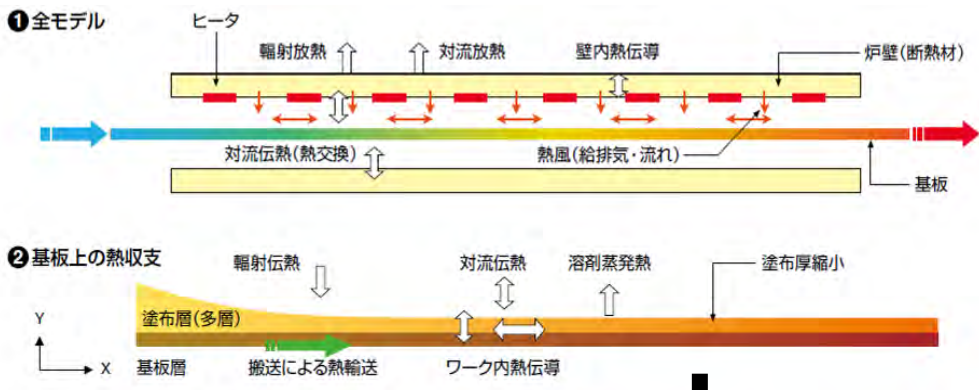
- 気密性を意図的に下げ内部**温度差形成** → **非平衡系形成**
- メイン波長は処理用途に応じて設定する
- 水、アルコール等の**O-H伸縮振動**を選択励起し、乾燥促進等

