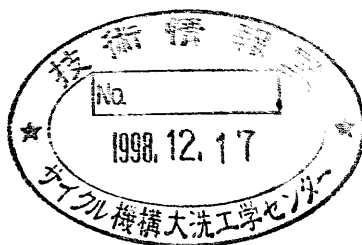


高速実験炉「常陽」

2次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価

1998年5月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-1393, Japan

©動力炉・核燃料開発事業団

(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

高速実験炉「常陽」 2 次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価

磯崎 和則^{*}、小川 徹^{*}、久保 篤彦^{**}菅谷 和司^{****}、青木 裕^{***}、小澤 健二^{*}

要 旨

「常陽」において、配管合流部におけるサーマルストライピングが問題となる箇所がないか簡易評価による検討を実施した。この結果、2 次主冷却系及び 2 次補助冷却系プラグング計ユニット内部の合流部（以下内部合流部という）では、合流部温度差（ ΔT_{in} ）が大きく、詳細なサーマルストライピング評価が必要となった。

したがって、 ΔT_{in} が最も大きい 2 次補助冷却系プラグング計を対象として、内部合流部に温度応答特性の良好な 0.5mm ϕ の熱電対を 15 点取り付け配管外面の温度ゆらぎ測定を実施した。また、温度ゆらぎ測定結果と非線形構造解析システム“FINAS”を用いた配管熱伝導解析結果を用いて、配管内面温度ゆらぎと配管板厚方向に発生する応力を評価した。

評価結果は、以下のとおりであった。

- (1) 発生する最大温度ゆらぎは、常に内部合流部中心から下流側 10mm の位置であった。
- (2) 最大温度ゆらぎ幅は、配管外面で約 33℃であった。また、温度ゆらぎの支配的周波数は、0.04Hz、0.09Hz であった。
- (3) FINAS による熱伝導解析の結果、ゆらぎの支配的周波数 0.04Hz、0.09Hz では、配管内面及び配管外面の温度ゆらぎに時間的遅れがほとんどなく、配管板厚方向に大きな温度分布が生じないことを確認した。
- (4) 温度ゆらぎ測定結果と FINAS による熱伝導解析結果を用いて、配管内面温度ゆらぎと配管板厚方向に発生する応力を評価した。その結果、配管内面温度ゆらぎ幅は、ほぼ外面温度ゆらぎ幅と同一で、発生応力は、2 次主冷却系及び 2 次補助冷却系プラグング計内部合流部の材料である SUS304 の設計疲労限を十分下回る小さな応力であることを確認した。

* : 大洗工学センター 実験炉部 原子炉第二課

** : 同 上 技術課

*** : 同 上 原子炉第一課

**** : 原子力システム (株)

Evaluation of Thermal Striping for the plugging system
in the Secondary Auxiliary Cooling System in JOYO

Kazunori Isozaki*, Tooru Ogawa*, Atsuhiko Kubo**
Kazushi Sugaya****, Hiroshi Aoki***, Kenji Ozawa*

Abstract

Scrutiny based on the convenient evaluation to verify whether we have the place where thermal striping in the pipe confluence part was thought to be a primary factor for the heavy accident or not has been done in JOYO. As the result, the big temperature difference(ΔT_{in}) of the simple inner pipe confluence part existed at the inner pipe confluence part of the plugging system in the secondary main and auxiliary cooling system. Therefore, detailed evaluation of thermal striping was needed.

With the thermocouples of high response installed, the temperature fluctuation in outer surface of the pipe was measured on the secondary auxiliary plugging system for the reason why the temperature difference(ΔT_{in}) was the biggest. And, the temperature fluctuation in inner surface of the pipe and stress occurring in the pipe plate thickness direction was evaluated by means of the temperature fluctuation measurement result and non-linear structure analysis system "FINAS".

The above-mentioned evaluation results were as follows.

- (1) The maximum temperature fluctuation occurring in the pipe was always located from the center of inner pipe confluence to 10mm position of the down-stream side.
- (2) The maximum temperature fluctuation range was about 33°C in outer surface of the pipe. And, controlling frequency of the temperature fluctuation was 0.04Hz and 0.09Hz.
- (3) Time delay was almost never contained in the temperature fluctuation elements between inner and outer surface of the pipe by dint of analysis results of the heat conduction by "FINAS". And, the big temperature distribution did not occur in the pipe plate thickness direction was confirmed that the big temperature distribution did not occur in the pipe plate thickness direction.
- (4) The temperature fluctuation in the pipe inner surface and the stress occurring in the pipe plate thickness direction was evaluated by use of result of the temperature fluctuation measurement and the heat conduction analysis by "FINAS". Consequently, the temperature fluctuation range in the pipe inner surface was almost the same as that of the pipe outer surface. It was confirmed that the stress occurring there was enough lowered than the design fatigue limit of SUS304 which was the materials in the confluence part of the plugging system inner part in the secondary main and auxiliary cooling system.

* : Maintenance Section, Experimental Reactor Division, OEC

** : Reactor Technology Section, Experimental Reactor Division, OEC

*** : Operation Section, Experimental Reactor Division, OEC

**** : Nuclear Engineering System Incorporation

目 次

1. 概 要	1
2. 温度差が生じる配管合流部の調査	2
3. F I N A Sによる熱伝導解析（配管温度応答特性）	4
3.1 解析条件	4
3.2 解析結果	4
4. サーマルストライピングに対する簡易構造健全性評価	2 5
4.1 単純な ΔT_{in} を用いた簡易構造健全性評価	2 5
4.2 F I N A S解析結果を反映した簡易構造健全性評価	2 6
5. 2次主冷却系及び2次補助冷却系プラグング計の非破壊検査	3 4
5.1 外観目視検査	3 4
5.2 浸透探傷試験（P T）	3 4
5.3 放射線透過試験（R T）	3 4
6. 2次補助冷却系プラグング計内部合流部への仮設温度計取付	3 6
6.1 仮設温度計取り付け位置の決定	3 6
6.2 仮設温度計取り付け位置	3 6
6.3 仮設温度計の仕様	3 7
7. 2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定	4 1
7.1 温度ゆらぎの経時的変化	4 1
7.2 パワースペクトル密度	4 2
7.3 考 察	4 2
8. 2次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価	6 9
9. まとめ	8 1
10. 謝 意	8 2
11. 参考文献	8 3

図リスト

図 3-1	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布解析条件	7
図 3-2	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布解析条件	8
図 3-3 (1/3)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (周波数 0.05Hz~0.3Hz)	9
図 3-3 (2/3)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (周波数 0.4Hz~1.0Hz)	10
図 3-3 (3/3)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (周波数 1.4Hz~10.Hz)	11
図 3-4	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (内面の最大、最小温度、外面の最大、最小温度の周波数依存性)	12
図 3-5 (1/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.05Hz 及び 0.1Hz)	13
図 3-5 (2/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.2Hz 及び 0.3Hz)	14
図 3-5 (3/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.4Hz 及び 0.5Hz)	15
図 3-5 (4/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.6Hz 及び 1.0Hz)	16
図 3-5 (5/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 1.4Hz 及び 2.0Hz)	17
図 3-5 (6/6)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 5.0Hz 及び 10.0Hz)	18
図 3-6 (1/2)	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (周波数 0.1Hz~1.0Hz)	19
図 3-6 (2/2)	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (周波数 1.4Hz)	20
図 3-7	2次補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いた FINAS 解析結果 (内面の最大、最小温度、外面の最大、最小温度の周波数依存性)	21
図 3-8 (1/3)	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.1Hz 及び 0.2Hz)	22
図 3-8 (2/3)	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布 (周波数 0.6Hz 及び 1.0Hz)	23
図 3-8 (3/3)	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布	

(周波数 1.4Hz)	2 4
図 4 - 1 2 次補助冷却系プラグニング計内部合流部の配管板厚方向温度分布評価結果 (温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係)	3 0
図 4 - 2 2 次補助冷却系プラグニング計内部合流部の簡易構造健全性評価結果 (温度ゆらぎ周波数と温度振幅 (合流低減係数考慮)、ピーク応力との関係)	3 1
図 4 - 3 2 次補助冷却系プラグニング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布評価結果 (温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係)	3 2
図 4 - 4 2 次補助冷却系プラグニング計補助冷却系ライン合流部の簡易構造健全性評価結果 (温度ゆらぎ周波数と温度振幅 (合流低減係数考慮なし)、ピーク応力との関係)	3 3
図 6 - 1 仮設温度計の取り付け位置	3 8
図 6 - 2 仮設温度計の概略取り付け構造	3 9
図 6 - 3 2 次補助冷却系プラグニング計仮設温度計の取り付け位置及びタグ No	4 0
図 7 - 1 (1 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化 (TE-M01、M03、M02、M04)	4 5
図 7 - 1 (2 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化 (TE-M05、M07、M11、M15)	4 6
図 7 - 1 (3 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化 (TE-M06、M08、M12)	4 7
図 7 - 1 (4 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化 (TE-M09、M13、M10、M14)	4 8
図 7 - 1 (5 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の原子炉定格出力運転中の流量ゆらぎの経時的変化 (メイン流量、オリフィス流量)	4 9
図 7 - 2 (1 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 26 日 11 : 15 定格出力運転中 TE-M01,M03,M02,M04)	5 0
図 7 - 2 (2 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 26 日 11 : 15 定格出力運転中 TE-M05,M07,M11,M15)	5 1
図 7 - 2 (3 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 26 日 11 : 15 定格出力運転中 TE-M06,M08,M12)	5 2
図 7 - 2 (4 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 26 日 11 : 15 定格出力運転中 TE-M09,M13,M10,M14)	5 3
図 7 - 2 (5 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計のメイン及びオリフィス流量ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 26 日 11 : 15 定格出力運転中)	5 4
図 7 - 3 (1 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度) (平成 9 年 12 月 12 日原子炉停止中 TE-M01,M03,M02,M04)	5 5
図 7 - 3 (2 / 5) 2 次補助冷却系プラグニング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)	

	(平成9年12月12日原子炉停止中 TE-M05,M07,M11,M15)	5 6
図7-3 (3/5)	2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定結果(パワースペクトル密度) (平成9年12月12日原子炉停止中 TE-M06,M08,M12)	5 7
図7-3 (4/5)	2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定結果(パワースペクトル密度) (平成9年12月12日原子炉停止中 TE-M09,M13,M10,M14)	5 8
図7-3 (5/5)	2次補助冷却系プラグング計のメイン及びオリフィス流量ゆらぎ測定結果(パワースペクトル密度)(平成9年12月12日原子炉停止中)	5 9
図7-4 (1/4)	ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 (TE-M02、M04~M06)	6 2
図7-4 (2/4)	ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 (TE-M07~M10)	6 3
図7-4 (3/4)	ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 (TE-M11~M14)	6 4
図7-4 (4/4)	ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 (TE-M15)	6 5
図7-5 (1/3)	2次補助冷却系プラグング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動(サンプリング周期 39msec)	6 6
図7-5 (2/3)	2次補助冷却系プラグング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動(サンプリング周期 20msec)	6 7
図7-5 (3/3)	2次補助冷却系プラグング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動(サンプリング周期 78msec)	6 8

表リスト

表 2-1	「常陽」における温度差が生じる配管合流部リスト	3
表 3-1	プラグング計配管板厚方向熱伝導解析条件	6
表 4-1	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果 (簡易評価)	2 8
表 4-2	2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果 (簡易評価)	2 9
表 7-1	温度ゆらぎのパワースペクトルに見られる顕著な周波数	6 0
表 7-2	ΔT_{in} と温度ゆらぎ幅との関係	6 1
表 8-1 (1 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M01、M02	7 1
表 8-1 (2 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M03、M04	7 2
表 8-1 (3 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M05、M06	7 3
表 8-1 (4 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M07、M08	7 4
表 8-1 (5 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M09、M10	7 5
表 8-1 (6 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M11、M12	7 6
表 8-1 (7 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M13、M14	7 7
表 8-1 (8 / 8)	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果 (平成9年12月12日～平成10年2月25日) TE-M15	7 8
表 8-2	実測温度ゆらぎ幅からの内面温度ゆらぎ幅予測結果と内面温度ゆらぎ幅の解析結果との比率	7 9
表 8-3	2次補助冷却系プラグング計内部合流部の実測配管外面温度ゆらぎと FINAS 解析結果を用いた配管内外面に発生する応力評価結果	8 0

1. 概 要

「常陽」において、配管合流部におけるサーマルストライピング*) が問題となる箇所がないか簡易評価による検討を実施した。この結果、2次主冷却系及び2次補助冷却系プラグング計の内部合流部では、合流部温度差 (ΔT_{in}) が大きく、詳細なサーマルストライピング評価が必要となった。したがって、 ΔT_{in} が最も大きい2次補助冷却系プラグング計を対象として、内部合流部に温度応答特性の優れた $0.5\text{mm } \phi$ の CA 熱電対を 15 点取り付け配管外面からの温度ゆらぎ測定を実施した。なお、2次主冷却系と2次補助冷却系のプラグング計は同一構造であり、2次主冷却系プラグング計は2次ナトリウム純化系に取り付けられている。また、サーマルストライピング測定結果と非線形構造解析システム“FINAS”を用いた配管熱伝導解析結果を用いて、配管内面温度ゆらぎと配管板厚方向に発生する応力を評価した。

本報告書は、これら一連の配管合流部におけるサーマルストライピングに関する調査・検討から詳細な2次補助冷却系のサーマルストライピング評価に至るまでをまとめたものである。

*) サーマルストライピングとは、流れの合流部において、合流温度差と流れの乱れによって温度ゆらぎが誘発され、この温度ゆらぎが板厚方向に温度変動をもたらすとともに、不連続な高サイクル応力を発生させ、構造物の疲労損傷の原因となるものである。

2. 温度差が生じる配管合流部の調査

本章は、「常陽」の配管合流部でサーマルストライピングが問題となる箇所がないか調査を行った結果を示すものである。

表2-1に「常陽」における温度差が生じる配管合流部リストを示す。この結果、温度差が生じる配管合流部は、4系統の合計8部位であり、これらを検討対象とした。

往年の水及びナトリウムを用いた配管合流部のサーマルストライピング研究成果^{(1),(2)}によれば、合流部の流量比（ノズル側流量 Q_2 / 合流後流量 Q_3 ）と温度差比（合流後の最大温度ゆらぎ ΔT_p / 単純な流入部温度差 ΔT_{in} ）との関係が求められており、これらの関係から ΔT_{in} に対して ΔT_p を逆算して求めることができる。なお、これらの値は、温度ゆらぎの支配的周波数に大きく影響され、支配的周波数は配管口径、流体流れ場の状況に大きく支配される。

上記で抽出された検討対象部位のうち、 ΔT_{in} 及び配管口径の関係から代表的な二つの部位について、3章「FINASによる熱伝導解析（配管温度応答特性）」で解析を行い、その周波数と温度分布との関係を明らかにすることとした。したがって、サーマルストライピングに対する評価は、これらの結果も含めて簡易的な評価を4章「サーマルストライピングに対する簡易構造健全性評価」で行っている。

表2-1 「常陽」における温度差が生じる配管合流部リスト

系統名	合流部名称	配管サイズ								ナトリウム温度			流量		流速		流量比	流速比
		主管				枝管				枝管	主管	ΔT_{in}	枝管側	主管 合流後	枝管側	主管 合流前	枝:主	枝:主
		口径	外径	板厚	流路断面積	口径	外径	板厚	流路断面積									
			(m)	(m)	(m^2)		(m)	(m)	(m^2)		($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)	(L/min)	(L/min)	(m/sec)	(m/sec)	
1次Na純化系	手動ブラギング計純化系戻り合流部	2B	0.0605	0.0039	0.0022	1B	0.0340	0.0034	0.0006	420	378	42	2.0	150.0	0.06	1.13	0.013	0.051
	自動ブラギング計純化系戻り合流部	2B	0.0605	0.0039	0.0022	1B	0.0340	0.0034	0.0006	420	378	42	2.0	150.0	0.06	1.13	0.013	0.051
2次補助冷却系	充填ライン補助系合流部	3B	0.0891	0.0055	0.0048	1B	0.0340	0.0034	0.0006	398	340	58	2.0	1,100.0	0.06	3.83	0.002	0.015
	ブラギング計内部合流部	3/8B	0.0173	0.0020	0.0001	3/8B	0.0173	0.0020	0.0001	381	130	251	2.4	3.0	0.29	0.07	0.800	4.000
	ブラギング計補助系戻り合流部	3B	0.0891	0.0055	0.0048	3/4B	0.0272	0.0029	0.0004	398	313	85	3.0	1,100.0	0.14	3.83	0.003	0.036
2次Na純化系	ブラギング計内部合流部	3/8B	0.0173	0.0020	0.0001	3/8B	0.0173	0.0020	0.0001	340	130	210	2.4	3.0	0.29	0.07	0.800	4.000
	ブラギング計純化系戻り合流部	1 1/2B	0.0486	0.0037	0.0013	3/4B	0.0272	0.0029	0.0004	351	287	64	3.0	66.7	0.14	0.80	0.045	0.175
2次主冷却系	汲み上げライン主冷却系合流部	12B	0.3185	0.0103	0.0697	1B	0.0340	0.0034	0.0006	370	340	30	33.3	20,766.0	0.96	4.97	0.002	0.192

3. FINASによる熱伝導解析（配管温度応答特性）

往年の研究成果によれば、温度ゆらぎの支配的周波数によってサーマルストライピングが大きく影響されることが示されていることから、2章で問題となっている2次補助冷却系プラグング計内部合流部及び2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向の温度応答特性をFINASによる熱伝導解析で明らかにしたものである。

以下に、解析結果を示す。

3.1 解析条件

解析条件は、表3-1、図3-1及び図3-2のとおりである。

解析に用いたFINASの解析要素は、熱伝導4節点四辺形軸対象要素（HQAX4）及び熱伝達2節点軸対象要素（FLAX2）を使用した。

2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ最高温度及び最低温度は、2次補助冷却系プラグング計内部合流部の主管（オリフィス側）及び枝管（バイパス側）の通常運転温度とした。この結果、最高温度は、2次補助冷却系ナトリウム温度からプラグング計内部合流部に至る温度降下分を差し引いた温度である381℃、最低温度はプラグ温度である130℃とした。したがって、2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} は251℃である。

2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の温度ゆらぎ最高温度及び最低温度は、2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の主管（2次補助冷却系配管）及び枝管（2次補助冷却系プラグング計配管）の通常運転温度とした。この結果、最高温度は、2次補助冷却系配管側ナトリウム温度である398℃、最低温度は2次補助冷却系プラグング計の戻りナトリウム温度313℃とした。したがって、2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} は85℃である。

3.2 解析結果

(1) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部

図3-3（1/3）～図3-3（3/3）に2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた熱伝導解析結果を示す。図3-4に図3-3の結果の内面最大、最小温度及び外面最大、最小温度の周波数依存性を示す。図3-5（1/6）～図3-5（6/6）に2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布を示す。

図3-3及び図3-4より、温度ゆらぎが低周波数の場合は、内面と外面の温度応答遅れがほ

はゼロ、すなわち温度ゆらぎの位相差がなく、温度追従性が良いことが判る。したがって、配管内面・外面で温度差が生じない。

これに対して、温度ゆらぎが高周波数の場合は、高周波数になるにしたがって、温度応答遅れが生じ、すなわち温度ゆらぎの位相差が生じ、周波数 10Hz では、内面側で温度ゆらぎが生じるが、外面側ではほぼゆらぎがゼロという状態となることが判る。これは、配管板厚が薄くても、その応答が外面に到達する前に次の挙動変化が生じるためであり、この傾向は高周波数になるにしたがって大きくなり、内面・外面で温度差が生じてくる。

図 3-5 は、各周波数における配管板厚方向温度分布解析のうち、内面高温時及び外面高温時の内面・外面で最大温度差が生じた時間における配管板厚方向の温度分布を示したもので、構造健全性評価で使用するために、線形化処理を行い、線形温度分布成分 (ΔT_1 成分) と非線形温度分布成分 (ΔT_2 成分) に分類した結果である。 ΔT_1 は、線形の内外面温度差であり、 ΔT_2 は、線形の内外面温度と熱伝導解析結果の内外面温度との差であり、 ΔT_2 は内面側と外面側の 2 種類となる。

(2) 2 次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部

図 3-6 (1/2) ~ 図 3-6 (2/2) に 2 次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いた熱伝導解析結果を示す。図 3-7 に図 3-4 の結果の内面最大、最小温度及び外面最大、最小温度の周波数依存性を示す。図 3-8 (1/3) ~ 図 3-8 (3/3) に 2 次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布を示す。

図 3-6 及び図 3-7 より、2 次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部については、2 次補助冷却系プラグング計内部合流部と異なり、約 3 倍の板厚を有していることから、温度ゆらぎが低周波数の場合でも、内面と外面の温度応答遅れが生じている。

温度ゆらぎが高周波数の場合は、2 次補助冷却系プラグング計内部合流部と同様に、高周波数になるにしたがって、温度応答遅れが生じ、すなわち温度ゆらぎの位相差が生じ、この傾向は、周波数 1.4Hz では、内面側で温度ゆらぎが生じるが、外面ではほぼゆらぎがゼロという状態となることが判る。この傾向は、配管の板厚が厚い分だけ、内部合流部より低周波数側となっている。

図 3-8 は、各周波数における配管板厚方向温度分布解析のうち、内面高温時及び外面高温時の内面・外面で最大温度差が生じた時間における配管板厚方向の温度分布を示したもので、構造健全性評価で使用するために、線形化処理を行い、線形温度分布成分 (ΔT_1 成分) と非線形温度分布成分 (ΔT_2 成分) に分類した結果である。

表 3-1 プラギング計配管板厚方向熱伝導解析条件

項目	単位	2次補助冷却系	
		内部合流部	補助冷却系ライン合流部
材 質		SUS304	2 1/4Cr-1 Mo
配管内径	mm	13.3	78.1
配管外径	mm	17.3	89.1
配管板厚	mm	2.0	5.5
温度ゆらぎ幅	℃	251	85
温度ゆらぎ最高温度	℃	381	398
温度ゆらぎ最低温度 ^{*1}	℃	130	313
温度ゆらぎ周波数	Hz	0.05	0.05
	Hz	0.10	0.10
	Hz	0.20	0.20
	Hz	0.40	0.40
	Hz	0.50	0.50
	Hz	0.60	0.60
	Hz	1.00	1.00
	Hz	1.40	1.40
熱伝達率 ^{*2}	kcal/mm ² ・sec・℃	8.8517E-06 (at 3L/min ^{*3} 、130℃)	6.0194E-06 (at 66.1m ³ /hr ^{*4} 、313℃)
外面		断熱	断熱

*1：2次補助系ライン合流部の最低温度は、内部合流部の主管と枝管との合流後の温度

内部合流部の主管（130℃、0.6L/min）、枝管（381℃、2.4L/min）と内部合流部から2次補助冷却系ラインまでの温度降下を考慮して以下の式より算出した。

$$(381^{\circ}\text{C} \times 0.2) + (130^{\circ}\text{C} \times 0.8) - 17^{\circ}\text{C} = 313.8^{\circ}\text{C} \text{ (小数点以下切り捨て)}$$

*2：温度ゆらぎ幅のうち、熱伝達率が最大となる値を使用。

*3：合流後流量

*4：2次補助冷却系流量56.5ton/hr＋プラギング系合流後流量3L/min

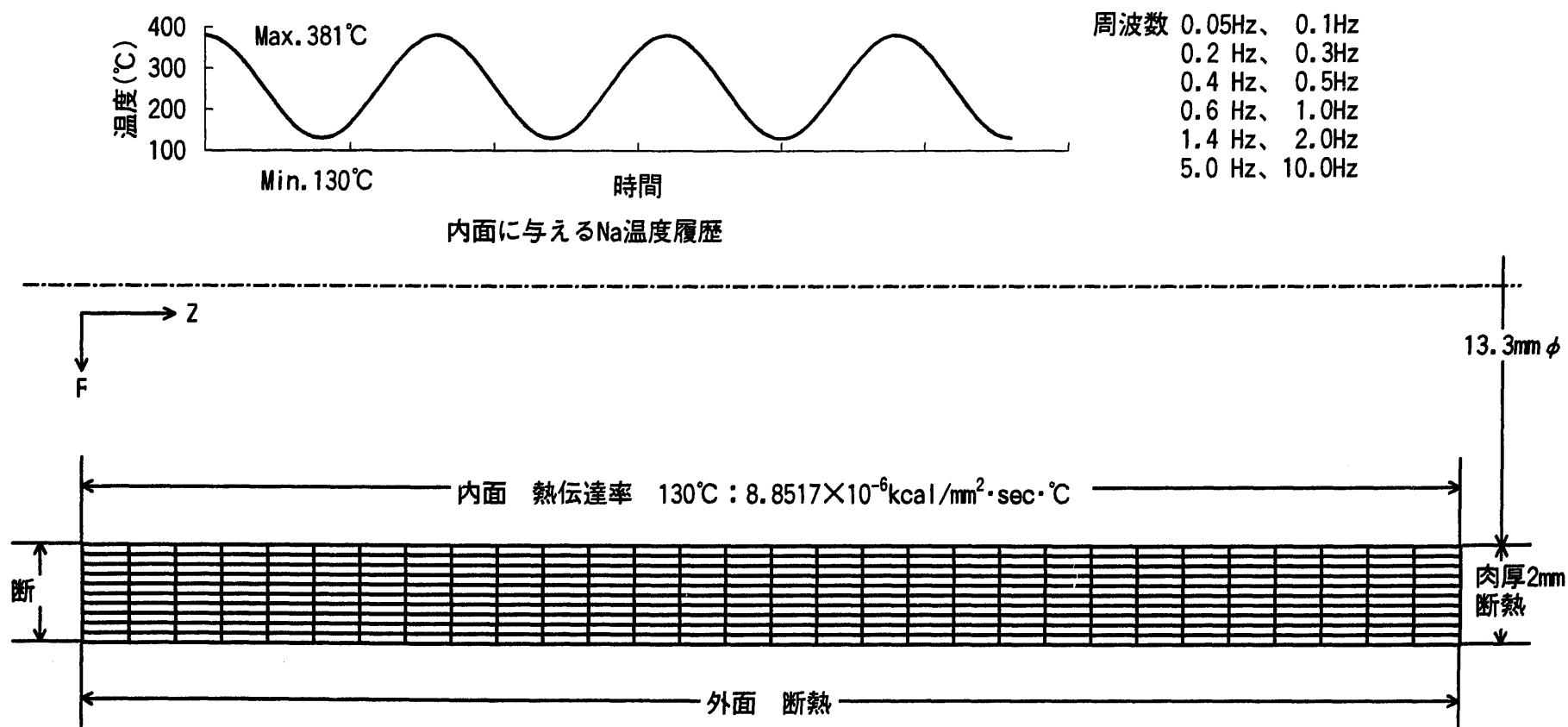


図 3 - 1 2 次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布解析条件

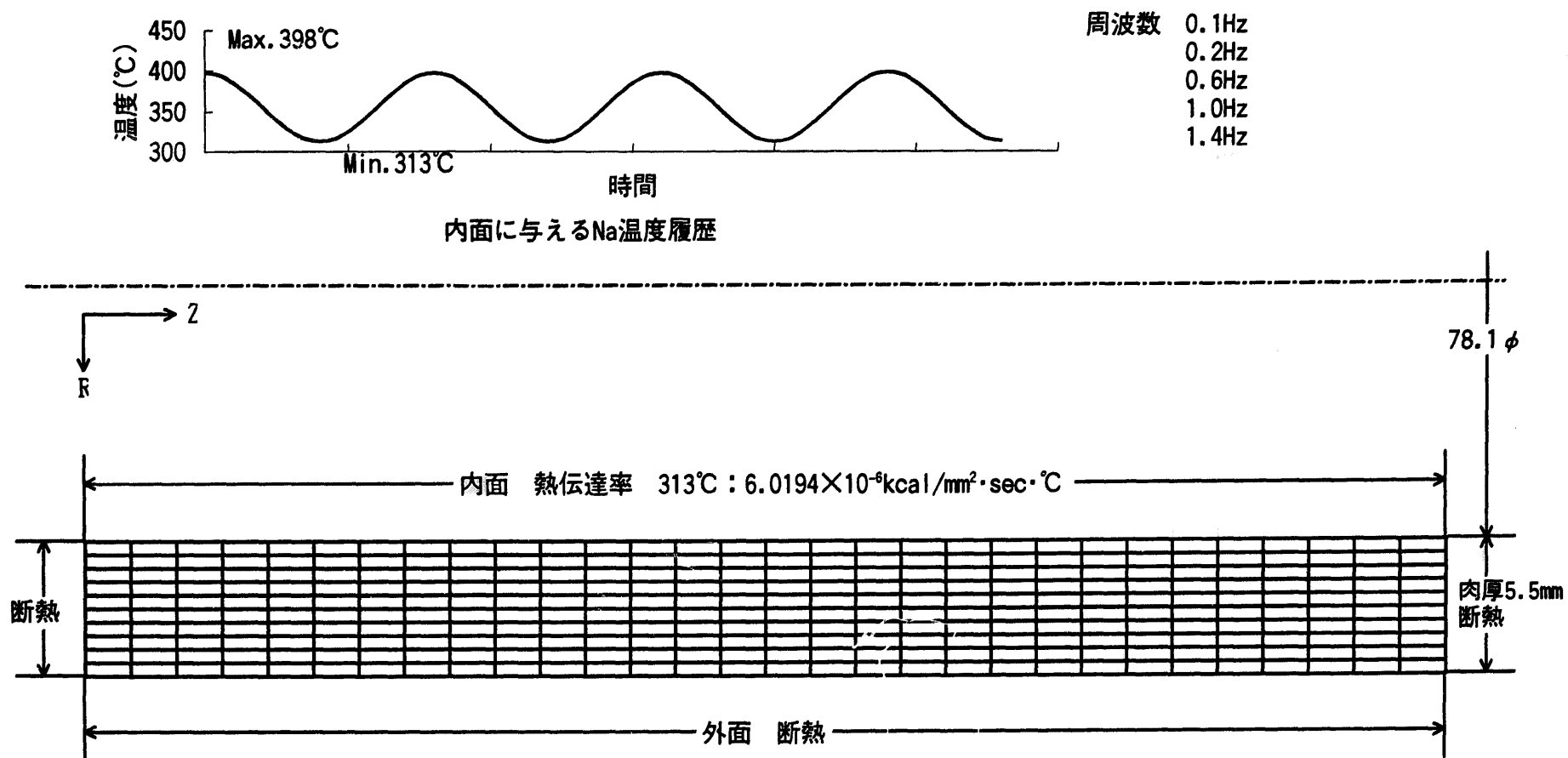


図 3-2 2次補助冷却系プラグイン計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布解析条件

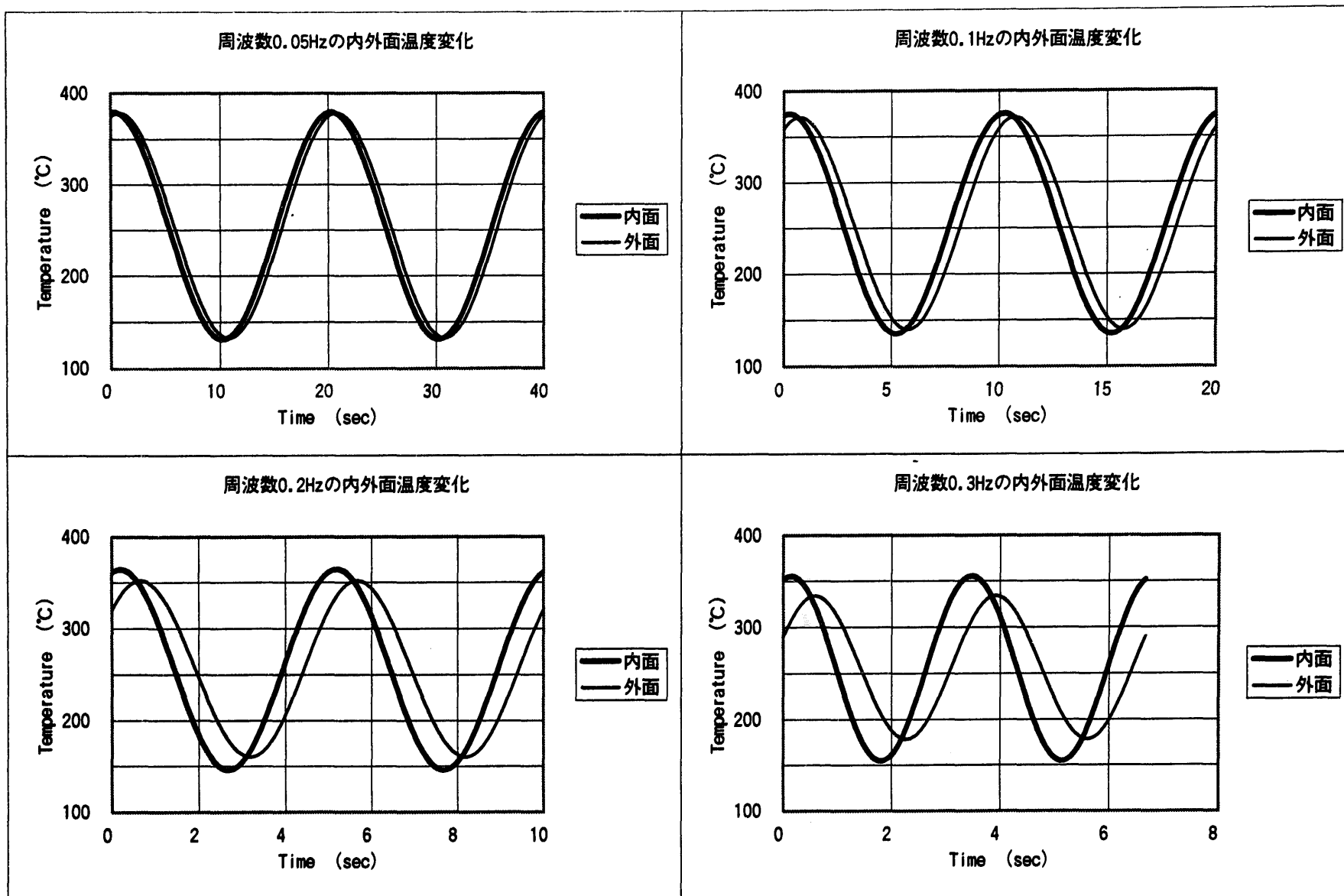


図3-3 (1/3) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いたF I N A S解析結果
(周波数0.05Hz~0.3Hz)

