

「常陽」炉内供用中検査技術に関する検討
—ナトリウム中における炉心支持板検査装置概念の検討—
(研究報告書)

2004年3月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

2004

2004年3月

「常陽」炉内供用中検査技術に関する検討
— ナトリウム中における炉心支持板検査装置概念の検討 —
(研究報告書)

有吉昌彦*、中山王克**

要 旨

本報告書は、高速実験炉「常陽」における炉内供用中検査技術に関するものである。

「常陽」の原子炉構造は、高速炉特有の高温、高中性子束照射環境にあるため、熱疲労や照射脆化等の強度劣化要因がある。そのため、サーバランス試験や燃料出口温度監視、ナトリウム漏えい監視等による健全性確認を行っているが、これらは間接的な検査手段であるため、クラック等破損の初期段階で異常を検出することが困難である。そこで、新しい概念を導入して炉内供用中検査の手法を高度化し、炉内構造物の健全性を直接検査することを検討した。

「常陽」炉内供用中検査では、検査対象である炉内構造物が複雑な形状であること及び冷却材にナトリウムを使うことから、検査技術に遠隔操作でかつ多様な位置決め機能をもつマニピュレータを組み合わせて検討する必要がある。

本検討では、重要な炉内構造物である炉心支持板をナトリウム中で検査する方針とした。この炉心支持板検査装置概念は、非破壊検査用センサーとマニピュレータを搭載した検査用集合体を炉心最外周に装荷し、非破壊検査用センサーを低圧プレナム側壁にアクセスさせるものである。非破壊検査用センサーには、複数の圧電素子を直線状に並べたリニアアレイセンサーを適用し、探傷面に対して非接触で電子走査を行うことにした。マニピュレータは、人体の手術に使うロボット鉗子の技術を応用し、アームの移動と関節部の折り曲げによりセンサーを位置決めする概念とした。

本概念は今後詳細な検討が必要である。そして、炉内検査装置の開発を進め、「常陽」で実証していく予定である。

*核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

照射施設運転管理センター 実験炉部 技術課

**核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター

要素技術開発部 新技術開発グループ

JNC TN9400 2004-015
March, 2004

Study on In-vessel ISI for JOYO
—Core support plate inspection equipment under sodium —
Masahiko Ariyoshi*, Oukatsu Nakayama**

ABSTRACT

This report describes the feasibility study on the in-vessel inspection technique to be applied for the experimental fast reactor JOYO.

Since JOYO is a sodium cooled fast reactor and the core structure components are in high temperature and fast neutron irradiation environment, material strength yields to decrease due to heat fatigue and irradiation induced embrittlement. The present surveillance method of testing structural material mechanical property, monitoring subassembly outlet temperature and sodium leak are not sufficient to detect a small crack. Therefore, the direct inspection method to confirm the core structure integrity needs to be developed considering the recent innovative technology.

Since the core structure has a complicated form and components under sodium are not visible, the manipulator technology is essential which has various positioning functions. The core support plate was selected to be an important inspection item, and the method which combines ultrasonic non-destructive inspection technology and manipulator technology was examined.

In this study, the core support plate inspection equipment concept was examined on the assumption that the inspection of the core support plate was executed under sodium. The sensor for the nondestructive testing is built into the inspection assembly which is loaded in most outer core area, and can be accessed to a low-pressure plenum sidewall by the manipulator. The linear array sensor which arranges several piezo-electric elements were applied to the sensor for the nondestructive testing, and for scanning the inspection object in non-contact. It was assumed for the concept of the manipulator that the sensor was positioned by moving of the arm and bending the joint. The technology of the Master Slave Manipulator for Laparoscopic Surgery was applied for the manipulator.

A detailed examination is necessary for this concept in the future. And, the development of in-vessel inspection equipment is continued and proto-type will be demonstrated in JOYO.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,

Oarai Engineering Center, JNC

**Advanced Technology Division, New Technology Development Group,

Oarai Engineering Center, JNC

目 次

1. はじめに -----	1
2. 検討の目的 -----	2
3. 検討方針 -----	5
3.1 検討の経緯 -----	5
3.2 炉心支持板検査装置の検討方針 -----	5
4. 炉心支持板検査装置の検討 -----	6
4.1 炉心支持板検査装置の全体概念 -----	6
4.2 非破壊検査用センサー -----	10
4.3 マニピュレータの検討 -----	13
4.4 今後の進め方 -----	18
5. まとめ -----	19
6. おわりに -----	20
参考文献 -----	21

図リスト

図 2-1 「常陽」の原子炉構造鳥瞰図	3
図 2-2 「常陽」の原子炉構造断面図	4
図 4.1-1 「常陽」炉心支持構造物及び炉心支持板の構造	7
図 4.1-2 「常陽」原子炉構造と炉内検査装置の概念	8
図 4.1-3 リンク型マニピュレータの概念	9
図 4.2-1 リニアアレイセンサーの外形	12
図 4.2-2 斜角法UTセンサーの外形	12
図 4.3-1 炉心支持板検査におけるセンサー位置	16
図 4.3-2 炉心支持板検査におけるセンサー旋回角度とアーム長さ	17

1. はじめに

本検討は、高速実験炉「常陽」の原子炉構造物を対象とした炉内供用中検査技術に関するものである。

高速実験炉「常陽」では、炉内供用中検査として、サーベイランス試験片による機械強度の確認、燃料集合体出口温度監視、ナトリウム漏えい監視等が行われているが、これらは直接的な検査手法ではない。一方、超音波によるナトリウム中可視化技術や体積検査技術がFBR将来炉に向けて開発が継続されている。この技術と医療用機器等で開発されているマニピュレータ技術と組み合わせることにより、「常陽」で直接的な炉内供用中検査を行えるよう検討を実施した。

本検討により炉内検査装置の概念を構築するとともに、今後、詳細化のための検討が必要であり、そのための課題を整理した。

2. 検討の目的

高速実験炉「常陽」はナトリウム冷却型高速炉であり、原子炉構造は、原子炉容器、炉心支持構造物、炉心上部機構、回転プラグ等から構成される。「常陽」の原子炉構造を図2-1に示す。

「常陽」原子炉構造にはオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304、SUS316）が使用されており、十分な強度余裕を持って設計されている。また、「常陽」は軽水炉とは異なり、冷却材にナトリウムを使用するので、ナトリウム中の不純物濃度が適切に管理されていれば応力腐食割れは発生しにくい。一方軽水炉と比べて冷却材が高温になり、高速中性子照射を受けるので、照射クリープや脆化、熱疲労等の強度劣化要因がある。

現在実施されている ISI・異常監視技術について、例えば中性子照射の影響については、原子炉構造材のサーベイランス試験片を原子炉内に装荷し、加速照射の考え方で設計寿命末期までの照射を受けても材料強度上問題が無いことを確認している。但し、このデータは照射後試験で得られたものであり、「常陽」実環境下（高温、ナトリウム環境下で中性子照射を受けながら荷重がかかる）での挙動が確認できたわけではない。また、炉心出口計装や燃料集合体装荷位置による確認は間接的なものであり、炉心支持構造物に大きな変形がないことは確認できるが、クラック等破損の兆候段階で異常を検知することは困難である。

