

ナトリウム－水反応時の熱的影響確認試験

(研 究 報 告)

2003年3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

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)

2003

ナトリウム-水反応時の熱的影響確認試験

(研究報告)

西村正弘*、下山一仁*、
栗原成計*、清野裕*

要 旨

高速炉の蒸気発生器(SG)における水リーク事故時には、高温流体であるナトリウム-水反応ジェットが生成して隣接する伝熱管へ影響を及ぼす。安全研究の観点からは、伝熱管の材料強度に影響を与える反応ジェットの熱的性質を明らかにすることが重要である。そのためナトリウム-水反応試験装置(SWAT-1R; Sodium Water Reaction Test Rig.)を用いて注水率をパラメータとしたナトリウム-水反応試験(Run-HT1:158g/s, HT2:337g/s, HT3:542g/s)を実施した。本試験では伝熱管群を模擬した試験体を液体ナトリウム中に設置し、そこに高温高圧の水・蒸気注水により発生するナトリウム-水反応を噴出する。本試験では反応ジェットの熱的性質(温度、拡がり)を明らかにすることを目的とし、試験体に設置した熱電対を用いて温度データを取得した。また、反応ジェットから隣接する伝熱管群が受ける熱的影響を評価するため、伝熱管壁内部に熱電対を埋め込んだ熱伝達率測定管を設置して温度データを取得した。さらに反応ジェットにさらされた伝熱管の金相観察を実施し、受けた熱的影響の評価を行った。これらの試験から得られた結果を以下に示す。

・反応ジェットの熱的性質

注水率をパラメータとした3つの試験の範囲内において反応ジェットの最高温度(HT-1:1161°C, HT-2:1013°C, HT-3:1164°C)に違いは確認できなかった。

各試験とも注水開始から10秒以内で反応ジェットは定在化し、その拡がりは注水率が増すほど大きくなった。

・伝熱管の受けた熱的影響

各試験において熱伝達率を測定するための、熱電対温度データを取得し、評価手法を確立した。

注水試験により熱的影響を受けた伝熱管の金相を観察し、フォーマスタ試験による基準サンプル金相との比較により評価した結果、約20秒 1100°C以上の反応ジェットにさらされたものでも伝熱管の受けた熱的影響は 900°Cを 20 秒保持したものとほぼ同等であった。この結果は、伝熱管に埋め込んだ熱電対の温度データと比較しても妥当である。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 熱化学安全試験グループ

Sodium-water reaction test to confirm thermal influence on heat transfer tubes

(Research Document)

M.Nisimura*, K.Shimoyama*,
A.Kurihara*, H.Seino*

Abstract

Sodium-water reaction tests are carried out using the Sodium Water Reaction Test Rig. (SWAT-1R). The objective of this study is to obtain the experimental knowledge of following items.

- 1) Thermal characteristic of sodium-water reaction jet
- 2) Effects on heat transfer tubes by high temperature reaction jet

Those are necessary to establish a systematic evaluate method for the failure propagation of FBR steam generator heat transfer tubes. Then we performed parametric three HT tests (series of test to confirm thermal influence on tubes), and the parameter is water leak rate. Following items are clarified in this report.

- 1) •No difference was observed about the maxim temperature of reaction jet in each test.

HT-1:1161°C, HT-2:1013°C, HT-3:1164°C

- The reaction jet became stable within ten seconds, and the jet size depended on water leak rate.
- 2) •The thermal data for calculating the heat transfer coefficient were obtained and it's evaluation method was established.
 - The thermal influence of heat transfer tubes suffered by more than 1100°C high temperature jet in 20 seconds are almost equal to that of standardization test materials suffered by 900°C in 20 seconds.

* Thermo chemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center

目 次

1.	はじめに	1
2.	試験概要	2
2.1	試験装置	2
2.1.1.	試験装置の全体概要	2
2.1.2.	反応容器	2
2.1.3.	その他の主要機器	3
2.1.4.	試験体構造	3
2.2	試験条件	6
2.2.1.	水/蒸気条件	6
2.2.2.	水リーク率と注水時間	7
2.2.3.	ナトリウム流動と注水方向	7
2.2.4.	反応容器カバーガス圧力	8
2.2.5.	熱伝達率測定管用の気泡ポンプガス流量	8
2.3	試験方法	14
2.4	測定項目	15
2.4.1.	温度	15
2.4.2.	圧力	16
2.4.3.	材料検査	16
3.	試験結果	17
3.1	注水率	17
3.2	反応容器カバーガス圧力	17
3.3	装置系統の温度変化	18
3.4	反応ジェットの温度変化	18
4.	試験体材料検査	20
4.1	検査方法概要	20
4.2	伝熱管仕様	20
4.3	対象伝熱管テストピースの選定	20
4.4	材料検査方法	21
4.4.1.	硬度検査	21
4.4.2.	金相観察	21
4.5	フォーマスタ試験	21
4.5.1.	伝熱管材料変態点	21
4.5.2.	熱的影響の標準化	21
4.6	テストピースの受けた熱的影響	23
4.6.1.	硬度検査結果	23

4.6.2.	金相観察結果	24
4.6.3.	テストピースの受けた熱的影響の推定	24
5.	管外熱伝達率	26
5.1	熱伝達率算出方法	26
5.2	管外熱伝達率の算出用データ	29
6.	まとめ	30
6.1	反応ジェットの熱的性質	30
6.1.1.	反応ジェットの最高温度	30
6.1.2.	反応ジェットの拡がり挙動について	30
6.2	伝熱管の受けた熱的影響	30
6.2.1.	熱伝達率測定に必要な温度データの収集	30
6.2.2.	材料検査による伝熱管の受けた熱的影響評価	31
7.	謝辞	32
	参考文献	33
	表	
表 2.1	機器主要目	34
表 2.2	試験条件表	35
表 2.3	気泡ポンプの設計条件	36
表 2.4	気泡ポンプ揚水特性確認用水試験条件	37
表 3.1	Run-HT1~3 平均注水率	38
表 4.1	テストピースの選定	39
表 4.2	フォーマスタ試験条件	40
表 4.3	テストピースの受けた熱的影響の推定(1/2)	41
表 4.4	テストピースの受けた熱的影響の推定(2/2)	42
	図	
図 1.1	ナトリウム-水反応試験装置概念図	43
図 2.1	SWAT-1R 試験装置フローシート	44
図 2.2	反応容器(RV)構造図	45
図 2.3	ダンプタンク(DT)構造図	46
図 2.4	反応生成物収納容器(RT)構造図	47
図 2.5	水加熱器(WH)構造図	48
図 2.6	試験体構造図	49
図 2.7	注水管及び熱伝達率測定管の構造図	50
図 2.8-1	試験体熱電対設置箇所(HT-1)	51
図 2.8-2	試験体熱電対設置箇所(HT-2)	52
図 2.8-3	試験体熱電対設置箇所(HT-3)	53

図 2.9 熱伝達率測定管製作図.....	54
図 2.10 反応容器内の気泡ポンプ(試験体を含む)構造図.....	55
図 2.11 ナトリウム流動による伝熱管内熱伝達率の変化.....	56
図 2.12 ナトリウム温度及び伝熱管壁温度の計算方法.....	57
図 2.13 気泡ポンプによる冷却効果 計算結果.....	58
図 2.14 気泡ポンプの揚水特性に関する計算結果.....	59
図 2.15 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験装置.....	60
図 2.16 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験結果.....	61
図 3.1 注水率の時間変化.....	62
図 3.2 Run-HT1 試験結果.....	63
図 3.3 Run-HT2 試験結果.....	64
図 3.4 Run-HT3 試験結果.....	65
図 3.5-1 Run-HT1 温度分布推移(3秒平均)(1/4).....	66
図 3.5-2 Run-HT1 温度分布推移(3秒平均)(2/4).....	67
図 3.5-3 Run-HT1 温度分布推移(3秒平均)(3/4).....	68
図 3.5-4 Run-HT1 温度分布推移(3秒平均)(4/4).....	69
図 3.6-1 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(1/4).....	70
図 3.6-2 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(2/4).....	71
図 3.6-3 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(3/4).....	72
図 3.6-4 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(4/4).....	73
図 3.7-1 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(1/4).....	74
図 3.7-2 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(2/4).....	75
図 3.7-3 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(3/4).....	76
図 3.7-4 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(4/4).....	77
図 3.8 反応ジェットの最高温度比較.....	78
図 4.1 伝熱管材料変態点.....	79
図 4.2 硬度検査結果(フォーモスタ試験材).....	80
図 4.3 断面硬さと保持温度の関係.....	80
図 4.4 硬度検査結果(テストピース).....	81
図 5.1 熱伝達率評価モデル図.....	82
図 5.2-1 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-1).....	83
図 5.2-2 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-2).....	84
図 5.2-3 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-3).....	85
写真	
写真 4.1-1 フォーモスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(1/6).....	86
写真 4.1-2 フォーモスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(2/6).....	87

写真 4.1-3 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(3/6)	88
写真 4.1-4 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(4/6)	89
写真 4.1-5 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(5/6)	90
写真 4.1-6 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(6/6)	91
写真 4.2-1 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件1)	92
写真 4.2-2 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件2)	93
写真 4.2-3 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件3)	94
写真 4.2-4 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件4)	95
写真 4.2-5 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件5)	96
写真 4.2-6 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件6)	97
写真 4.2-7 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件7)	98
写真 4.2-8 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件8)	99
写真 4.2-9 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件9)	100
写真 4.2-10 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件10)	101
写真 4.2-11 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件11)	102
写真 4.2-12 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件12)	103
写真 4.2-13 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件13)	104
写真 4.2-14 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件14)	105
写真 4.2-15 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件15)	106
写真 4.2-16 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM像(条件16)	107
写真 4.3-1 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.0)	108
写真 4.3-2 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.1)	109
写真 4.3-3 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.2)	110
写真 4.3-4 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.3)	111
写真 4.3-5 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.4)	112
写真 4.3-6 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.5)	113
写真 4.3-7 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.6)	114
写真 4.3-8 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.7)	115
写真 4.3-9 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.8)	116
写真 4.3-10 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.9)	117
写真 4.3-11 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.10)	118
写真 4.3-12 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.11)	119
写真 4.3-13 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.12)	120
写真 4.3-14 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.13)	121
写真 4.3-15 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.14)	122
写真 4.3-16 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.15)	123

写真 4.3-17 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.16)	124
写真 4.3-18 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.17)	125
写真 4.3-19 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.18)	126
写真 4.3-20 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.19)	127
写真 4.3-21 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.20)	128
写真 4.3-22 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.21)	129
写真 4.3-23 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.22)	130
写真 4.3-24 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.23)	131
写真 4.3-25 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.24)	132
写真 4.3-26 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.25)	133
写真 4.3-27 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.26)	134
写真 4.3-28 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.27)	135
写真 4.3-29 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.28)	136

付録

付録 A 伝熱管検査成績書	137
付録 B Run-HT1 試験データ集(金相観察比較用)	140
付録 C Run-HT2 試験データ集(金相観察比較用)	144
付録 D Run-HT3 試験データ集(金相観察比較用)	151

1. はじめに

FBR 蒸気発生器(以下、SG)の伝熱管破損にともなうナトリウム-水反応事故時の安全評価においては、破損メカニズムの解明とともに、適切な設計基準水リーク(DBL:Design Base Leak)の選定確認が必要である。原型炉 SG を対象とした試験研究により、ウェステージ(以下、腐食損耗)が主な破損メカニズムであることを確認し、保守的に伝熱管 4 本破断相当の DBL を選定した。しかしながら、将来炉 SG については、大型化、水/蒸気系の高温・高圧化、ナトリウム系の高温化等が指向されており、これらはいずれも英国 PFR の過熱器で発生したような内圧破裂(以下、高温ラプチャ)型破損の起こりやすい条件となる。したがって、将来炉 SG の DBL を現実的に評価するためには、ナトリウム-水反応現象をより詳細に評価して高温ラプチャ挙動を明らかにすると共に、そのモデルを取り入れた評価手法の高度化と検証により、安全評価技術体系を確立することが要求される。

その一環としてナトリウム-水反応時の反応ジェットが伝熱管に及ぼす熱的影響を確認するため、図 1.1 に示すナトリウム-水反応試験装置(以下、SWAT-1R)を用いて、試験により反応ジェットの広がり、温度分布、伝熱管への熱伝達特性データを取得する。また、試験後の破損伝熱管を検査することにより、ウェステージ特性に関するデータを評価する。

主な試験パラメータは、プラントの運転状態(定格運転、部分負荷運転等)と関係するナトリウム系及び水/蒸気系の圧力・温度、プラント設計と関係する伝熱管材質と寸法、そして想定する事故事象の規模に応じて設定される水リーク率である。

本報では、水リーク率をパラメータに実施した計3回のナトリウム-水反応試験について、温度・圧力データ及び試験後の伝熱管の材料検査結果を基に、管外熱伝達率、反応ジェットの温度分布等について評価・検討した結果について報告する。

(実施時期) ・Run-HT1 :平成 12 年 3 月 15 日

・Run-HT2 :平成 12 年 8 月 30 日

・Run-HT3 :平成 13 年 6 月 27 日

2. 試験概要

2.1 試験装置

2.1.1. 試験装置の全体概要

ナトリウム-水反応試験装置(SWAT-1R; Sodium Water Reaction Test Rig.)、Na冷却型FBRの蒸気発生器(SG)を模擬した反応容器内でナトリウム-水反応を起こし、反応ジェットの温度データや伝熱管損耗などに関する材料データ等を取得する目的で製作された。反応容器の容量はもんじゅSGの約1/6スケールと小規模な装置である。図 2.1 に装置全体系統を記載したフローシートを示す。

ナトリウム系はSGを模擬した反応容器(RV)、ダンプタンク(DT)、反応生成物収納容器(RT)とそれらを結ぶ配管系で構成される。その他にガス系、水・蒸気系、電気系、及び計測制御系で構成され、水・蒸気系の一部は伝熱管破損模擬試験装置(TRUST-2)と共用している。表 2.1 に各機器の主要目を示す。

試験では、ダンプタンクから反応容器へナトリウムを充填した後、反応容器内へ水・蒸気系出で昇温、昇圧された高温、高圧の水・蒸気を反応容器内へ噴出させることによりナトリウム-水反応をおこす。実際のプラントと異なり、本試験装置の反応容器はナトリウム循環機能を持たずナトリウムはスタグナントな状態であり、水・蒸気系についても循環機能はなく水加熱器で作られた高温、高圧蒸気をナトリウム中に注入するワンスルー型である。ナトリウム-水反応により生成した反応生成物は、反応生成物収納容器内において凝縮状の生成物と水素ガスに分けられ、凝縮状生成物は反応生成物収納容器内に回収し、水素ガスは燃焼処理した後に大気中に放出する。試験終了後は反応容器、反応生成物収納容器よりダンプタンク内にナトリウムおよび反応生成物をドレンする。

2.1.2. 反応容器

反応容器の規模は実機SGの縮尺モデルであるが、内部に設置する試験体の伝熱管仕様(直径、厚さ)と配置は実機寸法に合わせる。

反応容器の構造を図 2.2 に示す。内径 500mm、高さ約 3300mm、内容積 0.63m³の円筒容器で、この中に試験体と内部シュラウドが上部フランジから吊り下げられる。また音響測定用の導波棒が注水点近傍の容器外壁に設置されている。

2.1.3. その他の主要機器

ダンプタンクの構造を図 2.3 に示す。内径 1000mm、長さ約 1700mm、内容積 1.23m³の横置型円筒容器で、ナトリウムの充填・ドレンに使用される。

反応生成物収納容器(以下、収納容器)は内径 1000mm、高さ約 2300mm、内容積 1.62m³の縦置型円筒容器で、内部にセパレータを有している。セパレータは反応容器から放出される水素ガスとナトリウム及び反応生成物の液体を分離するための機能を有する。なお分離した水素ガスは、収納容器上部の放出配管を経由して点火器で燃焼処理された後、大気へ放出される。図 2.4 にその構造図を示す。

水加熱器は内径約 210mm、高さ 2350mm、内容積 0.07m³の縦置型円筒容器で、第一種圧力容器である。最高使用圧力/温度は、それぞれ 21.6MPa・G (220kg/cm²G)、450℃である。図 2.5 に水加熱器構造図を示す。

2.1.4. 試験体構造

試験体は図 2.6 に示すように注水管、ダミー管、熱伝達率測定管、それらを固定する側板等で構成される。組立が完了した試験体は、反応容器上部フランジに吊して内部シュラウド(内径 400mm×高さ 1500 mm; 図 2.2 参照)に挿入する。

試験条件である水リーク率に応じて注水管の配管径とノズル孔径が変わること以外、基本的には Run-HT1~3 の試験体仕様は同一である。

2.1.4.1. 伝熱管配列と試験体サイズ

伝熱管の配列は、過去の試験条件との整合を保つため、SWAT-3 試験で高温ラプチャ発生の有無を最終確認するために実施した Run-19(もんじゅの蒸気発生器を対象)の体系とした¹⁾。

試験体サイズは、中リーク領域における反応ジェットの拡がり²⁾³⁾、試験体に接続される気泡ポンプや注水用の配管、及び温度計測用熱電対等の取付けが内部シュラウド(内径 400mm φ)内に納まる範囲の 240mm×260mm×高さ 630mm とした。

2.1.4.2. 注水管

試験時の注水は、水加熱器から配管を経由して注水管に導き、ノズル部のラプチャ板を破裂させてナトリウム中に噴出させる。この注水管をラプチャ型注水管と言い、図 2.7 (1)にその構造図を示す。注水管の仕様は以下の通り。

- ①材 質 : SUS304
- ②外 径 : 31.8mm φ
- ③長 さ : 260mm
- ④その他 : ノズル孔径は計算と蒸気噴出予備試験により決定

2.1.4.3. ダミー管

ナトリウム-水反応時の温度分布やウェステージ率を測定するため、伝熱管群を模擬して STBA 鋼管の伝熱管を試験体に取り付ける。その際、切断した伝熱管の両端に穴を開け、専用の金具と棒で試験体に固定する。

伝熱管外表面には、ナトリウム-水反応時の温度を測定するため中リーク領域における反応ジェットの拡がりを参考に熱電対を取り付ける。図 2.8-1~3 に熱電対の設置箇所を示す。図中の Z=0 断面は伝熱管軸方向の中心断面で注水位置に相当する。その中心位置(Z=0)を含めて、50mm ピッチ(Z=±50mm と Z=±100mm)で計 5 断面に取り付ける。熱電対の取付け方法は測温部が伝熱管壁に貼りつくようにステンレス製針金で固定する。また、ナトリウム-水反応による熱電対シースの破損を極力防ぐため、伝熱管の反応ジェットが当たる面の裏側に固定して反応ジェットが直接熱電対シースに接触しないようにした。

熱電対の配置及び本数については、Run-HT1 と Run-HT2,3 とでは若干異なる。HT-1 では SK 型(シ

ース付き K 型熱電対: シース径 1mm ϕ , クラス 2) 71 本、SR 型 (シース付き R 型熱電対: シース径 1mm ϕ , 0.25 級) 3 本の計 74 本をダミー管に取り付ける。HT-2 および HT-3 では SK 型 (HT-1 に同じ) 115 本、SR 型 (HT-1 に同じ) 3 本の計 118 本をダミー管に取り付ける。R 型熱電対は K 型熱電対に比べて温度測定範囲が広く、特に高温領域で K 型より数百度高いことから K 型と同一箇所 (代表的な場所 3 点) に比較用として取り付ける。ダミー管の仕様は以下の通り。

- ①材 質 : STBA24 (2-1/4Cr-1Mo 鋼) もんじゅ相当材 (付録 A 参照)
- ②外 径 : 31.8mm ϕ
- ③肉 厚 : 3.8mm (公称)
- ④長 さ : 260mm
- ⑤その他 : 変形 (膨出) しないように、両端を開放して管内に圧力を負荷しない構造とする

2.1.4.4. 熱伝達率測定管

反応ジェットにより特に温度が高くなると予想される場所 (HT-1,3: 図 2.6 に示す伝熱管 No.31 と No.34 の 2 本、HT-2: 図 2.6 に示す伝熱管 No.31 と No.35 の 2 本) に熱伝達率測定管を設置する。計測用熱電対の設置箇所は、伝熱管 No.31 については長さ方向中心位置を基準として左右に 50mm ピッチで 3 断面 \times 表裏で 6 箇所 (熱伝達率測定管 TYPE-I)、HT-1 及び HT-3 試験における伝熱管 No.34、HT-2 試験における伝熱管 No.35 は長さ方向の中心位置の 1 断面 \times 表裏で 2 箇所 (熱伝達率測定管 TYPE-II) に、それぞれの箇所について伝熱管断面方向に SK 型熱電対を 3 本ずつ取り付ける。図 2.7(2),(3) に構造図を、図 2.9 に熱伝達率測定管 TYPE-I の製作図を示す。ナトリウム側の温度を測定する熱電対は、ダミー管と異なり測温部を伝熱管壁から 2mm 浮かして設置している。伝熱管断面に埋め込んだ熱電対は先端を絞って細く (0.5mm) している。

熱伝達率測定管 TYPE-I (伝熱管 No.31) の仕様は以下の通り。

- ①材 質 : STBA24 (2-1/4Cr-1Mo 鋼) もんじゅ相当材
- ②外 径 : 31.8mm ϕ

- ③肉 厚 : 3.8mmt (公称)
- ④長 さ : 260mm
- ⑤その他 : 伝熱管の両端に気泡ポンプ用導水管、及び揚水管を接続

熱伝達率測定管 TYPE-II (HT-1,3:伝熱管 No.34、HT-2:伝熱管 No.35)の仕様は以下の通り。

- ①材 質 : STBA24(2-1/4Cr-1Mo 鋼)もんじゅ相当材
- ②外 径 : 31.8mm φ
- ③肉 厚 : 10.0mmt※(公称)
- ④長 さ : 260mm

※管外熱伝達率の測定に重点をおいたもので、肉厚を出来る限り厚くし、断面方向への熱移動距離を長くすることで測定精度を向上させることを目的とした。

2.2 試験条件

ナトリウム-水反応時の伝熱管に及ぼす熱的影響(反応ジェットの広がり、温度分布、伝熱管への熱伝達特性データ等)を確認することを目的に、Run-HT1～Run-HT3 では水リーク率をパラメータにした注水試験を行った。

試験条件のベースとしては、過去の SWAT-3 試験で高温ラプチャ発生の有無を最終確認した Run-19(もんじゅ蒸気発生器を対象)¹⁾での体系を、またナトリウム系及び水系条件に係わるものは、もんじゅ定格運転時における蒸気発生器上部からの水リークを想定して設定した。これらの条件は基本的には高温ラプチャ評価上厳しくなるよう設定したもので、例えば注水方向については反応ジェットが極力拡がるような体系としている。

表 2.2 に Run-HT1～Run-HT3 の試験条件表を、以下に主要条件の設定根拠を示す。

2.2.1. 水/蒸気条件

注水管から噴出させる水/蒸気条件は、表 2.2 に示すもんじゅ 100%定格運転時の蒸気発生器上部

に合わせる。注水管内の圧力をもんじゅ条件に合わせるためには、水加熱器本体の初期圧力条件は注水弁と注水管の流路断面変化による圧力降下等を見越して予め高めに設定する。その圧力設定値は、蒸気噴出予備試験と LEAP-BLOW コード⁴⁾による解析の結果から 16.1MPa・G とした。ただし、水加熱器が密閉であるため試験中は注水に伴い圧力は除々に降下する。また、水加熱器では圧力条件を合わせた飽和蒸気を作り、飽和温度以上に加熱された蒸気配管中を蒸気が通過するときの熱交換で過熱蒸気とする。

2.2.2. 水リーク率と注水時間

試験パラメータである水リーク率は注水ノズル孔径を変えることで調整する。その孔径は予め行った蒸気噴出試験と LEAP-BLOW コード⁴⁾による解析結果を基に決定する。水リーク率は、反応容器の大きさ、ナトリウム容量等から許容できる発生圧力、温度上昇を考慮し、150g/s、300g/s、600g/s とする。ナトリウム-水反応時の熱伝達率を測定するためには、安定した反応ジェットの色度分布を計測することが重要であり、注水開始初期の不安定な領域を除いて 10～20 秒程度必要であることから Run-HT1～Run-HT3 では 30 秒と設定した。

2.2.3. ナトリウム流動と注水方向

もんじゅ SG の管束部ではナトリウムは上から下方に流れる。そのナトリウム流動は反応ジェット形状に影響を与える一つの因子と考えられるが、前述したように SWAT-1R はナトリウム循環機能を持たないため、反応容器内のナトリウムを流動させることはできない。よって、ここでは静止ナトリウム中で試験を行う。

静止ナトリウム中で注水試験を行う場合は、ナトリウム流動がある場合に比べて注水方向の影響が小さいため、むしろ反応ジェットが内部シュラウドなどの障害物に接触しないよう試験装置側の事情を考慮して設定する。本装置で水リーク率数百 g/s オーダーの反応ジェットを水平方向に噴出させた場合、φ400mm の内部シュラウドに接触して反応ジェット形状に影響することから、注水方向として上下方向を選択するが、今回は基準ケースとして上向き噴出を実施した。

2.2.4. 反応容器カバーガス圧力

カバーガス圧力はもんじゅ SG に合わせ、基準条件として 0.1MPa・G とする。ただし、水リーク率に比べてカバーガス容積が小さいため設定圧力を保持することは難しいことから、カバーガス圧力制御運転により 0.05MPa・G から 0.1MPa・G の範囲内で制御する。

水リーク率が大きい場合は前述の範囲内にカバーガス圧力を保持することができなくなり、収納容器のラプチャディスク(設定圧:0.15MPa・D)が破裂する。その場合、カバーガス圧は急激に大気圧付近まで低下し、収納容器出口の大気放出管に設置される逆止弁により 0.015MPa・G 以内に制御される。

2.2.5. 熱伝達率測定管用の気泡ポンプガス流量

熱伝達率測定管 (No.31) は反応ジェットにより管外壁から加熱されて伝熱管の温度が上昇するとともに、反応ジェットが接する伝熱管外面ではウェスティングによりダメージを受ける。実機 SG では伝熱管内は水・蒸気が流れて冷却されるが、SWAT-1R では伝熱管内の水・蒸気流動は模擬することができない。熱伝達率測定を目的としている本測定管においては、内部の冷却条件を実機と同じくするために、反応ジェットによる温度の影響を受けない内部シュラウド外のナトリウムを冷却材としてを伝熱管内に導入して流動により冷却を行う。ナトリウムの流動方法として、気泡ポンプを採用する。図 2.10 にその構造図と気泡ポンプ概念図を示す。

伝熱管内のナトリウム流量は、以下で計算するように、管内に流入するナトリウム温度 470°C が伝熱管内部で反応ジェットによる加熱を受けても沸騰しない条件とする。

2.2.5.1. 管内熱伝達率

管内熱伝達率は、伝熱工学資料の液体金属の熱伝達率⁵⁾に記されている Subbotin の式、

$$Nu_d = 5 + 0.025 Pe_d^{0.8} \quad (\text{式 2.1})$$

Nu_d : ヌセルト数

Pe_d : ペクレ数

に基づく。計算条件は、ナトリウム温度 470℃、伝熱管サイズ 31.8mm ϕ \times 4.2mm、圧力 0.1MPa・G、その他の物性値はナトリウム温度 470℃のものを採用した。管内流速をパラメータとした計算結果を図 2.11 に示す。管内熱伝達率は低流量域でも約 15000 W/(m²・K) 程度と予想される。

2.2.5.2. ナトリウムおよび管壁の温度

試験時に 470℃で管内に流入したナトリウムは反応ジェットにより加熱されるため、流路方向に沿って温度が上昇する。同様に管壁の温度も上昇することになる。温度上昇は反応ジェットから伝熱管への熱流束に依存するため、SWAT-3 試験データ¹⁾の平均レベル 1.2 \times 10⁶ W/(m²・K) を用いて評価する。図 2.12 のように、伝熱管に熱流速 $q(z) = q_0$ が与えられている条件で、温度 T_0 (K)、流量 W (kg \cdot s⁻¹) の流入ナトリウムの温度変化を計算する。ナトリウムの比熱は C (J \cdot kg⁻¹・K⁻¹) とする。任意の z 軸上微小区間 dz でのエネルギー保存式は、

$$q \cdot dz = CW \cdot dT \quad (\text{式 2.2})$$

で表せるため、 $z = 0$ で $T = T_0$ の境界条件を与えると、上式を解いて以下となる。

$$qz = CW (T - T_0) \quad (\text{式 2.3})$$

$$T = \frac{qz}{CW} + T_0 \quad (\text{式 2.4})$$

管内の内径を D (m)、熱伝達率を h (W \cdot m⁻²・K⁻¹) とすると、管壁の温度 T_w は同様に以下の保存式

$$q \cdot dz = h \cdot \pi D dz \cdot (T_w - T) \quad (\text{式 2.5})$$

を解いて、

$$T_w = T + \frac{q}{h\pi D} \quad (\text{式 2.6})$$

で求められる。図 2.13 に示す計算結果によると、伝熱管の加熱域長さは 230mm 程度であるので、平均レベルでは 0.1m/s = 2.6 ℓ /min 以上の流量を確保できれば、試験体出口でナトリウムの沸点以下に抑えることができる。この結果を基に誤差や予測できない条件を考慮して、試験では余裕をみて 0.4m/s = 10 ℓ /min の管内流量を設定する。

2.2.5.3. 気泡ポンプの仕様とガス流量

前述した通り熱伝達率測定管内のナトリウム流量が 10ℓ/min になるよう気泡ポンプのガス流量を設定する。ここでは気泡ポンプの設計及び水を用いた揚水特性確認試験結果も合わせて述べる。

a) 気泡ポンプの概要と設計

図 2.10 に示す気泡ポンプの概念図では、簡易的に断面積の一樣な垂直管からなる気泡ポンプの例をあげている。液面より H_s だけ低い場所より管内に気泡を導入すると、揚水量 Q_ℓ ($m^3 \cdot s^{-1}$) の液が H_d の位置まで揚水される。 $H_s + H_d = L$ の部分が気液混合物の流動する揚水管であり、長さ L' の部分は液体のみが流れる導水管である。

一般的に揚水量 Q_ℓ と吐出揚程 H_d を設計条件として気泡ポンプの設計を進めることが多い。この場合の設計手順は以下の通りである⁶⁾。

① 揚水管長 L の決定

浸水率 σ (H_s / L) の好適な範囲は $\sigma > 0.5$ である。浸水率はポンプ効率に関連するものであるため、適当な値を決定する必要がある。

② 揚水管径 D の決定

$\sigma = 0.5 \sim 0.8$ における最高効率点のみかけの水流速 $w_{\ell 0}$ は、 $w_{\ell 0} = 0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}$ の範囲にある。これを目標にして管径を決定する。

③ 液体体積率 f_ℓ と揚水量 Q_ℓ ・供給気体量 Q_g との関係

(式 2.7) と (式 2.8) より、一定浸水率における揚水量と供給気体量との関係を求める。具体的には、浸水率と液体体積率を与えて、(式 2.7) より $w_{\ell 0}$ を計算する。次に $w_{g 0}$ を仮定して(式 2.8) より液体体積率を計算し、これを f'_ℓ とする。 $f_\ell = f'_\ell$ を満足する $w_{g 0}$ を見出して、揚水量や供給気体量を決定する。なお(式 2.8)は気体スラグの上昇速度が $w_g = 1.2 (w_{g 0} + w_{\ell 0}) + 0.35 (gD)^{0.5}$ で与えられるという Nicklin らの式⁷⁾を参考にしたものである。これは気泡ポンプの一般的な運転状態

では、揚水管内の流動様式がスラグ流となる場合が多いことによる。

$$\frac{w_{\ell 0}^2}{2gL} = \frac{\sigma - f_{\ell}}{c_1 f_{\ell}^{-2} + c_2 + c_3} \quad (\text{式 2.7})$$

$$f_{\ell} = 1 - \frac{w_{g0}}{1.2(w_{g0} + w_{\ell 0}) + 0.35(gD)^{0.5}} \quad (\text{式 2.8})$$

ここで、

$w_{\ell 0}$: 揚水管内のみかけの液流速 (m/s)

g : 重力加速度 (m^2/s)

f_{ℓ} : 揚水管内の平均液体体積率 (-)

c_1 : 係数1 = λL (-)

λ : 管摩擦係数 (-)

z : 指数 (-)

c_2 : 係数2 = $\lambda L' / D + \zeta$ (-)

ζ : 導水管の入口損失係数 (-)

c_3 : 係数3 = $2 \left(\frac{1}{f_{\ell} - 1} \right)$ (-)

w_{g0} : 揚水管内のみかけの気体流速 = Q_g / F (m/s)

F : 管断面積 (m^2)

なお(式 2.7)は、定常的な揚水状態に関して断面 1 と断面 2 (図 2.10 参照)との間に運動量方程式を適用して導出したものである。ここで特記すべきは、(式 2.7)には流体の物性値が含まれていない、即ち揚水管内のみかけの液流量 $w_{\ell 0}$ が流体の種類や状態に影響を受けないということである。上述の運動方程式を導く際には流体の密度が式に含まれていたが、気泡ポンプにおいては一般に γ_{ℓ} (液体の密度) \gg γ_g (気体の密度) であるから、 γ_{TP} (揚水管内の気液二相流体の密度) \doteq $\gamma_{\ell} f_{\ell}$ と近似でき、最終的に γ_{ℓ} が消えている。

b) 設計条件

SWAT-1R の試験では、測定管(材質:STBA24、寸法:260mm×31.8mm φ)を使用して反応ジェットから受けた熱流束(熱伝達率)を評価する。測定管が反応ジェットの熱的影響を受けないようにするためには、管内に 10ℓ/min 程度のナトリウムを流して冷却する必要がある。ここでは揚水量として本流量を得ることのできる気泡ポンプを設計する。以下に基本的な考えを示す。

① 設計方法は前述の通りとし、揚水管長 L と揚水管径 D については、本来ポンプ効率の観点から決定すべきものであるが、ここでは効率より所定の揚水量を得ることが第一目的であるため、SWAT-1R の反応容器内に気泡ポンプを設置する際の空間的制約等により決定する。

② 揚水管は測定管下流で垂直に接続し、上端開口はナトリウム中に浸漬させる。従って、浸漬率は1となる。また揚水管及び導水管内の流動がナトリウム-水反応による影響を受けないように、揚水管の開口部はナトリウム液面近傍に、一方導水管の開口部はシュラウドを貫通した近傍に設ける。このため、揚水管と導水管の合計長さは最大で約 2.1m となる。

③ 測定管内に十分なナトリウムを流入させるため、また気泡注入部の取付の簡便化の観点から、気泡ポンプの揚水管径及び導水管径はともに測定管径(31.8mm φ)以上とする。但し、反応容器内部シュラウド(400mm φ)内に設置するという空間的制約のために、1B(34.0mm φ)とする。

具体的な設計条件を表 2.3 に示す。ここでは、①揚水管長及び導水管長(両者の長さは2.1m で一定とした)、②液体体積率(即ちガス流量)をパラメータとして、その時の揚水量(ℓ/min)を求めた。なお、揚水管長の下限は暫定的に 0.5m とし、中間値 1.0m、上限値 1.4m をパラメータとして検討した。

c) 計算結果

気泡ポンプの揚水特性(ガス供給量と揚水量の関係)に関する計算結果を図 2.14 に示す。同図より、揚水量はガス供給量の増加に伴って急激に増加し、途中で最大値に達した後、次第に減少するという一般的な傾向が見られる。これは基本的に供給するガス流量の増加に伴い揚水管内のボイド率が增大し揚水起動力が増すが、ガス流量がある程度以上になると、揚水起動力の増加に

比べて水力学的損失の増加が著しくなるためである。また揚水管長 L を長くすると揚水起動力が増加するために、同じガス供給量に対する揚水量も増大することが分かる。なお、本体系において目標揚水量(10ℓ/min)を得るためには、気体供給量が 1ℓ/min 以下で十分と予想される。

d) 揚水確認用水試験結果

ここで採用した気泡ポンプの設計方法は、本来作動液体が水、また揚水管長範囲 4~42m とかなり長い条件で適用を検証されたものであるため、SWAT-1R でのナトリウム及び揚水管長約 1.4m の条件と異なる点がある。設計方法の適用性の確認及び SWAT-1R への反映を行うため、水とアルゴンガスを使用した予備試験(以下、水試験)による揚水特性を確認した。図 2.15 に水試験装置の概略図を示す。同装置では、水(常温)を使用すること、また内部の状況を観察する等の理由から、アクリルパイプを構造材として使用した。

試験条件を表 2.4 に示す。主なパラメータは揚水管長 L (アルゴンガス供給位置)である。また、揚水管内を上昇する気泡の条件(個数、形状等)の影響を見るために、揚水管長 L :1.4m の場合のみアルゴンガス供給ノズルの形状も変更した。その形状は、0.5 μ m の焼結金属フィルタ、1/4inch 配管の円孔ノズル、同配管の開口幅約 1mm のスリットノズルの三タイプとした。

以上のケースにおける揚水特性試験結果を前項に求めた計算結果と共に図 2.16 に示す。総じて試験結果は計算結果より小さく、2/3 程度である。これは前述の様に(式 2.8)は流動様式がスラグ流の場合の関係式であるが、水試験では低アルゴンガス供給量で目標揚水量 10ℓ/min を得るために、試験時の多くは気泡流であったことが原因の一つとして考えられる。これは図 2.16(c)の結果において、気泡流からスラグ流に遷移する付近:アルゴンガス流量 \approx 7ℓ/min で揚水特性変曲点が現れていることから類推できる。即ち、流況の違いによって揚水特性もが影響を受けた。しかし、図 2.16 (c)のアルゴンガス供給量領域($7 \leq w_{g0} \leq 15$ ℓ/min)の流況はスラグ流であるが、計算結果と比較すると小さいため別の要因も考えられる。本件については断言できないが、(式 2.7)を導く際に適用した運動量方程式の体系が試験装置のものと若干異なる(試験装置では揚水管の出口を液体中に浸漬させている)ことが一因と推定する。

次に試験結果同士を比較すると、同位置条件での再現性が高いことが分かる。また図 2.16 (a)より、ノズル形状を変えると生成される気泡の形状や個数が変わるにも係わらず、本試験ではアルゴンガス供給量が 4.2ℓ/min 以下と小さく、この範囲では流況に大差がなかったために、揚水特性結果もあまり変わらなかった。

e) 気泡ポンプの仕様

以上より決定した気泡ポンプの構造図を図 2.10 に示す。ここでは、反応容器外壁から計測する音響計への影響を配慮して、アルゴンガス供給位置を極力注水点より離し、且つより少ないアルゴンガス供給量で目標揚水量を得ることのできる揚水管長 1.0m を採用した。またアルゴンガス供給ノズルの形状は、揚水特性にほとんど影響を及ぼさないという結果を得たが、ナトリウムの逆流や閉塞を懸念してスリットノズルとした。図 2.16 (b)より揚水管長 1.0m の場合において常温の水 ($\rho = 996.62\text{kg/m}^3$) を 10ℓ/min 揚水するためには、アルゴンガス供給量を約 1ℓ/min とすればよいことが分かる。SWAT-1R 試験時には、470°C のナトリウム ($\rho = 839.40\text{kg/m}^3$) を 10ℓ/min 流すことになるが、前述の様に、揚水管内のみかけの液流量は流体の種類や状態に影響を受けないので、水試験結果をそのまま利用して、揚水管内 (470°C) のアルゴンガス流量は約 1ℓ/min で良いことになる。アルゴンガス流量計 (FI401) はガス系室に設置されているため温度 (室温) 補正する必要があり、室温を 10°C と仮定するとアルゴンガス供給量は 0.38ℓ/min となる。

2.3 試験方法

試験では、ナトリウム系及び水/蒸気系を試験条件に基づいて昇温、昇圧し、水加熱器内の蒸気を反応容器内の注水管のノズル部よりナトリウム中へ噴出し、生成したナトリウム-水反応ジェットの熱的挙動等を測定する。熱伝達率測定管の 1 本 (伝熱管 No.31) は、管内に反応容器下部のシユラウド外部のナトリウムを気泡ポンプにより流して冷却する。これらの操作は、SWAT-1R の監視・制御装置 (astnex) 及び制御盤を使用して行う。

注水停止条件は、①試験条件で定められた注水時間、②総注水量 (水加熱器液面計指示値)、③

反応容器外壁温度「高」の3項目で、いずれかを満たした時点で、インターロック機能が働き自動的に注水停止となる。

試験時の反応容器カバーガス圧力は、一定制御(0.05~0.1MPa・G)するために反応容器と収納容器を結ぶ放出系バイパス配管(NV201ライン)を導通させ、収納容器の水素放出バイパス弁(NV202ライン)の開閉によりコントロールする。また、注水率が大きく圧力制御が困難な場合は、反応容器と収納容器に設置したそれぞれのラプチャディスク(反転ナイフ型)が破裂し、圧力を大気に開放する。その設定圧力は、反応容器(RD201)が0.3MPa・d、収納容器(RD202)が0.15MPa・dである。dはラプチャディスクにかかる差圧を意味する。

収納容器で分離された水素ガスは、点火器により燃焼処理された後に大気に放出される。

試験終了後は、反応容器や収納容器内のナトリウムをダンプタンクヘッドレンし、反応容器より試験体を取り外し解体・洗浄した後、ナトリウム-水反応ジェットから受けた熱的影響調査(材料検査)を実施する。

2.4 測定項目

反応ジェットの熱的特性(ナトリウム側熱伝達率の測定、反応ジェットの拡がり・温度分布)を把握するために必要な試験データを以下に整理する。特にナトリウム側熱伝達率(厳密には熱流束)の測定が第一目的であるため、主要な測定項目は熱電対による温度測定となる。

なお、装置の運転計装に係わる測定については、ここでは除外する。

2.4.1. 温度

反応容器内の注水部付近を重点的に熱電対を設置する。設置場所や本数に関しては、過去の試験データよりジェットの拡がりを想定したうえで決定した。詳細については「2.1.4 試験体構造」に述べた。

管外熱伝達率については、図 2.9 に示す熱伝達率測定管の内外(内側:2点、外側:1点)に設置した熱電対による温度データを使用して算出する。

気泡ポンプにより内部にナトリウムを流す熱伝達率測定管(伝熱管 No.31)については、出入口部に

熱電対(各1本)を取り付け、管内のナトリウム温度を測定する。

2.4.2. 圧力

ナトリウム-水反応によって発生する圧力上昇に関して、反応容器及び収納容器のカバーガス部において測定する(運転計装用の圧力計による)。

2.4.3. 材料検査

伝熱管が受けた熱的影響を評価するため、顕微鏡により金属組織を観察する。金属組織から温度を推定するために、同じ伝熱管材に対して温度履歴を加えるシミュレーション試験(フォーマスタ試験)を行い、組織の基準サンプルを予め用意した。これらの基準サンプルと試験で使用した伝熱管の金相を比較することにより伝熱管の受けた熱的影響を評価した。

3. 試験結果

3.1 注水率

試験における注水率は、①水加熱器の液面計出力変化により求める方法と、②水加熱器への試験前の給水量と試験後の残水量の差より求める方法の2つの方法により求めた。①の液面計出力変化から求める方法については減圧沸騰による液面の変動や容器、液面計の熱膨張などにより不確定な因子はあるが注水時間中の注水率経時変化を求めることができる。図 3.1 に水加熱器液面計の出力変化から求めた Run-HT-1～HT-3 の試験時間中の注水率時間変化を示すが、ほぼ一定の注水率で推移していることが確認できる。②の方法では、試験時間の平均注水率を水加熱器への試験前の給水量と試験後の残水量の差を注水時間で除することにより求めることができる。表 3.1 にRun-HT-1～HT-3 の平均注水率の算出に使用した値を示す。以上の結果を総合的に判断して平均注水率は、Run-HT-1 で 158g/s, HT-2 で 337g/s, HT-3 で 542g/s であった。

3.2 反応容器カバーガス圧力

注水後、ナトリウム-水反応により上昇する反応容器カバーガス圧力に対しては 2.3 項に記した圧力制御を行った。各試験中における反応容器カバーガス圧力の時間変化を図 3.2～図 3.4 の試験データ中(RV ガス圧力:PI101,RT ガス圧力:PI201)に示す。HT-1 試験では、注水開始から注水中、注水後にかけて水素バイパス放出弁 NV202 の制御により 0.05～0.10 MPa・G の範囲で推移し、収納容器のラプチャディスク RD202(設定圧:0.15MPa・d)が破裂することはなかった。HT-2 試験での反応容器カバーガス圧力は、注水開始から約 0.18MPa・G まで急激に上昇し、約 5 秒後には RD202 が破裂して急激に降下している。注水開始から 5 秒後以降 30 秒までの期間における圧力変動は、収納容器出口の大気放出管に取り付けられている逆止弁の開閉に連動している。HT-3 試験における反応容器カバーガス圧力の挙動は HT-2 試験と同様であるが、注水率の違いから、RD202 の破裂時刻が注水開始から約 2 秒後と早まり、最高到達の圧力も約 0.3MPa・G まで上昇している。また RD202 破裂後の圧力変動も HT-2 と比較すると高めで推移している。

3.3 装置系統の温度変化

図 3.2～図 3.4 の試験データにおいて水加熱器ガス温度:T-1 及び水加熱器液中温度:T-2 は注水開始とともに降下している。これは水加熱器の電気加熱が停止した状態で、水加熱器圧力:P-1 が降下することにより液相が減圧沸騰して T-2 温度が降下するためで、結果として T-1 の温度が降下する。注水中、注水直後などの過渡時においては T-1 と T-2 の間に温度差が生じているが時間が経ち平衡状態に達すると温度差はなくなる。水系配管温度:TE505 及び TE506 は注水前まで予熱ヒータにより約 400°C に予熱されているが注水開始とともに流れる蒸気により冷却され徐々に降下する。しかし、蒸気温度までは降下していない。

HT-2 と HT-3 試験では放出系バイパス温度:TIC216 を収録している。本ラインは、反応容器と反応生成物収納容器を結ぶラインであるが、HT-2 では予熱温度 400°C から約 40°C 上昇しているのに対して HT-3 では約 150°C 上昇しており注水率による違いが、圧力変化だけではなく放出系への熱移行においても現れている。また反応容器内のナトリウム温度 TI101, TI104 についても注水率が大きくなるにつれ温度上昇も大きくなっている。反応容器内ガス部温度:TI108 は HT-1 においてはナトリウム部と温度差があるのに対して HT-2、HT-3 において注水時間中の時間においては温度差がない。これは、ナトリウムと高圧蒸気の激しい反応の結果、ガス空間までナトリウムが飛ばされているためと考えられる。

3.4 反応ジェットの温度変化

反応ジェットの空間温度分布推移(注水ノズル孔直上面(Z=0面))について、図 3.5～図 3.7 に示す。これらの図は、反応温度分布の平均的な傾向を把握するため、試験体内に設置したナトリウム側の熱電対の空間配置とその指示の3秒平均値(例:0秒のデータ=0秒±1.5秒間の算術平均)からコンター図を作成したものである。注水開始から一定時間後に(HT-1:3秒、HT-2,HT-3:6秒)にはほぼ反応ジェットの高温領域は定在化し、注水終了までその領域が大きく変化することはないが注水率が大きい程高温領域は広がっている。

HT-1～HT-3 における反応ジェットの最高温度の違いを、熱伝達率測定管に取付けられた測温部が 2mm ナトリウム側に浮かしている熱電対(8本/1試験体)で比較した。

熱電対の生データは、その指示値が振動していることから 3 秒平均化処理を行うことにより高周波成分を除去し現実的な最高温度⁸⁾⁹⁾を求めた。それぞれの試験において最高温度を示した熱電対の時間推移を図 3.8 に示す。HT-2 では熱電対指示の生データ挙動から約 8 秒後に破損したと判断されることから 3 秒平均で影響の生じる 6.5 秒後以降のデータは点線で示している。最高温度は HT-1 で 1161℃、HT-2 で 1013℃、HT-3 で 1164℃となった。HT-2 の最高温度は HT-1, HT-3 と比較して低いがこれは反応ジェットが最高温度に達する前に熱電対が破損しているためと考える。その後の近傍熱電対の挙動から推測すると同程度まで上昇していたものと推定する。これらの結果から本試験範囲において最高温度に関する明らかな注水率依存性はなかった。

4. 試験体材料検査

4.1 検査方法概要

ナトリウム-水反応により伝熱管の受けた熱的影響を評価するため、試験に使用した伝熱管について反応ジェットの影響を受けたと考えられる部位(テストピース)28点を選定して材料検査を実施した。材料検査の方法としては、1)顕微鏡、走査型電子顕微鏡 SEM による金属組織観察(金相観察)と2)断面の硬さを測定した。一方、これらの観察、測定の結果から伝熱管が試験で受けた熱的影響を推定するためフォーマスタ試験を実施した。フォーマスタ試験では、試験で使用した伝熱管と同一仕様の未使用材にナトリウム-水反応試験時の温度履歴を模擬して与える。そのフォーマスタ試験材の金相観察、硬度検査結果と与えた温度履歴とを対応づけて熱的影響の標準化を行った。そして、試験に使用した伝熱管の金相観察、硬度検査結果と標準化されたフォーマスタ試験材の結果とを比較することによりその熱的影響を評価した。

4.2 伝熱管仕様

伝熱管の仕様については「2.1 試験装置」に示す通りである。試験に使用した伝熱管の検査成績書を「付録 A 伝熱管検査成績書」に示す。

検査成績書によると焼きならし(920℃×10分)後、焼き戻し(760℃×30分)を実施している。

4.3 対象伝熱管テストピースの選定

選定にあたって以下の3つを基準とした。各 Run において2本ある熱伝達率測定管については、伝熱管内部に埋め込み熱電対があり直接その指示値と材料検査結果を比較することができる。したがって、一つ目は、各試験の熱伝達率測定管から少なくとも1点ずつ選び、材料検査結果と熱電対指示値の対応をとるものとした。二つ目は、近傍のナトリウムの温度が一定温度で安定した挙動を示している部位を選定した。熱伝達率測定管以外の伝熱管に取付けられた熱電対はその測温部を伝熱管表面に接触させるように配置したものである。したがって、その指示値は概ねナトリウム側の温度を示していると思われる。よって、その場所での伝熱管の材料検査結果とナトリウム側の温度である熱電対の指示値を比較することとした。三つ目は、各 Run において観測されたウェステージ部位における温度データを取得す

るため材料検査を実施するものである。近傍に熱電対が配置されており、材料検査結果の評価がしやすい場所を選定した。選定した伝熱管テストピースの Run No.、設置場所、対応する T/C または近傍の T/C を表 4.1 に記す。また、この表に記したテストピースに加え、No.0 として未使用の伝熱管についても材料検査を実施した。

4.4 材料検査方法

4.4.1. 硬度検査

材料検査を実施する部位で伝熱管長手方向に垂直に切断し、切断面での伝熱管外表面部と伝熱管厚み中央部の断面硬さをビッカース硬度計で測定した。試験荷重 Hv9.8N で各試料につき 3 点を調査した。

4.4.2. 金相観察

硬度検査と同様に対象箇所切断面での伝熱管外表面部と伝熱管厚み中央部を観察した。顕微鏡で 500 倍、走査型電子顕微鏡 SEM で 10000 倍の観察を実施した。

4.5 フォーマスタ試験

4.5.1. 伝熱管材料変態点

フォーマスタ試験により熱的影響を標準化するにあたり、保持温度を決定する必要があるが、金相上の特徴の現れる温度を基準として観察することにより標準化を行うこととした。したがって同一材料を使用して変態点調査をおこなった。結果を図 4.1 及び以下に示す。

Ac1:768°C、Ac3:890°C、Ar3:819°C、ArI:749°C、Bu:629°C

この結果からフォーマスタ試験を表 4.2 に示す条件にて実施した。

4.5.2. 熱的影響の標準化

フォーマスタ試験材の材料検査を行い、材料が受けた熱的影響の標準化を行った。

4.5.2.1. フォーマスタ試験材の硬度試験結果

それぞれのフォーマスタ試験条件での試験材の硬度検査結果を図 4.2 に示す。

4.5.2.1.1. 降温速度の遅い条件(条件 1～条件8)における硬度

試料硬度は、保持温度の高い条件 1～2 (1300,1000℃) で Hv300 程度、条件 3～6 (940,900,829,768℃) で保持温度が低くなるに従って Hv260 程度から Hv170 程度まで下がる。条件 7～8 (758,650℃) の Ac1 より低い温度では未使用管 No.0 と同じく Hv150 程度である。

4.5.2.1.2. 降温速度の速い条件(条件 9～条件 16)における硬度

試料硬度は、保持温度が Ac3 以上の温度である条件 9～12 (1300,1000,940,900℃) ではほぼ変化がなく Hv330 程度である。条件 13 (829℃) では降温速度が遅い場合と比較して硬度が高くなっている。条件 14 (768℃) では逆に降温速度が遅い場合と比較して硬度が低くなっている。条件 15～16 (758,650℃) の Ac1 より低い温度では条件 7～8 と同じく Hv150 程度と未使用管 No.0 と同じである。

4.5.2.1.3. 断面硬さと保持温度の関係

断面硬さと保持温度との関係を図 4.3 に示す。降温速度の影響はあるものの概ね保持温度が高くなるにつれ硬度が高くなっているナトリウム-水反応における高温部の温度は注水終了とともに急激に降下することからテストピースを評価する場合には降温速度の速いものを基準とする。一方、反応容器内全体の平均ナトリウム温度と近い低温部については降温速度の遅いものを基準とする。

4.5.2.2. フォーマスタ試験材の金相観察結果

写真 4.1-1～6 に顕微鏡による金相写真、写真 4.2-1～16 に SEM による金相写真を示す。

4.5.2.2.1. 降温速度の遅い条件(条件 1～条件8)における金相

顕微鏡による金相写真によると保持温度の高い条件 1 ではベーナイト(一部マルテンサイト)であるが、条件 2～4 の Ac3 に近くなる条件ではフェライトが析出している。Ac1 と Ac3 の間の条件である条件 5～6 は温度が高い条件になるにつれベーナイト(パーライト)が分解してきており、ベーナイト(パーライト)・

フェライト組織の輪郭が不明瞭となっている。Ac1 以下の条件である条件 7～8 はベーナイト・フェライト (パーライト・フェライト) 組織がはっきりと観察される。SEM による観察結果も顕微鏡による組織観察結果と同様である。

4.5.2.2.2. 降温速度の速い条件(条件 9～条件 16)における金相

保持温度の高い条件 9 は条件 1 と同じくベーナイト(一部マルテンサイト)である。条件 10～12 の Ac3 以上の保持温度ではフェライトはほとんど析出しておらず、マルテンサイトが観察される。Ac13～16 では条件 5～8 とほぼ同じ結果である。また、SEM による観察結果も顕微鏡による観察結果と同様である。

4.5.2.2.3. 断面硬さと保持温度の関係

試験において注水終了後の反応ジェットの温度降下は降温速度の速い条件に近いものと考えられる。反応ジェットに直接さらされない伝熱管の温度降下についてはフォーマスタ試験における降温速度の遅い条件に近いものと考えられる。それぞれの伝熱管の試験中の温度推移を確認しながら、テストピースの評価を行う。全般的な共通事項として、Ac1 点以下の温度の低い領域については金相の違いを確認することが出来ないため Ac1 点以下(768℃以下)という評価となる。Ac1 点から Ac3 点についてはベーナイトの分解の程度から受けた熱的影響の度合いを評価することができる。Ac3 点以上についても、ベーナイトの分解の程度およびマルテンサイトの形成の度合いから同様に評価することができる。

4.6 テストピースの受けた熱的影響

4.6.1. 硬度検査結果

ビッカース硬度計を用い、試験荷重 Hv9.8N でテストピースの管外表面及び中央部についてそれぞれ3点ずつ断面硬さを検査した結果を図 4.4 に示す。未使用管の No.0 は硬さ Hv150 程度であるが、試験に使用した伝熱管は硬さ Hv300 を超えるものもある。

4.6.2. 金相観察結果

写真 4.3-1～-29 にテストピースの顕微鏡による金相写真を示す。対象箇所の外表面と厚さ中央部を観察した。No.0 は未使用材であるが基本的にベーナイト(パーライト)・フェライト組織である。テストピースの組織は、このベーナイト(パーライト)・フェライト組織のものもあるがベーナイト(パーライト)の炭化物が分解しているものや、さらにはマルテンサイトが発生しているものなどが観察される。SEM による金相観察の結果からも顕微鏡によるものと同様の結果が得られた。

4.6.3. テストピースの受けた熱的影響の推定

テストピースの受けた熱的影響を4.5.2項で標準化した基準に従い推定を実施した。硬度検査から推定した熱的影響評価結果と金相観察から推定したものが一致しない場合もあるが、硬度検査結果は検査場所によりばらつきが大きいことから総合的な評価の上では参考とし、金相観察結果を優先して評価を行った。評価結果を表 4.3 に示す。

HT-1,H-2 試験では埋め込み熱電対と直接比較することができるテストピース No.1,3, No.10～No.16 においては金相観察の結果から推定した熱的影響は熱電対により得られた温度推移の平均的な値と一致しており妥当な結果であった。HT-3 における同様の条件のテストピース No.19,20,23,24, No.26 のうち No.19, 20,23 及び 24 については埋め込んだ熱電対が注水途中で破損していることから直接比較することはできない。そこで破損前までの埋め込み熱電対の温度推移とナトリウム側の温度推移との関係から、破損していないナトリウム側の温度推移をもとに破損後の埋め込み熱電対の温度推移を推定すると到達温度は金相観察の結果から推定した熱的影響と同等と推定される。ただし、No.26 については、伝熱管の厚みが 10mm と厚肉であることから熱の伝導が1次元となっておらず、表面を観察した金相と 0.7mm埋め込んだ熱電対との間に違いが現れているものと思われる。次に近傍のナトリウムの温度が一定温度で安定した挙動を示している部位 No.6, No.7, No.17, No.25, No.28 の金相観察の結果から推定された熱的影響はその熱電対指示値と比較して小さくなっている。またその差は注水管に近い中心部ほど大きい。No.28 のように熱電対指示値で 1100℃を超えるような反応ジェット下にさらされていても伝熱管材料の受けた熱的影響としてはフォーマスタ試験における 900℃相当である。またウェス

ダメージを受けた部位 No.2, 4,5,8,9,18,22,27 について金相観察を実施した結果、受けた熱的影響は800℃～900℃程度であった。

5. 管外熱伝達率

5.1 熱伝達率算出方法

管外熱伝達率は図 2.6 に示すように 1 試験体内に 2 本組み込まれている熱伝達率測定用伝熱管内に埋め込まれた熱電対と表面に取りつけた熱電対の温度計測データ(3点)から求める。算出に関しては、入熱側の反応ジェットが定常状態ではないことから非定常状態を考慮した管外熱伝達率を算出する。

試験により測定しているデータは上述したように反応ジェット温度 T_{Na} と伝熱管内埋め込み熱電対内側温度 T_1 、伝熱管内埋め込み熱電対外側温度 T_2 の 3 点である。時刻 t における反応ジェットから伝熱管への管外熱伝達率 $h_{(t)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$ は、反応ジェットから伝熱管の外表面に単位面積 $[m^2]$ 当り単位時間 $[s]$ に伝わる熱量すなわち熱流束 $q_{4(t)} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ を反応ジェットの温度 $T_{Na(t)} [K]$ と伝熱管外表面温度 $T_{3(t)} [K]$ の差で除することにより求めることができる。

$$h_{(t)} = \frac{q_{4(t)}}{T_{3(t)} - T_{Na(t)}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (\text{式 5.1})$$

ここで、 $T_{Na} [K]$ は熱電対の測定温度データを使用し、 $T_3 [K]$ および $q_4 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ は伝熱管内埋め込み熱電対の測定データ T_1 、 T_2 とその測定位置および伝熱管の物性値から熱伝導方程式を解いて算出した値を使用する。

一般に、密度 $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ 、 x, y, z 方向への熱伝導率 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ 、比熱を $C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$ 、内部発熱を $w \left[\frac{W}{m^3} \right]$ とし熱伝導方程式は以下のように表される。¹⁰⁾

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{C_p \cdot \rho} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + w \right\} \quad (\text{式 5.2})$$

ここで、伝熱管は等方性物質であることから $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda$ とし温度依存は考慮せず一定と仮定する。また伝熱管の内部発熱はないことから $w = 0$ とすると(式 5.2)は以下になる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (\text{式 5.3})$$

ここで温度伝導率 α

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad (\text{式 5.4})$$

を導入して(式 5.3)に代入すると

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (\text{式 5.5})$$

となる。上式を円筒座標系に変換すると以下のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (\text{式 5.6})$$