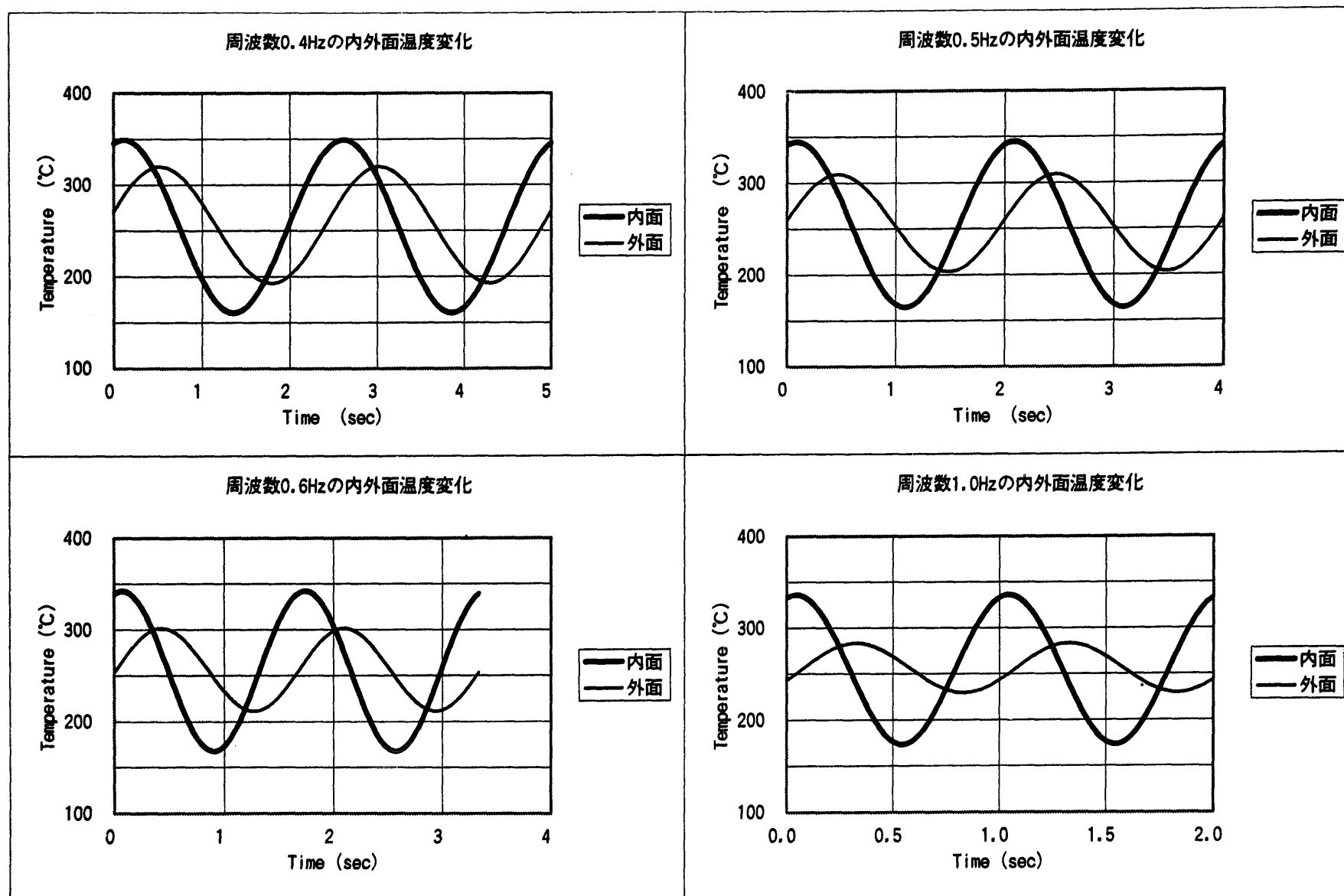


図 3 - 3 (2 / 3) 2 次補助冷却系プラグイン計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた F I N A S 解析結果
(周波数0.4Hz~1.0Hz)

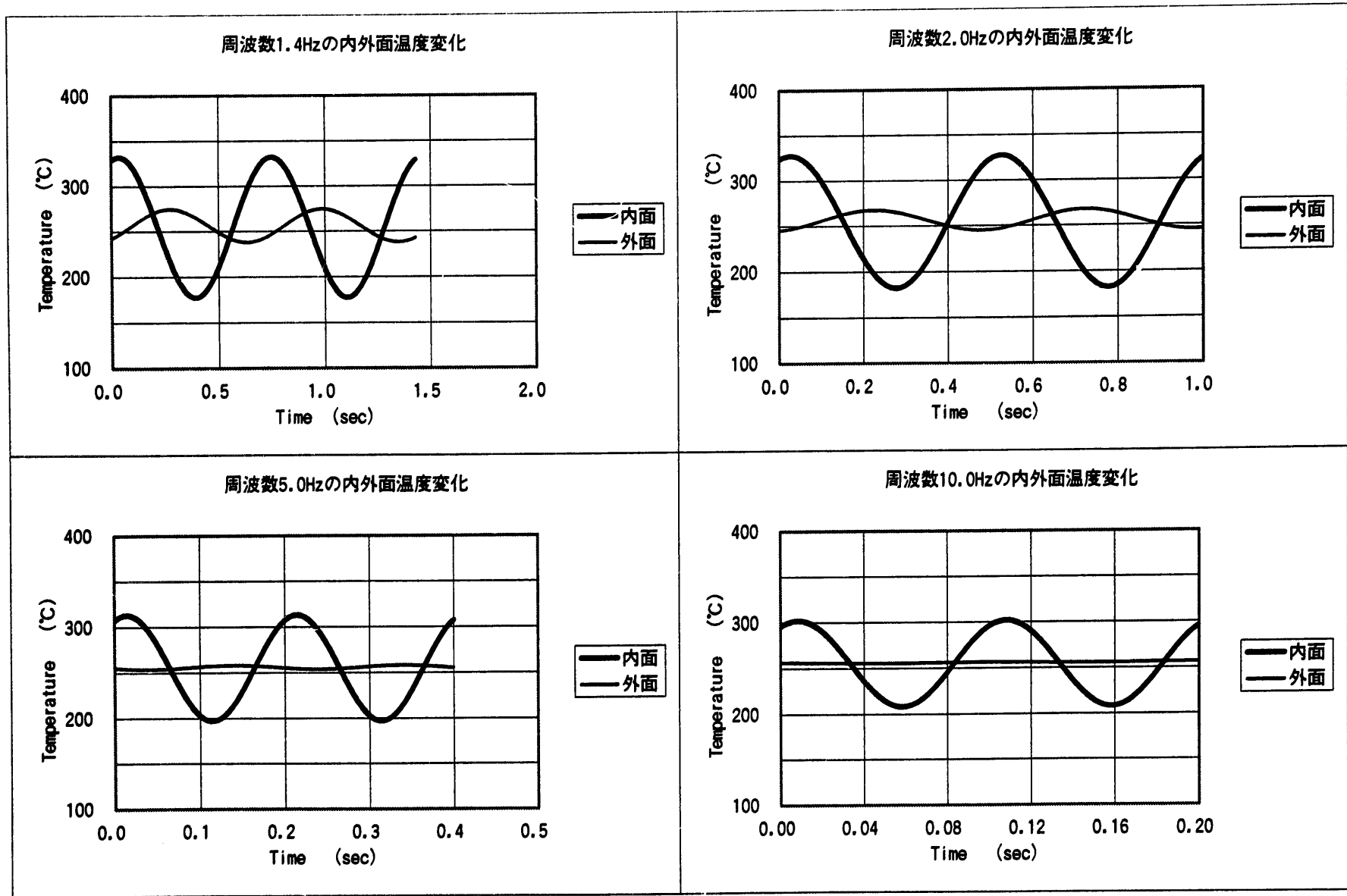


図 3 - 3 (3 / 3) 2 次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いた F I N A S 解析結果
(周波数1.4Hz~10Hz)

周波数	解析条件 ΔT_{in}	内面			外面		
		最大温度	最小温度	温度差	最大温度	最小温度	温度差
(Hz)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
0.05	251	379.4	131.5	247.9	378.4	132.7	245.7
0.10	251	375.3	135.4	239.9	371.5	140.1	231.4
0.20	251	364.5	145.8	218.7	352.1	160.2	191.9
0.30	251	355.4	154.6	200.8	334.0	178.8	155.2
0.40	251	349.2	160.7	188.5	320.0	193.0	127.0
0.50	251	345.1	164.8	180.3	309.5	203.6	105.9
0.60	251	342.3	167.6	174.7	301.6	211.5	90.1
1.00	251	336.1	173.9	162.2	283.5	229.7	53.8
1.40	251	332.4	177.6	154.8	274.7	238.3	36.4
2.00	251	327.8	182.2	145.6	267.7	245.1	22.6
5.00	251	313.1	197.2	115.9	258.3	253.8	4.5
10.00	251	302.2	208.4	93.8	256.5	255.7	0.8

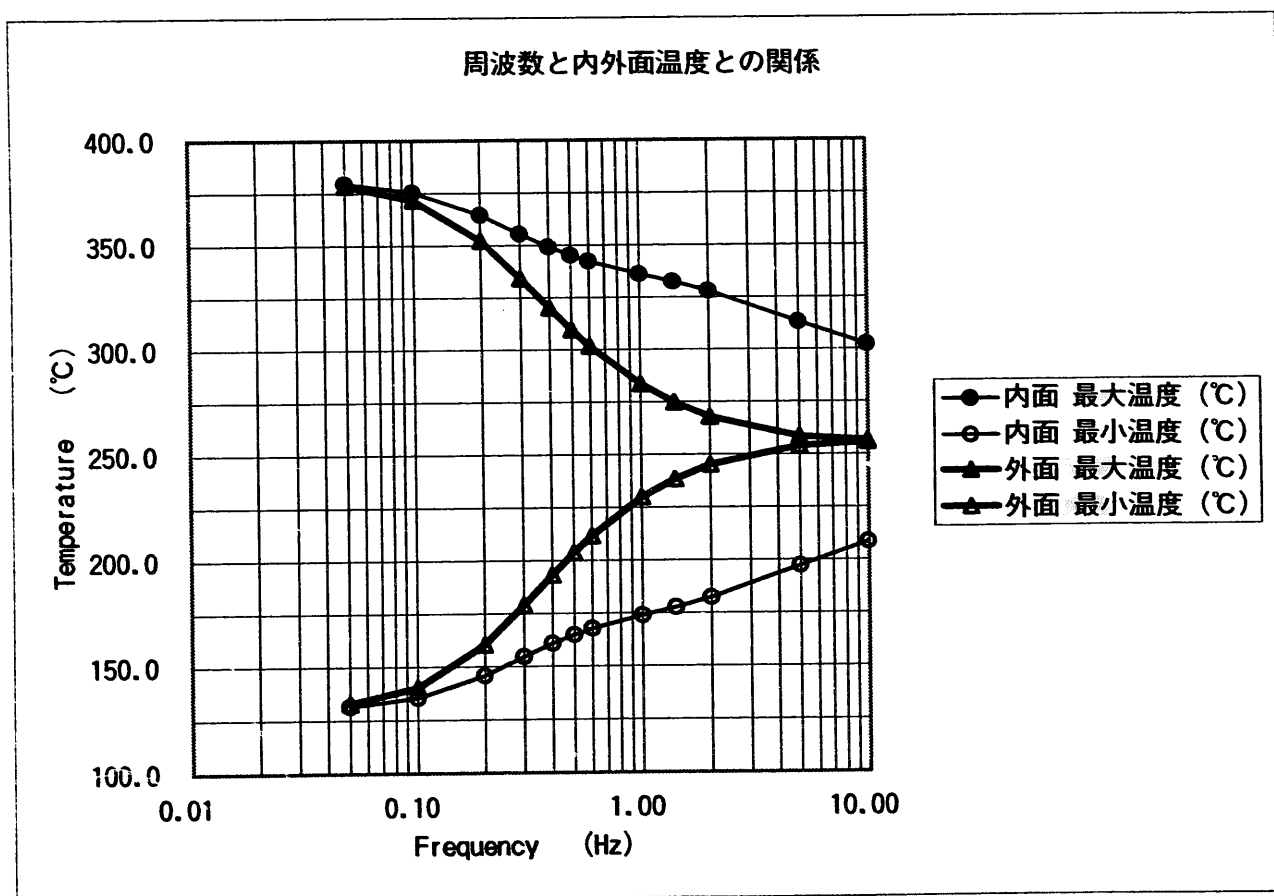


図3-4 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の単純な ΔT_{in} を用いたFINAS解析結果
(内面の最大、最小温度、外面の最大、最小温度の周波数依存性)

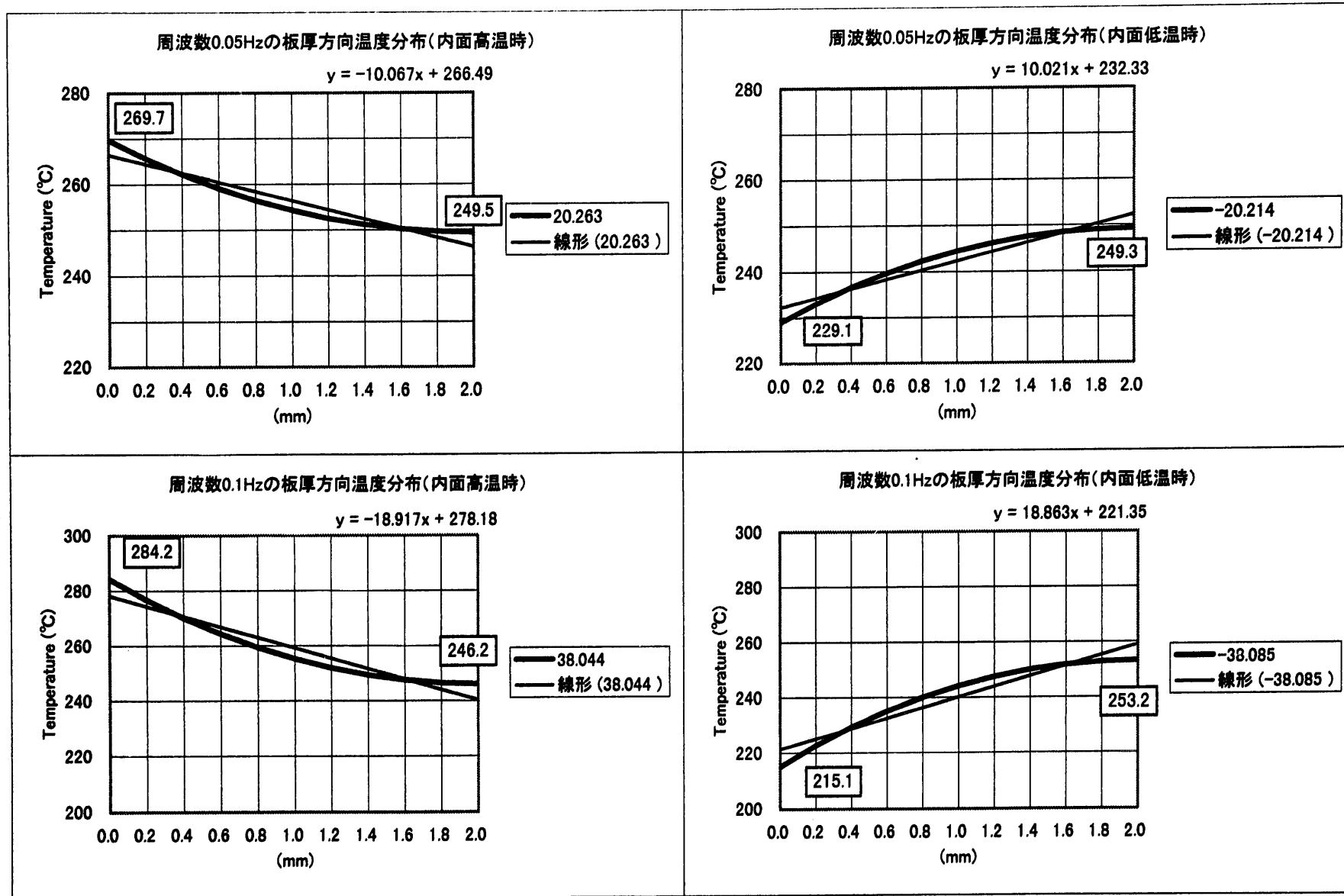


図 3-5 (1/6) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.05Hz及び0.1Hz)

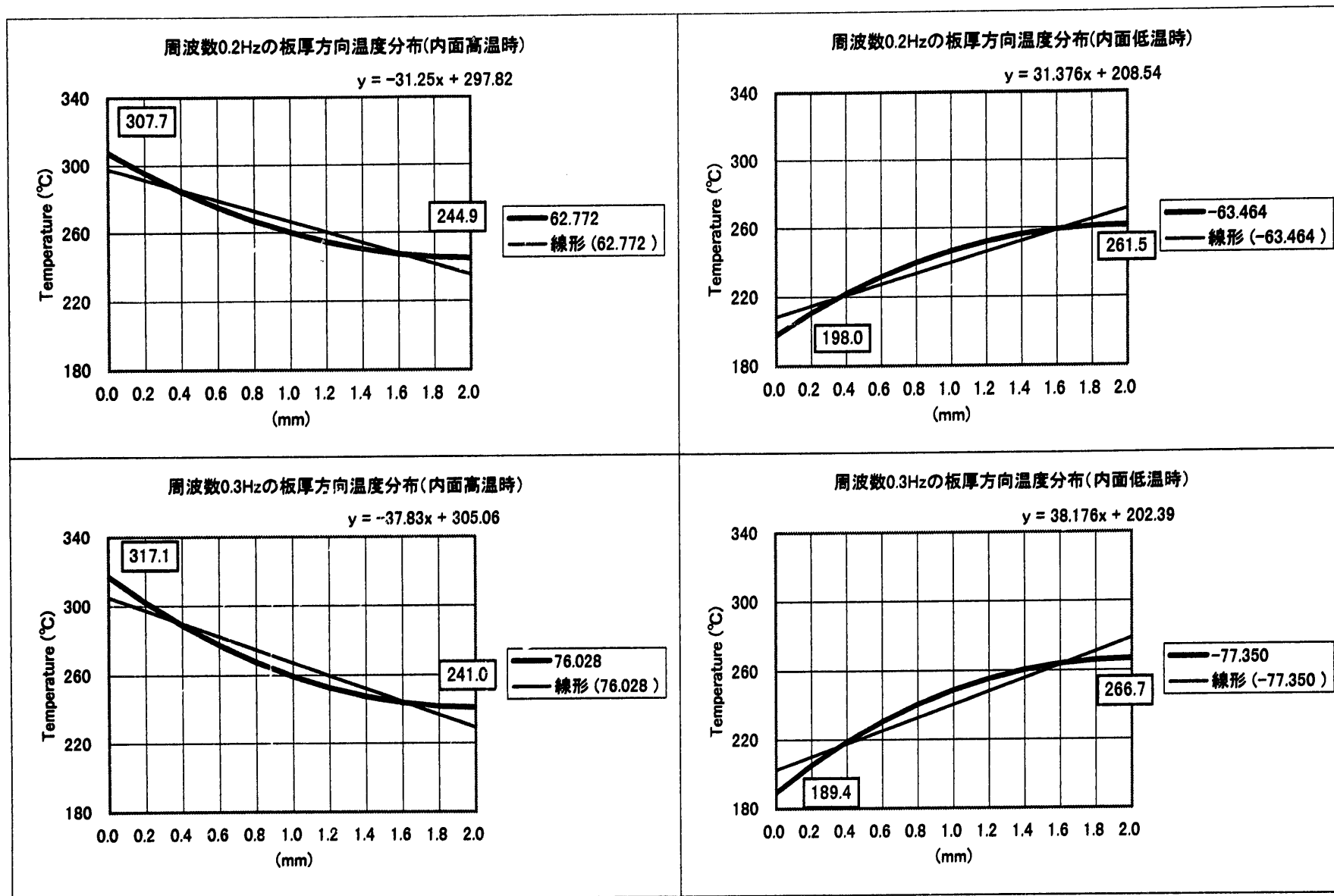


図 3-5 (2/6) 2次補助冷却系プラグイン計内部合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.2Hz及び0.3Hz)

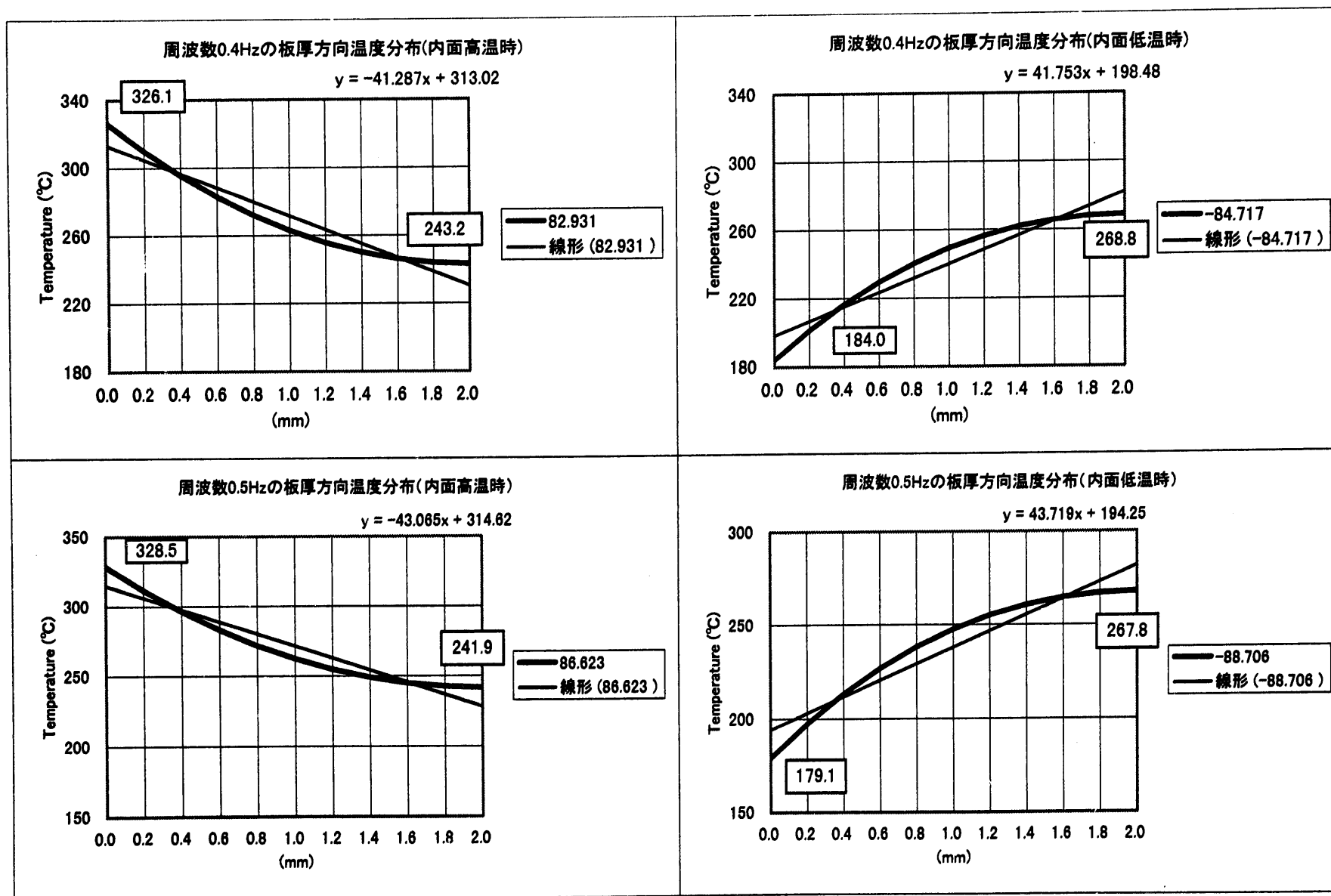


図 3-5 (3/6) 2次補助冷却系プラグイン計内部合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.4Hz及び0.5Hz)

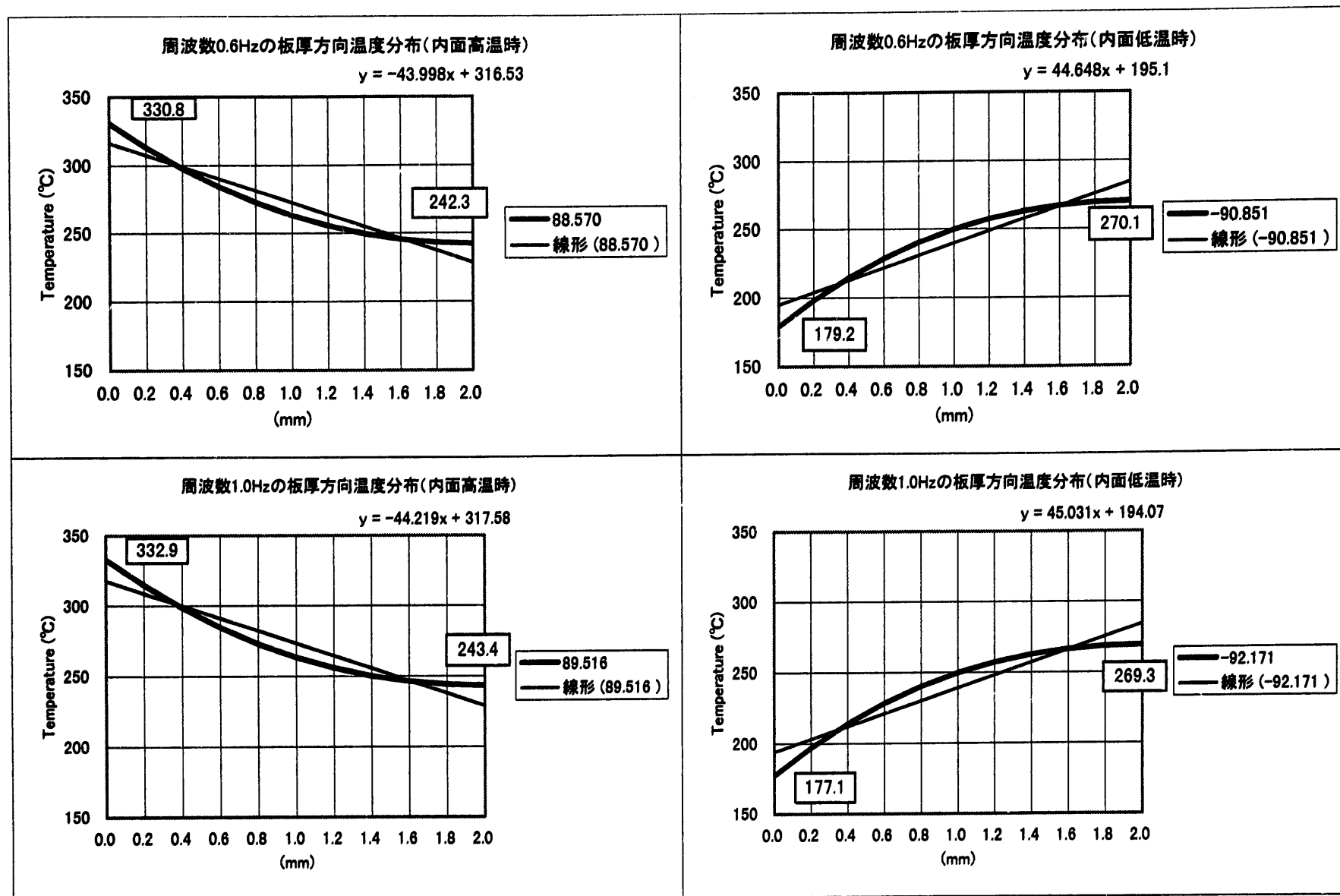


図 3-5 (4/6) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.6Hz及び1.0Hz)

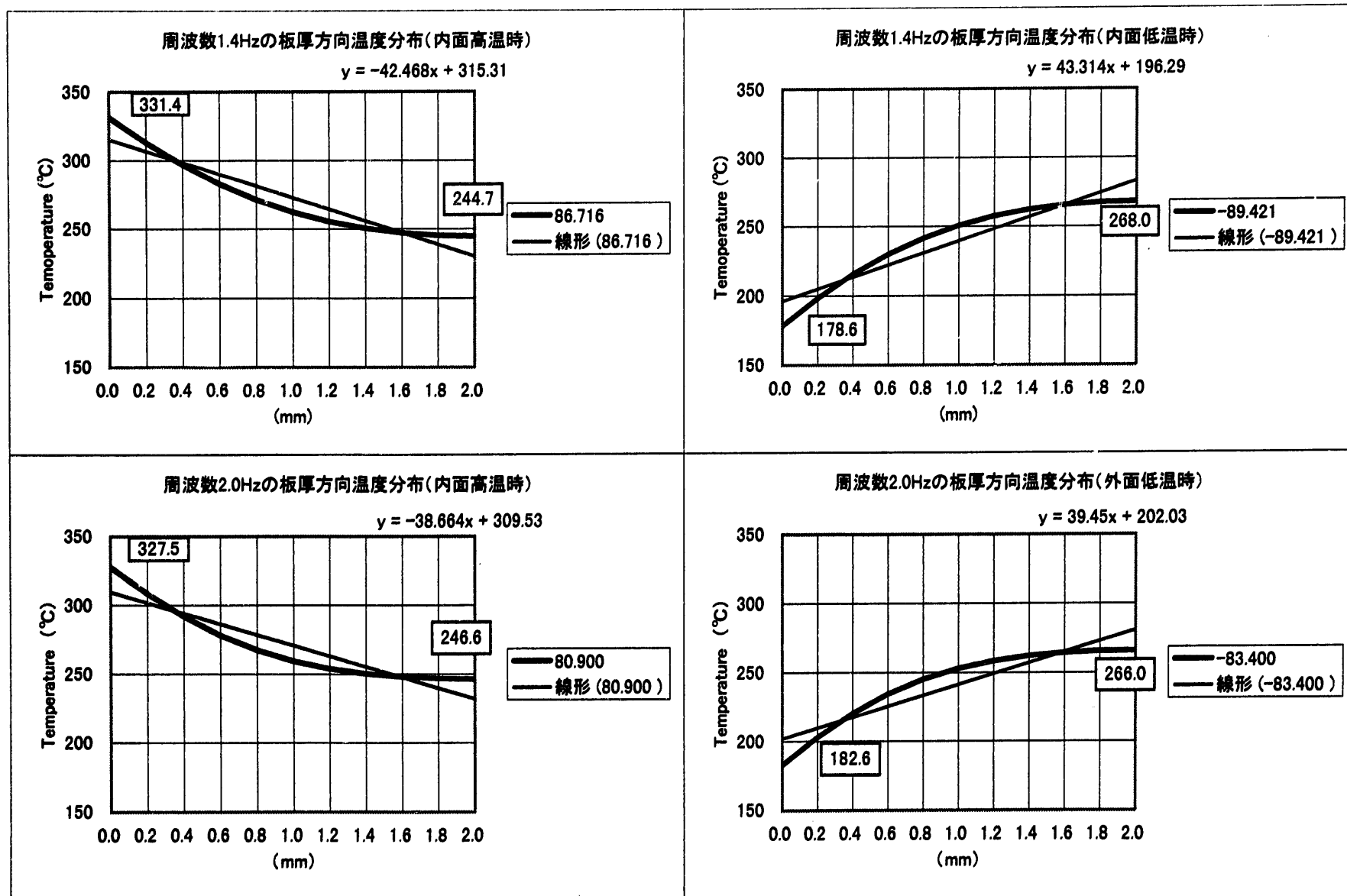


図3-5 (5/6) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布
 (周波数1.4Hz及び2.0Hz)

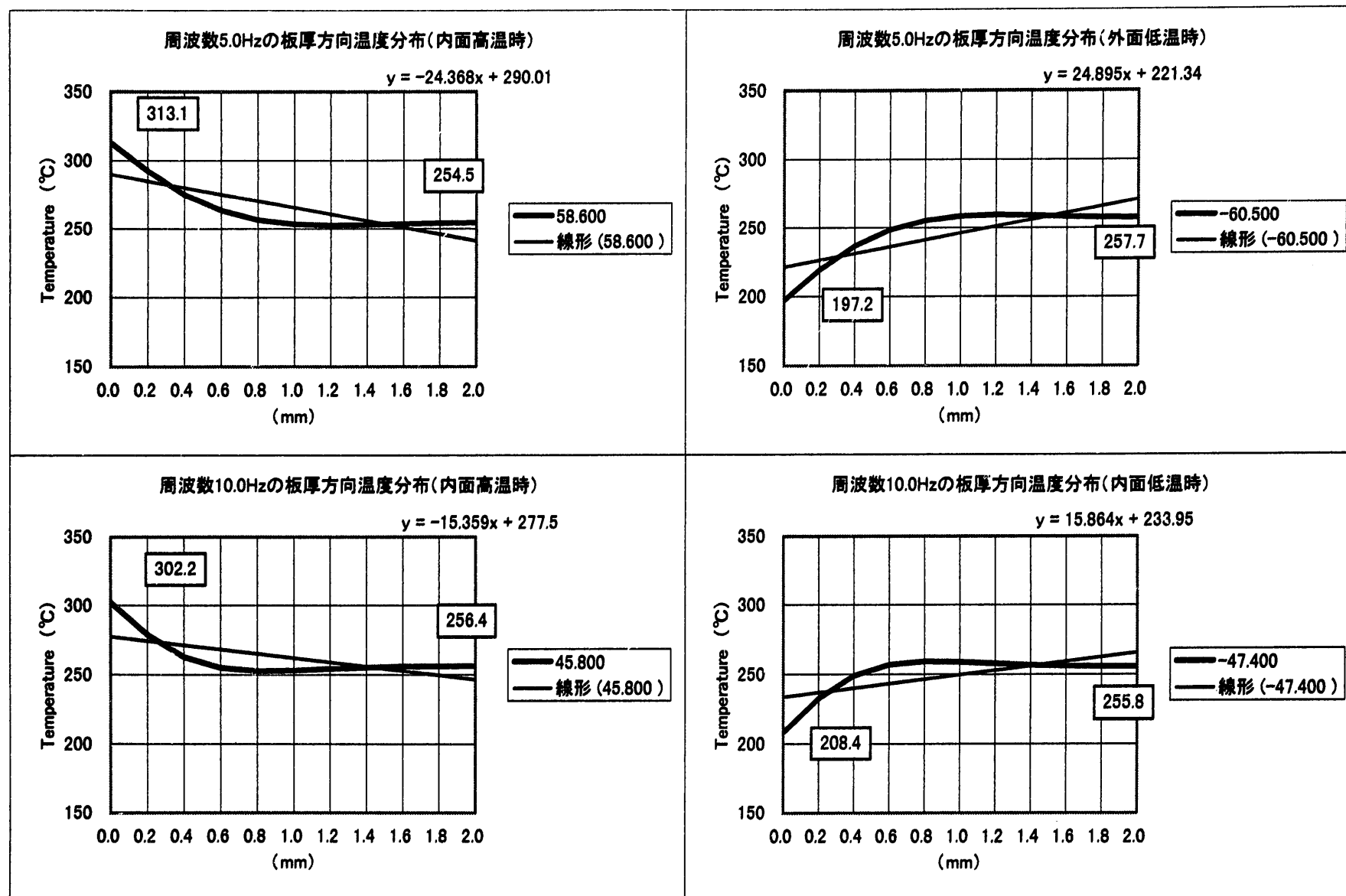


図 3-5 (6/6) 2次補助冷却系プラグイン計内部合流部の配管板厚方向温度分布
 (周波数5.0Hz及び10.0Hz)

