

# 特別講演

□第165回春季講演大会学術功績賞受賞記念特別講演  
(2013年3月27日)

## 資源・環境・エネルギー問題の 解決に向けた製鉄法の設計

Design of Ironmaking As Simultaneous Solution of  
Problems of Resource, Environment and Energy



\*脚注に略歴

秋山友宏 北海道大学 大学院工学研究院附属  
エネルギー・マテリアル融合領域研究センター センター長 教授  
Tomohiro Akiyama

### 1 はじめに

現在、日本鉄鋼業は、資源、環境、エネルギー問題の制約条件下で持続的発展が求められている。すなわち、原燃料の劣質化、地球温暖化、化石燃料枯渇である。それら問題点を解決するための未来の鉄鋼業の姿を提案する。

### 2 日本鉄鋼業を取り巻く三重苦

従来の鉄鉱石由来の製鉄法では炭素を介して還元・溶解する。現在世界粗鋼生産15億トンのうち約6割がこの炭素還元法(高炉・転炉法、直接還元法)、残りの4割はスクラップを電気炉で溶解している(電気炉法)。電気炉で溶解した場合、Cu、Sn、Cr、Ni、Moなどのトランプエレメントが溶鋼に混入するため分離が困難となるため、エネルギー的には電気炉法が有利であるが、高品位鋼製造のためには鉄鉱石利用の炭素還元法が一定の割合で将来に渡り存在し続けることは間違いない。

近年、炭素還元法の資源である鉄鉱石および石炭の低質化が進行している。すなわち鉄鉱石は高品位赤鉄鉱の割合は減少し、高結晶水鉄鉱である豪州産褐鉄鉱が増加する。石炭は粘結炭が減少し、コークス強度を維持しづらい非微粘炭の増加が予想される(図1参照)。そのため可能な限り褐鉄鉱および非微粘結炭の有効活用が求められる。同時に鉄鋼業は地球環境問題がCO<sub>2</sub>によって引き起こされているのであれば弱い立場にある。なぜなら総排出量13億トンのうち15%を

占める、国内最大のCO<sub>2</sub>排出産業であるため、その排出を抑える操業が求められる。我が国の一次エネルギーの10%程度が鉄鋼業に流入し、主に還元・溶融に使用され最終的には

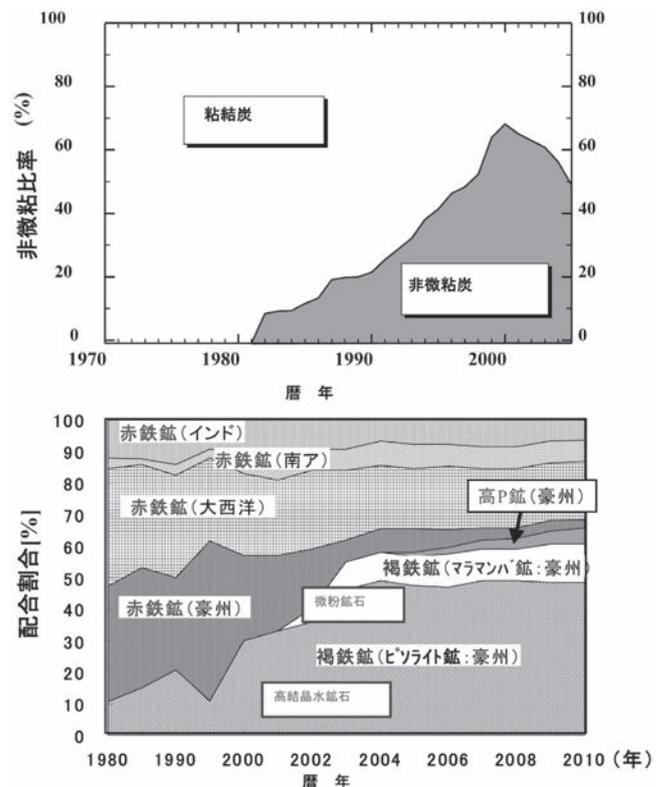


図1 原料事情の変化(上:原料炭、下:鉄鉱石)  
(出典:私信(清水九大名誉教授)を一部修正)