ここで、温度の分布が軸対象である無限円筒での問題(1次元の熱伝導)と仮定して(式 5.6)の第2項、第3項を省略し以下のように表す。図 5.1 に評価モデル図を示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} \quad (\text{式 5.7})$$

ここで、 $R = \log_e r$ と変数変換を行う。(5-7)式に $r = e^R, \partial r = e^R \cdot \partial R$ を代入して

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot \frac{1}{e^R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(e^R \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right) \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \cdot e^{-2R} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} \end{aligned} \quad (\text{式 5.8})$$

となる。

この時間に関して連続的な微分方程式(6)を微小な時間 Δt の間隔に分割し、空間の差分 $\Delta_i = R_i - R_{i-1} = \log_e r_i - \log_e r_{i-1}$ ($i=1,2,3$) を定義して数値的に以下のように求める。ここで微小時間 Δt はサンプリング周期をとる。

<(式 5.8)の左辺>

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i(t+\Delta t)} - T_{i(t-\Delta t)}}{\Delta t} \quad (i=1,2,3) \quad (\text{式 5.9})$$

< (式 5.8) の右辺 >

$$\alpha \cdot e^{-2R} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial R^2} = \alpha \cdot e^{-2R} \cdot \frac{\left(\frac{T_{i+1(t)} - T_{i(t)}}{\Delta_{i+1}} \right) - \left(\frac{T_{i(t)} - T_{i-1(t)}}{\Delta_i} \right)}{\left(\frac{\Delta_i + \Delta_{i+1}}{2} \right)} \quad (i=1,2) \quad (\text{式 5.10})$$

(式 5.9)、(式 5.10) を (式 5.8) に代入することにより伝熱管外表面温度 $T_3 [K]$ を以下のように求め

ることができる。

$$\begin{aligned} \frac{T_{2(t+\Delta t)} - T_{2(t-\Delta t)}}{\Delta t} &= \alpha \cdot e^{-2R_2} \cdot \frac{\left(\frac{T_{3(t)} - T_{2(t)}}{\Delta_3} \right) - \left(\frac{T_{2(t)} - T_{1(t)}}{\Delta_2} \right)}{\left(\frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} \right)} \\ \left(\frac{T_{3(t)} - T_{2(t)}}{\Delta_3} \right) &= \frac{\left(\frac{T_{2(t+\Delta t)} - T_{2(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right) \cdot \left(\frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} \right)}{\alpha \cdot e^{-2R_2}} + \left(\frac{T_{2(t)} - T_{1(t)}}{\Delta_2} \right) \\ T_{3(t)} - T_{2(t)} &= \frac{\left(\frac{T_{2(t+\Delta t)} - T_{2(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right) \cdot \left(\frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} \right) \cdot \Delta_3}{\alpha \cdot e^{-2R_2}} + \frac{\Delta_3}{\Delta_2} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) \\ T_{3(t)} &= T_{2(t)} + \frac{\left(\frac{T_{2(t+\Delta t)} - T_{2(t-\Delta t)}}{\Delta t} \right) \cdot (\Delta_2 + \Delta_3) \cdot \Delta_3}{2 \cdot \alpha \cdot e^{-2R_2}} + \frac{\Delta_3}{\Delta_2} (T_{2(t)} - T_{1(t)}) \end{aligned} \quad (\text{式 5.11})$$

ここで熱流束は

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\lambda \cdot e^{-R} \frac{\partial T}{\partial R} \quad (\text{式 5.12})$$

で与えられることから $R'_i = \frac{R_i + R_{i-1}}{2}$ における熱流束 $q_{i(t)}$ を以下のように求める。

$$q_{i(t)} = -\lambda \cdot e^{-R'_i} \frac{T_{i(t)} - T_{i-1(t)}}{\Delta_3} \quad (\text{式 5.13})$$

$q_{3(t)}$ と $q_{2(t)}$ から外挿して伝熱管壁面での熱流束 $q_{4(t)}$ を求め、(式 5.1) に代入することにより伝熱管

害壁面でのナトリウム側から反応ジェットから伝熱管への管外熱伝達率 $h_{(t)}$ を求める。

5.2 管外熱伝達率の算出用データ

管外熱伝達率の算出用データは1試験体にある2本ある熱伝達率測定管に取付けられた熱電対の温度データを用いる。5.1 項の方法で算出した熱流束および熱伝達率のサンプルを図 5.2-1~3 に示す。管外熱伝達率の評価については別途報告するが、評価に使用する温度データについては反応ジェット側温度振動や、埋め込み熱電対の破損に注意が必要である。埋め込み熱電対はその製作過程により埋め込み部のシースがうすくなっており反応ジェットにより損傷しやすい。埋め込み熱電対が健全な時、その温度推移は伝熱管温度を示しているため熱伝導に支配されており滑らかである。しかし、反応ジェットにより熱電対が損傷すると接点がナトリウム側に移動して、温度指示値が激しく振動する。その場合はもはや温度指示値は伝熱管温度を指示しておらず、熱伝達率を求めることはできない。したがってこれらの温度挙動を確認しながら、各試験において有効な熱伝達率を算出する。

6. まとめ

6.1 反応ジェットの熱的性質

反応ジェットの熱的性質を特徴づけるものとしてその温度と拡がり挙動があげられる。それぞれについて、試験体に設置した熱電対の温度データから以下の結果が得られた。

6.1.1. 反応ジェットの最高温度

反応ジェットの最高温度は、HT-1 で 1161°C、HT-2 で 1013°C、HT-3 で 1164°Cとなり今回パラメータとした注水率 HT-1: 158.0g/s, HT-2:337g/s, HT-3:542g/s の範囲内において注水率による違いを確認することができなかった。HT-2 において観測された最高温度が低いのは熱電対が注水中に破損したためであり、その後の近傍熱電対の温度上昇から推測して HT-1,HT-3 と同等の最高温度まで上昇していたものと推測される。

6.1.2. 反応ジェットの拡がり挙動について

試験体の伝熱管群には、反応ジェットの拡がり挙動を測定するために熱電対を数多く配置している。これらの熱電対の温度データをもとに反応ジェットの拡がり挙動を各注水率の試験で比較した結果、各試験とも注水開始から 10 秒以内で反応ジェットは定在化し、その拡がりには注水率が大きくなるほど大きくなることが確認された。

6.2 伝熱管の受けた熱的影響

伝熱管は高温の反応ジェットにより熱的影響をうける。伝熱管の材料強度は温度に依存することから反応ジェットから受ける熱的影響評価は重要となる。本試験では伝熱管の受けた熱的影響を評価するため以下の2つのアプローチを実施した。

6.2.1. 熱伝達率測定に必要な温度データの収集

反応ジェットから伝熱管への熱伝達を測定するため、伝熱管壁内に熱電対を埋め込んだ熱伝達率測定管を試験体内に設置し温度データを取得した。熱伝達率の評価結果については別途報告予定で

ある。

6.2.2. 材料検査による伝熱管の受けた熱的影響評価

各試験で反応ジェットにさらされた伝熱管の金相観察と硬度検査を行い、それらの結果とフォーマス試験で標準化された基準試験材の結果とを比較することによりその熱的影響を評価した。

材料検査から評価した伝熱管の受けた熱的影響は熱伝達率測定管に埋め込んだ熱電対の温度データと比較しても妥当な結果である。このことから、熱伝達率測定管に埋め込んだ温度データが伝熱管壁温度を示していることが確認されるとともに、熱電対の設置されていない場所の伝熱管の受けた熱的影響を推定することができた。その結果、1100℃を超える高温の反応ジェットにさらされたと思われる場所においても、伝熱管の受けた熱的影響は900℃に20秒間保持された熱的影響とほぼ同等であることが確認できた。

7. 謝辞

本報告書の執筆にあたり多くの方々のご協力を頂きました。試験の実施、データの収録にあたっては熱化学Grの川田耕嗣チームリーダーおよび鈴木和右氏、中根啓二氏をはじめとする東興機械工業㈱の皆様のご協力を頂きました。また、試験データの整理では、大野修司チームリーダーをはじめとする原子力システム㈱の小野功氏、豊原大輔氏にご協力を頂きました。また、全体のアドバイザーとして浜田広次サブグループリーダーおよび宮原信哉グループリーダーにご助言をいただきました。この場を借りまして謝意を表します。

参考文献

- 1) 田辺裕美、渡辺智夫、「蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) による破損伝播試験 (V)」、PNC TN9410 86-104(1986.9)
- 2) 田辺裕美、錦見正和、他、「高速炉蒸気発生器伝熱管の中リーク・ウェステージ破損試験」、PNC TN941 80-27(1980.2)
- 3) 田辺裕美、佐藤稔、他、「蒸気発生器安全性総合試験装置 (SWAT-3) による破損伝播試験 (I)」、PNC TN941 81-05(1981.1)
- 4) 糸岡聡、岡部綾夫、他、「LEAP コード用ブローダウンコードの改良と検証 -50MWtSG ブローダウン試験データとの比較-」、PNC TJ9124 97-006 (1997.3)
- 5) 日本機会学会、「伝熱工学資料 改訂 4 版」、pp106～107、(1986)
- 6) 轟一郎、他、「気ほうポンプの揚水特性」、日本機会学会論文集(第2部)、38巻312号(昭47.8)、p.2085～p.2091
- 7) Nicklin, D.J., et al., Trans. Inst. Chem. Engr., 40(1962), 61.
- 8) 田辺裕美、和田雄作、他「蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ型破損評価手法の整備と適用」、PNC TN9410 98-029(1998.6)
- 9) 三宅収、浜田広次、他「蒸気発生器伝熱管の高温ラプチャ型破損評価手法の整備と適用(Ⅲ)」、PNC TN9400 2001-130(2002.3)
- 10) 庄司正弘著、「伝熱工学」、東京大学出版会、初版、p.13～p.119 (1995)

表 2.1 機器主要目

機器名	単位	反応容器 (RV)	ダンプタンク (DT)	反応生成物 収納容器 (RT)	水加熱器 (WH)
型 式	—	縦置円筒	横置円筒	縦置円筒	縦置円筒
最高使用圧力	MPa-G (kg/cm ² G)	1.97 (20.0)	0.971 (9.9)	0.971 (9.9)	21.57 (220)
最高使用温度	℃	580	555	555	450
胴径(内径)	mm	500	1000	1000	209.4
全 長	mm	3334	1732	2257	2350
胴 厚 さ	mm	12	12	12	29
材 質	—	SUS304	SUS304	SUS304	SFVAF11A
内 容 積	m ³	0.63	1.23	1.62	0.07
ナトリウム インベントリ	m ³	0.4	0.8	—	—
備 考	—	第二種 圧力容器	第二種 圧力容器	第二種 圧力容器	第一種 圧力容器

表 2.2 試験条件表

		Run-HT1	Run-HT2	Run-HT3
試験体	型式	ユニット型 (直管 43 本で管束部を模擬)	←	←
	伝熱管材質	STBA24 (2-1/4Cr-1Mo 鋼)	←	←
	伝熱管寸法 (mm)	φ31.8×3.8t (公称) ×260L	←	←
	注水ノズル孔径	3.7mmφ	5.8mmφ	8.0mmφ
	注水配管径 (mm)	φ21.7×2.8t	←	φ17.3×2.3t
水系条件	水リーク率	0.15 kg/s	0.3 kg/s	0.6 kg/s
	水リーク条件	飽和蒸気	←	←
	注水方向	真上	←	←
	初期水加熱器圧力	16.1 MPa・G	←	←
	初期水加熱器温度	348 °C	←	←
	注水時間	30 s	←	←
Na系条件	初期 Na 温度	470 °C	←	←
	初期カバーガス圧力 ^{※1}	0.08 MPa・G	←	←
	気泡ポンプ配管径	φ34.0×2.3t	←	←
	気泡ポンプ用ガス供給流量	0.38 l/min	←	←

※1 : 実験運転時のカバーガス圧力制御範囲は 0.05~0.1MPa・G

○ 参考 (もんじゅ定格運転時の蒸発器上部を対象)

- ・ ナトリウム温度 : 496°C
- ・ カバーガス圧力 : 0.1 MPa・G
- ・ 水/蒸気温度 : 470°C
- ・ 水/蒸気圧力 : 14.7 MPa・G

表 2.3 気泡ポンプの設計条件

記号	項目	単位	ケース1	ケース2	ケース3	備考
σ	浸水率	-	1	1	1	$H_s/L=1$ (揚水ヘッドはないとした)
H_s	浸水深さ	m	1.4	1	0.5	$\sigma=1$ より $H_s=L$
L	揚水管長	m	1.4	1	0.5	パラメータ(0.5~1.4m)、 $L+L'=2.1$
D	揚水管内径	m	0.0294	0.0294	0.0294	外径 34mm、厚さ 2.3mm
F	揚水管断面積	m ²	0.0007	0.0007	0.0007	
λ	管摩擦係数	-	0.018	0.018	0.018	
z	指数	-	1.75	1.75	1.75	
L'	導水管長	m	0.7	1.1	1.6	パラメータ(0.7~1.6m)、 $L'=2.1-L$ (測定管を含む)
D'	導水管内径	m	0.0242	0.0242	0.0242	外径 31.8mm、厚さ 3.8mm (測定管と同一とした)
ζ	入口損失係数	-	0.5	0.5	0.5	導水管の入口損失係数
c1	係数 1	-	0.8571	0.6122	0.3061	揚水管の圧力損失係数
c2	係数 2	-	2.0228	2.5562	3.2231	導水管の圧力損失係数
c3	係数 3	-	2	2	2	ガス注入による管内運動量変化に対応する圧力損失係数
fl	液体体積率	-	0.5	0.5	0.5	パラメータ

表 2.4 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験条件

試験 No.	揚水管長 L	Ar 供給部の構造	備 考
1	1.4m	フィルタ(0.5 μ m)	
2	1.4m	フィルタ(0.5 μ m)	No.1 の再現試験(流量計のチェックを含む)
3	1.4m	フィルタ(0.5 μ m)	No.1, 2 の再現試験(流量計のチェックを含む)
4	1.4m	円孔(6.35 ϕ , 1.0t)	
5	1.4m	スリット(開口幅:約 1mm)	パイプ(6.35 ϕ)の先端を潰して製作
6	1.0m	フィルタ(0.5 μ m)	
7	1.0m	フィルタ(0.5 μ m)	No.6 の再現試験
8	0.5m	フィルタ(0.5 μ m)	
9	0.5m	フィルタ(0.5 μ m)	No.8 の再現試験

表 3.1Run-HT1~3 平均注水率

			HT-1	HT-2	HT-3	備考
総給水量	基準(1.0V)以上の給水量	(kg)	23	28.1	31	HT-2給水量は給水後の液面計指示値から算出した。
	基準(1.0V)以下の給水量	(kg)	12.3	←	13	
	小計(1)		35.3	40.4	44	液面計ラインの保有水4.29kg(計算値)は初期給水量から除外
総回収量	基準(1.0V)までの残水量	(kg)	22.16	13.87	11.78	
	基準以下の残水(WV-11からのドレン)	(kg)		9.07	8.4	
	圧力計(P2)ライン残水量	(kg)	0.3	7.44	0	
	ガスライン(GV-1)残水量	(kg)	0.1		0.67	
	WV-2ライン残水量	(kg)	3.43		3.64	
	WV-1ライン残水量(WH側未回収分含む)	(kg)	4.42		3.26	
	小計(2)		30.41	30.38	27.75	
未回収量	WV501~502間のブロー量	(kg)	0.08	0.08	0.08	(計算値)
	溶存酸素ブロー量	(kg)	0.07	0.07	0.07	(予備試験)
	その他	(kg)	0	0	0	(バルブボディ残水、内壁付着量等)
	小計(3)		0.15	0.15	0.15	
注水量 G:(1)-(2)-(3)		(kg)	4.74	9.87	16.1	
注水時間t		(sec)	30	29.3	29.7	注水弁のトリガ信号より
平均注水率 G/t		(g/sec)	158.0	366.9	542.1	

表 4.1 テストピースの選定

TP	Run	伝熱管 No.	場所	選定理由	比較用熱電対	
					対応熱電対	参考 ☆
1	HT-1	*31	(66°、0mm)近傍	①	TE31	TE30
2	↑	*31	(120°、+30mm)近傍	③		TE34,TE67
3	↑	*34	(156°、0mm)近傍	①	TE40	TE42
4	↑	35	(156°、0mm)	②	TE43	
5	↑	35	(200°、0mm)近傍	③		TE43
6	HT-2	23	(156°、-50mm)	②	TE97	
7	↑	28	(66°、0mm)	②	TE28	
8	↑	30	(66°、0mm)	③	TE34	
9	↑	30	(90°、-30mm)近傍	③		TE34
10	↑	*31	(66°、0mm)近傍	①	TE38	TE39
11	↑	*31	(66°、-50mm)近傍	①	TE106	TE107
12	↑	*31	(246°、0mm)近傍	①	TE43	TE42
13	↑	*31	(246°、+50mm)近傍	①	TE86	TE85
14	↑	*31	(246°、-50mm)近傍	①	TE110	TE109
15	↑	*35	(336°、0mm)近傍	①	TE54	TE53
16	↑	*35	(156°、0mm)近傍	①	TE58	TE59
17	HT-3	19	(156°、+50mm)	②	TE69	
18	↑	27	(156°、0mm)	③	TE26	
19	↑	*31	(66°、0mm)近傍	①	TE39	
20	↑	*31	(246°、0mm)近傍	①	TE44	
21	↑	*31	(156°、0mm)	③	TE41	
22	↑	*31	(180°、0mm)	③		TE41
23	↑	*31	(246°、50mm)近傍	①	TE86	TE85
24	↑	*31	(66°、50mm)近傍	①	TE82	TE81
25	↑	32	(156°、0mm)	②	TE47	
26	↑	*34	(156°、0mm)近傍	①	TE57	TE56
27	↑	35	(246°、0mm)	③	TE61	
28	↑	35	(66°、0mm)	②	TE59	

選定理由

- ① 埋め込み熱電対温度指示値と金相観察の結果から推定した熱的影響との比較
- ② 反応ジェット温度(熱電対指示)と伝熱管の受けた熱的影響(金相観察結果)の関係
- ③ ウェステージ部の伝熱管の受けた熱的影響
- (*) 熱伝達率測定管
- (☆) 比較用熱電対で参考としているのは、選定理由が①のものについては同一箇所の上ナトリウム側温度を示す熱電対、③の選定理由のものについては、金相検査場所直近にT/Cがないことから、最も検査箇所近く温度的に近いと推定される熱電対をあげている。

表 4.2 フォーマスタ試験条件

No	①	②		③	④	
	昇温速度 (°C/s)	保持温度 (°C)	保持時間 (s)	降温速度 (°C/s)	温度 (°C)	保持時間 (hrs)
1	40	1300	20	1.4	600	1
2	40	1000	20	1.4	600	1
3	40	940 Ac3+50	20	1.4	600	1
4	40	900 Ac3+10	20	1.4	600	1
5	40	829 (Ac1+Ac3)/2	20	1.4	600	1
6	40	768 Ac1	20	1.4	600	1
7	40	758 Ac1-10	20	0.8	600	1
8	40	650	20	0.8	600	1
9	40	1300	20	80	540	0.5
10	40	1000	20	80	540	0.5
11	40	940 Ac3+50	20	80	540	0.5
12	40	900 Ac3+10	20	80	540	0.5
13	40	829 (Ac1+Ac3)/2	20	80	540	0.5
14	40	768 Ac1	20	80	540	0.5
15	40	758 Ac1-10	20	50	540	0.5
16	40	650	20	50	540	0.5

昇降温パターン

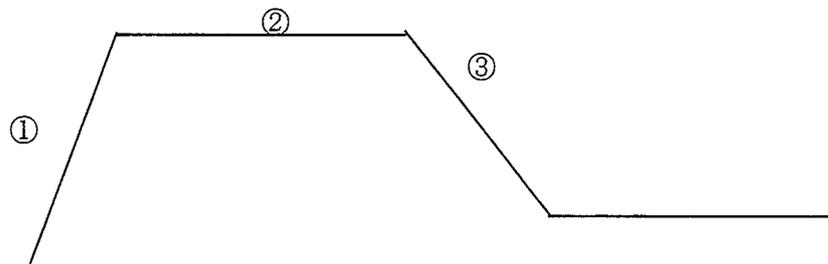


表 4.3 テストピースの受けた熱的影響の推定(1/2)

No.	位置	硬さ		金相		総合判定	選定理由
		推定温度	組織	組織との関係	推定温度		
		°C			°C		
1	外面	820	F+B	Ac1	768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
2	外面	820	F+B	Ac1+10	778	800	③
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
3	外面	820	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
4	外面	768	F+B	Ac1+10	778	800	②
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
5	外面	900	F+B+M	Ac3+10	900	900	③
	中央	768	F+B	Ac1	768	768	
6	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	②
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
7	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	②
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
8	外面	768	F+B	Ac1+20	788	780	③
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
9	外面	>900	F+B+M	Ac3+10	900	900	③
	中央	820	F+B	Ac3-90	800	810	
10	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
11	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
12	外面	768	F+B	Ac1 直上	768	768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
13	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
14	外面	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
15	外面	820	F+B	Ac1 以下	<768	<768	①
	中央	820	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
16	外面	900	F+B+M	Ac3+30	920	920	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	

表 4.4 テストピースの受けた熱的影響の推定(2/2)

No	位置	硬さ	金相			総合判定	選定理由
		推定温度	組織	組織との関係	推定温度		
		°C			F:フェライト		
17	外面	820	F+B	Ac1+20	788	805	③
	中央	778	F+B	Ac1+10	778	778	
18	外面	>900	F+B	Ac3+10	900	900	③
	中央	800	F+B	Ac3-90	800	800	
19	外面	<768	F+B	Ac1 直上	768	<768	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
20	外面	>900	F+B+M	Ac3+10	900	900	①
	中央	<768	F+B	Ac1	768	<768	
21	外面	>900	F+B	Ac3+10	900	900	③
	中央	800	F+B	Ac3-90	800	800	
22	外面	875	F+B	Ac3-15	875	875	③
	中央	800	F+B	Ac3-90	800	800	
23	外面	820	F+B	Ac3-90	800	810	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
24	外面	890	F+B+M	Ac3 直下	890	890	①
	中央	768	F+B	Ac1 直上	768	768	
25	外面	>900	F+B+M	Ac3 直下	890	890	②
	中央	>900	F+B	Ac3 直下	890	890	
26	外面	>900	F+B	Ac3 直下	890	900	①
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
27	外面	768	F+B	Ac1 直上	768	768	③
	中央	<768	F+B	Ac1 以下	<768	<768	
28	外面	>900	F+B+M	Ac3 直上	900	900	②
	中央	>900	F+B+M	Ac3 直上	900	900	

- ① 埋め込み熱電対温度指示値と金相観察の結果から推定した熱的影響との比較
- ② 反応ジェット温度(熱電対指示)と伝熱管の受けた熱的影響(金相観察結果)の関係
- ③ ウェステージ部の伝熱管の受けた熱的影響

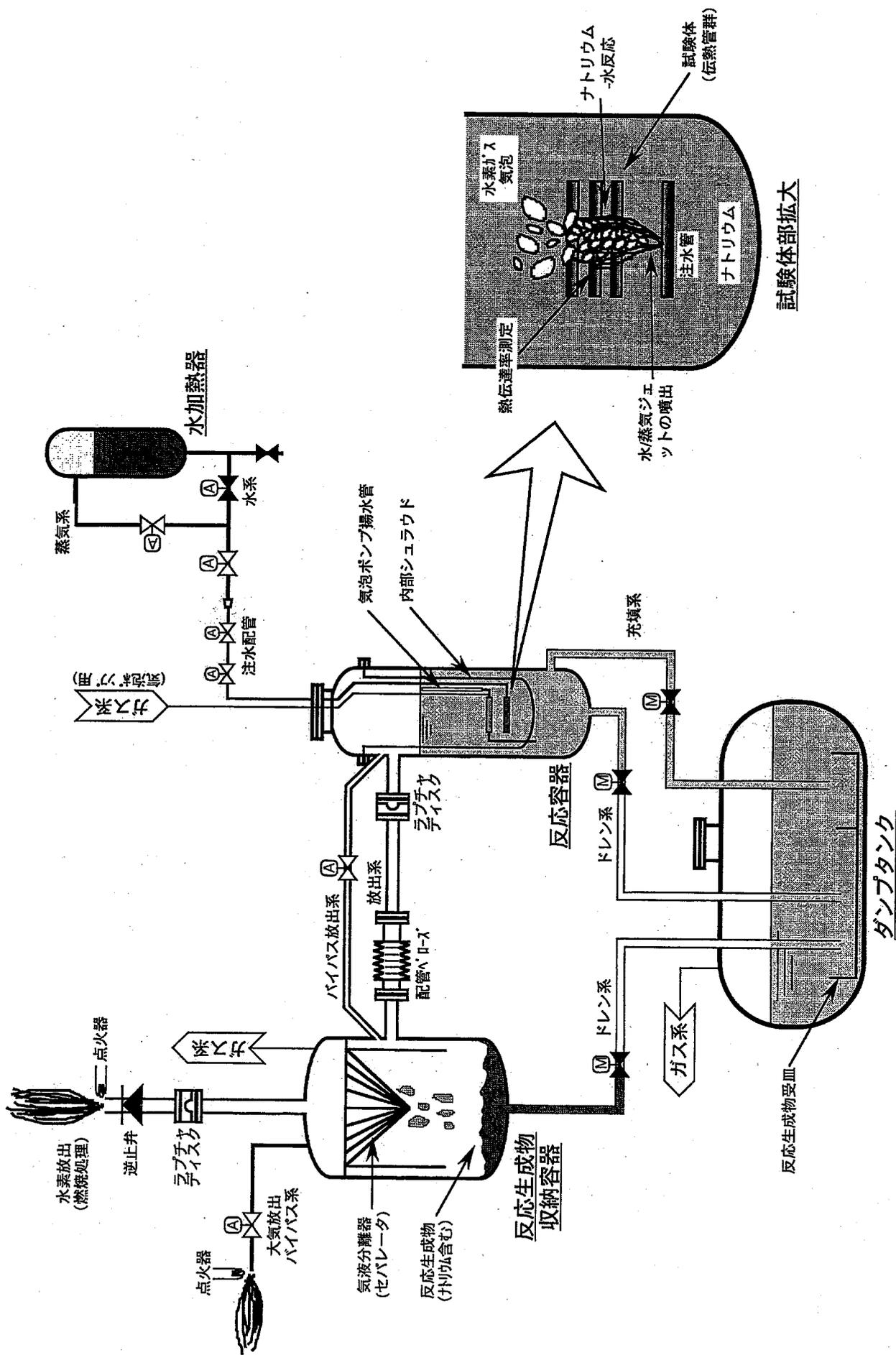


図1.1 ナトリウム-水反応試験装置概念図

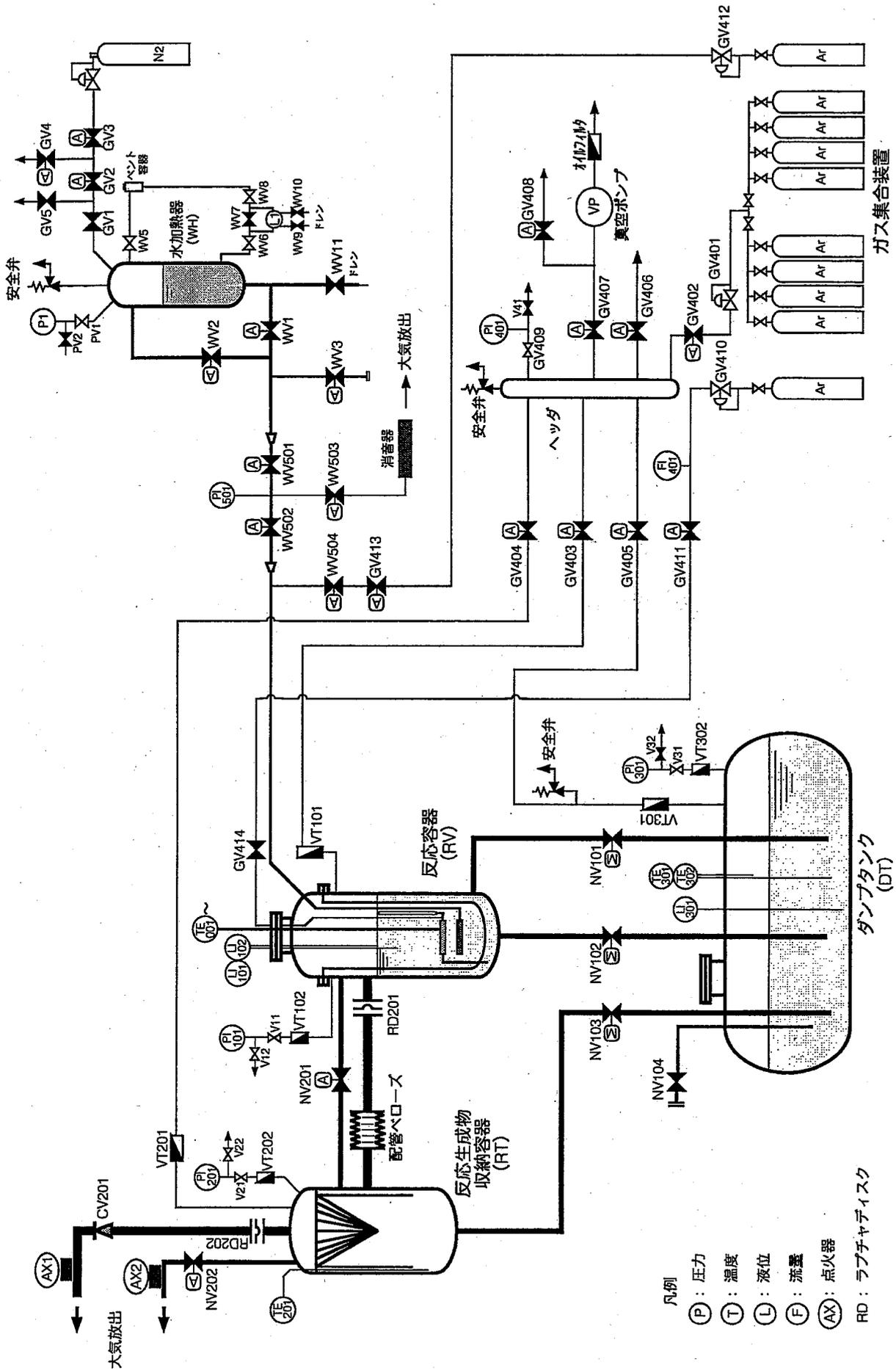


図2.1 SWAT-1R試験装置フローシート

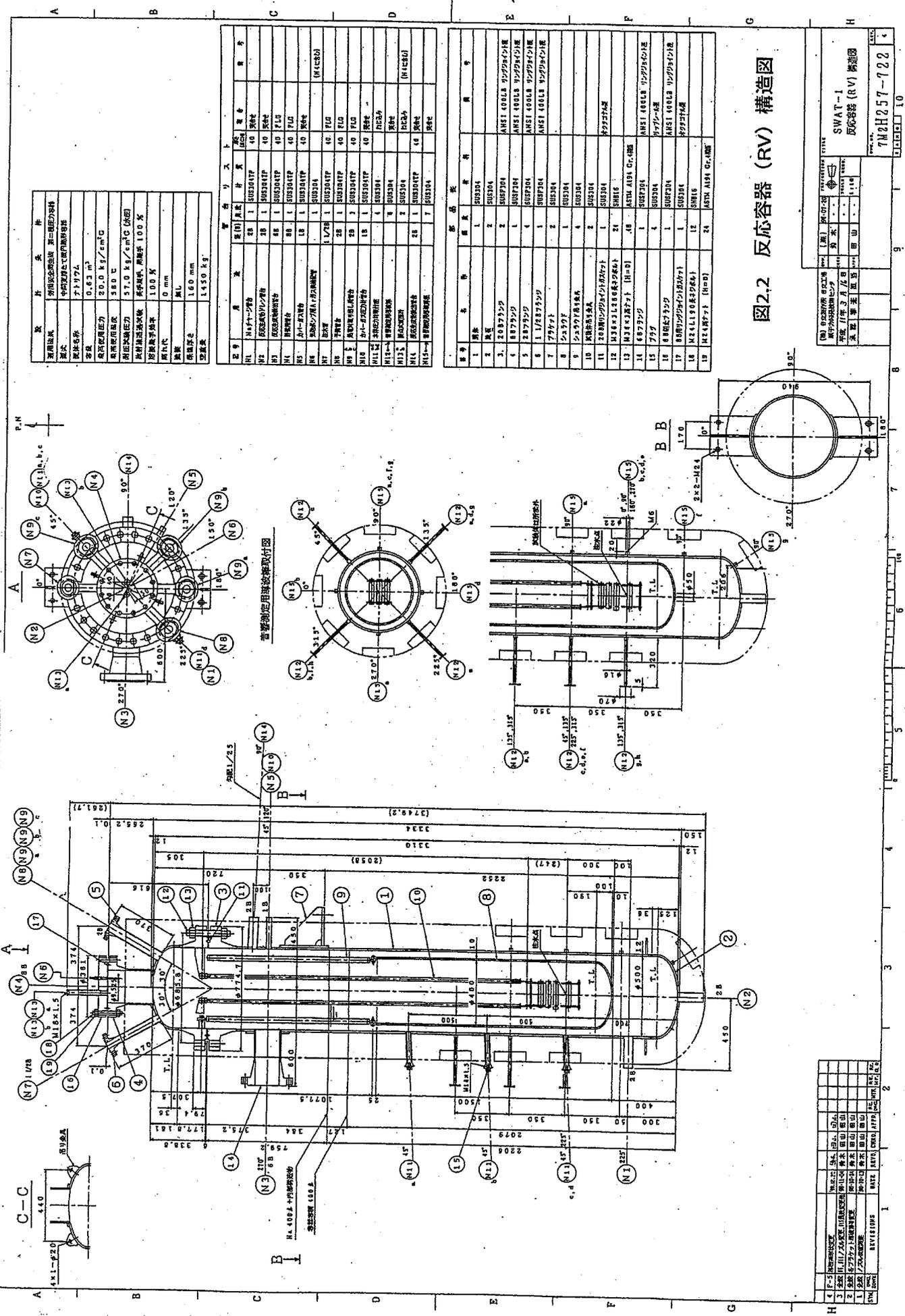


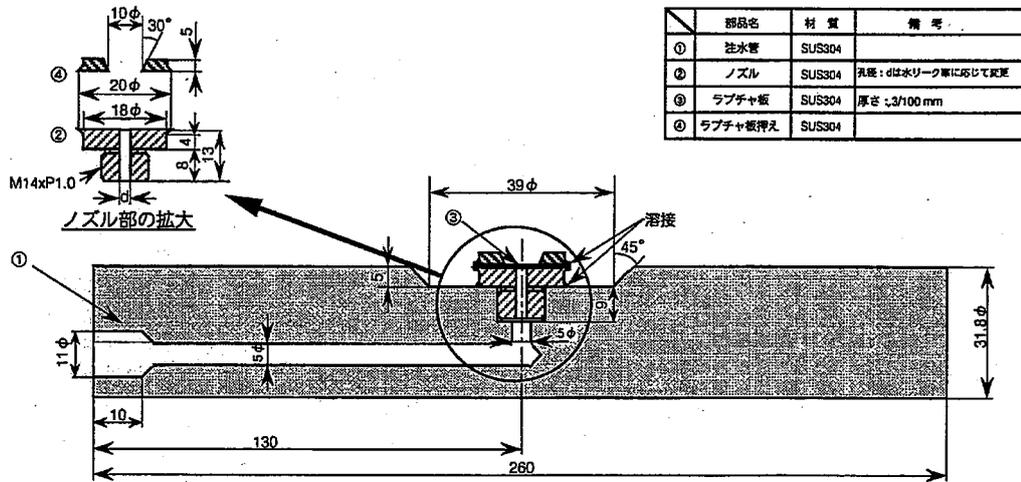
図2.2 反応容器 (RV) 構造図

項目	内容
材料	第一種圧力容器用材料
設計	中野設計院(株) 第一種圧力容器部
設計者	ナトヤマ
容積	0.63 m ³
最高許容圧力	20.0 kg/cm ² G
最高運転圧力	5.0 kg/cm ² G
許容歪み	57.0 kg/cm ² G (4倍)
材料強度試験	長手引張、厚手引張、100℃
設計温度	100℃
設計圧力	0 mm
設計速度	無し
設計重量	1450 kg

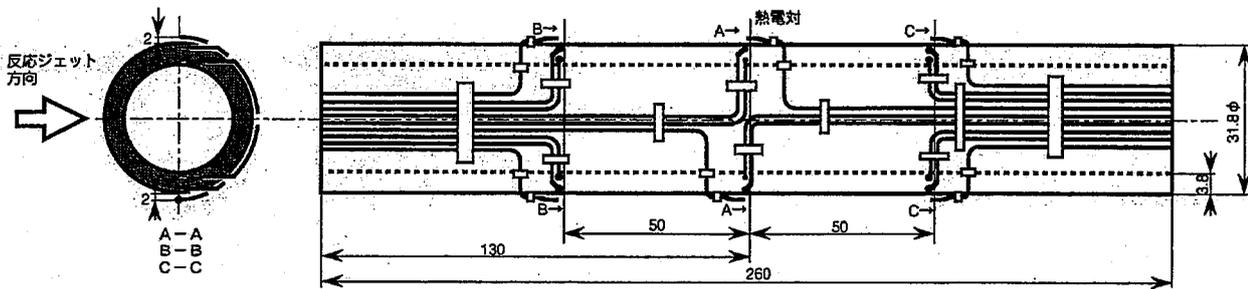
品番	品名	数量	単位	材料	規格
1	筒体	1	個	SUS304	40 厚
2	封入管	2	個	SUS304	40 厚
3	封入管	2	個	SUS304	40 厚
4	封入管	1	個	SUS304	40 厚
5	封入管	1	個	SUS304	40 厚
6	封入管	1	個	SUS304	40 厚
7	封入管	1	個	SUS304	40 厚
8	封入管	1	個	SUS304	40 厚
9	封入管	1	個	SUS304	40 厚
10	封入管	1	個	SUS304	40 厚
11	封入管	1	個	SUS304	40 厚
12	封入管	1	個	SUS304	40 厚
13	封入管	1	個	SUS304	40 厚
14	封入管	1	個	SUS304	40 厚
15	封入管	1	個	SUS304	40 厚
16	封入管	1	個	SUS304	40 厚
17	封入管	1	個	SUS304	40 厚
18	封入管	1	個	SUS304	40 厚
19	封入管	1	個	SUS304	40 厚

品番	品名	数量	単位	材料	規格
1	筒体	1	個	SUS304	40 厚
2	封入管	2	個	SUS304	40 厚
3	封入管	2	個	SUS304	40 厚
4	封入管	1	個	SUS304	40 厚
5	封入管	1	個	SUS304	40 厚
6	封入管	1	個	SUS304	40 厚
7	封入管	1	個	SUS304	40 厚
8	封入管	1	個	SUS304	40 厚
9	封入管	1	個	SUS304	40 厚
10	封入管	1	個	SUS304	40 厚
11	封入管	1	個	SUS304	40 厚
12	封入管	1	個	SUS304	40 厚
13	封入管	1	個	SUS304	40 厚
14	封入管	1	個	SUS304	40 厚
15	封入管	1	個	SUS304	40 厚
16	封入管	1	個	SUS304	40 厚
17	封入管	1	個	SUS304	40 厚
18	封入管	1	個	SUS304	40 厚
19	封入管	1	個	SUS304	40 厚

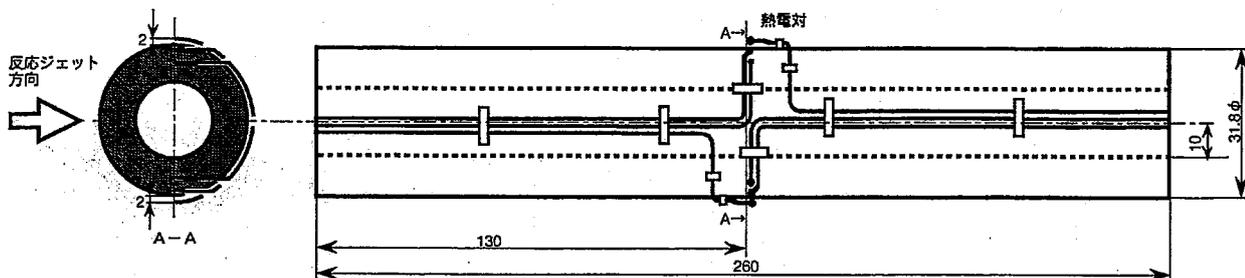
設計者	ナトヤマ
設計日	2003.01.14
設計場所	東京
設計内容	SWAT-1 反応容器 (RV) 構造図
承認者	山田
承認日	2003.01.14
承認場所	東京
承認内容	7M2H257-122



(1) ラプチャ型注水管

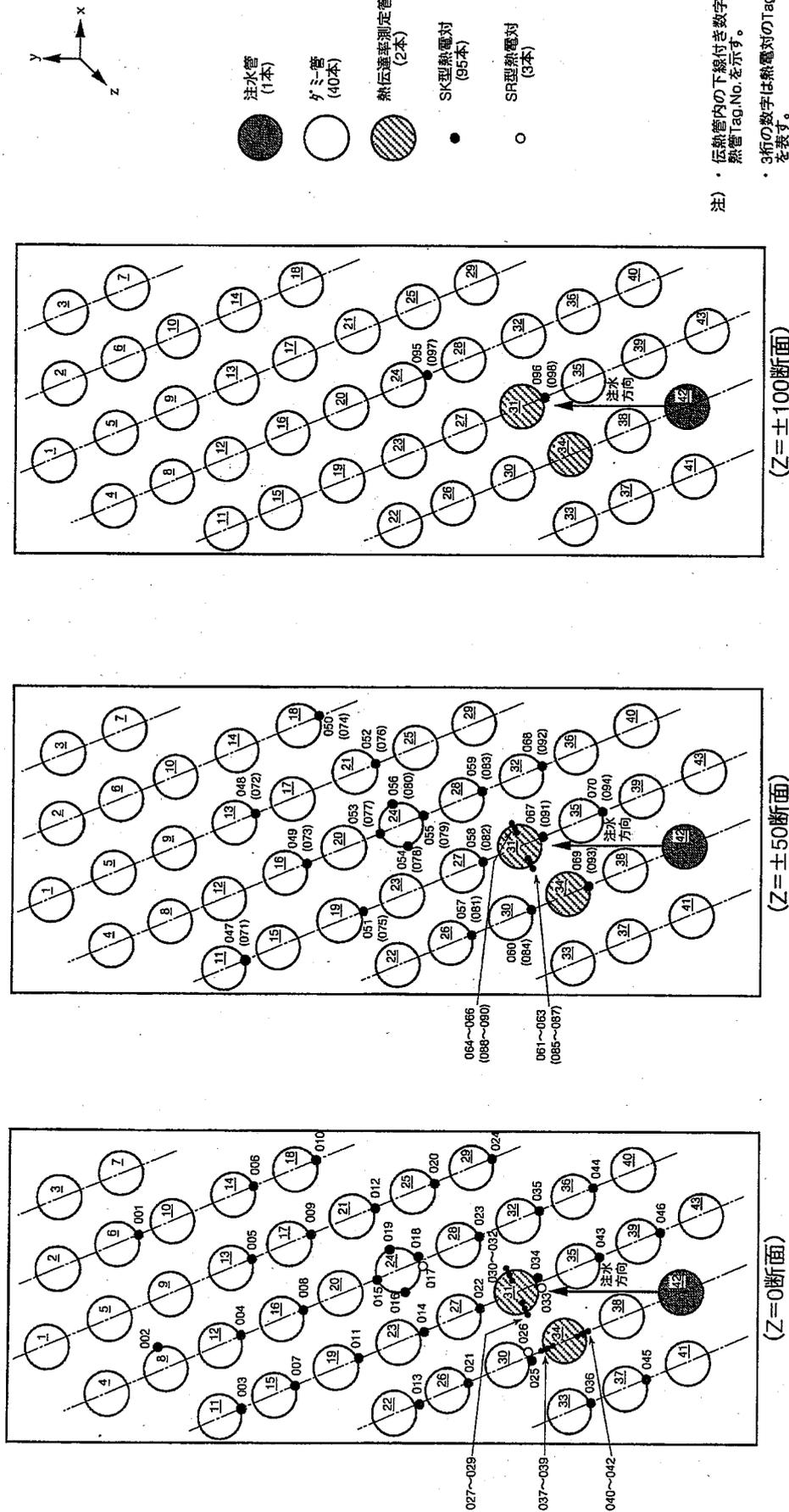


(2) 熱伝達率測定管 TYPE-I (伝熱管No.31)



(3) 熱伝達率測定管 TYPE-II (伝熱管No.34)

図2.7 注水管及び熱伝達率測定管の構造図



注) ・伝熱管内の下線付き数字は伝熱管 Tag.No. を示す。
 ・3桁の数字は熱電対の Tag.No. を表す。
 ・Z=±50, 100断面で()無し Tag.No. は十桁、()付き tag.No. は一桁の Tag.No. である。

図2.8-1 試験体熱電対設置箇所 (HT-1)

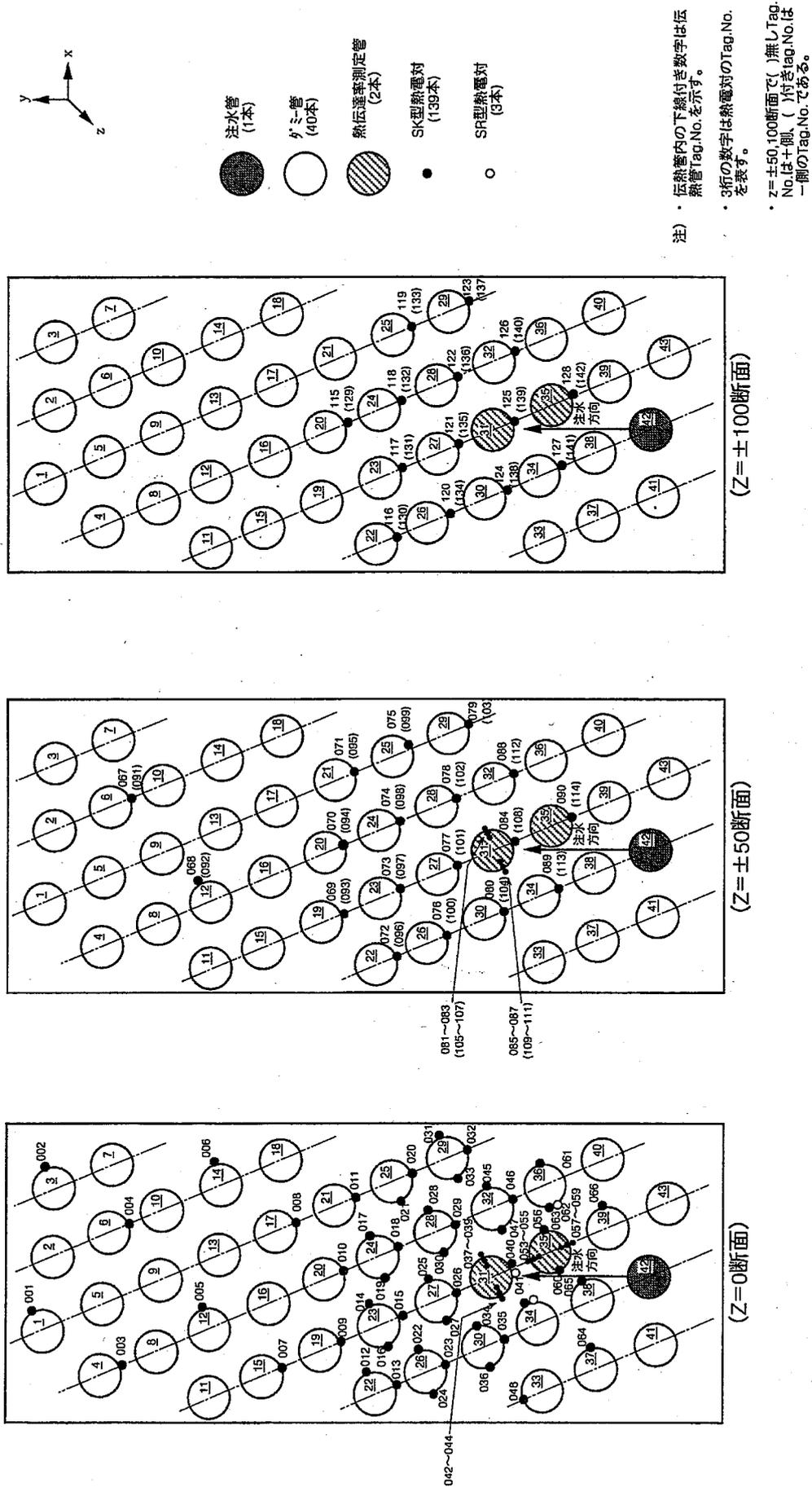
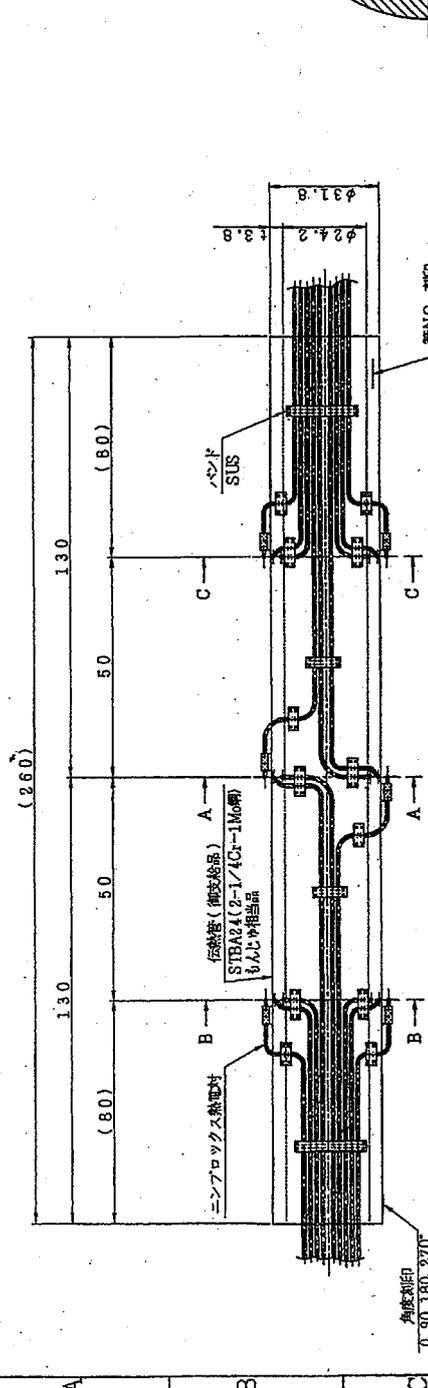
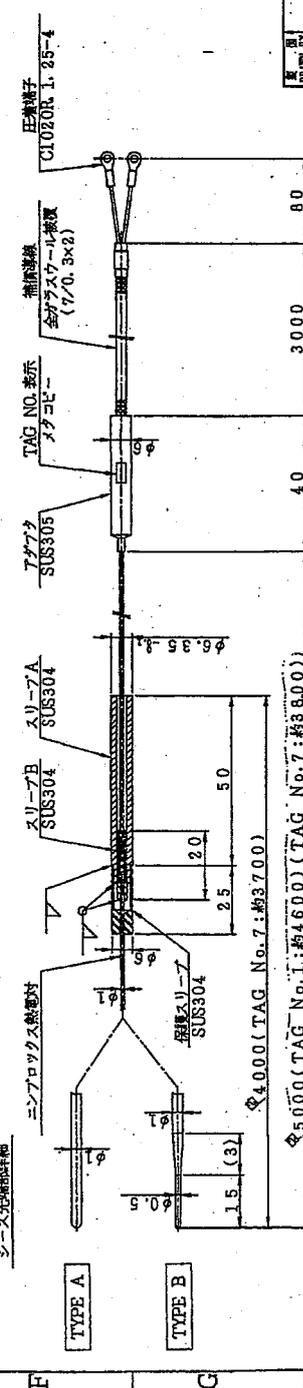
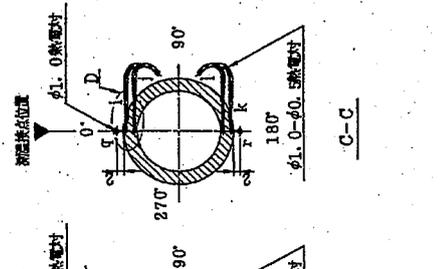


図2.8-2 試験体熱電対設置箇所 (HT-2)

Rev. No.	CONTENTS	DATE	REV. D	JOB NO.
①	伝熱管の追加	10.1.13	村田	T059787
②	熱電対の追加	10.1.13	佐々木	



項目	φ1.0熱電対仕様	項目	φ1.0熱電対仕様
クラス	2	クラス	2
対極	1対(シングル)	対極	1対(シングル)
シース外径	φ1.0	シース外径	φ1.0-φ0.5
シース材質	SUS316	シース材質	SUS316L
製造工場	非特約型(工場9)	製造工場	非特約型(工場9)
別注	別注熱電対及び温度に対する許容差	別注	別注熱電対及び温度に対する許容差
	IIS C1602-1995		IIS C1602-1995



熱電対仕様
 (伝熱管 1セット当たりの熱電対員数)
 φ1.0熱電対(TYPE A): 6本
 φ1.0-φ0.5熱電対(TYPE B): 12本

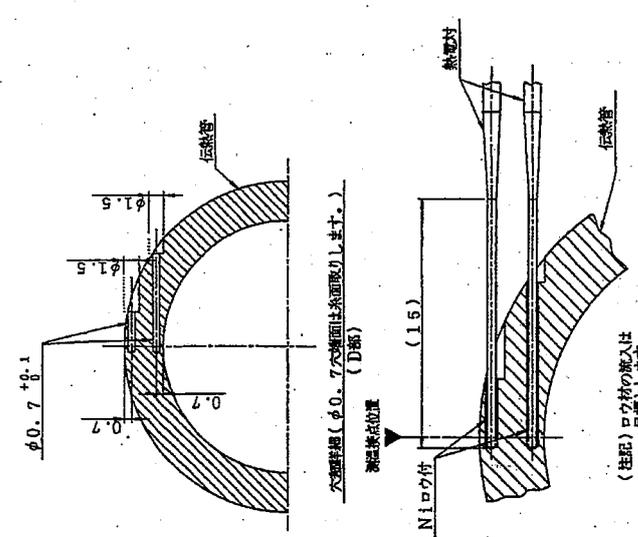
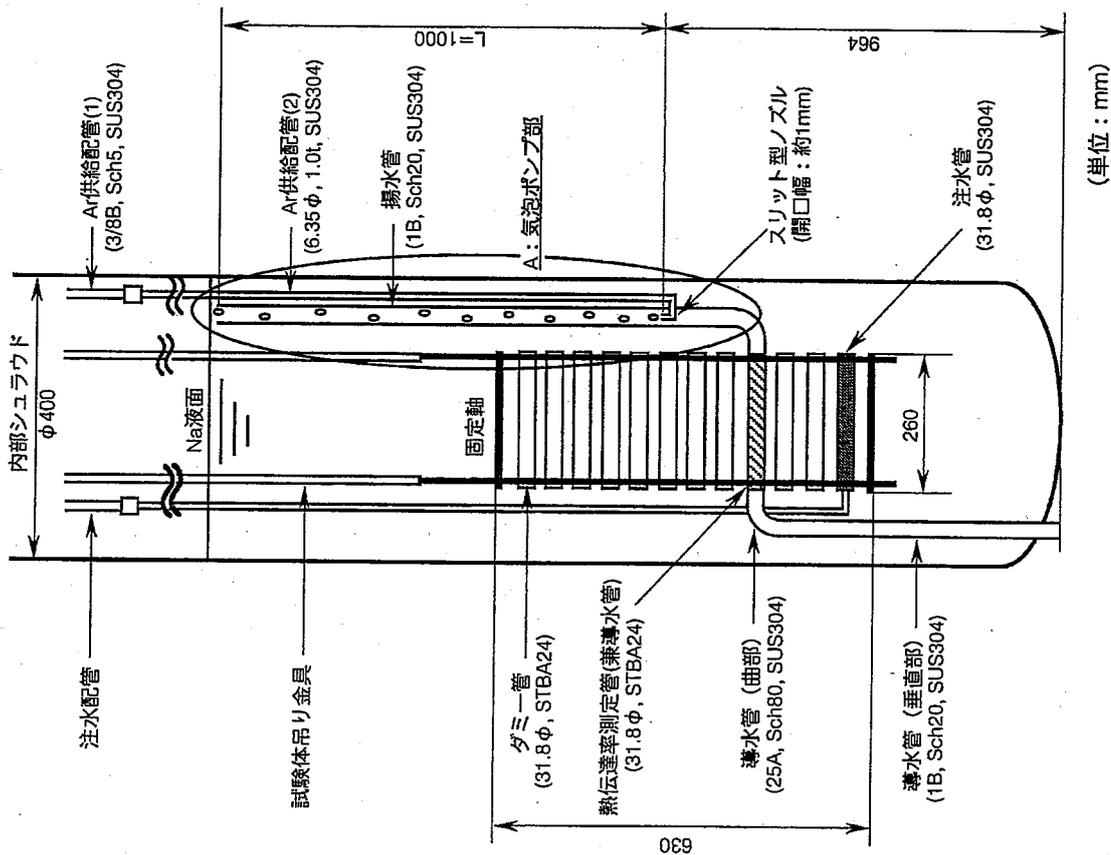


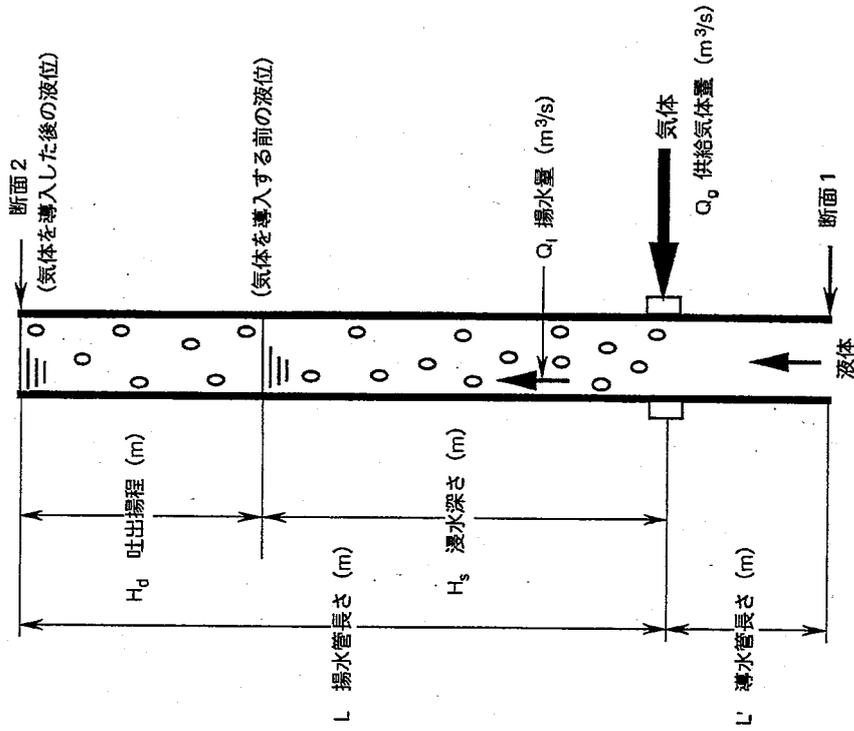
図2.9 熱伝達率測定管製作図 (TYPE-1)

図名	図番	縮尺	単位	図名	図番
伝熱管	99.2.21	縮尺	1:1	伝熱管	99.2.21
製図者	99.2.21	製図者	99.2.21	製図者	99.2.21
承認者		承認者		承認者	

図名: SWAT-1計測用伝熱管
 図番: SC-105-050



(単位: mm)



気泡ポンプの概念図
(A部拡大)

