

和歌山製鉄所における凝固末期冷却技術による ラウンドCC鑄片の内部品質改善*1

Improvement of Inner Quality of Continuous Cast Round Billet by FCR Technology at Wakayama Works

西岡 亮*
Ryo NISHIOKA

永井 真二
Shinji NAGAI

吉廣 望
Nozomu YOSHIHIRO

藤原 道丈
Michitake FUJIWARA

塚口 友一
Yuichi TSUKAGUCHI

抄 録

和歌山製鉄所では、使用環境の厳しいエネルギー関連のラインパイプ、油井管向けのシームレスパイプを製造している。これらの製品は、ラウンドCC鑄造のビレットを用いて製造される。鑄造時には、ビレット中心に生成する中疵（軸心割れ）による製管中疵発生が品質上の問題となる。その対策として、ここでは凝固末期冷却技術（FCR：Final Compressive cooling for Round billet）について、その最適条件を明らかにした。第一には、最終凝固位置をFCRゾーンに合わせるための鑄造速度調整を行った。更に、310mm径以上の、大径ビレットへのFCR適用に際しては、表面温度低下に伴う $\gamma \rightarrow \alpha$ 膨張変態による中心部での引張応力発生により、内質の悪化が生じることを見出した。そのため、冷却条件の更なる最適化を行い、製管工程での中疵発生率の大幅減を達成した。

Abstract

Seamless pipes for energy-related line pipes and Oil Country Tubular Goods (OCTG), used in a severe environment, are manufactured at Wakayama Works. These products are manufactured using round CC cast billets. At the casting process, the occurrence of internal defects at billet center (axial cracks) becomes defects at pipe forming process and quality problems. As a countermeasure, the optimum conditions for the final solidification cooling technology (FCR: Final Compressive cooling for Round billet) were clarified here. First, the casting speed was adjusted to match the final solidification position with the FCR zone. Furthermore, when applying FCR to larger diameter billets with a diameter of 310 mm or more, it was found that the internal quality deteriorates due to the generation of tensile stress at the center due to the $\gamma \rightarrow \alpha$ expansion transformation accompanied by the decrease in surface temperature. Therefore, further optimization of cooling conditions was performed. As a result, we achieved a significant reduction in the incidence of cracks in the pipe making process.

1. 緒 言

ラウンド連続鑄造（以下CCと略す）鑄片から製造したラインパイプにおいては、ビレット中疵（軸心割れ）による製管中疵発生が課題である。そこで、ラインパイプの更なる内部品質（内質）改善技術開発に取り組み、顕著な改善効果を確認した。

2. 背 景

2.1 和歌山製鉄所ラウンドCCアズキャストにおけるシームレスパイプ製造プロセス

図1に日本製鉄(株)和歌山製鉄所のラウンドCCアズキャストにおけるシームレスパイプ製造プロセス概要を示す。和歌山製鉄所ではKanbara reactor (KR) - 脱りん炉 - 脱炭炉 - 真空脱ガス (RH) - 連続鑄造の製鋼プロセスの後、直結した製管工場にてパイプが製造される。

*1 日本鉄鋼協会 製鋼部会 第156回部会大会発表資料を転載

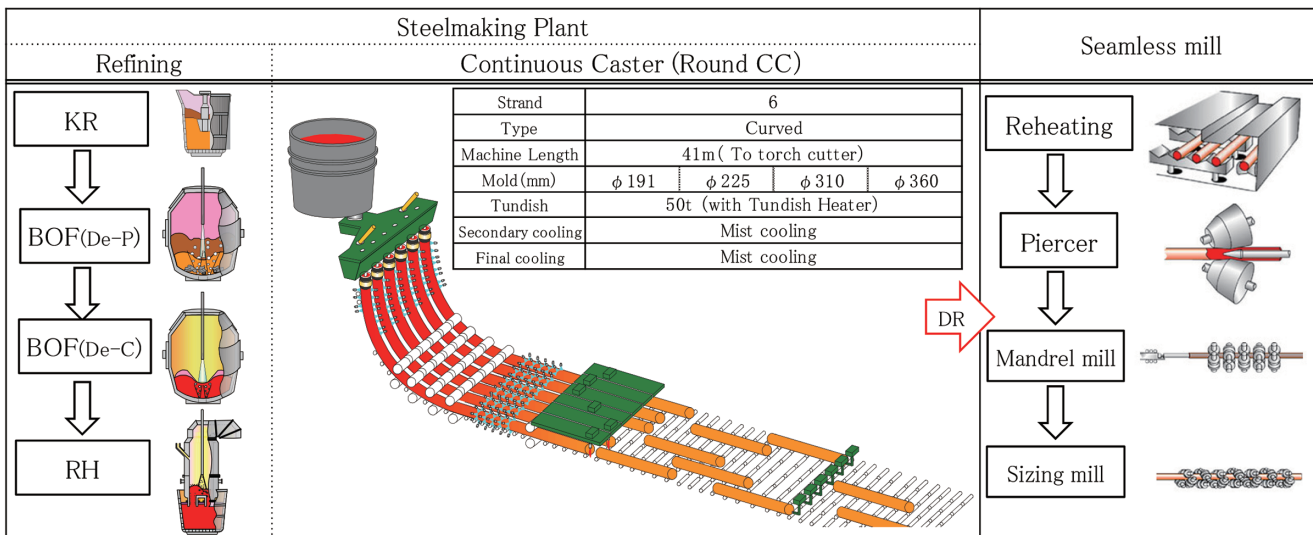


図1 和歌山製鉄所アズキャストにおけるシームレスパイプ製造プロセス (中径製管向け)
Seamless pipe manufacturing process in Wakayama Works (medium size seamless pipe from cast billet)

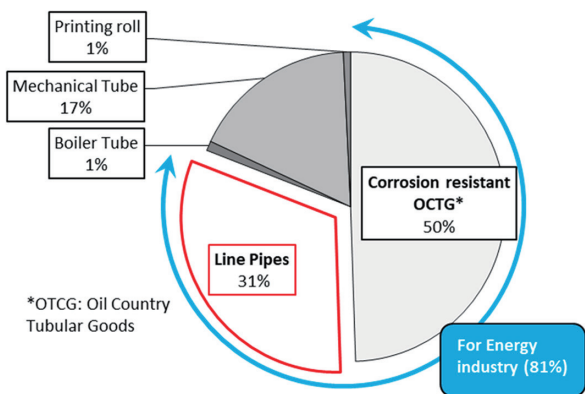


図2 和歌山製鉄所シームレスパイプのプロダクトミックス
Product configuration of seamless pipe at Wakayama Works

2.2 和歌山製鉄所シームレスパイプの概要

図2に和歌山製鉄所シームレスパイプのプロダクトミックスを示す。全体の約80%はエネルギー関係(ラインパイプ、耐食性油井管)が占める。その中で、ラインパイプは石油、天然ガスの輸送用パイプとして使用される。図3にラインパイプの特徴を示すが、ラインパイプは設置環境に応じて幅広いサイズが求められる。また、設置場所が深海、寒冷地である点および、パイプ接続に伴う溶接部の韌性低下に対応するために高韌性が求められ、低炭素材質([C]=0.05~0.07mass%)が使用される。

3. ラインパイプの品質課題と対策

図4にラインパイプ用アズキャストビレットの中疵形態を示す。中疵は軸心部に放射状に広がる割れ形態である(軸心割れ)。図5にフェライト凝固温度範囲りと軸心割れ長さの関係を示す。軸心割れは脆弱なフェライト層に沿って進展する。そのため、フェライト凝固温度範囲が大きい、低炭素鋼にて軸心割れは大きくなる。

