

入門講座

鋼の凝固入門-8

連続鋳造 I : 連続鋳造の基礎

Continuous Casting I : Fundamentals of Continuous Casting Process

加藤 徹 新日鐵住金(株) 技術開発本部
 プロセス研究所 研究企画室
 室長
 Toru Kato

1 はじめに

鋼の凝固プロセスに関しては、現在わが国では粗鋼生産の98%以上、世界でも95%もが連続鋳造法により製造されている¹⁾。これは連続鋳造法が従来の凝固プロセスである造塊法と比較して、工程の省略が可能で歩留まりや生産性が高く、低コストかつ大量生産に適したプロセスであることによる。したがって、鋼の凝固を考えるには連続鋳造プロセスを知る必要があり、鋼の凝固入門シリーズでは本稿から3回にわたり連続鋳造法をテーマとする。初回となる本稿では”連続鋳造の基礎”として連続鋳造機の構成や形態について解説する。なお、連続鋳造技術の詳細や開発の経緯などに関しては優れた成書^{2,4)}や解説記事⁵⁾などがあり、詳しくは是非参照されたい。

2 連続鋳造機の概要

連続鋳造機の模式図を図1に示す。取鍋(レードル)で運搬されてきた溶鋼は一旦タンディッシュと呼ばれる中間容器に受けられ、浸漬ノズルを通じて製品に応じた断面形状の水冷

銅鋳型に注入されて連続的に凝固する。鋳型およびその直下での鋳片の断面の模式図を図2に示す。鋳片は表面のみが凝固した状態で鋳型から引き抜かれ、ロールなどで支持しつつスプレー水などで冷却されて徐々に固められる。同様の鋳造を行ってもアルミニウムや銅のような熱伝導率の高い金属では鋳型内あるいは鋳型直下で完全に凝固するが、鋼では凝固シェル自体が熱抵抗となるため成長が遅く、図に示すように凝固界面は鋳型面とほぼ平行と言ってよいほどの形状となる。

この時の凝固挙動は半無限一次元の鋳塊を仮定し、式(1)で表されるフーリエの熱伝導方程式を固液界面でエネルギー保存則が成立するとして初期条件や境界条件を代入することにより解くことができる⁶⁾。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

ρ : 密度、 C_p : 比熱、 λ : 熱伝導率、 T : 温度、 t : 時間、 x : 鋳塊表面からの距離。

その結果、凝固シェル厚 D は簡易的に式(2)で表現するこ

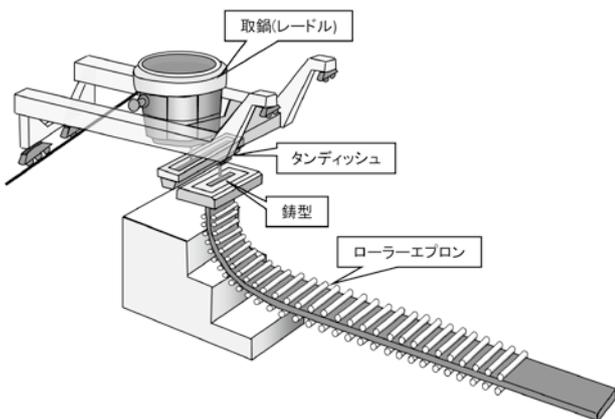


図1 連続鋳造機の模式図

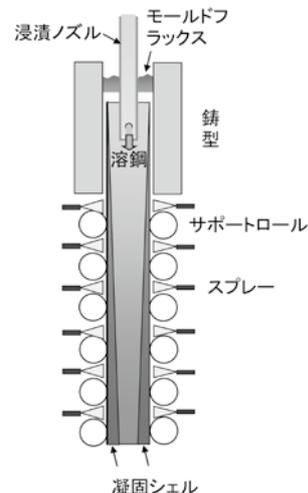


図2 鋳型近傍の連続機断面

とができ、凝固開始後の経過時間 t の1/2乗に比例して成長する。ここで K を凝固係数と呼び、 casting時の凝固挙動を把握する目安となる。 castingおよび冷却条件により異なるものの鋼の連続 castingでは一般に23-30程度の値（凝固開始後の時間 t の単位はmin）となる。