■ 従来の炉概念を脱却し、**低温空間での赤外線熱処理を実現**



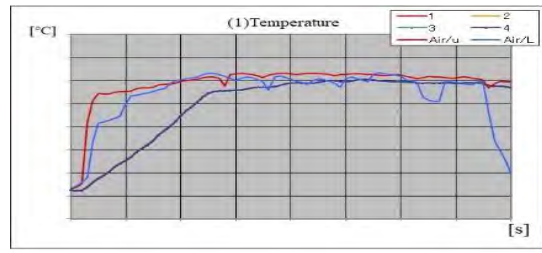
# 数値解析モデルを導入した炉設計事例

## ■ 乾燥プロセス（炉内）のモデル化

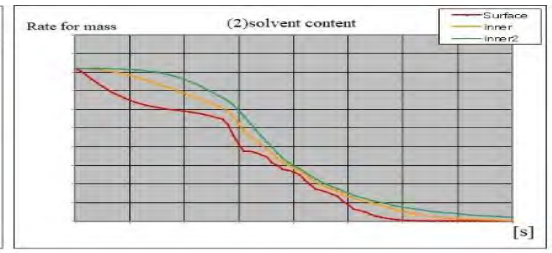


## ■ 塗布膜部解析

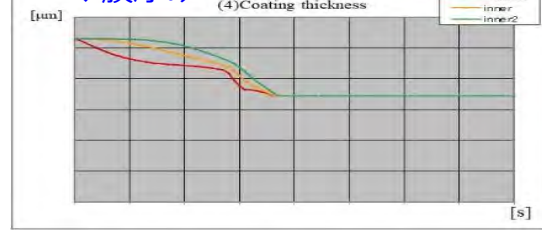
### ◆ 温度



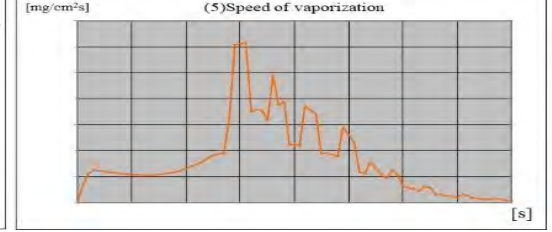
### ◆ 溶剤濃度（膜厚み方向部位別）



### ◆ 膜厚み



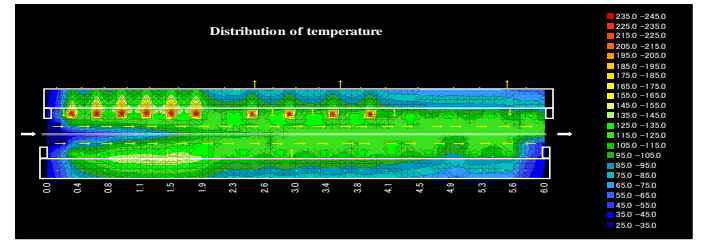
### ◆ 蒸発速度



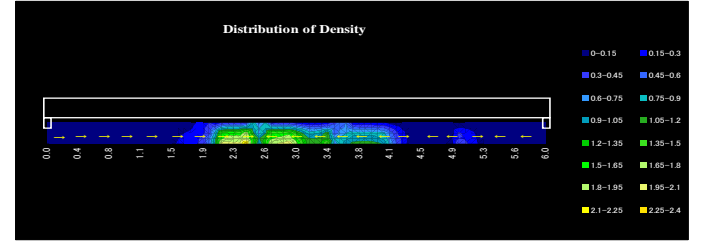
膜厚み方向における 赤：表層部 黄色：中間部 緑：基板側部 の値を示す

## ■ 炉体部解析

### ◆ 炉内温度・気相流れ



### ◆ 炉内(気相) 溶剤濃度



## ■ 乾燥炉の実例（解析内容を反映）



■ ハードと並行して、輻射+乾燥数値解析ソフトも社内開発

## ■ 特徴もしくは効果

- ・大空間内において、**特定波長赤外線**の選択放射が可能
- ・所定の赤外線エネルギーを確保しつつ、**プロセス温度の低下が可能**
  - 被加熱物選択許容性の拡大（低耐熱性物質の検討等）
  - 赤外線システム導入のフィールドの拡大（安全性の拡大等）
  - プロセスの省エネルギー（用途によって効果は異なる）

## ■ 留意点

赤外線の非熱効果に関するメカニズムは十分に解明（認知）されていない

- 特に各種温度計測の信頼性については十分な考察が必要

有効性の評価は単純ではない

- 温度制限のあるプロセスで効果が顕著になる可能性が高い
- ふく射エネルギーのみならず、対流エネルギーに変換されるロス量の検証も重要

1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
- 4. 効果事例**
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

