

# 高Ni合金連続鋳造スラブ切断装置の改善

宮崎 芳春\*・水野 建次\*・本郷 敦哉\*<sup>2</sup>・石井 照彰\*<sup>2</sup>・轟 秀和\*<sup>2</sup>

Improvement of Inline Cutting Device for Continuous-cast Slab in High-Ni Alloys

Yoshiharu MIYAZAKI, Kenji MIZUNO, Atsuya HONGO, Teruaki ISHII and Hidekazu TODOROKI

**Synopsis** : An improvement has been carried out to minimize the time for cutting continuously cast slabs in high-Ni alloy by means of a torch-cut equipped with Fe and Al powder supply. Two major reasons why it was so tough to cut the slabs in high-Ni alloy were considered. Firstly, heat generation by torch-cut is insufficient to keep burning a slab for high-Ni alloy because Ni is a metal nobler than Fe or Cr. Secondly, fluidity of the flown melt formed by torch-cut of slab is lower for high-Ni alloy than for low-Ni stainless steel. The formed flown melt consists of a mixture of molten alloy and oxides. The flown melt for high-Ni alloy includes higher ratio of solid oxides which lowers the fluidity. In order to cut the slab against low fluidity of the flown melt, the cutting device was improved by increasing ability to supply combustion gas and powder. In addition, the powder ratio of Al to Fe was optimized as 25 mass%. Consequently, the improvement succeeded in shortening the time for cutting a slab to half for high-Ni alloy.

**Key words**: continuous casting; high-Ni alloy; stainless steel; torch-cut.

## 1. 緒言

高Ni合金<sup>†1</sup>は一般のステンレス鋼に比べ溶断が難しい。そのため、高Ni合金を連続鋳造機にて製造する際、スラブ切断能力の向上は最も重要な技術課題の一つである。比較的Ni含有量の低いステンレス鋼では、鉄粉の燃焼熱を利用してスラブ切断を行っている<sup>†1</sup>。しかし、高Ni合金ではNi含有量の増加にともない、鉄粉による切断が困難になる。熱量の大きいAl粉を鉄粉と併用しても、Table 1に示すごとく、SUS304と比べ5~10倍もの時間を要し、従来の設備では連続鋳造中の切断が不可能である。そのため、機内で全スラブが納まるよう溶鋼重量に制限を設け、鋳造完了後40~50分もかけて慎重に切断するか、場合によっては数人がかりでランスにて切断することを余儀なくされる。また、スラブ切断面は平滑性に劣り、再切断工程が必

要になる問題点もある。そこで、高Ni合金の高速スラブ切断技術を開発することを目的として、高Ni合金の切断特性について調査するとともに、その調査結果をもとに設備改造ならびに切断条件を適正化したので報告する。

## 2. 技術課題

### 2.1 製造工程

Fig. 1に(株)YAKIN川崎(製鋼工場)の製鋼工程を示し、以下に概要を説明する。まず、30 tonもしくは60 ton EFで、スクラップ、Fe-Cr、Fe-Niなどの原料を溶解する。その後AODもしくはVODで、脱炭、脱酸、脱硫後、LFにて温度調整を行う。最終的に、1CCMもしくは2CCMで鋳造し、スラブを製造している。

これらのCCMは垂直型であるため湾曲型に比べ、スラブ切断には以下の2点が不利である。1)機内に納まるスラブの長さが制限されるため、スラブ切断に要する時間が制限される。2)切断方向が地軸に対し垂直であるため、切断中に発生する切断ノロ<sup>†2</sup>を吹き飛ばす能力が低いと切断ノロが切断面に残り切断を妨害する。

### 2.2 スラブ切断のメカニズム

高Ni合金スラブの難切断性の原因を調査するにあたり、スラブ切断のメカニズムを理解することは重要である。そ

Table 1. Typical spent time (in s) for a cut of cast slab in two kinds of alloys.

