

Hi-QIP プロセス (新粒鉄製造プロセス) の開発

Hi-QIP, a New Ironmaking Process

澤 義孝 SAWA Yoshitaka JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(課長)
村尾 明紀 MURAO Akinori JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(副課長)
武田 幹治 TAKEDA Kanji JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部長・Ph. D.

要旨

石炭ベースの新しい粒鉄製造プロセスの開発を進めている。本プロセスは回転炉床炉で粉鉱石、石炭粉を直接使用することで、脈石分(スラグ分)のない粒鉄を製造することができる。特筆すべきは、炉床の上に粉状の炭材を敷くことであり、この炭材層が耐火物の役目をするだけでなく、溶融鉄を再凝固させる際の鑄型および補助的な還元材として機能する。この特徴により回転炉床炉内でトラブルもなく還元鉄を溶融することが可能であり、また原料性状、原料配合の変化にも強い。パイロットプラントを建設、操業試験を実施した。連続操業期間は6日間で、最大生産性は1.23 t/m²dであった。

Abstract:

A new coal based ironmaking process has been developed. The process produces iron pebbles free of minerals in rotary hearth furnace using directly fine iron ore and fine coal. A feature of this process is using fine carbonaceous material layer on rotary hearth as refractory, casting mold for melting iron and auxiliary reducing agents. Therefore, the feature enables to melt reduced iron in the rotary hearth furnace without any trouble and to permit fluctuation of mixing of raw material. The pilot plant was constructed and the tests using the pilot plant were carried out. The operation lasted six days without any malfunction. The maximum productivity was 1.23 t-metal /m²d.

1. はじめに

最近の世界の粗鋼生産量は、旺盛な中国の需要により急激に上昇しており、世界中であらゆる国、企業が鉄源確保を争っている状況にある。そのため、鉄鉱石、石炭、およびそれらから生産される還元鉄の価格は2005年度の初めから急激に上昇し始め、現在のところ需要、価格とも下降傾向が見られない。また、直接還元鉄の生産量も、粗鋼生産量と同調するように増加しつづけている。このような状況を鑑み、JFE スチールでは以下の概念を基に、新しい石炭ベースの粒鉄製造プロセスの開発を進めている。

- (1) 高炉法で使用するコークス、直接還元鉄製造に使用する天然ガスを必要としない。
- (2) 電気炉でも容易に使用できる脈石成分のない粒鉄を製造する。
- (3) 極力簡単な設備と最低限のエネルギーリカバリーシステムで構成する。

いくつかの実験室レベルの実験成果^{1,2)}などから、JFE ス

チールはHi-QIP (High Quality Iron Pebble Process) と名付ける新しい粒鉄製造プロセスを考案するに至った。このプロセスの開発は現在パイロットプラントまでの段階に到達している。本論文では特にパイロットプラント試験の結果を中心に、開発の概要について説明する。

2. Hi-QIP プロセス

本プロセスが他の類似したプロセスと比較して特質する点は、回転炉床上に炭材を敷き詰め、炉内で還元鉄を溶融することである。Hi-QIP プロセスの概要を図1に示す。設備構成の中心となる還元溶融炉には回転炉床炉を用いている。予熱、還元、原料の溶融などの炉内状況を、回転炉を直線状に展開した図2で示す。鉄鉱石、石炭、石灰石などの原料は、粉状で使用する。まず炭材を回転炉床上に敷設し、窪み付けローラーによって炭材表面に小さなカップ状の窪みを付け、鉄鉱石、石炭、石灰石からなる混合粉を炭材層の上に層状に敷設する。混合粉層がバーナーによって加熱される間に、混合粉層中の鉄鉱石は還元され溶融し、石炭はガス化し鉄鉱石を還元し、石灰石は脈石や灰分とともに溶融する。溶鉄と溶融スラグはあらかじめ炭材表面に

