JNC TN9400 2003−067

小規模漏えいを対象とした ナトリウムプール燃焼実験

— Run-F7-4及びRun-F8-2 —

（ 研 究 報 告 ）

２００３年６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

Ⓚ

JNC TN9400 2003-067

2003年 6月

小規模漏えいを対象としたナトリウムプール燃焼実験

－ Run-F7-4及びRun-F8-2 －

（研 究 報 告）

二神　敏*1、大野修司*1
加藤一憲*2

要　旨

ナトリウムの小規模漏えい時の床上堆積物拡がり挙動と床ライナ温度挙動に関する基礎的知見を取得するための実験（Run-F7シリーズ）及び高湿分条件下での床ライナ材腐食挙動に着目した実験（Run-F8シリーズ）を平成10年から実施してきた。両実験シリーズではそれぞれナトリウム漏えい率及び供給空気の湿分濃度を主要パラメータとしてそれらの影響を調べているが、その最終実験として、(1) Run-F7-4（平成12年6月28日実施）　(2) Run-F8-2（平成12年1月26日実施）を実施した。本実験結果及びこれまでのRun-F7、Run-F8シリーズの結果から、ナトリウム小規模漏えい(10kg/h程度)に対する以下の結論を得た。

・受け皿の最高温度はナトリウム漏えい率の低下につれて低くなる傾向である。また、漏えい高さ、湿分ともに受け皿最高温度を上昇させる要因となる。
・堆積物の拡がりについては、漏えい初期には時間にほぼ比例して拡がるが、漏えい期間中に拡がりが停止する。また、最終拡がり面積はナトリウム漏えい率にほぼ比例する。
・受け皿の腐食減肉量測定値や材料分析結果によれば、4.6～4.8%と夏の高湿分条件を模擬した条件においても、減肉速度の比較的遅いNaFe複合酸化型腐食が支配的であったと考えられ、堆積物中の化合物分析結果もまた、溶融塩型腐食の発生しにくい環境であることを示唆していた。

*1　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
*2　原子力技術株式会社

JNC TN9400 2003-067

June, 2003

Sodium pool combustion test for small-scale leakage
- Run-F7-4 and Run-F8-2 -

(Research Document)

Satoshi Futagami*1, Shuji Ohno*1,
Kazunori Katoh*2

Abstract

Since 1998, the test (Run-F7 series) was performed to acquire the fundamental knowledge about the sodium pool growth and floor liner temperature in the case of small-scale leakage of sodium. And the test (Run-F8 series) was performed to know the floor liner material corrosion mechanism under high moisture conditions. In both test series, those influences are investigated by making the rate of sodium leakage, and moisture conditions of supply air into main parameters. As the last test, (1)Run-F7-4 (June 28, 2000) and (2)Run-F8-2 (January 26, 2000) were carried out. The conclusion of the following which receives sodium small-scale leakage (about 10 kg/h) was obtained from these experiments and the result of old Run-F7 and Run-F8 series.

- The peak temperature of a catch pan tends to become lower with decrease of sodium leak rate. Moreover, height of leak point and moisture conditions also become the factor which raises the catch pan peak temperature.

- Although it grows up in proportion [almost] to time in early stages of leakage about growth of a sodium pool, growth stops during the leakage. Moreover, the final growth area is mostly proportional to the rate of sodium leakage.

- It was suggested by the measured value of catch pan corrosion thickness and a material analysis result that the dominant corrosion mechanism was relatively slow `Na-Fe double oxidization type corrosion` even under the high moisture condition of 4.6 to 4.8%. And the chemical analysis result of a deposit also suggested that the catch pan material was in the environment in which `molten salt type corrosion` was not easy to occur.

---

*1 Thermochemistry Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, OEC
*2 Nuclear Technology & Engineering CO.LTD.

目　次

第1章　緒論 1
第2章　実験装置と計測 2
2.1　実験装置 2
2.2　計測及びデータ収録 3
第3章　実験条件と実験方法 8
3.1　実験条件 8
3.2　実験方法 8
第4章　実験結果 10
4.1　実験経過 10
4.2　受け皿減肉量 16
4.3　燃焼速度 17
4.4　燃焼後ナトリウムの分布 18
4.5　エアロゾル化学組成分析結果 18
4.6　実験後観察結果 19
4.7　堆積物化学分析結果 19
4.8　受け皿歪み測定結果 19
4.9　材料分析結果(Run-F8-2) 19
第5章　考察 21
5.1　受け皿温度 21
5.2　プールの拡がり 21
5.3　燃焼速度 22
5.4　腐食減肉量(Run-F8-2) 23
5.5　腐食形態(Run-F8-2) 23
5.6　受け皿の腐食発生条件 24
第6章　結論 25
謝辞 26
参考文献 27

表、図、写真リスト

表2-1　Run-F7-4測定項目と測定方法 28
表2-2　Run-F8-2測定項目と測定方法 29
表4-1　実験条件に対する結果 30
表4-2　Run-F7-4ナトリウムプール燃焼実験スケジュール 31
表4-3　Run-F8-2ナトリウムプール燃焼実験スケジュール 32
表4-4　燃焼後ナトリウムの分布 33
表4-5　エアロゾル化学組成分析結果 34
表4-6　堆積物と材料の界面のＸ線回折結果 35
表5-1　Run-F7、Run-F8シリーズ実験条件表(実績値) 36

図2-1　ナトリウムプール燃焼実験系統図 37
図2-2　FRAT-1試験装置概略図 38
図2-3　受け皿構造図 39
図2-4　Run-F7-4ナトリウム供給容器構造図 40
図2-5　Run-F8-2ナトリウム供給容器構造図 41
図2-6　Run-F7-4計量容器ノズル 42
図2-7　Run-F8-2計量容器ノズル 43
図2-8　ガス供給系統図 44
図2-9　水蒸気供給装置フロー図 45
図2-10　RUN-F7-4フロー図 46
図2-11　RUN-F8-2フロー図 47
図2-12　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対等配置図(平面図) 48
図2-13　Run-F8-2受け皿表面空間熱電対等配置図(平面図) 49
図2-14　Run-F7-4受け皿裏面熱電対取付図(下面図) 50
図2-15　Run-F8-2受け皿裏面熱電対取付図(下面図) 51
図2-16　保温材熱電対取付図(平面図) 52
図2-17　FRAT-1内部ガス温度熱電対配置図 53
図2-18　FRAT-1内外壁温度熱電対配置図 54
図2-19　ガスサンプリングフロー図 55
図2-20　エアロゾル化学組成サンプリング 56
図2-21　燃焼生成物の分析方法 57
図4-1　漏えいナトリウム温度 58
図4-2　連続式液位計出力の時間変化 59
図4-3　Run-F7-4換気流量、酸素濃度の時間変化 60
図4-4　Run-F7-4雰囲気湿度の時間変化 61

図4-5　Run-F7-4ガスサンプリング分析結果 62
図4-6　Run-F8-2換気流量、酸素濃度の時間変化 63
図4-7　Run-F8-2雰囲気湿度の時間変化 64
図4-8-1　Run-F8-2ガスサンプリング分析結果1 65
図4-8-2　Run-F8-2ガスサンプリング分析結果2 66
図4-9　エアロゾル濃度の時間変化 67
図4-10　Run-F7-4カスケードインパクタ 68
図4-11　Run-F8-2カスケードインパクタ 69
図4-12-1　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布1 70
図4-12-2　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布2 71
図4-12-3　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布3 72
図4-12-4　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布4 73
図4-12-5　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布5 74
図4-12-6　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布6 75
図4-13-1　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布1 76
図4-13-2　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布2 77
図4-13-3　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布3 78
図4-13-4　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布4 79
図4-13-5　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布5 80
図4-13-6　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布6 81
図4-13-7　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布7 82
図4-14-1　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化1 83
図4-14-2　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化2 84
図4-14-3　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化3 85
図4-14-4　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化4 86
図4-14-5　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化5 87
図4-14-6　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化6 88
図4-15-1　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化1 89
図4-15-2　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化2 90
図4-15-3　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化3 91
図4-15-4　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化4 92
図4-15-5　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化5 93
図4-15-6　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化6 94
図4-16　Run-F7-4受け皿中心近傍の熱流束 95
図4-17　Run-F8-2受け皿中心近傍の熱流束 95
図4-18-1　Run-F7-4断熱材温度の時間変化1 96
図4-18-2　Run-F7-4断熱材温度の時間変化2 97

図4-18-3　Run-F7-4断熱材温度の時間変化3 98
図4-18-4　Run-F7-4断熱材温度の時間変化4 99
図4-19-1　Run-F8-2断熱材温度の時間変化1 100
図4-19-2　Run-F8-2断熱材温度の時間変化2 101
図4-19-3　Run-F8-2断熱材温度の時間変化3 102
図4-19-4　Run-F8-2断熱材温度の時間変化4 103
図4-20-1　Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度1(Level 500) 104
図4-20-2　Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度2(Level 1200) 105
図4-20-3　Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度3(Level 1900) 106
図4-20-4　Run-F7-4 FRAT-1容器天井温度 107
図4-21-1　Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度1(Level 500) 108
図4-21-2　Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度2(Level 1200) 109
図4-21-3　Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度3(Level 1900) 110
図4-21-4　Run-F8-2 FRAT-1容器天井温度 111
図4-22-1　Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度1(Level 500) 112
図4-22-2　Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度2(Level 1200) 113
図4-22-3　Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度3(Level 1900) 114
図4-23-1　Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度1(Level 500) 115
図4-23-2　Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度2(Level 1200) 116
図4-23-3　Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度3(Level 1900) 117
図4-24-1　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化1 118
図4-24-2　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化2 119
図4-24-3　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化3 120
図4-24-4　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化4 121
図4-25　Run-F8-2受け皿表面空間熱電対温度変化 122
図4-26　プール拡がり速度 123
図4-27　プール面積の時間変化 124
図4-28　Run-F7-4受け皿減肉量 125
図4-29　Run-F8-2受け皿減肉量 126
図4-30　Run-F7-4受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量 127
図4-31-1　Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量1 128
図4-31-2　Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量2 129
図4-31-3　Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量3 130
図4-31-4　Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量4 131
図4-32-1　Run-F7-4燃焼速度 132
図4-32-2　Run-F7-4単位面積当たりの燃焼速度 133
図4-33-1　Run-F8-2燃焼速度 134

図4-33-2　Run-F8-2単位面積当たりの燃焼速度 135
図4-34　FRAT-1容器の熱量変化モデル 136
図4-35　FRAT-1容器の酸素消費量モデル 137
図4-36　Run-F7-4堆積物化学分析結果 138
図4-37　Run-F8-2堆積物化学分析結果 139
図4-38　受け皿歪み測定結果 140
図4-39　Run-F8-2受け皿切り出し位置 141
図5-1　ナトリウム漏えい時の床ライナ温度解析結果
（もんじゅ　2次主冷却系設備配管）と実験値の比較 142
図5-2　ナトリウム漏えい率とプール拡がり面積 143
図5-3　Run-F7-4とRun-F8-2の燃焼速度比較（酸素濃度変化から導出） 144

写真1-1　Run-F7-4監視カメラ映像1 145
写真1-2　Run-F7-4監視カメラ映像2 146
写真2-1　Run-F8-2監視カメラ映像1 147
写真2-2　Run-F8-2監視カメラ映像2 148
写真2-3　Run-F8-2監視カメラ映像3 149
写真3　材料分析用試料洗浄後 150
写真4-1　EPMAマッピング1 151
写真4-2　EPMAマッピング2 152
写真5-1　材料表面観察1 153
写真5-2　材料表面観察2 154
写真5-3　材料表面観察3 155
写真6-1　材料組織観察1 156
写真6-2　材料組織観察2 157
写真6-3　材料組織観察3 158
写真6-4　材料組織観察4 159

第1章　緒論

空気雰囲気で液体ナトリウムが比較的小規模に漏えい燃焼する場合、漏えいナトリウムの燃焼は、反応生成物が床上の限られた領域（局所）に堆積する状態で進み、床ライナの局所的な温度は大規模漏えいの場合よりも高くなる傾向がある。また、「ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱ」[(1),(2)]に見られたように、雰囲気中の湿分濃度と酸素濃度の両者が高い場合、反応生成物中に過酸化ナトリウムと水酸化ナトリウムが多くなれば、床ライナ材に溶融塩型腐食が生じる可能性がある[(3)(4)]。

このような経緯のもとで、ナトリウムの小規模漏えい時の床上堆積物拡がり挙動と床ライナ温度挙動に関する基礎的知見を取得するための実験（Run-F7シリーズ）[(5),(6)]及び高湿分条件下での床ライナ材腐食挙動に着目した実験（Run-F8シリーズ）[(6)]を平成10年から実施してきた。両実験シリーズではそれぞれナトリウム漏えい率及び供給空気の湿分濃度を主要パラメータとしてそれらの影響を調べているが、その最終実験として、

(1) Run-F7-4（平成12年6月28日実施）：5kg/h程度のナトリウム漏えい率の条件で床ライナ上の堆積物拡がり挙動と床ライナ温度挙動を調べる実験

(2) Run-F8-2（平成12年1月26日実施）：夏場の最高湿分濃度を上回る条件で床ライナ材の腐食状況・腐食環境を調べる実験

を実施した。本報告書はこれらの実験の方法と結果及び得られた知見についてまとめたものである。次章以降、第2章で実験装置と計測について、第3章で実験条件および方法について、第4章で実験結果について、第5章で実験結果の考察について述べる。続く第6章は結論である。

第2章　実験装置と計測

2.1　実験装置

ナトリウムプール燃焼実験Run-F7-4及びRun-F8-2は、大洗工学センター内の大規模ナトリウム漏えい燃焼試験施設SAPFIRE(Safety Phenomenology Tests on Sodium Leak ,Fire and Aerosols)にある小型密閉容器FRAT-1(Fission Product and Radioactive Aerosol Release Test Rig 1)を用いて実施した。図2-1に実験装置系統図を示す。実験装置はFRAT-1の他、ナトリウム供給容器、ガス供給設備、水蒸気供給装置（Run-F8-2にて使用）及び小型排煙処理装置から構成されている。以下に各装置、設備について述べる。

2.1.1　FRAT-1

FRAT-1の概略を図2-2に示す。FRAT-1は直径約1.3m、高さ約2.2m、内容積約3m^{3}のステンレス製密閉容器である。FRAT-1には、側面に空気取入ダクト(4B配管)と監視用の覗き窓、上部には加熱ナトリウムを供給するためのナトリウム供給容器、排気ダクト(4B配管)等を接続している。

容器内底部には床ライナを模擬した受け皿が取り付けられる。Run-F7-4で用いた受け皿は、図2-3に示すように直径が1128mm、外周側立部の高さが100mmあり、床面の板厚が6mm、外周側立部の板厚が3.2mmの炭素鋼(SM400B)製のものである。Run-F8-2については、外周側立部を3.2mmの炭素鋼(SM400B)2重構造とした。また、受け皿下部は、断熱材(ファインフレックス＃1300、厚さ50mm)を2層設置し、その下はキャッチパン(SUS304、厚さ3mm)となっている。「もんじゅ」の床ライナ及び下部の構造(ライナ板厚6mm、約50mmのギャップ、25mmのパーライトボード、構造コンクリート)に比べて、床ライナ材は同じであるが断熱性が高くなっている。なお、受け皿は各実験で新品を使用している。

2.1.2　ナトリウム供給容器

ナトリウム供給容器は、図2-4及び図2-5に示すように、Run-F7-4では直径11cm、高さ約75cm、容積が約7リットル、Run-F8-2では直径21cm、高さ約87cm、容積が約30リットルのステンレス製密閉容器で、実験に使用するナトリウムを加熱し、FRAT-1容器内へ供給することができる。ナトリウム供給容器には、容器へナトリウムを充填するための配管、FRAT-1内部にナトリウムを供給するためのノズル(以下供給ノズル)などが付属されている。また、連続式液位計と接点式液位計、圧力計、及び熱電対等の計測機器を取り付けてある。

供給ノズルは先端部で内径が4.35mmあり、図2-6及び図2-7に示すように、FRAT-1内部・受け皿上へナトリウムを一定流量で供給するために、ノズル途中にオリフィス(Run-F7-4：直径約0.74mm、Run-F8-2：直径約1.2mm)を設けてある。なお、供給ノズルの先端部には保護管をつけて2重構造としてあるが、これは、供給ノズル先端周辺をヘリウムガス雰囲気にして、ナトリウム燃焼生成物によるノズル先端の閉塞を防止するためのものである。

2.1.3　ガス供給設備

ガス供給設備は、図2-8に示すように、アルゴンガス供給系とヘリウムガス供給系を設けている。このうちアルゴンガス供給系は、バッファタンク(FRAT-1のナトリウム加熱器を代用)を介してナトリウム供給容器の液位を調整(ナトリウム漏えい速度を微調整)すること及び実験終了後のFRAT-1容器内を不活性ガス雰囲気に保つことを目的として設置してある。一方、ヘリウムガス供給系は、前述したように供給ノズルの閉塞防止と、供給ノズル内に残留したナトリウムを排出するために設置してある。

2.1.4　小型排煙処理装置

小型排煙処理装置は、水冷却塔、水スクラバ、フィルタ設備、排気ブロワ、水循環ポンプ等から構成されている。実験で発生するナトリウムエアロゾルを含む排気ガスは、まず水冷却塔で冷却した後、水スクラバ、さらに2系統のフィルタ設備（プレフィルタ、デミスタ(金網メッシュ)、高性能フィルタ）を通すことによってエアロゾルを除去した後に排気ブロワで大気中へ放出する。冷却塔及び水スクラバを循環することによってアルカリ性の廃液となる水は、廃液受槽に一時貯蔵し、循環水タンクを経由して中和槽に移送して、塩酸にて中和した後に一般排水として処理する。

2.1.5　水蒸気供給装置

Run-F8-2では、図2-9に示すような水蒸気供給装置を空気取入ダクトに接続し、供給空気の湿分濃度を調整している。

水蒸気供給装置は、水タンク、水ポンプ、水加熱器、給気ブロワ、空気加熱器、バッファタンク等から構成されている。本装置を使用したRun-F8-2では、水ポンプにより水加熱器へ水を一定流量で供給して蒸気を発生させ、バッファタンク内にて加熱空気と混合し所定湿度の空気をFRAT-1容器内へ供給する。なお、水蒸気供給装置の全配管には予熱用ヒータを設置し、水蒸気の凝縮や結露を防止している。

2.1.6　FRAT-1容器予熱設備

大気中の水蒸気または水蒸気供給装置から供給される水蒸気が結露することを防止するため、FRAT-1容器外壁に予熱用のヒータと保温材を設置した。FRAT-1容器予熱設備は、予熱用ヒータ、保温材、外装板から構成されている。予熱用のヒータは1.1kwのマイクロヒータ（FRAT-1容器の上部、中部、下鏡部の3系統に設置）、保温材は厚さ25mmのロックウール、外装板は厚さ0.4mmのカラー鉄板である。

2.2　計測及びデータ収録

計測項目を表2-1及び表2-2、図2-10及び図2-11に示す。各計測項目の概略について以下に述べる。

2.2.1　各部の温度計測

ナトリウムプールの温度、受け皿温度、その他の各構造材等の温度を計測するために、各部にシース型熱電対を設置した。これらの熱電対には、主にクロメル-アルメル(K型)熱電対を用いたが、受け皿温度計測用の一部についてはプラチナ-プラチナ・13%ロジウム合金(R型)熱電対を使用した。各部に設置した熱電対は以下の通りである。

(1)ナトリウムプール温度の計測（図2-12、図2-13参照）

ナトリウムプール（堆積物）の拡がり挙動に関する情報を得る目的で、温度測定用の熱電対(K型:シース径1mm)を受け皿表面から約4mm高さの空間で同心円状に(Run-F7-4：80本、Run-F8-2：20本)配置した。

(2)受け皿温度の計測（図2-14、図2-15参照）

受け皿温度測定用の熱電対は、火炎の影響を受けないように受け皿裏面(断熱材を設置した面)に53本のK型熱電対(シース径1mm)をスポット溶接で受け皿へ密着するように設置した。Run-F8-2では、さらに5本のR型熱電対(シース径1.6mm)を追加設置した。

(3)断熱材温度の計測（図2-16参照）

2層に設置した断熱材の中間位置に22本のK型熱電対(シース径1mm)を設置した。

(4)ガス温度の計測（図2-17参照）

FRAT-1容器内部のガス温度計測用に、25本のK型熱電対(シース径1mm)を直径5mmのステンレス棒で支持し設置した。

(5)試験容器壁及び天井温度の計測（図2-18参照）

FRAT-1容器壁及び天井部分については、内面に16本、外面に16本のK型熱電対(シース径1.6mm)を容器壁・天井に埋め込み設置した。

(6)その他の温度計測

上記(1)～(5)の計測用の他に、ナトリウム供給容器内部のナトリウム温度計測用、排気ダクト内外壁温度計測用、排気ダクト内ガス温度計測用、水蒸気供給装置各部温度計測用などの熱電対を必要のある各部位に設置した。

2.2.2　プール拡がり速度の計測

プールの拡がり速度の計測には、前頁の(1)で述べたナトリウムプール温度計測用熱電対の温度上昇信号をもってナトリウムプールの到達時刻とし、熱電対の位置と到達時刻から導出した。

2.2.3　床方向への熱流束の計測（図2-14、図2-15参照）

床方向への熱流束の計測用として熱流束センサー(表面型高熱流束用)を受け皿中心付近に1個設置した。

2.2.4　ナトリウム漏えい率の計測

ナトリウム漏えい率の計測用として、2.1.2項で述べたように、ナトリウム供給容器内部に接点式及び連続式の液位計を設置した。但し、連続式液位計は不感領域があり全漏えい期間中の漏えい率を計測することはできない。よって、連続式液位計は漏えい期間前半のナトリウム漏えい率の制御に用い、ナトリウム漏えい率は、実験後に連続式液位計の計測データから漏えい率が一定であったことを確認した後、ナトリウム漏えい量を漏えい時間で割ることによって算出した。

2.2.5　酸素・水素・二酸化炭素濃度の計測

FRAT-1容器内の酸素及び水素濃度の計測用として、オンライン式計測系とオフライン式計測系の2系統を設置した。

オンライン式計測系として、磁気式酸素濃度計及び熱伝導度式水素濃度計を用い、図2-10及び図2-11に示したように、計測に供するガスを採取するための配管を空気取入ダクト、FRAT-1容器の下部と中央部、及び排気ダクトに接続し、連続的に各濃度計までガスを吸引して計測するようにした。また、同じくオンライン式計測系としてガスクロマトグラフィー(酸素、水素、二酸化炭素濃度の定量分析)用にガス採取配管を排気ダクトに取り付け、間欠的(5分間隔)にガスクロマトグラフィーまで吸引し、定量分析するようにした。なお、オンラインによるガスクロマトグラフィー分析値は吸引距離が長いため、水素濃度等の実験監視用として使用し、計測値としては、後述のガスサンプリングタンクによるオフライン式ガスクロマトグラフィー分析値を正とした。

オフライン式計測系については、図2-19に示すように、空気取入ダクト、FRAT-1容器の中央部、排気ダクトの3箇所に吸引式のガスサンプリングタンクを設置し、間欠的に採取するようにした。これらのサンプリングしたガスは、実験終了後、ガスクロマトグラフィーによって酸素・水素・二酸化炭素濃度を定量分析した。

2.2.6　湿度の計測

雰囲気湿度測定用として、相対式湿度計(高分子吸湿型)を設置した。相対式湿度計は、図2-10及び図2-11に示すように、ガスを採取するための配管を空気取入ダクト、FRAT-1容器下部、及び排気ダクトの3箇所にヘッダを介して接続し、雰囲気ガスを吸引して計測するようにした。また、補助的に低露点計(多孔質薄膜型)をFRAT-1容器下部と排気ダクトの2箇所に設置し、－10℃以下の低露点ではこちらの計測値を正とすることとした。

Run-F7-4では、R0101が排気、R0102がFRAT-1容器内、R0103が供給空気の湿度である。

Run-F8-2では、R0101,104が排気、R0102がFRAT-1容器内、R0103が供給空気の湿度である。

R0101、R0102については、これまでの実験で計測値が湿度計を取り付けたヘッダ中のNaOHを主成分とするエアロゾルの水和によって低めに評価されていた可能性があることから対策を施したものである。対策は、湿度計前段にフィルタを設け、フィルタをNaOHエアロゾルが水和しない100℃に予熱するものである。

2.2.7　エアロゾル濃度の計測

ナトリウム燃焼中のエアロゾル濃度の計測用として、図2-19に示したガスサンプリングタンクの上流側に焼結金属フィルタ(孔径が2μmと0.5μmの２段)を設置し、FRAT-1容器内の一定量の雰囲気ガスを前述の2.2.5項の要領で採取する際に、エアロゾルだけ焼結金属フィルタに付着・採取するようにした。実験終了後に焼結フィルタに付着したエアロゾル量を原子吸光分析にて定量し、採取したガス量との関係からエアロゾル濃度を算出するようにした。

2.2.8　エアロゾル化学組成

エアロゾルの化学組成分析用としてエアロゾルサンプラーを設置した。エアロゾルサンプラーは図2-20に示すような構造をしており、トラップフィルタを排気ダクトに直接挿入し、サンプリングを行うものである。エアロゾルサンプラーは排気ダクトに2基設置し、一定時間(6分間)のサンプリングを2回実施した（Run-F7-4では20-26分と40-46分、Run-F8-2では20-26分と50-56分）。サンプリング後はアルゴン雰囲気に置換することによって、化学分析を行うまで実験時の状態を保持するようにした。

2.2.9　エアロゾル粒径分布

エアロゾルの粒径分布の計測用としてカスケードインパクタを設置した。カスケードインパクタは図2-10及び図2-11に示すように、排気ダクトの2箇所に設置し、プレートに付着したエアロゾルからエアロゾル粒径分布を算出するものである。カスケードインパクタは、排気ダクトの上流側に2基設け、漏えい開始20分後と40分後からそれぞれ30秒間サンプリングした。

さらにELPI(Electrical Low Pressure Impactor)を同図2-10及び図2-11に示すように排気ダクトに設け、時系列でエアロゾルの粒径分布を測定した。ELPIはエアロゾル粒子を帯電させ、粒径に依存した12段のステージ(フィルタ)に捕集し、各ステージにて電荷量を測定することによってエアロゾル量を算出するものである。

2.2.10　プール拡がり面積、受け皿歪み、受け皿減肉量

実験が終了して受け皿をFRAT-1容器から取り出した後に、受け皿上堆積物の外周を透明な方眼紙に写し取り、プール拡がり面積を算出した。さらに、堆積物を除去して受け皿を洗浄した後に、受け皿の歪みと減肉量を測定した。受け皿の歪み測定には定規を用い、減肉量測定には超音波厚み計を用いた。

2.2.11　燃焼後ナトリウムの分布

受け皿上堆積物を含む全ての機器の実験後洗浄処理において、洗浄水のサンプルを採取し、化学分析を行い、試験体系各部位へのナトリウム移行量の分布を算出した。

2.2.12　受け皿上堆積物化学組成

実験終了後の受け皿上堆積物は、不活性雰囲気下でサンプリングを行い、図2-21に示すフローにしたがい化学分析を行った。

2.2.13　受け皿材料分析

床ライナ材の腐食状況・腐食環境に着目したRun-F8-2では、受け皿上堆積物サンプル採取時に受け皿材料の切り出しを行い、切り出しサンプルは化学分析、EPMAマッピング（元素分布解析）、光学顕微鏡による観察を実施した。

2.2.14　データ収録

装置の運転状況、各部の温度、連続的に測定する酸素及び水素濃度のデータ収録には、パソコン型収録装置(DARWIN:横河電機(株)製)を用い、収録周期を1秒として収録した。

2.2.15　映像収録

実験中のナトリウムの燃焼状況と実験終了後の保存状態を視覚的に観察するため、CCDカメラをFRAT-1容器の内部上方からナトリウム漏えい部(供給ノズル)及び受け皿全体を捉える位置、及びFRAT-1容器外部の目視観察用覗き窓から受け皿を捉える位置の2箇所に設置した。CCDカメラの映像は、実験中及び保存状態監視中ともVTRで収録するようにした。

第3章　実験条件と実験方法

3.1　実験条件

実験条件の実際の達成値は第4章で述べることとし、ここでは実験条件の設定の考え方について述べる。

Run-F7-4は、主にナトリウム漏えい率をパラメータとした場合の受け皿上の堆積物拡がり挙動と受け皿温度挙動を調べるRun-F7シリーズの一環として実施したものである。このため、ナトリウム漏えい率を本シリーズの中で最小（目標：5kg/h）となるように設定し、他の条件は本シリーズの他実験と同一の値に設定した。

Run-F8-2は、高湿分濃度条件での受け皿の腐食状況・腐食環境を調べるRun-F8シリーズの一環として実施したものである。このため、供給空気の湿分濃度は夏場の最高値を包絡するよう「もんじゅ」の２次主冷却系安全解析の条件に一致させる(46600vol-ppm)とともに、ナトリウム漏えい継続時間についても同じく「もんじゅ」２次主冷却系のナトリウム漏えい対策設備改善後の安全解析条件に一致させる(43分20秒)ことを目標とし、他の条件はRun-F7, Run-F8シリーズの標準値と同一の値に設定した。

3.2　実験方法

実験方法を以下に述べる。

予め所定量のナトリウムをナトリウム供給容器に充填しておき、ナトリウム漏えい開始までにノズル内部にヘリウムガスを供給しながらナトリウムを約507℃に昇温した。ナトリウム漏えい開始直前に、ノズル先端部でのナトリウム閉塞を防止するため、ヘリウムガス供給先を保護管(供給ノズルの周囲)に切り換え、ノズル外周部をヘリウムガス雰囲気とした。

ナトリウム供給容器下部の止め弁(NV611)を開くことにより、ナトリウムを受け皿上へ漏えいさせ、実験を開始した。ナトリウム漏えい中は、ナトリウムの漏えい率が一定となるように、連続式液位計の測定データをもとに供給容器のアルゴンガスカバーガス圧力を調整した。

FRAT-1容器の換気は、小型排煙処理装置の排気ブロワを運転することにより行った。換気流量は、排煙ラインのダンパの開度調節により、約3m^3/minとなるよう調整した。Run-F8-2においては、空気供給側に設けた水蒸気供給装置により湿分濃度が約46600ppmとなるように調整し、FRAT-1容器内圧が微負圧（-50mmAq程度）となるよう水蒸気供給装置ブロワのダンパと排煙ラインダンパの開度を調節した。また、Run-F8-2では湿分の凝縮を防止するために供給空気及びFRAT-1容器の壁と受け皿を約55℃に予熱した。

ナトリウム供給容器内のナトリウムが全量漏えいしたことを確認した後、ナトリウム供給容器下部の止め弁(NV611)を閉めることによってナトリウムの漏えい終了とした。ナトリウムの漏えい終了後、ナトリウムプール燃焼が停止(火点が存在せず、エアロゾルの発生が停止)したことを確認した後、FRAT-1容器内をアルゴンガスで置換してから排気ブロワを停止した。その後FRAT-1容器内は不活性雰囲気を維持し、プール堆積物(反応生成物)の状態を化

学分析用サンプル採取時まで保持するようにした。

堆積物の化学分析用サンプル採取については、実験装置の降温後、不活性雰囲気を維持した状態で受け皿を簡易グローブボックス内に移送し、この簡易グローブボックス内で実施した。

第4章　実験結果

4.1　実験経過

実験条件に対する結果を表4-1に示す。また、Run-F7-4及びRun-F8-2に関する実験経過をそれぞれ表4-2及び表4-3に、実験時の監視カメラによる映像をそれぞれ写真1及び写真2に示す。

時系列の実験経過を以下に示す。

(1)Run-F7-4(平成12年6月28日実施)

13:55	漏えい開始
14:17	漏えい終了(受け皿中心温度606℃)
14:17～18	受け皿温度が最高値611.9℃(TE204)
14:21	エアロゾルが晴れはじめ、堆積物が燃焼している様子を確認 (受け皿中心温度604℃)
14:40	燃焼がほぼ終了(受け皿中心温度551℃)
15:05	FRAT-1容器内アルゴンガス置換開始(受け皿中心温度393℃)
15:15	FRAT-1容器内酸素濃度3%以下

(2)Run-F8-2(平成12年1月26日実施)

14:00	漏えい開始
14:30	漏えい終了(受け皿中心温度672℃)
14:53	エアロゾルが晴れはじめ、堆積物が石炭状に燃焼している様子を確認 (受け皿中心温度714℃)
15:06	受け皿温度が最高値732℃(TE202)
15:10	燃焼がほぼ終了(受け皿中心温度719℃)
15:20	堆積物中央部に液相を確認(受け皿中心温度640℃)
15:30	液相最大(受け皿中心温度554℃)
15:50	液相が固化(受け皿中心温度415℃)
15:52	FRAT-1容器内アルゴンガス置換開始(受け皿中心温度403℃)
16:01	FRAT-1容器内酸素濃度3%以下
19:19	受け皿中心温度90℃

4.1.1　漏えいナトリウム温度

漏えいナトリウム温度は、ナトリウム供給容器内のK型熱電対(シース径：1.6mm)TE621により測定した。測定結果を図4-1に示す。Run-F7-4では漏えい開始から約11分、Run-F8-2では漏えい開始から約17分のところで温度が低下している。これは、ナトリウムの漏えいによって供給容器内のナトリウム液位が下がり、熱電対がガス空間温度を測定したためである。但し、供給容器ノズル部のTE702～703の温度がナトリウム漏えい期間中一定であったことか

ら漏えいナトリウム温度は漏えい開始から終了まで一定であったと言える。TE621指示値が一定である期間の漏えいナトリウム温度は各実験ともに約507℃であった。

4.1.2　ナトリウム漏えい量

ナトリウム漏えい量は、Run-F7-4が2.5kg、Run-F8-2が7.25kgであった。ただし、ナトリウム漏えい量は実測値ではなく、計量容器へのナトリウム充填量である。実験後に計量容器及びノズルにナトリウムが残存していないことを確認し、ナトリウム充填量をナトリウム漏えい量とすることは妥当とした。

4.1.3　ナトリウム漏えい率

漏えい期間中平均のナトリウム漏えい率は、Run-F7-4が約6.8kg/h、Run-F8-2が約14.5 kg/hであった。これらの値はナトリウム漏えい量と後述の漏えい時間から算出した。

ナトリウム供給容器に設置した連続式液位計の出力変化を図4-2に示す。漏えい開始からの出力変化を1次式で近似すると良い直線性を得た。よって、ナトリウム漏えい率が一定であったことが確認でき、ナトリウム漏えい量とナトリウム漏えい時間から算出するナトリウム漏えい率は妥当とした。

4.1.4　ナトリウム漏えい時間

連続式液位計の出力は供給容器下部に不感領域があるために、ナトリウム漏えい時間は、図4-2の液位計出力変化をもとに、ナトリウム液面が液位計の不感領域に至るまでの経過時間とナトリウム量の関係を直線外挿して求めた。Run-F7-4が約22分、Run-F8-2が約30分であった。

4.1.5　換気流量

図4-3にRun-F7-4、図4-6にRun-F8-2の換気流量を示す。FI601が供給空気流量、FI602が排気流量である。換気条件として、Run-F7-4は排気側ブロワのみによっていたが、Run-F8-2については、水蒸気を供給するために供給側にもブロワを設け、容器内圧がRun-F7シリーズと同程度の微負圧(-50mmAq程度)となるよう2基のブロワ開度を調整し流量制御を行った。

供給空気の流量(FI601)はRun-F7-4、Run-F8-2ともに3m^3/min近傍で推移した。アルゴンガス置換開始時刻以降、FI602流量が1.5～2m^3/minで推移しているのは、アルゴンガス注入によってFRAT-1容器内が正圧とならないよう排気側ダンパを微開調整(排気側ブロワは運転)したためである。また、Run-F7-4では、排気流量FI602の流量の方が供給空気流量FI601よりも低めで推移した。これは、容器内ガスの連続的サンプリング(湿度計：数十ℓ/min、ELPI：5ℓ/min、酸素・水素濃度測定用ガス吸引：5ℓ/min)による影響及びナトリウムの反応による酸素や湿分の消費などが考えられる。一方、Run-F8-2では供給空気流量FI601の流量の方が排気流量FI602よりも低めで推移した。これは、微負圧(-50mmAq程度)となるよう2基のブロワにより流量制御を行った影響であると考えられるが、FRAT-1容器の負圧度が微負圧

(-50mmAq程度)であったことから、容器内へのインリークの可能性は低い。

4.1.6　酸素濃度

図4-3にRun-F7-4、図4-6にRun-F8-2の磁気式酸素濃度計による酸素濃度変化を示す。

Run-F7-4の給気中の酸素濃度(CO601)は20.6%程度で安定し、排気ダクト内酸素濃度(CO101)、FRAT-1容器内酸素濃度(CO102,CO103)は漏えい開始約20分後に最低で20.2%程度まで低下した。

Run-F8-2の給気中の酸素濃度(CO601)は20.9%程度で安定し、排気ダクト内酸素濃度(CO101)、FRAT-1容器内酸素濃度(CO102,CO103)は漏えい開始約32分後に最低で20.0%程度まで低下した。

また、両ケースにおいて、燃焼終了後FRAT-1容器内をアルゴンガス置換しており、置換開始後10分程度で容器内酸素濃度を3%以下とした。

4.1.7　雰囲気中の湿度

図4-4にRun-F7-4、図4-7にRun-F8-2の雰囲気湿度を示す。供給空気の湿度（RO103）はRun-F7-4では23000vol-ppm、Run-F8-2では46000～48000vol-ppmで推移した。

Run-F7-4測定結果はRO101が漏えい開始25分で急激に上昇している。これは、湿度計センサ部へのエアロゾルの付着もしくは温度上昇による故障と思われる。

Run-F8-2測定結果はRO101、RO102のほうが、前段にフィルタの無いRO104よりも低い値となった。これは、前段に設けたフィルタ自体の吸湿と、フィルタにトラップされたエアロゾルによるNaOH水和以外の吸湿効果によるものと考えられる。

また、両ケースにおいて時間の経過とともに低下している湿度が2000 vol-ppm付近で平坦となっているが、これは、湿度計が相対湿度の測定値で0%(誤差±2%)となった場合には、その直前の測定値でHOLDされるためである。

4.1.8　ガスサンプリング分析結果

図4-5にRun-F7-4、図4-8にRun-F8-2のガスサンプリング測定結果を示す。Run-F7-4の酸素濃度履歴は磁気式酸素濃度計の傾向と一致しているが、Run-F8-2の酸素濃度履歴は吸気ダクト、FRAT-1容器内の傾向に不整合がある。傾向としては、磁気式酸素濃度計によるものが妥当であると考えられるが、不整合の原因がサンプリング時の温度、圧力等のガスの状態によるものか、計測系の不具合によるものかは特定できないが、エアロゾルによりサンプリングタンクラインは閉塞気味であった。参考値として、オンラインガスクロマトグラフィーによる測定値を図4-8にプロットした。傾向は磁気式酸素濃度計の傾向と一致している。二酸化炭素濃度履歴については、供給空気中にはRun-F7-4で300ppm程度、Run-F8-2で450ppm程度含まれていたが、燃焼期間中の排気中からは殆ど検出されなかった。これは二酸化炭素が燃焼生成物と反応しているためであると推測される。水素濃度履歴については、Run-F7-4では検出されなかったが、Run-F8-2では排気中に最大で約170ppm含まれていた。

4.1.9　エアロゾル濃度

図4-9にエアロゾル濃度を示す。エアロゾル濃度はRun-F7-4で最大2～3g-Na/m^3、Run-F8-2で最大10～20 g-Na/m^{3}あった。

4.1.10　エアロゾル粒径分布

図4-10にRun-F7-4、図4-11にRun-F8-2のカスケードインパクタによる測定結果を示す。カスケードインパクタによるエアロゾル粒径分布測定結果については、両ケースともこれまでのRun-F7、Run-F8シリーズの結果と同様に、検出可能な最小粒径1μm付近で最大となる分布であった。

図4-12にRun-F7-4、図4-13にRun-F8-2のELPI(Electrical Low Pressure Impactor)による測定結果を示す。ELPIはエアロゾル粒子を帯電させ、粒径に依存した12段のステージ(フィルタ)に捕集し、各ステージにて電荷量を測定することによってエアロゾル量を算出するものである。但し、エアロゾル濃度を算出するにあたってはエアロゾルの密度を1g/cm^{3}と仮定しており、エアロゾル濃度履歴については相対的な傾向を追っていることとなる。両ケースにおいて粒径分布の測定結果は燃焼が安定した漏えい開始5分以降に粒径1μm付近にピークをもつものとなった。また、漏えい初期（エアロゾル濃度低）に比較的大きな粒子成分を検出している。これはELPIがナトリウムエアロゾル以外の大きな粒子成分を検出しているためであると考えられる（カスケードインパクタはナトリウムのみ検出する）。漏えい開始35分以降は実際のエアロゾル濃度測定値と比較して、ELPIのエアロゾル濃度測定値が低下してきており、各ステージ(フィルタ)が閉塞気味であると考えられ、測定結果は参考データである。

4.1.11　各部温度

各部の温度変化及び受け皿への熱流束について以下に述べる。

(1)熱電対健全性確認結果

実験後、熱電対の絶縁抵抗と線間抵抗値を測定し、実験前の測定値と比較した結果を以下に述べる。

①Run-F7-4

Run-F7-4での破損熱電対は受け皿表面空間熱電対80本のうち20本(TE001～TE005,TE007,TE010～TE013,TE015～TE018,TE027～TE028,TE030～TE031,TE036,TE038)であった。

②Run-F8-2

Run-F8-2での破損熱電対は受け皿表面空間熱電対20本のうち6本(TE001～TE005,TE007)であった。

(2)受け皿裏面温度変化

図4-14にRun-F7-4、図4-15にRun-F8-2の受け皿裏面温度変化を示す。

①Run-F7-4

Run-F7-4の受け皿裏面温度は、高温域が漏えい口直下(受け皿中心から100mm以内)と周辺部(受け皿中心から200～283mm)の2領域化する傾向であったが、これまでのRun-F7、Run-F8シリーズのようにナトリウム漏えい終了後徐々に温度が上昇するような傾向は見られなかった。受け皿裏面の最高温度としては、漏えい開始約22分に611.9℃(TE204)が確認された。

②Run-F8-2

Run-F8-2の受け皿裏面温度は、漏えい終了時に受け皿中心で672℃(TE201)であったが、徐々に上昇し、漏えい開始約66分に最高値732℃(TE202)となった。最高温度は受け皿中心近傍で確認されたが、高温域は給気口に近い受け皿風上側45°方向に偏っている。これは、実験後の堆積物観察結果から、ナトリウムプールが風上側45°方向に偏ったためであると考えられる。また、漏えい開始約80分に堆積物中央部に液相を確認した時の受け皿中心温度は640℃、液相が固化した時の受け皿中心温度は415℃であった。

(3)受け皿への熱流束

図4-16にRun-F7-4、図4-17にRun-F8-2の受け皿裏面に設置した熱流束計の測定結果を示す。

①Run-F7-4

Run-F7-4の漏えい口直下近傍(HF254)での熱流束は、漏えい開始8分後に約4800kcal/m^2hのピーク値を示した。

②Run-F8-2

Run-F8-2の漏えい口直下近傍(HF254)での熱流束は、漏えい開始直後(約30秒後)に約11600kcal/m^2hのピーク値を示した。

(4)受け皿下部断熱材の温度変化

図4-18にRun-F7-4、図4-19にRun-F8-2の受け皿下部断熱材温度変化を示す。

①Run-F7-4

Run-F7-4では、漏えい口直下に近い位置(TE302)において、漏えい開始約59分後に約277℃のピーク温度に達した。

②Run-F8-2

Run-F8-2では、漏えい口直下に近い位置(TE303)において、漏えい開始約84分後に約451℃

のピーク温度に達した。

(5)FRAT-1容器壁・天井温度変化

図4-20にRun-F7-4、図4-21にRun-F8-2のFRAT-1容器壁・天井温度変化を示す。

①Run-F7-4

Run-F7-4の壁温度は、受け皿から500mm上方では漏えい開始約37分後に約65℃、1200mm上方では漏えい開始約37分後に約58℃、1900mm上方では漏えい開始約119分後に約59℃、また、天井(上部鏡部)では漏えい開始約119分後に約56℃のピーク温度に達した。

②Run-F8-2

Run-F8-2の壁は初期温度55℃である。これは、壁での水蒸気の凝縮・結露を防止するために壁をマイクロヒータで予熱したことによる。但し、ヒータは漏えい開始15分前に切ったため、実験中のヒータからの入熱はない。

実験中の壁温度は、受け皿から500mm上方では漏えい開始約61分後に約185℃、1200mm上方では同約61分後に約143℃、1900mm上方では同約72分後に約116℃、また、天井(上部鏡部)では同約71分後に約126℃のピーク温度に達した。

(6)FRAT-1容器内ガス温度変化

図4-22にRun-F7-4、図4-23にRun-F8-2のFRAT-1容器内ガス温度変化を示す。

①Run-F7-4

Run-F7-4のFRAT-1容器内ガス温度は、受け皿から500mm上方では漏えい開始約21分後に約128℃、1200mm上方では漏えい開始約27分後に約89℃、1900mm上方では漏えい開始約30分後に約86℃のピーク温度に達した。

②Run-F8-2

Run-F8-2のFRAT-1容器内ガス温度は、受け皿から500mm上方では漏えい開始約36分後に約224℃、1200mm上方では漏えい開始約45分後に約167℃、1900mm上方では漏えい開始約43分後に約159℃のピーク温度に達した。

(7)プール温度計測用熱電対の温度変化

図4-24にRun-F7-4、図4-25にRun-F8-2のナトリウムプール径方向の熱電対温度変化を示す。

①Run-F7-4

ナトリウムプール温度は、約600℃で安定していた。方向によってピーク温度に多少の違いがあるものの、中心からの位置とピークを示す時間は同じような傾向を示し、プールが同

心円状に拡がったことがわかる。温度が上昇傾向にあるときの800℃を越える高い温度は、燃焼フレームの温度を計測している可能性がある。また、温度が大きく振動しているものは断線によるものと推測される。

②Run-F8-2

ナトリウムプール温度は、約700～750℃を計測した後に、安定傾向を示す前に大きく振動し、断線と推測される挙動を示している。温度が上昇傾向にあるときの800℃を越える高い温度は、燃焼フレームの温度を計測している可能性がある。

4.1.12　ナトリウムプールの拡がり

図4-26にRun-F7-4とRun-F8-2のナトリウムプールの拡がり速度、図4-27にナトリウムプール面積の時間変化(Run-F7、Run-F8シリーズ)を示す。ナトリウムプールの拡がり速度はこれまでのRun-F7、Run-F8シリーズで行った手法と同様に、受け皿表面に設置したナトリウムプール温度計測用熱電対の温度上昇信号をもってナトリウムプールの到達時刻とし、熱電対の位置と到達時刻から導出したものである。ナトリウムプール面積については、ナトリウムプールの熱電対への到達時刻と熱電対の位置との関係をフィッテイングし、各径方向(45°間隔で8方向)のプール縁を結んだ8角形の面積として導出している（Run-F8-2については径方向に2方向(45°,225°)のみ測定しているため２つの半円として導出）。なお、ナトリウムプール面積計算上の終値は、プールが到達した熱電対の位置を結んだ8角形の面積となるため、実験後に測定した実際のプール面積と若干異なる。比較のため、実験後のプール面積測定値を図4-27に示す(Run-F7-4、Run-F8-2のプール面積測定値等実験後観察結果の詳細は4.6節で後述する)。

Run-F7-4の拡がり挙動については、これまでのRun-F7シリーズの傾向と一致し、漏えい初期は時間に比例して拡大し、供給(漏えい率)と消費(燃焼速度)のバランスにより、漏えいが終了する前に拡がりは停止している。

Run-F8-2の拡がり挙動についても、これまでのRun-F7シリーズの傾向と一致するが、若干拡がりの停止時刻が遅れている。これは、高湿分条件による影響であると考えられる。

4.2　受け皿減肉量

図4-28にRun-F7-4の受け皿減肉量、図4-29にRun-F8-2の受け皿減肉量を示す。

Run-F7-4の減肉量測定結果の最大値は0.012mmと超音波厚み計の測定誤差の範囲(±0.05mm程度)であり、有意な減肉は生じなかった。

Run-F8-2では、受け皿上の燃焼生成物を除去し、洗浄した際、各所に幅が最大で数mm程度のピット状の穴が確認された。ピットは受け皿全面に不均一に分布しており、風上に多く分布していた。減肉量は平坦部で最大0.444mm、ピット部で最大0.868mmであった。ただし、平坦部の受け皿減肉量は、実験前後の肉厚測定値の差であるが、ピット部は測定予定外の位置であったため、目視で減肉量が大きいと思われた点について肉厚を測定し、実験前の平均肉

厚測定値5.881mmとの差を減肉量とした。

こららの減肉量が測定された部位について、受け皿裏面温度測定結果から換算する腐食減肉量評価式を用いて腐食減肉量を算出した。図4-30にRun-F7-4、図4-31にRun-F8-2の算出結果を示す。

Run-F7-4については、温度履歴は有意な減肉が発生しうる環境であったことがわかる。

Run-F8-2については、一様な腐食部についてはこれまでのRun-F7-3、Run-F8-1と同様にNaFe複合酸化型腐食の減肉量の範囲内である。ピット部については最大減肉点において、NaFe複合酸化型腐食の上限値を超え、溶融塩型腐食の下限値を若干下回っている。

なお、本計算では、NaFe複合酸化型腐食については文献(3)の試験データをもとにした評価式、溶融塩型腐食については文献(4)の試験データをもとにした評価式を使用した。参考に今回用いた減肉速度式を以下に示す。なお、減肉量カーブ（計算結果）が腐食型それぞれ3本示されているが、これは各腐食について減肉速度データの中央値を使用した場合と95%信頼幅上下限値（溶融塩型腐食については99%信頼幅上下限値）を使用した場合を示したものである。

減肉量=C*exp(-Q/RT)

R: ガス定数　1.9872

・NaFe複合酸化型腐食の場合

Q:	中央値	11130.72	上限値	11130.72	下限値	1130.72
C:		63.7314		129.0260		31.479

・溶融塩型腐食の場合

Q:	中央値	9610.256	上限値	9610.256	下限値	9610.256
C:		148.29214		262.10658		83.8993

4.3　燃焼速度

図4-32にRun-F7-4、図4-33にRun-F8-2の燃焼速度を示す。

熱量変化からの燃焼速度の導出は図4-34に示すモデルにしたがい、容器壁温度、天井温度、受け皿温度、断熱材温度、実験室温度、排気温度の時間変化から熱量変化を求め、反応生成物の割合をNa_2O：Na_2O_2=6：4と仮定した場合の反応熱を使用してナトリウム燃焼速度を算出した。Run-F7-4が最大で約3.8kg-Na/h、Run-F8-2が最大で約7.0kg-Na/hであった。（これまでのRun-F7-1～Run-F7-3はFRAT-1容器壁からの放熱を自然対流熱伝達で考慮しているが、Run-F7-4、Run-F8-1～Run-F8-2についてはFRAT-1容器に保温材を敷設しているため、壁は断熱とみなし、壁からの放熱は考慮していない。）プール面積の時間変化の結果をもとに単位面積あたりの燃焼速度を導出すると、Run-F7-4が最大で約46kg-Na/h・m^2、Run-F8-2が最大で約33kg-Na/h・m^2であった。

また、酸素濃度変化からの燃焼速度の導出には、図4-35に示すように、供給する空気の酸素濃度と出口の酸素濃度を用い、ナトリウムと酸素の反応については、反応生成物の割合を

Na_2O：Na_2O_2=6：4と仮定した。導出式を以下に示す。

(燃焼速度)＝FI602×60×（CO601－CO101）/100/（1－CO601/100）×1.43×2.05

Run-F7-4が最大で約2.7kg-Na/h、Run-F8-2が最大で約4.7kg-Na/hであった。プール面積の時間変化の結果をもとに単位面積あたりの燃焼速度を導出するとRun-F7-4が最大で約28kg-Na/h・m^2、Run-F8-2が最大で約19kg-Na/h・m^2であった。

これまでのRun-F7、Run-F8シリーズの結果、実験後の堆積物中の燃焼ナトリウム量と熱量変化から算出した燃焼速度から算出した燃焼ナトリウム量が良い一致を示しており、Run-F7-4、Run-F8-2でも、燃焼速度は熱量変化から算出したものが妥当な値と考えるが、詳細は考察で後述する。

4.4　燃焼後ナトリウムの分布

表4-4に燃焼後ナトリウムの分布を示す。

Run-F7-4の燃焼後ナトリウムは、エアロゾルとして289g回収され、受け皿上堆積物として2163g回収された。総回収量としては2452gであるが、受け皿上堆積物の化学組成分析用のサンプルとして反応生成物100g程度を採取したため、漏えい量2500gとほぼ一致する。漏えい量に対するエアロゾル発生量の割合は約12%であった。

Run-F8-2の燃焼後ナトリウムは、エアロゾルとして990g回収され、受け皿上堆積物として6070g回収された。総回収量としては7060gであるが、受け皿上堆積物の化学組成分析用のサンプルとして反応生成物200g程度を採取したため、漏えい量7250gとほぼ一致する。漏えい量に対するエアロゾル発生量の割合は約14%であった。

4.5　エアロゾル化学組成分析結果

表4-5にエアロゾル化学組成分析結果を示す。

Run-F7-4においては、排気ダクトの同位置で、エアロゾルAは漏えい開始20分～26分、エアロゾルBは漏えい開始40分～46分にサンプリングを行っている。エアロゾルAの分析結果は、殆どが$NaOH・H_2O$であり、Na_2CO_3も存在した。エアロゾルBは、採取されたサンプルが微量だったため、分析不可であった。

Run-F8-2においては、排気ダクトの同位置で、エアロゾルAは漏えい開始20分～26分、エアロゾルBは漏えい開始50分～56分にサンプリングを行っている。エアロゾルAの分析結果は、NaOH とNaOH・H_2Oの割合が大きい。エアロゾルBの分析結果も、NaOH とNaOH・H_2Oの割合が大きい。高湿分条件下であるにもかかわらず、Run-F7-4に比してNaOH・H_2Oの割合が小さいのは雰囲気温度が高温で推移したため(150～170℃)であると考えられる。

4.6　実験後観察結果

Run-F7-4の実験後の燃焼生成物の写真を図4-36に示す。Run-F7-4ではこれまでの低湿分条件のRun-F7-1～2と同様に、ほぼ等方的に円く拡がり、直径約0.39m、面積約0.11m^2、厚さ約50mmであった。表面には黄白色のポーラス状の殻のようなもの、その下に灰色のフレーク状の生成物(金属ナトリウム状の物質も混在)があり、最下層に金属ナトリウム状の銀色の粘りのある物質が存在した。銀色の物質は中心部で厚く外側で薄く分布していた。

Run-F8-2の実験後の燃焼生成物の写真を図4-37に示す。Run-F8-2では燃焼生成物の面積は約0.25m^{2}であった。また、風上(45°)と風下(225°)で様相が異なっており、風上は厚さ約15～40mm、ゴツゴツとした白色の突起部と黒緑色部が混在し、突起部は低湿分条件のRun-F7-4ではポーラス状であったものが潮解したと思しき様相であった。風下は中心近傍で厚さ約15mm程度の風上と同様に突起状にゴツゴツした様相であったが、外周部は厚さ約1mm程度の緑色の物質が堆積していた。実験中の映像から、液相であったと思われる中央部付近の表面は平坦で、灰緑色であった。燃焼生成物中央部の鉛直方向の状態は、上層部が灰緑色、中層部が灰色、下層部が赤褐色の固体であった。燃焼生成物と受け皿の境界にはごく薄い(0.1mm程度)の金属ナトリウム状の層が存在した。

4.7　堆積物化学分析結果

Run-F7-4の堆積物化学分析結果を図4-36に示す。全般的にNa_2Oが多く存在し、上層部ではNa_2O_2と$NaOH$、下層部では金属Naが多く存在した。この傾向は低湿分条件下のRun-F7-1、Run-F7-2と同様である。

Run-F8-2の堆積物化学分析結果を図4-37に示す。全般的にNa_2Oが多く存在し、上層部ではNa_2O_2と$NaOH$、Na_5FeO_4、下層部ではNa_4FeO_3が多く存在し、金属Naは微量であった。

4.8　受け皿歪み測定結果

図4-38に受け皿歪み測定結果を示す。受け皿は、Run-F7-4、Run-F8-2ともに中心部が15～20mm程度下方に歪んでいた。

4.9　材料分析結果(Run-F8-2)

4.9.1　材料分析対象部

Run-F8-2の材料分析用試料は、図4-39に示す位置を切り出した。切り出し試料は可能な限り付着物や堆積物が変質しないよう、切り出し後アルゴンガスを充填したペール缶に入れ、微正圧にアルゴンガスを封入した不活性状態で移送、保管した。

材料分析用試料はＸ線回折、EPMAマッピング用試料については、堆積物と一緒に切り出しを行った。切り出し後、堆積物を除去、水洗浄を行い、XY格子状に分割し、受け皿中心付近の(x3,Y10)、ピット状の腐食がある(X10,Y18)、(X13,Y18)の試料を材料表面、組織観察に供した。水洗浄後の試料を写真3に示す。

4.9.2　化合物の同定(堆積物と材料の界面の分析結果)

受け皿材料のX線回折結果を表4-6に示す。材料側表面(地鉄界面)のいずれの領域でもNaOH、Na_2O及び金属ナトリウムが存在した。Na-Fe-O化合物としては、Fe^{2+}にNa_2O が配位したNa_4FeO_3以外に$NaFeO_2$ 、$Na_3Fe_5O_9$などFe^{3+}にNa_2O が配位したNa-Fe-O化合物、また$NaFe_2O_3$のようにFe^{2+}とFe^{3+}にNa_2O が配位したNa-Fe-O化合物も検出されている。

4.9.3　腐食表層観察結果(EPMA元素分布解析)

堆積物と受け皿材料表層のEPMAマッピング結果を写真4に示す。EPMAマッピングの結果、堆積物中の構成物質(Na、Fe、O)の濃度は一様でないことがわかる。ただし、地鉄界面の相はNa-O相、Na-Fe-O相が主体と考えられる。

4.9.4　材料表面観察結果

堆積物水洗浄の後、材料表面を光学顕微鏡およびSEMにより観察した。観察結果を写真5に示す。材料表面は金属光沢を呈し、一様な腐食面については、これまでのRun-F7-3、F8-1と同様に一部で粒界腐食割れ、粒内割れが確認された。また、目視により確認されたピット状の穴については、穴の表層から底にかけては一様部と同様に滑らかであるが、底部は割れ状模様があるものもあった。

4.9.5　材料組織観察結果

受け皿断面にナイタルエッチを施し、表層の金属組織を観察した。観察結果を写真6に示す。材料組織観察結果からも腐食面はRun-F7-3、Run-F8-1と同様に粒界腐食割れ、粒内割れ、ラテラル方向の割れであることが確認されたが、Run-F7-3、Run-F8-1で見られたような粒の成長は確認されなかった。また、表面形態の観察であったピット底部の割れ状模様はラテラル方向の割れであることが確認され、表面から底にかけて粒が滑らかであり、孔食による腐食とは様相が異なっていた。

第5章　考察

5.1　受け皿温度

Run-F7、Run-F8シリーズの実験条件(実績値)を表5-1に、受け皿最高温度を図5-1に示す。また、比較のためナトリウム燃焼解析コードASSCOPS ver.2.1(Analysis of Simultaneous Sodium Combustion in Pool and Spray)[7]による「もんじゅ」２次主冷却系設備配管室体系での解析結果[8]、ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅰ[9]、ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱの受け皿最高温度も図5-1に示す。ASSCOPSコードによる解析において、1ton/h→10ton/hで床ライナ最高温度が低下するのは、漏えい規模の増大につれて酸欠の傾向が顕著となり、燃焼が抑制されるためである。10ton/h以上では、プールはライナ全面に拡がるが、漏えい規模の増大につれて同じプール面積に加えられるスプレイ液滴熱量が増大し、ライナ最高温度は高くなる傾向である。

受け皿の最高温度はナトリウム漏えい率の低下につれて最高温度も低下する傾向であり、一点近似のASSCOPSコードによる解析（約800℃以上）よりも低く、堆積物や受け皿を多次元メッシュ分割で解析したSPHINCSコード(Sodium Fire Phenomena in Multi－Cell System)[10]と整合する結果[11],[12]となった。これは、堆積物が小さくなるにつれて受け皿の径方向（外側方向）へ熱の逃げる効果が強くなったためと考えられる。

また、落下高さは受け皿最高温度に影響するが、0.1m(Run-F7-1)よりも本シリーズの基準ケース1.5m(Run-F7-2)の方が、受け皿最高温度が高くなった。これは、漏えい口直下の温度差が受け皿最高温度の差とほぼ等しかったことから、落下燃焼期間の差によるものと考えられる。ただし、基準ケース1.5mよりも更に高い場合、落下燃焼期間は長くなるが、ナトリウム漏えい量に対するコラム燃焼とプール燃焼のバランスから、ある程度高くなると受け皿最高温度は飽和し、直線外挿的に上昇することは無いと考えられる。SPHINCSコードによる解析でも、漏えい高さがある程度以上高くなると受け皿温度は飽和する結果となっており、本シリーズでの基準ケース漏えい高さ1.5mは「もんじゅ」で想定される落下高さを包絡するものでは無いが、受け皿下の構造が「もんじゅ」よりも断熱性が高く、実機評価を考える上で問題となるものではないと言える。

さらに、湿分の受け皿最高温度に及ぼす影響については、夏場の最高湿分濃度を上回る46000～48000vol-ppmのRun-F8-2と湿分以外の諸条件がほぼ一致するRun-F7-2を比較した場合、湿分が高い方が受け皿最高温度も高くなっている。このことは、後述のプールの拡がり挙動と燃焼速度に起因するものと考えられが、Run-F8-2の湿分条件が実機で考えうる最高湿分濃度であることから、両ケースの差がすなわち湿分の影響による上限値であると言える。

5.2　プールの拡がり

Run-F7、Run-F8シリーズより、漏えい初期のプールの拡がり速度は、漏えい高さ、漏えい率に対して感度が小さく、堆積物の面積が初期は時間にほぼ比例して拡大すること、また最終拡がり面積は漏えい率にほぼ比例することが確認できた。本実験規模の漏えい率と最終的

な拡がり面積の関係については、図5-2に示すように、良い直線近似式が得られた。さらに、図4-27の最終拡がり面積に達する時間に着目すると、湿分濃度が低いケースは早い時刻に交わるような傾向となっており、この場合、ナトリウムの供給と堆積物上での消費がバランスして、漏えいが続いていても拡がりが停止する挙動となることを示している。一方、Run-F8-2は堆積物の拡がり、拡がりの停止ともに遅いが、これは湿分濃度が高いことに起因して堆積物表面にNaOHのフィルムのようなものが形成され拡がりを減速させるような働きをしているのではないかと推察される。このことは、Na_2O、Na_2O_2がポーラスな形状を作りナトリウムが滲みだし、プールの拡大を助長するのに対し、NaOHはポーラスとならずにナトリウムの進行を阻害する壁となったと考えると理解できる。

5.3 燃焼速度

酸素濃度変化から算出した燃焼速度と、熱量変化から算出した燃焼速度を比較すると、絶対量としては、Run-F7-4、Run-F8-2ともに熱量変化から算出した燃焼速度の方がRun-F7-4で約40%、Run-F8-2で約48%大きい。この原因としては、計算方法そのものが有する誤差、反応生成物割合の仮定（Na_2O：Na_2O_2=6:4）と実際の割合の相違、湿分の反応を考慮に入れていないことによる誤差などが考えられる。定性的にはRun-F7-4、Run-F8-2ともに熱量変化から算出した燃焼速度が漏えい開始直後から0.5～1kg-Na/h程度の燃焼速度であるのに対し、酸素濃度変化から算出した燃焼速度では漏えい開始直後は殆ど燃焼していないことになる。これは、酸素濃度計の検出遅れが2分程度あるためと、Run-F7-4については低いナトリウム漏えい率のため、ナトリウム燃焼による酸素濃度変化が小さく、計測誤差が大きくなったと推測される。単位面積あたりの燃焼速度では、熱量変化から算出したものについては、漏えい直後に大きな燃焼速度を示した後に降下し、徐々に上昇していく初期ピークがある傾向となっている。この違いについては、漏えい初期はプール面積の拡大に対する熱量変化の応答誤差の影響が大きくなるためである。すなわち、時系列のプール面積は同心円状に配した熱電対の接触した計測データを基に内外挿近似しているため、漏えい初期はプール面積が0～微小となっており、実現象としては、漏えい初期でも落下高さの影響によりある程度プール燃焼面が形成されることによる違いが大きく影響したものと考えられる。

燃焼速度の履歴から、ナトリウム燃焼量を概算すると、熱量変化から算出した燃焼速度による概算値はRun-F7-4で約1.75kg、RunF8-2で約4.5kgとなり、酸素濃度変化から算出した燃焼速度による概算値はRun-F7-4で約1.2kg、RunF8-2で約3.7kgとなる。ナトリウム漏えい量がRun-F7-4で2.5kg、Run-F8-2で7.25kgであったことから、Run-F7-4については、堆積物の化学分析結果により未燃焼ナトリウムが20～40%存在したことを考慮すると、熱量変化から算出した燃焼速度が妥当な値であると考える。一方、Run-F8-2については、堆積物の化学分析結果により未燃焼ナトリウムが微量であったことから、酸素濃度による算出値、熱量変化による算出値共に燃焼速度から概算したナトリウム燃焼量と反応生成物量との整合が取れていない。すなわち、実際の酸素消費及び発熱量に対して反応生成物の割合が大きいということであり、これは、前述の湿分の反応による影響と考える。相対的には、熱量変化から算

出した燃焼速度の方が、反応生成物量に整合する傾向であることから、Run-F8-2についても、熱量変化から算出した燃焼速度が妥当な値であると考える。

また、図5-3に示すように、Run-F8-2と湿分以外の諸条件がほぼ一致するRun-F7-2の燃焼速度(酸素濃度変化から算出)を比較した場合、Run-F8-2の方が、ナトリウム漏えい中は低く、漏えい終了後も燃焼が持続する傾向がわかる。この結果は、受け皿の最高温度の違い、プール拡がり停止時刻の違いとも整合する。

5.4 腐食減肉量(Run-F8-2)

一様な腐食面について、腐食減肉量と受け皿温度履歴を比較すると、腐食減肉量はNaFe複合酸化型腐食で想定される腐食速度の範囲内であり、その傾向は一致しており、受け皿の減肉量がこれまでのRun-F7-3、Run-F8-1と同様に温度履歴に依存していることがわかる。

ピット部はその分布が堆積物下の全面に不均一であり、溶融塩型腐食の特徴とされるプールの縁が特に顕著ということもなく、温度分布との相関も見られない。温度が一番厳しかった点の温度履歴を腐食速度式にあてはめ減肉量を算出すると、NaFe複合酸化型腐食で約0.1～0.6mm、溶融塩型腐食で約0.9～2.6mmとなり、実際のピット部減肉量は最大でも0.868mmと腐食速度式のNaFe複合酸化型腐食の範囲を若干上回るが、溶融塩型腐食の範囲までには至らない。

以上により、Run-F8-2における腐食減肉量は、一様腐食面についてはNaFe複合酸化型腐食で想定される腐食速度の範囲内であること、また、ピット部の減肉量についても、NaFe複合酸化型腐食で想定される腐食速度の範囲を若干上回る程度であり、溶融塩型腐食で想定される腐食速度には該当しないと考えられる。

5.5 腐食形態(Run-F8-2)

Run-F8-2の腐食環境としては、①溶融塩型腐食に必要なNaOH、Na_2O_2が有意な量存在したが、Na_2Oの割合が多く、金属ナトリウムも微量存在したこと、②実験後堆積物中のFe化合物の殆どが「実験Ⅰ」でNaFe複合酸化型腐食の特徴とされたNa_5FeO_4とNa_4FeO_3であったこと(金属界面付近では実験Ⅱで溶融塩型腐食の特徴とされた$NaFeO_2$、$Na_3Fe_5O_9$が確認されている)から、NaFe複合酸化型腐食が支配的な環境であったと考えられる。さらに、Na_5FeO_4が堆積物の上層部でより多く確認されたことは、堆積物上層部の酸素ポテンシャルが高く下層部のそれは低かったということを意味する。雰囲気に近い上層部の酸素ポテンシャルが高いということは、上層部でNa_2O_2が多く確認されたことと一致する。

材料分析の結果、受け皿温度が高温で推移したにもかかわらず、Run-F7-3、Run-F8-1で見られたような粒の成長が確認されなかったことは、受け皿材料表面が高温による、脱炭、粒の成長を生じる前に腐食減肉したこと、すなわち、Run-F7-3、Run-F8-1よりも腐食が速く進行していたことを示唆している。しかし、材料表面は金属光沢を呈し、溶融塩型腐食で特徴的な酸化皮膜は存在しなかったこと、更に、材料組織としては、特に厳しい腐食が発生した痕跡は無く、局所的に粒界、粒内腐食が発生している程度であり、減肉量が大きいピット部

であっても、表層断面が滑らかな腐食面となっていることから、ピット部は局所的にNaFe複合酸化型腐食で想定している腐食速度を越える速度で腐食反応が進行していたが、溶融塩型腐食が発生していなかったと考えられる。

ピットの生成時期について考察すると、ナトリウムプールが拡がっていく過程で、プールの縁で発生した可能性は低い。これは、漏えい開始後早い時期からナトリウムプール下にあった受け皿中央付近であっても、一様な腐食によってピットが埋没してはいないことから判断できる。よって、ピットはナトリウムプールの下で発生したことになる。

ナトリウムプールの状態は、実験中のビデオ映像で燃焼終了後に堆積物中央部に液相が確認されている。その時の受け皿裏面温度は初期640℃、固化時420℃であった。これは、燃焼が終息した後も湿分が供給され続け、NaOH濃度が上昇したことにより、NaOH(融点328℃)を主成分とする溶融体プールが形成され、NaFe複合酸化物(Na_4FeO_3 、Na_5FeO_4が混在する環境では融点が低下する傾向)[13]、Na_2O、Na_2O_2が溶け込んだものと推測されるが、化学的な腐食環境としては溶融塩型腐食を伴うような溶融体プールでは無かったと考えられる。また、実験後の観察においてRun-F8-2の堆積物中央部が樹氷状ではなく平坦であったのは、実験中に溶融体プールが形成されたためであることは実験時のビデオから明らかであり、ピットが平坦な中央部だけでなく、樹氷状堆積物の下にも不均一に分布していたことから、ピットの生成と溶融体プールの因果関係は低いと考えられる。(Run-F7-3においても堆積物がカルデラ状に中央部が平坦であったことは、エアロゾル濃度が高かったために実験時のビデオで確認できなかったが、溶融体プールが形成されていた可能性を示唆している。しかし、カルデラ部が存在しなかったRun-F8-1でもピットは顕微鏡で確認できる程度の大きさで大差がないことから、ピットの生成と溶融体プールの因果関係が低いことを裏付ける結果となっている。)

以上により、Run-F8-2における腐食機構は、NaFe複合酸化型が支配的であったと考えられ、本実験規模の漏えい率では、実機で想定される最高の湿分濃度でも、溶融塩型腐食は発生しないことが確認できた。

