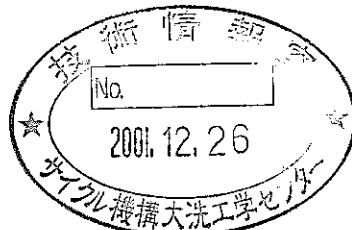


高信頼性 2 重管型蒸気発生器の開発
—DNB試験データ集—
(データ集)



2001年1月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

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

2001

2100

(KO)

高信頼性2重管型蒸気発生器の開発

—DNB試験データ集一

(データ集)

木曽原 直之*1 仲井 悟*2

佐藤 博之*3 谷田部 敏男*2

要旨

本報告書は1MWt小型2重管型蒸気発生器試験装置（2重管SG小型モデル）で実施されたDNB (Departure from Nucleate Boiling) 試験のデータ集である。生データとしてはDNB点およびその上下のナトリウム温度と外管内部温度を記載した。さらに、今後のDNB温度振動特性評価に用いることができるよう、温度振動生データからノイズ除去を行い、逆熱伝導解析により算出した内管内壁温度振動も記載した。また、伝熱管水側流量などの試験パラメータがDNB周期やDNB領域長さへ及ぼす影響についての観点からの整理も行った。試験データはすべて小型蒸気発生器試験施設に設置されたデータ収録装置を用いて記録した。

本データ集の内容は以下の通りである。

- (1) 試験装置、試験方法および試験条件
- (2) DNB領域長さ
- (3) DNB温度振動生データ（ナトリウム温度と外管内部温度）
- (4) DNB温度振動スペクトル解析結果
- (5) 内管内壁温度振動データ（逆熱伝導解析による計算値）

*1 システム技術開発部 FBRシステムGr (元 ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学Gr)

*2 要素技術開発部 施設保全Gr (元 ナトリウム・安全工学試験部 原子炉工学Gr)

*3 FBRサイクル開発推進部 炉システムGr (元 基盤技術開発部 熱流体技術開発室)

January, 2001

Development of a Double-Wall-Tube Steam Generator

—DNB Test Data —

Naoyuki KISOHARA*¹ Satoru NAKAI*²
Hiroyuki SATO*³ Toshio YATABE*²

Abstract

DNB (Departure from Nucleate Boiling) test were executed by a 1MWt Double-Wall-Tube Steam Generator. This data report describes the temperature fluctuation of the outer tube and sodium around DNB region. Furthermore, this report includes the temperature fluctuation of the inner surface of the inner tube obtained by removing noise of the original DNB signal and calculating heat flux of the tube, too. It also mentions the influence of the test parameter such as water flow rate on DNB period and DNB region length.

All the DNB data described in this report were recorded by the data acquisition system of the small steam generator test facility.

The contents are as followings :

- (1) 1MW double-wall-tube steam generator, test method and test condition
- (2) The length of DNB region
- (3) DNB temperature fluctuation of the outer tube and sodium (experimental data)
- (4) The spectrum of DNB temperature fluctuation
- (5) DNB temperature fluctuation of the inner surface of the inner tube
(calculation data)

* 1 Plant Safety Engineering Section, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center
* 2 Reactor Engineering Section, Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center
* 3 Reactor System Evaluation Group, FBR Cycle System Development Office, Head Office

高信頼性2重管型蒸気発生器の開発

—DNB 試験データ集—

1	緒言	1
2	試験目的、試験装置および試験方法	2
2.1	試験目的	2
2.2	試験装置	2
2.2.1	2重管 SG 小型モデル	2
2.2.2	DNB 温度計装	2
2.2.3	データ収録システム	2
2.2.4	熱電対校正	2
2.3	試験方法	3
2.3.1	DNB 温度振動測定試験	3
2.3.2	DNB 領域長さ測定試験	3
3	試験条件と結果	20
3.1	DNB 温度振動測定試験	20
3.2	DNB 領域長さ測定試験	20
4	逆熱伝導解析	27
4.1	ノイズ除去	27
4.1.1	トレンド除去	27
4.1.2	フーリエ変換	27
4.1.3	ノイズ除去	27
4.2	逆熱伝導解析	29
5	試験データ	45
5.1	DNB 温度振動測定試験結果	45
5.1.1	DNB 温度振動測定生データ	45
5.1.2	スペクトル解析データ	59
5.1.3	内管内壁温度逆熱伝導解析データ	73
5.2	DNB 領域長さ測定試験結果	87
5.2.1	DNB 領域長さ生データ	87
5.2.2	内管内壁温度逆熱伝導解析データ	99
6	DNB 温度振動特性	111
6.1	ピトー管流量との関係	111
6.2	DNB 振動周期	111
(1)	自己相関解析	
(2)	スペクトル解析	
6.3	DNB 領域長さ	112
7	結言	121

謝辞	122
参考文献	123
付録-1 ノイズ除去	124
付録-2 自己相関関数と相互相関関数	130

[表リスト]

表 2.2-1	2重管 SG 小型モデル主要目および定格運転条件	4
表 2.2-2	計装項目リスト	5
表 2.2-3	計装項目詳細リスト	6～8
表 2.2-4	DNB 用熱電対の温度補正係数	9～10
表 3.1-1	DNB 温度振動試験結果	21
表 3.2-1	DNB 領域長さ測定結果	22

[図リスト]

図 2.2-1	2重管 SG 小型モデル試験装置	11
図 2.2-2	2重管 SG 小型モデル伝熱管配列	12
図 2.2-3	2重管 SG 小型モデルプラグ伝熱管	13
図 2.2-4	DNB 計測用熱電対設置位置（軸方向）	14
図 2.2-5	DNB 計測用熱電対設置位置（径方向）	15
図 2.2-6	DNB 計測用熱電対取付状況	16
図 2.2-7	データ収録システム概念図	17
図 2.3-1	DNB 温度振動試験方法	18
図 2.3-2	DNB 領域長さ測定試験	19
図 3.1-1	DNB 温度振動試験結果	23
図 3.1-2	DNB 温度振動試験結果（ナトリウム温度）	24
図 3.1-3	DNB 温度振動試験結果（外管表面温度）	25
図 3.2-1	DNB 領域長さ測定試験結果	26
図 4.1-1	DNB 温度振動試験結果（トレンド除去前）	30
図 4.1-2	DNB 温度振動試験結果（トレンド除去後）	31
図 4.1-3	DNB 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）	32
図 4.1-4	DNB 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル（Na 温度）	33
図 4.1-5	DNB 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル（外管外表面温度）	34
図 4.1-6	DNB 領域ノイズ除去データ（外管内部温度）	35
図 4.1-7	DNB 領域外温度ノイズ除去データ（外管内部温度）	36
図 4.1-8	DNB 領域外温度ノイズ除去データ（外管内部温度）	37
図 4.1-9	ノイズ除去後データ	38
図 4.1-10	ナトリウム温度と外管内部温度（ノイズ除去データ）	39
図 4.1-11	ナトリウム温度と外管内部温度（ノイズ除去データ）	40
図 4.1-12	ナトリウム温度と外管内部温度の相互相関関数	41
図 4.1-13	ナトリウム温度と外管内部温度（逆熱伝達解析用データ）	42

図 4.2-1	逆熱伝導解析説明図	43
図 4.2-2	逆熱伝導解析結果	44
図 5.1.1 (1)~(12)	DNB 温度振動測定生データ	47 ~ 58
図 5.1.2 (1)~(11)	DNB 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル	61 ~ 71
図 5.1.3 (1)~(12)	逆熱伝導解析結果	75 ~ 86
図 5.2.1 (1)~(10)	DNB 領域長さ測定試験生データ	89 ~ 98
図 5.2.2 (1)~(10)	内管内壁温度逆熱伝導解析	101 ~ 110
図 6.1-1	DNB 温度振動とピトー管流量の関係	113
図 6.1-2	DNB 温度振動とピトー管流量の相互相関関数	114
図 6.2-1	DNB 温度振動の自己相関関数	115
図 6.2-2	DNB 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）	116
図 6.2-3	DN 領域と DNB 領域外の温度振動スペクトル	117
図 6.2-4	質量流速の温度振動スペクトルへの影響	118
図 6.2-5	蒸気圧力が温度振動スペクトルへ及ぼす影響	119
図 6.3-1	水側質量流速、蒸気圧力と DNB 領域長さの関係	120

1 緒言

経済性にすぐれた高速増殖炉プラントの実現においては、2次系削除型プラントの採用が有効な方策の一つと考えられる。この2次系削除型プラントは、従来プラントの2次系が有していた安全上の役割を2重管蒸気発生器が中心となって担わなければならないため、高い信頼性が要求される。

蒸気発生器の破損要因である伝熱管の座屈、腐食、SCC、フレッティング等については、適切な設計および運転・保守によって避けることが可能と考えられる。また、蒸気発生器の健全性、運転性に影響のある流動不安定についても運転条件によって避けることは可能である。しかし、DNB (Departure from Nucleate Boiling) 温度振動は通常運転時において常時発生しており、これによる伝熱管の熱疲労は避けがたい問題である。

DNB熱疲労は、伝熱管蒸気側における熱伝達率の大きい核沸騰領域と相対的に低い膜沸騰領域の局所的な状態変化による伝熱管内壁温度振動に起因する。この熱疲労はプラントの全供用期間にわたって継続して発生しており、蒸気発生器の設計においては十分考慮すべき項目の一つとなっている。

DNB熱疲労解析については、今までに種々の検討がなされているが、今までに行われてきた検討は、そのほとんどが単管の伝熱管に対してであり、2重管に対して実施された例は少ない。このため2重管SGでのDNB温度振動現象の評価を行う必要があり、1MWtの小型2重管型蒸気発生器試験装置（2重管SG小型モデル）を用いてDNB域の温度振動を測定した。本データ集はこのDNB試験での試験装置、試験方法および試験結果（DNB領域温度振動データ）を記載した。本データ集は単に生データだけでなく、今後のDNB温度振動特性評価に用いることができるよう、生データからノイズ除去を行い、逆熱伝導解析により内管内壁温度振動の算出も行った結果もあわせて記載した。さらに伝熱管水側流量や蒸気圧力などの試験パラメータがDNB周期やDNB領域長さ及ぼす影響についての観点からも整理を行った。

2 DNB試験の目的、装置および試験方法

2.1 試験目的

伝熱管DNBによる温度振動特性の把握および熱疲労解析を行うために必要な温度振動データを得ることを目的とする。熱疲労上、最も厳しい条件になるのは内管内壁温度であるが、試験では直接内壁温度の計測は困難であり、本データ集では計測点であるナトリウム温度および外管内部温度から内管内壁温度温度を算出した結果を記載する。

2.2 試験装置

2.2.1 2重管SG小型モデル

定格交換熱量1Mwtの2重管SG小型モデル試験体を製作した。この試験体は軸方向の長さおよび温度プロフィールについては大型SGを模擬しており、各種伝熱流動試験等（伝熱特性試験、流動安定性試験、内管リーク検出試験、DNB試験）を実施した。

2重管SG小型モデルの主要目と定格運転条件を表2.2-1に、また装置概念図を図2.1-1と図2.2-2に示す。最初は通水管10本で試験を実施し、さらに実機相当の水側高質量流速条件での特性を把握するため、4本をプラグし通水管6本で試験を行った。このプラグ伝熱管を図2.2-3に示す。

2.2.2 DNB温度計装

DNB温度振動計測については、図2.2-3に示すように、通水管10本（プラグ後は6本）のうち1本にDNB計測用熱電対を設置し、その温度振動を詳細に測定できるようにした。

DNB温度振動計測用熱電対の軸方向および径方向設置位置を図2.2-4～図2.2-6に示す。軸方向については予め予備解析によりDNB位置を予測し、その近傍に200mmまたは300mm間隔に14箇所（3.2m）に渡って熱電対を設置した。同一平面においては、ナトリウム温度、外管外表面温度、外管内部温度の3点を計測した。

2.2.3 データ収録システム

データ収録は表2.2-2に示すように、2重管SG小型モデルおよび各流体の温度と流量を計測した。それぞれの熱電対のTag. No.の詳細については表2.2-3(1/4)～(4/4)に記載する。

また、データ処理の一連の流れを図2.2-7に示す。試験施設の各種計測機器からの信号は計測機器によって電圧値、電流値が異なるため、信号変換器（増幅器）によって、一律に1～5Vに変換される。この後、A/D変換器によって信号をデジタル化し、光磁気ディスクに収録する。さらに、収録データは解析、評価のために様々な計算処理が必要であるため、各計測機器からの電圧信号を実際の温度、圧力、流量に変換した（工業値変換）。

なお、同図には各機器の測定精度も記載する。

2.2.4 热電対校正

2重管SG小型モデルに通水しない状態でナトリウム等温運転を行いDNB用熱電対校正試験を実施した。試験では最初に、Na入口温度およびNa流量を試験条件に設定し、30分継続してNa出口温度の変動幅が±2℃であることを確認した上でデータを収録した。収録間隔は1.0秒、収録時間は10分である。

[校正試験条件]・

ナトリウム入口温度・・・250, 300, 350, 380 (°C)

ナトリウム流量・・・50, 100, 200 (ℓ/min)

熱電対の補正式を以下に示す。ただし、T(i)は実験データ、AおよびBは各熱電対の補正係数で ΔT_i が温度補正值である。各熱電対における補正係数A、Bを表2.2-4に示す。

$$\Delta T_i = A + B \times T(i)$$

2.3 試験方法

試験は、DNB領域での温度振動（振幅と周期）を測定するDNB温度振動試験とDNB領域の長さを測定する試験の2つに分類される。以下にその試験方法を記す。

2.3.1 DNB温度振動試験

ナトリウム入口温度、給水流量等の各パラメータを設定する。ただしナトリウム流量は目安とする。最初に試験条件を設定した場合、14組のDNB計測用熱電対の温度分布により、DNB領域のおよその位置がわかるため、熱電対の中央近傍にDNB点が来るようナトリウム流量を増減させる。

例えば、図2.3-1に示すように、DNB領域が熱電対TDIS08より下方にある場合(①)はNa流量を減少させる。これによって、DNB領域は上方へ移動し、やがて熱電対TDIS08はDNB領域の中央部に位置するようになり、最大振幅を迎える。この状態でナトリウム流量一定のまま、5分間大きな変動がない状態の基でデータ収録を行う。

(サンプリング周期：10msec、サンプリング時間：5分)

2.3.2 DNB領域長さ測定試験

DNB領域の長さを測定するには、2つの熱電対の間を一定速度でDNB領域を通過させることによって行う。

DNB領域が熱電対TDIS08の下方にある場合には、Na流量を徐々に減少させる。これにより、DNB領域は上昇し、熱電対TDIS08→熱電対TDIS07の順に温度振動が観測され、DNB領域の移動時間を計測する。データ収録はサンプリング周期100msec、サンプリング時間1時間とする。

図2.3-2を参考に以下の方法にてDNB領域長さLを求める。

1) DNB領域の下端が低温側熱電対TDIS08と一致している状態Aから上端が高温側熱電対TDIS07と一致している状態BまでへDNB領域が移動する時間(Δt_2)および状態AからDNB領域の下端が高温側熱電対TDIS07と一致している状態Cまでの時間(Δt_1)を計測する。

2) X_{TC} (熱伝対間距離) は予めわかっており、次の関係が成立する。

$$V = X_{TC} / t_2 \quad V : \text{DNB領域移動速度}$$

$$X = V \times t_1 \quad X : \text{熱電対間距離} - \text{DNB領域長さ}$$

$$X_{TC} = L + X \quad L : \text{DNB領域長さ}$$

上式より、DNB領域長さLを求める。

表2.2-1 2重管SG小型モデル主要目および定格運転条件

項目		仕 様
本 体	型 式	一体貫流2重直管型SG
	交換熱量	定格1MWt(最大1.2MWt)
伝 熱 管	型 式	密着型
	材 質	Mod.9Cr-1Mo鋼
	外 径	19.0mm
	通水管本数	10本(伝熱管プラグ前) 6本(伝熱管プラグ後)
	配 列 ピッチ	正三角形 36mm
管 板	型 式	2枚管板
	形 状	平板

項 目	仕 様
Na入口温度 °C	505
Na出口温度 °C	360
給水温度 °C	240
蒸気温度 °C	487
蒸気圧力 kg/cm ² A	132
Na流量 t/h	19.57
給水流量 t/h	1.6
Na / 給水流量比	12.23

表2.2-2 計測項目リスト

熱電対

計測対象	計測位置	点数	計測点記号	Tag. No.
蒸気	蒸気出口部	10	A-1～A-10	TSST01～TSST10
Na	通水管(210°方向)	9	B-1-1～B-1-9	TN2101～TN2109
	通水管(330°方向)	9	B-2-1～B-2-9	TN3301～TN3309
	DNB管近傍	5	B-3-1～B-3-5	TNDN01～TNDN05
	通水管(30°方向)	13	B-4-1～B-4-13	TN0301～TN0313
	ダミー管近傍	5	B-5-1～B-5-5	TNDU01～TNDU05
He	上部Heプレナム部 下部Heプレナム部	1 1	C-1 C-2	THUP01 THL001
DNB管	伝熱管外管	14	D-1-1～D-1-14	TDOS01～TDOS14
	伝熱管内管	14	D-2-1～D-2-14	TDIS01～TDIS14
	ナトリウム	14	D-3-1～D-3-14	TDNA01～TDNA14
SG本体	胴部(外表面)	9	E-1-1～E-1-9	TGSH01～TGSH09
	上/下Heプレナム胴	2	E-2-1～E-2-2	TGUP01, TGL001
	ベローズ接合部	2	E-3-1～E-3-2	TGBE01～TGBE02
	給水管板	2	E-4-1～E-4-2	TGFE01～TGFE02
	Na出口管板	2	E-5-1～E-5-2	TGN001～TGN002
	Na入口管板	8	E-6-1～E-6-8	TGNI01～TGNI08
	蒸気出口管板	8	E-7-1～E-7-8	TGST01～TGST08
	Heプレナム伝熱管	2	E-8-1～E-8-2	TGHE01～TGHE02

流量計

計測対象	計測位置	点数	計測点記号	Tag. No.
流入流量	通水管	6		FW0001 FW0902 FW1203 FW1804 FW2105 FW3306

表2.2-3(1/3) 計測項目詳細リスト

番号	計測点記号	Tag. No.	計測項目	取付場所	方向 deg	取付位置	端子番号	備考
1	A-1	TSST01	蒸気温度	蒸気出口部	中央	773	TB1 - 1	
2	A-2	TSST02			0	773	TB1 - 2	
3	A-3	TSST03			60	773	TB1 - 3	
4	A-4	TSST04			90	773	TB1 - 4	
5	A-5	TSST05			120	773	TB1 - 5	
6	A-6	TSST06			180	773	TB1 - 6	
7	A-7	TSST07			210	773	TB1 - 7	
8	A-8	TSST08			240	773	TB1 - 8	
9	A-9	TSST09			300	773	TB1 - 9	
10	A-10	TSST10			330	773	TB1 - 10	
11	B-1-1	TN2101	Na温度	通水管軸方向	↑	3045	TB1 - 11	
12	B-1-2	TN2102				6045	TB1 - 12	
13	B-1-3	TN2103				8045	TB1 - 13	
14	B-1-4	TN2104				10045	TB1 - 14	
15	B-1-5	TN2105				12045	TB1 - 15	
16	B-1-6	TN2106				14045	TB1 - 16	
17	B-1-7	TN2107				16045	TB1 - 17	
18	B-1-8	TN2108				18045	TB1 - 18	
19	B-1-9	TN2109			↓	19999	TB1 - 19	
20	B-2-1	TN3301	Na温度	通水管軸方向	↑	3045	TB1 - 20	
21	B-2-2	TN3302				6045	TB1 - 21	
22	B-2-3	TN3303				8045	TB1 - 22	
23	B-2-4	TN3304				10045	TB1 - 23	
24	B-2-5	TN3305				12045	TB1 - 24	
25	B-2-6	TN3306				14045	TB1 - 25	
26	B-2-7	TN3307				16045	TB1 - 26	
27	B-2-8	TN3308				18045	TB1 - 27	
28	B-2-9	TN3309			↓	19999	TB1 - 28	
29	B-3-1	TNDN01	Na温度	DNB管近傍	↑	3045	TB1 - 29	
30	B-3-2	TNDN02				10045	TB1 - 30	
31	B-3-3	TNDN03				14045	TB1 - 31	
32	B-3-4	TNDN04				16045	TB1 - 32	
33	B-3-5	TNDN05			↓	19999	TB1 - 33	
34	B-4-1	TN0301	Na温度	通水管軸方向	↑	3045	TB1 - 34	
35	B-4-2	TN0302				6045	TB1 - 35	
36	B-4-3	TN0303				8045	TB1 - 36	
37	B-4-4	TN0304				10045	TB1 - 37	
38	B-4-5	TN0305				11045	TB1 - 38	
39	B-4-6	TN0306				12045	TB1 - 39	
40	B-4-7	TN0307				13045	TB1 - 40	
41	B-4-8	TN0308				14045	TB1 - 41	
42	B-4-9	TN0309				15045	TB1 - 42	
43	B-4-10	TN0310				16045	TB1 - 43	
44	B-4-11	TN0311				17045	TB1 - 44	
45	B-4-12	TN0312				18045	TB1 - 45	
46	B-4-13	TN0313			↓	19999	TB1 - 46	

表2.2-3(2/3) 計測項目詳細リスト

番号	計測点記号	Tag. No.	計測項目	取付場所	方向 deg	取付位置	端子番号	備考
47	B-5-1	TNDU01	Na 温度	ダミ一管近傍 軸方向	↑	3045	TB1 - 47	
48	B-5-2	TNDU02			49	10045	TB1 - 48	
49	B-5-3	TNDU03			↓	14045	TB1 - 49	
50	B-5-4	TNDU04			↓	16045	TB1 - 50	
51	B-5-5	TNDU05			↓	19999	TB1 - 51	
52	C-1	THUP01	He 温度	上部Heプローブ部 下部Heプローブ部	0	963	TB1 - 52	
53	C-2	THL001	He 温度		180	20994	TB1 - 53	
54	D-1-1	TDIS01	伝熱管 温度	DNB外管内部 軸方向	↑	13345	TB1 - 54	
55	D-1-2	TDIS02			330	13645	TB1 - 55	
56	D-1-3	TDIS03			↓	13945	TB1 - 56	
57	D-1-4	TDIS04			↑	14245	TB1 - 57	
58	D-1-5	TDIS05			330	14545	TB1 - 58	
59	D-1-6	TDIS06			↓	14845	TB1 - 59	
60	D-1-7	TDIS07			↑	15045	TB1 - 60	
61	D-1-8	TDIS08			330	15245	TB1 - 61	
62	D-1-9	TDIS09			↓	15445	TB1 - 62	
63	D-1-10	TDIS10			↑	15645	TB1 - 63	
64	D-1-11	TDIS11			330	15945	TB1 - 64	
65	D-1-12	TDIS12			↓	16245	TB2 - 1	
66	D-1-13	TDIS13			↑	16545	TB2 - 2	
67	D-1-14	TDIS14			330	16845	TB2 - 3	
68	D-2-1	TDOS01	伝熱管 温度	DNB外表面 軸方向	↑	13345	TB2 - 4	
69	D-2-2	TDOS02			330	13645	TB2 - 5	
70	D-2-3	TDOS03			↓	13945	TB2 - 6	
71	D-2-4	TDOS04			↑	14245	TB2 - 7	
72	D-2-5	TDOS05			330	14545	TB2 - 8	
73	D-2-6	TDOS06			↓	14845	TB2 - 9	
74	D-2-7	TDOS07			↑	15045	TB2 - 10	
75	D-2-8	TDOS08			330	15245	TB2 - 11	
76	D-2-9	TDOS09			↓	15445	TB2 - 12	
77	D-2-10	TDOS10			↑	15645	TB2 - 13	
78	D-2-11	TDOS11			330	15945	TB2 - 14	
79	D-2-12	TDOS12			↓	16245	TB2 - 15	
80	D-2-13	TDOS13			↑	16545	TB2 - 16	
81	D-2-14	TDOS14			330	16845	TB2 - 17	
82	D-3-1	TDNA01	Na 温度	DNB外管近傍 軸方向	↑	13345	TB2 - 18	
83	D-3-2	TDNA02			330	13645	TB2 - 19	
84	D-3-3	TDNA03			↓	13945	TB2 - 20	
85	D-3-4	TDNA04			↑	14245	TB2 - 21	
86	D-3-5	TDNA05			330	14545	TB2 - 22	
87	D-3-6	TDNA06			↓	14845	TB2 - 23	
88	D-3-7	TDNA07			↑	15045	TB2 - 24	
89	D-3-8	TDNA08			330	15245	TB2 - 25	
90	D-3-9	TDNA09			↓	15445	TB2 - 26	
91	D-3-10	TDNA10			↑	15645	TB2 - 27	
92	D-3-11	TDNA11			330	15945	TB2 - 28	
93	D-3-12	TDNA12			↓	16245	TB2 - 29	
94	D-3-13	TDNA13			↑	16545	TB2 - 30	
95	D-3-14	TDNA14			330	16845	TB2 - 31	

表2.2-3(3/3) 計測項目詳細リスト

番号	計測点記号	Tag No.	計測項目	取付場所	方向 deg	取付位置	端子番号	備考
96	E-1-1	TGSH01	SG温度	胴部(外表面) 軸方向	↑	3645	TB2 - 32	
97	E-1-2	TGSH02				5645	TB2 - 33	
98	E-1-3	TGSH03				7645	TB2 - 34	
99	E-1-4	TGSH04			30	9645	TB2 - 35	
100	E-1-5	TGSH05				11645	TB2 - 36	
101	E-1-6	TGSH06				13645	TB2 - 37	
102	E-1-7	TGSH07			↓	15645	TB2 - 38	
103	E-1-8	TGSH08				45	17645	TB2 - 39
104	E-1-9	TGSH09				60	18645	TB2 - 40
105	E-2-1	TGUP01	SG温度	上Heプローブ 下Heプローブ	30	964	TB2 - 41	
106	E-2-2	TGL001				20838	TB2 - 42	
107	E-3-1	TGBE01	SG温度	ペローズ接合部	30	19005	TB2 - 43	
108	E-3-2	TGBE02				19705	TB2 - 44	
109	E-4-1	TGFE01	SG温度	給水管板	90	21104	TB2 - 45	
110	E-4-2	TGFE02				21229	TB2 - 46	
111	E-5-1	TGN001	SG温度	Na出口管板	90	20445	TB2 - 47	
112	E-5-2	TGN002				20390	TB2 - 48	
113	E-6-1	TGNI01	SG温度	Na入口管板	↑	1845	TB2 - 49	
114	E-6-2	TGNI02			90	1825	TB2 - 50	
115	E-6-3	TGNI03				1785	TB2 - 51	
116	E-6-4	TGNI04			↓	1750	TB2 - 52	
117	E-6-5	TGNI05			↑	1845	TB2 - 53	
118	E-6-6	TGNI06			270	1825	TB2 - 54	
119	E-6-7	TGNI07				1785	TB2 - 55	
120	E-6-8	TGNI08			↓	1750	TB2 - 56	
121	E-7-1	TGST01	SG温度	蒸気出口管板	↑	893	TB2 - 57	
122	E-7-2	TGST02			270	818	TB2 - 58	
123	E-7-3	TGST03				768	TB2 - 59	
124	E-7-4	TGST04			↓	753	TB2 - 60	
125	E-7-5	TGST05			↑	893	TB2 - 61	
126	E-7-6	TGST06			90	818	TB2 - 62	
127	E-7-7	TGST07				768	TB2 - 63	
128	E-7-8	TGST08			↓	753	TB2 - 64	
129	E-8-1	TGHE01	SG温度	Heプローナム 伝熱管	180	1223	TB3 - 1	
130	E-8-2	TGHE02				20819	TB3 - 2	
131	F-1-1	FW0001	給水流量	各通水管入口	中央	↑	TB3 - 3	
132	F-1-2	FW0902			90		TB3 - 4	
133	F-1-3	FW1203			120		TB3 - 5	
134	F-1-4	FW1804			180		TB3 - 6	
135	F-1-5	FW2105			210		TB3 - 7	
136	F-1-6	FW3306			330	↓	TB3 - 8	

表2.2-4 (1/2) DNB用熱電対の温度補正係数 (1992年6月実施校正試験)

熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B	熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B	熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B
TDNA01	-0.005327	0.09605×10-2	TDOS01	-1.412	0.08787×10-2	TDIS01	1.892	-0.5126×10-2
TDNA02	-0.08066	0.3534×10-2	TDOS02	-0.9777	0.4203×10-2	TDIS02	0.23	-0.3885×10-2
TDNA03	0.2695	0.3042×10-2	TDOS03	0.6255	-0.4297×10-2	TDIS03	0.3345	-0.3225×10-2
TDNA04	-0.1493	0.3277×10-2	TDOS04	-0.9203	0.3536×10-2	TDIS04	0.728	-0.4679×10-2
TDNA05	-0.2454	0.2590×10-2	TDOS05	-0.9805	0.1545×10-2	TDIS05	0.7145	-0.5493×10-2
TDNA06	-0.165	0.1753×10-2	TDOS06	-0.07829	0.1653×10-2	TDIS06	0.9858	0.4995×10-2
TDNA07	-0.4331	0.2123×10-2	TDOS07	-1.176	0.3411×10-2	TDIS07	0.4566	-0.3108×10-2
TDNA08	0.227	0.3473×10-2	TDOS08	-0.7498	0.4054×10-2	TDIS08	-0.1054	-0.3603×10-2
TDNA09	0.6409	0.2985×10-2	TDOS09	-0.2315	0.2599×10-2	TDIS09	0.3539	-0.3811×10-2
TDNA10	0.6751	0.1936×10-2	TDOS10	0.1561	0.2165×10-2	TDIS10	1.26	-0.5687×10-2
TDNA11	0.7476	0.1802×10-2	TDOS11	0.4512	0.06967×10-2	TDIS11	0.1394	-0.4736×10-2
TDNA12	0.5128	0.1690×10-2	TDOS12	0.1728	0.2173×10-2	TDIS12	-1.734	-0.3564×10-2
TDNA13	0.3736	0.2190×10-2	TDOS13	-0.08724	0.1734×10-2	TDIS13	-1.51	-0.2437×10-2
TDNA14	0.5049	0.09997×10-2	TDOS14	-0.268	0.09200×10-2	TDIS14	-1.041	-0.3481×10-2

表2.2-4 (2/2) DNB用熱電対の温度補正係数 (1995年11月実施校正試験)

熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B	熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B	熱電対番号	補正係数 A	補正係数 B
TDNA01	0.04605	-0.07564×10-2	TDOS01	-0.247	-0.2779×10-2	TDIS01	2.116	-0.6045×10-2
TDNA02	0.01254	0.2582×10-2	TDOS02	-0.3847	0.07996×10-2	TDIS02	-0.06706	-0.2963×10-2
TDNA03	0.2253	0.2141×10-2	TDOS03	0.6515	0.2820×10-2	TDIS03	-0.09065	-0.1586×10-2
TDNA04	-0.1746	0.2183×10-2	TDOS04	-0.63	0.2453×10-2	TDIS04	0.02195	-0.1971×10-2
TDNA05	-0.9327	0.4111×10-2	TDOS05	-1.095	0.3334×10-2	TDIS05	0.4052	-0.3926×10-2
TDNA06	-0.4471	0.1707×10-2	TDOS06	-0.747	0.3838×10-2	TDIS06	0.4822	-0.3526×10-2
TDNA07	-0.6736	0.2567×10-2	TDOS07	-0.6409	0.3247×10-2	TDIS07	0.6859	-0.3940×10-2
TDNA08	-0.1796	0.4183×10-2	TDOS08	-0.1431	0.1736×10-2	TDIS08	-0.05806	-0.3735×10-2
TDNA09	0.6594	0.2258×10-2	TDOS09	-0.05543	0.2589×10-2	TDIS09	0.4335	-0.2386×10-2
TDNA10	0.1262	0.2807×10-2	TDOS10	-0.104	0.2586×10-2	TDIS10	0.5401	-0.3485×10-2
TDNA11	0.5996	0.1558×10-2	TDOS11	0.7462	0.1482×10-2	TDIS11	1.016	-0.3795×10-2
TDNA12	0.6598	0.5552×10-2	TDOS12	0.5525	0.03414×10-2	TDIS12	-2.387	-0.3563×10-2
TDNA13	0.4159	0.1081×10-2	TDOS13	0.6922	0.04006×10-2	TDIS13	-1.697	-0.4342×10-2
TDNA14	0.6172	0.1123×10-2	TDOS14	-0.2094	0.0221×10-2	TDIS14	0.2752	-0.2430×10-2

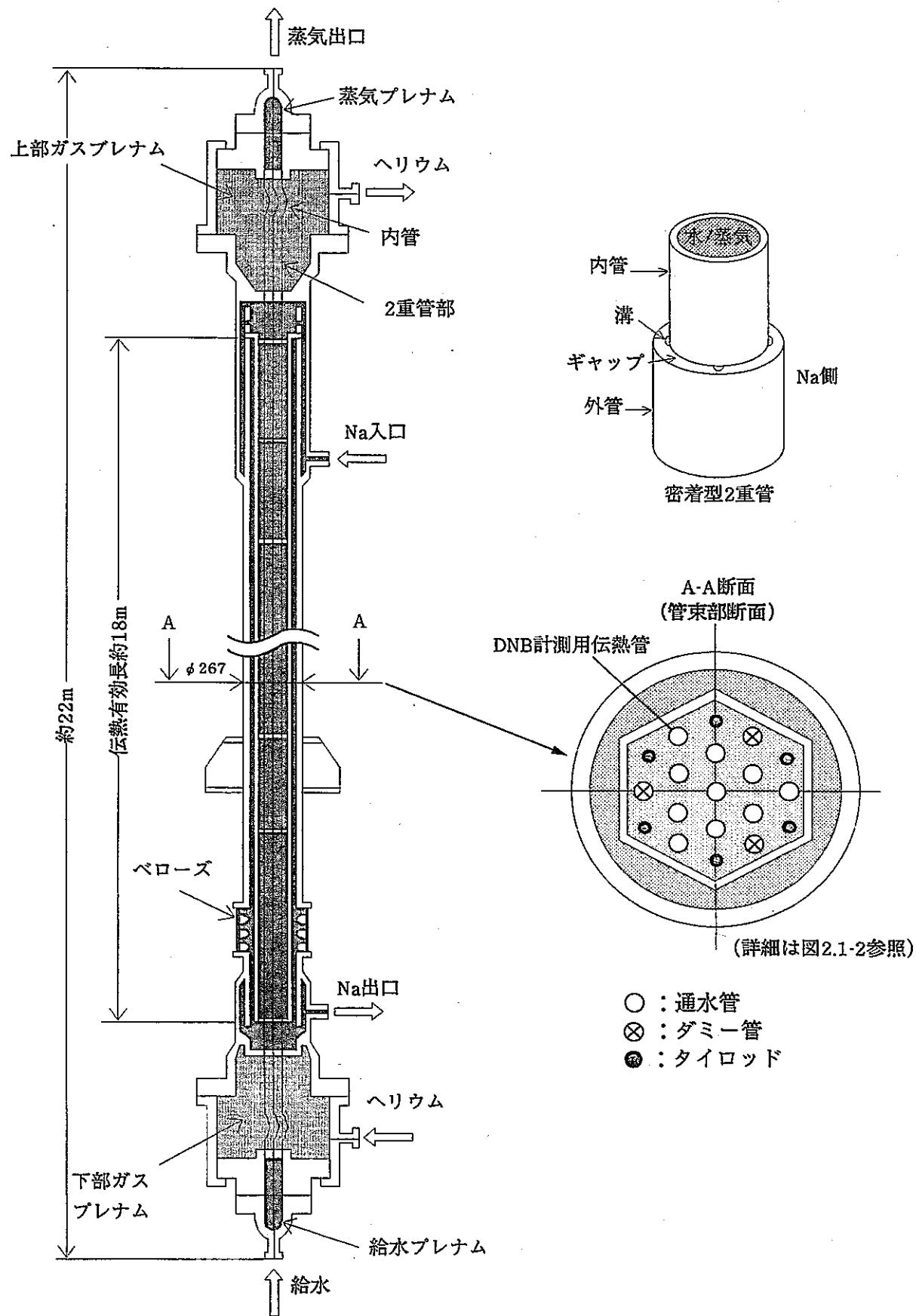


図2.2-1 2重管SG小型モデル試験装置

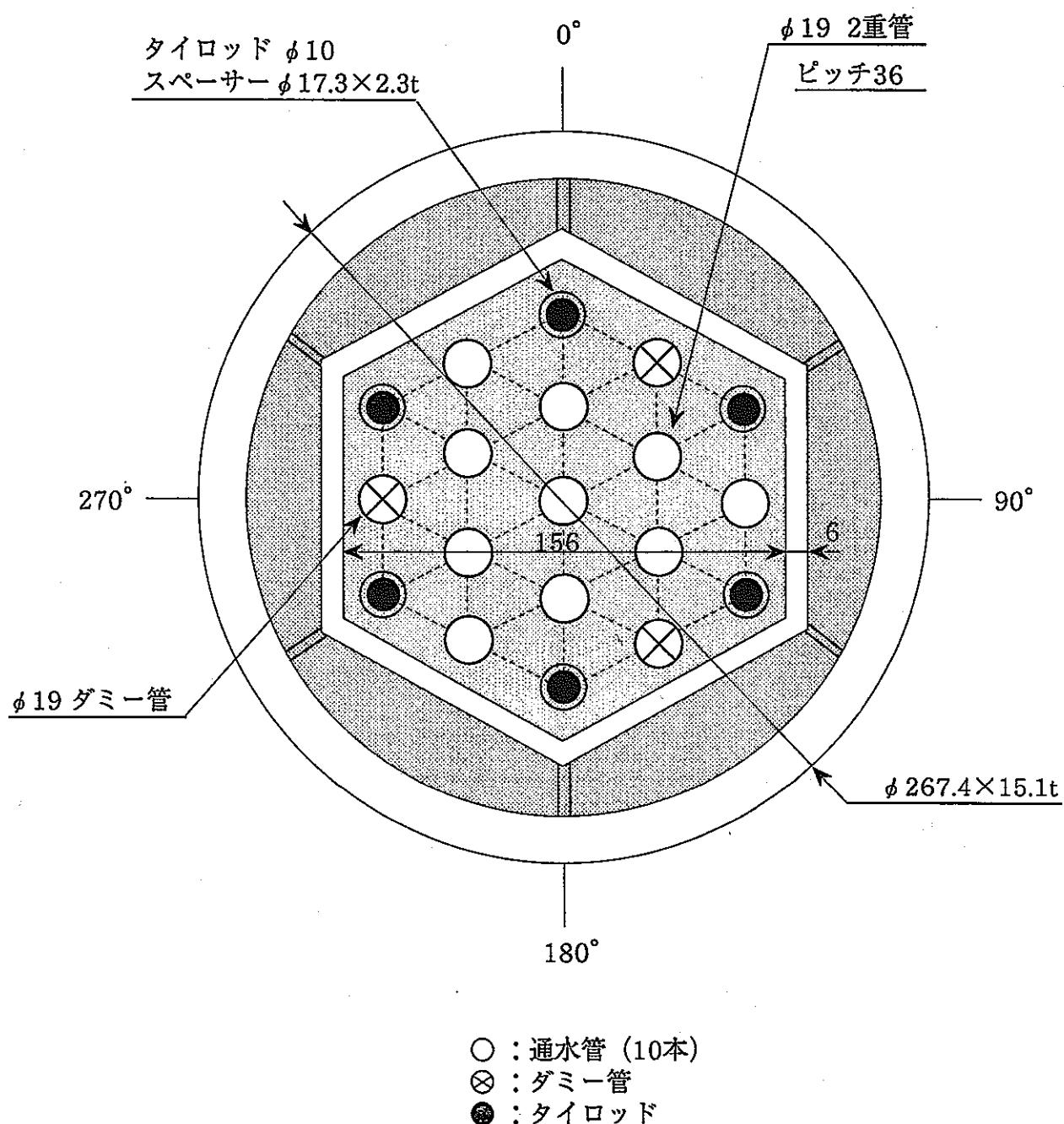
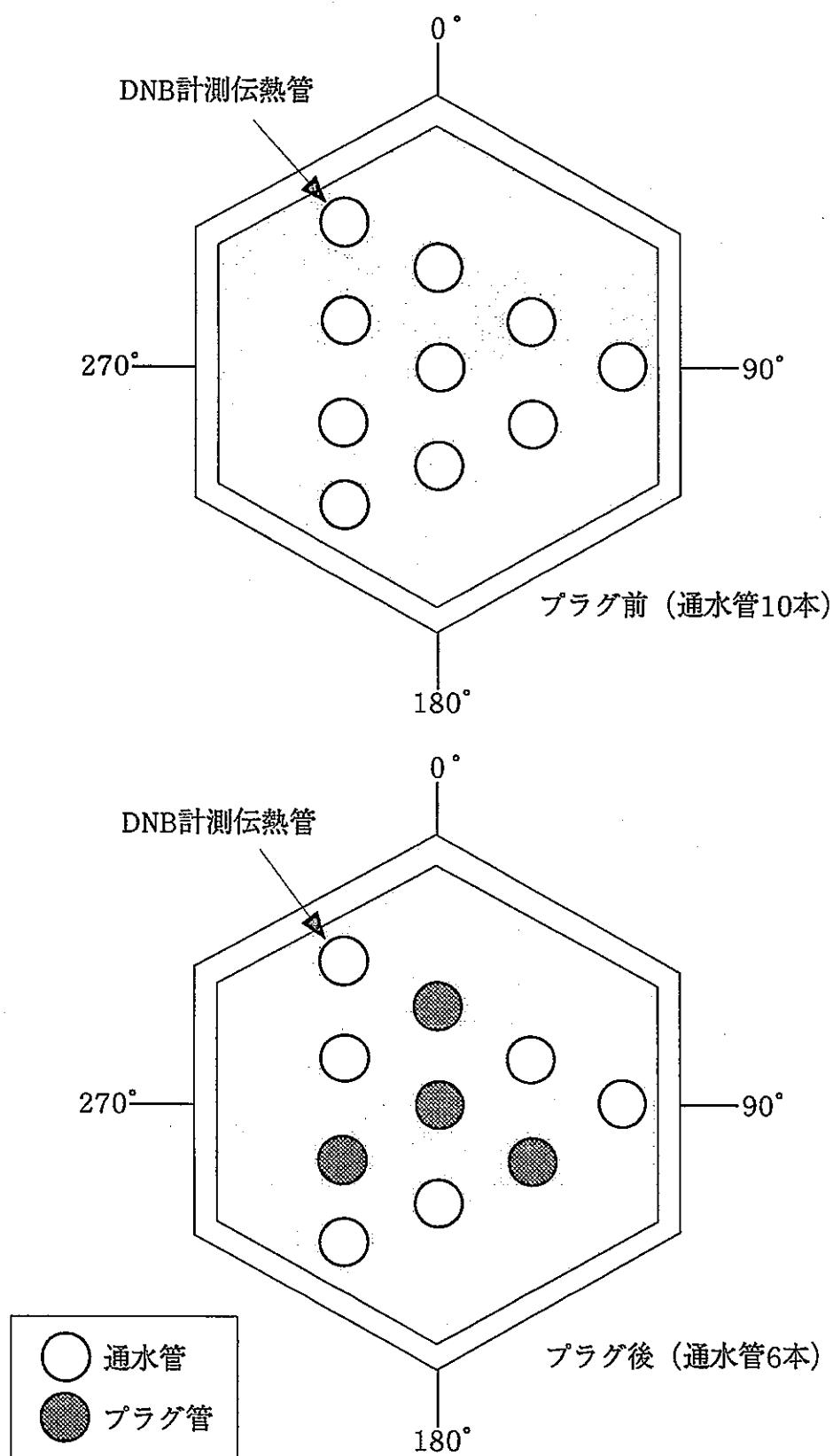
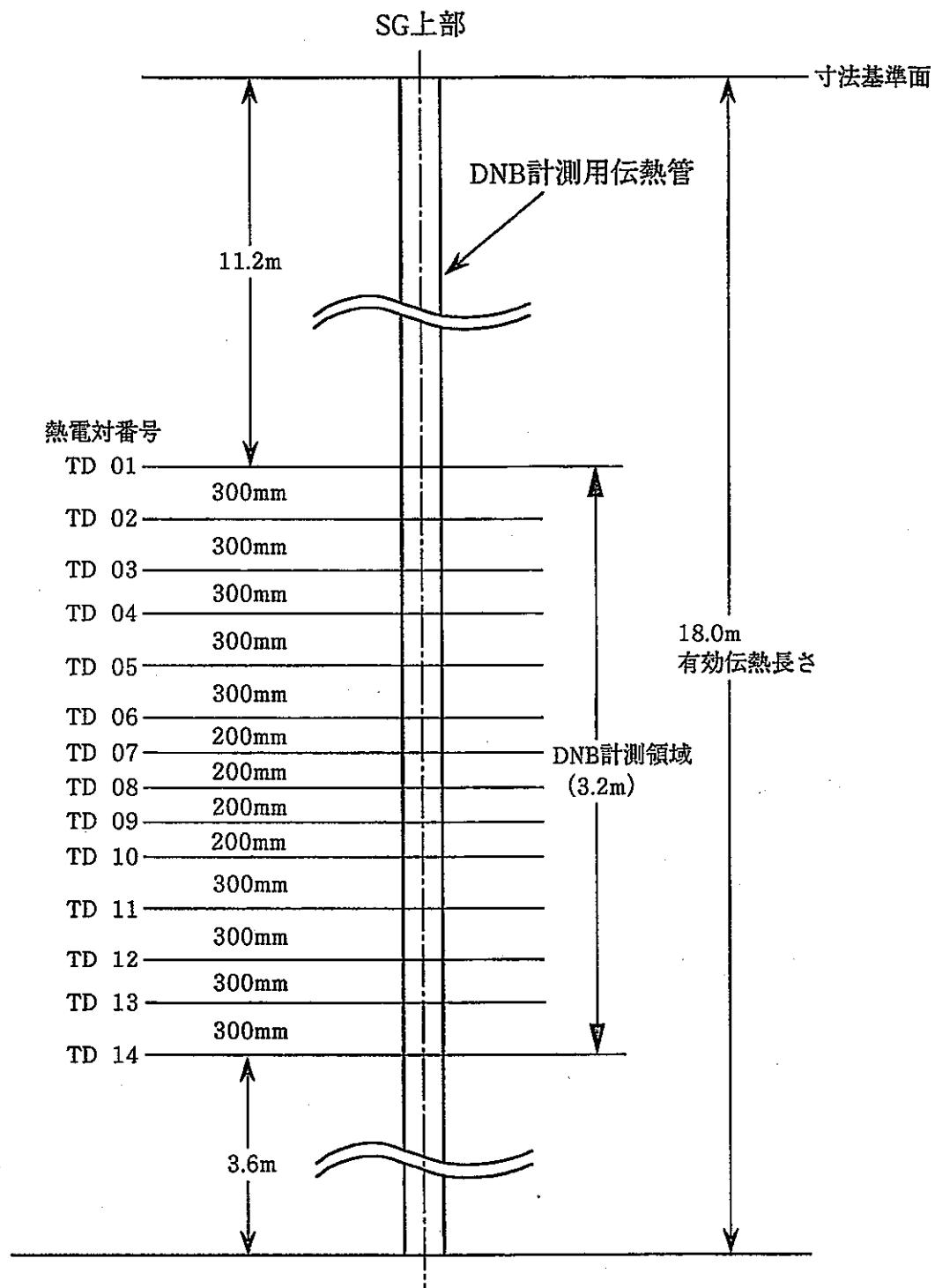


図2.2-2 2重管SG小型モデル伝熱管配列



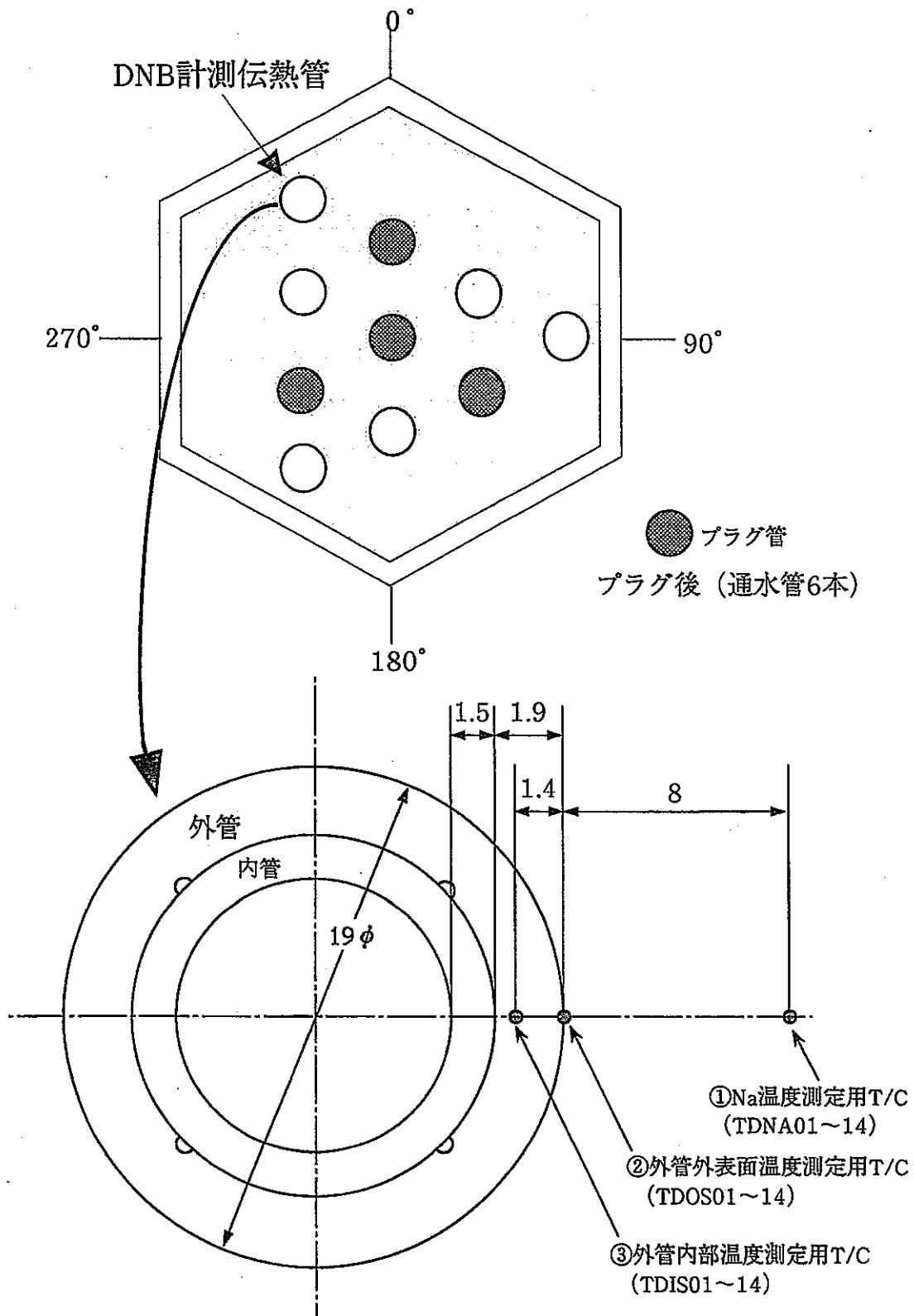
(注) 図中でダミー管、タイロッドは省略した。

図2.2-3 2重管SG小型モデルプラグ伝熱管



計測用熱電対はTD 1～14の位置において、Na温度、外管外表面温度および外管内部温度を計測。
詳細は図2.2-5参照。

図2.2-4 DNB計測用熱電対設置位置（軸方向）



注) T/Cは径方向の位置関係を示したものであり、周方向の位置は実際と異なる。(図2.2-6参照)