Alloy	No.1CCM 154mm <sup>†</sup>	No.2CCM 200mm <sup>†</sup>
NW2201	650	2700 or manually cut with a jet lance
SUS304	120	180

平成18年12月27日受付 平成19年3月8日受理 (Received on Dec. 27, 2006; Accepted on Mar. 8, 2007)

\* 日本冶金工業グループ(株)YAKIN川崎製造部 (Production Department, Nippon Yakin Kogyo Group, Yakin Kawasaki Co., Ltd., 4-2 Kojimacho Kawasakiku Kawasaki Kanagawa 210-8558)

\*<sup>2</sup> 日本冶金工業グループ(株)YAKIN川崎技術開発室 (Technology Development Department, Nippon Yakin Kogyo Group, Yakin Kawasaki Co., Ltd.)

†1 本稿では50 mass%以上のNiを含有するFe基またはNi基合金を高Ni合金と呼び、高合金鋼、Ni基合金、純Niを含む。

†2 切断ノロとは気流により飛散したスラグ・溶融金属の混合物として定義する。(Fig. 2参照)

ここで、溶断などの分野での報告書<sup>2,3)</sup>等を参照して、スラブ切断についての現象をまとめ、Fig. 2の模式図を描いた。

スラブ切断装置では、微細な鉄粉またはアルミニウム含有鉄粉（以後パウダーと称する）を、連続的に酸素ガスに混入し供給している。パウダーの燃焼により生じた酸化熱により、被切断材（以後母材と記述する）は発火温度まで加熱され、そこに高純度の酸素を高速で供給すると母材自身の燃焼が起こる。この時、パウダーおよび母材の燃焼により発生した反応熱は、金属および酸化物を溶融させる。そして、酸素の気流によりこれら溶融物が吹き飛ばされ、切断溝が形成される。このような現象が連続的に生じることで母材が切断される。

### 2.3 高Ni合金スラブの難切断性

前節に述べたメカニズムから、スラブ切断に望まれる特性は以下の5項目となる。

- 1) 連続的に母材の燃焼反応を進行させるために、母材の燃焼温度がその融点よりも低いこと。
- 2) 酸化物あるいはスラグが母材より低融点であること。

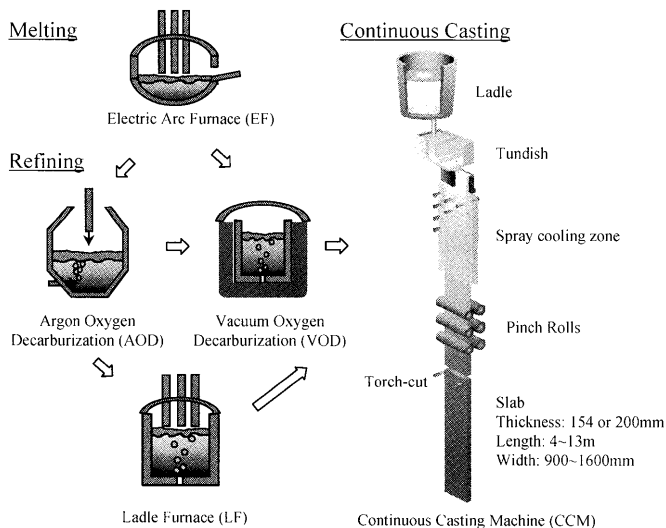


Fig. 1. Steelmaking process.

- 3) 酸化物あるいはスラグの流動性がよく、かつ母材からの剥離性が良いこと。
- 4) 母材成分中に不燃焼物および反応による不純物の生成量が少ないこと。
- 5) 切断酸素の気流が速く、切断反応部における溶融物を十分に排除できること。

これらの項目を高Ni合金のスラブ切断に照合すると、低Niの一般のステンレス鋼に比べ、難切断性を示す要因の一つには、Niは鉄よりも貴な金属のため燃焼しにくく、母材自身の燃焼に関しては不利な点が挙げられる。さらに、Ni含有量の増大に伴いスラブ切断時に生じる酸化物あるいはスラグの性質が変化して切断性が損なわれる可能性もあるが、スラブ切断時に形成する溶融物の挙動に及ぼすNiの影響は不明である。