5.6 受け皿の腐食発生条件

5.4、5.5の考察結果より、ナトリウム漏えい率が14.5kg/h、湿度が48000vol-ppm程度では溶融塩型腐食が発生しないことが実験的に確認できた。更に、本実験シリーズでナトリウム漏えい率が一番大きいRun-F7-3(ナトリウム漏えい率:26kg/h)で湿度が48000vol-ppm程度だった場合について考察する。供給される湿分が1.7倍になることから、NaOHの生成は促進され、プール拡がり速度の低下、燃焼継続時間が長くなることが予想され、受け皿最高温度は上昇し、NaFe複合酸化型腐食で想定される腐食速度で減肉量が増加するであろう。しかし、Na_2O_2を増加生成する要因が存在しないことから、腐食環境としては、ナトリウム漏えい量に対するNaOHの生成割合は増加するが、溶融塩型腐食発生環境に近づく傾向にはならないと考えられる。よって、本実験シリーズにおける漏えい率範囲では溶融塩型腐食は発生しないと推察する。

第6章　結論

「ナトリウムプール燃焼実験Run-F7-4」、「ナトリウム漏えい燃焼環境における床ライナの腐食発生条件確認実験Run-F8-2」の実験結果及びこれまでのRun-F7、F8シリーズの結果から、ナトリウム小規模漏えい(10kg/h程度)に対する以下の結論を得た。

・受け皿の最高温度はナトリウム漏えい率の低下につれて低くなる傾向である。また、漏えい高さ、湿分ともに受け皿最高温度を上昇させる要因となる。

・堆積物の拡がりについては、漏えい初期には時間にほぼ比例して拡がるが漏えい期間中に拡がりが停止する。また、最終拡がり面積はナトリウム漏えい率にほぼ比例する。

・受け皿の腐食減肉量測定値や材料分析結果によれば、4.6～4.8%と夏の高湿分条件を模擬した条件においても、減肉速度の比較的遅いNaFe複合酸化型腐食が支配的であったと考えられ、堆積物中の化合物分析結果もまた、溶融塩型腐食の発生しにくい環境であることを示唆していた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、もんじゅ建設所前田清彦元副所長、大洗工学センター要素技術開発部新材料研究グループ青砥紀身グループリーダー、新技術開発試験グループ三宅収グループリーダー、熱化学安全試験グループ宮原信哉グループリーダーに適切な助言及び指導をいただいた。

また、本実験の計画及び結果の検討と実験条件の設定にあたっては、本社経営企画本部企画部企画グループ小林孝良グループリーダーをはじめ、「床ライナ健全性評価における安全裕度の考え方に関する検討会」のメンバー各位に貴重な助言をいただいた。

実験の準備、実施等にあたっては、熱化学安全試験グループの川田耕嗣施設運転保守チームリーダーをはじめとしたグループ員、東興機械工業(株)の鈴木和右氏ならびに関係者のご協力をいただいた。

ナトリウム等の分析については実験炉部原子炉第１課大戸敏弘課長をはじめ、分析関係者のご協力をいただいた。

これらの各位に謝意を表します。

参考文献

(1)内山、他、「もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明　－ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅱ」、PNC TN9410 97-051、1997年3月
(2)動燃事業団高速増殖炉もんじゅ建設所:「40%出力試験中における２次主冷却系ナトリウム漏えい事故について（第４報報告書）」、1996年
(3)青砥、「大気中ナトリウム漏洩流下部における鉄系材料の腐食機構」、動燃技報No.103、1997年9月
(4)吉田、他、「ナトリウム化合物溶融環境中における炭素鋼の腐食特性評価　溶融塩型腐食環境（NaOH-Na_2O_2系）の腐食速度評価式」、JNC TN9400 2000-024、1999年10月
(5)二神、他、「ナトリウムプール燃焼実験Run-F7（中間報告）」、PNC TN9410 98-074、1998年8月
(6)二神、他、「ナトリウム漏えい燃焼環境における床ライナの腐食発生条件確認実験(Run-F7-3,Run-F8-1)」、JNC TN9400 2000-092
(7)大野、他、「ナトリウム燃焼解析コードASSCOPS Version2.1　使用説明書」、JNC TN9520 2000-001、2000年1月
(8)宮園、他、「高速増殖原型炉「もんじゅ」２次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析」、JNC TN2400 2000-006
(9)川田、他、「もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明　－ナトリウム漏えい燃焼実験-Ⅰ」、PNC TN9410 97-036、1997年1月
(10)山口、他、「ナトリウム漏洩・燃焼挙動の機構論的解析手法の開発」、PNC TN9410 97-040、1997年4月
(11)山口、他、「SPHINCSコードによるナトリウムプール燃焼実験(Run-F7)の検証解析」、PNC TN9410 98-070、1998年4月
(12)山口、他、「ナトリウム燃焼解析評価手法の開発（15）SPHINCSコード検証と小漏えい時のライナ温度評価」、原子力学会春の年会 I31、1999年3月
(13)山脇、他、「ナトリウム化合物の熱力学特性変化に関する基礎的研究－平成12年度共同研究成果報告書－」、JNC TY9400 2001-005、2001年3月

表2-1 Run-F7-4測定項目と測定方法

No.	測定項目	測定方法
1	ナトリウム温度	熱電対(TE001～TE080)
2	受け皿温度	熱電対(TE201～TE253)
3	断熱材温度	熱電対(TE301～TE322)
4	FRAT-1容器内ガス温度	熱電対(TE401～TE425)
5	FRAT-1容器壁・天井温度	熱電対(TE501～TE532)
6	プール拡がり速度	熱電対(TE001～TE080)
7	受け皿下方への熱流束	熱流センサ(HF254)
8	ナトリウム漏えい率	接点式液位計(L622) 連続式液位計(LI621)
9	酸素濃度	磁気式酸素濃度計 ガスクロマトグラフィー
10	水素濃度	熱伝導度式水素濃度計 ガスクロマトグラフィー
11	二酸化炭素濃度	ガスクロマトグラフィー
12	湿度	相対湿度計 低露点計
13	エアロゾル濃度	化学分析
14	エアロゾル化学組成	化学分析
15	エアロゾル粒径分布	カスケードインパクタ ELPI
16	プールの拡がり面積、受け皿歪み	定規
17	受け皿上堆積物化学組成	化学分析
18	受け皿材料の減肉量	超音波厚み計
19	燃焼後ナトリウムの分布	化学分析

表2-2 Run-F8-2測定項目と測定方法

No.	測定項目	測定方法
1	ナトリウム温度	熱電対(TE001～TE132)
2	受け皿温度	熱電対(TE201～TE253)
3	断熱材温度	熱電対(TE301～TE322)
4	FRAT-1容器内ガス温度	熱電対(TE401～TE425)
5	FRAT-1容器壁・天井温度	熱電対(TE501～TE532)
6	プール拡がり速度	熱電対(TE001～TE132) ボイド計(V002～V104)
7	受け皿下方への熱流束	熱流センサ(HF254)
8	ナトリウム漏えい率	接点式液位計(L622) 連続式液位計(LI621)
9	酸素濃度	磁気式酸素濃度計 ガスクロマトグラフィー
10	水素濃度	熱伝導度式水素濃度計 ガスクロマトグラフィー
11	二酸化炭素濃度	ガスクロマトグラフィー
12	湿度	相対湿度計 低露点計
13	エアロゾル濃度	化学分析
14	エアロゾル化学組成	化学分析
15	エアロゾル粒径分布	カスケードインパクタ ELPI
16	プールの拡がり面積、受け皿歪み	定規
17	受け皿上堆積物化学組成	化学分析
18	受け皿材料の減肉量	超音波厚み計
19	受け皿材料分析	化学分析、EPMA、光学顕微鏡
20	燃焼後ナトリウムの分布	化学分析

表4-1　実験条件に対する結果

	Run-F7-4	Run-F8-2
漏えいナトリウム温度	約507℃	約507℃
ナトリウム漏えい高さ	1.5m	1.5m
ナトリウム漏えい量	2.5kg	7.25kg
ナトリウム漏えい時間	約22分	約30分
ナトリウム漏えい率	約6.8kg/h	約14.5kg/h
アルゴン置換開始時刻	漏えい開始70分後（カメラにて鎮火を確認後）	漏えい開始1時間52分後（カメラにて液相の固化を確認後）
供給空気温度	23℃	55℃
供給空気湿分濃度	約23000vol-ppm（露点20℃）	約47000vol-ppm（露点32℃）
供給空気流量	約3m^3/min	約3m^3/min
FRAT-1容器壁初期温度	23℃（予熱なし）	55℃予熱

表4-2　Run-F7-4ナトリウムプール燃焼実験スケジュール

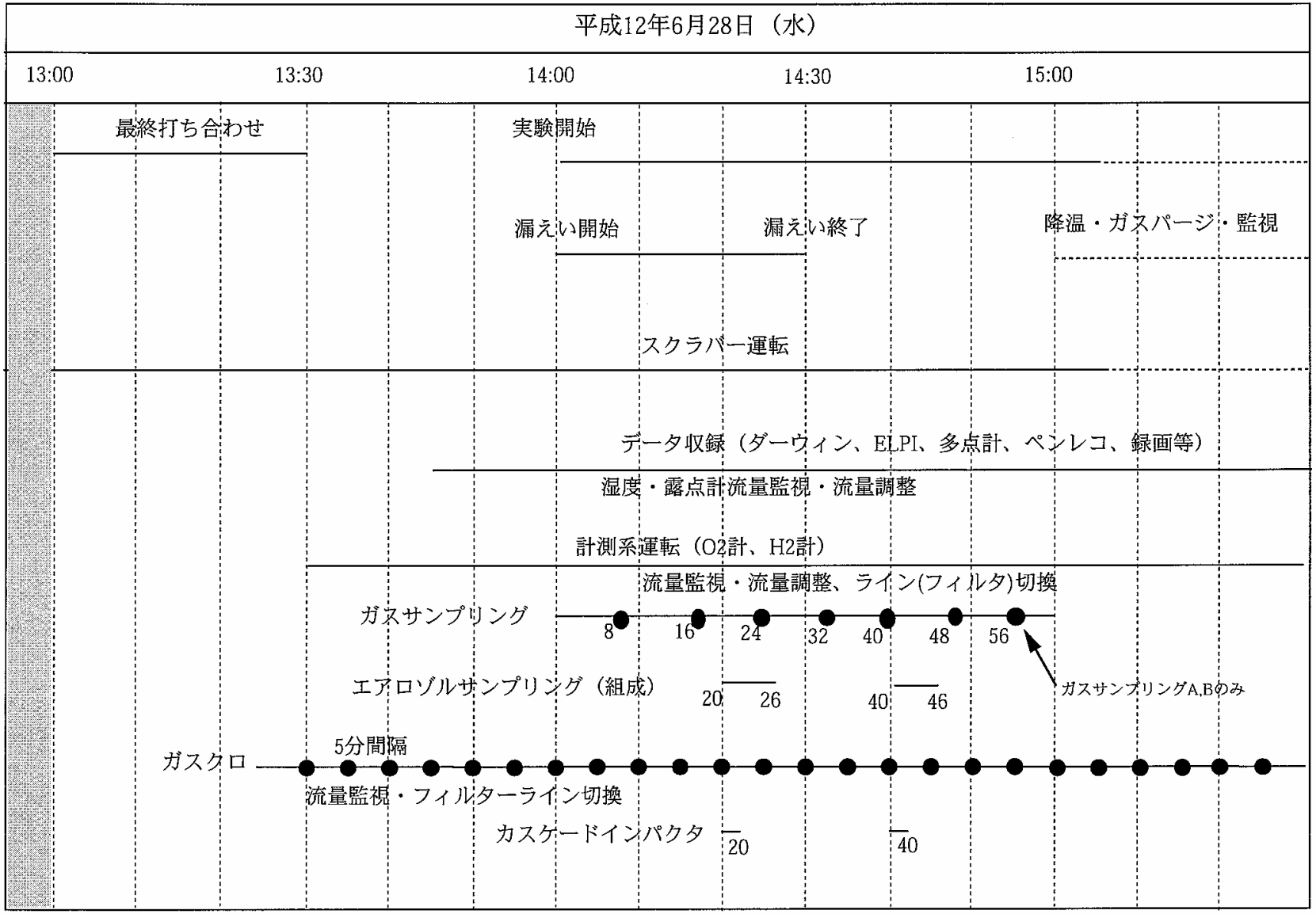


表4-3　Run-F8-2ナトリウムプール燃焼実験スケジュール

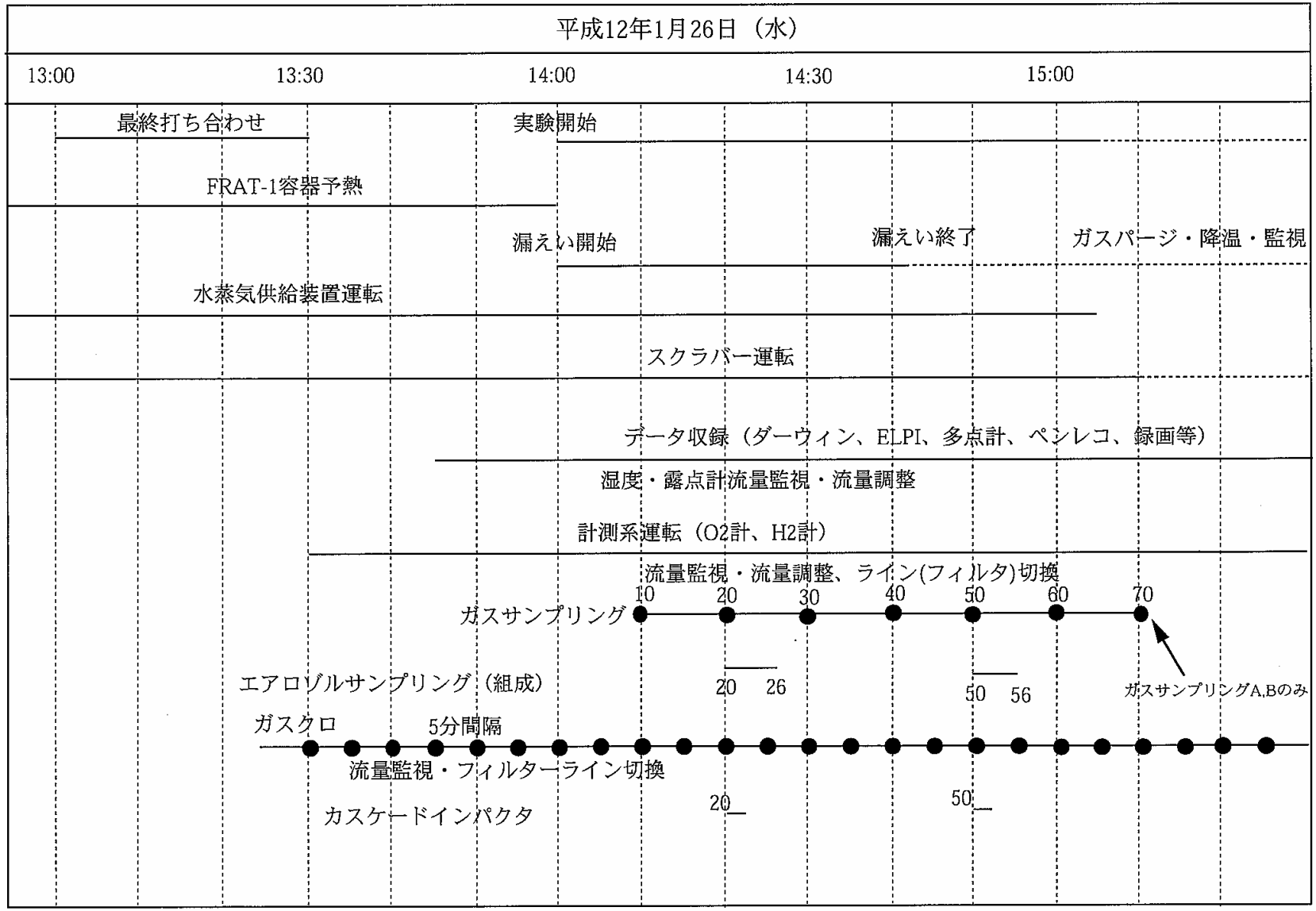


表4-4　燃焼後ナトリウムの分布

・Run-F7-4ナトリウム分布

エアロゾルとして回収	289g-Na
廃液タンク	221g-Na
HT600フィルタ	24g-Na
排煙ダクト	20g-Na
FRAT-1容器	24g-Na
受け皿上堆積物として回収	2163g-Na
回収量合計	2452g-Na

・Run-F8-2ナトリウム分布

エアロゾルとして回収	990g-Na
廃液タンク	681g-Na
HT600フィルタ	64g-Na
排煙ダクト	141g-Na
FRAT-1容器	104g-Na
受け皿上堆積物として回収	6070g-Na
回収量合計	7060g-Na

表4-5　エアロゾル化学組成分析結果

・Run-F7-4

1.エアロゾル化学組成A(20分～26分)

化学分析

Na	Na_2O	Na_2O_2	NaOH	NaOH・H_2O	Na_2CO_3
-	0	0.4	0	91.2	8.4

Wt%

2.エアロゾル化学組成B(40分～46分)

エアロゾル化学組成Bはサンプルを採取できなかったため化学分析は実施していない。

・Run-F8-2

1.エアロゾル化学組成A(20分～26分)

化学分析

Na	Na_2O	Na_2O_2	NaOH	Na_4FeO_3	NaOH・H_2O	Na_2CO_3
0	0	0.15	59.9	0	39.95	0

Wt%

2.エアロゾル化学組成B(50分～56分)

XRD

Na	Na_2O	Na_2O_2	NaOH	Na_4FeO_3	NaOH・H_2O	Na_2CO_3
-	-	-	++++	-	++	Tr

++++:非常に多い　+++:多い　++:中程度　+:少量　Tr:痕跡程度

※エアロゾル化学組成Bはサンプルが微量のためXRD分析のみ実施。

表4-6　堆積物と材料の界面のX線回折結果

中心からの距離 (cm)	回折線強度			
	+++	++	+	+-
9～10	α-Fe NaOH	Na_2O	金属Na	Na_4FeO_3 $NaFe_2O_3$
18～19	NaOH	Na_2O	α-Fe	金属Na Na_4FeO_3 $NaFeO_2$・H_2O
26～27	NaOH	α-Fe 金属Na	Na_2O	NaOH Na_4FeO_3 $NaFeO_2$ $Na_3Fe_5O_9$

表5-1 Run-F7、Run-F8シリーズ実験条件表(実績値)

Run No.	F7-1	F7-2	F7-3	F7-4	F8-1	F8-2
漏えいナトリウム温度	約507℃					
落下高さ	0.1m	1.5m				
換気流量	$3m^3$/min	$3m^3$/min	$5m^3$/min	$3m^3$/min	$5m^3$/min	$3m^3$/min
給気湿分濃度	約6000vol-ppm	14000～15000vol-ppm	27000～28000vol-ppm	23000～24000vol-ppm	25000～28000vol-ppm	46000～48000vol-ppm
平均ナトリウム漏えい率	約12kg/h	約12kg/h	約26kg/h	約6.8kg/h	約24kg/h	約14.5kg/h
漏えい継続時間	約25分	約25分	約23分	約22分	約25分	約30分
不活性化の時期	燃焼の終了後※				漏えい終了後	燃焼の終了後※

※受け皿裏面の全熱電対で500℃以下を確認後

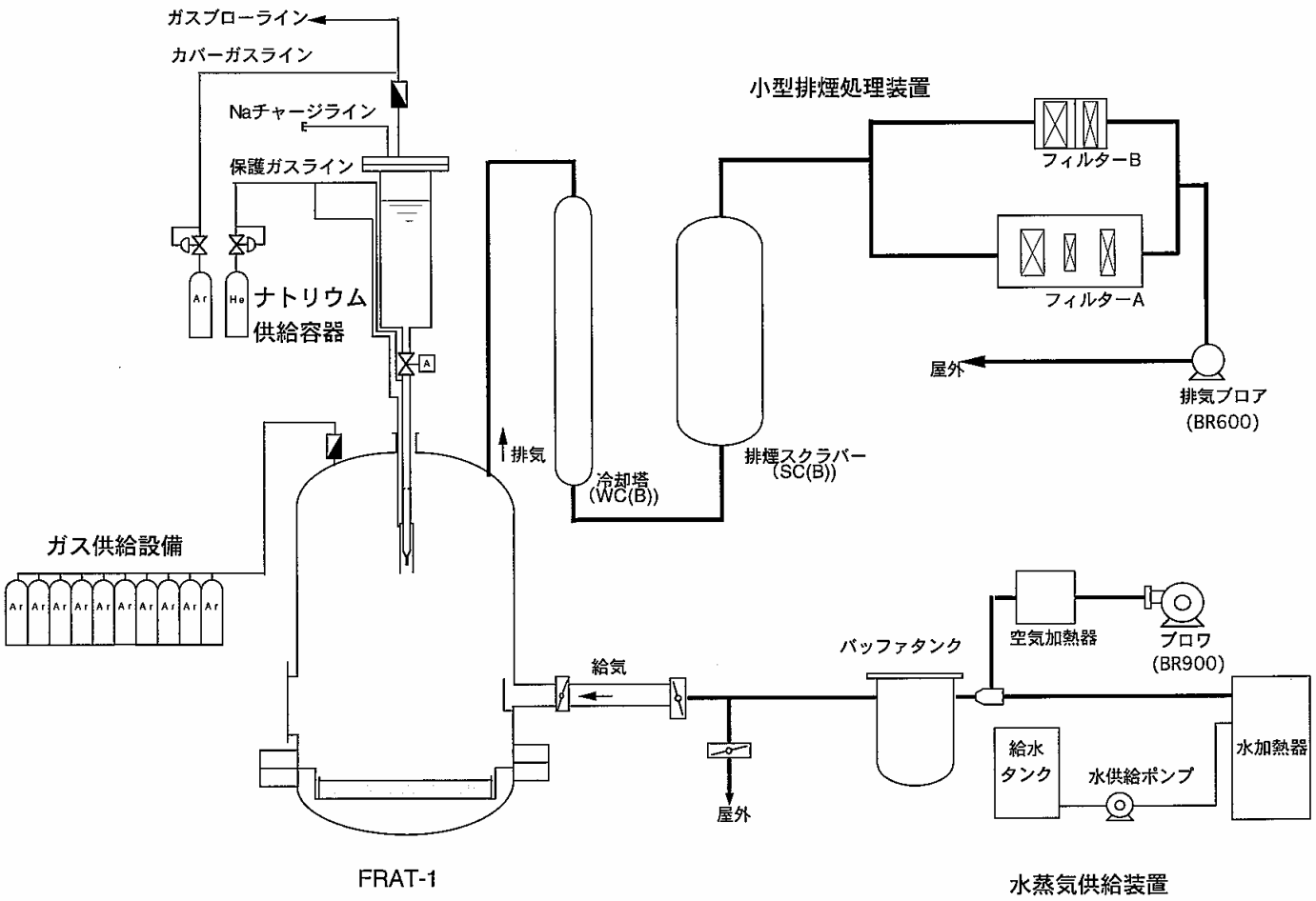


図2-1　ナトリウムプール燃焼実験系統図

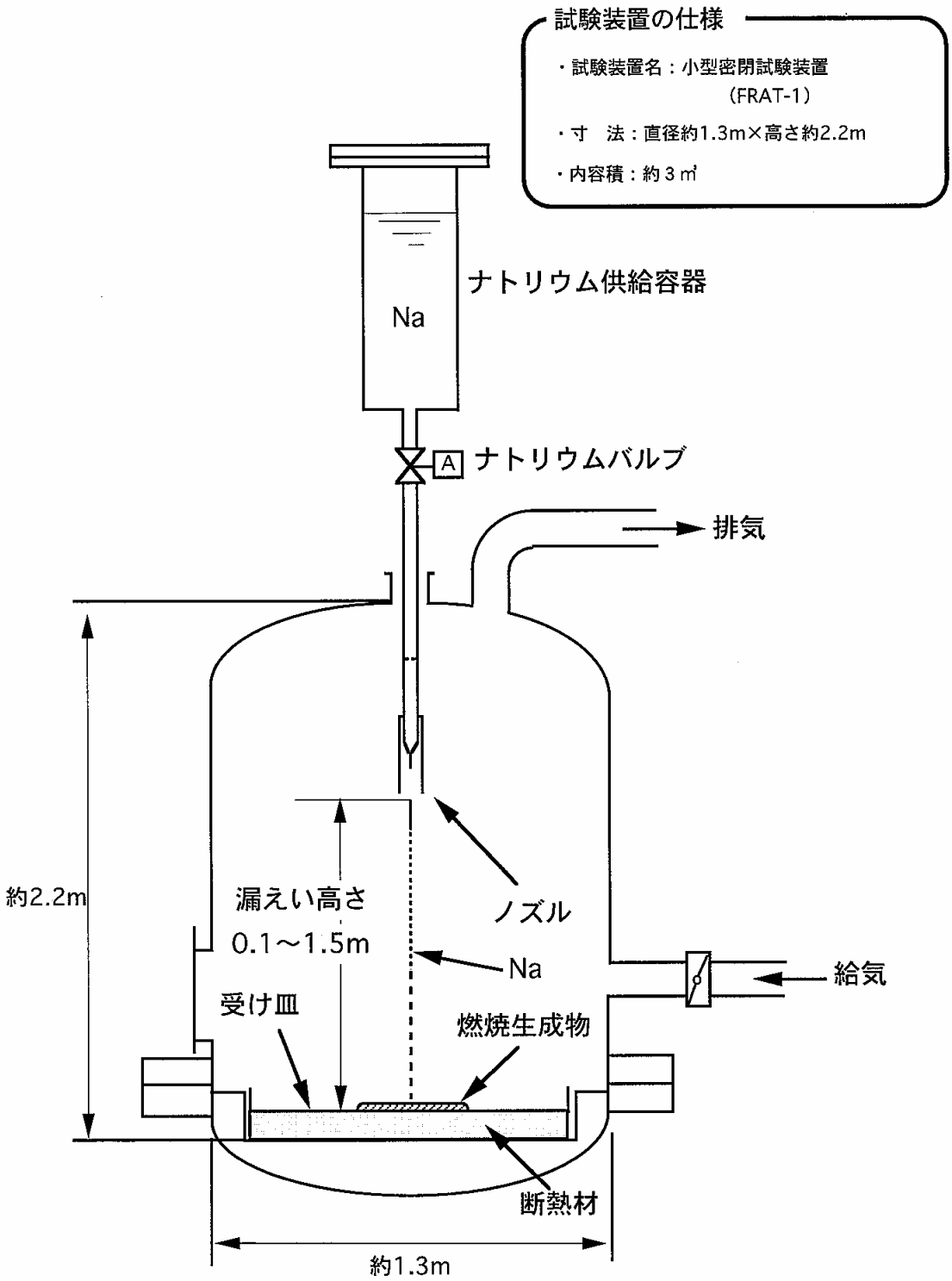


図2-2　FRAT-1試験装置概略図

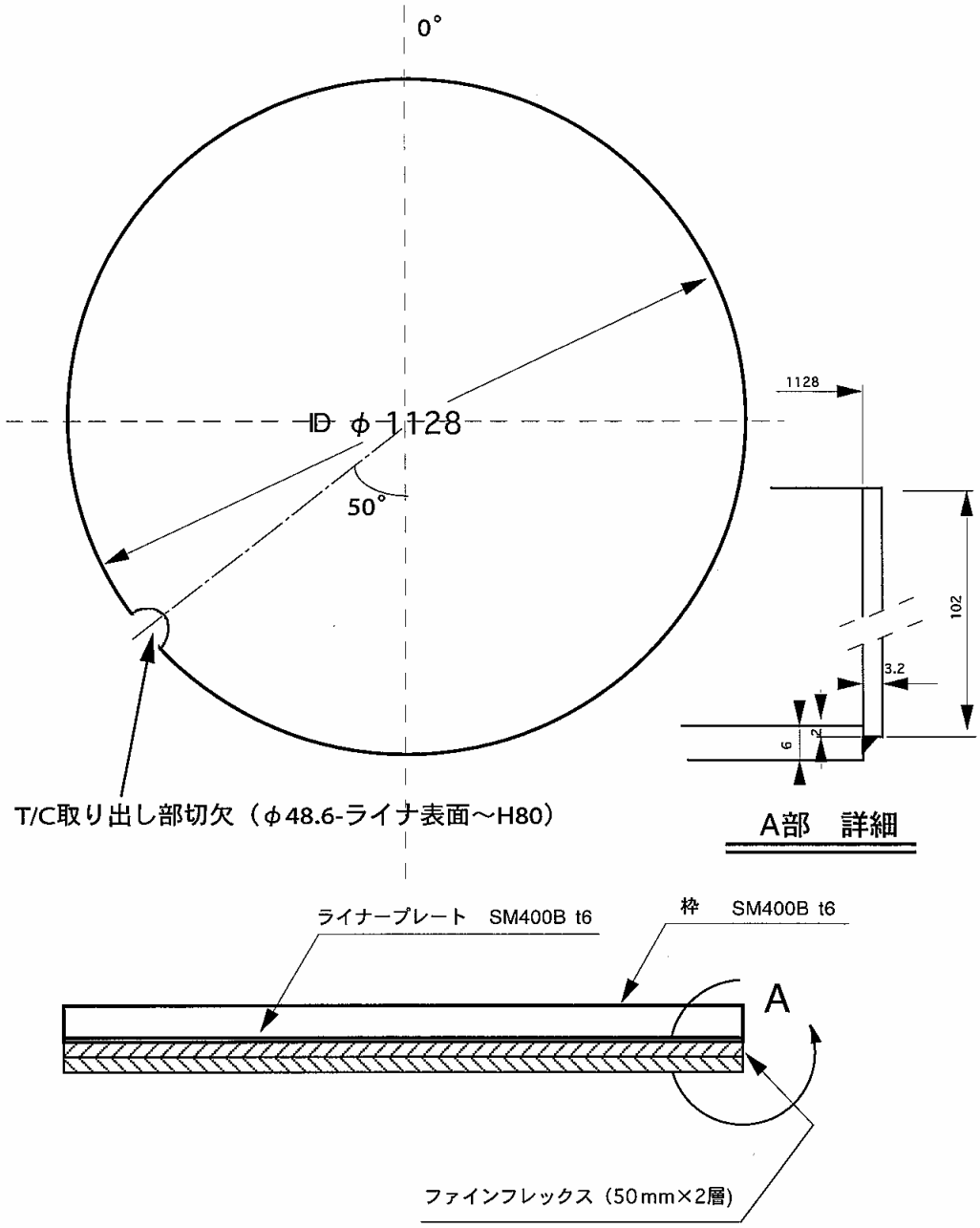
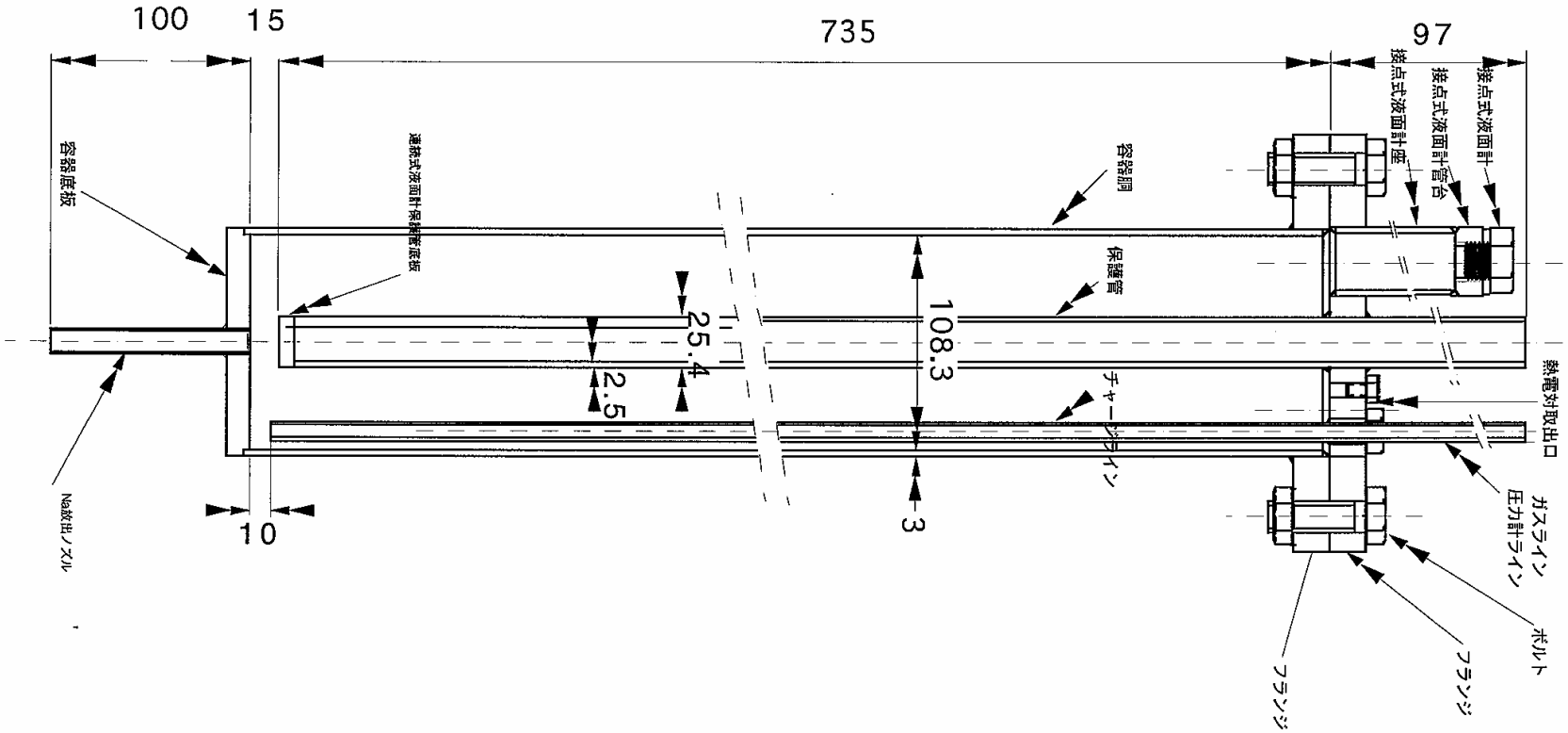

0°
ID φ1128
50°
T/C取り出し部切欠（φ48.6-ライナ表面～H80）
1128
102
3.2
6
2
A部　詳細
ライナープレート　SM400B t6
枠　SM400B t6
A
ファインフレックス（50mm×2層）

図2-3　受け皿構造図



単位：mm

図2-4　Run-F7-4ナトリウム供給容器構造図

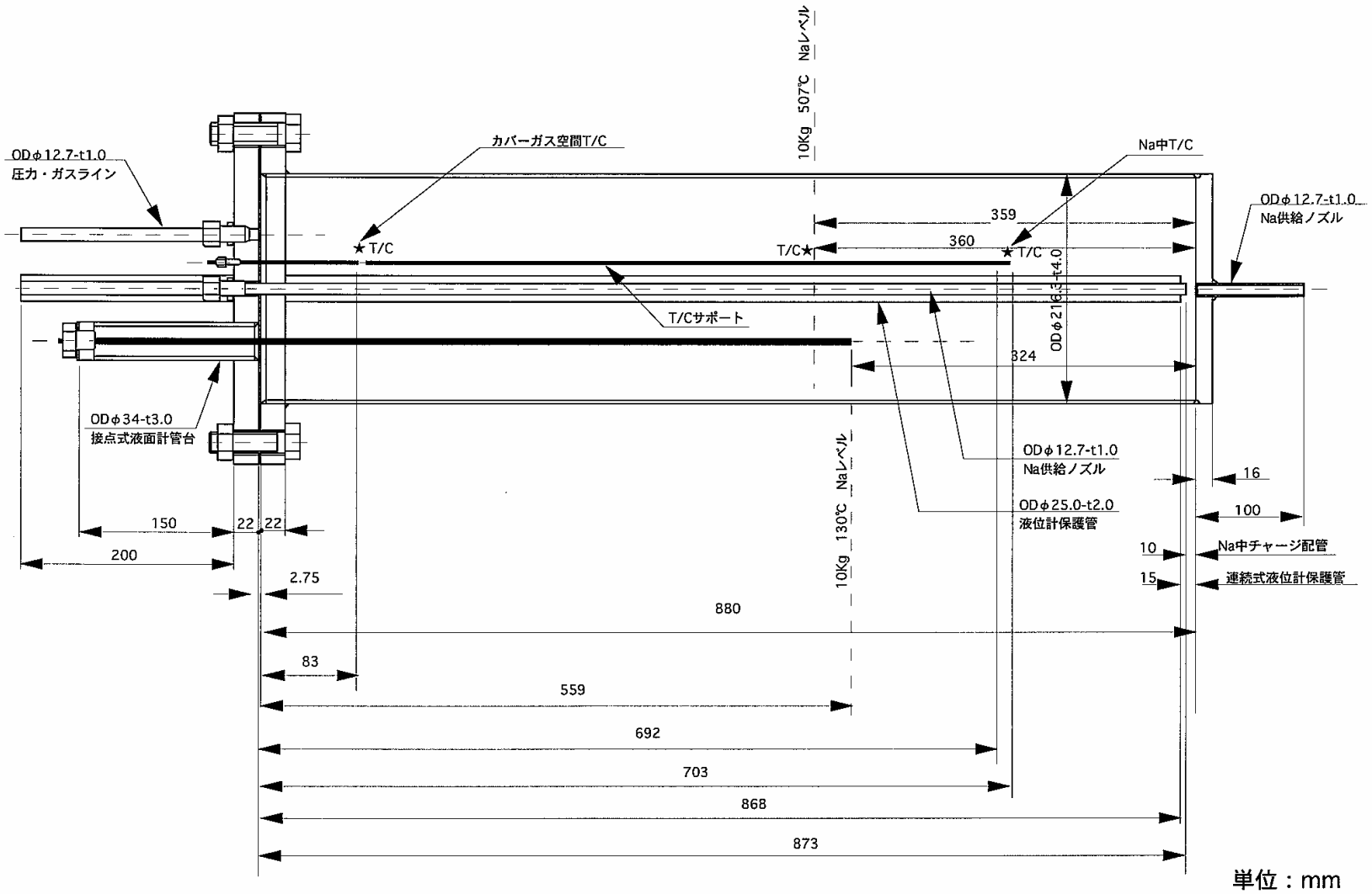


図2-5　Run-F8-2ナトリウム供給容器構造図

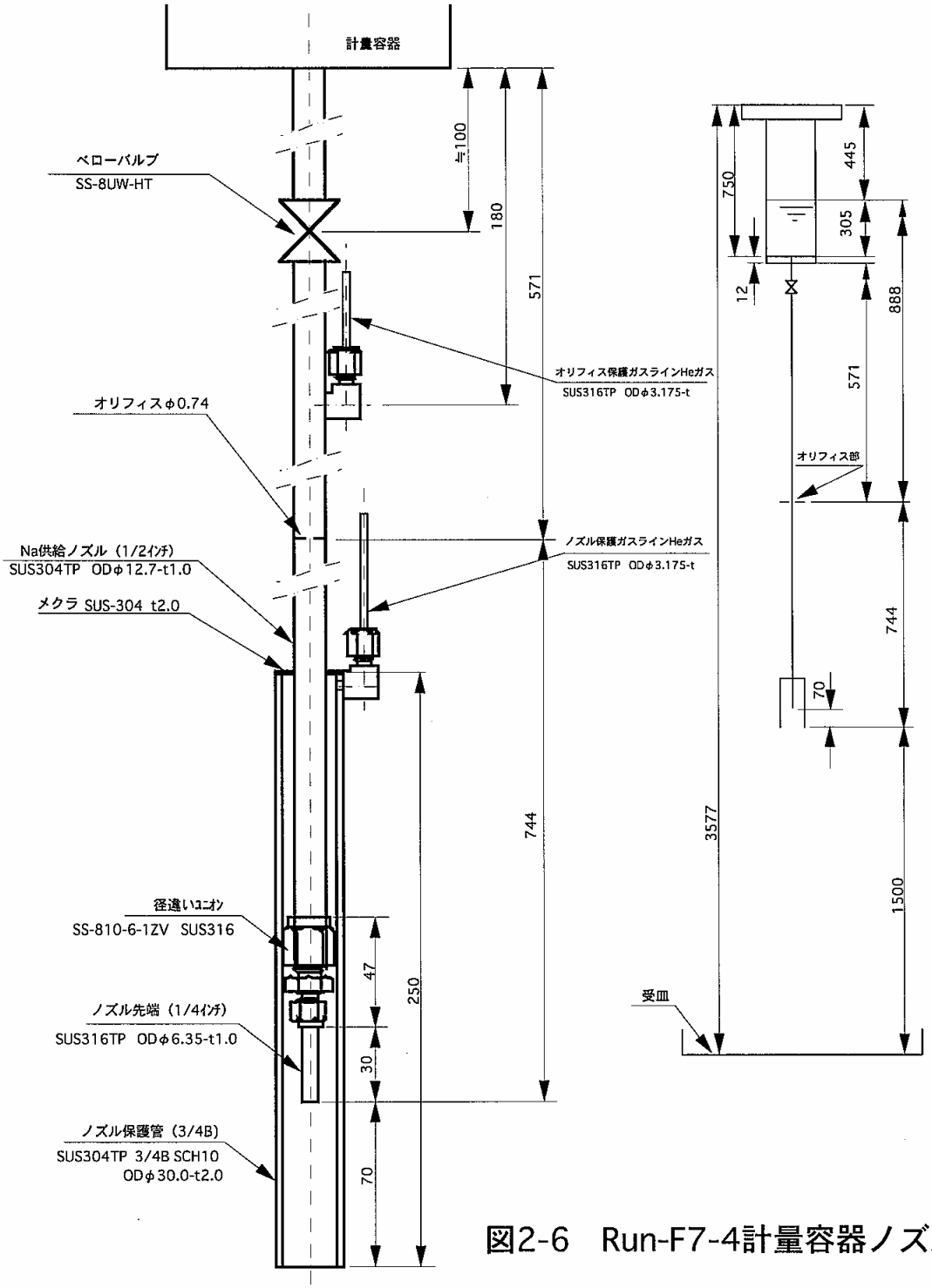


図2-6　Run-F7-4計量容器ノズル

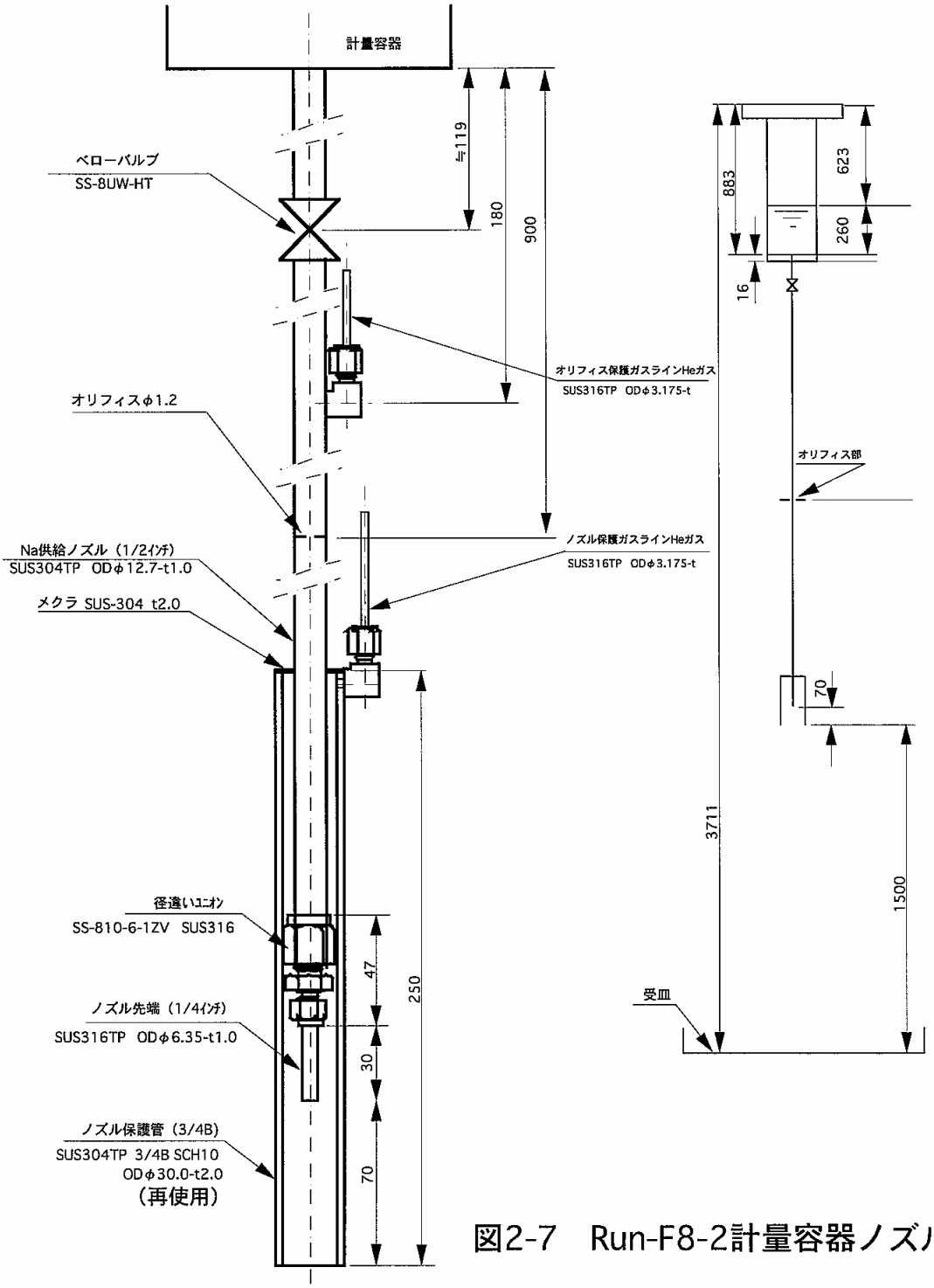


図2-7　Run-F8-2計量容器ノズル

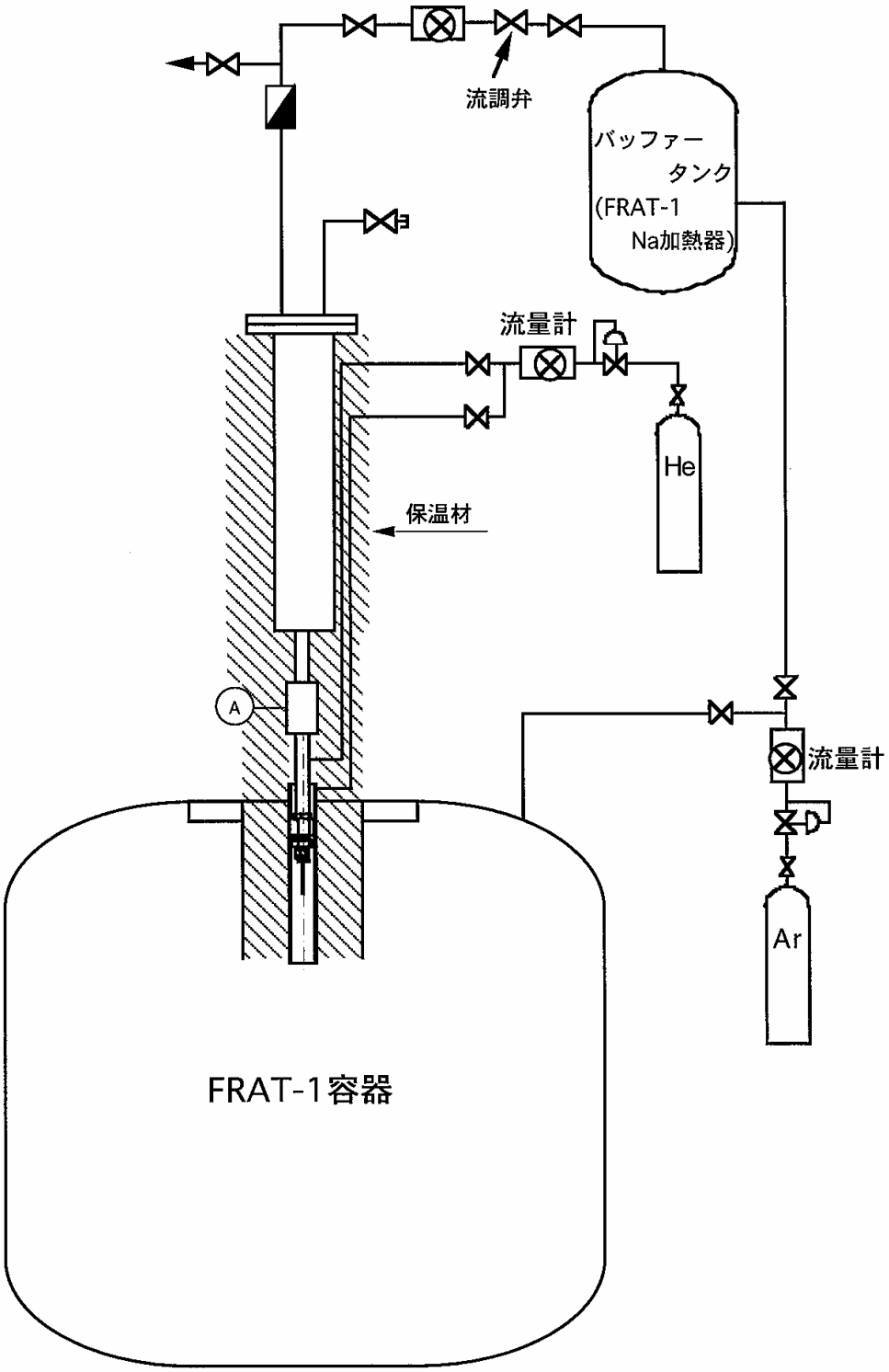


図2-8　ガス供給系統図

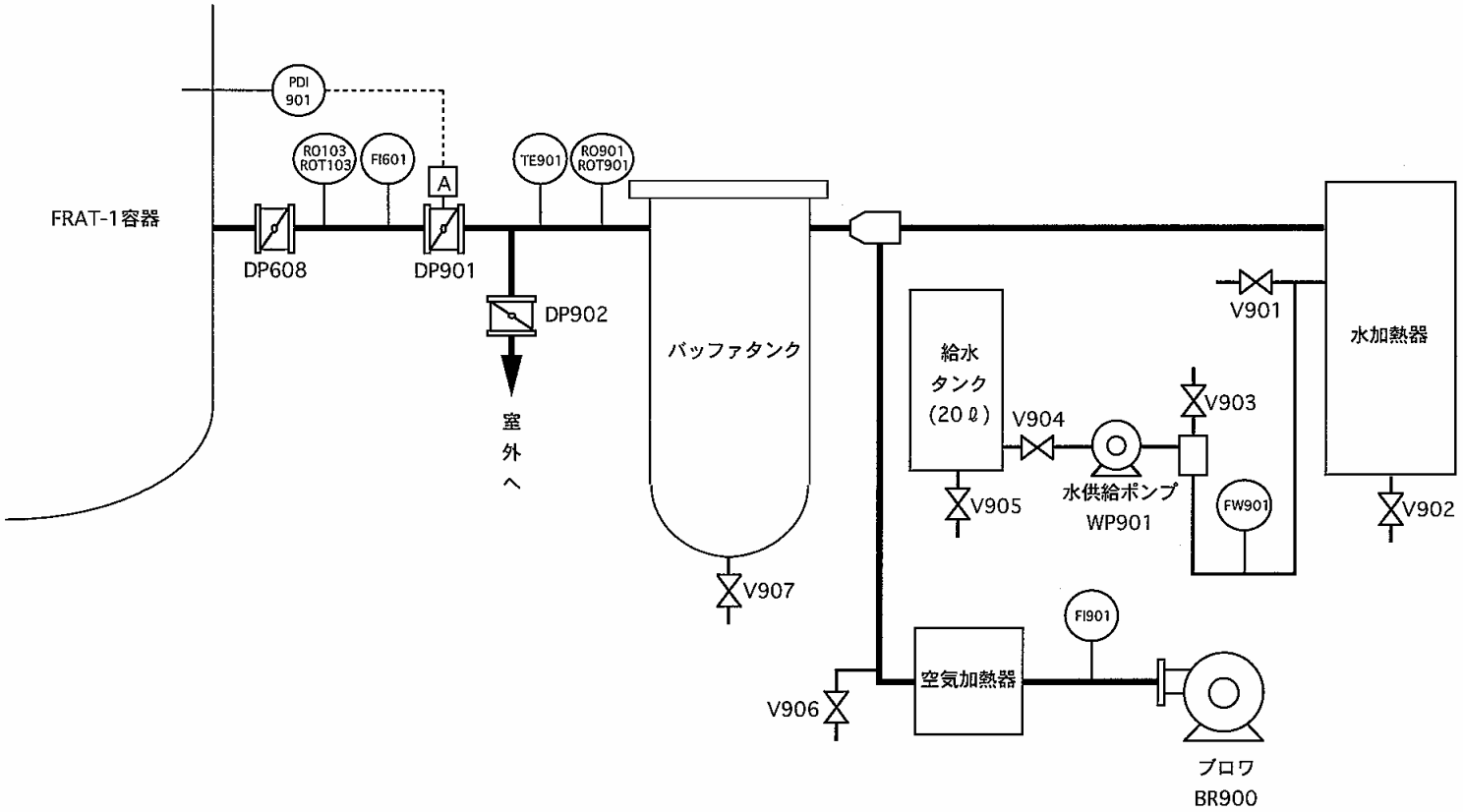


図2-9　水蒸気供給装置フロー図

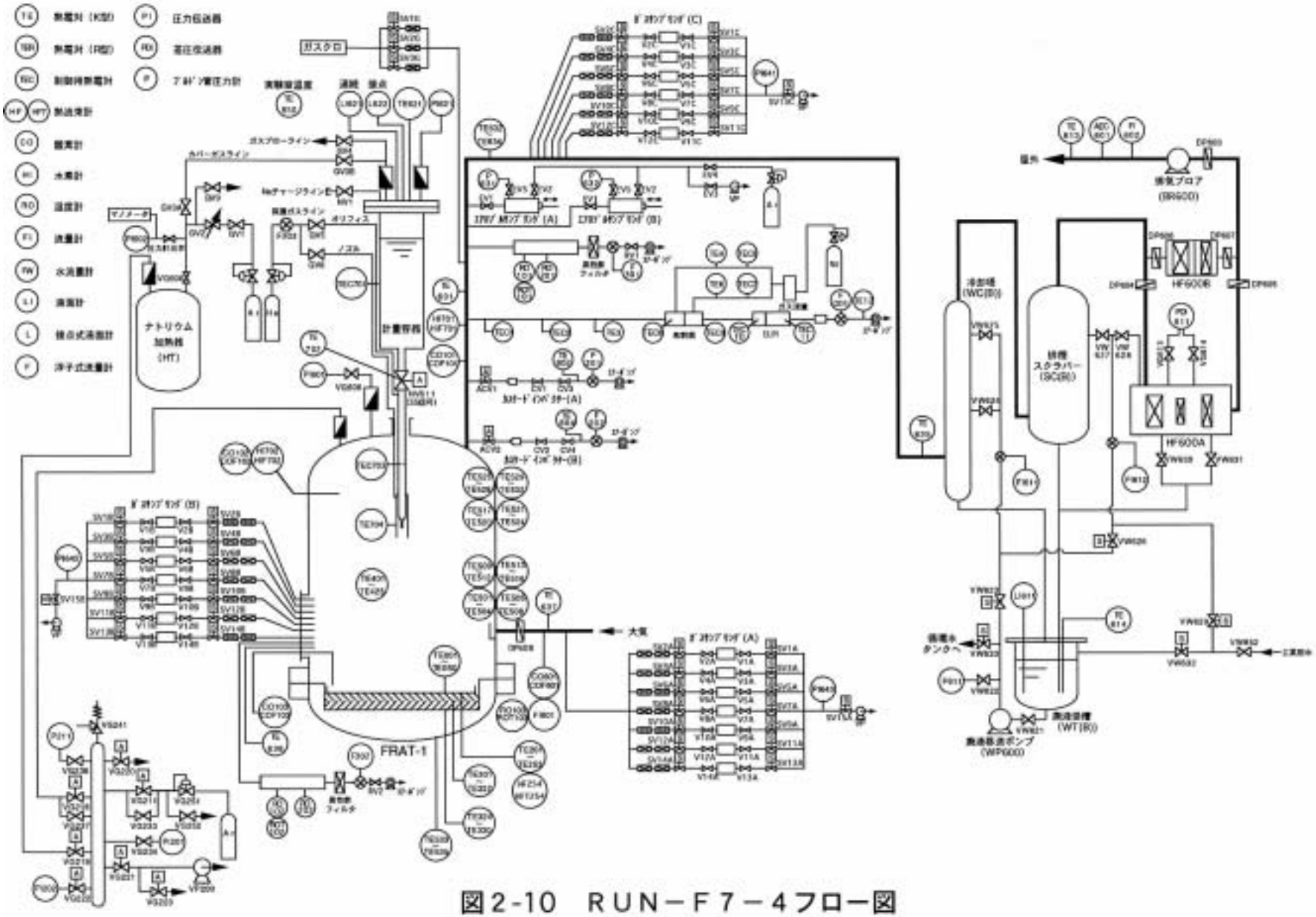


図2-10　RUN－F7－4フロー図

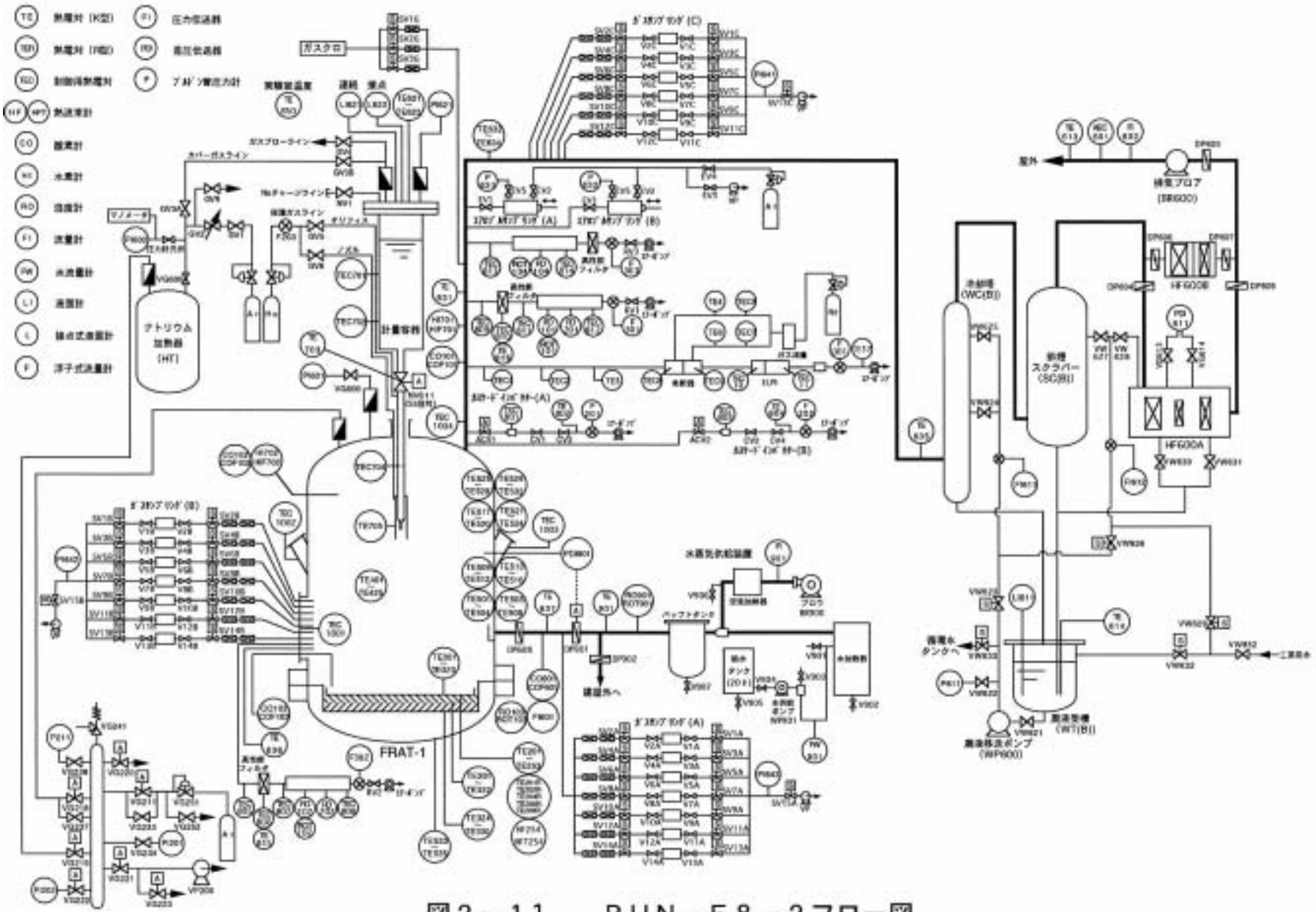


図2－11　RUN－F8－2フロー図

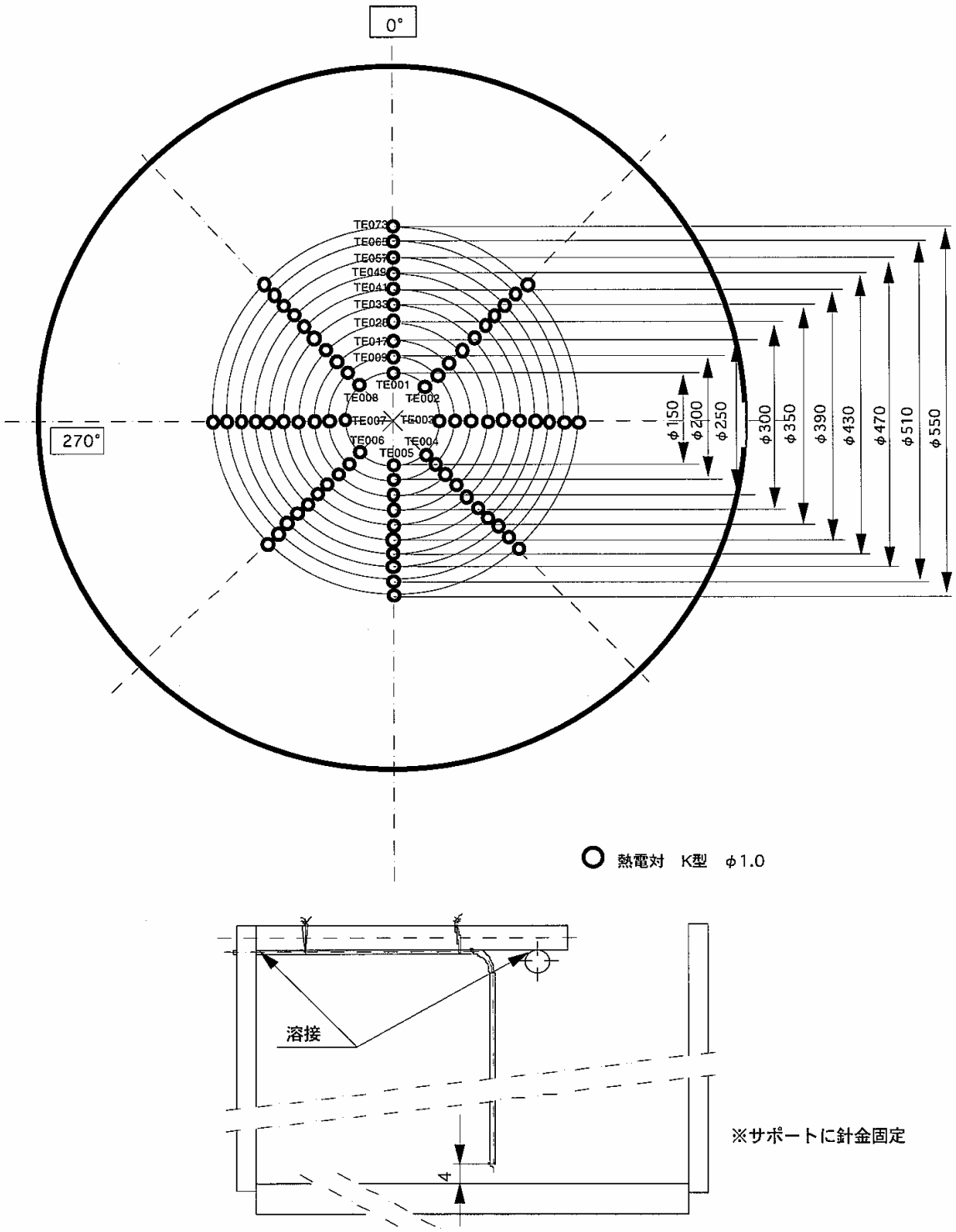


図2-12 Run-F7-4受け皿表面空間熱電対等配置図(平面図)

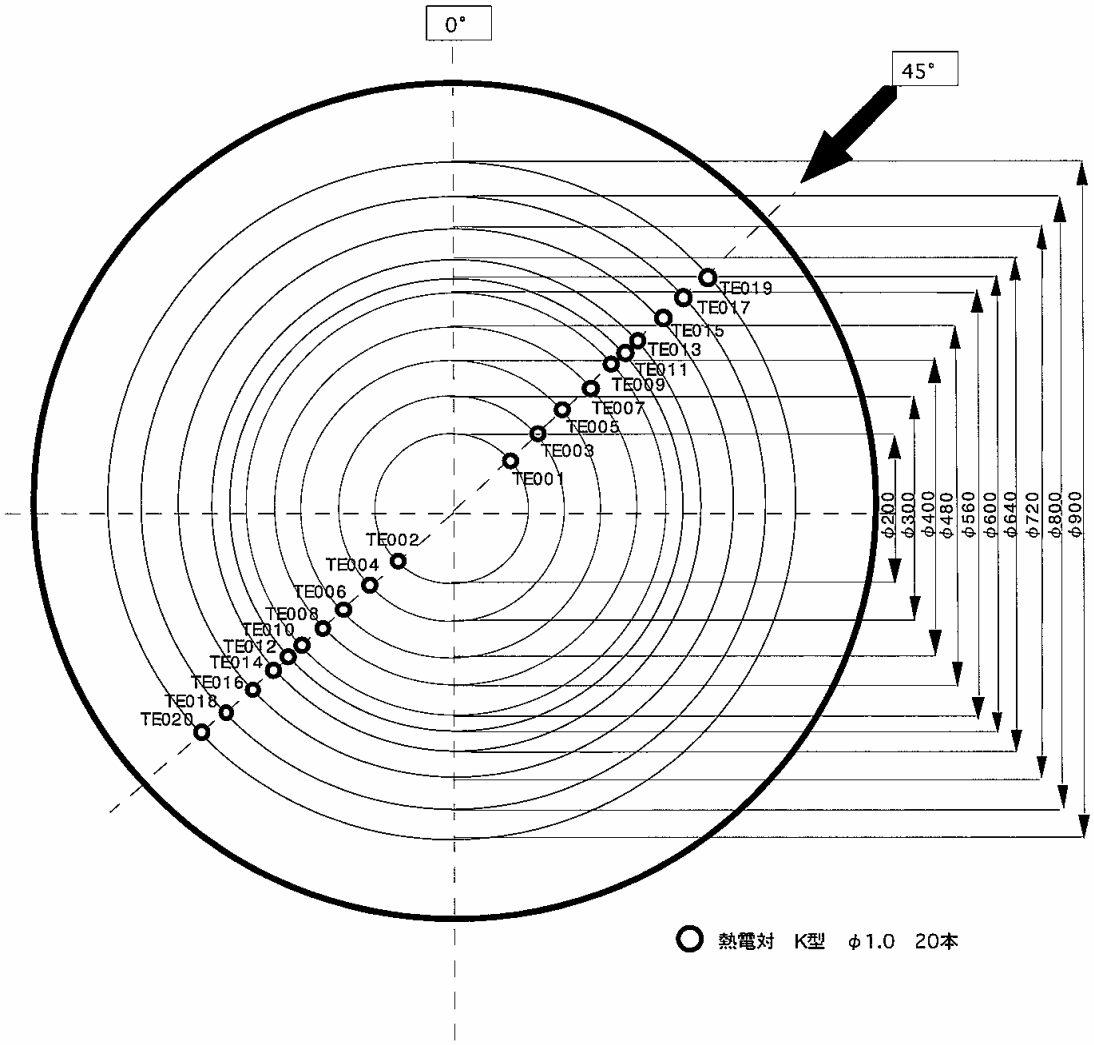


図2-13 Run-F8-2受け皿表面空間熱電対等配置図(平面図)

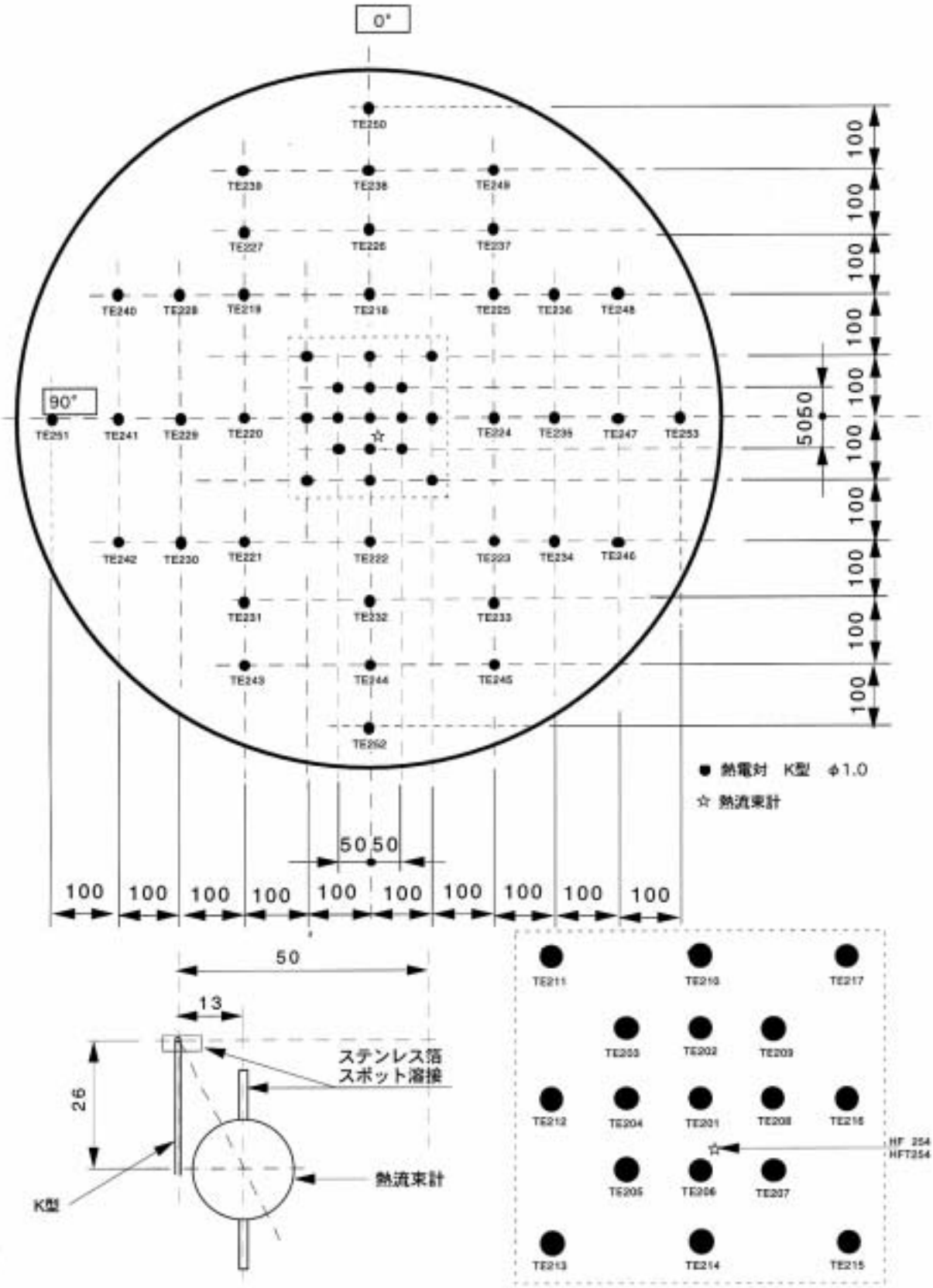


図2-14　Run-F7-4受け皿裏面熱電対取付図(下面図)