そこで、本検討では「常陽」の構造強度上問題が無いことを直接的な手段で確認するための検査技術を検討するものである。

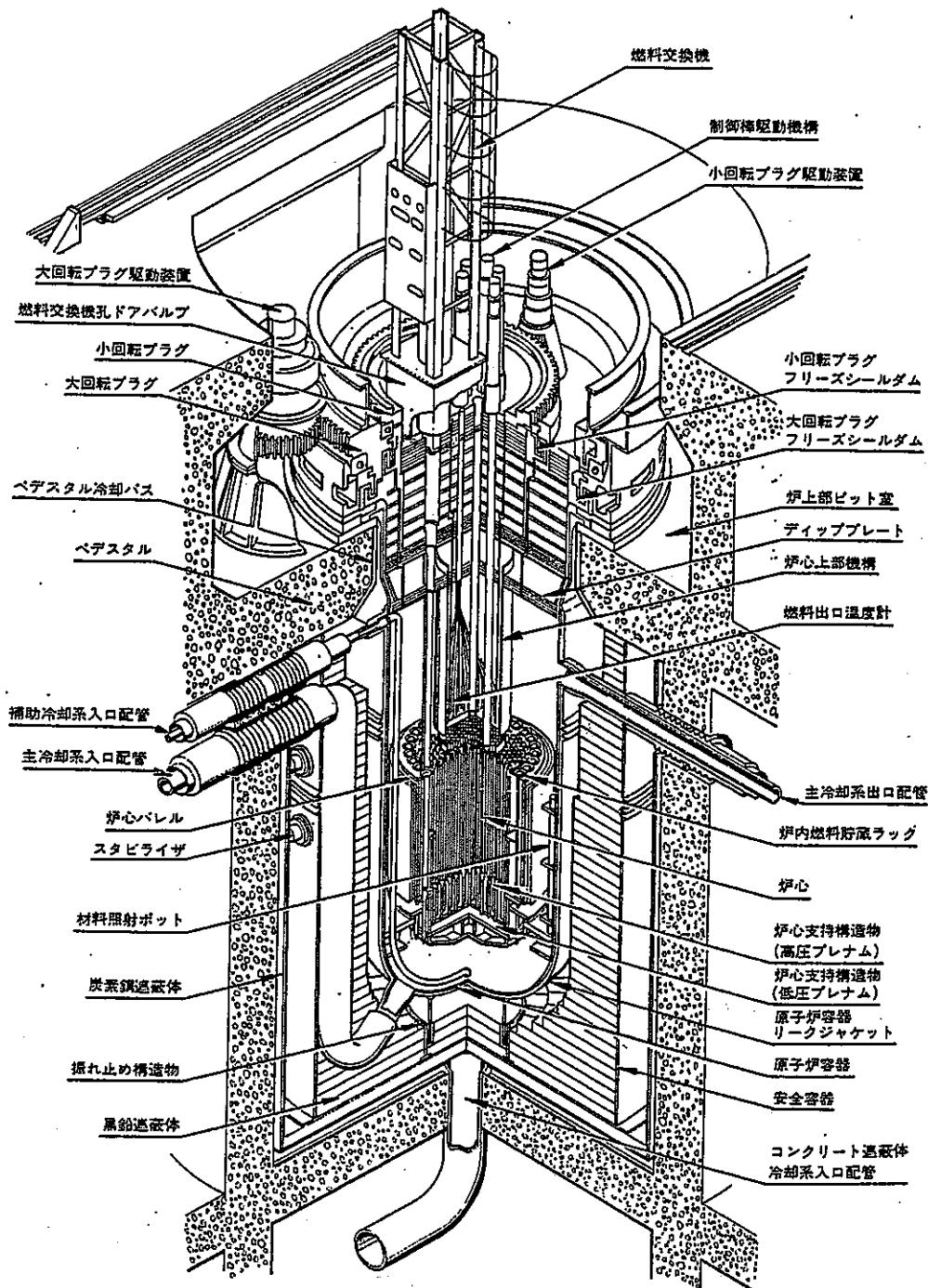


図 2-1 「常陽」の原子炉構造鳥瞰図

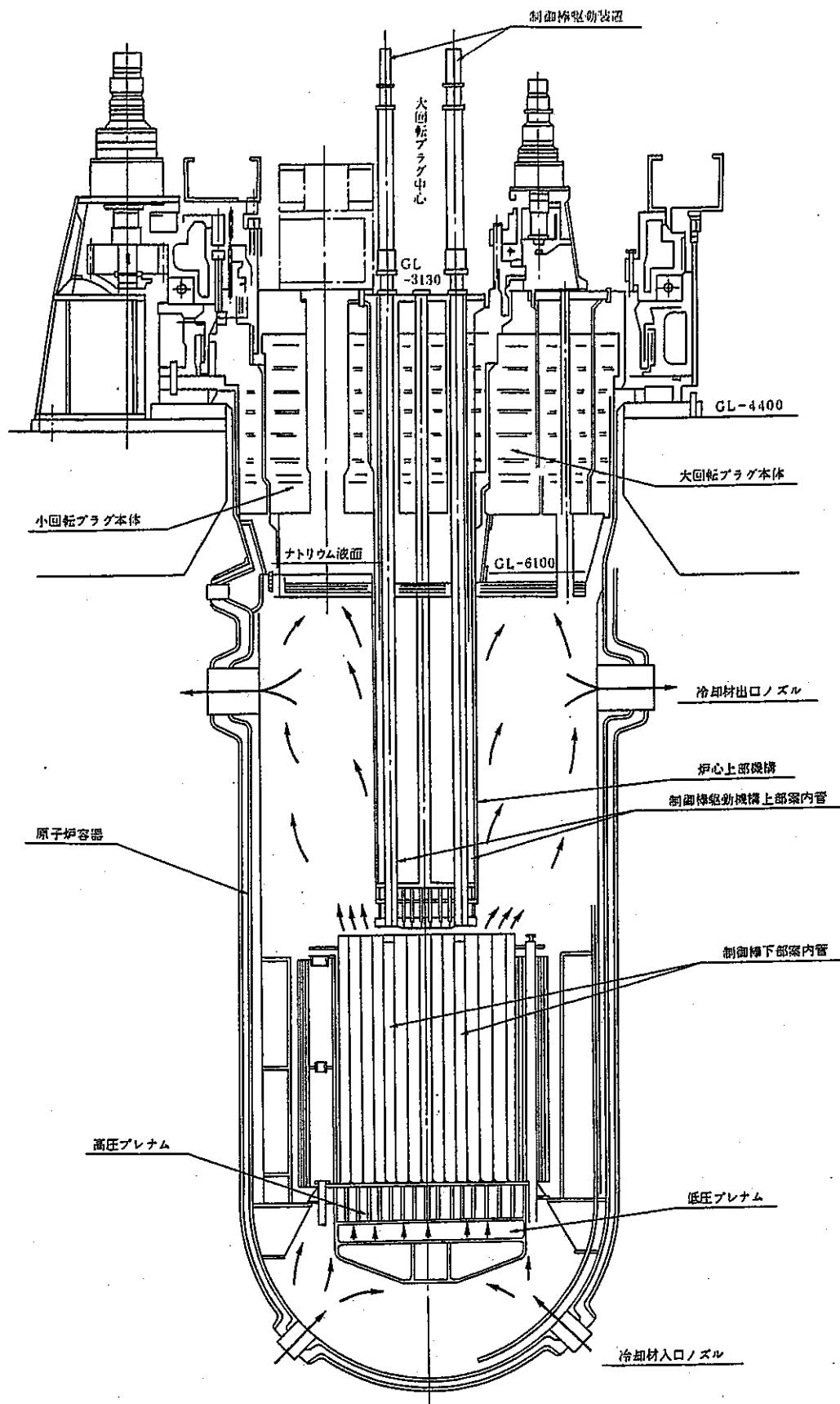


図 2-2 「常陽」の原子炉構造断面図

3. 検討方針

3. 1 検討の経緯¹⁾²⁾

「常陽」における炉内供用中検査では、表面検査と体積検査の両方を対象とする。

検査技術はナトリウム環境下で適用するものとカバーガス中で適用するものに分ける。カバーガス中の検査技術はナトリウム中検査技術に比べて実績が多く、欠陥検出性能が高い。これを通常ナトリウムに浸漬されている部分に適用するためには、ナトリウムをドレンする必要があるが、原子炉容器内の全てのナトリウムをドレン（全ドレン）する場合は、全炉心退避等プラントに対する影響が大きい。一方、炉心構成要素の自重を支える炉心支持板は、原子炉容器底部に位置することから常時ナトリウムに浸漬され、直接的な検査が行いにくい。そこで、本検討では、炉心支持板を検査対象に選定し、直接的な検査手法を構築することにした。

炉心支持板はその下部フランジを原子炉容器の炉心構造物取付台に搭載して固定されるが、下部フランジや炉心構造物取付台にはセンサーを貫通させる孔が無い。そのため、炉心支持板を検査するための非破壊検査用センサーは、炉心部から連結管を通して低圧プレナム内側から検査対象部位にアクセスさせることにした。

非破壊検査用センサーは、一般に欠陥検出精度の良い接触法の超音波非破壊検査（以下、UT）センサーの適用が望ましいが、極力ナトリウムをドレンしないため、ナトリウムを超音波伝播媒体に活用して非接触で探傷が可能なりニアアレイセンサー³⁾についても検討することにした。