

新しい技術

UDC 669.184.244.62 : 669.184.23

底吹き転炉による鋼の大量生産技術の開発

太田豊彦*・三枝 誠*²・数土文夫*²・野崎 努*³

Improvement of Higher Productivity Using Bottom Blown Converter

Toyohiko OHTA, Makoto SAIGUSA, Fumio SUDO, and Tsutomu NOZAKI

1. 緒 言

鉄鋼の製造は、主として高炉-転炉-連铸-圧延のプロセスで行われており、今後も当分のプロセスは続くであろう。このうち製鋼炉としては現在 LD 転炉すなわち純酸素上吹き転炉が主流となっている。LD 転炉法は我が国鉄鋼生産量の約 80% を占めており、品質およびコスト面でも最も進んだ製鋼法として評価を受けて来た。

一方、底吹き転炉法は、溶鋼の強攪拌による炉内反応の促進などから注目されていたが、炉底耐火物の寿命に問題があり、大量生産転炉としての設置に疑問があつた。当社ではこの強攪拌を利用する操業改善を目指して、1977 年 2 月に当社千葉製鉄所に底吹き転炉を設置・操業を開始した¹⁾。

大量生産を指向し、稼働率を高めるためには、吹錬制御技術の開発と、羽口寿命延長技術の開発が必要となる²⁾。底吹き転炉の吹錬制御は、上吹き転炉とは脱炭効率などの点で大きく異なり、羽口冷却用の炭化水素の分解も考慮する必要がある³⁾。炉底から大量に酸素を吹き込むため、耐火物への影響が大きく、羽口寿命を延長する技術を開発して初めて、底吹き転炉が大量生産炉として活躍できることになる。

操業技術の向上のため吹錬途上の炉内反応を精度よく推定するには、炉内反応の理論的解明が不可欠である。上吹き転炉との比較の上で底吹き転炉の強攪拌が炉内反応におよぼす影響を調べることは冶金的に興味深い。

以下に、底吹き転炉の高生産性を目標に、操業技術と炉底延長の技術開発経過について述べる。

2. 炉底寿命延長についての技術開発

2.1 羽口の構造と従来の羽口寿命延長策

稼働当初には、炉底寿命の延長は羽口自体の損耗を極

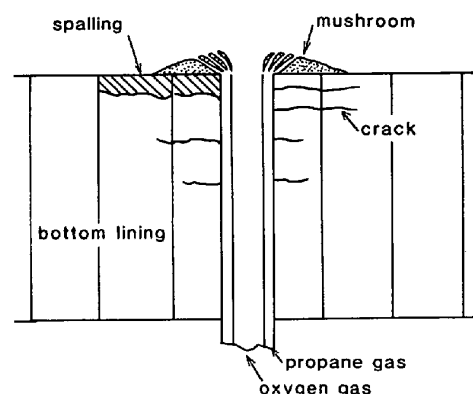


Fig. 1. Schematic representation of wearing mechanism of lining brick.

力防ぐべきであろうとの考えから、酸素吹き込み圧力を種々変化させて羽口損耗への影響を調べた。また、羽口溶損におよぼす羽口径、および羽口材質の影響も検討したが、これら諸要因は羽口損耗に対して抑止効果がないことが判明した。すなわち、2重管の外管を流れるプロパンの冷却によつて、Fig. 1 で示されるように、溶鋼と接する羽口外管周囲に凝固鉄が生成すると、羽口損耗が抑制されることがわかつた。

2.2 羽口損耗機構の解明

使用後の羽口周囲を観察すると羽口耐火物断面には炉底面に平行に微細なき裂が入っている (Fig. 1 参照)。この微細なき裂の発生量と羽口損耗速度の間には Fig. 2 に示すように、微細なき裂が増すほど羽口損耗速度が増加する傾向にある。

羽口冷却に用いるプロパンの冷却を加味した羽口耐火物の熱履歴を実測と熱計算から求めた。この結果炉底表面から耐火物側へ 40~50 mm 入った所に低温部分が生じており、これは非吹錬時には消滅している。Fig. 3

昭和 56 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1981) (依頼新しい技術)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

*² 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiha Works, Kawasaki Steel Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)技術研究所 理博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

