

# 双ロール式ストリップキャストの開発と商用化

## Development and Commercialization of Twin Roll Strip Caster

松 下 俊 郎 IHI メタルテック株式会社 常務取締役  
中 山 勝 巳 IHI メタルテック株式会社機械技術部 部長代理  
深 瀬 久 彦 株式会社アイメック 工学博士  
長 田 史 郎 株式会社アイメック 業務部 部長

当社は 1982 年に新しい鋼板の製造プロセスであるストリップキャストの開発を開始し、200 mm 幅の casting に成功した。1989 年からオーストラリア BHP 社と共同開発を開始し商用化にめどをつけ、2000 年にアメリカ NUCOR 社と 3 社で Castrip 社を設立した。その後 NUCOR 社から受注した商用 1 号機は、インディアナ工場に建設され、順調に稼働している。0.85 ~ 1.5 mm の超薄鋼板は熱延板・冷延板代替として実用に供され、生産量はすでに 65 万 t に達する。現在、新たに受注した 2 号機の建設を進め、2008 年内の稼働をめざしている。

IHI started development of the strip caster in 1982, and this expanded to the collaboration with BHP of Australia in 1989, which was almost reaching to the success in commercialization. Nucor of the US joined hands with us in 2000 and established the joint corporation, Castrip LLC. The first commercial facility was constructed at the Indiana steel works of Nucor and is now producing low carbon steel strip of 650 000 tons a year. Ultra thin steel strips ( 0.85 to 1.5mm thick ) produced by the caster are now replacing those from the conventional hot/cold strip rolling mills. The strip caster has potential competitiveness in producing value-added products, which cannot be achieved by the conventional rolling processes. IHI has received the order for the second commercial facility to be operated in 2008.

### 1. 緒 言

双ロール式ストリップキャストは、1856 年にヘンリー・ベッセマー卿によって発表された溶鋼を直接薄鋼板に casting する技術である。我が国では 1980 年代後半にニアネットシェイプ技術として鉄鋼メーカ、重工メーカによって盛んに開発が行われ、1990 年代後半には新日本製鐵株式会社やヨーロッパの大手鉄鋼メーカがステンレス鋼を対象として実用化に向けた開発を行ってきた<sup>(1), (2)</sup>。

当社は、1982 年に双ロール式ストリップキャストの開発に着手し、1989 年からオーストラリア BHP 社と共同開発を行い世界で初めて普通鋼のストリップキャストの商用化にめどをつけた。2000 年にアメリカ NUCOR 社を加えた 3 社で合弁会社 Castrip 社を設立し、NUCOR 社より商用ストリップキャスト設備 1 号機を受注した。この商用 1 号機は 2001 年にインディアナ州 NUCOR 社クロフォーズビル製鉄所に建設され、2002 年から稼働しており、これまでに 65 万 t の低炭素鋼板を casting している。0.85 ~ 1.5 mm の超薄鋼板の製品は、熱間圧延鋼板・冷間圧延鋼板に代わって広い範囲で実用化されている。

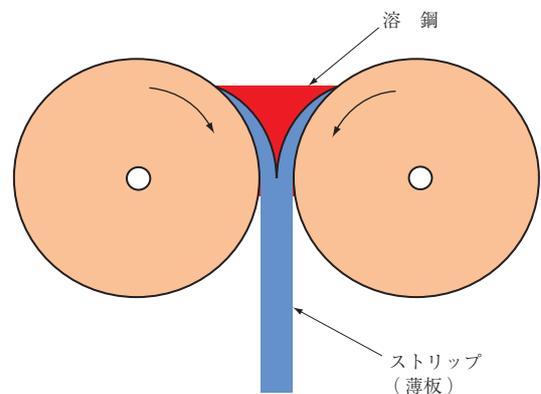
この度当社は、NUCOR 社より商用 2 号機を受注した。この設備は、アーカンソー州ブライズビルに建設され

2008 年内に稼働される予定である。

本稿では、双ロール式ストリップキャストの特長、開発経緯、商用 1 号機の稼働状況ならびに製造された鋼板の特長について、以前筆者が発表した塑性と加工の論文<sup>(3)</sup>ならびに、最近 NUCOR 社の M. Schueren らが AIST で発表した論文<sup>(4)</sup>をもとに紹介する。

