

機関番号：12608

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18070003

研究課題名（和文） マイクロ波照射 低温・高酸素ポテンシャル迅速高純度製鉄法の開発

研究課題名（英文） Innovation of pig iron making technology rapidly to produce high pure pig iron under low temperature and high oxygen potential by microwave irradiation

研究代表者

永田 和宏 (NAGATA KAZUHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70114882

研究成果の概要（和文）：2.45 GHz のマイクロ波を磁鉄鉱と黒鉛の混合粉末に窒素雰囲気化で照射し、約 10 分で 1350℃炭素濃度約 3%の銑鉄を得た。銑鉄のシリコン等不純物濃度は低く、特にリン濃度は高炉銑より 1 桁以上低い。耐火物がマイクロ波を吸収し自己発熱し溶解するのを防止するための冷却と、強エネルギー場で原料を照射するための弱出力のマイクロ波の集中が重要であり、日産 30kg 炉に成功し、日産 1 トンの 120kW 実証炉を構築している。

研究成果の概要（英文）：Molten pig iron with about 3 mass% was produced from mixed powder of magnetite and graphite during about 10 min by means of microwave heating with 2.45 GHz. The concentrations of impurities in pig iron were very low and especially that of phosphorous was one tenth in pig iron produced in blast furnace. It is realized that the refractories of reaction chamber should be cooled preventing them from absorbing microwave and melting itself and that microwave beams with weak power are concentrated to make high power zone at resources. 20kW furnace producing about 30kg of pig iron per day was successfully constructed and 120kW furnace producing 1 ton per day is now constructing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	24,000,000	0	24,000,000
2007 年度	39,000,000	0	39,000,000
2008 年度	39,000,000	0	39,000,000
2009 年度	56,400,000	0	56,400,000
2010 年度	29,300,000	0	29,300,000
総計	187,700,000	0	187,700,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：環境技術、金属生産工学、省エネルギー、二酸化炭素排出削減、反応分離工学

## 1. 研究開始当初の背景

我国の鉄鋼生産技術は、世界で最高の省エネルギーを達成しており銑鉄1トンの生産に必要なコークスは炭素換算で約530kgである。そして、これ以上の省エネルギーは既存の高炉技術では困難である。理論的に製鉄に必要な炭素は380kgなので150kgは高炉という反応装置を維持するために必要な「エクセルギー

損失」である。高炉のエクセルギー損失は、くるみ大の鉄鉱石とコークスの塊原料を用いる事から生じている。通気性を確保して高温の還元ガスを反応サイトに行き渡らせるために用いる塊原料は、反応に8時間という長時間を要し高さ30m以上の巨大な高炉を出現させた。また原料を積み重ねるため高強度を要し、これがさらに長い反応時間を要するとい

う悪循環をきたした。このため反応性の良い焼結鉱などの開発が行われた。また、巨大な炉体は高温度を必要とし、約1550℃の銑鉄を製造してエクセルギー損失に寄与している。

鉄鉱石の還元と銑鉄の生成は鉄鉱石の表面で起る不均一反応である。体積に対する比表面積が大きい粉体は反応時間を大幅に短縮し高速で銑鉄を製造するので反応容器を小さくできる。しかし粉体は通気性を阻害し飛散する。高温ガスに変わるエネルギー源を用いた新しい製鉄原理が求められている。

## 2. 研究の目的

粉鉄鉱石と粉炭材の混合物を窒素ガス雰囲気中、マイクロ波エネルギーで急速加熱することにより、10分以内に1350℃の温度で現行高炉法の銑鉄不純物濃度が1桁以上低い高純度銑鉄を大量生産する方法を開発する。本方法は、原料内部で局所発熱し全体の平均温度が低く還元反応における炭素利用率が格段に向上するので、銑鉄1トン当たりの燃料費は現行高炉法より約100kg少なくできる。また、操業の停止と開始が容易である。反応炉高さは高炉30mに対し2m以下にできるので強度の弱い様々な鉱石や炭材の粉体が使える。速い反応のためエネルギー供給律速になるが、10MW（発生器の分割可能）で1m<sup>3</sup>当り1日に生産する銑鉄量（出銑比）現行2トンを10トン程度にできる。