## 3. 高Ni合金スラブの切断特性

溶融物に及ぼす母材中Ni含有量の影響に着目し、スラブ切断時の切断ノロの調査を行い、高Ni合金の切断特性を検討した。

### 3.1 調査方法

スラブ切断時に発生する切断ノロ (Fig. 3) の調査を行った。母材には、高Ni合金としてNW2201を、比較材にSUS304を使用した。母材の化学成分は、Table 2の通りである。NW2201は鉄粉のみの切断が困難なため、より発熱量の大きいAl含有鉄粉を使用し、45分程度かけて切断した。一方、SUS304ではパウダーとして鉄粉のみを使用し、切断時間2分を要した。切断後に採取した切断ノロ試料について、外観およびマイクロ組織観察、酸化物部分のX線回折、EDSによる酸化物の分析を実施した。

### 3.2 調査結果

#### 3.2.1 切断ノロの外観

Fig. 3から、NW2201のノロは厚くかつ凹凸が多く見ら

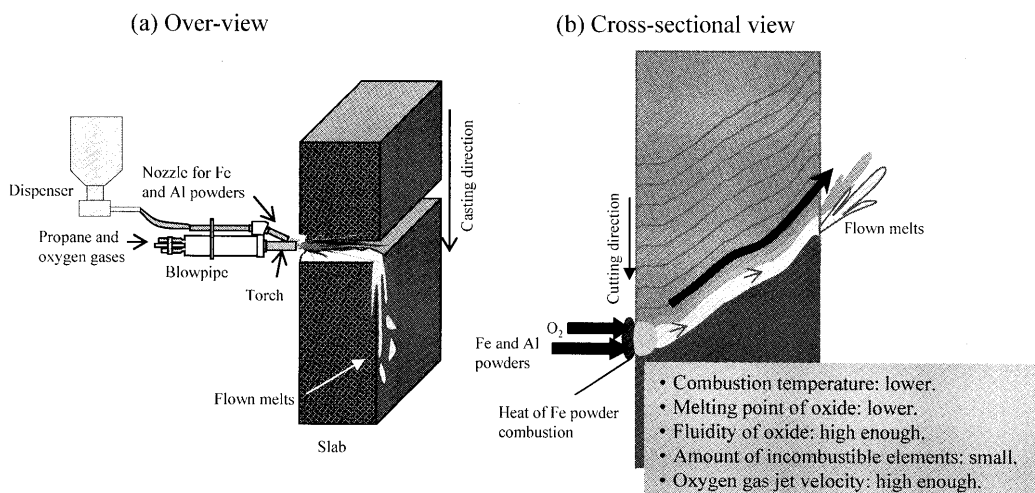


Fig. 2. The principle of cutting slab process. (a) Over-view and (b) cross-sectional view of a torch-cut blowing Fe and Al powders.

れたことから、流動性が悪かったことが推測される。一方、SUS304のノロは細く流れた様相を呈していて、流動性が良かったと推測される。またNW2201はほぼ全体に光沢が見られたのに対し、SUS304のノロは光沢が全く無い。これらの試料を振動ミル(40s)で粉碎したところ、NW2201のノロは重量比で約50%も粉化したが、SUS304のノロは極少量しか粉化せずほとんどが金属質であった。このことから、NW2201のノロはSUS304の場合よりも著しく酸化物量が多かったと言える。

### 3・2・2 切断ノロのマイクロ組織

Fig. 4に、NW2201の切断ノロの断面マイクロ組織を示す。ノロに気泡は比較的少なく、金属光沢のある溶融物であったと考えられるものが幾重にも折り重なって見え、その隙間に酸化物を噛み込んでいる。酸化物をEDSにより分析したところ、高融点(1950°C)のNiOであることがわかった。このNiOは母材の燃焼時に発生した酸化物と思われる。さ

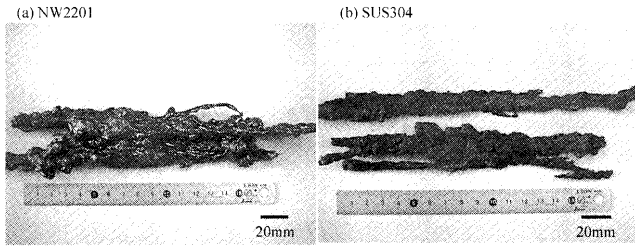


Fig. 3. Appearance of the flown melts after cutting slab in (a) NW2201 and (b) SUS304.

