

鑄造ステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発

Development of Ultrasonic Inspection Techniques for Cast Stainless Steel

黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)*

要約 加圧水型原子力発電所(PWR)の1次冷却材管には、鑄造ステンレス鋼が広く使用されている。鑄造ステンレス鋼の複雑な結晶構造は、正確な超音波探傷検査の妨げとなっている。すなわち、粗粒構造による大きな減衰と散乱ノイズは、欠陥の検出の障害となり、異方性による音速の変化とビームの曲がり、欠陥位置精度を不正確なものにする。本研究では、こうした鑄造ステンレス鋼の超音波探傷に適した大型の2振動子探触子と専用の局部水浸治具を開発し、欠陥検出性を向上させた。さらに自動探傷装置と組み合わせ、探傷データを画像表示することで、欠陥識別性を向上することができた。その上で、本超音波探傷手法を実際の1次冷却材管と同規模の溶接試験体に適用し、他の方式と比較した結果、最も高い欠陥検出性能を得ることができた。

キーワード 鑄造ステンレス鋼、加圧水型炉、一次冷却材管、溶接部、超音波探傷検査、2振動子探触子、局部水浸法

Abstract Cast stainless steel is widely used for the reactor coolant piping in pressurized water reactors (PWRs). Its complex crystal structure hinders accurate ultrasonic inspection. This is because the large attenuation and scattering noise due to the coarse grain structure interfere with defect detection, and the sound wave velocity variations and beam skewing resulting from the anisotropic crystal structure make the determination of defect locations inaccurate. In this study, a large twin crystal transducer with a local water immersing attachment was developed in order to enhance the defect detectability for cast stainless steel. The ability to detect defects was improved by combining the transducer with an automatic driving unit to display the inspection data. This ultrasonic inspection technique was applied to weld specimens of the same scale as actual PWR main coolant pipe, and was compared with other manufacturers' devices. The results demonstrated that the defect detection performance of this technique was the superior.

Keywords Cast stainless steel, PWR, main coolant pipe, weldment, ultrasonic inspection, twin crystal transducer, local water immersion.

1. はじめに

鑄造ステンレス鋼は、耐食性が良く、強度が高く、溶接性が優れているために、加圧水型原子炉(PWR)の1次冷却材管、1次冷却材ポンプケーシングなどに広く使用されている。これら1次冷却材圧力バウンダリー機器の溶接部は、供用期間中検査(In-Service Inspection: ISI)を行わねばならないが、超音波探傷検査は、ISIとして最も広く行われている。鑄造ステンレス鋼は、結晶粒が粗大であり、結晶異方性(特に柱状晶を有する遠心鑄造材)を有するという特性を持つ。粗大な結晶粒は、材料中を透過する超音波ビームの散乱、減衰を引き起こし、バック

グラウンドノイズとしての林状エコーを生ずる。これは、SN比(Signal Noise 比)の低下すなわち欠陥検出性低下の原因となる。結晶異方性は、超音波ビームのゆがみ(スキュー)と音速の方向による変動をもたらす。これは、欠陥位置の推定精度を低下させる。このため、鑄造ステンレス鋼の超音波探傷検査は、欠陥の識別に関し、ベテラン検査員の経験と長い時間を必要としていた。

鑄造ステンレス鋼特有の超音波伝播特性は、以前から知られており、実験的手法やコンピューターシミュレーションに関する研究が進められている⁽¹⁻¹⁸⁾。超音波探触子については、結晶粒での散乱と減衰への対処法として、大型の振動子により高エネルギー

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

の超音波を発生させる手法や、比較的低周波の超音波を使用すること、材料中での超音波の集束効果をねらいとしたものが開発あるいは推奨されている。⁽⁵⁾⁽¹⁹⁻³⁴⁾また、空間アベレージング、スプリットスペクトラム法等の信号処理によりSN比を改善しようとした研究もなされている。⁽³⁵⁻⁴⁴⁾特に、欧州では、PISC(Program for the Inspection of Steel Components)の活動の一環として、実規模大の鑄造ステンレス鋼溶接部試験体を用いた大がかりなラウンドロビンテストが実施され、本材料に対し効果的な検査技術、検査手法を明らかにしている。⁽⁴⁵⁻⁵⁵⁾これらの研究開発あるいは検証活動の結果をふまえ、本研究においては、PWR1次冷却材管に用いられている鑄造ステンレス鋼のような粗粒材の超音波探傷に適した探触子として、直径76mmの大型球面振動子を送信側、受信側それぞれに搭載した大型2振動子探触子を開発した。この探触子は、高いエネルギーの超音波を発生し、球面振動子と2振動子の両方の集束効果により、材料の目的の位置に効率的に超音波を伝えることが可能である。この探触子を専用に開発した局部水浸治具とともに駆動機構に取り付け、自動超音波探傷を実施した。得られた探傷データは、画像表示することで、欠陥識別を容易にした。完成した超音波探傷システムを、実機大の

一次冷却材配管溶接部試験体を用いて試験した。

2. 自動超音波探傷システム

2.1 システム構成

PISCにおいては、各国の検査チームが、それぞれの超音波探傷法で検査を実施し、欠陥検出率、寸法定精度などの客観的尺度を用いて各チームの検査成績を評価した。その結果、教訓として得られたことの一つに、このようなノイズの多い粗粒材に関しては、自動超音波探傷を使用することが効果的であるということがあった。これは、手動探傷において、探傷画面上の欠陥信号強度とその継続性により欠陥の識別をしなければならないが、SN比が悪いと欠陥信号そのものの把握が困難なことが理由である。⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾

自動超音波探傷では、一度超音波探傷データを採取すれば、欠陥がどうかを識別するための分析作業は、場所を移して行うことが可能である。したがって、本研究でも1次冷却材管のような放射線環境下の超音波探傷に適していると判断し、自動超音波探傷を採用することとした。本研究で採用した自動超音波探傷システムを図1に示す。