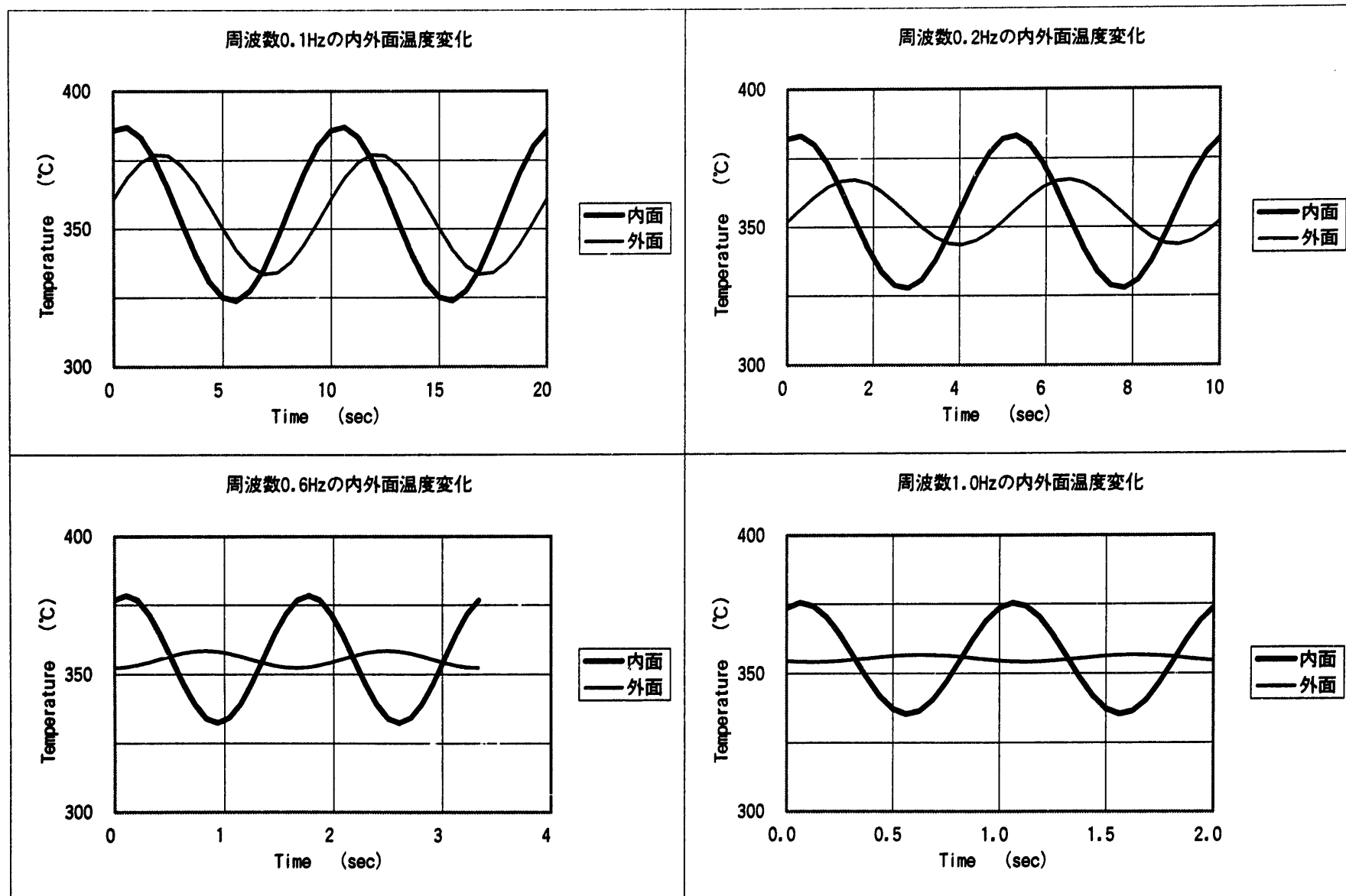


図3-6 (1/2) 2次補助冷却系プラグイン計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いたF I N A S解析結果
(周波数0.1Hz~1.0Hz)

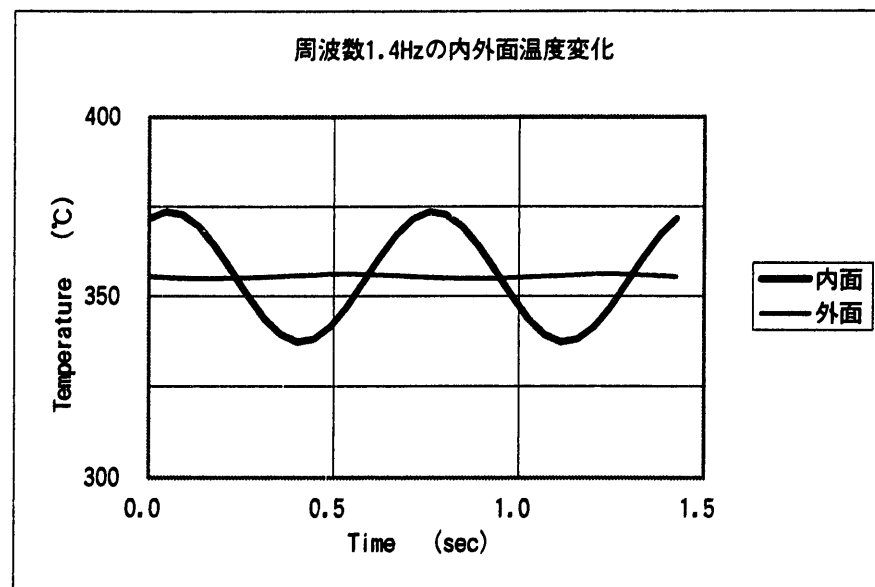


図 3-6 (2/2) 2次補助冷却系プラグイン計補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いたF I N A S解析結果
(周波数1.4Hz)

周波数	解析条件 ΔT_{in}	内面			外面		
		最大温度	最小温度	温度差	最大温度	最小温度	温度差
(Hz)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
0.10	85	387.1	323.9	63.2	377.1	333.5	43.6
0.20	85	383.2	327.8	55.4	367.3	343.6	23.7
0.60	85	378.5	332.5	46.0	358.5	352.4	6.1
1.00	85	375.6	335.4	40.2	356.7	354.2	2.5
1.40	85	373.6	337.3	36.3	356.1	354.9	1.2

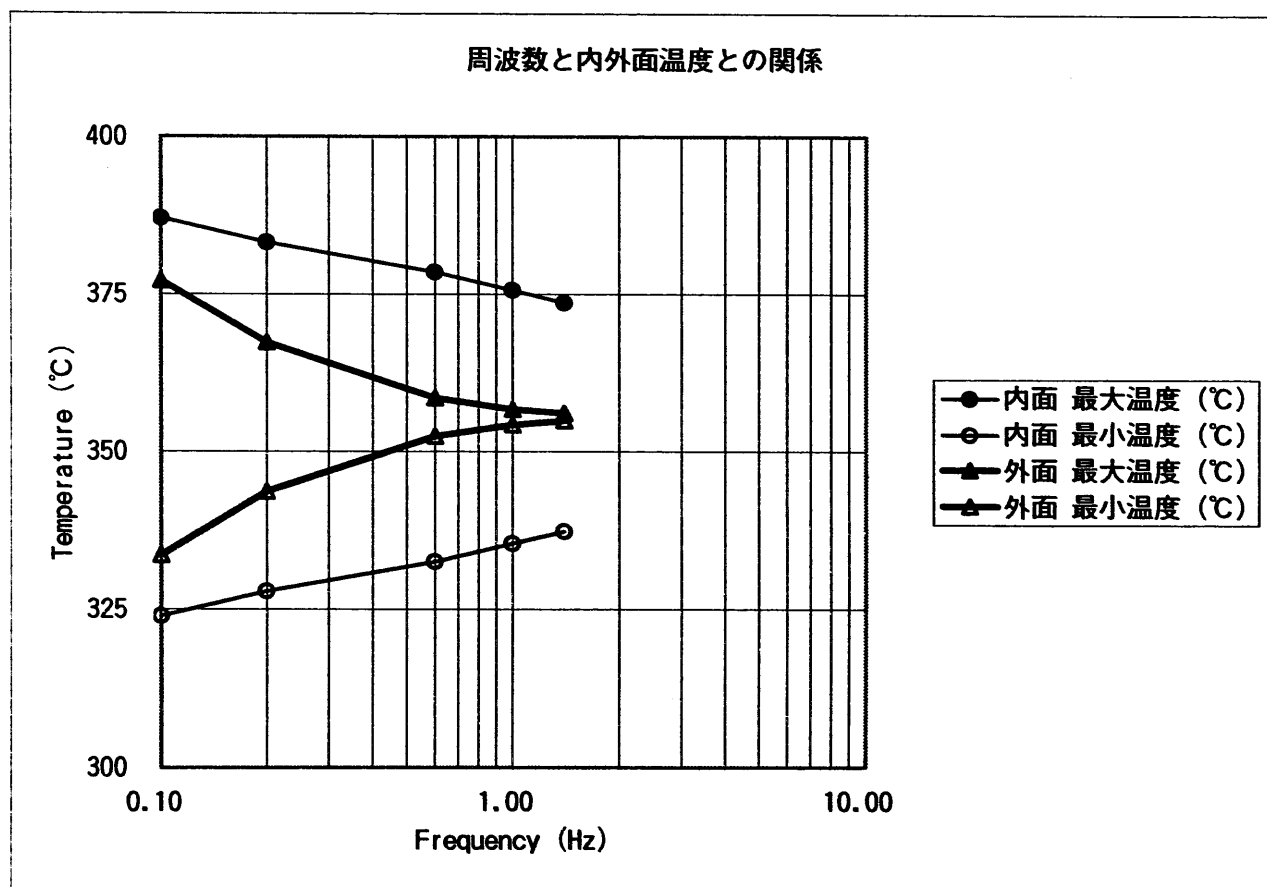


図3-7 2次補助冷却系ライン合流部の単純な ΔT_{in} を用いたFINAS解析結果
(内面の最大、最小温度、外面の最大、最小温度の周波数依存性)

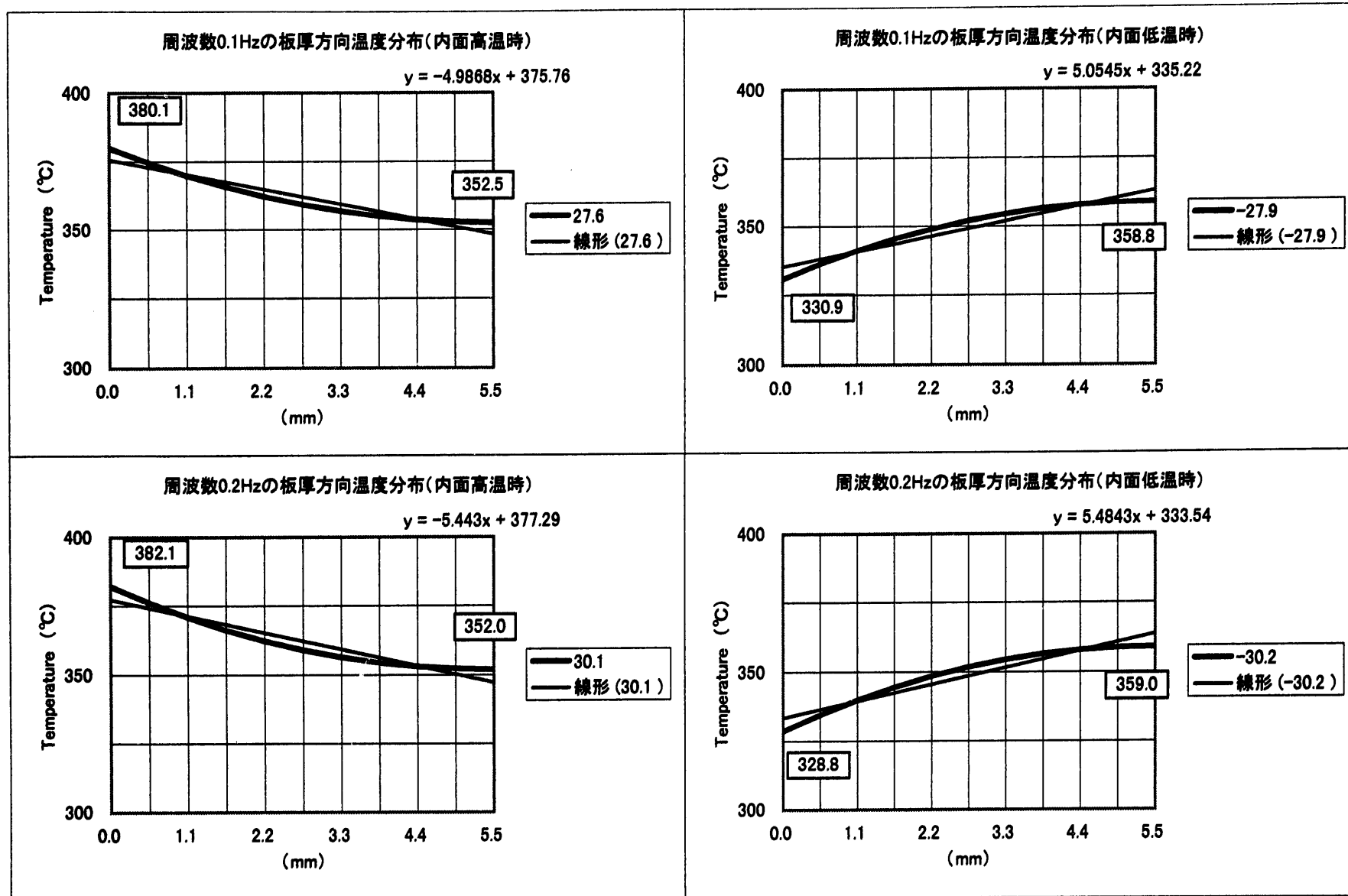


図 3 - 8 (1 / 3) 2 次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.1Hz及び0.2Hz)

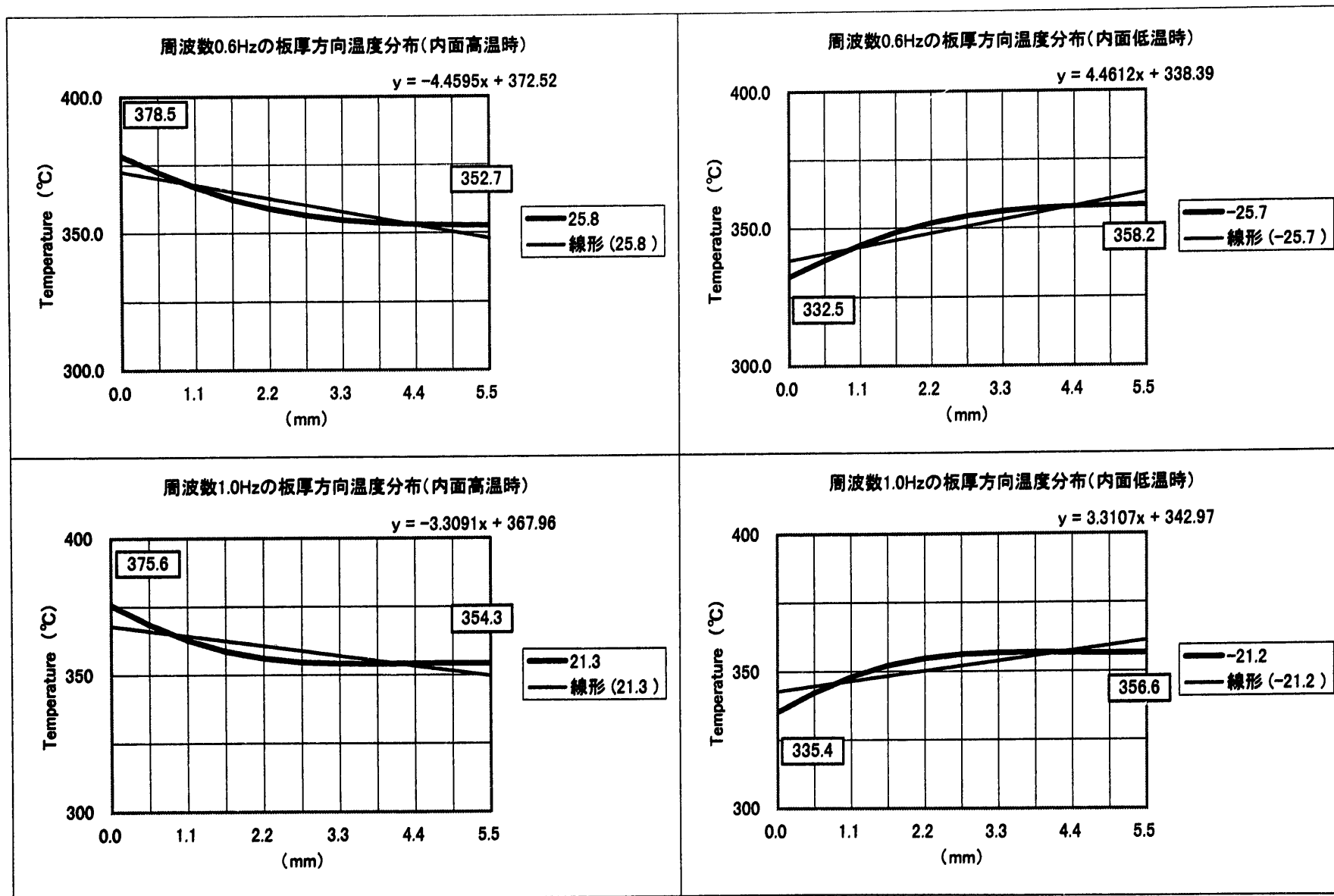


図 3-8 (2 / 3) 2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数0.6Hz及び1.0Hz)

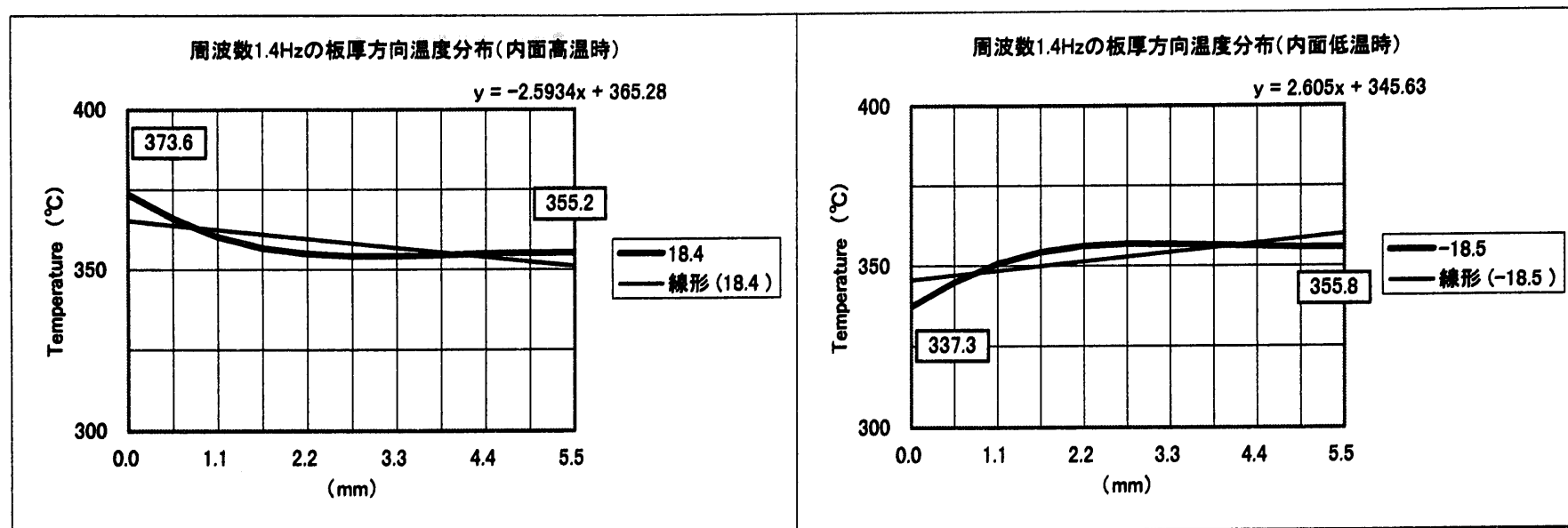


図 3 - 8 (3 / 3) 2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布
(周波数1.4Hz)

4. サーマルストライピングに対する簡易構造健全性評価

2.章の温度差が生じる配管合流部の調査結果を受けて、これらの対象部位の簡易構造健全性評価を行ったものである。評価にあたっては、通産省告示 501 号第 46 条及び往年の水を用いたサーマルストライピング研究成果を参考とした。本簡易評価の結果、詳細評価が必要な部位は、2 次主冷却系プラグング計内部合流部及び 2 次補助冷却系プラグング計内部合流部の 2 箇所であり、これらについては、内部合流部の非破壊検査、温度測定及び詳細構造健全性評価結果を実施した。これらの結果については、5.章以降にその結果を記述した。

4.1 単純な ΔT_{in} を用いた簡易構造健全性評価

往年の水を用いたサーマルストライピング研究成果によれば、合流部の流量比（ノズル側流量 Q_2 / 合流後流量 Q_3 ）と温度差比（合流後の最大温度ゆらぎ ΔT_p / 単純な流入部温度差 ΔT_{in} ）との関係が求められており、これらの関係から ΔT_{in} に対して ΔT_p を逆算して求めることができる。したがって、これらの結果を用いて、温度差が生じる配管合流部の合流後の ΔT_p を求め、簡易構造健全性評価を実施した。

(1) 1 次ナトリウム純化系

① 手動プラグング計純化系戻り合流部

手動プラグング計純化系戻り合流部は、単純な流入部温度差（ ΔT_{in} ）＝42℃で、合流部の流量比（ Q_2/Q_3 ）＝0.01 である。この関係における温度差比（ $\Delta T_p/\Delta T_{in}$ ）は、配管上面で 0.1、配管下面で 0.2 である。よって、 ΔT_p は約 4.2～8.4℃となり、配管板厚方向に発生する応力は約 1kg/mm² となり問題とならない。

② 自動プラグング計純化系戻り合流部

自動プラグング計純化系戻り合流部については、その ΔT_{in} 及び Q_2/Q_3 とも手動プラグング計純化系戻り合流部と同様であることから、その発生応力は問題とならない。

(2) 2 次補助冷却系

① 充填ライン補助系合流部

充填ライン補助系合流部は、単純な流入部温度差（ ΔT_{in} ）＝58℃で、合流部の流量比（ Q_2/Q_3 ）＝0.002 である。この関係における温度差比（ $\Delta T_p/\Delta T_{in}$ ）は、配管上面で 0.05、配管下面で 0.1 である。よって、 ΔT_p は約 5.8℃となり、配管板厚方向に発生する応力は 1kg/mm² 以下となり問題とならない。

② プラグング計内部合流部

プラグング計内部合流部は、単純な流入部温度差 (ΔT_{in}) = 251℃で、合流部の流量比 (Q_2/Q_3) = 0.8 である。この関係における温度差比 ($\Delta T_p/\Delta T_{in}$) は、配管上面で 1.00、配管下面で 0.75 である。よって、 ΔT_p は約 188～251℃となり、配管板厚方向に発生する応力は約 50～67kg/mm² となり、詳細な検討が必要となった。

③ プラギング計補助冷却系ライン合流部

プラグング計補助系戻り合流部は、単純な流入部温度差 (ΔT_{in}) = 85℃で、合流部の流量比 (Q_2/Q_3) = 0.003 である。この関係における温度差比 ($\Delta T_p/\Delta T_{in}$) は、配管上面で 0.05、配管下面で 0.1 である。よって、 ΔT_p は約 4.3～8.5℃となり、配管板厚方向に発生する応力は約 1kg/mm² となり問題とならない。

(3) 2次ナトリウム純化系

① プラギング計内部合流部

プラグング計内部合流部は、単純な流入部温度差 (ΔT_{in}) = 210℃で、合流部の流量比 (Q_2/Q_3) = 0.8 である。この関係における温度差比 ($\Delta T_p/\Delta T_{in}$) は、配管上面で 1.00、配管下面で 0.75 である。よって、 ΔT_p は約 158～210℃となり、配管板厚方向に発生する応力は約 42～56kg/mm² となり、詳細な検討が必要となった。

② プラギング計純化系戻り合流部

プラグング計純化系戻り合流部は、単純な流入部温度差 (ΔT_{in}) = 64℃で、合流部の流量比 (Q_2/Q_3) = 0.045 である。この関係における温度差比 ($\Delta T_p/\Delta T_{in}$) は、配管上面で 0.05、配管下面で 0.1 である。よって、 ΔT_p は約 3.2～6.4℃となり、配管板厚方向に発生する応力は 1kg/mm² 以下となり問題とならない。

(4) 2次主冷却系

① 2次ナトリウム純化系汲み上げライン主冷却系合流部

2次ナトリウム純化系汲み上げライン主冷却系合流部は、単純な流入部温度差 (ΔT_{in}) = 30℃で、合流部の流量比 (Q_2/Q_3) = 0.002 である。この関係における温度差比 ($\Delta T_p/\Delta T_{in}$) は、配管上面で 0.05、配管下面で 0.1 である。よって、 ΔT_p は約 1.5～3.0℃となり、配管板厚方向に発生する応力は 1kg/mm² 以下となり問題とならない。

4.2 FINAS 解析結果を反映した簡易構造健全性評価

4.1 章で単純な ΔT_{in} を用いた簡易構造健全性評価結果を示したが、その中で問題となる箇所は、2次補助冷却系プラグング計内部合流部及び2次ナトリウム純化系プラグング計内部合流部の2箇所であり、これらについて FINAS による熱伝導解析結果を反映した評価を行った。

表4-1に2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果（簡易評価）を示す。また、表4-2に2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果（簡易評価）を示す。

図4-1及び図4-2に表4-1で示した温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係と、温度ゆらぎ周波数と全温度振幅、ピーク応力との関係を示す。図4-3及び図4-4に表4-2で示した温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係と、温度ゆらぎ周波数と全温度振幅、ピーク応力との関係を示す。

評価にあたっては、4.1章で示したような単純な ΔT_{in} をすべて配管内表面に加わる非線型なピーク温度（ ΔT_2 ）成分であるという保守的過ぎる評価から、FINAS解析結果を用いて、配管板厚方向の温度分布を線形化処理し、その温度分布を線形な温度（ ΔT_1 ）成分と非線型なピーク温度（ ΔT_2 ）成分に分類した上で評価を行うこととした。

なお、本項における合流後の ΔT_p は、以下のようにして求めた値を使用した。

まず、单相多次元熱流動解析コード「AQUA」による熱流動解析結果を用いて、2次補助冷却系プラグング計内部合流部の最大温度変動幅の温度ゆらぎ幅実効値（温度ゆらぎ幅の自乗の時間平均の平方根）を求め、この値に、往年のナトリウムを用いた研究成果^②で示されている最大温度変動幅の温度ゆらぎ幅実効値に対する最大倍率を乗じて、仮の ΔT_p を算出した。次に、算出した ΔT_p を、評価するそれぞれの単純な合流部温度差 ΔT_{in} で除して温度変動幅（ ΔT_p ）の流体温度差（ ΔT_{in} ）に対する比率 β を算出し、4.1項で示した温度差比（ $\Delta T_p / \Delta T_{in}$ ）に代えて、この比率 β （=0.51）を ΔT_{in} 及びFINASを用いて算出した結果に乗じている。

この結果、表4-1に示すとおり、2次補助冷却系プラグング計内部合流部は、4.1項で示した結果に対して大幅に応力が低減したものの、発生ピーク応力は、最大となる温度ゆらぎ周波数1.0Hzとした場合で10.4kg/mm²であり、内部合流部の材質SUS304の設計疲労限である10.3kg/mm²をわずかに上回る結果となった。

逆に、表4-2に示すとおり、2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部は、温度変動幅の流体温度差に対する比率 β （=1.0）としているため（補助冷却系ライン合流部についてはAQUAによる熱流動解析を行っていないため、保守的に $\beta=1.0$ としている）、発生ピーク応力は、最大となる温度ゆらぎ周波数0.2Hzとした場合でも6.9kg/mm²であり、補助冷却系ライン合流部の材質1 1/4Cr-1 Mo鋼の設計疲労限である7.7kg/mm²を下回っていた。

以上より、これまでの簡易評価の結果、問題なる部位は、2次補助系プラグング計内部合流部及び2次ナトリウム純化系プラグング計内部合流部の2箇所であり、これらについて5章以降で詳細な構造健全性評価を行うこととした。

表4-1 2次補助冷却系プラグイング計内部合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果(簡易評価)

項 目			記号	単位	周波数(Hz)											
					0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.4	2.0	5.0	10.0
ティー部入口基準温度	枝管温度	(バイパス側)	T _B	(℃)	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00
	主管温度	(プラグ側)	T _P	(℃)	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
	基準温度差	T _B -T _P	ΔT _{in}	(℃)	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00
	合流後温度		T _{BP}	(℃)	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80
内面温度が高温時(最大値)	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(℃)	269.70	284.20	307.70	317.10	326.10	328.50	330.80	332.90	331.40	327.50	313.10	302.20
		外面温度	T _{out}	(℃)	249.50	246.20	244.90	241.00	243.20	241.90	242.30	243.40	244.70	246.60	254.50	256.40
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(℃)	256.42	259.26	266.57	267.23	271.73	271.56	272.53	273.36	272.84	270.87	265.64	262.14
		線形分	ΔT _L	(℃)	-20.13	-37.83	-62.50	-75.66	-82.57	-86.13	-88.00	-88.44	-84.94	-77.33	-48.74	-30.72
		非線形分	ΔT _{2in}	(℃)	3.21	6.02	9.88	12.04	13.08	13.88	14.27	15.32	16.09	17.97	23.09	24.70
			ΔT _{2out}	(℃)	3.14	5.85	9.58	11.60	12.75	13.41	13.77	14.26	14.33	14.40	13.23	9.62
		内面温度	T _{Lin}	(℃)	266.49	278.18	297.82	305.06	313.02	314.62	316.53	317.58	315.31	309.53	290.01	277.50
		外面温度	T _{Lout}	(℃)	246.36	240.35	235.32	229.40	230.45	228.49	228.53	229.14	230.37	232.20	241.27	246.78
内面温度が低温時(最大値)	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(℃)	229.10	215.10	198.00	189.45	184.00	179.10	179.20	177.10	178.60	182.60	197.20	208.40
		外面温度	T _{out}	(℃)	249.30	253.20	261.50	266.65	268.80	267.80	270.10	269.30	268.00	266.00	257.70	255.80
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(℃)	242.35	240.21	239.92	240.57	240.23	237.97	239.75	239.10	239.60	241.48	246.24	249.81
		線形分	ΔT _L	(℃)	20.04	37.73	62.75	76.25	83.51	87.44	89.30	90.06	86.63	78.90	49.79	31.73
		非線形分	ΔT _{2in}	(℃)	-3.23	-6.25	-10.54	-12.99	-14.48	-15.15	-15.90	-16.97	-17.69	-19.43	-24.14	-25.55
			ΔT _{2out}	(℃)	-3.07	-5.88	-9.79	-12.04	-13.19	-13.89	-14.30	-14.83	-14.92	-14.93	-13.43	-9.88
		内面温度	T _{Lin}	(℃)	232.33	221.35	208.54	202.44	198.48	194.25	195.10	194.07	196.29	202.03	221.34	233.95
		外面温度	T _{Lout}	(℃)	252.37	259.08	271.29	278.69	281.99	281.69	284.40	284.13	282.92	280.93	271.13	265.68
線形分の温度ゆらぎ幅		内外面	ΔT _{Li}	(℃)	34.16	56.83	89.28	102.62	114.54	120.37	121.43	123.51	119.02	107.50	68.67	43.55
非線形分の温度ゆらぎ幅		内面	ΔT _{2in}	(℃)	6.44	12.27	20.42	25.03	27.56	29.03	30.17	32.29	33.78	37.40	47.23	50.25
		外面	ΔT _{2out}	(℃)	6.22	11.73	19.37	23.64	25.94	27.30	28.06	29.09	29.24	29.33	26.66	19.50
温度変動幅の流体温度差に対する比率		内外面	β		0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
線形分の温度ゆらぎ幅(×β)		内外面	ΔT _{Li} ×β	(℃)	17.42	28.98	45.53	52.34	58.42	61.39	61.93	62.99	60.70	54.83	35.02	22.21
非線形分の温度ゆらぎ幅(×β)		内面	ΔT _{2in} ×β	(℃)	3.28	6.26	10.41	12.77	14.06	14.81	15.39	16.47	17.23	19.07	24.09	25.63
		外面	ΔT _{2out} ×β	(℃)	3.17	5.98	9.88	12.06	13.23	13.92	14.31	14.84	14.91	14.96	13.59	9.94
発生応力	内面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.8193E+04	1.8070E+04	1.7864E+04	1.7780E+04	1.7698E+04	1.7676E+04	1.7654E+04	1.7635E+04	1.7649E+04	1.7685E+04	1.7816E+04	1.7913E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/℃)	1.7514E-05	1.7571E-05	1.7664E-05	1.7701E-05	1.7735E-05	1.7745E-05	1.7753E-05	1.7761E-05	1.7756E-05	1.7741E-05	1.7685E-05	1.7642E-05
		線形分	σ(ΔT _{Li})	(kg/mm ²)	3.96	6.57	10.26	11.76	13.10	13.75	13.86	14.09	13.59	12.29	7.88	5.01
		非線形分	σ(ΔT _{2in})	(kg/mm ²)	1.49	2.84	4.69	5.74	6.30	6.63	6.89	7.37	7.71	8.55	10.84	11.57
		ピーク応力	Sp _{in}	(kg/mm ²)	5.46	9.41	14.96	17.50	19.40	20.39	20.75	21.46	21.30	20.84	18.72	16.58
			Sp _{in} /2	(kg/mm ²)	2.73	4.71	7.48	8.75	9.70	10.19	10.38	10.73	10.65	10.42	9.36	8.29
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30
	外面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.8360E+04	1.8387E+04	1.8397E+04	1.8429E+04	1.8411E+04	1.8422E+04	1.8418E+04	1.8409E+04	1.8399E+04	1.8384E+04	1.8319E+04	1.8304E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/℃)	1.7432E-05	1.7418E-05	1.7413E-05	1.7397E-05	1.7406E-05	1.7401E-05	1.7402E-05	1.7407E-05	1.7412E-05	1.7420E-05	1.7452E-05	1.7460E-05
		線形分	ΔT _{Li}	(kg/mm ²)	3.98	6.63	10.42	11.99	13.37	14.06	14.18	14.42	13.89	12.54	8.00	5.07
		非線形分	ΔT _{2out}	(kg/mm ²)	1.45	2.74	4.52	5.52	6.06	6.38	6.55	6.79	6.83	6.84	6.21	4.54
		ピーク応力	Sp _{out}	(kg/mm ²)	5.43	9.37	14.94	17.51	19.43	20.43	20.73	21.21	20.72	19.38	14.21	9.61
			Sp _{out} /2	(kg/mm ²)	2.72	4.68	7.47	8.75	9.71	10.22	10.37	10.60	10.36	9.69	7.10	4.80
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30

は、熱伝導解析結果を線形処理した結果に基づくデータを示す。設計疲労限は、SUS304の350℃の値

表4-2 2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の温度ゆらぎ周波数の違いによる温度ゆらぎ幅と発生ピーク応力の算出結果(簡易評価)