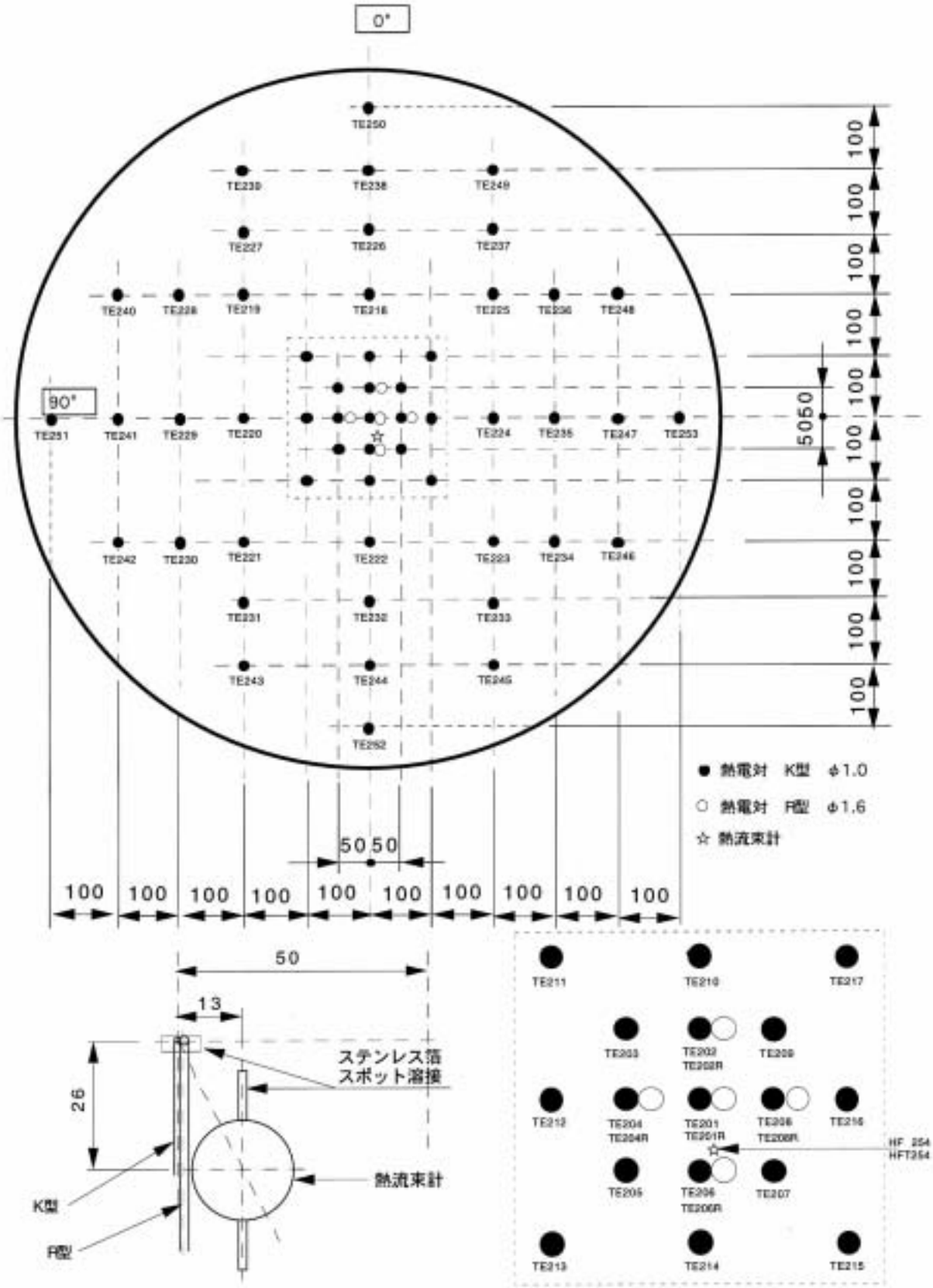


図2-15　Run-F8-2受け皿裏面熱電対取付図(下面図)

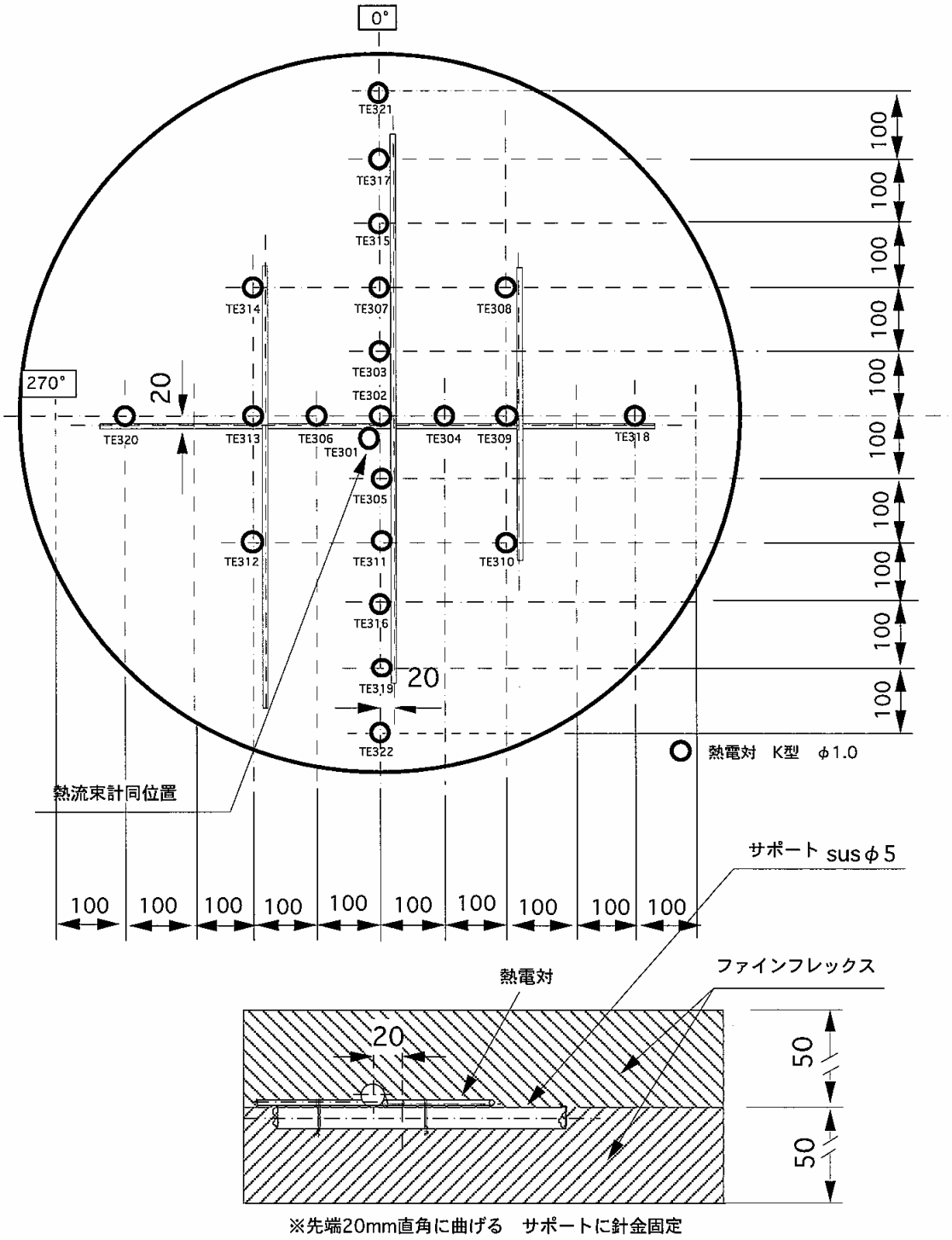


図2-16 保温材熱電対取付図(平面図)

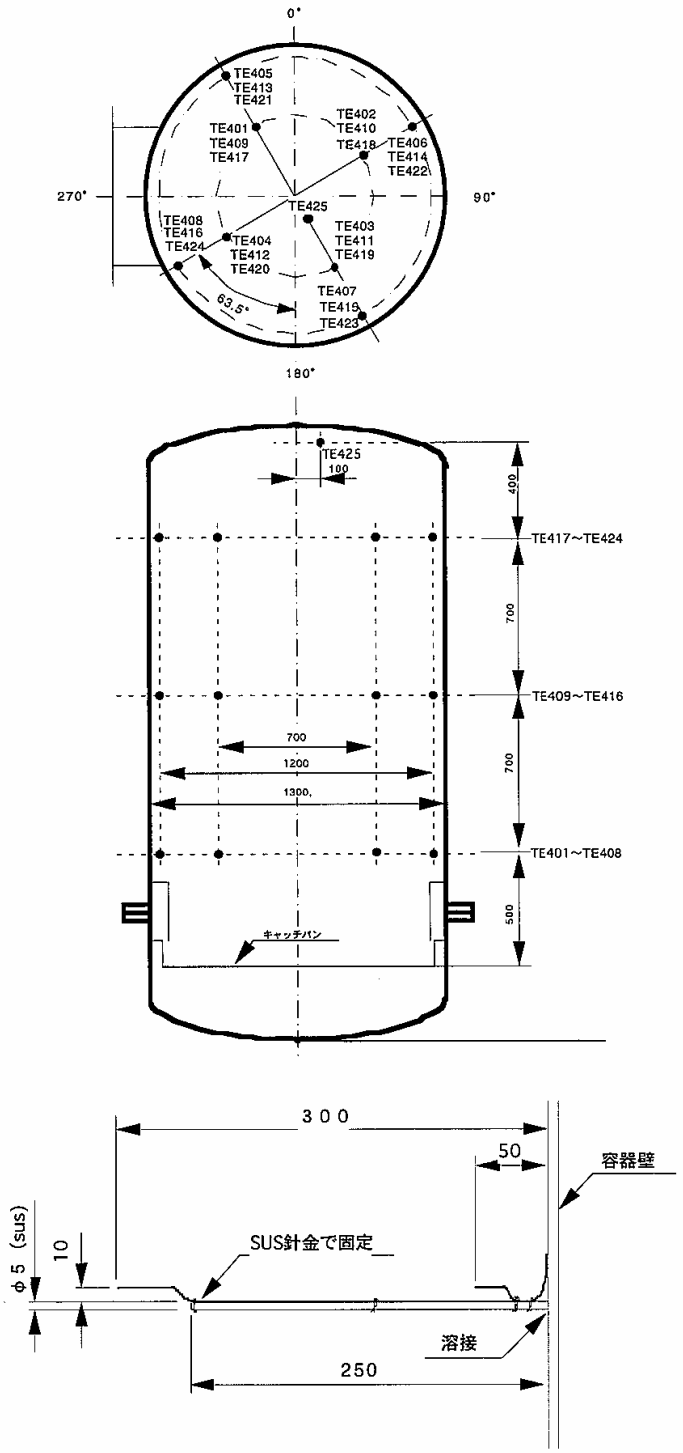
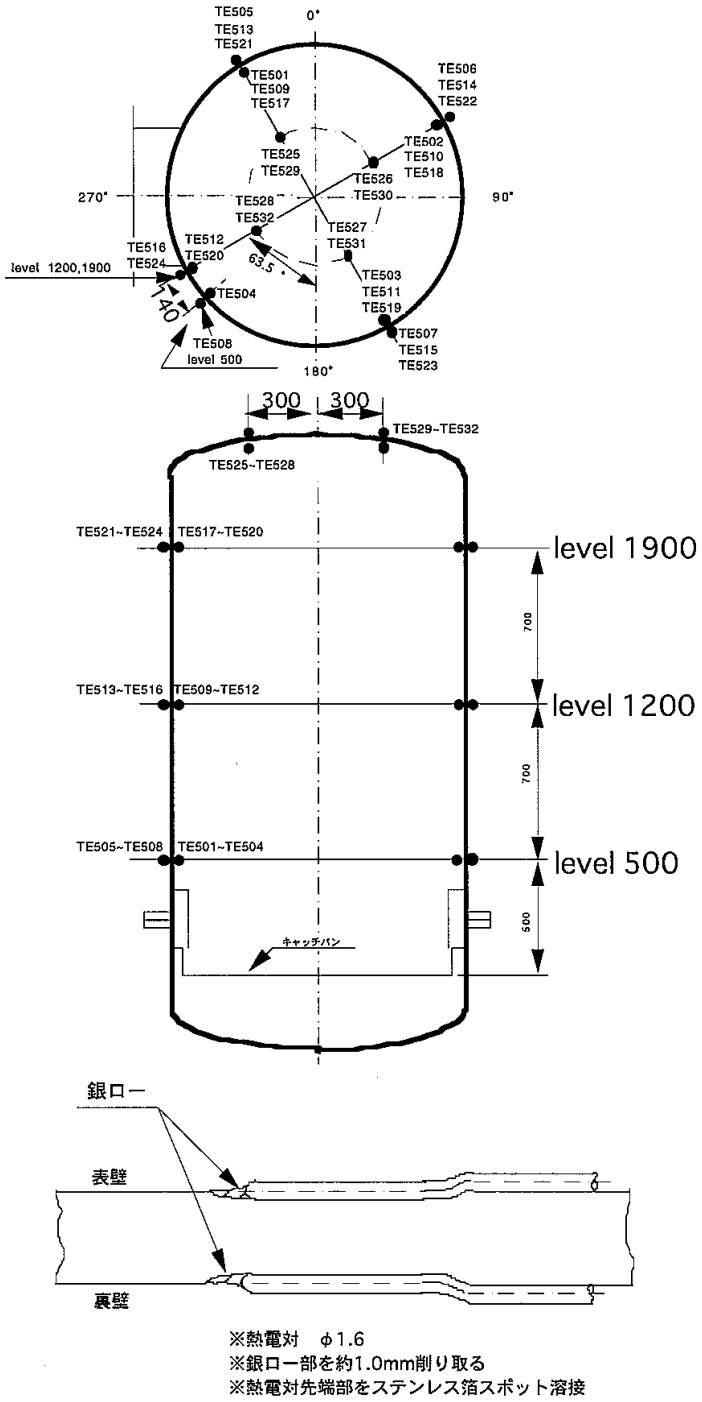


図2-17　FRAT-1内部ガス温度熱電対配置図



※熱電対　φ1.6
※銀ロー部を約1.0mm削り取る
※熱電対先端部をステンレス箔スポット溶接

図2-18　FRAT-1内外壁温度熱電対配置図

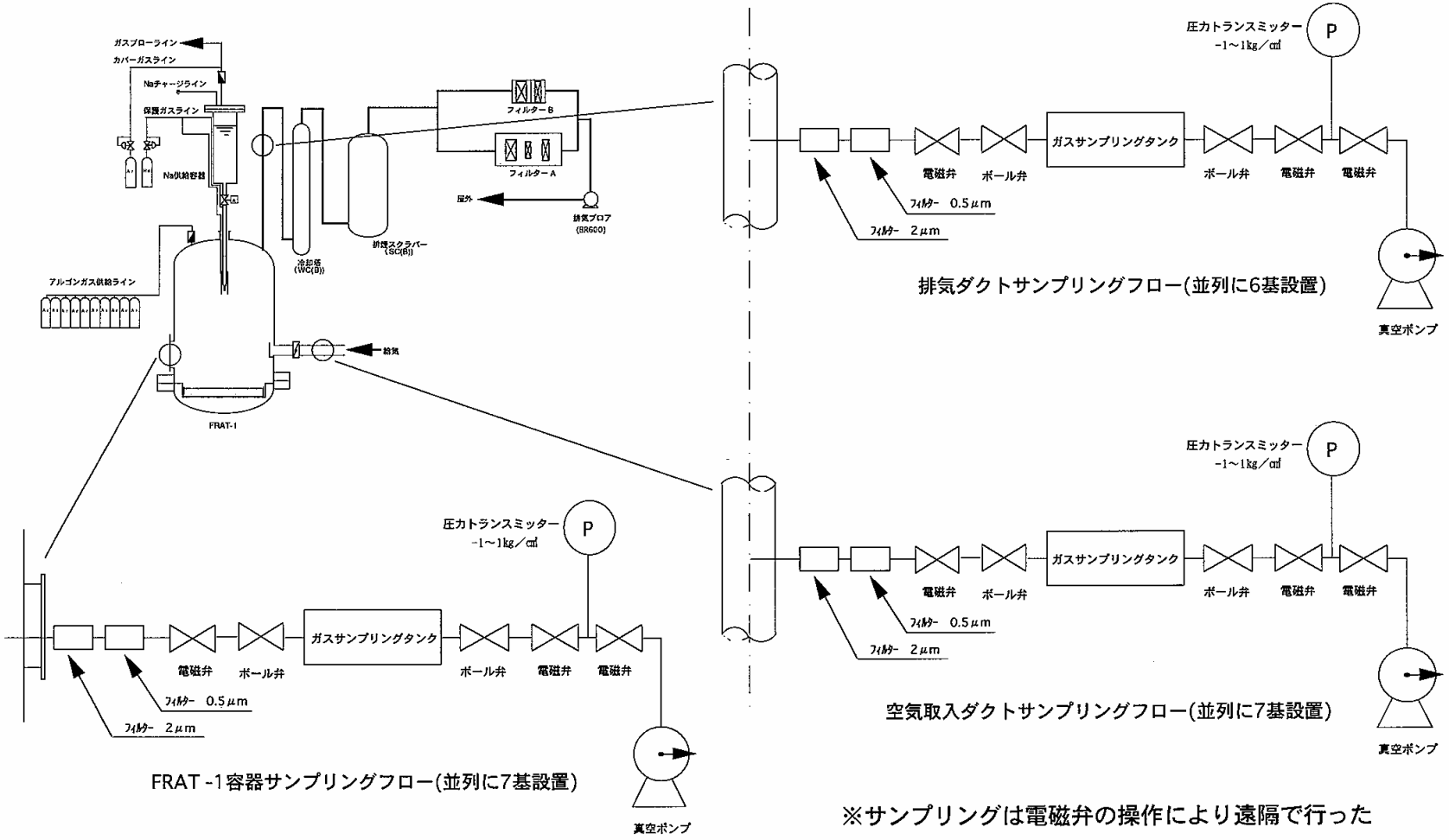
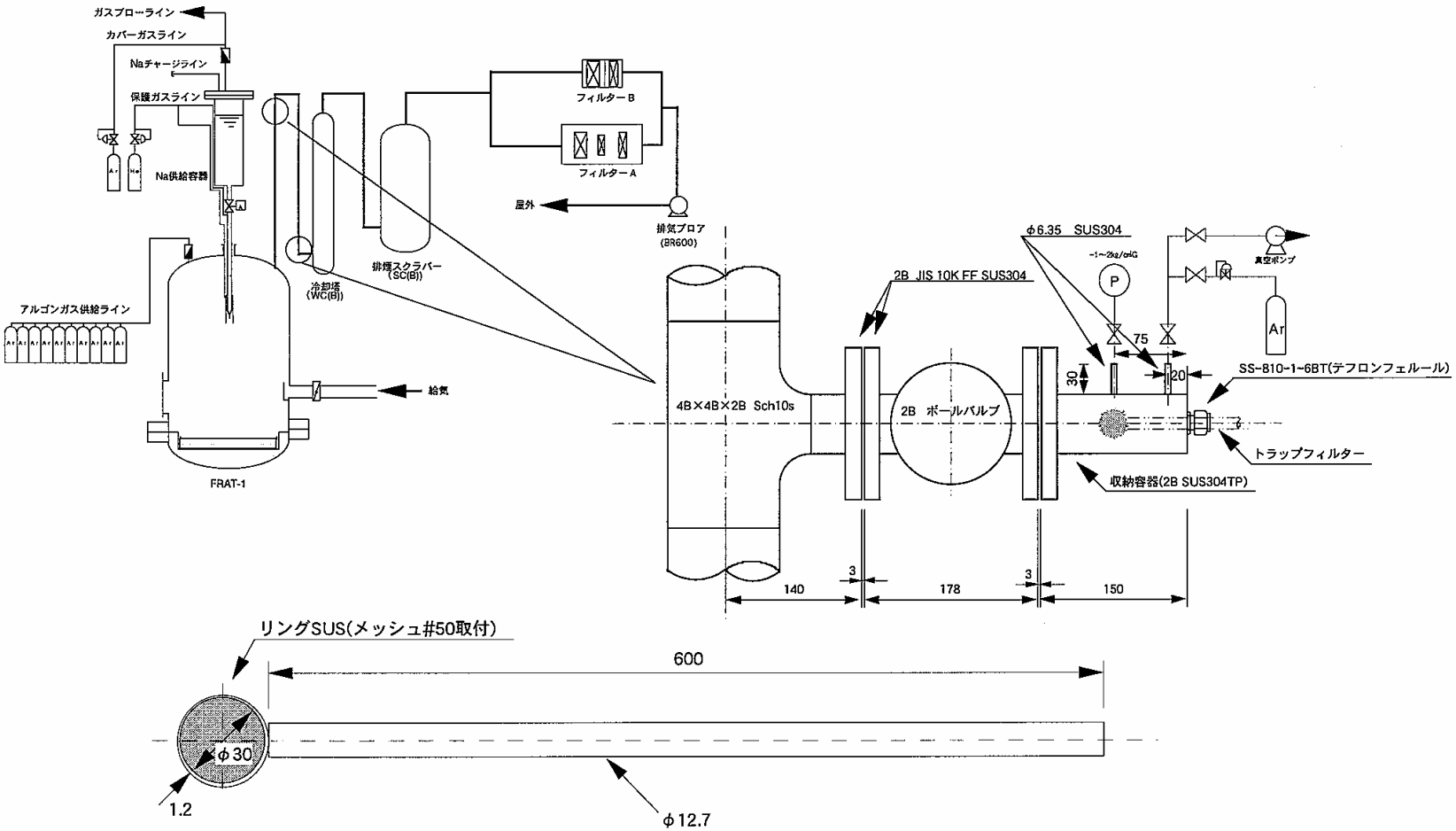


図2-19　ガスサンプリングフロー図



トラップフィルター詳細

図2-20 エアロゾル化学組成サンプリング

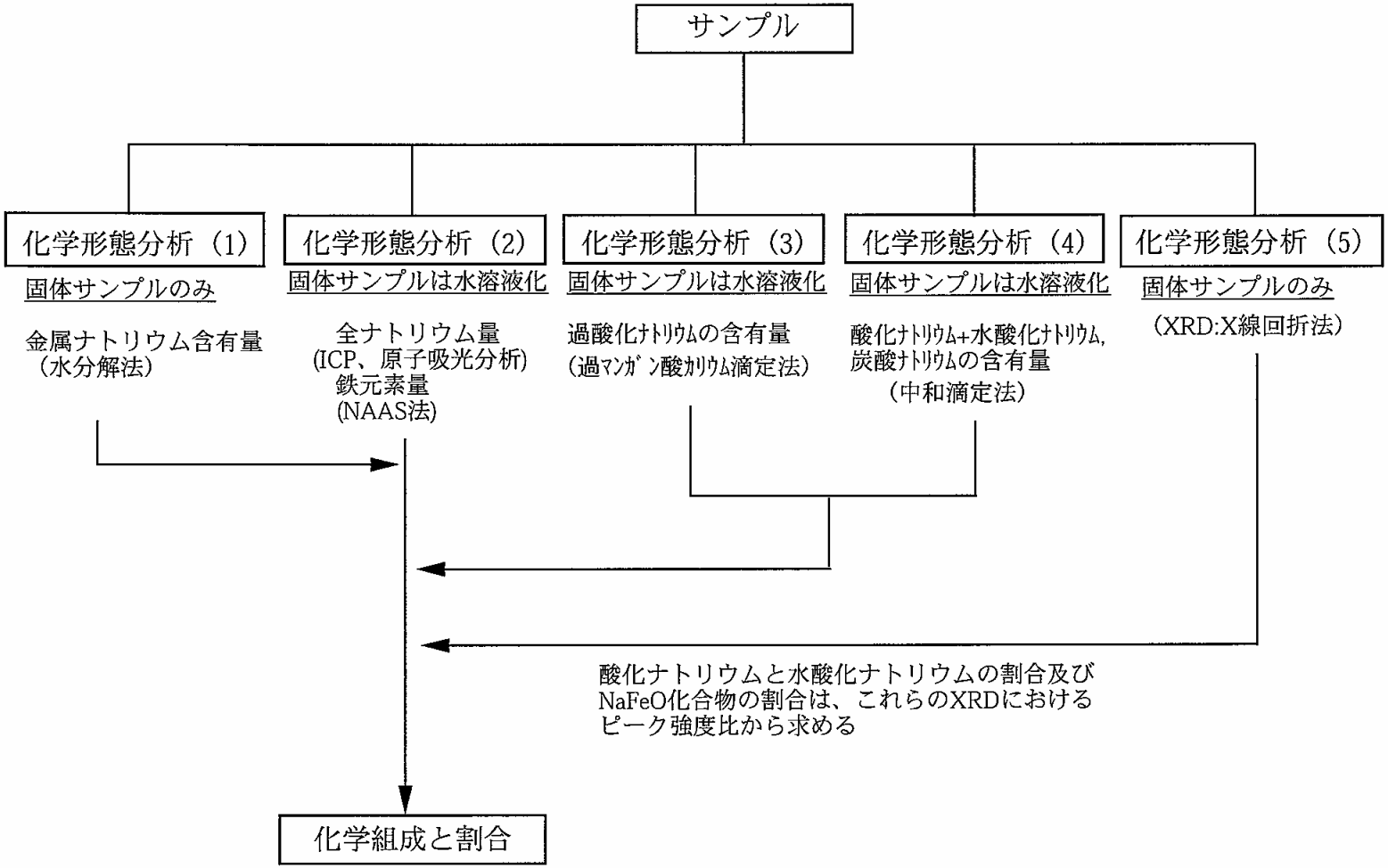
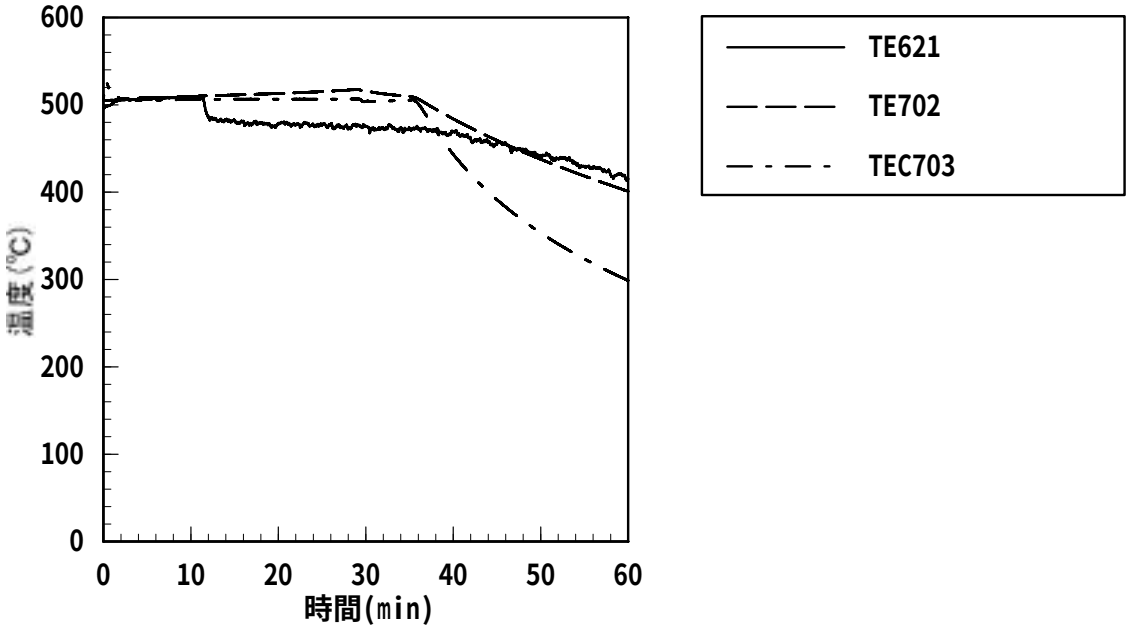
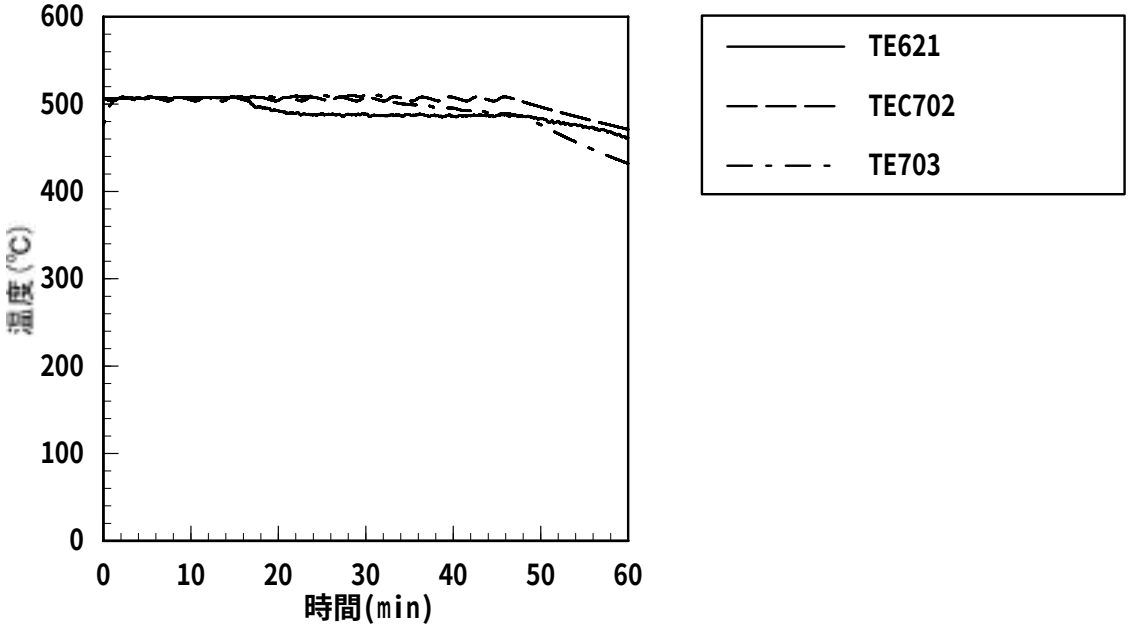


図2-21　燃焼生成物の分析方法

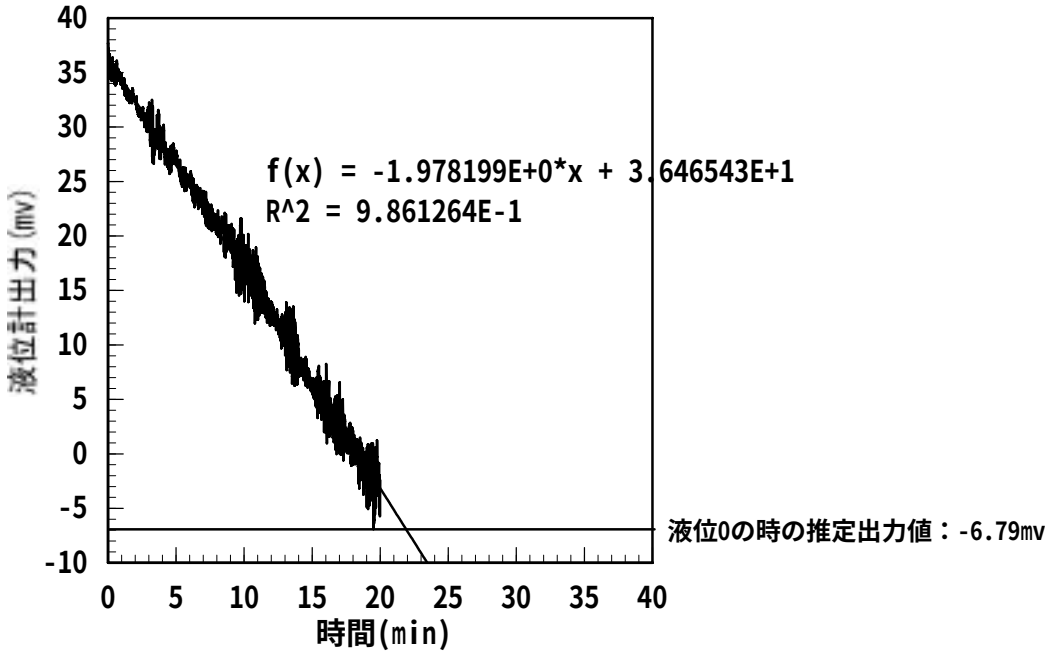


Run-F7-4漏えいナトリウム温度

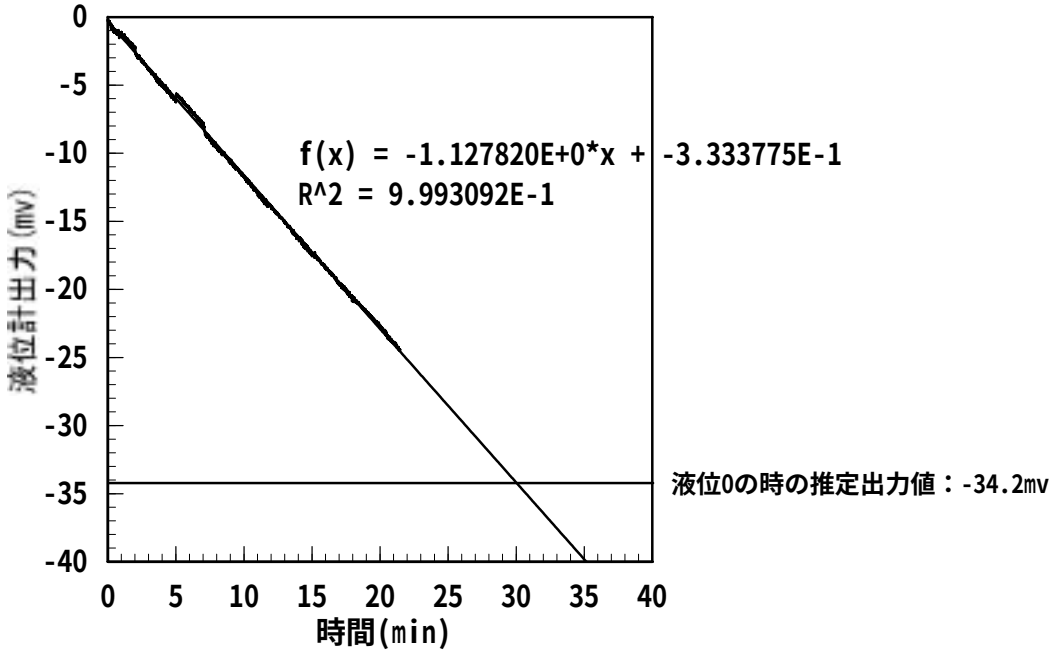


Run-F8-2漏えいナトリウム温度

図4-1　漏えいナトリウム温度

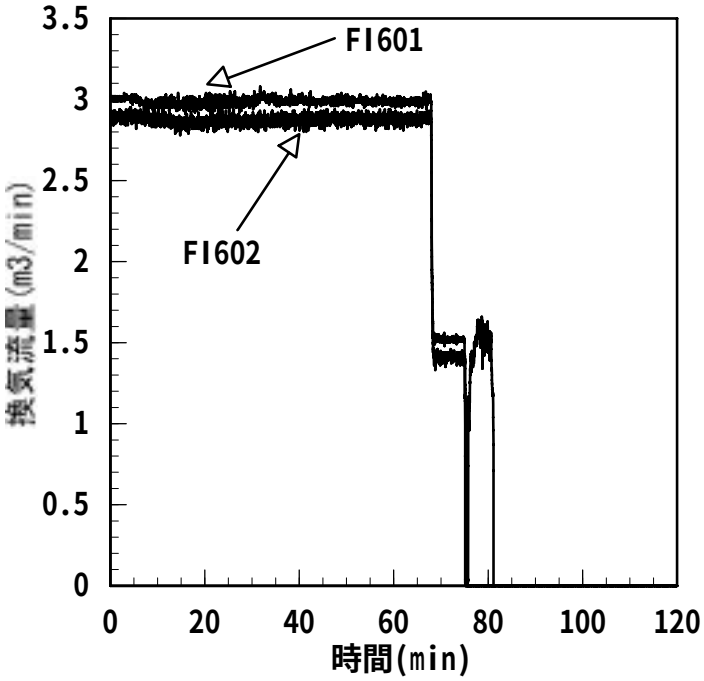


Run-F7-4連続式液位計出力(LI621)

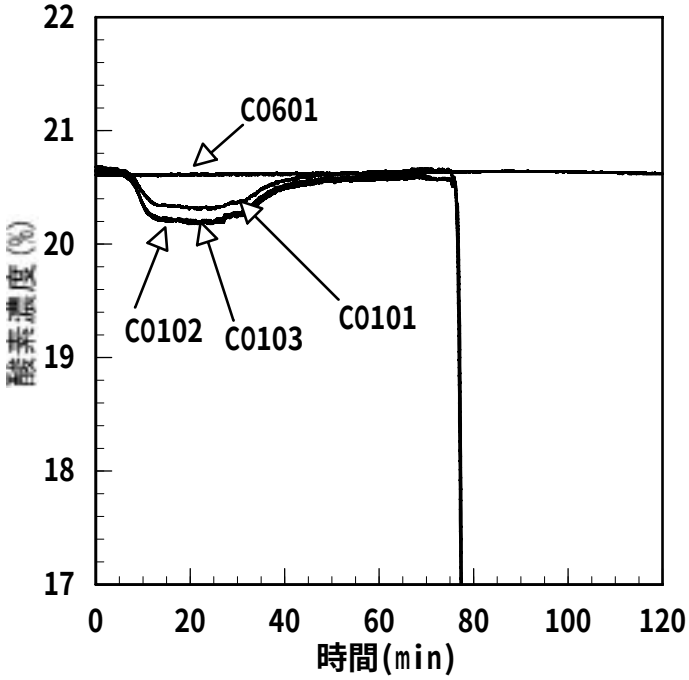


Run-F8-2連続式液位計出力(LI621)

図4-2　連続式液位計出力の時間変化



Run-F7-4 換気流量



Run-F7-4 酸素濃度変化

図4-3　Run-F7-4換気流量、酸素濃度の時間変化

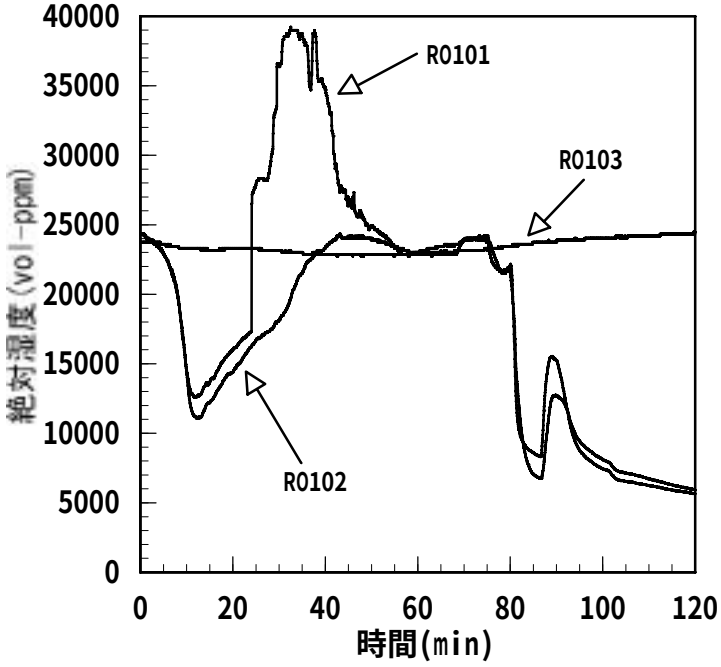
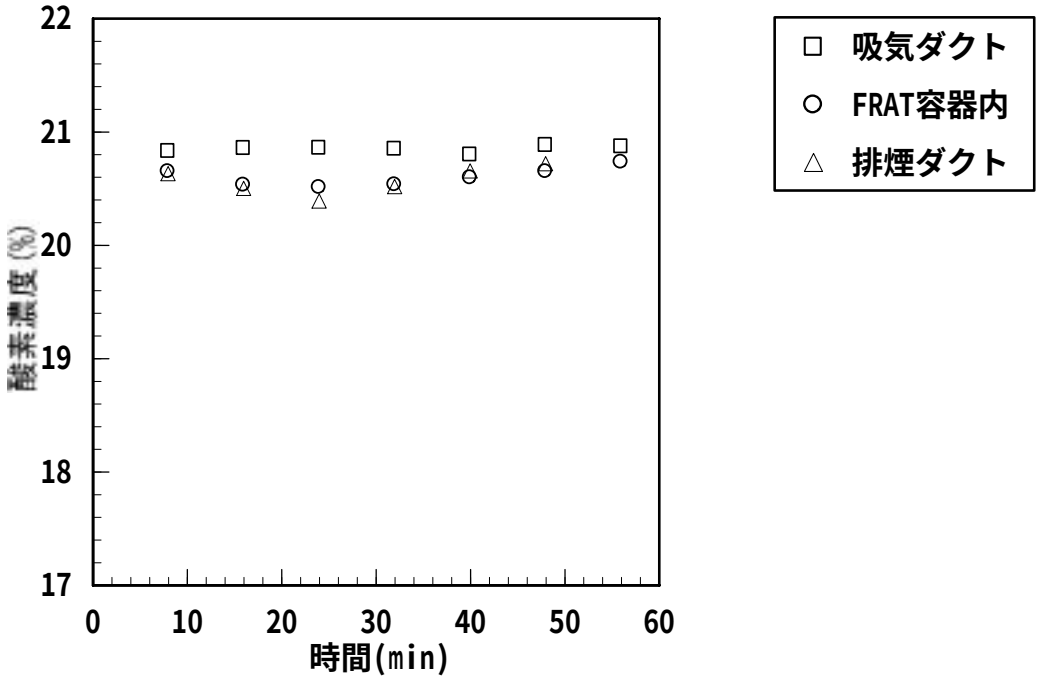
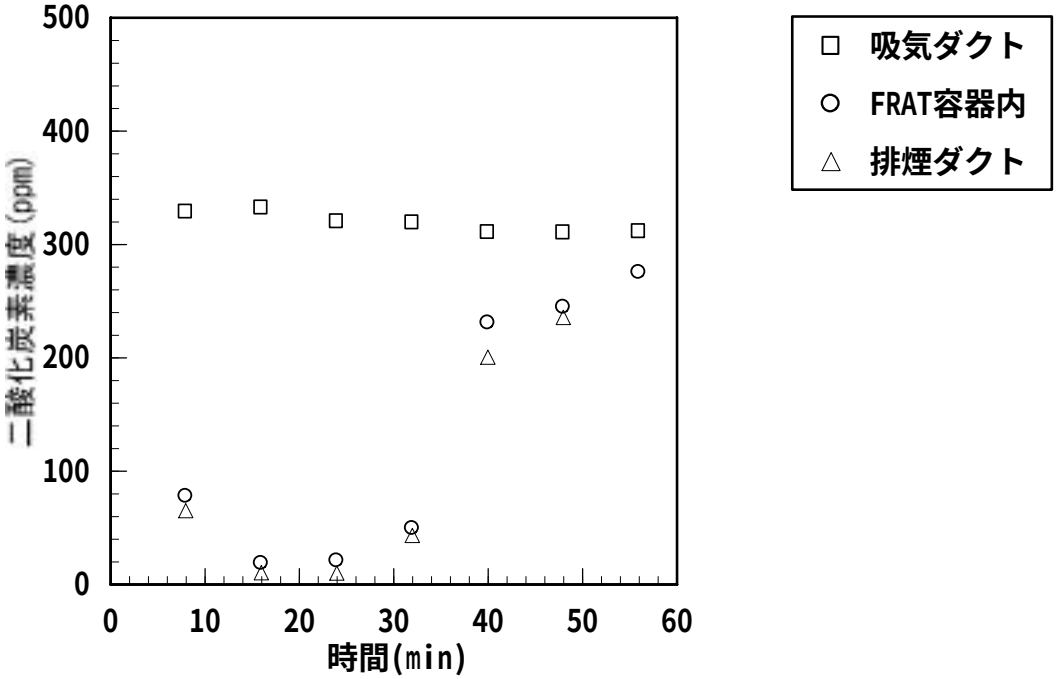


図4-4　Run-F7-4雰囲気湿度の時間変化

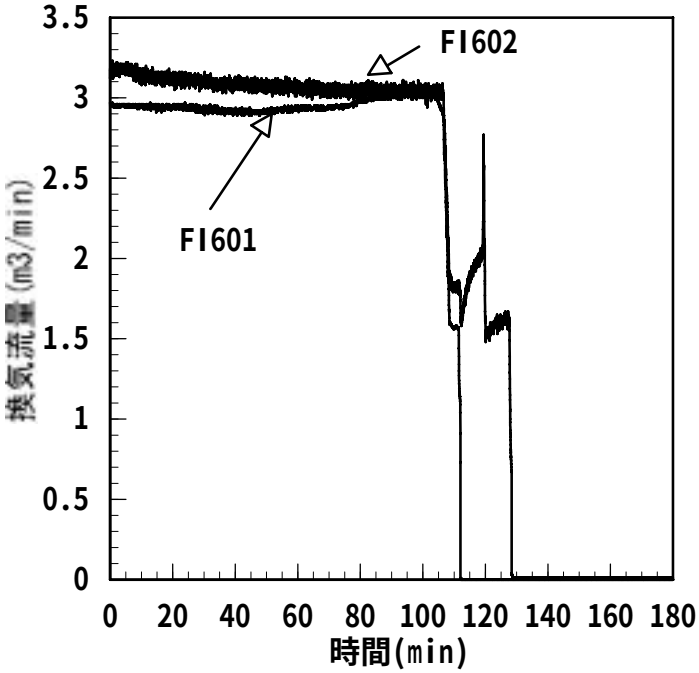


Run-F7-4ガスサンプリング酸素濃度変化

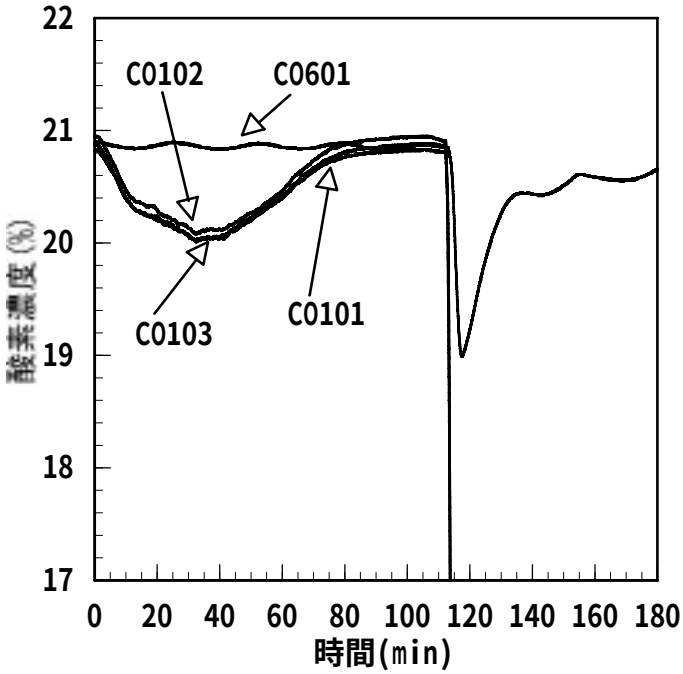


Run-F7-4ガスサンプリング二酸化炭素濃度変化

図4-5　Run-F7-4ガスサンプリング分析結果



Run-F8-2換気流量



Run-F8-2酸素濃度変化

図4-6　Run-F8-2換気流量、酸素濃度の時間変化

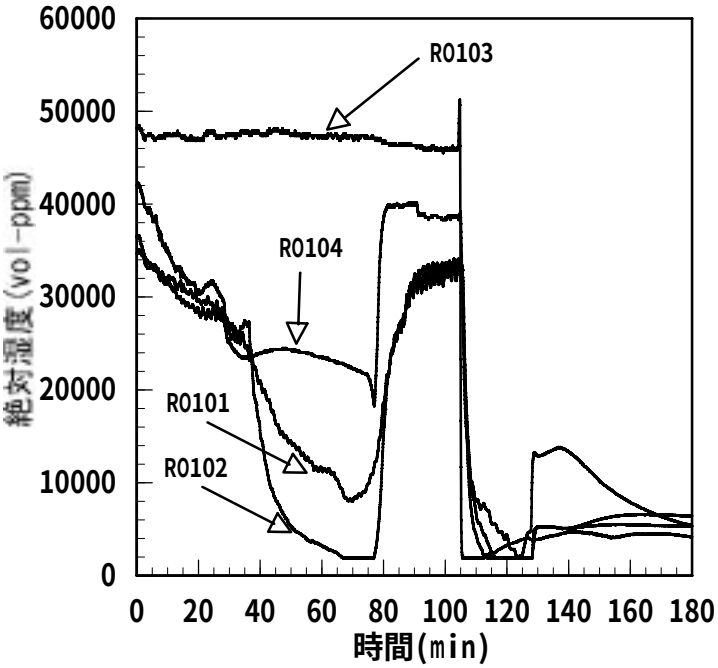
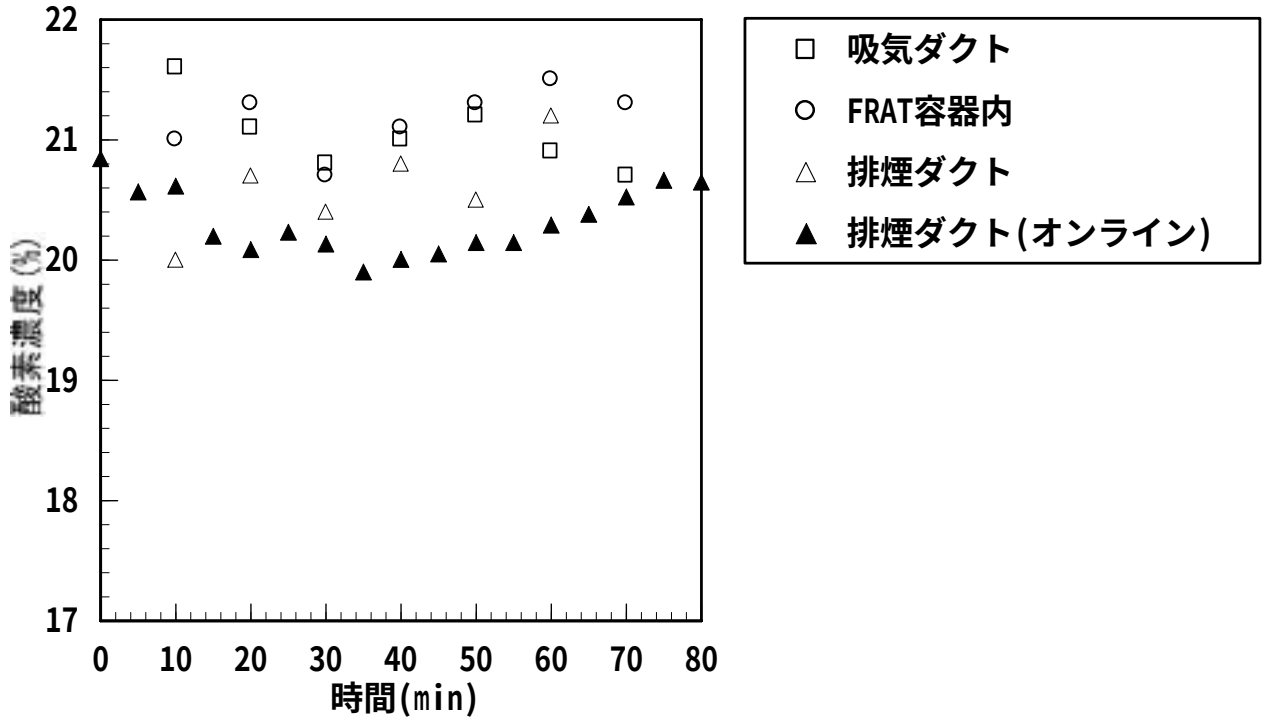
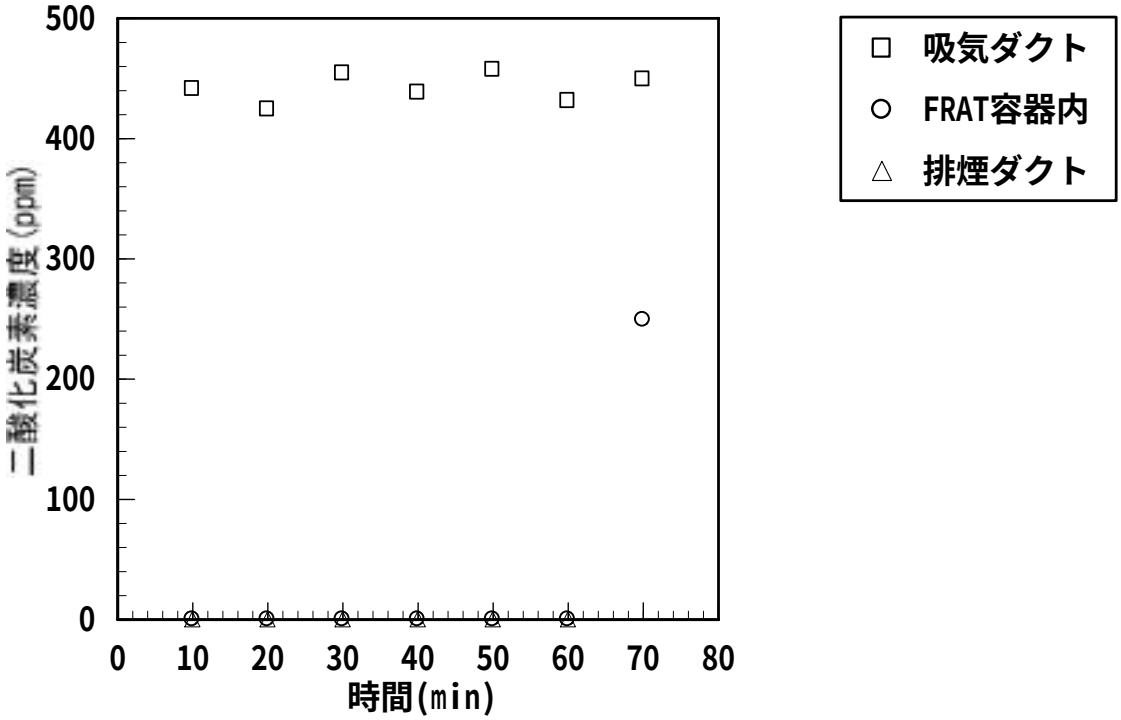


図4-7　Run-F8-2雰囲気湿度の時間変化

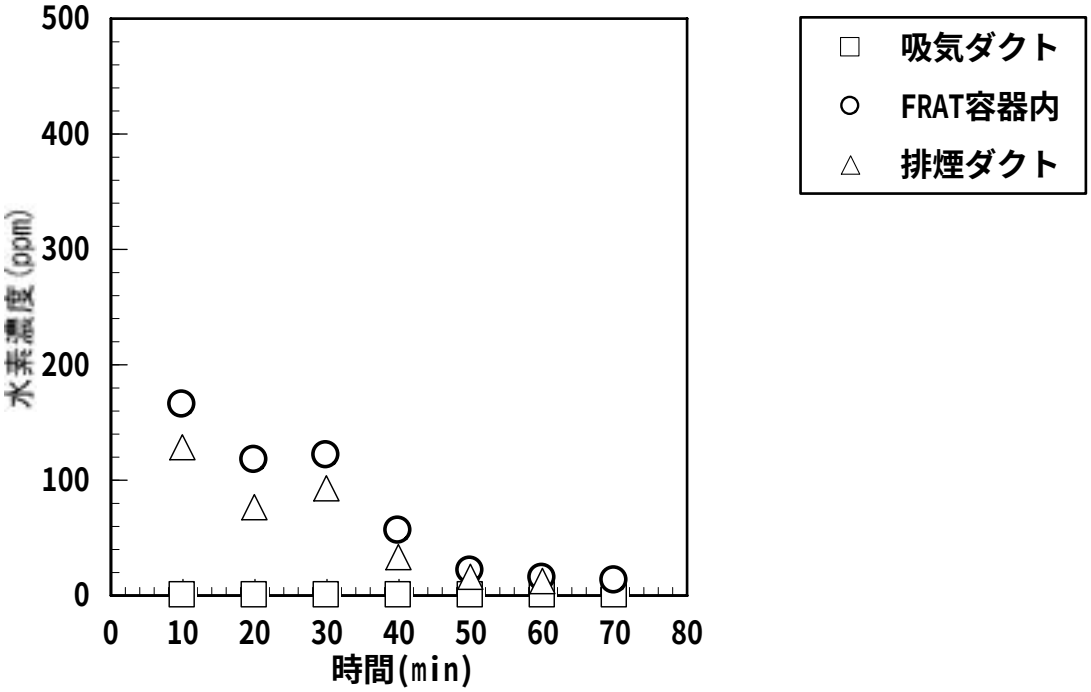


Run-F8-2ガスサンプリング酸素濃度変化



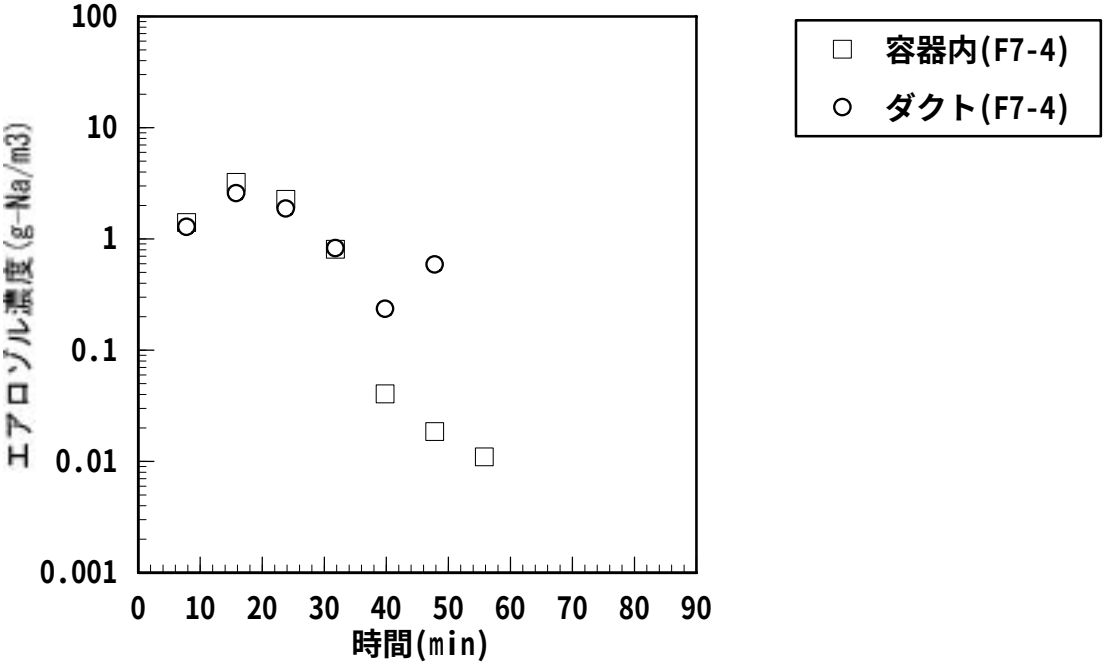
Run-F8-2ガスサンプリング二酸化炭素濃度変化

図4-8-1　Run-F8-2ガスサンプリング分析結果1

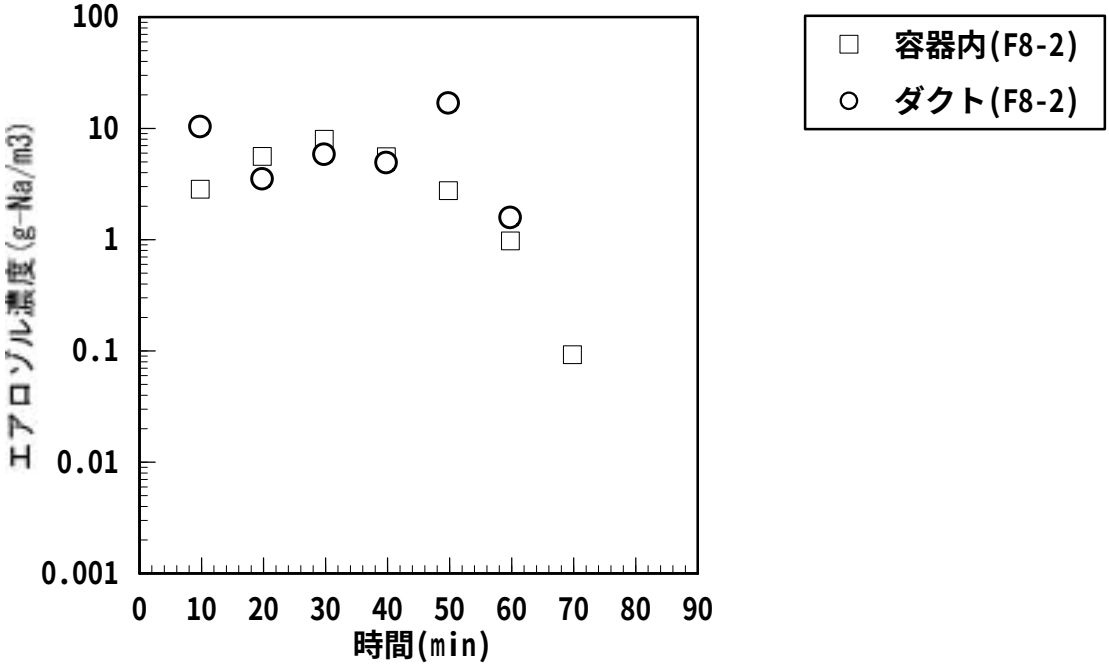


Run-F8-2ガスサンプリング水素濃度変化

図4-8-2　Run-F8-2ガスサンプリング分析結果2

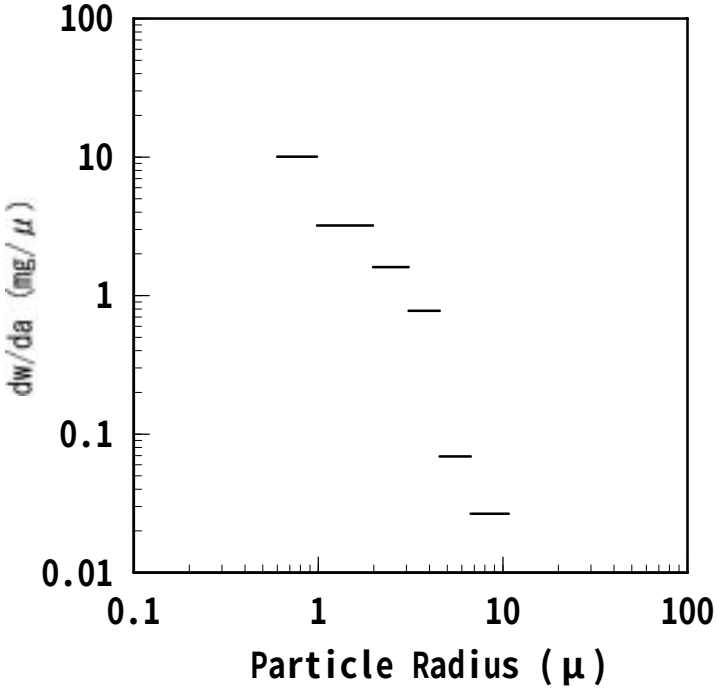


Run-F7-4エアロゾル濃度

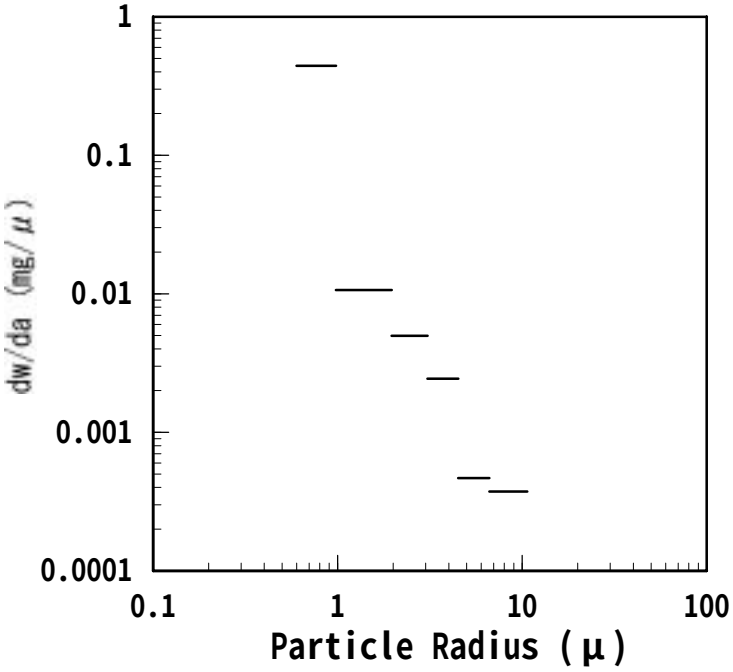


Run-8-2エアロゾル濃度

図4-9　エアロゾル濃度の時間変化



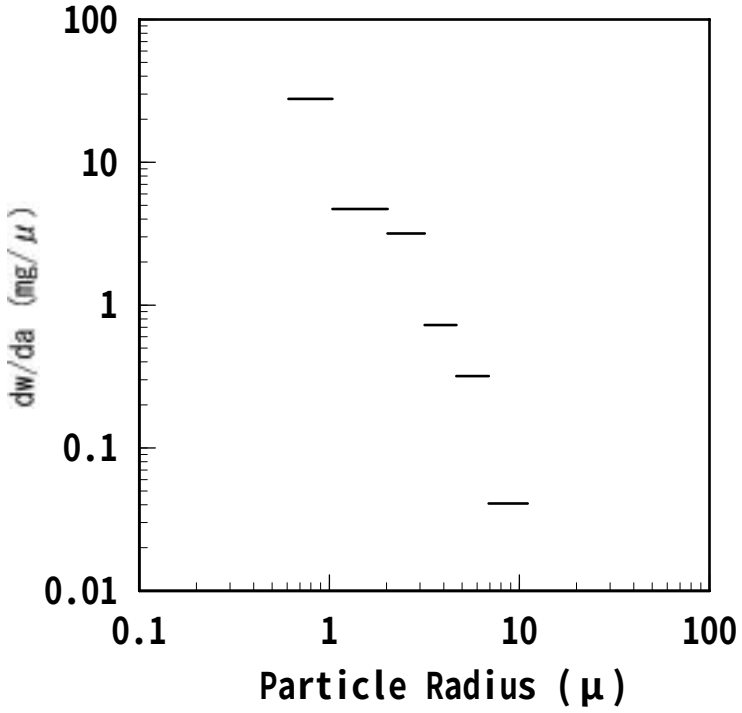
Run-F7-4 カスケードA



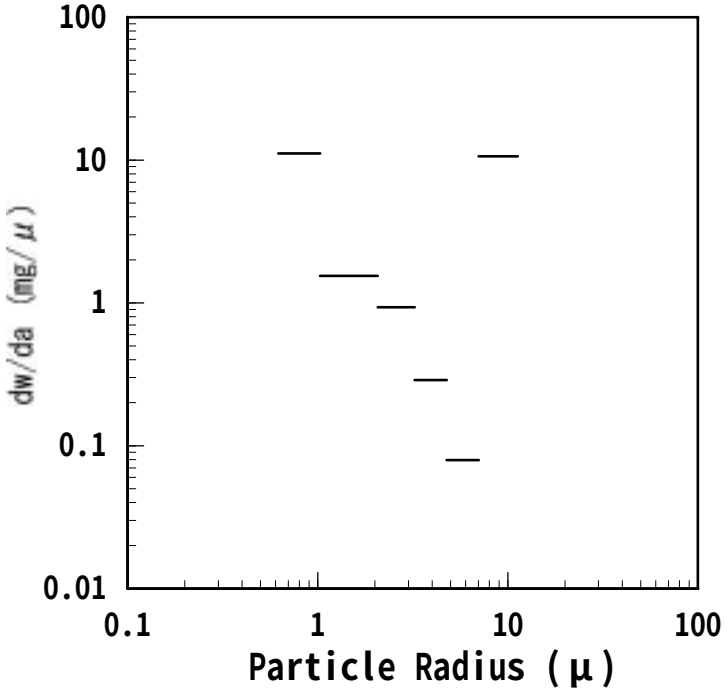
Run-F7-4 カスケードB

図4-10　Run-F7-4カスケードインパクタ

(A;漏えい開始20分～20分30秒,B;漏えい開始40分～40分30秒)



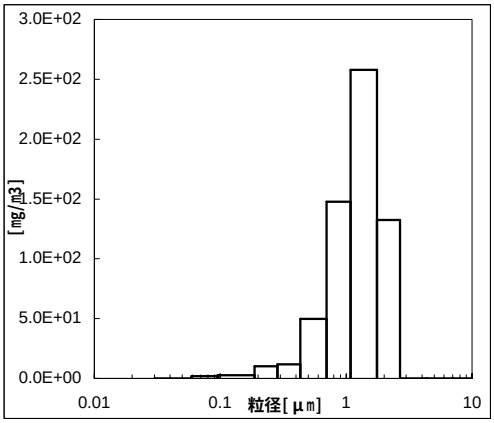
Run-F8-2 カスケードA



Run-F8-2 カスケードB

図4-11　Run-F8-2カスケードインパクタ

(A;漏えい開始20分～20分30秒,B;漏えい開始50分～50分30秒)



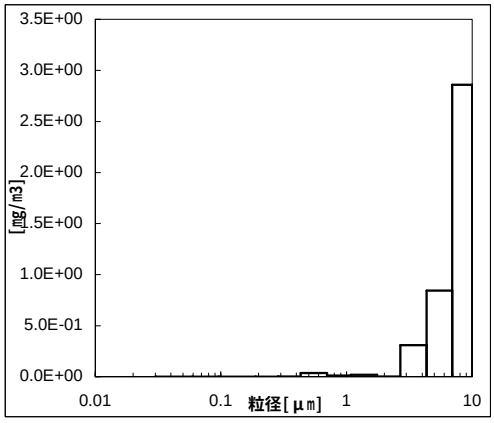
経過時間　0:00:00　～　0:45:00

※経過時間とは漏えい開始からの経過時間。
サンプリング周期は1秒であり、時々刻々の粒径分布を計算している。

ﾄｰﾀﾙ	614.45 mg/m3
標準偏差	1.691
中位径	1.173 μm

※エアロゾル濃度は、エアロゾル密度を1g/cm^{3}と仮定して導出した。

プール燃焼期間中(0～45分)の平均粒径分布

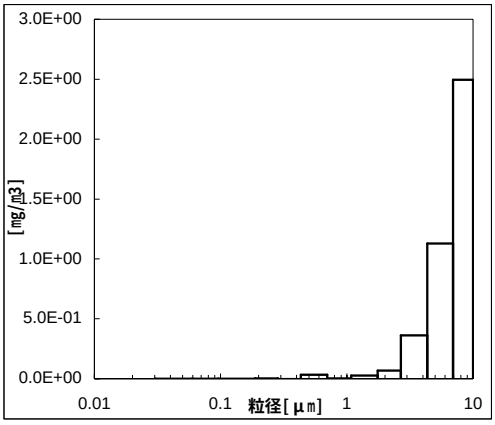


経過時間　0:00:00　～　0:00:00

ﾄｰﾀﾙ	4.09 mg/m3
標準偏差	1.505
中位径	6.842 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(0秒)

