

蒸気発生器の検査装置について

1. 「もんじゅ」の蒸気発生器の概要と特徴
2. 蒸気発生器の設計・製作管理
3. 蒸気発生器の供用期間中検査（ I S I ）
4. 蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷検査
5. 検査装置の性能
6. 今後の検査装置の開発

平成 13 年 10 月 27 日

核燃料サイクル開発機構

蒸気発生器の検査装置について

1 「もんじゅ」の蒸気発生器の概要と特徴

1.1 蒸気発生器の概要

(1) 「もんじゅ」の炉心で発生した熱は、1次主冷却系を經由して中間熱交換器を介して2次主冷却系ナトリウムに伝えられ、蒸気発生器で水と熱交換して発電する。蒸気発生器は2次系に位置するため、そこで発生するトラブルが直接原子炉に影響しにくいシステムとなっている。また、2次主冷却系の途中から分離した補助冷却設備（空気冷却器）をもっているため、蒸気発生器は原子炉停止時の崩壊熱除去の機能を期待されてない。

（図-1）

(2) 水 / 蒸気は伝熱管内を流れる。蒸発器及び過熱器で給水入口部から入った水 / 蒸気は、入口管板部で伝熱管に分岐して、下向きに下降管を通過して流れ、その後、Uベント部で流れを上向きに変え、らせん状にヘリカルコイル部を上昇して、出口管板部から出ていく。（図-2）

(3) この伝熱管は、蒸発器では約 84m、過熱器は約 46mの長さで、1基当たりそれぞれ 140本、147本ある。

(4) 一方、ナトリウムは蒸気発生器の上部から流入して、ヘリカルコイル部で熱交換しながら下向きに流れ、蒸気発生器の下端から出ていく。

なお、「もんじゅ」の蒸気発生器は、軽水炉での機器区分との対比上は第4種機器に該当するともいえるが、我国で初めてのナトリウム冷却炉用蒸気発生器であることを考慮して第3種機器にグレードを上げて設計・製作されている。

1.2 蒸気発生器の特徴

(1) ヘリカルコイル形

胴と伝熱管の熱膨張を吸収しやすい。

直交流熱伝達となり、伝熱特性が良好である。

機器の小型化が図れる。

(2) 管板

製作経験が多く実績に優れている。

伝熱管の供用期間中検査及びプラグが容易である。

(3)有液面

ナトリウム・水反応時の圧力上昇が緩和できる。

蒸気出入口管板の熱応力が緩和できる。

(4)フランジ構造（蒸発器）

供用期間中、何らかの理由で、リークした伝熱管を補修する必要がある場合に作業が容易である。

2 蒸気発生器の設計、製作管理

蒸気発生器伝熱管に発生すると想定される欠陥は、割れ、孔食、支持部減肉等の欠陥が考えられる。これらの想定される欠陥に対しては、設計製作段階で発生原因を取り除くよう対策を講じている。

2.1 設計段階での配慮

- (1)軽水炉で経験した応力腐食割れに関しては、応力腐食割れを起こしにくい材料を選定するとともに水側の溶存酸素濃度を低く管理する方法で応力腐食割れ防止対策を講じている。
- (2)伝熱管製造時に発生する欠陥に対しては、非破壊検査によって有害な欠陥を排除するとともに、非破壊検査で検出限界以下となる欠陥に対しては、破壊力学的評価により寿命期間中の応力サイクルではほとんど進展しないことを確認している。
- (3)水側の高温水腐蝕による減肉と、伝熱管支持部のゴーリング(伝熱管が軸方向に伸び縮みすることによって生じる摺動磨耗)に対しては、水側にクレビス部を設けない構造を採用することや水質管理と伝熱管支持部構造を工夫することによって、その発生を抑制している。

2.2 製作段階での配慮

- (1)原子炉施設は、建設段階において国の「使用前検査」や「溶接検査」を受けなければならないが、「使用前検査」は、各種機器の素材入手時の材料検査から始まり、機器の製作、据付工事、試運転の各段階において、工事及び性能にかかわる検査が行われる。
- (2)「もんじゅ」の蒸気発生器は、各種の部品がいろいろな検査を経て、製作され、組み立てられている。なお、組立時には、伝熱管支持部が伝熱管母材部となるよう配慮している。(図-3)
- (3)蒸気発生器が現地に据付けられ、工事にかかわる使用前検査は完了しているが、性能にかかわる使用前検査は完了しておらず、

途中段階である。

- (4) 検査には法令に基づく使用前検査のほか、サイクル機構が自主的に実施した検査があり、総合機能試験で実施した伝熱管検査装置の作動試験や供用期間前のデータ取得は自主的な検査である。
- (5) 蒸気発生器伝熱管について実施された検査は、以下のとおり。
 - 工場製作のための素材入手時に実施する材料検査
 - 工場で溶接前に実施する開先検査等
 - 工場で溶接後に健全性を確認するため行う非破壊検査等
 - 工場で各種部品を組立てた後に実施する耐圧漏えい検査等
 - 現地で各種部品を組立てた後実施する外観検査等
- (6) 以上の検査等によって、「もんじゅ」の蒸気発生器の健全性は十分確認されている。

3 蒸気発生器の供用期間中検査 (ISI)

3.1 供用期間中検査 (ISI) の目的

軽水炉の供用期間中検査は、民間規格「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 (JEAC 4205)」に基づき実施している。「もんじゅ」では、冷却材にナトリウムを使用することに考慮を払うとともに、高速実験炉「常陽」の実績を踏まえ、また軽水炉の供用期間中検査を参考とし、「もんじゅ」の原子炉施設に適合した供用期間中検査計画を作成し、これに基づいて検査を実施する計画である。

蒸気発生器は、原子炉冷却材バウンダリを構成する機器ではなく、原子炉の崩壊熱除去機能を有する機器でもない。しかし、伝熱管壁を隔てて水とナトリウムが存在する高速増殖炉特有の機器であり、運転実績が少ないことに鑑み、原子力発電所の信頼性向上を図る観点から蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査を実施する。(図-4)

3.2 供用期間中検査 (ISI) の方法

- (1) 万一の伝熱管からの水漏えいは、水漏えい検出器 (水素計)、カバーガス圧力計、圧力開放板開放信号により監視されている。サイクル機構は、液体金属冷却型原子炉の検査規則を定めた米国の基準 ASME Sec. XI Div.3 の連続監視による検査の考え方

