


本資料は 年 月 日付で登録区分、  
変更する。

01.11.30

[技術情報室]

分置

配布限定

PNC  J225 85-06  
JWES-AE-8508

昭和59年度動力炉・核燃料開発事業団委託研究

# 供用期間中の体積試験方法とその 欠陥検出性に関する調査 (I)

成 果 報 告 書

昭和60年3月

社団法人 日本溶接協会  
原子力研究委員会  
A V E 小委員会

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

承認が必要です。

配布限定

PNC SJ 225 85-06

JWES-AE-8508

1985年3月



## 供用期間中の体積試験方法とその欠陥検出性に関する調査 (I)<sup>※</sup>

(独)日本溶接協会原子力研究委員会

AVE 小委員会

主査 安藤 良 夫<sup>※※</sup>

### 要 旨

高速増殖炉ナトリウム冷却材バウンダリに適した供用期間中の体積試験方法とその欠陥検出性について、新技術を含めて、調査検討する計画の初年度として、次の調査を行った。

- (1) 高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリに対して供用期間中検査等として行う各種試験に関して、その役割、試験環境等について、海外の例、軽水炉の場合との相違点を含めて調査する。
- (2) 非破壊試験方法のひとつとして体積試験方法を把え、新技術を中心に可能性のある試験技術を広く調査する。

---

※本報告書は、日本溶接協会原子力研究委員会が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究成果である。

※※東京大学 名誉教授

Not for Publication

PNC SJ 225 85-06

JWES - AE - 8508

March 1985



# INVESTIGATION ON VOLUMETRIC EXAMINATION METHOD FOR ISI AND ITS DEFECT DETECTABILITY (I)\*

Yoshio Ando\*\*

Chairman, AVE Subcommittee

Nuclear Energy Research Committee

The Japan Welding Engineering Society

## Abstract

This report presents the results of following two investigations, which were the first year's activities of the investigation plan on the volumetric examination method for ISI suitable for the FBR sodium coolant boundary and its defect detectability, focusing on the advanced examination technique:

- (1) Investigation of the roles and examination environments of the various examinations for the ISI etc. of the FBR sodium coolant boundary, including the situations of the foreign countries and the comparisons with the case of LWR.
- (2) Investigation of the potential examination techniques, focusing on the advanced ones, of the volumetric examination as one of the non-destructive examinations.

---

\* Work performed by Japan Welding Engineering Society under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

\*\* Professor emeritus, University of Tokyo.

(社) 日本溶接協会 原子力研究委員会 AVE小委員会名簿

主 査	安 藤 良 夫	(財) 発 電 用 熱 機 関 協 会
副 主 査	岸 輝 雄	東京大学 工学部 境界領域研究施設
中立委員	植 田 脩 三	日本原子力研究所 構造強度研究室
"	大 岡 紀 一	日本原子力研究所 大洗研究所材料試験炉部
"	仲 佐 博 裕	(財) 電 力 中 央 研 究 所 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 原 子 力 部
幹 事	紺 谷 健 一 朗	(株) 東 芝 動 力 炉 開 発 部
"	高 橋 文 信	(株) 日 立 製 作 所 エ ネ ル ギ ー 研 究 所 第 2 部
"	花 輪 昌 威	三菱重工業(株) 神戸造船所 新型炉設計部
委 員	岸 上 守 孝	石川島播磨重工業(株) 技術研究所金属材料部
"	古 野 光 一	川崎重工業(株) 原子力本部
"	杉 野 伸	川崎重工業(株) 原子力本部
"	古 城 満 義	川崎製鉄(株) 技術研究所 計測制御研究室
"	青 木 真 一	川崎製鉄(株) 技術本部 鋼材技術部
"	岩 崎 全 良	(株) 神 戸 製 鋼 所 浅 田 研 究 所 技 術 開 発 本 部 電 子 技 術 セ ン タ ー
"	高 橋 英 司	(株) 神 戸 製 鋼 所 溶 接 棒 事 業 部 技 術 部
"	川 島 捷 宏	新日本製鐵(株) 第一技術研究所計測制御研究センター
"	阪 本 喜 保	住友金属工業(株) 制御技術センター計測技術部
"	有 井 満	(株) 東 芝 原 子 力 事 業 本 部
"	小 崎 明 郎	(株) 日 本 製 鋼 所 鉄 鋼 重 機 事 業 本 部 原 子 力 技 術 部
"	本 間 亮 介	(株) 日 本 製 鋼 所 鉄 鋼 重 機 事 業 本 部 原 子 力 技 術 部
"	木 村 敏 三	パブコック日立(株) 呉工場 品質保証部
"	河 原 愈	(株) 日 立 製 作 所 日 立 工 場 原 子 力 開 発 部
"	前 田 宣 喜	富士電機(株) 原子力プラント統括部品品質保証部
"	森 本 一 夫	三菱重工業(株) 高砂研究所 電子技術総合研究室
委託者側委員	岡 林 邦 夫	動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖炉開発本部
"	山 崖 佳 昭	動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖炉開発本部
"	中 本 香 一 郎	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器開発室
"	林 道 寛	動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター機器開発室
事務局	大 西 要 一	(社) 日 本 溶 接 協 会
"	嵯 峨 敬	(社) 日 本 溶 接 協 会
"	小 熊 輝 男	(社) 日 本 溶 接 協 会

ワーキンググループA 委員名簿

責任者	岸	輝	雄	東京大学 工学部
中立委員	植	田	脩	三 日本原子力研究所 構造強度研究室
〃	大	岡	紀	一 日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部
幹事	紺	谷	健	一 朗 ㈱東芝 動力炉開発部
〃	花	輪	昌	威 三菱重工業㈱ 神戸造船所 新型炉設計部
委員	河	原	愈	㈱日立製作所 日立工場 原子力開発部
事務局	嗟	峨	敬	㈱日本溶接協会
担当者	小	熊	輝	男 ㈱日本溶接協会

ワーキンググループB 委員名簿

責任者	岸	輝	雄	東京大学 工学部
中立委員	植	田	脩	三 日本原子力研究所 構造強度研究室
〃	大	岡	紀	一 日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部
〃	仲	佐	博	裕 ㈱電力中央研究所 エネルギー研究所 原子力部
幹事	高	橋	文	信 ㈱日立製作所 エネルギー研究所 第2部
委員	岸	上	守	孝 石川島播磨重工業㈱ 技術研究所 金属材料部
〃	古	野	光	一 川崎重工業㈱ 原子力本部
〃	杉	野	伸	川崎重工業㈱ 原子力本部
〃	古	城	満	義 川崎製鉄㈱ 技術研究所 計測制御研究室
〃	岩	崎	全	良 ㈱神戸製鋼所 浅田研究所 技術開発本部
〃	川	島	捷	宏 新日本製鐵㈱ 第一技術研究所
〃	阪	本	喜	保 住友金属工業㈱ 制御技術センター計測技術部
〃	有	井	満	㈱東芝 原子力事業本部
〃	小	崎	明	郎 ㈱日本製鋼所 鉄鋼重機事業本部
〃	木	村	敏	三 バブコック日立㈱ 呉工場 品質保証部
〃	前	田	宣	喜 富士電機㈱ 原子力プラント統括部品品質保証部
〃	森	本	一	夫 三菱重工業㈱ 高砂研究所 電子技術総合研究室
事務局	嗟	峨	敬	㈱日本溶接協会
担当者	小	熊	輝	男 ㈱日本溶接協会

# 目 次

第1章	緒 言	1
1.1	調査の目的	1
1.2	調査の範囲	1
1.3	調査の方法	1
第2章	高速増殖炉の供用期間中検査に関する検討	2
2.1	はじめに	2
2.2	軽水炉 ISI 技術の現状	2
2.2.1	概 要	2
2.2.2	PWR ISI 技術の現状	4
2.2.3	BWR ISI 技術の現状	10
2.3	海外FBRのISIの動向	14
2.4	我が国のFBRのISIに対する考え方	15
2.4.1	ISIの対象箇所	15
2.4.2	試験環境条件	18
2.4.3	試験技術の開発	19
2.4.4	体積試験の欠陥検出性について	19
第3章	体積試験における新技術の調査	21
3.1	はじめに	21
3.2	調査内容	21
3.2.1	調査の対象	21
3.2.2	調査の内容	21
(1)	電子走査式超音波探傷法	23
(2)	超音波ホログラフィ	38
(3)	開口合成法	45
(4)	超音波散乱法	50
(5)	A E法	56
(6)	レーザ超音波法	61
(7)	電磁超音波法	65
(8)	渦電流探傷法	73
(9)	電気抵抗法	78

(10) X線・ $\gamma$ 線CT	82
(11) ラジオグラフィ	88
(12) 中性子ラジオグラフィ	99
3.3 まとめ	103
第4章 結 言	111



# 第 1 章 緒 言

## 1.1 調査の目的

高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリは、その材料にぜい性的挙動を示さないオーステナイト系ステンレス鋼を使用しており、バウンダリに作用する内圧が低いこととあいまって、安全性確保の観点から許容しうる欠陥の大きさが、その壁厚に比べて十分大きい。したがって、供用期間中に行う体積試験については、その欠陥検出性に関して軽水炉におけるそれとは異なる観点に立って、合理的な試験方法を策定する必要がある。

このため、高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリに適した体積試験方法とその欠陥検出性について調査検討を行う。

## 1.2 調査の範囲

調査の範囲は、次の 2 項目からなる。

- (1) 高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリに適した体積試験方法について、新技術の導入を含めて、調査検討する。
- (2) 前項の検討により有望と見られる試験方法について、その欠陥検出性を調査検討する。

## 1.3 調査の方法

上に述べた調査は、昭和 59, 60 年度の 2 年度にわたって実施する計画である。昭和 59 年度の調査(Ⅰ)(以下「本調査」という。)では、次の方法により調査を行った。

- (1) 高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリに対して供用期間中検査等として行う各種試験に関して、その役割、試験環境等について、海外の例、軽水炉の場合との相違点を含めて調査し、適切な体積試験方法を検討する基礎資料を得る。
- (2) 非破壊試験方法のひとつとして体積試験方法を把え、新技術を中心に可能性のある試験技術を広く調査し、適切な体積試験方法を検討する基礎資料を得る。

上記 2 項目の調査を行うために、AVE 小委員会にワーキング・グループ A 及びワーキング・グループ B を設置し、それぞれ(1)項及び(2)項の調査を分担した。

これらの調査に基づき、目的に適した体積試験方法を検討する作業は、昭和 60 年度の調査(Ⅱ)において実施する計画である。

本報告書は、中間報告として、上記 2 項目からなる本調査の成果を示すものである。

## 第2章 高速増殖炉の供用期間中検査に関する検討

### 2.1 はじめに

ワーキンググループAにおいては、まず国内の軽水炉における対象個所及び試験環境条件を含めた供用期間中検査（以下「ISI」という。）の現状について調査を行い、今後の試験技術の改良についてまとめることとした。

高速増殖炉（以下「FBR」という。）に関しては海外先行炉におけるISIに対する考え方、動向及び技術の現状についての調査を行うと共に高速原型炉の機器配管を念頭において、我国FBRのISIに対する考え方—対象個所の選定・試験方法—を整理することとした。

以上の検討と平行して、体積試験の欠陥検出性について既往の文献を基に調査・分類を行いこれをまとめることとした。

### 2.2 軽水炉ISI技術の現状

#### 2.2.1 概要

原子力発電所は、原子炉等規制法ならびに電気事業法によって定期検査が義務づけられている。

軽水炉に於いては、原子炉冷却機圧力バウンダリを形成する機器配管、工学的安全施設及び補助系を含む原子力発電用の機器配管の溶接部を主とする耐圧部および支持部について定期検査時に計画的にISIが実施されている。試験範囲、試験程度及び時期、試験方法については、日本電気協会の電気技術規程「軽水炉型原子力発電所用機器の供用期間中検査 JEAC 4205-1980」に沿って、試験が行われている。表2.2-1にPWRおよびBWRの試験対象個所と試験の種類を示す。これらの試験は図2.2-1、図2.2-2に示すように放射線管理区域内で行われる。放射線雰囲気下という特殊環境下で、作業員の被曝低減をはかり、より信頼性の高い試験を実施する為には、試験装置の自動化をはかる必要があり、この為種々の研究開発が行われて来ており、合せて省力化、定期検査期間の短縮化をはかっている。

以下PWRおよびBWRで開発された主要なISI技術を紹介する。

表 2.2 - 1 PWR 及び BWR の試験対象個所と試験の種類

設 備		設 備		試 験 の 種 類
		区 分	P W R	
容 器	第 一 種	原子炉容器 加 圧 器 蒸気発生器（一次側） 一次冷却材ポンプ	原子炉圧力容器	体積（UT, RT, ECT） 表面（PT, MT） 肉眼（VT） 耐圧, 漏洩
	第 三 種	蒸気発生器（二次側） 再生熱交換器（管側） 体積制御タンク ホウ酸タンク 高圧充填ポンプ 他	残留熱除去系熱交換器	体積（UT） 表面（PT, MT） 肉眼（VT） 耐圧, 漏洩
管	第 一 種	一次冷却系統	原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する管	体積（UT, RT） 表面（PT, MT） 肉眼（VT） 耐圧, 漏洩
	第 三 種	化学体積制免系統 安全注入系統 余熱除去系統 格納容器スプレー系統 主 蒸 気 管 主 給 水 管 試料採取系統	残留熱除去系 炉心スプレー系 高圧注水系 原子炉隔離時冷却系 主蒸気系, 給水系 PCV バウンダリ	体積（UT, RT） 表面（PT, MT） 肉眼（VT） 耐圧, 漏洩
	第 四 種	化学体積制御系統 安全注入系統 主 給 水 管 廃棄物処理系統 格納容器スプレー系統 海 水 管 計器用圧縮空気系統 試料採取系統 補 助 蒸 気 他	残留熱除去海水系 原子炉冷却材浄化系 可燃性ガス濃度制御系 燃料プール冷却浄化系 主蒸気系, 抽気系	肉眼（VT） 耐圧, 漏洩

UT : 超音波探傷試験  
RT : 放射線透過試験  
ECT : 渦電流探傷試験

MT : 磁粉探傷試験  
PT : 液体浸透探傷試験  
VT : 目視試験

## 2.2.2 PWRのISI技術の現状

PWRのISI技術のうち、原子炉容器、配管ならびに蒸気発生器に関するものについて、試験技術と試験装置の自動化の現状について以下に紹介する。

### (1) 原子炉容器

原子力発電所に於て最も重要な機器の一つである原子炉容器は、高放射線下にあり、また配置の制約上外面からの接近が困難であるため、その体積検査手法として、内部からの水浸法による自動超音波探傷装置によりISIを実施している。この装置を図2.2-3に示す。装置は、原子炉容器に装着されるマシン本体と、探傷器、データ処理装置等を収納したトレーラーに大別される。

マシンの制御は、トレーラーに搭載された計算機により駆動条件と指令を指示し、位置制御システムにより駆動部の位置決めを行うようになっている。探触子は図2.2-4に示すように探触子板に組み込まれ多関節のマニピュレータのアームの先端をとりつけられマニピュレータは所定の位置まで移動した後、同じく計算機からの指令により探傷位置ごとに必要とされる各軸の動きが制御される。

採取されたデータは、トレーラーに収納された計算機によりオンライン、オフラインで処理される。図2.2-5はデータ処理後表示されたCスキャン図の一例を示す。

### (2) 配 管

配管の溶接部の超音波探傷は、定期検査中実施されるISIのうち最も試験対象が多く、かつ寸法、形状も多種多様である。

しかし、放射線下での試験であり被曝低減をはかる必要があり、かつ大量のデータを処理する必要がある為自動化がはかられており、図2.2-6に示す配管用自動/半自動超音波探傷装置が開発されている。

探触子の駆動は種々の試験個所に対応可能となるように自動あるいは半自動となっているが、データ収録は自動的に行われる。収録されたデータは放射線管理区域外に設置された計算機により処置され、探傷結果の評価に必要な各種出力が得られる。

図2.2-7に出力例を示す。

### (3) 蒸気発生器伝熱管渦電流探傷装置

蒸気発生器伝熱管は1基あたり約3400本あるが、我国では、定期検査に全数、全長の渦電流探傷が実施されている。この試験の為、短期間で検査を実施し定量評価を行い、かつ、被曝量を極力少なくするための検査装置およびデータ処理システムが開発されてきた。図2.2-8は、各サイトで実施されている渦電流探傷装置全体図を示す。探触子は図2.2-9に示す管板を自動歩行するロボットで伝熱管に案内される。探傷は図2.2-10の多重周波探傷器により同時に複数の周波数で行われ、磁気テープにデータが収録される。こ

のテープは図 2.2-11 の分析センタのデータ処理装置に送られ、計算機により解析が行われる。

尚、評価にあたっては、多重周波の信号を演算処理し、欠陥以外の信号を抑制し、S/N 比を向上させる方法が開発されている。

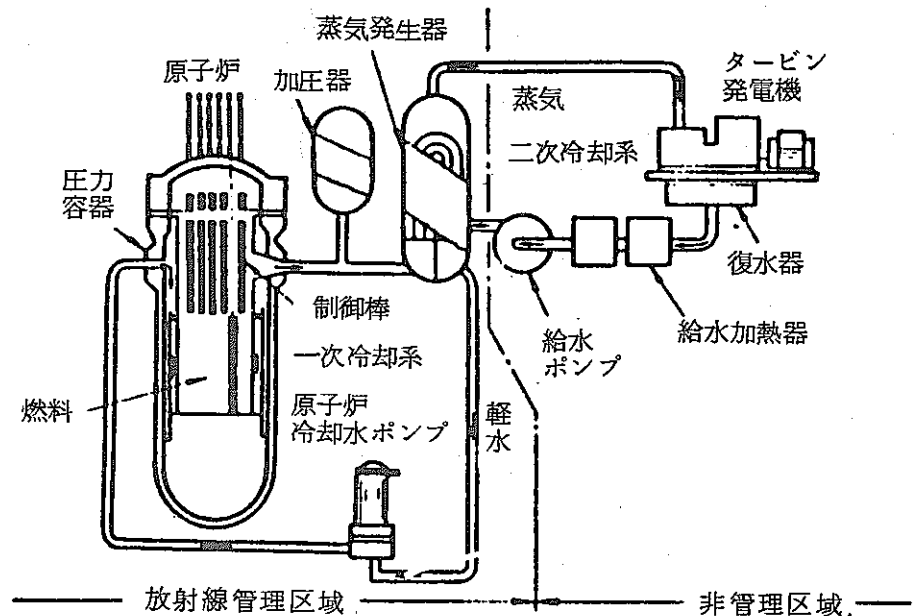


図 2.2-1 加圧水型動力炉概念図

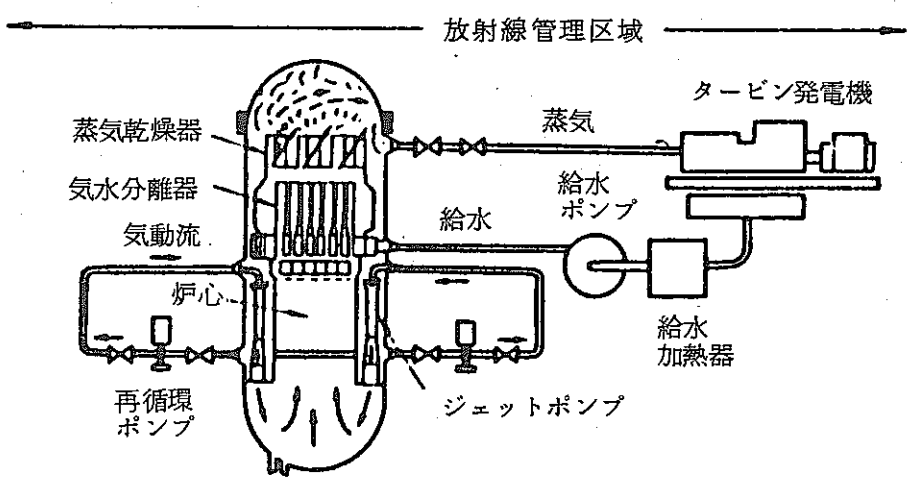


図 2.2-2 沸騰水型動力炉概念図

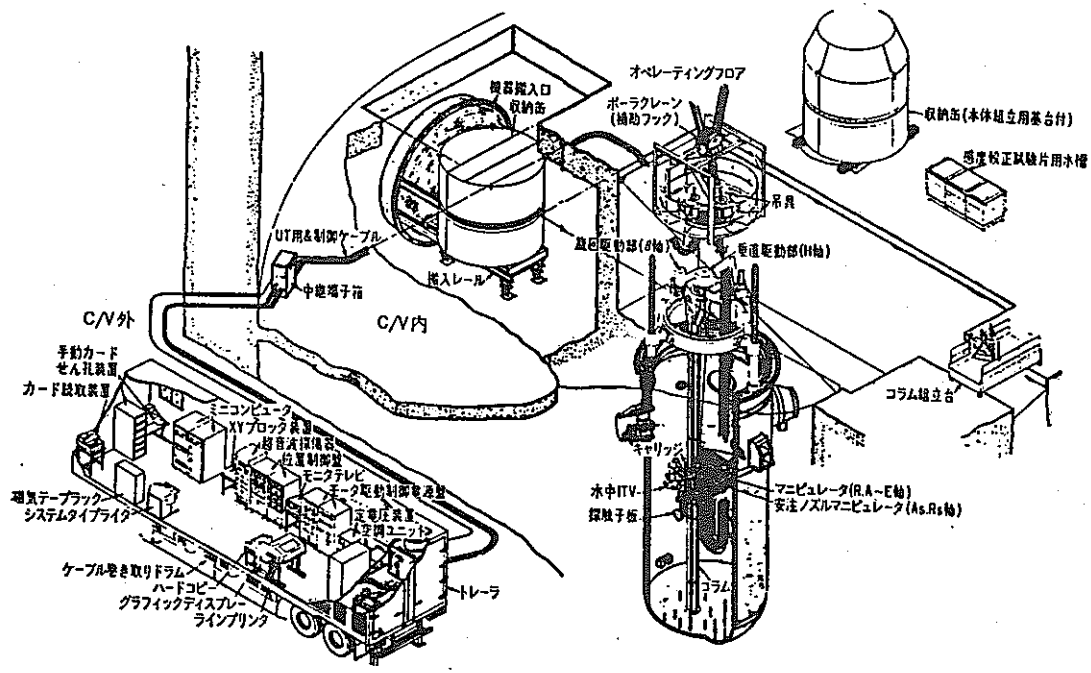


図 2.2-3 原子炉容器超音波探傷装置外観図 (PWR)

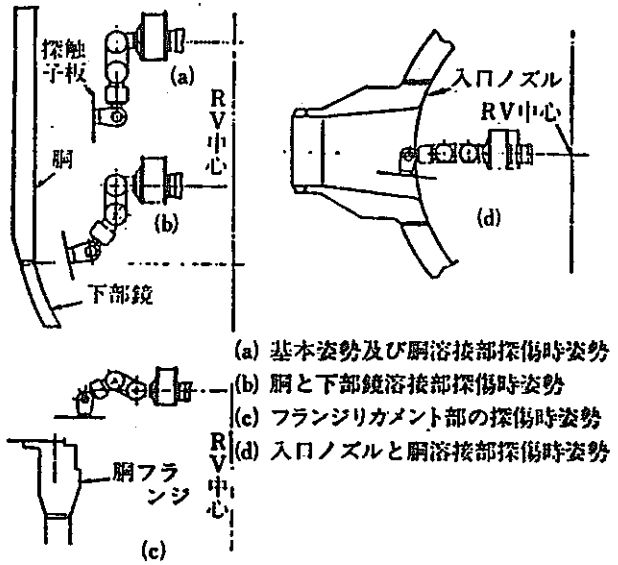


図 2.2-4 各探傷部における探触子板の姿勢

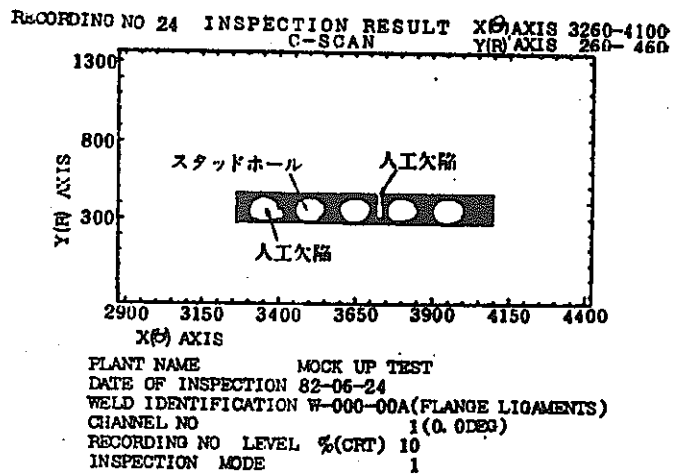


図 2.2-5 C スキャン図の例 (フランジリガメント部)

