

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：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310049

研究課題名(和文)スクラップ素材の高度分別のための変調測光レーザー誘起プラズマ発光分析装置の開発

研究課題名(英文)Development of laser-induced plasma - optical emission spectrometer system for advanced sorting of scrapped materials

研究代表者

我妻 和明 (WAGATSUMA, KAZUAKI)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：30158597

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円、(間接経費) 4,620,000円

研究成果の概要(和文)：スクラップ素材を構成する元素組成に注目して高度分別を行うために、レーザー誘起プラズマ発光分析装置を開発し、実際試料への分析応用を行った。試料に含まれる合金元素、ニッケル、クロム及びモリブデン、あるいは銅の発光線について、時間分解測光および変調測光によりその強度を解析して、最適な測定条件の検討を行った。本法を、ステンレス鋼の合金成分毎の分別および鋼中に微量含まれる銅の定量分析に応用した。

研究成果の概要(英文)：An analytical system based on atomic emission excited by laser-induced plasma (LIP) was developed and employed for the element-based sorting of actual scrapped samples. An optimal experimental condition for the LIP system was investigated in time-resolved and modulation detections of their emission intensities. A sorting of stainless steels was conducted by estimating the contents of nickel, chromium, and molybdenum, in them, and also small amounts of copper in steel samples could be determined by using the LIP optical emission spectrometer.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境技術・環境材料

キーワード：リサイクル技術

1. 研究開始当初の背景

金属スクラップ素材の循環構築に関しては、金属製品が極めて広範かつ大量に使用されているため、その利用の高度化を図り、素材再生による資源の利用効率を向上させることは重要な研究課題である。特に鉄鋼素材は直近での粗鋼生産量が1億トン以上であり、膨大な生産量、流通量、社会蓄積量のために、資源の有効活用、エネルギー節減、温暖化ガス削減等の観点から、リサイクルのもたらす量的効果は桁違いに大きい。そのため、鉄鋼スクラップ材の再生利用は比較的良好に実践されており、我が国では年間約3000万トンの使用済鉄鋼製品が電炉にて再生利用されている。しかしながら、鉄鋼リサイクルには、希少・有価金属資源の散逸という大きな問題がある。

鉄鋼材料においては使用用途に応じて、さまざまな合金元素(ニッケル、クロム、モリブデン、バナジウム、タンタル、ニオブ、タングステン等)が添加されているが、その多くは鉄と比較してはるかに高価であり、かつ、レアメタル(希少金属)としてその産出地域は著しい偏りがあるため国家間で戦略的に利用されることが危惧されてきた。昨今の国際情勢は、この危惧が現実のものとなりつつあることを示している。一方、現状の鋼リサイクルでは磁力選別が可能なオーステナイト系ステンレス製品を除けば、鉄鋼は単に「鉄」としてリサイクルされているに過ぎない。従って、リサイクルすればするほど再生鉄鋼製品中に合金元素が蓄積する。鉄スクラップ材の回収時には含有合金元素の定量的な管理は殆どなされていない。濃度を制御されていない合金元素は、その資源の損失をもたらすのみならず、再生鉄鋼製品の品質の低下を招くことになる。

近年、我国の鉄鋼産業においては、アジア諸国との国際競争を克服するため、付加価値の高い高級鋼種の製造に重点が置かれている。このような高級鋼種(たとえば自動車用鋼板のように強加工ができる薄板材)では、製品特性の向上を実現するため、不純物元素の含有量は低減化され厳密に管理されている。現状では、組成制御ができていないスクラップ素材を高級鋼の原料として使用することは困難であり、鉄資源リサイクルにおいて大きな問題点として指摘される。従って、鉄鋼スクラップ素材の高度再利用(素材製造に費やされた資源やエネルギーの最適利用)のためには、スクラップの回収後に鋼種毎に分別して再生使用することが求められる。

2. 研究の目的

本研究は、市中の金属スクラップ素材の高速・高度選別を可能とするため、その元素構成/含有量を作業現場で瞬時に提供することができる、新たな分析・計測システムの実用化を目的とする。この用途に適する分析機器として、変調測光法を測定原理とする共鳴

