



高速増殖原型炉「もんじゅ」の改良型温度計の設計

島野 国男 友部 勝眞 伊藤 健司

高速増殖炉もんじゅ建設所

Design of Improved Thermometer for the Prototype Fast Breeder Reactor MONJU

Kunio SHIMANO Kenji ITO Katsuma TOMOBE

Monju Construction Office

高速増殖原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故の原因となった温度計ウエルの流力振動による破損の再発を防止するために、改良型温度計の設計を行った。

平均温度測定と応答時間（20秒以内）及び同期振動の回避・抑制条件を満足するように、温度計ウエルの配管内突き出し長さを応答性要求のあるものは110mmに、応答性要求のないものは60mmに短尺化するとともに、テーパ形状とした。温度計ウエル取付の簡素化のため、既設の温度検出器取付管台を利用することとした。設計の妥当性を確認するため、最終仕様の改良型温度計について解析及び試験を実施した。流力振動及び強度の解析評価を行い構造健全性が確保できることを確認するとともに、流力振動関連試験を行い振動特性等の解析が妥当であることを確認した。また、温度計ウエルの加工及び管台への溶接が問題なく行えることを確認した。

The thermometer design for the secondary coolant system was improved to prevent recurring failure of the thermometer well due to flow-induced vibration, the direct cause of the sodium leak incident of the prototype fast breeder reactor" MONJU".

To satisfy the requirements of average temperature measurement, response time (within 20 seconds), avoidance and restraint of synchronized vibration, the insertion length of thermometer wells into the pipe was shortened to 110mm for the response requirement and 60mm for the no response requirement with a tapered shape.

To simplify the installation, thermometer wells are mounted on the existing nozzles. To confirm the suitability of the design, analyses and experiments using the final design of the improved thermometer were performed. By analytical evaluation of flow-induced vibration and strength, the structural integrity was confirmed. Additionally, through flow-induced vibration experience, analyses of vibration characteristics confirmed the suitability. Furthermore, manufacture and welding of the thermometer wells on the existing nozzles were confirmed to be possible.

キーワード

高速増殖炉，温度計ウエル，ナトリウム，漏えい，流力振動，改良設計，構造検討，構造健全性，施工性

Fast Breeder Reactor, Thermometer Well, Sodium, Leakage, Flow-Induced Vibration, Improved Design, Structural Studies, Structural Integrity, Installation



島野 国男

プラント第二課 機械1
チーム所属
技術主務
「もんじゅ」2次冷却系機械
設備の保守，設備改善計画
に従事



友部 勝眞

プラント第二課 機械1
チーム所属
チームリーダー
「もんじゅ」2次冷却系機械
設備の保守，設備改善計画
に従事



伊藤 健司

プラント第二課 機械1
チーム所属
副主任技術員
「もんじゅ」2次冷却系機械
設備の保守，設備改善計画
に従事
第1種放射線取扱者

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す)は、1995年12月に2次主冷却系のナトリウムが漏えいする事故が発生した。漏えいは、温度計ウェル(以下、計装用ウェルという)の破損によるものであった。破損メカニズムについては、事故後実施した原因究明のための調査、試験、解析によって、流力振動による高サイクル疲労によることが判明した。

本報告では、破損原因及び漏えい事故経験を踏まえて、2次主冷却系設備及び補助冷却設備の改良型温度計について、設計要求条件を基に、計装用ウェル形状の選定、施工性及びメンテナンス性を考慮した構造検討を行い、その結果を基に実施した流力振動及び強度等に関する健全性評価と設計の妥当性を確認するために実施した試験及びモックアップ試験について記載している。

2. 改良型温度計の設計

2.1 設計の基本的考え

今回の事故は、流力振動により計装用ウェルが破損したことから、破損防止の観点から漏えい要因の排除と流力振動防止の方策を検討した。改良型温度計の設計を進める上での基本的な考え方を図1に示す。

- 1) 漏えい要因を排除する観点から、温度計そのものの削減を図る。
- 2) ナトリウム温度計に要求される計測性能を満足するとともに、同期振動の回避・抑制など計装用ウェルの健全性を確保するための設計要求

を満足するものとする。

- 3) ナトリウム漏えい事故の教訓から、更なる信頼性向上のため、漏えいの抑制・確認機能を付加する。

また、メンテナンス性及び施工性に配慮する。

(1) 漏えい要因の排除

漏えい要因を排除する観点から、2次主冷却系設備及び補助冷却設備に現在16本/ループ(3ループで48本)設置している温度計の信号用途を再整理し、温度計そのものの本数削減を検討した。

温度計の信号用途を表1に示す。表1に記載のダブルエレメント(W)とは熱電対素線が2組で温度信号を2点取り出せるタイプである。空気冷却器出口温度計(2本/ループ)をダブルエレメントとしているのは、運転監視、制御及びインタロックの重要な信号用途に用いられており、また、補助冷却設備のナトリウム流量計の温度補正用信号としても独立して使用されるためである。その他の温度計はシングルエレメントであり、熱電対素線が1組で温度信号を1点取り出せるタイプである。

補助冷却設備空気冷却器出入口(各1本/ループ)の温度計については、運転監視(空気冷却器出口温度信号の1つはナトリウム流量計の温度補正に使用)に用いられ、同じ場所に取り付けられている空気冷却器出入口(各2本/ループ)の一方の温度計の信号を分岐して運転監視用(空気冷却器出口温度信号の1つはナトリウム流量計温度補正用)に利用することが可能であることから、出入口各1本/ループの温度計(2本/ループ)

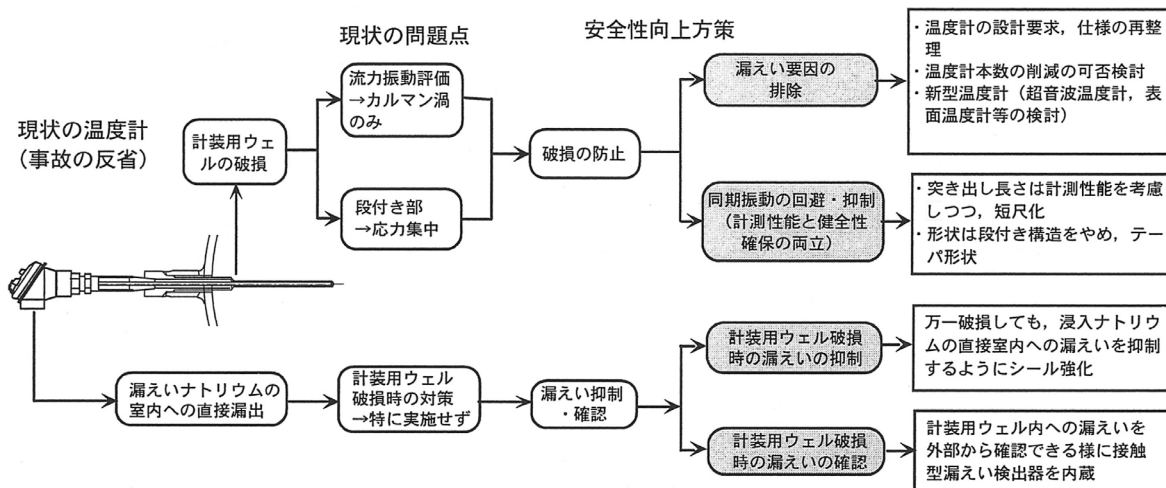


図1 改良型温度計の基本的考え方

表1 温度計の信号用途

温度計	温度計.No.	本数 *1	設置目的			要求 応答 時間 *3	熱電 対素 線 *4	備 考
			運転 監視	制御 *2	インタ ロック			
2 次 主 冷 却 設 備	中間熱交換器 出口	210 TE1	1	-	-	-	S	補助冷却設備待機時流量高インタロックの一条件 (360℃)として使用
	過熱器入口	210 TE2	1	-	-	-	S	水・蒸気系気水分離器ドレン弁制御のナトリウム温 度信号として使用
	過熱器出口 1,2	210 TE3 A,B	2	-	-	20秒 以内	S	過熱器除熱能力低下監視用インタロック信号に使用 (2 out of 2論理回路を構成)
	蒸発器出口 , ,	210 TE4 A,B,C	3	-	-	20秒 以内	S	水・蒸気系異常時に原子炉を停止するインタロック 信号(安全保護系)に使用(2 out of 3論理回路を構 成)
	蒸発器出口 1,2	210 TE5 A,B	2	-	-	-	S	空気冷却器待機時の補助冷却設備ナトリウム流量制 御に使用(運転監視および制御用として2信号を使 用)
	中間熱交換器 入口	210 TE6	1	-	-	-	S	
補 助 冷 却 設 備	空気冷却器 入口1,2	260 TE1 A,B	2	-	-	-	S	空気冷却器出入口温度差での風量制御に使用(運転 監視および制御用として2信号を使用)
	空気冷却器 入口3	260 TE2	1	-	-	-	S	運転監視用に用いており,260 TE1の信号を分岐し て利用できるため,本温度計を撤去
	空気冷却器 出口1,2	260 TE3 A,B	2	-	-	20秒 以内	W	空気冷却器出入口温度差で風量を制御や異常時にポン プを停止するインタロック信号に使用(2 out of 2 論理回路を構成)運転監視(ナトリウム流量計温度 補正)用としても使用
	空気冷却器 出口3	260 TE4	1	-	-	-	W	運転監視(ナトリウム流量計温度補正)用として使 用しており,260 TE3を分岐して利用できるため, 本温度計を撤去

(注記) *1) 本数は1ループ当たりの数量。*2) 制御欄の記号「」はナトリウム系統の制御信号。*3) 要求応答時間は時定数。
*4) Sはシングルエレメント(熱電対素線が1組), Wはダブルエレメント(熱電対素線が2組)

を撤去し、残りの14本/ループの温度計を改良型に交換することとした。撤去する補助冷却設備空気冷却器出入口温度計各1本については、撤去後の既設管台に閉止キャップを溶接にて取り付けることとした。