項 目			記号	単位	周波数(Hz)				
					0.1	0.2	0.6	1.0	1.4
ティー部入口基準温度	枝管温度	(バイパス側)	T _B	(°C)	398.00	398.00	398.00	398.00	398.00
	主管温度	(プラグ側)	T _P	(°C)	313.00	313.00	313.00	313.00	313.00
	基準温度差	T _B －T _P	Δ T _{in}	(°C)	85.00	85.00	85.00	85.00	85.00
	合流後温度		T _{BP}	(°C)	397.78	397.78	397.78	397.78	397.78
内面温度が最高温度時における値	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(°C)	380.10	382.10	378.50	375.60	373.60
		外面温度	T _{out}	(°C)	352.50	352.00	352.70	354.30	355.20
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(°C)	362.05	362.32	360.26	358.86	358.15
		線形分	Δ T ₁	(°C)	－27.43	－29.94	－24.53	－18.20	－14.26
		非線形分	Δ T _{2in}	(°C)	4.34	4.81	5.98	7.64	8.32
			Δ T _{2out}	(°C)	4.17	4.65	4.71	4.54	4.18
		内面温度	T _{Lin}	(°C)	375.76	377.29	372.52	367.96	365.28
		外面温度	T _{Lout}	(°C)	348.33	347.35	347.99	349.76	351.02
内面温度が最低温度時における値	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(°C)	330.90	328.80	332.50	335.40	337.30
		外面温度	T _{out}	(°C)	358.80	359.00	358.20	356.60	355.80
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(°C)	349.12	348.62	350.66	352.07	352.79
		線形分	Δ T ₁	(°C)	27.80	30.16	24.54	18.21	14.33
		非線形分	Δ T _{2in}	(°C)	－4.32	－4.74	－5.89	－7.57	－8.33
			Δ T _{2out}	(°C)	－4.22	－4.70	－4.73	－4.58	－4.16
		内面温度	T _{Lin}	(°C)	335.22	333.54	338.39	342.97	345.63
		外面温度	T _{Lout}	(°C)	363.02	363.70	362.93	361.18	359.96
線形分の温度ゆらぎ幅		内外面	Δ T _{L1}	(°C)	40.54	43.75	34.13	24.99	19.65
非線形分の温度ゆらぎ幅		内面	Δ T _{2in}	(°C)	8.66	9.55	11.87	15.21	16.65
		外面	Δ T _{2out}	(°C)	8.39	9.35	9.43	9.12	8.34
温度変動幅の流体温度差に対する比率		内外面	β		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
線形分の温度ゆらぎ幅(× β)		内外面	Δ T _{L1} × β	(°C)	40.54	43.75	34.13	24.99	19.65
非線形分の温度ゆらぎ幅(× β)		内面	Δ T _{2in} × β	(°C)	8.66	9.55	11.87	15.21	16.65
		外面	Δ T _{2out} × β	(°C)	8.39	9.35	9.43	9.12	8.34
発生応力	内面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.7183E+04	1.7163E+04	1.7199E+04	1.7227E+04	1.7247E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/°C)	1.7939E－05	1.7946E－05	1.7933E－05	1.7922E－05	1.7915E－05
		線形分	σ(Δ T _{L1})	(kg/mm ²)	8.93	9.63	7.52	5.51	4.34
		非線形分	σ(Δ T _{2in})	(kg/mm ²)	3.81	4.20	5.23	6.71	7.35
		ピーク応力	Sp _{in}	(kg/mm ²)	12.74	13.83	12.75	12.22	11.69
			Sp _{in} /2	(kg/mm ²)	6.37	6.91	6.37	6.11	5.84
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70
	外面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.7451E+04	1.7456E+04	1.7449E+04	1.7434E+04	1.7425E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/°C)	1.7836E－05	1.7834E－05	1.7837E－05	1.7843E－05	1.7846E－05
		線形分	Δ T _{L1}	(kg/mm ²)	9.01	9.73	7.59	5.55	4.36
		非線形分	Δ T _{2out}	(kg/mm ²)	3.73	4.16	4.19	4.05	3.71
		ピーク応力	Sp _{out}	(kg/mm ²)	12.74	13.89	11.78	9.60	8.07
			Sp _{out} /2	(kg/mm ²)	6.37	6.94	5.89	4.80	4.04
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	7.70	7.70	7.70	7.70	7.70

は、解析結果等に基づく入力データを示す。

設計疲労限は、21/4Cr-1Mo鋼の400°Cの値

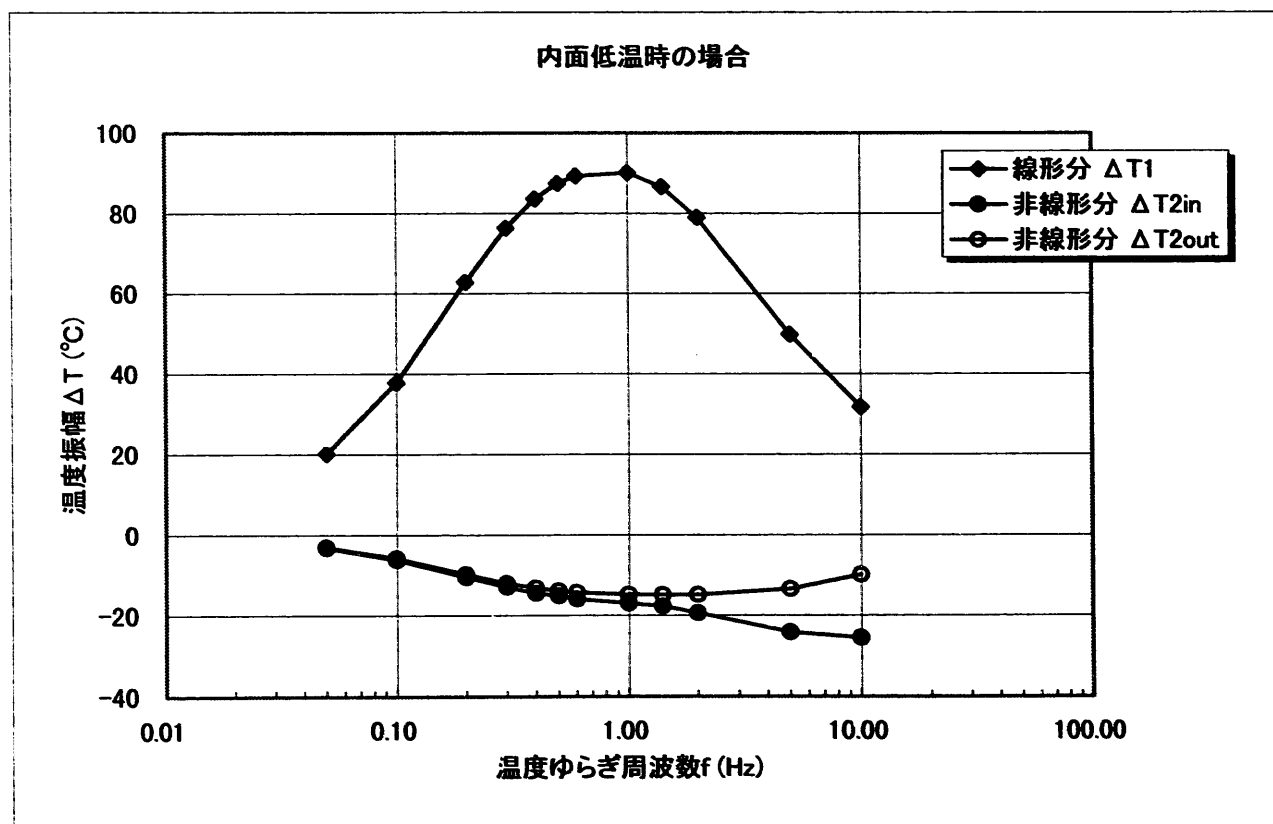
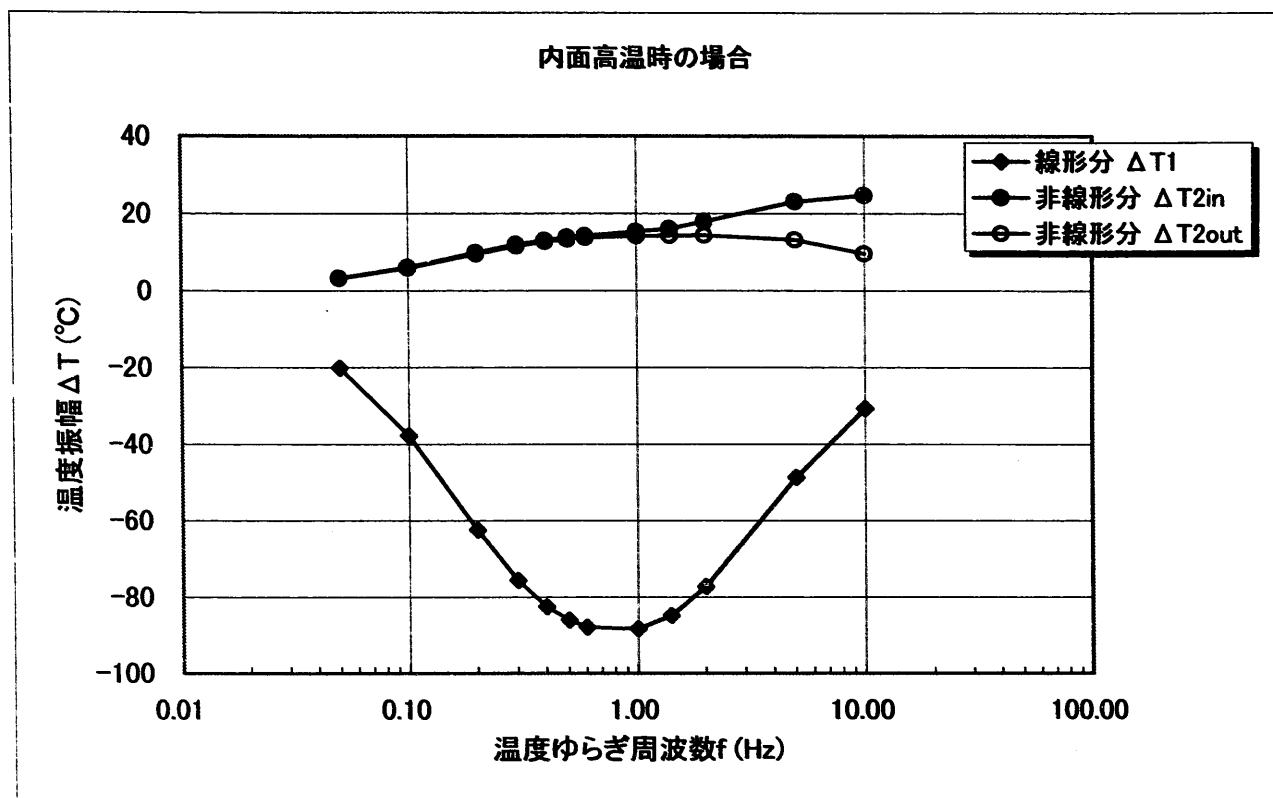


図4-1 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の配管板厚方向温度分布評価結果
(温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係)

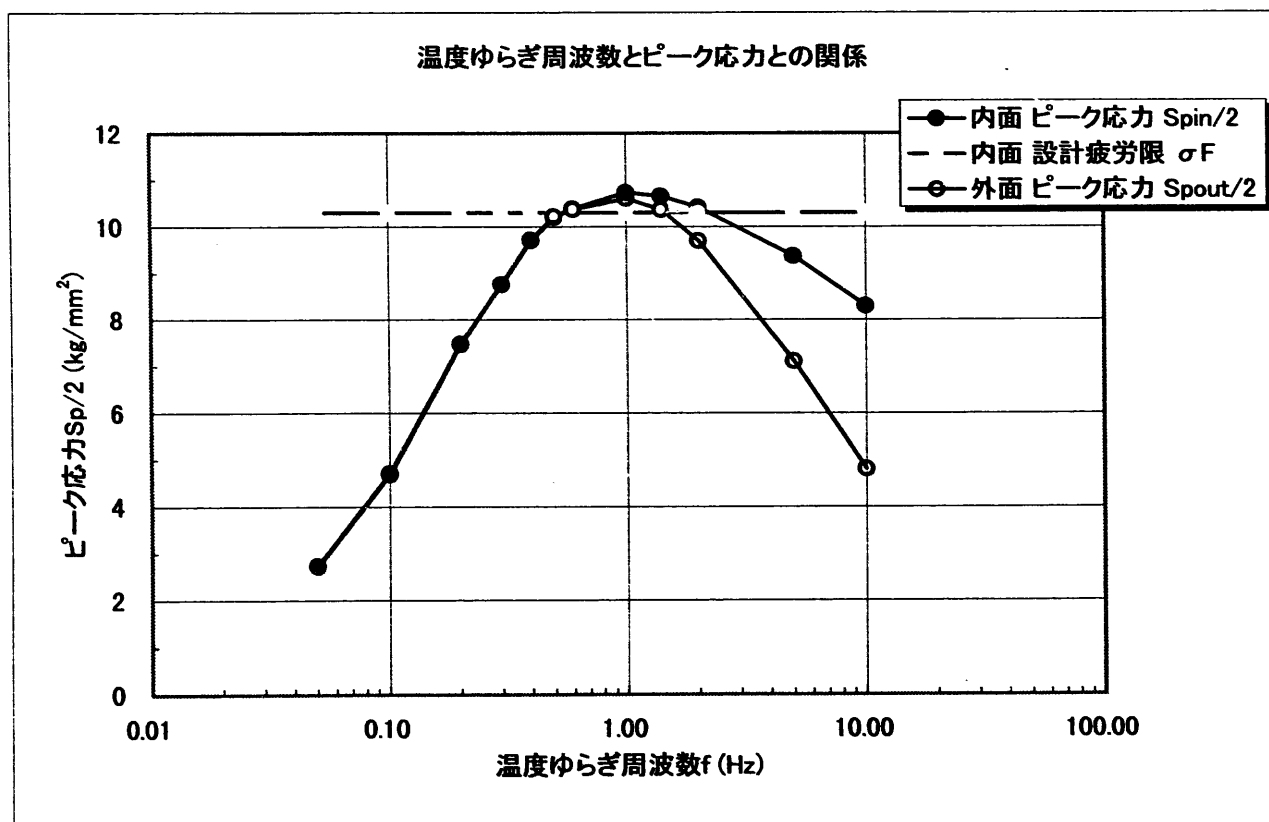
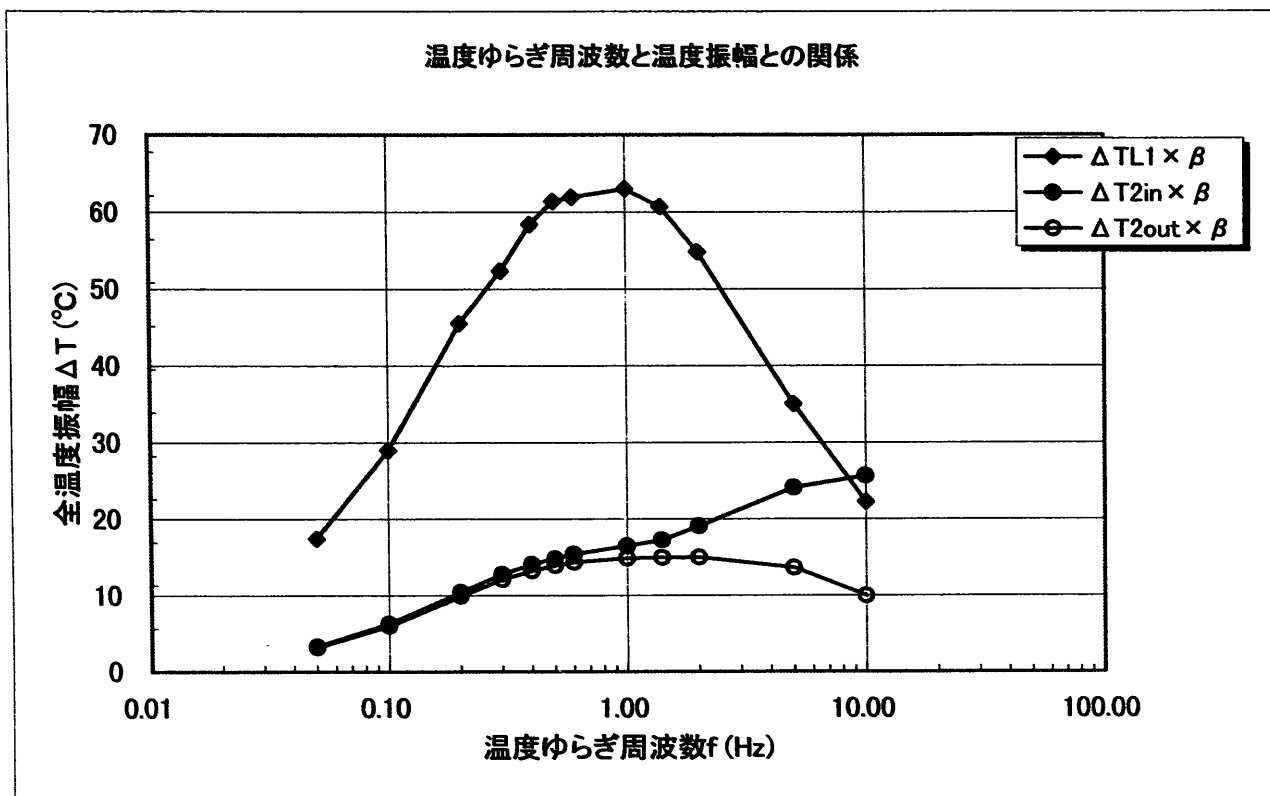


図4-2 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の簡易構造健全性評価結果
(温度ゆらぎ周波数と温度振幅(合流低減係数考慮)、ピーク応力との関係)

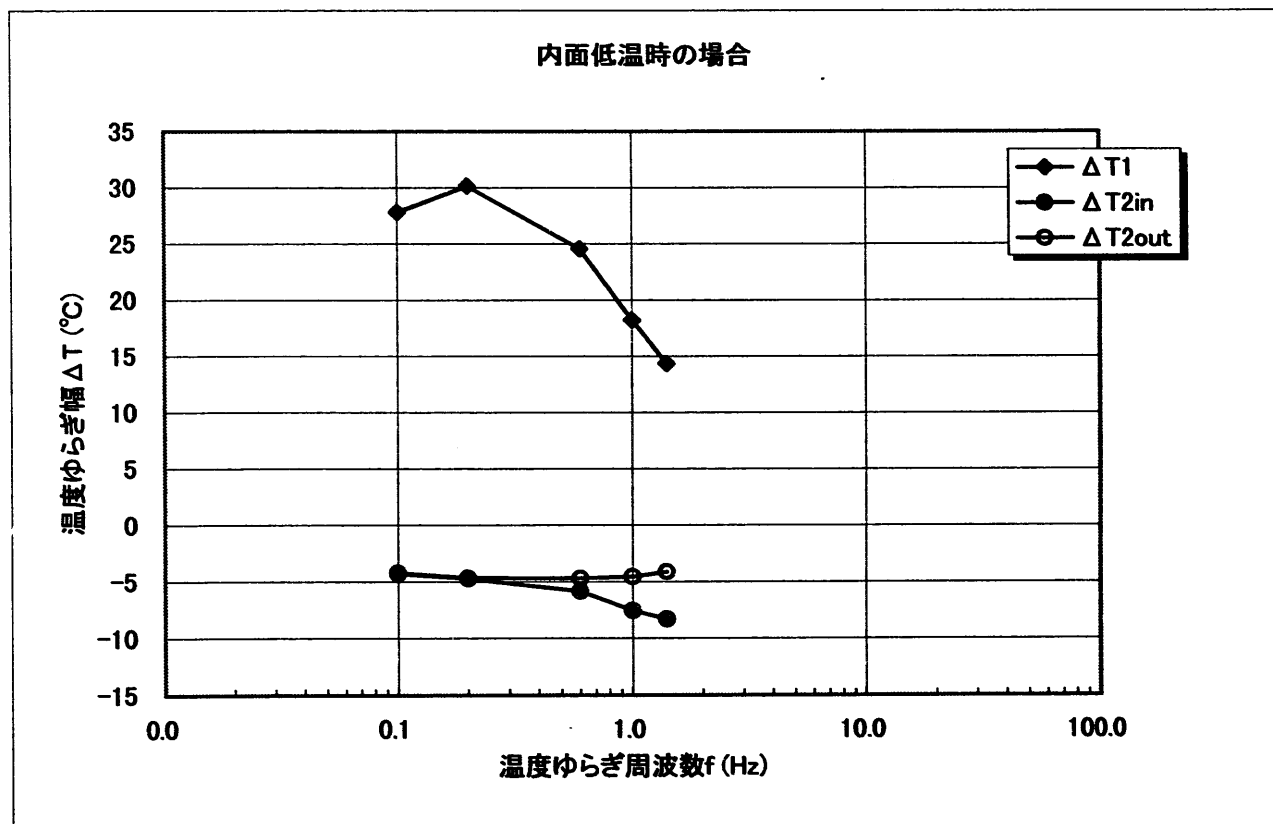
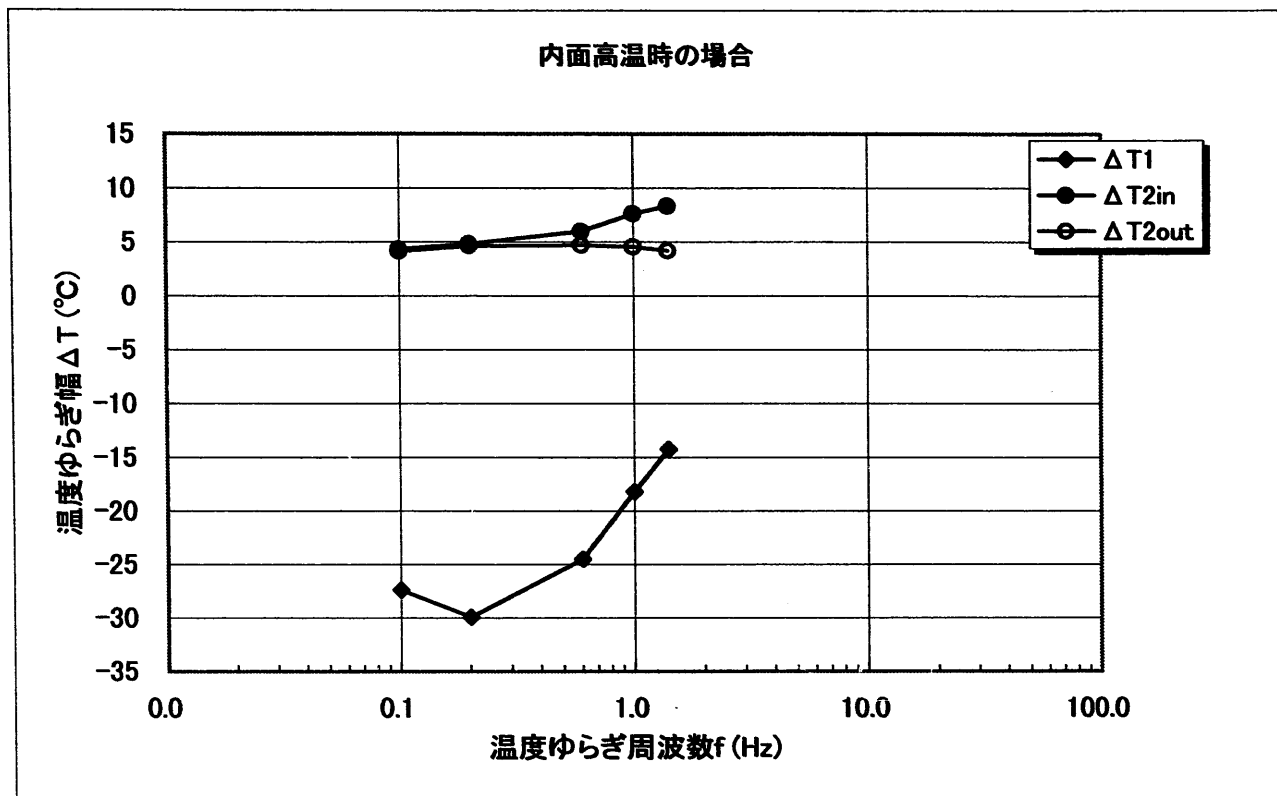


図4-3 2次補助冷却系プラグング計補助冷却系ライン合流部の配管板厚方向温度分布評価結果
(温度ゆらぎ周波数と温度振幅との関係)

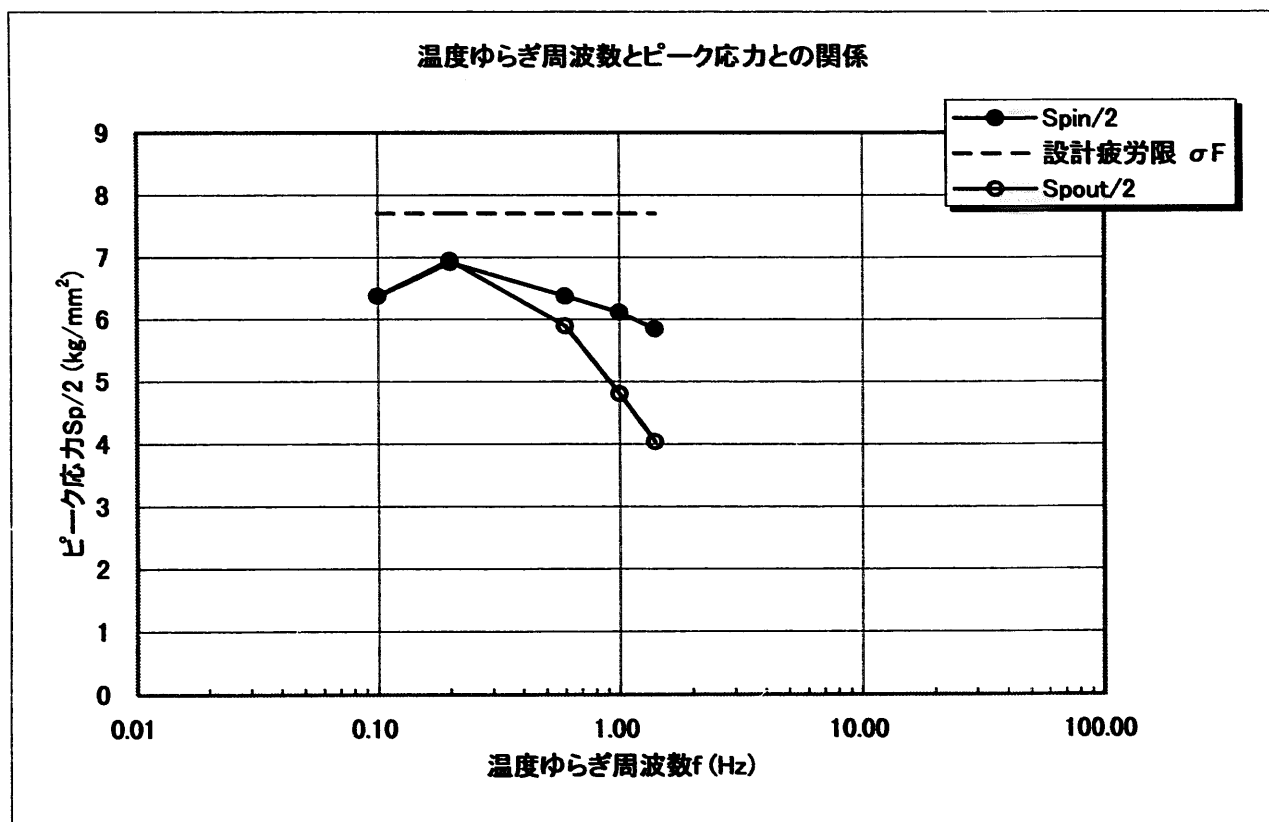
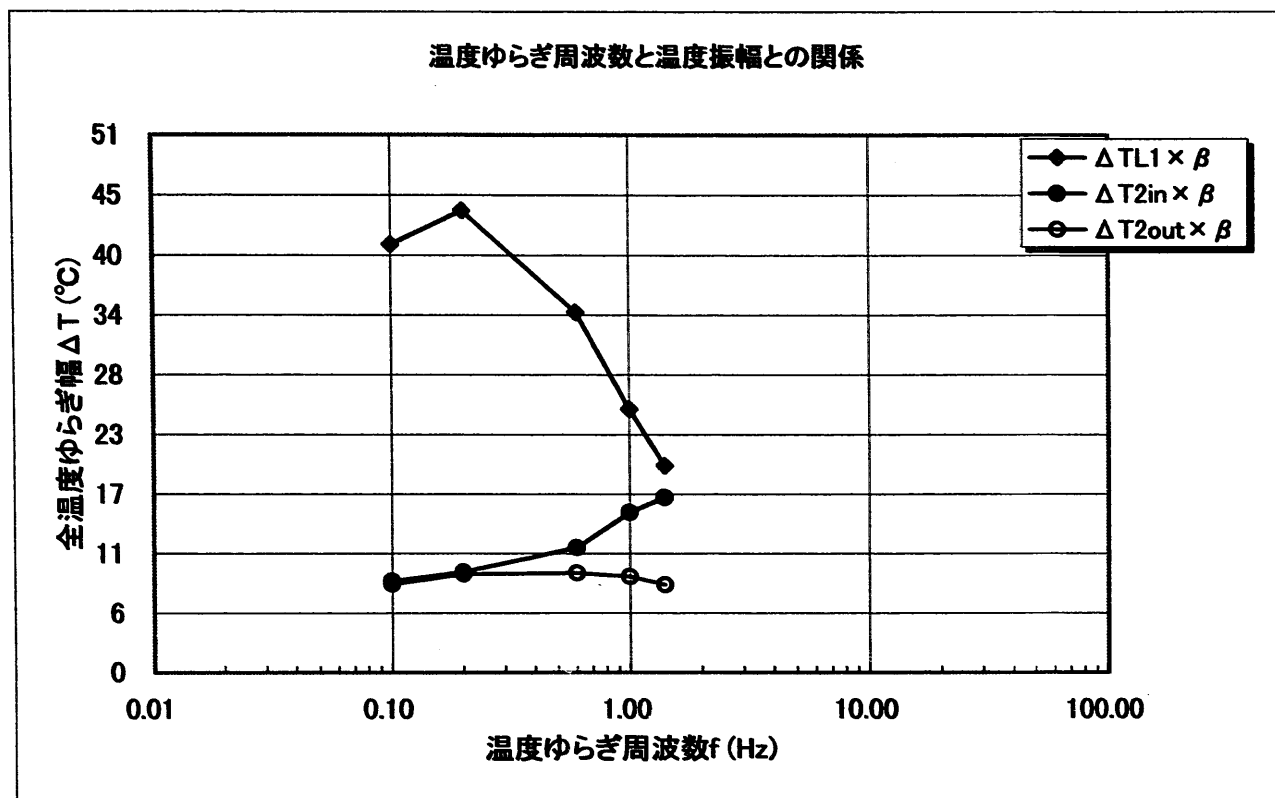


図4-4 2次補助冷却系プラグging計補助冷却系ライン合流部の簡易構造健全性評価結果
(温度ゆらぎ周波数と温度振幅(合流低減係数考慮なし)、ピーク応力との関係)

5. 2次主冷却系及び2次補助冷却系プラグング計の非破壊検査

4.章「サーマルストライピングに対する簡易構造健全性評価」の結果、サーマルストライピングが問題となる部位は、2次主冷却系プラグング計内部合流部及び2次補助冷却系プラグング計内部合流部の2箇所であることが明確となった。これらサーマルストライピングに大きく影響する要因は、温度ゆらぎ幅と温度ゆらぎの支配的周波数であり、その一つの要因である温度ゆらぎの支配的周波数は、3.章「FINASによる熱伝導解析（配管温度応答特性）」において、単純な ΔT_{in} を用いた温度ゆらぎの周波数と温度ゆらぎ幅との関係から明確になった。

本章では、サーマルストライピングに大きく影響するもう一つの要因である温度ゆらぎ幅を明確にするため、内部合流部付近に仮設の熱電対を取り付け温度ゆらぎの実測を行う前に実施した非破壊検査結果をまとめたものである。なお、温度ゆらぎ測定結果は、7.章「2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定」にまとめている。

非破壊検査は、配管外面の欠陥を対象とした外観目視検査、液体浸透探傷試験（PT）、配管内部の欠陥を対象とした放射線透過試験（RT）を実施した。

5.1 外観目視検査

外観目視検査は、プラグング計内部合流部付近の配管外面を対象として、その欠陥の有無を確認するため実施した。

この結果、配管外表面の溶接部及び母材部に欠陥指示は認められなかった。

5.2 浸透探傷試験（PT）

浸透探傷試験は、プラグング計内部合流部付近の配管外面を対象として、その欠陥の有無を確認するため実施した。

試験方法は、試験研究の用に供する原子炉等の溶接の技術基準に関する総理府令第74号（以下府令第74号という）の第15条第1項第4号の浸透探傷試験に基づき実施した。

この結果、配管外表面の溶接部及び母材部に欠陥指示は認められなかった。

5.3 放射線透過試験（RT）

放射線透過試験（RT）は、プラグング計内部合流部付近の配管内部を対象として、その欠陥の有無を確認するため実施した。

試験方法は、府令第 7 4 号の第 15 条第 1 項第 1 号の放射線透過試験に基づき実施した。

この結果、配管の溶接部及び母材部に欠陥指示は認められなかった。

6. 2次補助冷却系プラギング計内部合流部への仮設温度計取付

5.章「2次主冷却系及び2次補助冷却系プラギング計の非破壊検査」で記述した検査が終了後、2次補助冷却系プラギング計を対象として、内部合流部配管の外面上における温度ゆらぎ測定を行うため、仮設温度計を取り付けた。

本章は、仮設温度計の取り付け位置、取り付け構造、その応答特性についてまとめたものである。

6.1 仮設温度計取り付け位置の決定

2次補助冷却系プラギング計内部合流部への仮設温度計取り付け位置は、事前に合流部付近の熱流動解析を行い、その結果を参考に最大温度ゆらぎが生じる部位を推定して取り付けした。

6.2 仮設温度計取り付け位置

仮設温度計は、合流部付近に合計 15 点の温度計を取り付けた。図 6-1 に仮設温度計の取り付け位置を示す。また、図 6-2 に仮設温度計の概略取り付け構造を示す。図 6-3 に仮設温度計の取り付け位置及びタグ No を示す。

仮設温度計のタグ No と名称は、以下のとおりとした。なお、このタグ No 及び名称は、7.章「2次補助冷却系プラギング計のサーマルストライピング測定」において統一して使用している。

TE-M01	： 主管ティー中心から 25mm 上流側（合流前）温度（オリフィス側温度）
TE-M02	： ティー角部上流側温度
TE-M03	： 枝管ティー入口から 2d 上流側（合流前）温度（バイパス側温度）
TE-M04	： ティー中心上部温度
TE-M05	： ティー中心から 10mm 下流側上部温度
TE-M06	： ティー中心から 10mm 下流側上部から 90° 横手前温度
TE-M07	： ティー中心から 20mm 下流側上部温度
TE-M08	： ティー中心から 20mm 下流側上部から 90° 横手前温度
TE-M09	： ティー中心から 20mm 下流側下部温度
TE-M10	： ティー中心から 20mm 下流側上部から 90° 横裏側温度
TE-M11	： ティー中心から 30mm 下流側上部温度
TE-M12	： ティー中心から 30mm 下流側上部から 90° 横手前温度
TE-M13	： ティー中心から 30mm 下流側下部温度

TE-M14 : ティー中心から 30mm 下流側上部から 90° 横裏側温度

TE-M15 : ティー中心から 86.5mm 下流側上部温度

6.3 仮設温度計の仕様

仮設温度計の仕様は、以下のとおりである。

種 類 : K (NiCr-NiAl)

