PNC-TJ9124 98-003

ナトリウム液滴生成実験

（動力炉・核燃料開発事業団　契約業務報告書）

1998年１月

株式会社　日立製作所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせください。
〒311-13　茨城県東茨城郡大洗町成田町4002
動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター　システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団（Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）

PNC-TJ9124 98-003
１９９８年　１月

ナトリウム液滴生成実験

高橋和雄*　床井博見*　緑川義男**
十亀　求***　糸岡　聡***　嵐田源二***

要　　旨

ナトリウム液滴の滴下中の燃焼挙動を把握するとともに、解析コードへ検証用データを提供することを目的として、ナトリウム液滴の燃焼実験を実施した。

本研究の主要な成果は以下の通りである。

(1)実験装置の設計及び製作

直径3.5±1.0mm、温度500±10℃の液滴を安定して生成し、不活性ガス雰囲気及び大気雰囲気中で滴下できる実験装置を設計・製作した。

(2)不活性ガス雰囲気実験によるナトリウム液滴径の測定

生成した液滴を燃焼させないように不活性ガス雰囲気中で50滴滴下する試験を4回実施した。回収した個々の液滴のナトリウム重量測定値から算出した生成時の平均液滴径は約3.8mmであった。

(3)大気雰囲気実験によるナトリウム液滴の燃焼量及び落下速度の測定

大気雰囲気で液滴を 50 滴滴下する試験を 6 回実施した。回収した全液滴のナトリウム重量測定値と、上記(2)で評価した滴下ナトリウム総重量との差から算出した滴下中のナトリウム燃焼量は、約 3.4mg であった。

滴下途中の液滴の高速度写真の撮影結果から算出した約 2.4 m落下後の液滴速度は、燃焼液滴及び燃焼していない液滴とも 5.5±0.1m/s であった。

本報告書は、(株)日立製作所が動力炉・核燃料開発事業団との契約により実施した業務の成果である。
契約番号：09-C-1780
事業団担当部課室および担当者名：大洗工学センター　安全工学部　プラント安全工学室
宮原 信哉
*　　：(株)日立製作所 電力・電機開発本部 原子力第１部 開発炉・機器Gr
**　　：日立ニュークリアエンジニアリング(株) 研究開発本部
***　：(株)日立製作所 日立工場 原子力開発技術センタ 原子炉・プラント計画Gr

PNC-TJ9124 98-003

JANUARY, 1998

Experiments of liquid sodium drop generation

Kazuo Takahashi(*), Hiromi Tokoi(*), Yoshio Midorikawa(**),
Motomu Sogame(**), Satoshi Itooka(***), Genji Arashida(***)

Abstract

Experiments were carried out to understand burning behavior of a falling liquid sodium drop and to get verification data for an analytical program.

The main results of this research were as follows.

(1) Design and manufacturing of experimental devices.

Devices were designed and manufactured, which generated liquid sodium drops with diameter of 3.5 ± 1.0 mm and with temperature of 500 ± 10 ℃ and dropped them in the atmosphere of inert gas and air.

(2) Measurement of liquid sodium drop diameters of the inert gas experiments.

Four experiments were conducted , in which 50 drops of liquid sodium were fell into inert gas atmosphere. An averaged diameter of liquid sodium drop was about 3.8 mm.

(3) Measurement of burned weight and drop velocity of the air atmosphere experiments.

Six experiments were conducted , in which 50 drops of liquid sodium fell into air atmosphere. An averaged burned weight of the liquid sodium drop was about 3.4 mg. The velocity after about 2.4 m drop was evaluated from photographs. Which indicated that the falling velocity of burned and un-burned single liquid sodium drop was 5.5 ± 0.1 m/s.

Work perfected by Hitachi, Ltd. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Shinya Miyahara, FBR Plant Safety Section, Safety Engineering Devision, Oarai Engineering Center

* : Advanced Reactor Components Group., Power & Industrial Systems R & D Division.

** : Research and Development Division., Hitachi Nuclear Engineering Co.

***: Advanced Reactor Engineering Center, Hitachi Works.

目　次

1．まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1- 1

2．実験装置の設計・製作 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2- 1

2.1 不活性ガス雰囲気実験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2- 1

2.2 大気雰囲気実験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2- 2

3．実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1- 1

3.1 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1- 1

3.1.1不活性ガス雰囲気実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1- 1

3.1.2大気雰囲気実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1- 1

3.2 実験結果及び考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2- 1

3.2.1不活性ガス雰囲気実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2- 1

3.2.2大気雰囲気実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.2- 7

4．まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4- 1

5．謝辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5- 1

6．参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6- 1

7．付録 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7- 1

7.1 予備試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7.1-1

7.2 液滴の落下速度の測定例 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7.2-1

7.3 Ｎａ液滴の落下所要時間について ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7.3-1

表 リ ス ト

表 3.1- 1　主要計測器の仕様一覧 …… 3.1- 5
表 3.2- 1　不活性ガス雰囲気実験結果（予備試験１） …… 3.2- 17
表 3.2- 2　不活性ガス雰囲気実験結果（予備試験２） …… 3.2- 19
表 3.2- 3　不活性ガス雰囲気実験結果（第１回目） …… 3.2- 25
表 3.2- 4　不活性ガス雰囲気実験結果（第２回目） …… 3.2- 31
表 3.2- 5　不活性ガス雰囲気実験結果（第３－１回目） …… 3.2- 37
表 3.2- 6　不活性ガス雰囲気実験結果（第３－２回目） …… 3.2- 42
表 3.2- 7　不活性ガス雰囲気実験のまとめ …… 3.2- 48
表 3.2- 8　低酸素雰囲気実験結果 …… 3.2- 56
表 3.2- 9　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第１－１回目） …… 3.2- 66
表 3.2-10　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第１－２回目） …… 3.2- 73
表 3.2-11　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第２－１回目） …… 3.2- 84
表 3.2-12　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第２－２回目） …… 3.2- 92
表 3.2-13　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第３－１回目） …… 3.2-101
表 3.2-14　液滴径の分布（大気雰囲気実験，第３－２回目） …… 3.2-108
表 3.2-15　大気雰囲気実験のまとめ …… 3.2-110
表 3.2-16　不活性ガス雰囲気実験における Na 蒸発量の推定 …… 3.2-112
表 3.2-17　大気雰囲気実験における燃焼量 …… 3.2-113
表 7.1- 1　ノズル先端形状の検討 …… 7.1- 3
表 7.1- 2　各液体の表面張力 …… 7.1- 4
表 7.1- 3　ノズル長さの検討結果 …… 7.1- 6
表 7.2- 1　Na 液滴落下速度一覧表(1/2) …… 7.2- 46
表 7.2- 2　Na 液滴落下速度一覧表(2/2) …… 7.2- 47
表 7.3　Na 液滴の約 2.7m 落下に要した時間 …… 7.3- 2

図 リ ス ト

図 2.1- 1　実験装置の系統概要 …… 2.1- 4
図 2.1- 2　Ｎａ液滴滴下部及びＮａ供給部組図 …… 2.1- 6
図 2.1- 3　Ｎａ液滴滴下ノズル …… 2.1- 7
図 2.1- 4　ノズルホルダー …… 2.1- 8
図 2.1- 5　ガイド管 …… 2.1- 9
図 2.1- 6　ガス加熱器 …… 2.1- 10
図 2.1- 7　不活性ガス雰囲気実験装置組図 …… 2.1- 11
図 2.1- 8　不活性ガス雰囲気実験試験容器概要 …… 2.1- 12
図 2.1- 9　ノズル周辺部の熱電対配置 …… 2.1- 16
図 2.2- 1　大気雰囲気実験装置組図 …… 2.1- 18
図 2.2- 2　大気雰囲気実験試験容器概要 …… 2.2- 19
図 2.2- 3　大気雰囲気実験試験容器 …… 2.2- 20
図 3.1- 1　ナトリウム液滴径評価手順（不活性ガス雰囲気実験） …… 3.1- 3
図 3.1- 2　不活性ガス雰囲気実験における計測センサー配置図 …… 3.1- 4
図 3.1- 3　ナトリウム液滴径評価手順（大気雰囲気実験） …… 3.1- 6
図 3.1- 4　ナトリウム液滴落下速度評価手順 …… 3.1- 7
図 3.1- 5　大気雰囲気実験における計測センサー配置図 …… 3.1- 8
図 3.2- 1　ノズル内径と生成液滴径の関係 …… 3.2- 20
図 3.2- 2　滴下Ｎａ温度（不活性ガス雰囲気実験，第１回目） …… 3.2- 22
図 3.2- 3　滴下試験中のノズル近傍温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第１回目） …… 3.2- 23
図 3.2- 4　滴下試験中の軸方向温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第１回目） …… 3.2- 24
図 3.2- 5　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第１回目） …… 3.2- 26
図 3.2- 6　滴下Ｎａ温度（不活性ガス雰囲気実験，第２回目） …… 3.2- 28
図 3.2- 7　滴下試験中のノズル近傍温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第２回目） …… 3.2- 29
図 3.2- 8　滴下試験中の軸方向温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第２回目） …… 3.2- 30

図 3.2- 9　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第２回目）…… 3.2- 32
図 3.2-10　滴下Ｎａ温度（不活性ガス雰囲気実験，第３-1 回目）…… 3.2- 34
図 3.2-11　滴下試験中のノズル近傍温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 35
図 3.2-12　滴下試験中の軸方向温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 36
図 3.2-13　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 38
図 3.2-14　滴下Ｎａ温度（不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2- 39
図 3.2-15　滴下試験中のノズル温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2- 40
図 3.2-16　滴下試験中の軸方向温度分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2- 41
図 3.2-17　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2- 43
図 3.2-18　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 44
図 3.2-19　液滴径の分布（不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2- 45
図 3.2-20　電荷量換算 Na 液滴重量と分析 Na 液滴重量の関係(第３－１回目）…… 3.2- 46
図 3.2-21　電荷量換算 Na 液滴重量と分析 Na 液滴重量の関係(第３－１回目）…… 3.2- 47
図 3.2-22　滴下Ｎａ温度（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 51
図 3.2-23　滴下試験中のノズル近傍温度分布（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 52
図 3.2-24　滴下試験中の酸素濃度及び露点（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 53
図 3.2-25　滴下試験中の軸方向温度分布（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 54
図 3.2-26　滴下試験中の周方向温度分布（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 55
図 3.2-27　滴下Ｎａ温度（大気雰囲気実験，第１回目）…… 3.2- 61
図 3.2-28　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第１－１回目）…… 3.2- 62
図 3.2-29　滴下試験中の酸素濃度及び露点（大気雰囲気実験，第１－１回目）…… 3.2- 63
図 3.2-30　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第１－１回目）…… 3.2- 64
図 3.2-31　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第１－１回目）…… 3.2- 65
図 3.2-32　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第１－２回目）…… 3.2- 69
図 3.2-33　滴下試験中の酸素濃度及び露点（大気雰囲気実験，第１－２回目）…… 3.2- 70
図 3.2-34　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第１－２回目）…… 3.2- 71
図 3.2-35　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第１－２回目）…… 3.2- 72

図 3.2-36　滴下Ｎａ温度（大気雰囲気実験，第２回目）…… 3.2- 78
図 3.2-37　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第２－１回目）…… 3.2- 79
図 3.2-38　滴下試験中の酸素濃度（大気雰囲気実験，第２－１回目）…… 3.2- 80
図 3.2-39　滴下試験中の露点（大気雰囲気実験，第２－１回目）…… 3.2- 81
図 3.2-40　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第２－１回目）…… 3.2- 82
図 3.2-41　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第２－１回目）…… 3.2- 83
図 3.2-42　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第２－２回目）…… 3.2- 87
図 3.2-43　滴下試験中の酸素濃度（大気雰囲気実験，第２－２回目）…… 3.2- 88
図 3.2-44　滴下試験中の露点（大気雰囲気実験，第２－２回目）…… 3.2- 89
図 3.2-45　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第２－２回目）…… 3.2- 90
図 3.2-46　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第２－２回目）…… 3.2- 91
図 3.2-47　滴下Ｎａ温度（大気雰囲気実験，第３回目）…… 3.2- 95
図 3.2-48　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 96
図 3.2-49　滴下試験中の酸素濃度（大気雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 97
図 3.2-50　滴下試験中の露点（大気雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 98
図 3.2-51　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2- 99
図 3.2-52　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第３－１回目）…… 3.2-100
図 3.2-53　滴下試験中のノズル近傍温度分布（大気雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2-103
図 3.2-54　滴下試験中の酸素濃度（大気雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2-104
図 3.2-55　滴下試験中の露点（大気雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2-105
図 3.2-56　滴下試験中の軸方向温度分布（大気雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2-106
図 3.2-57　滴下試験中の周方向温度分布（大気雰囲気実験，第３－２回目）…… 3.2-107
図 3.2-58　Ｎａ液滴落下実験の模式図 …… 3.2-111
図 3.2-59　燃焼量の誤差 …… 3.2-114
図 7.1- 1　ノズル内径と液滴径の関係 …… 7.1- 5
図 7.1- 2　ガイド管酸素濃度分布測定体系 …… 7.1- 7
図 7.1- 3　ガイド管酸素濃度分布測定結果 …… 7.1- 8

写 真 リ ス ト

写真 2.1- 1 不活性ガス雰囲気実験装置全景 …… 2- 5
写真 2.1- 2 不活性ガス雰囲気実験装置試験容器 …… 2- 13
写真 2.1- 3 Ｎａ液滴滴下ノズル部 …… 2- 14
写真 2.1 -4 Ｎａ液滴滴下ノズル部及びガイド管部 …… 2- 15
写真 2.2- 1 大気雰囲気実験装置全景 …… 2- 17
写真 2.2- 2 大気雰囲気実験装置試験容器 …… 2- 21
写真 3.2- 1 ノズル長さ 2mm 時のＮａ液滴の生成状況 …… 3.2- 15
写真 3.2- 2 予備実験１における液滴の生成と落下状況 …… 3.2- 16
写真 3.2- 3 予備実験２における液滴の生成と落下状況 …… 3.2- 18
写真 3.2- 4 不活性ガス雰囲気実験（第１回目） …… 3.2- 21
写真 3.2- 5 不活性ガス雰囲気実験（第２回目） …… 3.2- 27
写真 3.2- 6 不活性ガス雰囲気実験（第３回目） …… 3.2- 33
写真 3.2- 7 低酸素雰囲気実験 …… 3.2- 49
写真 3.2- 8 回収したＮａ粒子 …… 3.2- 50
写真 3.2- 9 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 57
写真 3.2-10 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定（低酸素雰囲気実験）…… 3.2- 58
写真 3.2-11 大気雰囲気実験（第１回目） …… 3.2- 59
写真 3.2-12 回収したＮａ粒子 …… 3.2- 60
写真 3.2-13 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定（大気雰囲気実験，第 1-１回目）…… 3.2- 67
写真 3.2-14 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定（大気雰囲気実験，第 1-１回目）‥ 3.2- 68
写真 3.2-15 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定（大気雰囲気実験，第 1-２回目）…… 3.2- 74
写真 3.2-16 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定（大気雰囲気実験，第 1-２回目）‥ 3.2- 75
写真 3.2-17 大気雰囲気実験（第２回目） …… 3.2- 76
写真 3.2-18 回収したＮａ粒子 …… 3.2- 77
写真 3.2-19 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定（大気雰囲気実験，第２-１回目）…… 3.2- 85

写真 3.2-20 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第２－１回目)‥ 3.2- 86
写真 3.2-21 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第２－２回目)‥ 3.2- 93
写真 3.2-22 大気雰囲気実験（第３回目）‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 3.2- 94
写真 3.2-23 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第３－１回目)‥ 3.2-102
写真 3.2-24 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第３－２回目)‥ 3.2-109
写真 7.2- 1 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 2
写真 7.2- 2 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 3
写真 7.2- 3 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 4
写真 7.2- 4 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 5
写真 7.2- 5 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 6
写真 7.2- 6 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 7
写真 7.2- 7 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 8
写真 7.2- 8 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(低酸素雰囲気実験)‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥‥ 7.2- 9
写真 7.2- 9 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥‥‥ 7.2- 10
写真 7.2-10 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥‥‥ 7.2- 11
写真 7.2-11 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥‥‥ 7.2- 12
写真 7.2-12 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥‥‥ 7.2- 13
写真 7.2-13 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥ 7.2- 14
写真 7.2-14 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥ 7.2- 15
写真 7.2-15 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥ 7.2- 16
写真 7.2-16 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-１回目)‥ 7.2- 17
写真 7.2-17 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥‥‥ 7.2- 18
写真 7.2-18 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥‥‥ 7.2- 19
写真 7.2-19 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥‥‥ 7.2- 20
写真 7.2-20 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥‥‥ 7.2- 21
写真 7.2-21 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥ 7.2- 22
写真 7.2-22 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-２回目)‥ 7.2- 23

写真 7.2-23 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-2 回目)‥ 7.2- 24
写真 7.2-24 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 1-2 回目)‥ 7.2- 25
写真 7.2-25 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥‥‥ 7.2- 26
写真 7.2-26 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥‥‥ 7.2- 27
写真 7.2-27 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥‥‥ 7.2- 28
写真 7.2-28 ガイド管直下での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥‥‥ 7.2- 29
写真 7.2-29 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥ 7.2- 30
写真 7.2-30 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥ 7.2- 31
写真 7.2-31 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥ 7.2- 32
写真 7.2-32 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-1 回目)‥ 7.2- 33
写真 7.2-33 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-2 回目)‥ 7.2- 34
写真 7.2-34 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-2 回目)‥ 7.2- 35
写真 7.2-35 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-2 回目)‥ 7.2- 36
写真 7.2-36 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 2-2 回目)‥ 7.2- 37
写真 7.2-37 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-1 回目)‥ 7.2- 38
写真 7.2-38 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-1 回目)‥ 7.2- 39
写真 7.2-39 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-1 回目)‥ 7.2- 40
写真 7.2-40 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-1 回目)‥ 7.2- 41
写真 7.2-41 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-2 回目)‥ 7.2- 42
写真 7.2-42 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-2 回目)‥ 7.2- 43
写真 7.2-43 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-2 回目)‥ 7.2- 44
写真 7.2-44 約 2.4m 落下位置での Na 液滴落下速度の測定(大気雰囲気実験，第 3-2 回目)‥ 7.2- 45

1．まえがき

ナトリウム液滴の滴下中の燃焼挙動を把握するとともに、解析コード[1),2)]へ検証用データを提供することを目的として、ナトリウム液滴の燃焼実験を実施した。

本研究の実施内容は下記である。

(1)実験装置の設計及び製作

直径3.5±0.1mm、温度500±10℃の液滴を安定して生成し、不活性ガス雰囲気及び大気雰囲気中で滴下できる実験装置を設計・製作する。

(2)不活性ガス雰囲気実験によるナトリウム液滴径の測定

生成した液滴を燃焼させないように不活性ガス雰囲気中で滴下し、回収した個々の液滴のナトリウム重量測定値から生成時の液滴径を算出する。

(3)大気雰囲気実験によるナトリウム液滴の燃焼量及び落下速度の測定

大気雰囲気で液滴を滴下し、回収した全液滴のナトリウム重量測定値と、上記(2)の結果から求めた滴下ナトリウム総重量の差から、滴下中のナトリウム燃焼量を算出する。

また、滴下途中の液滴の高速度写真の撮影結果から、液滴の落下速度と滴下中の燃焼状況を算出、確認する。

2．実験装置の設計・製作

2.1 不活性ガス雰囲気実験装置

Ｎａ液滴の燃焼量は、滴下直後の液滴重量と燃焼落下後の液滴重量を測定すれば、その差から評価できる。しかしながら、同一の液滴について滴下直後と燃焼落下後の重量を直接測定するのは困難である。そこで、Ｎａ液滴の燃焼落下実験に先立ち、落下直後のＮａ液滴重量を測定するために不活性ガス雰囲気実験装置を製作した。

実験装置の系統概念を図 2.1-1 に、装置全景を写真 2.1-1 に示す。

また、実験装置の詳細図を図 2.1-2～図 2.1-7 に示す。

実験装置は、Ｎａ液滴滴下ノズル、ヒータ、試験容器を有する試験部、Ｎａ供給機構を有するＮａ供給部、ガス加熱器を有する雰囲気調整用の不活性ガス供給部、これらを接続する配管、測定や温度制御を行う計測制御部で構成される。

2.1.1 試験部

図 2.1-7、図 2.1-8 及び写真 2.1-2 に不活性ガス雰囲気実験で使用する試験容器構造を示す。

不活性雰囲気実験では試験容器をガラス製にすることにより、Ｎａ液滴の落下過程を観測可能としている。

試験容器の上部にはＮａ液滴滴下ノズルとヒータを取付けている（詳細は図 2.1-2～図 2.1-4 参照）。試験容器の底部には、Ｎａ液滴を固化回収するための液状パラフィンを入れた容器を設置している。

Ｎａ供給部から供給されたＮａは、Ｎａ液滴滴下ノズル先端から滴下する。Ｎａ液滴滴下ノズルは 3.5±1.0mm の液滴径を生成できるよう、予備試験（7.1 参照）に基づき外径 0.5mm、内径 0.2mm、長さ 10mm としている（写真 2.1-3）。

液滴生成中のＮａの酸化を防止するため、Ｎａ液滴滴下ノズルの周りにはガラス製ガイド管(図 2.1-5)を設け、管内にはＨｅガスを供給する。ノズル先端部を不活性雰囲気に維持するために必要なガイド管の長さは、予備試験（7.1 参照）に基づき 150mm としている（写真 2.1-4）。

Ｎａ滴下直前の液滴温度を 500±10℃に調整するため、Ｎａ液滴滴下ノズル及びガイド管をヒータで加熱するとともに（写真 2.1-4）、Ｎａ液滴滴下ノズル周囲を流下するＨｅガスをガス加熱器で 600℃程度に加熱している。

試験容器全体を不活性雰囲気とするため、Ｎａ液滴滴下ノズル部のガイド管の外側から試験容器内にＡｒガスを供給している。

2.1.2 Ｎａ供給部

Ｎａ供給部は、Ｎａ液滴滴下ノズルの上方に設置している（図 2.1-2）。試験に使用する原子炉級Ｎａを充填した部分と、液滴を一定間隔で生成するためのＮａ供給機構を有する。

Ｎａ供給機構には、ベータアルミナ板に電位差を与えてＮａを一定速度で透過させる（送り出す）方式を採用している。この方式では、ガス圧により間欠的にＮａを押出す方式に比べて安定したＮａ液滴生成が可能であることを予備試験で確認済である。

2.1.3 不活性ガス供給部

不活性ガス供給部からは、Ｎａ液滴滴下ノズル部のＮａ酸化防止用Ｈｅガスと、試験容器雰囲気調整及びＮａ供給部Ｎａの酸化防止用Ａｒガスを供給している。各ガスの供給量は流量計で測定する。

Ｈｅガスはガス加熱器（図 2.1-6）で 600℃程度に加熱した後供給している。

2.1.4 計測制御部

計測制御部では、ヒータ、ノズル、ノズル周辺部雰囲気、パラフィン等の温度並びに試験容器の酸素濃度及び湿度（露点温度）等を測定するとともに、ヒータ部の温度を指定値に設定する機能を有する。ノズル周辺部の熱電対の配置の詳細を図 2.1-9 に示す。

また、ベータアルミナ部の電流を監視し、ノズルから流出したＮａ量を評価可能としている。

2.2 大気雰囲気実験装置

装置全景を写真 2.2-1 に示す。また、実験装置の詳細図を図 2.2-1 に示す。

実験装置は試験容器が大型化している点を除き基本的に不活性ガス雰囲気実験装置と同様である。

2.2.1 試験部

図 2.2-2、図 2.2-3 及び写真 2.2-2 に大気雰囲気実験で使用する試験容器構造を示す。

大気雰囲気実験では試験容器の２側面をガラス板にすることにより、Ｎａ液滴の落下過程を観測可能としている。

試験容器の上部に設置するＮａ液滴滴下ノズルとヒータ部分は、不活性ガス雰囲気実験と同一の構造である。

試験容器の底部には燃焼したＮａ液滴を窒息消化後固化回収するための液状パラフ

ィン容器を設置している。

2.2.2 Ｎａ供給部

Ｎａ供給部は、不活性ガス雰囲気実験装置と同一の構造である。

2.2.3 雰囲気ガス供給部

Ｎａ液滴の滴下ノズル部のＮａ酸化防止用Ｈｅガスと、Ｎａ供給部のＮａ酸化防止用Ａｒガス供給については不活性ガス雰囲気実験装置と同一である。

試験容器内の雰囲気調整ガスは、試験容器の底部に設置する液状パラフィン容器の上方から供給する。

2.2.4 計測制御部

計測制御部は、液滴落下経路に沿った雰囲気温度の測定点数が多い点を除き、不活性ガス雰囲気実験装置と同様である（図 2.2-3）。

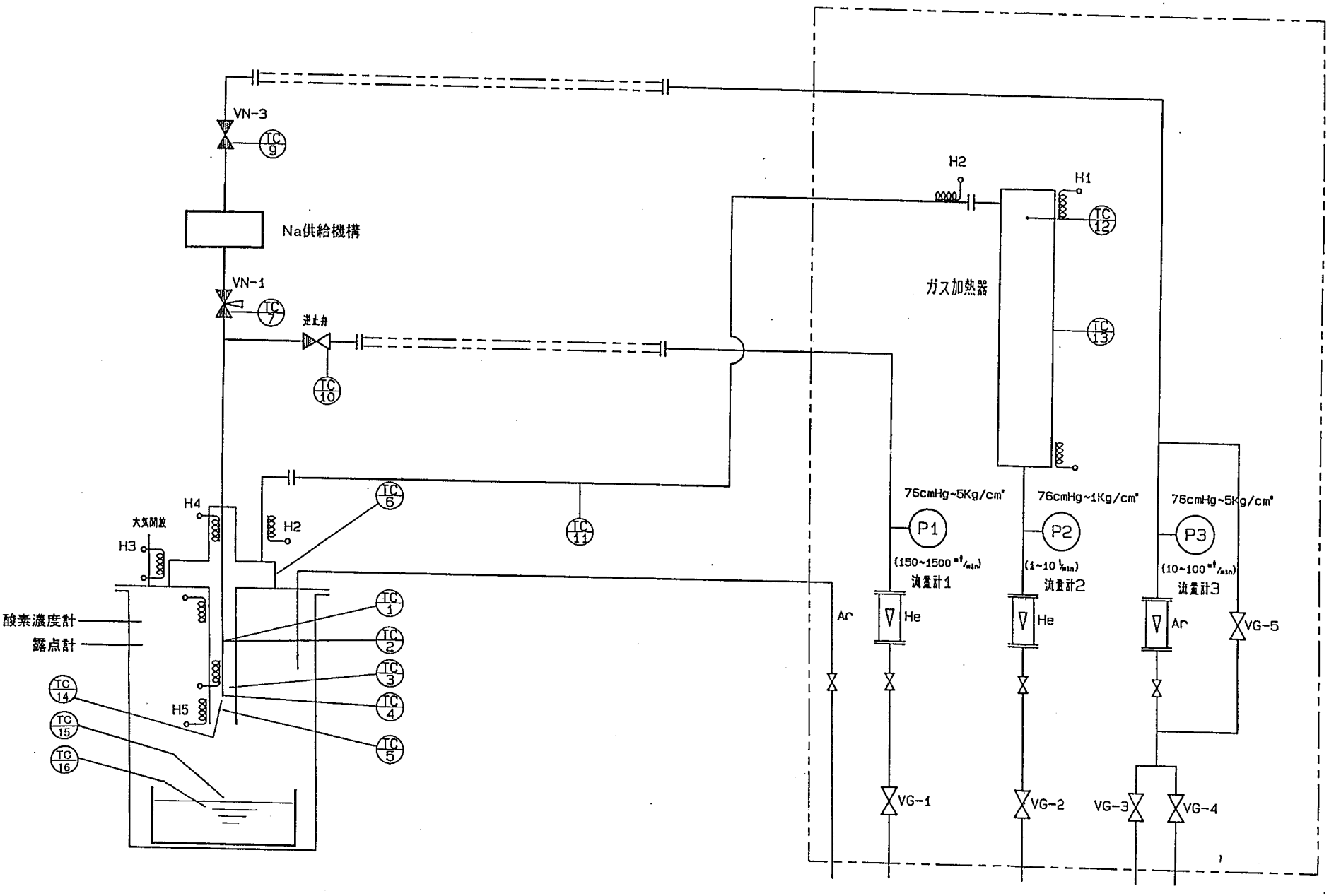


図2.1- 1　実験装置の系統概要

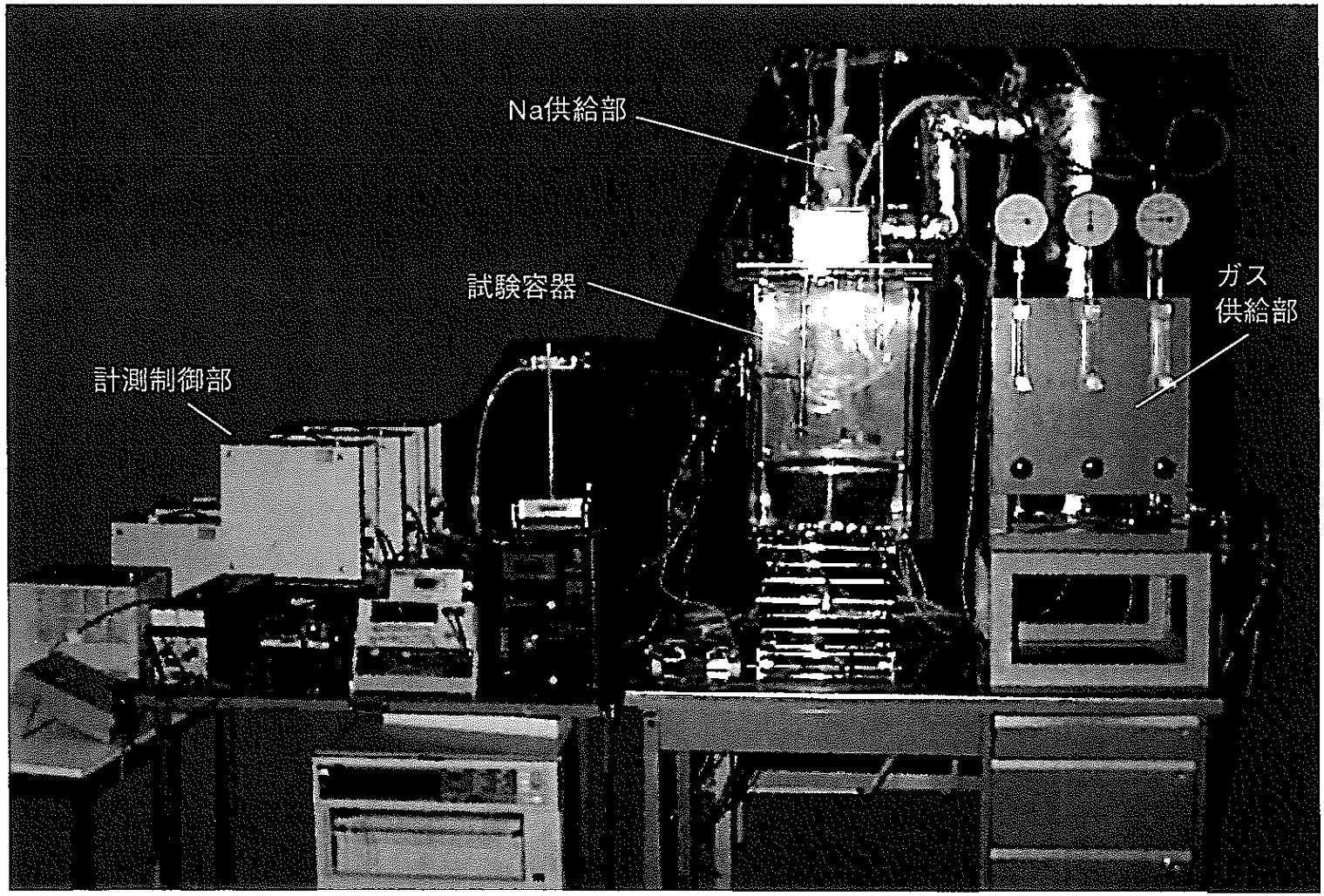
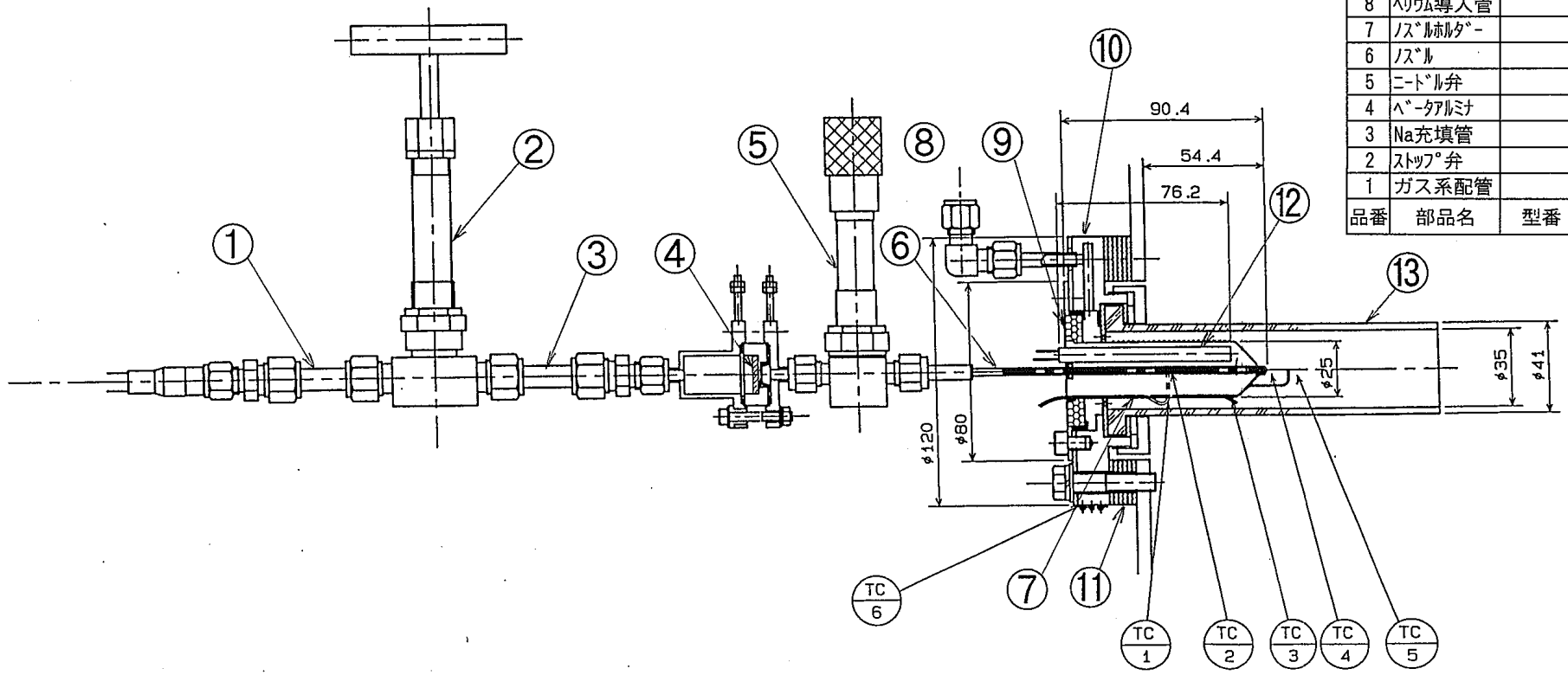
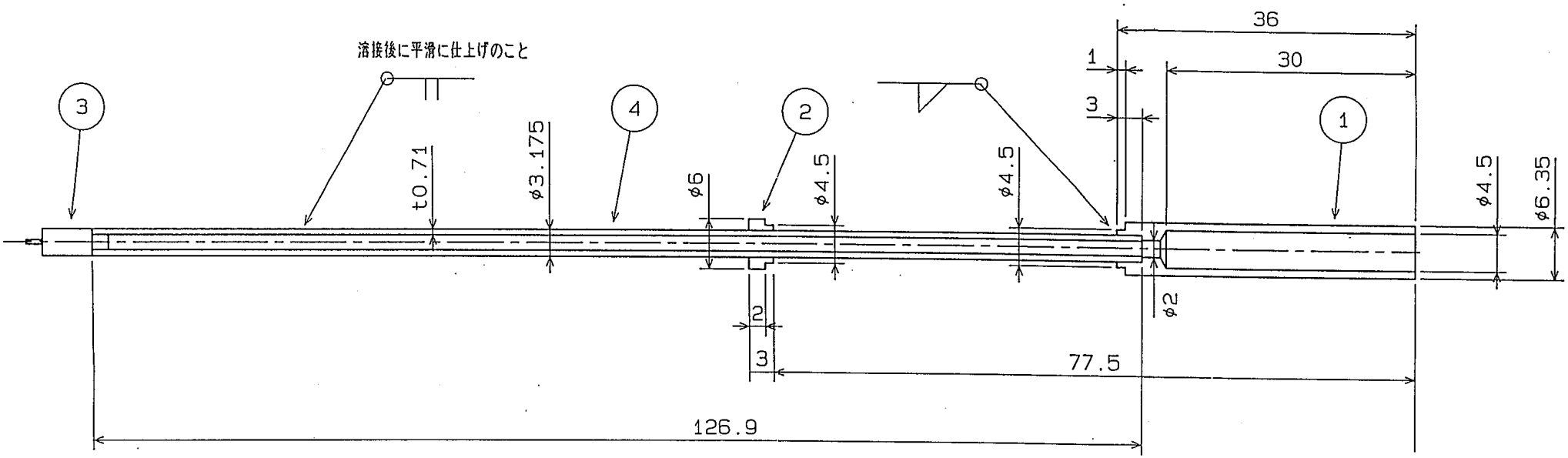


