

「常陽」炉内供用中検査技術に関する検討
ー 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 ー
(研究報告書)

2003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)

2003

「常陽」炉内供用中検査技術に関する検討

ー 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ー (研究報告書)

有吉昌彦

要 旨

本報告書は、高速実験炉「常陽」における供用中炉内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、高速中性子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、サーベイ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供用中炉内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」供用中炉内検査では、検査対象である炉内構造物が複雑な形状をしてい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持つマニピュレータを組み合わせる必要がある。

本検討では、重要な炉内構造物である炉心支持板を検査対象に選定し、超音波非破壊検査技術とマニピュレータ技術を組み合わせて、超音波探触子を炉心支持板内側から接触させることにより、ナトリウム充填状態で炉心支持板を検査する装置の概念を考案した。さらに、非接触で遠隔操作性に優れるレーザー超音波技術を活用した検査技術についても検討した。

また、レーザー超音波技術に関する文献調査の結果、本技術が十分な欠陥検出精度を有し、光ファイバケーブルにより遠隔操作に必要なレーザーを伝送可能であることを確認した。これにより、供用中炉内検査に適用できることがわかった。

今後、検査技術とマニピュレータ技術の動向を踏まえ、炉内検査装置の開発計画を進め、「常陽」で実証していく予定である。

Study on In-vessel ISI for JOYO

— Laser based ultra sonic non-destructive inspection and manipulation technique —

Masahiko Ariyoshi

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 monitoring are not sufficient to detect abnormalities with 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.

As a result, the concept of core support plate inspection equipment under sodium condition was obtained by contacting ultrasonic sensor from inner side of the core support plate. Another concept was examined by applying laser based ultrasonic inspection technology. This method has advantage of remote control operation because of no-contacting inspection and it was confirmed to be feasible for JOYO in-vessel inspection method from the viewpoint of defective detection accuracy and laser transmission ability by means of fiber cable. This is promising for in-vessel inspection without sodium draining.

Based on this study, the development of in-vessel inspection equipment is continued and the proto-type will be demonstrated in JOYO.

目 次

1. 概要	1
2. 検討の目的	2
3. 供用中炉内検査に適用する技術と検査内容	6
4. 炉心支持板検査装置の検討	11
4.1 「常陽」炉心支持板の概要と検査対象箇所	11
4.2 炉心支持板検査装置の概念	13
4.3 レーザー超音波技術の応用	17
4.4 まとめと検討課題	22
5. あとがき	23
参考文献	24

表リスト

表 2 - 1	「常陽」原子炉構造における強度劣化要因と I S I ・異常監視技術	3
表 3 - 1	フェニックスにおける原子炉構造の検査技術	8
表 3 - 2	「常陽」供用中炉内検査における検査技術	9
表 3 - 3	「常陽」供用中炉内検査の内容	10

図リスト

図 2 - 1	「常陽」の原子炉構造	4
図 4 . 1 - 1	「常陽」炉心支持板の構造	12
図 4 . 2 - 1	「常陽」炉心支持板検査装置の概念	15
図 4 . 2 - 2	リンク型マニピュレータの概念	16
図 4 . 3 - 1	ナトリウム局所排除概念（レーザー超音波検査装置との組合せ）	20
図 4 . 3 - 2	ベローズ型マニピュレータの概念	10

1. 概要

本検討は、高速実験炉「常陽」の原子炉構造物の供用中炉内検査技術に関するものである。

高速実験炉「常陽」では、供用中炉内検査として、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おり、また最近ではレーザー超音波による非接触、遠隔性を有する検査技術が開発されてきている。そこでこれらを活用し、マニピュレータ技術と組み合わせることにより、「常陽」で直接的な供用中炉内検査を行なえるよう本検討を実施した。

これらの技術は開発途上であり、「常陽」に適用するためには技術課題を解決していく必要がある。本検討では「常陽」にとって有望な技術の現状を調査し、その結果を踏まえて適用概念を具体化するとともに、今後の検討課題を抽出した。

2. 検討の目的

「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、しゃへい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（酸素等）濃度が適切に管理されていれば軽水炉のような応力腐食割れは発生しにくい。一方軽水炉と比べて高温かつ高速中性子照射を受けるので、下記のような強度劣化要因がある。

- ① 高温による強度低下と照射クリープ
- ② 高速中性子照射による脆化
- ③ 高温と低温のナトリウムが混合することによる熱疲労
- ④ 流体による磨耗
- ⑤ 応力集中
- ⑥ 溶接

構造強度劣化要因は、「常陽」原子炉構造における各部位ごとに異なるので表2-1に整理した。また現在実施されている供用期間中検査（ISI）や異常監視技術についても併せて整理した。

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、本研究では「常陽」の構造強度上問題がな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。

表 2-1 「常陽」原子炉構造における強度劣化要因と I S I ・異常監視技術

部位	主な機能	強度劣化の要因	I S I ・異常監視
原子炉容器	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉冷却材の保持 	<ul style="list-style-type: none"> 高温(リ-プ領域) 高速中性子照射 溶接 	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム漏洩監視 サーベイランス試験 燃料集合体出口温度監視
炉心上部機構	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉出力を制御する制御棒駆動機構の保持 安全監視上重要な炉心出口計装の保持 原子炉上部プレナムの冷却材流路の構成 	<ul style="list-style-type: none"> 高温(リ-プ領域) 高速中性子照射 熱疲労 溶接 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料集合体出口温度監視
炉心支持構造物	<ul style="list-style-type: none"> 炉心構成要素の保持 炉心構成要素に対する冷却材流量配分 	<ul style="list-style-type: none"> 高速中性子照射 (炉心に近いので照射量大) 流体磨耗 応力集中 溶接 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料装荷時の着床位置 燃料集合体出口温度監視 炉雑音 音響 サーベイランス試験
(1次主冷却系配管)	<ul style="list-style-type: none"> 炉心の冷却と2次冷却系への熱移送 	<ul style="list-style-type: none"> 高温(リ-プ領域) 溶接 	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム漏洩監視 配管(内管)の外観確認(一部の配管) サーベイランス試験

