

受賞技術-1

回転炉床式還元炉による 製鉄ダスト類リサイクルプロセスの開発

Development of Technologies of the Rotary Hearth Process for Recycling Dust Emitted in Steel Mills

茨城哲治
Tetsuharu Ibaraki

新日本製鐵（株） 製鉄技術部
部長

1 はじめに

わが国の鉄鋼業では、長年、省資源と省エネルギーの観点から、プロセス連続化によるロス削減や排エネルギー回収を徹底して追及してきた。この結果、現行の製鉄プロセス枠内では、省エネルギー設備の普及が進んでおり、省エネルギー投資の経済性が低下してきている。そこで、近年ではリサイクルが省エネルギー・省資源の新しい手段として注目されている。

製鉄所内では、焼結設備、高炉、転炉等のガス中ダストや圧延スケールが発生しており、これらは酸化鉄と炭素が主な成分であり、量的にも多く、高炉一貫製鉄所では、粗鋼生産量の約10%の質量のダスト・スラッジなど（以下、製鉄ダストと記載）が発生している。従来からも、製鉄ダストは、有効な資源としてリサイクルされてきた。

しかし、従来技術では製鉄ダストの全量をリサイクルができない課題があった。その主な理由は、亜鉛やアルカリなどの高揮発性元素が含まれるものがあることと、スラッジ状で中間処理が難しいものなどがあることであった。亜鉛などは鉄鉱石や鉄スクラップに混在しているものが、炉内で蒸発しダストなどに濃縮したものであり、最大5質量%の含有率に達するものもある。亜鉛などを含む製鉄ダスト類を高炉にリサイクルすると、これらが炉内高温部で蒸発し、再凝集し炉壁に付着し、高炉炉内の装入物の降下が阻害される問題が起きる。また、転炉や電炉で使用する際には、製鉄ダストの酸化鉄等を還元するエネルギーのため、生産性が低下するなどの問題があった。

そこで、新日本製鐵と新日鉄住金ステンレスでは、製鉄ダスト全量リサイクルのために、回転炉床式還元炉を用いた製鉄ダスト処理技術を開発し、リサイクル操業を実施してい

る。本報告では、技術開発と処理技術の概要を報告する。

2 製鉄ダスト類リサイクルの研究概要

2.1 RHF プロセスの特徴

製鉄ダスト類の脱亜鉛方法としては、高温還元して亜鉛を蒸発分離する方法が最も有効である。この機能を有するプロセスは、ロータリーキルン、電気式還元炉、シャフト炉、回転炉床炉（Rotary Hearth Furnace：RHF）であり、新日本製鐵では、プロセス機能のうち、投資額、生産性とエネルギー効率を中心に評価をした。高エネルギー効率のリサイクルは省炭酸ガスにもつながるため、この評価を最重要課題とした。

ロータリーキルンは最も実績あるプロセスである¹⁾。しかし低温処理のため、酸化鉄還元が不十分であり、エネルギー効率的な問題があった。電気式還元炉とシャフト式還元炉は高還元能力で溶融鉄が得られる利点があったが、高エネルギーコストであった。これに対してRHFは、造粒物の加熱条件が優れており、原理的には高還元率が得られるなど、ロータリーキルンに対して原理的な優位性がある。

RHFダストリサイクルプロセスは、図1と2に示すように、ドーナツ状の炉（RHF）を中心とするプロセスで、原料準備・造粒工程、RHF還元工程、排ガス処理工程からなる。酸化鉄等と炭素を含む造粒物を製造し、これをRHF炉内で還元して、還元鉄（Direct Reduced Iron：DRI）を製造する。燃焼排ガスは冷却され、亜鉛濃縮ダストを除塵した後、大気に放散される。

図3に示すように、RHFでは、耐火物製の天井と側壁の下で、炉床が一定速度で回転する。側壁のバーナーにより、炉床上の造粒物を加熱する。造粒物は炉床上に敷き詰められて

炉床とともに移動し、加熱ゾーンで十分に加熱された後、還元ゾーンで酸化鉄等と炭素が反応を起こす。加熱された造粒物中の酸化鉄と炭素が反応して、金属鉄と一酸化炭素が生成する。酸化亜鉛は還元された後、亜鉛蒸気となり、排ガスとともに、炉外に排出される。