写真2.1-1　　不活性ガス雰囲気実験装置全景



品番	部品名	型番	材質
13	ｶﾞｲﾄﾞ管		ﾊﾟｲﾚｯｸｽｶﾞﾗｽ
12	ﾋｰﾀﾋﾟﾝ		
11	ﾊﾟｯｷﾝ		
10	ﾌﾗﾝｼﾞ		SUS
9	断熱材		ﾏｺｰﾙ
8	ﾍﾘｳﾑ導入管		SUS
7	ﾉｽﾞﾙﾎﾙﾀﾞｰ		Cu
6	ﾉｽﾞﾙ		SUS
5	ﾆｰﾄﾞﾙ弁		
4	ﾍﾞｰﾀｱﾙﾐﾅ		
3	Na充填管		SUS
2	ｽﾄｯﾌﾟ弁		
1	ガス系配管		SUS

図2.1－2　Ｎａ液滴滴下部及びＮａ供給部組図



品番	部品名	型番	材質
4	パイプ		SUS304
3	ノズル		SUS304
2	スリーブ		SUS304
1	管		SUS304

図2.1-3　Na液滴滴下ノズル

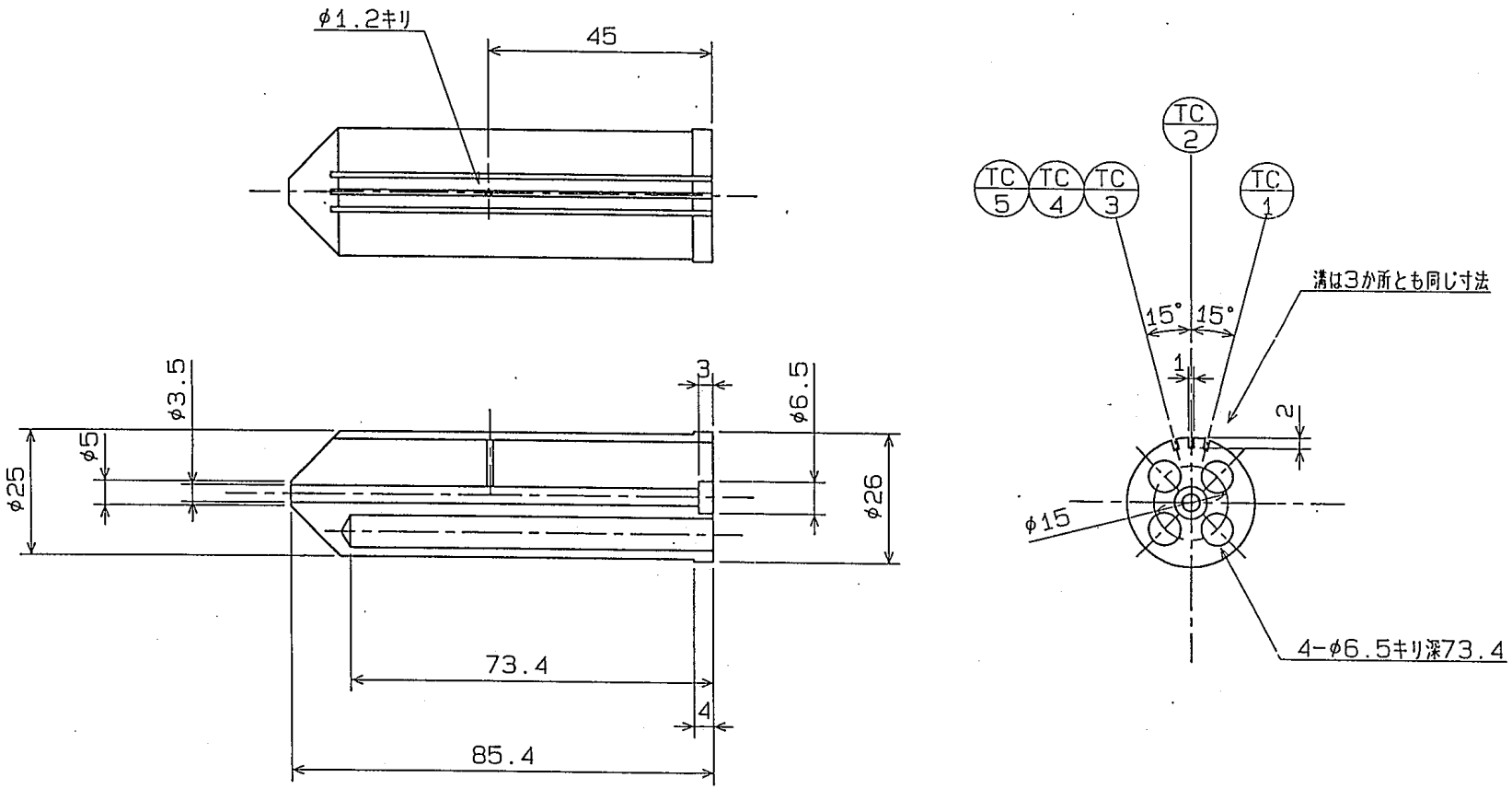
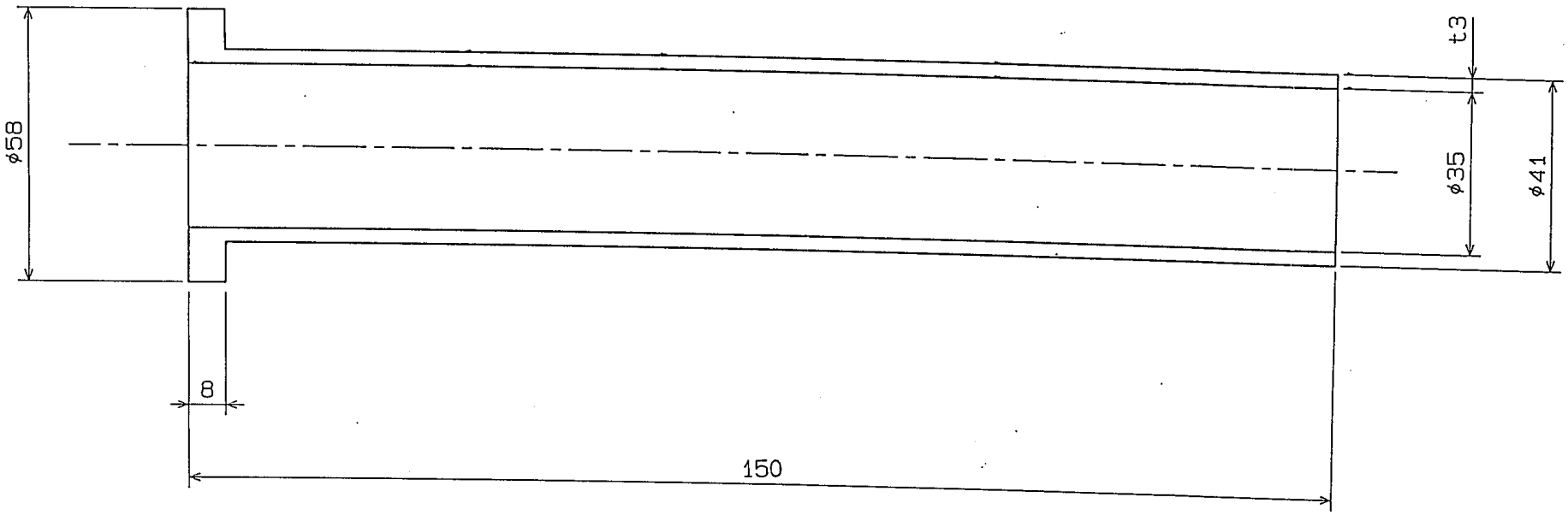
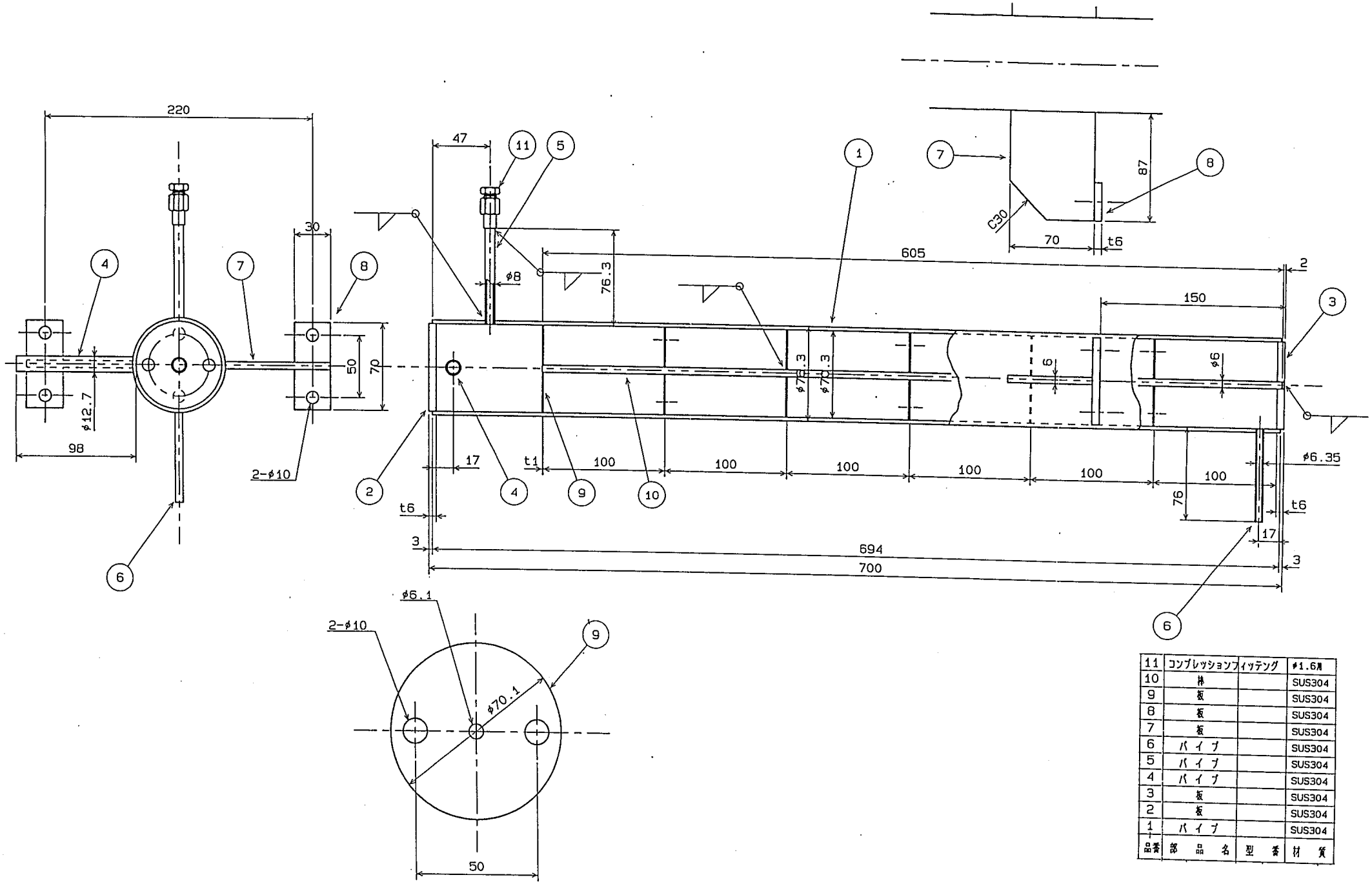


図2.1−4　ノズルホルダー



ガイド管		パイレックスガラス
部　品　名	型　番	材　質

図2.1- 5　ガイド管



品番	部品名	型番	材質
11	コンプレッションフィッテング		φ1.6用
10	棒		SUS304
9	板		SUS304
8	板		SUS304
7	板		SUS304
6	パイプ		SUS304
5	パイプ		SUS304
4	パイプ		SUS304
3	板		SUS304
2	板		SUS304
1	パイプ		SUS304

図2.1－6　ガス加熱器

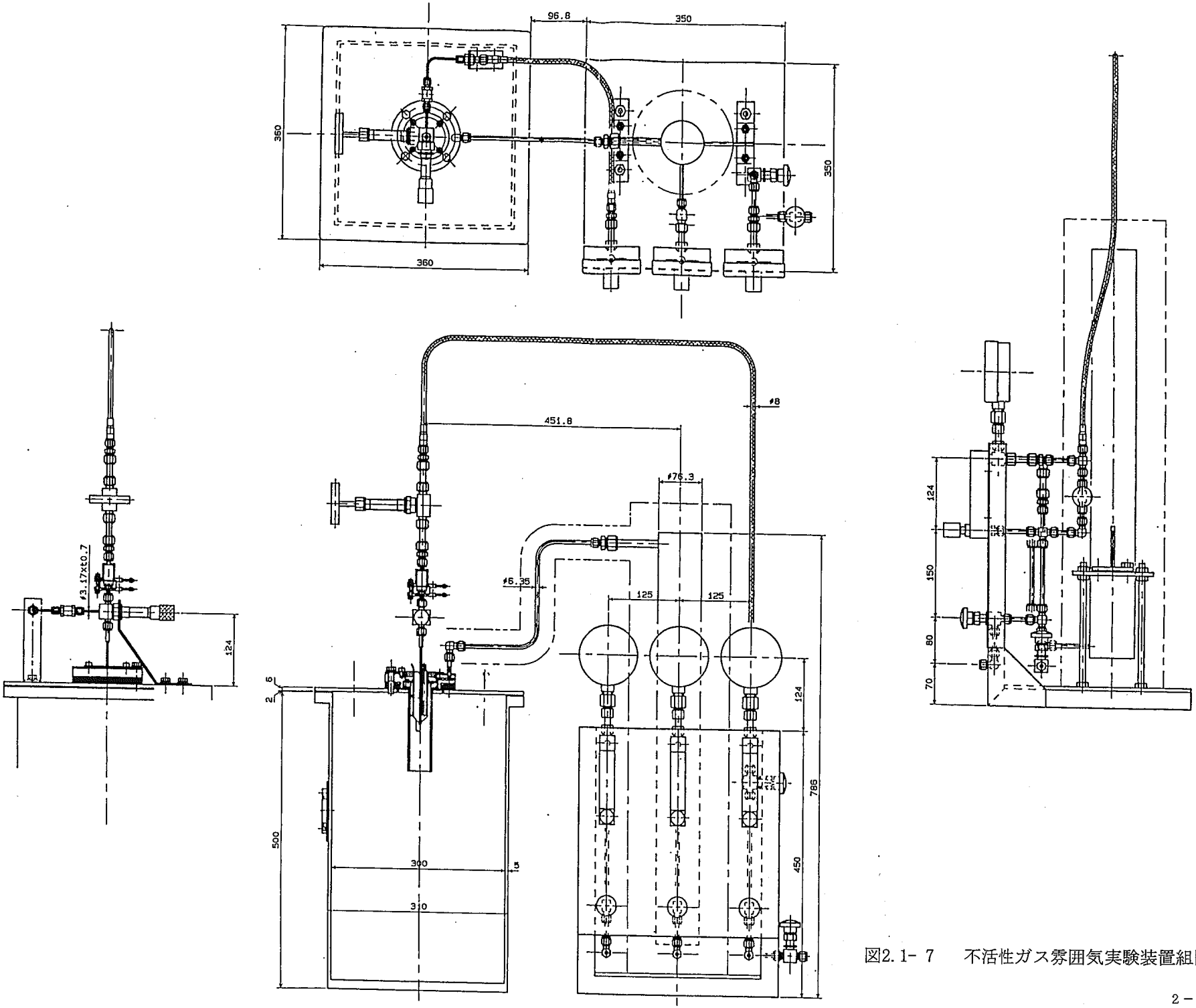


図2.1- 7　不活性ガス雰囲気実験装置組図

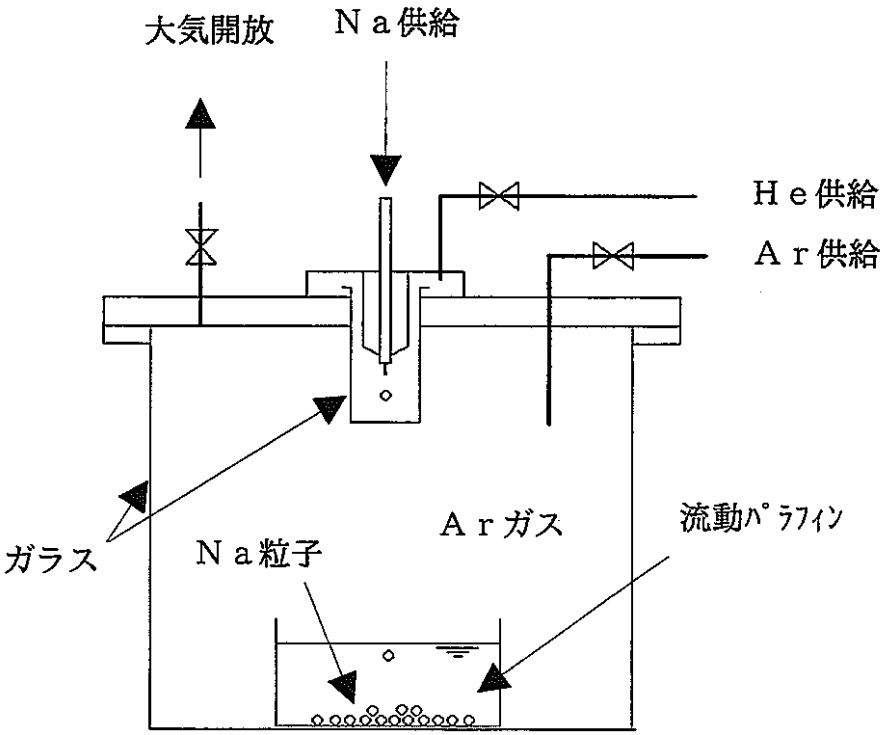


図2.1-8　不活性ガス雰囲気実験試験容器概要

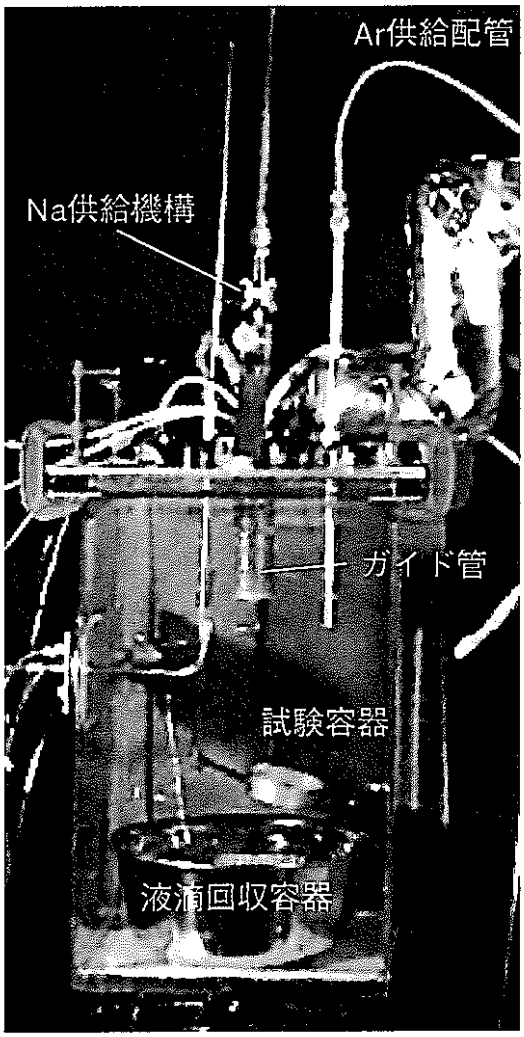


写真2.1-2　　不活性ガス雰囲気実験装置試験容器

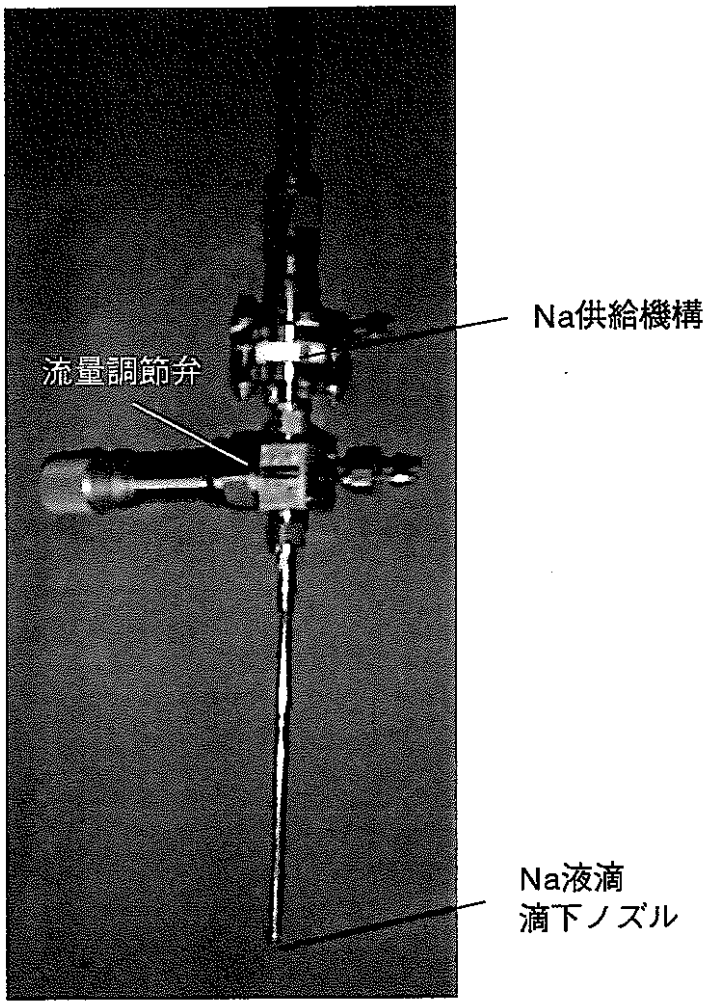


写真2.1-3　　Na液滴滴下ノズル部

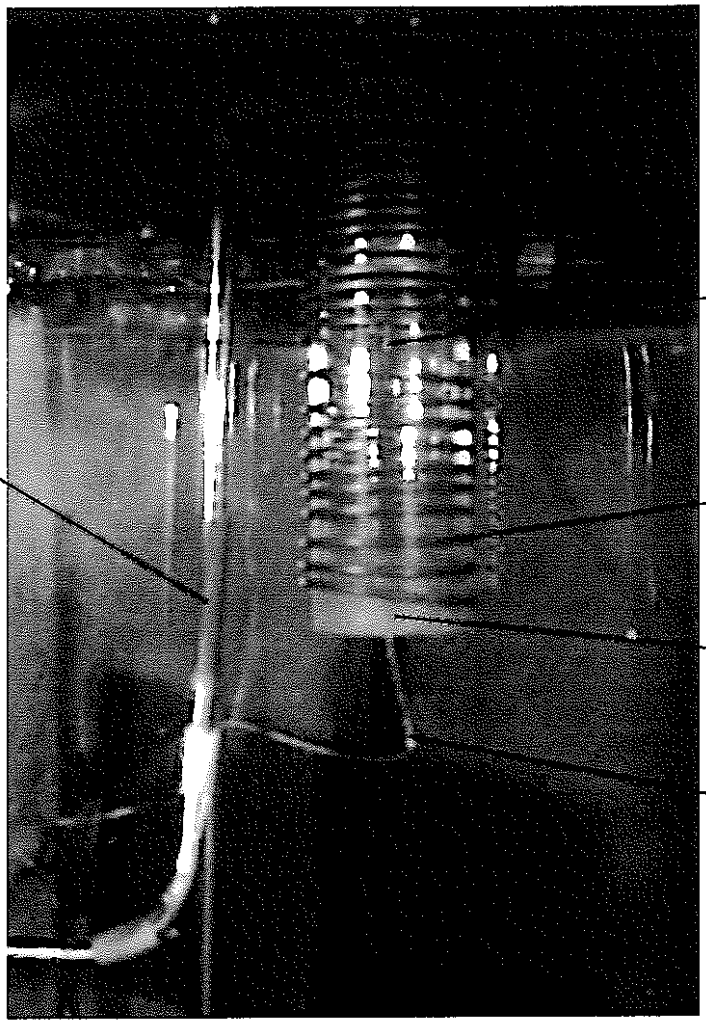


写真2.1-4　　Na液滴滴下ノズル部およびガイド管部

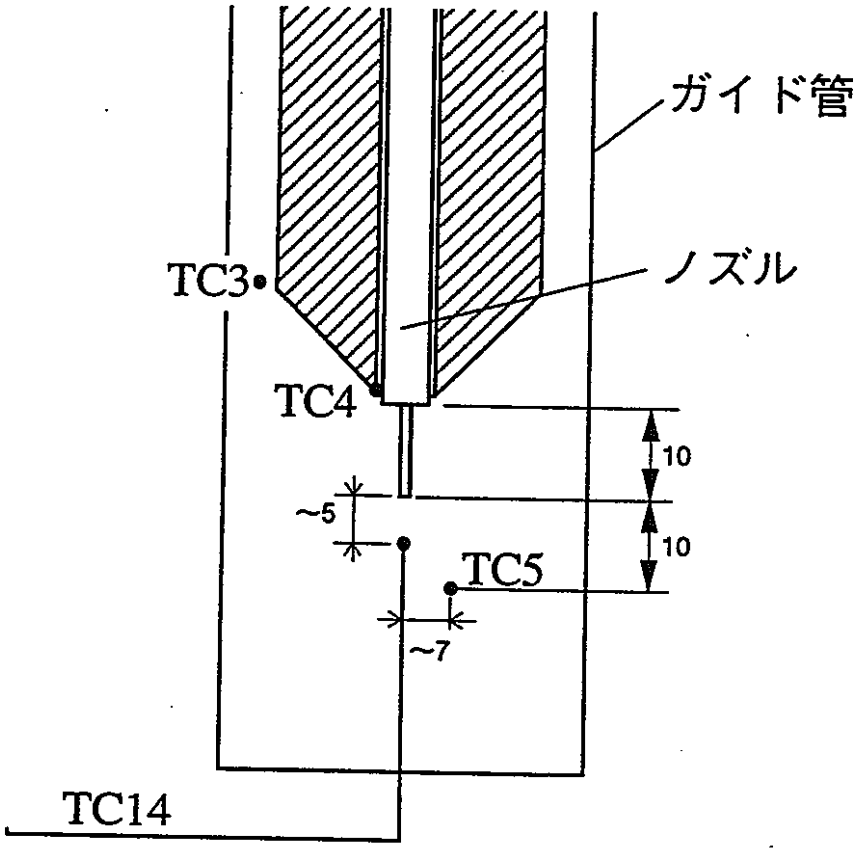


図2.1- 9　　ノズル周辺部の熱電対配置

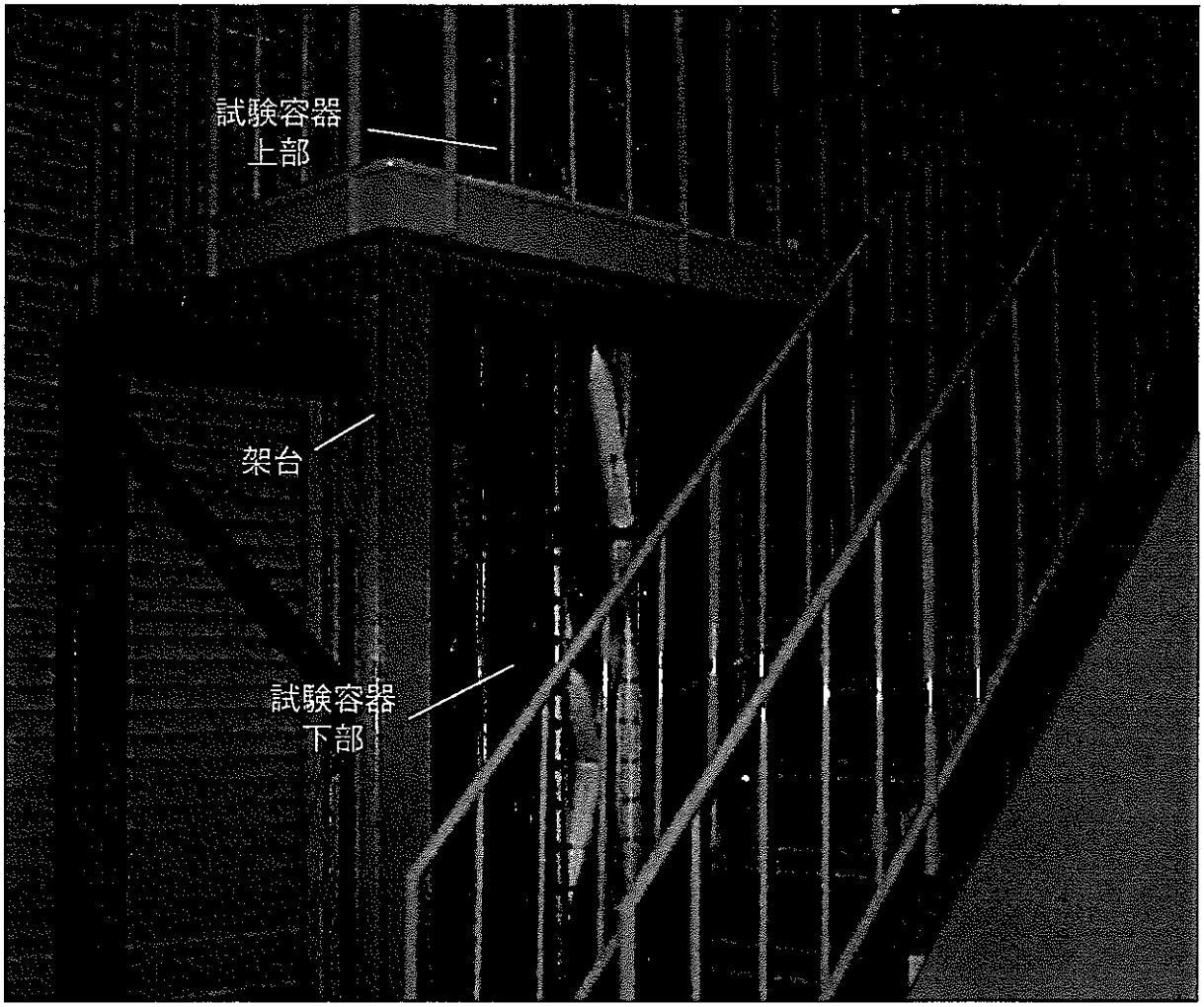


写真2.2-1　　大気雰囲気実験装置全景

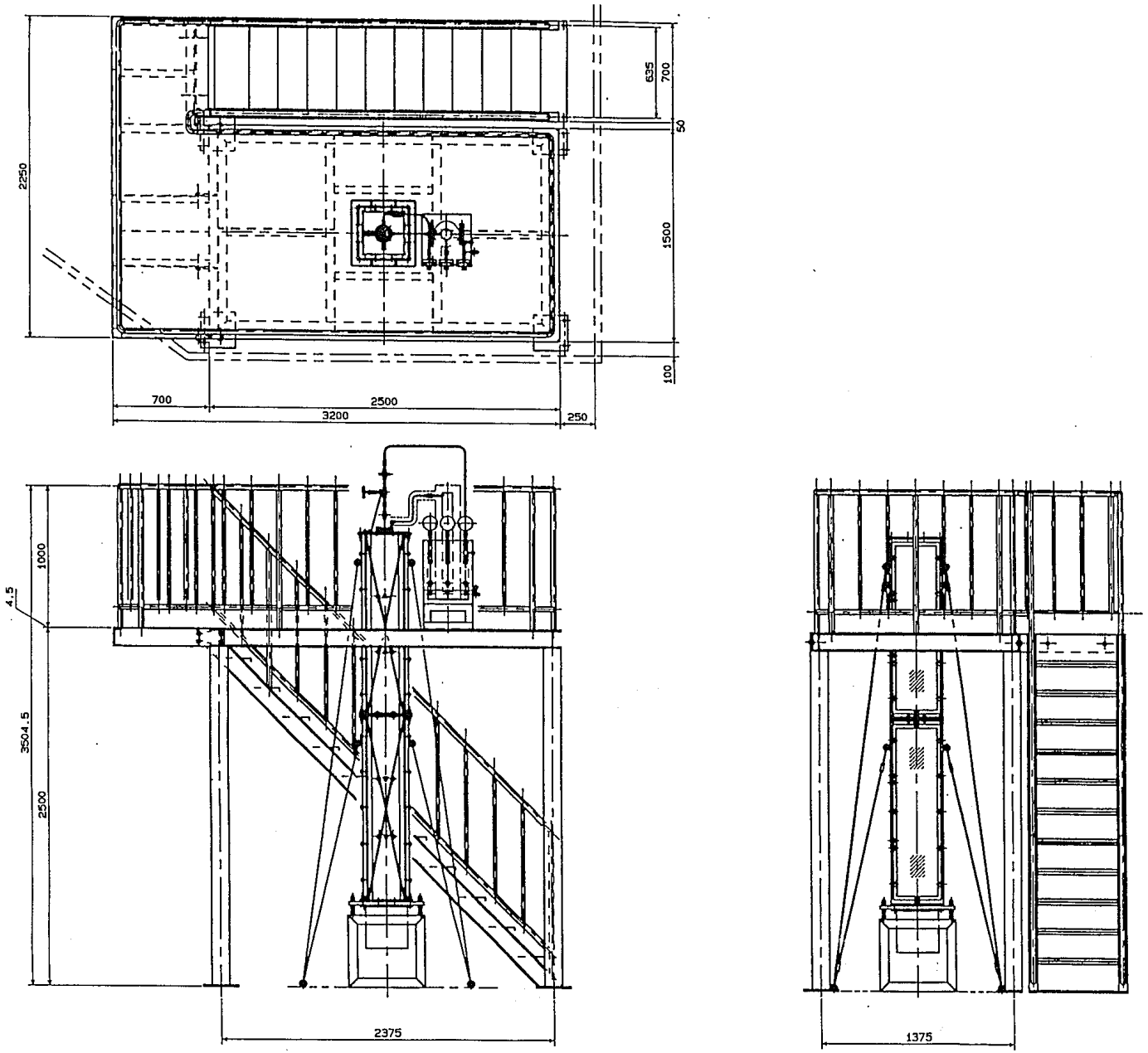
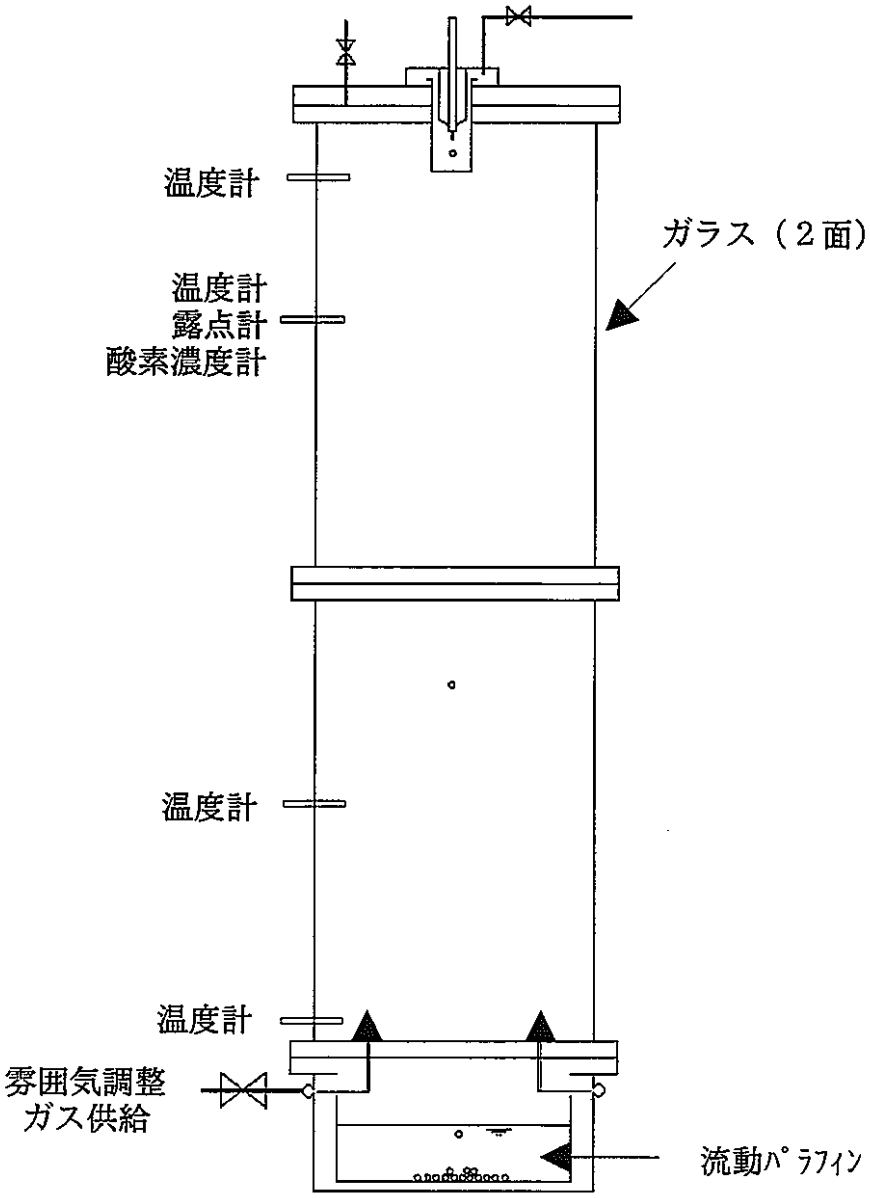


