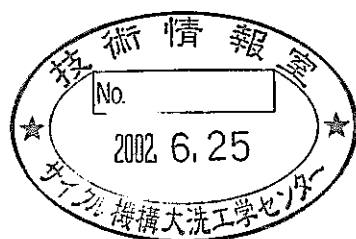


「常陽」炉内供用中検査技術に関する検討

－ 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 －

(研究報告)



2002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

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)
2002

「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 －

(研究報告)

有吉昌彦*、石田公一*

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。

現在、「常陽」の炉内構造物については、回転プラグ上部からの燃料頂部の観察を除いて直接目視等で健全性の確認が行なえる手段が無いため、供用中炉内検査の手法を高度化し、炉内構造物の直接的な健全性確認を行なうことを目的に本検討を実施した。

供用中炉内検査の対象として、重要な炉内構造物である炉心支持板を選定した。そして、プラントへの影響の観点から、ナトリウム全ドレンを実施しないこと、炉上部からの遠隔操作が行なえることを重視した。その結果、以下に示す技術が有望と考えた。

- 超音波によるナトリウム中目視、体積検査技術（ナトリウム全ドレン無しで供用中炉内検査に適用できる）。
- レーザー超音波非破壊検査技術（遠隔操作性に優れている）。
- 局所ナトリウム排除技術（レーザー超音波技術をナトリウム環境下で適用可能とする）。

これらの技術について調査・検討し、「常陽」炉心支持板の供用中炉内検査に適用する概念を検討した。また、これらを「常陽」供用中炉内検査に適用した場合の課題の抽出を行なった。

*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

Study on In-vessel ISI for JOYO

**— Technical Survey of under sodium non-destructive inspection technique
And Study of application concept —**

Masahiko Ariyoshi* , Koichi Ishida*

ABSTRACT

This report is concerning the in-vessel in-service inspection (ISI) technology for the experimental fast reactor JOYO.

The present ISI method in JOYO is not able to confirm the integrity of the core structure directly, expecting the visual inspection for the top of core assemblies from above the rotating plug. The purpose of this examination is to progress of the ISI method, and to confirm the integrity of the core structure directly.

The core support plate is an important structure and it is selected for the object of in-vessel ISI. From the viewpoint of the influence on the plant, it is regarded important the method without all sodium draining, and the remote operation from above of the shielding plug. As a result, following technology is thought promising.

- Under sodium inspection technique by means of ultrasonic method (it is able to apply in-vessel ISI without all sodium draining).
- Nondestructive inspection technique by laser based ultrasonic method (it is superior in remote operating)
- The local sodium discharge mechanism (it makes possible to apply laser based ultra sonic method for under sodium inspection)

These technologies were investigated, examined, and the concept applied to ISI in JOYO core support plate was examined. Moreover, the problem when these were applied to in-vessel ISI in JOYO was picked up.

*Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, Irradiation Center,
Oarai Engineering Center, JNC

目 次

1. 概要	1
2. 供用中炉内検査技術の検討方針	2
2.1 検査の目的	2
2.2 炉内 I S I の検査対象	2
2.3 炉内 I S I の内容	3
3. I S I 技術の調査	6
3.1 I S I 技術の調査とその適用条件	6
3.2 重点調査技術	6
3.3 「常陽」炉内 I S I への適用概念	9
3.4 検討課題の摘出	18
4. あとがき	20
参考文献	21

表リスト

表 3.1-1	炉内 I S I 技術の候補概念と適用条件	11
表 3.3-1	局所ナトリウム排除概念の特徴	12

図リスト

図 2.2-1	「常陽」原子炉構造	4
図 2.2-2	「常陽」炉心構造物及び炉心支持板の構造	5
図 3.2-1	レーザー超音波法非破壊検査の概念	13
図 3.4-1	炉心支持板連結管部の検査概念	14
図 3.4-2	炉心支持板低圧プレナム部の検査概念	15
図 3.4-3	レーザー超音波非破壊探傷と局所ナトリウム排除概念(成形ベローズ方式)	16
図 3.3-4	レーザー超音波非破壊探傷と局所ナトリウム排除概念(非接触方式)	17

1. 概要

本検討は、高速実験炉「常陽」の原子炉建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やナトリウム漏洩の連続監視が行われているが、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することにより、「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. 供用中炉内検査技術の検討方針

2. 1 検討の目的

高速実験炉「常陽」では、安全上重要な構造物（例；炉心構造物等）は十分な強度余裕を持って設計され、また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やナトリウム漏洩の連続監視が行われている。しかし、これらの検査手法では間接的な確認しか行なえないため、直接的な手法で健全性確認が行なえるよう、供用中炉内検査の手法を高度化することを目的とする。

2. 2 供用中炉内検査の検討対象

「常陽」の原子炉構造を図 2.2-1 に示す。供用中炉内検査では、原子炉容器本体と全ての炉内構造物を対象と考えるが、本検討では代表的な炉内構造物である炉心支持板を検査対象に選定して検討を行なった。

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、あるいは炉心が下に落ち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などして炉心崩壊事故（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内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、炉容器入り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。

炉心支持板の形状を図 2.2-2 に示す。

以上に述べたように、炉心支持板は重要な構造物であり、また形状が複雑でかつ常時ナトリウムに浸漬されているため供用中炉内検査は容易ではないが、この検査方法が確立できれば炉心構造物や炉心上部機構等の直接的な検査が可能となる。

2. 3 供用中炉内検査の内容

本検討では、目視検査技術と体積検査技術を対象とする。

ASME Section XI(*1)では、液体金属冷却型高速炉の炉心支持構造物(Core Support Structure)の供用中検査方法は目視検査VTM-3（軽水炉の場合はVT-3）となっている。VTM-3試験は試験対象の機械的・構造的状態を判定するための試験であり、欠陥や破片の有無、ボルトまたは溶接による機器への接合部の健全性を確認するものである。光学的手段(periscope and light)またはナトリウム中透視装置(scanner)や遠隔寸法測定装置(dimensional gauges)を使用して良いとされている。

体積検査技術は、ASMEで炉心支持構造物に対する供用中検査として記載は無いが、例えば、万一目視検査で欠陥を発見した場合に、その欠陥の大きさ、深さ等定量的評価に備えるものである。

*1 : BPVC Section XI – Rules For Inservice Inspection Of Nuclear Power Plant Components