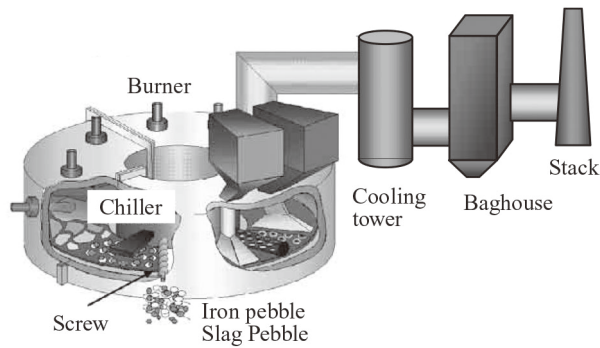


図1 Hi-QIP プロセスの概要
Fig.1 Outline of Hi-QIP process

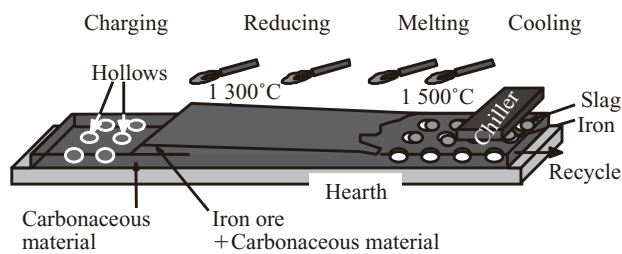


図2 Hi-QIP 炉床部の原料，製品積載状態
Fig.2 Stacking state on the hearth of Hi-QIP Process

付けた窪みに流れ込む。その後，冷却装置によって再凝固された粒鉄と粒スラグは排出スクリーンによって炉外に排出される。

本プロセスにおいて炭材層は3つの重要な働きをする。

- (1) 耐火物：溶融物が発生するプロセスにおいては耐火物の保護は最も重要である。本プロセスにおける炭材層は耐火物の役割を果たし，溶融物と炉床との接触を防ぐ。したがって，炉床に使用する耐火材料は溶融物との接触を考慮する必要がない。
- (2) 鑄型：一度生成した溶鉄，溶融スラグは，炉内冷却帯で再凝固する。このとき粒状にすることによって炉から容易に製品排出することが可能になる。本プロセスでは，炭材表層の小さなカップ状の窪みを付け，それを鑄型として使用している。
- (3) 補助還元材：混合粉中に混合させた石炭は，還元材として使用される。しかしながら，炉床上に積載した混合粉の石炭配合比率を炉床上のあらゆる位置および時間的にも一定を保つことは工業的には相当困難な課題である。石炭量が不十分な箇所では鉱石の還元は不十分となる可能性を否定できない。そのような場合に混合粉層の下にある炭材層が補助的な還元材の役割をし，鉱石の還元を助ける。

3. パイロットプラント試験

3.1 パイロットプラントの設計と建設

パイロットプラントの生産量は，実機化へのステップアップ

を考慮して15 t/dとした。原料の昇温パターンと，溶融物の降温パターンは，ラボスケールでの実験およびシミュレーションモデルによって検討した。それにより炉床径，炉床幅，予熱帯長さ，還元帯長さ，溶融帯長さ，冷却帯長さ，バーナー数，バーナーカロリーなどの回転炉床炉の仕様を決定した。仕様を表1に示す。

パイロットプラントはJFE スチール東日本製鉄所千葉地区に建設した。パイロットプラントの外観を写真1に示す。写真右側が原料系設備，写真中央部が排ガス処理系設備，写真左側が回転炉本体である。

3.2 試験条件

パイロット試験に用いた原料組成を表2に示す。すべての原料は粉状であり，焼結に使用するサイズである。炭材層として使用する石炭も表2の石炭と同一のものを使用した。混合粉の配合はスラグ塩基度で0.8~1.6，還元材比で0.8~1.6の範囲で選択した。ここで，還元材比は石炭中の

表1 パイロットプラントの仕様
Table 1 Specification of the pilot plant

Hearth diameter	7 m
Hearth width	1 m
Burner	11
Maximum temperature	1 823 K



写真1 パイロットプラントの外観
Photo 1 Outline of the pilot plant

表2 パイロット試験に用いた原料組成
Table 2 Raw materials for the pilot plant

	T-Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Ore A	57.3	5.72	2.63	0.43	0.19
Ore B	67.7	1.10	0.54	0.03	0.04
Ore C	67.5	0.75	0.70	0.01	0.02