なお、温度計の改良とは異なる方策についても検討を行い、配管内部に計装用ウェル(熱電対)を挿入せずに、配管外部から温度を計測する方法として、別途、超音波温度計等の開発試験も行っている。

(2) 改良型温度計への設計要求

温度計には種々の設計要求があり、これらの設計要求条件を満足するように設計を進める必要がある。改良型温度計の設計検討を行う上で考慮した基本的設計要求条件を以下に示す。

1) 計測性能

イ) 温度計仕様

温度計の仕様として以下を要求条件とした。

- ・計測範囲：0～600℃
- ・最高使用温度：525℃

ロ) 温度計応答時間(時定数)

蒸発器出口ナトリウム温度高の原子炉トリップ信号について、原子炉設置許可申請書・添付書類十の安全評価に関する基本方針は、解析に使用する「蒸発器出口ナトリウム温度高」の原子炉のトリップ応答時間(時定数：ある物理量が時間変化する時に、最終目標値の1/1/e倍(63.2%)に達するまでの時間)を20秒としている。蒸発器出口温度計(3本/ループ：安全保護系として、2 out of 3の論理回路を構成)は、水・蒸気系での異常発生時に(例えば、蒸発器への給水流量低下等による除熱能力喪失)、それを検知し、原子炉を停止するための信号を発信するものである。

また、過熱器出口温度計(2本/ループ：2 out of 2の論理回路を構成)について、水・蒸気系での異常発生(過熱器の除熱能力低下による過熱器下流側の温度上昇)を検知し原子炉や2次主冷却系循環ポンプを停止する信号を発信するものであり、応答時間20秒を要求条件とした。さらに、空気冷却器出口温度計(2本/ループ：2 out of 2の

論理回路を構成)についても、空気冷却器送風機の異常を検知する信号として、応答時間20秒を要求条件とした。

八) 配管内平均温度の計測

温度計測に当たっては、配管内壁の影響を受けないで、配管内の平均温度を計測できることとした。また、応答性要求のある温度計については、急激な温度上昇を伴う過渡事象においても平均温度を計測できることとした。

2) 計装用ウェルの健全性の確保

運転時の温度・流速条件において問題となる振動が生じないように、改良型温度計の計装用ウェルは流力振動防止基準²⁾を満足するとともに高温構造強度を確保する構造とした。

3) 漏えいの抑制・確認機能

万一の計装用ウェル破損に対しても、ナトリウム漏えいの確認が可能にするとともに、計装用ウェル内部からのナトリウム漏えいを抑制する構造とした。さらに計装用ウェルと温度検出器取付管台との溶接部からの漏えいナトリウムエアロゾルをガスサンプリング型ナトリウム漏えい検出器へ導けるような保温構造とした。

4) メンテナンス性

温度検出器(熱電対)の取り出し、交換、復旧が容易にできる構造とした。

5) 施工性

温度計の交換工事における施工性を考慮した。

(3) 改良型温度計の構造

温度計の交換計画図を図2に、従来型及び改良型の温度計(閉止キャップ)の概略構造を図3にそれぞれ示す。上記に示した計測性能と破損の防止要求を両方とも満足する構造とするため、計測性能を考慮しつつ、計装用ウェルの短尺化を図り、段付き構造からテーパ形状へと外形を変更した。計装用ウェルの取付け法については、交換工事の簡素化のために既設の温度検出器取付管台に取り付けられる構造を採用した。また、温度検出器は、万一の計装用ウェルの破損に対しても、浸入ナトリウム室内への漏えいを抑制するようにシール強化するとともに、計装用ウェル内部へのナトリウム漏えいを外部から確認できる構造とした。

2.2 改良型温度計の基本構造設計

2.2.1 改良型温度計の形状・主要寸法の設計

(1) 計装用ウェル形状

計装用ウェルは、根元が太く先端部が細くなる

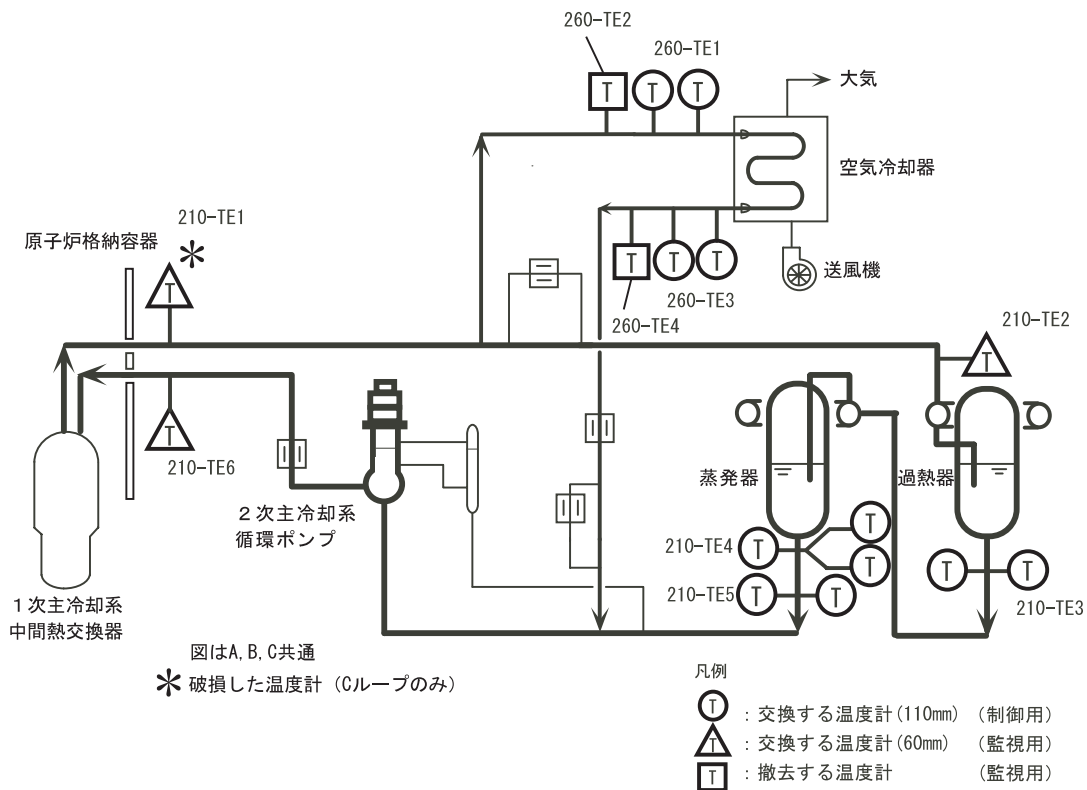


図2 温度計の交換計画図

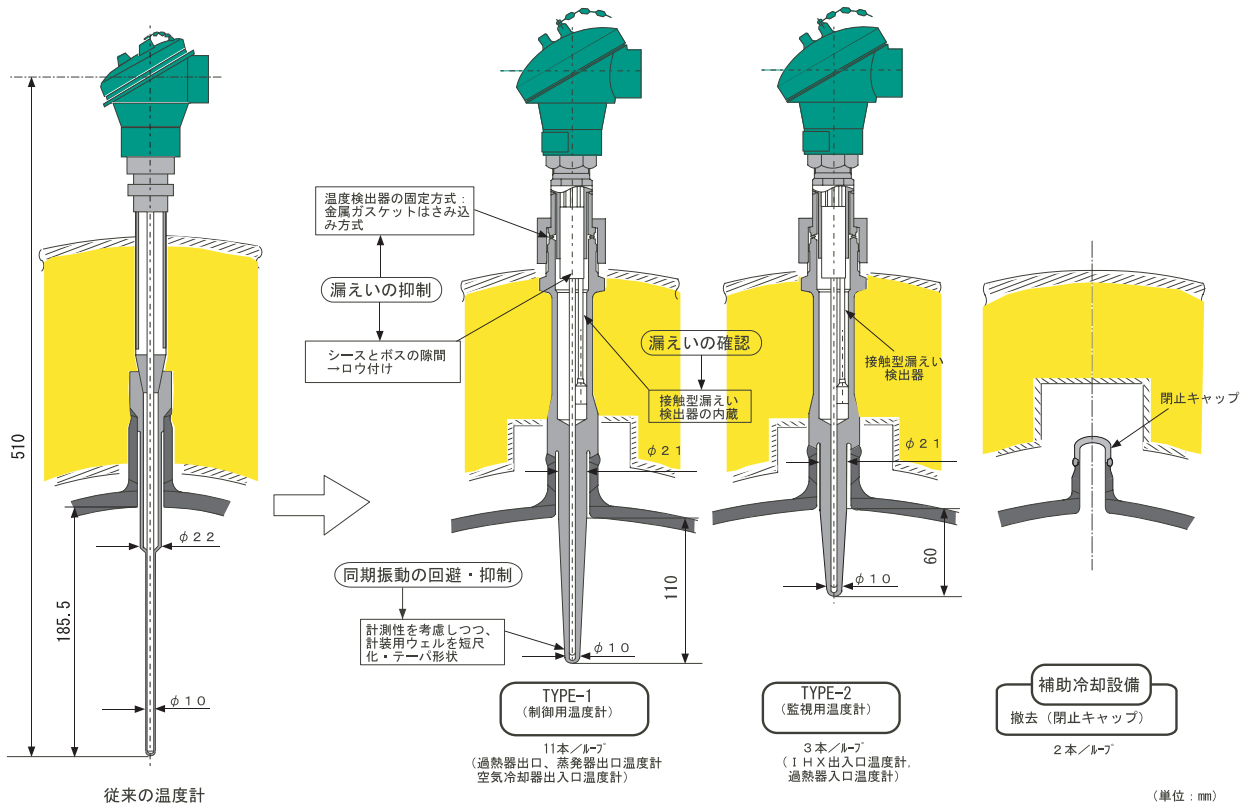


図3 従来型及び改良型の温度計（閉止キャップ）の概略構造図

テーパ形状を採用し、剛性が高く固有振動数を高くとれるようにした。また、計装用ウェル先端部まで緩やかなテーパとして構造不連続部をなくし、応力集中部ができないようにした。