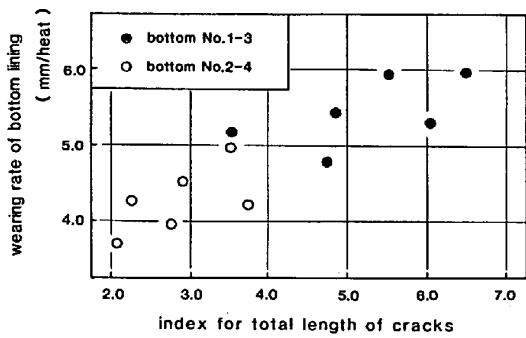


Fig. 2. Relationship between wearing rate and index for total length of cracks of bottom lining around tuyere in 230 t Q-BOP.

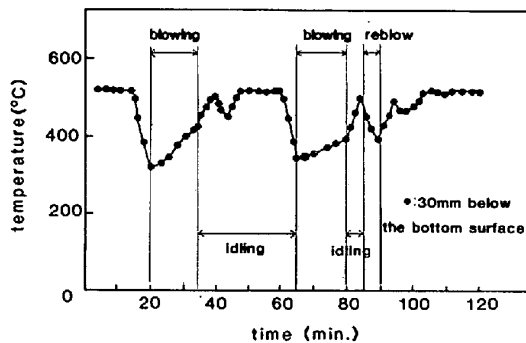


Fig. 3. Change of tuyere temperature during blowing.

に羽口耐火物の連続測温を行つた例を示す。吹錬中はプロパンの分解による吸熱反応によつて、羽口温度は低下するが、非吹錬時、 N_2 ガスに切り換えると羽口温度は上昇する。再吹錬を行えば、当然熱サイクルが1回増すので、耐火物寿命へ悪影響をおよぼす。

2.3 耐火物特性判定装置と羽口用耐火物の開発

羽口周囲耐火物は、上述のようにプロパン分解による冷却と、高温溶鋼からの熱を受けて、極端な温度勾配と温度変動に伴いスポーリングを繰り返す。耐火物の加熱時に発生するき裂を Acoustic Emission (AE) としてとらえ、スポーリングを定量的に評価する試みを行つた⁴⁾。

AE 測定システムでは実炉使用に供する実物大の試験耐火物が放出する弾性波を、センサーで電気的信号に変換し、AE エネルギーの総和として記録する。この AE 装置を開発したことによつて、i) き裂発生時点が明確に把握できる、ii) 微細き裂も含めき裂発生量の定量化ができる、iii) 実炉使用条件での耐火物の事前評価ができる、など実験室的に耐火物の評価を可能にした。

2.4 羽口用耐火物の開発

底吹き転炉羽口用耐火物の開発に際し、i) 耐スポーリング性に秀れていること、ii) 熱伝導率が高く、弾性率が低いこと、iii) スラッグの侵蝕に耐え得ること、を目的とした。AE 装置による種々の耐火物試験結果⁵⁾か

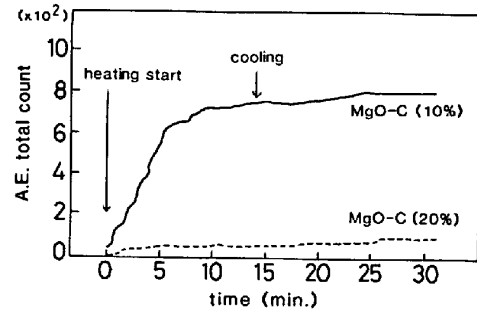


Fig. 4. Typical results of panel-AE spalling test of MgO-C bricks.

ら、上記の諸条件を満足するのは MgO-C 系耐火物であることを見出した。MgO-C 系であっても、Cの含有率、使用するCの種類によつて特性が変わるであろうとの推察から、Fig. 4 に示す実験結果を得た。以上の評価と実炉での部分使用により酸化脱炭のないことを確認し、底吹き転炉に最適な MgO-20% C 羽口用耐火物が完成した。

パネル AE 試験法をさらに実用化するため、有限要素法による応力解析も一助にして、耐火物が構造体として築造される場合のスポーリング挙動も調査した。これらの解析から羽口周囲耐火物の断面形状を小型化すること、耐火物を鋼製羽口の拘束から解放し、熱膨張、収縮が緩和できる築炉法を案出し、炉底寿命の延長に役立っている。

