

サーマルストライピングによる構造物の周波数応答ナトリウム実験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年3月

(株) 日立製作所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

1 9 9 9 年 3 月

サーマルストライピングによる構造物の周波数応答ナトリウム実験

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

山形 保男* 小澤 一雅* 床井 博見*

森田 博**

要 旨

サーマルストライピングによる構造物の周波数応答ナトリウム実験において、温度振動周波数を制御し、低温及び高温のナトリウム噴流をナトリウム中に設置した構造材表面に交互に流出させて、噴流場でのナトリウムと構造材内部それぞれの温度を同時計測し、熱サイクルの違いによる温度振幅挙動を明らかにした。

- (1) 高温用と低温用のナトリウムバルブを交互切換えによって、0.01Hz～0.2Hz、温度差240℃の高低温ナトリウム交互噴流の生成を実証した。
- (2) ナトリウム中の温度振幅の変動とゆらぎは、周波数を小さくすると減少する。
- (3) 構造材内部の温度振幅は、ナトリウム中に比べ極端に減衰する。
- (4) 構造材内部の温度振幅は、低周波数ほど大きくなり周波数に反比例する。
- (5) 構造材内部の温度振幅の変動は、周波数が小さい程少ない。
- (6) 微細な温度ゆらぎは、高周波数側では大きいが、構造材表面近傍に限定される。
- (7) 微細な温度ゆらぎは、低周波数側では小さいが、構造材内部まで浸透する。

本報告書は、(株)日立製作所が核燃料サイクル開発機構殿との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号: 10C3721

サイクル機構担当部: 大洗工学センター システム技術開発部

* :電力・電機開発研究所 原子力第1部

** :原子力事業部 日立生産本部 燃料サイクル部

March, 1999

Frequency Response Experiments for a Fluid and Structure Interaction System
Due to Thermal Striping in Sodium

Morio Yamagata*, Kazumasa Ozawa*, Hiromi Tokoi* and Hiroshi Morita**

Abstract

Thermal striping phenomena induced by the alternate flows of cold and hot sodium impinging against a horizontal test piece surface were investigated. The temperatures of sodium and structure material were measured simultaneously using thermocouples located various positions. From the present experiments, the following results have been obtained.

- (1) The alternate flows of cold and hot sodium with the frequency from 0.01Hz to 0.2Hz and the temperature difference of 240°C were composed using the opening and closing operations of a cold and a hot sodium valve alternately.
- (2) The change and fluctuation of temperature amplitude in sodium decreases with decreasing of frequency component.
- (3) Amplitude component of temperature vibration decreased extremely in the structure material inside of the test piece than sodium.
- (4) Amplitude component of temperature vibration in the structure material increases in inverse proportion to decreasing of frequency component.
- (5) Amplitude component change of temperature vibration in the structure material decreases with decreasing of frequency component.
- (6) Fine fluctuations of temperature vibration in the structure material increases with increasing of frequency component, but it was limited near the surface of material.
- (7) Fine fluctuations of temperature vibration in the structure material decreases with decreasing of frequency component, but it was penetrated into the deep inner part of the material.

Work performed by Hitachi, Ltd. under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute
JNC Liaison: Structure and Material Research Group, System Technology Division, Oarai Engineering
Center

Contract No. : 10C3721

* : Hitachi, Ltd. Power & Industrial Systems R&D Laboratory Advanced Reactor Components Group

** : Hitachi, Ltd. Power & Industrial System

目 次

第1章 緒 言	1
第2章 実験方法	2
2. 1 試験体	2
2. 2 実験装置	2
2. 3 計測システム	3
2. 4 実験条件	4
2. 5 実験手順	4
第3章 実験結果	31
第4章 結 言	58
参考文献	59
謝辞	60

[付録]

付録A：初期及び終期の各周波数における高低温Na交互噴流でのNaと 材料の温度ゆらぎ	63
付録B：実験中のNa温度モニタ	85
付録C：実験中のNa流量モニタ	91
付録D：熱電対付試験体製作図	95

List of Figures and Tables

Fig.2-1 Thermocouples Location of test piece	7
Fig.2-2 Thermocouples attachment on test piece	9
Fig.2-3 Appearance of test piece	11
Fig.2-4 Schematic diagram of sodium test loop	13
Fig.2-5 Details of test section	15
Fig.2-6 Appearance of test section	17
Fig.2-7 Frequency controller and temperature regulators	19
Fig.2-8 Appearance of test section	21
Fig.2-9 Appearance of nozzle and test piece	23
Fig.2-10 Data acquisition system	25
Fig.2-11 Data acquisition device	27
Table 2-1. Experimental condition	29
Table 2-2. Time interval of valve operating hot and cold sodium select valves	29
Table 2-3. Sodium temperature difference due to vibration of sodium temperature	29
Table 2-4. Temperature correction of thermocouples	30
Fig.3-1 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.2Hz	33
Fig.3-2 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.1Hz	35
Fig.3-3 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.04Hz	37
Fig.3-4 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.02Hz	39
Fig.3-5 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.01Hz	41
Fig.3-6 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.2Hz	43
Fig.3-7 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.1Hz	45
Fig.3-8 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.04Hz	47
Fig.3-9 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.02Hz	49

Fig.3-10 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.01Hz	51
Fig.3-11 Max. and min. temperature distributions in material at different cycle rates	53
Fig.3-12 Effect of the frequency of sodium temperature vibration on the amplitude of temperature vibration in material	55
Table 3-1. Results of measuring of temperature vibration in sodium and material at different frequency	57

第1章 緒言

高速炉の炉心出口近傍や配管合流部など、乱流挙動によって高温と低温の冷却材が混合する多くの領域では、その混合過程で不規則な冷却材の温度ゆらぎが恒常に発生する。この温度ゆらぎを伴った冷却材が、炉内に位置する各種の構造物の表面近傍を通過すると、冷却材の不規則な温度ゆらぎが構造材中に伝搬し、その材料は高サイクル熱疲労（サーマルストライピング）を受ける。

このような流体一構造物間での温度に関する周波数応答挙動は、流体及び構造物に係わる数多くのパラメータの影響を受けることから、原子炉機器の設計合理化を達成するためには、影響因子を機構論的に分離して解析・評価することが必要となる¹⁾。

これまで、この観点から、高温及び低温の衝突平行噴流場において流体一構造物間の非定常熱的応答に関する基礎ナトリウム実験を実施するとともに、サーマルストライピング解析評価システムによる解析を行って、当該評価システムの妥当性を確認してきた²⁾。

本報での試験は、温度振幅と周波数の制御が行えるように試験装置を改造し、ナトリウム中に置かれた材料表面に対して、各周波数ともナトリウム流量を一定にして高温と低温のナトリウム噴流を1つのノズルから交互に流出させ、流体中及び構造材中の温度振幅データを採取し、周波数応答特性を定量的に把握するものである。

第2章 実験方法

周波数応答ナトリウム実験では、ナトリウム中に設置された構造材表面に対し、各周波数ともナトリウム流量を一定にして一個のノズルから高温と低温のナトリウム噴流を交互に流出させ、その噴流場での構造材内部と流体中の温度振幅データを取得した。本章では、実験で用いた試験ループ、試験体及び計測システムなど実験装置と実験方法について述べる。

2. 1 試験体

ナトリウム実験では、試験容器内のナトリウム中に設置した試験片の表面に向って、一個の固定ノズルから高温と低温のナトリウム噴流を交互に流出させて、試験体に取付けた熱電対により温度ゆらぎデータを取得する。今回、構造材内部の温度を測定するため、試験体中心の同心円位置(10mm ϕ)に熱電対を多数取付けた。試験体の熱電対配置と熱電対取付状態及び製作後の試験体写真を Fig.2-1～2-3 にそれぞれ示す。

熱電対は、熱電対先端から熱接点までの距離を特定するため、先端部を X 線撮影した。X 線撮影の結果から、熱電対先端から熱接点までの距離が所定の長さに比べ長いものについては熱電対先端をエメリーペーパーで削って長さを調整し、再度 X 線撮影で確認し、所定の長さのものを試験体に採用した。当然、熱電対先端から熱接点までの距離が短いものについては使用しなかった。

試験体(316FR 鋼)は、表面を切削加工して所定の形状 (50[□] × 厚さ 10mm)に調整した。熱電対挿入用の孔は、流体温度測定用(Fig.2-1 の a～c)が板厚方向、構造材内部温度測定用(Fig.2-1 の e～i)は板側部より面内方向に放電加工で所定の深さに加工した。また、材料表面より深さ 0.5mm の熱電対用の孔(Fig.2-1 の d)は、裏面から板厚方向に斜め 45° で試験体中心の同心円位置(10mm ϕ)まで切削した。

熱電対はシース外径 0.5mm の接地型 CA 熱電対を用いた。流体中の熱電対は試験体中心から同心円位置に、構造材表面から 1.5mm 高さ(計測チャンネル ch1, Fig.2-1 の a)及び 0.1mm 高さ(計測チャンネル ch2, Fig.2-1 の b)の流体内、表面(計測チャンネル ch3, Fig.2-1 の c)、表面より深さ 0.5mm(計測チャンネル ch4, Fig.2-1 の d)、同 1.3mm(計測チャンネル ch5, Fig.2-1 の e)、同 2.3mm(計測チャンネル ch6, Fig.2-1 の f)、同 3.3mm(計測チャンネル ch7, Fig.2-1 の g)、同 5.3mm(計測チャンネル ch8, Fig.2-1 の h)、同 8.3mm(計測チャンネル ch9, Fig.2-1 の i)の構造材内に配置した。また、試験体の裏面の中心位置にも同熱電対(計測チャンネル ch10, Fig.2-1 の j)を取付け、温度を監視した。

なお、シース外径 0.5mm の接地型熱電対の 90% 応答時間は、約 50ms である。

2. 2 実験装置

装置全体の構成を Fig.2-4 に示す。本実験装置は純度管理した高温と低温ナトリウムを試

試験容器内に設けた2個のナトリウム切換弁を交互に開閉させ、一個のノズルから試験体に流出させる構造とした。

ナトリウムループは主に貯蔵タンク、コールドトラップ、電磁ポンプ、流量計および試験容器からなる。コールドトラップはナトリウム中不純物を捕獲するメッシュを内蔵している。高温及び低温ナトリウムが流れる配管系にはそれぞれ加熱器及び冷却器が取り付けられ、電磁流量計と流調弁によりナトリウムを所定の流量に設定することができる。

試験容器の詳細をFig.2-5、その外観写真をFig.2-6、サイクル信号発生器及び温度調整器の写真をFig.2-7に示す。ナトリウム容器では、内径6mmの一個のノズルから高温と低温のナトリウム噴流を熱サイクル発生装置を用いて交互に発生させ、かつ、一定流量を維持して試験体表面に垂直に流出させる構造とした。熱サイクル発生装置は、試験容器内に設けた低温及び高温ナトリウム切換弁を交互に開閉させることで、ノズルへの低温と高温のナトリウムの流れが流动/停止を繰返すことが可能となる。切換弁の開閉は、試験容器外に設けたエアシリンダをタイマー信号により交互に上下動させて行う。また、片側の弁が開でノズルへ向う流れを形成した状態では、他方の弁は当然閉になる。ナトリウムループは、一個の電磁ポンプで低温側と高温側のナトリウム循環を形成しており、片側の弁が閉状態で完全に流れを停止すると、開側のノズルへ向う流れに流动変動を生じ、ノズルからの流出流量を維持できない。さらに、閉側の循環ラインのナトリウム温度を一定に保つことが困難となる。このため、切換弁構造を三方弁形状にし、出口をノズル側と試験容器内ナトリウム中(バイパスライン)に流出するようにした。これにより、低温と高温のナトリウムは、各切換弁開時にはノズル側、閉時にはバイパスラインを常に循環しており、弁を切換えるてもノズルへ安定した流量を供給でき、それぞれの温度を維持できる。

ナトリウム液面は、試験体表面より上側15.5mmの位置に設定し、試験体の内部温度が平均温度を保持するようにした。ノズル出口(ch12, TC7)の先端はナトリウム液面より10mmの深さ位置とした。また、Fig.2-5の試験容器に示したように、ノズル先端より上流側24mmのノズル内に熱電対を取り付け、ノズルから流出するナトリウム温度を計測し、熱サイクルが一定となるよう制御した。Fig.2-8に試験部全体写真、Fig.2-9に試験部詳細写真を示す。

本実験では、試験体とノズルの位置関係(距離)を精度よく保つことが必要である。このため、試験体は試験体支持板の上に、ノズル出口の中心位置に対向するように固定した。さらに、容器の上部フランジには、試験体とノズル出口との距離を手動で調整できる上下駆動機構を設け、高温と低温ナトリウムによって誘起される試験体表面の温度差を任意に可変できるようにした。これにより、熱サイクル0.2Hzにおけるノズル出口の温度差240°C、構造材表面での温度差155°Cを設定した。この時の試験体とノズル間の距離は5.5mmにした。なお、ノズルは、フランジ下面に取付けた支持枠により所定の位置に設置した。

2. 3 計測システム

サーマルストライピングによる構造物の周波数応答ナトリウム実験に使用したデータ収録処理システムを Fig.2-10, データ収録装置写真を Fig.2-11 に示す。

本システムはデータ収録及び FFT 演算処理機能を備えた HIOKI 製 FFT アナライザ(高速波形記録計 8825), データ変換及び計算処理の日立製 FLORA パソコン(5DS01-A80A5)及び図形を修正する Macintosh パソコン(Quadra 840AV)で構成している。

試験体は極細径の熱電対を 9 本, 反対の面には, 試験体表面温度モニタとして熱電対 1 本が配置してある。さらに, ノズル出口ナトリウム温度及びノズル入口の低温/高温のナトリウム温度を実験時の温度振幅データと一緒にアナライザで収録するようにした。熱電対信号は 13ch の温度ユニット, 弁の開閉信号はアナログユニットを介してディジタル変換されアナライザに収録される。また, アナライザの測定モードをレコーダモードに設定することにより温度を常時監視できる。

2. 4 実験条件

実験条件を Table 2-1 に示す。ナトリウムの純化運転後, サーマルストライピング実験を実施した。実験条件は, 実験順序を高周波数側からとし, 各熱サイクルのノズル出口の温度差は 240°C 一定とした。試験体表面の温度差は 0.2Hz のみ 155°C とした。また, 0.1, 0.04, 0.02 及び 0.01Hz における試験体表面の温度差は特定せず, 0.2Hz で設定したノズル先端と試験体表面の距離(5.5mm)のみを一定として実施した。Na 流量は, 各熱サイクルとも 1.2 l/min(約 0.7m/s)一定で実施した。

2. 5 実験手順

(1) 热サイクル発生装置の機能確認

本実験に先立ち, 装置の機能を把握するため各熱サイクルにおける周波数制御とノズル出口での温度差を確認した。周波数制御確認結果を Table 2-2 に示す。加熱器/冷却器のナトリウム温度を 400/200°C, ナトリウム流量を 1 l/min(約 0.6m/s)に設定し, 热サイクル制御信号(タイマ-)による切換え弁の開閉動作時間とノズル出口の温度振幅波形を同時測定し, 実際に制御されている周波数を確認した。その結果, 誤差時間は低周波数(0.01Hz)以外は, 0.2 秒程度弁の開閉動作が遅れることが分かった。切換弁の開閉機構は, 一定圧のガスを加圧した電磁弁をタイマ-信号により開閉させることで, エアシリンダ側にガスの流動/停止(加圧/減圧)が生じる。これによりエアシリンダーの軸と一体にした弁棒が上下作動し, 切換弁が開閉する。また, ガス圧は弁棒が上下作動できる程度の低圧に抑え, 弁開閉時の弁棒と弁座の衝撃を緩和するようにした。0.01Hz 以外の開閉動作の遅れは, 上下動の可能な下限界圧力を低く抑えたため, 弁切換時のガスラインが下限界圧力を下回るのに時間を要し, これが弁の開閉動作に影響して生じるものと思われる。

各熱サイクルでの温度差確認結果を Table 2-3 に示す。ノズル出口の温度差 250~300°C を得るために, 加熱器/冷却器のナトリウム温度を 600/185°C 一定とし, ナトリウム流量を

1(約0.6m/s), 1.2(約0.7m/s)及び1.3 l/min(約0.8m/s)に設定してノズル出口における各熱サイクルの温度差を確認した。その結果、高周波数(0.2Hz)における温度差は、ナトリウム流量1 l/min/206.7°C, 1.2 l/min/241.25°C及び1.3 l/min/229.25°Cであった。従って、0.2Hzの最高周波数において最も温度差を高く取れるのは、流量1.2 l/minの条件である。

この理由は以下のように考えられる。

試験ループの加熱器、冷却器共に能力に限界があり、1 l/minを越えると所望の高・低温ナトリウム温度を実現することが不可能となる。すなわち、ナトリウム流速が速いほど、加熱器での滞在時間が短くなるため、高温ナトリウムの温度が低く抑えられ、冷却器でも同様に低温ナトリウム温度が高くなってしまう。一方、流速が遅いと高温と低温のナトリウムが接触するノズル上流側での高温ロスが大きくなり、結果的に温度振幅が小さくなる。

ナトリウム流量を1.2 l/minで一定とした時、各熱サイクルでの温度振幅の下限温度/上限温度は0.2Hzが260/501.25°C, 0.1Hzが250.5/522.5°C, 0.04Hzが242/533.25°C, 0.02Hzが238.25/534°C及び0.01Hzが232.5/538°Cであった。これらの結果から、周波数の最も低い0.01Hzでのノズル出口の温度振幅は305.5°Cと最も大きい値を示し、周波数の最も高い0.2Hzでは241.25°Cと最も小さい値となる。温度振幅は周波数に反比例して、周波数が高いと小さく、低いと大きくなることがわかる。以上により、本実験のナトリウム流量は温度差が最も高い値を示した1.2 l/min(約0.7m/s)とした。

(2) 温度計測の校正

データの補正值をTable 2-4に示す。実験前に、アナライザの各チャンネル(以下、chと略記)間の校正と試験部の各熱電対間の誤差補正值を算出した。アナライザのch間の校正是、HIOKI製シグナルソース(7011)より300°C及び500°C相当の基準電圧を各chに入力し、それを10秒間5回計測した。その後、各ch毎の平均を求め、それぞれの全ch間の平均値を算出した。さらに、基準電圧入力値と算出した平均値がズレた分は、300°Cと500°Cの2点間の直線上からスパンとシフト量を求め、ここで得られたスパンとシフト量を校正值としてアナライザの各chに入力した。

試験部10本の熱電対間の温度誤差特性は、流動中のナトリウム温度300°C及び500°Cをそれぞれ5回測定した後、毎回の偏差の平均値(ばらつき温度)を算出した。その時のそれぞれのノズル出口温度を基準温度とし、上記アナライザの校正法と同様に2点間からスパンとシフト量を求めた。これを熱電対の補正值とし、実験終了後、アナライザでch間の校正を実施したデータをパソコンに入力し、EXCEL Fileで処理した。

(3) ナトリウムの純化

サーマルストライピング実験に先立ち、装置内のナトリウムを純化した。純化時、コールドトラップのメッシュ部の最低温度を120°Cに制御した。このときのナトリウム中酸素濃度はEichelbergerの酸素溶解度式から1.0ppmとなる。

(4) 温度データサンプリング

各熱サイクルの温度差の平均温度(振幅の中心温度)の差は5°C以内に調整し、試験ループ

が定常の温度状態になったことを確認後、前記の計測システムにより、アナライザの測定モードをメモリーモードにして測定した。熱サイクルが 0.2Hz ではデータサンプリング速度が 20Hz で計測時間を 50s とした。0.1Hz ではサンプリング速度 10Hz(計測時間 100s), 0.04Hz でサンプリング速度 4Hz(計測時間 250s), 0.02Hz でサンプリング速度 2Hz(計測時間 500s)及び 0.01Hz でサンプリング速度 1Hz(計測時間 1000s)で温度データを採取した。

採取したデータは温度波形を確認後、フロッピィディスク(以下 F/D)1 にファイルした。実験終了後、各 ch の校正值を入力したアナライザに、再度 F/D1 をロードして各 ch の温度補正を行い、その補正後のデータを F/D2 にファイルした。次に、パソコンにより F/D2 の温度振幅データの File Format を DOS/V+Windows に変換後、Microsoft EXCEL File 上で各熱電対の補正をした。この後、同 File で図を作成し、F/D3 にファイルした。