レーザー誘起プラズマ発光分析装置を開発する。資源循環型社会の構築は、近未来の社会の姿として行政各レベルにおいてさまざまな施策が実行されている。昨今、レアメタル資源に関する諸問題が顕在化し、金属資源の循環利用はとりわけ重要となっている。また、鋼スクラップ素材の循環に関しては、鉄鉱石還元と比較してスクラップ利用によりエネルギー消費が1/3程度に節約できること、市中スクラップが100万トン/年の割合で増加していること等の理由により、強力に推進されるべき課題である。鋼スクラップ材にはニッケル、モリブデン、バナジウム、タングステン等の高価・希少金属が合金元素として添加されたものも含まれる。これらを的確かつ迅速に分別することは、その後の循環使用に際して大きな助けとなる。従来分析法では、オンサイト・インラインで瞬時に分析値を得ることが難しく、新しい分析方法/装置の開発が必要とされる。

3. 研究の方法

レーザー誘起プラズマ発光分光分析法の分析特性の改善、特に検出感度の向上と分析精度の向上を同時に実現するために、新たな要素技術である共鳴励起法と変調測定法を取り入れたレーザー誘起プラズマ発光分析装置を設計・製作する。この測定系を用いて、鋼スクラップ素材に含まれる希少金属である、ニッケル、クロム、モリブデン、バナジウム、タングステン等の定量分析を行い、検出感度や検出精度の検討を行う。これらの結果に基づき、実際のスクラップ素材への分析応用を試み、高速・高精度スクラップ素材選別装置として提案する。

4. 研究成果

(1) LIPS法によるステンレス合金の相互判別

図1には左からCr I 427.480 nm、Ni I 352.454 nm、及びMo I 536.056 nmの発光スペクトルを、6種類の組成の異なるステンレス鋼及び純鉄(4N)について示したものである。まずクロムについては純鉄以外のステンレス鋼についてクロムからの発光線が明瞭に観測をされた。ニッケルについては300番台のオーステナイト系ステンレスについてのみ観測をされ、モリブデンについてはSUS316及びSUS440Cのみに発光ピークが明瞭に見られた。ステンレス鋼のように鉄を母相とする合金についてはバックグラウンド発光がアルミ合金と比較して高くなる傾向が見られたため、明確に発光線を判別できる程度のS/N比を得るためにレーザーショット数は10発、1秒間照射とした。測定する波長範囲は320-540 nmと設定したため内部演算に0.4秒程度を要し、総測定時間は1.4秒程度であった。

ステンレス鋼の鋼種判別はニッケル、クロ

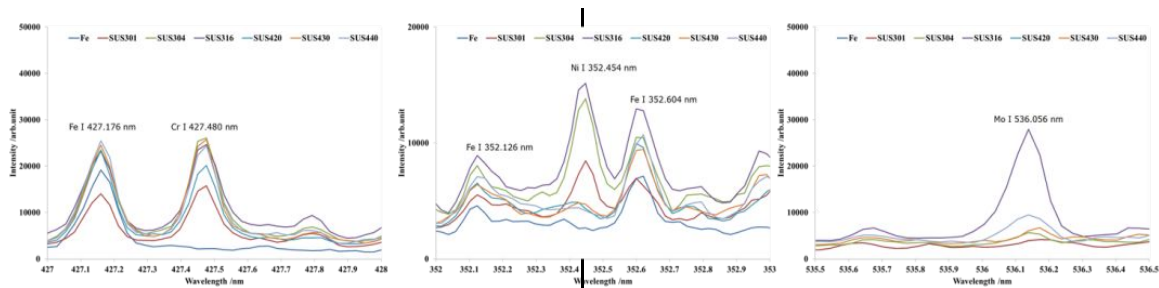


図1 ステンレス合金のLIPSスペクトル

ム、モリブデンの発光線を測定することにより容易に行えることが分かった。

(2) 低合金鋼中の銅の検出

図2にはFe-Cu二元系鋼標準試料(FXS350, Cu:0.2 wt%)からの発光スペクトルを純鉄(4N)と比較して掲載したものである。中央はレーザー1発、0.2秒の測定時間による発光スペクトルを、右上には10発照射、1.4秒の測定時間によるスペクトルを示している。10発照射するとS/N比が改善するために明瞭に銅の2種類の発光線(Cu I 324.753 nm及びCu I 327.396 nm)が観測されるが、1発照射による測定においても十分に含有をしている銅を識別することが可能であることが分かった。