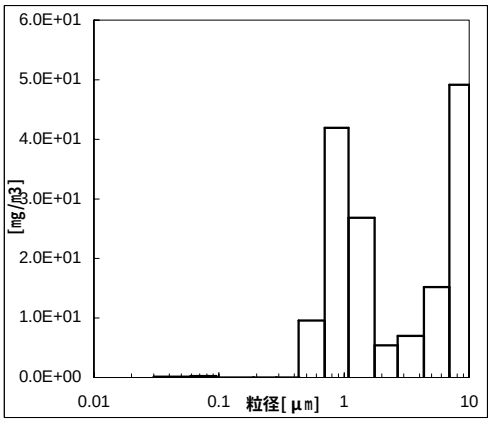
図4-12-1　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布1



経過時間　0:01:00　～　0:01:00

ﾄｰﾀﾙ　4.12 mg/m3
標準偏差　1.514
中位径　6.487 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(1分)

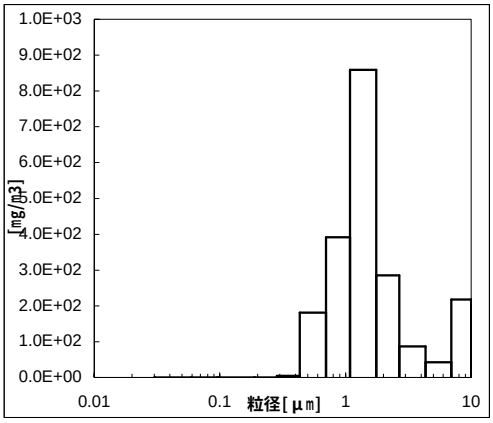


経過時間　0:05:00　～　0:05:00

ﾄｰﾀﾙ　155.48 mg/m3
標準偏差　2.798
中位径　2.444 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(5分)

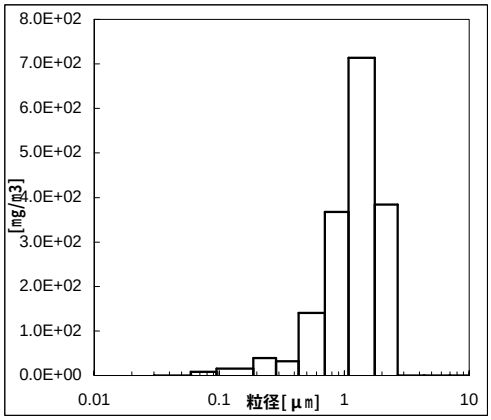
図4-12-2　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布2



経過時間　0:10:00　～　0:10:00

ﾄｰﾀﾙ　2068.93 mg/m3
標準偏差　2.083
中位径　1.599 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(10分)

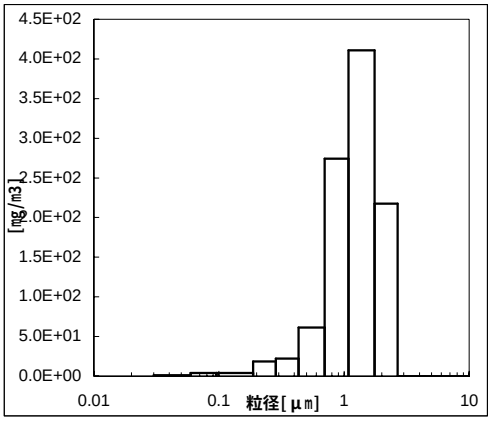


経過時間　0:15:00　～　0:15:00

ﾄｰﾀﾙ　1701.42 mg/m3
標準偏差　1.780
中位径　1.157 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(15分)

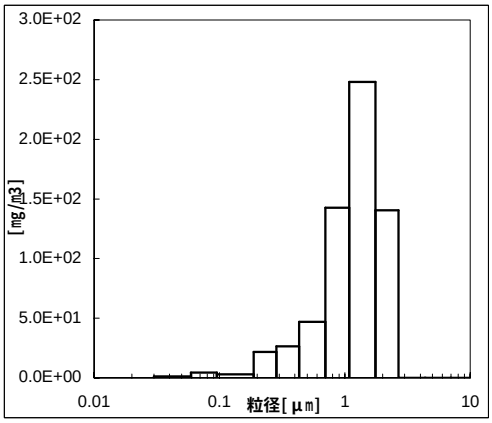
図4-12-3　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布3



経過時間　0:20:00　～　0:20:00

ﾄｰﾀﾙ　1013.72 mg/m3
標準偏差　1.715
中位径　1.164 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(20分)

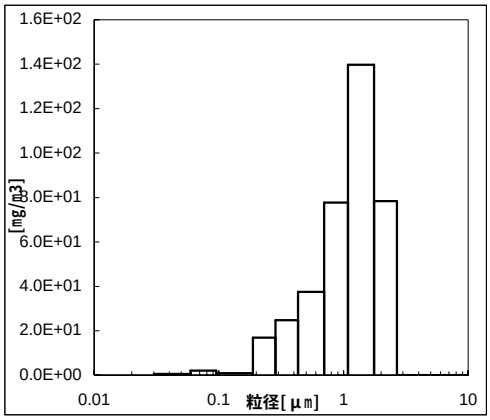


経過時間　0:25:00　～　0:25:00

ﾄｰﾀﾙ　634.83 mg/m3
標準偏差　1.879
中位径　1.100 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(25分)

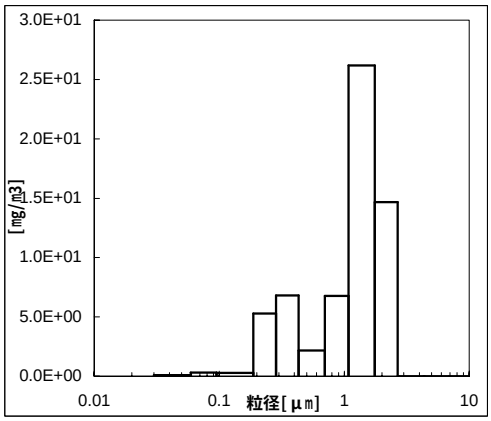
図4-12-4　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布4



経過時間　0:30:00　～　0:30:00

ﾄｰﾀﾙ　378.53 mg/m3
標準偏差　1.921
中位径　1.036 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(30分)

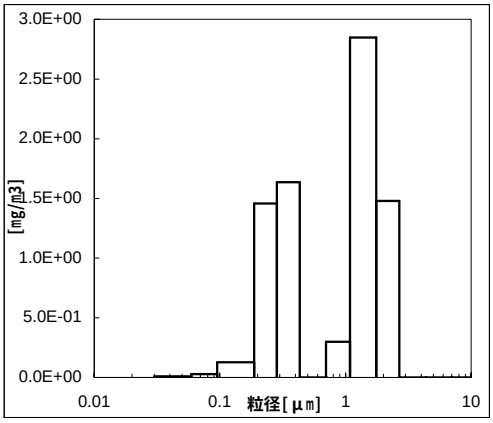


経過時間　0:35:00　～　0:35:00

ﾄｰﾀﾙ　62.63 mg/m3
標準偏差　2.127
中位径　1.014 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(35分)

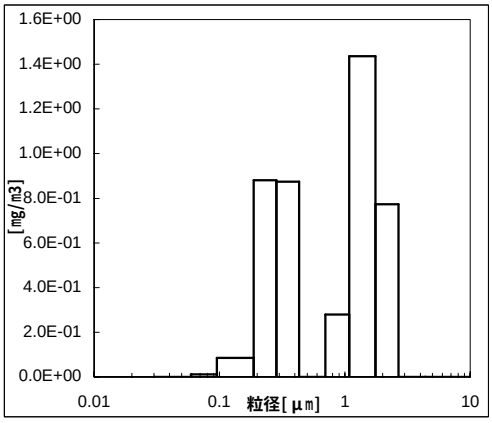
図4-12-5　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布5



経過時間　0:40:00　～　0:40:00

ﾄｰﾀﾙ　7.89 mg/m3
標準偏差　2.449
中位径　0.757 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(40分)

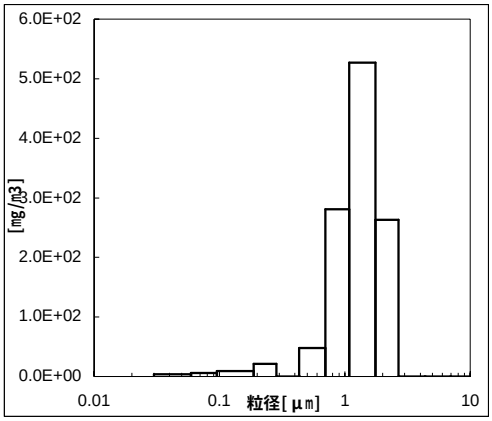


経過時間　0:45:00　～　0:45:00

ﾄｰﾀﾙ　4.34 mg/m3
標準偏差　2.441
中位径　0.726 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(45分)

図4-12-6　Run-F7-4 ELPIエアロゾル粒径分布6

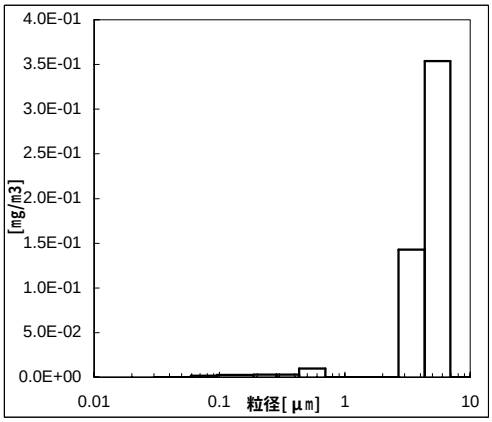


経過時間　0:00:00　～　0:49:57

※49分57秒がELPIの収録終了時間。
約50分でエアロゾルの発生は終息傾向であった。

ﾄｰﾀﾙ	1159.38 mg/m3
標準偏差	1.733
中位径	1.218 μm

プール燃焼期間中(0～約50分)の平均粒径分布

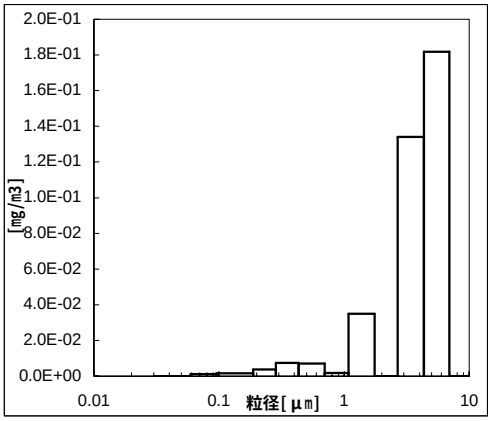


経過時間　0:00:00　～　0:00:00

ﾄｰﾀﾙ	0.52 mg/m3
標準偏差	1.769
中位径	4.324 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(0秒)

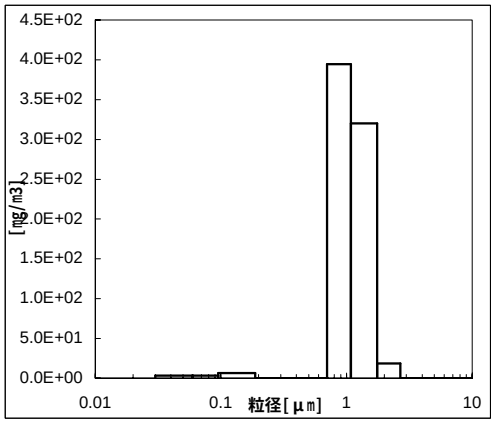
図4-13-1　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布1



経過時間　0:01:00　～　0:01:00

ﾄｰﾀﾙ　0.37 mg/m3
標準偏差　2.059
中位径　3.440 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(1分)

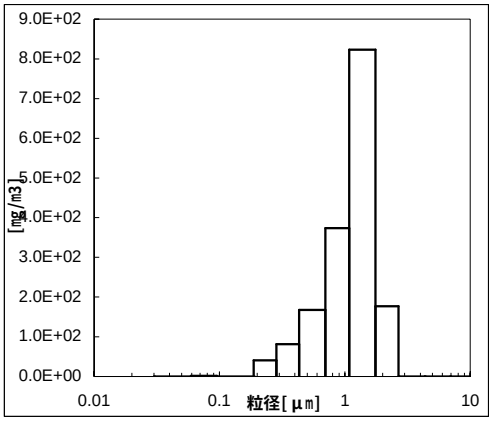


経過時間　0:05:00　～　0:05:00

ﾄｰﾀﾙ　746.22 mg/m3
標準偏差　1.522
中位径　1.043 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(5分)

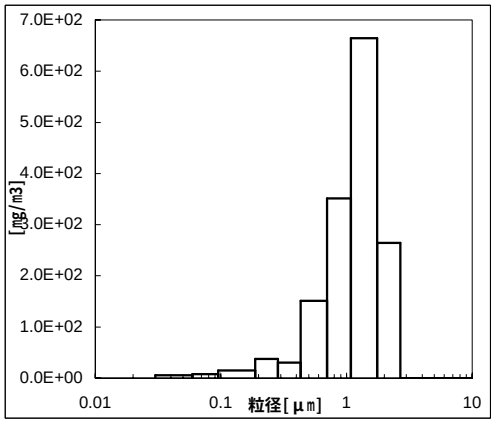
図4-13-2　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布2



経過時間　0:10:00　～　0:10:00

ﾄｰﾀﾙ　1665.14 mg/m3
標準偏差　1.671
中位径　1.063 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(10分)

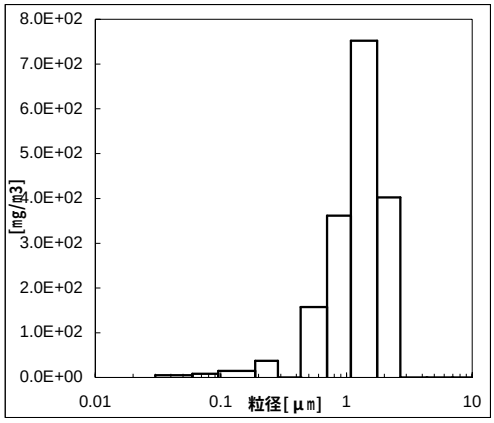


経過時間　0:15:00　～　0:15:00

ﾄｰﾀﾙ　1528.07 mg/m3
標準偏差　1.835
中位径　1.085 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(15分)

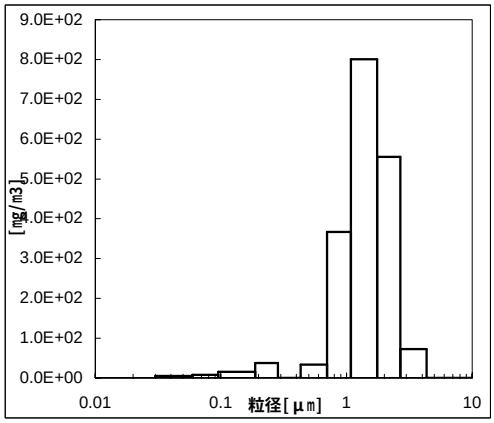
図4-13-3　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布3



経過時間　0:20:00　～　0:20:00

ﾄｰﾀﾙ　1739.95 mg/m3
標準偏差　1.787
中位径　1.179 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(20分)

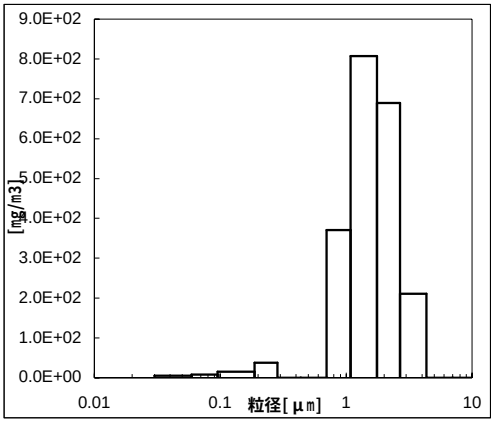


経過時間　0:25:00　～　0:25:00

ﾄｰﾀﾙ　1895.91 mg/m3
標準偏差　1.768
中位径　1.360 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(25分)

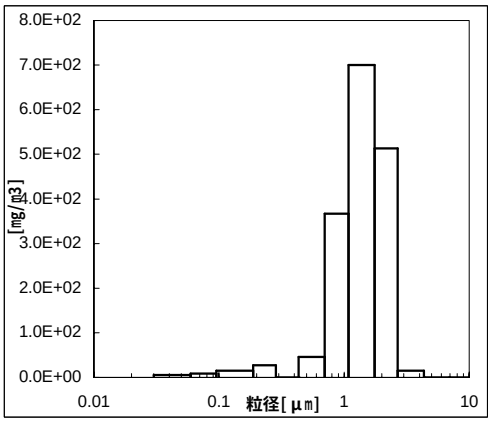
図4-13-4　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布4



経過時間　0:30:00　～　0:30:00

ﾄｰﾀﾙ　2144.54 mg/m3
標準偏差　1.780
中位径　1.506 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(30分)

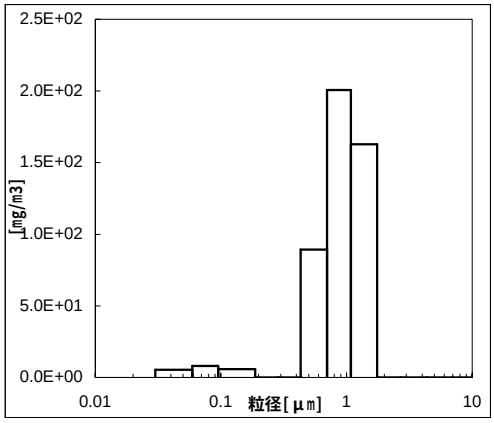


経過時間　0:35:00　～　0:35:00

ﾄｰﾀﾙ　1695.64 mg/m3
標準偏差　1.751
中位径　1.308 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(35分)

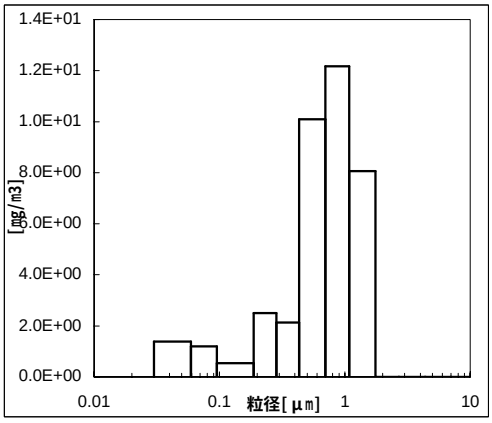
図4-13-5　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布5



経過時間　0:40:00　～　0:40:00

ﾄｰﾀﾙ　472.10 mg/m3
標準偏差　1.830
中位径　0.846 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(40分)

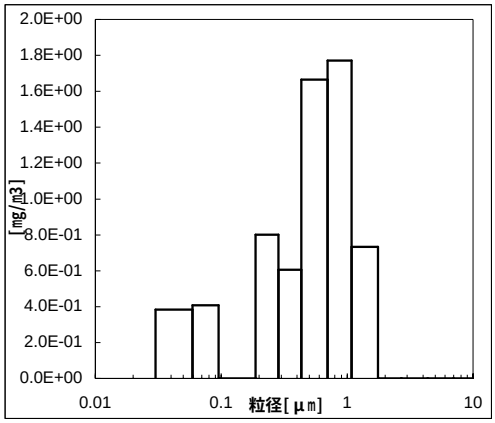


経過時間　0:45:00　～　0:45:00

ﾄｰﾀﾙ　38.10 mg/m3
標準偏差　2.301
中位径　0.598 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(45分)

図4-13-6　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布6

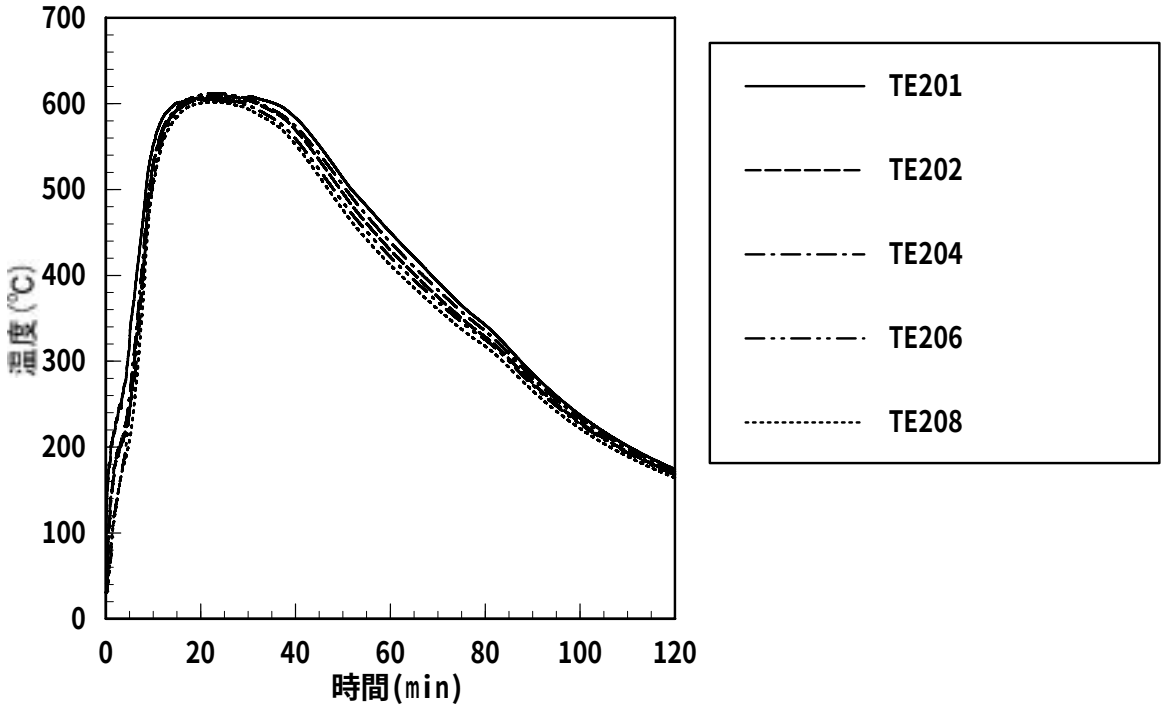


経過時間　0:49:57　～　0:49:57

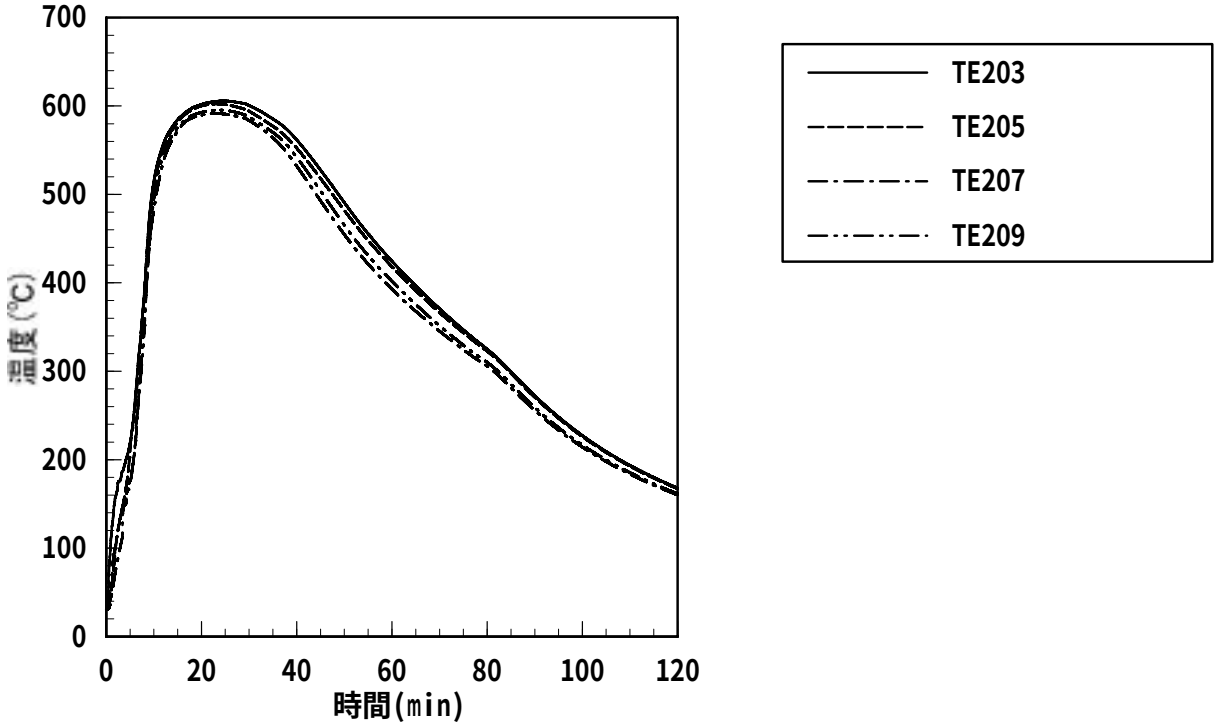
ﾄｰﾀﾙ　6.37 mg/m3
標準偏差　2.559
中位径　0.450 μm

プール燃焼期間中の粒径分布(49分57秒)

図4-13-7　Run-F8-2 ELPIエアロゾル粒径分布7

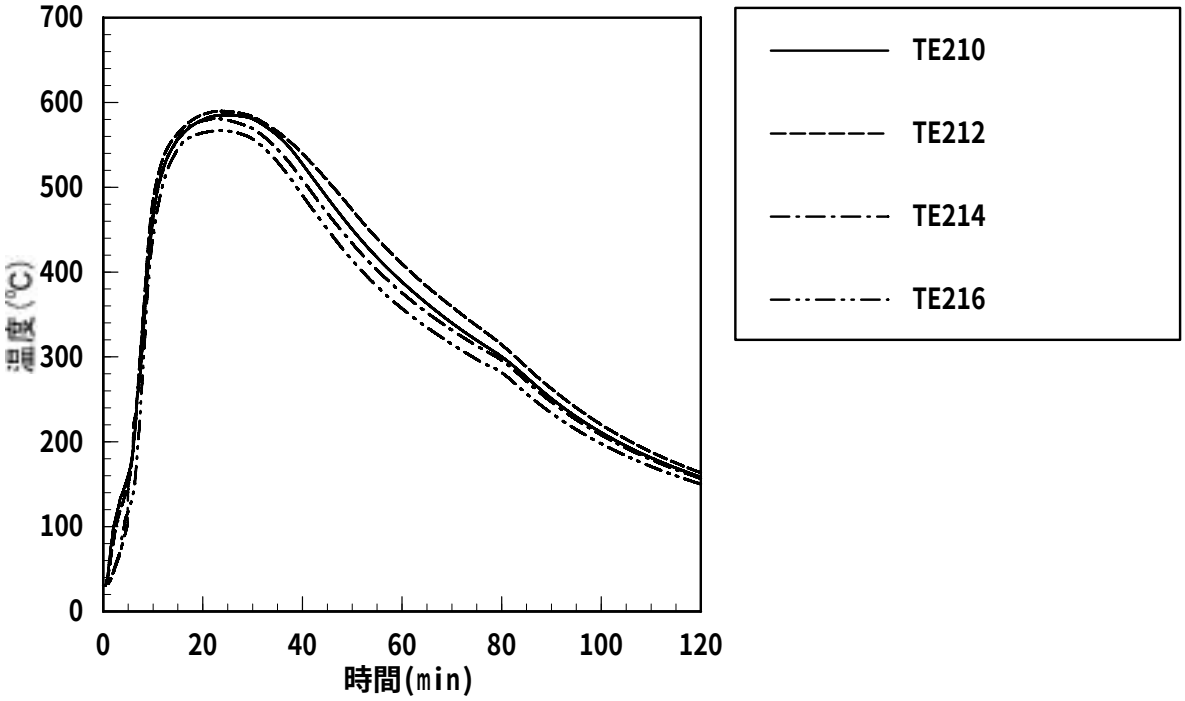


受け皿中心から５０㎜以内

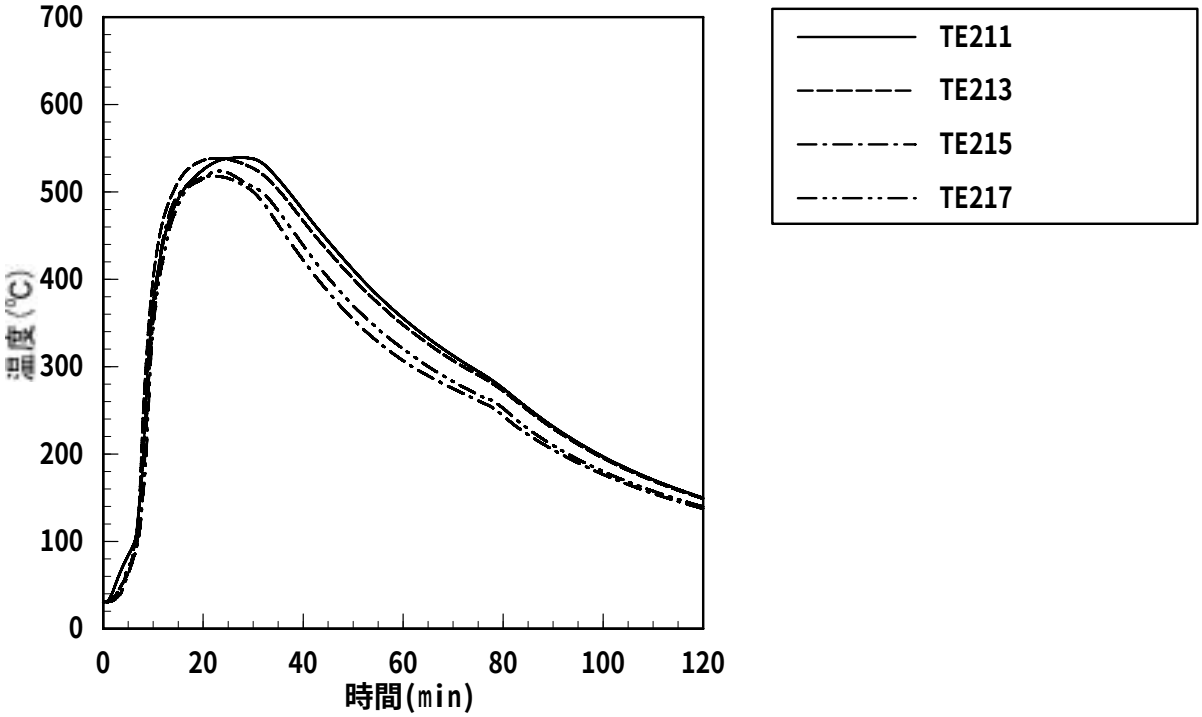


受け皿中心から７1㎜

図4-14-1　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化１

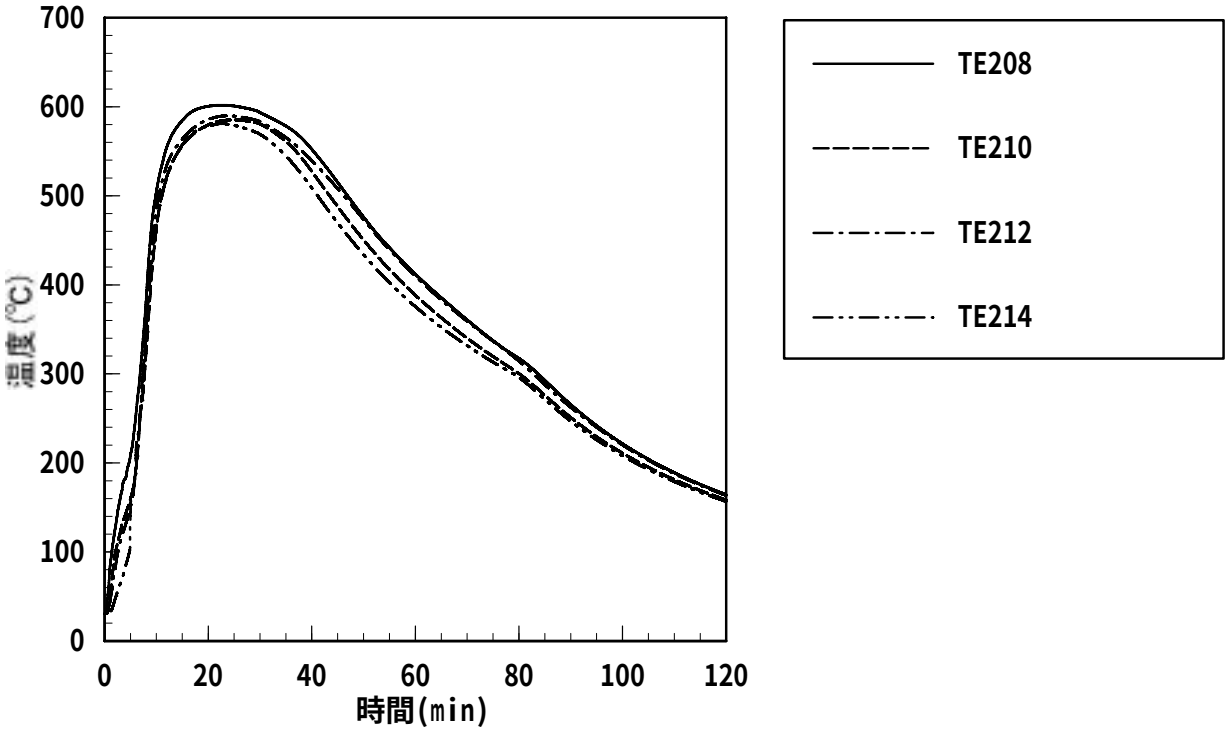


受け皿中心から１００㎜

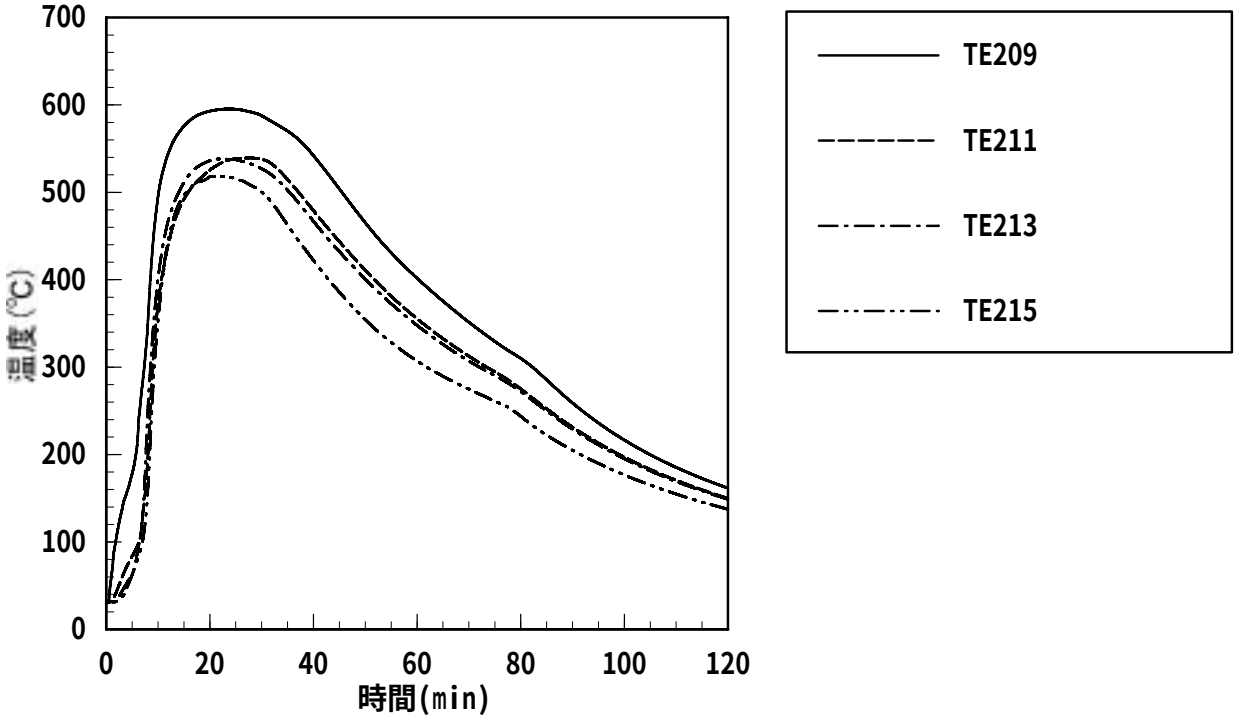


受け皿中心から１４１㎜

図4-14-2　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化２

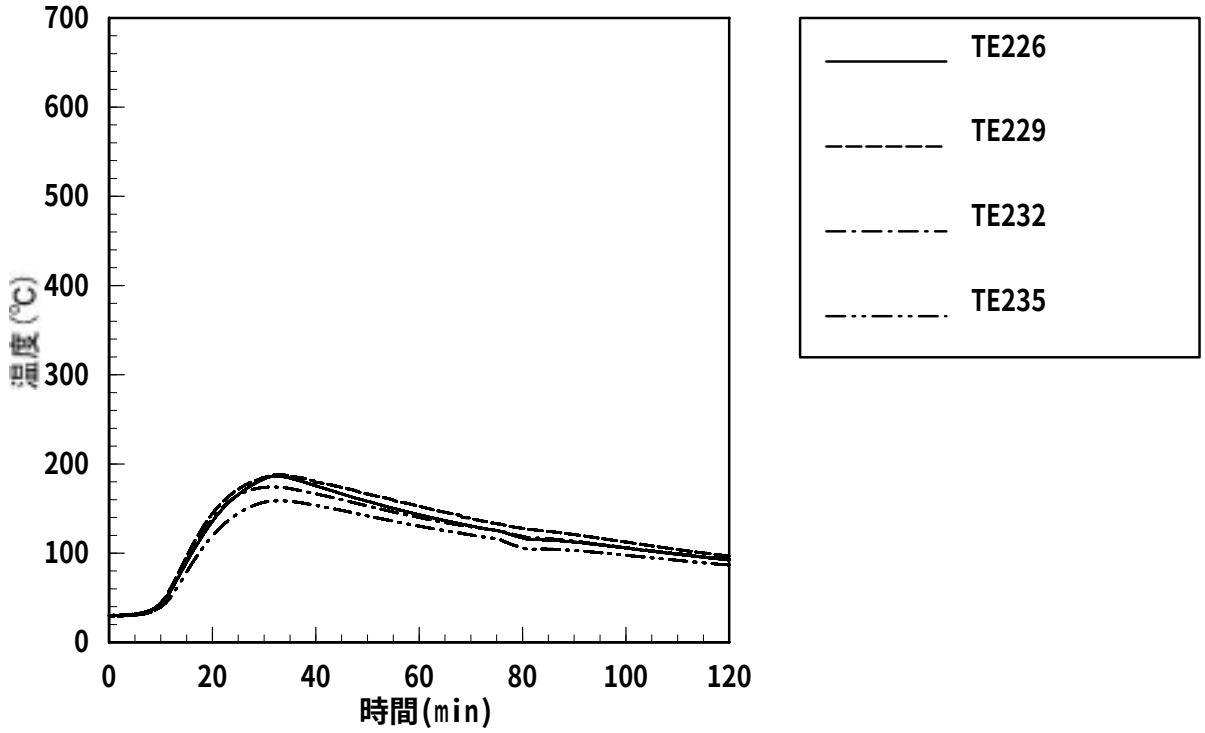


受け皿中心から２００㎜

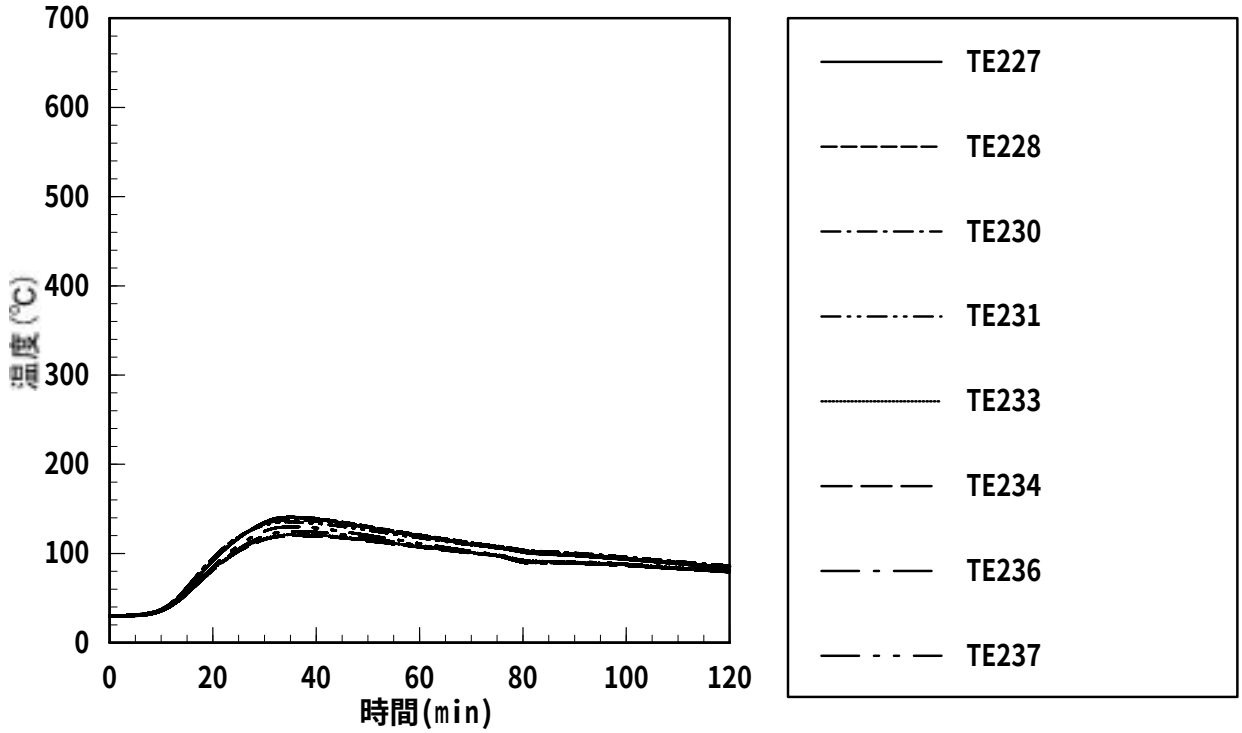


受け皿中心から２８３㎜

図4-14-3 Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化３

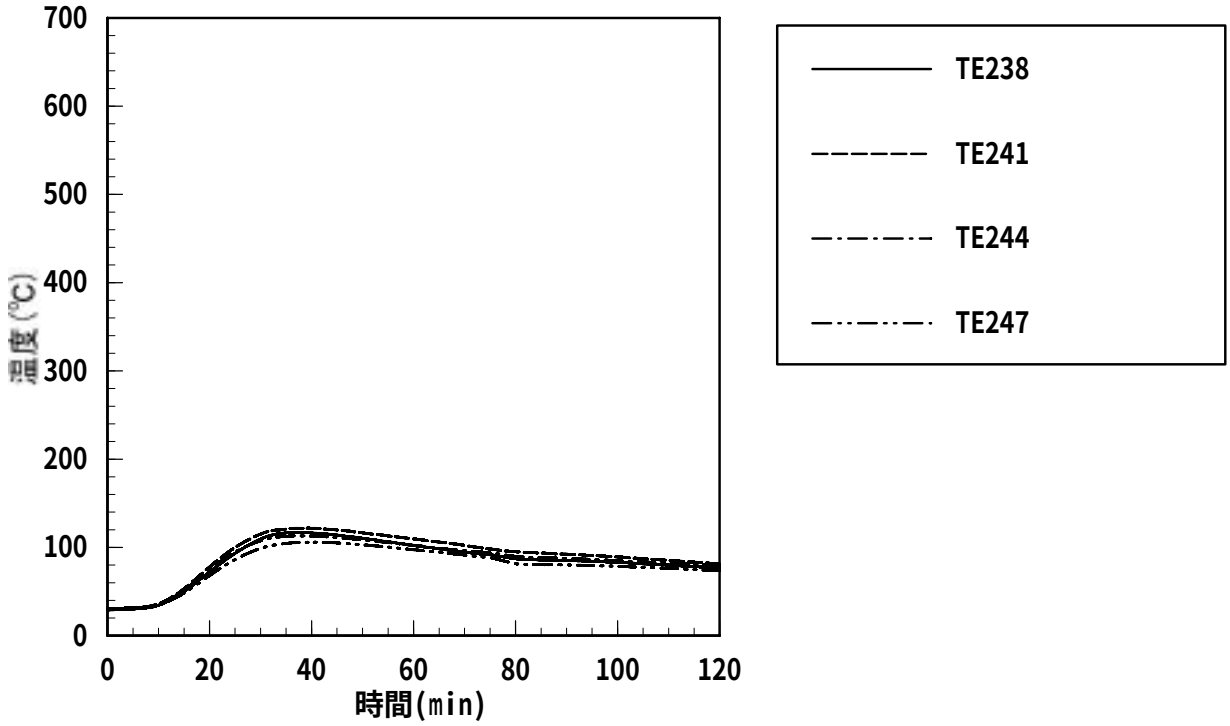


受け皿中心から３００㎜

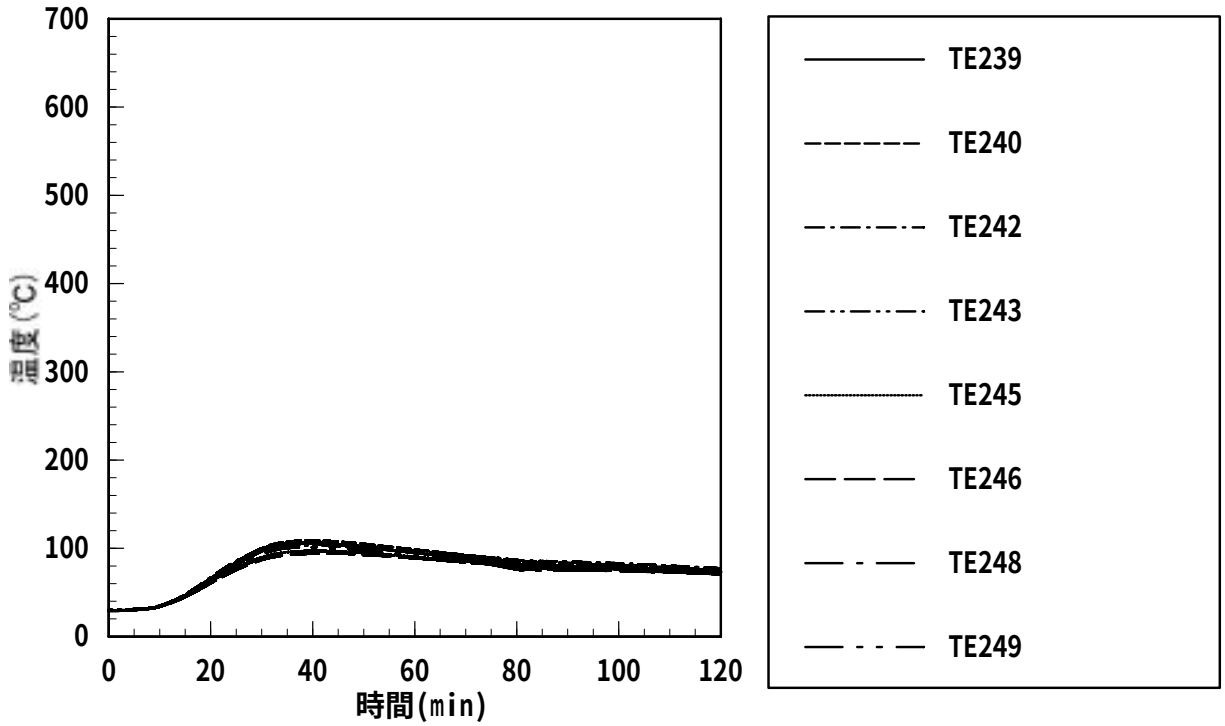


受け皿中心から３６１㎜

図4-14-4 Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化４



受け皿中心から４００㎜



受け皿中心から４４７㎜

図4-14-5 Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化５

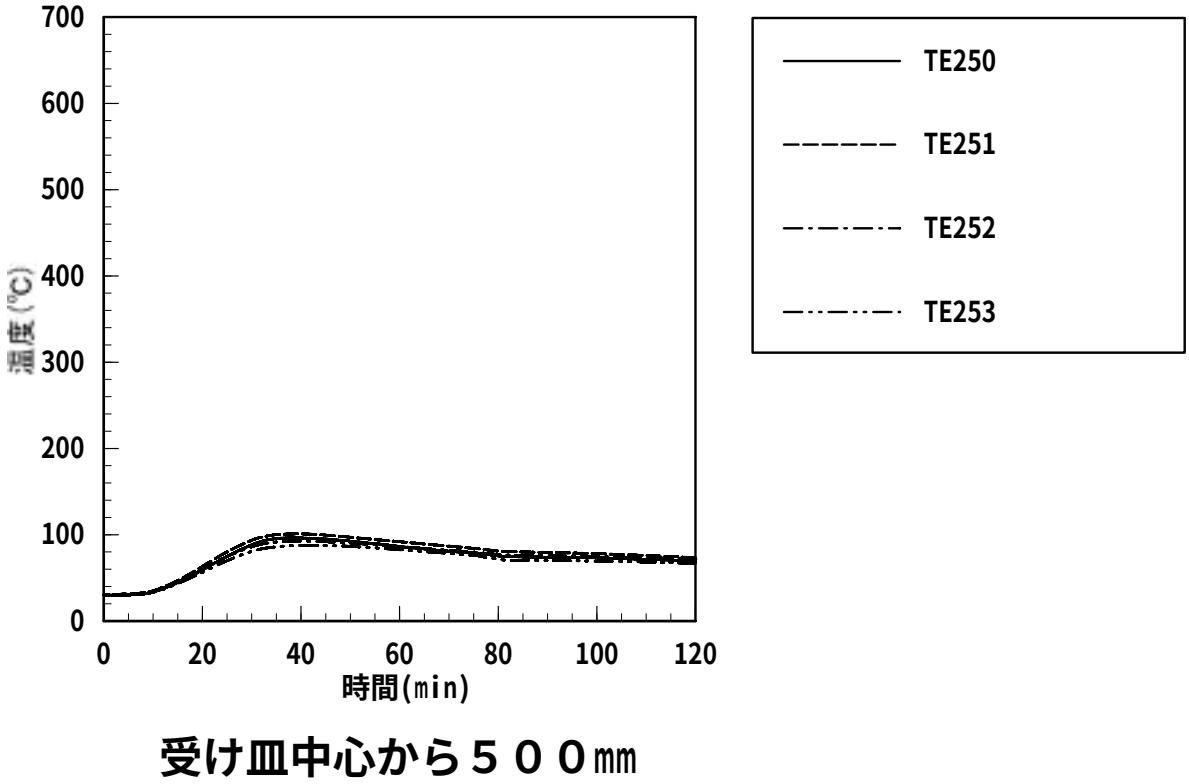
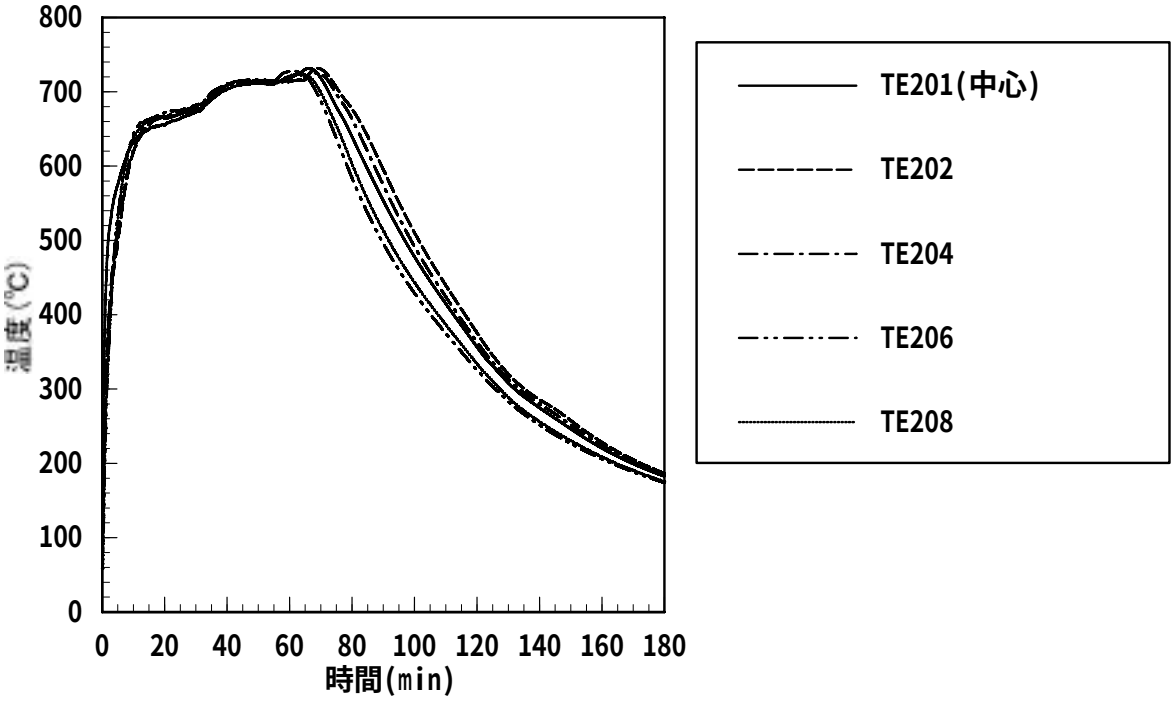
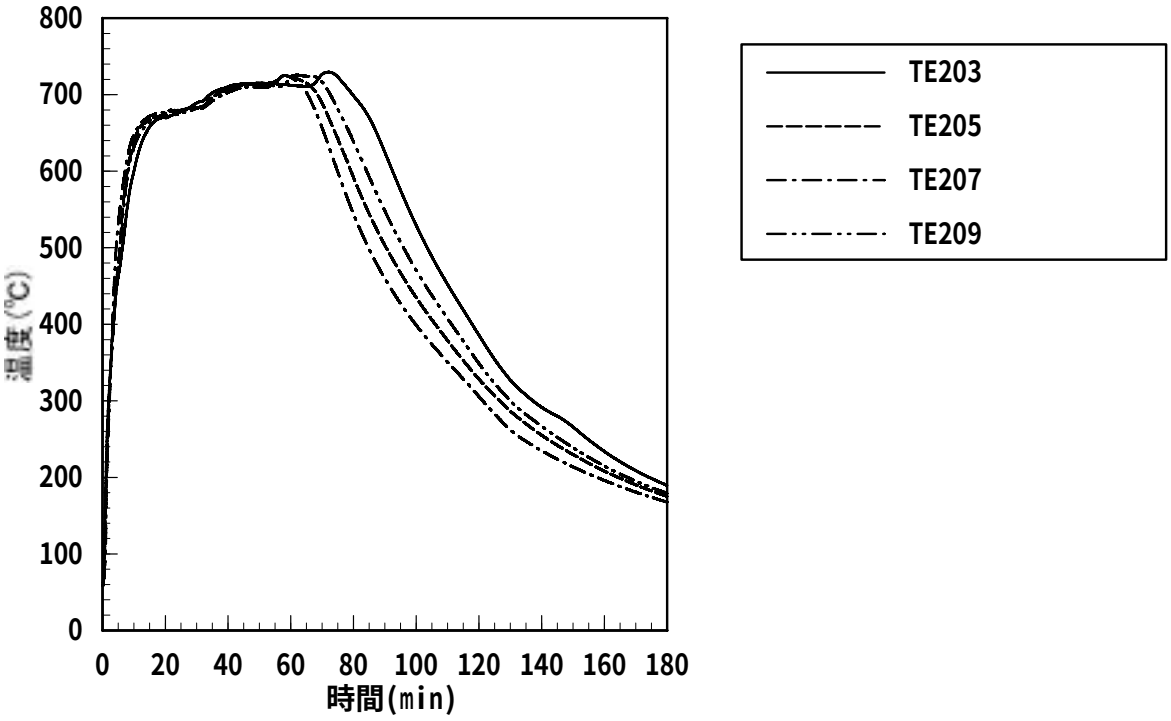