を参酌し、これら水漏えい監視系のうち、小規模の水漏えいを監視する水素計を用いた漏えい監視を、供用期間中検査の一手段として位置付けている。

- (2)これによって、プラント運転中の小漏えいを常時監視し、伝熱管から水漏えいが発生した場合、漏えいを初期段階で発見し、伝熱管の破損規模が拡大する前に適切な措置を講じられるようにしている。
- (3)水漏えい検出設備を使用し、原子炉運転中における水漏えいの連続監視を行う。この漏えい検出設備は、ナトリウム中あるいはカバーガス中の水素濃度を監視し、水素濃度の変化から水漏えいの有無を検出する。
- (4)また、蒸気発生器全伝熱管は、設計製作段階で、種々の破損防止対策が講じられており、信頼性が高いものとなっているが、これに加えて、定期検査期間中に供用期間中検査として渦電流探傷検査（ECT）を実施し、伝熱管の構造健全性を確認することとしている。

4 蒸気発生器伝熱管の渦電流探傷検査

4.1 渦電流探傷検査装置の概要

- (1)検査装置は、信号検出部（センサ）の励磁用コイルに交流を流し、伝熱管に生じる渦電流の変化を検出用コイルで検出して、伝熱管の減肉や傷等を検出する技術であり、軽水炉や一般産業用に広く用いられている。（図-5、表-1）
- (2)現有の検査装置は、検査用プローブ（渦電流探傷検査を行うためのセンサとケーブルの集合体）、位置決め装置（検査用プローブの挿入位置を決める装置）、プローブ挿入装置（検査用プローブをガス圧により伝熱管内へ送る装置）、渦電流探傷収録装置（ECT信号を表示及び収録する装置）、オフライン信号処理装置（ECT信号データを解析する装置）から構成される。（図-6）
- (3)また、検査用プローブは、蒸発器と過熱器の伝熱管材料の違いを考慮して、それぞれ特徴をもったセンサで構成されており、特に、蒸発器用については、伝熱管の内面検査用センサと外面検査用センサとがある。（図-7）

4.2 伝熱管の検査方法

- (1)伝熱管検査においては、伝熱管 1 本の検査毎に渦電流探傷プローブが標準欠陥試験片を通過する機器構成としており、プローブを伝熱管に挿入する前に欠陥検出感度を確認する。
- (2)伝熱管全長に亘る検査は、プローブを伝熱管に挿入し、ガス圧により、200～400mm/秒の速度で移動させながら伝熱管の検査データを採取する。

4.3 開発経緯

- (1)蒸気発生器用の渦電流探傷検査装置の開発は、昭和 48 年に予備検討に着手し、その後の研究開発のための方向付けを行うとともに、昭和 51 年からは装置を具体化し、性能の向上を図る研究開発を進めてきた。
- (2)これらの成果を踏まえながら、昭和 62 年からは、「もんじゅ」の蒸気発生器用の検査装置の設計検討を開始し、平成 2 年に製作が完了している。
- (3)大洗工学センターのもんじゅ伝熱管を模擬したモックアップ設備（実物大模擬試験装置）にて、この検査装置のシステム性能試験を行うとともに、平成 3 年からは「もんじゅ」での総合機能試験及び供用期間前検査に使用している。（図-8）

4.4 検査装置の使用実績

(1)実物大模擬試験装置における検査

「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の検査のため、平成元年から平成 2 年にかけて渦電流探傷検査装置を設計・製作し、実物大模擬試験装置を用いて、検査装置のシステム性能試験、取扱習熟訓練を実施している。（図-9）

(2)「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の検査

「もんじゅ」では、平成 3 年 5 月から 10 月にかけて、総合機能試験の一環として、「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管による検査装置の作動確認、検査プローブの挿入・引抜き性能確認、探傷データの採取等を行った。（表-2）

この結果、「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管への適用性が確認され、蒸発器及び過熱器の全伝熱管（861 本）の検査データを採取している。

5 検査装置の性能

5.1 実物大模擬試験装置における性能

開発した検査装置を用いて、プローブを実物大模擬試験装置の伝熱管全数、全長に亘って滑らかに挿入できた。また、欠陥検出性能は伝熱管外面では、蒸発器伝熱管について板厚の10%深さの減肉を、過熱器については2%深さの減肉をそれぞれ検出している。(図-10)

5.2 「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管検査における性能

検査装置は、「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管全数に接続し、伝熱管の全数、全長に亘って探傷データを採取した。(図-11)

一部の伝熱管検査データにノイズの大きいものがあったが、渦電流探傷(ECT)の検査目標である伝熱管厚みの20%深さを超える欠陥(減肉)を検出できる水準であり、必要な性能は確保できている。

6 今後の検査装置の開発

現在、平成3年に実施した「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の検査において、一部の検査データにノイズの大きいものがあったことから、ノイズの低減と欠陥検出性能の向上を目的として、新しい検査装置の開発に取り組んでいる。

ノイズの発生原因は、伝熱管の中でセンサが振動することにより生じるものと考えており、これまでにノイズ対策を施したセンサを試作し、実物大模擬試験装置においてその効果を確認した。

サイクル機構としては、検査精度の更なる向上を図るため、今後も検査装置の技術開発を継続する計画でいる。(図-12)

なお、サイクル機構の行う研究開発では、海外機関・企業・研究者の活用も含め、一般には競争的環境の下で、効率的に研究開発を進めることが求められているが、「もんじゅ」の蒸気発生器伝熱管は、全長が長く、形状がヘリカイルコイル状である等の特徴があることから、その検査装置を開発するためには、従来の渦電流探傷技術だけでなく、蒸気発生器全体の設計・製作に関する十分な知識と経験を持つことが必要である。