3. 転炉操業方法の開発

3.1 吹錬自動制御法の開発

吹錬制御が不完全な場合、再吹錬比率が高まり、製鋼時間の延長、酸素原単位の上昇、耐火物溶損などで生産性が阻害される。したがつて、吹錬を精度よく実施するために、吹錬途上での炉内情報を取り入れた動的制御が必要である。このため、i) 底吹き転炉吹錬中の測温、サンプリング技術、ii) 底吹き転炉の炉内反応を反映させたモデル式、iii) スラッグ中 T·Fe および滓化コントロール技術、の開発を行うことが必須であつた。i) の目的達成のため上吹き転炉のサブランスに相当するセンサーランスを設置した。

ii) のモデル式のうち脱炭速度式には羽口冷却用の炭化水素の考慮はもちろんのこと、スラッグに吸収される酸素量、計算塩基度、螢石使用量なども加味し、吹錬精度の向上を計っている。

上吹き転炉では、吹錬適中の精度に大きい影響をもつスラッグ中 T·Fe の制御はランス高さ、送酸圧力・流量制御など操業要因が多く難しい。しかし底吹き転炉ではその利点を生かして、スラッグ塩基度やC濃度の関数として T·Fe を精度よく推定できるので、Fig. 5 に示すようにスラッグ中の T·Fe の制御が可能となり、吹錬の終点制

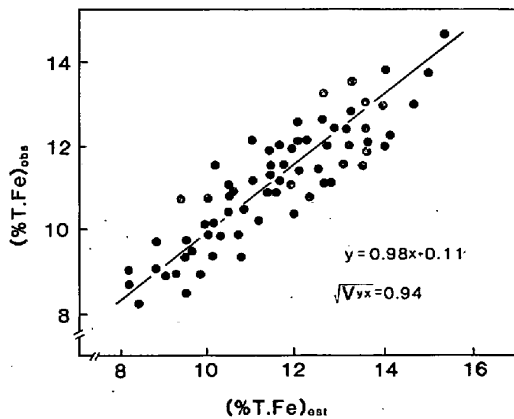


Fig. 5. Relation between the observed- and estimated-(%T.Fe) in slag.

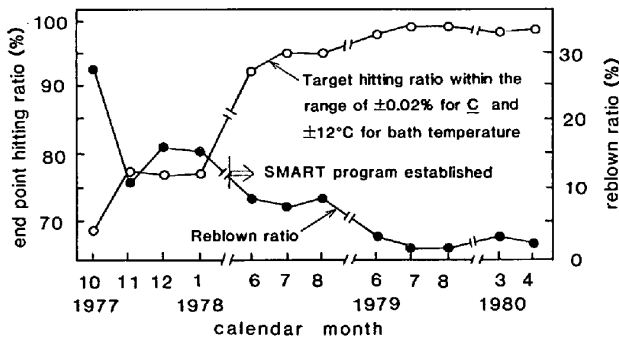


Fig. 6. Monthly variations of hit rate of carbon and temperature at blow end, and of reblow rate.

御は向上した。

センサー装置によるデータ採取と、炉内反応のモデル化の研究から、底吹き転炉稼働後1年にして、SMART (System for Measuring and Attaining the Refining Target) と名付けた吹錬制御システムを開発した。吹錬は静的制御システムで開始し、吹錬後半にはセンサーランスを炉内に挿入して、これによる情報を基に、その後の脱炭および昇熱計算を行い、必要に応じて吹錬の軌道修正を行う。

現在ではこの SMART 法を全てのヒートに適用し、Fig. 6 に示す高い適中率の操業を安定して行っている。

3.2 迅速出鋼法の開発

SMART 法の開発によつて終点制御の大幅な向上を実現した。この結果羽口周囲耐火物の熱サイクルが減少し、炉底寿命が延長した。さらに、積極的に炉底耐火物の熱サイクルを減少させる目的で、迅速出鋼 (Quick and Direct Tapping) 技術を確立した⁷⁾。

上吹き転炉の無倒炉法と比較して、QDT 法の特徴は終点での温度・サンプリングを全く行わないことにある。このため、分析採取および結果待ちの時間が不要となり、高温の溶鋼を炉内に保持する必要がなく耐火物寿命延長の効果が期待できる。