図4-14-6　Run-F7-4受け皿裏面温度の時間変化６

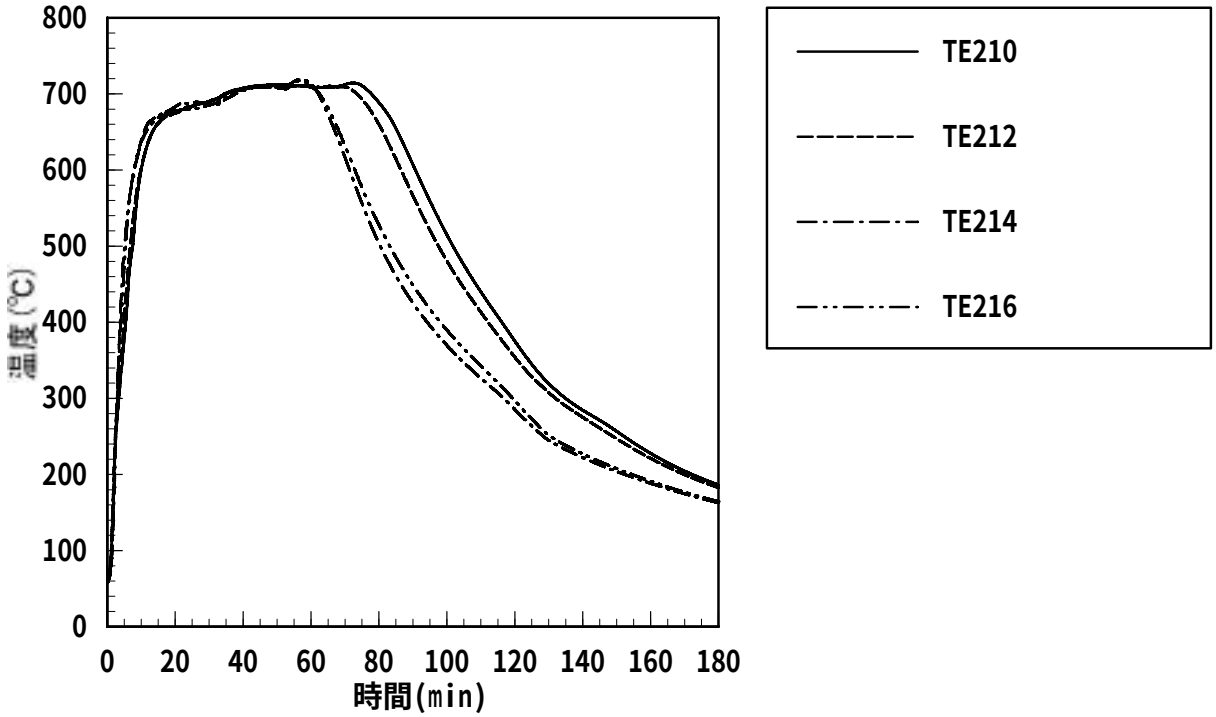


受け皿中心から５０㎜以内

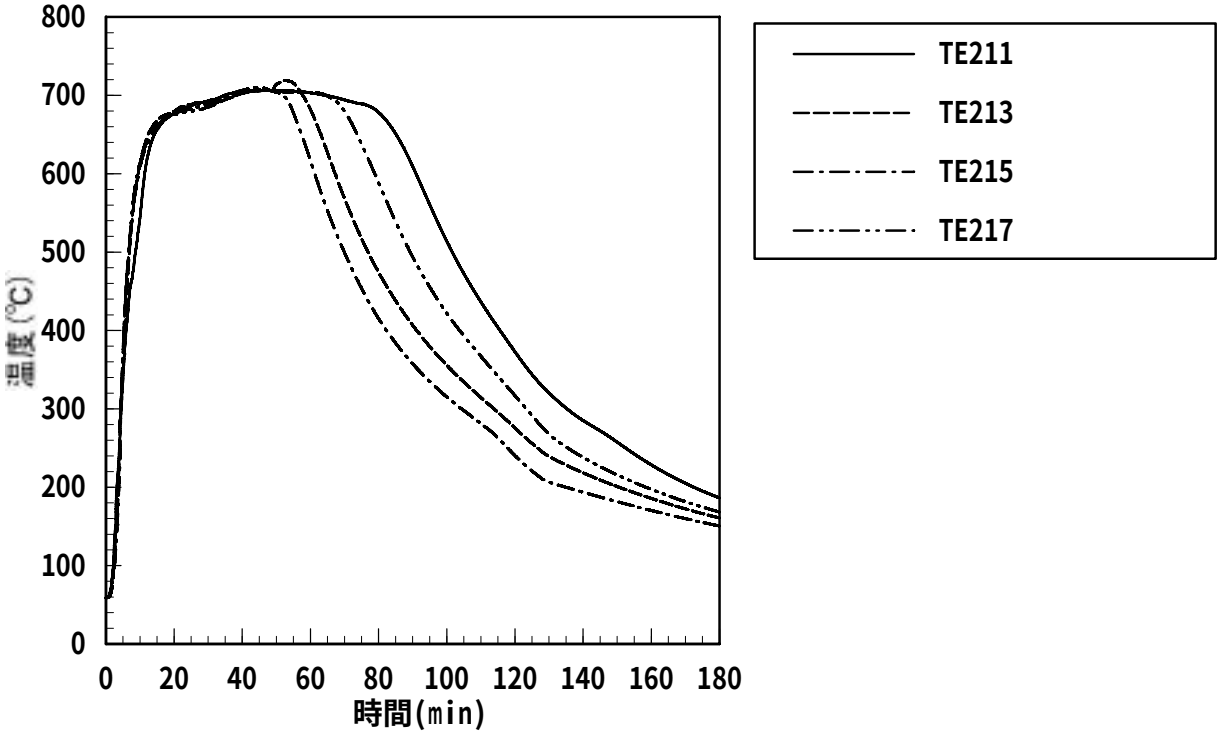


受け皿中心から７1㎜

図4-15-1　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化１

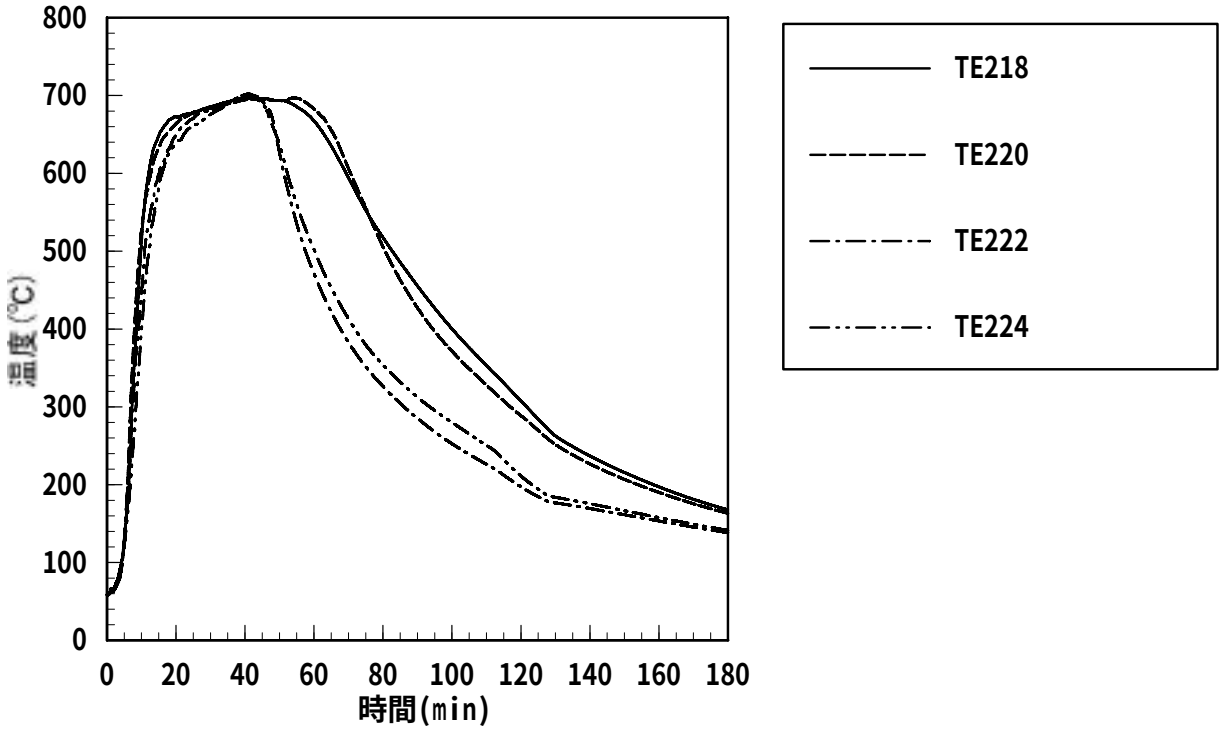


受け皿中心から１００㎜

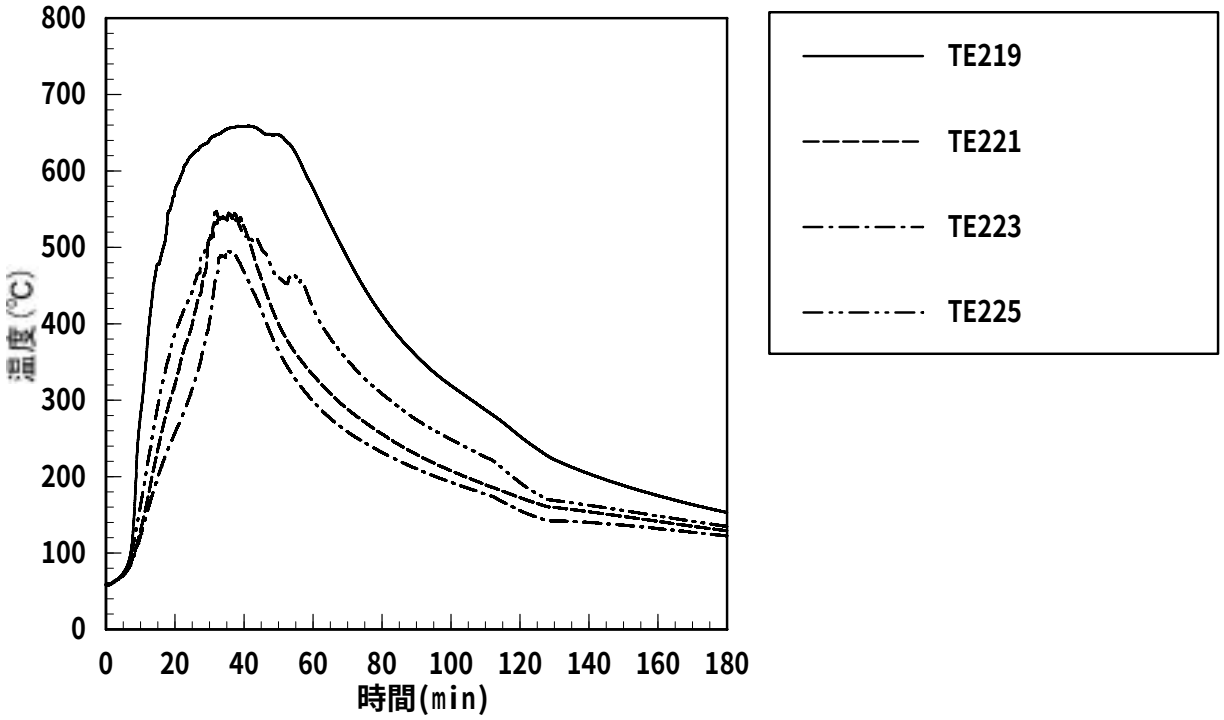


受け皿中心から１４１㎜

図4-15-2　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化２

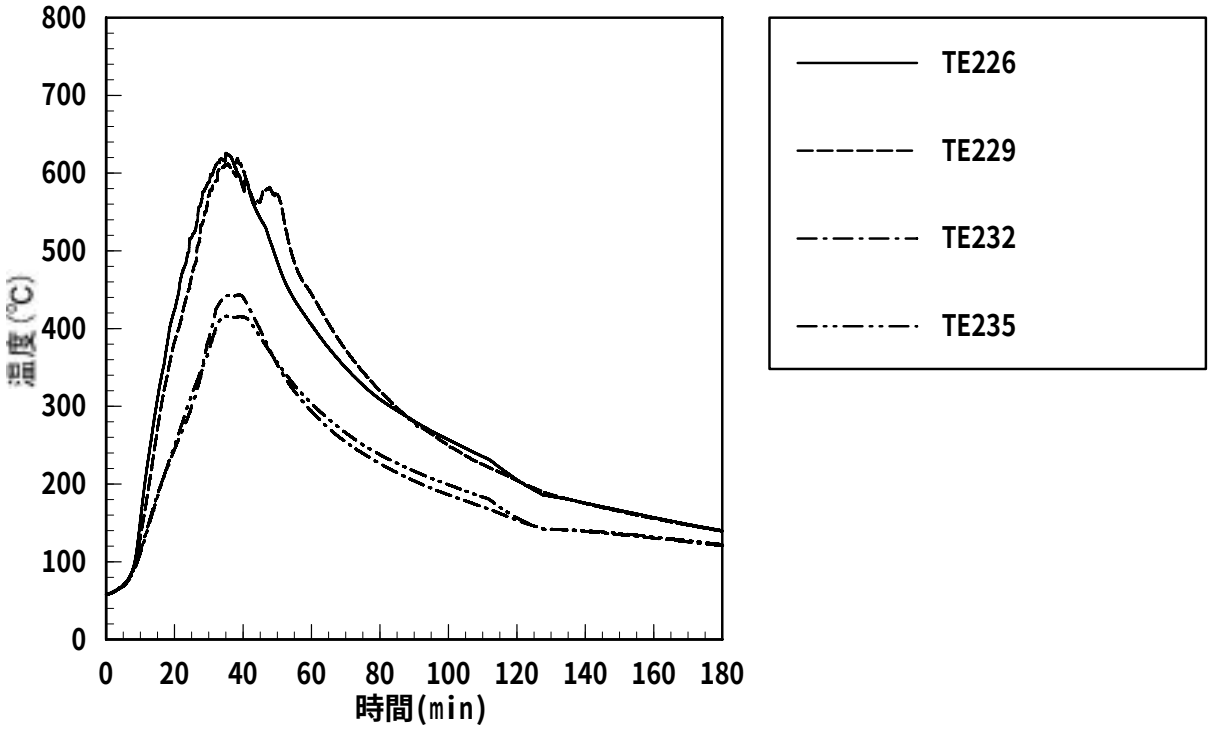


受け皿中心から２００㎜

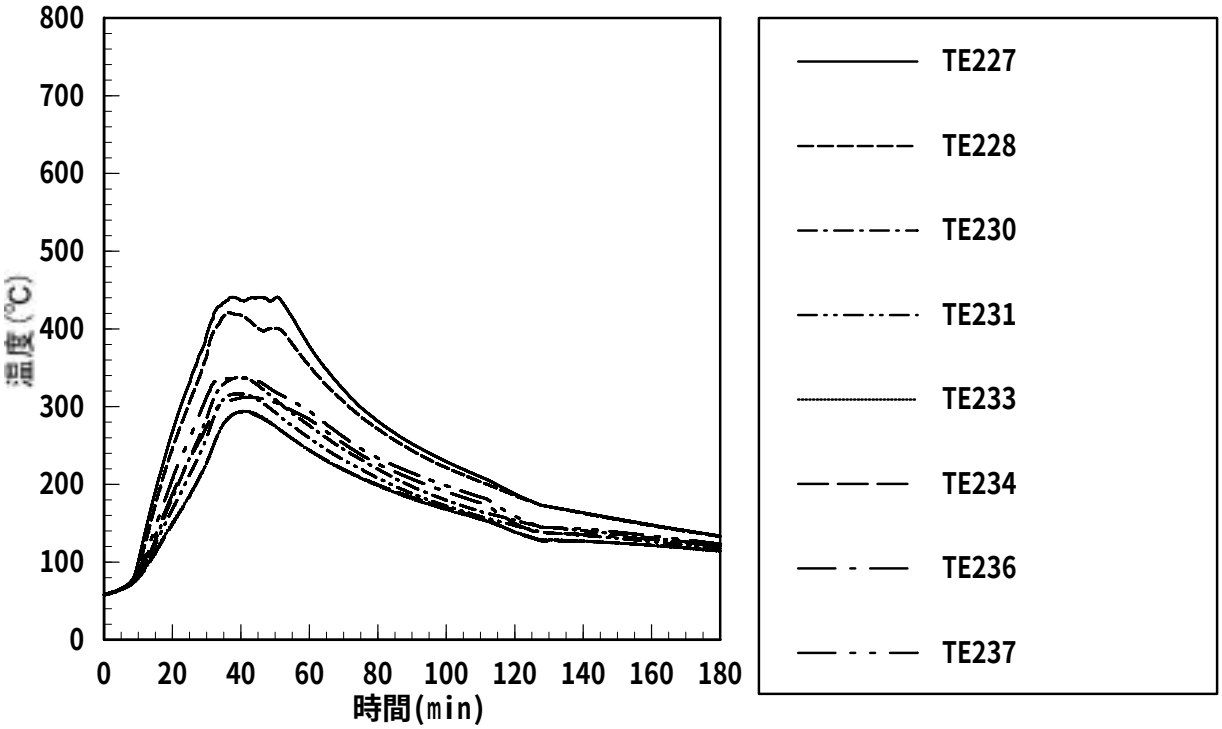


受け皿中心から２８３㎜

図4-15-3 Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化３

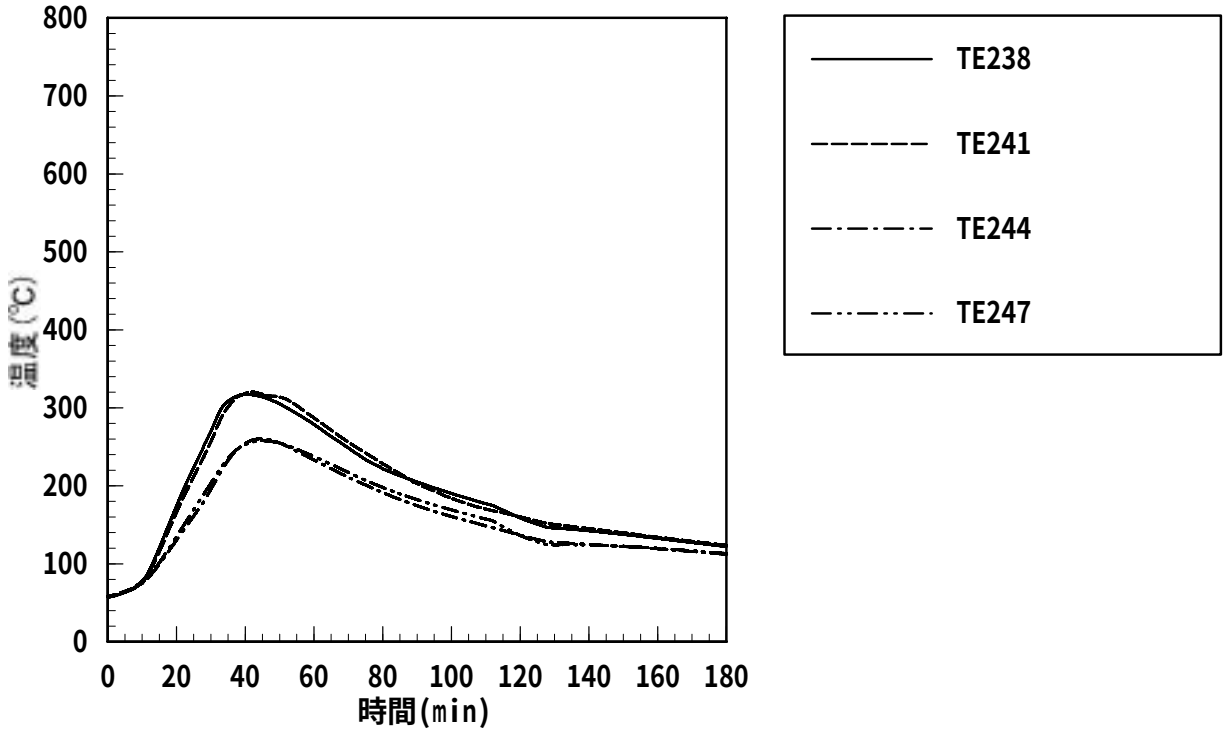


受け皿中心から３００㎜

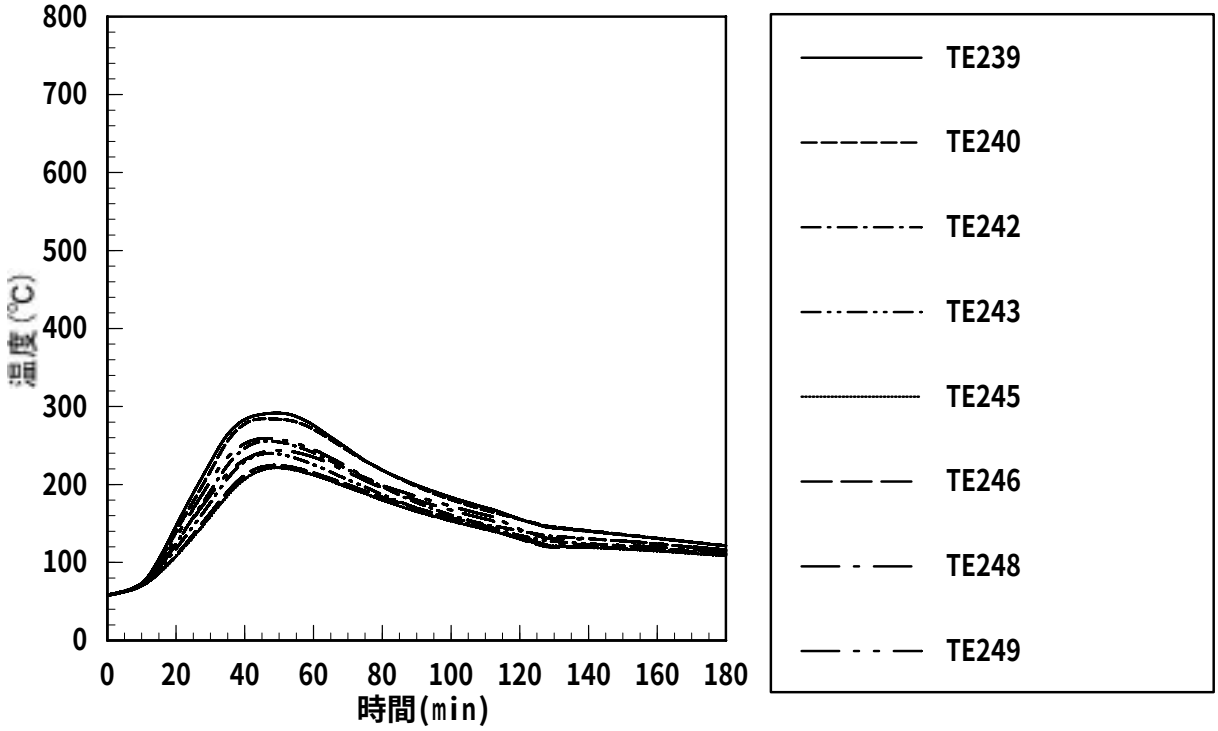


受け皿中心から３６１㎜

図4-15-4 Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化４

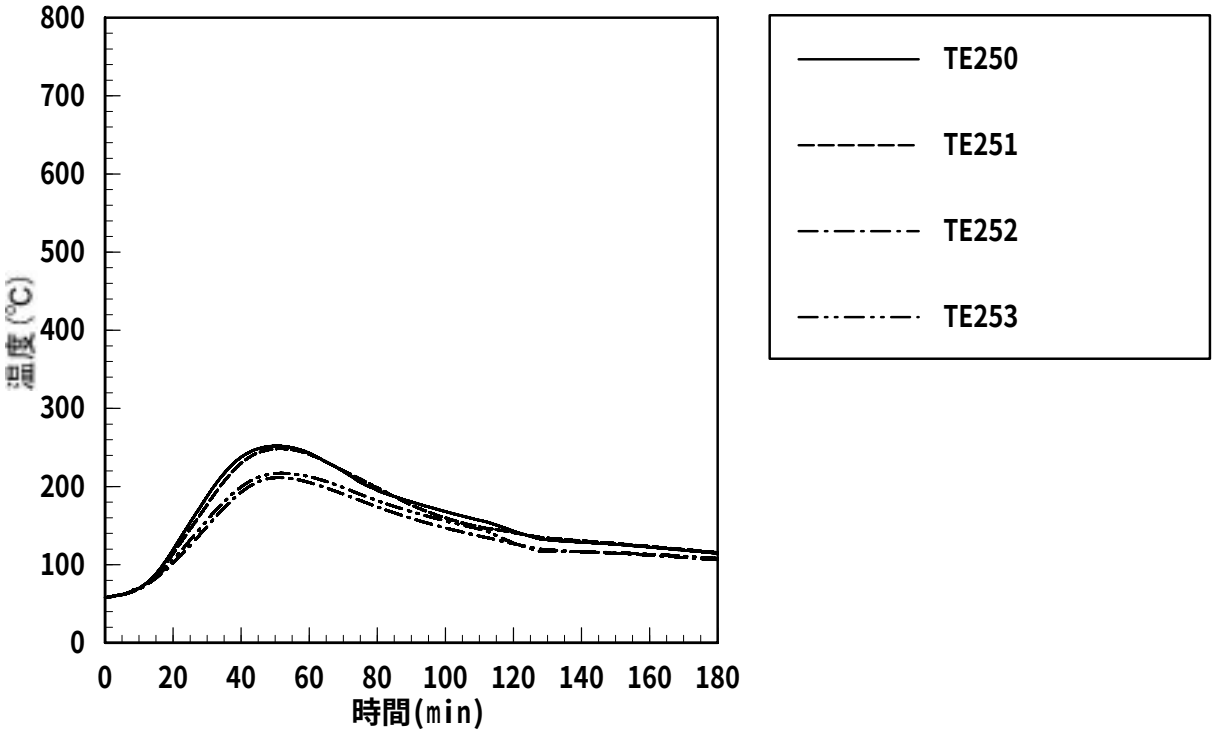


受け皿中心から４００㎜



受け皿中心から４４７㎜

図4-15-5 Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化５



受け皿中心から５００㎜

図4-15-6　Run-F8-2受け皿裏面温度の時間変化６

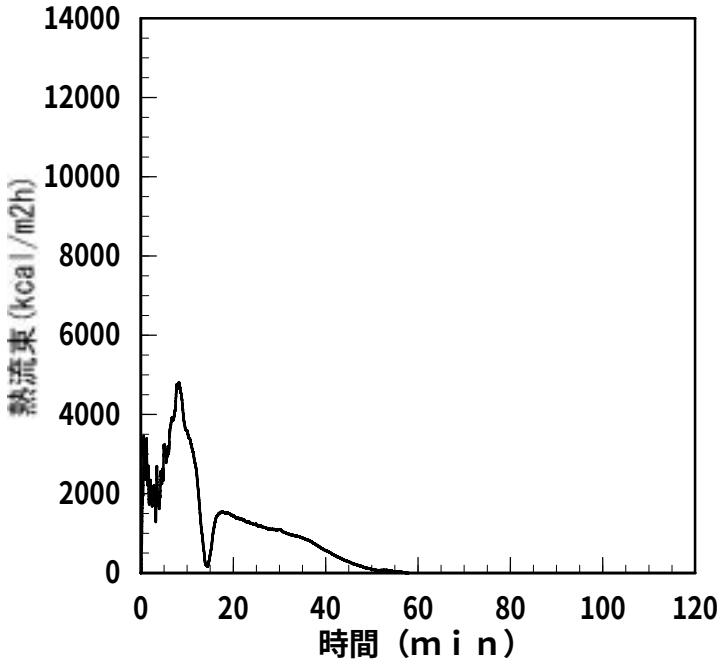


図4-16 Run-F7-4受け皿中心近傍の熱流束

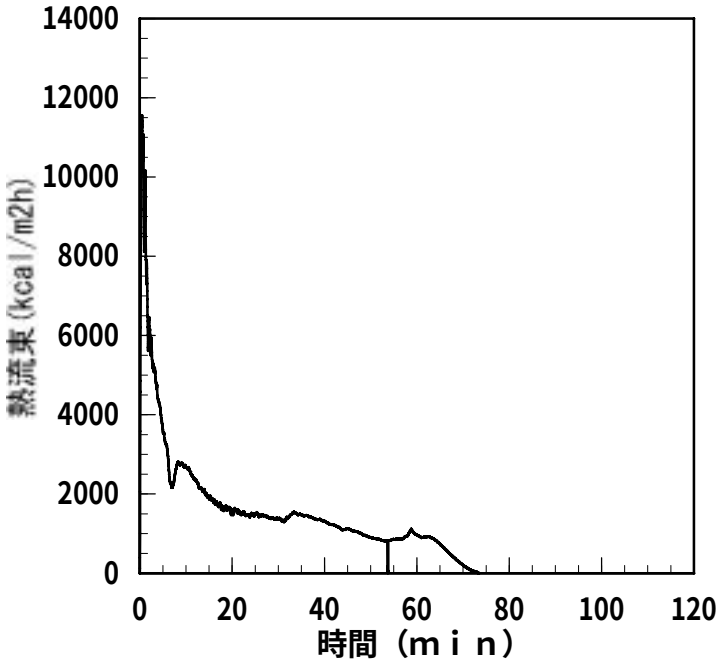
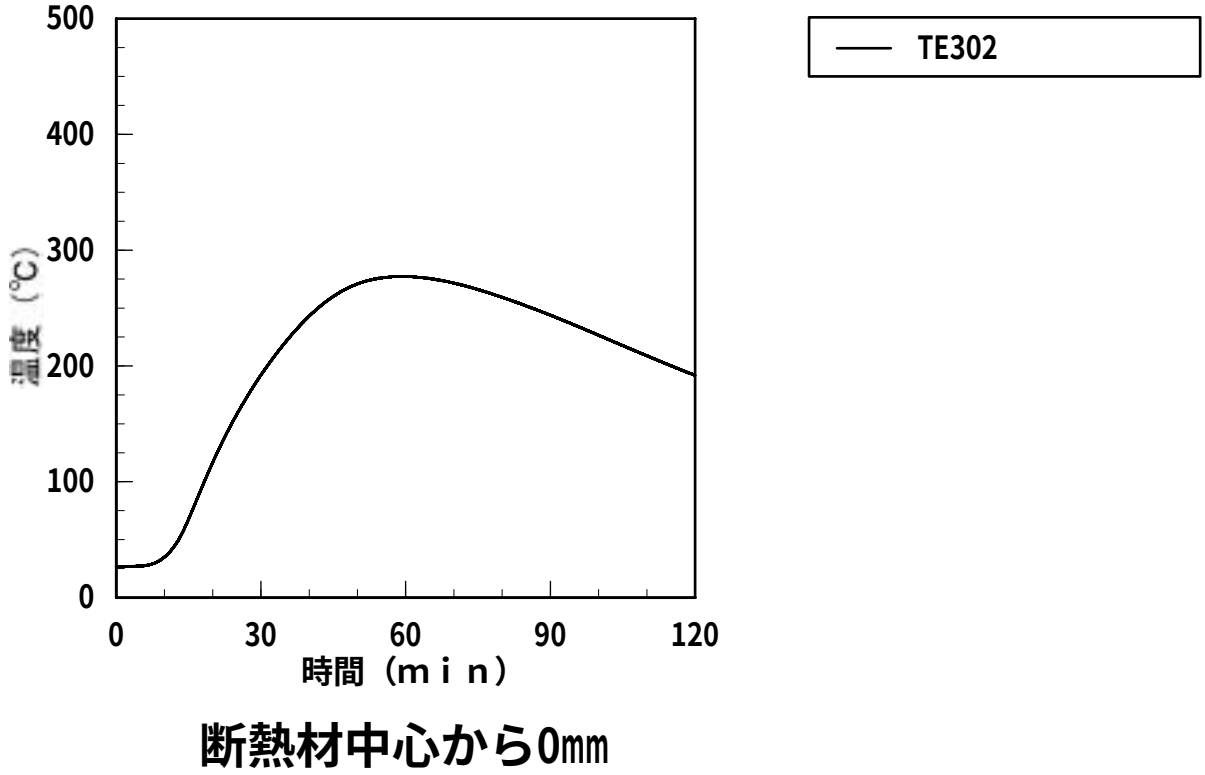
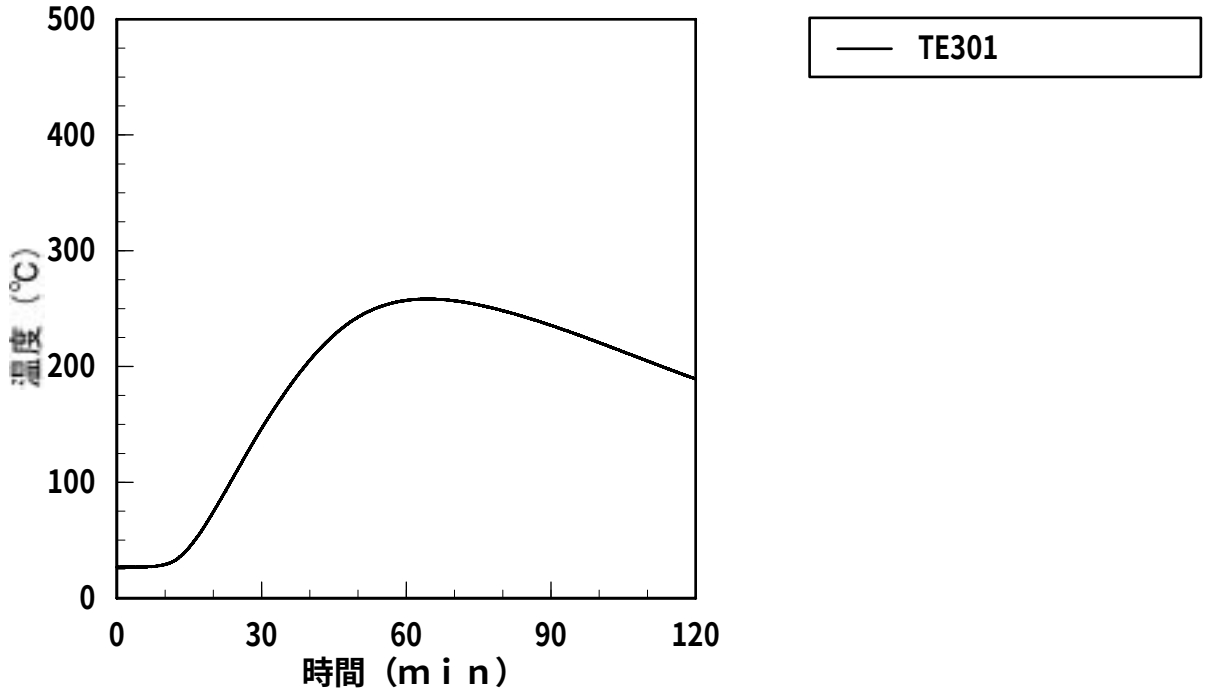


図4-17 Run-F8-2受け皿中心近傍の熱流束

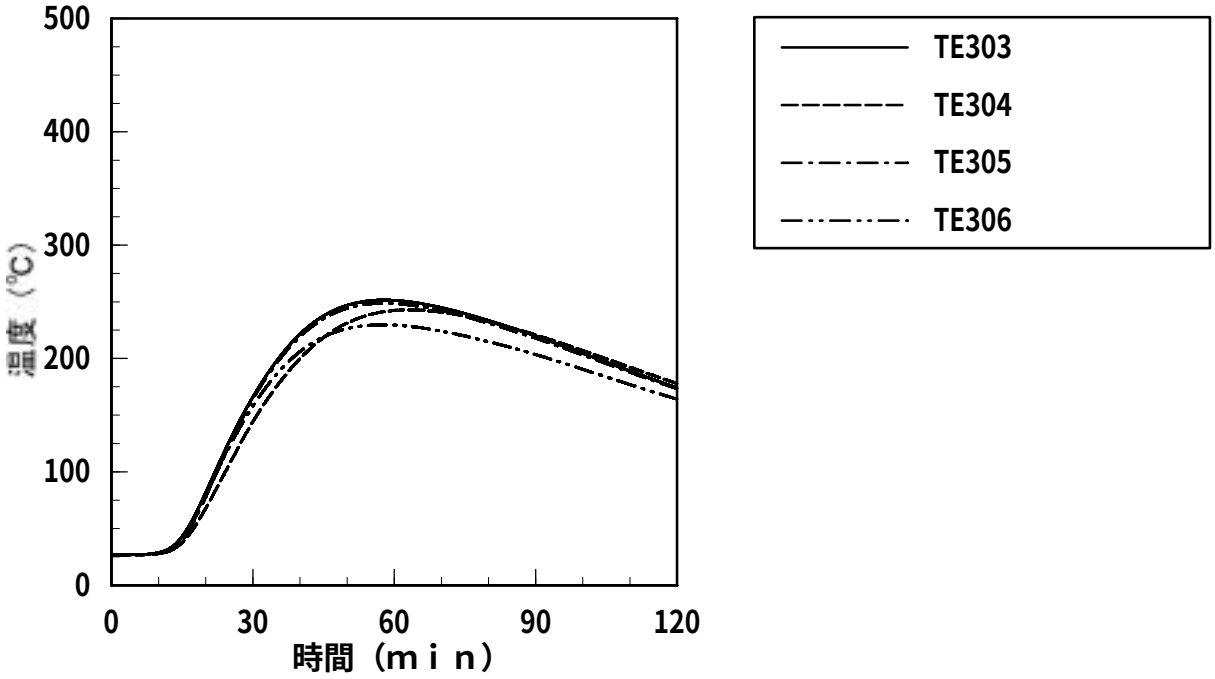


断熱材中心から0㎜

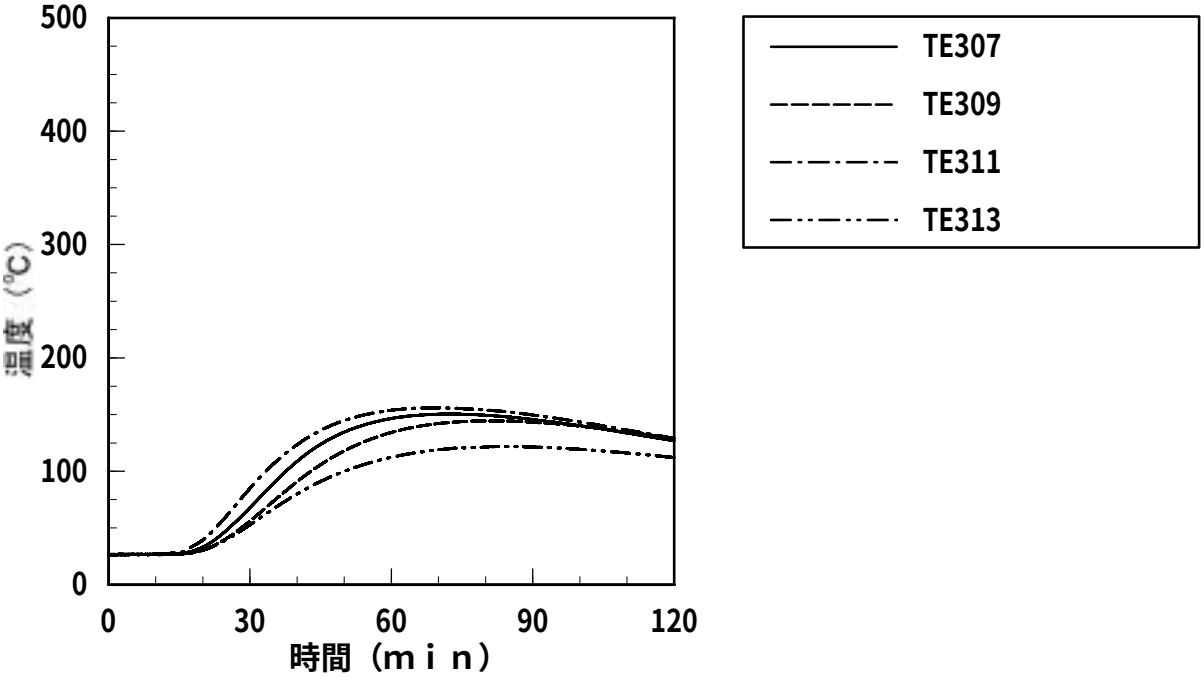


断熱材中心から28㎜

図4-18-1　Run-F7-4断熱材温度の時間変化1

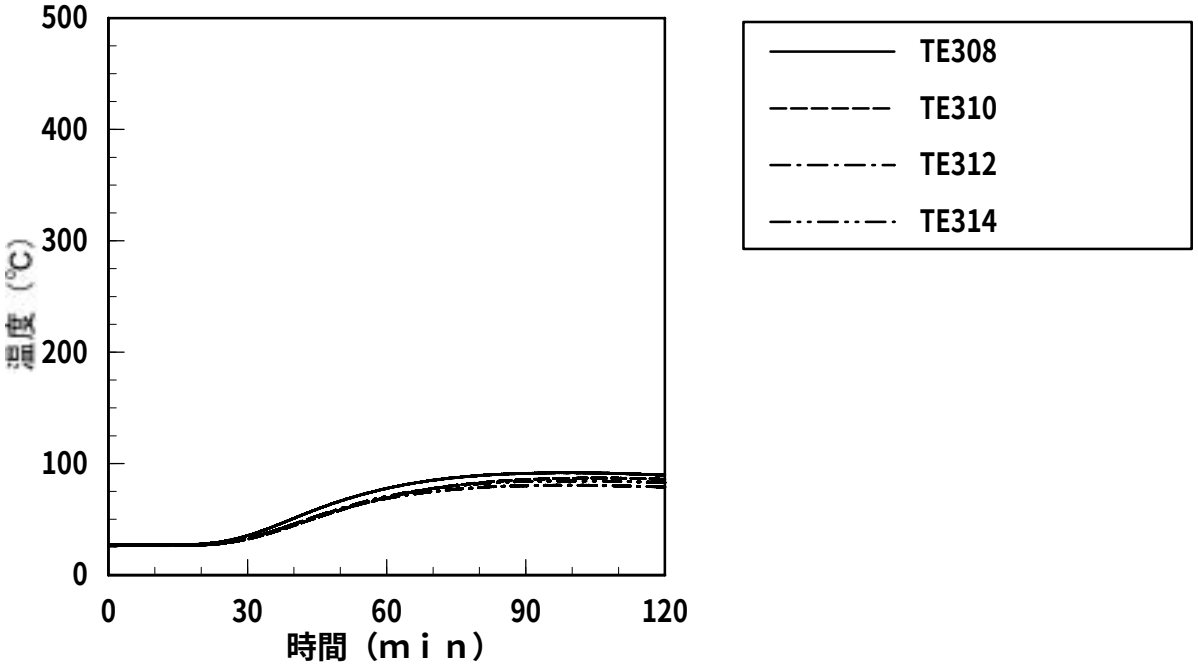


断熱材中心から100㎜

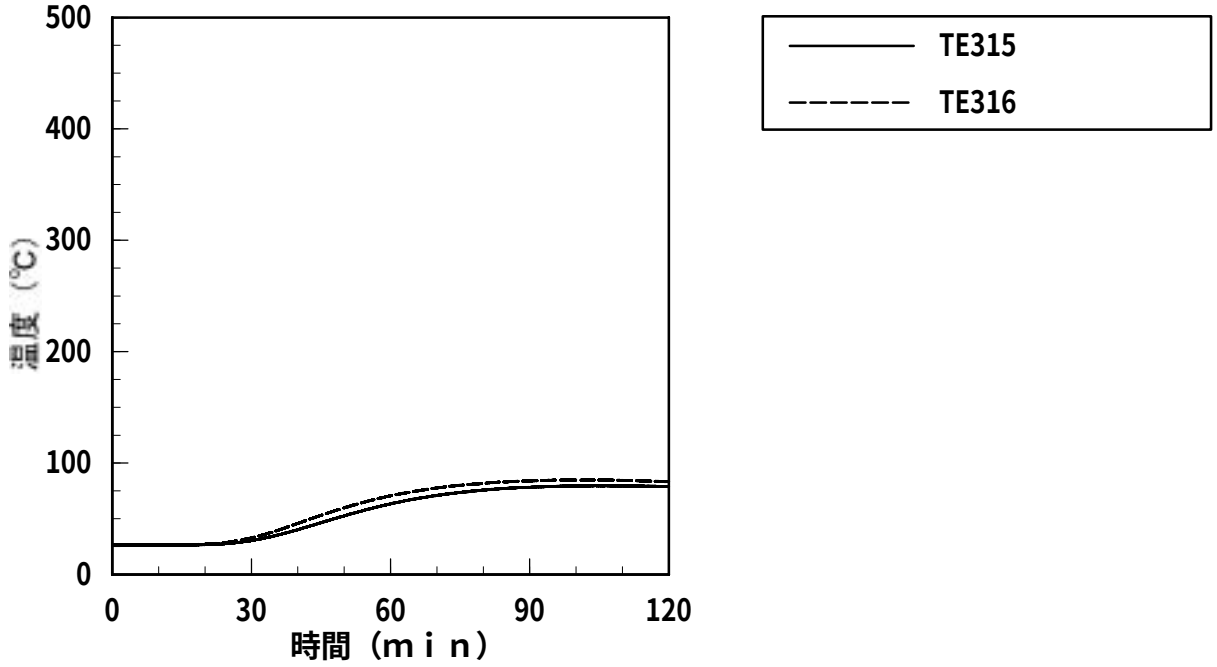


断熱材中心から200㎜

図4-18-2　Run-F7-4断熱材温度の時間変化2

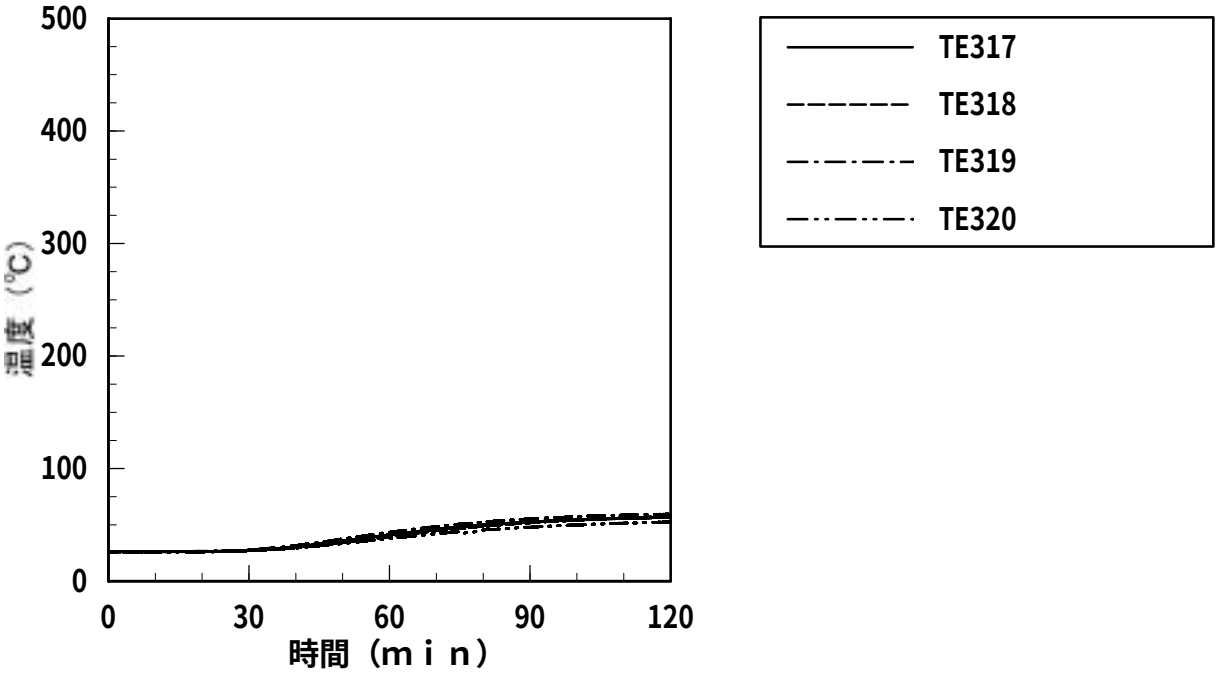


断熱材中心から282㎜

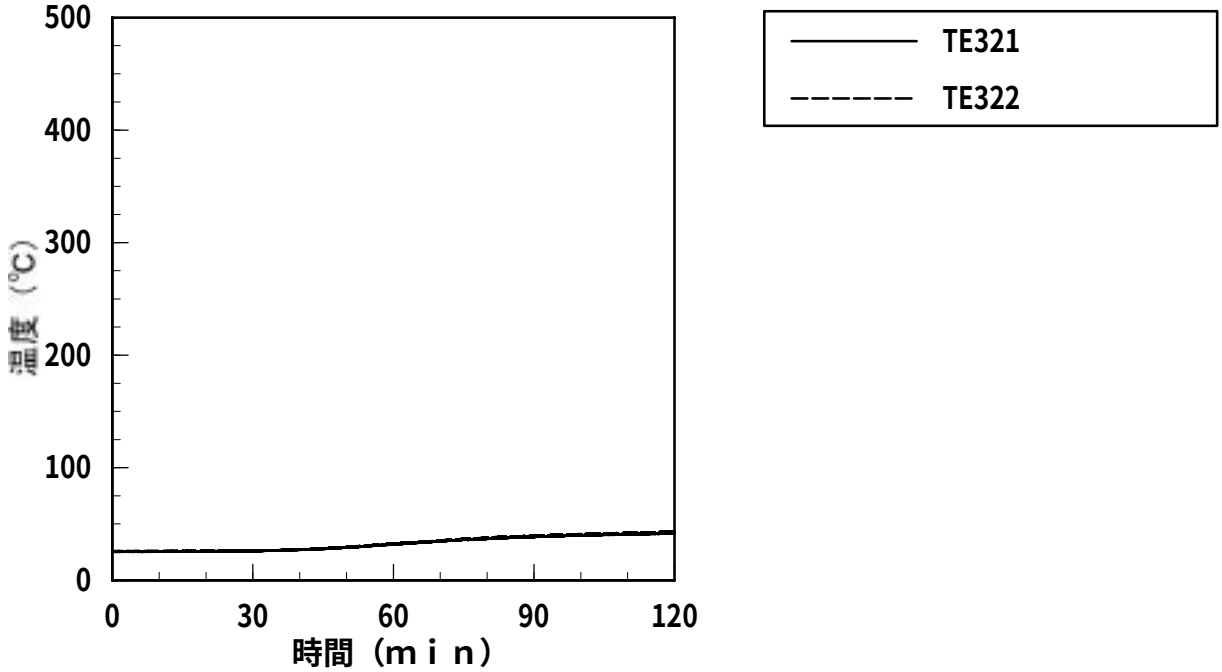


断熱材中心から300㎜

図4-18-3　Run-F7-4断熱材温度の時間変化3

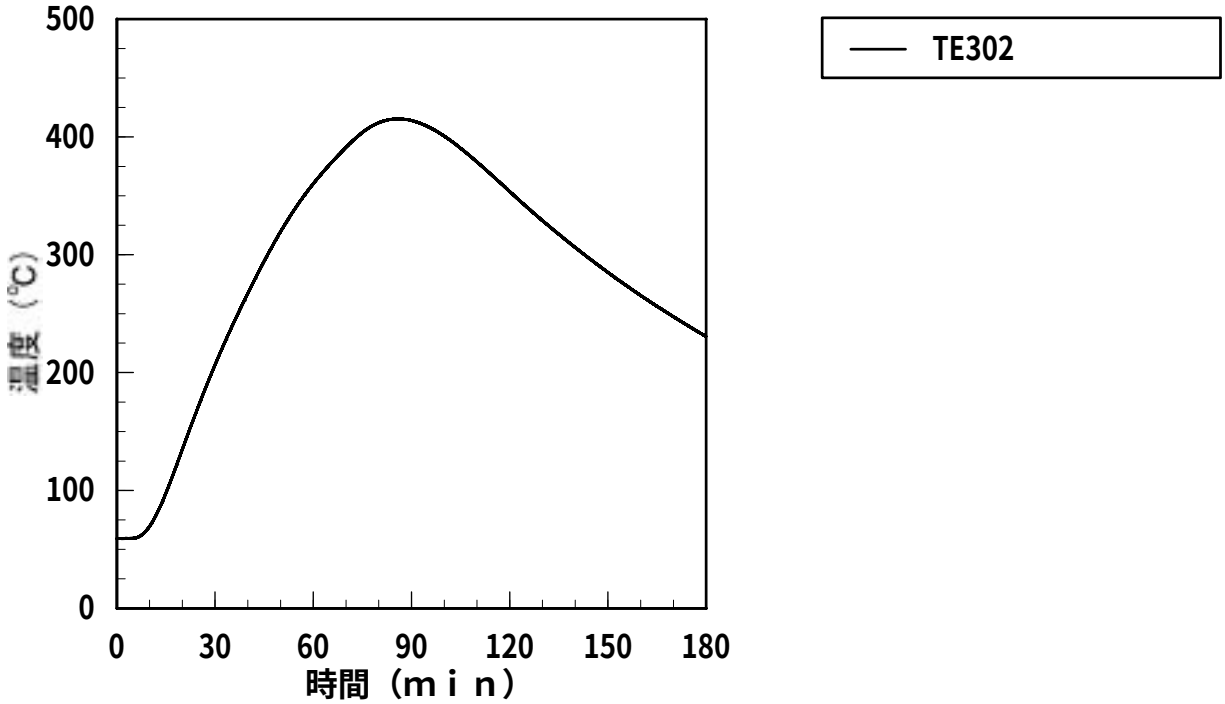


断熱材中心から400㎜

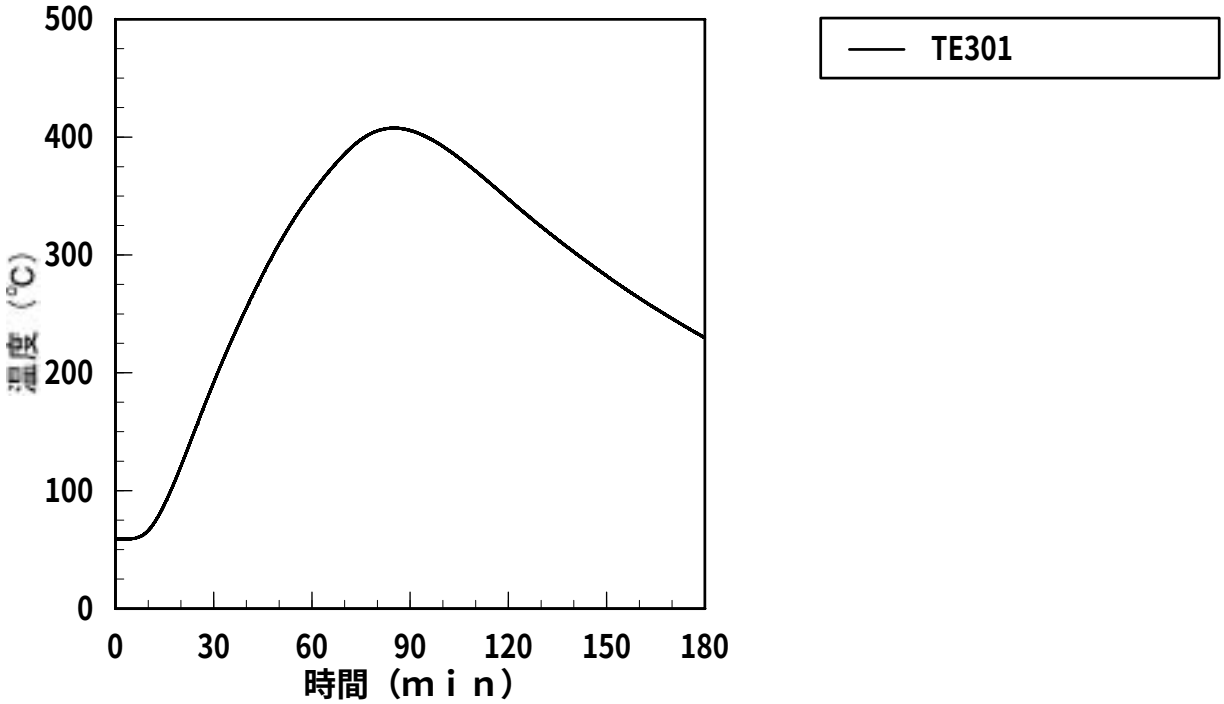


断熱材中心から500㎜

図4-18-4　Run-F7-4断熱材温度の時間変化4

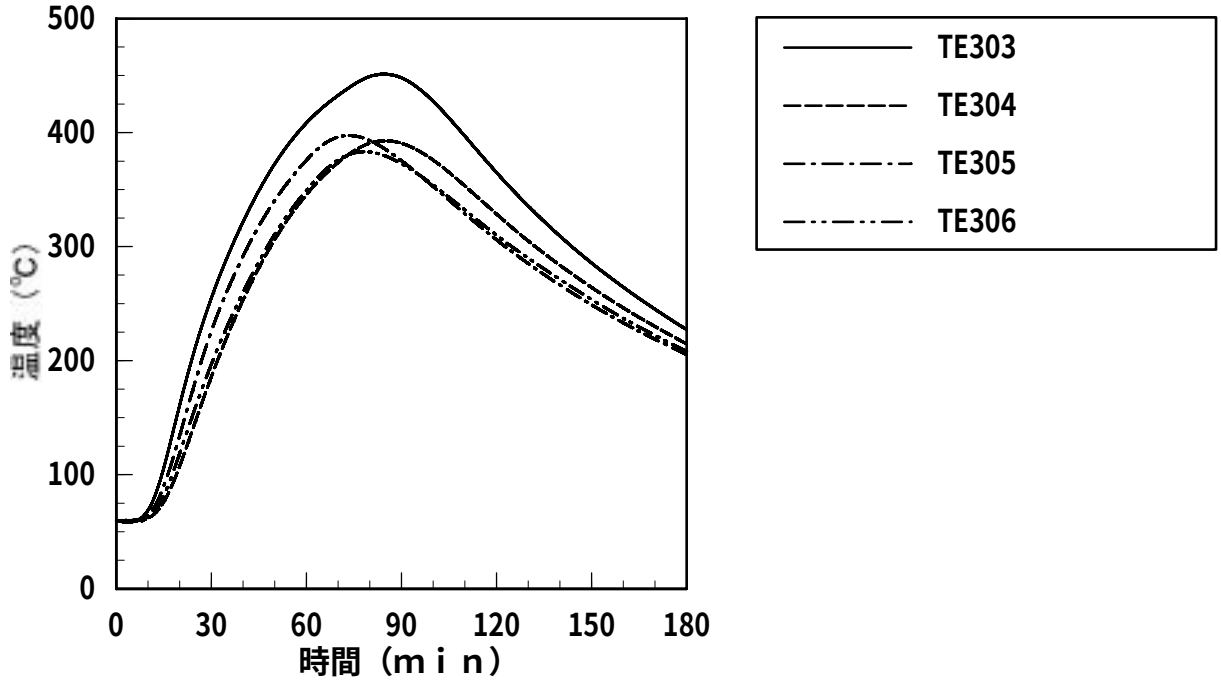


断熱材中心から0㎜

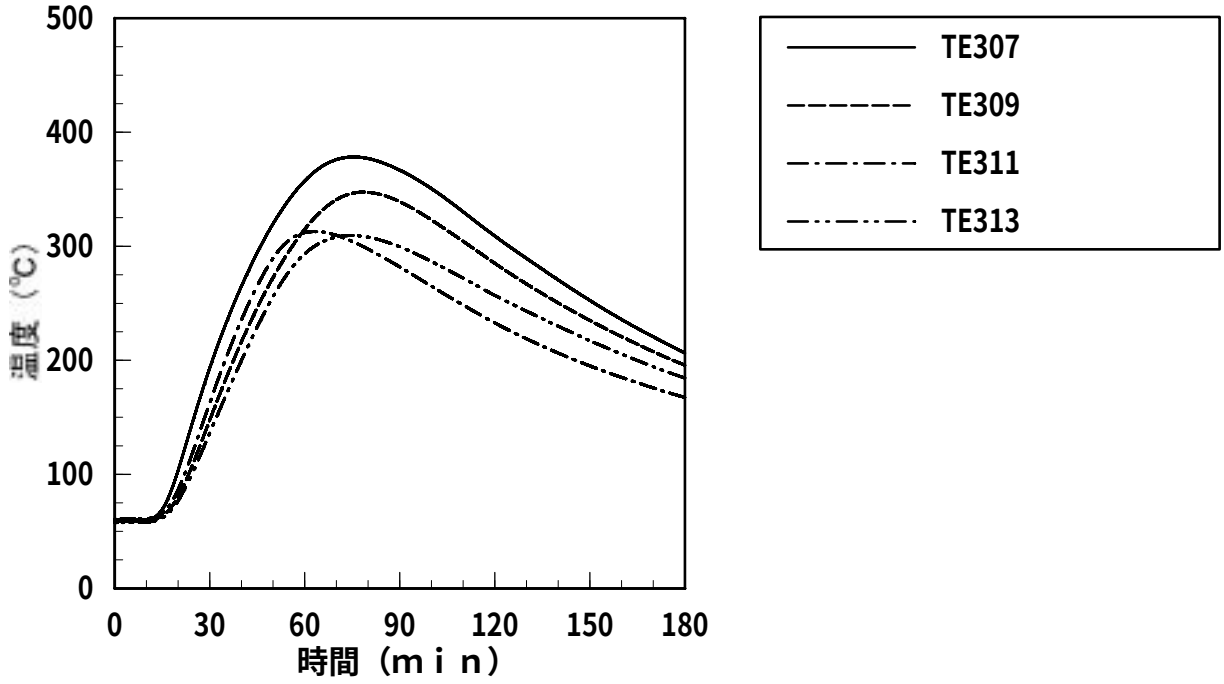


断熱材中心から28㎜

図4-19-1　Run-F8-2断熱材温度の時間変化1

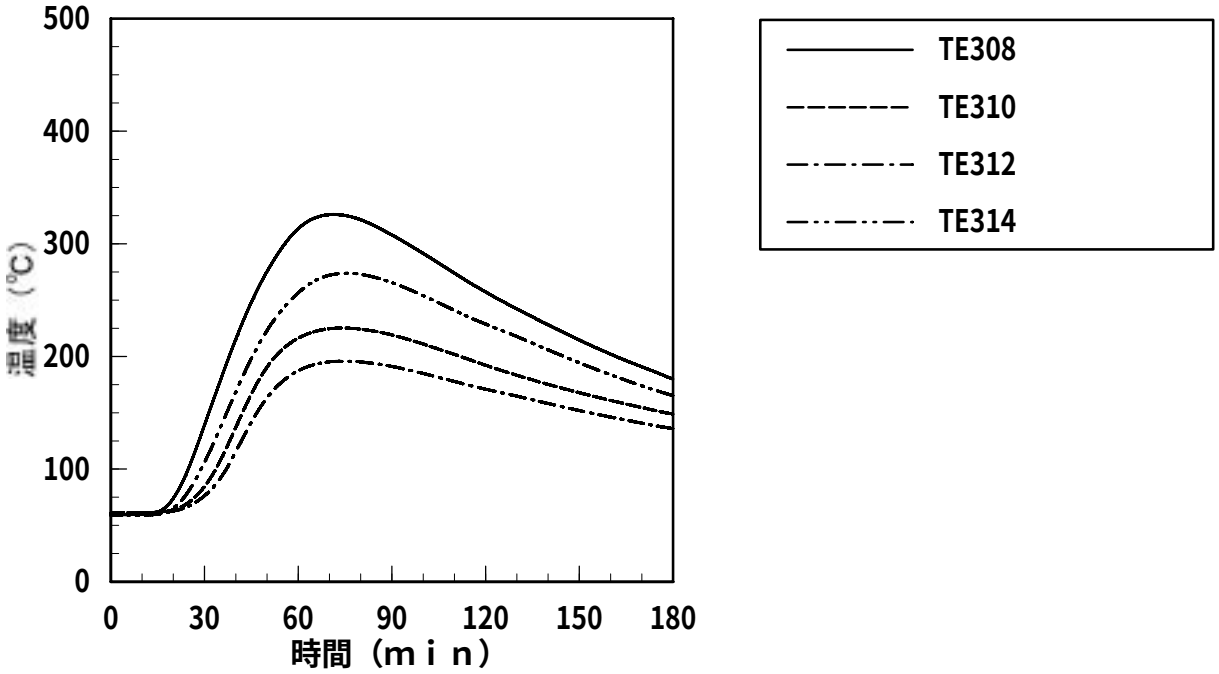


断熱材中心から100㎜

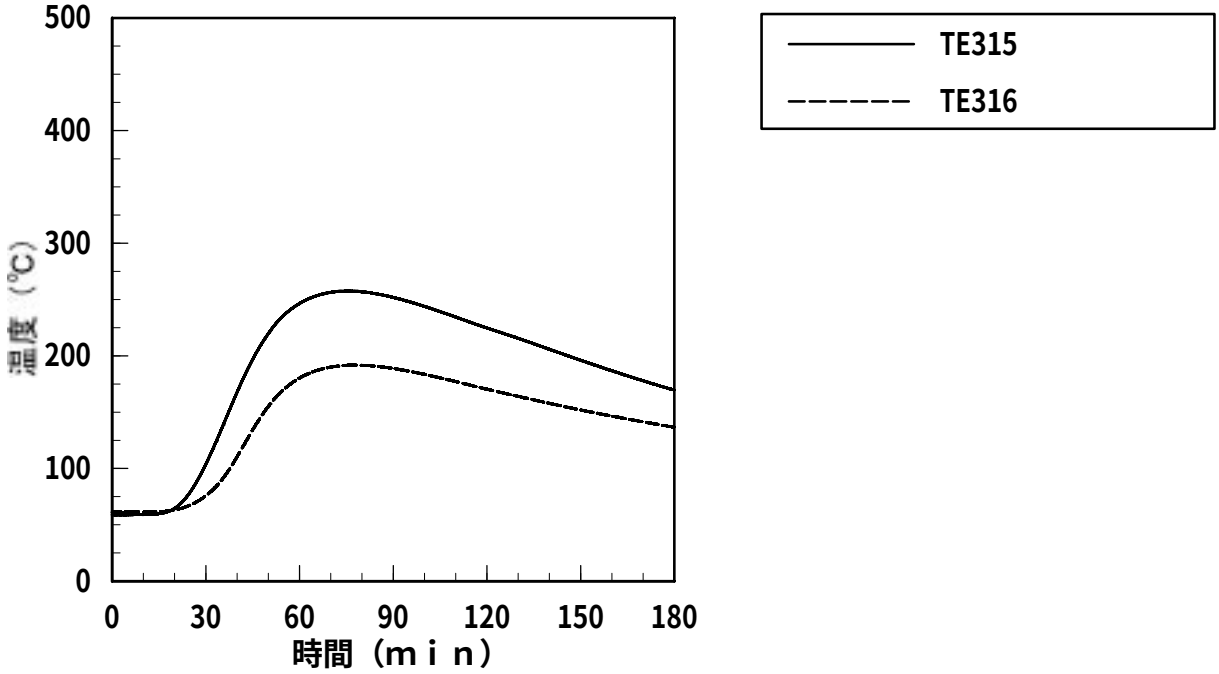


断熱材中心から200㎜

図4-19-2　Run-F8-2断熱材温度の時間変化2

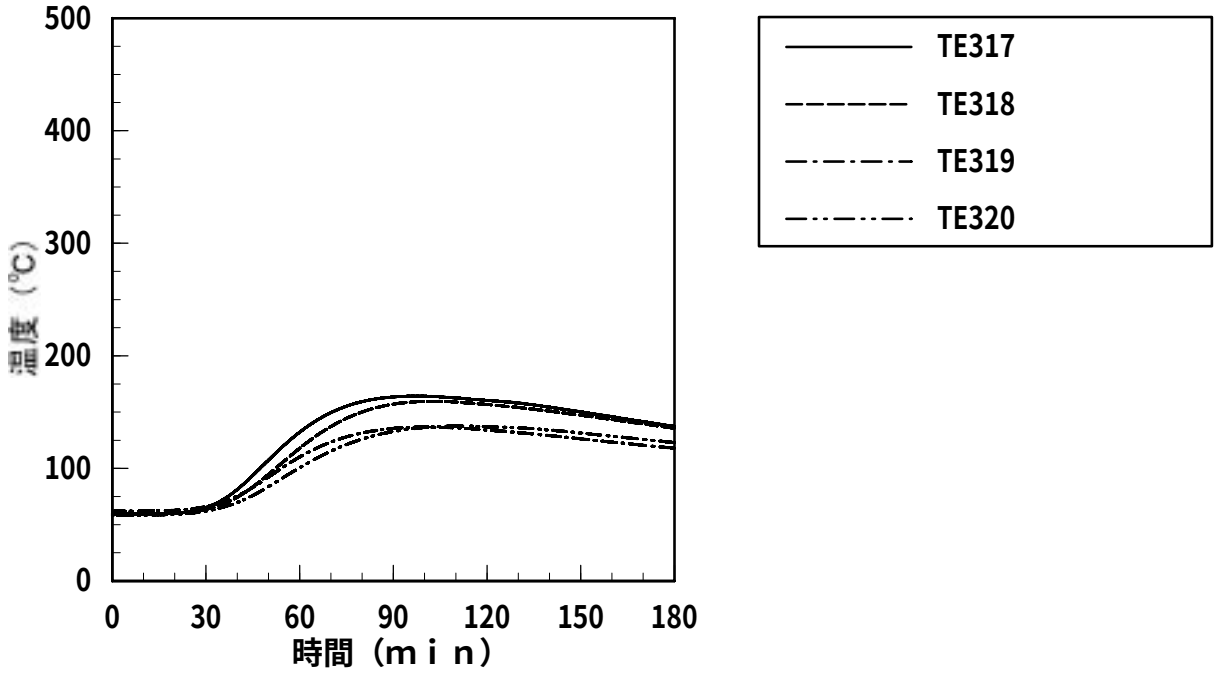


断熱材中心から282㎜

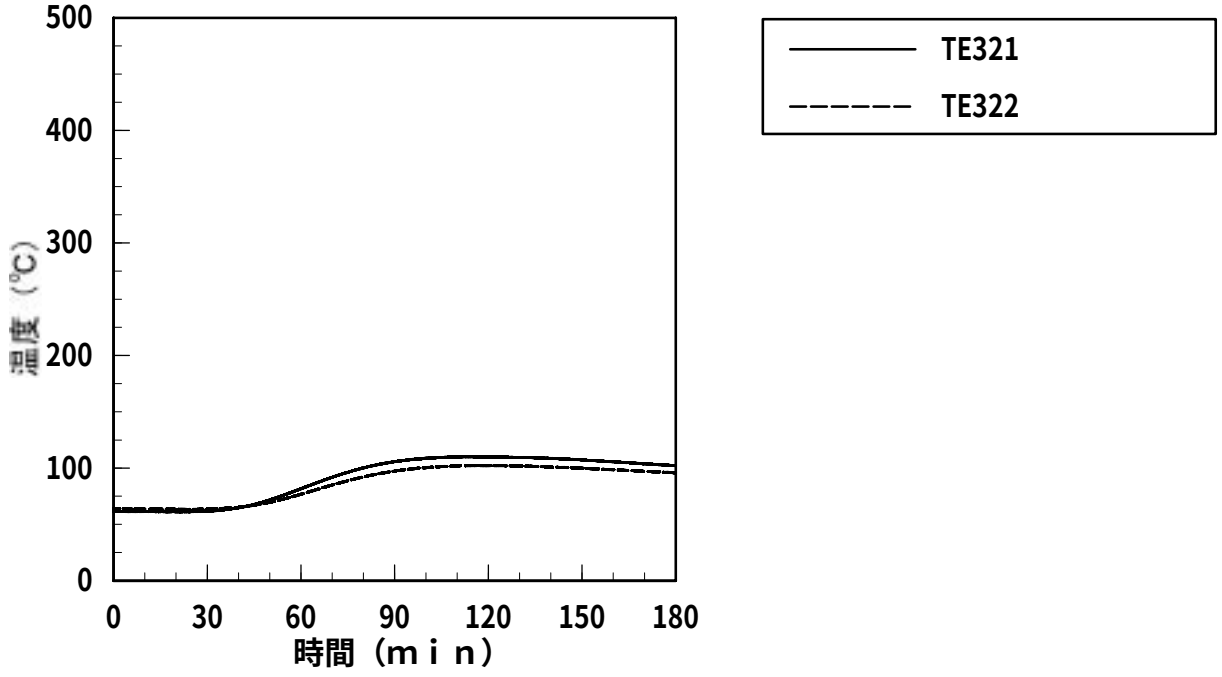


断熱材中心から300㎜

図4-19-3　Run-F8-2断熱材温度の時間変化3

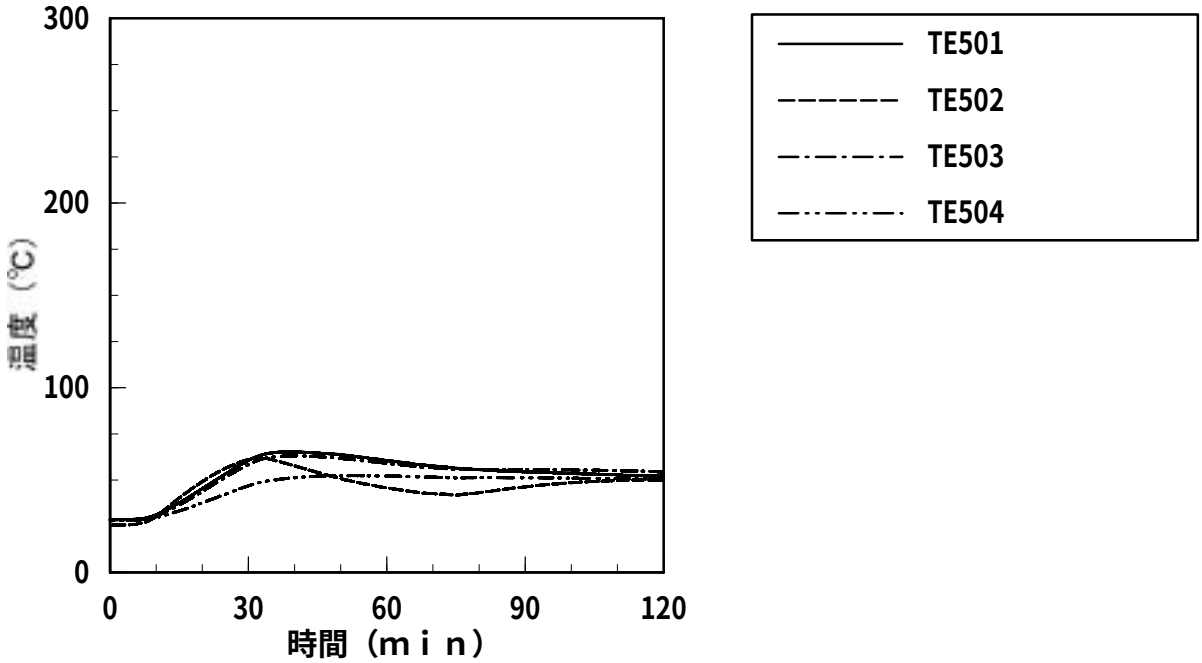


断熱材中心から400㎜

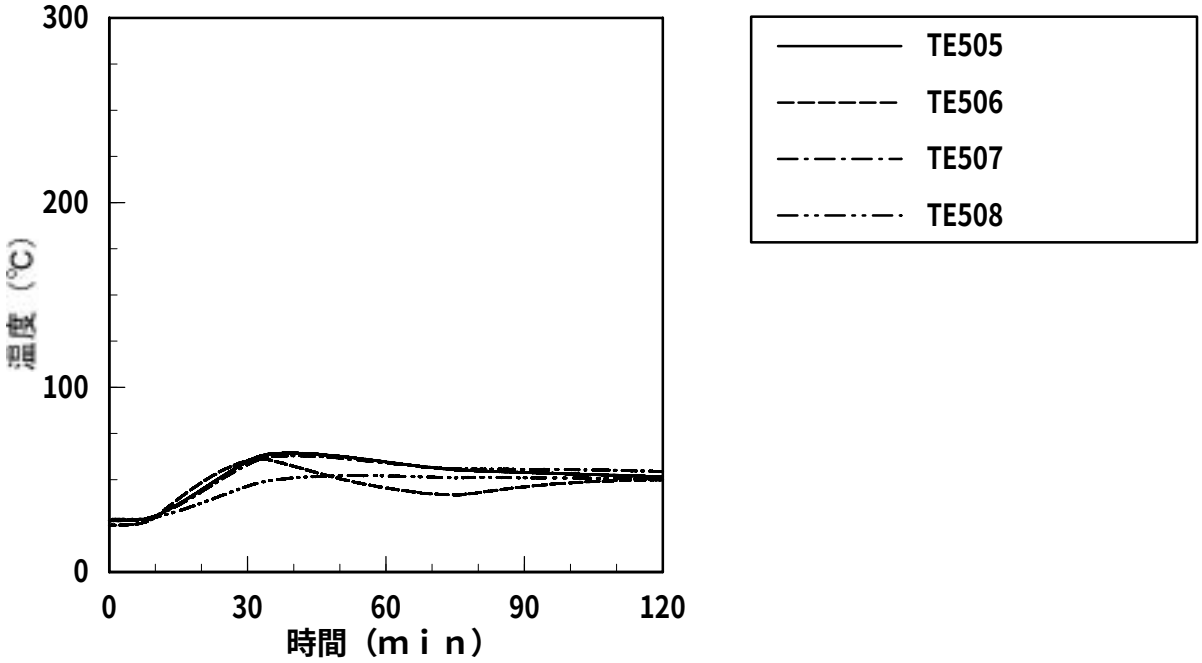


断熱材中心から500㎜

図4-19-4　Run-F8-2断熱材温度の時間変化4

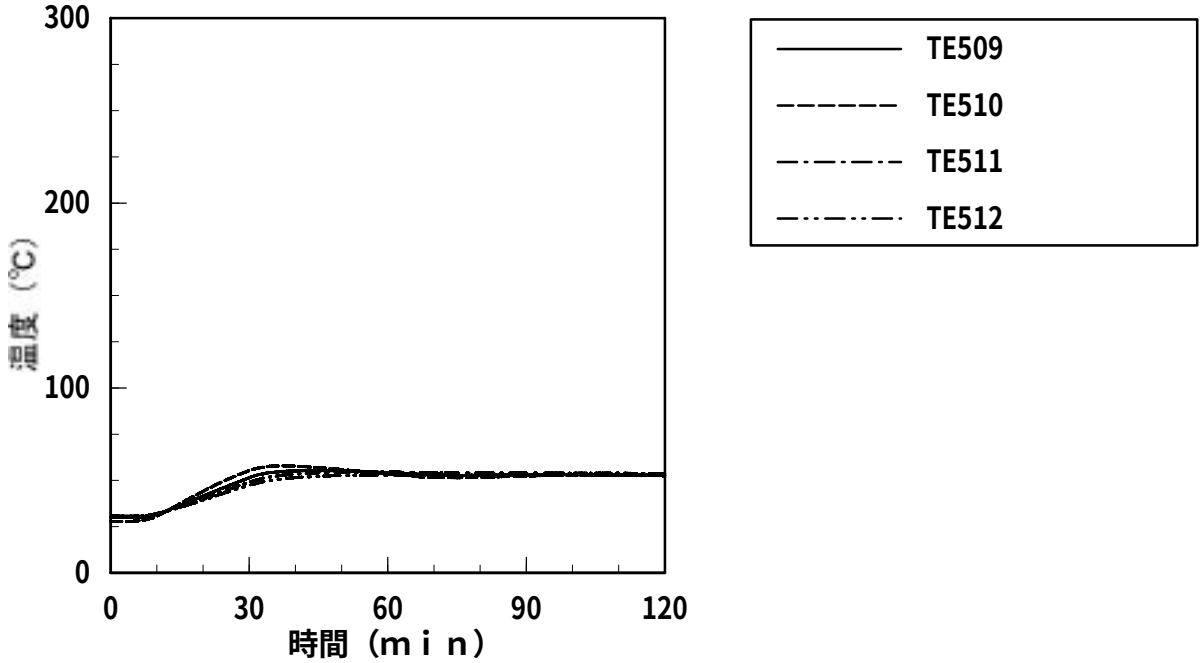


内壁

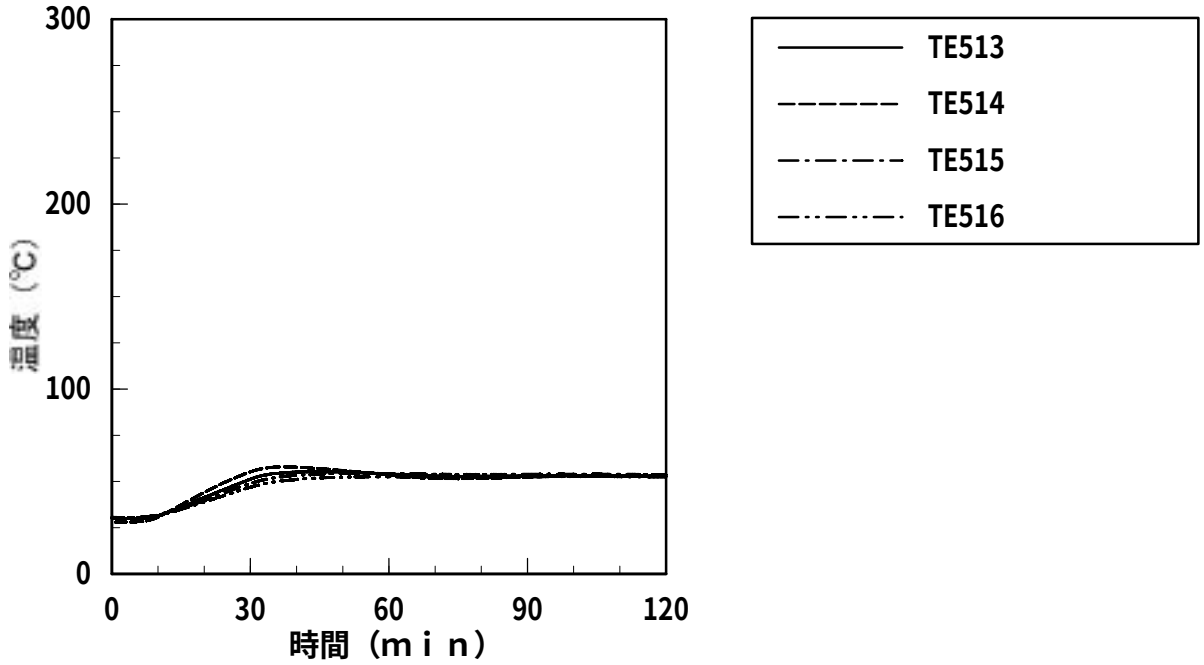


外壁

図4-20-1 Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度1(Level 500)

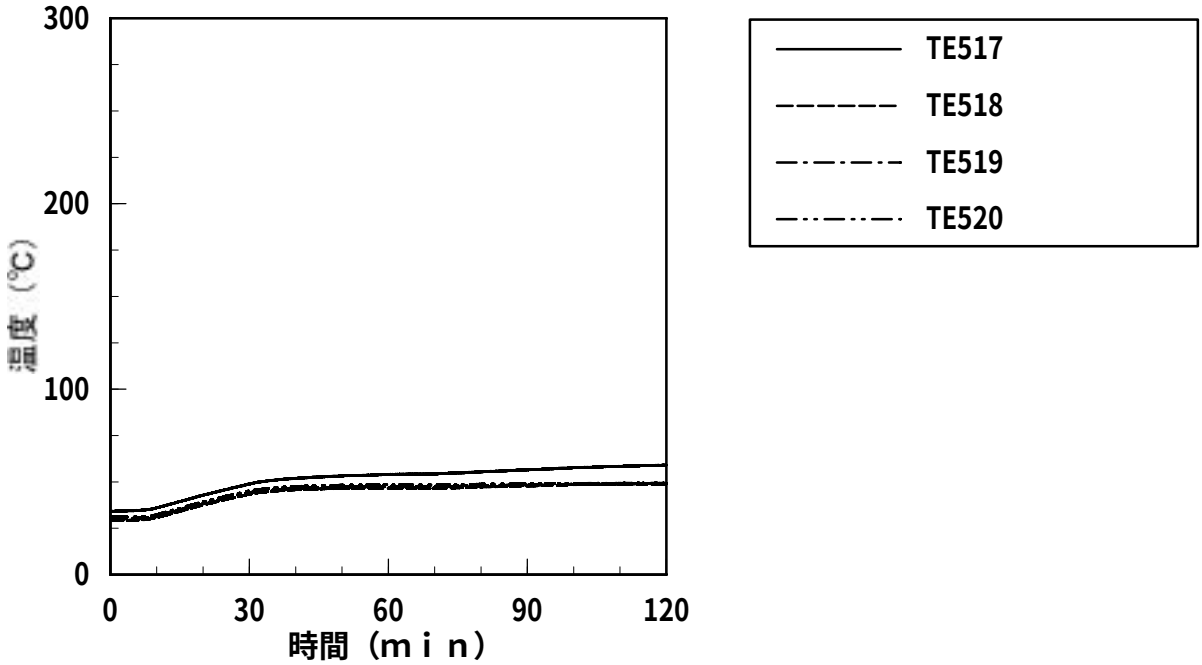


内壁

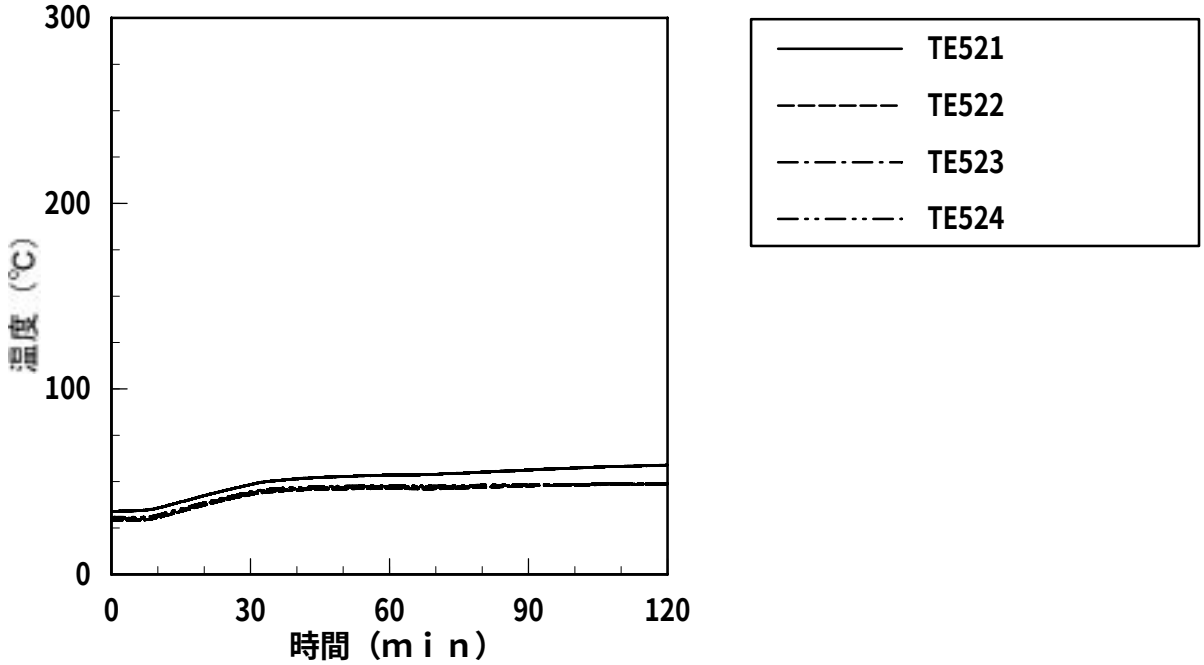


外壁

図4-20-2 Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度2(Level 1200)