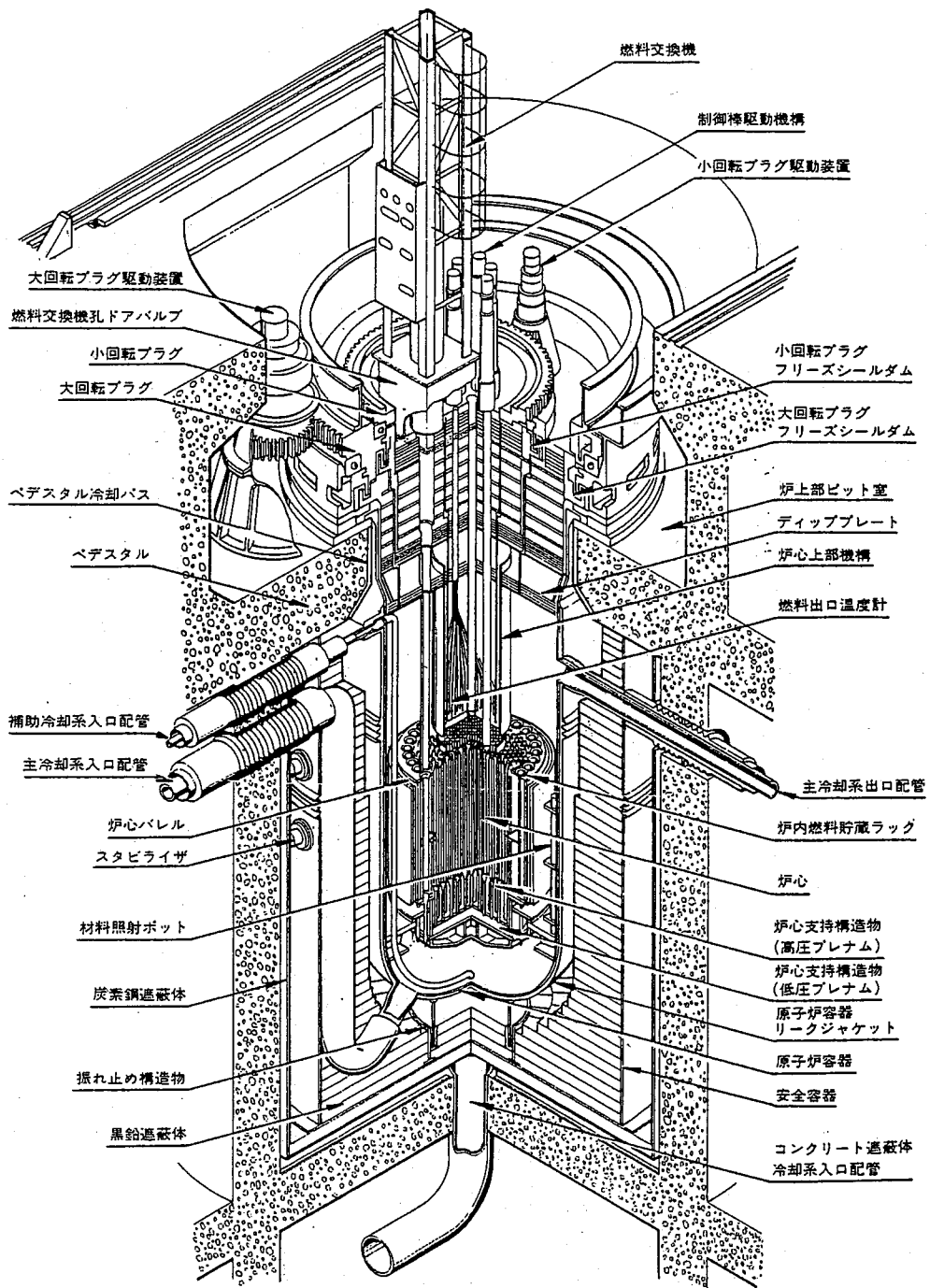


図2-1 「常陽」の原子炉構造(1/2)

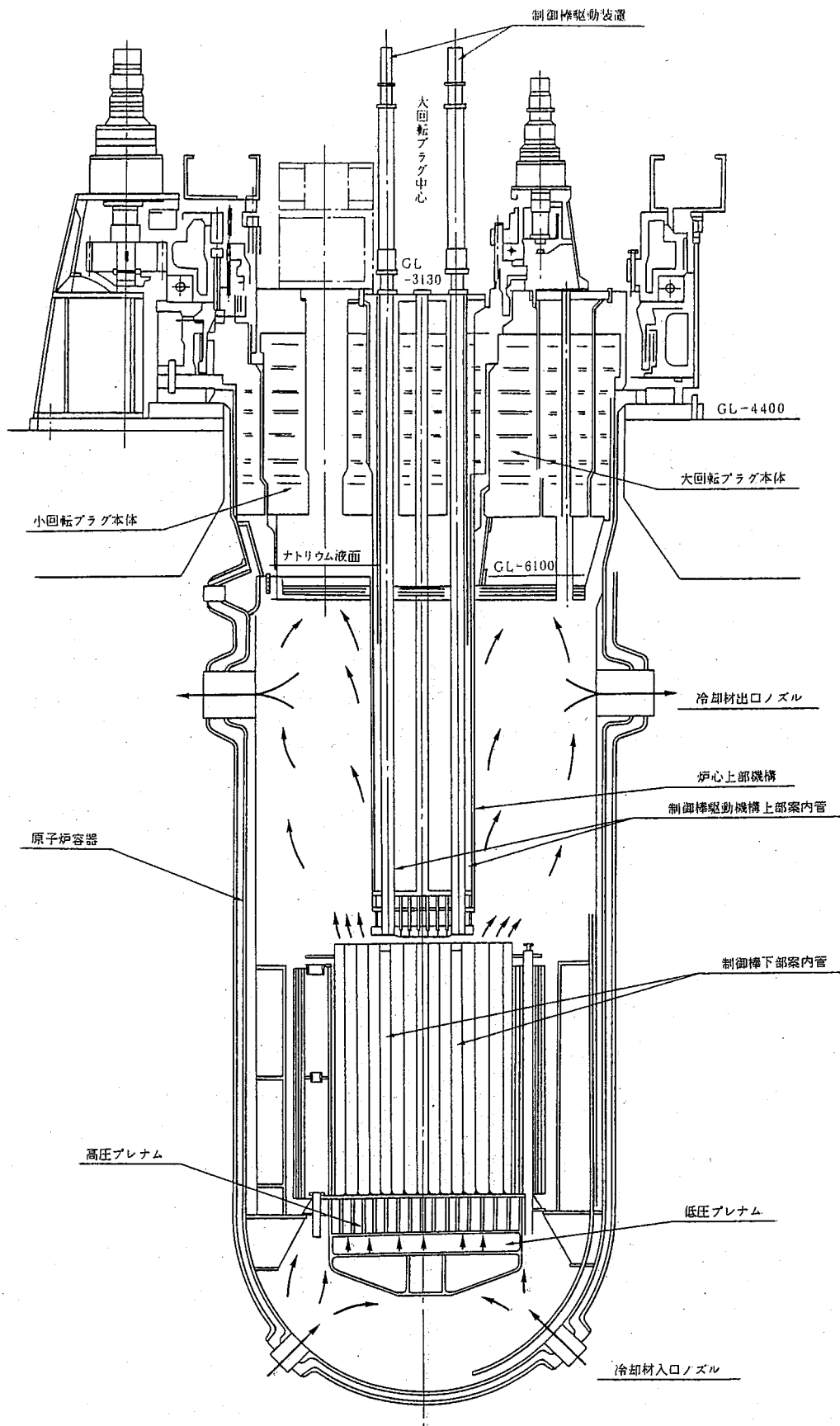


図2-1 「常陽」の原子炉構造(2/2)

3. 供用中炉内検査に適用する技術と検査内容

(1) 「常陽」供用中炉内検査に適用する検査技術

軽水炉では原子炉冷却材に水を使用するので炉内構造物の目視検査が容易であり、応力腐食割れによるクラックが検出された例等が報告されているが、高速炉は不透明なナトリウムを原子炉冷却材に使用していることから、海外炉を含めて供用中に実施した原子炉構造の直接的な検査の例は少なく、唯一フェニックスで表3-1のような例が報告されている。「常陽」とフェニックスでは構造が異なるので、フェニックスの例をそのまま適用できないが、それを参考にしながら「常陽」に適用可能な検査技術を表3-2に整理した。

「常陽」供用中炉内検査では、表面検査と体積検査の両方を対象とする。

表面検査では、フェニックス実施例③のような光学的目視検査が「常陽」においても実施可能である。この技術の適用範囲はカバーガス中に限られるので、検査範囲を拡大するためにナトリウムドレンが必要になる。「常陽」では燃料集合体頂部までの部分ドレンの実績があるが、更に適用範囲を拡大する場合は、ナトリウム全ドレンが必要になる。しかし、その場合は全炉心退避等プラントに対する影響が大きいため、超音波技術の利用によりむしろナトリウムの存在を積極的に活用したナトリウム中目視技術の適用が望ましい。但し、ナトリウム中目視技術では圧電センサをマトリックス状に並べたマトリックスセンサを使用するが、これまで報告^{3),4),5)}されている例ではセンサの大きさが90mm×90mmであり、狭隘部の検査に適用するためには小型化が必要である。

