

配布限定

PNC SJ225 85-10
JWES-AE-8509

分

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]

昭和60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 (II)

成 果 報 告 書

昭和60年12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 1J 225 85-10
JWES-AE-8509
1985 年 12 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(II)^{*}

(社)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^{**}

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、2年間にわたり調査研究した。

(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、試験環境等が、海外の例、軽水炉の場合との相違点を含めて明らかになった。

(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た。この調査に基づいて、温度、放射線線量率、スペース等の試験環境を考慮しFBRに適する体積試験方法を4つのカテゴリーに分類し、体積試験で用いる種々の方法の適用性を検討し有望と考えられる方法の開発課題等を明らかにした。

* 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Not for Publication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-SJ225 85-10
JWES-AE-8509
Dec. 1985



INVESTIGATION ON VOLUMETRIC EXAMINATION
METHOD FOR ISI AND ITS DEFECT DETECTABILITY (II)*

Yoshio Ando**
Chairman, AVE Subcommittee
Nuclear Energy Research Committee
The Japan Welding Engineering Society

Abstract

This report presents the investigation results on the volumetric examination method for ISI suitable for the FBR sodium coolant boundary and its defect detectability, focusing on the advanced examination techniques. The investigation results are as follows.

- (1) It is clarified that 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) It is clarified that the potential examination techniques, focusing on the advanced ones, of the volumetric examination as one of the non-destructive examinations.

Four categories are classified from a view point of temperature, γ irradiation rate and examination space and the advanced technologies including the conventional methods are studied their suitability for each category.

* 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 60AVE小委員会名簿

主 査	安 藤 良 夫	(株) 発電設備技術検査協会
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	(株) 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
"	増 山 巖	石川島播磨重工業(株) 技術本部企画部企画グループ
"	古 野 光 一	川崎重工業(株) 原子力本部品質保証班
"	杉 野 伸	川崎重工業(株) 原子力本部品質保証班
"	古 城 満 義	川崎製鉄(株) 技術研究本部 計測制御研究部
"	青 木 真 一	川崎製鉄(株) 鉄鋼技術本部 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
"	石 山 幹 夫	住友金属工業(株) 制御技術センター計測技術部
"	藤 沢 和 夫	住友金属工業(株) 制御技術センター計測技術部
"	村 山 理 一	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
"	佐 藤 道 雄	(株) 東芝 原子力技術研究所 自動化システムグループ
"	小 林 正 佳	(株) 日本製鋼所 鉄鋼重機事業本部 原子力技術部
"	小 崎 明 郎	(株) 日本製鋼所 鉄鋼重機事業本部 原子力技術部
"	木 村 敏 三	パブコック日立(株) 呉工場 品質保証部第二検査課
"	細 田 篤 雄	パブコック日立(株) 呉工場 品質保証部第二検査課
"	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) 原子力統括部品質保証部
"	松 尾 剛 男	三菱重工業(株) 神戸造船所 新型炉設計部
"	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	土 屋 毎 雄	動力炉・核燃料開発事業団 動力炉研究開発本部

委託者側	岡 林 邦 夫	動力炉・核燃料開発事業団	動力炉開発推進調整部
”	山 崖 佳 昭	動力炉・核燃料開発事業団	動力炉建設運転本部
”	仲 村 喬	動力炉・核燃料開発事業団	動力炉建設運転本部
”	中 本 香 一 郎	動力炉・核燃料開発事業団	大洗工学センターFBR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FBR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	

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 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・ γ 線CT	82
(11) ラジオグラフィ	89
(12) 中性子ラジオグラフィ	102
第4章 検討および評価	115
4.1 各種体積試験方法の適用性評価	115
4.2 超音波応用技術に関する検討	118
4.2.1 評価項目と評価の条件	118
4.2.2 評価結果	120
4.2.3 カプラント不要の試験法及びナトリウム存在による欠陥検出性の検討	120
4.3 光・電磁気応用技術に関する検討	127
4.3.1 検討項目	127
4.3.2 電磁超音波法	127
4.3.3 渦電流法	130
4.3.4 電気抵抗法	131
4.3.5 電磁気応用検査技術の総合評価	132
4.4 放射線応用技術に関する検討	137
4.4.1 検討項目	137
4.4.2 放射線CT	137
4.4.3 放射線透過法	139
4.5 評価	144
第5章 結 言	146

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、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た、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こととした。

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、調査検討をする。
- (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をする。

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された。昭和59年度の調査(I)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方法に関して、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。

昭和60年度の調査(II)では、前年度の成果に基き、以下の検討を行った。

- (1) 高速増殖炉のナトリウム冷却材バウンダリに適した有望な体積試験方法を検討する。
- (2) 有望とみられる試験方法について、その欠陥検出性を考察し、合理的な適用方法を検討する。なお、本報告書は前年度の調査・検討の成果を含めた総合報告書である。

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		試 験 の 種 類
区 分	P W P	B 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

MT : 磁粉探傷試験

RT : 放射線透過試験

PT : 液体浸透探傷試験

ECT : 渦電流探傷試験

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。

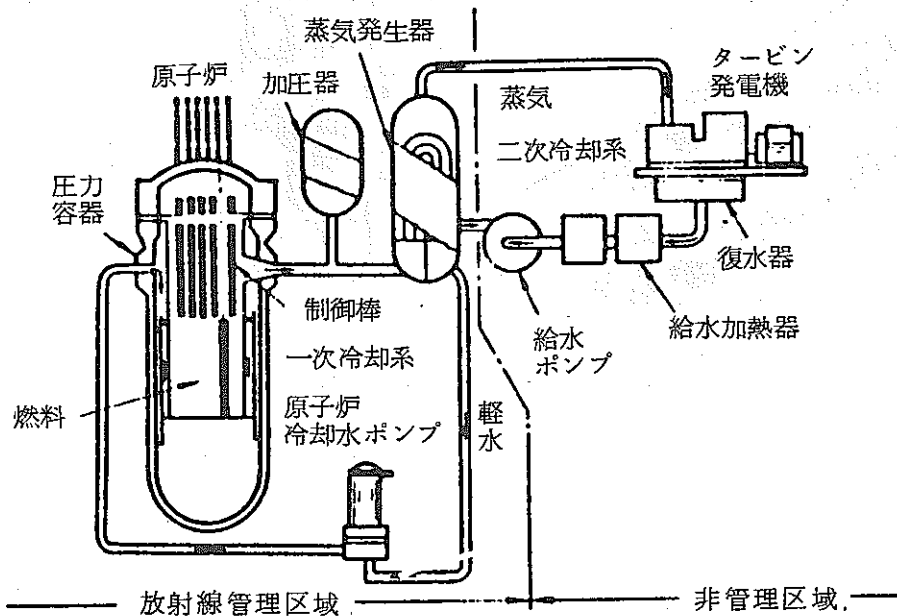


図 2.2-1 加圧水型動力炉概念図

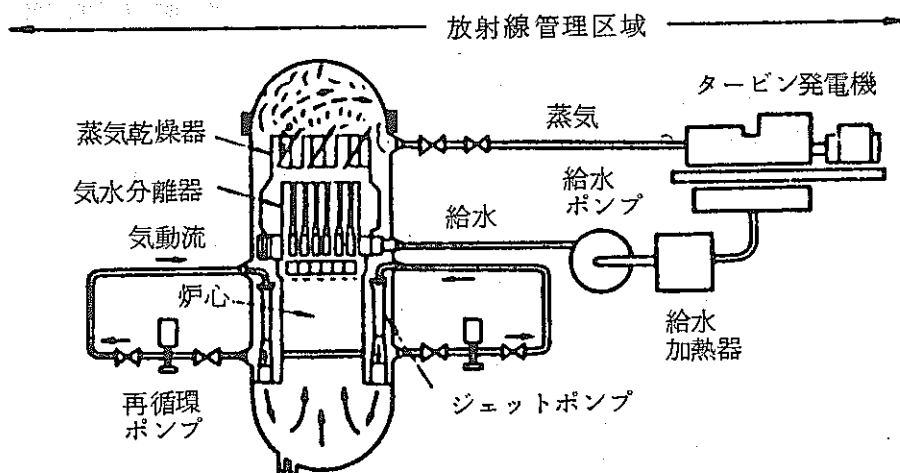


図 2.2-2 沸騰水型動力炉概念図

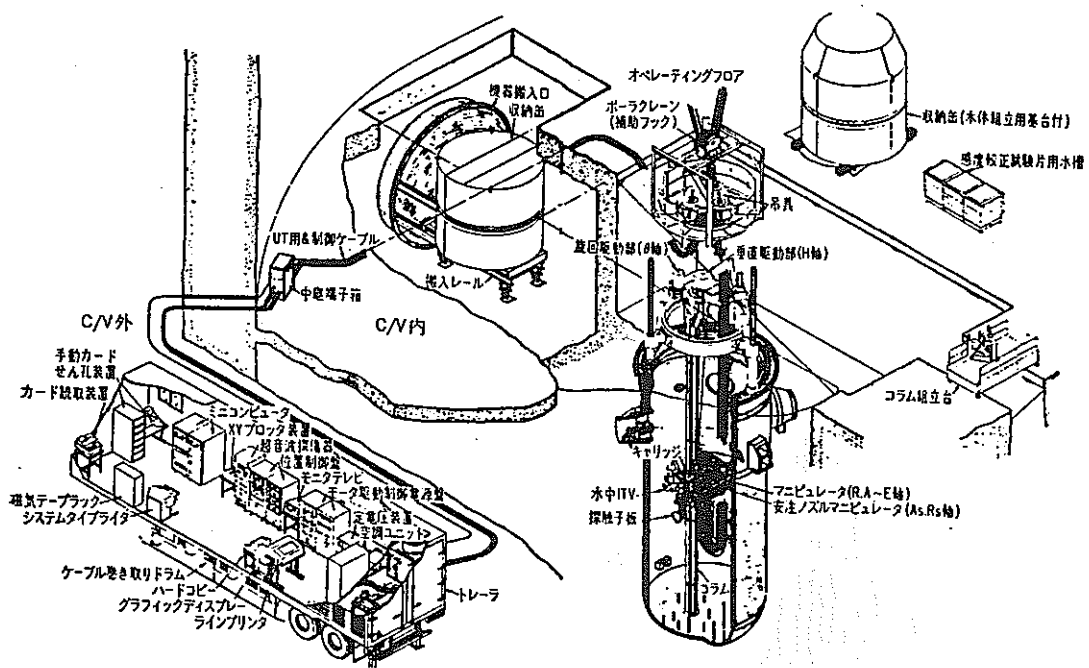


図 2.2-3 原子炉容器超音波探傷装置外観図 (PWR)

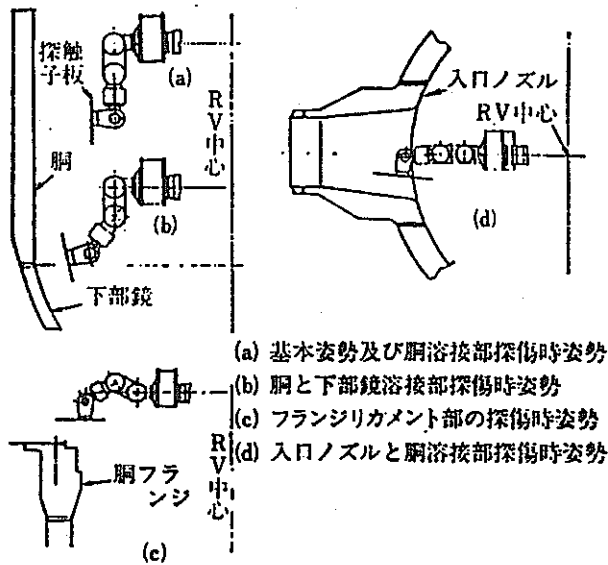


図 2.2-4 各探傷部における探触子板の姿勢

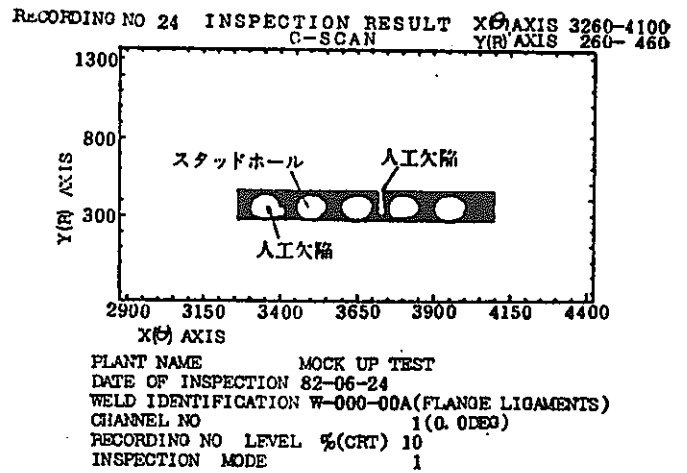


図 2.2-5 Cスキャン図の例
(フランジリガメント部)