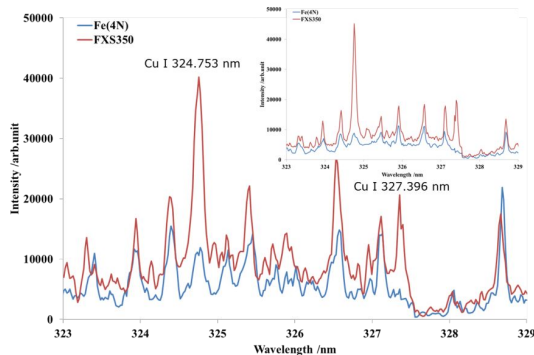


図2 Fe-Cu合金のLIPSスペクトル

(3) 関連研究、イメージ分光器によるプラズマ解析

レーザー誘起プラズマの二次元分布状態を解析するために取得したイメージ分光器を用いて、分光分析用のプラズマの物理状態について詳細な解析を行い多くの知見を得た。

グロー放電プラズマについては、発光強度の空間分布や励起温度の分布等の解析を行い、励起機構の解明に資する実験結果を報告した。マイクロ波誘導プラズマについては、Okamoto-cavityを用いて発生させたプラズマにおいて窒素-酸素混合ガスを用いた場合に優れた分析特性を示すことを明らかにした。このプラズマを用いた発光分析装置は、従来から金属分析に幅広く適用されているICP発光分析装置の代替えとして使用できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

Y. Arai, S. Sato, K. Wagatsuma, Comparative study on the emission spectrometric determination of manganese using nitrogen-oxygen Okamoto-cavity microwave induced plasma and argon radio-frequency inductively-coupled plasma, *Microchem. J.*, 116, (2014) 135-141. DOI:

10.1016/j.microc.2014.04.017 (査読有り)

S. Sato, Y. Arai, K. Wagatsuma, Spatially-resolved spectral image of a microwave-induced plasma with Okamoto-cavity for nitridation of steel substrate, *Anal. Sci.*, 30(2), (2014) 237-243. DOI:10.2116/analsci.30.237, JOI:

JST.JSTAGE/analsci/30.237 (査読有り)

S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Characteristic of the calibration curves of copper for the rapid sorting of steel scrap by means of laser-induced breakdown spectroscopy under ambient air atmospheres, *Anal. Sci.*, 29(12), (2013) 1159-1164.

DOI: 10.2116/analsci.29.585,

JOI: JST.JSTAGE/analsci/29.1159 (査読有り)

L. Zhang, K. Wagatsuma, Rapid determination of small amounts of copper in steel scraps by laser-induced plasma spectrometry, *ISIJ Int.*, 53(12) (2013), 2201-2205.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.53.2201> (査読有り)

Y. Arai, S. Sato, K. Wagatsuma, Emission spectrometric analysis using an Okamoto-cavity microwave-induced plasma with nitrogen-oxygen mixed gas, *ISIJ Int.*, 53(11) (2013), 1993-1999.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.53.1993> (査読有り)

M. Matsuura, K. Wagatsuma, Two-dimensional observation of emission image of a copper chip excited in a glow discharge plasma, *ISIJ Int.*, 53(11) (2013), 1923-1926.

DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.53.1923> (査読有り)

R. Oka, K. Wagatsuma, Spatially resolved

observation of a radio-frequency-powered glow discharge plasma for emission spectrometric analysis, *Anal. Sci.*, 29(5), (2013) 585-590.

DOI: 10.2116/analsci.29.585, J01:

JST.JSTAGE/analsci/29.585 (査読有り)

L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Comparative Studies on the Excitation Mechanism of Fe II Lines in Low Pressure Laser-Induced Plasma of Argon and Neon, *Spectrosc. Lett.*, 46(1) (2013) 1-12.

DOI: 10.1080/00387010.2012.656875 (査読有り)

S. Urushibata, K. Wagatsuma, Determination of Minor Alloyed Elements in Steel Samples in Radio-frequency Glow Discharge Plasma Optical Emission Spectrometry Associated with Pulsed Bias-Current Modulation Technique, *ISIJ International*, 52, No. 9 (2012) 1622-1627.

<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.1622> (査読有り)

K. Wagatsuma, R. Oka, S. Urushibata, Excitation Processes in Introduction of Bias Current to a Radio-frequency Glow Discharge Plasma Evaluated from Boltzmann Plots of Iron Atomic and Ionic Spectral Lines, *Anal. Sci.*, 28(8), (2012) 759-766.