体積検査については、フェニックス実施例②のような炉心支持構造物の溶接部検査を「常陽」で実施するのが望ましいが、フェニックスでは原子炉容器の外側から接触法超音波探傷技術による検査を行っているのに対し、「常陽」では原子炉容器とリークジャケットの間隙が狭く、またリークジャケットの外側には黒鉛しゃへい体があるので、検査員が入ることができない。また、タンク型のフェニックスとは異なり、炉心支持板と原子炉容器の接続方法が異なるので、原子炉容器の外側から超音波探傷を行うことができない。従って、フェニックスの検査概念をそのまま「常陽」に適用することはできないが、類似の概念として、超音波探触子を炉内に挿入して検査を行うことが考えられる。そこで、「常陽」供用中炉内検査では、フェニックスと同じ接触法超音波探傷技術だけでなく、非接触法超音波探傷技術も検討した。

接触法超音波探傷技術は一般に欠陥検出感度が良いが、検査対象と探触子の間にカップラント（超音波を伝えるための液体）が必要であるため、適用範囲がカバーガス中となる。しかし、感度が高いAE（アコースティックエミッション）用のセンサを使えばカップラントを不要にできる可能性があるため、今後、耐熱性や耐ナトリウム性、耐放射線性を含めて適用性を検討する必要がある。なお、

A E用センサは自身で超音波を発信しないので、別の超音波発信手段との併用が必要である。

非接触法超音波探傷は、接触法超音波探傷に比べて一般に欠陥検出感度が低いが、リニアアレイ法⁶⁾はナトリウムを超音波伝播媒体に使用するので、ナトリウムドレンの必要が無く、供用中炉内検査における活用が望まれる。また、レーザー超音波法は、基本的にカバーガス中で適用するものであるが、非接触かつ遠隔操作が可能であり、複雑形状への適用性が高いことから高速炉への活用が望まれる。

(2) 「常陽」供用中炉内検査における検査内容

表3-2の各炉内検査技術の適用範囲(カバーガス中またはナトリウム環境下)を考慮し、「常陽」原子炉構造の各部位ごとに適用可能な技術と検査内容を表3-3に整理した。

原子炉容器については、外表面から表面検査や非接触法超音波探傷検査を行うことが考えられるが、そのためには検査装置と併せてキャリアーロボットやマニピュレータ技術を開発する必要があり、原子炉容器外面とリークジャケットの間隙寸法(25mm)や挿入方法を考慮して開発を進める必要がある。

炉心上部機構については、燃料集合体出口に近い整流装置が熱疲労の影響を最も受けやすいため、「常陽」で実績がある燃料集合体頂部までの部分ドレンを行うことにより、炉心上部機構全体をカバーガス雰囲気に出露させて、光学的目視検査技術による外観検査を行うことができる。また、その状態で、レーザー超音波技術を活用することにより、複雑な形状をしている整流装置の体積検査を行うことができる。これらの検査を実現させるためには、任意の位置に任意の角度で検査装置をアクセスさせる必要があり、マニピュレータ技術との組合せが不可欠である。なお、炉心上部機構の側面は上部プレナムとなっており、寸法上の制約を受けないので、現在開発されているようなマトリックスセンサ^{3),4),5)}を用いてナトリウム中目視技術による検査を行うことができる。

炉心構造物については、炉心構成要素を支持する重要な炉内構造物であるが、形状が複雑であり、原子炉容器底部付近に位置するため常時ナトリウム中にあることから、直接的な検査が困難である。そこで、本検討では、炉心構成要素の荷重を直接支え、また流量配分機能を持つ重要な構造物である炉心支持板の検査装置を重点的に検討することにした。炉心支持板の概要と炉心支持板の検査技術について、検討結果を次項4. に示す。

表 3-1 フェニクスにおける原子炉構造の検査技術

	件名	概念	特徴
①	原子炉容器上部支持構造物の溶接検査	原子炉容器をルーフラブより吊り下げる上部ハンガーの健全性を確認するため、溶接部を検査した。	上部ハンガーは非常にアクセス性が困難な部分に溶接部を有し、原子炉停止時の温度が 110℃ と高温であることから特殊な自動超音波検査装置が開発された。
②	炉心支持構造物(コニカルサポート)の溶接部検査	炉心支持構造物は炉容器との溶接部、バツフル板との溶接部を持っている。これらの溶接線の超音波検査を実施した。	<ul style="list-style-type: none"> 2 重容器 (原子炉容器外側の容器) に 5 箇所の孔をあけて原子炉容器外周にアクセスした。 高温(150℃)、高放射線(20mrad/h)で使用可能な特殊な超音波検査装置を開発した。 遠隔操作可能なキャリアを使用した。
③	炉内構造物の目視検査	炉容器内構造物の点検のため、炉容器内(カバークラス空間)にカメラを導入した目視検査を実施した。	<ul style="list-style-type: none"> 炉容器内のナトリウムを部分的にドレンし、液面を炉心頂部とした。 カメラの耐熱温度は 150℃ (200℃まで問題ない) である。 カメラは、視野が狭いが解像度が高いタイプと視野が広く補助的に使用されるタイプの 2 台を使用した。
④	炉心上部機構の異常監視	機械的不具合を早期に検出するため、振動周波数をオンラインで連続監視した。	<ul style="list-style-type: none"> 定格運転中に炉心上部機構の振動周波数測定の結果 7.4Hz であった。 解析の結果、溶接部欠陥 (円周 1/4 長) では固有振動数がほとんど変化しないが、大きな欠陥または完全破断では固有振動数が大きく低下する。

表3-2 「常陽」 供用中炉内検査における検査技術

		概念	適用範囲	特徴
表面検査	光学的 目視検査	<ul style="list-style-type: none"> 光学検査装置²⁾ (例; ITVカメラ、ペリスコープ、ファイバースコープ) を使用する。 光学検査装置は、燃料交換孔あるいは検査孔から炉内に挿入する。 カバークラス雰囲気中に露出してある炉内機器の表面を観察する。 	カバークラス 雰囲気	フェニックスでも実施されており、「常陽」でも実施しやすい。
	超音波 目視技術	<ul style="list-style-type: none"> マトリックスセンサ(圧電センサをマトリックス状に配置した検査装置) をナトリウム中に浸漬する。 エコーの空間分布より検査対象の形状を求める。 	ナトリウム 環境下	もんじゅや実用炉向けに継続的に研究開発が行われている
体積 検査	接触法UT	<ul style="list-style-type: none"> 超音波探触子を炉内構造物に接触させ、構造物内部の超音波伝播状況により内部の欠陥の有無を検査する。 	カバークラス 雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> 一般的に欠陥の検出感度が良い。 通常の探触子の場合、検査対象との間に超音波を伝えるためのカップラントが必要。
	・AE (アコースティックエミッション) 用探触子を炉内構造物に接触させ、内部の欠陥の有無を検査する。	<ul style="list-style-type: none"> AE (アコースティックエミッション) 用探触子を炉内構造物に接触させ、内部の欠陥の有無を検査する。 AE用探触子は自身で超音波を発信できないので、別の超音波発信手段 (例; レーザ超音波等) と組合せる。 	カバークラス 雰囲気 ナトリウム 環境下*1	<ul style="list-style-type: none"> AE (アコースティックエミッション) 用探触子は感度が良いためカップラントが不要になる可能性がある。
	非接触法UT	<ul style="list-style-type: none"> 超音波探触子を検査対象に接近させ、非接触で構造物内部に超音波を発生させ、その伝播状況により内部の欠陥の有無を検査する。 	ナトリウム 環境下 カバークラス 雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> 非接触(但し検査対象に近接)のためカップラントが不要。 ナトリウム中検査が可能であるため、供用中炉内検査への活用が望まれる。 一般的に欠陥の検出感度が低い。
	・電磁超音波法	<ul style="list-style-type: none"> 探触子を検査対象に接近させて、電磁力で超音波を発生させる。 	ナトリウム 環境下 カバークラス 雰囲気	
	・リニアアレイ 法	<ul style="list-style-type: none"> 圧電素子をリニアに並べたりニアセンサを検査対象に接近させ、各センサの発信周期をコントロールすることにより超音波を集束させながら体積検査を行う。 	ナトリウム 環境下	
	・レーザー超音 波	<ul style="list-style-type: none"> 検査対象にレーザー光を照射して内部に超音波を発生させ、内部の欠陥から反射された超音波を非接触で検出する。 	カバークラス 雰囲気 ナトリウム 環境下*2	<ul style="list-style-type: none"> 非接触 (遠隔) で表面検査、体積検査が可能。 高温、複雑形状も検査対象に適用可能。