Table 2. Chemical composition and spent time for a cut of slab in the alloys.

Alloy	Powder	Spent time for a cut (s)	Chemical composition (mass%)						
			C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe	
High-Ni alloy	NW2201	Fe and Al	2700	0.01	0.1	0.2	99	0.0	0.1
Stainless steel	SUS304	Fe	120	0.04	0.6	1.1	8.5	18.1	71

らに、金属光沢のある部分をより詳細に観察したところ、酸化物がデンドライト状に多量に分布していることがわかった。これは、酸素が飽和した溶融Niから凝固時に過飽和となり、初晶として晶出したものと考えられる。

Fig. 5に、SUS304の切断ノロの断面マイクロ組織を示す。SUS304の切断ノロには気泡が多数見られ、構成する物質のほとんどが金属であった。量的には少なかったが、シミのような部分が観察された。EDS分析によると、これは高融点(2275°C)のCr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>であることがわかった。

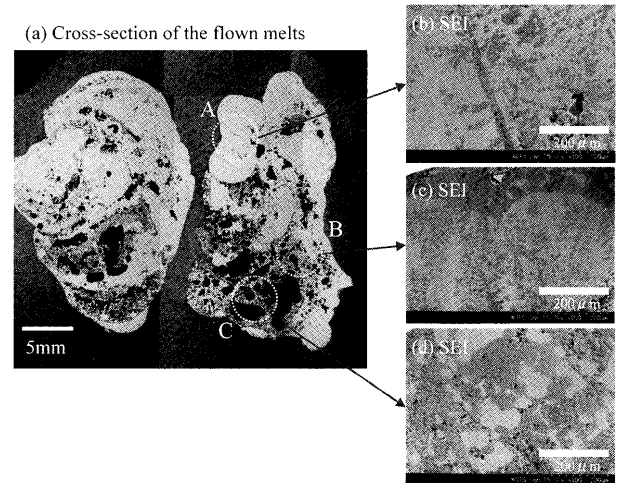


Fig. 4. Microstructure in the cross-section of the flown melts of NW2201. (a) Optical micrograph. (b), (c) and (d) show the magnified SEM images of the part A, B and C, respectively.

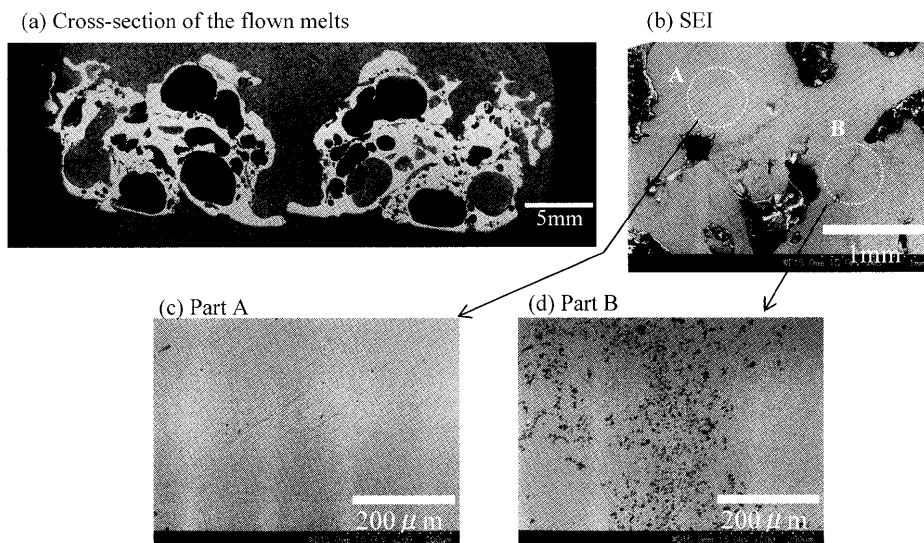


Fig. 5. Microstructure in the cross-section of the flown melts of SUS304. (a) Optical micrograph and (b) SEM image. (c) and (d) show the magnified views of the part A and B in the above SEM, respectively.