<http://dx.doi.org/10.2116/analsci.28.759> (査読有り)

L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Deviation from Boltzmann Distribution in Excited Energy Levels of Singly-ionized Iron in an Argon Glow Discharge Plasma for Atomic Emission Spectrometry, *Spectrochim. Acta Part B*, 67 (2012) 24-31.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2011.12.005> (査読有り)

阿部 千景、我妻 和明、減圧レーザー誘起プラズマ発光分析法を用いた Fe 基合金中の Ni の定量分析、鉄と鋼、98(2) (2012) 63-68. (査読有り)

L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Boltzmann Statistical Consideration on the Excitation Mechanism of Iron Atomic Lines Emitted from Glow Discharge Plasmas, *Spectrochim. Acta Part B*, 66 (2011), 785-792.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sab.2011.10.002> (査読有り)

M. Matsuura, K. Wagatsuma, Spatially-resolved Observation of the Excitation Temperature in a Glow Discharge Plasma for Atomic Emission Spectrometry, *Anal. Sci.*, 27, (2011), 231-235. (査読有り)

Y. Sasaki, H. Shimada, K. Wagatsuma, Metallurgical Consideration on the Calibration Curve for Binary Alloy Samples

in Low-pressure Argon Laser-induced Plasma Spectrometry, *Anal. Sci.*, 27, (2011), 453-456. (査読有り)

島田 温彦、我妻 和明、レーザー誘起プラズマ発光分光法における鉄-クロム合金の原子化及び励起挙動の解析と検量線の作成、分析化学、60 (2011) 59-65. (査読有り)

[学会発表](計48件)

K. Wagatsuma, Non-LTE behaviour of argon and krypton glow discharge plasmas estimated from the intensity analysis of nickel atomic lines, 2nd International Glow Discharge Spectroscopy Symposium, Praha, Czech Republic, Apr. 7-9, 2014.

柏倉 俊介、我妻 和明、大気圧 LIBS による鉄鋼スクラップ中のトランプエレメントの簡易検出、素材産業から見た自動車リサイクル研究会最終報告会、日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会、東京工業大学、3/21-3/23, 2014.

我妻 和明、レーザー誘起プラズマ発光分析法による鉄鋼スクラップの高度分別、DOWA ホールディングス若手交流会、Dowa サーモテック、名古屋、12/12, 2013.

L. Zhang, S. Sashiwakura, K. Wagatsuma, Laser-induced plasma atomic emission spectrometry for application to element-based sorting of steel scraps (invited lecture), World Green Energy & Resources Congress 2013, Changwon, Korea, Oct. 28-29, 2013.

S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Investigations on the calibration lines of chromium and nickel obtained by Fe-Cr and Fe-Ni binary alloys for rapid sorting of stainless steels with the aid of laser-induced breakdown spectroscopy, EMSLIBS 2013, Bari, Italy, 9/15-9/20, 2013.

佐藤 成男、荒井 勇喜、我妻 和明、山下 昇、古城 篤志、児玉 憲治、岡本 幸雄、大津 直史、鉄鋼のプラズマ窒化反応における窒素励起状態の効果、日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会、金沢大学、9/17-9/19, 2013.

笠原 岳、柏倉 俊介、我妻 和明、レーザー誘起プラズマ発光分光分析法による介在物粒子の空間分布の迅速評価(第2報)、日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会、金沢大学、9/17-9/19, 2013.

張 蕾、柏倉 俊介、我妻 和明、レーザー誘起プラズマ発光分析法による鉄鋼中の微量銅の分析条件の最適化、日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会、金沢大学、9/17-9/19, 2013.

柏倉 俊介、我妻 和明、大気圧下 LIBS を用いた低合金鋼中の微量元素の簡易定量、日本分析化学会第 62 年会、近畿大学、9/10-9/12, 2013.

我妻 和明、岡本 幸雄、Okamoto-cavity マイクロ波誘導プラズマの励起機構(2) - 鉄

1 価イオン線からの考察, 日本分析化学会第 62 年会、近畿大学、9/10-9/12, 2013.

我妻 和明, LIBS の原理と最新の研究動向, レーザーアブレーションワークショップ 2013、幕張メッセ、千葉、9/4、2013.

K. Satoh, S. Sato, K. Wagatsuma, Synchronized control of pulsed radio-frequency voltage and pulsed bias-current in a glow-discharge plasma excitation source for atomic emission analysis, ASIANALYSIS XII, Fukuoka, Japan, 8/22-8/24, 2013.

G. Kasahara, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Rapid Evaluation of Alumina Inclusion Particles by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Asianalysis XII, Fukuoka, 8/22-8/24, 2013.

S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Investigations on the calibration curves of copper obtained from Fe-Cu binary alloys by Laser-Induced breakdown spectroscopy, Asianalysis XII, Fukuoka, 8/22-8/24, 2013.