図2.10 反応容器内の気泡ポンプ (試験体を含む) 構造図

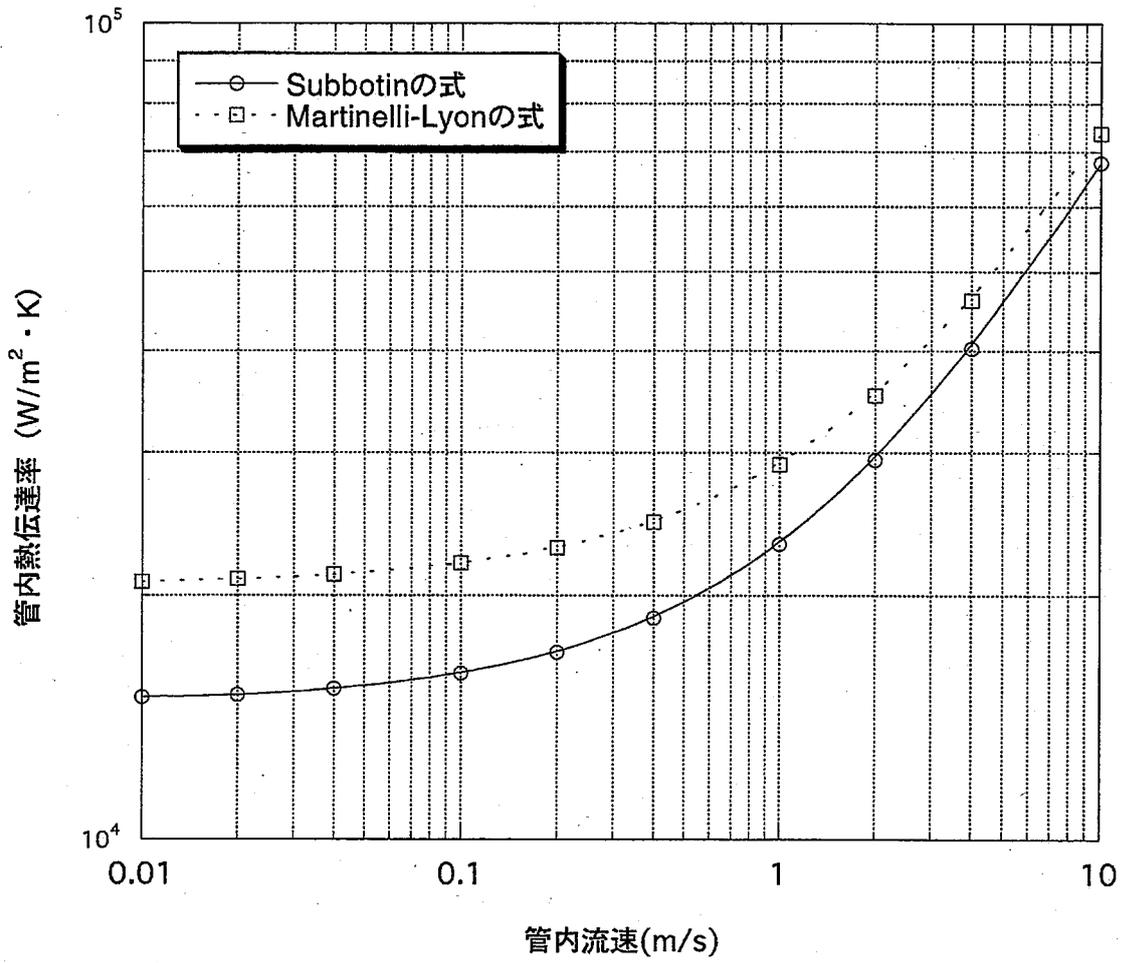


図 2.11 ナトリウム流動による伝熱管内熱伝達率の変化

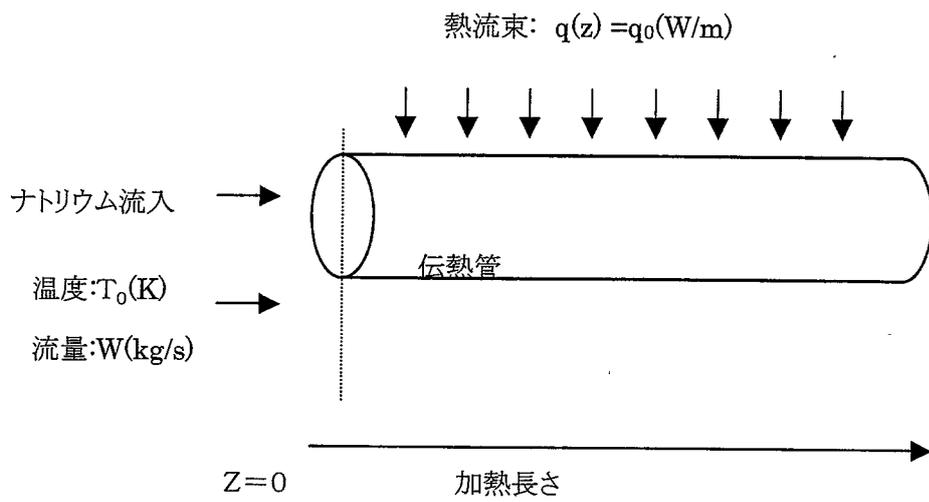


図 2.12 ナトリウム温度及び伝熱管壁温度の計算方法

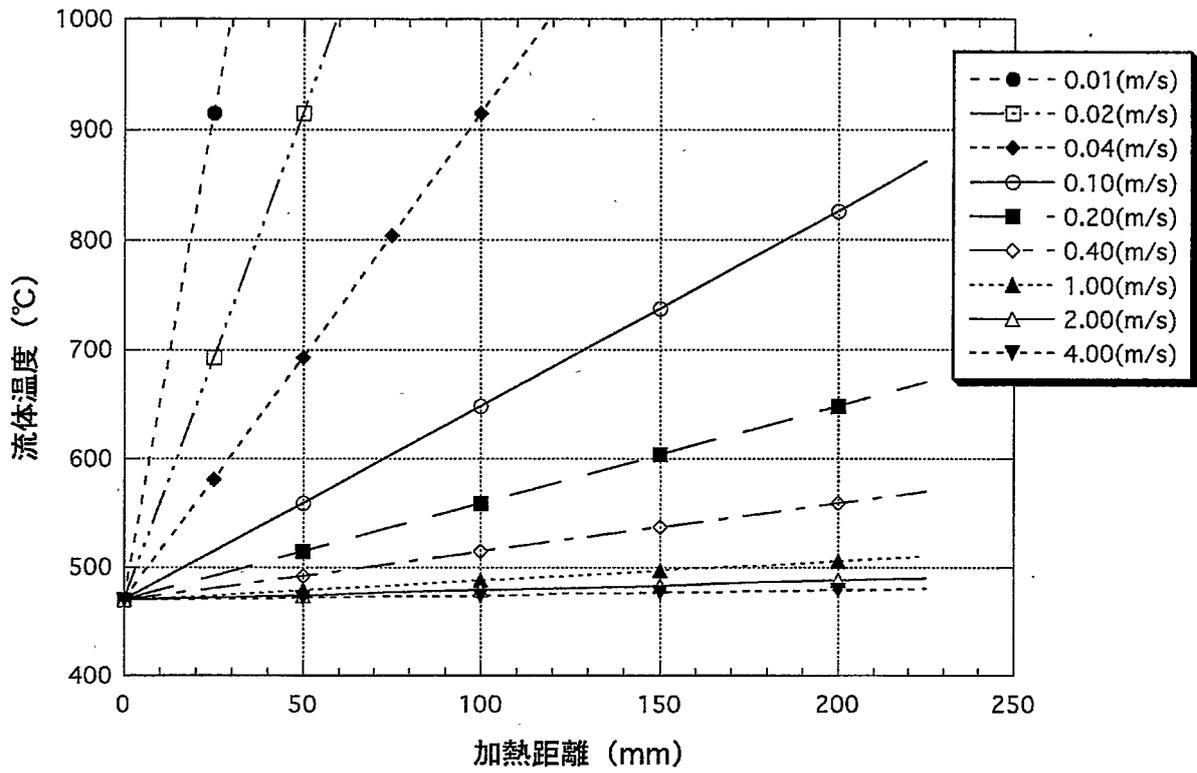


図2.13(a) 伝熱管内流動ナトリウムの温度変化

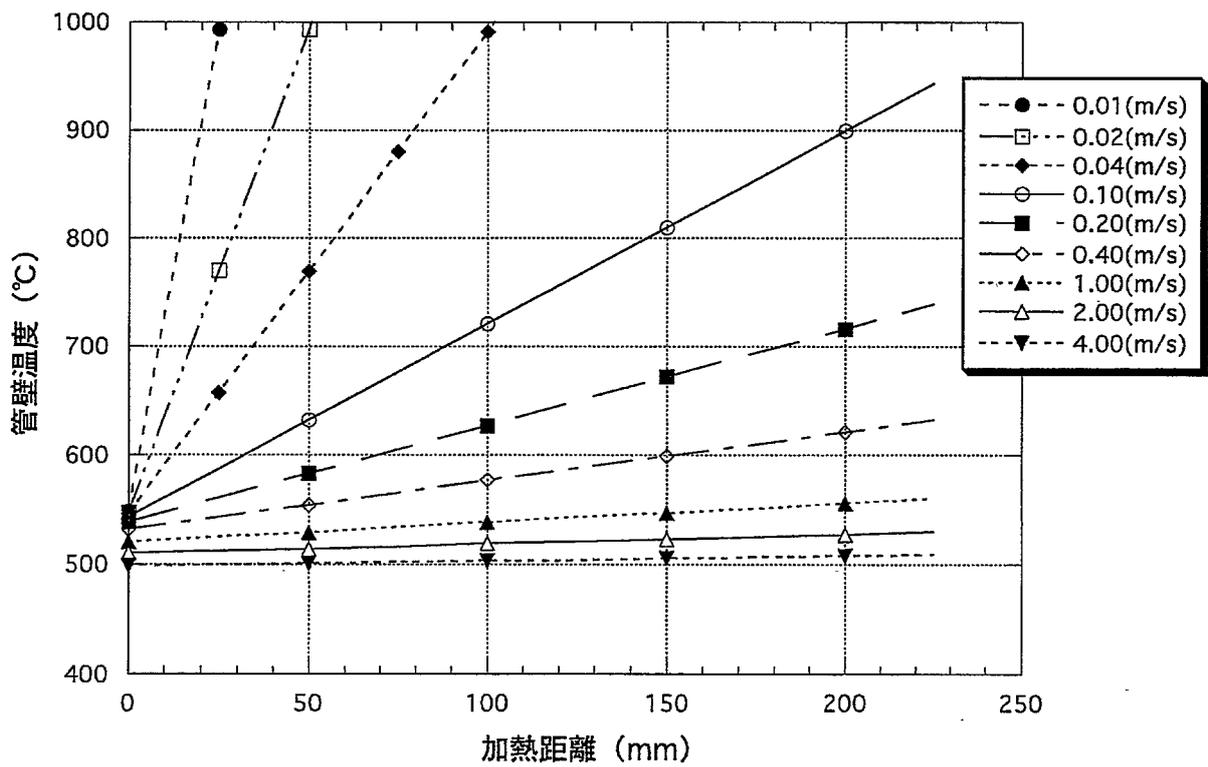


図2.13(b) 伝熱管外壁の温度変化

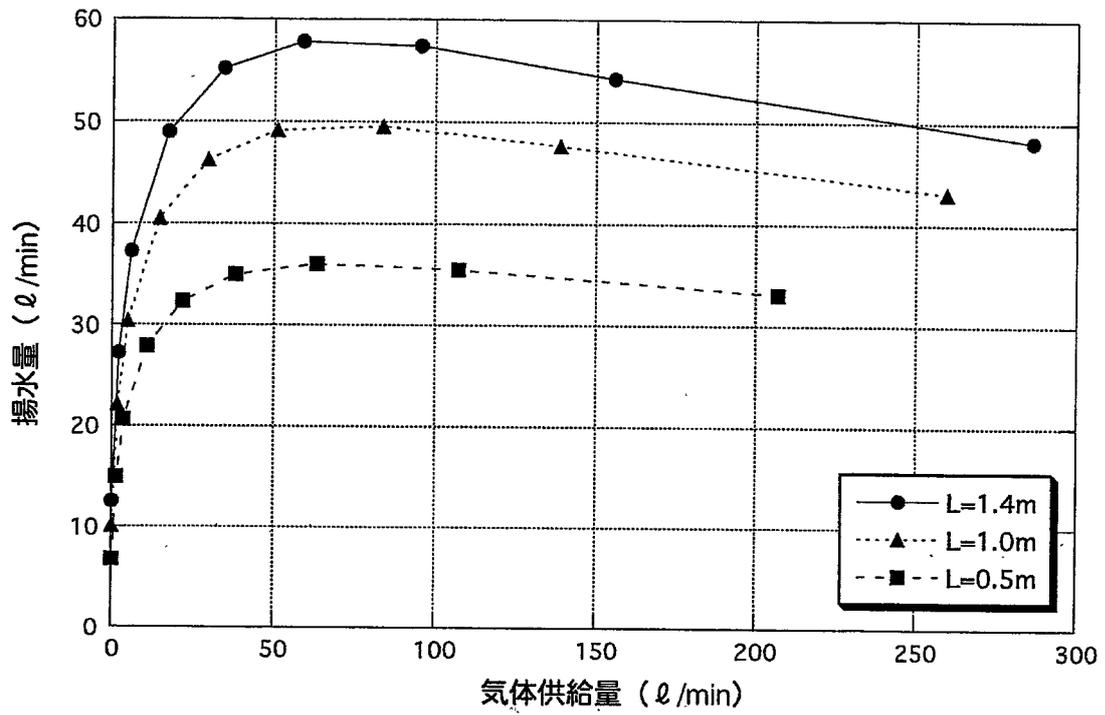


図2.14 気泡ポンプ揚水特性に関する計算結果

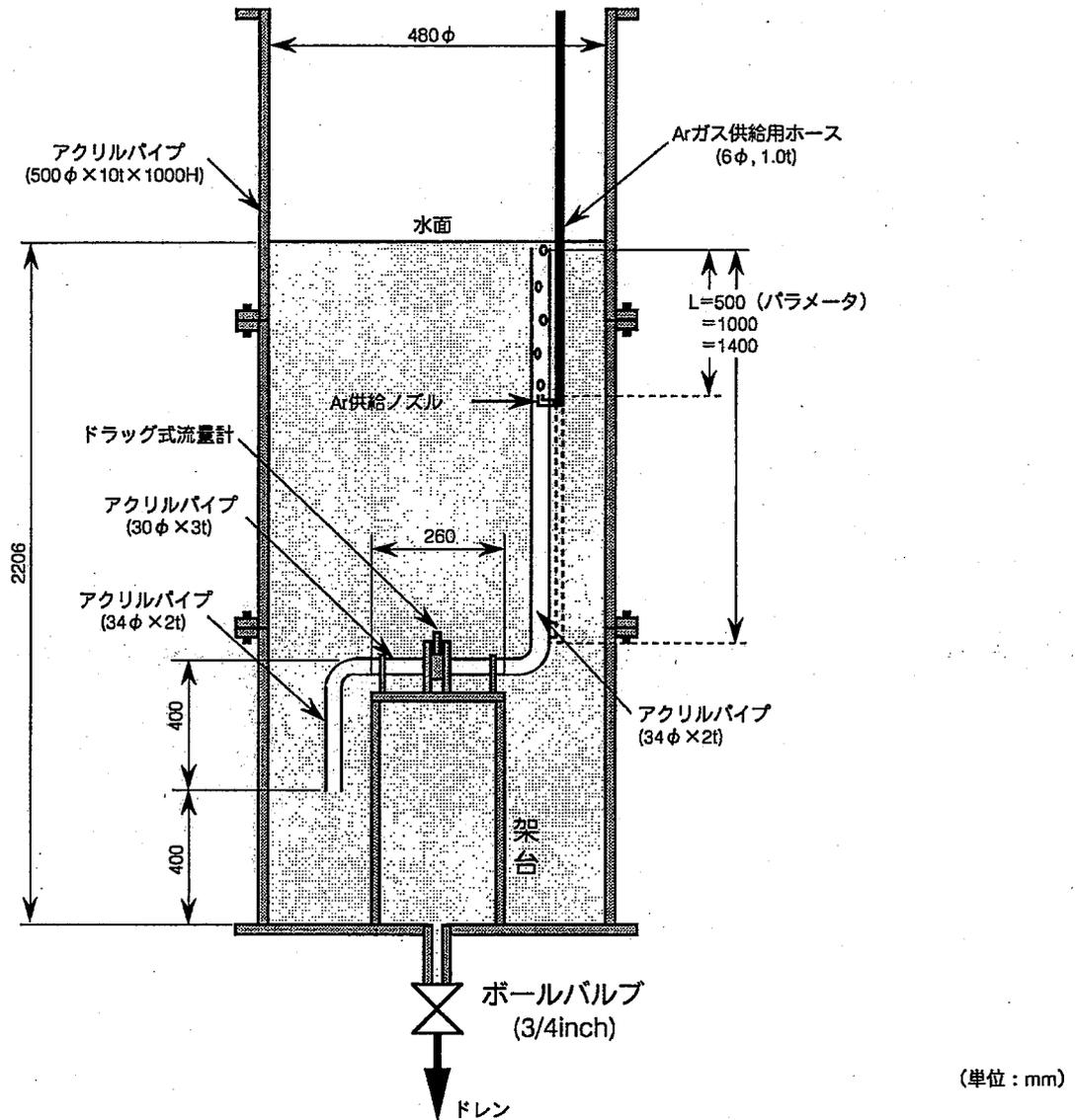


図2.15 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験装置

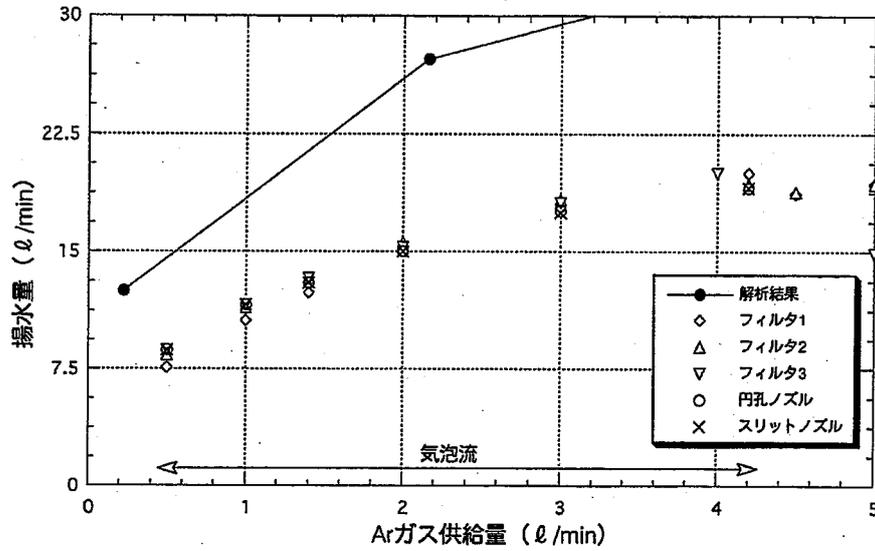


図2.16(a) 気泡ポンプ揚水特性試験結果 (揚水管長: L=1.4m)

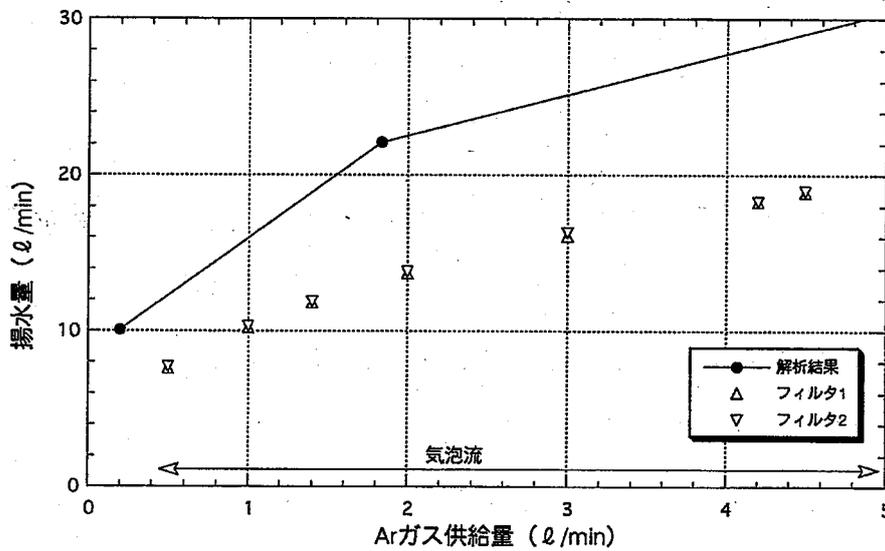


図2.16(b) 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験結果 (揚水管長: L=1.0m)

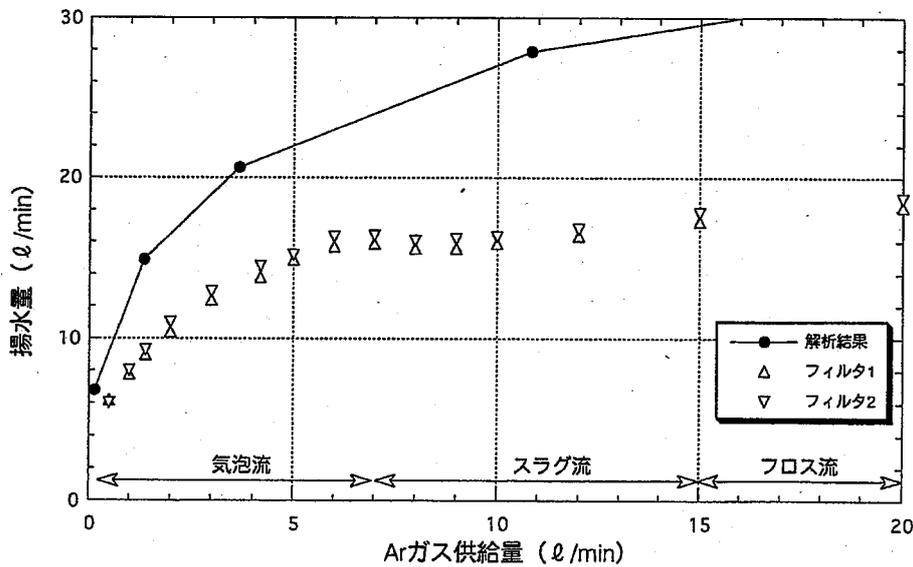


図2.16(c) 気泡ポンプ揚水特性確認用水試験結果 (揚水管長: L=0.5m)

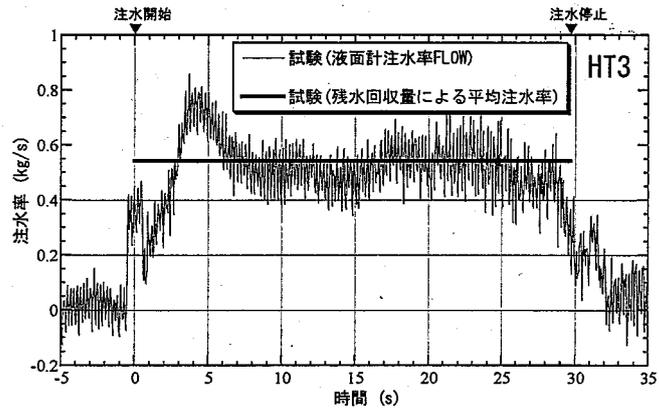
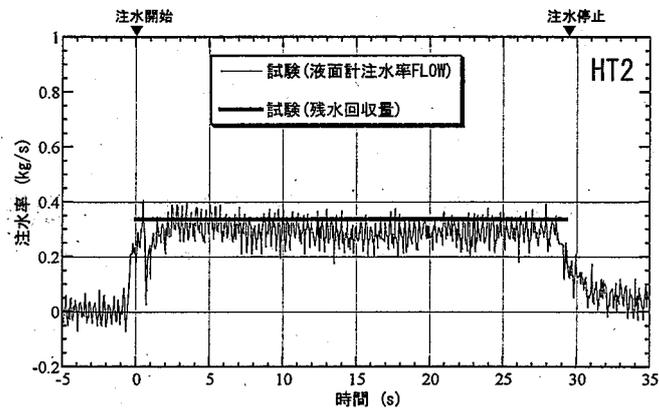
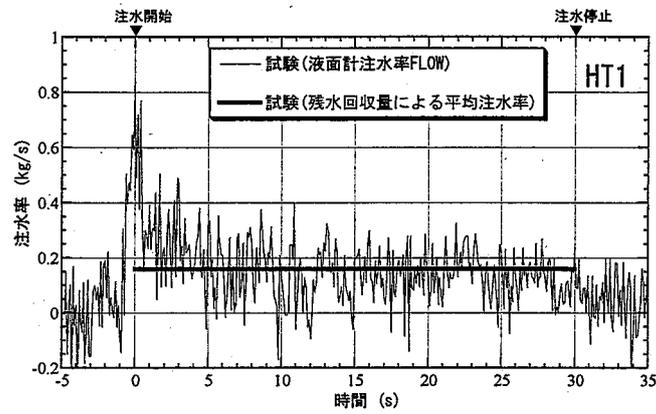


図 3.1 注水率の時間変化

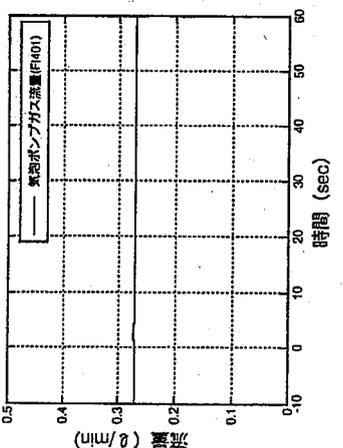
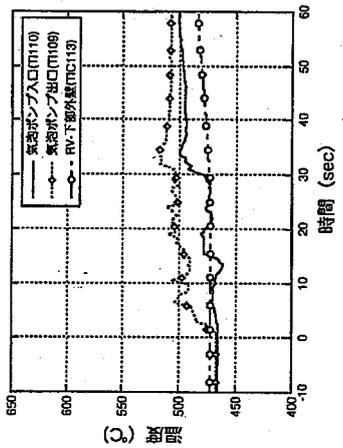
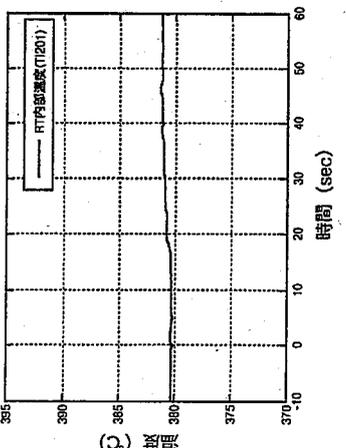
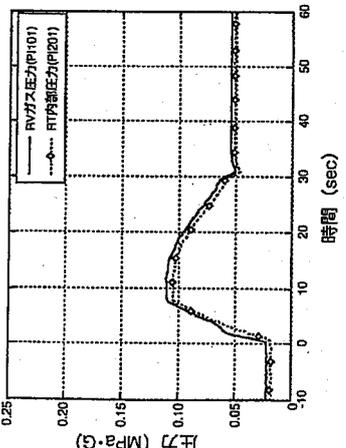
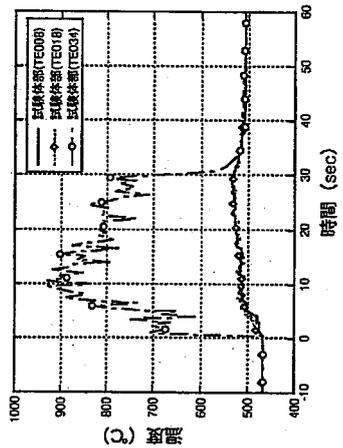
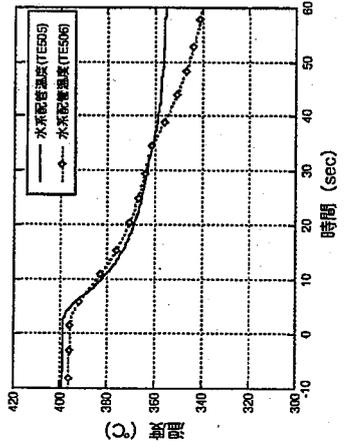
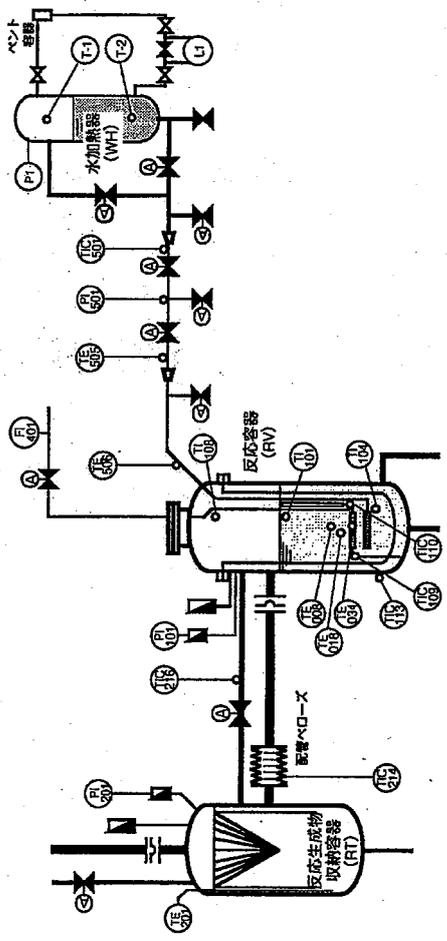
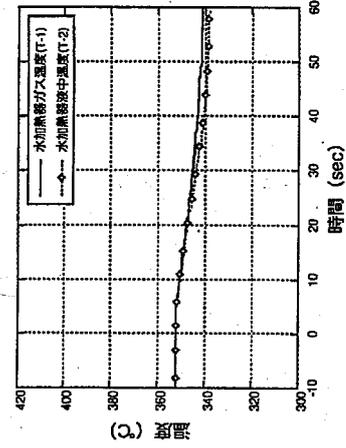
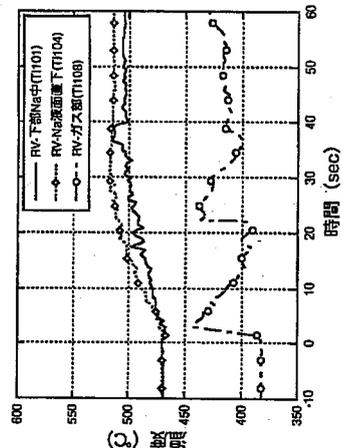
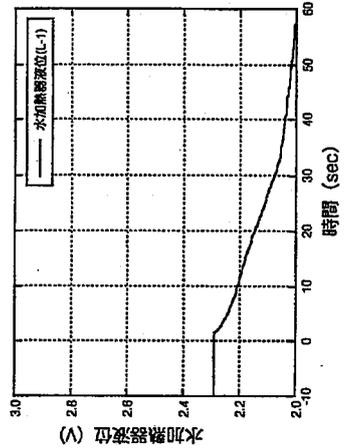
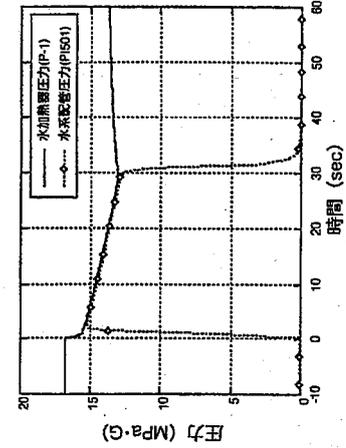


図3.2 Run-HT1試験結果

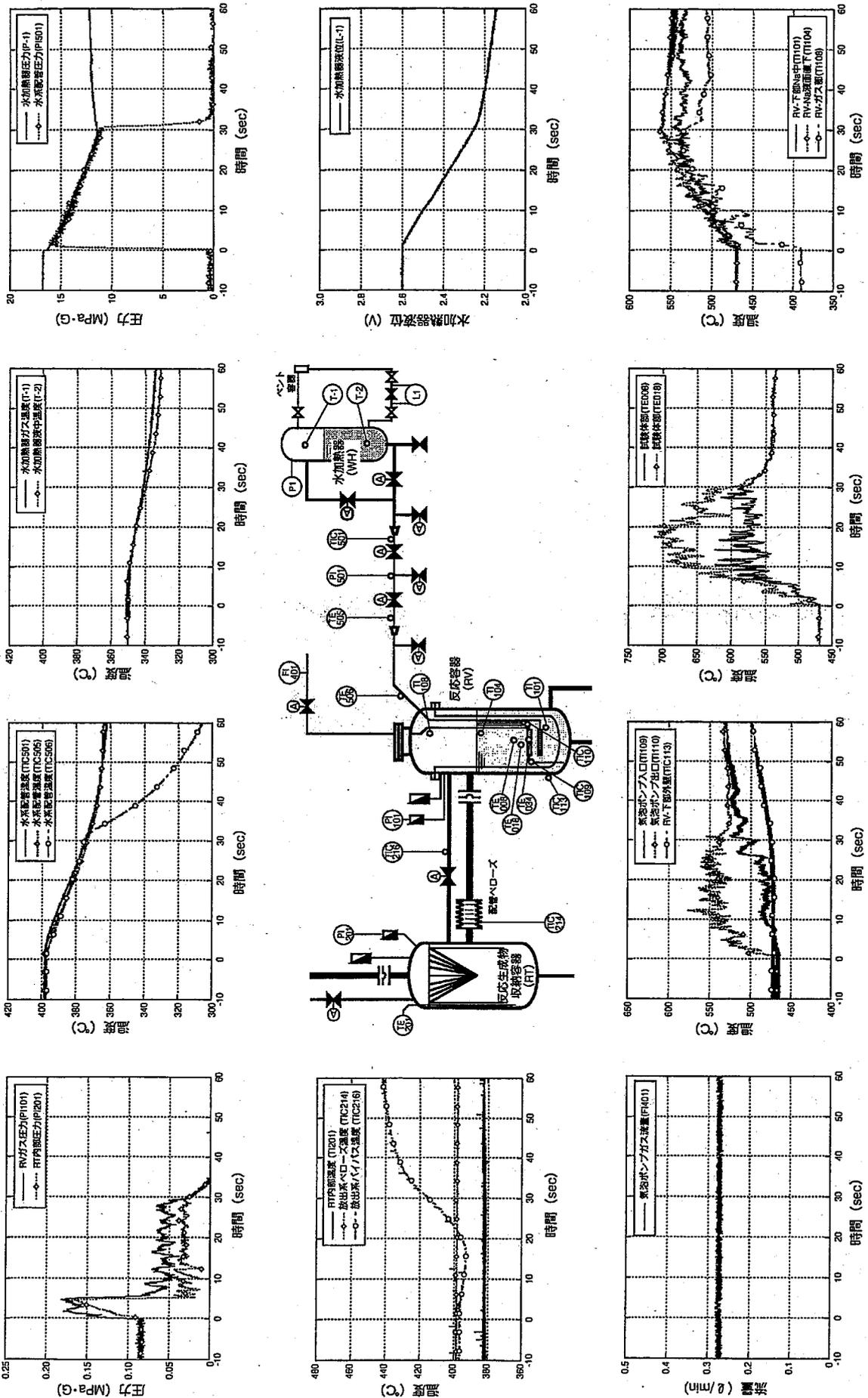


図3.3 Run-HT2試験結果

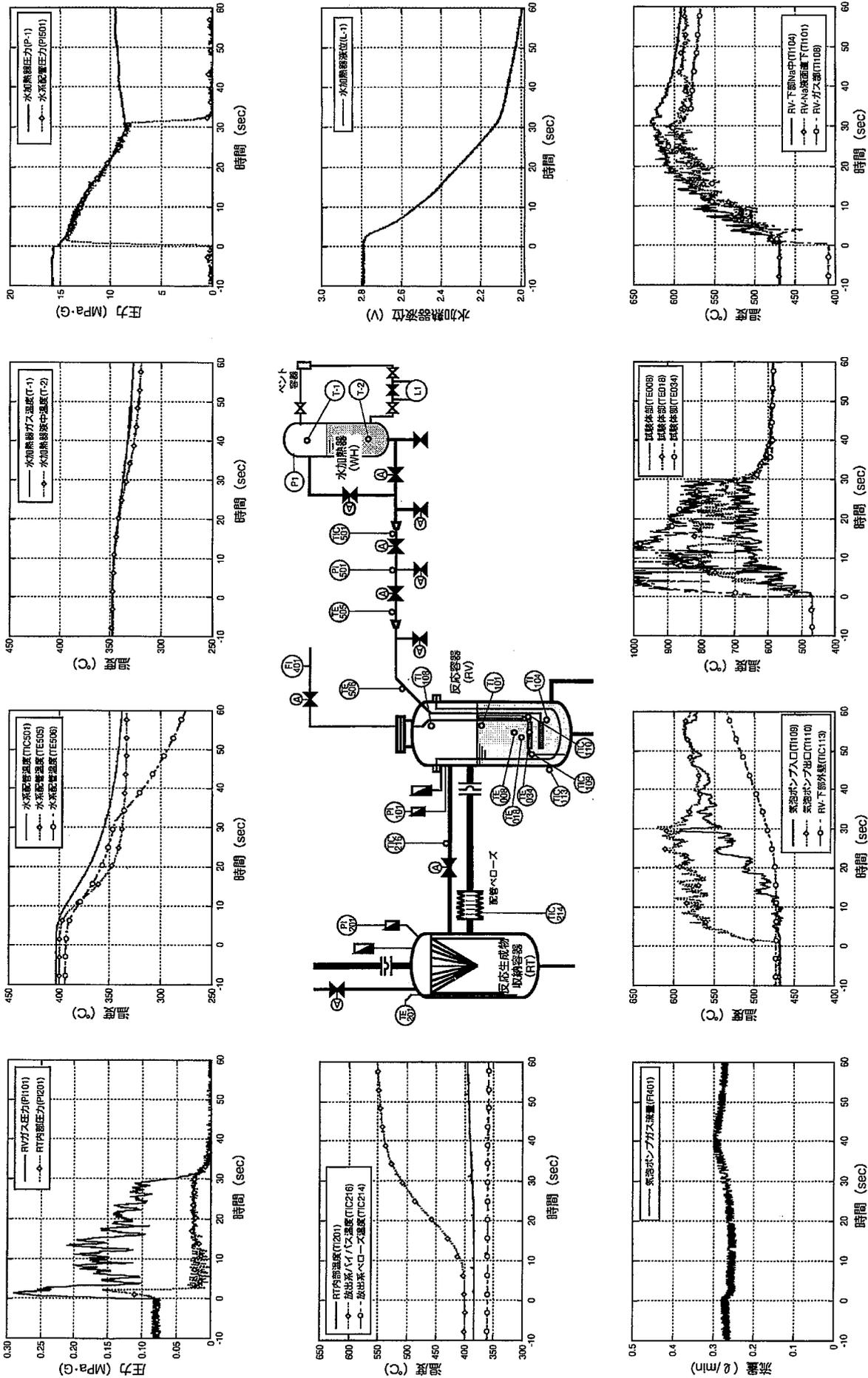
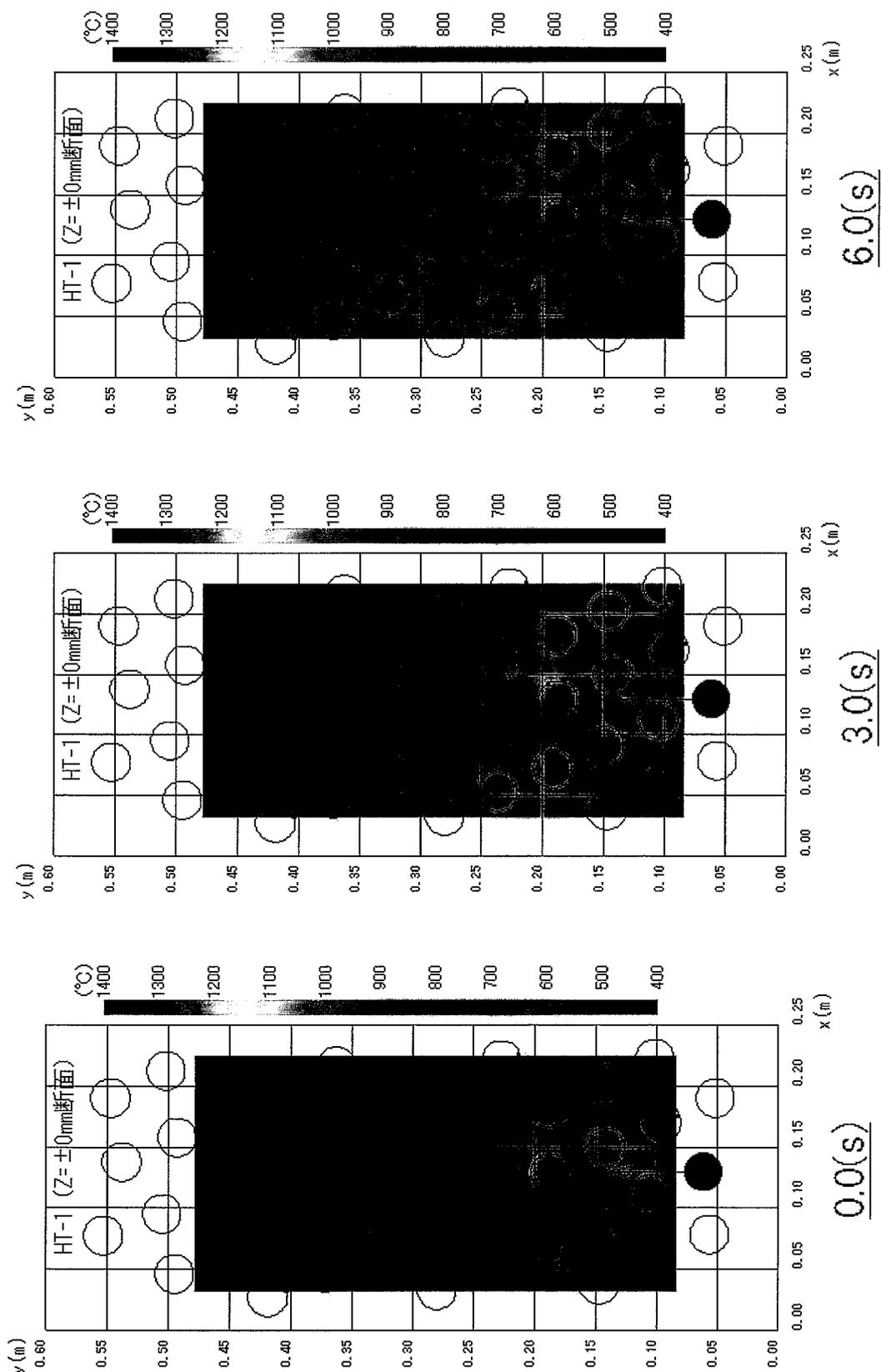


図3.4 Run-HT3試験結果



☒ 3.5-1 Run-HT1 温度分布推移 (3 秒平均) (1/4)

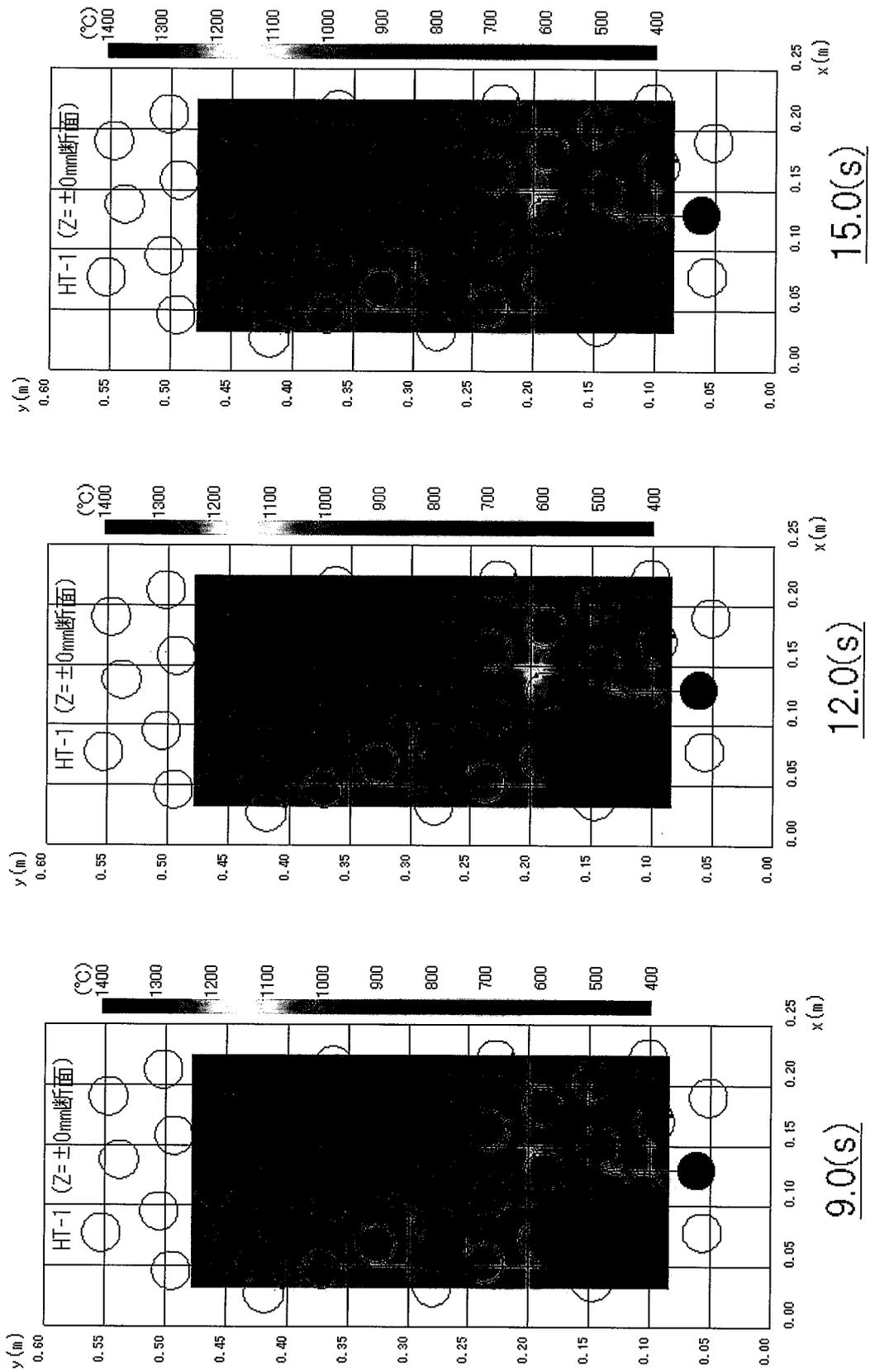


图 3.5-2 Run-HT1 温度分布推移 (3 秒平均) (2/4)

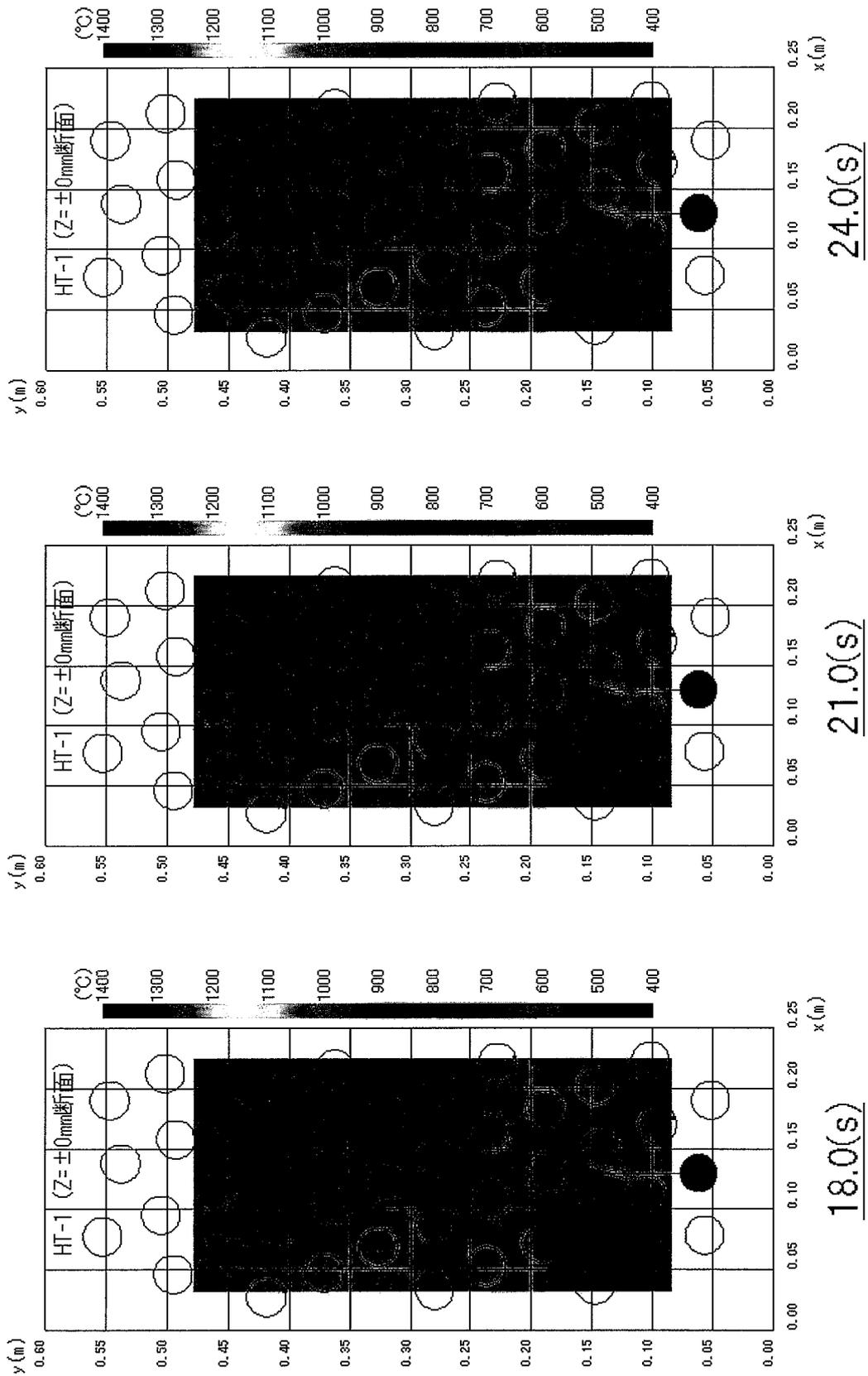


图 3.5-3 Run-HT1 温度分布推移 (3 秒平均) (3/4)

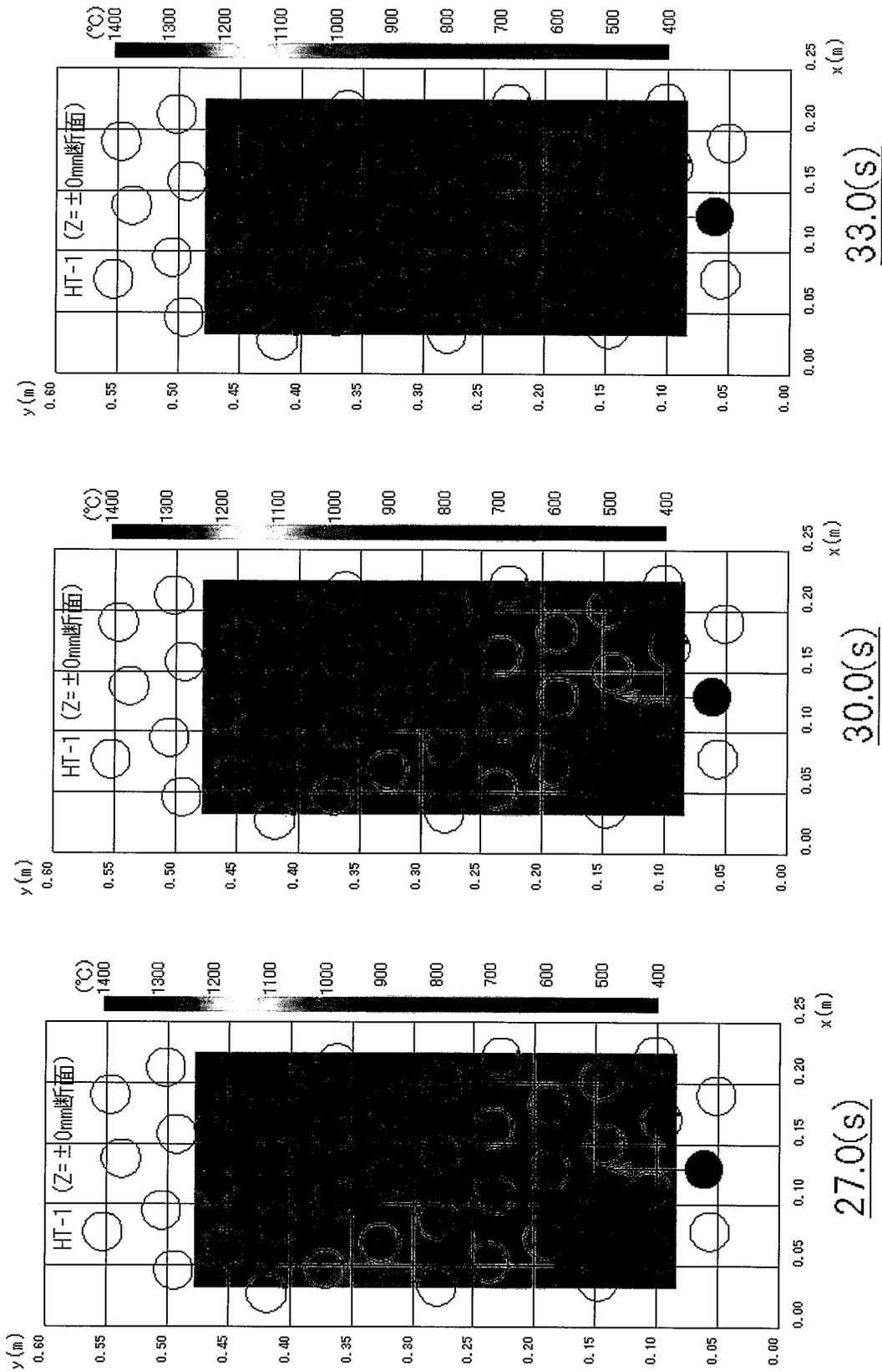


图 3.5-4 Run-HT1 温度分布推移 (3 秒平均) (4/4)

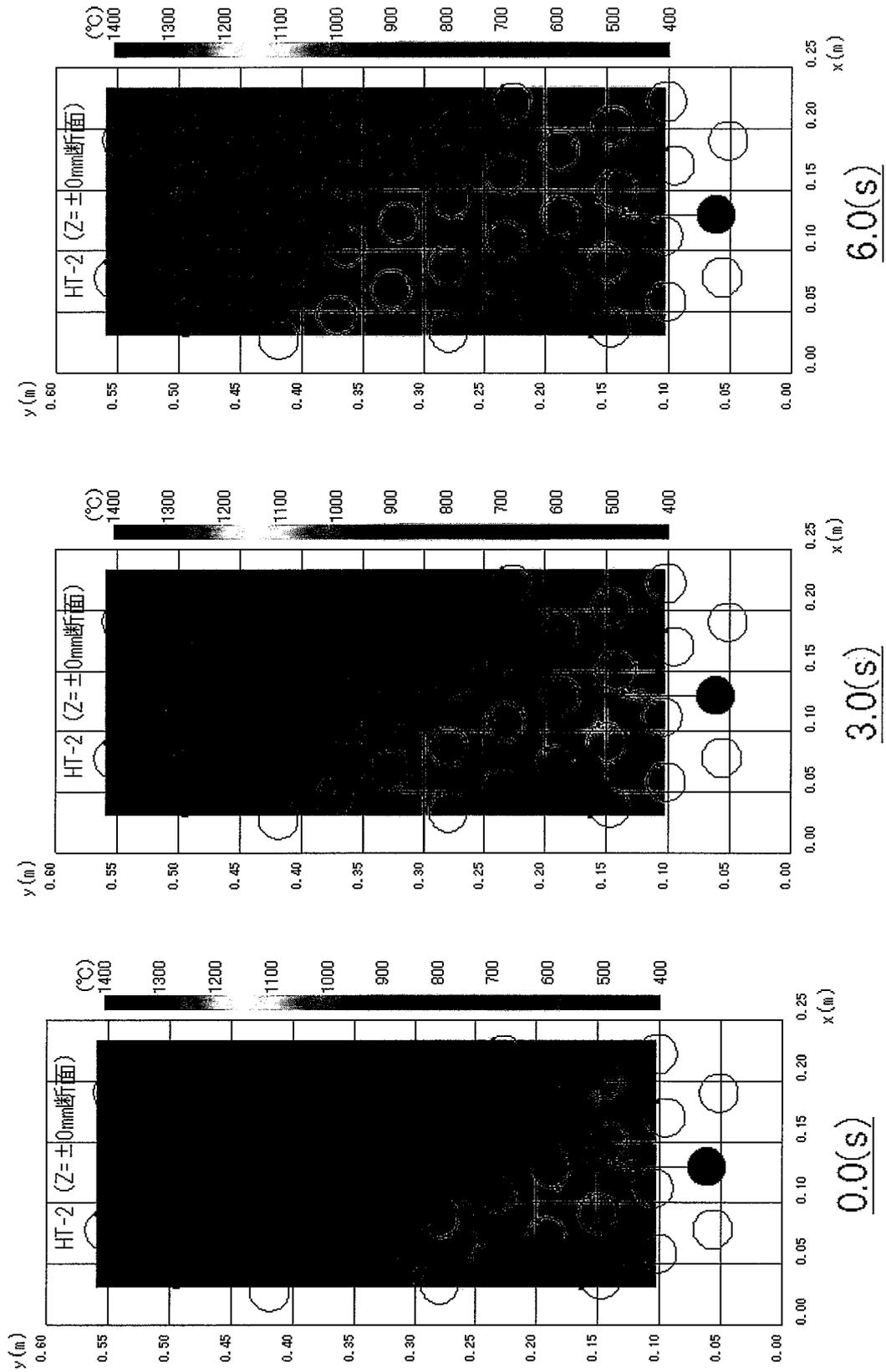


图 3.6-1 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(1/4)

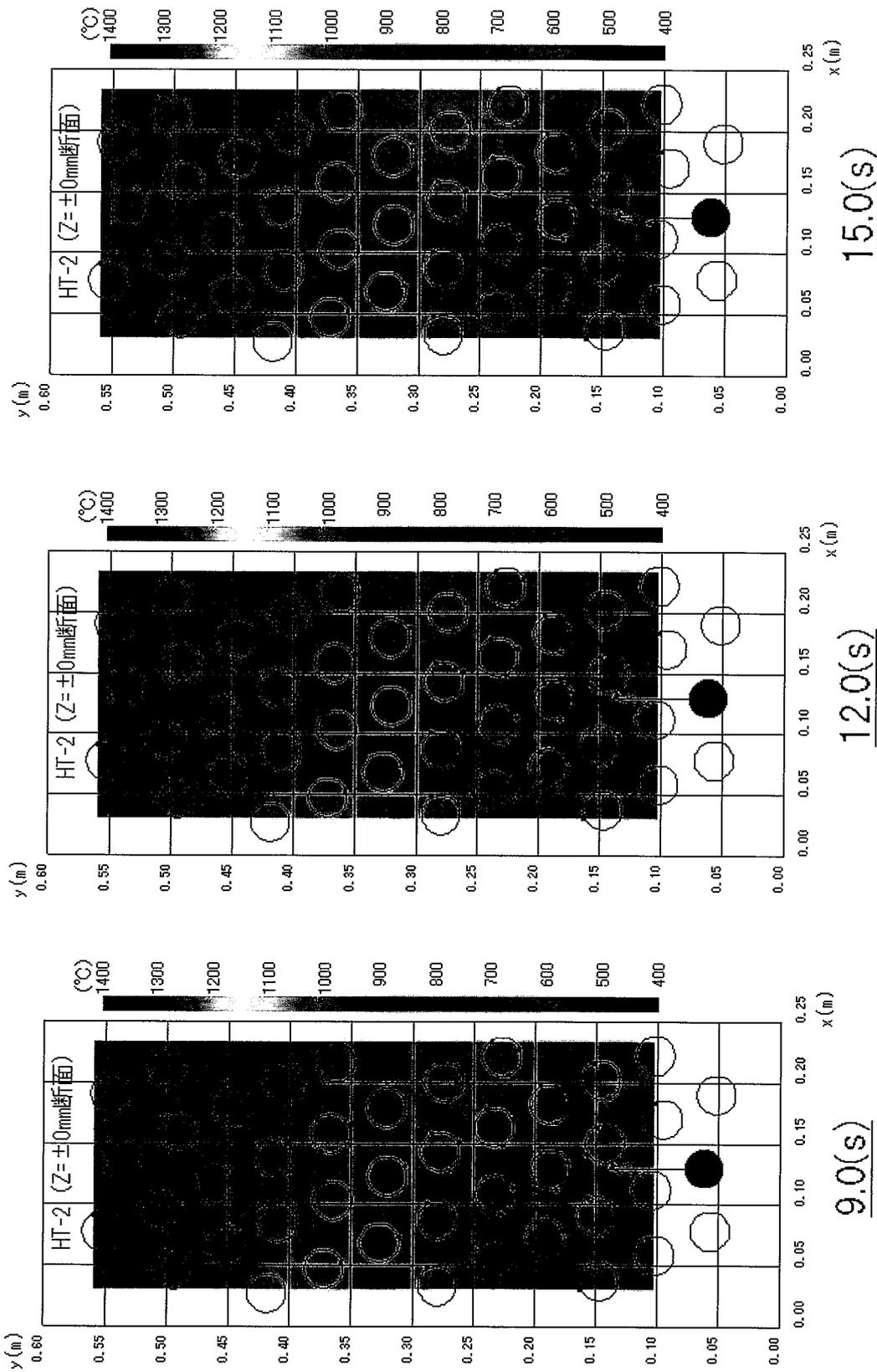


图 3.6-2 Run-HT2 温度分布推移 (3 秒平均) (2/4)