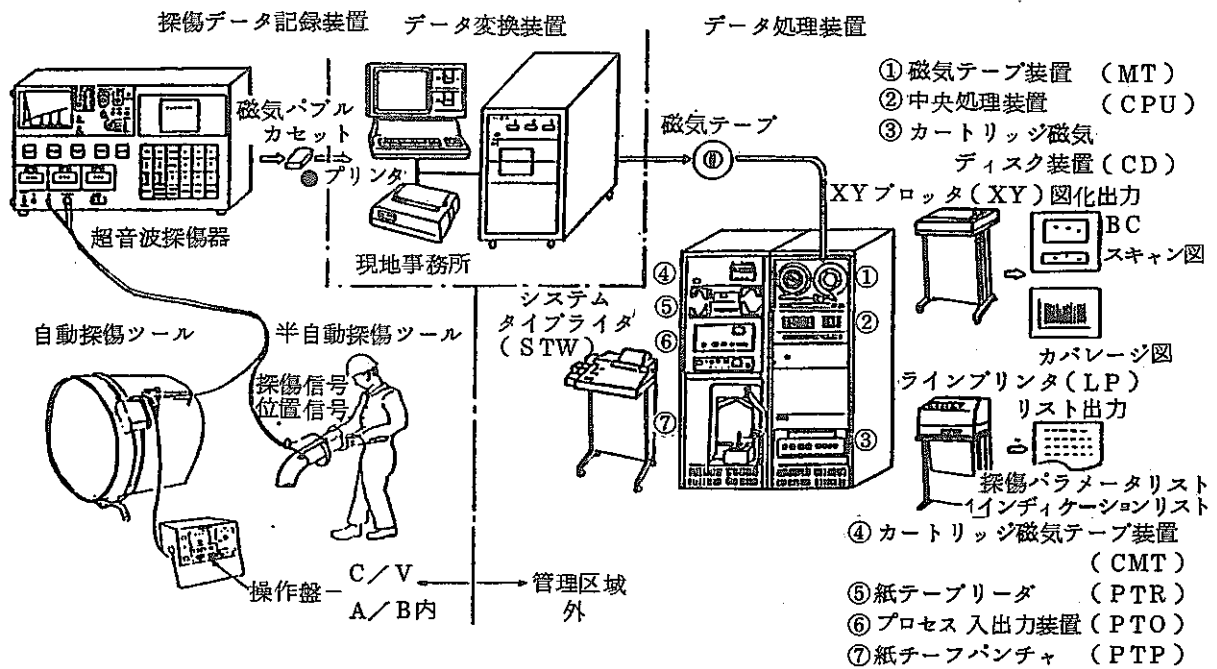


図 2.2-6 配管用自動/半自動超音波探傷装置外観図

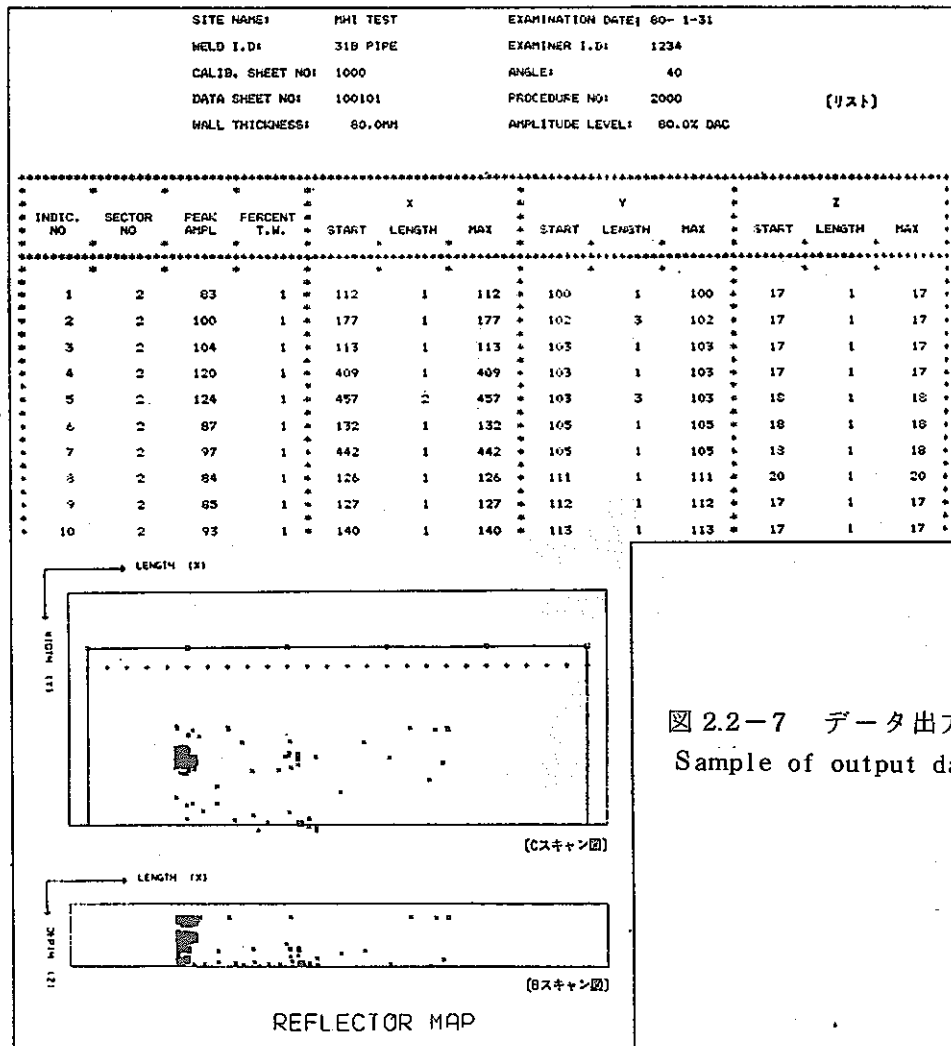


図 2.2-7 データ出力例  
Sample of output data

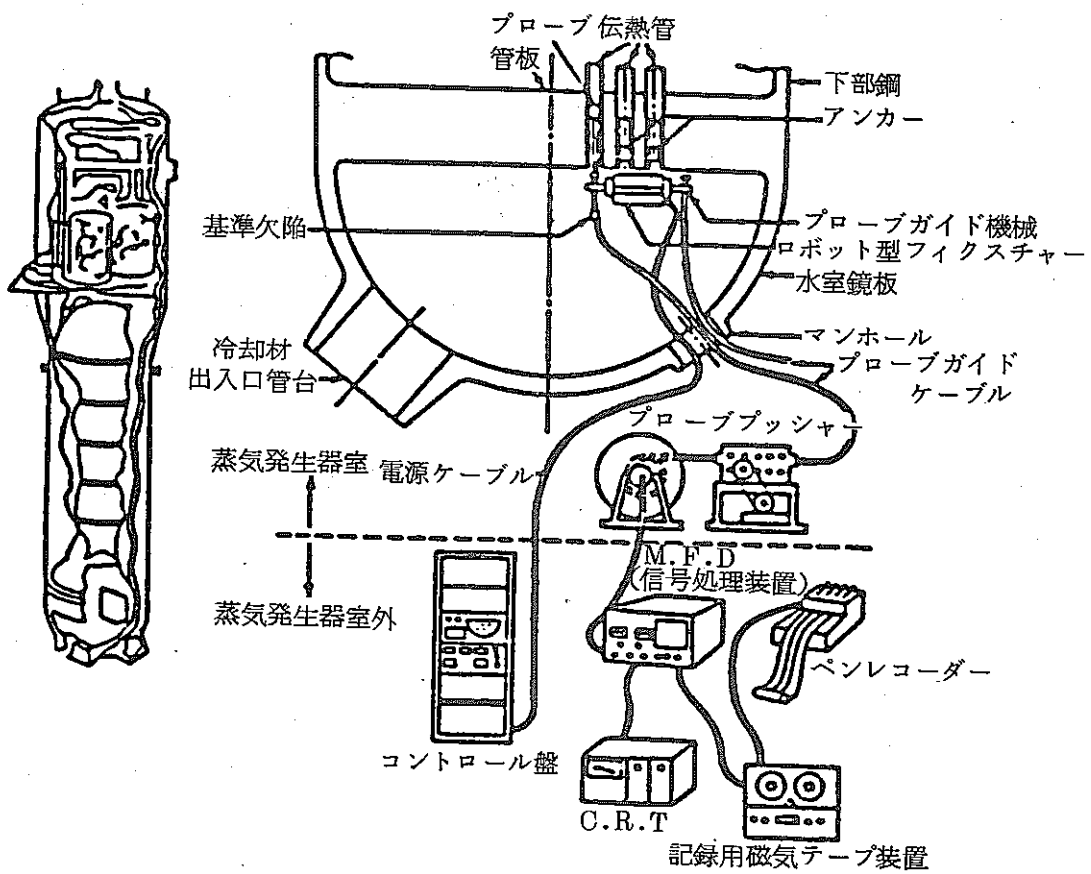


図 2.2-8 蒸気発生器渦流探傷装置全体図

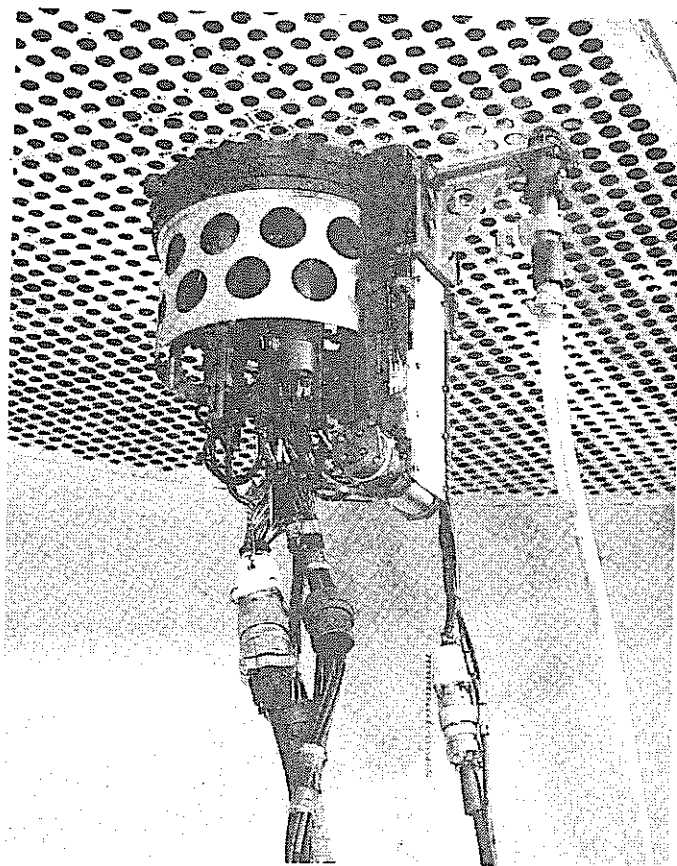


図 2.2-9 歩行ロボットの外観



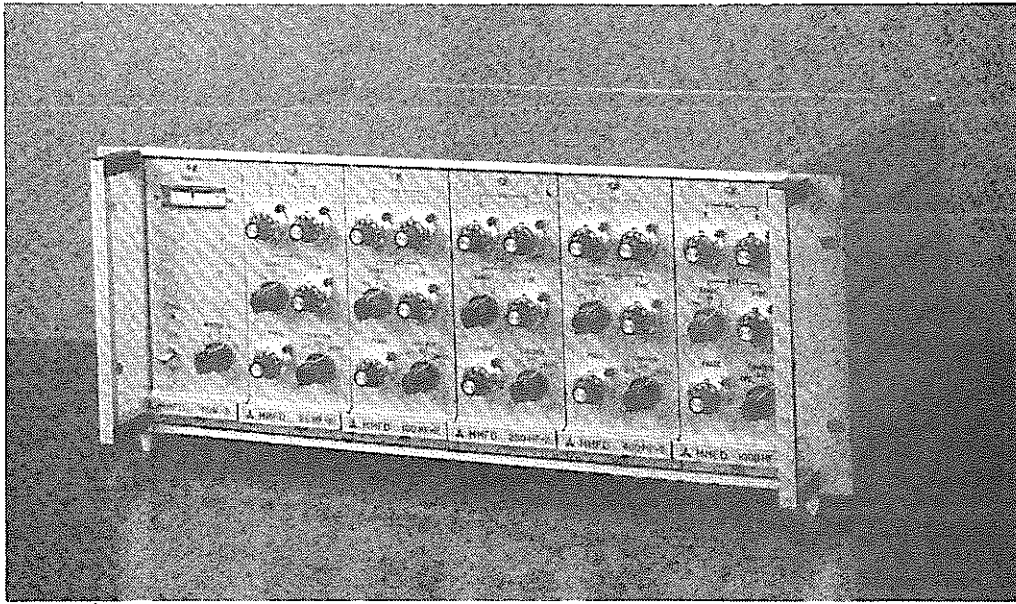


図 2.2-10 多重周波数探傷器

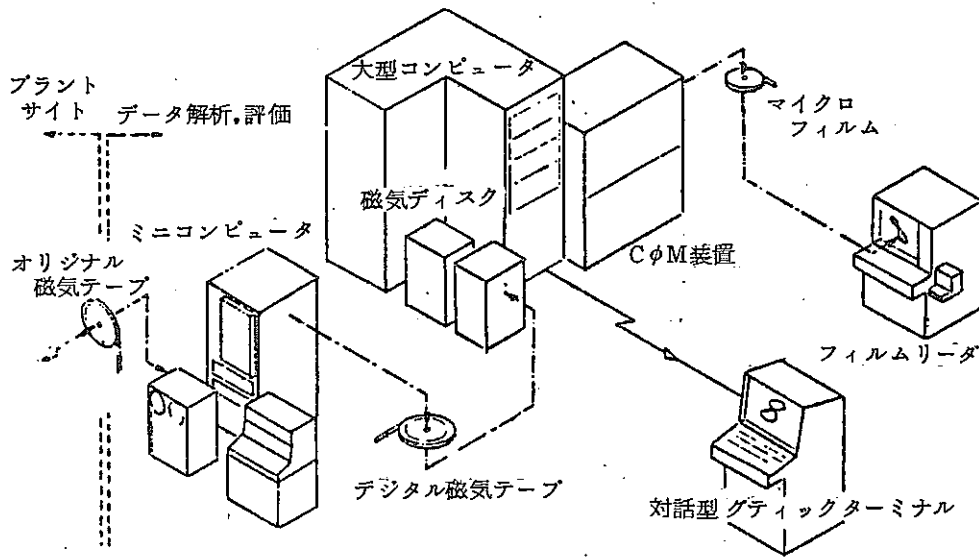


図 2.2-11 データ処理装置の構成

## 2.2.3 BWR ISI技術の現状

### (1) 原子炉圧力容器用超音波探傷装置

原子炉圧力容器耐圧溶接部については、主として超音波探傷法が適用されている。原子炉圧力容器は、わずかな間げきを介して、保温材及び原子炉遮蔽壁に囲まれており、検査対象部位の検査は放射線下で狭隘部での作業のため、検査員の被曝低減、検査効率の向上及び検査の信頼性向上を図る目的で、遠隔自動超音波探傷装置が開発されている。

この装置は、(i)遠隔操作、自動化、(ii)自動記録と信号処理・表示の多様化、(iii)装置の小形化・軽量化の観点で開発検討され、図2.2-12に示すように、各種駆動装置部、制御・データ収録装置、データ処理装置などから構成されている。

超音波探触子は、図2.2-13に示すように一つの探触子に3角度の超音波ビーム送受波子を組み込んだものであり、1回の走査で3角度の同時探傷を行う事ができるマルチビーム探触子が用いられている。

駆動装置は、図2.2-14に示すように原子炉圧力容器の検査対象溶接部に沿って保温材の内側に設置された胴体用軌道に、ISIの都度検査員によって取付けられ、低放射線量区域に設置された制御装置により遠隔自動操作により探傷走行する。更に、縦軌道、周軌道の交点にはターンテーブルを設け、ターンテーブルの回転操作によって駆動装置は進行方向を変え、縦軌道、周軌道上を相互に乗り換え走行ができる。

採取された超音波エコー信号は、探触子の位置信号と共にオンラインでデータ収録装置を経てデータ処理装置に送られ、平面図、断面図、エコー高さ表示図、評価リストなどの各種図表として出力される。

### (2) 配管用超音波探傷装置

配管の耐圧溶接部に要求される体積検査についても、原子炉圧力容器と同様主として超音波探傷法が適用されている。配管における検査対象部位の多くは、比較的放射線量の高い原子炉格納容器内にあり、これら部位を対象に配管用自動/半自動超音波探傷装置が開発されている。

図2.2-15に上記装置の駆動部及び軌道部の構成を示す。配管の直管一直管溶接部、ノズルセーフエンド溶接部には配管用自動駆動装置が、また配管の直管一直管溶接部及び直管一エルボ溶接部には配管用半自動駆動装置が適用されている。図2.2-16に配管用半自動駆動装置を用いた検査作業状況を示す。これら探傷箇所へ搬入される各種駆動装置、仮設軌道などは、特に小型・軽量化及び被検体部への取付け、取外しが容易なように設計・製作されている。

また、超音波探触子より得られた超音波エコー信号は、原子炉圧力容器の場合と同様オンラインでデータ収録装置を経てデータ処理装置に送られ各種図表として出力される。

図2.2-17及び18にデータ処理装置からの出力例を示す。図2.2-17はエコー位置が平面に投影表示された平面図であり，図2.2-18は配管における3角度の超音波入射角による探傷結果を極座標図として示した出力図である。

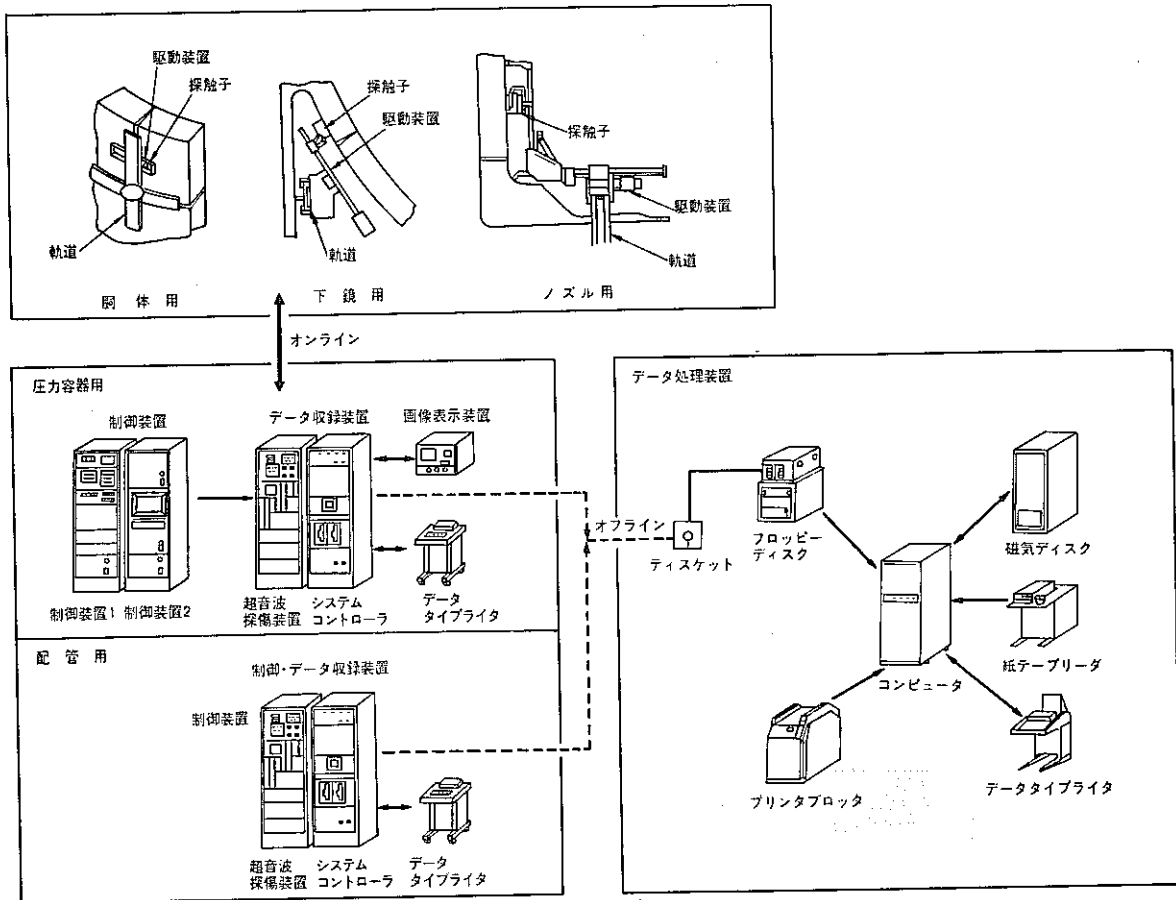


図 2.2-12 原子炉圧力容器及び配管の遠隔自動・半自動超音波探傷装置の構成

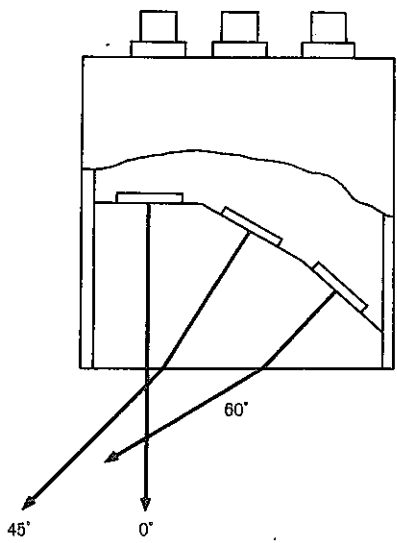


図 2.2-13 マルチビーム探触子

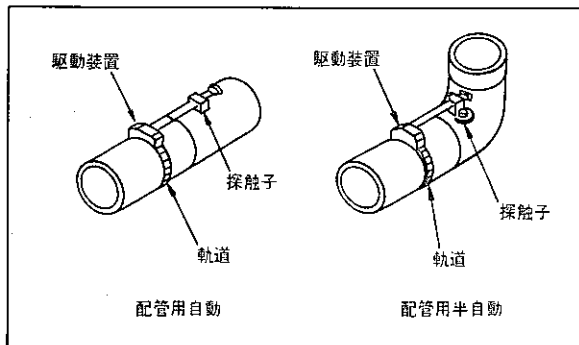


図 2.2-15 配管用自動/半自動駆動装置

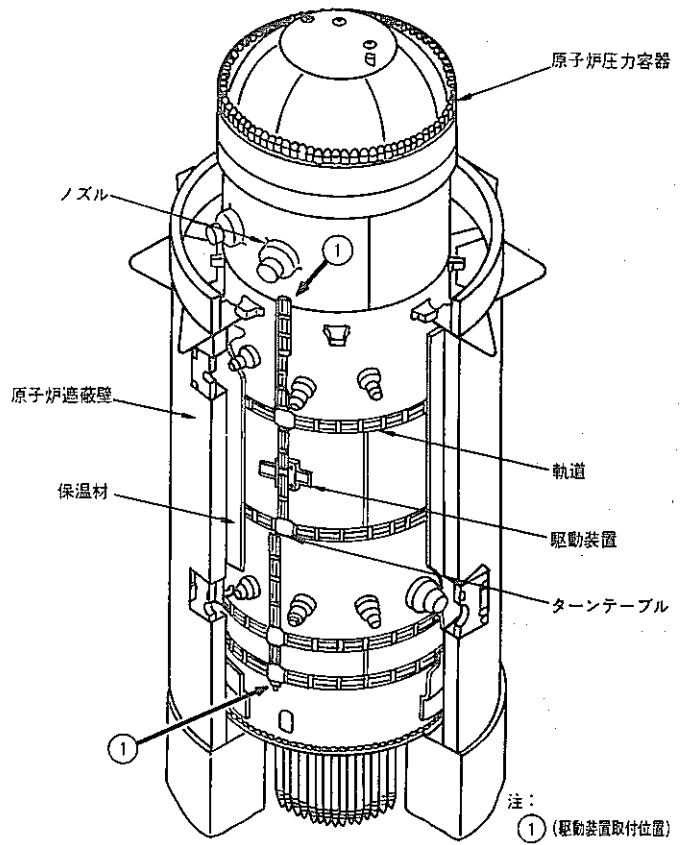
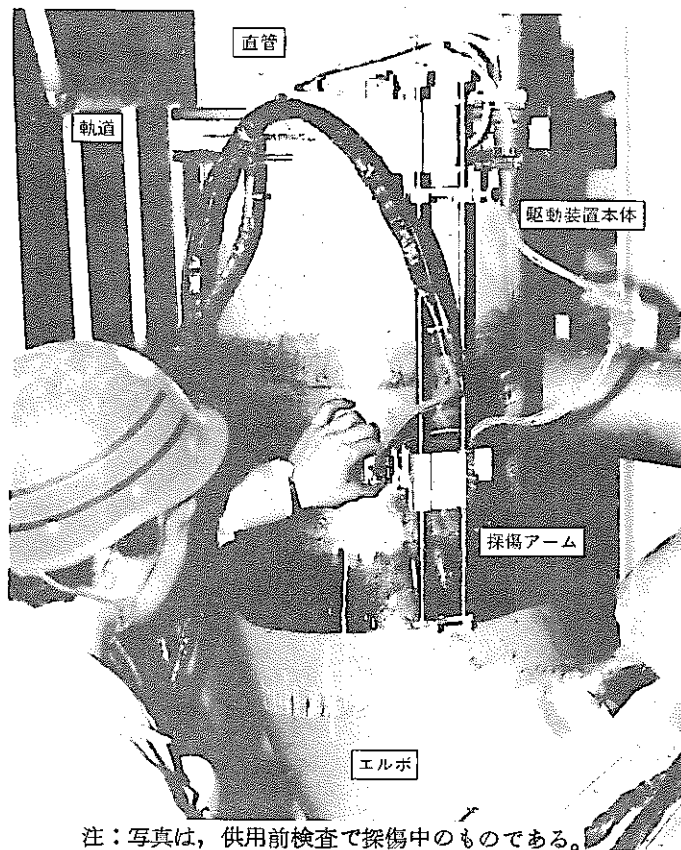


図 2.2-14 原子炉压力容器及び胴体用駆動装置



注：写真は、供用前検査で探傷中のものである。

図 2.2-16 配管用半自動駆動装置

PLANE REFLECTOR MAP

SHEET NO. \_\_\_\_\_  
PART- 3/4

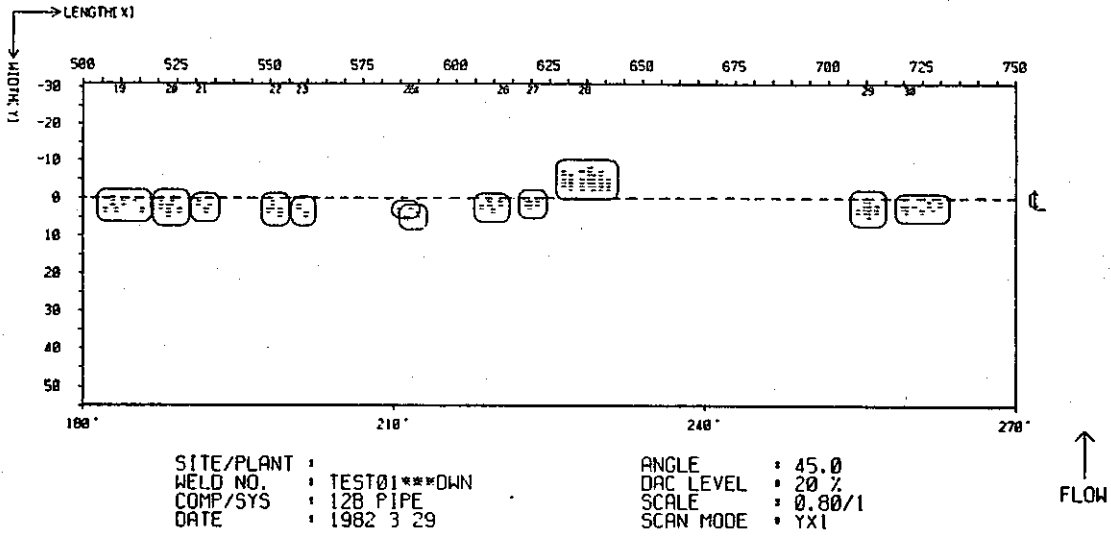


图 2.2-17 平面图

POLAR PLOT

SITE/PLANT :  
WELD NO. : TEST01\*\*\*DWN  
COMP/SYS : 12B PIPE  
DATE : 1982 3 29  
SCAN MODE : YX1

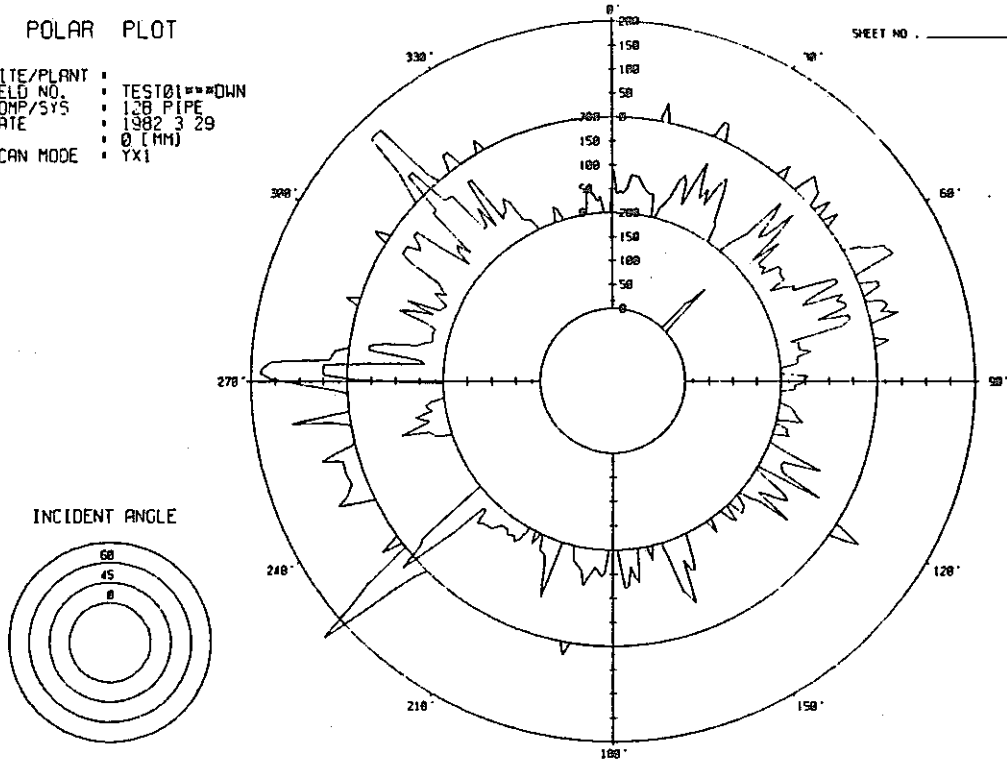


图 2.2-18 极坐标图

### 2.3 海外FBRのISIの動向

諸外国，特にFBRの開発が先行しているヨーロッパ各国においては，採用あるいは計画している炉型に関係なく，ISIに関して以下の共通認識を有しているようである。

- (1) オーステナイト系ステンレス鋼により構成されているFBR冷却材バウンダリに対して，LBB(Leak Before Break)の考え方は成立する。
- (2) 構造欠陥の発生検出手段としての体積試験用装置の開発は継続する必要があるものの，許認可上のISIはナトリウム漏洩監視と肉眼試験を基本とする。
- (3) 体積試験は必要が生じた時のみ行うという位置付けとする。なお体積試験の対象は当面異種金属間の溶接継手部に限定する。