柏倉 俊介、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光分析法を用いた大気圧下におけるステンレス種の判定に関する検量線の選択, 第 73 回分析科学討論会、北海道大学函館キャンパス、5/18-5/19、2013.

佐藤 こずえ、我妻 和明, 高周波電力 - バイアス電流二重変調型グロー放電管の発光分光分析への応用, 第 73 回分析化学討論会、北海道大学函館キャンパス、5/18-5/19、2013.

我妻 和明、岡本 幸雄, Okamoto-cavity マイクロ波誘導プラズマの励起機構, 第 73 回分析化学討論会、北海道大学函館キャンパス、5/18-5/19、2013.

荒井 勇喜、佐藤 成男、我妻 和明, Okamoto-cavity マイクロ波誘導プラズマを用いた発光分光分析の高感度化, 鋼中非金属介在物粒子の多面的評価研究会最終報告会、日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会、東京電機大学、3/29、2013.

松浦 宗彦、銭谷 嘉高、島田 温彦、阿部 千景、笠原 岳、柏倉 俊介、我妻 和明、レーザー誘起プラズマ及びグロー放電プラズマを用いた介在物粒子の元素イメージング, 鋼中非金属介在物粒子の多面的評価研究会最終報告会、日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会、東京電機大学、3/29、2013.

笠原 岳、柏倉 俊介、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光分析法による介在物粒子の空間分布の迅速評価, 日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会、東京電機大学、3/27-3/29、2013.

②④ 柏倉 俊介、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光分析を利用した鋼スクラップ中のステンレスの判定, 日本鉄鋼協会第 165 回春季講演大会、東京電機大学、3/27-3/29、2013.

②② R. Oka, K. Wagatsuma, Effect of argon gas pressure on the emission intensity from radio-frequency glow discharge plasma with pulsed bias-current introduction, RATEC2012 (Recent advance in analytical techniques for steelmaking industry), Tokyo, Japan, Nov.28-30, 2012

②③ L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Investigation on the excitation mechanism of Cu II lines in Ar and Ne GDP, RATEC2012 (Recent advance in analytical techniques for steelmaking industry), Tokyo, Japan, Nov. 28-30, 2012

②④ S. Kashiwakura, L. Zhang, K. Wagatsuma, The calibration curve obtained from in-air laser induced plasma spectrometry for sorting of steel scraps, RATEC2012 (Recent advance in analytical techniques for steelmaking industry), Tokyo, Japan, Nov.28-30, 2012

②⑤ S. Sato, Y. Arai, N. Yamashita, A. Kojyo, K. Kadama, N. Ohtsu, Y. Okamoto, K. Wagatsuma, Rapid nitriding treatment using microwave-induced nitrogen plasma at atmospheric pressure, RATEC2012 (Recent advance in analytical techniques for steelmaking industry), Tokyo, Japan, Nov. 28-30, 2012

②⑥ K. Wagatsuma, Y. Arai, S. Sato, Nitridation technique of steel materials by using nitrogen high-power microwave-induced plasma (plenary lecture), ISAMAT2012 (The international symposium for advanced materials and analytical techniques 2012), Changwon, Korea, Nov. 20, 2012.

②⑦ L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Comparative studies on the excitation mechanism of copper ionic lines in Ar and Ne glow discharge plasmas, ICASI2012 (International committee of analysis in steel and iron industry), Beijing, China, Oct. 31- Nov. 3, 2012

②⑧ S. Kashiwakura, L. Zhang, K. Wagatsuma, Rapid analysis of copper in steel scraps by means of laser-induced plasma spectroscopy, ICASI2012(International committee of analysis in steel and iron industry), Beijing, China, Oct. 31- Nov. 3, 2012

②⑨ K. Wagatsuma, Comparative study on excitation temperature between DC-powered and RF-powered glow discharge plasmas for emission spectrometric analysis (plenary lecture), ICASI2012 (International committee of analysis in steel and iron industry), Beijing, China, Oct. 31-Nov. 3, 2012

③⑩ S. Kashiwakura, L. Zhang, K. Wagatsuma, Rapid quantification of manganese in steel

scraps by laser-induced plasma spectroscopy under atmospheric pressure, APLAS BALI 2012: The 7th Asian-Pacific Landfill Syposium -Sustainable Solid Waste Management for a Better Life, Bali, Indonesia, Oct. 8-11, 2012.