図6にラウンドCCアズキャストプロセスにおける制約

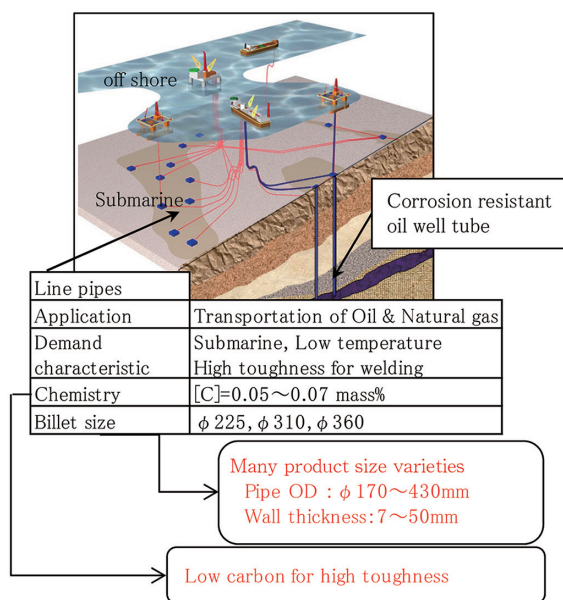


図3 エネルギー関係シームレスパイプの用途
End use of seamless pipe

と軸心割れの発生メカニズムを示す。ラウンドCCでは、製管トラブル回避のため、断面形状(真円度)の厳格管理が必要であり、ロールでの機械的圧下が困難である。そのため、最終凝固位置にて残存した未凝固部の凝固収縮に伴って、中心部に引張応力が発生する。その結果、脆弱なフェライト相に沿って軸心割れが発生する。

4. 模擬試験による凝固末期冷却技術の基礎特性把握

4.1 凝固末期冷却技術概要

断面形状に影響を与えない内質改善技術として、図7に示す凝固末期冷却技術(FCR: Final Compressive cooling for Round billet)^{2,4)}に注目した。FCRは最終凝固位置にて表面を急冷する技術である。急冷によって、表層部で熱収縮を

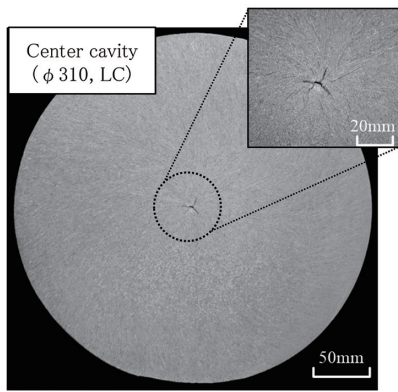


図4 ビレット(低炭材)中疵形態(軸心割れ)
Feature of internal defect of billet (center cavity, low carbon steel)

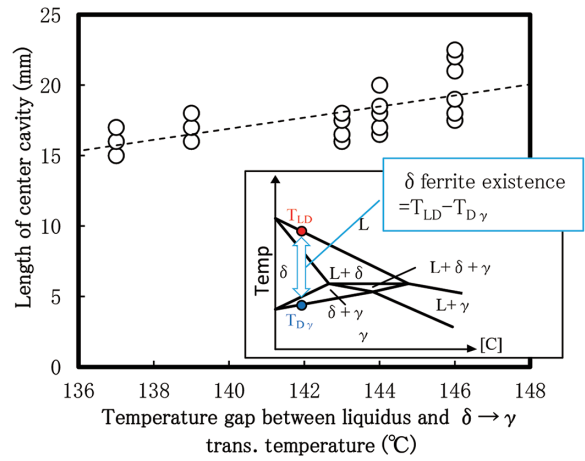


図5 フェライト凝固温度範囲 - 軸心割れ長さ関係^{1,2)}
Relation between temperature range of δ ferrite existence temperature and center cavity length

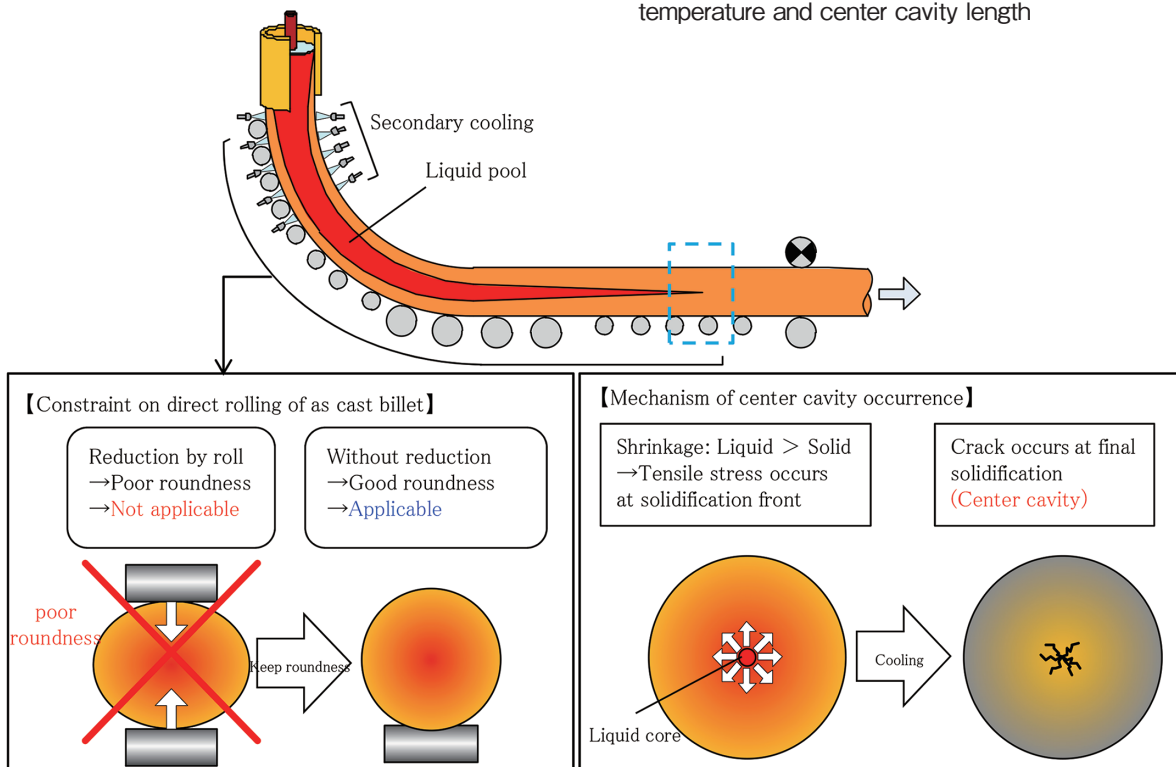


図6 ラウンド CC における制約と軸心割れ発生メカニズム
Constraint on direct rolling of as cast billet and mechanism of center cavity occurrence

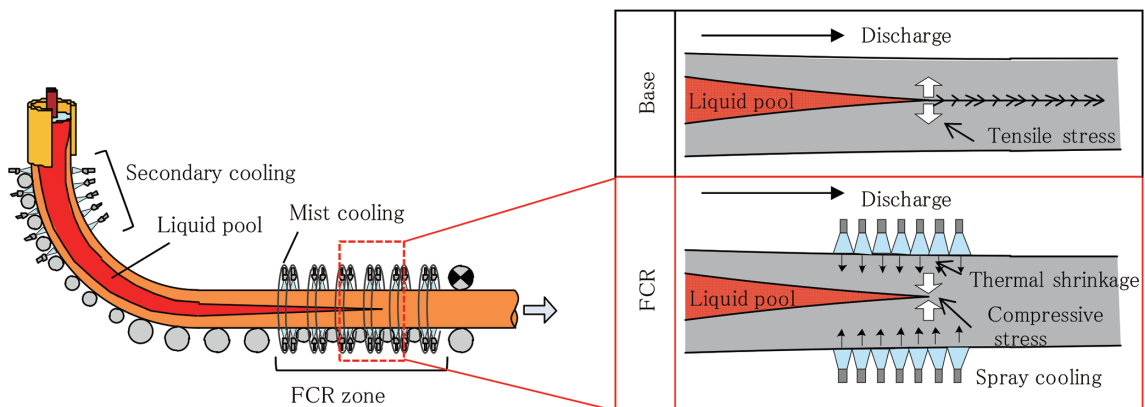


図7 ラウンド CC FCR 設備概要
Schematic drawing of FCR

発生させることで、中心部に圧縮応力を発生させて軸心割れを抑制する。また、機械式圧下を行わないため、断面形状への影響がない。

4.2 FCR 条件設定における考え方

図 8 に FCR における条件設定の考え方を示す。FCR 技術では、軸心割れが発生する最終凝固位置にて表面を急冷する必要があり、FCR ゾーン内に最終凝固位置をフィッティングする必要がある。そこで、事前の凝固計算により溶鋼過熱度 (ΔT)・合金含有量による最適铸造速度 (V_c) パターンを設定した。そして、FCR ゾーン内にて適正な FCR 冷却により、中心部に圧縮応力を作用させる必要がある。FCR 流量の設定は研究所での模擬試験において適正値を定めており、その内容について説明する。