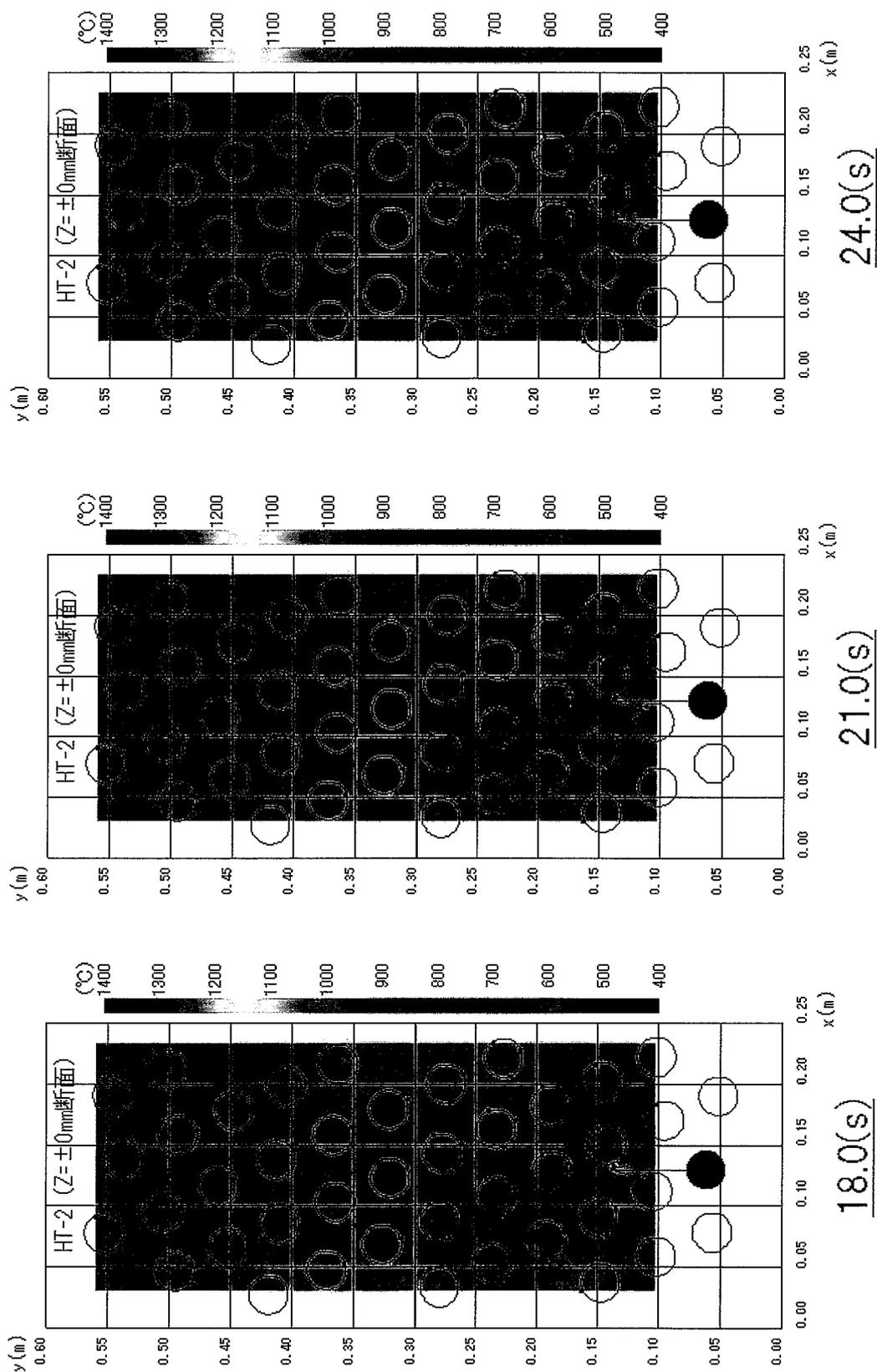


图 3.6-3 Run-HT2 温度分布推移 (3 秒平均) (3/4)

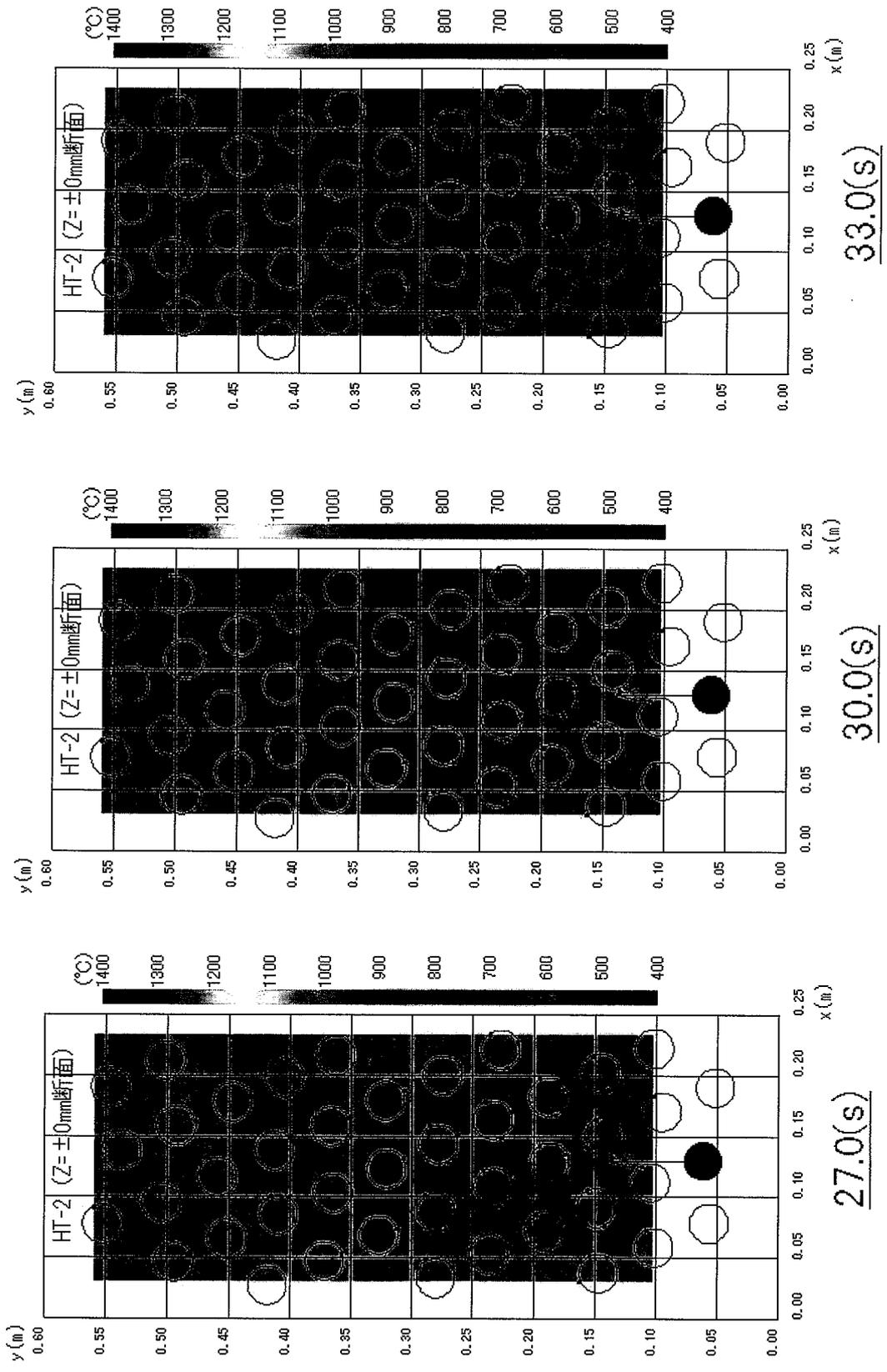


图 3.6-4 Run-HT2 温度分布推移 (3 秒平均) (4/4)

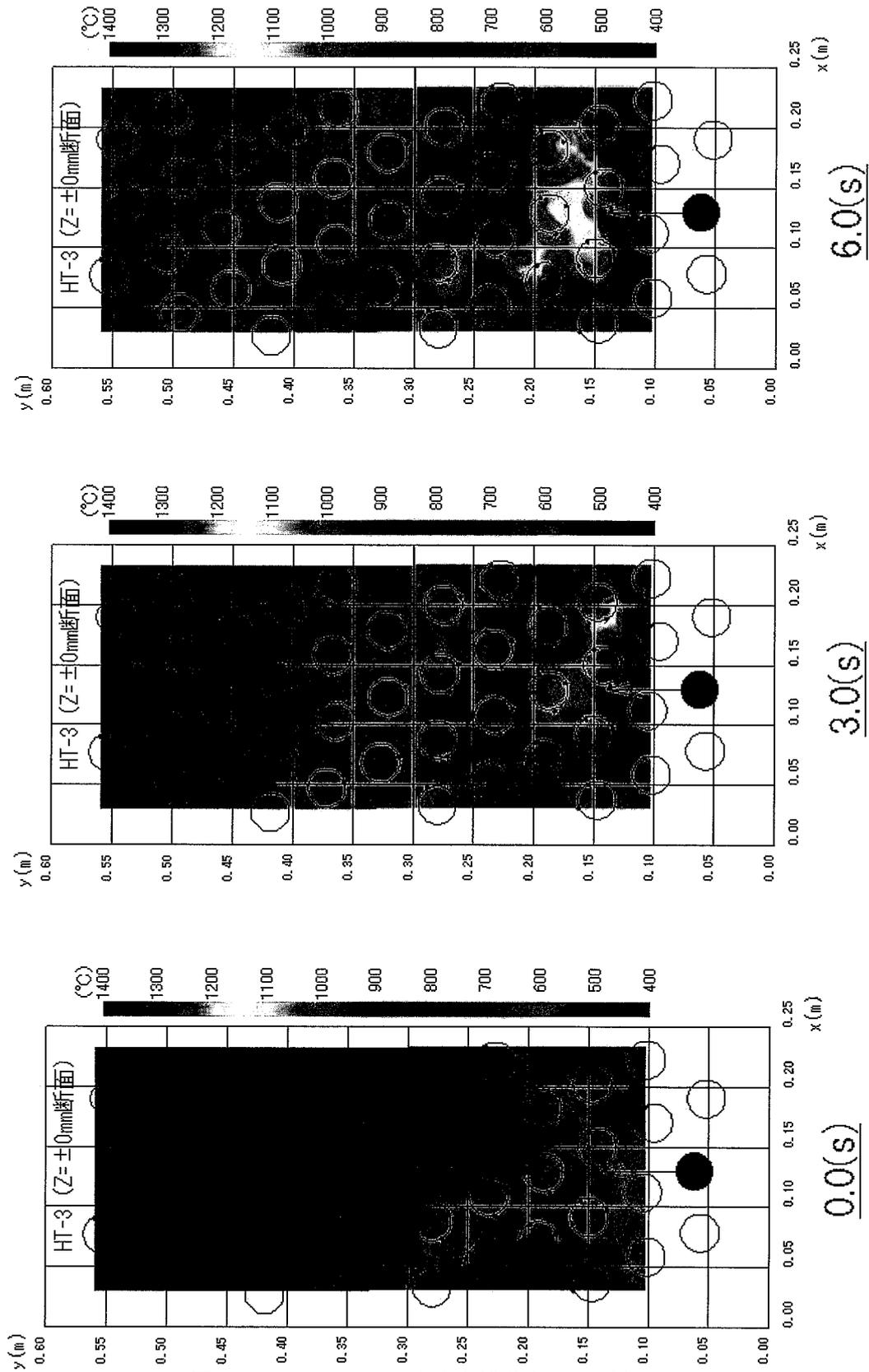


图 3.7-1 Run-HT2 温度分布推移(3 秒平均)(1/4)

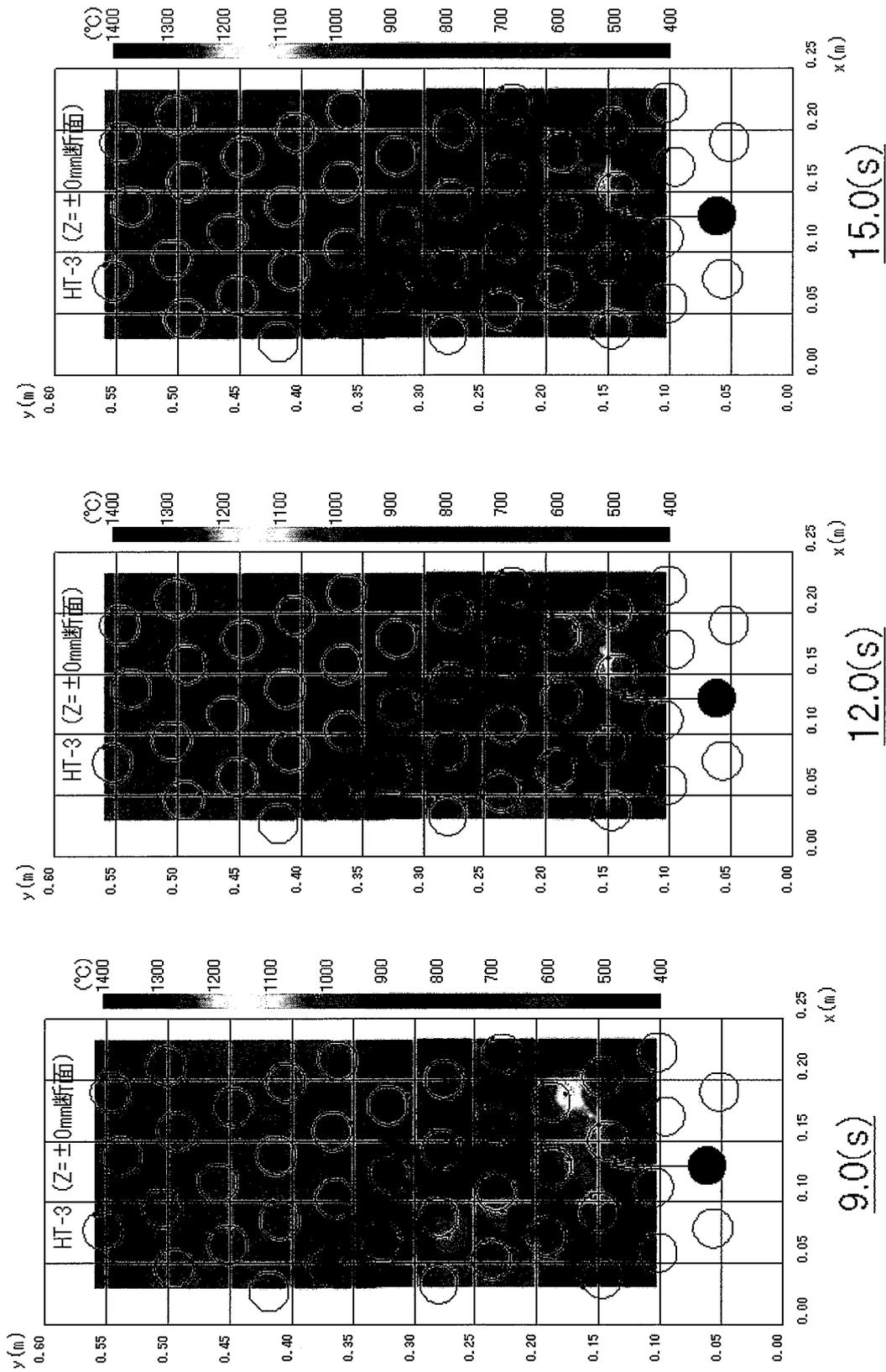


图 3.7-2 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(2/4)

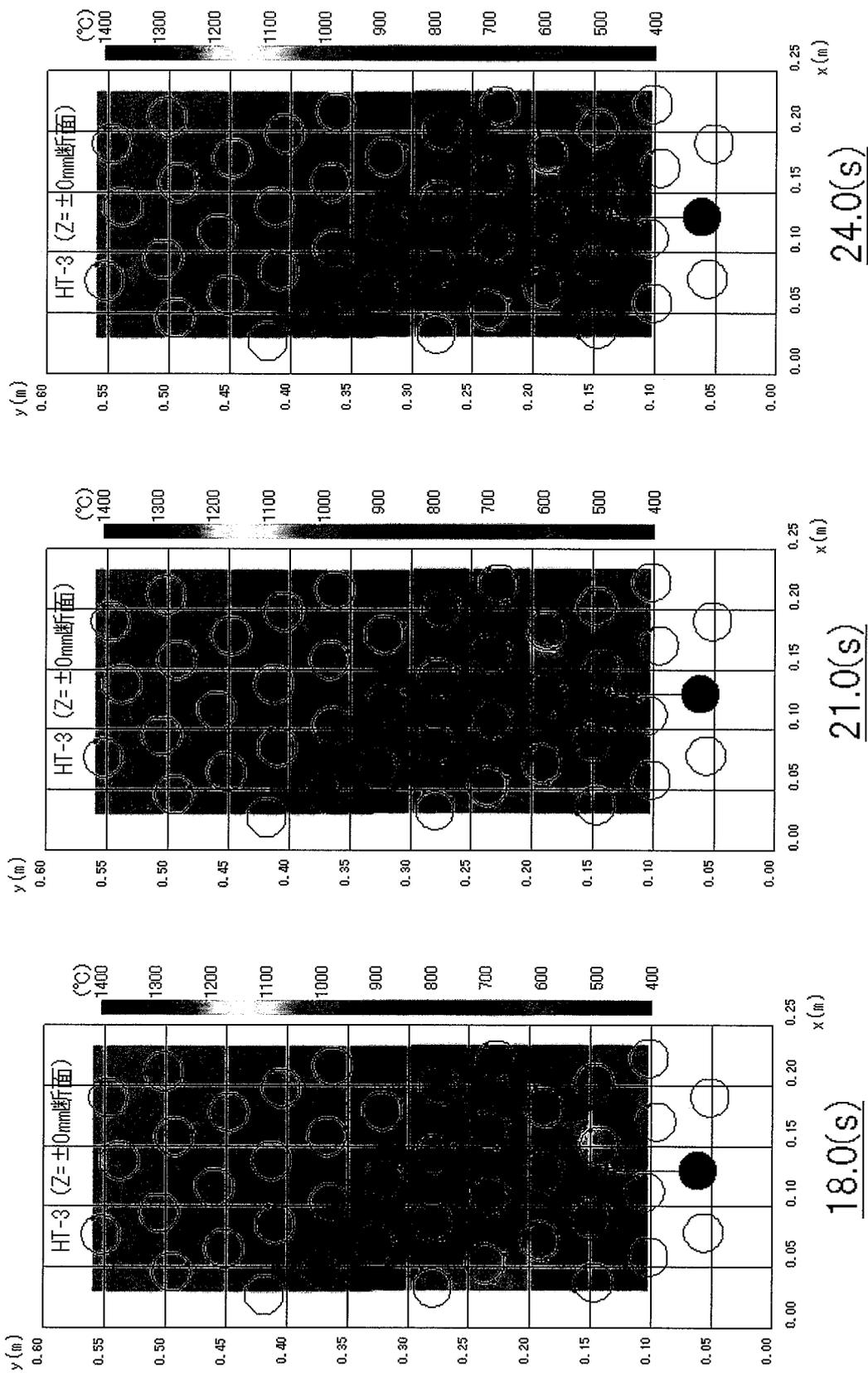


图 3.7-3 Run-HT2 温度分布推移 (3 秒平均) (3/4)

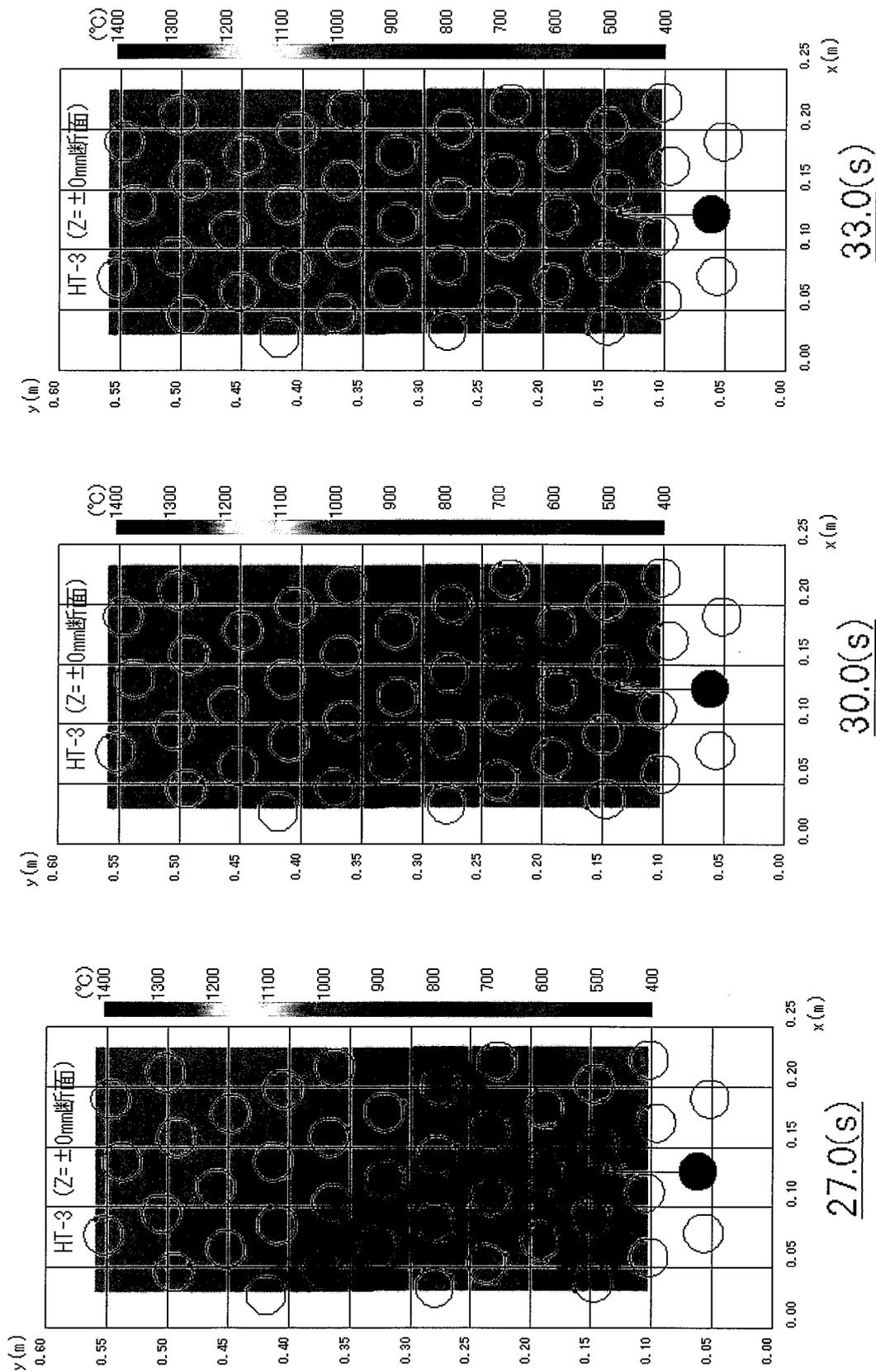


图 3.7-4 Run-HT2 温度分布推移(3秒平均)(4/4)

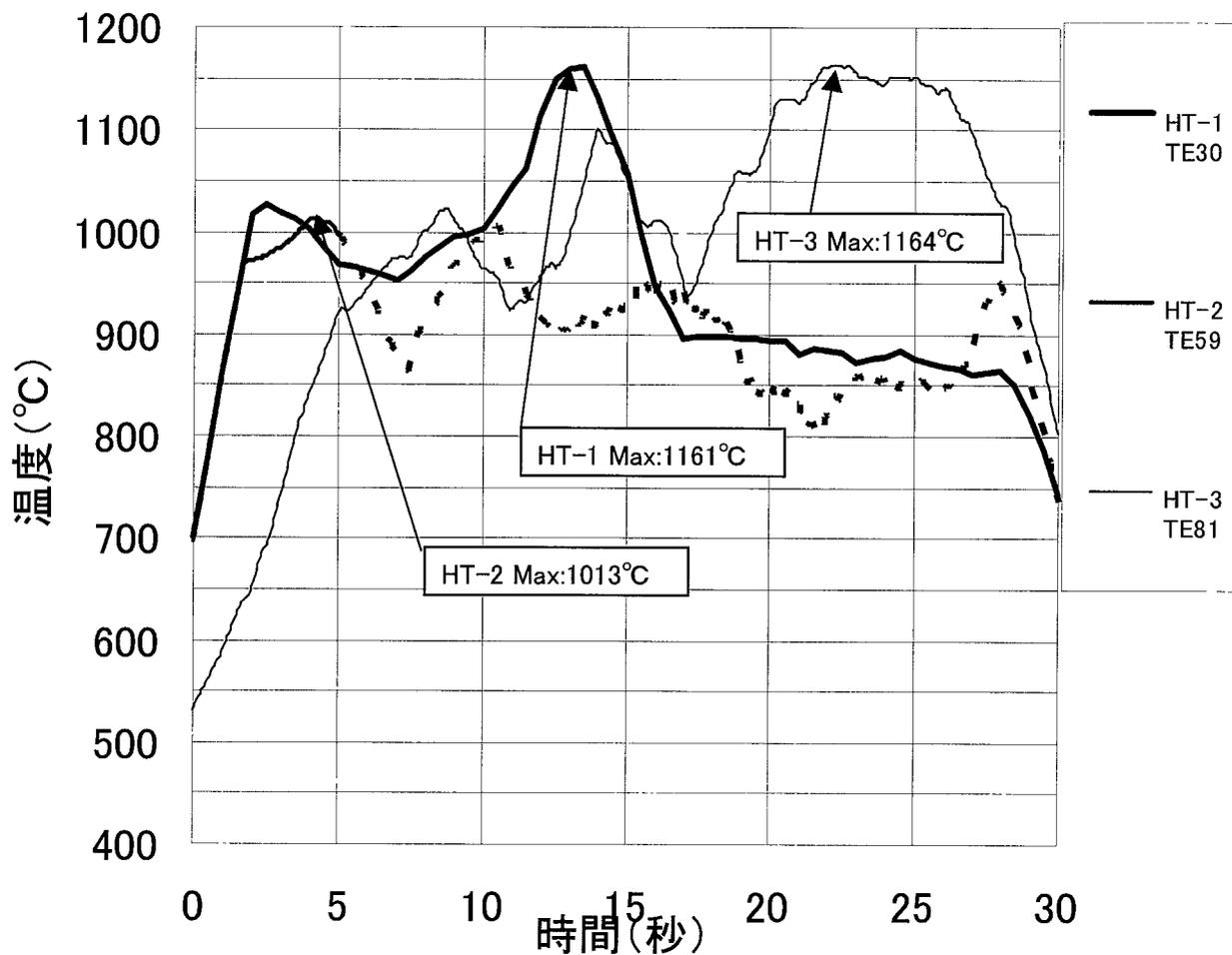


図 3.8 反応ジェットの最高温度比較

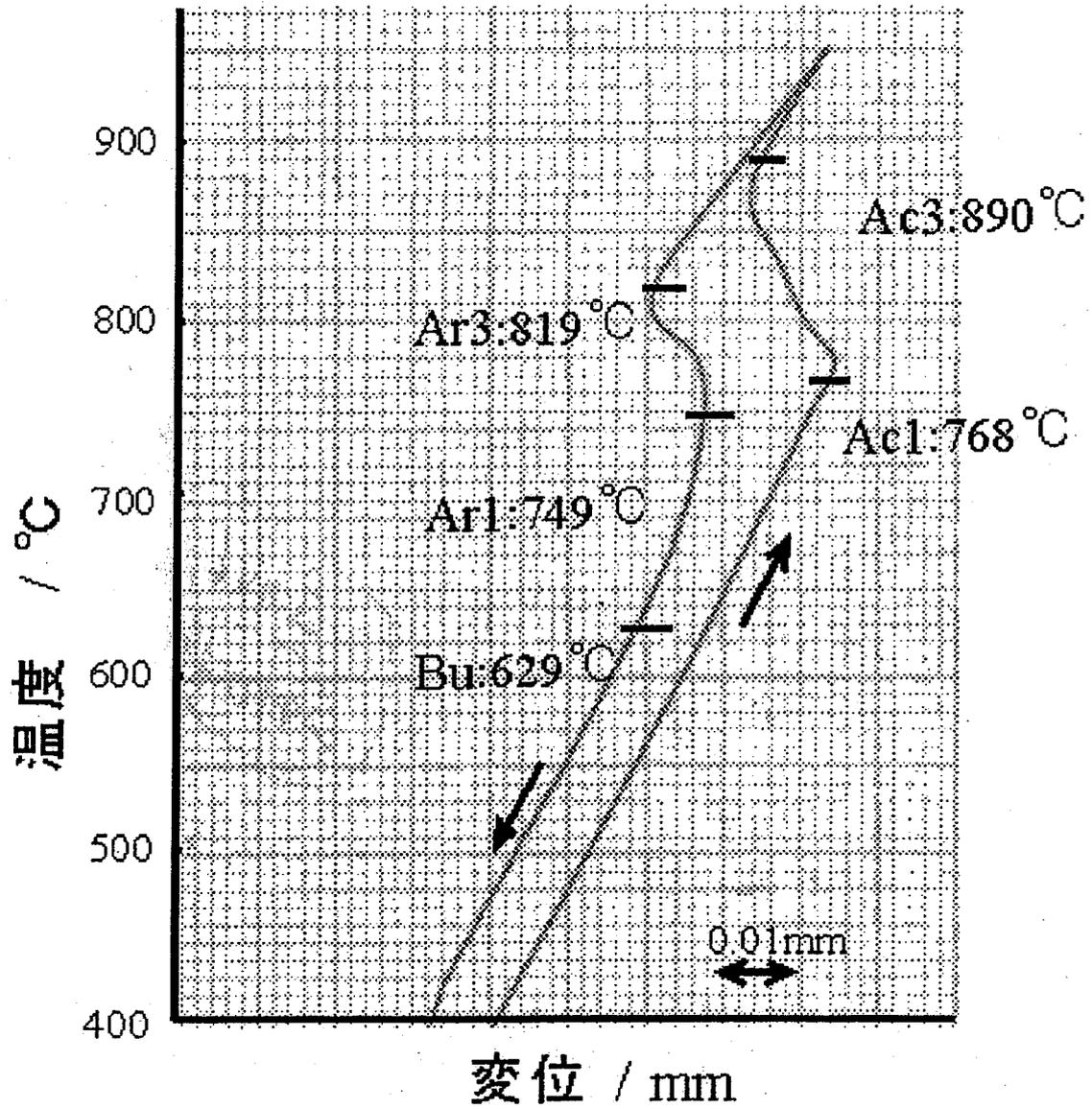


图 4.1 伝熱管材料変態点

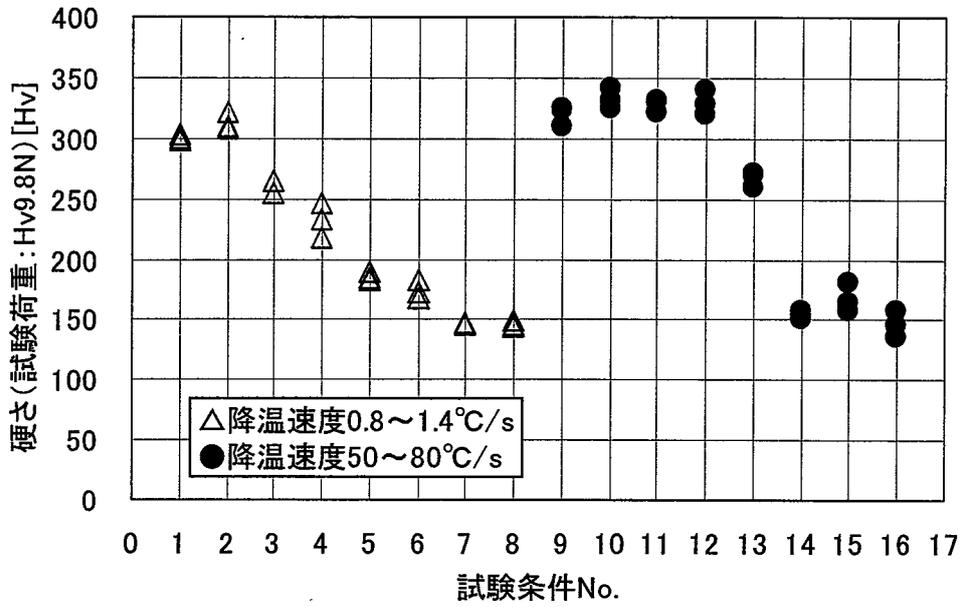


図 4.2 硬度検査結果(フォーマスタ試験材)

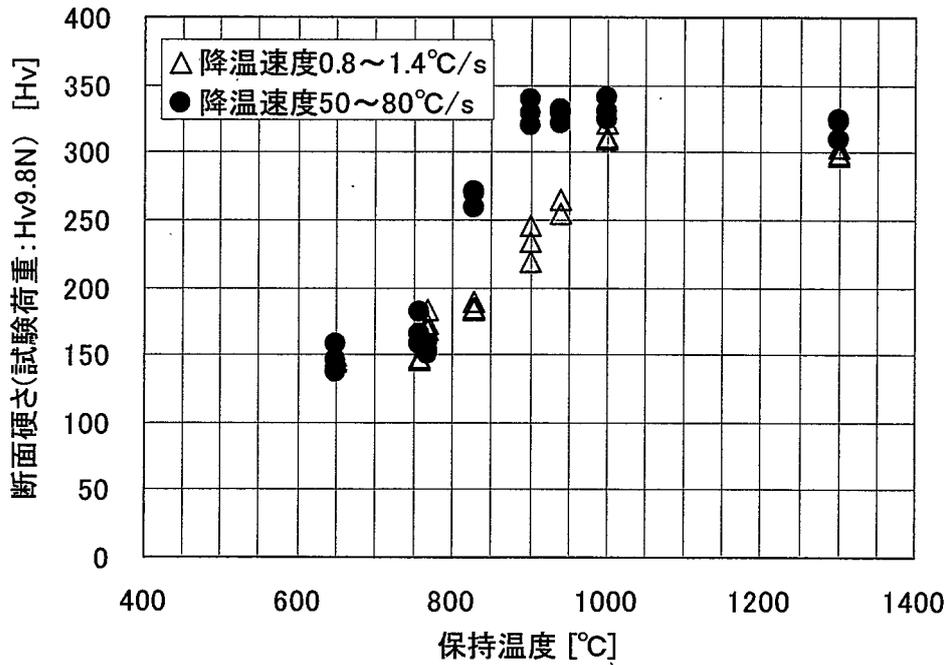


図 4.3 断面硬さと保持温度の関係

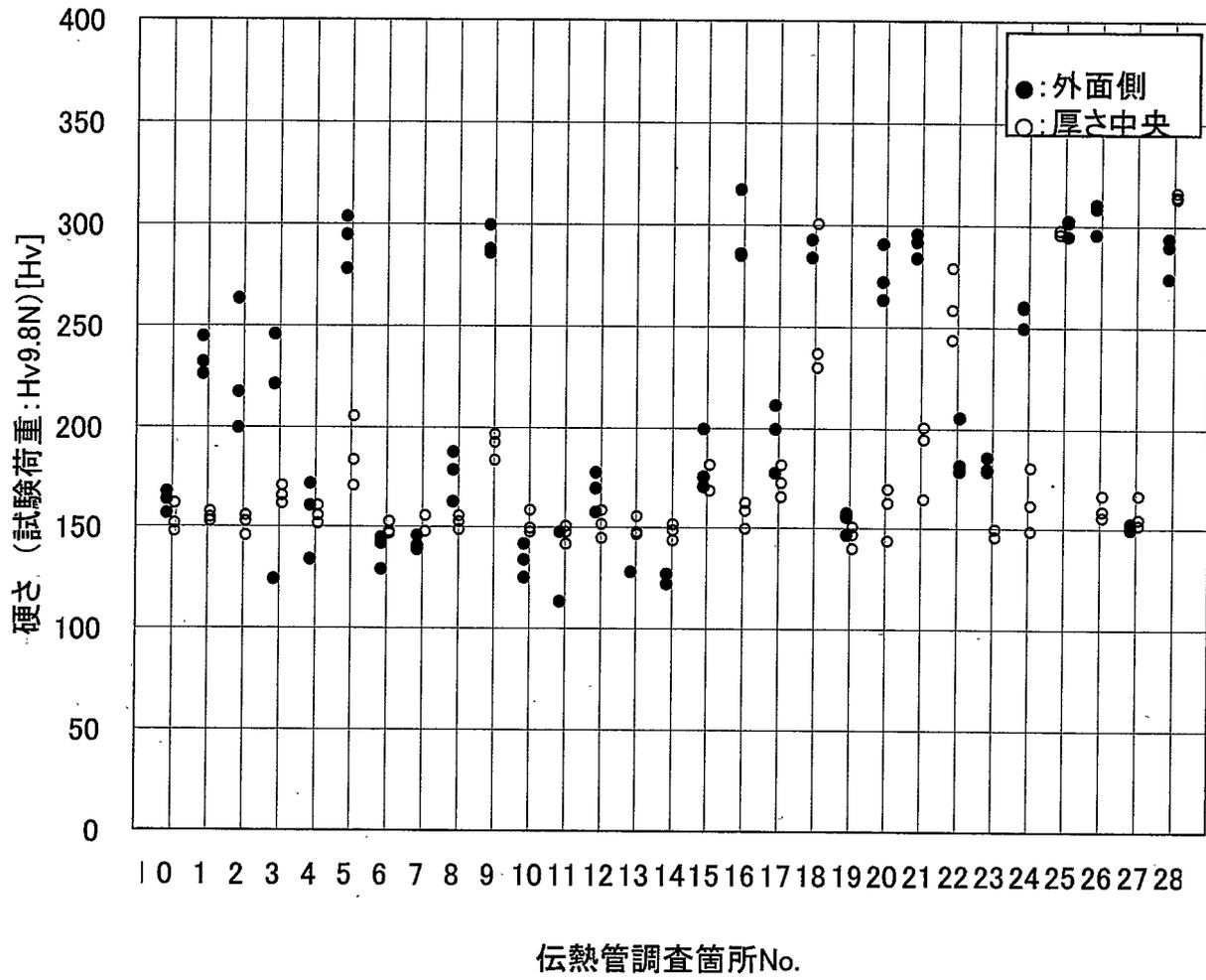


図 4.4 硬度検査結果(テストピース)

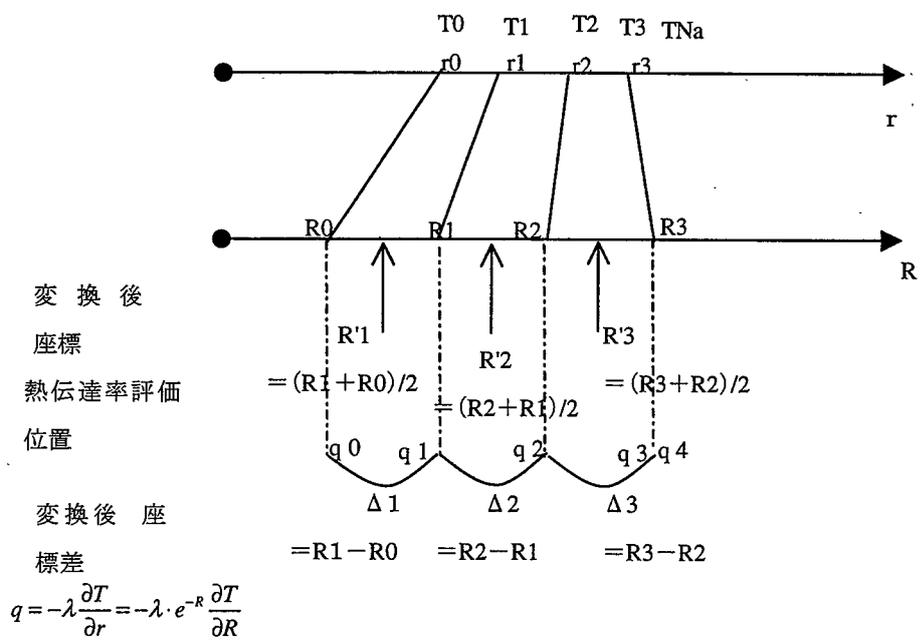
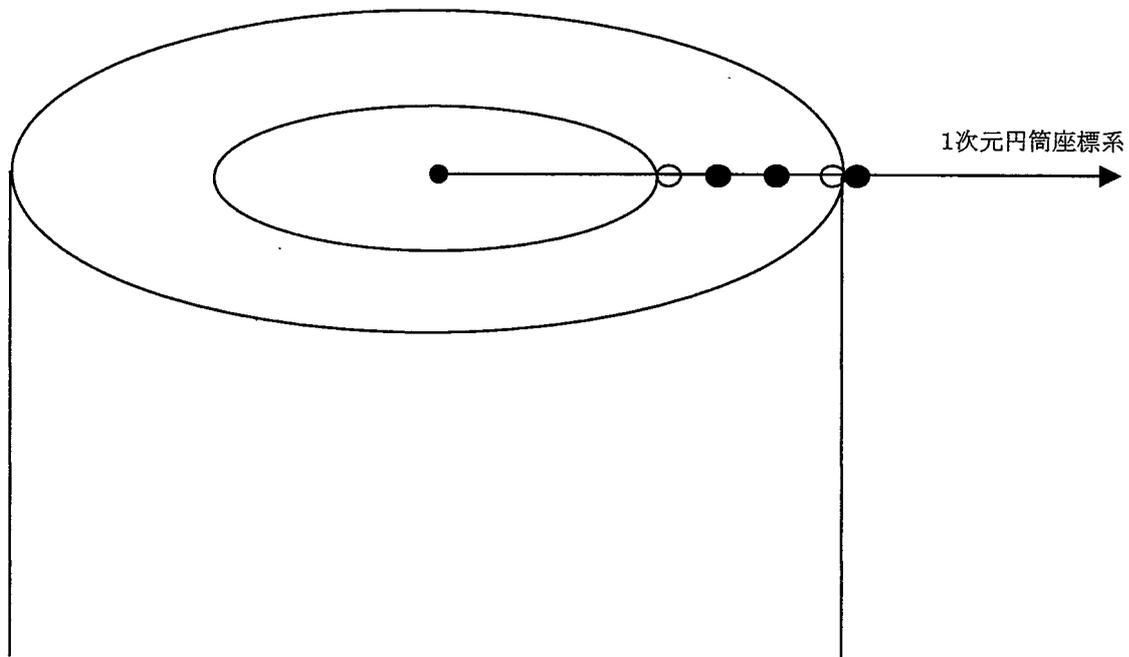
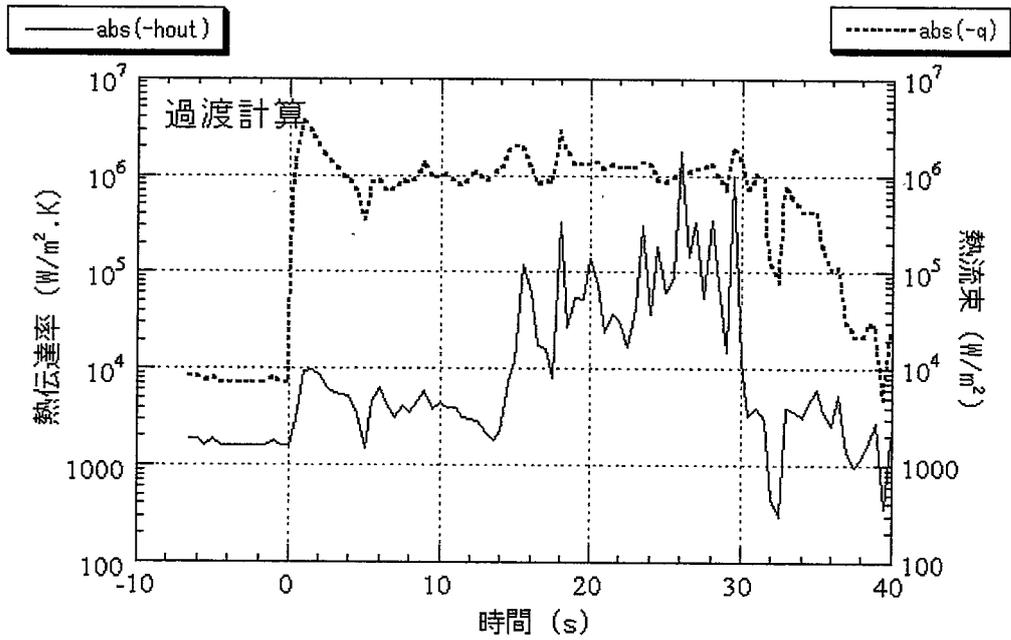
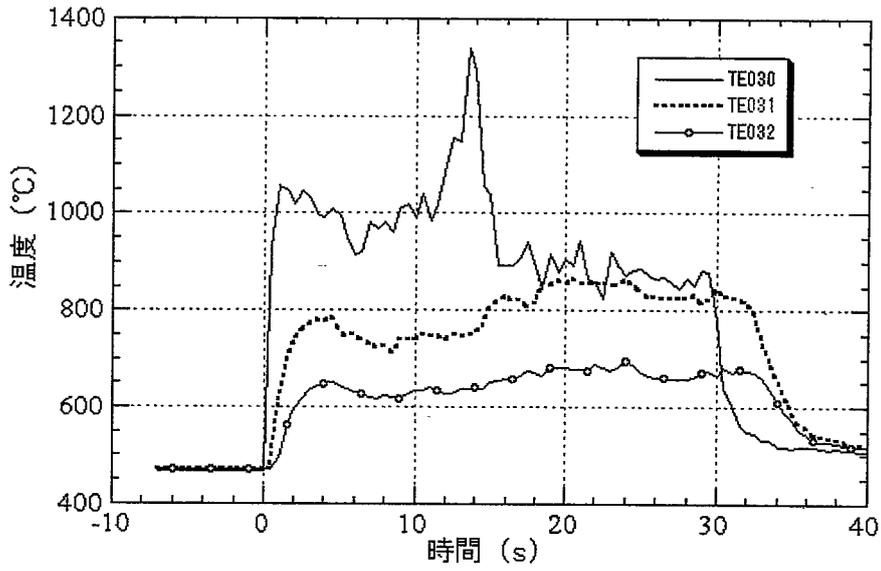
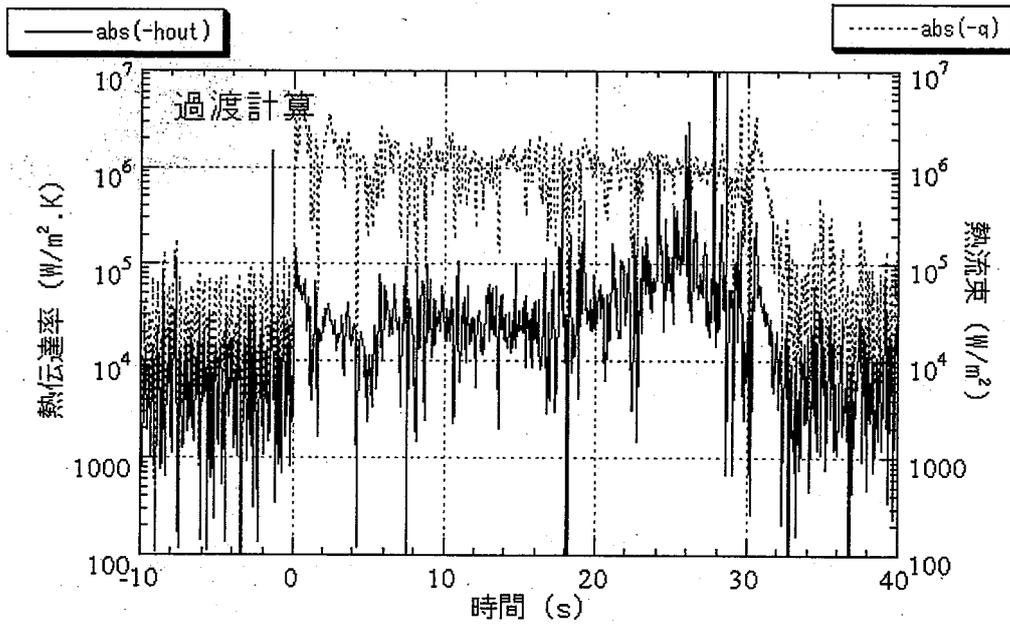
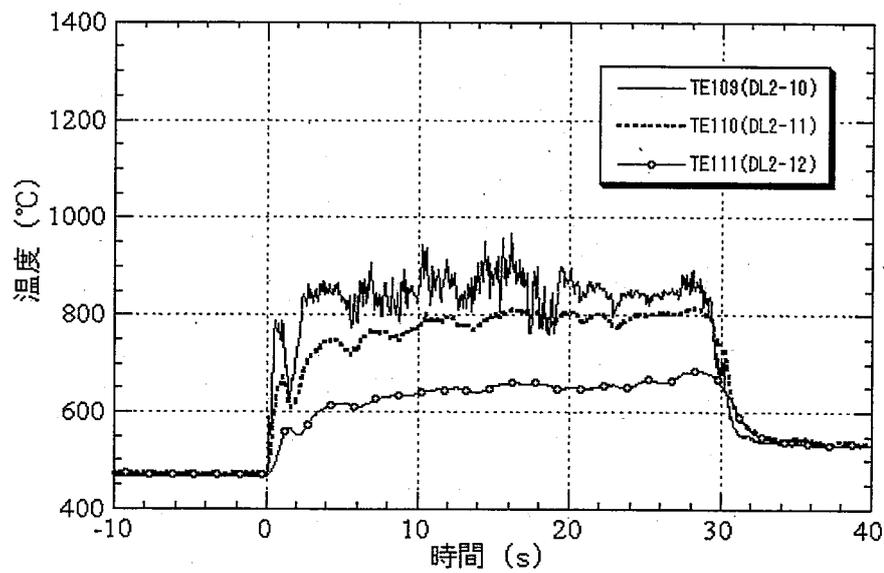


図 5.1 熱伝達率評価モデル図



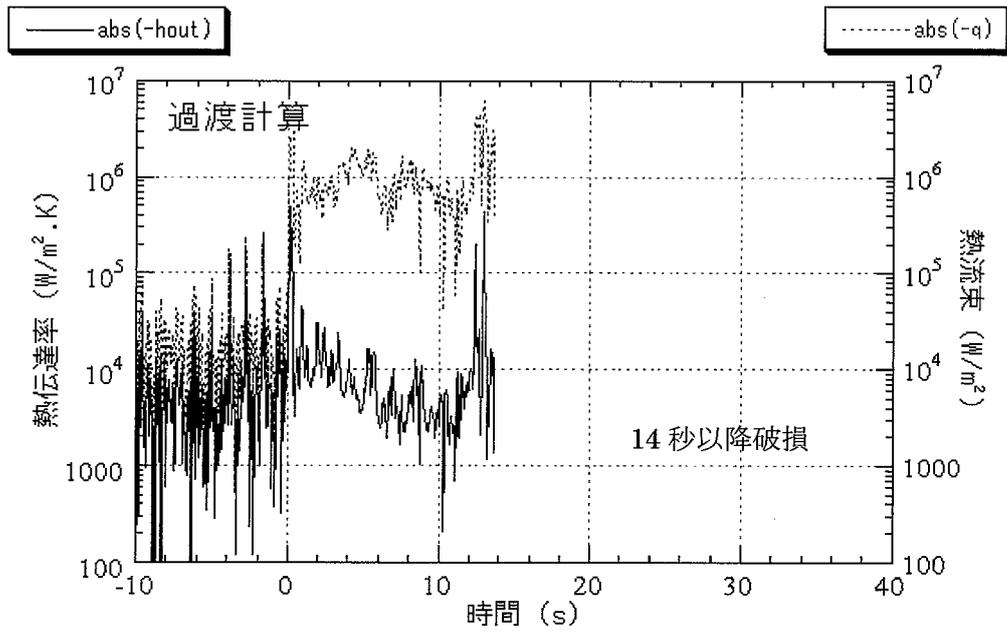
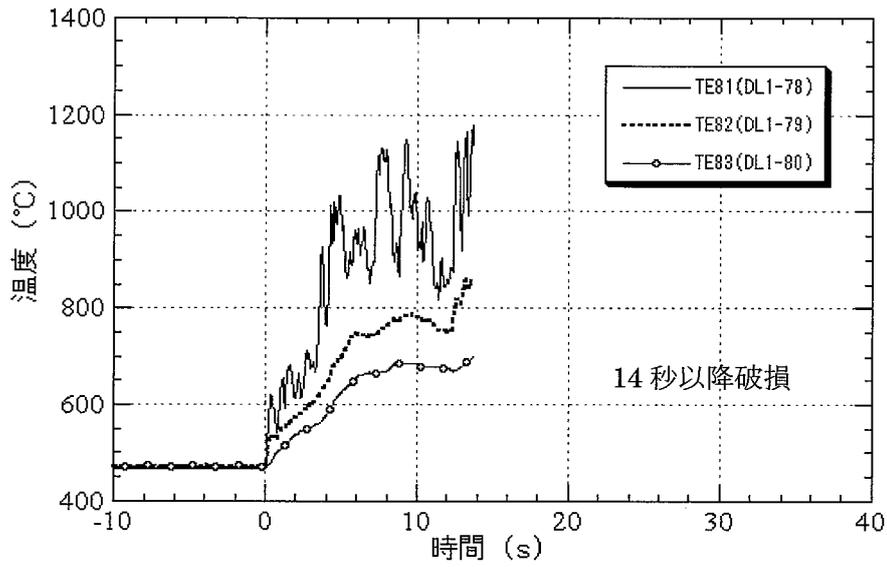
(収録速度 :0.5 秒)

図 5.2-1 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-1)



(収録速度 :0.05 秒)

図 5.2-2 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-2)



(収録速度 :0.05 秒)

図 5.2-3 管外熱伝達率の算出サンプル(HT-3)

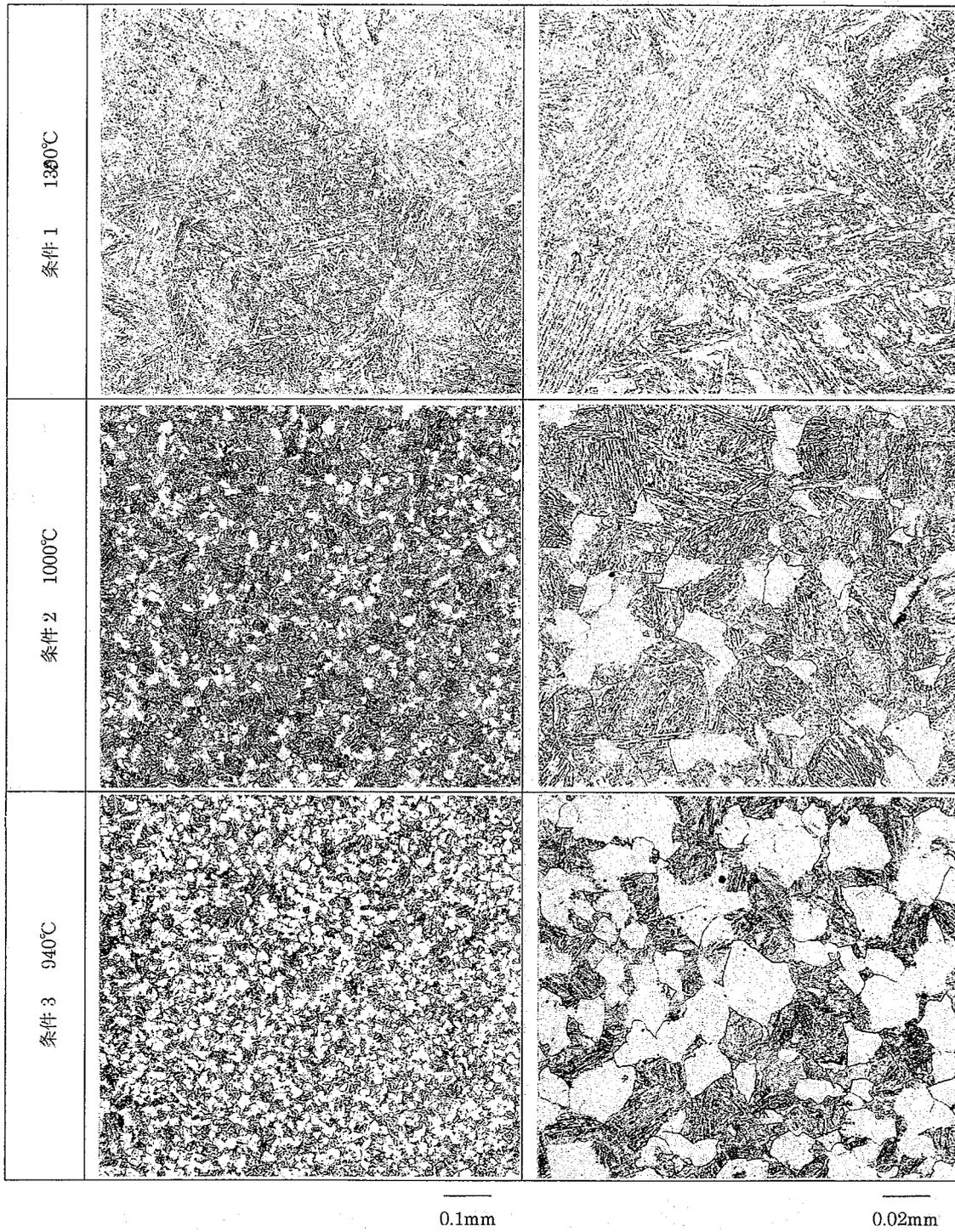
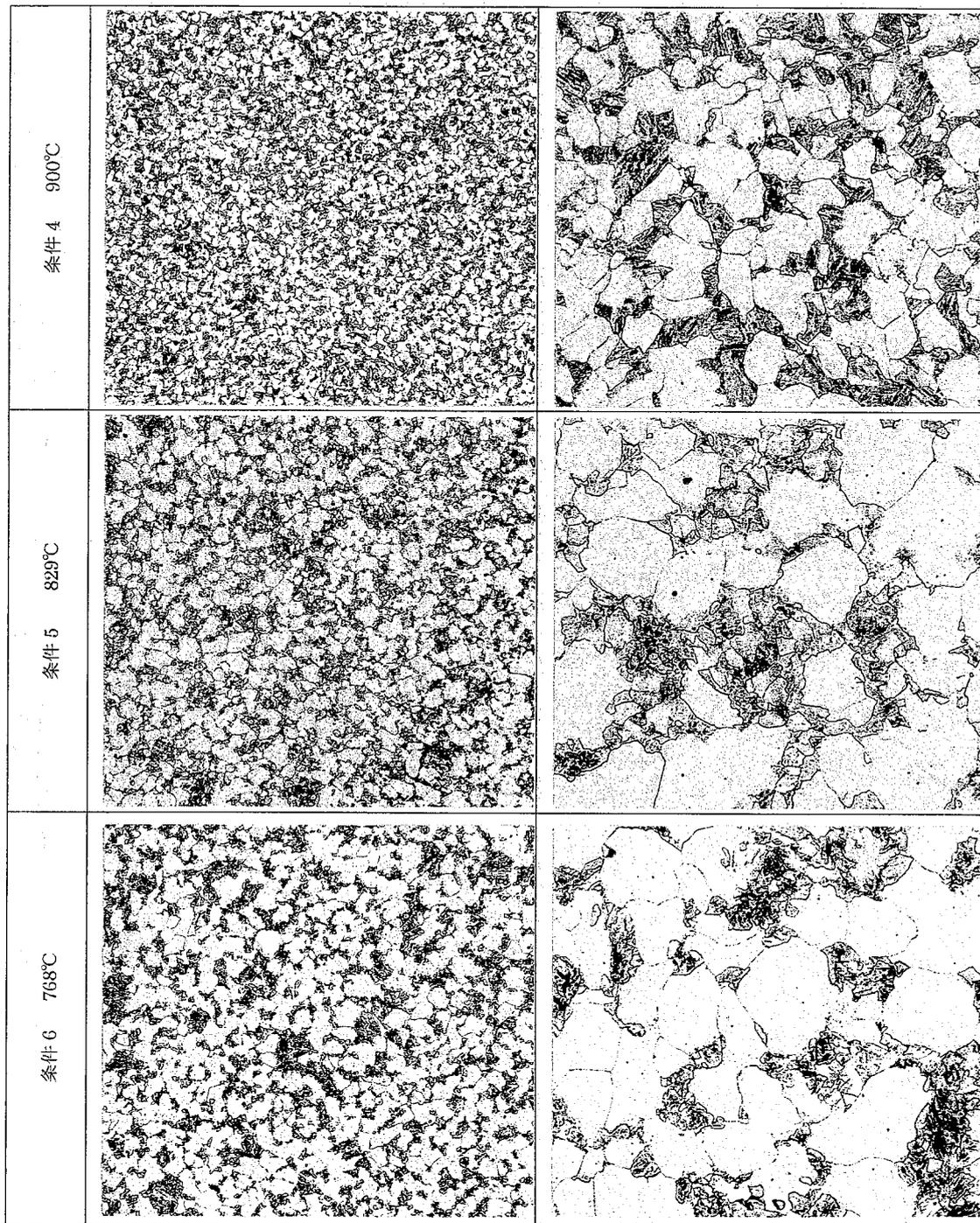