RHF内では、造粒物が炉床に対して静止しており、造粒物からの一酸化炭素が炉床周囲に留まり、高還元雰囲気を形成する。また輻射による高伝熱速度と高比表面積の微粉原料使用のため、還元反応が迅速に進み、約10分間で反応が完了する特長がある。

2.2 RHFでの製鉄ダスト類リサイクル技術の開発経緯

RHFのプロセス的優位性に着目し、還元鉄生産を目指し研究機関でプロセス研究や実験が行われていた^{2,3)}。またRHFはダスト処理設備としても注目されており、1998年時点で米国に2基の製鉄ダストリサイクル用RHFが建設されていた。しかし、製鉄ダスト処理では、重大な技術的問題があり、両

プラントとも稼働開始後すぐに操業を停止していた^{4,5)}。唯一の成功例はINMETCO社のプラントであるが、ステンレス廃棄物処理が主体で還元率が低く、一貫製鉄所の製鉄ダスト処理に直ちに適用できるものではなかった⁶⁾。

RHFでの製鉄ダスト処理のためには、製鉄ダストの成分・物性変動に対応する技術、再利用プロセスに適合した品質の還元鉄を製造する技術などを開発する必要があった。このような認識の下、新日本製鐵では、RHFプロセスを原料造粒—還元—排ガス処理—亜鉛ダスト回収の一貫プロセスとして捉え、全体系を適正化する方針で技術開発を進めた。2000年に君津、広畑両製鉄所で各々約20万トン/年の設備を稼働させた。その後、実設備操業で種々の技術的トラブルが発生したが、原料調合・安定操業技術・耐火物等の技術開発を粘り強く進め、2002年末には安定操業技術を確立した^{7,8)}。

更に2002年には、高含水スラッジの直接リサイクルを可能とする、スラッジ処理とRHFを組合せる技術を開発した^{9,10)}。また2005年には、溶解炉との熱間直結技術でエネルギー効率を改善した広畑No.2プラントを建設すると同時に他製鉄所のダスト処理も行う広域ダストリサイクルシステムを構築した。

並行してステンレス製造で生じるダスト類の処理技術開発を進め、2001年に光製鐵所(当時、新日本製鐵)にRHF設備を稼働させた。以降、操業技術開発を継続し、ステンレスダスト類リサイクルを安定して実施できるようになった。

2.3 主なRHFの技術開発内容

2.3.1 劣質原料の製鉄ダスト類の造粒技術

製鉄ダスト類は不純物が多く、粒度分布、水分、成分のばらつきが大きいため、造粒が難しい。そこで、ペレット法、ブリケット法、および押し出し成形法の三方式において、表1に示すように、劣質原料に対応できる造粒技術を開発した。押し出し成形法では、湿潤粉体であっても高温の炉内で爆裂しない技術を開発して、無乾燥で成形体を炉内に供給することを可能とした。