*1 ナトリウム環境下で適用するためには、AE用探触子の耐熱性、耐ナトリウム性、耐放射線性等について検討が必要。

*2 ナトリウム環境下で適用するためには、ナトリウム環境下の局所排除が必要。

表 3-3 「常陽」 供用中炉内検査の内容

部位	検査技術	検査内容	アクセスルート
原子炉容器 高温(クリップ領域) 高速中性子照射	光学的目視検査	<ul style="list-style-type: none"> 炉容器外表面の目視による表面欠陥検査を行う。 	アクセスルート 炉容器とリークジャケットの間(25mm幅)にマニピュレータあるいはキャリアーロボットを使って検査装置を挿入する。
	非接触法UT (電磁超音波)	<ul style="list-style-type: none"> 溶接線に沿って非破壊超音波探傷検査を行う。 	
炉心上部機構 高温(クリップ領域) 高速中性子照射 熱疲労	光学的目視検査	<ul style="list-style-type: none"> 燃料頂部まで部分ドレンを行う。 胴部の表面(欠陥)を検査する。 フィンガ部の外観(ルースパーツ)を検査する。 	回転プラグの燃料交換孔(または炉内検査孔)から装置を挿入(検査内容によってはマニピュレータ技術を組合せる)。
	超音波目視技術	<ul style="list-style-type: none"> ナトリウム通常液位とする。 マトリックスセンサを浸漬させ、胴部表面や外観を確認する。 	
	レーザー超音波	<ul style="list-style-type: none"> フィンガ部(複雑形状部)の非破壊検査を行う。 	
	光学的目視検査	<ul style="list-style-type: none"> 炉心支持構造物フランジ部の外観検査(表面欠陥、ボルト等のルースパーツ)を行う。 	
炉心支持構造物 高速中性子照射 (炉心に近いので照射量大) 流体磨耗	超音波目視技術	<ul style="list-style-type: none"> 炉心支持構造物フランジ溶接部の非破壊探傷検査を行う。 	検査用集合体にマニピュレータ技術を組合せる。
	接触法UT [斜角法]	<ul style="list-style-type: none"> 炉心支持板溶接部(内部からのみアクセス可能)の非破壊探傷検査を行う。 	
	レーザー超音波	<ul style="list-style-type: none"> 多孔板の応力集中部の非破壊検査を行う。 	
	非接触UT	<ul style="list-style-type: none"> 連結管内面のエロージョン検査を行う。 	

4. 炉心支持板検査装置の検討

4. 1 「常陽」炉心支持板の概要と検査対象箇所

(1) 炉心支持板の概要¹⁾

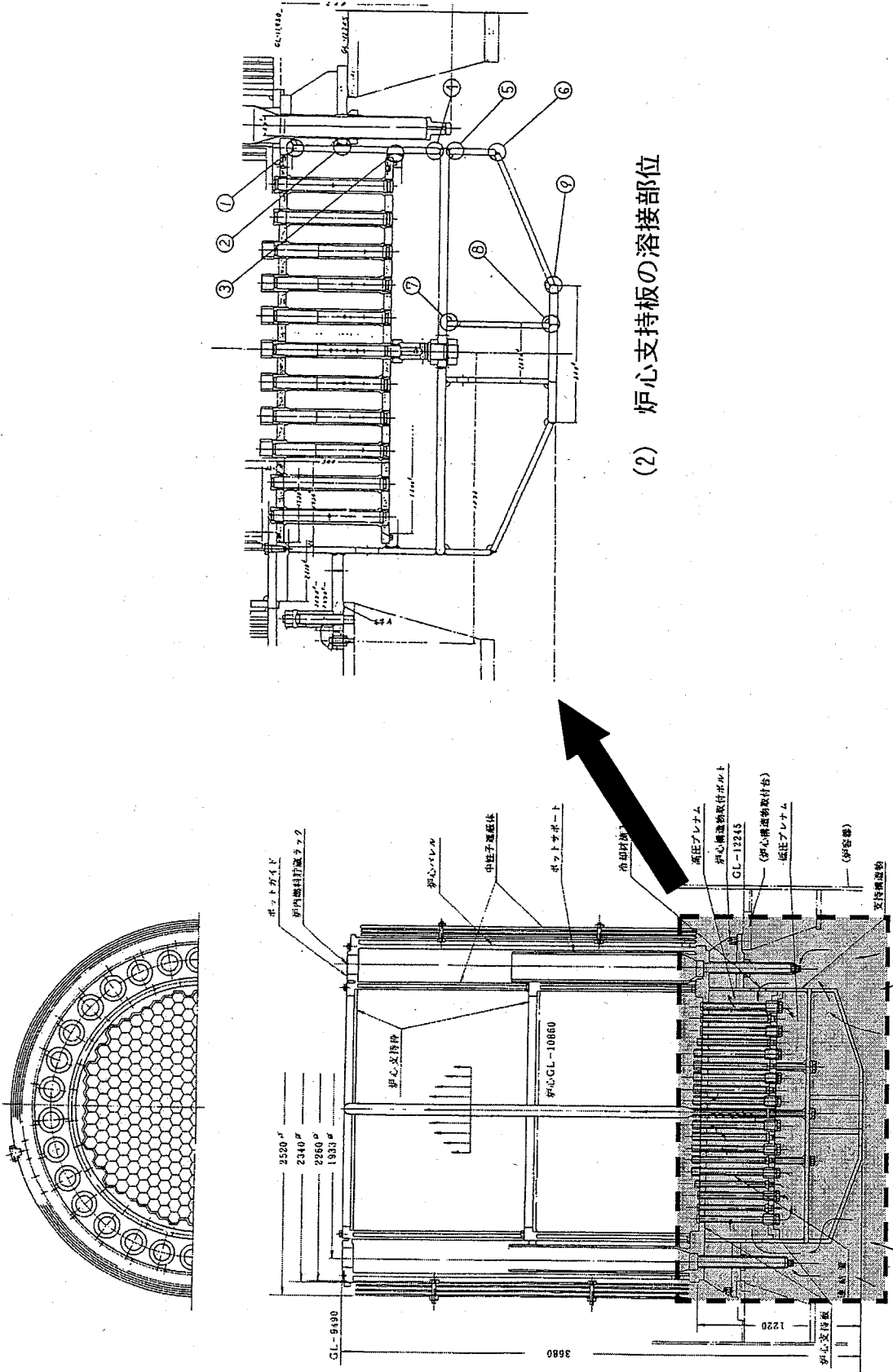
「常陽」炉心支持構造物と炉心支持板の構造を図4. 1-1(1)に示す。

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。万一異常な変形等が生じてその機能が喪失すると、炉心構成要素に冷却材が供給されなくなったり、あるいは炉心が落下して制御棒との相対位置にずれが生じたり、制御棒が挿入されなくなる等により炉心崩壊事故（CDA；Core Destructive Accident）に到る可能性がある。そのため、構造強度上十分な余裕を持って設計されているが、万一の異常が生じる前に例えば微小なクラック発生等の段階で検出できれば破損に到ることを防ぐことができる。