## 3. 研究の方法

- (1) 製鉄原料のマグネタイトと黒鉛の混合粉末のマイクロ波照射による発熱機構の解明、
- (2) 製鉄原料と耐火物の電磁氣的物性値測定、
- (3) マイクロ波加熱炭素熱還元反応機構解明、
- (4) マイクロ波加熱炉と反応炉に用いる材料の問題点の解明、
- (5) 20kW マイクロ波集中加熱炉の開発と連続銑鉄製造炉の開発、
- (6) 日産1トン連続銑鉄製造実証炉の開発
- (7) ロータリーキルン型マイクロ波加熱炉の開発
- (8) マイクロ波加熱炭素熱還元法によるシリコンの生成とイルメナイトからのアナターゼの生成法の開発

## 4. 研究成果

- (1) 製鉄原料のマグネタイトと黒鉛の混合粉末のマイクロ波照射による発熱機構

高温 X 線回折装置（理学電機（RINT-TTR-3C））に電場・磁場分離型マイクロ波炉（マイクロ電子社製 UM-1500EC-B 型、2045GHz、1.5kW）を設置した。マグネタイトとグラファイト試薬の混合粉末を石英ガラス管内で窒素ガス中マイクロ波加熱しながら X 線回折で反

ットより、また電場より磁場の方が、さらに粒度が小さいほど高温になった。磁場中ではマイクロ波照射加熱により1068～1096℃の間でウスタイトまで還元されたが鉄は生成せず、照射を止めた後冷却中に鉄が生成した。電場中では550℃以上でウスタイトが生成し、1000℃で鉄が生成した。試料内での発熱は局所的で温度測定に問題がある。

反応生成物をその場で同定すると同時に、それらの X 線ピーク位置の熱膨張による変動から、個々の反応生成物の温度を測定した。磁場中では加熱初期にマグネタイトが発熱し数秒で800℃になるが、キュリー点を越すため常磁性となり発熱しなくなり600℃近傍に降温する。黒鉛粉とウスタイトはジュール損失により発熱することが分かった。

### (2) 製鉄原料と耐火物の高温電磁氣的物性値

「PNA-L ネットワークアナライザー」と同軸型試料ホルダーを用いて、粒径50nm～180μmの粉末のヘマタイト、マグネタイト、ウスタイト、黒鉛の複素誘電率と複素透磁率を200MHz～13.5GHz、室温から700℃の範囲で測定した。粉の表面積を「自動比表面積/細孔分布測定装置」で測定し、誘電率や透磁率の粒子の見かけ密度、形状の依存性を検討した。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の透磁率の実部は、バルクと、粒径100-180μm、38-62μmの粉末で周波数が高くなるにつれ単調に減少した。一方、粒径50-60nmの粉末と針状粉末はそれぞれ1GHzと2GHzにピークをもっていた。透磁率の虚部はピークを示し、100～180μmの球状粉末では706MHz、38～62μmでは2.59GHz、50～60nmでは2.99GHz、針状粉末では3.21GHzに最大値があった。一方、単結晶体と焼結体の虚部は、下限の周波数である200MHzまで周波数が低くなるに従って単調に増加した。すなわち、大きな試料ほど低周波側に虚部のピークがある。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粉末の複素誘電率と複素透磁率の温度依存性の結果を述べる。粉末の粒度は38～62μmで充填率は62.9%である。誘電率の実部は450℃～500℃でピークを示し、キュリー点の575℃でゼロになる。誘電率の虚部は、温度上昇と共に増大するが、特にこのピークより高い温度で急速に大きくなる。誘電率の虚部は電気伝導度に比例するので半導体的性質を持つFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の電氣的特性と一致する。複素透磁率もこのピーク以上の温度で急速に減少し、キュリー点で1になる。このことは、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>の発熱は、このピーク以下の温度では誘電損失と磁気損失で起るが、それ以上の温度では、誘導電流による抵抗発熱によることを示して