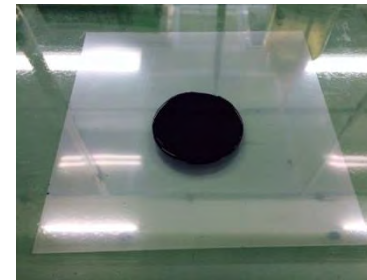
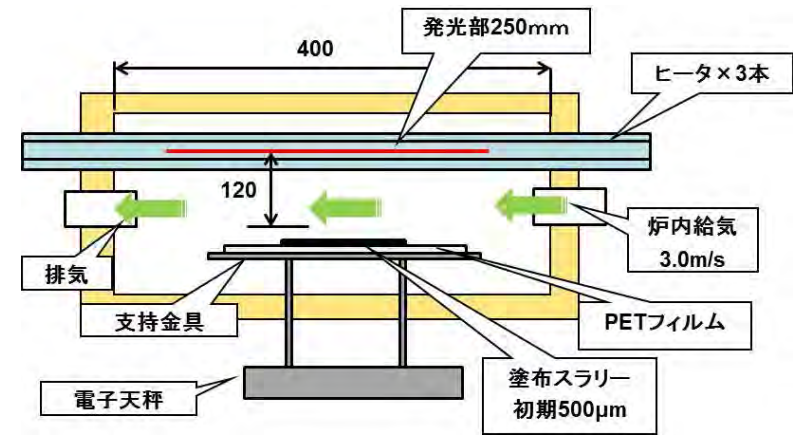
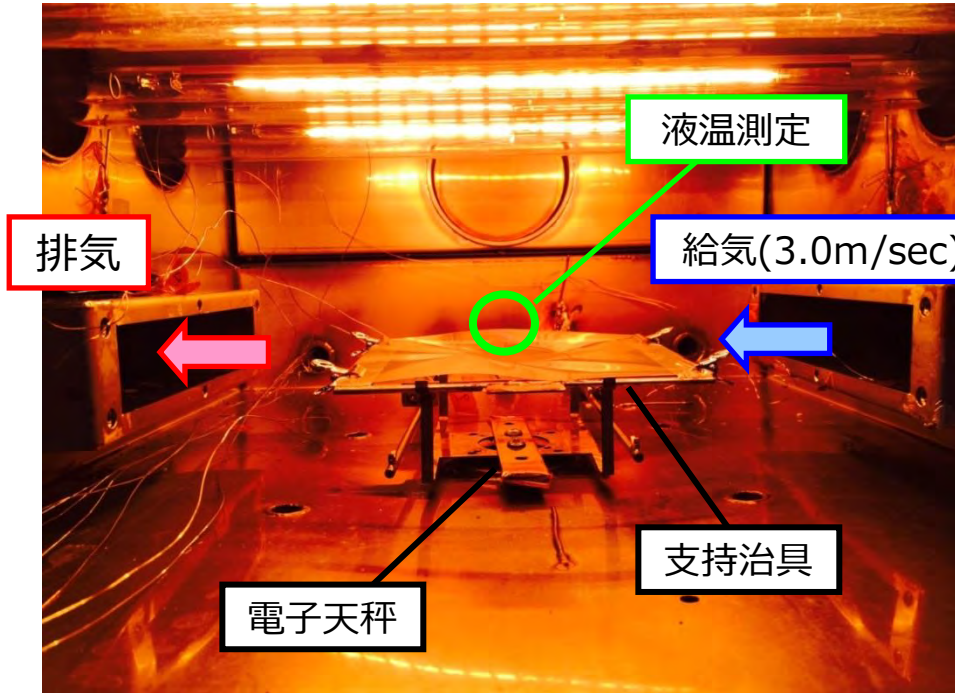
# 事例1 - 近赤外線による水の低温乾燥

## ■ 同等の水膜温度 + 風速条件でも、乾燥速度が異なることがありうるか？

→ 「**熱風のみ**」と「**近赤外線 + 冷風**」という2種類の条件でスラリーの乾燥過程を比較

試験炉内状況

■ LiB電池負極電極乾燥工程をイメージ



← 塗布直後のスラリー

- スラリー : 水 + カーボン粉末
- 塗布厚み : Wet状態で約500µm
- 基材 : PETフィルム
- 基材厚み : 約50µm

条件	ヒータ出力[W]	打込みエア			合計出力[W]
		温度[°C]	風量[m <sup>3</sup> /h]	風速[m/s]	
<b>熱風のみ</b>	—	<b>76</b>	<b>52</b>	<b>3.0</b>	<b>750</b>
<b>NIR + 冷風</b>	<b>750</b>	<b>23</b>	<b>68</b>	<b>3.0</b>	<b>750</b>