\* 昭和60年3月北大大学院工学研究科金属工学専攻修了後、同年4月東北大選鉄製錬研究所助手に採用、平成4年4月素材工学研究所助手、9年1月同講師、9年4月国立宮城工業高等専門学校機械工学科助教授、12年4月大阪府立大学大学院工学研究科助教授、16年10月北海道大学エネルギー変換マテリアル研究センター教授、22年4月北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター教授に配置換え。24年4月からセンター長、現在に至る。

5%程度が熱の形態で流出する。この排熱の温度域は広範で、1500℃以上のスラグ、燃焼排ガス、製品顕熱から100℃以下の冷却水まで幅広く分布している。そのため、これら排熱を未利用エネルギーとして温度レベルを考慮して段階的に有効活用する、熱のカスケード利用技術が求められる<sup>1-7)</sup>。

果たしてこの資源、環境、エネルギー問題の三重苦を同時に解決する画期的な方法はあるのだろうか。複雑なパズルを解く答えは容易には見つからない。

COURSE50プロジェクトのステップ1(2008～2012年度)では水素製鉄のための反応制御、コークス炉ガス改質、高強度・高反応性コークス製造の各技術と、高炉ガス(BFG)からのCO<sub>2</sub>分離・回収技術開発に成功している。ただし、非化石燃料からのグリーン水素製造法と二酸化炭素の封入技術に関しては調査外である。未来の鉄鋼業では低品位原燃料、木質系バイオマス、炭素循環、未利用熱利用(含む太陽熱)がキーワードになるだろう(図2参照)。実際、吸熱的化学反应によりCO<sub>2</sub>を炭素や一酸化炭素に転換再生できれば、地中や海底にCO<sub>2</sub>を運び埋める必要もなくなることから、現実的な選択肢として新たな製鉄法が見えてくるのではないだろうか。

### 3 CVI製鉄の基本原則とその応用

図3はCVI(化学気相浸透法)による革新的炭素含有鉄源製造の模式図を示す。CVIとはChemical Vapor Infiltrationの略で、気体原料ガスを繊維質又は多孔質のプリフォーム中に流し、化学反応を経て空隙や細孔内に目的物質を析出させ、封孔・緻密化する方法である。ここでは目的物質を炭素として捉え、低品位鉱石褐鉄鉱を脱水、多孔質化させ、バイオマス、褐炭熱分解ガス中のタールを細孔中へCVIにより炭化析出させる。CVIでは多孔質鉱石のメソ孔(2-50nm)のみならずマイクロ孔(2nm以下)にまで炭素析出が期待できる。細孔

は亀裂によって増大する。比表面積は大きければ大きいほど有利となる。ゲーサイトFeO(OH)は乾燥時水蒸気が発生し多孔質化する。乾燥はマイルドな条件が望ましい(図3参照)。発生する一次亀裂とガス還元時Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>に還元する際の膨張により発生する二次亀裂とは区別している。一方、石炭・バイオマスの低温乾留時にはタールが多量に発生して反応器内壁やパイプ内壁に析出して閉塞するなど、しばしば操業上の問題を引き起こす。この時に多孔質体と接触させることによりガス化が促進され、両者の問題は同時に解決され好都合となる。

多孔質体はガス化触媒である。一般に触媒は炭素析出によりその機能を失うが、本プロセスでは酸化鉄自身が予備還元され、加えて炭素が内部に析出するために後続の還元プロセスにとって好都合に働くことになる。500℃程度でCVI処理した場合、内部に炭素が析出した鉱石はマグネタイトまで還元されているため、低品位原燃料を革新的炭素含有鉄源にグレードアップして利用することが可能となる。得られる鉱石は600℃程度の低温から高速で還元される。この現象は褐炭のみならず、松など木質系バイオマスの処理に適用可能である<sup>8)</sup>。

### 4 革新的炭素循環製鉄システムと3つのイノベーション

図4はこの技術に基づきエネルギー、資源、環境の3問題を同時解決する革新的炭素循環製鉄システムを示す。アクティブな炭素循環では排熱を利用してC、CO、H<sub>2</sub>を製造、パッシブな炭素循環ではバイオマスを利用していずれも温暖化に寄与しない炭素フリーを目指す。太陽熱が利用可能な豪州では乾燥およびCVI処理の熱源としても有望で、現地処理も実現性がある。