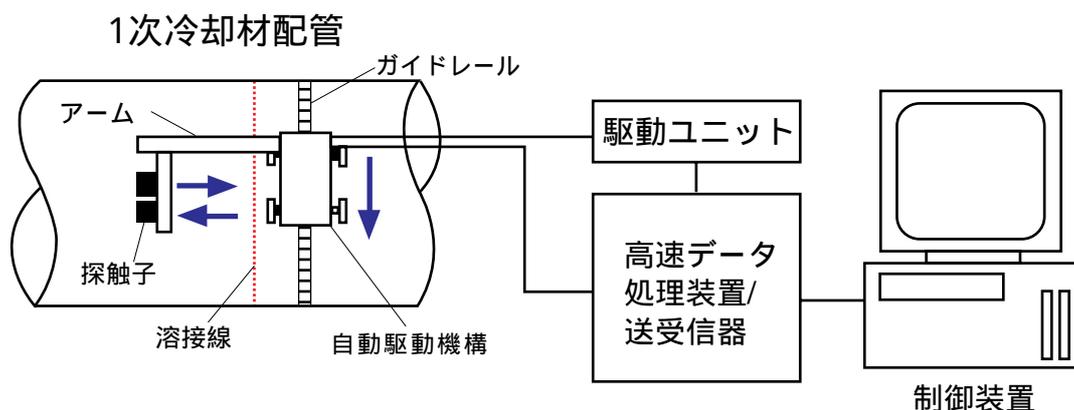


図1 配管自動超音波探傷システム

自動駆動機構のアーム上に探触子が配置され、探触子は配管の軸方向を往復する。同時に自動駆動機構全体が配管周方向に移動する。高速データ処理装置/送受信器は、探触子への送受信を行うと同時に、各位置でのAスキャンデータを探触子位置情報とと

もに採取し、制御装置のハードディスクに保存する。システムに関わる全ての制御は、ワークステーションで行われる。表1に、自動駆動機構の仕様、表2に、データ処理システムの仕様を示す。

表1 自動駆動機構の仕様

装置名(メーカー)	PIMMSマニプレータ (AIB Voncotte)
外形寸法	本体 : 275L x 260W x 165H (mm) Xアーム : 575L (mm) ベルトアーム : 700 (mm)
重量	本体 : 19kg Xアーム : 5.9kg ベルトアーム : 4.1kg
最大探触子荷重	2.5kg
最大速度	X軸(配管軸方向) : 100mm/s Y軸(配管周方向) : 50 ~ 100mm/s
モーター分解能	X軸(配管軸方向) : 0.05mm Y軸(配管周方向) : 0.05mm
エンコーダ分解能	X軸(配管軸方向) : 0.05mm Y軸(配管周方向) : 0.1mm
内面検査可能最小半径	500mm
外面検査可能最小半径	270mm

表2 データ処理システムの仕様

装置名(メーカー)	Tomoscan sv(R&D Tech)
パルサーレーザー	チャンネル数16ch, バンド幅30MHz
ディジタイザー	12bit, 60MHz
フィルター	8 low pass, 8 high pass
最大データ取得間隔	20kHz
データ取得速度	3Mbytes/sec
Aスキャン最大取得データ数	30,000point
画面表示機能	A,B,C, D scan, angle-corrected top view, side view, front view

配管一周あたりの探傷時間は、探傷ピッチと探傷速度に依存する。現状は、探傷ピッチがX軸方向1mm、Y軸方向3mm、探傷速度はX軸方向25mm/sec、Y軸方向25mm/secで1周約4時間である。将来は、探傷速度を上げて能率向上を図る。ディジタイザは8bit、16MHz、ゲート間隔は最大50msecを使用しているので、データ取得速度は十分な能力である。図2に自動駆動機構の写真を示す。



図2 自動駆動機構，試験体写真

2.2 探触子の開発

2.2.1 大型2振動子探触子

通常、炭素鋼やステンレス鋼材の超音波探傷においては、斜角探触子として周波数2～10MHzの横波探触子が適用される。一般に、結晶粒界での超音波の散乱減衰は、波長が長いほど小さくなる。したがって、鋳造ステンレス鋼に対しては、減衰を補償する手段として、1MHzや場合によっては0.5MHzといった比較的低い周波数の縦波探触子が適用されている。^{(19-22)(24,25)(27)(29-34)}

さらに、超音波エネルギーを材料中に集束させる手段としては、送受信の振動子を探触子ハウジング内で分離した2振動子探触子(Transmitter Receiver Longitudinal:TRL)^{(19-21)(24)(29)(33,34)}や大型の集束型探触子⁽²²⁾⁽²⁵⁾⁽²⁷⁾⁽³⁰⁻³²⁾などが用いられている。2振動子探触子は、送信側と受信側の振動子に角度を持たせ、材料中の1点における超音波の集束効果をねらったものである。集束型探触子は、振動子の前面に音響レンズを組み込み、超音波を屈折させて材料中の1点に集束させようとしたものである。なお、集束型の探触子には、振動子自体が曲率を有する球面振動子を用いたものもある。

図3に本研究で開発した大型2振動子探触子の構成を示す。本研究では、大型の球面振動子(76mm)を2つに分割、送受信側に配置し、集束型探触子と2振動子探触子の両方の相乗効果をねらった大型2振動子探触子を製作した。

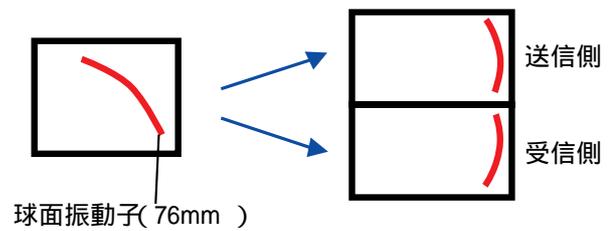


図3 大型2振動子探触子の構成

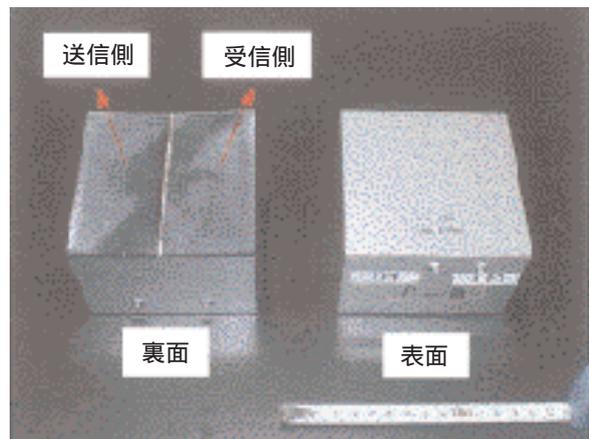


図4 大型2振動子探触子の写真

図4に、本研究で設計製作した大型2振動子探触子の写真、表3に従来型2振動子探触子と大型2振動子探触子の仕様を示す。周波数と超音波のモードに関しては、関連する各種研究成果を参考に、1MHz、縦波とした。^{(19) (22)(22,245(27)(29) 34)}