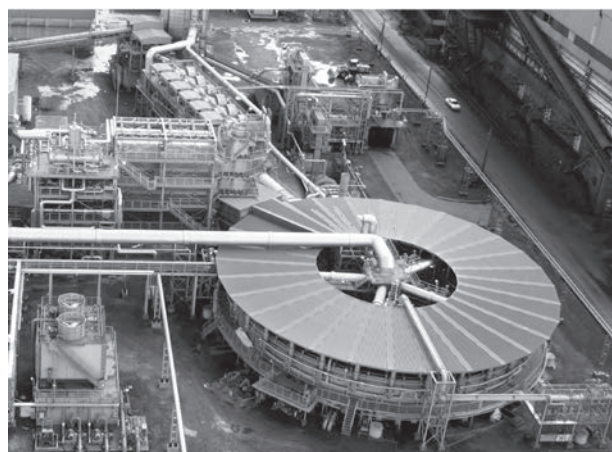


図1 君津No.3 RHFプラント写真

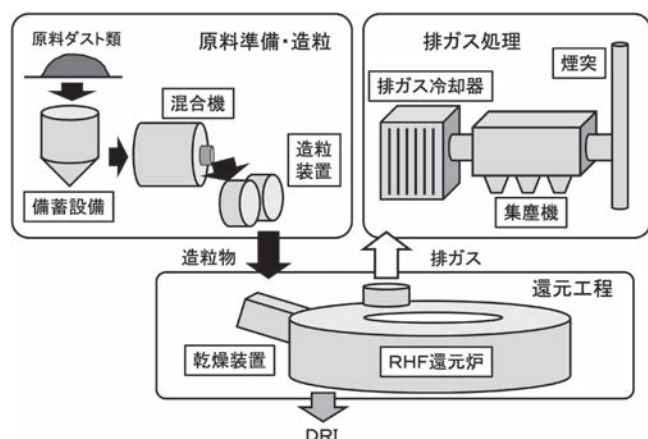


図2 RHFダストリサイクルプラントの設備フロー図

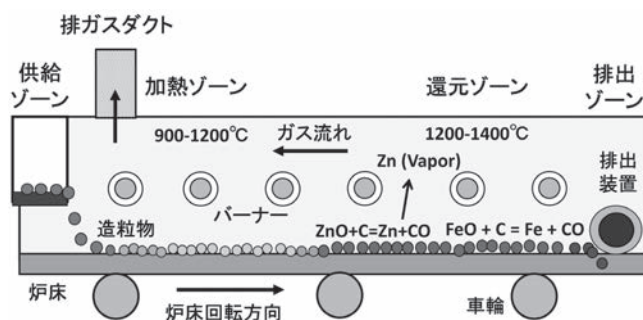


図3 RHFの回転方向の炉内展開図

各々の造粒法に適した製鉄ダストの配合条件と水分管理基準に差がある。実際のリサイクル処理においては、原料条件により三種類のを使い分けることが効果的である。

2.3.2 製鉄ダスト類の還元技術

RHFで製造されたDRIは中間製品であり、最終製品とするには、精錬炉での溶解・最終還元が必要である。今回の技術開発の対象であった精錬炉は、高炉、鉄浴溶解炉、電炉であり、各々必要とされるDRI品質が異なる。そのため、各溶解プロセスの要望に対応する品質のDRI製造技術を開発した。

(1) 高炉向け高強度DRI製造

DRIを高炉で使用すると、高炉還元材を削減できることから、二酸化炭素排出抑制効果がある⁷⁾。ただし、高炉内では大荷重がかかるため、高強度DRIを製造することが求められた。還元生成した造粒物内部の金属鉄粒を焼結させることで、約10MPaの高強度DRIを製造する方法を開発した。2000年に、この技術を君津No.1プラントに適用し、世界で初めて高炉に直接装入できる高強度DRIを製造した^{7,8)}。

(2) 高金属化DRI製造

実験室では高還元DRIが得られるが、商業プラントでの高還元率達成は困難であった。理由は、商業プラント炉内では、炉内ガス中の二酸化炭素が還元反応を阻害する影響を完全に防止できないためである。広畑製鉄所では、実設備の還元条件改善を進め、高金属率条件を実現できる操業条件を研究した。炉内ガスの高温化と温度制御性の向上、原料配合調整による反応速度向上等の操業技術を開発した。この結果、商業

プラントとして初めて85%以上の金属化率を達成できた。

(3) ステンレス電炉向けDRI製造

ステンレス製造工程から発生するダスト・スラッジ類は鉄、ニッケル、クロムの酸化物を多く含むものであり、普通鋼中心の製鉄所の製鉄ダスト類とはRHFの操業条件が異なる。このダスト類では、クロムのみならず鉄・ニッケルの還元率が低位に留まる問題があった。これは酸化クロムの低反応性の問題であることを解明して、これを解決するために、原料粉の化学成分調整などの技術改善をした。

2.3.3 長時間安定操業のための技術開発

製鉄ダストには不純物が多く含まれるなどの原因で、長時間にわたり安定操業が阻害される。しかし、商業プラントでは、長時間の連続稼働が不可欠であり、高稼働率を実現する技術が求められていた。そのため、以下の主要3項目を含む種々の操業技術改善を行った。

(1) 炉床耐火物への造粒物付着対応

RHFでは、造粒物の炉床耐火物への付着問題があった。造粒物が反応中に原料酸化物が耐火物と融合し易い物性に変化することを解明した。そこで酸化物が反応しづらい組成を見出し、原料配合基準を作成した。また、未排出粉の炉床焼付きもあり、これに対しては、造粒技術を改善し粉率を低減する改善をした。