### 2. 双ロール式ストリップキャストの原理と特長

双ロール式ストリップキャストとは、第 1 図に示すように冷却された 2 本の回転するロール間に溜められた溶鋼が、凝固されながらロールニップで圧着され連続的にス



第 1 図 双ロール式ストリップキャスト原理図  
Fig. 1 Principle of twin roll strip caster

トリップを製造する技術である。スラブ連铸は、铸型にパウダと潤滑剤が塗布され固まったスラブを振動させながら徐々に引き抜いていくが、双ロール铸造プロセスでは、パウダや潤滑剤を使用せず溶鋼が直接回転する铸型（ロール）に挟まれ、高速で薄い鋼板となる。第1表に示すように、基本的铸造パラメータは、スラブ連铸とは大きな違いがあることが分かる。双ロール式ストリップキャストは、凝固時間が非常に短く、熱流束が極めて高いことが特長である。このため薄板を高速で製造することが可能であり、生産性の高い魅力的な製法である。反面、短時間で凝固コントロールすることと铸型に掛かる過大な熱負荷を克服することが、この製法の難しい技術課題である。近年、

高速コンピュータ、先進的な材料、初期凝固の基礎研究、それに工業的な铸造ノウハウが合体して商業的技術革新開発の基礎ができた。この10年間のブレイクスルーのためにキーとなった論文を参考文献に記載した<sup>(5)~(8)</sup>。

第2図に示すとおり、ストリップキャストは加熱炉、複数の圧延機が不要で、設備長さが従来方式の1/10のため、設備費が安く、消費エネルギーが少なくて済む。第2表に示すように、エネルギー消費量と二酸化炭素発生量が大幅に少ないため、地球環境にやさしく、これからの時代ニーズにマッチした設備となっている。

### 3. 開発経緯と Castrip 社設立

当社は、1982年から開発着手し、200mm幅の炭素鋼・ステンレス鋼のストリップを製作した（第3図）。1989

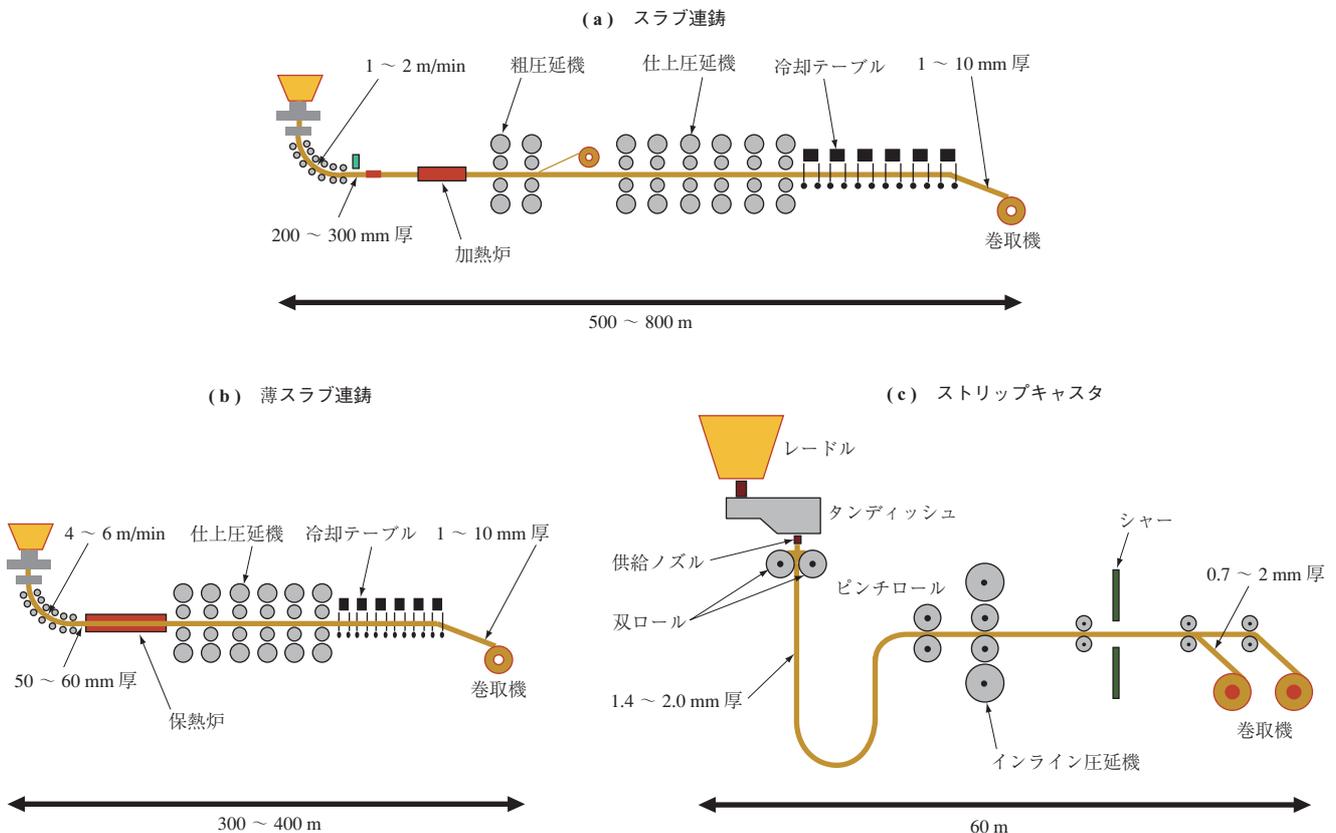
第1表 各铸造方式の基本特性  
Table 1 Basic casting parameters