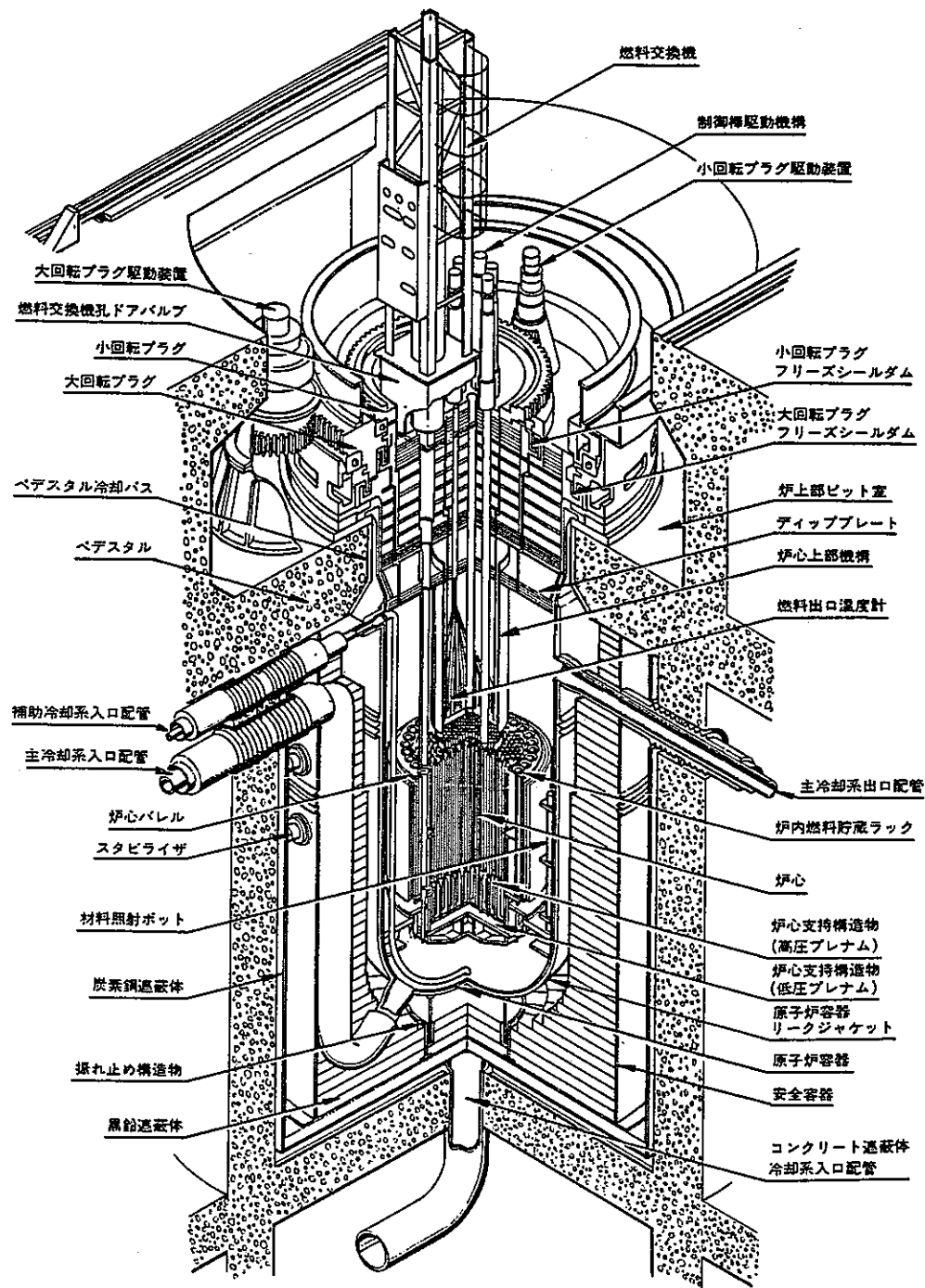


図 2.2-1 「常陽」原子炉構造

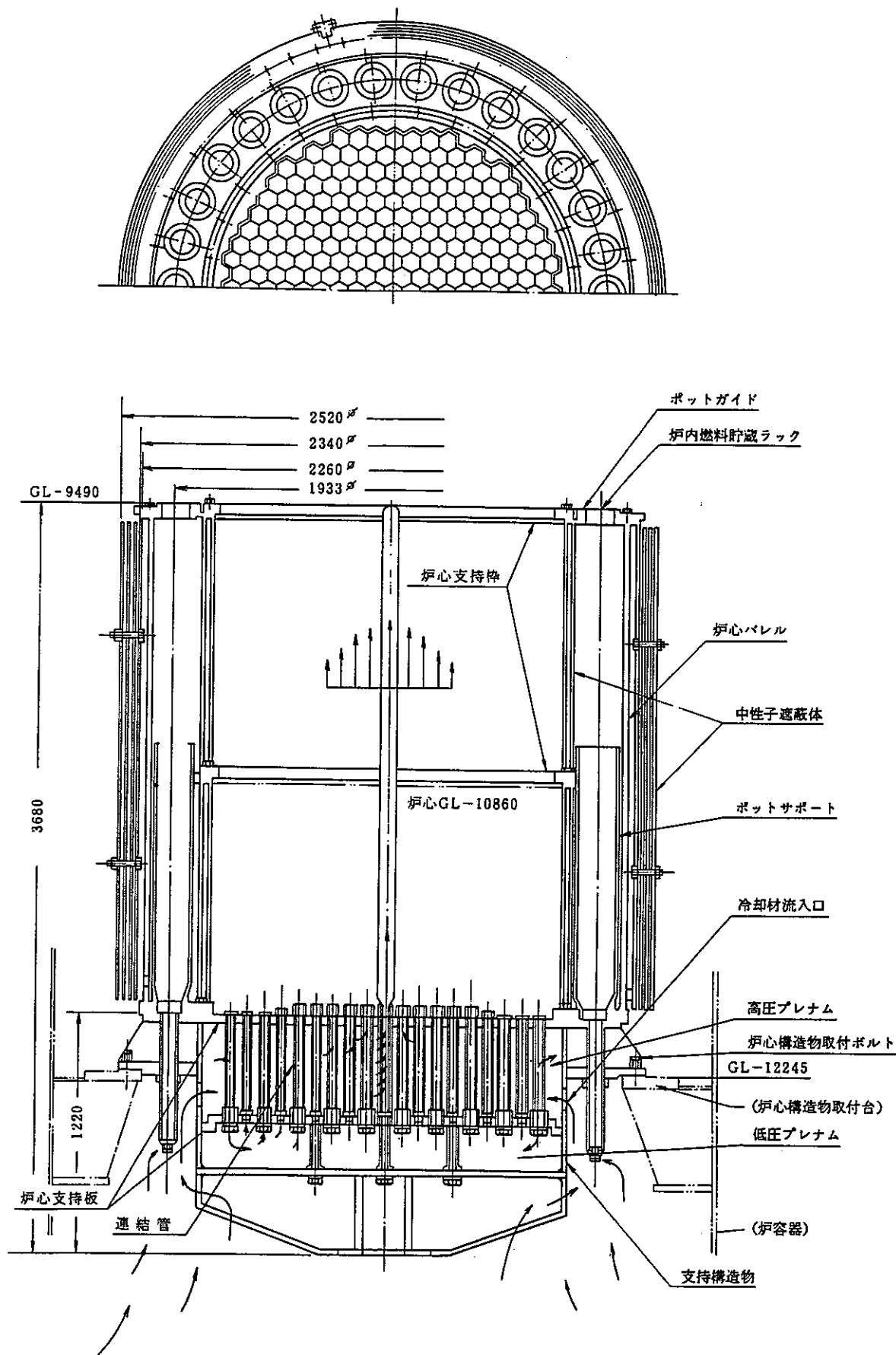


図 2.2-2 「常陽」炉心構造物及び炉心支持板の構造

3. 供用中炉内検査技術の調査

3. 1 供用中炉内検査技術の候補概念とその適用条件

炉心支持板は原子炉容器底部に位置するためナトリウムに浸漬されている。ナトリウムは不透明であるため、イメージスコープやカメラによる光学的目視点検を炉内で行なう場合はナトリウム全ドレンが必要になる。

しかしナトリウム全ドレンは次項3.2に示すようにプラントに対する影響が大きいので、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するような点検方法も検討されている^{1) 2) 3)}。そこで、これらの供用中炉内検査技術をナトリウムドレンの有無と関連つけて表3.1-1に整理した。

3. 2 重点技術の調査

(1) ナトリウム全ドレンの問題点

「常陽」では、設計上、1次補助冷却系ノズルを使えば原子炉容器内のナトリウムを全てドレンできるようになっている。しかし、「常陽」では、燃料頂部レベルまで液位を下げる（原子炉容器ナトリウム部分ドレン）ことは経験があるが、ナトリウム全ドレンは建設後一度も行われたことがない。少なくとも以下のような課題があり、慎重な検討が必要である。

- ① ナトリウム全ドレンを実施した場合は崩壊熱除去が出来なくなるため、全ての炉心構成要素を炉外に取り出す必要がある。「常陽」ではEVSTが無く、取り出された炉心構成要素は全て水プールで保管するため、原子炉容器に再装荷することが出来ず、新たに製作したものを装荷する必要がある。
- ② ナトリウム全ドレンを行なっても、局所的にナトリウムが残留する可能性がある。残留箇所は、例えば原子炉容器底部（補助冷却系より下の領域）、炉心支持構造物の低圧プレナム、燃料ポット、模擬炉心構成要素等が考えられる。また、構造物表面にナトリウムが膜状になって残る可能性がある。低圧プレナムは支持構造物に小さな孔があいているので、時間をかければナトリウムがドレンされると思われるが、局所的な残留の可能性はある。
- ③ これらの残留ナトリウムに対し、全ドレン状態での雰囲気管理や温度管理が課題となる。ナトリウムが酸化しないよう内部は不活性ガスを充填することになる。温度については、原子炉内の残留ナトリウムを凝固させないために原子炉容器内の予熱を継続する必要がある。
- ④ ナトリウム全ドレンにより原子炉内がガス雰囲気になり、温度分布が生じ易くなるが、特に回転プラグや制御棒駆動機構等動的機器に付着したナトリウムミストがその機能に及ぼす影響について検討が必要である。