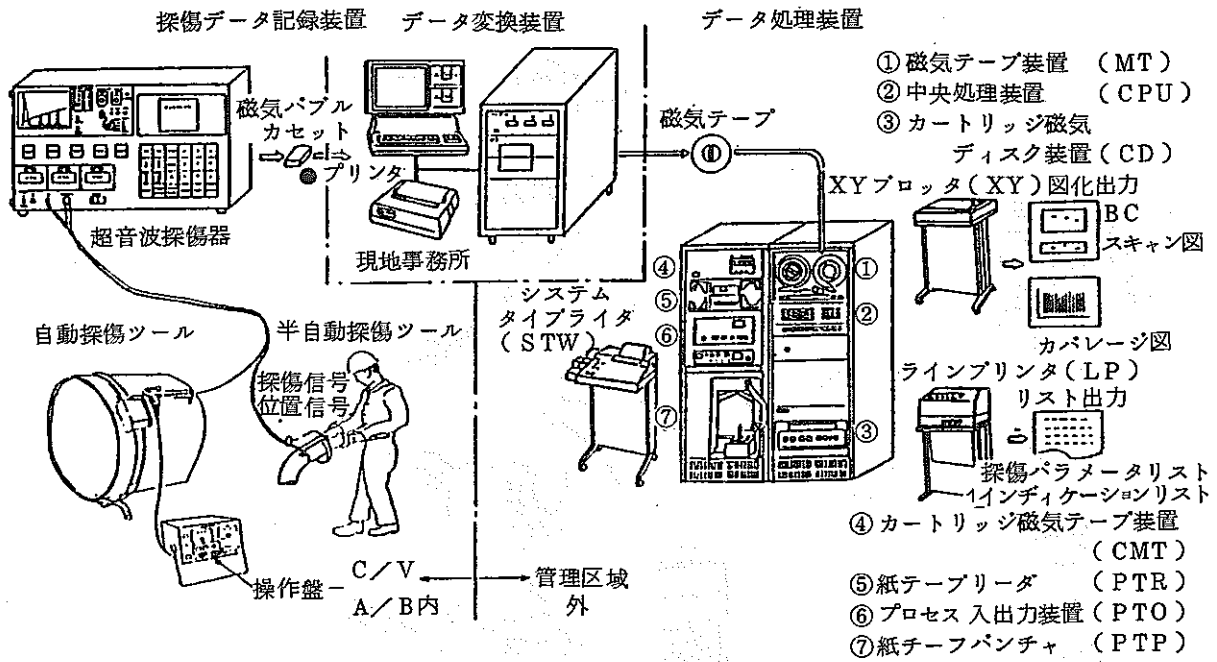


図 2.2-6 配管用自動/半自動超音波探傷装置外観図

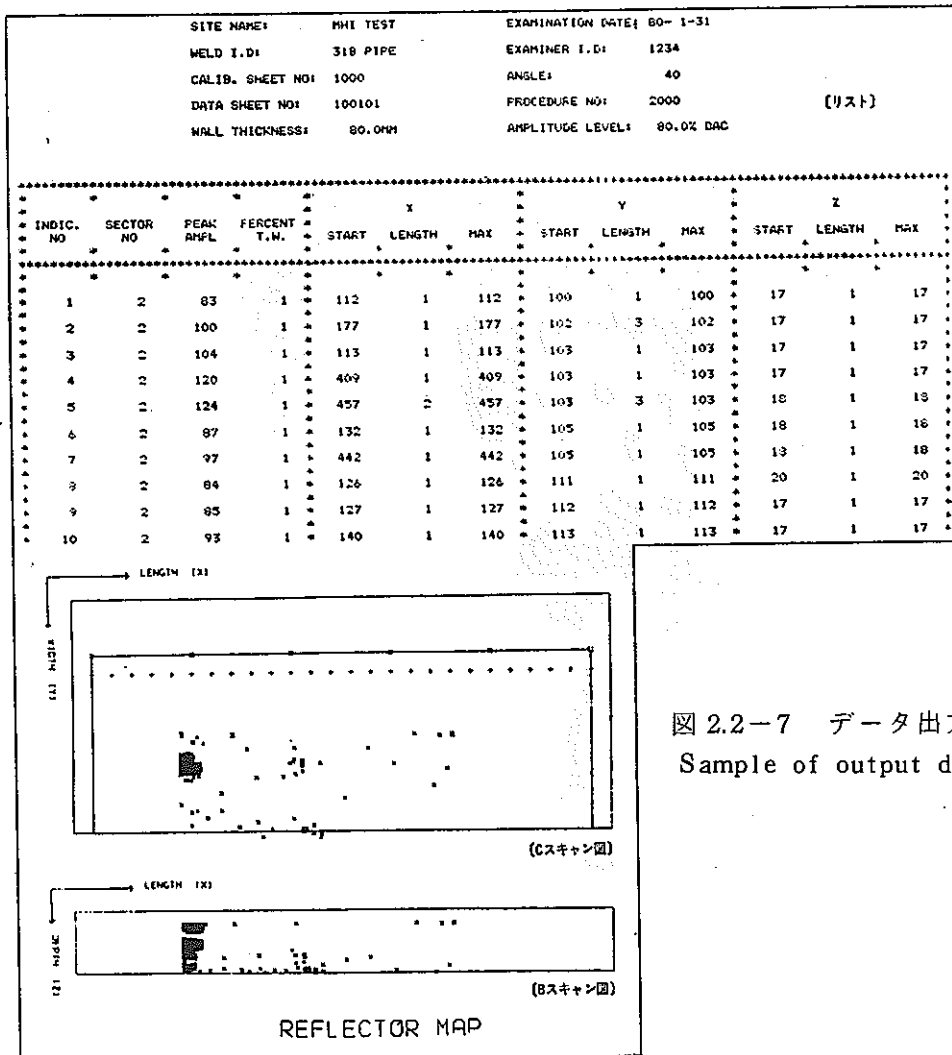


図 2.2-7 データ出力例
Sample of output data

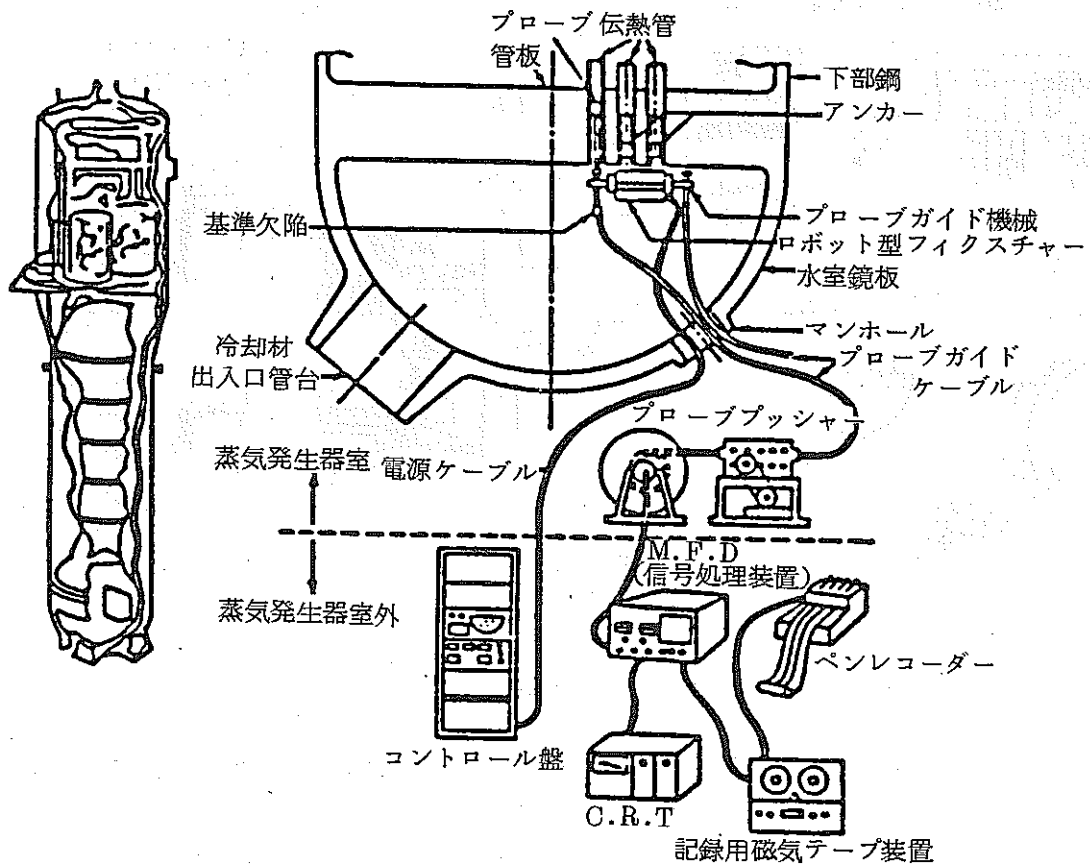


図 2.2-8 蒸気発生器渦流探傷装置全体図

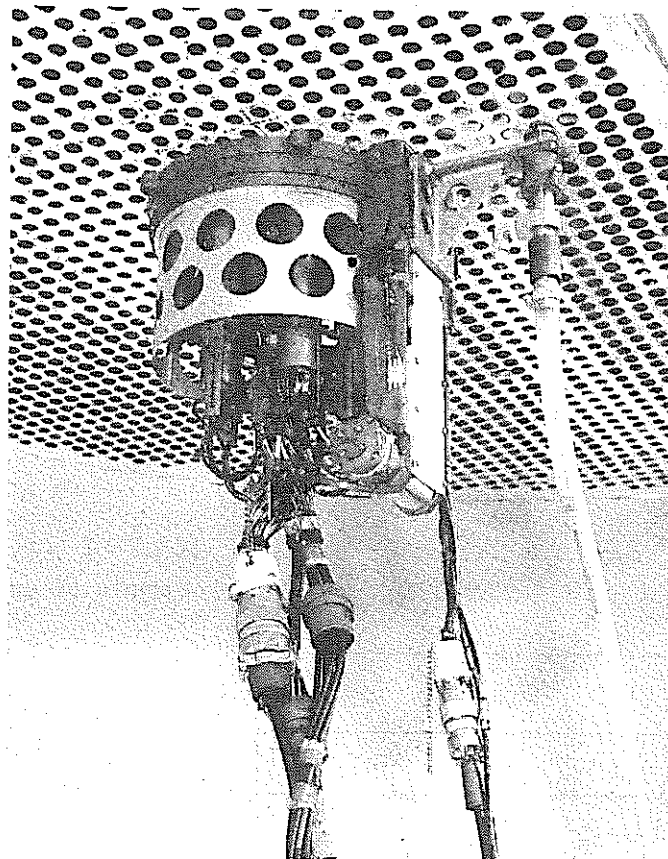


図 2.2-9 歩行ロボットの外観

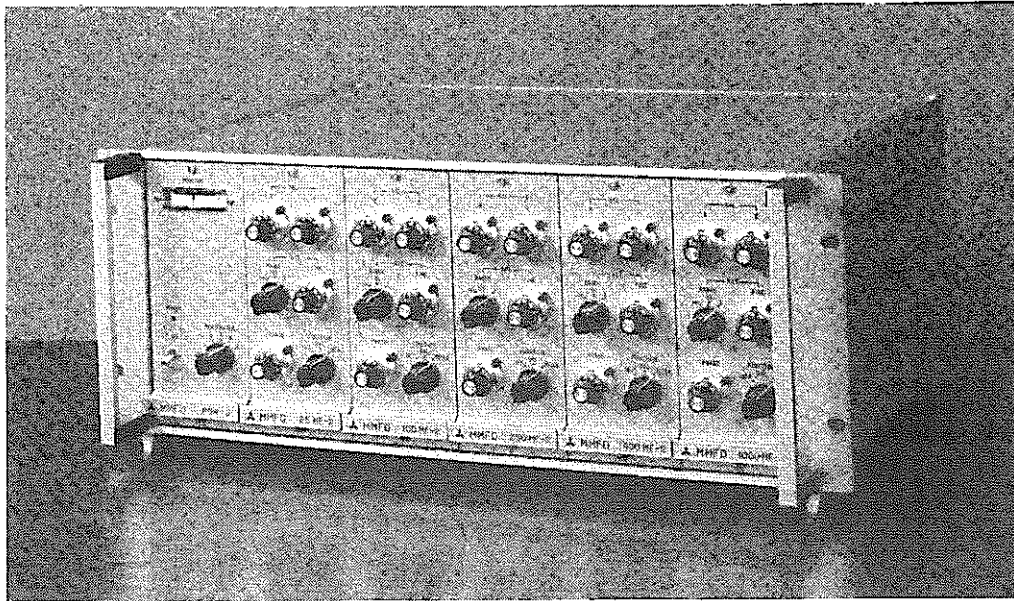


図 2.2-10 多重周波数探傷器

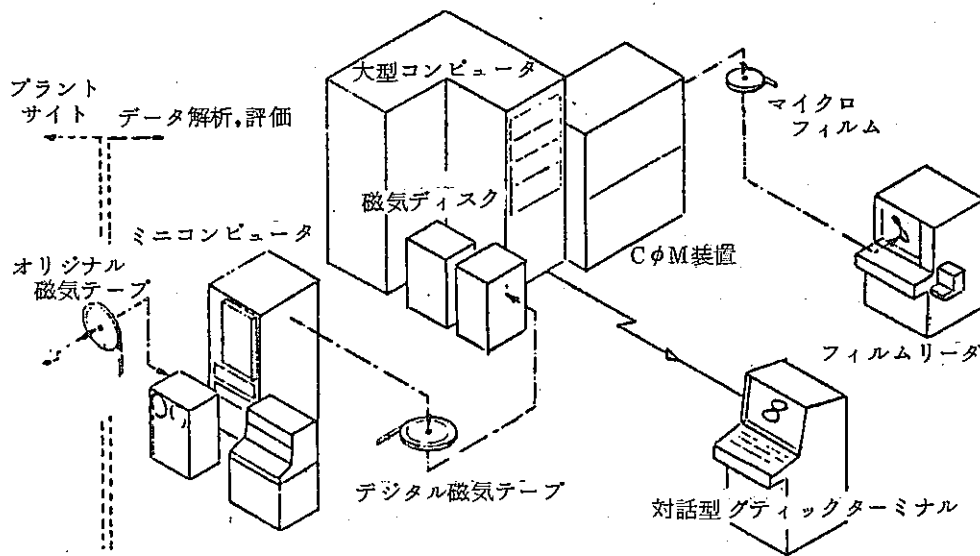


図 2.2-11 データ処理装置の構成

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)装置の小型化・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-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。

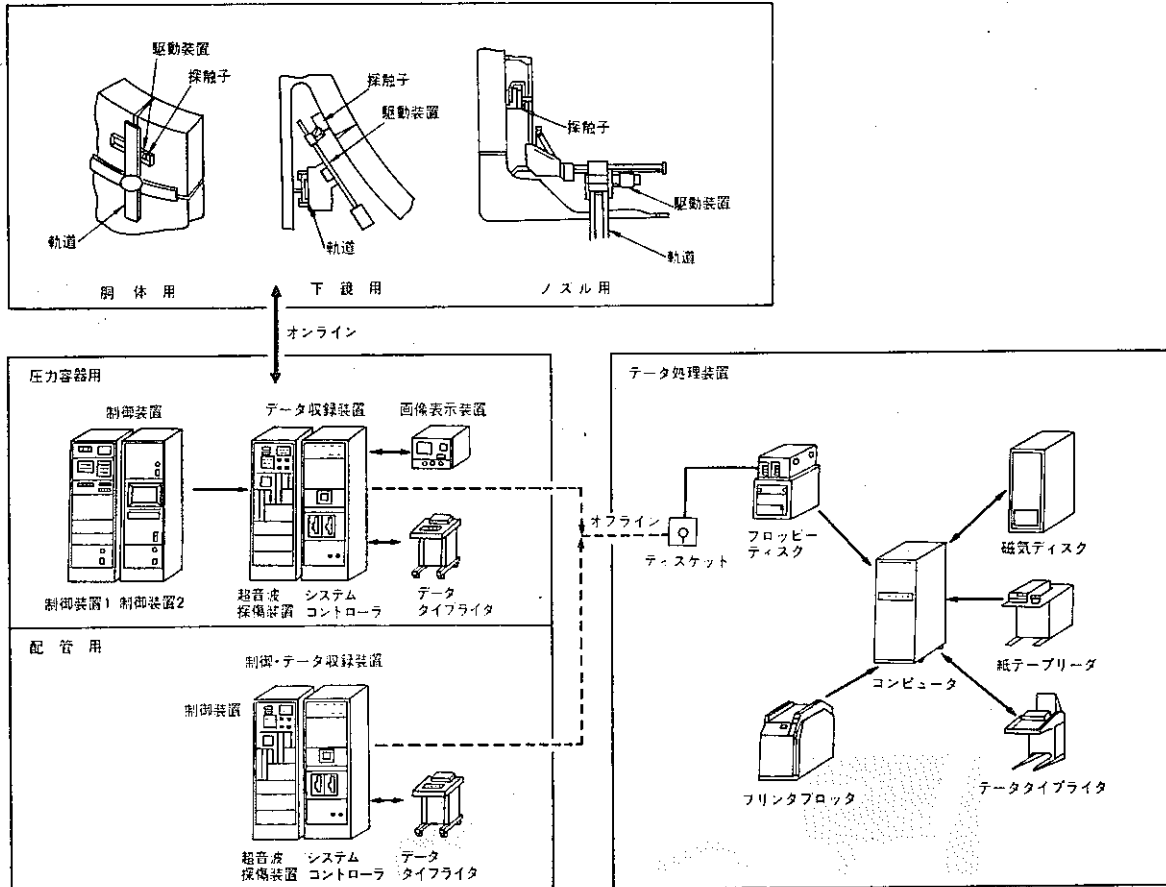


図 2.2-12 原子炉圧力容器及び配管の遠隔自動・半自動超音波探傷装置の構成

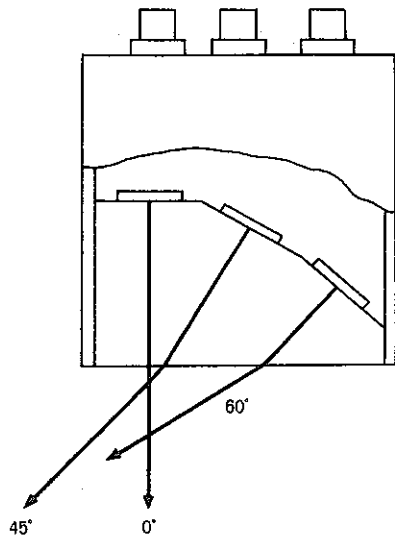


図 2.2-13 マルチビーム探触子

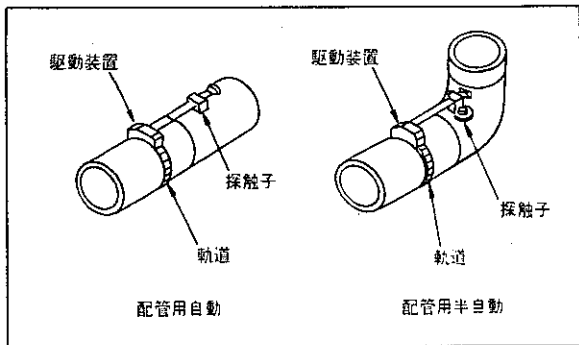


図 2.2-15 配管用自動/半自動駆動装置

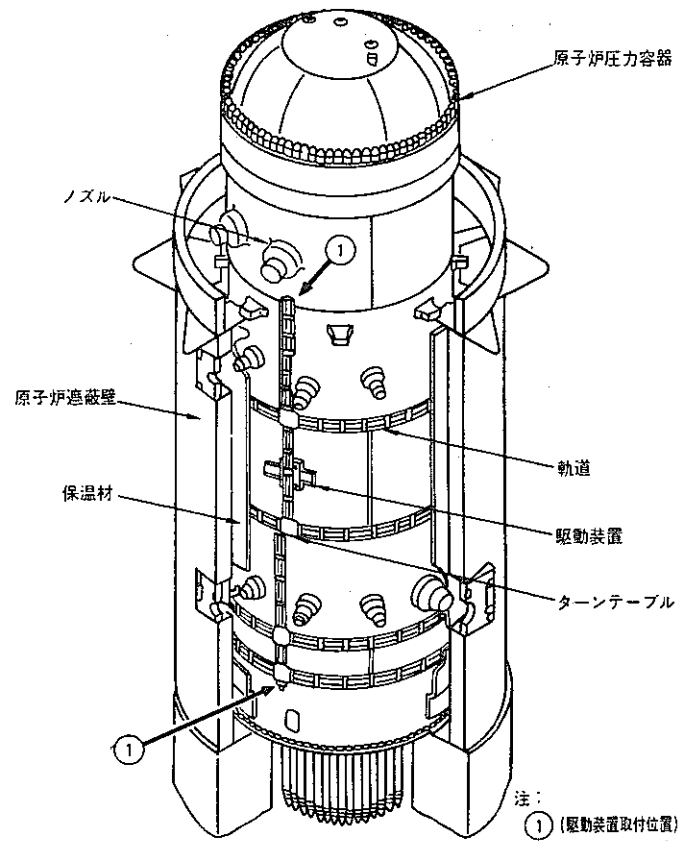
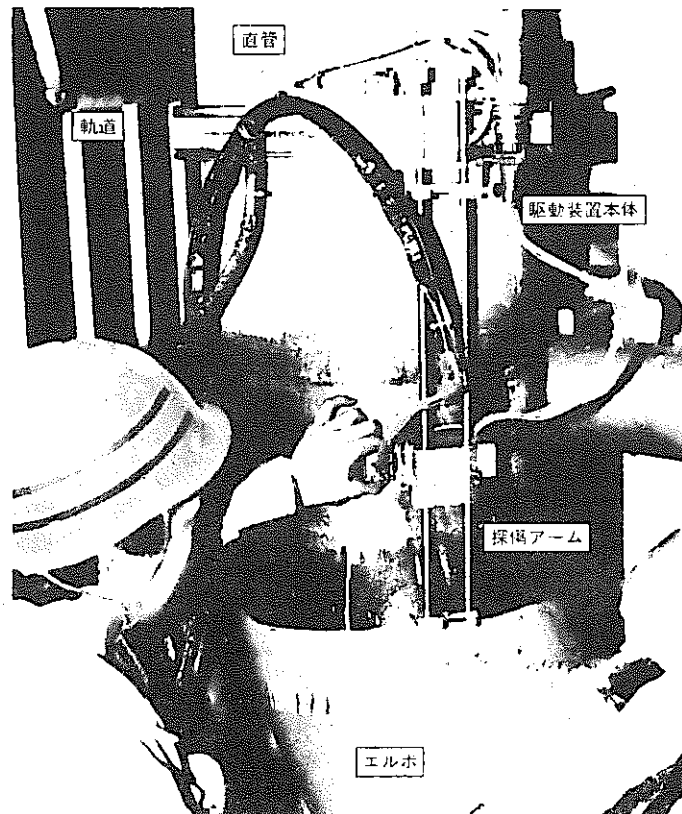


図 2.2-14 原子炉压力容器及び胴体用駆動装置



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

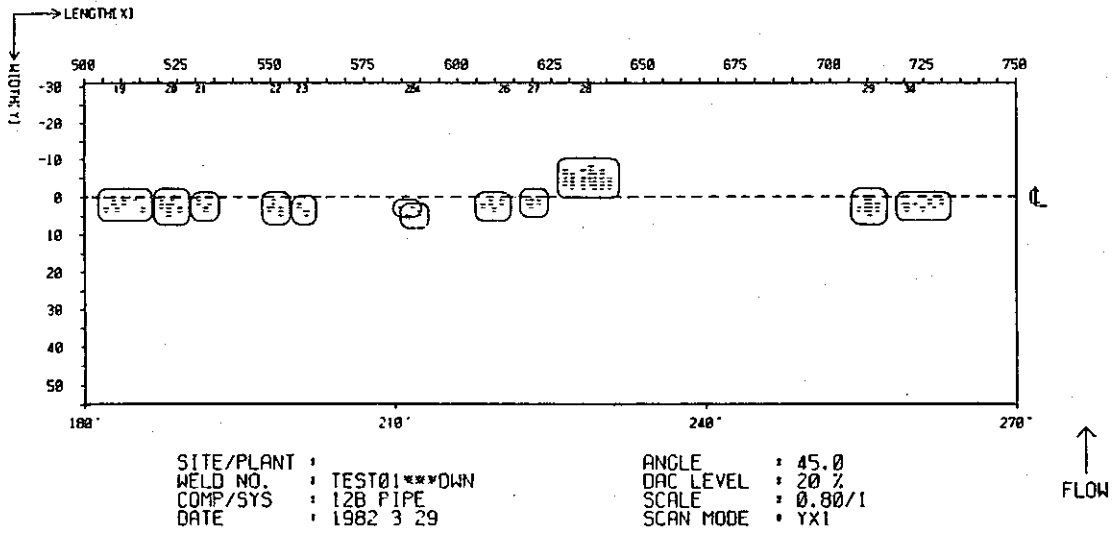
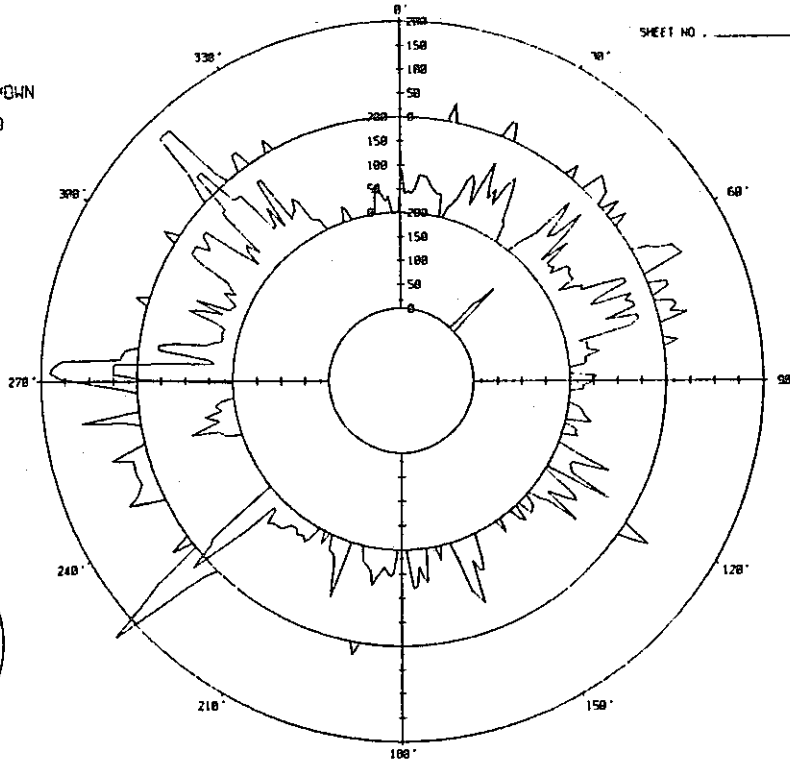


图 2.2-17 平面图

POLAR PLOT

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



INCIDENT ANGLE

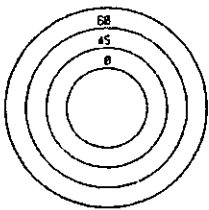


图 2.2-18 极坐标图

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えておく必要がある。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えておく必要がある。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 R/H	有	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 R/H	有	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 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雰囲気には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迫る必要がある。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、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つては、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採り上げることにした。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

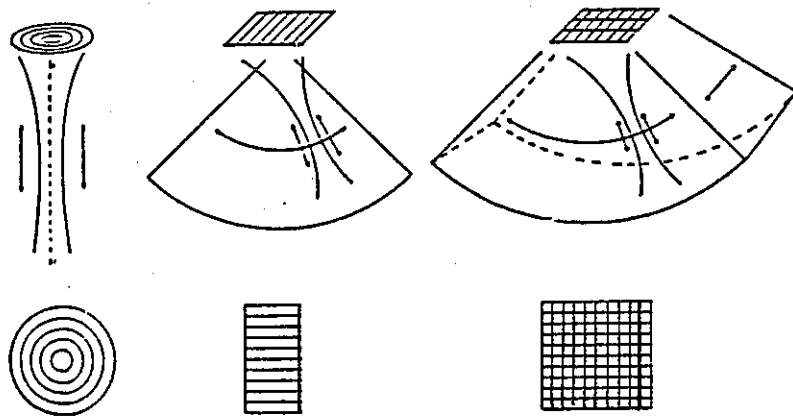
電子走査式超音波探傷法とは、1個の探触子の中に複数の振動子を配列したものをを用いる方法であり、配列の種類として、図3.2-1に示すような、リング・アレイ、リニア・アレイ、2次元アレイの三種がある。

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。



(a) リング・アレイ

(b) リニア・アレイ

(c) 2次元アレイ

図 3.2-1 アレイの種類

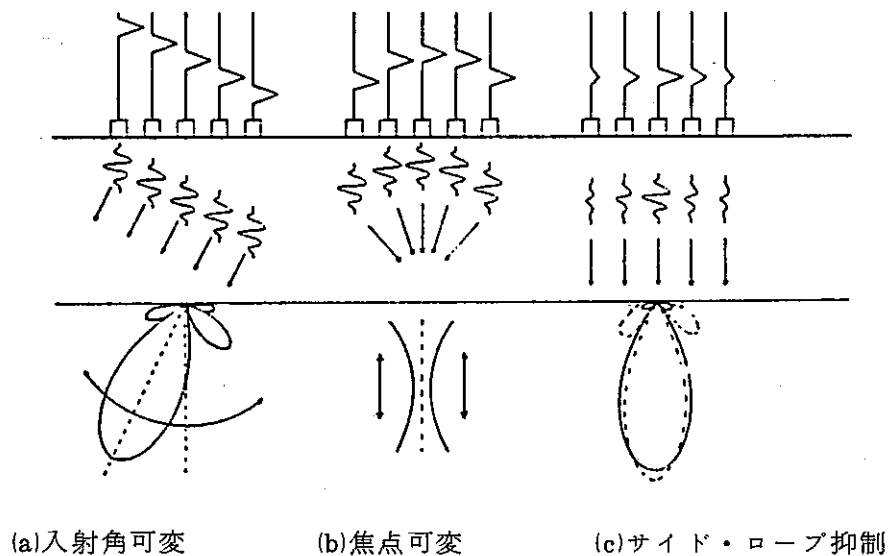


図 3.2-2 電子走査による三つの機能

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 「電子走査型超音波探傷法の部分溶込み溶接部への適用」

- 長井, 柏谷, 内田, 柿原
非破壊検査 Vol. 32 No.9 p.756-757, S.58
- E-302 「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」
窪田, 佐々木, 木野 他
NDI 資料 21040 p.27-32, S.59
- E-303 「超音波医学機器の進歩」
井出
非破壊検査 Vol. 29 No.10 p.688-693, S.55
- E-304 "Improvement of Ultrasonic Testing by Phased Arrays"
W.Gebhardt
The 2nd Japanese-German Joint Seminar, 1983
- E-305 "Defect Reconstruction and Classification by Phased Arrays"
W.Gebhardt, F.Bonitz, H.Woll
Materials Evaluation Vol. 40 p.90-95, 1982
- E-306 "A Review of Ultrasonic Transducer Arrays"
D.S.Dean
British J. of NDT p.140-146, 1979

〔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。

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>	K開先溶接部 未溶着部 (SM41A)	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	—	—	—	<p>断面像形成 時間：1.1s フレーム数： 20フレーム/S</p>	○	各種実欠陥による検 出性能の確認

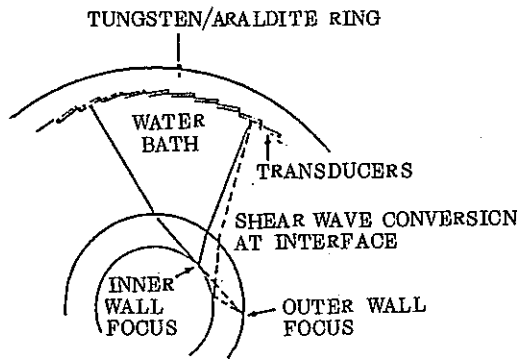
技術名称：電子走査式超音波探傷法

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 300 mm	—	± 2 mm	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

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 が高いため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個づつ(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>TUNGSTEN/ARALDITE RING WATER BATH TRANSDUCERS SHEAR WAVE CONVERSION AT INTERFACE INNER WALL FOCUS OUTER WALL FOCUS</p> <p>Tube testing allay. Whittlington</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, K. F. Briers

Materials Evaluation 1979.10

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 No.2 S.58.2

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 No.9 S.56.9

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 No.2 S.56.2

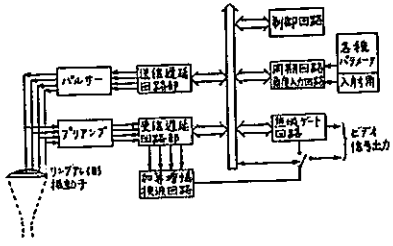
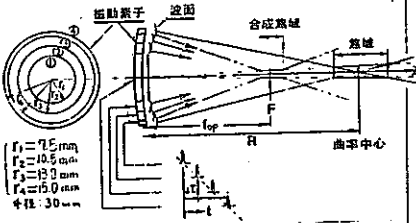
E-106 ; "A PVDF Dynamically Focused Transducer"

W. E. Glenn, J. B. O'Maley

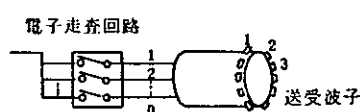

Materials Evaluation Vol.41 1983.11

〔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>焦域制御用送受信部の構成ブロック図</p>	<ul style="list-style-type: none"> 鋼材 鋼溶接部 	(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 10mm/s 対応可	○	<ul style="list-style-type: none"> 実用化装置の開発
	$f_{\text{F}} = \left[\frac{1}{R} - (2 \sin \frac{\Delta \theta}{R}) \right]^{-1}$ <p>ただし、v: 媒質中の音速、R: 曲率半径</p>  <p>リングアレイ振動子によるビーム集束の原理</p> <ul style="list-style-type: none"> ビームの尖鋭化 方位分解能向上 									

