

山陽の非破壊検査設備

小林 敏郎*

1. はじめに

山陽特殊製鋼では年間約80万トンの製品を出荷しているがその内訳は、

形状的には、圧延棒鋼76%、鋼管14%、線材3%、素形材7%

鋼種的には、構造用合金鋼・炭素鋼57%、軸受鋼32%、高合金鋼11%

となっている。(2002年度実績)

一方、当社の特殊鋼製品は軸受、自動車や産業機械などの製造メーカーで重要部品の素材として過酷な条件下で使用される。従って、全ての製品にはお客様の加工工程における高能率で安定した加工特性と、最終製品における安全で安定した機能が発揮できるように高度な品質保証が求められている。当社ではこれらのニーズを満足するよう各製造工程で入念な作り込みをしているが、中間工程の鋼片検査と最終の製品検査工程では最新の非破壊検査(NDI)技術を適用して表面キズと内部欠陥等の品質を保証している。

本稿では当社の鋼片、棒鋼および鋼管の検査設備について非破壊検査に関するものを中心に紹介する。

2. 当社検査設備の発展

2.1 ~1960年

：単独検査台作業による外観検査、手動超音波探傷検査

当社の検査作業は、1960年頃までは寸法測定と外観検査、表示、結束作業等が中心で、非破壊検査としては大形鍛造品の中心部欠陥を対象とした手動の超音波探傷が行われていた。すなわち、単独の検査台上で人手に頼る検査作業を行っていた。

2.2 1960年代~1970年代

：連続検査設備導入とNDIによる表面キズ探傷、全数全量検査

1960年前後は当社が急速に設備を強化し増産体制を整えた時期である。30トン電気炉3基(1959~1962年)、ユージンセジュール式熱間押出製管工場(1959年)、大

形圧延工場(1960年)、中小形圧延工場(1962年)が相次いで稼働を始めた。それらの下流工程では、鋼管製品の内部キズ検査用として貫通型渦流探傷機、棒鋼製品の表面キズ検査用として軸通電型磁粉探傷機などを備えた連続検査設備が設置され、1963年には全数全量を検査する体制が整った。

そして1975年には、国内で第1号機となるプローブ回転型漏洩磁束探傷機(RAM)を非破壊検査機器メーカーと共同で開発し、中小形棒鋼検査ラインに導入した。その後、継目無し鋼管の外内面欠陥探傷用に同型の漏洩磁束探傷機を、鋼線・磨き棒鋼の表面欠陥探傷用に回転型渦流探傷機を導入するなど、自動の非破壊検査設備を増設しながら品質保証精度と生産性を向上させた。

2.3 1980年代~

：自動・高精度・全数・全領域(表面、内部、寸法等)一貫検査工場の稼働

1982年の第2製鋼工場と1986年の第2棒線圧延工場の建設を機に検査ラインは大きく変化した。それぞれの工場の最終工程には鋼片・管材の検査ラインと棒鋼製品の精整・検査ラインが圧延工場に直結して設けられた。検査ラインの設計基本方針は、軸受用鋼および自動車用途向け冷鍛用鋼等に対する高度な品質保証と上流工程の圧延ピッチにマッチングした高生産性を達成することであった。そのため、当時の最新鋭NDI技術と計測・制御技術が導入されて、表面欠陥と内部欠陥が自動で全数全領域探傷できる検査ラインが建設され稼働した。

現在もその基本方針に変わりが無いが、お客様である2次加工メーカーの更なる加工技術の進歩に伴い、要求される品質レベルは高度化かつ複雑化している。従って、それに対応して製造段階での作り込み技術向上とともに、検査員の技術力向上、検査設備の改造・更新を重ねて現在に至っている。

3. 製造工程と検査工程別検査項目

3.1 主な製造工程

当社の主な製造工程を図1に示す。太字部が検査工程である。

* 技術管理部

製鋼工程で作られた鋳片は鋼片・管材に圧延される。鋼片・管材の検査では、表面キズと内部の欠陥を検出して手入れし、除去することで、製品工程での安定した歩留と品質を確保している。そして、製品の最終工程では出荷前の検査が行われ、お客様から要求された品質を保証している。

3・2 検査工程別検査項目

各検査工程での主な検査項目は表1に示すように多岐にわたっている。表面欠陥、内部欠陥および寸法の検査にはNDI機器が使用されている。

続いて、鋼片、棒鋼および鋼管各検査工場と主な非破壊検査設備を紹介する。

4. 鋼片検査

4・1 概要

鋼片検査工場は第2製鋼一貫工場の最終工程に配置されている。第2製鋼工場では90T電気炉で出鋼された溶鋼が、

取鍋精錬炉(LF)、RH脱ガス炉で精錬処理後、完全垂直型連铸機でブルームに鋳込まれ、引き続き分塊、PSW圧延機を経てφ167mm鋼片に圧延され、冷却後検査される。スクラップ装入から鋼片検査完了まで約9時間の直送連続ラインである。