- ⑤ 原子炉再起動時には、ナトリウムの再充填と冷却材の浄化運転、また制御棒駆動機構等動的機器の機能確認を行なった後、炉心構成要素の再装荷を行なう。従って、供用中炉内検査の期間を併せるとかなり長期間となる。

(2) 重点技術の絞り込み

前項(1)に述べたように、原子炉ナトリウム全ドレンはプラントへの影響が大きい。仮にナトリウム全ドレンを行なった場合でも、炉内を不活性ガス雰囲気にして予熱する関係から作業員が立ち入りできる環境では無い。そして、再装荷に備えて模擬炉心構成要素に置き換えられるので、炉心支持板にアクセスするためには、炉心構成要素の移動が必要である。ここでその移動体数は、燃料のセルフオリエンテーション機能を損なわない等、模擬炉心の構成上支障の無い範囲に限定する必要がある。従って、ナトリウム全ドレンの有無に係わらず、炉上部より検査機具を挿入し、炉心構成要素数体分を移動することにより得られた限られた寸法条件下で供用中炉内検査を実施することになる。

以上のような理由により、本検討ではナトリウム全ドレンを行なわないこと、炉上部から遠隔操作できることを重視し、前項 3.1 に記載の技術の中から下記を有望と考え、重点的に検討することとした。

- ① 超音波技術を活用したナトリウム中目視検査技術、体積検査技術（ナトリウム全ドレン無しで供用中炉内検査が行なえる。）
- ② レーザー超音波による非破壊検査技術（遠隔操作性の点で優れているため、超音波体積検査技術とは異なる検査方法が期待できる。）
- ③ 局所ナトリウム排除技術（本来ナトリウム全ドレンを前提とするレーザー超音波技術をドレン無しで適用可能にする）

(3) 重点技術の調査結果

前項(2)で絞り込んだ3つの技術について、現状性能と開発動向について調査した。以下にその内容を示す。

(a) ナトリウム中超音波技術

ナトリウム中超音波技術は、可視化技術と体積検査技術がある。

ナトリウム中可視化技術は、トランスデューサをマトリックス状に並べ、観察対象からの反射波の空間分布により形状を特定するものである。性能の現状は、解像度が約 2mm、観察対象からの距離は 1m 以内で視野は 20×20mm である¹⁾²⁾³⁾。

ナトリウム中体積検査技術は、トランスデューサをリニアに並べ、各発信位相を変えることにより収束効果を得ながら観察対象内の欠陥を検出するものである。現状水中試験でφ3mm×L5mm 程度の人工欠陥を検出できている⁴⁾⁵⁾。

(b) レーザー超音波

レーザー超音波は、観察対象表面にレーザーを照射し、熱膨張により内部に超音波を励起させ、その伝播特性の変化により欠陥を検出するものである。その検出はレーザー干渉計を用いて行なうため、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。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。レーザー超音波による非破壊探傷試験の概念を図3.2-1に示す。