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																																																																		
E-102	<p>DETERMINATION OF EXCITATION DELAY PERIODS</p> <p>PULSE DELAY TIME</p> <p>OUTERMOST ELEMENT ARRAY ELEMENTS INNERMOST ELEMENT</p> <p>-Determination of excitation pulse delay schedule.</p>	鋼材及び鋼溶接部	<p>下表参照</p> <p>○ 垂直： 環状</p> <p>○ 斜角 45°： 分割環状</p>	常温	<p>路程，下記図参照</p> <p>垂直：鋼中 —</p> <p>10~40mm</p> <p>集束ビーム径 垂直：5mm 斜角：5mm</p>	—	—	—	△	固定焦点探触子に比べ、分解能が低下する。																																																														
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>図 45°焦点範囲</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>図 0°焦点範囲</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">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"></th> <th colspan="2">Frequency</th> <th colspan="2">Segmented Array</th> <th colspan="2">Segmented Array</th> </tr> <tr> <th>1.0 MHz</th> <th>2.5 MHz</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>Number of elements</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>16</td> <td>9</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>Outside diameter</td> <td>38 mm (1.5)</td> <td>38 mm (1.5)</td> <td>38 mm (1.5)</td> <td>38 mm (1.5)</td> <td>19 mm (.75)</td> <td>19 mm (.75)</td> </tr> <tr> <td>Piezoelectric</td> <td colspan="6" style="text-align: center;">Lead Metaniobate</td> </tr> <tr> <td>Element width</td> <td>3 mm (.125)</td> <td>1.65 mm (.065)</td> <td>3 mm (.125)</td> <td>3 mm (.125)</td> <td>0.8 mm (.032)</td> <td>0.8 mm (.032)</td> </tr> <tr> <td>Element center to center spacing</td> <td>3.9 mm (.156)</td> <td>2.4 mm (.097)</td> <td>3.9 mm (.156)</td> <td>2.4 mm (.097)</td> <td>1 mm (.042)</td> <td>1 mm (.042)</td> </tr> <tr> <td>Space between elements</td> <td>0.8 mm (.032)</td> <td>0.5 mm (.032)</td> <td>0.8 mm (.032)</td> <td>0.5 mm (.032)</td> <td>0.25 mm (.010)</td> <td>0.25 mm (.010)</td> </tr> <tr> <td>Center element diameter</td> <td>6.3 mm (.250)</td> <td>3 mm (.125)</td> <td>6.3 mm (.250)</td> <td>3 mm (.125)</td> <td>2 mm (.075)</td> <td>2 mm (.075)</td> </tr> </tbody> </table>												Frequency		Segmented Array		Segmented Array		1.0 MHz	2.5 MHz	2.5 MHz	2.5 MHz	2.25 MHz	5 MHz	Number of elements	5	8	10	16	9	9	Outside diameter	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	19 mm (.75)	19 mm (.75)	Piezoelectric	Lead Metaniobate						Element width	3 mm (.125)	1.65 mm (.065)	3 mm (.125)	3 mm (.125)	0.8 mm (.032)	0.8 mm (.032)	Element center to center spacing	3.9 mm (.156)	2.4 mm (.097)	3.9 mm (.156)	2.4 mm (.097)	1 mm (.042)	1 mm (.042)	Space between elements	0.8 mm (.032)	0.5 mm (.032)	0.8 mm (.032)	0.5 mm (.032)	0.25 mm (.010)	0.25 mm (.010)	Center element diameter	6.3 mm (.250)	3 mm (.125)	6.3 mm (.250)	3 mm (.125)	2 mm (.075)	2 mm (.075)
	Frequency		Segmented Array		Segmented Array																																																																			
	1.0 MHz	2.5 MHz	2.5 MHz	2.5 MHz	2.25 MHz	5 MHz																																																																		
Number of elements	5	8	10	16	9	9																																																																		
Outside diameter	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	38 mm (1.5)	19 mm (.75)	19 mm (.75)																																																																		
Piezoelectric	Lead Metaniobate																																																																							
Element width	3 mm (.125)	1.65 mm (.065)	3 mm (.125)	3 mm (.125)	0.8 mm (.032)	0.8 mm (.032)																																																																		
Element center to center spacing	3.9 mm (.156)	2.4 mm (.097)	3.9 mm (.156)	2.4 mm (.097)	1 mm (.042)	1 mm (.042)																																																																		
Space between elements	0.8 mm (.032)	0.5 mm (.032)	0.8 mm (.032)	0.5 mm (.032)	0.25 mm (.010)	0.25 mm (.010)																																																																		
Center element diameter	6.3 mm (.250)	3 mm (.125)	6.3 mm (.250)	3 mm (.125)	2 mm (.075)	2 mm (.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"> SG 伝熱管 (低合金鋼) SUS 	<ul style="list-style-type: none"> 外径; φ 18mm 長さ; 55mm 重さ; 約 50g 	常温	4mm t	φ 0.2mm 孔	± 0.03mm	4 m/min (Max. 16m/min)	◎	<ul style="list-style-type: none"> マルチチャンネルの超音波装置の開発 実機規模のモックアップによる実証
					<p>(記) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> プローブ全長 1.6~3M(多節構造) 適用管内径 Min. φ 22mm 全重量 1~1.5kg 軸方向, 周方向, ピンホール欠陥および 減肉を同時探傷可 					

(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のホログラムを得る。

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 Δr は、 λ 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 λ 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

1) 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HOLOSAFT (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"

V.Schmitz, M.Wosnitza

Acoustical Imaging, Vol.8 p.651~683. 1983.

H-2: "Acoustical Holographic Characterization of Defects in Pressure Vessel Materials"

A.E.Holt Ultrasonics p.421~431 1977.

H-3: "Defect Sizing and Classification Using HOLOSAFT"

International Conference on NDE 1984.

H-4: 「開口合成について」

佐藤 非破壊検査 第32巻3号 p.243~251 1983.3

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」

高橋, 鈴木 非破壊検査 第29巻1号 p.2~10 1980.1

H-6: "Computer Reconstruction for Digital Acoustical Holographic Inspection of Turbine Rotors and Pipes"

F.Takahashi, K.Suzuki, et-al

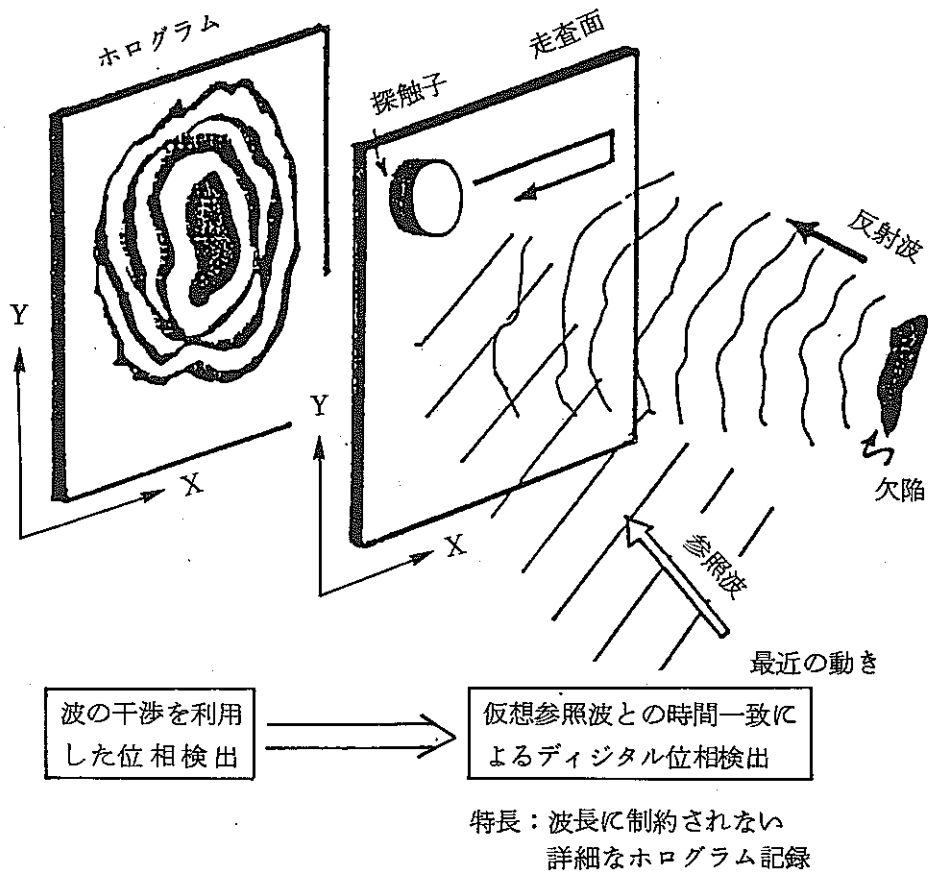
The 2nd Japanese-German Joint Seminar. p.26~40 1983.2

〔Ⅳ〕 適用性

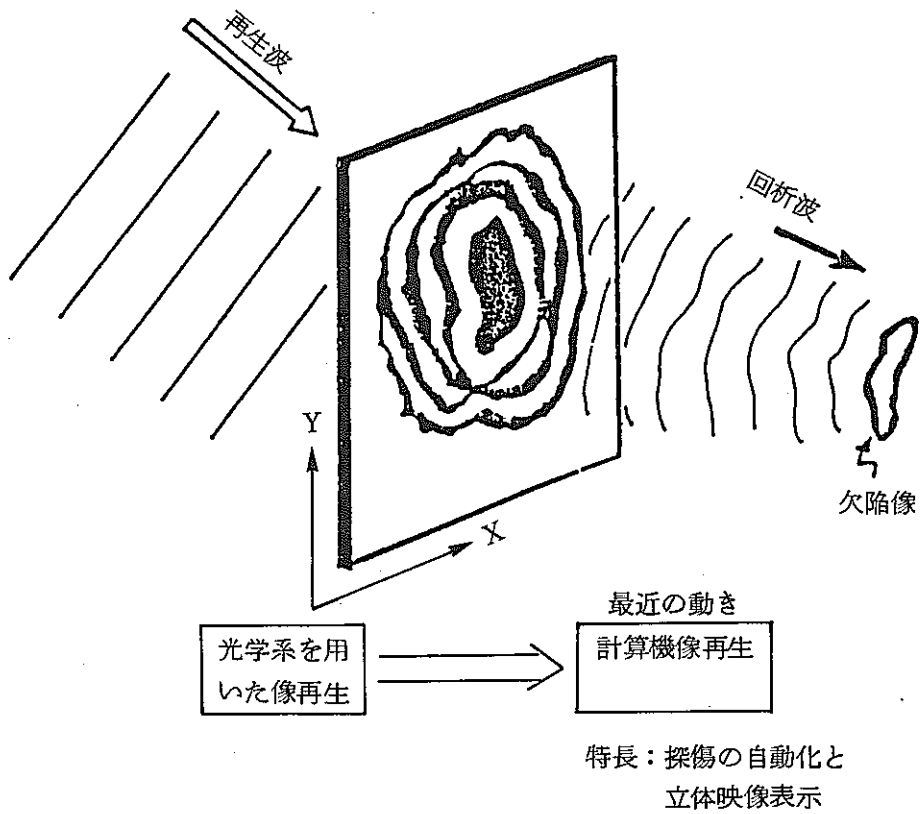
超音波ホログラフィは、薄肉材及び厚肉材の検査で、とくに欠陥形状の把握、大きさの定量評価に有効な方法である。遠隔かつ自動探傷が実現されており、高線量率の環境下で、作業者の被曝低減がはかれる。しかしながら、精密な探触子走査が要求されることから、現状

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。



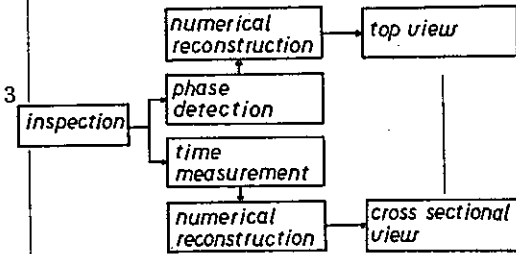
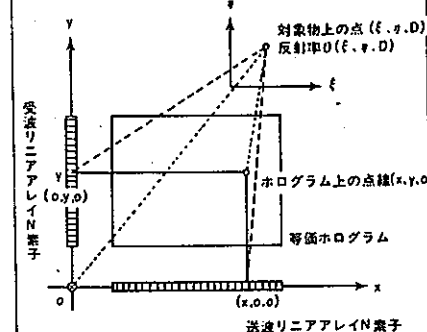
(a) ホログラムの記録

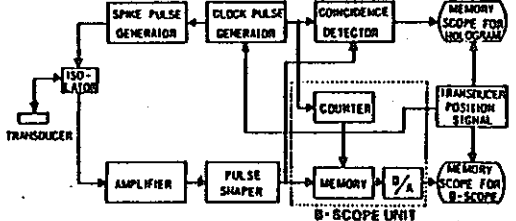
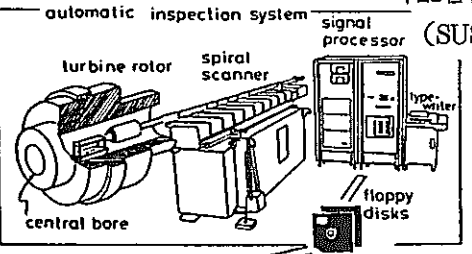


(b) 欠陥像の再生

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	<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 ϕ 焦点距離: 100 mm	—	~100 mm	2 mm ϕ (F.B.H)	分解能: 1.4 mm	スキャン 時間: 20 × 64 ² ms = 82s (at 25mm/s) 再生時間: 720 s (at 64 ² meshes)	◎	(検査時間の短縮)
H-2	<p>by Babcock & Wilcox (米) 1977年</p>	鋼材探傷	1, 3, 5 MHz 集束形 探触子	—	~100 mm	6 mm × 3 mm 以下 (Slag)	~2 mm	スキャン 時間: 17分 (100 × 100 ^{mm²}) <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 H\bar{O}L\bar{O} SAFT by IzfP (西独) 1984年</p>	圧力容器							◎	<文献 s60/2 入手予定>
H-4	 <p>Wellsのクロスリニアアレイ 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 mm 水中 焦点距離 80～100 mm	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 して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>automatic inspection system</p> <p>turbine rotor central bore spiral scanner signal processor floppy disks</p> <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 mm 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 ² 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 HOLOSAFT"
W.Müller, V.Schmitz, G.Schäfer
The 2nd Japanese-German Joint Seminar on Non-Destructive
Evaluation and Structural Strength of Nuclear Power plants. 1983.2
- S-102 : 「超音波探傷技術の現状 (SAFT法を中心に)」
宮沢, 上杉
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 S.59.10

- S-103 : "Characterization of Flaw Location, Shape and Dimensions with the ALÖK System"
 B.Grohs, O.A.Barbian et-al
 Materials Evaluation, Vol.40, No1, p.84~89, 1982.10
- S-104 : 「端部エコー法を用いたALÖK法によるき裂深さ測定」
 平沢, 古村 他
 (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
 S.59.2
- S-105 : "The Effects of Surface Mapping Corrections with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging"
 J.Johnson, B.Barna
 IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS
 Vol. SU-30, No5, 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—」
 松本賢三 他
 日本超音波医学会講演論文集 41-PE-33 p.587~588, S.57.12

(V) 適用性

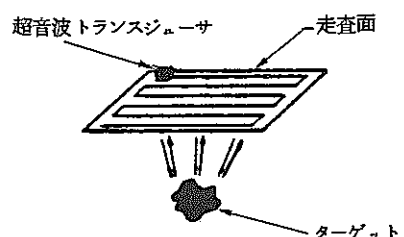
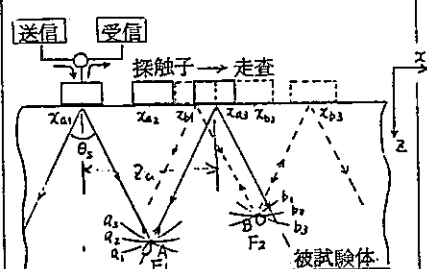
開口合成法およびALÖK法は、自動的に探傷が行なわれるので、装置の設置作業以外、作業員の被曝がないという優れた特徴を有しているが、FBR検査用として適用するためには、トランスジューサの耐熱性の向上というFBR適用上の共通の問題がある。

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

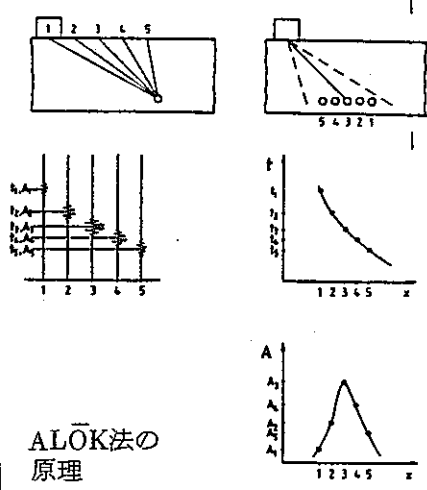
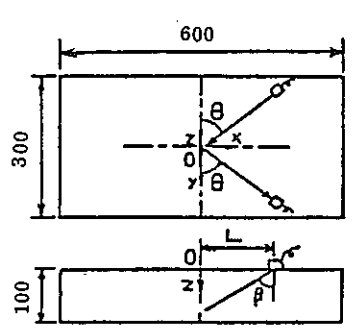
- i) トランスジューサの位置決め精度の向上
- ii) 探傷面の凹凸の問題
- iii) データ処理時間の短縮

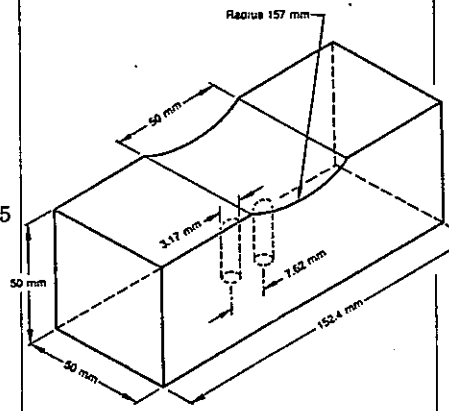
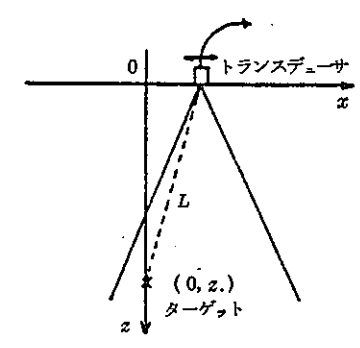
等の課題を解決する必要があると考えられる。

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	10mmφ 4MHz	—	300mm 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	12mmφ 2MHz	—	50mm	—	3mm以下	10分 (データ処 理時間)	◎	<ul style="list-style-type: none"> 探触子走査面が平面であること。 エコー信号が小さいこと。 探触子の位置検出精度

技術名称：開口合成法 (ALOK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-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 ϕ 5MHz	—	100mm	0.2mm (位置決め 精度)	—	—	—		

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 ϕ 2.25MHz	—	50 mm	約 3 mm	—	—	◎	<ul style="list-style-type: none"> 探傷表面の形状の変化に対する対策 材料の異方性の問題 	
S-106	 <p>実験および解析のモデル</p>	水中の透視	15 mm ϕ 3.5MHz	—	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

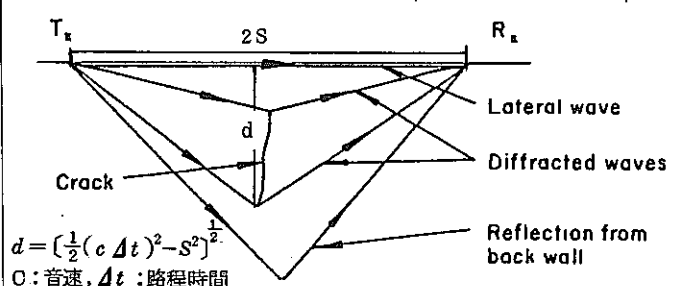
調査した文献を下記に示す。

- 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」
佐々木荘二 他 NDI資料 2951 S.53.1
- D-2 “Time Domain Diffraction Technique. Ultrasonic Scatter Technique. Surface Wave Technique.”
Research Techniques in Nondestructive Testing IV p.485~488, 1975.6
- D-3 “The Potential of Scattered or Diffracted Ultrasound in the Determination of Crack Depth” M.G. Silk, et-al
Non-destructive Testing p.146~151, 1975.6
- D-4 “Defect Sizing Using Ultrasonic Diffraction”
M.G.Silk
British Journal of NDT 1979.1

〔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>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>α : 入射点から開口までの距離 Vs : 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	0 ~ 50°	き裂深さ 1 ~ 12mm	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 °C の範囲は短時間なら可能
			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。 (10MHz) φ6							

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>$d = \left(\frac{1}{2}(c \Delta t)^2 - S^2\right)^{\frac{1}{2}}$ <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			±1mm	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			±1mm	実時間探傷	○	○高温探傷は困難	

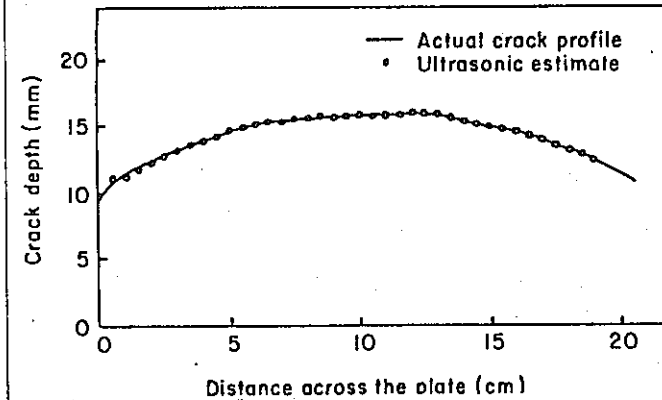
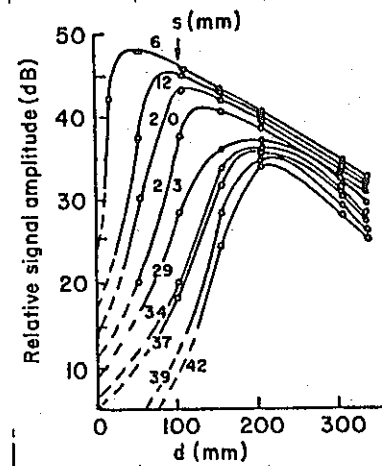
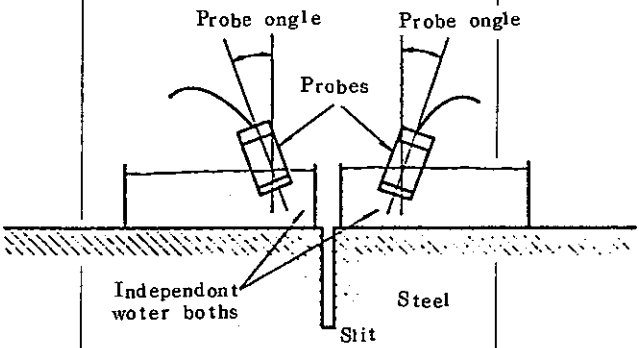
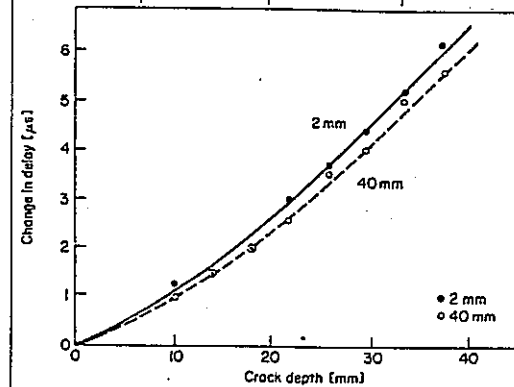
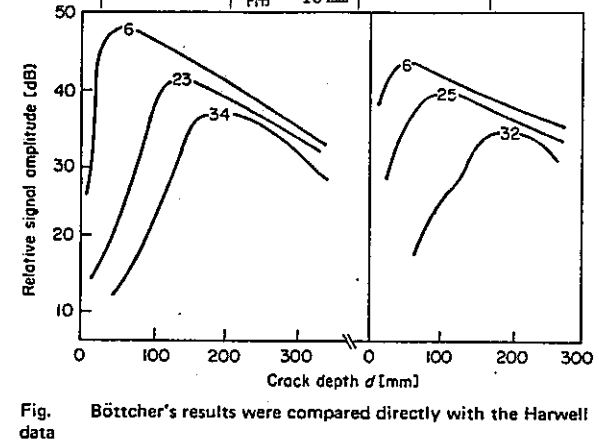
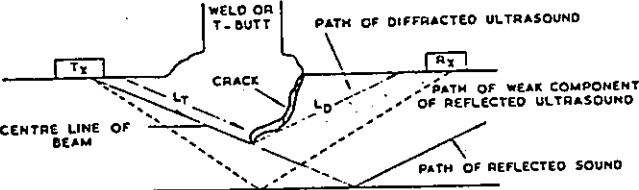
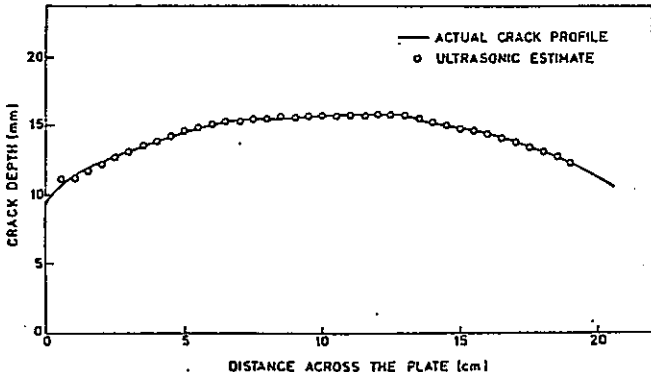
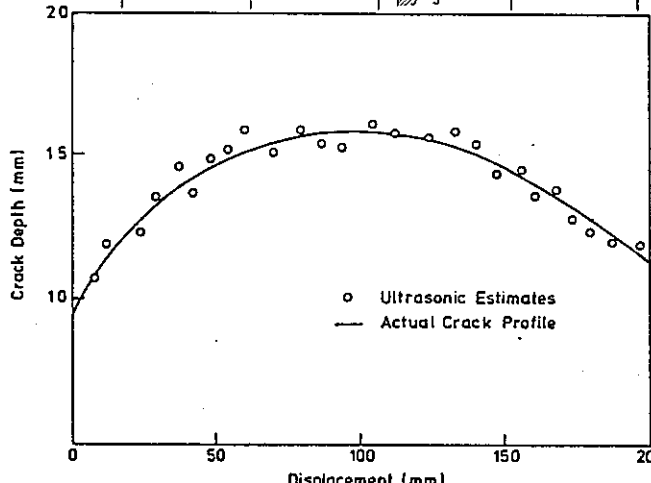


Fig. Crack profile using diffraction technique (from Silk, 1979c).