$$D = K\sqrt{t} \dots\dots\dots (2)$$

D ：凝固シェル厚 (mm)。

丸 casting片や幅の狭い casting片を除き、 casting片内部に未凝固の溶鋼が残る間は、サポートロールによる支持が必要であり、これにより溶鋼の静圧により casting片が膨らみ引き抜き不能などの大きなトラブルとなることを防止している。 casting型内の湯面からロールにより casting片が支持されている末端までの長さが機長であり、連続 casting機の規模を知る指標となる。 casting片厚や casting速度により異なるが、各社の代表的な高生産機では40m台後半の長さとなっている。 casting片厚さ250mm、凝固係数を26と想定すると casting片が完全凝固するまでに約23分が必要となり、凝固時間と casting速度の積が機長に相当する。

3 連続 casting技術開発の歴史

連続 casting技術は、はるか昔1856年にH.Bessemerが銅および casting鉄で図3に示すような双ロールストリップ連続 casting機タイプの実験を実施するとともに特許を申請した⁷⁾ことが端緒となっている。しかしながら、鋼の製造において工業的に採用されるまでには多くの時間と労力が必要であり、図1に示したような現在の連続 casting機の構成が確立されたのは1960年代に入ってからのことである。その間多くの安定 casting技術確立のための努力がなされたが、1934年、S.Junghansにより発明された casting型振動（オシレーション）⁸⁾はプロセス成否の鍵となった技術であり、現在も欠かすことのできない要素と

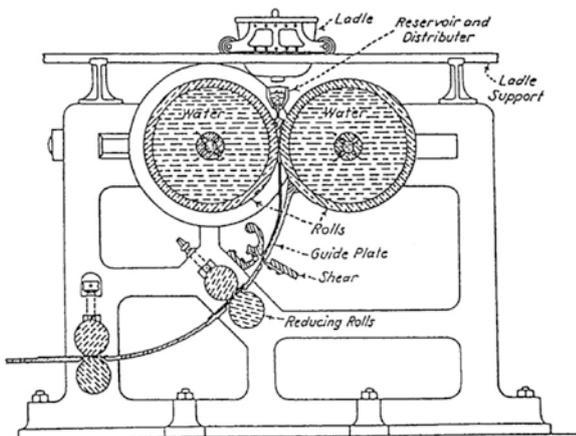


図3 H.Bessemerの連続 casting機⁷⁾

なっている。

わが国では1955年に10 ton規模のピレット連続 castingの实用化試験機、1960年にはスラブ連続 casting機が設置され、種々の技術課題を克服したが^{2,5)}、当初は生産性が低く急速に発展した転炉法の生産能力に対応させることができなかった。その後も生産性向上、品質改善のための多大な努力がなされ、1960年代末期に浸漬ノズルとモールドフラックスが实用レベルに到達したことで casting片の清浄度や表面性状が大幅に改善し、連続 casting法の工業技術へと発展と普及への大きな転機となった。

このような過程を経て連続 casting法は純酸素上吹き転炉法とともに現代製鋼技術を大きく変えた技術であり、粗鋼生産に占めるそれぞれの比率は製鋼技術の進歩を示す指標となっている。各国における連続 casting比率の推移を図4⁹⁾に示す。連続 casting法はわが国では1970年代に世界に先駆け急速に普及し、1985年には90%を超え、90年代にはほぼ飽和に達した。国外に関しては、わが国におよそ5年遅れてEU諸国、次いで米国など先進国での普及が進んだ。1990年代に入り中国をはじめとしてBRICs諸国などでも著しい経済成長や粗鋼生産の拡大と共に広く適用されるようになり、前述のように現在では鋼は連続 casting法により製造されるのが世界的にも標準的なプロセスとなっている。

4 連続 casting機の形態

連続 castingは製造される casting片の断面形状により、厚板や薄板などの板材の素材となるスラブ、管、棒、線材の素材として分塊圧延を行った後製品への加工を行うブルーム、分塊圧延を経ず直接圧延する比較的小断面のピレットに分類することができる。一部に兼用機も含まれるが、2002年には世界でスラブ：490基、ブルーム：270基、ピレット：930基の計