	F.C	VM	Ash	S
Coal	85.7	6.7	7.1	0.54

F.C: Fixed carbon VM: Volatile matter

カーボンと鉄鉱石中の被還元酸素のモル比である。炉内温度は、溶融帯で 1773 K~1 823 K の範囲に収まるようにした。

3.3 試験結果

写真 2 に還元帯出口の炉内映像を示す。混合粉層中の鉄鉱石は還元されてすでに溶融開始しており、溶融物が各窪みの中に集合しているのが分かる。溶融物は還元帯の次工程である溶融帯においてさらに昇温され、完全に溶融し窪みに集まる。試験で得られた粒鉄を写真 3 に示す。すべての粒鉄は玉石形状で概ね同一サイズであることが分かる。

粒鉄の化学組成を表 3 に示す。試験はさまざまな条件で行ったが、得られた粒鉄の化学組成の変動は小さかった。多くの場合、C 濃度が 2~3 重量%であり、Si, Mn はほとんどなく、P 濃度は高炉鉄より低く、S 濃度は高炉鉄より高かった。スラグの化学組成を表 4 に示す。FeO 濃度が



写真 2 還元帯の炉内状態
Photo 2 Inner vision of the furnace



写真 3 パイロットプラントテストで製造した粒鉄
Photo 3 Iron pebbles produced in a pilot plant test

表 3 粒鉄の化学組成

Table 3 Chemical composition of iron pebble

	C	Si	Mn	P	S
Ore A	2.5	0.08	0.01	0.040	0.21
Ore B	2.1	0.04	0.01	0.027	0.25
Ore C	3.0	0.07	0.01	0.038	0.24

表 4 粒スラグの化学組成

Table 4 Chemical composition of slag pebble

	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Ore A	9.8	31.9	15.4	36.4	1.4
Ore B	3.2	34.4	16.0	40.9	3.3
Ore C	5.5	29.9	17.6	36.3	0.1

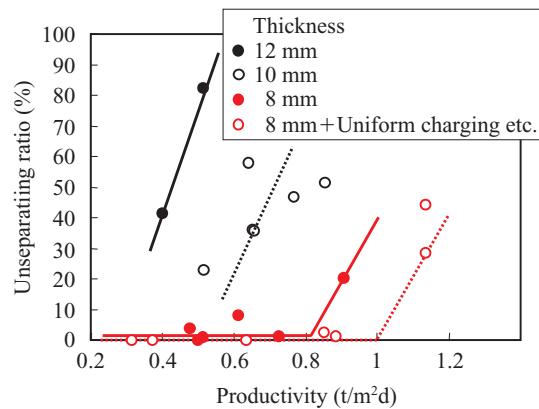


図 3 Hi-QIP プロセスの生産性
Fig.3 Productivity of Hi-QIP Process

およそ 3~10 重量%であった。これより鉄歩留りを算出すると 97%以上となる。

図 3 に生産性と粒鉄-粒スラグ未分離率との関係を示す。粒鉄-粒スラグ未分離率とは回収した粒鉄、粒スラグのうち、粒鉄、粒スラグが分離していないものの重量比率である。粒鉄-粒スラグ未分離率はゼロに近いほうが望ましい。混合粉層の層厚が薄い方が粒鉄-粒スラグが分離しやすく、高生産性となる結果になった。層厚を増加させた方が単位面積当たりの積載量が増加し、一見生産性を上げられそうであるが、混合粉層内部への熱伝導量が大きく減少するため、生産性はかえって減少する。さらに、炉床半径方向および回転方向に対し、層厚の均一性を向上させ、カップ形状窪みの深さを適正化することで生産性が向上する結果となった。

また、生産性は鉱石種によっても異なる。鉱石に Ore A, Ore B, Ore C を用いた場合、生産性は、それぞれ 0.9, 1.1, 1.2 t/m²d であり、脈石成分の少ない鉱石を用いた場合に増加した。