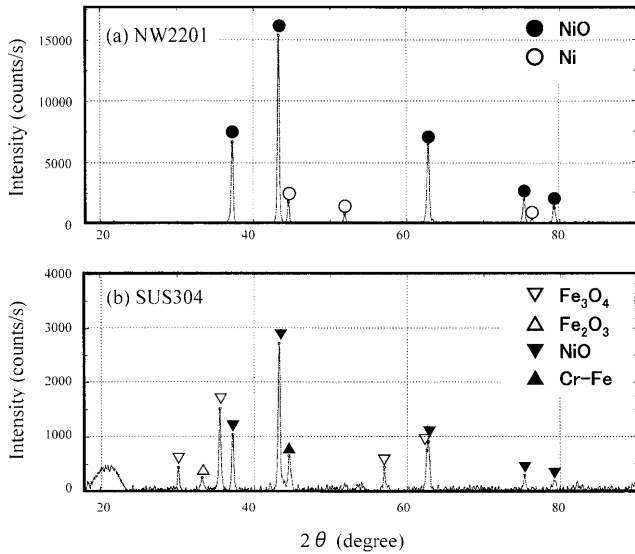


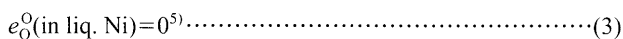
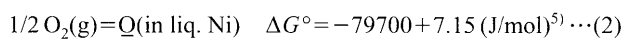
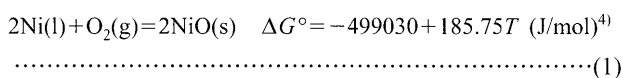
Fig. 6. X-ray diffraction patterns of oxides involved in the flown melts of (a) NW2201 and (b) SUS304.

粉化した切断ノロ試料のX線回折パターンをFig. 6に示す。粉化部分はいずれも酸化物主体であったが、その組成は異なっている。すなわち、NW2201ではNiOのみが存在するのに対し、SUS304では $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ およびNiOが共存する。なお、Fig. 4にて内部に確認された $\text{Cr}_2\text{O}_3$ は、金属部分に含まれていたため、ここには検出されなかったものと考えられる。

### 3.3 考察

#### 3.3.1 溶融Ni中の酸素濃度

前節で説明したとおり、NW2201の切断ノロ中に多量に散在しているデンドライト状のNiOは、酸素によって母材が燃焼し、その場で生成した酸化物というより、酸素が飽和状態に達した溶融Niから、凝固時に晶出したものと考えた。そこで、溶融Ni中の酸素溶解度について熱力学的な検討を行った。計算には、以下の熱力学データを使用した。



(1)式は、溶融Niが燃焼するときの標準自由エネルギー変化である。(2)式は溶融Ni中に、酸素が溶解する反応の自由エネルギー変化である。溶融Ni中の酸素の活量は、mass%を単位とした無限希薄溶液を基準に取っており、NiOの活量は純固体を基準に取っている。また、酸素の活量係数に必要な溶融Ni中における酸素間の相互作用助係数は(3)式を用いた。

(1)~(3)式より、NiO(s)と平衡する酸素濃度を計算し

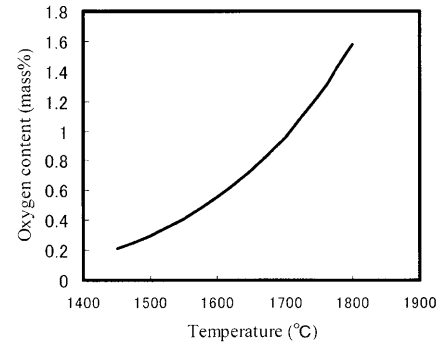


Fig. 7. Oxygen content in molten Ni in equilibrium with solid NiO.