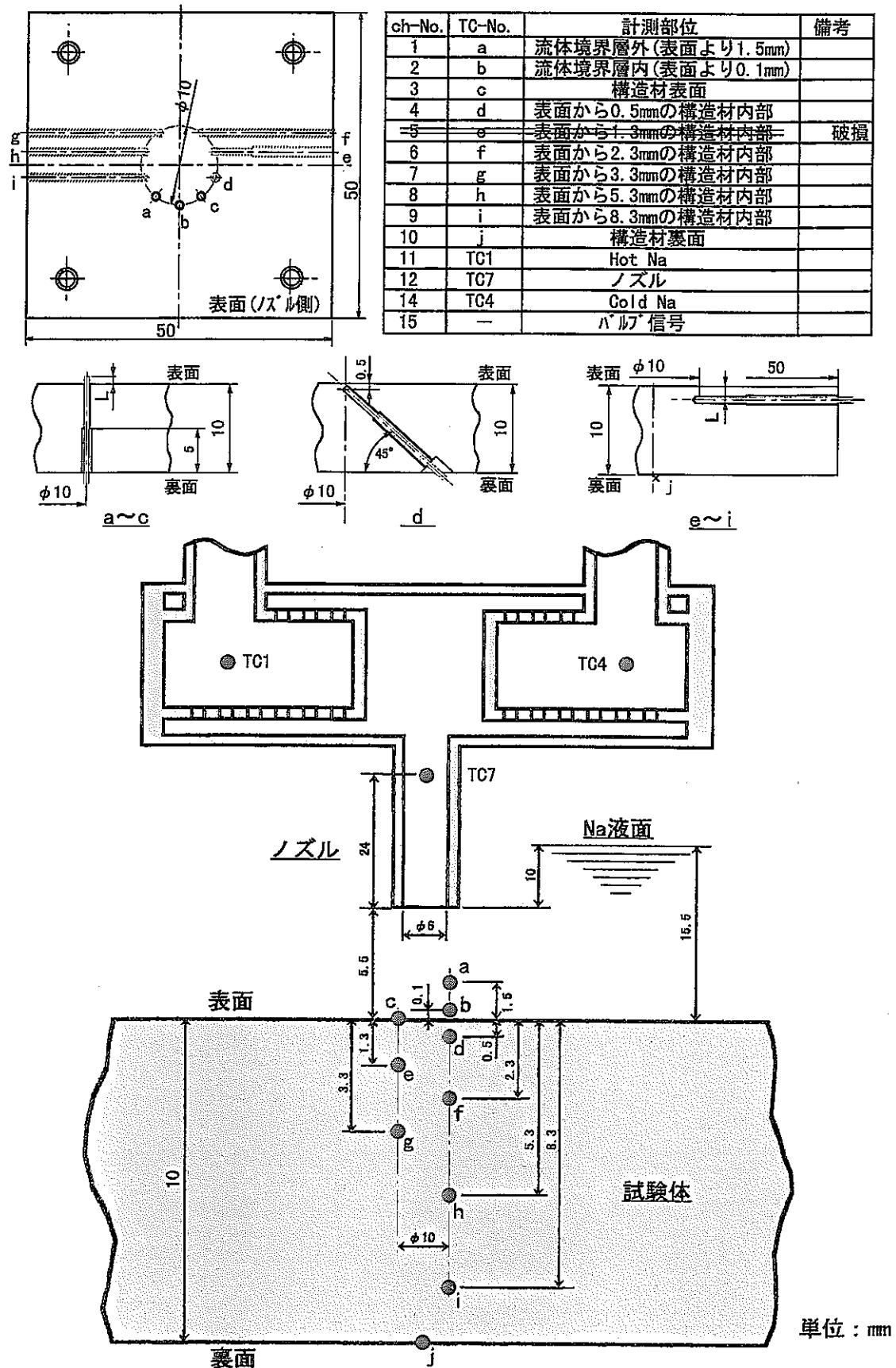


Fig.2-1 Thermocouples location of test pieces

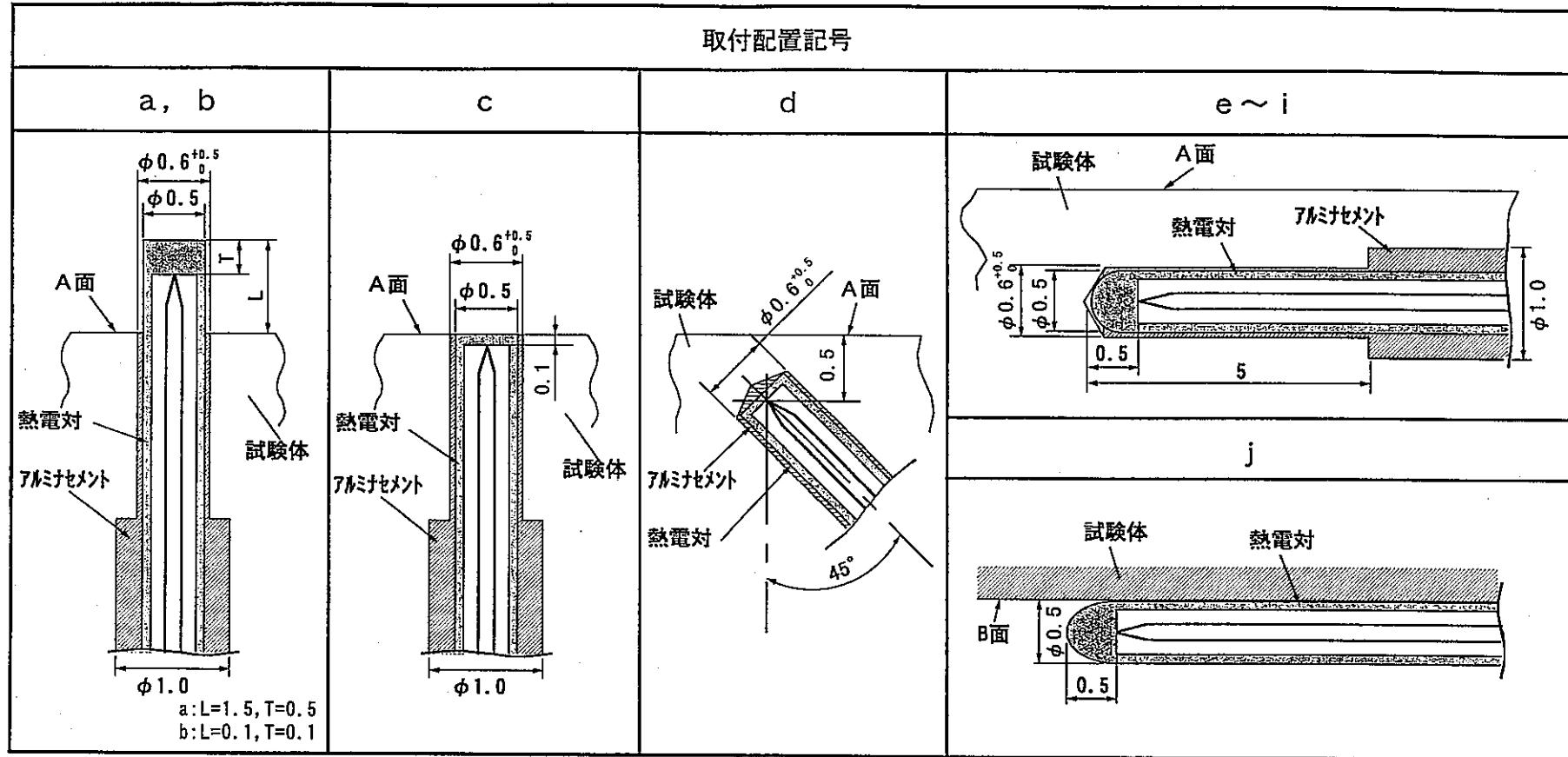
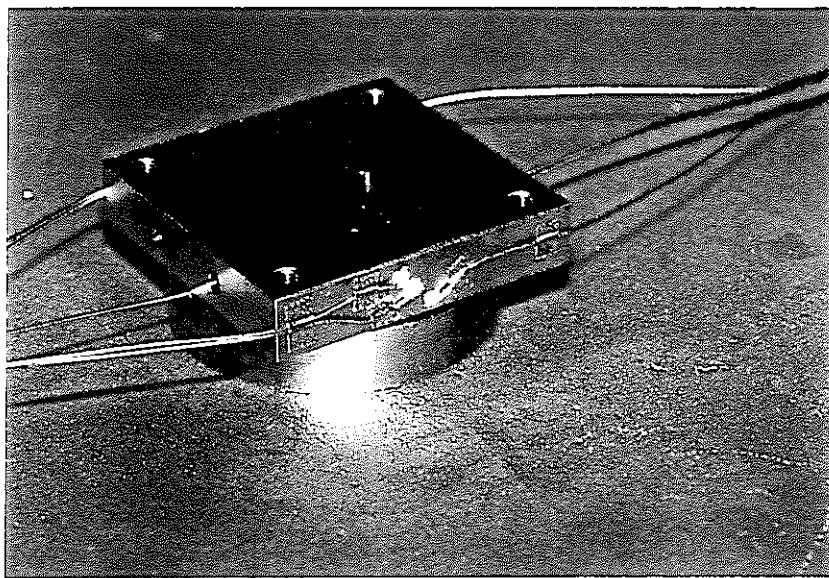
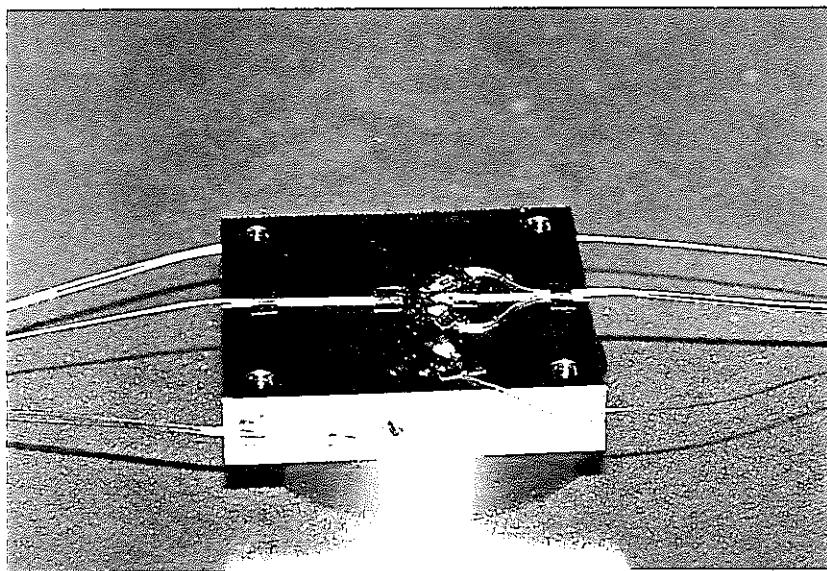