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



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 "Summary of Detection, Location, and Characterization Capability of AE for Continuous Monitoring of Cracks in Reactors"

P.H.Hutton, R.J.Kurtz

12th Water Reactor Safety Research Information Meeting p.362~380

1984.10

A-102 "Acoustic Emission for On-Line Reactor Monitoring: Results of Intermediate Vessel Test Monitoring and Reactor Hot Functional Testing"

P.H.Hutton, R.J.Kurtz

11th Water Reactor Safety Reserch Information Meeting P.1~19
1983.10

A-103 "Acoustic Emission Monitoring of ZB-1 Intermediate Scale Vessel
Test"

P.H.Hutton, R.J.Kurtz

12th European Working Group Meeting P.89~105 1983.10

A-104 "Monitoring of Thermal Shoch Induced Crack Growth in a Feed Water
Nozzle Corner of Reactor Pressure Vessel by Acoustic Emission"

P.Höller, 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"

S.Sakakibara, T.Kishi, K.Yamaguchi

Progress in Acoustic Emission II (IAES-7) p.278~285 1984.10

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 p.245~250 1982.9

A-202 "AE Characteristics in Hydrostatic Test on Small Pressure Vessels"

Y.Shinomiya, K.Tatsuno, H.Sato, I.Komura,

Paper Summer ASNT National Conf. No. Spring 1981.

〔Ⅳ〕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A Eの計測及び音響信号波形解析によるA E信号とノイズの識別。	PWR 压力容器 (P S I 高温 機能試験)	450~500 KHz 共振の導 波棒型A E 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	—	◎	A E 信号以外の信号 とA E 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I S Iモニタリング	休止中の60M _{WH} 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 A E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 ◎ 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-105	<p>日本溶接協会 FAET 委員会で FBR の配管の健全性評価に A E 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"> 1. センサーの開発 2. キャリブレーションシステムの開発 3. ウェーブガイドの特性評価とハンドリングの確立 4. 疲労欠陥進展の測定システム開発 5. 液体ナトリウムのノイズレベルの測定 6. 疲労クラックの位置標定 7. 疲労クラック進展の関数としての A E イベント数と振巾の効果 	SUS 304	<p>高感度センサー</p> <p>ウェーブガイド 5mm²×200mm</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 A E 信号 の識別</p>	<p>位置標定 精度 10~20mm</p>	—	◎	<ol style="list-style-type: none"> 1. 評価基準確立のための波形解析 2. 実機でのバックグラウンドノイズの計測が必要 3. A E 法による評価信頼性の確立
A-106	<p>A E 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>$V_0 = D^{-1/2}$</p> <p>$V_0 =$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 24.8M _{pa} 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効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”

D.A.Hutchins, R.J.Dewhurst. S.B.Palmer

Ultrasonics. 1981.5

L-2 : “Examination of Vibration Amplitude Distribution of Ultrasonic Transducers Using Optical Holography with a Modulated Reference Beam.”

I.Wojciechowska, A.Śliwiński,

Ultrasonics. 1981.5

L-3 : 「レーザ探傷器について」

宇田川, 米辻

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 1984.4

(Ⅳ) 適用性

レーザ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

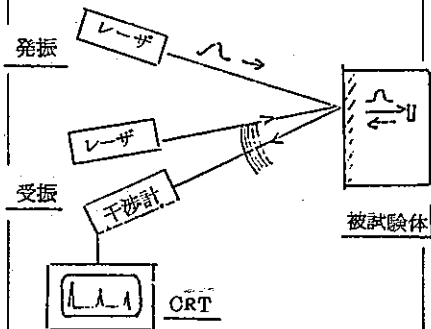
(i) 非接触超音波探傷が可能であるため高温材料の検査に適している。

(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: > 40mJ</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 $\pm 3 \times 10^{-9} \text{m}$	—	—	○	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>レーザー発振器より高出力のパルス状レーザーを発振させ、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>別のレーザー発振器により連続発振レーザーを材料表面に当てると一部のレーザー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ー光は干渉計に導かれ探傷器のCRT上に表示される。</p>	圧延鋼又はアルミニウム	Nd/YAG レーザー 50 Mw 20 nS 5mm巾 スポット 1~30MHz	—	—	200mm厚 さの裏面 より 0.4 mm位置の 0.4mm ϕ FBH。	—	—	△	。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。
		炭素繊維複合材	Nd/YAG レーザー 5 Mw 20 nS 5mm巾 スポット 1~10MHz	—	—	50mm厚 さの裏面 より 0.2 mm位置の 1mm ϕ FBH。	—	—	△	



(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° 異なる超音波を波長 (λ_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°C 程度で使用可能な小型非冷却タイプのも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°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 130mm 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 : "An EMAT System for Detecting Flaws in Steam Generator Tubos"

R.B.Thompson, W.E.Peterson and G.F.Vasile

Ultrasonics Symp. 1979.

M-102 : "Development of a Portable Crack Detector for the Location of Defects in the Cornars of Continuously Cast Warm-Bloom Material"

P.T.Cole,

Ultrasonic Int. Conf. Exhib 1979.

M-103 : "Ultrasonic Inspection of Hot Steel"

K.R.Whittington

British Journal of NDT 1978.

M-104 : "Electrodynamic Probes-Principles, Performance and Applications"

K.R.Whittington

British Journal of NDT 1981.

M-105 : "Electromagnetic-Acoustic Techniques for Internal and Surface Ins
Inspection of Round Steel Bars"

D.M.Wilson, P.T.Cole, K.R.Whittington

Ultrasonic Int Conf. 1977.

M-106 : "Ultrasonic Nondestructive Evaluations of Butt Welds Using
Electromagnetic Acoustic Transducers"

C.M.Fortunko, R.E.Shramm

Welding Journal 1982.

M-201 : "Electromagnetic UT-Transducer for Guided and Bulk Waves and
Their Application"

H.J.Salzburger, 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」

C.M.Fortunko, J.C.Moulder

Ultrasonics 20-3 p.113~117 1982.

M-203 : "Improvement in Flaw Detection in Austenitic Stainless Steel
Weldments"

R.K.Elsley, C.M.Fortunko

IEEE Ultrasonics p.28~35 1981.

M-204 : 「FBR-ISI 用電磁超音波探傷技術の開発」

坂本 哲 三菱原子力技保 No.35 1984.

M-205 : 「高温用電磁超音波探傷技術の開発」

三菱重工業 1984.

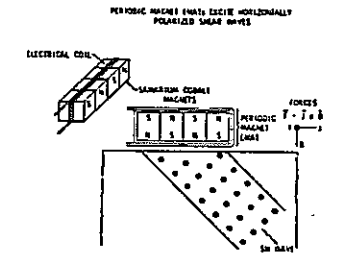
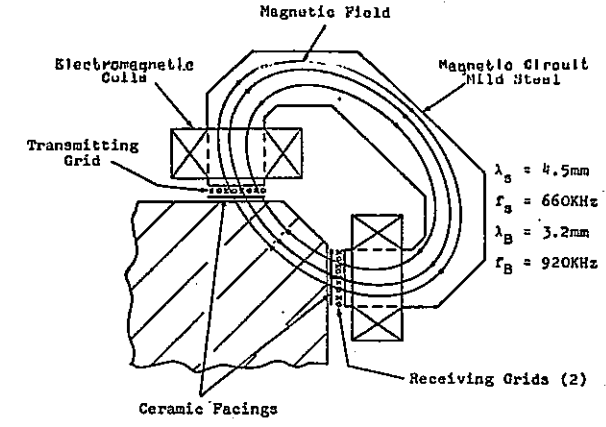
M-206 : "Ultrasonic Inspection of Weldments with Frequency Scanned SH Waves"

C.M.Fortunko 1979 Ultrasonics Synposium 1979.

(IV) 適用性

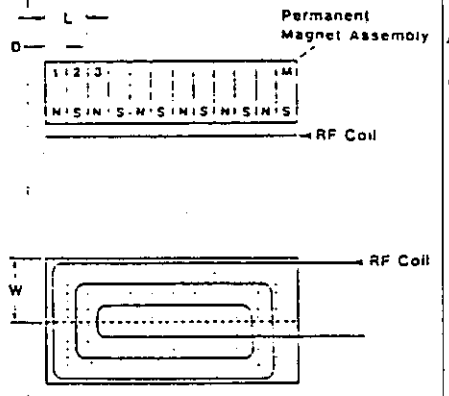
電磁超音波は、高温での適用、接触媒質を用いない超音波探傷が可能で、高温での体積検査に適した手法と考えられるが、開発段階の技術であり、実験室レベルから実用化へ向けて、下記の課題を克服してゆくことが必要と考えられる。

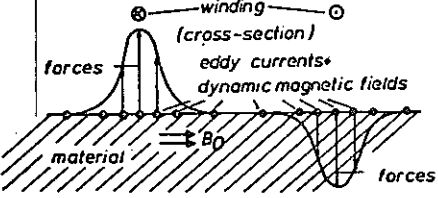
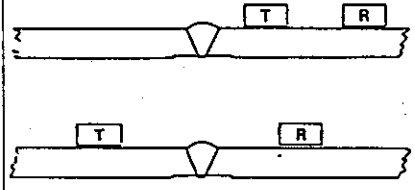
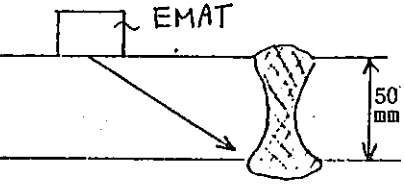
- i) 高温用に適用されているものは、水冷等により大型の装置となっている。非冷却型は、開発段階であり、高温への適用性や、信頼性を検討する必要がある。
- ii) 通常の超音波探傷に比べ、信号レベルが低いためセンサ、探傷器、信号処理装置などシステム全体を検討し、雑音に強い装置とする必要がある。

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 GENERATOR 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	◎		
									○		
M-102	 <p>Fig. Test head arrangement</p> <p> $\lambda_B = 4.5\text{mm}$ $f_B = 660\text{KHz}$ $\lambda_B = 3.2\text{mm}$ $f_B = 920\text{KHz}$ </p>										
				700℃	表面割れ 1mm	クラック 2mm ²	—	—			

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	<p>(1) 体積波</p> <p>Fig Cross section of e.m.a. internal inspection transducer</p>	丸棒 165mmφ	—	750℃	—	3mm	—	—	◎	
	<p>(2) 表面波</p> <p>Fig Cross section of an e.m.a. transducer modified for surface inspection</p>	同上	—	700℃	0.25mm	—	—	—	◎	

技術名称： 電磁超音波法

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				
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 ₀)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	—	90 mm	φ3(平底) 検出 φ8(横穴)	—	—	(○)	
		表面波探傷	磁性体	表面波用	—	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		—	—	12.7 mm (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	50 mm	d φ 9.2mm×37mm	—	—	(○)	

技術名称：電磁超音波法

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				
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: 「伝熱管の渦電流探傷技術」

遠藤 他 三菱重工技報 13(3) 1976.

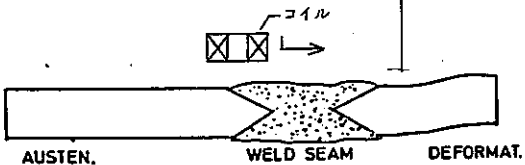
- C-2 : 「加圧水型軽水炉における蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷技術」
遠藤 他 三菱重工技報 15 (5) 1978.
- C-3 : “A Multifrequency Approach to Interpret Defect Signals Superimposed
by Disturbing Signals According to the Causing Defect Type and Size”
K.Betzold ASTM-STP 722 p.204~212 1981.
- C-4 : “Multi-Parameter Methods of Non-Destructive Testing of Materials”
W.Stumm Brit.J.of NDT 13 p.76~81 1978.
- C-5 : “Design of a Pulsed Eddy-Current Test Equipment with Digital Signal
Analysis”
G.Witting and H.M.Thomas ASTM-STP 722 p.387~397 1981.
- C-6 : 「渦電流による欠陥大きさの測定法」
小堀 他 日本非破壊検査協会第3分科会 1984.

(N) 適用性

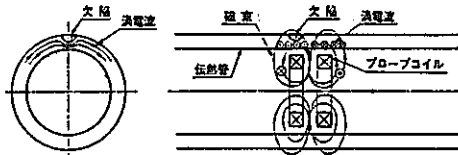
ECTでは、渦電流が被検査体の表面近くに発生するため、薄肉又は表面近傍の欠陥検出に適用されており、10mm以上の肉厚のもの体積検査に適用する場合には、下記の課題が考えられる。

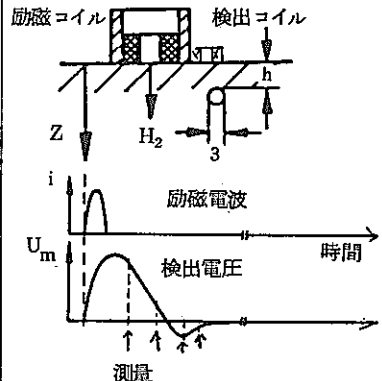
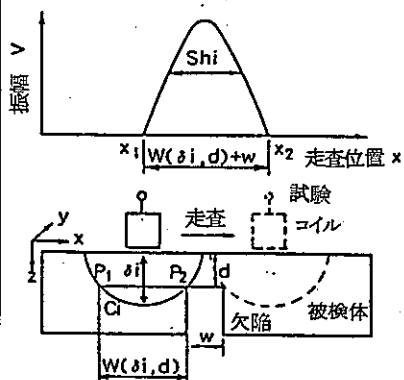
- i) 内面欠陥で、割れのように幅が極めて狭い欠陥の検出能向上
- ii) パルスECTの場合、溶接部の材質変化の影響の対策及び割れのように幅の狭い欠陥の検出能の検討。

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-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	—	—	(◎)	



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ヶ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ヶ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の場合に、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」

山口富夫, 藤村 非破壊検査 18 (7) p.298~306 1969.7

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」

鎌田 裕, 金沢勝雄, 佐藤邦雄, 本間 隆

火力原子力発電 35 (2) p.111~121 1984.2

P-3: 「直流ポテンシャル法による表面き裂状の検出」

林 眞琴, 坂田信二, 清水 翼, 志田 茂

材 料 33(368) p.602~608 1984.5

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

E. Hay, M. W. Brown

Fatigue of Engineering Materials and Structure 4 (3) p.287~290

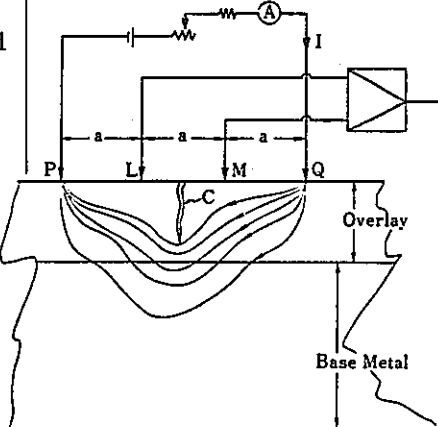
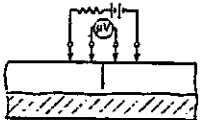
1981.3

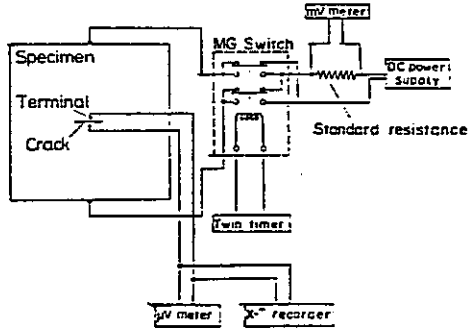
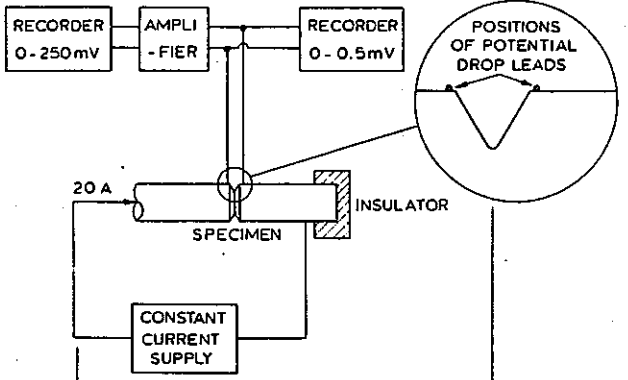
(IV) 適用性

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 圧力容器 内面 SUS クラッド 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	◎	1. 検出限界の向上 (比較的大型) の欠陥対象 2. 精度が UT, ET よ り劣ることの改善 3. 外乱電図の明確化
P-2	 <p>原研; 火力原子力発電(1984) No.2</p>	PWR 圧力容器 内面 SUS クラッド 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1mm まで	深さ 0.2 mm以上 長さ10mm 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2mm まで	深さ 0.3 mm以上	0.1 mm	—	△	

(10) X線CT, γ 線CT [X]

(I) 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、実用化されてきた。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ている。一方、非破壊検査の分野でのCT利用については最近、木材、セラミック、アルミ材などに適用範囲を拡げている。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、近年この技術を非破壊検査に導入する動きが活発になってきているが、現状の技術では立体的な被試験体内の映像を2次元の平面に重なった影絵としてしか見ることができないため、内部欠陥や内部状態を定量的に把握するには不十分な場合がある。

3次元の映像化は原理的には可能であるので、コンピュータによる高速画像処理用のソフトウェアの普及が待たれる。

(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している。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X線、あるいは γ 線を線源として用いるCT技術が必要であり、東芝・新日鉄では高エネルギーX線(420 Kev)利用の装置を開発し丸棒鋼材中の欠陥検出や鋼管の肉厚測定を行なっている。

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。特に鋼管の肉厚測定や欠陥を映像化する目的のものが商品化されつつある。

SMS社(Scientific Measurement System社, Austin, Texas)では大量のRI(Ir^{192} , Co^{60} 等～数百キュリー)と高速のコンピューターを利用したCTの開発を行なっている。未だプロポーザルの段階であるが最大透過厚み(鋼換算で)約300mmのものの断面を1.4mmで映像化する装置を発表している。

Bethlehem Steel社(Bethlehem, Pennsylvania)ではやはりRI(Cs^{137} , Co^{60} , ~30キュリー)を使用し鋼管断面を測定する装置を開発中である。

ARACOR社(Advanced Research & Applications Corporation, Sunnyvale, California)ではロケットの固体燃料の検査装置等で成果をあげているようである。

以上の他にも研究段階のものは多々あるようであるが、原子炉ならびにその周辺におけるような空間的に制約を受け、且つバックグラウンド放射線レベルの高い場所での実用化例は現在のところ見当たらない。

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-3000」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,
No.4, P.1-12, January 1983.