Hi-QIP プロセスでは混合粉をペレット化、圧密、ブリケット化したものも利用可能であり、混合粉の圧密体を用いた場合の生産性は 1.23 t/m²d であった。

4. 実機へのスケールアップ技術の確立

4.1 商用化に向けての課題

商用化に向けての課題の一つとして、炉内エネルギー効率の改善、燃料原単位の削減があげられる。図 4 にパイロット試験中に、還元帯において炉床上の CO ガス濃度を

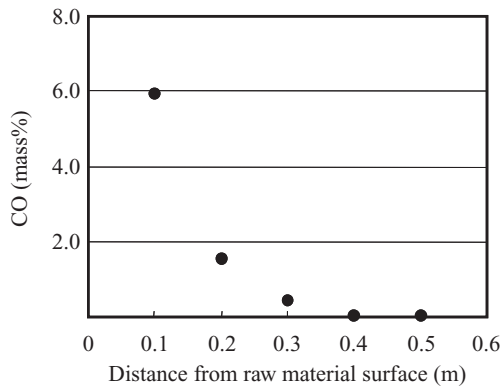


図4 炉床上のCOガス濃度分布
Fig.4 Vertical distribution of CO from raw material surface

測定した結果を示す。CO濃度は原料表層近傍で約7%、原料表層から0.3mでは1%弱まで低下していることが分かる。鉍石の還元で発生したCOや炭材の昇温によって生じた揮発分などの可燃性ガスは、炉外へ排出される前に炉内で有効に燃焼し熱源とすることで、燃料原単位の削減に繋がる。そのために、燃料バーナーおよび空気もしくは酸素富化空気を吹き込む2次燃焼バーナーの使用方法が重要となる。ここでは、バーナーの有効利用法を検討するツールとして、燃焼・流動解析ソフトCFX5.7を用いたHi-QIPコンピューターシミュレーションモデルを開発したので紹介する。

4.2 モデルの概要

本モデルは炉殻および炉床で囲まれた炉内空洞部、すなわちガス燃焼流動部をシミュレートするものである。モデルでの炉形状を図5に示す。近似的に回転炉を直線的に展開した。形状作成はDesign Modelerにより行い、各部寸法の変更を可能とした。メッシュはすべて四面体要素で、要素数は578,122である。ガス燃焼流動部で考慮した化学種はO₂, N₂, CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄, C₂H₆の8種で、

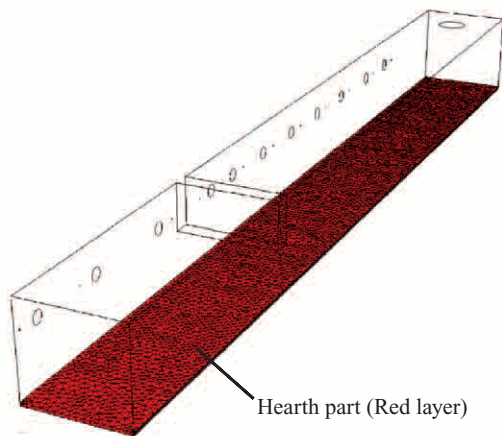


図5 モデルでの炉形状
Fig.5 The furnace shape in the mathematical model

ガス燃焼流動部の流動・伝熱解析を行った。ガス燃焼流動部内での反応モデルはCFX5.7が標準内蔵している化学反応データベースを用いた。考慮した反応を表5に示す。

実際には炉床部であるガス燃焼流動部下端には混合粉層が存在し、そこでは鉍石の還元、石炭のガス化などの反応が起こる。これらの反応によってCOガスが発生する。ガス燃焼流動部からみてCO流入という境界条件として与えた。また、反応吸熱はガス燃焼流動部下端からのヒートロスとしてモデル化した。

本モデルでは以下の境界条件を設定する必要がある。(1) バーナー条件, (2) 炉殻からのヒートロス, (3) 炉床部(ガス燃焼流動部下端)からのCOなどのガス出入条件, (4) 炉床部(ガス燃焼流動部下端)へのヒートロス(反応吸熱)である。