鋼片検査工場には圧延ラインと直結した黒皮鋼片検査ラインとピーリング鋼片検査ラインの2つがある。それらの検査対象材とNDI設備を表2に示す。

4・2 鋼片検査の特徴と主な検査設備

4・2・1 特徴

鋼片と管材の断面は棒鋼と鋼管の製品圧延用素材として共通な丸形状になっている。鋼片検査では丸形状の利点を活かして、次のような特徴を有している。

- 1) 国内トップクラスの高生産性とリードタイムの短縮
 圧延後のクーリングベッドでの均一冷却処理により曲りが少ないこと、および回転型超音波探傷機(RUST)のピンチローラー間隔を従来機に比べ短くしたことで

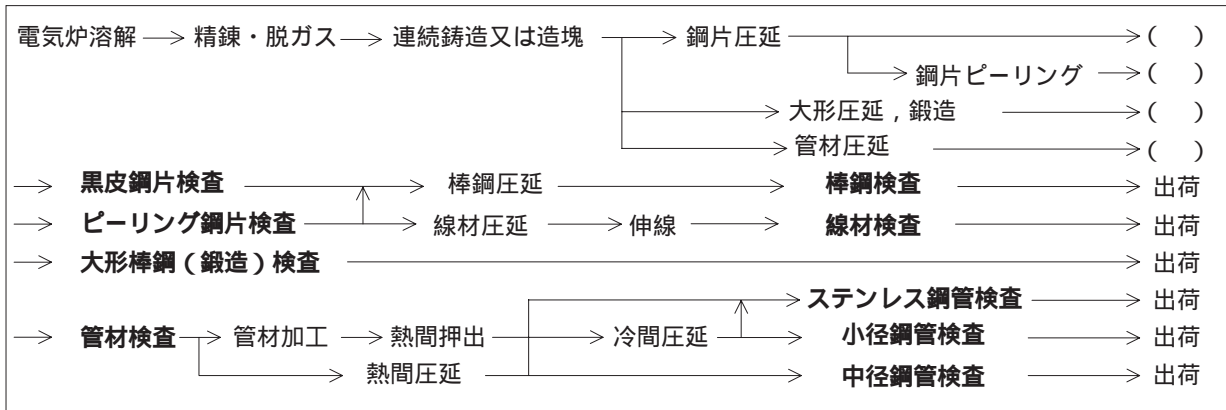


図1 主な製造工程と検査工程

表1 検査工程別検査項目

検査対象	表面欠陥	内部欠陥	寸法	長さ	本数, 重量	表示	その他
鋼片・管材	N	N					
棒鋼	N	N	N				曲り, 磁気
線材	N						
鋼管	N	N	N				曲り, 磁気

注: : 検査実施 N: NDI機器使用 : 上流工程での作り込みをチェック

表2 鋼片検査の対象材, NDI設備

検査ライン	対象材	寸法	NDI設備
黒皮鋼片検査	黒皮鋼片・管材	φ85 ~ φ167	回転型UT (RUST) 軸通電MT
ピーリング鋼片検査	ピーリング鋼片	φ135 ~ φ167	MLFT (鋼片回転型: SHAM) 回転型UT (RUST) 極間MT

(UT: 超音波探傷, MT: 磁粉探傷, MLFT: 漏洩磁束探傷)

曲がり許容が拡大できたため、矯正無しでの検査が可能となった。この結果、高生産性（63,000トン/月）、工程リードタイムの短縮（電気炉出鋼後約9時間で検査完了）など、生産効率が国内でトップクラスの黒皮鋼片検査ラインが実現した。

2) 断面全領域探傷

丸鋼片の回転型超音波探傷は角鋼片にくらべて断面全領域を精度良く容易に探傷可能である。（詳細は後述）

3) 鋼片ピーリング適用による高度な表面キズ・脱炭保証
丸鋼片のピーリング処理によって、製品では検査保証が困難な線材の表面欠陥と脱炭深さの特別な品質保証が可能となっている。