本提案は触媒開発、鉄源開発/鉱石-炭材近接技術、およ

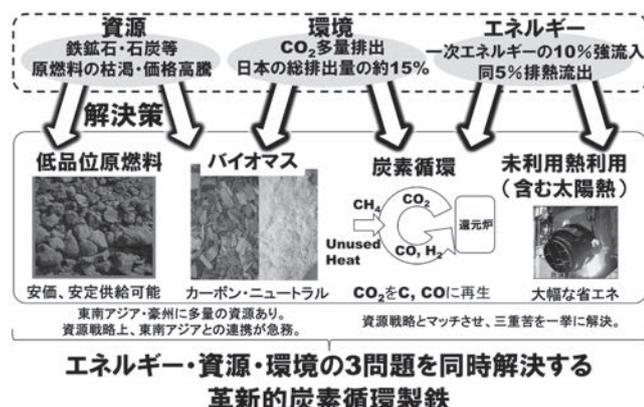


図2 日本鉄鋼業を取り巻く三重苦とその解決策

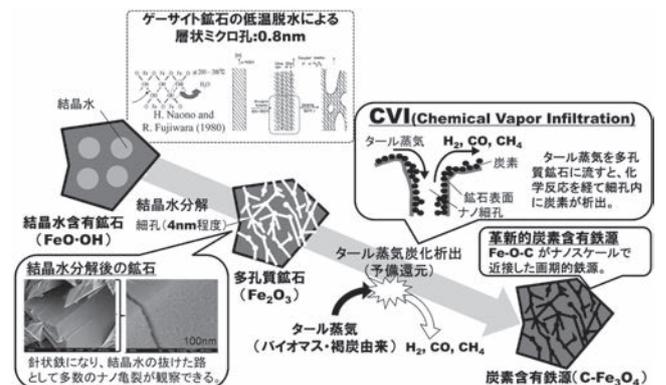


図3 酸化鉄と炭素の近接法としてのCVI(化学気相浸透)処理(褐鉄鉱原料の場合)

びCO<sub>2</sub>再生技術の3つの観点からイノベーションがある。表1、2、3は従来技術と比較してまとめている。これまで多孔質体と炭素源を変化させることにより多くの適用可能性が示されている(表4参照)。図5は実用化構想とCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルを示す。短期的には国内製鉄所への導入、中長期的には海外展開を謀ることにより極めて大きな削減ポテンシャルが期待できる。

## 5 残された課題と今後の方針

このように一見魅力的なCVI炭素循環製鉄も基礎的研究課題が山積している(図6、7参照)。これらの課題に対して今後5年間、ミクロ、マクロ、バルクスケールの観点から当センターでは関連メンバーが関わり取り組んでいく予定(図8参照)なので、お気軽に問い合わせなど頂き、スケールアップ、プロセス化に貢献できれば幸いです。

## 6 おわりに

鉄鋼業では高品位鉱石・強粘結炭の資源減少、CO<sub>2</sub>大量放出が深刻な問題である。本提案では低品位鉱石を触媒に、製鉄排熱を有効活用し、自立的に炭素を循環する革新的製鉄法の確立を実現する。褐鉄鉱を低温で乾燥すると結合水が分解し、ナノ細孔を有する優れた多孔質触媒となることに着目

表1 触媒開発イノベーション

古典的触媒	本提案の新触媒
希少金属(Pt, Ni, Rh..)	ユビキタス元素(鉄酸化物)
人工物	天然物(FeO・OH)
高価	超安価
担体必要	担体不要
ナノ粒子化	結晶水熱分解由来のナノ亀裂
炭素析出させない(失活)	あえて析出炭素させる
比較的長寿命	気孔内炭素析出で寿命
リサイクル不適當	魅力的製鉄原料に再生(低温迅速還元可)

表2 鉄源開発/鉱石-炭材近接技術イノベーション

従来技術	本提案技術
高品位鉱石利用 (資源枯渇・価格高騰)	低品位鉱石を グレードアップして利用
強粘結炭利用 (資源枯渇・価格高騰)	CVIの応用により、低品位炭・ バイオマス利用可能
鉱石・コークス層間制御 (m~mm単位)	CVIによるC-Fe-O間 近接配置(nm単位)
	