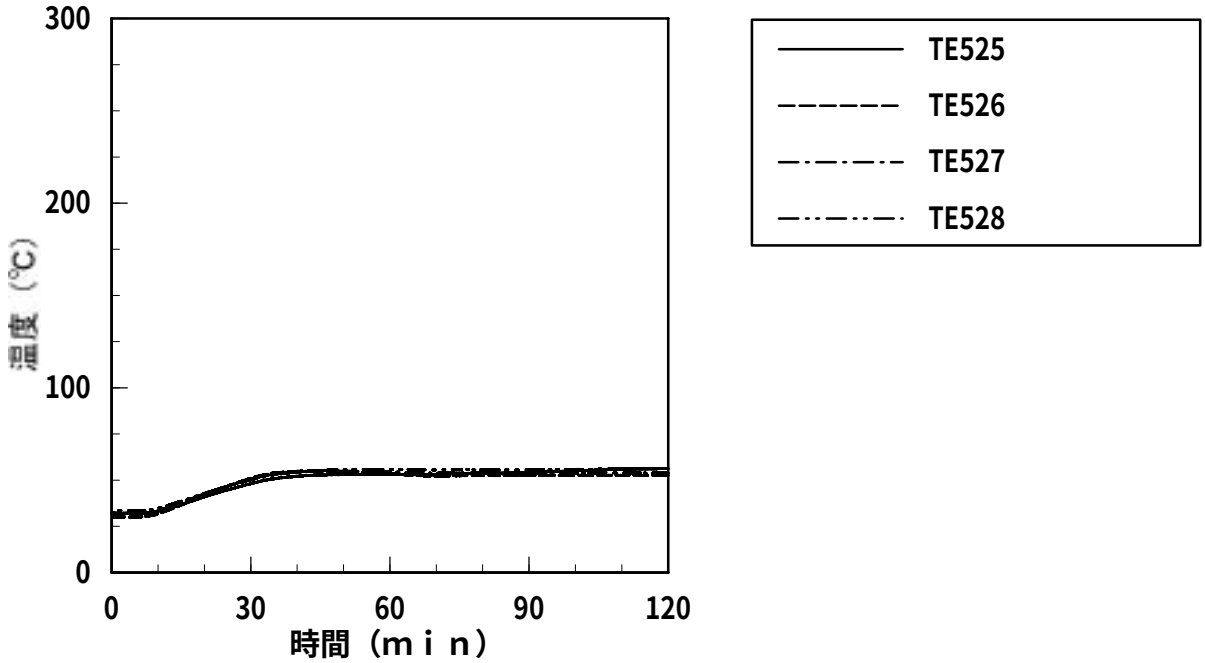


内壁

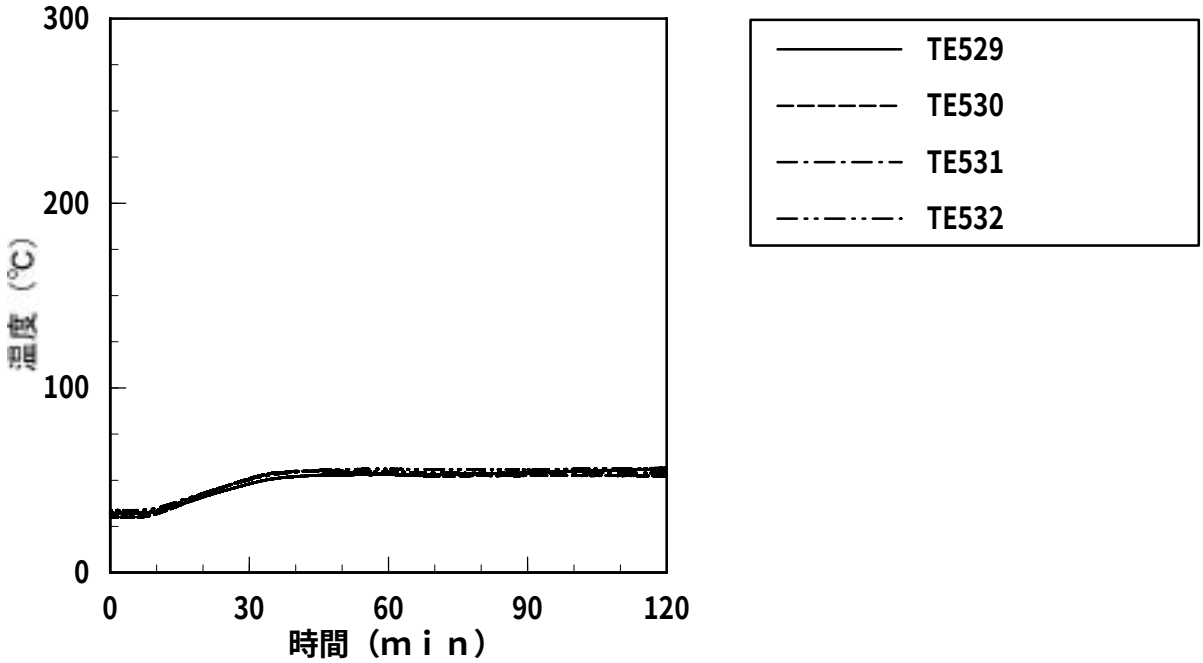


外壁

図4-20-3 Run-F7-4 FRAT-1容器壁温度3(Level 1900)

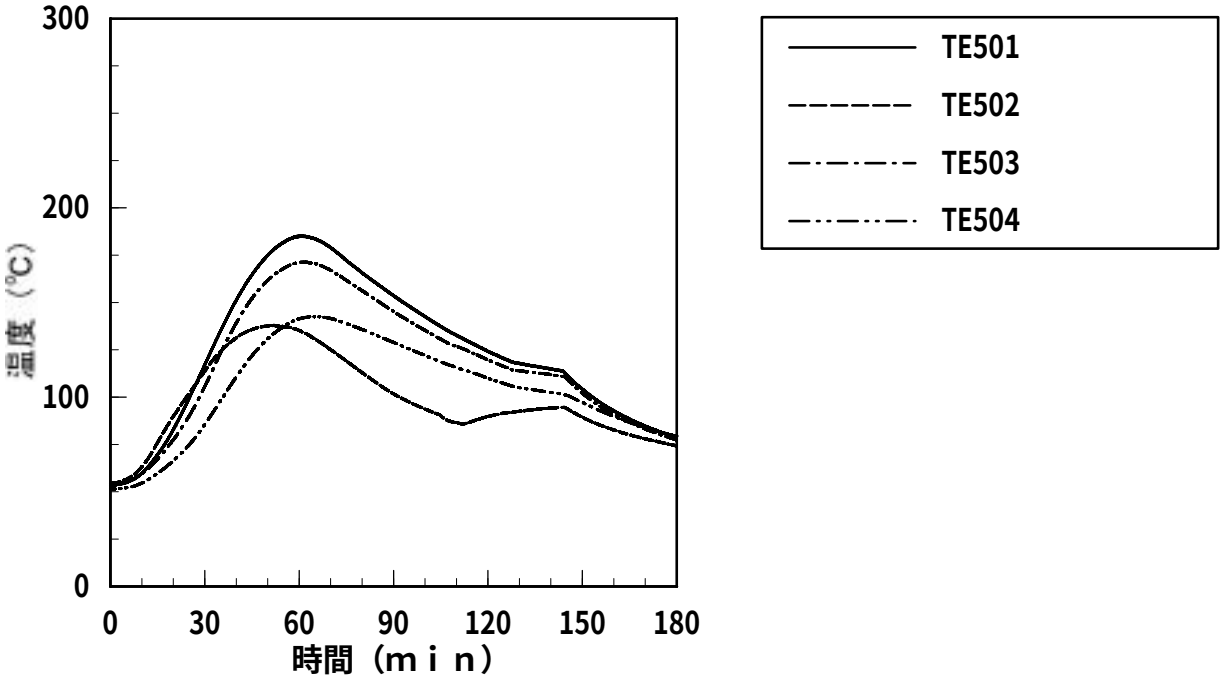


内壁

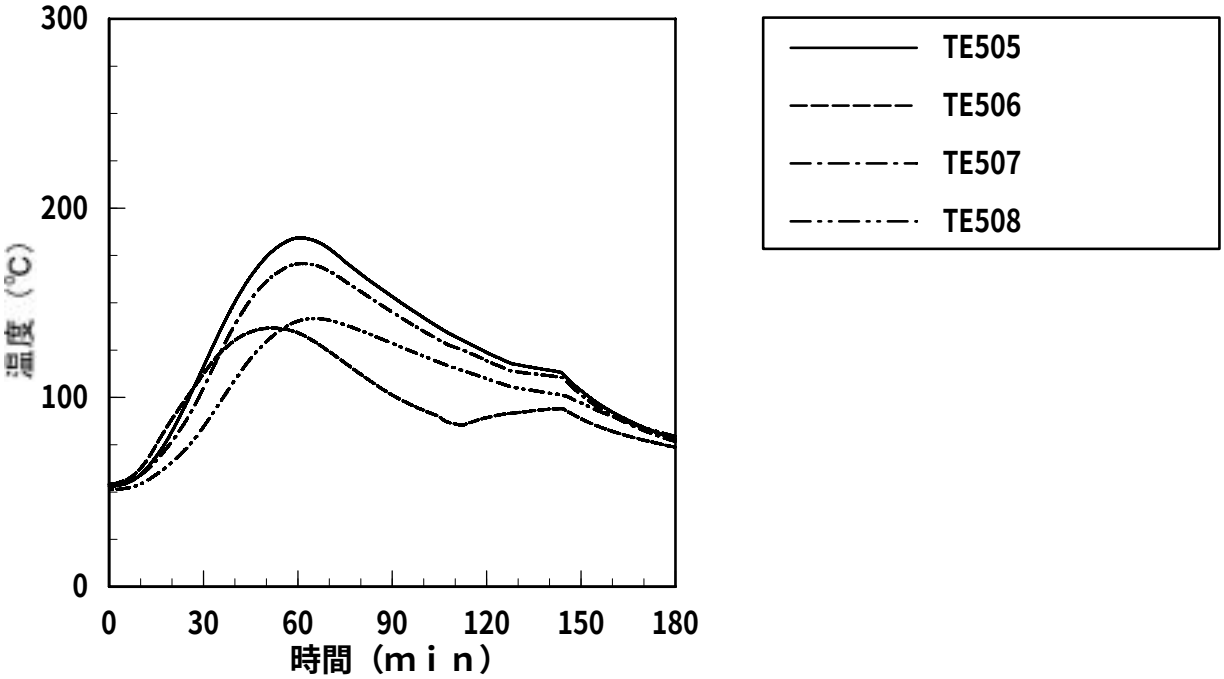


外壁

図4-20-4 Run-F7-4 FRAT-1容器天井温度



内壁



外壁

図4-21-1 Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度1(Level 500)

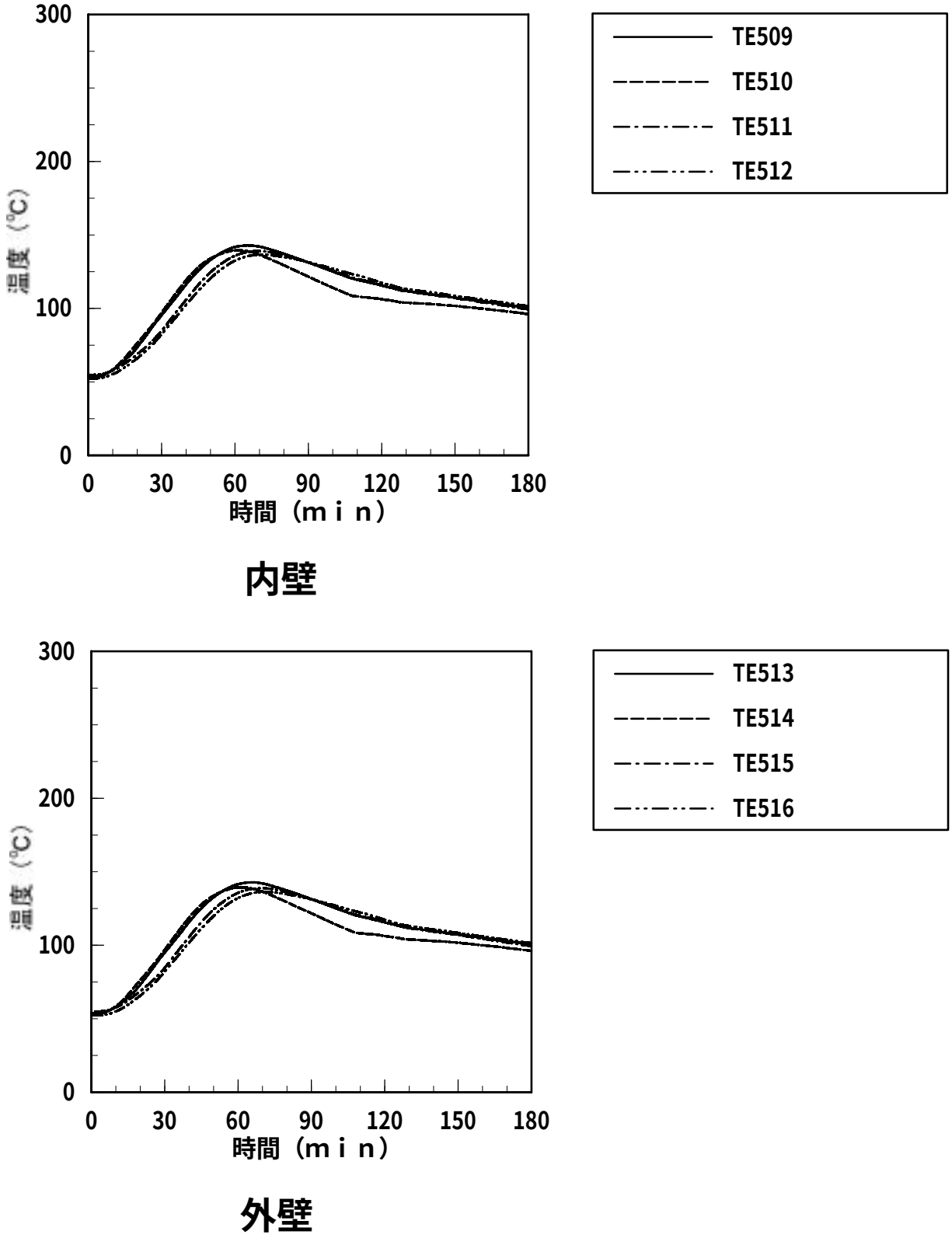
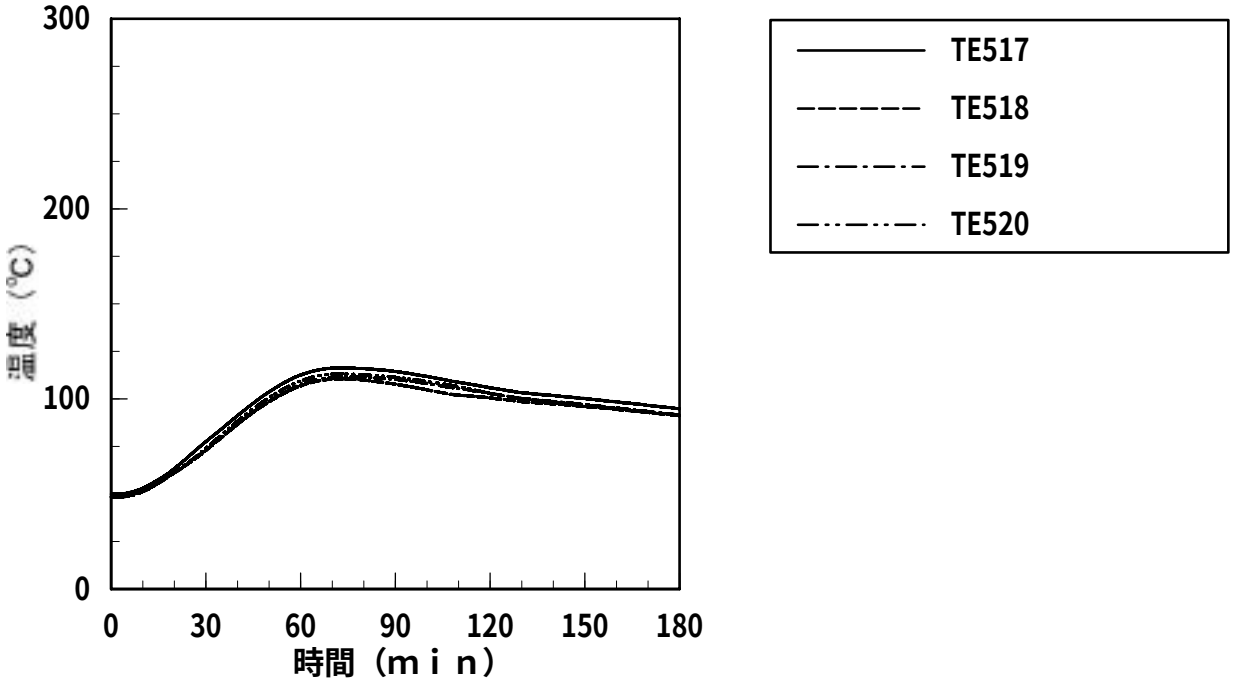
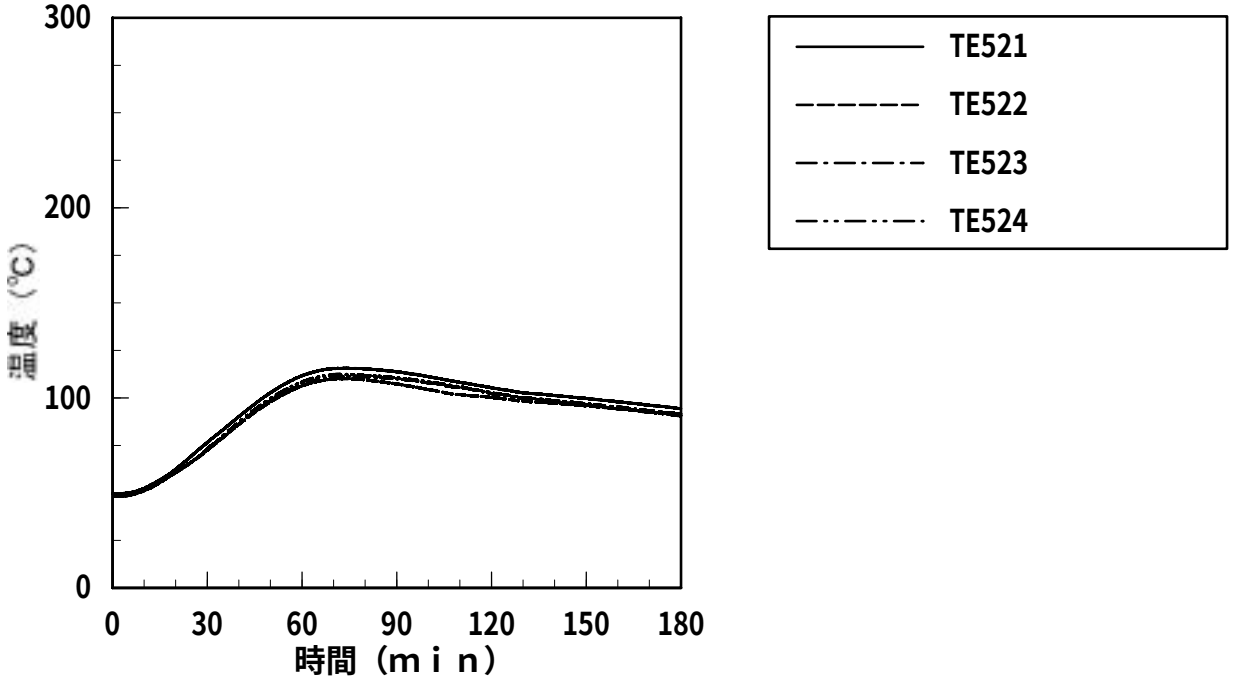


図4-21-2 Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度2(Level 1200)

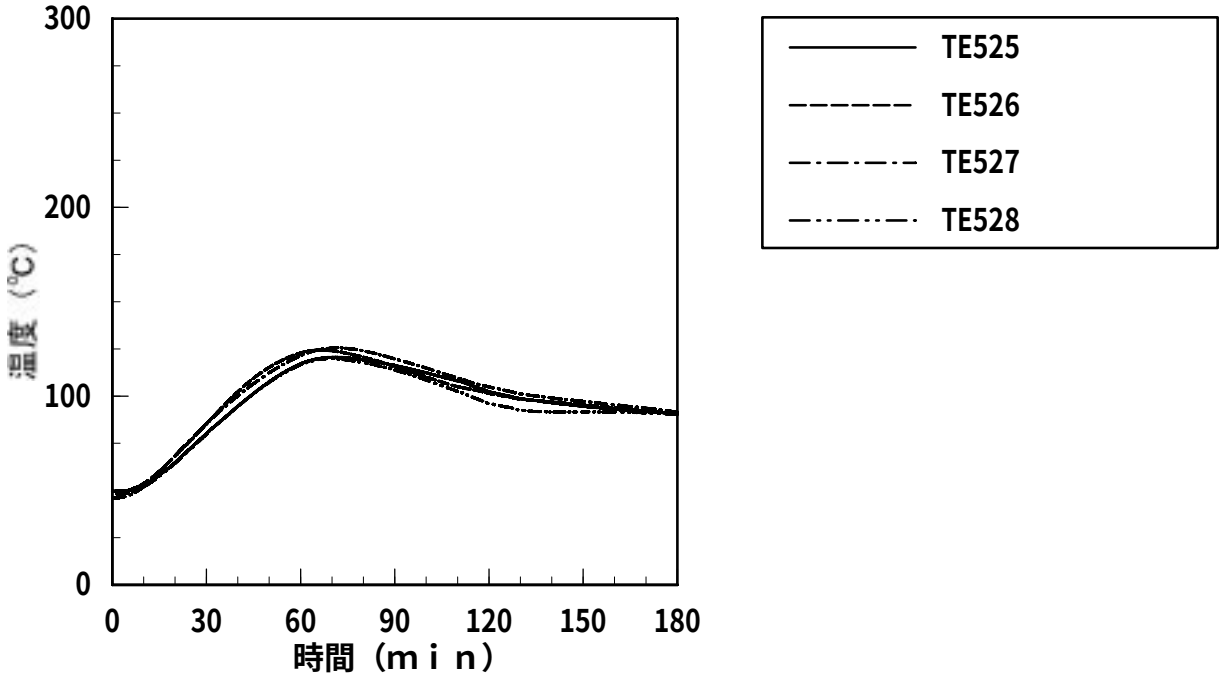


内壁

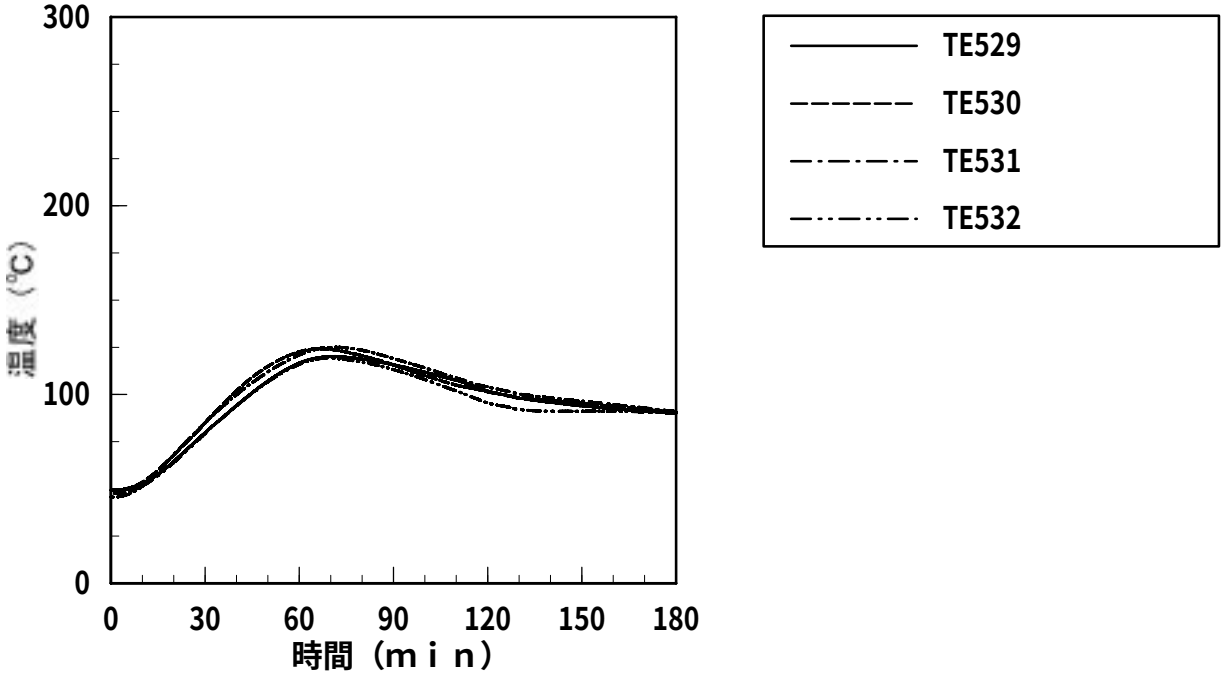


外壁

図4-21-3 Run-F8-2 FRAT-1容器壁温度3(Level 1900)

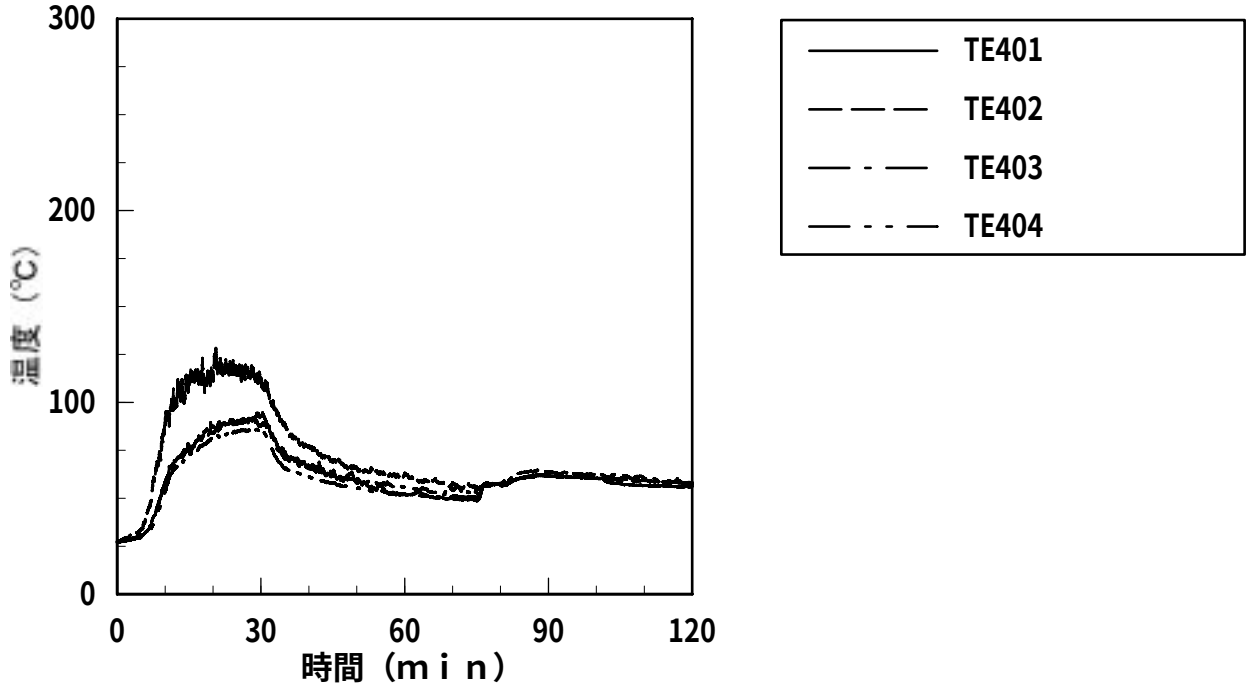


内壁

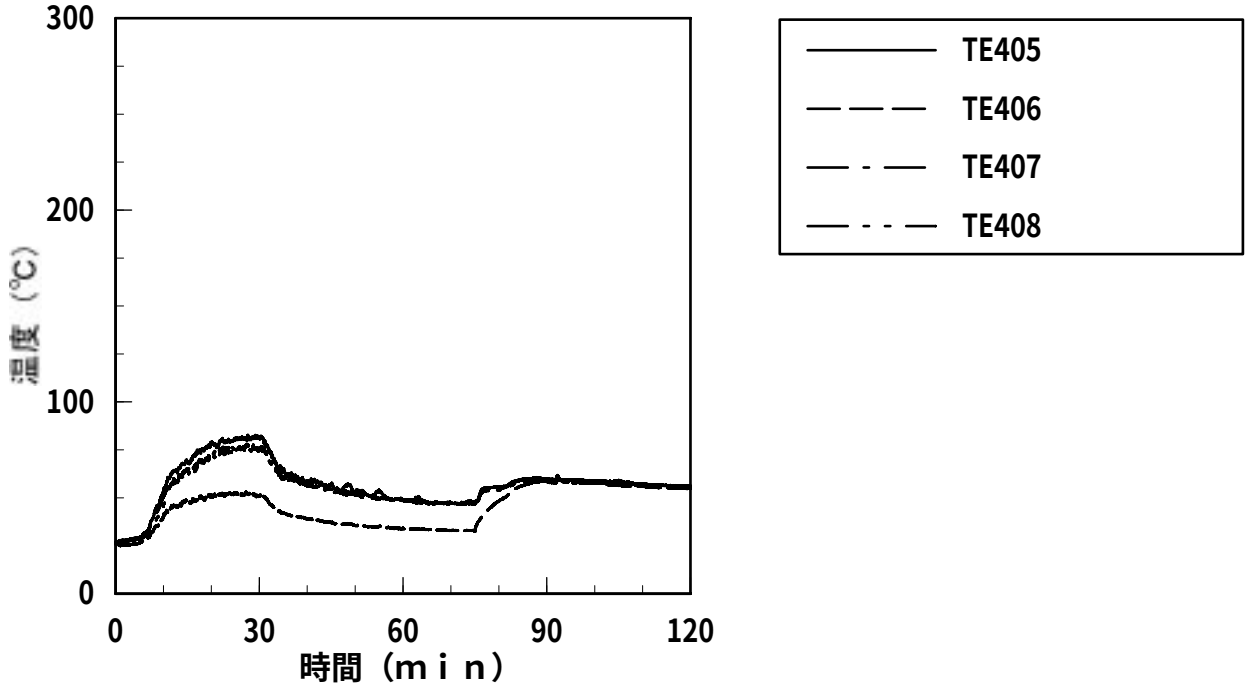


外壁

図4-21-4 Run-F8-2 FRAT-1容器天井温度

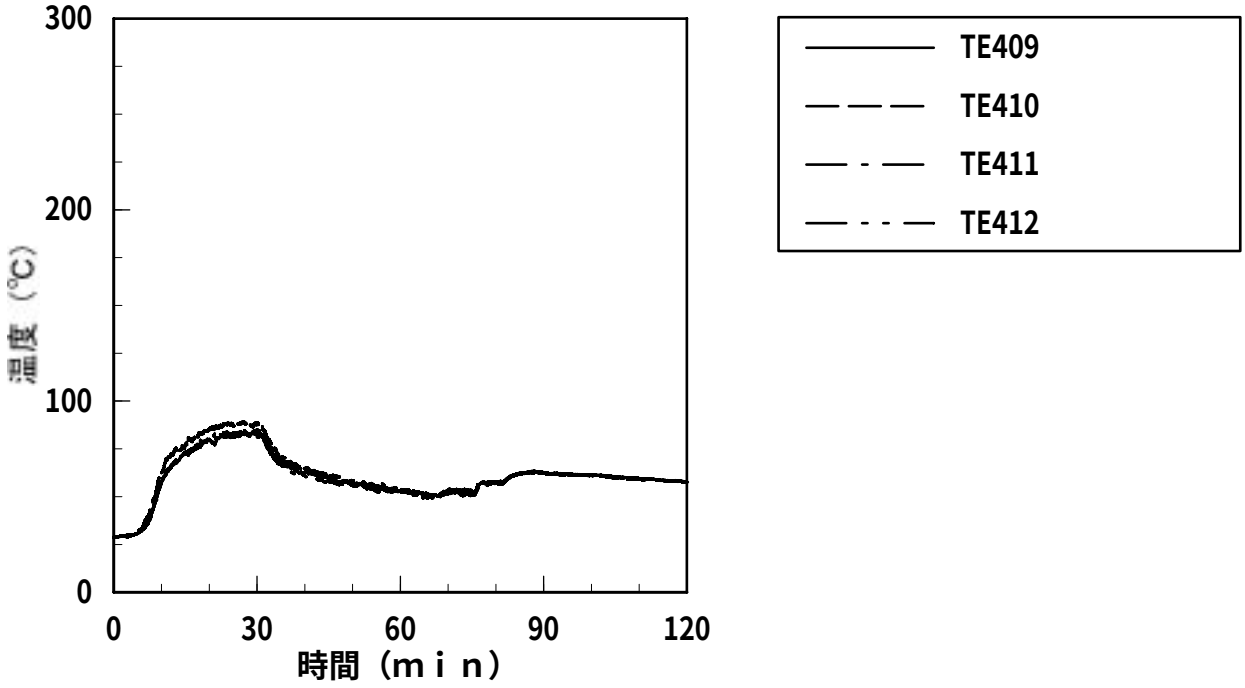


壁より300㎜

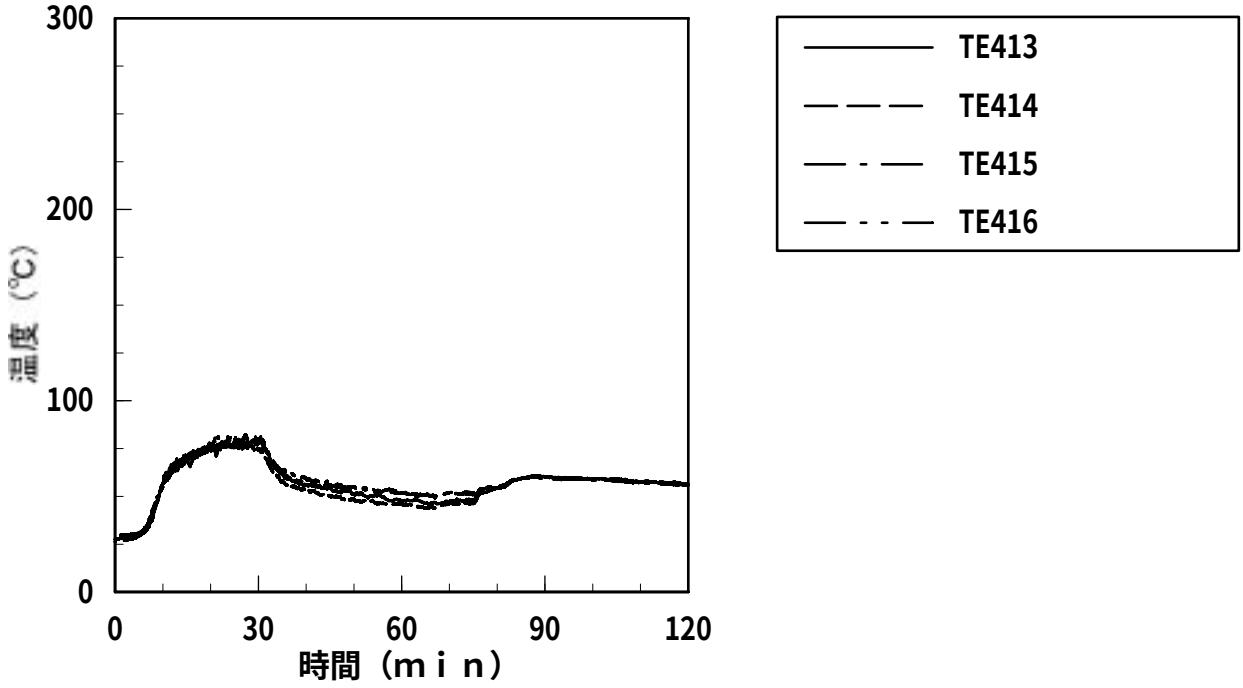


壁より50㎜

図4-22-1 Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度1(Level 500)

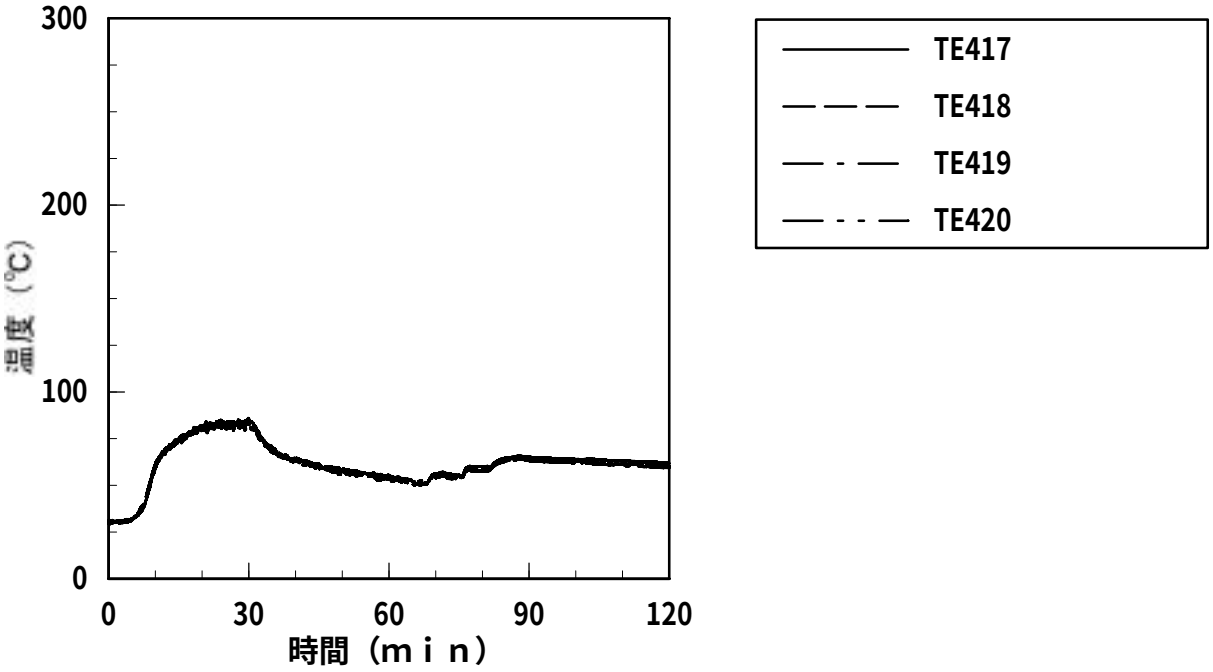


壁より300㎜

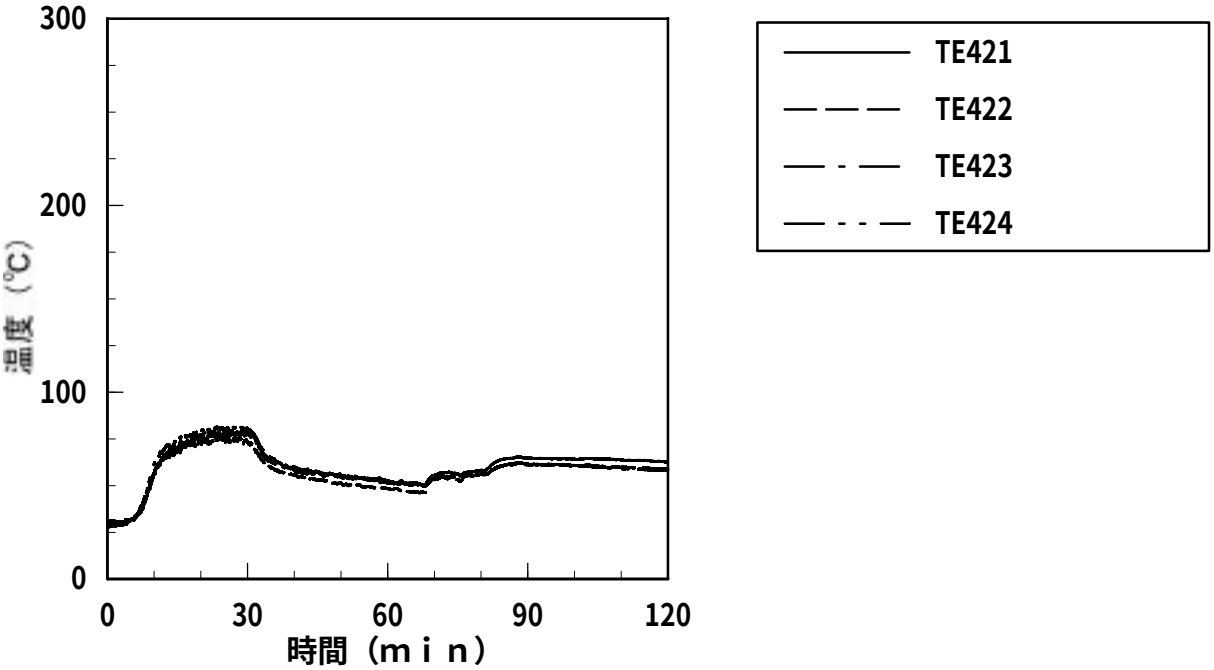


壁より50㎜

図4-22-2 Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度2(Level 1200)

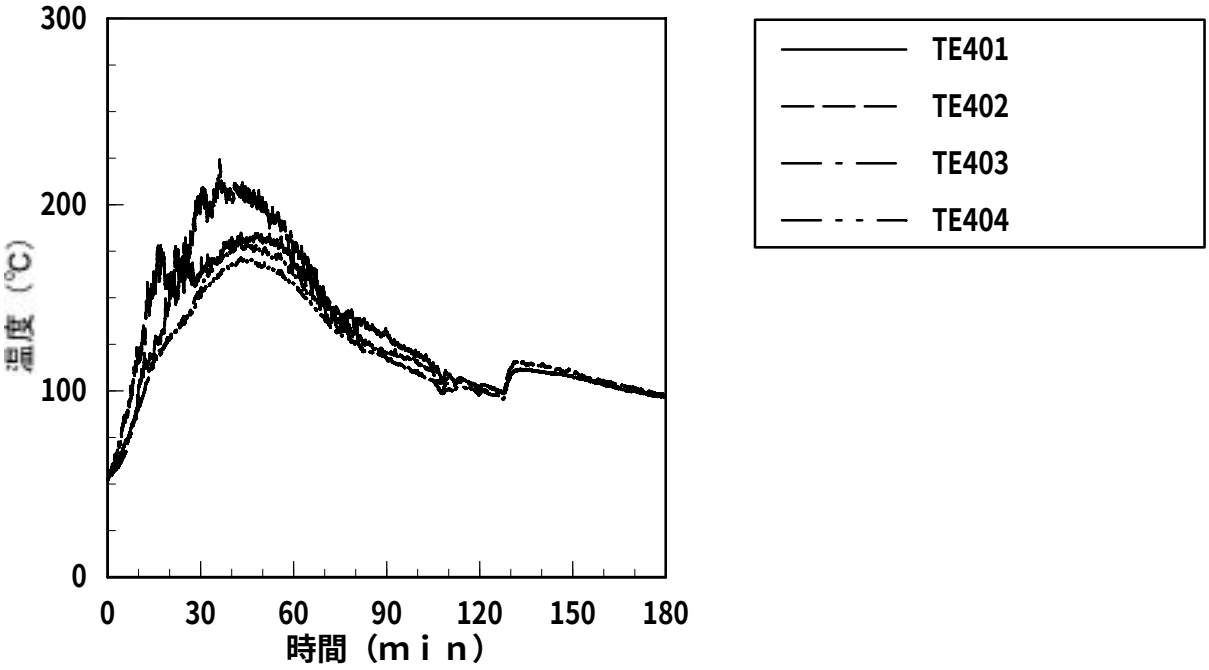


壁より300㎜

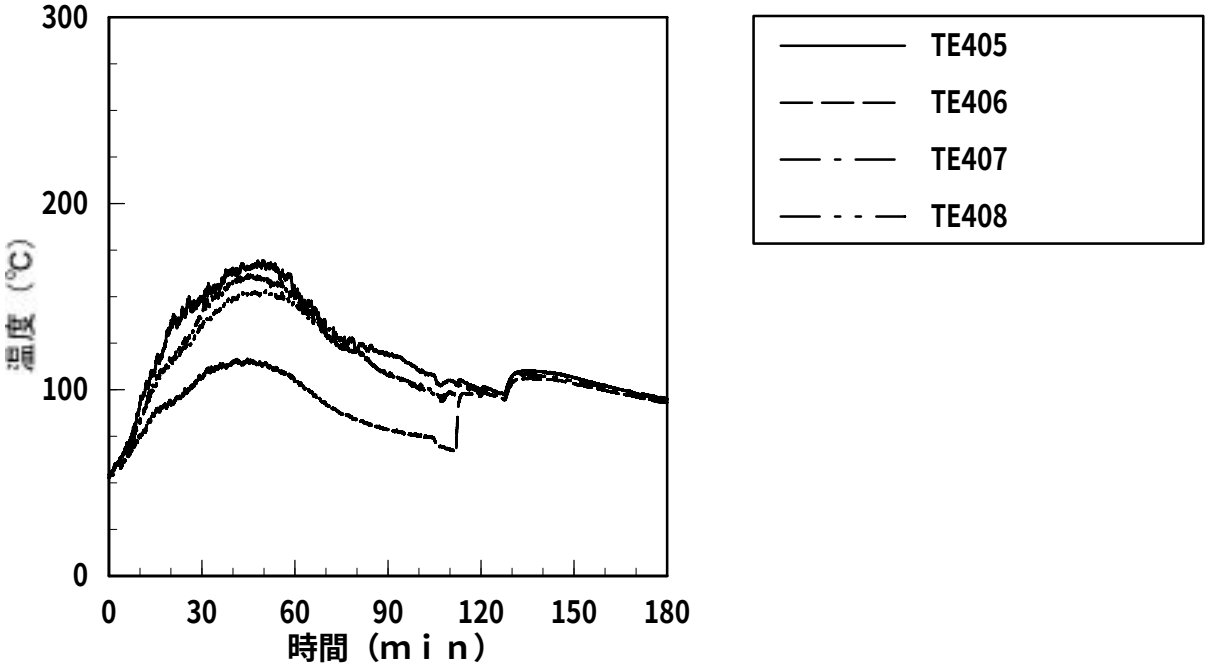


壁より50㎜

図4-22-3 Run-F7-4 FRAT-1容器内ガス温度3(Level 1900)

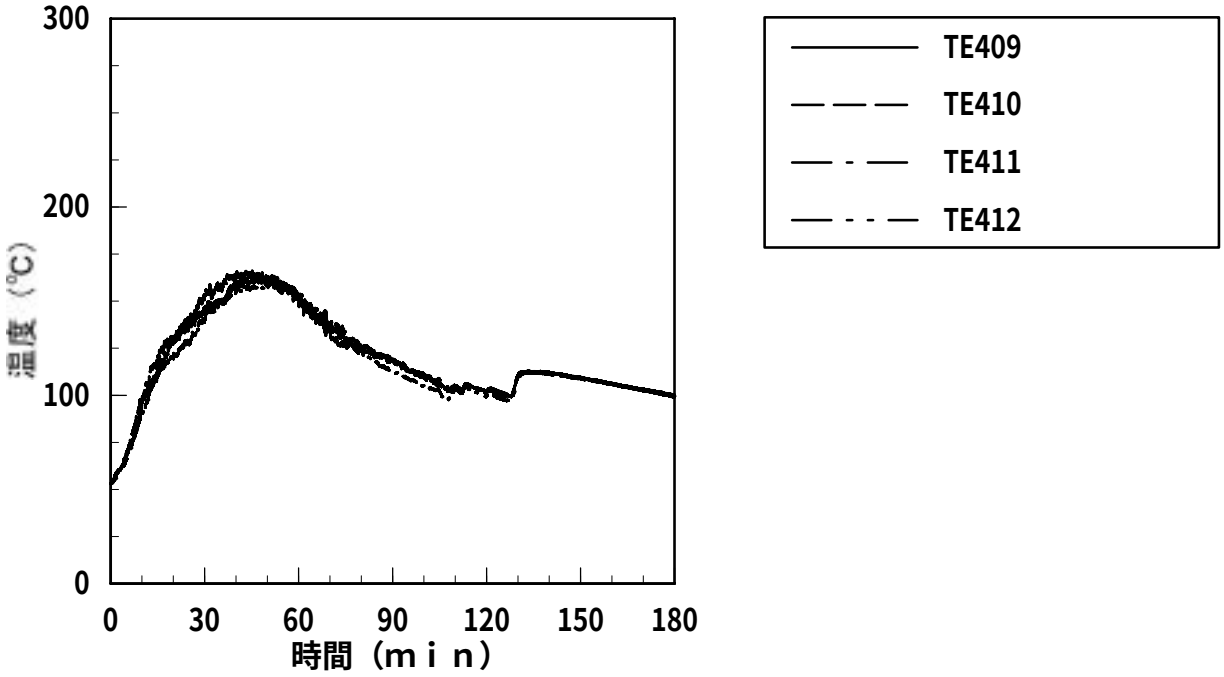


壁より300㎜

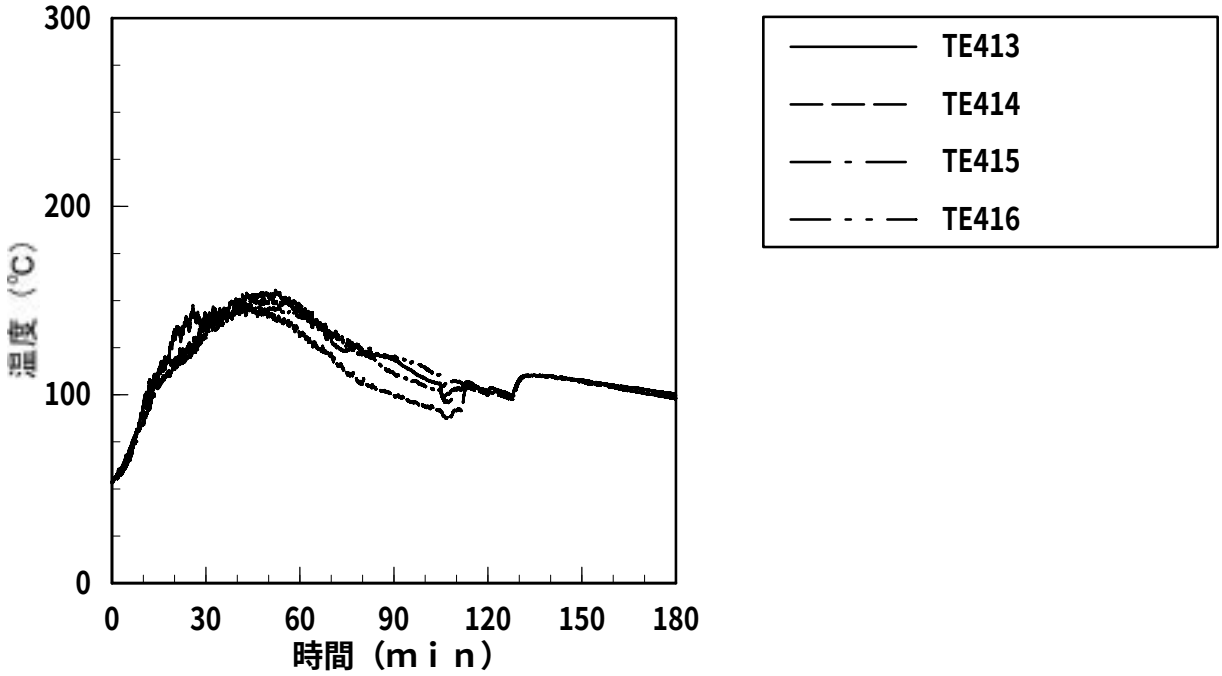


壁より50㎜

図4-23-1 Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度1(Level 500)

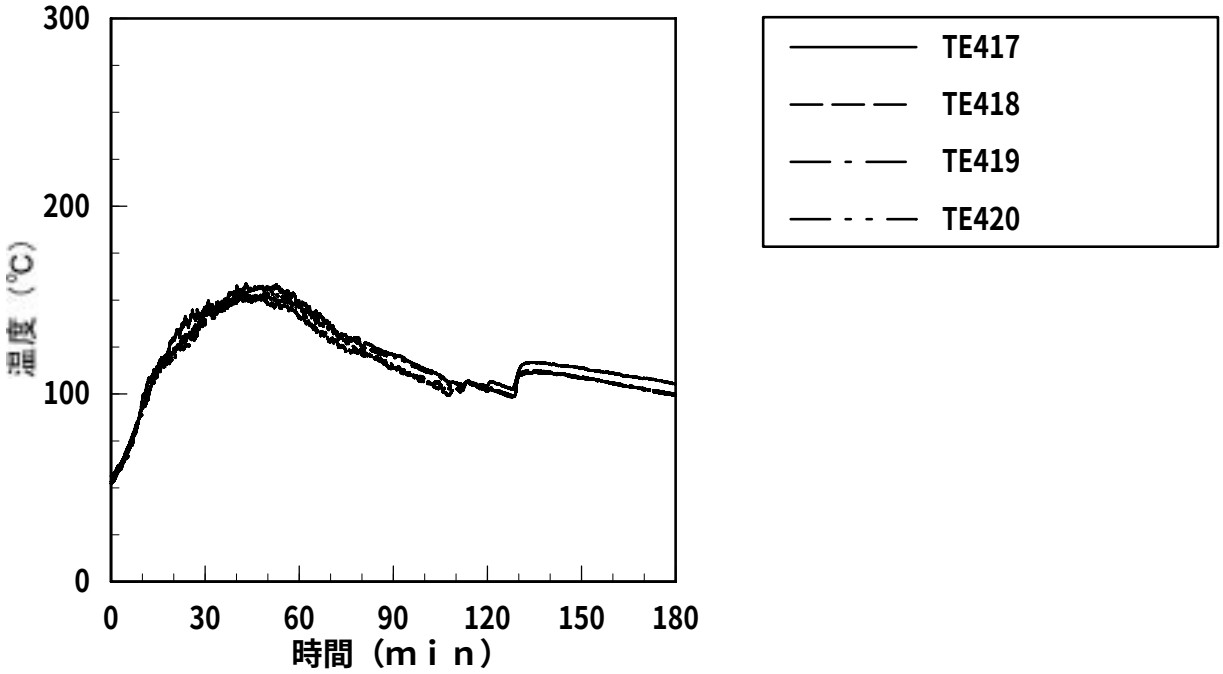


壁より300㎜

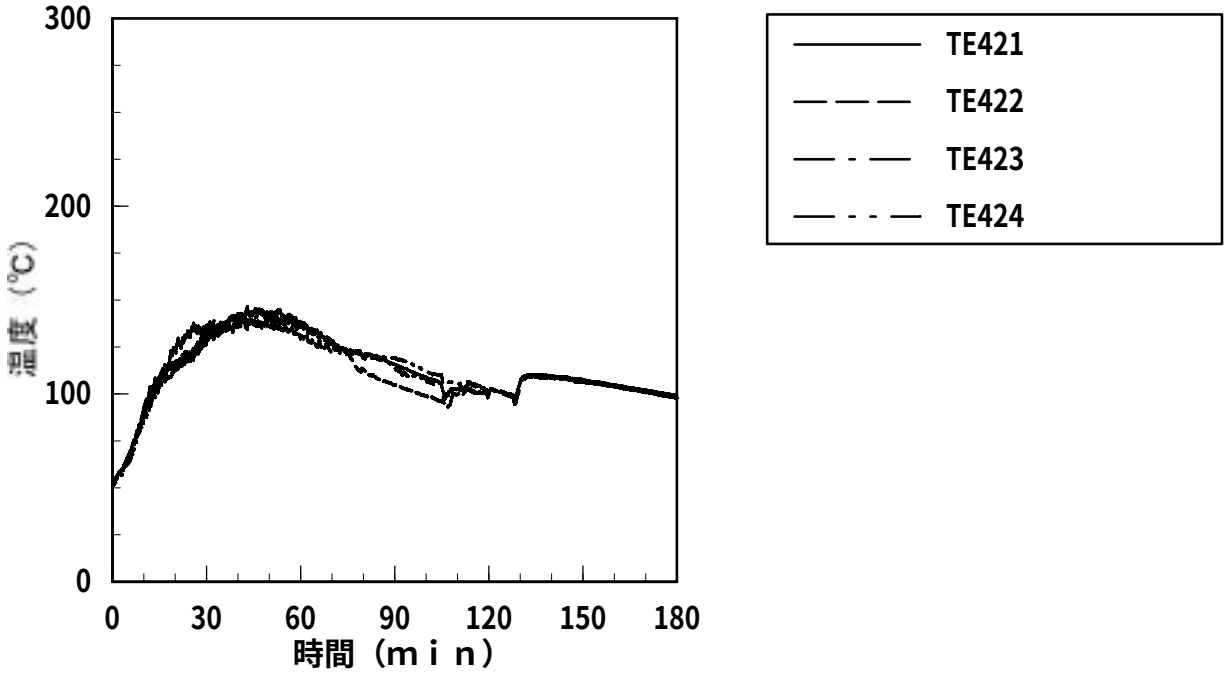


壁より50㎜

図4-23-2 Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度2(Level 1200)

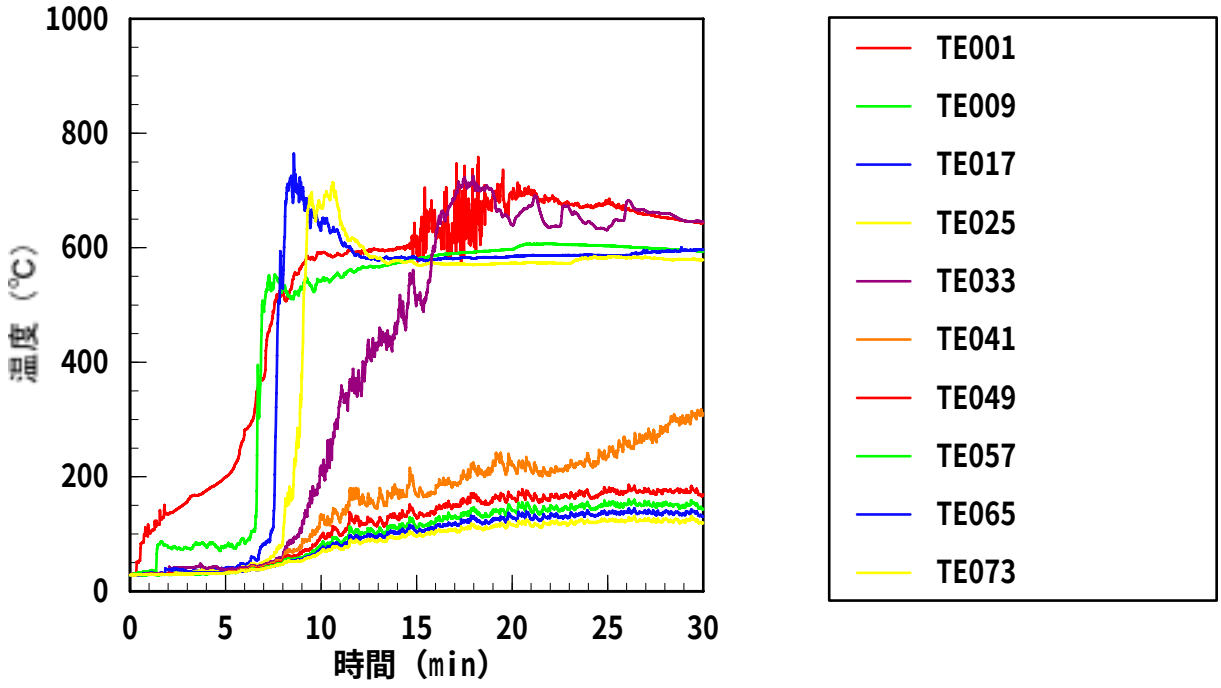


壁より300㎜

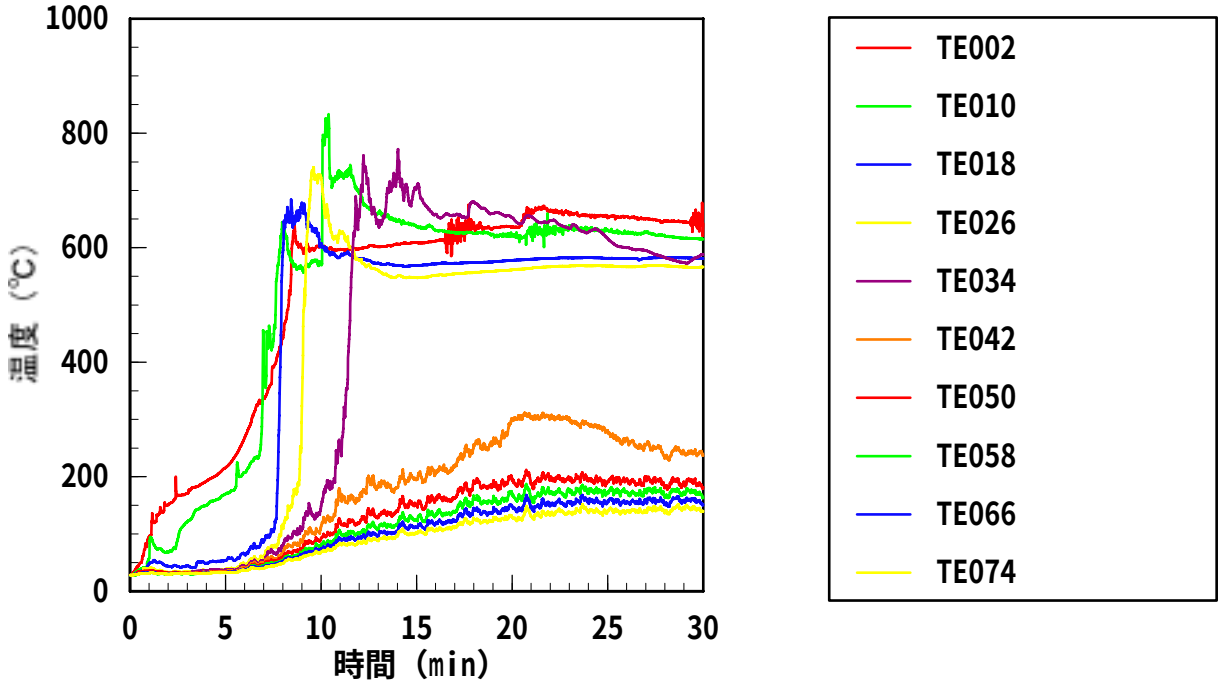


壁より50㎜

図4-23-3 Run-F8-2 FRAT-1容器内ガス温度3(Level 1900)