炉心支持板は2枚の多孔円板と313本の連結管の機械的結合により構成され、連結管下端に延長した13本の支持棒により支持構造物に機械的に固定される。多孔円板は連結管の上下に430mmの間隔で固定され、その間は炉心燃料集合体に冷却材を供給する高圧プレナムとなる。下側多孔円板の下部と支持構造物との間は制御棒や反射体に冷却材を供給する低圧プレナムとなる。また、連結管は炉心構成要素下端のエントランスノズルが嵌合されて位置決め、重量支持を行なう。冷却材は、一次冷却系配管より炉容器底部に流入し、炉容器入口プレナムを経て支持構造物胴部の多数の孔から高圧プレナムに流入する。そしてその一部は連結管側面の孔で流量調節されて炉心燃料集合体へ入り、他は連結管側面の孔と反射体の溝により圧力及び流量が調節されて低圧プレナムに入り、ここから反射体や制御棒に入る。

(2) 炉心支持板の検査対象箇所

炉心支持板の縦断面を拡大して図4. 1-1(2)に示す。図中の丸印は一般に欠陥が発生しやすいとされる溶接継ぎ手部を示している。炉心上部支持板や胴部の溶接部（図中の①、②の部分）は、炉心の荷重を受けて支える部分であり、炉心下部支持板の近傍の溶接部（図中の③、④の部分）は、高圧プレナムと低圧プレナムとのバウンダリを形成する部分である。両者とも、熱影響部（HAZ部）に沿って応力のかかる方向に亀裂が進展していくことが考えられ、非常に重要な溶接部であるため、本検討では図中①～④の部分を検査対象箇所を選定した。



(1) 炉心支持構造物及び炉心支持板の構造

図4. 1-1 「常陽」炉心支持板の構造

4. 2 炉心支持板検査装置の概念

「常陽」炉心支持板検査装置の概念について、図4. 2-1に示す。

炉心構造物は、支持構造物下部フランジを炉心構造物取付台の上に搭載して固定される。検査装置は回転プラグ上の燃料交換孔から炉内に装荷するが、支持構造物下部フランジや炉心構造物取付台には検査装置を貫通させる孔がないので、連結管を通してセンサ等を炉心支持板内側にアクセスさせて、前項4. 1に示すような炉心支持板の溶接部を検査する。従って、高圧プレナムや低圧プレナムを形成する胴部は、外面からアクセスできないので、外側の表面検査も含めて全て内面から検査することになり、超音波による体積検査技術を活用する必要がある。

検査装置の先端部は燃料集合体と同様の形状とし、通常の燃料交換のように回転プラグで位置決めして炉心支持板の連結管に挿入する概念（検査用集合体）とする。そして、検査装置の先端から炉心支持板内面にアクセスするためのメカニズムにマニピュレータ技術を適用する。マニピュレータ技術の一例として、検査装置先端にリンク機構を設けて、センサを炉心支持構造物胴部内側に接触あるいは接近させる概念を検討した。本案の概念を図4. 2-2に示す。本案では、リンクの長さや傾き角度でセンサを位置決めするが、下側炉心支持板と炉心構造物底板との間隔 210mm に対して、最外周の連結管位置から胴部内面間での距離は約 100mm～約 150mm であり、センサを胴板に接触させるのに必要なリンク長さを確保できる。但し、リンクの支点には回転駆動及び角度制御が可能なメカニズム（例：マイクロマシンモータ）が必要であるので、その具体化を含めて寸法条件を確認する。

本概念を接触法超音波探傷技術と組合せ、斜角法（探触子から検査対象接触面に対して斜めに超音波を入射し、検査対象内部で反射を繰り返しながら対象箇所へ超音波を当てて検査を行う）を採用することにより、原理的には溶接部（①～④）の検査が可能である。なお、前項3. に示すとおり、通常の接触法超音波探傷技術は検査対象と探触子の間にカップラント（超音波を伝えるための液体）が必要であり、適用範囲がカバーガス中となるが、AE（アコースティックエミッション）用のセンサを使ってカップラントを不要とし、他の位置からレーザー光を照射して炉心支持板内部に超音波を励起することによりナトリウム中で炉心支持板の検査を行うことが考えられる。この場合のレーザー光照射については、次項4. 3に示すマニピュレータ概念を活用する必要がある。

また、非接触であるリニアアレイ法超音波探傷技術と組合せることが考えられる。この場合は、ナトリウムを超音波の伝播媒体に使用するので、ナトリウムドレンの必要はなく、探触子を炉心支持板に接触させないで近接位置に保持