Fig.2-2 Thermocouples attachment on test piece



(a) 表面



(b) 裏面

形状 : 50[□] × 厚さ 10 mm

Fig.2-3 Appearance of test piece

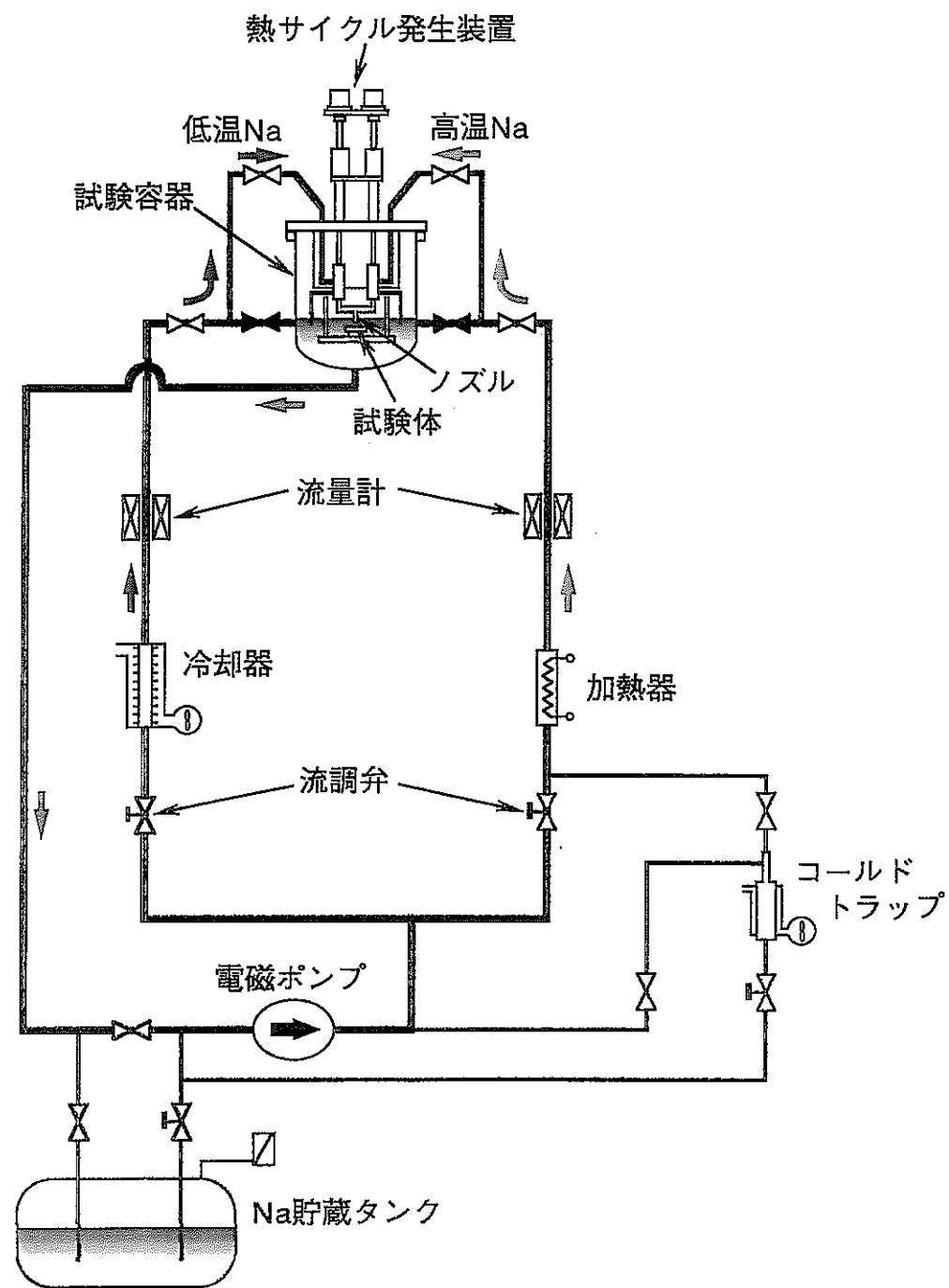


Fig.2-4 Schematic diagram of sodium test loop

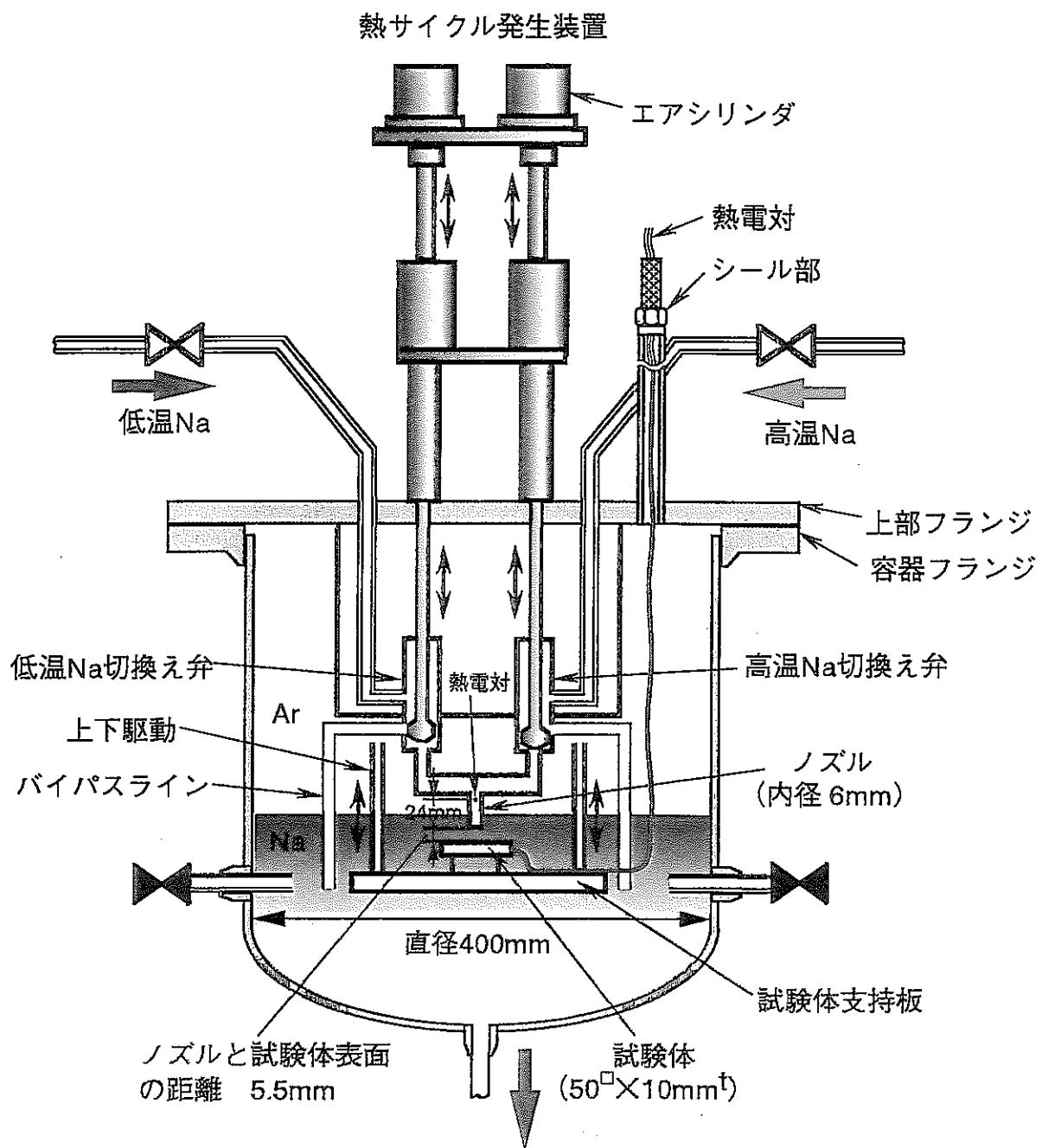


Fig.2-5 Details of test section

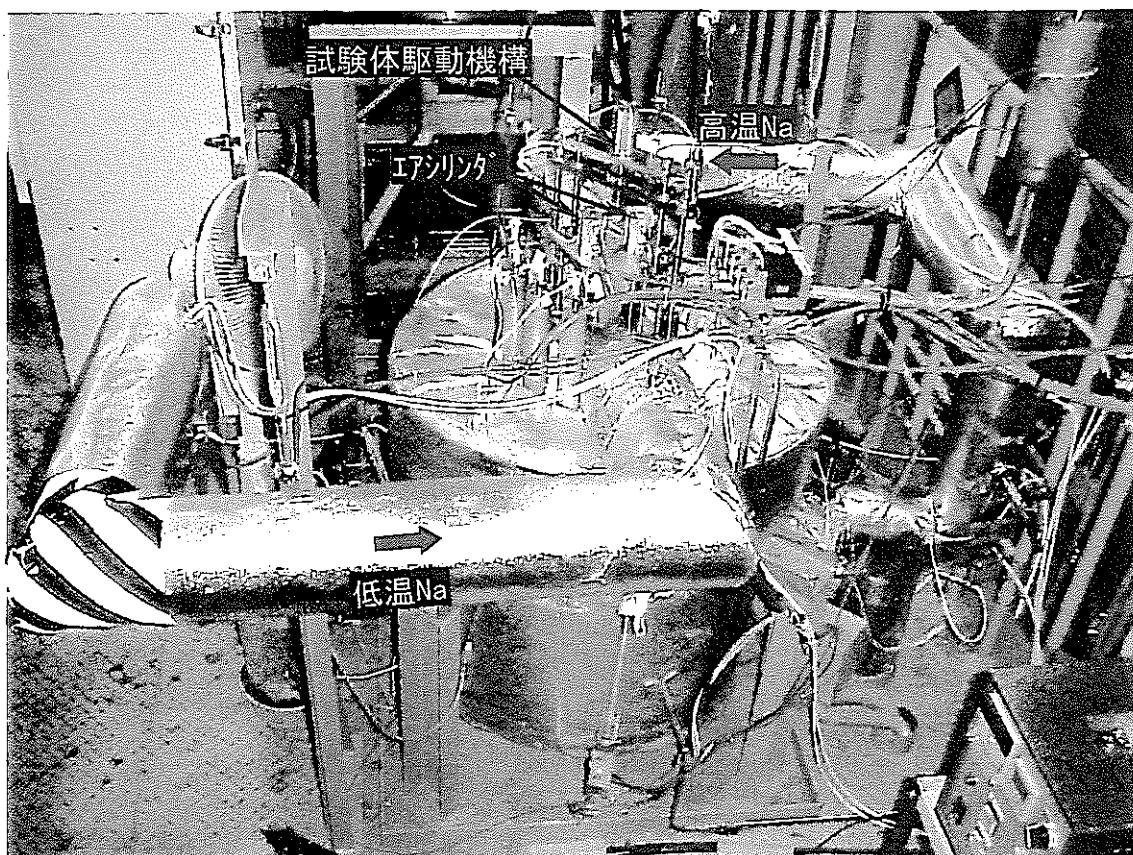


Fig.2-6 Appearance of test section



Fig.2-7 Frequency controller and temperature regulators

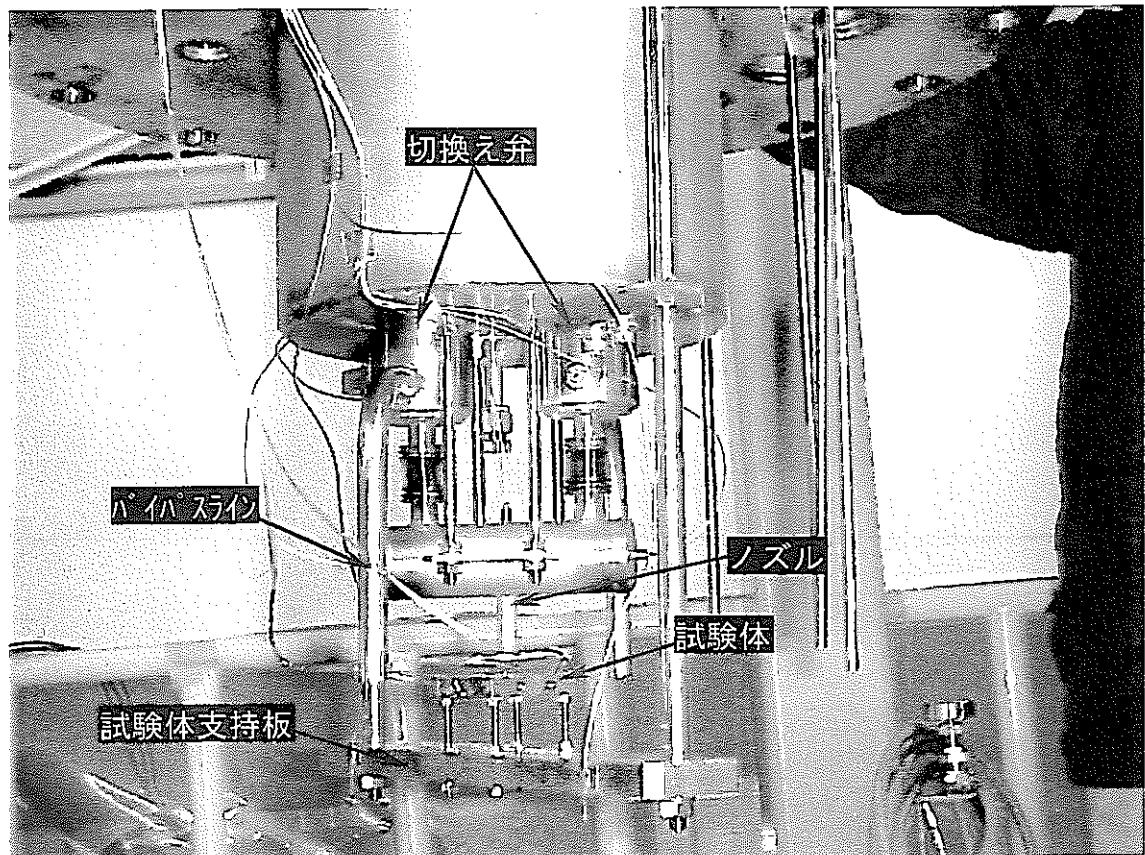


Fig.2-8 Appearance of test section

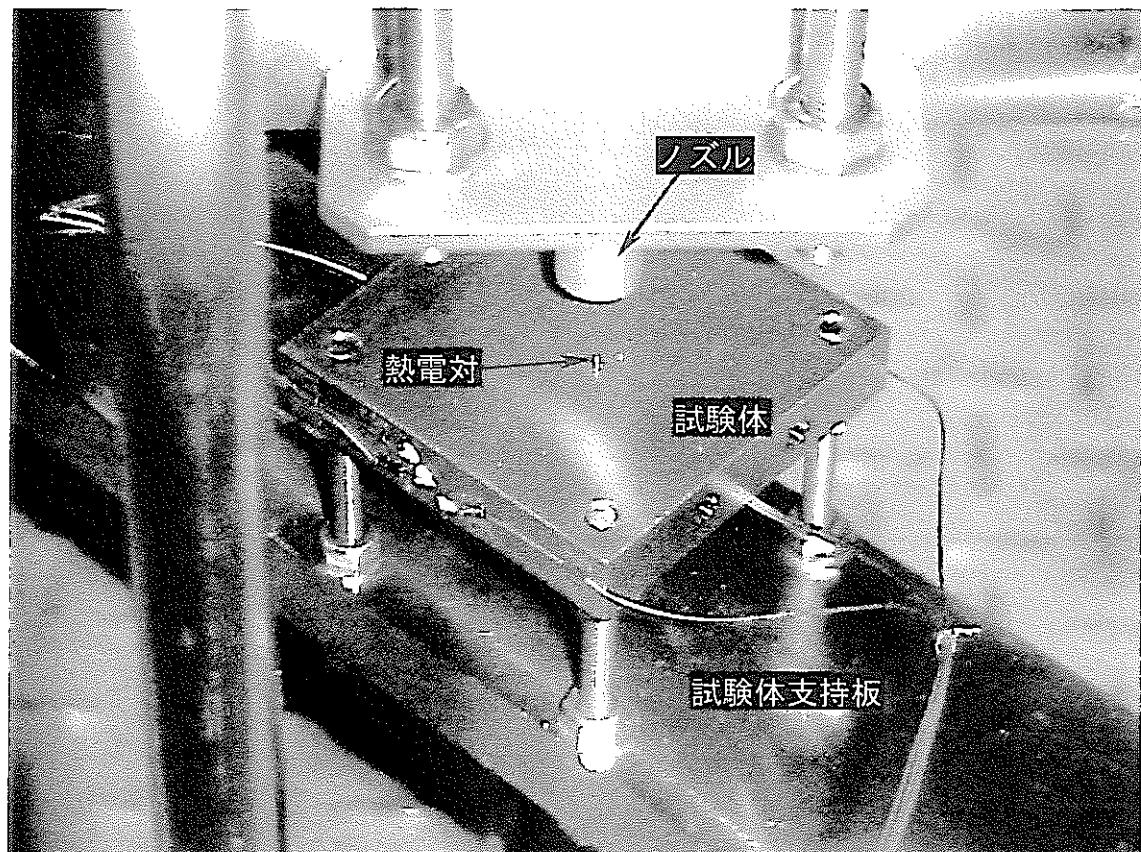


Fig.2-9 Appearance of nozzle and test piece

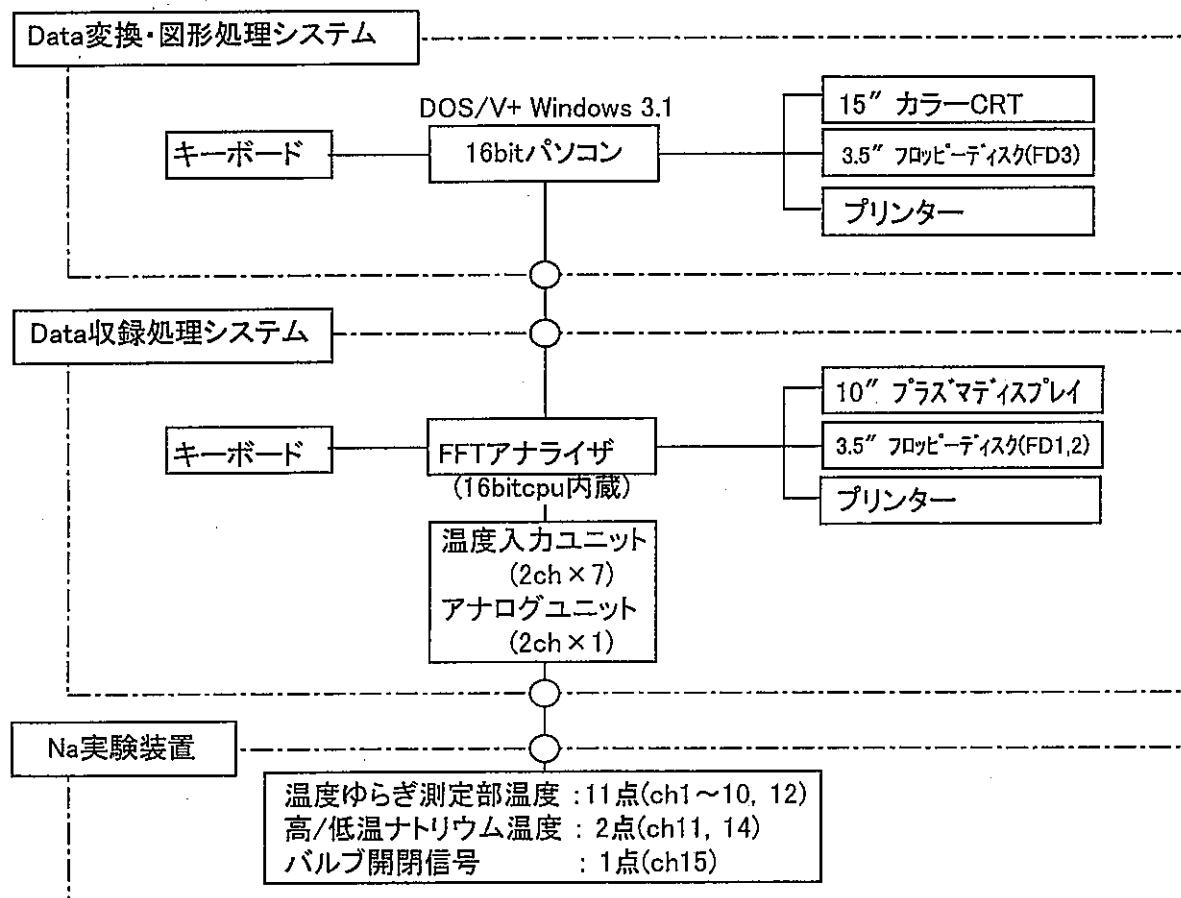


Fig.2-10 Data acquisition system

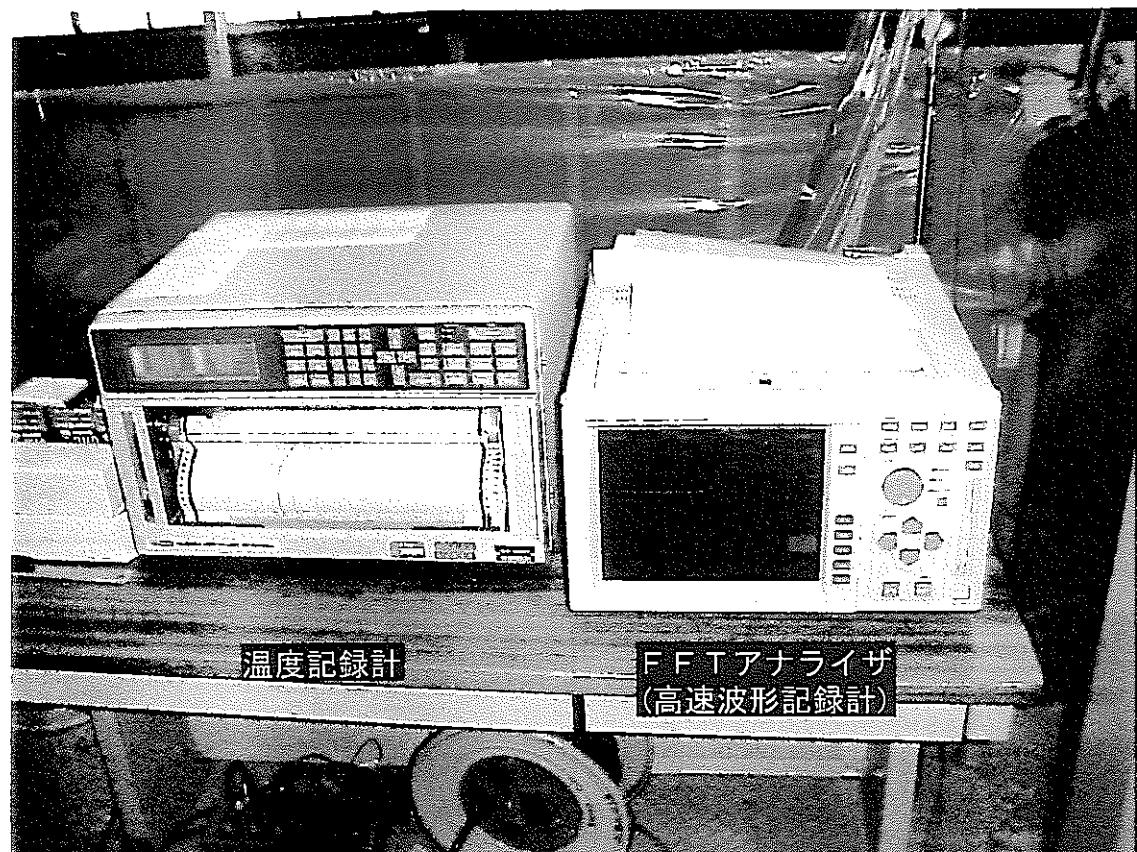


Fig.2-11 Data acquisition device

Table 2-1 Experimental condition

	熱サイクル (Hz)				
	0.2	0.1	0.04	0.02	0.01
試験体表面温度 ΔT (°C)	155	155+ α	155+ α	155+ α	155+ α
ノズル出口温度 ΔT (°C)		240			
Na流量 (l/min)			1.2		
試験体とノズルの距離 (mm)			5.5		

Table 2-2 Time interval of valve operating hot and cold sodium select valves

熱サイクル(Hz)	初期設定値(s)	ノズル出口(s)	誤差時間(s)	確認後の設定値(s)
0.2 (5s)	2.5	2.7	+0.2	2.3
0.1 (10s)	5.0	5.2	+0.2	4.8
0.04 (25s)	12.5	12.7	+0.2	12.3
0.02 (50s)	25.0	25.25	+0.25	24.75
0.01(100s)	50.0	50.0	0	0

Table 2-3 Sodium temperature difference due to vibration of sodium temperature

熱サイクル(Hz)	ノズル出口温度 ΔT (°C)			備 考
	1 l/min時	1.2 l/min時	1.3 l/min時	
0.2 (5s)	206.7 (273.25/480.0)	241.25 (260.0/501.25)	229.25 (263.5/492.75)	()内： 低温min./高温max.
0.1 (10s)	252.0 (252.5/504.5)	272.0 (250.5/522.5)	—	
0.04 (25s)	283.25 (240.75/524.0)	291.25 (242.0/533.25)	—	
0.02 (50s)	296.25 (232.25/528.5)	298.25 (238.25/534.0)	—	
0.01(100s)	310.75 (222.75/533.5)	305.5 (232.5/538.0)	—	

Table 2-4 Temperature correction of thermocouples

ch-No.	アナライザの校正值		T/C-No.	計測部位	各熱電対の補正值	
	スパン	シフト(°C)			スパン	シフト(°C)
1	0.9994	-1.8929	a	流体境界層外 (表面から高さ1.5mm)	0.9991	-0.8300
2	0.9999	-1.0368	b	流体境界層内 (表面から高さ0.1mm)	0.9974	-0.5255
3	0.9996	-2.0401	c	材料表面	0.9963	-0.0563
4	1.0002	-1.3173	d	材料内部 (表面より深さ0.5mm)	0.9980	-0.2347
5	0.9998	-1.9346	e	材料内部 (表面より深さ1.3mm)	0.9992	-0.7806
6	1.0001	-1.1971	f	材料内部 (表面より深さ2.3mm)	0.9984	-0.4764
7	1.0005	-2.1101	g	材料内部 (表面より深さ3.3mm)	1.0011	-1.2169
8	1.0010	-1.3644	h	材料内部 (表面より深さ5.3mm)	1.0021	-1.4236
9	0.9995	-1.6023	i	材料内部 (表面より深さ8.3mm)	1.0031	-1.9518
10	0.9998	-1.0438	j	材料裏面	1.0046	-2.3689
11	1.0010	-2.0822	T/C1	高温側ノズル内	0.9982	0.5082
12	1.0000	-1.5031	T/C7	ノズル出口*	1.0000	0.0000
14	1.0009	-1.9046	T/C4	低温側ノズル内	1.0141	-3.2347

※ 基準熱電対

第3章 実験結果

(1) 交互噴流によるナトリウム温度振幅

確認試験結果を基に、ナトリウム流量を 1.2 l/min(約 0.7m/s)一定、ノズル出口の温度差は 240(±2)℃一定、及びその温度差の中心温度の誤差を 5℃以内、また構造材表面の温度差は 0.2Hz のみ 155(±2)℃として熱サイクル 0.2Hz, 0.1Hz, 0.04Hz, 0.02Hz 及び 0.01Hz における周波数応答ナトリウム実験を実施した。

各熱サイクルの温度差を評価するのに先立ち、各周波数の温度差特性を確認するため、長時間計測し、全計測データ(0.2Hz:300 秒間, 0.1Hz:600 秒間, 0.04Hz:1500 秒間, 0.02Hz:3000 秒間, 0.01Hz:4000 秒間)の計測初期、中期及び終期の温度差(振幅波形)を調べた。中期は本文中に、初期と終期は付録の Appendix A-1~10 に示す。この結果から、各周波数での計測データは、初期から終期までほぼ一定した温度振幅が得られていることを確認した。

(2) ナトリウムと構造材中の温度ゆらぎ

本報告は各熱サイクルの典型例として計測中期(0.2Hz : 50 秒間, 0.1Hz : 100 秒間, 0.04Hz : 250 秒間, 0.02Hz : 500 秒間, 0.01Hz : 1000 秒間)を用いて実験結果を説明する。

各熱サイクルにおけるナトリウム中と構造材中の板厚方向温度挙動(10 波)を Fig.3-1~5 に示す。流体側及び構造材内部の各周波数における温度振幅は、ch1(流体境界層外, 表面から高さ 1.5mm, a)が最も大きく、次に ch2(流体境界層内, 表面から高さ 0.1mm, b), ch3(材料表面, c)であり、ch4(表面より深さ 0.5mm, d)以下構造材内部では深くなるに従って温度振幅は減衰している。また、ch1, ch2, ch3 及び ch4 の温度振幅は高周波数である 0.2Hz が最も不安定で、低周波数になるに従って安定する傾向を示し、0.01Hz では最も安定している。

各熱サイクルにおけるナトリウム中と構造材中の板厚方向の温度挙動を拡大(2 波)して Fig.3-6~3-10 に示す。各周波数において、ノズル出口温度(ch12, TC7)は、弁切換後から温度振幅の上限及び下限温度に到達するまでに不規則なゆらぎが発生している。このゆらぎは、弁が切換えられた後、ノズル上流の高温配管と低温配管の合流部分で、一部切換え前の温度のナトリウムが随伴されるためと考えられる。0.2Hz 時が最も大きくゆらいでおり、低周波数になるに従ってこのゆらぎは小さくなる。一方、構造材内部での温度ゆらぎは、ナトリウム中に比べると極めて小さい。詳細に Fig.3-6~3-10 を観察すると、構造材中の不規則な温度ゆらぎは、0.2Hz 及び 0.1Hz では ch4(表面より深さ 0.5mm, d), 0.04Hz では ch6(表面より深さ 2.3mm, f), 0.02Hz では ch7(表面より深さ 3.3mm, g) にまで温度ゆらぎが及ぶ。また、低周波数になるに従ってノズルからの流出ナトリウム量は多く、当然、容器内ナトリウム温度がゆらぐ領域も大きくなる。そのため、0.01Hz では ch7(表面より深さ 3.3mm, g)までが構造材表面から、ch10(構造材裏面, j)及び ch9(表面より深さ 8.3mm, i)のゆらぎは容器内ナトリウム温度の影響を受けて、ゆらいでいることがわかる。

各 ch 波形の上限/下限温度(Fig.3-1～3-5 の 10 波の平均値)とその温度差(ΔT)を算出した。各熱サイクルにおける温度差測定結果を Table 3-1 に示す。 いずれの周波数も構造材表面から深くなるに従って ΔT は減少し、各 ch は低周波数になるほど大きくなっている。ch3(構造材表面, c)から ch4(構造材表面より深さ 0.5mm, d)に至るまでの ΔT の減少は、0.2Hz が約 66°C と最も大きく、0.1Hz が約 55°C、0.04Hz が約 40°C、0.02Hz が 35°C 及び 0.01Hz が 35°C である。このことから、 ΔT は高周波数(0.2Hz 及び 0.1Hz)ほど表面近傍で大きく減少することが分かる。しかし、低周波数(0.02 及び 0.01Hz)になるほどその減少が小さい分 ΔT は大きく、構造材深くまで浸透することを示している。

板厚方向の上限及び下限温度分布を Fig.3-11 に示す。 いずれの周波数においても構造材内部の上限/下限温度の差は ch3(構造材表面, c)が最も大きく、次に ch4 (表面より深さ 0.5mm, d) であり、深くなるに従って小さくなる。

構造材内部における温度差の周波数依存性を Fig.3-12 に示す。流体中、表面、板厚深さ方向及び裏面の温度差は、低周波数側では大きいが、高周波数側になるほど小さくなり、周波数に反比例する。ナトリウム流量 1.2 l/min(約 0.7m/s)において、低温/高温ナトリウムが弁の切換で試験容器内ナトリウム中に流出される量は、0.2Hz では 50ml(2.5s)、0.1Hz では 100ml(5s)、0.04Hz では 250ml(12.5s)、0.02Hz では 500ml(25s)、0.01Hz では 1000ml(50s)である。高周波数ほど流出するナトリウム量は少ないため、試験容器内ナトリウムとの混合領域は小さい。従って、弁切換後の流出ナトリウムの温度は、試験容器内ナトリウム温度の影響が大きく、流体中(ch1, a 及び ch2, b)の温度差は小さくなる。また、低周波数になるに従って流出するナトリウム量は多くなり、試験容器内ナトリウムとの混合領域が大きくなる。このため、試験容器内ナトリウム温度の影響が少なくなり、流体中(ch1, a 及び ch2, b)の温度差は大きくなる。また、試験体製作時において構造材内部の熱電対は、板側部より面内方向に取付け、構造材内部温度の影響を受けない様にした。しかし、流体中(ch1, a 及び ch2, b)の熱電対は、製作上、裏面から板厚方向に取付けたため、構造材内部温度の影響を受け易くなっている。従って、Table 3-1 に示したように、構造材内部の ΔT は高周波数側では表面近傍、低周波数側では構造材内部深くまで浸透しており、流体中の ΔT は構造材内部温度の影響を受けていることが考えられる。以上のことから、流体中(ch1, a 及び ch2, b)の温度差は、高周波数側では小さく、低周波数側では大きくなると考える。