フランスでは，ISIとして許認可上“Systematical inspection”の実施が必要な対象と，欠陥が検出された場合にのみ詳細なInspectionを行なう対象“Equipment inspected as required”とを分けて考えている。

前者に対しては既存の技術に基づく試験を行うこととし，後者に対しては今後の改良，開発を前提とした試験技術の適用を考える。

この様にフランスでは現在の技術水準を認識した上で，今後の技術開発の進展を予測しながら安全性，経済性のバランスを考慮したISI計画を立てている。

現在，開発中の試験装置としては主容器と安全容器の間隙を移動して肉眼試験及びUTによる体積試験を行なう試験装置“MIR”(Module d'Inspection des Reacteurs Rapides)があり，この開発はモックアップ試験の段階に至っている。

西独においては，一部条件付きながらLBBのFBR配管への適用を決めている。ISIとしてはナトリウム漏洩監視と肉眼試験を考えており，体積試験は許認可上実施の必要なしの方針を決定している。これは原型炉に，同じループ型を採用している日本と同様な方向であることを示している。

英国においては，PFRのISIは規制側の所掌範囲外であったこと，実証炉規模のFBRとして計画されているCDFRが未だ許認可の段階まで至っていないことから，ISIについての規制側の対応は未検討であるが，開発側としては，他のヨーロッパ諸国と同様，一次系バウンダリに対し，ナトリウム漏洩監視と肉眼試験の実施を考えている。

ISI試験装置については，体積試験を含み各種試験用に開発を進めているが未だ基礎的研究段階にあるようである。

米国においてはCRBRPが中止とはなかったが、このプラントのISIに関して、開発側DOEはナトリウム漏洩監視と肉眼試験及び二次系の異種金属継手部に対する体積試験は実施するものの、原子炉容器の異材継手については実施しない方針を出している。

なお、HEDLの見解もFFTFの経験から原子炉容器のISIとしての体積試験は不要であるとしている。

一方、規制側NRCはナトリウム漏洩監視と肉眼試験に加え、プラント運転開始後の冷却材バウンダリ構造材の劣化がないことの確認の為に体積試験（但し原子炉容器については異材継手部のみ）の実施を要求している。

結局、同材（オーステナイト系ステンレス鋼）の継手については双方とも「体積試験」は不要との考え方で一致している。

FBR用ISIコードについてはヨーロッパ各国とも未だ整備されてはいない。ASME Sec. XI Div. 3 や国内軽水炉用のコード等を参照してプラント毎に判断しており、将来は作成の必要ありと考えている段階である。

## 2.4 我国のFBRのISIに対する考え方

### 2.4.1 ISIの対象箇所

原子炉施設の安全上重要な機器は、適切な規格、基準等に基づいて、設計、製作、検査等を行い、高い品質とすることにより、その破損の防止が計られている。

ISIは、このような破損防止対策を補完し、破損の規模を限定することによって、当該機器に要求される安全上の機能を確保する手段として、位置付けられるものと考えられる。

従って、ISIの方法としては、単に試験（Examination、肉眼、表面及び体積試験）によって機器の欠陥を検出する方法のみならず、試験（Test、耐圧試験及び漏えい試験）により漏えいの有無等を確認する方法、さらには冷却材漏えいの連続監視により漏えいを早期に検知する方法等が含まれる。

ISIの基本方針を適切なものにするためには、対象とする原子炉施設の特徴を考慮し、適切なISIの方法を選択することが重要と考えられる。

このような観点から、我国のFBRのISIに対する考え方を把握するために、高速増殖炉もんじゅ発電所（以下「もんじゅ」という。）のナトリウム冷却材バウンダリに関するISIの基本計画を見てみると、その概要は次のようになる。

原子炉冷却材バウンダリについては、主要な機器、配管等について溶接部を主たる対象として肉眼試験を主とした試験を行い、また供用期間中を通じてナトリウム漏えい監視を行うこと等により冷却材の漏えいを速やかに検知できるようにする。さらに今後の検査機器開発の成果を取入れることができるように設計上配慮する。一部の構造材については材料監視試験を行い、必要に応じて材料に対する環境効果を評価する。

その他のナトリウム冷却材バウンダリについては、安全性確保上の必要性に応じて試験等を行う。

上記の基本計画による供用期間中検査の概要を表 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 において、「試験等の方法」に記載されている各方法の意義は次の通りである。

肉 眼： 肉眼試験をいう。試験の方法としては直接肉眼試験のほか工業用テレビ(ITV)、ファイバースコープ、ボアスコープなどの光学装置を使用する遠隔肉眼試験がある。例えば 2 次主冷却系配管などは直接肉眼試験を行うが、原子炉容器は遠隔肉眼試験とする。

ナトリウム漏えい監視： ガスサンプリング型漏えい検出器、接触型漏えい検出器などによりナトリウム漏えいの有無を連続監視する。

放射性カバーガスモニタ： 主として対象部分が設置されている室の雰囲気ガス中の放射能をモニタすることにより放射性カバーガスの漏えいを連続監視する。

材料監視： 供用期間中の環境によって構造材に生じる可能性のある材質変化を監視することを目的として試験片を同等の環境下に装荷し、定期的にあるいは必要に応じて取り出し試験を行う。

体 積： 体積試験をいう。超音波探傷、渦電流探傷などの方法により試験を行う。なお、1 次主冷却系配管及び 2 次主冷却系配管については、高温構造等の健全性を確認する観点から、使用温度、溶接構造及び応力条件等並びに接近性を考慮して適切な部位を選定し、体積試験を実施するものとする。

なお、原子炉容器のガードベッセルに囲まれた部分に対して、体積試験の可能性を探るために、研究開発が行われている。



表 2.4-1 ナトリウム冷却材バウンダリの ISI の概要 (もんじゅ)

機 器	対 象 部 分	試 験 等 の 方 法
原 子 炉 容 器	ガードベッセルに囲まれた部分	肉眼, ナトリウム漏えい監視, 材料監視
	ガードベッセル外	ナトリウム漏えい監視 放射性カバーガスモニタ
1 次 主 冷 却 系 循 環 ポ ンプ	外ケーシング	肉眼, ナトリウム漏えい監視, 放射性カバーガスモニタ
1 次 主 冷 却 系 中 間 熱 交 換 器	胴 体	肉眼, ナトリウム漏えい監視
	伝 熱 管	漏えい監視
1 次 主 冷 却 系 配 管	配 管	肉眼, ナトリウム漏えい監視, 体積
1 次 主 冷 却 系 逆 止 弁	弁 箱	ナトリウム漏えい監視
1 次 補 助 ナ ト リ ウ ム 系 配 管	配 管	ナトリウム漏えい監視
2 次 主 冷 却 系 循 環 ポ ンプ	外ケーシング	肉眼, ナトリウム漏えい監視
蒸 気 発 生 器	胴 体	肉眼, ナトリウム漏えい監視
	伝 熱 管	体積
2 次 主 冷 却 系 配 管	配 管	肉眼, ナトリウム漏えい監視, 体積
補 助 冷 却 設 備 空 気 冷 却 器	伝 熱 管	ナトリウム漏えい監視
炉 外 燃 料 貯 蔵 設 備	ナトリウムバウンダリ	ナトリウム漏えい監視

## 2.4.2 試験環境条件

FBRプラントのナトリウム冷却材バウンダリについて、ISIとして各種試験を実施する上での試験環境を検討するために、「もんじゅ」を例にとって調べてみると、次のことがいえる。

原子炉冷却材バウンダリの機器は、放射性腐食生成物の付着等により、冷却材をドレンした状態で、最大約1R/H程度の放射線環境となる可能性がある。(冷却材をドレンすれば、試験時の温度は常温と考えてよい。)

原子炉冷却材バウンダリのうち、原子炉容器まわりは放射化の水準が高く、約 $10^3$  R/H程度の放射線環境を考慮しておく必要がある。また、原子炉容器まわりについては、冷却材をドレンせずに試験を実施することになるので、定温停止状態の冷却材温度(約200℃程度)に相当する試験温度条件を考慮しておく必要がある。その上、ガードベッセルとの間の空間は制限されている(約300mm巾)ので、試験機器を狭隘な空間で遠隔操作する必要がある。

2次主冷却系配管のようなナトリウム冷却材バウンダリでは、原子炉冷却材バウンダリよりは制約が少ない試験環境といえる。

これらの試験環境をまとめて、表2.4-2に示す。

表2.4-2 ISI対象機器と試験環境(もんじゅ)

機 器 (注1)		寸 法	試 験 環 境			
			温 度	放 射 線	内側Naの有無	雰 囲 気
原 子 炉 容 器 (ガードベッセルに囲まれた部分)		約 $7\text{ m}\phi \times 50\text{ mm}^t$	(200℃)	約 $10^3\text{ R/H}$	有	$\text{N}_2$ (注3)
1次主冷却系 配 管	原 子 炉 容 器 廻 り	約 $600\text{ mm}\phi \times 14.3\text{ mm}^t$	(200℃)	約 $10^3\text{ R/H}$	有	$\text{N}_2$ (注3)
	そ の 他	約 $800\text{ mm}\phi \times 11.1\text{ mm}^t$ (ホットレグ配管)	常 温	約 $1\text{ R/H}$ (max.)	(注2)	Air
2次主冷却系配管		約 $550\text{ mm}\phi \times 9.5\text{ mm}^t$	常 温	—	(注2)	Air

(注1) 構造材料は、SUS304。

(注2) 体積試験は当該ループのナトリウムをドレンしてから実施することを想定。

(注3) 試験時Air雰囲気に置換することも検討されている。

### 2.4.3 試験技術の開発

FBRプラントのISI技術の研究開発の課題は、

- (1) 狭隘な空間での遠隔操作による試験接近手段の開発
- (2) 試験機器の耐環境性開発

に要約される。その上で所要の欠陥検出性を満しながら、よりコンパクトで信頼性の高いシステム構成とする事が要求される。

肉眼試験においては、冷却を必要とするITVにかわり、耐熱耐放射線性のファイバースコープの開発により、大巾に簡素化がはかれる見通しが得られている。一方体積試験技術においては、従来のコンベンショナルなUT技術については、ほぼ耐環境性についての目安は得られているものの、原子炉容器まわりのような環境下では、カプラントの供給、回収手段を含めた試験システムの構成は遠隔操作装置全体としてかなり大型のものとなり、プラント周辺設備へのインパクトも大きく、かつ検査性をも阻害する結果となっている。

このため原子炉容器まわりのように狭隘な間隙を前提に考える場合には、特に小型化、システムの簡素化を追及する必要がある、システムを構成する機器を小型化し、かつ耐環境性を持たせ冷却装置を不要にするとともに、カプラントを必要としない体積試験技術を開発する事が肝要である。

FBRのナトリウム冷却材バウンダリの体積試験については、2.4.1項の各部位に対し引きつづき、前記要求を満たす試験手法、試験システムを開発し、FBRプラントの特徴に適合し、適用時点の技術レベルを反映したシステムを採用することが推奨される。

### 2.4.4 体積試験の欠陥検出性について

前述のように、FBRプラントのナトリウム冷却材バウンダリに関しては、その試験環境に適した体積試験技術が研究開発されている。このような試験技術の有用性を適切に評価するためには、その欠陥検出性に関して、どのような水準の要求をすべきかということを検討しておく必要がある。

第1章に述べたように、FBRのナトリウム冷却材バウンダリは、その材料に脆性的挙動を示さないオーステナイト系ステンレス鋼を使用しており、バウンダリに作用する内圧が低いこととあまって、安全性確保の観点から許容しうる欠陥の大きさが、その壁厚に比べて十分大きい。したがって、軽水炉の原子炉冷却材圧力バウンダリ、とくに原子炉(圧力)容器における急速な伝播型破断を防止する観点からの欠陥検出性の要求に比べると、壁厚比として見た検出すべき欠陥の寸法ははるかに大きいものになる。

一方、現行の軽水炉における非破壊試験、特に放射線透過試験、超音波探傷試験等の体積試験にあっては、有孔形透過度計やドリル穴等を基準として用いている。その欠陥検出性に

に基づき、建設工事中の検査に当たっては、試験結果に対して原則として「割れ状欠陥指示」は寸法の大小を問わず許容しないという形で適用されている。これらの考え方が供用期間中の試験にも反映されており、試験技術に関して規定された欠陥検出性と、試験結果に対する割れ状欠陥の許容度は直接的に結びつかない。

このような背景の下で、前述のようなFBRのナトリウム冷却材バウンダリの特徴を考慮して、体積試験に関する欠陥検出性の要求を具体的に表示するためには、検定法としては在来の方法を用い、工学的な判断により標準とする穴等の寸法を適切に設定するという方法が考えられる。

## 第3章 体積試験における新技術の調査

### 3.1 はじめに

材料中の欠陥を検出する方法として、従来から、超音波探傷法、渦電流探傷法、X線あるいは放射性同位元素を用いた透過試験法などが採用されている。これらの試験法は、既に製品検査等で活用され、実用性のある試験検査機器として広くゆきわたっている。しかしながら、各試験によっては適用範囲の限界により、どんなものでも試験できるというものではなく、各種の試験法を組み合わせ実施している場合もある。例えば、表面疵の検出手段としては、もっとも一般的な肉眼試験も現状では検査の重要な位置を占めている場合もあり、磁粉探傷、液体浸透探傷は、欠陥によって生じる物理・化学的な現象を目を補促する試験法である。近年、エレクトロニクス、コンピュータ技術の発展に伴ない、検査技術を駆使した医療診断装置が急速に発達するとともに、非破壊検査の分野でも自動化を目的とした検査技術の進展が顕著である。そこで今回はFBRプラント・ナトリウム冷却材バウンダリの供用期間中における体積試験への適用性を検討するために、比較的新らしい非破壊検査技術を対象として、現時点における技術レベルについて、幅広く文献調査した。

### 3.2 調査内容

#### 3.2.1 調査対象

非破壊検査技術のうち、磁粉探傷、液体浸透探傷のように表面疵の検出を中心とした表面試験法を除き、体積試験が可能な検査技術を調査対象とした。さらに、過去5年間で、検査技術の開発に関する文献があり、従来技術に対してあきらかに技術進展が認められる検査技術を探り上げることとした。なお、従来のA、B、Cスコープ方式超音波探傷法は、軽水炉ISIとして利用され自動化も進んでおり、今回の調査対象からは除いた。対象に選定した新技術及び主な特徴を表3.2-1にまとめて示す。

#### 3.2.2 調査結果

新検査技術の調査項目は、(i)その技術の特徴となる原理、(ii)センサの重量及びその使用温度、(iii)欠陥を検出でき得る深度と最小欠陥の大きさ、(iv)欠陥のサイジング精度、(v)試験に要する時間、(vi)自動、手動試験の水準および(vii)その技術の実用化する上での課題等である。各項目につき、文献の記載内容をまとめた。詳細不明の場合は( )で推定値、又は、充分予想される事項を表記してある。

以下、各新技術の調査結果を記述する。

表 3.2 - 1 体積試験における新技術の調査対象

分野	技術名称	主な特徴	分類記号
超音波利用	電子走査式 超音波探傷法	医療分野で発展した技術で、近年、非破壊検査に積極的に採用されつつある。短時間で欠陥を映像化できるのが特徴。	E
	超音波 ホログラフィ	欠陥を立体的に映像化できるのが特徴で、欠陥形状の把握、サイジングの有効な方法である。	H
	開口合成法	ホログラフィと同様、欠陥を高精度で映像化するのが特徴で、処理表示法を簡略化した方法が採用され始めている。	S
	超音波散乱法	超音波探傷で困難な表層部欠陥の定量測定を目的とした方法で、欠陥深さの測定精度に顕著な向上がみられる。	D
	A E 法	歴史が長い方法であるが、近年、材料疲労の評価、プラント検査への新しい展開がみられる。	A
光・電磁気 利用	レーザ超音波法	探傷法としては未だ完成していないが、非接触で超音波探傷が出来得る新技術である。	L
	電磁超音波法	非接触式超音波探傷法として実用化がはかられつつあり、斜角探傷等進展がみられる。	M
	渦電流探傷法	欠陥検出を目的として広く用いられている方法であり、近年、欠陥の定量測定に進展がある。	C
	電気抵抗法	従来、材料強度の評価手段として用いられてきた方法であり、欠陥のサイジングを目的とした実用化の進展がみられる。	P
放射線利用	X線・γ線CT	医療分野で発展した技術で、近年非破壊検査への利用が盛んである。非接触で試験し、複雑な内部構造を映像化できる。	X
	ラジオグラフィ	透過試験として利用されている方法であり、これまでのフィルム撮影にかわり、測定、データ処理のエレクトロニクス化が顕著である。	R
	中性子 ラジオグラフィ	透過能力の最も高い中性子を用い大型機器の検査用として開発する動きが活発になっている。	N

## (1.1) 電子走査式超音波探傷法(リニアアレイ法) [E]

### [I] 技術概要

#### i) 原理

電子走査式超音波探傷法とは、1個の探触子の中に複数の振動子を配列したものをを用いる方法であり、配列の種類として、図3.2-1に示すような、リング・アレイ、リニア・アレイ、2次元アレイの三種がある。

この各振動子をパルスで励振するタイミングと強度を電子的にコントロールし、種々の超音波ビームを合成する。最も実用化の進んでいるリニア・アレイにおいては、図3.2-2に示すように、パルスのコントロールにより、三つの機能を発揮することができる。

(a)において入射角はパルスの遅れによりコントロールすることができ、このパルスの遅れを変化させることにより試験体内を走査することができる。これをセクター・スキャンという。

(b)においてパルスの遅れをコントロールすることにより焦点位置を可変にすることができる。多数の振動子の中の隣接する数個の振動子で焦点ビームを作り、これを1個ずつずらして走査していく方法をリニア・スキャンという。セクター・スキャンを行いつつリニア・スキャンを行う方法を複合スキャンという。

(c)においてパルスの強度分布を適切な形に選ぶことにより、疑似信号の原因となる副極(サイド・ローブ)を抑制することができる。

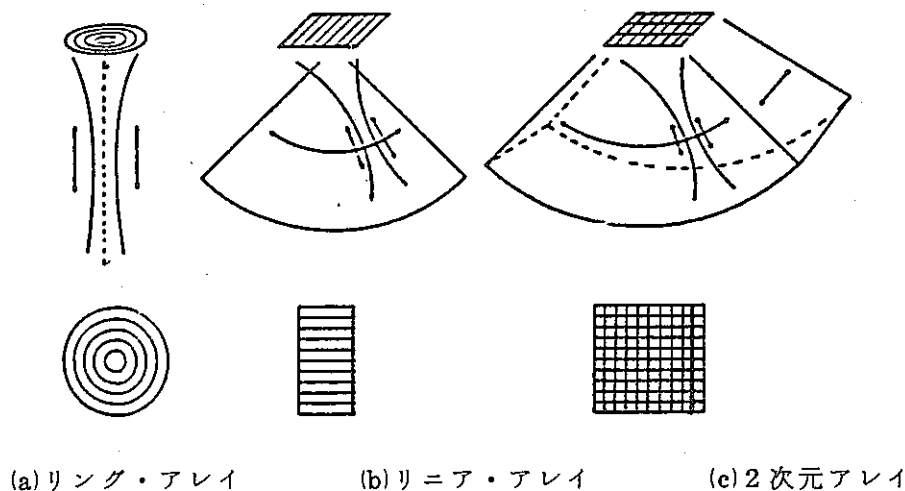
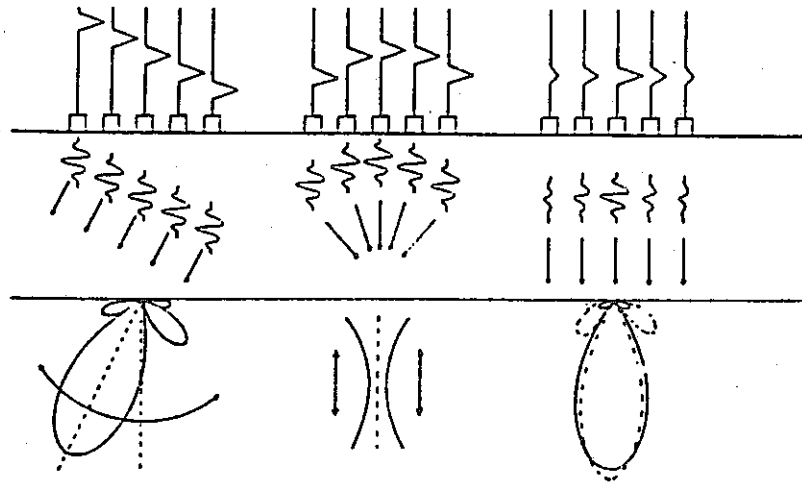


図 3.2-1 アレイの種類



(a)入射角可変

(b)焦点可変

(c)サイド・ローブ抑制

図 3.2-2 電子走査による三つの機能

ii) 適用例

現在開発段階であり、原子力プラントに適用された例はない。

iii) センサ

サイズは長さが100 mm以内であり、使用温度は通常の探触子と同等である。

iv) 検出能力

探傷深度は焦点距離程度（約100 mm）であり、検出限界は探触子のピッチ等によって決まると考えられ、3 mm以下の欠陥は見逃す場合がありうる。

v) サイジング精度

一例では±3 mm程度であった。

vi) 検査時間

電子走査式超音波探傷法の最大のメリットの1つは、手による走査を電子的に行うことにより、検査時間を大巾に短縮できることであり、通常の探傷で見つかった欠陥の寸法・位置・形状を詳細に知るには手探傷では時間のオーダーを要するが、本法では秒のオーダーですむ可能性がある。

vii) 自動化について

走査を電子的に行うので、原理的には探触子は固定しておけばよいので、自動化は極めて有望である。



〔Ⅱ〕開発状況

i) 国内状況

国内においては、基礎的な検討が進められているが、東芝では製品化も行われており、その主要な仕様は次の通りである。

表 3.2 - 2 電子走査形超音波探傷装置の主要機能

項 目	機 能
探 傷 周 波 数	2.4 MHz
送受信チャンネル数	リニア走査 64 チャンネル セクタ走査 32 チャンネル
超 音 波 モ ー ド	縦波
探 傷 距 離	鋼中 500 mm
電 子 走 査 範 囲	リニア走査 197 mm セクタ走査 -60° ~ +60°
表 示 方 式	波形表示 (A スコープ) 断面像表示 (B スコープ)

表 3.2 - 3 アレイ形探触子の種類

種 別	周 波 数 MHz	振動子間隔 mm	振 動 子 数	探触子寸法 mm	用 途
セクタ走査用	2.4	1.5	32	48×24	直接接触
	2.4	0.35	32	12×12	直接接触
リニア走査用	2.4	2.0	64	128×16	直接接触
	2.4	1.5	64	96×16	水 浸

製作段階並びに I S I において、実際にこのような装置を適用することにより、電子走査式超音波探傷法の特徴・問題点が明らかにされるものと思われる。

ii) 海外状況

海外では西独、米国等で活発な研究・開発が行われているが、実欠陥への適用、製品化の動きはこれからのようである。

〔Ⅲ〕調査内容

E - 301 長井, 柏谷, 内田, 柿原

- 「電子走査型超音波探傷法の部分溶込み溶接部への適用」  
非破壊検査 Vol. 32 №9 (昭58) pp756-757
- E-302 窪田, 佐々木, 木野ほか  
「リニアアレイプローブによる電子複合走査式超音波探傷法」  
NDI資料 21040 (昭59) pp 27-32
- E-303 井出  
「超音波医学機器の進歩」  
非破壊検査 Vol. 29 №10 (昭55) pp 688-693
- E-304 W. Gebhardt  
“Improvement of Ultrasonic Testing by Phased Arrays”  
The 2nd Japanese - German Joint Seminar (1983)
- E-305 W. Gebhardt, F. Bonitz, H. Woll  
“Defect Reconstruction and Classification by Phased Arrays”  
Materials Evaluation/40/1982. pp 90-95
- E-306 D.S. Dean  
“A Review of Ultrasonic Transducer Arrays”  
British J. of NDT 1979 pp 140-146

#### 〔IV〕適用性

現状では軽水炉プラント I S I への適用の実績が殆んどなく、又、実欠陥の検出、寸法測定のためのデータが少ないため、このデータを集めることが、まず必要である。

探触子の寸法が大きくなるので、曲率の大きいものに対して直接々触法で試験する場合に、接触性の問題について検討する必要がある。

オーステナイト鋼溶接部の探傷には、結晶粒界からの反射等の問題をアレイ探触子として独自に検討する必要がある。

その他の問題（自動化、高温、放射線の影響等）については、通常の探触子の場合と基本的に同じである。

技術名称：電子走査式超音波探傷法

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-301	<p>リニア・アレイをセクタースキャンし、放電加工スリット長、溶接部未溶着部長が精度良く測定されることを確認した。</p> <p>探触子：2C1532PA(東芝) 2.4MHz, 1.5mmピッチで32コ スキャン： ±60°, 1°ピッチ 集束点： 100mm(1定) 探傷器： AU100(東芝)</p>	<p>K開先溶接部 未溶着部 (SM41A)</p>	約50mm長	常温	—	—	約±3mm	—	○	各種実欠陥による 検出性能の確認