図2.2- 1　大気雰囲気実験装置組図



２）大気雰囲気試験

図2.2-2　大気雰囲気実験試験容器概要

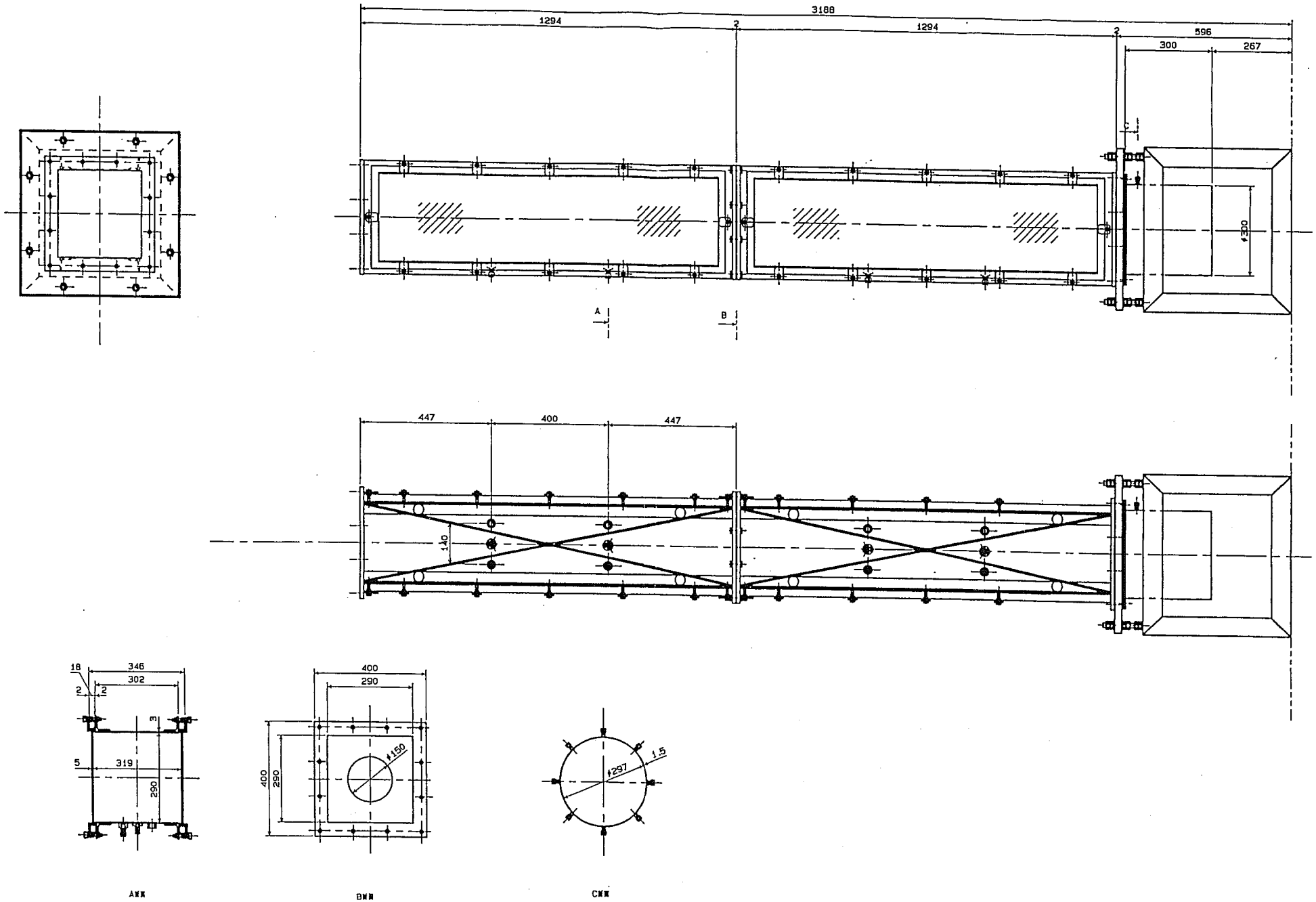


図2.2- 3　大気雰囲気実験試験容器

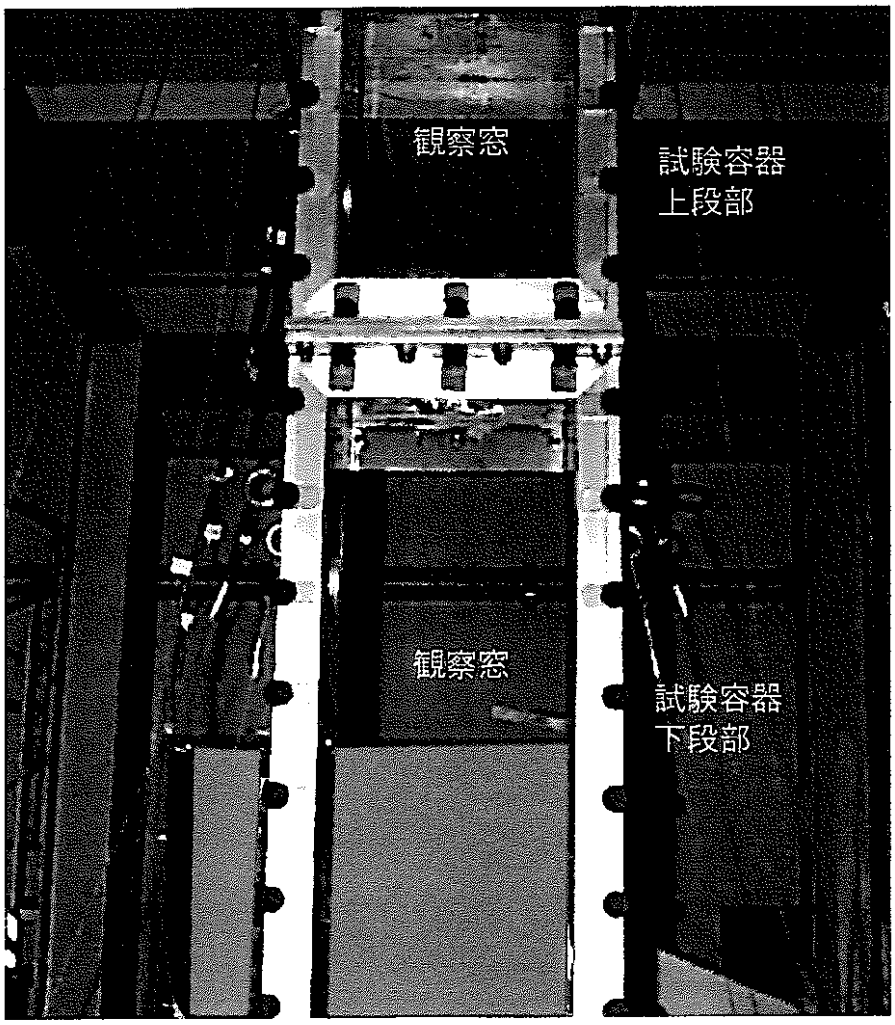


写真2.2-2　　大気雰囲気実験装置試験容器

3．実験

3.1 実験方法

3.1.1 不活性ガス雰囲気実験

第2章第1節に記載した不活性ガス雰囲気実験用試験容器を用い、Ｎａ液滴滴下ノズルからＮａ液滴を落下させ、回収容器で固化し、個別に回収して液滴径の分布を評価した。

試験条件は下記とし、試験は3回実施した。

Ｎａ温度　　：500±10℃

Ｎａ液滴径　：500℃での球換算直径3.5±1.0mm(約19mg)

容器内雰囲気：Ａｒガス

Ｎａ滴下高さ：約30cm

Ｎａ滴下量　：約50滴

Ｎａ液滴径は、図3.1-1に示すように湿式化学分析（原子吸光光度計）で求めた回収液滴のＮａ重量から液滴を球と仮定して算出した。

試験中は、Ｎａ液滴滴下ノズル下端近傍で、液滴落下の様子をビデオ撮影する。なお、実際の試験ではＮａ液滴温度を直接測定できない。このため、液滴温度は本試験開始前の数滴について、落下直後の液滴温度を直接測定し（図 2.1-1 の TC14）、その温度が500±10℃を満足していることを確認した。本試験中も液滴温度が変化しないようにするため、Ｎａ液滴滴下ノズル先端温度（図2.1-1のTC4）、先端近傍雰囲気温度（図2.1-1のTC5）及びガイド管内Ｈｅ流量を液滴温度測定時と同等に維持した。

不活性ガス雰囲気実験は、まず、水実験で選定した形状のノズルで目標とした液滴径が得られることを実際にＮａを用いて確認した後、実験を開始した。実験時の計測センサーの配置を図3.1-2に示す。また、主要計測器の仕様一覧を表3.1-1に示す。ただし、表中の高速度ビデオシステムについては、大気雰囲気実験のみ使用した。

3.1.2 大気雰囲気実験

第2章･第2節に記載した大気雰囲気実験用試験容器を用いて、Ｎａ液滴滴下ノズルからＮａ液滴を落下させ、落下中の燃焼量と液滴の落下速度を評価した。

試験条件は下記とした。

Ｎａ温度　　：500±10℃

容器内雰囲気：低酸素雰囲気（Ａｒガス充填)及び大気雰囲気

（いずれも湿分は成り行き）

Ｎａ滴下高さ：約２ｍ

Ｎａ滴下量　：約 50 滴

試験は、低酸素雰囲気で 1 回、大気雰囲気で 2 回実施した。

落下中の燃焼量は、不活性ガス雰囲気で回収したＮａの総重量と、大気雰囲気で回収したＮａの総重量の差から、Ｎａ液滴 1 個当りの平均値を算出した。液滴の重量測定は図 3.1-3 の手順で実施した。

Ｎａ液滴の落下速度は、撮影した高速ビデオの連続撮影画像の液滴間隔（距離）を撮影間隔（時間）で除して算出する。（図 3.1-4 参照）

なお、Ｎａ液滴温度については、不活性ガス雰囲気実験と同様に、本試験前に落下直後の液滴温度を直接測定し、その温度が 500±10℃を満足することを確認した。本試験中は、Ｎａ液滴滴下ノズル周辺の各部温度及びＨｅ流量を、液滴温度測定時と同等に維持した。

大気雰囲気実験体系での各種計測センサーの配置を図 3.1-5 に示す。熱電対は、ノズル近傍の配置を不活性ガス実験時と同様にし、試験容器内についてはＮａの落下軌道に沿って配置したＡ-1～Ａ-10 の他、一部周方向の温度を計測するためにＢ-4, Ｂ-8 及びＣ-4, Ｃ-8 を設置した。酸素計及び露点計については、低酸素雰囲気実験に用いる Ar ガスが大気より重いことから、試験容器に設けた計測ポートのできるだけ上段のポートを利用し設置した。高速度ビデオカメラは、１回の実験を前半と後半に分け前半をガイド管直下の位置に設置し、後半をガイド管下端面から約 2.4m 下に移動した。また、試験容器上部と下部内には、高速度ビデオカメラで撮らえられた落下中の液滴速度を評価するためのスケールを設置した。

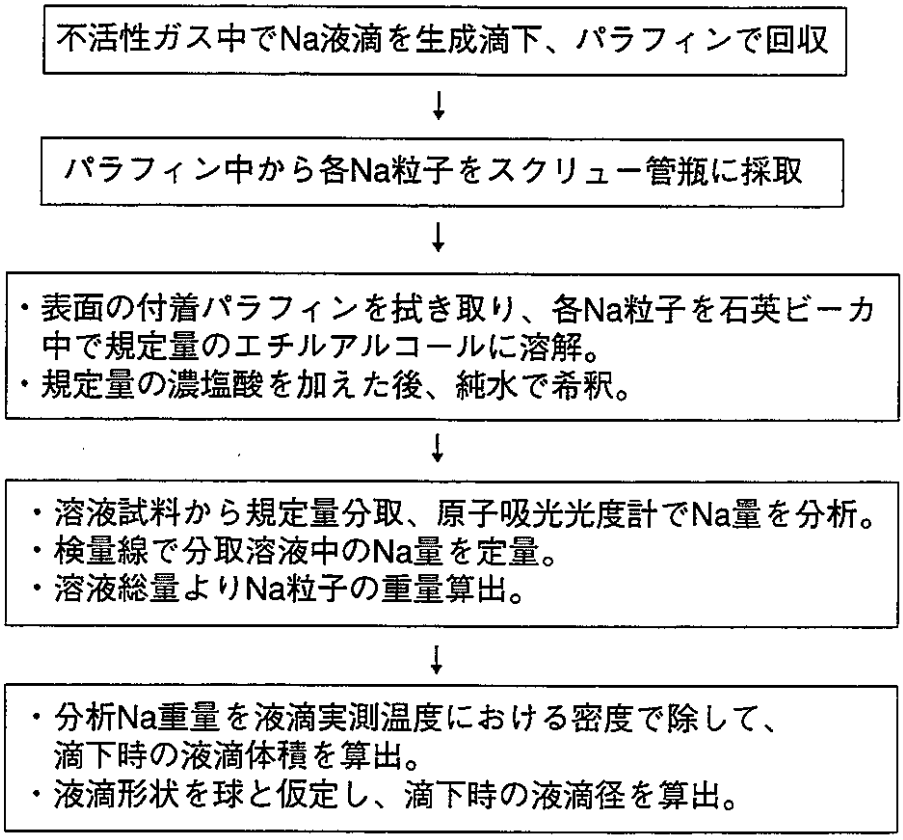


図3.1-1　ナトリウム液滴径評価手順(不活性ガス雰囲気実験)

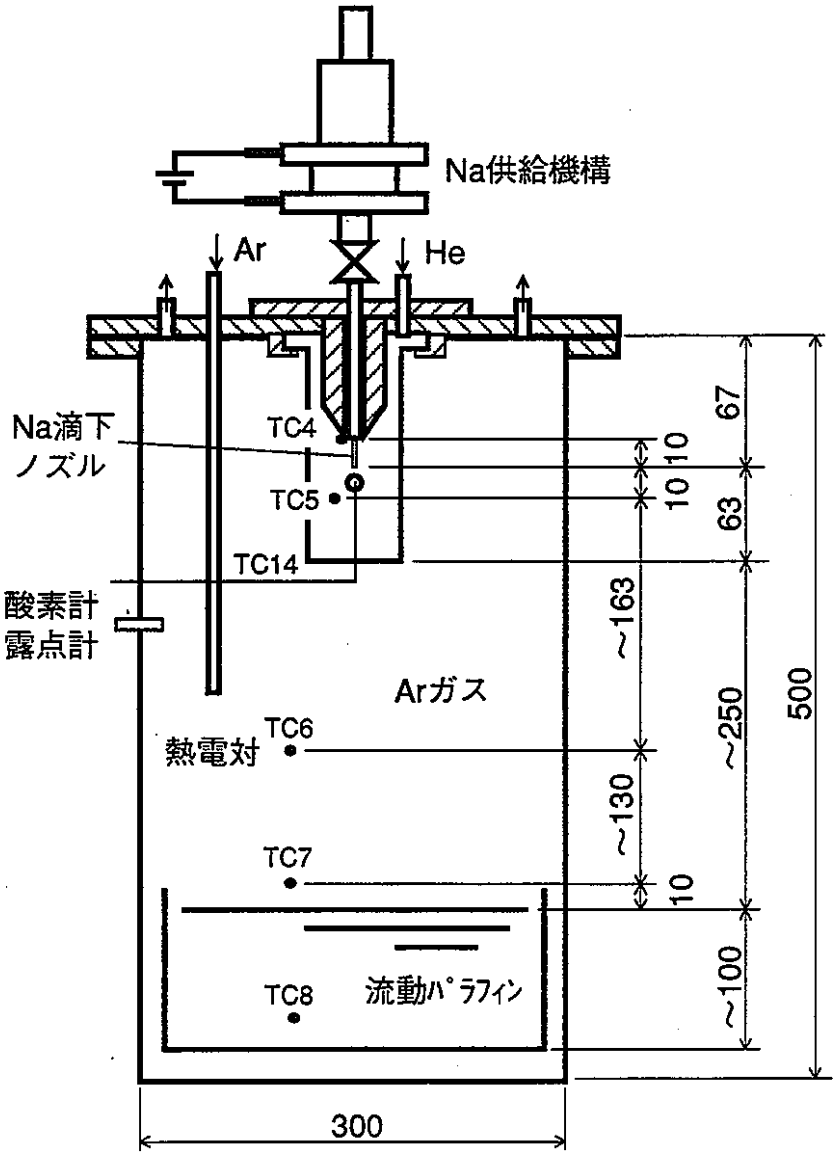


図3.1-2　　不活性ガス雰囲気実験装置における計測センサー配置図

表3.1-1　主要計測器の仕様一覧

No.	項目	型式	主な仕様
1	温度計	シース熱電対 （K型非接地）	助川電気製：0.5mmφ及び1.0mmφ ・許容差：測定温度の±0.75% ・温度応答性：76.3ms(63.2%応答) 161.3ms(90%応答) ・同一ロット間誤差：±0.5℃
2	酸素計	ジルコニア式 （LC－750H）	東レエンジニアリング製 ・測定レンジ：0～1000ppm 0～1%,0～10% 0～100%、切替え式 ・許容差：±2%FS（2%レンジ以上） ±3%FS（2%レンジ未満） ・応答速度：ガス濃度により変化 （数%ガス、90%応答5秒以内）
3	相対湿度計 （露点計）	ポリマー薄膜フィルム	桜エンドレス製 ・測定範囲：露点-15℃～+75℃
		薄膜酸化アルミニウム方式	日本パナメトリクス製 ・測定範囲：露点-10℃～-110℃ ・精度：±2℃(-65℃～+20℃)
4	高速度ビデオ システム	HSV-200 （R・G・B　3管式）	ナック製 ・メカニカルシャッター：1/2000秒 ・画像：200フィールド/秒

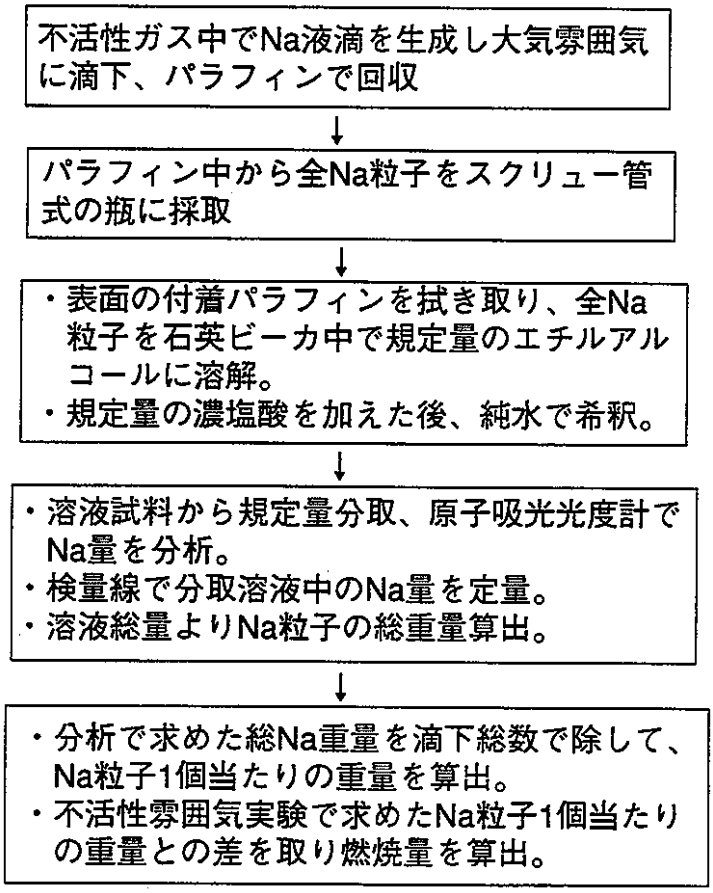


図3.1-3　ナトリウム液滴径評価手順(大気雰囲気実験)

ガイド管下端近傍及び約2m下方で
高速度ビデオ撮影
撮影間隔：1/200秒
シャッター間隔：1/2000秒

↓

時間を変え同一液滴を撮らえた2枚の
写真と写真中のスケール目盛から落下
距離を測定

↓

落下速度を下式で算出
(落下速度) ＝ (落下距離) / (撮影間隔)

↓

未燃焼液滴(低酸素雰囲気実験)の落下
速度と燃焼液滴（大気雰囲気実験)の
落下速度を比較

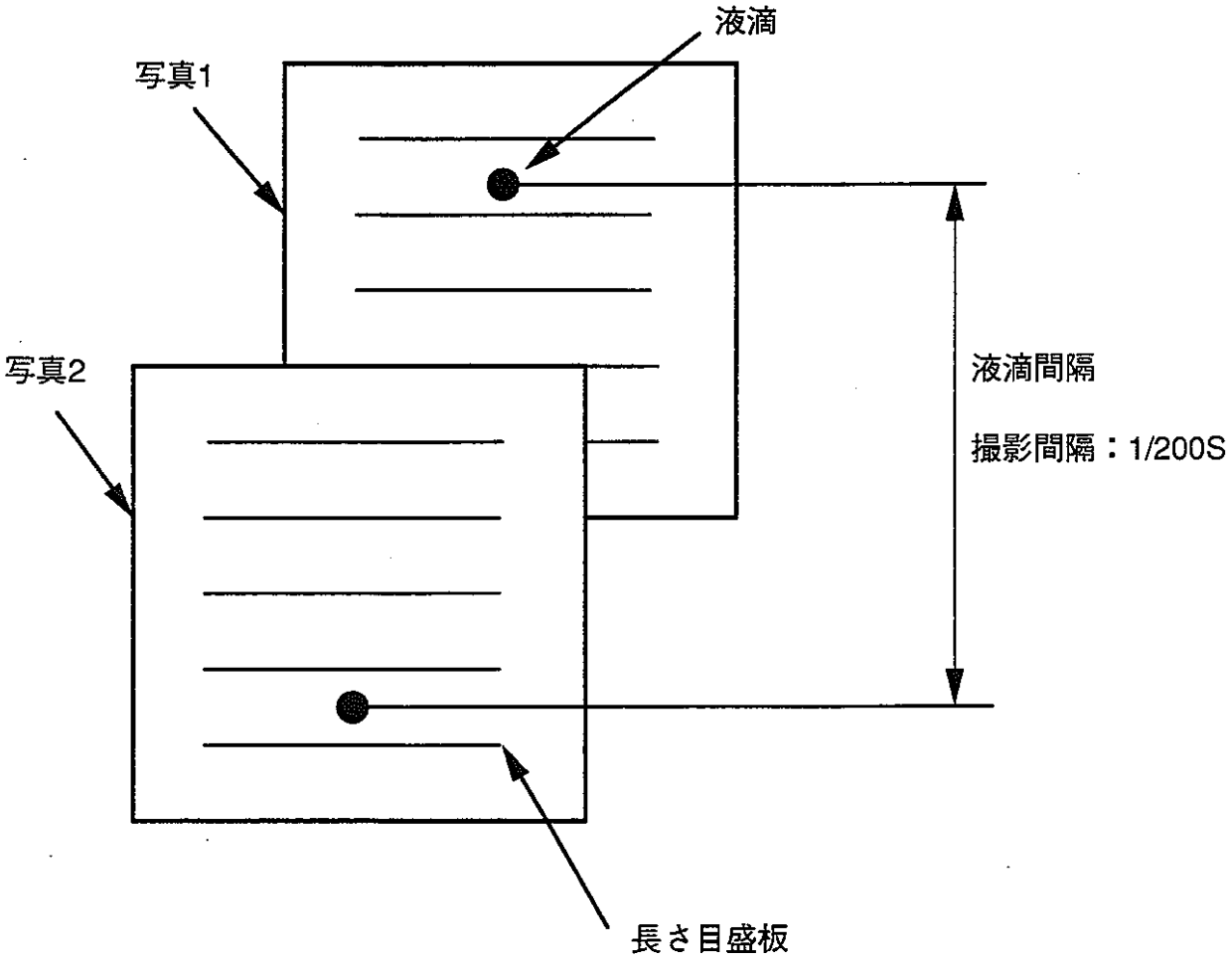


図3.1-4　ナトリウム液滴落下速度評価手順

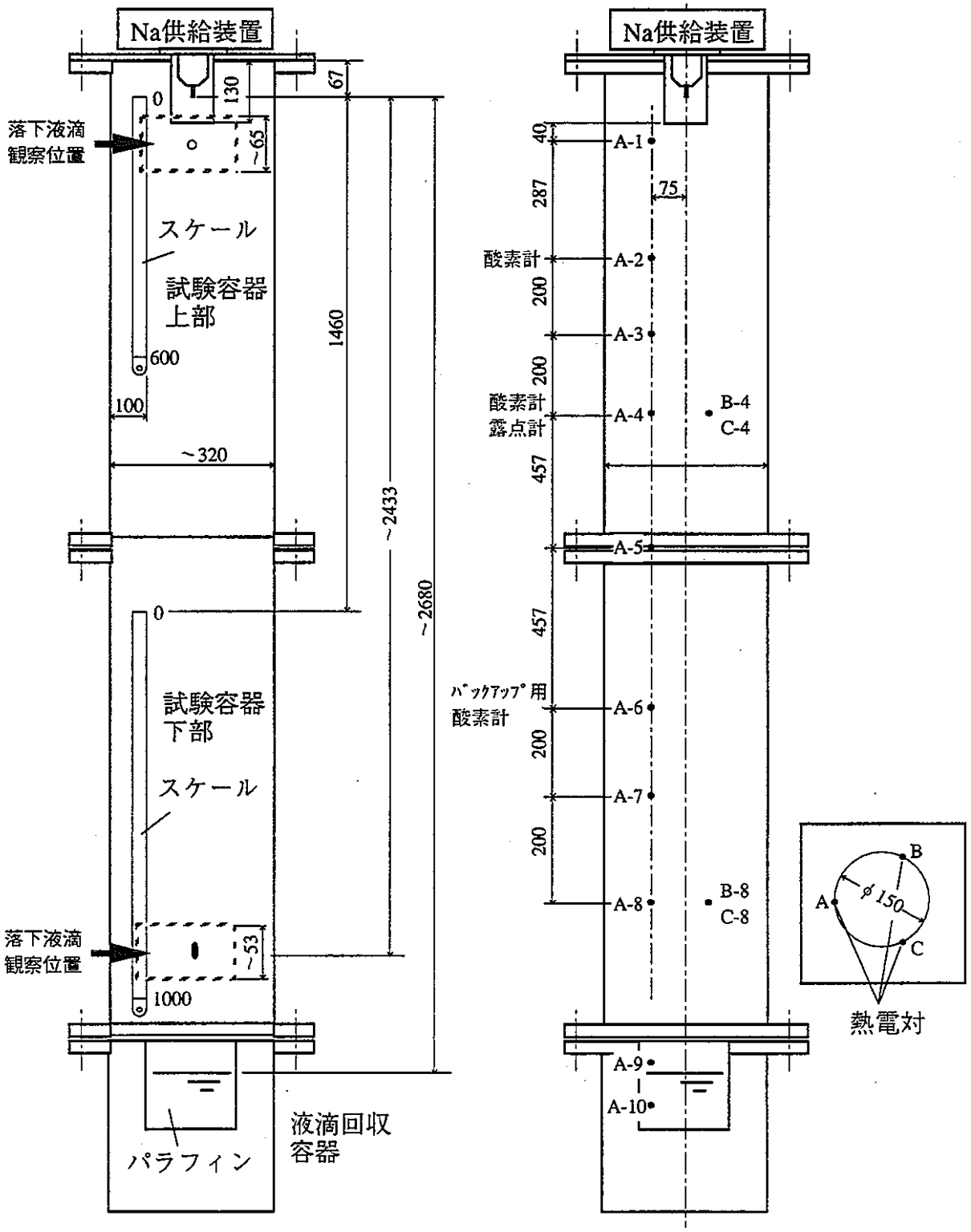


図3.1-5　大気雰囲気実験装置における計測センサー配置図

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 不活性ガス雰囲気実験

(1) Ｎａ滴下予備実験

本実験に先立ち水実験で選定したノズル仕様で、直径 3.5±1.0mm のＮａ液滴が生成でき、かつ安定して継続的に滴下できることを実証するため、Ｎａを用いて予備実験をした。予備実験では、ノズル先端の細管部（外径 0.5mm）の長さを 2mm と 15mm に変えて液滴の生成状況を調べた。

ノズル先端細管部の長さが 2mm では、写真 3.2-1 に示すようにＮａ液滴が細径部を覆い太径部との接続部まで成長し、しかもノズルホルダーの先端に液滴が生成するため、大きな液滴径となることがわかった。

一方、ノズル細管部の長さが 15mm の場合、予備実験１では、写真 3.2-2 に示すようにノズル下端面から外面の上方約 8mm まで円錐状の皮膜が形成し、皮膜の底面部にＮａ液滴が生成し落下した。しかしながら、Ｎａ液滴は安定して生成し、ほぼ一定の時間間隔で滴下した。このため、流動パラフィン中に 30 滴のＮａ液滴を滴下して回収し、化学分析により個別にＮａ重量を求め液滴径を調べることにした。化学分析結果を表 3.2－1 に示す。30 滴のＮａ重量は、化学分析値で 83.39±5.40mg であった。これを次式により滴下時の液滴径に換算した。

$$D = (6 \times Wa/(\pi \times \gamma))^{1/3} \quad \text{----------} \quad (1)$$

ここで、D ： 滴下時の液滴径（cm）

Wa ： Ｎａ化学分析重量（g）

γ ： 滴下温度でのＮａ密度（g/cm^3）

この結果、得られたＮａ液滴径(化学分析で得られた重量を温度補正し、球を仮定して求めた直径)と標準偏差(1 σ)は滴下時に 5.71±0.13mm であり、目標とした液滴径より大きいことが判明した。

このように液滴が大きくなった理由は、ノズル先端部の外面に皮膜が形成し、みかけ上ノズル外径が大きくなったためと推定された。ノズル外面に形成した皮膜がＮａ酸化物とすれば、ガイド管内への酸素の漏れ込みが考えられる。そこで、ガイド管内部の酸素濃度を調べた。その結果、ノズル先端部を不活性化するために流通させているＨｅガス中に約 300ppm の酸素が検出された。極微量の酸素混入は、ノズル取付け用フランジのシール部より大気がインリークして生じたものである。そこで、フランジの隙間部にセラミックボンドを塗ってシール性を高めると共に、万一の大気インリークに備え、試

験中はフランジ外表面部を簡易な容器で覆い、その容器内にＡｒガスを流し二重シール構造とした。

ガイド管内部への大気インリーク防止策を施したのち、第２回目の予備実験をした。滴下状況を写真 3.2-3 に示す。Ｎａ液滴は、ノズル下端面から外面を 3～4mm 程度上昇するものの、予備実験１で見られたような皮膜を形成せず、一定の時間間隔で液滴の生長とノズル下端からの滴下を繰り返した。このため、流動パラフィン中に液滴を滴下して個別に回収し、化学分析によりそれぞれのＮａ重量を求め液滴径を調べた。結果を表 3.2-2 に示す。50 滴のＮａ重量は、24.80±0.58mg であった。また、(1)式で求めた滴下時の液滴径は 3.82±0.03mm であり、いずれの液滴も目標とした 3.5±1.0mm を満足した。