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

Ⅳ) 適用性

FBR構造・機器の試験用として、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であるが、線源部・受信部ともそれぞれ冷却する系統設備は必要。

ii) 自動測定であり、装置の設置作業以外、被曝を受けることがない。

但し、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、その周囲には回転移動用架台とこれに伴う移動空間が必要である。

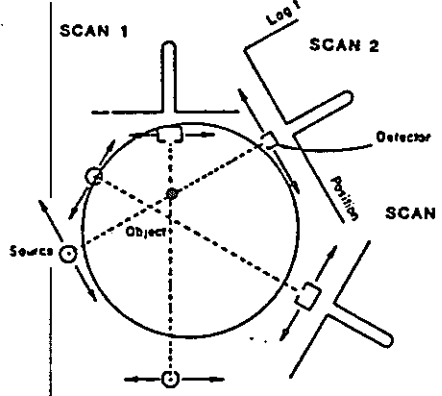
又、実用化に関しては、下記項目が当面の課題になると思われる。

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良い検出器の開発 …… 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。

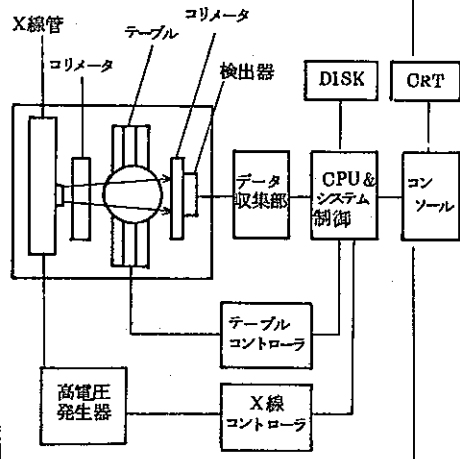
FBR機器へ適用する場合、材質が主としてオーステナイト系ステンレス鋼(SUS 304 etc)であること、最大透過肉厚が厚い(例えば800mm ϕ ×11.1mmtの配管の場合透過肉厚は約270mmになる)ことなどから高エネルギーのX線源が必要となるが、高すぎるとX線の散乱効果によりS/N比を低下させる恐れがあるので適切な強度を持つ線源と検出効率のよい受信センサーの開発が必要。

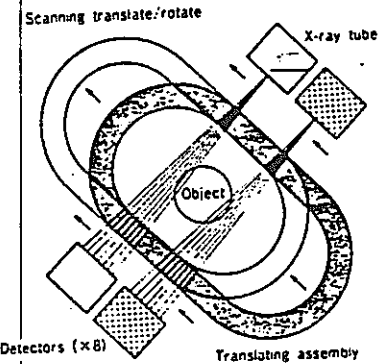
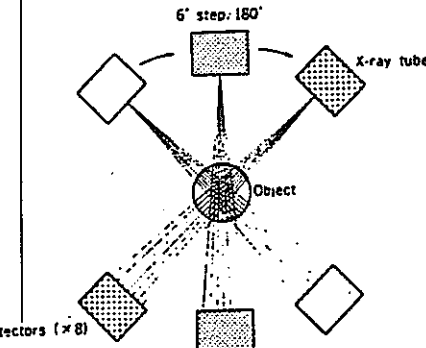
- c) 体積試験能力の実現 …… 本試験法は他の原理による試験法(超音波応用, 電磁波応用)と比較した場合、未知の欠陥を検出するよりも、他の手法により検出された欠陥の形状, 性状及びその進展をより精密に追跡するのに効果的な方法である。従って三次元の体積試験ができる様に, スキャナの走査軸を増設し, それに伴う立体表示用ソフトウェアの実用化が必要である。

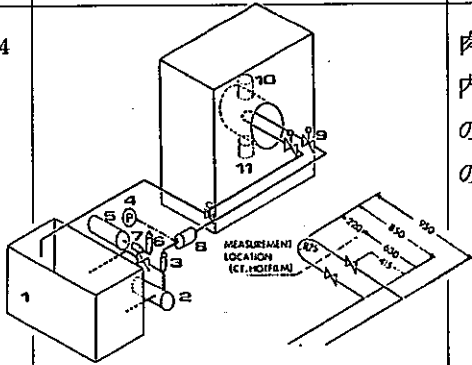
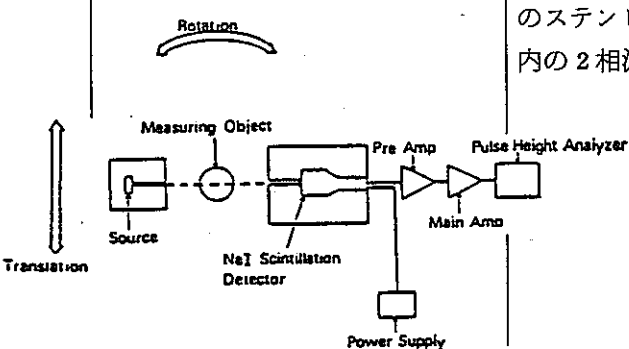
No.	原理等	適用例 (材質等)	センサ		検出能力		サイジング 精度	検査時間	自動 自動可○ 手動△	主な課題
			サイズ 重量	使用温度	探傷深度	検出限界				
X-1	<p>Basic Reconstruction by Summation Method</p>  <p>a.) Data Acquisition Geometry</p> <p>特徴：モンテカルロ計算による2 次散乱線の補正 by Science Applications (USA) 1983.</p>	<p>4.8インチ スケジュール 120 配管 (スチール)</p>	<p>線源： Ir-192 1Ci Cs-137 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>

技術名称：X線CT, γ 線CT

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 300mmϕ \times 600mm</p> <p>100 kg</p>	—	—	<p>ϕ 140mm のアルミ ニウム柱 で100μm 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 1 mm 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: Rotameter (water) 4: Strain gauge pressure 5: Compressor 6: Rotameter (air) 7: Detector 8: Mixer 9: Solenoid valve transducer 10: X-ray tube 11: BGO scintillation detector</p> <p>Fig. Schematics of air-water two-phase flow loop and experimental arrangement (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 ² (画素: 1.1×1.1mm ²) 当り密度 差 10%	160秒	◎	(金属製配管での 試験実績要)	
X-5	 <p>Fig. Block diagram of experimental apparatus (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 スステー ル管 8mm +アクリ ル樹脂 53mm 又は +水 53mm	4×4mm ² (画素: 4×4mm ²) 当り密度 差 3%	—	◎	(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 γ 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つでも同じであり、被検体との位置関係はいつでも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、原子炉配管から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

ないことを予測し、報告している。

また、日本鋼管では、高温状態の鋼板（約 200～300℃，5～22mm厚さ）の放射線透過試験を、断熱材でカバーしたフィルムとアルミ防熱板で保護したX線源を用いて行ない、200～300℃程度の高温状態の鋼板の放射線透過試験は実施可能であることを実験により確かめた。

その他、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X線装置の開発（Miniaturized Linear Accelerator：略称MINAC計画）を進め、1981年のISI時に再循環ポンプの肉厚溶接部の放射線透過試験を行なっている。

又、EPRIでは、引続きMINACと同程度の性能を有し、且つより小型のポータブルタイプの高エネルギーX線照射ヘッドの試作（EPRI-Project MINAC-3）を進め、約10 inch程度に小型化した照射部の試作を終え、実用化の試験を進めている。その他、PWRの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。

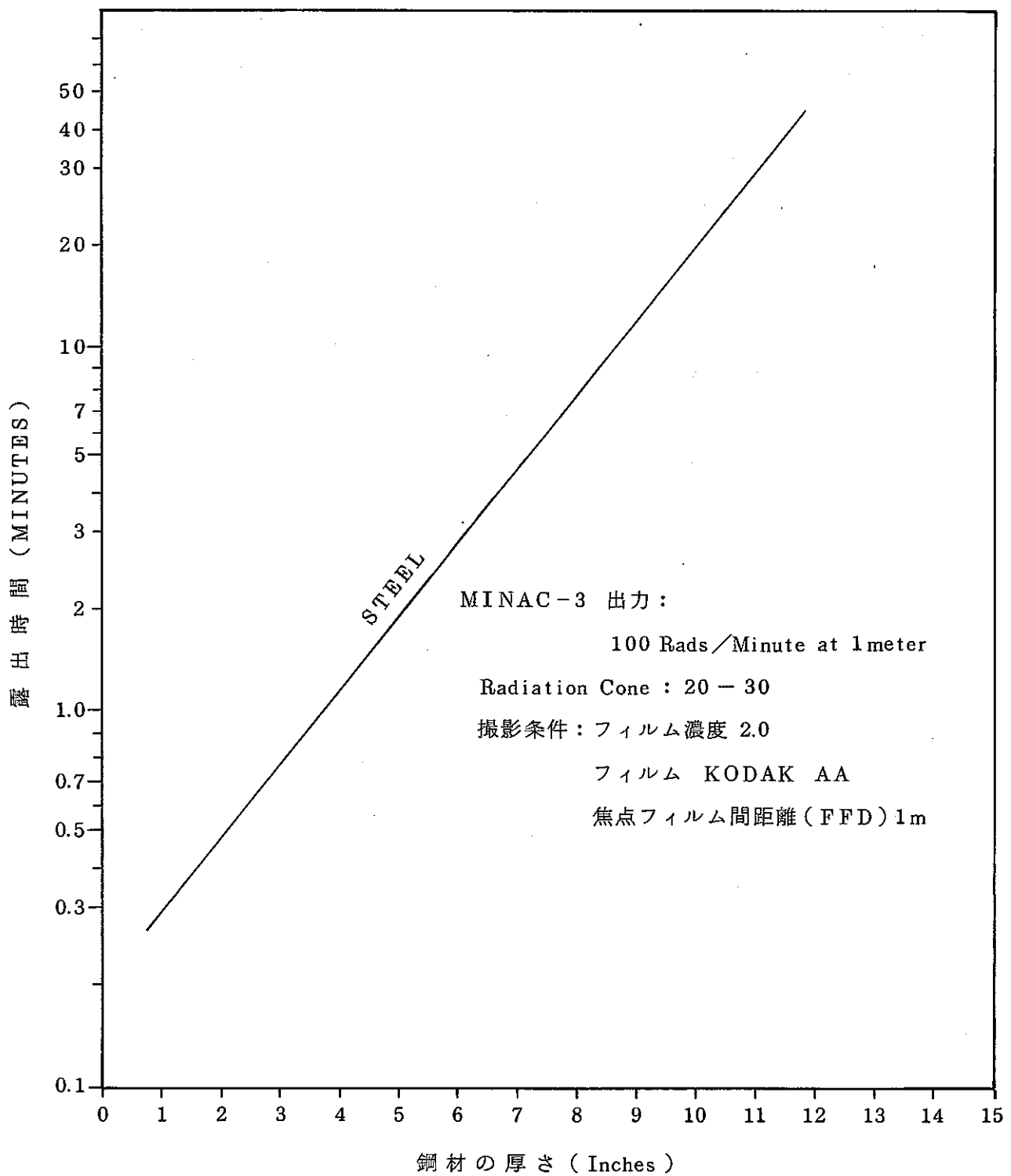


図 3.2 - 4

MINAC-3* 露出線図

(*MINAC-3 : EPRI-Miniaturized linear Accelerator.- 3 project)

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-8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)

R-8 : 「高温時の放射線透過試験について」

日本鋼管㈱ NDI資料 No.1811 (1981)

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う必要がある。

- 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。

FBRのISIへの適用で最も問題である放射線環境によるフィルム像質の低下に関しては、JMTRに設置されている照射設備を用いて行なった実験報告が、現状における参考データである。

この実験報告によると、配管表面線量率 335 mR/hr のとき、配管の表面線量のみでX線フィルム濃度 1.5 に到達するのは 17.5 hr を必要とし、またX線装置による透過線量で同じくフィルム濃度 1.5 を得る為には、X線フィルムの線量特性によって 0.2 hr であった。

いっぽう、出力 100 R/m² at 1 m 程度の高エネルギーX線装置 (EPRI-project MINAC-3 クラス) を線源として用いる場合、X線フィルム濃度 1.5 を撮影条件とする露出時間は、2~3 inch 厚さの鋼材で約 1 分以内であるので、配管線量率を 1 R/hr 程度とするとき、若干の識別濃度差としての像質低下を考慮すれば放射線透過試験の実施は可能であると考えられる。

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X線装置の開発も進められており、また検査効率が良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。今後の原子力プラント ISI時または補修時の試験への適用の可能性は期待できるものと思われる。

尚、高温部のISIへの適用については、試験が放射線の物質透過性を用いた測定原理であるのでX線フィルムまたは受像センサーや線源部を試験所要時間中 50℃ 以下に保つことができるように、透過性の良い断熱材 (アルミ箔やガラス繊維など) でカバーし、これら装置を温度的に保護することによって、表面温度 200~300℃ 程度の高温度下の試験は可能であると考えられる。日本鋼管の高温鋼板の実験報告では、鋼板とフィルムとの間にフィルム保護のための断熱材が有ることによって、幾何学的な像質の低下は生ずるが、鋼板 200~300℃ のときフィルムカセット内の温度が 50℃ に到達するための所要時間は約 20 分である。従って、フィルム露出時間は約 1 分間程度であるので、フィルムカセットの装着時間を数分程度の短時間で処理することによって、1 回の試験時間は 20 分以内と考えられるため、試験対象物の温度が 200~300℃ 程度であっても、放射線透過試験の実施は可能であると云える。

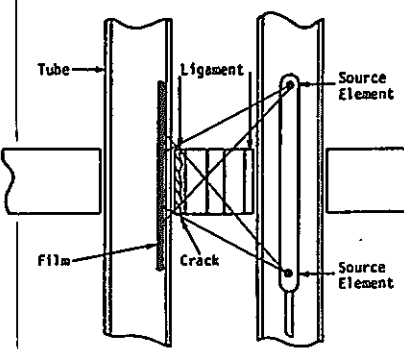
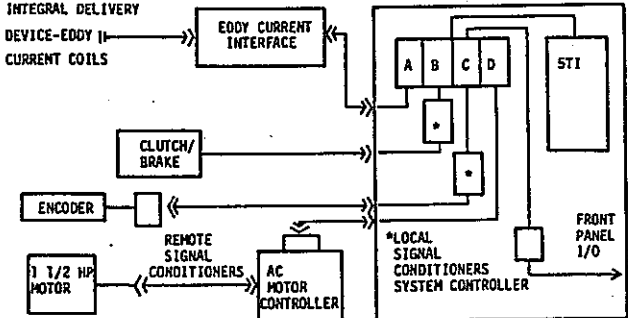
実用化に関しては、下記項目が当面の課題であろう。

- 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、透過像の立体撮影による欠陥評価の

- 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の開発。

ISIにおける検査対象としては、低線量域の構造物，機器，配管等の溶接部，ポンプ，弁など鋳造品，その他厚肉品の内部状態の検査などの他，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				
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>Fig Block Diagram of System Controller Functions</p> <p>5 TI PROGRAMMABLE CONTROLLER INPUT/OUTPUT MODULES</p> <ul style="list-style-type: none"> A. Eddy current input B. Clutch-brake output C. Encoder input D. Motor output E. Front panel input-output 										

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, 其他 のX線透過試験	ヘッド: 105 kg 40 cm口 × 75 cm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

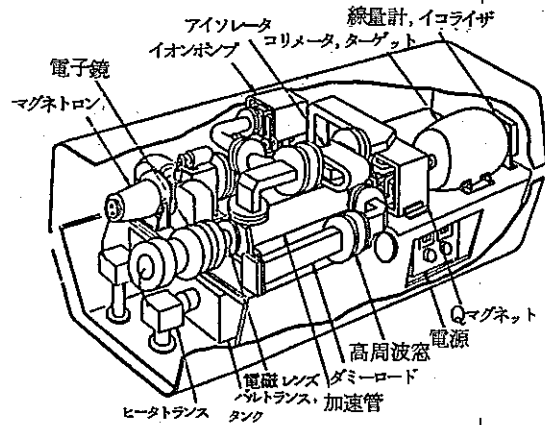


図 ライナックのヘッドの構造 (ex.)

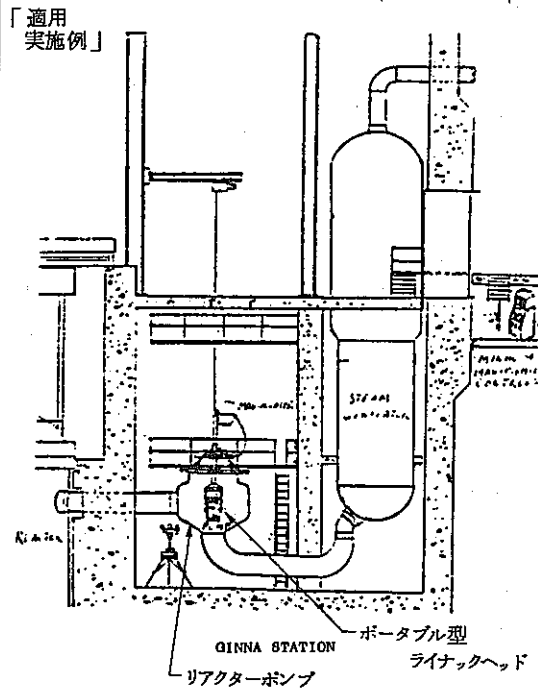
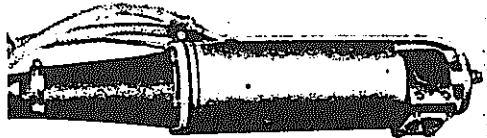
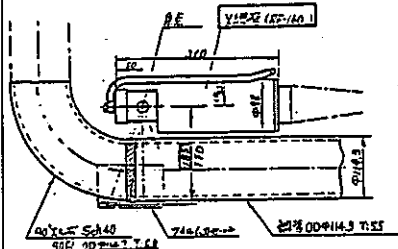


Fig Cross Section of the Ginna Station

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"> <tr><td>X線管二重壁</td><td>大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm</td></tr> <tr><td>発電出力</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>フ イ ル ム</td><td>0.1-9.9分/1-99分 切り換</td></tr> <tr><td>電源電圧</td><td>AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA</td></tr> <tr><td>X線発生器</td><td>1270×356×356mm (50kg)</td></tr> <tr><td>寸法 (重量)</td><td>X線管 350×100φmm (8kg) X線管架 305×407×490mm (45kg) 冷却器 355×370×610mm (51kg) 圧縮機 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	大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm	発電出力	25-160kV (5kVステップ切り換)	電流出力	大焦点 10mA 小焦点 4mA	フ イ ル ム	0.1-9.9分/1-99分 切り換	電源電圧	AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA	X線発生器	1270×356×356mm (50kg)	寸法 (重量)	X線管 350×100φmm (8kg) X線管架 305×407×490mm (45kg) 冷却器 355×370×610mm (51kg) 圧縮機 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>	—	—	欠陥識別 度 2%以下	—	—	△	<p>〔原子力プラント： 検査対象部へのセ ンサ及びフィルム の自動装着〕</p>
X線管二重壁	大焦点 1.5×1.5mm 小焦点 0.4×0.4mm																							
発電出力	25-160kV (5kVステップ切り換)																							
電流出力	大焦点 10mA 小焦点 4mA																							
フ イ ル ム	0.1-9.9分/1-99分 切り換																							
電源電圧	AC単相190-240V 50/60Hz 3kVA																							
X線発生器	1270×356×356mm (50kg)																							
寸法 (重量)	X線管 350×100φmm (8kg) X線管架 305×407×490mm (45kg) 冷却器 355×370×610mm (51kg) 圧縮機 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	原理及びシステムの構成 <p>図 センサ部の構成</p> <p>図 コンデンサレンズの特性</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>	40~250mm 厚の steel 等のリアルタイムでの X線試験	—	—	—	欠陥識別度 2% 以下	—	リアルタイム	△	原子力プラント： 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 & D

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	2.5±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)	16	28	24	14	10	10	2
U.T (JIS Z 3060) L線	13	23	9	4	8	5	0
U.T (JIS Z 3060) L/2線	17	36	29	11	11	9	3

注) R.T: 放射線透過試験
U.T: 超音波探傷試験

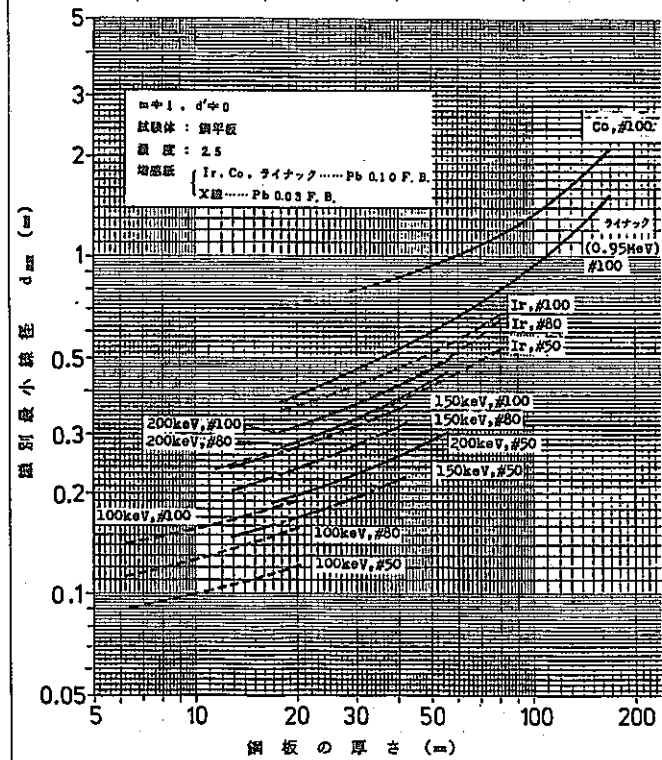
図 狭照射野撮影方法の撮影配置

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	0.25 mm	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 $m=1$ 、 $d'=0$



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らない。

ii) 海外状況

国内とは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: 「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 S.58.8

N-2 : "A Demonstration of Filtered Neutron Beam Computed Tomography ;
Evaluation of a 37 Pin Fuel Assembly Phantom"

G.A.Schlapper et-al

Material Evaluation, Vol.39, p.1121~p.1125 1981.

N-3 : "Neutron Tomography of Nuclear Fuel Bundles"

W.J.Richards et-al

Material Evaluation, Vol.40, p.1263~p.1267 1982.