図2.2-5 DNB計測用熱電対設置位置 (径方向)

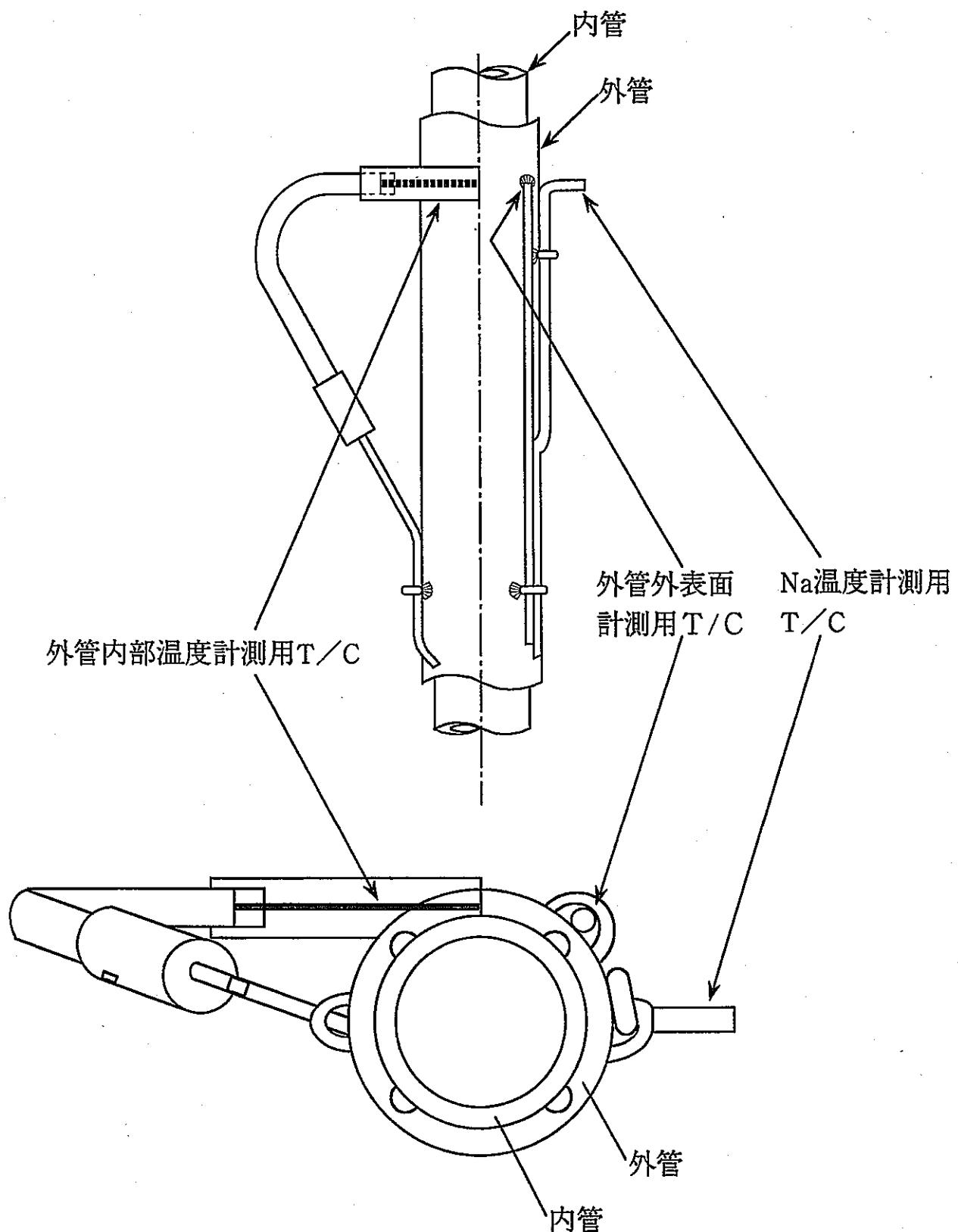


図2.2-6 DNB計測用熱電対取付状況

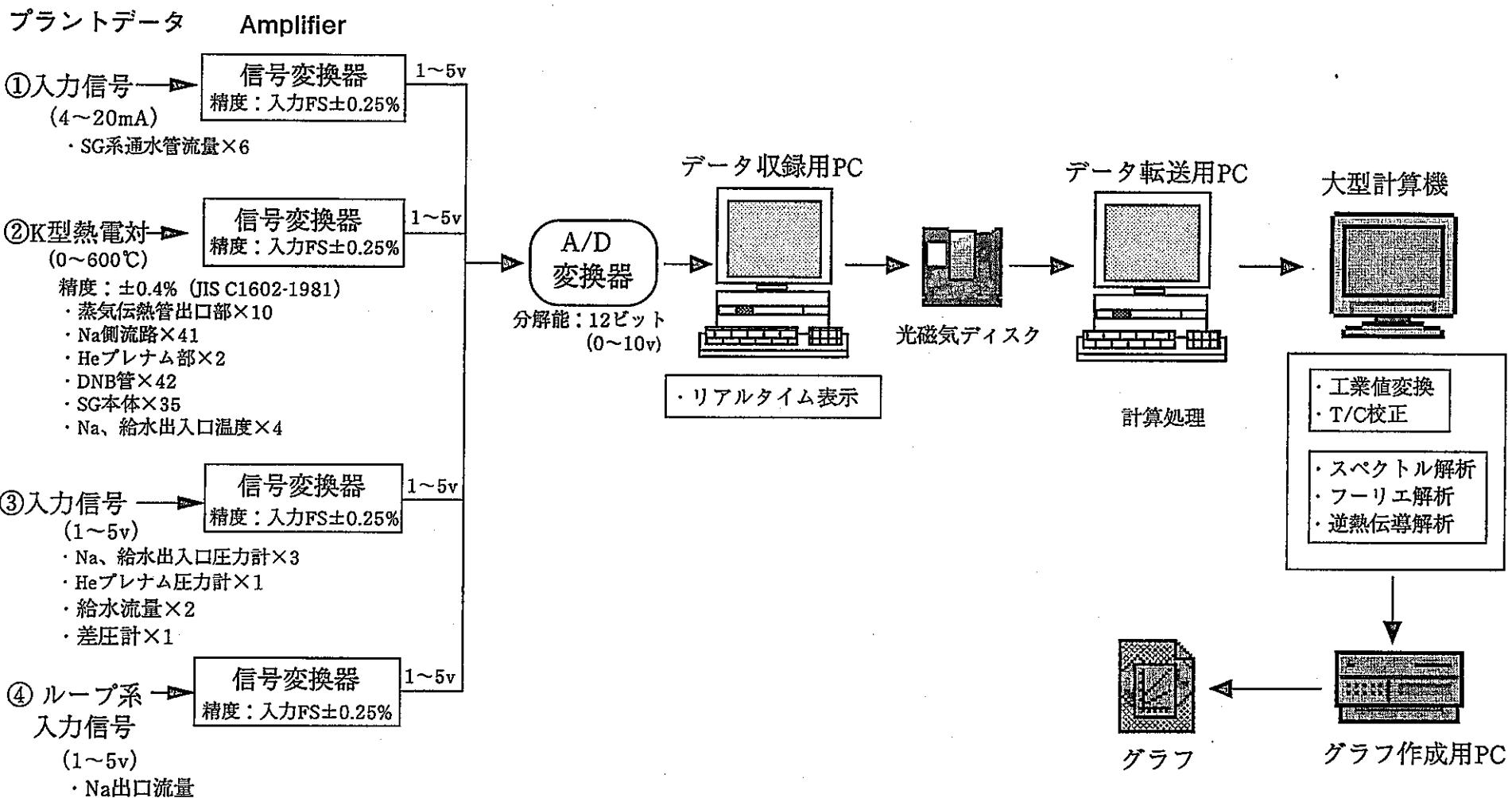
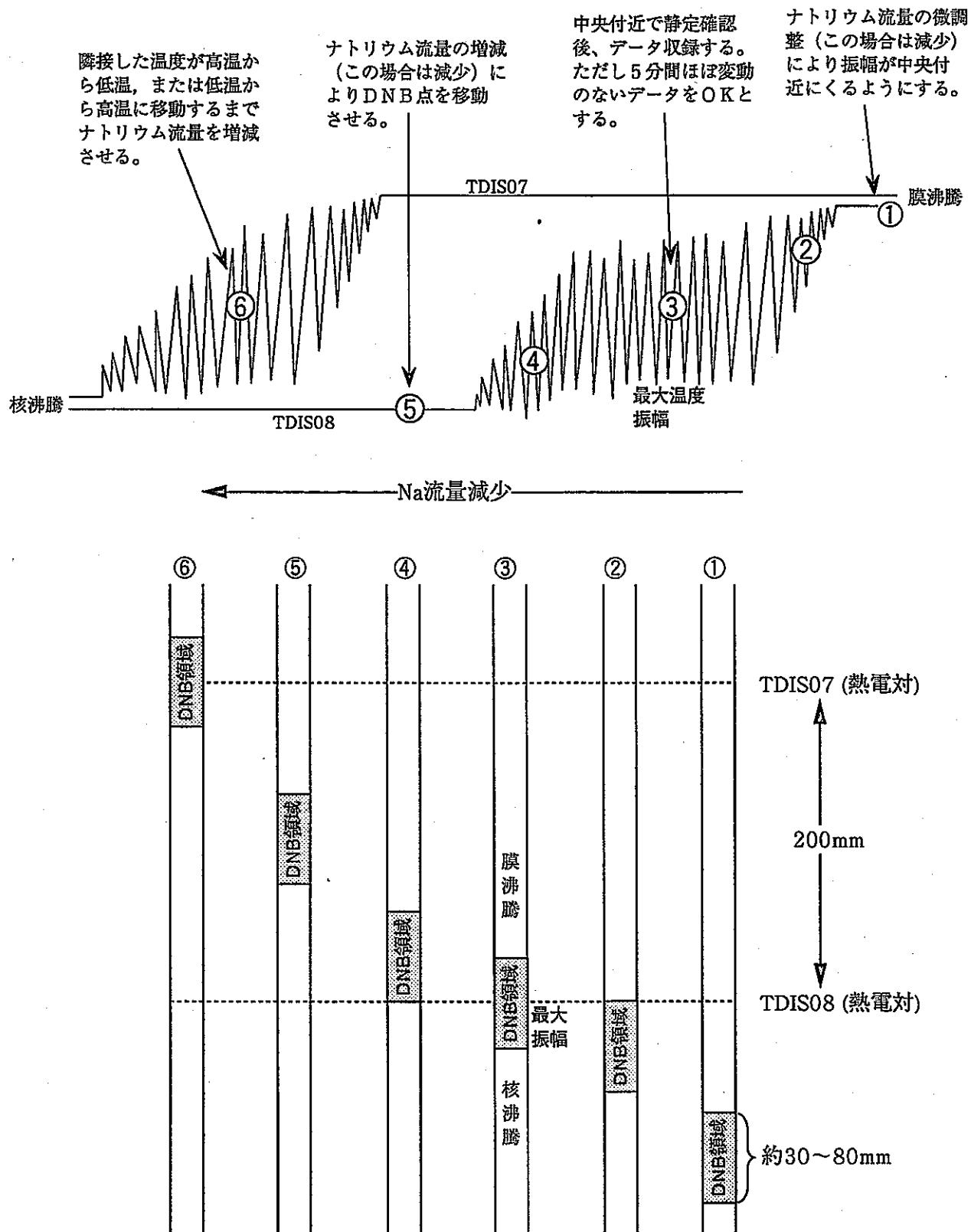
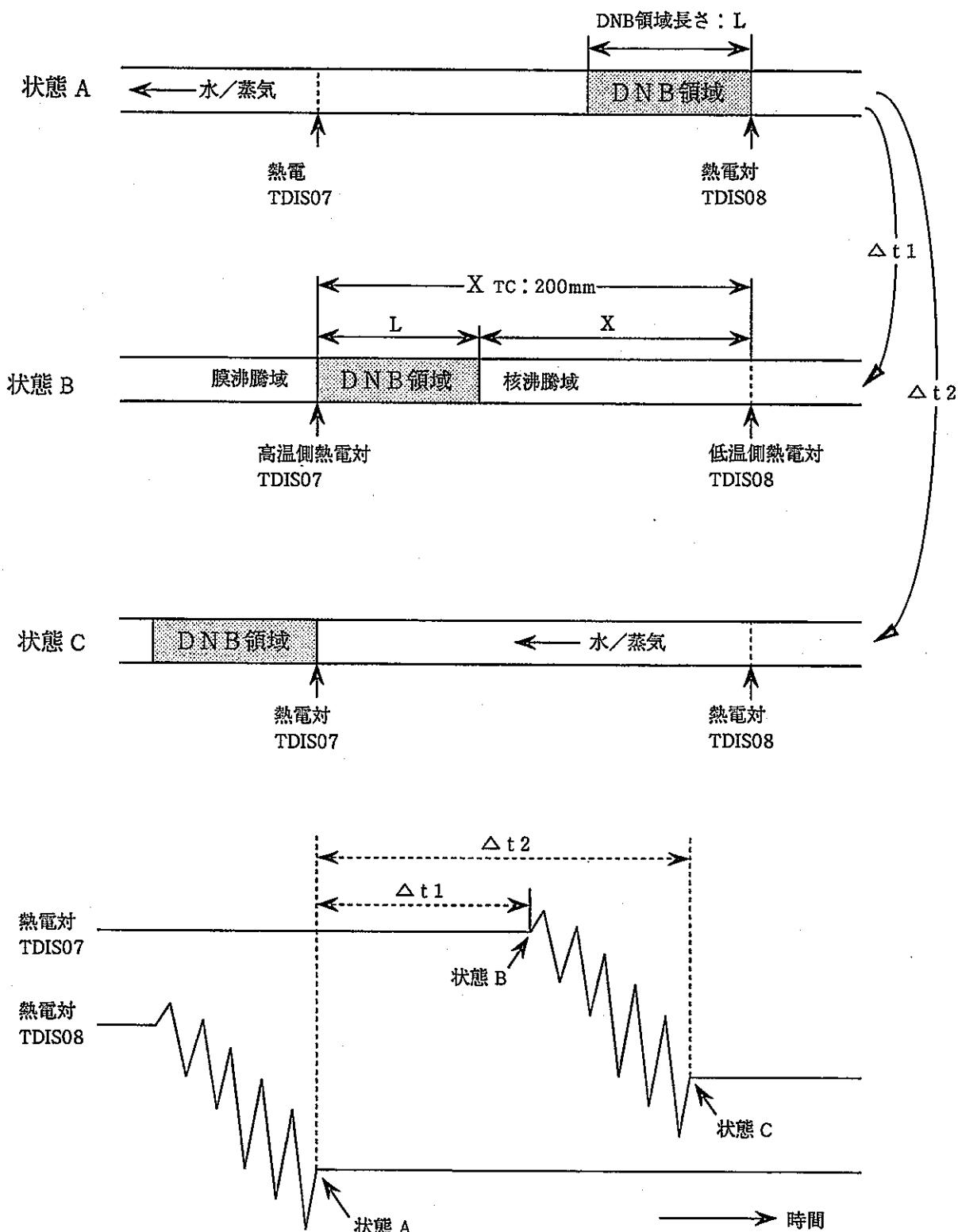


図2.2-7 データ収録システム概念図



※図ではT/Cは、TDIS07およびTDIS08を記載しているが、実際の試験では必ずしもこのT/Cに限った計測ではない。

図2.3-1 DNB温度振動試験方法



※図ではT/Cは、TDIS07およびTDIS08を記載しているが、実際の試験では必ずしもこのT/Cに限った計測ではない。

図2.3-2 DNB領域長さ測定試験

3 DNB試験条件と結果

3.1 DNB温度振動測定試験

試験条件およびその結果を表3.1-1に示す。また代表例として試験ケースDB01の外管内部、ナトリウムおよび外管外表面の温度振動の様子をそれぞれ図3.1-1、図3.1-2および図3.1-3に示す。図3.1-1には DNB領域(TDIS04)とDNB領域外(TDIS01,TDIS07)の外管内部温度振動を示すが、DNB領域では明らかに振幅が大きくなっていることが確認できる。

全試験ケースの外管内部温度については5.1.1節に記載する。

3.2 DNB領域長さ測定試験

DNB領域長さ測定結果を表3.2-1にまとめる。また、試験結果の一例として温度データを図3.2-1に示すが、ナトリウム流量を徐々に減少させるにしたがって、DNB点が上方へ移動するため、熱電対TDIS04の位置からTDIS03に移行している様子が確認できる。

表3.1-1 DNB温度振動試験結果

試験ケース	ナトリウム側			水・蒸気側								
	流量 (t/h)	入口温度 (°C)	出口温度 (°C)	プラグ	流量 (t/h)	質量流速 (kg/m ² /sec)	給水温度 (°C)	蒸気温度 (°C)	給水圧力 (kg/cm ²)	蒸気圧力 (kg/cm ²)	DNBクオリティ (-)	DNB熱流速 (kcal/m ² /hr)
DB-01	13.63	538.1	320.9		1.61	440	239.7	515.4	133.1	132.5	0.603	457000
DB-02	10.78	527.4	315.3		1.3	354	239.1	518.3	132.4	132.5	0.66	438000
DB-03	8.33	536.4	315.5		0.99	270	239.2	525.5	132.1	132.4	0.715	459000
DB-05	14.54	540.6	336		1.61	440	238.9	523.8	150.8	150.2	0.521	447000
DB-06	11.79	536	331.7		1.3	355	238.9	527.3	150.2	150.3	0.652	
DB-07	8.62	537.7	325.2		0.99	270	239.1	527.5	150.3	150.5	0.668	417000
DB-09	13.25	535.5	313.5		1.61	440	239.5	507.9	128	127.4	0.599	501000
DB-10	10.53	535.4	308.3	プラグ前 (10本管)	1.3	354	239.1	514.5	125.3	125.2	0.66	505000
DB-11	7.71	538.4	298.5		0.99	269	239.2	525.3	109.9	110.3	0.727	501000
DB-13	16.64	501.4	330.9		1.61	439	239.4	481.8	133.1	132.4	0.587	459000
DB-14	13.7	502.3	332.8		1.3	355	239	489.7	132	132	0.656	467000
DB-15	9.54	500.9	316.4		0.99	270	239.3	488.5	132.3	132.5	0.713	411000
DB-17	17.92	502.7	343.4		1.62	441	239.4	491.1	151.2	150.7	0.589	
DB-18	13.65	503.8	335.3		1.3	355	239.1	492.7	150.1	150.2	0.609	437000
DB-19	10.35	502.8	332.8		0.99	271	239.1	494.6	150.5	150.5	0.667	386000
DB-20	6.72	502.4	321		0.69	187	238.8	495.7	149.9	150.2	0.734	362000
DB-21	15.41	500.5	316.8		1.61	439	239.3	474	121.2	120.5	0.646	
DB-22	12.33	499.6	313.8		1.3	354	239.1	479	124.4	124.6	0.677	465000
DB-23	8.88	500.8	300.9		0.99	269	239.1	490	110	110.3	0.832	
PDNB132	17.44	500.3	338.4		1.62	736	238.7	465.8	134.7	132.9	0.555	522000
PDNB142	13.54	498.9	333	プラグ後 (6本管)	1.28	582	239.9	472.8	133.6	132.7	0.606	472000
PDNB19	9.87	500.5	330.8		0.94	428	239	487.9	150.5	150	0.679	418000

表3.2-1 DNB領域長さ測定結果

試験番号	Δt_2 min	Δt_1 min	XTC T/C間距離 mm	X mm	V DNB移動速度 mm/sec	DNB領域長さ mm
DB01	31.3	26.4	300	253	9.60	46.9
DB02	27.0	22.9	300	254	11.1	45.8
DB03	20.1	16.0	200	159	9.94	41.0
DB05	41.9	37.9	300	271	7.16	28.7
DB06	24.0	19.5	200	163	8.33	37.5
DB07	27.6	17.1	200	124	7.24	76.0
DB09	25.8	23.0	300	268	11.7	32.0
DB10	24.9	21.9	300	264	12.1	36.2
DB11	18.3	13.8	300	226	16.4	74.0
DB13	39.3	36.0	300	275	7.64	24.8
DB14	24.5	20.3	200	166	8.18	34.4
DB15	24.3 19.2	18.5 15.6	300 300	228 244	12.4 15.6	72.2 56.3
DB17	36.3	30.6	300	254	8.28	46.5
DB18	42.9	36.3	300	254	6.99	46.2
DB19	12.9	11.4	200	177	15.5	23.3
DB20	22.6	16.9	200	149	8.84	50.8
DB21	29.4	26.1	300	267	10.2	33.2
DB22	27.1	22.1	300	245	11.1	55.3
DB23	16.8	9.83	200	117	11.9	83.0
PDNB132	32.6	28.2	300	260	10.6	40.1
PDNB142	39.9	32.4	300	244	7.52	56.4
PDNB19	31.5	25.8	300	246	9.52	54.3

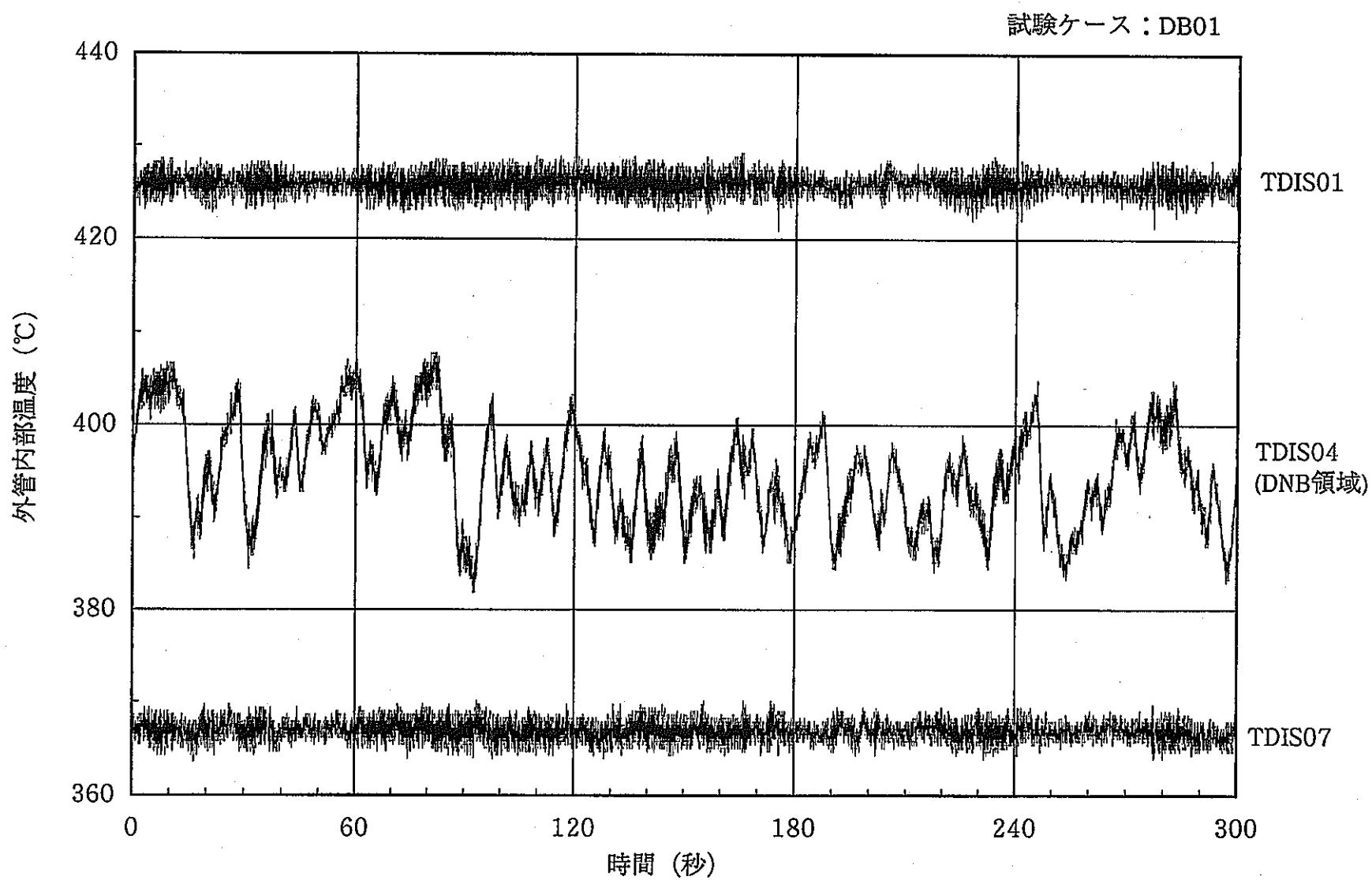


図3.1-1 DNB温度振動試験結果（外管内部温度）

試験ケース：DB01A

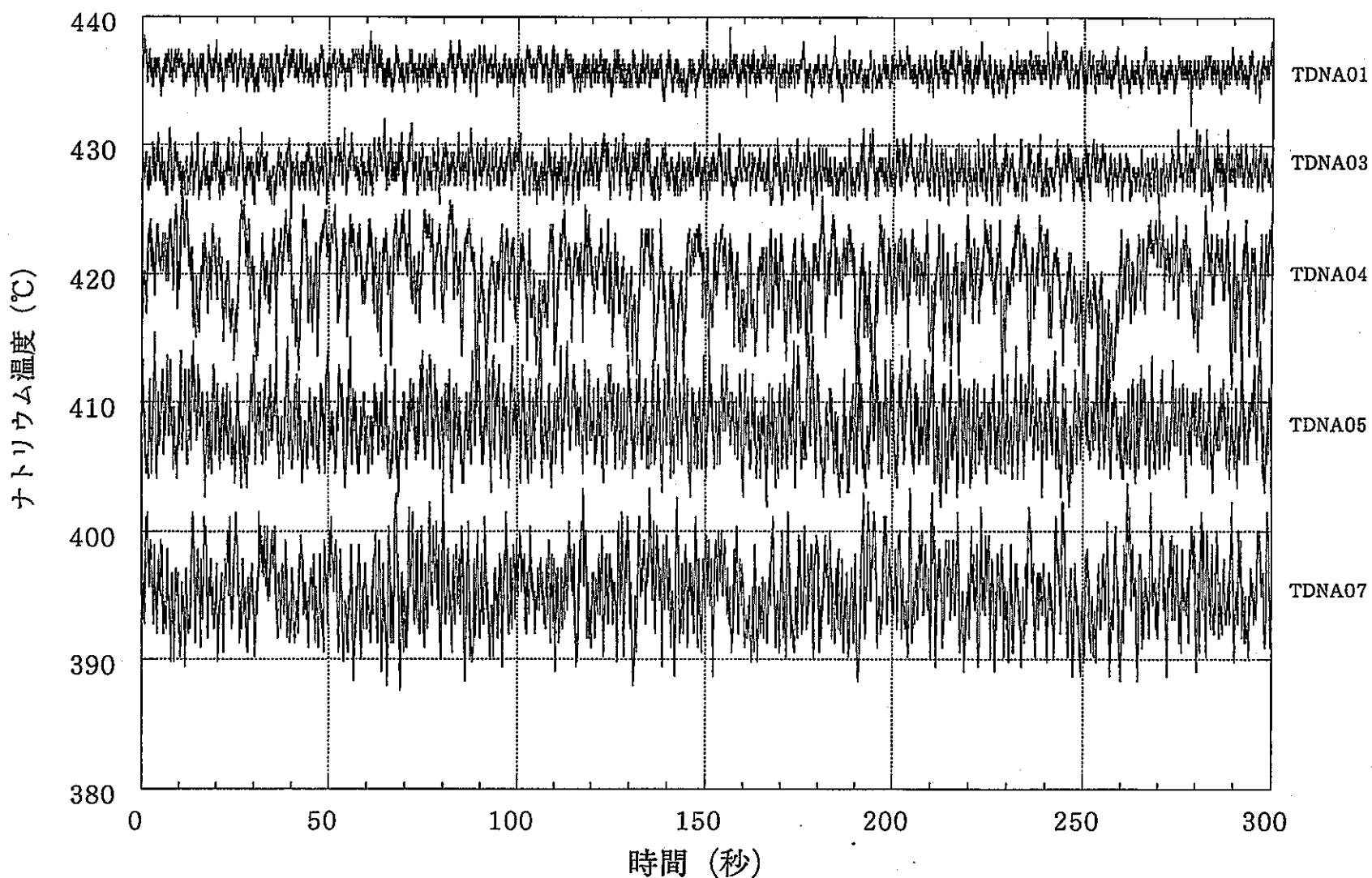


図3.1-2 DNB温度振動試験結果（ナトリウム温度）

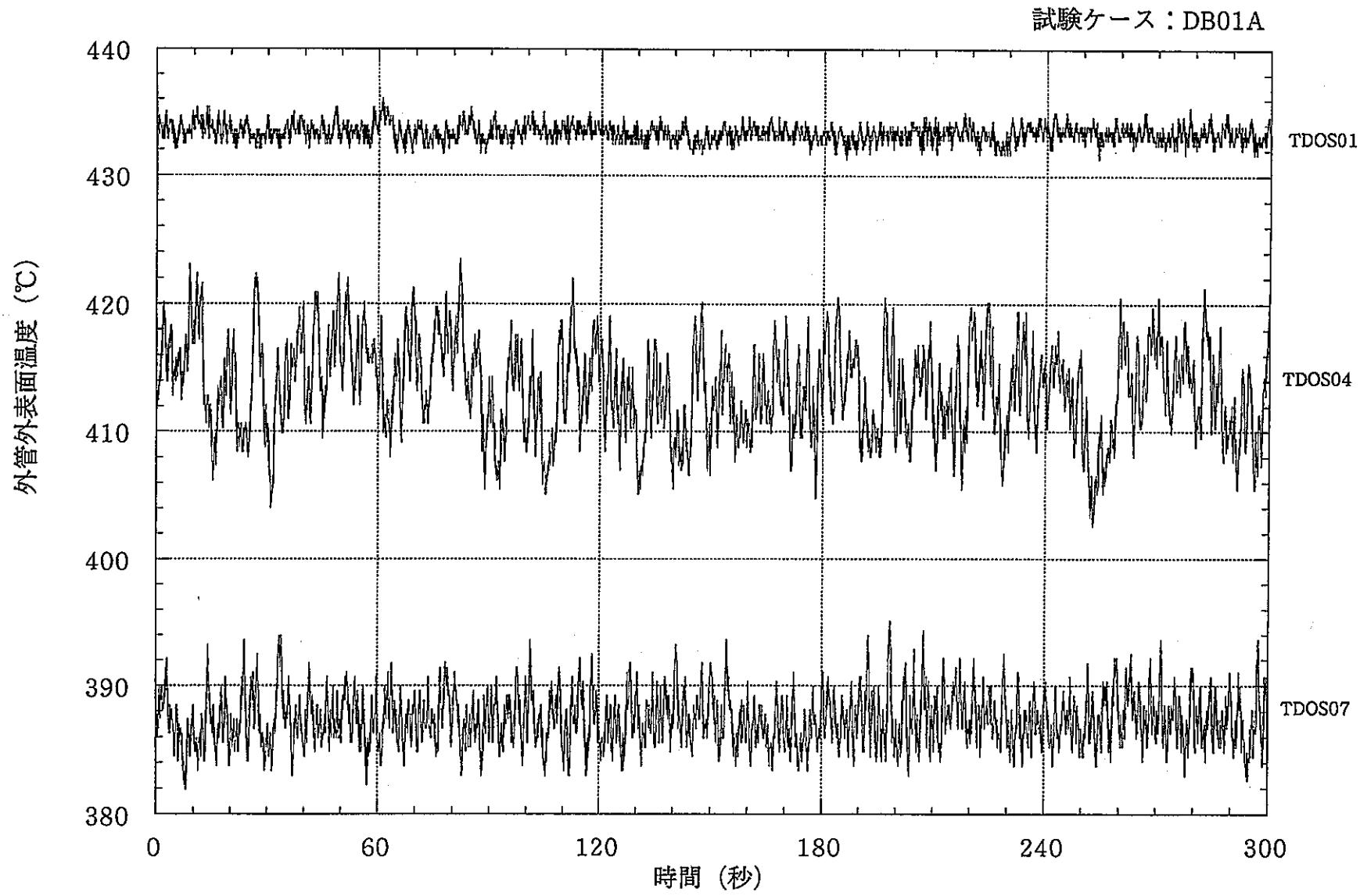


図3.1-3 DNB温度振動試験結果（外管外表面温度）

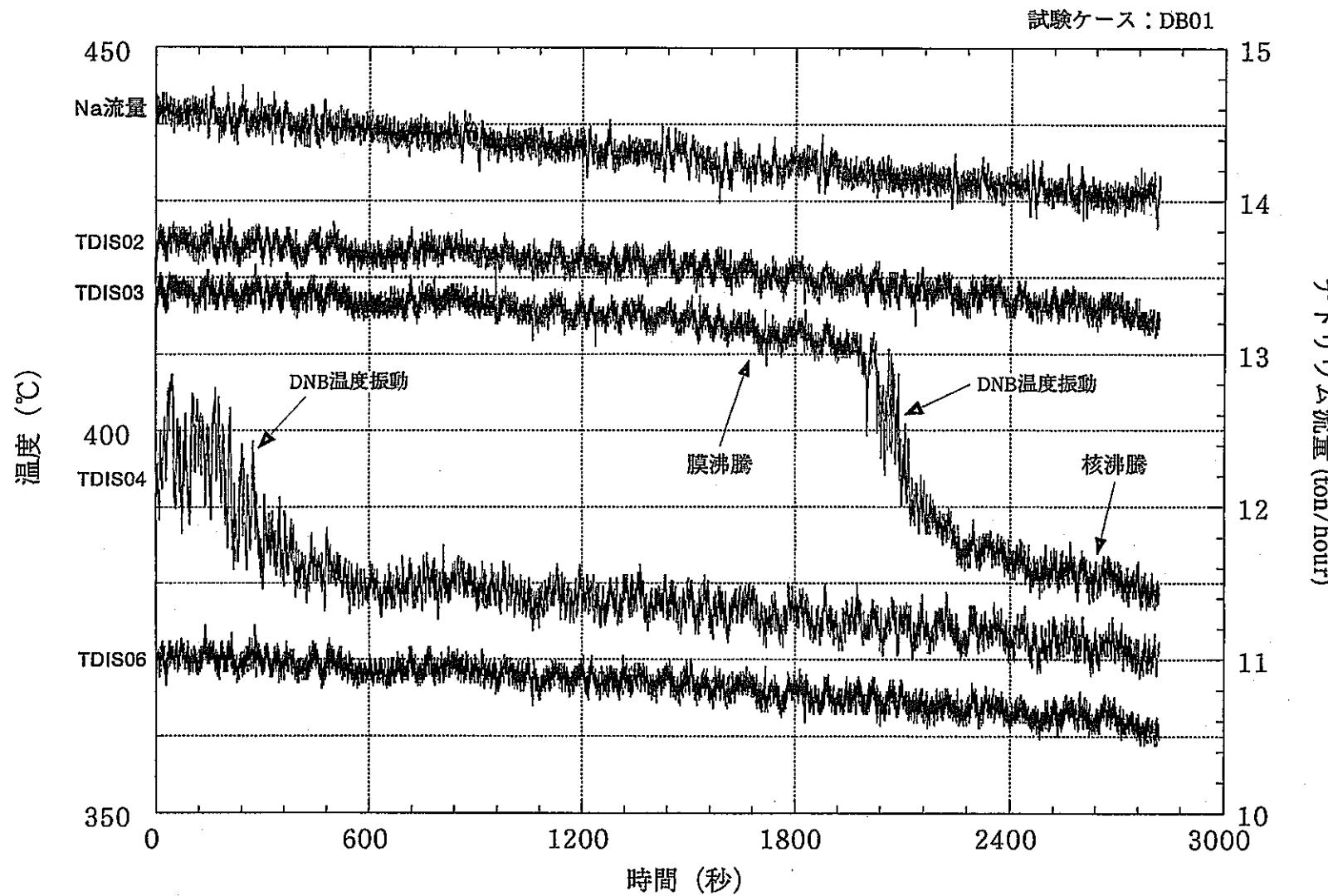


図3.2-1 DNB領域長さ測定試験結果

4 逆熱伝導解析

この章では、試験から得られた温度振動データ（ナトリウム温度、外管内部温度）を用いて、評価上最も厳しい条件となる内管内壁温度振動を求める。このためには、次に示す一連の計算処理が必要となり、以下に順次説明する。

- (1) 温度振動生データのスペクトル解析（フーリエ解析）
- (2) 温度振動生データからのノイズ除去
- (3) ナトリウム温度と外管内部温度から内管内壁温度の算出（逆熱伝導解析）

4.1 ノイズ除去

DNB試験の生データには本来のDNB温度振動以外にノイズが含まれているため、解析する前にそれを除去しなければならない。ノイズ除去にはフーリエ変換を用いた。トレンド除去したデータをフーリエ変換により周波数スペクトルを分析し、ノイズ周波数成分を調べた。ノイズ周波数を除去した後の信号を時間領域に戻し、逆熱伝導解析のための入力データとした。

この節では試験ケースDB01を例にとってその処理過程を説明する。なお、フーリエ解析およびノイズ除去についての詳細は付録-1に記載する。

4.1.1 トレンド除去

図4.1-1にDNB温度振動領域のトレンド成分を示す。この原信号からトレンド成分を除去し、さらに離散フーリエ変換を行うために2¹²個（286.72秒： $\Delta T=0.07$ 秒）の時系列データを抽出した結果が図4.1-2である。

4.1.2 フーリエ変換

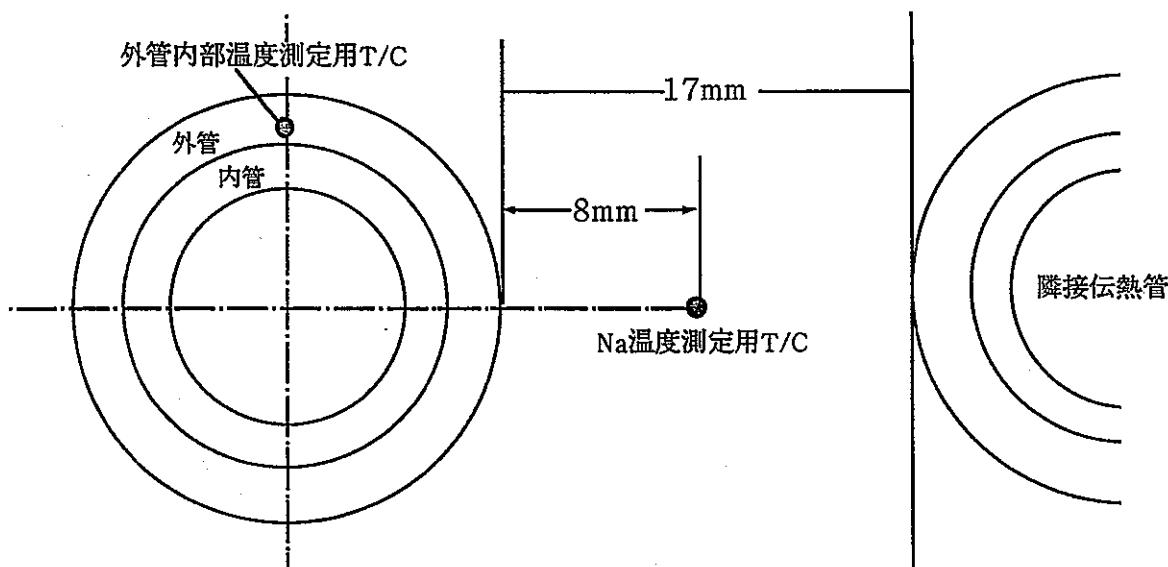
外管内部温度、ナトリウム温度および外管外表面温度についてDNB領域(TD 04)とDNB領域外(TD 01,TD 07)の熱電対信号のパワースペクトルを表したグラフがそれぞれ図4.1-3、図4.1-4および図4.1-5である。図4.1-3は外管内部温度についてを示すが、約0.8Hz以下においてDNB温度振動の成分が顕著に表れており、この周波数以上はノイズ成分として除去する。図4.1-4はナトリウム温度についてであるが、DNB域のTDNA04とDNB領域外(DNBより下の領域)のTDNA07では両者のスペクトルに明確な相違は表れていない。また、図4.1-5の外管外表面温度では、外管内部温度(図4.1-3)ほどDNB領域とDNBより下の領域については明確な相違は得られなかった。

4.1.3 ノイズ除去

図4.1-3からも分かるようにノイズとして約0.8Hz以上の成分は除去できるため、これ以上の周波数を除去した結果が図4.1-6である。この図はノイズ除去前データも合わせて表示するが高周波ノイズ成分が除去されていることが確認できる。一方、DNB領域外(TDIS01,TDIS07)の温度振動についても同じ周波数でノイズ除去した結果を図4.1-7と図4.1-8に示す。ノイズ除去後信号においても、DNB振動と同じ周波数でのDNBに起因しない信号成分が含まれていることがわかる。

ノイズ除去後データのみを合わせて表示した結果を図4.1-9に示した。

内管内壁温度を求めるためには、ナトリウム温度と外管内部温度を用いて逆熱伝導解析を行うことになる。図4.1-10にノイズ除去後のナトリウム温度と外管内部温度を合わせてプロットした。両者の関係を明確に見るため図4.1-10の100~180秒の範囲の時間を拡大して示したグラフが図4.1-11である。このグラフからナトリウム側においても温度振動が観察されるものの、明らかにDNB振動とは明らかに周期の異なる（小さい）ノイズ成分が出現していることがわかる（このノイズは低周波であるため4.1.3節で述べた0.8Hz以下のローパスフィルターでは除去されない）。両者の相互相関関係を調べたが（図4.1-12）、明確な相関がなかった。これは、ナトリウム側は隣接伝熱管の影響や斜行流により本来のDNBとは異なる周期の温度振動が発生したと考えられる。さらに、下図に示すように外管内部温度測定用熱電対とナトリウム温度測定用熱電対は周方向の位置が異なり内管内面のDNB挙動が周方向において均一でない可能性（Rivletの存在）を考慮すれば、逆熱伝導解析においてこのナトリウム温度と外管内部温度を組み合わせることは意味がない。また隣接間との距離は17mmであり上述したようにナトリウム温度測定用熱電対は隣接管の影響を受けていることも十分に考えられる。したがって、ナトリウム温度はその平均値（一定値）を用いて内管内壁温度を算出した（図4.1-13）。



4.2 逆熱伝導解析

2重管SG小型モデルのDNB点での温度測定は径方向では外管内部、外管外表面およびナトリウムの3点であり、周方向にはそれぞれ一点である。したがって、本解析では径方向の1次元解析を行う。この解析においては図4.2-1に示すように、両端の境界条件を既知として内部の温度分布を計算する方法と、片方の境界条件から熱流束に基づいてもう片方の境界値と内部温度分布を計算する逆熱伝導解析法とに分けて計算する。前者はナトリウムから外管内部温度測定点までの領域(DIRECT領域)であり、後者は外管内部温度測定点から内管内表面までの領域(VERSE領域)である。

基礎式を以下に示す。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla q = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial t} \left(\kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4.2-1\text{式})$$

境界条件

$$T(R_m, t) = T_m(t) \quad (4.2-2\text{式})$$

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} = h_0 \{T_0(t) - T_\infty(t)\} \quad (4.2-3\text{式})$$

記号

T : 温度 (°C)

r : 半径 (m)

κ : 热伝導率 (kcal/mh°C)

h : 热伝達率 (kcal/m²h°C)

添字

o : 外管外表面

m : 外管内部での温度測定位置

以上に基づいて求めた内管内壁温度振動を算出した。この結果を図4.2-2に外管内部温度、ナトリウム温度と共に示す。以上によりDNB温度振動評価を行うためのデータを得ることができた。なお、本章は試験ケースDB01を例にとって一連の計算処理を述べたものであり、全試験ケースの計算処理結果については5章に記載する。