た結果をFig. 7に示す。溶融Niの1550~1650°Cにおける酸素濃度は4000~8000 ppmである。これはFe-18 mass%Cr溶銅が同じ温度範囲で $\text{Cr}_3\text{O}_4(\text{s})$ と平衡する酸素濃度<sup>6)</sup>、300~400 ppmに対し、約10~20倍も高い。さらにNi-O系状態図<sup>7)</sup>から、より高温の2000°Cの溶融Niは約20%もの酸素溶解度がある。このことは、高温で多量に酸素を溶解した溶融Niから、凝固時に、過飽和となった酸素が、初晶であるNiOとして多量に晶出してくることを裏付けている。

#### 3.3.2 高Ni合金スラブの難切断性の要因

以上より、高Ni合金の切断性が劣る理由を、次のように推察することができる。もともとNiは燃焼しにくいことに加え、切断ノロ中に、母材の融点(約1450°C)と比較して非常に高融点なNiOが、多量に懸濁した状態となる。さらに、温度が低下するにしたがって、多量に溶解した酸素がNiOとして晶出し、混合溶融物の見掛けの粘度が高くなる。その結果、この混合物が酸素気流で十分に吹き飛ばされずに母材切断面を覆い、最終的に酸素が母材を燃焼させる反応を妨げ、切断を阻害する。また、この混合溶融物が十分に排除されないために、切断溝に残存して切断面が再結合する可能性も考えられる。

## 4. スラブ切断技術の改善

スラブ切断に長時間を要してしまう理由として、設備上の問題点を以下の通り考えた。

- 1) 流動性に劣るノロを排除するには切断酸素気流が十分ではない。
- 2) 1)の理由により高融点酸化物(NiO)を多量に含むノロが排除できずに、切断表面を覆ってしまい、酸素と母材との反応を妨げ、切断が阻害される。
- 3) 切断酸素気流によって飛散・排除できず切断溝に残存した溶融切断ノロにより、再接合されてしまう。

これらの問題点を全て解決するためには、従来の設備では能力不足であり、以下の改善を実施した。

#### 4.1 改善内容

Fig. 2に示したように、切断装置は、プロパンと酸素ガ

Table 3. Problems and related apparatuses in slab-cutting process.

Problem in process	Factor	Related apparatus
Shortage in heat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low flow rate of gas*</li> <li>• Short supply of powder</li> <li>• Low Al content in powder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blowpipe</li> <li>• Torch</li> <li>• Dispenser</li> <li>• Optimization of gas ratio</li> <li>• Optimization of Al contents in powder</li> </ul>
Difficulty in removing the flown melts from the cut surface	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low flow rate of oxygen gas</li> <li>• Short supply of powder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blowpipe</li> <li>• Torch</li> <li>• Dispenser</li> </ul>

\*Here, gas is defined as a mixture of main oxygen gas, preheated oxygen gas and propane gas.

スを供給し燃焼させる吹管およびAl含有鉄粉を供給するパウダー供給ノズルを主に構成されている。さらに微細な鉄およびアルミニウムパウダーを供給している。従来の切断装置の問題点および改造内容をTable 3にまとめて示す。燃焼ガスおよびパウダーの供給能力を高めて切断能力を向上させるため、吹管本体の構造、吹管先端部の火口構成、および、パウダー供給量を制御するディスペンサーを改造した。さらに、設備改造後は切断ガス圧力と、パウダー中含有Al量の適正化を行った。

4.1.1 切断装置

吹管

Fig. 8に新規に導入した吹管の模式図を示す。酸素量とパウダー量を増やすことで切断時の熱量を増加させ、切断ノロが切断表面を被覆する前に切断するため、パウダー供給ノズルを従来の1本から2本に増設した。また、ノズル増設に伴いガス流速が高まり、切断ノロの排除性も向上した。

火口

Fig. 9に火口を新旧比較して示す。ガス流量とパウダーの燃焼熱量不足を解消するべく、プロパンと予熱酸素の混合性が優れ、ガス流量が大きい構造の火口に変更し、ガス配管内径の最適化も行った。特に、ガス流量とのバランスを種々変化させてテストした結果から、メインの酸素ガス配管径は、従来のφ6mmからφ8mmに変更した。これにより、熔融切断ノロの飛散性に優れた効果が得られた。