このため、サイクル機構としては従来から検査装置の開発を担

当してきた三菱重工業(株)と今後とも協力して検査装置の開発を進めていく計画であり、三菱重工業(株)がこの開発から下りたという事実はない。

表 - 1 一般産業での使用例

区分	目的	具体例	基準欠陥等
素材検査	製造工程中の最終工程で試験を行い製品の良、不良を判別する	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼管 貫通方式のコイルを用いて製造時の欠陥検出に適用 材質:磁性体(低合金鋼管) 非磁性体(ステンレス鋼管) 管外径:10~180mm、肉厚:1~20mm ・その他丸棒鋼など 貫通方式のコイルによる探傷が適用されている 材質:磁性体、棒径:2~100mm 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼管(JIS) 種類:角みぞ、やすりみぞ、貫通穴 深さ:肉厚の10%~50% ・その他丸棒鋼など(JIS) 種類:角みぞ、貫通穴 深さ:肉厚の5%~50%
保守検査	配管・機器などについて保守管理のため検査を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・タービン復水器伝熱管 内挿方式のコイルを用いて保守検査に適用 材質:非磁性体(Ti管、黄銅管)、管外径:25mm 肉厚:1mm ・ガス埋設管 内挿方式のコイルを用いて腐食検査に適用 材質:磁性体(炭素鋼管)、管外径:50~80mm 肉厚:3.8~4.2mm ・その他 火力プラント等の機器(熱交換器伝熱管) 内挿方式のコイルを用いて保守検査に適用 材質:非磁性体(真ちゅう管、ステンレス鋼管、黄銅管) 磁性体(炭素鋼管、低合金鋼管) 	<ul style="list-style-type: none"> ・タービン復水器伝熱管(自主) 種類:全周スリット、貫通穴 深さ例:20%t~80%t ・ガス埋設管(自主) 種類:部分減肉 深さ例:50%t~90%t ・火力プラント給水加熱器(自主) 種類:全周角みぞ、部分みぞ 深さ例:50%t

表－２ 総合機能試験及び供用期間前検査の概要

1. 実施時期

○平成3年5月～平成3年10月

2. 試験概要

(1) 総合機能試験

- ・ 位置決め性能確認試験
- ・ 検査用プローブの挿入・引抜き性能確認試験
- ・ 探傷データの採取機能試験

(2) 供用期間前検査

- ・ 探傷データ採取及び収録

3. 試験及び検査結果

- (1) 全ての伝熱管に対して、位置決めが可能。
- (2) 全ての伝熱管に対して、検査用プローブの挿入及び引戻しが可能。
- (3) 伝熱管全長にわたり検査データの収録が可能。
- (4) 試験期間内に課題を解決し、ほぼ予定された期間内に終了。
- (5) 収録したデータは、その後約1年かけてデータ評価を行い、支持部、溶接部、バンド部に特異な信号を識別して整理。