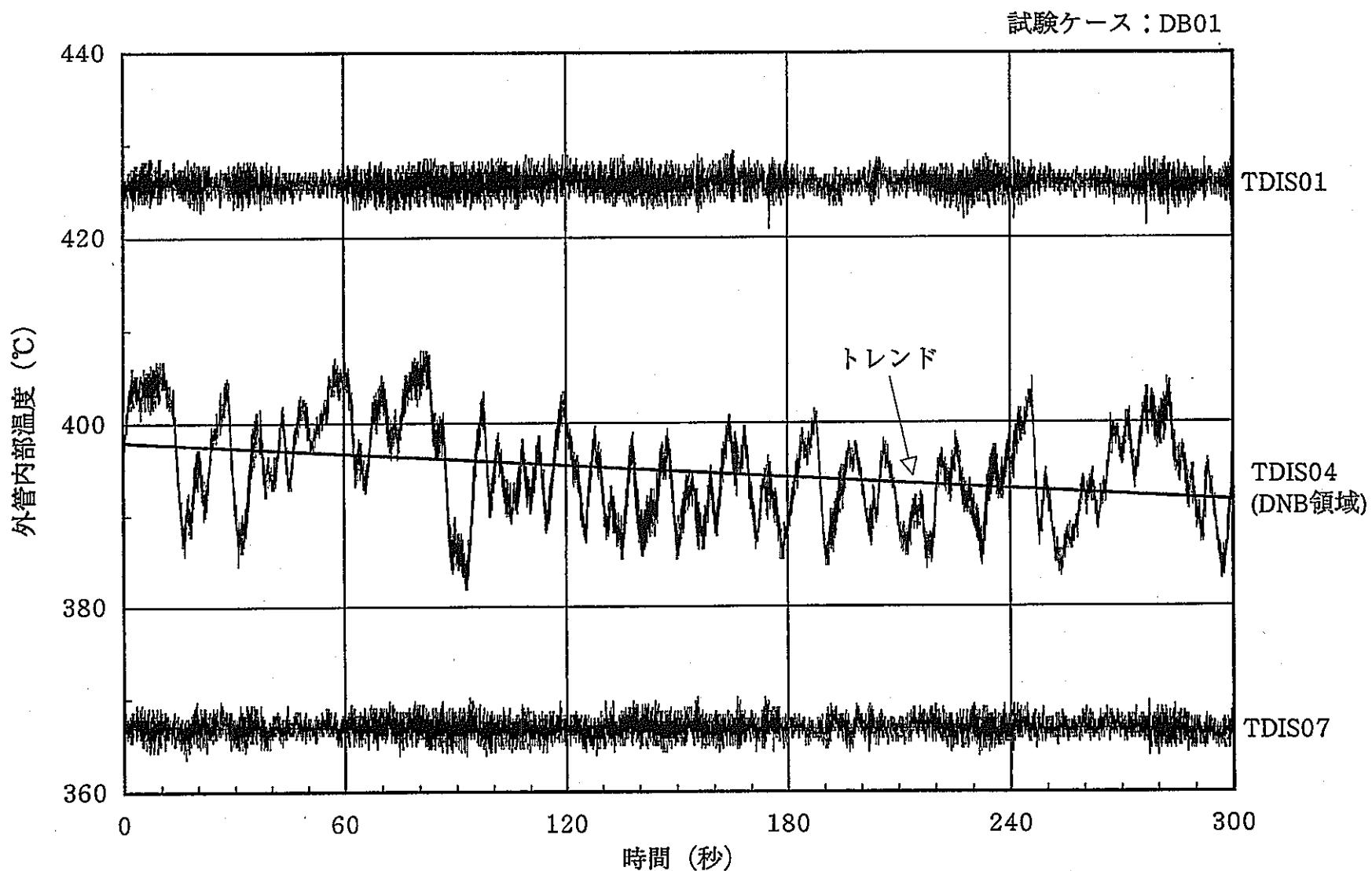


図4.1-1 DNB温度振動試験結果（トレンド除去前）

試験ケース：DB01

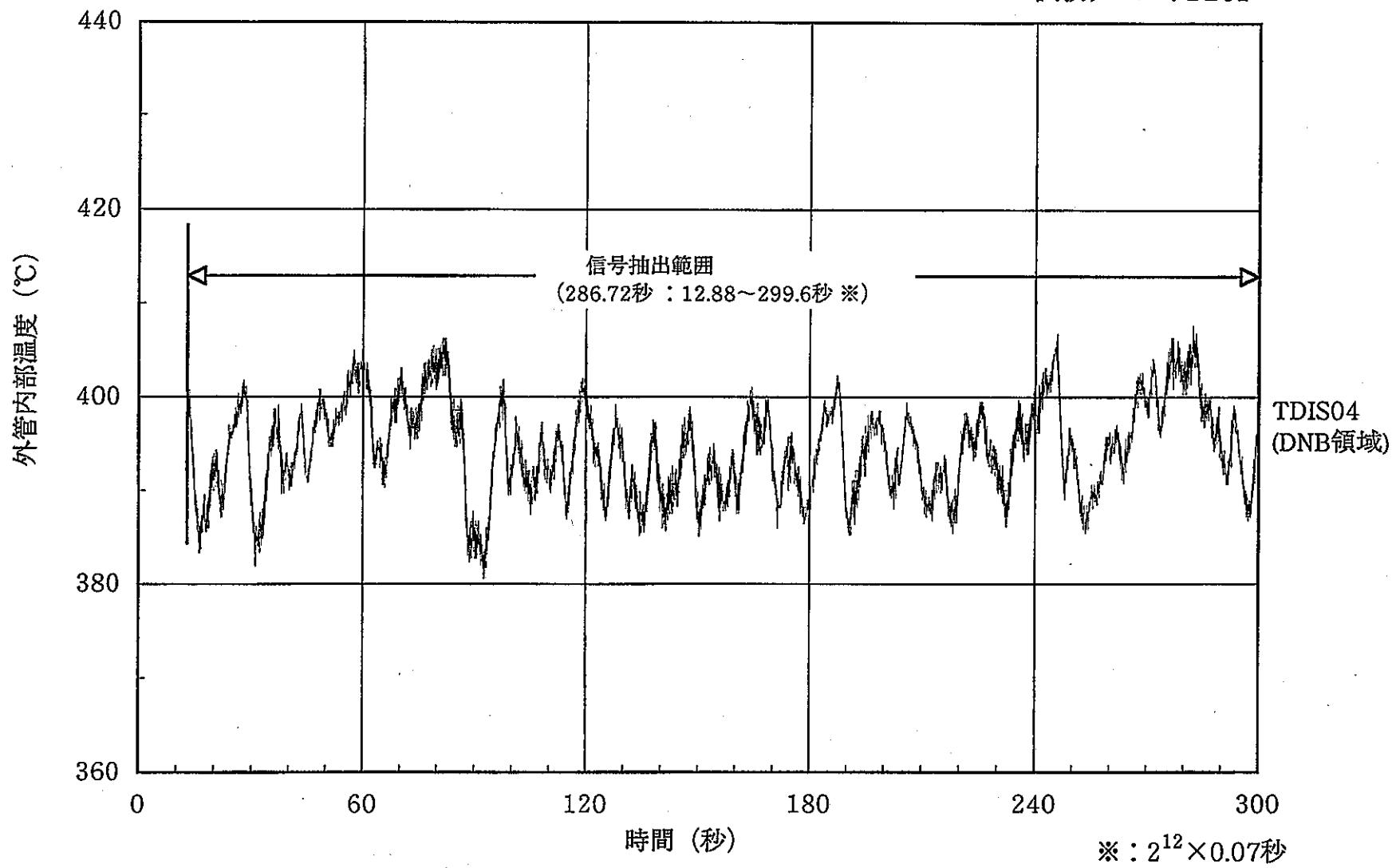


図4.1-2 DNB温度振動試験結果（トレンド除去後）

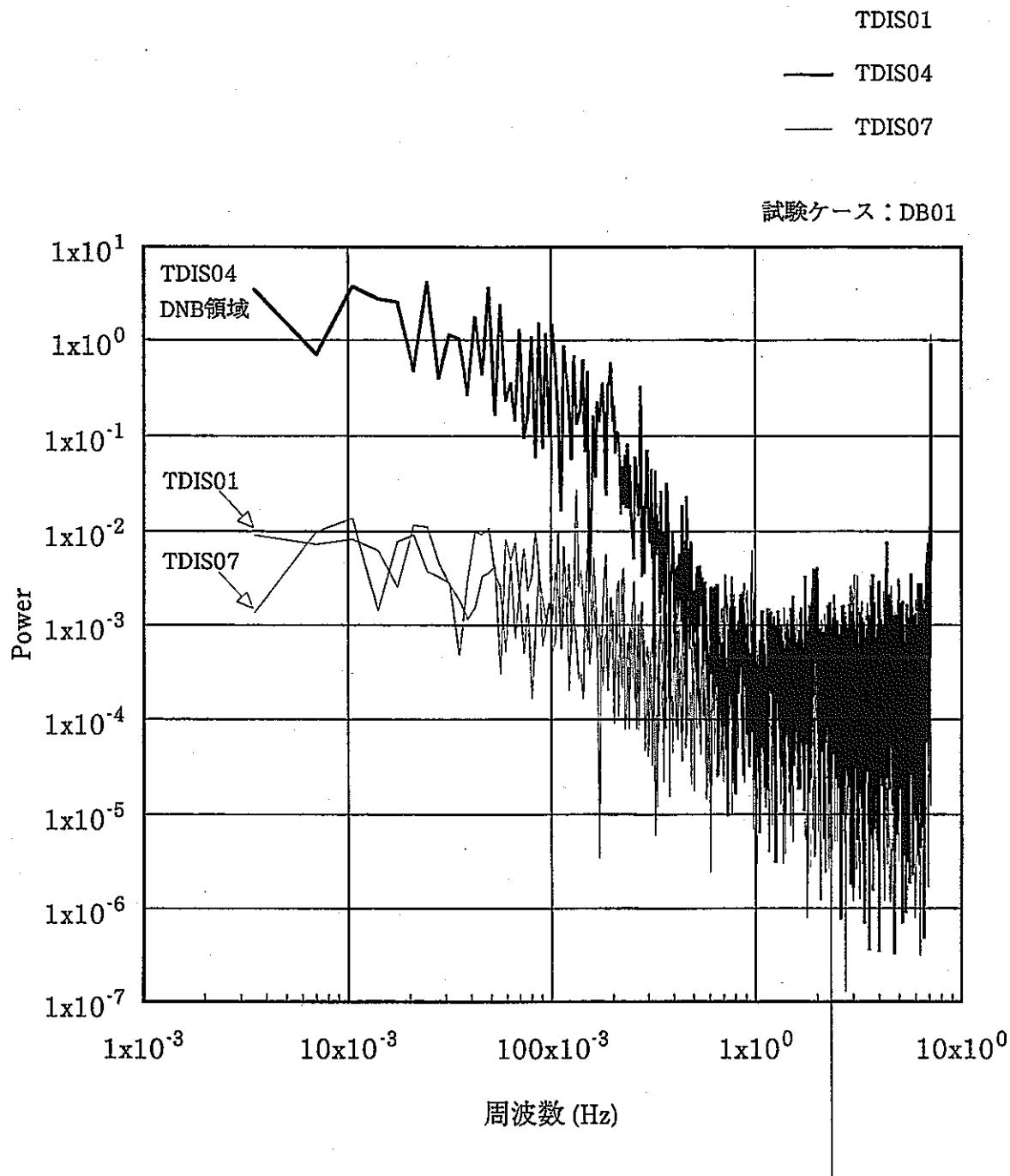


図4.1-3 DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

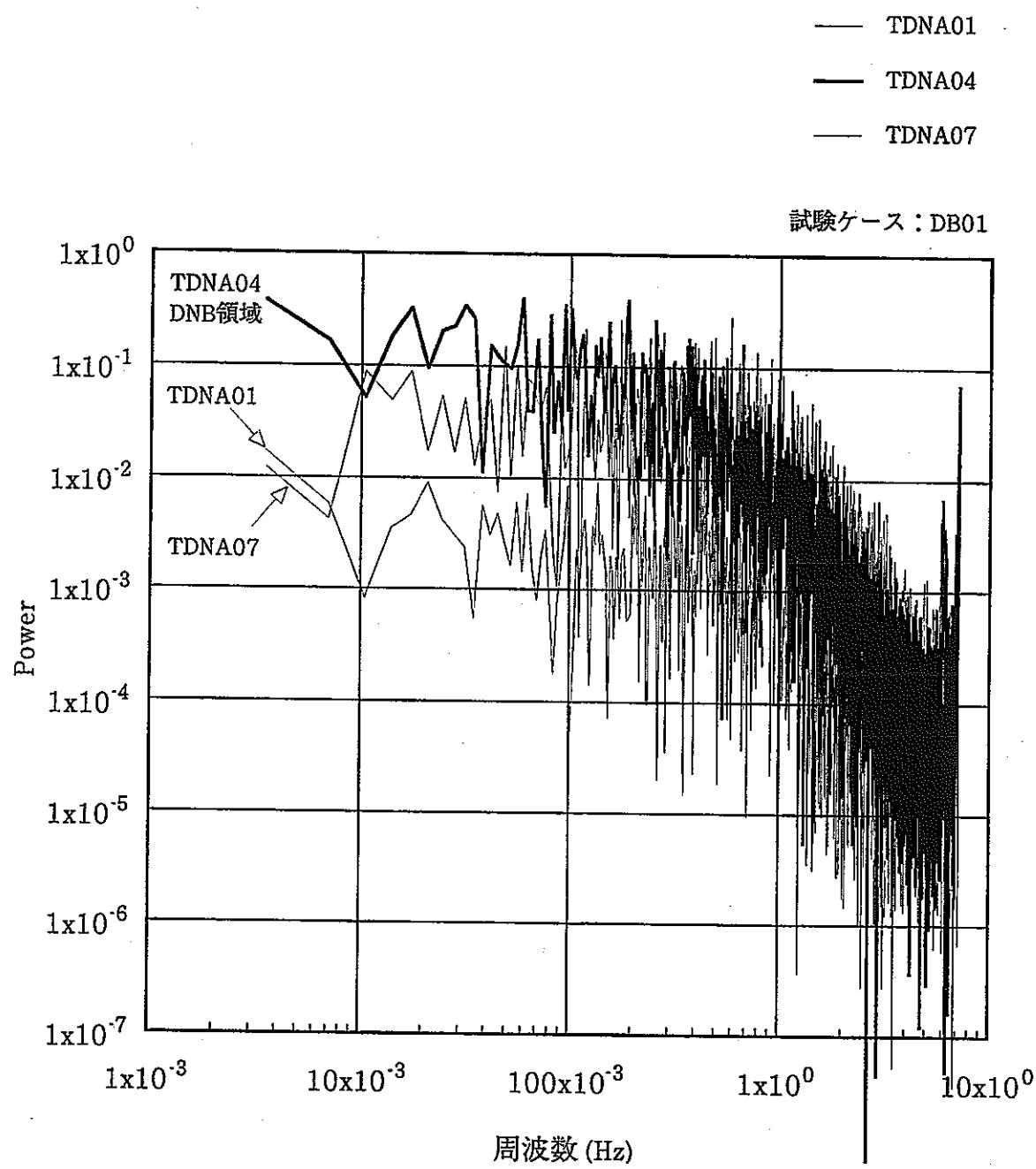


図4.1-4
DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（Na温度）

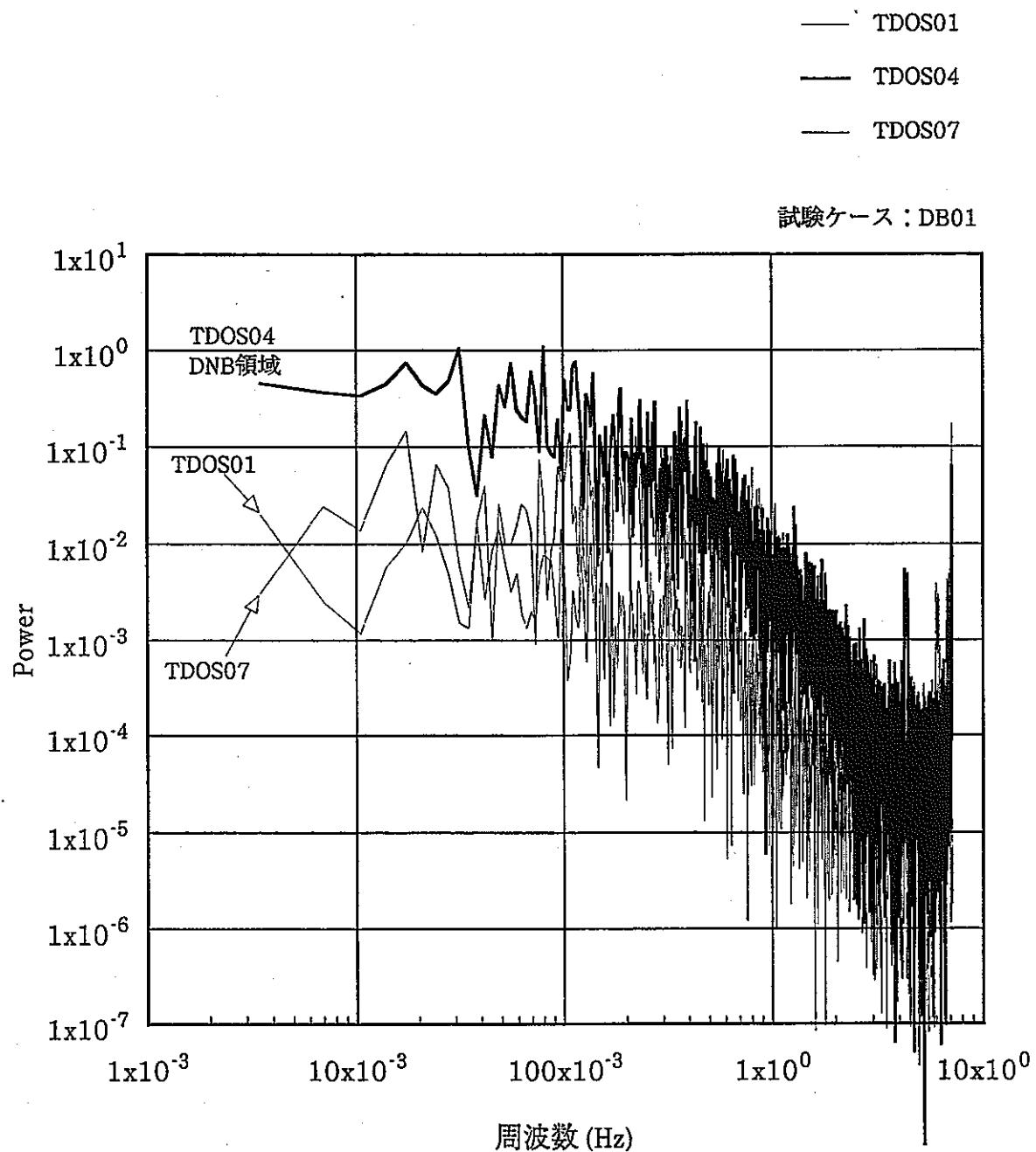


図4.1-5
DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管外表面温度）

試験ケースー：DB01

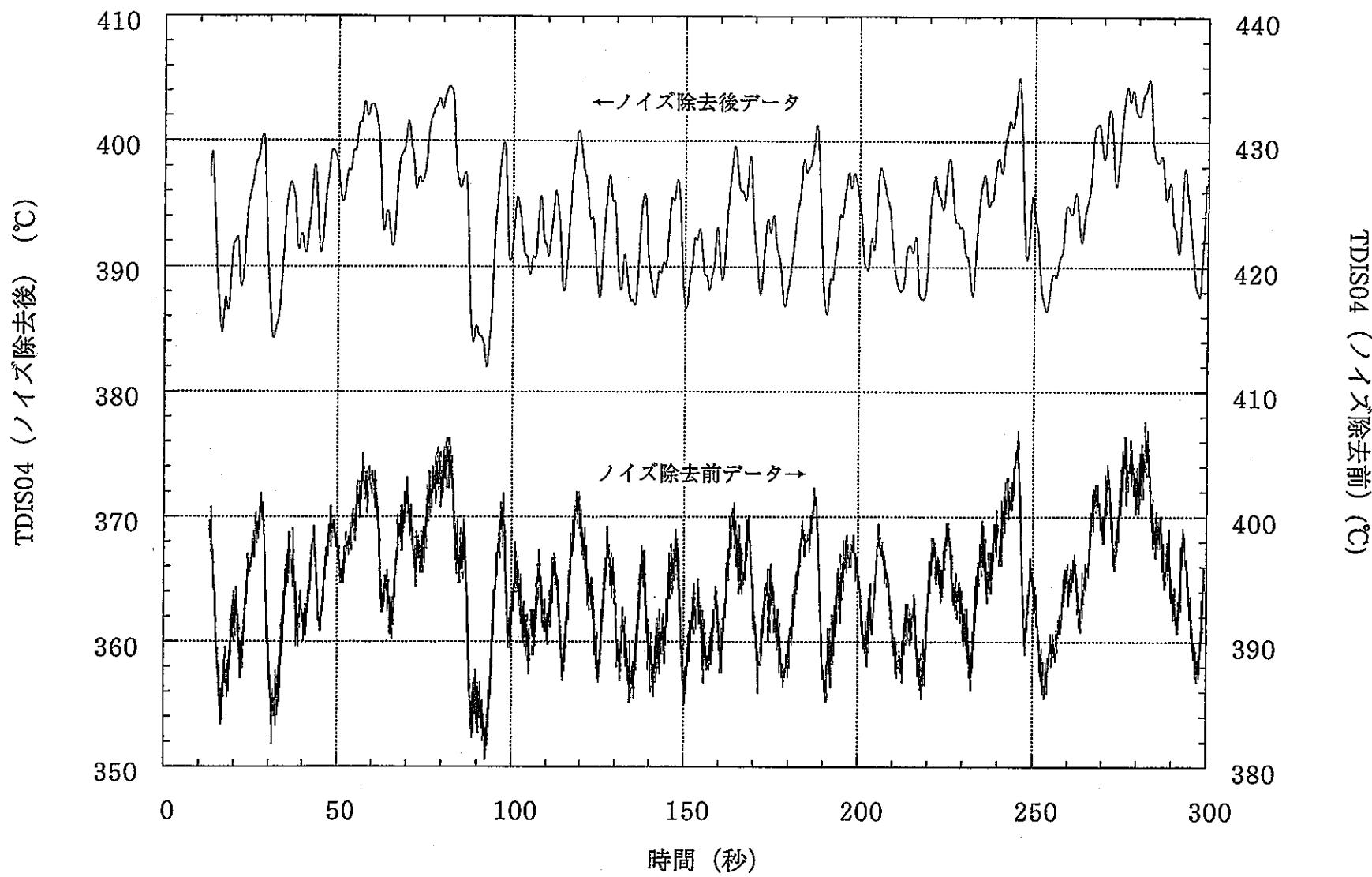


図4.1-6 DNB領域ノイズ除去データ（外管内部温度）

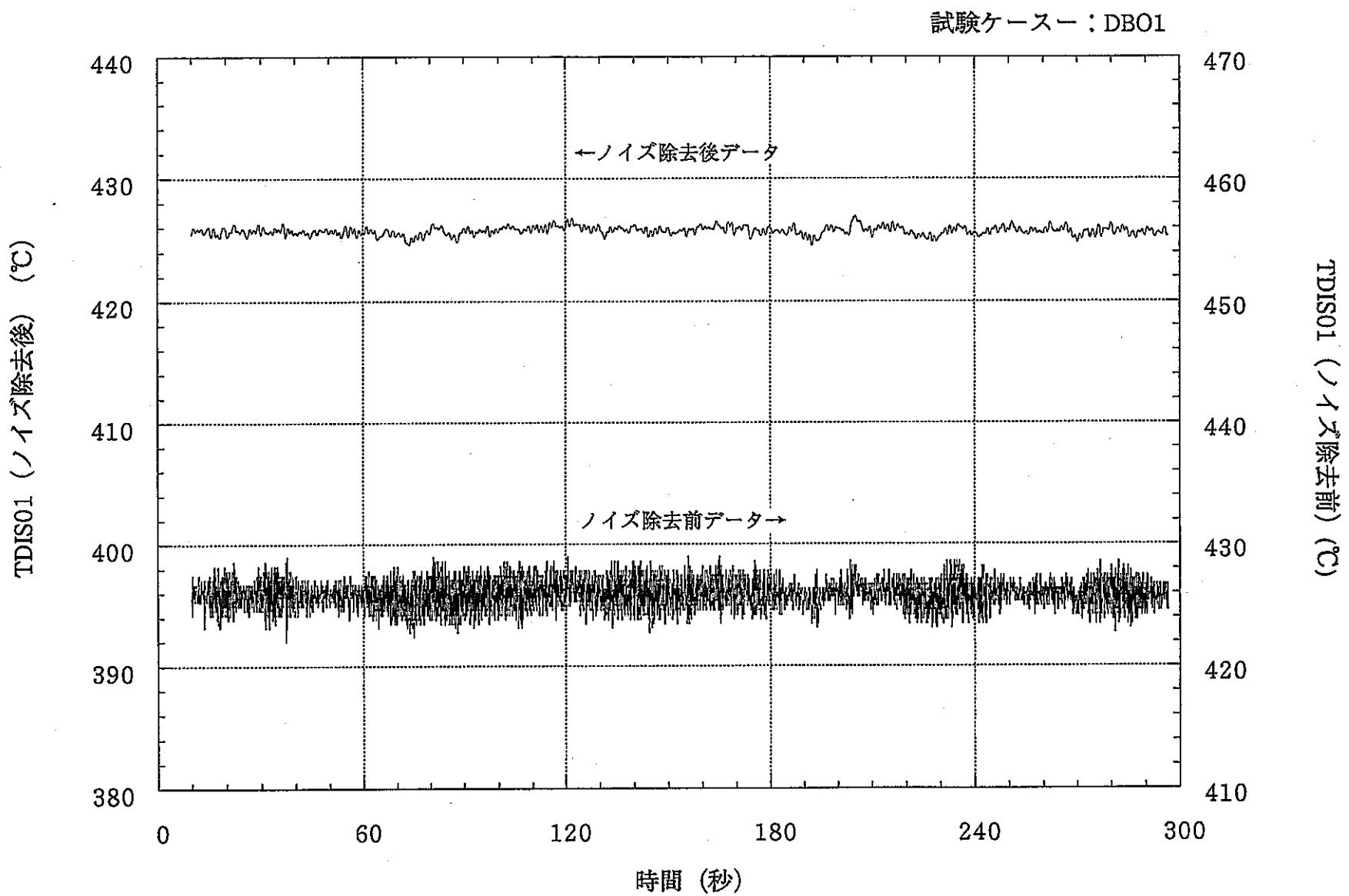


図4.1-7 DNB領域外温度ノイズ除去データ（外管内部温度）

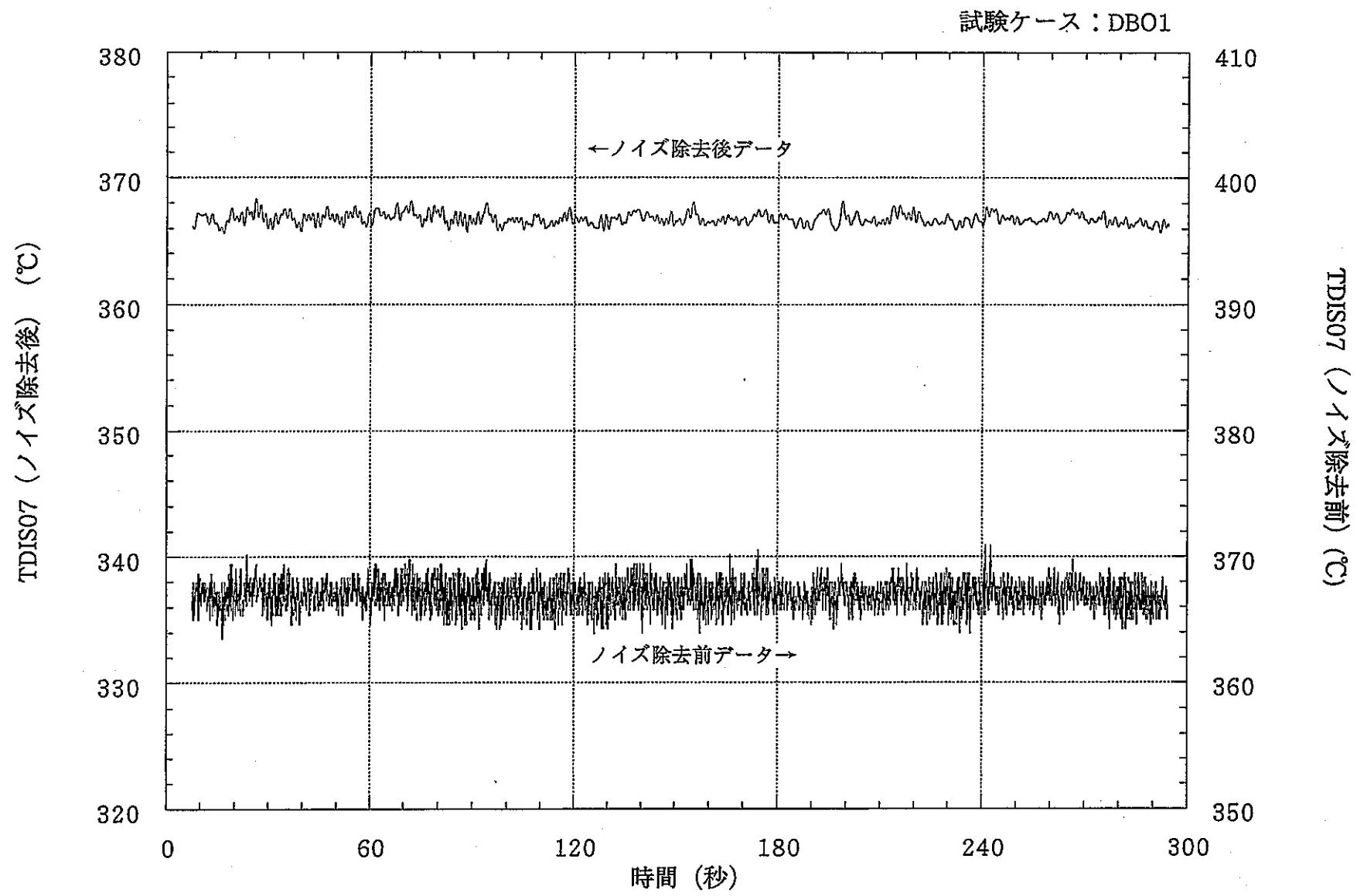


図4.1-8 DNB領域外温度ノイズ除去データ（外管内部温度）

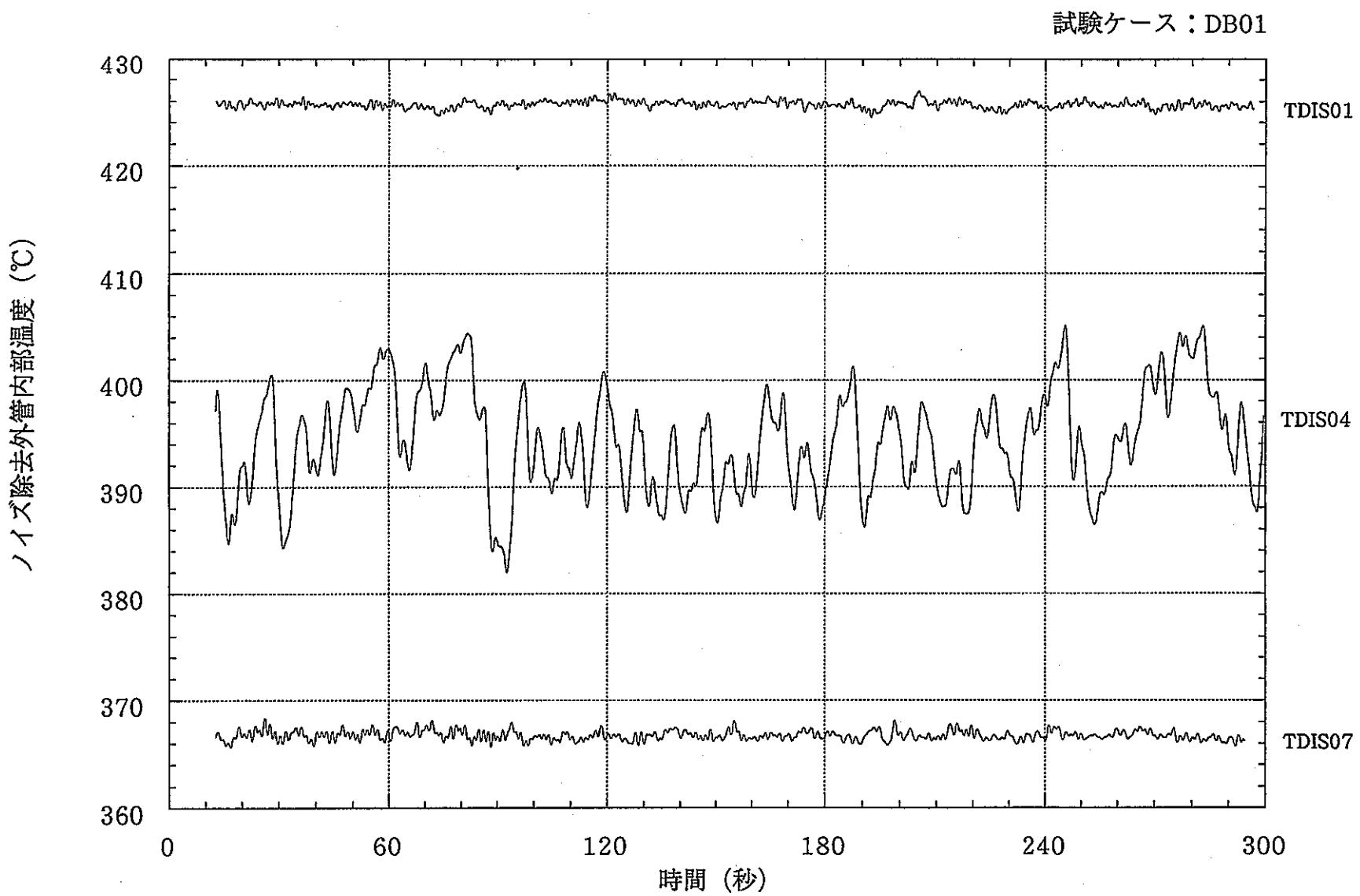


図4.1-9 ノイズ除去後データ（外管内部温度）

試験ケース：DB01A

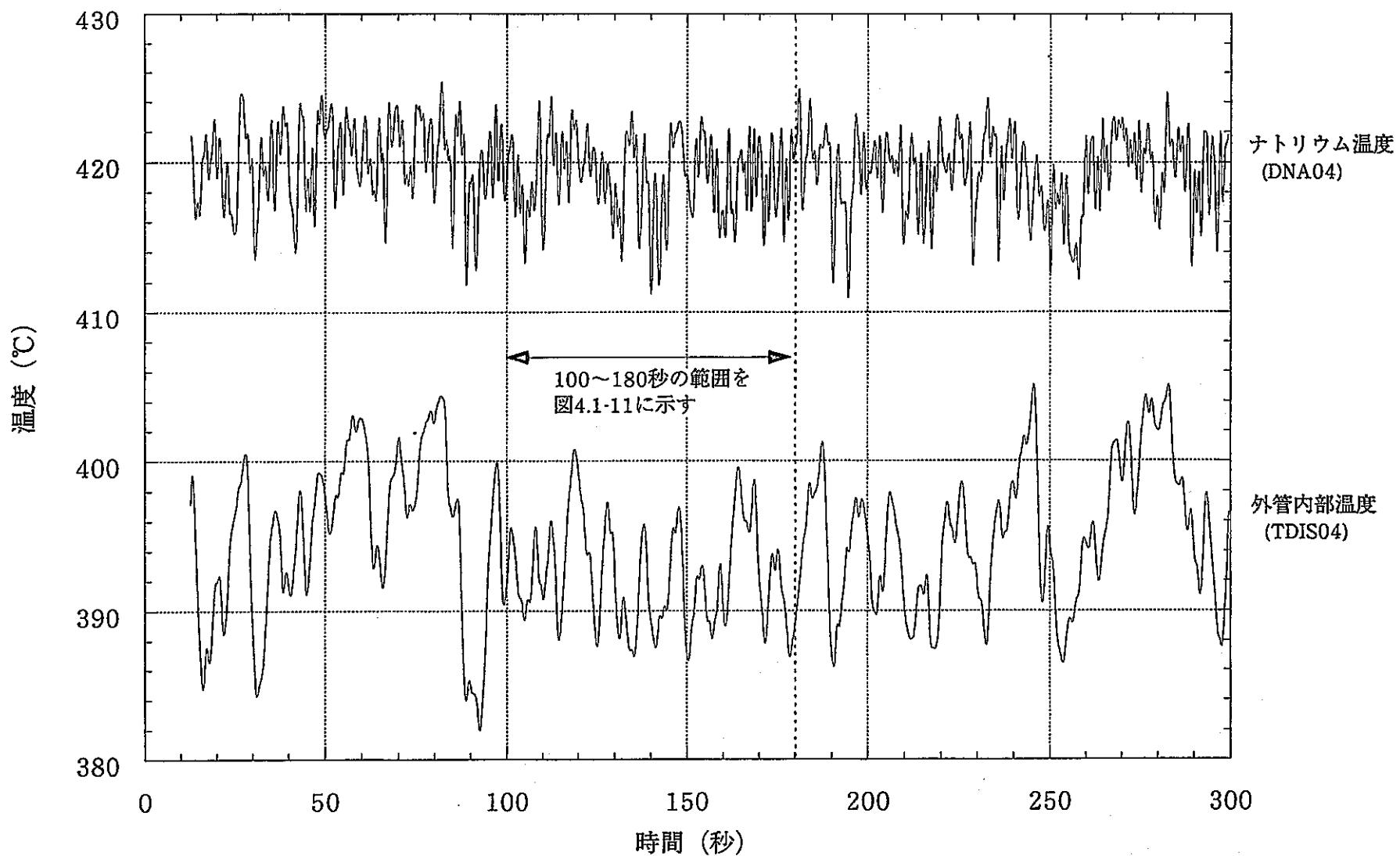


図4.1-10 ナトリウム温度と外管内部温度（ノイズ除去データ）

試験ケース：DB01A

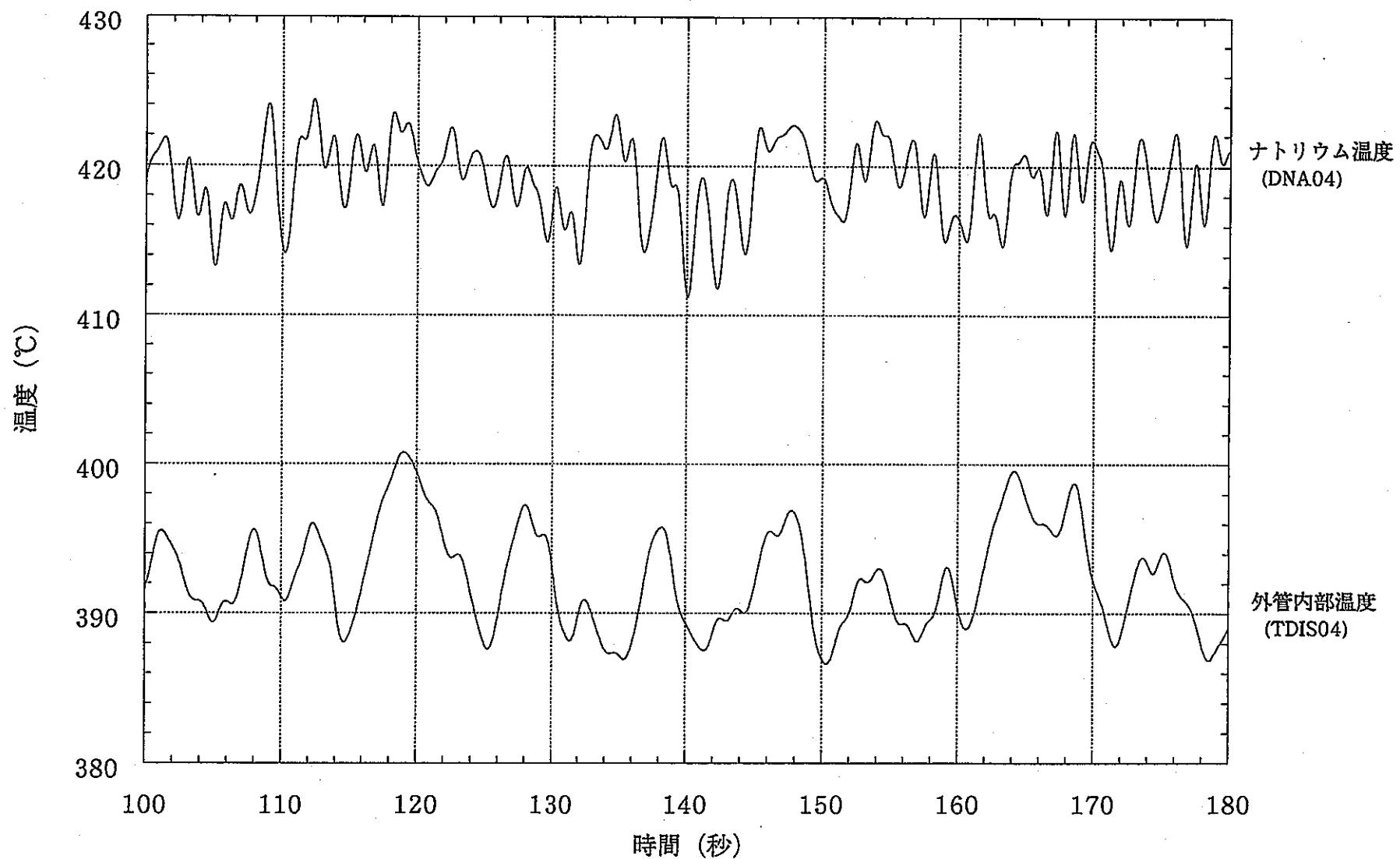


図4.1-11 ナトリウム温度と外管内部温度（ノイズ除去データ）

試験ケース：DB01
ナトリウム温度：TDNA04
外管内部温度：TDIS04

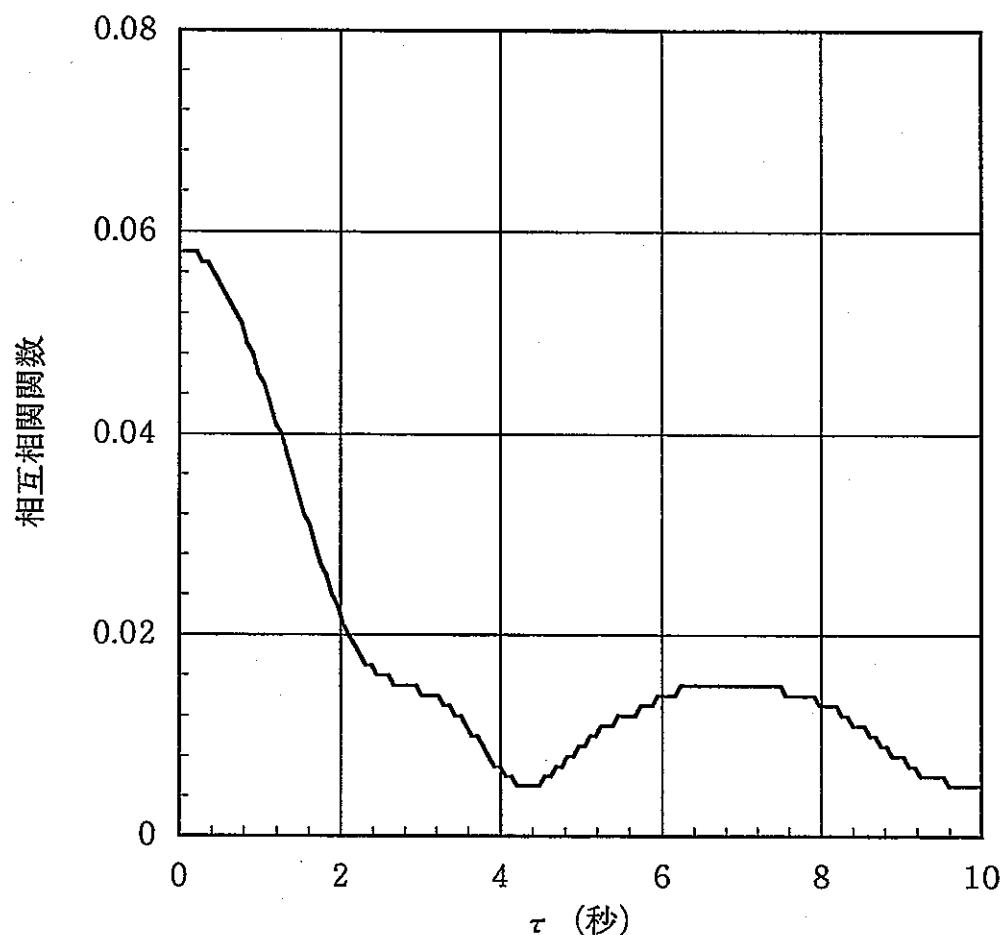


図4.1-12 ナトリウム温度と外管内部温度の相互相關関数

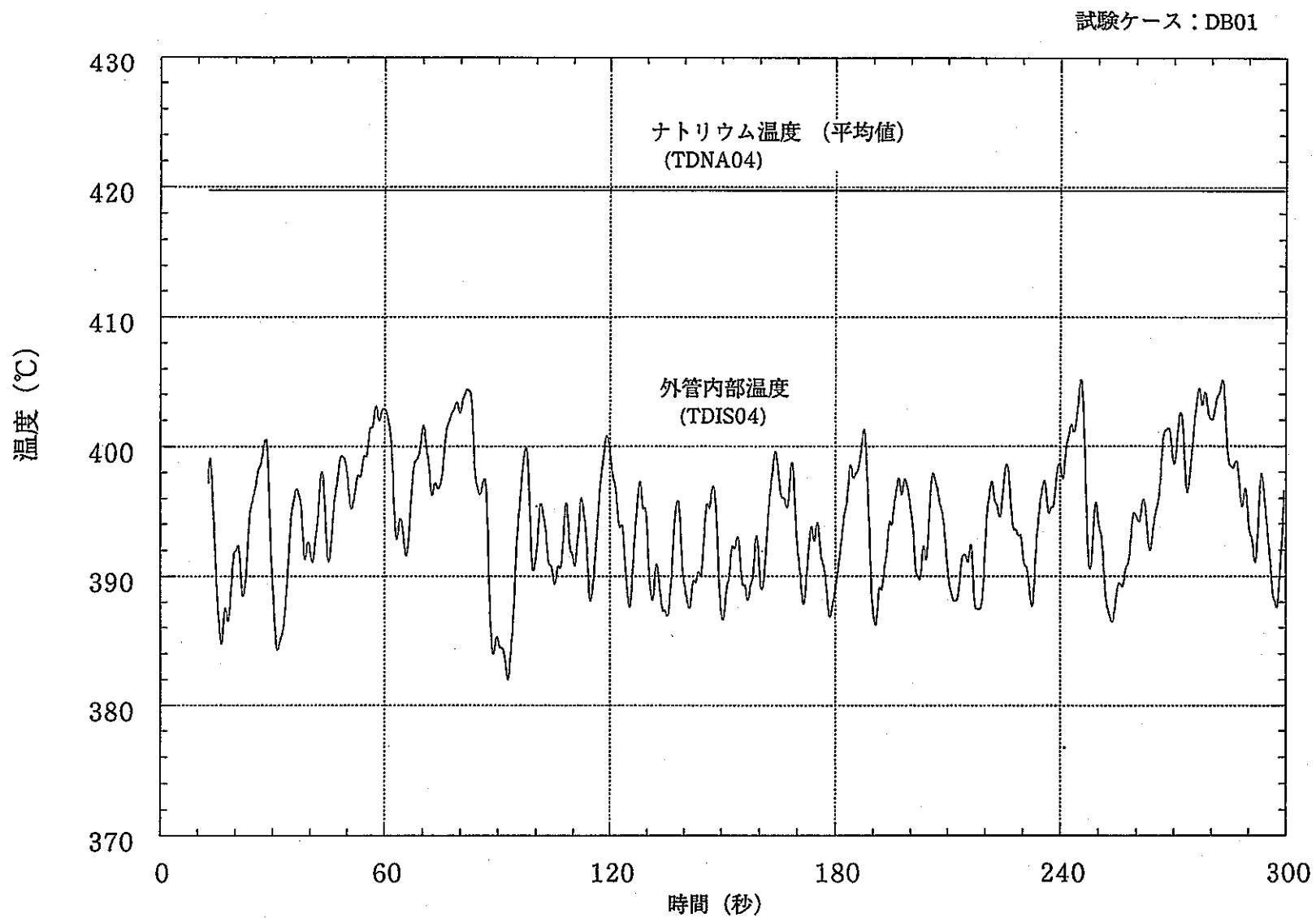


図4.1-13 ナトリウム温度と外管内部温度（逆熱伝達解析用データ）

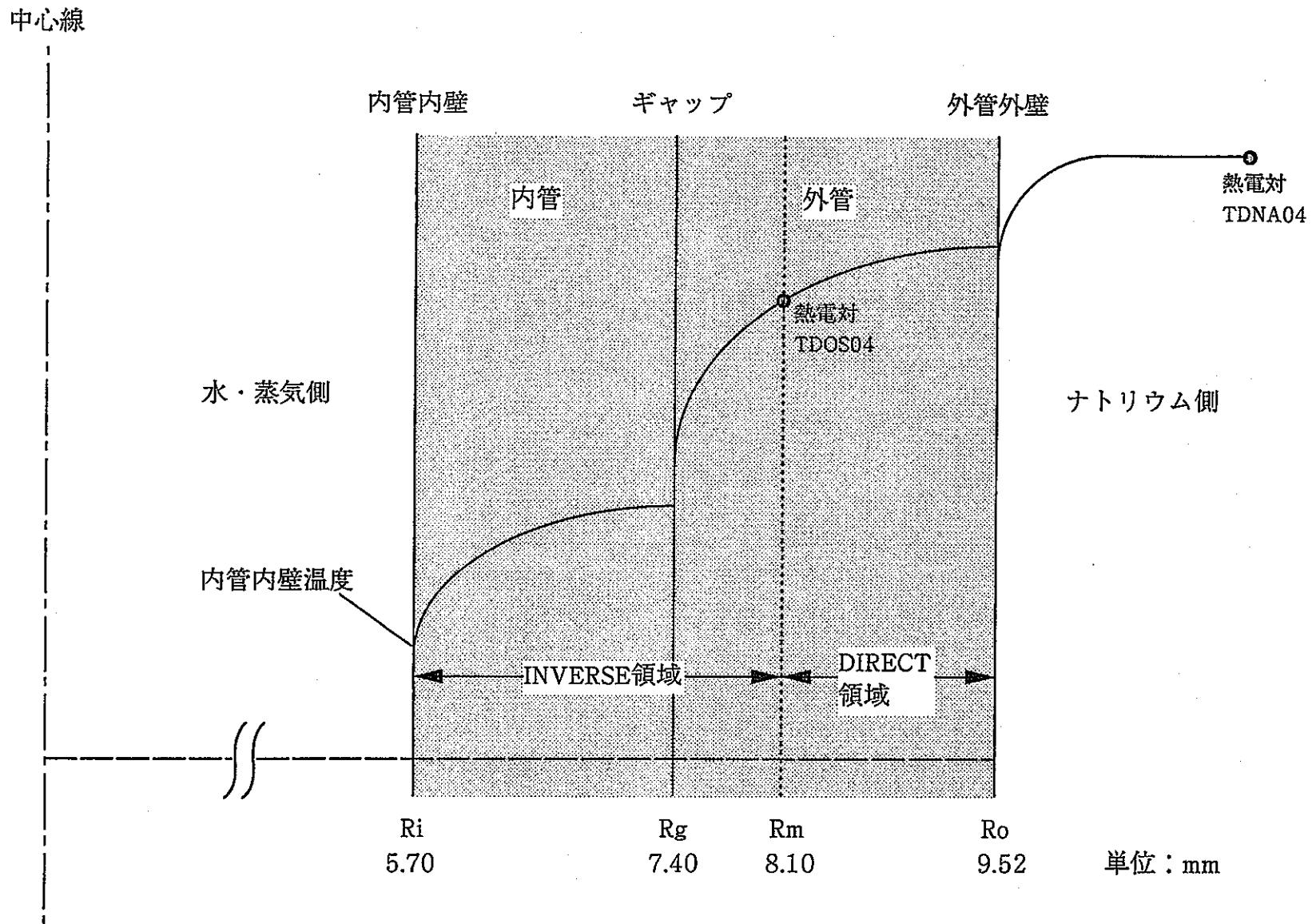


図4.2-1 逆熱伝導解析説明図

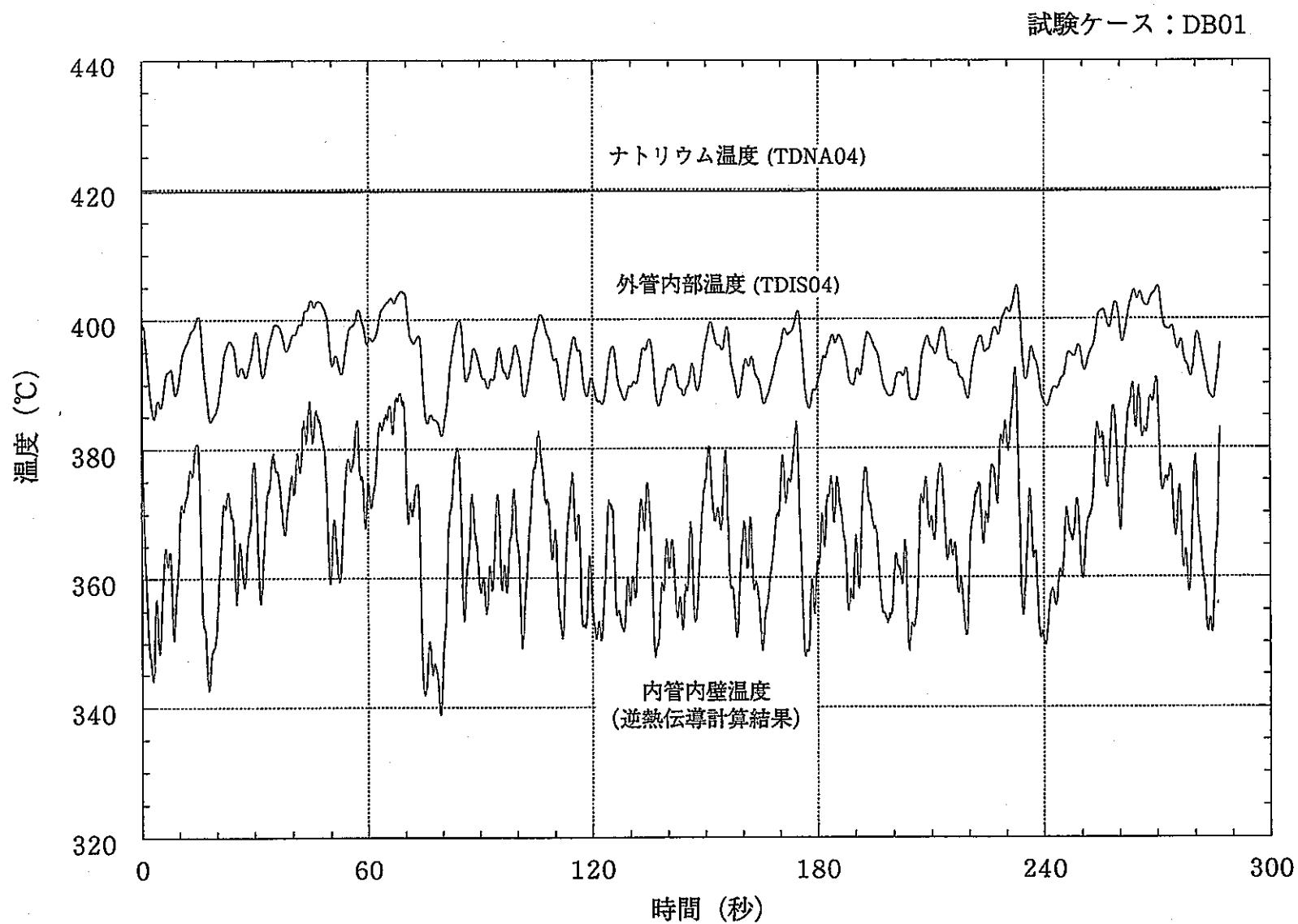


図4.2-2 逆熱伝導解析結果

5.1.1 DNB温度振動測定生データ

DNB領域およびDNB領域外の外管内部温度計測用熱電対の生データ（ノイズ除去前データ）を記載する。