[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	<p>1 Be target 2 Water tank 3 Collimator 4 Sample 5 NE213 scintillator</p> <p>Water Paraffin-H₂BO₃</p>	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	
	<p>Lead block Containing Polyethylene Heavy Concrete</p> <p>D₂O Shutter Reactor Wall Biological Shield Bismuth (10 thick) Aluminum Plug D₂O Tank</p> <p>Detector TV Camera Sample Movable Shutter (160φ × 200) Cd Collimator (160φ × 400) Collimator (90φ) Collimator (150φ)</p> <p>2830 2310</p> <p>OSM Neutron Radiography Facility</p>	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	—	—	スペーサ 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, γ 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, γ 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 Vol.41	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 他	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. Gebhardt	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. Gebhardt F. Bonitz H. Woll	Defect Reconstruction and Classification by Phased Arrays	Materials Evaluation Vol.40 P.90~95	1982. 1
E - 306	D. S. Dean	A Review of Ultrasonic Transducer Arrays	British J. of NDT P.140~146	1979. 5
H - 1	V. Schmitz M. Wosnitzer	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	A. E. Holt	Acoustical Holographic Characterization of Defects in Pressure Vessel Materials	Ultrasonics P.421~431	1977.
H - 3		Defect Sizing and Classification Using HOLOSAFT	International Conference on NDE	1984.
H - 4	佐 藤	開口合成について	非破壊検査 Vol.32 No3 P.243~251	1983. 3
H - 5	高 橋, 鈴 木	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 Vol.29 No1 P.2~10	1980. 1
H - 6	F. Takahashi K. Suzuki et-al	Computer Reconstruction for Digital Acoustical Holographic Inspection of Turbine Rotors and Pipes	The 2nd Japanese-German Joint Seminar P.26~40	1983. 2
S - 101	W. Müller V. Schmitz G. Schäfer	3-Dimensional Defect Reconstruction Using HOLOSAFT	The 2nd Japanese-German Joint Seminar on Non-Destructive Evaluation and Structural Strength of Nuclear Power Plants.	1983. 2

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発行年月
S-102	宮 沢 , 上 杉	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	B.Grohs , O.A.Barbian W.Kappes, H.Paul R.Licht, F.W.Höh	Characterization of Flaw Location, Shape, and Dimensions with the ALOK System	Materials Evaluation Vol.40 No.1 P.84~89	1982.10
S-104	平沢泰治, 古村一朗 柏谷英夫	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	J.Johnson B.Barna	The Effects of Surface Mapping Correction with Synthetic-Aperture Focusing Techniques on Ultrasonic Imaging	IEEE TRANSACTIONS ON SONICS AND ULTRASONICS Vol. SU-30, No.5 P.283~294	1983. 9
S-106	松本賢三 他	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	佐々木荘二 他	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	昭53. 1
D-2		Time Domain Diffraction Technique. Ultrasonic Scatter Technique. Surface Wave Technique.	Research Techniques in Nondestructive Testing IV P.485~488	1975. 6
D-3	M.G.Silk B.H.Lidington	The Potential of Scattered or Diffracted Ultrasound in the Determination of Crack Depth	Non-destructive Testing P.146~151	1975. 6
D-4	M.G.Silk	Defect Sizing Using Ultrasonic Diffraction	Britisch Journal of NDT	1979. 1
A-101	P.H.Hutton R.J.Kurtz	Summary of Detection, Location, and Characterization Capability of AE for Continuos Monitoring of Cracks in Reactors	12th Water Reactor Safety Reseach Information Meeting P.362~380	1984.10

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発行年月
A-102	P.H.Hutton R.J.Kurtz	Acoustic Emission for On-Line Reactor Monitoring :Results of Intermediate Vessel Test Monitoring and Reactor Hot Functional Testing	11th Water Reactor Safety Research Information Meeting P. 1~19	1983. 10
A-103	P.H.Hutton R.J.Kurtz	Acoustic Emission Monitoring of ZB-1 Intermediate Scale Vessel Test	12th European Working Group Meeting P. 89~105	1983. 10
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) P. 232~239	1984. 10
A-105	Y.Sakakibara T.Kishi K.Yamaguchi	Evaluation of Structural Integrity of Piping Components for Fast Breeder Reactor by Acoustic Emission Signals	Progress in Acoustic Emission II (IAES-7) P. 278~285	1984. 10
A-106	Y.Mori, K.Aoki, K.Kuribayashi, T.Kishi, Y.Sakakibara	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 D.G.Dawson	Acoustic Emission Examination of Nuclear Reactor Steam Drums	British Journal of NDT 24-5 P. 245~250	1982. 9
A-202	Y.Shinomiya K.Tatsuno H.Sato, I.Komura	AE Characteristics in Hydrostatic Test On Small Pressure Vessels	Paper summer ASNT National Conf. No. Spring	1981.
L-1	D.A.Hutchins R.J.Dewhurst S.B.Palmer	Laser Generated Ultrasound at Modified Metal Surfaces	Ultrasonics	1981. 5
L-2	I.Wojciechowska A.Śliwiński	Examination of Vibration Amplitude Distribution of Ultrasonic Transducers Using Optical Holography with a Modulated Reference Beam	Ultrasonics	1981. 5
L-3	宇田川義夫 米辻 栄一	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. 7

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
M-101	R.B.Thompson, W.E.Peterson and C.F.Vasile	An EMAT System for Detecting Flaws in Steam Generater Tubes	Ultrasonics Symp	1979.
M-102	P.T.Cole	Development of a Portadle Crack Detector for the Location of Defects in the Cornars 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	Electoromagnetic-Acoustic Tecniques for Internal and Surface Inspection of Round Steel Bars	Ultrasonic Int Conf.	1977.
M-106	C.M.Fortunko R.E.Shramm	Ultrasonic Nondestructive Evaluations of Butt Welds Using Electromagnetic Acoustic Transducers	Welding Journal	1982.
M-201	H.J.Salzburger	Electromagnetic UT-Transducer for Guided and Bulk Waves and Their Application	第1回 日独セミナー	
M-202	C.M.Fortunko J.C.Moulder	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	Ultrasonics 20-3 P.113~117	1982.
M-203	R.K.Elsley C.M.Fortunko	Improvement in Flaw Petection in Austenitec Stainless Steel Weldments	IEEE Ultrasonics P.28~35	1981.
M-204	坂本 哲	FBR-ISI用電磁超音波探傷技術の開発	三菱原子力技報 No.35	1984.

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発行年月
M-205		高温用電磁超音波探傷技術の開発	三菱重工業	1984.
M-206	C.M.Fortunko	Ultrasonic Inspection of Weldments with Frequency Scanned SH Waves	1979 Ultrasonics Symposium	1979.
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	W.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.
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.
P-1	山口富夫, 藤村	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. 7
P-2	鎌田 裕, 金沢勝雄 佐藤邦雄, 本間 隆	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. 2

番 号	著 者	タ イ ト ル	雑 誌 名	発 表 年 月
P-3	林 眞琴, 坂田信二 清水 翼, 志田 茂	直流ポテンシャル法による表面き裂状の検出	材 料 33 (368) P.602~608	1984. 5
P-4	E.Hay M.W.Brown	A D.C.Potential Drop Method to Monitor Crack Growth in Notches Subjected to Torsin	Fatigue of Engineering Materials and Structure 4 (3) P.287~290	1981. 3
X-1	R.M.Polichar D.C.Shreve	X-Ray Computed Tomography of Thick Steel Castings and Forgings	Quantitative NDE in the Nuclear Industry ISBN: D-8710-158-8 P.275~279	1983.
X-2	中村, 谷本, 藤井	産業用CTスキャナ TOSCANER-3000	東芝レビュー 38 (12) P.1073~1076	1983.
X-3	M.Iizuka, H.Kimura, S.Morooka	X-Ray CT Scanner Application to Void Fraction Measurement in BWR Core	Toshiba Review No.144 P.17~20	1983.
X-4	Ikeda, et-al	Preliminary Study on Application of X-Ray CT Scanner to Measurement of Void Fraction in Steady Two-Phase Flows.	JNST 120 (4) P.1~12	1983. 1
X-5	Tsumaki et-al	Measurement of Void Fraction Distribution by Gamma-Ray Computed Tomography	JNST 120 (4) P.315~317	1984. 4
X-6		Scientific Measurement Systems, Inc. "Computerized Industrial Tomography"	SMS社カタログ	1983. 4
R-1		Steam Generator Support Plate Radiographic Evaluation System	EPRI Research Project S 105-1 NP-2823	1983.
R-2		Portable Linear Accelerator 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	大岡, 金谷, 星谷	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. 8
R-4	花田, 田淵	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度計識別度についての実験報告	理学電気報	1984. 2
R-5	鈴木敏允 他	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 Vol.55, No.10	1981.
R-6	仙田富男 他	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.
R-8	日本鋼管(株)	高温時の放射線透過試験について	NDI資料 No.1181	1981.
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	昭58. 8
N-2	G.A.Schlapper et. al.	A Demonstration of Filtered Neutron Beam Computed Tomography; Evaluation of a 37 Pin Fuel Assembly Phantom	Materials Evaluation Vol.39 P.1121~1125	1981.
N-3	W.J.Richards et. al.	Neutron Tomography of Nuclear Fuel Bundles	Materials Evaluation Vol.40 P.1263~1267	1982.

第4章 検討および評価

4.1 各種体積試験方法の適用性評価

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に行う体積試験においては、対象物の材質、寸法や温度、放射線、雰囲気、空間（スペース）等の試験環境が重要であるため、表 2.4-2 に対応して、下表の如く適用対象カテゴリーを作った。すなわち全体を I, II, III, IV のカテゴリーに区分して検討・評価を行うことにした。

表 4.1-1 試験対象ごとの試験環境とカテゴリー分類（もんじゅ）

機 器 (注1)	寸 法	試 験 環 境				適用対象 カテゴリー	
		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 R/H	有	N ₂ (注3)	I	
1次主冷却系 配 管	原子炉容器 廻 り	約 $600\text{ mm} \phi \times 14.2\text{ mm}^t$	(200℃)	約 10^3 R/H	有	N ₂ (注3)	II
	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 R/H (max.)	(注2)	Air	III
2次主冷却系配管	約 $550\text{ mm} \phi \times 9.5\text{ mm}^t$	常 温	—	(注2)	Air	IV	

(注1) 構造材料は、SUS 304.

(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。

第3章で調査した各種体積試験方法について、上記カテゴリー毎に表 4.1-2 に示すフォーマットに基いて試験環境への適合性、作業性、欠陥検出性および実用性の面から検討・評価を行った。

試験環境への適合性については、主としてセンサーの耐熱、耐放射線性、付帯設備の要・不要、試験対象箇所までのアクセス性等について検討し、原理的に適合不可のものについてはそれ以下の検討を省略したものもある。

作業性に関しては、センサーおよび関連設備の所要スペースや試験検査に必要な作業のスペース、センサーを試験対象部位に沿って走査させる場合の制御機能、体積試験のために必要とされる準備作業や前後処理作業の必要性、および1シーム当りの実質的検査時間等の観点から検討した。

欠陥検出性については、第2.2.4項で述べたように、FBRプラントにおいては安全性確保の観点から軽水炉に比し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ことから、内面からの欠陥高さによってA（肉厚の25%以下の欠陥）、B（同25～50%の欠陥）、C（同50～75%の欠陥）、D（同75%以上の欠陥）の4ランクに分けて検討した。

新技術を応用した体積試験方法については、開発の難易度等実用性の面からも検討した。

なお、コスト評価も検討・評価上重要な因子ではあるが、体積検査手法が多岐にわたりコスト評価の範囲を共通化して比較しづらいこと、技術の成熟度が大きく異なり将来予測がすべての手法について必ずしも同じレベルで明確に出来ないことから、ここでの検討は割愛した。

表 4.1-2 FBRプラント供用期間中における体積試験方法

検討・評価共通フォーマット

カテゴリー：()

評価項目	適用方法		(試験方法名)	
	評価基準	判定・評価		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度()	○, △ 又は ×	特記事項 あれば記入
		放射線()		
		Na ()		
	雰囲気()			
1. 試験環境への適合性	付帯設備	—————	要又は不要	要の場合は具体的に記入
	試験対象個所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	自動 半自動 又は 手動	特記事項 あれば記入
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—————	m ϕ × m のような形で空間寸法を記入
	走査装置	走査制御の必要度	要又は特に必要とせず	走査制御, 姿勢制御等が特に必要な場合その必要度を記入
		姿勢制御の要否	要又は否	
		達成難易度	難又は易	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	要又は不要	特記事項 あれば記入
		保温材の脱着	要又は不要	
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長:	約 時間	特記事項 あれば記入	
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の25%以下の欠陥 B : 同 25~50%の欠陥 C : 同 50~75%の欠陥 D : 同 75%以上の欠陥	A~D	特記事項 あれば記入	
4. 実用性	開発の難易度 (4~5年以内に開発可能か否か)	可又は否	付帯条件等 あれば記入	
	装置の特殊性	有又は無	装置の操作性 (自動化の程度)等 有, の場合記入	

4.2 超音波応用技術に関する検討

4.2.1 評価項目と評価の条件

アレイ探触子を用いて高速試験が可能な電子走査式超音波探傷法，高解像の欠陥映像化が可能な超音波ホログラフィ，開口合成法，これまでの超音波試験法では難かしかった表面開口欠陥のサイジングが可能な超音波散乱法について，“もんじゅ”体積試験への適用性を評価した。

各試験法の評価では，表4.1-2 に示す試験環境への適合性，試験の作業性，欠陥の検出性，“もんじゅ”体積試験実施のための開発期間を考慮した実用性およびコストを考慮した汎用性について検討した。評価にあたって，各種条件を下記の通り考慮した。

1) 試験環境への適合性

(i) 耐環境性

耐熱性について：試験対象個所での耐熱性については，探触子の耐熱性と走査装置の耐熱性を考慮する必要がある。後者とくにガイドレールの耐温度性では文献1) (p. 39. 34-38行)に常温～約290℃に適用可との報告がある。前者については，200℃の耐熱性がある探触子を試作した例がある。通常，PZT等の圧電素子を用いた探触子では，圧電素子の耐熱性が約170℃であり，耐熱性を200℃以上に高めることは可能と考える。しかしながら探触子のシュー部には通常アクリル樹脂等が用いられ，この部分の耐熱性は100℃程度と考えるので探触子の耐熱性を現段階では100℃と評価した。

またカプラントとしては，ナトリウム冷却材バウンダリに水を適用することは望ましくない。ナトリウム冷却材バウンダリに対しては，例えばシリコンオイル(燃焼温度は約300℃)の適用可能性がある。しかしながら粘性のあるシリコンオイルを使用する場合には，試験後の除去，回収で特殊な機構が必要となり，走査装置の容積は，さらに増加することになる。

耐放射線性について：探触子の耐放射線性についての報告も現段階では見当たらない。探触子の放射線照射による劣化は，振動子と電極を接合する接着剤，シューとして使われるアクリル樹脂の脆化が原因になると予想される。部材の脆化による探触子の劣化が現状の軽水炉ISIで問題にならないことから， 10^5 Rまでは，超音波探触子が適用可能と判断する。

2) 作業性

(i) 作業空間

軌道走行を前提とした試験では，探触子を走査するための走査装置を設置できる空間が最低限必要になる。文献1)の図7，文献2)の図11に示される走査装置は，高さ20cm，幅20cm，長さ40cmの容積を満足する大きさであり，作業空間は，最低限 $0.2\text{m}\phi \times$

0.4 mと評価した。

(ii) 試験時間

a) 電子走査式超音波探傷

超音波探傷では、シームに垂直に斜角ビームで試験するのが基本になる。したがって、シームに垂直に1次元アレイ探触子を設置し電子走査で試験し、シーム方向には、機械走査で試験することを想定した。文献3) (p.5, 18-23行)では、長さ28.8mmのアレイ探触子を30msで電子走査している。長さ200mmでは、約210ms ($30\text{ms} \times 200\text{mm}/28.8\text{mm}$)必要と推定する。シーム方向の機械走査の速度は、文献2)の最大走査速度 60mm/s (p.8右4行)を下回る 50mm/s とし、各シーム長に対する走査時間を算定した。

b) 超音波ホログラフィ, 開口合成法, 超音波散乱法

上記、電子走査式超音波探傷と同様、機械走査の速度を 50mm/s とした。各試験法に必要なシーム方向のピッチ間隔にもとづき、各シームの試験に必要な走査軌道長を速度で除した走査時間を算定した。データ処理に要する時間は、文献4) (p.21-3行)にあるように走査時間より短い。従って、所定領域でのデータ採取後、次の領域を走査中にデータ処理を並行して実施すれば、全走査を終了時にはシーム全領域のデータ処理をほぼ完了させることができる。従って、試験時間は、データ処理時間を含めず走査時間のみで評価した。

3) 欠陥検出性

超音波探傷における欠陥検出性については、文献5)での実証実験にもとづく報告がある。軽水炉の構造材を対象とし、人工スリット、疲労割れ、応力腐食割れ、溶接欠陥の4種類について試験している。人工スリット、疲労割れの欠陥高さは、圧力容器の場合肉厚の1~5%, 配管の場合肉厚の5~15%とし、欠陥長さは高さの2~6倍としている。再現性にはバラツキがあるが、上記欠陥高さの範囲で欠陥が検出されており、超音波探傷の欠陥検出性の評価はAと判断する。以下各試験法について評価内容を示す。

(a) 電子走査式超音波探傷

文献6)では、 0.2mm 幅の貫通した放電加工スリット(スリット長:最小 15mm)を対象に端部ピークエコー法で検出している。深さは 100mm である。(p.1, 4~19行)また文献3)では、鋼材深さ 15mm の直径 1mm のドリル横孔を映像化している(図9)。以上により、欠陥検出性は、Aと評価する。

(b) 超音波ホログラフィ

文献2)では、肉厚 10mm の鋼材中の垂直スリット(最小高さ 1mm , 長さ 5mm)を映像化(図9)している。欠陥検出性はAと評価する。

(c) 開口合成法

文献7)で、鋼材深さ25mmの直径1mmのドリル横孔を映像化(図4)している。欠陥検出性はAと評価する。

(d) 超音波散乱法

散乱法に関しては、表面開口欠陥の検出が主である。文献8)では、スリット状欠陥を対象に表面から深さ1~12mmの模擬欠陥をB-スコープで映像化(図3)している。表面開口欠陥の検出を条件として、検出性をAと評価する。

4.2.2 評価結果

各試験法を、各評価項目について前年度の技術調査結果をもとに評価した結果を表4.2-1~4に示す。

(1) カテゴリーⅠ及びⅡへの適用性について

アレイ形を含む超音波探触子は、各試験法とも、材質的には同じもの(PZT)を用いている。従って、探触子の耐放射線性は少なくとも 10^5 R以上あると考えられる反面、許容温度は高々100℃程度ある。このため、超音波試験法は、探触子の耐環境性により、カテゴリーⅠ及びⅡへの適用は困難と判断する。

(2) カテゴリーⅢ及びⅣへの適用性について

カテゴリーⅢ及びⅣでは、カテゴリーⅠ及びⅡと異なり、温度は室温になり、超音波探触子の耐環境性の問題はとり除かれる。超音波試験法の場合、探触子と試験個所の間のカプラントを入れる必要があるため、カテゴリーⅢ及びⅣでカプラントを使用できるという条件で、超音波試験法が適用可能と判断する。

4.2.3 カプラント不要の試験法及びナトリウムの存在による欠陥検出性の検討

超音波試験の適用を容易にするため①カプラントを使用しない試験、②Naの存在による欠陥検出性の低下について検討した。

(1) カプラント不要の試験法の検討(常温)

カプラント不要の超音波探触子が市販されつつあり、その探触子の特性を実験的に検討した。

探触子特性の試験結果についてまとめると次の様になる。

- (i) 押しつけ荷重4kg以上で、1mmφドリル孔(鋼材中深さ30mm)の反射波を充分検出できる。
- (ii) 垂直探傷が可であるが斜角探傷は不可。

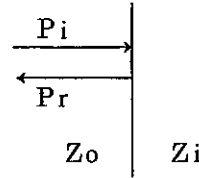
以上、本探触子はカプラントの役割をするラバー材を貼り付けており試験対象表面での摺動走査では摩耗が予想されるため、探触子を連続摺動せず各走査位置毎に荷重4kg以上

で押しつけて試験する必要があり走査時間が長くなること、また、斜角探傷用探触子がな
いため垂直スリット状欠陥の検出が困難であることから、カプラント不要の試験は現時点
では難しいと判断する。

(2) Naの存在による欠陥検出性の低下

配管内部にNa(固体,液体)が存在する場合の超音波反射率がどの程度変化するかを検
討した。超音波反射率(振幅反射率) r は、

音響インピーダンス Z_0 の媒質を通過して、 Z_i
なる音響インピーダンスの媒質との境界に
超音波を垂直に入射させた場合の反射率 r



$$r = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0}$$

は次式で定義される。

但し、 P_i および P_r はそれぞれ入射超音波の振幅、反射超音波の振幅である。

Na, 空気の音響インピーダンス Z_i は、それぞれ 3.26×10^6 (20℃), 2.24×10^6 (200℃),
および 0.0004×10^6 であり、鋼の音響インピーダンス Z_0 は、 46.1×10^6 であるから(単位
はそれぞれ $\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}$) それぞれの組合せでは以下の様になる。

	鋼・Na (20℃)	鋼・Na (200℃)	鋼・空気
r	0.867	0.907	1

以上の結果より、液体Naの存在では、Naがない場合(空気)に対して、反射率が約10%、
固体Naでは約13%低下するのみである。

この程度の低下では、検出感度の顕著な低下はないと判断する。

参 考 文 献

- 1) : 成瀬他 “原子力発電所供用期間中調査用遠隔自動・半自動超音波探傷装置”
日立評論 Vol.65 No.9 (1983-9)
- 2) : 高橋他 “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”
日本非破壊検査 第29巻第1号 (昭和55年1月) H-5
- 3) : S. Ogura et al. “Development of Ultrasonic Inspection System Using
Array Transducer”
The 3rd German-Japanese Joint Seminar (1985-August)
- 4) : 高橋 “デジタル方式超音波ホログラフィによる立体映像化システムの開発”
日本非破壊検査 第2分科会 (昭和58年6月)
- 5) : 増山他 “ISIにおける超音波探傷の再現性評価”
日本原子力学会誌 Vol.27, No.8 (1985-8)

- 6) : 長井他 “電子走査型超音波探傷法の部分溶込み溶接部への適用”
日本非破壊検査 昭和 58 年度秋季大会 (昭和 58 年 9 月)
- 7) : 石井他 “開口合成超音波探傷法による探傷実験”
日本非破壊検査 昭和 56 年度秋季大会 (昭和 56 年 9 月)
- 8) : 武捨他 “超音波散乱法を利用したき裂検査法”
日本非破壊検査 昭和 55 年度春季大会 (昭和 55 年 2 月)

表 4.2-1 カテゴリー：I (原子炉容器)

評価項目	適用方法 評価基準	電子走査式超音波探傷		超音波ホログラフィ		開口合成法		超音波散乱法		
		判定・評価		判定・評価		判定・評価		判定・評価		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度 (200℃)	×	耐用温度 100℃ 以内	×	同 左	×	同 左	×	同 左
		放射線 (10 ⁵ R/hr)	○	10 ⁵ R まで可	○	同 左	○	同 左	○	同 左
		Na (有)	○	反射率 13% 低	○	同 左	○	同 左	○	同 左
		雰囲気 (N ₂)	○		○		○		○	
	付帯設備	—	要	・ブリアンプ部等の冷却装置 ・カプラント回収機構	要	・カプラント回収機構	要	同 左	要	同 左
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	×	・容器壁までのガイドレール要 ・50mの遠隔化	自動	・ガイドレール不要	自動	同 左	自動	同 左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	0.2 m φ × 0.4 m	—	同 左	—	同 左	—	同 左
	走査装置	走査制御の必要度	要	精度 1mm 以内	要	精度波長/2 以内	要	同 左	要	精度 1mm 以内
		姿勢制御の要否	要	狭隘部通過及び各シーム間移動のため	要	同 左	要	同 左	要	同 左
		達成難易度	難	狭隘部通過のための遠隔制御, 高信頼化	難	同 左	難	同 左	難	同 左
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要	溶接肉盛部は製作時研摩すること	不要	同 左	不要	同 左	不要	同 左
		保温材の脱着	不要		不要		不要		不要	
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長: 22.3m 走査長: 200mm	約 0.12 時間	シーム方向に 3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 120 時間	シーム方向に 0.2mm ピッチ 速度 50mm/s	約 8 時間	シーム方向に 3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 8 時間	シーム方向に 3mm ピッチ 速度 50mm/s	
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の 25% 以下の欠陥 B : 同 25~50% の欠陥 C : 同 50~75% の欠陥 D : 同 75% 以上の欠陥	A	従来 UT に比し 6~10 dB 感度低	A	従来 UT と感度同じ	A	同 左	A	但し深さによって センサの対向角変更要	
4. 実用性	開発の難易度 (4~5 年以内に開発可能か)	否	50m の遠隔化難 耐温度 (100℃)	否	ガイドレールによる駆動機構が難 耐温度 (100℃ 以内)	否	同 左	否	同 左	
	装置の特殊性	無		無		無		無		