残された課題は、Ｎａの液滴温度 500±10℃を満足することにあった。本実験では、後述するように落下する液滴の直下に熱電対(TC-14)を設置して液滴の温度を直接測定するようにしたが、予備実験時には、TC-5 の熱電対をノズル近傍に近づけ落下する液滴の温度を間接的に測定した。後述する直接測定した結果と、この間接的に測定した雰囲気の温度とから予備実験２における液滴温度を推定すると約 440℃であり、目標温度を満足しないことがわかった。実験装置上、液滴温度を高める方策として採用したガイド管内に供給するＨｅガスの加熱器(温度 600℃)、及びフランジに取り付けた加熱ヒータでの加熱もほぼ限界であった。そこで新たにガイド管の外面にヒータを巻き付け、ノズル周囲を流下するＨｅガスを加熱し、目標値仕様を満足できるようにした。

上記の対策により、ノズルから落下するＮａ液滴の径と温度が目標仕様を満足できたことから、ノズル径に対し生成したＮａ液滴径を調べるために、図 3.2-1 に示す従来の水実験等で評価されている関係図[3)]にプロットした。この結果、生成した液滴径はノズルの内径で規定されるのではなく、ノズル先端がＮａで濡れるため外径に依存することがわかった。また、ノズル外径よりもさらに大きな液滴径となる理由は、ノズルの外面に生成したＮａ酸化物によりノズルの外径がみかけ上、太くなるためと推定される。

(2) Ｎａ滴下実験

Ｎａ滴下予備実験により、目標とするＮａ液滴径を得るには、ノズル外径(0.5mm)を規定する他、ノズル細径部の長さを少なくとも 8mm 以上にする必要があった。一方、ノズルの製作性や内部流体であるＮａの温度と流出圧力等の実験上の制約から細管部の長さは、できるだけ短い方が有利である。このため、本実験では、必要長さに若干の裕度を見込み細径部の長さを 10mm とした。

不活性雰囲気中でのＮａ滴下実験は、ノズル先端の製作誤差による液滴径のバラツキを調べるためノズルを変えて 3 回実施した。Ｎａの滴下数は、1 回の実験で 50 滴を目

標とした。実験結果を以下に示す。

(a) 第１回目のＮａ滴下実験

第１回目の実験におけるＮａの滴下状況と回収状況を写真 3.2-4 に示す。Ｎａ液滴の滴下状況は、実験中、最初から最後までほぼ一定の時間間隔であった。また、試験開始前の数滴について落下直後の液滴温度を直接測定した結果は、図 3.2-2 に示す通り 493℃であり目標とした 500±10℃を満足した。さらに、滴下試験中のノズル先端温度及び先端近傍雰囲気温度は、図 3.2-3 に示す通り、試験開始前の液滴温度測定時とほぼ同等に維持できた。従って滴下試験中のＮａ液滴温度は、試験前に直接測定した温度 493℃に維持できたと考える。滴下試験中の試験容器内軸方向温度とパラフィンの温度変化を図 3.2-4 に示す。雰囲気の温度は約 80℃で滴下試験中ほぼ一定、パラフィンの温度は約 41℃から滴下試験中に 2～3℃上昇した。なお、温度測定データの急峻な下への凸は、5Hz のローパスフィルタで除去できなかったノイズである。

流動パラフィンから個別に回収した滴下Ｎａ粒子の化学分析結果を表 3.2-3、その液滴径の分布を図 3.2-5 に示す。滴下時の液滴径は、いずれも 3.88±0.02mm の範囲にあった。

(b) 第２回目のＮａ滴下実験

第２回目の実験におけるＮａの滴下状況と回収状況を写真 3.2-5 に示す。試験開始前の数滴について実測した落下直後の液滴温度は、図 3.2-6 に示す通り 507℃であった。滴下試験中のノズル近傍の温度分布は、図 3.2-7 に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。また、滴下試験中の試験容器内軸方向の温度は、図 3.2-8 に示す通り約 80℃でほぼ一定、パラフィンの温度は約 55℃から第１回目の試験同様に 2～3℃上昇した。

流動パラフィンから個別に回収した滴下Ｎａ粒子の化学分析結果を表 3.2-4、その液滴径の分布を図 3.2-9 に示す。滴下時の液滴径は、いずれも 3.93±0.15mm であり目標値を満足していたものの、第１回目の実験に比べ液滴径のバラツキ幅が多少大きかった。この液滴径のバラツキは、以下の理由からノズル内部に生じたＨｅのガス溜りによるものと考えられる。

Ｎａ供給機構では、ベータアルミナから一定の速度でＮａを送り出しているのに係わらず、第２回目の実験に関する限り液滴を滴下後、次の液滴が生成するまでわずかな間があり、その後ノズル先端に急速に液滴が生長して落下する現象が連続して見られた。このような現象が現れた理由として、 Ｎａの酸化を防止するため滴下前にノズル内に流通させていた He ガスが、Ｎａ供給機構とノズル先端との間に設けたバルブ等に閉じ

込められ、このガスの圧縮、膨張などによりＮａの滴下挙動に影響を及ぼしたものと考える。

(c) 第3回目Ｎａ滴下実験

第3回目の実験では、液滴の生成挙動に留意しながら50滴の滴下試験を続けて2回実施した。液滴の滴下状況を写真3.2-6に示す。第2回目の実験とは異なり、液滴はノズル先端に徐々に成長し、かつ一定の時間間隔で滴下し、試験終了までこの状況が持続した。

第3-1回目の試験における落下直後の液滴温度は、図3.2-10に示す通り499℃で、滴下試験中のノズル近傍の温度は、図3.2-11の通り液滴温度測定時とほぼ同様の温度に維持できた。また、滴下試験中の試験容器内軸方向の温度は、図3.2-12に示す通り約55℃～60℃、パラフィンの温度は約30℃から滴下試験中に約5℃上昇した。

流動パラフィンから個別に回収したＮａ粒子の化学分析結果を表3.2-5、その液滴径の分布を図3.2-13に示す。滴下時の液滴径は、3.77±0.01mmと良好な結果であった。なお、表中には電荷量で評価した液滴重量とその径を併記した。これについては後述する。

一方、第3-1回目の試験終了後、引き続き実施した第3-2回目の試験では、液滴温度が図3.2-14に示す通り493℃で、図3.2-15に示す滴下試験中のノズル近傍の温度分布も液滴温度測定時とほぼ同等に推移した。また、滴下試験中の試験容器内軸方向の温度は、図3.2-16に示す通り約60℃、パラフィンの温度は約35℃から滴下試験中に2～3℃上昇した。

回収したＮａ粒子の化学分析結果を表3.2-6、その液滴径の分布を図3.2-17に示す。滴下時の液滴径は、3.75±0.01mmであり、第3-1回目の試験同様に良好な結果であった。

上記した液滴の化学分析結果を示す表には、電荷量で評価した液滴重量とその径を併記した。これは、Ｎａ供給機構にベータアルミナを採用したことにより可能になったもので、ベータアルミナでのＮａ供給量は電荷量に一致する。すなわち、Ｎａはベータアルミナを透過する時、Na^+イオンとなり電子1ヶを放出する。従って、Ｎａの透過量Ｑはファラディーの法則より、

$$Q = A \times h / F \quad \text{----------} \quad (2)$$

ここで、Ｑ：Na^+イオンの透過量（mol）

Ａ：電流（A）

h：時間（s）

F：ファラディー定数　(9.648531*10^4 C/mol)

で表される。Ｎａのモル量をミリグラムに単位換算すると単位時間当たりのＮａ透過量は、0.23827mg/(A·s)を得る。ここで、電荷量は、（2）式から明らかなようにベータアルミナへの透過電流値と、Ｎａ液滴の滴下間隔を測定することにより算出可能である。実験では、ベータアルミナの電源にシャント抵抗を接続して透過電流を実測すると共に、Ｎａの滴下状況を観察するために設置したビデオカメラの視野内にストップウォッチを設置し、各滴毎の滴下に要した時間を実測した。さらに、ここで得た電荷量と落下したＮａ液滴を１滴毎に対応させるため、パラフィン中に落下したＮａ液滴を分別して回収した。従って、表 3.2-5 と表 3.2-6 に示した電荷量評価と化学分析評価の液滴重量と径は、それぞれ対応した結果となっている。

電荷量評価による液滴径の分布を図 3.2-18 および図 3.2-19 に示す。電荷量評価による液滴径の分布は、中央値が 3.90mm でバラツキが 0.10mm で、化学分析による滴下時の評価液滴径より中央値が約 0.10mm 大きい値であった。また、各滴毎の電荷量から換算したＮａ重量に対する化学分析から求めたＮａ重量の関係を図 3.2-20 および図 3.2-21 に示す。１滴毎のＮａ重量の対応結果では、電荷量評価Ｎａ重量が１滴だけ大きな値を示した。これは、表 3.2-5 に示した第 3-1 回目の液滴 No.49 であり、一定電流のもとで滴下に要した時間が他の液滴よりも約 6 秒ほど長くなっていた。この原因は、第２回目の実験で推定したようにノズル内部の残留ガスの影響と考えられる。しかしながら、化学分析で求めたＮａ重量は、他の値とほぼ同等であることから偶発的な現象と見るべきであろう。

上述した１滴を除く残り 99 滴について、Ｎａ液滴の径と重量を統計処理し、電荷量による評価値と化学分析による評価値を比較した。その結果、滴下時の平均径とその標準偏差（１σ）は、電荷量評価が 3.86±0.01mm、化学分析評価が 3.76±0.02mm でその差約 0.10mm 電荷量評価径が上回った。また、平均重量とその標準偏差（１σ）は、電荷量評価が 25.00±0.12mg、化学分析評価が 23.16±0.32mg で、その差 1.84mg 電荷量評価重量が上回っていた。

(d) 電荷量評価と化学分析評価によるＮａ重量の差異について

第 3 回目の実験でＮａ液滴の重量は、電荷量評価値と化学分析評価値の間で約 1.84mg の差異が生じた。この差異の生じた主な理由は、ノズル先端に液滴が生成して落下し、パラフィンで冷却·固化する間の蒸発現象と考えられる。そこでＮａの蒸

発量を測定データの誤差評価も含めて以下に検討する。

電荷量で評価したＮａ重量は、液滴生成期間中の電流変動、リーク電流及び時間の計測誤差、さらには液滴生成中のＮａ蒸発の影響を受ける。これら要因の中で電流変動は、計測器の測定下限値以下での変動であり $1/10^4$ Ａオーダーの誤差、リーク電流はベータアルミナの電気絶縁に用いたα-アルミナの温度上昇に伴う電気抵抗の低下が考えられが、500℃でも抵抗率は 10^9 Ω･cm と大きく無視できる値である。従って、主な誤差要因は、時間の計測誤差とＮａの蒸発と考えられる。時間の計測はビデオで撮影したストップウォッチの読取り誤差とノズル内のガス溜り等によるＮａ供給速度への影響が考えられる。この内、ストップウォッチの読取り誤差は、仮に 10ms の読取誤差が生じても影響が少なく、ノズル内ガス溜りによるＮａ供給速度への影響の方が大きいと推定される。実際、第３回目の実験において、Ｎａ液滴の生成に要した時間変動（２σ）は約１％で、電荷量による重量評価誤差の主要因であった。

一方、化学分析で評価した重量には、パラフィンからのＮａ粒子の回収誤差、パラフィン中へのＮａの溶出及び化学分析誤差が含まれる。この内、回収誤差はパラフィン滴下時にＮａ液滴が分裂すると大きな要因となるが、実験では１滴毎に滴下状況を観察し、分裂しないＮａ粒子を分別回収し化学分析に供している。このため、回収誤差は無視できる。パラフィン中へのＮａ溶出による誤差は、実験前後にパラフィンをサンプリングし化学分析でＮａ濃度を確認した。この結果、Ｎａ粒子を回収するまでの溶出誤差は、不活性ガス雰囲気実験の場合 0.03％であった。一方、化学分析の誤差は、これまでの分析経験から統計誤差として約1％を得ている。従って、化学分析による累積誤差は、1.03％程度と推定される。

上記した誤差要因の検討結果から、最も少なく見積もった時のＮａ蒸発量は、電荷量評価による平均Ｎａ重量から１％引いた補正値(24.75mg)と、化学分析で求めた平均Ｎａ重量に 1.03％を加えた補正値(23.40mg)との差となり約 1.35mg と推定される。

ここで、参考までに文献[4]の蒸発速度を用いてＮａ蒸発量を評価する。強制対流下500℃のＮａプール液面からの蒸発速度は 1.31×10^{-5} (g/cm²･s)、電荷量評価Ｎａ重量の補正値を球換算して得られた表面積 0.464cm² 及び液滴生成に要した平均時間 52.34 秒とから保守側に算出したＮａ蒸発量は、0.32mg であり、今回の実験結果と大きな隔たりがあった。

実験では、ノズル先端に液滴が生成し始めると多量のＮａ蒸気が放出され、ノズル周囲に供給した He ガス（流速約 10.7cm/s）と一緒にガイド管から放出される様子が観察された。従って、定性的ではあるが、Ｎａ液滴の蒸発速度は、文献で得られている強制対流下でのＮａ蒸発速度より、さらに大きな値である可能性もあり、今後詳細

な検討が必要である。

以上より、ノズル先端でＮａ液滴が生長し、落下･回収されるまでの間に液滴重量が減少することが明らかとなった。

(3) 不活性ガス雰囲気実験のまとめ

不活性ガス雰囲気実験の目標仕様と実験実績をまとめて表 3.2-7 に示す。3 回実施した実験の実績値は、Ｎａ液滴温度及びＮａ液滴径とも全て目標仕様を満足した。以下に不活性ガス雰囲気実験で得られた主な知見をまとめて示す。

(a) 滴下するＮａの液滴温度は、ノズル自身とノズル周辺にＮａの酸化防止用に流通させたＨｅガスの温度を目標温度まで加熱することで 500±10℃を達成した。

(b) 外径 0.5mm、内径 0.2mm、長さ 10mm の細径長尺ノズルと、新たに開発したベータアルミナを用いたＮａ供給機構を組み合わせることより、目標液滴径 3.5±1.0mm に対し、回収したＮａ粒子の化学分析結果を基に算出した滴下時の液滴径は、ノズルの個体差を考慮しても 3.8±0.1mm であり目標仕様を満足できた。

(c) 薄肉細径長尺ノズルを用いて生成するＮａの液滴径は、従来水実験等で得られているようなノズル内径では規定されず、ノズル先端がＮａで濡れるため外径で規定される。

(d) ノズル先端での約 52 秒間のＮａ液滴生長過程と、約 31cm の落下過程において、Ｎａ液滴重量は、少なく見積もっても約 1.35mg 減少した。

3.2.2 大気雰囲気実験

実験は、図 3.1-2 に示した回収容器の上部から試験容器の内部上方に向ってＡｒガスを流通させ、低酸素雰囲気で１回、試験容器を大気雰囲気にして３回、合計４回実施した。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 低酸素雰囲気実験

低酸素雰囲気実験は未燃焼のＮａ液滴を自由落下させて速度を測定し、燃焼しながら自由落下するＮａ液滴の速度とを比較するために実施した。滴下条件は、不活性ガス雰囲気実験と比べＮａ液滴の落下距離を約 2.7 ｍと長くした点を除きほぼ同等とした。以下、 低酸素雰囲気での実験結果を示す。

低酸素雰囲気実験におけるＮａの滴下状況と回収状況を写真 3.2-7 及びパラフィンで回収したＮａ粒子を写真 3.2-8 に示す。試験開始前の数滴について実測した落下直後

の液滴温度は、図 3.2-22 に示す通り 493℃であった。滴下試験中のノズル近傍の温度分布は、図 3.2-23 に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。試験容器内の酸素濃度と露点の測定結果を図 3.2-24 に示す。酸素濃度は、当初試験容器上部の下段の計測ポート(図 3.1-2 で熱電対取付け位置A-4)で測定を予定していたが、計算機の入力データ取り込み不良のため、試験容器下部の上段計測ポート(熱電対取付け位置A-6)に取り付けたバックアップ用センサーの結果を示す。液滴回収中の酸素濃度は約 0.2vol%、露点が－45℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図 3.2-25 及び図 3.2-26 に示す通りノズル近傍の雰囲気(A-1)で約 95℃、さらに 300mm 下の位置(A-2)で約 50℃の他、軸方向及び周方向とも 20～30℃の範囲であった。パラフィンの温度は、約 12℃でＮａ液滴の回収前後で変化が見られなかった。

表 3.2-8 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で 3.84±0.01mm、24.76±0.13mg 及び化学分析評価で 3.76mm、23.26mg であった。化学分析評価値は、電荷量評価値に比べ平均液滴径で 0.1mm 小さく、重量で 1.5mg 少なかった。従って、ノズル先端での液滴生長過程と、2.7m の落下過程において、液滴の重量減少が生じることが明らかとなった。

次に、ガイド管直下及びガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮らえたＮａ液滴を写真 3.2-9 及び写真 3.2-10(他の液滴の代表例は第 7 章 2 節を参照のこと)に示す。ガイド管直下での落下速度は、写真 3.2-9 の上の写真でＮａ液滴の下端位置を写真内のスケールで読取り、次に 40ms 後に撮影された下の写真で液滴の下端位置を写真中のスケールで測定し評価した。この結果、40ms の間に 53.5mm 落下しており、落下速度として 1.3m/s を得た。同様に、約 2.4ｍ下の位置における落下速度を写真 3.2-10 から測定した結果、落下速度として 5.6m/s を得た。落下速度の詳細については、大気雰囲気実験結果と一緒に後述する。

(2) 大気雰囲気実験

(a) 第１回目

第１回目の実験は、低酸素雰囲気実験に引き続き試験容器内に大気を流入させ、試験容器内の酸素濃度が約 21vol%になったのを確認して 50 滴の滴下を２回実施した。

第１回目の実験におけるＮａ液滴の生成、滴下及び回収状況を写真 3.2-11 に示す。Ｎａ液滴は、落下途中で火炎を上げ燃焼しながらパラフィン中に落下した。Ｎａの火炎は、パラフィン中に落下するとほぼ瞬時に消失した。2 回の実験で最初を第 1-1 回目、後半を第 1-2 回目とし、パラフィンで回収したＮａ粒子を写真 3.2-12 に示す。

試験開始前の数滴について実測した落下直後の液滴温度は、図 3.2-27 に示す通り493℃であった。以下、第1-1回目の結果を示す。

第1-1回目における滴下実験中のノズル近傍の温度分布は、図3.2-28に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。試験容器内の酸素濃度(熱電対取付け位置でA-6)と露点の測定結果を図3.2-29に示す。液滴回収中の酸素濃度は20.7～20.8vol%、露点が-3～-4℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図 3.2-30 及び図3.2-31に示す通りノズル近傍の雰囲気(A-1)で100～80℃（途中で急激に温度が低下したのは、高速度ビデオカメラ用の照明を切ったことによる）、さらに 300mm 下の位置(A-2)で約 45℃の他、軸方向及び周方向とも 20～30℃の範囲であった。パラフィンの温度は、約12℃でＮａ液滴の回収後半でわずかに上昇した。

表 3.2-9 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の平均液滴径と重量は、電荷量評価で3.84±0.04mm、24.80±0.75mg 及び化学分析評価で 3.62mm、20.65mg であり、電荷量評価値から化学分析評価値を減算した液滴径の減少と重量減少量は、不活性ガス及び低酸素雰囲気実験に比べ大きくなった。

また、ガイド管直下及びガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮らえたＮａ液滴を写真3.2-13及び写真3.2-14(他の液滴の代表例は第7章2節を参照のこと)に示す。得られた落下速度は、ガイド管直下で1.3 m/s、約2.4m下の位置で5.4m/sであった。

次に、第1-2回目の実験結果を以下に示す。ノズル近傍の温度分布は、図3.2-32に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。試験容器内の酸素濃度と露点の測定結果を図3.2-33に示す。酸素濃度は、初期に21vol%を指示していたが、第1-1回目の実験で発生したＮａエアロゾルが試験容器内に残存しており、実験開始直後にガスサンプリング用の配管が閉塞傾向を示し指示が急激に低下した。従ってこの結果は、参考値の扱いとする。露点は、試験開始時に約-5.8℃であったが、徐々に低下し、終了時には-8.5℃程度となっていた。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図3.2-34及び図 3.2-35 に示す通りノズル近傍の雰囲気(A-1)で約 80℃、さらに 300mm 下の位置(A-2)で約 43℃の他、軸方向及び周方向とも 10～20℃の範囲であった。パラフィンの温度は、約10℃であった。

表 3.2-10 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で3.82±0.02mm、24.37±0.45mg及び化学分析評価で3.66mm、21.40mgであり、第1-1回目に比べ電荷量評価値と化学分析評価値の差が小さくなった。

また、ガイド管直下及びガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮らえたＮａ液滴を写

真 3.2-15 及び写真 3.2-16(他の液滴の代表例は第 7 章 2 節を参照のこと)に示す。得られた落下速度は、ガイド管直下で 1.3 m/s および約 2.4m 下の位置で 5.6m/s であった。

(b) 第２回目

第１回目の大気雰囲気実験は、試験容器の２側面のガラス板を上下部とも設置したまま内部を大気雰囲気にしてＮａを滴下させた。このため、試験中にＮａ液滴の燃焼によって発生したエアロゾルが試験容器内に徐々に停滞し、特に試験容器上部では、発生したエアロゾルで酸素計のサンプリング管に設けたフィルタが閉塞した。そこで、第２回目の実験では、試験容器に取り付けたガラス板を全て取り除き 50 滴の滴下実験を２回実施した。

第２回目の実験におけるＮａ液滴の生成、滴下及び回収状況を写真 3.2-17 に示す。直径約 3.9mm、500℃のＮａ液滴は、ノズル直下から 63mm の不活性ガス領域を通過後、大気に晒されガイド管下 240～300mm の位置で着火し、その後燃焼しながらパラフィン中に落下した。第１回目の実験同様にＮａの火炎は、パラフィン中に落下するとほぼ瞬時に消失した。２回の実験で最初を第 2-1 回目、後半を第 2-2 回目とし、パラフィンで回収したＮａ粒子を写真 3.2-18 に示す。

試験開始前の数滴について実測した落下直後の液滴温度は、図 3.2-36 に示す通り約 493℃であった。以下、第 2-1 回目の結果を示す。

第 2-1 回目における滴下実験中のノズル近傍の温度分布は、図 3.2-37 に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。試験容器上下部内の酸素濃度(図 3.1-2 の熱電対取付け位置でA-4 及びA-6) 測定結果を図 3.2-38、露点の測定結果を図 3.2-39 に示す。液滴回収中の酸素濃度は 20.7～20.8vol%、露点が-0.6～-0.8℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図 3.2-40 及び図 3.2-41 に示す通りノズル近傍の雰囲気(A-1)で 30～20℃ (途中で急激に温度が低下したのは、高速度ビデオカメラ用照明を切ったことによる) 、他の軸方向及び周方向とも約 10℃であった。

表 3.2-11 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で 3.98±0.02mm、27.53±0.42mg 及び化学分析評価で 3.71mm、22.35mg であった。

また、ガイド管直下及びガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮らえたＮａ液滴を写真 3.2-19 及び写真 3.2-20(他の液滴の代表例は第 7 章 2 節を参照のこと)に示す。得られた落下速度は、ガイド管直下で 1.3 m/s、約 2.4m 下の位置で 5.6m/s であった。

次に、第 2-2 回目の実験結果を以下に示す。ノズル近傍の温度分布は、図 3.2-42 に示す通り液滴温度測定時とほぼ同等であった。試験容器上下部内の酸素濃度測定結果

を図 3.2-43、露点の測定結果を図 3.2-44 に示す。液滴回収中の酸素濃度は 20.7～20.8vol％、露点が-0.6～-0.8℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図 3.2-45 及び図 3.2-46 に示す通り、高速度ビデオカメラ用照明の変更により軸方向及び周方向とも 10～20℃の範囲であった。

表 3.2-12 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で 3.93±0.03mm、26.44±0.66mg 及び化学分析評価で 3.67mm、21.50mg であった。

また、高速度ビデオカメラによるＮａ液滴の落下速度の測定結果を写真 3.2-21(他の液滴の代表例は第 7 章 2 節を参照のこと)に示す。第 2-2 回目の実験では、約 2.4m 落下位置のみ撮影した。得られた落下速度は 5.6m/s であった。

(c) 第３回目

第３回目の大気雰囲気実験は、試験容器の２側面のガラス板のうち上下部とも１側面のみ外してＮａを滴下させた。実験は、第２回目の実験同様に 50 滴の滴下を２回実施した。

第３回目の実験におけるＮａ液滴の生成、滴下及び回収状況を写真 3.2-22 に示す。Ｎａ液滴は、第２回目の実験同様にガイド管下端面から 240～300mm 落下した時点で火炎を上げ、その後燃焼しながらパラフィン中に落下した。Ｎａの火炎は、パラフィン中に落下するとほぼ瞬時に消失した。パラフィンで回収したＮａ粒子の外観は、第２回目の実験とほぼ同じであった。

試験開始前の数滴について実測した落下直後の液滴温度は、図 3.2-47 に示す通り約 502℃であった。以下、２回実施した内の最初の実験、第 3-1 回目の結果を示す。

第 3-1 回目における滴下実験中のノズル近傍の温度分布は、図 3.2-48 に示す通り滴下直前に雰囲気温度が約 5℃低下したが、これまで実施した実験時の温度と大差ないため継続して実験を進めた。試験容器上下部内の酸素濃度(図 3.1-2 の熱電対取付け位置でA-4 及びA-6) 測定結果を図 3.2-49、露点の測定結果を図 3.2-50 に示す。液滴回収中の酸素濃度は 20.7～20.8vol％、露点が 3.0～3.5℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図 3.2-51 及び図 3.2-52 に示す通り 10～30℃であった。

表 3.2-13 に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で 3.92±0.04mm、26.26±0.92mg 及び化学分析評価で 3.58mm、20.02mg であった。

また、ガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮らえたＮａ液滴を写真 3.2-23(他の液滴の代表例は第 7 章 2 節を参照のこと)に示す。得られた落下速度は、5.6m/s であった。

次に、第3-2回目の実験結果を以下に示す。ノズル近傍の温度分布は、図3.2-53に示す。試験容器上下部内の酸素濃度測定結果を図3.2-54、露点の測定結果を図3.2-55に示す。液滴回収中の酸素濃度は20.7～20.8vol%、露点が約3.5℃であった。また、滴下試験中の試験容器内の温度は、図3.2-56及び図3.2-57に示す通り、10～30℃の範囲であった。

表3.2-14に各滴毎の電荷量評価径と全Ｎａ液滴の化学分析評価による平均液滴径の換算結果を示す。滴下時の液滴径と重量は、電荷量評価で3.85±0.02mm、24.87±0.46mg及び化学分析評価で3.59mm、20.22mgであった。

また、高速度ビデオカメラによるＮａ液滴の落下速度の測定結果を写真3.2-24(他の液滴の代表例は第7章2節を参照のこと)に示す。得られた落下速度は5.5m/sであった。

上記した低酸素雰囲気及び大気雰囲気実験の結果をまとめて表3.2-15に示す。

(3) 燃焼量の算出

大気雰囲気実験において、火炎を発して落下したＮａ液滴の燃焼量を以下に算出する。ここで、Ｎａ液滴の燃焼量は、着火点からパラフィンに到達する間に消費したＮａ量と定義する。この場合、ノズル先端での液滴成長中及び落下後の着火に至るまでのＮａ蒸発量を算出する必要がある。Ｎａ蒸発量は、ノズル先端に成長したＮａ液滴の重量と、着火点におけるＮａ重量との差から算出できる。具体的には、以下の方法で算出する。

ノズル先端に成長するＮａ液滴の重量は、前述の(2)式により電荷量から理論的に算出できる。一方、着火点におけるＮａ液滴の重量は、図3.2-58に示す通り、不活性雰囲気実験体系におけるＮａ液滴の回収位置が、大気雰囲気実験体系におけるＮａ液滴の着火点位置とほぼ一致することから不活性ガス雰囲気実験の化学分析値から算出できる。

不活性ガス雰囲気実験の第3-1回目及び第3-2回目の結果よりＮａ蒸発量を推定し表3.2-16に示す。なお、表中の誤差については、ガウスの誤差伝播式に従った。この結果、液滴成長中及び着火位置まで落下する間のＮａ蒸発量は、1.88±0.56mgと推定される。従って、火炎を発して落下したＮａ液滴の燃焼量は、大気雰囲気実験の電荷量で求めたＮａ重量と化学分析で求めたＮａ重量との差から、さらに不活性ガス雰囲気実験で求めた推定Ｎａ蒸発量1.88±0.56mgを差引いて求めることにした。

表3.2-17及び図3.2-59に燃焼量の算出結果を示す。得られた液滴の燃焼量は、大気雰囲気実験第2-1回目で3.30±0.78mg、第2-2回目で3.06±0.93mg、第3-1回目で4.36±1.14mg及び第3-2回目で2.77±0.80mgであった。なお、誤差については、

Ｎａ蒸発量の推定と同様にガウスの誤差伝播式に従った。各測定値の精度は、68%信頼度で31%以内であった。

さらに、4 回の大気雰囲気実験で得られた燃焼量の平均値は、3.37±0.69mg であり、これら4回の繰り返し実験を実施することにより68%信頼度で21%以内の精度で燃焼量を算出できた。

(4) 落下速度の算出

実測したＮａ液滴の落下速度は、ガイド管直下で1.3～1.4m/s、約2.4ｍ下の位置では5.5～5.6m/s であった。また、未燃焼Ｎａ液滴と燃焼Ｎａ液滴との間で落下速度の差異は認められなかった。

次に、Ｎａ液滴を剛体球と仮定し、空気の抵抗を考慮した落下速度を求め実験結果と比較する。球形粒子の自由落下に関わる運動式は、

$$m(dv/dt) = mg - 1/2\ \rho_f v^2 \pi r^2 C_D - m_f g \quad \text{--------} \quad (3)$$

ここで、m：液滴の質量(kg)

g：重力加速度(9.8m/s^2)

v：液滴の速度(m/s)

r：液滴の半径(m)

m_f：液滴体積の占める空気質量(kg)

ρ_f：空気の密度(1.1763kg/m^3 at 27℃)

μ_f：空気の粘性 (18.62×10^{-6} Pa·s)

C_D：抗力係数

で表される。(3)式から液滴の落下速度Ｖを求めると、

$$v = (\beta/\alpha)^{0.5} \times [\,1 - \exp\{-2\,(\alpha\beta)^{0.5} t\}]/[\,1 + \exp\{-2\,(\alpha\beta)^{0.5} t\}] \quad \text{--------} \quad (4)$$

ここで、$\alpha = 3\rho_f C_D / (4\rho_p D)$

$\beta = (1-\rho_f/\rho_p) \times g$

ρ_p：液滴の密度(832kg/m^3 at 500℃)

D：液滴の直径(0.0038m)

を得る。(4)式を時間で積分し落下距離ｘ(m)と時間ｔ(ｓ)の関係式に直すと、

$$x=(\beta/\alpha)^{0.5}\ \ln\{\cosh(\alpha\beta)^{0.5}t\} \qquad \text{--------} (5)$$

となる。ここで層流領域（Re ＜ 2×10^5）における抗力係数は、

$$C_D=24/Re+6/(1+Re^{0.5})+0.4 \qquad \text{--------} (6)$$

の実験式が推奨されている[5)]。この抗力係数を算出するためには、レイノルズ数を決定する必要がある。レイノルズ数は、実験で得られた液滴の落下速度 V_e と平均液滴径を用い、$Re=\rho_f V_e D/\mu_f$ の式で算出した。以下に落下速度の計算結果を示す。

液滴が落下速度測定位置Ｘに達する時間ｔを求めるため、(5)式の時間ｔを変数として、挟み込み法を用いて繰り返し計算し、時間ｔを決定した。距離ｘは、実験時の高速度カメラの撮影位置とし、試験容器上部撮影位置(ガイド管直下と記述した位置)を 0.09m、下部撮影位置(約 2.4m 下と記述した位置)を 2.42m とした。

繰り返し計算で決定した時間ｔを(4)式に代入して得られた自由落下速度は、上部撮影位置で約 1.1m/s 及び下部撮影位置で約 5.3m/s、実験結果がそれぞれ 1.3～1.4m/s 及び 5.5～5.6m/s であり、計算値／実験値は、それぞれ 0.79 と 0.95 であった。

落下速度の評価では、レイノルズ数が 10^3 オーダーになると液滴周りで生じる後退渦による抵抗を考慮する必要があると言われている。実際、写真 3.2-17 の写真ｄに示した落下中の液滴から生じた白煙は、渦状の模様を呈している。今回適用した式では、抗力係数の項で考慮しているものの、より精度の高い液滴の落下速度を算出するには、今後、さらに実験を重ね液滴周りの後退渦の効果や、Ｎａの蒸発による液滴径の変化等を詳細に解析・検討が必要と考える。

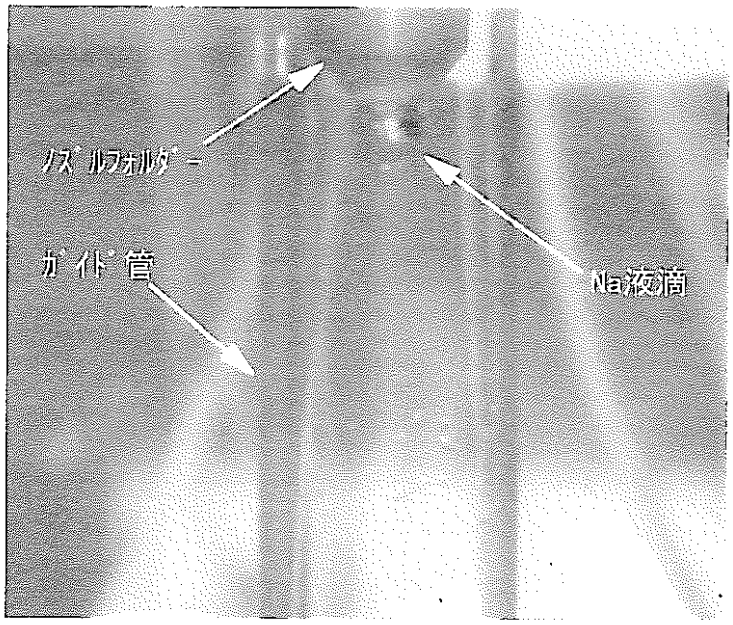
(5)　大気雰囲気実験のまとめ

Ｎａ液滴を 2.7m の高さから 50 滴滴下する低酸素雰囲気実験を１回と大気雰囲気実験を６回実施し、全て目標仕様を満足した。これらの実験から得られた知見をまとめて以下に示す。

(a) 直径約 3.8mm のＮａ液滴を 2.7m 落下させた時の平均燃焼量は、約 3.37±0.69mg であった。

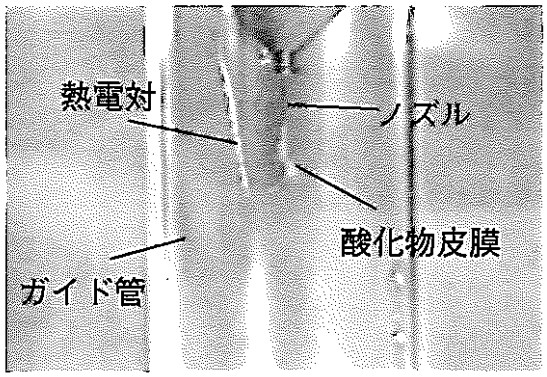
(b) Ｎａ液滴の落下速度は、ガイド管直下 31mm で約 1.3m/s であり、2.4m 下においては燃焼の有無にかかわらず、約 5.6m/s であった。

