

# 超省エネ型マイクロ波マグネシウム 製錬技術

沖縄工業高等専門学校・情報通信システム工学科  
教授 藤井 知

令和2年12月17日

# 従来技術とその問題点

マグネシウム金属は、世界市場の80%を中国にて生産し、石炭を使ったピジョン法が使われている。そのため、石炭燃焼に起因する

- ・CO<sub>2</sub>が発生(37t/1tMg)
- ・PM<sub>2.5</sub>が発生

等の問題があり、中国のみならず、日本への環境被害が甚大になりつつある。

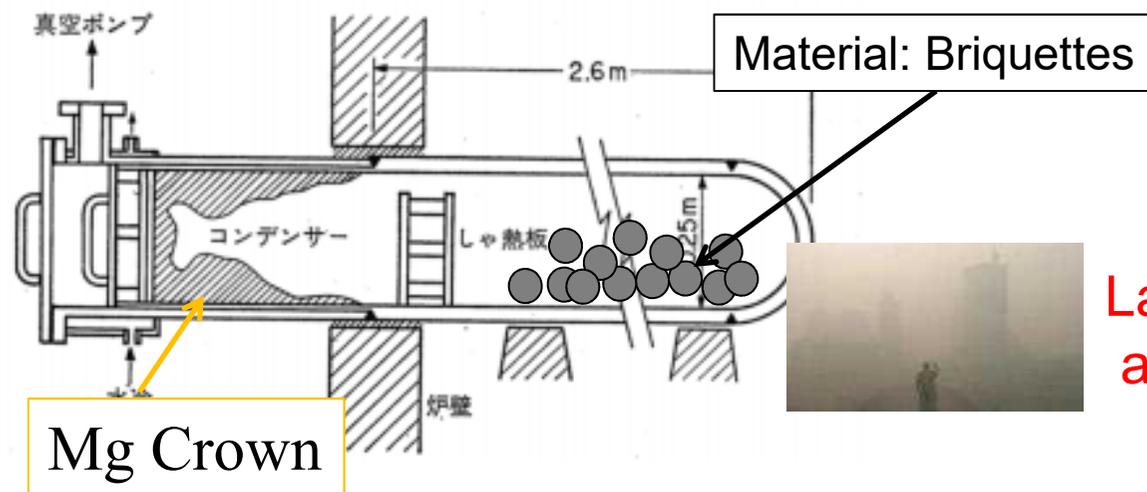
# マグネシウム製造プロセスーピジョン法ー

Reaction Eq.



Reaction condition:

Temperature: **1200°C** Pressure: 0.01 Torr (1.3Pa)



Heat source :  
Coal 7.2t /Mg 1t

Large emission of CO<sub>2</sub> around 37t  
and a lot of PM2.5

中国のマグネシウムの生産量は、世界の80%  
日本メーカーも、経済的理由で購入を続けている。

# 新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来技術の問題点であった、加熱源を石炭からマイクロ波加熱とし、マイクロ波加熱は効率よく反応場へエネルギーを届けることが出来、凡そ、70%エネルギー削減を達成した。
- 製錬されたマグネシウム金属は金属薄膜として取り出すことが可能。
- 原料ドロマイトから酸化マグネシウムが多く含まれる廃耐火レンガにすることが可能。

# マイクロ波加熱原理とマグネシウムの還元反応

$$Energy\ loss = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 + \pi f \epsilon_0 \epsilon_r'' |E|^2 + \pi f \mu_0 \mu_r'' |H|^2$$

$E$  : electric field intensity,  $H$  : magnetic field intensity

$\sigma$  : electrical conductivity

$\epsilon_0$  : permittivity of free space,  $\epsilon_r''$  : dielectric loss

$\mu_0$  : permeability of free space,  $\mu_r''$  : magnetic loss.