シース外径 : 0.5mm ϕ

シース材質 : NCF600

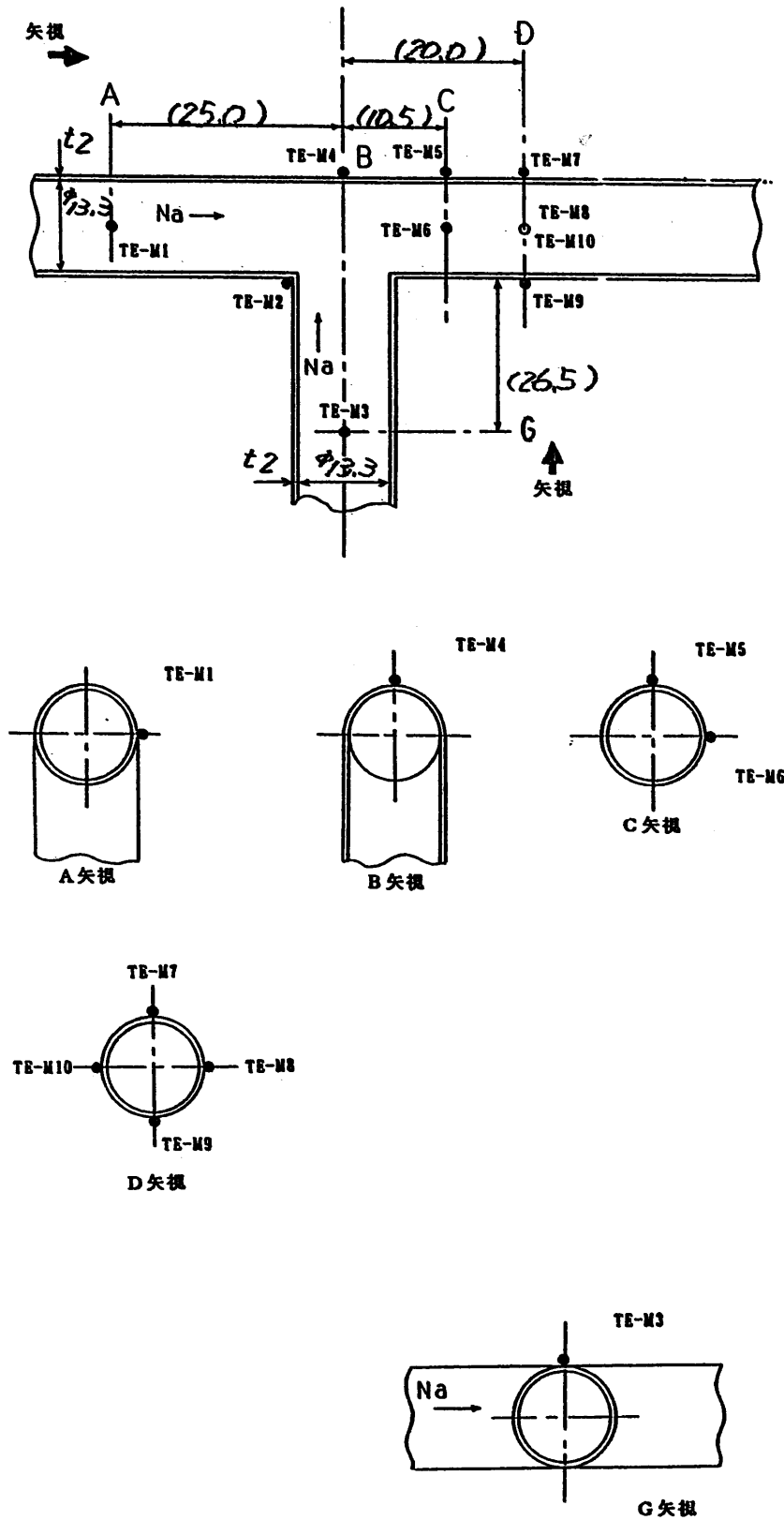
测温接点形状 : 非接地型

規 格 : JIS C1602-1981

精 度 : 0.4 級

長 さ : 1,000mm

温度応答特性 : 約 90msec (100%)



() 内は、実測値を示す。

図 6 - 1 仮設温度計の取り付け位置

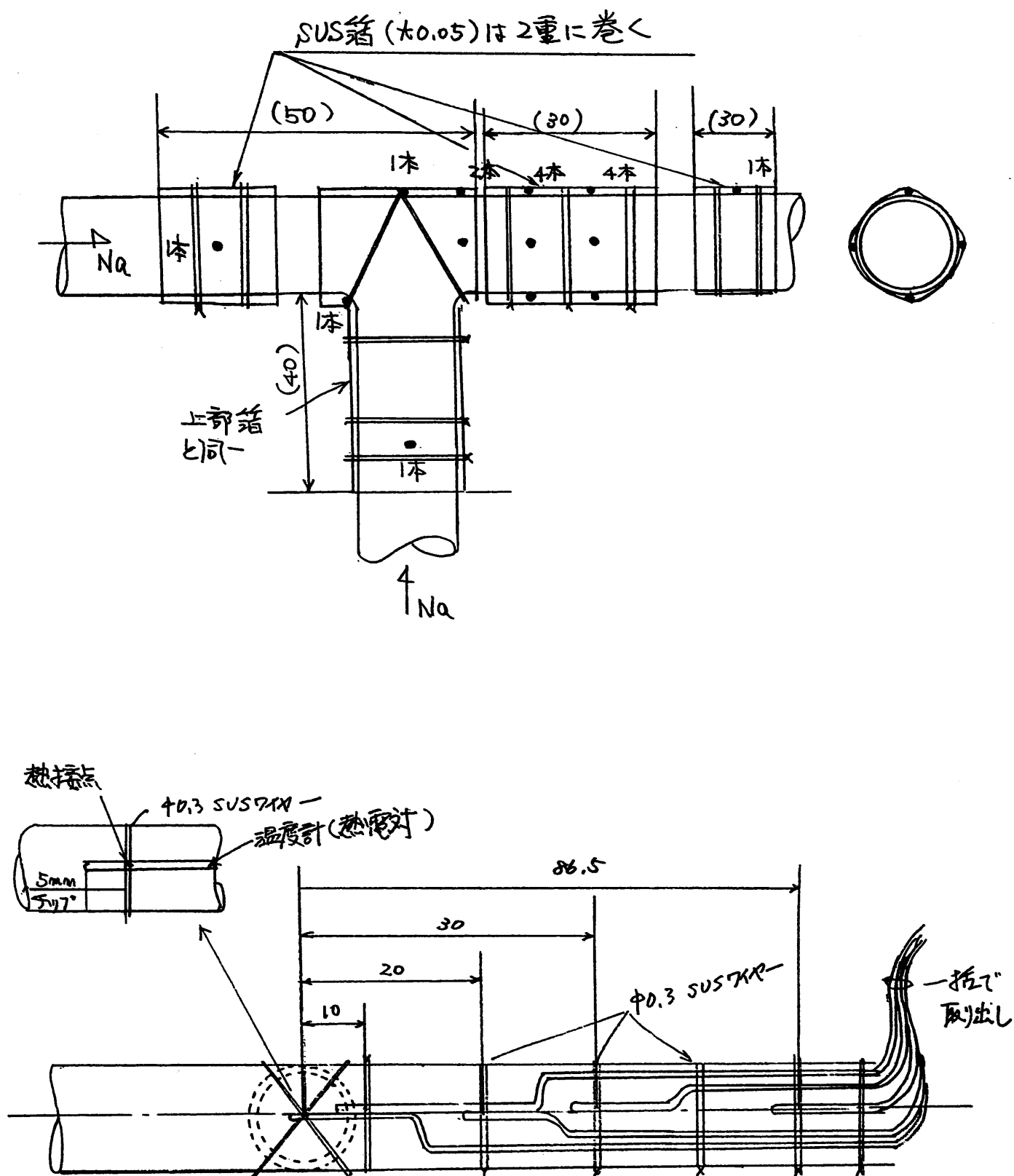


図6-2 仮設温度計の概略取り付け構造

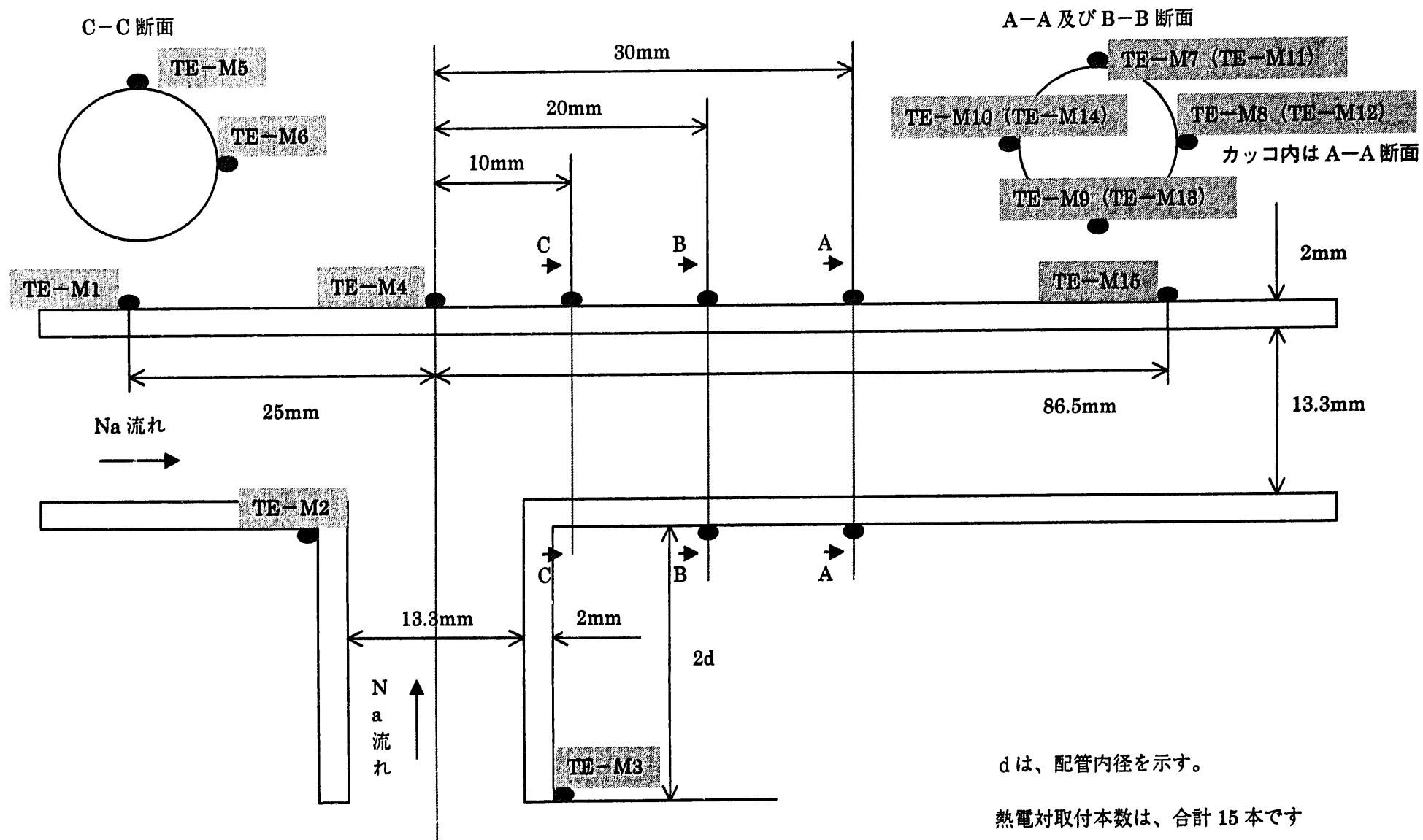


図 6-3 2 次補助冷却系プラグング計仮設温度計取付位置及びタグ No

7. 2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定

6.章で記述したように、内部合流部に取り付けた仮設温度計を用いて、合流部配管外面の温度ゆらぎ測定を実施した。なお、サーマルストライピングの評価は、本測定データと 3.章で示した FINAS による配管板厚方向の熱伝導解析結果を用いて、8.章「2次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価」で詳細な構造健全性評価を行っている。

7.1 温度ゆらぎの経時的変化

図 7-1 (1/5)～図 7-1 (5/5) に 2次補助冷却系プラグング計の原子炉定格出力運転中における系統ナトリウム温度約 393℃で測定された温度ゆらぎの経時的変化を示す。

測定条件は、以下のとおりである。

サンプリング周期	: 0.039sec
サンプリング個数	: 8,192 (1 サンプリングデータの個数)
測定対象周波数	: ~10Hz
測定方法	: 温度 15 点、流量 2 点の同時連続測定
アンプ倍率	: 500 (TE-M01)、200 (TE-M02～M15)、1,000 (流量 2 点)

図 7-1 (1/5) より、合流する前の TE-M01 (オリフィス側温度) 及び TE-M03 (バイパス側温度) は、ほとんどゆらぎがないことが判る。また、図 7-1 (5/5) に示したメイン流量及びオリフィス流量のゆらぎとの相関性もないようである。

図 7-1 (1/5) 及び図 7-1 (2/5) は、主管ティー中心 (TE-M04) ～ティー中心から 10mm 下流側 (TE-M05) ～ティー中心から 20mm 下流側 (TE-M07) ～ティー中心から 30mm 下流側 (TE-M11) ～ティー中心から 86.5mm 下流側 (TE-M15) までの配管上部外面の温度ゆらぎを示したものである。これらのデータから、ティー中心～ティー中心から 10mm 下流側においては、ほぼ温度ゆらぎが同一であり、それ以降は、ティー中心から下流側に離れるにしたがって温度ゆらぎが減衰し、ティー中心から 86.5mm 下流側の位置においては、ほとんど温度ゆらぎがない状態まで減衰していることが判る。

図 7-1 (1/5)～図 7-1 (4/5) の原子炉定格出力運転中における系統温度約 393℃で測定した TE-M01～TE-M15 までの温度データのうち、最も温度ゆらぎが大きかった配管位置は、ティー中心から 10mm 下流側上部から 90° 横手前側の TE-M06 であることが判る。これは、原子炉停止中における系統ナトリウム温度約 240℃で測定したデータでも同一の傾向を示していた。なお、原子炉定格出力運転中において多数採取したサンプリングデータの中には、一部最も温

度ゆらぎが大きかった配管位置が、TE-M06 からティー中心上部の TE-M04 に変化している傾向が見られた。

7.2 パワースペクトル密度

図 7-2 (1/5) ~ 図 7-2 (5/5) に 2 次補助冷却系プラグング計の原子炉定格出力運転中における系統ナトリウム温度約 393℃ で測定された温度ゆらぎのパワースペクトル密度を示す。また、図 7-3 (1/5) ~ 図 7-3 (5/5) に 2 次補助冷却系プラグング計の原子炉停止中における系統ナトリウム温度約 240℃ で測定された温度ゆらぎのパワースペクトル密度を示す。

図 7-1 に示した各温度ゆらぎの経時的変化と図 7-2 に示した各温度ゆらぎのパワースペクトル密度より、大きな温度ゆらぎの支配的周波数は、かなり低いことが判る。また、1Hz 以上の高周波数の温度ゆらぎは、低周波数の大きな温度ゆらぎの中に、僅かな温度ゆらぎとして重畳してゆらいでいることが判る。

表 7-1 に各温度ゆらぎのパワースペクトルに見られる顕著な周波数を示す。

7.3 考 察

2 次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎの経時的変化とパワースペクトルより考察すると、以下のとおりである。

- (1) 表 7-2 及び図 7-4 (1/4) ~ 図 7-4 (4/4) に合流前の単純な温度差 (ΔT_{in}) と温度ゆらぎ幅との関係を示す。この結果より、最大温度ゆらぎ幅は、ティー中心から 10mm 下流側上部から 90° 横手前側の TE-M06 又は主管ティー中心の TE-M04 であり、主管ティー中心から下流側 10mm の間に集中している。
- (2) TE-M01~TE-M15 のすべてに含まれている約 1.25Hz のピークは、メイン及びオリフィス流量のパワースペクトルに現れている顕著なピークと周波数が一致したもので、すべての測定データに含まれている周波数であり、測定系のノイズであると思われる。仮に、1.25Hz のピークがノイズでないとしても、温度ゆらぎの時系列データを見ても明らかなように低周波数の大きなゆらぎに重畳した小さなゆらぎであり、問題とならない。

約 1.25Hz の周波数が測定系のノイズであることを確認するため、温度変動のない状態である TE-M01、TE-M03 の温度データ及び流量データを確認した結果、図 7-5 のとおりであった。図 7-5 は、温度レンジを大幅に拡大したものであるが、デジタル信号データで見られる誤差幅におけるゆらぎ現象が見られる。

ゆらぎ測定に用いた A/D 変換器は、測定レンジが 12 ビットストレートバイナリ出力の 0~

4,095mV であり、精度がフルスケールの $\pm 0.2\%$ ($\pm 8.19\text{mV}$) であり、今回の測定では、このデジタル誤差のゆらぎが周波数 1.25Hz に現れたものである。図 7-5 に示した TE-M01 及び TE-M03 の温度データのアンプ倍率、A/D 変換器入力信号値は、以下のとおりである。

TE-M01 倍率 500 倍 入力電圧約 2,400mV

温度換算誤差 ($\pm 8.19\text{mV}/500$) $\times 24.387^\circ\text{C}/\text{mV} = \pm 0.4^\circ\text{C}$

TE-M03 倍率 200 倍 入力電圧約 2,000mV

温度換算誤差 ($\pm 8.19\text{mV}/200$) $\times 24.393^\circ\text{C}/\text{mV} = \pm 1.0^\circ\text{C}$

上記で示した値と、図 7-5 で示したデジタルデータ誤差とを比較すると、TE-M01 及び TE-M03 とともに、ほぼ上記の温度換算誤差内でデータがゆらいでいることが判る。したがって、温度ゆらぎの周波数 1.25Hz は、A/D 変換器のノイズであることが明確となった。

- (3) パワースペクトルの傾向は、配管上部、配管上部から 90° 横手前及び裏側、配管下部の 3 種類に分かれることが明確となった。

配管上部の温度ゆらぎは、ティー中心上部 (TE-M04) のパワースペクトル成分のうち、約 0.04Hz 成分のゆらぎが流れによって支配的に伝達されている。なお、配管上部でもティー中心から 86.5mm 下流側の TE-M15 が、他の配管上部と異なり、合流前温度のパワースペクトルの傾向と同一なのは、合流による流れの乱れが十分減衰し、合流前と同一の流れになっているものと判断することができる。

配管上部から 90° 横手前及び裏側の温度ゆらぎは、ティー中心上部 (TE-M04) のパワースペクトル成分のうち、約 0.09Hz 成分のゆらぎが流れによって支配的に伝達されている。なお、同一軸方向位置で、パワーレベルを比較すると、配管上部から 90° 横のパワーレベルが最も高くなっており、したがって、温度ゆらぎも最も大きな値となっている。

配管下部の温度ゆらぎは、合流前温度の傾向を示している。これは、ティー部の合流体系から考えて、配管上部や配管上部から 90° 横手前及び裏側に比べて、合流による流れの乱れを受けにくいからである。これは、温度ゆらぎ幅にも顕著に現れている。

- (4) 図 7-6 より、熱流動解析で最も温度ゆらぎが大きくなる位置は、配管上部であったが、実測では、配管上部から 90° 横手前の位置であった。一般的に、ティー部配管の配管構造は流れ方向から見て軸対称構造であるため、ティー部の流れの合流の仕方からすれば、配管上部に温度ゆらぎの最大が現れるはずである。しかし、配管上部から 90° 横手前の位置に温度ゆらぎの最大が現れているということは、ティー部の構造が僅かに左右非対称の構造となっており（製作上真に対称になることはあり得ない）、これが微妙に影響して流れの乱れ具合が異なっているものと考えられる。

- (5) パワースペクトル密度から、温度ゆらぎの支配的な周波数は、約 0.09Hz と約 0.04Hz であることが明確となった。この周波数では、3.章「FINAS による熱伝導解析（配管温度応答特性）」で示したように、配管外面と配管内面との間に温度ゆらぎ幅の大きな違いが現れず、ほぼ内外面とも同一温度ゆらぎを生じることがほぼ明確となった。

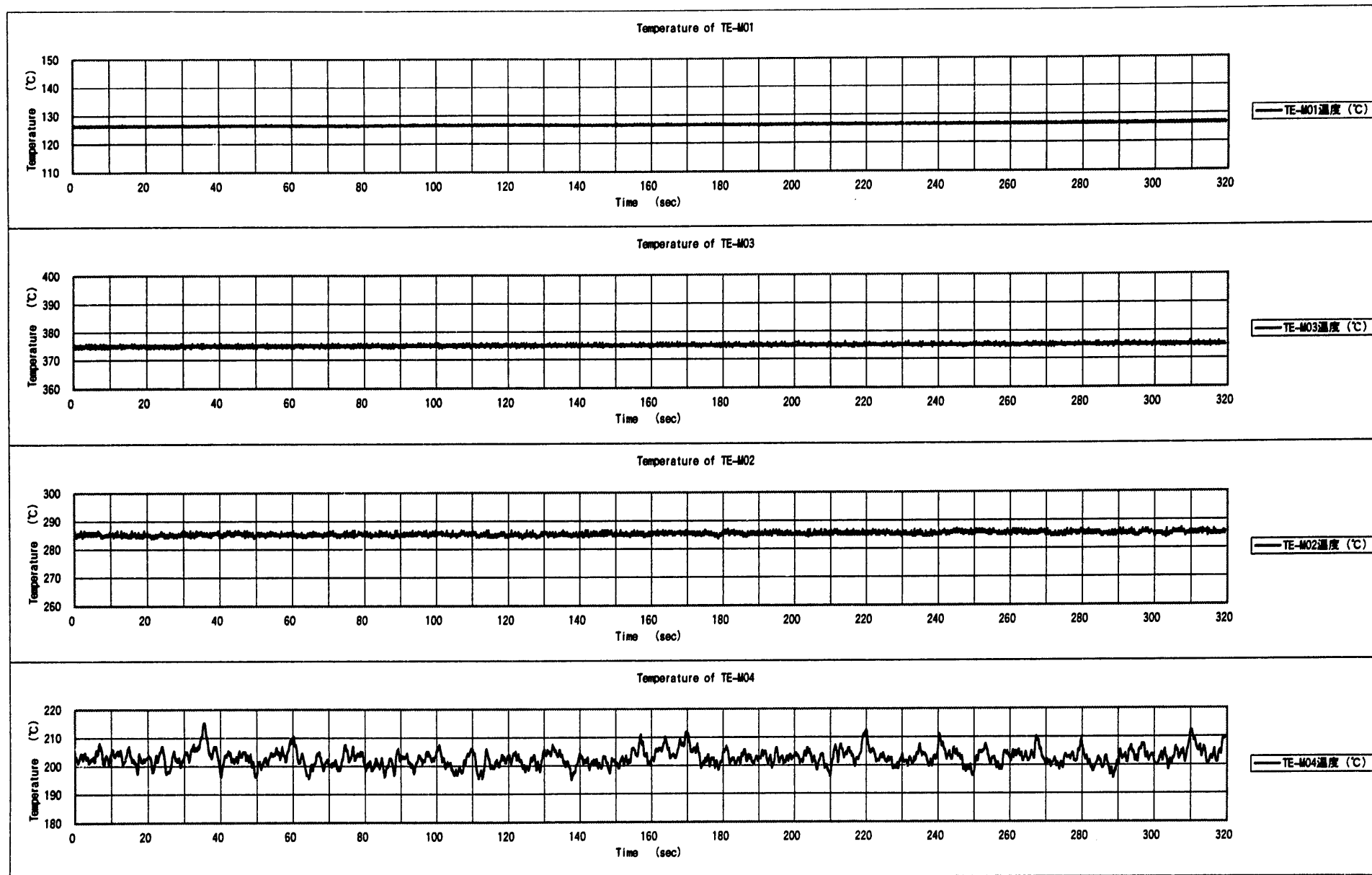


図 7-1 (1 / 5) 2 次補助冷却系プラグイン計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化