また、非接触で欠陥検出分解能が高いことから、高温で複雑な形状の機器が多いFBRへの適用が期待できるレーザー超音波の適用を検討した。この検査技術は、従来の圧電素子に比べて微小な亀裂から大きな亀裂まで適用範囲が広いというメリットがあるが、炉心支持板検査に適用するためには、ナトリウム全ドレンか、あるいはレーザー光路のみ部分的にナトリウムを排除する概念と組み合わせる必要がある。

3. 2 炉心支持板検査装置の検討方針

前項3.1に示す経緯を踏まえ、炉心支持板検査装置の検討方針を以下のとおりとした。

- 原子炉容器にナトリウムが充填され、炉心燃料が装荷された状態で炉心支持板を検査できる装置を検討する。
- 非破壊検査用センサーには、ナトリウム中検査が可能なりニアアレイセンサーを適用し、マニピュレータ技術を含めて装置全体の概念を検討する。
- レーザー超音波による非破壊検査技術については、開発途上であり、課題も多いことから今後の技術動向を見ながら長期的に検討していく位置づけとする。

4. 炉心支持板検査装置の検討

4. 1 炉心支持板検査装置の全体概念

(1) 炉心支持板の概要

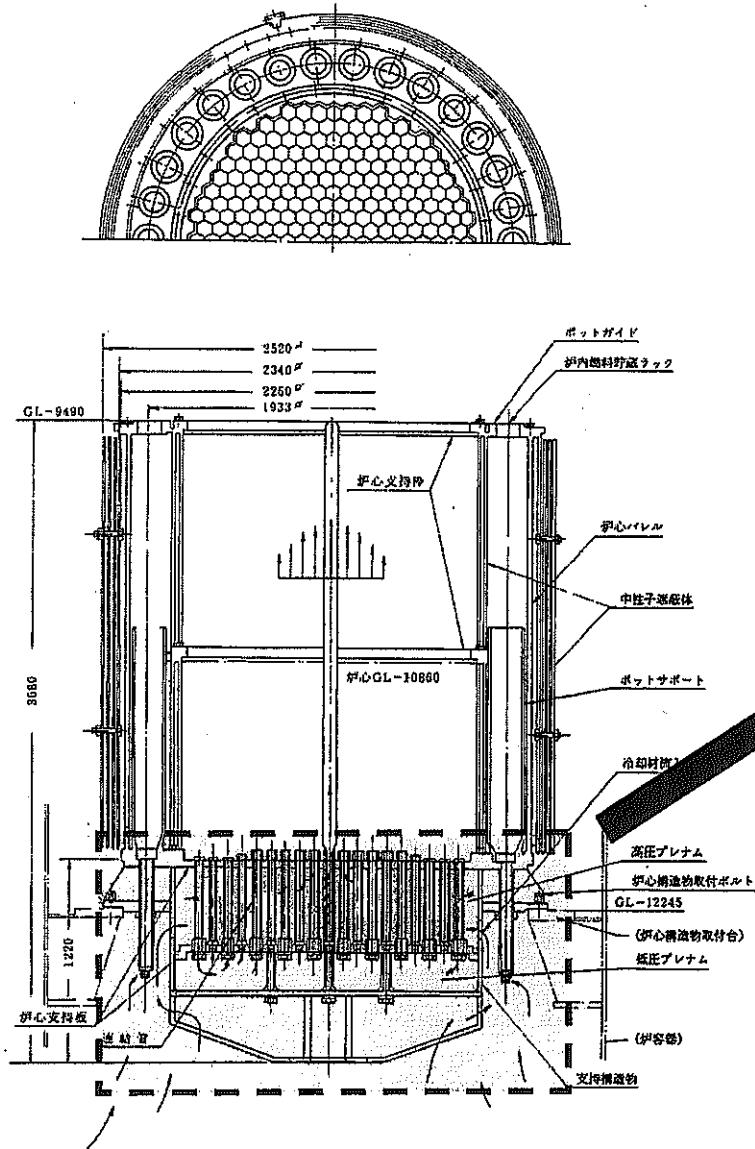
「常陽」炉心支持構造物と炉心支持板の構造を図 4.1-1 に示す。

炉心支持板は、炉心構成要素の荷重を受ける重要な構造物であり、また、高圧プレナム、低圧プレナムを形成することにより炉心構成要素に冷却材を供給する機能を持っている。

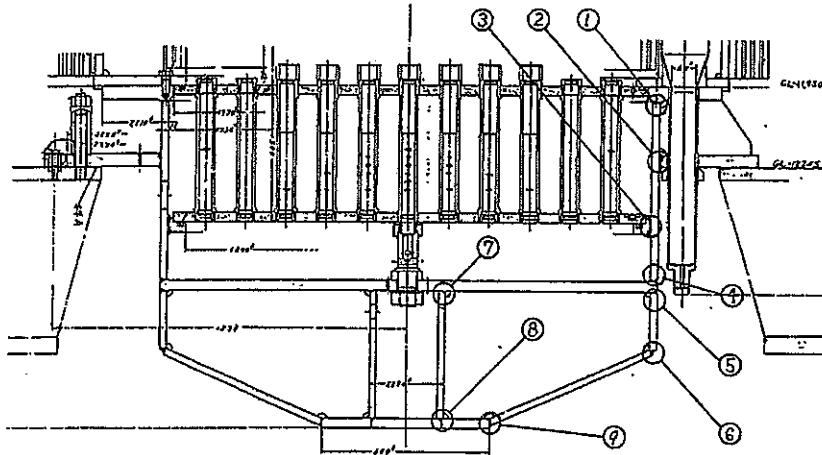
炉心支持板には、図 4.1-1(2)に示す①～⑨の溶接部がある。その中で①～④は炉心の荷重を受けて支える部分であり、また高圧、低圧プレナムのバウンダリを形成する重要な溶接部である。そこで、「常陽」炉内供用中検査では、図中の①～④を検査対象として検討することにした。