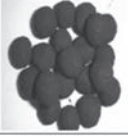
(2) 排ガス冷却装置での揮発性不純物付着対応

亜鉛・アルカリ等は炉内高温部で蒸発し、排ガス中で析出する際に、亜鉛とアルカリの酸化物・塩化物の高粘性複合体を形成する。これが排ガス処理装置内に付着し操業阻害要因となる。付着防止策として、原料配合改善による複合体の高融点化、排ガス冷却装置の構造改善と付着物除去の技術開発を行った。排熱蒸気が利用可能な君津製鉄所では、耐付着性の排熱ボイラーを設置した。

(3) 耐アルカリ性に優れた耐火物の開発

製鉄ダストからのアルカリ金属蒸気がアルミナ系耐火物へ浸潤し表面剥離する問題があった。そこで高温化学的な検討を行い、アルカリ浸潤速度低下のための添加物を採用し、またアルカリ浸潤時の膨張抑制ができる材質の耐火物を開発した。この結果、1400℃でも長寿命が得られ、またガス温度の高温化による生産性および還元率向上の効果も得られた。

表1 RHF向け造粒物の製造技術比較

造粒技術		ペレット法	ブリケット法	押出し法
原料	原料種	製鉄ダスト 粒径分布制約あり	製鉄ダスト 粒径分布制約が弱い	スラッジ(ダストも可) 粒度分制約小
	水分範囲	低水分	低水分	高水分
造粒方法		原料を円盤状バン上で転動させながら造粒する	原料を凹状型のあるローラーで圧縮成形する	湿潤粉体をノズルから押出し成形する
造粒物	造粒物形状	球	アーモンド状	円柱状
	写真			
	生産性	高(>60t/h)	高(最大20~30t/h)	低
造粒技術	技術改善点	粒度分布最適化とブレンド制御	同左	原料水分の安定化
	水分管理		同左	適切な気孔率管理-炉内爆裂防止
			新バインダー開発 高強度・粉低減	
特徴まとめ		高生産性・低コスト 原料物性変動抑制が必要	高生産性 原料物性変化に対応可能範囲が広い	低生産性 原料配合変動に強い 湿潤原料対応技術

3 製鉄ダスト類リサイクルへのRHF 設備適用結果

3.1 ダストリサイクル処理実績

新日本製鐵と新日鉄住金ステンレスでは、表2に示すように、合計7基のRHFプラントを建設し、製鉄ダスト類のリサイクル処理を行っている。図4に示すように、処理量は年々増加しており、2009年は100万トン弱のリサイクル処理を行い、また2010年以降は120万トンの処理を計画している。

3.2 製鉄ダスト類のリサイクルシステム

製鉄ダストリサイクルを経済的に実現するには、RHFを含む複数の設備に製鉄ダストを適正配分することも重要である。そこで、新日本製鐵では、製鉄所の特性に合わせたリサイクルシステムを構築した。

3.2.1 一貫製鉄所での製鉄ダスト全量リサイクルシステム

粗鋼年産1100万トン規模の君津製鐵所では、亜鉛含有ダスト発生量が30から50万トン／年ある。これに対応する製鉄ダスト類リサイクルシステムを構築した。高炉でのDRI使用

表2 新日本製鐵と新日鉄住金ステンレスで稼働しているRHFプラント一覧

プラント	運転開始年	規模 千t/y	原料	造粒物	製品	稼働率
君津製鐵所		620				
	No.1	2000	乾ダスト	ペレット	高強度DRI	>90%
	No.2	2002	スラッジ	押し出し		
	No.3	2008	乾ダスト	ペレット		
広畑製鐵所		600				
	No.1	2000			高還元率DRI (HBI)	>90%
	No.2	2005	混合ダスト	ブリケット		
	No.3	2008				
光製造所	2001	30	ステンレス副生物	ブリケット	Fe Cr Ni還元物	>90%