焼成ドロマイト(CaO・MgO) 粉体

- 複素誘電率:  $4 - 0.03j$  at 2.45 GHz
- $\sigma$ : 0.1 S/m

フェロシリコン (Si 75 wt.%, Fe 25 wt.%) 粉体

- $\sigma$ : 2432 S/m

ペレット: 80 wt.% 焼成ドロマイト, 20 wt.% フェロシリコン  
を均一に混ぜると、

虚数部分は、僅かに上昇  $0.05$ , 導電率は  $0.1$  S/m  
とても加熱できるレベルとは思えない

## 実験結果とシミュレーション

シミュレーションでは、もちろん加熱できない。

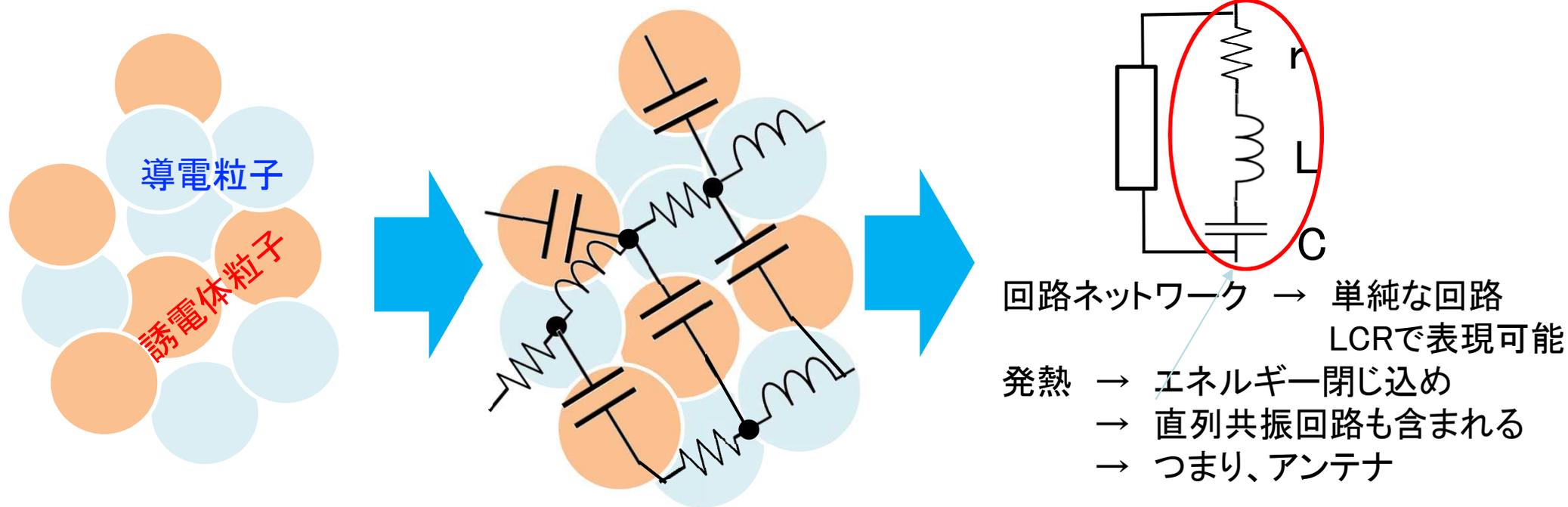
実験は、ある条件だと極めて効率良く加熱できた！

# 導電性粒子と誘電体粒子のモデル化

高周波モデル：一旦、特定の周波数( $j\omega$ )のみでの扱い

- ・導電性粒子100 vol% → 導電性(抵抗)とインダクタンス(コイル)
- ・誘電体粒子100 vol% → キャパシタンス(コンデンサ)

つまり、L、C、Rの等価回路モデルに置き換え



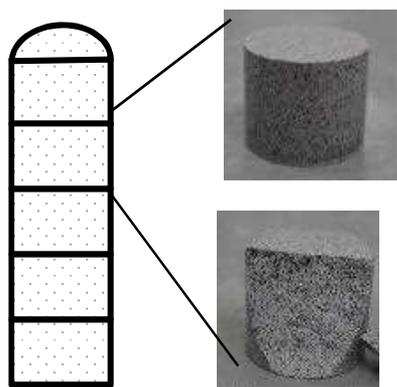
過去発見した導体と誘電体の組合せで誘電損が発現する  
マイクロな現象は $r$ の増大で表記可能！！

粒子全体：LCRのインピーダンスネットワーク

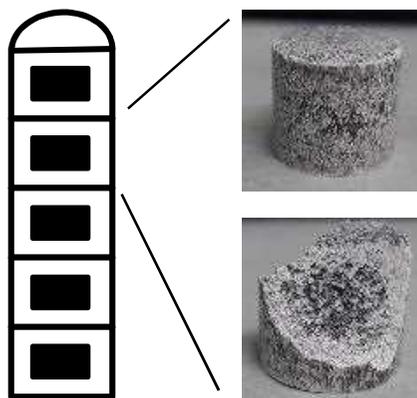
# 検討したペレット構造

ドロマイト/フェロシリコンの誘電率 約3.8

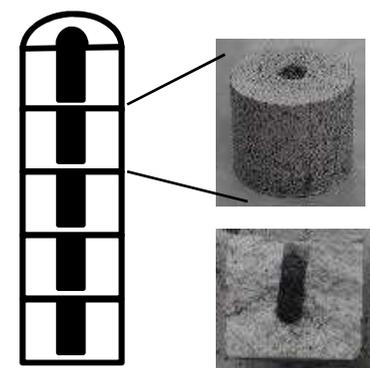
(A) 均一に混ぜたもの



(B) 不均一に混ぜたもの

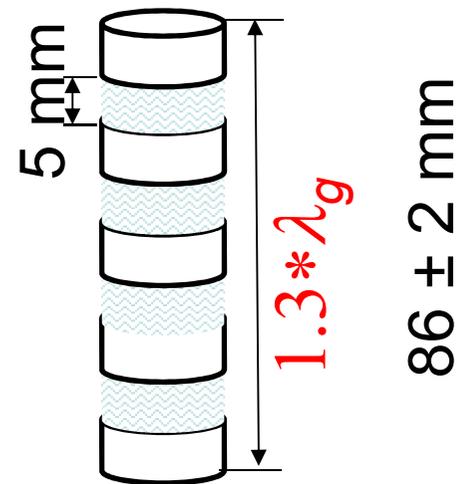
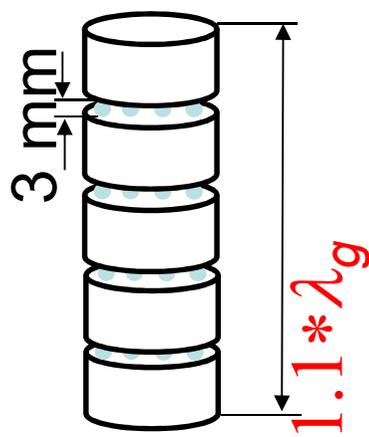
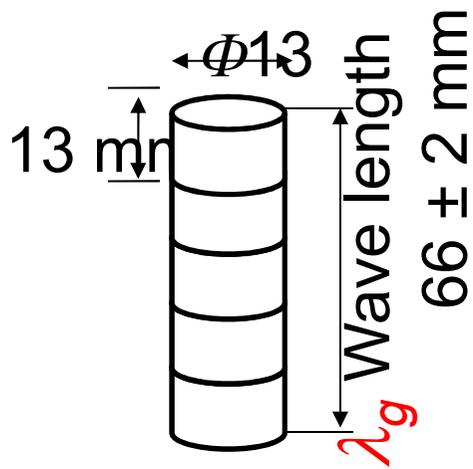