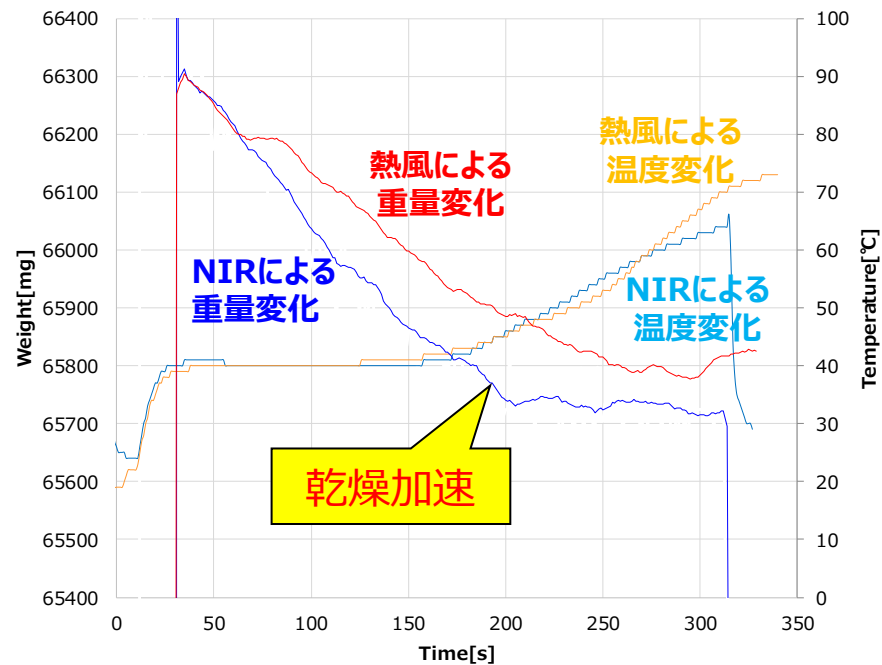
# 事例1 - 低温乾燥プロセスの可能性提示

## ■ 実験条件 (再掲)

条件	ヒータ出力[W]	打込みエア			合計出力[W]
		温度[°C]	風量[m <sup>3</sup> /h]	風速[m/s]	
熱風のみ	—	76	52	3.0	750
NIR+冷風	750	23	68	3.0	750

## ■ 実験結果

① 塗布面温度一定条件 → NIR乾燥速度が大きい



風速が同一のため従来理論では「乾燥速度同一 ⇔ 塗布膜温度同一」となるはずだが・・・  
 気液界面における分子間相互作用（水素結合）への赤外線的作用が要因の一つと見て検討中

# 事例2 - 近赤外線による厚膜のレベリング

## ■ 近赤外線 + 冷風による厚塗塗布膜の表面均一化の試み

### PVA水溶液の乾燥

Taiki Kinnan, Yoshio Kondo, Michiro Aoki and Susumu Inasawa  
 "How do drying methods affect quality of films? Drying of polymer solutions under hot-air flow or infrared heating with comparable evaporation rates"  
*Drying Technology* accepted. 2020.10

#### 試験方法

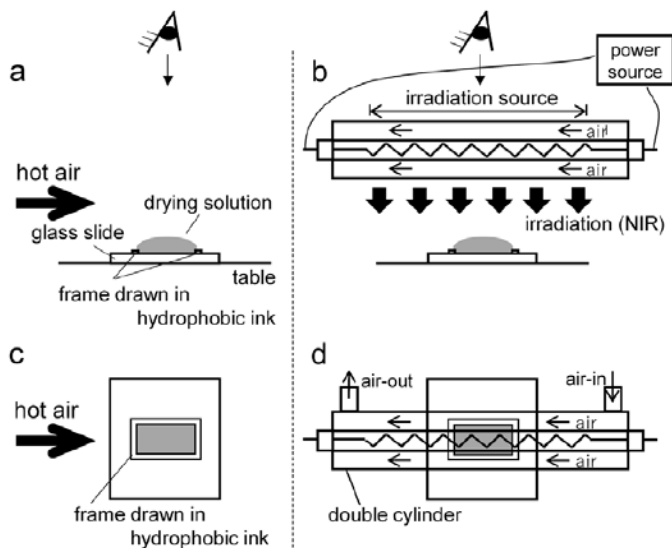
初期塗布厚み約500 $\mu$ m

**熱風**

70°C@3m/s  
(795W)