4) 品質のフィードバック機能

1), 2) の結果、製鋼や圧延の上流工程へ迅速に品質情報をフィードバックして、品質向上と操業の安定化のためのアクションをとることが可能となっている。

4・2・2 主な検査設備

(1) 探触子回転型全領域超音波探傷機（RUST）

当設備は黒皮鋼片検査ライン及びピーリング鋼片検査ラインの両方に設置されている。

黒皮鋼片検査ラインのフロー

黒皮鋼片検査ラインの工程フローを図2に示す。

圧延された鋼片は冷却床で空・水冷され、ショットブラストで表面のスケールを除去された後検査される。表面欠陥と内部欠陥はいずれもRUSTで探傷され、しきい値を超えたものは磁粉探傷機（MT）へ送られる。MTで表面欠陥はキズの位置を確認してマーキング後手入れされる、又表面直下～中心部に内部欠陥がある鋼片にはNGの処置がされて良品のみが次工程に送られる。

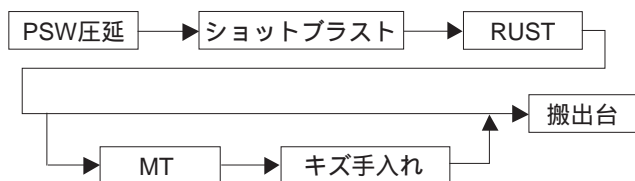


図2 黒皮鋼片検査ラインのフロー

設備の概要

装置の外観写真を図3，設備の仕様を表3に示す。

当装置は鋼片を探傷している全国唯一の探触子回転型超音波探傷機で、同型探傷機では国内で最大の外径（φ167）を探傷している。

探傷の原理

垂直及び斜角の超音波探傷原理を図4-1，2，探傷波形を図5-1，2に示す。

図4-1の中心部、及び中間部（網掛け部）は垂直探触子



図3 鋼片RUSTの外観

表3 鋼片用RUSTの設備仕様

機器名称		鋼片RUST		
探傷器	メーカー	三菱電機		
	チャンネル数	24		
探触子	垂直	型式	5Z12×(8.4×12)I	
		数量	1	
	斜角	周波数	5MHz	
		型式	5Z8×(12.5×8)A45	
探傷方法	数量	4		
	周波数	5MHz		
探傷方法	方式	水浸法		
	型式	探触子回転		
断面カバー率 (%)		100		
キズ検出限界	垂直 (mm)	φ0.4×12 L		
	(人工キズ基準) 斜角 (mm)	φ0.4×12 L		

で探傷される。超音波は丸鋼片の表面から屈折せずそのまま入射し、図5-1のように中間部、中心部領域のゲートにある欠陥で反射したエコーを欠陥信号として捕らえる。

いっぽう、図4-2の表面及び表面直下は斜角探触子で探傷される。丸鋼片の表面から入射した超音波は45度の角度で屈折して、図5-2に示すように表面、表面直下領域のゲートにある欠陥で反射したエコーを欠陥信号として捕らえる。

両探触子はそれぞれ水が封入されたホルダーにセットされて回転し、ホルダー内を走行する鋼片の断面全領域がスパイラル状に全長にわたって探傷される。

特に、表面と表面直下はお客様の鍛造工程で最も過酷な塑性変形を受ける部分であるが、ゲートを分割化することにより、従来は表面キズの虚報として扱われていた表面直下欠陥の厳格な処置が可能となった。