して検査を行うことになる。

本概念におけるナトリウム環境下への適用性や欠陥検出性能については、今後AE用センサやリンク機構の詳細な検討を行い、更にモックアップ等による感度確認が必要である。

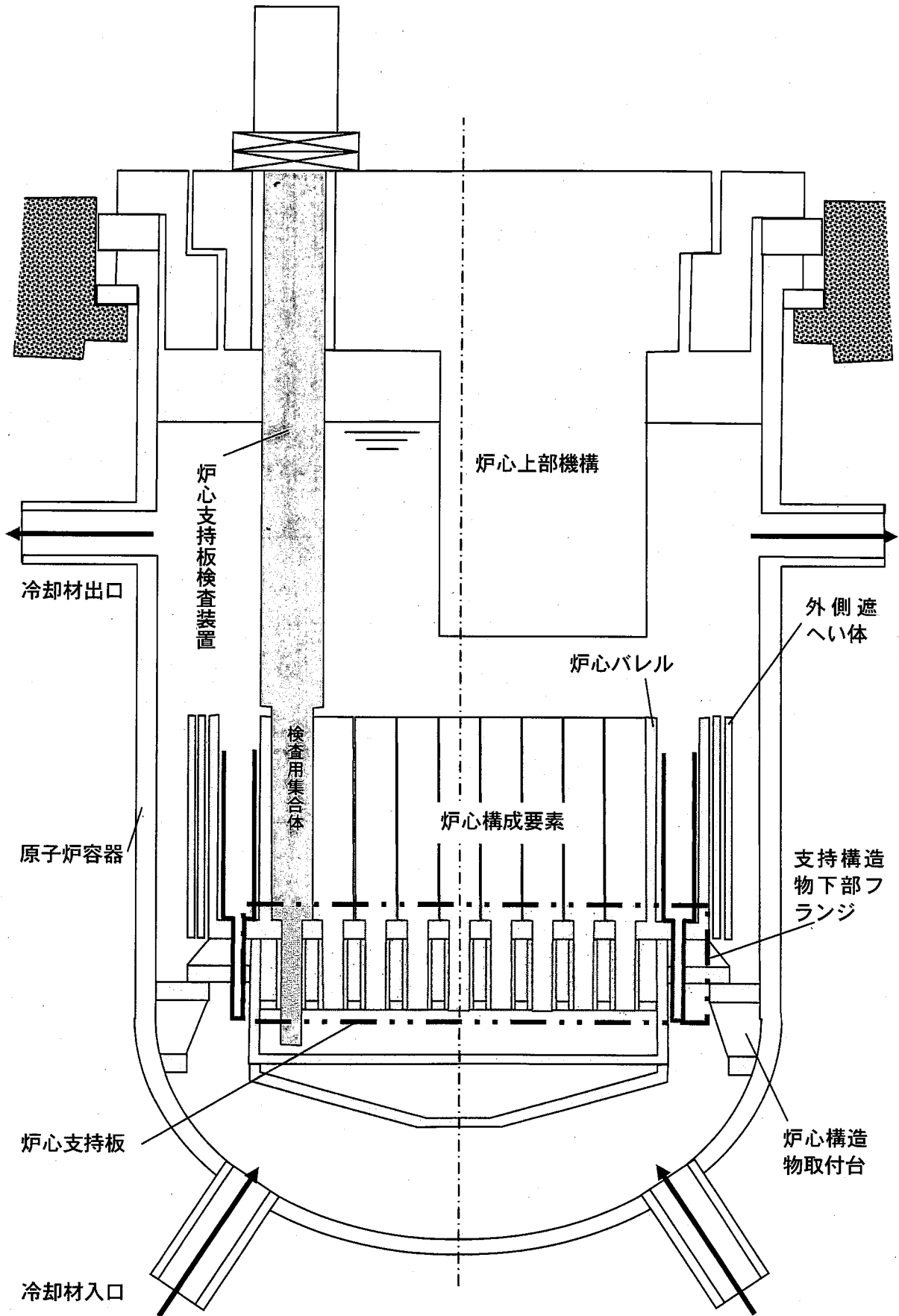


図 4. 2 - 1 「常陽」炉心支持板検査装置の概念

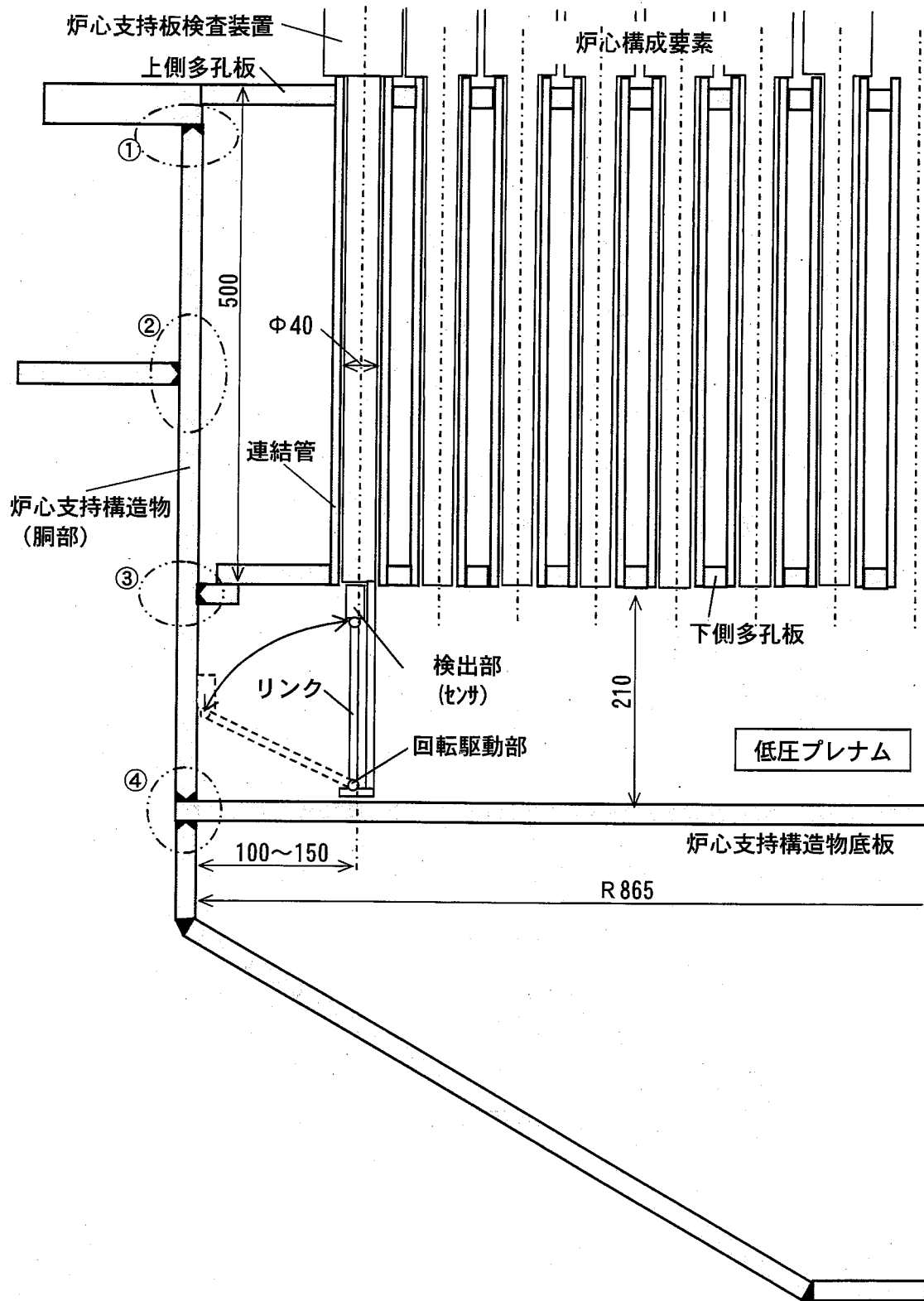


図4. 2-2 リンク型マニピュレータの概念

4. 3 レーザー超音波技術の応用

レーザー超音波技術は、高温複雑形状機器の検査に対する適用性が高いことから、「常陽」供用中炉内検査における活用が望まれる。レーザー超音波技術は活発な技術開発が行われているので、その技術動向を調査し、マニピュレータ技術と併せて炉心支持板検査装置への適用概念を検討した。

(1) レーザー超音波の原理

レーザー超音波は、観察対象表面にパルスレーザーを照射して内部に超音波を励起させ、その伝播特性の変化を測定して欠陥を検出するものである。

超音波の発生メカニズムは、レーザー光の照射により物体表面が急激に熱膨張して発生するが、レーザー光の強度が大きくなると物体表面が熔融・気化するアブレーションが発生する。欠陥検出感度が向上する一方、検査対象にダメージを与える可能性があるため、欠陥検出感度向上と材料損傷防止の両方の観点からレーザー光出力を適切に設定する必要がある。

物体における超音波伝播挙動の測定は、レーザー干渉計にて非接触で行う。レーザー干渉計とは、光源から出た光を2つ以上の光に分割し、別々の光路を通った後再び重ね合わせ、光路差により発生する干渉縞を解析して被検体の表面形状を求めるものである。

(2) レーザー超音波のメリット

レーザー超音波は、超音波の発生から欠陥検出まで全て非接触で実施できるのが長所である。また、従来の超音波非破壊探傷技術に比べて、検査対象上における超音波の送受信に必要な面積が小さいため、欠陥検出の分解能が高く、き裂位置の同定性能や微小き裂の検知性が高い。従って、高温で複雑な形状の機器が多いFBRへの適用が期待される。

また、一般に、検知可能なき裂のサイズやサイジング精度は、使用する超音波の波長（周波数の逆数に比例）に依存するが、従来の圧電素子を用いた探傷方法では圧電素子の固有振動数の影響を受けるため、超音波の周波数帯域が制限されるが、レーザー超音波ではその影響を受けないため、周波数帯域が広く、微小き裂から大きなき裂まで検知範囲が広い。⁸⁾

また、レーザー超音波による探傷技術は、次項(3)に示すように計算機による画像処理まで含めてシステム化できるので、通常の超音波探傷のように検査員の熟練度に左右されないというメリットがある。

(3) レーザー超音波の検査性能

レーザー超音波による検査の内容として、表面欠陥検査と体積検査の両方が報告されている。

表面欠陥検査は、検査対象表面にパルスレーザーを照射した後、別の位置でレーザー干渉計により表面の微小な振動を測定する。表面き裂欠陥から反射された反射表面波または欠陥を潜り抜けた透過表面波を測定して、き裂の幅、深さを同定することができる。軽水炉では、代表的な欠陥モデルであるSCCに対し、き裂発生初期段階である深さ0.1mmオーダーの状態を検知できれば適切な補修工事でこれ以上の進展を防止できるので、0.1mmオーダーの人工欠陥を検知できることが実際に確認されている。なお、欠陥の幅について、レーザー超音波による表面欠陥検査では、肉眼ではわからないような空隙のないき裂でも検出できる^{9),10)}。この手法は測定データを計算機処理するので、検査員の熟練に係わらず欠陥の見落としがないのがメリットである。