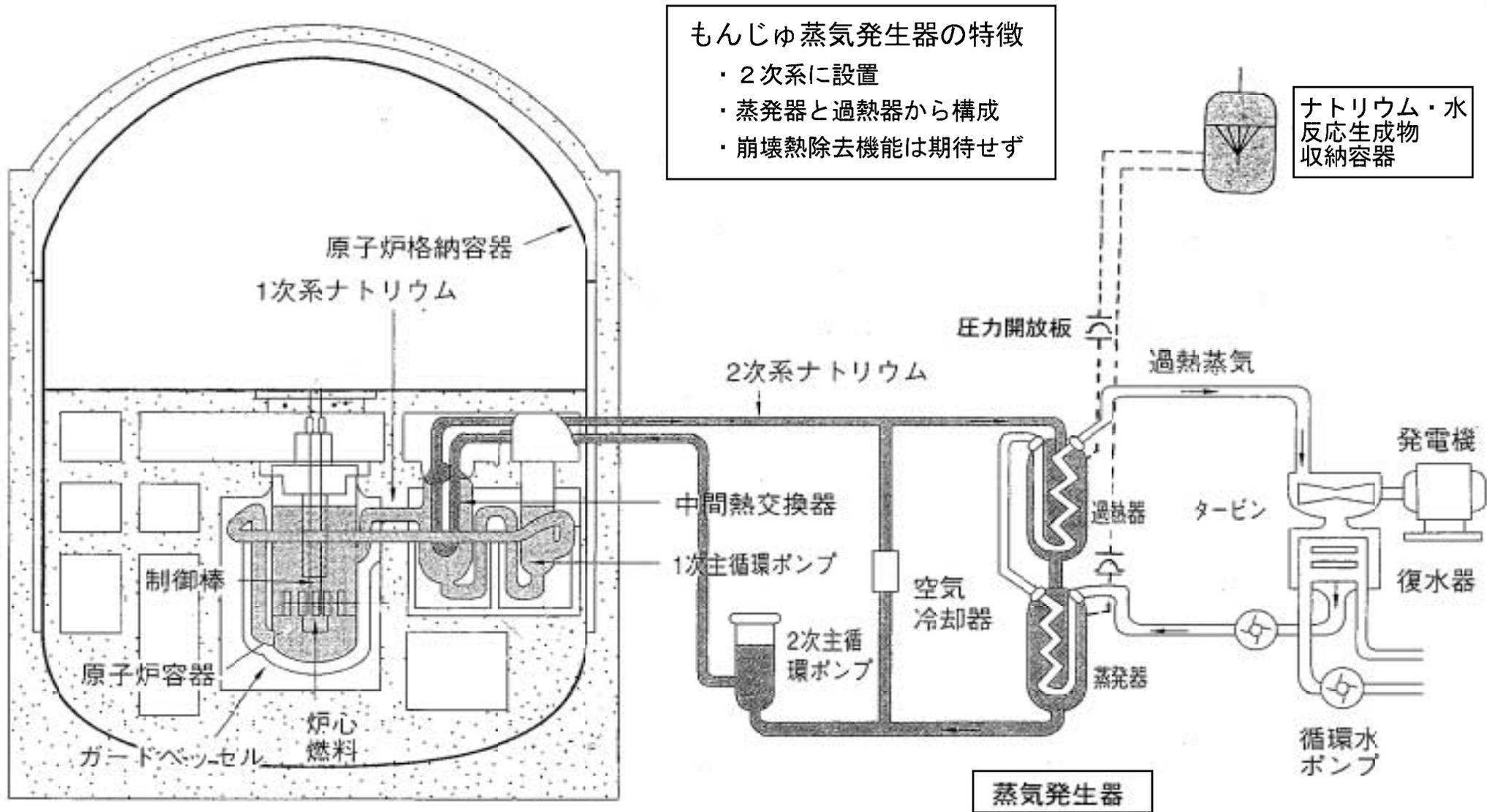


図-1 「もんじゅ」の冷却系系統図

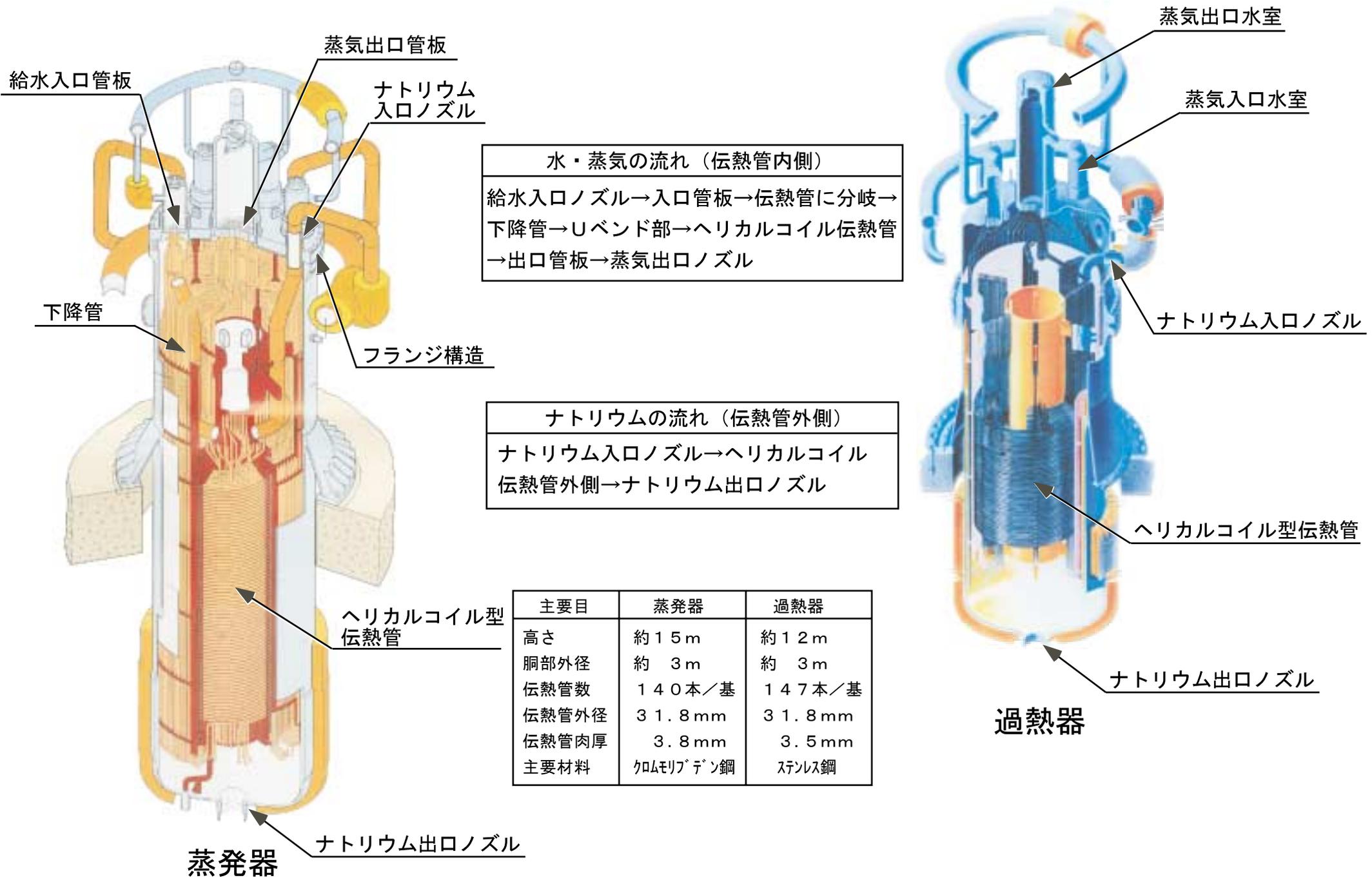


図-2 蒸気発生器の概要

供用期間中検査（ISI）の目的

「もんじゅ」の蒸気発生器は、原子炉冷却材バウンダリを構成する機器でなく、また原子炉の停止時に崩壊熱除去機能を有する機器ではありません。しかし、伝熱管壁を隔てて水とナトリウムが存在するもんじゅ特有の機器であり、運転実績が少ないことを鑑み、事故・トラブルを未然に防止して、信頼性の高いプラントを目指して、供用期間中検査を実施するものです。

供用期間中検査（ISI）の方法

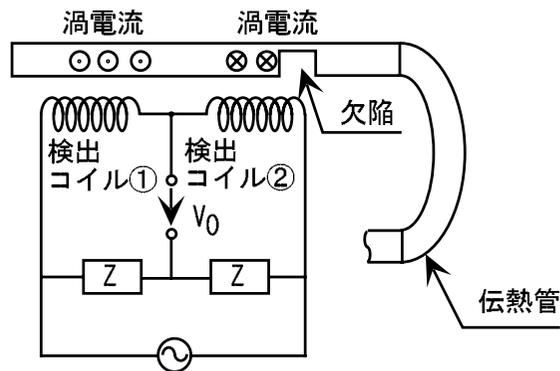
- (1) 水素計による水漏えい監視
- (2) 定期検査期間中における渦電流探傷（ECT）による伝熱管検査