この技術は、現在研究開発段階であり、装置が市販される段階には到っていない。原子カプラントにおける適用も検討されていて、複雑な形状に対して遠隔操作で検査を行なうために、光ファイバによる高出力パルスレーザーの伝送技術（コア径1mmの光ファイバで20MWのレーザーパルスを伝送）や、き裂からの反射エコーを検出するための小型プローブの開発などが行なわれている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

(c) 局所ナトリウム排除技術

この技術は、レーザー超音波あるいは光学的目視のための光ファイバーをナトリウム中機器に近づけるにあたり、光ファイバーがナトリウムと接しないよう保護するものである。光ファイバーは、内部を不活性ガス雰囲気にした保護筒内に収納する。そして、保護筒を観察対象面に近づけた状態でガスブローすることによりナトリウムを局所的に排除する。

この技術には「常陽」ナトリウム中コネクタ技術の経験を活用することができる。「常陽」ナトリウム中コネクタは、ナトリウム中に設置された乙コネクタに対し、上方から保護筒内に収納された甲コネクタを近づけ、甲乙両コネクタを保護筒内の不活性ガス雰囲気の中に入れて結合させるものである。この概念は実際に試作してナトリウム中試験が行なわれており、その時の保護筒内径は50mm、流量が4～5L/minのガスをブローすることにより保護筒内部が不活性ガス雰囲気に保たれている。またそのガスがナトリウム中に気泡として放出されるが、保護筒先端に切り欠き（2mm幅×10mm高さ）を設けることにより液面の保持と気泡の大きさが適切になり、保護筒の外側に回収管（先端をラッパ状にしたもの）を設けて気泡の拡散が防止できることを水中試験で確認している⁶⁾⁷⁾。

3. 3 「常陽」 供用中炉内検査への適用概念

(1) ナトリウム中超音波技術

ナトリウム中超音波技術の「常陽」供用中炉内検査への適用概念を図3.4-1と図3.4-2に示す。

図3.4-1は、炉心支持板の連結管内部の健全性（エロージョン等がないこと）

を確認するため、炉心構成要素のエントランスノズル部に超音波トランスデューサを設置した概念である。この装置はしゃへいプラグの制御棒予備孔または燃料交換孔から炉内に向けて装荷されるもので、しゃへいプラグ上にトランスデューサの駆動部や信号取り出し部が設置される。図 3.4-2 は同様の設置概念で低圧プレナム内の可視化を行なうものである。連結管の内径は $\phi 42\text{mm}$ なので、内部に挿入するためには外径を約 40mm とする必要がある。付録 2 のように 2.5mm 角の振動子を 5mm ピッチで配列する場合、 $40\times 40\text{mm}$ の平面に収める場合は 6×6 程度の配列になる。このような構成でどこまで検出性能（解像度や視野）が得られるのか、今後検討が必要である。

(2) レーザー超音波と局部ナトリウム排除技術の組合せ

この概念を炉心支持板の I S I に適用するにあたり、特に低圧プレナムではブローしたガスが内部に残留するのを防止することが重要である。そのため、「常陽」ナトリウム中コネクタにおけるブローガスの気泡回収概念を適用した。図 3.4-3 と図 3.4-4 に気泡回収管の形状に着目して 2 つの案を示す。

A 案（図 3.4-3）は気泡回収管先端に成形ベローズをつけ、観察対象面に押し付ける概念である。気泡回収管の押し付け力と成形ベローズのパネ定数の関係より内管（保護筒）と観察面の距離を把握し、所定の位置で内管（保護筒）を保持してガスブローすることによりナトリウムを排除する。ブローしたガスは保護筒から出た後、全量が気泡回収管の中を通過して上昇する。

B 案（図 3.4-4）は「常陽」ナトリウム中コネクタと同様の気泡回収管を適用した概念で、先端をラッパ状に広げたものである。前項(1)に示したように、連結管部を貫通させるためには気泡回収管の最大外径を約 40mm にする必要があるので、内部に収納する光ファイバーや検出プローブの形状、本数、配置が制約を受ける。保護筒端部にはナトリウム中コネクタと同様切り欠きを設け、気泡放出位置の均一化、気泡サイズの適正化を行なう。

A・B 両案の長所、短所を比較して表 3.2-1 に示す。

内管（保護筒）の内部における配置について、図 3.4-3 と図 3.4-4 では以下のような寸法を想定している。

- 光ファイバ：外径 2mm
- 検出プローブ：外径 10mm

光ファイバについては文献 10) でコア径 1mm の光ファイバで高出力パルスレーザーの伝送を行なっている例が紹介されていることから、少し余裕を取って上記寸法とした。また、このレーザー光で観察対象面表面に残るナトリウムを除去するため、光ファイバ先端を動かしてナトリウム排除領域全体にレーザーを照射できるようにする。一方、検出プローブについては開発例が無いので、上記寸法は暫定的に設定した。今後、耐高温、耐放射線性を考慮して、装置全体