写真 4.1-1 フォーマスタ試験材断面の金属組織：顕微鏡（1/6）



0.1mm

0.02mm

写真 4.1-2 フォーマスタ試験材断面の金属組織：顕微鏡(2/6)

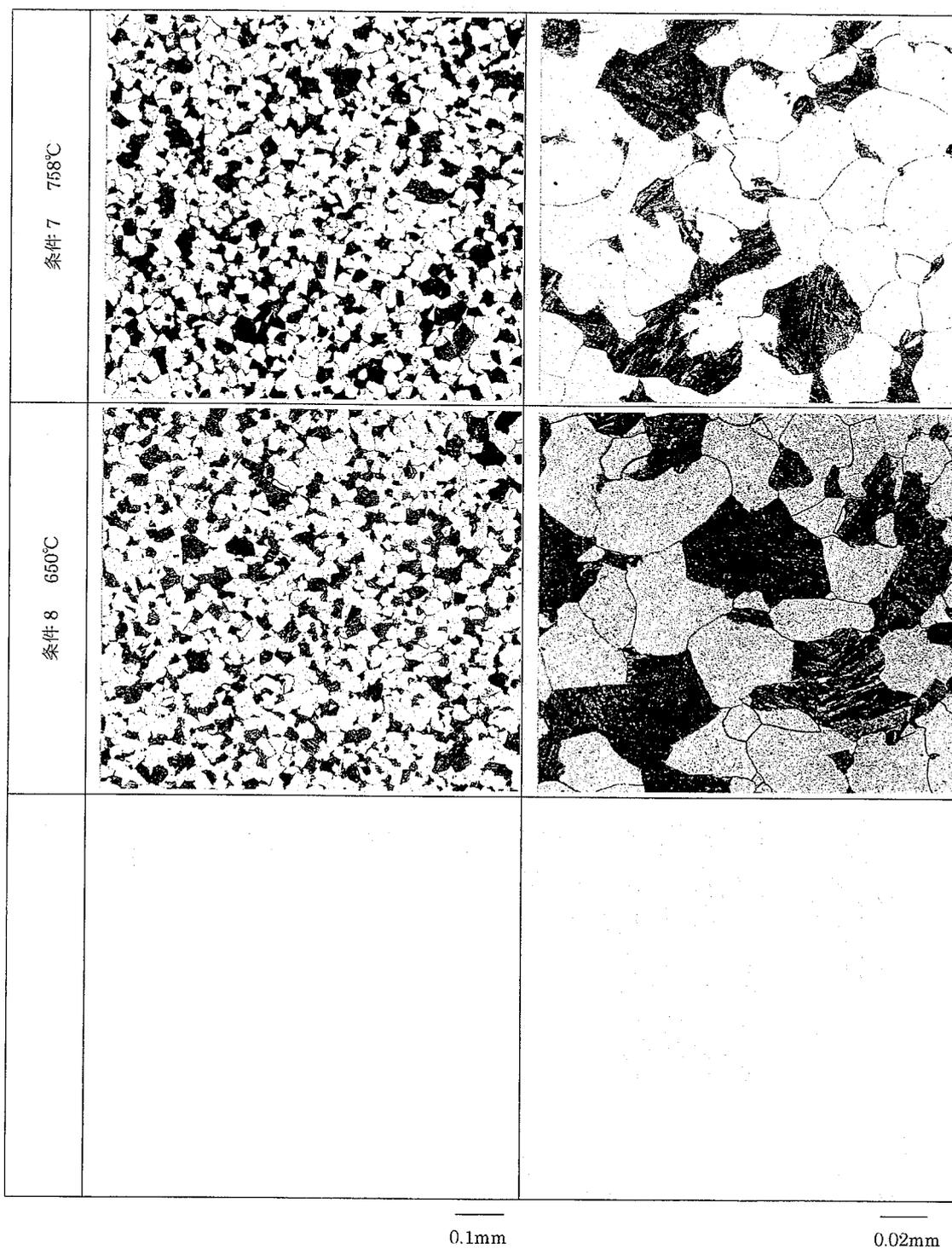


写真 4.1-3 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(3/6)

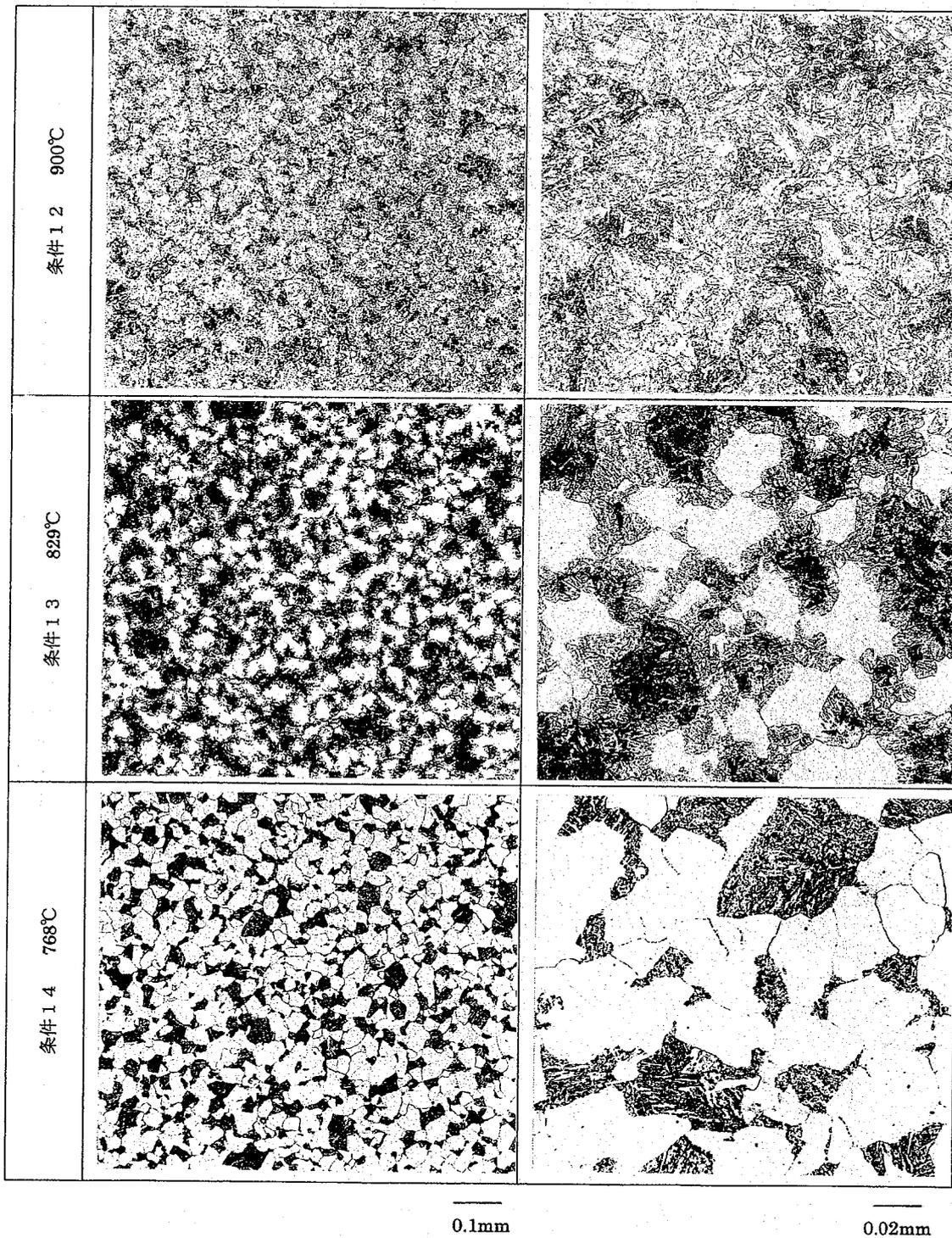


写真 4.1-5 フォーマスタ試験材断面の金属組織:顕微鏡(5/6)

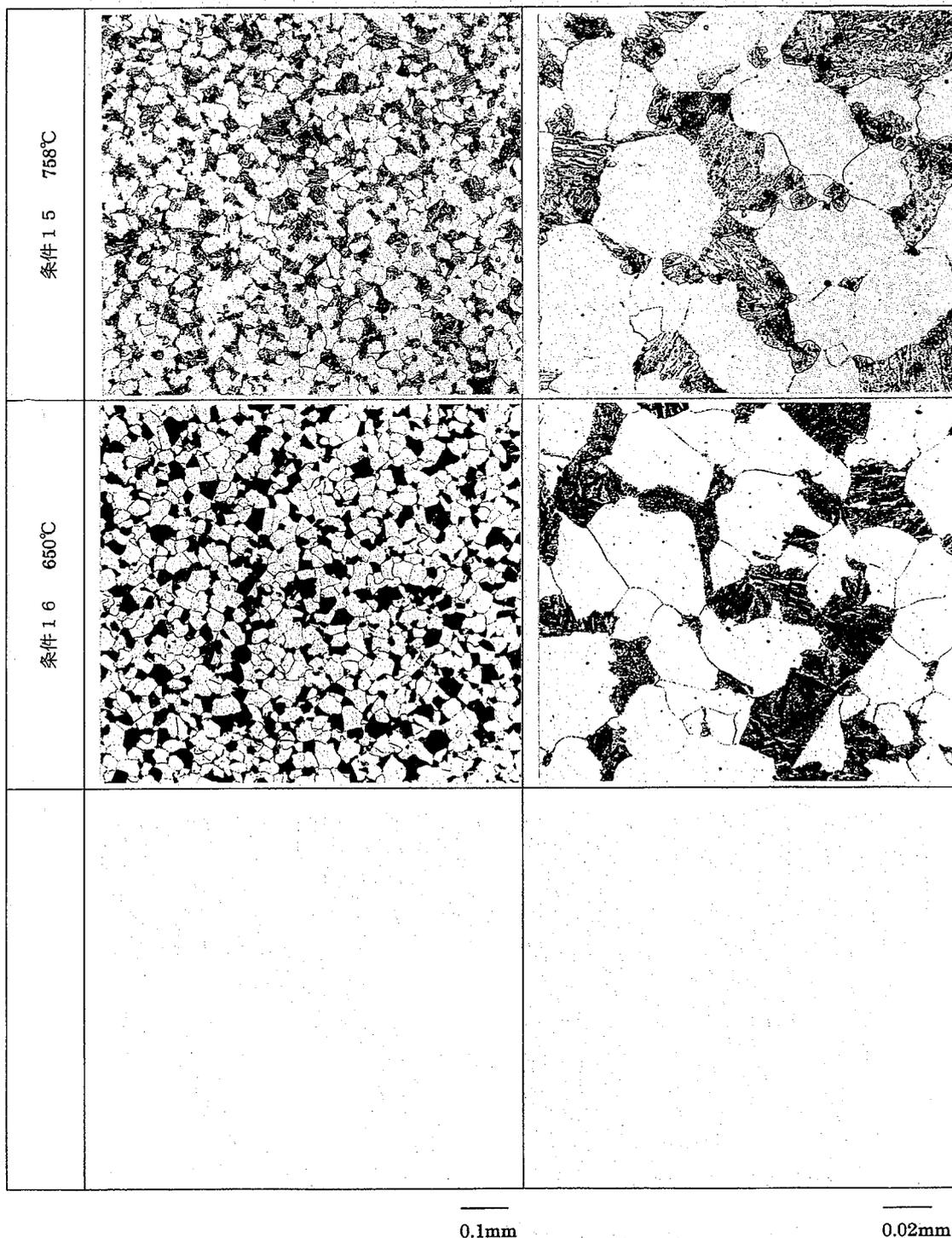


写真 4.1-6 フォーマスタ試験材断面の金属組織: 顕微鏡(6/6)

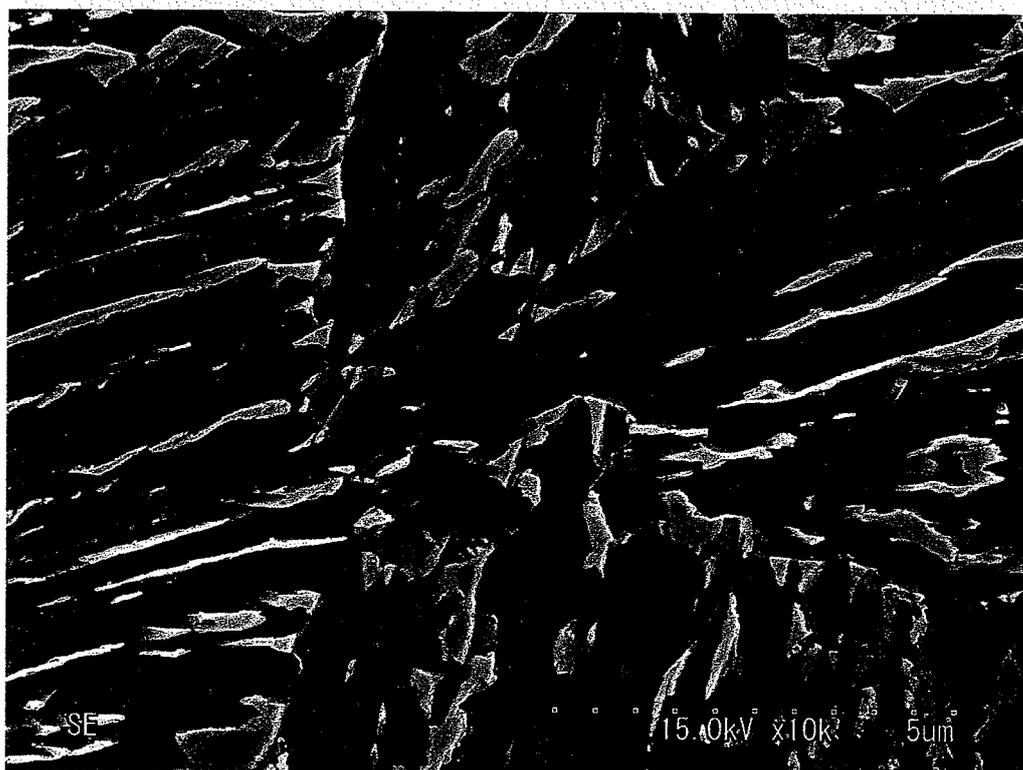


写真 4.2-1 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 1)

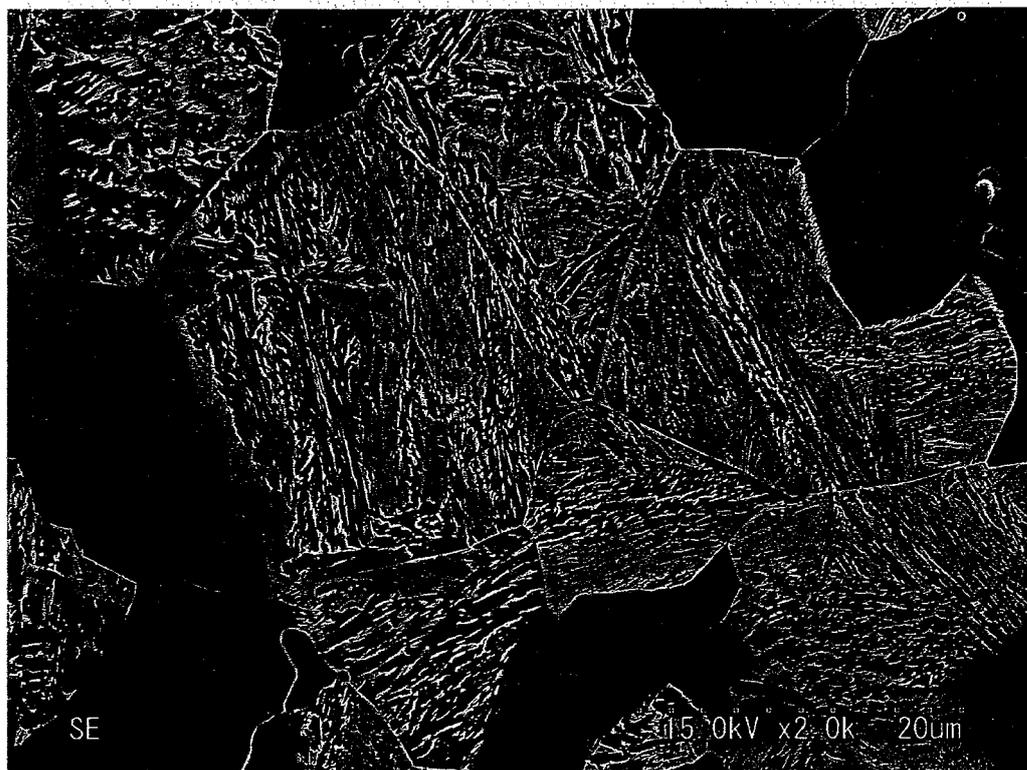


写真 4.2-2 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 2)

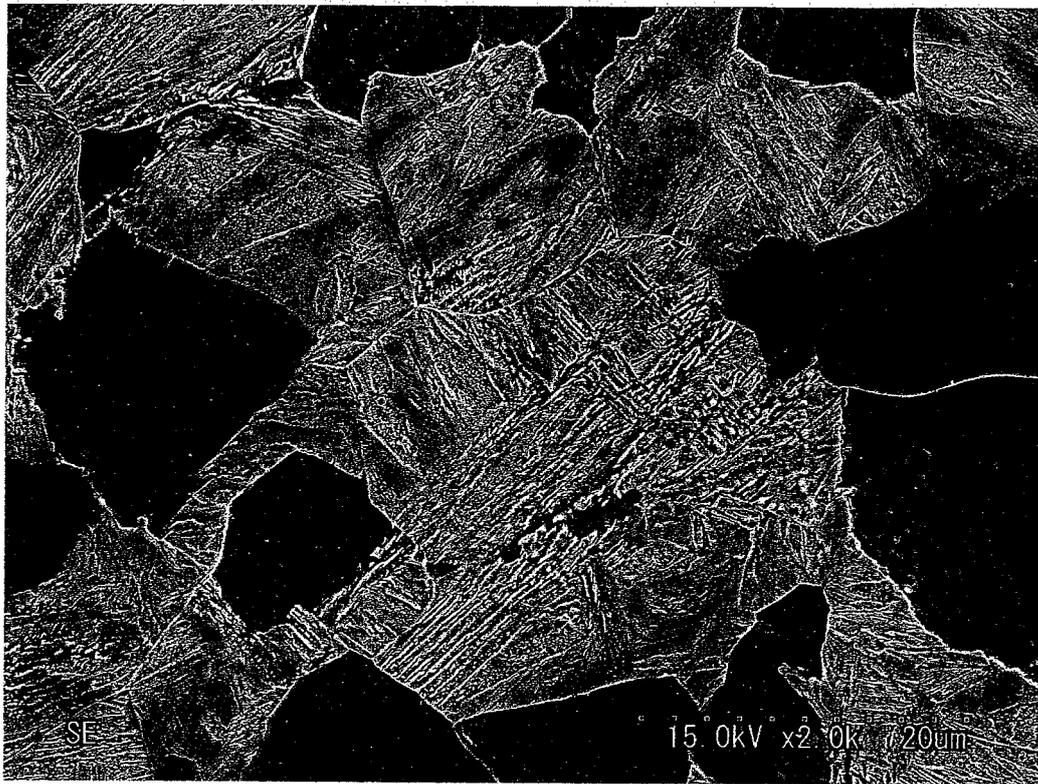


写真 4.2-3 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 3)

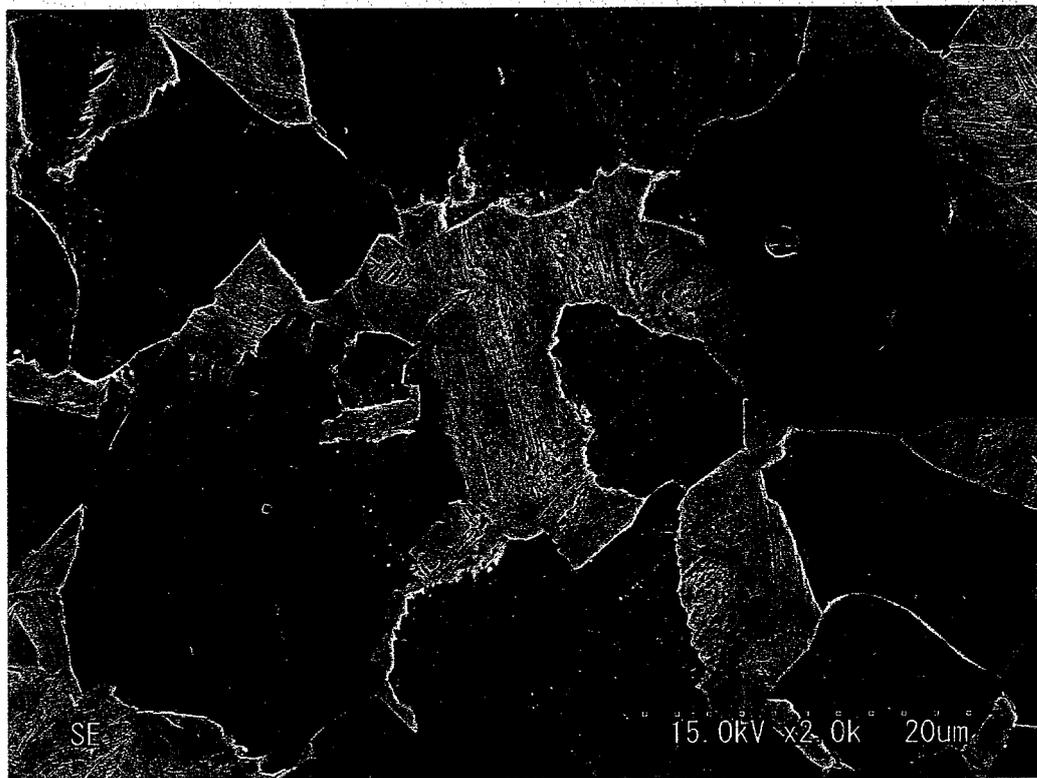


写真 4.2-4 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 4)

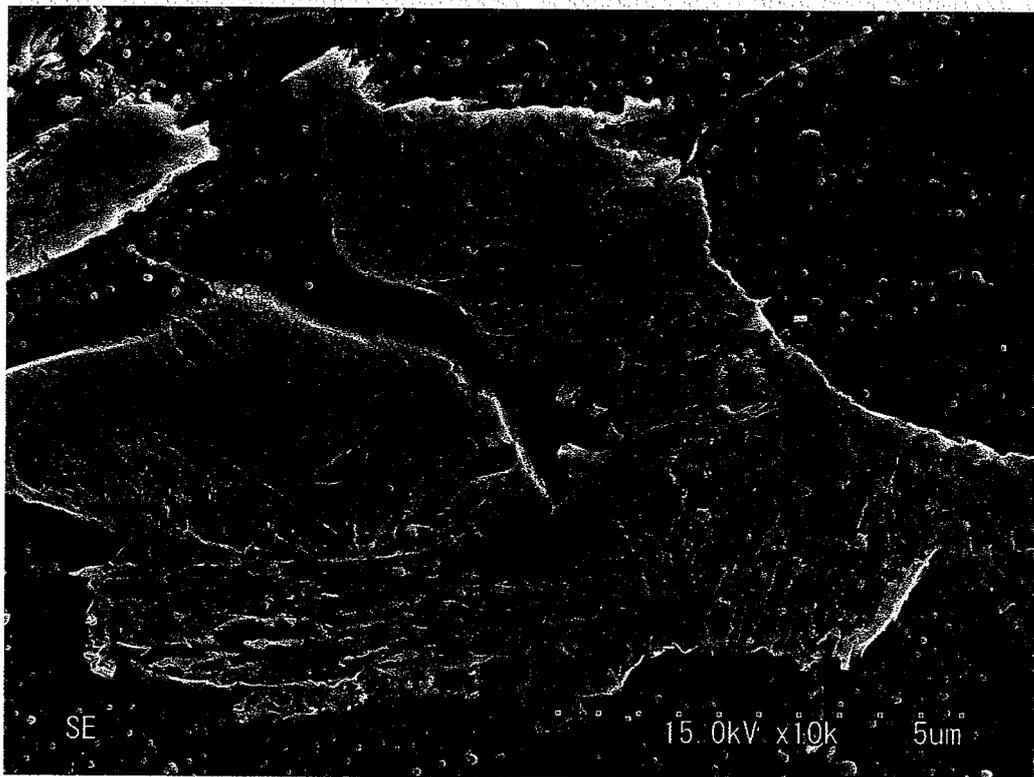
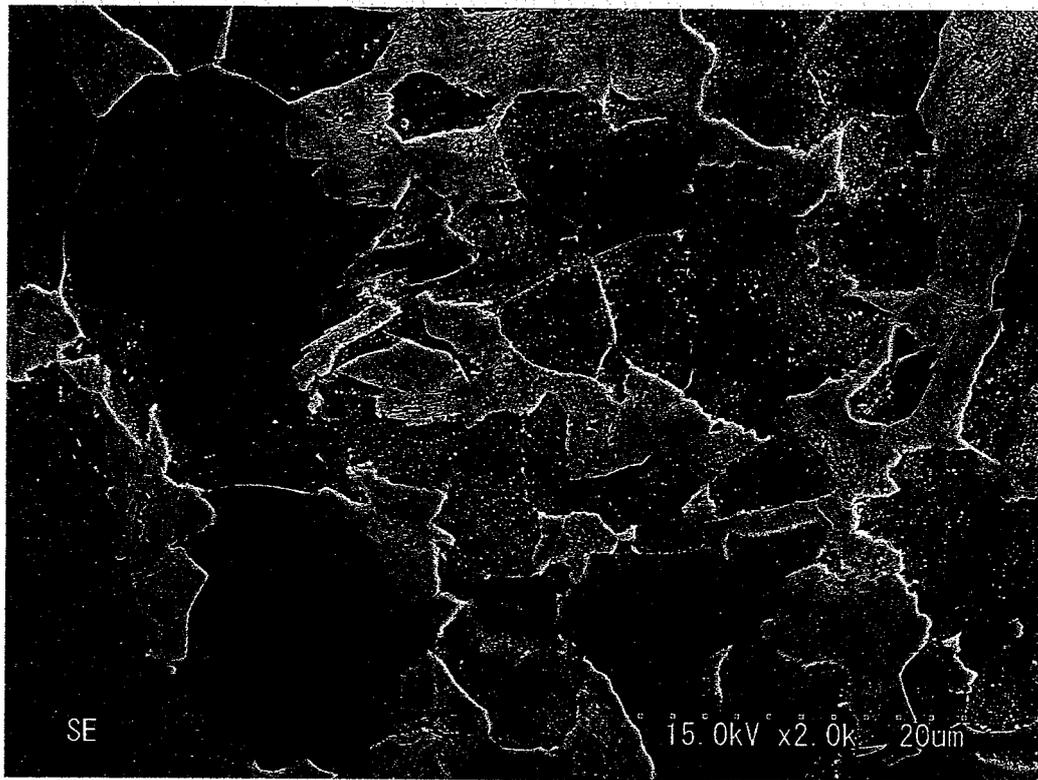


写真 4.2-5 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 5)

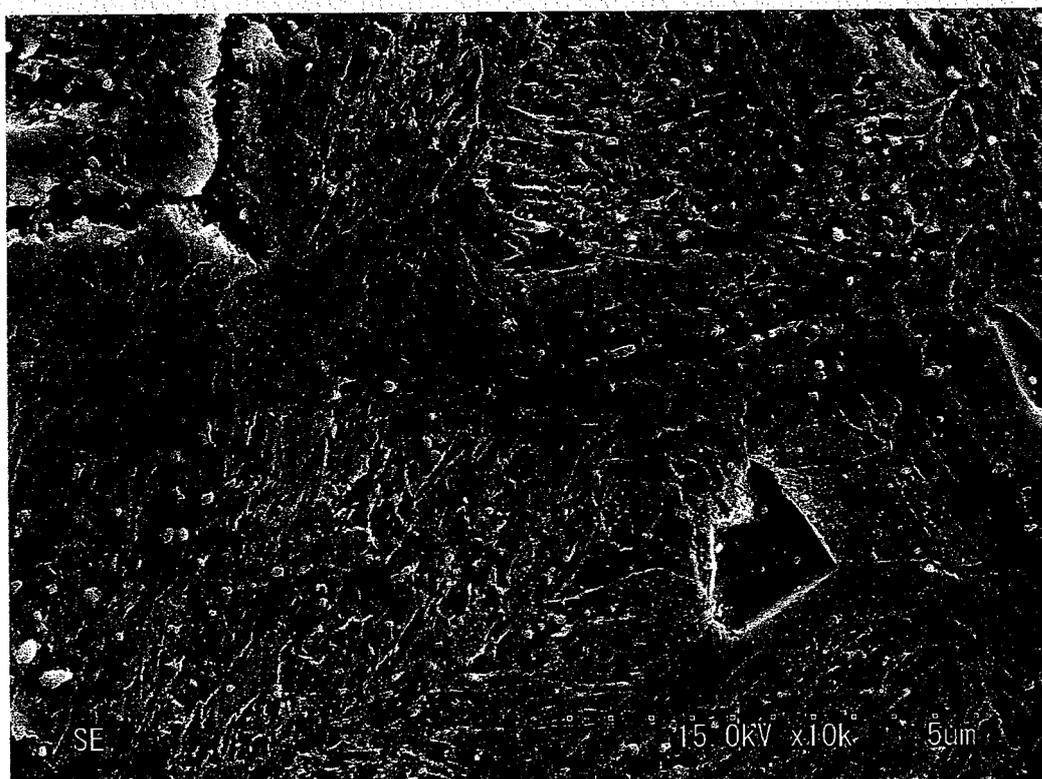


写真 4.2-6 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 6)

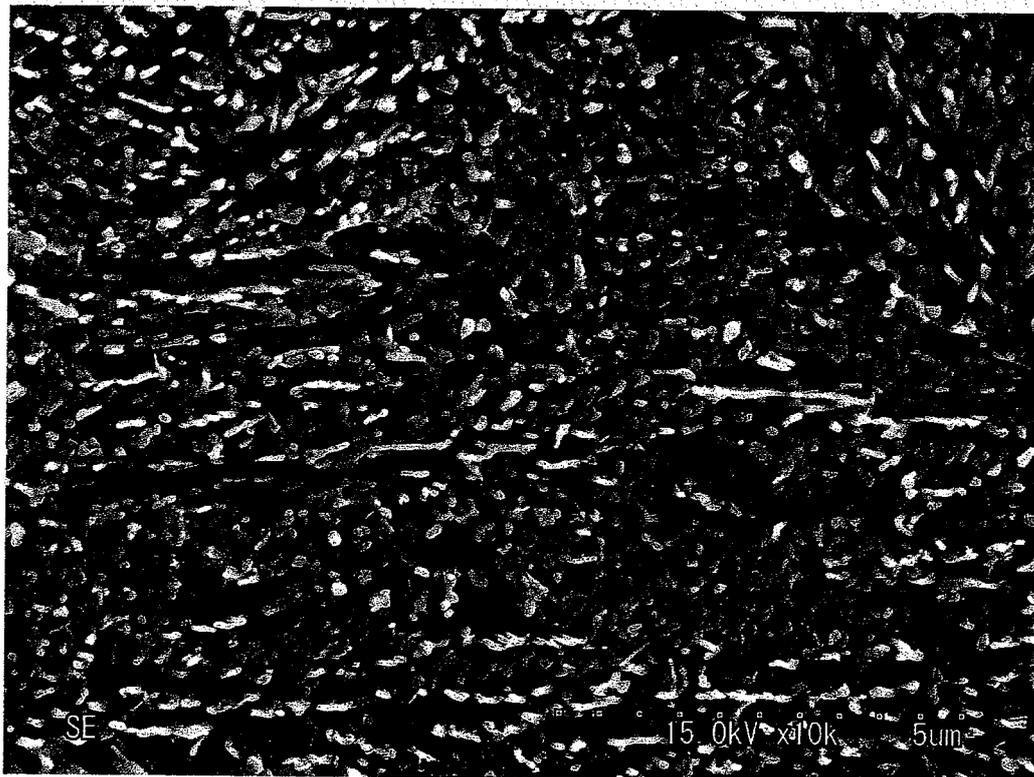
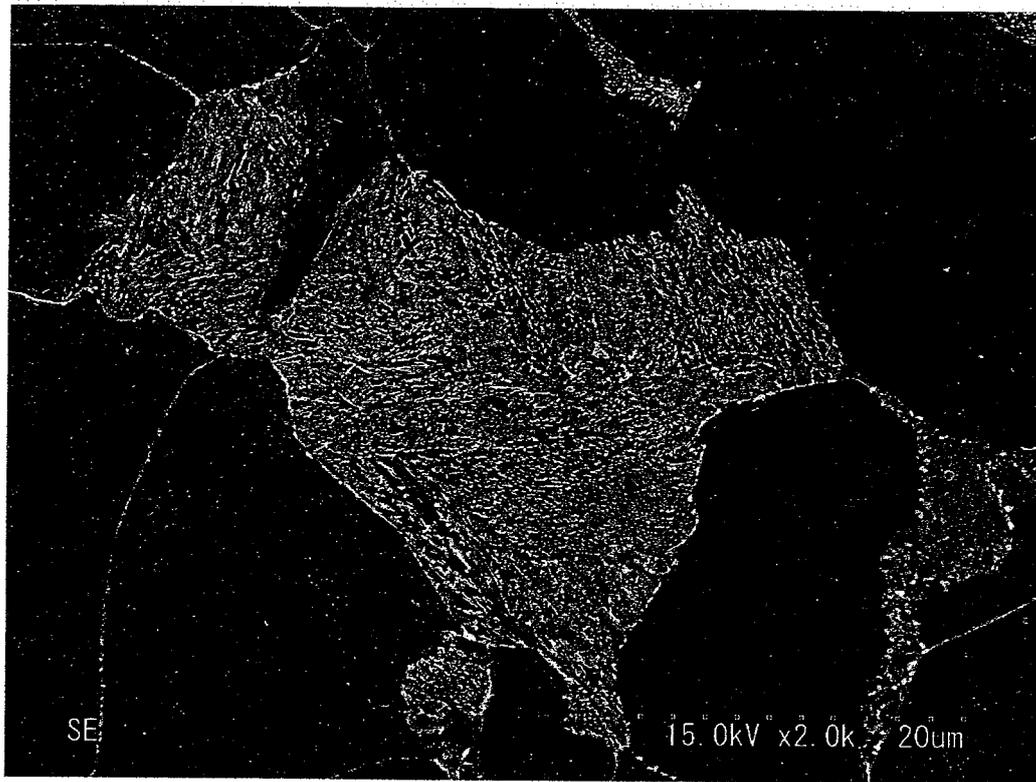


写真 4.2-7 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 7)

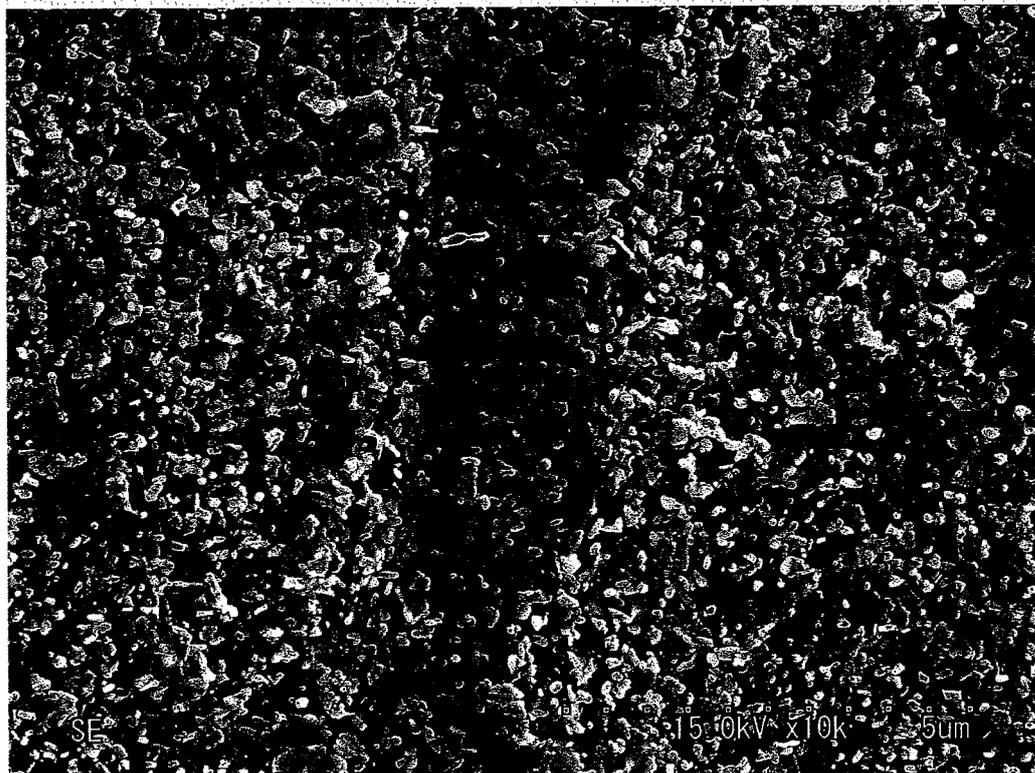
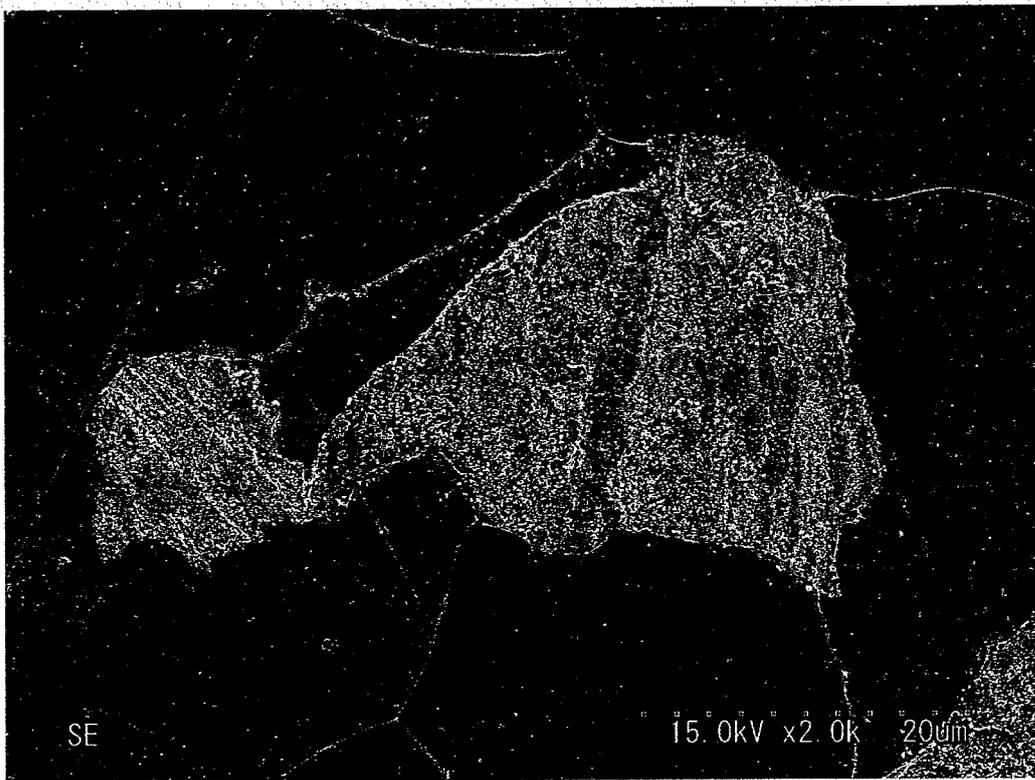


写真 4.2-8 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 8)

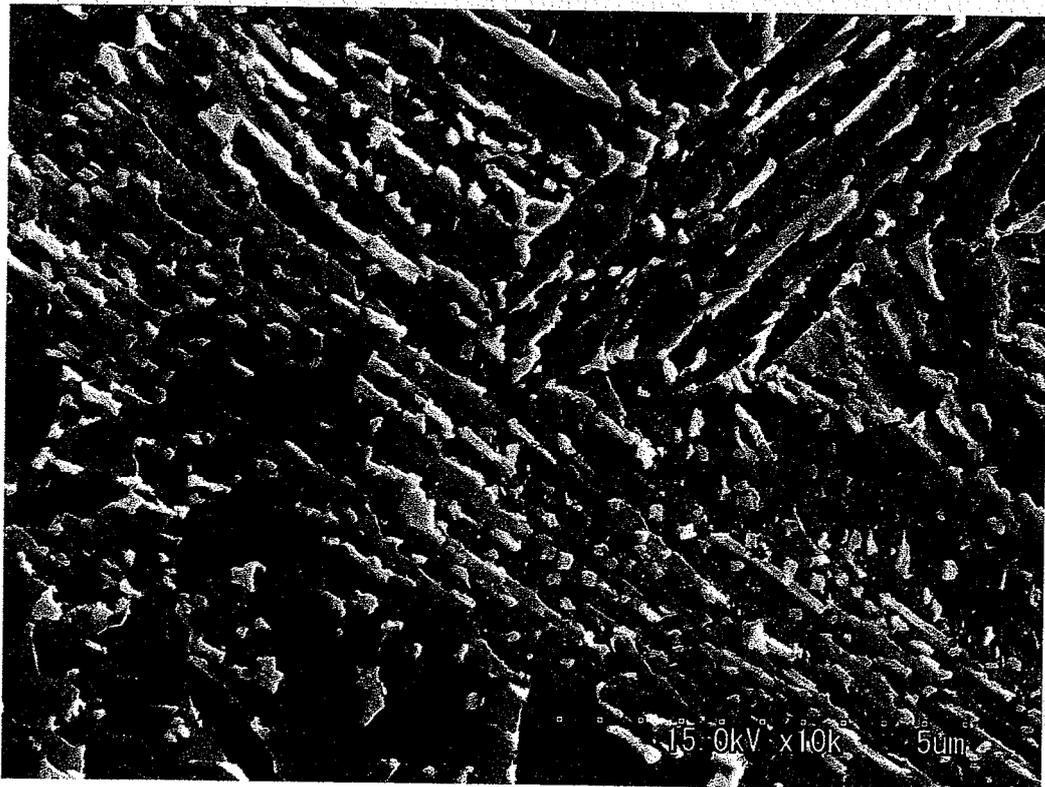
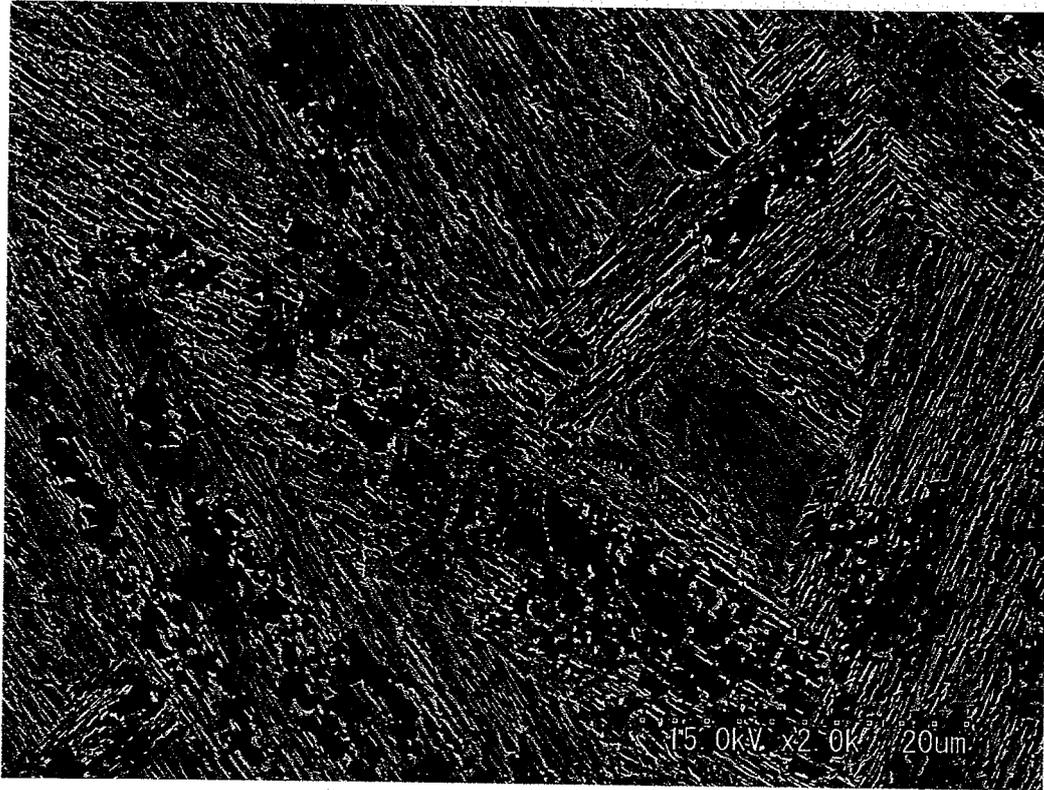


写真 4.2-9 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 9)

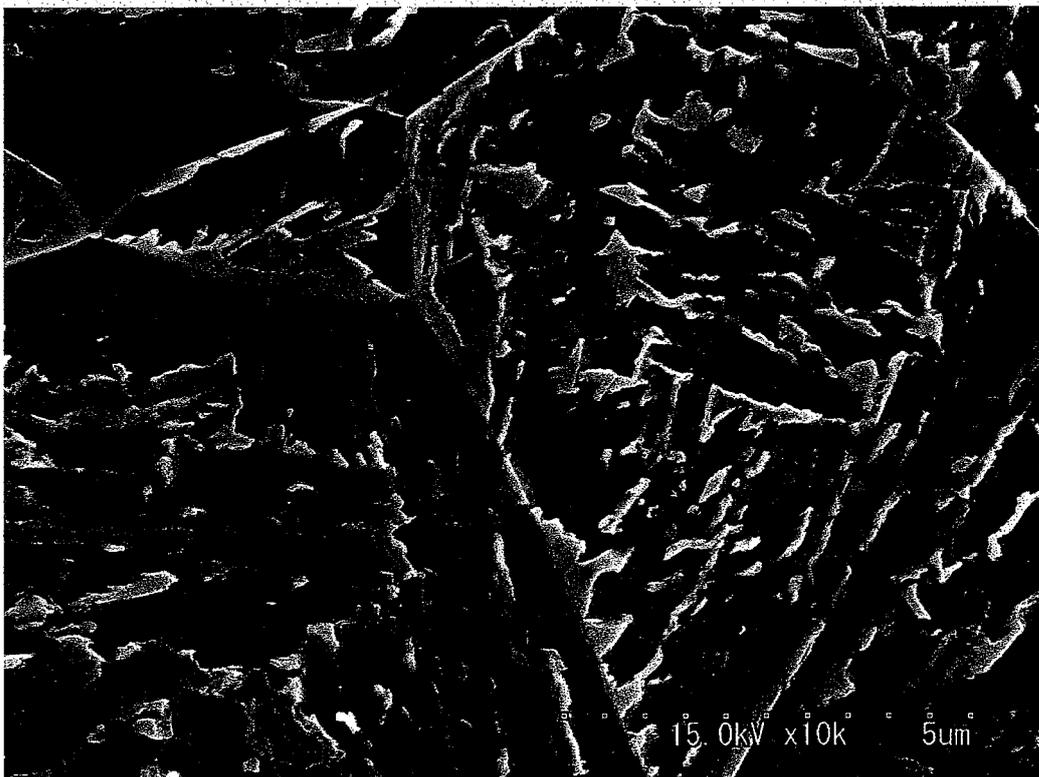


写真 4.2-10 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 10)

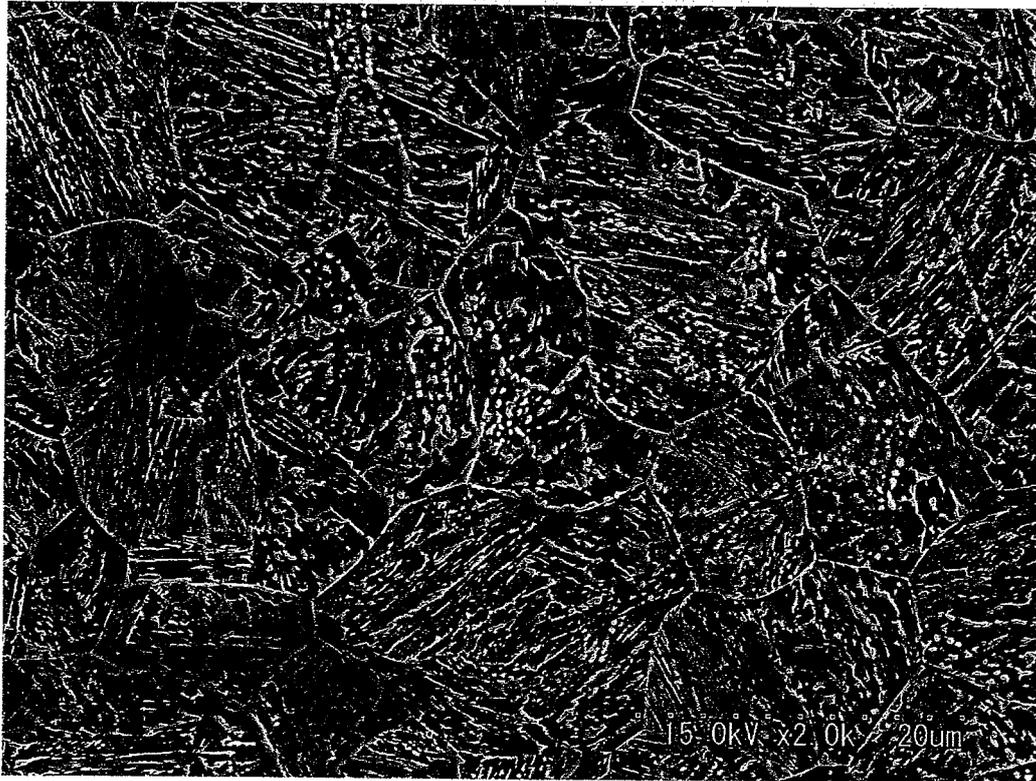


写真 4.2-11 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 11)

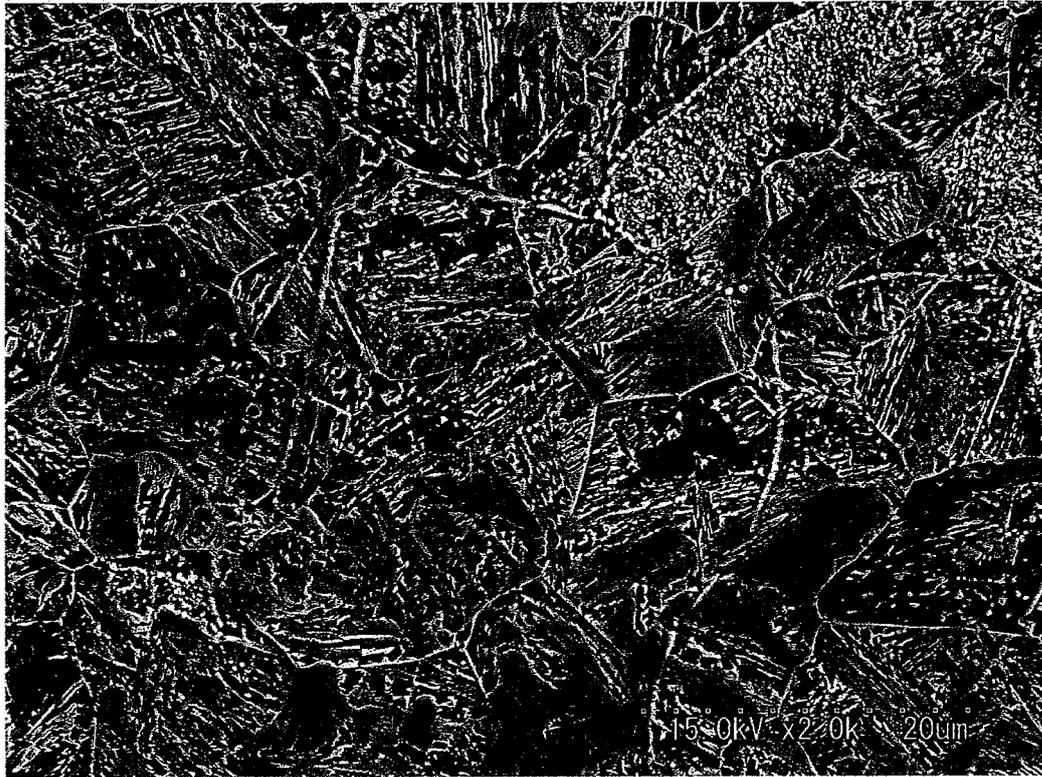


写真 4.2-12 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 12)

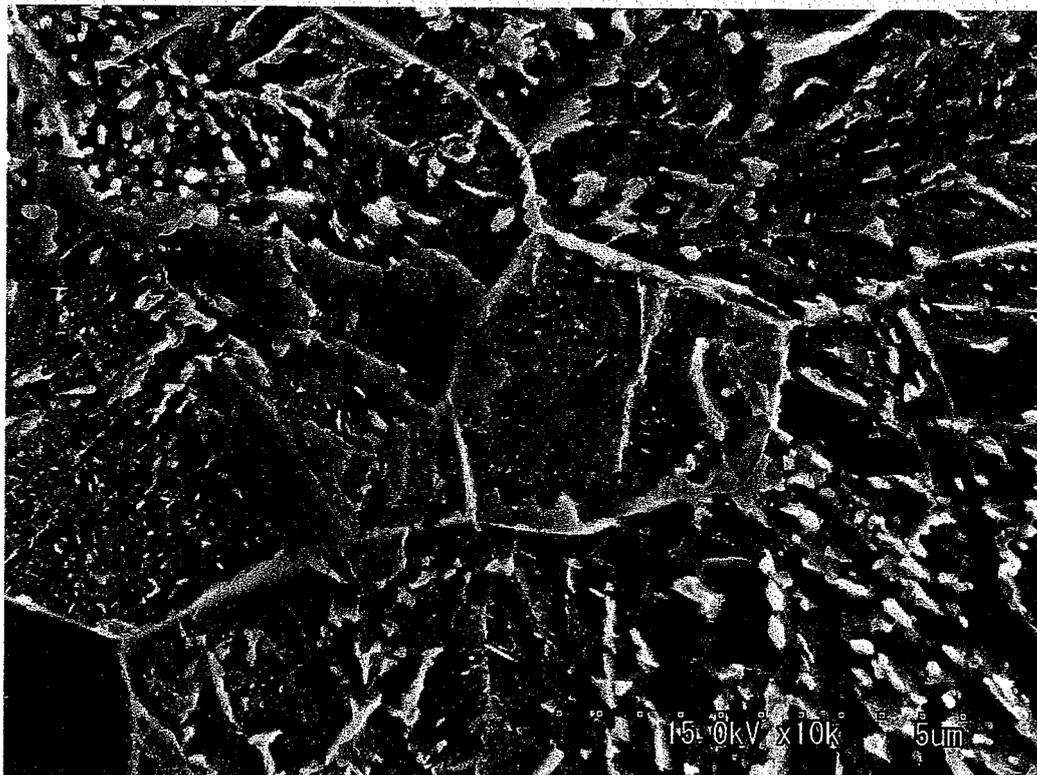
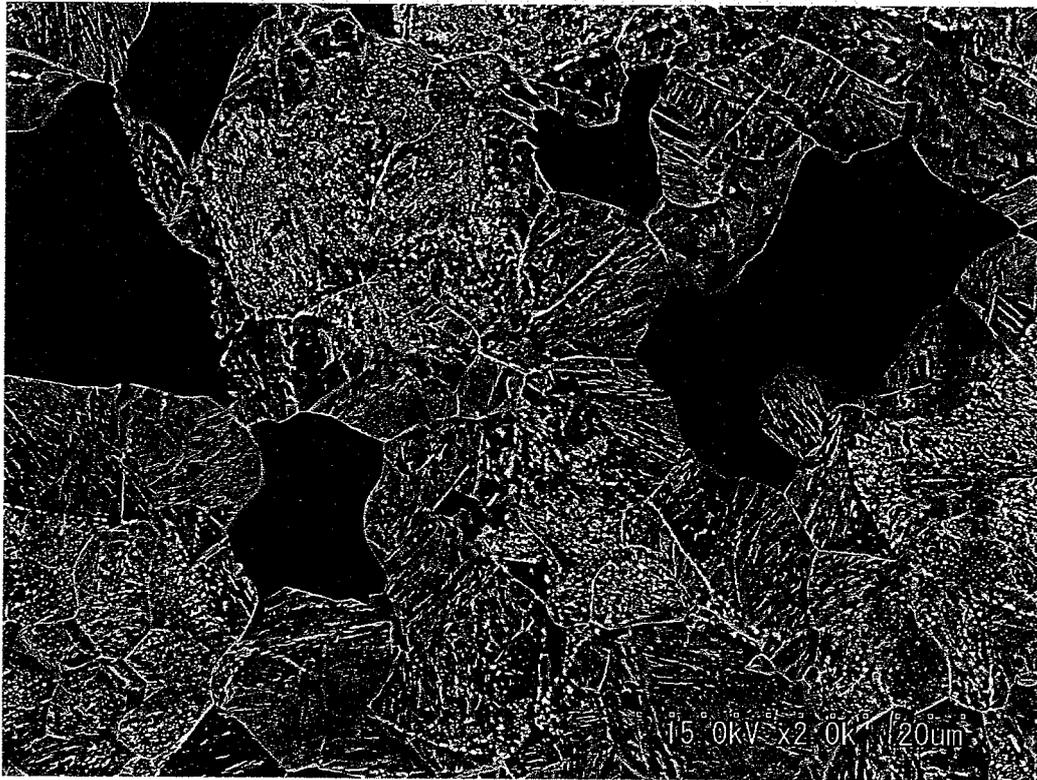


写真 4.2-13 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 13)