2振動子探触子のように超音波を集束させるタイプの探触子は、超音波の集束位置において、本来の性能が発揮される。このため、あらかじめ集束位置(集束深さ)を設計しておく必要がある。原子力発電所の運転中に1次冷却材管に発生し得るのは、応力腐食割れ、疲労割れなど内表面欠陥である。本研究においては、これらの欠陥の検出をねらいとして、探触子の集束深さは1次冷却材管板厚相当の60~70mmとした。

2.2.2 大型2振動子探触子の性能試験

従来型の2振動子探触子と本研究で開発した大型2振動子探触子を用いて、鋳造ステンレス鋼製校正試験片中に加工された放電加工(Electron Discharge Machining:EDM)スリットの探傷試験を実施した。表4に試験条件を示す。校正試験片は、実際の1次冷却材管と同じ板厚70mmの遠心鋳造ステンレス鋼配管ブロックである。校正試験片の内表面側に、高さ

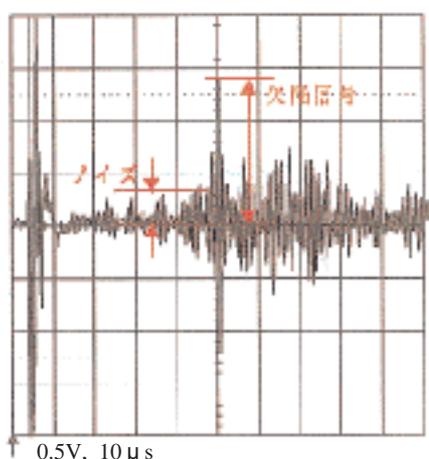
表3 2振動子探触子の仕様

	従来型探触子の例	本研究の探触子
型式	2振動子型	2振動子型
外形寸法	60×60×45(mm)	100×100×84(mm)
モード	縦波	縦波
周波数	1.0MHz	1.0MHz
振動子形状	平面型	球面型
振動子寸法	24×49(mm) (2個)	38×76(mm) (2個)
焦点深さ	50~60mm	60~70mm
入射角	45°	45°

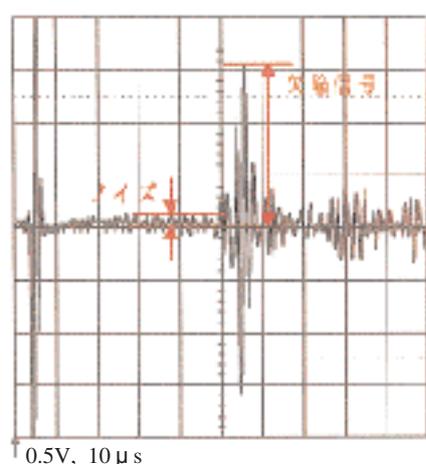
が板厚の5%に相当するEDMスリットを入れてある。図5に試験結果を示す。探触子の性能は、欠陥信号強度とノイズ強度の比、SN比で比較した。この図から、従来型の探触子のSN比が4であるのと比べ、大型2振動子探触子のSN比は21と5倍となり非常に高い性能であることがわかる。

表4 性能試験条件

送信周波数	1.0MHz
受信感度	58dB
フィルター	no filter
板厚	69mm
材質	CF8,遠心鋳造管
欠陥	5% t , EDM slit



在来型 2 振動子探触子



大型 2 振動子探触子

図5 校正試験片の5%EDMスリットによる性能確認試験結果

2.2.3 大型2振動子探触子用局部水浸治具の開発

超音波探傷においては、探触子下面と材料の接触部における超音波の伝達効率を確保するために、接触媒質を使用しなければならない。通常は、接触媒質としてマシン油等の粘性物質または水を使用する。水を使用する場合、探触子と試験片共に水中に沈めて探傷を行う水浸法ならびに探触子と材料の接触部分のみに水を注入する局部水浸法がある。自動超音波探傷においては、基本的にはどちらでも可能であるが、大型探触子と併用するときは、局部水浸

法が採用されている。^{(22)(24,25)(27)(29)}これは、通常の粘性物質では、探触子の下面全体に十分に供給されないためである。本研究で開発した探触子は、大型で寸法が縦横それぞれ100mmあるため、局部水浸法を採用し、専用の局部水浸治具を開発した。図6に、大型2振動子探触子用局部水浸治具を示す。

本局部水浸治具は、探触子ホルダーの下側に人工皮革製のスカートを取り付け、その内側に水を案内する構造にした。このスカートが探触子下面に水の膜を保有することで圧力が生じ、このために探触子全体が浮き上がった状態で走行できる。図6左の写