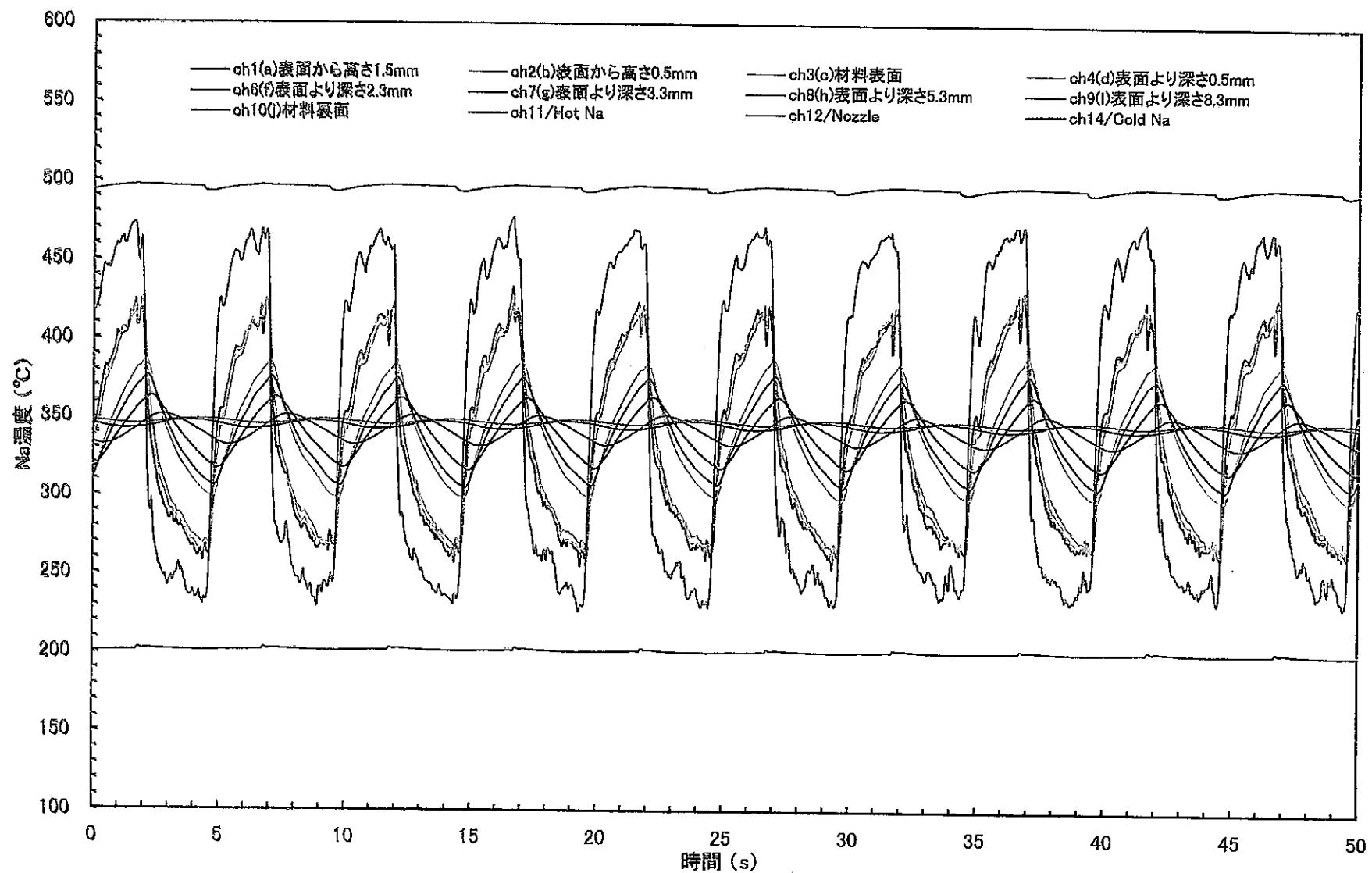


Fig.3-1 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.2Hz

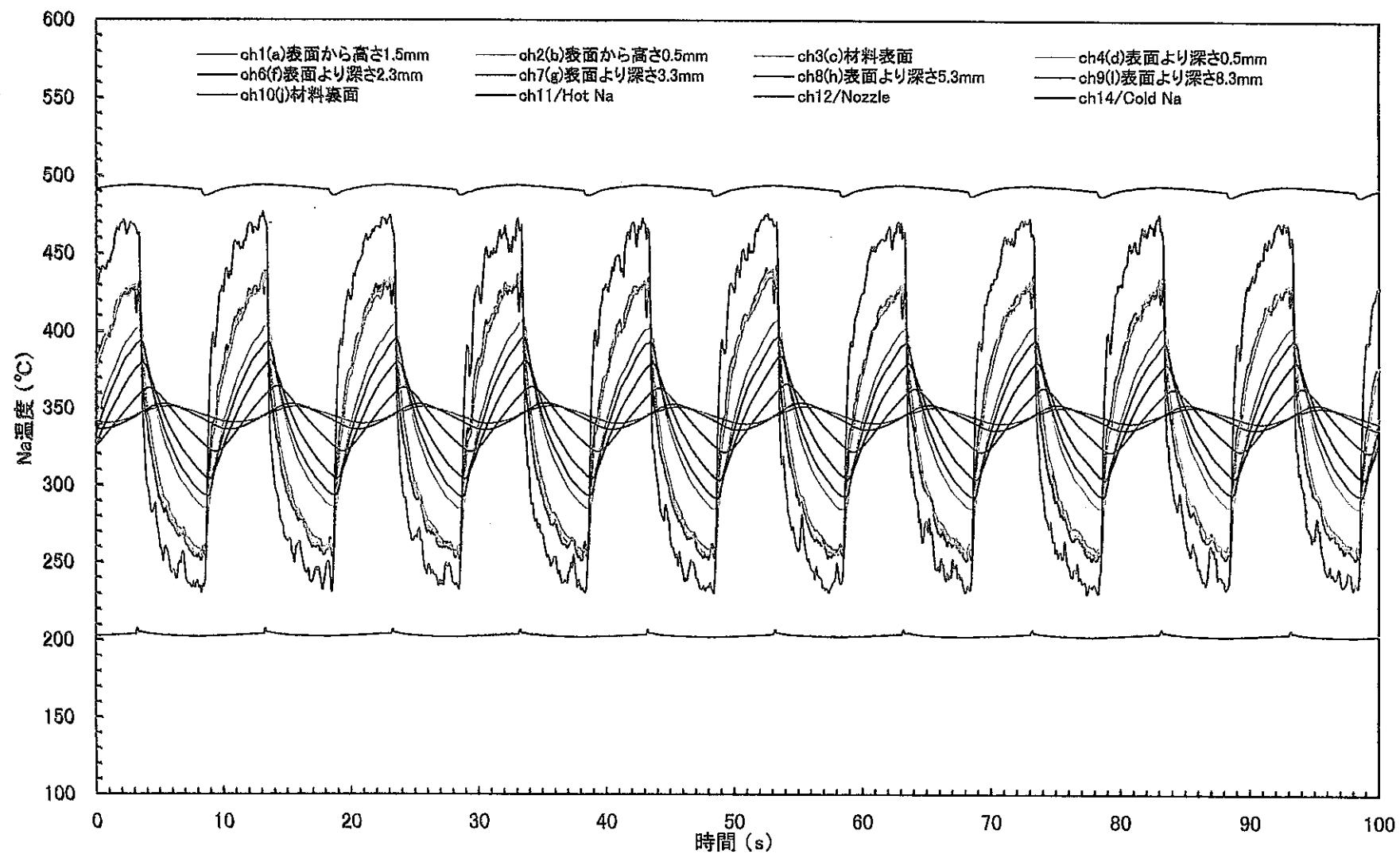


Fig.3-2 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.1Hz

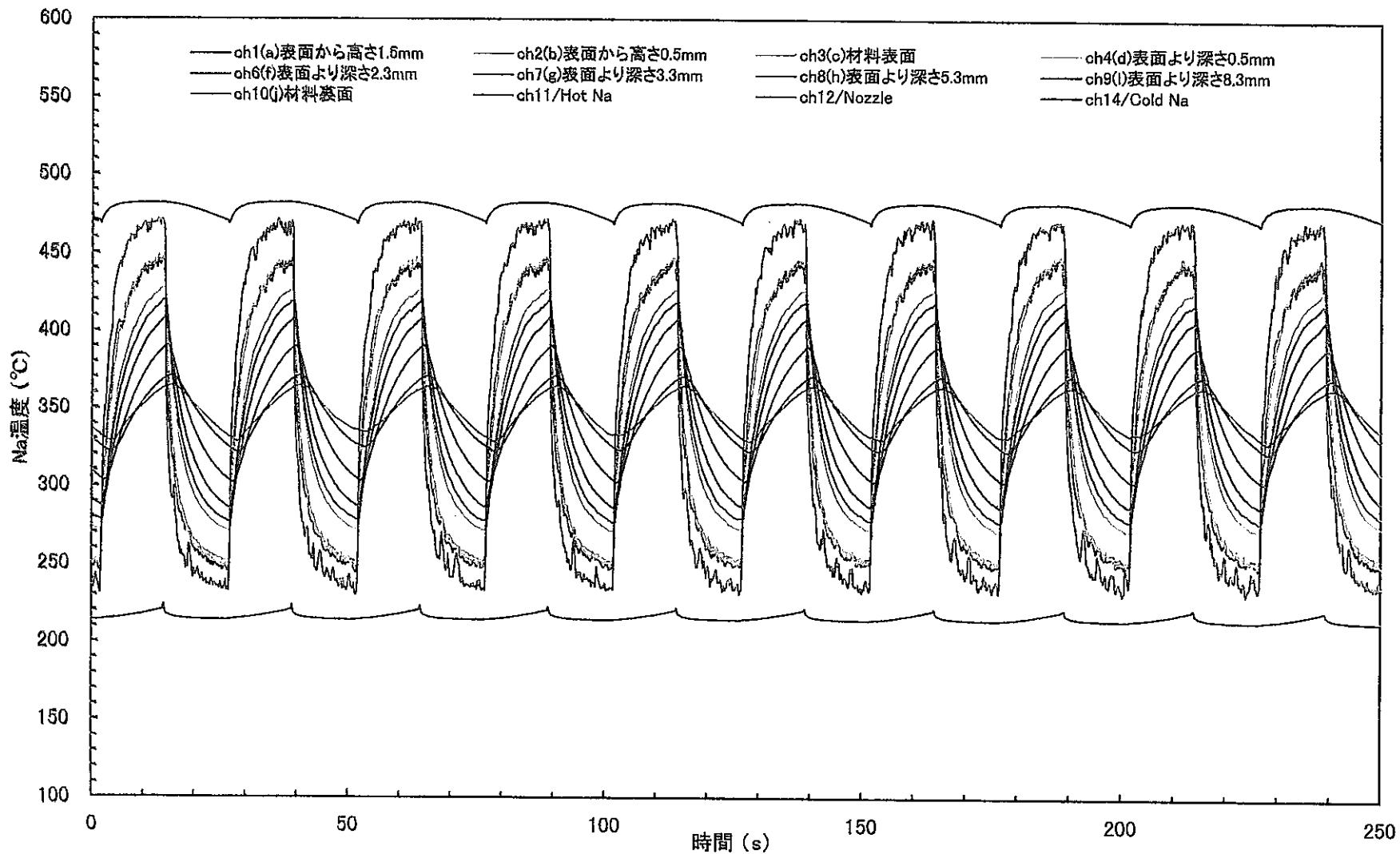


Fig.3-3 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.04Hz

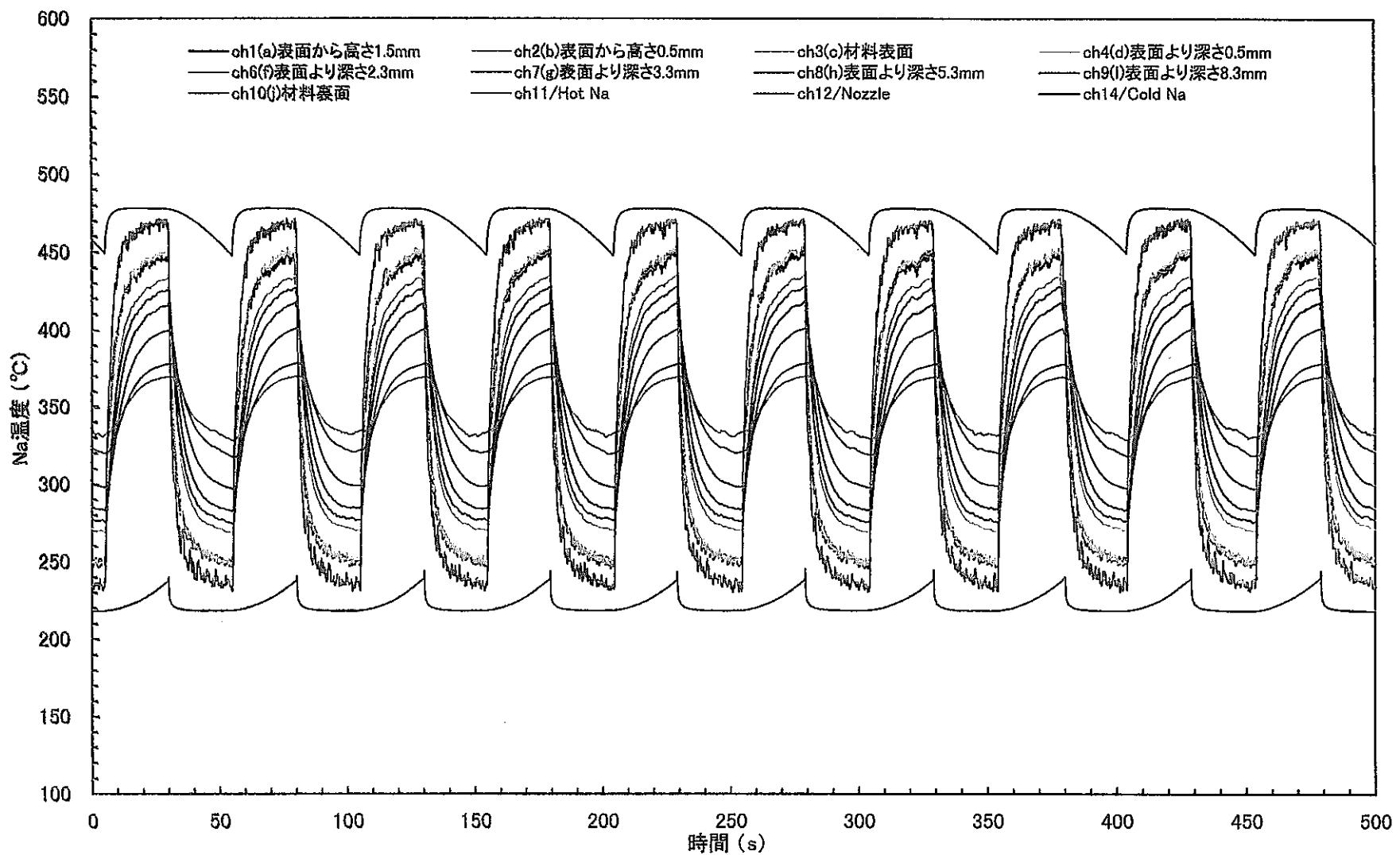


Fig.3-4 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.02Hz

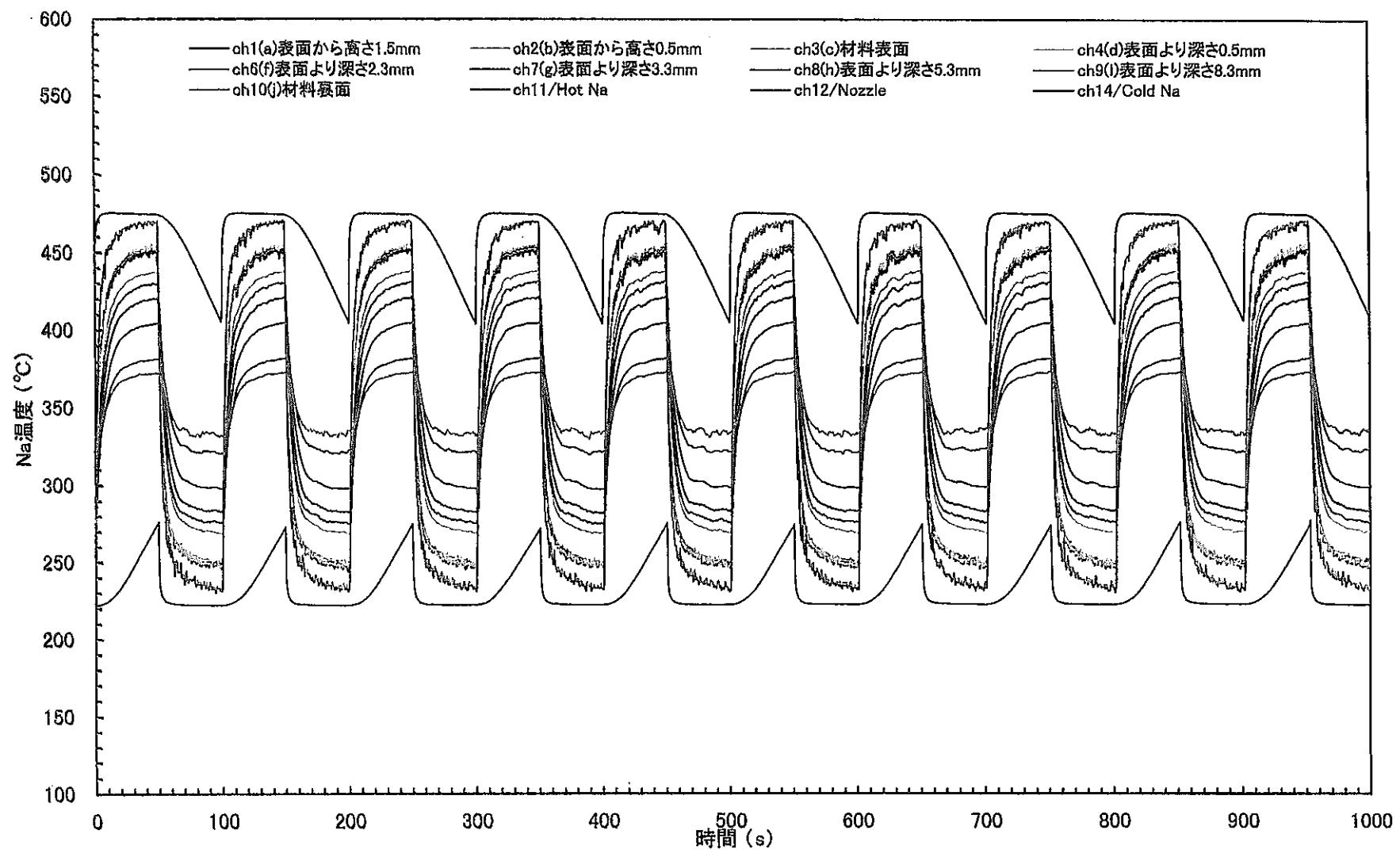


Fig.3-5 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.01Hz

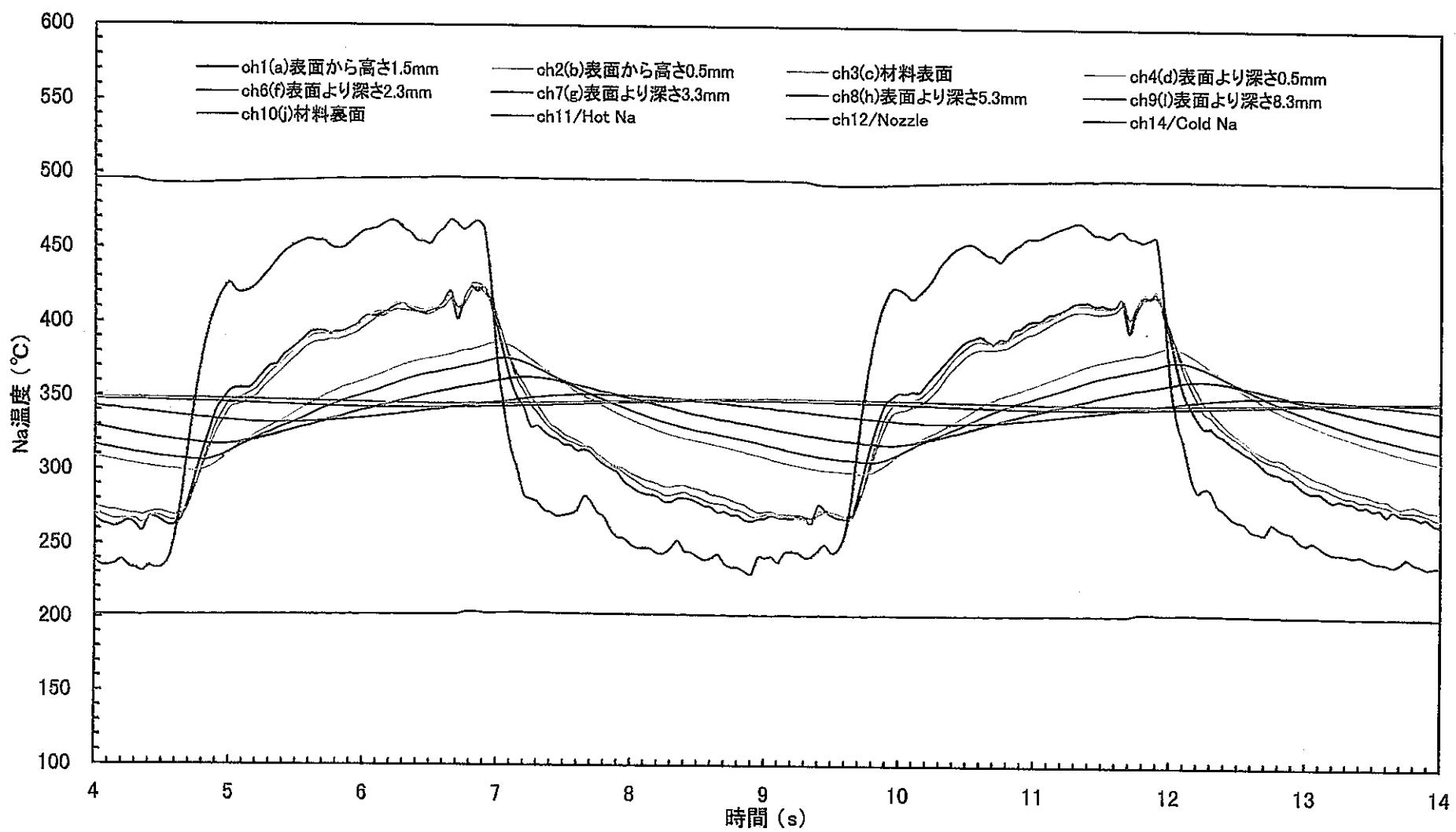


Fig.3-6 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.2Hz

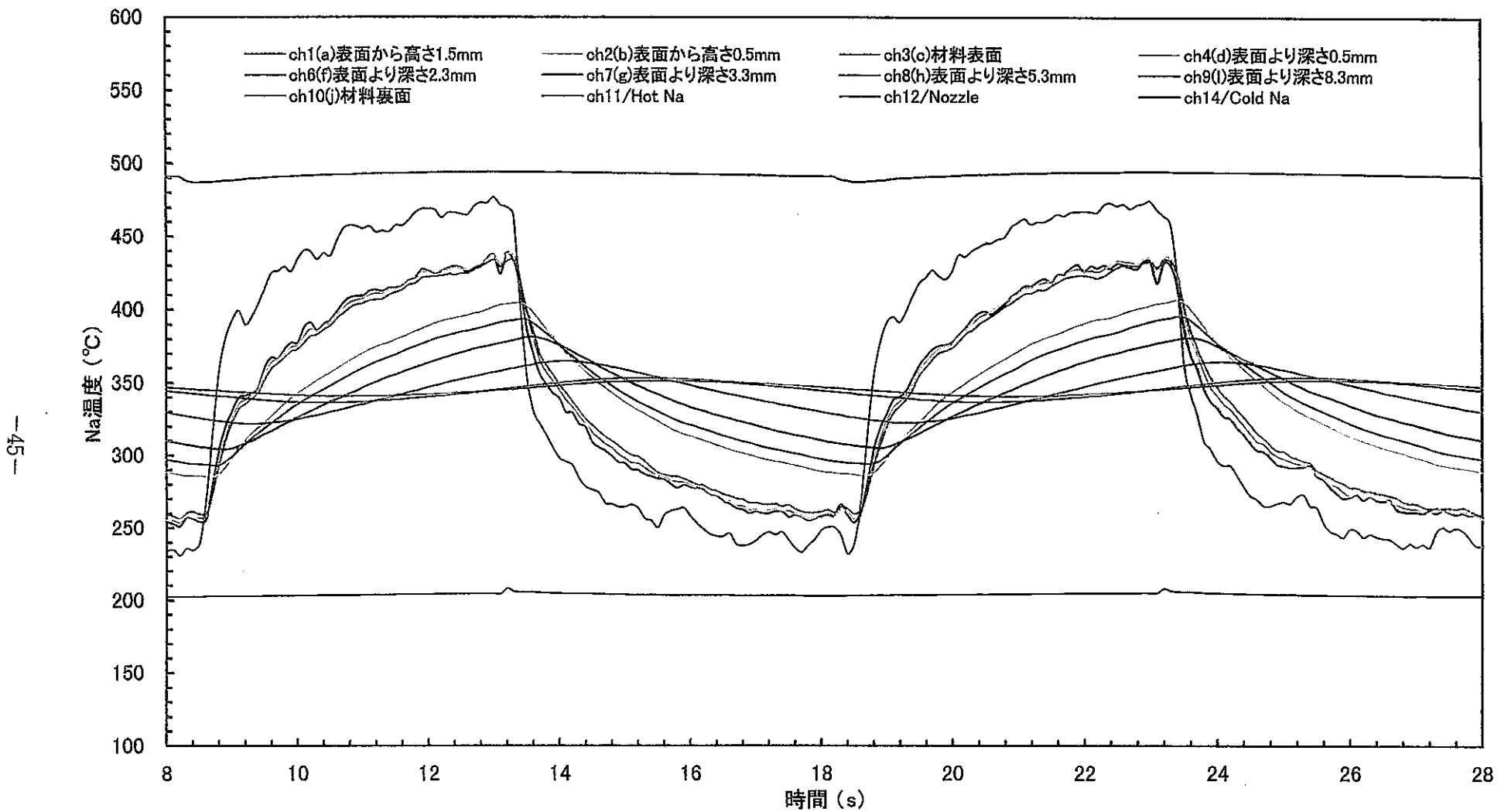


Fig.3-7 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.1Hz