(C) 導体をロッド状に埋め込んだもの



Type

Length

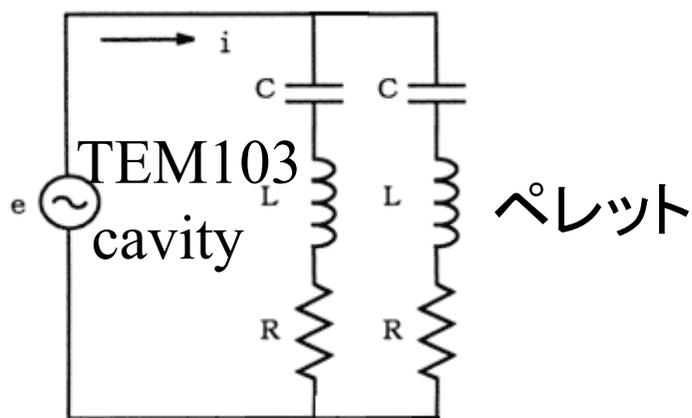
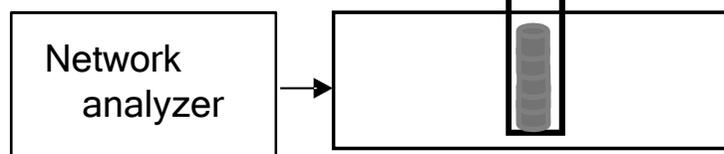