の開発を進める必要がある。

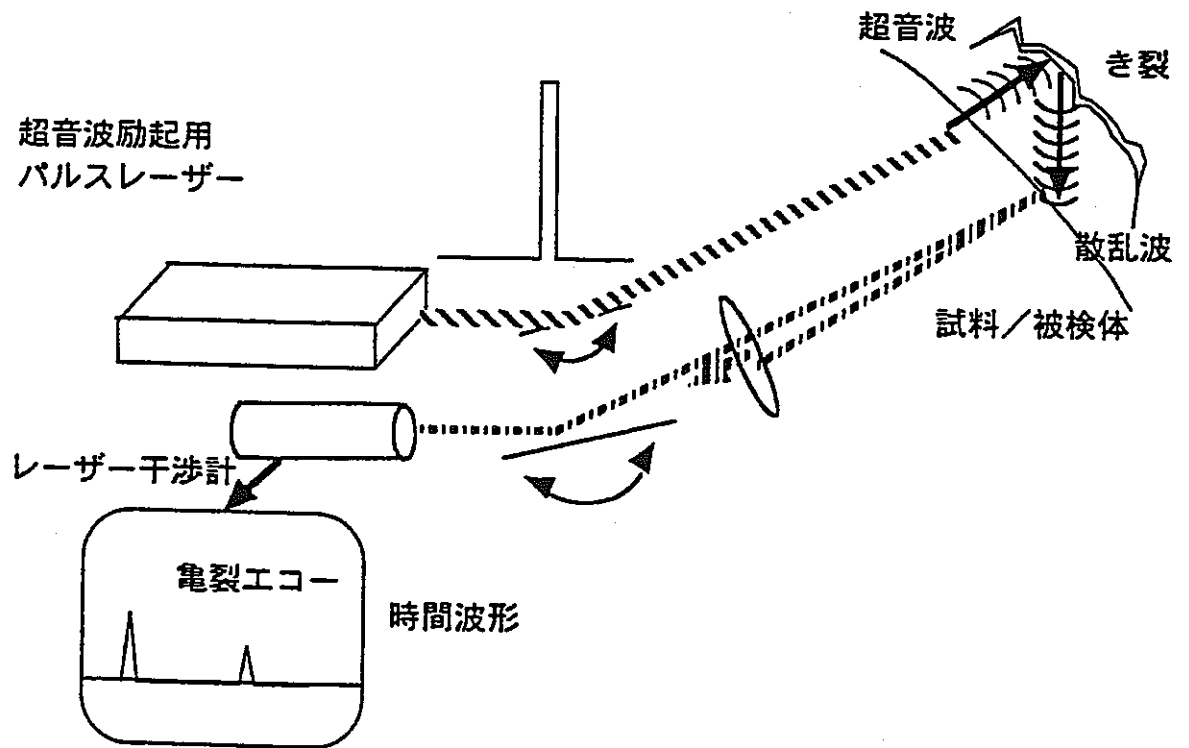
なお、上記A・B両案では一つの内管（保護筒）の中にレーザー光伝送用の光ファイバと検出プローブを収容する概念としたが、超音波発生用のレーザー光供給と検出プローブを分け、それぞれ個別の内管（保護筒）に収納して、異なる連結管から挿入することが考えられる。そして、欠陥検出性能の向上のため、一つのレーザー光供給に対し、複数の連結管位置より検出プローブを挿入することにより、欠陥の分布、位置決め、大きさの特定を行なうことが考えられる。

表3.1-1 炉内ISI技術の候補概念と適用条件

ナトリウム環境		目視検査	非破壊検査(体積検査)
ナトリウム無し (ナトリウム全ドレン)		燃料交換孔からイメージスコープやカメラ等を炉内に装荷し、光学的手段で炉心支持板の目視点検を行なう。	寸法上の制約や雰囲気管理制約のため炉内に点検員が入れないので、非接触、遠隔操作性を有するレーザー超音波技術を適用する。
ナトリウム有り	ナトリウム 一切排除無し	超音波によるナトリウム中目視技術を適用する。この概念はトランスデューサをマトリックス状に並べたものである。	超音波によるナトリウム中体積検査技術を適用する。この概念はトランスデューサをリニアに並べたものである。
	ナトリウム 局所的排除	ナトリウムを局所的に排除することにより、イメージスコープあるいはカメラを炉内に装荷することが出来る。これにより超音波目視技術より高い解像度が期待できる。	ナトリウムを局所的に排除することにより、レーザー超音波による非破壊検査技術を炉内に適用することが出来る。