4.3 FCR 模擬試験による最適流量の設定

4.3.1 模擬試験条件

表 1 に模擬試験方法を示す。模擬試験は図 9 に示す、

着脱式鑄型を用いた試験機にて実施しており、各流量における内質改善効果の評価した。そして、模擬試験結果をベースに FEM 解析を用いて最適 FCR 流量を定めた。

4.3.2 模擬試験結果

図 10 に模擬試験における冷却水量と軸心割れ長さの関係を示す。FCR の適用により、軸心割れ改善効果を確認した。しかし、FCR 流量が過大となると効果が低減することが確認され、FCR 流量に最適点があることが確認された。

表 1 模擬試験方法
Experimental casting condition

Size	$\phi 263$ mm
CC	Pilot caster
Procedure	① Molten steel pouring into mold through tundish ② 4 min later after pouring, mold gap open by 5 mm ③ Another 7 min later, mold open ④ Spray cooling start

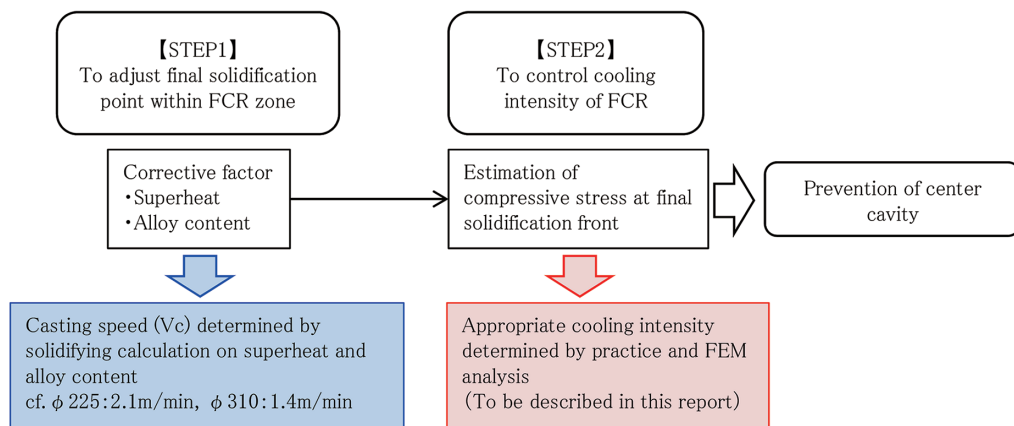


図 8 FCR 条件設定における考え方
Procedure to determine appropriate FCR condition

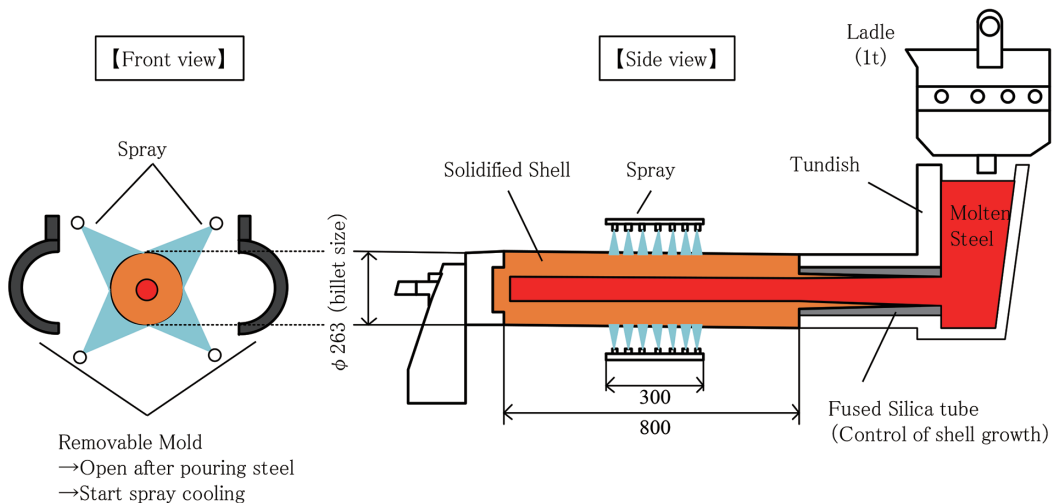


図 9 模擬試験設備
Schematic drawing of pilot caster

4.3.3 模擬試験結果を反映した FEM 解析による最適点 導出

図 11 に FEM 解析モデルを示す。ここでは、断面の一部を切出したモデルを採用し、熱伝達係数に模擬試験結果を反映した。図 12 に水量密度で整理した径方向応力を示す。模擬試験結果同様、圧縮応力が最大となる最適点が確認された。また、流量過大の場合は、冷却直後に急冷されて表面が低温になる。その結果、最終凝固位置での冷却速度が低下し、圧縮応力が低減することが確認された。以上から、ラウンド CC 実機試験での FCR 流量は 225 mm 径、310 mm

径両サイズで効果が得られる 400 ℓ/min とし、サイズ影響を含めた評価を実施した。

5. 凝固末期冷却技術 (FCR) の実機適用試験

5.1 試験条件

表 2 に実機適用試験条件を示す。ここでは、ラインパイプの内質改善ニーズの高い 225 mm 径、310 mm 径の 2 種類にて試験を実施した。また、材質は低炭系材質 (ラインパイプ) とし、FCR 流量は研究所での模擬試験、FEM 解析結果から 400 ℓ/min とした。

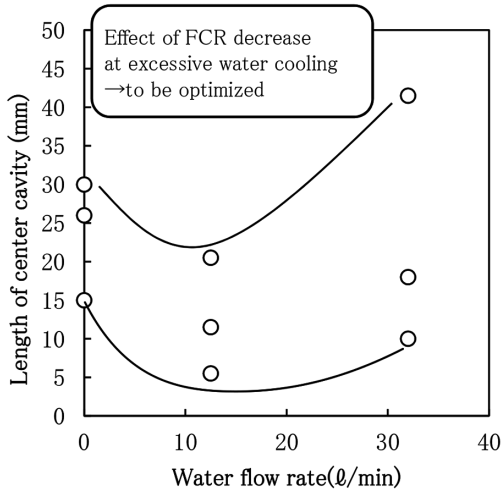


図 10 冷却水量における軸心割れ影響
Influence of water flow ratio on center cavity

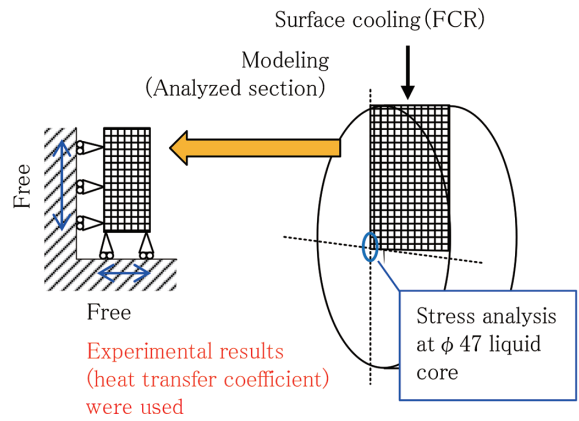


図 11 FEM 解析モデル
Analysis of thermal elastic-plastic stress and strain during cooling of cylindrical ingot by FEM