|        | 単位                | ストリップキャスト | 薄スラブ連铸           | 厚スラブ連铸             |
|--------|-------------------|-----------|------------------|--------------------|
| 厚さ     | mm                | 1.6       | 50               | 220                |
| 铸造速度   | m/min             | 80        | 6                | 2                  |
| 平均熱流束  | MW/m <sup>2</sup> | 14        | 2.5              | 1.0                |
| 凝固時間   | s                 | 0.15      | 45 <sup>*1</sup> | 1070 <sup>*2</sup> |
| 平均冷却速度 | ℃/s               | 1700      | 50               | 12                 |

(注) \*1 : K factor = 29  
\*2 : K factor = 26  
K factor : 凝固定数

第2表 エネルギー消費量と二酸化炭素発生量の比較  
Table 2 Comparison between energy consumption and carbon dioxide generation

|                    | エネルギー消費量 (GJ/t) | CO <sub>2</sub> 発生量 (t) |
|--------------------|-----------------|-------------------------|
| 厚スラブ連铸機+熱間圧延機      | 1.80            | 0.20                    |
| 薄スラブ連铸機+熱間圧延機      | 1.08            | 0.14                    |
| ストリップキャスト+インライン圧延機 | 0.20            | 0.04                    |

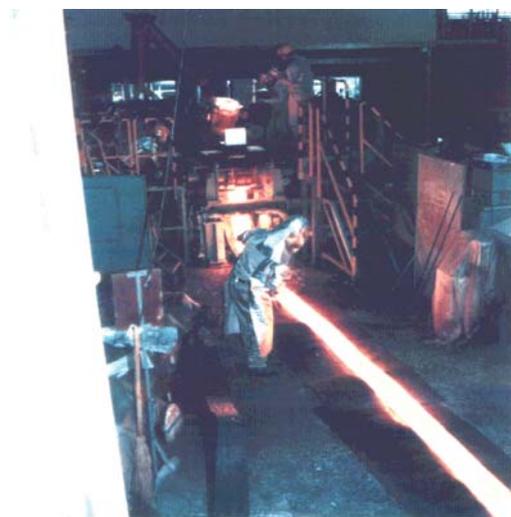


第2図 各連続铸造方式の比較  
Fig. 2 Schematic diagram of slab caster, thin slab caster and strip caster

年にオーストラリア BHP 社（現 BSL 社）と共同研究を開始し、BHP 社ウナンデラ製鉄所の 1 300 mm 幅、5 t 規模のパイロットプラントで、ステンレス鋼および低炭素鋼の鑄造に成功した（第 4 図）。その後、1995 年に BHP 社ポートケンプラ製鉄所に 60 t 電気炉をもつ商用規模開発機を建設し、実証試験を行った（第 5 図）。1999 年までに低炭素鋼を 34 000 t 鑄造し、インライン圧延で 1 mm 厚のコイルを製造し（第 6 図）、屋根材に使用され、商用化にめどをつけた。2000 年にアメリカの NUCOR 社を加えた 3 社で、ストリップキャストのライセンス販売を目的とする合弁会社として Castrip 社を設立し、その商用 1 号機を NUCOR 社のクロフォーズビル製鉄所に建設することを決定した。ここは、奇しくも世界で初めて薄スラブ