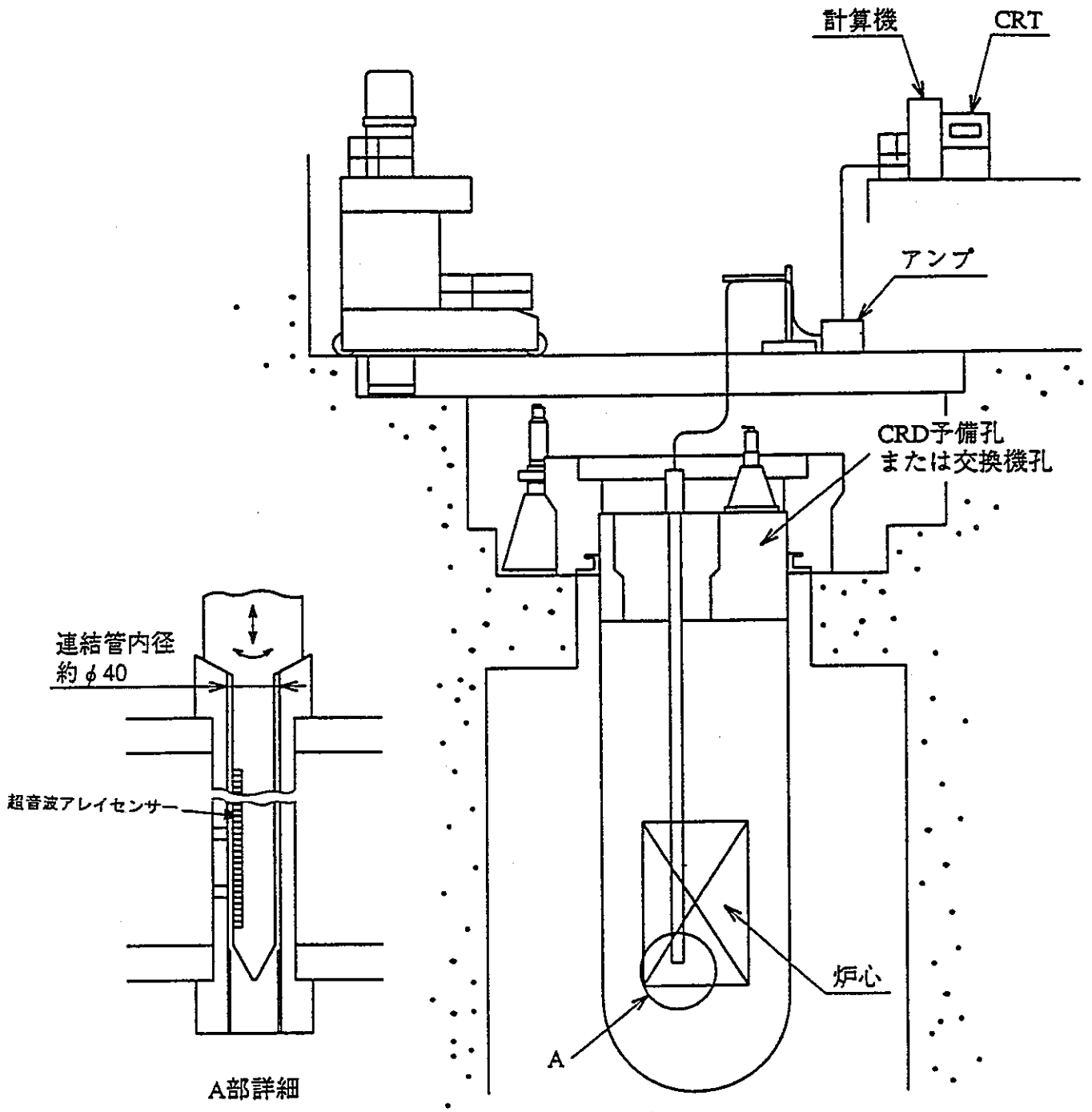
表3.3-1 局所ナトリウム排除概念の特徴

	概念	長所	短所
A案	<p>気泡回収管の先端に成形ペローズを設け、観察対象面に押し付けた時のバネ力に基づいて位置決めを行う。そして内管(保護筒)内のナトリウムをガスブローにより排除する。(図3.4-3 参照)</p>	<p>① 気泡回収管で外部のナトリウムを遮断するため、ナトリウムの排除がB案より確実にこなえる。</p> <p>② 上記①と同様の理由で気泡を確実に回収できる。</p>	<p>気泡回収管を炉心支持構造物に押し付ける時に、構造健全性に影響を及ぼす可能性がある。</p>
B案	<p>気泡回収管の先端をラッパ状にし、内管(保護筒)先端を観察対象面に近づけ、非接触の状態でガスブローすることによりナトリウムを排除する。(図3.4-4 参照)</p>	<p>非接触のため、炉心支持構造物の構造健全性に影響を与えない。</p>	<p>① 保護筒内にナトリウムが残り、更にガスブローの関係で液面が波打つ等不安定な現象が生じる懸念がある。</p> <p>② 気泡が100%回収出来ない可能性がある。</p> <p>③ 気泡回収管の先端をラッパ状に広げるため、保護筒が細くなり、光ファイバや検出プローブ等収容物に対する寸法上の制約が大きい。</p> <p>④ 保護筒先端の位置決め(観察対象面からの距離検出)が困難。</p>



出典：参考文献 8)：非破壊検査第 49 巻第 5 号

図 3.2-1 レーザー超音波法非破壊検査の概念



炉内 Na 中で超音波センサー（アレイセンサー）から超音波を発信し、
割れ孔の画像化を行い、連結管の健全性（IR-ゾーン等がないこと）を
確認する。

図 3.4-1 炉心支持板連結管部の検査概念

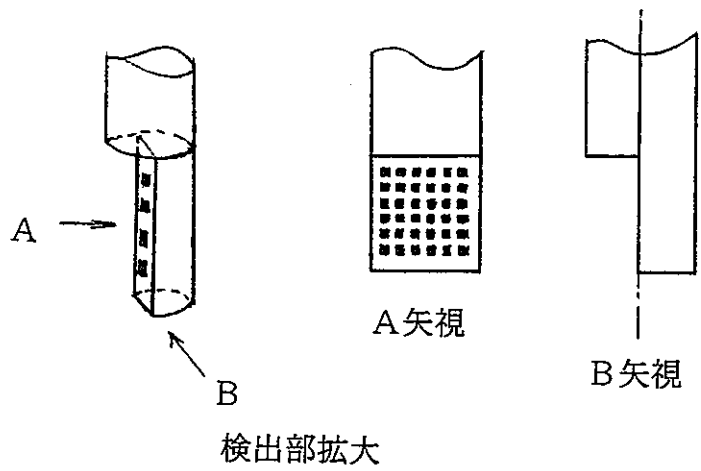
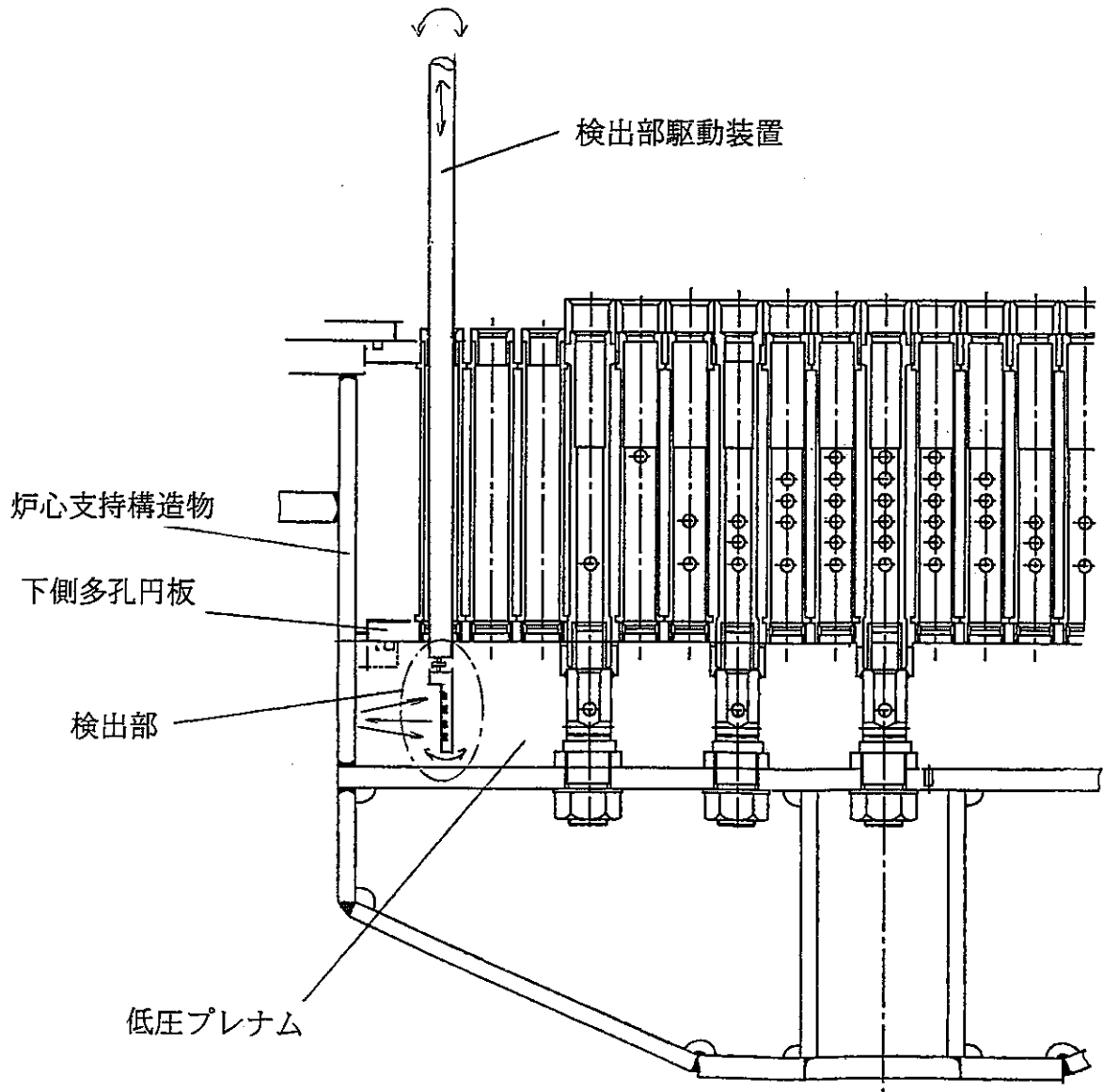