**NIR**

440W

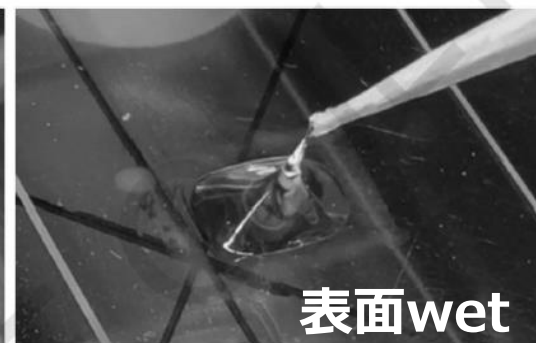


乾燥開始  
2min後の  
膜状態

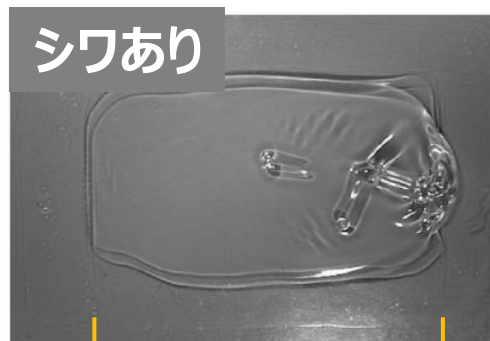
**熱風**



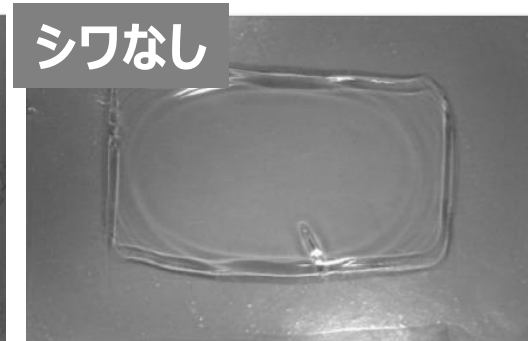
**NIR**



**シワあり**



**シワなし**



乾燥後の  
膜状態

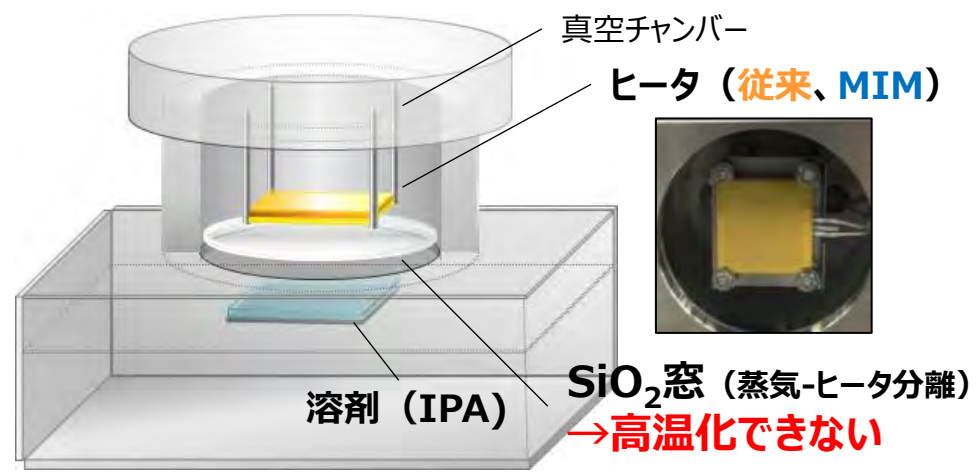
11mm

NIRにより塗布膜表面の  
平滑化を達成！

- ① 双方で乾燥速度が同一になる条件を作成
- ② 上記により塗布膜の表面状態推移を比較

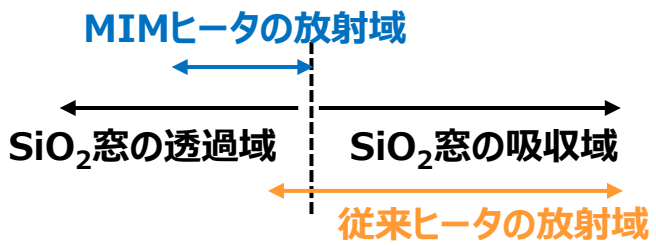
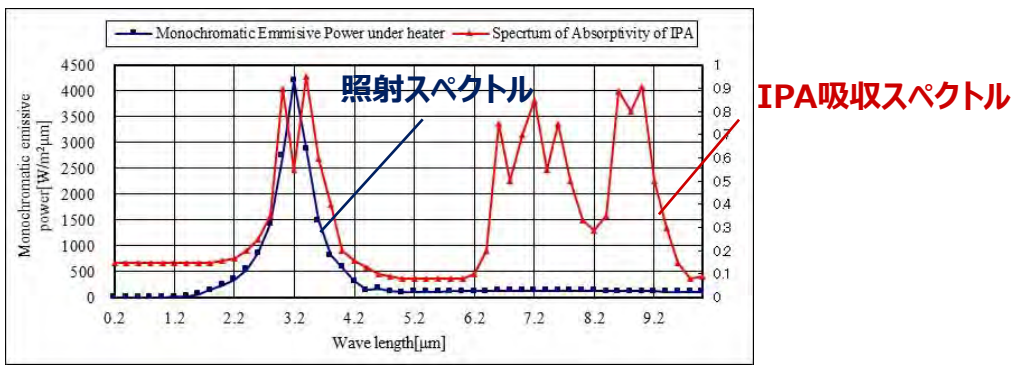
# 事例3 - メタマテリアルヒータによるIPA乾燥実験

## ■ 温度制限のある加熱系の一例

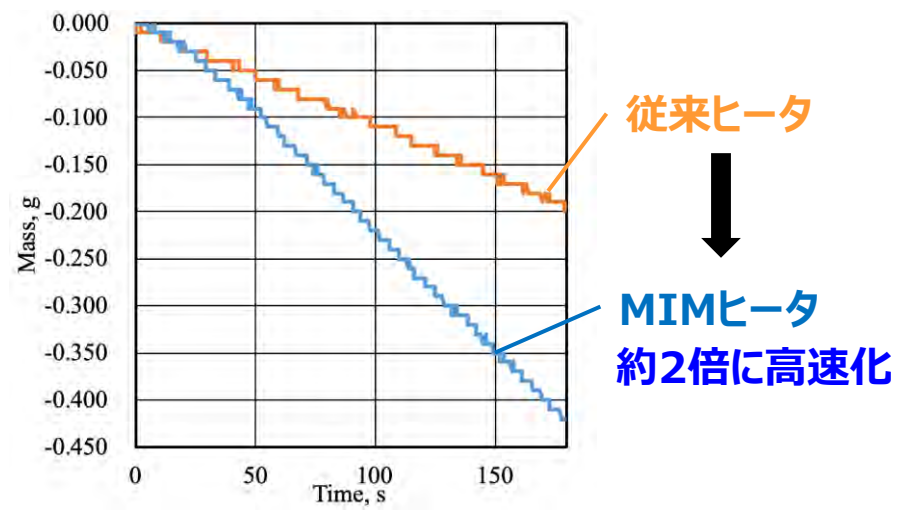


Tsuyoshi Totani (Hokkaido University),  
 Atsushi Sakurai (Niigata University),  
 Tadaaki Nagao (National Institute of Material and Science),  
 Yoshio Kondo (NGK Insulators, LTD.)  
 APTSE2019 & MNHTE  
 Oct. 31-Nov. 2, 2019  
 Beitou Hot Spring Resort, Taipei, Taiwan

### MIMヒータ照射スペクトル (解析)



### 窓温度均一条件でのIPA重量推移比較



従来ヒータ (波長非選択) は窓高温化  
 →高出力化不可能

MIMヒータ (波長選択) は窓低温維持  
 →高出力化可能 (温度制約下において威力発揮)

# その他効果事例（主として乾燥分野）

## 水系溶媒 基材ダメージレス・時間短縮に効果あり

熱源	ワーク温度 (°C)	Wet 厚み (μm)	乾燥時間 (min)	基材ダメージ
熱風	70	300	60	少しあり
遠赤	70	300	20	大
波長制御	70	300	15	なし