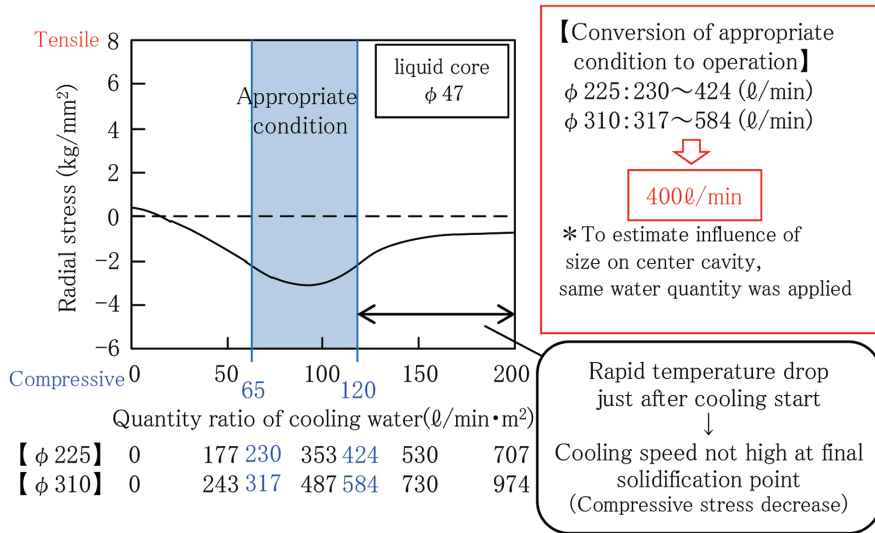


図 12 水量密度に対する中心部応力関係 (FEM 解析)
Influence of cooling intensity on calculated radial stress

表 2 FCR 実機適用試験条件
Actual casting condition with FCR

Item	Condition	Remark
Steel grade	Low carbon steel (line pipe, X65)	[C]=0.05-0.07 mass%
Billet size	φ 225 mm φ 310 mm	-
FCR	400 ℓ/min	Conversion of appropriate condition to operation from experimental results

5.2 FCR 実機適用試験結果

図 13 に FCR 実機適用試験結果を示す。225mm 径においては模擬試験結果通り、FCR により軸心割れが改善した。しかし、310mm 径においては FCR 適用により、貫通孔形状の欠陥が発生し、非適用時に対して内質の悪化が確認された。そこで、310mm 径における内質悪化要因分析および、FCR 条件設定方法を再検討した。

5.3 310mm 径への FCR 適用による品質悪化現象推定および対策

5.3.1 ビレットサイズ別にみた FCR 現象推定

図 14 に各サイズにおける FCR 適用時の現象を熱収縮に注目して整理した結果を示す。鋼は冷却に伴い収縮する。しかし、860℃近傍にて γ 相 (fcc) から α 相 (bcc) への相変態に伴う膨張変態が発生する。凝固計算の結果、225mm 径では FCR 入側から最終凝固までの範囲において膨張変態領域には入らないことが確認された。そのため、ビレット中心部には FCR 入側から最終凝固位置まで、常に圧縮応力が作用する。

一方で、310mm 径では凝固位置を FCR ゾーンに調整する必要から、225mm 径よりも V_c が低下する。そのため、FCR 入側での温度が低下し、最終凝固位置到達前に膨張変態温度域に入る。その結果、表層部で膨張変態が発生することで、中心部に過大な引張応力が発生すると考えられる。以上から、最終凝固までに膨張変態を回避するために、FCR の弱冷化が必要と考えた。

5.3.2 FCR 条件設定における考え方を見直し

図 15 に 310mm 径の FCR 現象を考慮して見直した、FCR 条件設定における考え方を示す。FCR 実機試験の結果を受け、FCR 適用条件の検討において、従来の最終凝固位置の FCR ゾーンへの調整に加えて、FCR 流量の適正範囲の見直しが必要であることが確認された（膨張変態を回避してかつ、FCR 効果が発生する最適流量を設定）。そこで、膨張変態を回避するための FCR 流量の上限値および、FCR 効果発生に必要な FCR 流量の下限値の設定方法を再検討した。

5.3.3 膨張変態を回避するための FCR 流量設定 (① FCR 流量の上限値)

図 16 に FCR 過冷却による膨張変態回避の考え方を示す。ここで、最終凝固位置 (固相率 $f_s=1$) での表面温度を T_f と定義する。FCR 過冷却による内質悪化を回避するためには最終凝固位置での表面温度 T_f を 860℃以上確保する必要がある。図 17 に凝固計算により求めた FCR 流量に対する、最終凝固位置での表面温度 T_f の関係を示す。225mm 径では設備限界 (600 l/min) であっても T_f が 860℃以下にはならない。一方で 310mm 径では V_c 低下影響 (最終凝固位置を FCR ゾーンに調整) から、 T_f は 225mm 径に対して低下する。その結果、 T_f を 860℃以上に保つには FCR 流量を 220 l/min 以下とする必要がある。