図－４ 「もんじゅ」蒸気発生器の供用期間中検査（ISI）

測定原理

励磁コイルに交流
 ↓
 伝熱管に渦電流が発生
 ↓
 減肉などの欠陥がある場合
 ↓
 渦電流に乱れが発生
 ↓
 検出コイル①と②の電圧に差

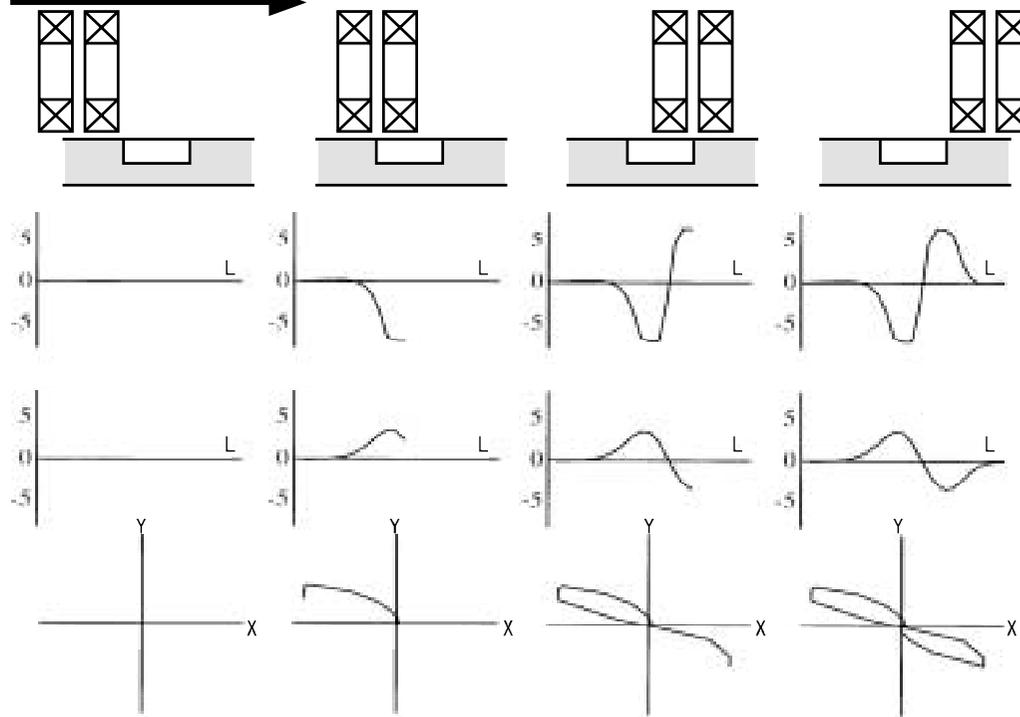
検出信号



検出信号の例

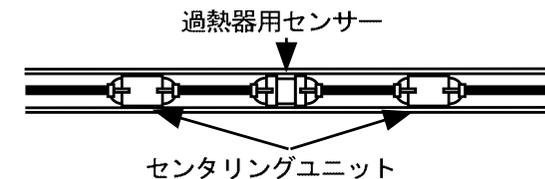
検出コイルの移動距離 (L)

X信号出力 Y信号出力
 ベクトル図



伝熱管内面と外面の測定法

(1) 伝熱管内にプローブを挿入



(2) センサーと管内面との間に隙間

↓
 多少のノイズの原因

- ① センサーを管中心に保持 (センタリングユニット)
- ② 信号とノイズとを位相差で識別

(3) 伝熱管の支持部、溶接部、曲がり部 (バンド部) でも渦電流の乱れ

↓
 特有の信号を検出

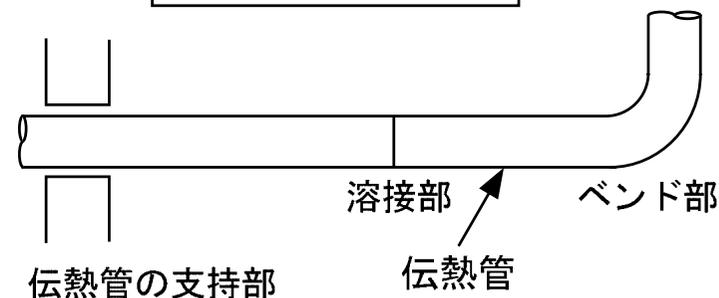


図-5 渦電流探傷 (ECT) の測定原理

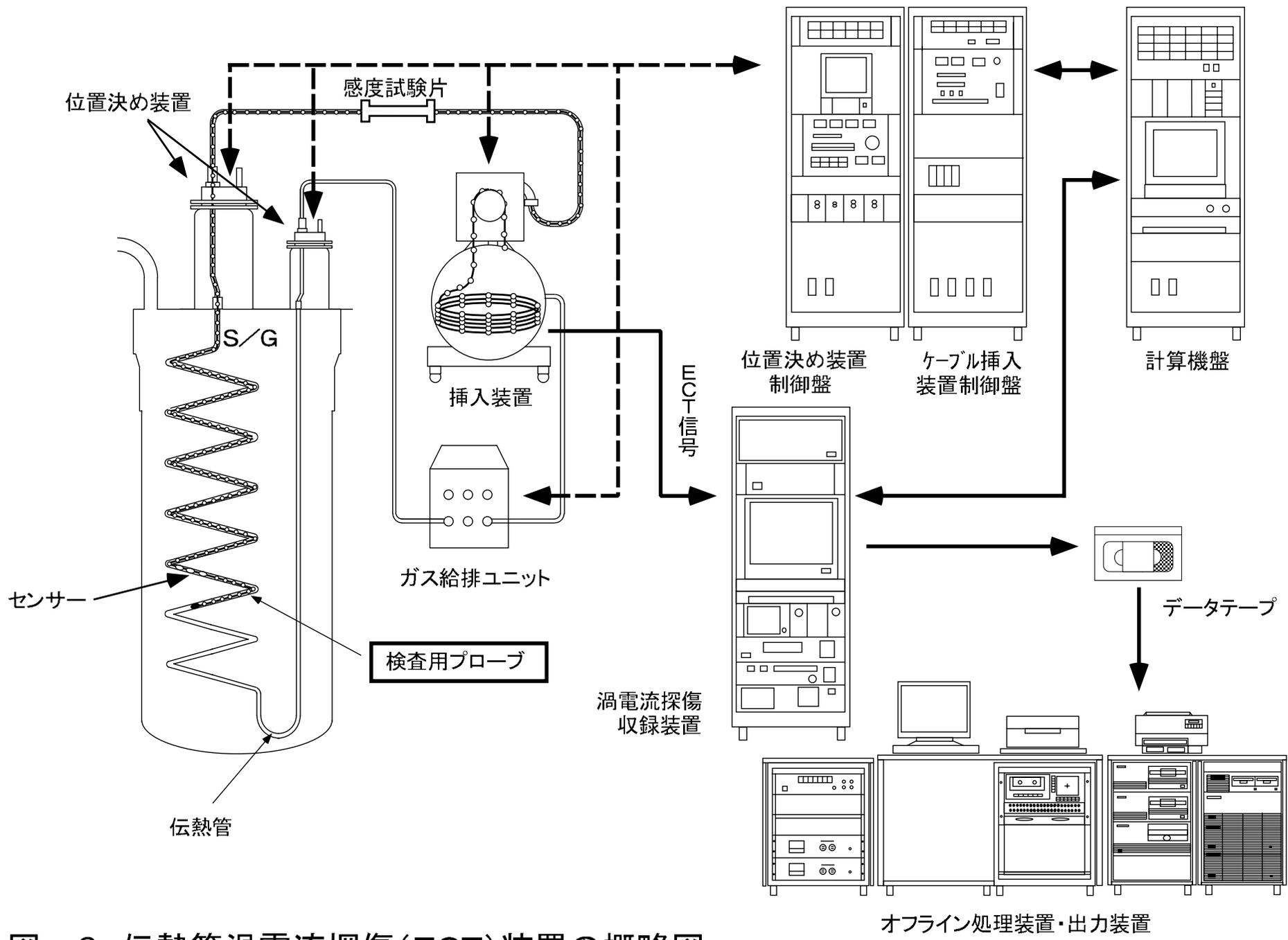
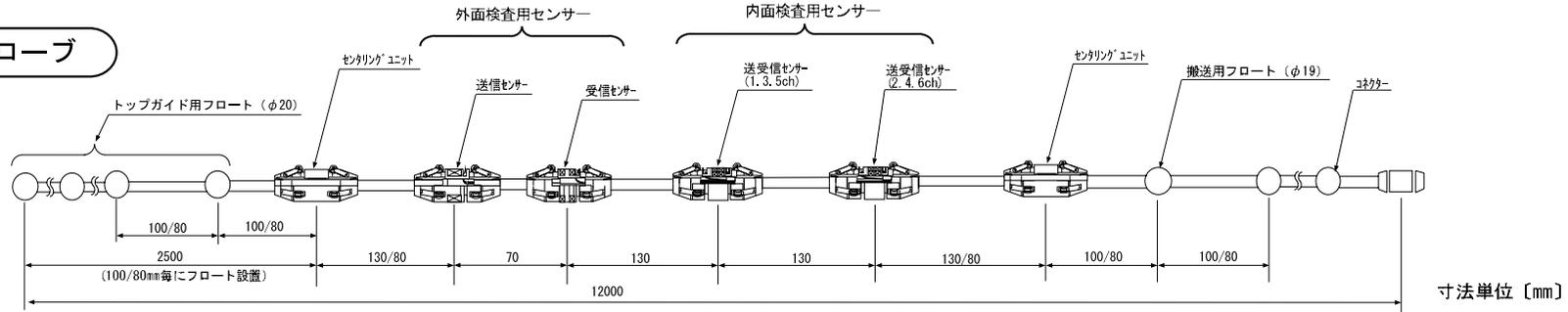