(2) 計装用ウェル主要寸法の設定

1) 突き出し長さ

温度計の設計上、重要なポイントの一つである計装用ウェルの突き出し長さ設定の考え方は以下の通りである。

渦励起振動による同期振動が計装用ウェルの破損原因となったことから、同期振動を回避・抑制するためには、従来に比べ計装用ウェルの突き出し長さを短めに設定し、固有振動数を大きくすることが有効である。その一方で、配管内に生じる温度分布を考慮し、配管壁温度の影響を受けないで平均温度を計測するためには、ある程度の突き出し長さが必要となる。また、蒸発器、過熱器はヘリカルコイル型の伝熱管を有した熱交換器であり、容器内のナトリウムが温度分布を持つことから、容器出口配管部のナトリウムは温度分布を持つことが予想されている。

したがって、突き出し長さの設定は、温度計の

用途や要求される温度応答性及び配管内の温度分布を考慮し、同期振動回避・抑制条件を両立させる必要がある。ここで、計装用ウェルの突き出し長さを以下のように設定した。

① 応答性要求のある温度計

対象となる温度計は以下のとおりである。() 内に信号用途を示す。

- ・蒸発器出口温度計（運転監視，インタロック）
：3本ノルブ
- ・過熱器出口温度計（運転監視，インタロック）
：2本ノルブ
- ・空気冷却器出口温度計（運転監視，制御，インタロック）
：2本ノルブ

突き出し長さの設定に当たっては、大型容器の下流側に位置する、過渡時に配管内の温度分布が最も生じると想定される蒸発器出口温度計を評価の対象とした。解析条件として添十事故解析「主給水管破断事故（原子炉100%出力運転中に瞬時に水側の除熱が喪失）」を想定し、温度計設置位置における配管内温度分布を算出した。図4に解析結果の例を示す。解析結果から、配管内の温度は、配管壁に近づくにしたがって温度上昇が遅れるこ

原子炉出力：100%
 温度過渡：管束部出口で325℃から435℃にステップ上昇

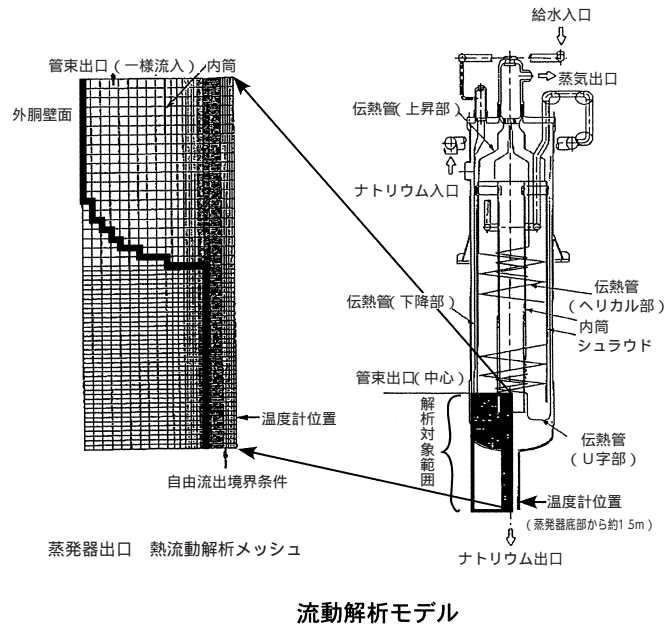
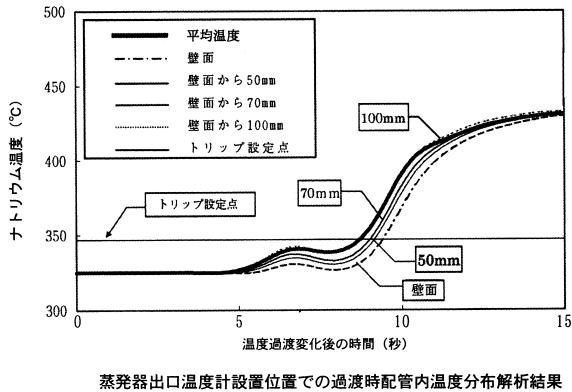


図4 突き出し長さ設定のための解析（応答性要求のある温度計）

と配管内の平均温度を常に測定しようとするれば、管壁から测温部（熱電対素線の先端部）までの長さを100mm程度とすることにより、ほぼ全時刻にわたって平均温度を上回ることが分かった。

以上のことから、応答性要求のある温度計すべてについて、実機で用いる計装用ウェルの突き出し長さは、100mm（测温部）に、計装用ウェル先端板厚等を考慮して110mmと設定した。

なお、空気冷却器出口は、蒸発器出口配管に比べて配管口径や流速が小さく、蒸発器出口のような温度分布も生じないため、空気冷却器出口温度計の突き出し長さは短くてもよいが、応答性要求のある温度計として同じ仕様とした。

② 応答性要求はないが突き出し長さを110mmとする温度計

対象となる温度計は以下のとおりである。（ ）内は信号用途を示す。

- ・蒸発器出口温度計（運転監視，制御）

：2本/ループ

補助冷却設備空気冷却器待機時に、空気冷却器出口温度と蒸発器出口温度とほぼ同一となるように補助冷却設備ナトリウム流量制御を行う空気冷却器出口止め弁バイパス弁に発信する上記温度計は、応答要求のある蒸発器出口温度計（3本/ループ）とほぼ同じ箇所に設置されていることから、運転監視と同じ計測性能で温度を計測できるよう

にするため、突き出し長さを110mmとした。

- ・空気冷却器入口温度計（運転監視，制御）

：2本/ループ

補助冷却設備空気冷却器出入口温度差で送風機風量制御に使用する補助冷却設備空気冷却器入口温度計についても、応答性要求のある空気冷却器出口温度計との温度差で制御に使用していることから同様の計測性能が得られるように、突き出し長さを110mmとした。

③ 応答性要求のない温度計

対象となる温度計は以下のとおりである。（ ）内は信号用途を示す。

- ・中間熱交換器出口温度計（運転監視，インタロック）

：1本/ループ

本インタロックは、ナトリウム温度が360℃以上の運転時、補助冷却設備ナトリウム流量が高となると発信するものである。本温度信号は、ナトリウム流量のインタロックの補助的な条件となるものであり、他のインタロックのように直接使用される信号と異なる。

- ・過熱器入口温度計（運転監視）

：1本/ループ

- ・中間熱交換器入口温度計（運転監視）

：1本/ループ

応答性要求のない上記温度計は、大型機器（容器）から離れた配管に設置されているため蒸発器

出口配管のように径方向温度分布が少ない。これらについては、流速を2m/s一様とし上流の配管断面内に一様なステップ状温度変化(325℃から347℃)を与えた時の配管内温度分布解析結果から、必要とする突き出し長さを求めた。解析結果を図5に示す。解析結果から、配管内壁の影響を受けないで平均温度を計測するための測温部までの突き出し長さ(L)は、配管内半径(R)の20%程度必要である結果が得られた。Lは以下の式より算出する。

$$L = R \times 0.2 \quad \dots (2.2.1)$$

対象となる温度計が設置される2次主冷却系配管22Bの内半径(R)は269.9mmであることから、管壁から測温部までの長さ(L)は約50mm程度となる。

以上のことから、実機で用いる計装用ウエルの突き出し長さは、50mm(測温部)に、計装用ウエル先端板厚等を考慮して、60mmと設定した。

2) 計装用ウエル先端板厚, 計装用ウエルと熱電対シースとの両側ギャップ

設計要求では応答時間(時定数)20秒を要求している。ただし、この要求は信号処理時間, 判定回路遅れ時間を含む。このため、温度計単体の時定数は設計上18秒以内と設定した。この要求を満足するように、計装用ウエル先端板厚, 計装用ウエルとシース(保護管付き)熱電対(以下、シース

略す)との両側ギャップを設定するため、温水中温度応答性試験を実施した。

温水中温度応答性試験は、シースを挿入した計装用ウエルを約0℃に保持した後、計装用ウエルを約100℃の温水中に挿入した時の温度変化から時定数を求めた。次に、計装用ウエル先端板厚3.2mmと両側ギャップ0.4mmの試験体を用いた試験で得られた時定数と解析により得られた計装用ウエルとシース間の熱抵抗(他の熱伝達経路に比べて大きく、両側ギャップを大きくするとこの抵抗が増大する)を基に、両側ギャップ0.4mmで、計装用ウエル先端板厚(3.2, 4.2, 5.2mm)をパラメータとした解析を実施した。図6に解析結果を示す。解析の結果、計装用ウエル先端板厚4.5mm以下で時定数18秒を下回ることがわかった。図6の右側縦軸に示したナトリウム中時定数推定値は、温水に対して、ナトリウムの熱伝達係数が高いこと、使用温度が高いことによる輻射伝熱の効果から、温水中よりも時定数が小さくなる。

次に、この計装用ウエル先端板厚を約3.3mm程度として、両側ギャップ(0.2, 0.3, 0.8mm)をパラメータとした試験を行い、両側ギャップ0.3mm以下で時定数が18秒以下となることを確認した。

以上の結果から、計装用ウエル先端板厚を3.25mm(寸法確認は超音波厚み計等により測定)