高温還元(900-1000°C) 間接還元(FeO+CO=Fe+CO <sub>2</sub> )	低温・迅速還元(600°C-) 直接還元(FeO+C=Fe+CO)

表3 CO<sub>2</sub>再生技術イノベーション

CO <sub>2</sub> 海底・地底貯留	本提案の炭素循環
低温排熱でCO <sub>2</sub> を 化学吸着、回収	高温排熱でCO <sub>2</sub> を熱化学再生し、 CO(還元ガス)として再利用、循環
長距離輸送 CO <sub>2</sub> を海底・地底に貯留	炭素循環により、CO <sub>2</sub> は 製鉄所外へ出ない(現地利用)
有価物を併産する 要素は無い	CVIとの組み合わせにより、 C-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> コンポジット とのコ・プロダクションが可能
大規模施設・高コスト	小規模施設・低コスト

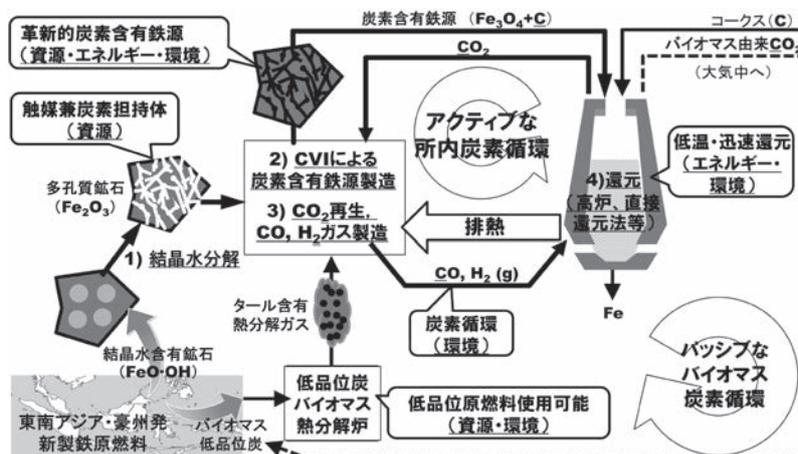
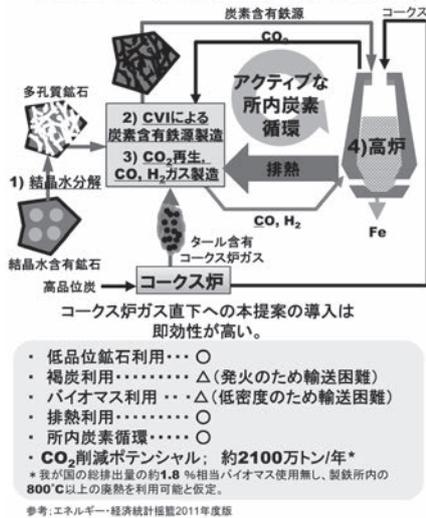