しかし、模擬試験の結果から中心部に圧縮応力を付与するには、最低 317 l/min が必要との結果 (図 12) であり、従

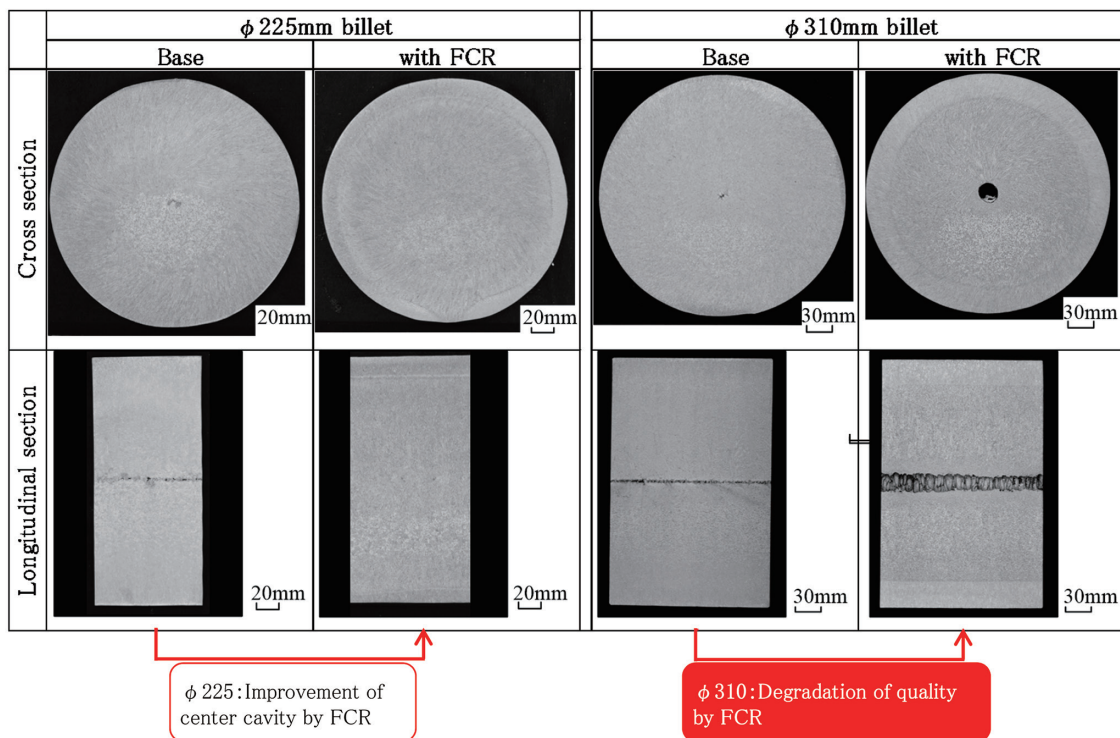


図 13 FCR 実機適用試験結果
Result of center cavity with/without FCR

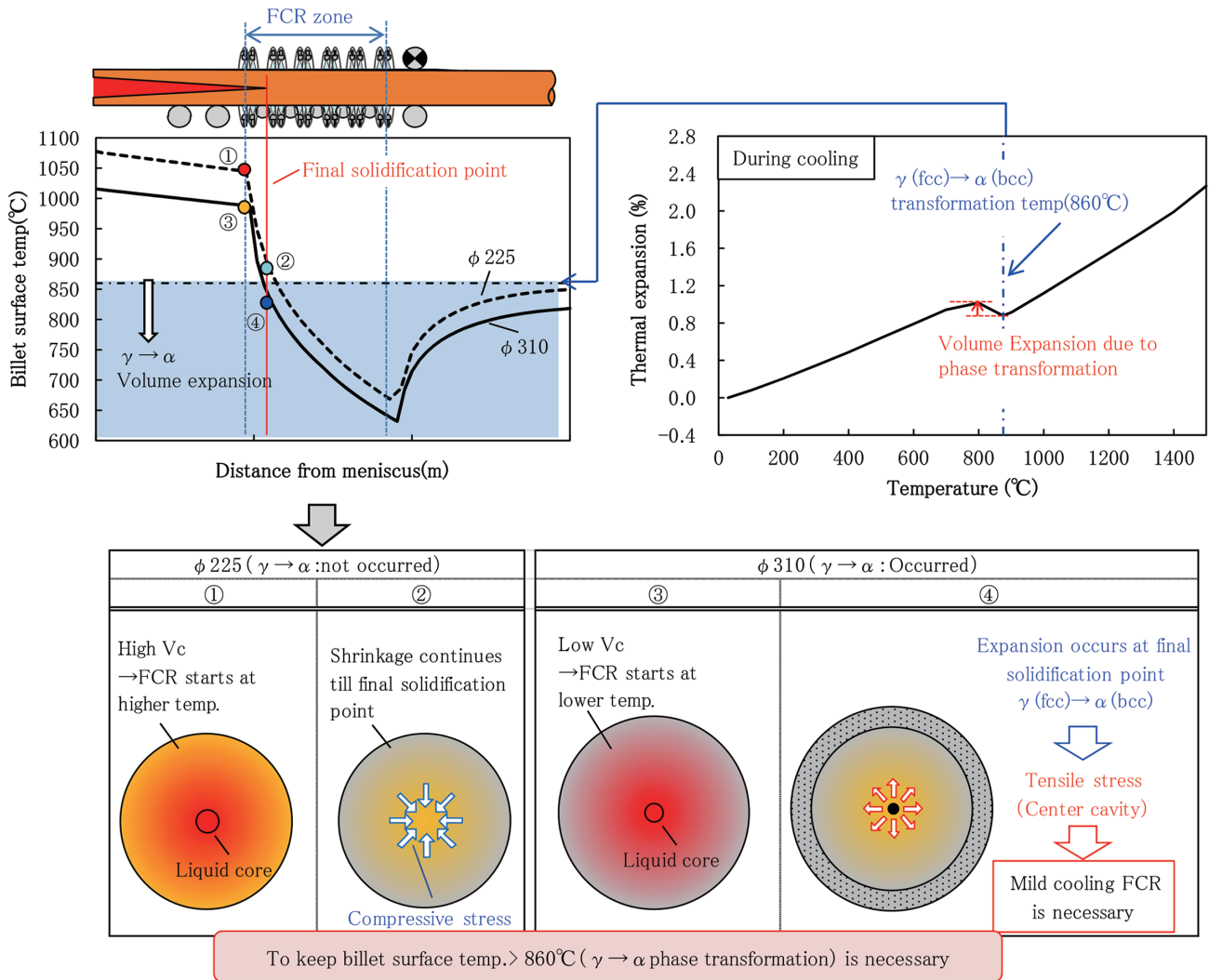


図14 310mm 径への FCR 適用による内質悪化メカニズム推定
Mechanism diagram of center cavity degradation on φ310 billet with FCR

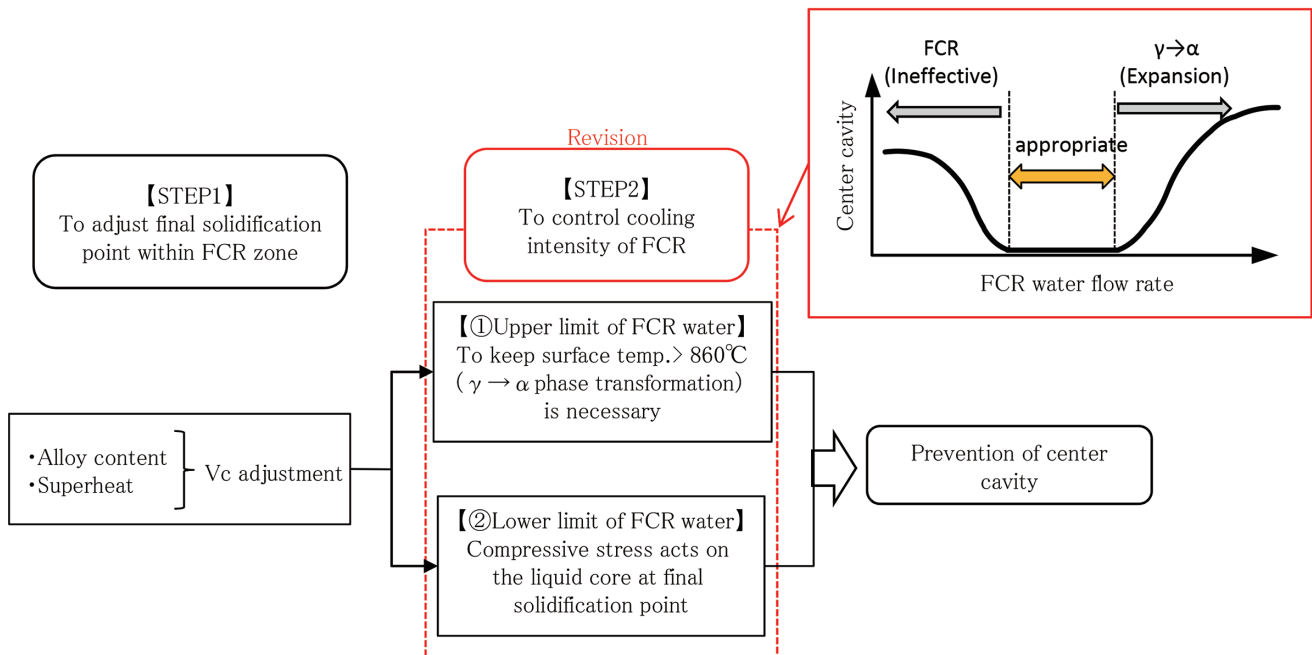


図15 FCR 条件設定における考え方 (310mm 径 FCR 現象考慮)
Optimization of FCR condition

来評価方法では 310mm 径への適用は不可となる。一方で、従来評価における FEM 解析 (断面の一部を切り抜いたモデル) では、ビレット断面全体での収縮量差影響が加味されていない。そこで、ビレット断面積差による収縮量の差を加味した再評価を実施した。

5.3.4 軸心割れ抑制可能な FCR 流量設定 (② FCR 流量の下限値)

FCR 効果が発生する流量を図 18 に示すモデルにて検討した。ここでは、新たな評価指標としてビレット断面積差による収縮量差を考慮した中心部作用力を定義した。そし