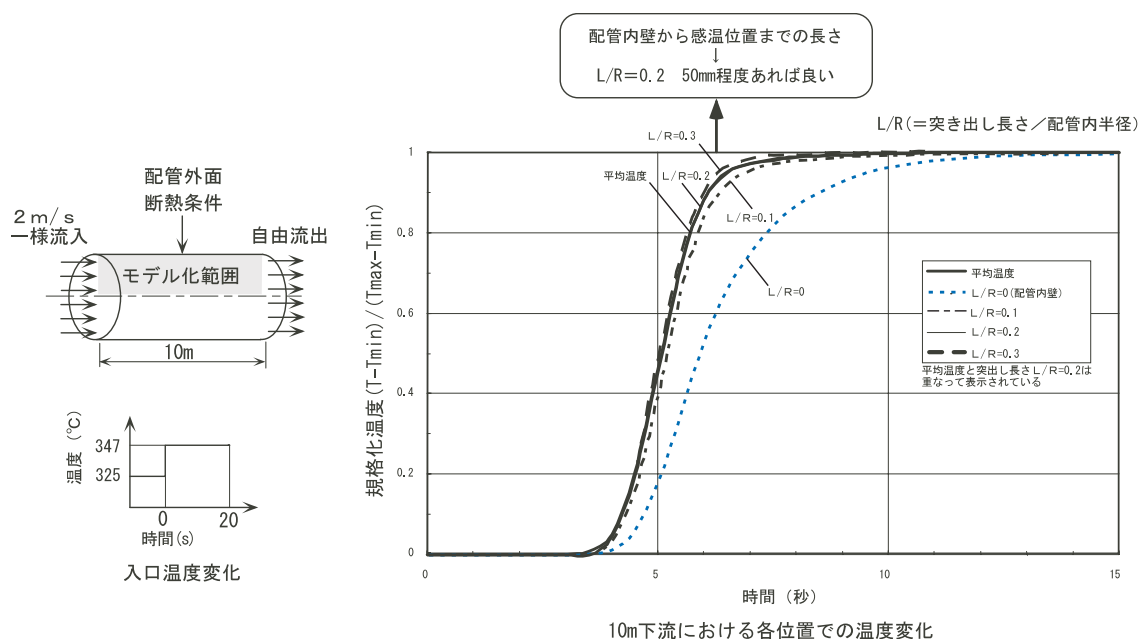


図5 突き出し長さ設定のための解析(応答性要求のない温度計)

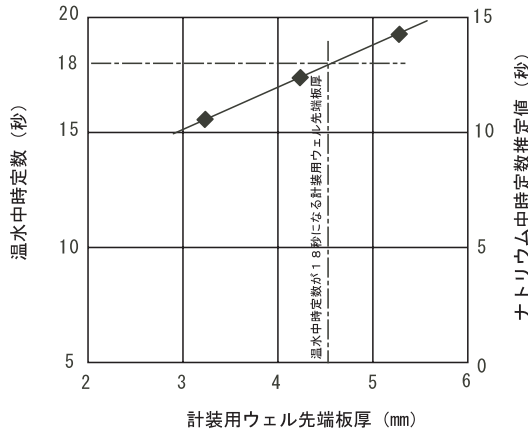


図6 計装用ウェル先端板厚の時定数に及ぼす影響

とし、両側ギャップは、応答性を満足しつつ、シースの挿入性を確保できる範囲でギャップを小さくすることとし、両側合計ギャップを0.3mm（計装用ウェル内径を限界ゲージで、シース外径をノギスで測定）とした。

上記の値を最終仕様とした模擬計装用ウェルを試作し、ナトリウム中での温度応答性試験を行った。図7にナトリウム中温度応答試験装置の概要を示す。計装用ウェルを所定温度に保持した後、所定温度に加熱したナトリウムを試験容器内に流入させて、温度変化を測定した。表2に試験結果を示す。試験ケースによりバラツキがあるものの、ナトリウム中時定数は約6～8秒となり、温度計単体の要求時定数（18秒以内）に対して余裕を持って満足することを確認した。

3) 温度検出器取付管台と計装用ウェルの隙間

計装用ウェルの付け根部外径は太いほど剛性が大きくとれ、流力振動回避に対する余裕が大きく取れる。しかし、一方では温度検出器取付管台と計装用ウェルの隙間が狭くなり、加工性、据付性の課題が出てくる。このため、温度検出器取付管台内の計装用ウェル付け根部は平行形状とし、外径は付け根部におけるRの機械加工が可能な隙間が確保できるように設定し、計装用ウェル付け根部外径を21mmとし、温度検出器取付管台との隙間2mm程度を確保できるようにした。

(3) 温度検出器（熱電対）

熱電対の型式は、耐熱性と温度応答性を考慮し、ナトリウム温度計として実績のあるシース熱電対（JIS SK型）とした。シース外径は、細かいほど温度応答性が良いが、耐熱温度は下がる。計測範囲

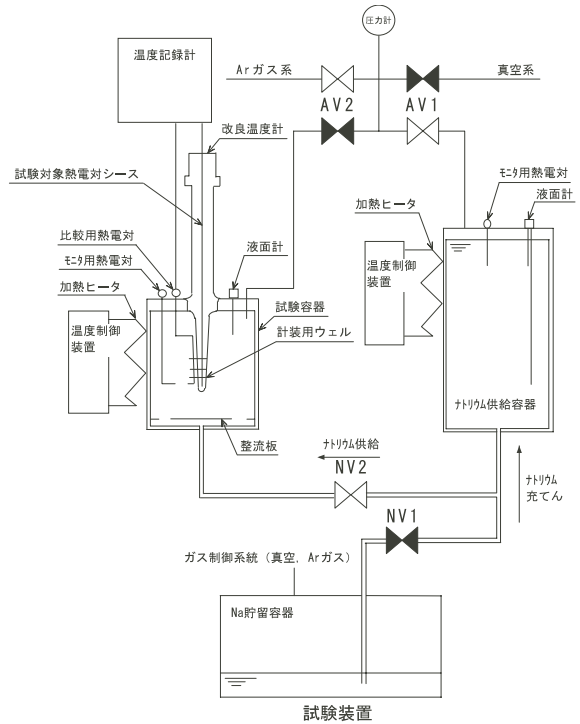


図7 ナトリウム中温度応答性試験装置の概要

表2 ナトリウム中温度応答性試験結果

試験条件	目的	ナトリウム中時定数(秒)
325℃ 425℃ (+100℃)	EV出口ホットショック条件	6.3
325℃ 425℃ (+100℃)	同上, 再現性	7.0
470℃ 520℃ (+50℃)	SH出口ホットショック条件	7.5
470℃ 520℃ (+50℃)	同上, 再現性	6.7
325℃ 375℃ (+50℃)	Tの影響	5.7
325℃ 425℃ (+100℃)	EV出口ホットショック条件 個体差の影響	6.5
470℃ 520℃ (+50℃)	SH出口ホットショック条件 個体差の影響	6.4
325℃ 425℃ (+100℃)	EV出口ホットショック条件 個体差の影響	6.2
470℃ 520℃ (+50℃)	SH出口ホットショック条件 個体差の影響	7.4

(注記Ⅰ) 時定数: $\log_{10} \frac{t(T)}{T(t)}$ の傾きから求める方法。

ここで $t(T) = T(t + \tau) - T(t)$

$t(T)$ は 時間 t から t 秒間の温度変化量であり、時間 t に対して 対数プロットした傾きの逆数が時定数となる。(伊沢著「自動制御入門」より)

(2) EV: 蒸発器, SH: 過熱器

が600℃であることから 実機に仕様するシースの外径は、耐熱性を十分確保でき(常用限度750℃)、かつ極力温度応答性を良く出来るよう、3.2mm(シース単体の時定数は1~1.5秒)とした。

2.2.2 ナトリウム漏えいの抑制・確認機能

(1) 漏えい抑制機能

改良型温度計は破損することは考えにくいですが、万一計装用ウェルが破損し、ナトリウムが計装用ウェル内に浸入しても、そのナトリウムが系外に漏えいしにくい構造を採ることとした。このため、従来方式のテーパねじ込み方式に比べ気密性の良い金属ガスケットによるシール継手を採用した。図8に金属ガスケットはさみ込み方式継手の構造図を示す。本継手により、温度検出器の挿入後の計装用ウェルへの固定は、温度検出器自体をねじ込まないで、ナットのみを締め込むことで可能なようにした。また、ボスと熱電対のシース及びナトリウム漏えい検出器のシースの隙間は耐熱性の高いニッケルロウ付けを行い、計装用ウェル内部を気密構造とした。

(2) 漏えい確認機能

計装用ウェル破損時のナトリウム漏えいを外部から確認可能とするため、計装用ウェル内に接触型のナトリウム漏えい検出器を取り付けた。温度検出器の交換時等の必要に応じ、現場において、漏えい検出器の導通を測定することによりナトリウム漏えいを確認できるようにした。

また、計装用ウェル廻りの保温構造は、図3に示すように、従来、計装用ウェルと温度検出器取付管台との溶接部が保温材の中にあつた。このため溶接部からナトリウムが漏えいした場合、漏えいナトリウムが保温材に留まり、2次冷却系ガスサンプリング型ナトリウム漏えい検出設備(RID)では漏えいが検出しづらい構造となっていた。こ

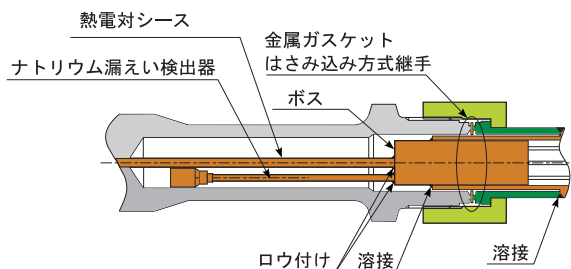


図8 ナトリウム漏えい抑制構造

の対策として改良型温度計では、溶接部からの漏えいに対し、配管のガスサンプリングとしてナトリウムエアロゾルを検出できるように、保温材の切り欠き、溶接部を内装板の内側とし、供用期間中に配管と保温材の隙間(ガス空間)のガスを監視することで、健全性を常時確認できるものとした。

2.3 改良型温度計の設置構造設計

2.3.1 メンテナンス性(温度検出器の交換)