# ペレットの評価と結果

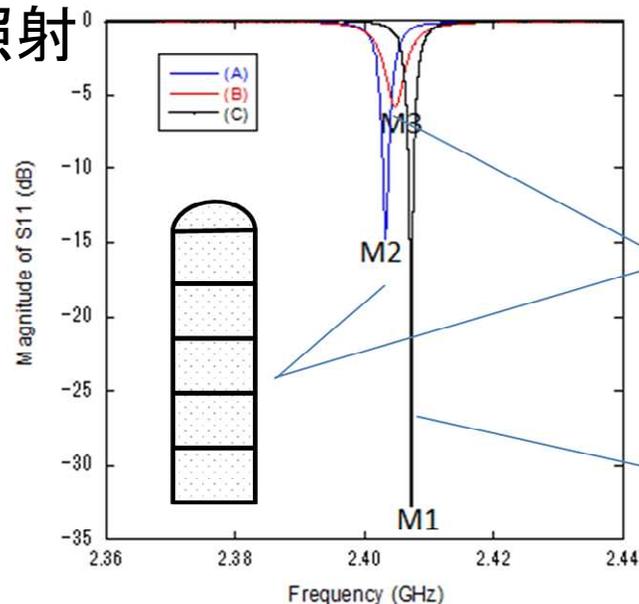
## 高周波測定

Waveguide Cavity  
TE<sub>103</sub> mode

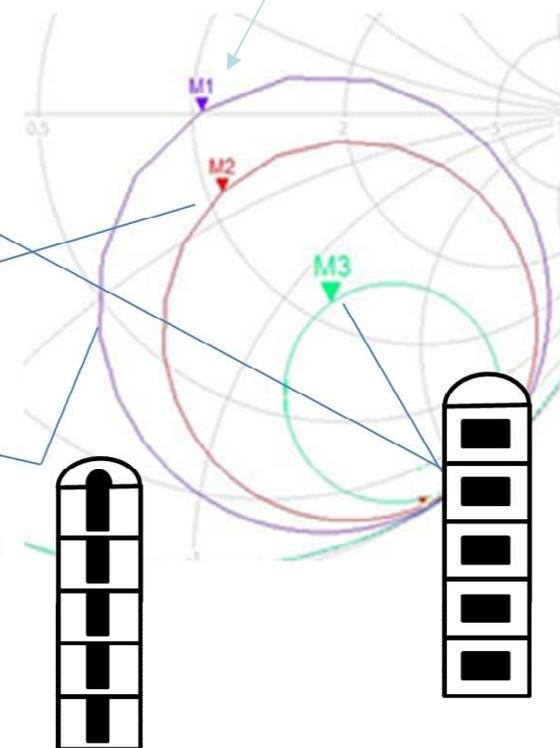
TEモードの波: ペレット全体を照射



## 高周波測定

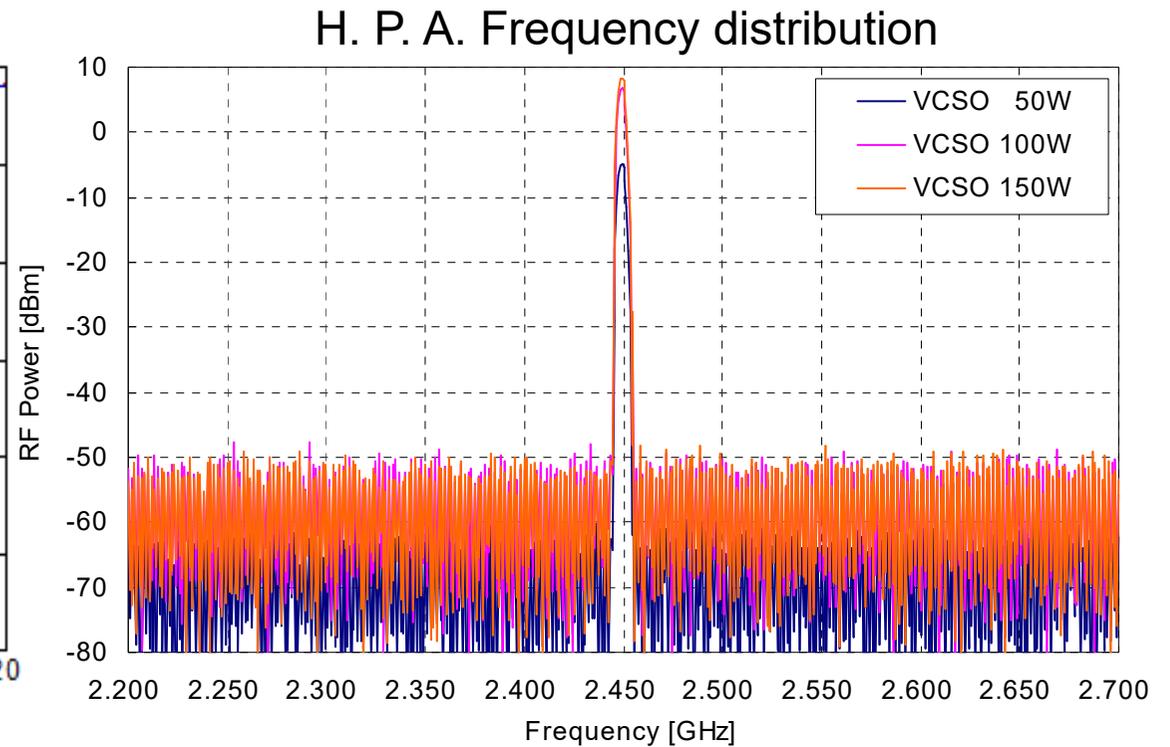
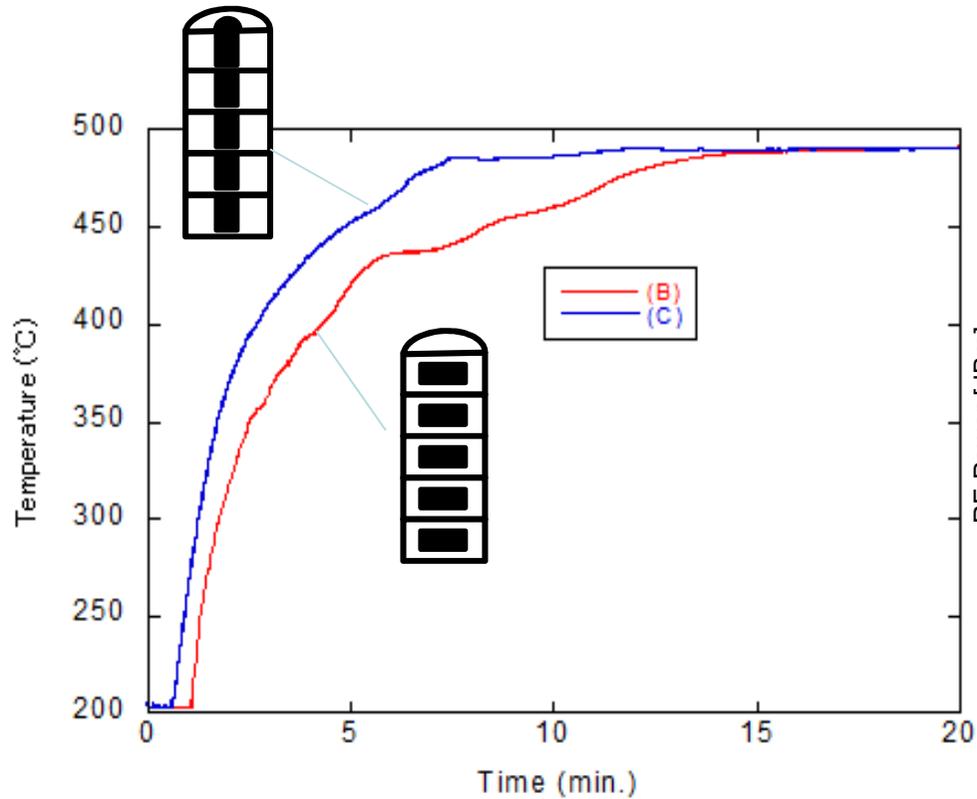