③① Y. Arai, S. Sato, K. Wagatsuma, Two-dimensional estimation of Okamoto-cavity Microwave Induced Plasma for optimazing the measuring conditions for the emission spectrometric analysis (invited), AsiaSteel 2012, Beijing, China, Sept. 23-27, 2012

③② 柏倉 俊介、我妻 和明, 大気圧下レーザー誘起プラズマ発光の空間分布及び経過時間変化, 日本鉄鋼協会第 164 回秋季講演大会、愛媛大学、9/17-19、2012.

③③ 我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光法を用いた材料分析, 日本鉄鋼協会第 164 回秋季講演大会、シンポジウム”鉄鋼合金元素の有効活用を指向した自動車リサイクルにおける素材産業の役割“、愛媛大学、9/17、2012.

③④ Y. Arai, S. Sato, K. Wagatsuma, Spectrometric study on nitritization of a steel surface by Okamoto-cavity microwave induced plasma (invited), 2012APWC, Jeju, Korea, Aug. 26-29, 2012

③⑤ 岡 龍一郎、我妻 和明, イメージ分光器を用いたバイアス電流導入型グロー放電プラズマの 2 次元観察, 日本分析化学会第 72 回分析化学討論会、鹿児島大学、5/19-5/20、2012.

③⑥ 張 蕾、柏倉 俊介、我妻 和明, Exploration of excitation mechanism of iron ionic and atomic lines by Boltzmann distribution from a glow discharge plasma, 日本分析化学会第 72 回分析化学討論会、鹿児島大学、5/19-5/20、2012.

③⑦ 漆畑 里美、我妻 和明, バイアス電流変調法を用いた高周波グロー放電発光分析法による鋼中合金元素の定量限界, 日本鉄鋼協会第 163 回春季講演大会、横浜国立大学、3/28-3/30、2012

③⑧ 柏倉 俊介、張 蕾、島田 温彦、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光分析法を用いた鋼スクラップ中のクロムの迅速分析, 日本鉄鋼協会第 163 回春季講演大会、横浜国立大学、3/28-3/30、2012

③⑨ 柏倉 俊介、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分析を用いた金属スクラップの迅速分析法の開発, 廃棄物資源循環学会第 22 回研究発表会、東洋大学、11/3-5、2011.

④⑩ A. Shimada, C. Abe, K. Wagatsuma, On-site Analysis for Recycling of Steel Materials by Using Laser-induced Plasma Optical Emission Spectrometry (invited), 17th. ATA, Changwon, Korea, Nov. 1-3, 2011.

④⑪ 阿部 千景、我妻 和明, LIBS におけるレーザー出力とクレータ形状の相関, 日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会、大阪大学、9/22、

2011

④⑫ 佐々木 遥、島田 温彦、阿部 千景、我妻 和明, Scanning LIBS 法を用いた元素マッピング分析, 鋼中非金属介在物粒子の多面的評価研究会シンポジウム、日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会、大阪大学、9/22、2011.

④⑬ 阿部 千景、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分析法を用いた Fe-Ni 合金中 Ni 検量線の検討, 日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会、大阪大学、9/20-9/22、2011.

④⑭ 柏倉 俊介、張 蕾、島田 温彦、我妻 和明, レーザー誘起プラズマ発光分光分析法を用いた鋼スクラップ中のトランプエレメントの迅速分析, 日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会、大阪大学、9/20-22、2011.

④⑮ L. Zhang, S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Comparative Study on Excitation Phenomena in Laser Induced Plasmas with Several Plasma Gases, ICAS 2011, IUPAC International Congress on Analytical Sciences 2011, Kyoto, Japan, May. 23-26, 2011.

④⑯ S. Kashiwakura, K. Wagatsuma, Transient Response of Emission Signals from a Pulsed Glow Discharge Plasma, ICAS 2011, IUPAC International Congress on Analytical Sciences 2011, Kyoto, Japan, May. 23-26, 2011.

④⑰ K. Wagatsuma, Emission Characteristics of a Microwave-induced Plasma with Nitrogen-Oxygen Mixed Plasma Gases, ICAS 2011, IUPAC International Congress on Analytical Sciences 2011, Kyoto, Japan, May. 23-26, 2011.

④⑱ S. Urushibata, K. Wagatsuma, Effect of the Duty Ratio of Pulsed Bias Current on the Analytical Performance in Radio-Frequency Glow Discharge Plasma Optical Emission Spectrometry Associated with Bias-Current Modulation Technique, CETAS 2011, Luxembourg, May. 17-19, 2011.

〔その他〕

ホームページ

<http://wagatsuma.imr.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

我妻 和明 (WAGATSUMA, KAZUAKI)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号 : 30158597