いる。

他の酸化鉄の誘電率の大きさは実部、虚部とも  $Fe_{1-x}O > Fe_3O_4 > \cdot -Fe_2O_3$  の順である。したがって、酸化鉄の還元が  $Fe_{1-x}O$  まで進行するとこれも誘導電流で加熱される。

電気炉電極用黒鉛、工業用黒鉛、黒鉛試薬及びカーボンブラックの複素誘電率を測定した。複素誘電率は周波数に対し単調に減少し、吸収ピークはない。特に微細なカーボンブラックの複素誘電率は非常に小さい。したがって、黒鉛は発熱に適しているが、微細なカーボンブラックは適していない。

ムライト耐火物の誘電率を1200℃までの高温で測定した。1000℃近傍以上で自己発熱による熱暴走が起きる。この時誘電率も急に大きくなることが分った。

#### (3) マイクロ波加熱炭素熱還元反応機構解明

2.45GHz・2.8kW マルチモードマイクロ波炉を用いて、マグネタイトと黒鉛混合粉末の加熱反応を窒素ガス中で行なわせ、排ガス中の二酸化炭素と一酸化炭素の濃度をガスクロマトグラフィーで測定した。加熱開始数秒で約800℃に昇温し、その後温度が少し低下したのち、再度昇温して還元が進行し、1350℃近傍で銑鉄が生成した。原料のミリング時間が長いほど反応が短時間で終了した。鉄鉱石と炭材の接触が密なほど反応が速くなる。

12kW 出力可変型マイクロ波加熱炉を用いてNiOの炭素熱還元実験を等速昇温法で行ない、活性化エネルギーを測定した。反応は、 $NiO + C = Ni + CO$ 、 $2NiO + C = 2Ni + CO_2$ 、 $NiO + CO = Ni + CO_2$ 、 $CO_2 + C = 2CO$ 、が考えられるが、相律から独立反応は2つである。活性化エネルギーはそれぞれ、 $2.76 \times 10^5$  (J/mol)、 $2.32 \times 10^5$ 、 $1.65 \times 10^5$  及び  $1.81 \times 10^5$  であった。抵抗加熱炉による反応の活性化エネルギーは3番目の反応は文献 (J.H.Krasuk ら、Alche Journal, 18 (1972), pp. 506-12.) から  $1.97 \times 10^5$  J/mol であり、マイクロ波による活性化エネルギーは見かけ上、通常加熱による活性化エネルギーより小さくなることが分った。これにより、コヒーレントなマイクロ波の一部が直接化学反応に寄与している事を示した。

#### (4) マイクロ波加熱炉と反応炉に用いる材料の問題点の解明

12.5kW マルチモード型マイクロ波加熱炉を用いて連続製銑実験を行った。この結果、反応炉の設計で2つの重要な点が明らかになった。1つは、断熱材にマイクロ波を吸収しないものを使う必要があることである。誘電率が小さいシリカ系耐火物が良いが、耐熱性があるアルミナ系耐火物、特にポーラスなボー

ドや繊維がマイクロ波の吸収が少なく使用可能である。もうひとつは、マイクロ波を炉内に充填させるには内径が1m程度の炉容量を必要とするが、原料の容量が小さいためマイクロ波吸収効率が非常に小さくなってしまふことである。

耐火物の量は断熱効果とのバランスで決まる。原料がマイクロ波を吸収して発熱し、数十秒で1200℃の溶融銑鉄を生成するが、溶融銑鉄はマイクロ波を吸収しないので温度が低下し凝固する。連続銑鉄製造のためには、反応容器もある程度発熱し、反応容器内の温度が1350℃程度を維持するよう設計する必要がある。