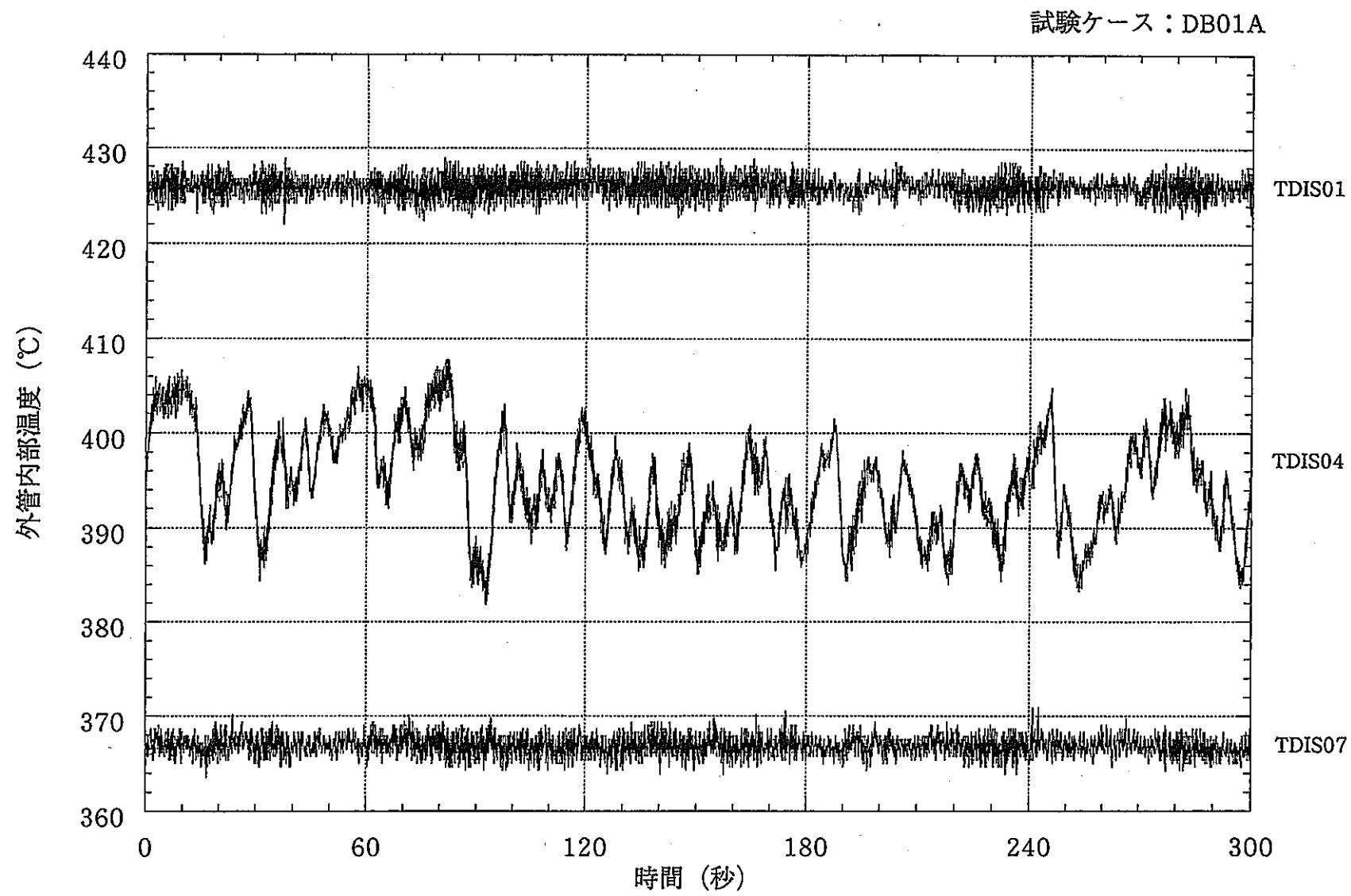


図5.1.1(1) DNB温度振動測定データ（外管内部温度）

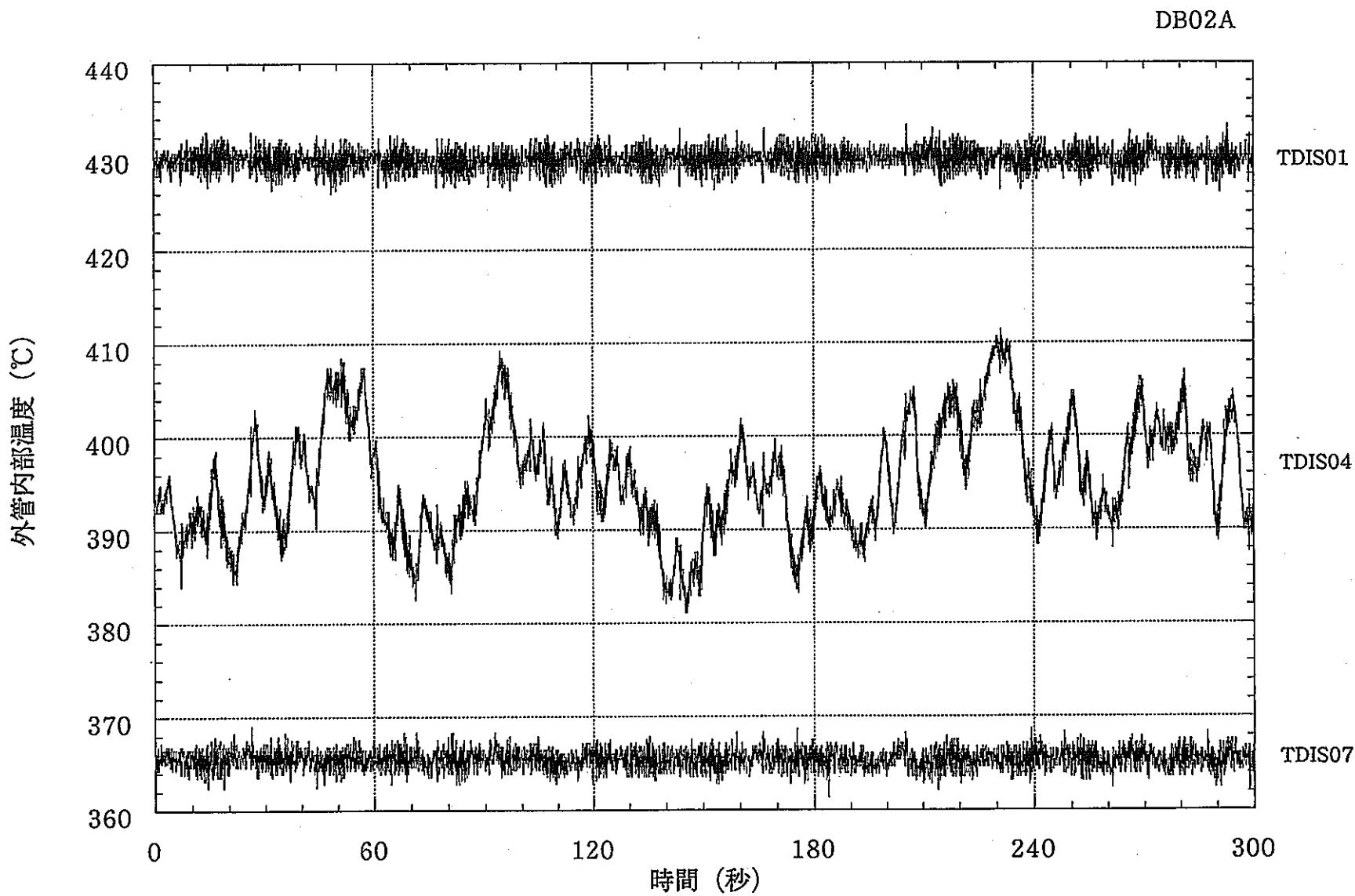


図5.1.1(2) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

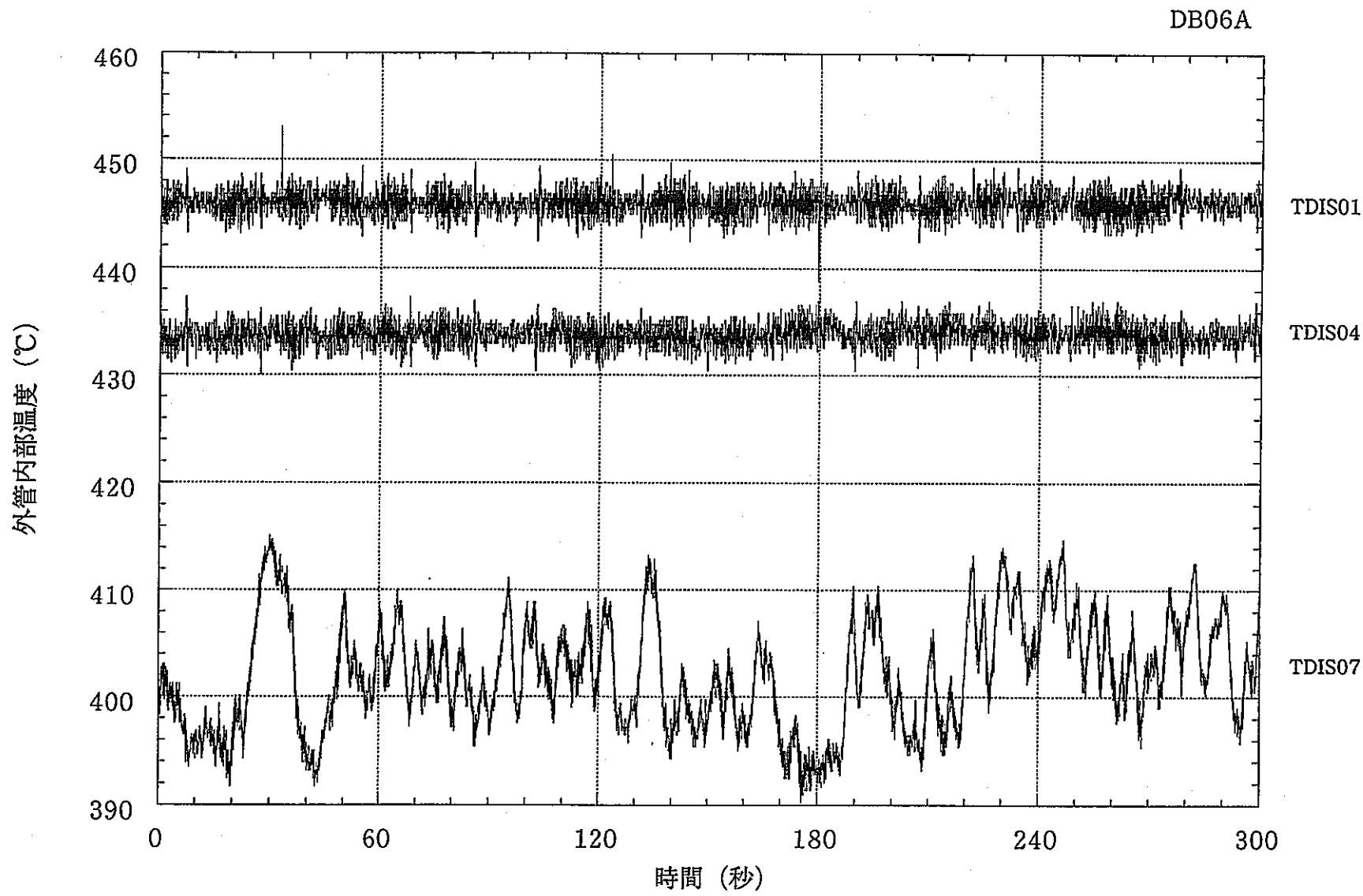


図5.1.1(3) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

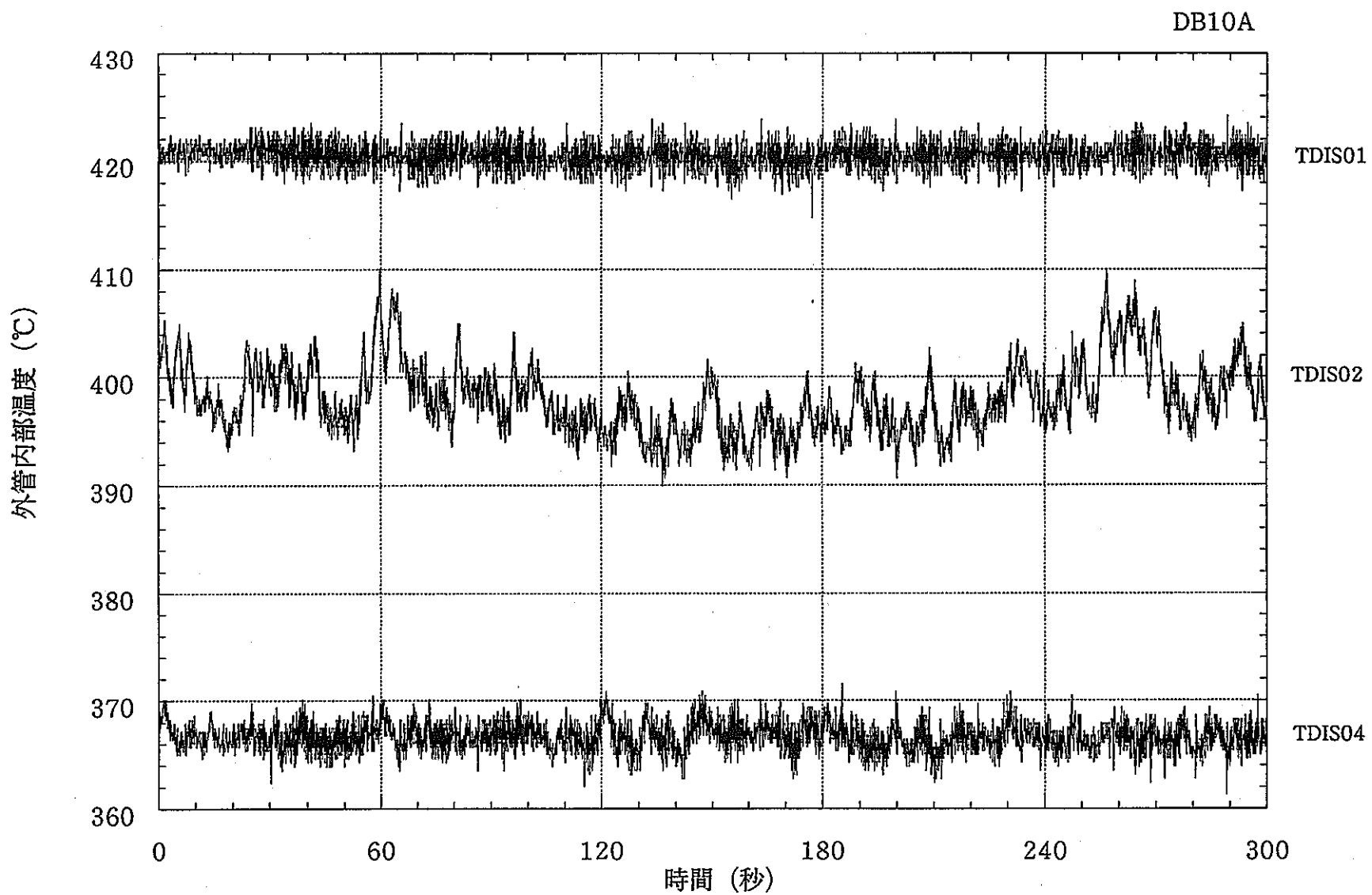


図5.1.1(4) DNB温度振動測定データ（外管内部温度）

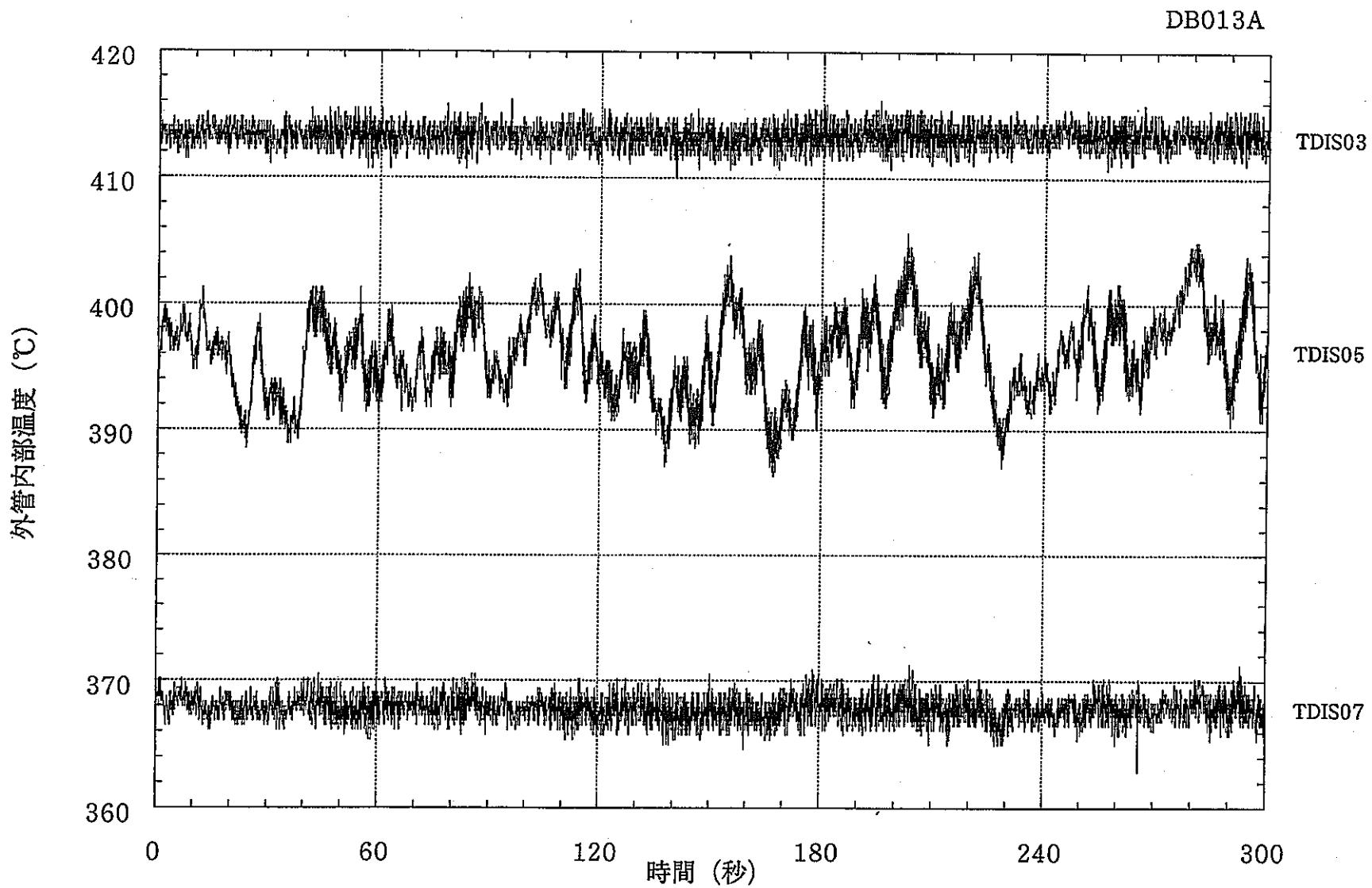


図5.1.1(5) DNB温度振動測定データ（外管内部温度）

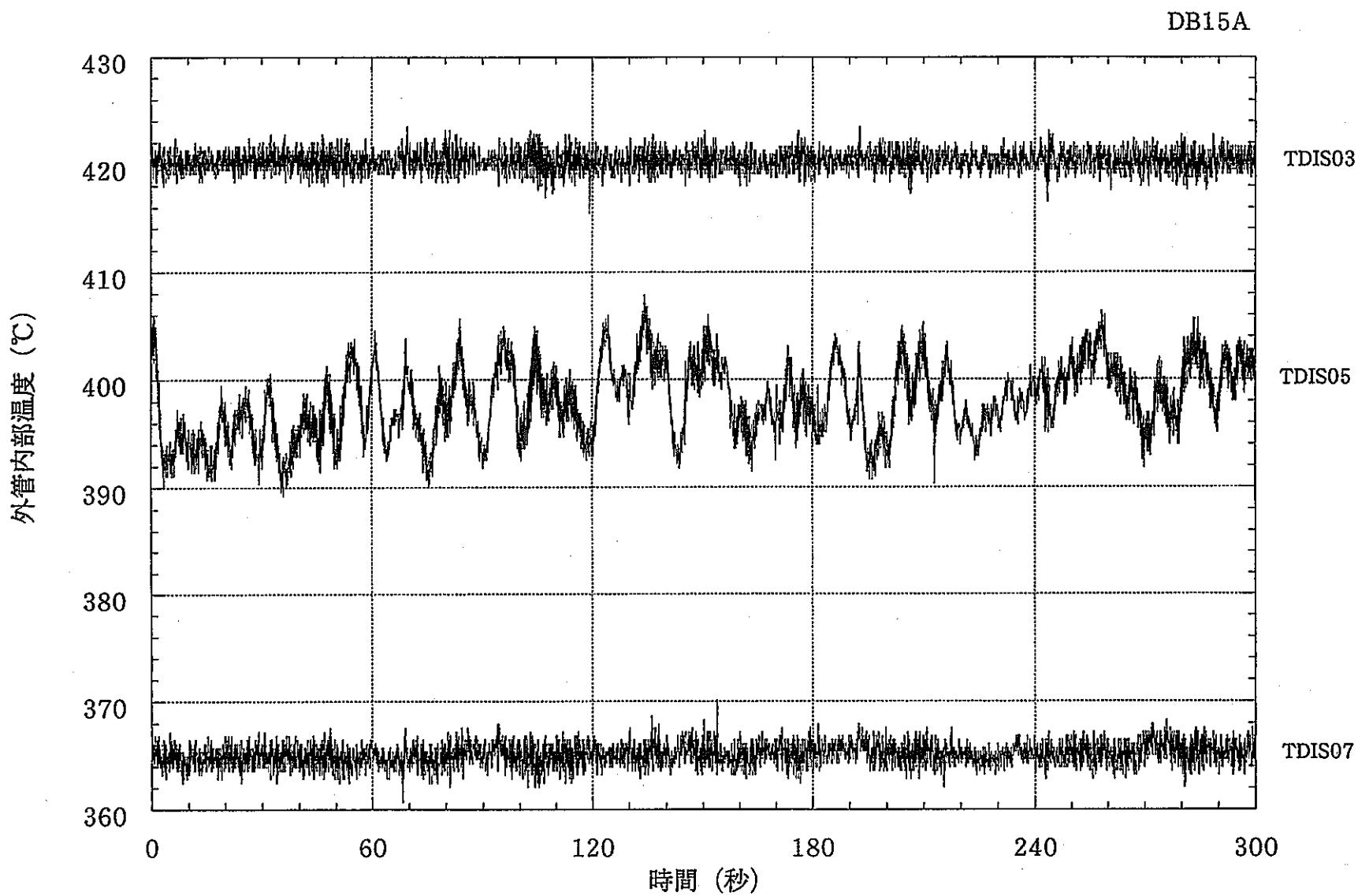


図5.1.1(6) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

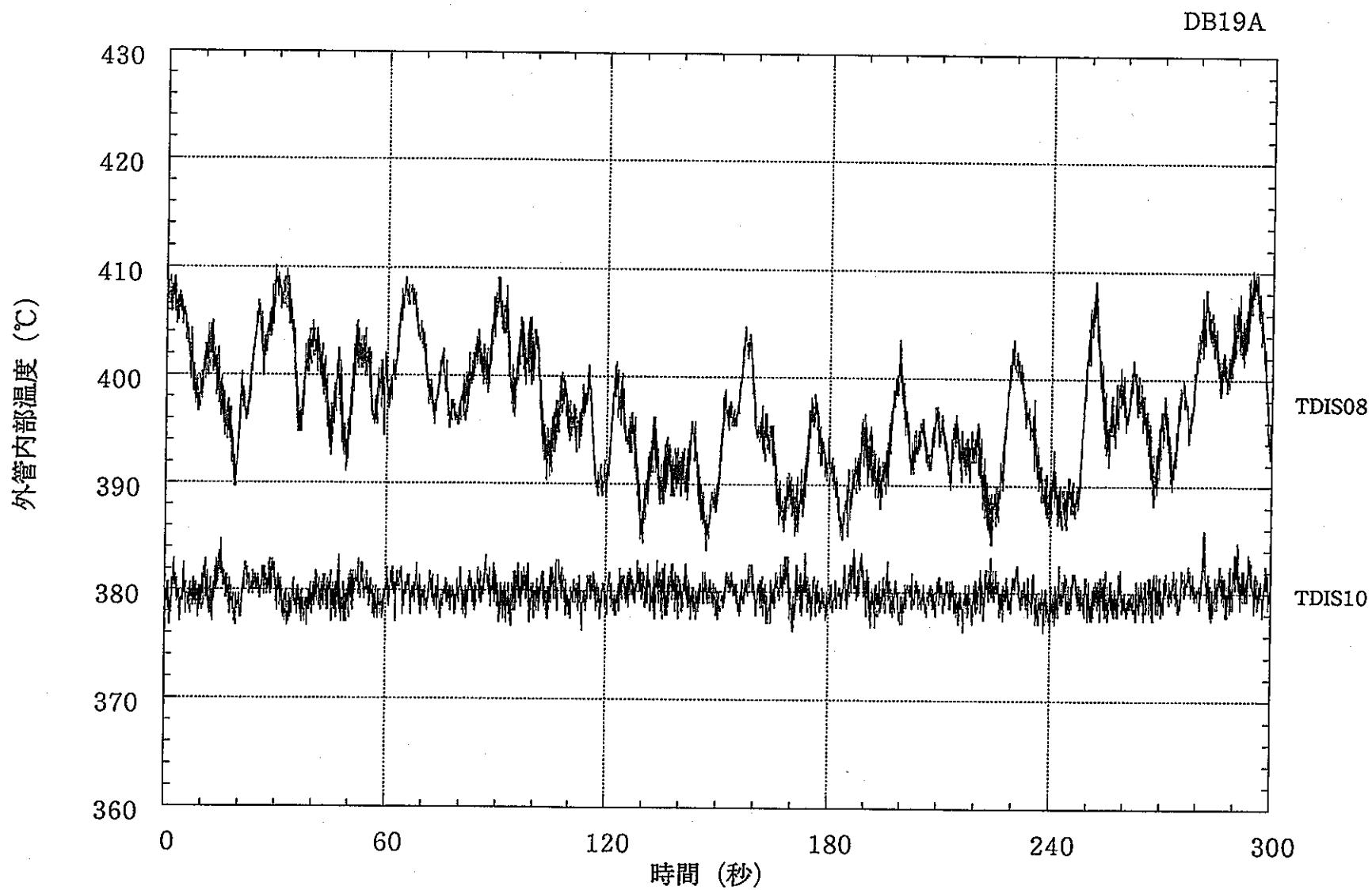


図5.1.1(7) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

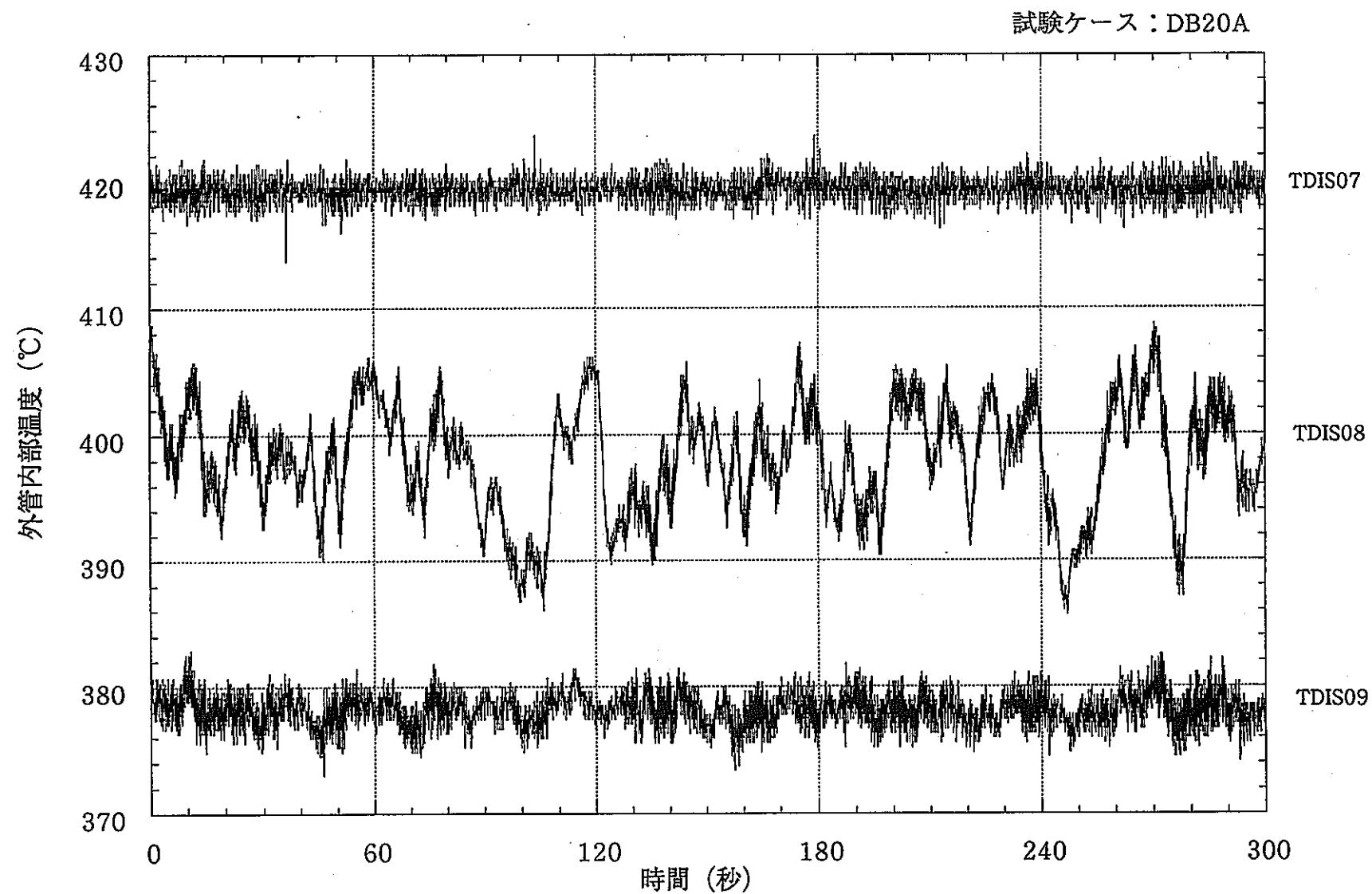


図5.1.1(8) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

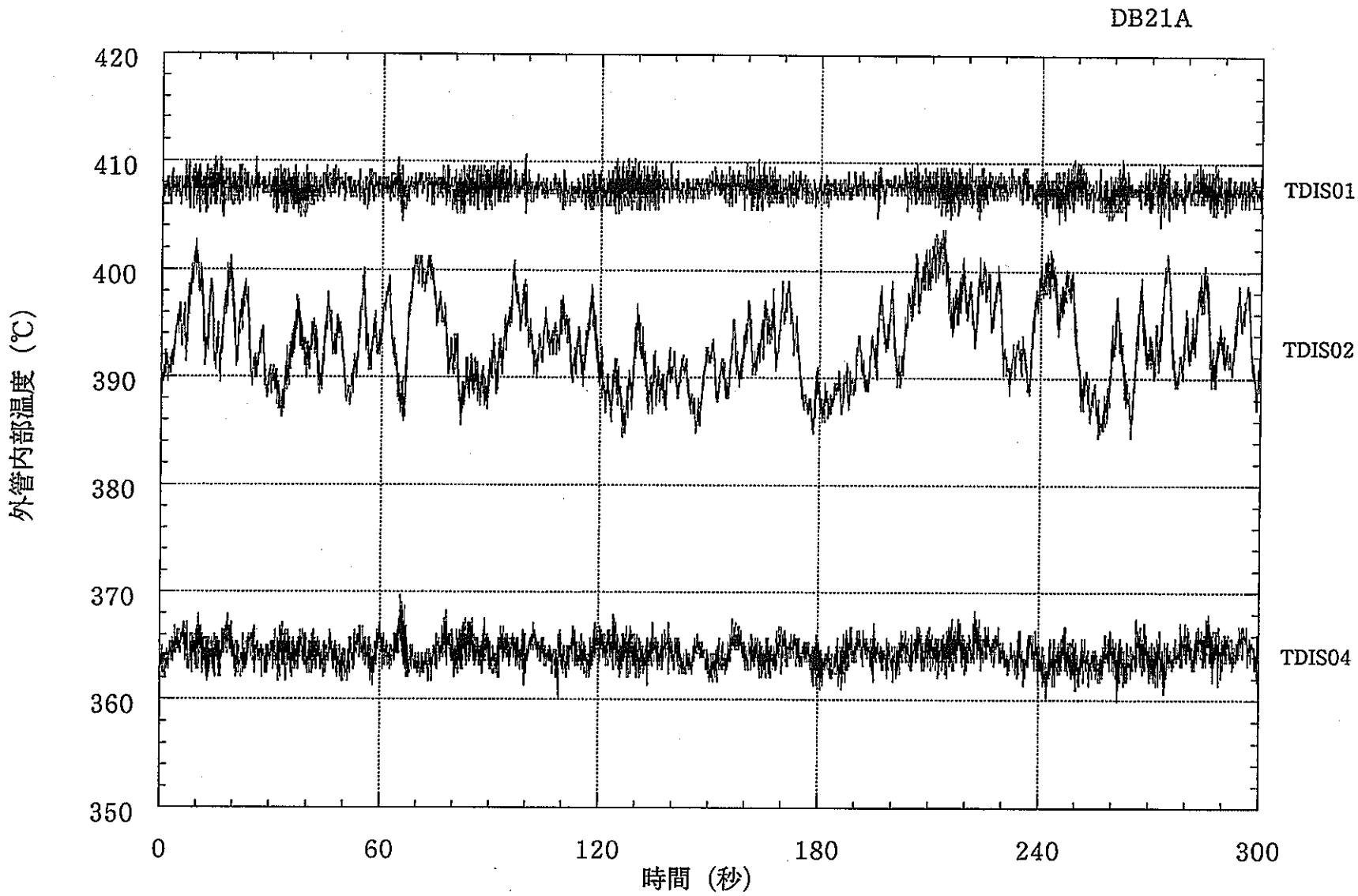


図5.1.1(9) DNB温度振動測定データ（外管内部温度）

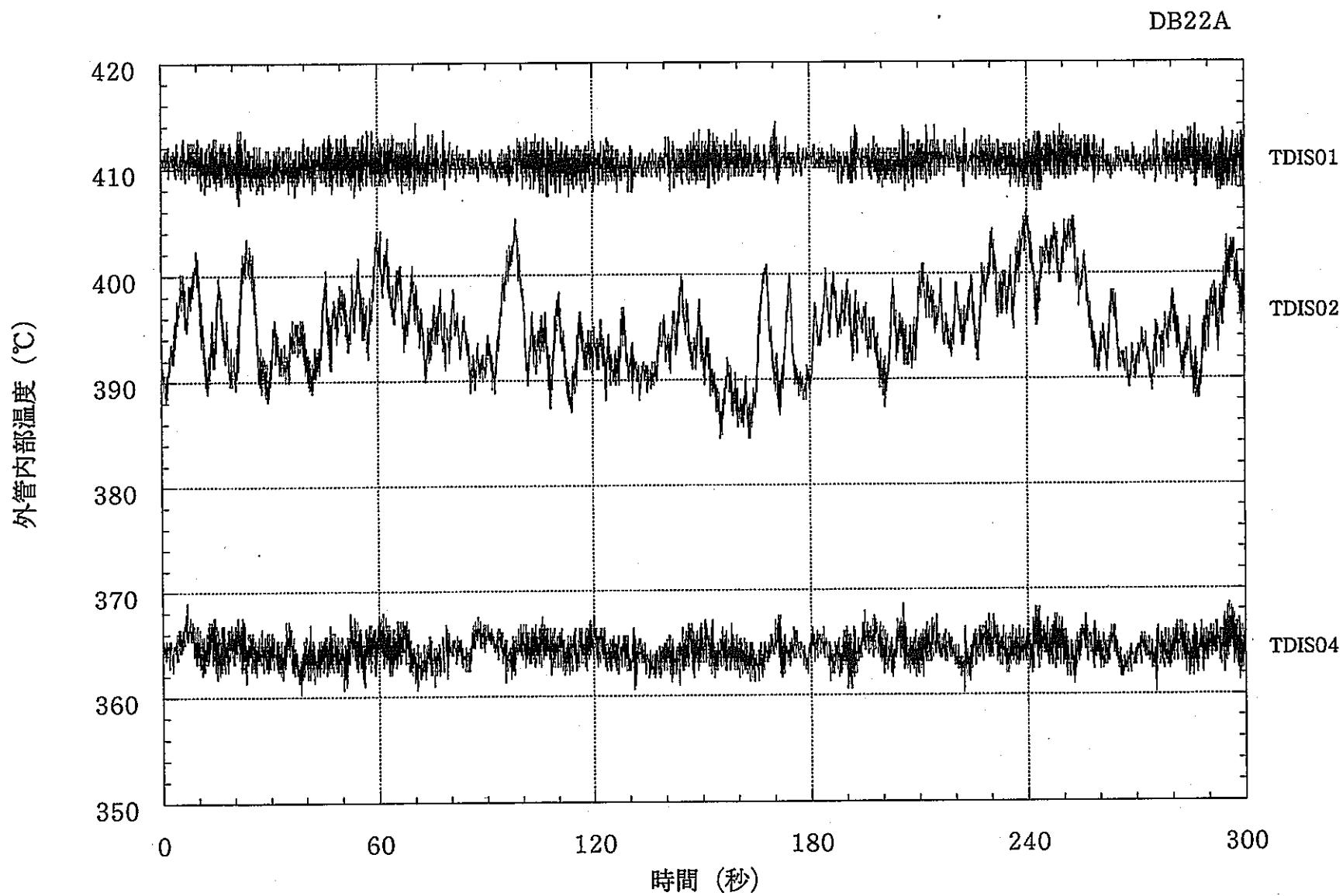


図5.1.1(10) DNB温度振動測定データ（外管内部温度）

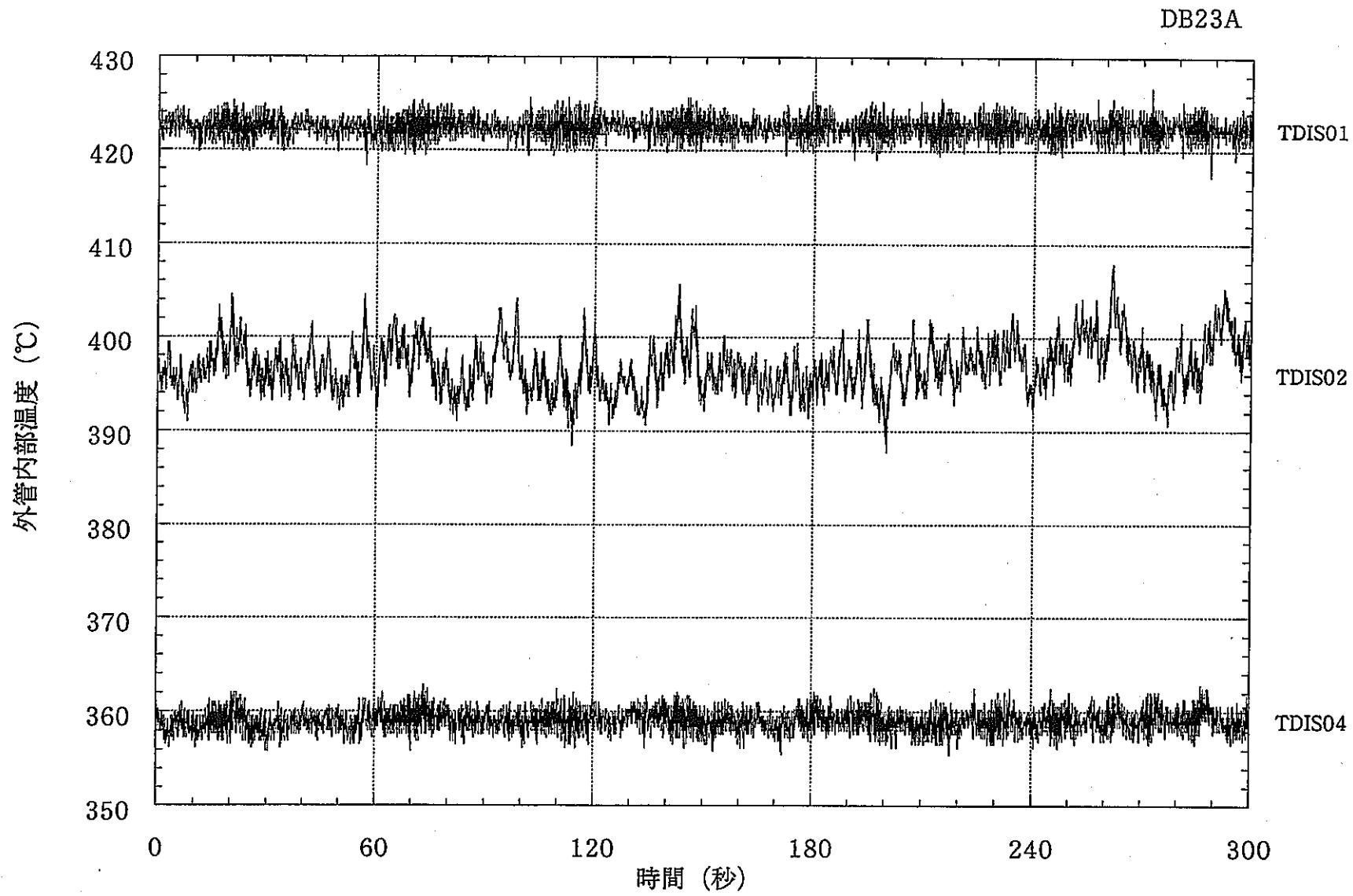


図5.1.1(11) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

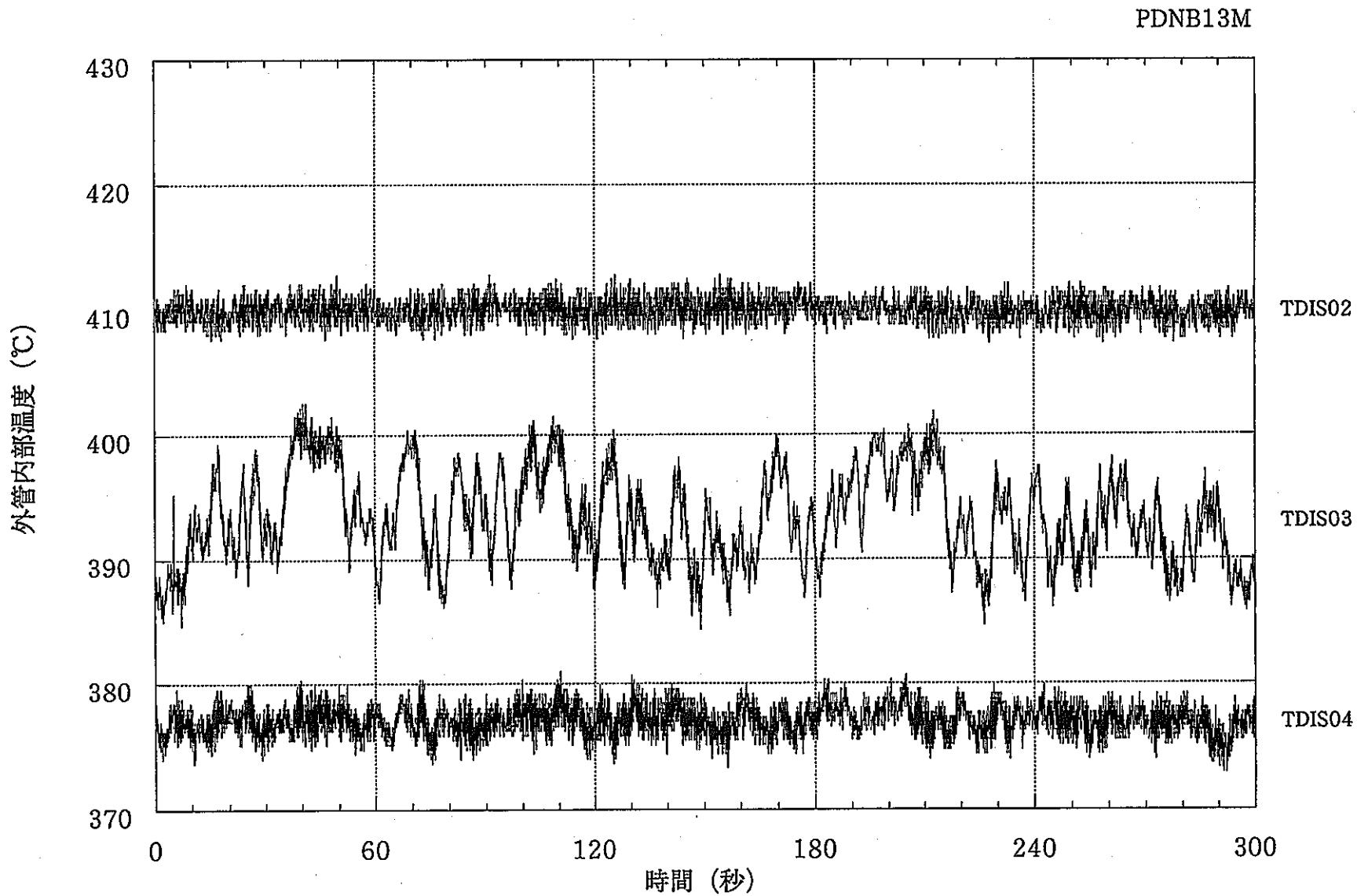


図5.1.1(12) DNB温度振動測定生データ（外管内部温度）

5.1.2 スペクトル解析データ

DNB領域およびDNB領域外の外管内部温度計測用熱電対のスペクトルを記載する。

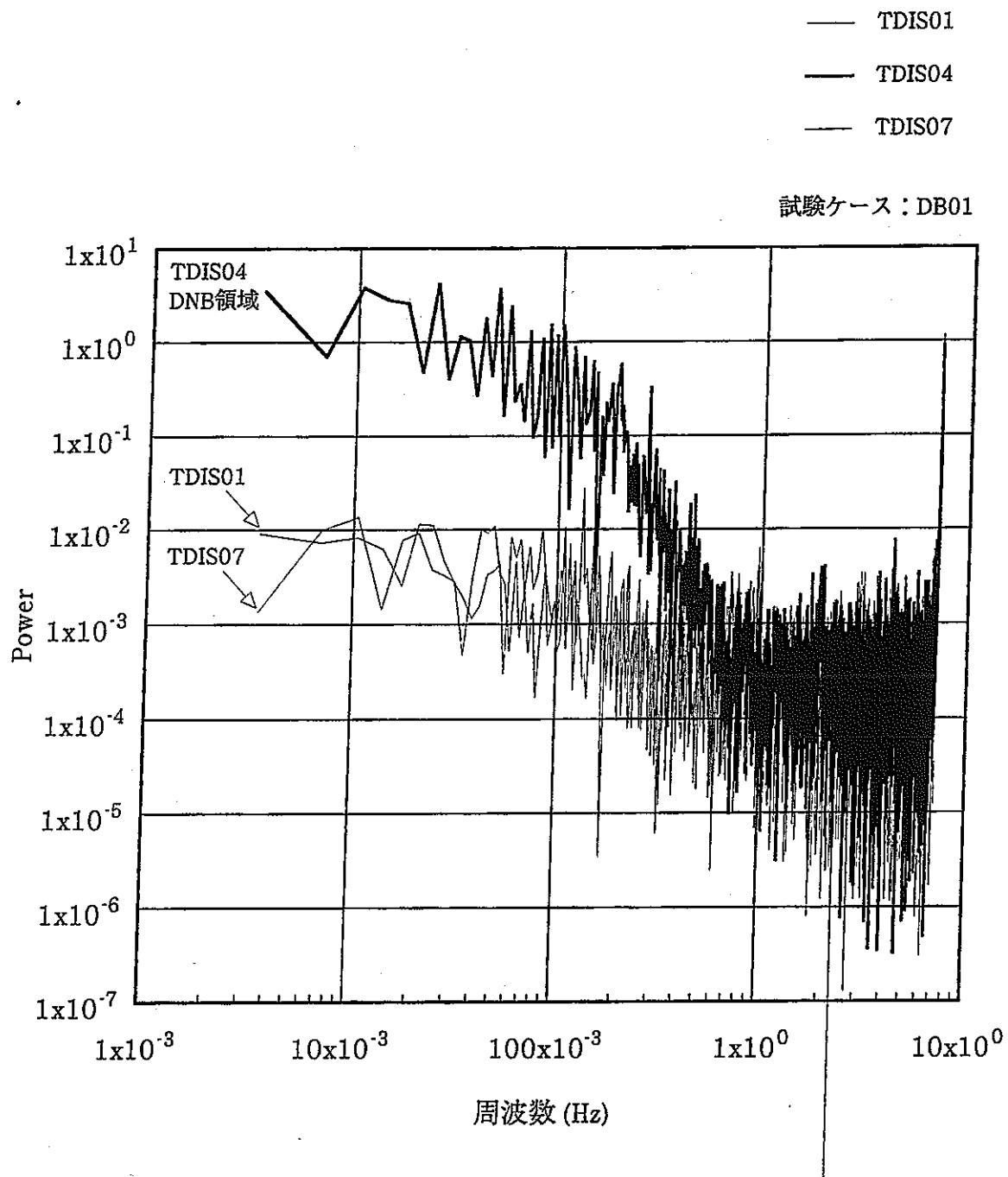


図5.1.2(1) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

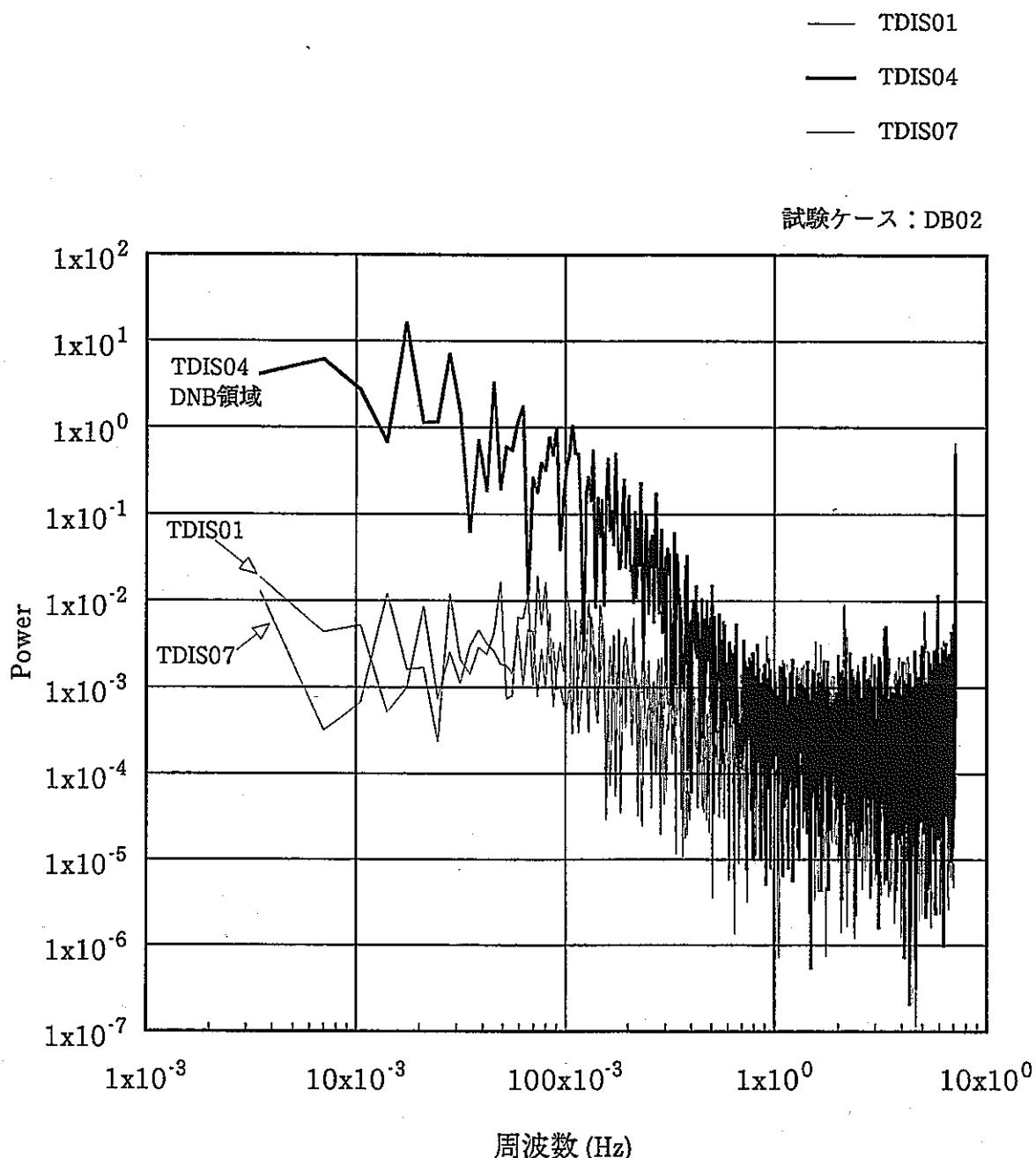


図5.1.2(2) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