(2) 炉心支持板検査装置の全体概念

炉心支持板検査装置は、原子炉容器上部から炉内に設置する。炉心部分には他の炉心構成要素と同じ形状をした検査用集合体を装荷し、その先端からセンサーを出し、連結管を通して検査対象部位にアクセスさせる。そのため、検査用集合体にはマニピュレータを搭載する。炉心支持板検査装置の概念図を図 4.1-2 に示す。そして、リンク型マニピュレータ概念の一例を図 4.1-3 に示す。この概念は、低圧プレナム内でリンク機構を開閉することによりセンサーを胴板にアクセスさせるものである。



(1) 炉心支持構造物及び炉心支持板の構造



(2) 炉心支持板の溶接部位

図 4.1-1 「常陽」炉心支持構造物及び炉心支持板の構造

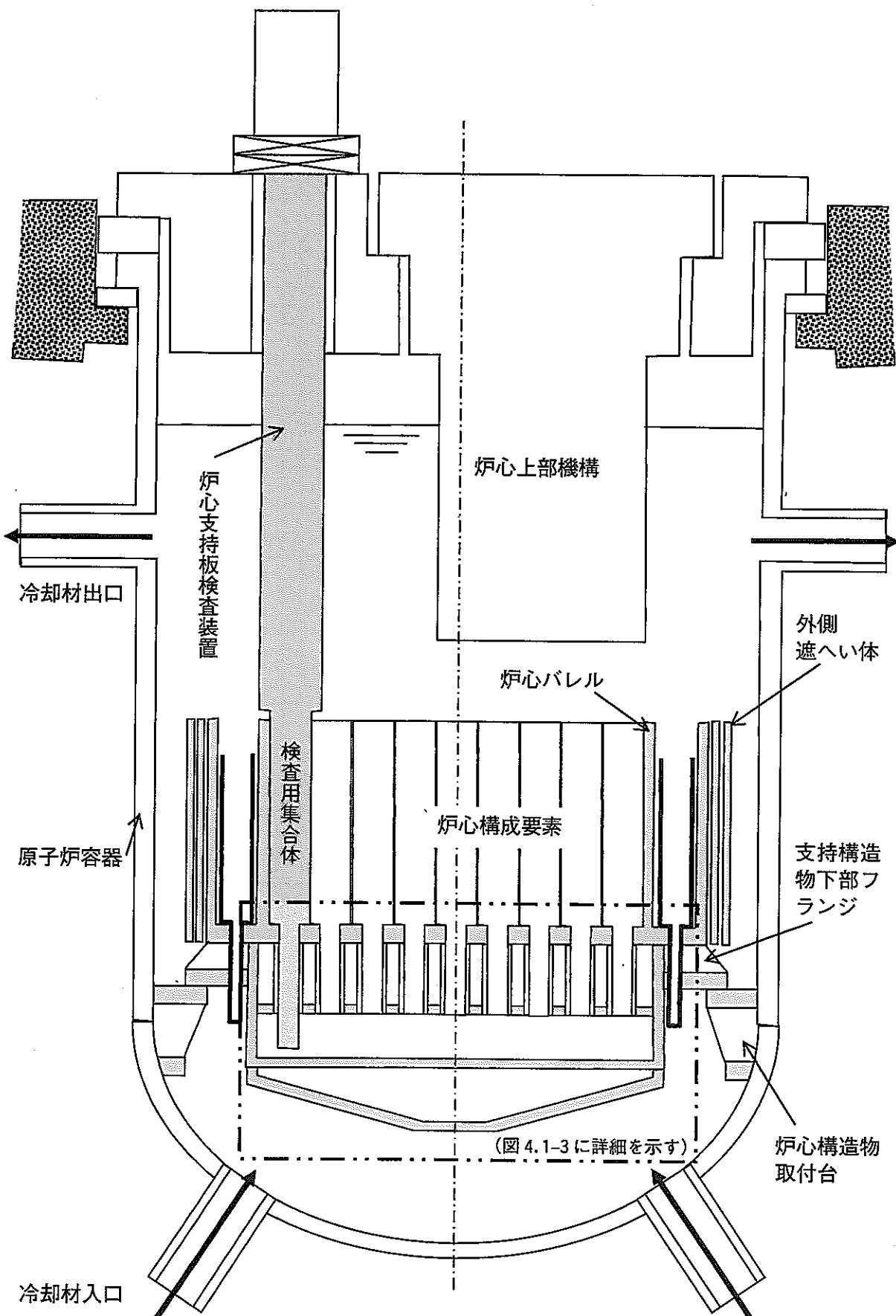


図 4.1-2 「常陽」原子炉構造と炉内検査装置の概念

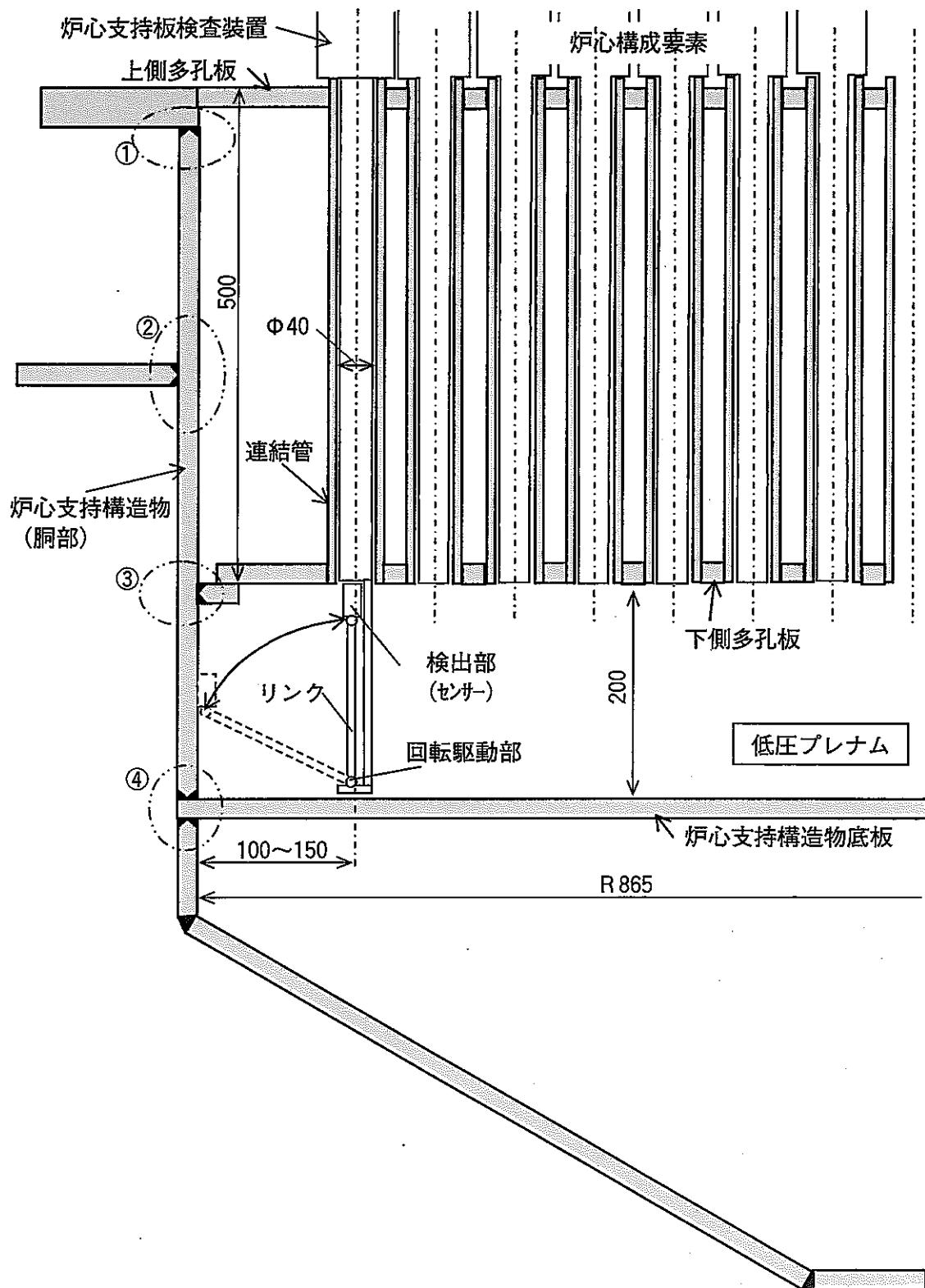


図 4.1-3 リンク型マニピュレータの概念

4. 2 非破壊検査用センサー

炉心支持板検査では、リニアアレイセンサーと接触式UTセンサーを適用する。

リニアアレイセンサーは、接触式UTセンサーに比べて効率的な検査が行える。

接触式UTセンサーは、あらかじめ定めた方向へ超音波が出るようなっていて、検査部位に応じて適切な入射角の探触子を選定し、探傷面上で機械的にセンサーを動かして走査する。一方、リニアアレイセンサーは圧電素子を直線上に並べて、各素子からの超音波発信時期を制御することにより電子走査を行うので、検査範囲を柔軟に設定でき、検査時間も短縮できる。

そこで、炉心支持板検査では、最初にリニアアレイセンサーを使って欠陥の有無を確認し、次に欠陥の存在が疑われる場合について接触式UTセンサーで詳細な検査を行う方針とする。

(1) リニアアレイセンサー

炉心支持板検査に適用するリニアアレイセンサーは、検査用集合体から連結管を通して低圧プレナム側壁にアクセスさせる。検査用集合体のエントランスノズル部の内径が33mm程度であるため、図4.2-1に示すとおり、リニアアレイセンサーの寸法は、約20mm×約20mm×約100mmにする必要があり、その場合の重量は約500gと想定される。探傷面に対する位置決めについて、超音波発信面が探傷面と平行になるようにし、その距離を10～30mmにする。

上記のリニアアレイセンサーを実現するためには、圧電素子の個数と超音波の受発信性能、ケーブル引き回しスペース等について、今後試作を含む検討が必要である。また、炉心支持板は複雑な構造をしているため、上記の試作試験で確認したセンサーの特性を踏まえてモックアップ試験等で超音波伝播挙動を確認し、欠陥検出性能を評価する必要がある。

なお、水中で使用されているリニアアレイセンサーの仕様を調査したので、参考用に以下に示す。

- ① 圧電素子：高感度P Z T（常温用）