技術名称：電子走査式超音波探傷法

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-302	<p>リニア・アレイを複合スキャン（セクタースキャン+リニア・スキャン）し、T形隅肉溶接部の欠陥を探傷し、欠陥と溶接肉盛部外面とが区別されることを確認した。又、レール継手部ボルト穴周辺のノッチ傷を検出した。</p> <p>探触子：                      2.3MHz：ピッチ1.5mm                      5MHz：ピッチ1mm                      素子数：64コ（8コ群）                      セクタースキャン可能範囲：                      2.3MHz：±40°                      5MHz：±20°</p>	T形溶接継手、 レール穴	—	常温	—	—	—	断面像形成 時間：1.1s フレーム数： 20フレーム/S	○	各種実欠陥による検出性能の確認

技術名称：電子走査式超音波探傷法

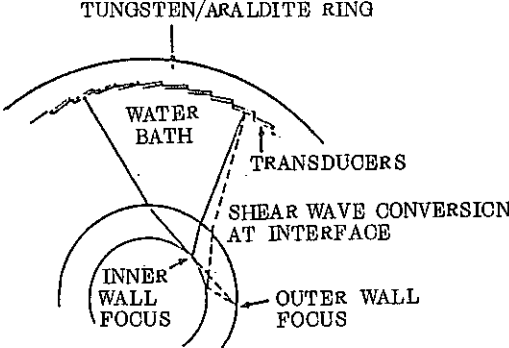
No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-303	超音波医学機器の進歩について解説したものであり、断面像（Bスコープ）を短時間で得るために開発された高速走査法の一方法として電子走査法を位置付けており、高速走査法にはその他に高速機械走査法がある。走査法としてリニア走査とセクタ走査が紹介されている。	人体，頭部， 心臓，胎児	約 50×10×20	常温	約 300mm	—	±2mm	30枚/秒	○	医療機器から鋼材の探傷器への技術のtransferは有益であろうと思われる。

技術名称：電子走査式超音波探傷法

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-304	<p>下記の手法について概説している。</p> <p>(1) リニア・アレイによる焦点探触子</p> <p>(2) リング・アレイによる収束範囲の広い探触子</p> <p>(3) リニア・アレイ，セクター・スキャンを用いたピーク点検出による欠陥像再生法</p> <p>(4) リニア・アレイ，セクター・スキャンの欠陥像の重ね合せ(コンパウンド化)による再生</p> <p>(5) リニア・アレイ，セクター・スキャンを用いたピーク点検出による欠陥の方向の検出</p>	鋼材試験片	長さ 30 mm	常温	100 mm	10 mm	—	—	○	各種実欠陥による検出性能の確認

技術名称：電子走査式超音波探傷法

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-305	<p>種々の手法について概説されているが、特に下記の点がユニークである。</p> <p>(1) リニア・アレイのコンパウンド・スキャンによる溶接部の探傷</p> <p>(2) アレイを用いると一般に redundancy が高いので加算法により結晶粒界等からの反射のようなノイズを除去することができる。</p>	200t × 807 × 1400 鋼材突合せ溶接部	長さ 30 mm	常温	100 mm	10 mm	—	—	○	クラックのような面状欠陥と、体積を有する欠陥の識別をコンパウンド・スキャンで行うことについて述べているが、もっとデータを集める必要がある。

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-306	<p>各種の方法について概説したものであり、具体的な応用として下図のような管の周方向走査を管と同心円状に配置した90°のアレイを10個ずつ(1~10, 2~11, …)集束させながらスキャンしていく方法を紹介している。</p>  <p>Tube testing alloy. Whittington</p>	管 材	—	常温	—	—	—	—	◎	欠陥検出，寸法決定性能について定量的なデータを探るべきである。



## (1.2) 電子走査式超音波探傷法(リングアレイ, マルチアレイ方式)〔E〕

### 〔I〕 技術概要

電子走査式超音波探傷法とは1個の探触子の中に複数の振動子を配列したものをを用いる方法であり各振動子を励振するパルスのタイミングと強度を電子的にコントロールし, 種々の超音波ビームを合成する。

この配列の種類として, リングアレイ, リニアアレイおよび2次元アレイがあり, さらに同一周上配列し, 電子切替によりビームを回転走査するマルチアレイがある。

- i) リングアレイ型探触子は, 同心状に配列した円形の各振動子に対し, 時間をずらしてパルスを励振させることにより中心軸上の任意点に焦点を形成するようにしたものである。このアレイでは超音波ビームの焦点領域を長くとれること, ビームを細く絞れることから方位分解能を改善し, 欠陥評価精度向上が期待される。
- ii) マルチアレイ型探触子でFBRのSG伝熱管を対象とした探触子は管の全方位を探触子を回転することなく探傷できるよう管の円周上に複数の振動子を配列し, 電子切換により順次動作させるようにしたものである。

### 〔II〕 開発状況

#### i) 国内状況

- a) リングアレイに関しては実機に適用した例は報告されていないが, 日立において試作装置を用い鋼材試験片の人工欠陥により特性調査を行った結果, 欠陥寸法の定量化や評価精度向上に有効な手段であることが確認されている。
- b) SG伝熱管のISIを対象としたマルチアレイ型探触子の開発についてPNCの受託研究として行った結果が報告されており, 電子走査により回転走査を行う管内挿入式マルチアレイ型超音波探触子の適用の見通しが得られている。

#### ii) 海外状況

- a) リングアレイに関しては国内と同様試作実験が進められており, 理論通りのフォーカス特性が得られることを確認し, 今後の実用化への見通しを得た段階といえる。

### 〔III〕 調査内容

調査した文献を下記に示し, 技術内容の要約を調査票に示す。

E-101; “可変焦点集束ビーム探触子による超音波探傷法”

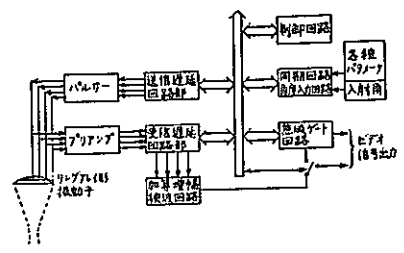
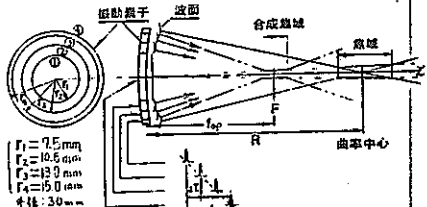
佐々木, 窪田

NDI第2分科会資料 No.2935 (S.57.9)

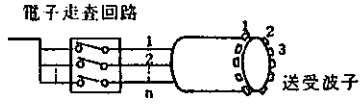
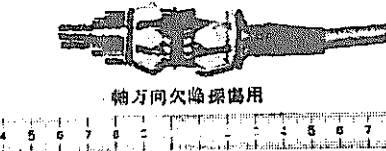
- E-102 ; " Annular Array Search Units and Their Potential Application in Conventional Ultrasonic Testing System J.T.McElroy and K.F.Briers Materials Evaluation/October 1979
- E-103 ; " 管内挿入式マルチアレイ型超音波プローブ "  
木野, 佐々木  
NDI VoL.32 №2
- E-104 ; " 電子セクタスキャン式超音波探傷装置の開発 "  
佐藤, 佐々木  
NDI VoL.30 №9
- E-105 ; " アレイ型超音波探触子の音場分布について "  
長井, 内田  
NDI VoL. 30. №2
- E-106 ; A PVDF Dynamically Focused Transducer" W.E Glepr,  
J.B.O Maley  
Materials Evaluation/41/November 1983

#### (IV) 適用性

- i) リングアレイは欠陥評価精度向上を目的としたものであり, 主として欠陥の定量評価や精密探傷に有効である。現状では開発段階の技術であるが基礎はほぼ確立されており今後実用化装置を開発してゆけば実機への適用は可能と考えられる。但し, 他の超音波技術と同様に常温での適用が条件となり, 高温環境下での適用はできない。
- ii) SG伝熱管ISI用マルチプローブは, 実機適用への見通しが得られており, 今後の課題としては
- (a) マルチチャンネル超音波装置の開発
  - (b) 実機規模のモックアップによる実証が挙げられる。

No.	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-101	 <p>焦点制御用送受信部の 構成ブロック図</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>鋼 材</li> <li>鋼溶接部</li> </ul>	(実験用) 振動子; $\phi 30$ (45° 5MHz)	常温	路程; 20~100mm  集束ビーム 径; $\phi 1.4\sim 4\text{mm}$	偏差; 約 0.4mm	2mm程度の 欠陥のサイ ジング可 (人工欠陥)	走査速度 10 mm/s 対応可	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>実用化装置の開発</li> </ul>
	$f_{\theta} = \left[ \frac{1}{R} - (2v \cdot \frac{\Delta r}{r^2}) \right]^{-1}$ <p>ただし、<math>v</math>: 媒質中の音速、<math>R</math>: 曲率半径</p>  <p>リングアレイ形振動子によるビーム集束の原理</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ビームの尖鋭化</li> <li>方位分解能向上</li> </ul>									

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題																																																																																																																				
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界																																																																																																																									
E-102	<p>DETERMINATION OF EXCITATION DELAY PERIODS</p> <p>PULSE DELAY TIME</p> <p>OUTERMOST ELEMENT      INNERMOST ELEMENT</p> <p>ARRAY ELEMENTS</p> <p>-Determination of excitation pulse delay schedule.</p>	鋼材及び鋼溶接部	下表参照 ○垂直： 環状 ○斜角45°： 分割環状	常温	路程，下記図参照	垂直：鋼中 10~40mm 集束ビーム径 垂直：5mm 斜角：5mm	—	—	—	△	固定焦点探触子に比べ、分解能が低下する。																																																																																																																				
			<p>図 45°焦点範囲</p>		<p>図 0°焦点範囲</p>																																																																																																																										
<p>表 探触子サイズ</p> <p>TABLE 1. Physical Characteristics of Annular Arrays Produced in the Program</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Piezoelectric</th> <th colspan="2">1.0 MHz</th> <th colspan="2">2.5 MHz</th> <th colspan="2">Segmented Array</th> <th colspan="2">Segmented Array</th> </tr> <tr> <th>Frequency</th> <th>Number of elements</th> <th>Frequency</th> <th>Number of elements</th> <th>2.5 MHz</th> <th>2.5 MHz</th> <th>2.25 MHz</th> <th>5 MHz</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lead Metaniobate</td> <td>1.0</td> <td>5</td> <td>2.5</td> <td>8</td> <td>2.5</td> <td>16</td> <td>2.25</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Element width</td> <td>38 mm</td> <td>38 mm</td> <td>35 mm</td> <td>35 mm</td> <td>35 mm</td> <td>35 mm</td> <td>19 mm</td> <td>19 mm</td> </tr> <tr> <td>Outside diameter</td> <td>(1.5)</td> <td>(1.5)</td> <td>(1.5)</td> <td>(1.5)</td> <td>(1.5)</td> <td>(1.5)</td> <td>(.75)</td> <td>(.75)</td> </tr> <tr> <td>Element center to center spacing</td> <td>3 mm</td> <td>1.65 mm</td> <td>3 mm</td> <td>1.65 mm</td> <td>3 mm</td> <td>1.65 mm</td> <td>0.8 mm</td> <td>0.8 mm</td> </tr> <tr> <td>Space between elements</td> <td>(.125)</td> <td>(.125)</td> <td>(.125)</td> <td>(.125)</td> <td>(.125)</td> <td>(.125)</td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> </tr> <tr> <td>Center element diameter</td> <td>3.9 mm</td> <td>2.4 mm</td> <td>3.9 mm</td> <td>2.4 mm</td> <td>3.9 mm</td> <td>2.4 mm</td> <td>1 mm</td> <td>1 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>(.156)</td> <td>(.097)</td> <td>(.156)</td> <td>(.097)</td> <td>(.156)</td> <td>(.097)</td> <td>(.042)</td> <td>(.042)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.8 mm</td> <td>0.5 mm</td> <td>0.5 mm</td> <td>0.5 mm</td> <td>0.5 mm</td> <td>0.5 mm</td> <td>0.25 mm</td> <td>0.25 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> <td>(.032)</td> <td>(.010)</td> <td>(.010)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>6.3 mm</td> <td>3 mm</td> <td>6.3 mm</td> <td>3 mm</td> <td>6.3 mm</td> <td>3 mm</td> <td>2 mm</td> <td>2 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td>(.250)</td> <td>(.125)</td> <td>(.250)</td> <td>(.125)</td> <td>(.250)</td> <td>(.125)</td> <td>(.075)</td> <td>(.075)</td> </tr> </tbody> </table>												Piezoelectric	1.0 MHz		2.5 MHz		Segmented Array		Segmented Array		Frequency	Number of elements	Frequency	Number of elements	2.5 MHz	2.5 MHz	2.25 MHz	5 MHz	Lead Metaniobate	1.0	5	2.5	8	2.5	16	2.25	9	Element width	38 mm	38 mm	35 mm	35 mm	35 mm	35 mm	19 mm	19 mm	Outside diameter	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(.75)	(.75)	Element center to center spacing	3 mm	1.65 mm	3 mm	1.65 mm	3 mm	1.65 mm	0.8 mm	0.8 mm	Space between elements	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.032)	(.032)	Center element diameter	3.9 mm	2.4 mm	3.9 mm	2.4 mm	3.9 mm	2.4 mm	1 mm	1 mm		(.156)	(.097)	(.156)	(.097)	(.156)	(.097)	(.042)	(.042)		0.8 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.25 mm		(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.010)	(.010)		6.3 mm	3 mm	6.3 mm	3 mm	6.3 mm	3 mm	2 mm	2 mm		(.250)	(.125)	(.250)	(.125)	(.250)	(.125)	(.075)	(.075)
Piezoelectric	1.0 MHz		2.5 MHz		Segmented Array		Segmented Array																																																																																																																								
	Frequency	Number of elements	Frequency	Number of elements	2.5 MHz	2.5 MHz	2.25 MHz	5 MHz																																																																																																																							
Lead Metaniobate	1.0	5	2.5	8	2.5	16	2.25	9																																																																																																																							
Element width	38 mm	38 mm	35 mm	35 mm	35 mm	35 mm	19 mm	19 mm																																																																																																																							
Outside diameter	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(1.5)	(.75)	(.75)																																																																																																																							
Element center to center spacing	3 mm	1.65 mm	3 mm	1.65 mm	3 mm	1.65 mm	0.8 mm	0.8 mm																																																																																																																							
Space between elements	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.125)	(.032)	(.032)																																																																																																																							
Center element diameter	3.9 mm	2.4 mm	3.9 mm	2.4 mm	3.9 mm	2.4 mm	1 mm	1 mm																																																																																																																							
	(.156)	(.097)	(.156)	(.097)	(.156)	(.097)	(.042)	(.042)																																																																																																																							
	0.8 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.25 mm																																																																																																																							
	(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.032)	(.010)	(.010)																																																																																																																							
	6.3 mm	3 mm	6.3 mm	3 mm	6.3 mm	3 mm	2 mm	2 mm																																																																																																																							
	(.250)	(.125)	(.250)	(.125)	(.250)	(.125)	(.075)	(.075)																																																																																																																							

No.	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
E-103	<p>電子走査回路</p>  <p>送受波子</p> <p>図 1 . マルチアレイ型超音波 プローブの概念図</p>  <p>軸方向欠陥探傷用</p> <p>試作送受波子ユニット</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ SG 伝熱管 ( 低合金鋼 ) SUS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 外径 ; φ 18 mm</li> <li>○ 長さ ; 55 mm</li> <li>○ 重さ ; 約 50 g</li> </ul>	常温	4 mm t	φ 0.2 mm 孔	± 0.03 mm	4 m / min ( Max . 16 m / min )	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ マルチチャンネル の超音波装置の開 発</li> <li>○ 実機規模のモック アップによる実証</li> </ul>
					<p>(記) ; ○ プローブ全長 1.6~3 M (多節構造)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 適用管内径 Min. φ 22 mm</li> <li>○ 全 重 量 1~1.5 kg</li> <li>○ 軸方向, 周方向, ピンホール欠陥お よび</li> <li>○ 減肉を同時探傷可</li> </ul>					

## (2) 超音波ホログラフィ〔H〕

### 〔I〕技術概要

超音波探傷は、欠陥検査感度が他の非破壊検査法にくらべて優位にあるため、広く使用されている方法である。しかしながら、溶接境界面など金属組織的な不連続部からも超音波が反射され、欠陥反射波との区別が必要なこと、超音波が金属中で拡散しやすく欠陥の大きさを定量的に測定するのが比較的難かしいこと等が超音波試験技術の課題であった。

溶接境界面と欠陥の区別、さらに欠陥の大きさを定量的に測定できる様にするため、反射体を高い解像度で映像化する方法として超音波ホログラフィ法が開発されつつある。

超音波ホログラフィの原理と示すと次のようになる。

超音波ホログラフィには、ホログラムの作成とホログラムから欠陥像を再生する工程がある。ホログラムの作成工程は、図 3.2 - 3 (a) に示す様に、探触子を走査面上で走査しながら欠陥からの反射波と、時間基準となる参照波との干渉強度を測定し、その強度の空間分布をホログラムとして記録することである。参照波に対して反射波の位相が半波長ずれた場所では干渉強度が負、位相が1波長分ずれた所では干渉強度が正になり図中に示す縞模様ホログラムを得る。

図 3.2 - 3 (a) で得たホログラムを回析格子として、再生波を図 3.2 - 3 (b) に示す様に、回析させると、そのホログラムパターンを形成した欠陥の像が立体的に結像する。この工程が像再生と呼ばれるものである。2次元像であるホログラムには、3次元の情報が干渉縞のパターンとして記録されており、広範囲にわたる干渉強度が重なり合って欠陥像を形成するため、S/N が高く、解像度が高い映像が得られる。欠陥像の分解能  $\Delta r$  は、 $\lambda$  を超音波波長、 $Z$  を欠陥の深さ、 $D$  をホログラムの大きさ(開口)とすると次式で得られる。

$$\Delta r = 1.22 \lambda Z / D$$

上式でわかる様に、波長  $\lambda$  を短かく、ホログラムの開口  $D$  を大きくすれば、分解能が向上する。

### 〔II〕開発状況

#### 〔I〕国内状況

超音波ホログラフィの研究は、北海道大学、東京工業大学、東京大学生産技術研究所などで実施されていたが、原理実験の段階に止まり、実用段階まで進めているのは、日立製作所と沖電気である。沖電気は、水中透視を目的とした装置として市販中であり、日立製作所は鋼材検査を目的とした自動検査装置を開発中である。日立は、従来の干渉方式とは違った時間一致方式の位相測定によるデジタル方式ホログラフィで、像を立体表示でき

る段階にはいった。ホログラフィでは一般に探触子を精密に走査する必要があるため、走査時間が長い欠点があるが、走査時間を短縮する目的でアレイ探触子の電子走査を利用する動きがある。

## ii) 海外状況

干渉方式の超音波ホログラフィ装置は、米国Holosonics社が最初に市販し、この方式を原形として装置開発がなされている。米国では、現在バッチル社、Babcock & Wilcox社が開発している模様だが、西独が強力に推進中で実機試験への適用にこぎつけた。西独IzfPがホログラフィによる平面像表示、開口合成による断面像表示で欠陥を立体的に把握できるHOLOSFT (Holography & Synthetic Aperture Focusing Tomography)を実現した。今後、圧力容器等厚肉材の検査に使用されてゆくと思われる。

## (III) 調査内容

1977年以降の文献で、実用段階の技術を抽出した。文献は次の通りである。

- H-1) "Experiences in using Ultrasonic Holography in the Laboratory and in the Field with Optical and Numerical Reconstruction"  
Acoustical Imaging, Vol.8 pp651~683. 1983.
- H-2) "Acoustical Holographic Characterization of Defects in Pressure Vessel Materials"  
International Conference of NDE 1984
- H-3) "Defect Sizing and Classification using HOLOSFT"  
International Conference of NDE 1984
- H-4) "開口合成について"  
非破壊検査 第32巻3号 pp.243-251 1983
- H-5) "デジタル方式超音波ホログラフィ探傷装置の開発とその応用について"  
非破壊検査 第29巻1号 pp.2-10. 1980
- H-6) "Computer Reconstruction for Digital Acoustical Holographic Inspection of Turbine Rotors and Pipes"  
The 2nd Japanese-German Joint Seminar.  
pp.26-40 1983

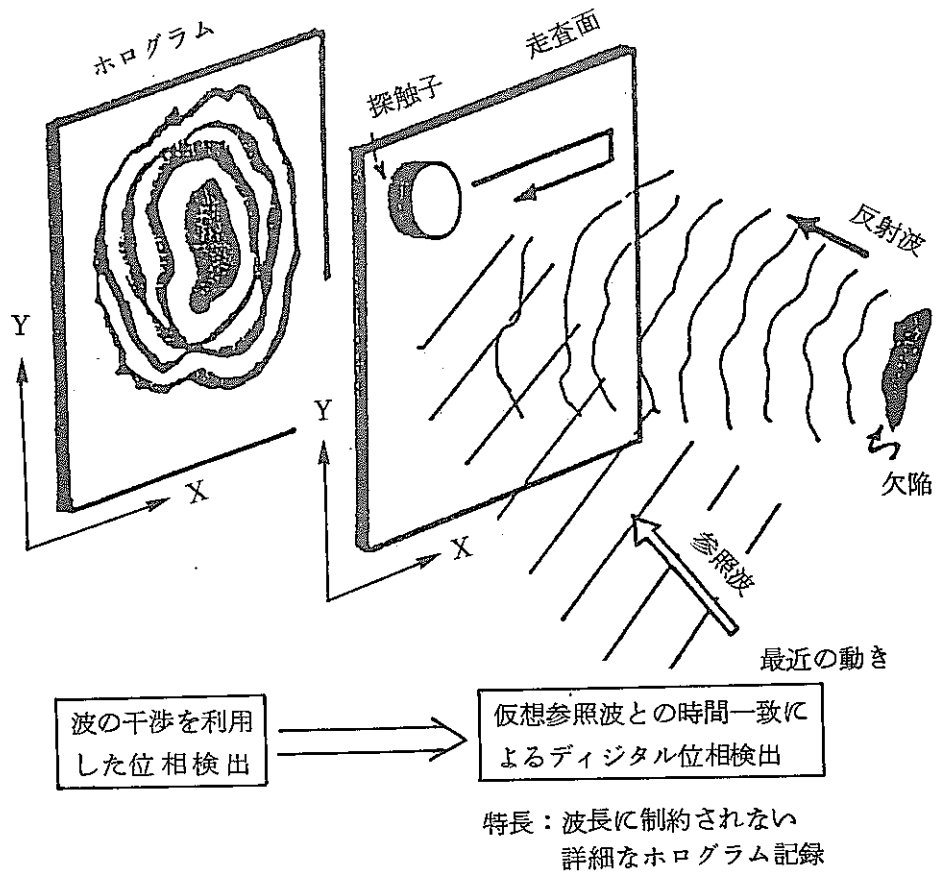
## (IV) 適用性

超音波ホログラフィは、薄肉材及び厚肉材の検査で、とくに欠陥形状の把握、大きさの定量評価に有効な方法である。遠隔かつ自動探傷が実現されており、高線量率の環境下で、作業者の被曝低減がはかれる。しかしながら、精密な探触子走査が要求されることから、現状では、走査の高速化、それに伴う像再生の高速化が必要になる。この対策として、アレイ探触子の電子走査を利用する動きがあり、近い将来、秒単位の時間で詳細な映像化ができる

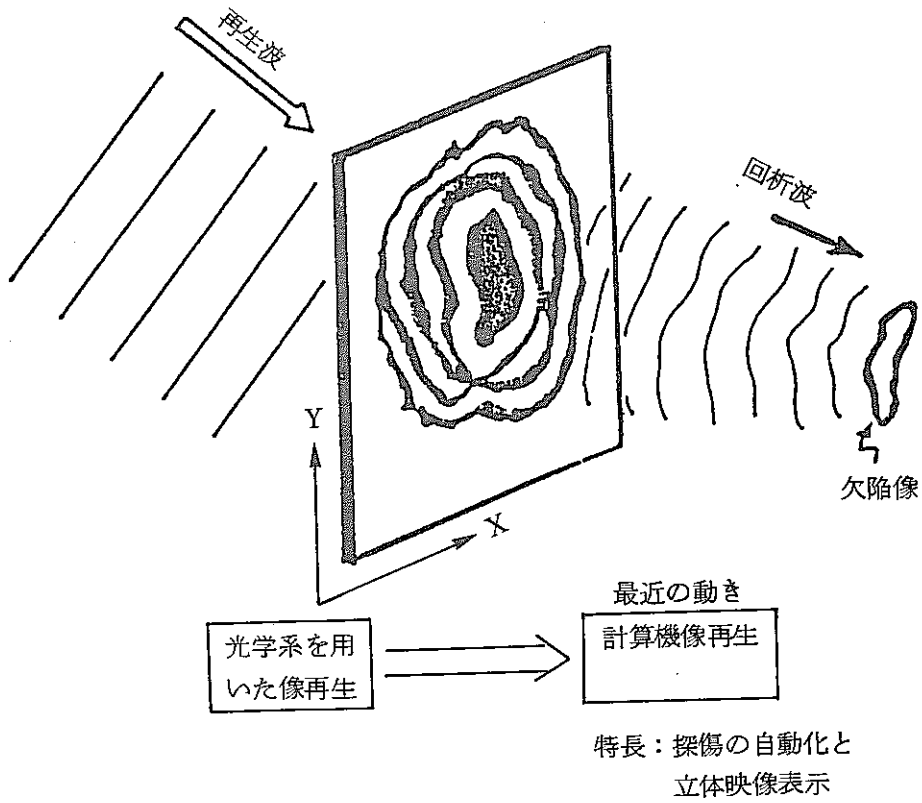
技術革新が期待できそうである。

高温部の検査への適用という点では、カップリング使用、探触子の耐高温性の制約のため困難と判断する。カップリング不要の探触子が開発されつつあり、この様な探触子の利用あるいは、電子走査による瞬間的な試験方式で探触子の昇温を防止するなどの対策が今後の課題になる。





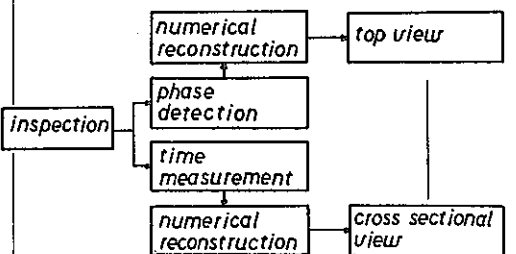
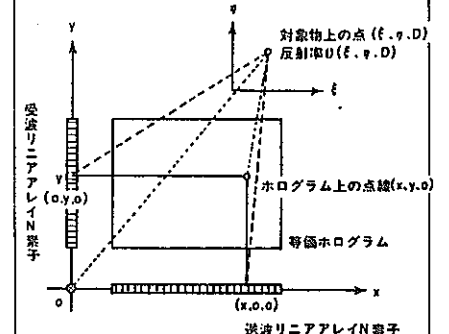
(a) ホログラムの記録