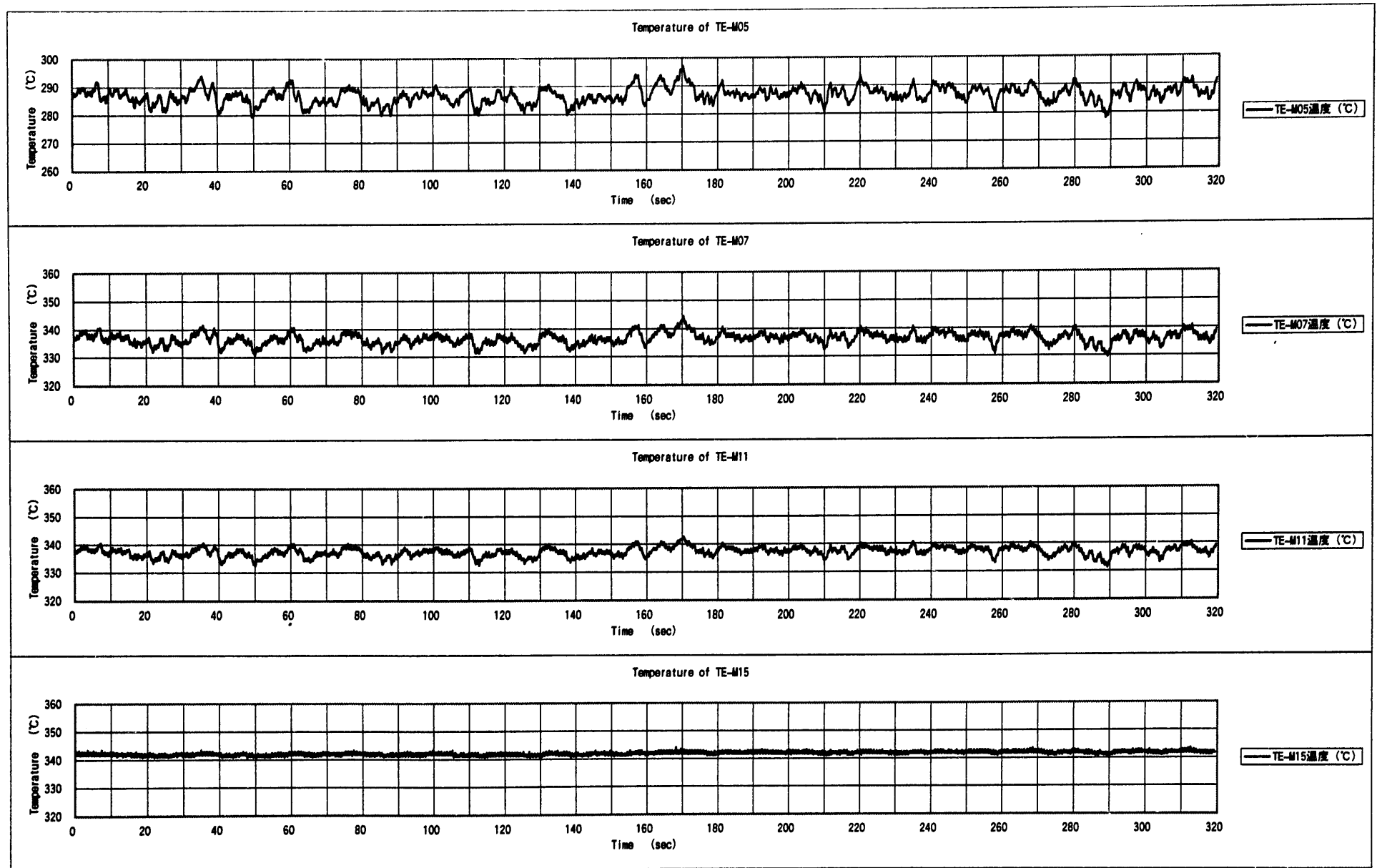


図7-1 (2/5) 2次補助冷却系プラグング計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化

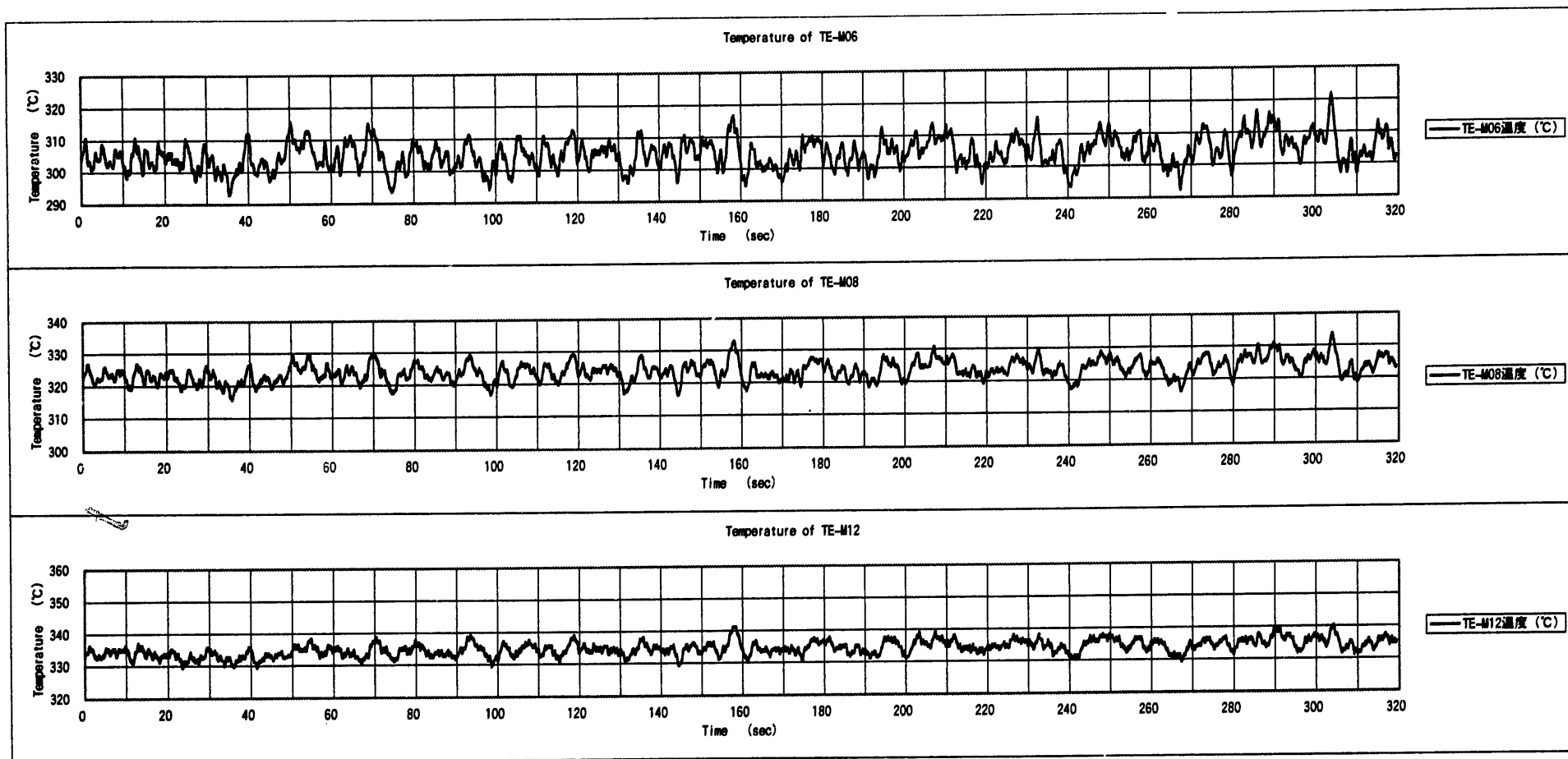


図 7-1 (3/5) 2次補助冷却系プラグイン計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化

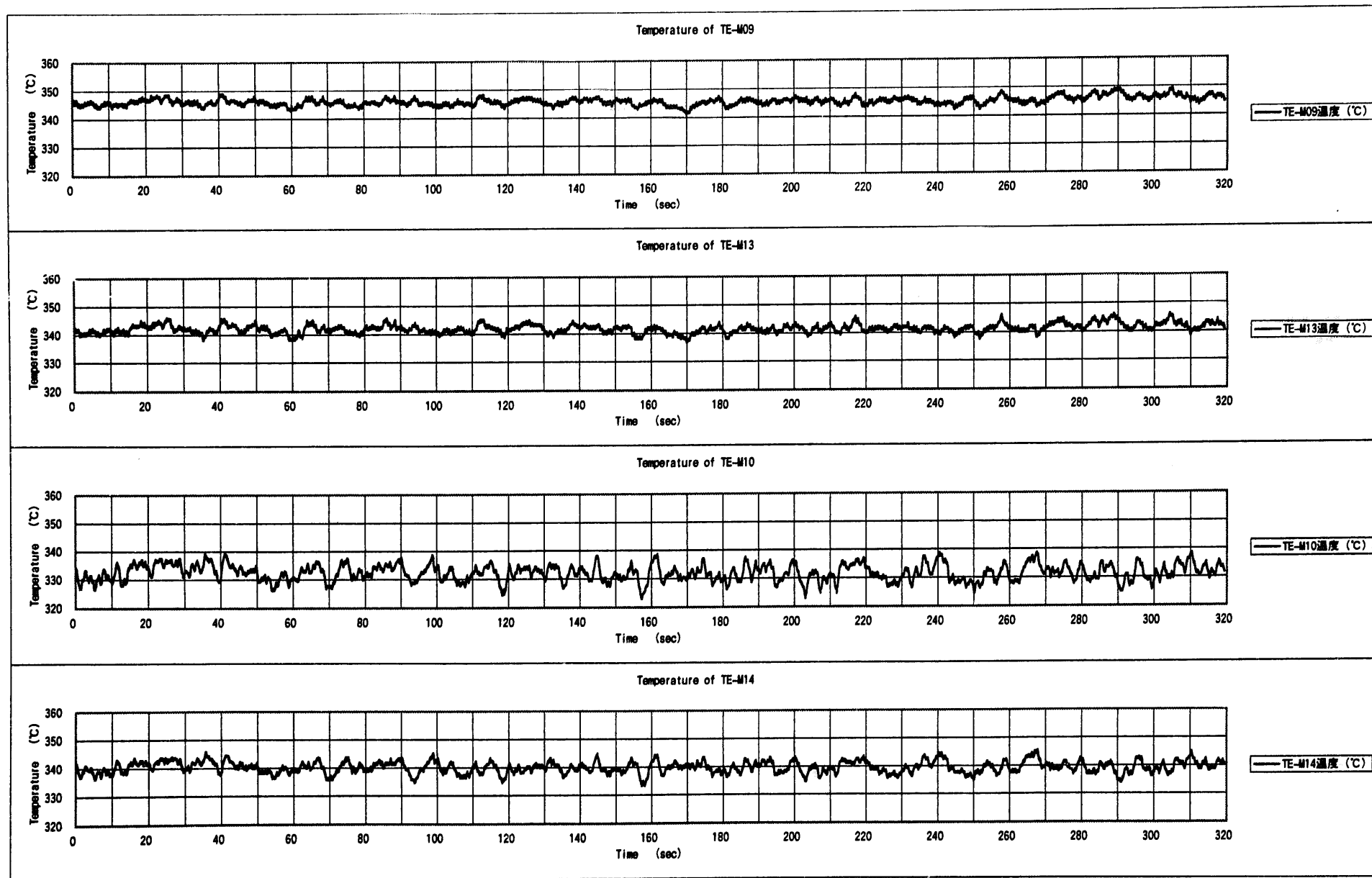


図 7-1 (4/5) 2次補助冷却系プラグイン計の原子炉定格出力運転中の温度ゆらぎの経時的変化

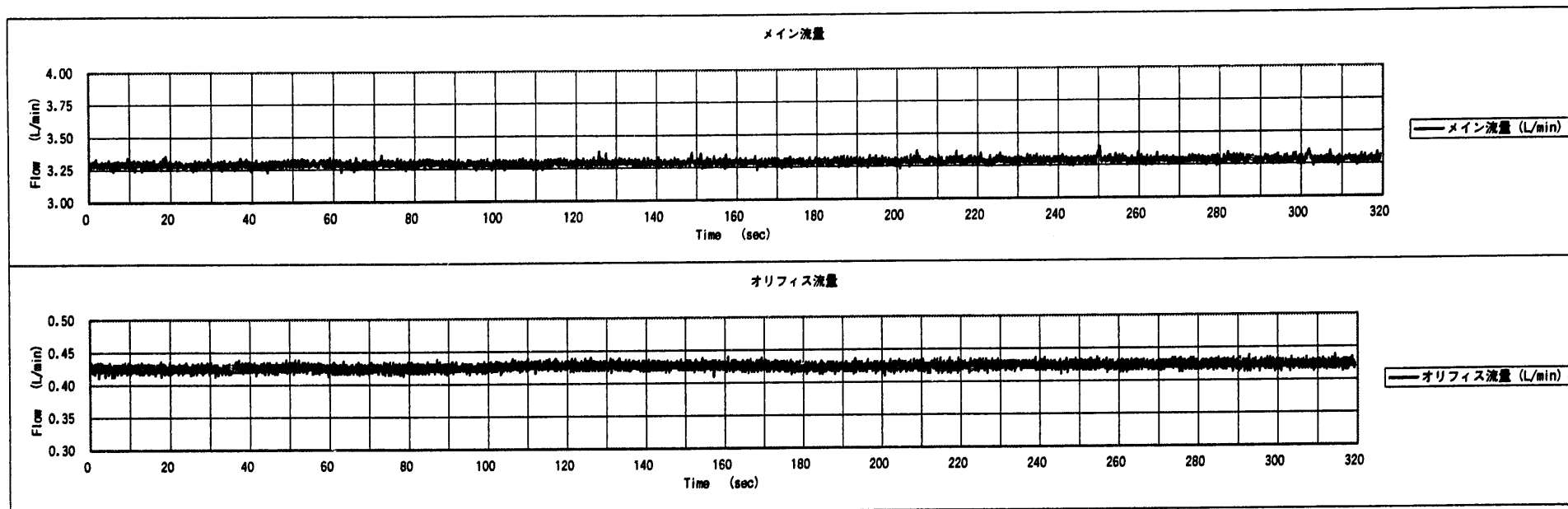


図 7-1 (5 / 5) 2次補助冷却系プラグング計の原子炉定格出力運転中の流量ゆらぎの経時的变化

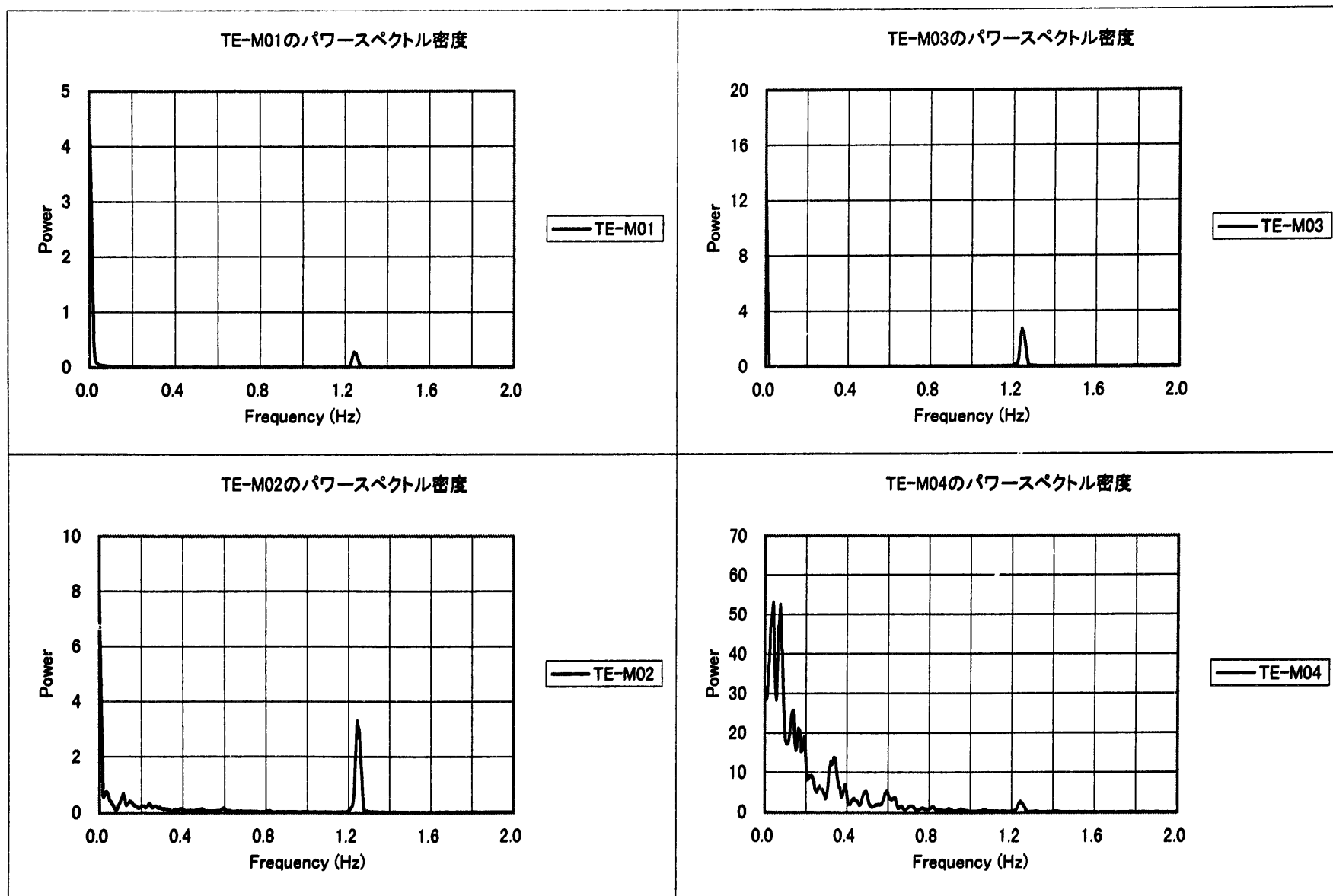


図 7-2 (1/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成9年12月26日 11:15 定格出力運転中 TE-M01, M03, M02, M04

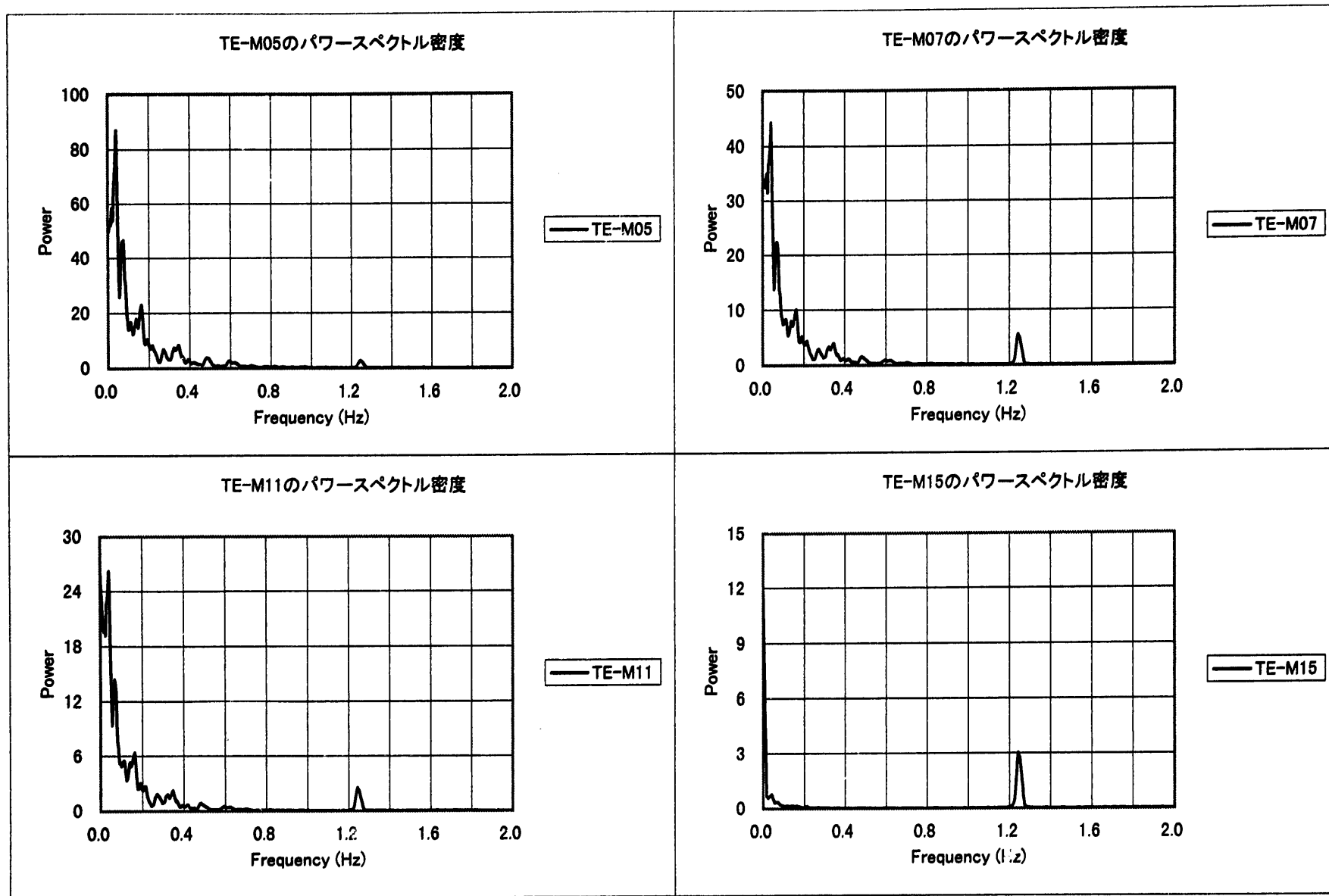


図 7-2 (2/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成 9 年 12 月 26 日 11:15 定格出力運転中 TE-M05, M07, M11, M15

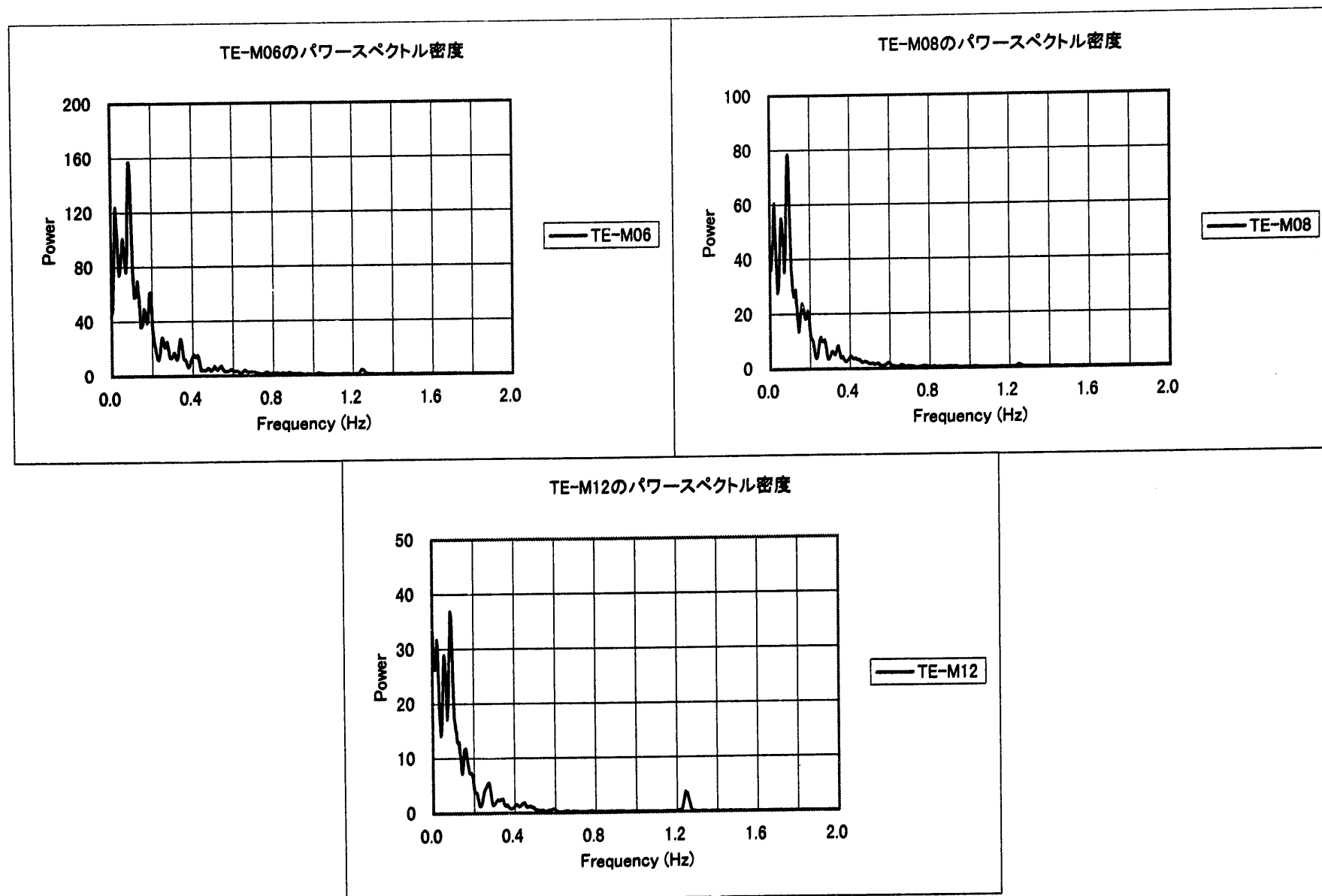


図 7-2 (3/5) 2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成9年12月26日 11:15 定格出力運転中 TE-M06, M08, M12

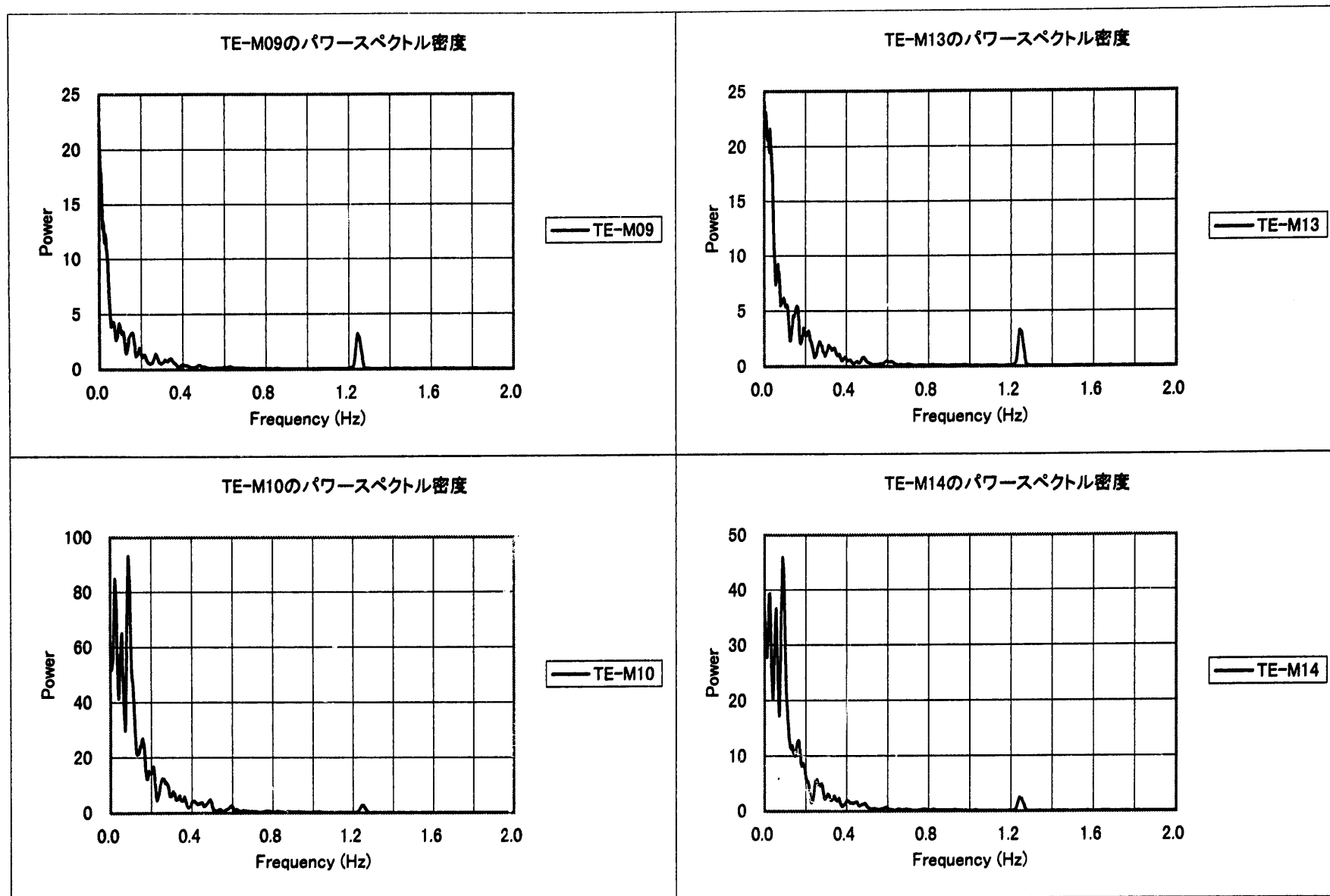


図7-2 (4/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成9年12月26日 11:15 定格出力運転中 TE-M09, M13, M10, M14

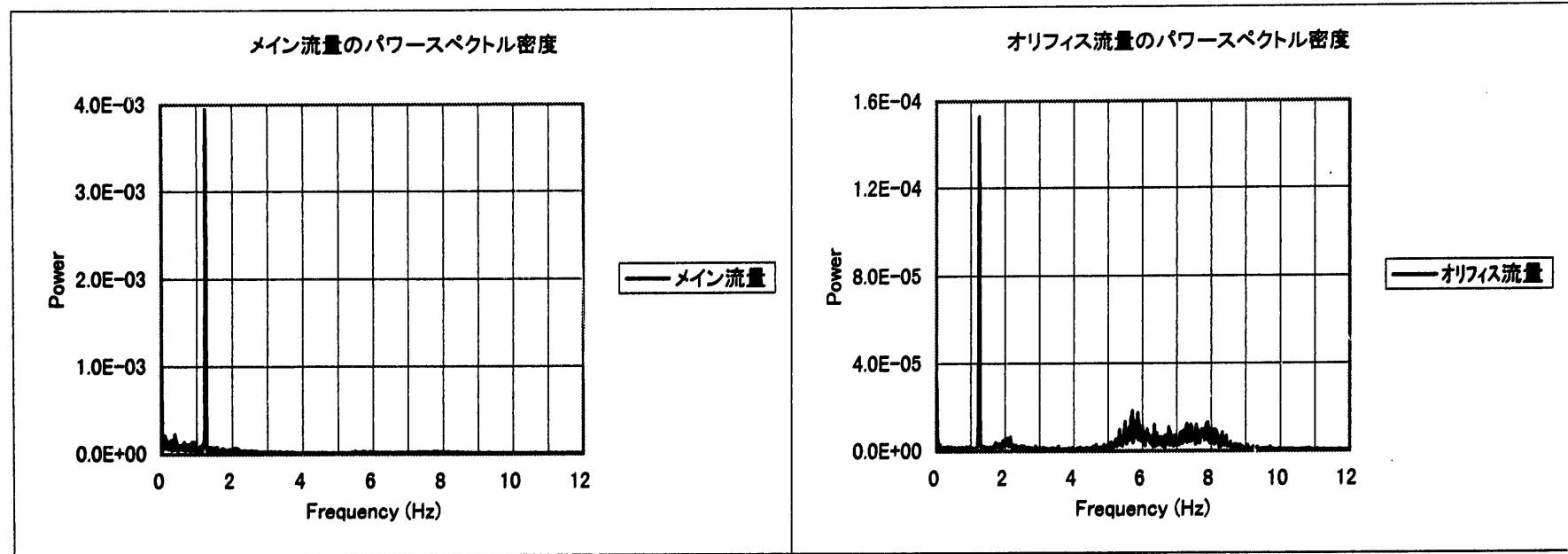


図 7-2 (5/5) 2次補助冷却系プラグング計のメイン及びオリフィス流量ゆらぎ測定結果
(パワースペクトル密度) 平成9年12月26日 11:15 定格出力運転中

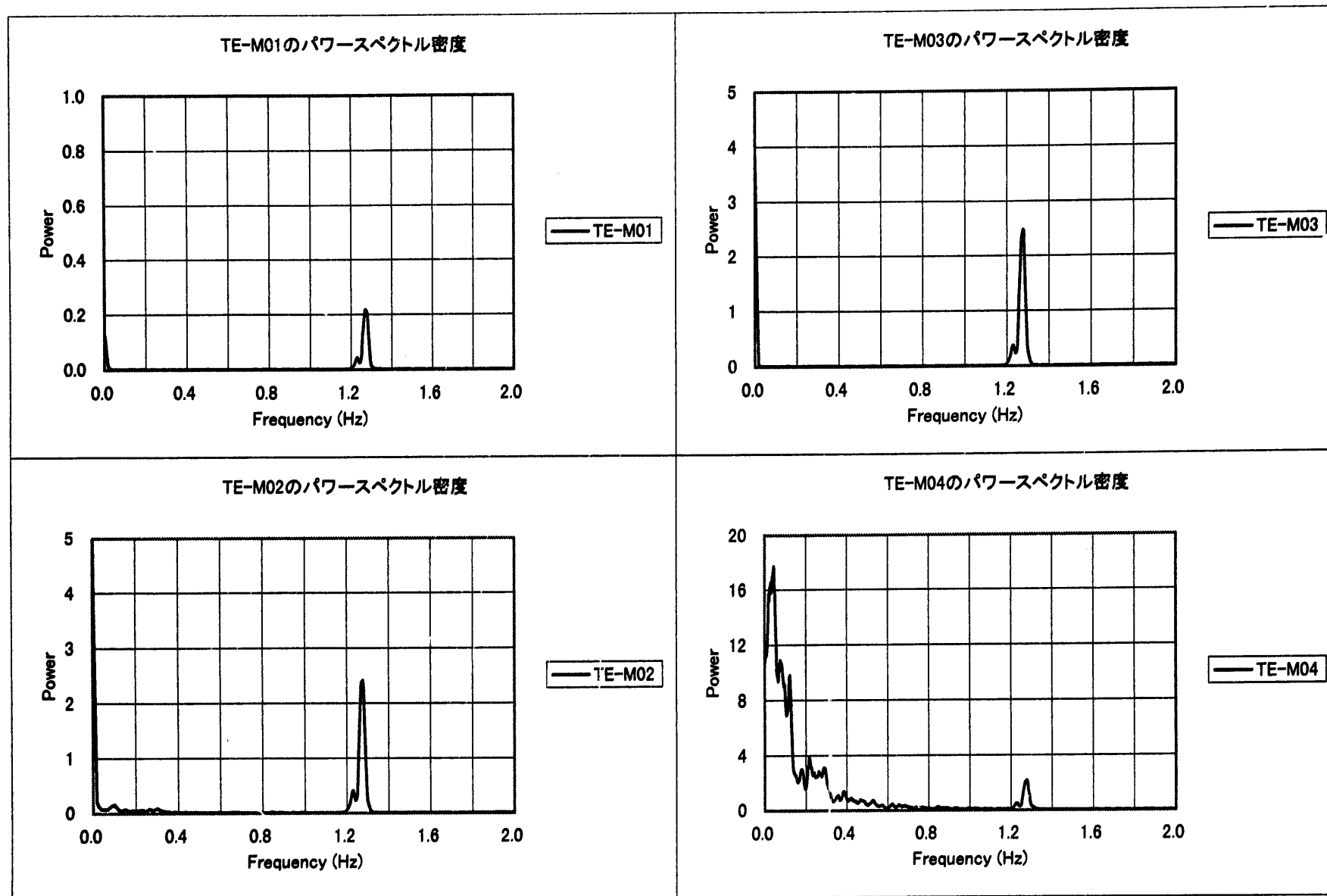


図 7-3 (1/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成9年12月12日 原子炉停止中 TE-M01, M03, M02, M04

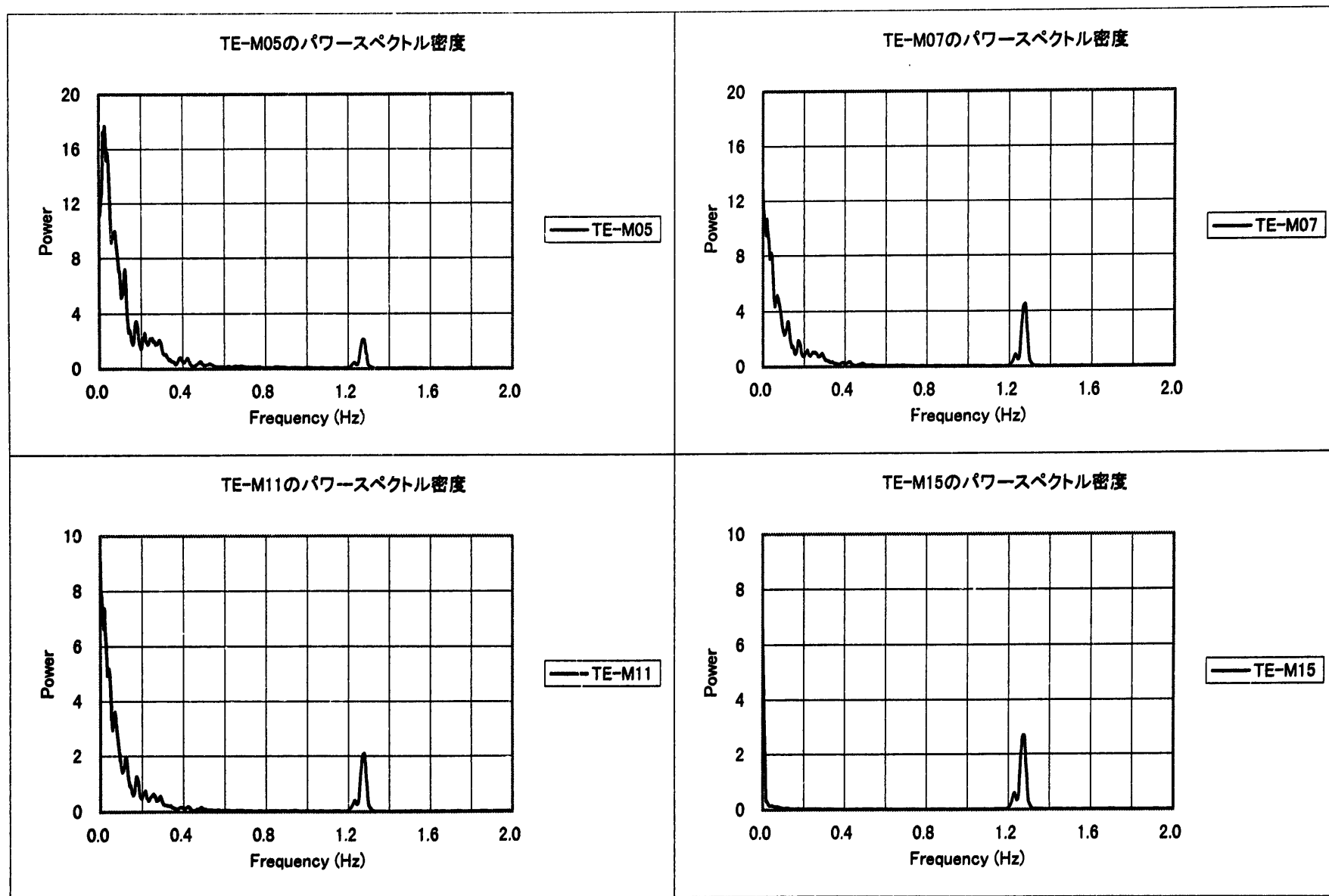


図 7-3 (2/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成 9 年 12 月 12 日 原子炉停止中 TE-M05, M07, M11, M15

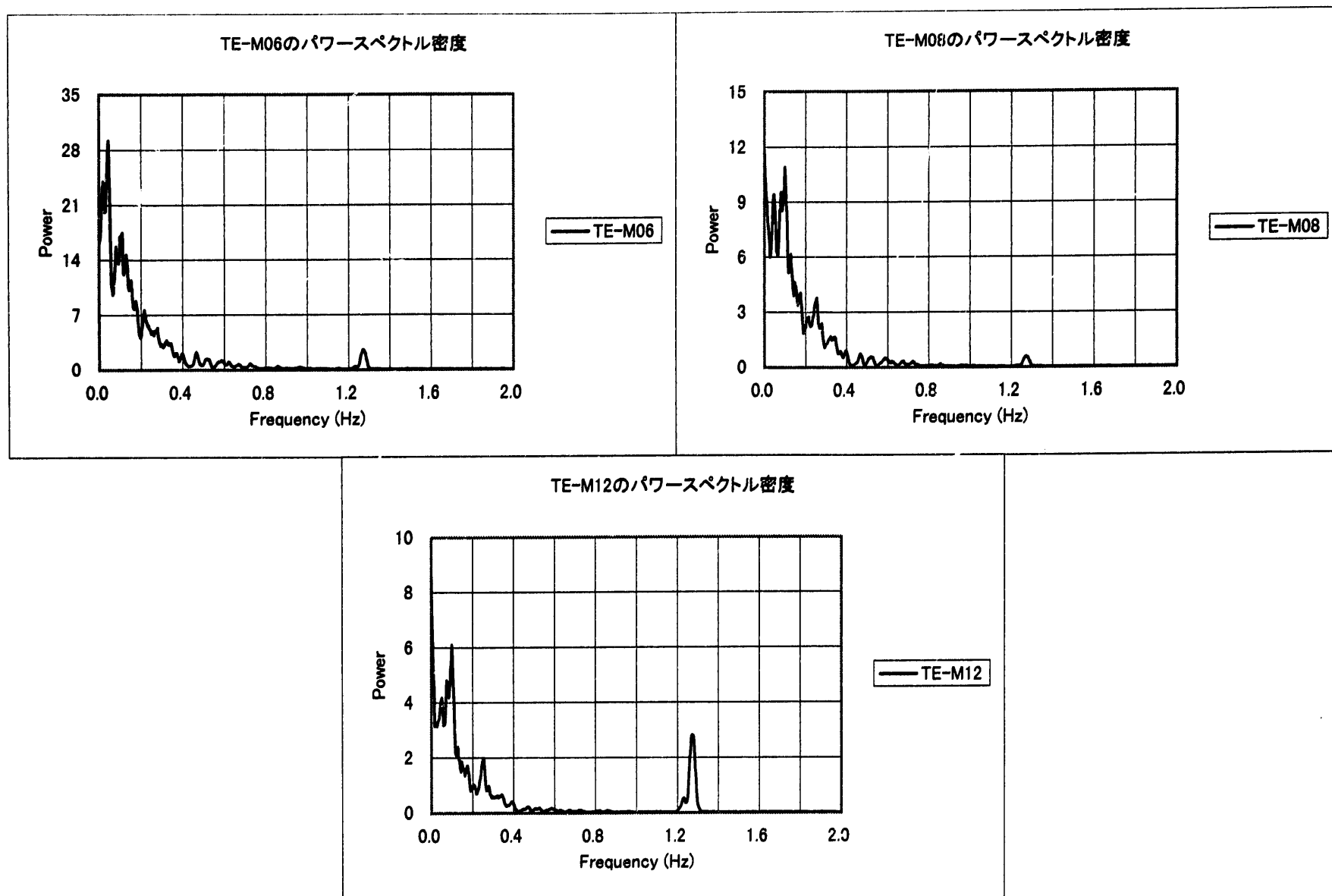


図 7-3 (3/5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成 9 年 12 月 12 日 原子炉停止中 TE-M06, M08, M12

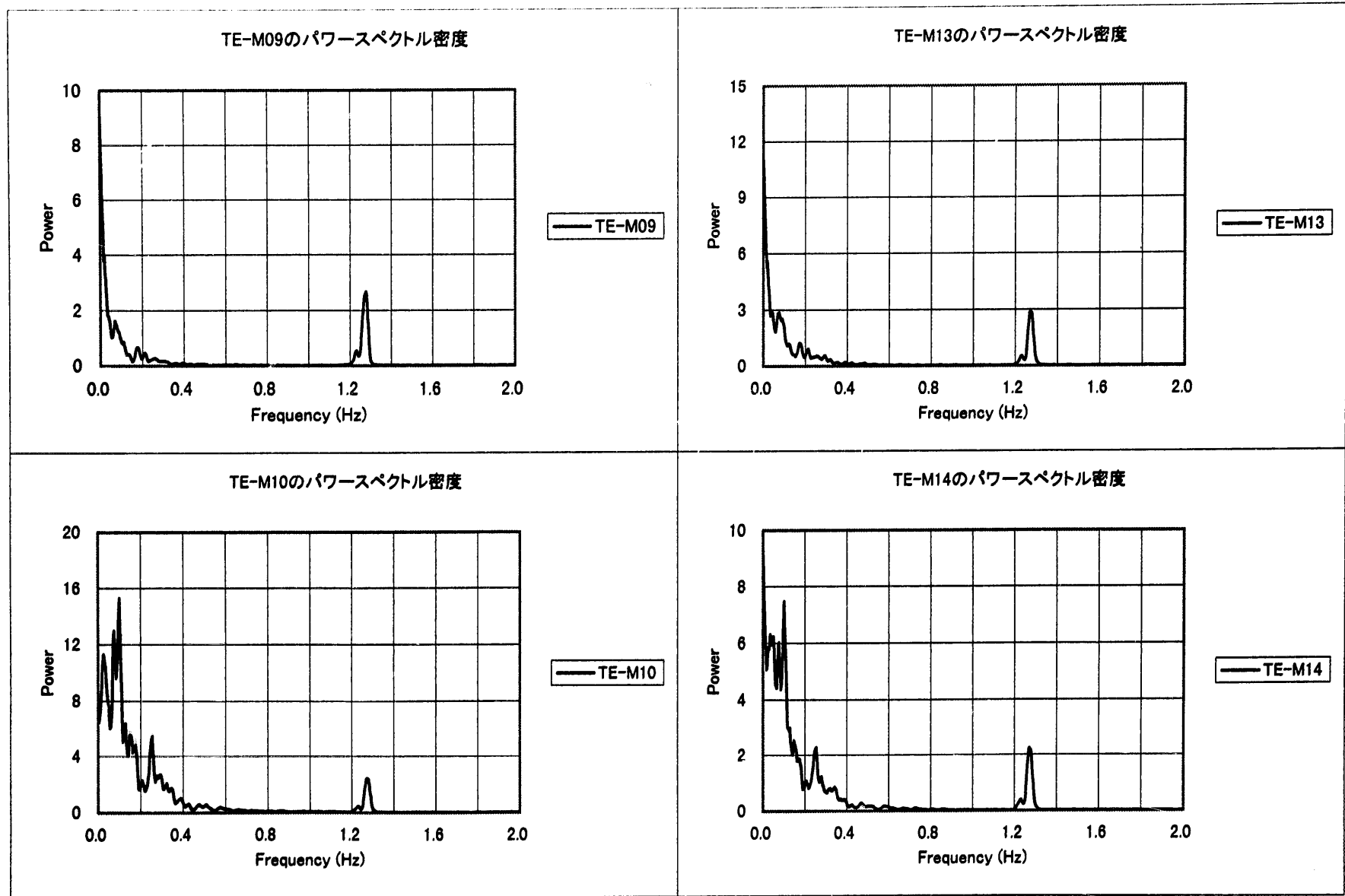


図 7-3 (4 / 5) 2次補助冷却系プラグイン計の温度ゆらぎ測定結果 (パワースペクトル密度)
平成 9 年 12 月 12 日 原子炉停止中 TE-M09, M13, M10, M14