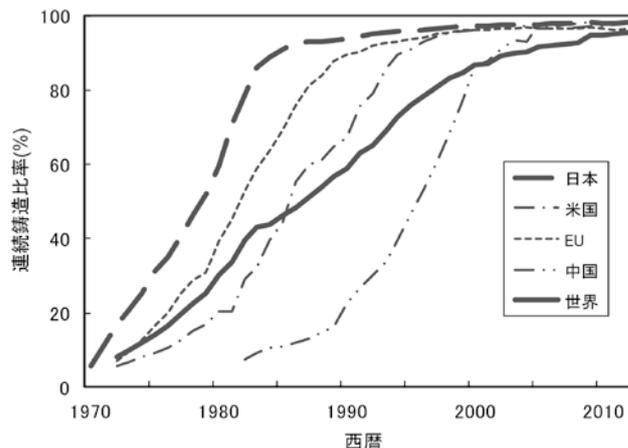


図4 各国の連続 casting比率の推移

約1700基が稼働していた¹⁰⁾。その後2000年代の世界的な粗鋼量拡大期に中国を筆頭としてBRICs 諸国で新設が相次ぎ、現在では1800基超が稼働していると考えられる。

スラブ連続鋳造機の代表的断面寸法は厚さ220~300mm、鋳片幅は薄板用で最大1800mm程度、厚板用で最大2300mm程度となる。多くの場合には鋳造中に鋳片幅を変更できる構造となっており、製品幅に応じて幅が1000mm未満の鋳片も同じ鋳型から生産されている。通常1基のタンディッシュから生産規模に応じて1、2基の鋳型に鋳造する1または2ストランド機となる。代表的な高生産機では鋳造速度2m/min前後で操業し、2ストランドで月間40万 ton 程度の鋳造を実現しており、熱延ストリップミル1基の生産量にもほぼ対応する規模となっている。また、1990年代以降鋳片厚50~100mm程度の薄スラブ連続鋳造機が急速に普及したが、これに関してはニアネットシェイブ連続鋳造技術として後述する。

ブルーム連続鋳造機は厚さ300~400mm、鋳片幅は500~600mm程度の場合が多く、丸断面を採用しているものもある。スラブ連続鋳造機より断面積が小さいため、生産性を確保するために3、4ストランドとした連続鋳造機も多くある。ブルーム鋳片は分塊圧延を経るため生産コストの増加要因となるが、軸受鋼に代表されるような品質要求レベルの高い材質では広く採用されている。ほとんどの場合鋳造中には断面寸法を変更せず、変更を必要とする場合にはオフラインで鋳型を交換している。

ビレット連続鋳造機は110~200mm角程度の矩形断面の鋳片で棒鋼、線材の素材となる場合が多いが、管材用途などで丸断面としている場合もある。断面積が小さいことから生産性を確保するために3~8ストランド程度の多ストランド機とするとともに、鋳造速度も3~4m/min程度の比較的高速で操業している場合が多い。その他に、形鋼用の素材を鋳造するために鋳型断面形状をH型とした、ビームブランク連続鋳造機も活用されている。

連続鋳造マシン形式の主なものを図5に示す。連続鋳造法の工業化の初期にはいずれも(a)垂直型であった。この形式

は鋳型内での気泡や介在物の浮上がしやすく鋳片の曲げや矯正を伴わないので品質面では優れていたものの、生産性の拡大が難しく、当時大幅に拡大を続けていた粗鋼生産量やLD転炉による出鋼量に見合わなかった。

そこで(b)湾曲型(円弧型)の連続鋳造機が各社で採用され、連続鋳造機の高さすなわち建屋高さを低くすることが可能となった。この時期の様々な技術開発の成果もあり、連続鋳造法の生産性が飛躍的に向上するとともに、一貫製鉄所の量産設備として急速に普及した。当初は未凝固の鋳片を矯正する技術が確立しておらず、完全凝固後に矯正する方法が採用されたが、鋳片に発生する各種割れの発生機構の解明が進み、矯正歪を分散させる多点矯正技術が確立され、完全凝固位置を鋳片矯正後の水平部とすることが可能となった。

一方で、湾曲型の連続鋳造機で鋳造速度を増加すると鋳型内に持ち込まれた介在物が凝固シェルに捕捉され鋳片の内R側(天側)の約1/6厚さ位置に集積するという問題がある。そこで介在物に厳しい鋼種を鋳造するために(c)垂直凝固後曲げ型(VSB型: Vertical Solid Core Bending もしくは単にVB型)が実用化された。