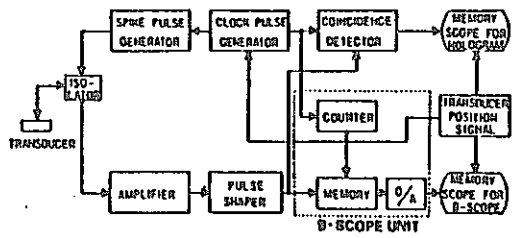
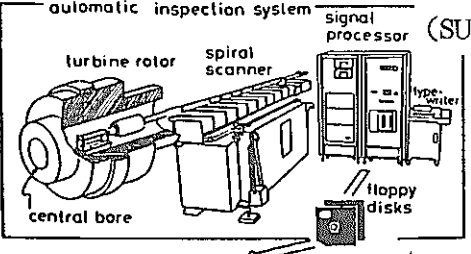


(b) 欠陥像の再生

図 3.2-3 超音波ホログラフィの原理

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
H-1	<pre> graph TD     inspection[inspection] --&gt; reg[registration of amplitude &amp; phase]     reg --&gt; dm[digital memory hologram]     dm --&gt; nr[numerical reconstruction]     reg --&gt; om[optical memory]     om --&gt; or[optical reconstruction]             </pre> <p>by IzP Universität(西独)1982年</p>	鋼材探傷 (22NiMoCr 3.7 23Cr/11Ni)	2~5 MHz 集束形 探触子 口径：25 mm $\phi$ 焦点距離： 100 mm	—	~100 mm	2 mm $\phi$ (F.B.H)	分解能： 1.4 mm	スキャン 時間： 20 × 64 <sup>2</sup> ms = 82 s (at 25mm/s) 再生時間： 720 s (at 64 <sup>2</sup> meshes)	◎	(検査時間の短縮)
H-2	<pre> graph TD     inspection[inspection] --&gt; pad[phase, amplitude detection]     pad --&gt; hf[hologram film]     hf --&gt; or[optical reconstruction]             </pre> <p>by Babcock &amp; Wilcox(米) 1977年</p>	鋼材探傷	1, 3, 5 MHz 集束形 探触子	—	~100 mm	6mm × 3mm 以下 (Slag)	~2mm	スキャン 時間： 17分 (100 × 100 <sup>mm<sup>2</sup></sup> ) <推定>	◎	(同上)

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
H-3	 <p>特徴 HOLO SAFT by IzfP (西独) 1984年</p>	圧力容器							◎	<文献 s60/2 入手予定>
H-4	 <p>特徴：アレイセンサによるホログラム作成 by 沖電気 KK 1977年</p>	水中透視	4×4 送信素子 32×32 受信素子	—	4.2mm (水中)	15mmφ のパイプ	~30mm	—	◎	(鋼材探傷への適用)

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
H-5	 <p>試作したデジタル方式超音波ホログラフィ装置の構成</p> <p>特徴：イメージホログラムで欠陥を等高線表示（等高線可変） by 日立製作所 1980年</p>	配管検査 (SUS 304)	3MHz 集束形 探触子 口径：25.4 水中 焦点距離 80~100mm	室温	15.2mm 以上	1mm欠陥 (スリット状 人工欠陥)	0.34mm	10インチ 配管に対し 2時間 (走査長 100mm 全周検査の 場合)	◎	60°斜角探傷時のノイズ低減 (検査時間の短縮)
H-6	 <p>Numerical reconstruction</p> <p>特徴：コンピュータ処理による立体映像表示 by 日立製作所 1983年</p>	タービン検査 配管検査 (SUS 304 鋼)	3MHz 集束形 探触子 口径 6~20 水中 焦点距離 25~80mm	室温 <100℃ 以下>	40mm <256mm>	1.6mm (F.B.H)	0.3mm 以内	走査時間： 7分(100× 100mm <sup>2</sup> 配 管面) 2時間(12m のタービン) 再生時間： 3分 (小型計算機) 10秒 (大型計算機)	◎	(検査時間の短縮)

### (3) 開口合成法 (ALÖK法を含む) (S)

#### 〔I〕技術概要

開口合成法はSAFT法 (Synthetic Aperture Focusing Technique) と呼ばれる。原理は、広指向性の超音波探触子を用いて探傷表面上を走査し、各点でのエコー信号を合成して、材料中の欠陥の像を構成するものである。この方法は、従来のエコー探傷法に比べて欠陥検出性能の向上が図れるため、注目すべき技術の1つである。

ALÖK法はAmplituden-und Laufzeit-Ortz-Kurvenの略であり、Amplitude and transit time dynamic Curvesの意味である。原理は、超音波探触子を走査し、その時に得られる探触子位置と欠陥エコーの振幅及びエコー時間の間に得られる規則性を利用して、より正確な欠陥の位置検出を

#### 〔II〕開発状況

##### i) 国内状況

開口合成法およびALÖK法とも実験室規模で、鋼材やアルミニウム材中の人工欠陥の検出やその映像化の試みを行っている程度である。また医用機器に応用を試みることを目的として、SAFT法を水中で実験した例も報告されている。開口合成法およびALÖK法とも開発段階にある技術である。

##### ii) 海外状況

開口合成法は米国、西独等でも研究が行なわれているが、開発段階としては我国と同程度であると考えられる。またALÖK法は発祥地の西ドイツが一步リードしていると考えられるが、実用化の段階に完全には達していないと考えられる。

#### 〔III〕調査内容

調査した文献を下記に示し、その技術内容を調査票に示す。

S-101: "3-Dimensional Defect Reconstruction Using HÖLÖSAFT"  
The 2nd Japanese-German Joint Seminar on Non-Destructive  
Evaluation and Structural Strength of Nuclear Power  
Plants. February, 1983

S-102: "超音波探傷技術の現状 (SAFT法を中心に)"  
日本高圧技術協会技術セミナー  
非破壊評価技術の現状と問題点 昭和59年10月

- S-103: "Characterization of Flaw Location, Shape and Dimensions with the ALÖK System"  
 Material Evaluation, Vol.40, No.1, pp.84~89, 1982
- S-104: "端部エコー法を用いたALÖK法によるき裂深さ測定"  
 (社)日本非破壊検査協会 昭和59年度春季大会講演概要集  
 昭和59年2月, pp.146~147
- S-105: "The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging"  
 IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS  
 VOL. SU-30, No.5, September 1983, pp.283-294
- S-106: "開口合成超音波診断装置-非線形処理の有効性-"  
 日本超音波医学会講演論文集41-PE-33 pp.587~588  
 昭和57年12月

#### (IV) 適用性

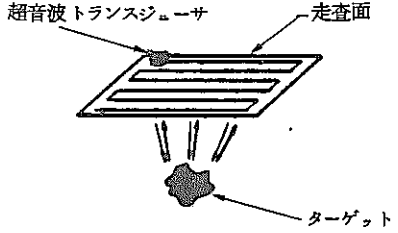
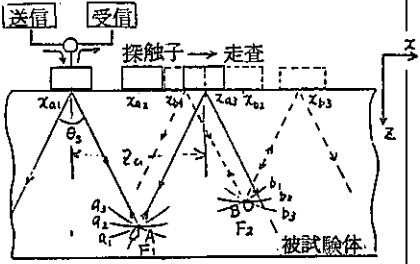
開口合成法およびALÖK法は、自動的に探傷が行なわれるので、装置の設置作業以外、作業員の被曝がないという優れた特徴を有しているが、FBR検査用として適用するためには、トランスジューサの耐熱性の向上というFBR適用上の共通の問題がある。

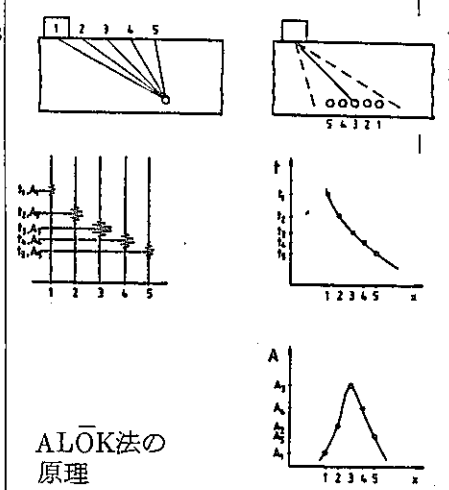
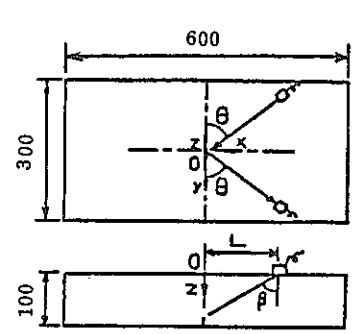
さらに、開口合成法あるいはALÖK法を実用化するためには、主として

- i) トランスジューサの位置決め精度の向上
- ii) 探傷面の凹凸の問題
- iii) データ処理時間の短縮

等の課題を解決する必要があると考えられる。

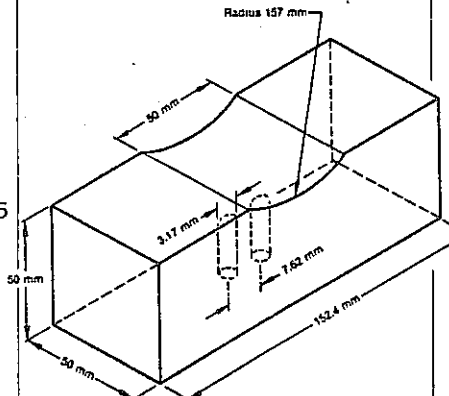
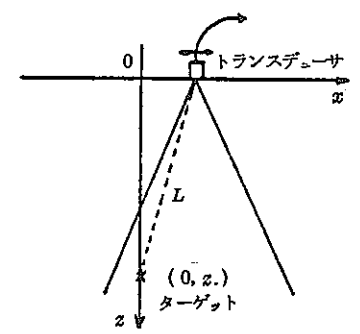
技術名称：開口合成法

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
S-101	 <p>広指向性の探触子を用いて探傷表面上を走査し、各点でのエコー信号を合成して、欠陥像を再構成する。</p>	一般厚肉材 検 査	10 mm φ 4MHz	—	300 mm 程 度	—	—	40分 (データ 処理時間)  75mm/s (走査速度)	◎	(データ処理時間) を短縮する。
S-102	 <p>SAFT法の原理</p>	一般厚肉材 検 査	12 mm φ 2MHz	—	50 mm	—	3 mm以下	10分 (データ処 理時間)	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>探触子走査面が平面であること。</li> <li>エコー信号が小さいこと。</li> <li>探触子の位置検出精度</li> </ul>

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
S-103	<p>超音波ビームの走査により，規則性を有する欠陥エコーを得，これを利用してノイズエコーとの分離および位置算定を行う。 (ALOK法)</p>  <p>ALOK法の原理</p>	一般厚肉材 検査	(縦波) 2MHz (横波) 1MHz	—	—	1mm 程度	—	35mm/s (走査速度)	◎	
S-104	 <p>実験の方法 (ALOK法) 試験体</p>	一般厚肉材 検査	6.3mm $\phi$ 5MHz	—	100mm	0.2mm (位置決め 精度)	—	—	—	



技術名称： 開口合成法

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
S-105	 <p>探傷表面が平面でない材料中の欠陥の像を再構成する</p>	アルミニウム の角材	20 mm $\phi$ 2.25 MHz	—	50 mm	約 3 mm	—	—	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>探傷表面の形状の変化に対する対策</li> <li>材料の異方性の問題</li> </ul>	
S-106	 <p>実験および解析のモデル</p>	水中の透視	15 mm $\phi$ 3.5 MHz	—	75 mm	—	—	—	◎	(鋼材探傷への適用)	

#### (4) 超音波散乱法〔D〕

##### 〔I〕技術概要

オーステナイト系ステンレス鋼に亀裂が生じた場合、これを非破壊的に検知し、その深さを定量的に推定する等はかなり難しいとされている。その理由は、このような材質では、超音波の散乱や減衰が著しいために、従来の超音波探傷ではS/Nが低く、有効な信号が得られなかったからである。更にプラントの供用中検査に適用する事を考えると高能率な検査の自動化が必要となってくる。超音波散乱法は以上の事を考慮して開発された技術で亀裂の片側から入射させた超音波が材料中で散乱され亀裂の他方の側の表面に到達するまでの時間の遅れから亀裂深さを推定するものであり亀裂の試験手法として有効な方法だと考えられる。

##### 〔II〕開発状況

###### I) 国内状況

超音波散乱法は、日立が検討を進めており実験室段階ではほぼ検討が終了している。現場適用も充分可能と考えられる。

###### II) 海外状況

超音波散乱法は欧州で盛んに研究されており特に、西独、英国で検討が進められている。M.G.Silk等(AERE Itarwell)らは、ラボテストで良い結果を得ている。

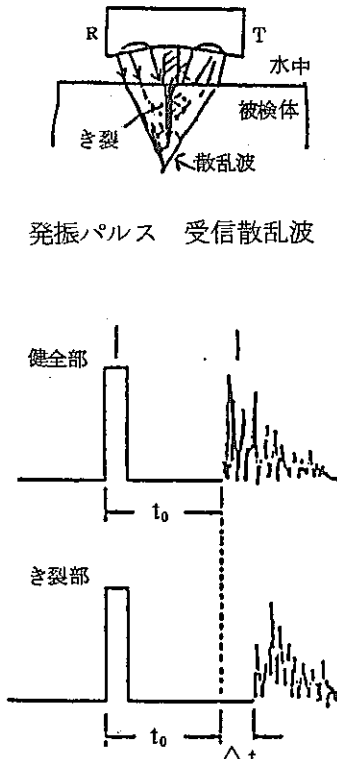
##### 〔III〕調査内容

調査した文献を下記に示す。

- D-1 “超音波散乱法による圧力容器クラッド層の亀裂検査法”  
NDI資料 2951
- D-2 “Time Domain Diffraction Technique, Ultrasonic Scatter Technique” Scatter Technique”  
Research Techniques in Nondestructive Testing IV  
p.485～488
- D-3 “The potential of scattered or diffracted ultrasound in the determination of crack depth”  
Nondestructive Testing June 1975 p.146-151
- D-4 “Defect Sizing using ultrasonic Diffraction”  
British Journal of NDT January 1979

#### 〔Ⅳ〕適用性

- i) 通常探傷法に比べて、減衰の大きな材料に対して有効
- ii) 自動測定には有利
- iii) 高温材料に適用する為には高温用探触子の開発が必要
- iv) 開口欠陥或いは表面近傍の割れ性欠陥には有効だが内面側に近接或いは開口した欠陥の検出は原理的に難しい。

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
D-1	 <p>発振パルス 受信散乱波</p> <p>健全部</p> <p>き裂部</p> <p><math>\Delta t</math></p> <p>超音波散乱性の著しい被検体の表面にき裂が存在する場合としない場合で超音波散乱波の路程の変化に基づく受信信号の時間遅れより読みとる。</p> $\Delta t = \frac{2}{V_s} (\sqrt{(d+\alpha)^2 + a^2} - \sqrt{d^2 + a^2})$ <p>a : 入射点から開口までの距離  V<sub>s</sub> : 被検体内での音速  θ : 送受波子の設定角  d : き裂深さ  α : き裂先端から散乱中心までの距離</p>	ステンレス管溶接部 (SUS 304)	送信子, 受信子は各々数 100 φ 程度  送受信子 1 体者と考えた場合は 1 Kg 程  サイズとしては 5 cm 程度と思われる。 (10 MHz) φ6	0~50°	き裂深さ 1~12mm 迄は確認済み	き裂深さ 1mm 以上	±1mm	実時間 処理可能	○	1. 高温材への適用は難しい 50~200℃ の範囲は短時間なら可能	

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
D-2	<p>Time Domain Diffraction Technique</p> <p><math>d = \left[ \frac{1}{2}(c \Delta t)^2 - S^2 \right]^{\frac{1}{2}}</math>  <small>c: 音速, Δt: 路程時間</small></p> <p>Fig. The time domain diffraction technique (from Silk, 1979c).</p> <p>送信器から入射させた超音波がクラック先端で回折した超音波を受信器で検知し、その送信から受信までの時間より寸法を出す。</p>	通常探触子	常温			± 1 mm	実時間探傷	○	○ 高温探傷は困難	
	<p>Ultrasonic Scatter Technique</p> <p>探触子の設定は上記と同じだが、測定量として受信エコーの大きさを求める。</p>		通常探触子	常温			± 1 mm	実時間探傷	○	○ 高温探傷は困難

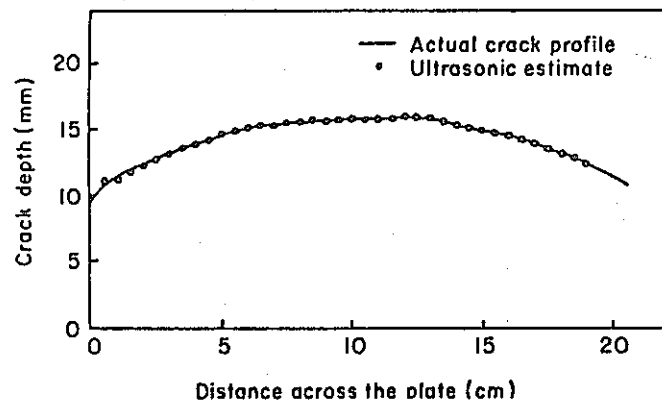
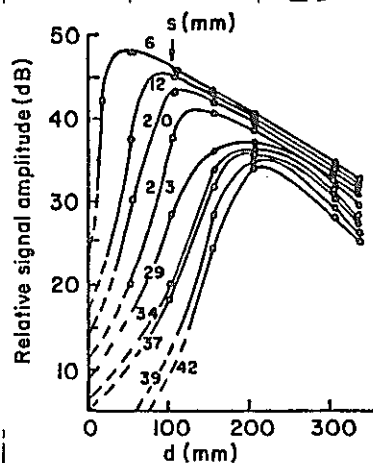
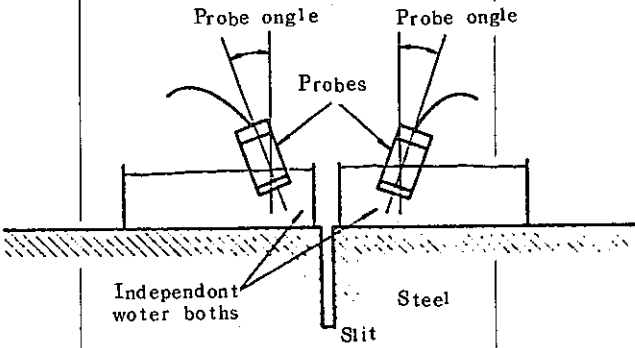


Fig. Crack profile using diffraction technique (from Silk, 1979c).



No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
D-3	<p>Amplitude Variation</p>  <p>手法はD-2のTime Domain Diffraction Techniqueと同じ</p>		通常探触子	常温			5.5mm 探触子間 隔 40mm	実時間可能	○	高温探傷が出来ない
	<p>Time delay method</p> <p>手法はD-2のTime Domain Diffraction Techniqueと同じ</p>		通常探触子	常温			0.8mm 探触子間 隔 40mm	実時間可能	○	高温探傷が出来ない

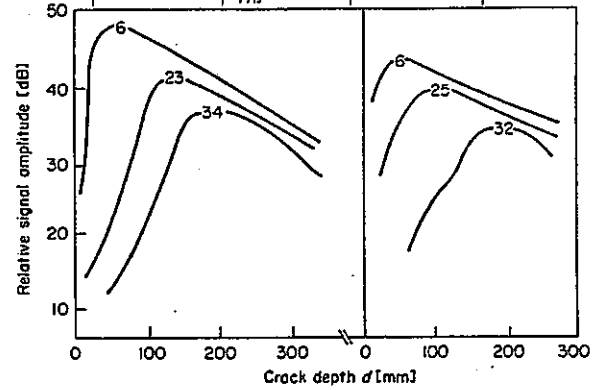


Fig. Böttcher's results were compared directly with the Harwell data

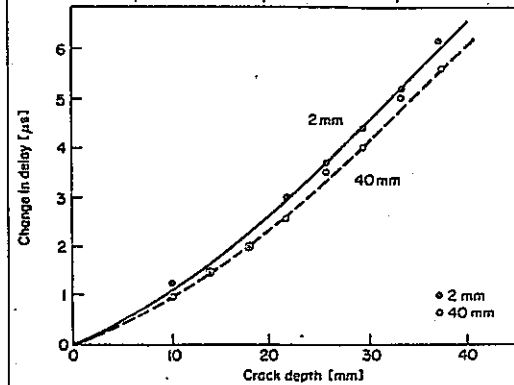
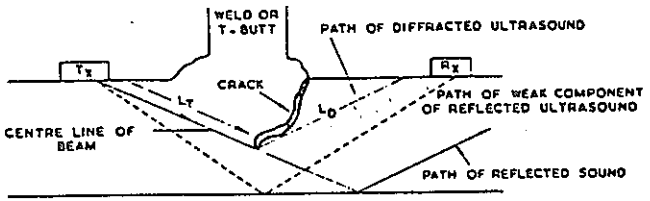
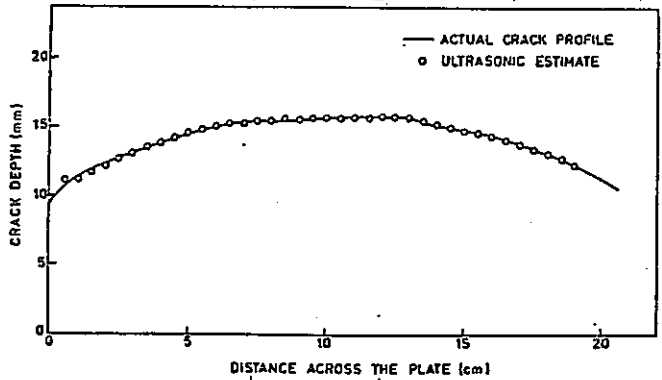
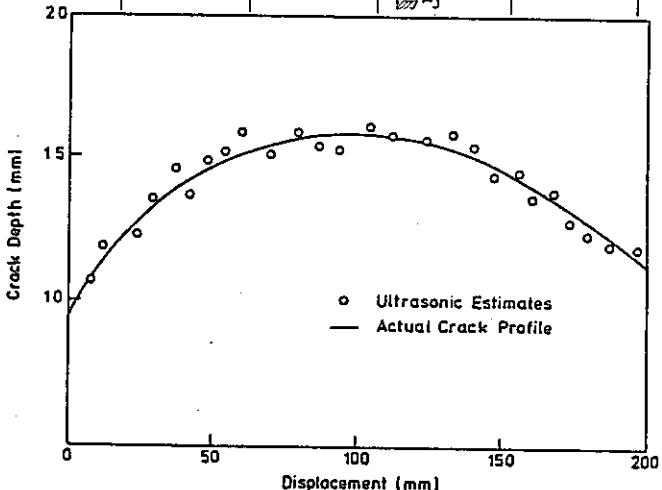


Fig. Further work gave a correlation curve for a probe separation of 40 mm

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動◎ 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
D-4	Two Probe Technique	T-butt welding	通常探触 子重さ	常温			±0.5mm	実時間探 傷可	○	○高温材への適用が 困難
 <p>Fig. The use of diffracted ultrasound in crack depth measurement (from AERE R7774)</p> <p>送信器から入射させた超音波がクラック先端で回折した超音波を受信器で検知し、その送信から受信までの時間より寸法を出す。</p>										
	Single Probe Technique	T-butt welding	通常探触 子重さ	常温			±1.0mm	実時間探 傷可	○	○高温材への適用が 困難
<p>送信器から入射させた超音波がクラック先端で反射した超音波を、同一送信器を受信器として用いて検知し、その送信から受信までの時間より寸法を出す。</p>										

## (5) AE法 [A]

### 〔I〕技術概要

AE法は、材料が外力により、塑性変形あるいは破壊する際にそれまで貯えられていたひずみエネルギーを瞬時的に解放して弾性波として放出する(AE:Acoustic Emission)現象を利用する方法である。

AE信号の性質及び発生状況は、材料固有の内的条件あるいは応力、環境などの外的条件に対し敏感である。そこでAE現象の性状を調べることによって各種構造欠陥の有無やその動的挙動などの情報を、また複数個の変換子を用いAE信号の発生位置の情報を得ることができる。

### 〔II〕開発状況

#### i) 国内状況

圧力容器では東芝が水圧テストでクラック進展に関しAE評価が可能との結果を得ている。

配管については、PNCがバックグラウンド・ノイズ存在下のモニタリングの可能性を調査し、日本溶接協会のFAET委員会では高温用変換子を開発、バックグラウンド・ノイズ存在下のクラック進展及び位置の標定が可能と結論している。

#### ii) 海外状況

圧力容器でIzfPでは給水ノズルにある熱疲労クラックの進展のモニタリングでクラックの摩擦ノイズとクラック進展ノイズとを分離できるとし、PNLは実機環境に近い条件で自然発生の疲労クラック生長のモニターに成巧、同じく水圧試験でUKAEAもモニタリングに成功している。

### 〔III〕調査内容

調査した文献を下記に示し、その技術内容の要約を調査票に示した。

A-101 “AE法の原子炉連続監視適用性に関するNRC-BMIプロジェクトの概要” 仲佐 AVE小委資料

P.H.Hutton and R.J.Kurtz (A-101, A-102, A-103)  
ex. 11th Water Reactor Safety Research Information Meeting  
(1983, pp.1~19)

A-104 “Monitoring of thermal shock induced crack growth in a feed water nozzle Corner of reactor pressure vessel by acoustic emission”  
P.Holler, E. Waschkies, K. Hepp  
Progress in Acoustic Emission II (IAES-7, 1984.10)



- A - 105 " Evaluation of structural integrity of piping components for fast breeder reactor by acoustic emission signals "
- Sasuride Sakakibara 7th International Conf-on NDE in the Nuclear Industry 1984
- A - 106 " Background noise of acoustic emission signals in sodium piping loop "
- Y. Mori, K. Aoki, ASM 6th International Conf. on NDE in the Nuclear Industry (1983.11)
- A - 201 " Acoustic emission examination of nuclear reactor steam drums "
- P.G.Bentley, R.J.Davies, British Journal of NDT 24-5 (1982)
- A - 202 " AE Characteristics in hydrostatic test on small pressure vessels "
- Yasuo Shinomiya, Kyoichi Tatsuno, Paper Summer ASNT National Conf. No. Spring Vol.1981

#### (V) 適用性

AE法では高温用探触子及びAE信号の発生源の位置標定に関しては解決している。実用化するに当り、実機によるバックグラウンドノイズの計測が必要なこと、高速度マルチチャンネルAEシステムの開発及び評価基準確立のための波形解析、更にAE法による評価信頼性の確立などが課題となっている。

No.	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検 査 時 間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重 量	使用温度	探傷深度	検出限界				
A-101	高温下における原子炉压力容器の水圧試験及び運転時に放出されるAEの計測及び音響信号波形解析によるAE信号とノイズの識別。	PWR 压力容器 (PSI 高温) 機能試験	450~500 KHz 共振の導 波棒型AE センサー	557 F 2235 psig	120 mm	—	人工及び 自然の疲 労クラッ ク  人工疲労 クラック d×ℓ: 30×61 84×41 56×194	—	◎	AE信号以外の信号 とAE信号との識別
A-104	压力容器の給水ノズルに発生する熱疲労クラック進展のISIモニタリング	休止中の60M <sub>wH</sub> HDR原型炉蒸 気発生器による 試験  給水ノズル ノズル外径380mm ノズル内径184mm  材質 22Ni Mo Cr 37 (SAE. 4718)	6チャンネル Izfp製 AE装置  広帯域水 冷式セン サ	給水ノズ ル部で20 ℃~300℃ のくりか えし	98 mm	ノイズと クラック 進展信号 が分離可 能	—	—	◎	