#### (5) 20kW マイクロ波集中加熱炉の開発と連続銑鉄製造炉の開発

マイクロ波は炉体金属表面で反射を繰り返す、その一部は吸収されて熱に替り放熱してエネルギーロスを大きくする。そこで、マイクロ波の指向性を利用して、導波管から照射されるマイクロ波が直接試料に当たるようにする。これらの条件を勘案し、マイクロ波の指向性を利用した出力20kWのマイクロ波集中照射型加熱炉を構築した。球形に近い容器に出力2.5kW・2.45GHzのマグネトロン発振器を上下4基ずつ8基設置した。ヘリカルアンテナを用いてマイクロ波照射が中心で約60cmの範囲に集中している。

反応炉は炉床にマグネシア焼結板を用い、炉壁はムライトのボードで囲った。内部をマグネシアセメントでコーティングした。ムライトボードとセメントの間にはアルミナファイバーを入れ断熱し、ボードが高温にならないようにした。また、焼結板下はスパーサーを入れ冷却した。天井はムライトボード板を用いた。これにより、マイクロ波を透過させても炉の断熱壁の温度が数百度以下に抑えられ、壁自身の発熱暴走を防止できた。一方、炉床のマグネシア板は発熱して原料の加熱に有効に利用できる。また、空気断熱層により下部のレンガの加熱による発熱暴走を防止できた。原料は水冷ステンレス管により炉上部から連続投入し、排気ガスは同様な管で上部から排出した。

銑炉から銑鉄を炉外に連続的に出銑させる方法を開発した。マイクロ波の漏洩防止のために鉄管の途中に3cm幅のチョークを2個入れた。また、出銑口からのCOガス遺漏防止のため銑鉄受けのマグネシア容器中に $B_2O_3$ を溶解し、シリカ管をこれに浸した。さらに接地したグラファイト板をルツボ底に設置して銑鉄を接地した。

20kW マイクロ波集中加熱炉を用い、グネタ

イト-18%グラファイト混合粉末を2kg入れ、アプリケーション内を窒素ガスで置換した。加熱開始から約60分で1400℃に達し、1300℃を越える辺りから銑鉄が出銑口から流出した。毎分約50gで製鉄原料を連続装荷し、定常操業約2時間で3kgの2.8%炭素含有銑鉄を得た。エネルギー効率は約20%である。銑鉄中の不純物濃度は、シリコン0.0843mass%、リン0.0039mass%、硫黄0.1598mass%であった。硫黄が高いのはマグネタイト鉱石中の高い硫黄濃度による。

#### (6) 日産1トン連続銑鉄製造実証炉の開発

銑鉄日産1トンを製造するためのマイクロ波加熱炉を設計し、構築した。クライストロン方式の出力30kWマイク炉は発振器を4基設置し、最大出力120kWとした。伝送系は、アイソレータ、方向性結合器、3スタブ自動整合器、コーナー・アークディテクターを30kWクライストロン・マイクロ波発振装置に矩形導波管で結合し、これを4系統設置した。

日産1トンの連続銑鉄製造装置は、厚さ5mmの鉄製容器の中に軽量キャストブルで断熱層を作り、その内壁にグラファイト板を貼り付けた。4系統の矩形伝送管は水平に接地し、その先端を斜めに切断してマイクロ波が炉床に直接照射するようにした。反応容器の天井中央に水冷管を垂直に取り付け、原料を炉床に連続的に供給できるようにした。炉内の電磁波強度分布をコンピューター・シミュレーションで計算し結果、炉床面約60cm径に集中照射することが分かった。

炉内にMgOルツボを置き耐熱ボード隔壁で導波管と分離しダストなどの汚染を防止したところ、出力32kWで原料を最大毎分0.5kgで供給し24kgから10kgの銑鉄を得た。効率は36%であった。

#### (7) ロータリーキルン型マイクロ波加熱炉の開発

別の方式として反応容器を回転させるロータリーキルン型マイクロ波炉を設計し作製した。これは、炉体を回転させることにより原料を広げてマイクロ波の照射面積を大きくして効率を上げようとするものである。回転筒の両側から2.5kW・2.45GHzマグネトロン型マイクロ波発振器を4基ずつ、計8基装備し、出力20kWとした。