第 5 図 BHP 社での商用規模開発機  
Fig. 5 Prototype for Commercialization at BHP



第 3 図 IHI でのストリップキャスト実験機  
Fig. 3 Strip casting experiment at IHI



第 6 図 インライン圧延された板厚 1 mm のコイル  
Fig. 6 1 mm thick coil by inline rolling

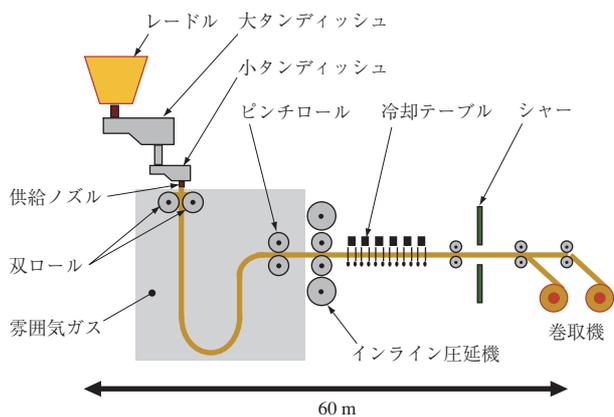


第 4 図 BHP 社でのパイロットプラント  
Fig. 4 Pilot plant at BHP

キャスト商用機を導入した製鉄所であり、新たな双ロール式ストリップキャストの商用機の歴史も同じ製鉄所からスタートすることとなった。

#### 4. IHI・BHP 社商用規模機での開発

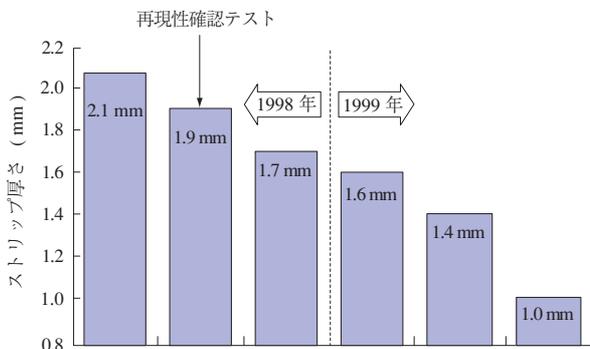
第 7 図に開発機概念図と主仕様を示す。厚み 2 mm 以下の炭素鋼薄板を目標にしたため、鑄造ロールが 500 mm と他社に比べ際立って小径である。このため鑄造ロールは、軽量でコストが安く、制御応答が速く、ロール交換も容易である。さらにサイドダムも小さくて済むので、ランニングコストも低く、制御の点からもメリットがある。またダミーバーなしの鑄造方式であるのでスタート・ストップも容易である。4 段圧延機は、圧延荷重が 3 000 t で、自動板厚制御装置を備えている。後続のランアウトテーブルではストリップを冷却し、ドラムシャー、



(注) 鋼種：低炭素鋼 (Si/Mn キルド鋼)  
 レードル：60 t  
 双ロール径：500 mm  
 铸造速度：最大 150 m/min (代表的には 80 m/min)  
 ストリップ厚み：2.1 ~ 0.7 mm  
 ストリップ幅：1 000 ~ 2 000 mm (主に 1 345 mm)  
 コイルサイズ：25 t (2×40 t 巻取機)  
 生産能力：300 000 ~ 500 000 t

第 7 図 商用規模開発機概念図と主仕様  
 Fig. 7 Schematic diagram and specifications of prototype

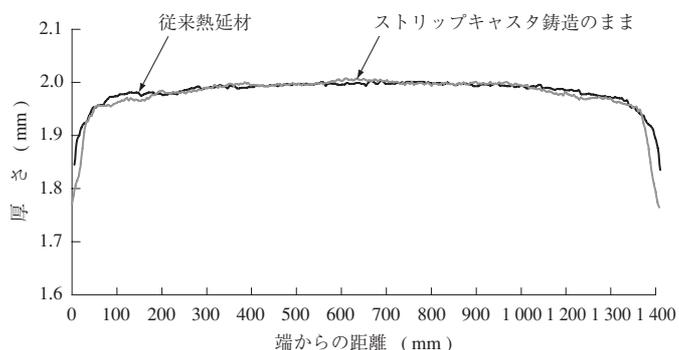
2 基の巻取機で連続的に製造する。この開発機で行ったシリコンキルド低炭素鋼による開発経緯を第 8 図に示す。铸造板厚 1.9 mm では、同一条件で 29 回の再現テストを行い、それぞれレードルを完铸し、運転の信頼性を確認した。また 80 m/min で 1.4 mm の薄板を铸造し、1 mm までインライン圧延したコイルを製造した。第 9 図に開発機で製造されたコイルの良好な端部形状を示す。第 10 図は、As Cast 材が従来熱延材と同等の板厚精度であることを示す。酸化スケール厚さは 6 μm 程度で、従来熱延材と同等であった。第 11 図は、インライン圧下率を上げるほど結晶粒が微細になることを示す。第 3 表に示すように、機械的性質は、铸造速度と圧下率によって調整することができる。また第 12 図に示すとおり、ランアウトテーブル