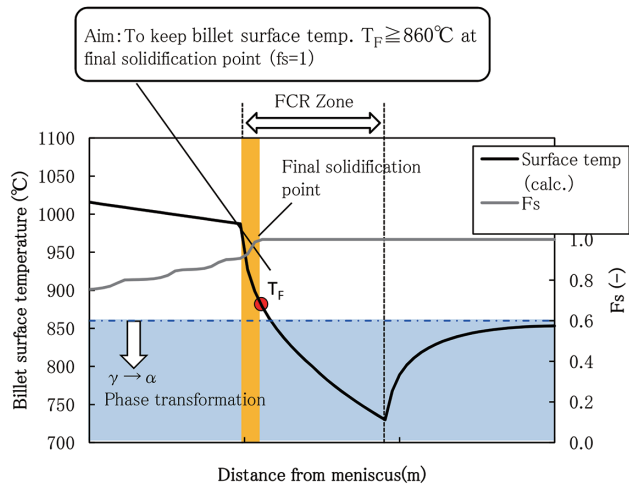


図 16 FCR 過冷却回避の考え方
Schematic view of prevention from overcooling by FCR

て、ビレット表層部と中心部の冷却速度差から熱応力を導出するモデルを作成した (各位置の温度は凝固計算から導出)。この熱応力に対して、FCR 流量が影響するビレット表面積を加味することで、ビレット径差による収縮量差を評価指標に織り込んだ。

図 19 に中心部作用力に対する FCR 流量の影響を示す。大径化に伴い、FCR 冷却による断面収縮量は小径に対して

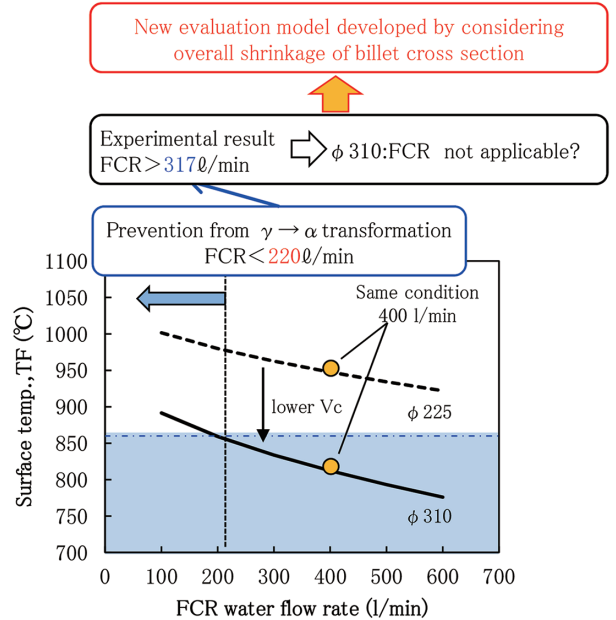


図 17 FCR による最終凝固位置での表面温度 T_F 関係
Relation between FCR water and billet surface temperature at final solidification

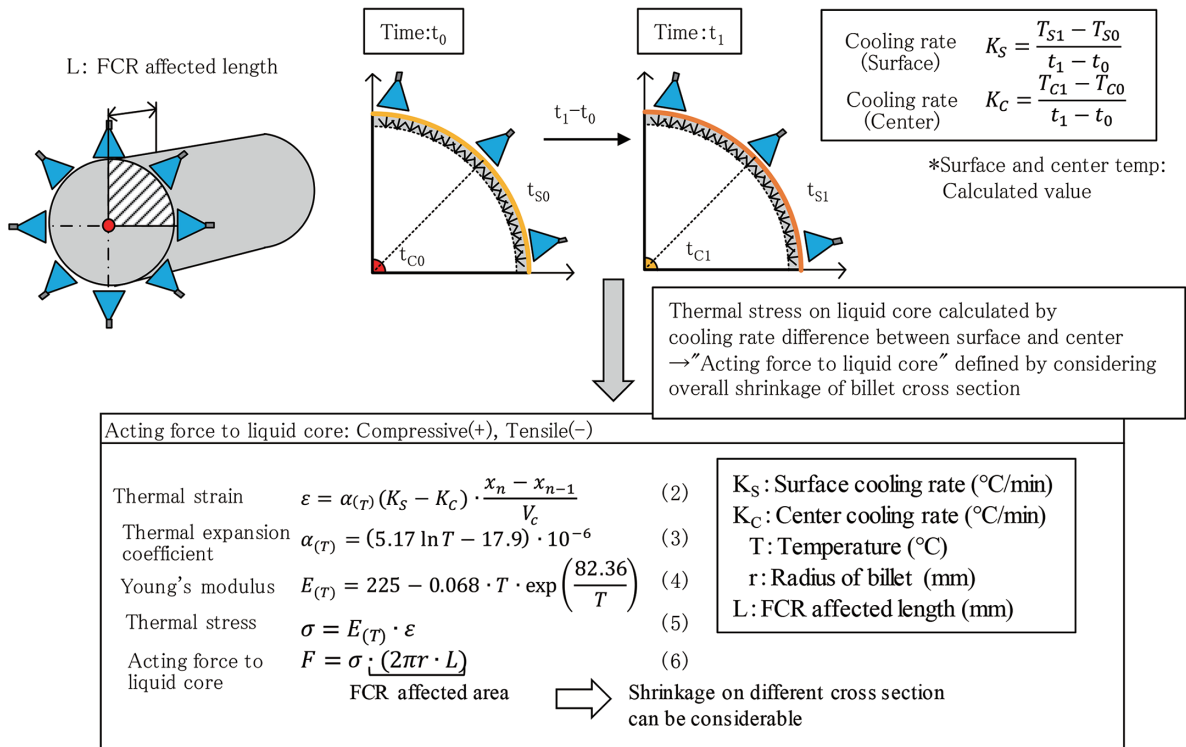


図 18 FCR 効果評価モデル
New evaluation model of FCR effect

大きくなるため、同一流量での中心部作用力は小径よりも大きくなる。そのため、実機試験で良好であった小径 (225 mm 径) よりも少流量での FCR 効果発生が可能となる。ここで、軸心割れ改善効果が得られた 225 mm 径 -FCR 流量 400 l/min (実機試験) を基準とした場合、同等の中心部作用力を得るには 310 mm 径では 155 l/min となり、膨張変

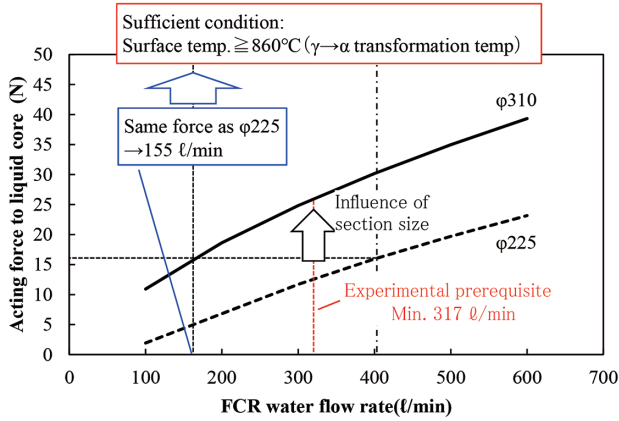


図 19 中心部作用力に対する FCR 流量の影響
Relation between FCR water flow rate and acting force to liquid core

態回避可能な流量 (220 l/min 以下) での FCR 適用が可能である。

5.3.5 最適 FCR 条件範囲の検討

図 20 に各ビレットサイズでの最適 FCR 流量範囲の整理結果を示す。大径丸 (310 mm 径以上) では小径丸 (225 mm 径) に対して FCR 流量の適正範囲が狭くなり、FCR 適用は困難となる。しかし、再検討を行って適正範囲を導き、その範囲が現設備において制御可能な精度範囲であることを確認した。

5.3.6 FEM 解析を用いた FCR 適正流量の検証

図 21 に FEM 解析モデルを示す。ここでの解析はビレットサイズ差影響を考慮するため、1/2 モデルとした。また、中心部に 30 mm 径の空隙を設けることで、FCR ゾーン入側での未凝固部を想定した。ここで未凝固部径の 30 mm については、225 mm 径で FCR 効果を得た条件を凝固計算に反映し、凝固計算における FCR ゾーン入側での未凝固部径とした。図 22 に中心部未凝固部の径変化 (図 21 プロット部の変位) を示す。検討通り、FCR 流量 400 l/min では