図4 エネルギー・資源・環境の3問題を同時解決する革新的炭素循環製鉄システム

表4 CVI製鉄関連研究の成果まとめ

No.	Reference	トピック	鉄源 (炭素担持体)	鉄源の 鉄濃度 [wt.%]	結晶水 含有量 [wt.%]	炭素源	炭素 担持率 [mass%]	知見
1	Hata et al. Energy & Fuels, 23(2009)1128-31.	結晶水含有量の異なる鉱石への バイオマスタールのCVI及び 炭素析出鉱石の還元。	R-ore	57.2	9.02	マツ	4.0	結晶水含有量が多い鉱石程、 多孔質化が促進、炭素担持量も 増加。析出炭素の還元剤としての 利用率は約90%
			H-ore	56.9	3.79		1.7	
			C-ore	67.6	1.59		1.1	
2	Kashiwaya et al. J. Nanomaterials, (2010)1-12.	ゲーサイト脱水時のナノクラックお よびタール由来析出炭素の鉱石 中存在状態の観察。	ゲーサイト 鉱石	57.2	9.02	マツ	-	ゲーサイト脱水時のナノクラックおよび炭素 担持鉱石中の炭素状態を観察し、細孔内 での炭素析出・還元反応機構を解明した。
			$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	マツ	-	
3	Kudo et al. Fuel, (2011)	ゲーサイト鉱石を用いたバイオ タールの改質と鉄の併産。	ゲーサイト 鉱石	62.4	-	スギ チップ	~10.7	生成ガス中の残留重質タール収率を 0.002wt%までに低減。高炭素担持 率のマグネタイト/ウスタイトを併産。
4	Hosokai et al. Energy & Fuels, (2012), inpress.	バイオマスタール由来の炭素析出 鉱石の還元反応速度を評価。	ゲーサイト 鉱石	57	8.8	マツ	5.96	炭素析出鉱石は高い被還元性を示した。 還元はマグネタイト→ウスタイト→鉄の逐 次反応であることを確認した。
5	Alya et al. Energy & Fuels, 26(2012)3196-3200	製鋼スラグへのバイオマスタールの CVIによる炭素担持量の調査。	KRスラグ	21.03	12	マツ	10.59	熱分解温度、CVI温度が低い程、 炭素担持率は増加。KRスラグ中の 酸化鉄の還元に必要な炭素量以上 の炭素担持に成功。
6	Bakti et al. (2012)	製鋼スラグを用いたCOGおよび タールの改質及び炭素担持鉱石 同時製造。	KRスラグ	21.03	12	高品位炭	4~10	KRスラグのタール分解性能を確認し、 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> の二酸化炭素改質の触媒 となり得る可能性が示唆された。
7	Alya et al. (2012)	マレーシア産鉱石への各種バイオ マスタールのCVI。バイオマス の高熱分解が炭素担持率に及ぼ す影響を調査。	マレーシア産 リモナイト	49.73	5.9	ヤシ殻 ヤシ繊維 果物房	4.33 3.52 3.92	バイオマスの急速熱分解により、 鉱石の炭素担持量が増加。炭素担持 鉱石は約900℃まで不活性雰囲気 で加熱するとFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ・Feまで還元された。
8	Bakti et al. (2012)	低品位鉱石への低品位石炭 由来タールのCVI。炭素析出 鉱石の還元挙動観察。	マレーシア産 リモナイト	49.73	5.9	亜漚青炭	4	低品位鉱石は石炭タール分解触媒 として有望である。炭素担持鉱石の 還元はFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> とコークス粉のそれより はるかに低温から開始した。
						褐炭	4.2	
9	Nomura et al. (2012)	コールタール、リモナイトおよび廃 熱によるCOG改質と炭素含有鉄 源の併産。(システム解析)	リモナイト	(55)	(8.09)	COG タール	-	提案プロセスにより、コークス使用量を現 行プロセスの8.8%削減、所内利用可能化 学エクセルギーを14%増幅可能。

短期的シナリオ；  
我が国の製鉄所への部分的導入



中長期的シナリオ；  
資源拠点への導入による製鉄分離

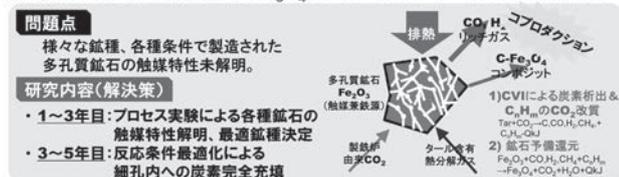


図5 実用化構想とCO<sub>2</sub>削減ポテンシャル

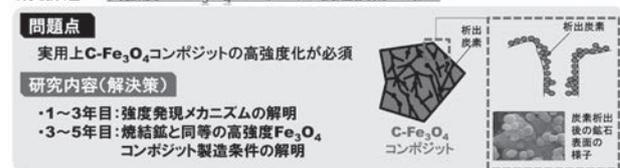
研究課題 1: 高比表面積、高触媒活性を有する多孔質化鉱石製造技術の確立



研究課題 2: タールの熱分解とC-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>コンポジットのコ・プロダクション技術の確立