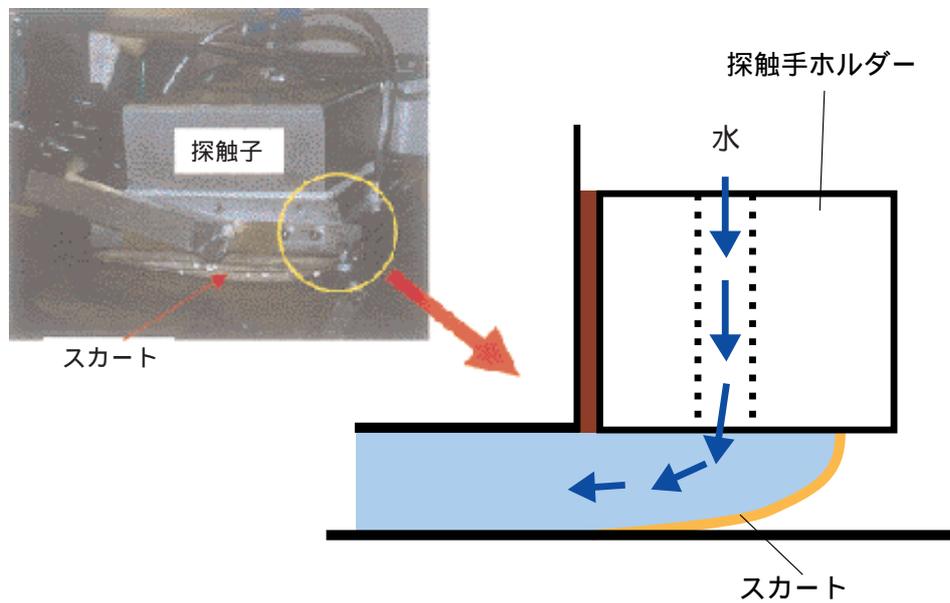


図6 大型2振動子探触子用局部水浸治具

真に示すように、本局部水浸治具によれば、溶接部のように凹凸があっても十分な水の供給が可能である。探触子と材料の隙間は最大10mmまで水が供給できることを確認した。

3. システムの性能試験

3.1 試験体

図2の写真に示すように、人工欠陥を有するPWR1次冷却材配管溶接部を模擬した実規模大の試験体を製作した。図7に試験体の形状と寸法、表5に

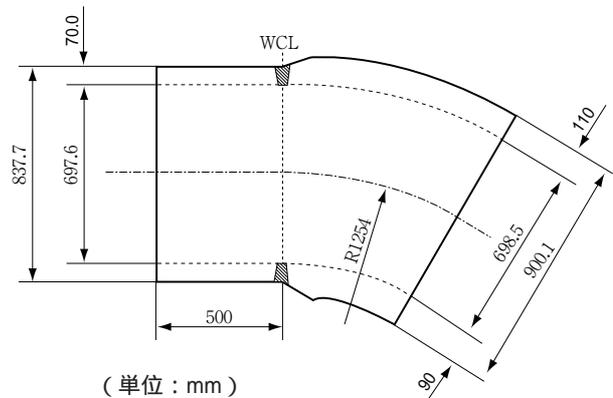


図7 一次冷却材配管溶接部模擬試験体

試験体の仕様を示す。直管部は遠心鋳造製，エルボ一部は静鋳造製の鋳造ステンレス鋼(CF-8M)を使用し，溶接施工されている。直管部板厚は約70mm，エルボ一部板厚は約90～110mmであるが，溶接部内面側にカウンターボアが施工されている。このため，溶接部付近の板厚は配管側で約67mm，エルボ側で約72～77mmである。また，エルボの溶接開先側には，幅40～140mmのチャンファが施工されている。溶接余盛り部表面は，手入れがなされているが，配管と余盛りの境界部に約3～5mmの凸凹が存在する。

試験体の溶接部付近に，人工的に6カ所の欠陥を導入した。表6に，導入した欠陥の種類，大きさ(深さ)，個数を示す。欠陥の大きさ(深さ)は，試験体の板厚t(=70mm)に対する%で表している。なお，溶け込み不良以外の欠陥は，全て配管内表面の開口欠陥である。

3.2 試験条件

3.2.1 探傷装置，探触子

探傷は，全て自動で行われた。データの受け取りは，表2に示すTomoscanデータ処理システムが用いられた。探触子は，本研究で開発した大型2振動子探触子の他，比較のために6種類の2振動子探触子を用いた。表7に使用した探触子を示す。

表7 試験に使用した探触子

会社名	型式	入射角 (°)	周波数 (MHz)	モード	振動子 寸法(mm)	外形寸法 (mm)
INSS	INSS-TRL45	45	1	縦波	2(38 x 76)	100 x 100 x 70
A社	AV TS 45 1 635	45	1	縦波	2(24 x 49)	60 x 60 x 42
	AV TS 55 1 635	55	1	縦波	2(24 x 49)	60 x 60 x 42
	AV TS 45 1 835	45	1	縦波	2(33 x 66)	80 x 88 x 50
	AV TS 55 1 835	55	1	縦波	2(33 x 66)	80 x 88 x 50
B社	RTD45TRL0.5	45	0.5	縦波	2(24 x 42)	60 x 60 x 34
	RTD60TRL0.5	60	0.5	縦波	2(24 x 42)	60 x 60 x 34

表5 試験体仕様

部品	仕様
直管	材料：ASTM A182 CF8M 製造法：遠心鋳造 エルボ材料：ASTM A182 CF8M 製造法：静鋳造

表6 欠陥の種類，大きさ，場所，個数

種類	大きさ	個数
溶け込み不良	20%t	1
疲労クラック	30%t	1
EDMスリット*	10～40%t	4

*：Electron Discharge Machining (放電加工)スリット

3.2.2 探傷感度設定と探傷範囲

通常，超音波探傷の感度設定は，校正試験片の標準欠陥の信号を基準に行われるが，鋳造ステンレス鋼は，探触子の場所により減衰率が大きく変化するため，この方法は適用できない。そこでノイズレベルで探傷を実施した。ノイズレベルとは，散乱によるノイズ信号が受信画面高さの10～20%程度になるように設定された感度のことである。

図8に，探傷範囲を示す。探傷は，配管側からのみ溶接線に垂直な方向で行った。これは，エルボ一

側にチャンファが施工されているので、探触子がアクセスできないためである。探傷範囲は、探触子の超音波入射点が溶接部の中心線から配管側に160mmの間である。また、探傷データのサンプリングは、配管軸方向に1mm、配管周方向に3mmピッチで実施した。