ロータリー型マイクロ波加熱製鉄炉の回転筒内に内径50cm、長さ50cmのグラファイト管を設置し原料の広がりとその厚さを計測した結果、原料供給速度を3kg/時、回転数毎分0.15回転で回転筒の傾きを1°にする製鉄条件が分った。

このグラファイト管内にムライトボードで

直径60cm幅約8cmの空間を造り、マグネシアセメントで内張りした。この中にマグネタイト鉱石-18%黒鉛混合粉2kgを装荷し、毎分0.1回転で回し、加熱した所、10分ほどで銑鉄が生成した。

(8) マイクロ波加熱炭素熱還元法によるステンレス酸洗スラッジからの有用金属の回収、シリコンの生成及びイルメナイトからのアナターゼの生成法の開発

ステンレスの酸洗スラッジに炭材粉末と混合し、2.45GHzのマイクロ波加熱で熱炭素還元を行い、銑鉄を生成して、その中にニッケルとクロムを溶解させて回収した。回収率は90%になったが、リンの溶解も同時に起った。

マグネシアルツボ内をSiC粉末で内張りし、その中にSiCとSiO<sub>2</sub>の混合粉活を詰めて2.45GHzのマイクロ波で加熱した。約20分で温度は2000℃以上になった。加熱後の試料は、SiCとMg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>及びシリコンが生成した。

マイクロ波加熱によりArガス中でイルメナイト粉末の炭素熱還元した所、イルメナイト中の酸化鉄が還元されて銑鉄が生成した。これを弱酸溶液中で処理して鉄を溶解除去し、純度83%のアナターゼを得た。

#### 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26件)

①K.Nagata, Pig iron making from powdery iron ores, 査読有, Proc. of 8<sup>th</sup> Japan-Brazil Symp. on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries, 2010, 142-147

②M.Hotta, M.Hayashi & K.Nagata, Complex permittivity and permeability of  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>1-x</sub>O powders in the microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz, 査読有, ISIJ International, vol.50, 2010, 1514-1516

③K.Kashimura, K.Nagata & M.Sato, Concept of furnace for metal refining by microwave heating- A design of microwave smelting furnace with low CO<sub>2</sub> emission 一, 査読有, Materials Transactions, vol.51, 2010, 1847-1853.

④永田和宏、マイクロ波加熱による革新的製鉄技術、査読無、金属、80、2010、44-50.

⑤K.Kashimura and K.Nagata, Removal of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Film Using Atmosphere Transferred Plasma at Low Temperature, 査読有, ISIJ International, vol.50, 2010, 169-173.

⑥M.Hayashi and K.Nagata, Pig Iron Making by Microwave Heating for Reducing CO<sub>2</sub> Gas Emission by Half, 査読有, Proc. Ironmaking for Sustainable Development 2010, 137-140

⑦M.Hotta, M.Hayashi, A.Nishikata and K.Nagata, Complex Permittivity and

Permeability of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Powders in Microwave Frequency Range between 0.2 and 13.5GHz, 査読有, ISIJ International, vol.49, 2009, 1443-1448.

⑧ Kazuhiro NAGATA, Innovation of iron making by microwave heating, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 273-273.

⑨ Miyuki HAYASHI, Keiji TAKAGI and Kazuhiro NAGATA, Effects of electric and magnetic fields on microwave induced carbothermic reduction of magnetite mixtures, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 325-326

⑩ Kotaro ISHIZAKI and Kazuhiro NAGATA, Carbothermal reduction of magnetite by microwave irradiation, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 453-456

⑪ Kazuhiro NAGATA, Keita KODAMA and Miyuki HAYASHI, Kinetics of carbothermic reduction of magnetite powder mixed with graphite heated by microwave, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 457-460.