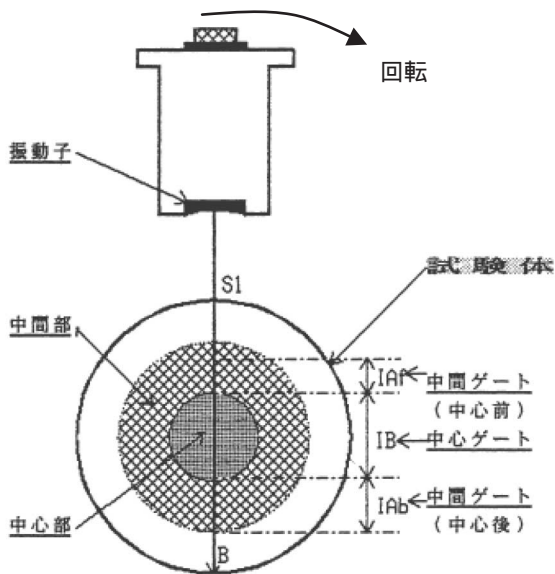


図4-1 垂直探傷原理¹⁾

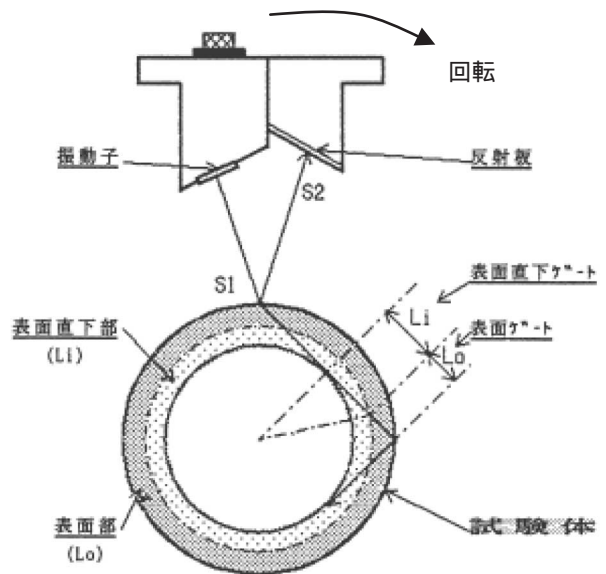


図4-2 斜角探傷原理¹⁾

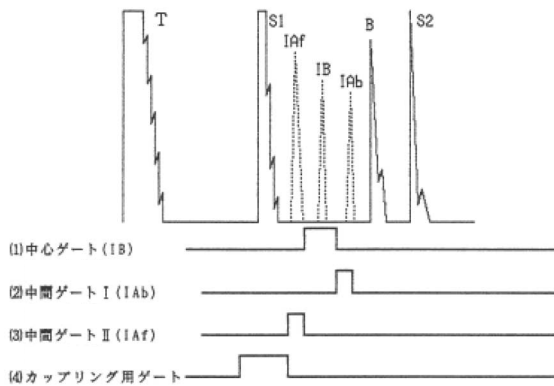


図5-1 垂直探傷波形¹⁾

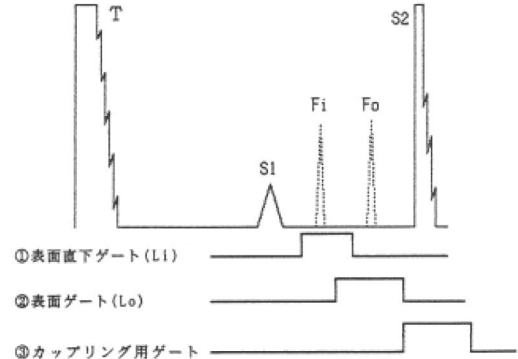


図5-2 斜角探傷波形¹⁾

(2) 鋼片その場回転・プローブ走行型漏洩磁束探傷機 (SHAM)

当設備はピーリング鋼片検査ラインに設置されている。

ピーリング鋼片検査ラインのフロー

ピーリング鋼片検査ラインの工程フローを図6に示す。

PSW圧延鋼片の一部は一旦保管された後、第2棒線工場の圧延指令に合わせてピーリング処理後検査される。表面欠陥は漏洩磁束探傷機 (SHAM) で検査され、マーキング部にある表面キズは、グラインダーで手入れされたのち極

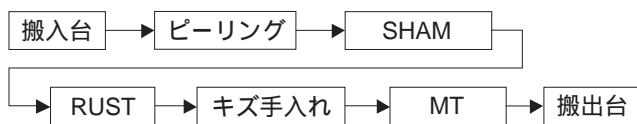


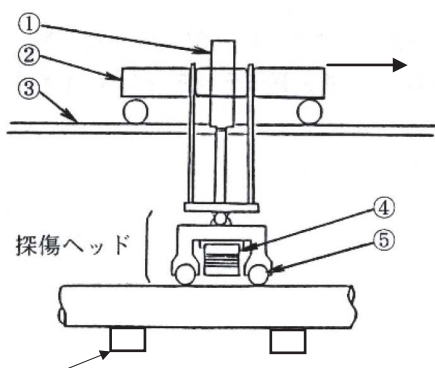
図6 ピーリング鋼片検査ラインのフロー

間磁探 (MT) で探傷される。内部欠陥は、黒皮鋼片ラインと同型の探触子回転型全領域超音波探傷機 (RUST) で探傷される。

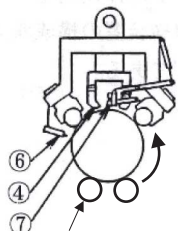
設備の概要

装置の探傷機構を図7に、設備の仕様を表4に示す。鋼片はローラー上で回転し、探傷ヘッドがその上部に乗った状態で走行して外周全面がスパイラル状に探傷される。プローブ (センサー) がキズを検出すると探傷ヘッドに組み込まれているマーカがキズの位置にマーキングを行う。マーカが検出部と一体となって走行するため、キズ直上へのマーキングを容易かつ正確に行うことができる。この結果、次工程のキズ手入れでは磁粉探傷無しでキズ部を直接グラインダーで手入れすることができる。