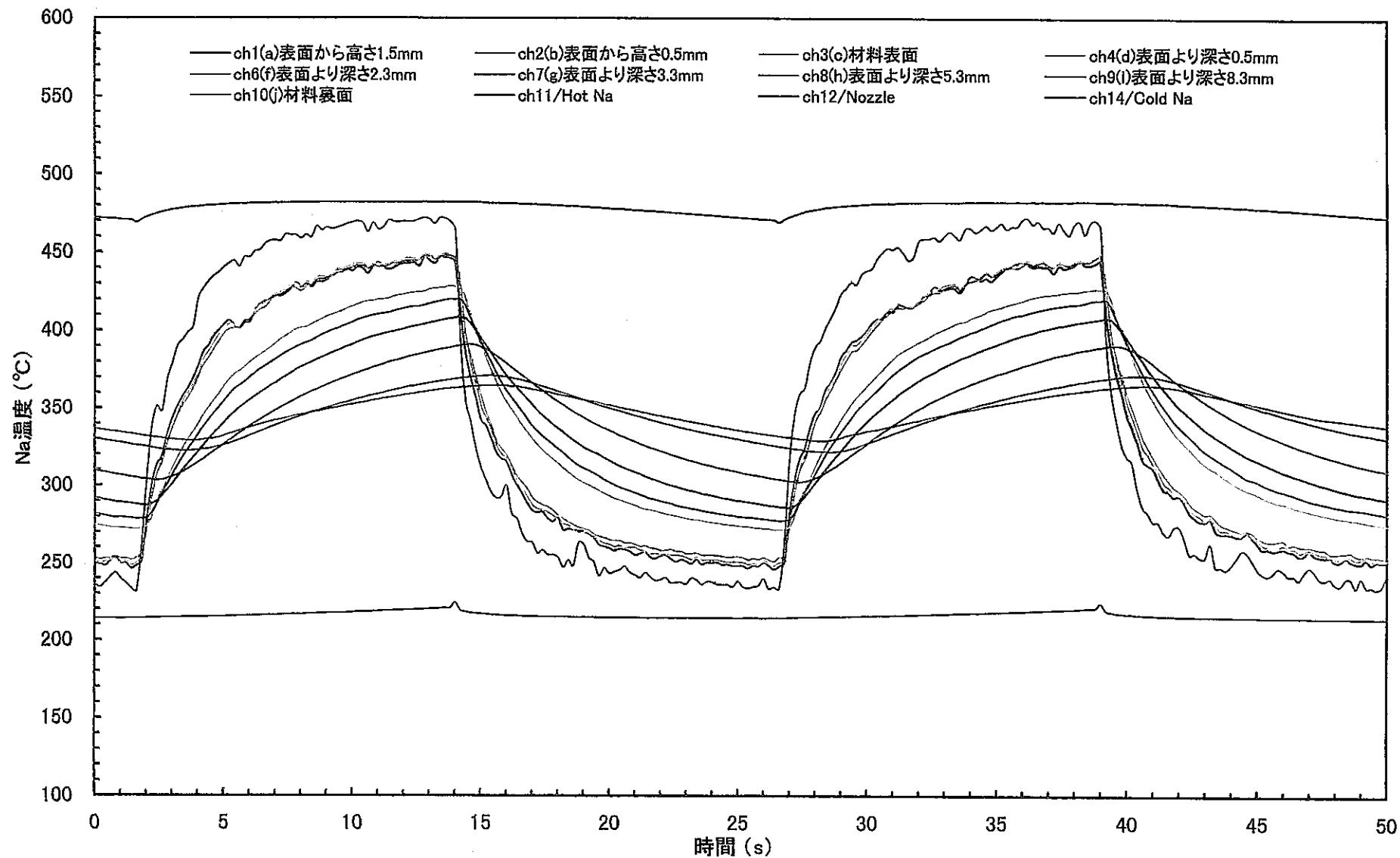


Fig.3-8 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.04Hz

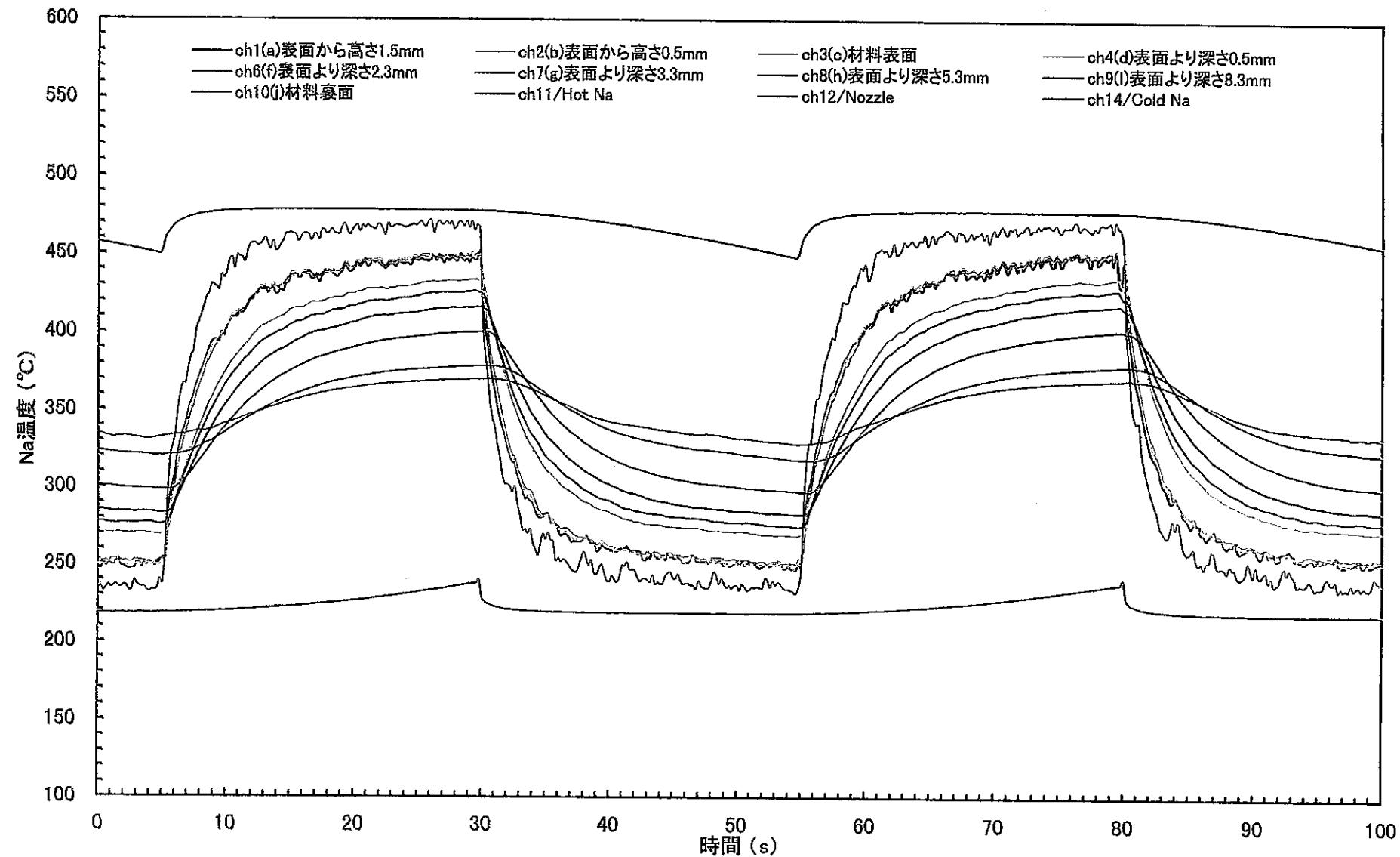


Fig.3-9 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.02Hz

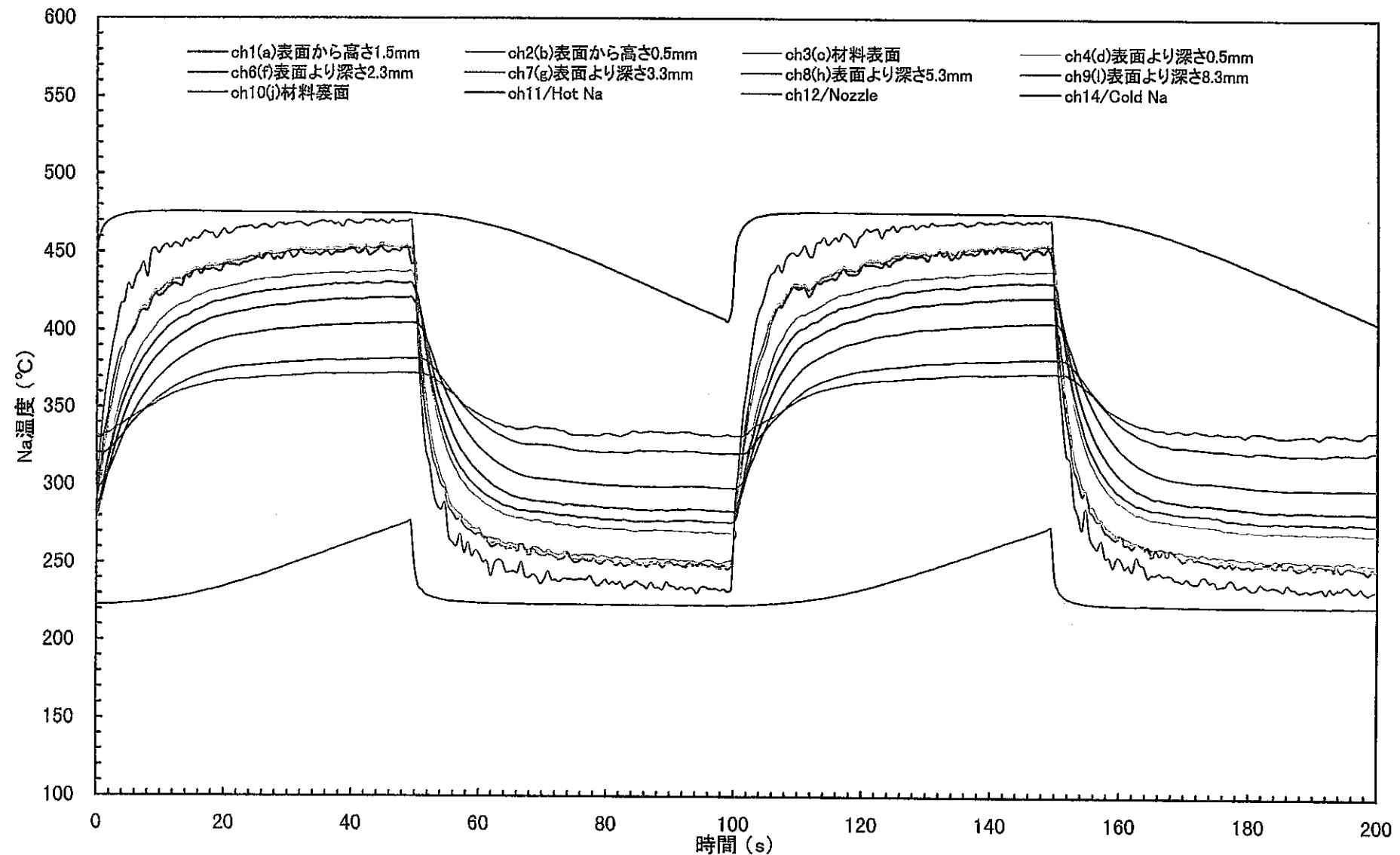


Fig.3-10 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium for 0.01Hz

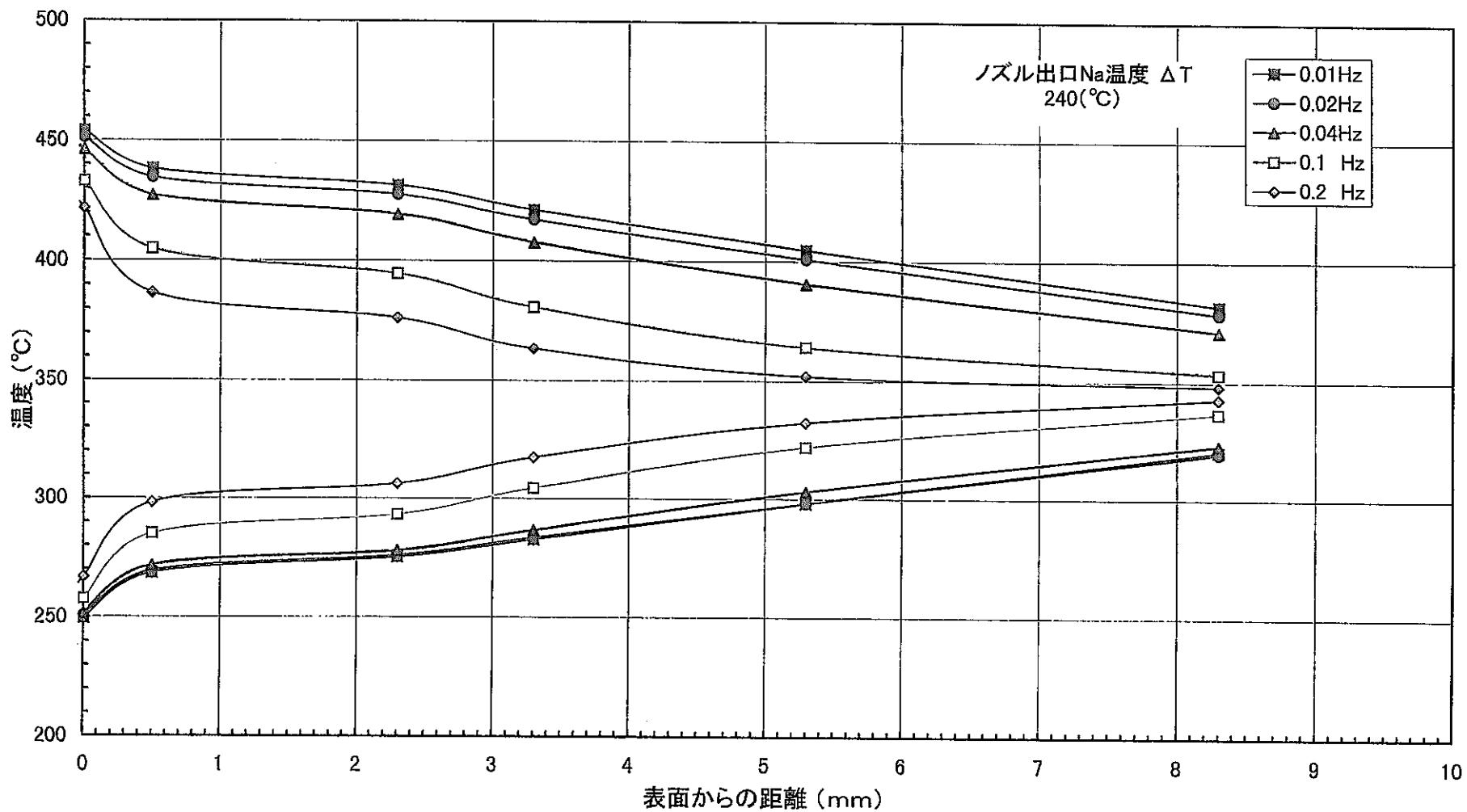


Fig.3-11 Max. and min. temperature distributions in material at different cycle rates

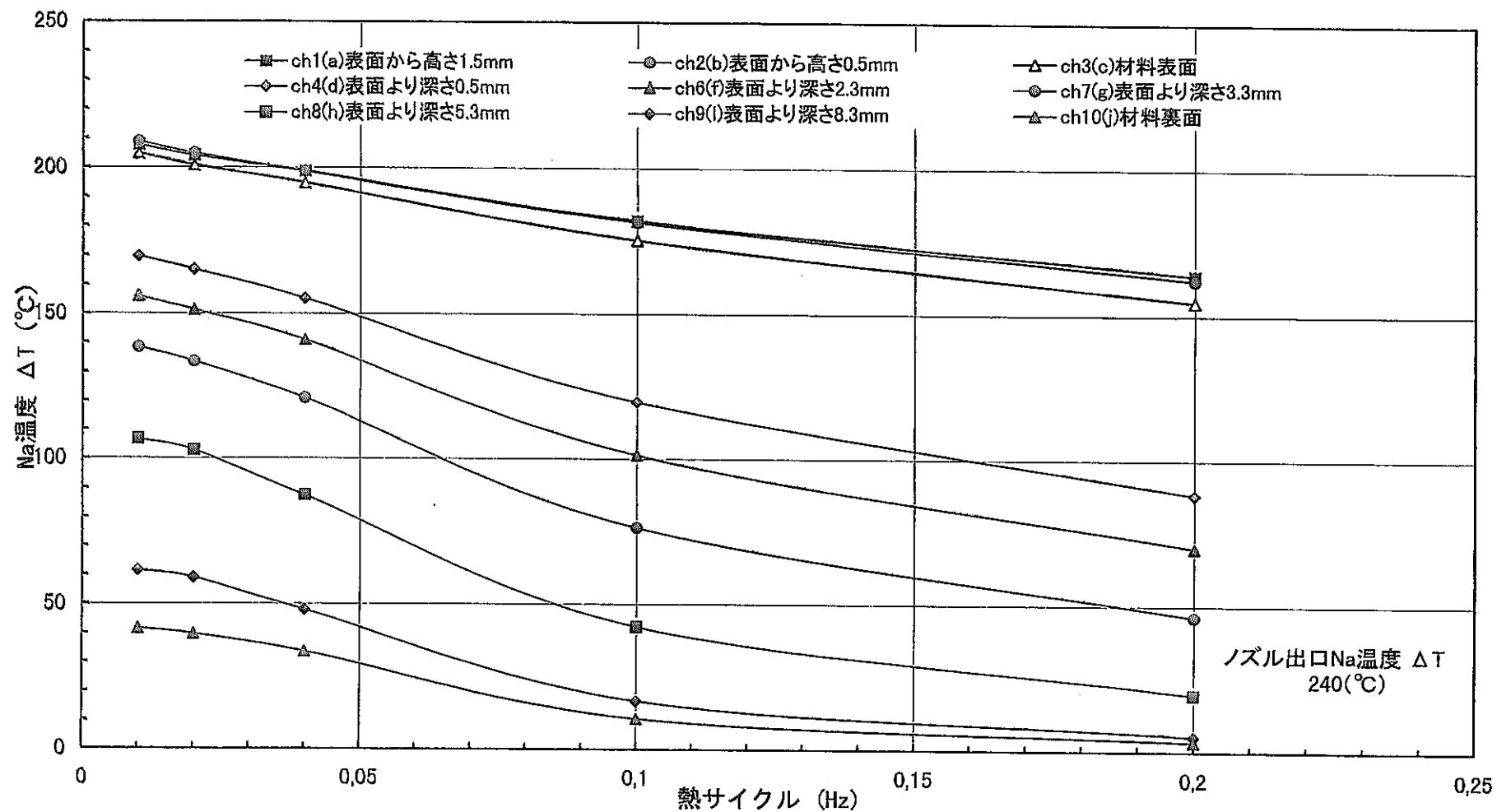


Fig.3-12 Effect of the frequency of sodium temperature vibration on the amplitude of temperature vibration in material

Table 3-1 Results of measuring of temperature vibration in sodium
and material at different frequency