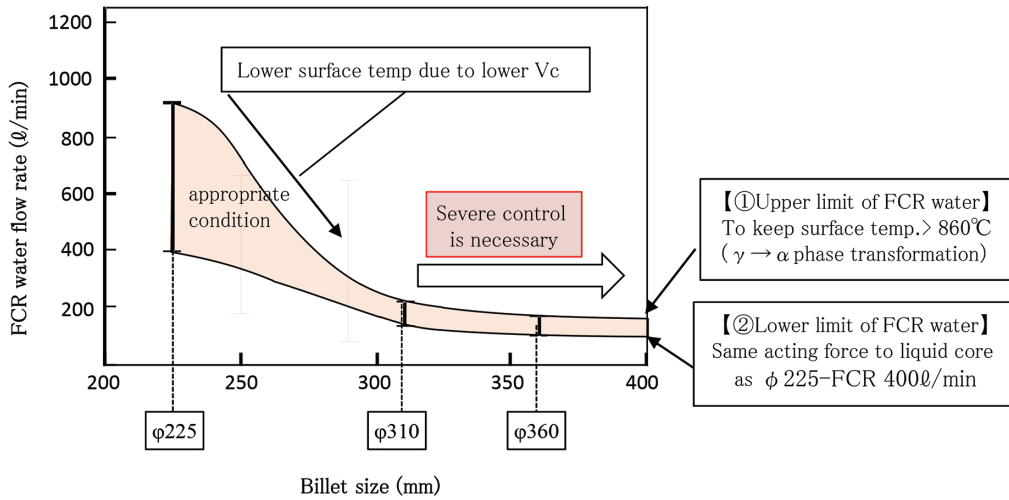


図 20 サイズ別 FCR 適正条件
Influence of section size on appropriate FCR condition

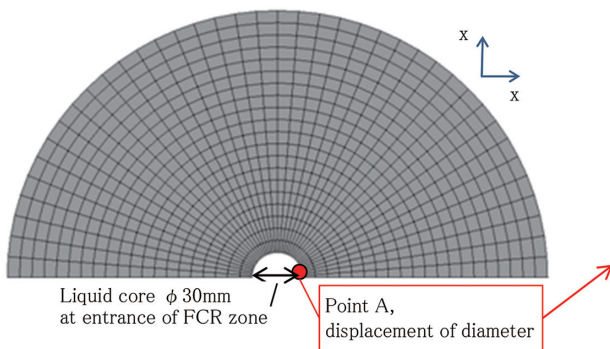


図 21 FEM 解析モデル
FEM model

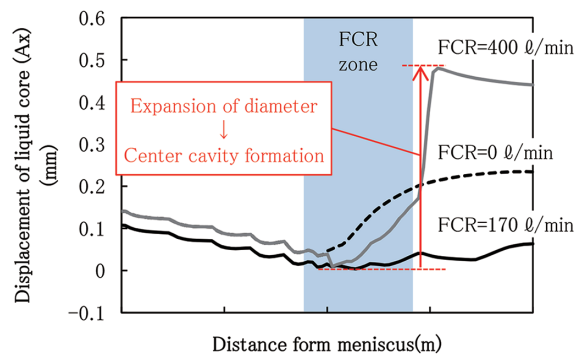


図 22 FCR ゾーン内の未凝固部径推移
Calculated displacement of liquid core during FCR

表層部の γ (fcc) \rightarrow α (bcc) 相変態による径の拡大が確認された。一方で、FCR 流量を再検討にて導出した 170 l/min とすることで、径の拡大が FCR 非適用時に対して防げるということが確認された。

図 23 に FEM 解析における相当歪 (2 次元歪を単軸歪へ換算) 分布を示す。FCR 過冷却時 (FCR=400 l/min) は表層部で $\gamma \rightarrow \alpha$ 膨張変態が発生し、表層部に引張歪が確認された。その結果、中心部に大きな引張歪が発生しており、軸心割れ悪化現象が再現されている。一方で、適正流量 170 l/min においては表層部に圧縮歪が発生し、中心部においても圧縮歪が保持されている。以上から、検討結果の有効性が検証されたため、実機試験による 310mm 径への FCR 適用効果を評価した。

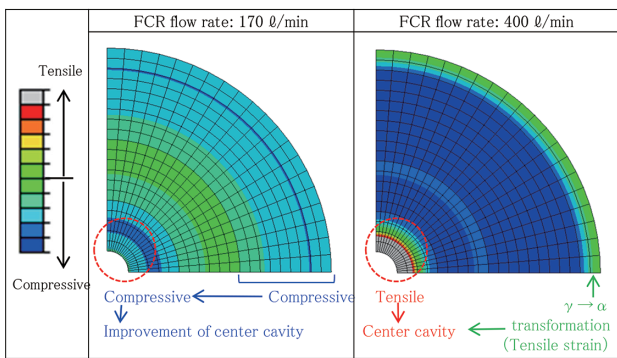


図 23 FCR適用による断面相当歪分布(FCR入側より2m間)
Analyzed strain distribution at 2m from the entrance of FCR zone

6. 310mm径におけるFCR適用試験

6.1 310mm 径 FCR 適用試験条件

表 3 に 310mm 径への FCR 適用試験条件を示す。対象材質は現在の主要なラインパイプグレードである、X65 グレードの低炭材とした。また、2 次冷却は最終凝固位置の安定化を目的に比水量を一定とした。Vc は凝固計算により定めた、最終凝固位置を FCR ゾーンに調整するための Vc パターンを用いた。FCR 流量は事前検討における最適流量範囲の中で、設備限界最低流量 170 l/min および流量影響評価を目的とした 200 l/min の 2 パターンでの試験を実施した。

6.2 FCR 適用による表面温度影響

図 24 に FCR 適用による表面温度測定結果を示す。また、最終凝固位置での温度は FCR ゾーン内であるために実測不可であった。そのため、入側・出側実測温度から凝固計算にて換算した温度を示している。FCR 流量 \leq 200 l/min の範囲では、最終凝固位置で 860℃ 以上の表面温度が確認され、事前検討通りの結果を得た。

6.3 軸心割れ改善効果

図 25 に FCR 流量別の軸心割れ改善効果を示す。本検討にて定めた適正流量範囲 (170, 200 l/min) において、従来に対する軸心割れの改善効果が確認された。

図 26 に各流量でのマクロ評価結果を示す。狙い流量

表 3 310mm 径ピレット FCR 適用試験条件
Modified casting condition with FCR for ϕ 310 billet

Item	Condition		Remark	
Steel grade	Low carbon steel (line pipe, X65)		[C]=0.05-0.07 mass%	
FCR	Water flow rate		170 l/min: Minimum flow rate within capability of facility 200 l/min: Prevention of $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation and estimation of influence of flow rate	
	Test ①	170 l/min		0 l/min
	Test ②	200 l/min		400 l/min

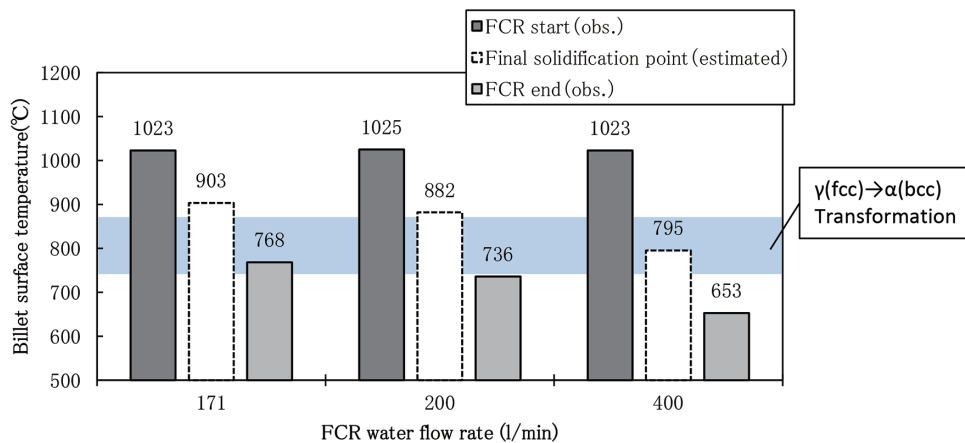


図 24 FCR 流量によるピレット表面温度影響
Relation between FCR water and billet surface temperature