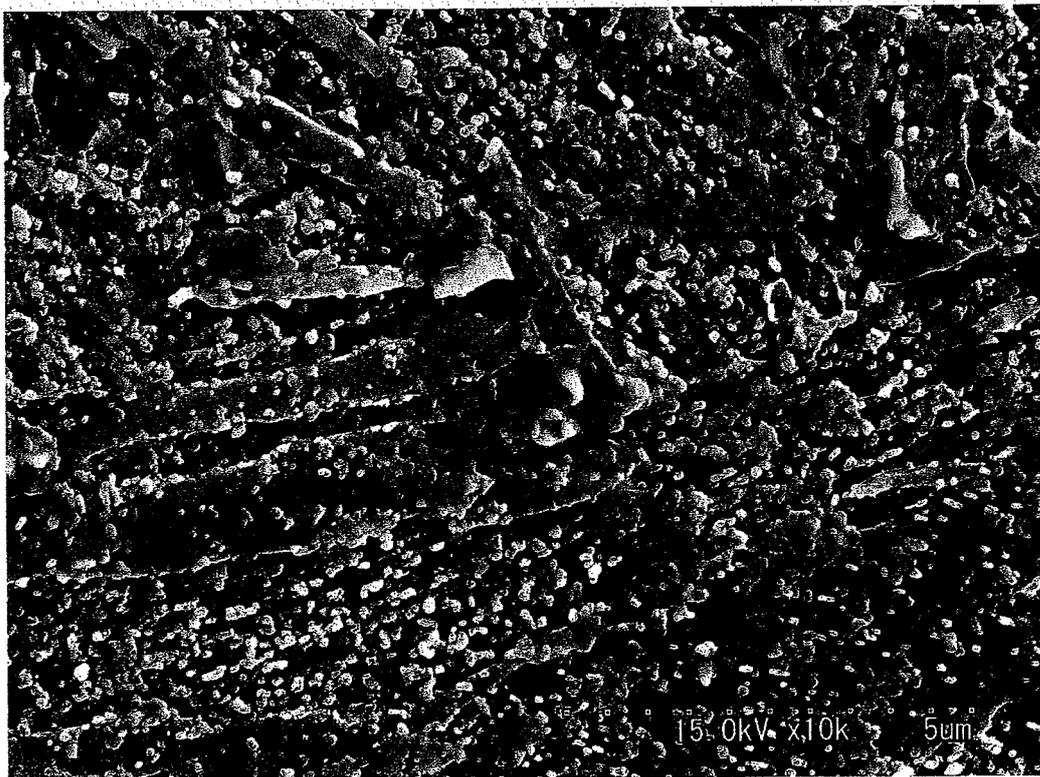
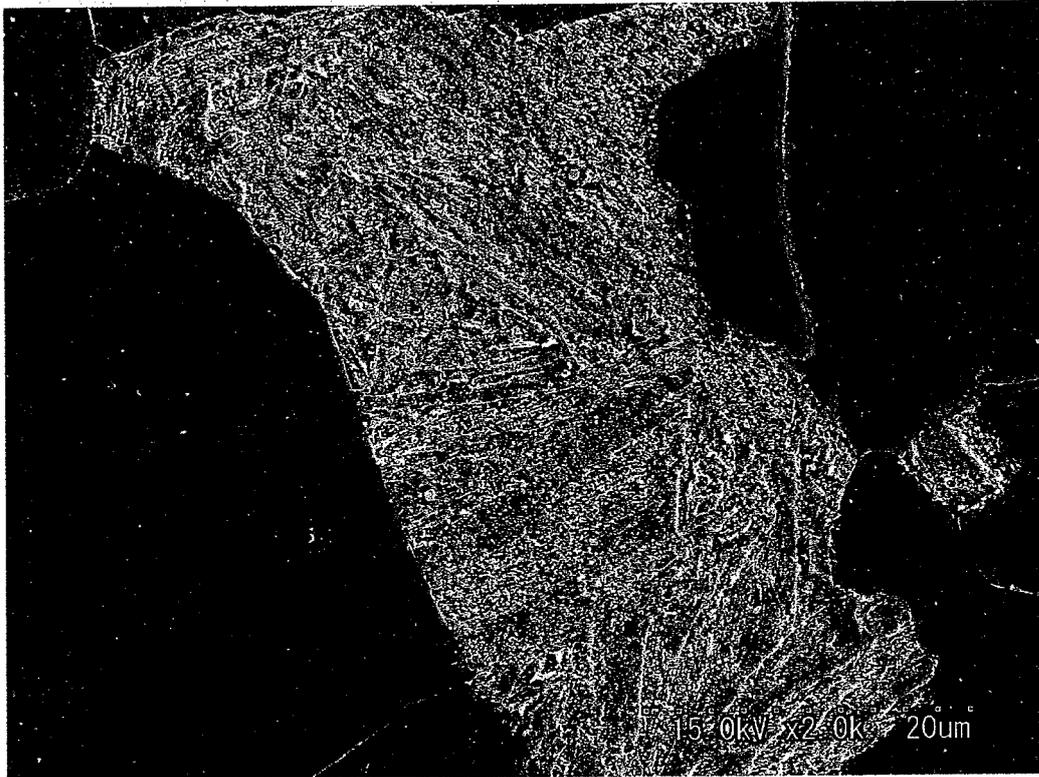


写真 4.2-14 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 14)

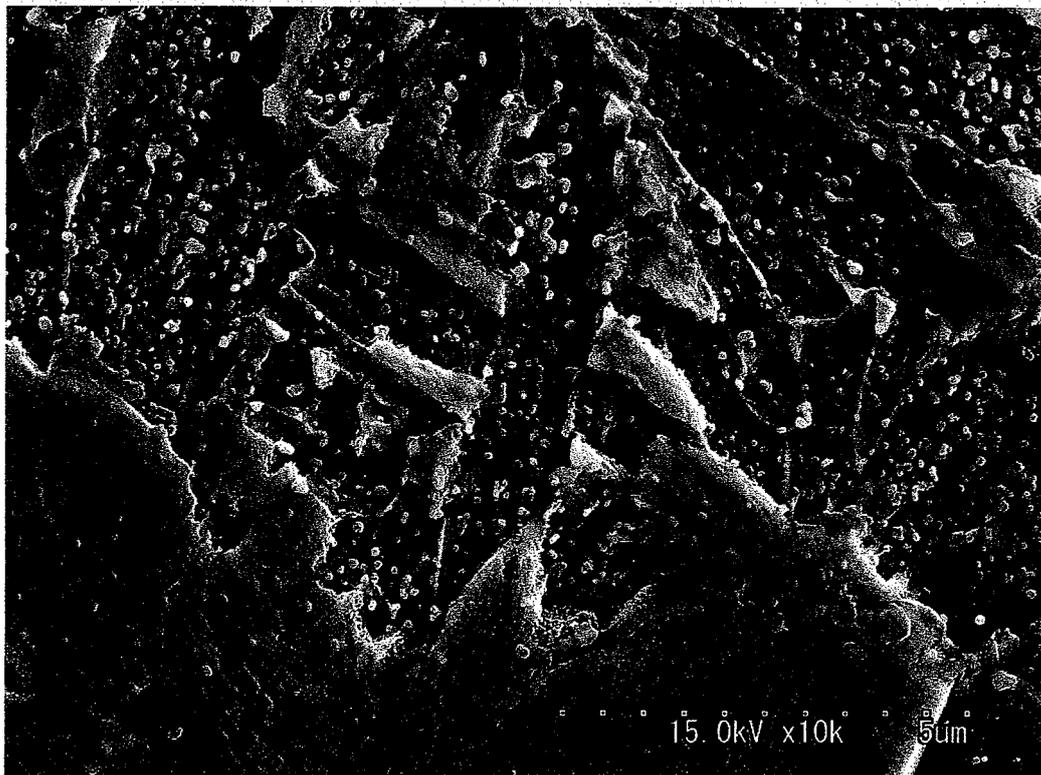
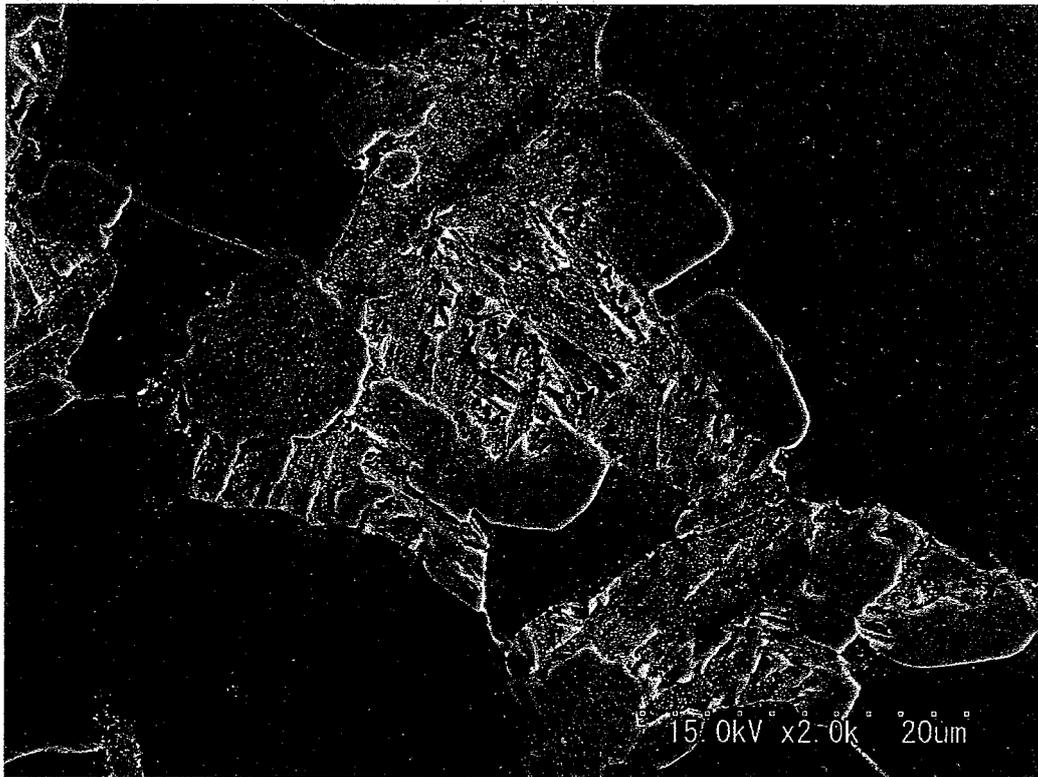


写真 4.2-15 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 15)

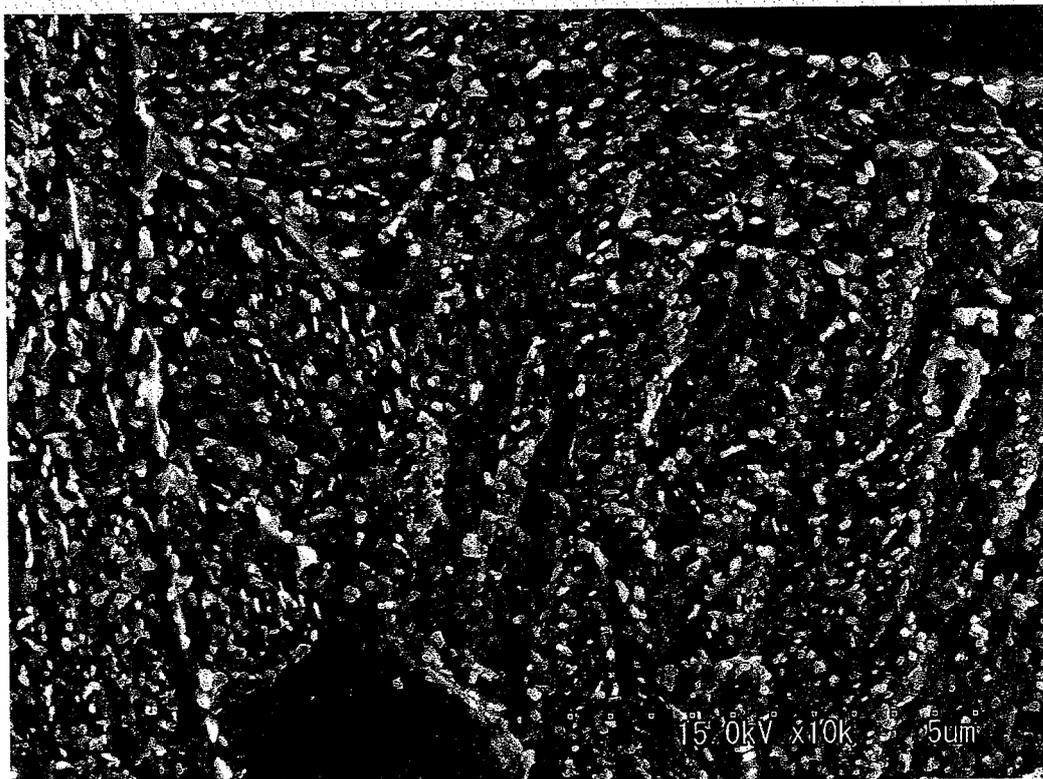
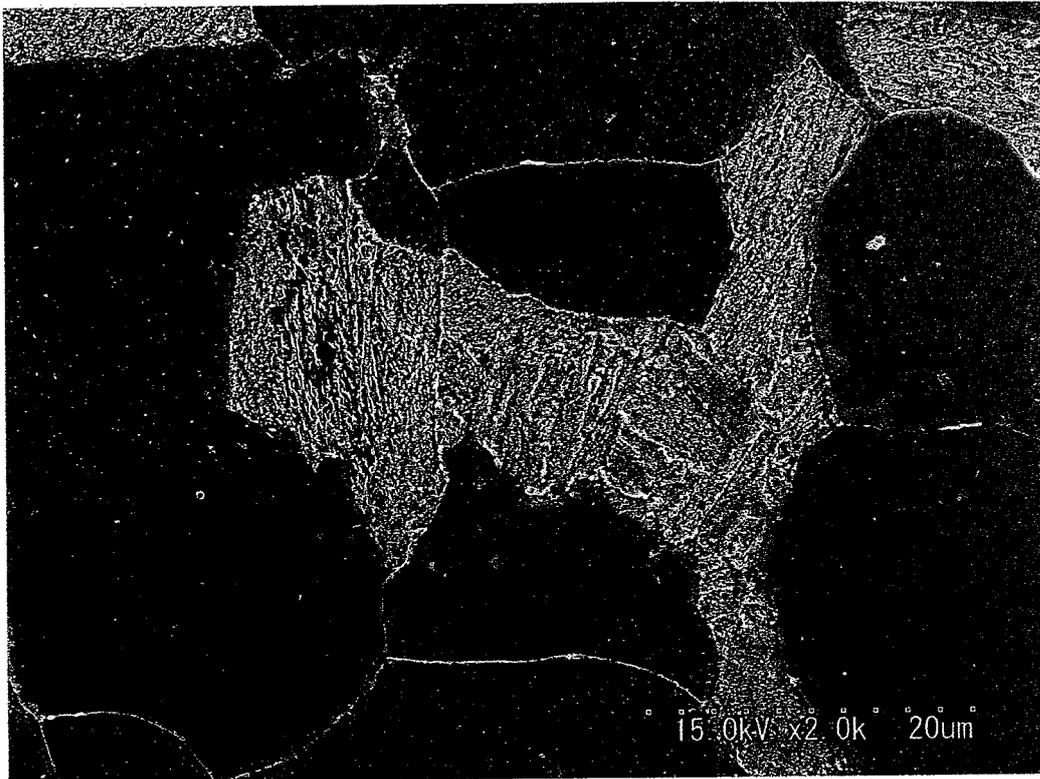


写真 4.2-16 フォーマスタ試験材断面の金属組織:SEM 像(条件 16)

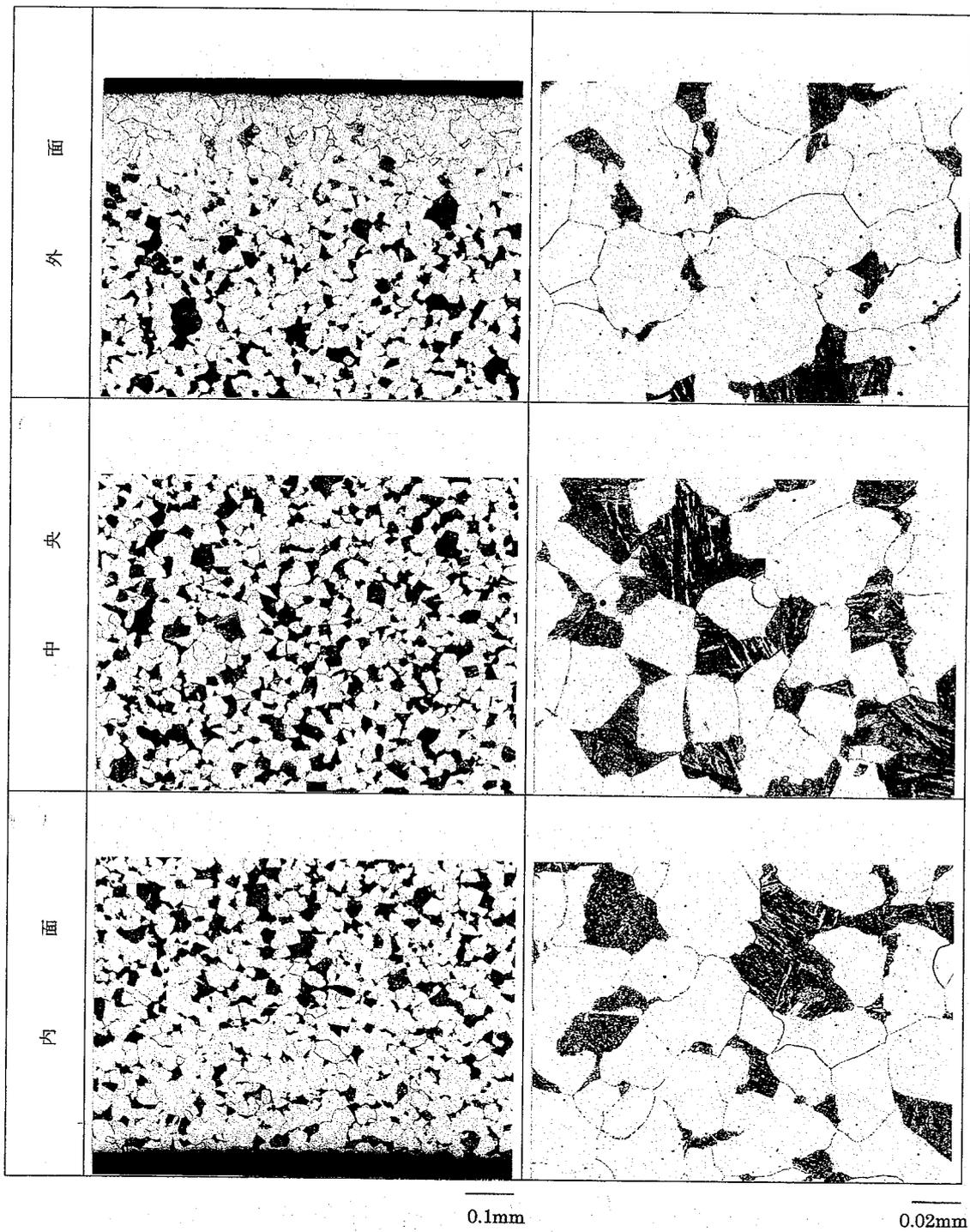


写真 4.3-1 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.0)

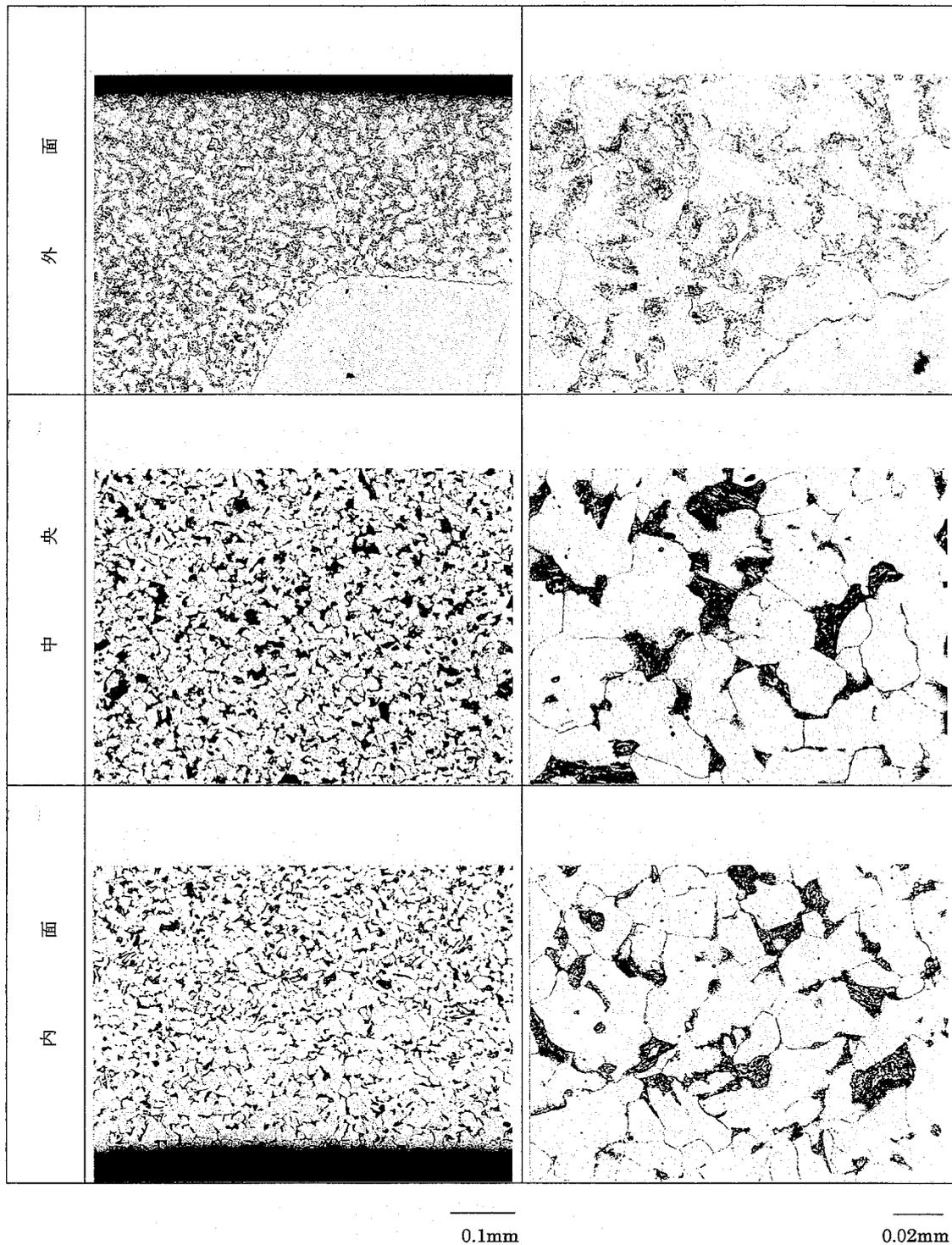


写真 4.3-2 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.1)

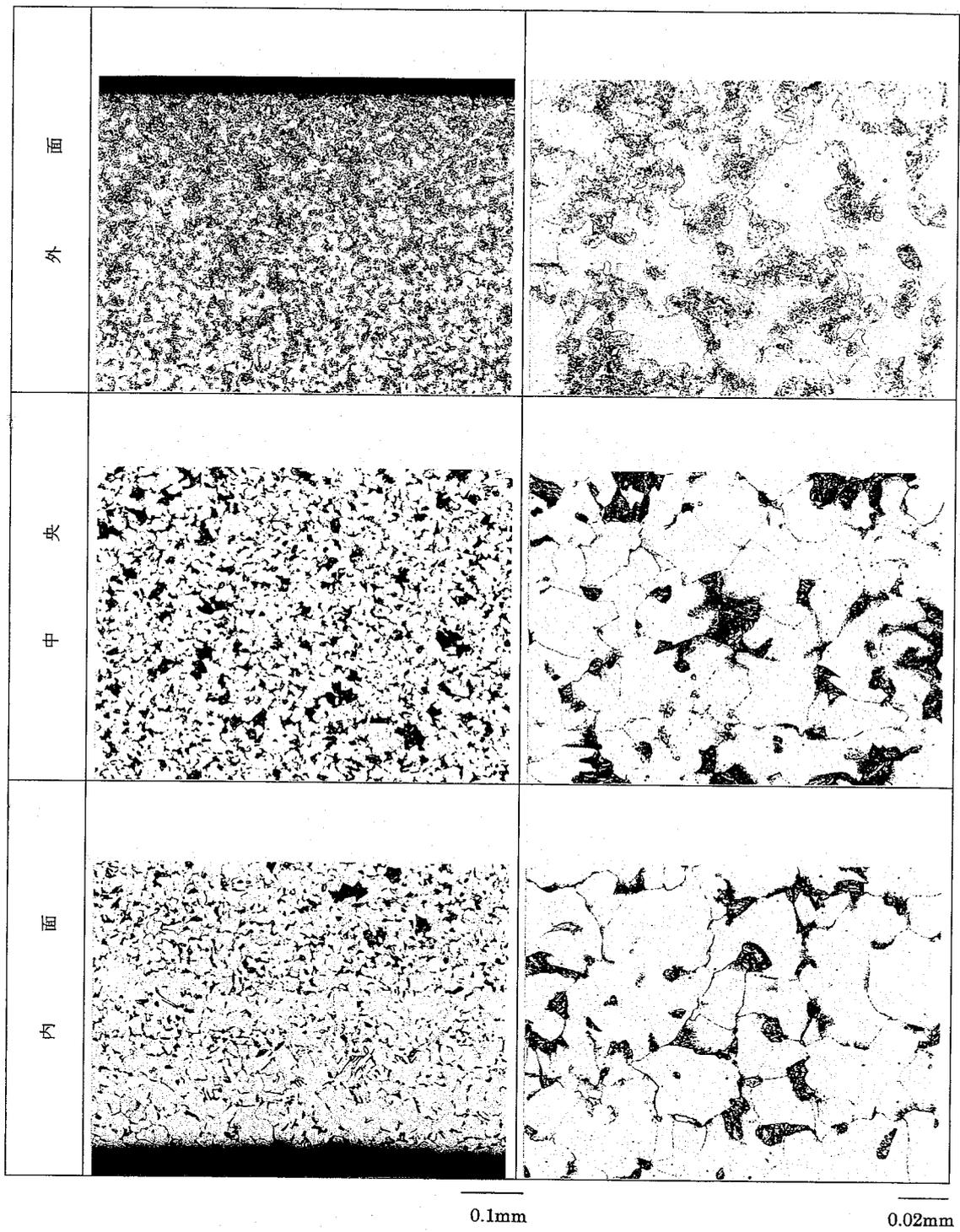


写真 4.3-3 テストピースの金属組織：顕微鏡(No.2)

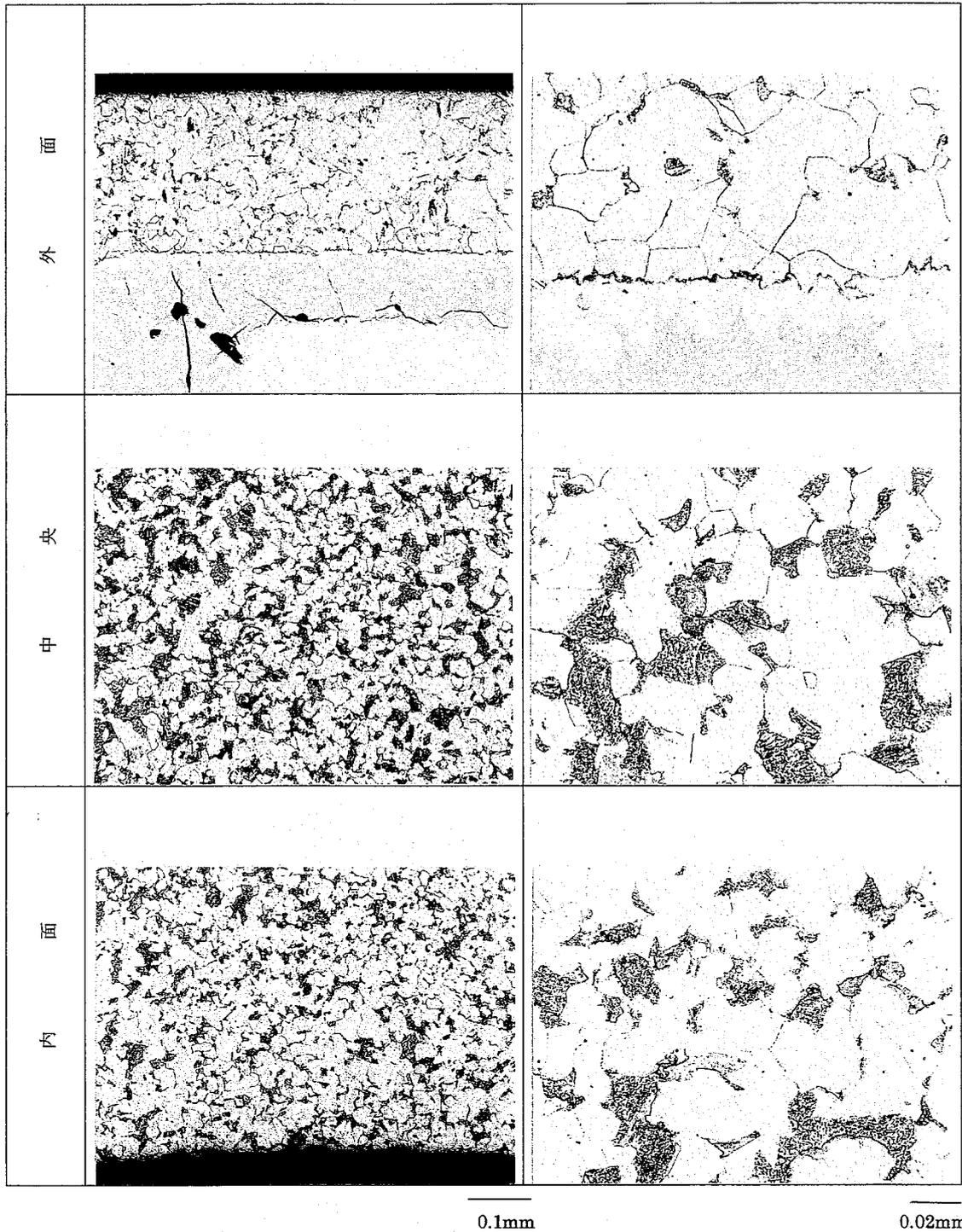


写真 4.3-4 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.3)

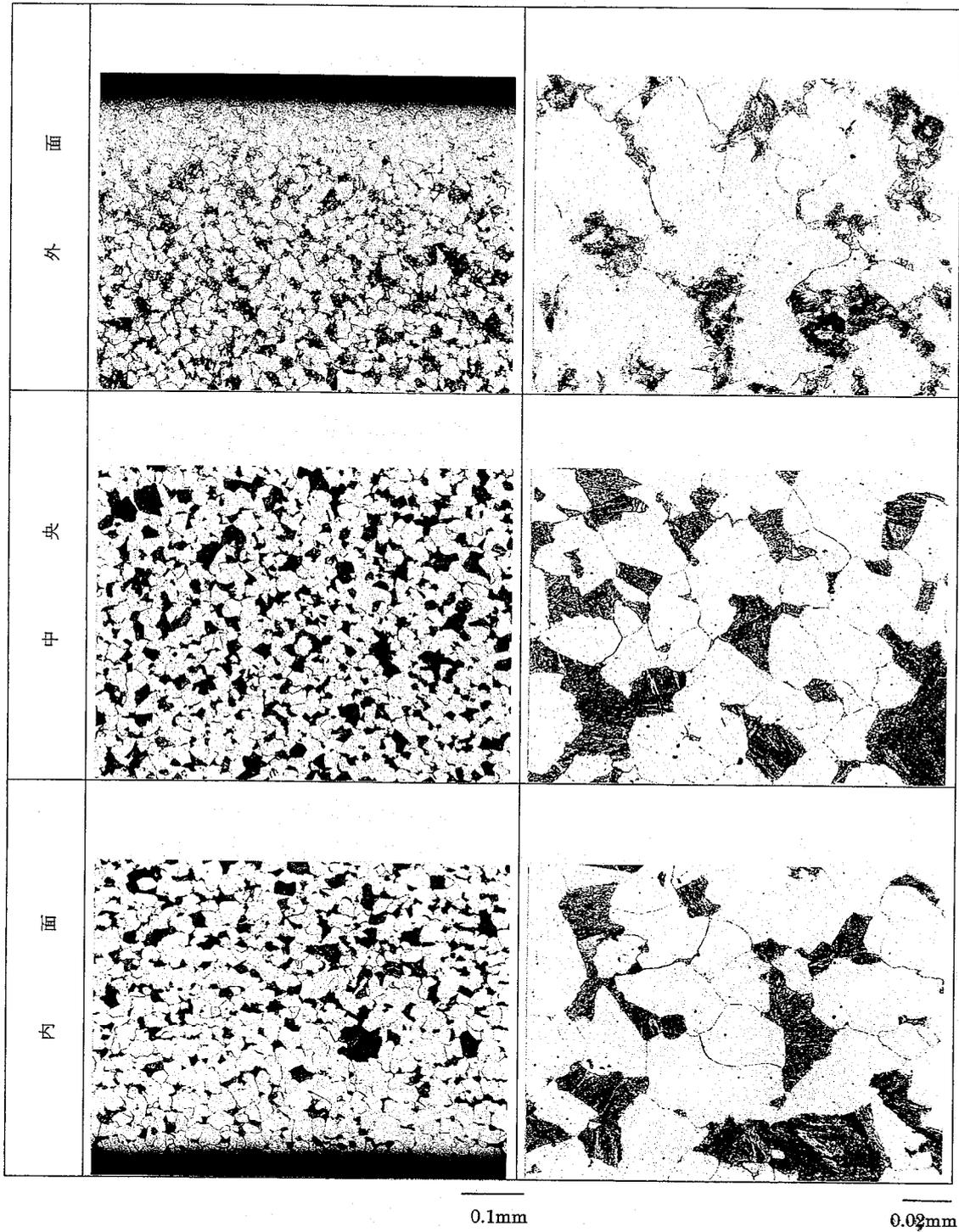


写真 4.3-5 テストピースの金属組織：顕微鏡(No.4)

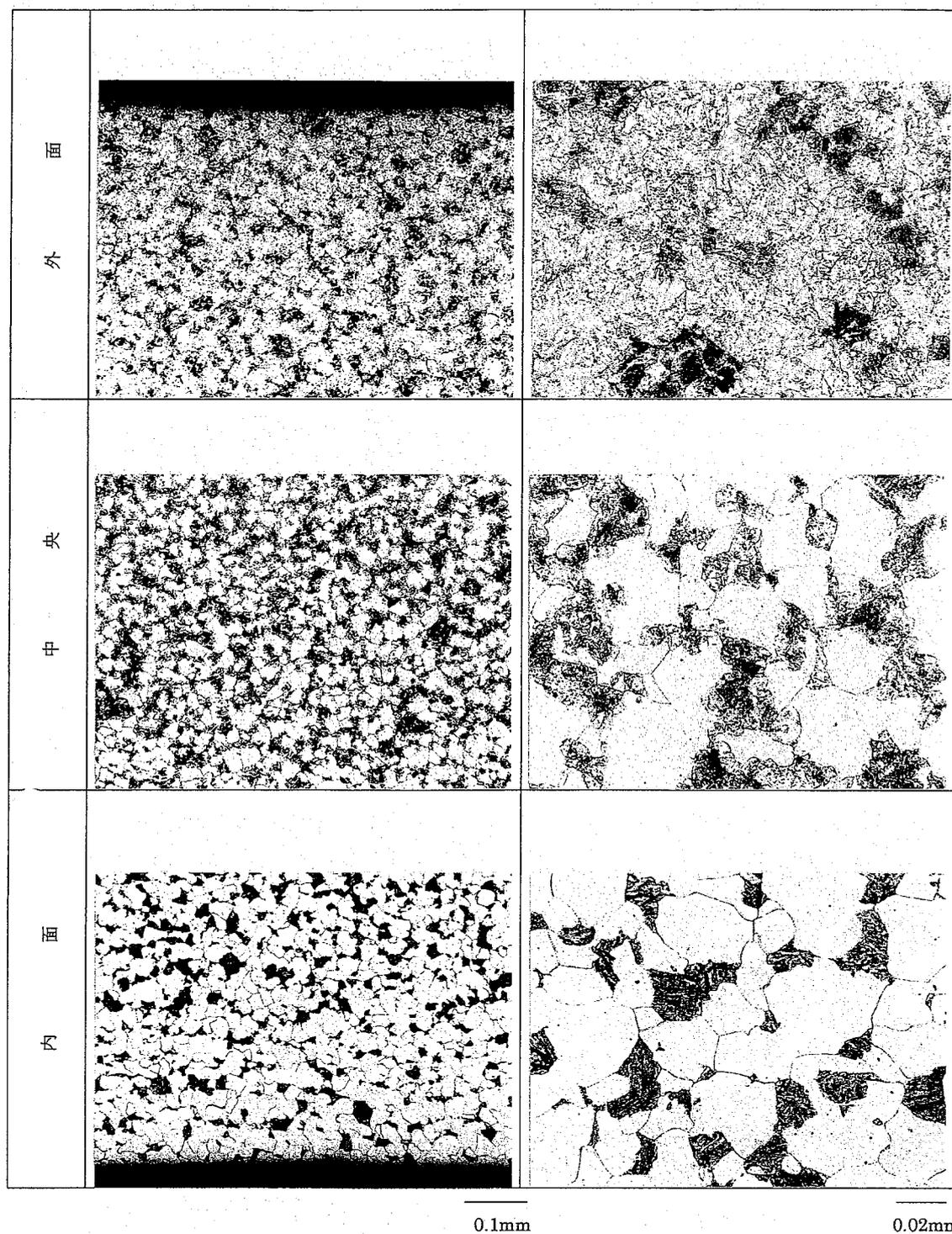


写真 4.3-6 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.5)

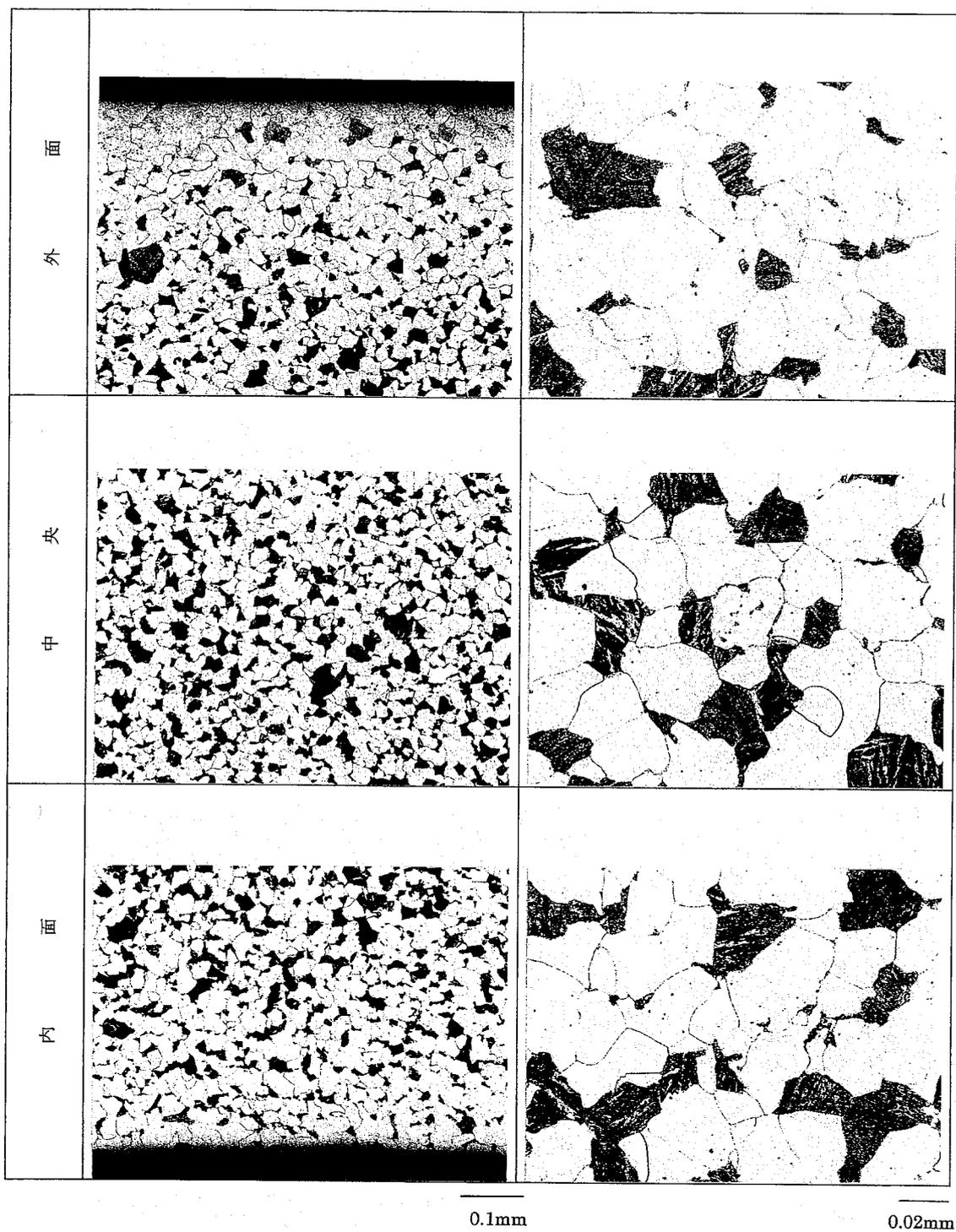


写真 4.3-7 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.6)

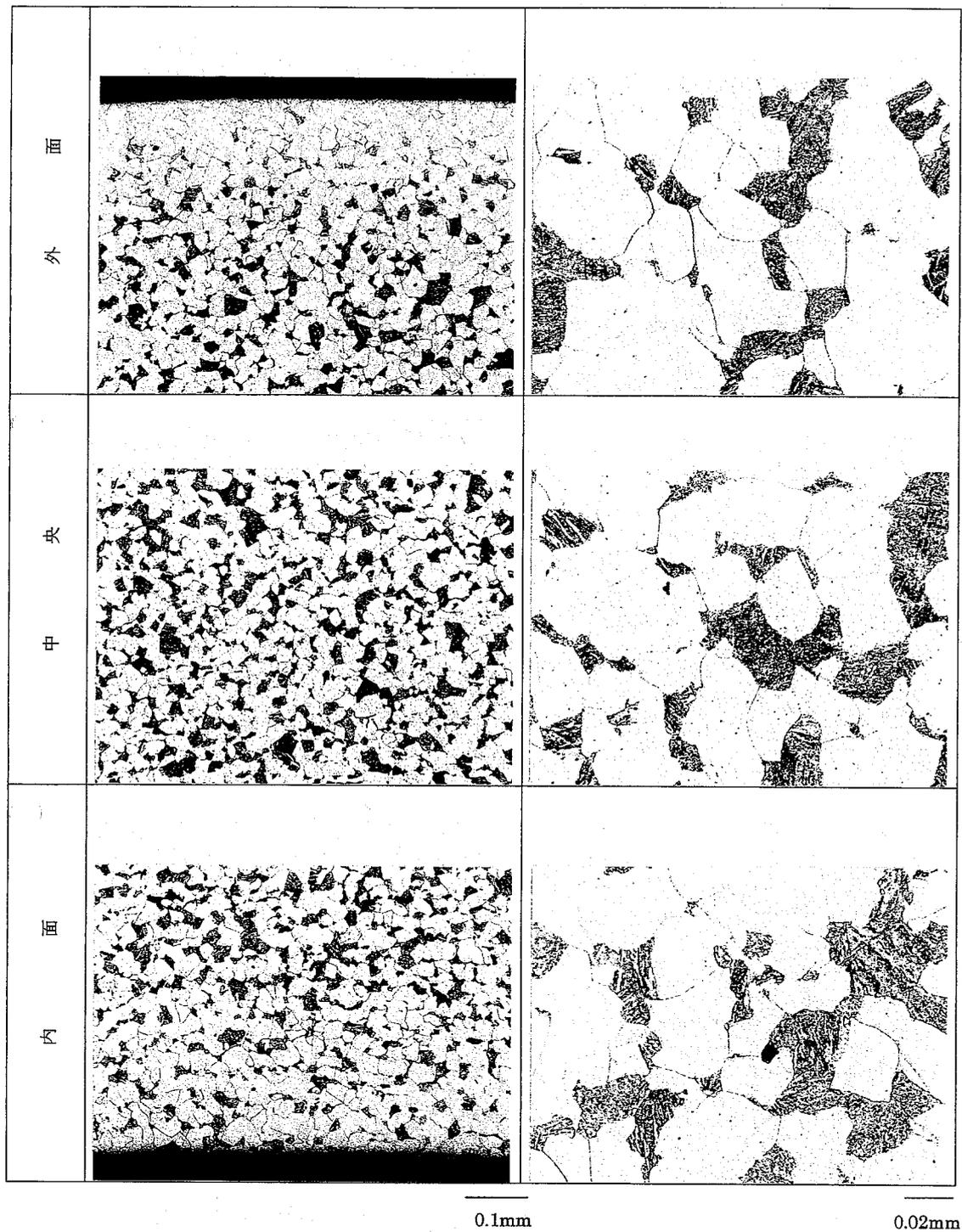


写真 4.3-8 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.7)

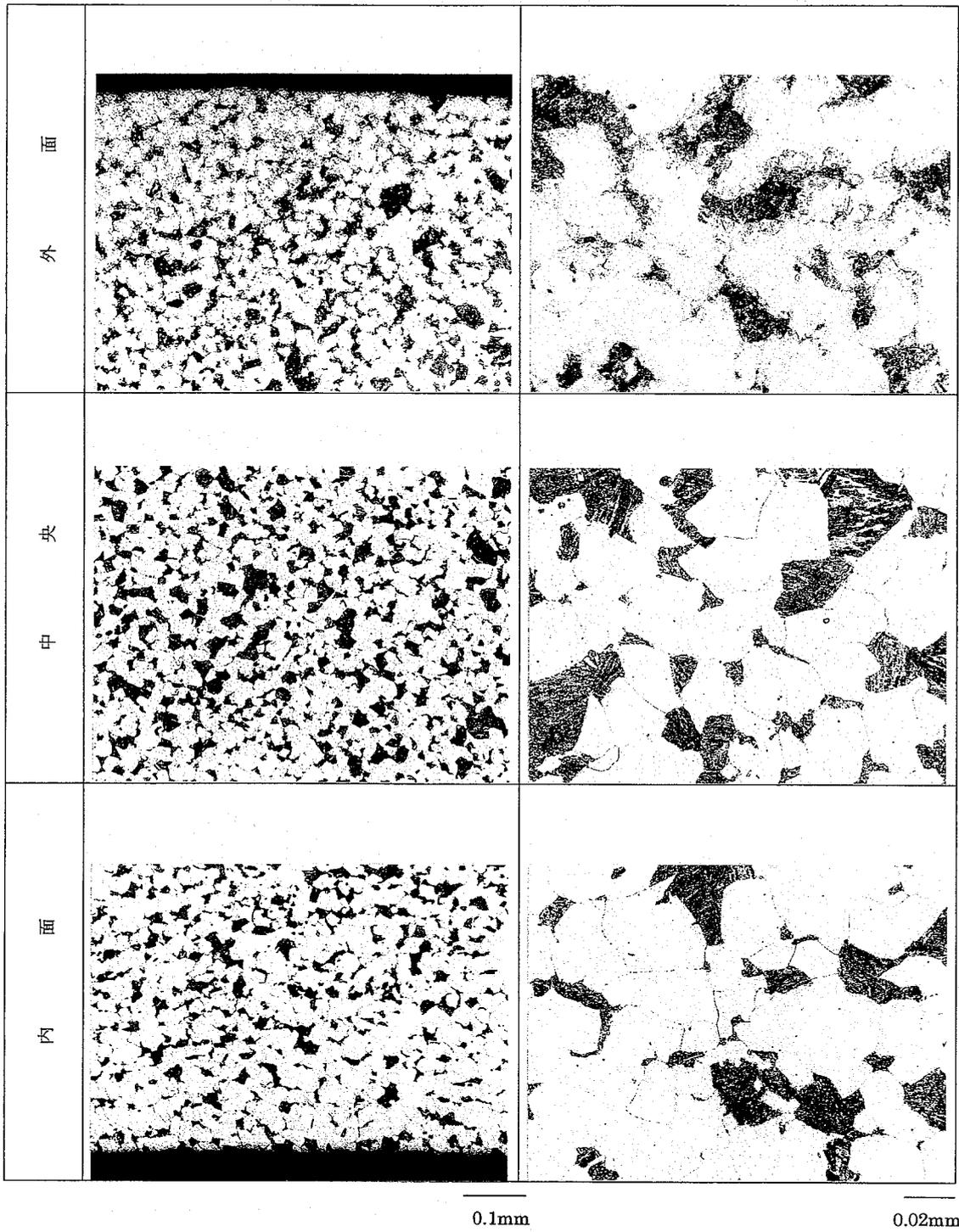


写真 4.3-9 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.8)

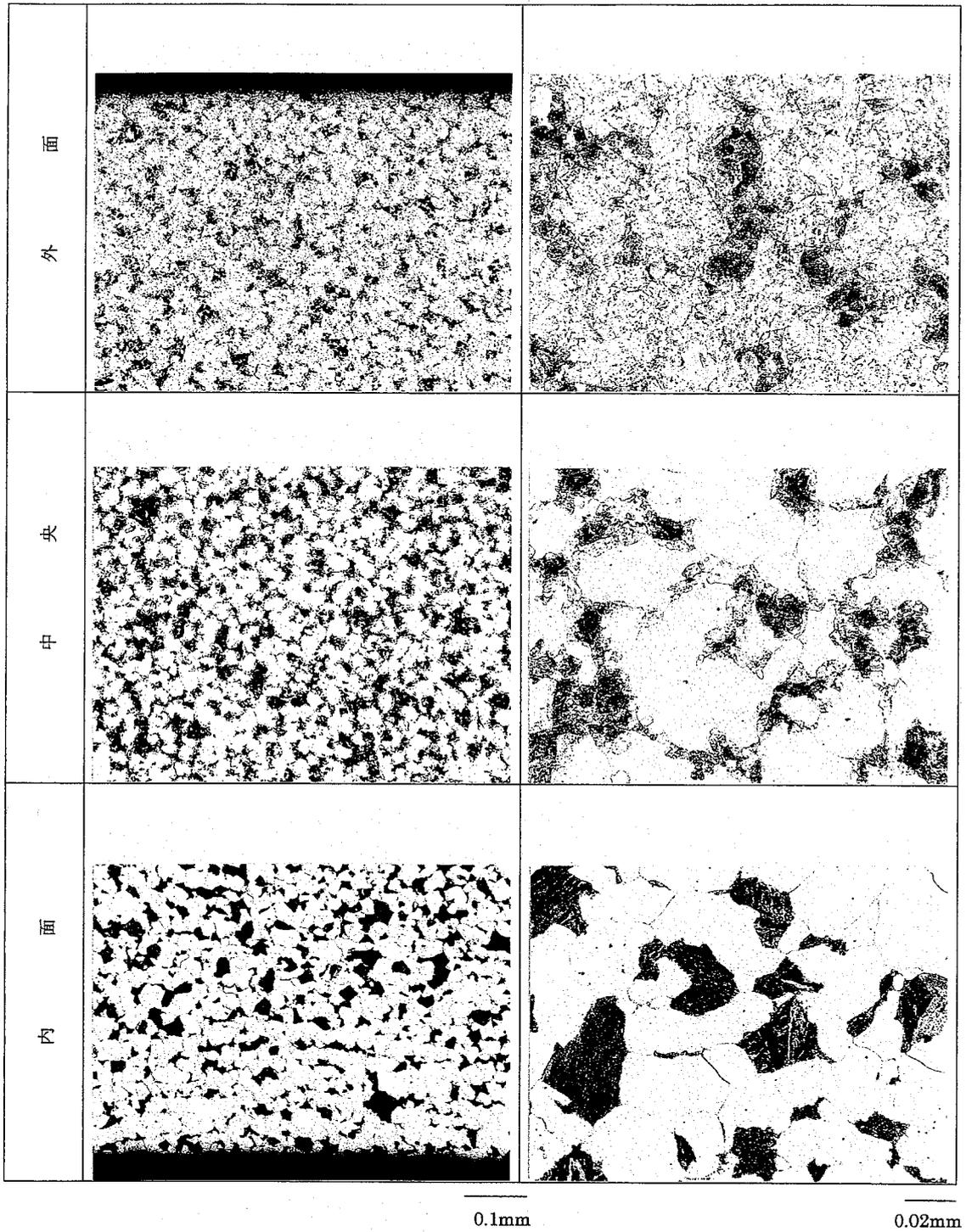


写真 4.3-10 テストピースの金属組織:顕微鏡 (No.9)

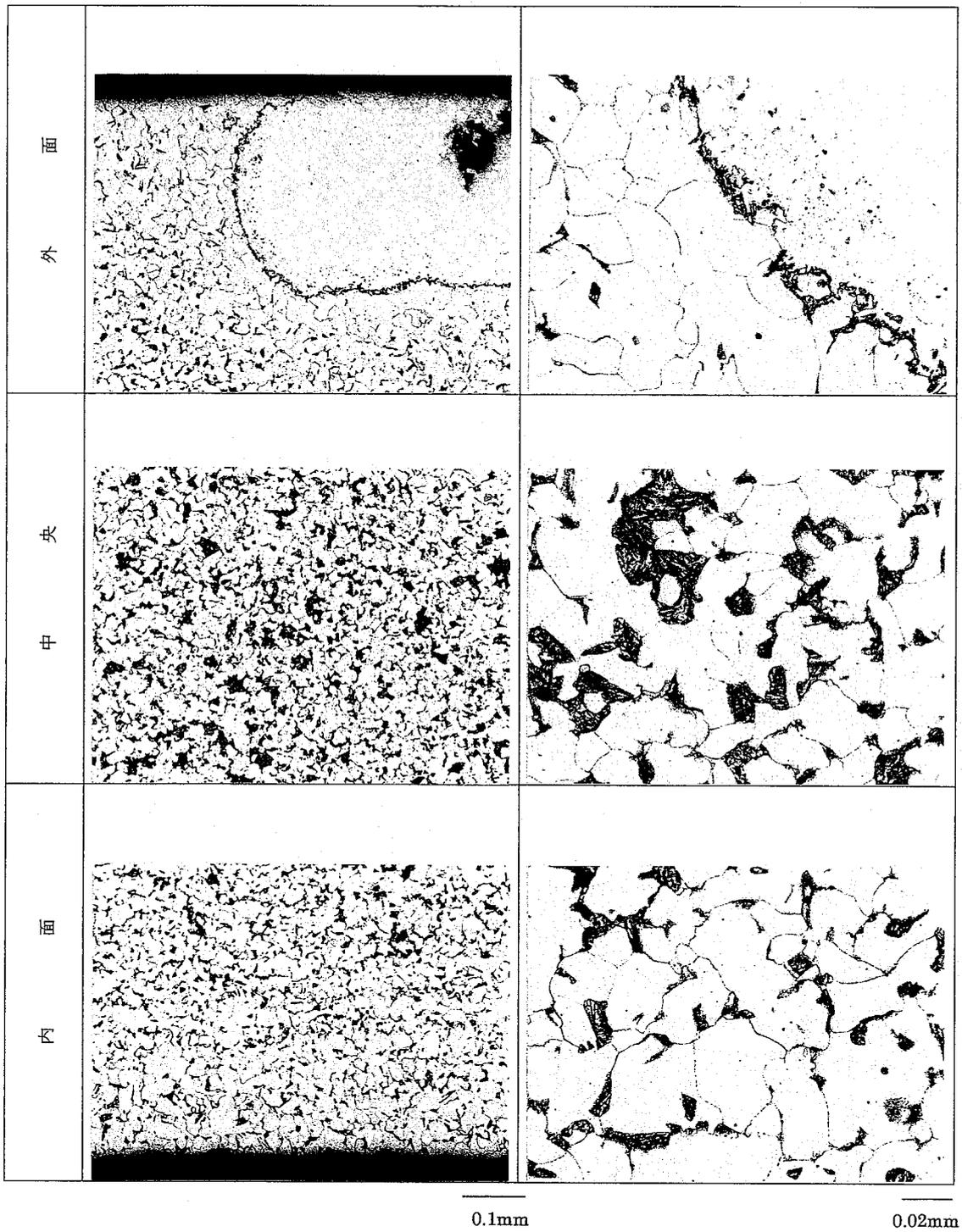


写真 4.3-11 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.10)

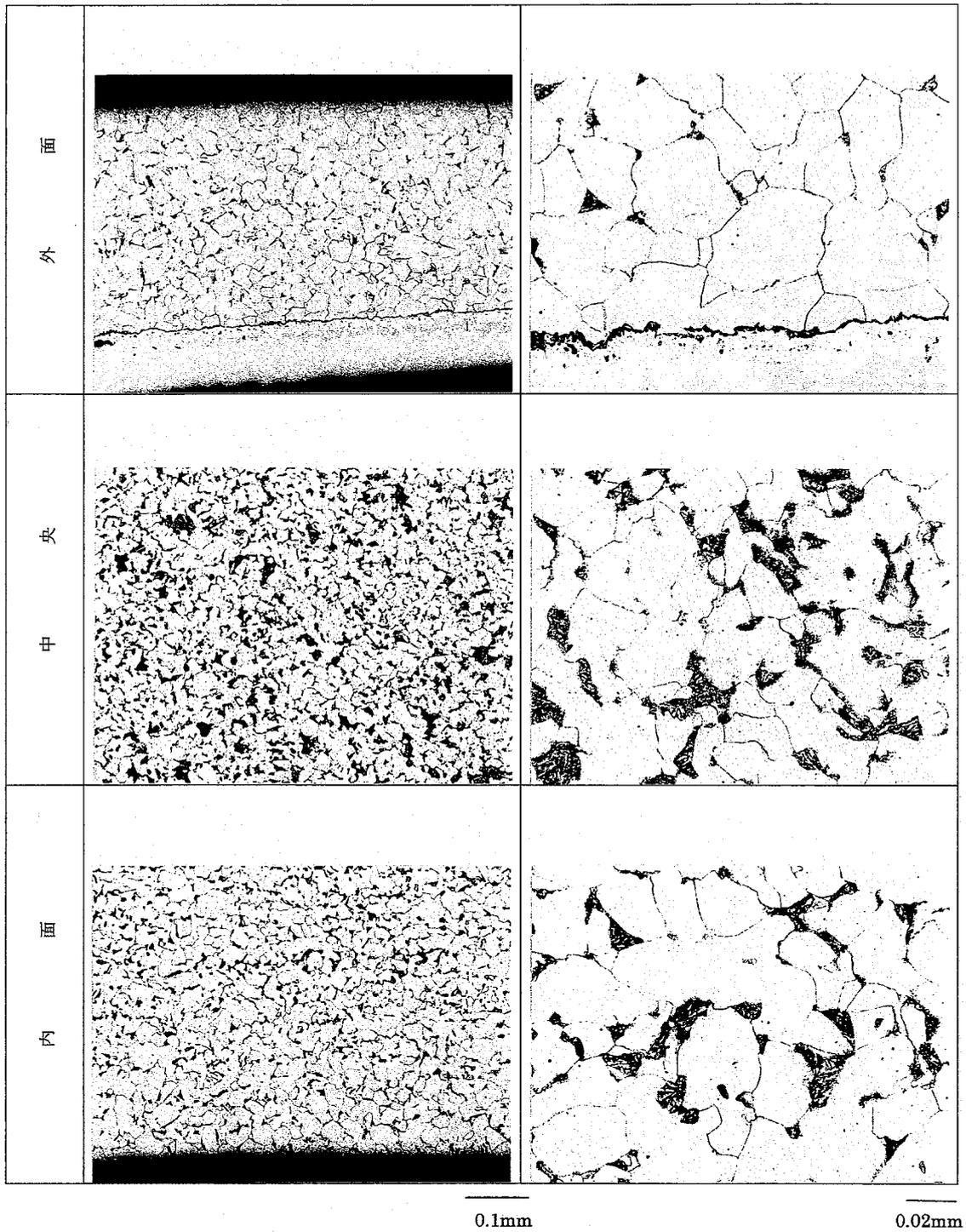


写真 4.3-12 テストピースの金属組織：顕微鏡(No.11)