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検 査 時 間	自 動 〇 自 動 可 〇 手 動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
A-105	<p>日本溶接協会 FAET 委員会で FER の配管の健全性評価に AE を適用すべく調査した結果の要約</p> <p>調査項目</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. センサーの開発</li> <li>2. キャリブレーションシステムの開発</li> <li>3. ウェーブガイドの特性評価とハンドリングの確立</li> <li>4. 疲労欠陥進展の測定システム開発</li> <li>5. 液体ナトリウムのノイズレベルの測定</li> <li>6. 疲労クラックの位置標定</li> <li>7. 疲労クラック進展の関数としての AE イベント数と振巾の効果</li> </ol>	SUS 304	<p>高感度センサ</p> <p>ウェーブガイド 5mm<sup>2</sup>×200mm</p> <p>オーステナイト ステンレス製</p>	600℃	<p>外径 12 インチ</p> <p>肉厚 6.5mm</p>	<p>バックグラウンド ノイズと AE 信号 の識別</p>	<p>位置標定 精度 10~20mm</p>	—	◎	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 評価基準確立のための波形解析</li> <li>2. 実機でのバックグラウンドノイズの計測が必要</li> <li>3. AE 法による評価信頼性の確立</li> </ol>
A-106	<p>AE がバックグラウンドノイズのある LFMBR の配管系で疲労損傷のモニタリング技術として適用可能か否かの試験</p>	<p>1/5 スケールの 5 Mwt 蒸気発生 器による試験</p>	<p>周波数 100 KHz 以下</p>	—	<p><math>V_0 = D^{-1/2}</math></p> <p><math>V_0</math> = バックグラウンドノイズ rms レベル</p> <p>D = ポンプからの距離</p>	—	—	—	◎	

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
A-201	蒸気ドラムの水圧試験における AE モニタリング クラック進展時のAE 検出とノイズ 識別及びAE 信号減衰の調査	DUCOL-W30 (BS 1501-2718) t = 71mm φ1.51m×9.4m 水圧最大 24.8 Mpa テスト温度 90℃	175 KHz センサ 5ヶ	90℃	71mm	小さなス ラグ巻込 み状欠陥	位置標定 は 10 cm 以内	—	◎	
A-202	原子力圧力容器のPSI/ISIモニ タリングとして用いるAEの実用 化試験 (AE信号とクラック進展との関係 づけ)	A 508 ニッケルクロム モリブデン鋼系 t = 10mm 水圧テスト	差動式 150KHz 4 チャン ネルセン サ	—	10mm	人工ノッ チ深さ 3.3~8.3mm 長さ200mm	—	—	◎	

## (6) レーザ超音波法 (L)

### 〔I〕 技術概要

1960年に初めてレーザー発振に成功して以来、紫外域から遠赤外に分布する各種方式によるレーザー発振が可能となっている。

レーザーは学術研究用として使用され、新しい応用が開発されている一方、光通信、加工医療、各種計測、エネルギー開発、情報処理等の分野では実用化が進められている。

レーザーは①単色性、②指向性、③干渉性、④エネルギー集中度に優れており、レーザーの熱衝撃的效果を用いた超音波の発生及びレーザー干渉計を用い、材料表面の振動測定を組み合わせたレーザーによる超音波探傷装置の基礎研究が行われている。しかしレーザーを用いた場合通常の超音波探傷法とは異なり非接触検査が可能であることから実用化は重要な課題である。

### 〔II〕 開発状況

レーザー超音波法に関しては非破壊試験の分野で実用データは殆んど無い状況である。基礎研究の分野では1981年、ポーランドの文献“液体中を伝播する超音波で偏向したレーザー光と別の超音波で振動する物体表面の反射光とを干渉させてホログラムを作成し振動変位を測定”及び英国の文献“レーザービームをアルミブロックに照射し発生した超音波の角度分布を測定”程度でありいずれも大学での研究である。

最近、レーザー超音波法の技術開発が西独において進められており、日本クラウトクレマ社が“レーザー探傷器”の紹介を日本非破壊検査協会の第2分科会（超音波探傷試験部門）で行っている。これは国内唯一の文献である。技術開発と実用化は今後の課題である。

### 〔III〕 調査内容

調査した文献を下記に示し、その技術内容の要約を調査票に示す。

L-1: Laser Generated Ultrasound at Modified Metal Surfaces  
ultrasonics. May 1981

L-2: Examination of Vibration Amplitude Distribution of  
ultrasonic Transducers Using Optical Holography with a  
Modulated Reference Beam. Ultrasonics. May 1981

L-3: レーザ探傷器について、非破壊検査協会第2分科会、非接触超音波探傷シン  
ポジウム(1984)

#### 〔Ⅳ〕適用性

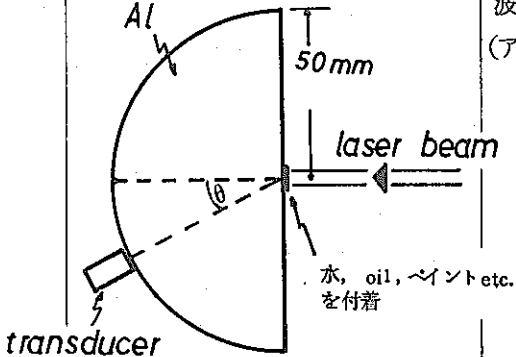
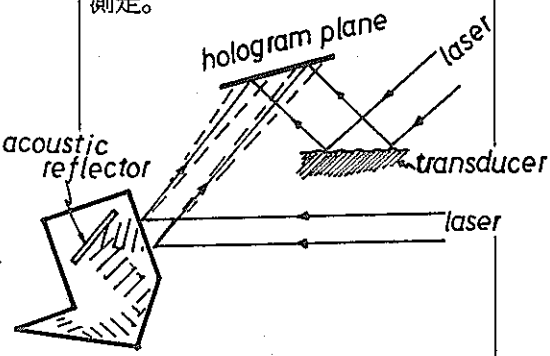
レーザー超音波探傷装置は被検査物の表面状態の影響を受けなく、形状が複雑であっても検査に適用可能である。

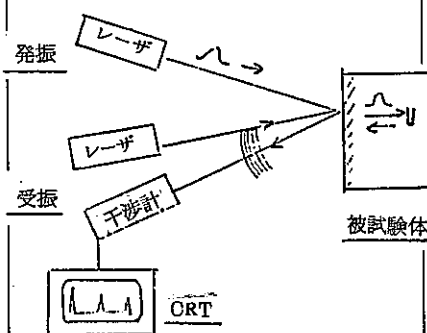
FBRとしては

(i) 非接触超音波探傷が可能であるため高温材料の検査に適している。

(ii) また、放射線レベルの高い材料の探傷が可能である。

などの理由から適用性があると判断されるが未だ基礎研究の域を出てなく実用化までには長時間を要するものと思われる。

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
L-1	<p>レーザビームをアルミブロックに照射し、発生した超音波の角度分布を測定。</p> 	<p>レーザ照射で発生した超音波の角度分布を超音波探触子で測定 (アルミブロック)</p>	<p>YAGレーザ パルス幅： 24 ns 波長： 1.06 μm 出力： &gt; 40 mJ</p> <p>超音波探触子 3~5 MHz (PZT素子)</p>	—	50 mm	—	—	—	△	非接触式超音波受信が要	
L-2	<p>液体中を伝播する超音波で偏向したレーザ光と別の超音波で振動する物体表面の反射光とを干渉させてホログラムを作成し振動変位を測定。</p> 	<p>チタン酸バリウム振動子面の測定</p>	<p>He-Ne レーザ 波長 632.8 nm</p> <p>参照超音波周波数： 0.5~3 MHz</p>	—	—	振動変位 ±3×10 <sup>-9</sup> m	—	—	○	光学系の調整の簡素化	

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
L-3	<p>レーザ発振器より高出力のパルス状レーザを発振させ、これを材料表面に当てる。一部は反射し残りは材料中に吸収され熱となる。この材料表面の加熱が急速であると材料の熱膨張により機械的応力が生じ音波が発生する。材料内部を伝播した超音波パルスは欠陥等で反射され再び材料表面に到達して材料表面に微小変位を生じる。</p> <p>別のレーザ発振器により連続発振レーザを材料表面に当てると一部のレーザ光は材料の微小変位により位相変調して反射される。この位相変調されたレーザ光は干渉計に導かれ探傷器のCRT上に表示される。</p>	<p>圧延鋼又はアルミニウム</p>	<p>Nd/YAG レーザ 50 Mw 20 nS 5mm巾 スポット 1~30MHz</p>	—	—	<p>200mm厚 さの裏面 より0.4 mm位置の 0.4mm<math>\phi</math> FBH。</p>	—	—	△	<p>・試作器の段階なので実用化のための開発試験が必要である。</p>
		<p>炭素繊維複合材</p>	<p>Nd/YAG レーザ 5 Mw 20 nS 5mm巾 スポット 1~10MHz</p>	—	—	<p>50mm厚 さの裏面 より0.2 mm位置の 1mm<math>\phi</math> FBH。</p>	—	—	△	



## (7) 電磁超音波法〔M〕

### 〔I〕 技術概要

電磁超音波法はコイルに流す高周波電流により発生する渦電流と静磁界( $B_0$ )の相互作用により力を発生させ、超音波を送信する方法である。超音波の検出は上記と逆のメカニズムでおこなわれる。

斜角法としては、一様な磁界と蛇行コイルにより位相が $180^\circ$ 異なる超音波を波長( $\lambda_s$ )の $\frac{1}{2}$ のピッチで発生させ、干渉により、斜方向に超音波を伝播させる。

このような原理のため、非接触で超音波探傷が可能で、接触媒質が不要であり、構成部材がコイルと磁石であるため耐熱化が容易であるといった特長を有している。

但し、電気音響変換効率が従来の超音波センサに比べ低く、従来の超音波探傷法に比べ検出能が劣る短所もある。

### 〔II〕 開発状況

#### i) 国内状況

本技術の特長を生かした応用として、新日鉄、住金等鉄鋼メーカーにおいて連鑄等の高温材の検査等に垂直探触子が開発され適用され始めている。また、厚み測定や垂直探傷装置として、日立、三菱電機より発表されている。

他方、斜角探傷用としては $240^\circ\text{C}$ 程度で使用可能な小型非冷却タイプのものが三菱重工で開発されている。

今後、垂直用、斜角用、表面波用等各種の電磁超音波トランスデューサが開発され、実用化されてゆくものと思われる。

#### ii) 海外状況

高温探傷用としては、丸棒の検査に適用するために $750^\circ\text{C}$ 程度で使用可能な垂直用及び表面波用のセンサがT I社(英国)で開発され、適用され始めていると思われる。

斜角探傷としては、SH波と呼ばれる特殊な超音波を発生できるセンサによるSUS溶接部の検査技術の開発がロックウェル社(米国)でおこなわれている。また板厚 $130\text{mm}$ 程度の厚板鋼板の探傷用として、斜角用センサがIzfP(西独)で積極的に進められている。

また、表面検査として、表面波センサの開発やチューブ検査用として、板波やSH波を発生する特殊なセンサが、IzfP等で開発されている。

初期は、高温への適用のため研究が進められてきたが、接触媒質が不要、SH波等特殊な超音波が発生できる等の特長を生かし、通常の探傷への適用が進められつつあり、各種タイプのセンサが今後開発され、適用範囲が広がってゆくものと思われる。

〔Ⅲ〕 調査内容

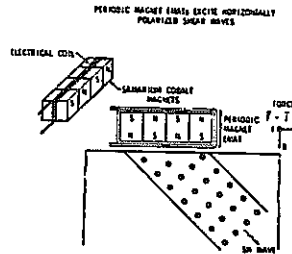
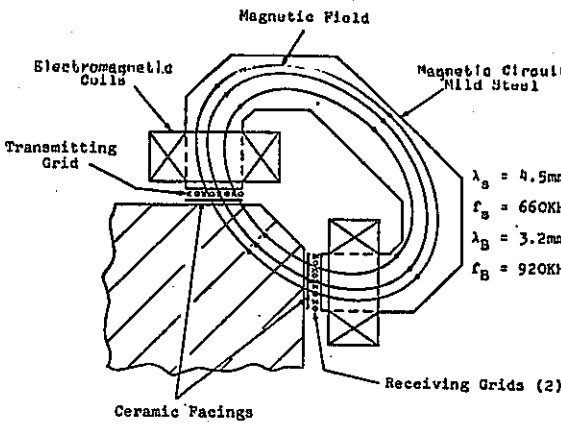
調査した文献を以下に示す。またその技術内容の要約を調査票に示す。

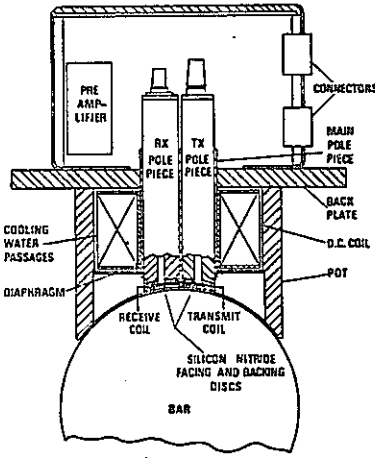
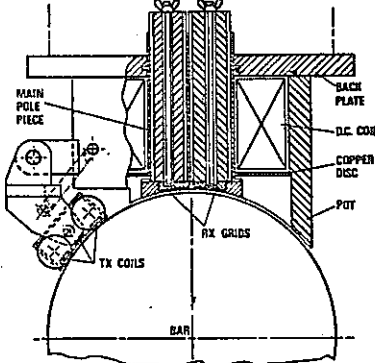
- M-101: R. B. THOMPSON. W. E. PETERSON AND C. F. VASILE; AN EMAT SYSTEM FOR DETECTING FLAWS IN STEAM GENERATOR TUBES, ULTRASONICS SYMP. 1979
- M-102: P. T. COLE; DEVELOPMENT OF A PORTABLE CRACK DETECTOR FOR THE LOCATION OF DEFECTS IN THE CORNERS OF CONTINUOUSLY CAST WARM-BLOOM MATERIAL, ULTRASONIC INT. CONF. EXHIB. 1979
- M-103: K. R. WHITTINGTON; ULTRASONIC INSPECTION OF HOT STEEL, BRITISH JOURNAL OF NDT 1978
- M-104: K. R. WHITTINGTON; ELECTRODYNAMIC PROBES-PRINCIPLES, PERFORMANCE AND APPLICATIONS, BRITISH JOURNAL OF NDT 1981
- M-105: D. M. WILSON, P. T. COLE, K. R. WHITTINGTON; ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TECHNIQUES FOR INTERNAL AND SURFACE INSPECTION OF ROUND STEEL BARS, ULTRASONIC INT. CONF. 1977
- M-106: C. M. FORTUNKO AND R. E. SHRAMM; ULTRASONIC NON-DESTRUCTIVE EVALUATIONS OF BUTT WELDS USING ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC TRANSDUCERS WELDING JOURNAL 1982
- M-201: H. J. Zalzbüger; Electro-Magnetic Acoustic Transducers for Guided and Bulk Waves and their Application 第1回 日独セミナー
- M-202: 水平偏波横波を用いたステンレス鋼突き合せ溶接部の超音波検査, 非破壊検査, Vol. 31, No.12 (1982)
- M-203: R. K. Elseley & C. M. Fortunko; Improvements in Flaw Detection in Austenitic Stainless Steel Weldment. 1981 IEEE Ultrasonic Symp (1981)
- M-204: FBR-ISI 用電磁超音波探傷技術の開発; 三菱原子力技術 No.35 (1984)
- M-205: 高温用電磁超音波探傷技術の開発 AVE-10 (1984)
- M-206: C. M. Fortunko; Ultrasonic Inspection of Weldments With Frequency Scanned SH Waves, 1979 Ultrasonics Symp. (1979)

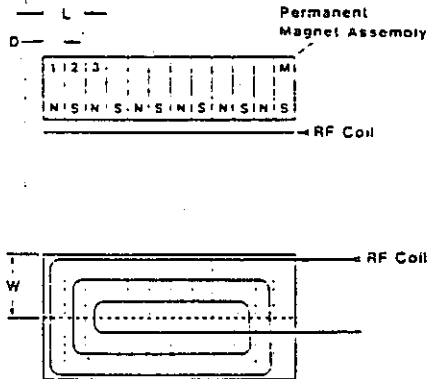
#### 〔Ⅳ〕適用性

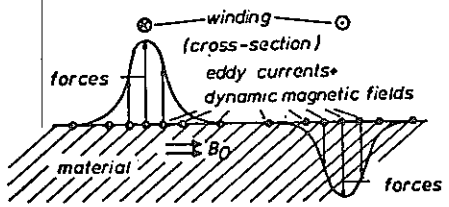
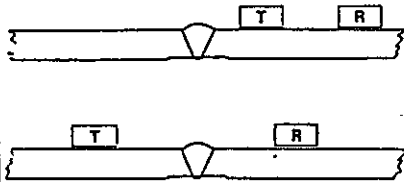
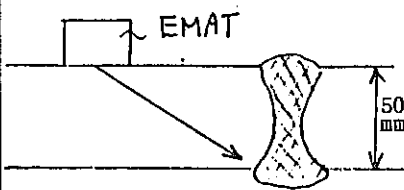
電磁超音波は、高温での適用、接触媒質を用いない超音波探傷が可能で、高温での体積検査に適した手法と考えられるが、開発段階の技術であり、実験室レベルから実用化へ向けて、下記の課題を克服してゆくことが必要と考えられる。

- i) 高温用に適用されているものは、水冷等により大型の装置となっている。非冷却型は、開発段階であり、高温への適用性や、信頼性を検討する必要がある。
- ii) 通常の超音波探傷に比べ、信号レベルが低いためセンサ、探傷器、信号処理装置などシステム全体を検討し、雑音に強い装置とする必要がある。

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
M-101	 <p>Fig. Periodic permanent magnet probe. These devices can excite horizontally polarized shear in a plate (as shown) on torsional modes of a tube.</p> <p>SH波の斜角</p> <p>表面波</p>	<p>STEEM GENERATER TUBE(インコネル)</p> <p>外径：2.22cm 厚さ：0.13cm 長さ：21.3m</p> <p>原子炉のISIへの適用を目差している。</p> <p>連鑄の高温ブルームのコーナー</p>	管内に挿入できる	室温	—	0.97mm	—	渦流方式より早くする	◎		
			—	700℃	表面割れ 1mm	クラック 2mm	—	—	○		
M-102	 <p>Fig. Test head arrangement</p> <p><math>\lambda_B = 4.5\text{mm}</math> <math>f_B = 660\text{KHz}</math> <math>\lambda_B = 3.2\text{mm}</math> <math>f_B = 920\text{KHz}</math></p>										

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
M-103	(1) 体積波	丸棒 165mmφ	—	750℃	—	3mm	—	—	◎	
M-104	 <p>Fig Cross section of e.m.a. internal inspection transducer</p>		—	700℃	0.25mm	—	—	—	◎	
M-105			(2) 表面波	同上	—	700℃	0.25mm	—	—	
	 <p>Fig Cross section of an e.m.a. transducer modified for surface inspection</p>									

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
M-103 M-104 M-105	(3) 板 波	チューブ	—	室 温	—	—	—	測定時間 短縮を目的として いる	○	
M-106	 <p>Fig. An SH wave EMAT SH波による斜角</p>	径 1.22m 厚さ 15.9mm のAPI 5LX- 70のSMA溶接部	—	室 温	ノッチ深度 0.75mm	—	—	—	○	

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )		セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
				サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
M-201	(1) 発生原理 コイルに流す高周波電流により発生する渦電流と外界からの静磁界 (B <sub>0</sub> ) の相互作用により力を発生させ超音波を発振する。 	斜角探傷	厚肉材 (磁性体)	斜角用は不明	—	90mm	φ3 (平底) 検出 φ8 (横穴)	—	—	(○)	
		表面波探傷	磁性体	表面波用 L H W 70×50×70	—	表面	波長の5% (d0.5スリット検出)	—	—	(○)	
		チューブ探傷	インコネル	チューブ用 (不明)	—	チューブ壁 約1mm	d0.05mm スリット	—	—	(○)	
M-202 M-203	図のように、斜角EMATを送信用及び受信用に設定し、反射法及び透過法で欠陥検出をおこなう。 	ステンレス鋼溶接部		—	—	12.7mm (配管板厚)	溶込み不良 クラック (貫通) 検出	—	—	○	
M-204 M-205		ステンレス鋼溶接部		L H W 70×50×70	240℃ 最高	50mm	d ℓ 9.2mm×37mm	—	—	(○)	

No	原 理 等	適・用例 (材質等)	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
M-206	屈折角 38° の斜角探傷法にて欠陥 検出。	Fe-2½%Cr- 1%Mo  溶接部	マグネット サイズ 38×12.7 mm	—	25.4 mm	φ 2.3 (横穴)	—	—	(◎)	



## (8) 渦電流探傷法〔C〕

### (I) 技術概要

コイルを被検物に接近させて高周波電流を流すと、被検物表面に渦電流が流れる。欠陥があると渦電流の流れが変化する。この変化をコイルのインピーダンス変化として検出する方法である。

実用上は、被検体表面の凹凸やコイルの振れによるリフトオフ変化や、磁気特性の影響を除去するため、複数の周波数を用いる多重周波数法が適用されている。

また、本法は表面及び表面近傍を検査する手法であり、さらに深い箇所の検査をおこなうことを目的として、高電流パルスを用いるパルスEOT法が研究されている。これは検出コイルの電圧波形の変化を検出することにより欠陥検出をおこなう。

センサの構造も簡単で小型化、高温化が比較的容易であると考えられる。

適用としては、熱交換器の非磁性管(PWRのS/Gチューブ等)の検査が、最も多く適用され、研究も多い。また渦電流の浸透深さの関係上、表面検査又は非磁性体の検査への適用が多い。

### (II) 開発状況

#### i) 国内状況

PWRの蒸気発生器のチューブ検査に適用するために、三菱重工等で、内挿型の各種プローブの開発と、支持板等の影響を除去するための多重周波数技術の開発が実施され、供用期間中検査に実用されている。

またSUS板(10mm程度)の欠陥深さを測定するための研究が日立で進められている。

#### ii) 海外状況

蒸気発生器のチューブ検査用としては、各国で開発が行なわれ、国内と同様実用化されている。

SUS溶接部やSUS材表層部の欠陥検出用としては、多重周波数法により溶接部の材質変化、溶接による変形の影響を低減させる方法により表面開口欠陥や表層下約2mm程度の欠陥検出ができることが示されており、またパルスEOT法により深さ9mm程度のドリル穴が検出できることが示されているが、まだ研究レベルである。

### (III) 調査内容

調査した文献を下記に示す。また調査内容を調査票に示した。

C-1: 遠藤他;伝熱管の渦電流探傷技術,三菱重工技報 Vol.13 No.3(1976)

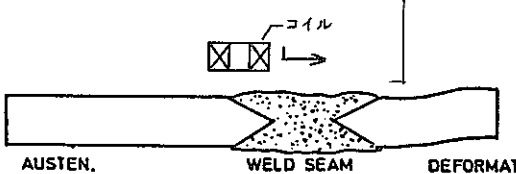
C-2: 遠藤他;加圧水形軽水炉における蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷技術 三菱重工技報 Vol.15 No.5(1978)

- C - 3 : K. Betzold; A Multifrequency Approach to Interpret Defect Signals Superimposed by Disturbing Signals According to the Causing Defect Type and Size, ASTM-STP 722 p. 204-p.212 (1981)
- C - 4 : Srumm, W; Multi-Parameter Methods of Non-destructive Testing of Materials, Brit. J. of NDT 13 p.76-p.81 (1978)
- C - 5 : G. Wittig and H. M. Thomas, Design of a Pulsed Eddy Current Test Equipment with Digital Signal Analysis, ASTM-STP 722 p.387-p.397 (1981)
- C - 6 : 小埜他, 渦電流による欠陥大きさの測定法  
日本非破壊検査協会第3分科会(1984)

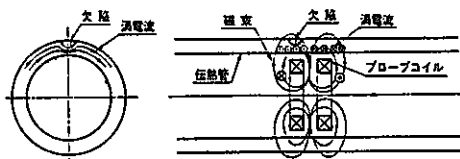
#### 〔Ⅳ〕 適用性

ECTでは、渦電流が被検査体の表面近くに発生するため、薄肉又は表面近傍の欠陥検出に適用されており、10mm以上の肉厚のもの体積検査に適用する場合には、下記の課題が考えられる。

- i) 内面欠陥で、割れのように幅が極めて狭い欠陥の検出能向上
- ii) パルスECTの場合、溶接部の材質変化の影響の対策及び割れのように幅の狭い欠陥の検出能の検討。

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
C-1	<p>高周波数の電流をコイルに流し、被検体表面に渦電流を発生させ、欠陥による渦電流の変化をコイルインピーダンス変化として検出する。</p> <p>被検体の導電率や透磁率の変化、リフトオフの影響は、2周波数の情報により低減する。</p>	オーステナイト・ステンレス鋼溶接部	φ5 コイル φ10 コイル	—	表面 表面下 2 mm	w d 0.1×1 検出	—	—	(○)	(深い所の欠陥) 検出能向上
C-2	<p>下図のように、コイルを水平に走査し、検査をおこなう。このとき溶接部の透磁率変化や母材部の変形のための影響は2周波数の情報により除去し、欠陥信号を抽出する。</p> 	ステンレス鋼溶接部	—	—	表面	表面開口 疲労割れ	—	—	(○)	(深い所の欠陥) 検出能向上

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
C-3	<p>2組のコイルを適当な距離をおいて配置し、両コイルのインピーダンスを常に比較する。これにより管肉厚のわずかな変化、内径ばらつきを打消している。</p> <p>また多重周波数により、支持板等の影響を除去している。</p>	インコネルチューブ	—	—	1.27 (チューブ肉厚)	<p>ℓ w d 8×0.2×0.3 スリット 検出</p> <p>φ0.5mm穴 検出</p>	±10%	—	(◎)	[20%以上の人工欠陥]
C-4	<p>ECTによるチューブ検査において、多重周波数法やプローブ形状の改良により、下記の影響を除去する。</p> <p>(1) 伝熱管形状変化 (2) 伝熱管支持構造部の影響 (3) 管材、管板の磁気特性のばらつき (4) プローブの揺れ</p>	インコネルチューブ	—	—	1.27 (チューブ肉厚)	支持板部 外面50% スリット 検出	—	—	(◎)	



技術名称：渦電流探傷法

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
C-5	<p>励磁コイルにパルス状の電流を流し、受信コイルで検出される電圧のある一定時間後のレベルを測定する。</p>	ステンレス鋼	励磁コイル φ15~φ25	—	1~9mm	φ3 (横穴)	—	コイルの 走査スピー ード  100mm/sec			
C-6	<p>2周波数を用い、各周波数毎の空間的な信号分布より欠陥深さを推定する。</p>	ステンレス鋼薄板	φ4.5mm	—	0.5~2mm	スリット w=1~4mm ℓ=20mm	0.3mm	2mm/sec	◎		