- ② 要素厚みと幅の関係： $w/t = 0.6$ 近辺（最も効率よく振動できる）。
- ③ 周波数：1～5MHz
- ④ 要素の数：用途に合わせて設定する。
- ⑤ 各要素の間隔：超音波波長の1/2以下（水中5MHz時では0.15mm以下）
- ⑥ 音響整合層：理論的に1/4波長音響整合法
- ⑦ パッキング材：タンクステン粉や酸化鉄粉など
(音響インピーダンスを考慮して選択する)

(2) 接触式斜角法UTセンサー

前項(1)のリニアアレイセンサーで欠陥の存在が疑われた場合、接触式UTセンサーを用いて検査を行う。この場合はセンサーを探傷面に軽く押し付けるこ

とにより接触させる。通常の接触法UTではセンサーと探傷面に超音波を伝播させるためのカップラントを塗布するが、本検査ではナトリウム中で行うことから、探傷面とセンサーの間隙に満たされたナトリウム薄膜により超音波伝播させることになる。

接触式UTには垂直法と斜角法UTがある。垂直法は探傷面に対して垂直に超音波を入射するが、斜角法は探傷面に対して超音波ビームを斜めに入射させるものである。炉心支持板検査ではUTセンサーのアクセス性が限られ、垂直法では超音波が届かない部分があるので、斜角法UTを適用する必要がある。

図4.2-2に斜角法UTセンサーの外形を示す。この図は、市販の斜角法UTを参考に、「常陽」炉心支持板検査の条件における寸法条件に適合するようにしたものである。

斜角法UTの具体的な適用方法について、検討した内容を以下に示す。

① 屈折角：45°～80°（縦波を生じないので好都合）

- ・ 板厚が厚い場合 45°程度、薄い場合 70°～80°（超音波伝播時の減衰があるため）、目安として、70°（40mm以下）、45°（40mm以上）
- ・ 余盛エコーを少なくするために、屈折角の大きい探傷子を用いる。

② 周波数：1～5MHzを用いる

- ・ 板厚 20mm～100mm 以上 : 2MHz(2.25MHz)
- ・ 板厚 20mm 以下、精密検査 : 4～5MHz
- ・ 超音波減衰が著しい場合 : 1MHz

③ 走査方法

- ・ 溶接線に対して、垂直に前後走査、左右走査、振子走査等がある。
- ・ 上記走査方法を組合せた方法として、ジグザグ走査方法である。

④ 溶接部の検査方法

- ・ 突合せ溶接部：余盛がある場合は、主として斜角法を適用する。
- ・ 隅肉溶接部：溶着金属が見える母材の表面を探傷面とする場合に斜角法、その反対面にアクセスできる場合は、垂直法を適用する。
- ・ 現在検討しているアクセスルート(前項 3.1 参照)では、上記の両方ともアクセスできないが、将来的に自由度の高いマニピュレータを構築できれば検査方法についても見直すものとする。

⑤ その他

- ・ 垂直探傷に比較すると欠陥検出能力が著しく低い。
- ・ 薄板（5mm）の場合、板波探傷を用いる。
- ・ その他の探傷方法として、2次クリーピング法、縦波焦点型探傷法等があり、斜角法と組合せて検査を行うことが考えられる。