(c) 直径 3.8mm の 500℃Ｎａ液滴は、ノズル直下から 63mm の不活性ガス領域を通過後、大気に晒されガイド管下端面から 240～300mm 落下した時点で着火した。

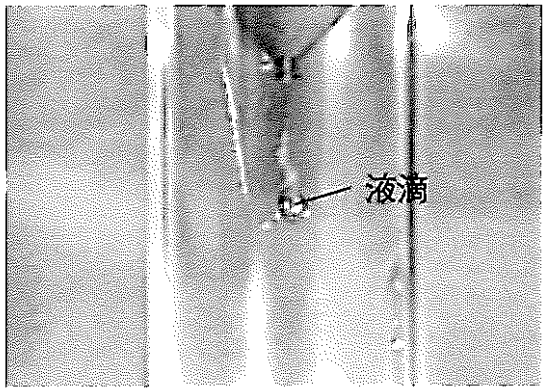


ノズル外径0.5mm, 長さ2mm

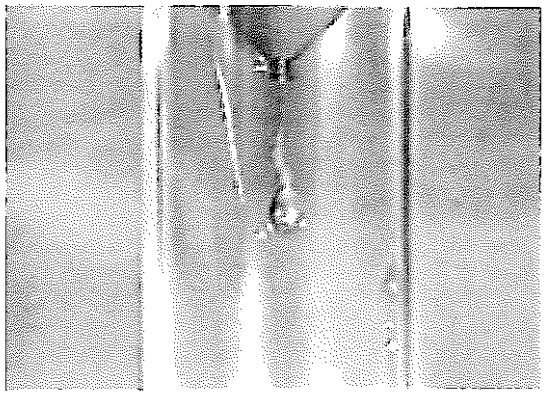
写真 3.2-1 ノズル長さ2mm時のNa液滴生成状況



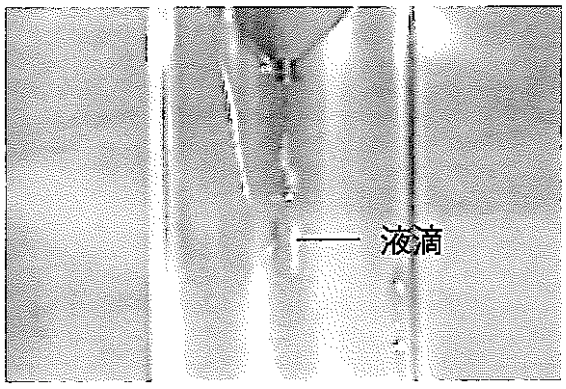
(a) ノズル先端部に生成した酸化物皮膜



(b) 生成中の液滴



(c) 落下直前の液滴



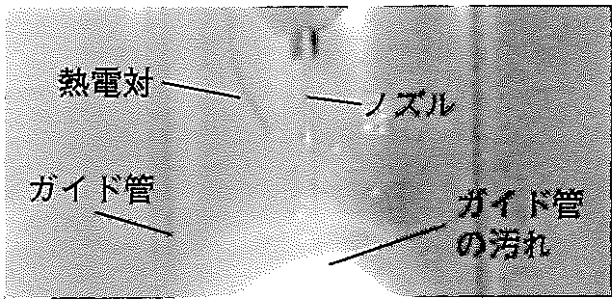
(d) 滴下直後の液滴

写真3.2-2　　予備実験1における液滴の生成と落下状況

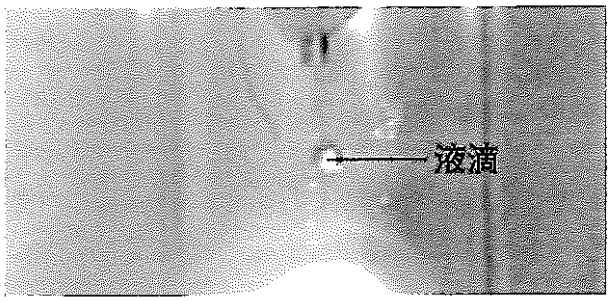
表3.2-1　不活性ガス雰囲気実験結果（予備試験１）

＊：γ＝　0.856　g/cm^3

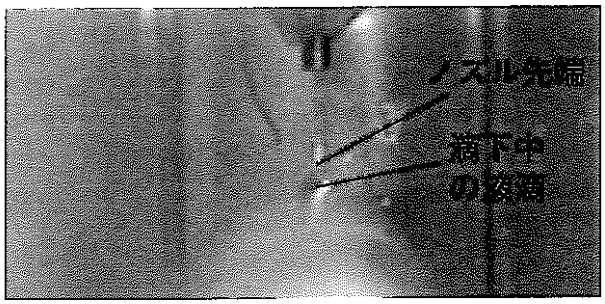
液滴 No.	分析液滴重量 (g)	液滴径(400℃滴下時) ＊ (mm)	備考
1	0.09020	5.86	
2	0.09025	5.86	液滴重量
3	0.08685	5.79	平均：0.08339g
4	0.08802	5.81	標準偏差：0.00540
5	0.07980	5.63	
6	0.07377	5.48	液滴径
7	0.08594	5.77	平均：5.71mm
8	0.08269	5.69	標準偏差：0.127
9	0.08447	5.73	誤差2σ：4.44%
10	0.08396	5.72	
11	0.08791	5.81	
12	0.08700	5.79	
13	0.08852	5.82	
14	0.08893	5.83	
15	0.08710	5.79	
16	0.08533	5.75	
17	0.08796	5.81	
18	0.07919	5.61	
19	0.08147	5.66	
20	0.08563	5.76	
21	0.07073	5.40	
22	0.07874	5.60	
23	0.08472	5.74	
24	0.08153	5.67	
25	0.08411	5.73	
26	0.08406	5.72	
27	0.06900	5.36	
28	0.07615	5.54	
29	0.08335	5.71	
30	0.08442	5.73	



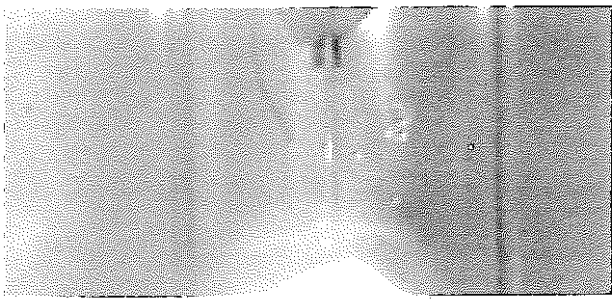
a) 液滴生成前



b) 液滴生成中



c) 液滴滴下直中



d) 液滴滴下後

写真3.2-3　　予備実験2における液滴の生成と落下状況

表3.2-2　不活性ガス雰囲気実験結果（予備実験2）

＊：γ＝　0.847　g/cm^3

液滴 No.	分析液滴重量 (g)	液滴径(430℃滴下時) ＊ (mm)	判定
1	0.02496	3.83	液滴重量 平均：0.02480g 標準偏差：0.00058 液滴径 平均：3.82mm 標準偏差：0.030 誤差2σ：1.57%
2	0.02517	3.84	
3	0.02496	3.83	
4	0.02505	3.84	
5	0.02509	3.84	
6	0.02527	3.85	
7	0.02529	3.85	
8	0.02555	3.86	
9	0.02517	3.84	
10	0.02535	3.85	
11	0.02316	3.74	
12	0.02462	3.81	
13	0.02482	3.83	
14	0.02432	3.80	
15	0.02496	3.83	
16	0.02517	3.84	
17	0.02515	3.84	
18	0.02505	3.84	
19	0.02484	3.83	
20	0.02484	3.83	
21	0.02511	3.84	
22	0.02454	3.81	
23	0.02322	3.74	
24	0.02464	3.82	
25	0.02458	3.81	
26	0.02458	3.81	
27	0.02543	3.86	
28	0.02458	3.81	
29	0.02501	3.83	
30	0.02342	3.75	
31	0.02460	3.81	
32	0.02492	3.83	
33	0.02377	3.77	
34	0.02501	3.83	
35	0.02464	3.82	
36	0.02496	3.83	
37	0.02511	3.84	
38	0.02507	3.84	
39	0.02531	3.85	
40	0.02498	3.83	
41	0.02466	3.82	
42	0.02452	3.81	
43	0.02464	3.82	
44	0.02509	3.84	
45	0.02645	3.91	
46	0.02468	3.82	
47	0.02355	3.76	
48	0.02470	3.82	
49	0.02482	3.83	
50	0.02470	3.82	

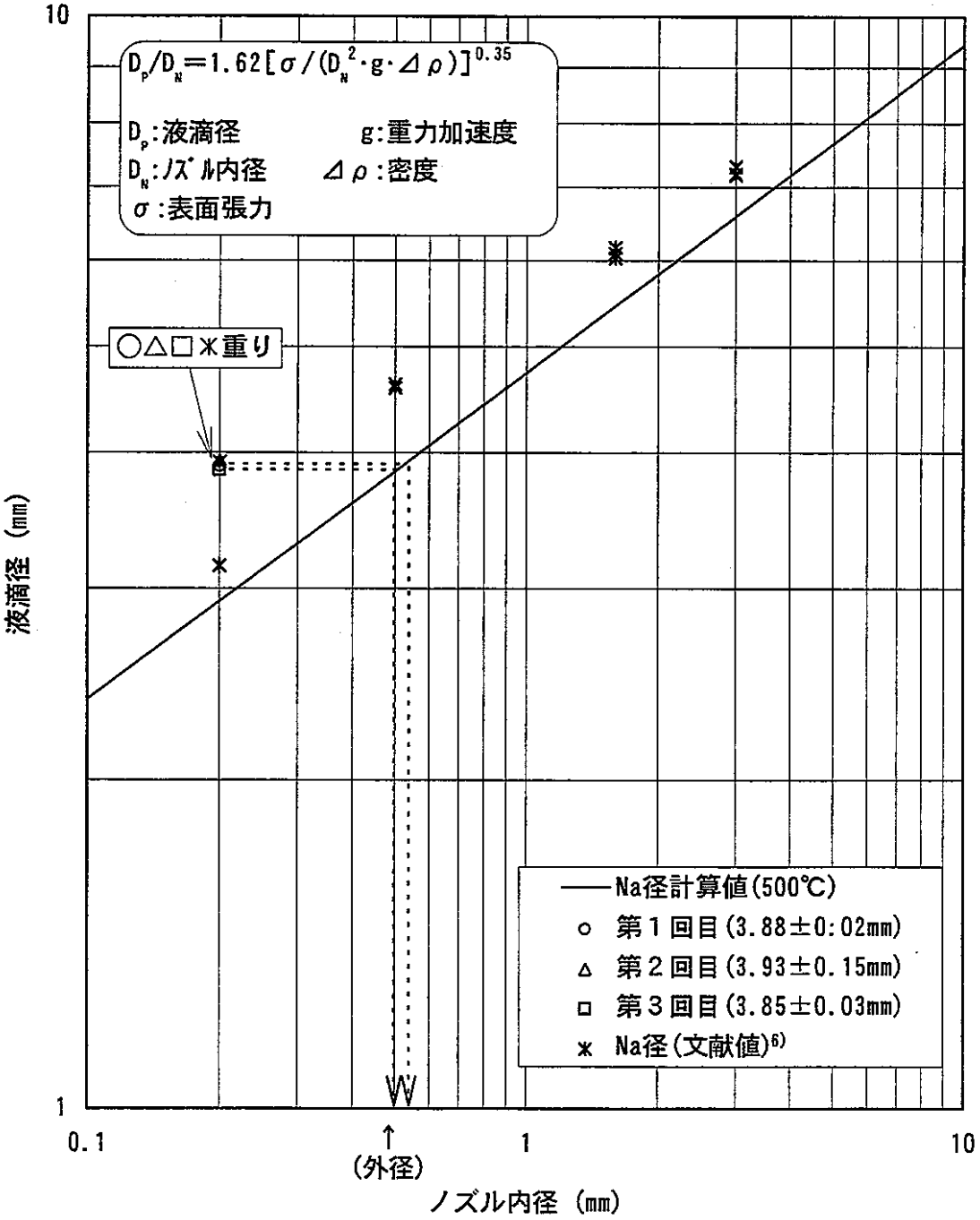
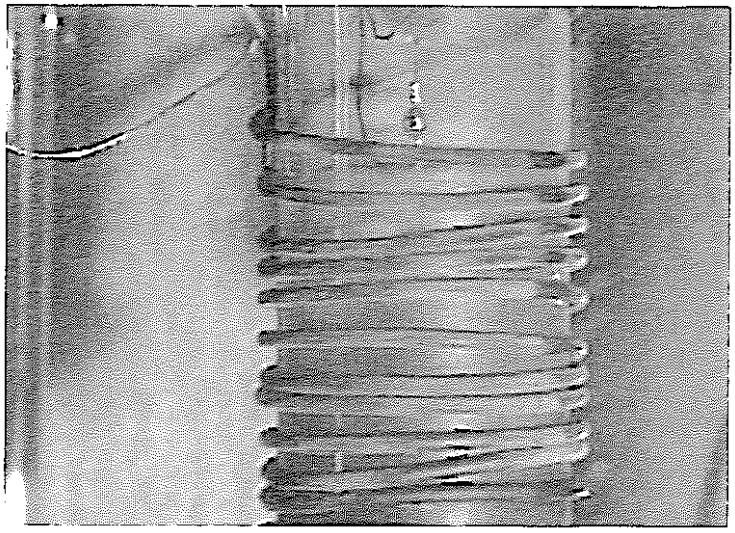
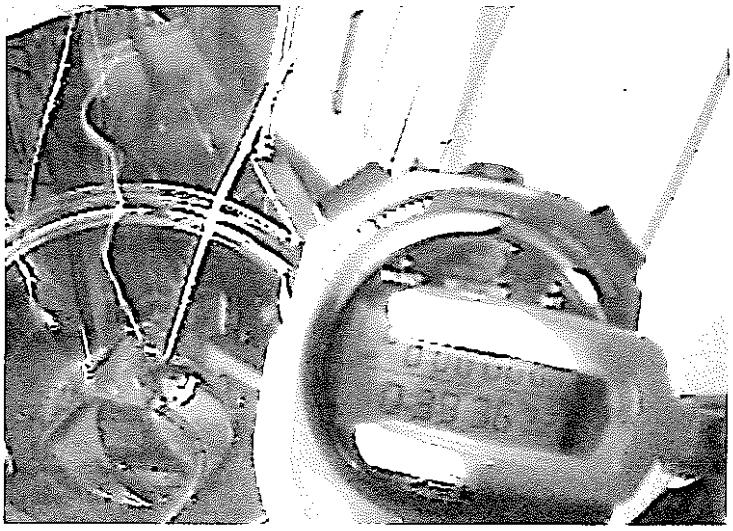


図 3.2-1 ノズル内径と生成液滴径の関係



a．Na液滴生成状況



b．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによるNa液滴の回収状況

写真 3.2-4 不活性雰囲気実験(第1回目)

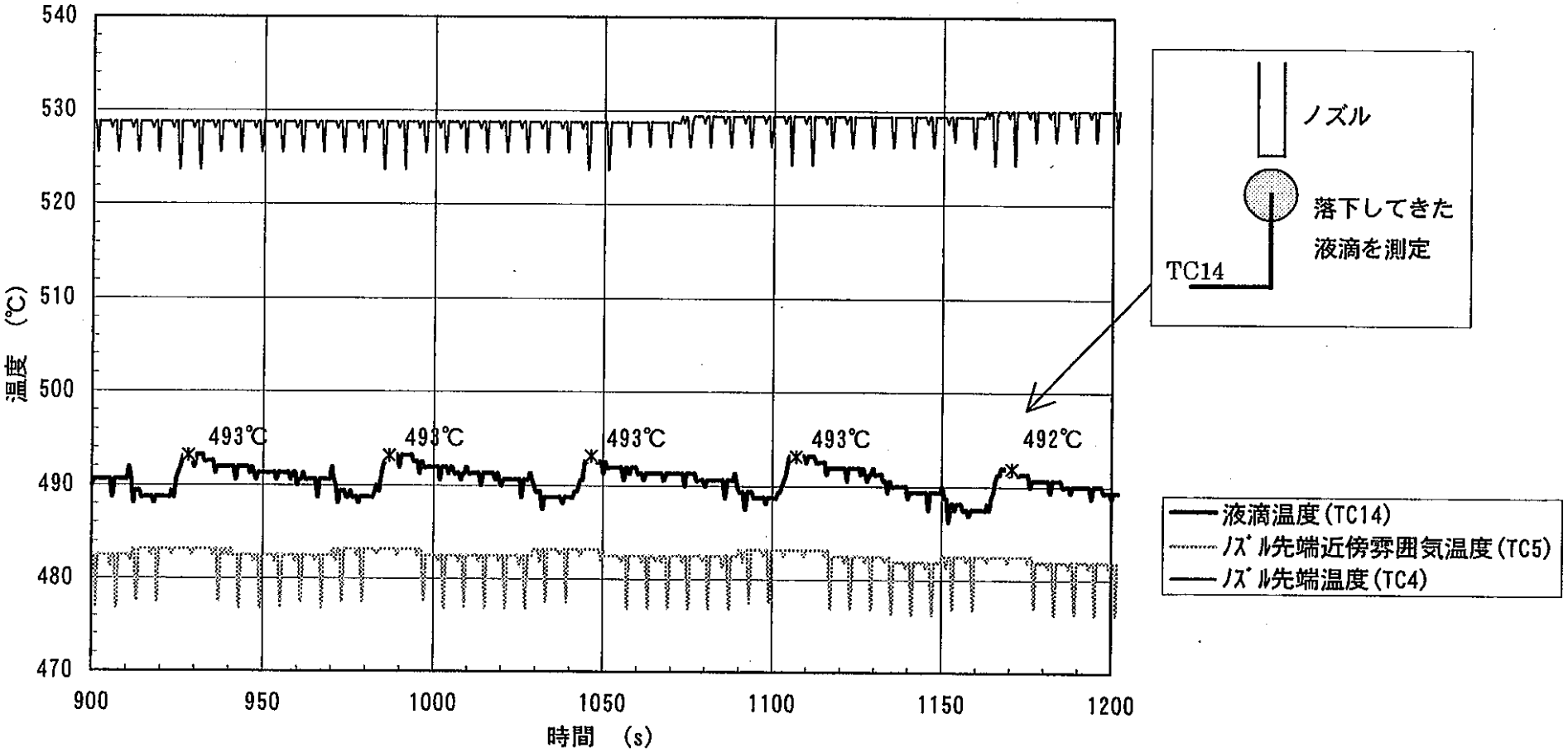


図 3.2-2 滴下Na温度(不活性ガス雰囲気実験，第1回目)

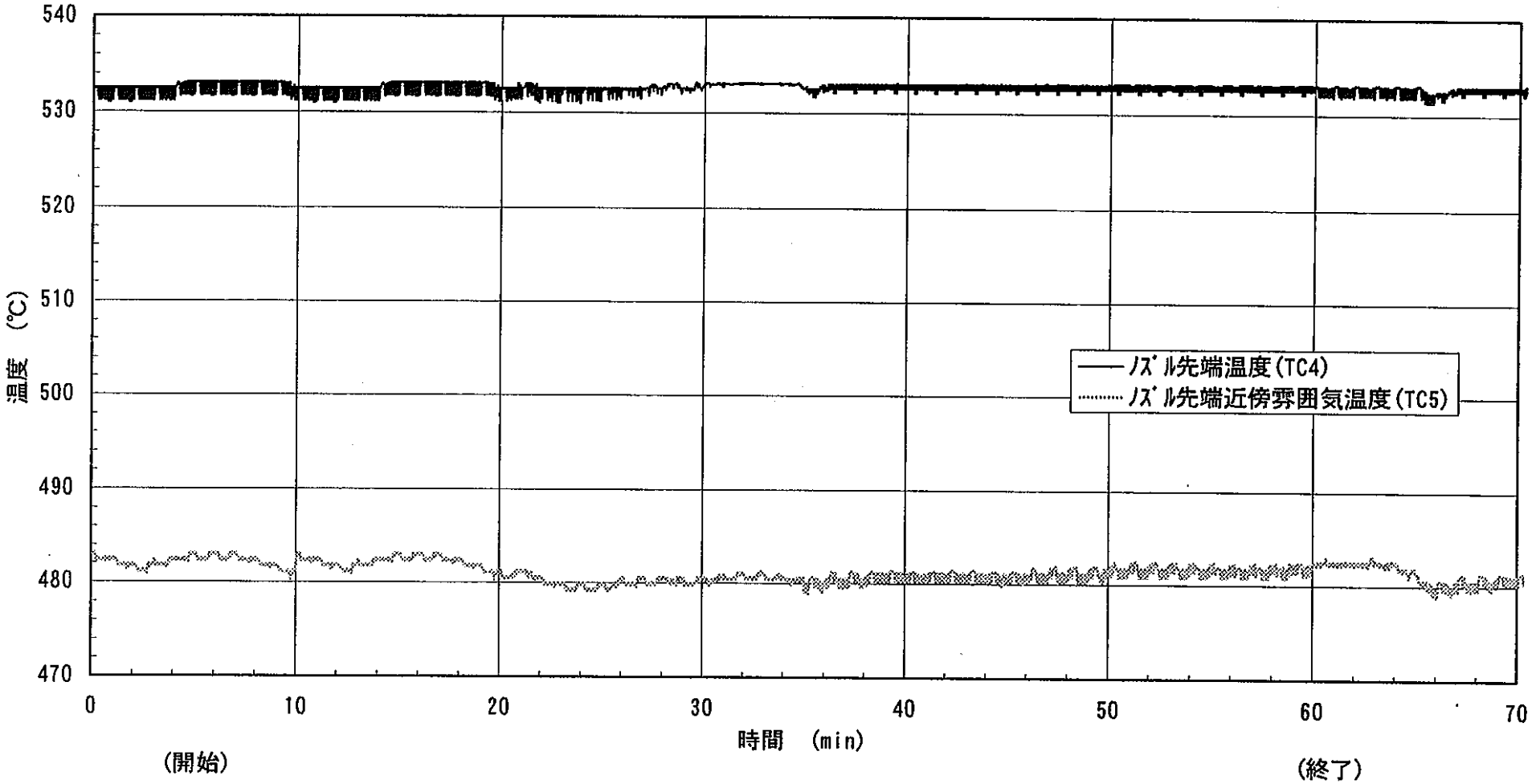


図 3.2-3 滴下試験中の温度分布(不活性ガス雰囲気実験，第1回目)

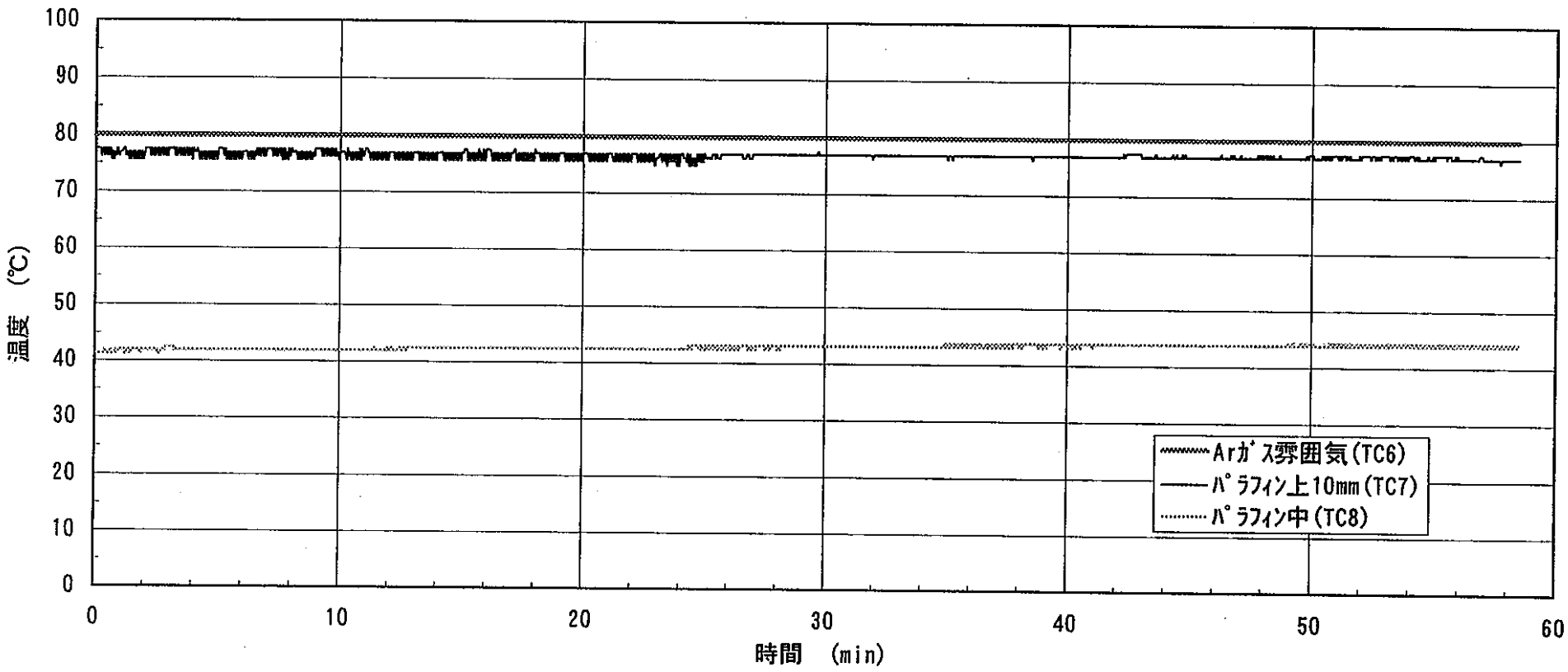


図 3.2-4 滴下試験中の軸方向温度分布(不活性ガス雰囲気実験 第1回目)

表3.2-3　不活性ガス雰囲気実験結果（第1回目）

＊：γ＝　0.834　g/cm^3

液滴 No.	分析液滴重量 (g)	液滴径(493℃滴下時) ＊ (mm)	備考
1	0.02580	3.89	
2	0.02501	3.85	液滴重量
3	0.02539	3.87	平均：0.02556g
4	0.02565	3.89	標準偏差：0.00035
5	0.02509	3.86	
6	0.02620	3.91	液滴径
7	0.02667	3.94	平均：3.88mm
8	0.02576	3.89	標準偏差：0.018
9	0.02547	3.88	誤差2σ：0.90%
10	0.02549	3.88	
11	0.02557	3.88	
12	0.02590	3.90	
13	0.02586	3.90	
14	0.02594	3.90	
15	0.02582	3.90	
16	0.02610	3.91	
17	0.02557	3.88	
18	0.02521	3.86	
19	0.02600	3.90	
20	0.02578	3.89	
21	0.02624	3.92	
22	0.02582	3.90	
23	0.02545	3.88	
24	0.02486	3.85	
25	0.02574	3.89	
26	0.02513	3.86	
27	0.02580	3.89	
28	0.02545	3.88	
29	0.02569	3.89	
30	0.02533	3.87	
31	0.02527	3.87	
32	0.02563	3.89	
33	0.02567	3.89	
34	0.02551	3.88	
35	0.02569	3.89	
36	0.02547	3.88	
37	0.02553	3.88	
38	0.02543	3.88	
39	0.02525	3.87	
40	0.02549	3.88	
41	0.02541	3.88	
42	0.02539	3.87	
43	0.02547	3.88	
44	0.02535	3.87	
45	0.02549	3.88	
46	0.02529	3.87	
47	0.02555	3.88	
48	0.02521	3.86	
49	0.02537	3.87	
50	0.02484	3.85	

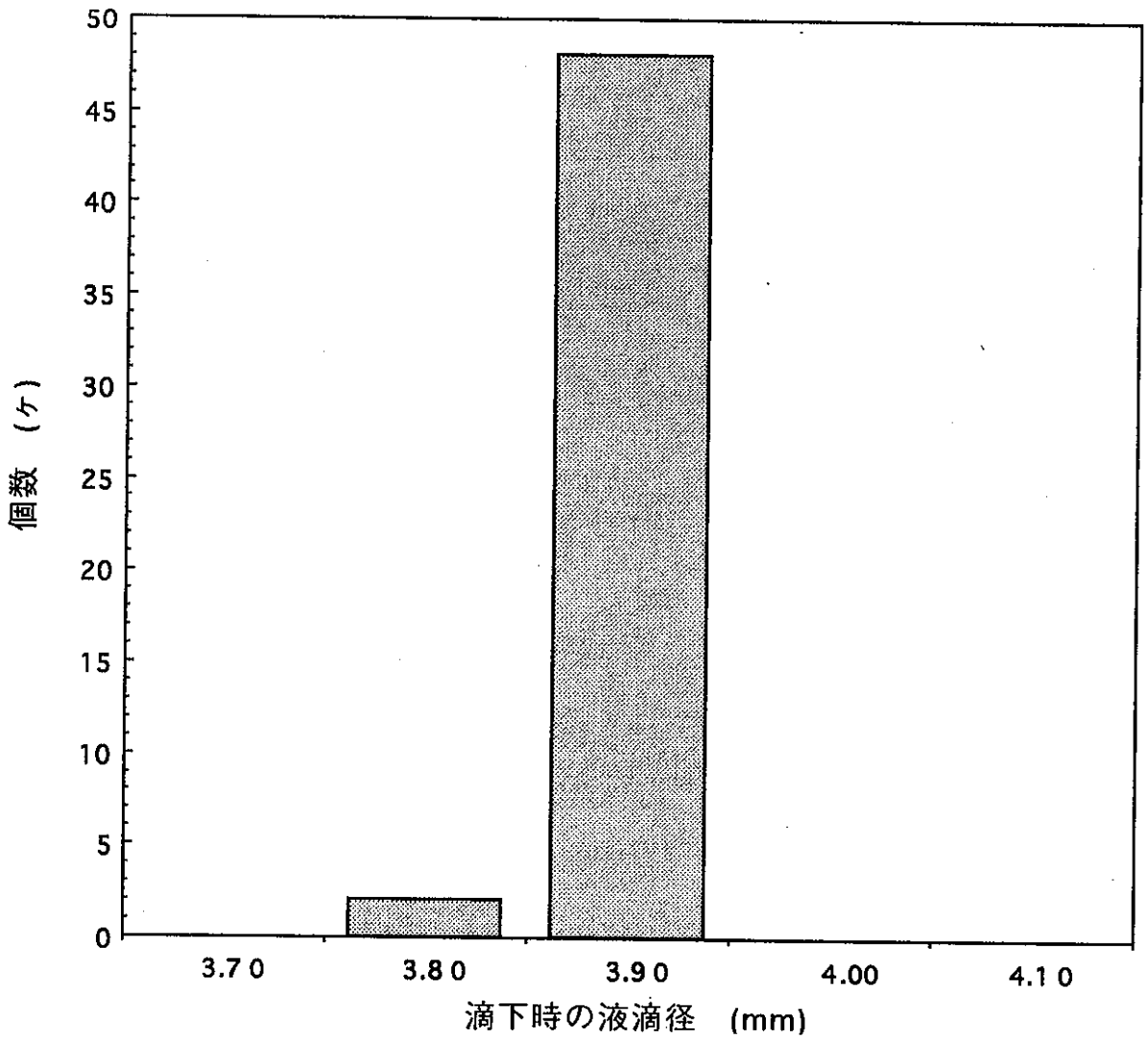
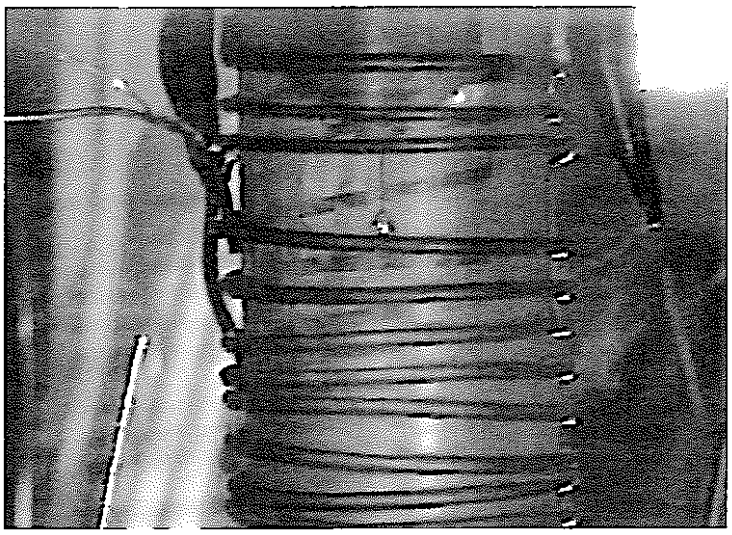
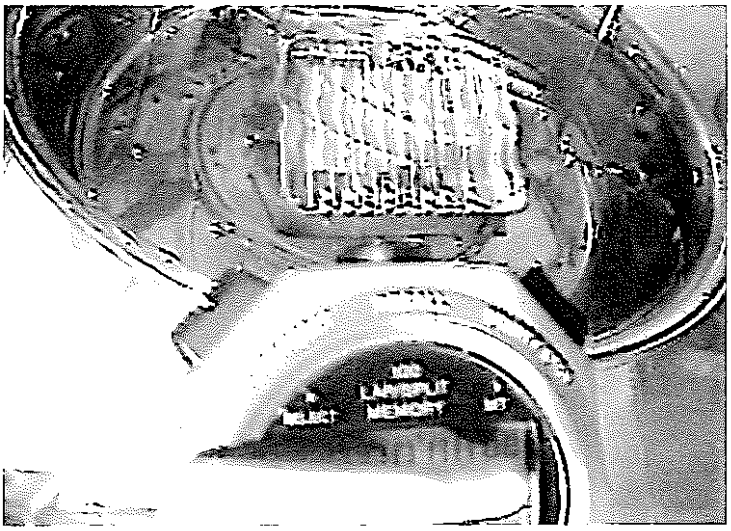


図3.2-5　液滴径の分布
(不活性ガス雰囲気実験，第1回目)



a．Na液滴生成状況



b．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによるNa液滴の回収状況

写真 3.2-5　不活性雰囲気実験(第２回目)