第 8 図 铸造板厚の開発経緯  
 Fig. 8 History of casting thickness

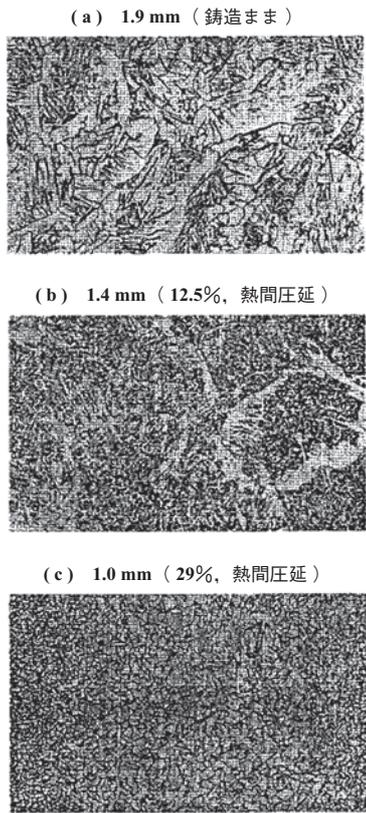


第 9 図 商用規模開発機で製造されたコイル端部  
 Fig. 9 Coil edge produced by prototype



第 10 図 As cast 材と従来熱延材との幅方向板厚分布  
 Fig. 10 Thickness distributions of As cast strip and conventional strip by hot strip mill

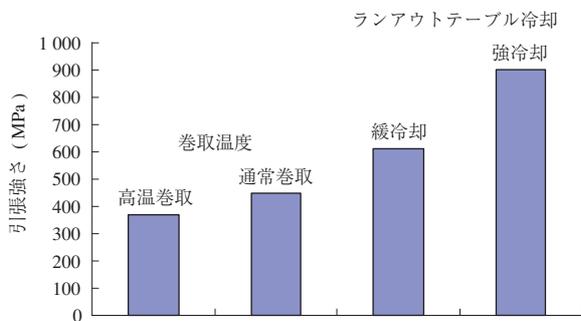
の冷却条件、巻取温度を変えることで、化学成分を変えることなく高強度材から降伏応力は低いが高い伸びをもつ材料までを作り分けることができる。さらに従来熱間圧延材では、粒界割れを生じさせるため厳しく制限されている Cu, Sn の基準値を大幅に上回る Cu 0.4%, Sn 0.2% でも、铸造しても割れは見られなかった。ストリップキャストでは急凝固のため、粒界に Cu や Sn が析出しにくいと考えられる。今後、スクラップの Cu, Sn の濃度が高まる傾向が予想されることから、ストリップキャストは、従来プロセスに比べ大きなメリットとなる。Cu は強度を高め耐候性ももたらす効果がある。第 13 図に示すように同一化学成分で、さらに有害と思われた不純物を逆に強みにして、従来材工法より遥かに幅広い範囲の鋼板を製造することが期待できる。第 14 図、第 15 図には、冷延・メッキ・ロール成形した後、建材や家具製品に加工された例である。第 16 図、第 17 図は、As Cast 材をドラム缶と電線管に加工したものを示し、溶接性に問題がないことを確認した。



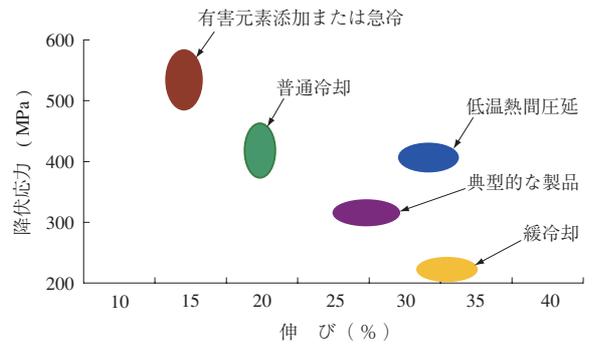
第 11 図 圧下率の違いによる結晶組織  
Fig. 11 Reduction rates and grain sizes

第 3 表 機械的性質  
Table 3 Mechanical properties

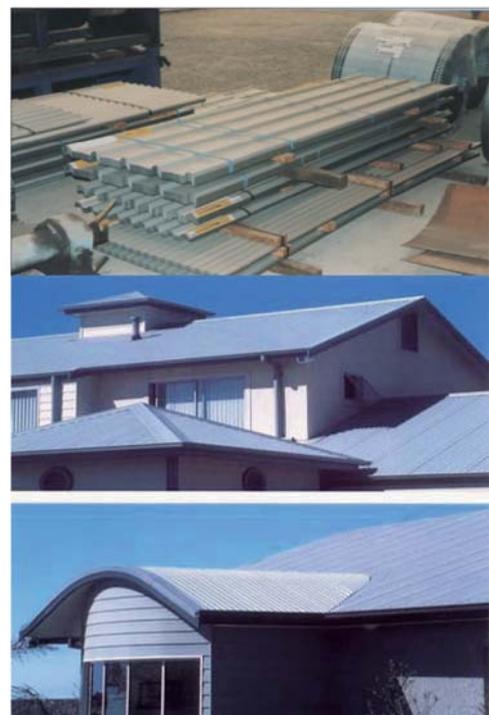
|            | 単 位   | ストリップキャストイング |     |       |       | 熱間圧延        |
|------------|-------|--------------|-----|-------|-------|-------------|
| 鑄 造 速 度    | m/min | 45           | 80  | 80    | 80    | —           |
| 鑄 造 厚 さ    | mm    | 1.9          | 1.6 | 1.6   | 1.4   | —           |
| インライン圧延圧下率 | %     | 0            | 0   | 13    | 29    | —           |
| 最 終 板 厚    | mm    | 1.9          | 1.6 | 1.4   | 1     | 2           |
| 圧 延 温 度    | ℃     | —            | —   | 1 050 | 1 050 | 1 200 ~ 850 |
| 降 伏 応 力    | MPa   | 280          | 300 | 300   | 320   | 250 ~ 360   |
| 引 張 強 さ    | MPa   | 420          | 440 | 440   | 450   | 320 ~ 440   |
| 伸 び        | %     | 28           | 26  | 26    | 28    | 22 ~ 35     |