単位: °C

熱サイクル (Hz)	ch-No.(TC-No.)	ch1(a)	ch2(b)	ch3(c)	ch4(d)	ch6(f)	ch7(g)	ch8(h)	ch9(i)	ch10(j)	ch11(TC1)	ch12(TC7)	ch14(TC4)
	測定位置(mm)	高さ 1.5	高さ 0.5	表面 0	深さ 0.5	深さ 2.3	深さ 3.3	深さ 5.3	深さ 8.3	裏面 10	Hot Na	ノズル出口	Cold Na
0.2	上限温度(平均)	424.82	425.39	421.70	386.68	376.39	363.58	352.01	348.11	348.91	497.75	471.87	203.67
	下限温度(平均)	260.61	262.94	266.94	298.26	306.29	317.29	332.30	342.62	345.39	493.39	231.50	201.19
	差 (ΔT)	164.21	162.45	154.76	88.42	70.10	46.29	19.71	5.49	3.52	4.36	240.37	2.49
0.1	上限温度(平均)	434.48	435.66	433.12	405.04	394.71	380.88	364.34	353.35	351.34	494.51	473.65	207.43
	下限温度(平均)	252.20	253.99	257.85	285.16	293.21	304.41	321.96	336.50	340.54	487.68	231.80	202.48
	差 (ΔT)	182.28	181.67	175.27	119.88	101.50	76.47	42.38	16.85	10.80	6.83	241.85	4.95
0.04	上限温度(平均)	446.51	447.78	446.37	427.23	419.22	407.73	390.78	371.25	364.58	482.47	472.15	222.50
	下限温度(平均)	247.41	248.82	251.68	271.76	278.03	286.63	303.10	323.07	330.91	469.30	232.20	214.18
	差 (ΔT)	199.10	198.95	194.69	155.47	141.19	121.09	87.68	48.17	33.66	13.16	239.95	8.32
0.02	上限温度(平均)	451.28	452.69	451.42	434.76	427.56	417.17	401.03	378.54	369.85	478.49	471.65	243.13
	下限温度(平均)	246.88	247.55	250.68	269.44	276.06	283.48	298.11	319.36	330.05	448.69	231.35	218.31
	差 (ΔT)	204.40	205.13	200.74	165.33	151.50	133.69	102.92	59.18	39.80	29.80	240.30	24.82
0.01	上限温度(平均)	453.70	455.60	454.43	438.51	431.60	421.35	404.95	382.03	372.96	475.80	470.80	274.70
	下限温度(平均)	245.74	246.56	249.56	268.64	275.44	282.75	298.09	320.37	331.36	405.15	231.12	222.37
	差 (ΔT)	207.97	209.05	204.87	169.87	156.16	138.60	106.86	61.66	41.60	70.64	239.68	52.32

高さ: 材料表面から高さ(流体中), 深さ: 材料表面より深さ(材料中)

第4章 結 言

サーマルストライピングによる構造物の周波数応答ナトリウム実験において、ナトリウム中に設置した 316FR 鋼材料表面に対し、1 個のノズルから低温及び高温のナトリウム噴流を交互に流出させて、その噴流場での構造材内部と流体中の温度振幅データを取得した。熱サイクル 0.01, 0.02, 0.04, 0.1 及び 0.2Hz のノズル出口の温度差は 240°C 一定、構造材表面の温度差は 0.2Hz のみ 155°C として実施した。ナトリウム流量は、1.2 l/min(約 0.7m/s) 一定で実施した。得られた結果は次の通りである。

(1) ナトリウム中の温度変動は以下の様であった。

- (i) ノズル出口から離れる程、ナトリウム温度振幅は小さくなる。
- (ii) ナトリウム中の温度振幅の変動は、周波数を小さくすると減少する。
- (iii) ナトリウム中の温度ゆらぎは、周波数を小さくすると減少する。

(2) 構造材内部の温度特性は以下の様であった。

- (i) 構造材内部の温度振幅は、ナトリウム中に比べ極端に減衰する。
- (ii) 構造材内部の温度振幅は、周波数に反比例し、低周波数程大きい。
- (iii) 温度振幅の変動は、ナトリウム噴流の特性のため、周波数が小さい程少ない。
- (iv) 温度振幅に重畠する微細な温度ゆらぎは、高周波数側では大きいが構造材表面近傍に限定される。
- (v) 温度振幅に重畠する微細な温度ゆらぎは、低周波数側では小さいが構造材内部まで浸透する。

参考文献

- 1) 佐藤 善美, 福田嘉男, 間所 学, 安部英昭, サーマルストライピングに対する構造設計法の試案, 日本機械学会 (No.920-93) シンポジウム講演論文集 1992
- 2) 村松 壽晴, 冷却材温度ゆらぎ現象の解析的評価手法の開発(XII), 定常不規則温度ゆらぎ挙動の周波数領域における検討, PNC TN9410 98-013 1998

謝　　辞

本作業の遂行にあたり、動力炉・核燃料開発事業団(現、核燃料サイクル開発機構)大洗工学センター基盤技術開発部構造・材料技術開発室の笠原直人主任研究員に御指導、御討論を頂くことにより、本作業を達成することができました。ここにあらためて関係各位に対し謝意を表します。

[付 錄]

付録A：初期及び終期の各周波数における高低温Na交互噴流でのNaと
材料の温度ゆらぎ

付録B：実験中のNa温度モニタ

付録C：実験中のNa流量モニタ

付録D：熱電対付試験体製作図

List of appendices

Appendix A-1 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.2Hz , the first stage)

Appendix A-2 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.2Hz , the last stage)

Appendix A-3 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.1Hz , the first stage)

Appendix A-4 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.1Hz , the last stage)

Appendix A-5 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.04Hz , the first stage)

Appendix A-6 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.04Hz , the last stage)

Appendix A-7 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.02Hz , the first stage)

Appendix A-8 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.02Hz , the last stage)

Appendix A-9 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.01Hz , the first stage)

Appendix A-10 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.01Hz , the last stage)

Appendix B-1 Sodium temperature under the experimental stage(1)

Appendix B-2 Sodium temperature under the experimental stage(2)

Appendix B-3 Sodium temperature under the experimental stage(3)

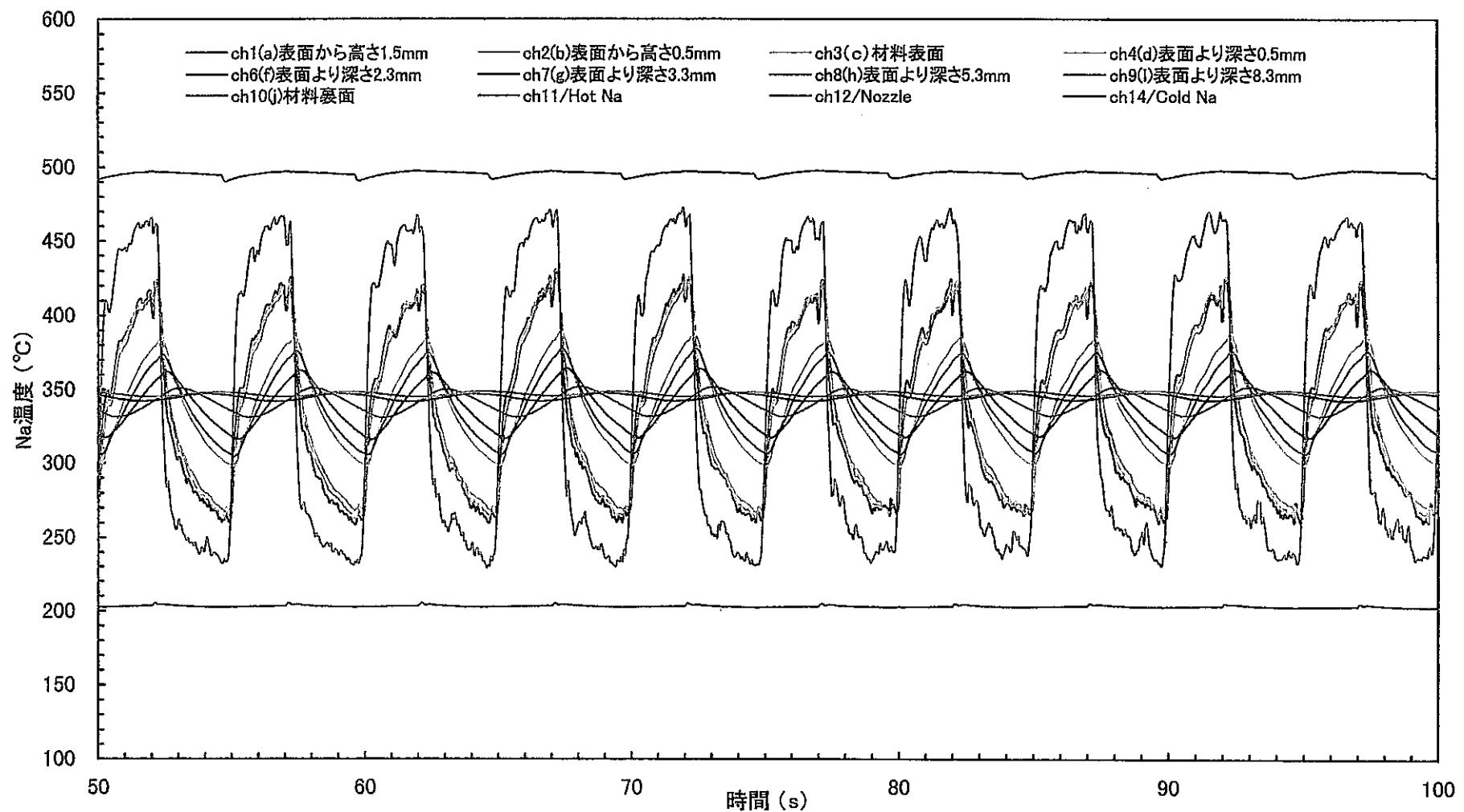
Appendix B-4 Sodium temperature under the experimental stage(4)

Appendix C-1 Sodium flowing under the experimental stage(1)

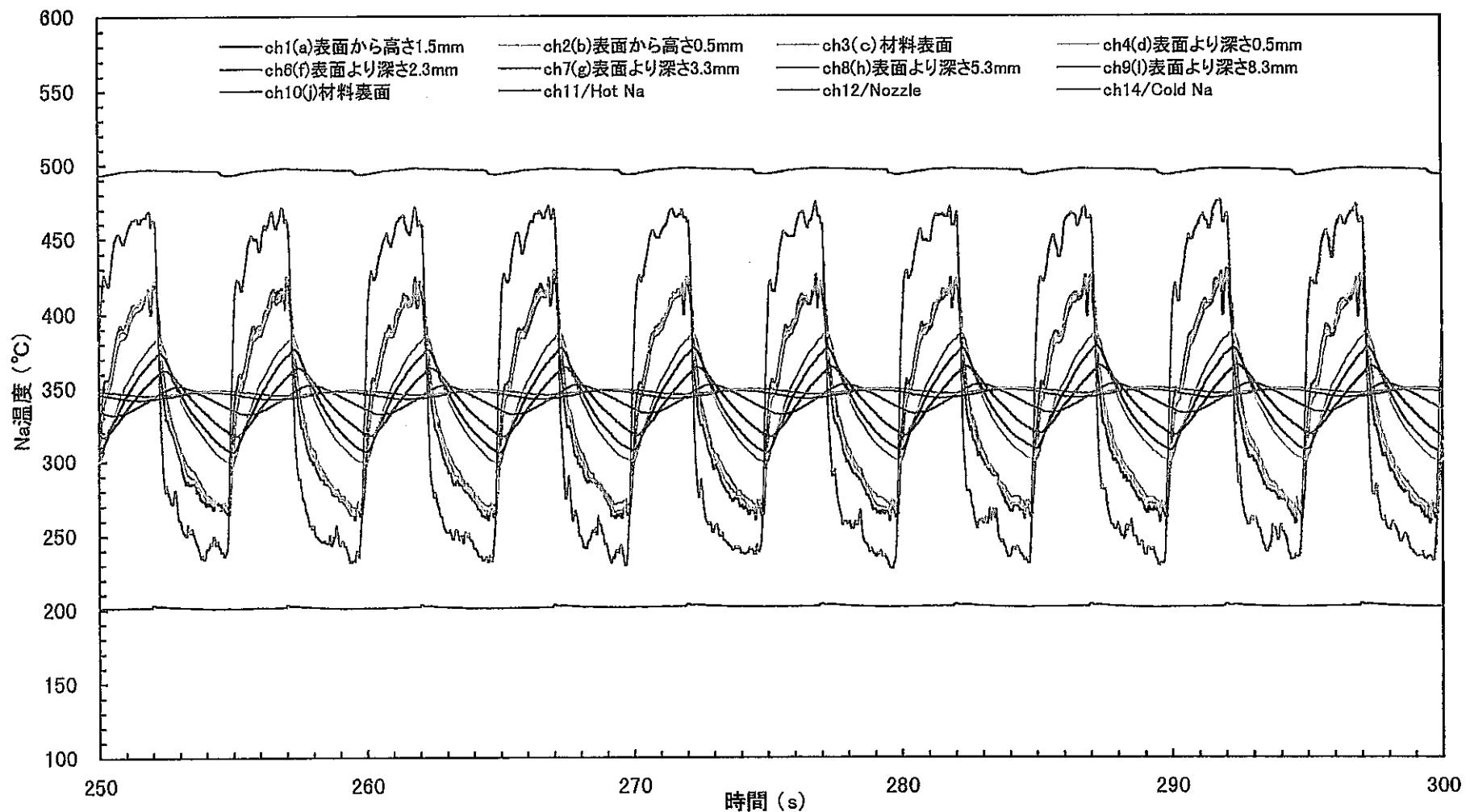
Appendix C-1 Sodium flowing under the experimental stage(2)

Appendix D-1 Detailed structure of test piece with thermocouples attachment

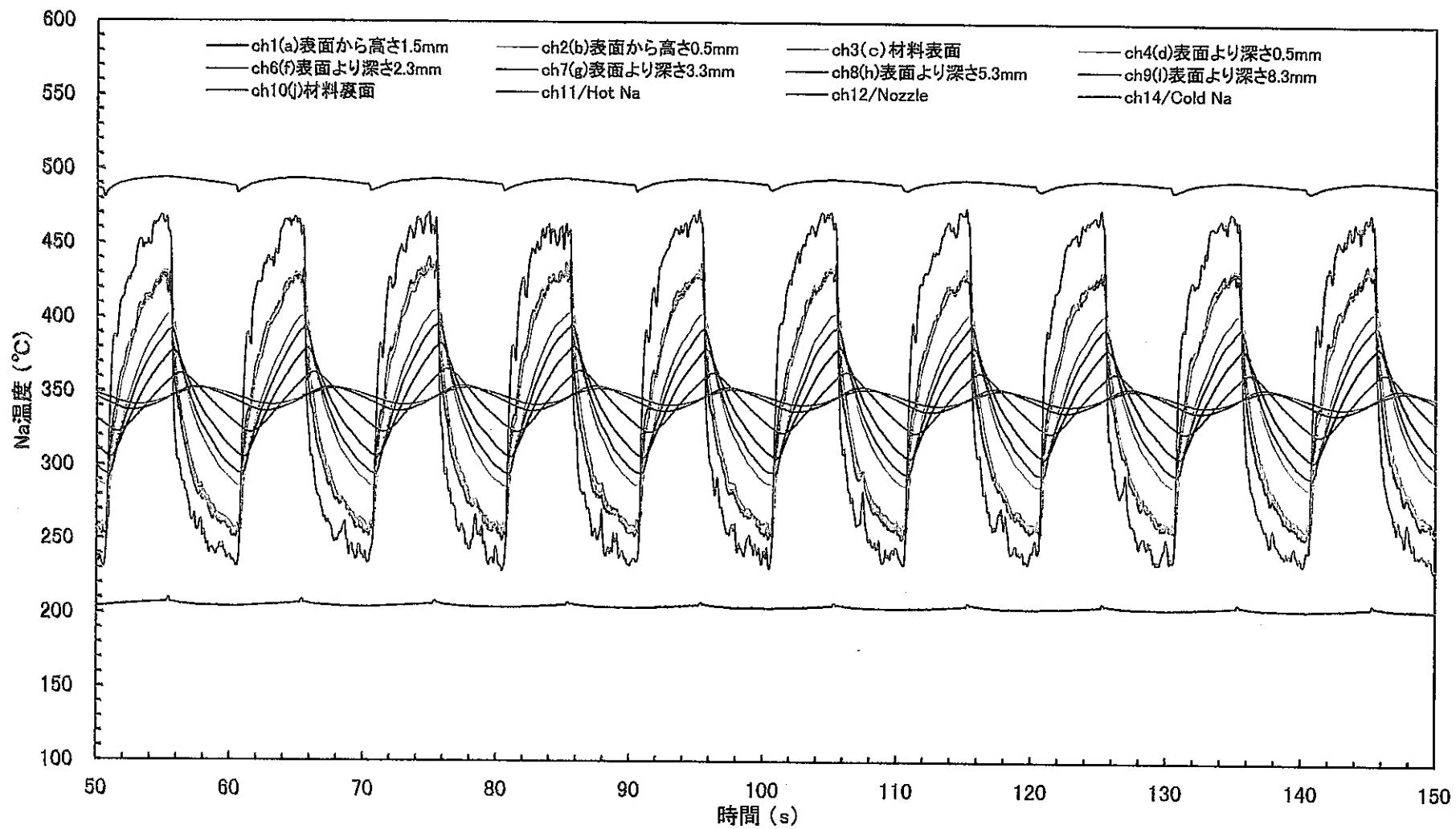
付録A：初期及び終期の各周波数における高低温 Na 交互噴流での Na と
材料の温度ゆらぎ



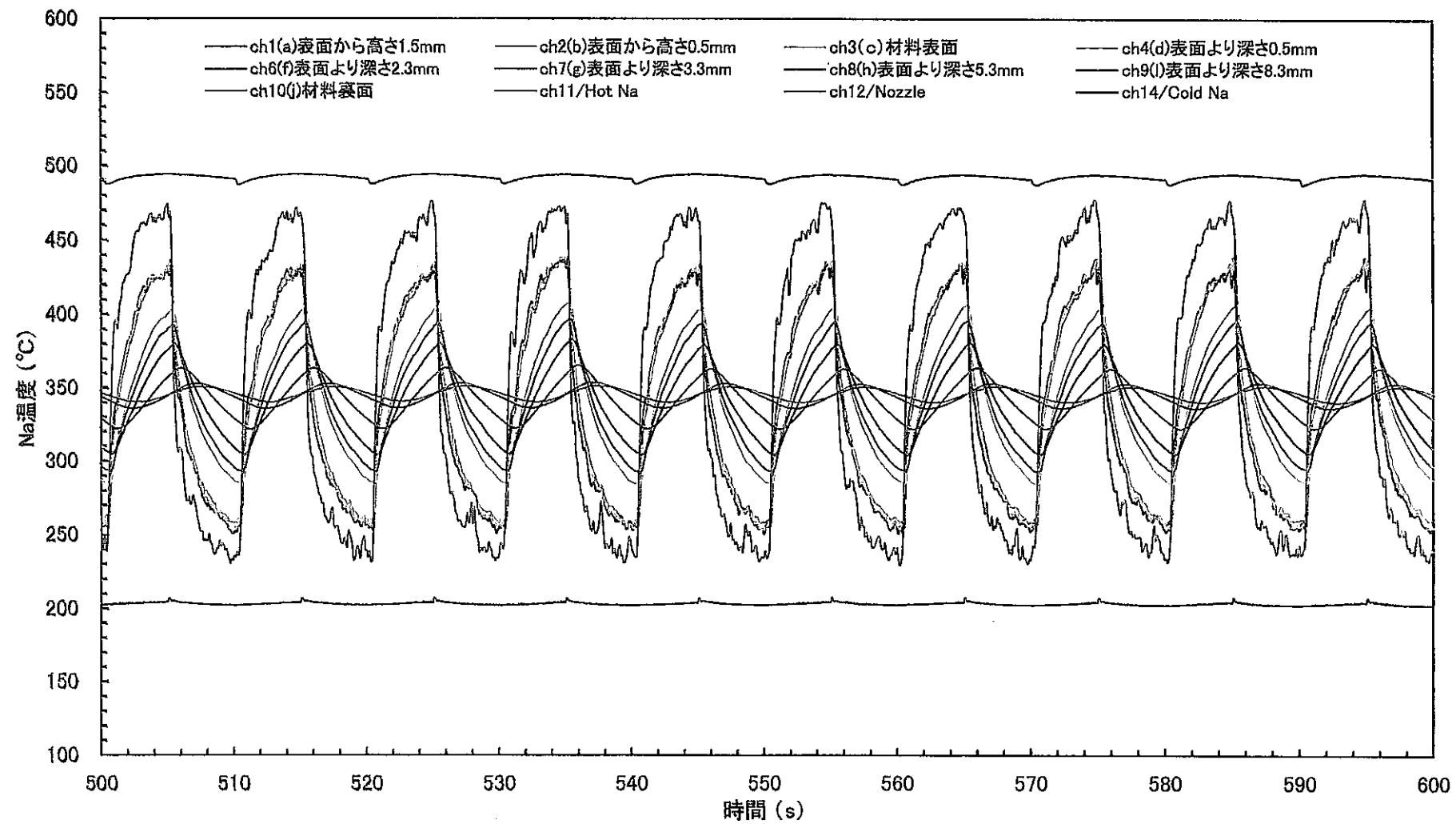
Appendix A-1 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.2Hz , the first stage)



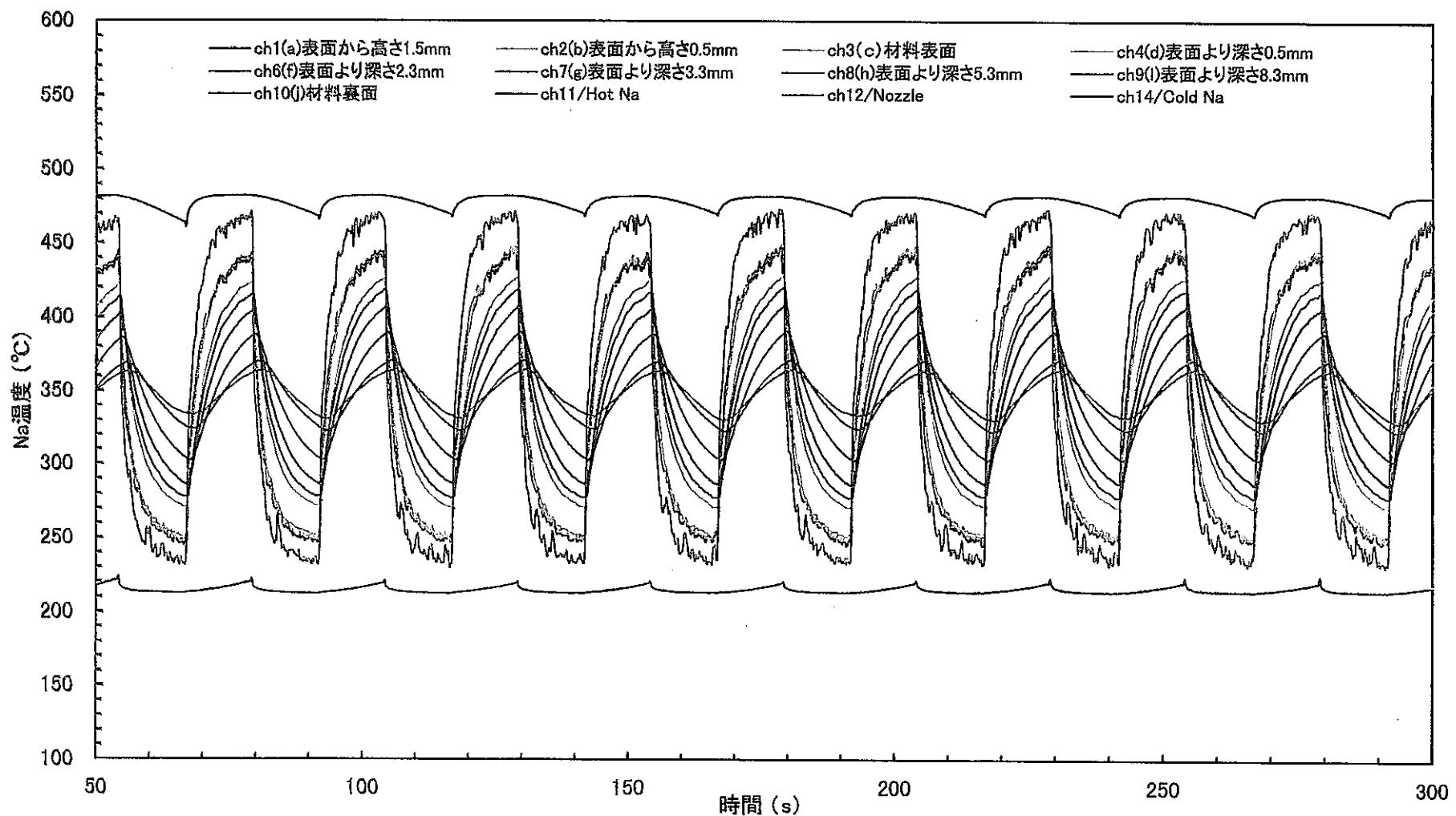
Appendix A-2 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.2Hz , the last stage)