耐火物の溶損は炉傾動回数に比例すると予想されたの

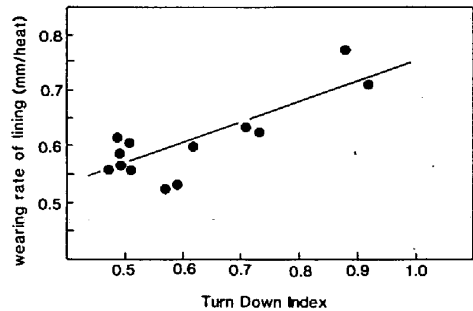
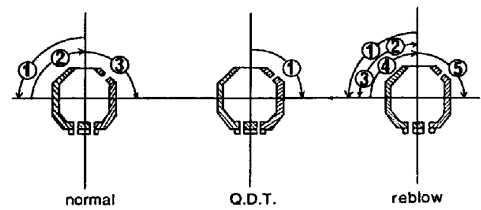


Fig. 7. Illustration of turn-down index, and relationship between wearing rate of bottom lining and turn-down index (TDI).

で、この関係を把握するため Fig. 7 に示す倒炉指数 (Turn Down Index) を導入した。これは 90° を単位として炉体を傾転する回数を1炉代について比率で示したものである。通常操業、QDT および再吹錬ヒートの割合をそれぞれ r_n , r_{QDT} および r_{rb} とすれば TDI は (1) 式となる。

$$TDI \equiv r_n + \frac{1}{3}r_{QDT} + \frac{5}{3}r_{rb} \dots\dots\dots (1)$$

1 炉代中すべて QDT を実施すれば TDI は 0.33 となる。炉底損耗速度は Fig. 7 に示すように TDI と密接な関係にあり、倒炉回数の減少に伴い炉底損耗も減少できることがわかった。このように底吹き転炉の操炉技術も炉底寿命の延長に極めて重要な役割を果たしていることがわかる。

QDT 法のその他の特徴としては、i) 出鋼待ち時間が不要で吹き止め温度を 10~20°C 低下できること、ii) 倒炉回数の減少に伴いスラグ中の金属鉄分が減少し 0.24% の歩留り向上がある、iii) 吹き止めから出鋼までに使用する N_2 , Ar ガスが削減できる、iv) Mn 損失が 0.01% 防止でき、Fe-Mn 使用量が削減できる、v) 取鍋内溶鋼温度が正確に制御でき、品質のよい鋼塊が生産できる、など製鋼コストの削減に著効を示している。

3.3 操炉技術の開発

炉底耐火物の温度変化を減少させ、炉底寿命を延長させる目的には、耐火物表面に断熱層としてスラグをコーティングすることが有効である。スラグ中に溶出する MgO と軽焼ドロマイト投入量およびスラグ中の MgO 濃度との関係を詳細に調査し⁸⁾、コーティング用スラグの組成を管理した。

1 炉代の間にスラグコーティングを間歇的に実施し

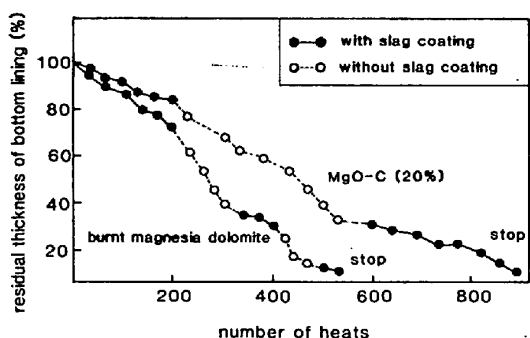


Fig. 8. Effect of slag coating on wearing of bottom lining.

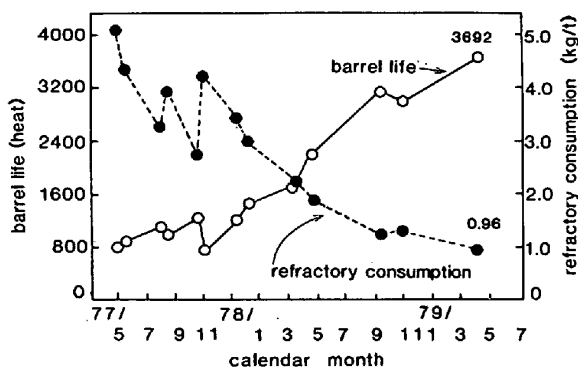


Fig. 9. Monthly variations of barrel life and refractory consumption.