さらに、薄板用材料の連続鋳造において生産性向上を目的に鋳造速度の高速化が図られたが、鋳型内の湯面から2.5m程度の垂直部を設置すれば介在物の浮上を著しく改善できることが明らかにされ¹¹⁾、(d)垂直未凝固曲げ型(VLB型: Vertical Liquid Core Bending もしくは単にVB型)が開発された。この形式は生産性と高品質を兼ね備えていることから1980年以降では新設連続鋳造機の主流となるとともに、従来の湾曲型の連続鋳造機から改造される例が続いた。2000年には国内のスラブ用連続鋳造機でVSB型とVLB型をあわせた垂直曲げ型が24/49基、49%であった³⁾のに対して、現在は31/46基、67%と大幅に増加している。

また、この様な流れとは別に小ロットの棒線材、管材などを安価に連続鋳造化するために水平型が開発され、数基が稼働している。この方式は機高が低いため建設費が安くメンテナンスが容易である他、タンディッシュと鋳型が接続されているためノズルからの吐出流による凝固シェル溶解や鋳型内湯面でのパウダー巻き込みや二次酸化がないという利点がある²⁾。一方で、タンディッシュと鋳型の接続部に耐火物を使用するため溶鋼と水冷銅鋳型と耐火物とが一点で接触する3重点の生成が避けられず、鋳片の表面品質に影響を与える他、操業上も鋳片の引き抜き方法や接続部の構造などに様々な工夫が必要となる。

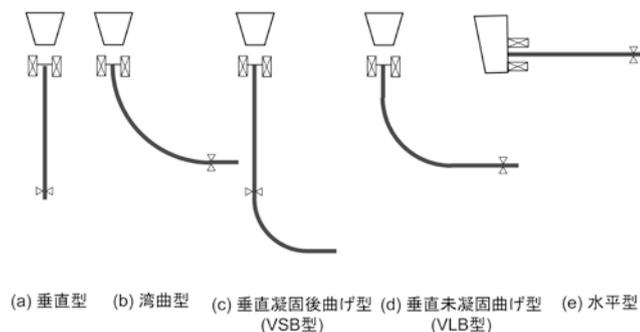


図5 連続鋳造機のマシン形式

5 ニアネットシェイブ連続鋳造^{12,13)}

鋳片厚さが220~300mm程度の従来型スラブ連続鋳造機

に対して、鋳片厚さを最終製品の板厚に近付け、工程省略と設備費用の削減を目的としたニアネットシェイプ連続鋳造法が開発されている。ニアネットシェイプ連続鋳造法の分類を図6に¹⁴⁾、鋳片厚さ、機長Lと生産性、鋳造速度Vcの関係を図7に示す。現在、商業生産に使用されている代表的な形態が鋳片厚50~100mm程度とした薄スラブ連続鋳造機 (TSC: Thin Slab Caster) と双ロール式ストリップキャスト (SC: Strip Caster) である。鋳片厚さが薄くなると機長は短くなり設備費用は減少するが、生産性を確保するために鋳造速度を上げる必要がある。TSCではほとんどが機長が5~10m程度として鋳造速度を3~8m/min程度と設定している。SCでは鋳片厚さは1~5mm程度となるため鋳造速度は30~150m/min程度となっている。

TSCは図6に示すように鋳型と凝固シェルが同期して移動する同期鋳型方式と従来型の連続鋳造法と同様の固定鋳型方式に分類できる。同期鋳型方式は1980年代に傾斜式、垂直式の種々の方式のベルトキャストの開発がすすめられたが従来型の連続鋳造法に対する優位性が得られなかった^{12,13)}。現在は欧州にて水平単ベルト方式により通常の連続鋳造が難しい鋼種を対象に商業生産に向けた試験を実施中である。

固定鋳型方式のTSCでは高い鋳造速度に対応するための高速鋳造技術と、薄い鋳型空隙に溶鋼を注入する技術が大き

な技術課題となる。後者を克服するために浸漬ノズルを挿入する鋳型中央部を鋳型上端に向かって漏斗状に拡大した漏斗状鋳型が採用されたことが大きな特徴となっている。鋳片品質向上や鋳造可能鋼種拡大の努力が続けられ、現在世界で80基程度が稼働し、年間1億トン程度を生産している⁵⁾。