r=1のところ



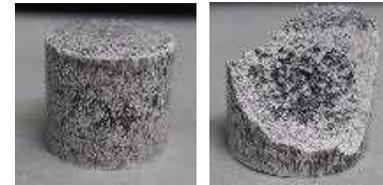
共振器の中に、共振器が入ると、  
中の方が優先される。

# 加熱特性・シングルモードキャビティ

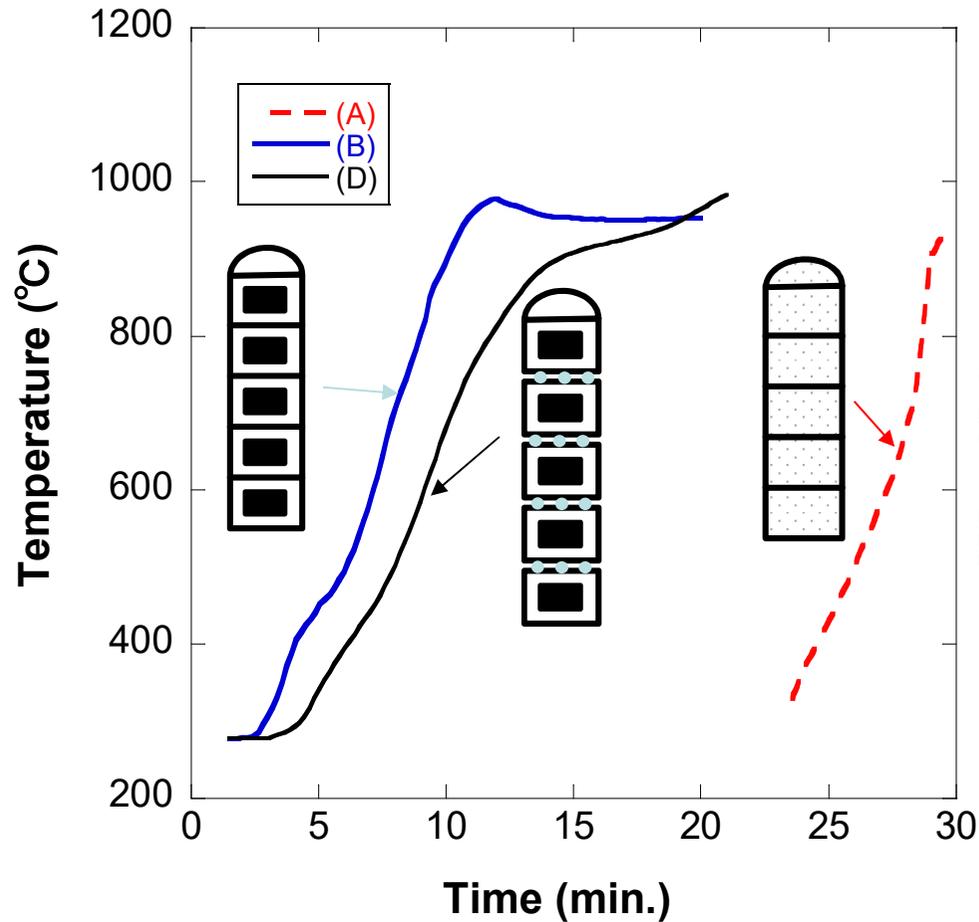


ロッド状のペレットが最も加熱されやすい

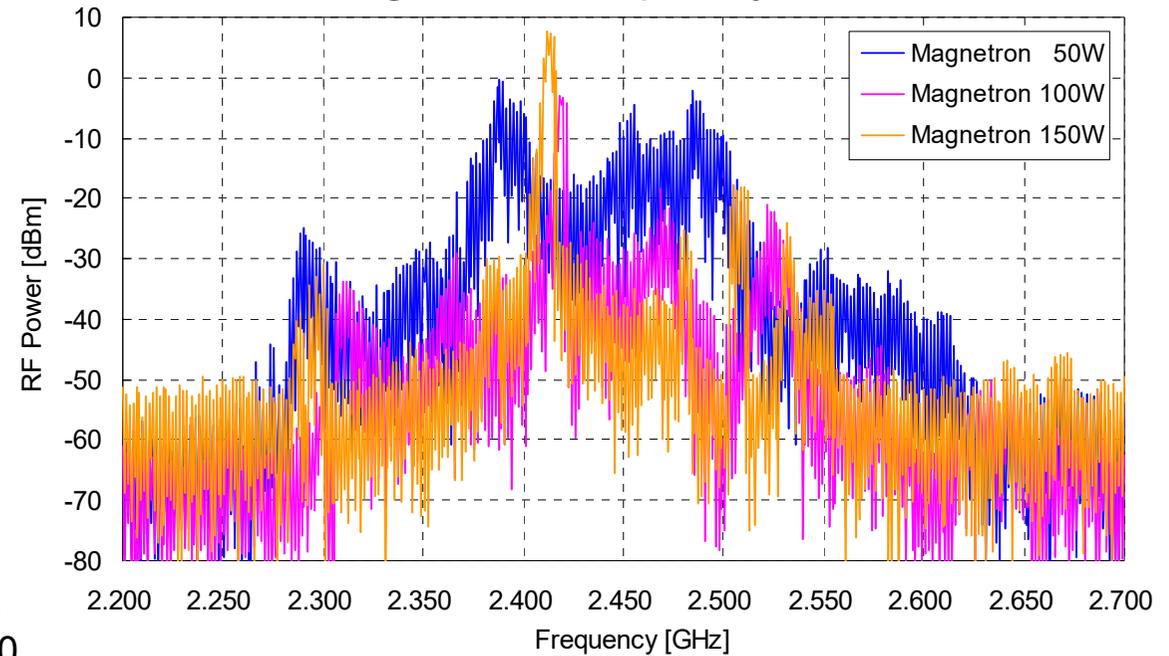
# 加熱特性・マルチモード



- broad-band antenna  
- lots of reaction points



Magnetron Frequency distribution

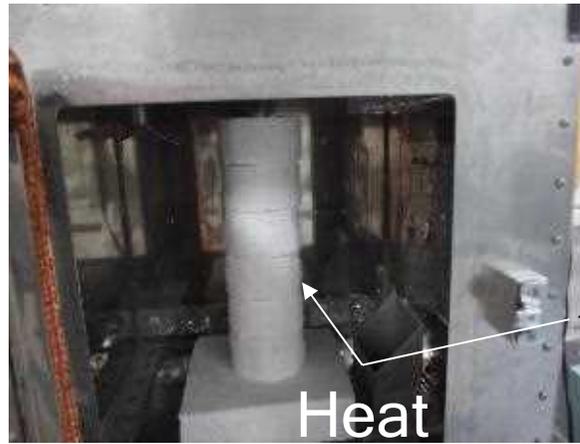


- ・ロッドタイプに比べ、反応点が多い、不均一形状が良い
- ・反応が進んで形状が変わる、  
均一やロッド形状より、低Qの共振構造が有利

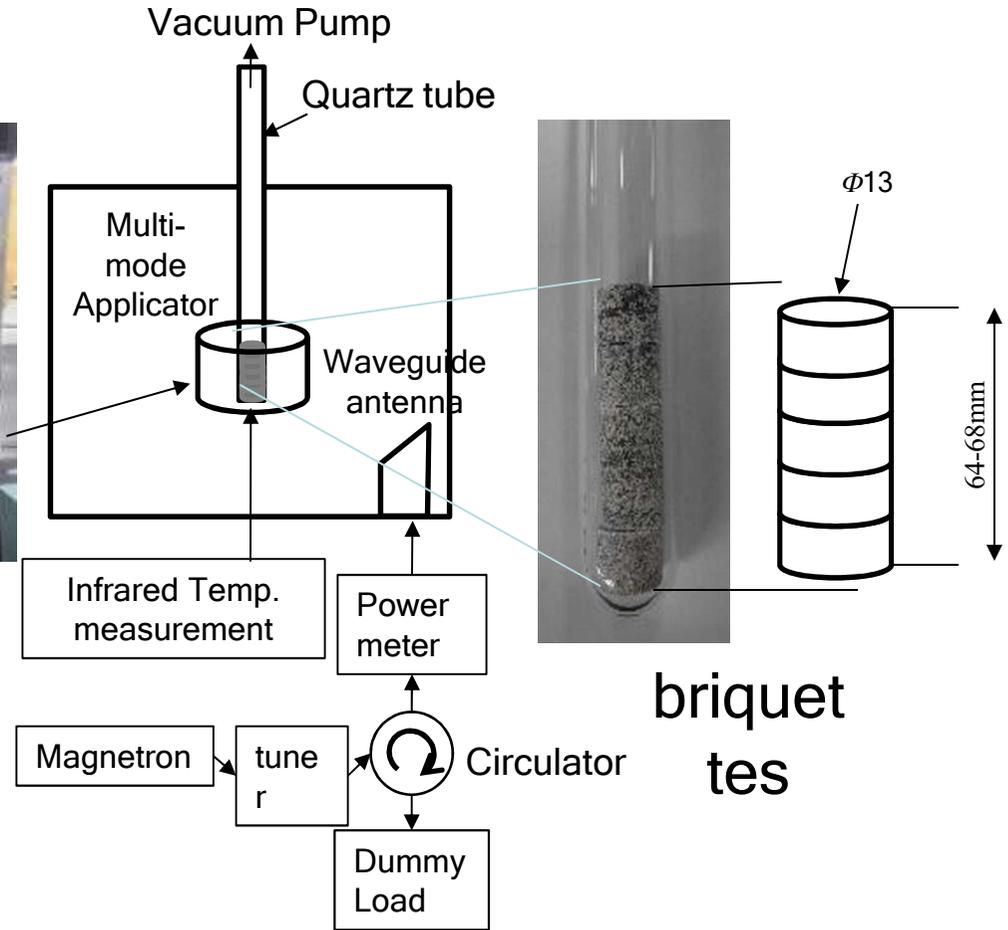
# マルチモードキャビティ・マグネシウム製錬実験



overview



inside of the applicator



Block diagram

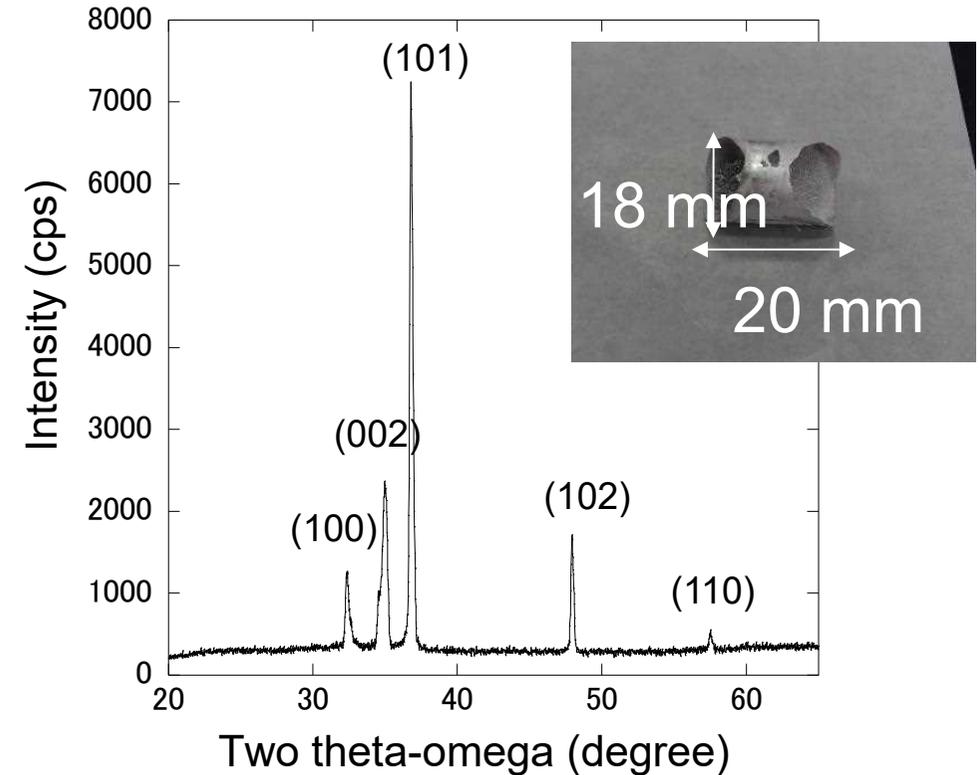