体積検査（内在欠陥・き裂の検査）でも直径0.1mmの人工欠陥が検出できることが確認されている⁸⁾。また、物体に圧電素子またはパルスレーザー光で超音波を励起させ、レーザー干渉計を用いて表面の超音波伝播挙動を可視化した例が報告されている¹¹⁾。この報告例では、レーザー干渉計のレーザー光（ビーム径30 μ m）を物体表面に照射し、約0.1mmピッチで照射位置を移動させ、各位置で測定した表面振動の経時変化をもとに、超音波励起後の振動伝播状況を可視化している。

そして、超音波発生用のパルスレーザー光と、検査対象表面の超音波測定用レーザー光（レーザー干渉計のレーザー光）を同じ位置に照射し、検査対象表面を走査（0.1mm程度のピッチで照射位置を移動）して、表面からの距離が同じ断面の反射波の測定結果を整理することにより内部欠陥の画像を合成することができる（開口合成法）¹²⁾。

以上より、レーザー超音波による探傷技術では0.1mm程度の欠陥でも十分検出できていることから、基本的に「常陽」供用中炉内検査に必要な欠陥検出精度を有する。但し、レーザー超音波ではレーザー干渉計を用いて、光の波長レベルで表面振動を測定するため、レーザー光の照射位置（平面内の0.1mmピッチの位置決め、物体表面からレーザー照射位置までの距離）に高精度が求められる。

また、超音波発生のためのレーザー光は、欠陥検出感度を向上させるためには出力を大きくするのが望ましいが、検査対象に損傷を与えるおそれがあるので、検査対象を実規模で模擬したモックアップ試験でレーザーの照射位置、出力と超音波の伝播挙動を検討し、材料の損傷と併せて欠陥検出性能を評価する必要がある。

(4) 「常陽」供用中炉内検査に対する適用について

「常陽」供用中炉内検査にレーザー超音波技術を適用するためには、回転プラグ上のレーザー光源から炉内の検査対象部位まで光ファイバによりレーザーを伝送する必要があるが、前項(3)の表面欠陥検査では、超音波励起用、欠陥検出用の両方のレーザーを光ファイバで伝送する技術が既に実現されている¹⁰⁾。

但し、この技術は光学的に不透明なナトリウム環境下では適用できないので、ナトリウムをドレンするか、あるいはナトリウムを局部的に排除する必要がある¹⁾。そこで、図4. 3-1のように光ファイバ周囲と検査対象受光面までの部分を局部的にナトリウムドレンする概念を検討している。一方、最近医療用技術向けに、チューブ状のものを自在に伸縮、屈曲させて狭隘部を進む技術が検討されており、その概念を取り入れることにより、図4. 3-2のような炉心支持板検査装置の概念を検討した。この概念は、レーザー光伝送用の光ファイバ等を内蔵したベローズを自身で伸縮、屈曲させながら検査対象位置に位置決めして表面に押し付けた後、内部のナトリウムを排除する。この概念については、ベローズを自身で伸縮、屈曲させるメカニズムのFBR環境（耐熱、耐ナトリウム、耐放射線）への適用性や、レーザー超音波技術に必要な0.1mm程度の位置決め精度の実現性等を検討する必要がある。

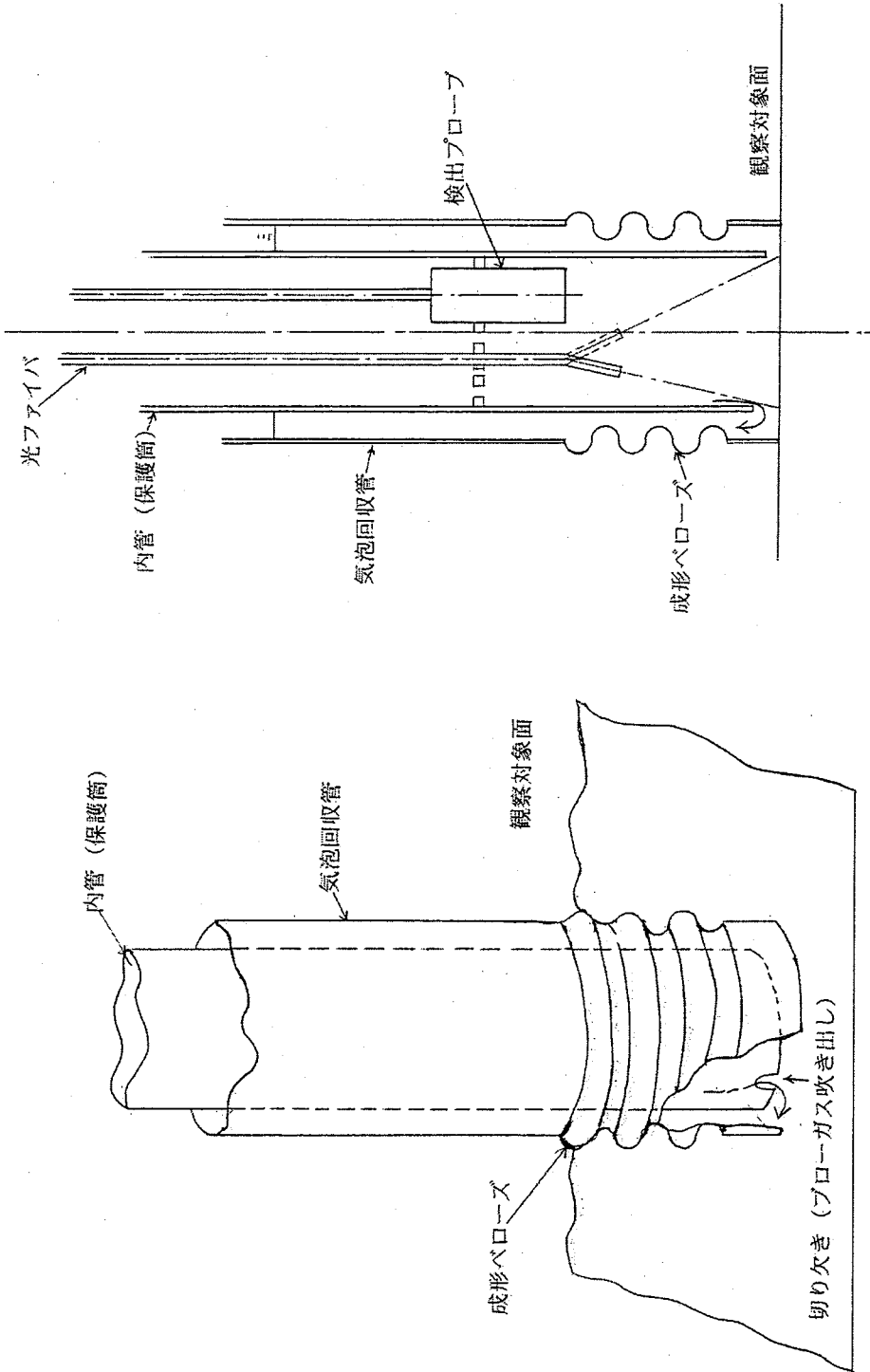


図4.3-1 ナトリウム局所排除概念(レーザー超音波検査装置との組合せ)