て、羽口残厚を調査した結果を Fig. 8 に示す。羽口損耗の抑制に対してスラグコーティングが有効であるとの確認から、現在、吹錬ヒートごとにスラグコーティングを行い、羽口耐火物の延長に役立っている。

今一つはレーザー光線を利用して、炉体耐火物残厚を各部位について測定する技術である。これを採用した理由は、耐火物原単位を削減するには炉底寿命はもちろんのこと、吹付補修による炉体と炉底寿命のマッチングが重要であると考えたからである。レーザー測定から、吹き付け補修の位置と量を決定し、炉底損耗に見合った炉体プロフィールを維持する方法をとっている。このような操炉法を開発した結果、炉底寿命の延長に伴い炉体寿命も大幅に向上し、Fig. 9 に示すように、耐火物原単位を 1 kg/t-steel 以下にできた。

底吹き転炉導入時に幾多の不安要素と考えた転炉稼働率、耐火物原単位、羽口寿命などの問題は今まで述べて来た技術の開発によつて、目標を上回つたばかりでなく、上吹き転炉と同等もしくは凌駕する成績を示すに至つた。

4. 炉内反応におよぼす攪拌の効果

鋼浴の攪拌と炉内反応を結びつける一つの指針としてエネルギーの大小がある。近年、酸化精錬炉は LD、

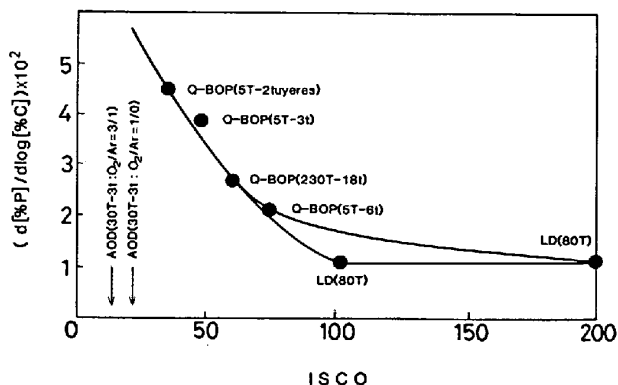


Fig. 10. Ratio of dephosphorization rate to decarburization rate as a function of ISCO.

AOD, Q-BOP というように精錬時間の短縮、反応性の増大を計り進歩して来ている。通常これらの酸化精錬炉の特性として、送酸量 (q_{O_2}) に対するメタル量 (W) の比 q_{O_2}/W が使われて来た。しかし同一の q_{O_2}/W でも鋼浴の攪拌が大幅に異なる LD と Q-BOP の相違点を q_{O_2}/W で表現するのは不適當である。それゆえ、均一混合時間 τ を導入し $q_{O_2}/(W/\tau)$ をプロセス・パラメータにすれば、溶鋼循環量に対する送酸量という概念が生まれる。

さらに AOD の例からもわかるように、優先脱炭に関し炉内の P_{CO} 分圧が重要な因子であるので、これらを総合的に取り入れ、酸化精錬炉の特性を具体化できるパラメータを得る。そこで、このパラメータを (2) 式で ISCO (Index for Selective Carbon Oxidation) と定義する⁹⁾。

$$ISCO \equiv \left(\frac{2q_{O_2}}{2q_{O_2} + 4q_P} \right) \left(\frac{q_{O_2}}{W/\tau} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに q_P はプロパン流量である。(2)式から ISCO が小さい酸化炉は C の優先酸化が保証され、P や Cr の酸化が軽度となる。一方、ISCO が大きくなれば Fe や P が酸化しやすい製鋼炉と言える。ISCO と脱炭末期の $d[\%P]/d \log[\%C]$ の関係を Fig. 10 に示す。これより ISCO は各酸化精錬炉での冶金反応を統一的に説明し、吹錬方式の指針となることがわかる。