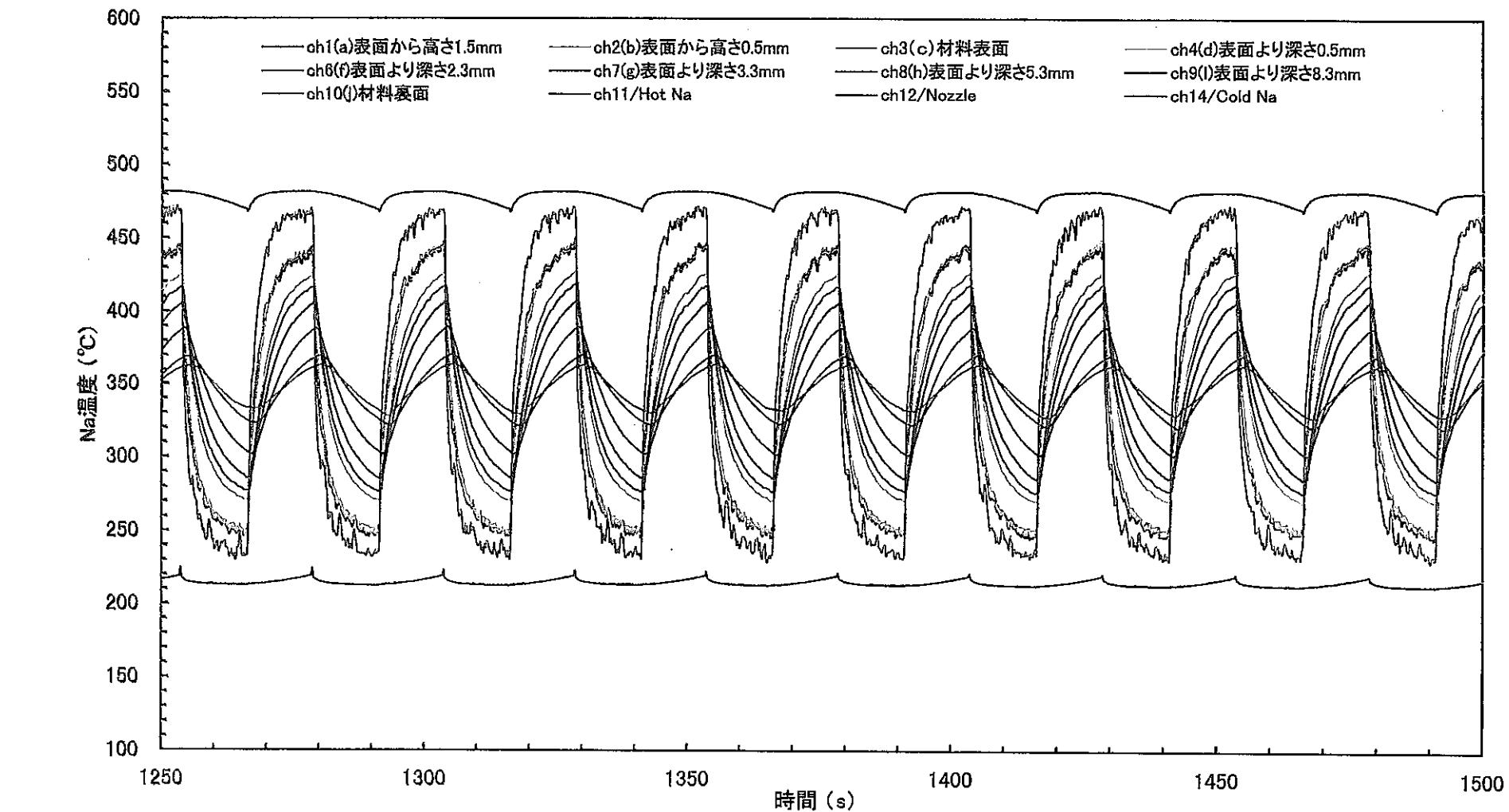
Appendix A-3 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.1Hz, the first stage)



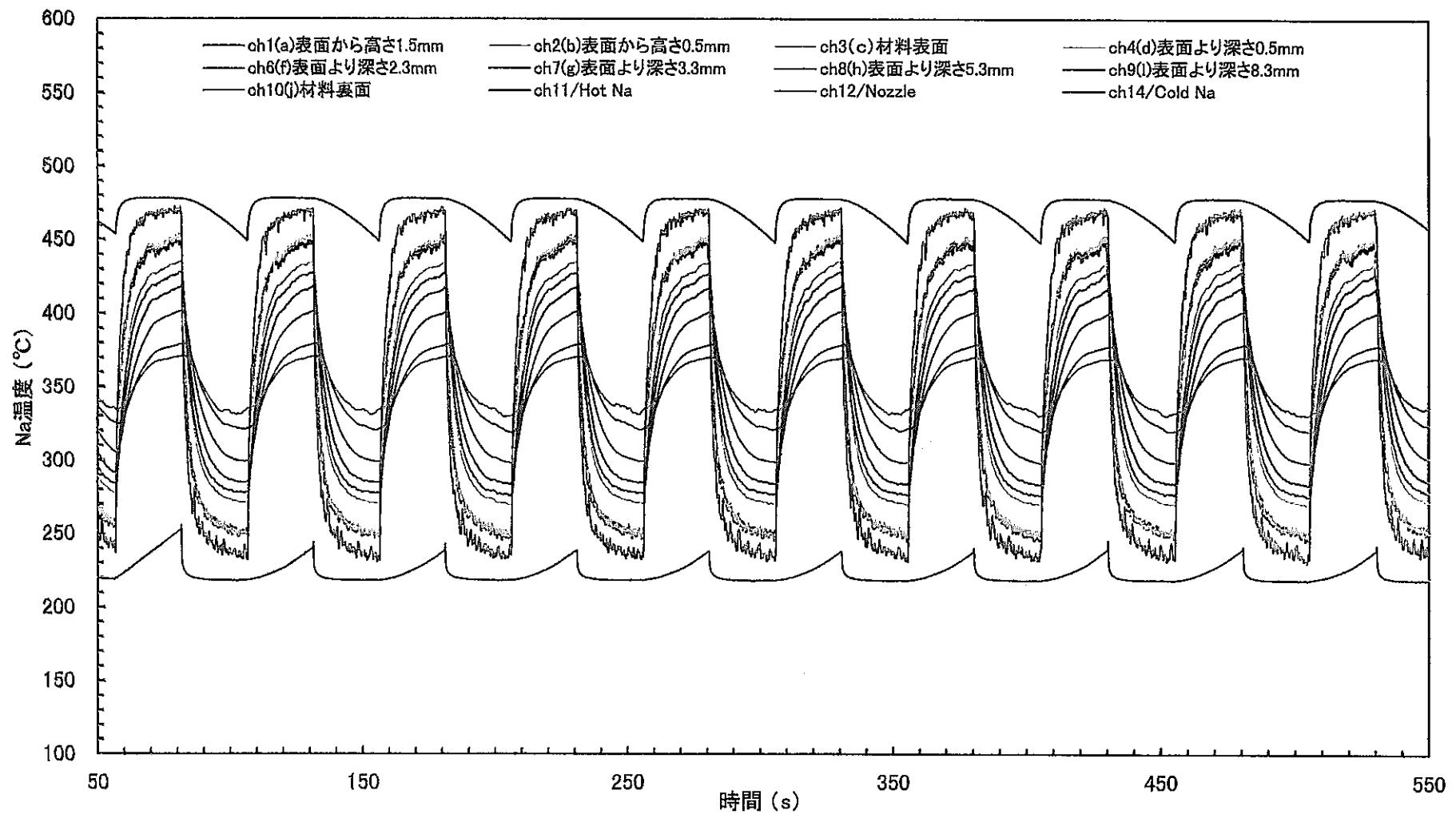
Appendix A-4 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.1Hz , the last stage)



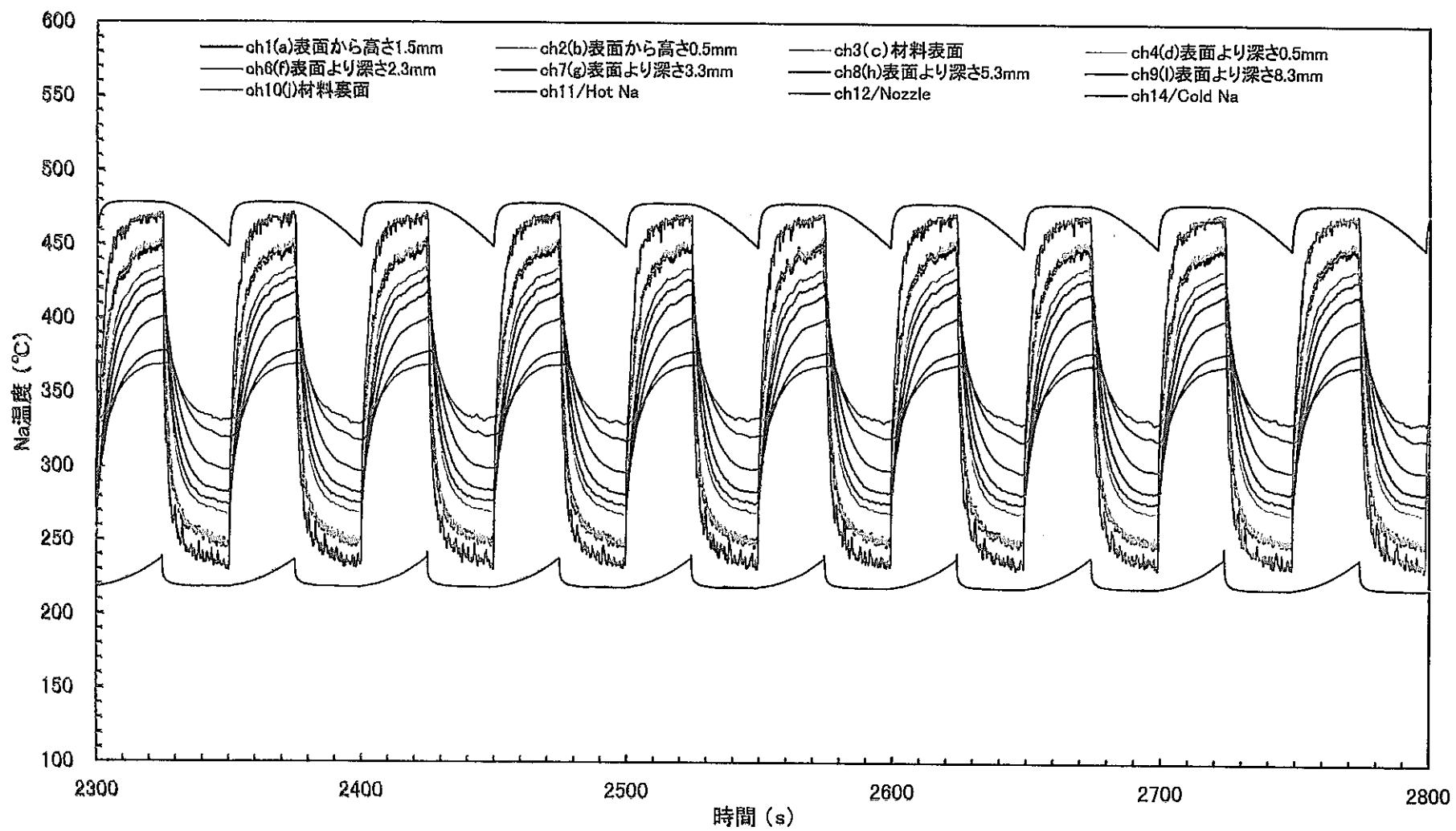
Appendix A-5 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.04Hz , the first stage)



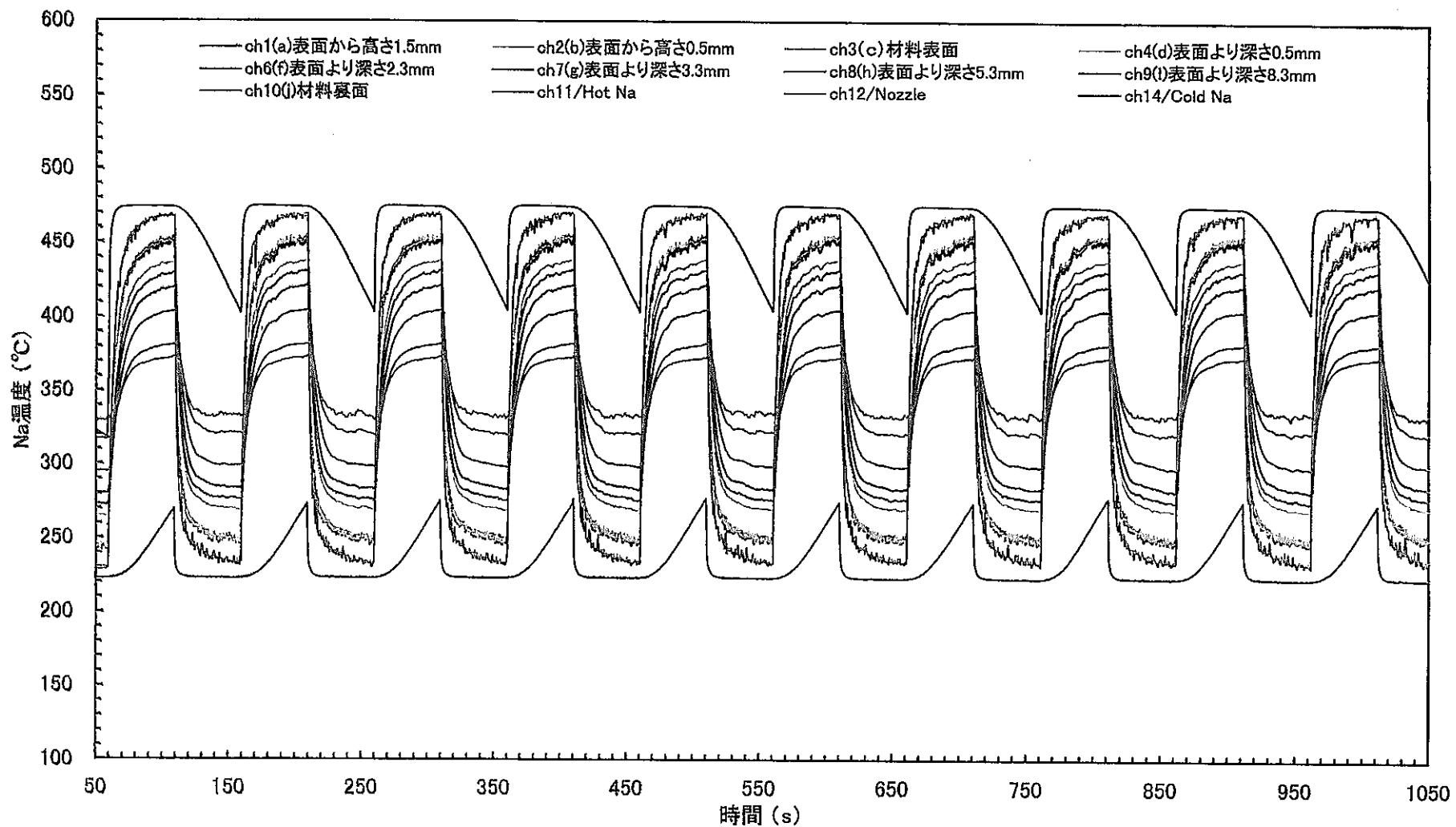
Appendix A-6 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.04Hz , the last stage)



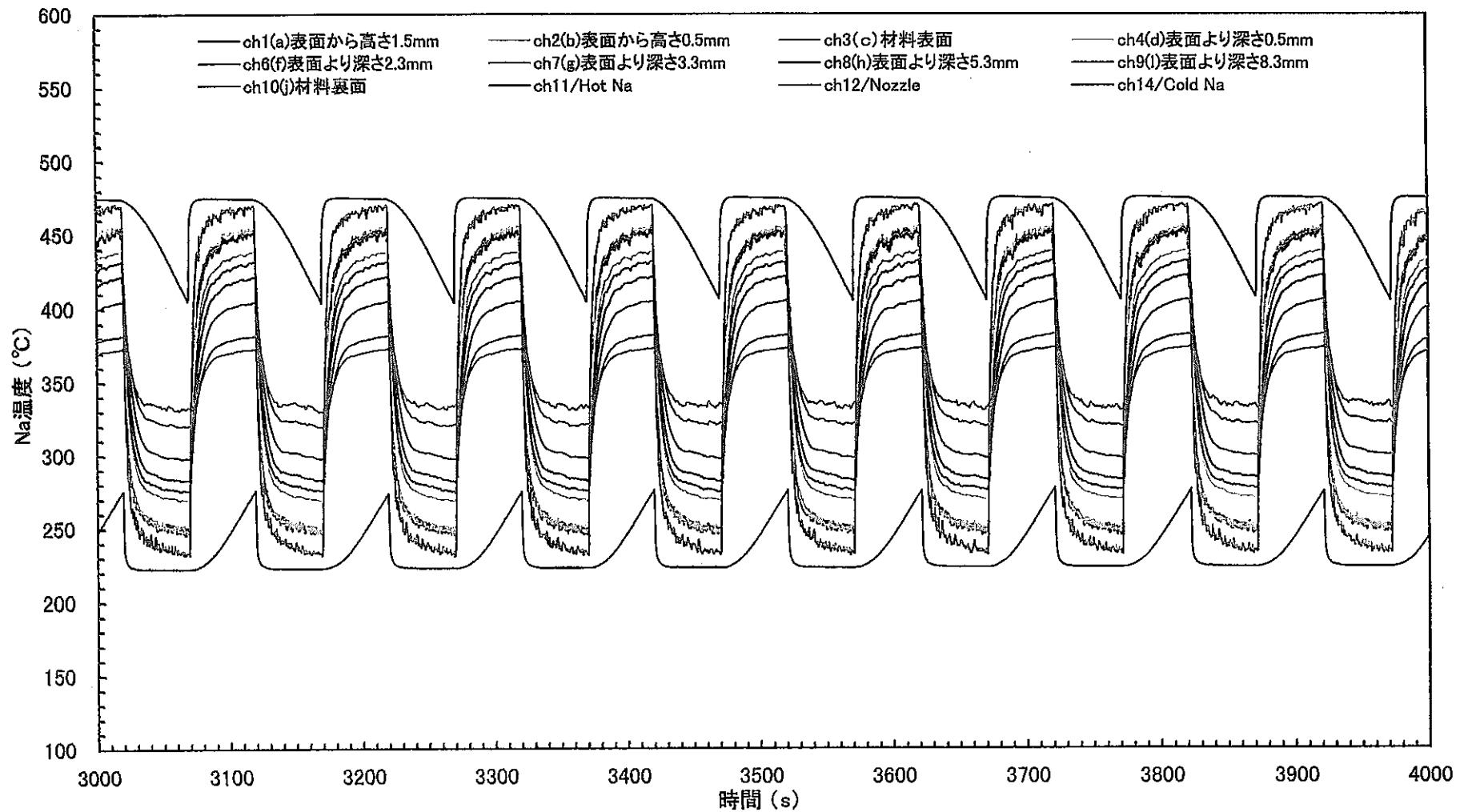
Appendix A-7 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.02Hz , the first stage)



Appendix A-8 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.02Hz , the last stage)