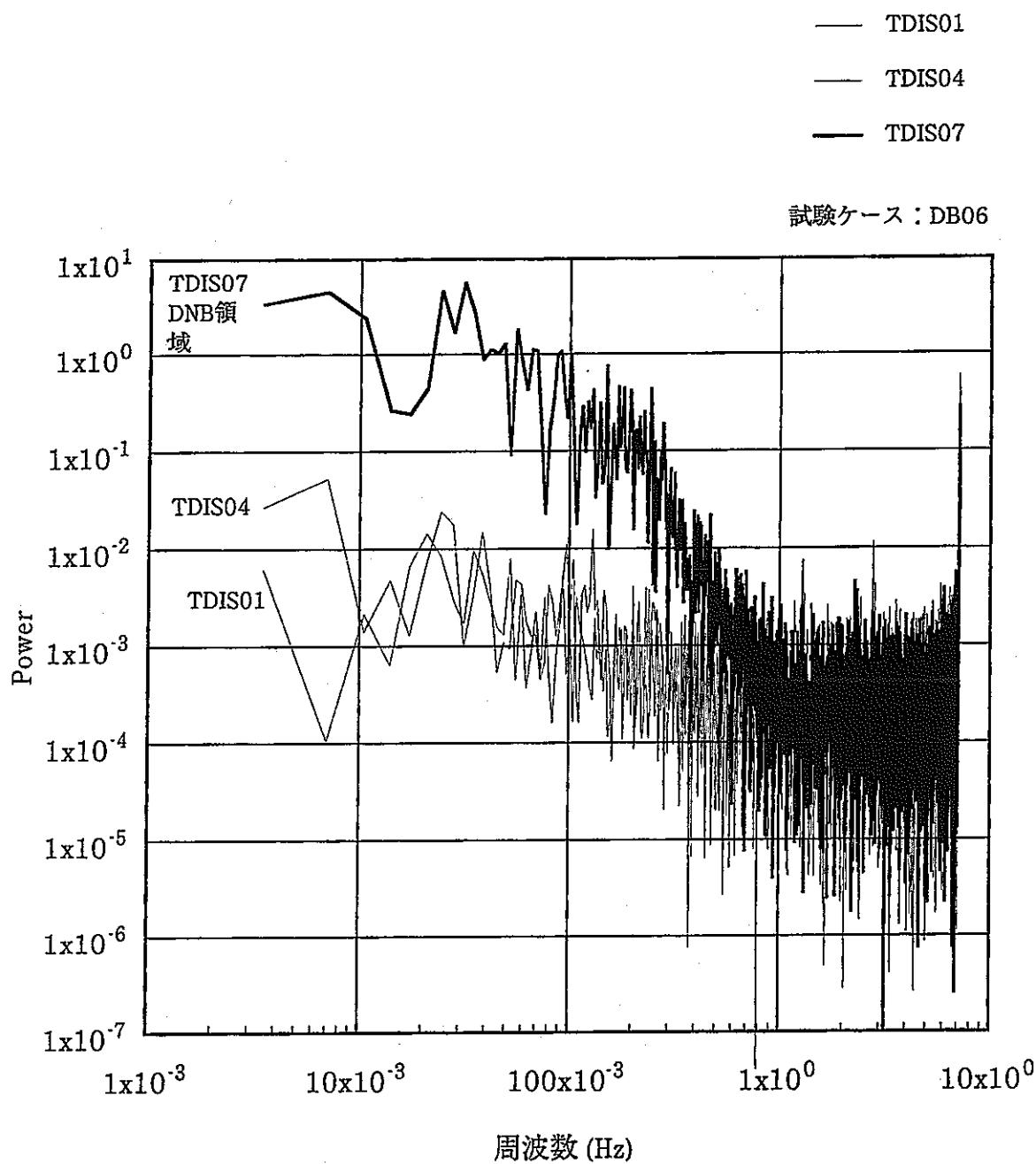


図5.1.2(3) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

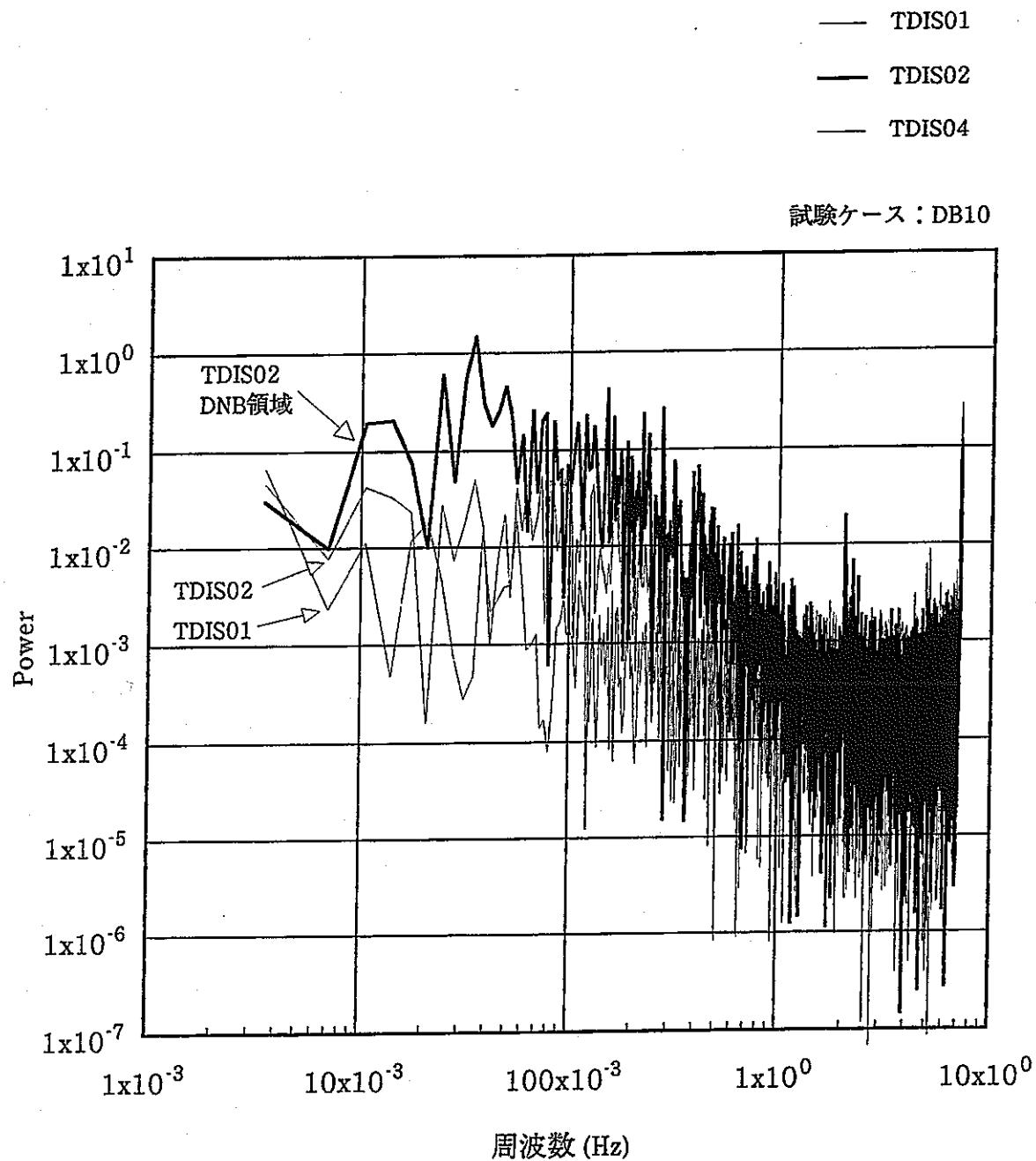


図5.1.2(4) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

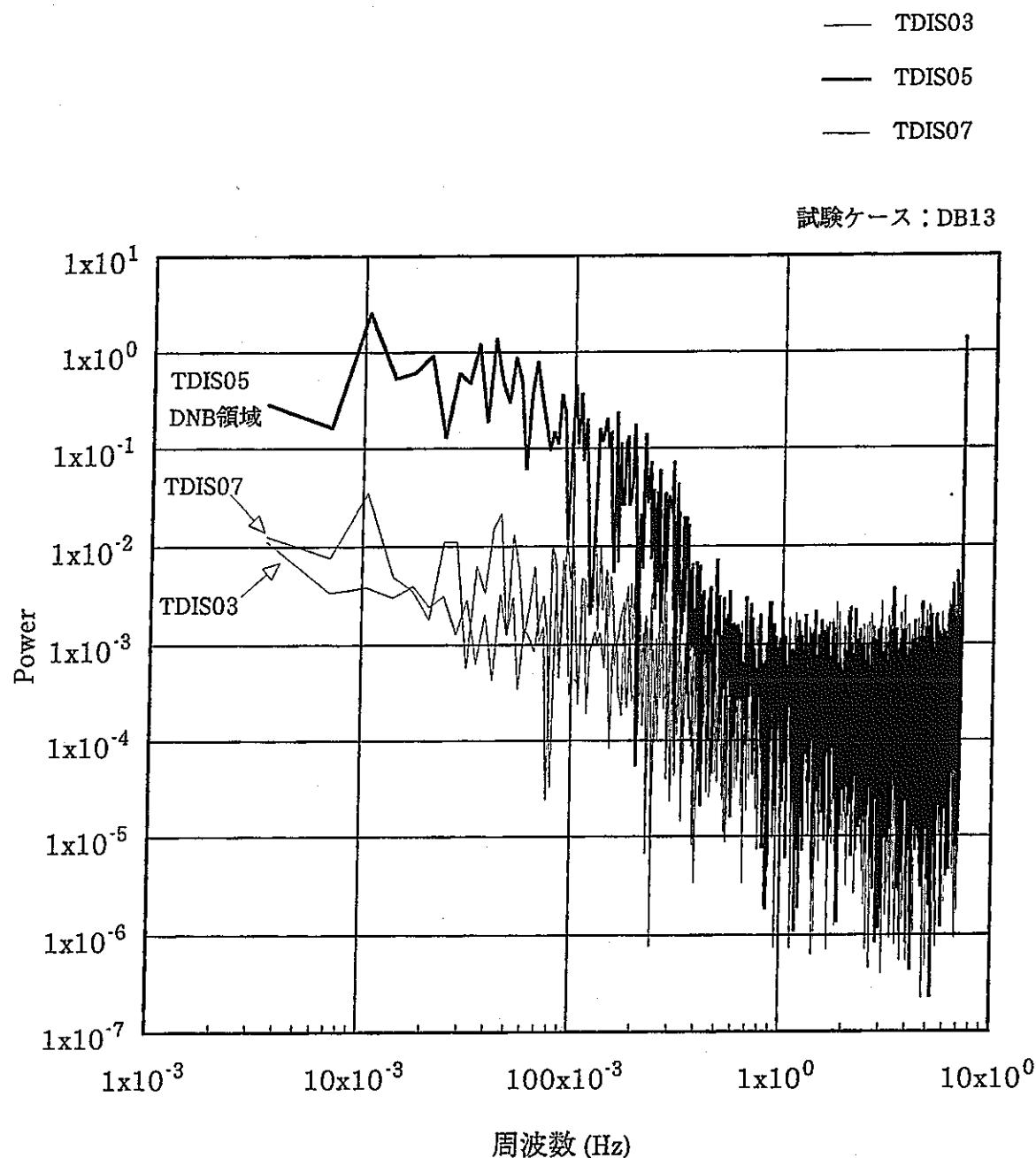


図5.1.2(5) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

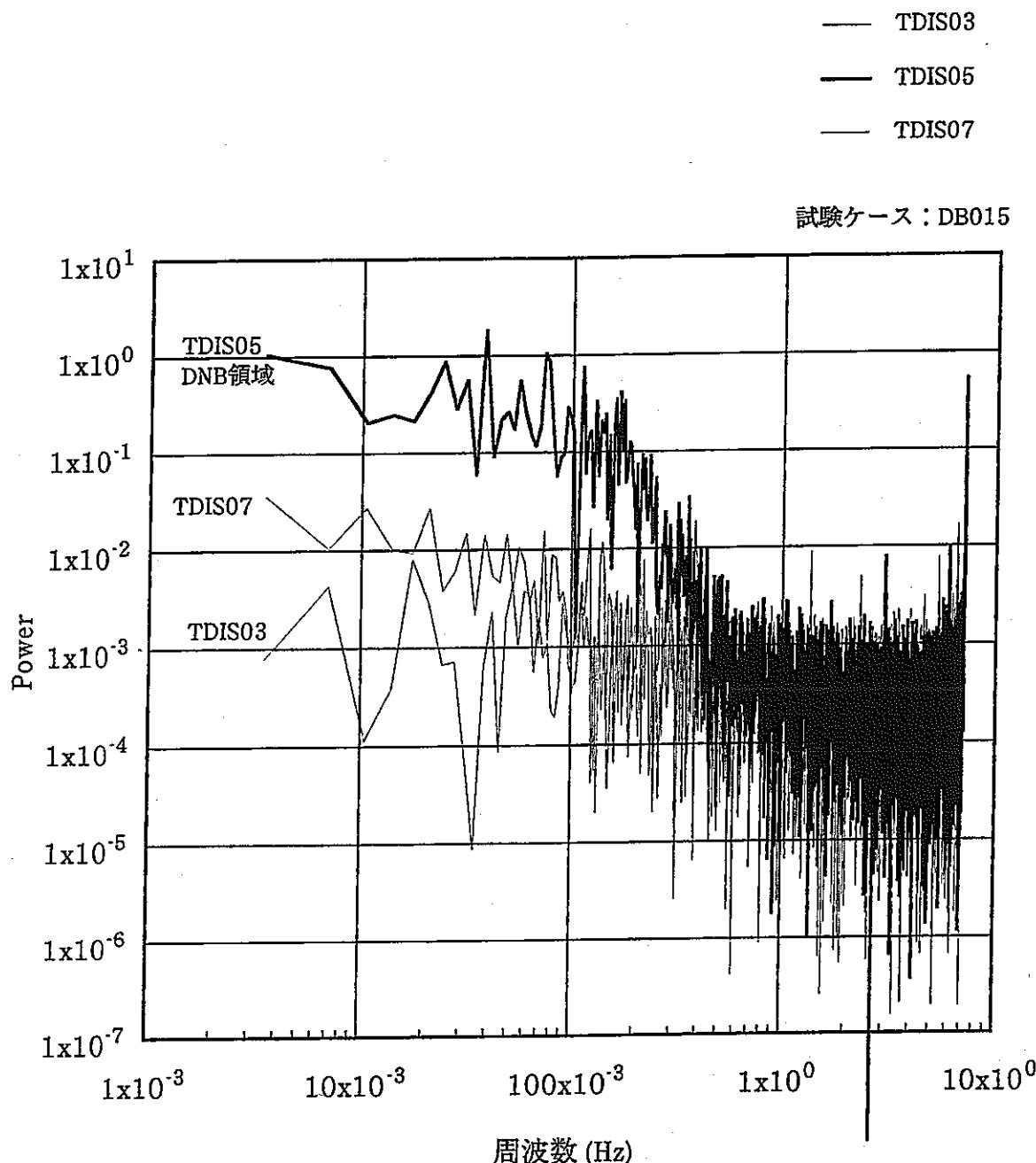


図5.1.2(6) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

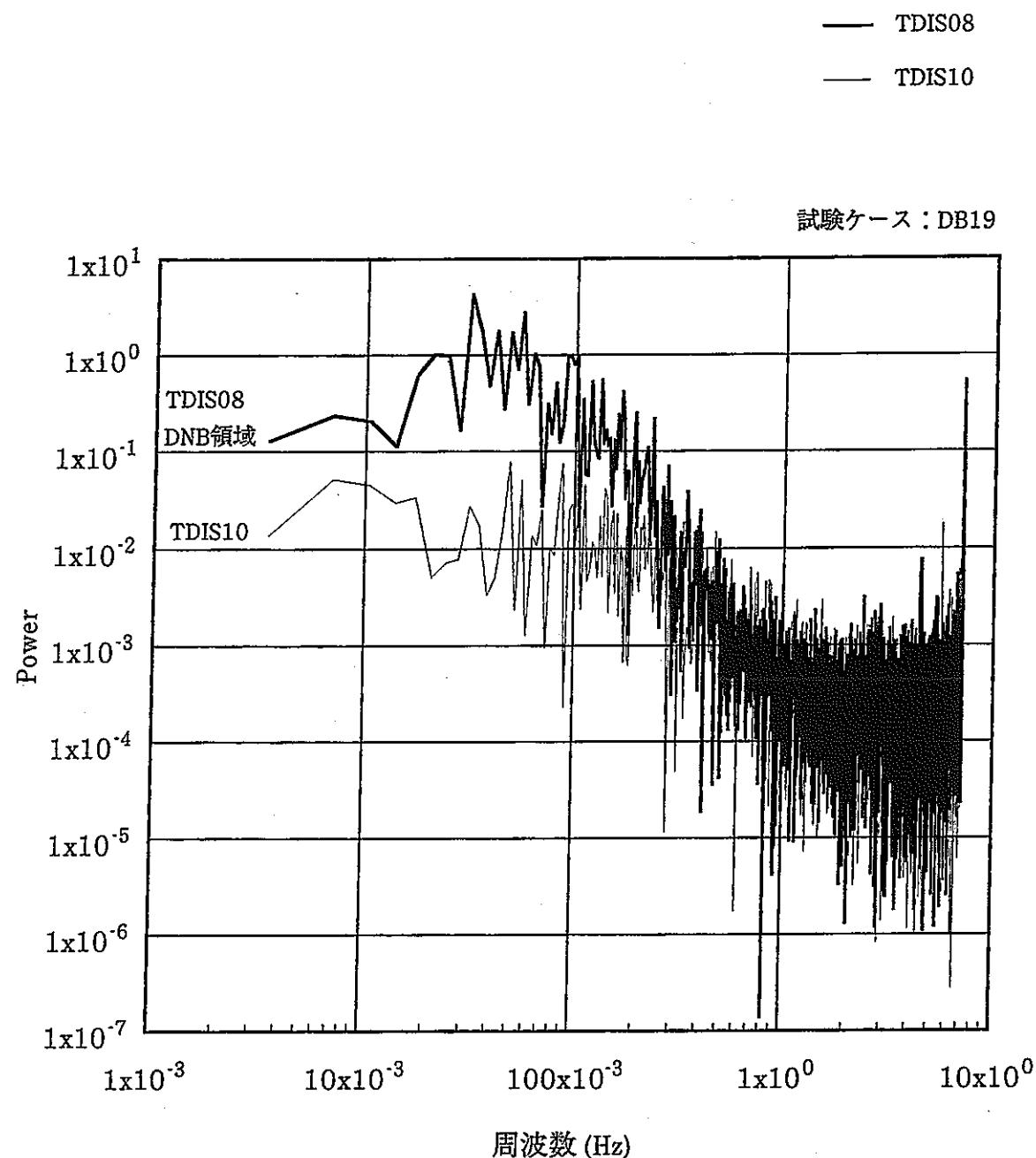


図5.1.2(7) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

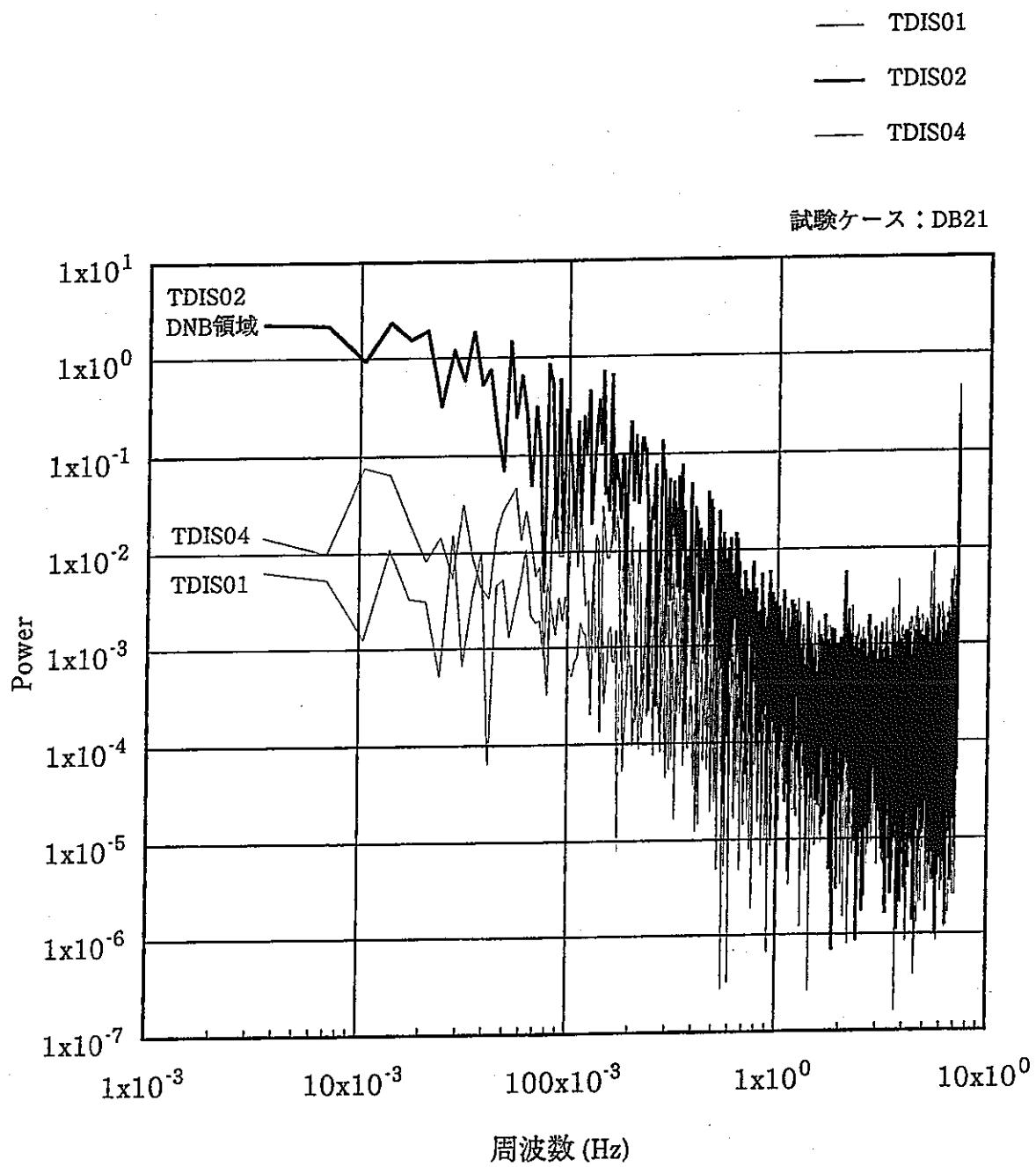


図5.1.2(8) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

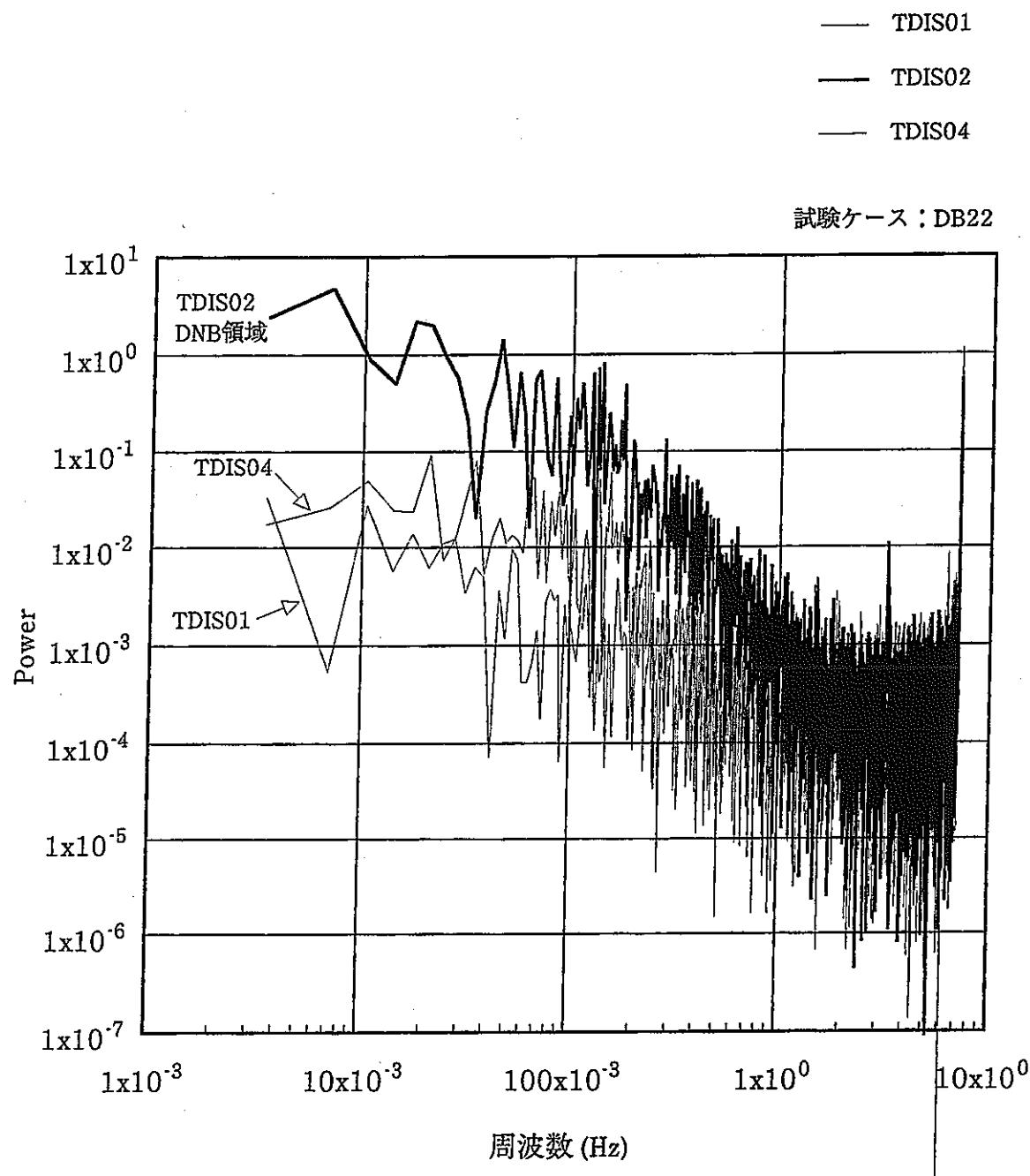


図5.1.2(9) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

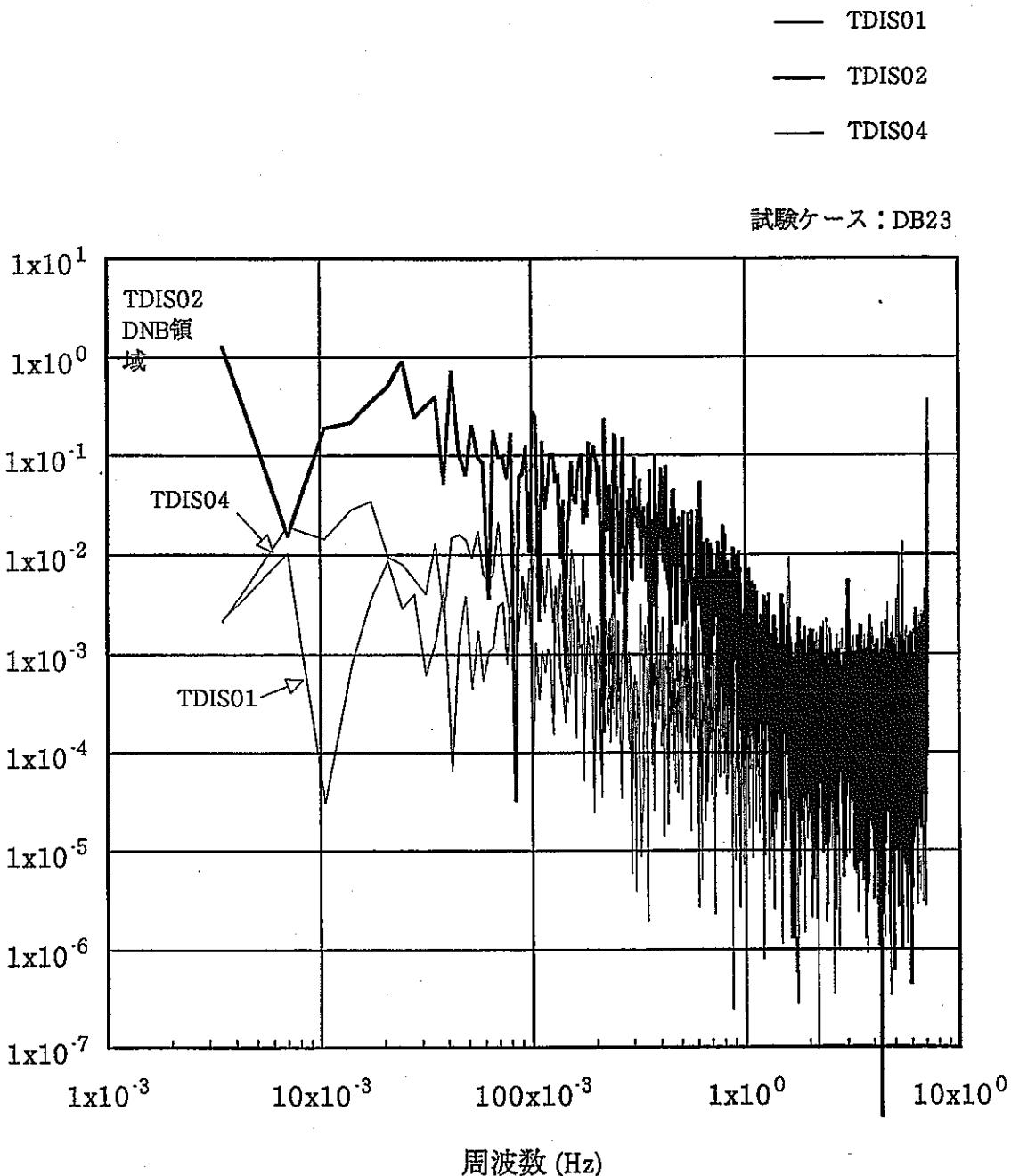


図5.1.2(10) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル (外管内部温度)

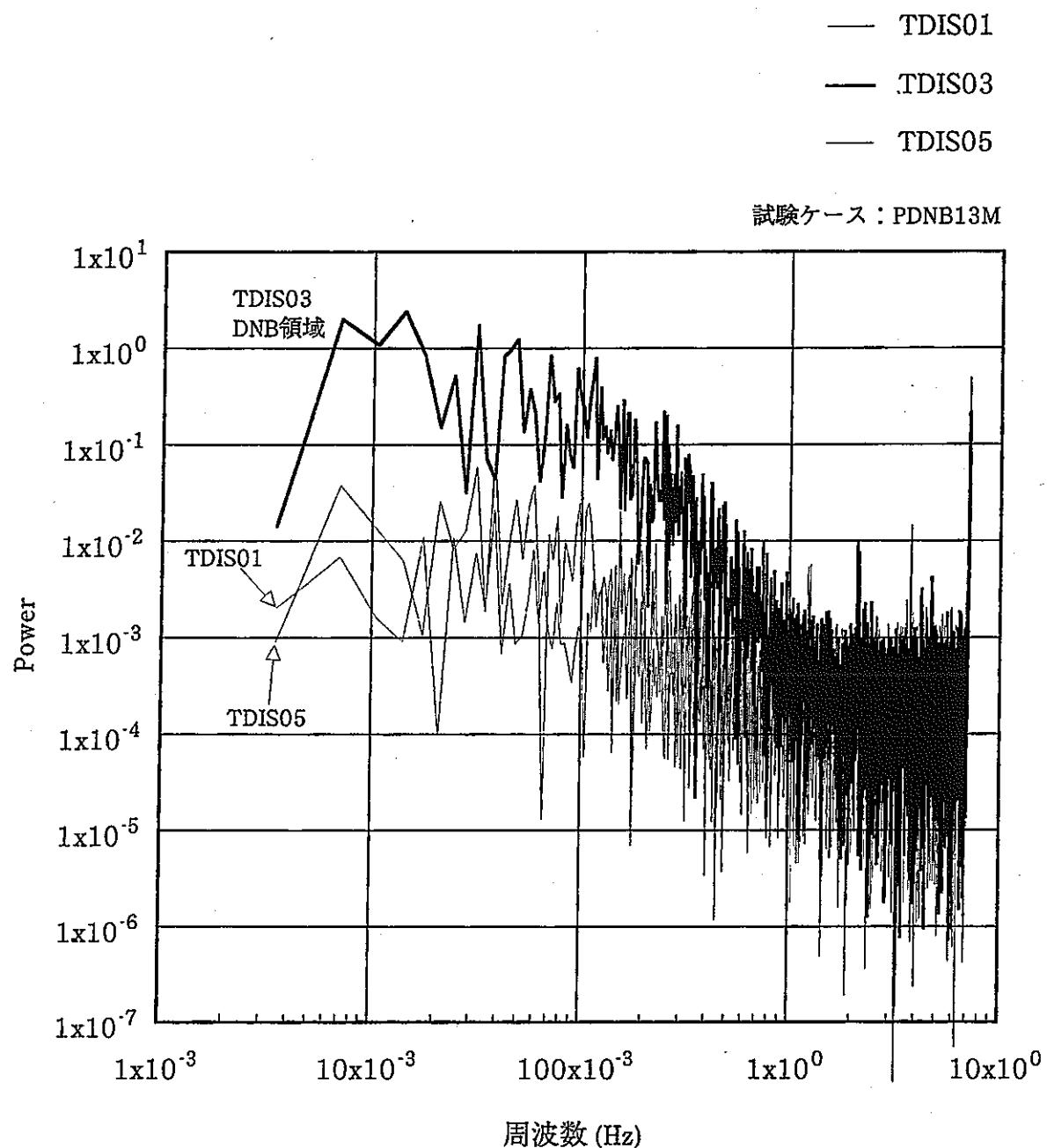


図5.1.2(11) DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

5.1.3 内管内壁温度逆熱伝導解析データ

DNB領域におけるナトリウム温度、外管内部温度（以上、実験値）および内管内壁温度（計算値）を記載する。

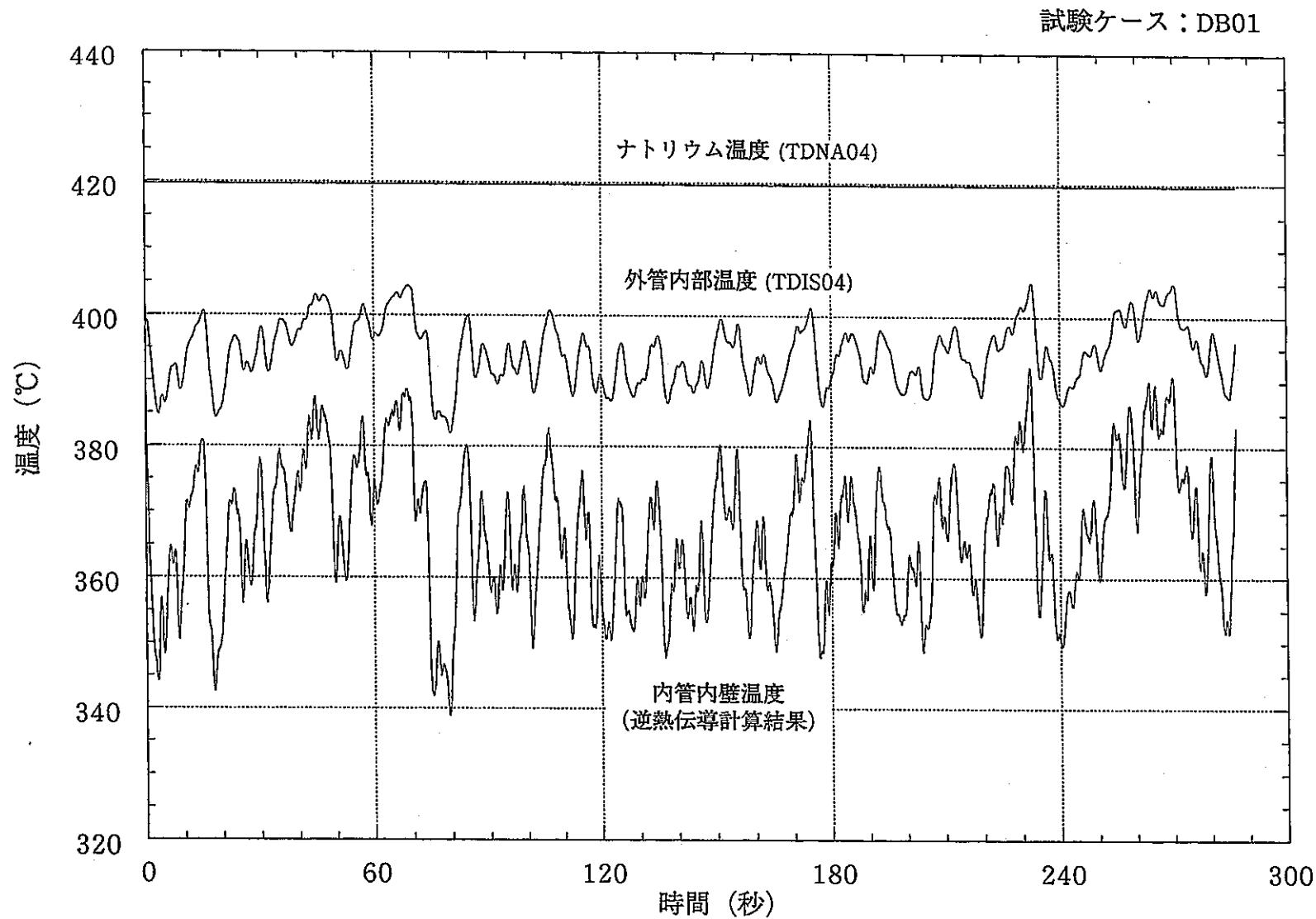


図5.1.3(1) 逆熱伝導解析結果

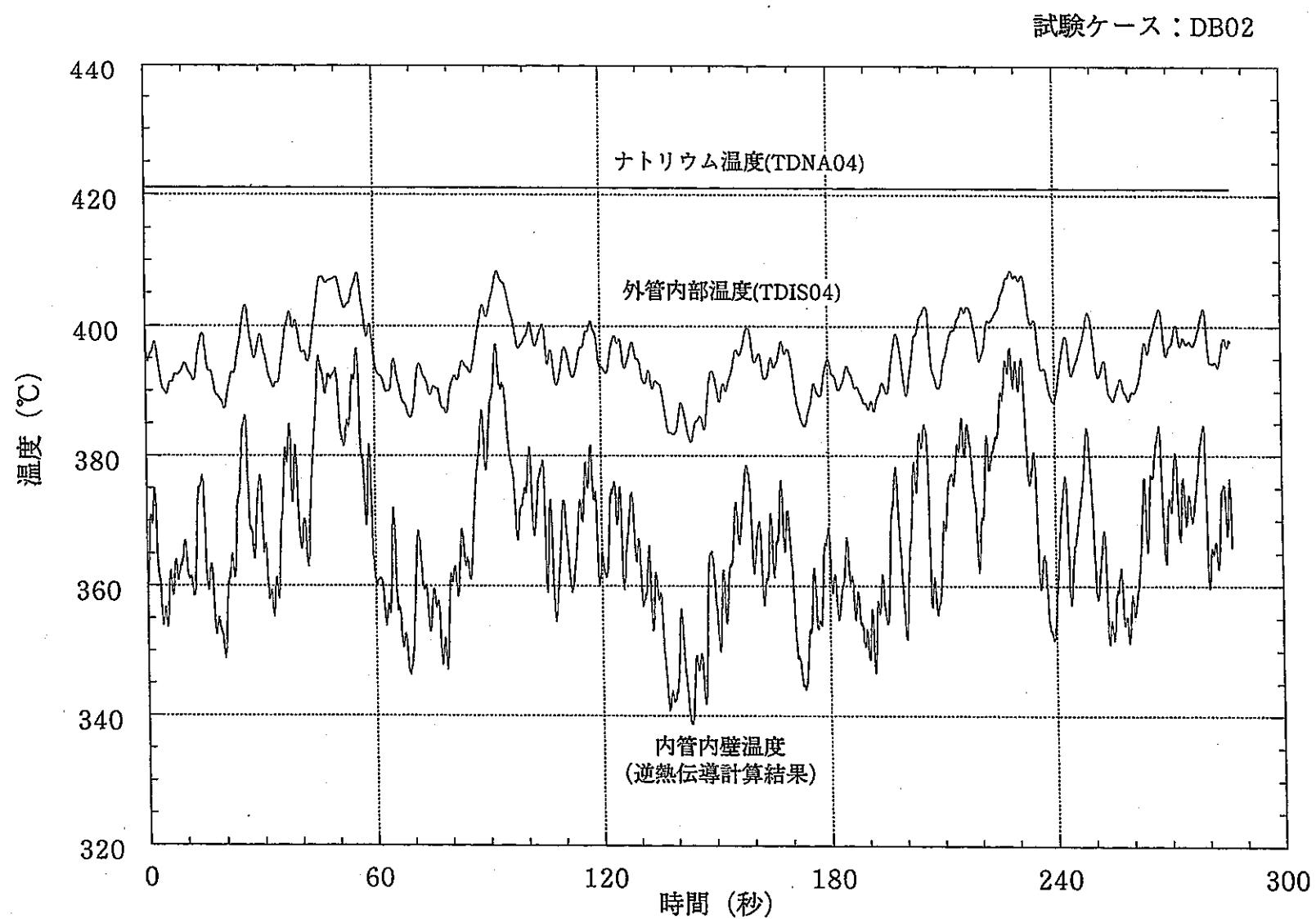


図5.1.3(2) 逆熱伝導解析結果

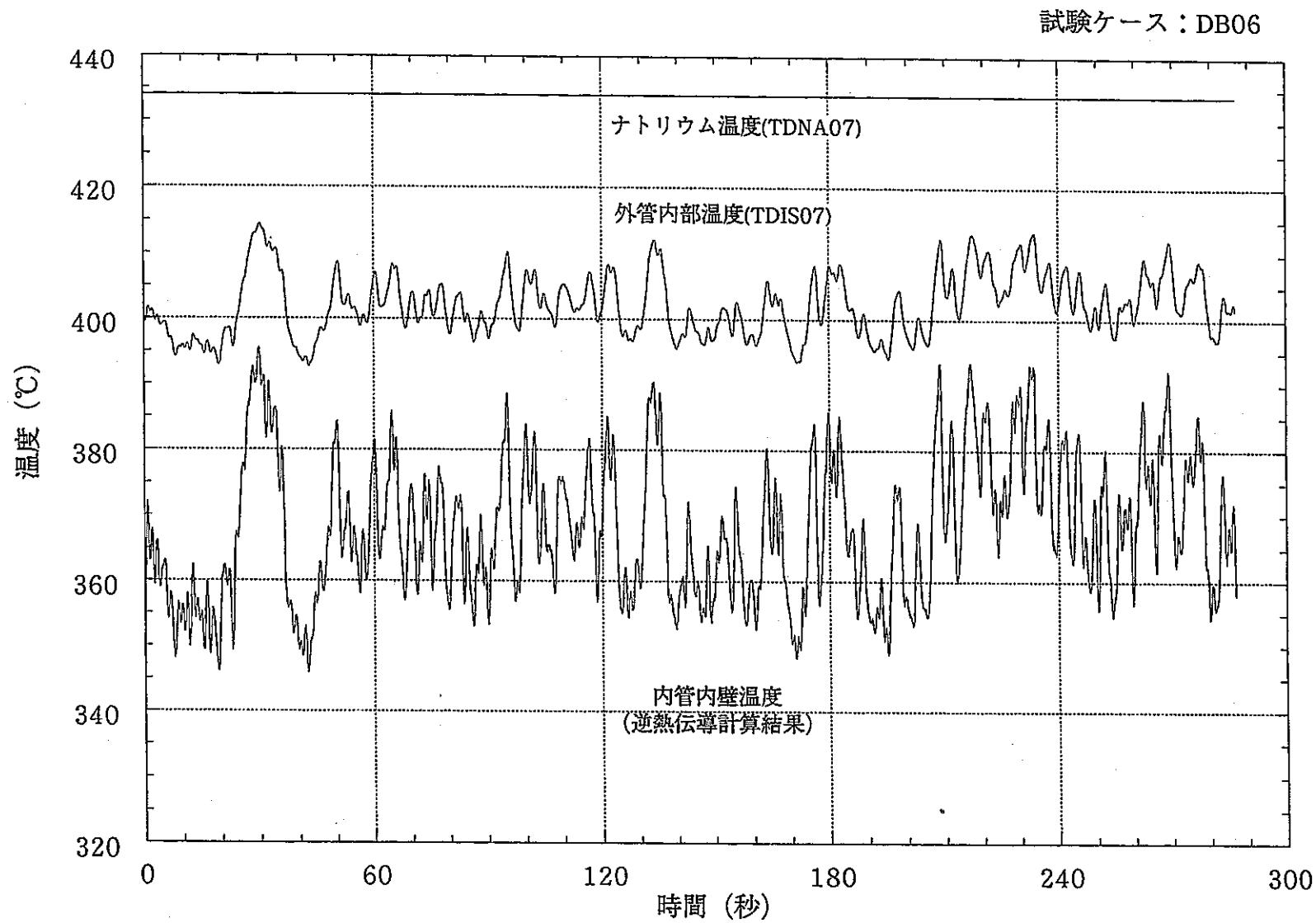


図5.1.3(3) 逆熱伝導解析結果

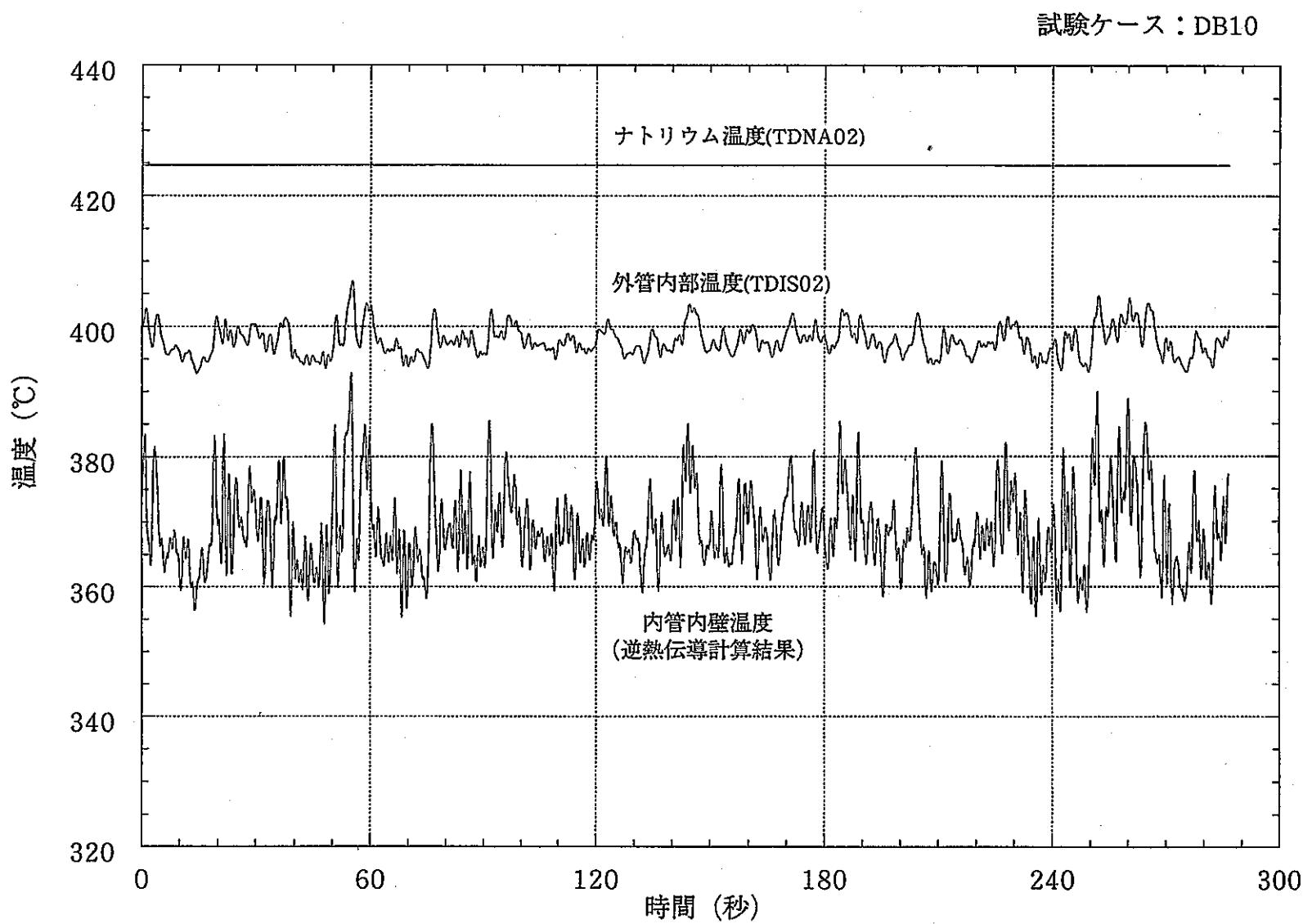
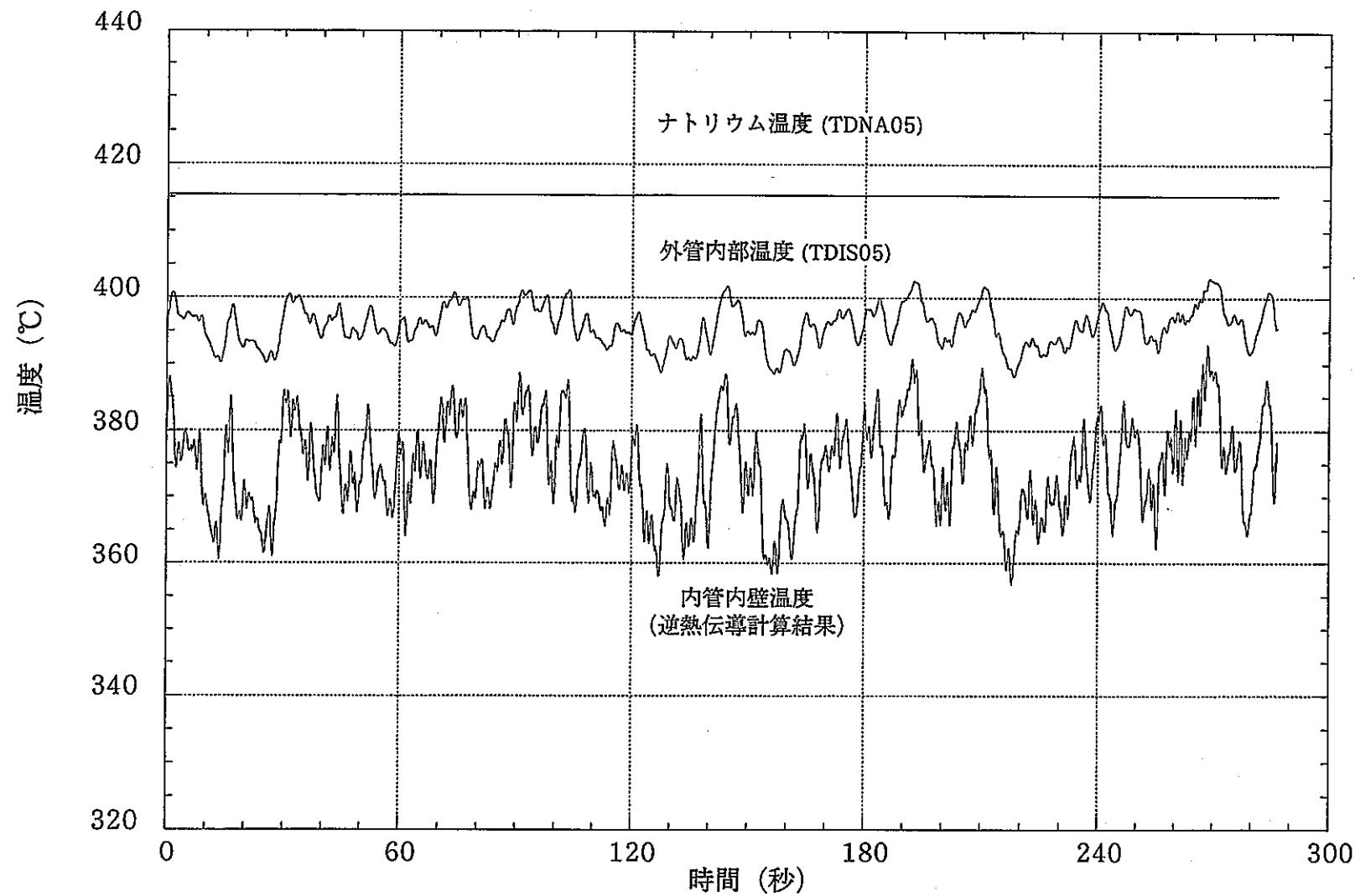