## トルエン溶媒 厚膜化・乾燥時間短縮に効果あり

熱源	ワーク温度 (°C)	Dry 厚み (μm)	乾燥時間 (min)	発泡
熱風	80	100	16hr	なし
熱風	80	300	乾燥不可	あり
波長制御	80	100	10	なし
波長制御	80	300	60	なし

## アセトン・酢酸エチルの混合溶媒 低温乾燥・厚膜化に効果あり

熱源	ワーク温度 (°C)	Dry 厚み (μm)	乾燥時間 (min)	発泡
熱風	80	180	15	少しあり
波長制御	40	240	15	なし

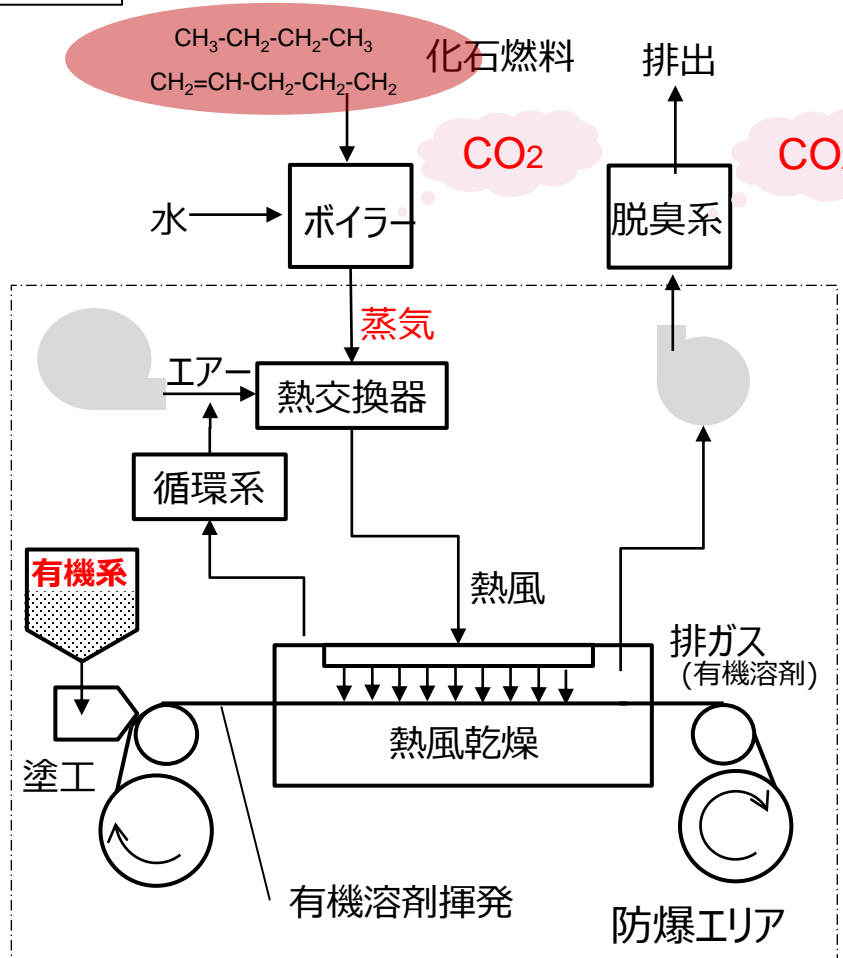
その他（MIMヒータを用いて）さらに精密な熱処理プロセスへの用途開拓を検討中  
 →各種結晶生成プロセスの効率化、特定反応の促進等（マイクロ波との比較も重要）