SCに関しては、工程簡省略による設備簡略化や省エネルギー効果があり、次世代凝固プロセスとして高い関心を集め

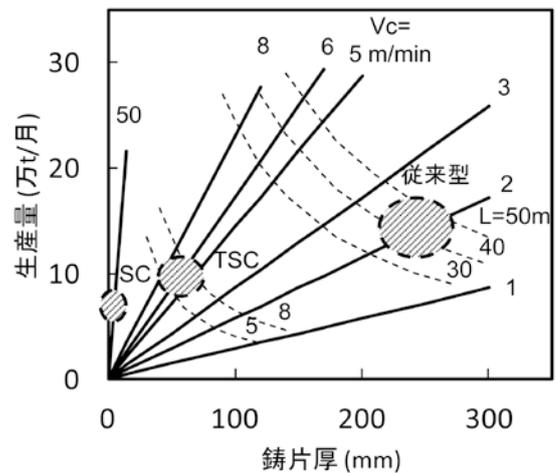


図7 ニアネット連鋳機のプロセス分類

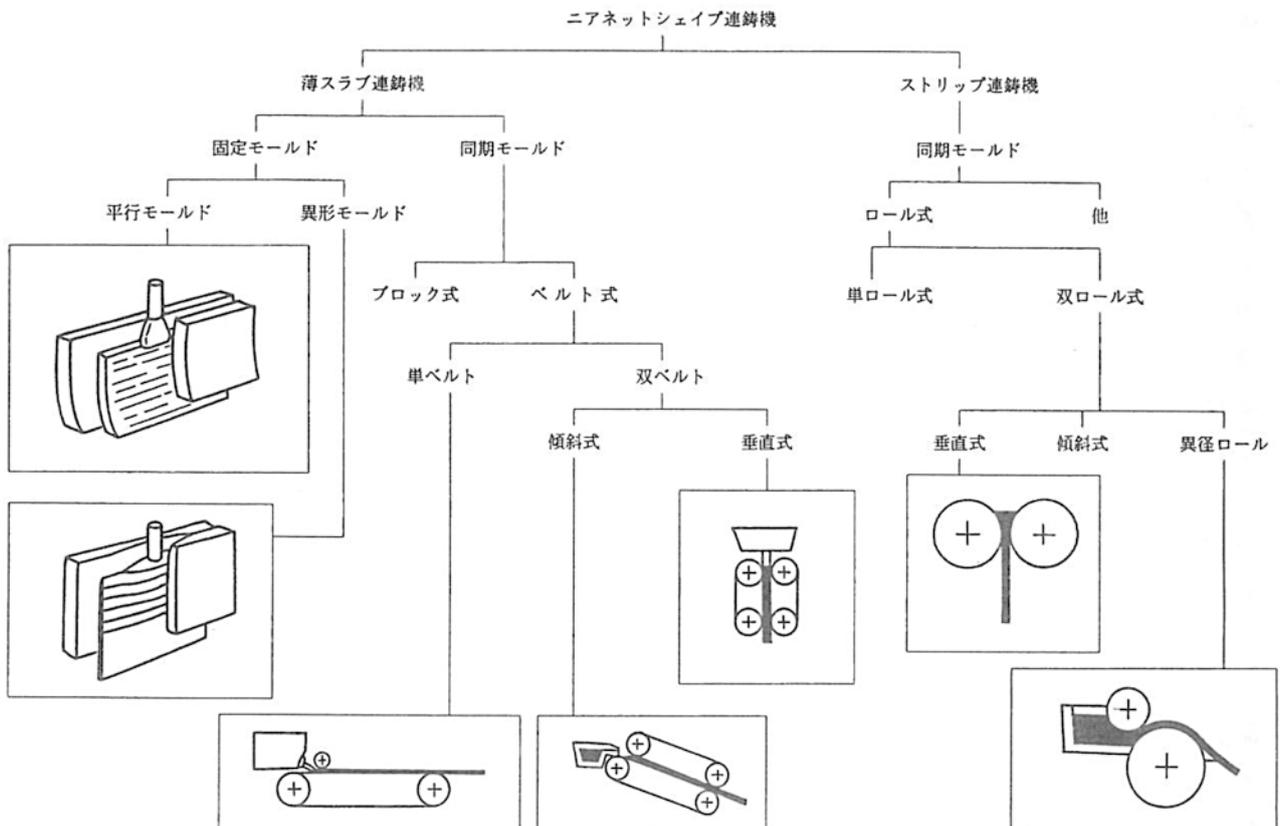


図6 ニアネット連鋳機のプロセス分類¹⁴⁾

ているものの、従来型の連続 casting 法や TSC と比べ生産性が低いことに加え、圧延工程による品質・材質のつくり込みができないという課題がある。現在、商業生産への適用を公表しているのは米国において低炭素鋼を対象とした例のみであり¹⁵⁾、今後の動向に引き続き注視していく必要がある。