図5.1.3(4) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB13



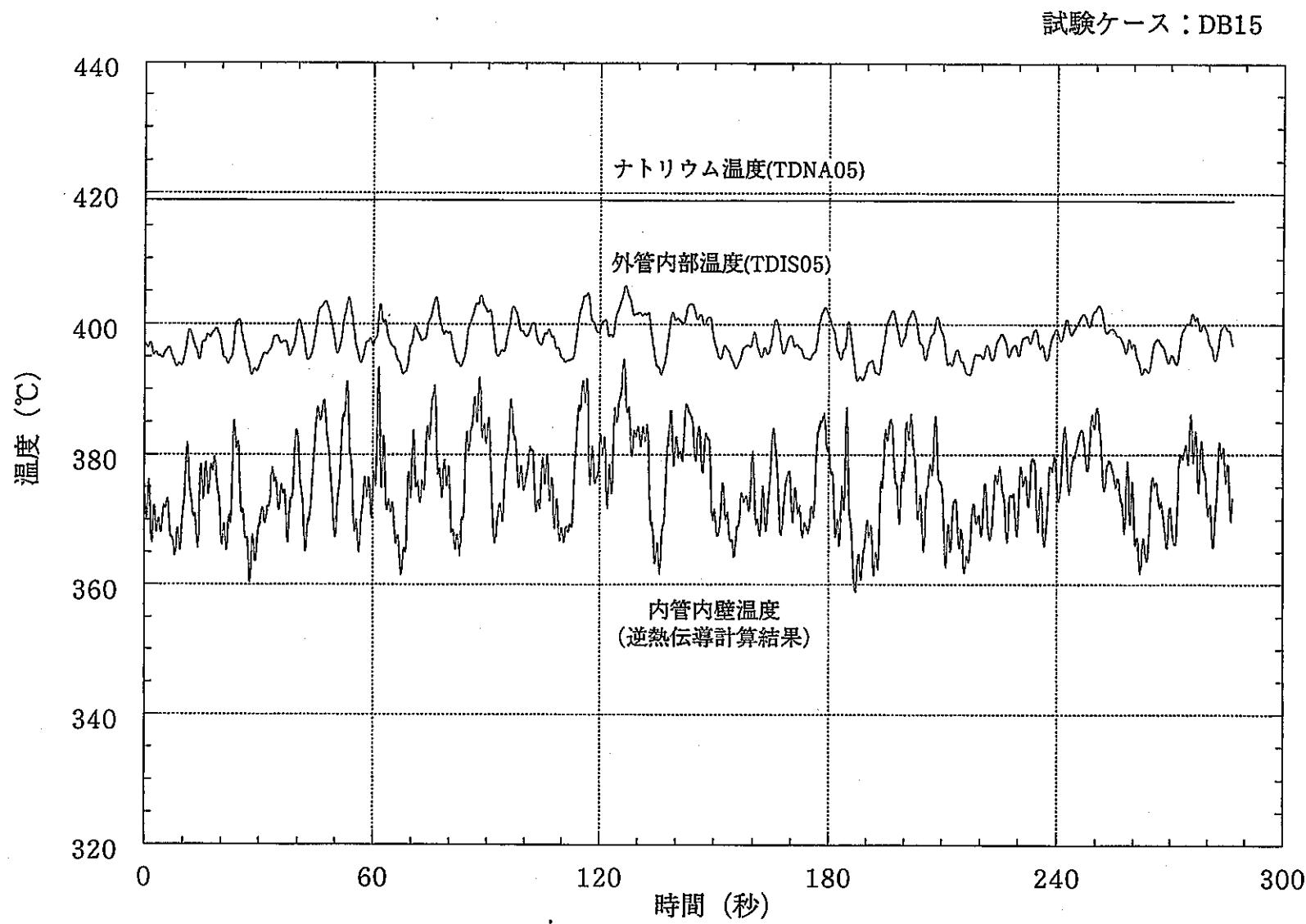


図5.1.3(6) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB019

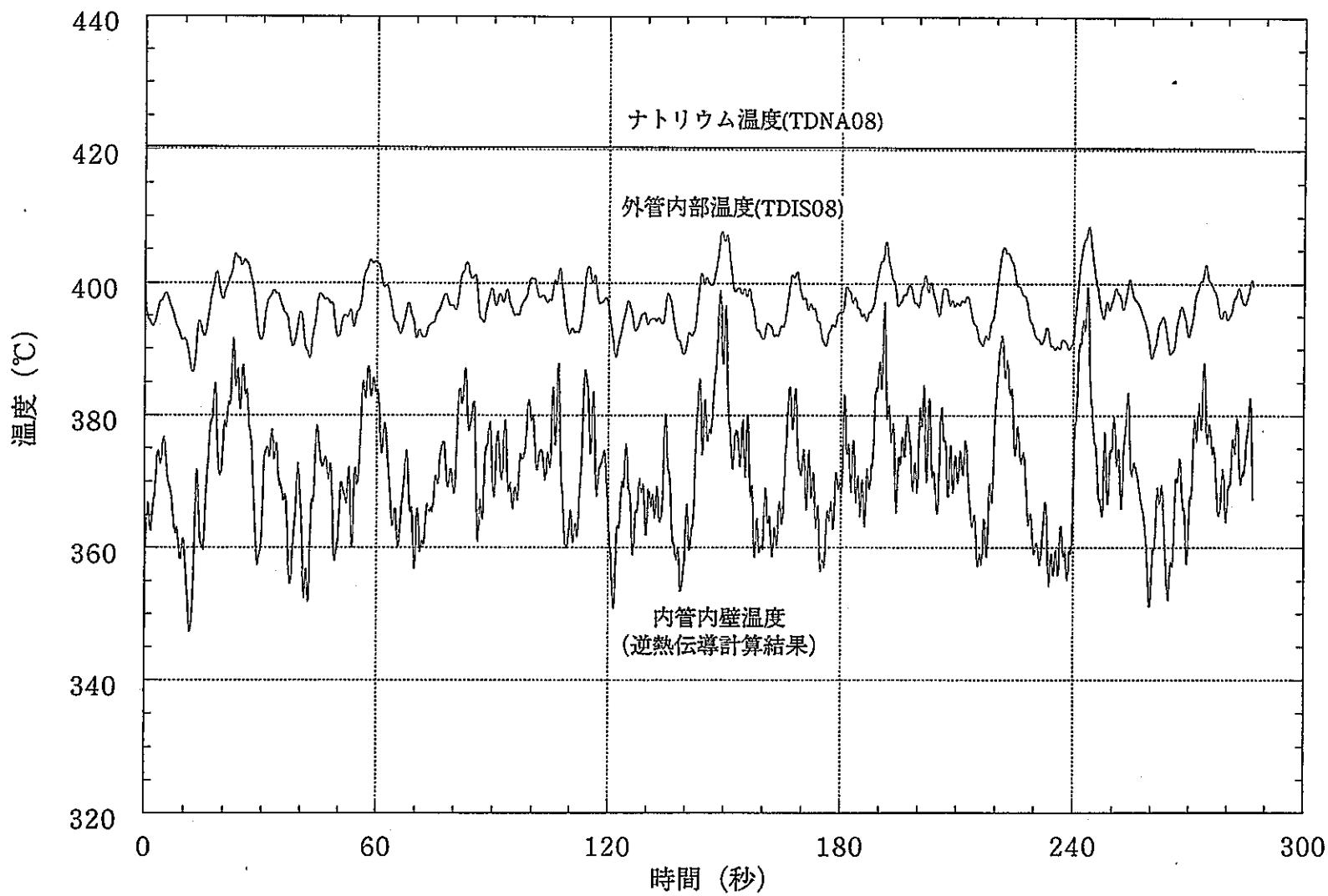


図5.1.3(7) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB20

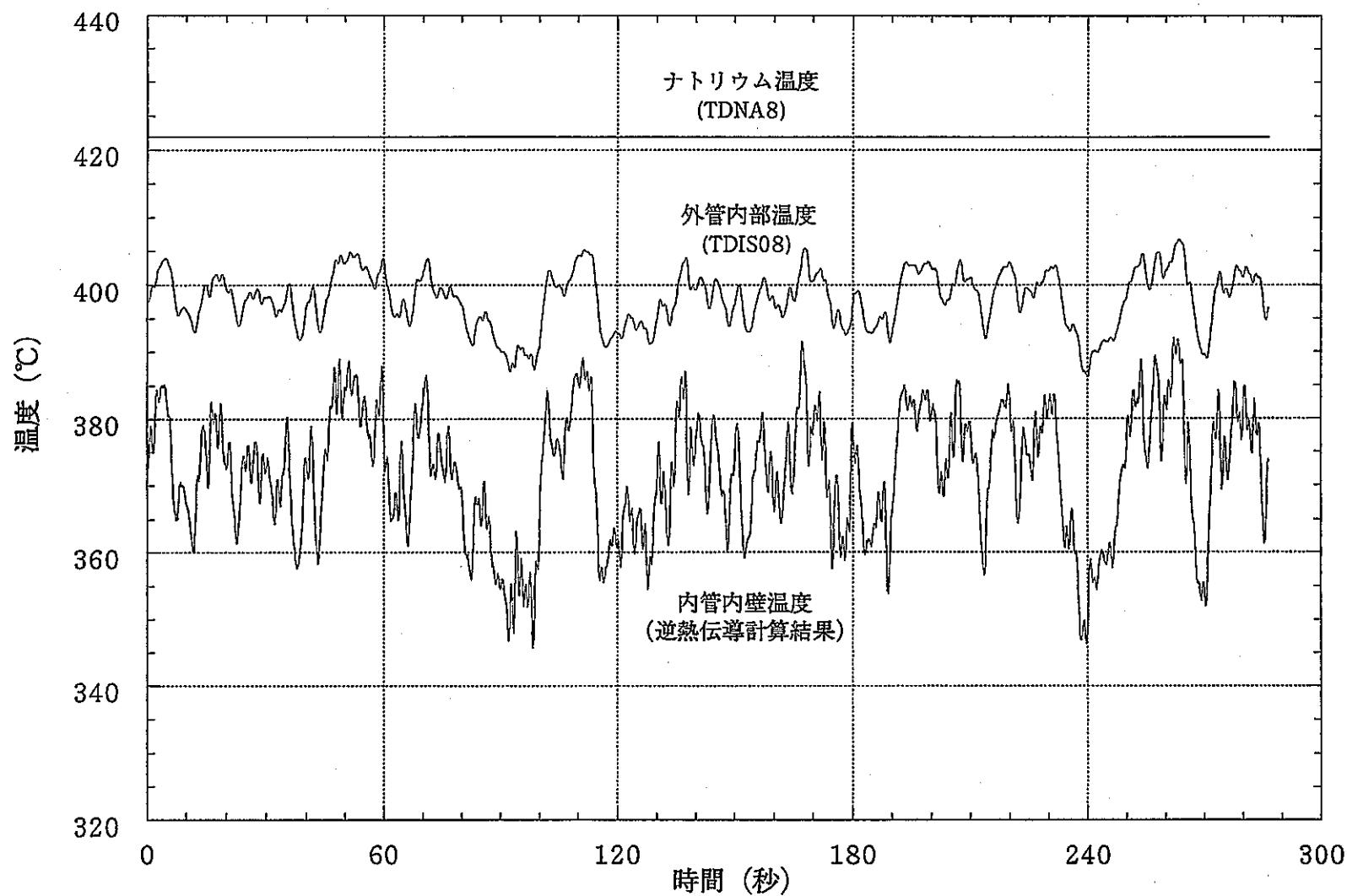


図5.1.3(8) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB21

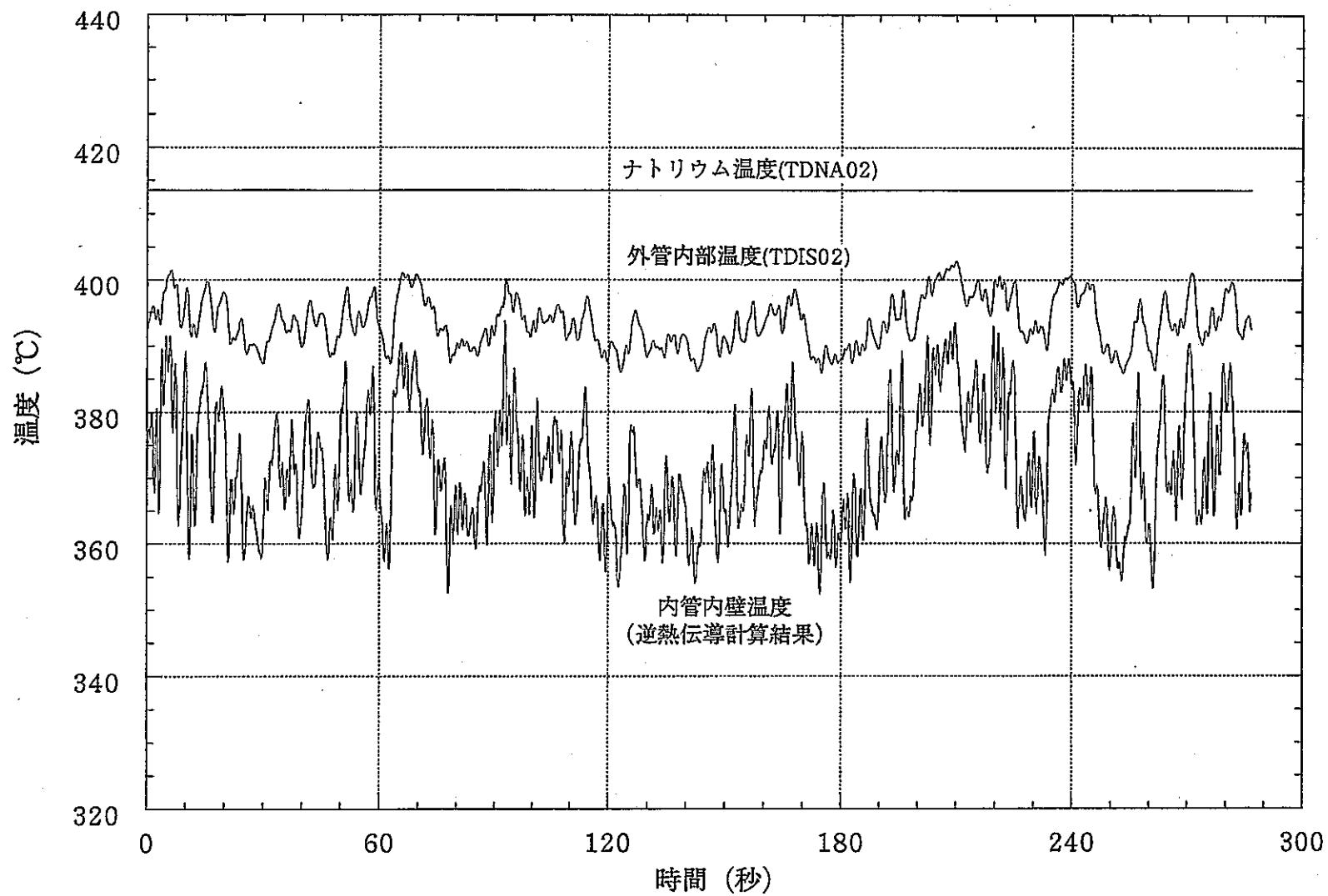


図5.1.3(9) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB22

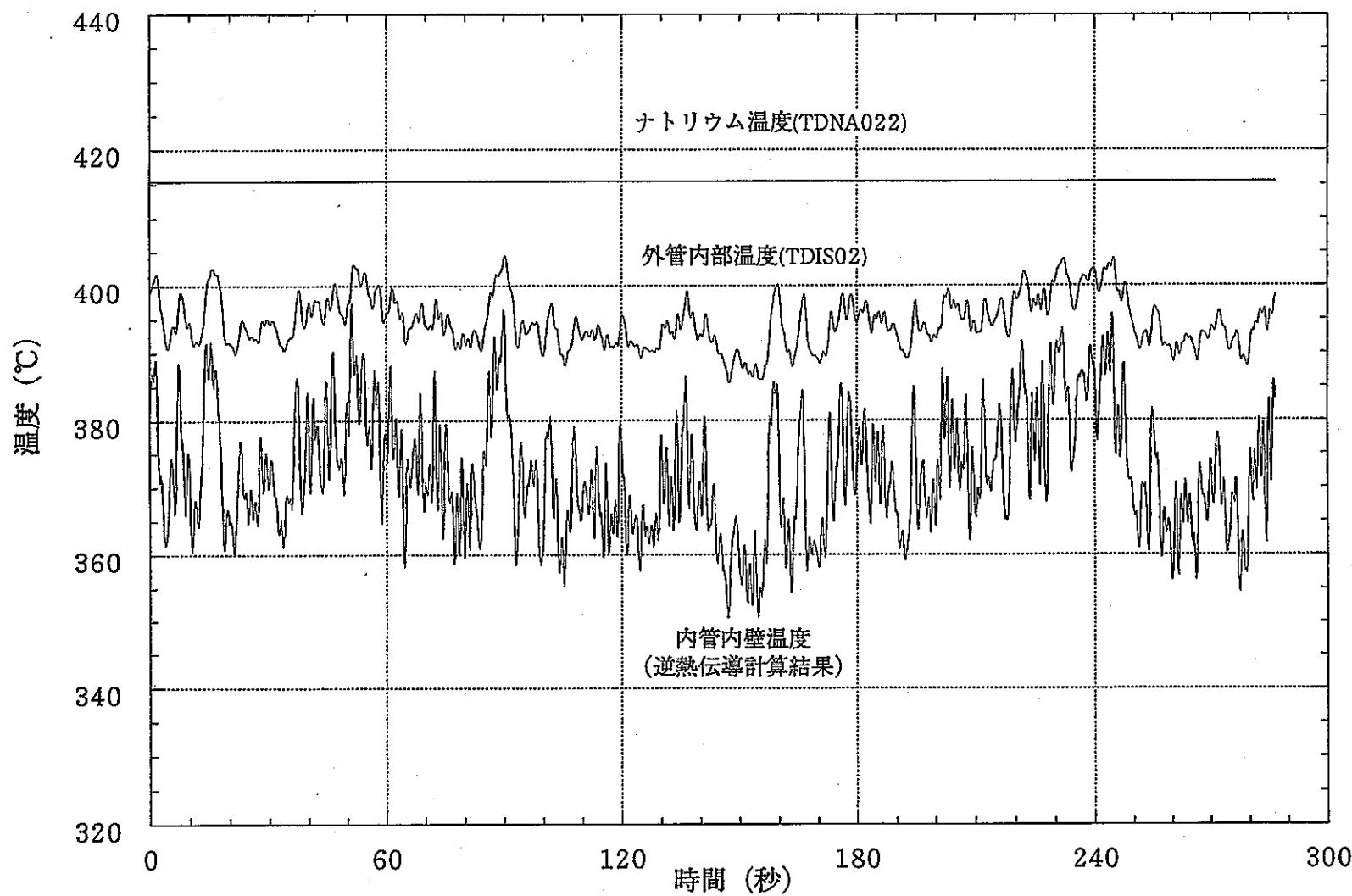


図5.1.3(10) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：DB23

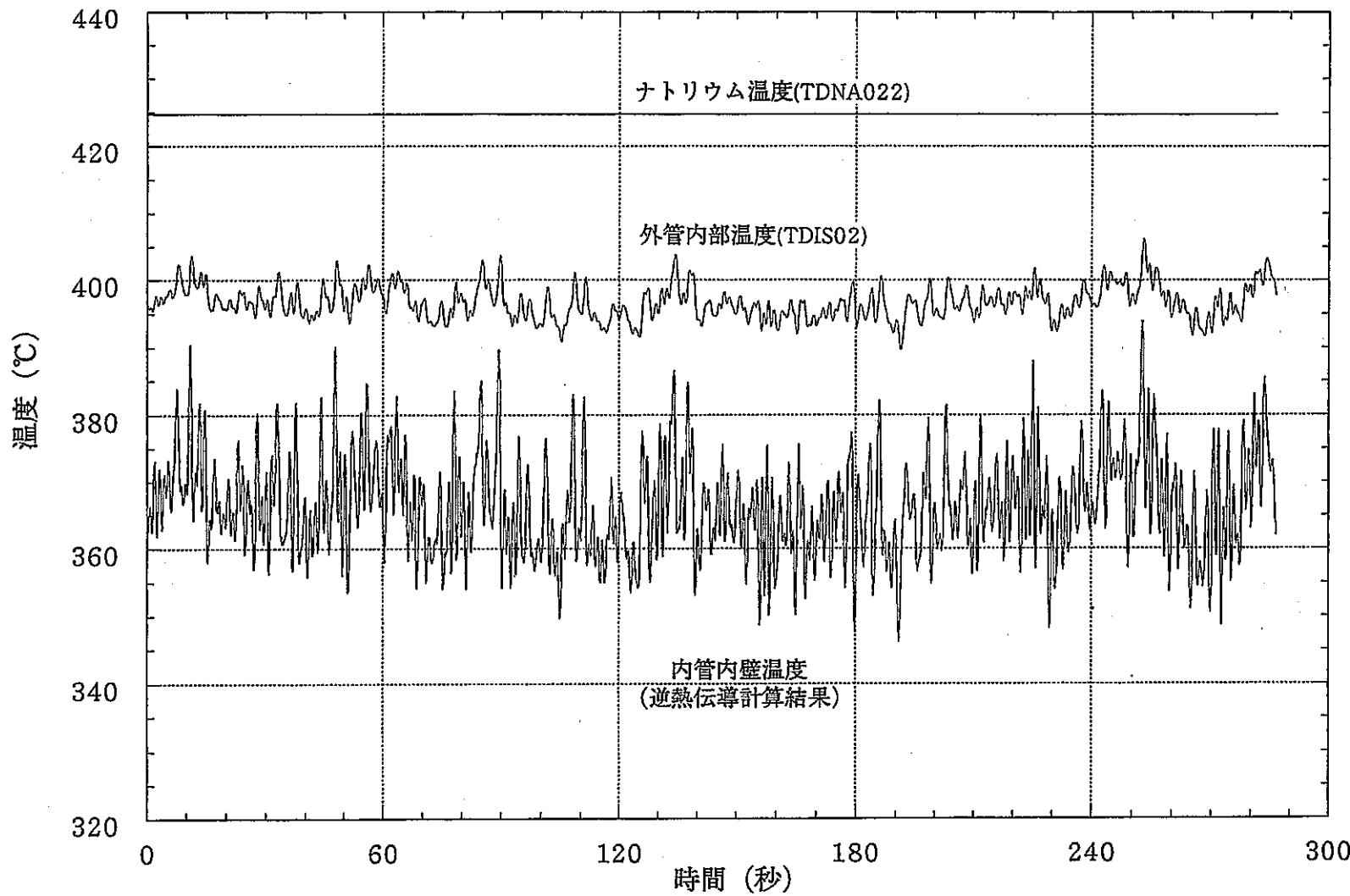


図5.1.3(11) 逆熱伝導解析結果

試験ケース：PDNB13M

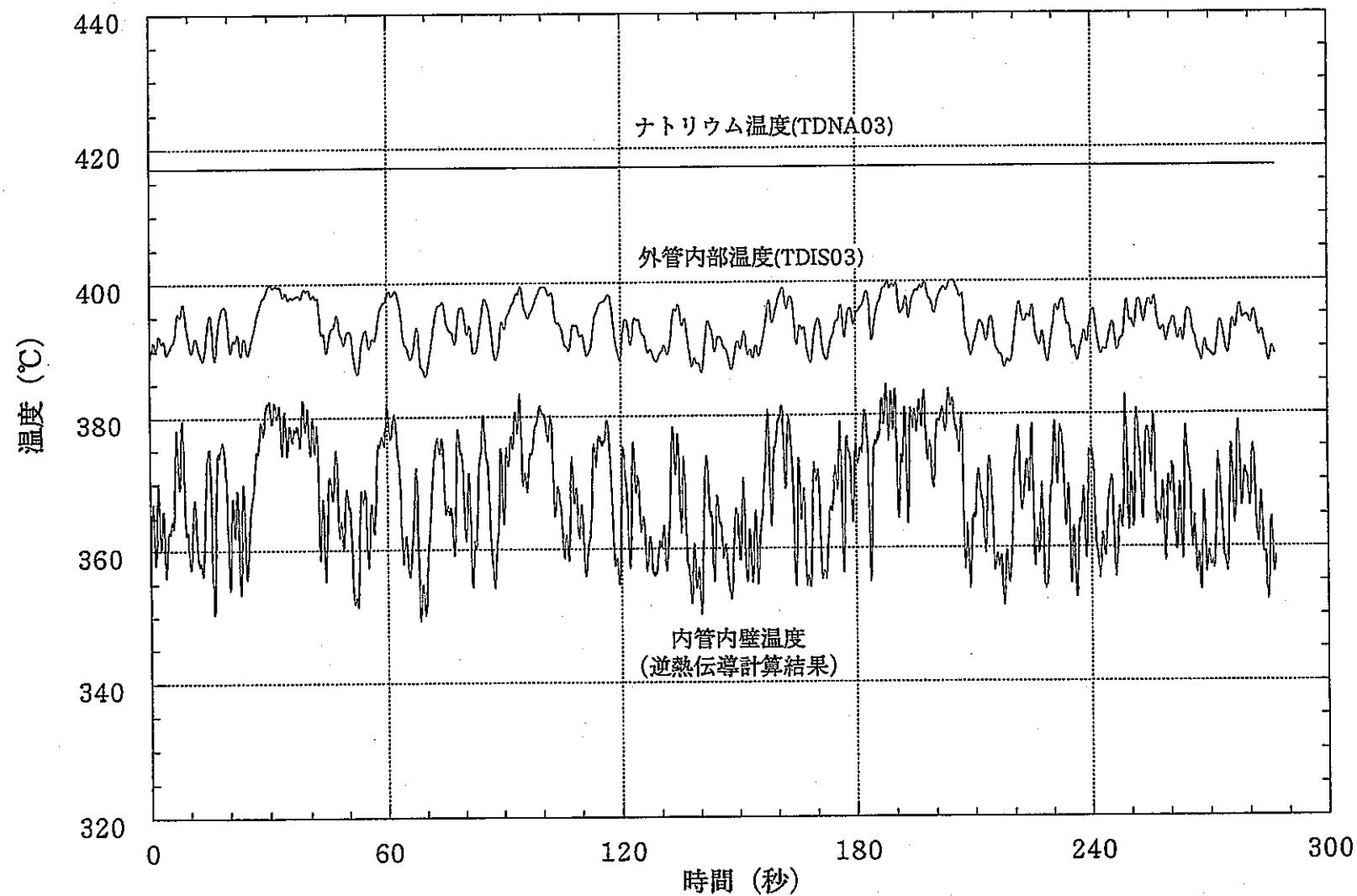


図5.1.3(12) 逆熱伝導解析結果

5.2.1 DNB領域長さ測定生データ

膜沸騰域→核沸騰域に至る過程でのナトリウム温度および外管内部温度の生データを記載する。

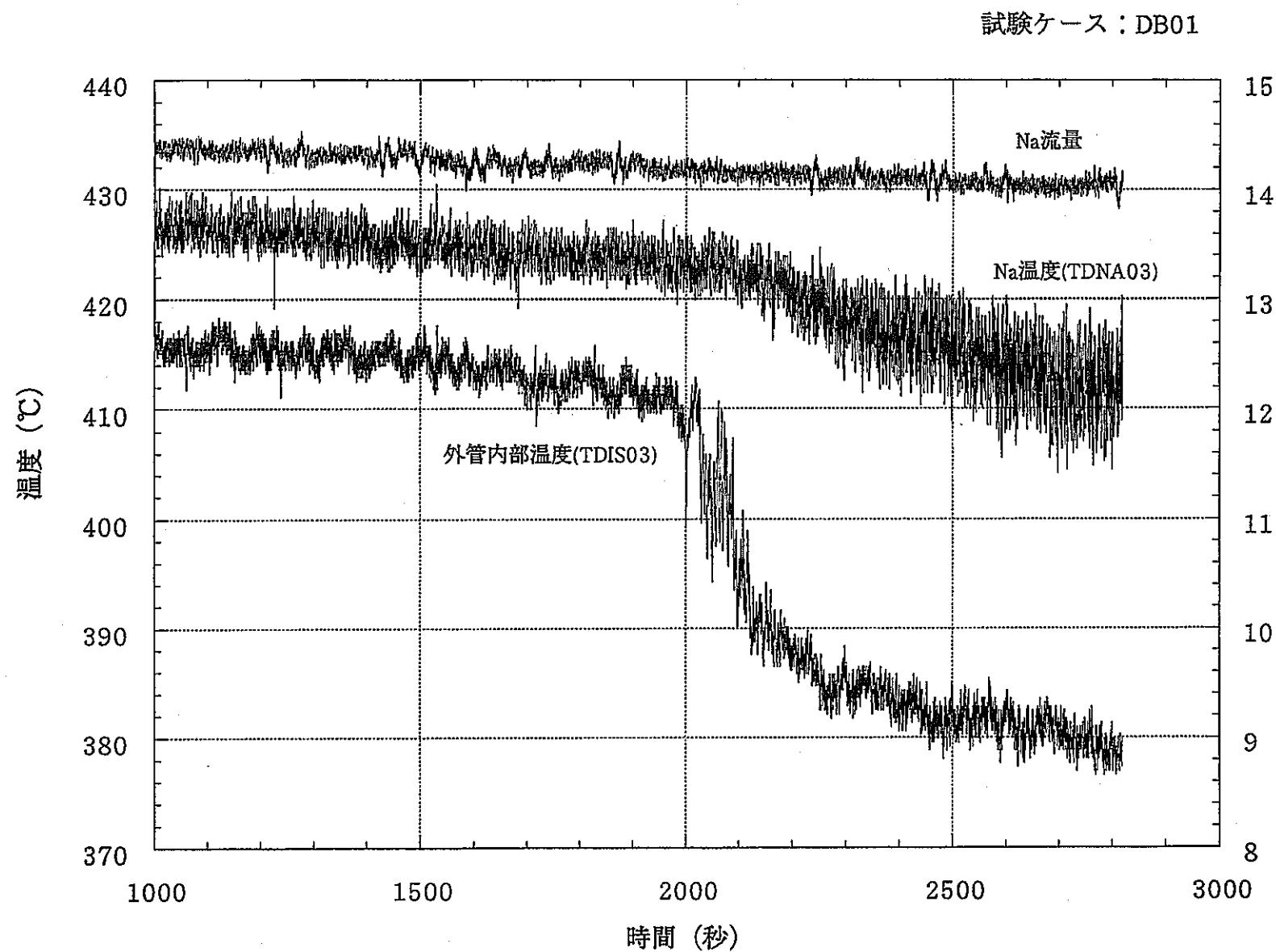


図5.2.1(1) DNB領域長さ測定試験生データ

試験ケース：DB02

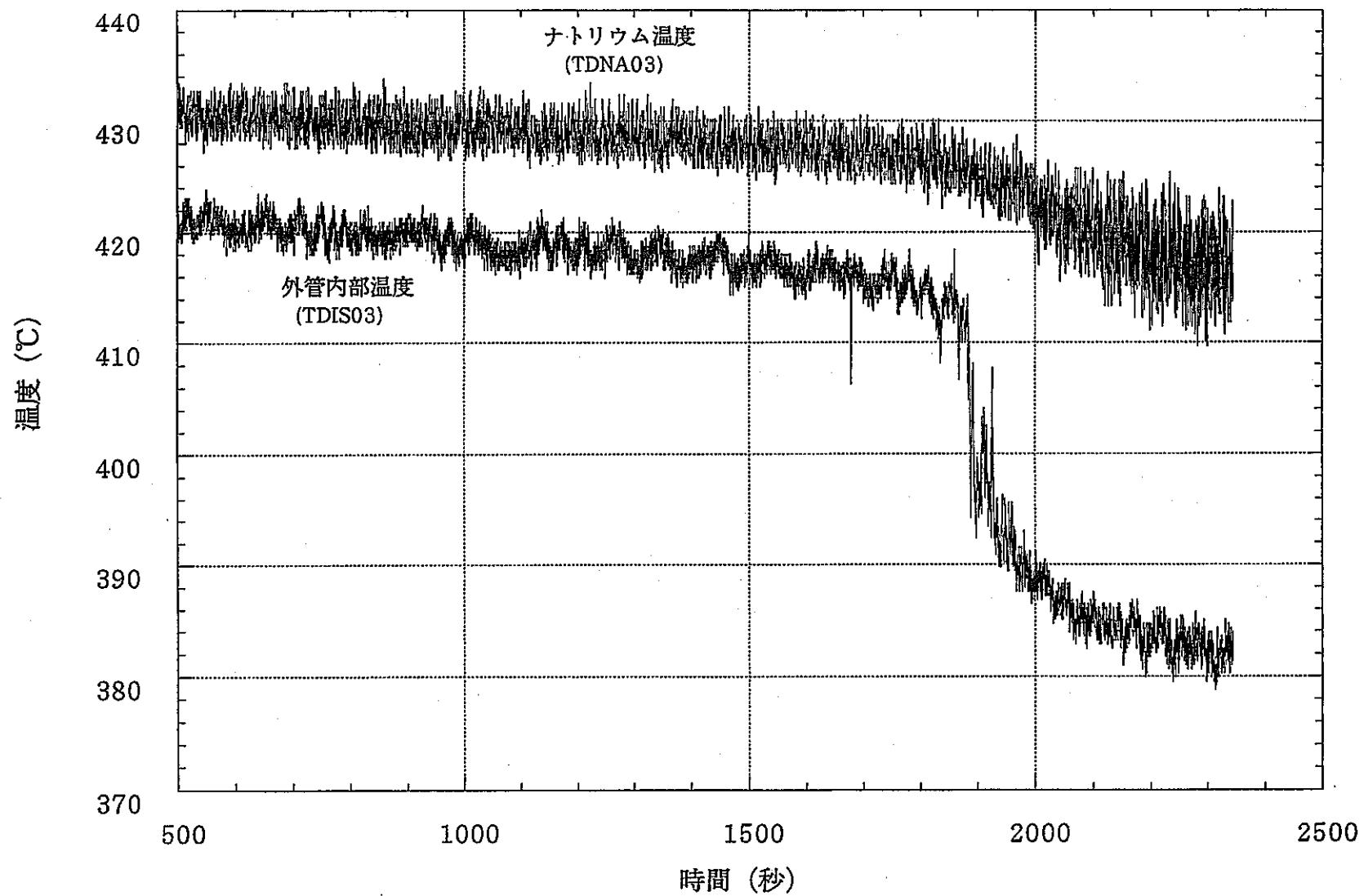


図5.2.1(2) DNB領域長さ測定試験生データ

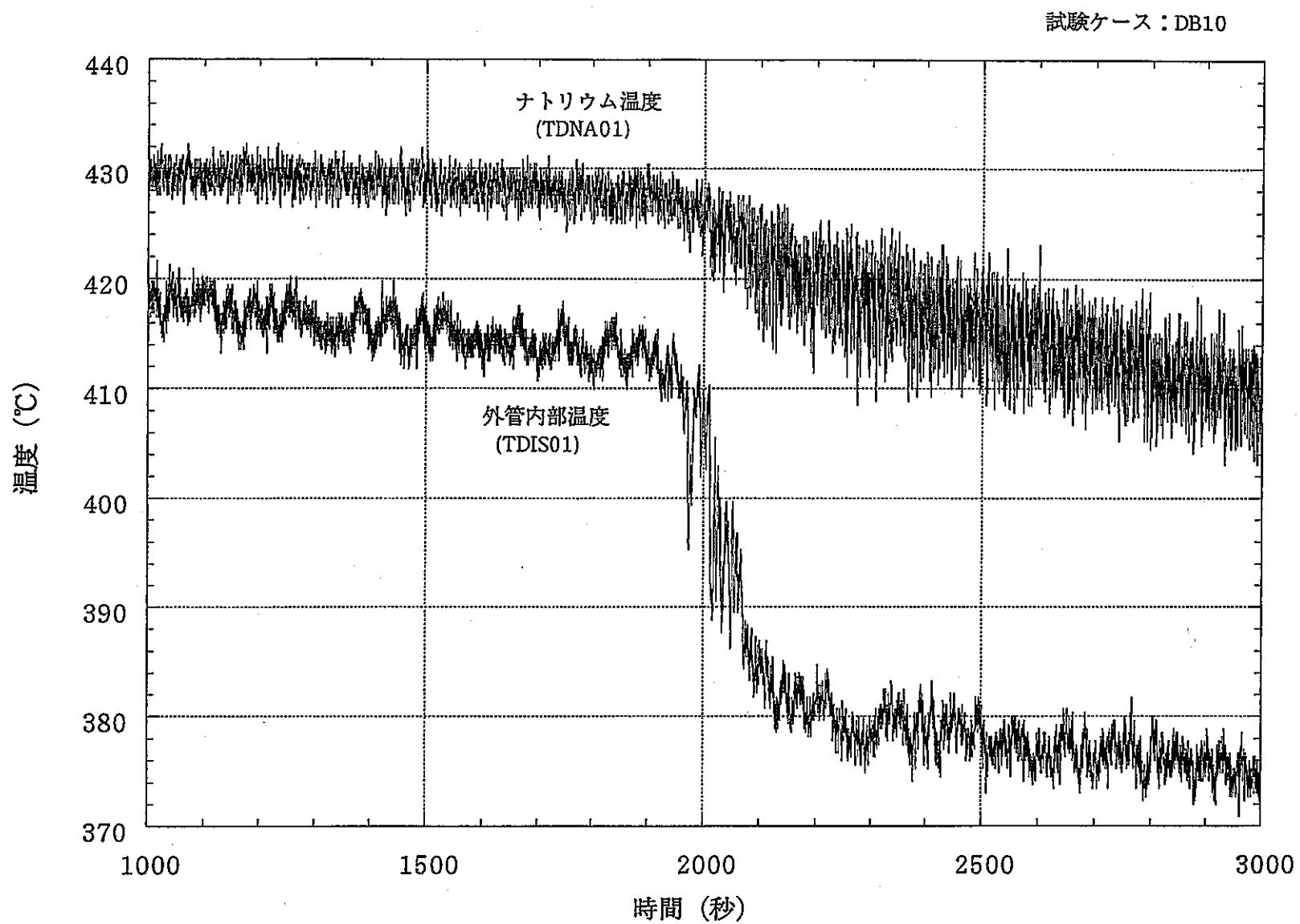


図5.2.1(3) DNB領域長さ測定試験生データ

試験ケース：DB15

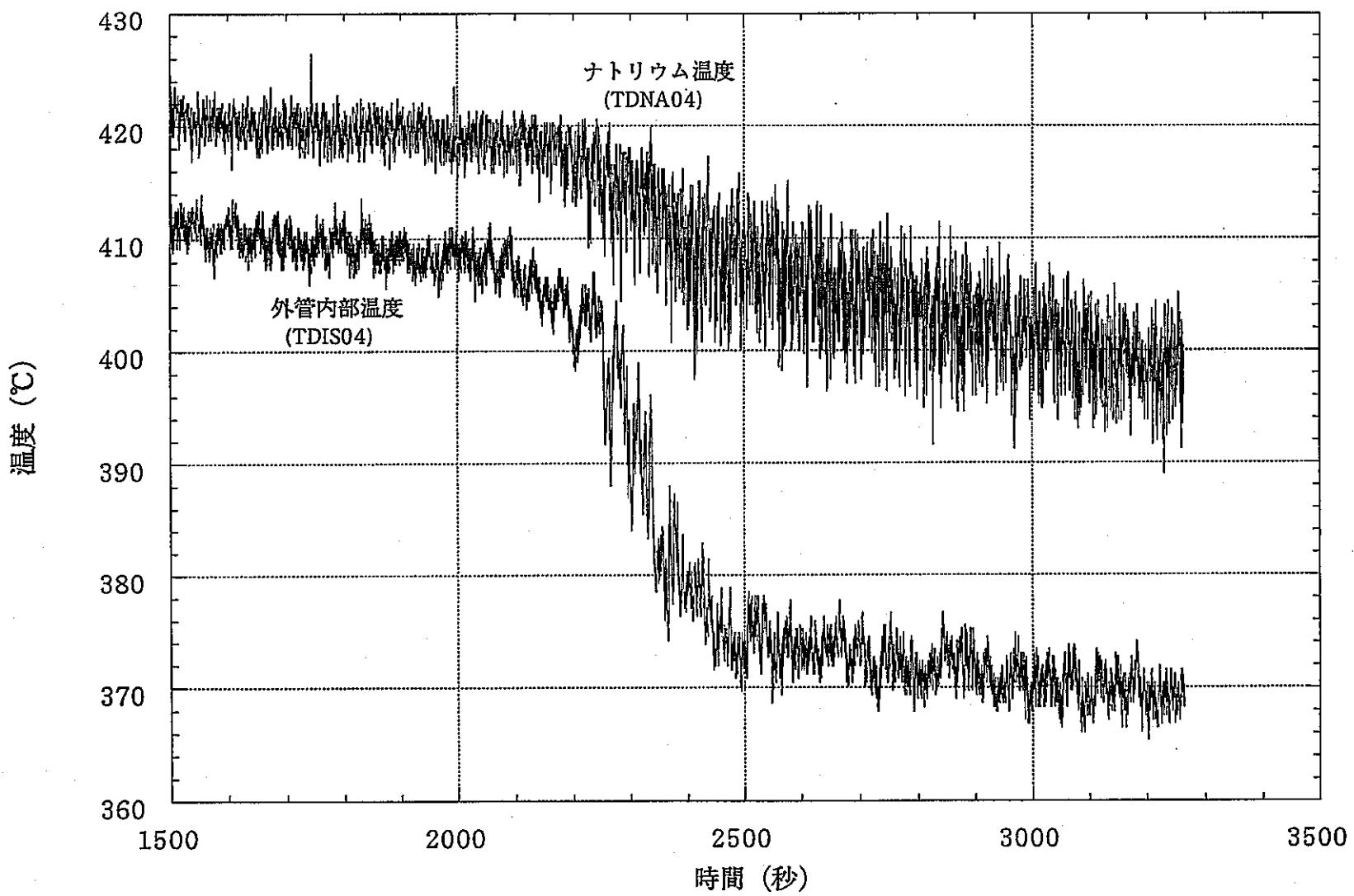


図5.2.1(4) DNB領域長さ測定試験生データ

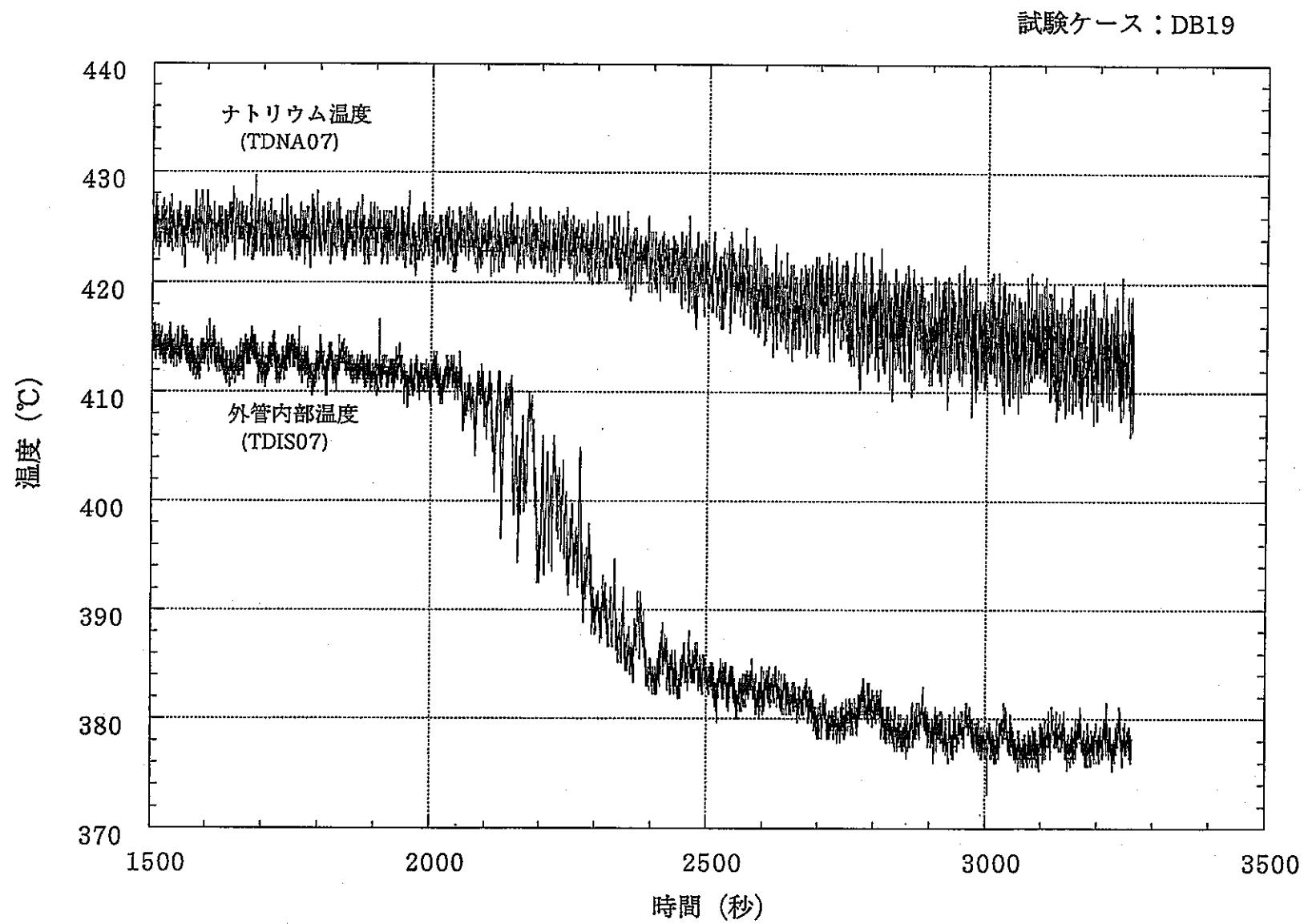


図5.2.1(5) DNB領域長さ測定試験生データ

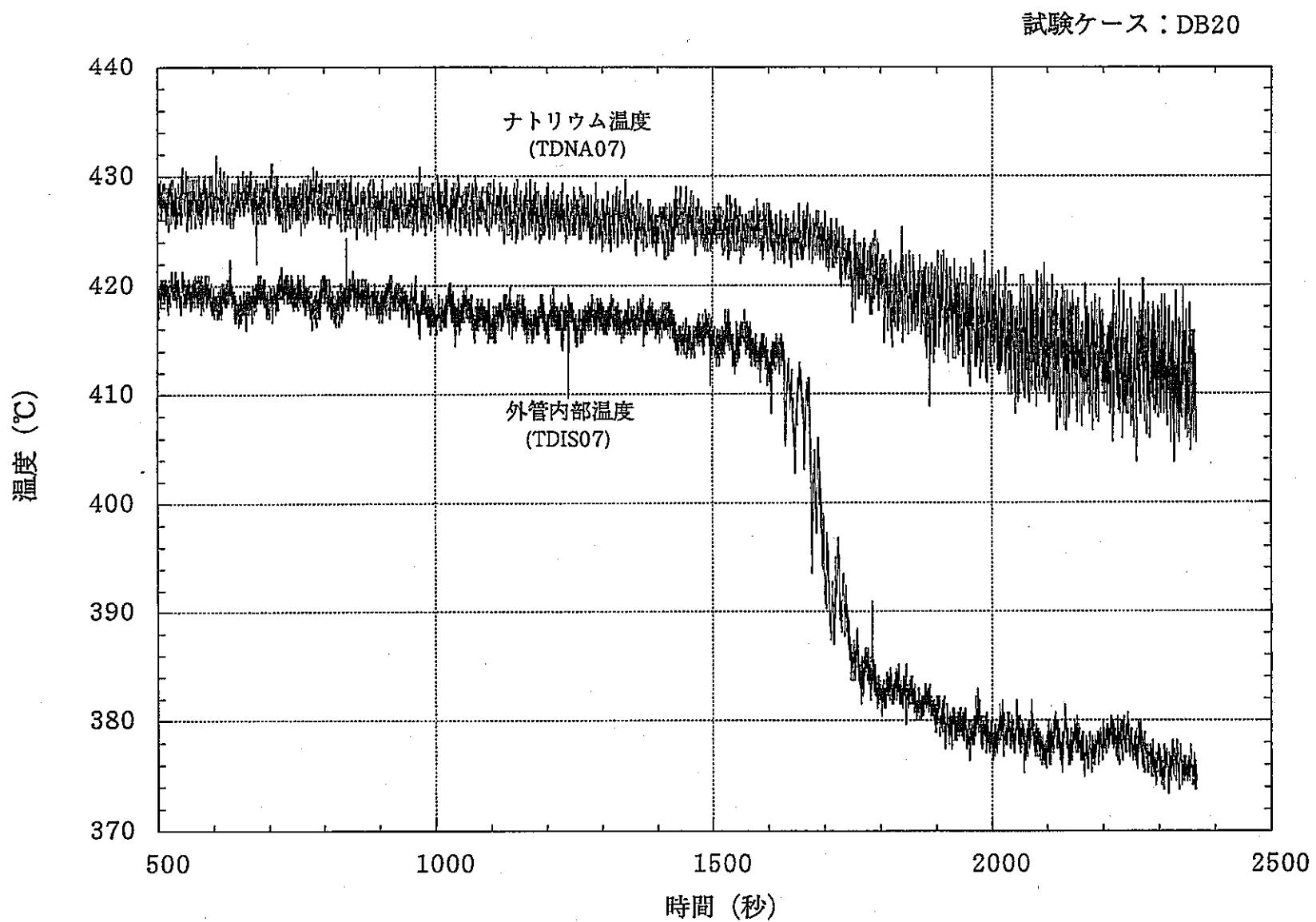


図5.2.1(6) DNB領域長さ測定試験生データ