HBI : Hot Briquet Iron

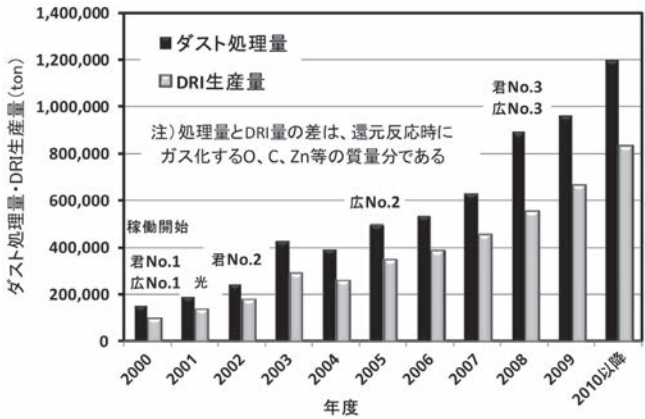


図4 新日本製鐵と新日鉄住金ステンレスのRHFプラントでの製鉄ダスト類処理量とDRI生産量

を実現するために、高強度DRIをRHFで製造する方法を採用した。君津製鐵所では、図5に示すように、低亜鉛濃度の製鉄ダスト類をコールドペレットとダスト混合設備でリサイクルして、高亜鉛含有のものをRHFで処理する。

高生産性のペレット造粒方法 (No.1, 3) および難造粒性ダストとスラッジを処理する押し出し造粒方法 (No.2) を併用するシステムを採用した。難処理の原料をNo.2プラントに集中することで、他プラントの生産性を最大限に高めた⁹⁾。

DRIの還元化エネルギーを有効利用できることから、一貫製鐵所では、高炉にDRIをリサイクルすることが最もエネルギー経済性が高い。DRIを高炉で使用した結果、図6に示されるように、高炉還元剤比が低減でき、省エネルギーも実現できた。

3.2.2 集中処理による多製鐵所連結リサイクルシステム

自所と他製鐵所で発生した製鉄ダスト類を集中リサイクルする体制を広畑製鐵所のRHFを中心に構築した。広畑製鐵所は高炉を有さず、冷鉄源から鉄源を生産する製鐵所であ

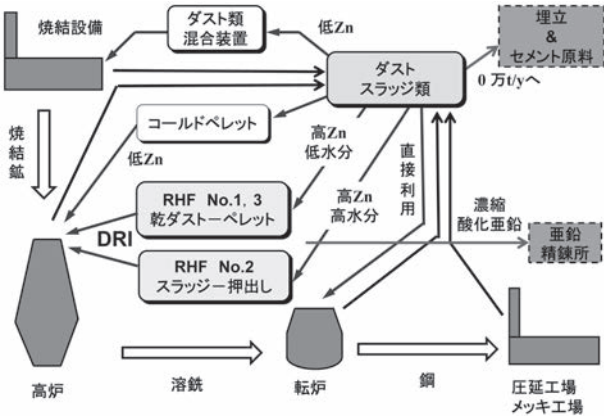


図5 君津製鐵所での製鉄ダスト類リサイクル処理フロー

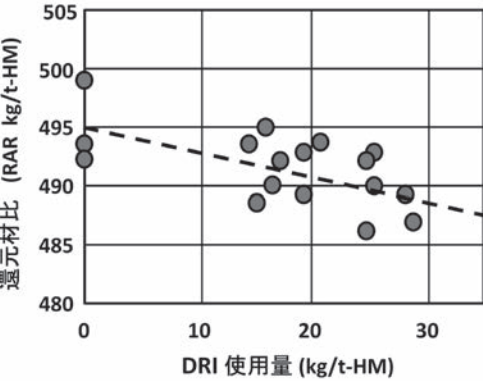


図6 DRIを高炉で使用した場合の還元材削減効果 (君津第三高炉での実績)
RAR : 高炉還元材比 (Reducing Agent Ratio)

る。このため、他所からの製鉄ダスト類をリサイクルしても、高炉の亜鉛濃縮が起きないため、集中リサイクルが可能である。広畑製鉄所では図7に示すように自所ダストと他所ダストを混合してRHF原料として利用する。混合原料に最適なブリケット造粒技術を開発した。

また高還元率を実現するRHF操業技術も確立するとともに、RHFと溶解炉間を高温DRIで直結する設備も開発し、RHFと溶解炉一貫での低エネルギー操業を行っている。

3.2.3 ステンレス系ダスト類のリサイクル

ステンレスダスト、スラグを電炉でリサイクルする場合は、還元エネルギーの影響で電炉の生産性が低下するなどの悪影響があった。そこで、電気炉の還元負荷低減のために、ダスト類をRHFで処理することで、リサイクルを可能とした。新日鉄住金ステンレス光製造所で、RHFで鉄とニッケルの高還元率を達成することで、効率的なリサイクル処理技術を完成した。この結果、図8に示すように、一部の忌避成分を含むスラグ以外のステンレス系製鉄ダスト類のリサイクルフローを確立した。