図 3.4-2 炉心支持板低圧プレナム部の検査概念

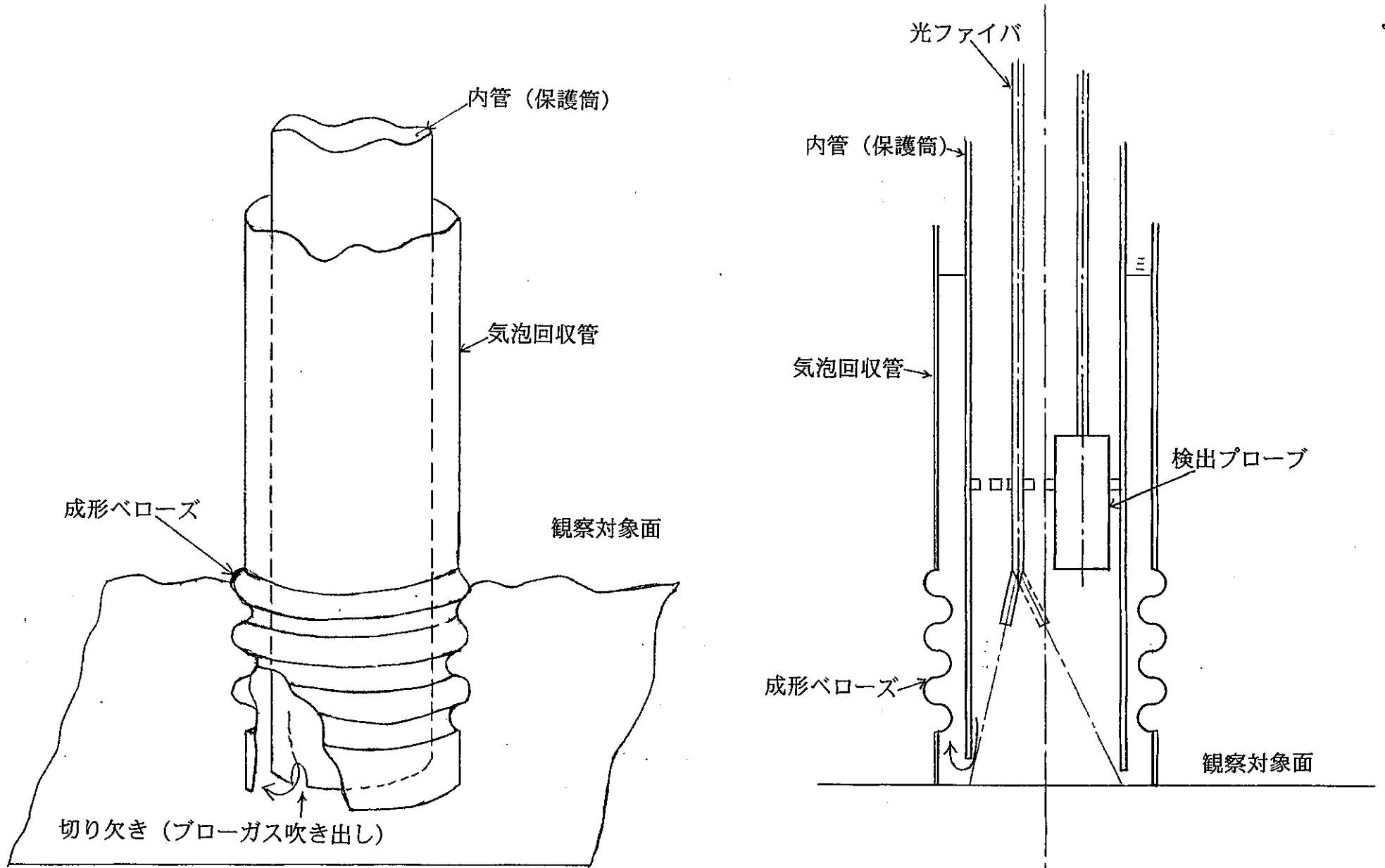


図 3.4-3 レーザー超音波非破壊探傷と局所ナトリウム排除概念
(成形ベローズ方式)