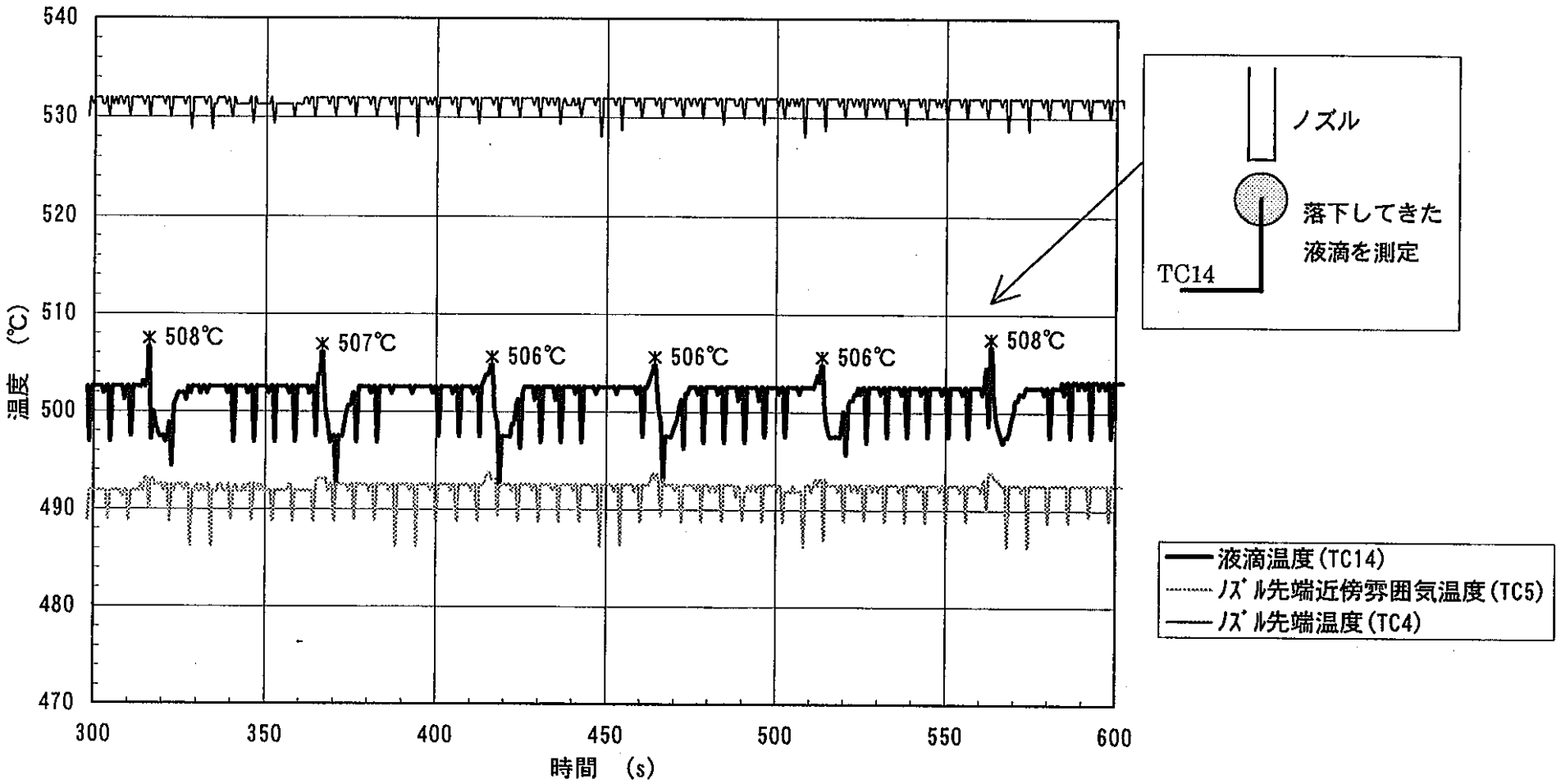


図3.2-6　滴下Na温度(不活性ガス雰囲気実験，第２回目)

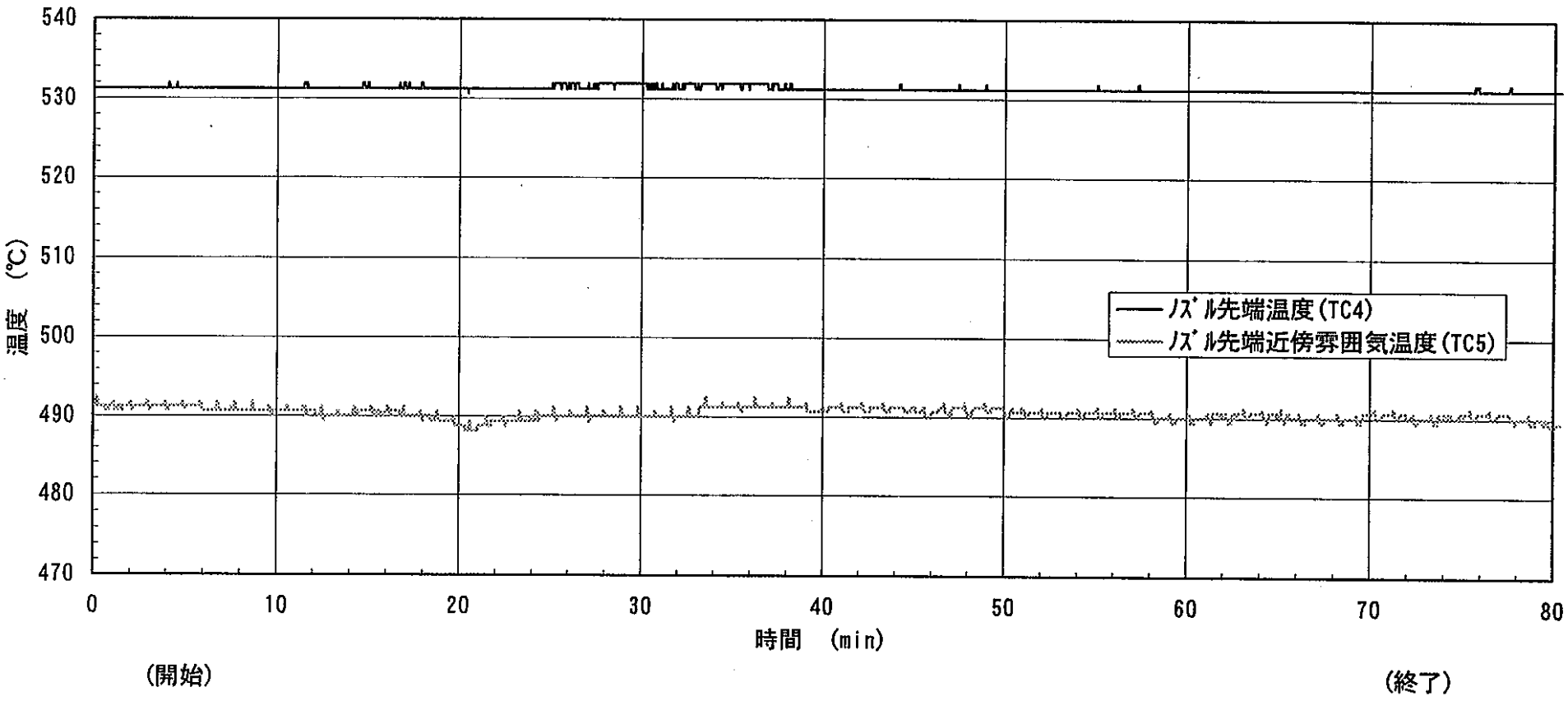


図 3.2-7 滴下試験中のノズル近傍温度分布(不活性ガス雰囲気実験，第２回目)

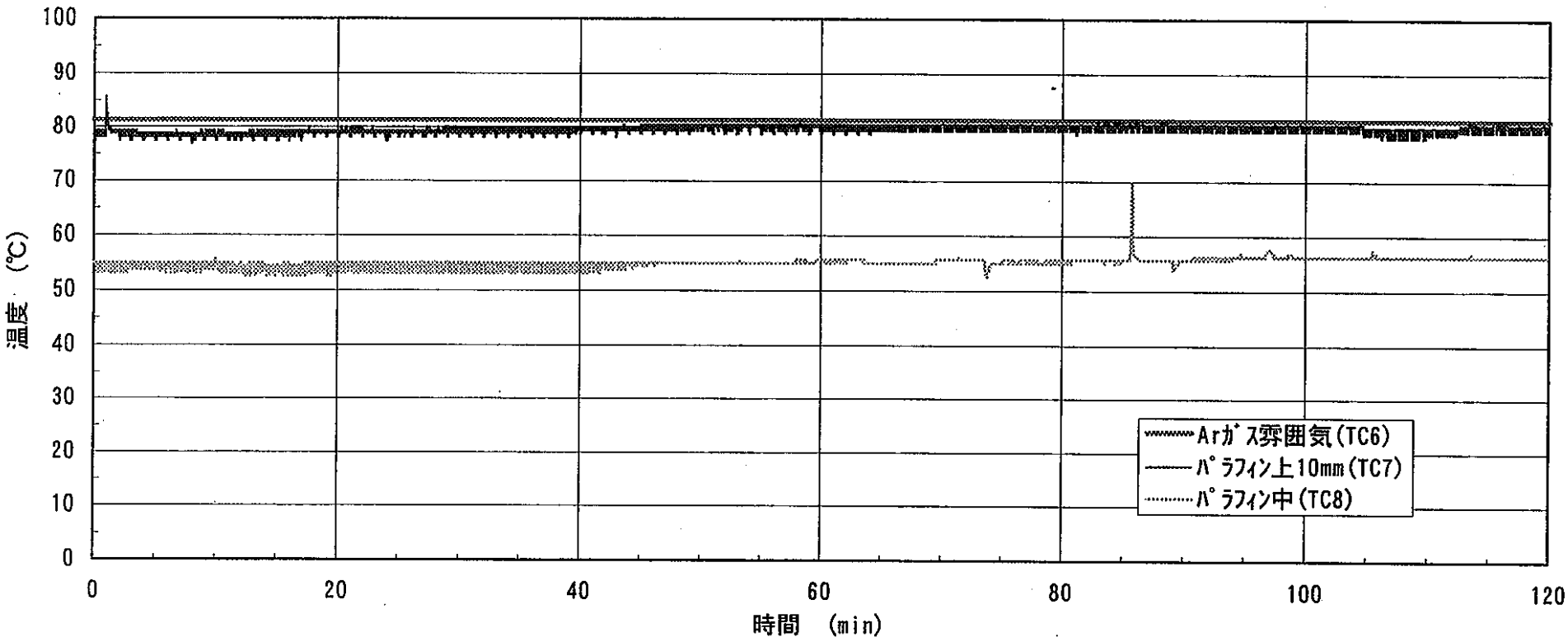


図 3.2-8 滴下試験中の軸方向温度分布(不活性ガス雰囲気実験，第２回目)

表3.2-4　不活性ガス雰囲気実験結果**（第2回目）

＊：γ＝　0.831　g/cm^3

液滴 No.	分析液滴重量 (g)	液滴径(507℃滴下時) ＊ (mm)	備考
1	0.02298	3.75	
2	0.02399	3.81	液滴重量
3	0.02363	3.79	平均：0.02654g
4	0.02401	3.81	標準偏差：0.00312
5	0.02273	3.74	
6	0.02348	3.78	液滴径
7	0.02332	3.77	平均：3.93mm
8	0.02342	3.78	標準偏差：0.154
9	0.02316	3.76	誤差2σ：7.85%
10	0.02296	3.75	
11	0.02215	3.71	**：液滴生成時、
12	0.02269	3.74	ノズル内にHeガス
13	0.02180	3.69	残留の可能性有。
14	0.02342	3.78	
15	0.02399	3.81	
16	0.02501	3.86	
17	0.02602	3.91	
18	0.02559	3.89	
19	0.02533	3.88	
20	0.02505	3.86	
21	0.03089	4.14	
22	0.02756	3.99	
23	0.02762	3.99	
24	0.02732	3.97	
25	0.02730	3.97	
26	0.02740	3.98	
27	0.02801	4.01	
28	0.02813	4.01	
29	0.02896	4.05	
30	0.03070	4.13	
31	0.03064	4.13	
32	0.03070	4.13	
33	0.03072	4.13	
34	0.03070	4.13	
35	0.03089	4.14	
36	0.03083	4.14	
37	0.03083	4.14	
38	0.03072	4.13	
39	0.03064	4.13	
40	0.03018	4.11	
41	0.02456	3.84	
42	0.03040	4.12	
43	0.02878	4.04	
44	0.02284	3.74	
45	0.02403	3.81	
46	0.02381	3.80	
47	0.02614	3.92	
48	0.02334	3.77	
49	0.02886	4.05	
50	0.02896	4.05	

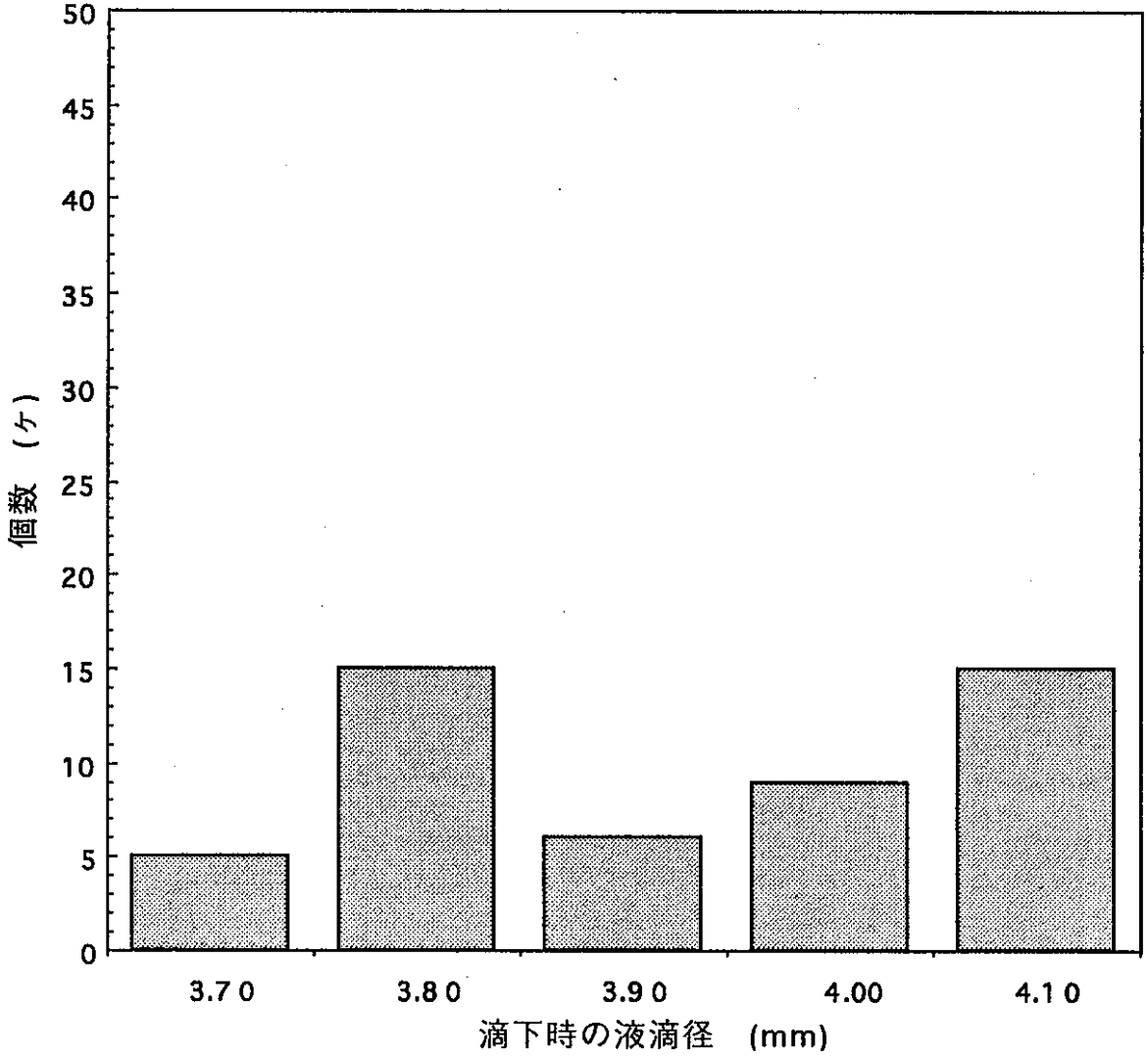
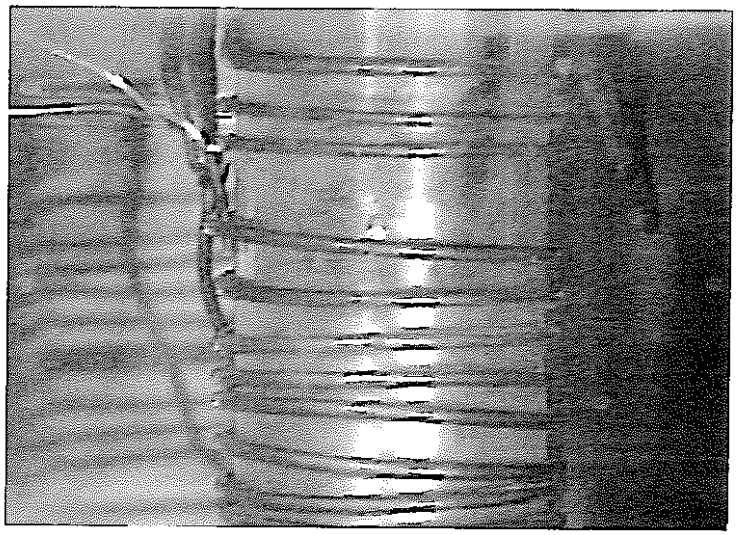
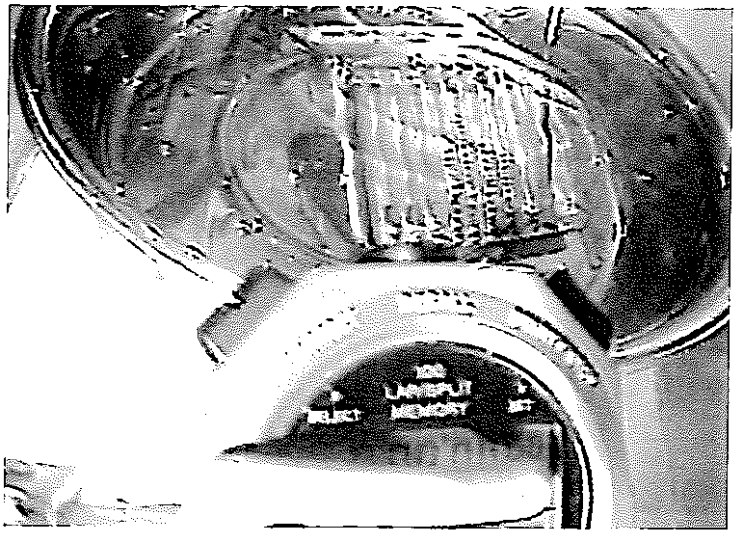


図3.2-9　液滴径の分布
(不活性ガス雰囲気実験，第2回目)



a．Na液滴生成状況



b．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによるNa液滴の回収状況

写真 3.2-6 不活性雰囲気実験(第３回目)

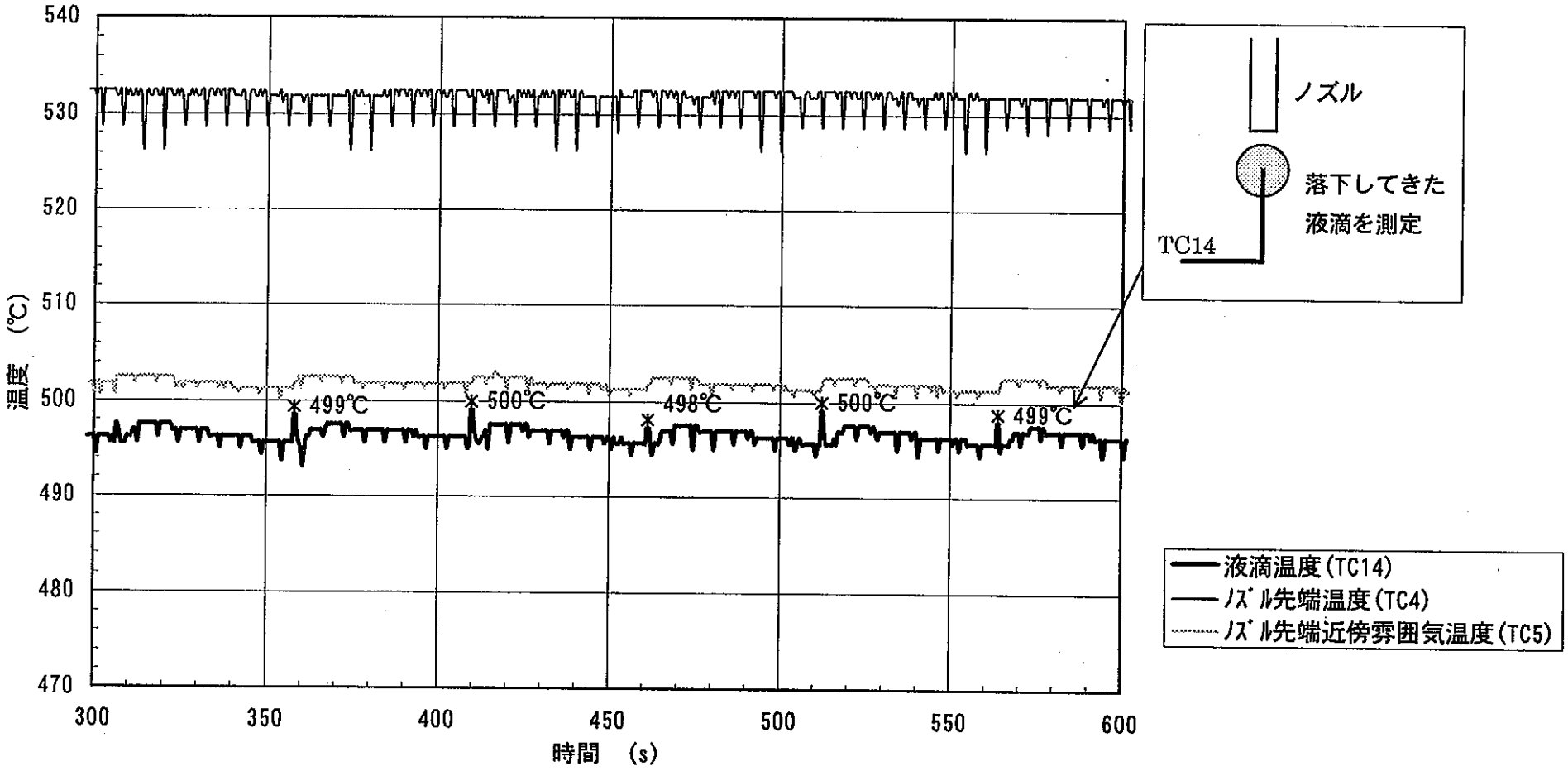


図 3.2-10　滴下Na温度(不活性ガス雰囲気実験，第３－１回目)

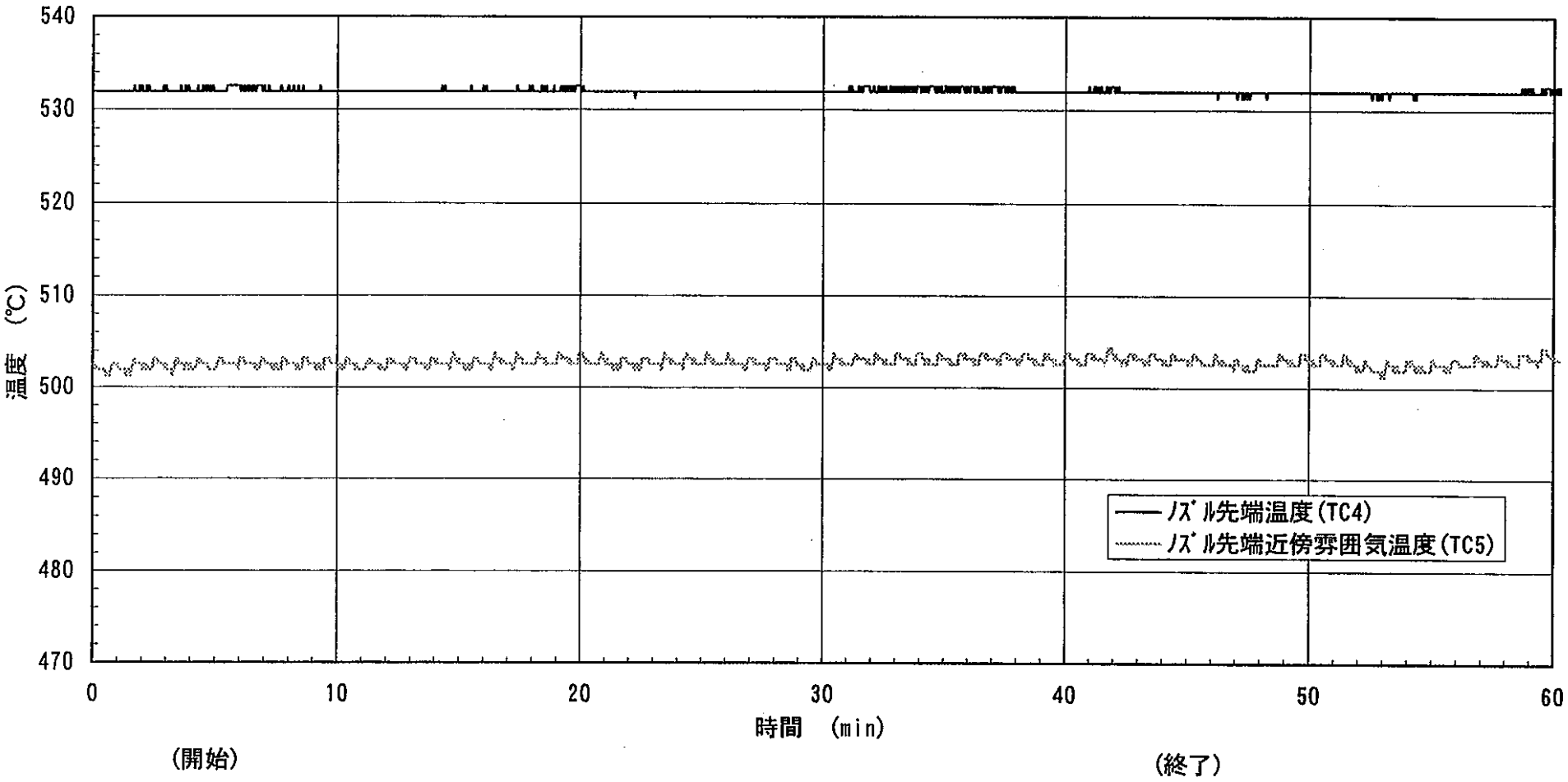


図 3.2-11 滴下試験中のノズル近傍温度分布(不活性ガス雰囲気実験，第3－1回目)

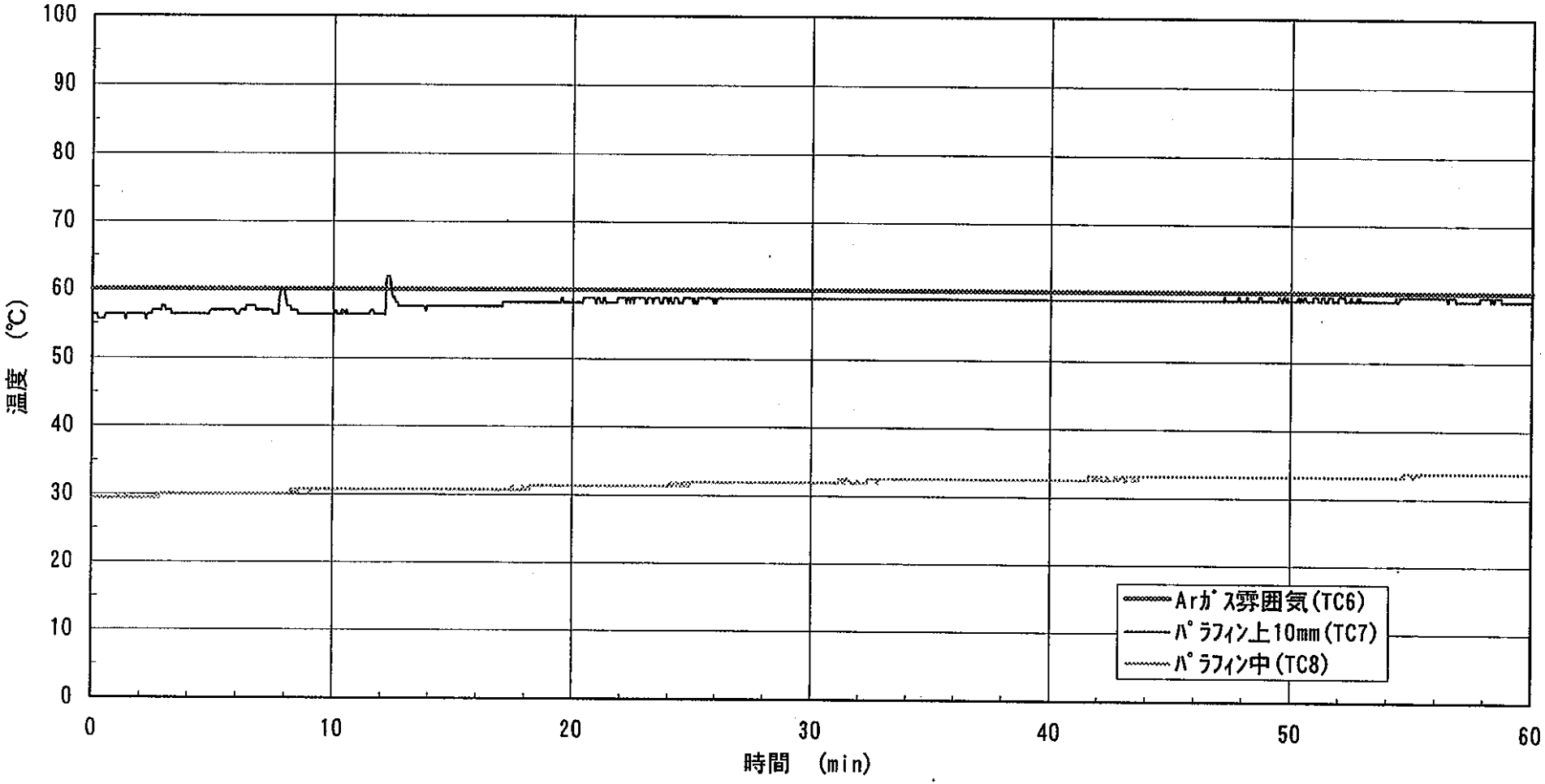


図 3.2-12　滴下試験中の軸方向温度分布(不活性ガス雰囲気実験　第３－１回目)

表 3.2-5 不活性ガス雰囲気結果(第3-1回目)

No.	電荷量評価				分析評価		備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)	Na量(g)	換算径(mm)	
No.1	2.004	52.22	0.02493	3.85	0.02352	3.78	
No.2	2.004	51.42	0.02455	3.83	0.02338	3.77	
No.3	2.004	53.18	0.02539	3.88	0.02334	3.77	
No.4	2.004	52.28	0.02496	3.86	0.02344	3.78	
No.5	2.004	52.31	0.02498	3.86	0.02314	3.76	
No.6	2.004	52.25	0.02495	3.85	0.02326	3.77	
No.7	2.004	52.44	0.02504	3.86	0.02352	3.78	
No.8	2.004	52.28	0.02496	3.86	0.02328	3.77	
No.9	2.004	52.22	0.02493	3.85	0.02361	3.78	
No.10	2.004	52.31	0.02498	3.86	0.02352	3.78	
No.11	2.004	52.46	0.02505	3.86	0.02328	3.77	
No.12	2.004	52.57	0.02510	3.86	0.02348	3.78	
No.13	2.004	52.43	0.02504	3.86	0.02393	3.80	
No.14	2.004	52.38	0.02501	3.86	0.02348	3.78	
No.15	2.004	52.53	0.02508	3.86	0.02352	3.78	
No.16	2.004	52.66	0.02515	3.86	0.02361	3.78	
No.17	2.004	52.6	0.02512	3.86	0.02355	3.78	電荷量評価
No.18	2.004	52.56	0.02510	3.86	0.02352	3.78	平均Na量(g): 0.02508
No.19	2.004	52.5	0.02507	3.86	0.02338	3.77	標準偏差(1σ): 0.00046
No.20	2.004	52.68	0.02515	3.87	0.02357	3.78	
No.21	2.004	52.4	0.02502	3.86	0.02346	3.78	平均換算径(mm): 3.86
No.22	2.004	52.12	0.02489	3.85	0.02367	3.79	標準偏差(1σ): 0.02
No.23	2.004	52.4	0.02502	3.86	0.02369	3.79	
No.24	2.004	51.98	0.02482	3.85	0.02277	3.74	
No.25	2.004	52.04	0.02485	3.85	0.02316	3.76	
No.26	2.004	52.19	0.02492	3.85	0.02348	3.78	分析評価
No.27	2.004	52.19	0.02492	3.85	0.02357	3.78	平均Na量(g): 0.02337
No.28	2.004	52.56	0.02510	3.86	0.0234	3.77	標準偏差(1σ): 0.00023
No.29	2.004	52.25	0.02495	3.85	0.02352	3.78	
No.30	2.004	52.19	0.02492	3.85	0.02336	3.77	平均換算径(mm): 3.77
No.31	2.004	52.5	0.02507	3.86	0.02334	3.77	標準偏差(1σ): 0.01
No.32	2.004	52.08	0.02487	3.85	0.02326	3.77	
No.33	2.004	52.42	0.02503	3.86	0.02328	3.77	
No.34	2.004	52.5	0.02507	3.86	0.02342	3.77	
No.35	2.004	52.24	0.02494	3.85	0.02363	3.79	
No.36	2.004	52.6	0.02512	3.86	0.02344	3.78	
No.37	2.004	52.4	0.02502	3.86	0.02342	3.77	
No.38	2.004	52.38	0.02501	3.86	0.02316	3.76	
No.39	2.004	52.56	0.02510	3.86	0.02365	3.79	
No.40	2.004	52.6	0.02512	3.86	0.02328	3.77	
No.41	2.004	52.49	0.02506	3.86	0.02334	3.77	
No.42	2.004	52.51	0.02507	3.86	0.0229	3.75	
No.43	2.004	52.32	0.02498	3.86	0.02292	3.75	
No.44	2.004	52.4	0.02502	3.86	0.02334	3.77	
No.45	2.004	52.4	0.02502	3.86	0.02318	3.76	
No.46	2.004	52.6	0.02512	3.86	0.02316	3.76	
No.47	2.004	52.5	0.02507	3.86	0.02304	3.75	
No.48	2.004	52.24	0.02494	3.85	0.02312	3.76	
No.49	2.004	59.03	0.02819	4.01	0.023	3.75	
No.50	2.004	53.04	0.02533	3.87	0.02304	3.75	