1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ

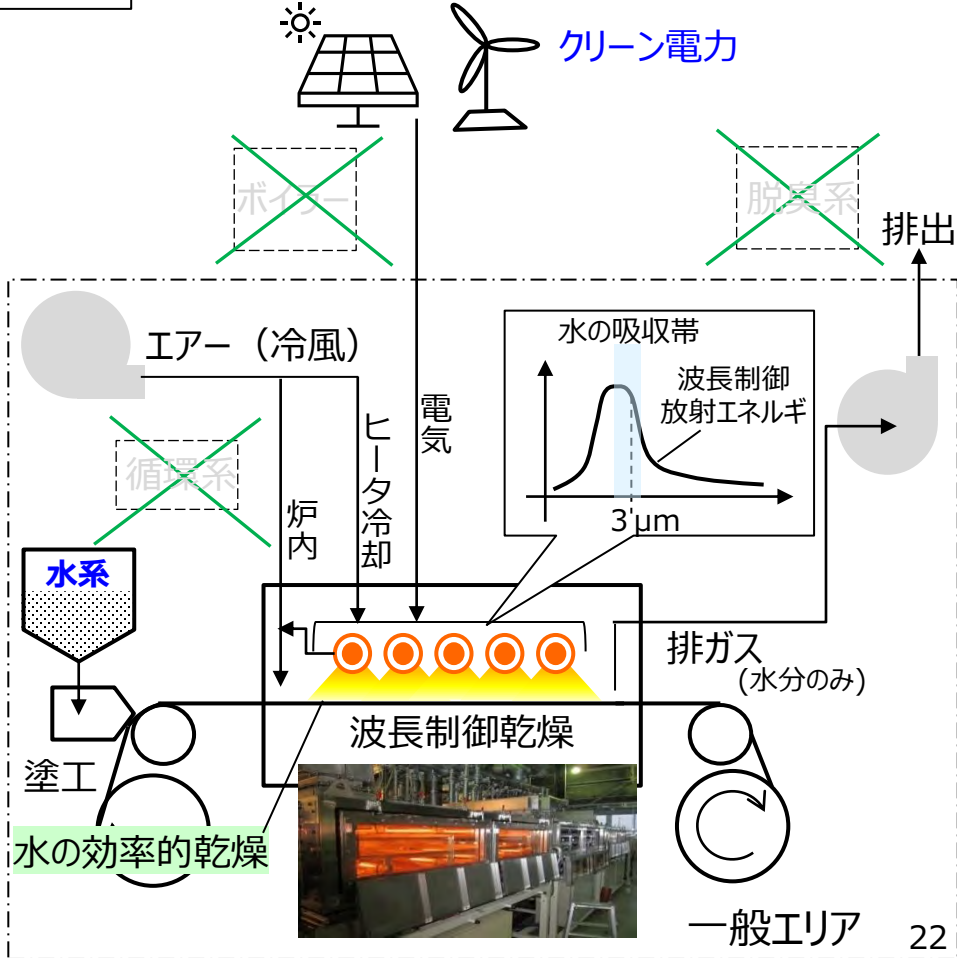
# 波長制御システムを用いたプロセス効率化の一案

- 波長制御システムによる環境貢献を考える上で、塗工・乾燥プロセス上の枠組みの再考も重要になります
  - 熱源を熱風（蒸気）から電化し、ボイラーからクリーン電力へ置換え
  - 水・水系溶剤の効率乾燥 → 脱有機溶剤の実現とともに付帯設備の不要化

## 現状 有機溶剤 + 熱風(蒸気)が主流



## 今後 IRでCO<sub>2</sub>排出削減の可能性



1. アブストラクション
2. 赤外線（熱ふく射）と従来技術の問題点
3. 波長制御システム
4. 効果事例
5. 省エネルギーへの試み
6. 今後の展望とまとめ



## 【現状での成果】

- 「波長制御熱ふく射」の導入が各種プロセスで実現しつつある
- 乾燥プロセスの低温化、膜のレベリング効果等を実験的に確認

## 【発想の転換】

- 「波長」の概念を持ち込むことで、赤外線熱処理プロセスは別物になる
- 熱処理 ≠ 昇温 ⇒ 低温で機能付加できれば最良
- いかに早く温度を上げるか ⇒ いかに**温度を上げず**に処理するか

## 【今後に向けて…】

- 赤外線の効果メカニズム等についての更なる検討が必須
- 塗布乾燥工程以外のソフトマター分野での用途拡大
- 産学連携、分野横断型研究の重要性拡大