図-6 伝熱管渦電流探傷(ECT)装置の概略図

	もんじゅ		軽水炉 (PWR)
	蒸発器	過熱器	
伝熱管材質	クロムモリブデン鋼	ステンレス鋼	インコネル
磁氣的性質	強磁性体	非磁性体	非磁性体
外径 x 肉厚	31.8mm x 3.8mm	31.8mm x 3.5mm	22.23mm x 1.27mm

1. 標準プローブ



		センサーの構造	プローブの構造
蒸発器 強磁性体としての工夫	伝熱管内面検査用	マルチセンサー (励磁コイルと検出コイルが一体の構造であり、コイルは周方向に3分割型) 3分割型コイル 	<p>リモートフィールドセンサー</p> <p>マルチセンサー</p> <p>センタリングユニット</p> <p>伝熱管の中にプローブを挿入して管の内外面を検査する</p>
	伝熱管外面検査用	リモートフィールドセンサー (励磁コイルと検出コイルが離れた構造である) 励磁コイル 検出コイル 	
過熱器 厚肉としての工夫		過熱器用センサー (励磁コイルと検出コイルが一体の構造であり、3周波多重探傷方式: 40KHz; 20KHz; 10KHz) 	<p>過熱器用センサー</p> <p>センタリングユニット</p>