従来の温度計は、計装用ウェルと温度検出器の接続箇所が保温材に埋もれる構造であったため、温度検出器交換時には挿入部が視認しにくい構造となっていた。このため、改良型温度計では、接続箇所を保温材の外にして視認性を高め、温度検出器の取り外し及び挿入が容易な構造とした。図

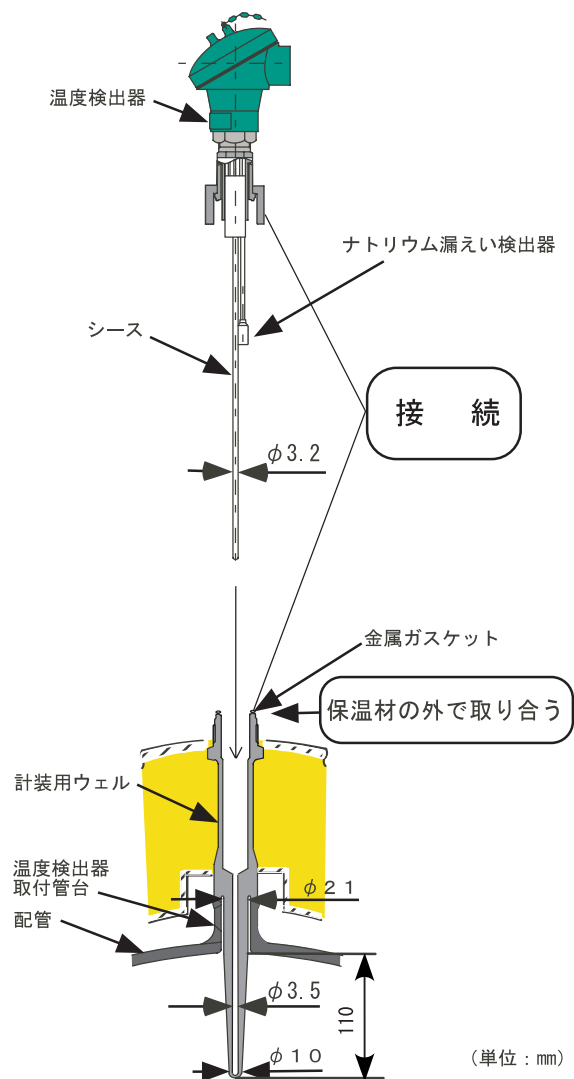


図9 温度検出器の挿入概要図

9に温度検出器の挿入概要を示す。

2.3.2 施工性（計装用ウエルの取付け法）

図10に計装用ウエルの取付け構造を示す。計装用ウエルの取付け方式として、既設の温度検出器取付管台を撤去して配管に計装用ウエルを直接溶接する方式（つば付き方式）と既設の温度検出器取付管台を利用して計装用ウエルを交換する方式（既設管台方式）を検討した。前者は計装用ウエル付け根部の外径に管台という制約条件がないことから、外径を太く（剛性が大きい）することが可能となり、流力振動評価上はより有利となる。一方で加工範囲が大きく、工事が大がかりになること、蒸発器出口部のように5本の温度計が付いている箇所では、計装用ウエルだけを交換するわけにはいかず配管ごと交換することになることから、施工性の観点では不利となる。一方、後者は、計装用ウエル付け根部の外径に対する制約や溶接検査にやや難はあるものの、既設の温度検出器取付管台で計装用ウエルの交換が可能であることから、工事作業量が少なく、工程上有利であり工事期間中のトラブル発生リスクが軽減される。

以上のことから、計装用ウエルの取付け方法としては、既設管台方式でも十分に同期振動回避基準を満足できること、工事期間中のトラブル発生リスクを軽減できる既設管台方式を採用することとした。

図11に既設の温度検出器取付管台切断位置図を示す。既設の温度検出器取付管台高さは、配管表面から約60mmの位置にある。これに対し、新しく取り付ける計装用ウエルに必要な管台高さは、管台脚長（20mm）、溶接熱影響長さ（5mm）、溶接ラップ量（2mm）、開先代（2mm）に、施工誤差（5mm）を考慮すると34mm以上であれば良い。既設管台の切断位置は2次主冷却系設備と補助冷却設備によって異なり37~42mmとなるが、既設の管台高さはこれを十分確保できる。

なお、既設管台方式による工事の施工性については、モックアップ試験により確認している（4章参照）。

3. 構造健全性評価

3.1 概要

温度計は、高温のナトリウムが流れる主配管流路内に突起する構造であり、流力振動や熱荷重、経年劣化など、その健全性に関して影響を与え得

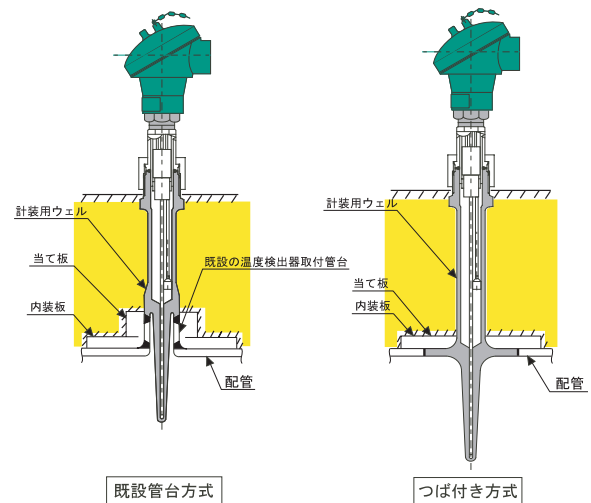


図10 計装用ウエルの取付け構造

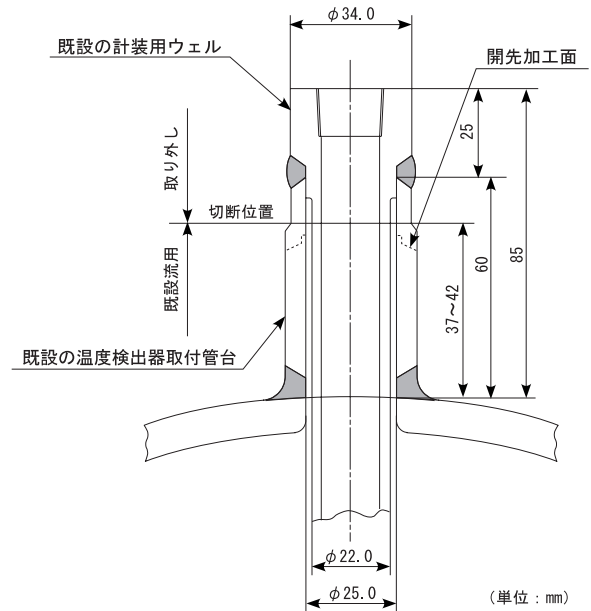


図11 既設の温度検出器取付管台切断位置図

る要因がいくつか考えられる。これらの要因に対し、流力振動計算、熱荷重を含めた強度計算及びその他の要因（機械振動、磨耗、腐食）による評価を行い、改良型温度計の構造健全性を確認した。

3.2 流力振動評価

(1) 評価方法

流力振動評価については、ナトリウム漏えい事故後に定められた日本機械学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」²⁾（JSME 基準と略

す)に基づき評価を行った。配管内円柱構造物の流力振動評価フローを図12に、以下にその概要を示す。

① 改良型温度計を図13に示すように多質点のはり要素モデルに置換し、構造物の基本固有振動数 f を算出する。

② 算出された基本固有振動数を基に換算流速 V_r 、換算減衰率 C_n を算出する。

ここで、換算流速 V_r は(3 2 1)に示す無次元流速であり、円柱構造物の基本固有振動数 f に対して、どの程度の流速かを示すパラメータである。また、換算減衰率 C_n は、円柱構造物の対数減衰率

に円柱構造物と流体の密度比の効果を加味して、振動のしにくさを表すパラメータとして定義されたものである(詳しくはJSME基準を参照されたい)。

$$V_r = \frac{\bar{V}}{f \cdot d} \quad \dots (3 2 1)$$

$$C_n = \frac{2 \cdot M \cdot \delta}{\rho \cdot \left\{ \int_{L_e} d_0^2(x) \cdot \phi_0^2(x) \cdot dx / \int_L \phi_0^2(x) \cdot dx \right\}} \quad \dots (3 2 2)$$

$$M = \int_L m(x) \cdot \phi_0^2(x) \cdot dx / \int_L \phi_0^2(x) \cdot dx$$

$$m(x) = m_s(x) + m_c(x) + m_A(x)$$

ここで、

\bar{V} : 構造物まわりの平均流速

d : 構造物の代表外径

M : 構造物の基本モードに対する一般化質量

: 空気中における構造物の対数減衰率

: 流体の密度, d_0 : 構造物の外径

$\phi(x)$: 構造物の基本振動モード関数

L_e : 流体中の突き出た構造物の長さ

L : 構造物の長さ

$m_s(x)$: 円柱状構造物の単位長さ当たり質量

$m_c(x)$: 円柱状構造物内包物体の単位長さ当たり質量

$m_A(x)$: 排除流体の単位長さ当たり質量

③ 上記の式によって算出された V_r 、 C_n を基にして同期振動が回避又は抑制されることを確認する。同期振動の回避又は抑制条件は

(a) $V_r < 1$ (b) $C_n > 64$ (c) $V_r < 3.3$ かつ $C_n > 2.5$ であり、これを図示すると図14のようになる。

④ 次に流体力による応力を評価するため、定常抗力による応力 (σ_D) と流れの乱れによるランダム振動応力 (σ_R) を算出する。

⑤ 算出された応力 σ_D 、 σ_R と配管内圧により発生する応力を組み合わせた応力が許容応力以下であることを確認する。

⑥ ランダム励振力に対する疲労評価として、応力集中を考慮した応力振幅 ($K \sigma_R$) が設計疲労限 (σ_F) 以下であることを確認する。Kは応力集中係数であり、FEM解析により求めると値は