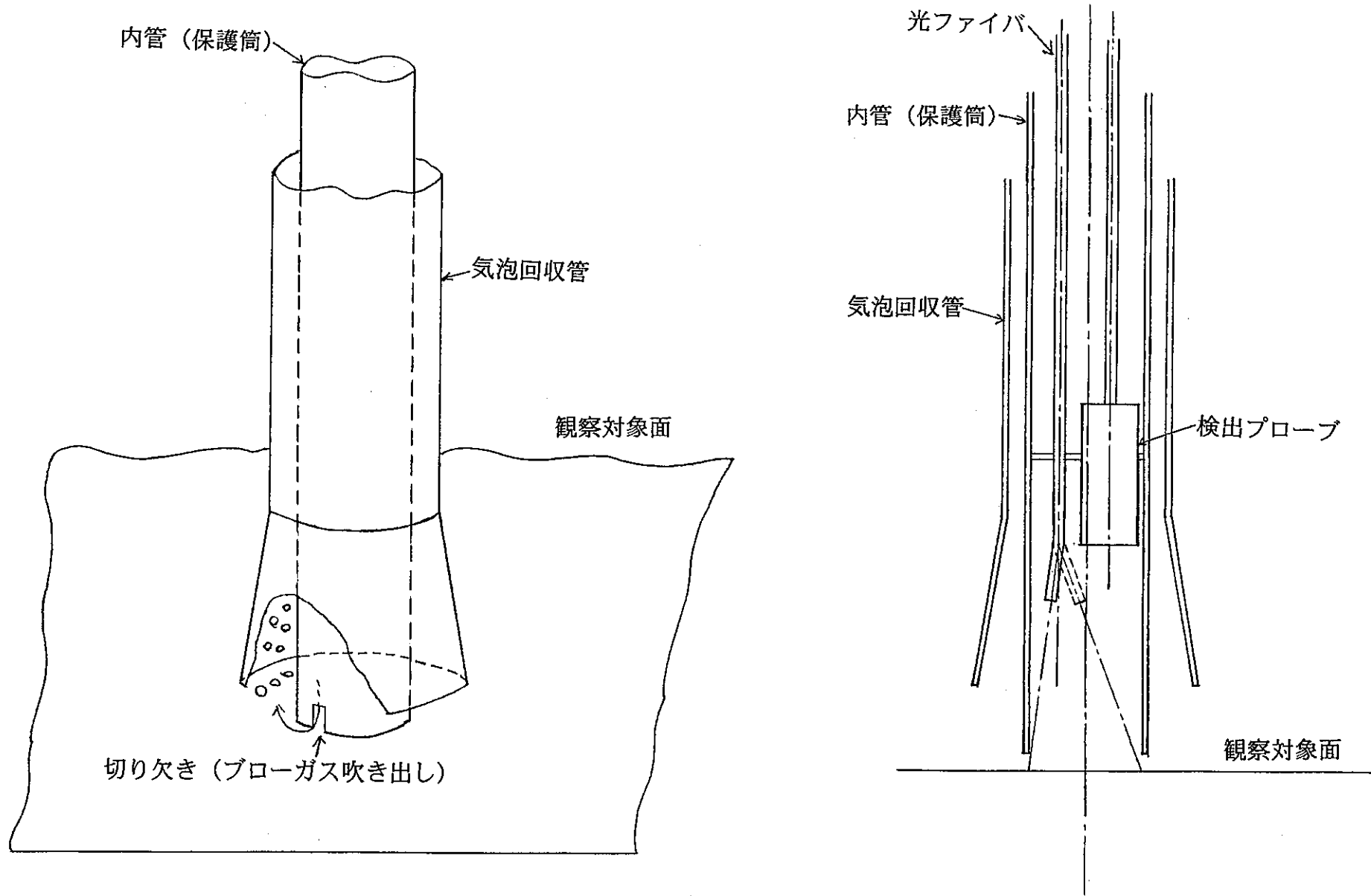


図 3.4-4 レーザー超音波非破壊探傷と局所ナトリウム排除概念 (非接触方式)

3. 4 検討課題の抽出

前項3. 2と3. 3で調査・検討した技術について、今後の検討課題を以下にまとめた。

(1) ナトリウム中超音波技術

現状軽水炉等で行われている検査と同等の精度で表面欠陥を検出するため、出来れば解像度が現状約2mmから1mm程度以下に向上することを期待する。特に炉心支持板の低圧プレナム内部を見る場合は、連結管の寸法制限により現在開発途中のものよりかなり振動子を少なくする必要があるため、その条件下でどこまで性能が得られるか、確認が必要である。

(2) レーザー超音波による非破壊検査技術

- ① レーザー超音波による非破壊検査技術は現在研究開発段階であり、欠陥検出性能（欠陥の大きさ、位置、形状等）そのもの見極めが必要である。
- ② 供用中炉内検査に適用するためには、光ファイバー経由でレーザー光を供給し、小型プローブで検出を行なうことになる。これらは局所ナトリウム排除概念と組み合わせる関係から寸法制限を受けるため、極力小型化する必要がある。
- ③ 検出プローブについては、FBR環境（高温、高放射線環境下、ナトリウムベーパー）で使用出来るよう開発が必要である。また、高出力パルスレーザーを伝達する光ファイバについても環境条件の確認が必要である。
- ④ 高出力パルスレーザーを伝達する光ファイバは、観察対象面の表面に残留するナトリウム膜を除去するため先端に可動部を設ける。その機構を検討する必要がある。
- ⑤ 超音波励起用のレーザーで表面ナトリウム除去を行なうことに関し、レーザーの出力とナトリウム除去性能の関係等を見極める必要がある。

(3) ナトリウム局所排除技術

- ① ナトリウム局所排除技術に関して、内管（保護筒）の先端形状や観察面との距離、ブローガス流量等とナトリウム除去性能の関係を確認する必要がある。
- ② 気泡回収管については、成形ベローズタイプの場合はベローズの剛性と荷重検出精度を最適化しながら、炉心支持板の構造健全性を損なわないよう設計する必要がある。また、非接触型（ナトリウム中コネクタと同じ形）の場合は、内管（保護筒）の位置決め、気泡回収管の形状と気泡回収性能、そしてナトリウム除去性能の確認が必要である。
- ③ 今年度は観察対象面が水平の場合を検討したが、今後垂直面やすみ肉溶接部等への適用を検討する必要がある。

(4) 遠隔操作技術の向上（アクセス及び位置決め技術）。

ナトリウム中超音波技術におけるトランスデューサや、局所ナトリウム排除技術の保護筒等を観察対象部に対して所定の距離・角度で位置決めする必要がある。今後供用中炉内検査の検討を進めるにあたり、複雑な形状をした炉内構造物の各所にアクセスするために柔軟に位置決めできるようなメカニズムを検討する必要がある。

4. あとがき

「常陽」原子炉構造条件下で適用可能な供用中炉内検査技術を調査し、「常陽」への適用概念を検討した。

本検討では、ナトリウム全ドレンを行なわないこと、炉上部からの遠隔操作に対応できることを重視し、超音波技術の活用、局所ナトリウム排除技術、レーザー超音波技術が有望と考えた。そして、本来ナトリウム全ドレンを必要とするレーザー超音波技術をナトリウム環境下で適用するために必要となる局所ナトリウム排除技術に着目した。

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。

最後に、本検討におけるレーザー超音波技術の適用に関して、小舞正文研究員（現在、(株)東芝）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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,小舞他
- 2) 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,泉他
- 3) 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,田村他
- 4) 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,唐沢他
- 5) 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, 小舞他
- 6) ナトリウム中コネクタの開発（総集編）、PNC TN9410 98-076、1998年、片岡一他
- 7) ナトリウム中コネクタの開発（Ⅱ）、PNC ZN9410 91-210、1991年、濱崎茂幸他
- 8) レーザー超音波法の原理と応用、非破壊検査第49巻5号(2000)、pp.292-299、山中一司
- 9) 発電プラントにおけるレーザ応用計測技術、東芝レビューVol.55 No.10(2000)、竹島徳幸他
- 10) 原子力におけるレーザ応用技術開発、東芝レビューVol.55 No.10(2000)、宮野廣他
- 11) レーザー励起表面波による微小欠陥検査（1） 日本原子力学会「1999 春の年会」E27, 成瀬他