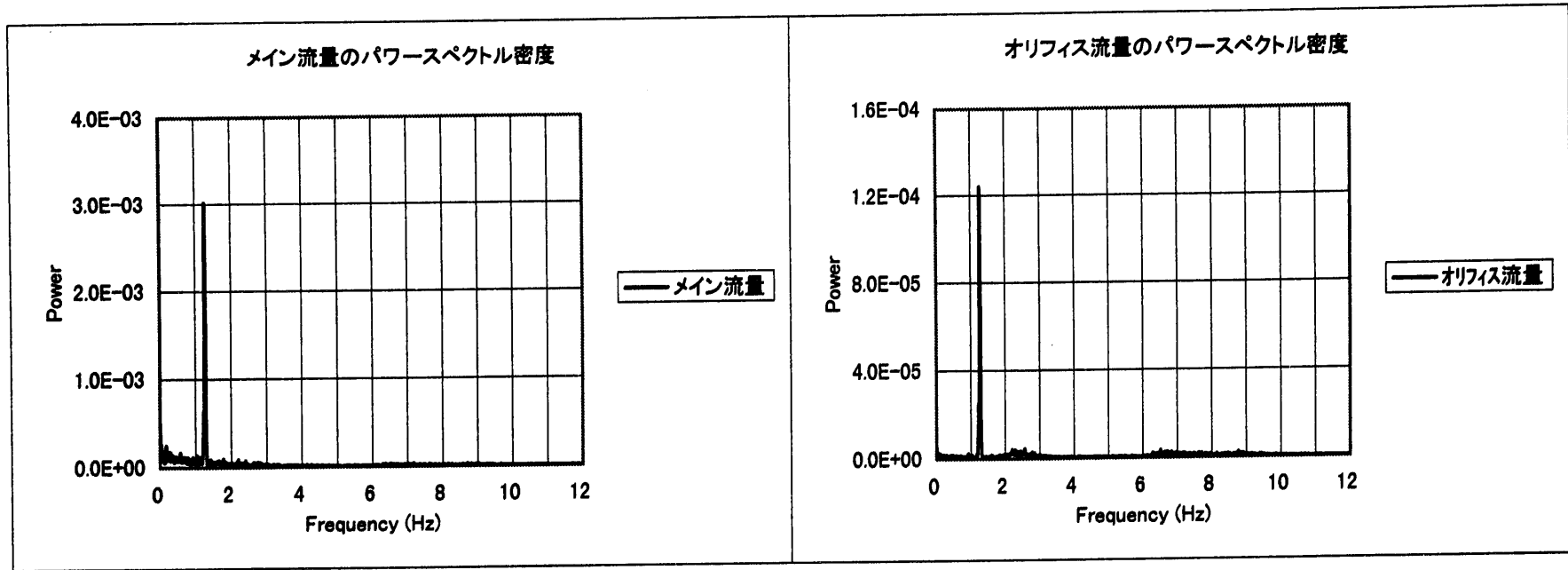


図 7-3 (5/5) 2次補助冷却系プラグング計のメイン及びオリフィス流量ゆらぎ測定結果
(パワースペクトル密度) 平成9年12月12日 原子炉停止中

表 7-1 温度ゆらぎのパワースペクトルに見られる顕著な周波数

測定位置	名 称	顕著な周波数 (Hz)		
TE-M01	合流前温度 (オリフィス温度)	—	—	約1.25
TE-M03	合流前温度 (バイパス側温度)	—	—	約1.25
TE-M02	ティー角部上流側温度	—	—	約1.25
TE-M04	ティー中心上部温度	約0.04	約0.08	約1.25
TE-M05	ティー中心から10mm下流側上部温度	約0.04	—	約1.25
TE-M07	ティー中心から20mm下流側上部温度	約0.04	—	約1.25
TE-M11	ティー中心から30mm下流側上部温度	約0.04	—	約1.25
TE-M15	ティー中心から86.5mm下流側上部温度	—	—	約1.25
TE-M06	ティー中心から10mm下流側上部から90℃横手前温度	約0.02	約0.09	約1.25
TE-M08	ティー中心から20mm下流側上部から90℃横手前温度	約0.02	約0.09	約1.25
TE-M12	ティー中心から30mm下流側上部から90℃横手前温度	約0.02	約0.09	約1.25
TE-M09	ティー中心から20mm下流側下部温度	—	—	約1.25
TE-M13	ティー中心から30mm下流側下部温度	約0.03	—	約1.25
TE-M10	ティー中心から20mm下流側上部から90℃横裏側温度	約0.02	約0.09	約1.25
TE-M14	ティー中心から30mm下流側上部から90℃横裏側温度	約0.03	約0.09	約1.25
メイン流量		—	—	約1.25
オリフィス流量		—	—	約1.25

表 7-2 ΔT_{in} と温度ゆらぎ幅との関係

測定日時	ΔT_{in} (合流 前温度差)	TE-M01	TE-M03	TE-M02	TE-M04	TE-M05	TE-M06	TE-M07	TE-M08	TE-M09	TE-M10	TE-M11	TE-M12	TE-M13	TE-M14	TE-M15
1997/12/12 10:00	130.3	0.84	2.09	2.69	9.56	8.97	13.15	7.45	10.46	4.78	10.75	5.67	7.77	5.67	7.76	2.39
1997/12/15 18:00	154.7	1.31	2.99	3.28	11.66	9.86	13.75	7.45	8.37	5.67	11.65	5.97	7.77	5.97	8.66	3.29
1997/12/16 8:40	211.4	1.08	1.79	2.99	11.96	13.15	19.72	9.93	13.15	6.27	13.44	7.76	9.56	7.76	9.26	2.99
1997/12/17 10:05	251.3	2.75	2.39	3.28	17.33	14.65	25.70	11.79	17.93	7.76	21.80	10.45	12.55	11.35	14.33	2.69
1997/12/17 16:00	257.3	2.87	2.39	3.58	18.53	17.04	26.30	11.79	16.44	9.85	19.12	9.55	13.74	11.35	13.74	3.58
1997/12/26 10:50	254.0	2.03	2.39	4.18	19.13	15.84	26.90	11.79	16.73	7.17	17.92	8.66	12.25	8.36	13.74	2.99
1997/12/26 11:15	250.0	1.55	2.09	3.58	19.43	15.54	25.10	12.10	18.53	6.87	20.61	9.55	12.15	8.96	15.53	2.99
1998/1/7 14:00	250.2	2.51	2.39	3.88	18.23	15.54	26.90	11.48	15.54	8.06	19.71	8.66	11.95	10.15	13.14	2.99
1998/1/14 14:15	245.2	0.96	2.09	5.97	25.40	17.94	25.10	12.10	16.44	8.36	16.73	9.25	12.55	9.26	11.05	2.69
1998/1/16 9:10	240.3	1.67	2.39	3.58	10.76	13.45	20.92	10.55	16.14	7.17	13.74	8.95	13.15	9.56	11.35	3.58
1998/1/21 14:30	248.5	0.96	2.09	3.28	20.32	19.13	29.59	14.89	18.32	8.36	16.73	11.34	11.95	9.26	12.54	3.58
1998/1/22 14:10	249.5	3.23	2.09	3.58	23.01	18.53	29.89	14.27	19.72	8.96	19.41	10.45	13.15	10.75	14.93	2.99
1998/1/27 15:45	237.0	3.11	2.09	3.28	12.55	9.86	18.83	9.62	14.64	5.97	12.84	8.66	11.95	7.47	11.35	3.58
1998/2/1 14:10	246.6	6.93	2.09	4.48	25.40	14.65	22.42	10.86	14.94	6.57	14.34	9.55	11.95	7.76	11.65	3.88
1998/2/23 17:20	262.3	8.96	2.09	5.37	17.04	14.95	19.13	12.10	14.34	7.17	17.62	11.64	13.74	10.75	14.63	5.38
1998/2/24 9:05	255.4	2.99	2.09	3.88	10.76	11.06	18.53	9.93	14.34	7.46	18.52	9.55	14.64	10.75	14.93	3.88
1998/2/24 13:05	244.7	1.67	2.69	4.18	11.36	10.46	16.74	10.55	12.25	6.57	15.53	9.55	11.95	8.96	13.74	3.58
1998/2/24 17:30	238.7	1.31	2.39	3.58	14.94	10.46	19.73	10.24	15.84	5.37	14.93	9.55	12.55	6.87	11.95	3.29
1998/2/24 19:00	233.1	2.99	2.09	2.99	32.88	15.25	17.63	10.55	16.14	6.57	11.95	8.66	12.55	8.96	10.15	4.18
1998/2/25 15:35	128.1	1.55	1.79	2.69	7.17	5.38	9.56	4.96	7.47	4.78	6.87	5.07	7.17	5.97	5.97	2.39
1998/2/25 15:50	127.7	0.96	1.79	2.69	5.98	6.28	8.37	4.96	6.57	4.18	7.17	4.78	6.57	4.18	6.27	2.39
は、各サンプリングデータにおける最大温度ゆらぎ幅を示す																

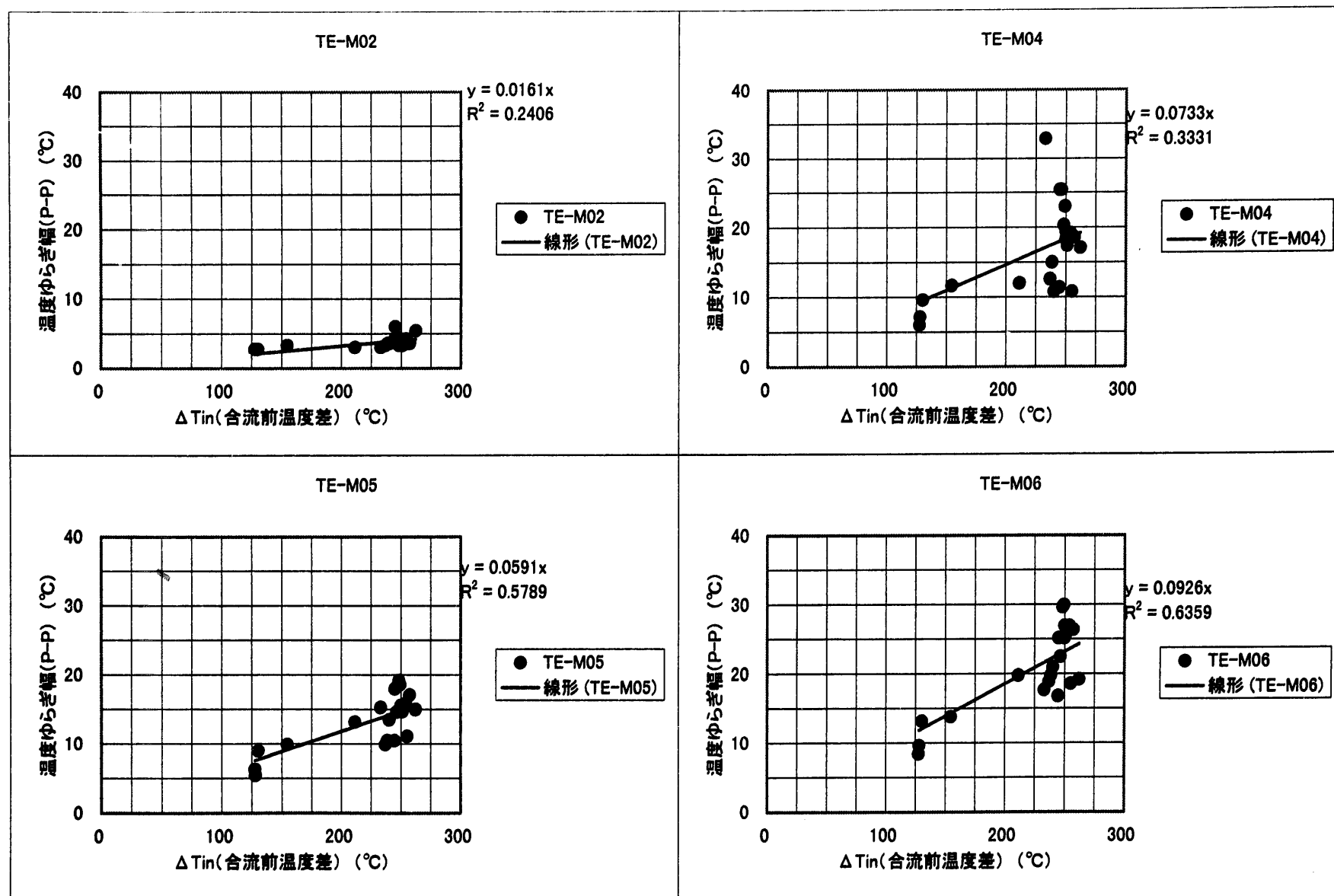
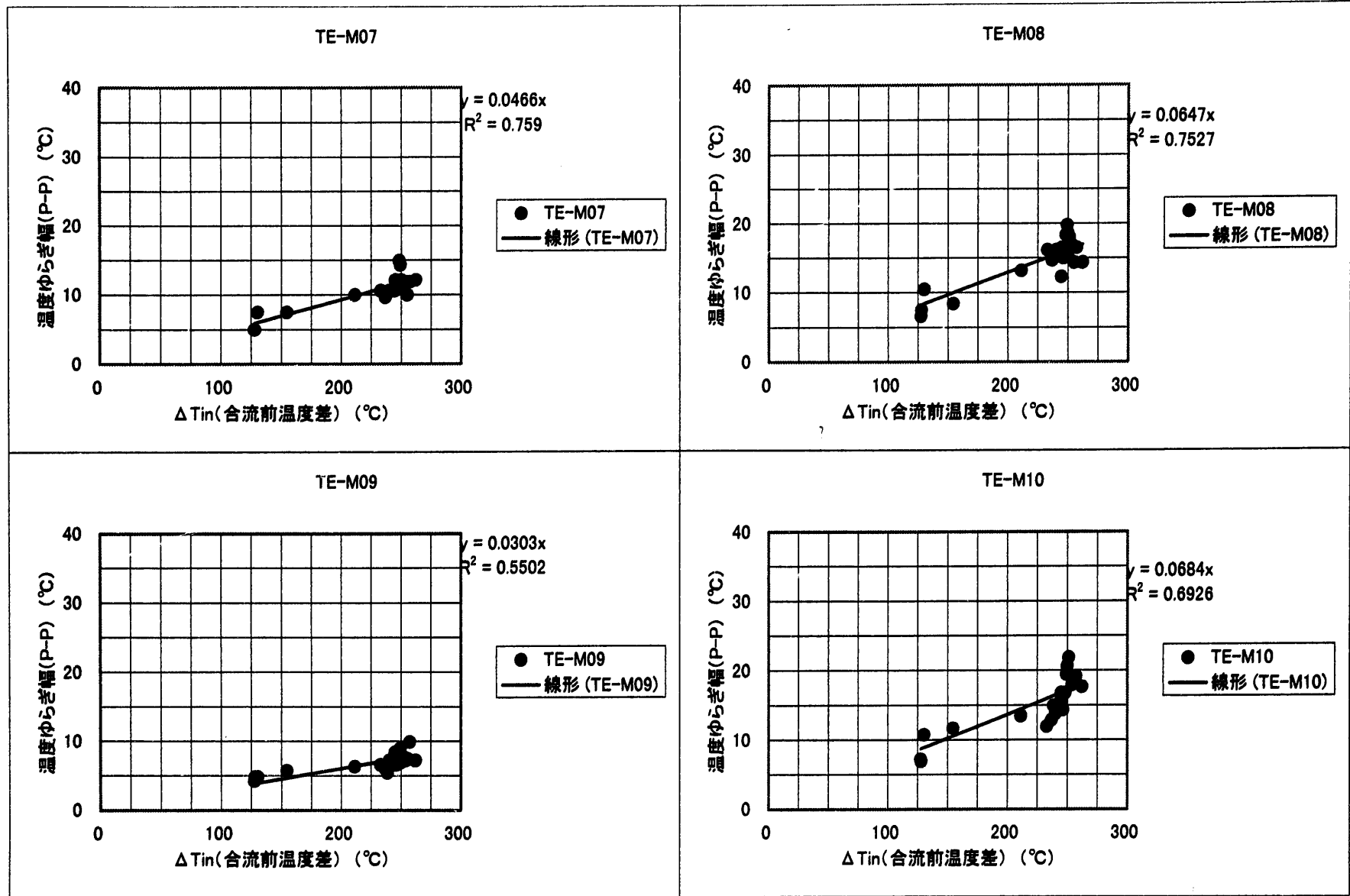


図7-4 (1/4) ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 TE-M02、M04～M06

図7-4 (2/4) ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 TE-M07~M10

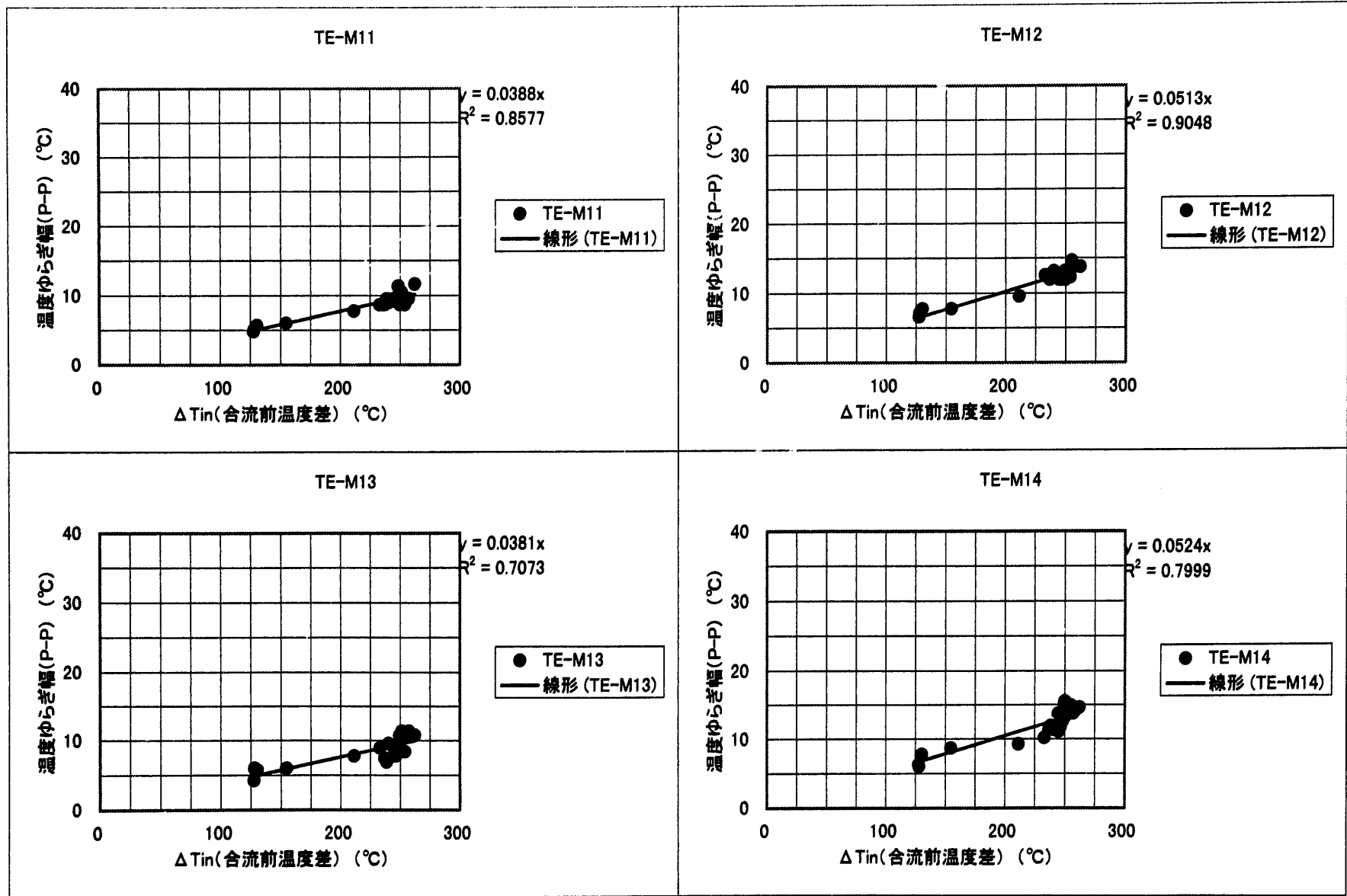


図 7-4 (3/4) ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 TE-M11~M14

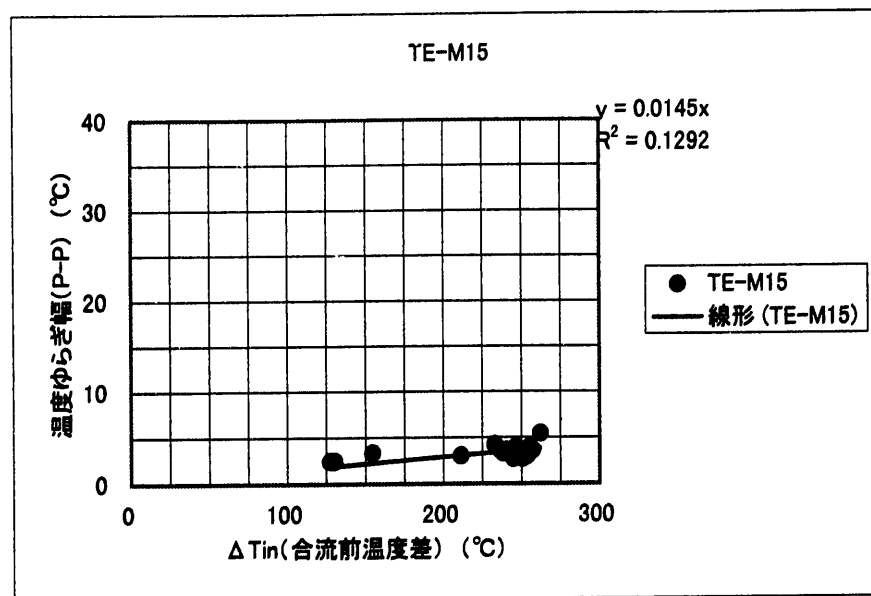


図 7-4 (4/4) ΔT_{in} (合流前温度差) と温度ゆらぎ幅 (P-P) との関係 TE-M15

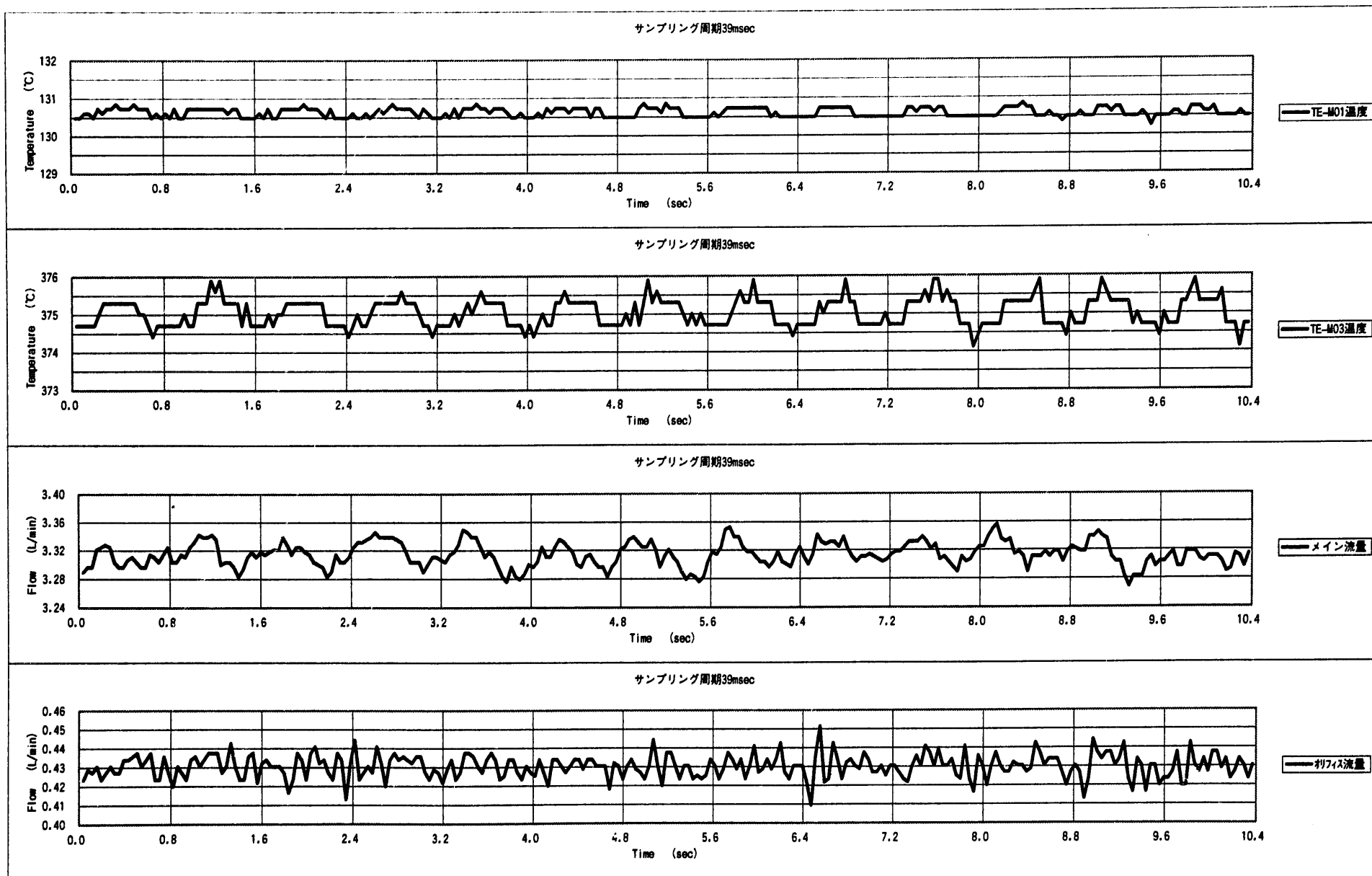


図7-5(1/3) 2次補助冷却系プラグング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動 サンプリング周期39msec

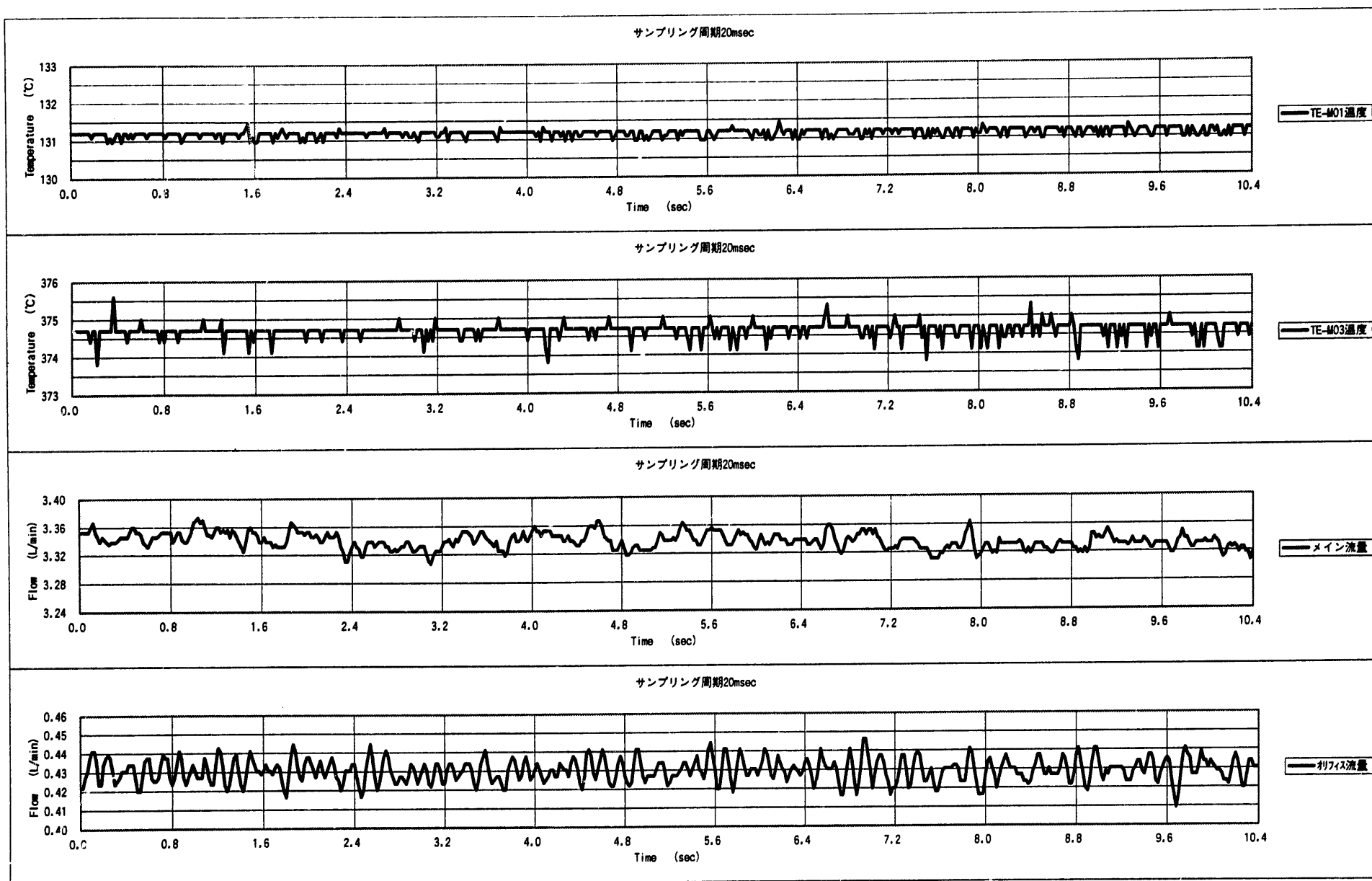


図7-5(2/3) 2次補助冷却系プラグング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動 サンプリング周期20msec

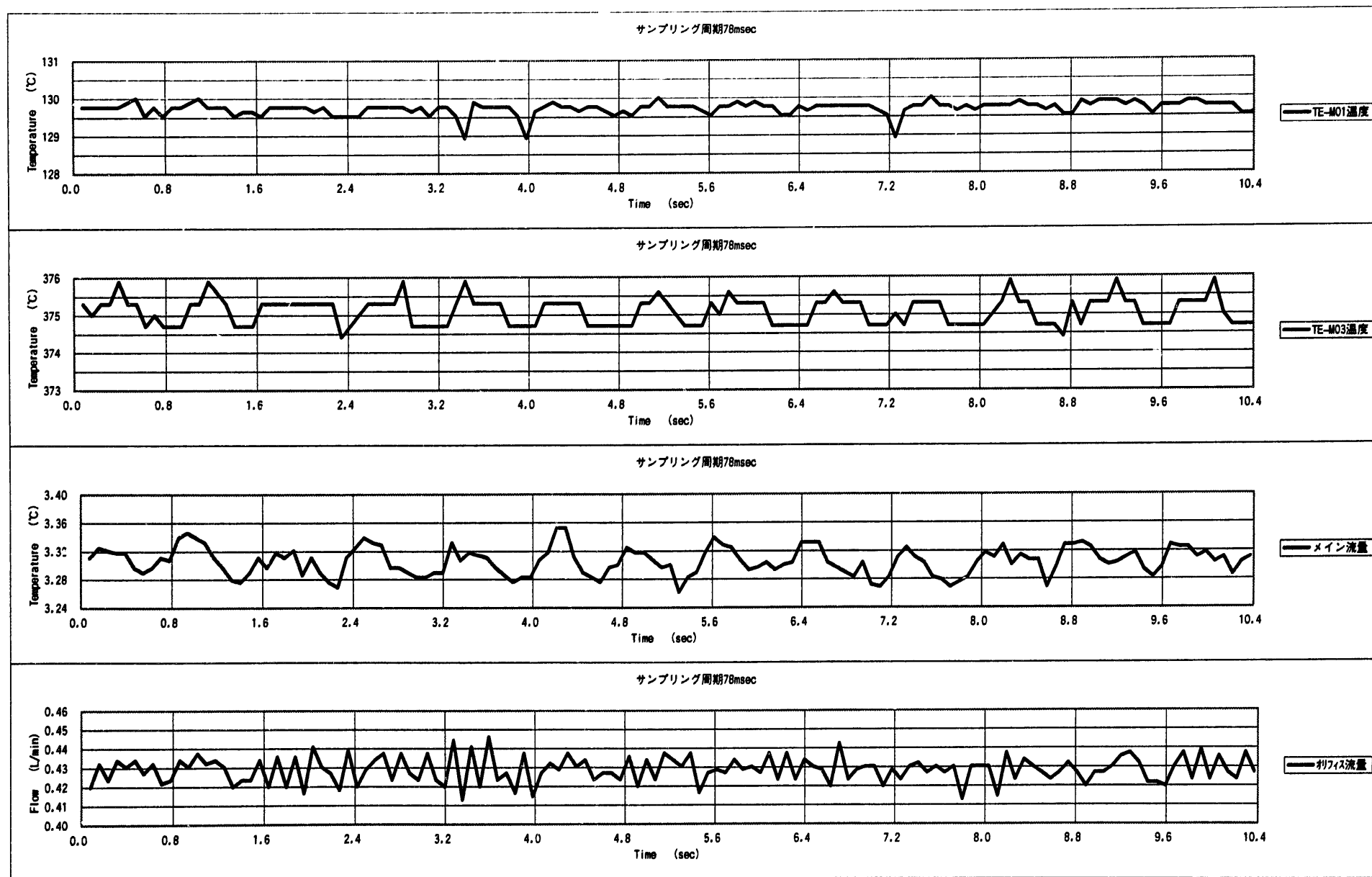


図7-5(3/3) 2次補助冷却系プラギング計合流前温度ゆらぎと流量ゆらぎの挙動 サンプリング周期78msec

8. 2次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価

表8-1 (1/8)～表8-1 (8/8)に2次補助冷却系プラグング計の温度ゆらぎ測定結果と FINAS 熱伝導解析結果から測定時配管内面温度ゆらぎを予想値した結果を示す。

表7-2より、原子炉定格出力運転中の2次補助プラグング計内部合流部の配管外面における温度ゆらぎの最大値は、TE-M04 (ティー中心上部)の位置で、32.9℃であった。

一方、2次補助冷却系プラグング計のバイパス側温度とプラグ側温度との単純な ΔT_{in} (= 251℃)を用いた FINAS による熱伝導解析結果は、図3-4に示すとおりである。また、熱伝導解析結果の時系列データは、図3-3 (1/3)～図3-3 (3/3)に示すとおりである。3.章で記述したように、図3-3及び図3-4より、温度ゆらぎが低周波数の場合は、配管内面と配管外面との温度ゆらぎはほぼ同一であり、内外面で温度差が生じない。しかし、高周波数になるにしたがって、温度応答遅れが生じ始め、配管内面と配管外面との温度ゆらぎの位相差が生じるとともに、温度ゆらぎ幅が内外面で異なってくる。