ディスペンサー

Fig.10にディスペンサーを新旧比較して示す。パウダーと酸素量のバランスが悪く、不完全燃焼する点を解消するため、パウダー供給方式を、従来の加圧と移送ガスの圧力差制御から、新ディスペンサーではローター制御に変更した。これにより、パウダー量の微調整が可能となった。さらに、各種ガス圧の最適化とパウダーの詰まり防止のために、エジェクターの形状を従来の横向きから下向きに変更した。さらに、先述したパウダー供給ノズルの増設に伴い、パウダーを安定して供給するため、ディスペンサーを従来の2基から4基に増設した。また、プロパン圧力を

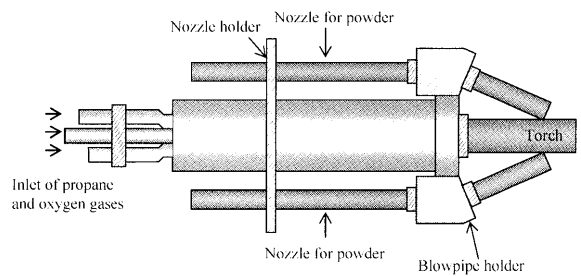


Fig. 8. An improved blowpipe for the torch.

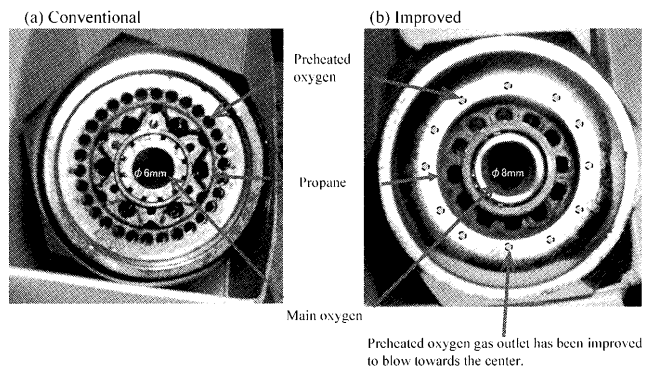


Fig. 9. Appearance of (a) conventional and (b) improved torches.

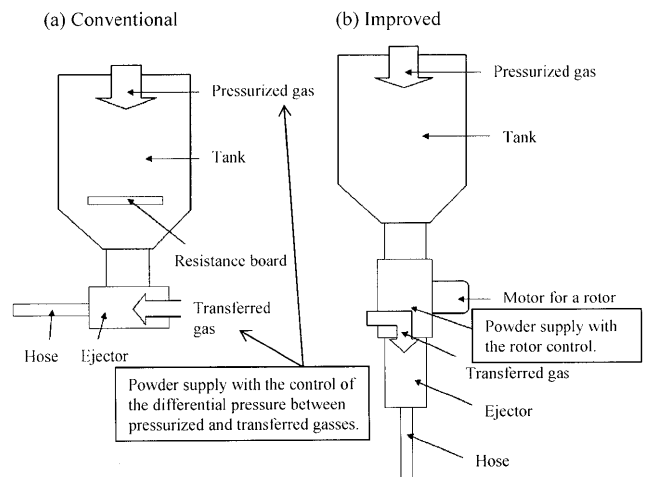


Fig. 10. Illustrations of (a) conventional and (b) improved dispensers demonstrating how to control powder supply.

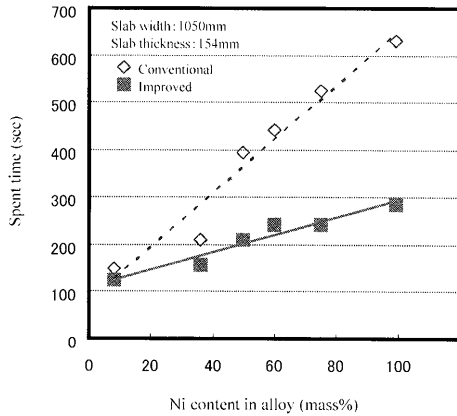


Fig. 11. Effect of the improvement of cutting device on spent time for a cut of slab in various Ni-containing alloys.