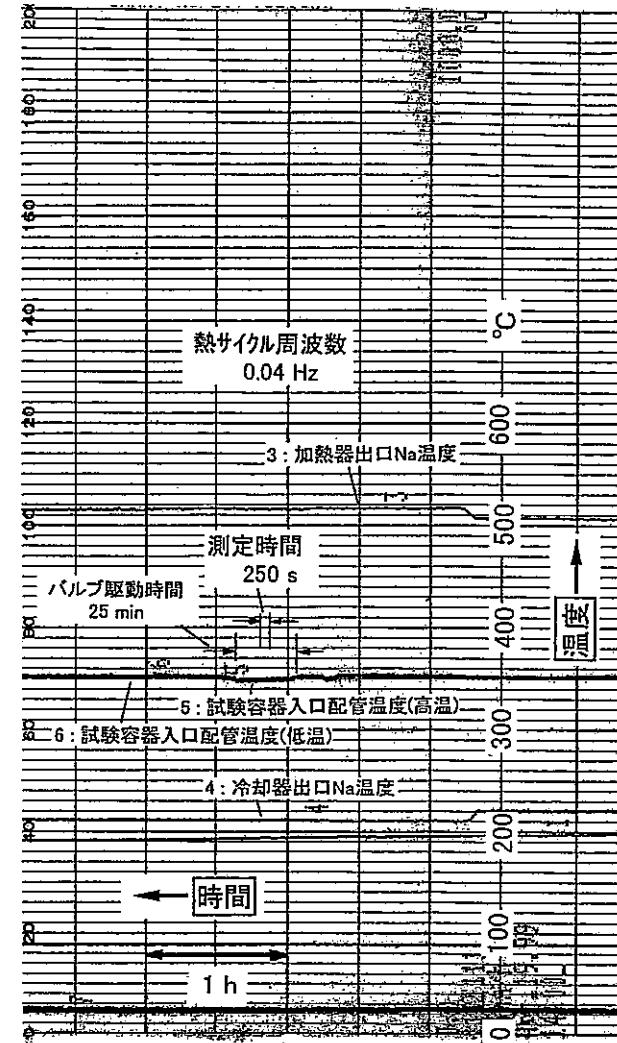
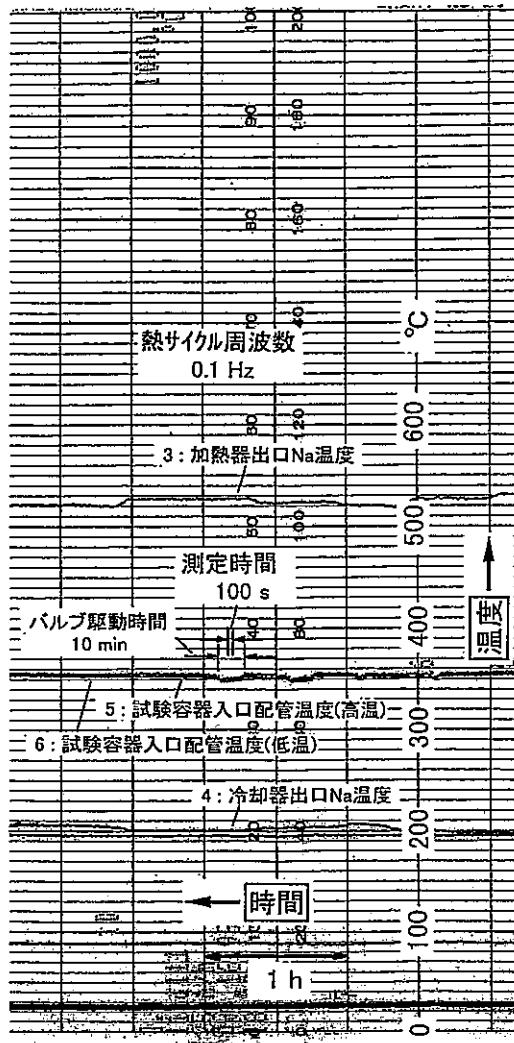
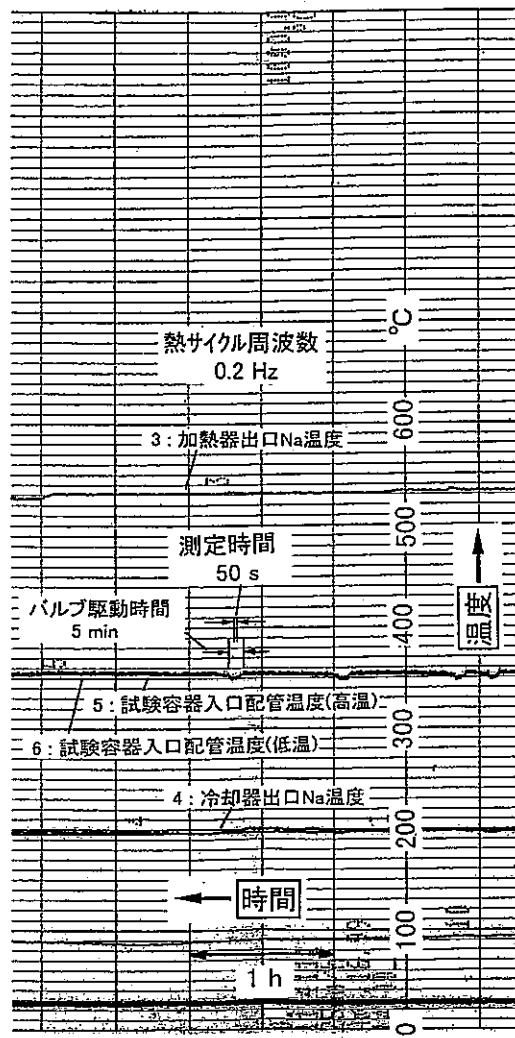


Appendix A-9 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.01Hz, the first stage)

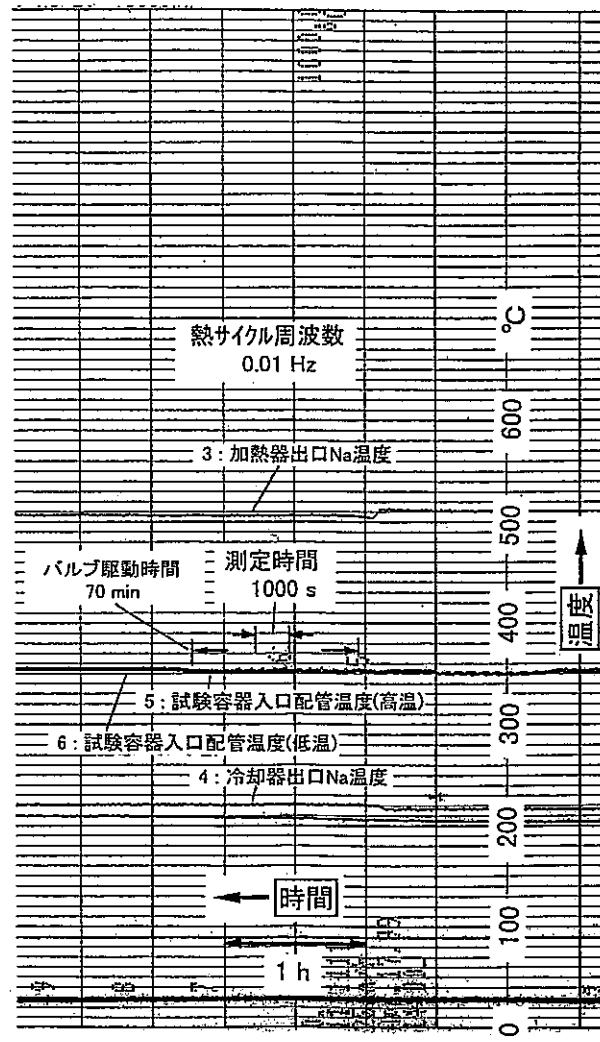
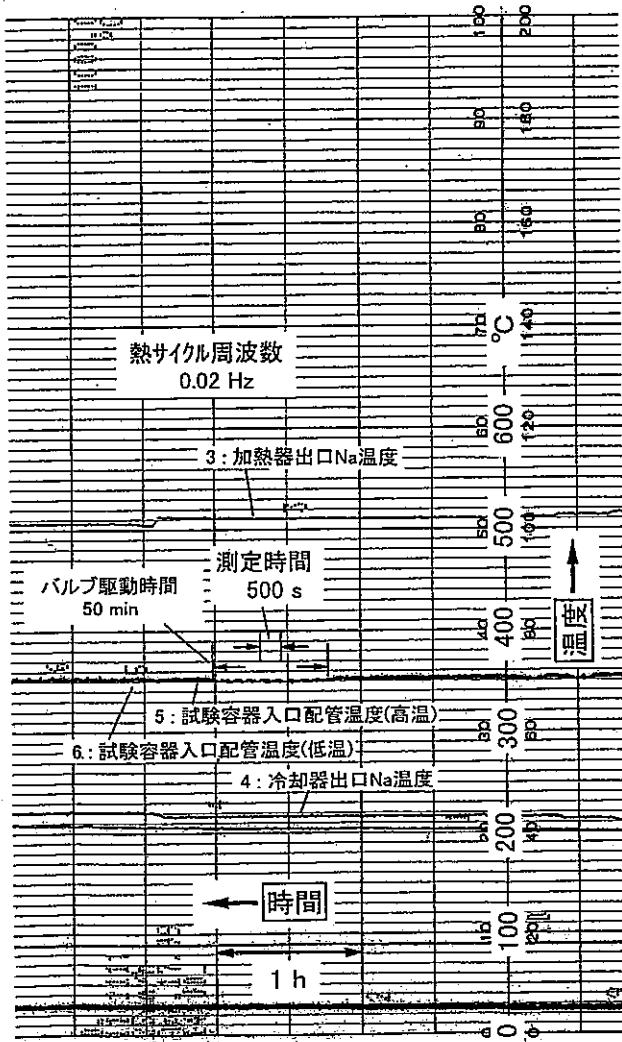


Appendix A-10 Temperature vibration in the material and sodium due to alternate flowing of hot and cold sodium (0.01Hz , the last stage)

付録B：実験中のNa温度モニタ



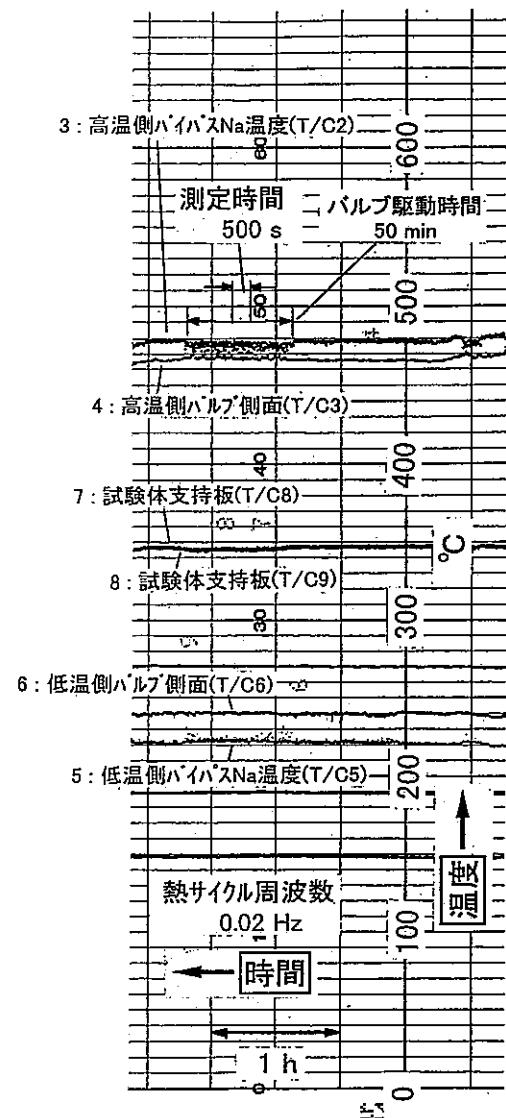
Appendix B-1 Sodium temperature under the experimental stage(1)



Appendix B-2 Sodium temperature under the experimental stage(2)

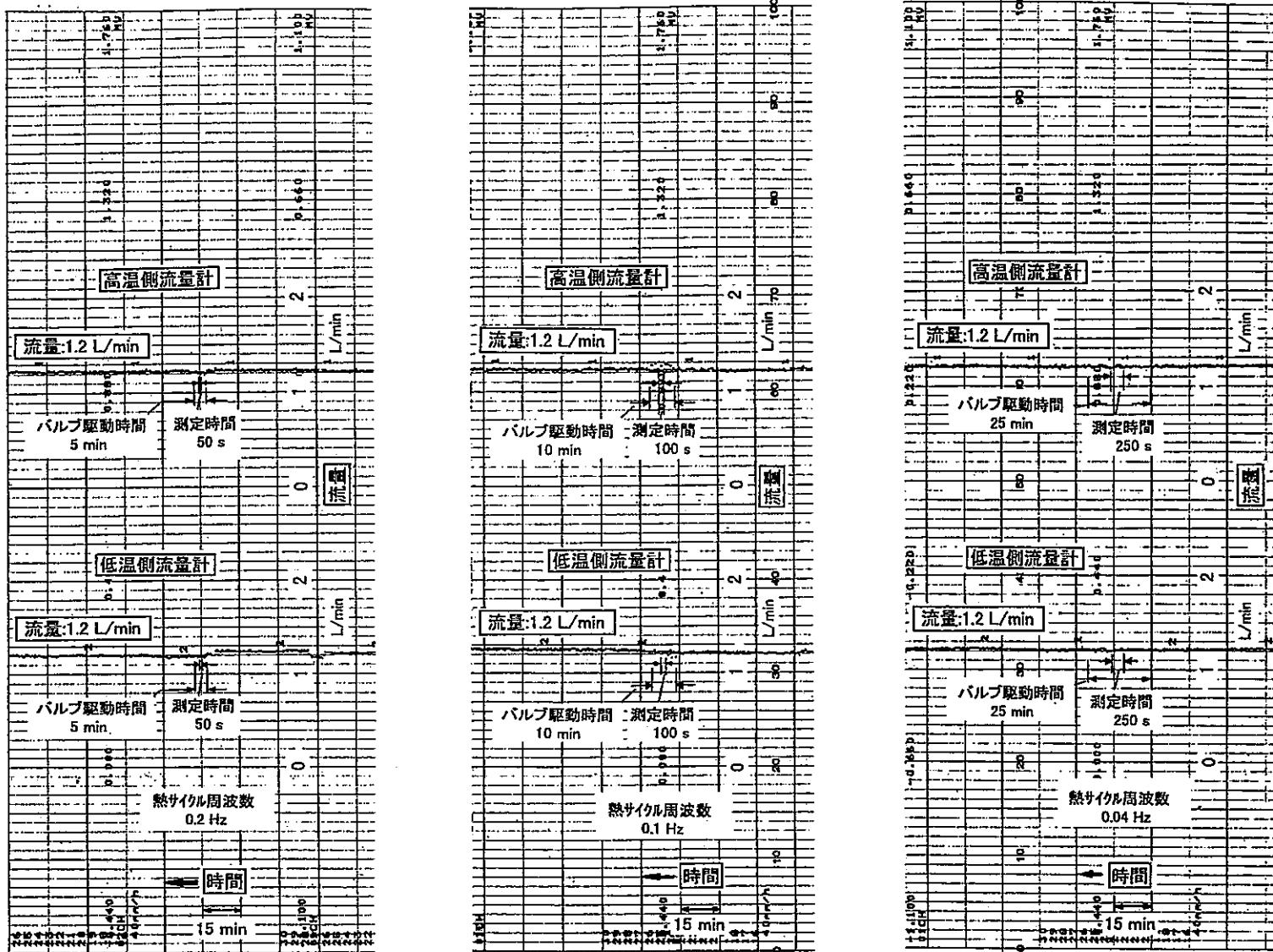


Appendix B-3 Sodium temperature under the experimental stage(3)

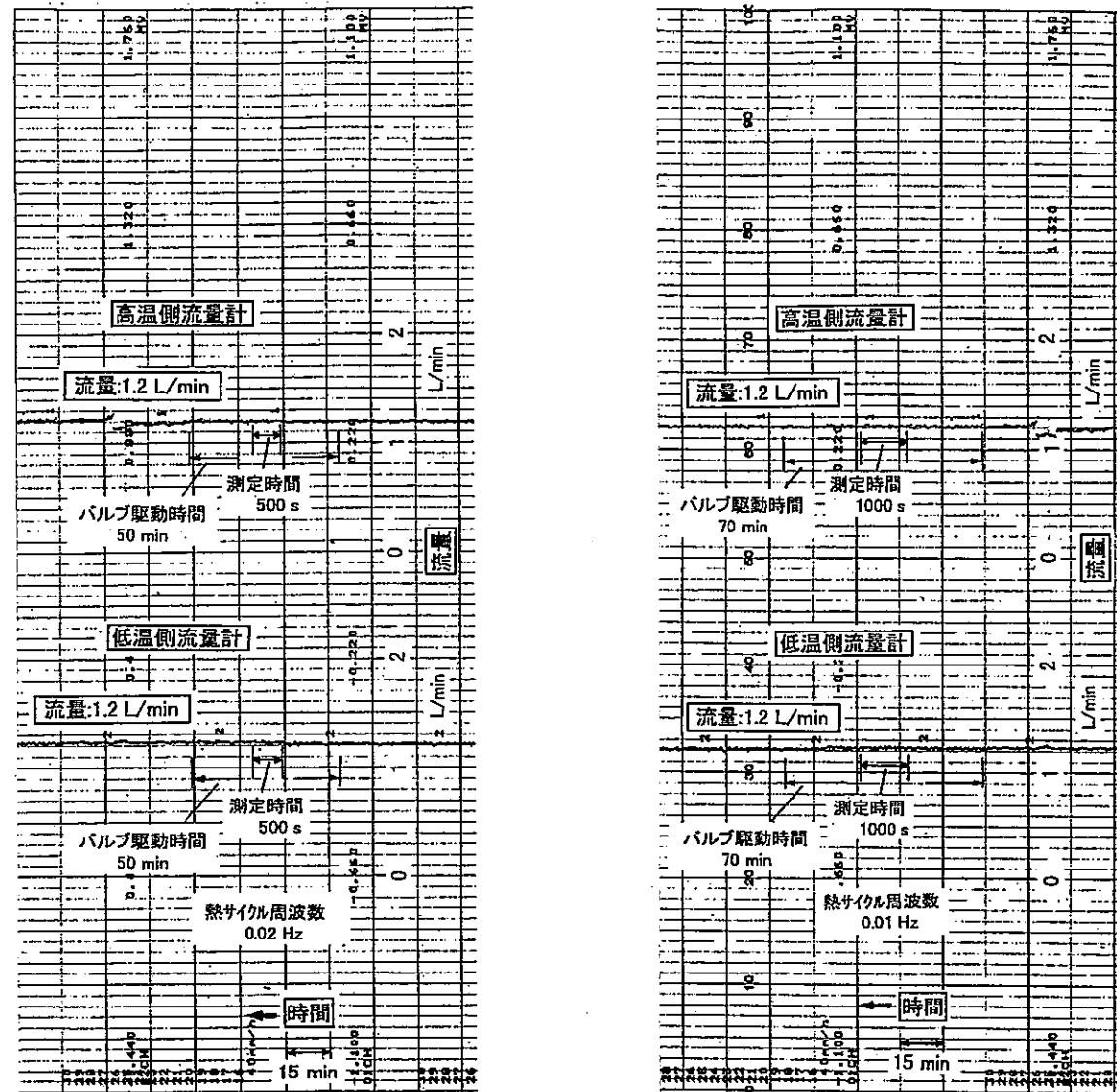


Appendix B-4 Sodium temperature under the experimental stage(4)

付録C：実験中のNa流量モニタ

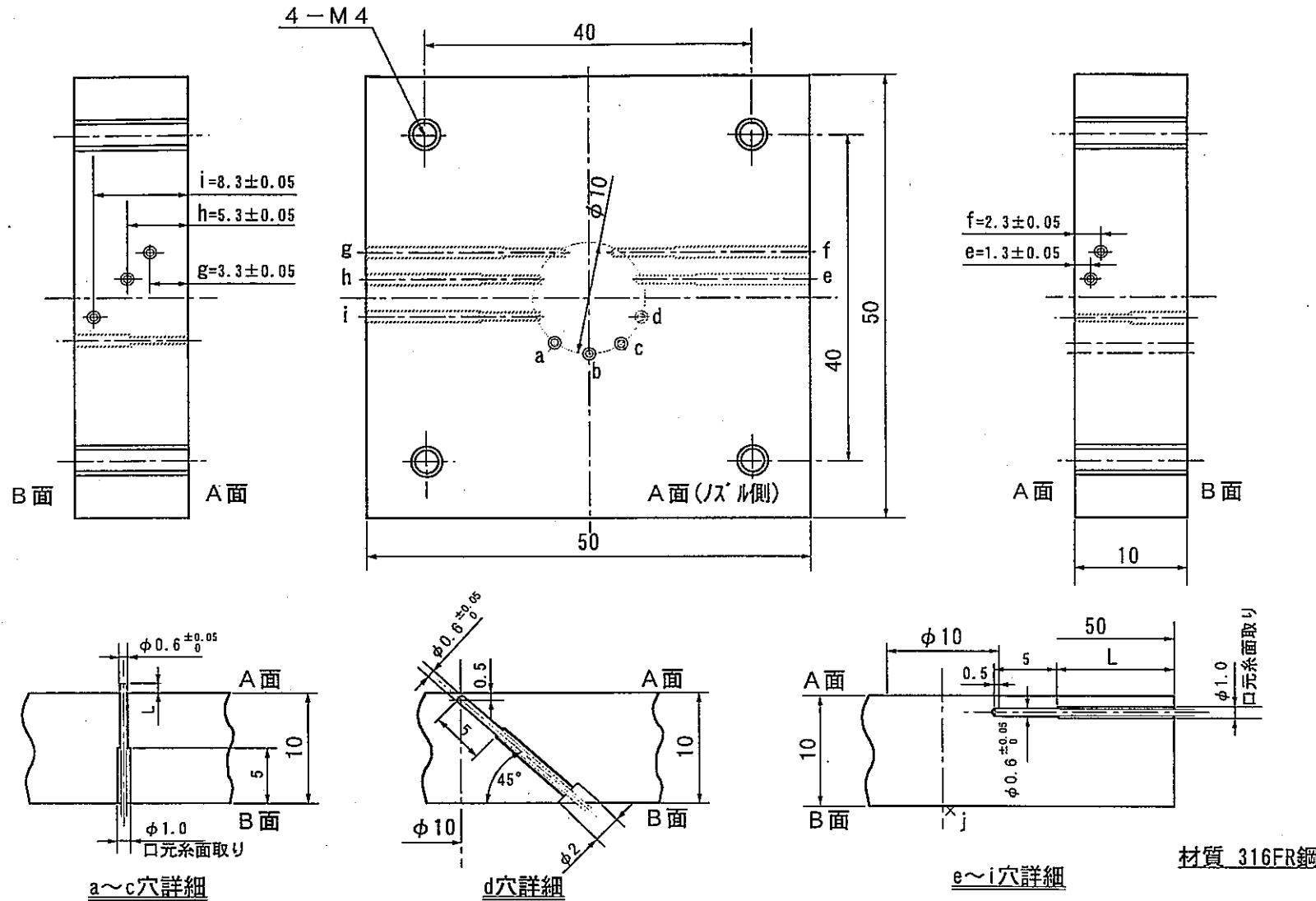


Appendix C-1 Sodium flowing under the experimental stage(1)



Appendix C-2 Sodium flowing under the experimental stage(2)

付録D：熱電対付試験体製作図



Appendix D-1 Detailed structure of test piece with thermocouples attachment