⑫ Masahiro HOTTA, Miyuki HAYASHI and Kazuhiro NAGATA, Microwave absorption mechanisms of raw materials and refractories for iron making – permittivity and permeability measurements of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  –, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 537-540.

⑬ Akihiro Matsubara, Motoyasu Sato, Sadatsugu Takayama, Kazuya Nakayama, Takahiro Kaneba, Katsumi Ida, Kazuhiro Nagata and Shigeki Okajima, Investigation of Microwave-Carbothermic Reduction of Magnetite with the Integrated Microscopic Imaging Spectrometer, 査読有, Japan Soc. of Electromagnetic Wave Energy Applications, Proc. 1st GCMIEA 2008 MAJIC, 2008, 739-739.

⑭ Kazuhiro Nagata and Miyuki Hayashi, Pig iron making by microwave heating, 査読有, Proc. 7th Japan-Brazil Symposium on Dust Processing-Energy-Environment in Metallurgical Industries, vol.1, 2008, 134-142.

⑮ Kazuhiro NAGATA, Miyuki HAYASHI,

Motoyasu SATO and Kotaro ISHIZAKI,  $\text{CO}_2$  Saving Process for Steel Making by Microwave, 査読有, Proc. 4th Interl. Congress on the Science and Technology of Steelmaking, vol.1, 2008, 638-641.

⑯ Kyosuke HARA, Miyuki HAYASHI and Kazuhiro NAGATA, Melting of Iron Powder with Graphite by Microwave Heating, 査読有, Proc. 4th Interl. Congress on the Science and Technology of Steelmaking, vol.1, 2008, 658-661.

⑰ Kazuhiro NAGATA, Pig Iron Making by Microwave Heating for Reducing  $\text{CO}_2$  Gas Emission, 査読有, Proc. 13th VDEh – ISIJ-Seminar on Metallurgical Fundamentals, vol.1, 2008, 1-9.

⑱ 永田和宏, 簡単にできる「たたら製鉄」と現代の鉄づくり, 査読有, 化学と教育, 55 巻, 2007, 382-385.

⑲ 永田和宏, 林 幸, マイクロ波加熱高速高純度銑鉄製造法, 査読無, 日本エレクトロニクス, 154 巻, 2007, 13-17.

⑳ TORU YAMASHITA, TOMOYA NAKADA and KAZUHIRO NAGATA, *In-Situ* Observation of  $\text{Fe}_{0.94}\text{O}$  Reduction at High Temperature with the Use of Optical Microscopy, 査読有, Metallurgical and Materials Transactions B, vol.38B, 2007, 185-191.

㉑ Kotaro ISHIZAKI and Kazuhiro NAGATA, Localized Heating and Reduction of Magnetite Ore with Coal in Composite Pellets Using Microwave Irradiation, 査読有, ISIJ International, vol.47, 2007, 817-822.

㉒ Kotaro ISHIZAKI and Kazuhiro NAGATA, Selectivity of Microwave Energy Consumption in the Reduction of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  with Carbon Black in Mixed Powder, 査読有, ISIJ International, vol.47, 2007, 811-816.

㉓ Kotaro ISHIZAKI, Kazuhiro NAGATA and Tetsuro HAYASHI, Production of Pig Iron from Magnetite Ore-Coal Composite Pellets by Microwave Heating, ISIJ International, 査読有, vol.46, 2006, 1403-1409.

㉔ 永田和宏, マイクロ波加熱とは—多様な応用展開—「たたら」とマイクロ波製鉄、金属、査読無、76 巻、2006、870-875.

㉕ 永田和宏, 日本刀の原料—玉鋼—を作るたたら—高炉製鉄を超える低温高速高純度鉄製造法—, 未来材料, 査読無、6巻、2006、2-5.

㉖ Ichiro SEKI and Kazuhiro NAGATA, Reduction Kinetics of Hematite Powder

Mechanically Milled with Graphite, ISIJ International, 査読有 vol.46, 2006, 1-7.