3.3 試験結果

3.3.1 超音波探傷データの3次元表示

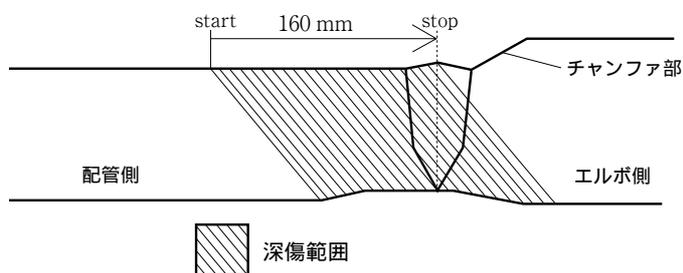


図8 入射角45°の場合の探傷範囲

図9に、探傷結果の3次元表示例を示す。これは、配管側に存在するEDMスリットの欠陥画像である。右下のAスコープは、横軸が時間、縦軸が信号の強度を表し、通常の超音波探傷で用いられている画面と同等である。Aスコープでは欠陥かどうかの判定は、画面上に現れる信号の高さとその継続性をもとに行われる。先述のように、本自動探傷においては、配管軸方向に1mm、配管周方向に3mmピッチで、Aスコープデータを採取しており、このAスコープデータを探触子位置情報をもとに画像表示したものがB、C、Dスコープである。Bスコープは溶接線に垂直な断面、Cスコープは上から見た平面、Dスコープは溶接線に平行な断面のイメージである。各スコープにおいて、信号強度に応じて色が変わる。Cスコープにおいては、Aスコープのうち、あらかじめ定められた範囲の最大値が表示される。このように視覚的に信号強度を表示することにより、铸造ステンレス鋼のようなノイズが多くSN比の悪い状況でも欠陥の

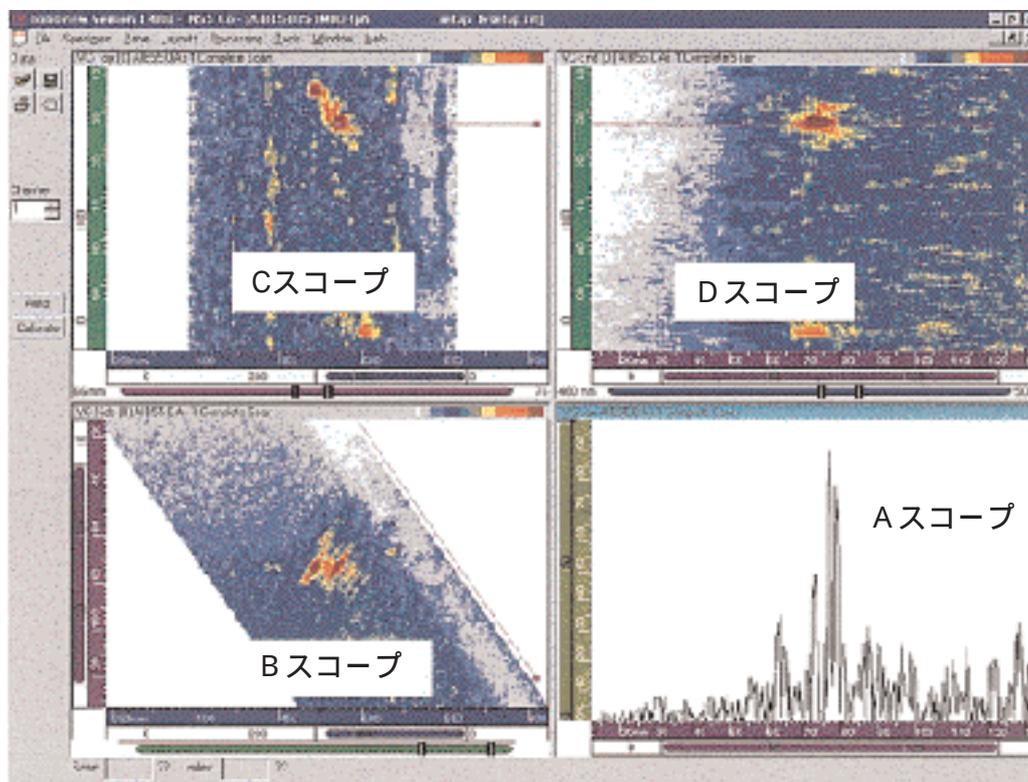


図9 探傷結果の3次元表示

識別が容易になる。

図10にEDMスリット(10%t)の信号例を示す。Cスコープ上に信号の強い部分が1箇所見える。これは、深さ10%tのEDMスリットからの信号である。Aスコープは、Cスコープ中で本欠陥の中心にあたる部分のデータである。B、Dスコープは、EDMスリットに合わせて表示されている。Bスコープの上端、Dスコープの左端が材料表面、目盛69~75mm付近が材料底面を表す。両方のスコープから、欠陥の深さは約14mmと読みとれ、実際の欠陥深さ7mmよりも大きめにでていることがわかる。

図11に、欠陥信号のCスコープ例を示す。図11(a)は、図10のCスコープと同じものである。Cスコープは、水平方向が配管の軸方向、垂直方向が配管の周方向に対応する。図中の点線は、溶接線を示しており、左が配管側、右がエルボー側である。このことから、この欠陥は溶接部のエルボー側にあることがわか

る。図11(b)は、別の場所のCスコープを示す。図11(b)においては、2つの欠陥が確認できる。一方は、溶接部の配管側にあり管軸方向に対して傾斜しており、他方は溶接部のエルボー側にあることがわかる。

3.3.2 欠陥検出率誤識別率の比較

3.3.1に示したような3次元表示画面を用いて超音波探傷データを分析し、欠陥かどうかの判定を行った。PISCの手法に準じ、検査員に実際の欠陥の位置を知らせずに欠陥かどうか判定させるブラインドテストを行った。図12に、試験体の6個の欠陥に対する欠陥検出率と誤識別率を、同じ試験体に対する他の方式のブラインドテストの結果とともに示す。