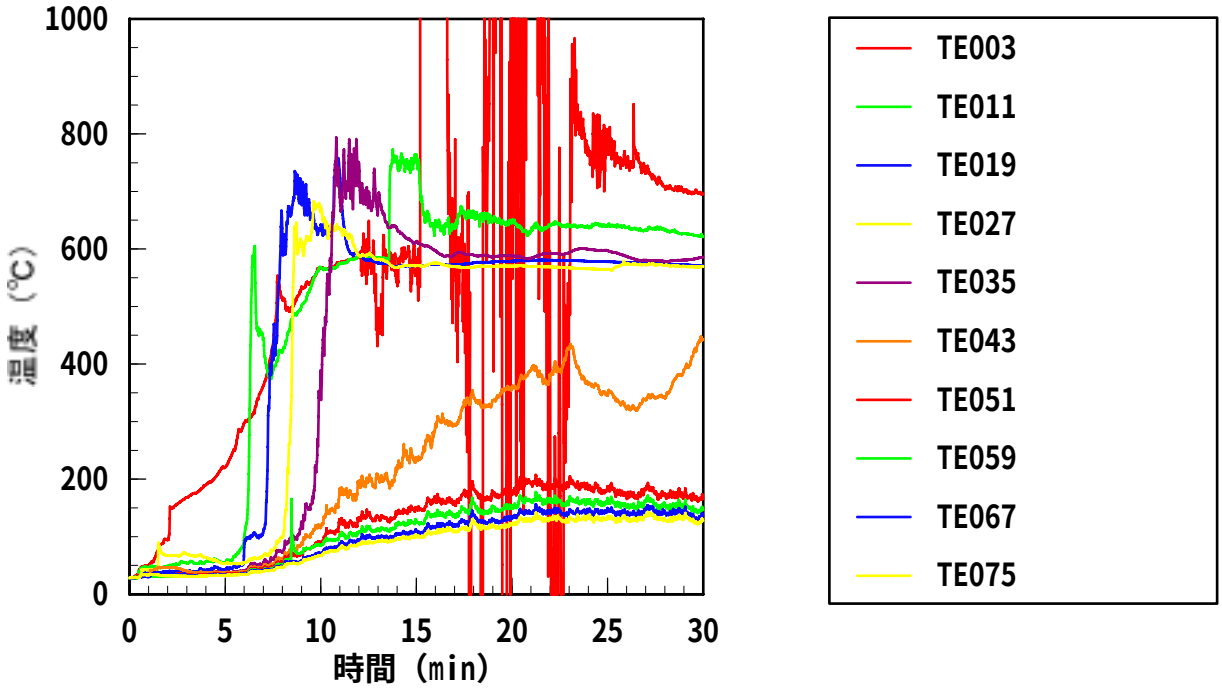


TE001列：0°方向

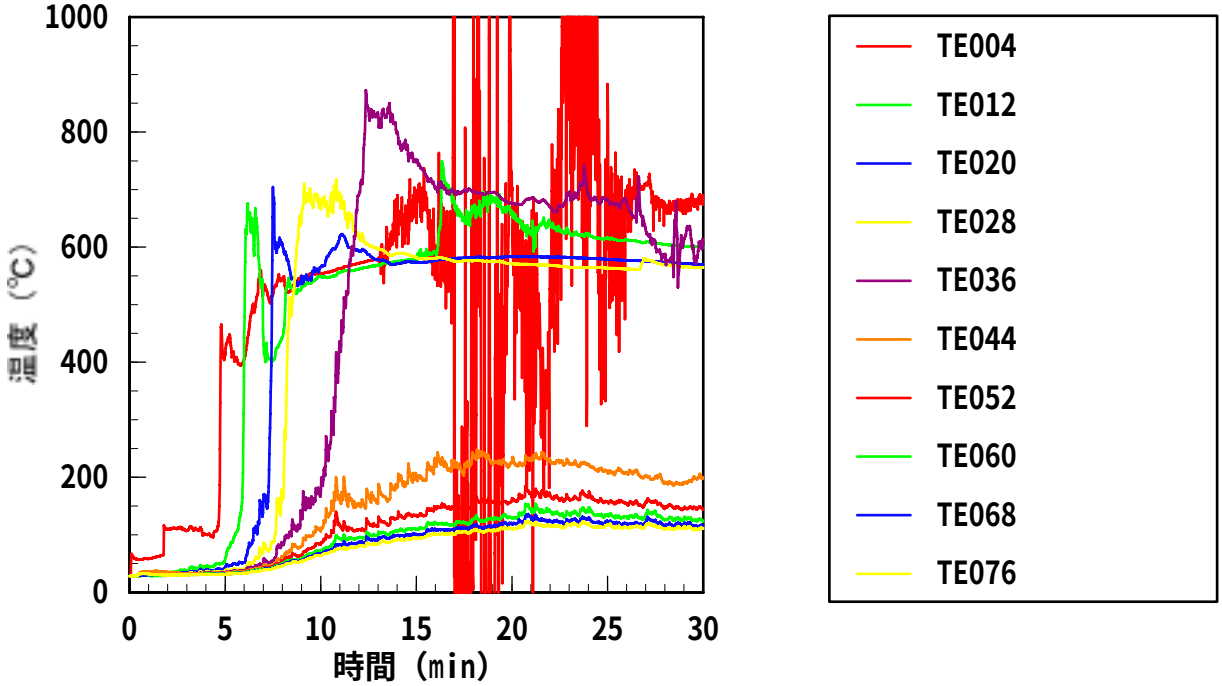


TE002列：45°方向

図4-24-1　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化1

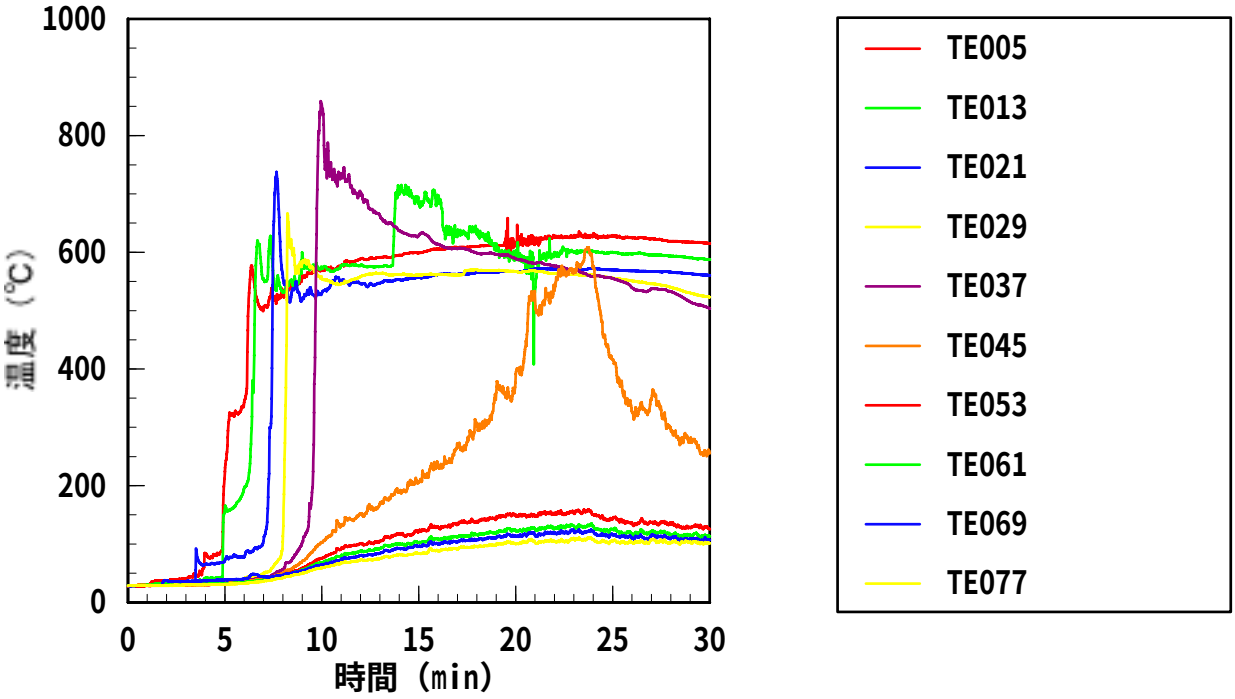


TE003列：90°方向

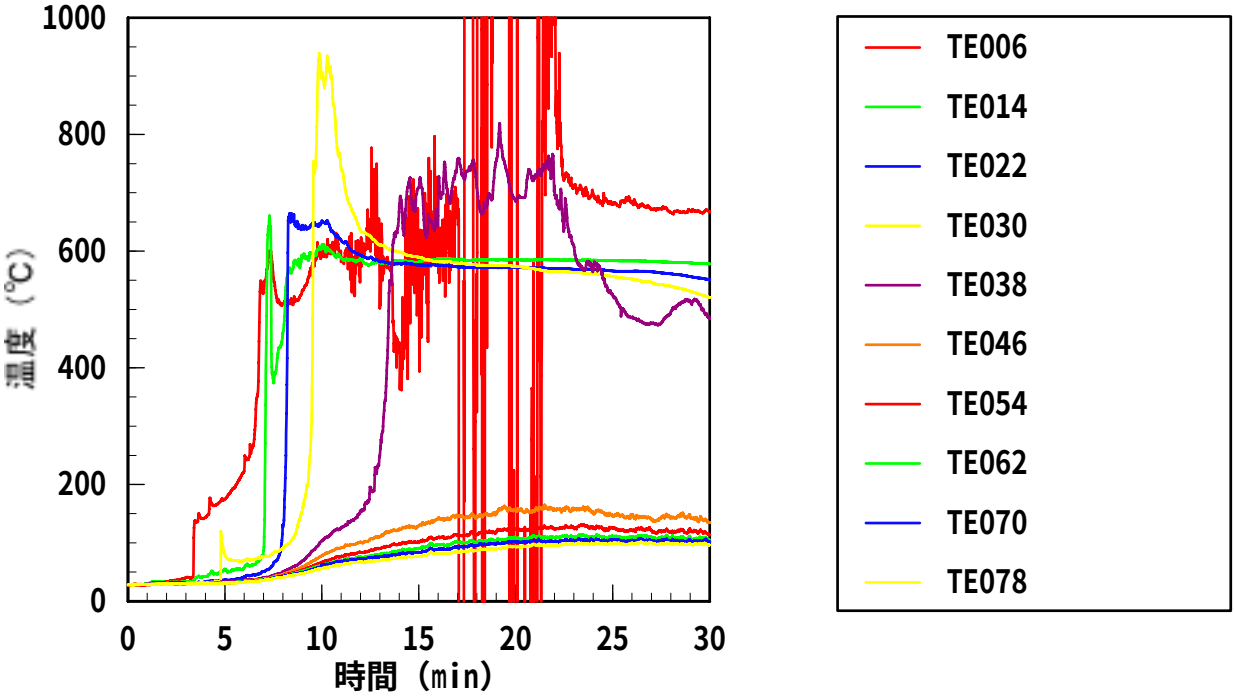


TE004列：135°方向

図4-24-2　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化2

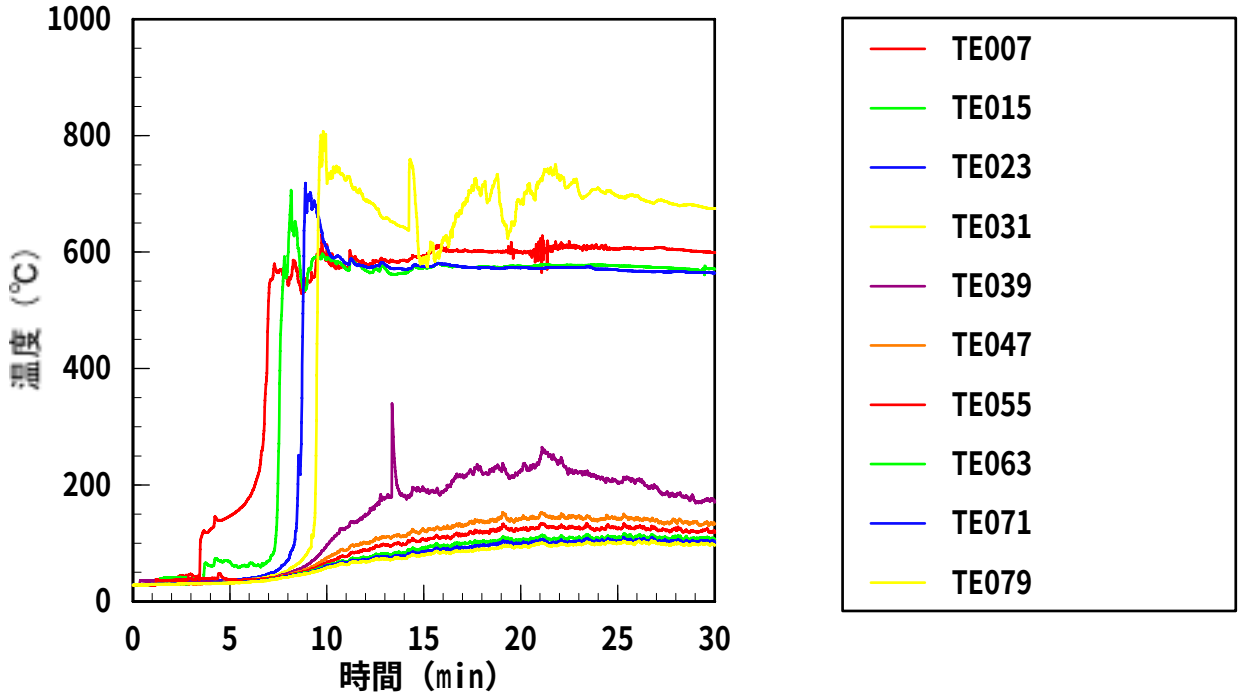


TE005列：180°方向

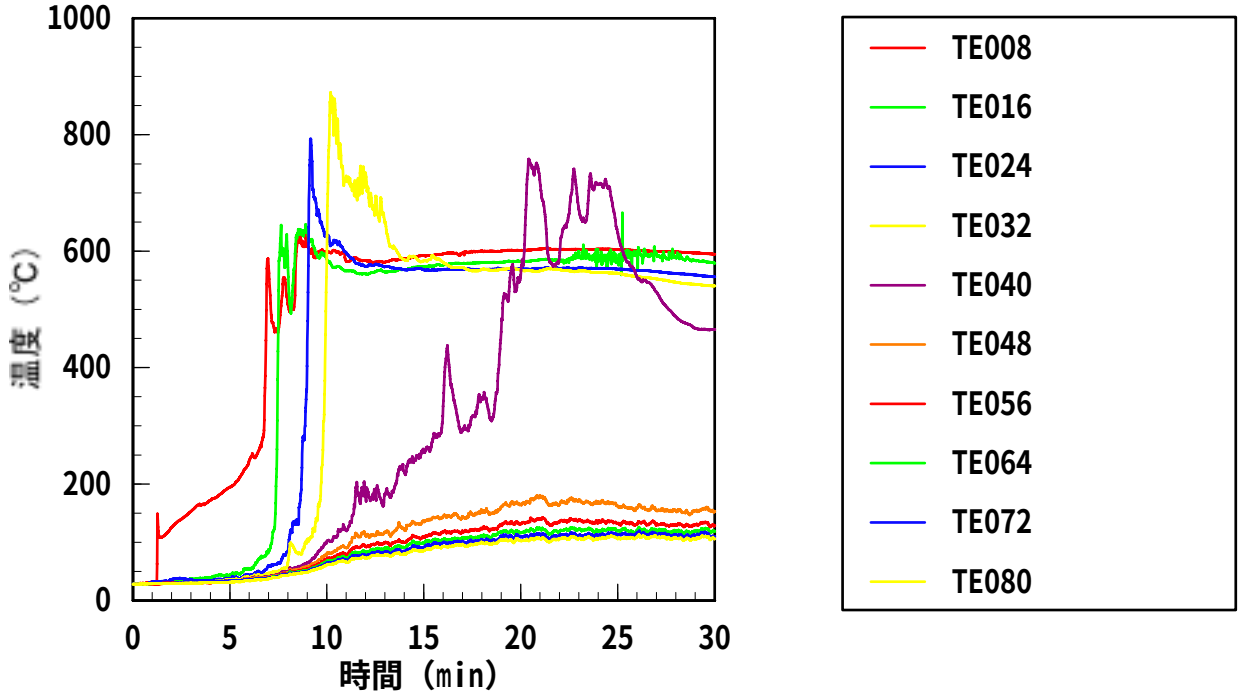


TE006列：225°方向

図4-24-3　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化3

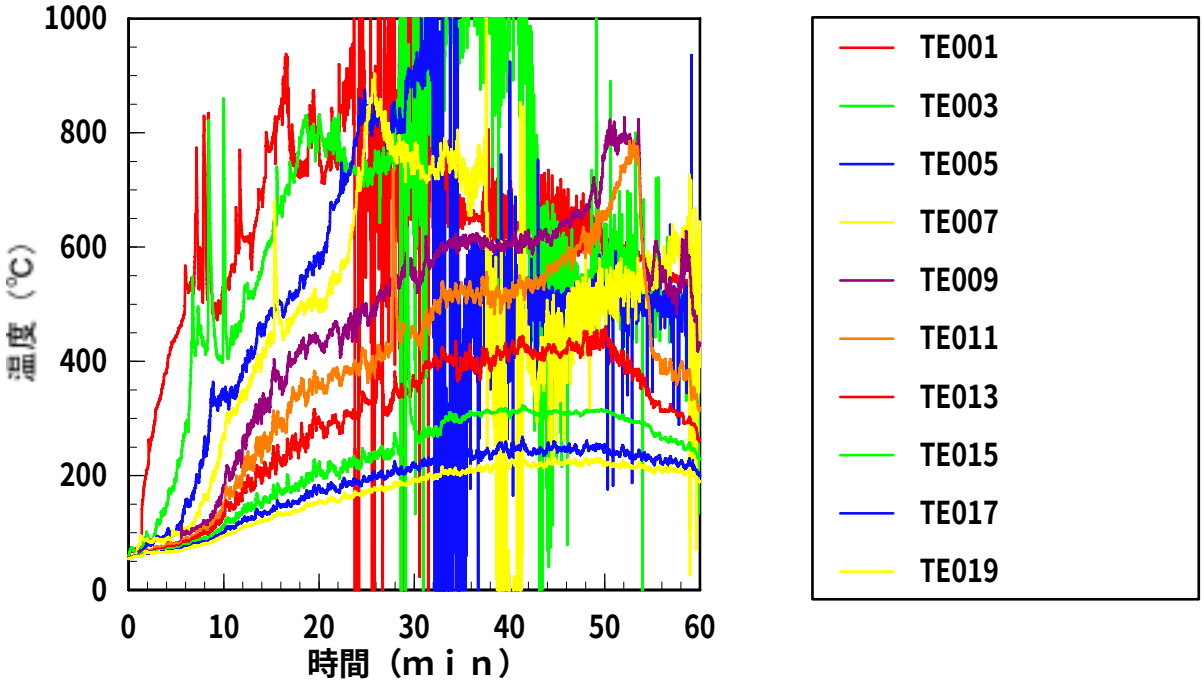


TE007列：270°方向

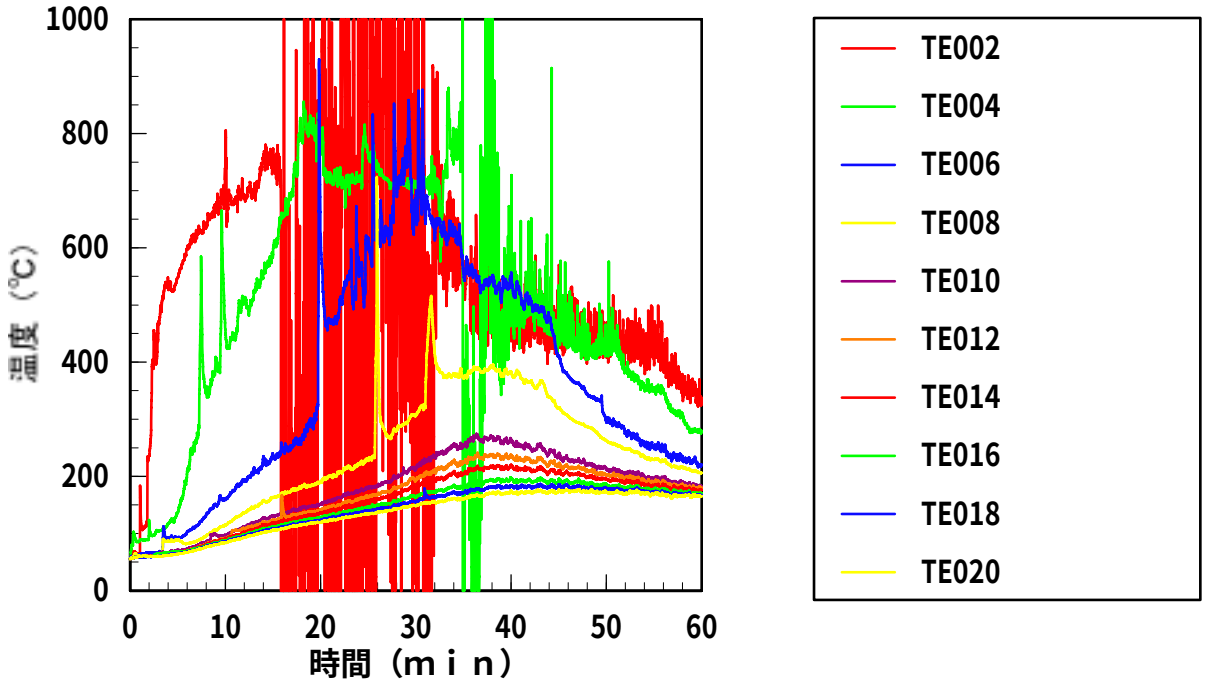


TE008列：315°方向

図4-24-4　Run-F7-4受け皿表面空間熱電対温度変化4

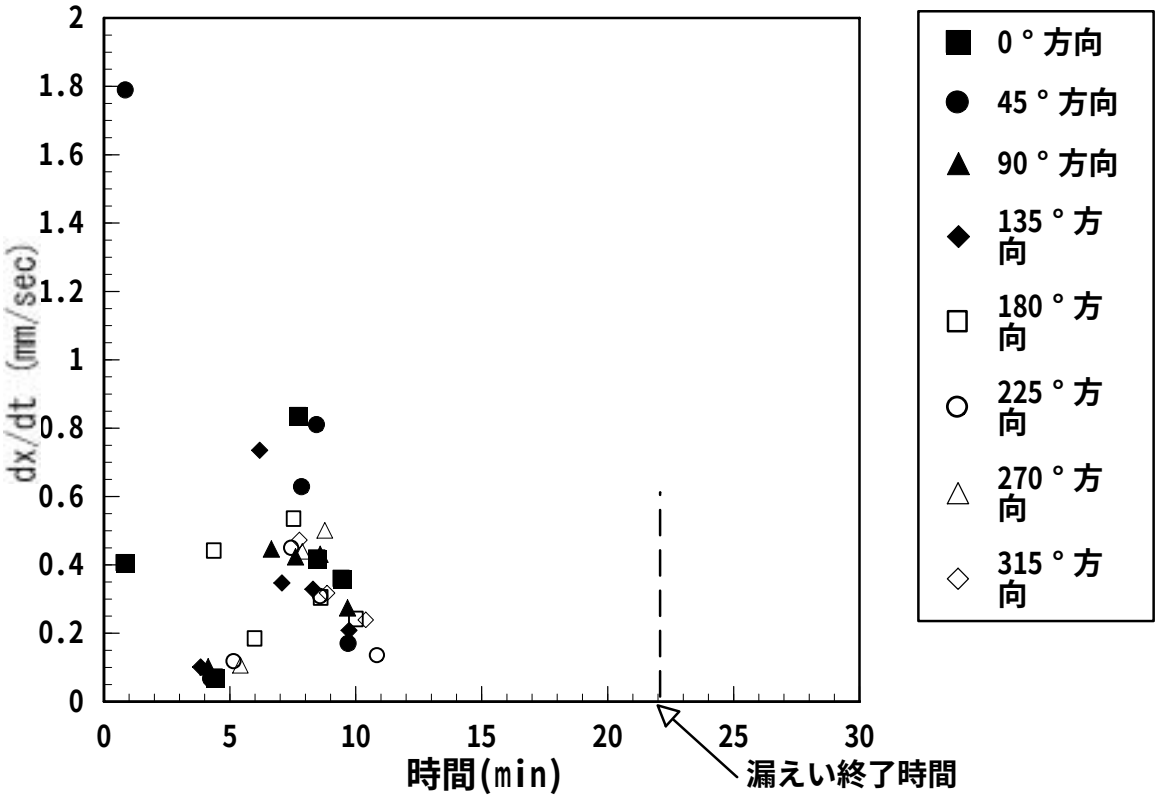


TE001列：45°方向

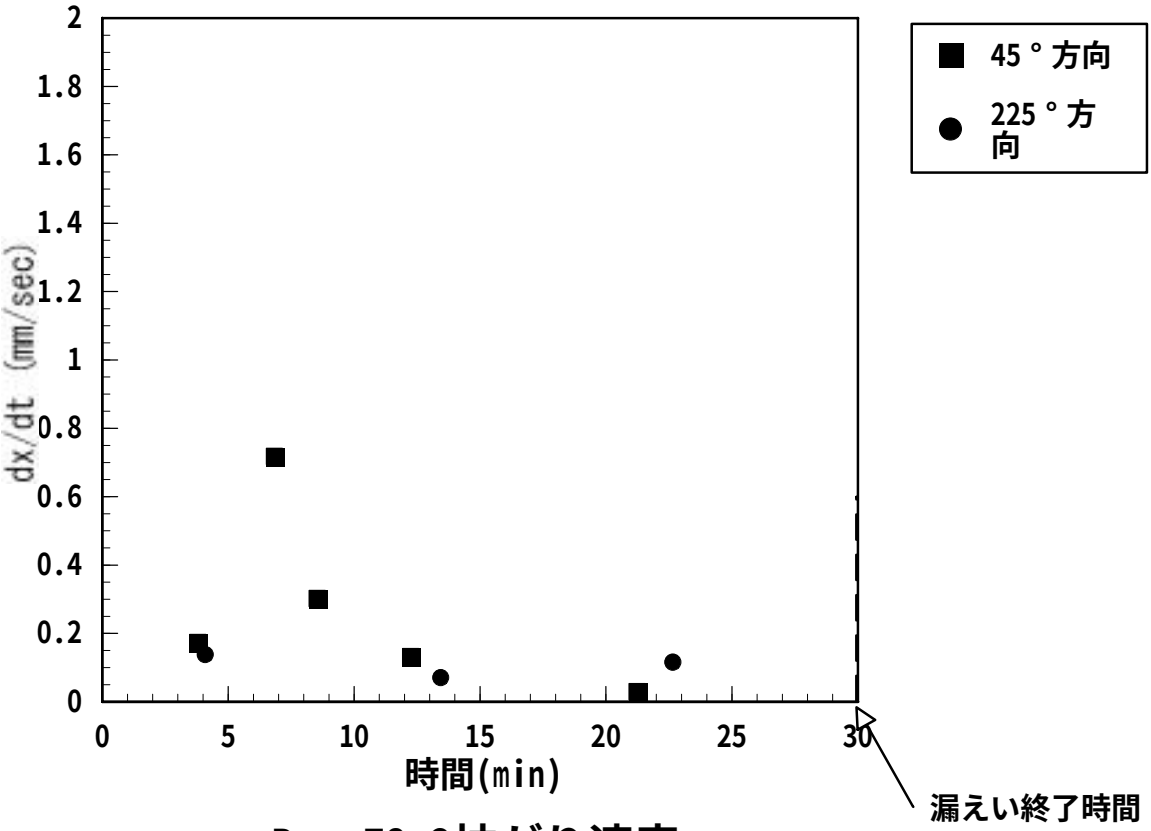


TE002列：225°方向

図4-25 Run-F8-2受け皿表面空間熱電対温度変化



Run-F7-4拡がり速度



Run-F8-2拡がり速度

図4-26　プール拡がり速度

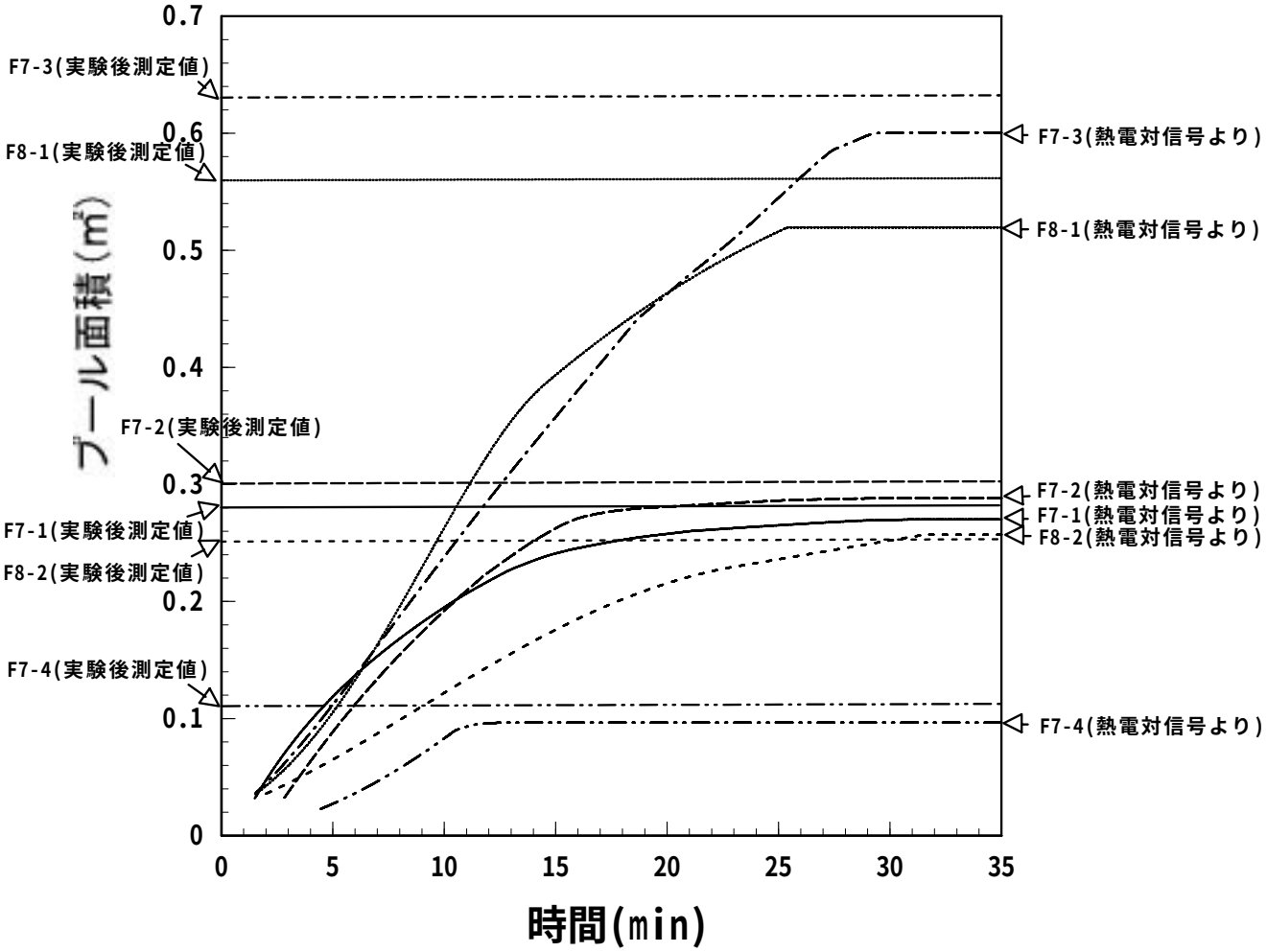


図4-27 プール面積の時間変化

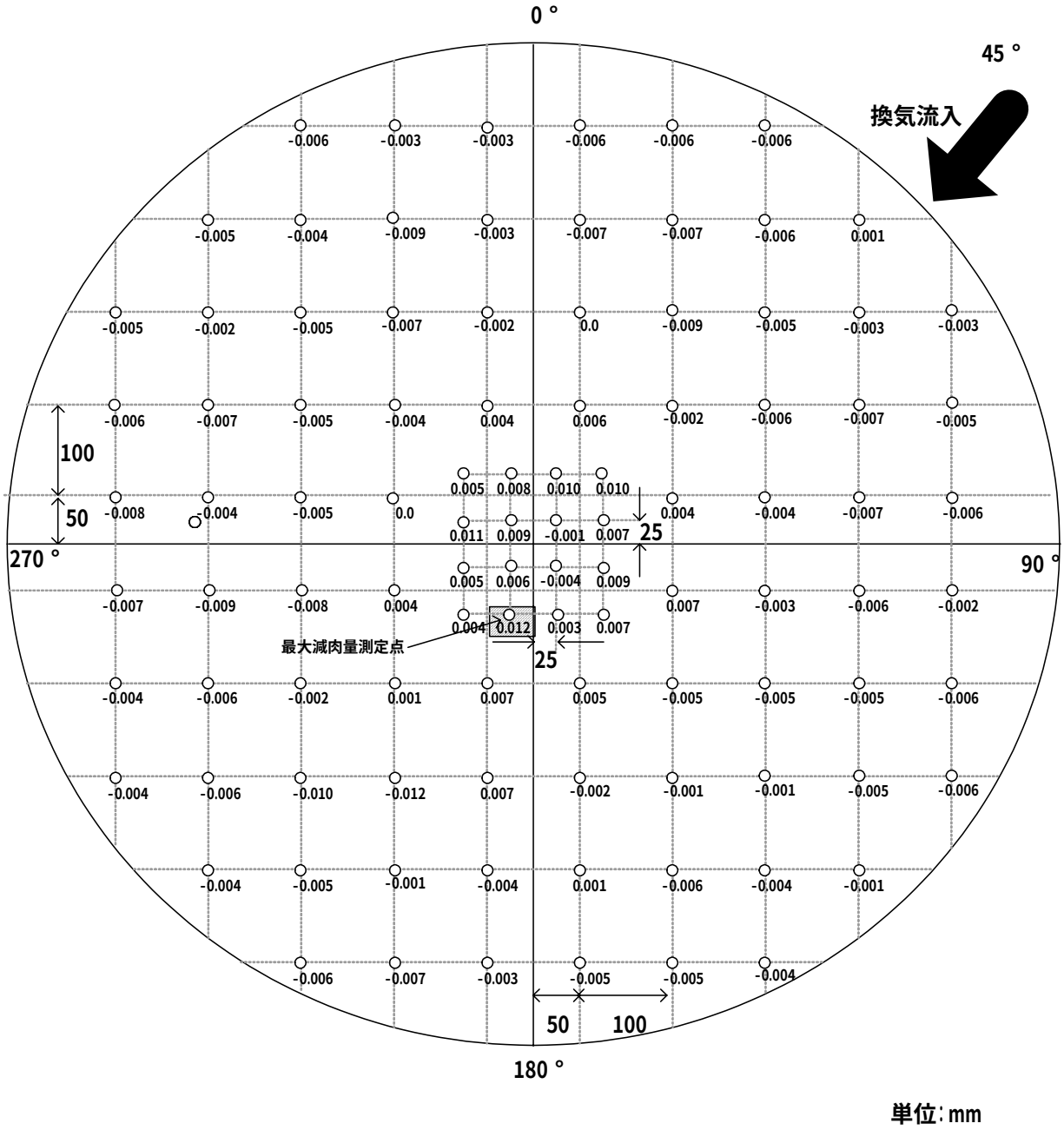
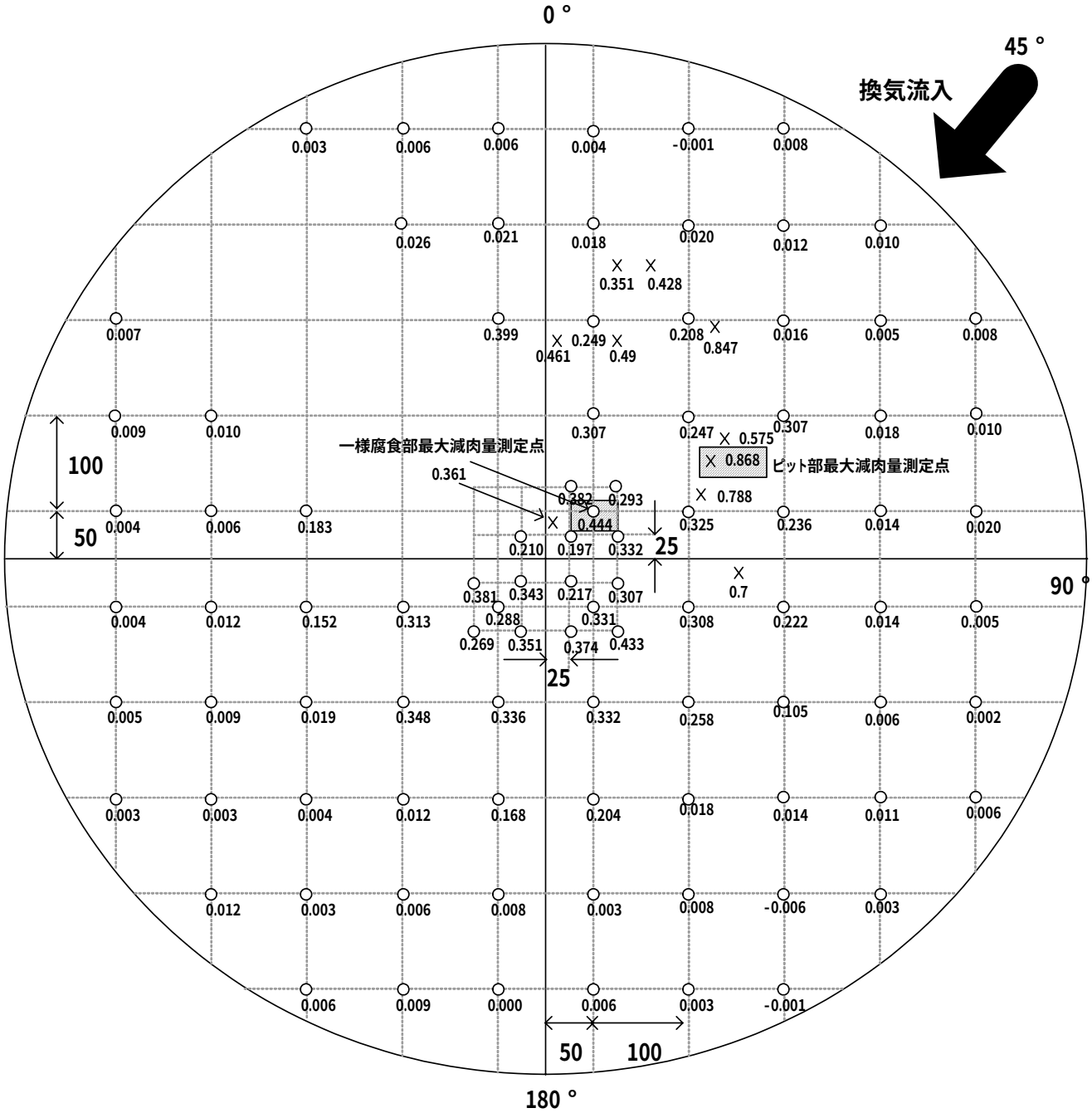


図4-28 Run-F7-4 受け皿減肉量

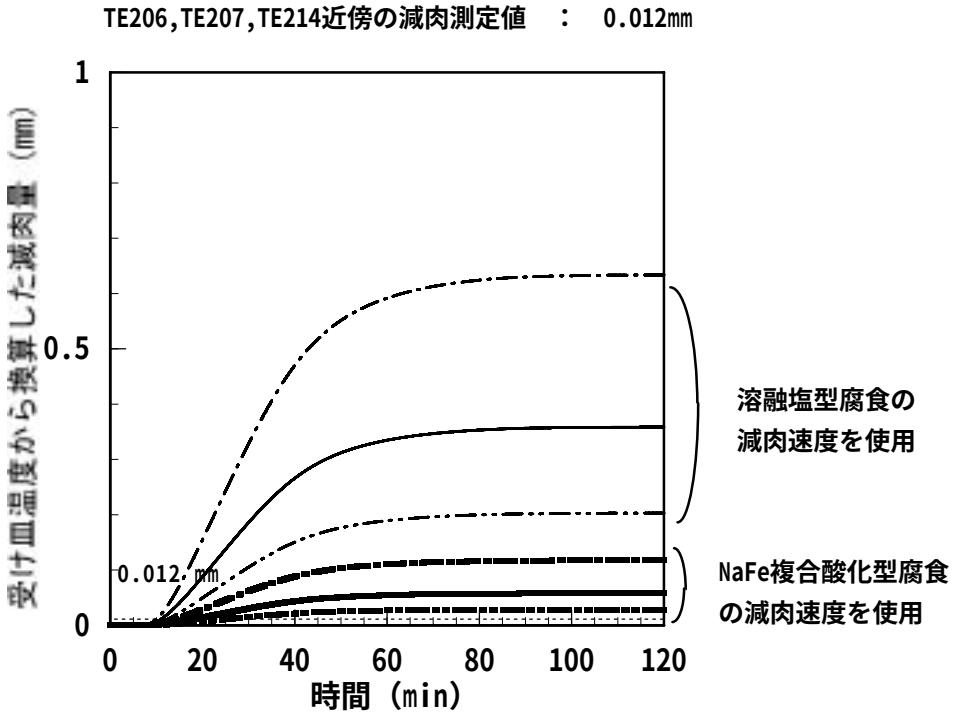


単位：mm

○ ：(実験前の肉厚) -(実験後の肉厚)

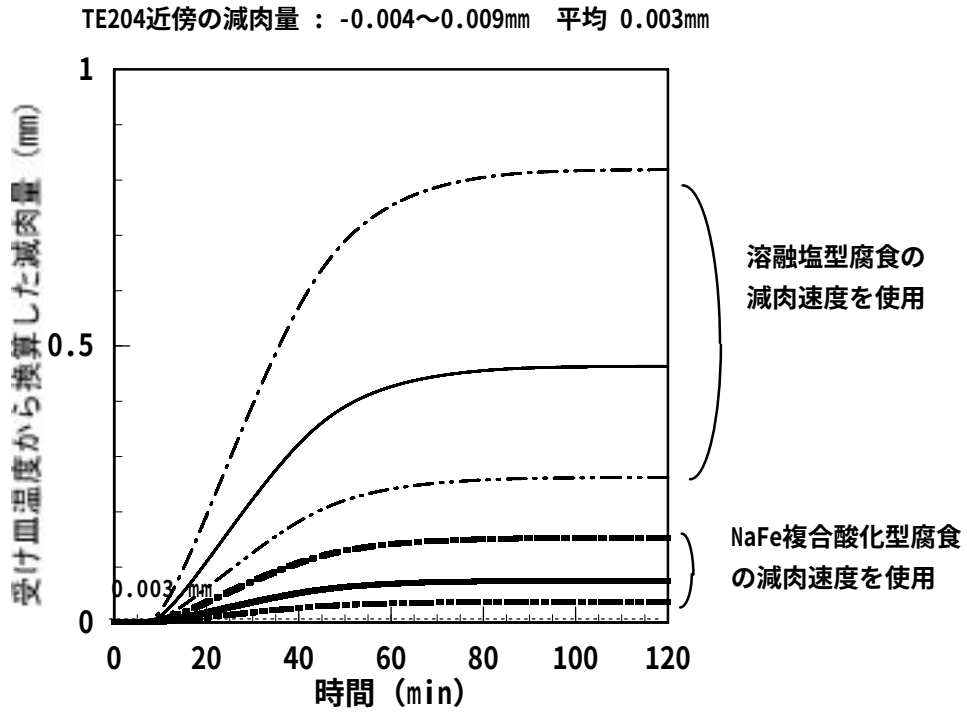
× ：(平均肉厚:5.881mm) -(ピット部肉厚)

図4-29 Run-F8-2受け皿減肉量



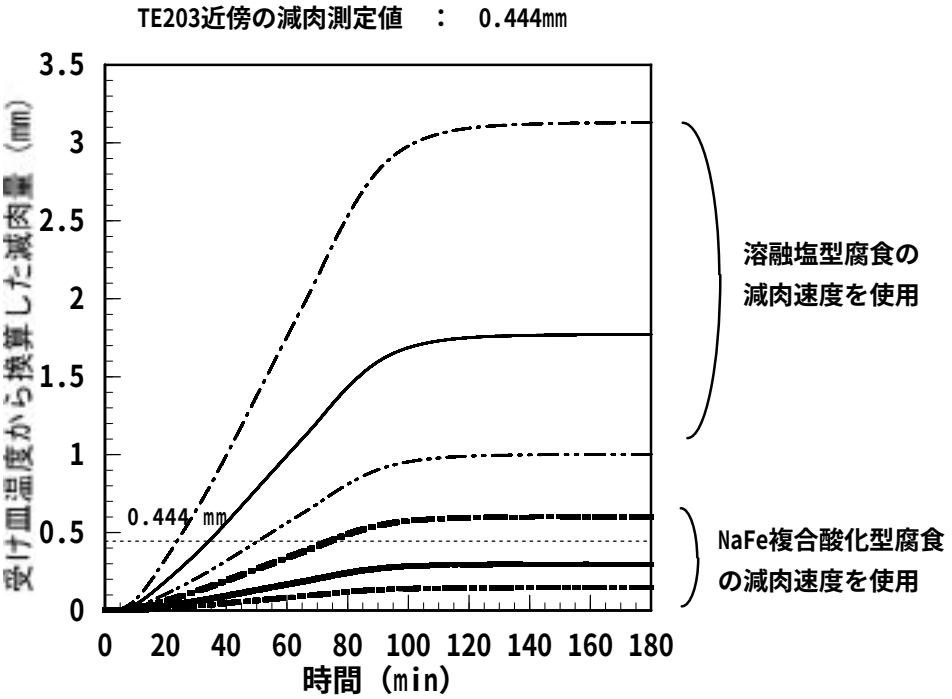
最大減肉点（TE206,TE207,TE214近傍）の測定温度から換算した減肉量

※測定温度は算術平均した

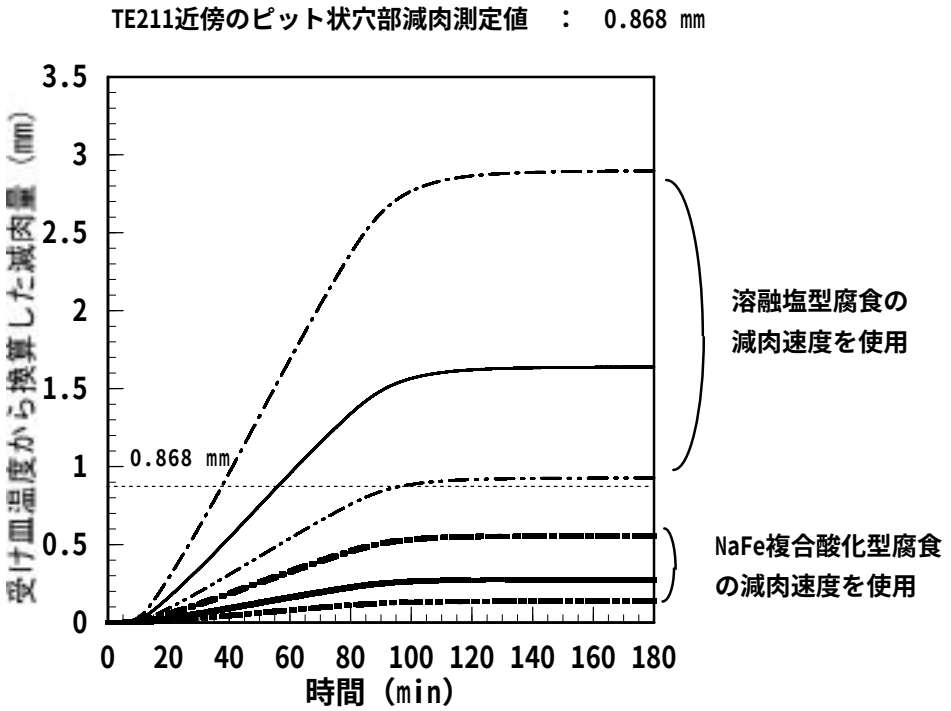


最高温度測定点（TE204）の測定温度から換算した減肉量

図4-30　Run-F7-4受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量

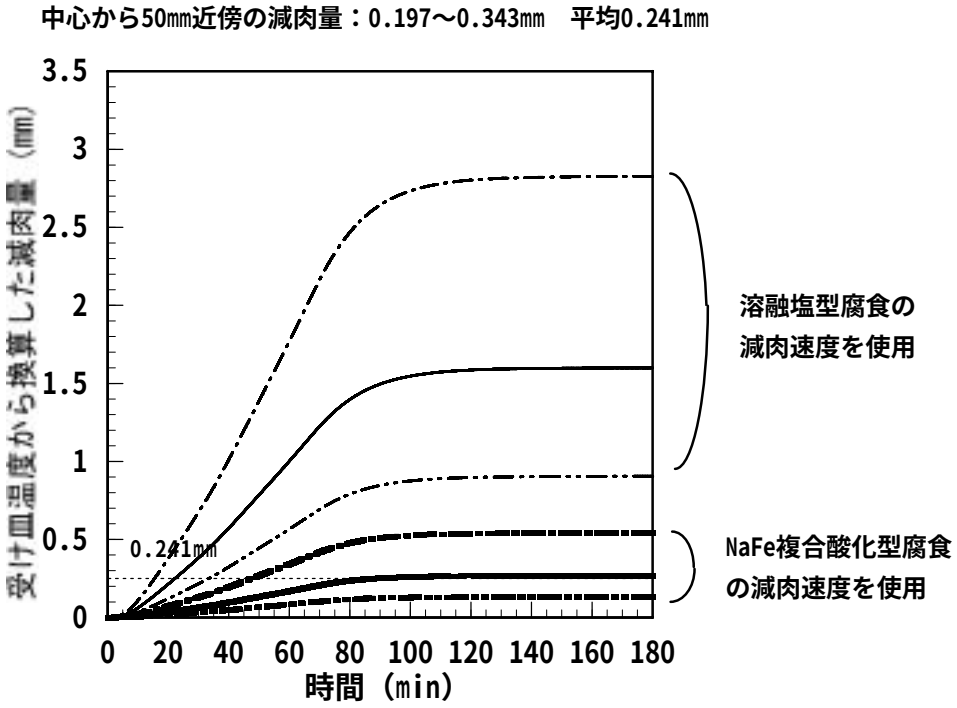


最大減肉点（TE203近傍）の測定温度から換算した減肉量

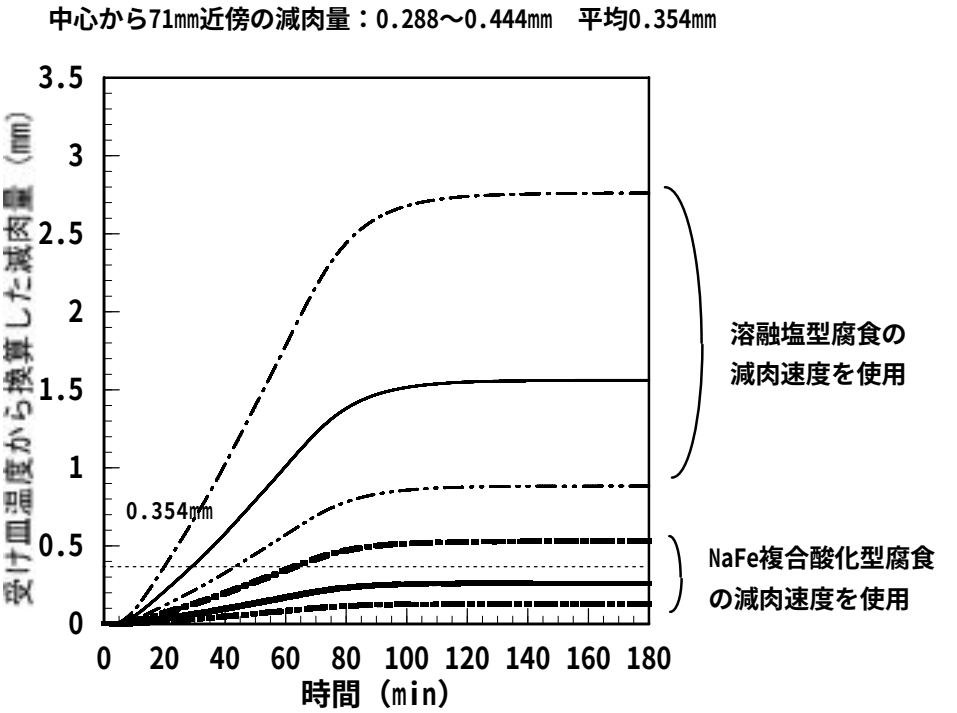


ピット状穴部最大減肉点（TE211近傍）の測定温度から
換算した減肉量

図4-31-1
Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量1



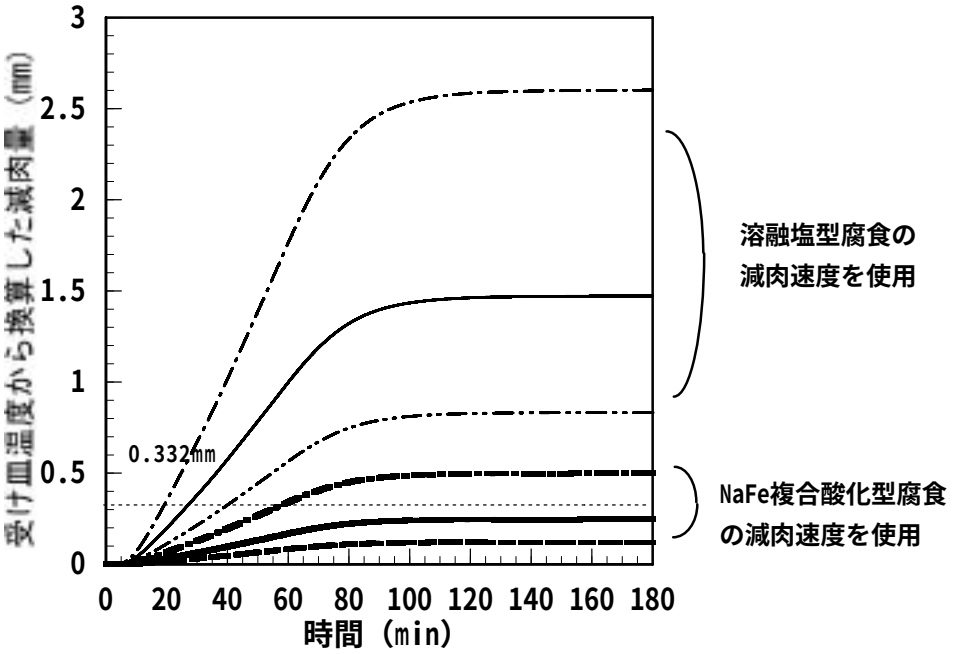
中心から50㎜の平均測定温度から換算した減肉量



中心から71㎜の平均測定温度から換算した減肉量

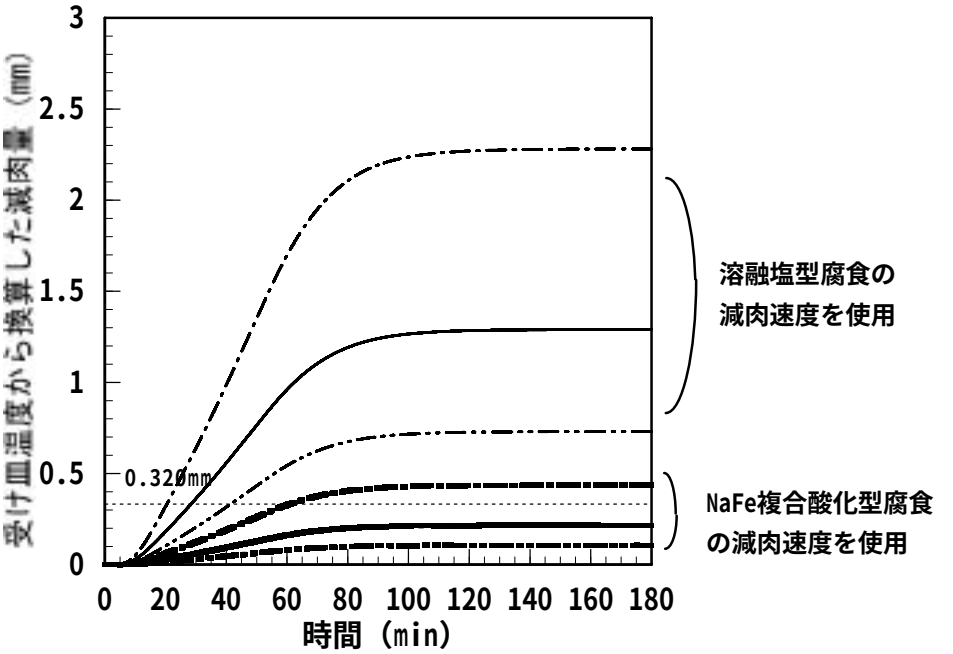
図4-31-2
Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量2

中心から100㎜近傍の減肉量：0.269～0.433㎜　平均0.332㎜



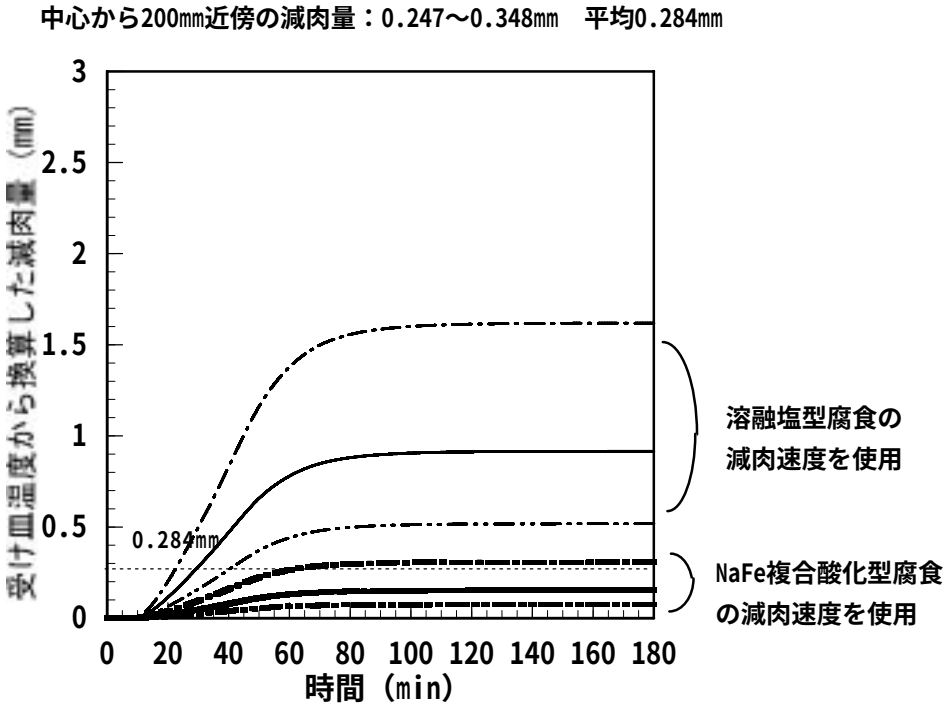
中心から100㎜の平均測定温度から換算した減肉量

中心から141㎜近傍の減肉量：0.307～0.336㎜　平均0.320㎜



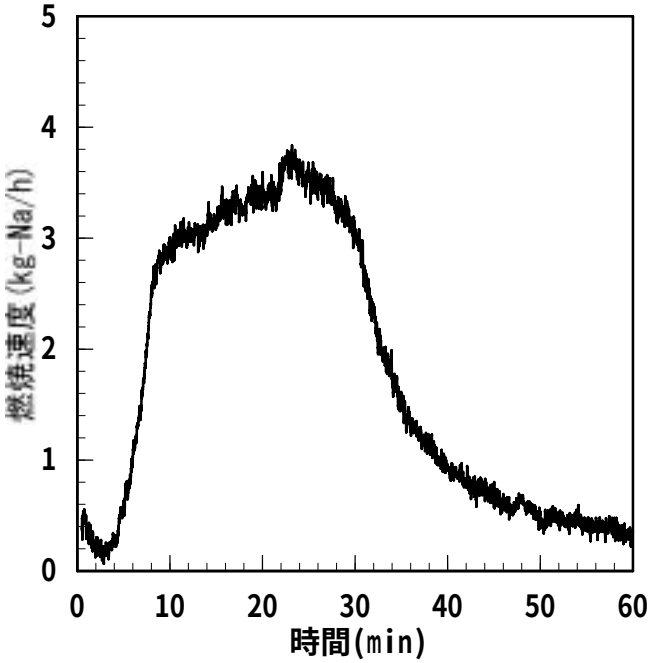
中心から141㎜の平均測定温度から換算した減肉量

図4-31-3
Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量3

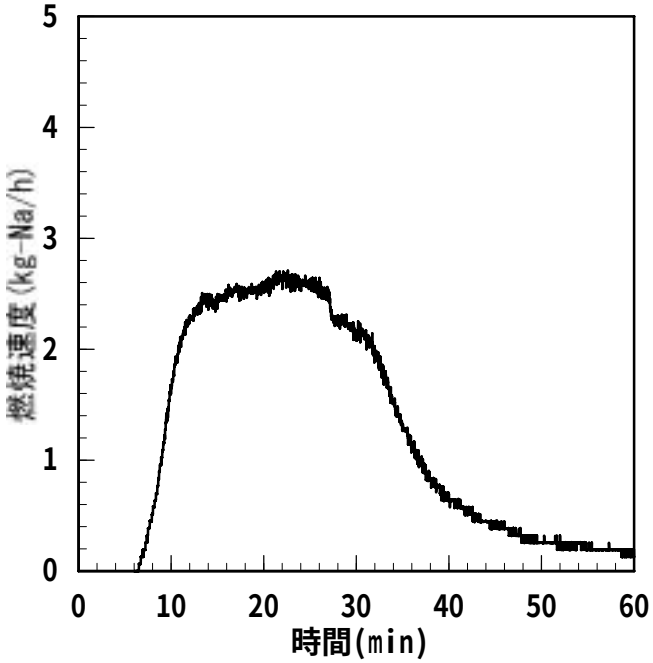


中心から200㎜の平均測定温度から換算した減肉量

図4-31-4
Run-F8-2受け皿裏面温度測定値から換算した減肉量4

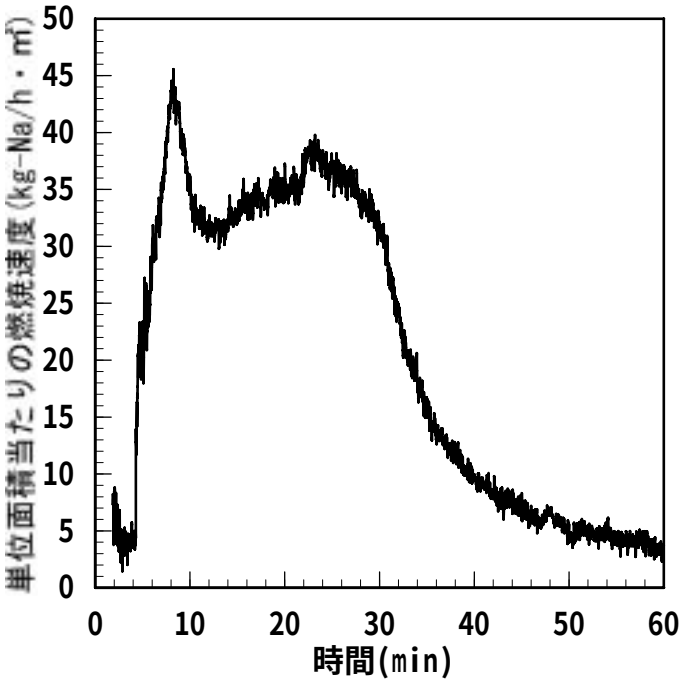


熱量変化から導出

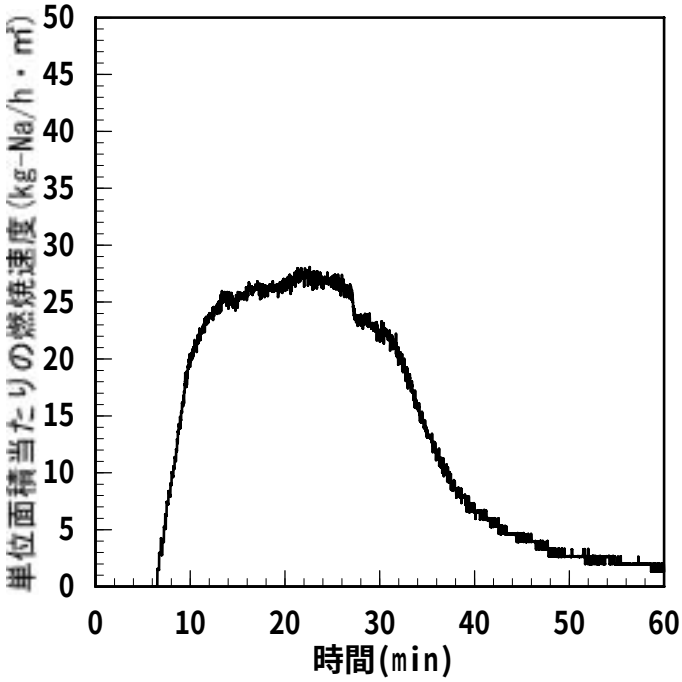


酸素濃度変化から導出

図4-32-1 Run-F7-4燃焼速度

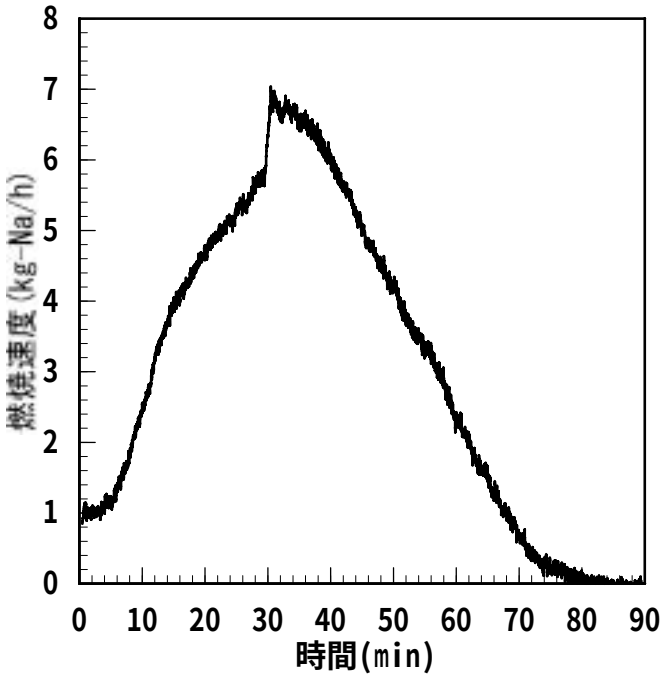


熱量変化から導出

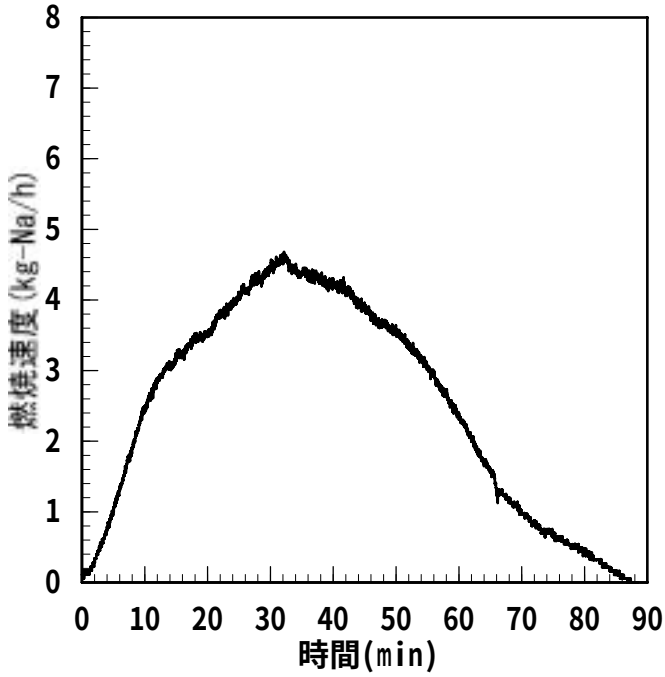


酸素濃度変化から導出

図4-32-2 Run-F7-4単位面積当たりの燃焼速度

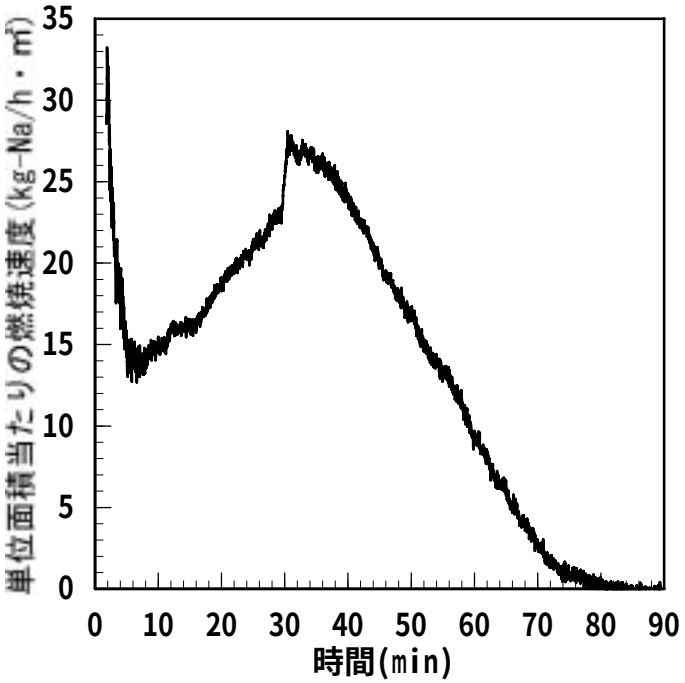


熱量変化から導出

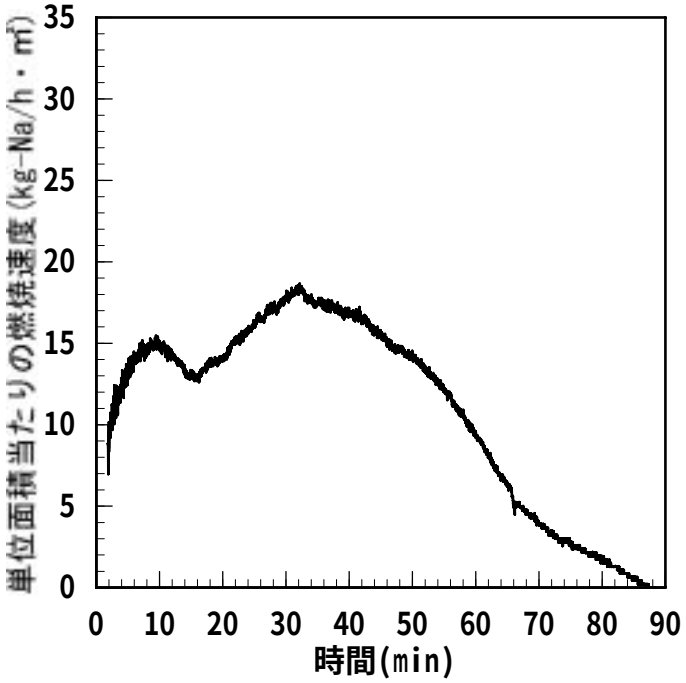


酸素濃度変化から導出

図4-33-1 Run-F8-2燃焼速度

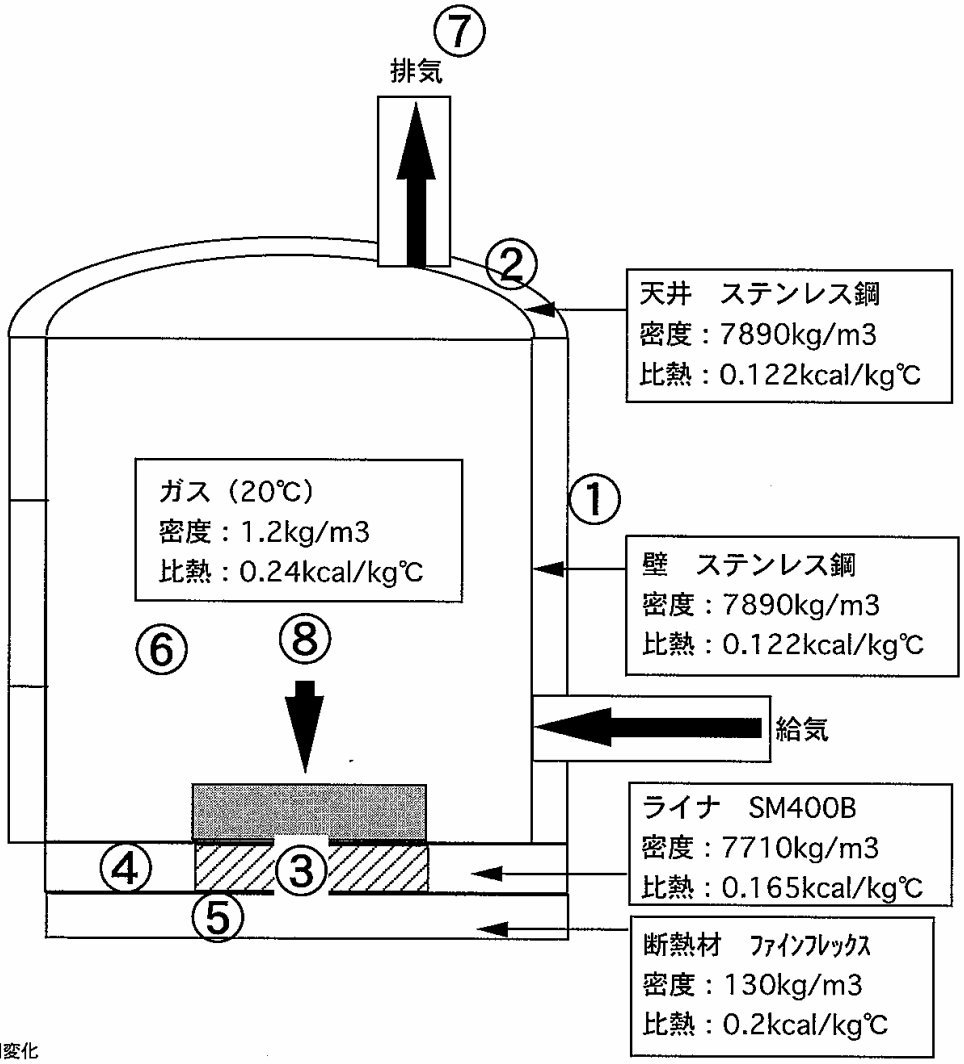


熱量変化から導出



酸素濃度変化から導出

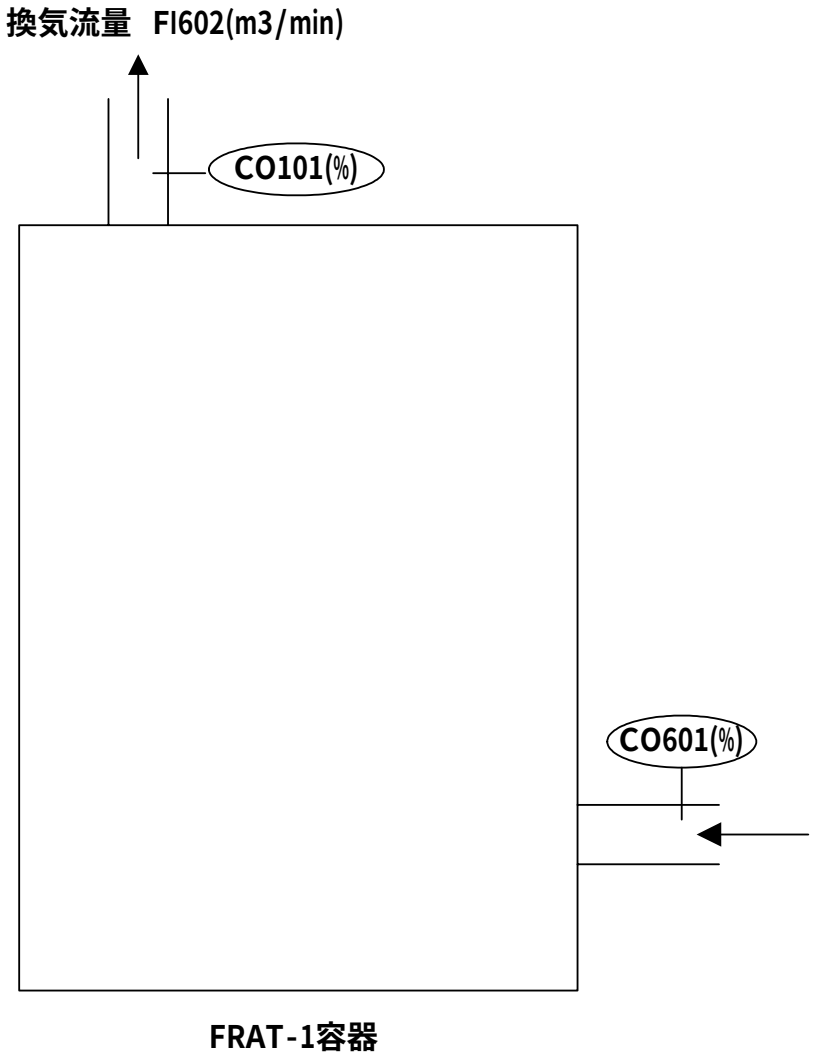
図4-33-2 Run-F8-2単位面積当たりの燃焼速度



①壁の受けた熱量の時間変化
　壁の内面に付けた熱電対の平均温度変化と、壁の持つ熱容量から壁の受けた熱量を求める。
②天井の受けた熱量の時間変化
　天井の内面に付けた熱電対の平均温度変化と、天井の持つ熱容量から天井の受けた熱量を求める。
③受け皿の受けた熱量の時間変化（堆積物接触部）
　実験後の観察で堆積物が拡がった領域の下面にある熱電対の平均温度変化と、堆積物が拡がった領域の下面ライナの持つ熱容量から受け皿（堆積物接触部）の受けた熱量を求める。
④受け皿の受けた熱量の時間変化（堆積物非接触部）
　実験後の観察で堆積物が拡がった領域以外の下面にある熱電対の平均温度変化と、堆積物が拡がった領域以外の下面ライナの持つ熱容量から受け皿（堆積物非接触部）の受けた熱量を求める。
⑤断熱材の受けた熱量の時間変化
　保温材に付けた熱電対の平均温度変化と、保温材の持つ熱容量から保温材の受けた熱量を求める。
⑥容器内ガスの受けた熱量の時間変化
　容器内のガス空間に付けた熱電対の平均温度変化と、容器内のガスの持つ熱容量から容器内ガスの受けた熱量を求める。
⑦排気による除熱量
　入口のガス温度と出口のガス温度の温度差と排気ガスの熱容量から排気による除熱量を求める。
⑧プールへ供給されるナトリウムの熱量
　漏えい期間中のナトリウム温度を507℃で一定とし、漏えい率から熱容量を求める。