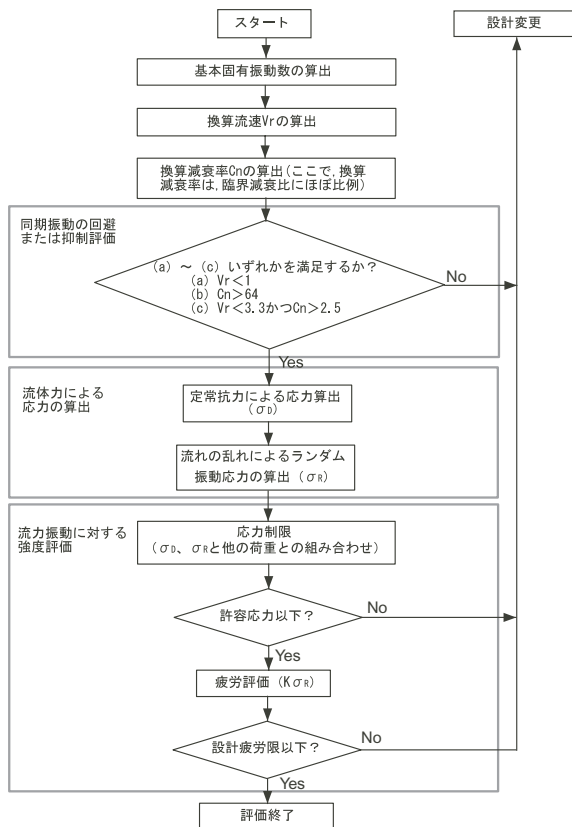


図12 流力振動評価フロー²⁾

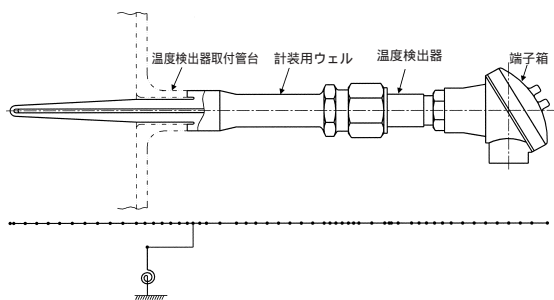
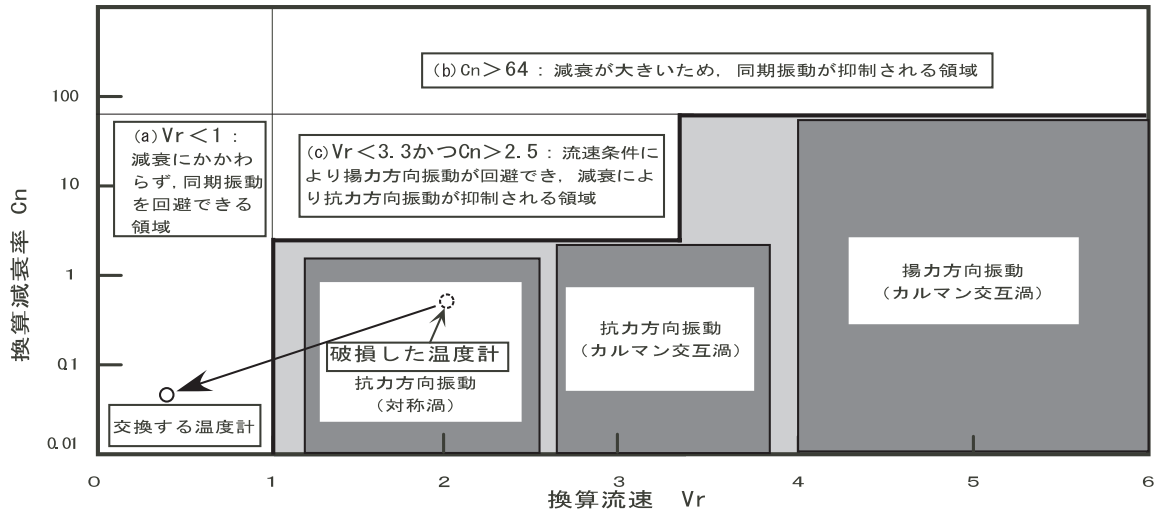


図13 多質点のはり要素モデル



- (注記 1) 換算流速 V_r : 固有振動数と発生渦の同期のしやすさを表す指標
(管内流速が大きいほど、また温度計の直径が小さいほど数値が大きくなる)
換算減衰率 C_n : 振動のしにくさを表す指標
(大きいほど振動が抑えられる)
- (2) 記号 (o) は中間熱交換器 2 次側出口ナトリウム温度計を示す

図14 同期振動の回避、抑制条件²⁾

2.4となる。

(2) 評価結果

表3に温度計の流力振動評価のまとめ表を示す。すべての改良型温度計は、各振動モードにおいて、換算流速 V_r が1を下回るか、または、換算減衰率 C_n が64を上回っていることから同期振動を回避または抑制していることを確認した。さらに、定常抗力による応力とランダム振動による応力の組み合わせ応力が応力制限値を下回ること、及びランダム励振力による疲労振幅が設計疲労限³⁾を下回ることから、流力振動に対する強度評価を満足していることを確認した。

3.3 強度評価

(1) 評価方法

強度評価では、機械的荷重条件(圧力、自重、地震、流体抗力)、温度条件(通常時、過渡時のプラント状態における冷却材温度)を考慮した。図15に、一例として、通常運転状態の荷重ヒストグラムを示す。熱過渡サイクルの中で、圧力、自重、流体抗力については一定の荷重とし、地震荷重は、最も厳しい時点で1回重ね合わせた。このような条件の下、一次応力、二次応力、ひずみ、クリープ疲労損傷値等を求め、改良型温度計の強度評価を行った。ここで、評価は、「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技

術基準⁴⁾(構造等の技術基準と略す)及び「高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針⁵⁾(BDSと略す)に従った。

改良型温度計の強度評価断面を図16に示す。評価断面は応力が高くなる構造不連続部の4箇所(温度検出器取付管台と配管の溶接部、管台と計装用ウェルの溶接部、計装用ウェルの付け根部、計装用ウェルテーパ開始部)の内外面とした。境界条件は、配管外面と計装用ウェル内面を断熱境界、配管内面と計装用ウェルテーパ面を熱伝達境界とし、管台と計装用ウェルの間隙部は計装用ウェルの付け根部でナトリウムが滞留するため、ナトリウムの出入りがないものとした。

(2) 評価結果

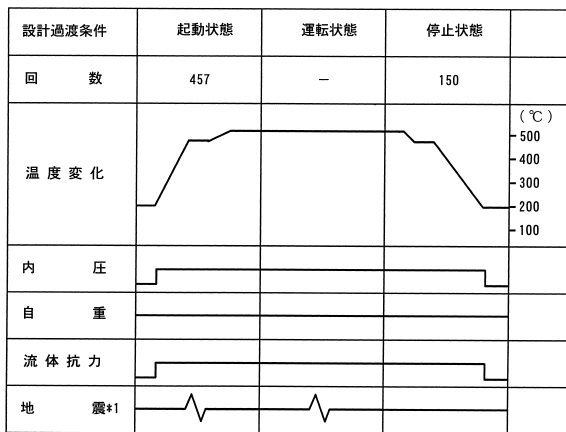
表4に強度の評価結果まとめ表を示す。この表では、最も S_n (一次+二次の応力強さ範囲)が高い断面1 OUT(温度検出器取付管台と配管の溶接部の外面)と計装用ウェルの中の評価断面で最も S_n が高い断面4 IN(計装用ウェルテーパ開始部のナトリウム接液面)を示している。また、評価は全ての改良型温度計について強度評価を実施したが、ここでは、ナトリウム漏えい事故原因となった中間熱交換器2次側出口ナトリウム温度計を例として示している。

以上の強度評価の結果、改良型温度計に発生する応力は小さく、一次応力、二次応力、ひずみ、

表3 温度計の流力振動評価まとめ表

温度計	各振動モードにおける同期振動の回避または抑制に関する評価結果									流力振動に対する強度評価結果 単位 (N/mm ²)						
	振動モード	固有振動数 (Hz)	突き出し長さ (mm)	最高使用温度 (°C)	換算流速 Vr	換算減衰率 Cn	同期振動の回避または抑制			評価	応力制限			疲労評価		
							条件 (a) Vr < 1	条件 (b) Cn > 64	条件 (c) Vr < 3.3 かつ Cn > 2.5		組み合わせ応力	応力制限 (1.5S ₀)	評価 <	応力振幅 K _R	設計疲労限 F	評価 K _R < F
中間熱交換器2次側出口ナトリウム温度計	1次	140	60	525	3.7	340	-	-	-	合格	9	145	合格	7	71	合格
	2次	790			0.7	5.1	-	-	合格							
	3次*	1330			0.42	0.059	-	-	合格							
過熱器入口ナトリウム温度計	1次	140	60	525	3.7	340	-	-	-	合格	9	145	合格	7	71	合格
	2次	790			0.7	5.1	-	-	合格							
	3次*	1330			0.42	0.059	-	-	合格							
過熱器出口ナトリウム温度計	1次	150	110	490	3.6	78	-	-	-	合格	17	151	合格	14	74	合格
	2次*	710			0.76	0.071	-	-	合格							
蒸発器出口ナトリウム温度計	1次	160	110	345	3.3	75	-	-	-	合格	16	164	合格	13	101	合格
	2次*	740			0.71	0.071	-	-	合格							
中間熱交換器2次側入口ナトリウム温度計	1次	150	60	345	3.4	320	-	-	-	合格	8	164	合格	6	101	合格
	2次	820			0.64	5.2	-	-	合格							
	3次*	1400			0.38	0.057	-	-	合格							
補助冷却設備空気冷却器入口ナトリウム温度計	1次	140	110	525	0.47	74	-	-	-	合格	1	145	合格	1	71	合格
	2次*	700			0.1	0.077	-	-	合格							
補助冷却設備空気冷却器出口ナトリウム温度計	1次	110	110	345	0.56	130	-	-	-	合格	1	164	合格	1	101	合格
	2次	650			0.1	0.28	-	-	合格							
	3次*	790			0.08	0.067	-	-	合格							