プローブが表面キズを検出する原理は後述する棒鋼用漏洩磁束探傷機と同様であるが、プローブが回転せずに鋼片がその場で回転する機構が異なっている。



探傷ヘッド構造図



昇降シリンダー	球面ローラー
台車	マーカ
走行レール	センサー
ヨーク	回転ローラー

図7 SHAMの探傷機構²⁾

表4 SHAMの設備仕様

機器名称		SHAM
探傷器	メーカー	原電子測器
	チャンネル数	8
プローブ	種類	コイル
	寸法	φ2
	数量	8
探傷方法	方式	鋼片その場回転
キズ検出限界 (人工キズ基準)	D×L (mm)	0.3×10L

表5 棒鋼・線材検査の対象材，NDI設備

検査ライン	対象材	寸法 (mm)	NDI設備
鍛造検査	棒鋼	~ φ 600	手動UT
	平鋼	厚 ~ 100, 幅 ~ 550	
大形検査	棒鋼	φ 50 ~ φ 210	軸通電MT (2基) 手動UT
2棒線検査	棒鋼	φ 18 ~ φ 90	回転型MLFT (2基) 回転型UT (2基)
中小形検査	棒鋼	φ 18 ~ φ 80	回転型MLFT
	棒鋼	φ 10 ~ φ 27	回転型MLFT
磨棒検査	磨棒鋼	φ 10 ~	回転型ET
線材検査	鋼線	φ 5.5 ~ φ 23	回転型ET (4基)

(ET : 渦流探傷)

5. 棒鋼検査

5.1 概要

鋳片及び鋼片は圧延されて鋼材及び線材製品となり検査工場へ送られる。

棒鋼及び線材の検査ライン，対象材とNDI設備を表5に示す。

表5の検査ラインのうち第2棒線検査について紹介する。

5.2 第2棒線検査工場

当検査工場は1986年に第2棒線圧延工場と同時に稼働を開始し，改造を重ねながら現在に至っている。以下に詳細を記す。

5.2.1 レイアウトと各精整検査設備

第2棒線検査工場は，図8に示すように2つの連続ラインがほぼ線対称形に配置されている。圧延された棒鋼はいったん冷却された後，両ラインでショットブラスト，矯正処理後，検査される。

レイアウト図8に示す各精整設備の主仕様を表6に示す。

5.2.2 第2棒線検査工場の特徴

(1) 高精度品質保証

表面欠陥は漏洩磁束自動探傷機で，内部欠陥は全領域自動超音波探傷機で，また超精密圧延材の外径は自動寸法測定機で全長にわたり高精度に保証される。

(2) 棒線圧延工場に直結した高能率な精整・検査工場

圧延された鋼材は散水冷却された後，直接当検査ラインで精整検査される。圧延ロット順に検査をすることでサイズ替えを最小限に少なくできることと高速搬送 (2m/秒) に対応した精整検査設備の適用により，月間検査量 (37,000t/月) および労働生産性 (3.2t/h・人) は同等サイズ構成の検査工場としては国内トップレベルである。(2003年実績)

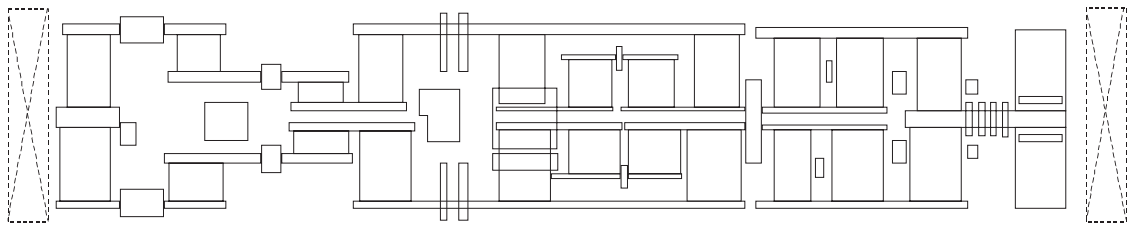


図8 第2棒線検査工場のレイアウト

表6 第2棒線検査工場の設備仕様

番号	設備	設備仕様
ショットブラスト		
	矯正機	豎形凹凹型2ロール矯正機
	面取機	斜動ローラー換面式
	端面研磨装置	斜動ローラー換面式
	漏洩磁束自動探傷装置 (Ro100)	プローブ回転式, 搬送速度Max.120m/min
	漏洩磁束自動探傷装置 (HAM)	プローブ回転式, 搬送速度Max.120m/min
	全領域自動超音波探傷装置 (RUST)	水柱結合方式, 垂直4斜角8プローブ プローブホルダ回転, 搬送速度Max.120m/min
	自動疵取機	フラップホイール研削式, 疵探査ヘッド付
	蛍光磁粉探傷機	直流電源軸通電式
	寸法測定機	光学式連続回転型
	ラベル貼付機	鋼材端面ラベル自動貼付, ラベル自動印字
	結束機	番線・引締巻付式
	秤量機	Max.5,000kg, ロードセル式