図7-1～図7-3に示した2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果より、配管外面の温度ゆらぎの支配的周波数は、ほぼ 0.1Hz 以下であり、ほぼ内外面に温度差が生じない状態で温度がゆらいでいると推測できる。

上記のように、温度ゆらぎの支配的周波数は 0.1Hz 以下であるが、本評価では、この大きな温度ゆらぎが、仮に、0.1Hz、0.4Hz、1.0Hzであったとして評価を行ったものである。評価結果は、以下のとおりである。

評価には、図3-3及び図3-4で示した $\Delta T_{in}=251℃$ を直接配管内表面に加えた FINAS 熱伝導解析結果と、原子炉停止中～原子炉定格出力運転中を通して測定された合流前温度の TE-M01 及び TE-M03 以外の仮設温度計により得られた配管外面温度ゆらぎデータを用いて行った。

FINAS 熱伝導解析による配管外面温度ゆらぎ及び配管内面温度ゆらぎは、図3-3及び図3-4にも示したとおり、以下のとおりであった。

配管外面温度ゆらぎ (0.1Hz) : 231.4℃	(内面温度ゆらぎ : 239.9℃)
(0.4Hz) : 127.0℃	(内面温度ゆらぎ : 188.5℃)
(1.0Hz) : 53.8℃	(内面温度ゆらぎ : 162.2℃)

上記の配管外面温度と内面温度との比率及び測定データを用いて、原子炉停止中～原子炉定格出力運転中の配管内面温度ゆらぎを予想した結果は、表8-1 (1/8)～表8-1 (8/8)に示したとおりである。また、表8-2に最大温度ゆらぎ幅が得られた TE-M04 の最大温度ゆらぎの

時の予想値をまとめたものを示す。

原子炉定格出力運転中 ($\Delta T_{in}=251^{\circ}\text{C}$) における配管外面温度ゆらぎ幅から、配管内面の温度ゆらぎ幅を予想した結果、周波数 1.0Hz としても 100°C 程度であることが明確となり、合流後の温度差はかなり低減されることが判った。

表 8-2 に示した実測から予測した内面温度ゆらぎ幅と FINAS 解析結果との比率は、表 4-1 で示した文献より算出した配管内表面の温度変動幅と流体温度差 (ΔT_{in}) との比率 $=\beta$ と、配管への熱伝達低減 (減衰) 率とが重畳したものに相当する。

表 8-3 に、FINAS 熱伝導解析結果による配管板厚方向温度分布より得られた ΔT_1 及び ΔT_2 成分と、上記で求められた FINAS 解析結果との比率 (配管内表面の温度変動幅と流体温度差 (ΔT_{in}) との比率 $=\beta$ と配管への熱伝達低減率とが重畳した係数) を用いて、配管に発生する応力を算出^③した結果を示す。

温度ゆらぎの支配的な周波数は実測より 0.1Hz 以下であり、その際に発生する板厚方向の温度分布による応力は設計疲労限を十分下回ることが明確となった。

以上より、これまで 2 次冷却系及び 2 次補助冷却系プラグイング計の構造健全性が担保されていたのは、合流による温度ゆらぎの減衰及び配管への熱伝達低減効果がかなり大きかったこと、及び配管が 3/8B sch20S で板厚 2.0mm と薄かったためであることが明確となった。

表8－1(1／8) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果(平成9年12月12日～平成10年2月25日)

項目		測定日時	測定方法	Δ Tin	アンプ倍率	熱電対ゆらぎ幅			温度換算係数	実測温度ゆらぎ幅	Δ Tin=251℃におけるFINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			Δ Tin=251℃におけるFINAS解析結果の内面温度ゆらぎ幅			(実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅)から実測時内面温度ゆらぎ幅を予想した値			内面温度ゆらぎの予想値から求めたΔ T低減係数(=内面予想値／251℃)			
						Min側(生)	Max側(生)	P-P(倍率補正後)			P-P	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1HzのΔ T低減係数	0.4HzのΔ T低減係数	1.0HzのΔ T低減係数
				℃		mV			℃/mV	℃	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率	
TE-M01	合流前(プラグ温度側)	1997/12/12 10:00	DC	130.3	500	2347.10	2364.25	0.03430	24.387	0.84																
		1997/12/15 18:00	DC	154.7	500	2342.20	2369.15	0.05390	24.387	1.31																
		1997/12/16 8:40	DC	211.4	500	2530.85	2552.90	0.04410	24.387	1.08																
		1997/12/17 10:05	DC	251.3	500	2376.50	2432.85	0.11270	24.387	2.75																
		1997/12/17 16:00	DC	257.3	500	2254.00	2312.80	0.11760	24.387	2.87																
		1997/12/26 10:50	DC	254.0	500	2467.15	2508.80	0.08330	24.387	2.03																
		1997/12/26 11:15	DC	250.0	500	2545.55	2577.40	0.06370	24.387	1.55																
		1998/1/7 14:00	DC	250.2	500	2540.65	2592.10	0.10290	24.387	2.51																
		1998/1/14 14:15	DC	245.2	500	2660.70	2680.30	0.03920	24.387	0.96																
		1998/1/16 9:10	DC	240.3	500	2758.70	2793.00	0.06860	24.387	1.67																
		1998/1/21 14:30	DC	248.5	500	2584.75	2604.35	0.03920	24.387	0.96																
		1998/1/22 14:10	DC	249.5	500	2545.55	2611.70	0.13230	24.387	3.23																
		1998/1/27 15:45	DC	237.0	500	2802.80	2866.50	0.12740	24.387	3.11																
		1998/2/1 14:10	DC	246.6	500	2562.70	2704.80	0.28420	24.387	6.93																
		1998/2/23 17:20	DC	262.3	500	2231.95	2415.70	0.36750	24.387	8.96																
		1998/2/24 9:05	DC	255.4	500	2427.95	2489.20	0.12250	24.387	2.99																
		1998/2/24 13:05	DC	244.7	500	2646.00	2680.30	0.06860	24.387	1.67																
		1998/2/24 17:30	DC	238.7	500	2540.65	2567.60	0.05390	24.387	1.31																
		1998/2/24 19:00	DC	233.1	500	2533.30	2594.55	0.12250	24.387	2.99																
		1998/2/25 15:35	DC	128.1	500	2594.55	2626.40	0.06370	24.387	1.55																
1998/2/25 15:50	DC	127.7	500	2606.80	2626.40	0.03920	24.387	0.96																		
TE-M02	ティー角部上流側	1997/12/12 10:00	DC	130.3	200	1612.10	1634.15	0.11025	24.374	2.69	230.2	124.1	52.7	0.012	0.022	0.051	236.9	186.8	161.0	2.77	4.04	8.21	0.01	0.02	0.03	
		1997/12/15 18:00	DC	154.7	200	1741.95	1768.90	0.13475	24.374	3.28	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.94	10.03	0.01	0.02	0.04	
		1997/12/16 8:40	DC	211.4	200	2099.65	2124.15	0.12250	24.374	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.49	9.12	0.01	0.02	0.04	
		1997/12/17 10:05	DC	251.3	200	2258.90	2285.85	0.13475	24.374	3.28	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.94	10.03	0.01	0.02	0.04	
		1997/12/17 16:00	DC	257.3	200	2244.20	2273.60	0.14700	24.374	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.39	10.95	0.01	0.02	0.04	
		1997/12/26 10:50	DC	254.0	200	2317.70	2352.00	0.17150	24.374	4.18	230.2	124.1	52.7	0.018	0.034	0.079	236.9	186.8	161.0	4.30	6.29	12.77	0.02	0.03	0.05	
		1997/12/26 11:15	DC	250.0	200	2332.40	2361.80	0.14700	24.374	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.39	10.95	0.01	0.02	0.04	
		1998/1/7 14:00	DC	250.2	200	2327.50	2359.35	0.15925	24.374	3.88	230.2	124.1	52.7	0.017	0.031	0.074	236.9	186.8	161.0	3.99	5.84	11.86	0.02	0.02	0.05	
		1998/1/14 14:15	DC	245.2	200	2430.40	2479.40	0.24500	24.374	5.97	230.2	124.1	52.7	0.026	0.048	0.113	236.9	186.8	161.0	6.15	8.99	18.24	0.02	0.04	0.07	
		1998/1/16 9:10	DC	240.3	200	2298.10	2327.50	0.14700	24.374	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.39	10.95	0.01	0.02	0.04	
		1998/1/21 14:30	DC	248.5	200	2327.50	2354.45	0.13475	24.374	3.28	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.94	10.03	0.01	0.02	0.04	
		1998/1/22 14:10	DC	249.5	200	2332.40	2361.80	0.14700	24.374	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.39	10.95	0.01	0.02	0.04	
		1998/1/27 15:45	DC	237.0	200	2293.20	2320.15	0.13475	24.374	3.28	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.94	10.03	0.01	0.02	0.04	
		1998/2/1 14:10	DC	246.6	200	2254.00	2290.75	0.18375	24.374	4.48	230.2	124.1	52.7	0.019	0.036	0.085	236.9	186.8	161.0	4.61	6.74	13.68	0.02	0.03	0.05	
		1998/2/23 17:20	DC	262.3	200	2224.60	2268.70	0.22050	24.374	5.37	230.2	124.1	52.7	0.023	0.043	0.102	236.9	186.8	161.0	5.53	8.09	16.42	0.02	0.03	0.07	
		1998/2/24 9:05	DC	255.4	200	2234.40	2266.25	0.15925	24.374	3.88	230.2	124.1	52.7	0.017	0.031	0.074	236.9	186.8	161.0	3.99	5.84	11.86	0.02	0.02	0.05	
		1998/2/24 13:05	DC	244.7	200	2273.60	2307.90	0.17150	24.374	4.18	230.2	124.1	52.7	0.018	0.034	0.079	236.9	186.8	161.0	4.30	6.29	12.77	0.02	0.03	0.05	
		1998/2/24 17:30	DC	238.7	200	2195.20	2224.60	0.14700	24.374	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.39	10.95	0.01	0.02	0.04	
		1998/2/24 19:00	DC	233.1	200	2178.05	2202.55	0.12250	24.374	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.49	9.12	0.01	0.02	0.04	
		1998/2/25 15:35	DC	128.1	200	1666.00	1688.05	0.11025	24.374	2.69	230.2	124.1	52.7	0.012	0.022	0.051	236.9	186.8	161.0	2.77	4.04	8.21	0.01	0.02	0.03	
1998/2/25 15:50	DC	127.7	200	1666.00	1688.05	0.11025	24.374	2.69	230.2	124.1	52.7	0.012	0.022	0.051	236.9	186.8	161.0	2.77	4.04	8.21	0.01	0.02	0.03			

表8-1(2/8) 2次補助冷却系プラグイン計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果(平成9年12月12日～平成10年2月25日)

項目	測定日時	測定方法	ΔTin	アンプ倍率	熱電対ゆらぎ幅			温度換算係数	実測温度ゆらぎ幅	ΔTin=251℃におけるFINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			ΔTin=251℃におけるFINAS解析結果の内面温度ゆらぎ幅			(実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅)から実測時内面温度ゆらぎ幅を予想した値			内面温度ゆらぎの予想値から求めたΔT低減係数(=内面予想値／251℃)			
					Min側(生)	Max側(生)	P-P(倍率補正後)			0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1HzのΔT低減係数	0.4HzのΔT低減係数	1.0HzのΔT低減係数	
			℃		mV			℃/mV	℃	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率	
TE-M03	合流前(バイパス温度側)	1997/12/12 10:00	DC	130.3	200	2001.65	2018.80	0.08575	24.393	2.09															
		1997/12/15 18:00	DC	154.7	200	2197.65	2222.15	0.12250	24.393	2.99															
		1997/12/16 8:40	DC	211.4	200	2744.00	2758.70	0.07350	24.393	1.79															
		1997/12/17 10:05	DC	251.3	200	3013.50	3033.10	0.09800	24.393	2.39															
		1997/12/17 16:00	DC	257.3	200	3011.05	3030.65	0.09800	24.393	2.39															
		1997/12/26 10:50	DC	254.0	200	3067.40	3087.00	0.09800	24.393	2.39															
		1997/12/26 11:15	DC	250.0	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/1/7 14:00	DC	250.2	200	3067.40	3087.00	0.09800	24.393	2.39															
		1998/1/14 14:15	DC	245.2	200	3069.85	3087.00	0.08575	24.393	2.09															
		1998/1/16 9:10	DC	240.3	200	3069.85	3089.45	0.09800	24.393	2.39															
		1998/1/21 14:30	DC	248.5	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/1/22 14:10	DC	249.5	200	3077.20	3094.35	0.08575	24.393	2.09															
		1998/1/27 15:45	DC	237.0	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/2/1 14:10	DC	246.6	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/2/23 17:20	DC	262.3	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/2/24 9:05	DC	255.4	200	3067.40	3084.55	0.08575	24.393	2.09															
		1998/2/24 13:05	DC	244.7	200	3060.05	3082.10	0.11025	24.393	2.69															
		1998/2/24 17:30	DC	238.7	200	2969.40	2989.00	0.09800	24.393	2.39															
		1998/2/24 19:00	DC	233.1	200	2930.20	2947.35	0.08575	24.393	2.09															
		1998/2/25 15:35	DC	128.1	200	2087.40	2102.10	0.07350	24.393	1.79															
1998/2/25 15:50	DC	127.7	200	2087.40	2102.10	0.07350	24.393	1.79																	
TE-M04	ティー中心上部	1997/12/12 10:00	DC	130.3	200	1254.40	1332.80	0.39200	24.398	9.56	230.2	124.1	52.7	0.042	0.077	0.181	236.9	186.8	161.0	9.84	14.40	29.22	0.04	0.06	0.12
		1997/12/15 18:00	DC	154.7	200	1332.80	1428.35	0.47775	24.398	11.66	230.2	124.1	52.7	0.051	0.094	0.221	236.9	186.8	161.0	12.00	17.55	35.61	0.05	0.07	0.14
		1997/12/16 8:40	DC	211.4	200	1643.95	1741.95	0.49006	24.398	11.96	230.2	124.1	52.7	0.052	0.096	0.227	236.9	186.8	161.0	12.30	18.00	36.52	0.05	0.07	0.15
		1997/12/17 10:05	DC	251.3	200	1548.40	1690.50	0.71050	24.398	17.33	230.2	124.1	52.7	0.075	0.140	0.329	236.9	186.8	161.0	17.84	26.09	52.96	0.07	0.10	0.21
		1997/12/17 16:00	DC	257.3	200	1523.90	1675.80	0.75950	24.398	18.53	230.2	124.1	52.7	0.080	0.149	0.352	236.9	186.8	161.0	19.07	27.89	56.61	0.08	0.11	0.23
		1997/12/26 10:50	DC	254.0	200	1553.30	1710.10	0.78400	24.398	19.13	230.2	124.1	52.7	0.083	0.154	0.363	236.9	186.8	161.0	19.68	28.79	58.44	0.08	0.11	0.23
		1997/12/26 11:15	DC	250.0	200	1582.70	1741.95	0.79625	24.398	19.43	230.2	124.1	52.7	0.084	0.157	0.369	236.9	186.8	161.0	19.99	29.24	59.35	0.08	0.12	0.24
		1998/1/7 14:00	DC	250.2	200	1582.70	1732.15	0.74725	24.398	18.23	230.2	124.1	52.7	0.079	0.147	0.346	236.9	186.8	161.0	18.76	27.44	55.70	0.07	0.11	0.22
		1998/1/14 14:15	DC	245.2	200	1648.85	1857.10	1.04125	24.398	25.40	230.2	124.1	52.7	0.110	0.205	0.482	236.9	186.8	161.0	26.14	38.24	77.61	0.10	0.15	0.31
		1998/1/16 9:10	DC	240.3	200	1862.00	1950.20	0.44100	24.398	10.76	230.2	124.1	52.7	0.047	0.087	0.204	236.9	186.8	161.0	11.07	16.20	32.87	0.04	0.06	0.13
		1998/1/21 14:30	DC	248.5	200	1597.40	1764.00	0.63300	24.398	20.32	230.2	124.1	52.7	0.088	0.164	0.386	236.9	186.8	161.0	20.92	30.59	62.09	0.08	0.12	0.25
		1998/1/22 14:10	DC	249.5	200	1582.70	1771.35	0.94325	24.398	23.01	230.2	124.1	52.7	0.100	0.185	0.437	236.9	186.8	161.0	23.68	34.64	70.31	0.09	0.14	0.28
		1998/1/27 15:45	DC	237.0	200	1822.80	1925.70	0.51450	24.398	12.55	230.2	124.1	52.7	0.055	0.101	0.238	236.9	186.8	161.0	12.92	18.89	38.35	0.05	0.08	0.15
		1998/2/1 14:10	DC	246.6	200	1759.10	1967.35	1.04125	24.398	25.40	230.2	124.1	52.7	0.110	0.205	0.482	236.9	186.8	161.0	26.14	38.24	77.61	0.10	0.15	0.31
		1998/2/23 17:20	DC	262.3	200	1737.05	1876.70	0.69825	24.398	17.04	230.2	124.1	52.7	0.074	0.137	0.323	236.9	186.8	161.0	17.53	25.64	52.05	0.07	0.10	0.21
		1998/2/24 9:05	DC	255.4	200	1759.10	1847.30	0.44100	24.398	10.76	230.2	124.1	52.7	0.047	0.087	0.204	236.9	186.8	161.0	11.07	16.20	32.87	0.04	0.06	0.13
		1998/2/24 13:05	DC	244.7	200	1822.80	1915.90	0.46550	24.398	11.36	230.2	124.1	52.7	0.049	0.092	0.216	236.9	186.8	161.0	11.69	17.10	34.70	0.05	0.07	0.14
		1998/2/24 17:30	DC	238.7	200	1719.90	1842.40	0.61250	24.398	14.94	230.2	124.1	52.7	0.065	0.120	0.284	236.9	186.8	161.0	15.38	22.49	45.65	0.06	0.09	0.18
		1998/2/24 19:00	DC	233.1	200	1661.10	1930.60	1.34750	24.398	32.88	230.2	124.1	52.7	0.143	0.265	0.624	236.9	186.8	161.0	33.83	49.49	100.44	0.13	0.20	0.40
		1998/2/25 15:35	DC	128.1	200	1452.85	1511.65	0.29400	24.398	7.17	230.2	124.1	52.7	0.031	0.058	0.136	236.9	186.8	161.0	7.38	10.80	21.91	0.03	0.04	0.09
1998/2/25 15:50	DC	127.7	200	1455.30	1504.30	0.24500	24.398	5.98	230.2	124.1	52.7	0.026	0.048	0.113	236.9	186.8	161.0	6.15	9.00	18.26	0.02	0.04	0.07		

表8－1(8／8) 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の温度ゆらぎ測定結果(平成9年12月12日～平成10年2月25日)

項目		測定日時	測定方法	ΔTin	アンプ倍率	熱電対ゆらぎ幅			温度換算係数	実測温度ゆらぎ幅	ΔTin=251℃におけるFINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅			ΔTin=251℃におけるFINAS解析結果の内面温度ゆらぎ幅			(実測外面温度ゆらぎ幅／FINAS解析結果の外面温度ゆらぎ幅)から実測時内面温度ゆらぎ幅を予想した値			内面温度ゆらぎの予想値から求めたΔT低減係数(=内面予想値／251℃)		
						Min側(生)	Max側(生)	P-P(倍率補正後)			0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1Hz	0.4Hz	1.0Hz	0.1HzのΔT低減係数	0.4HzのΔT低減係数	1.0HzのΔT低減係数
				℃		mV			℃/mV	℃	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	比率	比率	比率
TE-M15	ティー中心から86.5mm下流上部	1997/12/12 10:00	DC	130.3	200	1862.00	1881.60	0.09800	24.384	2.39	230.2	124.1	52.7	0.010	0.019	0.045	236.9	186.8	161.0	2.46	3.60	7.30	0.01	0.01	0.03
		1997/12/15 18:00	DC	154.7	200	2028.60	2055.55	0.13475	24.384	3.29	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.95	10.04	0.01	0.02	0.04
		1997/12/16 8:40	DC	211.4	200	2513.70	2538.20	0.12250	24.384	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.50	9.13	0.01	0.02	0.04
		1997/12/17 10:05	DC	251.3	200	2739.10	2761.15	0.11025	24.384	2.69	230.2	124.1	52.7	0.012	0.022	0.051	236.9	186.8	161.0	2.77	4.05	8.21	0.01	0.02	0.03
		1997/12/17 16:00	DC	257.3	200	2729.30	2758.70	0.14700	24.384	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.40	10.95	0.01	0.02	0.04
		1997/12/26 10:50	DC	254.0	200	2788.10	2812.60	0.12250	24.384	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.50	9.13	0.01	0.02	0.04
		1997/12/26 11:15	DC	250.0	200	2793.00	2817.50	0.12250	24.384	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.50	9.13	0.01	0.02	0.04
		1998/1/7 14:00	DC	250.2	200	2793.00	2817.50	0.12250	24.384	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.50	9.13	0.01	0.02	0.04
		1998/1/14 14:15	DC	245.2	200	2802.80	2824.85	0.11025	24.384	2.69	230.2	124.1	52.7	0.012	0.022	0.051	236.9	186.8	161.0	2.77	4.05	8.21	0.01	0.02	0.03
		1998/1/16 9:10	DC	240.3	200	2793.00	2822.40	0.14700	24.384	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.40	10.95	0.01	0.02	0.04
		1998/1/21 14:30	DC	248.5	200	2793.00	2822.40	0.14700	24.384	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.40	10.95	0.01	0.02	0.04
		1998/1/22 14:10	DC	249.5	200	2802.80	2827.30	0.12250	24.384	2.99	230.2	124.1	52.7	0.013	0.024	0.057	236.9	186.8	161.0	3.07	4.50	9.13	0.01	0.02	0.04
		1998/1/27 15:45	DC	237.0	200	2778.30	2807.70	0.14700	24.384	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.40	10.95	0.01	0.02	0.04
		1998/2/1 14:10	DC	246.6	200	2773.40	2805.25	0.15925	24.384	3.88	230.2	124.1	52.7	0.017	0.031	0.074	236.9	186.8	161.0	4.00	5.85	11.86	0.02	0.02	0.05
		1998/2/23 17:20	DC	262.3	200	2734.20	2778.30	0.22050	24.384	5.38	230.2	124.1	52.7	0.023	0.043	0.102	236.9	186.8	161.0	5.53	8.09	16.43	0.02	0.03	0.07
		1998/2/24 9:05	DC	255.4	200	2756.25	2788.10	0.15925	24.384	3.88	230.2	124.1	52.7	0.017	0.031	0.074	236.9	186.8	161.0	4.00	5.85	11.86	0.02	0.02	0.05
		1998/2/24 13:05	DC	244.7	200	2766.05	2795.45	0.14700	24.384	3.58	230.2	124.1	52.7	0.016	0.029	0.068	236.9	186.8	161.0	3.69	5.40	10.95	0.01	0.02	0.04
		1998/2/24 17:30	DC	238.7	200	2685.20	2712.15	0.13475	24.384	3.29	230.2	124.1	52.7	0.014	0.026	0.062	236.9	186.8	161.0	3.38	4.95	10.04	0.01	0.02	0.04
		1998/2/24 19:00	DC	233.1	200	2655.80	2690.10	0.17150	24.384	4.18	230.2	124.1	52.7	0.018	0.034	0.079	236.9	186.8	161.0	4.30	6.29	12.78	0.02	0.03	0.05
		1998/2/25 15:35	DC	128.1	200	1930.60	1950.20	0.09800	24.384	2.39	230.2	124.1	52.7	0.010	0.019	0.045	236.9	186.8	161.0	2.46	3.60	7.30	0.01	0.01	0.03
		1998/2/25 15:50	DC	127.7	200	1928.15	1947.75	0.09800	24.384	2.39	230.2	124.1	52.7	0.010	0.019	0.045	236.9	186.8	161.0	2.46	3.60	7.30	0.01	0.01	0.03

表8-2 実測温度ゆらぎ幅からの内面温度ゆらぎ幅予測結果と内面温度ゆらぎ幅の解析結果との比率

(単位:°C)

周波数	解析条件	FINAS解析結果							実測温度ゆらぎ幅からの内面 温度ゆらぎ幅予測 (温度ゆらぎ測定結果×解析 結果比率)	内面温度ゆらぎ 幅の解析結果と の比率
		内面			外面			内外面温度 差比率(内面 ／外面)		
	ΔTin	最大温度	最小温度	温度ゆらぎ幅	最大温度	最小温度	温度ゆらぎ幅		(最大温度ゆらぎ幅=32.9℃) (支配的周波数=0.04Hz、 0.08Hz)	(予測／解析)
(Hz)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)	(℃)			
0.05	251	379.4	131.5	247.9	378.4	132.7	245.7	1.009	33.2	0.134
0.10	251	375.3	135.4	239.9	371.5	140.1	231.4	1.037	34.1	0.142
0.20	251	364.5	145.8	218.7	352.1	160.2	191.9	1.140	37.5	0.171
0.30	251	355.4	154.6	200.8	334.0	178.8	155.2	1.294	42.6	0.212
0.40	251	349.2	160.7	188.5	320.0	193.0	127.0	1.484	48.8	0.259
0.50	251	345.1	164.8	180.3	309.5	203.6	105.9	1.703	56.0	0.311
0.60	251	342.3	167.6	174.7	301.6	211.5	90.1	1.939	63.8	0.365
1.00	251	336.1	173.9	162.2	283.5	229.7	53.8	3.015	99.2	0.612
1.40	251	332.4	177.6	154.8	274.7	238.3	36.4	4.253	139.9	0.904
2.00	251	327.8	182.2	145.6	267.7	245.1	22.6	6.442	外面の温度差が実測より小さく、かつ、(温度ゆ らぎ測定結果×解析結果比率)が解析結果の内 面温度差を上回る周波数領域のため対象外	
5.00	251	313.1	197.2	115.9	258.3	253.8	4.5	25.756		
10.00	251	302.2	208.4	93.8	256.5	255.7	0.8	117.250		

表 8-3 2次補助冷却系プラグング計内部合流部の実測配管外面温度ゆらぎとFINAS解析結果を用いた配管内外面に発生する応力評価結果

項 目			記号	単位	周波数(Hz)								
					0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0	1.4
ティー部入口基準温度	枝管温度	(バイパス側)	T _B	(°C)	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00	381.00
	主管温度	(プラグ側)	T _P	(°C)	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00	130.00
	基準温度差	T _B －T _P	ΔT _{in}	(°C)	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00	251.00
	合流後温度		T _{BP}	(°C)	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80	330.80
内面温度が高温時(最大値)	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(°C)	269.70	284.20	307.70	317.10	326.10	328.50	330.80	332.90	331.40
		外面温度	T _{out}	(°C)	249.50	246.20	244.90	241.00	243.20	241.90	242.30	243.40	244.70
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(°C)	256.42	259.26	266.57	267.23	271.73	271.56	272.53	273.36	272.84
		線形分	ΔT ₁	(°C)	－20.13	－37.83	－62.50	－75.66	－82.57	－86.13	－88.00	－88.44	－84.94
		非線形分	ΔT _{2in}	(°C)	3.21	6.02	9.88	12.04	13.08	13.88	14.27	15.32	16.09
			ΔT _{2out}	(°C)	3.14	5.85	9.58	11.60	12.75	13.41	13.77	14.26	14.33
		内面温度	T _{Lin}	(°C)	266.49	278.18	297.82	305.06	313.02	314.62	316.53	317.58	315.31
		外面温度	T _{Lout}	(°C)	246.36	240.35	235.32	229.40	230.45	228.49	228.53	229.14	230.37
内面温度が低温時(最大値)	FINAS解析結果	内面温度	T _{in}	(°C)	229.10	215.10	198.00	189.45	184.00	179.10	179.20	177.10	178.60
		外面温度	T _{out}	(°C)	249.30	253.20	261.50	266.65	268.80	267.80	270.10	269.30	268.00
	線形化处理結果	平均温度	T _{AVG}	(°C)	242.35	240.21	239.92	240.57	240.23	237.97	239.75	239.10	239.60
		線形分	ΔT ₁	(°C)	20.04	37.73	62.75	76.25	83.51	87.44	89.30	90.06	86.63
		非線形分	ΔT _{2in}	(°C)	－3.23	－6.25	－10.54	－12.99	－14.48	－15.15	－15.90	－16.97	－17.69
			ΔT _{2out}	(°C)	－3.07	－5.88	－9.79	－12.04	－13.19	－13.89	－14.30	－14.83	－14.92
		内面温度	T _{Lin}	(°C)	232.33	221.35	208.54	202.44	198.48	194.25	195.10	194.07	196.29
		外面温度	T _{Lout}	(°C)	252.37	259.08	271.29	278.69	281.99	281.69	284.40	284.13	282.92
線形分の温度ゆらぎ幅		内外面	ΔT _{L1}	(°C)	34.16	56.83	89.28	102.62	114.54	120.37	121.43	123.51	119.02
非線形分の温度ゆらぎ幅		内面	ΔT _{2in}	(°C)	6.44	12.27	20.42	25.03	27.56	29.03	30.17	32.29	33.78
		外面	ΔT _{2out}	(°C)	6.22	11.73	19.37	23.64	25.94	27.30	28.06	29.09	29.24
測定結果より求められた温度変動幅の流体温度差(ΔT _{in})に対する比率βと熱伝達減衰効果が重畳した係数(β×γ)		内外面	β×γ		0.134	0.142	0.171	0.212	0.259	0.311	0.365	0.612	0.904
線形分の温度ゆらぎ幅(×β×γ)		内外面	ΔT _{L1} ×β×γ	(°C)	4.58	8.07	15.27	21.76	29.67	37.44	44.32	75.59	107.59
非線形分の温度ゆらぎ幅(×β×γ)		内面	ΔT _{2in} ×β×γ	(°C)	0.86	1.74	3.49	5.31	7.14	9.03	11.01	19.76	30.54
		外面	ΔT _{2out} ×β×γ	(°C)	0.83	1.67	3.31	5.01	6.72	8.49	10.24	17.80	26.44
発生応力	内面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.81E+04	1.78E+04	1.77E+04	1.76E+04	1.77E+04	1.77E+04	1.78E+04	1.78E+04	1.78E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/°C)	1.76E－05	1.77E－05	1.77E－05	1.78E－05	1.77E－05	1.77E－05	1.77E－05	1.77E－05	1.77E－05
		線形分	σ(ΔT _{L1})	(kg/mm ²)	1.04	1.82	3.43	4.87	6.65	8.39	9.98	17.01	24.22
		非線形分	σ(ΔT _{2in})	(kg/mm ²)	0.39	0.78	1.57	2.37	3.20	4.05	4.96	8.90	13.75
		ピーク応力	Spin	(kg/mm ²)	1.43	2.60	4.99	7.24	9.84	12.44	14.93	25.91	37.96
			Spin/2	(kg/mm ²)	0.71	1.30	2.50	3.62	4.92	6.22	7.47	12.95	18.98
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30
	外面	縦弾性係数	E	(kg/mm ²)	1.84E+04	1.84E+04	1.85E+04	1.84E+04	1.84E+04	1.84E+04	1.83E+04	1.83E+04	1.83E+04
		瞬時熱膨張係数	α	(1/°C)	1.74E－05	1.74E－05	1.74E－05	1.74E－05	1.74E－05	1.74E－05	1.75E－05	1.75E－05	1.75E－05
		線形分	ΔT _{L1}	(kg/mm ²)	1.05	1.85	3.50	4.98	6.79	8.56	10.12	17.26	24.57
		非線形分	ΔT _{2out}	(kg/mm ²)	0.38	0.76	1.52	2.29	3.08	3.88	4.68	8.13	12.07
		ピーク応力	Spout	(kg/mm ²)	1.43	2.61	5.02	7.27	9.87	12.44	14.80	25.39	36.64
			Spout/2	(kg/mm ²)	0.71	1.30	2.51	3.64	4.93	6.22	7.40	12.70	18.32
		設計疲労限	σ _F	(kg/mm ²)	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30	10.30

9. ま と め

高速実験炉「常陽」において、温度差が生じる配管合流部の調査を行った結果、4系統の合計8部位を検討対象部位としてリストアップし、これらの部位に対して、合流前温度差 (ΔT_{in}) を用いたサーマルストライピングに対する簡易構造健全性評価を行った。簡易評価の結果、問題となる部位は、2次主冷却系プラグング計内部合流部及び2次補助冷却系プラグング計内部合流部の2部位であることが明確となった。

サーマルストライピングに大きく影響する要因は、文献等によって温度ゆらぎの支配的周波数と温度ゆらぎ幅であることから、これらを明確にするため、 ΔT_{in} が最も大きい2次補助冷却系プラグング計（なお、構造は、2次主冷却系プラグング計も同一）を対象として、内部合流部に温度応答特性の良好な $0.5\text{mm } \phi$ の熱電対を15点取り付け配管外面の温度ゆらぎ測定を実施した。また、配管外面の温度ゆらぎ幅測定結果から配管内面温度ゆらぎを算出するとともに、配管板厚方向に発生する応力を算出するために、非線形構造解析システム“FINAS”を用いた配管熱伝導解析結果を行い、サーマルストライピング評価を実施した。また、2次主冷却系プラグング計内部合流部及び2次補助冷却系プラグング計内部合流部については、非破壊検査として外観目視検査、浸透探傷試験及び放射線透過試験も実施し、問題ないことを確認した。

評価結果は、以下のとおりである。

- (1) サーマルストライピングによって発生する最大温度ゆらぎは、常に内部合流部中心から下流側10mmの位置であった。
- (2) サーマルストライピングによる最大温度ゆらぎ幅は、配管外面で約33℃であった。また、温度ゆらぎの支配的周波数は、0.04Hz、0.09Hzであった。
- (3) FINASによる熱伝導解析の結果、ゆらぎの支配的周波数0.04Hz、0.09Hzでは、配管内面及び配管外面の温度ゆらぎに時間的遅れがほとんどなく、配管板厚方向に大きな温度分布が生じないことを確認した。
- (4) サーマルストライピング測定結果とFINASによる熱伝導解析結果を用いて、配管内面温度ゆらぎと配管板厚方向に発生する応力を評価した。その結果、配管内面温度ゆらぎ幅は、ほぼ外面温度ゆらぎ幅と同一で、発生応力は、2次主冷却系及び2次補助冷却系プラグング計内部合流部の材料であるSUS304の設計疲労限を十分下回る小さな応力であることを確認した。

10. 謝 意

2次補助冷却系プラグング計のサーマルストライピング評価にあたっては、熱電対取り付け位置決定のため、内部合流部付近の熱流動解析を熱流体技術開発室の村松壽晴主任研究員に実施して頂き、測定した温度ゆらぎの周波数解析を原子力システム（株）の大山幸男氏に実施して頂いた。また、温度ゆらぎ測定用計測器の借用、並びにその取扱い等において原子炉工学室の大木義久氏に多大なる協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

11. 参考文献

- (1) K.E.Kasza, W.S.Colwell : Characterization of the Temperature Fluctuations Generated in a Thermal Mixing Tee (Sodium versus Water Behavior), 2nd Int. Topical Meeting on Nuclear Thermalhydraulics, 1983
- (2) T.M.Kuzay, K.E.Kasza : Thermal Striping Downstream of a Horizontal Elbow under Thermally Stratified Transient Flow Conditions, CONF-841105-10 DE84 014687, 1984
- (3) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編：解説 原子力設備の技術基準＜1994＞，電力新報社，1994