第 12 図 冷却テーブル冷却条件・巻取温度と引張強さの関係  
Fig. 12 Relationship between cooling conditions on the run-out table, coiling temperature and the tensile strength



第 13 図 幅広い機械的性質が得られるストリップキャスト材  
Fig. 13 Wide mechanical properties from strip casting



第 14 図 ストリップキャスト材で製作された建材と屋根  
Fig. 14 Construction use material and roofing made from strip casting materials



第 15 図 ストリップキャスト材で製作されたテーブルと椅子  
Fig. 15 Table and chair made from strip casting materials



第 16 図 As cast 材から製作されたドラム缶  
Fig. 16 Drum can made from As cast strip

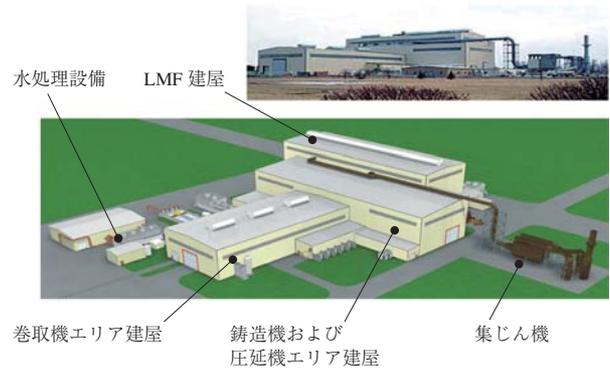


第 17 図 As cast 材から製作された電線管  
Fig. 17 Electric welded pipes made from As cast strip

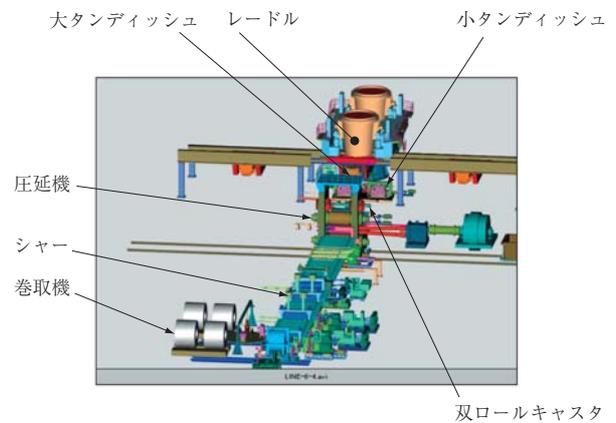
## 5. NUCOR 社向け商用 1 号機

BHP 社に設置されていた開発機を NUCOR 社クロフォーズビル製鉄所に移設し、Castrip 社がライセンスを与えた商用 1 号機として 2001 年 2 月から建設を開始した。第 18 図に CASTRIP 工場外観を示す。

第 19 図に CASTRIP 設備（Castrip 社がライセンスしたストリップキャストイング設備）を示す。レードルサイズは、110 t である。既設の薄スラブ連铸機とレードルとタンディッシュを共用している。電気炉工場は 500 m 離れており、トラックで溶鋼を CASTRIP 設備に運搬する。主铸造設備に付帯する製鋼調整設備として、真空脱ガス設備（Vacuum Tank Degasser：VTD）とレードル冶金調整炉（Ladle Metallurgy Furnace：LMF）を備えている。両者は、CASTRIP 設備建屋内にあり、溶鋼の成分調整と、キャストへの供給温度調整を行っている。タンディッシュは、小



第 18 図 NUCOR 社クロフォーズビル CASTRIP 工場  
Fig. 18 NUCOR Crawfordsville CASTRIP workshop