(注記) は条件を満足することを示す。- は計算または判定を実施する必要がないことを示す。Soは最大許容応力強さを示す。
*は流体中で最も振れる振動モードを示す。



(注記)*1:地震は、図に示す時点のうち、最も厳しい時点で1回重ね合わせる。

図15 設計条件での荷重ヒストグラム

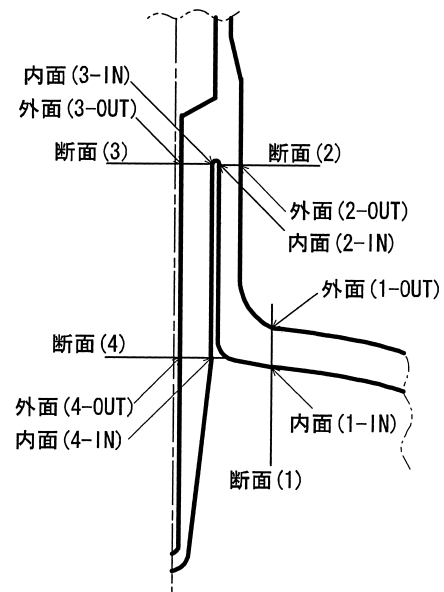


図16 強度の評価断面

表4 強度の評価結果まとめ表(中間熱交換器2次側出口ナトリウム温度計)

単位(応力: N/mm²)

評価断面		断面1 OUT	断面4 IN	
一次応力の制限(設計条件)	Pm (So)	26 (97)	1 (97)	
	PL + Pb (1.5So)	30 (145)	1 (145)	
	判定	合格	合格	
評価法の区分		B	B	
ひずみの制限	一次+二次応力の制限	Sn*(3SmH)	14 (290)	1 (290)
		Sr(3Sm)	153 (200)	87 (193)
		Sr(s(3Sm))	- (-)	- (-)
		Sn(3Sm)	- (-)	- (-)
	Sa制限	P'+Q(Sa)	- (-)	- (-)
		累積非弾性ひずみの制限	EC + mEF(0.01)	0.0001 (0.005)
	EC + mEF + bEF(0.02)		0.0001 (0.010)	0.000 (0.020)
運転状態に関する制限	Sn*(s(3SmH))	19 (719)	1 (719)	
	領域(E, S1, S2, P)	E	E	
クリープ疲労損傷の制限	Df	0.00	0.00	
	Dc	0.31	0.31	
	Df + Dc (D)	0.31 (0.60)	0.31 (0.60)	

注記

- (1) ()内の値は、許容値又は判定値を示す。
- (2) 評価法の区分の記号の意味は、次のとおりである。
 - A : 一般規定の場合
 - B : 長期一次応力が低い場合
 - C : クリープ効果が顕著でない場合
- (3) $P' + Q' = < PL + PL^* + (Pb + Pb^*)Kt >_{max} + < Q + Q^* >_R$
 PL, PL*: 長期/短期の一次局部膜応力
 Pb, Pb*: 長期/短期の一次曲げ応力
 Kt : 設計係数
 Q, Q*: 長期/短期の二次応力 (< >_R: 応力範囲)
- (4) 累積非弾性ひずみの許容値は溶接部では1/2とする。
- (5) 記号: 説明を以下に示す。
 - So : 最大許容応力強さ
 - : 「構造等の技術基準」第32条に定める継手効率(= 1)
 - Pm : 長期の一次一般膜応力
 - Sn*: 短期一次+二次応力強さ範囲

- 3SmH : 最高使用温度に対する設計応力強さの3倍
- Sn : (一次+二次)応力強さ範囲
- 3Sm : 応力緩和を考慮したシェイクダウン基準値
- s : 進行性ひずみの防止に係わる設計係数(= 2.5)
- Sn' : 熱曲げ応力を除く(一次+二次)応力強さ範囲
- Sa : Mir[1.25St; 10⁴hr, Sy]
- St : 設計応力強さ(時間依存)
- Sy : 設計降伏点
- EC : 促進クリープひずみ
- mEF : 長期二次膜応力により生じる弾性追従ひずみ
- bEF : 長期二次曲げ応力により生じる弾性追従ひずみ
- 領域E : 弾性領域
- 領域S1, S2 : シェイクダウン領域
- 領域P : 塑性サイクル領域
- Df : 累積疲労損傷係数
- Dc : 累積クリープ損傷係数
- D : 累積クリープ疲労損傷係数の制限値

クリープ疲労損傷のいずれもBDSの許容値を満足していることを確認した。

3.4 その他の要因に対する健全性の評価

(1) 機械振動

温度計の近傍部には、有害な機械振動を発生するポンプ、フロア等の回転機器は存在せず、振動の発生要因はない。ここでは、温度計近傍部以外の機械振動源として2次主冷却系配管に直結した2次主循環ポンプが加振源となる場合を想定した。ポンプの回転速度は約1,100rpmであることから、回転による振動の周波数は約18Hzとなり、改良型温度計の基本固有振動数は表3に示すように、計装用ウェル先端が振れる振動モードでの最低値700Hzより十分小さく、同期振動を回避している。

また、ポンプ圧力脈動は大型の機器や弁等の内部に入ると緩和され、その影響は無視できるものとする。

なお、ここで、2次主循環ポンプ羽根車の羽根きりによる圧力脈動を求めると、羽根きりによる周波数は、次式により求まる。

$$\begin{aligned} \text{周波数} &= \text{回転速度} \times \text{羽根枚数} \\ &= (1,100 \text{rpm} / 60) \times 7 \text{枚} = 128 \text{Hz} \end{aligned}$$

なお、100%定格流量時の回転速度は約940rpmであることから、上記値よりさらに低くなる。したがって、羽根きりによる圧力脈動も温度計の基本固有振動数(流体中で計装用ウェル先端が最も振れる2次又は3次モードでの振動数)の最低値700Hzより十分小さく、同期振動を回避している。なお、羽根きりによる周波数は1次モードの固有振動数に近いので、圧力脈動(ポンプ揚程の3%

と仮定)の励振力による温度計の応力振幅を評価した結果、設計疲労限の0.05%以下であり、健全性に影響を及ぼすものではない。

(2) 磨耗

計装用ウェルと管台の間には隙間を設ける設計としており、接触による磨耗が生じない構造としている。ここでは、計装用ウェルの振動による管台との接触を評価する。流力振動計算により算出した計装用ウェル先端のランダム振動変位振幅を表5に示す。

ここでランダム振動変位振幅： y_R は以下の式で算出される。

$$y_R(x) = C_0 \sqrt{\frac{\beta_0^2 \cdot G(f)}{64 \cdot \pi^3 \cdot M^2 \cdot f^3 \cdot (\xi + \xi_f)}} \cdot \phi_0(x) \quad \dots (3.4.1)$$

ここで、

- C_0 ：2乗平均値からピーク値への換算係数
- β_0 ：基本振動モードの刺激係数
- G ：単位長さ当たりのランダム励振力のパワースペクトル密度
- M ：付加質量を含む構造物単位長さ当たり一般化質量
- f ：基本固有振動数
- ：空気中における構造物の臨界減衰比
- ξ_f ：流体減衰
- x ：構造物の軸方向距離

振幅は最大でも約30 μ mであり、無視し得る小さなものである。したがって、管台内に位置する計装用ウェルの付け根部の振幅は、これよりさらに小さくなることから管台と接触することはない。

(3) 腐食

ナトリウムによる腐食量 (R_L) は「高速原型炉

表5 計装用ウェル先端のランダム振動変位振幅

(計算値)

温度計	最大振幅 (μ m)
中間熱交換器2次側出口ナトリウム温度計	7
過熱器入口ナトリウム温度計	7
過熱器出口ナトリウム温度計	30
蒸発器出口ナトリウム温度計	26
中間熱交換器2次側入口ナトリウム温度計	5
補助冷却設備空気冷却器入口ナトリウム温度計	0.2
補助冷却設備空気冷却器出口ナトリウム温度計	0.1

高温構造設計指針材料強度基準等」⁶⁾で採用している以下の式から算出される。

$$R_L = R \times L \quad \dots (3.4.2)$$

$$\log_{10} R = 0.85 + 1.5 \times \log_{10} C_0 - 3.9 \times 10^3 / (T + 273) \quad \dots (3.4.3)$$

ここで、

- R ：腐食速度 (mm / 年)
- L ：プラント寿命 (30年)
- C_0 ：酸素濃度 (10ppm)
- T ：最高温度 (525 $^{\circ}$ C)

上式で算出される腐食量 (R_L) は約0.09mmとなる。

また、規格計算による必要板厚は以下の(3.4.4)式から0.24mmとなる。この値に腐食量(0.09mm)を加えると、約0.33mmであり、計装用ウェル先端の最小板厚3.15mm(公称板厚3.25mmから厚さの許容差0.10mmを引いた値)に比べて十分小さな値であり、ナトリウムによる腐食は問題ない。

$$t_{op} = 3PeDo/4B \quad \dots (3.4.4)$$

(外圧作用時の必要板厚計算式(構造等の技術基準 第58条第1項第2号))

ここで、

- t_{op} ：外圧作用時の必要板厚 (mm)
- Pe ：最高使用圧力 [内圧] (MPa)
- Do ：管の外径 (mm)
- B ：構造等の技術基準の別図12ステンレス鋼 (SUS304) から求めた値 (MPa)

4. 試験, モックアップ試験による確認

改良型温度計の設計を目的として、温度計の打振試験、流力振動水試験を実施している。また、計装用ウェルの加工法、既設管台への取付法についてモックアップ試験を実施し、設計及び製作、工事方法の妥当性を確認した。