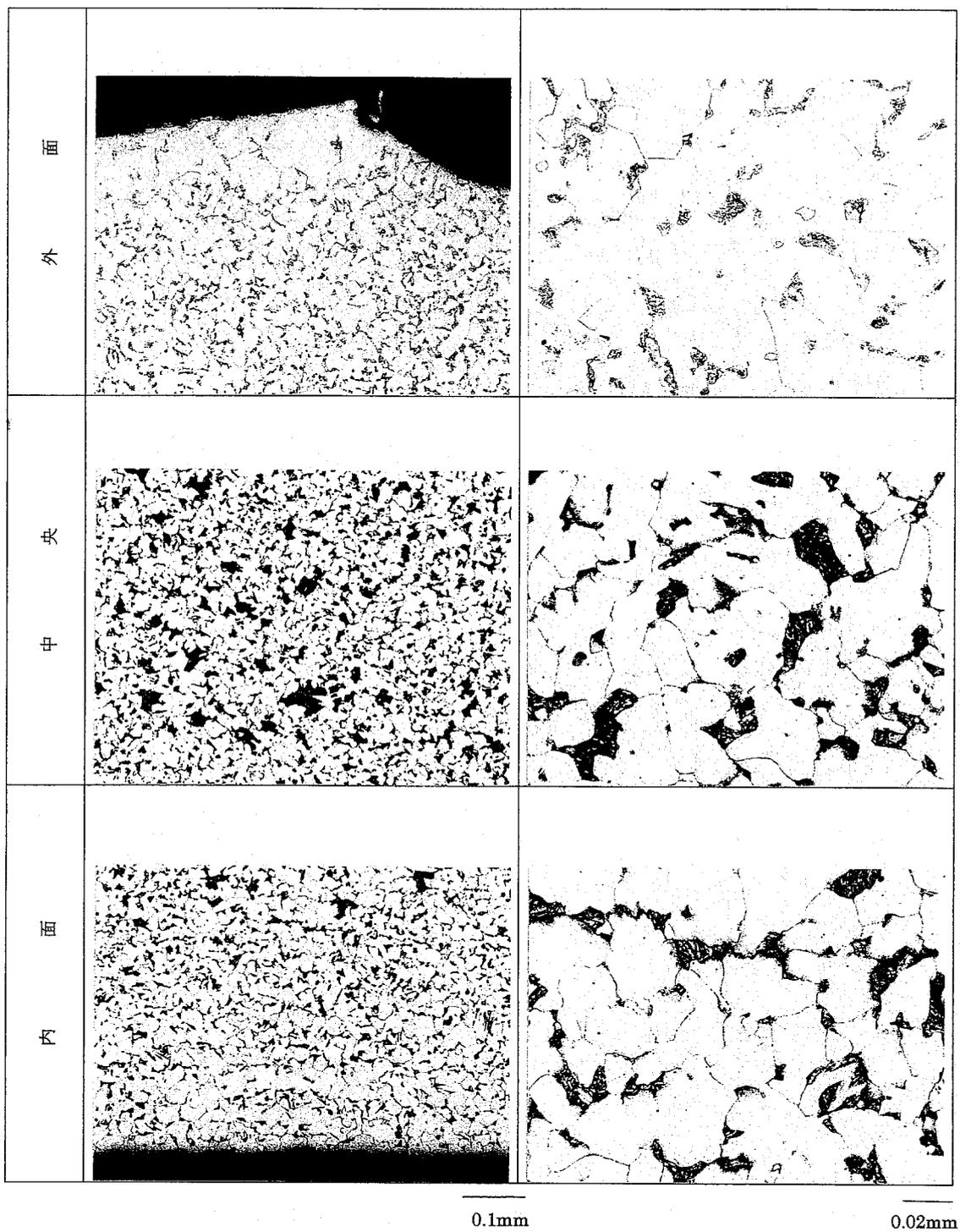


写真 4.3-13 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.12)

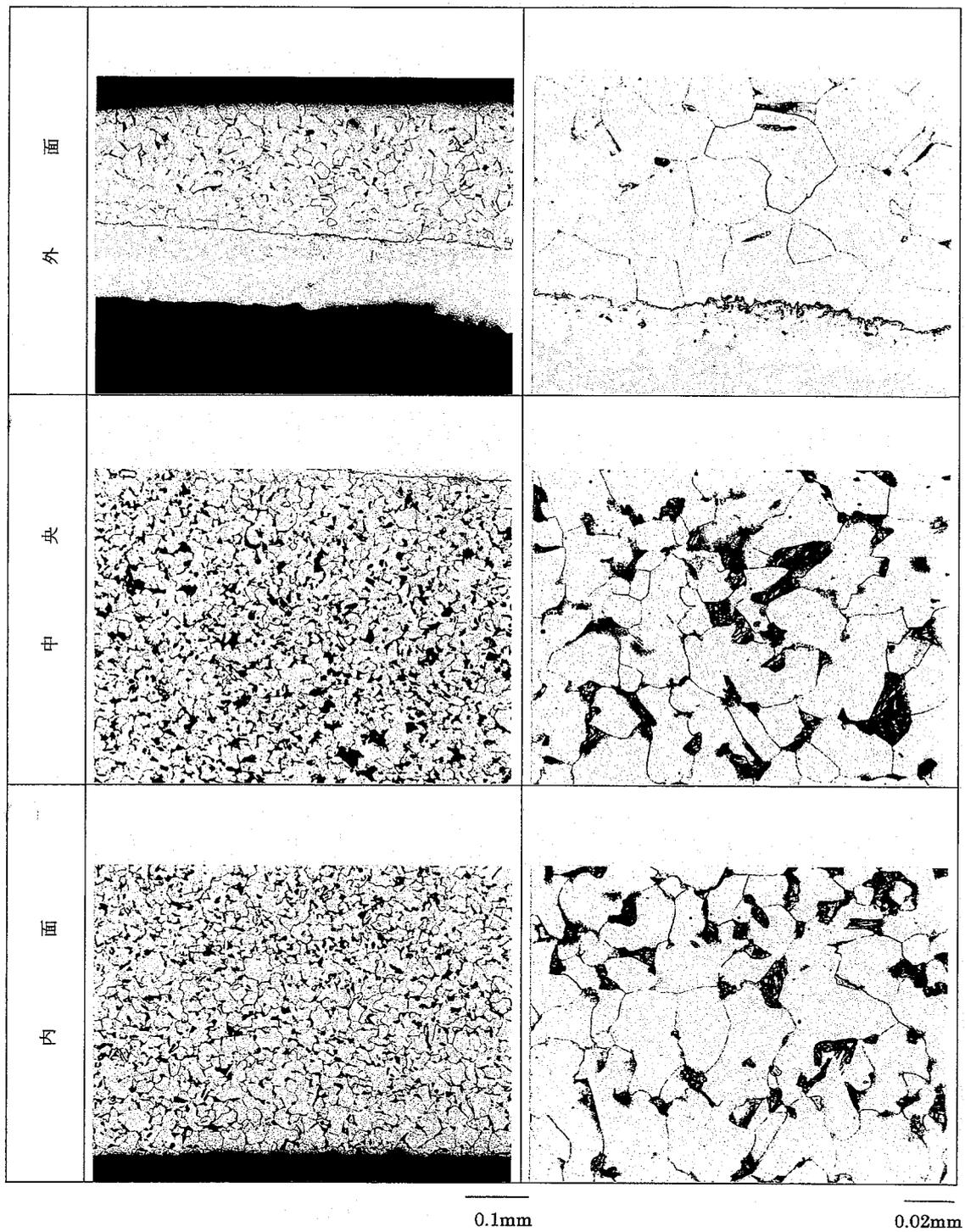


写真 4.3-14 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.13)

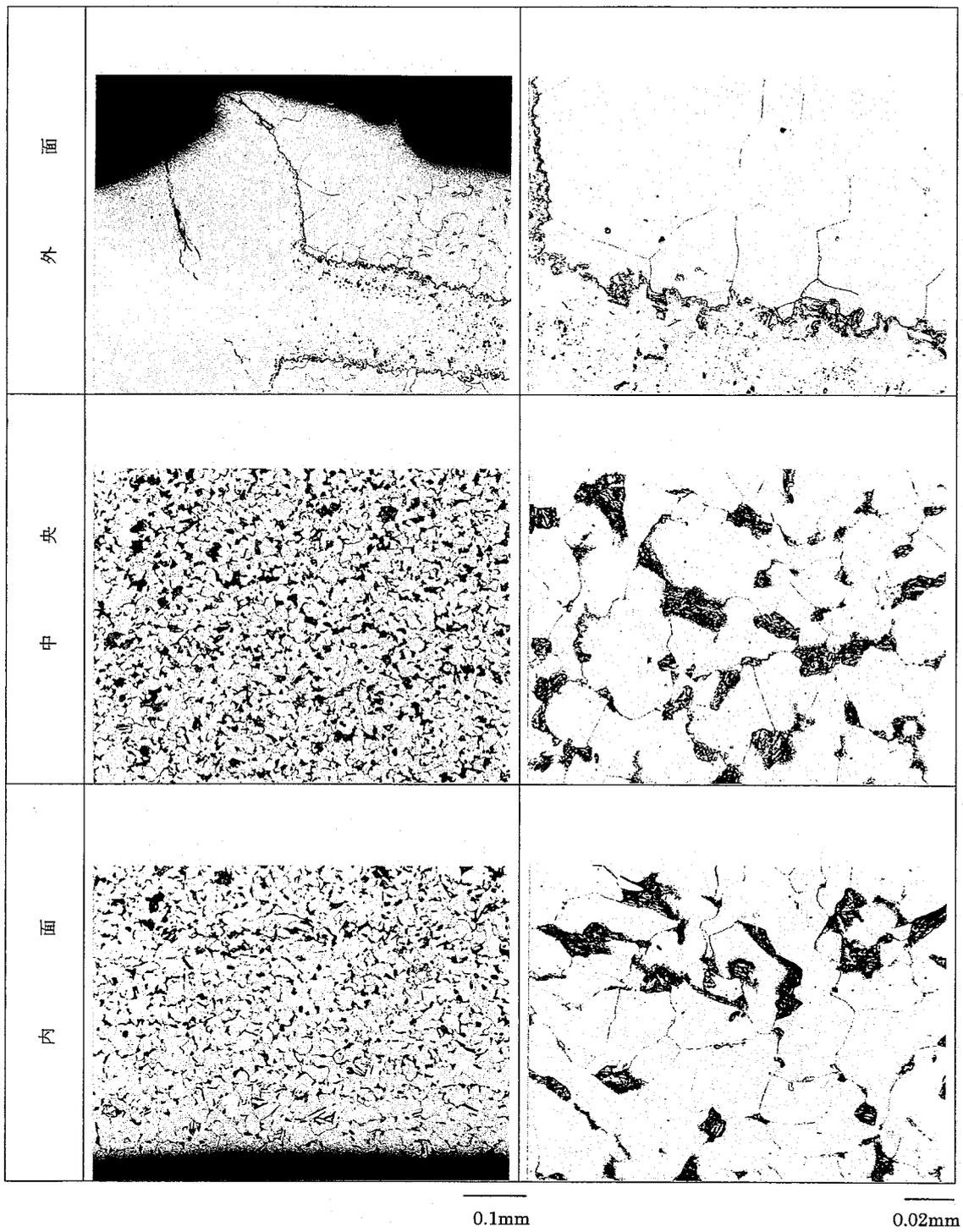


写真 4.3-15 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.14)

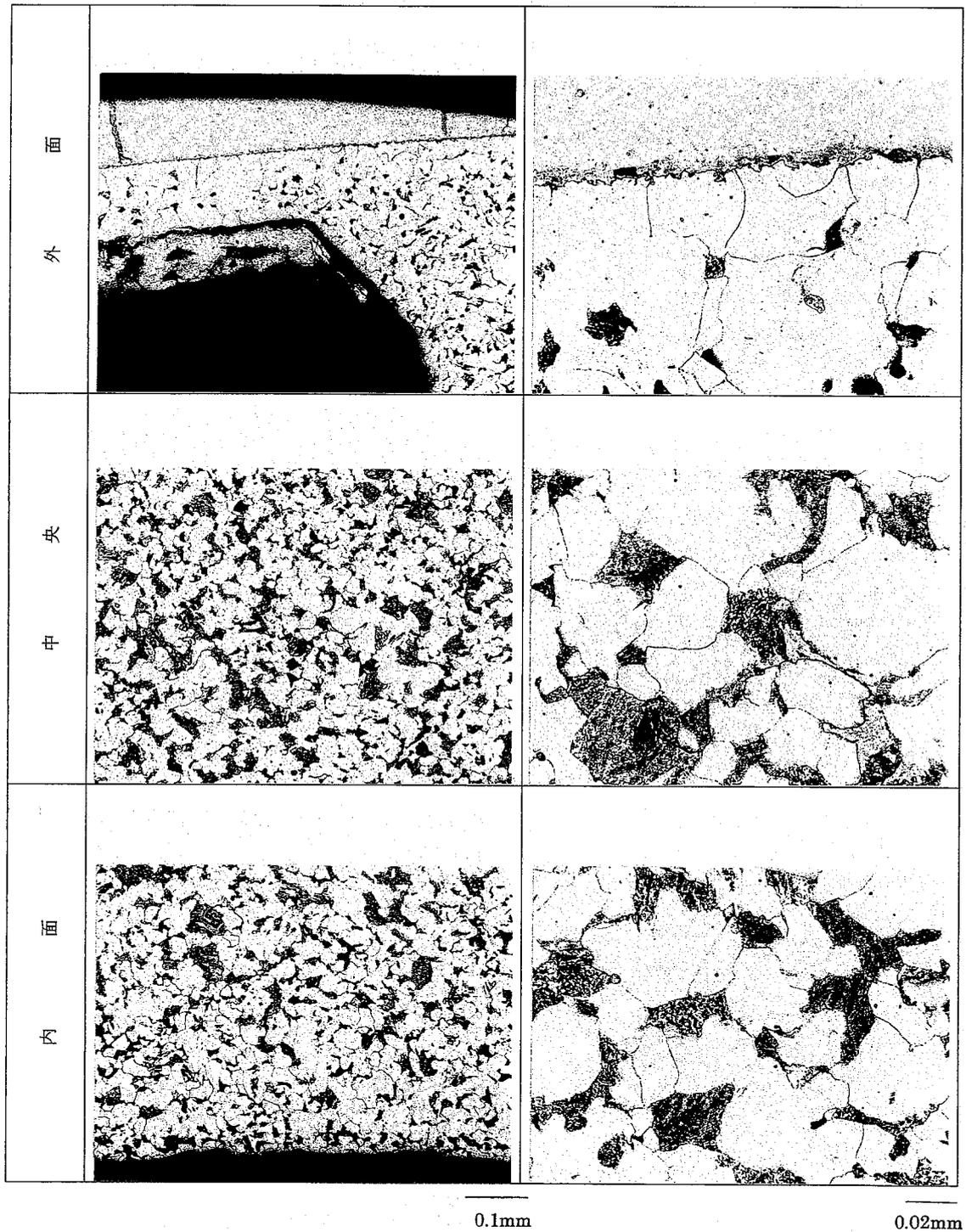


写真 4.3-16 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.15)

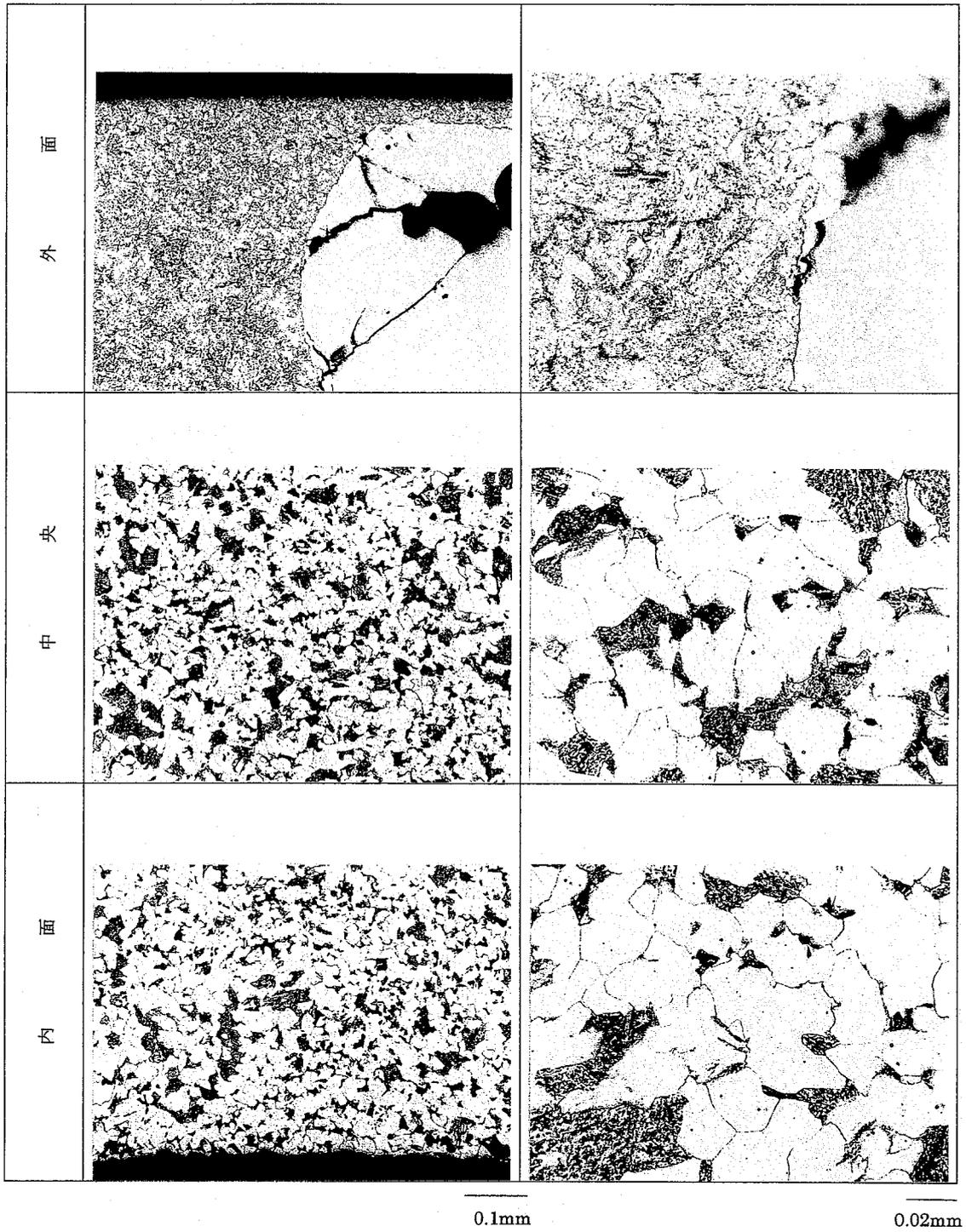


写真 4.3-17 テストピースの金属組織:顕微鏡 (No.16)

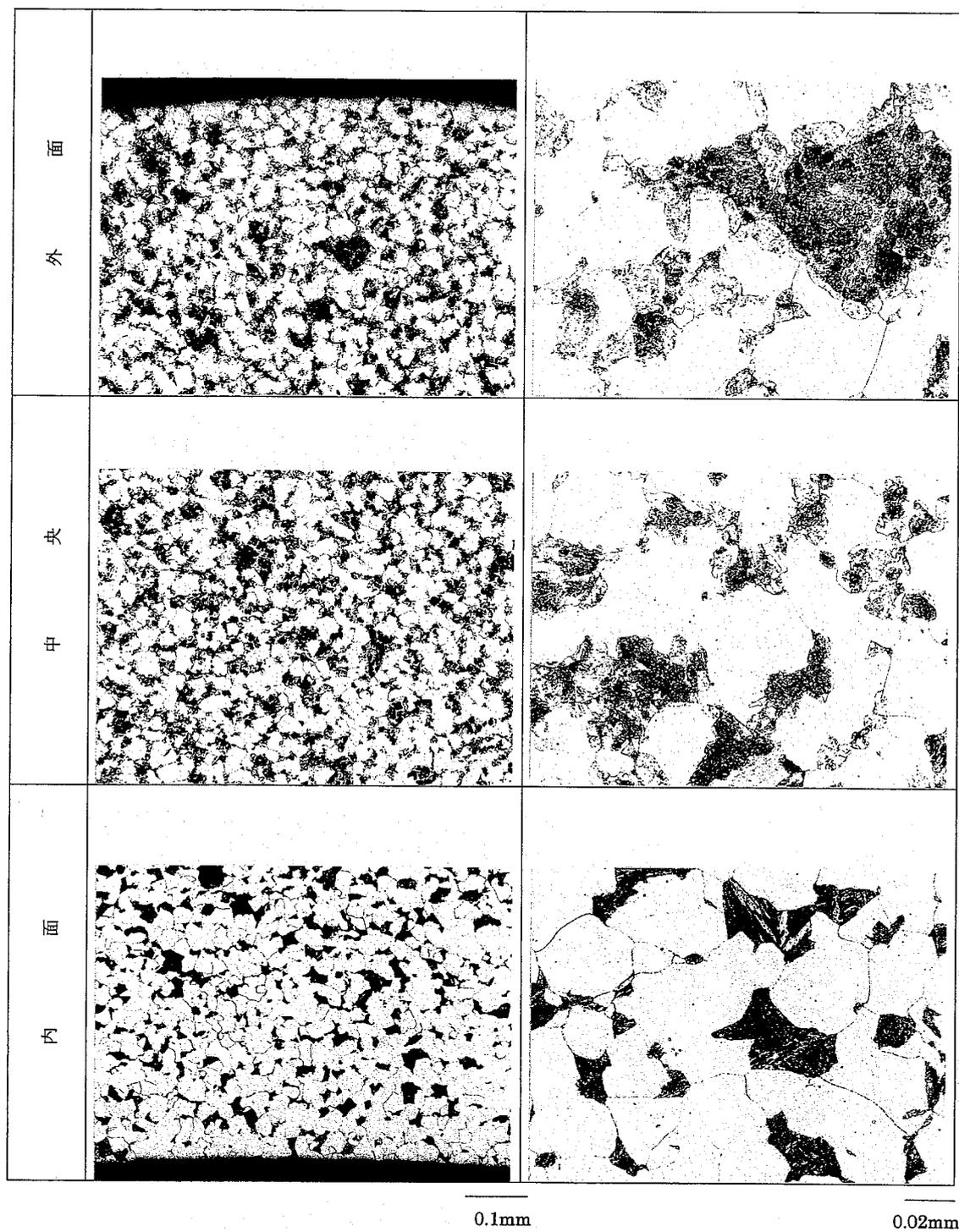


写真 4.3-18 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.17)

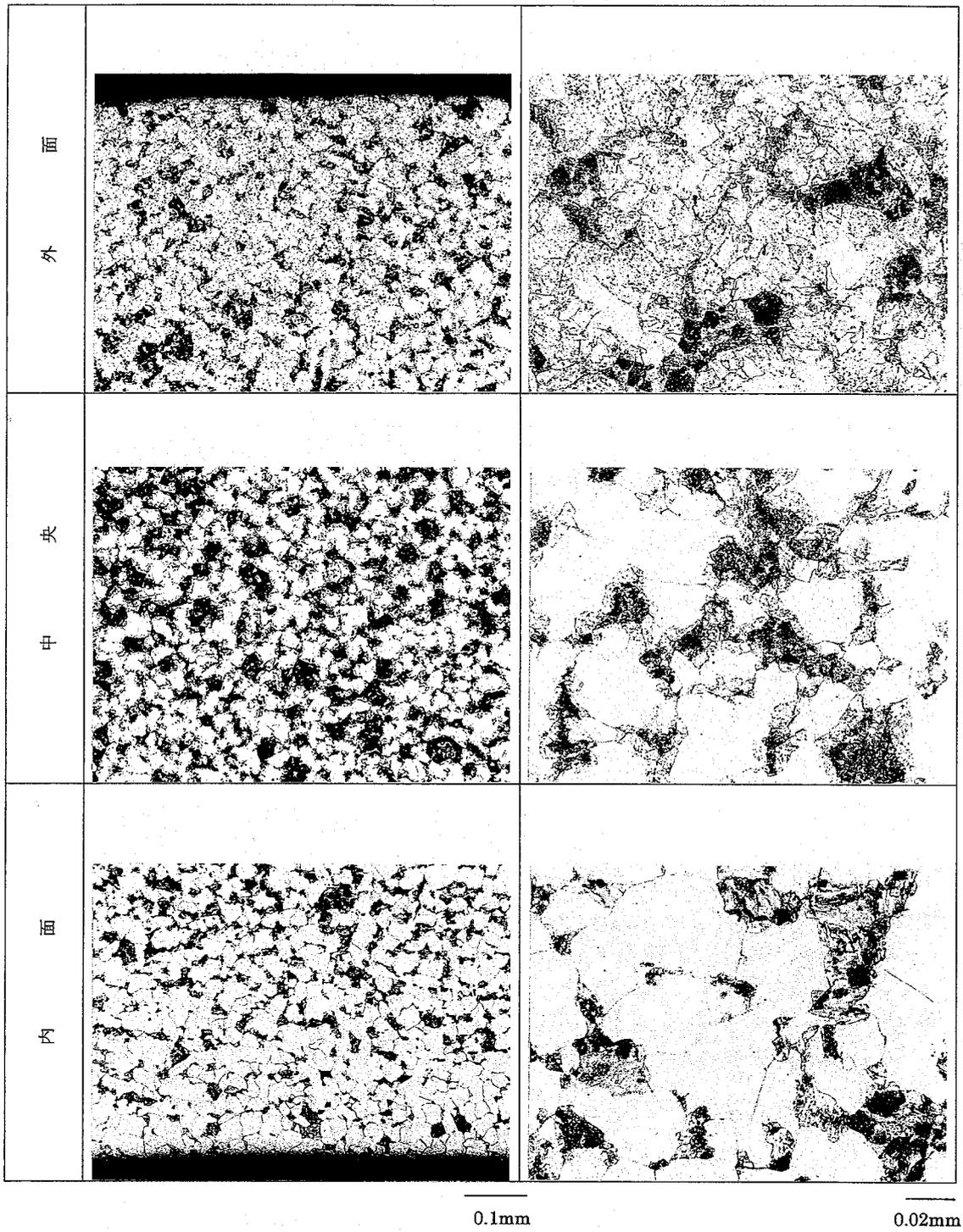


写真 4.3-19 テストピースの金属組織:顕微鏡 (No.18)

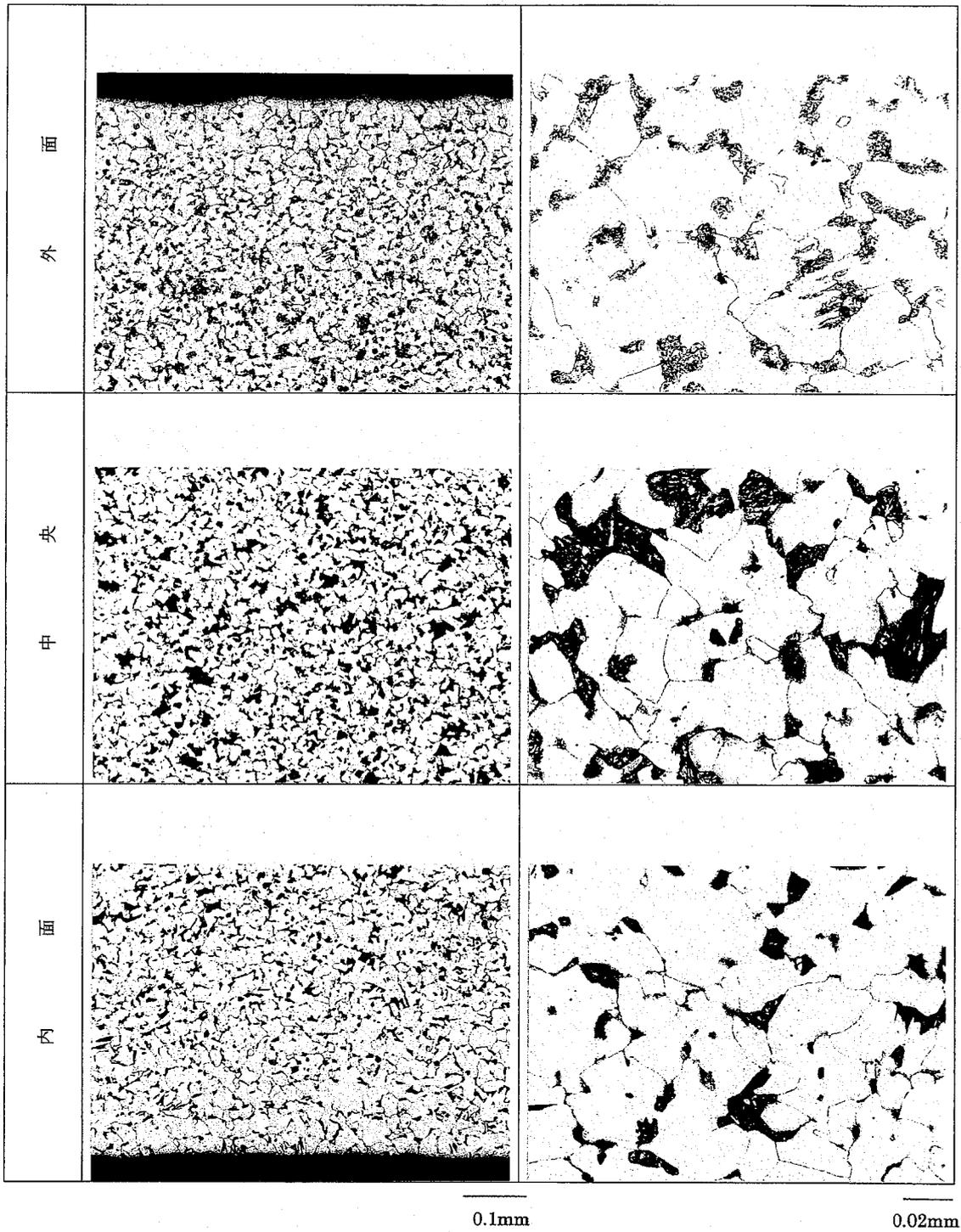


写真 4.3-20 テストピースの金属組織：顕微鏡(No.19)

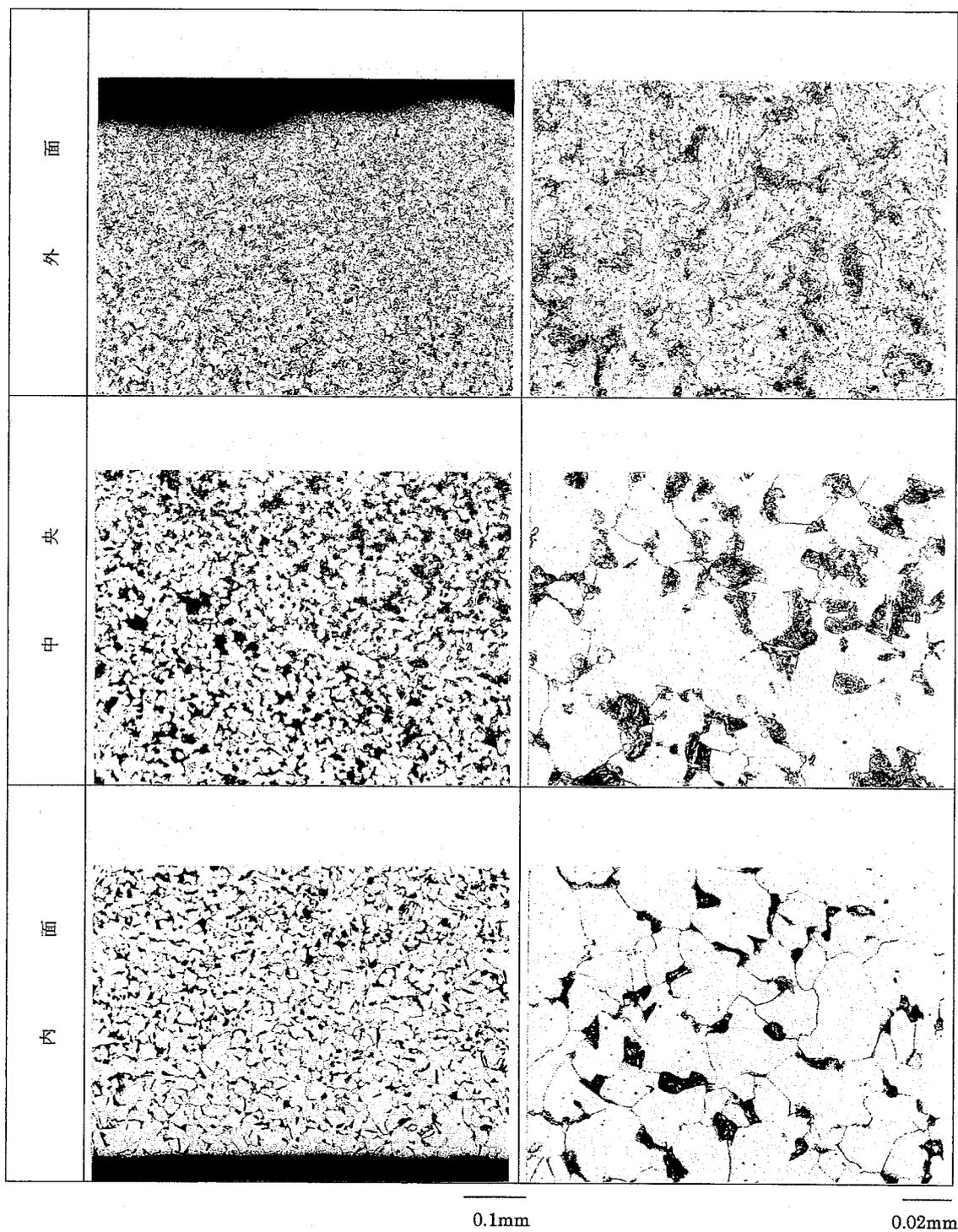


写真 4.3-21 テストピースの金属組織:顕微鏡 (No.20)

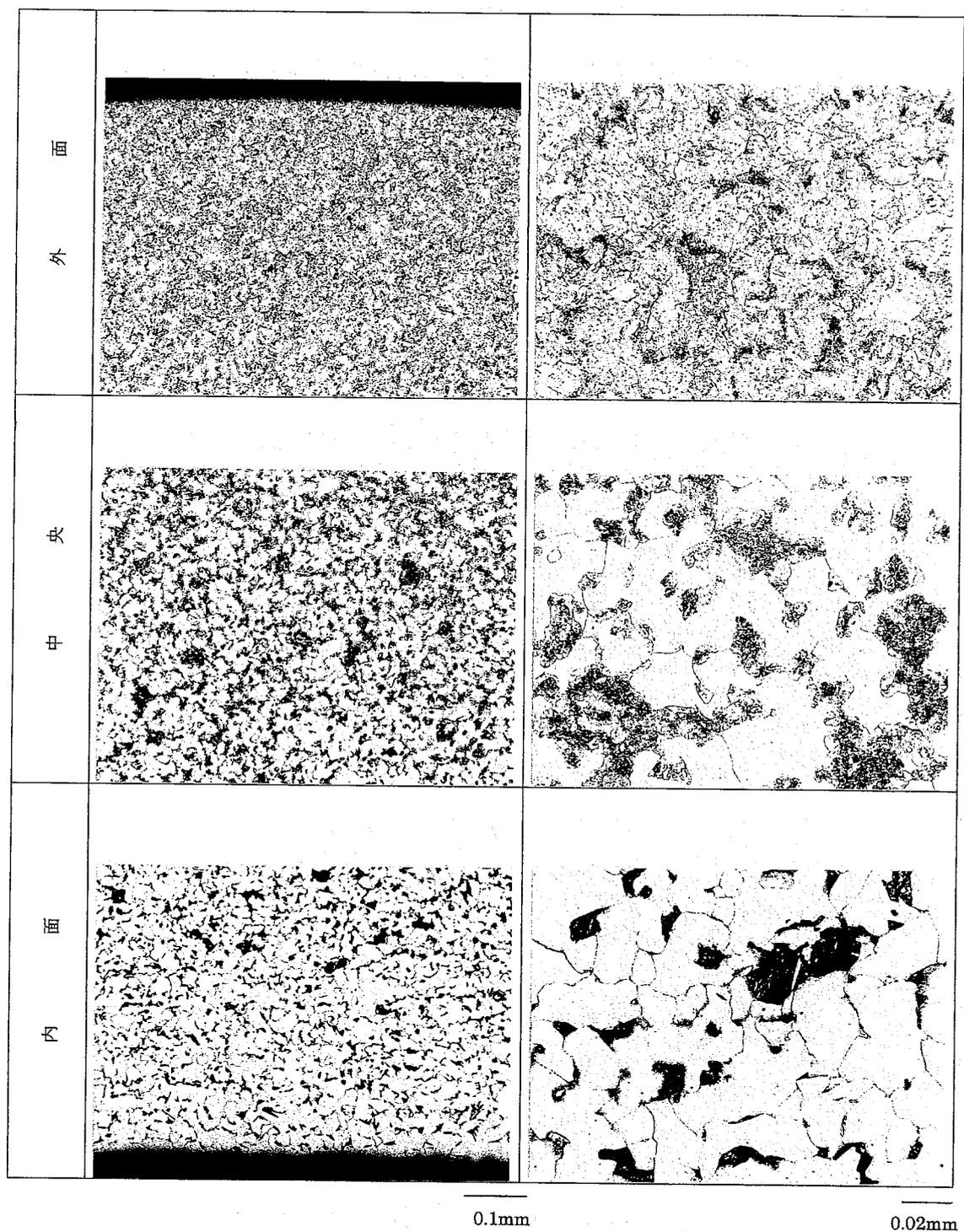


写真 4.3-22 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.21)

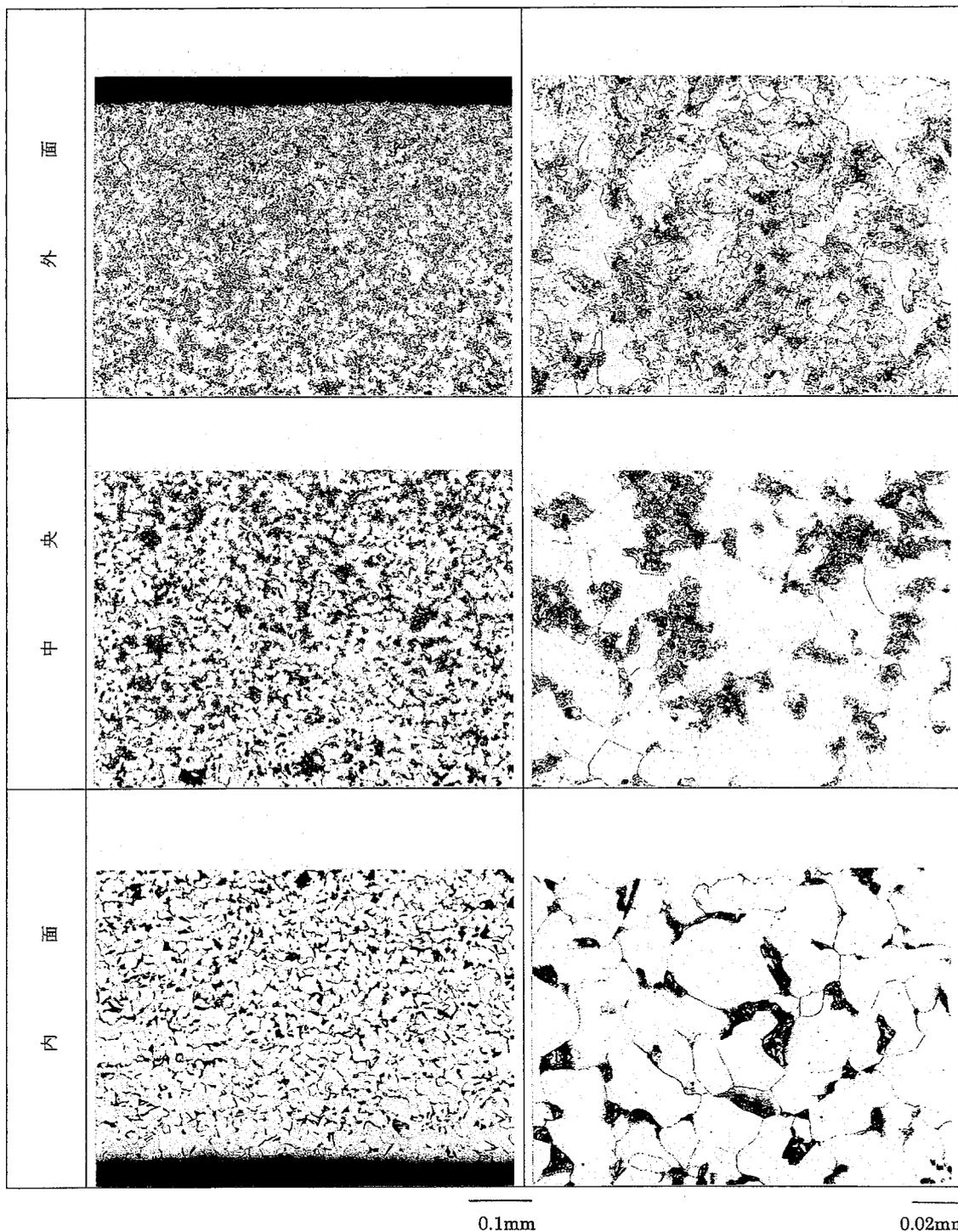


写真 4.3-23 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.22)

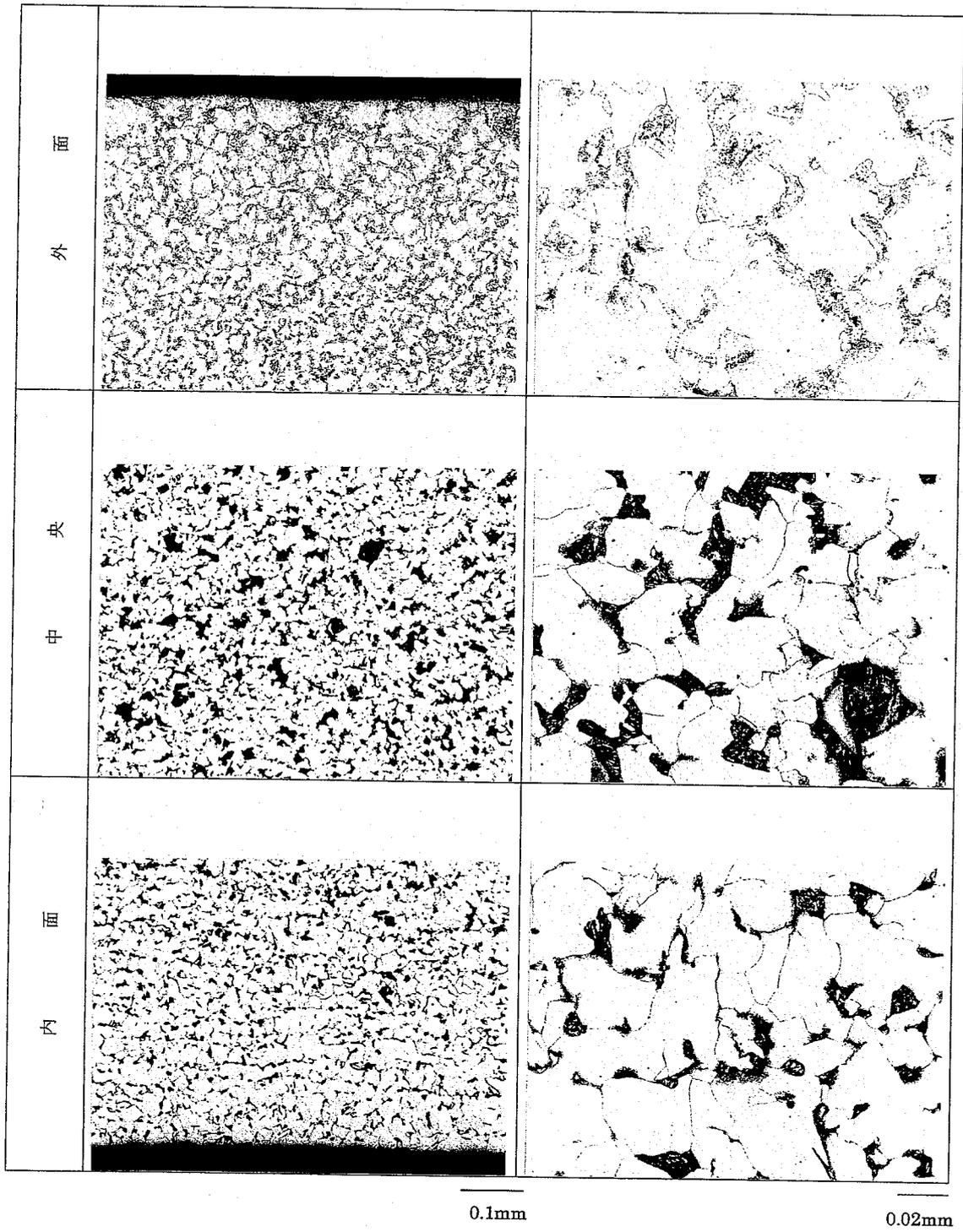


写真 4.3-24 テストピースの金属組織:顕微鏡 (No.23)

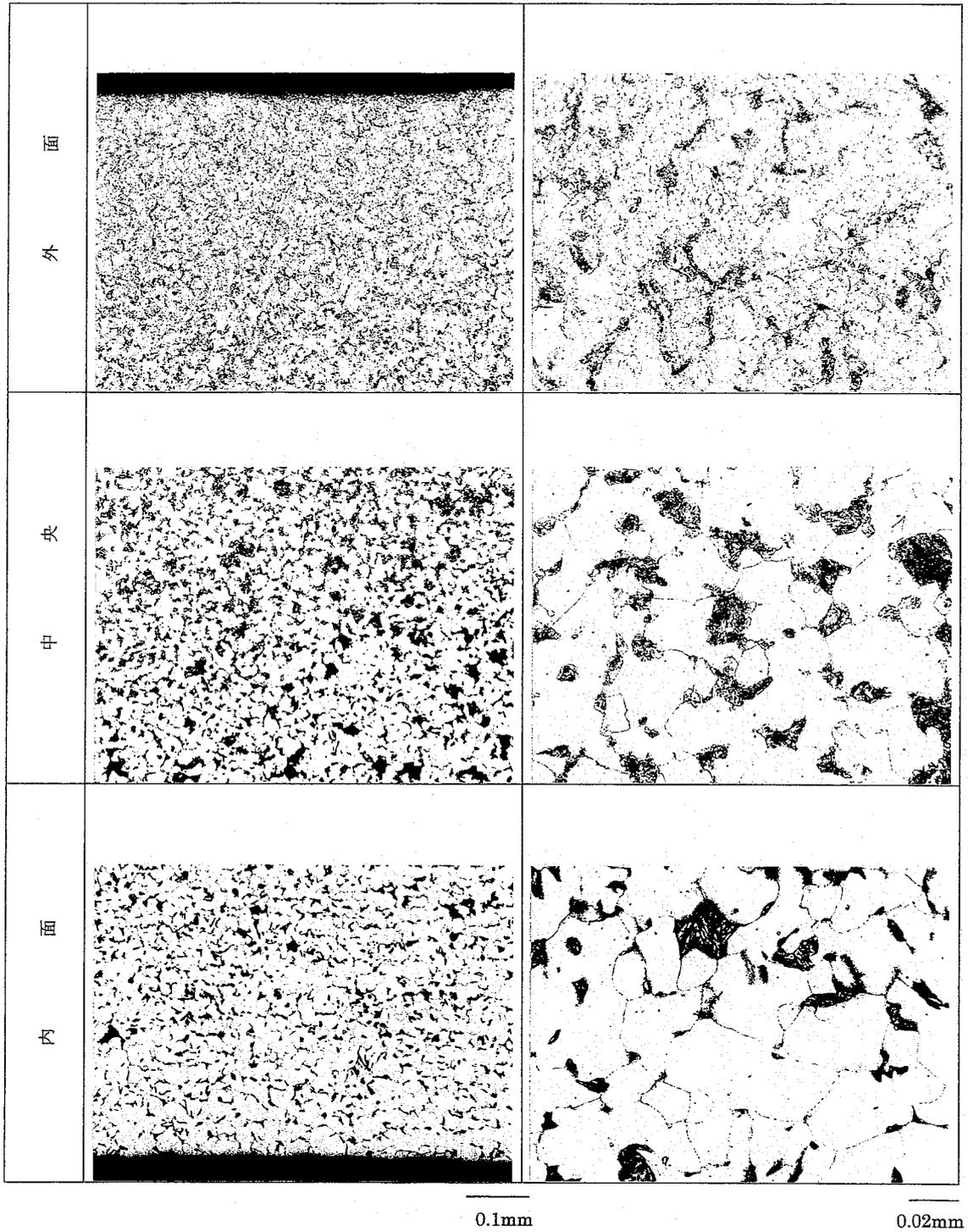


写真 4.3-25 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.24)

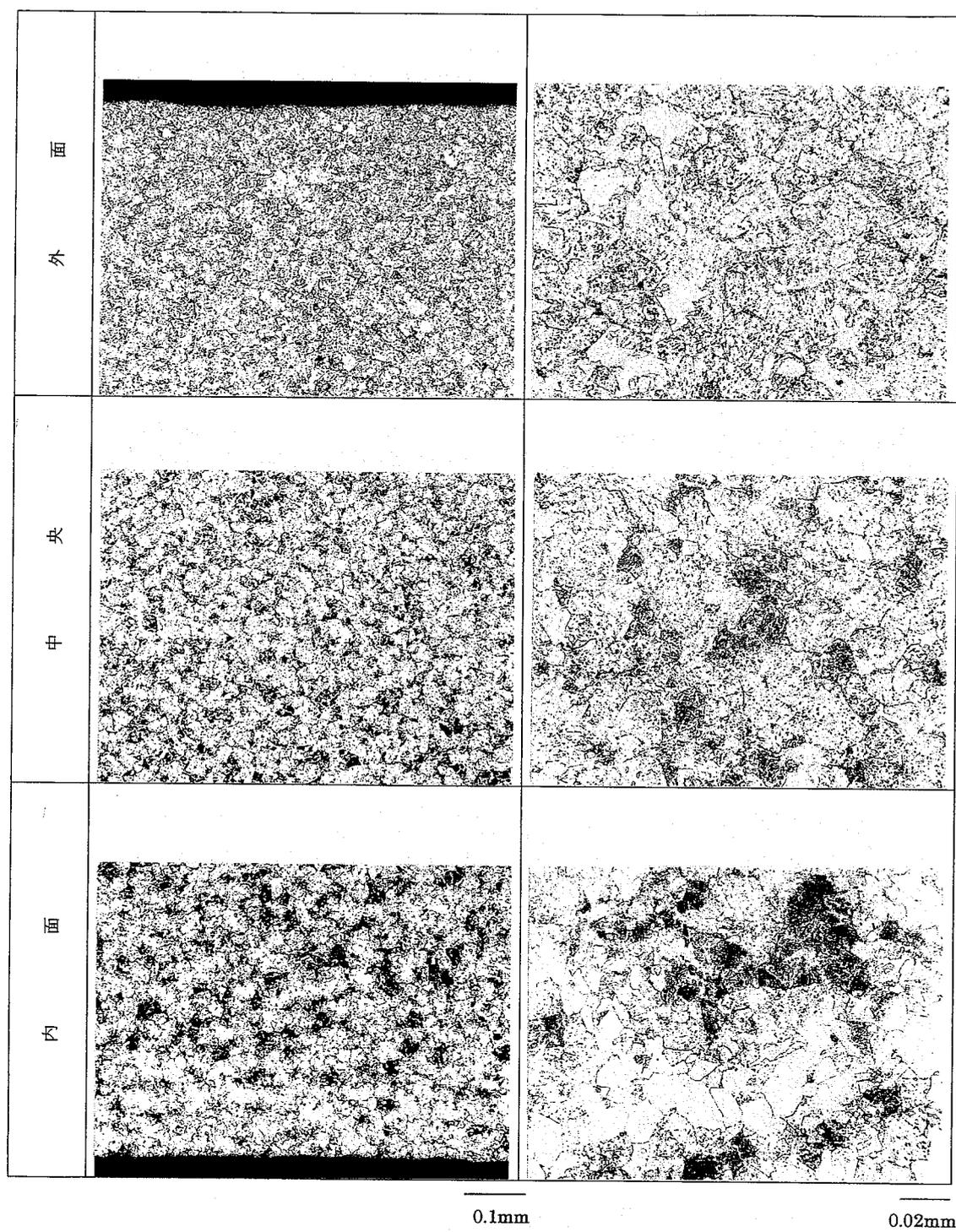


写真 4.3-26 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.25)

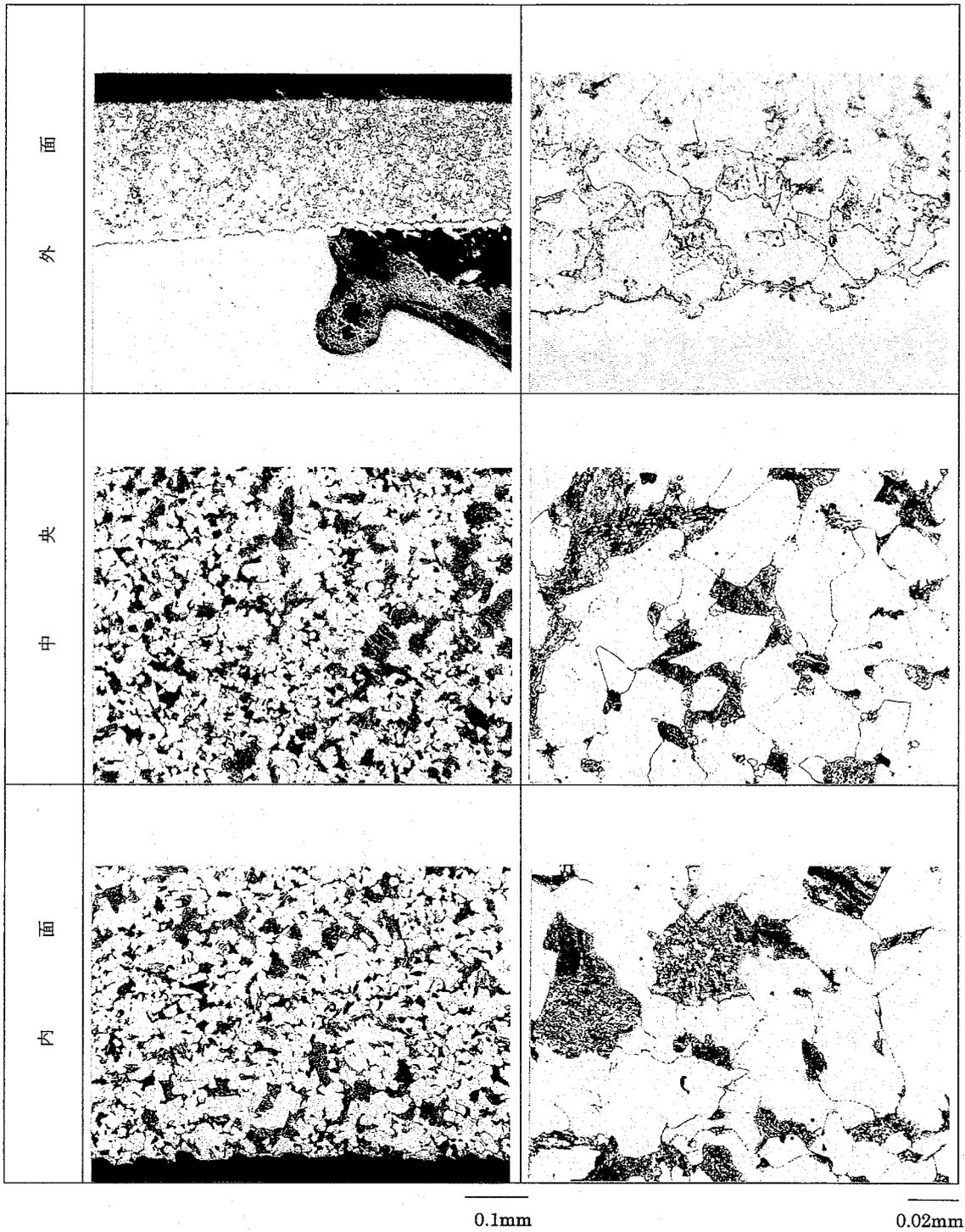


写真 4.3-27 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.26)

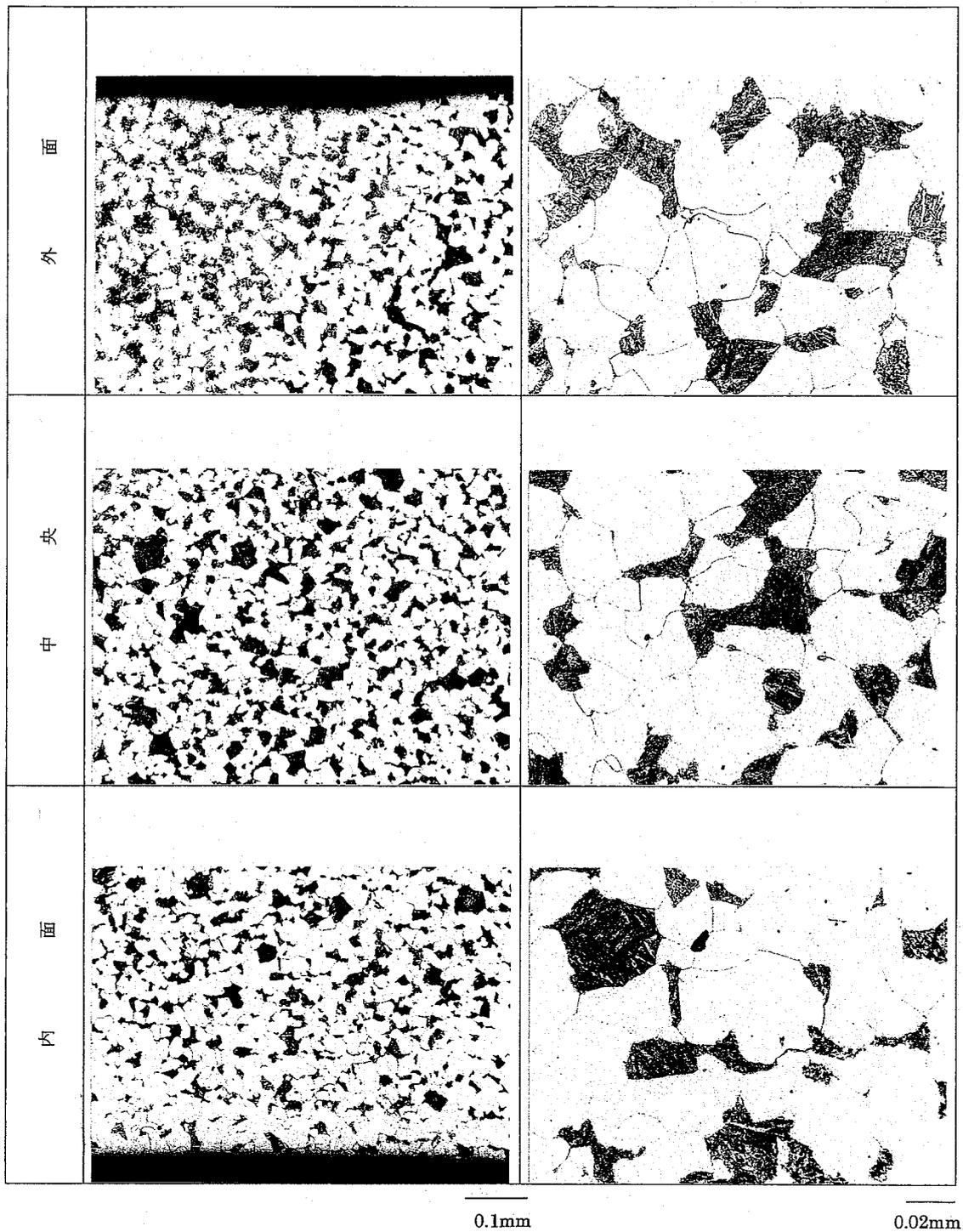


写真 4.3-28 テストピースの金属組織: 顕微鏡 (No.27)

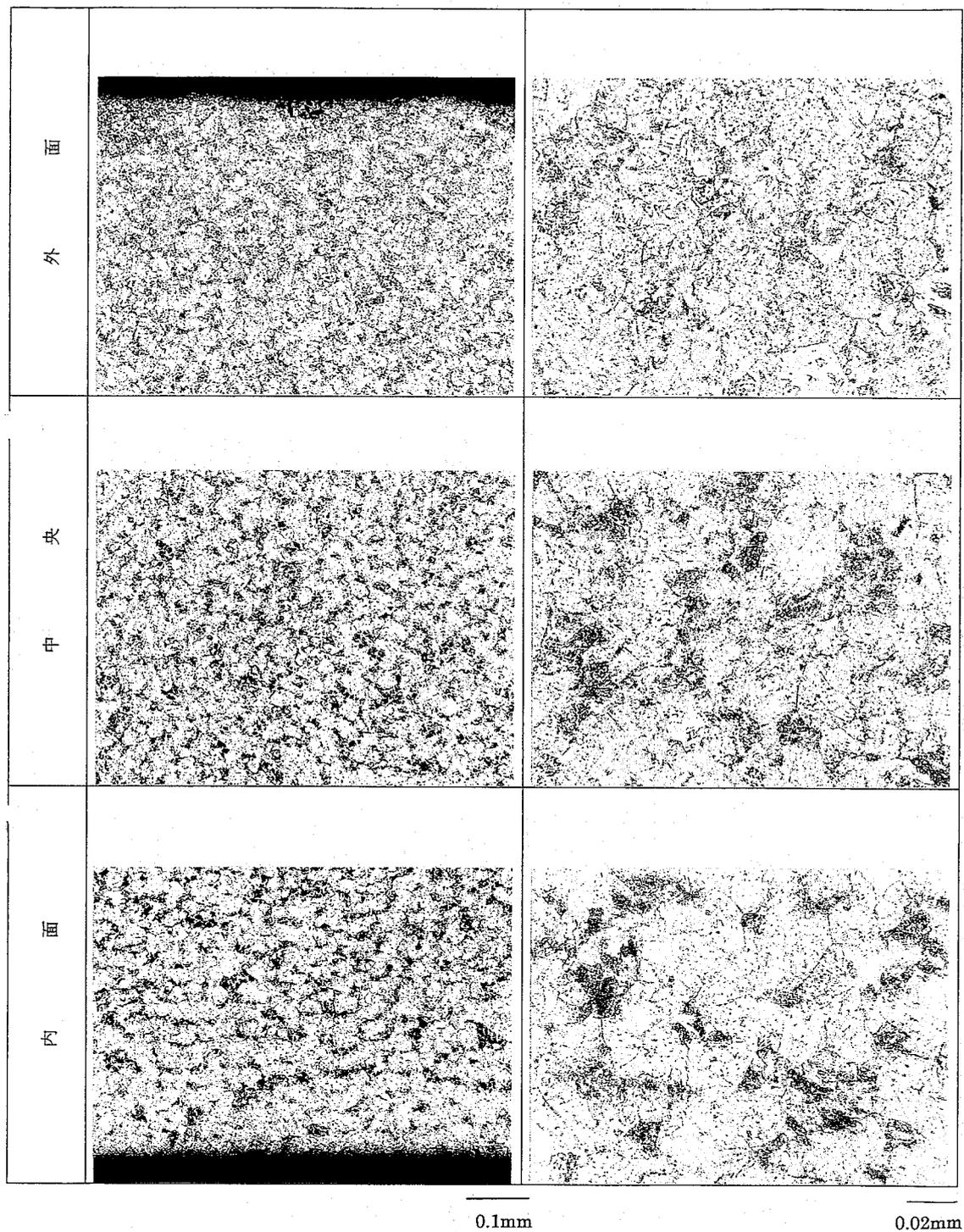


写真 4.3-29 テストピースの金属組織:顕微鏡(No.28)

付録 A 伝熱管検査成績書

検査証明書



証明書番号: 0NNC9839 ページ: 1 日付: 1998-02-04

需要家 :
 管理番号: 2633397ZG14W100-01-SE
 注文者 :
 品名 : マキマシレカシマケゴケシマケコカカ
 規格 : JIS G3462 STBA24 S-C (1978)
 仕様書 : ZGE-W138-2
 作業番号: 0NNC9839 外径: 31.8mm 厚さ: 3.8mm 長さ: 5000mm 員数: 29本 質量: 418 kg

溶鋼番号 製品本数
 A8=J71C284 29

熱処理: 焼ならし後焼もどし(920℃X10分 A.C. & 760℃X 30分 A.C.)