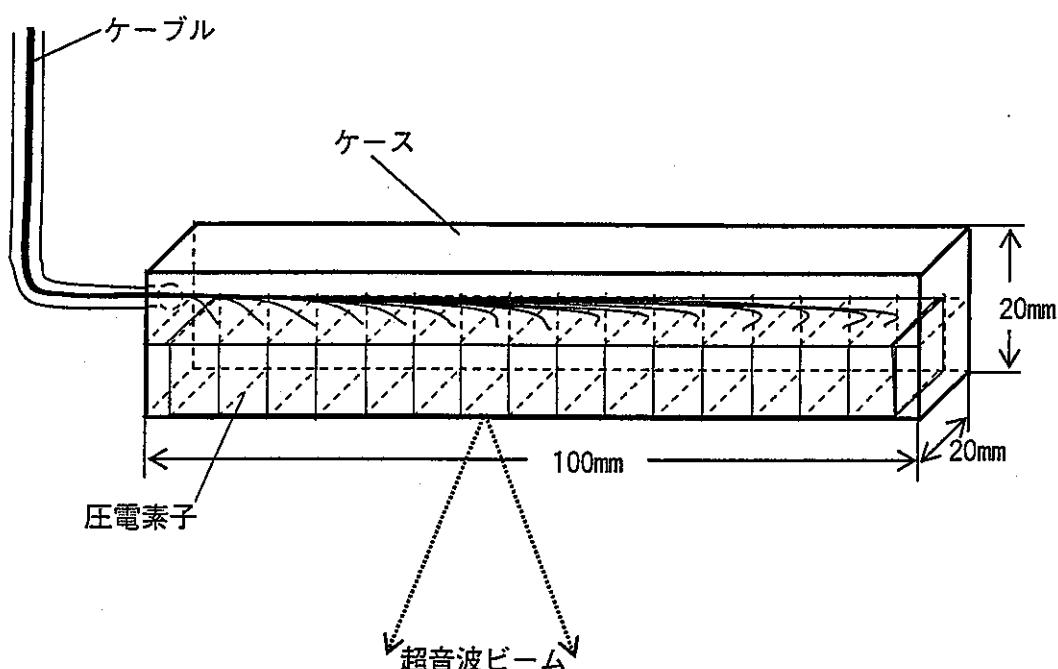


図 4.2-1 リニアアレイセンサーの外形

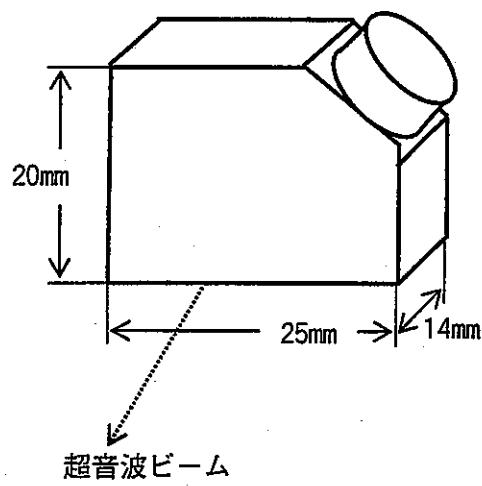


図 4.2-2 斜角法UTセンサーの外形

4. 3 マニピュレータの検討

(1) マニピュレータの検討条件

前項4. 1の炉心支持板検査装置において、炉心部に装荷した検査用集合体の先端からアームを延ばし、連結管内を通して低圧プレナム側壁にセンサーを接近させるためのマニピュレータの検討条件を整理した。

a. 検査用集合体

検査用集合体は、炉心支持板検査装置のうち、図4.1-2の炉心バレルに収納される部分である。検査用集合体の検討条件を以下に示す。

① 装荷位置

1回の装荷で極力広範囲の検査ができるのが望ましい。炉心中心に検査用集合体を装荷して旋回角度を360度にすれば1回の装荷で低圧プレナム側壁を全て検査できるが、アームの長さが長くなり、検査用集合体の限られた収納スペースでは実現が困難と思われる。そこで、アームの長さを極力短くするため、検査用集合体の装荷位置は炉心最外周（第9列、第10列の遮蔽集合体装荷位置）とする。

なお、検査用集合体の装荷位置を変更するためには、検査用集合体を装荷位置から引き上げて回転プラグをまわす必要がある。そのため、炉心支持板検査装置の燃料交換孔から上の部分には、検査用集合体の昇降と回転を可能とする駆動機能を持たせる。

② 寸法条件

検査用集合体は、通常この位置に装荷される遮蔽集合体と同じ形状にする必要がある。主要部分の寸法を以下に示す。

全長	2970mm
ラッパ管パッド部外対面間寸法	81.2mm
ラッパ管外面対面間寸法	78.5mm
ラッパ管内面对面間寸法	74.7mm
エントランスノズル外径	38mm(先端部)
内径	33~27mm

③ 検査用集合体の装荷方向

検査用集合体は、他の炉心構成要素と同様六角形断面であり、装荷する時の角度が1/6回転ずつ回転する可能性がある。そこで、装荷位置によって非破壊検査用センサーを保持するアームの旋回中心が検査対象部位の方向に向くよう、装荷角度を予め指定するものとする。

b. 非破壊探傷センサーの動作条件

前項4.2に示す非破壊検査用センサーの動作の内容について、以下に示す。

① センサーの位置

リニアアレイセンサーは、検査対象の側壁から 10~30mm の所に位置決めする。上下動作について若干の位置調整は行うが、基本的に走査はしない。斜角法UTセンサーについては、低圧プレナム側壁に軽く押し付けるようにして接触させ、上下方向の走査を行う。センサーの位置について、図 4.3-1 に示す。

② センサーの旋回角度

センサーの旋回角度について、各装荷位置における旋回動作により低圧プレナム側壁を全てカバーするためには、±(35+30) 度の±65 度とする必要がある。本検討では、余裕を見込んで±90 度の 180 度とする。

なお、リニアアレイセンサーは、1箇所の旋回位置で探傷できる範囲は、あまり大きくないので、探傷範囲をオーバラップさせて抜けが無いようにするためには、旋回動作の位置決めピッチをセンサー自身の幅と同程度にする必要がある。センサーの旋回角度について、図 4.3-2 に示す。

③ アームの長さ

アームの長さは、検査用集合体を装荷する位置（挿入する孔の位置）と旋回角度によって異なる。検査用集合体中心位置から低圧プレナム側壁表面までの距離は、130mm から約 190mm である。アームの長さについて、図 4.3-2 に示す。

④ センサーの位置検出

マニピュレータ旋回角度、アーム長さよりセンサー位置を検出する。また、センサー自身でも移動中に超音波を出して側壁からの距離を検出する。

c. 環境条件

① 雰囲気条件

炉心支持板検査は、ナトリウム環境下で行うものとする。なお、冷却材液位を燃料頂部まで下げた状態で検査用集合体の装荷位置を変更する場合は、マニピュレータ部分がカバーガス雰囲気に露出することになる。微細な部分にナトリウムが残留し、固化すると故障の原因になるので、この時の液位は通常液位とする。

② 温度

冷却材温度は約 200°C とする。

「常陽」の燃料交換時の冷却材温度は 250°C であるが、非破壊検査用センサーの超音波受発信特性の観点から少しでも低い温度にする。

③ 放射線

原子炉停止から炉心支持板検査開始までの時間を置くことにより、冷却材中の放射能を減衰させる。炉心構造物の放射化については、データがな

いので、試験装置の設計検討段階で炉内に検出器を挿入して実測を試みる。炉心支持板検査を実施する時は炉心燃料集合体が装荷されたままであるが、検査用集合体の装荷位置は炉心最外周であり、反射体による遮蔽効果が期待される。