## (9) 電気抵抗法〔P〕

### 〔I〕技術概要

電気抵抗法では、金属体表面に、2ケの接触式電極を押しつけこれを通して交流又は、直流の一定電流を流し、この電流電極の間に別の2ケの電圧電極を押しつけて、この金属体表面の2点間の電圧を測定する。金属体表面或は、表面近傍に亀裂等の不連続部が存在すると、電流の経路が乱され、測定した電圧が測定位置によって、異なる値を示すようになる。この電圧の変動の様子によって欠陥の存在及び欠陥の大きさを知る手法である。

このように、測定端子を被検体面に押しつけ1点ずつ微小領域の測定を行なうため、大面積の走査検出用に用いられることは少ないが、特定の試験領域を対象にしたり、既に欠陥の存在が明らかな場合に、その欠陥の深さを定量化する場合に利用されることが多い。

また、最近では疲労亀裂の進展の定量化を目的として、実験室的に良く用いられている。

### 〔II〕開発状況

#### i) 国内状況

既に存在が分かっている疵の深さをその都度測定することは、従来行われているがこれを自動化した例は少ない。しかし、三菱重工と日本原子力研究所は、JPDR原子炉圧力容器の強制循環冷却水出口ノズル部と底部を内部から自動測定する装置を実用化した。尚、疵深さの定量化のための各種の実験及び計算が、日立製作所、日本大学、神奈川大学、日本原子力研究所等で行われている。

#### ii) 海外状況

電気抵抗法による亀裂の定量化の精度向上のための実験は、米、英、独、露等各国で行われ、その報告があるが、自動的に被検体面を走査し、欠陥の検出を行った例は見当たらない。

### 〔III〕調査内容

最近10年間の国内外の電気抵抗法に関連した文献40件を調査した。その中から代表的な4件を下記に示し、その概要を調査票に示す。

#### P-1 電気抵抗法によるJPDR圧力容器の検査

非破壊検査 Vol.18 No.7 (1969) pp.298-306

#### P-2 原子炉圧力容器の内面割れの検出および深さ測定

火力原子力発電 Vol.35 No.2 (1984) pp.111-121

#### P-3 直流ポテンシャル法による表面き裂形状の検出

材料 Vol.33 No.368 (1984) pp.602-608

P - 4 : A D.C. Potential Drop Method to Monitor Crack Growth in Notches Subjected to Torsion

Fatigue of Engineering Materials and Structure Vol.4 No.3 (1981)

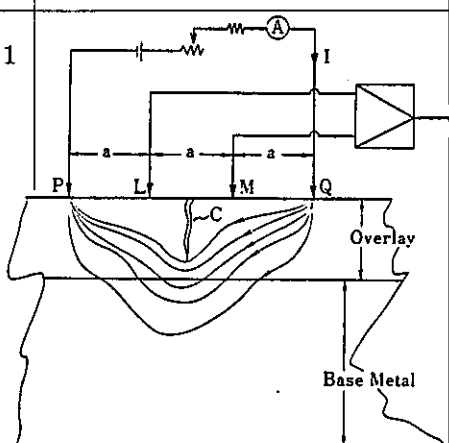
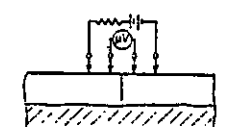
pp.287-290

(IV) 適用性

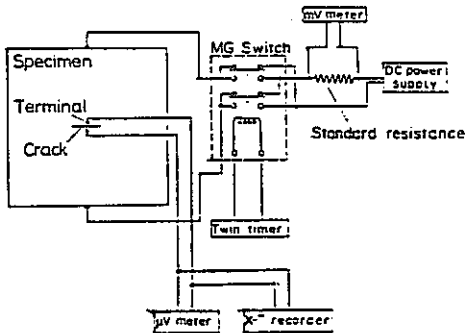
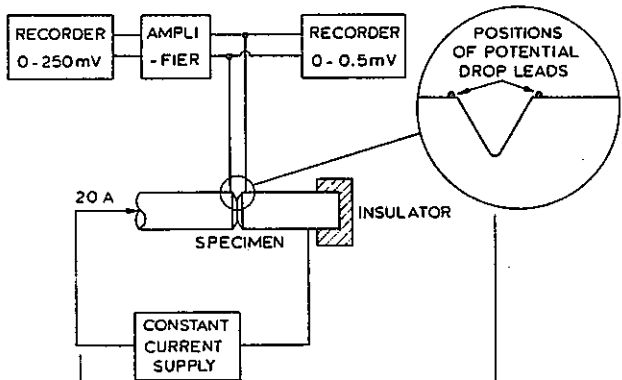
FBRの検査への適用性は、既に文献P-1にJPDR圧力容器へ適用した具体例が示すように、今後の進展があれば可能性がでてくると判断できる。

なお、FBRへの適用に際しては、具体的な検査対象物の位置・形状に適應した走査装置の開発が主題となる。

また、検出原理は、比較的単純であり、温度、放射線等の環境条件の克服も容易と考えられる。

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
P-1	 <p>注 ① a=5mm ② I=4A(一定)</p> <p>図. 測定原理 三菱重工; 非破壊検査(1969) No.7</p>	JPDR 压力容器 内面 SUS クラック 表面亀裂検出	37本の 多針式接 触子 φ50× l100	室温	表面から 深さ 10 mm まで	深さ 1 mm 以上 長さ 5 mm 以上	1 mm	150 時間 7000 点 = 1.3 分/点	◎	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 検出限界の向上 (比較的大型) の欠陥対象</li> <li>2. 精度が UT, ET より劣ることの改善</li> <li>3. 外乱電図の明確化</li> </ol>
P-2	 <p>原研; 火力原子力発電(1984) No.2</p>	PWR 压力容器 内面 SUS クラック 表面亀裂検出	市販 スメック ゲージ 100×100 ×50	室温	表面から 深さ 12 mm まで	深さ 1 mm 以上 長さ 5 mm 以上	2 mm	(数分?)	△	実用化のためには自動化が必要



No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
P-3	 <p>Fig. Block diagram of DC potential system.</p> <p>日立 材料 Vol. 33 (1984)</p>	鋼板 (A 516) 表面亀裂形状 検出	黄銅製接 触子	室温	表面から 深さ 1 mm まで	深さ 0.2 mm 以上 長さ 10 mm 以上	0.1 mm	0.5 分/1 回	△		
P-4	 <p>Fig. Schematic of electrical system.</p>	10φ 鋼棒の疲 勞亀裂検出	被検材に リード線 をスポット 溶接	室温	表面から 深さ 2 mm まで	深さ 0.3 mm 以上	0.1 mm	—	△		

## (10) X線CT, $\gamma$ 線CT (X)

### [1] 技術概要

X線CT (Computed Tomography) は人体患部を可視化する装置として医療分野で発達し、実用化されている。被検査体の周囲を線源と検出器が回転し放射線の透過強度分布を測定し計算機処理によって被検査体の密度分布を逆算し断層像として可視化する手法である。医療の分野ではすでにCTによる断層像を重ね合せ、例えば頭部の立体表示が可能な域に達しつつある。一方、非破壊検査の分野でのCT利用は遅れていると思われるが、検出器を被検査体に接触させない。いわゆる非接触検査が可能でしかも被検査体の内部の詳細を映像化できることから、近年CT技術を非破壊検査に導入する動きが活発になってきた。

### [II] 開発状況

#### i) 国内状況

X線CTは、日立・東芝が配管内の二相流計測、東大生研が理学電機の協力により電柱や立木の断面測定、また東京国立文化財研究所が仏像の調査のために利用されている。また東芝ではプラスチック及びアルミニウム材など内部欠陥の検出のために適用している。しかしX線の吸収の大きい金属材料の非破壊検査にCT技術を適用するためには高エネルギー(400 Kev)あるいは $\gamma$ 線を線源として用いるCT技術を開発する必要がある。

#### ii) 海外状況

CTによる非破壊検査技術の開発は米国が先行している。ステンレス鋼管の欠陥やコンクリートひび割れを映像化する目的で研究開発中である。X線CTから $\gamma$ 線CTへ移行中と思われる。

### [III] 調査内容

調査した文献を下記に示し、その技術内容を調査票に示す。

- X-1 : "X-ray Computed Tomography of Thick Steel Castings and Forgings"  
Quantitative NDE in the Nuclear Industry  
ISBN : 0-87170-15828. P.275~279. 1983.
- X-2 : "産業用CTスキャナ TOSCANER-3030," 東芝レビュー, Vol.38,  
No.12, 1073-1076 (1983)
- X-3 : "X-ray CT Scanner Application to Void Fraction Measurement in  
BWR Core, Toshiba review, No.144 Summer, 17-20 (1983)
- X-4 : "Preliminary Study on Application of X-ray CT Scanner to Measurement  
of Void Fractions in Steady State Two-phase Flows" JNST, Vol.120,

№4, P.1-12, January 1983.

X-5 : "Measurement of Void Fraction Distribution by Gamma-ray Computed Tomography" JNST, Vol.120, №4, P.315-317, April 1984.

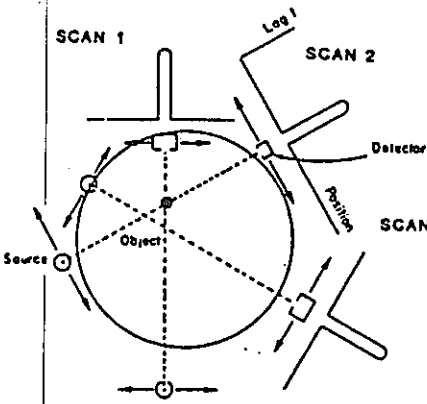
#### Ⅳ) 適 用 性

FBRの試験用として、適用の可能性はあると判断する。

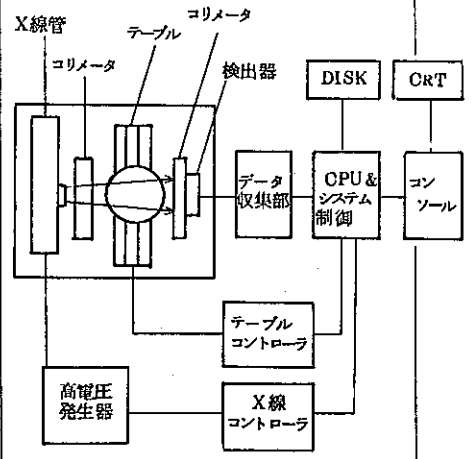
- i) 非接触検査が出来るため、高温材料の試験が可能。
- ii) 自動測定であり、装置の設置作業以外、被曝がない。

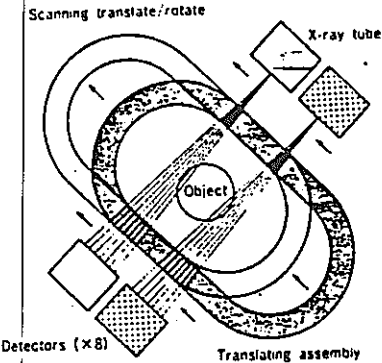
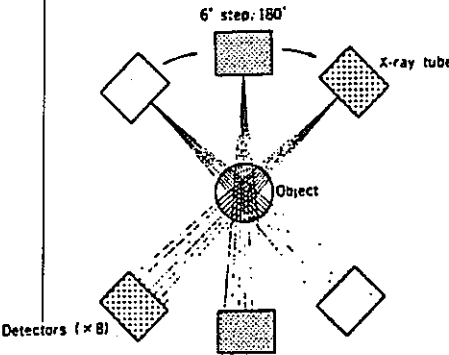
しかしながら、測定原理により検査対象は、線源、検出器がその周囲を回転走査でき得る配管、弁、ノズル等に限られる。また、実用化に関しては、下記項目が当面の課題になると思われる。

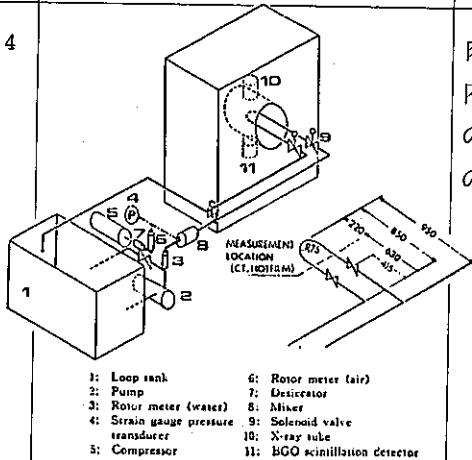
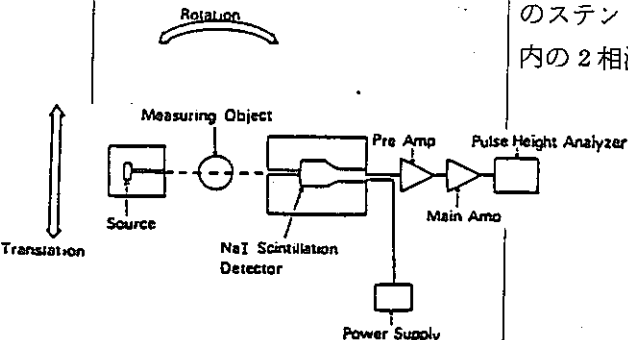
- a) スキャナの小型化……医療用CTをベースとしたスキャナでは、可搬性がほとんどない。
- b) 透過能力の高い線源及び検出効率の高い検出器の開発……低エネルギーのX線では透過率が低く、S/Nが低下し、検査時間が長くなる。
- c) 体積試験能力の実現……断面表示だけでは、欠陥を見逃し易くなる。体積試験できる様に、スキャナの走査軸を増設し、それに伴う立体表示用ソフトウェアの開発が必要。

No.	原理等	適用例 (材質等)	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
X-1	<p>Basic Reconstruction by Summation Method</p>  <p>a.) Data Acquisition Geometry</p> <p>特徴：モンテカルロ計算による2 次散乱線の補正 by Science Applications (USA) 1983.</p>	<p>4.8インチ スケジュール 120 配管 (スチール)</p>	<p>線源： Ir-192 1Ci Cs-137 Co-60 電離箱方式 80アレイセ ンサ</p>	—	<p>～30mm (肉厚の 2倍)</p>	<p>0.01mm ×2mm ×10mm</p>	—	～4h以上 (推定)	◎	<p>(1) 断面検査から 体積検査への移行 (2) 映像化の高速化</p>	

No	原理等	適用例 (材質等)	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
X-2	<p>X線管とX線検出器を対向して配置し、その扇状のX線の中で被検査物を、あるいはX線管とX線検出器が1体となり被検査物のまわりを回転してデータを収集する。収集されたデータは、高速演算装置により処理されて1枚の画像となる。再構成された画像は磁気ディスクに記憶されるとともにCRTに表示される。</p>	<p>プラスチック、 ゴム、木材等 ~300 mm</p> <p>セラミック、レ ンガ耐火物等 ~200 mm</p> <p>アルミニウム ~150 mm</p>	<p>検査対象 300 mm <math>\phi</math> <math>\times</math> 600 mm</p> <p>100 kg</p>	—	—	<p><math>\phi</math> 140 mm のアルミ ニウム柱 で 100 <math>\mu</math>m のスリッ ト</p>	—	15 秒/スキャン	◎	高エネルギーCTの開発、実用化



No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
X-3	 	内径 25 mm 及び 原子炉内形状を 模擬した 4×4 水平バンドルの 2相流ボイド計 測	X線管 ( 120KV 25mA BGO シンチレ ーション 検出法	—	—	ロッド表 面の約1.5 mmの液膜 の付着判 別可能	空間分解 能 1mm以 下	105 秒	◎	実機への適用	

No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動◎ 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
X-4	 <p>1: Loop tank 2: Pump 3: Rotor meter (water) 4: Strain gauge pressure transducer 5: Compressor 6: Rotor meter (air) 7: Desiccator 8: Mixer 9: Solenoid valve 10: X-ray tube 11: BGO scintillation detector</p> <p>Fig. Schematics of air-water two-phase flow loop and experimental arrangement</p> <p>(株)日立製作所エネルギー研究所 1983.1</p>	肉厚 2.5mm 内径 27mm の亚克力管内 の2相流測定	X線管 (120KV) 20mA  BGO シンチレ ーション 検出器	—	亚克力 管 5mm +水 27mm	1.1×1.1mm <sup>2</sup> 当り密度 差 10%	(画素: 1.1×1.1mm <sup>2</sup> )	160秒	◎	(金属製配管での) 試験実績要
X-5	 <p>Fig. Block diagram of experimental apparatus</p> <p>(株)日立製作所エネルギー研究所 1984.4</p>	肉厚 4mm 内径 53mm のステンレス管 内の2相流測定	線源: Cs-137 (96μCi)  NaI シンチレ ーション 検出器	—	ステンレ ススチ ール管 8mm +アクリ ル樹脂 53mm 又は +水 53mm	4×4mm <sup>2</sup> 当り密度 差 3%	(画素: 4×4mm <sup>2</sup> )	—	◎	(画素を縮小要)

## (II) ラジオグラフィ (R)

### [I] 技術概要

ラジオグラフィ技術は、X線や $\gamma$ 線が物体（被検体）を透過し、その後方に置いた写真フィルムもしくは蛍光板を感光または発光させ、被検体内部の欠陥や構造に応じた透過像を示すことから、被検体を切断もしくは切開することなく、その内部状態を調べ得る技術として、特に医学、工学の分野では古くより広く用いられ、これらの分野の進展に大いに役立っている。

工学分野では、鋳造品、鋼塊、溶接部などの内部状態の良否が製品の強度、性能を左右するものであり、同時に透過試験結果の良否がそれら製品の製造過程の正当性を証明するものなので、重要製品の受入れ検査として放射性透過試験が大いに用いられ、各国で制度規格化されて、非破壊検査の代表的試験となっている。放射線透過試験は被検体内部のブローホールなどの空隙、またはスラグなど異物を透過線量の差としてフィルムなどの平面上に投写し映像化する測定原理なので、欠陥検出性として、体積の有る欠陥の検出や透過した部分の被検体容積中の欠陥数を把握することなどに特にすぐれているが、反面、薄い面状欠陥や深さの小さい表面のヘアークラックなどの検出は原理的に不適性である。

放射線透過試験方法としては、写真フィルムによる直接撮影法、蛍光板による間接撮影法と透視法がある。これらの方法の基本原理はいずれも同じであり、被検体との位置関係はいずれの方法も被検体をはさんで片側に放射線源、他方にフィルムもしくは蛍光板となる。そのため、被検体の片側からだけで試験を行なうことができない。

また原子力プラントで、放射性沈着物などにより被検体の線量率が高いときは像質が低下する。

従って、原子力プラントのISI時に放射線透過試験を適用するときの課題の主なものは以下の事項であろう。

- i) 被検体の片側からだけでは試験ができないこと。
- ii) 隙間のない面状欠陥の検出性が良くないこと。
- iii) ISI時における原子炉機器配管の線量レベルによっては、透過写真のフィルム像質が低下すること。

### [II] 開発状況

#### i) 国内状況

放射線透過試験の検出精度を向上させるための撮影方法や散乱線の像質に及ぼす影響に関するものなどの研究が進められている。原研では、原子炉配管の放射線量率が透過写真の像質低下に及ぼす影響を実験で確かめ、軽水炉の配管ISI時ではほとんど影響しない



と報告している。また阪大では狭照射野撮影法の研究を進め、この方法がすぐれた撮影法であることを証明した。検査機器の開発では、三菱電機、東芝、理学電機などの市販各社がX線テレビシステムの開発を進めており、三菱電機は、材厚にあまり関係なくリアルタイムで検査の出来る高エネルギーX線のテレビシステムを開発した。また、理学電機は非常に小型のX線発生器を開発し、現場配管溶接部などのX線検査が容易にできるように図った。

## ii) 海外状況

放射線透過試験のISI適用では米国が先行している。EPRI-Projectでは、軽水炉ISIへの適用を目的としたポータブル型の高エネルギー線装置の開発を進め、1981のISI時にリアクターポンプの厚肉溶接部の放射線透過試験を行なっている。また、PWR蒸気発生器の伝熱管リガメント部分は、探傷センサの挿入が不能であり、観察することもできない部分であるが、EPRIではこの部分の健全確認を目的として、放射線透過試験の適用を図り、専用の試験装置を開発し、モックアップテストを終えている。

放射線透過試験関係の規格では、API(石油協会)が蛍光スクリーン上での観察およびテレビによる再生像の観察試験を写真フィルムによる透過試験に代るものとして許可している。これは、透過試験の自動化や量産品に対する透過試験の能率向上に寄与するものと思われる。

## III) 調査内容

1980以降の文献で、実用段階の技術を抽出した。その内容の要約を調査票R-1~R-7に示す。

R-1 : 「Steam Generator Support Plate Radiographic Evaluation System.」

EPRI Research Project S 105-1

Report No NP-2823 (1983)

R-2 : 「Portable Linear Accelerator Development」

EPRI Research Project No 822-6

Report No NP-2831 (1983)

R-3 : 「原子炉冷却系配管の放射線量率が透過写真のコントラストに与える影響について」

日本原子力研究所 NDI資料 No.1805 (1981)

R-4 : 「鋼、曲管突合せ溶接部の二重壁片面撮影法に際して、X線装置による制限と透過計識別度についての実験報告」

理学電機報 (1984)

R-5 : 「リアルタイム高エネルギーX線検査システムの開発」

三菱電機技報 Vol. 55, No 10 (1981)

R-6 : 「放射線透過試験と超音波探傷試験の溶接部欠陥検出比較について」

非破壊検査 Vol. 32, No 10 (1983)

R-7 : 「鋼溶接部の非破壊試験適用通則(案)」

日本溶接協会 (1983)

#### (Ⅳ) 適用性

FBRの試験用としての適用は、下記の課題について検討したうえで行い必要がある。

- i) 放射化沈着物などによる被検体の線量レベルの実態を把握し、被検体線量による像質低下の程度が試験目的を満足するかどうか。
- ii) 表面欠陥やヘアークラックなどの欠陥検出をほとんど期待しない検査であるかどうか。  
例えば現場溶接部の透過試験における溶接施工の総合評価のための試験。
- iii) 検査装置は被検体の両側接近となる。装置及びセンサーのための空間があるかどうか。  
しかし、以上の難点は有るものの、測定原理により放射線透過試験は、被検体の透過試験部分の容積すべての内部の状態を把握することが可能であり、且つ、試験結果を写真フィルムやVTRテープとして保存できるすぐれた記録性が有る。

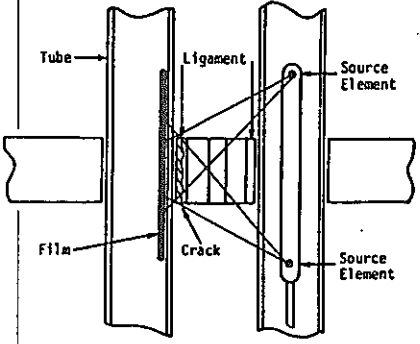
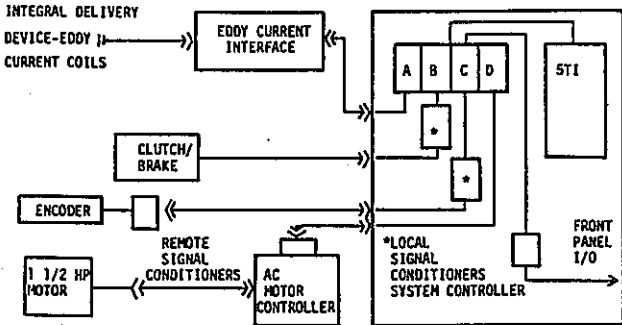
試験装置の現状では、透過試験のロボット化、または遠隔化を図るために都合の良い小型のX線発生器や、ポータブル型の高エネルギー装置の開発も進められており、また検査効率が高く遠隔自動化に有利である高エネルギーのX線テレビシステムの開発も進められているので、今後の原子力プラントISI時の試験への適用性は期待できるものと思われる。

尚、高温部の検査への適用という点では、試験が放射線の物質透過性を用いた測定原理なので、写真フィルムもしくは受像センサーを透過性の良い断熱材で丸ごとカバーし、シールすることで可能であろう。

実用化に関しては、下記項目が当面の課題であろう。

- a) TVシステムではセンサー類、またその他のシステムでは自動化やロボット化装置類に関する耐放射線性の対策。
- b) 検査装置の超小型化への開発アプローチ、もしくは被検体両側の試験装置用必要空間の確保。
- c) き裂欠陥の探傷能力の向上対策。  
例えば、透過像の立体映像化による欠陥評価技術の開発
- d) 検査対象物によっては、被検体の構造、形状などに見合った専用の遠隔自動検査装置としての開発。

ISIにおける検査対象としては、構造物、機器、配管の溶接部、ポンプ、弁など鋳造品、厚肉品の内部状態の検査、また、運転時を含む検査として弁体、タービン翼などの動状態のリアルタイムでの試験、などがあげられる。よって、適用範囲としては、かなりの広範囲の試験を対象とすることができる。

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
R-1	 <p>Fig Dual Source Configuration</p>	PWR蒸気発生器の伝熱管サポートプレートの欠陥検出	<p>① 線源ホルダー： 14φmm × 100mm長</p> <p>② フィルムカセット 13φmm × 140mm長</p>	—	—	サポートプレートの伝熱管部分の欠陥で幅 0.18mm × 深さ 0.33mm × 長さ リガメント厚さの10%	—	実績： 7日 (24hr×7)で 300個所の検査を行った。	○	〔伝熱管サイズ, リガメント寸法, センサの挿入性, などの実用化に関するR&Dが必要〕	
 <p>5 TI PROGRAMMABLE CONTROLLER INPUT/OUTPUT MODULES</p> <p>A. Eddy current input B. Clutch-brake output C. Encoder input D. Motor output E. Front panel input-output</p> <p>Fig Block Diagram of System Controller Functions</p>											

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
R-2	ライナックヘッドを小サイズ化したものである。	原子力ポンプ、バルブ、その他のX線透過試験	ヘッド： 105 kg 40cm口 × 75cm長	—	—	欠陥識別度 2%以下	—	—	△	〔原子力プラント：被検物に適合したライナックヘッドの操作のための自動化設備の開発〕

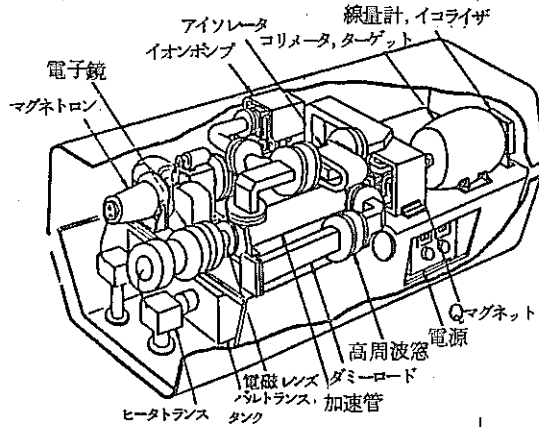


図 ライナックのヘッドの構造 (ex.)