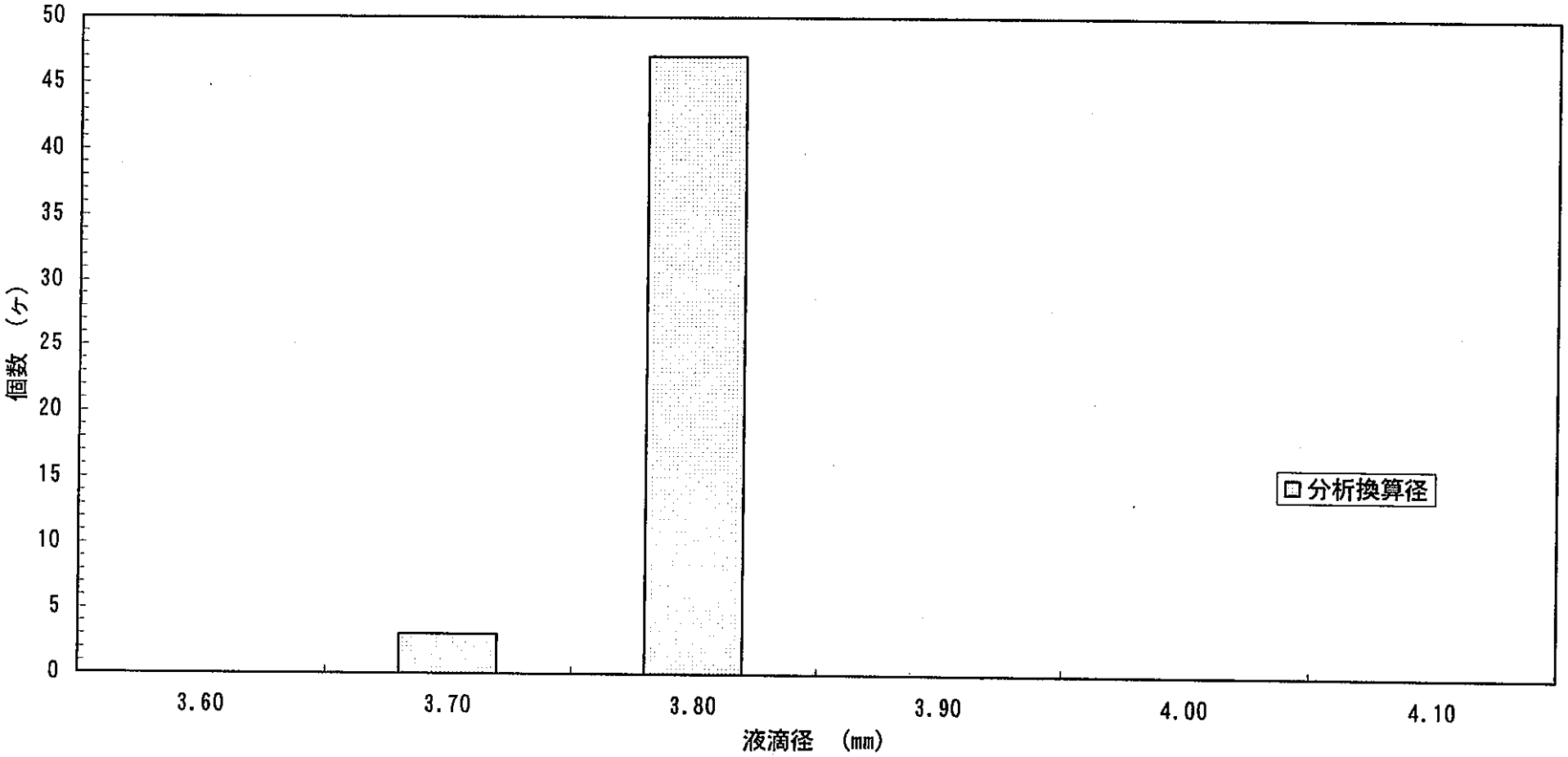


図 3.2-13 液滴径の分布(不活性ガス雰囲気実験, 第3-1回目)

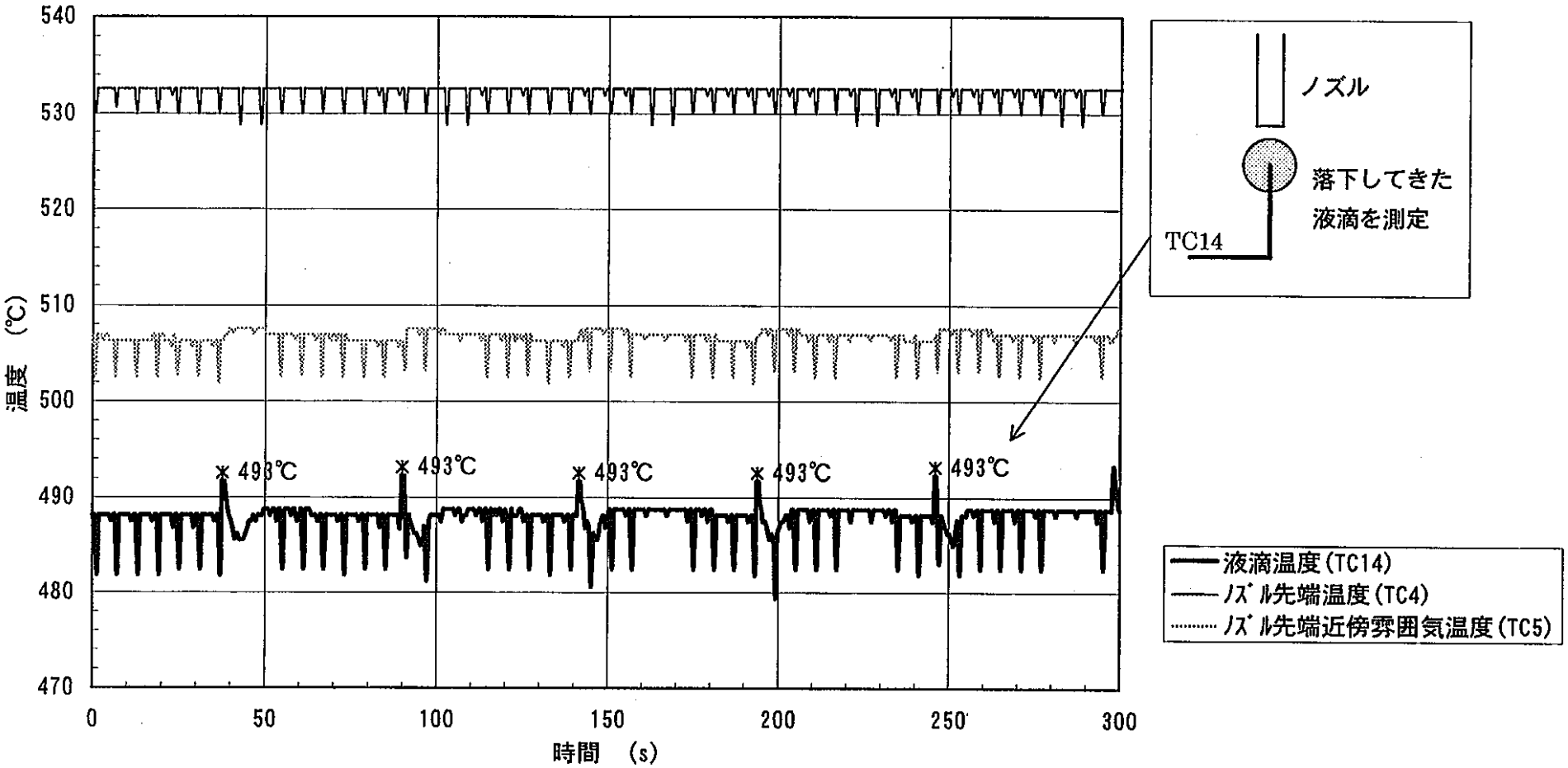


図 3.2-14 滴下Na温度(不活性ガス雰囲気実験，第3-2回目)

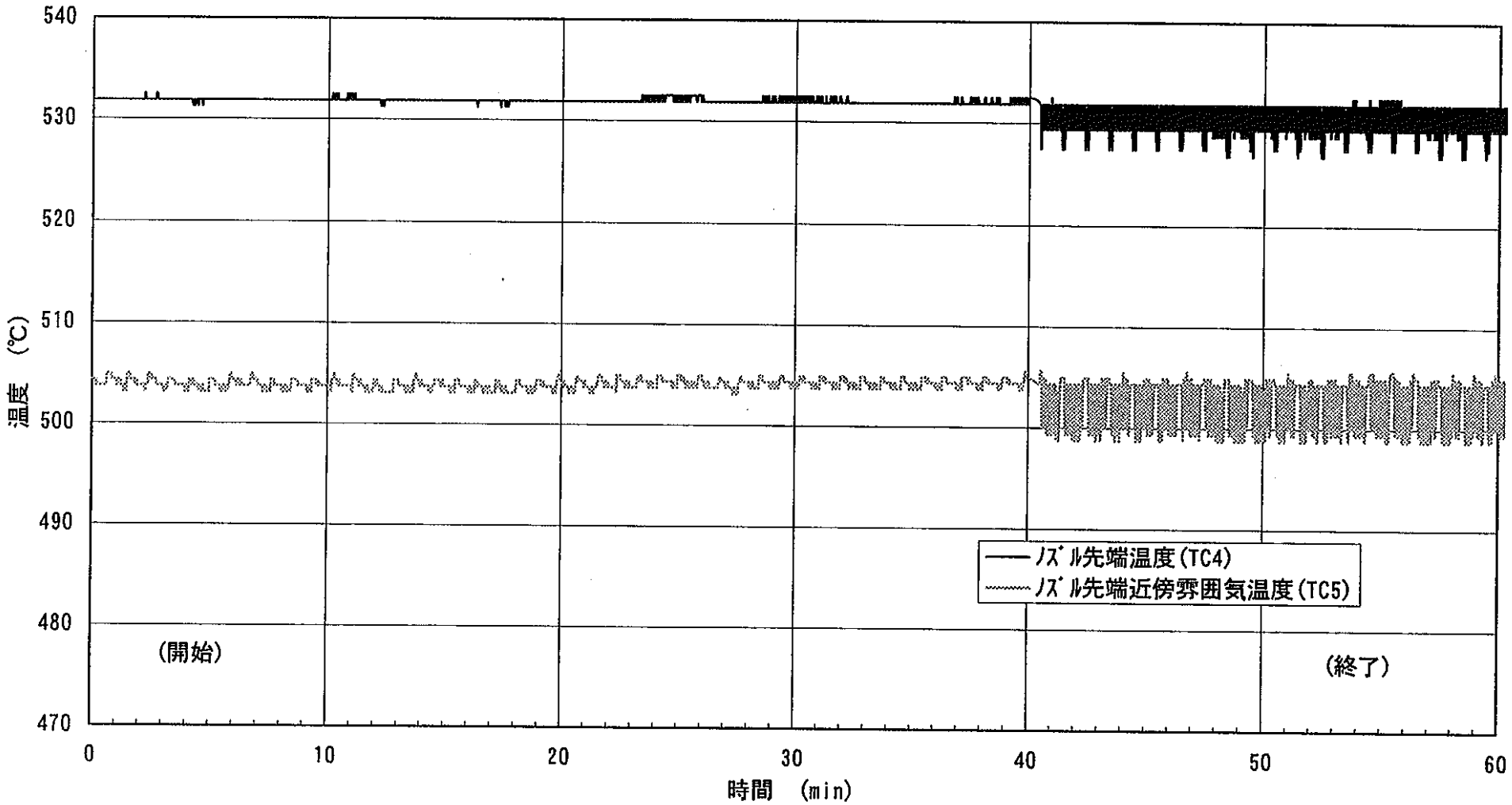


図 3.2-15 滴下試験中のノズル近傍温度分布
(不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目)

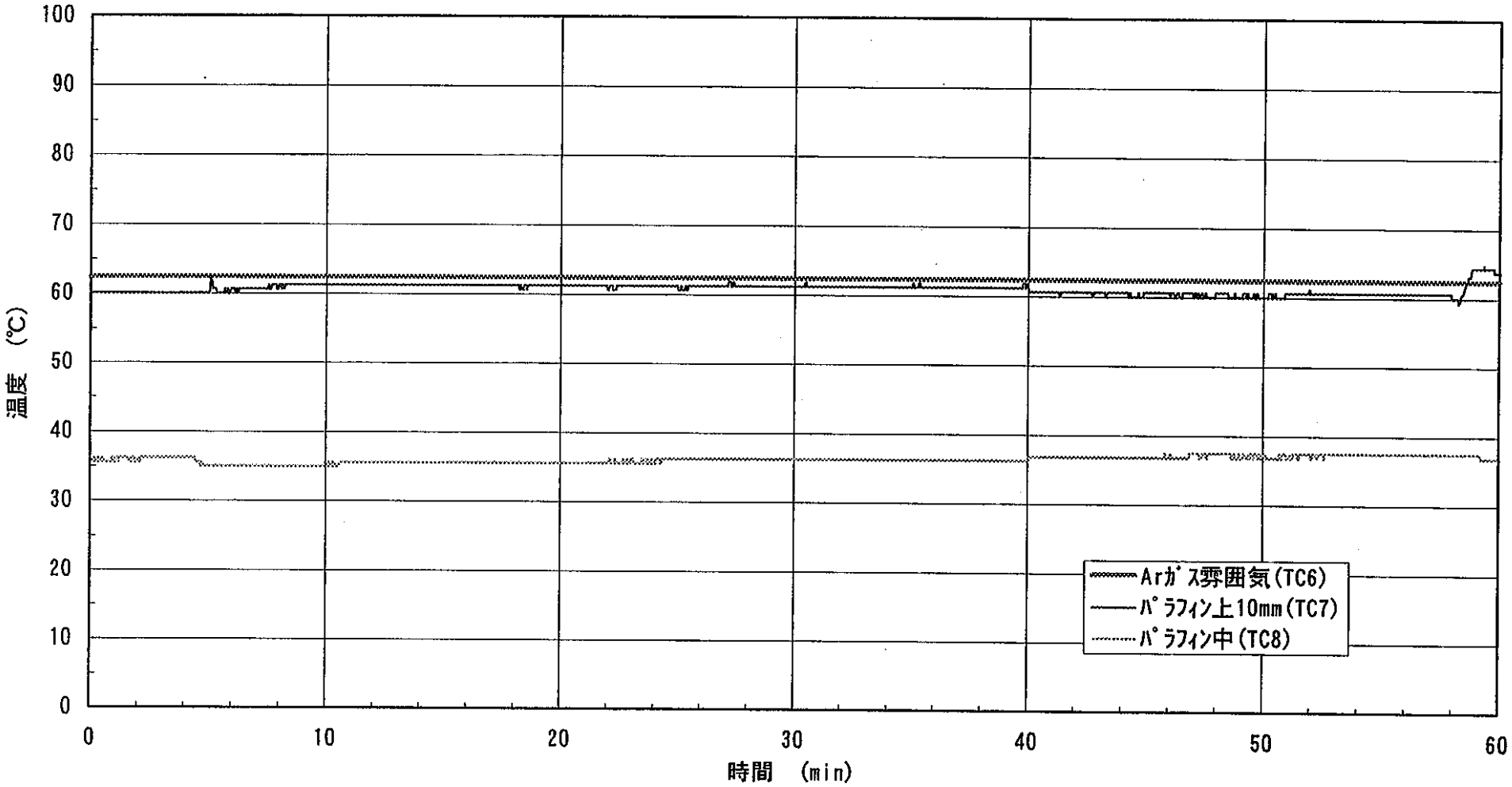


図 3.2-16 滴下試験中の軸方向温度分布(不活性ガス雰囲気実験，第３－２回目)

表 3.2-6 不活性ガス雰囲気結果(第3-2回目)

No.	電荷量評価				分析評価		備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)	Na量(g)	換算径(mm)	
No.1	2.006	51.59	0.02466	3.84	0.02298	3.75	
No.2	2.006	51.96	0.02484	3.85	0.02304	3.75	
No.3	2.006	52.42	0.02506	3.86	0.02271	3.73	
No.4	2.006	52.12	0.02491	3.85	0.02286	3.74	
No.5	2.006	52.22	0.02496	3.85	0.02288	3.74	
No.6	2.006	52.24	0.02497	3.85	0.02322	3.76	
No.7	2.006	52.2	0.02495	3.85	0.02314	3.76	
No.8	2.006	52.28	0.02499	3.85	0.02316	3.76	
No.9	2.006	52.34	0.02502	3.86	0.02308	3.75	
No.10	2.006	52.22	0.02496	3.85	0.02298	3.75	
No.11	2.006	52.28	0.02499	3.85	0.02308	3.75	
No.12	2.006	52.22	0.02496	3.85	0.02308	3.75	
No.13	2.006	52.21	0.02496	3.85	0.02296	3.75	
No.14	2.006	52.29	0.02499	3.85	0.02312	3.75	
No.15	2.006	52.15	0.02493	3.85	0.02332	3.77	
No.16	2.006	52	0.02485	3.85	0.02314	3.76	
No.17	2.006	52.25	0.02497	3.85	0.02326	3.76	電荷量評価
No.18	2.006	52.2	0.02495	3.85	0.0232	3.76	平均Na量(g): 0.02499
No.19	2.006	52.01	0.02486	3.85	0.02338	3.77	標準偏差(1σ): 0.00012
No.20	2.006	52.5	0.02509	3.86	0.02294	3.75	
No.21	2.006	52.24	0.02497	3.85	0.02304	3.75	平均換算径(mm): 3.85
No.22	2.006	52.34	0.02502	3.86	0.02265	3.73	標準偏差(1σ): 0.01
No.23	2.006	52.29	0.02499	3.85	0.02306	3.75	
No.24	2.006	52.24	0.02497	3.85	0.02316	3.76	
No.25	2.006	52.21	0.02496	3.85	0.0229	3.74	
No.26	2.006	52.54	0.02511	3.86	0.02296	3.75	分析評価
No.27	2.006	52.35	0.02502	3.86	0.02279	3.74	平均Na量(g): 0.02295
No.28	2.006	52.24	0.02497	3.85	0.02298	3.75	標準偏差(1σ): 0.00025
No.29	2.006	52.47	0.02508	3.86	0.02304	3.75	
No.30	2.006	52.41	0.02505	3.86	0.02292	3.74	平均換算径(mm): 3.75
No.31	2.006	52.38	0.02504	3.86	0.02312	3.75	標準偏差(1σ): 0.01
No.32	2.006	52.37	0.02503	3.86	0.02316	3.76	
No.33	2.006	52.42	0.02506	3.86	0.02235	3.71	
No.34	2.006	52.42	0.02506	3.86	0.02223	3.71	
No.35	2.006	51.91	0.02481	3.84	0.02231	3.71	
No.36	2.006	52.42	0.02506	3.86	0.02288	3.74	
No.37	2.006	52.27	0.02498	3.85	0.02273	3.73	
No.38	2.006	52.57	0.02513	3.86	0.02282	3.74	
No.39	2.006	52.4	0.02505	3.86	0.02267	3.73	
No.40	2.006	52.47	0.02508	3.86	0.02259	3.73	
No.41	2.006	51.82	0.02477	3.84	0.02294	3.75	
No.42	2.006	52.28	0.02499	3.85	0.0233	3.76	
No.43	2.006	52.48	0.02508	3.86	0.02288	3.74	
No.44	2.006	52.46	0.02507	3.86	0.02275	3.73	
No.45	2.006	52.54	0.02511	3.86	0.02298	3.75	
No.46	2.006	51.48	0.02461	3.83	0.02296	3.75	
No.47	2.006	52.48	0.02508	3.86	0.02271	3.73	
No.48	2.006	52.53	0.02511	3.86	0.0229	3.74	
No.49	2.006	52.89	0.02528	3.87	0.02316	3.76	
No.50	2.006	52.6	0.02514	3.86	0.0232	3.76	

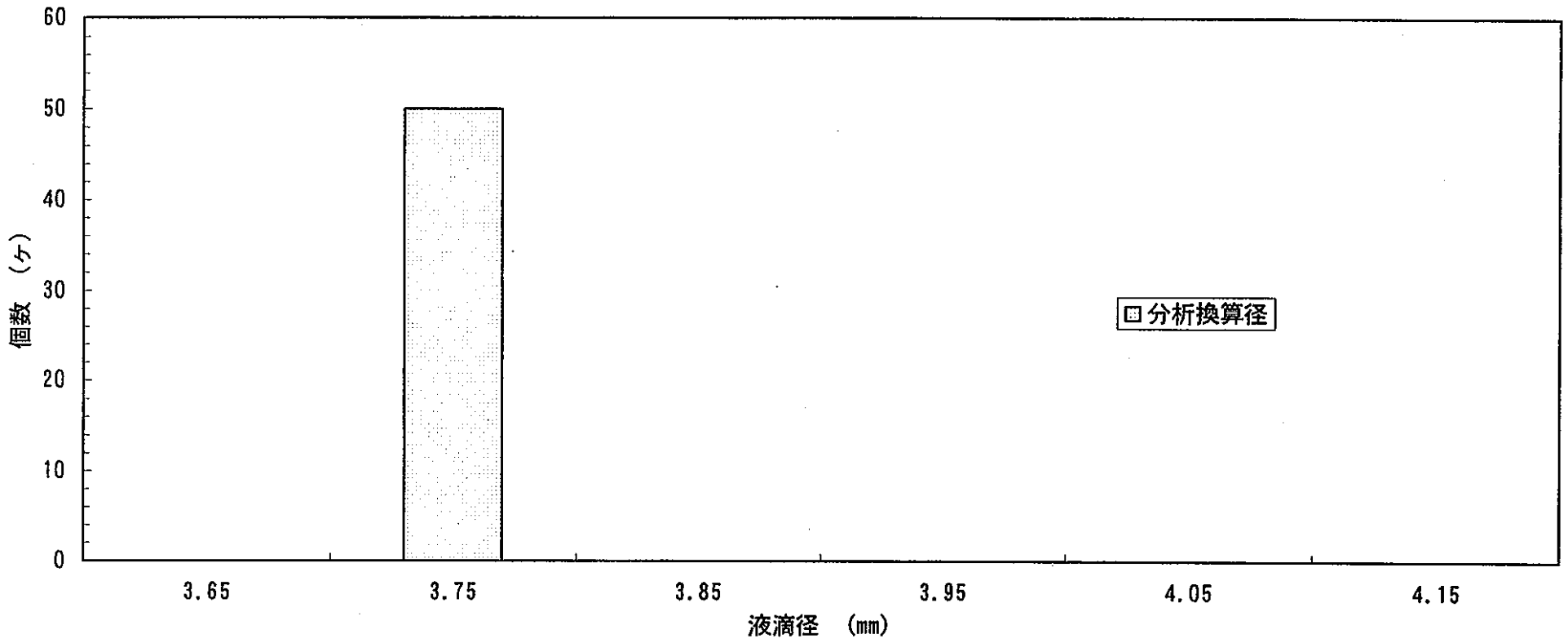


図 3.2-17 液滴径の分布(不活性ガス雰囲気実験, 第3-2回目)

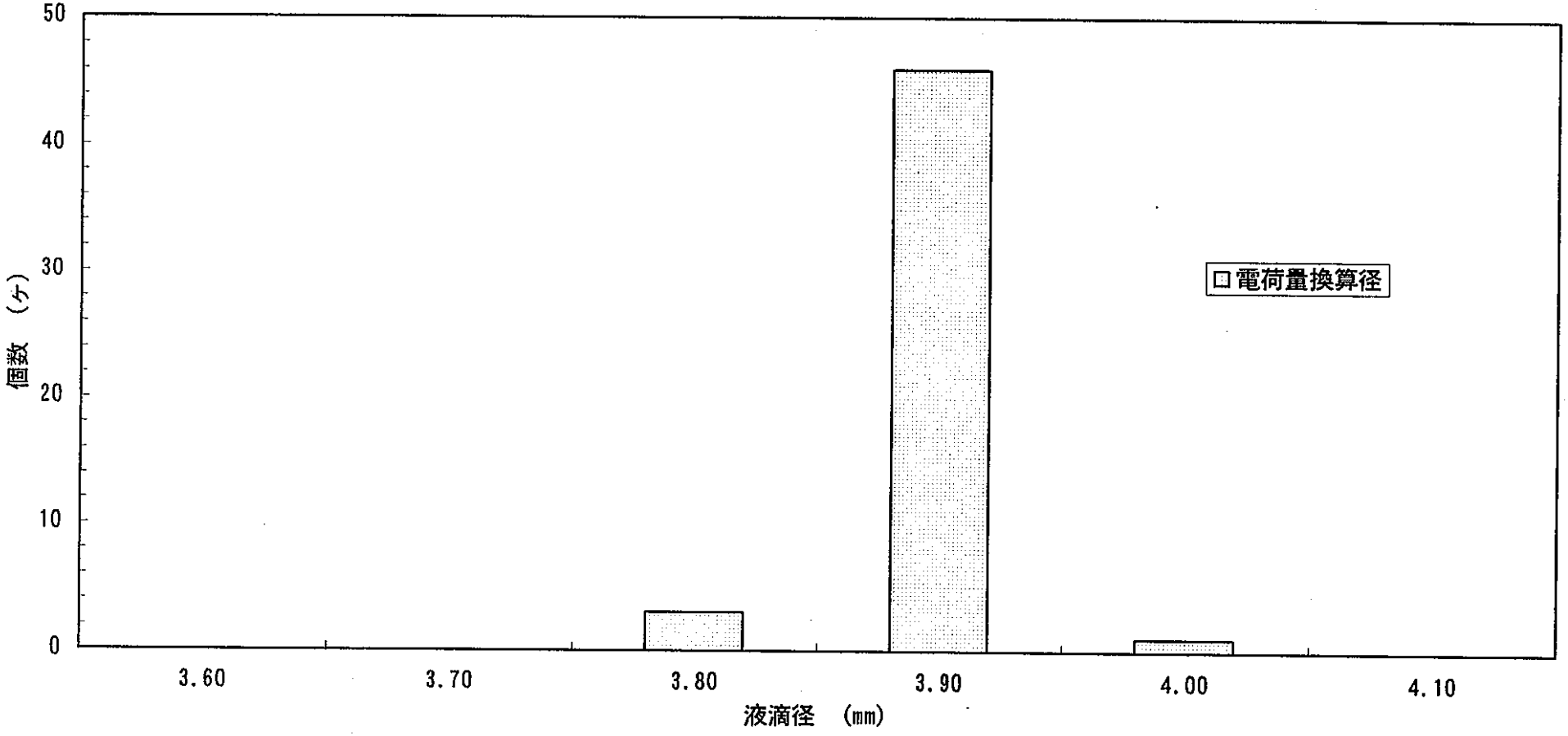


図 3.2-18　液滴径の分布(不活性ガス雰囲気実験，第3-1回目)

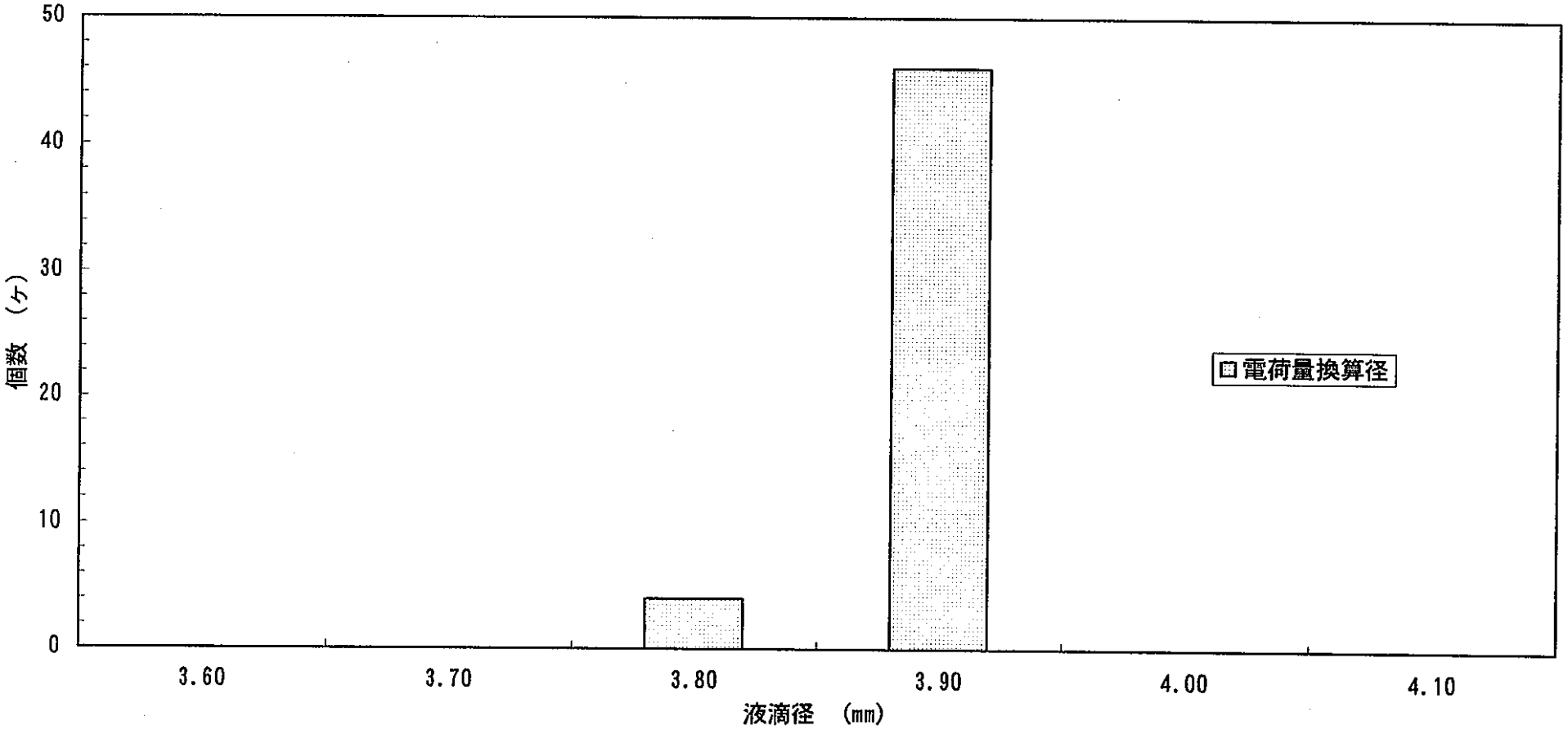


図 3.2-19　液滴径の分布(不活性ガス雰囲気実験，第3-2回目)

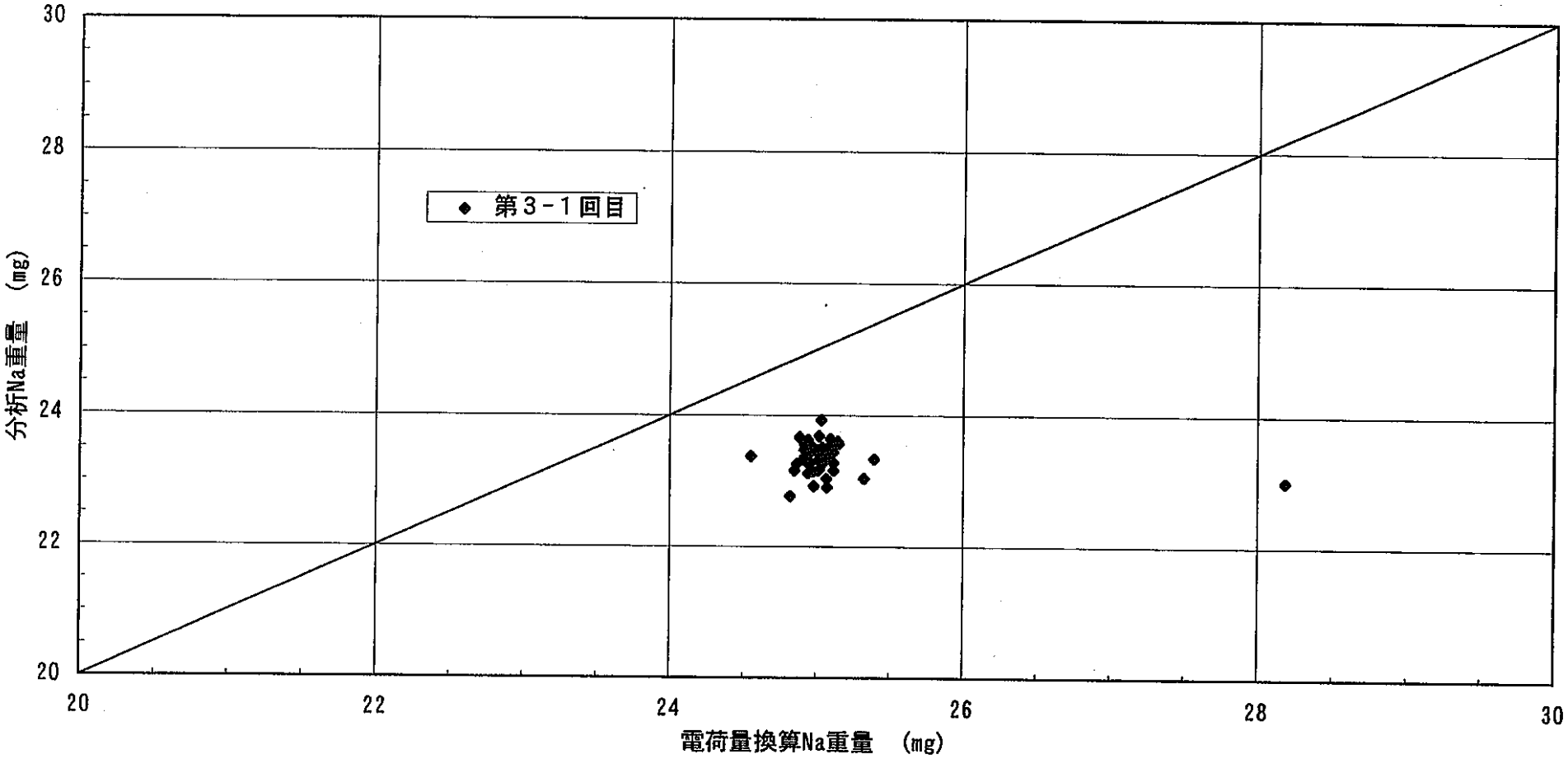


図 3.2-20　電荷量換算Na液滴重量と分析Na液滴重量の関係(第3-1回目)

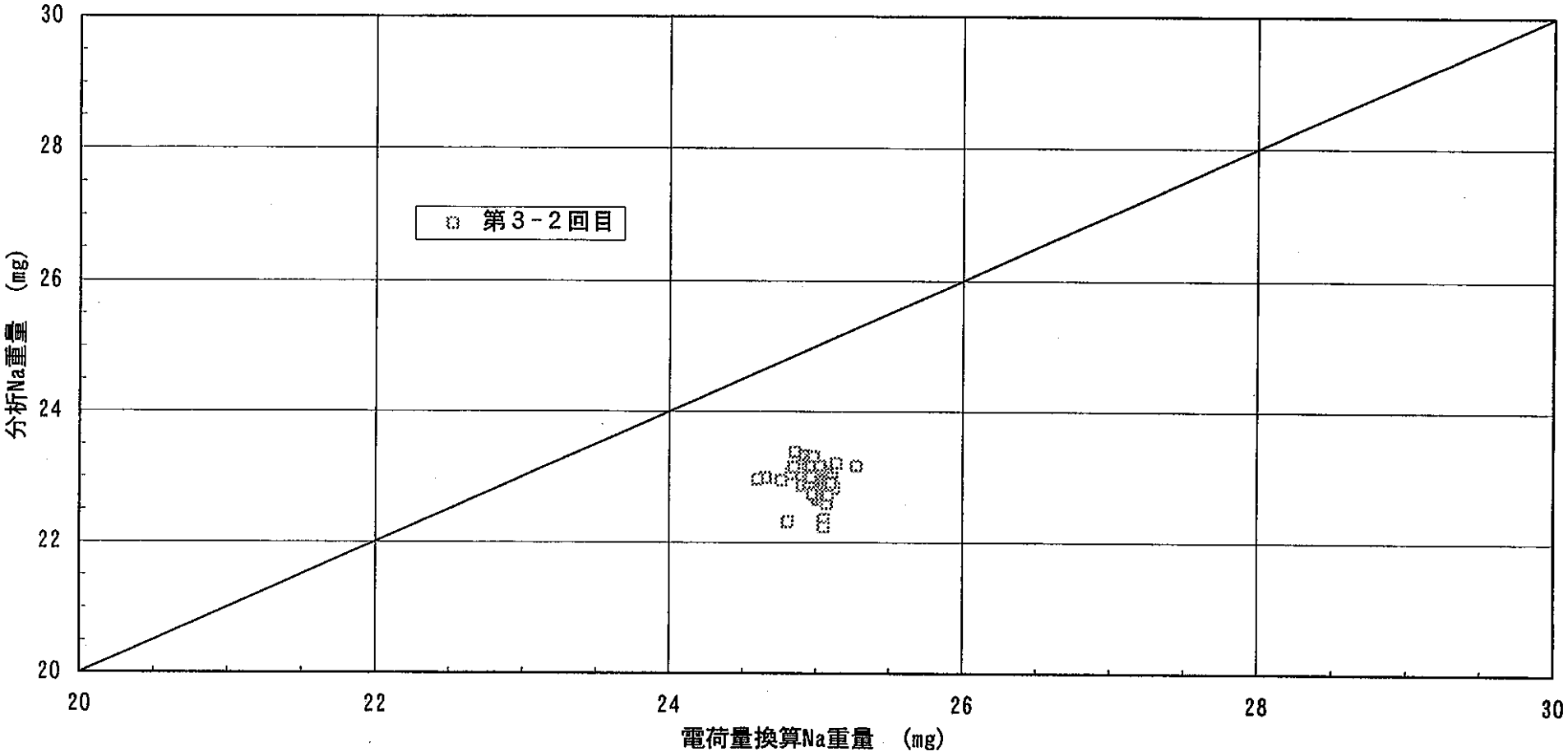


図 3.2-21　電荷量換算Na液滴重量と分析Na液滴重量の関係(第3-2回目)