5・2・3 主な検査設備

(1) プローブ回転型漏洩磁束自動探傷機 (MLFT)

設備の概要

漏洩磁束探傷機の外観写真を図9に、設備の仕様を表7に示す。

回転型漏洩磁束探傷の原理

図10に探傷原理を示す。直進する被検査材の周りを、被検査材を磁化するための励磁ヨークとプローブ（センサー）が一体化した検出器が180°対向で回転している。励磁ヨークのN極から出た磁束は、被検査材の表層部をと

おりS極に入る。もし、被検査材に割れ等の欠陥があると磁束の流れの障害となり磁束の一部が空气中に漏洩する。いっぽう、励磁ヨークの中にあるプローブでは、漏洩した磁束のために誘導起電力が発生しそれを電圧信号に変換して出力する。その信号の大きさにより欠陥の判定を行う方法が漏洩磁束探傷である。

探傷精度向上技術

当社では最新鋭の回転型漏洩磁束探傷機 (MLFT) 導入と磁探の改造により微小な表面欠陥を精度良く検出している。探傷精度向上技術は次の通りである。

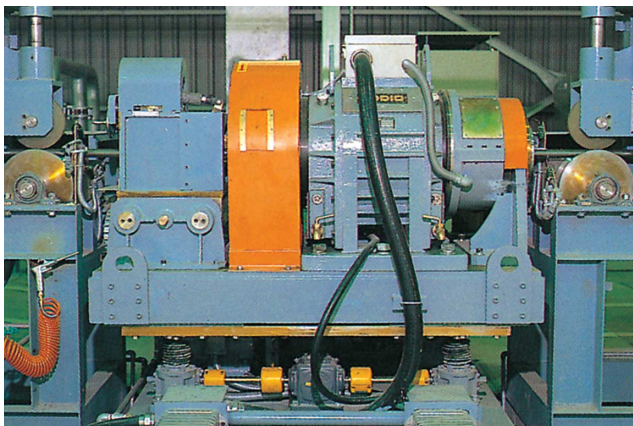


図9 漏洩磁束探傷機の外観

表7 漏洩磁束探傷機の設備仕様

機器名称	Ro100	HAM
メーカー	日本フェルスター	原電子測器
探傷器		
チャンネル数	12	18
励磁周波数	AC6kHz	AC8kHz
プローブ		
種類	コイル	コイル
寸法	φ2	φ2
数量	12	18
探傷方法		
方式	鋼材直進プローブ回転	鋼材直進プローブ回転
探傷速度 (m/分)	max.120	max.120
キズ検出限界 (人工キズ基準)		
D×L (mm)	0.1×15L	0.1×15L

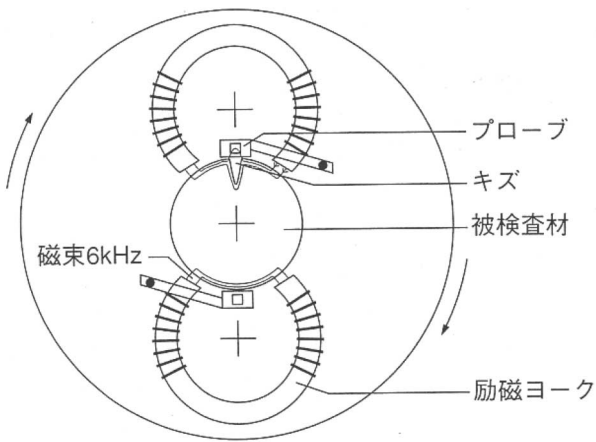


図10 回転型漏洩磁束探傷の原理³⁾

- i) 交流高周波電流を励磁ヨークのコイルに流すことで試験体を強く磁化させ表面キズからの漏洩磁束を増加させる。また、小径の差動式プローブを採用することにより小型の浅い欠陥（深さmin.0.10mm）や短い軸方向の欠陥（min.15mm）の検出能が向上している。
- ii) 磁粉探傷時のダブルキズ位置表示方式によるキズ見逃し防止
自動MLFTで吹き付けた蛍光マーカの表示と磁探室内のLED表示灯に示される自動MLFTのキズ位置情報の2つを磁粉探傷時に確認することでキズ磁粉模様の人的見逃しを防止している。