4.1 試験の概要

(1) 温度計の打振試験

改良型温度計を模擬した試験体に対して打振試験を実施し、固有振動特性を測定するとともに、温度計の減衰特性を調査した。

打振試験の計測位置を図17に示す。温度計を実機相当配管(22B)に設置し、各計測位置(計装

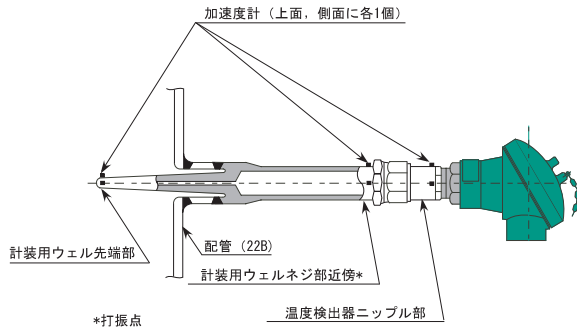


図17 打振試験の計測位置

用ウェル先端部、計装用ウェルネジ部近傍、温度検出器ニップル部)に加速度計を取り付けて、計装用ウェルネジ部近傍をハンマにより配管軸方向・軸直方向に打振し計測した。打振試験結果を表6に示す。1次モード(端子箱が卓越振動モード)の臨界減衰比は温度検出器(シース無し:最も臨界減衰比が小さくなる条件)を取付けた状態で約0.77~1.5%であり、流力振動評価に使用した値0.3%は保守側であることを確認した。また、固有振動数 f については、温度計にとって重要な計装用ウェル先端が主に振れる2次モード及び3次モードの測定値は、解析値に対して、最大でも6.9%の範囲の差異である。6.9%の差異を考慮した流力振動評価を実施し、換算流速 V_r が判定

値以下であることを確認している。

なお、今回の改良型温度計の設計においては、臨界減衰比は、計装用ウェル先端が最も振れる振動モードである2次モード及び3次モードでは一般的構造物での最小値としての0.05%⁷⁾の値を用いて流力振動評価を行い、流力振動基準を満足することを確認している。

(2) 流力振動試験

実機ナトリウム温度200℃、325℃、505℃のレイノルズ数(Re数)に相当する3種類の水溫条件下にて、実機定格流量5.5m/sにおける定常試験、及び流速1~8m/sの範囲における流速スイープ試験を実施し、その流力振動挙動を計測した。試験の結果、実機運転条件を包絡する流速領域において同期振動が見られないことを確認した。また、加速度計測値より算出した計装用ウェル先端及び温度計端子箱の振動振幅は設計から算出される振幅よりも小さく、構造健全上問題ないレベルであることを確認した。

4.2 モックアップ試験の概要

(1) 計装用ウェル加工性試験

計装用ウェルの加工寸法精度が流力振動や強度の健全性評価に影響するため、過去の製作実績等を考慮して、加工手順を検討・策定した。基本的

表6 打振試験結果

試験番号	計装用ウェル		温度検出器形状 ^{*2}	打振方向 ^{*3}	1次モードの臨界減衰比(%)	固有振動数(Hz)								
	試験体番号 ^{*1}	突き出し長さ(mm)				1次モード			2次モード			3次モード		
						試験	解析	差異 ^{*4}	試験	解析	差異 ^{*4}	試験	解析	差異 ^{*4}
1	A1	110	Sエレメント	直角方向	1.093	166	170	2.4%	800	812	1.5%	-	-	-
2	A2	110	Sエレメント	直角方向	1.023	166	170	2.4%	781	812	3.9%	-	-	-
3	B	60	Sエレメント	直角方向	1.515	165	167	0.9%	844	855	1.4%	1,470	1,572	6.9%
4	A1	110	Sエレメント	軸方向	0.819	185	178	3.9%	794	821	3.4%	-	-	-
5	A2	110	Sエレメント	軸方向	0.770	186	178	4.4%	771	821	6.4%	-	-	-
6	B	60	Sエレメント	軸方向	1.227	184	175	4.8%	873	871	0.3%	1,470	1,572	6.9%
7	A1	110	Wエレメント	直角方向	1.155	121	121	0.1%	666	686	3.0%	856	884	3.3%
8	A2	110	Wエレメント	直角方向	1.143	123	121	1.5%	668	686	2.7%	850	884	4.0%
9	A1	110	Wエレメント	軸方向	0.949	134	131	2.6%	701	705	0.5%	851	885	3.9%
10	A2	110	Wエレメント	軸方向	0.935	134	131	2.6%	703	705	0.2%	849	885	4.2%

(注記)^{*1}: 試験体A1, A2(2体:個体差確認のため)は突き出し長さ110mm, 試験体Bは突き出し長さ60mm

^{*2}: S(シングル)エレメントは熱電対素線が1組, D(ダブル)エレメントは熱電対素線が2組

①110mmとS(シングル)エレメントの組み合わせで、過熱器出口、蒸発器出口、空気冷却器入口の温度計を模擬

②60mmとS(シングル)エレメントの組み合わせで、中間熱交換器出入口、過熱器入口の温度計を模擬

③110mmとW(ダブル)エレメントの組み合わせで、空気冷却器出口の温度計を模擬

^{*3}: 水平配管に対して直角方向と軸方向

^{*4}: 試験と解析との差異

な手順として、計装用ウェル内径（3.5mm）加工は、ガンドリル（中心に切削油注入孔があり、先端部から流出した油とともに切屑がドリル外側のシャンク溝を通過して外部に排出される）のプレを小さくするために肉厚の厚い最初の工程で実施することとし、ガンドリル芯を基準として外径加工することにより偏肉を防止することとした。また、最終工程でネジ部を加工することとし、損傷による再加工を防止することとした。これらの加工方案に基づき、加工性確認試験を実施した。加工後の試験体寸法測定の結果、主要寸法（計装用ウェル付け根部外径、先端部外径、計装用ウェル全長、計装用ウェル耐圧部長さ）は許容公差内で良好に加工できることを確認した。

(2) 管台取付法確認試験

計装用ウェルの交換作業は基本的にブラバック内で作業を行うものとし、交換作業中に系統内へ空気が混入することを防止する計画である。計装用ウェルの既設の温度検出器取付管台への取付法確認のために、実機と同様の22B配管に既設の温度検出器取付管台を取付けた試験体を使用し、既設の温度検出器取付管台の切断作業性、開先加工性、計装用ウェルの溶接性を確認する試験を実施した。

① 切断作業

既設の温度検出器取付管台の切断は、スペーサを取り付け、所定の深さ以上に切れないように工夫したロールカッタを使用した。ブラバックを用いずに行う1次切削、ブラバック内で行う2次切削、いずれも問題なく行えることを確認した。

② 開先加工

開先加工機は、温度検出器取付管台内面から加工機が支持できるようにした温度計専用の加工機を用いた。駆動方式は、電動式に比べて、小型で、回転数の微調整が可能なエアーマータ方式を採用することとした。試験の結果、加工時の振動もなく安定した加工ができること、エアーマータの起動・停止操作もバルブのエア量調整で問題なく制御できること、及び仕上がりの開先寸法も所定の精度で加工できることを確認した。

③ 溶接試験

計装用ウェルの配管内への突き出し長さは、計装用ウェル溶接開先から計装用ウェル先端までの長さとし、配管内面から温度検出器取付管台溶接開先までの長さ、及び溶接縮み代で算出される。溶

接後の縮み代を測定した結果、1~2.5mmであり、突き出し長さの公差（±0.5mm：この値に対する流力振動評価及び温度計測性評価は別途実施済み）以内であることを確認した。また、溶接後の計装用ウェルと温度検出器取付管台隙間（配管内面位置）を測定した結果、最小1.4mmであり、計装用ウェルと管台が接触しないことを確認した。さらに、溶接部での計装用ウェルと管台の隙間を確認するため、外部線源による放射線透過試験（RT）を行い、計装用ウェルと温度検出器取付管台との隙間の検査が可能であることを確認した。

5. まとめ

「もんじゅ」の2次主冷却系のナトリウム漏えい事故の直接の原因となった計装用ウェルの流力振動による破損にかんがみ、同種の事故の再発を防止するために2次主冷却系設備及び補助冷却設備の改良型温度計の設計を行った。

(1) 計装用ウェルは、測定上要求される温度計測性能と同期振動の回避・抑制を満足する構造とするため、従来、約186mmある計装用ウェルの突き出し長さを110mmないしは60mmに短尺化し、段付き形状であった計装用ウェルをテーパ形状とした。

また、温度検出器は計装用ウェル内部に浸入したナトリウムの漏えい抑制と漏えい確認が可能な構造とした。

(2) 最終的に構造検討した改良型温度計について流力振動評価及び強度評価等を行い、構造健全性が確保できることを確認した。

(3) 温度計の打振試験、流力振動試験を実施し、固有振動数、振動特性等の設計が妥当であることを確認した。また、モックアップ試験により計装用ウェルの加工、既設の温度検出器取付管台への溶接が問題なく行えることを確認した。

参考文献

- 1) 伊藤和元, 他: 「もんじゅ」ナトリウム漏えい事故に関する技術報告, 日本原子力学会誌, Vol. 39, No. 9 (1997).
- 2) 日本機械学会編: 「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」, JSME S 012, (1998).
- 3) 「温度計の流力振動防止のための設計方針(案)」, PNC TN 9410 97 042, 動燃事業団, (1997).
- 4) 「ナトリウム冷却型高速増殖炉発電所の原子炉施設に関する構造等の技術基準」, 原子力安全局長通達62安局(原規)第20号, (1987)

- 5) “高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針”, 科学技術庁原子力安全局,(1984)
- 6) “高速原型炉高温構造設計指針材料強度基準等”, 科学技術庁原子力安全局,(1984)
- 7) R. D. Blevins, :“Vortex Induced Vibration and Damping of Thermowells”, PVP Vol. 328, p. 465 (1996).