第 19 図 NUCOR 社クロフォーズ製鉄所の CASTRIP（ストリップキャストイング商用機）  
Fig. 19 CASTRIP (Commercial strip casting facility) of NUCOR Crawfordsville

タンディッシュ（Transition Piece：TP）の真上にセットされる。TP は、溶鋼の鉄静圧を減少させ、铸造ロールの幅方向の流量分布を均一にする役目を果たす。双ロール間に配置されているコアノズルが、TP からの溶鋼を受け、溶鋼プールに浸せきされる。铸造速度は、通常 50 ～ 100 m/min で行っており、ストリップの厚さは、1.1 ～ 2.0 mm である。インライン圧延機は、50% の圧下能力をもっており、通常は 30% 以下で運転されている。製造されたコイルは、最終工程や客先へ出荷される前に、24 ～ 48 時間冷却される。第 4 表に設備仕様を示す。

第 20 図は、連続铸造間におけるレードル交換を示している。注ぎ終わった空のレードルが右上のライン外へ旋回され、溶鋼で満たされたレードルが铸造位置にセットされようとしている。

クロフォーズビルの CASTRIP 設備の最初の铸造は、2002 年 5 月で、その時からより幅広いマーケットに供給

第 4 表 NUCOR 社クロフォーズビル CASTRIP 仕様  
Table 4 Specifications of NUCOR Crawfordsville CASTRIP

| ユニット       | 単位    | 仕様                         |
|------------|-------|----------------------------|
| レードルサイズ    | t     | 110                        |
| 鑄造方式       | mm    | φ500 双ロール                  |
| 鑄造速度       | m/min | 80 (標準), 150 (最大)          |
| 製品厚さ       | mm    | 0.7 ~ 2.0                  |
| 製品幅        | mm    | 2 000 (最大)                 |
| コイルサイズ     | t     | 25                         |
| インライン圧延機   | —     | 4 段圧延機油圧 AGC 付<br>シングルスタンド |
| ワークロール径    | mm    | 475×2 050                  |
| バックアップロール径 | mm    | 1 550×2 050                |
| 圧延力        | MN    | 30 (最大)                    |
| 主モータ       | kW    | 3 500                      |
| 冷却テーブル     | —     | 10 ヘッダー (上下とも)             |
| 巻取機サイズ     | t     | 2×40 t コイラ                 |
| マンドレル径     | mm    | φ760                       |
| 生産能力       | t/y   | ~ 500 000                  |



第 20 図 NUCOR 社クロフォーズビルの CASTRIP プラントでの鑄造中のレードル交換

Fig. 20 Ladle exchange during casting at the CASTRIP plant at NUCOR Crawfordsville

するため鑄造上、操業上の問題を解決し、生産量を積み重ね、2007 年末で 65 万 t に達している。生産量の増加に伴い、通常 3 レードル連続鑄造を実施中である。2007 年 12 月には、最長連続鑄造記録を 3 度も塗り替え、24 レードル、38 時間、鑄造トン数 2 467 t の最長記録を達成し、2 387 t のコイルを出荷した。

CASTRIP プロセスから製造される超薄鋼板 (Ultra thin Cast Strip : UCS) は、従来の熱間圧延鋼板、冷間圧延鋼板とは工法が異なるため、市場から認知してもらうため 2004 年 9 月に、ASTM (American Society for Testing and Materials) から双ロール鑄造プロセスで製造された鋼板用に、新規格「A1039/A1039M-04」を取得した。第 21 図

に CASTRIP プロセスで製造された最近の製品の全体像を示す。グラフ図中に注釈されているように、熱延材の最小厚みは 0.05 インチ (1.27 mm) である。より薄い板厚は、通常冷間圧延鋼板として供給されるものである。図中の文字 A ~ E は、以下の製品範囲を示している。

A : 鋼製枠材と構造用デッキ材

厚さ 0.035 ~ 0.04 インチ。通常は冷間圧延後亜鉛メッキされるが、CASTRIP プロセスでは冷間圧延なしで供給される。

B : ラックと枠材

厚さ 0.043 ~ 0.046 インチ。冷間圧延高強度低炭素鋼の代替品として使用される UCS はラック部品として溶接性がより優れている。

C : 枠材

グレード (強度) 50 の厚さ 0.043 ~ 0.055 インチ。建設用枠材の用途が増すにつれ、より高強度グレードの製品が求められ、この要求にこたえている。亜鉛メッキにも対応が可能である。