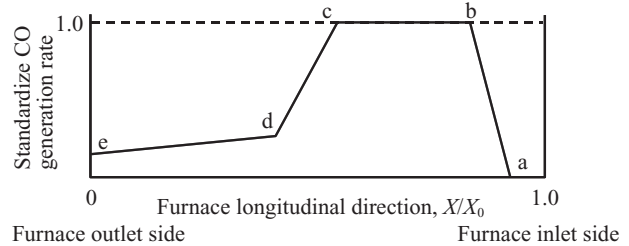
- (1) バーナー条件：バーナーに供給する燃料、燃焼用空気、酸素の量、各供給物質の温度である。燃料はCH₄, C₂H₆の混合気体であると仮定し、CH₄の割合を保ったままC₂以上の成分はすべてC₂H₆に置き換えた。
- (2) 炉殻からのヒートロス：総括熱伝達率を設定した。
- (3) 炉床部からのCOなどのガス出入条件：鉍石の還元および炭材のガス化によってCOガスが発生する。発生量分布を図6のように設定した。
- (4) 炉床部へのヒートロス：鉍石の還元および炭材のガス化によって反応熱が発生する。鉍石の直接還元は吸熱であり、実質ヒートロスとなる。吸熱量をヒートロスに単位変換し境界条件として与えた。

計算結果として得られる項目は、炉内温度、CO、CO₂、

表5 モデル中で考慮した反応
Table 5 Reaction equations used in the model

$CH_4 + (1/2)O_2 \rightarrow CO_2 + H_2$	(Reaction 1)
$C_2H_6 + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2$	(Reaction 2)
$CO + (1/2)O_2 \rightarrow CO_2$	(Reaction 3)
$H_2 + (1/2)O_2 \rightarrow H_2O$	(Reaction 4)
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	(Reaction 5)*

*Also considers inverse reaction



X/X_0	a	b	c	d	e
Standardize CO generation rate	0.0	1.0	1.0	0.3	0.15

図6 計算条件として与えた炉床からのCO発生量
Fig.6 CO supply from the hearth

O₂, N₂, CH₄, C₂H₆ などの各ガス成分の濃度, 各バーナーからの流線, 炉内速度, CO の反応率, 乱れエネルギー, 乱れ消散率などである。

4.3 計算結果

本モデルによる計算結果の一例を紹介する。計算条件を表 6 に示す。

還元帯 2 次燃焼バーナーは混合粉層内の鉱石還元または石炭乾留時に発生する CO ガスなどを燃焼させる目的で設置させているものであり, 本ガスが炉内のどこを流れていくかは混合粉層内から発生するガスの有効利用の点で重要である。図 7 に還元帯 2 次燃焼バーナーからのガスの流線を示す (溶融帯のガス流線は割愛した)。一般的な 2 次燃焼バーナーから送風された富化酸素空気の流れは次のとおりである。まず, バーナー対向面辺りまで直進する。その後多くのガスは炉床方向または炉内ガス排出方向に方向を転換する。そのうちのバーナー対向面に沿って炉床方向に向かったガスは, 炉床に到達後, 炉床に沿ったままやや炉内ガス排出口方向に傾きながらバーナー設置面に方向を変える。しかし, この流れはバーナー設置面までには到達せず, 途中から炉床から離れるとともに炉内ガス排出口に大きく方向を変える。ただし, この一般的な流れはどの 2 次

燃焼バーナーでも見られるわけではない。炉内ガス排出口に近い側に設置された 2 次燃焼バーナーの場合, 送風された富化酸素空気は炉床に到達する前に炉内ガス排出口に方向を変える。これは乱流強度分布の結果からも確認できる。図 8 に炉床進行方向鉛直断面 (XY 断面) の乱流強度分布を示す。還元帯上流部, 炉床に近い部分で乱流強度が弱い部分が存在している。

次に, 図 9 に炉床進行方向鉛直断面 (XY 断面) の CO ガス濃度分布を示す。一般的な CO 濃度分布は次のとおりである。混合粉層から CO ガスが発生していることから, 還元帯の炉床直上には高い CO 濃度領域が存在する。2 次燃焼バーナーからの送風された富化酸素空気などにより CO ガスは燃焼し, 炉床から離れるにつれ CO ガス濃度は低下する。このような一般的な傾向の中, 還元帯の炉内ガス下流側において, 炉床から炉内ガス排出口に向かってやや CO 濃度が高い部分が見られる。これは混合粉層から発生した CO ガスを十分に燃焼できていない結果と考えることができる。炉内エネルギー効率の改善, 燃料原単位の削減