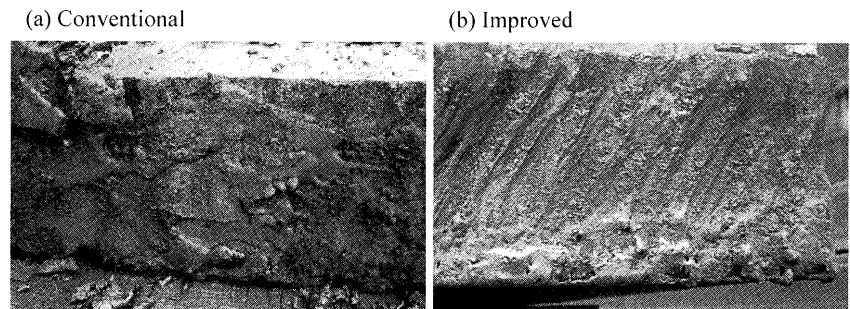


Fig. 12. Cross-section cut with (a) conventional and (b) improved equipments. Both slabs are high-Ni alloy (NW2201) and 154 mm in the thickness.

0.05 MPa一定とし、切斷ガス圧力の比率を変化させて切斷性を評価した結果、切斷酸素圧力0.85 MPa、予熱酸素圧力0.12 MPaの組み合わせが最良であることが判明した。

#### 4.1.2 パウダー

パウダー中の含有Al量が不適切のために、燃焼が不十分になっていた可能性も考えられた。そのため、パウダー中のAl含有量を変化させて切斷時間を測定した。その結果、Al含有量が25%までは、切斷時間が短縮されるが、それ以上ではほぼ一定となった。これより、Al含有量を25%と設定した。

#### 4.2 改善成果

スラブ切斷改善の効果を、切斷時間で評価してFig.11に示す。合金中のNi含有量が高くなるにしたがい、短縮された時間が大きくなり顕著な改善効果が表れている。特に、50 mass%以上のNiを含有する合金種では、従来に比べてスラブ切斷時間が約半分と大幅に短縮した。スラブの切斷面をFig.12に示す。従来のは切斷面はノロを被っており凹凸が大きく平滑性に劣るが、改善後の切斷面は、ドラッグラインが滑らかでかつ凹凸が少ない。

改善の結果、高Ni合金であっても、鋳造中にスラブ切斷が可能となり、それまで設けていた溶鋼重量制限を解除できたため、量産化ならびに生産性向上が実現した。さらに、スラブ切斷面を平滑にするために従来実施していた再切斷工程を省略できるようになった。危険かつ重筋作業であったランス切斷が不要となり、安全性も向上した。

## 5. 結言

溶斷の難しい高Ni合金の連続鋳造中スラブ切斷技術を

開発することを目的として、スラブ切斷性の調査を行い、高速切斷のための設備改善を行った。以下にその結果をまとめる。

(1) 高Ni合金スラブの切斷ノロを調査した結果、切斷ノロ中には多量のNiOが混在していた。このことから、難切斷性の原因には、Niが貴な金属であり燃焼しにくいことに加えて、スラブ切斷時に形成する切斷ノロの流動性が悪いことが考えられた。

(2) 高速切斷のため、切斷装置の吹管について、燃焼ガスおよびパウダーの供給能力を増強した。吹管変更の際し、火口改造、パウダー供給ノズルの増設、ディスペンサー改造を行った。さらに、パウダー中Al含有量を適正化した。これらの改善により、切斷が困難であった高Ni合金スラブが連続鋳造中に切斷可能となり、切斷時間は従来の約半分に短縮された。

本研究を遂行するにあたり、設備改善に多大なるご協力をいただきました、日酸TANAKA(株)鈴置宗朗氏、ならびに、日本スピング(株)大浦省司氏に、厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 第3版鉄鋼便覧II, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1979).
- 2) 溶接・接合技術概論, 溶接学会編, 産報出版, 東京, (1997), 65.
- 3) 鈴木春義: 最新溶接ハンドブック増補版, 山海堂, 東京, (1971), 160.
- 4) 第3版鉄鋼便覧I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1981).
- 5) F.Ishii and S.Ban-ya: *ISIJ Int.*, **36** (1996), 25.
- 6) J.F. Elliott and M.Gleiser: *Thermochemistry for Steelmaking G II*, Pergamon Press, London, (1963), 550.
- 7) H.Okamoto: *J. Phase Equilibria*, **18** (1997), 404.