※容器壁は断熱としてモデル化した

図4-34 FRAT-1容器の熱量変化モデル



上記モデルに従い、燃焼速度は、

(燃焼速度)=FI602*60*(CO601-CO101)/100/(1-CO601/100)*1.43*2.05

と計算される。

図4-35 FRAT-1容器の酸素消費量モデル

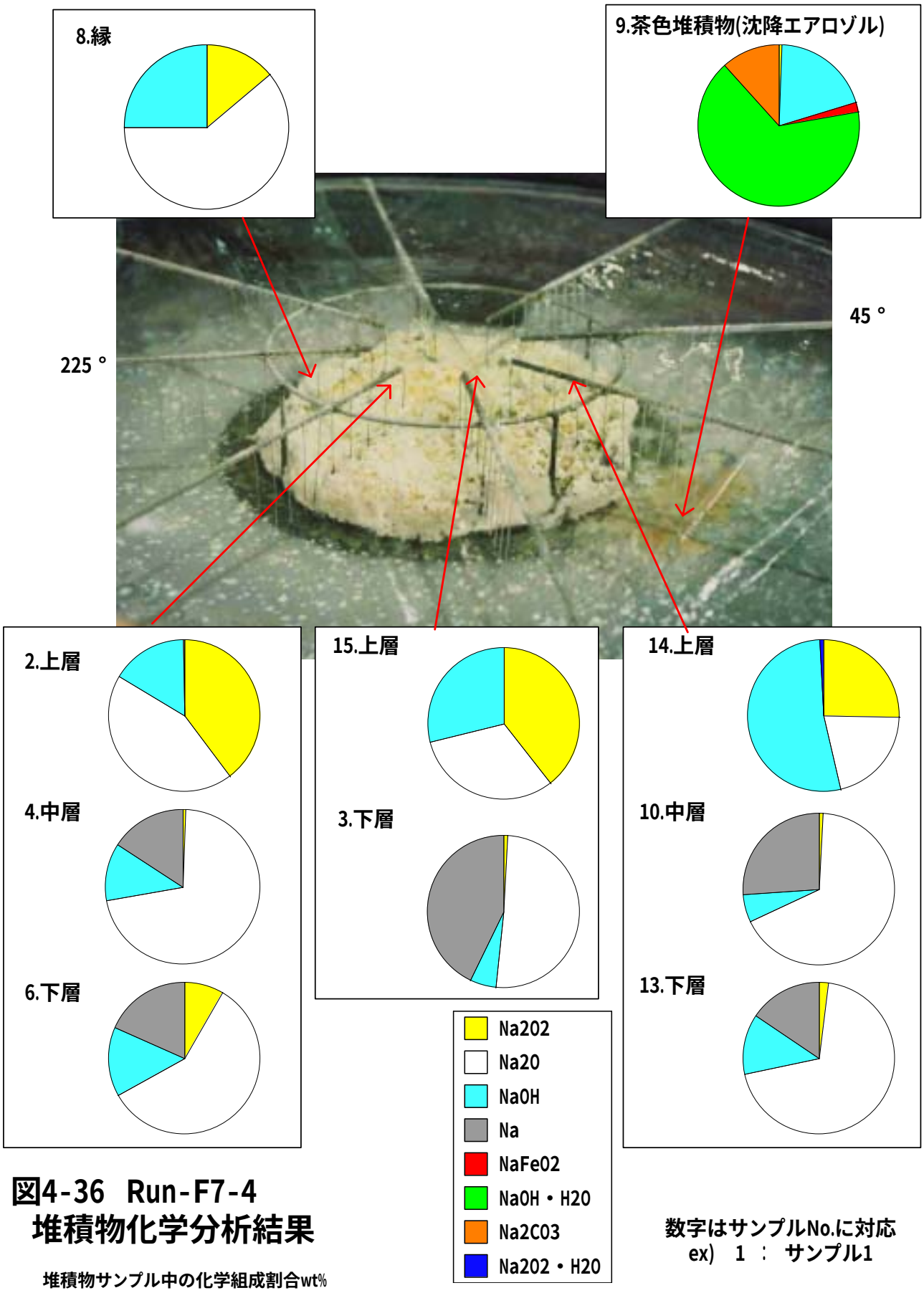


図4-36 Run-F7-4
堆積物化学分析結果

堆積物サンプル中の化学組成割合wt%

数字はサンプルNo.に対応
ex) 1 ： サンプル1

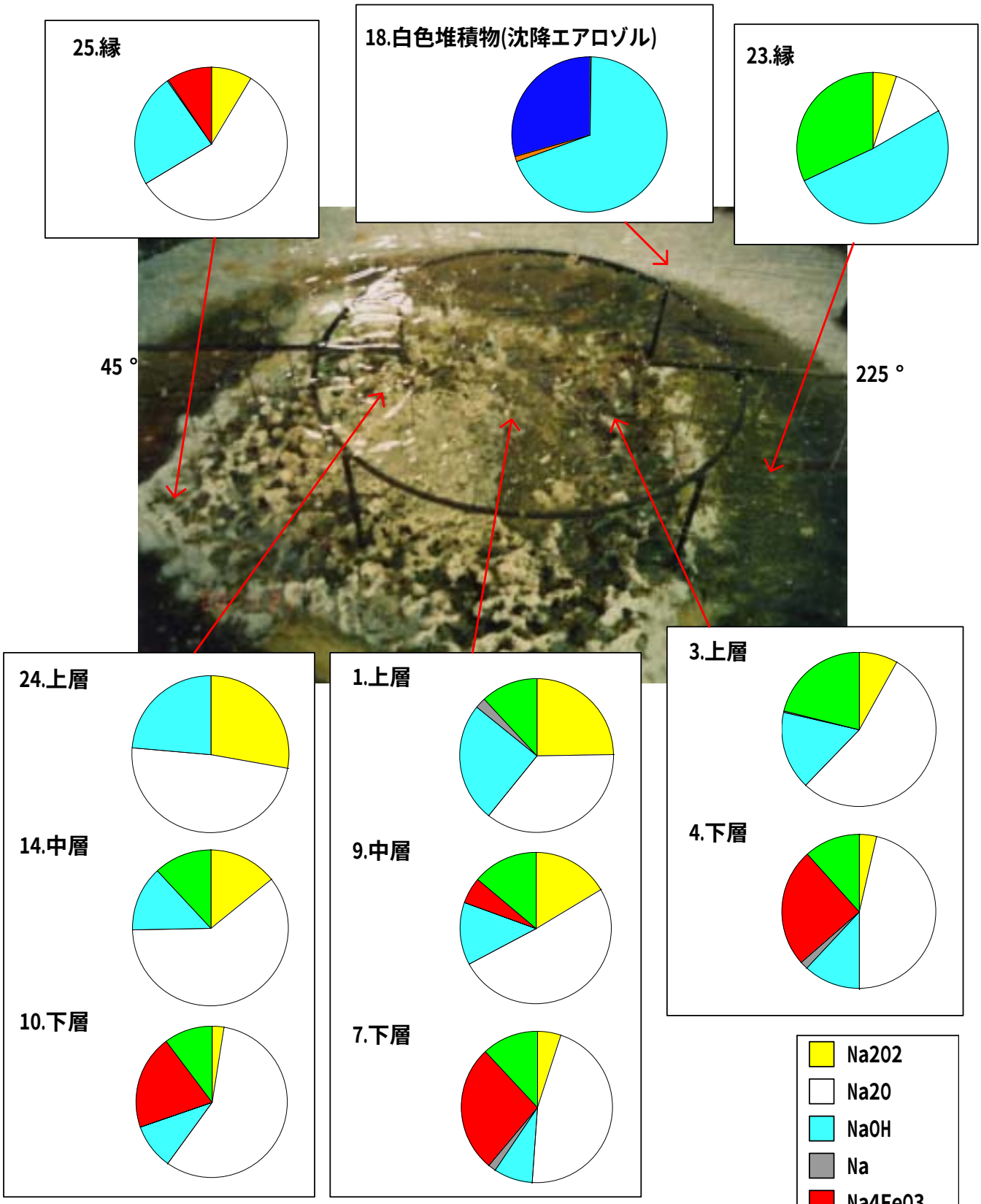
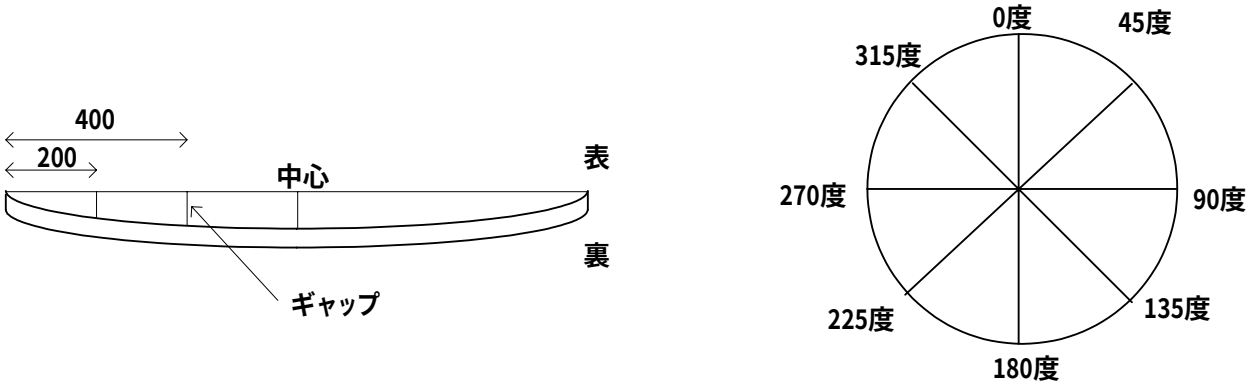


図4-37 Run-F8-2
堆積物化学分析結果

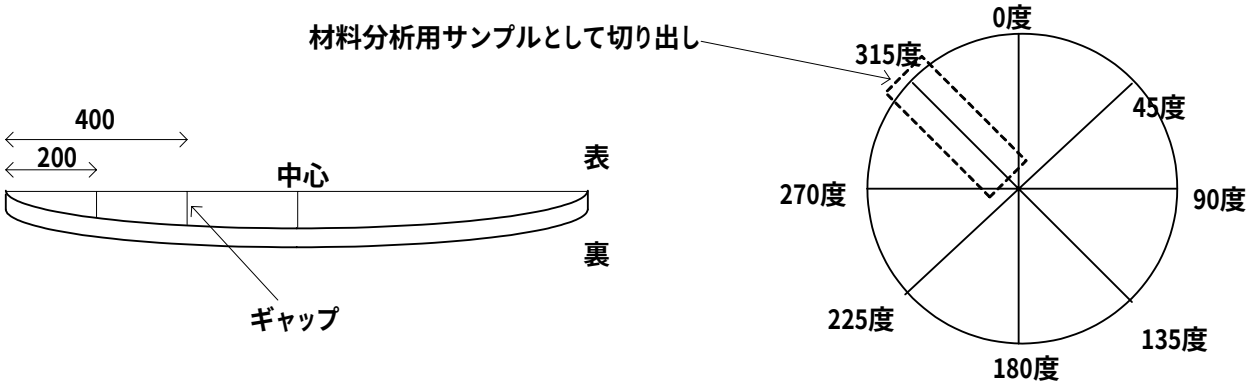
堆積物サンプル中の化学組成割合wt%

数字はサンプルNo.に対応
ex) 1 ： サンプル1



	200mmギャップ	400mmギャップ	センタギャップ		200mmギャップ	400mmギャップ
0度	4.0	8.0	13.5	180度	3.5	8.0
45度	4.5	8.5	14.0	225度	3.0	8.0
90度	4.5	9.0	15.0	270度	3.5	8.5
135度	3.5	8.0	14.5	315度	3.5	8.0

Run-F7-4 受け皿歪み測定結果



	200mmギャップ	400mmギャップ	センタギャップ		200mmギャップ	400mmギャップ
0度	3.5	9.5	16.5	180度	2.0	5.0
45度	3.5	12.5	17.5	225度	2.5	5.5
90度	4.0	11.5	19.5	270度	3.5	7.0
135度	3.0	7.5	18.0	315度		

Run-F8-2 受け皿歪み測定結果

図4-38 受け皿歪み測定結果

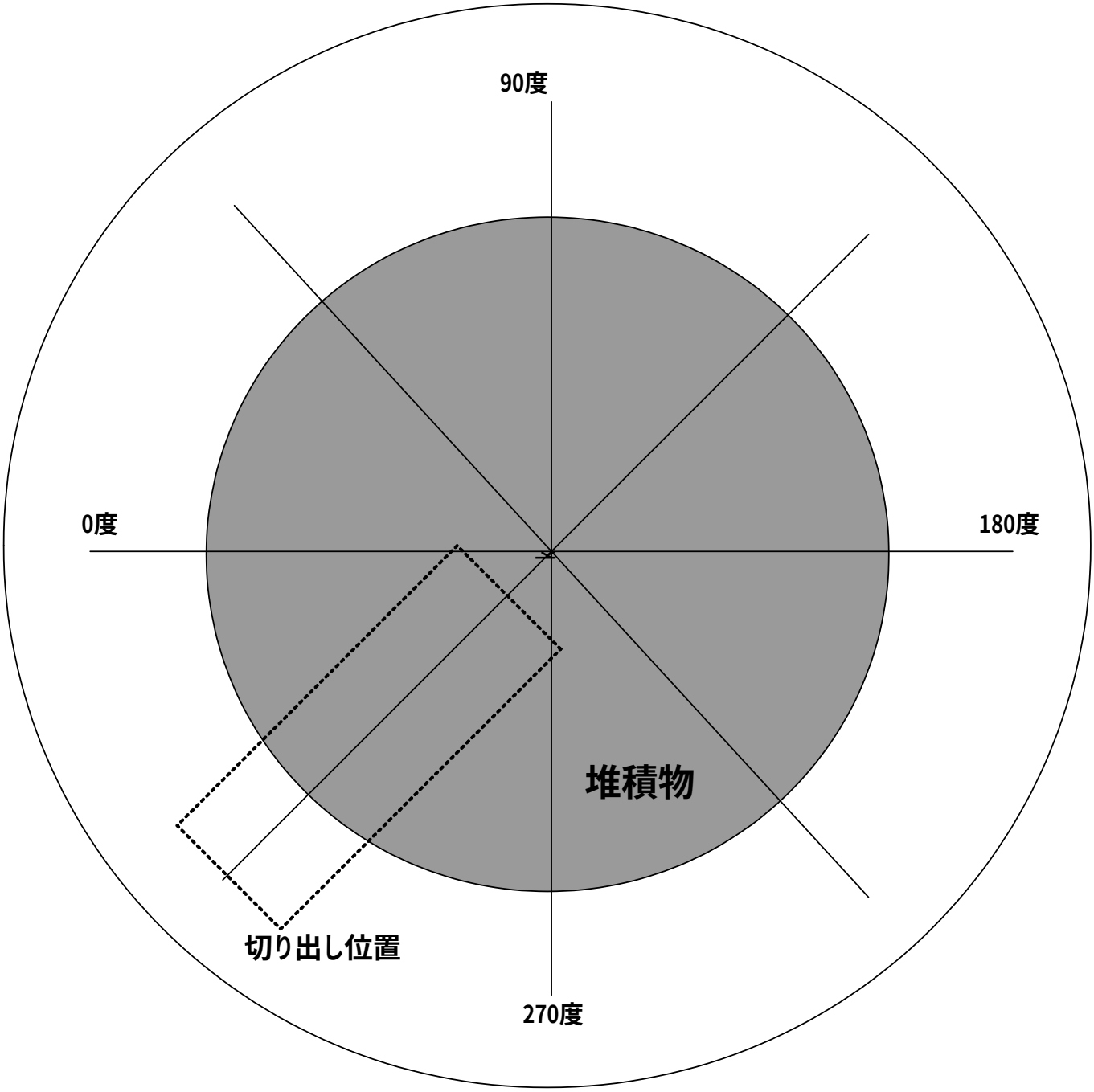


図4-39 Run-F8-2受け皿切り出し位置

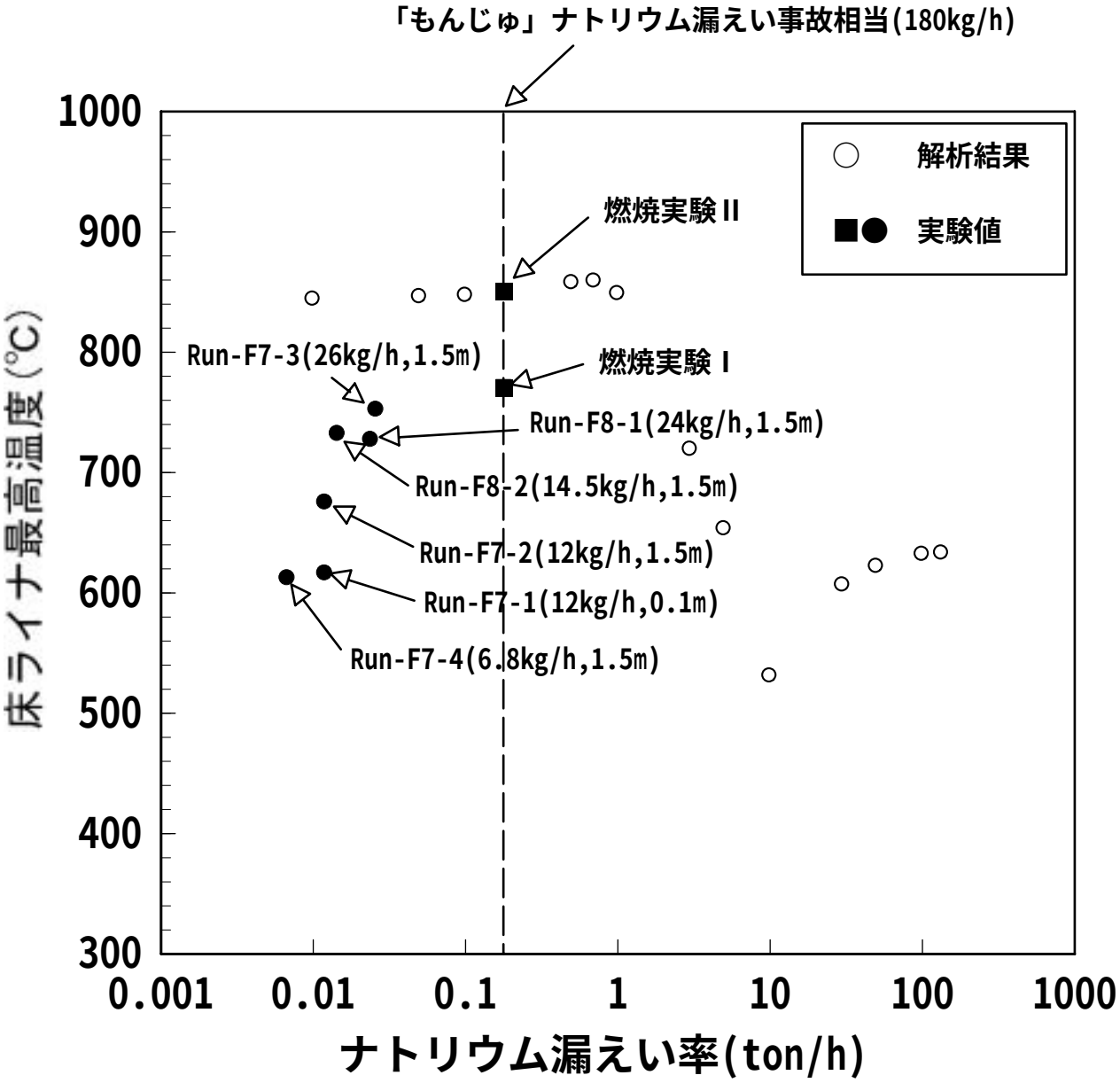


図5-1 ナトリウム漏えい時の床ライナ温度解析結果（もんじゅ ２次主冷却系設備配管室）と実験値の比較

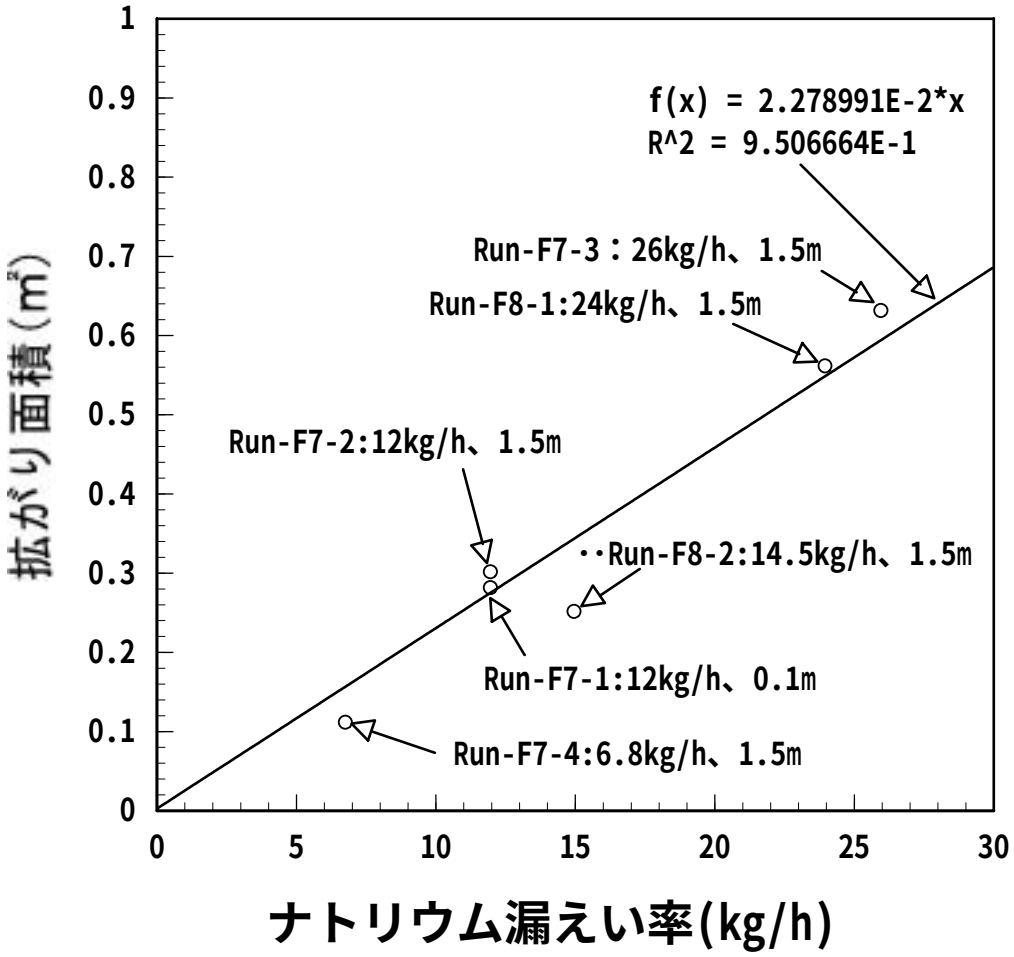


図5-2　ナトリウム漏えい率とプール拡がり面積

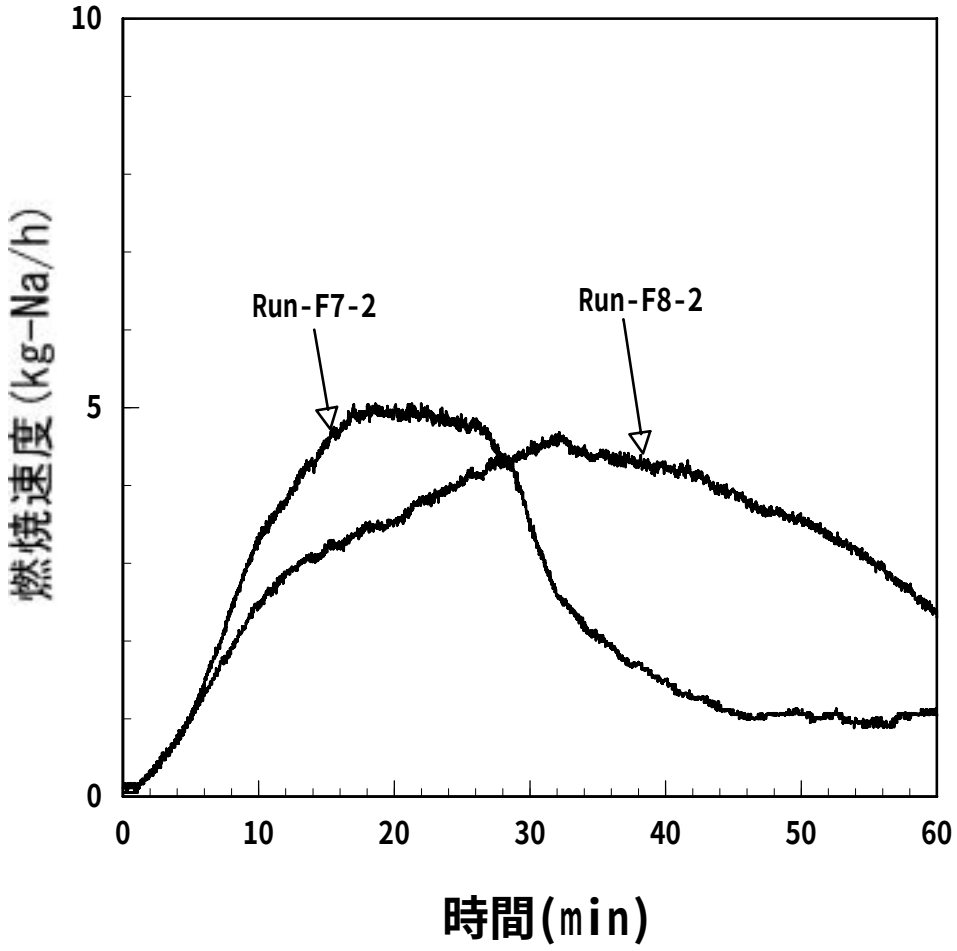
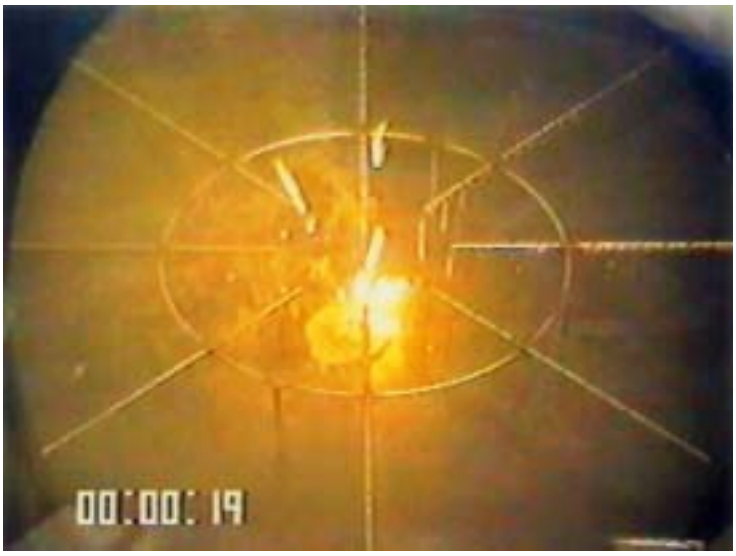
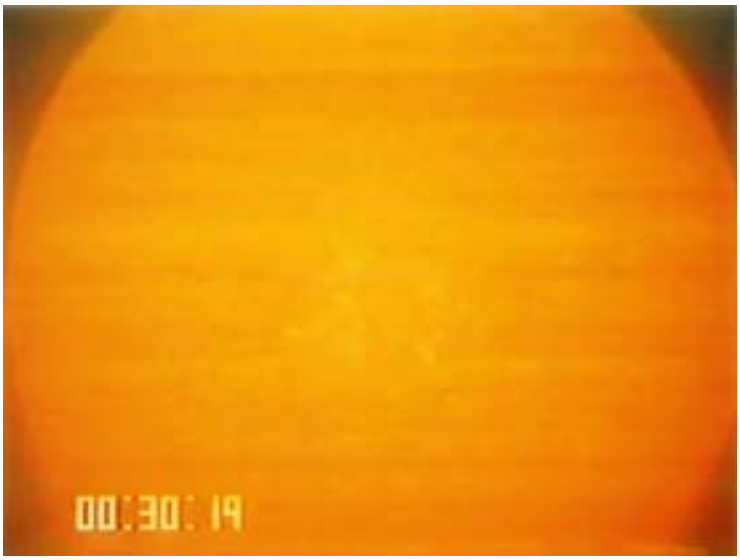


図5-3 Run-F7-4とRun-F8-2の燃焼速度比較
(酸素濃度変化から導出)



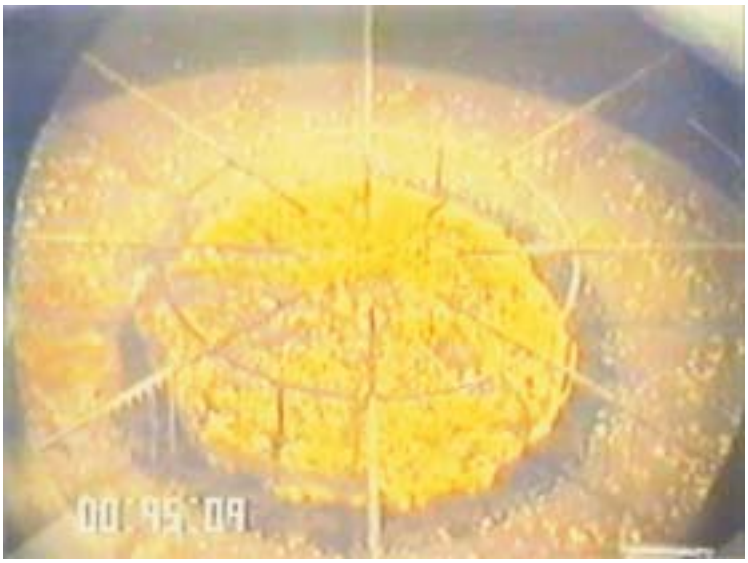
漏えい開始直後
(19秒経過)

ナトリウム漏えい中
(5分9秒経過)

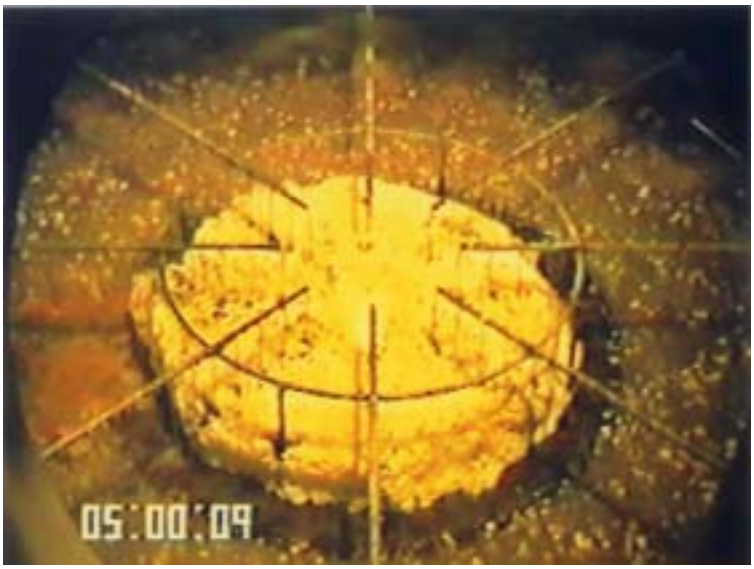


エアロゾルが晴れはじめ、
堆積物が燃焼している
(30分19秒経過)

写真1-1　Run-F7-4監視カメラ映像1



燃焼がほぼ終了
(45分9秒経過)



堆積物降温中
(5時間9秒経過)

写真1-2　Run-F7-4監視カメラ映像2

漏えい開始直後
(5秒経過)

エアロゾルが晴れてきた頃
石炭状に炎をあげて燃焼している
(53分42秒経過)

燃焼が終息してきた頃
(1時間10分11秒経過、
受け皿温度730℃)

写真2-1　Run-F8-2監視カメラ映像1

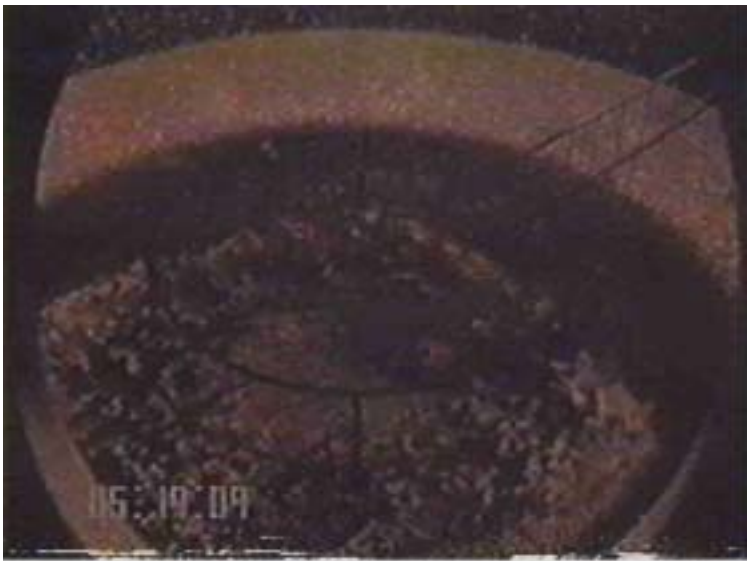
堆積物中央に液相を確認
(1時間20分10秒経過、
受け皿温度640℃)

液相が最大となる
(1時間29分41秒経過、
受け皿温度560℃)

液相が固化しつつある
(1時間49分経過、
受け皿温度420℃)

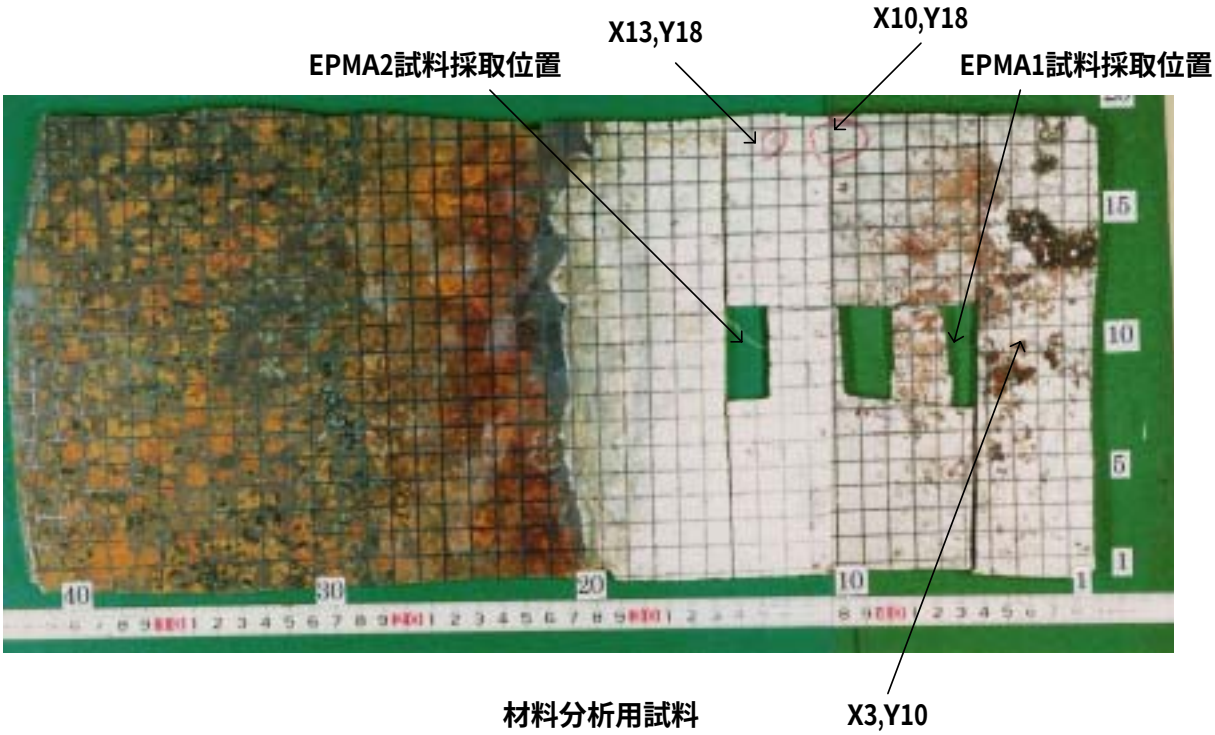
※1時間52分経過時に
FRAT-1容器のアルゴン
ガス置換を開始し、2時
間1分経過時に酸素濃度
が3%以下となった

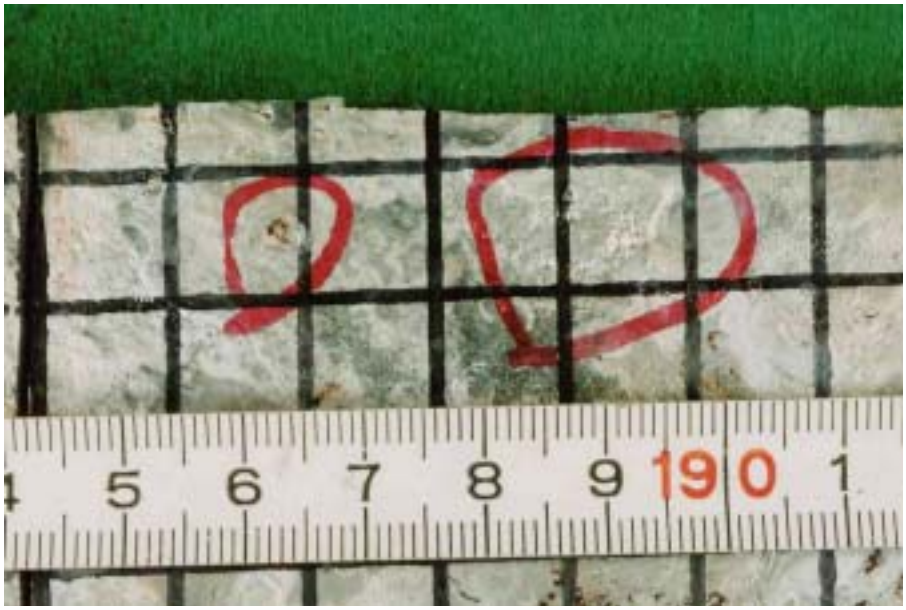
写真2-2　Run-F8-2監視カメラ映像2



堆積物降温中
(5時間19分9秒経過、
受け皿温度90℃)

写真2-3　Run-F8-2監視カメラ映像3





材料分析用試料ピット部拡大(X10,Y18、X13,Y18近傍)

写真3　材料分析用試料洗浄後

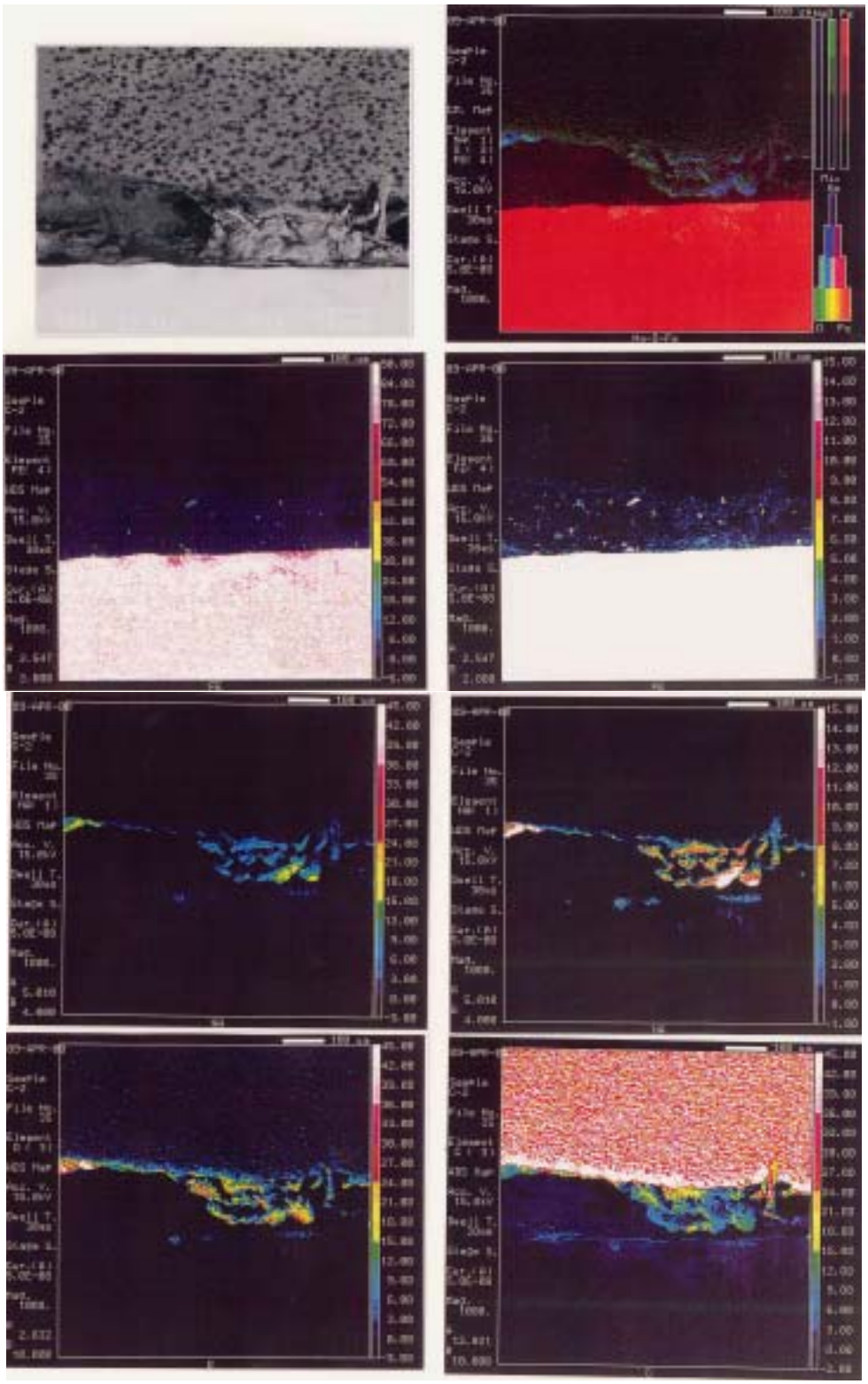


写真4-1　EPMAマッピング1

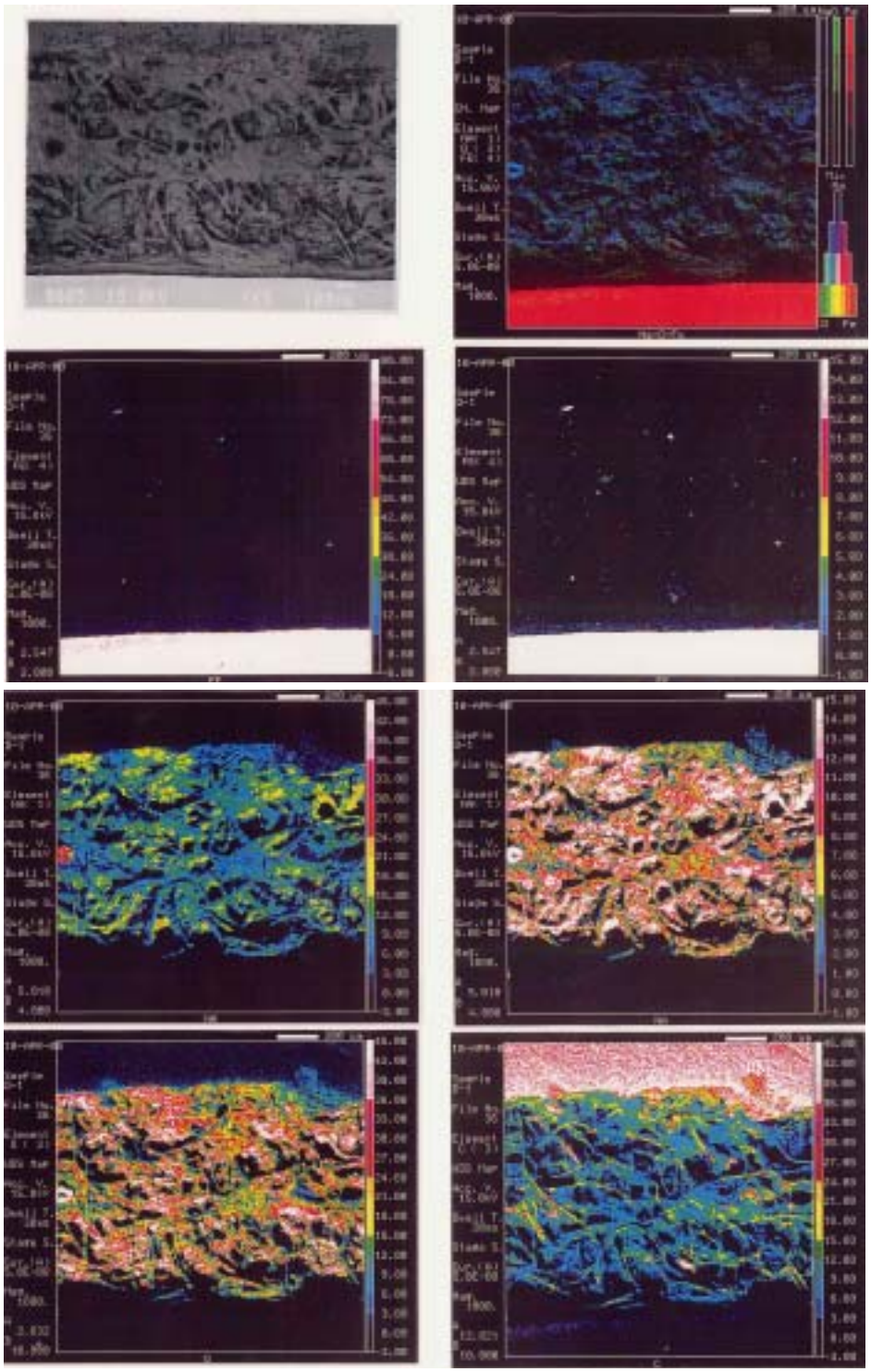
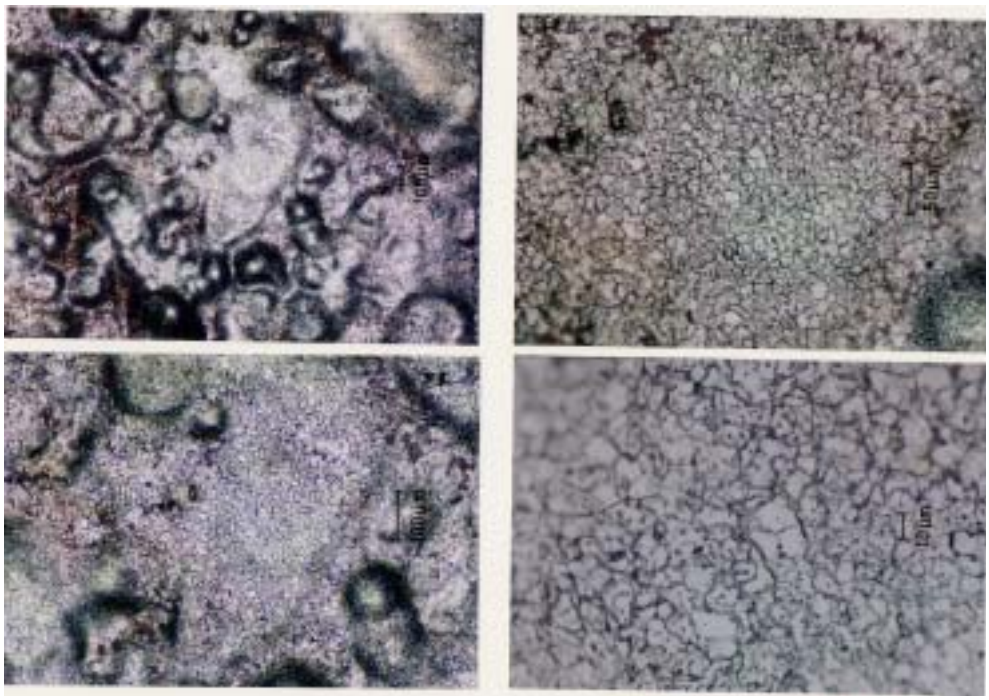
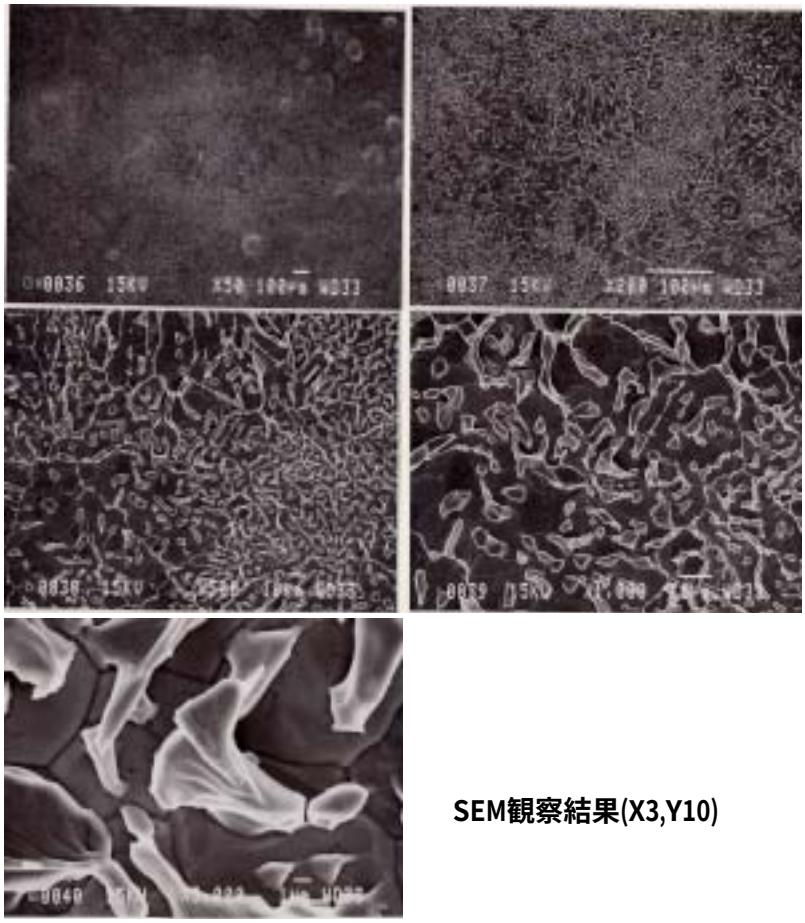


写真4-2　EPMAマッピング2

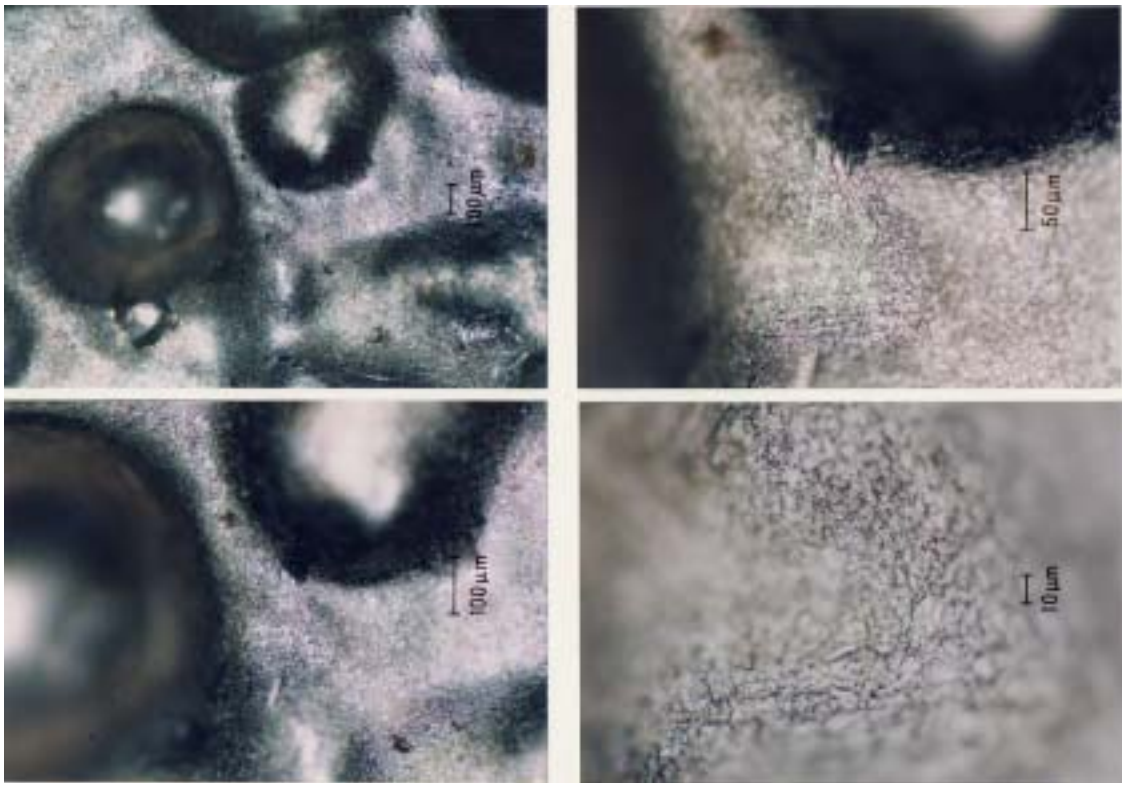


光学顕微鏡観察結果(X3,Y10)



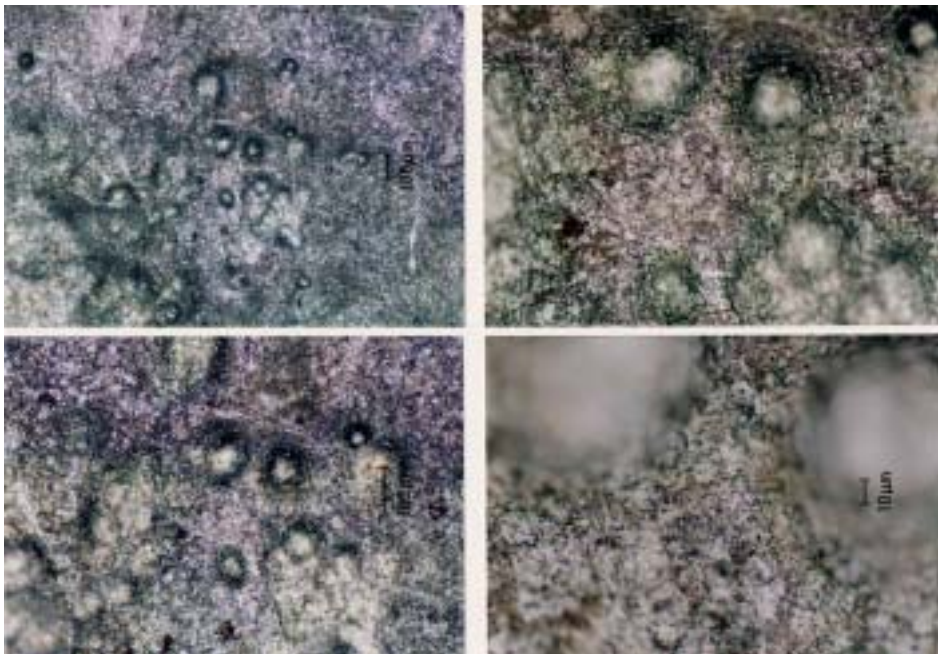
SEM観察結果(X3,Y10)

写真5-1 材料表面観察1

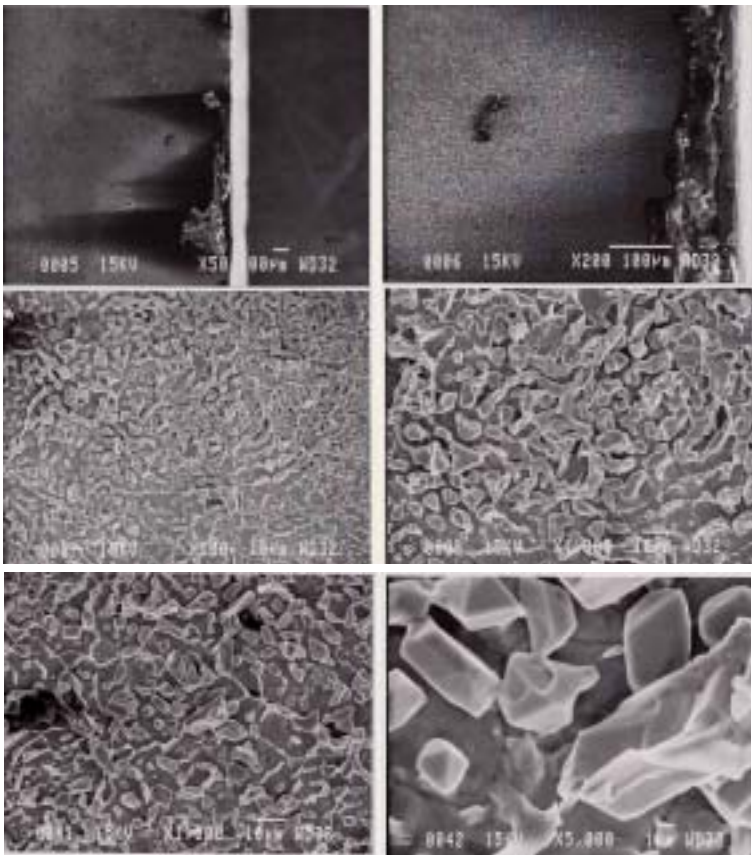


光学顕微鏡観察結果(X10,Y18)

写真5-2 材料表面観察2



光学顕微鏡観察結果(X13,Y18)



SEM観察結果(X13,Y18)

写真5-3 材料表面観察3

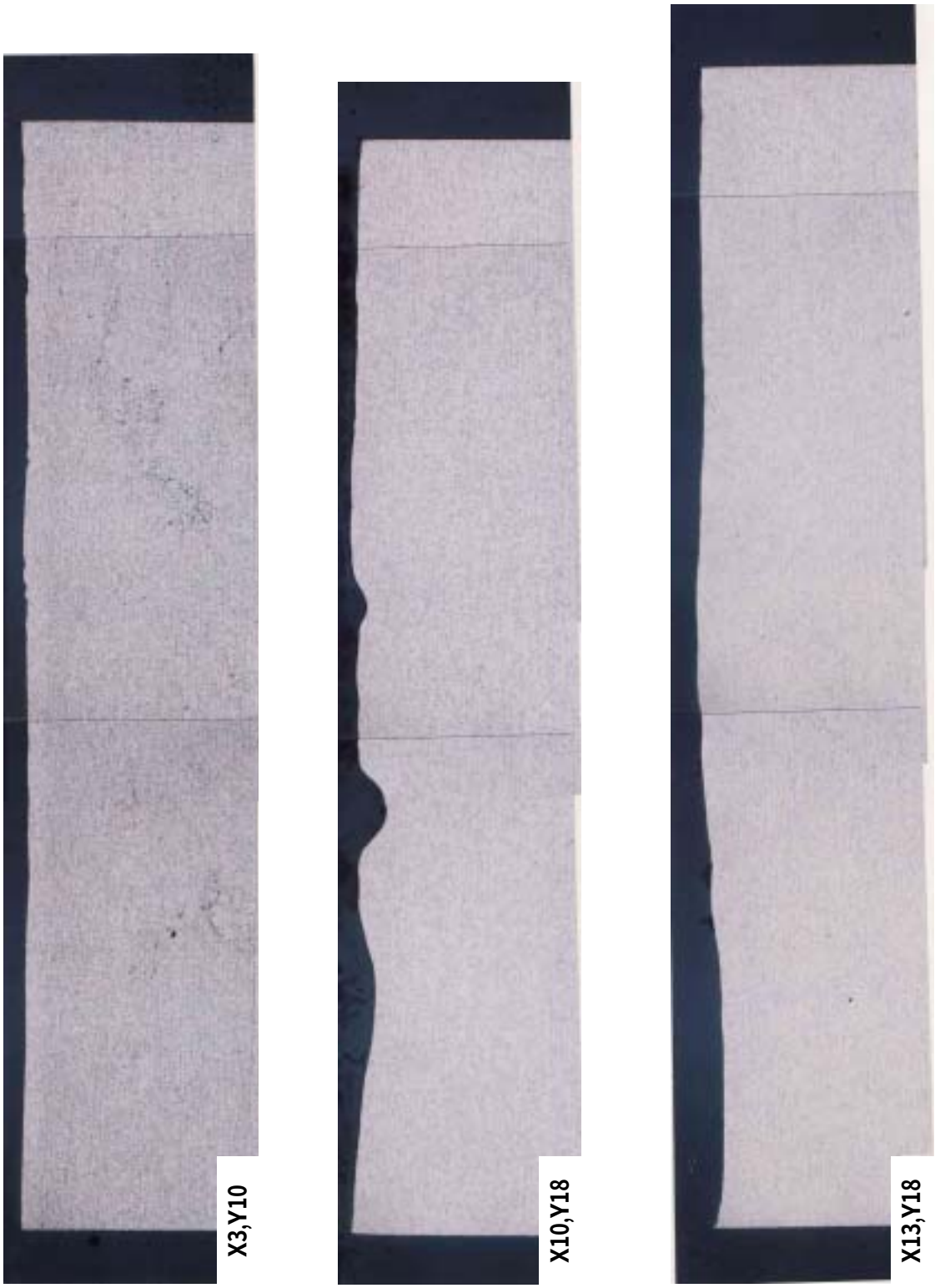
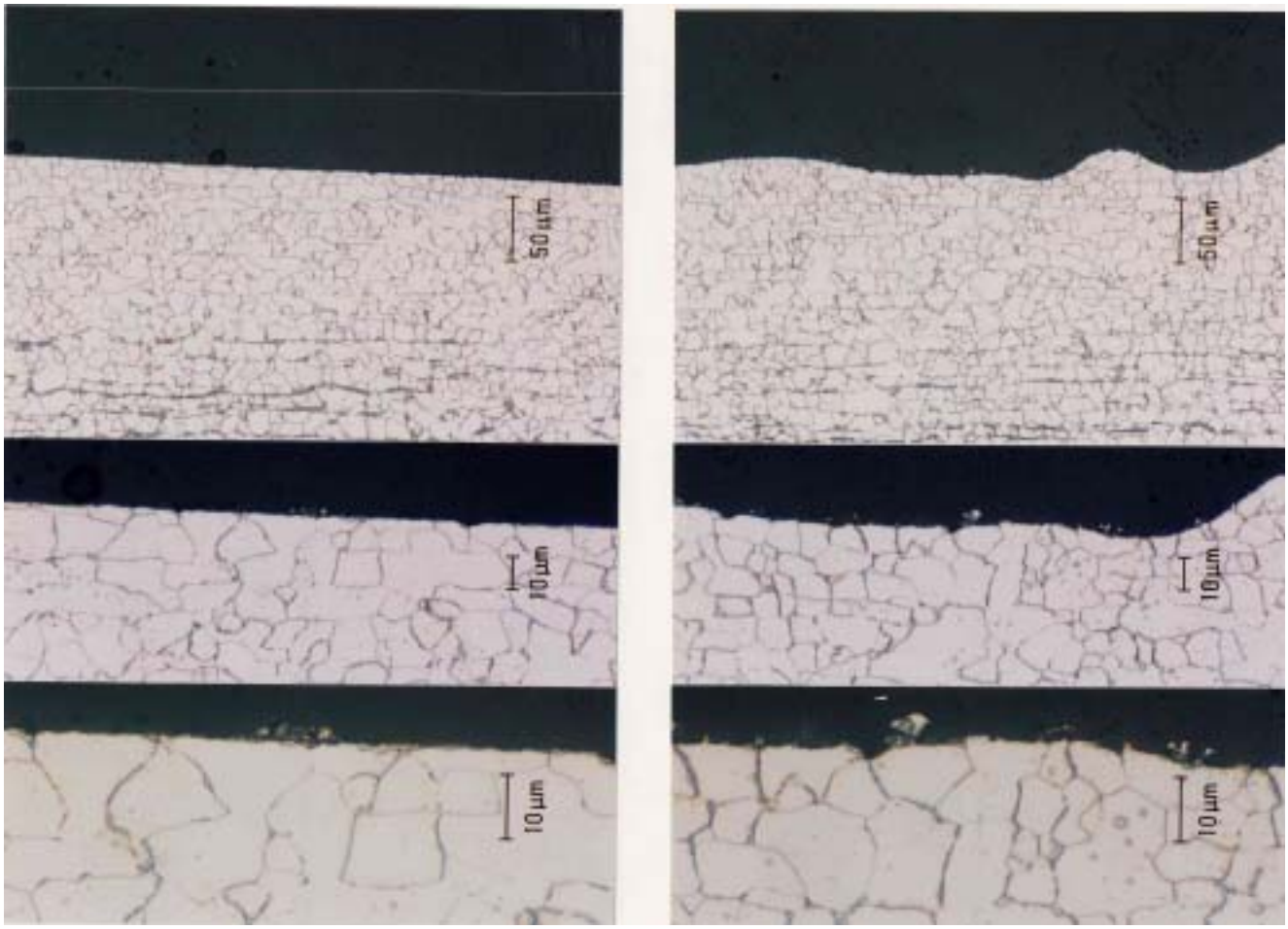
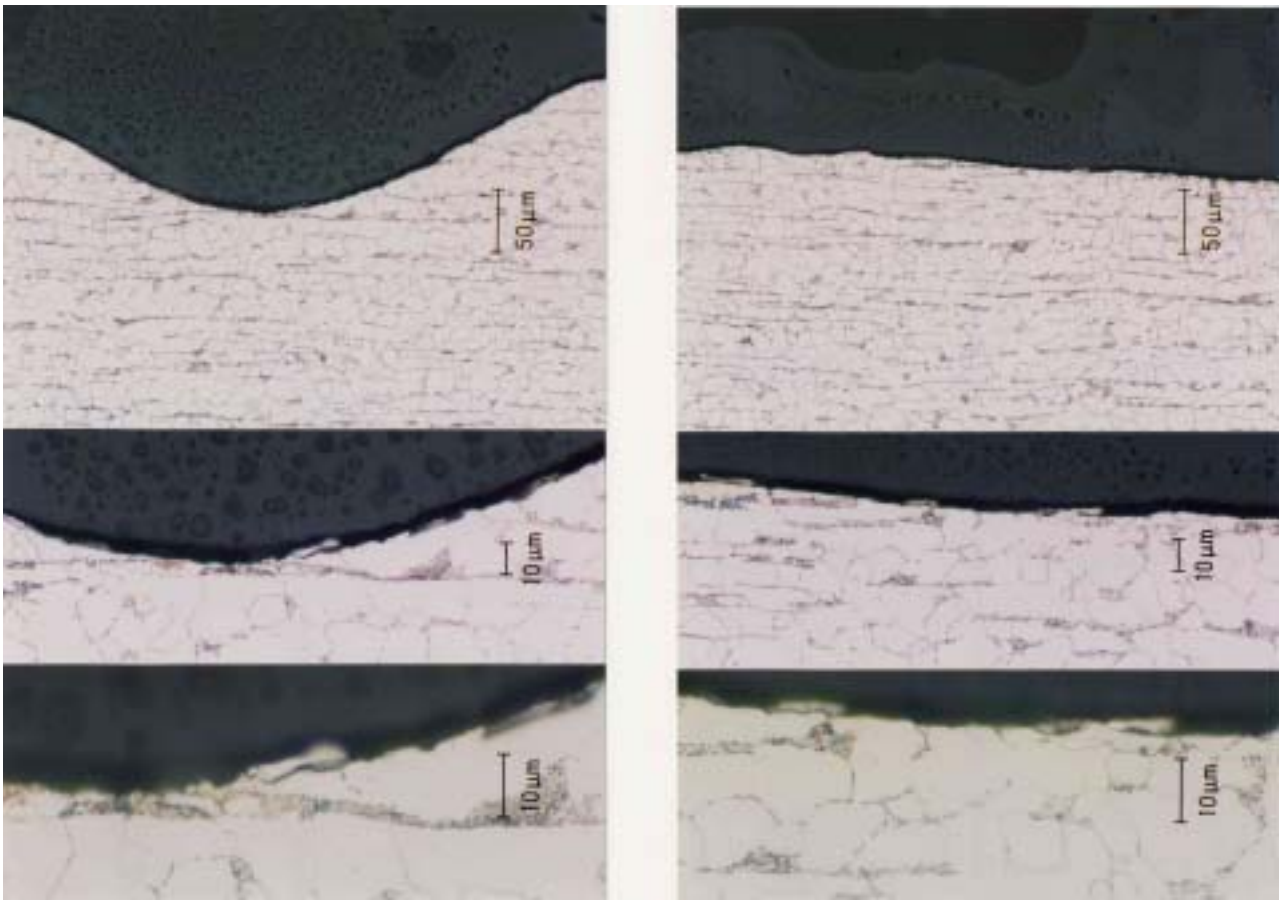


写真6-1 材料組織観察1



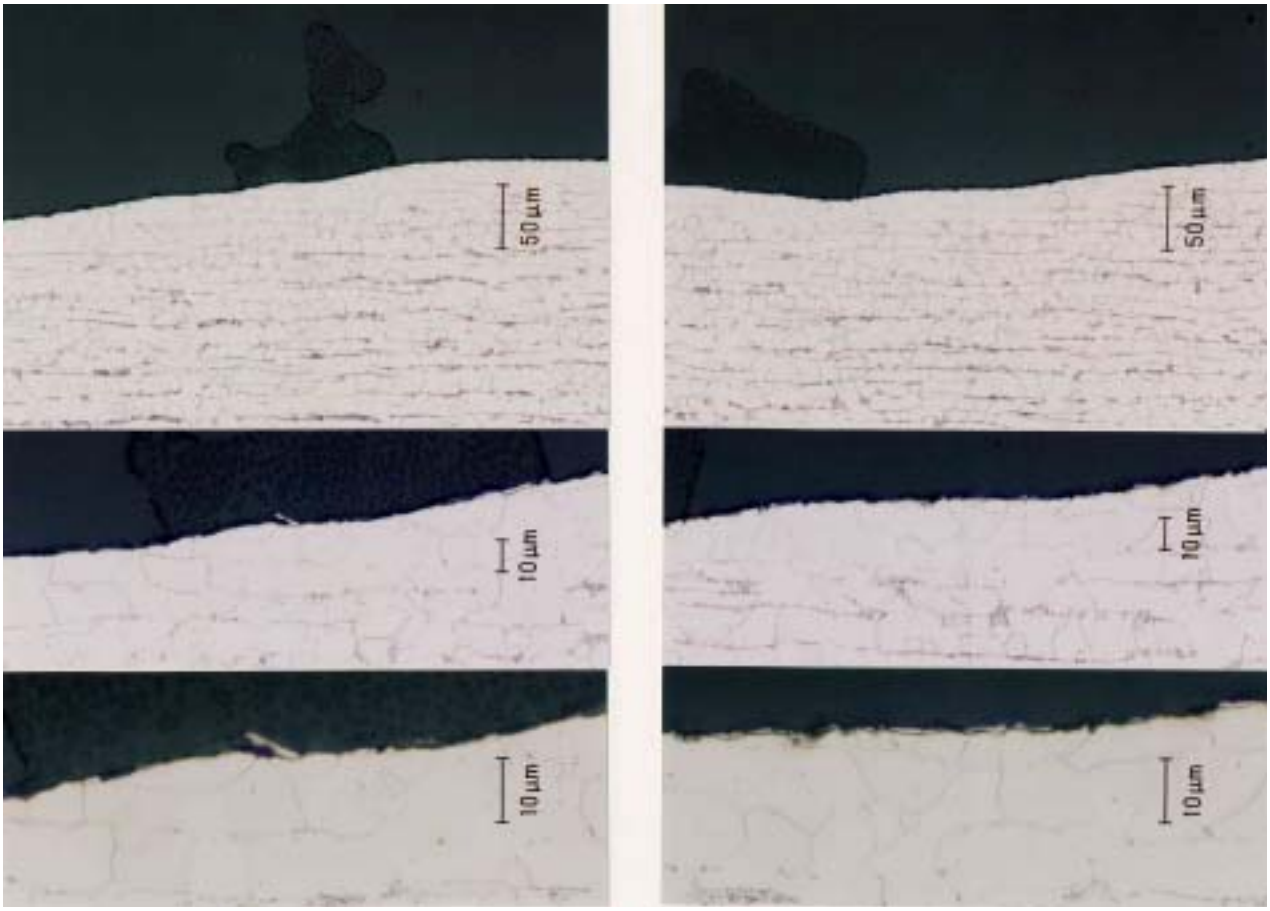
X3,Y10の位置

写真6-2 材料組織観察2



X10,Y18の位置

写真6-3 材料組織観察3



X13,Y18の位置

写真6-4 材料組織観察4