# マグネシウムの製錬結果

## Experimental

- Multi-mode cavity : 800W
- Reaction Temperature : 1000°C
- Pressure 2 Pa
- Reaction time : 80 min
- Dolomite (11.1115g)  
Ferrosilicon 75wt%FeSi (2.8455g)  
Starting material total : 13.957g



- broad-band antenna
- lots of reaction points



## Result:

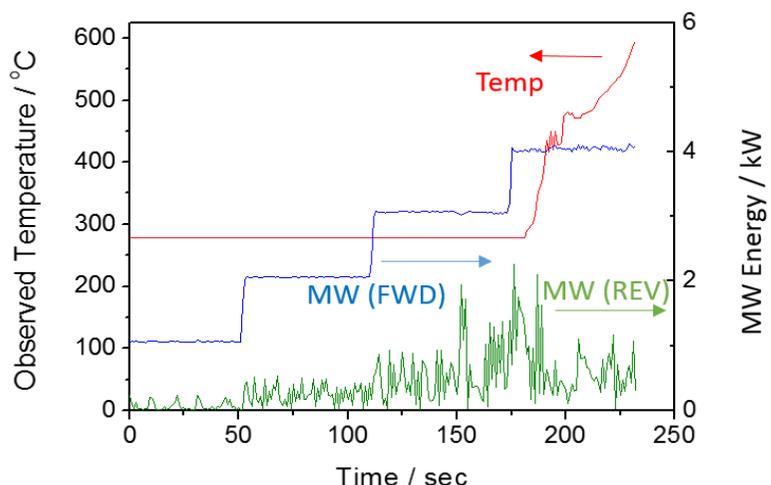
**Mg Yield: 71.4 % (Mg: 1.72g)**

It was succeeded in smelting Mg with yield 71.4%  
using microwave Pidgeon method.

# エネルギー計算のための実験



Smelting Mg with 1 ton  
Magnesium Yield by this method: 70%  
Theoretical Calorie : 15.23 GJ  
Heat efficiency : 37 %  
(Real temperature raise x Heat Capacity/Microwave energy)  
Microwave energy Conversion: 70%



Total energy: 58.58 GJ

Conventional method (Coal & electricity) : 192 GJ

マイクロ波ピジョン法の  
省エネルギー効果: 68.6 %

## 本方法のまとめ

- 石炭を使ったマグネシウムの生産からマイクロ波を加熱源とすることでCO<sub>2</sub>排出とPM2.5の大幅な低減が可能！
- 再生可能エネルギーが使える！

SCIENTIFIC REPORTS

### OPEN Smelting Magnesium Metal using a Microwave Pidgeon Method

Yuji Wada<sup>1</sup>, Satoshi Fujii<sup>1\*</sup>, Eiichi Suzuki<sup>1</sup>, Masato M. Maitani<sup>2\*</sup>, Shuntaro Tsubaki<sup>2</sup>, Satoshi Chonan<sup>2</sup>, Miho Fukui<sup>2</sup> & Naomi Inazu<sup>3</sup>