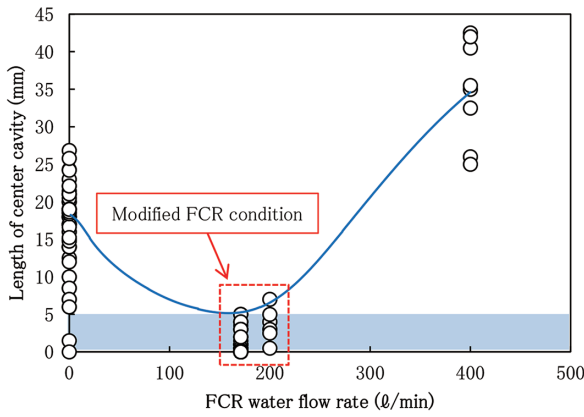


図 25 FCR 流量に対する軸心割れ改善効果
Influence of water flow ratio on center cavity

(170, 200 l/min) での FCR 適用によって横断面、縦断面ともに軸心割れの改善が確認された。また、FCR 流量 = 170 l/min 条件においては鋳込方向にわたっても安定した効果が確認され、310mm 径への FCR 技術の有効性を確認した。結果、ラインパイプの幅広いサイズでの内質改善技術が確立された。

7. 最終製品への内質改善効果評価

図 27 に製管中疵発生率への影響を示す。FCR の適用により、225 mm 径、310 mm 径ともに製管中疵の改善効果を確認した。これにより、更なるハイエンド品への展開も期待でき、FCR 技術の有効性が確認された。

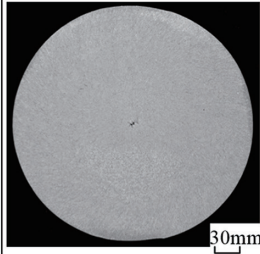
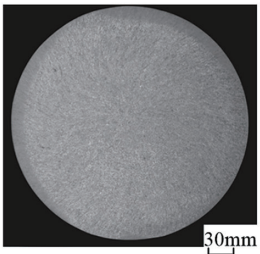
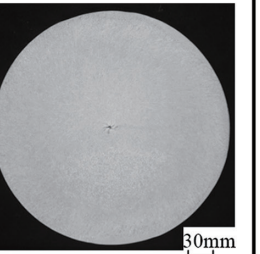
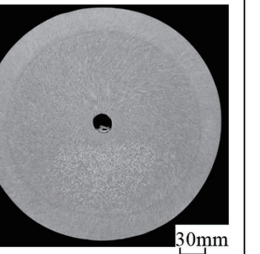
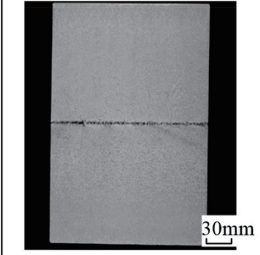
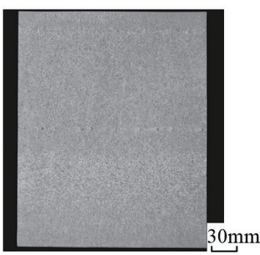
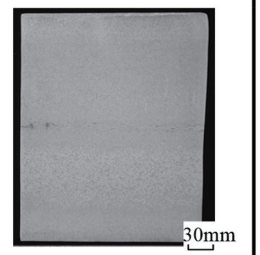
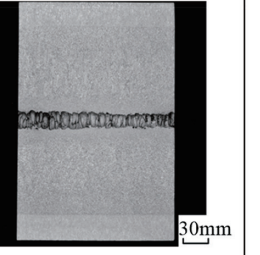
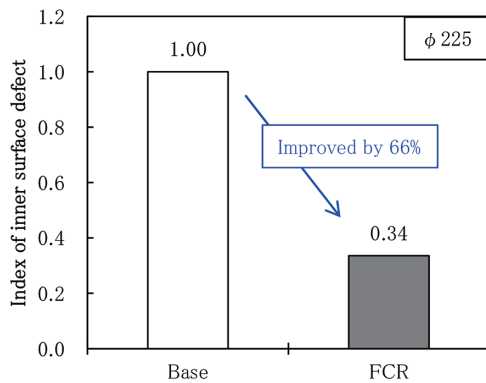
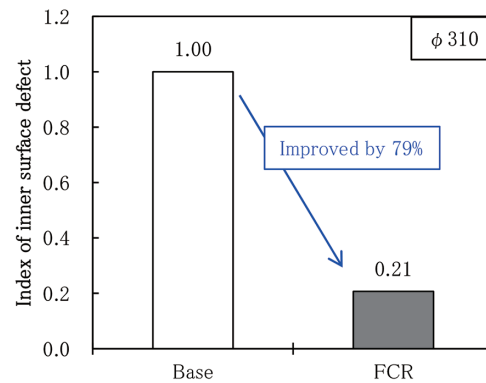
	Without FCR	Test① (Optimum) (FCR170 l/min)	Test② (FCR200 l/min)	Excessive flow rate (FCR400 l/min)
Cross section				
Longitudinal section				
Remark	Improved by equiaxed structure	Improved by FCR (Optimum)	Improved by FCR	Degraded by excessive cooling

図 26 310mm 径ビレットへの FCR 適用ビレットのマクロ評価
Influence of FCR water flow rate on center cavity ($\phi 310$ billet)



(a) $\phi 225$ mm



(b) $\phi 310$ mm

図 27 製管中疵成績改善効果 (鋳造起因欠陥)
Influence of optimized FCR on inner surface defect of product tube

8. 結 論

ラインパイプの内質改善を目的に適用した、ラウンドCC への凝固末期冷却技術 (FCR) の結果をまとめると以下となる。

- FCR 条件の設定においては、①最終凝固位置を FCR ゾーン内にフィッティングするための V_c 調整および、②最終凝固位置にて中心部に圧縮応力を付与できる最適流量の設定の2点が重要となる。
- 従来指標 (模擬試験) における最適流量 400 l/min 条件では、225mm 径では軸心割れが抑制された。しかし、310mm 径では従来に対する悪化が確認された。
- 大径サイズにおける FCR 適用では、最終凝固位置を FCR ゾーンに合わせるために V_c が低下することで、FCR 適用時の表面温度が低下する。そのため、表層部の $\gamma \rightarrow \alpha$ 膨張変態 (860℃以下) が発生する。その結果、中心部に引張応力が発生することで内質が悪化する。

- 大径サイズでは最終凝固位置までにおける膨張変態回避のため、FCR 流量の上限制約が小径よりも厳しくなる。その結果、FCR 適用ビレットの大径化により、適正流量範囲が狭くなる。
- 本試験における FCR 効果評価指標の構築および実機試験による効果確認により大径サイズへの FCR 適用技術を構築した。
- FCR によるビレットの軸心割れ改善により、製管工程での中疵発生率は大幅に減少した。その結果、更なるハイエンド品への適用の可能性を得た。

参考文献

- 1) Kobayashi, S. et al.: Trans ISIJ. 28, 543 (1988)
- 2) 足立学：第 129 回日本鉄鋼協会製鋼部会資料
- 3) Grill, A.: Ironmaking and Steelmaking. 2, 62 (1979)
- 4) Antoine, P. et al.: Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, Vol. 3, Nagoya, 1992, ISIJ, p.301



西岡 亮 Ryo NISHIOKA
和歌山製鉄所 製鋼部 製鋼技術室 主査
和歌山県和歌山市湊1850 〒640-8555



永井真二 Shinji NAGAI
鹿島技術研究部 主任研究員



吉廣 望 Nozomu YOSHIHIRO
和歌山製鉄所 品質管理部 一貫品質管理室
主幹



藤原道丈 Michitake FUJIWARA
和歌山製鉄所 製鋼部長



塚口友一 Yuichi TSUKAGUCHI
プロセス研究所 製鋼研究部 主幹研究員
博士(工学)