5. 底吹き転炉法の製鋼技術への波及効果

炉底寿命延長を念頭にした底吹き転炉の操業技術が確立され、上吹き転炉の攪拌が不十分であるとの認識から、上吹き転炉に底吹きを併用し、冶金反応の改善を計ろうとする試みが欧州および日本でいつせいに行われはじめた¹⁰⁾。上吹き転炉の攪拌能を増強したいとする背景には、1) 鋼浴温度、成分の均質性確保による品質の安定化、2) 鉄歩留りの向上、3) 合金鉄の削減に基づく省資源、4) 若干の改善で済む安価な設備費、などが考えられる。現在、各社で開発中の複合吹錬法は炉底から

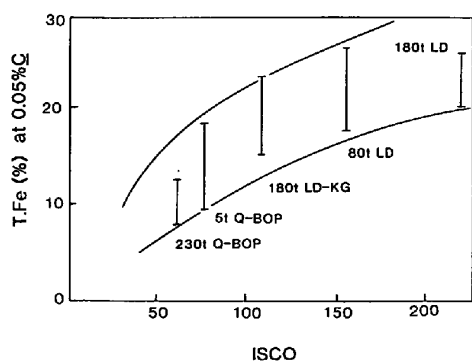


Fig. 11. (%T·Fe) in slag as a function of ISCO at 0.05% C.

i) Ar, N₂ を吹き込み攪拌のみに力点をおく方法,
ii) CO₂, O₂ の酸化性ガスを吹き込む方法, iii) 前述
ii) の方法に加えてフラックス吹き込みを可能にした方法
に大別される。Fig. 11 に示すように ISCO とスラ
グ中の T·Fe の関係から、炉底のガス吹き込み量によ
り、LD 的にもまた Q-BOP 的にもその吹錬挙動を制御
できる可能性が見出されている¹¹⁾。

また、底吹き転炉を用いた生石灰による脱磷法¹²⁾や石
灰石を炉底から吹き込み転炉排ガスのエネルギー回収を増
加する研究¹³⁾など底吹き転炉を活用する種々の試みを行
っている。

6. 結 言

底吹き転炉の炉底寿命延長のための操炉技術と、耐火
物の開発を行い、炉底寿命は 2000 ヒートを越え、耐火
物コストに関しても、上吹き転炉と比較し遜色のない水
準に達した。

このため、底吹き転炉はその冶金反応の利点を十分発
揮するに至り、上吹き転炉以上の高生産、低製造コス
ト、高品質製造のできる製鋼炉であることを実証した。
さらに、この底吹き転炉の成功が上吹き転炉を見直す機
運を生み、最近の複合吹錬技術開発の契機となった。

文 献

- 1) 川名昌志: 鉄鋼界, (1978) 1, p. 56
- 2) 太田豊彦, 三枝 誠, 永井 潤, 数土文夫, 中西
恭二, 野崎 努, 内村良治: 川崎製鉄技報, 12
(1980) 2, p. 209
- 3) 永井 潤, 数土文夫, 山田純夫, 森 淳, 中西
恭二, 別所永康, 土田 剛: 鉄と鋼, 64 (1978)
11, S 590
- 4) 熊谷正人, 内村良治, 川上辰男: 窯業協会誌, 87
(1979) 5, p. 259
- 5) 熊谷正人, 内村良治, 岸高 壽: 川崎製鉄技報,
11 (1979) 1, p. 132
- 6) 中西恭二, 加藤嘉英, 野崎 努, 江見俊彦: 鉄と
鋼, 66 (1980) 9, p. 1307
- 7) 三枝 誠, 永井 潤, 数土文夫, 山田純夫: 鉄と
鋼, 64 (1978) 11, S 591
- 8) 太田豊彦: セラミックデータブック '79, p. 127
- 9) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄
と鋼, 64 (1978) 4, S 169
- 10) T. EMI: Stahl u. Eisen, 100 (1980) 17, p. 998
- 11) 斎藤健志, 別所永康, 原田信男, 鈴木健一郎, 野
崎 努, 中西恭二, 江見俊彦: 鉄と鋼, 66 (1980)
4, S 239
- 12) 馬田 一, 森下 仁, 数土文夫, 今井卓雄, 三枝
誠, 中西恭二: 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 730
- 13) 小高幹雄, 森下 仁, 馬田 一, 数土文夫, 永井
潤: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 240