図-7 もんじゅ蒸気発生器伝熱管の検査用プローブ

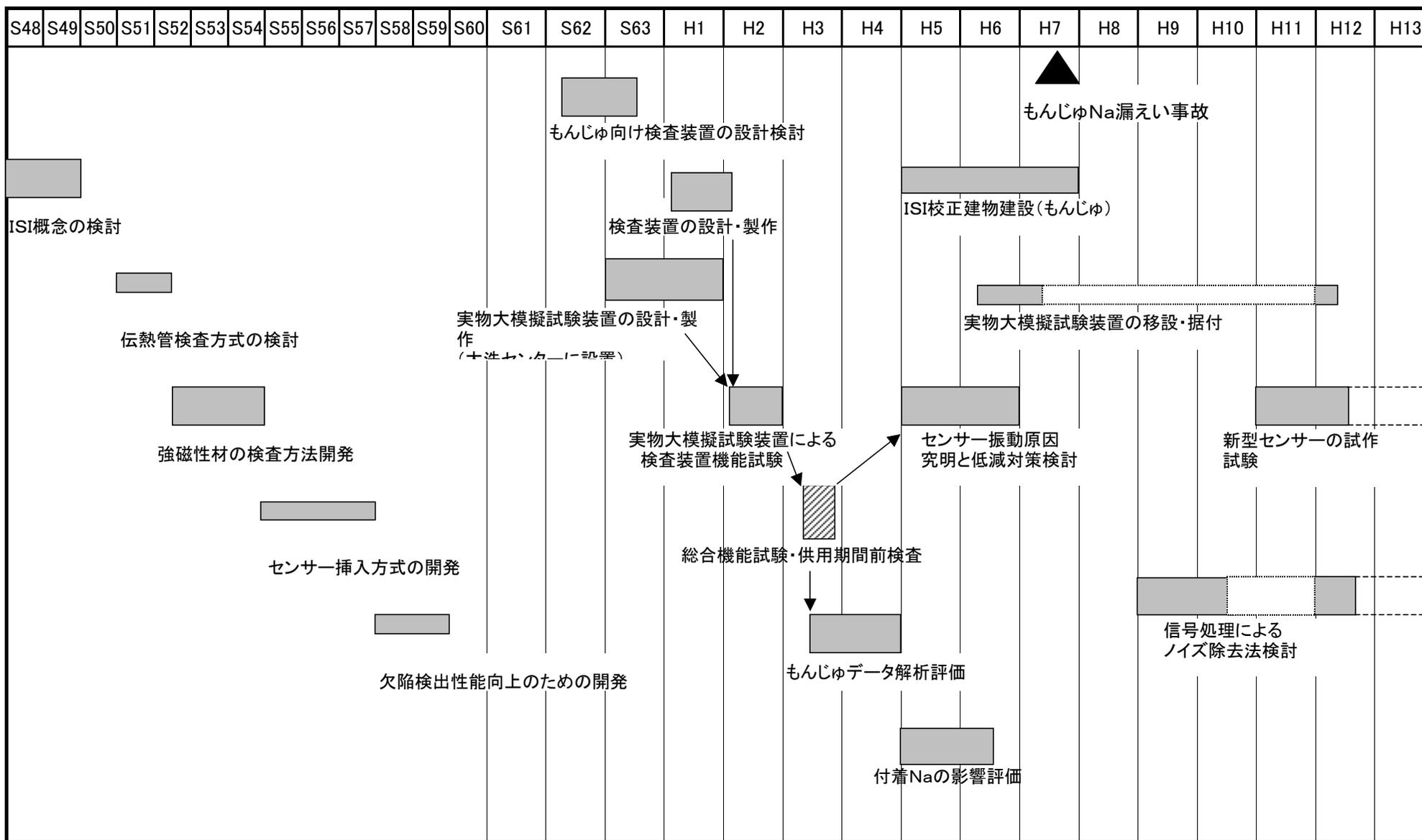
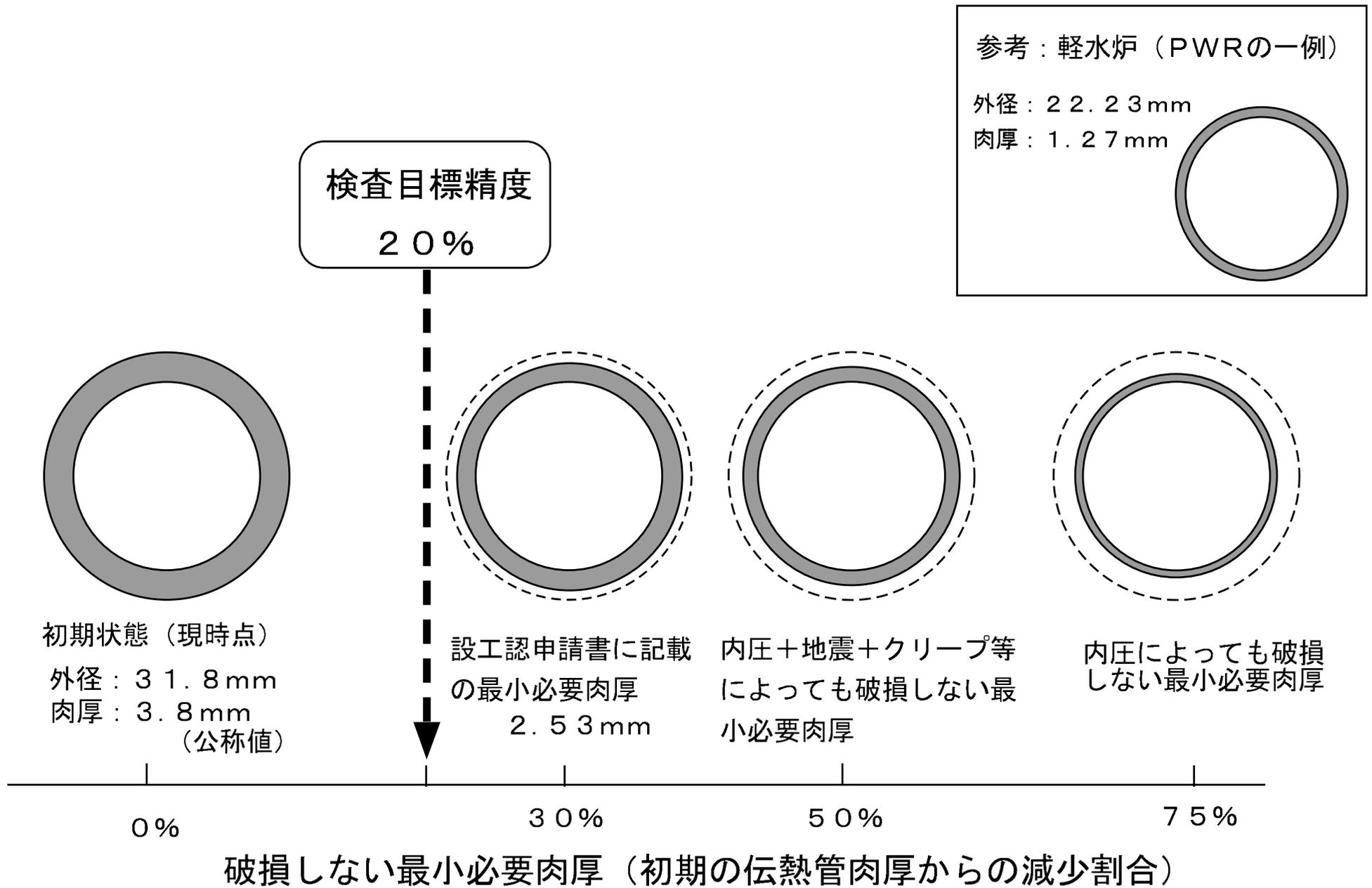


図 - 8 蒸気発生器用渦電流探傷検査装置の開発経緯



図－9 渦電流探傷（ECT）の検査目標精度

(1) 実施時期：平成2年～3年

(2) 試験内容

- ①装置の取扱作業性 ②管位置決め性
- ③検査プローブの挿入・引抜き性 ④欠陥検出性能

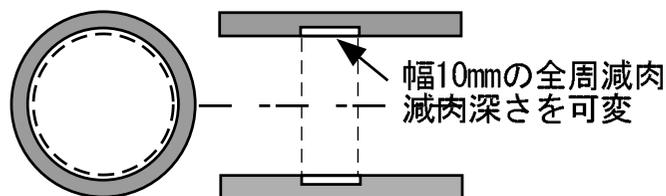
(3) 検出可能な欠陥の大きさ (肉厚減肉割合%*)

*初期の伝熱管肉厚を100%とした
場合の減肉量

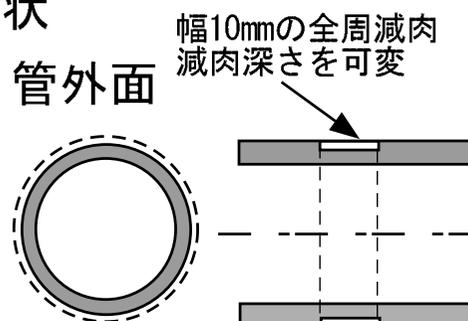
測定 部位	蒸発器				過熱器			
	伝熱管の 一般部位	特殊部位			伝熱管の 一般部位	特殊部位		
		支持部	溶接部	バンド部		支持部	溶接部	バンド部
管内面	2.5	2.5	(2.5) 注1	2.5	1	1	(-) 測定せず 注2	1
管外面	5	5 / 10 注3	(5) 注1	5	2	2	(-) 測定せず 注2	2