[学会発表] (計 11 件)

- ①堀田太洋、林幸、永田和宏、ムライト質耐火物のマイクロ波電場加熱と高温複素誘電率、日本金属学会講演大会、2010年3月30日、東京
- ②堀田太洋、永田和宏、マグネタイトの磁気損失に及ぼすサイズ及び形状の影響、日本金属学会講演大会、2008年9月23日、熊本
- ③永田和宏、粉鉄鉱石利用製鉄法の限界と展望、日本鉄鋼協会講演大会、2009年3月30日、東京
- ④原恭輔、永田和宏、マイクロ波集中照射型20kW製鉄炉の開発、日本鉄鋼協会講演大会、2009年3月30日、東京
- ⑤堀田太洋、永田和宏、キュリー温度近傍におけるマグネタイト粉末の複素誘電率・透磁率、日本鉄鋼協会講演大会、2009年3月30日、東京
- ⑥梁川雅弘、永田和宏、連続製鉄用20kWマイクロ波ロータリーキルンの開発、日本鉄鋼協会講演大会、2009年3月30日、東京
- ⑦堀田太洋、永田和宏、Microwave absorption mechanisms of raw materials and refractories for iron making, 1st Global Congress on Microwave Energy Applications (G CMEA2008), 2008年8月8日、滋賀
- ⑧阿部光利、永田和宏、マイクロ波加熱によるイルメナイトの炭素還元、日本鉄鋼協会講演大会、2008年9月23日、熊本
- ⑨横山優樹、永田和宏、シングルモードマイクロ波によるマグネタイト( $Fe_3O_4$ )熱炭素還元反応の高温X線解析、日本鉄鋼協会講演大会、2008年9月23日、熊本
- ⑩原恭輔、永田和宏、マイクロ波加熱による鉄粉溶解、日本鉄鋼協会講演大会、2008年9月23日、熊本
- ⑪原 恭輔、永田和宏、マイクロ波加熱連続製鉄法の開発 (I)、日本鉄鋼協会講演大会、2008年3月27日、東京

[産業財産権]

○出願状況 (計 6 件)

- ①名称：マイクロ波加熱炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：永田和宏、佐藤元泰  
種類：特許  
番号：特願 2011-143783  
出願年月日：平成 23 年 6 月 29 日  
国内外の別：国内
- ②名称：堅型マイクロ波製鉄炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：国立大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構  
種類：特許

番号：PCT/JP2010/051299

出願年月日：平成 22 年 1 月 31 日

国内外の別：国外

- ③名称：堅型マイクロ波製鉄炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：国立大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：特願 2009-021040

出願年月日：2009 年 1 月 31 日

国内外の別：国内

- ④名称：マイクロ波製鉄炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：国立大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：EPC : 08 013 746.6、

韓国：10-2008-0074985、米国：12/219,942、

中国：200810144798.1

出願年月日：2008 年 7 月 31 日

国内外の別：国外

- ⑤名称：マイクロ波製鉄炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：国立大学法人東京工業大学

種類：特許

番号：特願 2007-201388

出願年月日：2008 年 7 月 30 日

国内外の別：国内

- ⑥名称：マイクロ波加熱による高純度鉄鉄の高速製造法

発明者：永田和宏、佐藤元泰、林哲郎

権利者：永田和宏、大学共同利用機関法人自然科学研究機構、岐阜県

種類：特許

番号：特願 2006-25055

出願年月日：平成 18 年 2 月 1 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

- ①名称：マイクロ波製鉄炉  
発明者：永田和宏、佐藤元泰  
権利者：国立大学法人東京工業大学、大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：米国：7744810、EPC フランス・ドイツ：2023068、

韓国：10-1063070

取得年月日：(米)2010 年 6 月 29 日、(仏・独)

2011 年 2 月 16 日、(韓国)2011 年 8 月 31 日

国内外の別：国外

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 和宏 (NAGATA KAZUHIRO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70114882

(2) 研究分担者

渡邊 玄 (WATANABE TAKASHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：70361780