検出率とは、検出された欠陥数の欠陥の総数に占める割合を示し、誤識別率とは、欠陥と識別した信号の総数に占める誤識別数の割合を示すものであ

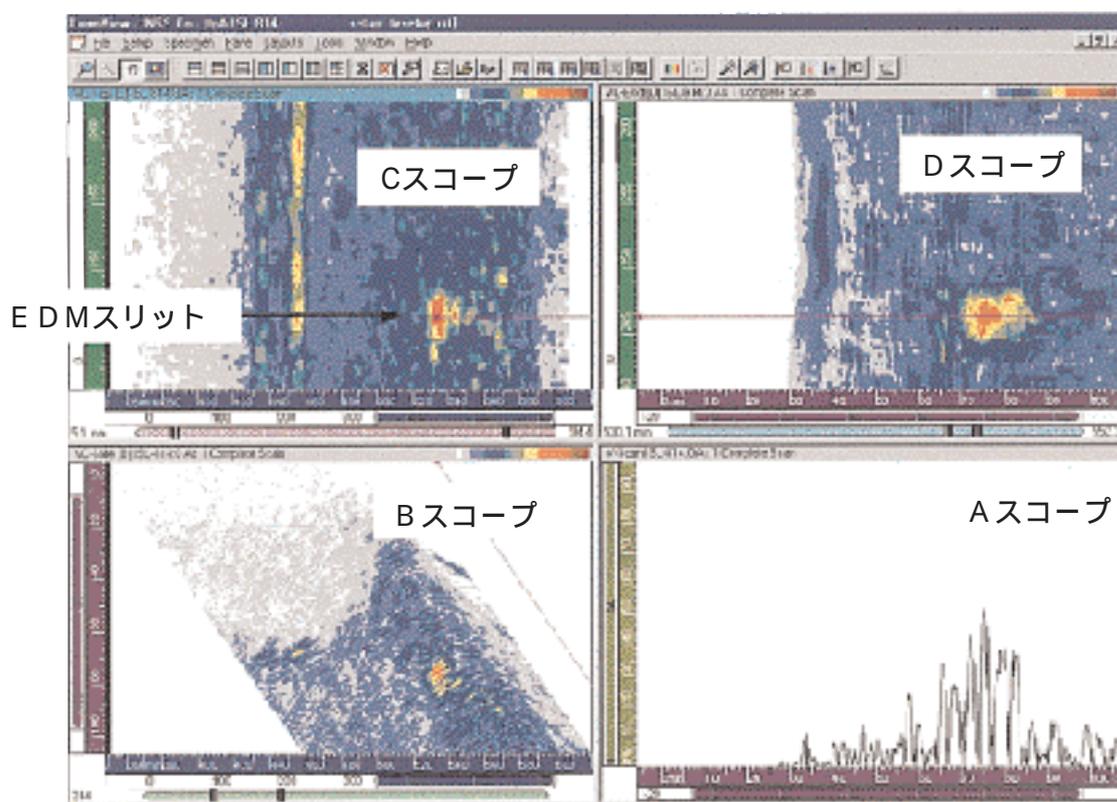


図10 欠陥信号の例(EDMスリット10%t)

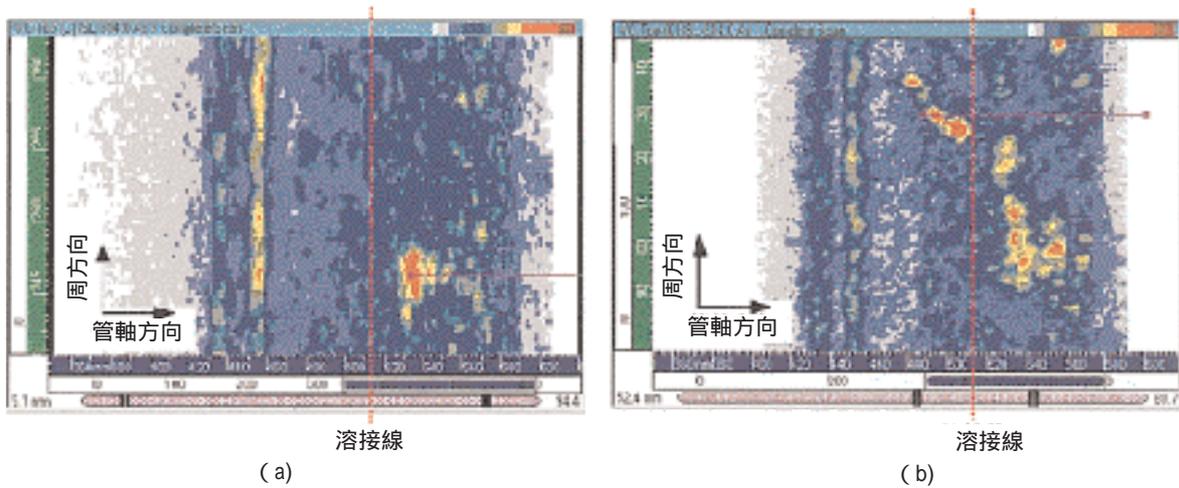


図11 欠陥信号のCスコープ例

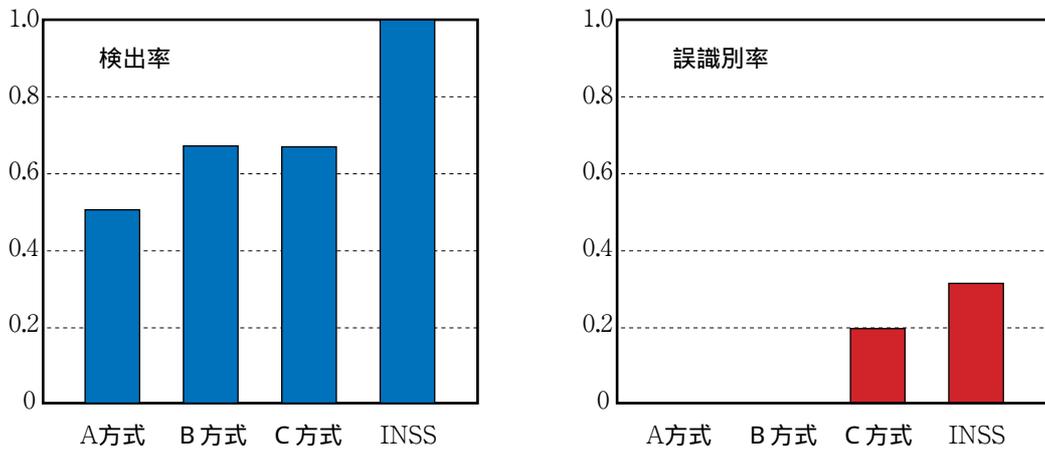


図12 欠陥検出率と誤識別率

る。検出率に示すように、本手法では、全ての欠陥が検出できた。これは、他の方式では検出できなかった疲労欠陥と10%*t*深さのEDMスリットを検出できたことによる。しかし、欠陥であるとした信号のうち、3分の1が欠陥ではなかった。これは、開発した大型2振動子探触子が高感度であることと、焦点深さを材料内表面としたことにより、欠陥信号とともに通常では検出されないレベルの材料内表面付近の形状、組織上の変化をとらえているためと思われる。