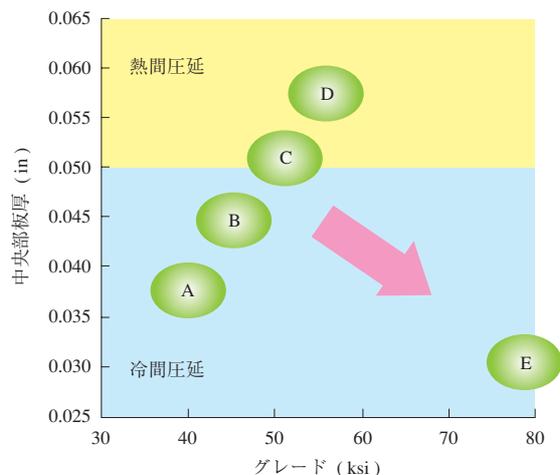
D : 構造用母屋桁およびラック材

厚さ 0.055 ~ 0.06 インチ。両方とも降伏応力 55 ksi (380 MPa) 以上で、中程度の成形性を満足する。

E : 枠材

軽圧下冷間圧延 UCS 材は伸び 10% 以上で、グレード 80 を示す。住宅用鋼製枠材として優れた性質もっている。

生産量増加と市場範囲拡大の要求によって、プロセス、品質など課題について、現地の NUCOR 社、BSL 社の技



第 21 図 CASTRIP プロセスで製造された代表的な製品の板厚とグレード

Fig. 21 Gauge and grade ranges by typical products by the CASTRIP process

術陣と当社が協力、分担し、解決に当たった。 castingに悪影響を与える水素と窒素は、VDTを設置することで、満足できるレベルにできた。溶鋼の成分・温度・介在物・流量制御、 castingロールエリアの改善、 鋳片の表面品質改善、UCSの形状・板厚精度改善などを行い要求にこたえた。

## 6. 結 言

約150年前に考案された双ロール式ストリップキャストを当社が開発を手がけ、BHP社(現BSL社)と共同で商用規模に育て、NUCOR社と3社でCastrip社を設立し、製品を市場に供給できる商用機に完成させた。クロフォーズビルのCASTRIP設備は、低炭素鋼の超薄鋼板を今までに65万t生産した。UCS製品の性質は、従来熱間圧延プロセスから製造される低炭素鋼板が適用される範囲に匹敵する。最近のクロフォーズビルの casting戦略は、製品の適用範囲を広げることに焦点を当てている。平行してNUCOR社の2号機CASTRIP設備をアーカンソー州ブライズビルのNUCOR/YAMATOに建設中である。UCS製品は、ユニークなプロセスルートであるため、従来圧延プロセス経由では製造できない付加価値のある製品を製造できるポテンシャルをもっている。Castrip社はCASTRIPプロセスのポテンシャルをフルに実現するため、新しいグレードの鋼板を castingする開発に取り掛かっている。

当社は、高炉大型製鉄所とは異なり、比較的場所を選ばず、少ない初期投資費用で、省エネのニアネットシェイプ製品を製造するCASTRIP設備の独占的製造権を保有している。地球環境にやさしいこの設備は、今後世界各地に受け入れられると思われる。

最後に、ストリップキャストの技術開発に多大な貢献をして頂いた技術開発本部ならびに当社を退職された諸先輩に謝意を表す。

## 参 考 文 献

(1) M. Yamada, K. Isogami, H. Hosoda, H.

Nakashima, M. Okimori and K. Sasaki : World's first commercial twin-drum strip casting process at Hikari works of Nippon Steel Corporation ECCC 第4回欧州連铸大会講演集 2002年10月 pp. 891 - 900

(2) G. Hohenbichler, P. Tolve, R. Capotosti and J. M. Damasse : U. Albrecht-Fruh : Eurostrip Direct strip casting of carbon and stainless steels latest results from Termi and Krefeld ECCC 第4回欧州連铸大会講演集 2002年10月 pp. 869 - 881

(3) 長田史郎 : 普通鋼ストリップキャストの開発 塑性と加工 Vol. 44 No. 508 2003年5月 pp. 489 - 495

(4) M. Schueren, P. Campbell, W. Blejde and R. Mahapatra : The CASTRIP process - An update on process development at Nucor steel's first commercial strip casting facility AISTech Indianapolis USA (2007.5)

(5) W. Blejde, H. Fukase and R. Mahapatra : Recent development in project M the joint development of low carbon steel strip casting by BHP and IHI METEC Congress (1999)

(6) W. Blejde, R. Mahapatra and H. Fukase : Application of fundamental research at project M IIS Belton Memorial Symposium (2000.1)

(7) W. Blejde, R. Mahapatra and H. Fukase : Development of low carbon thin strip production capability at project M ISS 83rd Steelmaking conference Pittsberg (2000.3)

(8) P. Campbell, G. Gillen, W. Blejde and R. Mahapatra : The CASTRIP process for twin-roll casting of steel\_Start-up experience at Nucor's Crawfordsville plant ECCC 第4回欧州連铸大会講演集 2002年10月 pp. 882 - 890