(2) マニピュレータの検討

前項(1)の要求条件を踏まえ、マニピュレータの候補概念について調査した。その結果、人体の手術に使うロボット鉗子⁴⁵⁾を応用した概念が有望である。ロボット鉗子は、大きな素早い動作は従来どおり医師が行うが、先端の作業部（ハサミ等）の微細で難しい角度からの操作にロボット技術を応用したもので、手元の操作部に動力源（モータ等）をおいてワイヤで作業部に動力を伝達している。動力源を外に置くことに関して、ロボット鉗子が万一故障し、人体内で先端の作業部が開いたままになると取り出せなくなることを考慮している。この時は動力を伝達する機構（ギア、減速機等）を手動で回して閉じることができる。

ロボット鉗子の技術を応用したマニピュレータ概念について、検討した内容を以下に示す。

- アームと関節を組み合わせることによりマニピュレータを構成する。低圧プレナム内でアームを横に折り曲げることによりセンサーを側壁に近づける。関節の位置と数により、センサー位置と側壁との距離を調整することができる。
- アーム及び関節の動力源は作業員がアクセスできる場所に置き、万一の故障時には手動で操作してマニピュレータを検査用集合体に収納できるようとする。動力はワイヤ等で伝達するが、炉上部プレナム領域を経由すると動力伝達経路が長くなり、熱膨張等の影響を受けるので、ロッド等の剛性の高い動力伝達機構を考える必要がある。
- マニピュレータは、ナトリウム中設置を考慮して全体をシールする。屈曲、伸縮等の機構部にはベローズのようなシールを用いる。なお、マニピュレータを一度ナトリウム外に取り出した時は、ベローズ表面に付着したナトリウムが残留、固化する可能性があるので、再装荷に備えた洗浄計画等を検討する必要がある。
- センサーと検査対象（低圧プレナム側壁）との相対位置は、マニピュレータのアーム長さ、関節の開き角度、全体の旋回角度等により検出する。しかし、このようなメカニズムにはガタや曲がりがあるので、センサー自身で超音波を発して概略位置を検知する方向で考える。