6. 鋼管検査

6.1 概要

2項の鋼片・管材検査ラインで検査された管材は、ユージンセジュールネ式押出製管工場あるいはアッセル式熱延製管工場で熱間加工され、さらにその一部は冷間圧延されて鋼管検査へ送られる。鋼管の検査ライン、対象材とNDI設備を表8に示す。

表8 鋼管検査の対象材，NDI設備

検査ライン	対象材寸法 (mm)	NDI設備
小径鋼管検査	外径20～80 肉厚1.2～36	回転型MLFT
		貫通型ET
		自動寸法測定機
		端部探傷機 (MLFT)
中径鋼管検査	外径45～180 肉厚5～38	回転型MLFT
		自動寸法測定機
		端部探傷機 (手動ET)
ステンレス鋼管検査	外径15～148 肉厚1.5～36	貫通型ET (2基)
超音波検査	外径15～95 肉厚1.5～36	探触子回転型UT (RUST) 鋼管スパイラル搬送型UT

6.2 主な検査設備

6.2.1 プローブ回転型漏洩磁束探傷機 (MLFT: RAM)

当設備は小径鋼管検査ラインと中径鋼管検査ラインにそれぞれ設けられている。

(1) 検査ラインのフロー

小径鋼管検査ラインと中径鋼管検査ラインのフローを図11に示す。押出鋼管，熱延鋼管及び冷延鋼管はその外径サイズにより両ラインに振り分けて検査される。両ラインのフローは小径ラインに貫通型渦流探傷機 (ET) が用いられている以外同様になっている。

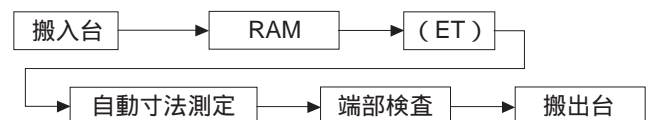


図11 鋼管検査ラインのフロー (小径, 中径)

(2) 設備の概要

設備の仕様を表9に示す。

表9 鋼管用漏洩磁束探傷機の設備仕様

機器名称	U-RAM	A-RAM
設置場所	小径鋼管検査	中径鋼管検査
メーカー	島津製作所	島津製作所
探傷器	形式	SAM-R
	チャンネル数	L-20+20
プローブ	型式	SMD φ 6.0
	数量	20+20
探傷方法	走査方式	パイプ直進
	検査速度 (m/分)	max.100
キズ検出限界 (人工キズ基準)	D × L (mm)	0.2 × 10

(3) 探傷の原理と特徴

前述した棒鋼用の漏洩磁束探傷機と異なる点は、鋼管の場合図12に示すように内面と外面を同時に探傷することである。内面キズの探傷では外面キズに比べ鋼管の肉厚分だけ深く磁化する必要がある。そのために磁化電流には直流を使用している。(直流は交流に比べ深い部分まで磁化することができる)

また、内外面のキズから漏洩した磁束を検出するプローブ (センサー) として磁気ダイオード (SMD) を採用している。磁気ダイオードは素子を通る磁束の大きさで抵抗が変化する特性があり、この変化の大きさを電気的に捕えることで欠陥を検出する。

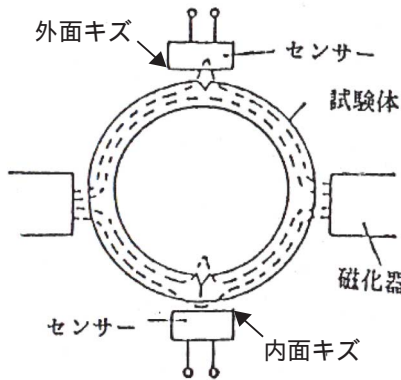


図12 直流磁化による内外表面探傷の原理⁴⁾

プローブには外面キズ検出用と内面キズ検出用の2つの磁気ダイオードが近接してモールド加工されている。ダイオードの方向を変えて配置することにより同時に内外面の欠陥を弁別し、検出することが可能である。

プローブを180°対向させて組み込まれたホルダーが直進する鋼管の周りを回転し、スパイラル状に全面を探傷することは他の回転型探傷機の場合と同様である。

6・2・2 探触子回転型超音波探傷機 (RUST)