研究課題 3: 高強度C-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>コンポジット製造技術の確立

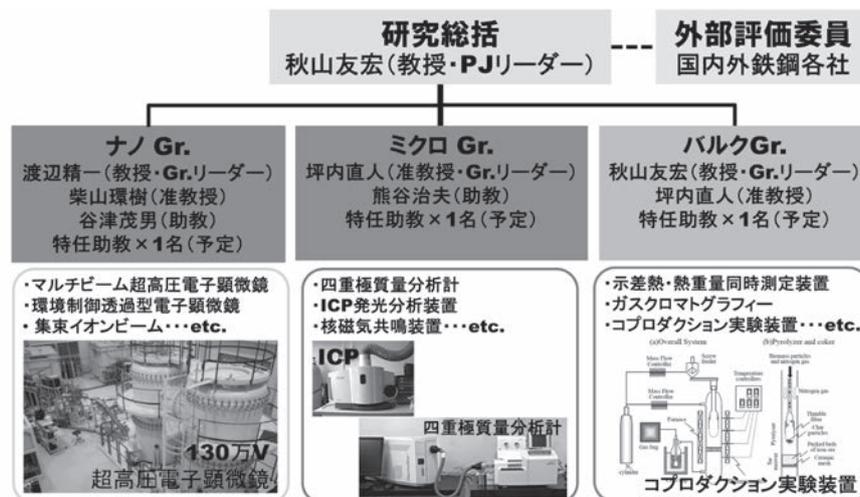


研究課題 4: C-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>コンポジットの低温・迅速還元技術の確立



図6 直面する研究課題1、2

図7 直面する研究課題3、4



世界に比類の無い130万Vマルチビーム超高压電子顕微鏡を中心に、当研究センターでしかできない研究手法で、学理を追究する。更に、外部評価委員として国内外大手鉄鋼各社との情報交換を密にし、当研究成果の実用化を促進する。

図8 研究体制

し、中高温でバイオマス・低品位炭と高炉排出CO<sub>2</sub>のガス化を実施する。熱源としては製鉄排熱、太陽熱を想定している。この操作でタールは完全分解しガス化が促進し、同時に多孔質鉱石は予備還元され細孔内に炭素を含有する良好な鉄源(C-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>複合体)となる。この鉄源はFe-O-Cの原子間距離が近接するために低温・高速還元可能で燃料比節約に繋がる。低品位鉱石ほどこの触媒特性は優れるため、本提案により製鉄業が直面するエネルギー、資源、環境の3つの深刻な問題の解決に貢献できる可能性がある。

**謝 辞**

本受賞に当たり次の方々へ感謝したい。研究アイデア、討論、実験データなどは皆さんとの関わりから生まれました。記して謝意を表す。八木順一郎先生(東北大)、高橋禮二郎先生(東北大)、石井邦宜先生(北大)、長坂徹也先生(東北大)、葛西栄輝先生(東北大)、斎藤公児氏(新日鉄住金)、藤林晃夫氏(JFEスチール)、山本高郁先生(大阪大学)、(以下論文共著者)清水正賢先生(九大)、林潤一郎先生(九大)、柏谷悦章先生(京大)、大野光一郎先生(九大)、沖中憲之先

生、Prof. Hadi Purwanto、秦裕一氏、細貝聡氏、松井耕祐氏、能村貴宏氏、安田尚人氏、Ms.Alya N.Rozhan, Mr.Rochim B.Cahyono

**参考文献**

- 1) 秋山友宏, 八木順一郎: 鉄と鋼, 82 (1996) , 177.
- 2) 秋山友宏: 省エネルギー, 52 (2000) 14, 35.
- 3) 秋山友宏: 日本エネルギー学会誌, 86 (2007) 3, 161.
- 4) 東松剛, 渡邊敏幸, 沖中憲之, 秋山友宏: ふえらむ, 12 (2007) 5, 51.
- 5) 秋山友宏: 化学工学, 72 (2008) 4, 15.
- 6) 能村貴宏, 沖中憲之, 秋山友宏: 日本エネルギー学会誌, 88 (2009) 11, 950.
- 7) 沖中憲之, 菊地麻美, 東松剛, 秋山友宏: 日本エネルギー学会誌, 88 (2009) 11, 961.
- 8) 秋山友宏: 金属, 82 (2012) 11, 39.

(2013年5月11日受付)