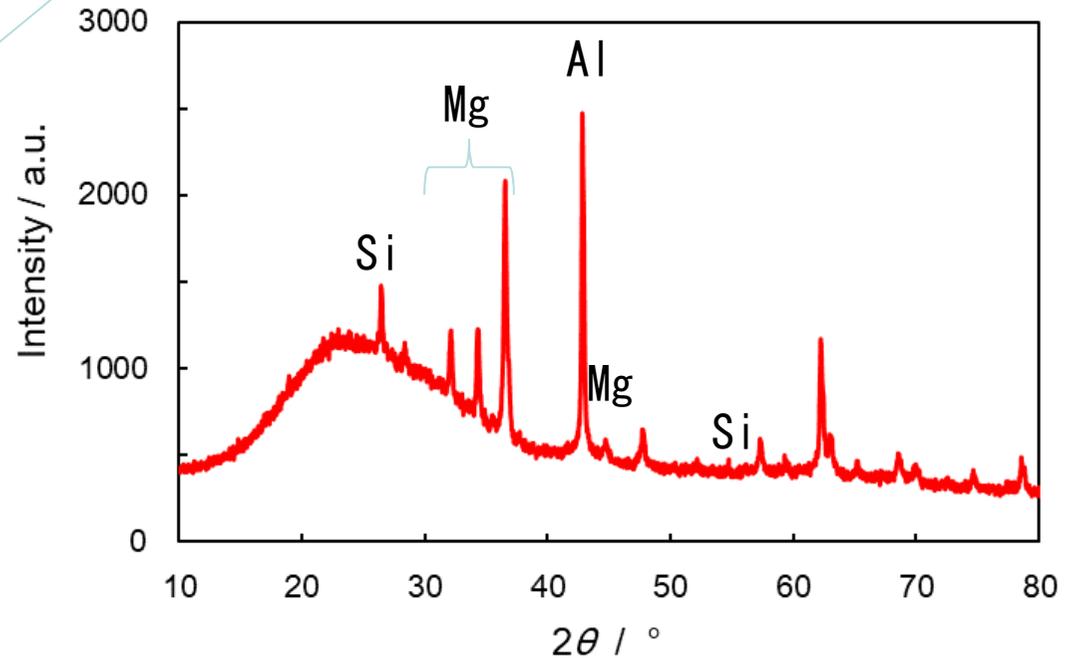
Received: 24 January 2017  
Accepted: 17 March 2017  
Published: 12 April 2017

Magnesium (Mg) is a lightweight metal with applications in transportation and sustainable battery technologies, but its current production through ore reduction using the conventional Pidgeon process emits large amounts of CO<sub>2</sub> and particulate matter (PM2.5). In this work, a novel Pidgeon process driven by microwaves has been developed to produce Mg metal with less energy consumption and no direct CO<sub>2</sub> emission. An antenna structure consisting of dolomite as the Mg source and a ferrosilicon antenna as the reducing material was used to confine microwave energy emitted from a magnetron installed in a microwave oven to produce a practical amount of pure Mg metal. This microwave Pidgeon process with an antenna configuration made it possible to produce Mg with an energy consumption of 58.6 GJ/t, corresponding to a 68.6% reduction when compared to the conventional method.

# 高効率アプリケーションの開発と 廃耐火レンガからマグネシウムの製錬



金属光沢部のX線回折



## まとめ

- ・ 耐火レンガを粉末化・還元材フェロシリコンとペレットした原料
- ・ 磁場加熱にて、部分的に800°Cを超える部分がみられ、還元反応が生じる
- ・ 耐火レンガからMg金属を取り出すことは可能、耐火レンガ中のアルミナが還元され、アルミニウムも還元され合金化。⇒用途により合金制御も可能

## 想定される用途

- 本技術の特徴としては、製錬時、直接、マグネシウム1次電池の負極製造に適用することが可能であり、マグネシウム金属の付加価値を上げることが可能。
- また、マグネシウム金属は製錬中他の金属と混合することで合金として形成可能。
- 電気炉を保有する会社では、耐火レンガを定期的に交換しており、その廃材から資源を取り出すことが可能。

## 実用化に向けた課題

- 現在、マイクロ波照射によるマグネシウム金属の製錬が可能なところ、効率的なマイクロ波照射方法まで開発済み。しかし、マグネシウム金属の用途に合わせた量産技術が課題、個体・個体反応の連続炉、金属薄膜の回収方法が未着手である。
- 実用化に向けて、マイクロ波ピジョン法のエネルギー効率を、さらに向上し、従来法に比較してエネルギー削減効率80%以上まで向上できるように技術を確立する。

## 企業への期待

- 未解決の量産技術については、磁気テープの金属蒸着技術により克服できると考えている。
- マグネシウムをエネルギーキャリアと考える、もしくはマグネシウム1次電池の技術を持つ、企業との共同研究を希望。
- また、廃耐火レンガの有効活用を開発中の企業、マグネシウム分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

## 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：マイクロ波を利用したマグネシウム製錬装置及び製錬方法
- 出願番号：特願2016-004089,2016-115948,  
2016-148133（登録済）
- 出願人：全持ち分を国立高等専門学校機構  
へ譲渡手続き中
- 発明者：藤井知、他

# 産学連携の経歴

- 2014年-2016年 X社と共同研究
- 2015年 NEDO委託研究「超省エネ型マイクロ波マグネシウム製錬技術の研究開発」
- 2017年 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構  
「マイクロ波を用いた砂の均一加熱に関する研究」
- 2018年以降 総務省戦略的情報通信研究開発推進事業・地域ICT振興型研究開発 採択  
など

# お問い合わせ先

国立高等専門学校機構 本部事務局研究推進課

TEL : 03-4212-6821 FAX : 03-4212-6810

Mail : [KRA-contact@kosen-k.go.jp](mailto:KRA-contact@kosen-k.go.jp)

URL : <https://www.kosen-k.go.jp/>