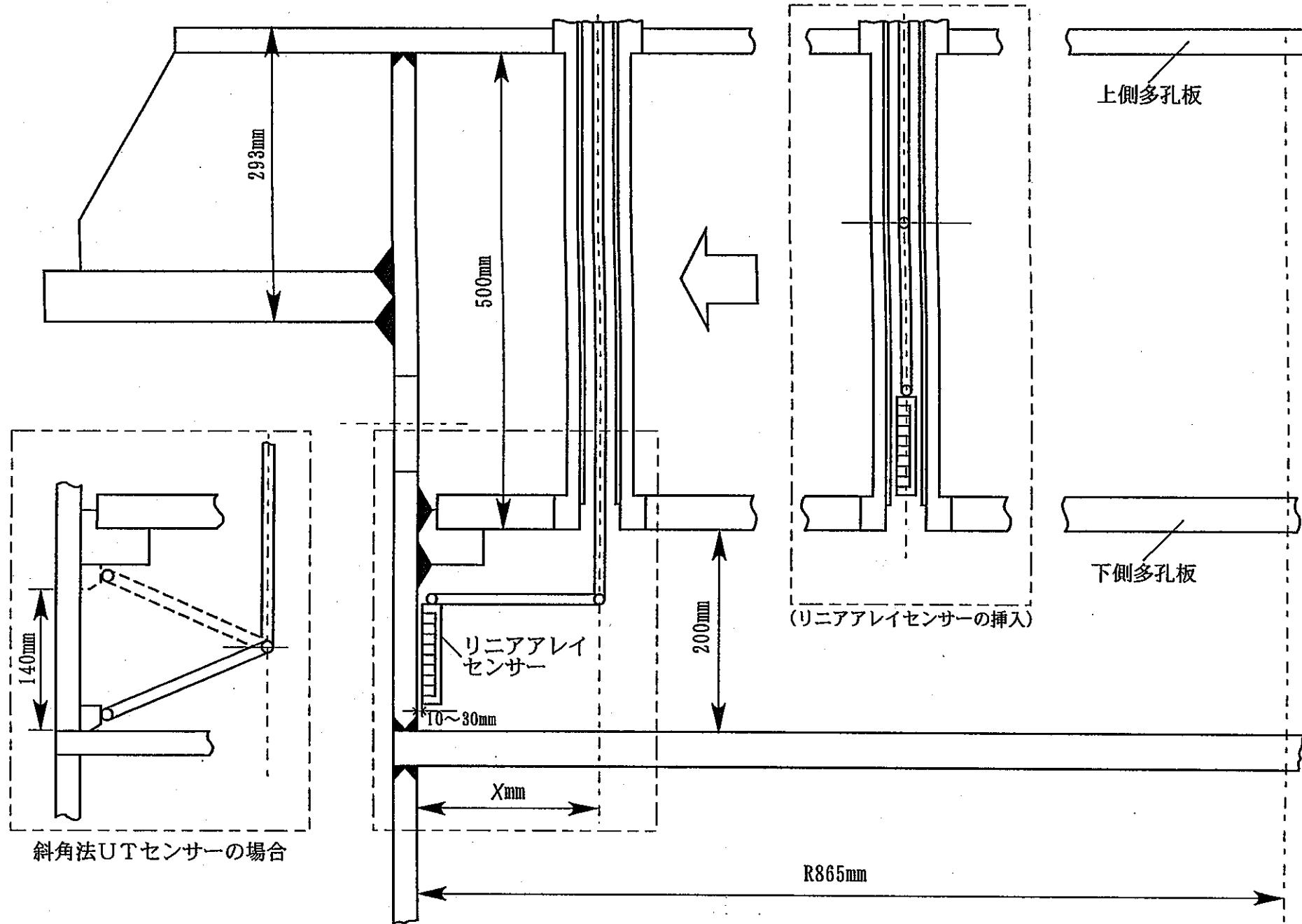


図4.3-1 炉心支持板検査におけるセンサー位置

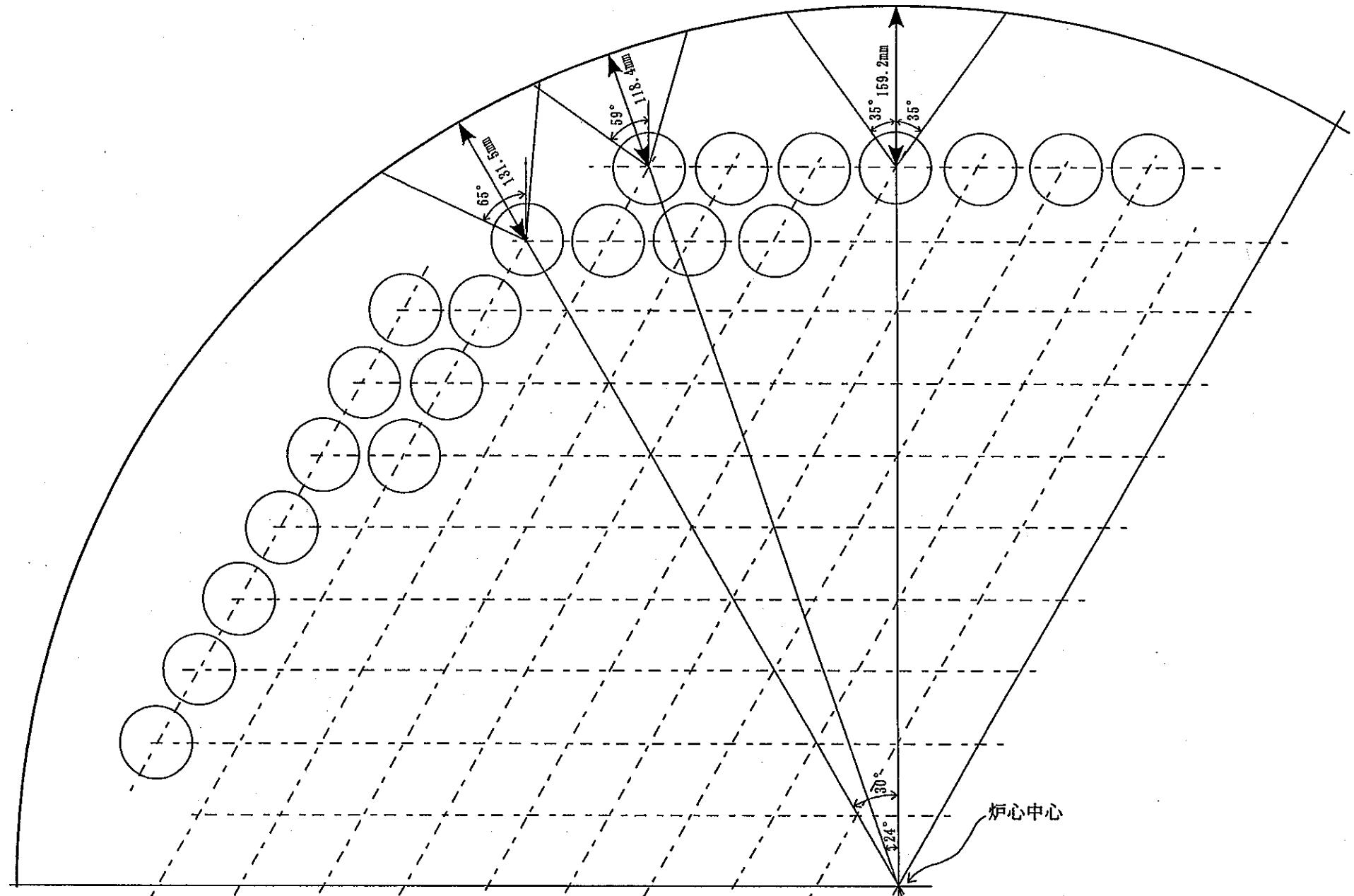


図4.3-2 炉心支持板検査におけるセンサー旋回角度とアーム長さ

4. 4 今後の進め方

前項 4.2 と 4.3 に示した検討内容を踏まえ、今後の検討の進め方について以下に整理した。

- 前項 4.2 に示すリニアアレイセンサーは、「常陽」炉内検査の寸法条件に基づいて設定したものであり、現状実績があるものではない。今後、欠陥検出性能や製作性等について試作を含む検討が必要である。
- 炉心支持板は複雑な形状であり、更に非破壊検査用センサーのアクセス位置が限られるので、解析や実験により超音波伝播挙動を評価しておく必要がある。そして、その結果を踏まえて非破壊検査用センサーを具体化し、その動作条件を検討する。
- マニピュレータやセンサーの検討条件が明確でないものについて、実機で実測する。例えば、検査用集合体やマニピュレータが炉内で受ける放射線照射量を把握するため、原子炉停止中の炉心最外周（第 9 列、第 10 列の遮蔽集合体装荷位置）や低圧プレナム部の放射線強度を測定する。また、検査時のセンサー位置決めを正確に行うため、検査用集合体位置から低圧プレナム側壁までの距離を検査開始前に実測する。
- マニピュレータについては、放射線や熱の影響を考慮した設計検討や、耐熱・耐放射線を有する部品の検討等を行う必要がある。それを踏まえて構成部品の配置、動力伝達機構等を具体化する。そして、故障時の対応に重点を置いた評価を行う。

5. まとめ

「常陽」炉内供用中検査において、原子炉にナトリウムを充填した状態で炉心支持板を検査するための装置を検討した。

炉心支持板検査装置は、回転プラグ上に設けた昇降・回転駆動装置により燃料交換孔を介して検査用集合体を炉心最外周（第9列、第10列の遮蔽集合体装荷位置）に装荷し、検査用集合体に収納した非破壊検査用センサーを炉心部から連結管を通して低圧プレナム側壁にアクセスさせる概念とした。非破壊検査用センサーには、複数の圧電素子を直線状に並べたリニアアレイセンサーを適用し、探傷面に対して非接触で電子走査を行うことにした。センサーを位置決めするマニピュレータは、人体の手術に使うロボット鉗子の技術を応用し、アームを関節部で折り曲げながら挿入することにより低圧プレナム内でセンサーを横方向に移動させる概念とした。

検査装置全体は原子炉容器上部から燃料交換孔を介して炉内に設置する。原子炉容器上部の部分には、検査用集合体の昇降及び回転動作の機能を持たせる。検査用集合体の装荷位置を変える時は、炉心装荷位置から引き上げた状態で回転プラグを回し、再装荷時は検査用集合体の装荷角度を調整して、アームの旋回中心が検査対象部位の方向に向くようにする。

本報告書におけるリニアアレイセンサー等は、炉心支持板検査装置の概念検討のため、「常陽」炉内供用中検査の条件に基づいて仮設定したものである。このセンサーの実現性（製作性）や欠陥検出性能は、試作試験等を踏まえて評価する必要がある。そして、マニピュレータについては、放射線や熱の影響を考慮して構成部品とその配置、動力伝達機構等を具体化する。その結果を踏まえて、炉心支持板検査装置の全体概念を見直すとともに故障時の対応に重点を置いた評価を行う。

6. おわりに

本検討により、炉心支持板検査装置の概念を構築することができた。今後概念を詳細化し、欠陥検出性能評価を踏まえて「常陽」炉内供用中検査を実現させたい。

なお、マニピュレータ技術に関する検討例、ロボット鉗子技術を応用した炉心支持板検査装置向けマニピュレータ概念に関するアイデア、リニアアレイセンサーに関する情報を提供していただいた（株）東芝の須藤肇殿、松日楽信人殿、小川秀樹殿、小舞正文殿に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 有吉昌彦, 石田公一, “常陽炉内供用中検査技術に関する検討—ナトリウム中非破壊検査に関する技術調査と適用概念の検討—”, JNC TN9400 2002-010, (2002)
- 2) 有吉昌彦, “常陽炉内供用中検査技術に関する検討—レーザー超音波技術とマニピュレーション技術を用いた炉内検査方法の検討—”, JNC TN9400 2003-027, (2003)
- 3) 小舞正文, 他 “FBRナトリウム中体積検査技術の開発（その2）” 日本原子力学会「1998年秋の大会」 F26, p. 353 (1998)
- 4) 神野誠、松日楽信人, 他, “腹膜鏡下手術支援用一体型マスタンプマニピュレータの開発”, 日本機械学会[No.01-04]ロボティクス・メカトロニクス講演会‘01講演論文集, 2A1-D2, (2001)
- 5) 砂押貴光, 神野誠, 松日楽信人, 他, “腹膜鏡下手術支援用一体型マスタンプマニピュレータの開発—動物実験による評価—”, 第19回日本ロボット学会学術講演会, 3M14, (2001)