6. まとめ

鑄造ステンレス鋼製の1次冷却材配管溶接部の高度

な自動超音波探傷技術を開発した。以下に、その成果についてまとめる。

- 1) 従来型の探触子と比べ、はるかに高SN比の大型2振動子探触子を開発した。また、専用の局部水浸治具を用いることにより、数mm程度の凹凸の大きい溶接部に対しても自動超音波探傷が可能となった。
- 2) 探傷結果を3次元表示することにより、欠陥の識別性が向上した。その結果、実機大の1次冷却材配管模擬試験体の全ての欠陥を検出することができた。
- 3) 開発した自動超音波探傷システムは、実際のPWR原子力発電所に適用可能である。

今後の課題を以下に示す。

- 1) 全ての欠陥を検出する一方で、欠陥の誤識別も発生した。これは、開発した探触子の感度が鋭いこ

とと、超音波の焦点深さの照準が、材料の内表面に合わせてあることが原因であると思われる。焦点深さの照準を材料の内表面に合わせたのは、欠陥のコーナーエコーの検出をねらいとしていたためであり、これに対して欠陥の先端からのエコーをねらいとした焦点深さの浅い探触子、あるいは、入射角の異なる探触子を併用することにより、解決できよう。

2) 使用した自動駆動機構は、そのまま実際の原子力発電所に適用できるが、寸法と重量がやや大きいため、小型軽量化により、さらに操作性の良いものにする必要がある。

文献

- (1) T.N.Claytor, D.S.Kupperman, K.J.Reimann, "Visualization of Ultrasonic-Beam Distortion in Anisotropic Stainless Steel", Journal de Physique Colloque, Vol.46, no.C-10, pp.795-799(1985)
- (2) D.S.Kupperman, K.J.Reimann, "Ultrasonic NDE of Cast Stainless Steel", NDT International, Vol.20, No.3, pp.145-152(1987)
- (3) P.Jeong, "Application of Ultrasound Ray Tracing for Cast Stainless Steel Components and Austenitic Welds Examination in Nuclear PowerPlant", Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.8, pp.1131-1136(1989)
- (4) P.Jeong, F.Amirato, "Ultrasonic Evaluation of Cast Stainless Steel Component", Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.8, pp.2105-2112(1989)
- (5) P.Jeong, F.Amirato, "Ultrasonic Examination of Cast Stainless Steel", EPRI NP-6299 Project 1570-2 Topical Report, (1989)
- (6) W.Lord, "Forward and inverse NDE problems", Proc. the ISMM Int. Sympto. Computer Applications in Design, Simulation and Analysis, pp.113-116(1989)
- (7) M.S.Good, E.R.Green, "Mapping of 1-MHz, 45 ° Longitudinal-Wave Fields in Centrifugally Cast Stainless Steel", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 8A, pp.889-895(1989)
- (8) J.L.Rose, K.Balasubramaniam, A.Tverdokhlebov, "Numerical integration Green's function model for ultrasonic field profiles in mildly anisotropic media", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.8, No.3 pp.165-179(Sep 1989)
- (9) P.D.Young, L.S.Lai, C.T.Eon, "Development of nondestructive testing technology for the pressure boundary", KAERI/RR-856/89, 106 p(1990)
- (10) R.B.Thompson, "Ultrasonic wave propagation in cast stainless steel", Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting, pp.8.1-8.5(1990)
- (11) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 10B, (1990)
- (12) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 10B, (1990)
- (13) J.L.Rose, T.D.K.Ngok, A.Tverdokhlebov, K.Balasubramaniam, Y.Huang, "Ultrasonic interactions with CCSS (Centrifugally Cast Stainless Steel) and guidelines for CCSS inspection", Proc. from the tenth annual EPRI NDE information meeting, pp.10.1-10.9(1990)
- (14) A.Minachi, R.B.Thompson, "Ultrasonic Wave Propagation in Inhomogeneous, Anisotropic Cast Stainless Steel", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 10B, (1991)
- (15) B.P.Hildebrand, M.S.Good, A.A.Diaz, E.R.Green, "Application of Critical Angle Imaging to the Characterization of Cast Stainless Steels", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol.11A, pp.863-870(1992)
- (16) Argonne National Lab., "Analytical ultrasonics for structural materials", Analytical Ultrasonics Conference, pp.14(1984)
- (17) M.S.Good, B.P.Hildebrand, C.M.Batson, "Phase Mapping of Ultrasonic Fields Passed Through Centrifugally Cast Stainless Steel", Review of

- Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 10B, pp.1975-1982(1990)
- (18) S.L.Lee, H.T.Lim, C.S.Park, B.C.Kim, "Ultrasonic testing simulation in austenitic stainless steel weld by ray tracing technique"., Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 15, pp.310-317(1995)
- (19) 赤井純一, 好光新他, "オーステナイト系ステンレス鋼における超音波探傷法の開発", クボタ技報, Vol.6, No.2, pp.135-142(1981)
- (20) 西野俊一, 肥田善雄, 山本通雄, "オーステナイト系ステンレス鋼溶接部超音波探傷法の研究", 三菱重工技報, Vol.18, No.6, pp.783-788(1981)
- (21) (財)原子力工学試験センター, "溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書", (1983)
- (22) P Dombret, P Caussin, P Rorive, "Developing ultrasonics for PWR pump bowl in-service inspection"., Nuclear Engineering, Vol.35, pp.42-44(1990)
- (23) G.A.Alers, "Application of electromagnetic acoustic transducers to coarse-grained material"., EPRI-NP-7438, (Jul 1991)
- (24) P.Dombret, "Methodology for the ultrasonic testing of austenitic stainless steel"., Nuclear Engineering and Design, 131, pp.279-284(1991)
- (25) C.Boveyron, D.Villard, R.Boudot, "Ultrasonic Testing of Cast Stainless Steel Components"., Proc. 11th Int.Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries(1992)
- (26) J.M.Bordier, M.Fink, A.L.Brun., F.C.Tenoudji, "The random phase transducer in ultrasonic nondestructive testing of coarse grain stainless steel: An original tool to characterize multiple scattering effect"., Proc. IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Vol.2, pp.877-882(1992)
- (27) C.Boveyron, D.Villard, R.Boudot, "Ultrasonic testing of cast stainless steel components"., EDF-93-NB-00096(1994)
- (28) J.M.Bordier, M.Fink, A.L.Brun, F.C.Tenoudji, "The random phase transducer in ultrasonic NDT of coarse grain stainless steel"., EDF-94-NB-00072(1993)
- (29) G.Maes, B.Hansoul, P.Dombret, "PISC parametric study on the effect of cast austenitic steel macrostructure on the capability of ultrasonic examination"., Proc. 12th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries(1994)
- (30) M.Serre, P.Benoist, "Ultrasonics examination of cast stainless steel"., Proc. 12th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries(1994)
- (31) M.Serre, P.Benoist, D.Villard, N.Mathan, "Ultrasonic examination of cast stainless steel"., EDF-95-NB-00055(1994)
- (32) M.Serre, P.Benoist, D.Villard, N.Mathan, "Enhancement of ultrasonic non-destructive techniques for the inspection of cast stainless steel components"., EDF-96-NB-00060(1995)
- (33) T.Zetterwall, "PISC III -- Experience from UT evaluation in cast austenitic stainless steel components"., Proc. Joint ASME/JSME pressure vessels and piping conference, pp.73-76(1995)
- (34) A.Diaz, S.R.Doctor, B.P.Hilderbrand, "Evaluation of Ultrasonic Inspection Techniques for Coarse Grained Materials"., NUREG/CR-6594 PNNL-11171(1998)
- (35) M.Bieth, D.Romy, "Improvement of the ultrasonic inspection of cast stainless steel by signal processing using averaging techniques"., 6th Int. Conf. on NDE in the Nuclear Industry and Equipment/Services Exposition, pp.277-281(1984)
- (36) J.L.Rose, P.Karpur, V.L>Newhouse, "Utility of split-spectrum processing in ultrasonic nondestructive evaluation"., Materials Evaluation, Vol. 46, pp.114-122(1988)
- (37) P.Karpur, P.M.Shankar, J.L.Rose, V.L.Newhouse, "Split Spectrum Processing : Optimizing the Processing Parameters using Minimization"., Ultrasonics, Vol. 25, No.4, pp.204-208(1987)
- (38) P.Karpur, V.L.Newhouse, C.D.Robert, "Research on the statistics of grain lattice echoes and their use in grain size estimation and grain echo suppression"., AD-A199811 AFOSR-88-1012TR, Aug (1988)
- (39) N.M.Bilgutay, J.Saniie, R.Murthy, "Ultrasonic NDT

- and Imaging of Centrifugally Cast Stainless Steel Samples"., Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol.8, pp.2119-2126(1989)
- (40) I. Atkinson, J.P. Charlesworth, B.M. Hawker, A. Rogerson, "Automated Ultrasonic Inspection of Austenitic Castings and Welds"., Non-Destructive Testing(Proc. 12th Int. Conf.), pp.1019-1024(1989)
- (41) Anon, "Feature-based imaging for cast stainless steel components: 1987 and 1988 field examinations"., EPRI NP n 6177 Jan 1989, (1989)
- (42) P. Karpur, "Split-Spectrum Technique as a Preprocessor for Enhanced Reliability in Ultrasonic Signal Analyses"., Materials Evaluation, June pp.793-797(1992)
- (43) M. Serre, A. Viard, "Improvement of Ultrasonic Testing of Austeno-ferritic Steel Cast Components Original Title", Euro. Conf. on non-destructive testing, p.5(1994)
- (44) C. Poidevin, M. Serre, O. Roy, N. Mathan, D. Villard, "Ultrasonic examination of cast stainless steel"., 14th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries(1996)
- (45) T. Zetterwall, "Detection of Surface Breacking Cracks in Centrifugally Cast Stainless Steel With Ultrasonic Inspection From the Cracked Side"., NDT-Proc. of the 4th European Conf., Vol.2, (1987)
- (46) Hacker M.G., "Technical approach for effective ultrasonic examination of cast stainless steel piping and components"., 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, pp.221-224(1989)
- (47) S.R. Doctor, L.J. Angel, A.A. Diaz, R.V. Harris, F.A. Simonen, G.J. Schuster, "Reliability of NDE - cast stainless steel , SAFT-UT performance, PISC III program status, and evaluation of computer-based UT/ISI systems"., NUREG/CP-0133-Vol.3(1994)
- (48) S.R. Doctor, P. Lemaitre, S. Crutzen, "Austenitic steel piping testing exercises in PISC"., Nuclear Engineering and Design, Vol.157, No.1-2, pp.231-244(1995)
- (49) P. Lemaitre, T.D. Koble, "Report on the evaluation of the inspection results of the wrought-to-wrought PISC III Assemblies no.31, 32, 33, 34, 35 and 36"., PISC III Report no.33 European Commission, (1995)
- (50) P. Lemaitre, T.D. Koble, "Report on the evaluation of the inspection results of the cast-to-cast PISC III Assemblies no.41, 42 and weld B of Assembly 43"., PISC III Report no.34 European Commission, (1995)
- (51) P. Lemaitre, T.D. Koble, "Report on the evaluation of the inspection results of the wrought-to-cast PISC III Assemblies 51 and weld A of Assembly 43"., PISC III Report no.35 European Commission, (1995)
- (52) P.G. Heasler, S.R. Doctor, "Piping inspection round robin"., NUREG/CR-5068(1996)
- (53) Anon, "Complementary document to ultrasonic examination of PISC-III wrought-to-wrought austenitic stainless steel specimens"., Welding Research Council Bulletin, No.420, pp.29-38(Apr 1997)
- (54) Anon, "Ultrasonic examination of PISC-III wrought-to-cast and cast-to-cast austenitic stainless steel assemblies"., Welding Research Council Bulletin, No.420, pp.38-50(Apr 1997)
- (55) 黒住保夫, 岡野行光, 西川雅弘, "オーステナイト系ステンレス鋳鋼の超音波探傷"., 原子力学会誌, Vol.39, No.4, pp.23-39(1997)