(4) 試験に使用した人工欠陥形状

管内面



管外面



- 注1) プローブ単体での結果
- 注2) 最近のプローブ単体の結果
では、20%以下。
- 注3) 下降管支持部は5%、ヘリカル
コイル支持部は10%。

図-10 実物大模擬試験装置による検査装置機能試験の結果

(1) 測定当時の整理

*センサーが伝熱管内を移動中に振動して発生するノイズ

- ①蒸発器…420本中17本がノイズ大
- ②過熱器…441本中 9本がノイズ大

(2) ノイズデータの見直し結果

(減肉相当値%)

		平均ノイズレベル	最大ノイズレベル	
			2乗平均(RMS)による値	ピーク値の最大値に注目
蒸発器	管内面	1.0%	5.5%	10.3%
	管外面	2.3%	7.5%	20.8%
過熱器	管内面	0.2%	0.5%	1.1%
	管外面	0.3%	1.7%	3.8%

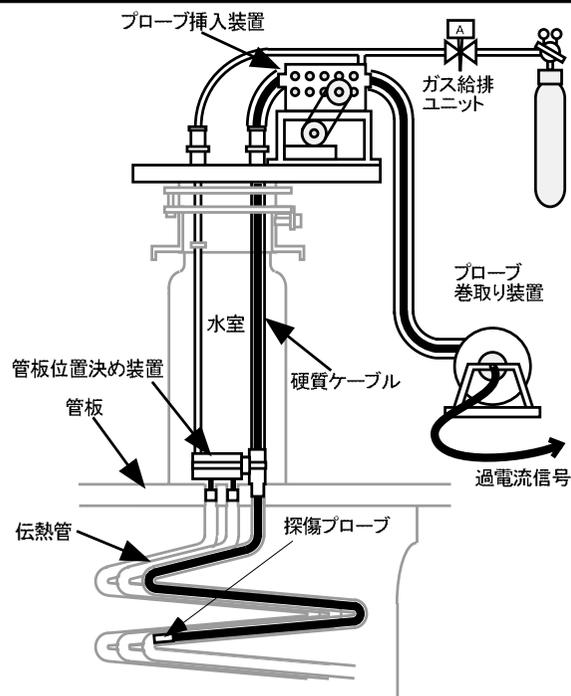
図-11 供用期間前検査における振動ノイズ*の発生状況

オンライン判定検査法の採用

現状装置	<ul style="list-style-type: none"> ・オフライン判定 ・プローブ挿入時にのみ測定
改良装置	<ul style="list-style-type: none"> ・オンライン判定 ・往復繰り返し測定

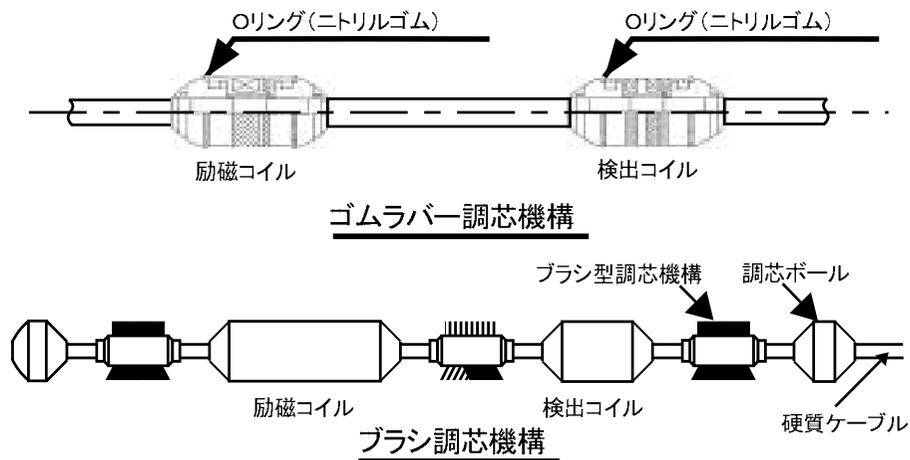
- ・SN比の改善
- ・欠陥識別性の向上

プローブ挿入方式の改良

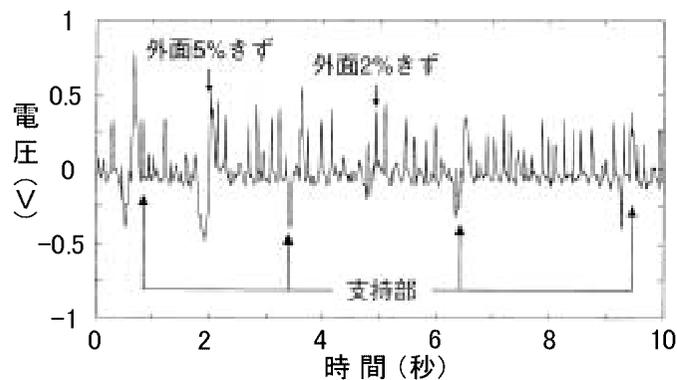


機械式プローブ挿入装置概念図
〔現状:ガス圧送式〕

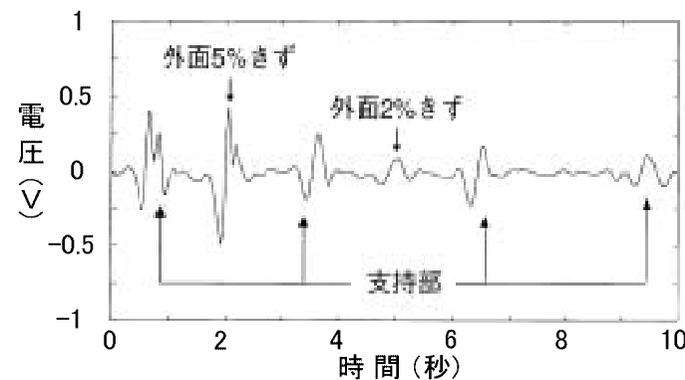
センサーの改良



ウェーブレット法によるデータ処理



合成信号



再構成結果

図-12 伝熱管検査装置のノイズ低減対策の例