4 まとめ

RHFによる製鉄ダスト類の効率的リサイクル技術を開発し

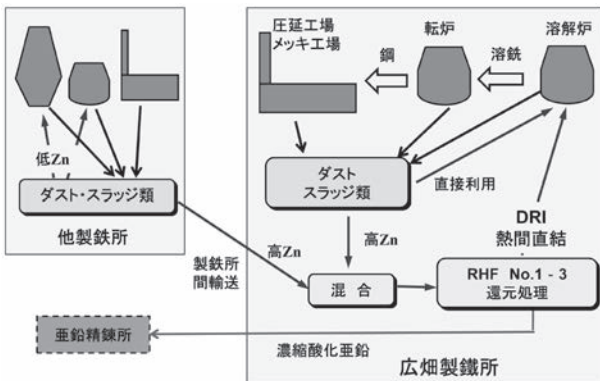


図7 広畑製鉄所のRHFプラントを中核とする多製鉄所間広域での製鉄ダスト類処理フロー

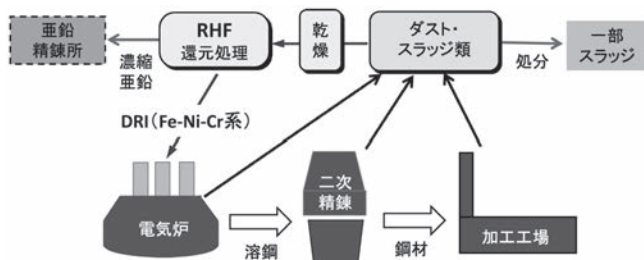


図8 光製造所での製鉄ダスト類リサイクル処理フロー

て、2000年に君津・広畑両製鉄所でリサイクル操業を開始した。従来技術では困難であった、亜鉛を含有する劣質な製鉄ダストを原料とした造粒技術とRHFでの安定操業技術を確立した。またステンレス鋼製造工程の発生物を効率的に処理する技術も開発し、光製造所に適用した。更に、高炉、鉄浴式溶解炉、およびステンレス電炉での使用に適切な品質の還元鉄を高効率で製造する技術を確立した。

新日本製鐵と新日鉄住金ステンレスで、2008年までに7基のRHFプラントを建設して、全社の製鉄ダスト類の全量リサイクル体制を構築した。君津製鉄所では、大型一貫製鉄所での自己完結型リサイクル体制を、また広畑製鉄所では、多製鉄所連携リサイクル体制を構築した。新日鉄住金ステンレスの光製造所のRHFプラントでは、ステンレス生産の発生物をリサイクルする技術を開発し、高価なクロムとニッケルのリサイクルに成功した。

更に、省エネルギーと省資源が両立する技術として、社外へのRHF製鉄ダストリサイクル技術の普及も進めており、現在までに、韓国POSCOとの合弁事業を含み、国内外に5カ所に技術提供している。また広畑製鉄所での広域リサイクル体制を拡大して、西日本の業界内連携の広域リサイクル体制を構築中である。

参考文献

- 1) 森川英二，喜多村健治，東風平玄俊：住友金属，50 (1998) 4, 42.
- 2) W-K.Lu and D.Frank Huang：ISIJ Int., 41 (2001), 8, 807.
- 3) 田中英年，原田孝夫，吉田昌平：R & D 神戸製鋼技報，56 (2006) 2, 27.
- 4) J.G.Powers and D.A.Molmar：2002 Ironmaking Conference Proceedings, (2002), 693.
- 5) T.J.Sack：Iron and Steelmaking, (2000) 4, 43.
- 6) R.H.Hanewald, and A.Dombrowski：Iron and Steel Engineering, 62 (1985) 3, 62.
- 7) 織田博史，茨城哲治，高橋政治：新日鉄技報，376 (2002), 28.
- 8) T.Ibaraki and H.Oda：La Revue de Metallurgie-CIT, 99 (2002) 10, 809.
- 9) 織田博史，茨城哲治，安部洋一：新日鉄技報，394 (2006), 135.
- 10) 織田博史，茨城哲治：高温学会，34 (2008) 3, 111.

(2010年7月16日受付)