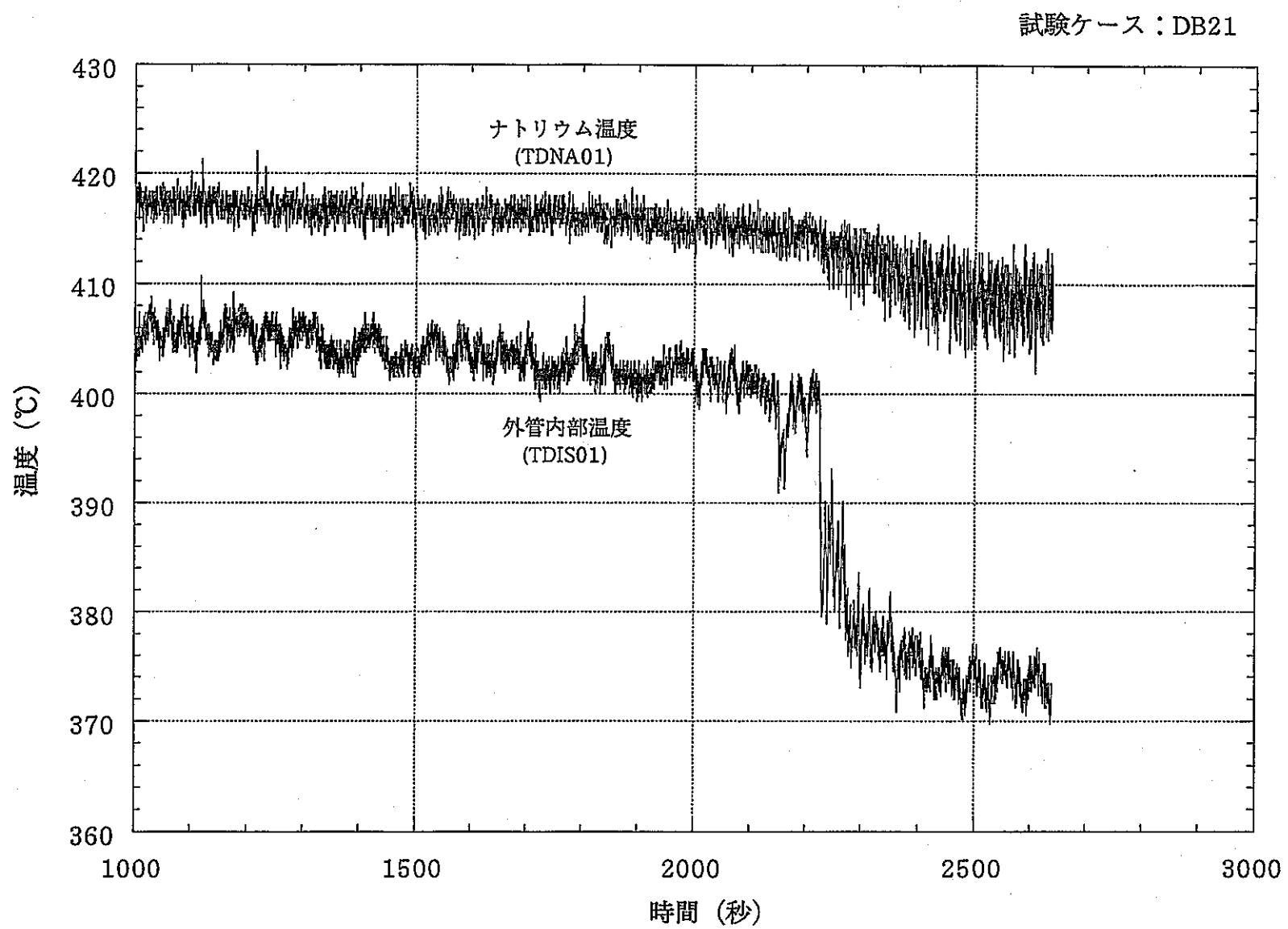


図5.2.1(7) DNB領域長さ測定試験生データ

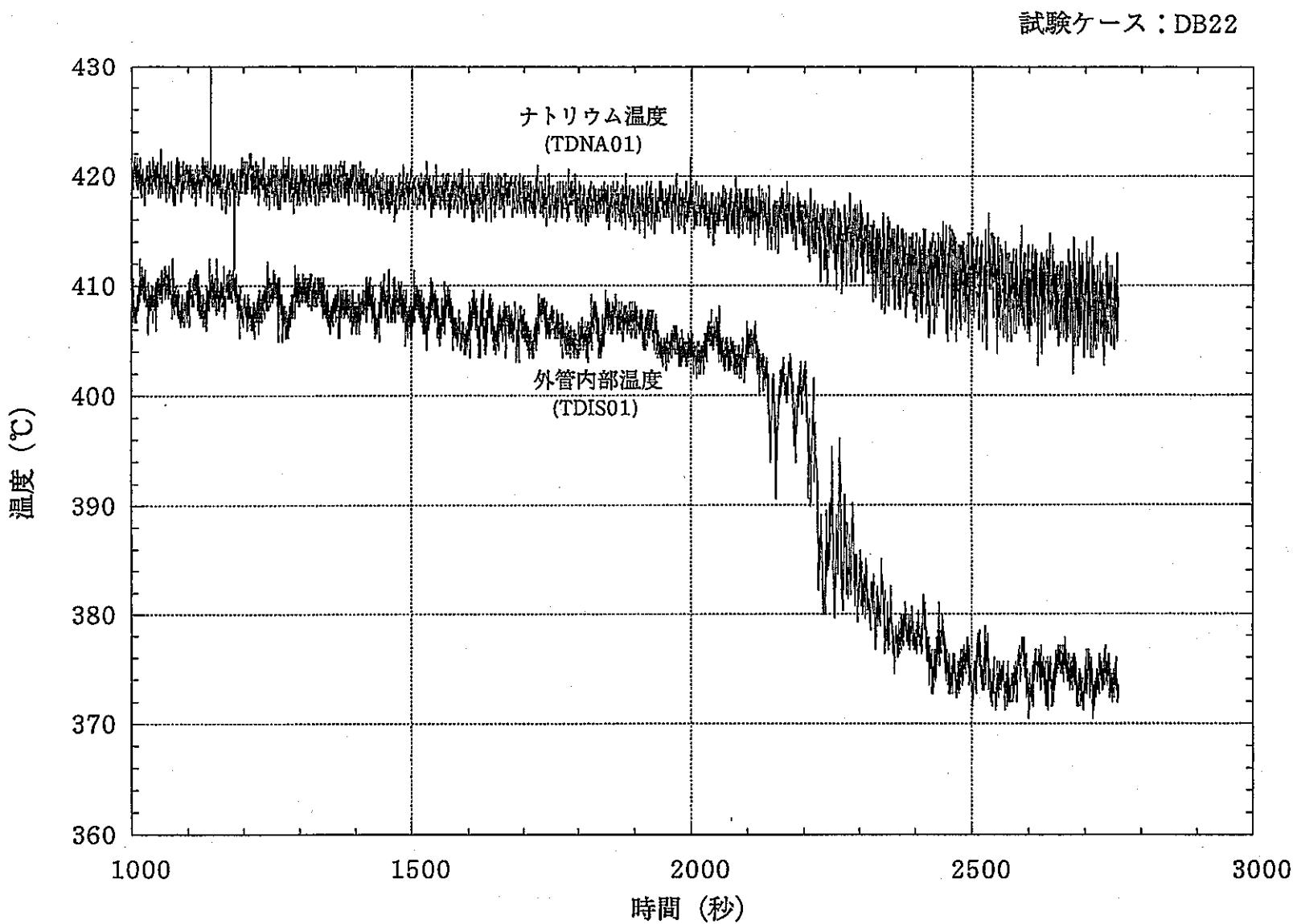


図5.2.1(8) DNB領域長さ測定試験生データ

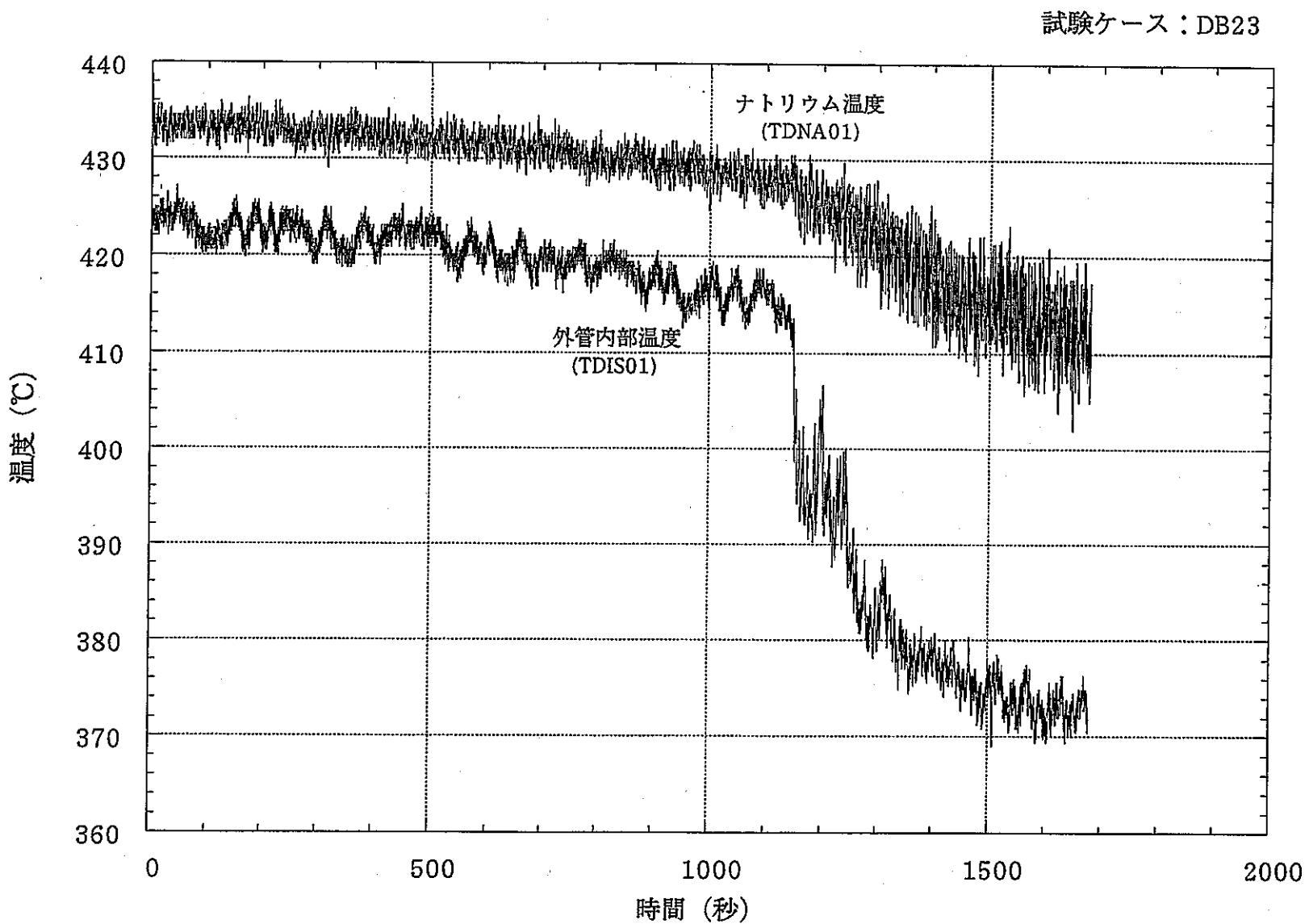


図5.2.1(9) DNB領域長さ測定試験生データ

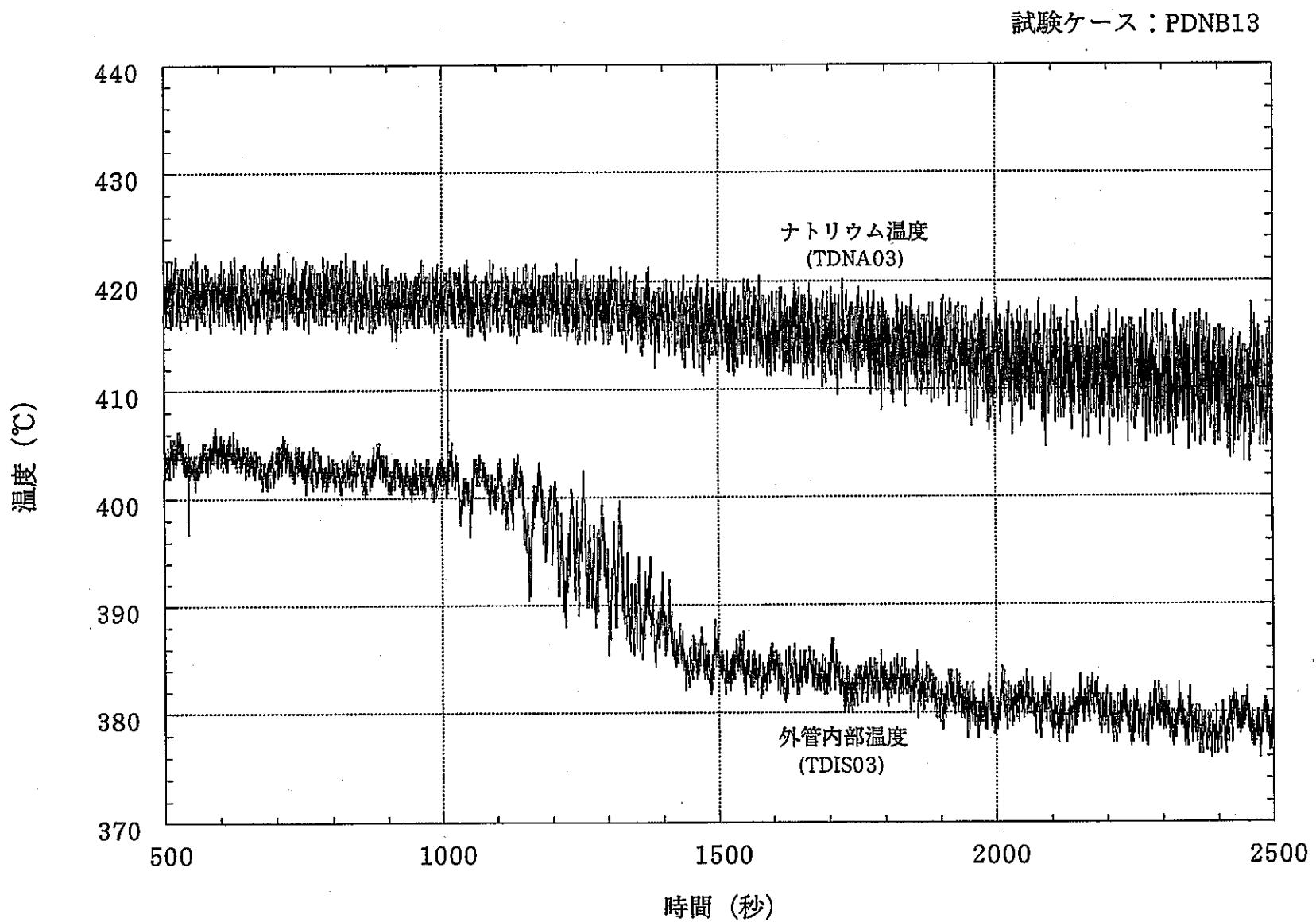


図5.2.1(10) DNB領域長さ測定試験生データ

5.2.2 内管内壁温度逆熱伝導解析データ

5.2.1節のナトリウム温度および外管内部温度生データからノイズ除去を行い
逆熱伝導解析により内管内壁温度を求めたものである。

試験ケース：DB01

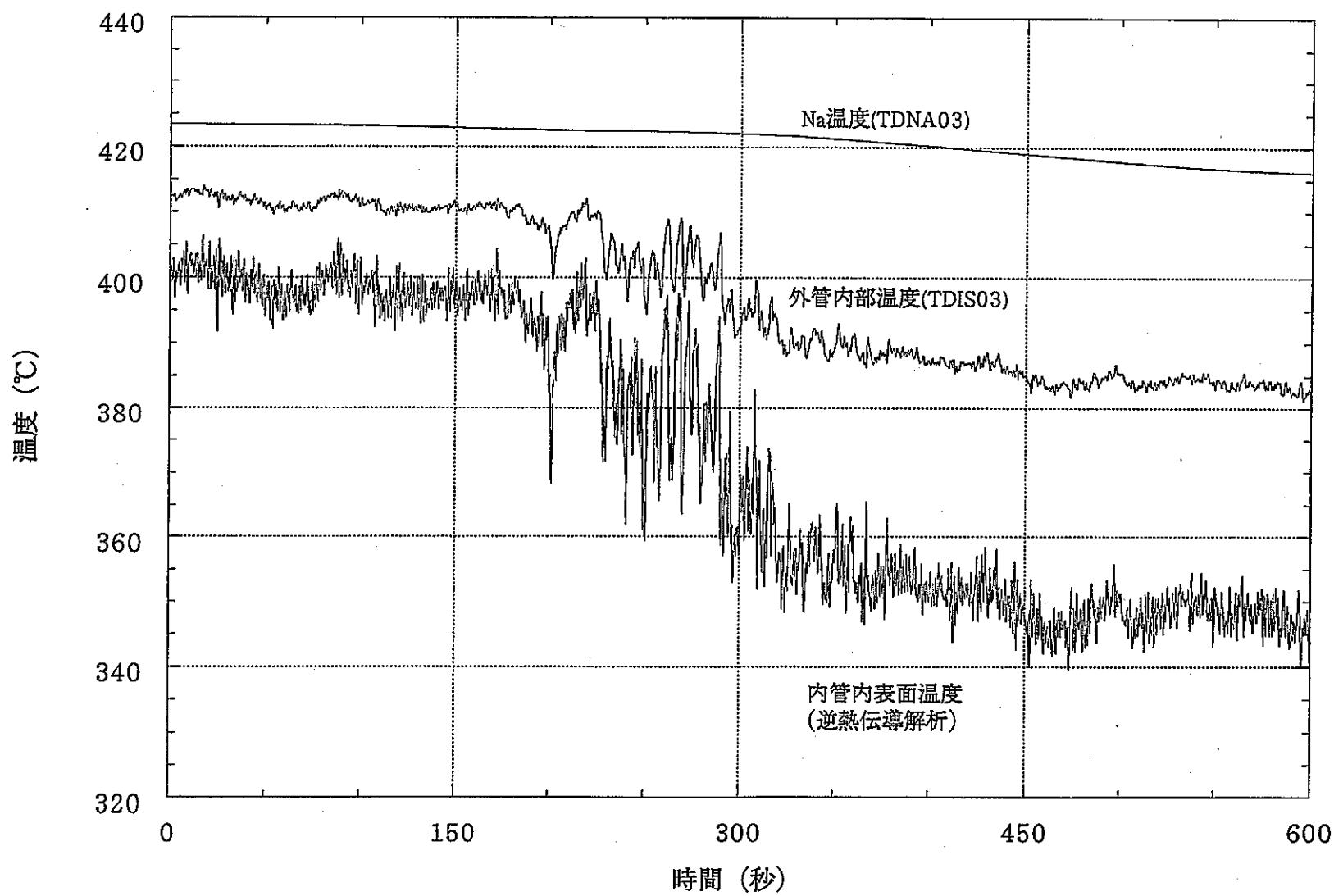


図5.2.2(1) 内管内壁温度逆熱伝導解析

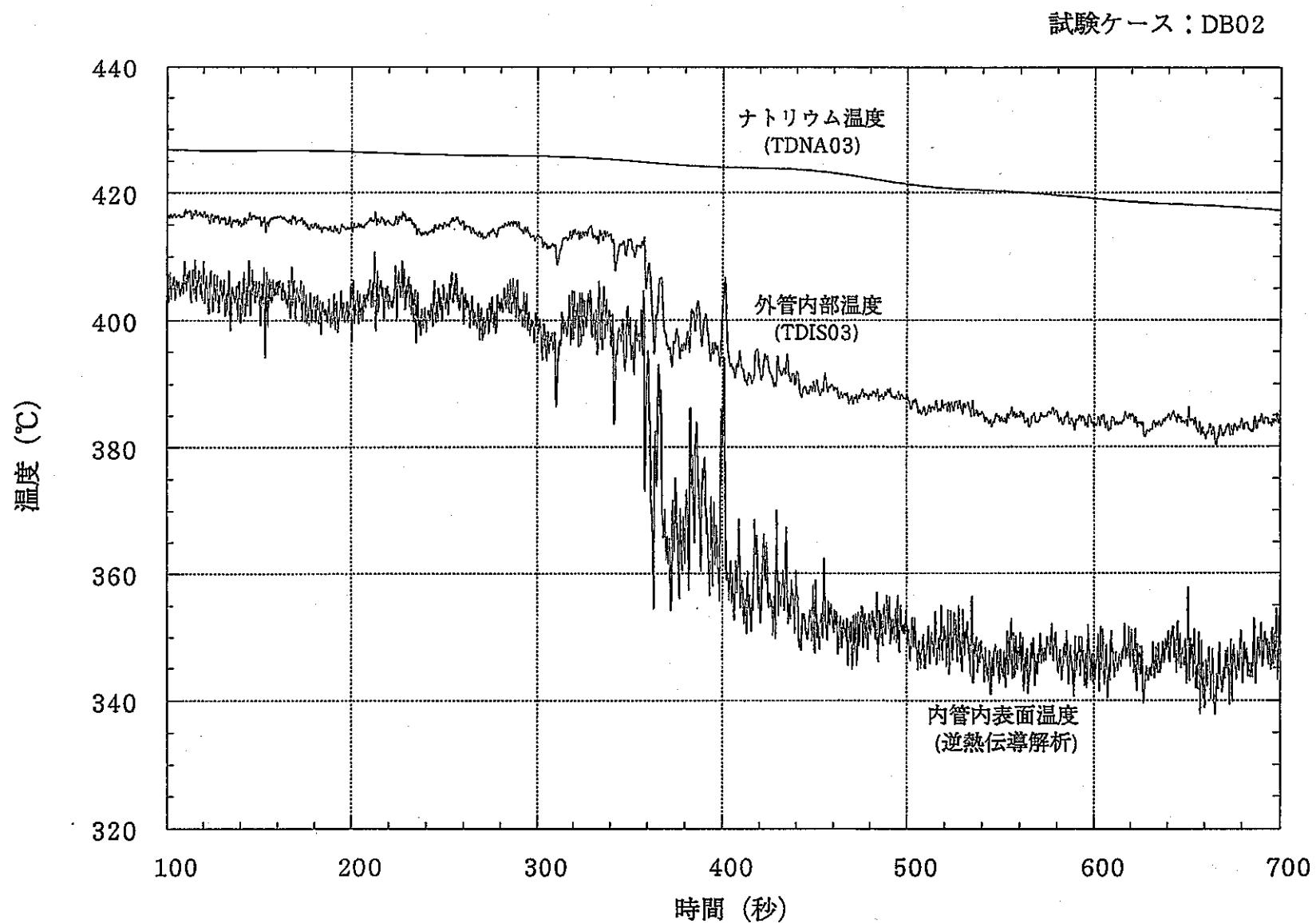


図5.2.2(2) 内管内壁温度逆熱伝導解析

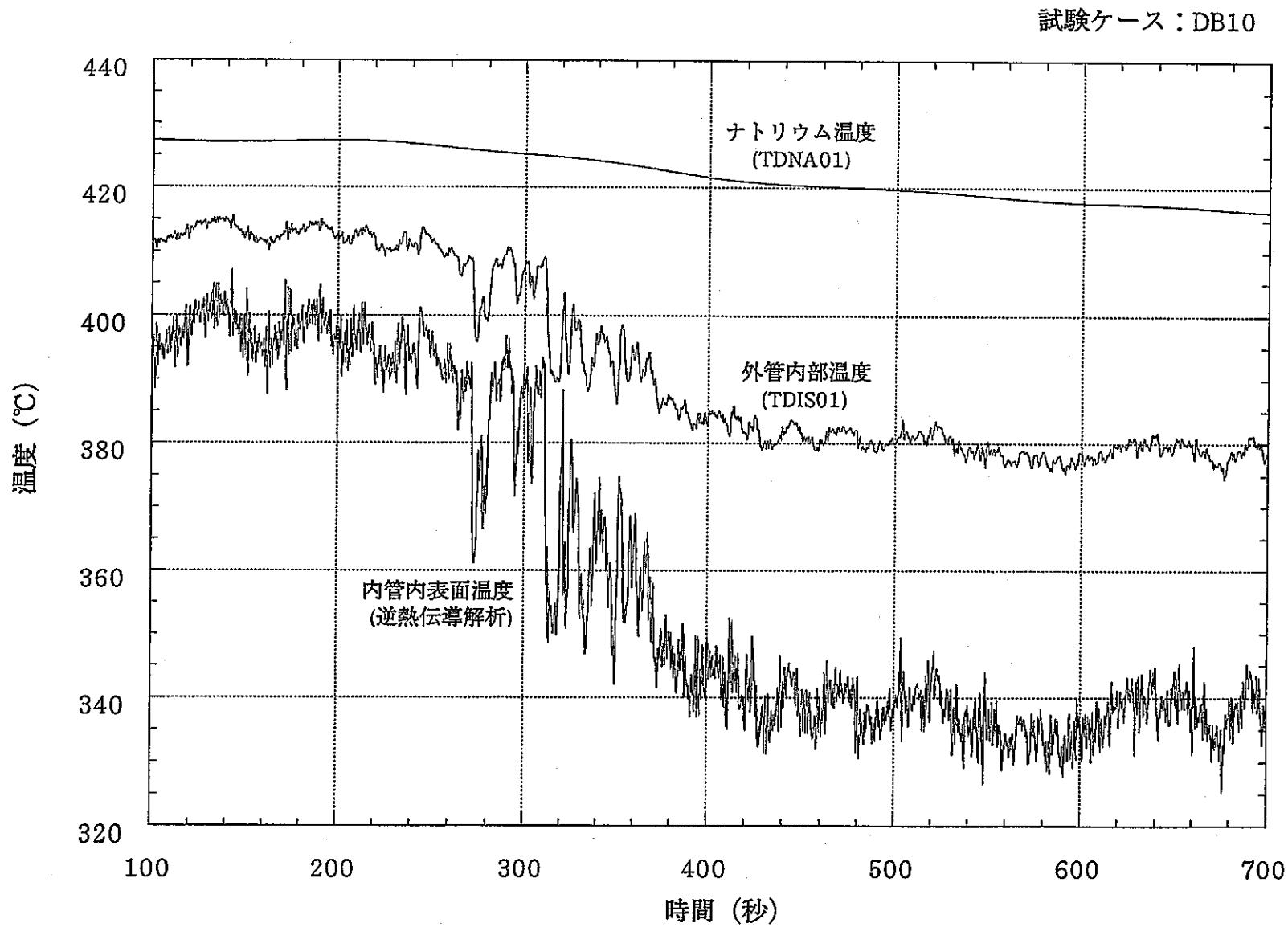


図5.2.2(3) 内管内壁温度逆熱伝導解析

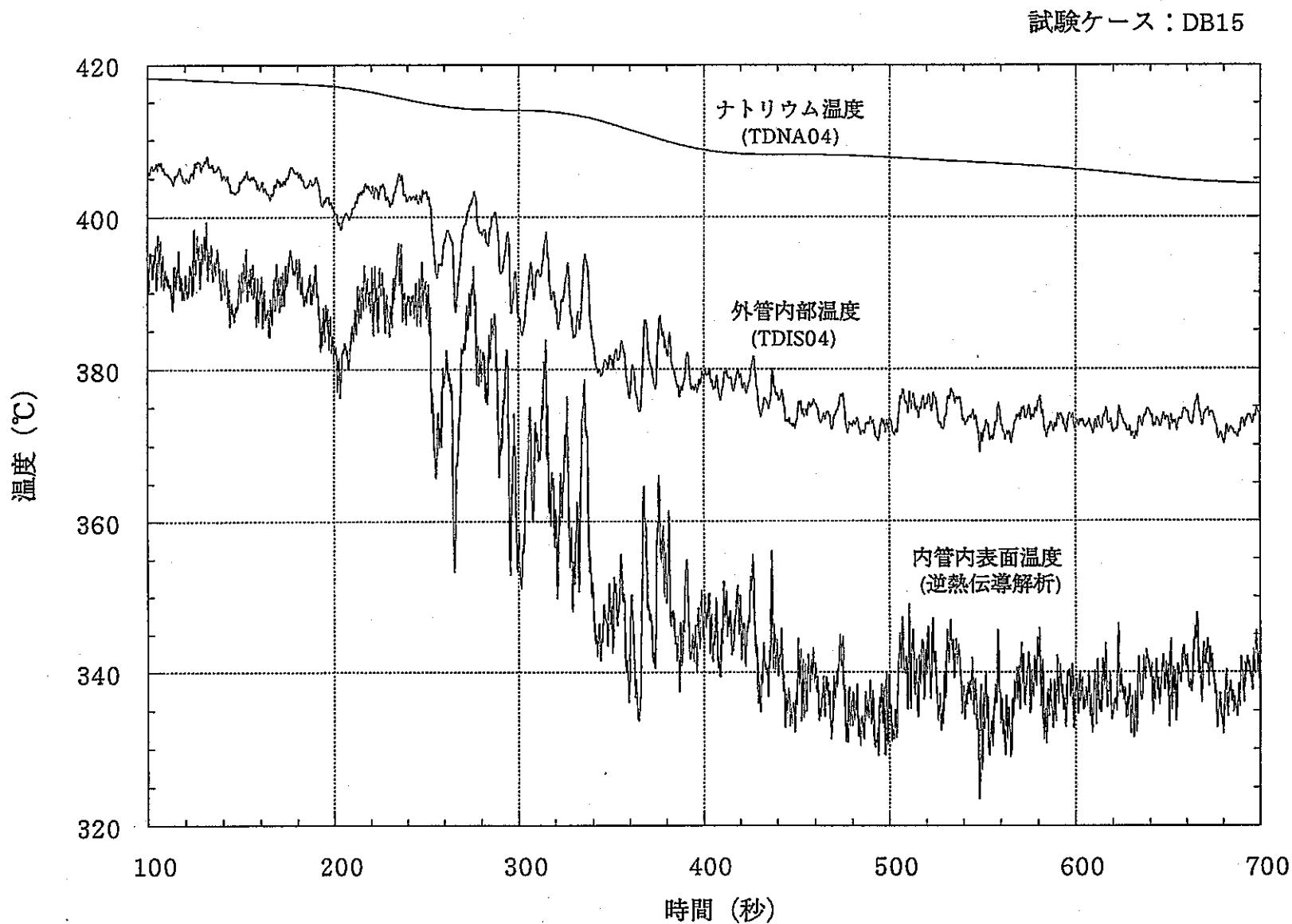


図5.2.2(4) 内管内壁温度逆熱伝導解析

試験ケース：DB19

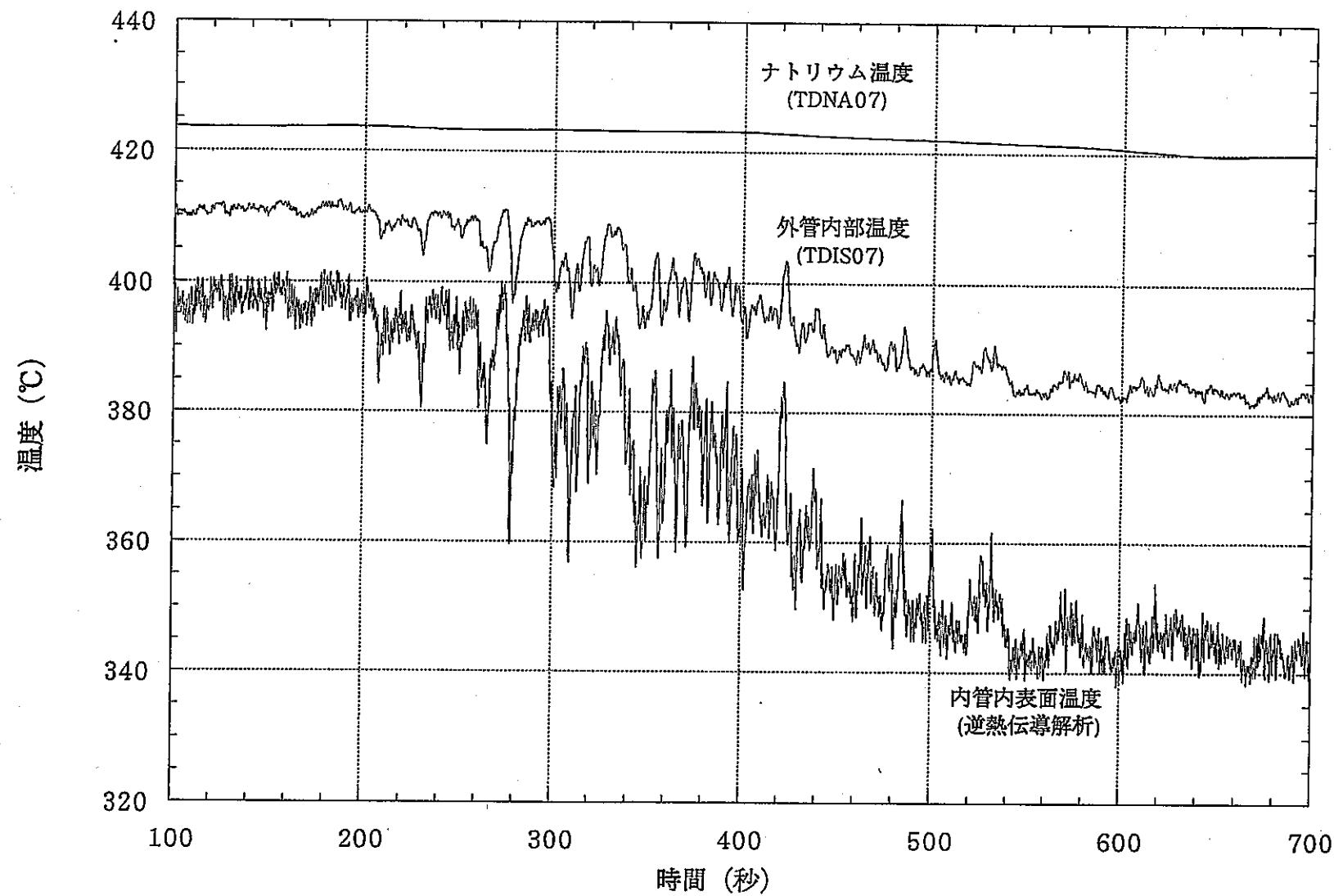


図5.2.2(5) 内管内壁温度逆熱伝導解析

試験ケース：DB20

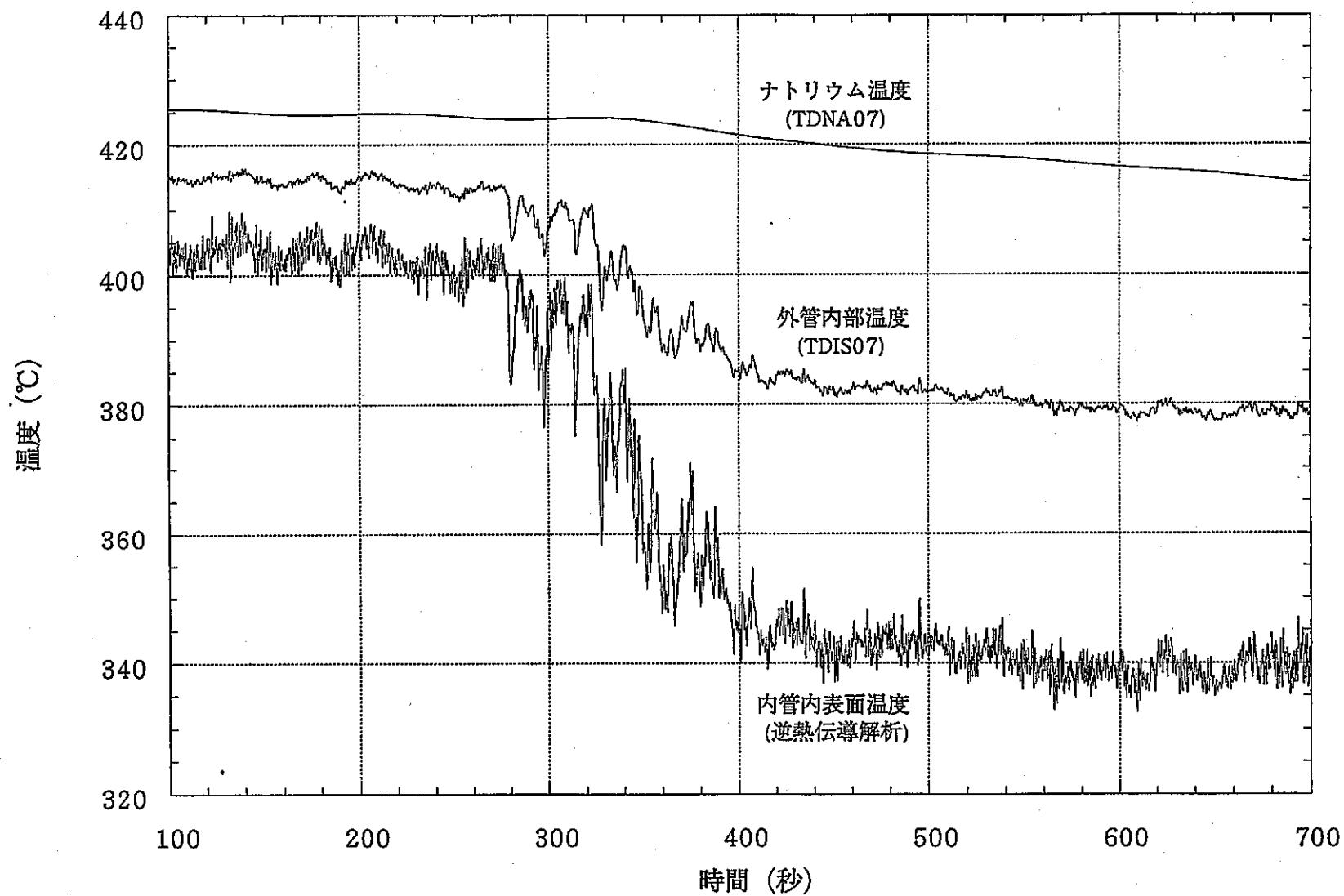


図5.2.2(6) 内管内壁温度逆熱伝導解析

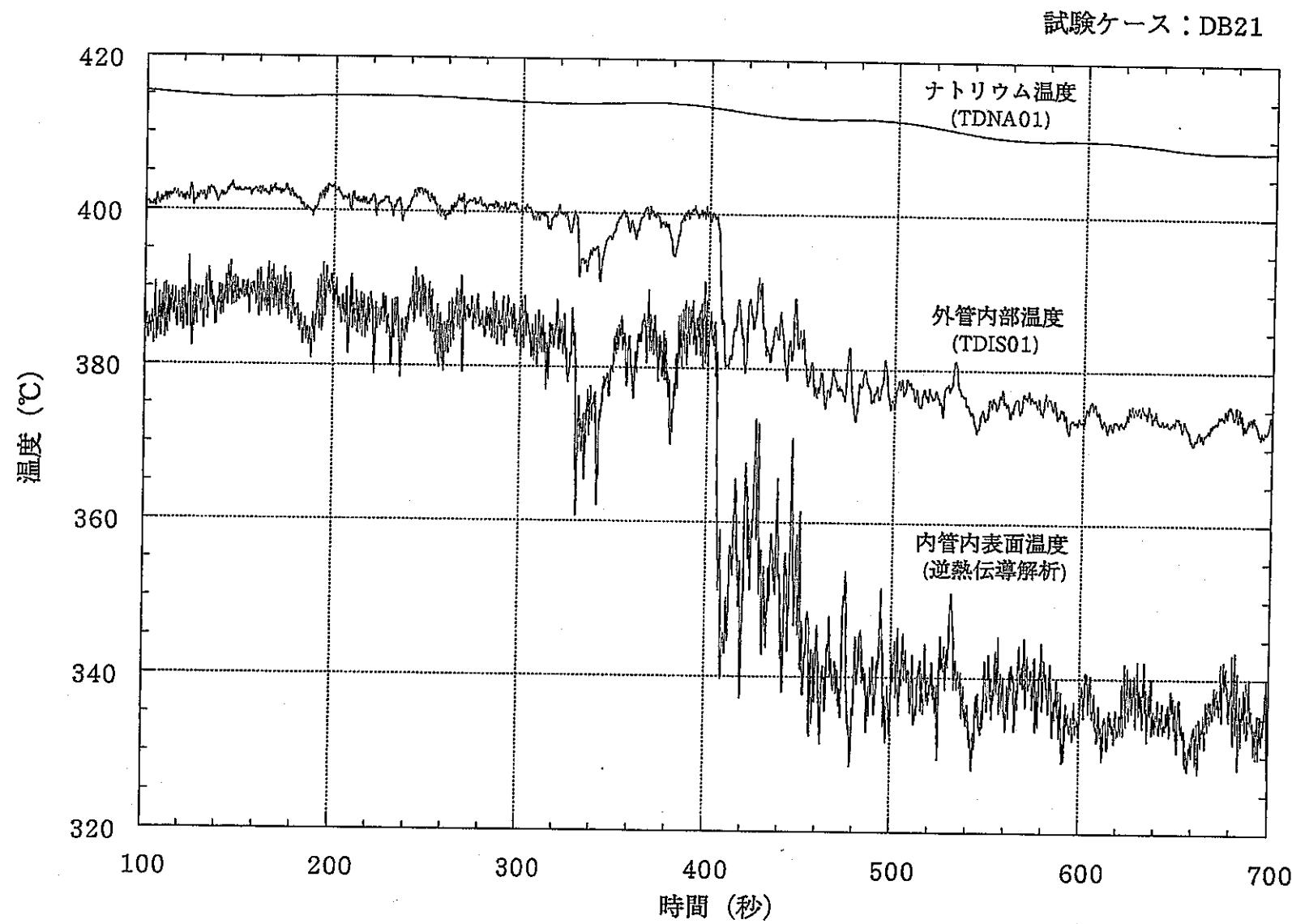


図5.2.2(7) 内管内壁温度逆熱伝導解析

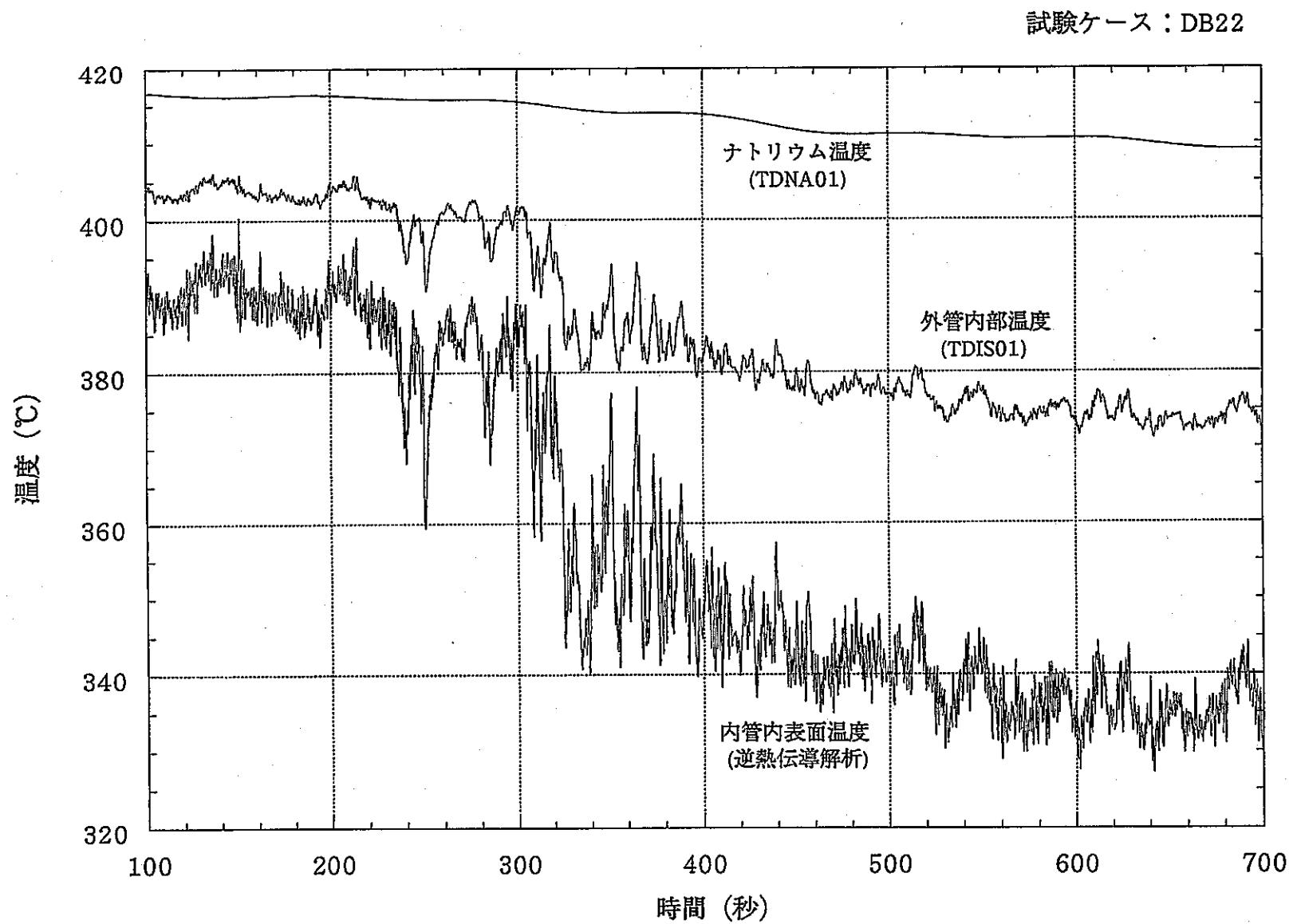


図5.2.2(8) 内管内壁温度逆熱伝導解析

試験ケース：DB23

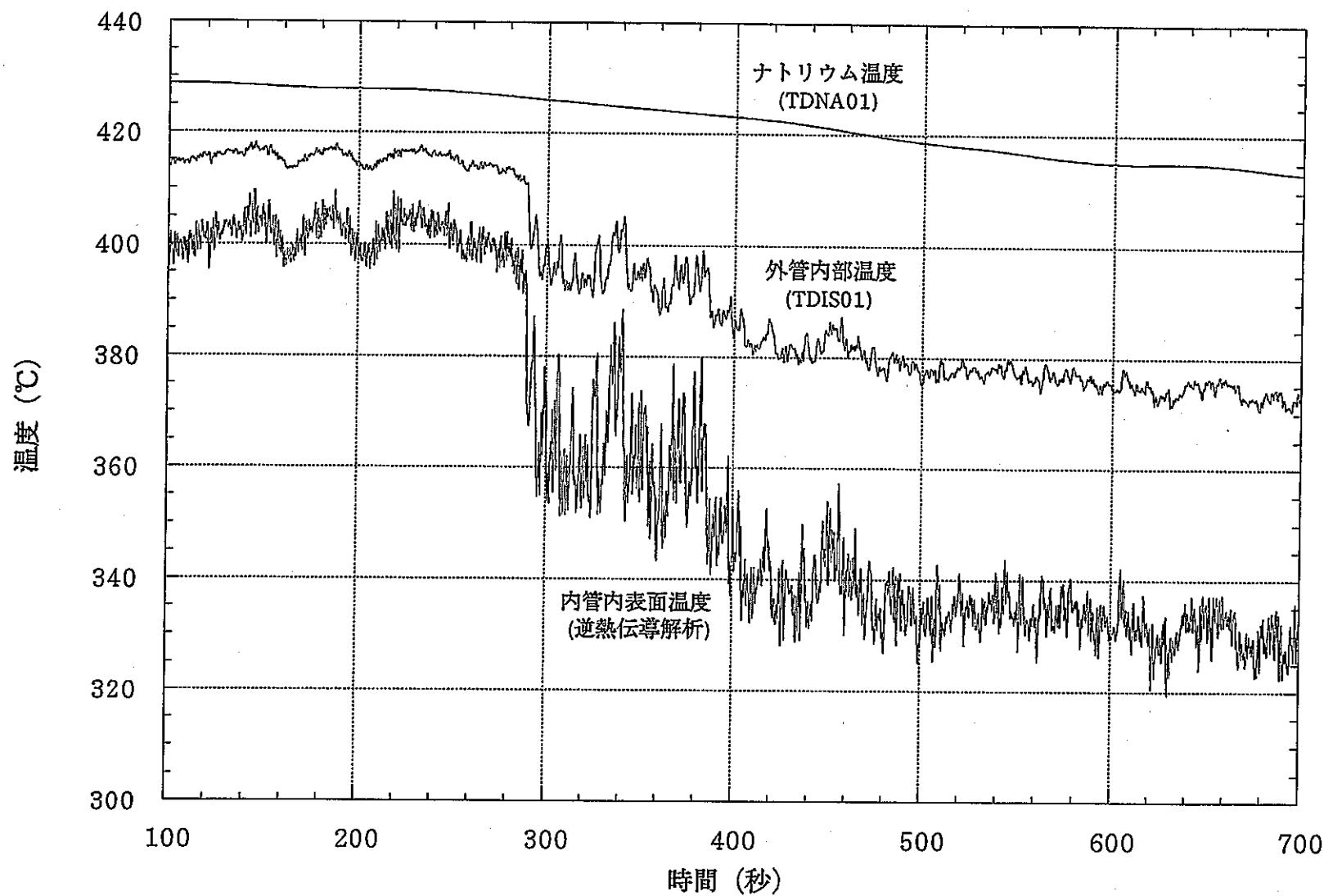


図5.2.2(9) 内管内壁温度逆熱伝導解析

試験ケース：PDNB13

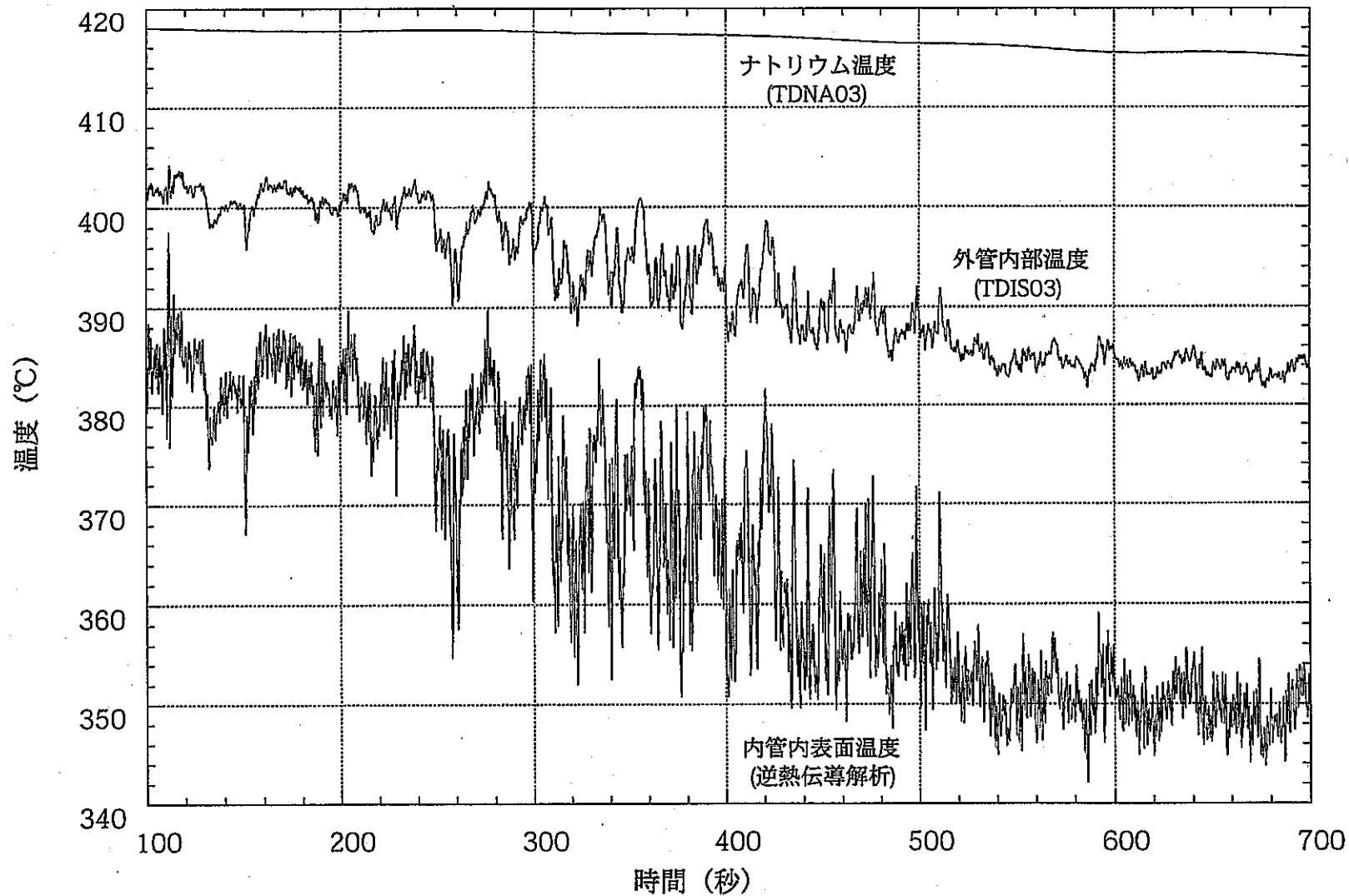


図5.2.2(10) 内管内壁温度逆熱伝導解析

6 DNB温度振動特性

6.1 ピトー管流量との関係

単管直管型SGではDNB温度振動は2種類のモードが観測されており、次の2つの原因が検討されている。一つはDNB域の位置の変動によるもので、水側流量などの影響を受けており、DNB温度振動と水側流量振動には強い相関が見られる。もう一つは伝熱管内面の液滴または液膜の付着、離脱に起因するもので水側流動振動とは独立したものである。