表 4.2-2 カテゴリー：Ⅱ（原子炉容器回り
1次主冷却系配管）

評価項目	適用方法 評価基準	電子走査式超音波探傷		超音波ホログラフィ		開口合成法		超音波散乱法		
		判定・評価		判定・評価		判定・評価		判定・評価		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度(200℃)	×	耐用温度100℃以内	×	同左	×	同左	×	同左
		放射線(10 ³ R/hr)	○	10 ³ Rまで可	○	同左	○	同左	○	同左
		Na(有)	○	反射率13%低	○	同左	○	同左	○	同左
		雰囲気(N ₂)	○		○		○		○	
付帯設備	—	要	・プリアンプ部等の冷却装置 ・カプラント回収機構	要	・カプラント回収機構	要	同左	要	同左	
	試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要、不要、人間がどこまで関与するか等	×	・対象箇所までのガイドレール要 ・50mの遠隔化難	自動	・ガイドレール要	自動	同左	自動	同左
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	0.2mφ×0.2m	—	同左	—	同左	—	同左
	走査装置	走査制御の必要度	要	精度1mm以内	要	精度波長/2以内	要	同左	要	精度1mm以内
		姿勢制御の要否	要	狭あい部通過のため	要	同左	要	同左	要	同左
		達成難易度	難	狭あい部通過のための遠隔制御、高信頼化	難	同左	難	同左	難	同左
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要	溶接肉盛部は製作時研摩すること	不要	同左	不要	同左	不要	同左
		保温材の脱着	不要		不要		不要		不要	
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長：2m 走査長：60mm	約 1/90 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度50mm/s	約 3.4 時間	シーム方向に0.2mm ピッチ 速度50mm/s	約 0.2 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度50mm/s	約 0.2 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度50mm/s	
3. 欠陥検出性	A：肉厚の25%以下の欠陥 B：同 25～50%の欠陥 C：同 50～75%の欠陥 D：同 75%以上の欠陥	A	従来UTに比し 6～10dB感度低	A	従来UTと感度同じ	A	同左	A	但し深さによって センサの対向角変更要	
4. 実用性	開発の難易度 (4～5年以内に開発可能か)	否	50mの遠隔化難 耐温度(100℃以内)	否	ガイドレールによる駆動機構が難 耐温度(100℃以内)	否	同左	否	同左	
	装置の特殊性	無		無		無		無		

表 4.2-3 カテゴリー：Ⅲ（1次主冷却系配管
ホットレグ配管）

評価項目	通用方法		電子走査式超音波探傷	超音波ホログラフィ		開口合成法		超音波散乱法			
	評価基準	判定・評価		判定・評価	判定・評価	判定・評価	判定・評価				
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度（室温）	○	○	○	○	○	○	○		
		放射線（1R/hr）	○	○	○	○	○	○	○		
		Na（無）	○	○	○	○	○	○	○		
		雰囲気（空気）	○	○	○	○	○	○	○		
付帯設備	—	要	・カプラント回収機構	要	同左	要	同左	要	同左		
	試験対象個所までのアクセス性	ガイドレールの要，不要，人間がどこまで関与するか等	半自動	・ガイドレール要 ・セッティングは手動	半自動	同左	半自動	同左	半自動	同左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	スキナー：0.2mφ×0.2m 処理装置： W D H 2×0.6×2m ³	—	同左	—	同左	—	同左	
		走査装置	走査制御の必要度	要	精度1mm以内	要	精度波長/2以内	要	同左	要	精度1mm以内
			姿勢制御の要否	否		否		否		否	
	達成難易度		易		易		易		易		
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要	溶接肉盛部は製作時研摩すること	不要	同左	不要	同左	不要	同左	
		保温材の脱着	要		要		要		要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長：2.6m 走査長：50mm	約 0.014 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 4 時間	シーム方向に0.2mm ピッチ 速度 50mm/s	約 0.26 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 0.26 時間	同左		
3. 欠陥検出性	A：肉厚の25%以下の欠陥 B：同 25～50%の欠陥 C：同 50～75%の欠陥 D：同 75%以上の欠陥	A	従来UTに対し 6～10dB感度低	A	従来UTと感度同じ	A	同左	A	同左		
4. 実用性	開発の難易度（4～5年以内に開発可能か）	可	カプラント使用可を条件とする	可	同左	可	同左	可	同左		
	装置の特殊性	無	セッティングは手動 走査は自動	無	同左	無	同左	無	同左		

表 4.2-4 カテゴリー：IV（2次主冷却系配管）

評価項目	適用方法		電子走査式超音波探傷	超音波ホログラフィ	開口合成法	超音波散乱法				
	評価基準	判定・評価					判定・評価	判定・評価	判定・評価	
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度（室温）	○	○	○	○				
		放射線（0 R/hr）	○	○	○	○				
		Na（無）	○	○	○	○				
		雰囲気（空気）	○	○	○	○				
付帯設備	——	要	・カプラント回収機構	要	同左	要	同左			
	試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	半自動	・試験用ガイドレール ・セッティングは手動	半自動	同左	半自動	同左		
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	——	スキャナ: 0.2mφ×0.2m 処理装置: W D H 2×0.6×2m ³	——	同左	——	同左		
	走査装置	走査制御の必要度	要	精度 1mm 以内	要	精度波長/2以内	要	同左	要	同左
		姿勢制御の要否	否		否		否		否	
		達成難易度	易		易		易		易	
	対象部の前後処理	対象部地面処理	不要	溶接肉盛部は製作時研摩すること	不要	同左	不要	同左	不要	同左
		保温材の脱着	要		要		要		要	
試験時間	1シーム当り試験に取る実時間 シーム長: 1.8m 走査長: 50mm	約 0.01 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 3.0 時間	シーム方向に0.2mm ピッチ 速度 50mm/s	約 0.2 時間	シーム方向に3mm ピッチ 速度 50mm/s	約 0.2 時間	同左	
3. 欠陥検出性	A: 肉厚の25%以下の欠陥 B: 同 25~50%の欠陥 C: 同 50~75%の欠陥 D: 同 75%以上の欠陥	A	従来UTに比し 6~10dB感度低	A	従来UTと感度同じ	A	同左	A	同左	
4. 実用性	開発の難易度 (4~5年以内に開発可能か)	可	カプラント使用可を条件とする	可	同左	可	同左	可	同左	
	装置の特殊性	無	セッティングは手動 走査は自動	無	同左	無	同左	無	同左	

4.3 光・電磁気応用技術に関する検討

4.3.1 検討項目

光・電磁気応用技術としては下記の技術があるが、3章の調査結果より、レーザ超音波法については、非接触で超音波探傷が出来る特徴があるものの、まだ基礎研究の段階であり実用化までには長時間を要すると考えられたため、検討対象技術から除去し、他3技術について検討をおこなった。

- (1) レーザ超音波法
- (2) 電磁超音波法
- (3) 渦電流探傷法
- (4) 電気抵抗法

4.3.2 電磁超音波法

(1) 試験環境への適合性

センサは温度 200℃、放射線約 10^3 R/H、窒素雰囲気でも使用可能であるが、欠陥割れ中に Na が入れれば影響が考えられる。しかし 0.3 μm 以上のギャップ中に水が入っている場合 SH 波はほぼ反射されることが確認されていることから、通常の割れのときには影響は少ないと考えられる。(1)

付帯設備は全て不要である。また試験対象個所までのアクセスとしては、カテゴリ I, II の場合には高温高放射能のため接近、探傷共に自動化が必要である。センサ位置は特に高い精度を必要としているわけではないので、仏国での MIR の例もありガイドレールは有っても、なくても可能と考えられる。カテゴリ III の場合には、人間が短時間接近可能であることから、接近は手動、探傷は自動とする半自動が考えられる。カテゴリ IV については、室温で放射線を考慮しなくてもよいので、手動探傷となることも考えられる。

(2) 作業性

作業空間としては、カテゴリ I の場合のプラント要求 300mm の空間で接近、試験が可能と考えられる。他カテゴリについてもほぼ同様である。走査装置の走査、姿勢の精度は通常の超音波探傷と同程度であり、これらのことを達成することは困難ではないと推定される。対象部の前後処理としては、カテゴリ I, II については不要であるが、カテゴリ III, IV については、探傷前後で保温材の脱着が必要である。試験時間としては、センサを 10mm/sec 程度のスピード前後走査しながら、溶接線方向に約 2mm/sec 程度で走査すると仮定すれば、走査時間は 1 溶接線当り、カテゴリ I の場合（前後走査範囲約 50mm）約 3 時間、カテゴリ II, III, IV の場合（前後走査範囲約 20mm）約 0.25～

0.4時間と比較的短時間でおこなうことができる。

(3) 欠陥検出性

文献等によれば90mm深さのところのφ3mm平底ドリル穴が検出可能とされており、また図4.3-1に示す基本構造のSH波電磁超音波センサが開発されており240℃でケーブル40m延長して50mm厚板の25mm高さの内面欠陥が検出されている例もある(図4.3-2, 図4.3-3参照)。これらのことよりS/Nは低いものの、カテゴリⅠ~ⅣでB~Cクラスの欠陥検出への適用が考えられる。今後改良がなされれば探傷結果の信頼性は向上するものと考えられる。

(4) 実用性

電磁超音波法を適用する場合、カテゴリⅠ, Ⅱについては高温用小型走査装置の開発が必要であるが、装置としての特殊性は特になく考えられるので、4~5年以内の開発は可能と考えられる。カテゴリⅢについては従来軽水炉用として開発されている装置(従来超音波探傷法)の利用が可能と考えられる。

(5) 総合評価

検出能的には従来超音波法に比べ低いものの、環境への適合性が良好であるため、カテゴリⅠ, Ⅱで比較的大きな欠陥を対象とするケースについては、合理的な方法と考えられる。しかし、探傷データの信頼性の観点からは、S/Nの向上を計ることが望ましい。

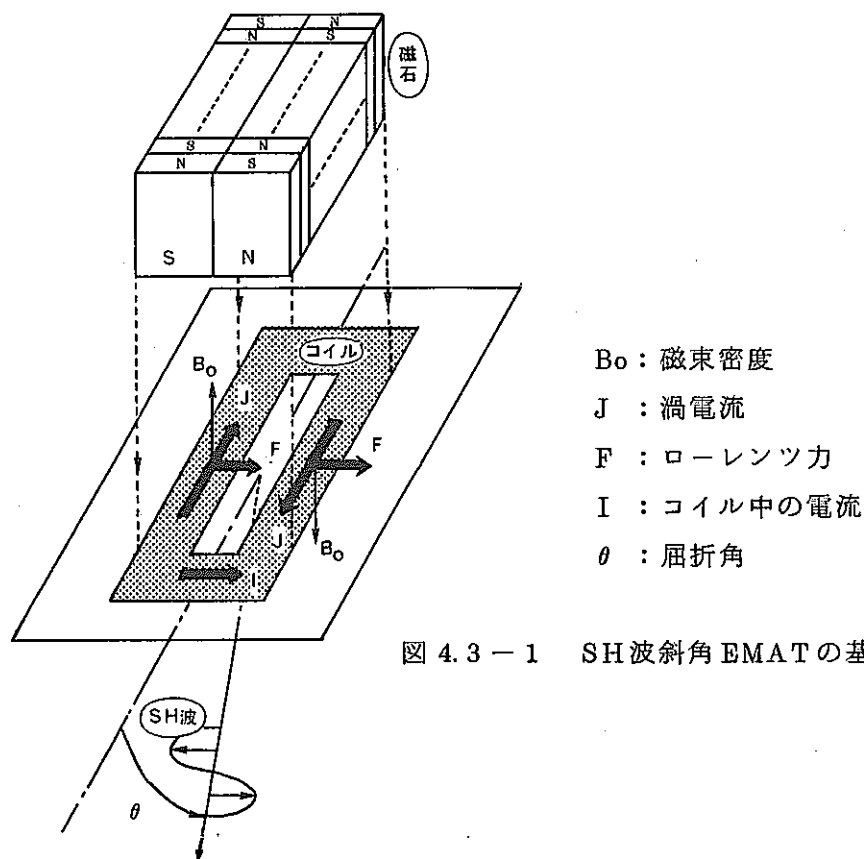


図 4.3 - 1 SH波斜角 EMAT の基本構造

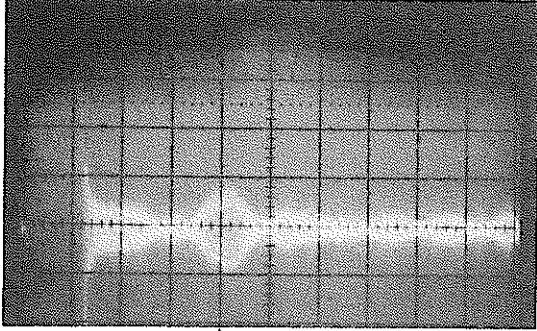
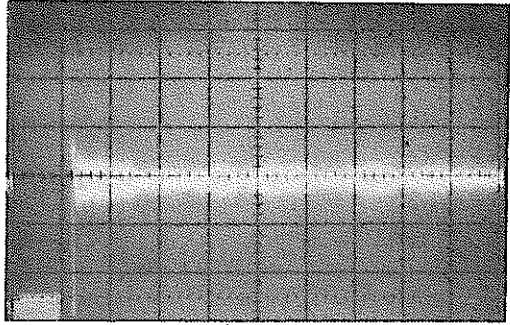
試験片: 50% 母材 [スリット 25 d × 40 l]	S/N	8.1 dB	試験片: 母材 (雑音)
 <p style="text-align: center;">↑ 欠陥</p>	 <p style="text-align: center;">↑ 雑音</p>		

図 4.3 - 2 高温 (240℃) の SH 波 EMAT 探傷波形
内表面欠陥探傷 (715 KHz)

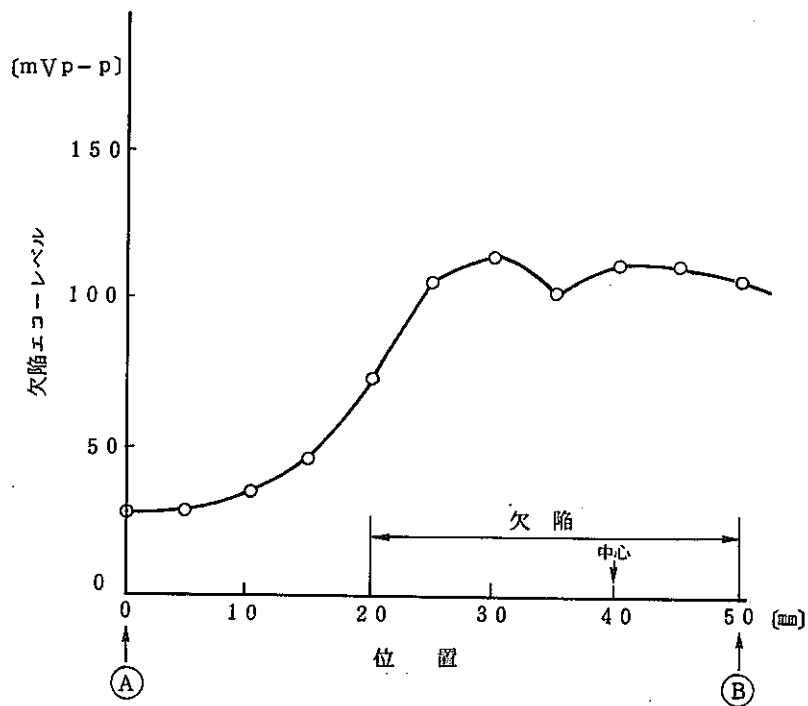


図 4.3 - 3 母材試験片エコーグラフ (欠陥に対して平行方向)

4.3.3 渦電流法

(1) 試験環境への適合性

センサは温度 200℃，放射線約 10^3 R/H，窒素雰囲気でも使用可能であり，全カテゴリーで適用可能である。しかし，欠陥割れ中にナトリウムが入った場合，ナトリウムの導電率は 4.5×10^6 mho/m，SUS 304 は 1×10^6 mho/m であり，封入ガスに比べ大きな差がある。このため検出性に影響があり，検出性は低下することが考えられる。付帯設備及びガイドレールについては，電磁超音波法と同様である。

(2) 作業性

作業空間は電磁超音波と同様 300mm の空間があれば接近，試験が可能と考えられる。走査及び姿勢の制御は従来の超音波探傷法と同様であるので，これらを達成することは困難ではないと思われる。試験時間については，超音波探傷に比べ 1 桁程度走査スピードを上げることが可能であるので，さらに短時間にすることが可能と考えられる。前処理は，非接触であることより，カテゴリー I，II については表面処理，保温材脱着は不要であり，カテゴリー III，IV については保温材の脱着のみ必要となる。

(3) 欠陥検出性

渦電流法は渦電流が表面近くに生じるため，表層部の検査法である。文献によれば，通常の方法では表面より 2mm 程度の^{C-6}パルス法で 9mm 程度の深さのところの $\phi 3$ 横ドリル穴が検出された例がある^{C-5}。しかし，溶接部は磁性体となっており，境界近傍では透磁率変化の影響が表われるし，形状変化の影響もある。これらの点は多重周波数法によりある程度除去可能と考えられている^{C-2}。これらのことより，カテゴリー I のように厚板の場合，内面欠陥としては，D クラスでなければ検出は困難と考えられる。カテゴリー II，III，IV については薄肉管であるため，内面欠陥検出性は C～D クラスになるものと推定される。

(4) 実用性

電磁超音波と同様に，カテゴリー I，II については高温用小型走査装置の開発が必要であるが，これ以外には特殊な装置を必要としないと考えられ，4～5 年以内の開発は可能と考えられる。カテゴリー III は半自動，カテゴリー IV は手動の適用が考えられ，軽水炉の技術が適用できると考えられる。

(5) 総合評価

耐環境性，作業性の点では良好であるが，ナトリウムが欠陥内に入ったときの影響や，内面欠陥検出性の点で，カテゴリー I のような厚板部での適用性は低いと考えられる。しかし，カテゴリー II，III のような薄肉管の場合，ナトリウムの影響や検出性の改善がなされれば，適用の可能性も考えられる。

4.3.4 電気抵抗法

(1) 試験環境への適合性

前述2方法と同様、200℃；約10³R/Hでの適用も可能と考えられる。しかし、欠陥割れ中にナトリウムが入れば渦電流と同様に影響は大きく、検出性の低下が考えられる。

付帯設備としては、センサの針先を被検査体に安定して接触させることが必要であることから、表面スケール除去装置が必要である。

試験対象個所までのアクセス性は前述2方法と同様である。

(2) 作業性

作業空間は、前述2方法と同様に300mm程度のスペースがあれば接所、試験が可能と考えられる。

対象部表面処理については、センサ針先を被検査体表面に接触させるために、スケール除去処理の必要がある。

試験時間は、安定接触させて走査する必要があり、超音波探傷法と同様かそれ以上の時間となると考えられる。

(3) 欠陥検出性

センサの電極間隔に依存するが、電流は表面近くを多く流れるため、表層欠陥検出性は高いが内面欠陥検出性は低くなる。表面欠陥では深さ10mm程度の欠陥の定量化の例がある。しかし、カテゴリⅠのように板厚が50mm以上の場合には内面欠陥検出性はDクラスとなると推定される。カテゴリⅡ、Ⅲ、Ⅳについては板厚が薄くなるため、内面欠陥検出性はC～Dクラスになるものと推定される。

(4) 実用性

表面のスケール除去装置が必要ではあるが、その他は前述2方法と同様であり、カテゴリⅠ、Ⅱについては高温用小型走査装置が必要となる。カテゴリⅢについては軽水炉用超音波探傷装置の技術が流用できるものと考えられる。

(5) 総合評価

耐環境性の点ではすぐれているが、プローブを多数予め被検体に取り付けておくといったことは実用的ではないため、走査して検査をおこなうとすれば、検出能と前処理が必要であり、プローブ針先を被検体に安定接触させながら走査しなければならず、適用性が低く、特にカテゴリⅠのような厚板の場合には検出性が低い。

カテゴリⅡ～Ⅲのような薄肉管の場合には、検出性C～Dクラスと推定されるが、適用上はナトリウムの影響の確認や、検出性の向上が必要と考えられる。

4.3.5 電磁気応用検査技術の総合評価

試験環境への適合性の点では、3方法は良好であり、カテゴリーⅠ、Ⅱのような厳しい環境への適用が可能である点に特徴がある。また作業性についても、電気抵抗法では前処理が必要であるが、作業空間、走査装置の面で有効な方法と考えられる。

欠陥検出性の面では、電磁超音波法はB～Cクラスの内面欠陥性検出が可能と考えられるが、渦電流法、電気抵抗法は表面近くの検出の方法であり、カテゴリーⅠのような厚肉の内面欠陥検出性はDクラスと低く、他カテゴリーの薄肉管の場合でもC～Dクラスと考えられ、しかも欠陥内にナトリウムが入ると影響があるため、検出性は低いと考えられる。

実用性については、カテゴリーⅠ、Ⅱについては高温用小型走査装置の開発が必要と考えられるが、装置の特殊性に特にないため4～5年以内の開発は可能と考えられる。また、カテゴリーⅢ以下についても従来の軽水炉用超音波探傷装置の利用が考えられる。

以上のことから、カテゴリーⅠ、Ⅱのような厳しい環境条件で、比較的大きな欠陥を対象とするケースについては、欠陥検出性の面から上記3方法のうち電磁超音波法の適用が合理的と考えられる。

参 考 文 献

- 11) : A. V. Clark, Jr., and S. D. Hart ; Measurement of Ultrasound Reflected from Liquid Layers of Submicron Thickness, Materials Evaluation Vol. P. 866—P. 873 (1982)

表 4.3-1 カテゴリー：I (原子炉容器)

評価項目	適用方法		電磁超音波法	渦電流法		電気抵抗法	備考	
	評価基準	判定・評価		判定・評価	判定・評価			
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度(200℃)	○	欠陥割れ中にNaが入れば若干影響有	○	欠陥割れ中にNaが入れば検出性に影響大	○	
		放射線(1×10 ³ R/hr)	○		○		○	
		Na(内包)	○		△		△	
		雰囲気(N ₂)	○		○		○	
付帯設備	—	不要		不要		要	スケール除去用前処理装置	
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要、不要、人間がどこまで関与するか等	自動	接近、探傷共にガイドレール有、無共に可	自動	同左	自動	同左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	300φmm以内(プラント要求)	—	同左	—	同左
	走査装置	走査制御の必要度	特に必要とせず	従来UTと同程度	特に必要とせず	同左	特に必要とせず	同左
		姿勢制御の要否	否		否		否	
		達成難易度	易		易		易	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要		不要		要	スケール除去前処理
保温材の脱着		不要		不要		不要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 溶接線長≧22.3mm	約3時間	前後走査の溶接線方向スピードを2mm/secとする	約0.3時間	前後走査の溶接線方向スピードを20mm/secとする	約3時間	電磁超音波法と同様	
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の25%以下の欠陥 B : 同 25~50%の欠陥 C : 同 50~75%の欠陥 D : 同 75%以上の欠陥	B~C		D		D		
4. 実用性	開発の難易度(4~5年以内に開発可能か否か)	可	高温用小型走査装置の開発	可	同左	可	同左	
	装置の特殊性	無		無		無		

表 4.3 - 2 カテゴリー：II（1次主冷却系配管：原子炉容器廻り）

評価項目	適用方法		電磁超音波法	渦電流法		電気抵抗法	備考	
	評価基準	判定・評価		判定・評価	判定・評価			
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度(200℃)	○	欠陥割れ中にNaが入れば若干影響有	○	欠陥割れ中にNaが入れば検出性に影響大	○	
		放射線(1×10 ³ R/hr)	○		○		○	
		Na(内包)	○		△		△	
		雰囲気(N ₂)	○		○		○	
付帯設備	—	不要		不要		要	スケール除去用前処理装置	
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	自動	接近, 探傷共にガイドレール有, 無共に可	自動	同左	自動	同左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	300φmm	—	同左	—	同左
	走査装置	走査制御の必要度	特に必要とせず	従来UTと同程度	特に必要とせず	同左	特に必要とせず	同左
		姿勢制御の要否	否		否		否	
		達成難易度	易		易		易	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要		不要		要	スケール除去前処理
保温材の脱着		不要		不要		不要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 溶接線長≒2m	約0.3時間	前後走査の溶接線方向スピードを 2mm/secとする	約0.03時間	前後走査の溶接線方向スピードを 20mm/secとする	約0.3時間	前後走査の溶接線方向スピードを 2mm/secとする	
3. 欠陥検出性	A: 肉厚の25%以下の欠陥 B: 同 25~50%の欠陥 C: 同 50~75%の欠陥 D: 同 75%以上の欠陥	B~C		C~D		C~D		
4. 実用性	開発の難易度 (4~5年以内に開発可能か否か)	可	高温小型走査装置の開発	可	高温小型走査装置の開発	可	高温小型走査装置の開発	
	装置の特殊性	無		無		無		