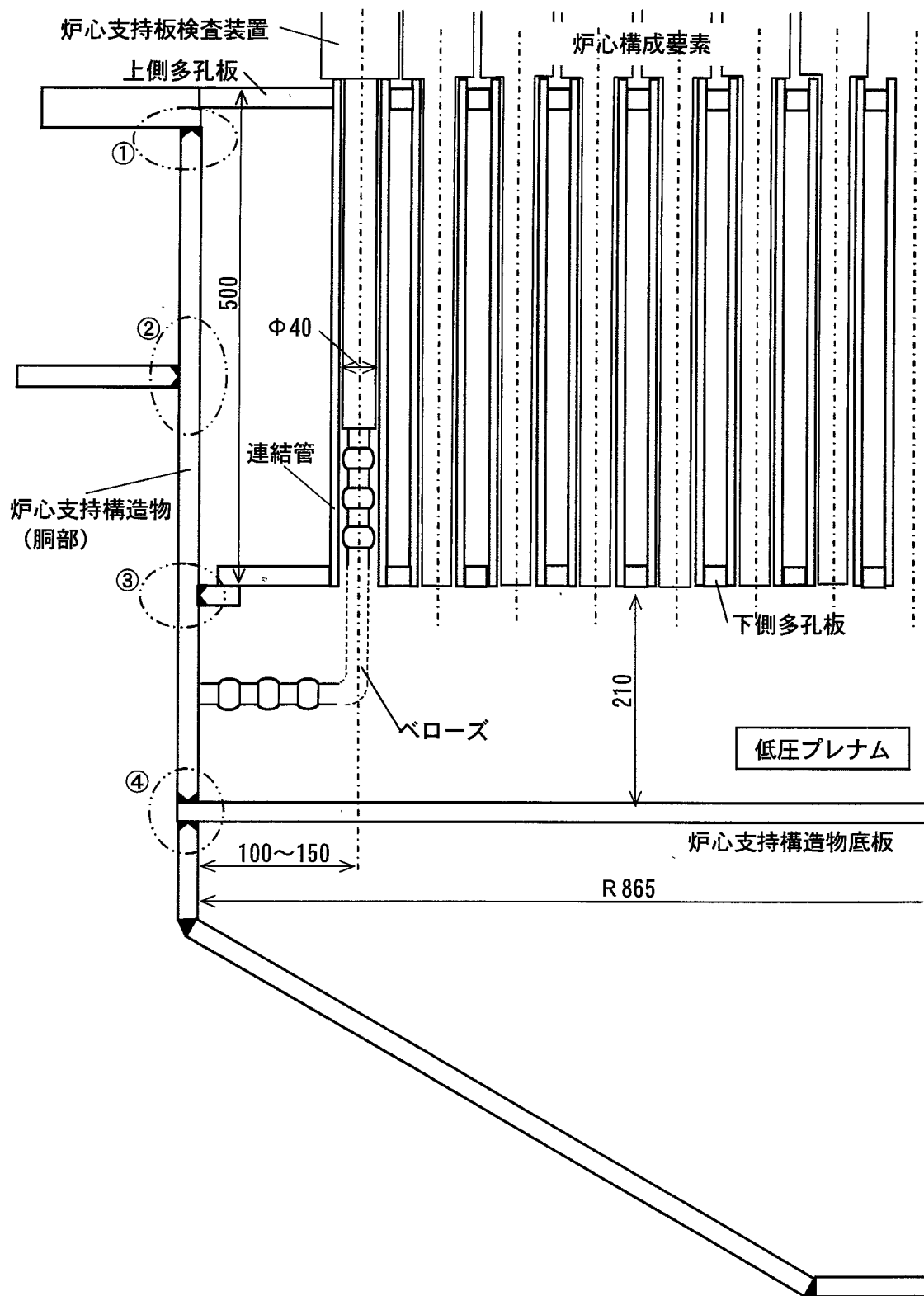


図4. 3-2 ベローズ型マニピュレータの概念

4. 4 まとめと検討課題

本検討では、重要な炉内構造物で常時ナトリウム中にある炉心支持板を検査対象に選定し、超音波非破壊検査技術とマニピュレータ技術を組み合わせた検査方法を検討した。

炉心支持板検査装置は、先端を燃料集合体と同じ形状とし、回転プラグで位置決めしながら燃料交換孔より装荷する概念とした。そして、その先端部分に検出器（センサ）を位置決めするためのマニピュレータを装着するが、その一例として、検査装置先端にリンク機構を設けて、センサを支持構造物胴部内側に位置決めする概念を検討した。本概念と接触法超音波探傷技術を組み合わせることにより、目的とする部位の検査を行うことができるが、実現のためには以下の検討が必要である。

- リンク機構の具体化と成立性の検討
- AE用センサの調査と適用性の検討
- 検査技術に応じたプラント状態の検討（ナトリウムドレンの有無）
- 検査対象物内部の超音波伝播挙動の検討（モックアップ試験）
- センサ位置と欠陥検出性能の評価

また、非接触、遠隔操作性を有し、高温、複雑形状の検査に対する適用性が高いレーザー超音波技術の動向調査を行い、欠陥検出性能や光ファイバによるレーザー光伝送が可能であることから「常陽」供用中炉内検査に適用可能であることを確認した。そして、光ファイバとレーザー光伝達経路のナトリウムを局所的に排除しながらレーザー光照射位置を位置決めするためのメカニズムと組み合わせ、炉心支持板検査装置の概念を検討した。本案の実現のためには、以下の検討が必要である。

- 検査対象物内部の超音波伝播挙動の検討（モックアップ試験）
- レーザー光（超音波発生用と欠陥検出用の両方の）の照射位置の検討
- レーザー光の強度（欠陥検出感度向上と材料損傷防止）
- マニピュレータ技術の成立性（材質、環境、位置決め精度）

今後、超音波技術やマニピュレータ技術の調査を継続し、炉心支持板検査装置の概念を具体的に構築する。

5. あとがき

海外炉の I S I 情報を参考にしながら「常陽」供用中炉内検査計画を整理し、重要な炉内構造物である炉心支持板の検査を行うための技術を調査・検討した。

その結果、検査技術としては、一般に欠陥検出感度が良い接触法超音波探傷技術や近年開発が進んでいるレーザー超音波技術を適用し、それぞれに適したマニピュレータ技術と組合せて炉心支持板検査装置の概念を検討した。

各技術は現在開発途上であり、今後の技術動向を見ながら「常陽」への適用を具体化する必要がある。そして、ナトリウム中コネクタ等「常陽」の技術経験を活かし、「常陽」固有の条件下に適合させるための技術開発を推進させる。

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ー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ー”,JNC TN9400 2002-010,(2002)
- 2) 中本香一郎,他,「ファイバ스코ープの現状とFBR供用期間中検査への適用性”, PNC TN942 85-01,(1985)
- 3) 小舞正文,他,「FBRナトリウム中目視技術の開発(その3)” 日本原子力学会「1996秋の大会」B55,p.270,(1996)
- 4) 泉守,他,「FBRナトリウム中目視技術の開発(その4)” 日本原子力学会「1996秋の大会」B56,p.271,(1996)
- 5) 田村政昭,他,「FBRナトリウム中目視技術の開発(その6)” 日本原子力学会「1998秋の大会」F24,p.351,(1998)
- 6) 唐沢博一,他,「FBRナトリウム中体積検査技術の開発(その1)” 日本原子力学会「1996秋の大会」B57,p.272,(1996)
- 7) 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秋の大会」F26,p.353,(1998)
- 8) “LASER CROSS”,財団法人レーザー技術研究所ニュース No.141,(1999)
- 9) 三浦崇広,他,「高他原子力におけるレーザー超音波の応用”,非破壊検査,第51巻4号,pp.194-199,(2002)
- 10) M.OCHIAI,et al., “COMPACT AND ROBUST INSPECTION SYSTEM FOR MICRO CRACKING DETECTION USING LASER-INDUCED SURFACE WAVES”, 10th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, June 26-30,(2000)
- 11) Blouin, A., et al., “Improved resolution and signal-to-noise ratio in laser-ultrasonics by SAFT processing,” OPTICS EXPRESS, Vol.2,No.13,22 June 1998,(1998)
- 12) 高坪純治,今出政明,「レーザー法による超音波伝搬の可視化”,非破壊検査,第51巻4号,pp.200-204,(2002)