6 連続 casting 化未達成の残る要因と対応

鋼の製造はほとんどが連続 casting 化されているが、今なお連続 casting 化されず残るものがある。その要因としては製品寸法に対して鑄片からの圧下比が十分確保できない、生産ロットが小さく連続 casting 化によるメリットが享受できない、材質の特性などに起因して技術的に casting が困難な鋼種があることなどが指摘されている³⁾。これに対して、2000年代に入り連続 casting 法を技術の根幹としながら、極厚あるいは大断面の鑄片を製造するための専用機が建設された^{16,17)}。また、従来スラブ連続 casting では厚さ300mm程度が最大であったのに対して、海外において VSB 型あるいは VLB 型で400mm厚、450mm厚とした連続 casting 機が相次いで稼働している。残る非連続 casting の割合は少ないが、連続 casting 化による合理化のメリットは大きいことから、一部の特殊な例を除きさらなる努力が進められていくものと考えられる。

7 おわりに

連続 casting 法が鋼への工業的適用が開始された1960年代以降、操業安定度や鑄片の品質に関しては別物といってもよいほどの進歩を遂げてきた。ここでは連続 casting 機の新設や改造の機会に鉄鋼メーカーと設備メーカー（重機メーカー）が協力して新技術を織り込み、操業ノウハウの蓄積などもあわせて生産性や鑄片の品質を向上させてきたことが大きな推進力となってきた。しかし、現在は欧州の重機メーカーを中心にモジュール化・パッケージ化した技術を世界各地で売り込み、操業指導まで主導する時代となっている。言い換えると相当レベルの操業技術や生産性が世界のどこでも入手でき

る時代となっている。我が国の鉄鋼業にとってはそういった環境下で今後も技術、品質面の優位性を維持できるかが問われており、将来の発展のためにはさらなる技術開発、革新的なアイデアが強く求められている。

参考文献

- 1) Steel Statistical Yearbook 2013 World Steel Association, Brussels, (2013)
- 2) わが国における鋼の連続 casting 技術史, 日本鉄鋼協会, 東京, (1996)
- 3) 日本鉄鋼協会編, 第4版 鉄鋼便覧, CD-ROM, 東京, (2002)
- 4) 鋼のスラブ casting 技術の最近の動向, 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1994)
- 5) 江見俊彦: 鉄と鋼, 100 (2014), 31.
- 6) 日本金属学会編: 講座・現代の金属学材料編第10巻「 casting 凝固」, 日本金属学会, 仙台, (1992), 41.
- 7) 英国特許 No.221 (1957.4.3)
- 8) ドイツ特許 DP 750, 301 (1944.5.18) (Application 1933)
- 9) Steel Statistical Yearbook World Steel Association, Brussels, 各年版より作成.
- 10) Concast Standard: Continuous Casting Machines for Steel World Survey, 28 (2002)
- 11) 田中宏幸, 今村晃, 西原良治: 鉄と鋼, 78 (1992), 1464.
- 12) 渡部忠男: 鉄と鋼, 88 (2002), 107.
- 13) 杉谷泰夫: 薄スラブ casting 機開発の現状と今後, 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1994), 225.
- 14) 王寺睦満: 鋼のスラブ casting 技術の最近の動向, 第153・154回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, 東京, (1994) 1.
- 15) 中山勝巳: 材料とプロセス, 22 (2009), 242.
- 16) 岡山豊, 川副文宏, 安井洋二, 梅木進, 原賢一, 加藤久詞, 上島良之, 星野 学: 新日鐵技報, 380 (2004), 50.
- 17) 岸幹根, 山口智則, 久村総一郎, 江口潤: 電気製鋼, 78 (2007), 49.

(2014年2月28日受付)