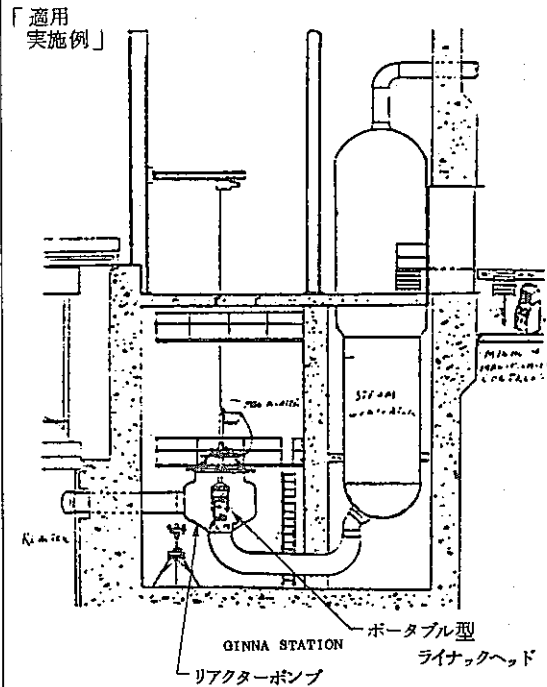
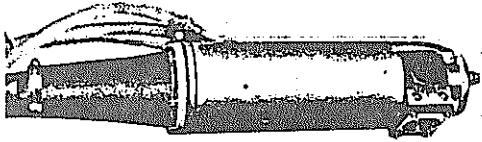
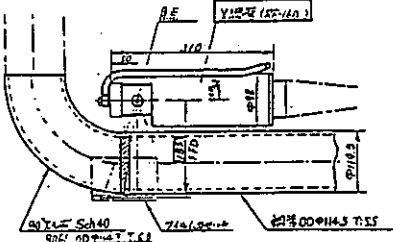
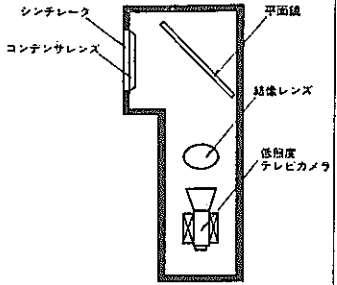
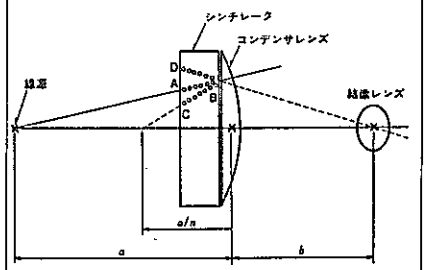
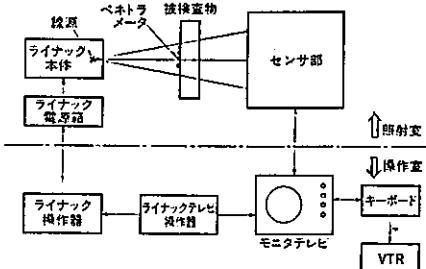


Fig Cross Section of the Ginna Station

技術名称：（配管線量の像質低下に及ぼす影響）

No	原 理 等	適 用 例 (材質等)	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
R-3	配管線量が有る場合と無い場合について、原子炉(JMTR)で実施した実験の成果である。  その結果、軽水炉の場合、像質はほとんど低下しないことが判った。	原子力プラントのX線透過試験	—	—	—	—	—	—	—	[ FBRでのISI 時の放射線量率 の評価 ]

No	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検 査 時 間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題																				
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界																								
R-4	<p>要目及びX線管容器部形状</p> <table border="1" style="font-size: small;"> <tr><td>X線管(二重壁型)</td><td>大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm</td></tr> <tr><td>電圧出力</td><td>25-160kV(5kVステップ切り換)</td></tr> <tr><td>電流出力</td><td>大焦点 10mA 小焦点 4mA</td></tr> <tr><td>ワット数</td><td>0.1-9.9分/1-99分 切り換</td></tr> <tr><td>電圧電圧</td><td>AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA</td></tr> <tr><td>X線管容器</td><td>1270×356×356mm(50kg)</td></tr> <tr><td>X線管</td><td>350×100φmm(8kg)</td></tr> <tr><td>X線管架</td><td>305×407×490mm(49kg)</td></tr> <tr><td>移動車</td><td>355×370×610mm(51kg)</td></tr> <tr><td>電源装置</td><td>720×1260×1100mm(70kg)</td></tr> </table>  <p style="text-align: center;">X線管容器部</p> <p>二重壁片面撮影法配置</p> 	X線管(二重壁型)	大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm	電圧出力	25-160kV(5kVステップ切り換)	電流出力	大焦点 10mA 小焦点 4mA	ワット数	0.1-9.9分/1-99分 切り換	電圧電圧	AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA	X線管容器	1270×356×356mm(50kg)	X線管	350×100φmm(8kg)	X線管架	305×407×490mm(49kg)	移動車	355×370×610mm(51kg)	電源装置	720×1260×1100mm(70kg)	<p>小径管の (4B程度) 二重壁片面撮影 によるX線透過 試験 およびその他X 線試験</p>	<p>X線管容 器： 100φmm × 350mm長</p>	—	—	<p>欠陥識別 度 2%以下</p>	—	—	△	<p>〔原子力プラント：〕 検査対称部へのセ ンサ及びフィルム の自動装着</p>
X線管(二重壁型)	大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm																													
電圧出力	25-160kV(5kVステップ切り換)																													
電流出力	大焦点 10mA 小焦点 4mA																													
ワット数	0.1-9.9分/1-99分 切り換																													
電圧電圧	AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA																													
X線管容器	1270×356×356mm(50kg)																													
X線管	350×100φmm(8kg)																													
X線管架	305×407×490mm(49kg)																													
移動車	355×370×610mm(51kg)																													
電源装置	720×1260×1100mm(70kg)																													

No.	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検 査 時 間	自 動 自 動 可 手 動	主 な 課 題
			サイズ 重 量	使用温度	探傷深度	検出限界				
R-5	<p>原理及びシステムの構成</p>  <p>図 センサ部の構成</p>  <p>図 コンデンサレンズの機能</p>  <p>図 リアルタイム高エネルギー X線検査システムの構成</p>	<p>40~250mm 厚の steel 等のリアルタイムでの X線試験</p>	—	—	—	欠陥識別度 2% 以下	—	リアルタイム	△	<p>原子カプラント： ①被検物への自動化の設備開発による接近性。 ②リアルタイムとしての動状態検査物の必要性。 ③センサ、テレビシステムの耐放射線性のための R &amp; D</p>



No	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動◎ 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
R-6	溶接部試験体による放射線透過試験と超音波探傷試験の欠陥検出能力の具体的比較である。 併せて、狭照射野撮影法による試験との比較である。	鋼板溶接部の欠陥検出  鋼板厚 24 mm	—	—	—	—	欠陥長さの検出。 下図に示す。	—	—	—

表 各種試験による欠陥長さの比較

種類 \ 欠陥No	1	2	3	4	5	6	7
切断試験	14±1.4	24±0.7	25±2.6	5±1.4	7.5±2.5	2.5±2.5	3.5±2.5
R.T	一般試験 (通常撮影)	9	23	25	5	4.0	0
	精密試験 (狭照射野撮影)	13	24	26	5	4.5	0
U.T (JIS Z 3080)	18	28	24	14	10	10	2
U.T (JIS Z 3060) L線	13	23	9	4	5	5	0
U.T (JIS Z 3060) L/2線	17	38	29	11	11	9	3

注) R.T: 放射線透過試験  
U.T: 超音波探傷試験

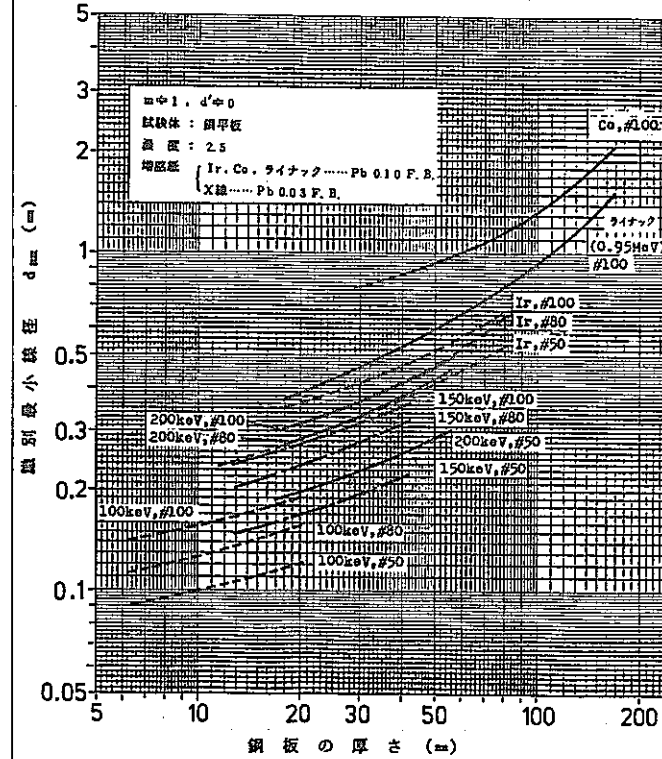
図 狭照射野撮影方法の撮影配置

No	原 理 等	適用例 (材質等)	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
R-7	照射線源の種類によって透過度計識別度に格差が生じるので、試験対象物、試験目的により線源を選定する必要があるが、スイッチャブルの高エネルギーX線のライナックは広い領域の検査が可能である。	鋼板	—	—	—	透過度計 識別度 下の図に 示す。	—	—	—	—

解説表 各技術によって得られる像質の一例\* (厚さ30mmの鋼板)

技術区分	線源の種類	X線フィルム 増感紙	識別可能な透過度計 の最小の線径	透過度計識 別度(%)	そ の 他
A	X線 (200KeV)	# 50 Pb 0.03	0.25mm	0.8	Z 3104 特級
B	X線 (200KeV)	# 100 Pb 0.03	0.40	1.4	Z 3104 特級
	Ir-192	# 50 Pb 0.10	0.32	1.1	Z 3104 特級
C	ライナック (0.95MeV)	# 100 Pb 0.10	0.50	1.7	Z 3104 普通級
	Ir-192	# 100 Pb 0.10	0.50	1.7	Z 3104 普通級
D	Co-60	# 100 Pb 0.10	0.80	2.7	JIS規格外

\* 拡大率  $m \neq 1$ 、 $d' \neq 0$



解説図 3.1 線源及び感光材料の種類と識別最小線径との関係(その1)

## (12) 中性子ラジオグラフィ (N)

### [I] 技術概要

ニュートロンラジオグラフィは、ソースからの中性子束が被検体により減衰しながら透過してくるのを検出し、被検査体の構造を調べる技術である。中性子の被検査体による減衰は反応断面積に依存し、物体の密度に依存しないのでX線(γ線)では、透視が困難なものが可能となる特徴がある。

中性子源としては、研究炉、加速器(バンデグラフ、サイクロトロン)、PI源(カリフォルニウム-252、アメリシウム-241-ベリリウムなど)がある。研究炉がもっとも強力な中性子源であるので研究が進んでいるが、可搬性の観点から他の方法が注目されている。

中性子のエネルギーに関しては、冷中性子、熱中性子、高速中性子が考えられている。像を得る方法としては写真、CTがある。

### [II] 開発状況

#### i) 国内状況

中性子源の改良、評価や像を得るためのCTの開発など基礎的研究が行なわれている段階と考えられる。中性子ラジオグラフィの適用例としては次のものがある。

- a) Cu, Fe, Al 又は Cu, Fe, Pb の3重円筒の識別
- b) ボイドを含むアクリル
- c) カメラの内部構造
- d) ロケット用火工品, ロケット用構成部品
- e) 自動車およびオートバイ用キャブレター内の水の挙動
- f) 模擬Liヒートパイプ内のLiの熔融状況
- g) 出土遺物
- h) 中空精密鋳造品(中子残りの検査)

検出能力の定量的データについては見当たらない。

#### ii) 海外状況

国内とほぼ同じ状況にあると考えられるが、海外では核燃料要素に適用した例があり、燃料ピンの欠損、変位やスペーサピンが識別できる像が得られている。

また、ASTMでは像質に関する規定E545や中性子ラジオグラフィビームのL/D比に関する規定E803-81などがある。

### [III] 調査文献

N-1 : 京都大学原子炉実験所「第6回中性子ラジオグラフィ短期研究会報告」

KURRI-TR-252

N-2 : G.A. Schlapper et-al "A Demonstration of Filtered Neutron Beam  
Computed Tomography : Evaluation of a 37 Pin Fuel Assembly Phantom"  
Material Evaluation, Vol. 39, 1981, P.1121~P.1125

N-3 : W.J.Ri chards et-al "Neutron Tomography of Neclear Fuel Bundles"  
Material Evaluation, Vol. 40, 1982, P.1263~P.1267

#### 〔Ⅳ〕 適 用 性

適用例からみて、異種材の識別、接着性、中性子吸収能力の大きい物質を含んだ被検査体の試験に適していることが分かる。またクラックの検出能力に関する発表文献は現在のところない。

以上の点からみて、高速炉構造物への適用の可能性をまだ論じる段階ではない。

No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可 手動	◎ ○ △	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界					
N-1		Cu, Fe, Al 又は Cu, Fe, Pb の3重円筒	電子線型 加速器 134 KeV. 78 KeV. 24 KeV.)	常温  複数のエネルギー	—	—	3重円筒の識別が可能	—	◎	平均中性子強度が弱い	
		カメラ	252 Cf: 536mCi 全重量 1150kg  熱中性子	常温	—	—	異種材料の組合せからなる構造物内部の検査に有効	—	◎	エレクトロニックイメージングの応用 核燃料ピンへの適用	
		H1 ロケットの火工品ダミー	サイクロトロン  熱中性子	常温	—	—	X線検査に比べて良好	—	◎	原子炉と同程度の中性子源が得られるように努力すること	
		中空精密鑄造品 (タービン用ブレード, ノズル)	京大原子炉 熱中性子	常温	—	1mm以下の中子残りが判別可能	—	—	◎		

No.	原 理 等	適 用 例 ( 材 質 等 )	セ ン サ		検 出 能 力		サイジング 精 度	検査時間	自動 ◎ 自動可 ○ 手動 △	主 な 課 題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
N-2		核燃料要素 37本, 6角配列 ピン	ミズーリ 大学研究 炉  高速中性子 24 KeV	常温	—	—	ステンレ ス容器内 の燃料ピ ンの位置 のずれ, 欠損が判 別できる。	—	◎	
N-3		核燃料要素 ( 使用済 ) 91本バンドル ( EBR- II のも の )	NRAD原 子炉 エピーサ ーナル中 性子 1.46 eV	常温	—	—	スパーサ ワイヤの 位置が分 かる。	中性子照 射時間は 11 hr 他に像に 直す処理 時間が必要	◎	

### 3.3 調査のまとめ

#### (1) 超音波を用いた体積試験技術

電子走査式超音波探傷法〔E〕, 超音波ホログラフィ〔H〕, 開口合成法〔S〕, 散乱法〔D〕は, 欠陥を映像化, サイジングを目的とした試験法であり, AE法〔A〕は欠陥を検出しその位置を標定することを主目的とした試験法である。いずれの方法も, 限られた試験体の自動試験が可能な水準にある。

超音波を用いた試験法は, 探触子を試験体に接触させる。AE法〔A〕を除く試験法では, 探触子の耐用温度は最高でも100℃と思われる。AE法〔A〕では, 耐用温度が600℃の探触子を用いている例もある。探触子の耐放射線性は不明である。いずれの試験法でも, 100mm程度の鋼材中の深部を探傷することができる。

#### (2) 光, 電磁気を用いた体積試験技術

レーザー超音波法〔L〕, 電磁超音波法〔M〕, 渦電流探傷法〔C〕は, いずれも非接触式探傷であり, 電気抵抗法〔P〕は探針を試験体に接触させて探傷する方式である。レーザー超音波法〔L〕を除く試験法〔M, C, P〕は, 限られた試験体に対し自動試験が可能な水準にある。センサの耐用温度は, 電磁超音波法〔M〕で750℃の例がある。その他の試験法〔L, C, P〕では詳細は不明だが原理的に高温材の試験は充分可能と思われる。センサの耐放射線性は不明である。

渦電流探傷法〔C〕, 電気抵抗法〔P〕は主として表層欠陥を対象とした試験法である。探傷可能な鋼材の厚さは, 電磁超音波法〔M〕で90mm, レーザー超音波法〔L〕で200mmとの報告例もある。

#### (3) 放射線を用いた体積試験法

X線,  $\gamma$ 線CT〔X〕, ラジオグラフィ〔R〕, 中性子ラジオグラフィ〔N〕は, いずれも線源とセンサとの中間に試験体を配置して試験する方法である。どの試験法でも, 装置と試験体とを接触させる必要はなく, 高温の試験体を試験できる。センサの耐放射線性については, センサの寿命という問題よりも, 透過放射線を検出するためS/Nの面で制約が生じられる。欠陥を映像化する試験法であり, 試験可能な鋼材の厚さは, 放射線の透過能力に大らと思われる。欠陥を映像化する試験法であり, 試験可能な鋼材の厚さは, 放射線の透過能力に大きく依存する。X線,  $\gamma$ 線CT〔X〕で, アルミニウム150mm厚の例を除き, 試験可能な鋼材の厚さは不明である。

### 第3章 参考文献一覧

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
E-101	佐々木, 窪 田	可変焦点集束ビーム探触子による超音波探傷法	NDI 第2分科会資料 No.2935	昭57. 9
E-102	J.I. McElroy , K.F. Briers	Annular Array Search Units and Their Potential Application in Conventional Ultrasonic Testing Systems.	Materials Evaluation	1979. 10
E-103	木 野, 佐々木	管内挿入式マルチアレイ型超音波プローブ	NDI Vol.32 No.2	昭58. 2
E-104	佐 藤, 佐々木	電子セクタスキャン式超音波探傷装置の開発	NDI Vol.30 No.9	昭56. 9
E-105	長 井, 内 田	アレイ型超音波探触子の音場分布について	NDI Vol.30 No.2	昭56. 2
E-106	W.E. Glenn , J.B. O'Maley	A PVDF Dynamically Focused Transducer	Materials Evaluation	1983. 11
E-301	長 井, 柏 谷, 内 田, 柿 原	電子走査型超音波探傷法の部分溶込み溶接部への適用	非破壊検査 Vol.32 No.2 P.756~757	昭58. 2
E-302	窪 田, 佐々木, 木 野 ほか	リニアアレイプローブによる電子複合走査式超音波探傷法	NDI資料 21040 P.27~32	昭59.
E-303	井 出	超音波医学機器の進歩	非破壊検査 Vol.29 No.10 P.688~693	昭55. 10
E-304	W. Gebhart	Improvement of Ultrasonic Testing by Phased Arrays	The 2nd Japanese-German Joint Seminar	1983.



番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
E-305	W.Gebhart F.Bonitz H.Woll	Detect Reconstruction and Classification by Phased Arrays	Materials Evaluation Vol.40 P.90~95	1982.
E-306	D.S.Dean	A Review of Ultrasonic Transducer Arrays	British J. of NDT P.140~146	1979.
H-1		Experiences in using Ultrasonic Holography in the Laboratory and in the Field with Optical and Numerical Reconstruction	Acoustical Imaging Vol.8 P.651~683	1983.
H-2		Acoustical Holographic Characterization of Defects in Pressure Vessel Materials	Ultrasonics P.421~431	1977.
H-3		Defect Sizing and Classification Using HOLOSAFT	International Conference of NDE	1984.
H-4		開口合成について	非破壊検査 Vol.32 No3 P.243~251	1983. 3
H-5		ディジタル方式超音波ホログラフィ探傷装置の開発とその応用について	非破壊検査 Vol.29 No1 P.2~10	1980. 1
H-6		Computer Reconstruction for Digital Acoustical Holographic Inspection of Turbine Rotols and Pipes	The 2nd Japanese-German Joint Seminer P.26~40	1983. 2
S-101		3-Dimentional Defect Reconstruction Using HOLOSAFT	The 2nd Japanese-German Joint Seminer on Non-Denstructive Evaluation and Structual Strength of Nuclear Power Plants.	1983. 2

番号	著者	タイトル	雑誌名	発行年月
S-102		超音波探傷技術の現状 (SAFT法を中心に)	日本高圧技術協会 技術セミナー 非破壊評価技術の現状と問題点	昭59.10
S-103		Characterization of Flaw Location, Shape, and Dimensions with the ALOK System	Material Evaluation Vol.40 No.1 P.84~89	1982.
S-104		端部エコー法を用いた ALOK 法によるき裂深さ測定	(社)日本非破壊検査協会 昭和59年度春季大会 講演概要集 P.146~147	昭59. 2
S-105		The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniquis on Ultrasonic Imaging	IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS SV 30(5) P.283~294	1983. 9
S-106		開口合成超音波診断装置 —非線形処理の有効性—	日本超音波医学会講演論文集 41-PE-33 P.587~588	昭57.12
D-1		超音波散乱法による圧力容器クラット層の亀裂検査法	NDI資料 2951	
D-2		Time Domain Diffraction Technique Ultrasonic Scatter Technique	Research Techniquis in Nondestructive Testing IV P.485~488	1975. 6
D-3		The Potential of scattered or diffracted ultrasound in the dertermination of crack depth	Nondestructive Testing P.146~151	1979. 1
D-4		Defect Sizing using Ultrasonic Diffraction	Britisch Journal of NDT	1983.
A-101	P.H.Hutton , R.J.Kurtz (A-101,A-102,A-103)	AE法の原子炉連続監視適用性に関するNRC-BMIプロジェクトの概要	11th Water Reactor Safety Research Information Meeting P.1~19	1984.10

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発表年月
A - 104	P.Höller, E.Waschkies K.Hepp	Monitoring of Thermal shock induced crack growth in a feed water nozzle corner of reactor pressure Vessel by acoustic emission	Progress in Acoustic Emission II (IAES-7)	1984. 10
A - 105	Sasuhide Sakakibara	Evaluation of structural integrity of piping components for fast breeder reactor by acoustic emission signals	7th International conf on NDE in the Nuclear Industry	1984.
A - 106	Y.Mori, K.Aoki	Background noise of acoustic emission signals in Sodium piping loop	ASM 6th International conf on NDE in the Nuclear Industry	1983. 11
A - 201	P.G.Bentley R.J.Davies	Acoustic emission examination of nuclear reactor steam drums	British Journal of NDT 24-5	1982.
A - 202	Yasuo Shinomiya Kyoich Tatsuno	AE characteristics in hydrostatic test on small pressure vessels	Paper summer ASNT National Conf.	1981.
L - 1		Laser Generated Ultrasound at Modified Metal Surface	Ultrasonics	1981. 5
L - 2		Examination of Vibrations Amplitude Distribution Ultrasonic Transducers Using Optical Holography with a Modulated Reference Beam	Ultrasonics	1981. 5
L - 3		レーザ探傷器について	非破壊検査協会第2分科会 非接触超音波探傷シンポジウム	1984.
M 101	R.B.Thompson, W.E.Peterson and C.F.Vasile	An emat system for detecting flaws in steam generator tubes	Ultrasonics Symp	1979.
M 102	P.T.Cole	Development of a portable crack detector for the location of Defects in the Corners of continuously cast warm-bloom material	Ultrasonic Int. Conf. Exhib	1979.

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
M 103	K.R.Whittington	Ultrasonic inspection of hot steel	British Journal of NDT	1978.
M 104	K.R.Whittington	Electrodynamic probes-principles, performance and applications	British Journal of NDT	1981.
M 105	D.M.Wilson P.T.Cole and K.R.Whittington	Electromagnetic-acoustic techniques for Internal and surface inspection of round steel Bars	Ultrasonic Int Conf.	1977.
M 106	C.M.Fortunko and R.E.Shramm	Ultrasonic nondestructive evaluations of butt welds using electromagnetic acoustic transducers	Welding Journal	1982.
C-1	遠 藤 他	伝熱管の渦電流探傷技術	三菱重工技報 13 (3)	1976.
C-2	遠 藤 他	加圧水型軽水炉における蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷技術	三菱重工技報 15 (5)	1978.
C-3	K. Betzold	A Multifrequency Approach to Interpret Defect Signals Super imposed by Disturbing Signals According to the Causing Defect Type and Size	ASTM-STP 722 P.204~212	1981.
C-4	Stumm	Multi-parameter Methods of Non-Destructive Testing of Materials	Brit. J. of NDT 13 P.76~81	1978.
C-5	G.Witting and H.M.Thomas	Design of a Pulsed Eddy Current Test Equipment with Digital Signal Analysis	ASTM-STP 722 P.387~397	1981.
P-1		電気抵抗法によるJPDR圧力容器の検査	非破壊検査 18 (7) P.298~306	1969.

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
P-2		原子炉圧力容器の内表面割れの検出および深さ測定	火力原子力発電 35 (2) P.111~121	1984.
P-3		直流ポテンシャル法による表面き裂状の検査	材 料 33(368) P.602~60	1984.
P-4		A.D.C. Potential Drop Method to Monitor Crack Growth in Notches Subjected to Torsion	Fafigue of Engineering Materials and Structure 4 (3) P.287~291	1981.
X-1		X-ray Computed Tomography of thick Steel Castings and Forgings	Quantitative NDE in the Nuclear Industry ISBN : D-87170-158-8 P.275~279	1983.
X-2		産業用CTスキャナ TOSCANER-3030	東芝レビュー 38 (2) P.1073~1076	1983.
X-3		X-ray CT Scanner Application to void Fraction Measurment in BWR Core	Toshiba Review No.144 P.17~20	1983.
X-4		Preliminary Study on Application of X-ray CT Scanner to Measurment of Void Fraction in Steady Two-Phase Flows.	JNST 120 (4) P.1~12	1983. 1
X-5		Measurment of Void Fraction Distribution by Gamma-ray Computed Tomography	JNST 120 (4) P.315~317	1984. 4
R-1		Steam Generation Support Plate Radiographic Evaluation System	EPRI Research Project S105-1 NP-2823	1983.
R-2		Portable Linear Aceleration Development	EPRI Research Project 822-6 NP-2831	1983.

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
R-3		原子炉冷却系配管の放射線量率が透過写真のコントラストに与える影響について	日本原子力研究所 NDI資料 No.1805	1981.
R-4		鋼，曲管突合せ溶接部の二重壁方面撮影法に際して，X線装置による制限と透過度計識別度についての実験報告	理学電気報	1984.
R-5		リアルタイム高エネルギーX線検査システムの開発	三菱電気技報 55 (10)	1981.
R-6		放射線透過試験と超音波探傷試験の溶接部欠陥検出比較について	非破壊検査 32 (10)	1983.
N-1		第6回中性子ラジオグラフィ短期研究会報告	京都大学原子炉実験所 KURRI-TR-252	
N-2	G.A. Schlapper et. al.	A Demonstration of Filtered Neutron Beam Computed Tomography : Evaluation of a 37 Pin Fuel Assembly Phantom	Material Evaluation Vol.39 P.1121~1125	1981.
N-3	W.J.Richards et. al.	Neutron Tomography of Nuclear Fuel Bundles	Material Evaluation Vol.40 P.1263~1267	1982.

## 第4章 結 言

高速増殖炉（FBR）構成機器の健全性確保のための非破壊評価技法の可能性を生じることを目的に調査研究を進めた。本年度は2つのワーキング・グループに分かれて

- 1) FBRの非破壊試験技術の考え方と現状
- 2) 新しい非破壊試験法の可能性

について国内外の文献資料を中心にまとめている。

本年度は中間報告として、いくつかの適用可能な試験法の現状技術レベルが示された段階であり、次年度に各技術の詳細な検討が加えられ、適用可能性についての提案がなされる予定である。