表 6 計算条件
Table 6 Conditions of the calculation

	Melting zone (Nm ³ /h)			Reducing zone (Nm ³ /h)		
	LNG	Air	O ₂	LNG	Air	O ₂
Burner	90.0	510.0	110.0	100.0	620.0	135.0
		Air ratio	1.21		Air ratio	1.33
		O ₂ %	35.02		O ₂ %	35.13
Secondary air		200.0	55.0		300.0	80.0
		O ₂ %	38.04		O ₂ %	37.63

LNG: Liquefied natural gas

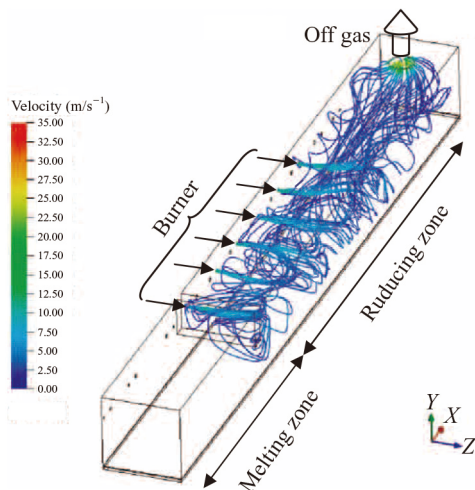


図 7 還元帯 2 次燃焼バーナーからのガス流線
Fig. 7 Gas stream lines from the secondary burners

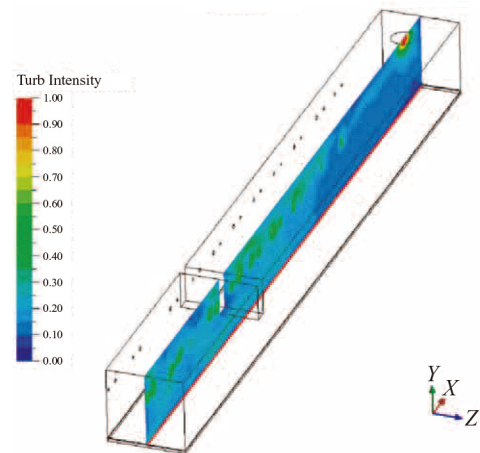


図 8 乱流強度分布
Fig. 8 Distribution of turbulence intensity

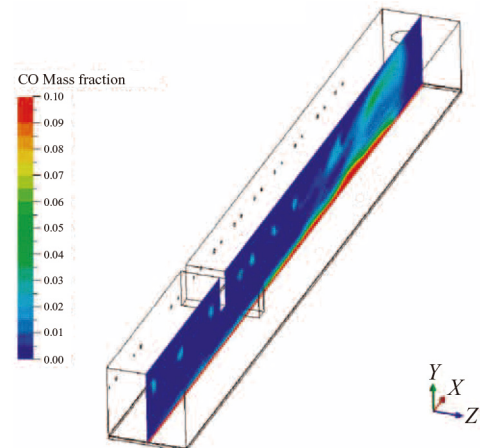


図 9 CO濃度分布
Fig. 9 Distribution of CO mass fraction

の観点からは必ずしも好ましい状態ではない。この高濃度 CO 領域は先のガス流れの解説で触れたように流れが弱い（乱流強度が低い）部位とほぼ一致し、2次燃焼バーナーから送風された富化酸素空気と混合粉層から発生した CO ガスが十分混合しなかった結果と推察される。今後、本モデルを用い、バーナー、2次燃焼バーナーの配置、それらの使用方法、炉内形状などを変更し、混合粉層から発生する CO ガスの効率的燃焼条件を検討する予定である。

5. おわりに

石炭ベースの新しい粒鉄製造プロセス（Hi-QIP Process）の開発を進めている。パイロットプラントの建設および試験を実施し、高い生産性で連続的な粒鉄の生産が可能であることを実証した。また Hi-QIP の商用化に向けて、Hi-QIP 炉内の燃焼・流動解析が可能なツールを開発した。

本研究開発は独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により行った。

参考文献

- 1) Sawa, Y.; Yamamoto, T.; Takeda, K.; Itaya, H. ISIJ Int. 2001, vol. 41 supplement, S17-S21.
- 2) Yamamoto, T.; Sawa, Y.; Takeda, K. Tetsu-to-Hagané, 2001, vol. 87, p. 734.



澤 義孝



村尾 明紀



武田 幹治