当設備は超音波検査ラインに設置されている。

(1) 検査ラインのフロー

超音波検査ラインのフローを図13に示す。

冷間圧延(コールドピルガー)された鋼管のうち、内外面欠陥を厳格に保証する必要があるものは当ラインで検査されたあと、小径・中径鋼管検査ラインへ送られる。

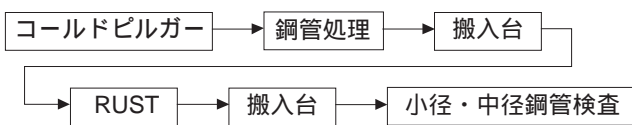


図13 超音波検査ラインのフロー

(2) 設備の概要

探触子回転型超音波探傷機の外観写真を図14に、設備の仕様を表10に示す。

(3) 探傷の原理

探傷原理及び探傷波形例を図15に示す。鋼管内外面キズの検出は、探触子ホルダーに180°対向して取り付けられた管軸方向(L)キズ用の探触子によって行われる。

探触子はキズに対して両方向から超音波が斜めに入射するように配置してある。水が封入されて回転している探触子ホルダーの中を鋼管が走行することで内外面が全長にわたってスパイラル状に全面探傷される。

鋼管の前後材がお互いに端部を突き合わせながら搬送され(END TO END)連続探傷されるため高い生産性(390本/h)を達成している。

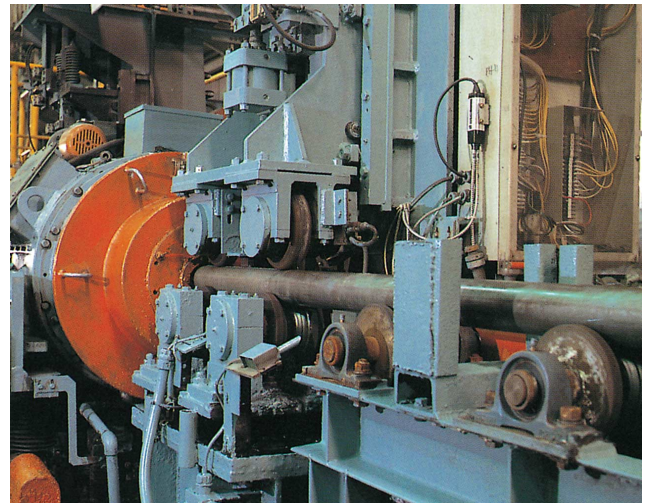


図14 鋼管用RUSTの外観

表10 鋼管用RUSTの設備仕様

機器名称	RUST	
探傷器	メーカー	三菱電機
	チャンネル数	4
探触子	型式	5Z8x17A38R25
	周波数	5MHz
	数量	4
探傷方法	方式	水浸法
	形式	探触子回転
	検査速度 (m/分)	32
キズ検出限界	D×L(人工キズ基準) (mm)	0.2×8L

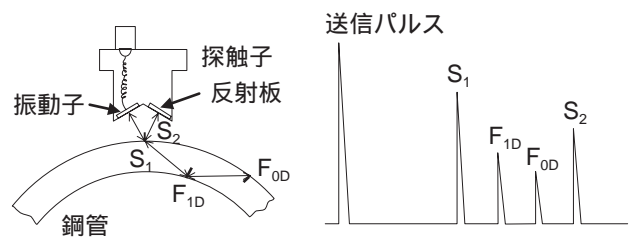


図15 探傷原理と探傷波形の例

7. まとめ

本稿では山陽特殊製鋼の検査設備について非破壊検査を中心に紹介をした。

当社では1960年以降非破壊検査設備の精度と処理能力を向上させて、特殊鋼に要求される高度な品質保証を目指してきた。特に第2製鋼工場と第2棒線工場の稼働以降は、鋼片と製品の両方の検査工程で全領域超音波探傷機を稼働させ内部欠陥の保証を実施してきた。また、表面キズの探傷においても最新の漏洩磁束探傷機を導入して保証レベル

を向上させてきた。

しかし、一方で本文中でも述べたように検査項目は多岐にわたり、その仕様内容はより一層高度化してきている。特に近年の表面キズ保証に対するお客様の要求レベルには厳しいものがある。

今後の我々の課題の一つとして非破壊検査で検出することがむずかしいといわれている表面キズの形状的要因を克服することがあげられる。すなわち、幅が狭いきず、鋼材の軸方向あるいは直径方向に対して傾斜しているキズ、軸方向の長さは短いが円周方向に進展しているキズなどがその対象である。

今後とも、このような表面キズを精度良く検出する非破壊検査技術を開発してさらにお客様のニーズに応えていくことが我々に課せられた重要な課題である。

文 献

- 1) 三菱電機(株)丸棒鋼用RUST取り扱い説明書
- 2) (社)日本鉄鋼協会品質管理部会NDI部門発行テキスト
鉄鋼製品の漏洩磁束探傷法;改訂新版 図5.15
- 3) 日本フェルスター(株)漏洩磁束探傷装置取り扱い説明書
- 4) JIS Z 2319:1991 漏洩磁束探傷試験方法(図4)