表 4.3-3 カテゴリー：Ⅲ（1次系主冷却系配管）

評価項目	適用方法		電磁超音波法	渦電流法		電気抵抗法	備考	
	評価基準	判定・評価		判定・評価	判定・評価			
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度（常温）	○	欠陥中に残ったNaの影響若干影響大	○	欠陥中に残ったNaの影響大	○	
		放射線（1R/hr）	○		○		○	
		Na（なし）	○		△		△	
		雰囲気（Air）	○		○		○	
付帯設備	—	不要		不要		要	スケール除去前処理装置	
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	半自動	試験対象箇所までの接近のためのガイドレールは不要	半自動	同左	半自動	同左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	配管外面より300mm以内	—	—	—	
	走査装置	走査制御の必要度	特に必要とせず	通常UTと同程度	特に必要とせず	同左	特に必要とせず	同左
		姿勢制御の要否	否		否		否	
		達成難易度	易		易		易	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要		不要		要	スケール除去前処理
保温材の脱着		要		要		要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 溶接線長≧2.6m	約0.4時間	前後走査の溶接線方向スピードを2mm/secとする	約0.04時間	前後走査の溶接線方向スピードを20mm/secとする	約0.4時間	電磁超音波法と同様	
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の25%以下の欠陥 B : 同 25~50%の欠陥 C : 同 50~75%の欠陥 D : 同 75%以上の欠陥	B~C		C~D		C~D		
4. 実用性	開発の難易度 (4~5年以内に開発可能か否か)	可		可		可		
	装置の特殊性	無		無		無		

表 4.3-4 カテゴリー：IV（2次系主冷却系配管）

評価項目	適用方法		電磁超音波法	渦電流法	電気抵抗法	備考		
	評価基準	判定・評価					判定・評価	判定・評価
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度（常温）	○	欠陥中に残ったNaの影響若干	○	欠陥中に残ったNaの影響大	○	
		放射線（なし）	○		○		○	
		Na（なし）	○		△		△	
雰囲気（Air）		○	○		○			
付帯設備	——	不要		不要	不要			
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要、不要、人間がどこまで関与するか等	手動	ガイドレールは不要	手動	同左	手動	同左	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	——	配管外表面より300mm以内	——	同左	——	同左
	走査装置	走査制御の必要度	特に必要とせず		特に必要とせず		特に必要とせず	
		姿勢制御の要否	否		否		否	
		達成難易度	易		易		易	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要		不要		要	スケール除去前処理
保温材の脱着		要		要		要		
試験時間	1シーム当たり試験に要する実時間 溶接線長≒1.8m	約0.25時間	〔前後走査の溶接線方向スピードを2mm/secとする〕	約0.025時間	〔前後走査の溶接線方向スピードを20mm/secとする〕	約0.25時間	電磁超音波法と同様	
3. 欠陥検出性	A：肉厚の25%以下の欠陥 B：同 25～50%の欠陥 C：同 50～75%の欠陥 D：同 75%以上の欠陥	B～C		C～D		C～D		
4. 実用性	開発の難易度（4～5年以内に開発可能か否か）	可		可		可		
	装置の特殊性	無		無		無		

4.4 放射線応用技術に関する検討

4.4.1 検討項目

放射線CT, 放射線透過法, 中性子ラジオグラフィーは, いずれも放射線を用い, 線源と受信部(センサー)の間に試験体を配置して試験する方法である。どの試験法も, 装置と試験体とを接触させる必要がない為, 線源部と受信部それぞれの冷却は必要とするものの, 高温の試験体を試験することもできる。このうち, 中性子ラジオグラフィーは, 中性子線源からの中性子束が試験体を減衰しながら透過してくるのを検出する技術であるが減衰は中性子吸収断面積に依存し, 物体の密度に依存しないのでX線, γ 線では, 透過が困難なものでも可視化することができる。

従って異種材の識別や中性子吸収断面積の異なる物質が混在しているような体系の識別には適していると言えるが現在までの所, 今回, 調査の目的としている構造材料等のクラックや欠陥の検出に適用された文献例や検出能力の定量的データは見い出されていない。

中性子ラジオグラフィーについては, 現時点では高速増殖炉機器構造への適用可能性を検討する段階に至っていないものと判断し, 今回の評価対象項目から, 除くこととした。放射線CT, 放射線透過法とも他の原理による試験法(超音波応用, 電磁波応用)と比較した場合, 未知の欠陥を走査検出するよりも, 他の手段により検出された欠陥の形状, 性状及びその進展をより精密に追跡するのに効果的な方法であると言える。従ってこの特徴を有効に生かす試験段階で適用するのが望ましいと思われる。

4.4.2 放射線CT

(1) 概要

放射線CTは当初医療分野で開発された技術であるが, 欠陥, 空洞など密度が大きく異なる箇所を映像化することが可能である所から最近では工業分野での応用が進み, セラミック製部品, アルミ材, 鋼材などへの適用例が報告されている。線源としてはライナック等のX線発生装置を使用するものの他に ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs などのRIを使用する装置も開発され, 実用に供されている。放射線CTは本来試験設備が固定され, 試験対象が移動, 回転するのが基本的な構成となっているが高速増殖炉に限らず原子炉発電所の冷却材バウンダリー構成機器は移動することができないため, 試験設備自身を可搬化, 小型化することが必要条件となってきた。従って試験対象部位周辺には線源と受信設備用のガイドレールや支持構造をあらかじめ設け, 試験の為の専有空間を確保する等の事前の対策が必要になる。

(2) 今後の開発課題

現在, 海外での開発例では, 線源部の容積が $0.4 \times 0.4 \times 0.5$ (M^3), 重量30 KgのX線源

があるが線源強度も 5 MeV 程度に止まっている。今回検討対象としたカテゴリⅢおよびⅣの配管の二重透視スキャンを実施する為にはその他の環境条件がととのえられたとしても有意な映像を得るのはかなり困難と推定され、強度面からは 7 MeV 程度の高い透過能力が必要である。しかし一方、線源強度が高い為にかえって強まる散乱効果によって像質が低下することも予想されるので今後、目的に応じた適切な強度を有し、可搬、小型な線源と検出効率の良いセンサーの開発が必要である。

原子力発電用機器を試験対象とする場合は一般に放射線バックグラウンドの影響を前提に考えておかなければならないが CT センサーの耐放射線性については 1 R/H 程度とされている。これはセンサーの寿命を短くするというよりセンサー受信時の S/N 比を劣化させ、それによる像質低下の影響が出る為であり、この面におけるセンサー部の耐放射線の向上も重要な開発課題である。なお放射線環境下においては遠隔自動操作が前提となるがこれに必要とする技術については他分野における蓄積もあり、開発上の大きな課題とはならないものと思われる。

(3) 評 価

I からⅣの各カテゴリごとに、放射線 CT の適用に関する評価を行なった。表 4.4-1 から表 4.4-4 にその結果を示す。

4.4.3 放射線透過法

(1) 概 要

放射線透過法は学術、産業の各方面の他、工業分野における非破壊検査の有効な手段として十分に実績を有している。既に確立された検査技術であると言ってよい。原子力用機器の非破壊検査法としてもよく用いられている手法で、適切な線源強度とフィルム感度又は電子影像感度の組み合わせで高い欠陥検出が期待できる。

又、線源及びフィルム、受信管などはいづれも遠隔操作となるが、これらの技術は従来技術の線上にあり、特に開発対象とはならない、しかし線源等が移動、回転する為の架合、ガイドレール等については放射線CTの場合と同様プラント設備の状況に応じた設置が必要である。

(2) 今後の開発課題

放射線透過法はその線源からX線、 γ 線を発する方式であるので、その適用に際しては放射線環境下におけるS/N比の観点からの検討が必要である。特に高いレベル(1 R/H以上)の環境下では、実績も少ない為、適切な試験条件の評価が難しい。バックグラウンドとなる放射線のスペクトラムに応じて、線源を選択すること、フィルターの使用も含めたフィルム感度、受像感度の選択などが課題とされる。

原子力発電所内での試験では、通例、試験に必要なとされるスペースが事前に確保されていることは少なく、いきおい狭隘部での実施を余儀なくされる。

従って設備の小型化は重要な課題として今後とも研究開発を続ける必要がある。

(3) 評 価

I からIVの各カテゴリーごとに放射線透過法の適用に関する評価を行なった。表4.4-1から表4.4-4にその結果を示す。

表 4.4-1 カテゴリー：I (原子炉容器)

評価項目	適用方法		放射線 CT		放射線透過法		備考
	評価基準	判定・評価	判定・評価	判定・評価	判定・評価		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度 (200℃)					<p>炉内器内は 200℃ の高温ナトリウムが充填されたままの状態にあるので、この中に放射線線源やセンサー設備を置くことは不可能である。又、炉内構造物がある関係上、二重透視 SCAN ないし撮影も不可能である。</p> <p>耐環境性の検討や、作業性の検討以前の問題として原理的に不可能と判断される。</p> <p>以下の検討・評価は省略する。</p>
		放射線 (1×10^3 R/H)					
		Na (内包)					
	雰囲気 (N ₂)						
付帯設備	_____						
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等						
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース					
	走査装置	走査制御の必要度					
		姿勢制御の要否					
		達成難易度					
	対象部の前後処理	対象部表面処理					
		保温材の脱着					
試験時間	1 シーム当り試験に要する実時間 シーム長: 22.3m						
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の 25% 以下の欠陥 B : 同 25~50% の欠陥 C : 同 50~75% の欠陥 D : 同 75% 以上の欠陥						
4. 実用性	開発の難易度 (4~5 年以内に開発可能か否か)						
	装置の特殊性						

表 4.4-2 カテゴリー：Ⅱ（原子炉容器廻り
一次主冷却系配管）

評価項目	適用方法		放射線 CT	放射線透過法		備考
	評価基準	判定・評価		判定・評価		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度(200℃)	△	環境放射線レベルが高く実際上受信不可能と判断される。(センサー部の許容レベル1R/H)温度条件も200℃では対応困難。	△	放射線バックグラウンドについては実績がない為評価は困難
		放射線(1×10 ³ R/H)	×		—	
		Na(内包)	○		○	
		雰囲気(N ₂)	○		○	
付帯設備	—	要	40℃～50℃迄の冷却設備が必要。	要	同 左	
試験対象箇所までのアクセス性	ガイドレールの要, 不要, 人間がどこまで関与するか等	自動	放射線レベルが高い為, 線源及び受信信部の操作は遠隔操作とする	自動	線源及びフィルムの操作は遠隔操作とする。	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	否	上記, 記載事由により, 作業性, 欠陥検出性及び実用性それぞれの検討・評価は実施していない。	難	米国製の最新の小型線源MINAC-3でも250mmの間隔が必要。
	走査装置	走査制御の必要性			特に必要とせず	
		姿勢制御の要否			要	角度を変えて撮影の要あり。
		達成難易度			難	スペース上の制約とメカニズムの開発
	対象部の前後処理	対象部表面処理			不要	非接触のため
		保温材の脱着			不要	保温材はなし
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長: 2.0m		約1時間			
3. 欠陥検出性	A: 肉厚の25%以下の欠陥 B: 同 25~50%の欠陥 C: 同 50~75%の欠陥 D: 同 75%以上の欠陥			不明	バックグラウンドの放射線の影響, 内包ナトリウムの影響, いずれも現状では評価が困難。	
4. 実用性	開発の難易度 (4~5年以内に開発可能か否か)			可	国産を前提。小型化および冷却設備の開発。	
	装置の特殊性			無		

表 4.4-3 カテゴリー：Ⅲ（一次主冷却系配管）

評価項目	適用方法		放射線CT	放射線透過法		備考	
	評価基準	判定・評価		判定・評価			
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度(常温)	○	クラックの中にNaが存在する場合、欠陥の大きさにもよるが像質の低下は予想される。	○	放射線の影響が懸念されるが基本的には適用可と判断される。	
		放射線(1R/H)	△		○		
		Na(なし)	○		○		
		雰囲気(Air)	○		○		
付帯設備	—	不要		不要			
試験対象個所までのアクセス性	ガイドレールの要、不要、人間がどこまで関与するか等	半自動	既設のガイドレールが必要。位置検出センサーを含め遠隔操作設備が必要。	半自動	同 左	ガイドレールへの装着までは、手動、それ以降は遠隔自動。	
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	管中心より半径約2m、高さ1mの円筒状専用空間が必要	—	同 左	両試験法とも線源部のサイズが、400×400×500の程度に納まることを前提。
	走査装置	走査制御の必要度	要	位置ぎめの為の検出センサー及びピッチ走査コントロールが必要。	特に必要とせず		
		姿勢制御の要否	要	欠陥の方向が特定できない場合。	要	同 左	
		達成難易度	易	線源設備側へメカニズム装備。	易	同 左	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要	非接触のため。	不要	同 左	
		保温材の脱着	要		要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長：2.6m		本対象配管(800mm ϕ ×11.1mm ^t 、最大透過肉厚約270mm)の二重透視スキャンを高出力×線源で実施する為には推定7MeV程度の出力電圧が必要である。 現状、小型可搬式を前提とした場合、最高の出力電圧で5MeV(米国にて開発)である。今後の開発努力如何では5～6年先に実施可能と推定するが、現状では本カテゴリーの対象配管の二重透視スキャンはきわめて困難である。	約 1.3 時間			
3. 欠陥検出性	A : 肉厚の25%以下の欠陥 B : 同 25～50%の欠陥 C : 同 50～75%の欠陥 D : 同 75%以上の欠陥			A	欠陥検出の限界推定値 約0.05(5%) 但し欠陥の方向と放射線の照射方向が一致する場合。		
4. 実用性	開発の難易度 (4～5年以内に開発可能か否か)			可	線源以外からの放射線遮蔽構造(フィルムに対する)の開発が必要。		
	装置の特殊性			有	遠隔操作によるフィルム交換メカニズム		

表 4.4-4 カテゴリー：IV（二次主冷却系配管）

評価項目	適用方法		放射線 CT		放射線透過法		備考
	評価基準	判定・評価	放射線 CT	判定・評価	放射線透過法		
1. 試験環境への適合性	耐環境性	温度（常温）	○		○		
		放射線（なし）	○		○		
		Na（なし）	○		○		
		雰囲気（Air）	○		○		
付帯設備	—	不要		不要			
試験対象個所までのアクセス性	ガイドレールの要、不要、人間がどこまで関与するか等	半自動	当該位置迄のセッティングは手動、溶接線に沿ってのスキャンは自動。	半自動	当該位置迄のセッティングは手動、撮影、移動は自動。		
2. 作業性	作業空間	試験に必要な装置のスペース及び近接に必要なスペース	—	管中心より半径約1m、高さ1m位の円筒状専用空間が必要。	—	同 左	カテゴリ-IIIと同一の前提条件が必要
	走査装置	走査制御の必要度	要	位置ぎめの為の検出センサー及びピッチ走査コントロールが必要。	特に必要とせず		
		姿勢制御の要否	要	欠陥の方向が特定できない場合。	要	同 左	
		達成難易度	易	線源設備側へメカニズム装備	易	同 左	
	対象部の前後処理	対象部表面処理	不要	非接触のため。	不要	同 左	
		保温材の脱着	要		要		
試験時間	1シーム当り試験に要する実時間 シーム長：1.8m		本対象配管（550mm ϕ ×9.5mm ^t 、最大透過肉厚約205mm）の二重透視スキャンを高出力×線源で実施する為には推定5MeV程度の出力電圧が必要である。	約0.8時間			
3. 欠陥検出性	A：肉厚の25%以下の欠陥 B：同 25～50%の欠陥 C：同 50～75%の欠陥 D：同 75%以上の欠陥		現状、小型可搬式を前提とした場合、出力電圧で5MeVのものが米国にて開発されているので技術的には可能と思われるが、欠陥検出性、試験時間等は不明である。4～5年後の適用は可能である。	A	欠陥検出の限界推定値 約0.05（5%） 但し欠陥の方向と放射線の照射方向が一致する場合。		
4. 実用性	開発の難易度 （4～5年以内に開発可能か否か）			可	線源以外からの放射線遮蔽対策（フィルムに対する）が必要		
	装置の特殊性			有	遠隔操作によるフィルム切替、交換メカニズムが必要		

4.5 評 価

前項までで検討してきた各種体積試験方法を、4.1項で述べた適用対象カテゴリー毎に検討する。

(1) カテゴリーⅠ（原子炉容器のうちガードベッセルに囲まれた部分）

試験環境は高温、高放射線レベル、狭隘と極めて厳しい。この試験環境には従来技術を直接適用することは困難であり、例えば超音波トランスジューサによる探傷（UT探傷）を適用する場合には高温用のカプラントを使用し、試験前後でその供給回収が行える装置やトランスジューサの耐熱化と電子回路の冷却装置が必要となる。

新技術の体積試験方法に関しても、厳しい試験環境条件に適合できるものは限定されているが、FBRプラントにおいては第2章で述べたように、供用期間中における体積試験で検出すべき欠陥は、比較的大きな寸法のもを対象とすることが許されているので、非接触方式（ノンカプラント）で、耐熱性があり付帯設備が不要な電磁超音波法が適用可能と考えられる。渦電流法や電気抵抗法は、その耐環境性からは期待されるものの、カテゴリーⅠのごとき厚肉部での適用は内面からの欠陥に対する欠陥検出性が低いと考えられ、特に後者では被験面のスケール除去装置等が必要となり実用性の面では劣る。

アレイ形を含む超音波トランスジューサは、 10^6 R 程度以上の耐放射線性を有しており、使用するカプラントは、現状ではシリコンオイルなどが考えられるが、これを採用した場合には供給装置と使用後の除去回収を行なう装置を走査装置に追加する必要がある。占有空間容積を考慮すると、カテゴリーⅠへの適用は困難と判断される。

放射線CTおよび放射線透過法は、耐熱性の他、放射線バックグラウンドや線源・センサー設備のスペースの問題から、カテゴリーⅠには物理的に適合できない。

(2) カテゴリーⅡ（原子炉容器廻り1次主冷却系配管）

カテゴリーⅡの試験環境条件は、カテゴリーⅠと同様であるが、試験対象は薄肉配管となる。薄肉内面欠陥検出に関する研究が今後とも必要ではあるが、カテゴリーⅠと同様電磁超音波法を利用できる可能性がある。渦電流は、その原理からいって、薄肉になった分、カテゴリーⅠの場合より欠陥検出性は良くなる。

他の体積試験方法は、カテゴリーⅠと同様、適合の可能性はほとんどない。

(3) カテゴリーⅢ（カテゴリーⅡ以外の1次主冷却系配管）

カテゴリーⅢは放射線レベルも低く、常温で試験できる上作業スペースもカテゴリーⅠ、Ⅱに比べて余裕がある。したがって、基本的には軽水炉技術もしくはその改良技術が適用可能である。なお、FBRプラントの場合、特有の配管保温構造があり、機器・配管サポート等も入り組んでいるため、試験方法はできるだけ単純で、軽装備なものが望まれる。センサーが小型で、かつ非接触方式で試験が行える電磁超音波法や渦電流法が好ましい。

なお、電子走査式超音波探傷法は試験時間が短い特長を有しており、アレイ探触子を配管に容易に取付けられる場合には、半自動化も期待できる。超音波ホログラフィーや開口合成法は欠陥を映像化でき、欠陥のサイジングや形状の把握等欠陥をより具体的に確認する場合に効果的と思われるが、FBRプラントに適用するためにはより精密な探触子の開発と試験時間の短縮等の研究開発が必要である。

放射線を応用した試験法は、他の手法に比べて装置が大がかりになり、かつ線源部が重くなるため実用性に欠けるが、保温材を脱着しなくても外部から欠陥の映像化が原理的には得られることから、将来技術としては期待される。ただし、いかに受信部あるいはフィルムに対し線源以外からの放射線の影響を押えることができるかの技術開発と、ガイドレール等対象部位までの接近手段およびその周囲の試験空間の確保等が必要である。なかでも放射線CTは、超音波ホログラフィーや開口合成法と同じく欠陥を映像化できる所に特長があり、見出された欠陥をCRT上にイメージ画像として表現することができるのでこの面での活用が考えられる。

(4) カテゴリーⅣ（2次主冷却系配管）

カテゴリーⅣは常温かつ非放射線雰囲気であり、また他のカテゴリーに比べて試験ならびにアクセスのためのスペースは最もゆとりがある。

カテゴリーⅠ～Ⅲで適合可能な体積試験方法はいずれもカテゴリーⅣに適合でき、また従来技術も適用可能である。供用期間中における体積試験データや試験設備はできるだけ共通化することが品質管理上からも望ましいのでカテゴリーⅣの体積試験方法についてはカテゴリーと同じ手法を基本とし同一の基準で評価できるようにしておくことが良いと考える。

(5) ま と め

調査検討の結果、カテゴリーⅠ、Ⅱについては、電磁超音波法は従来の超音波法に比べてSIN比が低いが、比較的大きな寸法の欠陥が検出対象となることから環境への適合性および作業性の観点もふまえて電磁超音波法による体積試験方法の追求が必要と考えられる。

また、カテゴリーⅢ、Ⅳについては、試験環境がⅠ、Ⅱ程厳しくないため従来技術も含め種々の技術の適用が可能であるが、今後の開発動向もふまえて、要求される検出性や開発コストも考慮の上、プラントとの整合性を図りながら統一かつ合理的な方法を選定するのが望ましい。

第 5 章 結 言

高速増殖炉（FBR）供用期間中におけるナトリウム冷却材バウンダリに適する各種体積試験方法とその欠陥検出性について調査検討した。

- (1) FBRプラントにおいては、軽水炉の原子炉冷却材バウンダリの欠陥検出性の要求に比べて、検出すべき欠陥の寸法は、大きなものが許容され得る。したがって、FBRプラント供用期間中における体積試験方法はセンサ等の環境条件への適合性ととも、欠陥検出性に対する要求の度合からも合理的に定められる必要がある。
- (2) カテゴリーⅠ（原子炉容器のうちガードベッセルに囲まれた部分）は試験対象が厚肉で、試験環境は高温、高放射線レベル、狭隘と極めて厳しい。この試験環境に適合可能な体積試験方法は限定されるが、前述したように、比較的大きな内面欠陥を対象にすることが許されることから電磁気応用技術が適用できる可能性がある。しかし狭隘な作業空間での遠隔操作が必要であることから、極力軽装備な試験法にする必要がある。
- (3) カテゴリーⅡ（原子炉容器廻り1次主冷却系配管）の試験環境条件は、カテゴリーⅠと同様で、薄肉配管が対象となる。基本的にはカテゴリーⅠと同じ電磁気応用技術が適用できる可能性がある。
- (4) カテゴリーⅢ（カテゴリーⅡ以外の1次主冷却系配管）は放射線レベルも低く、またカテゴリーⅣ（2次主冷却系配管）は放射線を考慮しなくてよい。そしてカテゴリーⅢ、Ⅳとも常温で試験が行えることから、従来技術もしくはその改良技術でも適用可能であるが、FBR特有の保温構造や狭隘な配管引回し空間を勘案すると、試験に伴う関連作業が少なくすむ体積試験方法が望ましい。

以上センサー部のFBR環境への適合性を評価、検討したが検査機器も含めてこれらに関する研究開発は、単独に行うのではなく、今後ともプラント設計との整合性を図りながら進めていく必要があるであろう。