特に、本試験において前者の水側流動振動による影響を調べるために、DNB温度振動とDNB計測管のピトー管流量を比較した。両者をあわせてプロットしたグラフが図6.1-1であり、この両者の相互相関解析 [付録-2] を行った結果が図6.1-2であるが、温度振動と流量の相関は観測されなかった。したがって、今回の試験での温度振動は液膜の付着、離脱に起因する、つまり膜沸騰と核沸騰の相互入れ替えにのみ起因した温度振動現象であると考えられる。

6.2 DNB振動周期

DNB温度振動は不規則信号であり、その代表的な周期（振動数）を求めるために自己相関関数およびスペクトル解析による検討を試みた。

(1) 自己相関解析

DNB振動周期を検出するためにケースDB01において自己相関関数 [付録-2] を計算した。この結果を図6.2-1に示すが、一定の周期性を見い出されず、多くの周波数成分が含まれていると考えられる。

(2) スペクトル解析

DNB温度振動の特徴をパワースペクトル密度により検討する。一例として試験ケースDB01のスペクトル解析結果を図6.2-2および図6.2-3に示す。図6.2-2の周波数軸を線形表示したグラフが図6.2-3である。両者ともDNB領域とDNB領域外の温度振動を合わせてプロットしたグラフであるが、DNB振動域においてはパワースペクトル密度は低周波数域で大きく、周波数の増加と共に減少している。そして、このケースでは約0.7HzでDNB領域外と同じ大きさになっている。同様のことが2重管SG小型モデルでの他のDNB試験ケースにおいても観測されており、DNB振動は0.7~1Hz以下の周波数成分が支配的である。このことは他の単管直管型SGのDNB試験結果ともほぼ一致している。しかし、多くの周波数成分を含んでいるため、スペクトルからその代表周期を決定することは困難である。

次にスペクトル解析によって、運転パラメータによる周波数成分への影響についての整理を行う。これまでの単管直管型SGでの試験から、給水質量流速、蒸気圧力がDNB周期に影響を及ぼすことが知られているため、これらを検討するためにDNB振動のスペクトルを図6.2-4と図6.2-5に示す。図6.2-4は質量流速が270、440、736 (kg/m²sec)の場合の各スペクトルであり、270 (kg/m²sec)と440 (kg/m²sec)ではその差はほとんどないが、736 (kg/m²sec)では高周波成分 (0.2~1Hz)が他に比べ大きくなっている。つまり、高質量流速では周期が短い傾向にあることがわかる。一方、図6.2-5は蒸気圧力が110, 132, 151(atg)

の場合のスペクトルであり、最も低い110(atg)では高周波成分(0.3~1.5Hz)が他に比べ大きく、かつ低周波成分(0.02~0.2Hz)が小さくなっている。つまり低蒸気圧力条件では周期が短い傾向にあることがわかる。このような傾向についても従来の単管直管型SGと同様であることがわかった。

6.3 DNB領域長さ

DNB領域長さについては単管直管型SGにおいてこれまで様々な試験が実施され、圧力12MPa以上では圧力と水側流量に依存せず30~70mmであると報告されている。

2重管SG小型モデルにおいて、質量流速、蒸気圧力とDNB領域長さの関係をプロットしたグラフが図6.3-1であるが、これまでの知見とほぼ同じでDNB領域長さは約20~80mmであり、質量流速、蒸気圧力との相関関係は見い出されなかった。

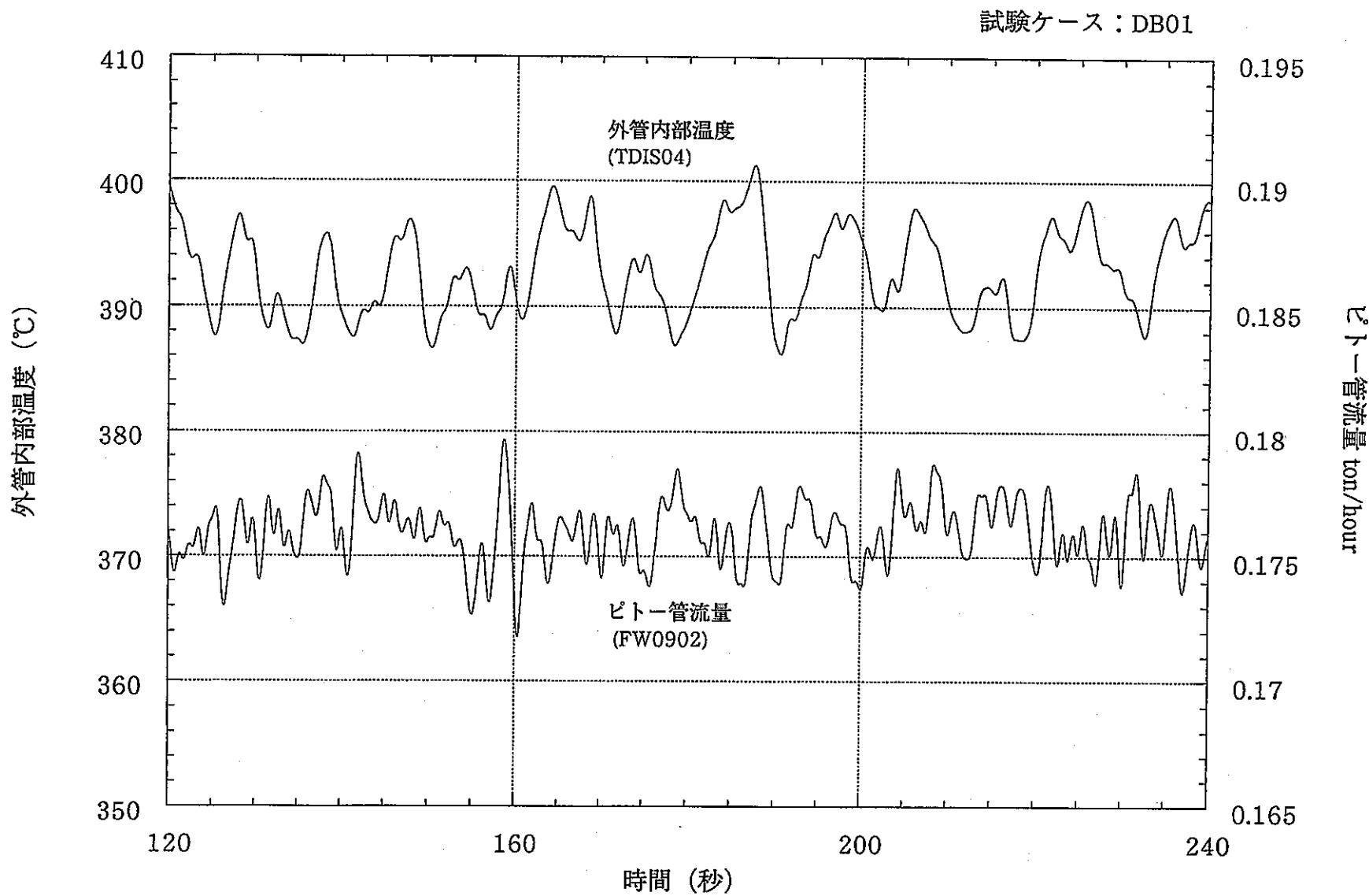


図6.1-1 DNB温度振動とピト一管流量の関係

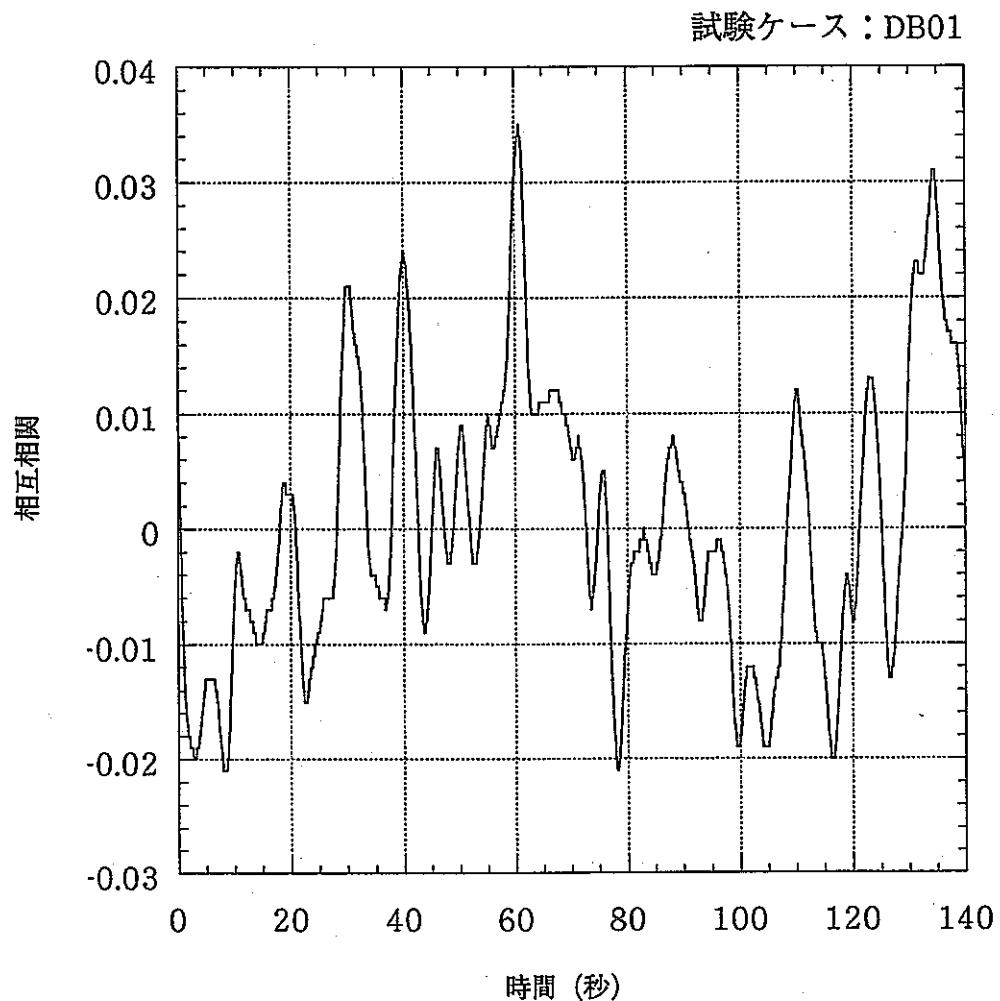


図6.1-2 DNB温度振動とピトー管流量の相互相関関数

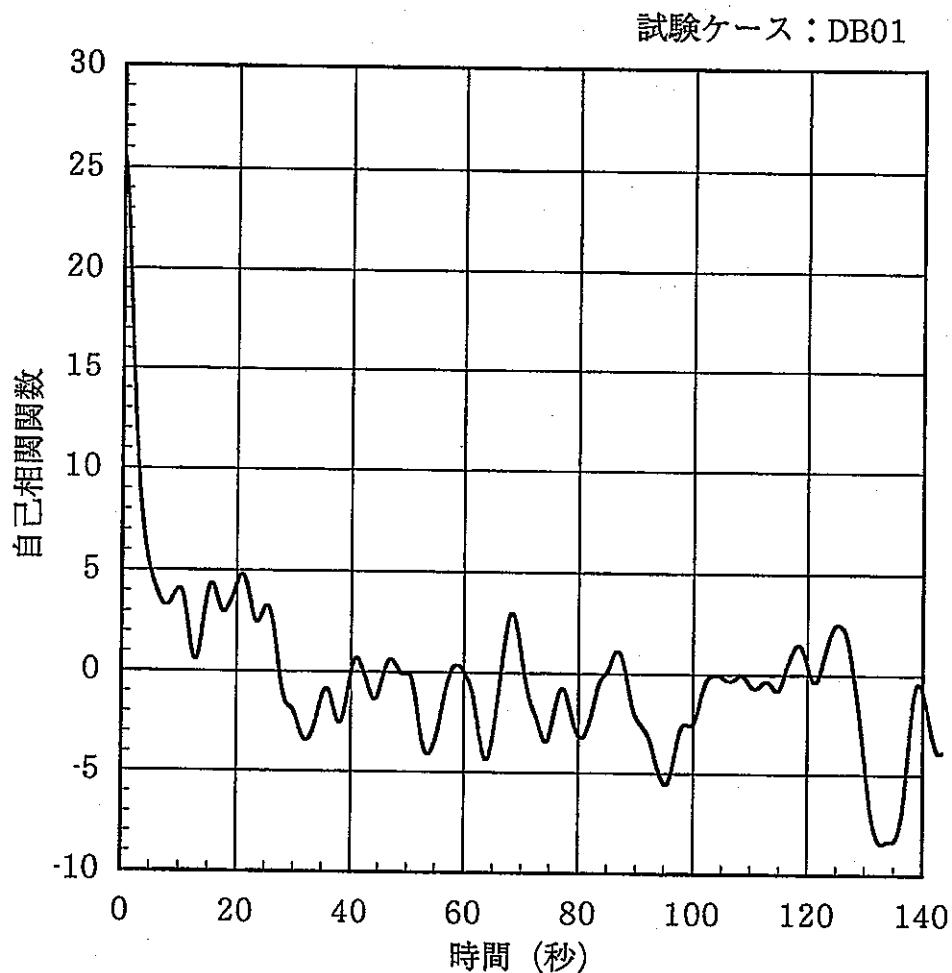


図6.2-1 DNB温度振動の自己相関関数

試験ケース：DB01

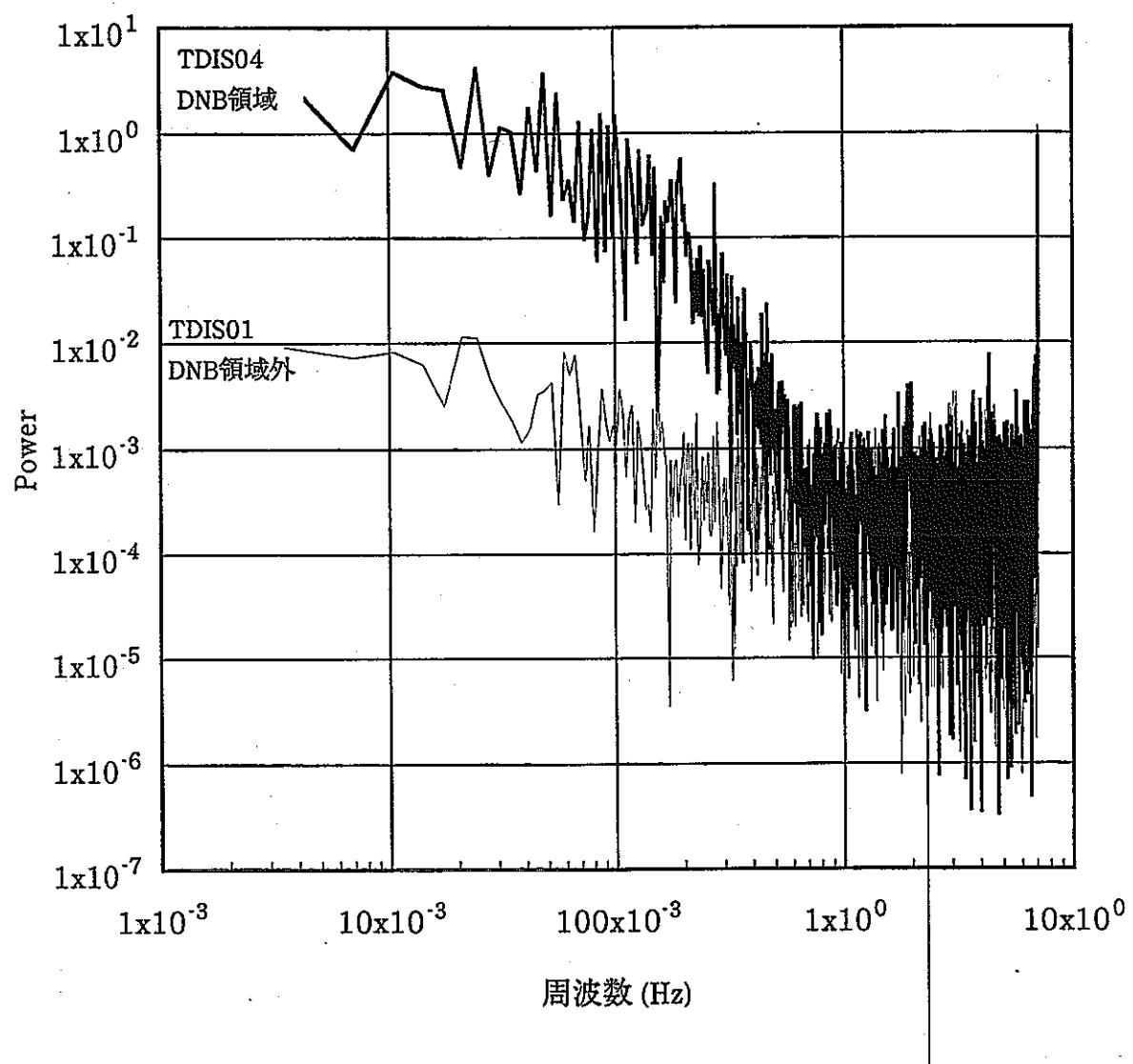


図6.2-2
DNB領域とDNB領域外の温度振動スペクトル（外管内部温度）

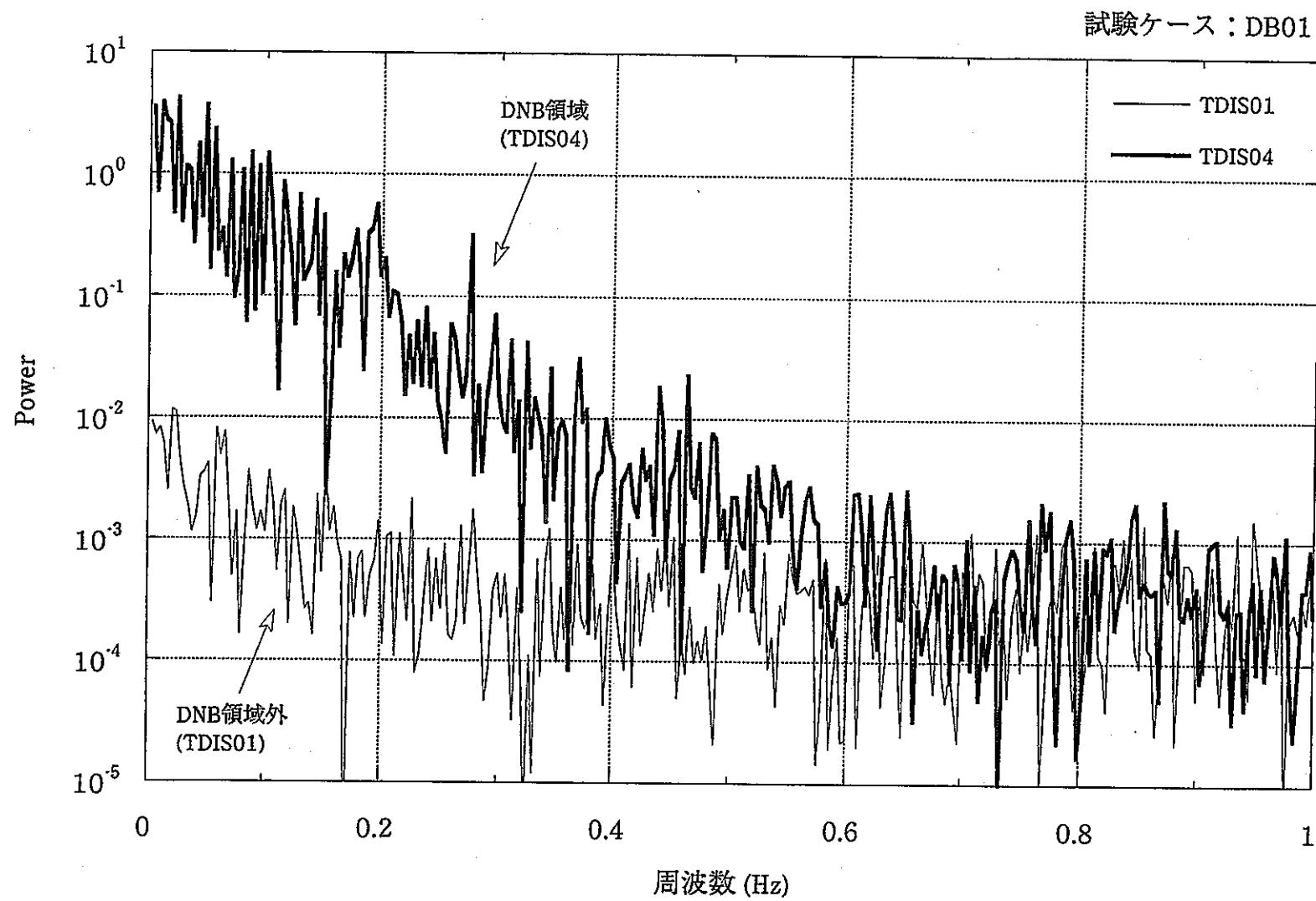


図6.2-3 DN領域とDNB領域外の温度振動スペクトル

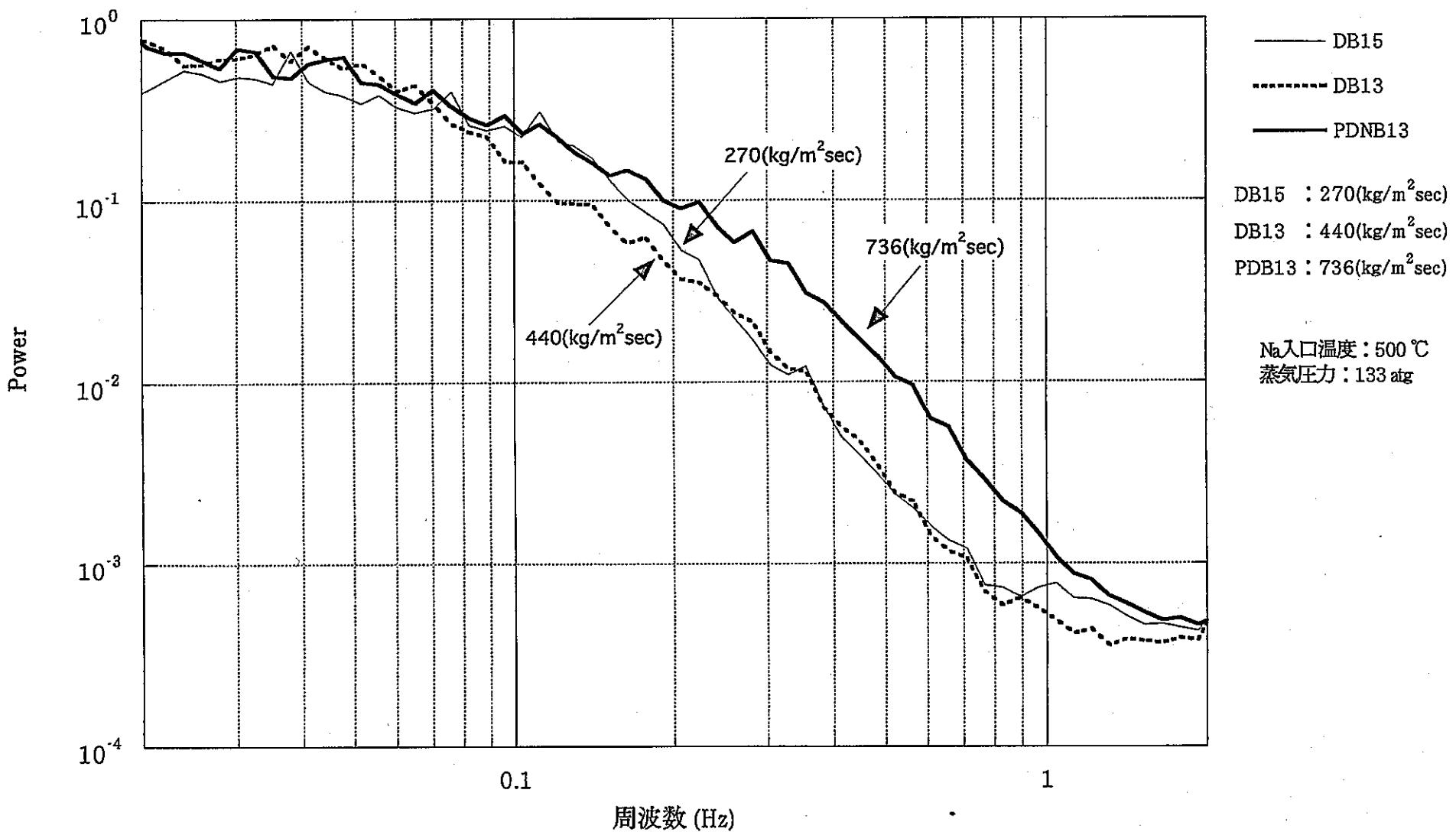


図6.2-4 質量流速の温度振動スペクトルへの影響

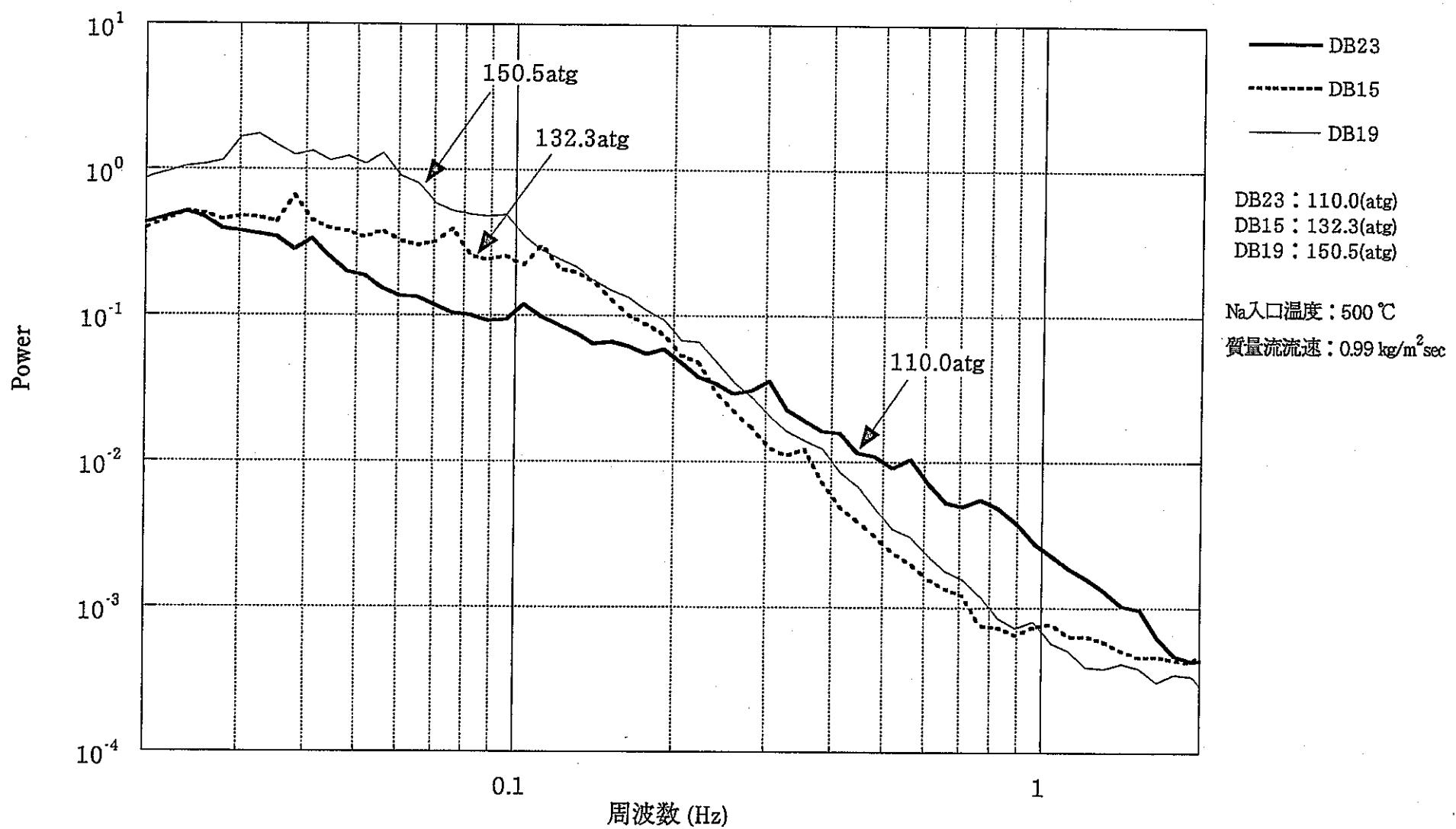


図6.2-5 蒸気圧力が温度振動スペクトルへ及ぼす影響

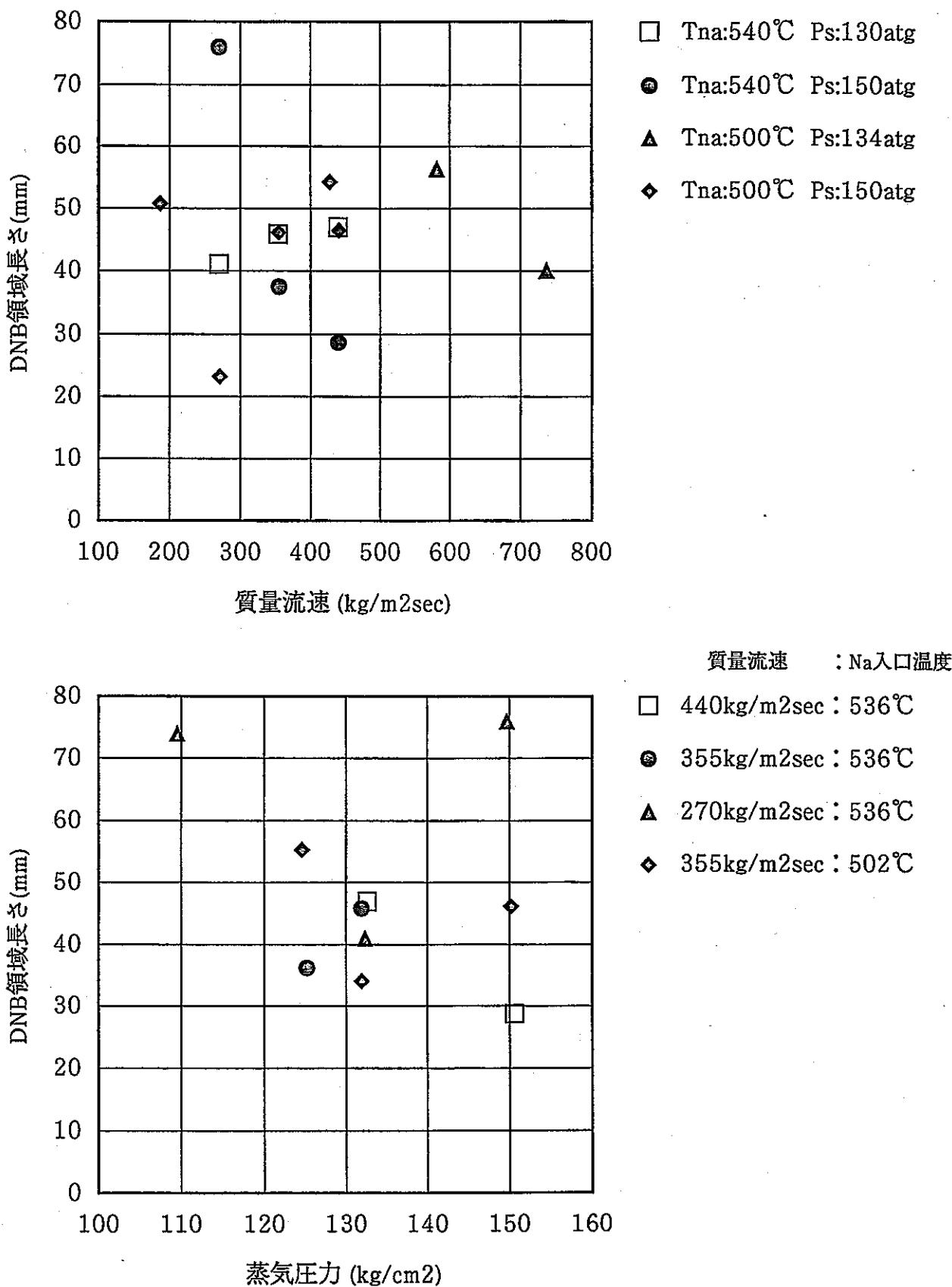


図6.3-1 水側質量流速、蒸気圧力とDNB領域長さの関係

7 結言

2重管SG小型モデルのDNB試験結果を整理し、データ集としてまとめることができた。これにより、本データは伝熱管DNB領域の熱応力解析のための入力データ整備およびDNB振動特性の詳細な評価に活用することができる。

謝辞

本データ集を作成するに当たり、原子力システム（株）の岩崎隆氏、中根茂氏および長澤一嘉氏にはデータ整理、計算処理プログラムの作成とその解析をしていただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

[1] 江原義朗

ユーザーズディジタル信号処理 東京電機大学出版局 1991年

[2] 松田稔

ディジタル信号処理入門 日刊工業新聞社 1984年

付録-1 ノイズ除去

信号からのノイズ除去については、一般的に加算平均、移動平均等様々な手法が提案されているが（加算平均によるノイズ除去は本熱電対温度信号には適用不可）、本解析では、より精度の高い信号処理が可能であるフーリエ変換による周波数分析を用いたノイズ除去を行った。以下にその概要を示す。

1 フーリエ級数展開

周期Tの任意の周期信号X(t)は、次のように種々の周波数の三角関数の無限の和として表すことができる。

$$X(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos \frac{2\pi m t}{T} + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin \frac{2\pi m t}{T} \quad (1 \text{ 式})$$

ここで、フーリエ係数 a_0 は、もとの信号の直流成分の大きさを表し、 a_m, b_m はそれぞれの周波数 m/T (Hz)のCOS成分、SIN成分を表す。さらに、同じ周波数のCOS成分、SIN成分は位相差が 90° であるため、(1式)は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} X(t) &= A_0 + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos \left(\frac{2\pi m t}{T} - \theta_m \right) \quad (2 \text{ 式}) \\ A_m &= \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \\ \theta_m &= \tan^{-1} \left(\frac{b_m}{a_m} \right) \end{aligned}$$

A_m は振幅、 θ_m は位相差を示し、特に A_m^2 をパワーと呼ぶ。

2 複素フーリエ級数展開

フーリエ級数展開の式は複素数を使って、より簡潔に表すことができる。(1式)を複素数を用いて表すと、

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} X_m \exp \left(j \frac{2\pi m t}{T} \right) \quad (3 \text{ 式})$$

$$X_m = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \exp \left(-j \frac{2\pi m t}{T} \right) \quad (4 \text{ 式})$$

X_m ：複素フーリエ係数

で表される。

3 離散フーリエ変換

計算機に収録されたデータは、一般に離散ディジタル信号であり、有限個数の信号系列 X_n に対しての周波数分析には、離散フーリエ変換(DFT)が定義されている。一般に計算機においては、長い信号の一部分を切り出して処理するが、図1に示すようにDFTでは切り出した信号の外側にも同じ信号が繰り返されていると仮定している。

離散信号 $X_n = X(n)$ $\{N=0,1,2,3,4 \dots N\}$ の離散フーリエ変換は

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp\left(-\frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (5 \text{式})$$

で定義されこれは、前述したアナログ周期信号に対する複素フーリエ変換の(4式)に相当する。

(5式)を分解してSIN、COSで表すと、

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} X_k \sin\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (6 \text{式})$$

となり、この式は $X_k = A_k - jB_k$ の形となっている。そこで、 A_k および B_k をそれぞれ離散フーリエ変換の実部、虚部という。そして、 X_k の2乗値

$$|X_k|^2 = A_k^2 + B_k^2 \quad (7 \text{式})$$

は、パワースペクトルとよばれ、 k 番目の成分のエネルギーを表す。

また、 X_k からもとの信号を求めることが離散フーリエ逆変換とよび

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(j \frac{2\pi n k}{N}\right) \quad (8 \text{式})$$

で表す。この式はアナログ周期信号に対する、複素フーリエ級数展開の(3式)に相当する。

4 離散フーリエ変換による周波数分析の性質

4.1 トレンドの除去

図2(a)の信号は、時間の経過と共に全体が上昇している。これは図2(b)の信号成分と図2(c)の信号成分が合成したものと考えることができ、このように信号が時間と共に緩やかに変化する傾向、つまり、解析するデータ長よりも長い周期を持った成分をトレンドと呼んでいる。このトレンドを含んだデータのスペクトルは図3に示すように実際と異なるスペクトル分布を示すようになるため、これをFFTによる分析の前に除去する必要がある。

トレンドの除去には最小2乗法を用いて仮定したトレンド多項式と実際の値との差の2

乗が最小になるように多項式の係数を求め、これを信号値から引く。図2(c)のトレンドは1次式(直線)でトレンド成分を推定したものであり、本熱電対温度信号処理においても、1次式を採用した。

4.2 信号の切り出し

離散フーリエ変換は、有限個数の信号系列 X_n に対して定義されている。コンピューター処理では、長い信号の一部分を切り出して処理するが、前述したように切り出した信号を周期信号と仮定している(図1)。しかし、この仮定が実際の処理においてスペクトルの誤差を生む原因ともなっている。

これは、例えば図3に示すように、10 Hzの正弦波を切り出しスペクトルを求める信号処理を考える。図3(a)は、10波長切りだして離散フーリエ変換によりそのスペクトルを求めたものであり、スペクトルは10Hzと正しく処理されている。これに対し、10.5波長分を切り出してフーリエ変換した場合を図3(b)に示すが、との信号には存在しない周波数成分が出現している。同じ10Hzの信号に対する切り出しの違いによるこの2つのスペクトルの差は、上述したように、周期信号を仮定していることが原因となっている。つまり、前者の場合は信号を切り出した最初と最後の点が同じ値であり、周期信号と仮定しても不連続とならない。これに対し、後者では、切り出した最初と最後の値が異なり、周期信号と仮定すると不連続となり矛盾が生じる。したがって、本熱電対温度信号解析においては、信号の周期の正数倍の長さになるように切り出すこととする。実際には、信号の最初と最後の値が一致するような切り出しを行う。

(この他、任意に切り出した信号の最初と最後の値を等しくするために幾つかの関数—窓関数を用いる方法が考え出されてはいるが、この窓関数は基の信号を変形させてしまう性質があるため、本DNB温度解析では採用していない。)

以上の前処理が済んだ信号について、初めてFFTによる周波数分析が可能となる。以下に一般的な基底2のFFTを使用する際の注意点を述べる。

●入力信号のサンプル数

信号のサンプル数Nは2のべき乗とする。 $(N = \dots, 256, 512, 1024, 2048, \dots)$

●周波数分解能

標本化間隔 Δt (秒)とサンプルの個数Nによって、解析する信号の長さ(時間) $T = \Delta t \times N$ (秒)が決まる。解析時間がT(秒)であれば、スペクトルのきざみは $1/T$ (Hz)間隔となる。解析時間が長いほど低い周波数成分まで求めることができ、また周波数分解能も良くなる。

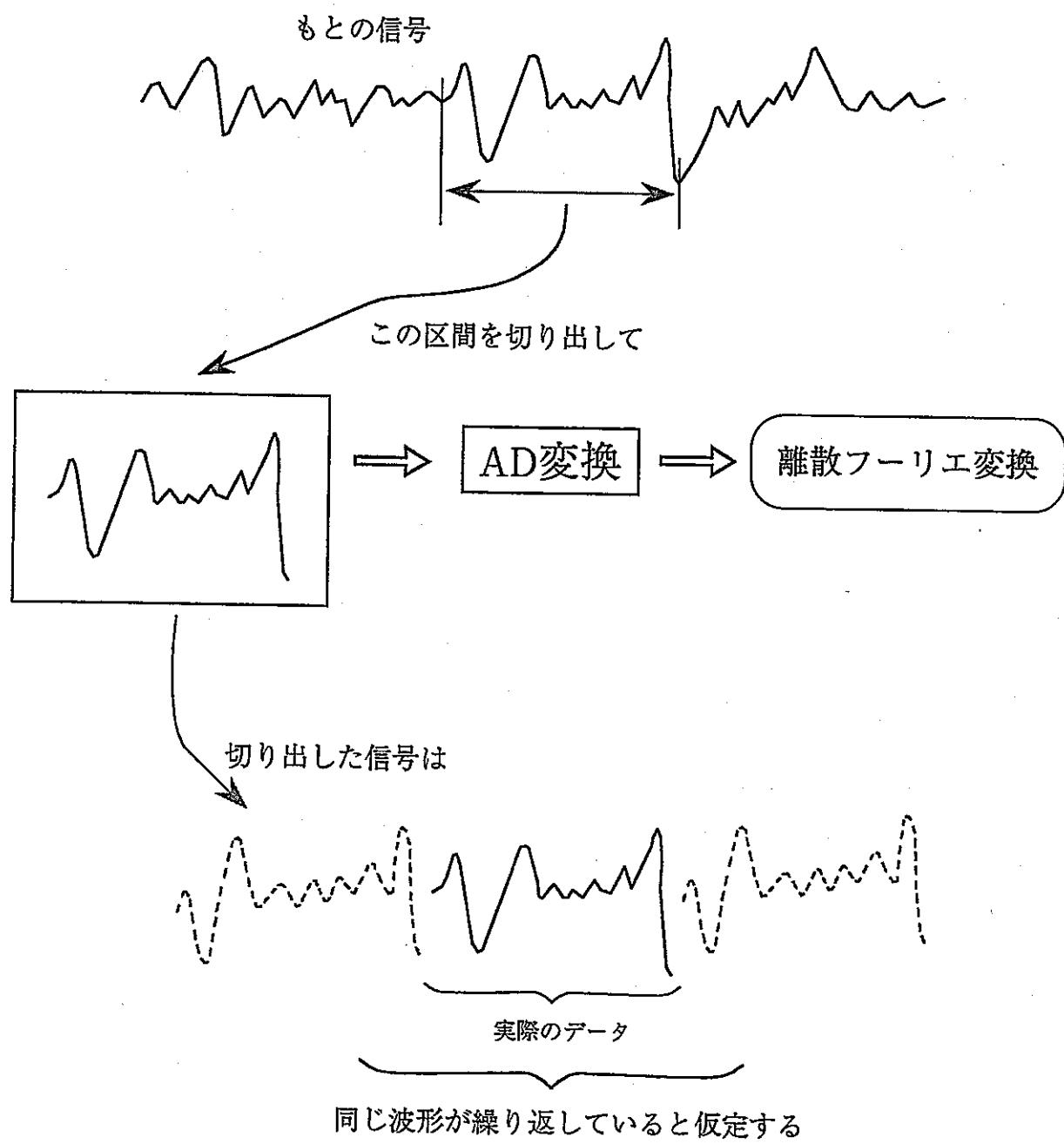
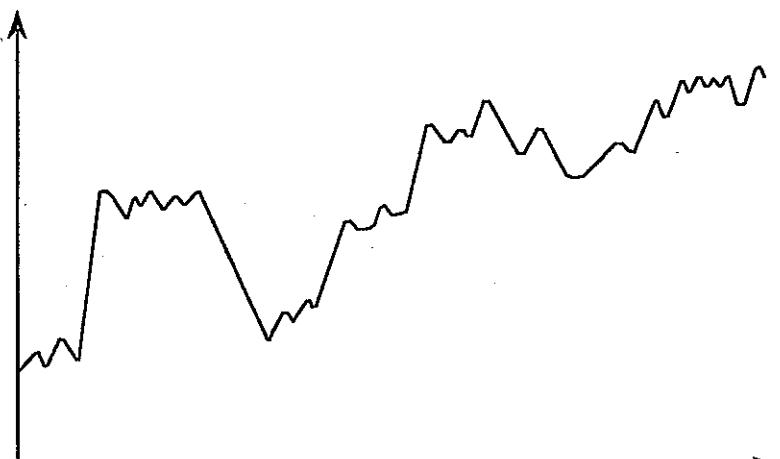
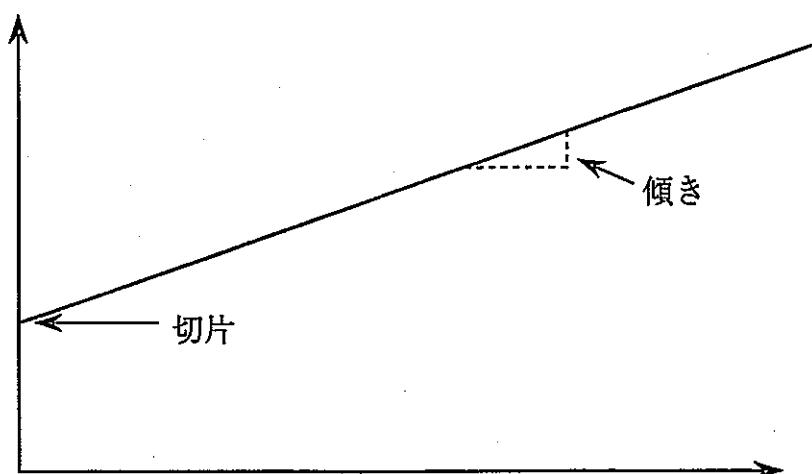


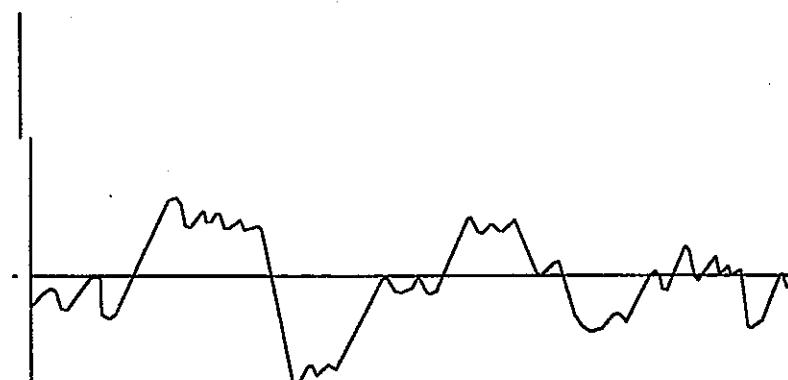
図1 離散フーリエ変換の周期信号仮定



(a) 線形トレンドを含んだ原信号



(b) 信号(a)に含まれるトレンド成分



(c) 原信号(a)からトレンド成分(b)を除去したもの

図2 信号のトレンド成分

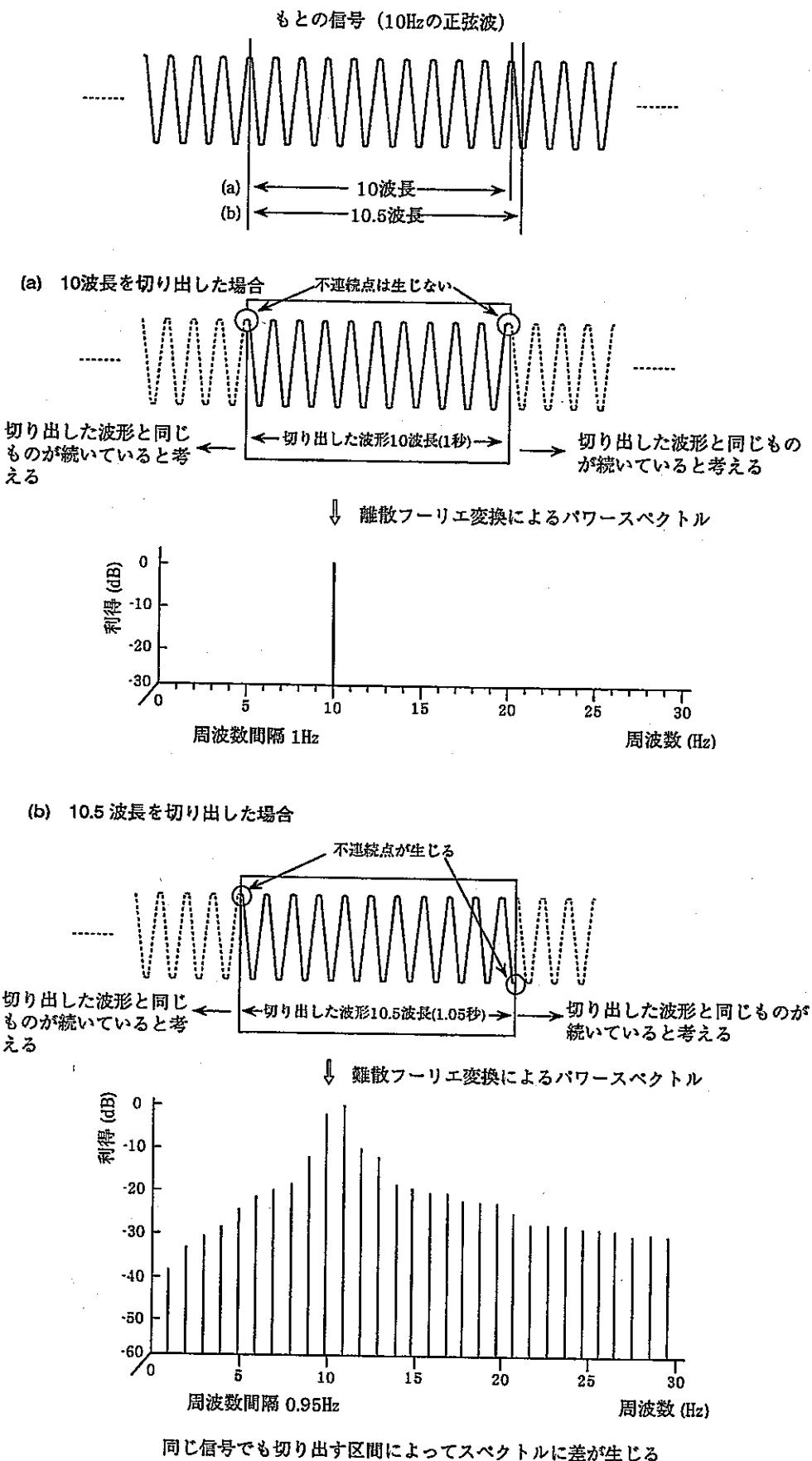


図3 信号の切り出し

付録-2 自己相関関数と相互相関関数

自己相関関数は信号の周期の検出に用いられる。例えば、 $x(t)$ が周期Tの周期変動であるとすれば、

$$x(t) = x(t \pm nT) \quad (n=0,1,2,3, \dots)$$

つまり、周期の整数倍だけ時間をずらすと基の波形と重なる。不規則変動 $x(t)$ が周期性の強いものならば、周期の整数倍だけ時間軸をずらすと元の波形と似ることが予想される。したがって、ある時間 τ だけずらした波形が元の波形とどれだけ似ているかを調べ変動中の周期成分を判別するには、 $x(t)$ と $x(t+\tau)$ の相関を求めればよい。

時間に関する不規則編量 $x(t)$ の τ 時間隔たった2つの変動の積の平均値で定義される関数を自己相関関数という。また隔たり時間 τ をラグと言い、 $x(t)$ が時間 t の関数であるのに対し、 $C(\tau)$ の関数になっている。

$$C(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t+\tau) dt$$

雑音を含んだ周期信号の自己相関関数を求めた場合には時間差 τ がもとの信号の周期と一致する時点で $C(\tau)$ が大きな値となる。この性質を利用し自己相関関数が大きな値となる時間差 τ でもとの信号の周期を推定することができる。

なお、有限個のデータに対する自己相関関数は、次のように表すことができる。

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k)$$

$$(k=0,1,2,3,4, \dots, N-1)$$

相互相関関数は、2つの信号の類似性および時間差を表すのに用いられる。データ $x(n)$ と $y(n)$ ($n=0,1,2,3, \dots, N-1$)の相互相関関数 $R_{xy}(k)$ は次式で定義される。

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k)$$

$$(k=0,1,2,3,4, \dots, N-1)$$

相互相関の定義式で y を x とすれば、自己相関の定義式と全く同じになり、相互相関関数の最大となる時間差が遅れ時間を表す。