化学成分(%)

*1	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo		
			*2	*2					
規定値 MIN. L	-	-	30	-	-	190	87	*1 L:溶鋼分析 *2: ×1000 上記以外: ×100	
MAX. L	15	50	60	30	30	260	113		
溶鋼番号									
A8=J71C284 L	11	26	43	23	7	206	93		
P	10	25	40	23	7	206	95		

引張試験

	*1	*2	YS *3	TS *3	EL %	
規定値 MIN.	L	B	K 21	K 42	30	試片形状 JIS11号 標点距離 50.0mm 降伏点又は耐力区分 0.2% 0.7σ _{0.2}
MAX.	L	B	K -	K -	-	
溶鋼番号						
A8=J71C284 L	L	B	K 34	K 50	48	*1 方向 L:軸 *2 採取位置 B:母材部 *3 単位 K:kgf/mm ²
	L	B	K 35	K 50	48	

へん平試験:合格
 押しひろげ試験:合格
 外観・寸法検査:合格/寸法測定表参照
 超音波探傷検査:合格

上記注文品はご指定の規格および仕様に従って製造され、その要求事項を満足していることを証明します。

品質保証室長

寸法測定表



証明書番号: ONNC9839 ページ: 1 日付: 1998-02-04

需要家 規格 : JIS G3462 STBA24 S-C (1978)

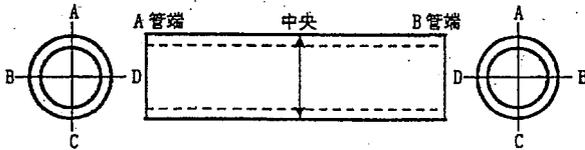
作業番号 : ONNC9839 外径: 31.8mm 厚さ: 3.8mm 長さ: 5000mm

単位: mm

P.No.	O.D. *A		O.D. *B		O.D. *C	
	A-C	B-D	A-C	B-D	A-C	B-D
A01	31.87	31.87	31.84	31.84	-	-
A01	31.85	31.88	31.81	31.82	-	-
A01	31.88	31.79	31.85	31.88	-	-
A01	31.85	31.83	31.87	31.88	-	-
A01	31.85	31.83	31.92	31.88	-	-
A01	31.94	31.94	31.92	31.88	-	-
A01	31.87	31.85	31.82	31.86	-	-
A01	31.88	31.82	31.82	31.80	-	-
A01	31.87	31.91	31.87	31.87	-	-
A02	31.86	31.89	31.87	31.87	-	-
TOL.	O.D. + 0.15 (31.95)					
	- 0.15 (31.65)					

P.No.	W.T. *A				W.T. *B				W.T. *C				L
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	
A01	4.28	4.21	4.22	4.28	4.28	4.27	4.17	4.16	-	-	-	-	5008
A01	4.22	4.29	4.25	4.13	4.20	4.14	4.20	4.20	-	-	-	-	5008
A01	4.03	4.22	4.30	4.15	4.17	4.24	4.24	4.26	-	-	-	-	5008
A01	4.14	4.23	4.32	4.21	4.12	4.17	4.29	4.29	-	-	-	-	5008
A01	4.23	4.13	4.22	4.32	4.25	4.20	4.25	4.29	-	-	-	-	5008
A01	4.32	4.30	4.26	4.24	4.26	4.22	4.21	4.25	-	-	-	-	5008
A01	4.31	4.25	4.15	4.21	4.31	4.27	4.20	4.18	-	-	-	-	5008
A01	4.26	4.28	4.21	4.14	4.14	4.26	4.26	4.09	-	-	-	-	5008
A01	4.32	4.26	4.17	4.26	4.31	4.32	4.18	4.16	-	-	-	-	5008
A02	4.30	4.25	4.17	4.25	4.31	4.31	4.17	4.17	-	-	-	-	5008
TOL.	W.T. + 20% (4.56)												L+ 10 (5010)
	- 0% (3.80)												- 0 (5000)

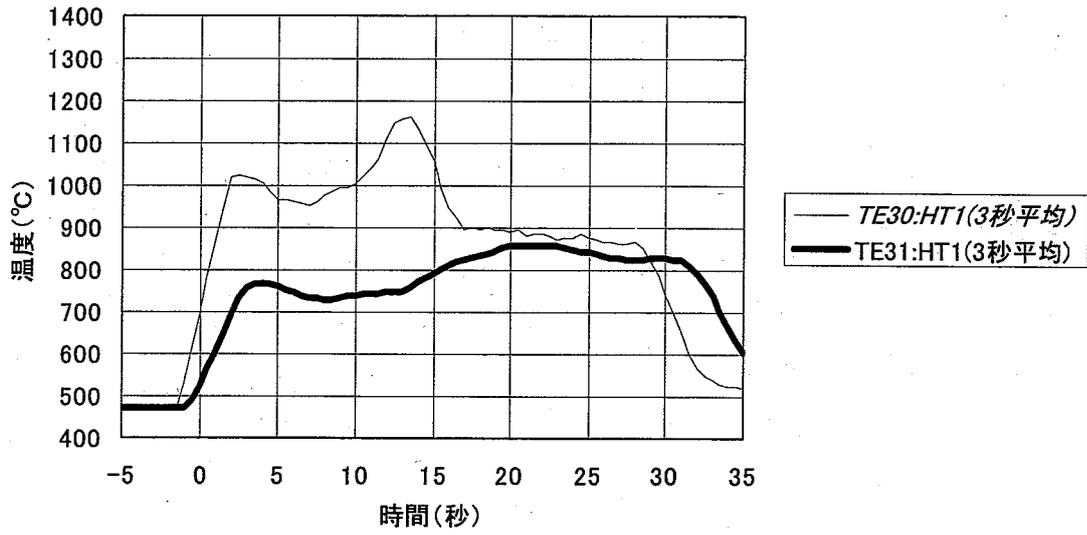
P.No.: 管番号 TOL.: 許容差 O.D.: 外径
 W.T.: 肉厚 L: 長さ
 *A: A管端 *B: B管端 *C: 中央



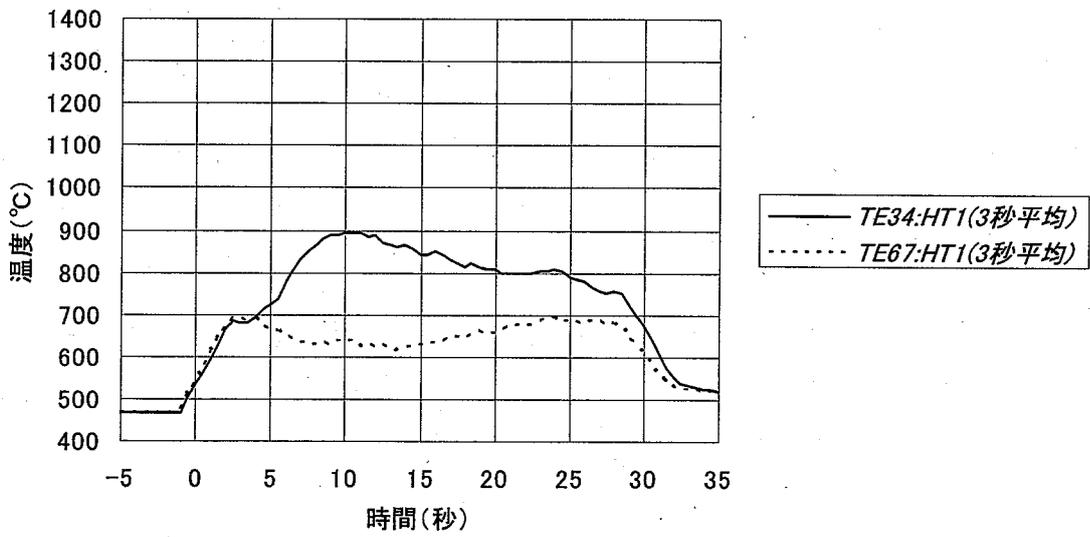
品質保証室長

付録 B Run-HT1 試験データ集(金相観察比較用)

(TP1)

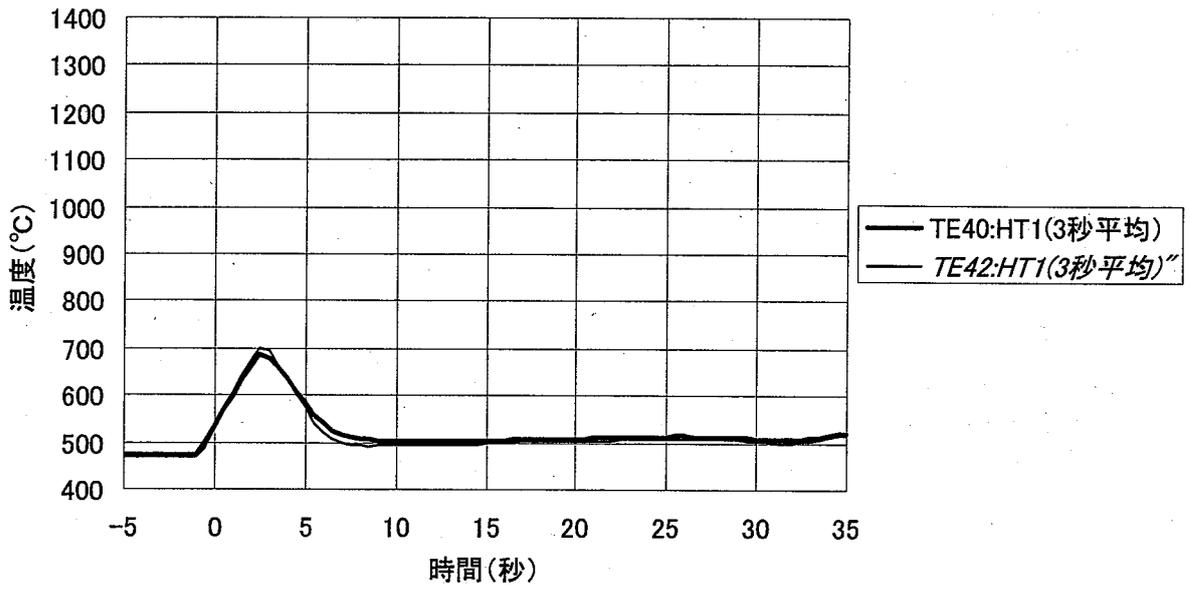


(TP2)

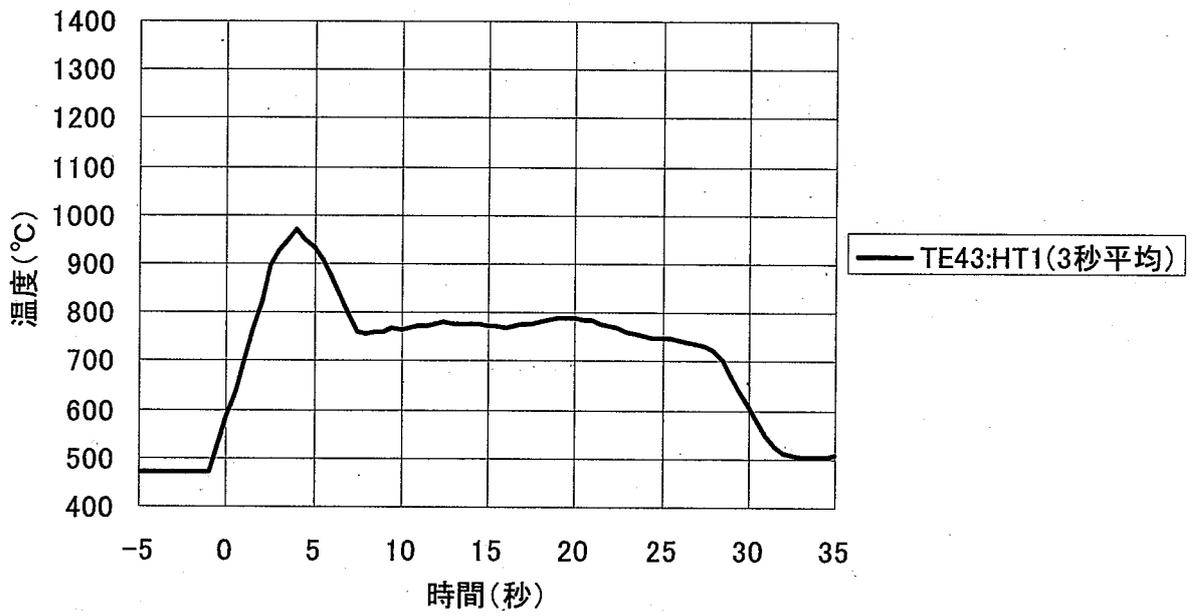


比較用熱電対挙動:HT1(1/3)

(TP3)

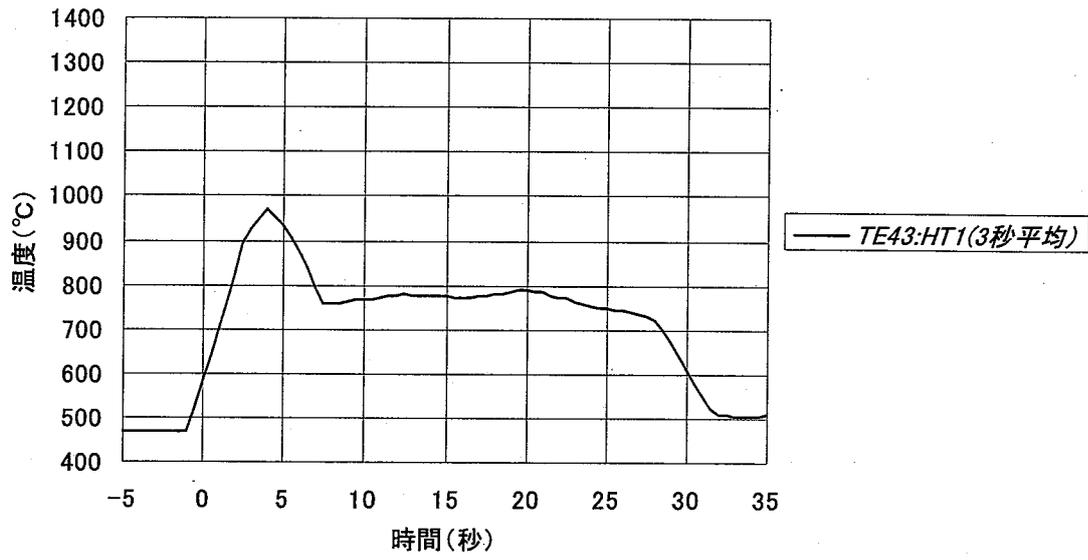


(TP4)



比較用熱電対挙動:HT1(2/3)

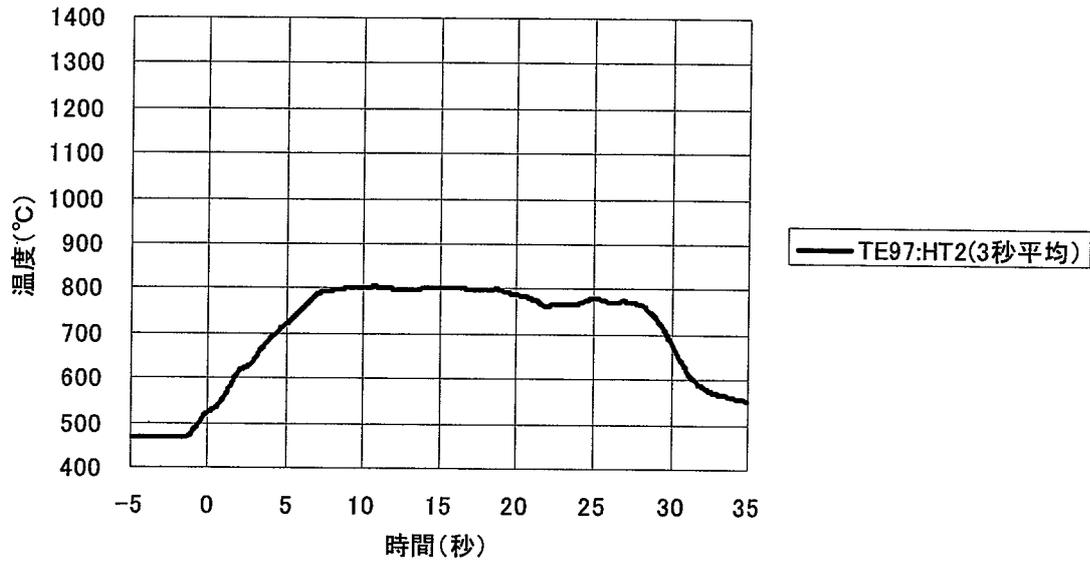
比較用熱電対挙動 (TP5)



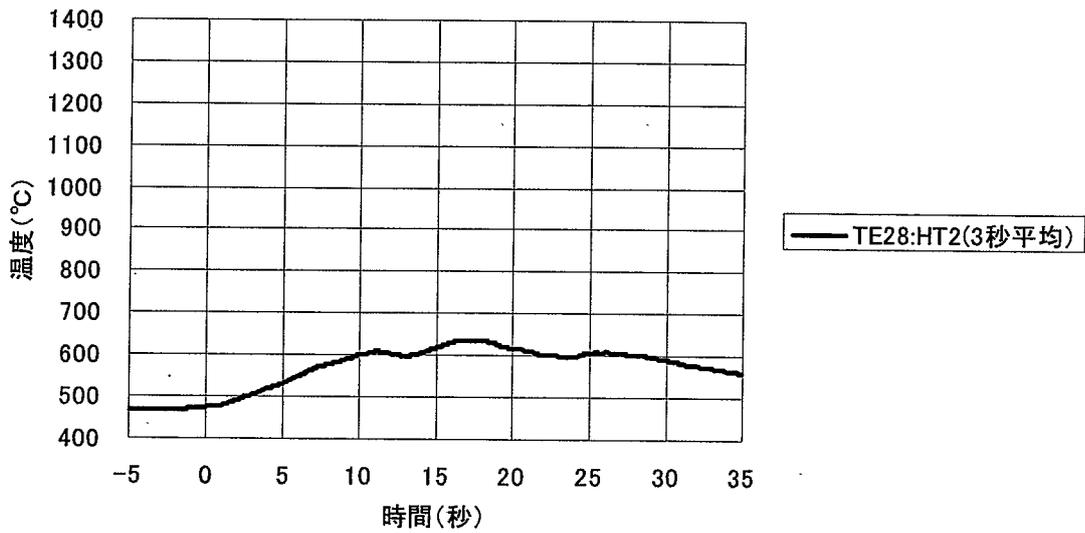
比較用熱電対挙動:HT1(2/3)

付録 C Run-HT2 試験データ集(金相観察比較用)

(TP6)

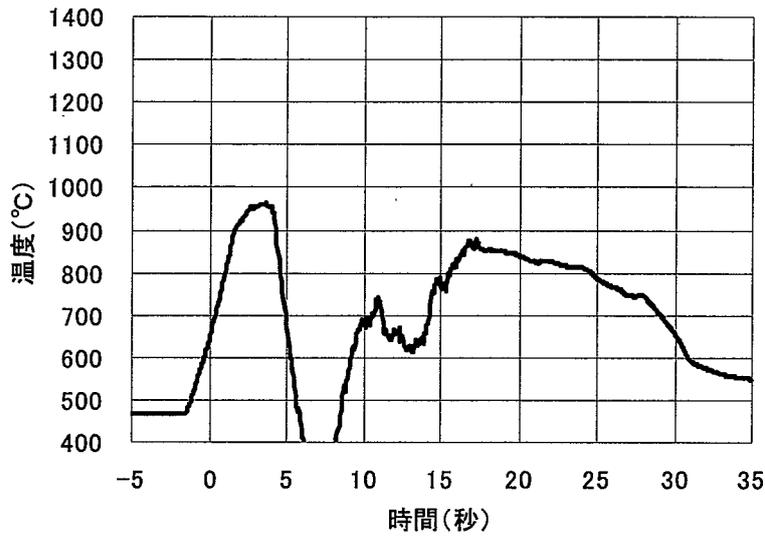


(TP7)



比較用熱電対挙動:HT2(1/6)

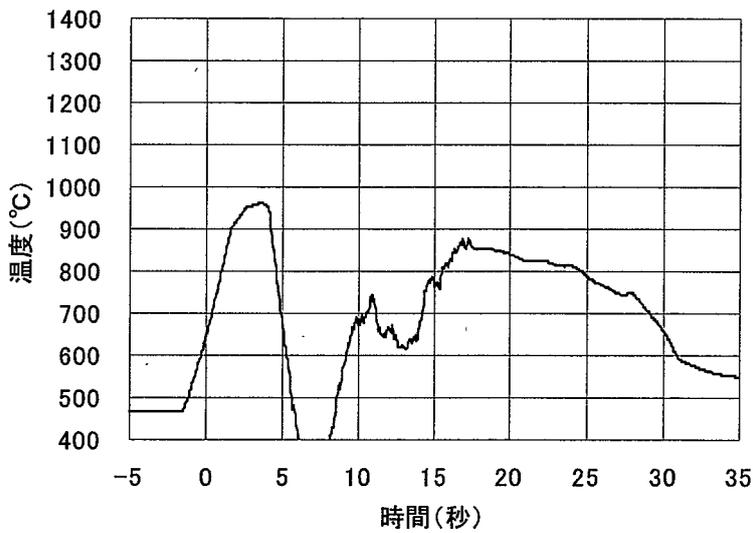
(TP8)



TE34は5秒後以降破損したと思われる。

— TE34:HT2(3秒平均)

(TP9)

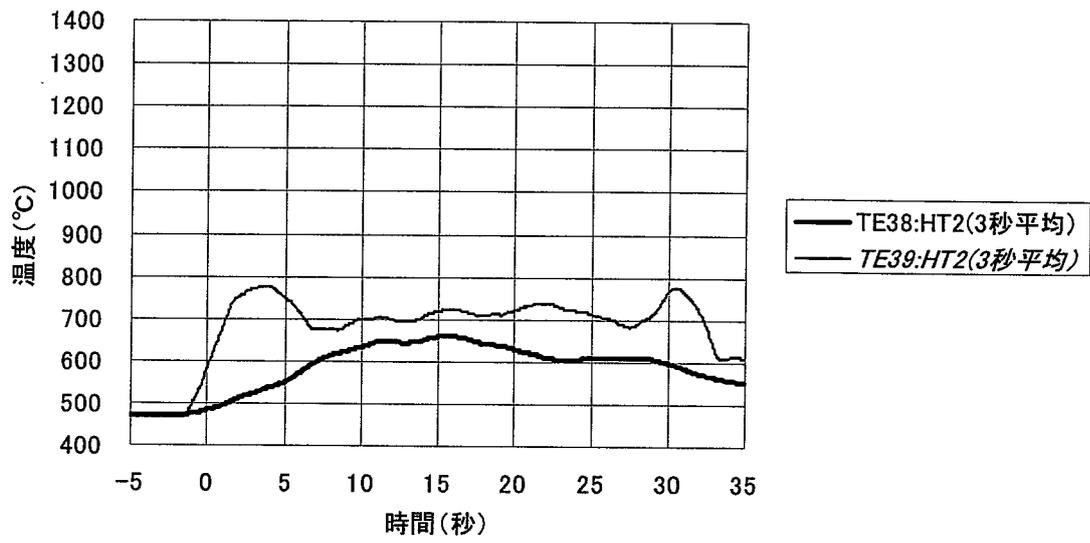


TE34は5秒後以降破損したと思われる。

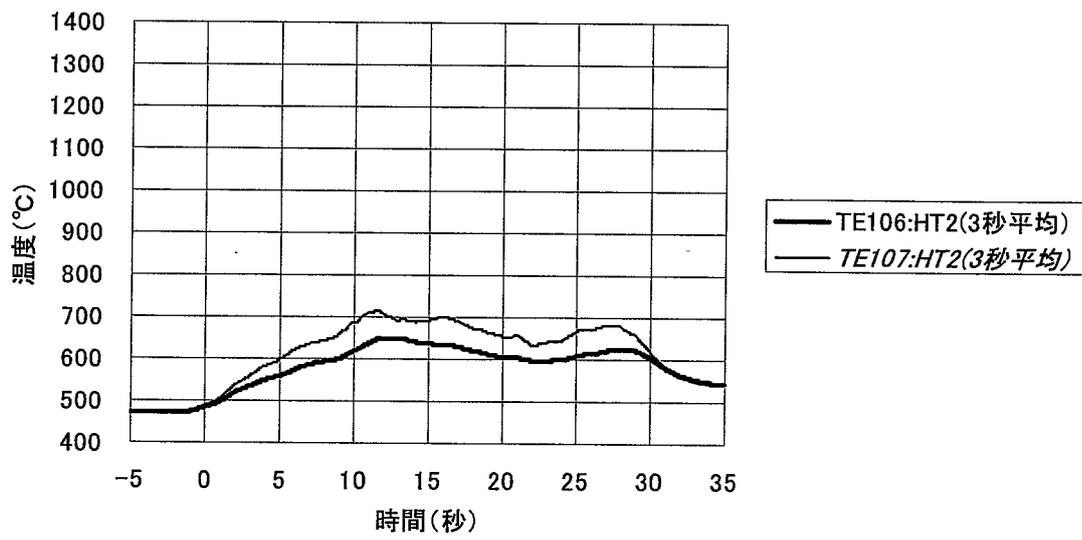
— TE34:HT2(3秒平均)

比較用熱電対挙動:HT2(2/6)

(TP10)

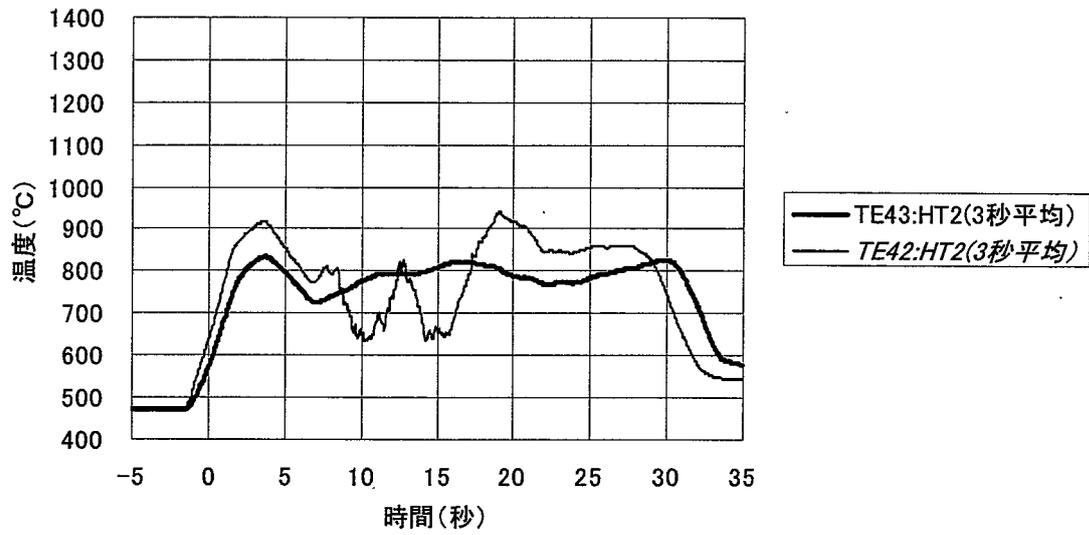


(TP11)

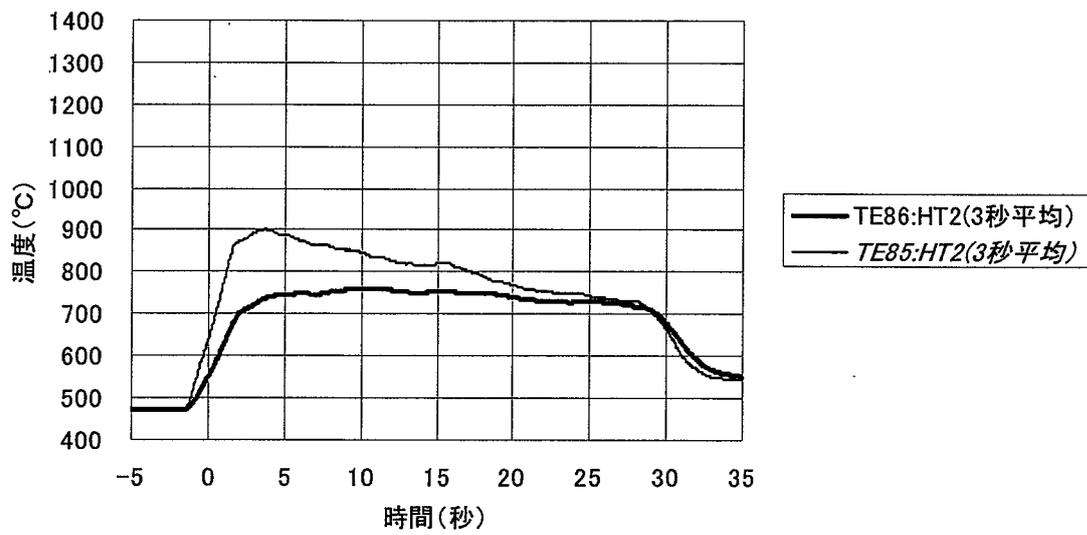


比較用熱電対挙動:HT2(3/6)

(TP12)

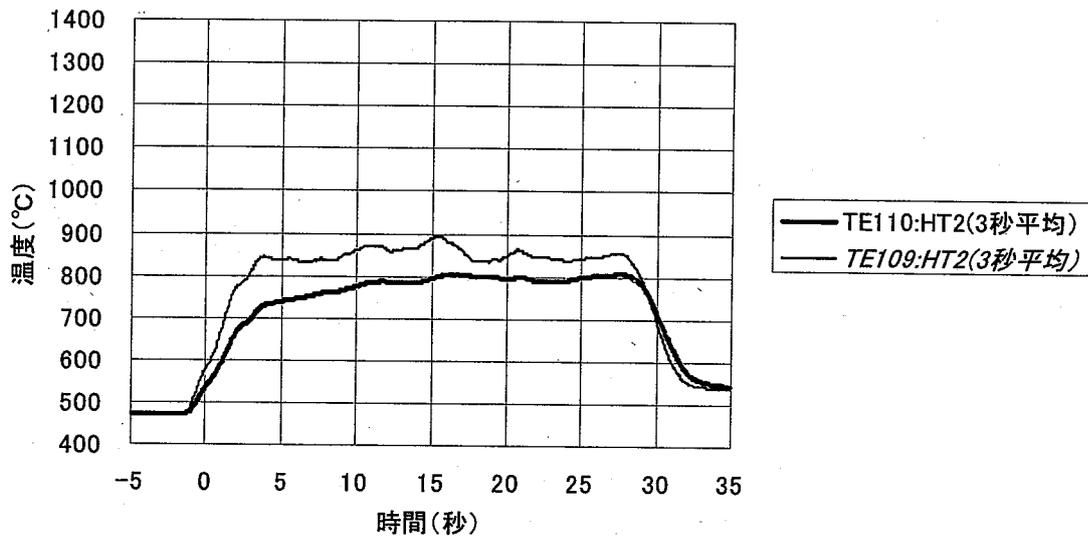


(TP13)

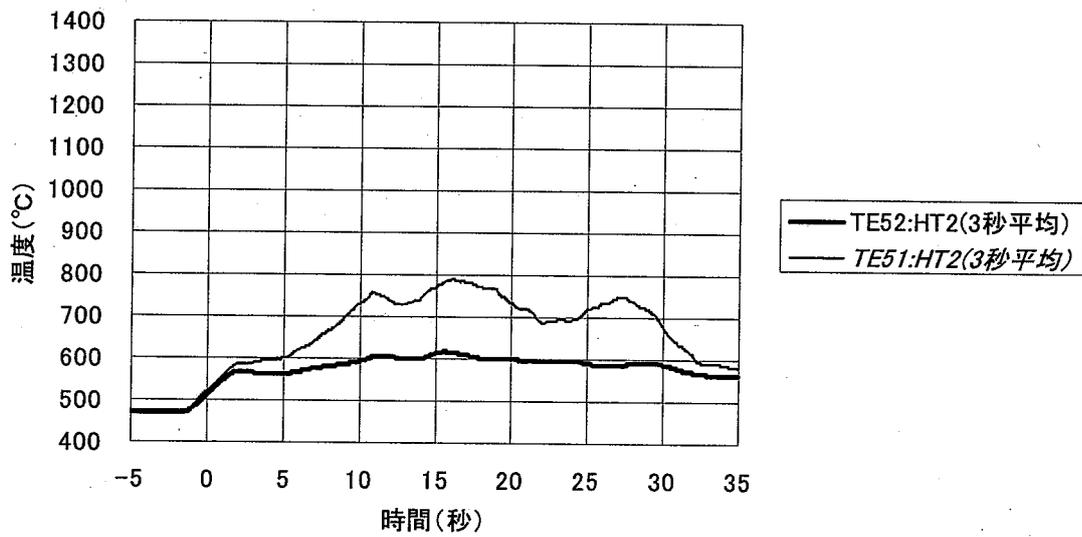


比較用熱電対挙動:HT2(4/6)

(TP14)



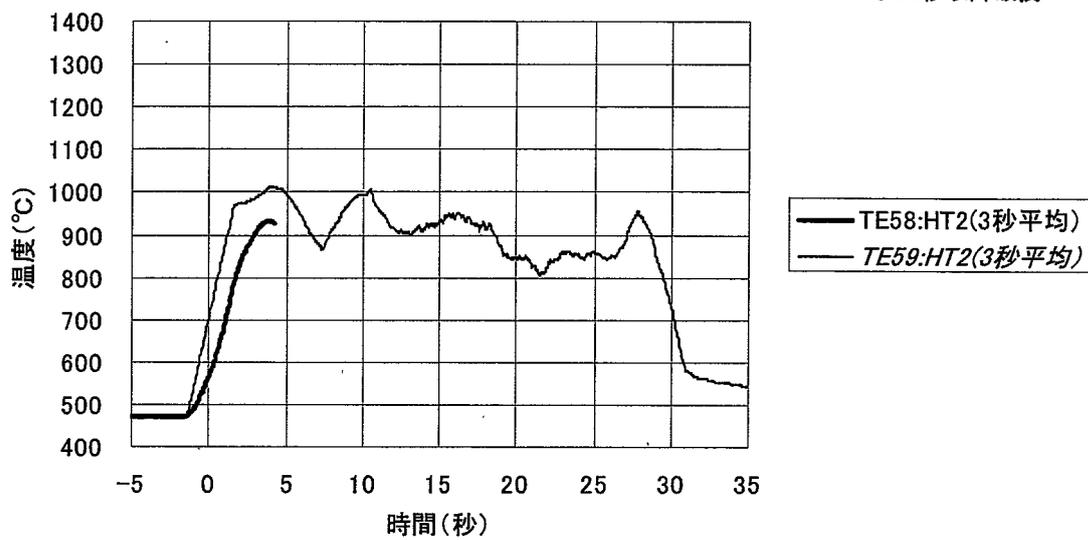
(TP15)



比較用熱電対挙動:HT2(5/6)

(TP16)

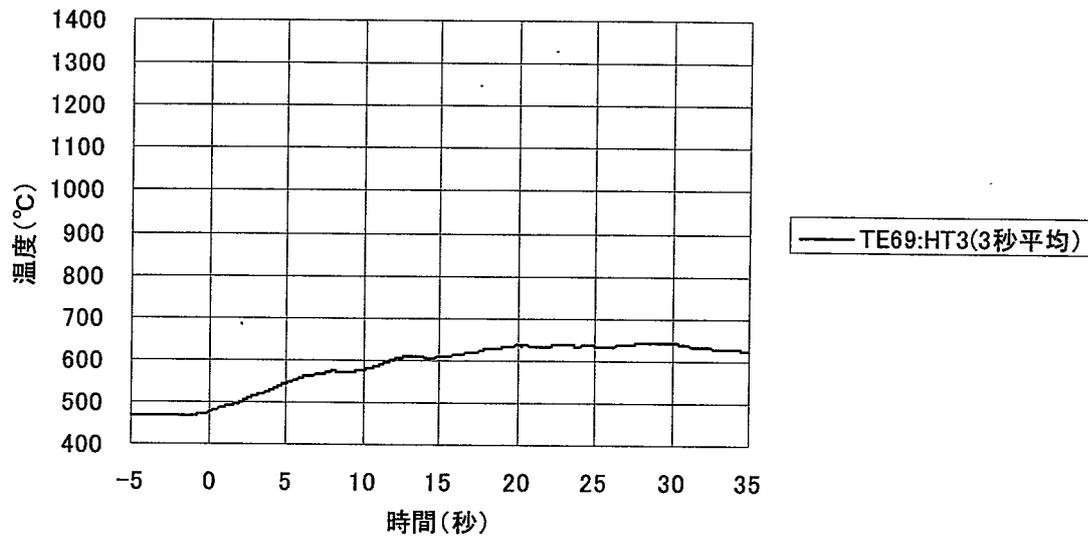
TE58は5.8秒以降破損



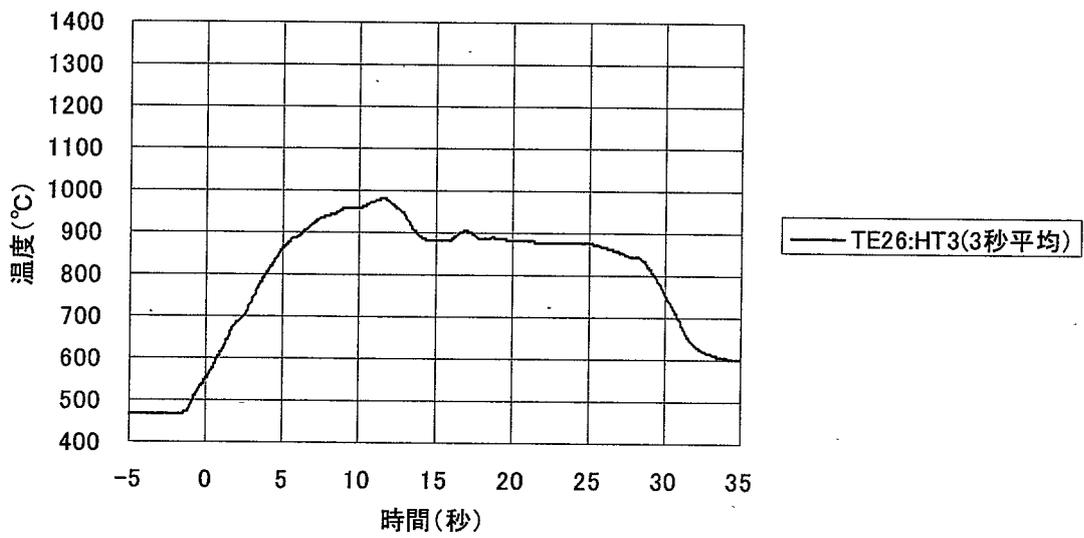
比較用熱電対挙動:HT2(6/6)

付録 D Run-HT3 試験データ集(金相観察比較用)

(TP17)



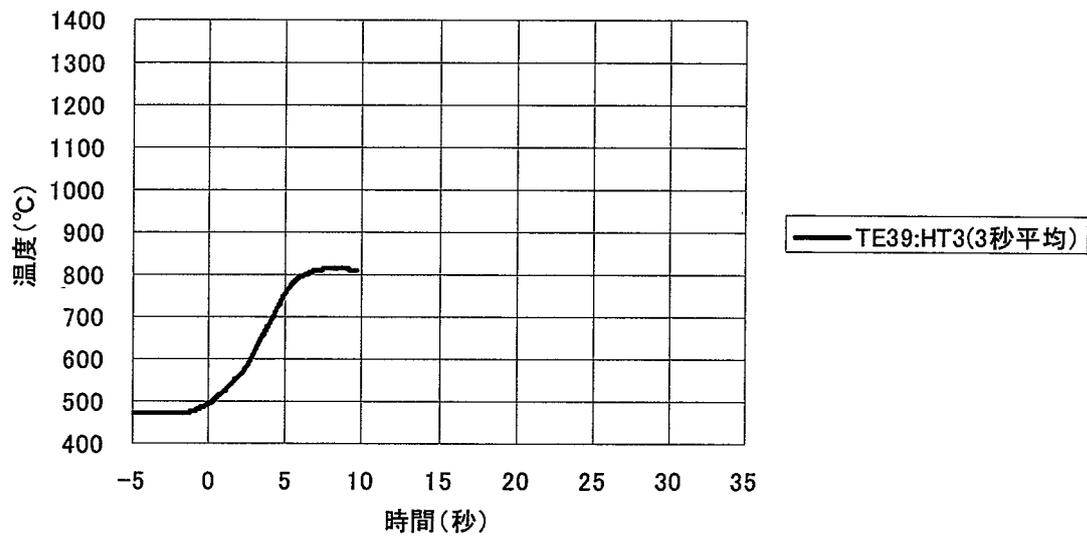
(TP18)



比較用熱電対挙動:HT3(1/6)

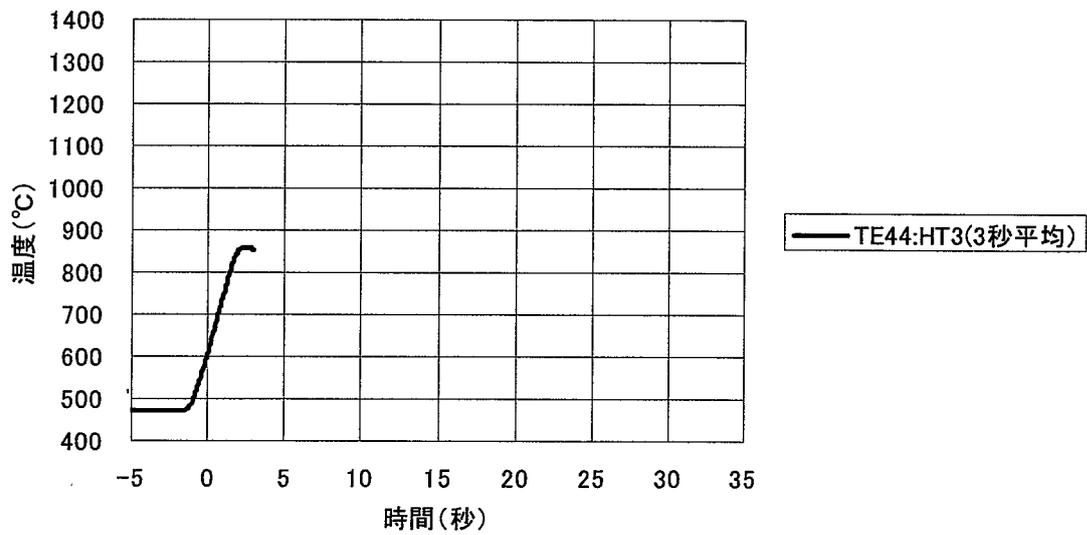
(TP19)

TE39は11.2秒で破損



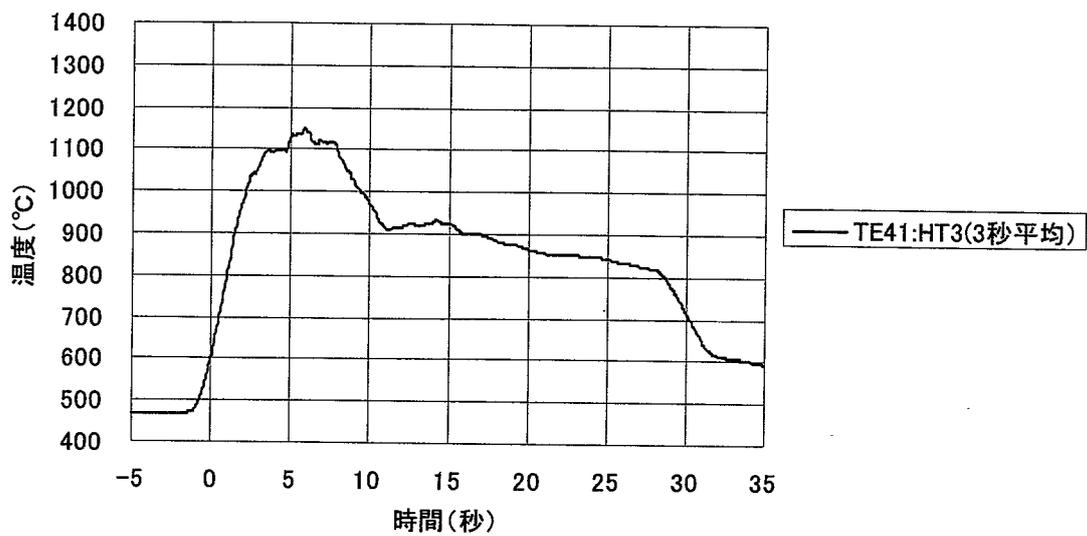
(TP20)

TE44は4.5秒で破損

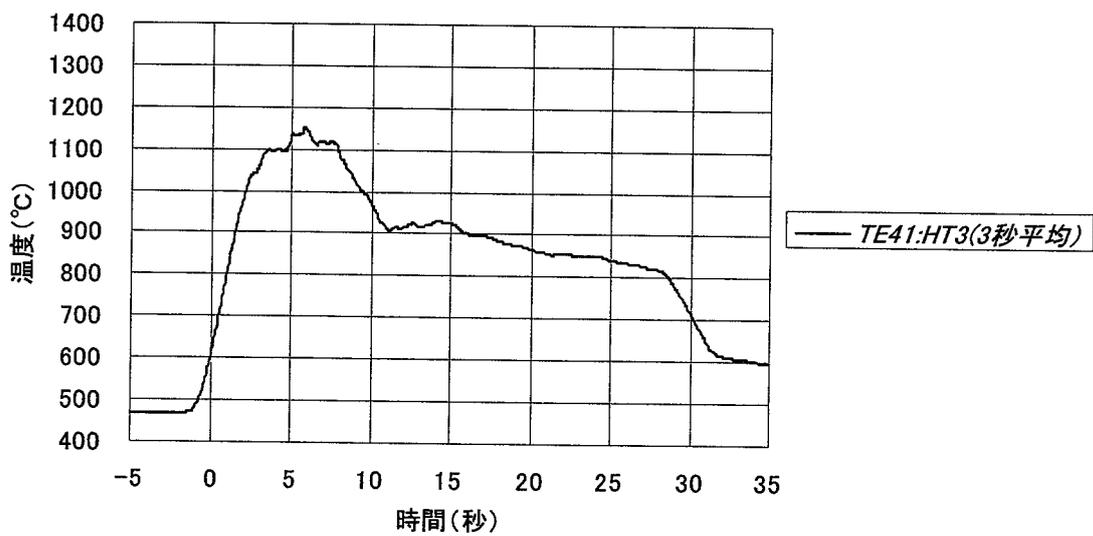


比較用熱電対挙動:HT3(2/6)

(TP21)



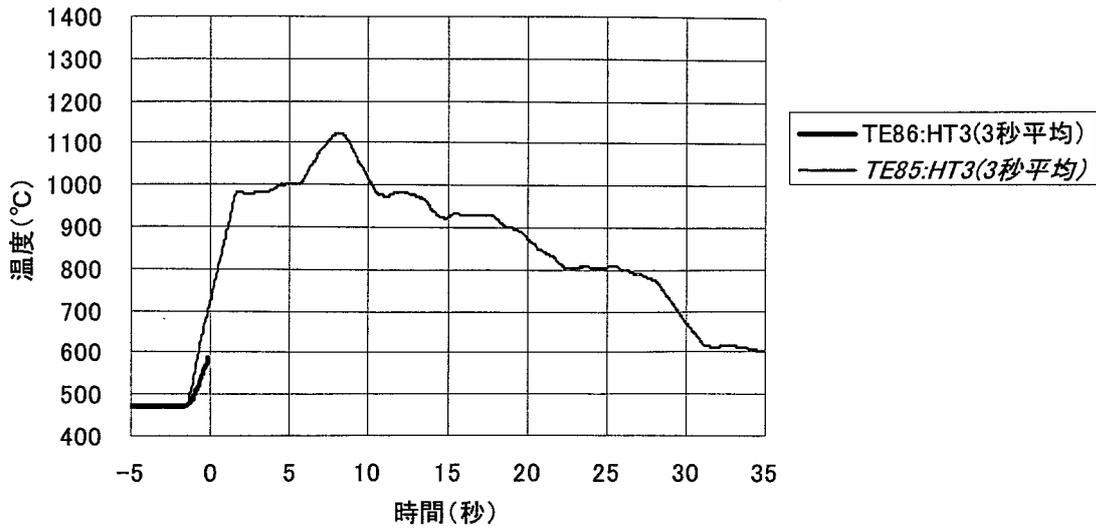
(TP22)



比較用熱電対挙動:HT3(3/6)

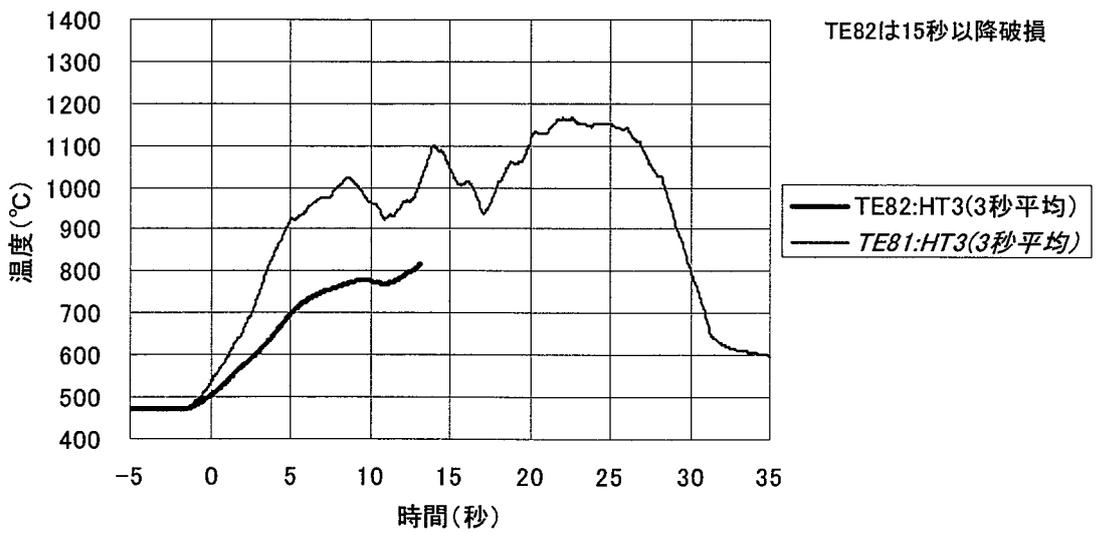
(TP23)

TE86は1.4秒で破損



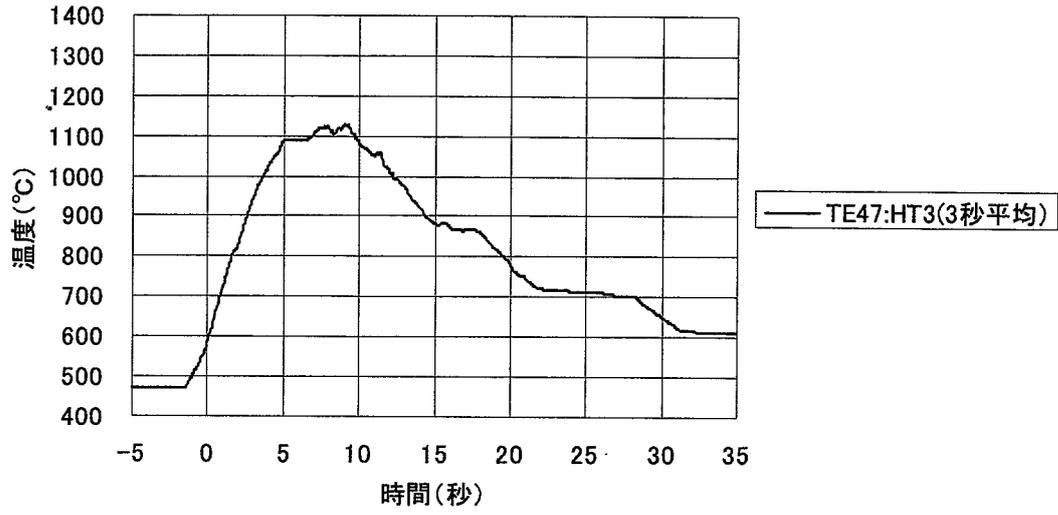
(TP24)

TE82は15秒以降破損

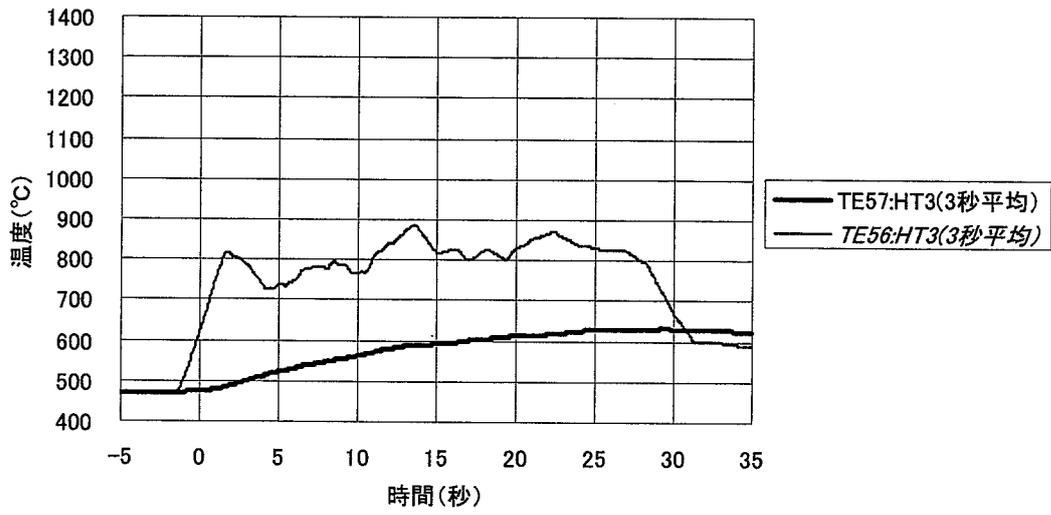


比較用熱電対挙動:HT3(4/6)

(TP25)

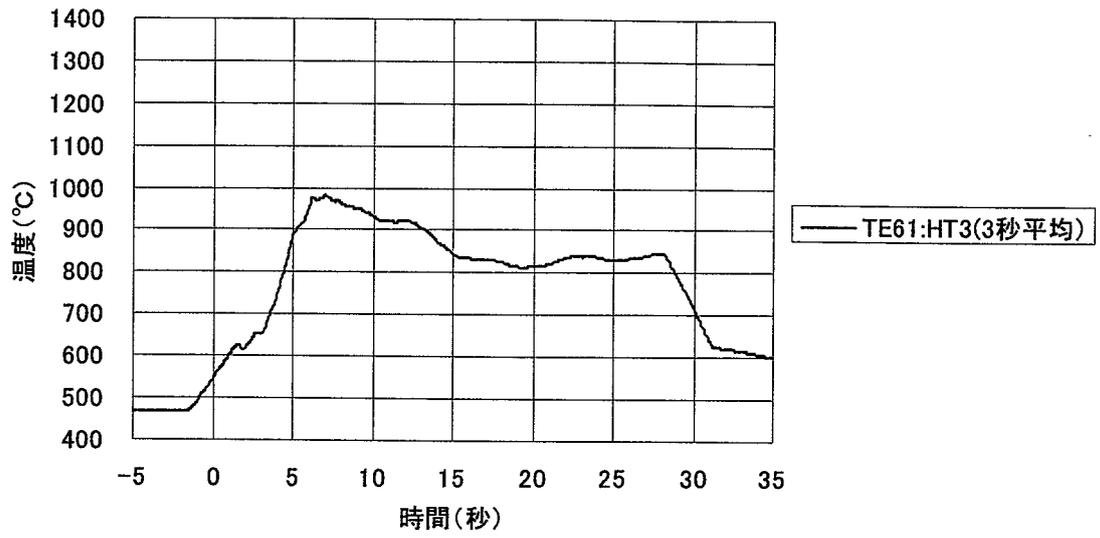


(TP26)

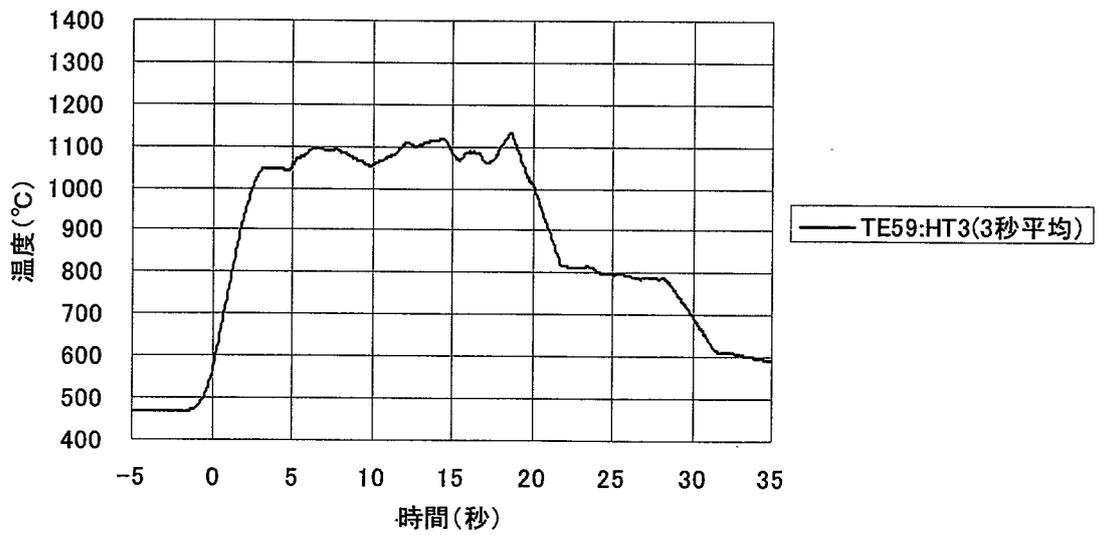


比較用熱電対挙動:HT3(5/6)

(TP27)



(TP28)



比較用熱電対挙動:HT3(6/6)