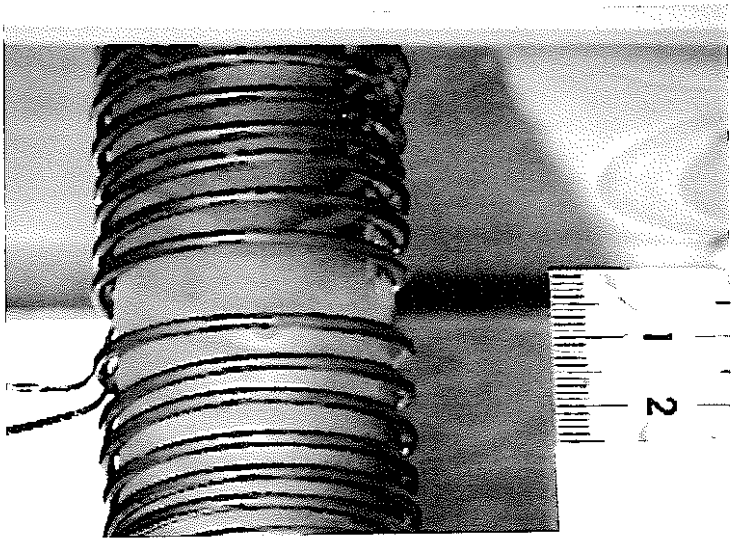
表3.2-7　不活性ガス雰囲気実験のまとめ

(1) 目標仕様

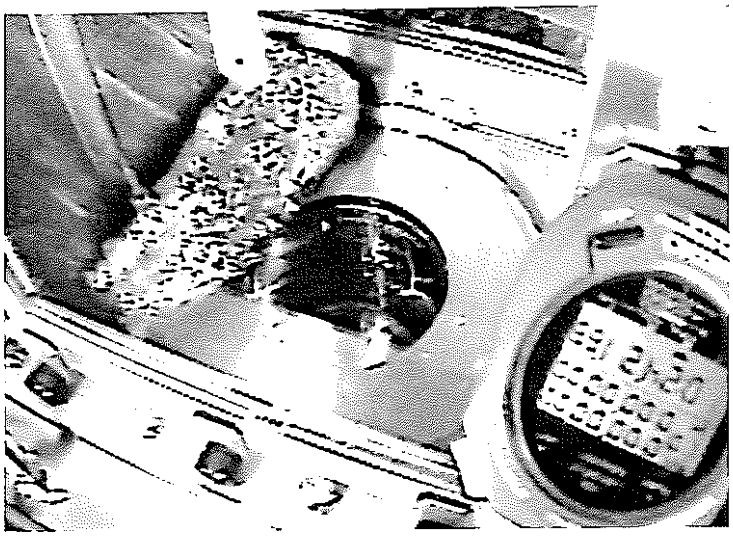
容器内雰囲気	Arガス
Na液滴温度	500±10℃
Na液滴径	500℃,球換算直径で3.5±1.0mm (室温,Na重量換算で6.82～39.70mg)

(2) 実験実績

試験No.	第1回目	第2回目	第3-1回目	第3-2回目
容器内Ar雰囲気酸素濃度(ppm)	18	20	18	17
容器内露点(℃)	<-15	-52	-54	-57
液滴温度(℃)	493	507	499	493
分析液滴重量(mg)	25.56±0.35	26.54±3.12	23.37±0.23	22.95±0.25
分析評価滴下時の液滴径(mm)	3.88±0.02	3.93±0.15	3.77±0.01	3.75±0.01
電荷量評価液滴重量 (mg)	—	—	25.00±0.12	
電荷量評価滴下時の液滴径(mm)	—	—	3.86±0.01	

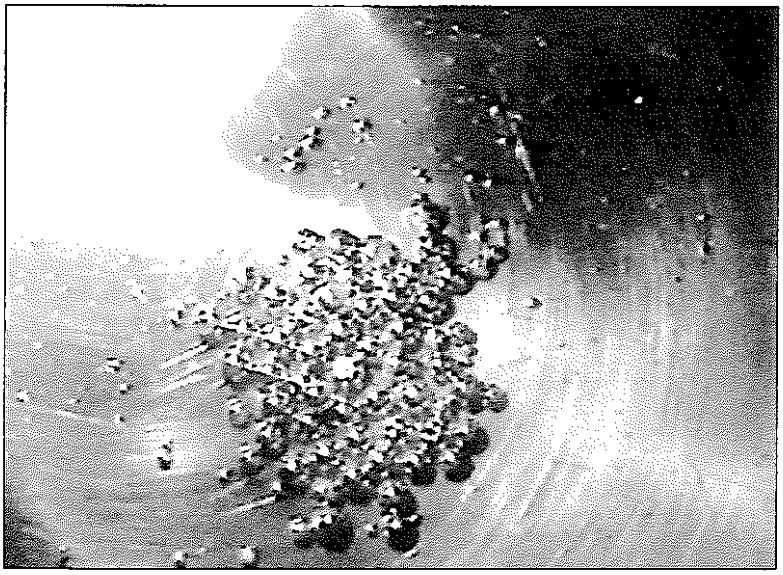


a．Na液滴生成状況



b．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによるNa液滴の回収状況

写真 3.2-7　低酸素雰囲気実験



低酸素雰囲気実験

写真 3.2-8　回収したNa粒子

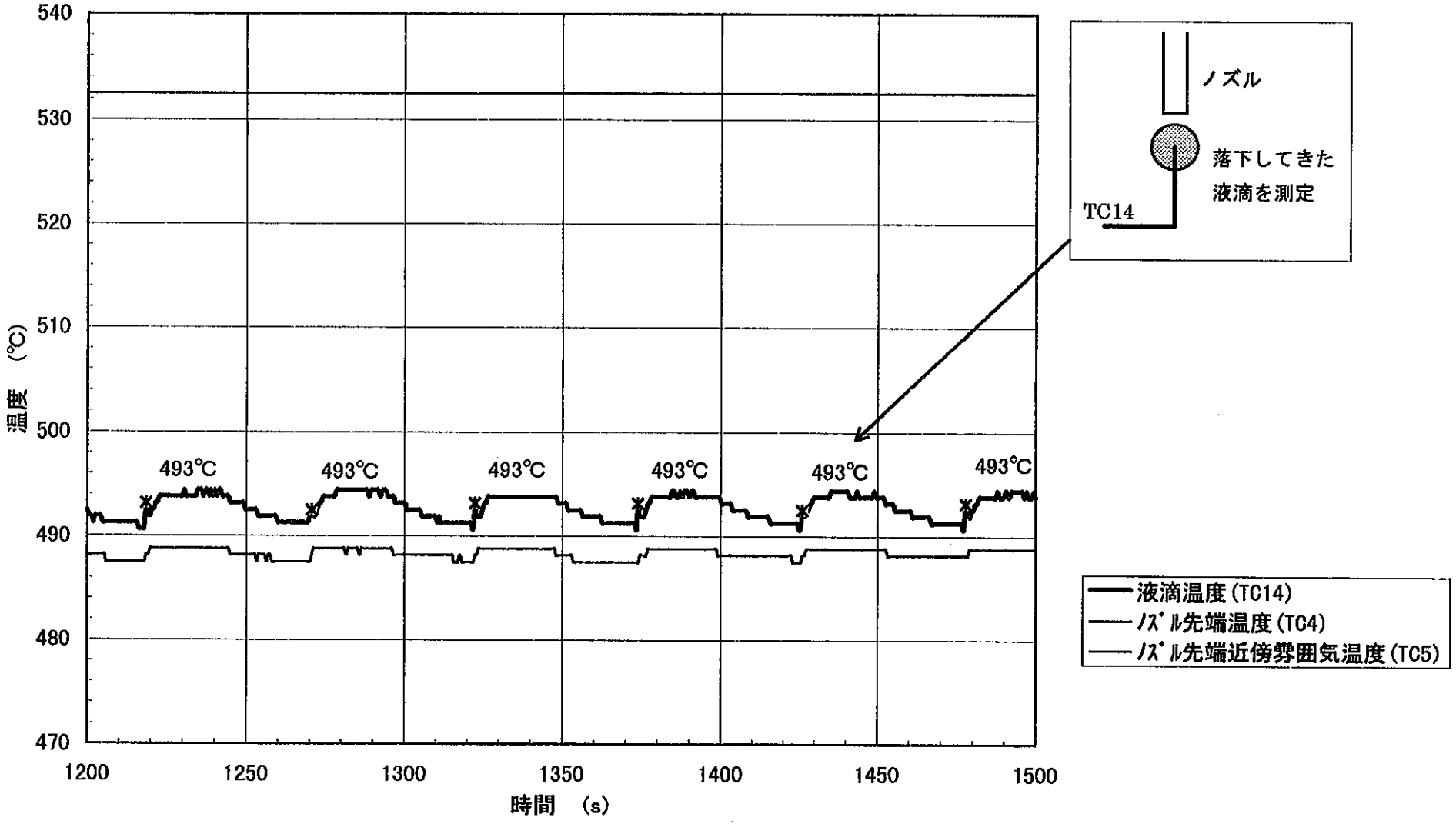


図 3.2-22 滴下Na温度(低酸素雰囲気実験)

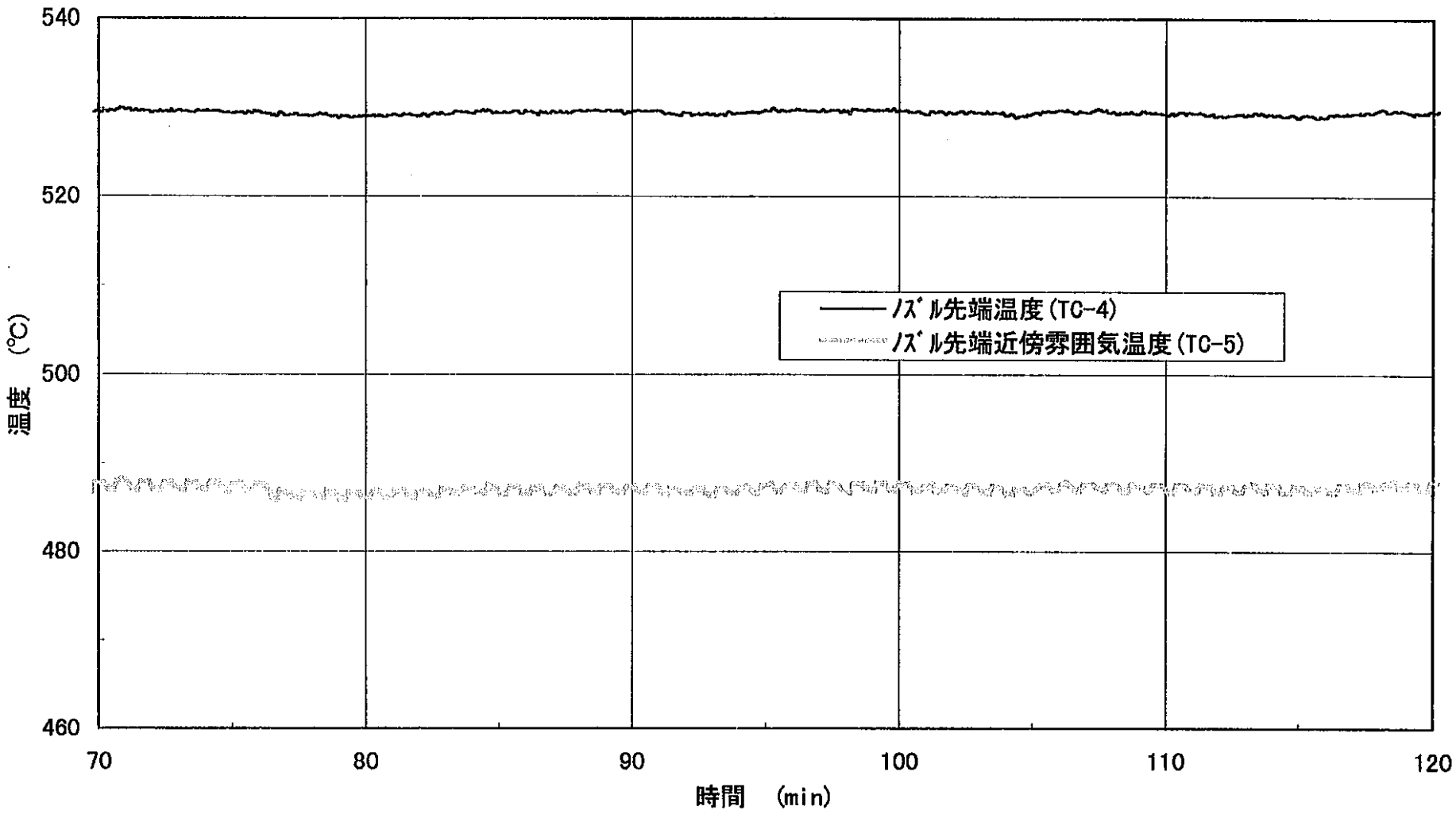


図 3.2-23 滴下試験中のノズル近傍温度分布(低酸素雰囲気実験)

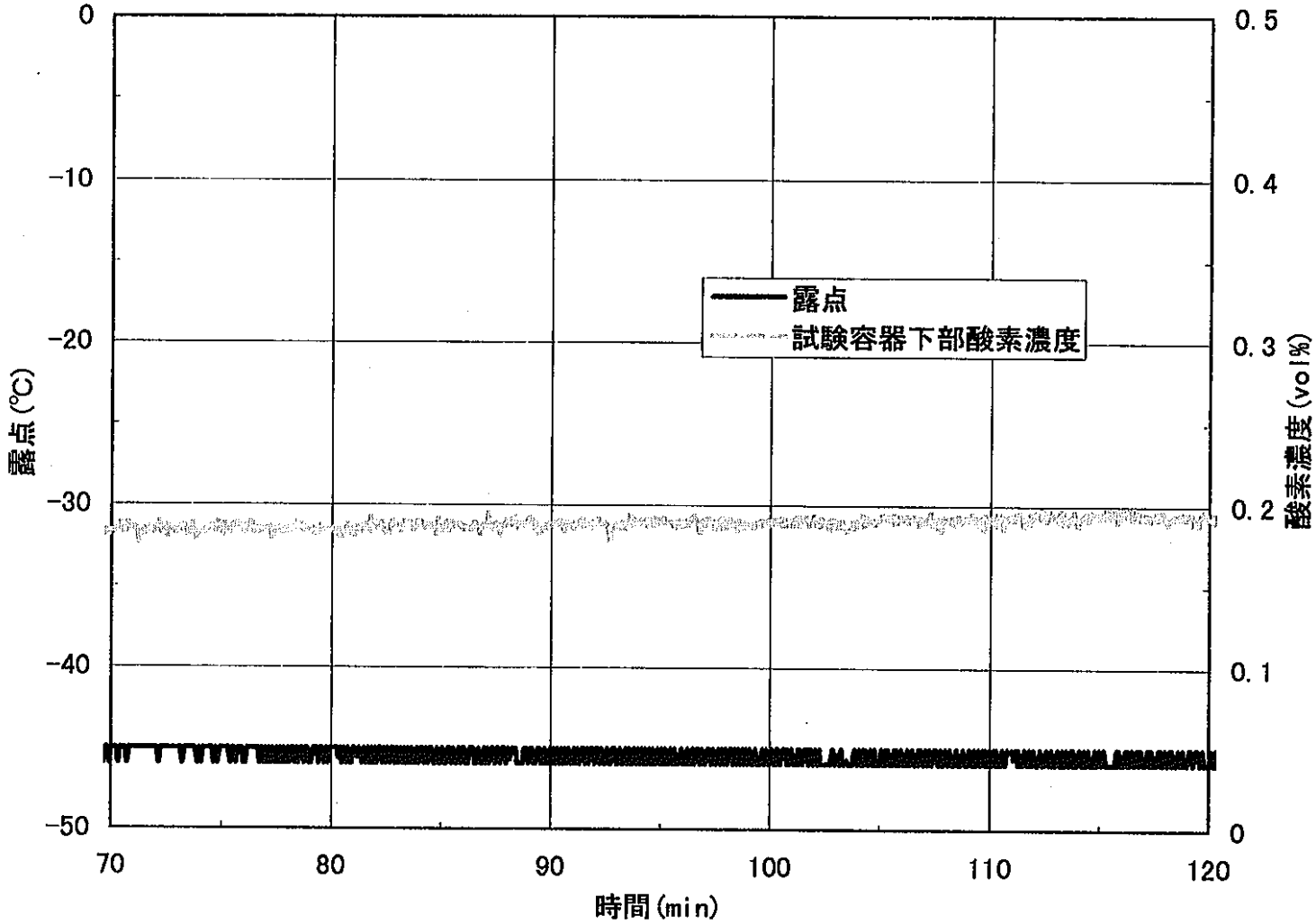


図 3.2-24　滴下試験中の酸素濃度及び露点(低酸素雰囲気実験)

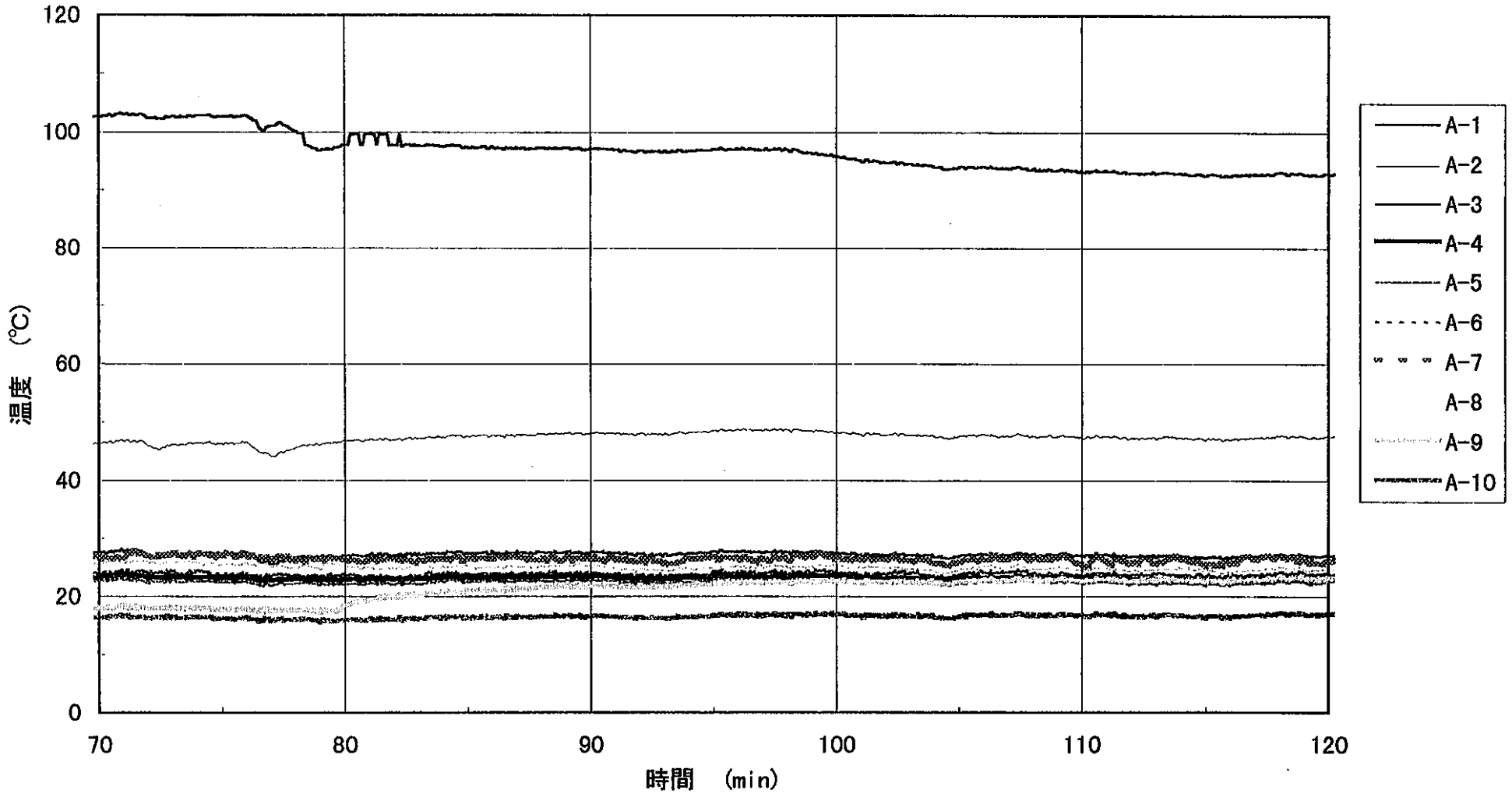


図 3.2-25 滴下試験中の軸方向温度分布(低酸素雰囲気実験)

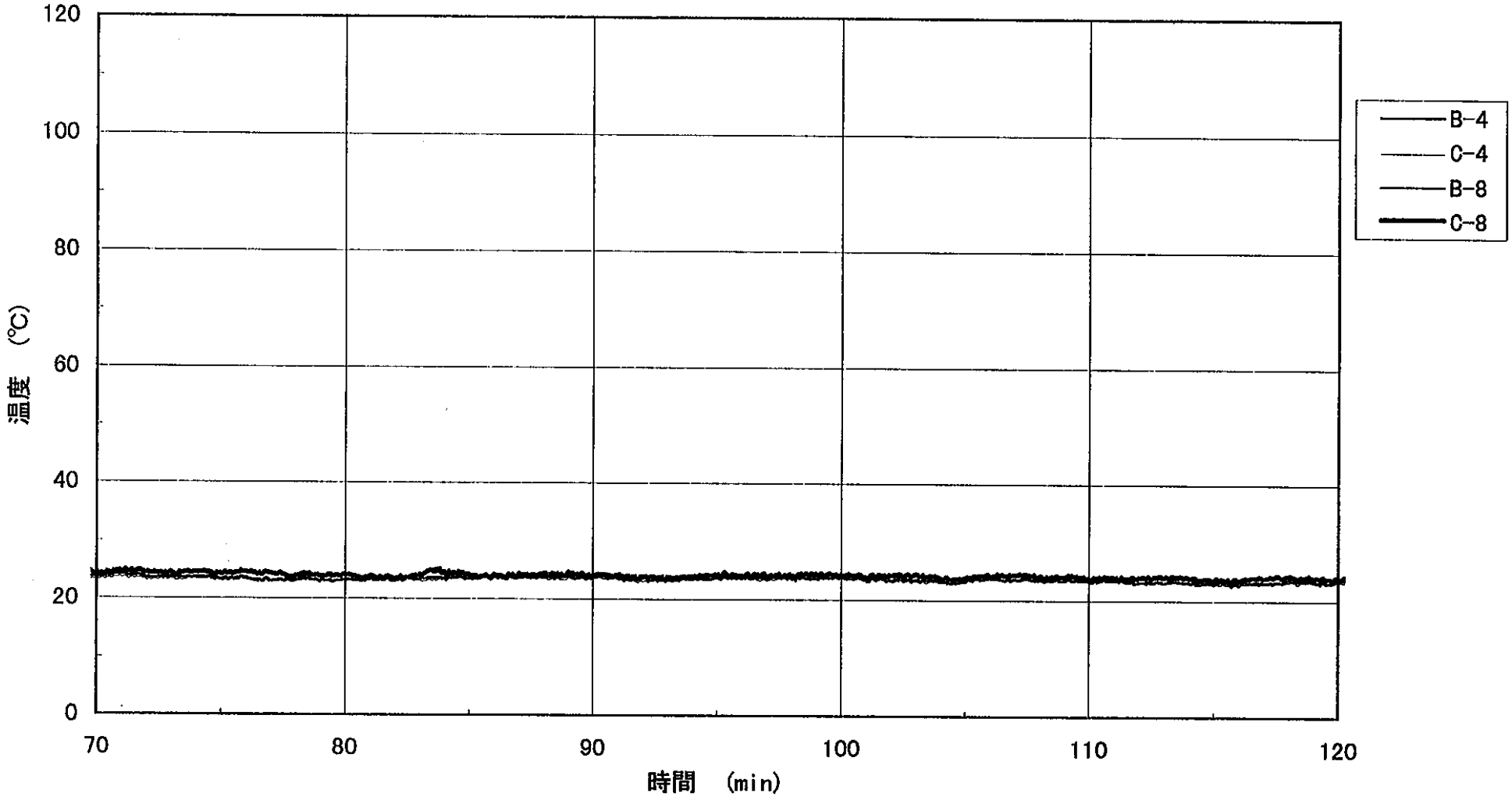
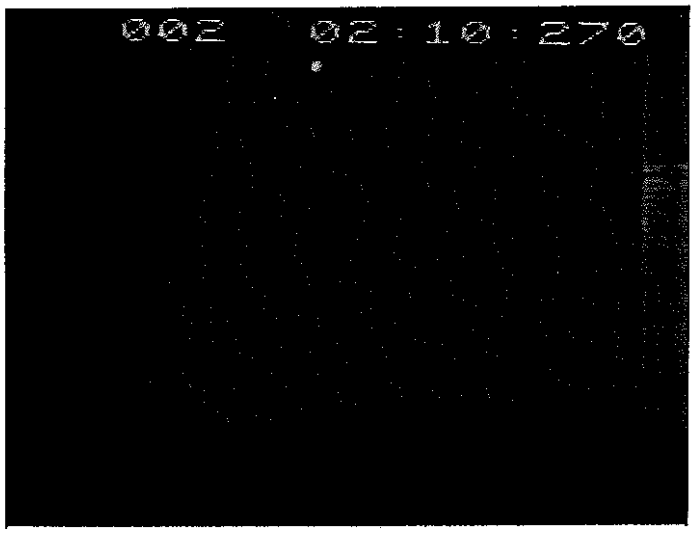
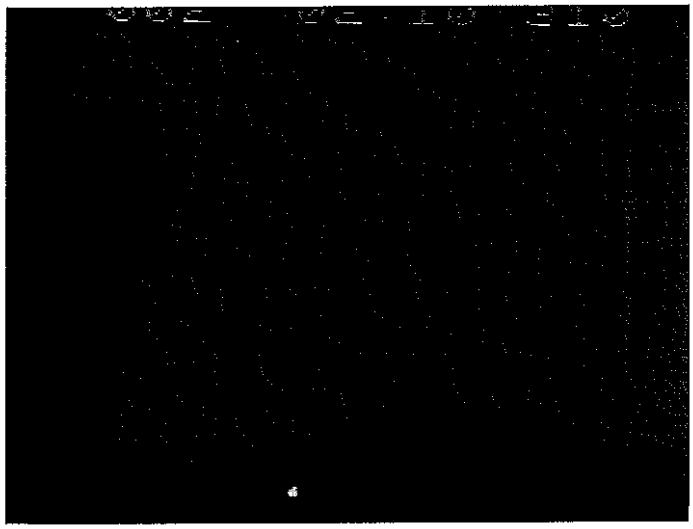


図 3.2-26 滴下試験中の周方向温度分布(低酸素雰囲気実験)

表 3.2-8 低酸素雰囲気実験結果

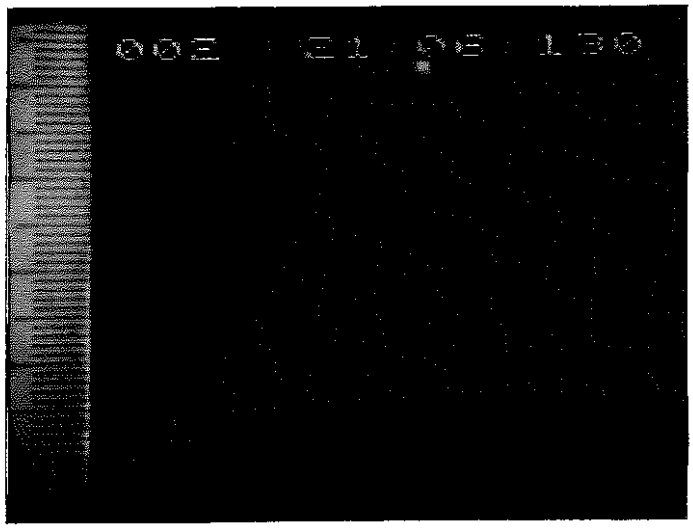
No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.006	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.006	51.93	0.02482	3.84		
No.3	2.006	52	0.02485	3.85		
No.4	2.006	52.1	0.02490	3.85		
No.5	2.006	52.05	0.02488	3.85		
No.6	2.006	52.29	0.02499	3.85		
No.7	2.006	51.6	0.02466	3.84		
No.8	2.006	51.68	0.02470	3.84		
No.9	2.006	51.5	0.02462	3.83		
No.10	2.006	51.25	0.02450	3.83		
No.11	2.006	51.51	0.02462	3.83		
No.12	2.006	51.62	0.02467	3.84		
No.13	2.006	51.56	0.02464	3.84		
No.14	2.006	51.47	0.02460	3.83		
No.15	2.006	51.31	0.02452	3.83		
No.16	2.006	51.32	0.02453	3.83		
No.17	2.006	51.43	0.02458	3.83		
No.18	2.006	51.38	0.02456	3.83		
No.19	2.006	51.35	0.02454	3.83		
No.20	2.006	51.3	0.02452	3.83		
No.21	2.006	51.7	0.02471	3.84		
No.22	2.006	51.56	0.02464	3.84	総Na量(g)	
No.23	2.006	51.99	0.02485	3.85	1.18638	電荷量評価
No.24	2.006	51.88	0.02480	3.84		平均Na量(g): 0.02476
No.25	2.006	51.81	0.02476	3.84	平均Na量(g)	標準偏差(1σ): 0.00013
No.26	2.006	51.69	0.02471	3.84	0.02326	
No.27	2.006	51.65	0.02469	3.84		平均換算径(mm): 3.84
No.28	2.006	52	0.02485	3.85	換算径(mm)	標準偏差(1σ): 0.01
No.29	2.006	51.9	0.02481	3.84	3.76	
No.30	2.006	52.26	0.02498	3.85		
No.31	2.006	51.74	0.02473	3.84		
No.32	2.006	51.92	0.02482	3.84		
No.33	2.006	51.97	0.02484	3.85		
No.34	2.006	52.13	0.02492	3.85		
No.35	2.006	51.87	0.02479	3.84		
No.36	2.006	52.03	0.02487	3.85		
No.37	2.006	52.03	0.02487	3.85		
No.38	2.006	51.91	0.02481	3.84		
No.39	2.006	51.95	0.02483	3.85		
No.40	2.006	52.14	0.02492	3.85		
No.41	2.006	51.97	0.02484	3.85		
No.42	2.006	51.87	0.02479	3.84		
No.43	2.006	52.13	0.02492	3.85		
No.44	2.006	52.11	0.02491	3.85		
No.45	2.006	52.08	0.02489	3.85		
No.46	2.006	51.9	0.02481	3.84		
No.47	2.006	51.81	0.02476	3.84		
No.48	2.006	52	0.02485	3.85		
No.49	2.006	51.76	0.02474	3.84		
No.50	2.006	51.67	0.02470	3.84		
No.51	2.006	52.17	0.02494	3.85		

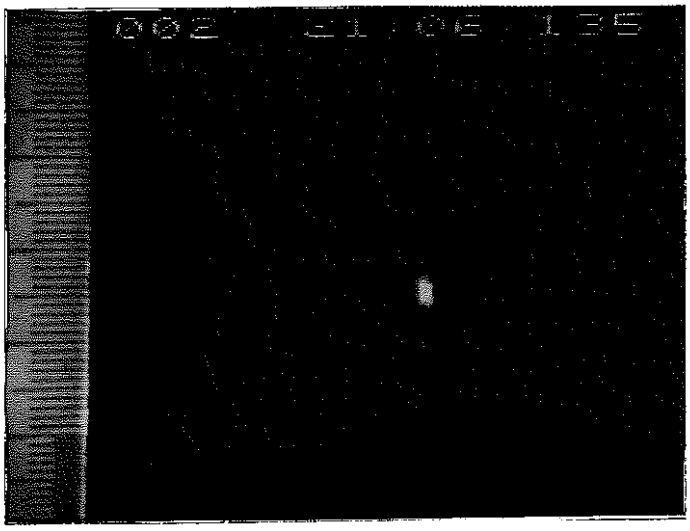




液滴No：3
落下距離：53.5mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.3m/S

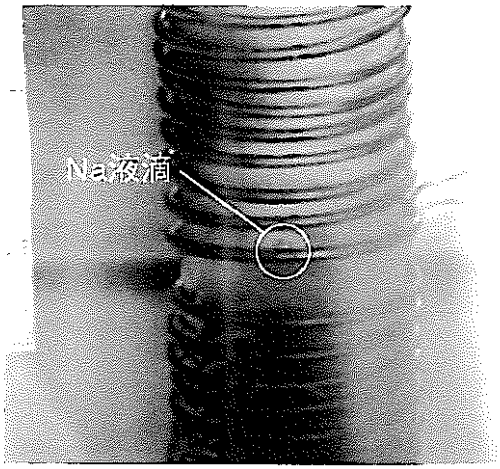
写真 3.2-9 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（低酸素雰囲気実験）



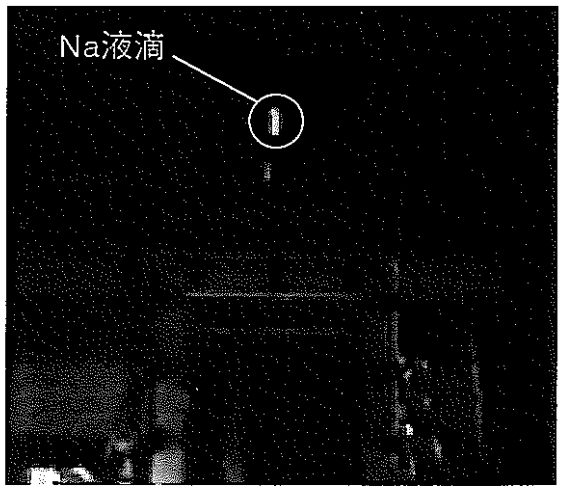


液滴No：25
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

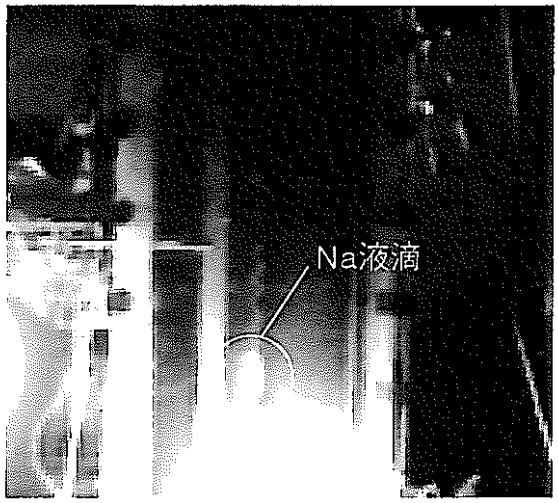
写真 3.2-10　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(低酸素雰囲気実験)



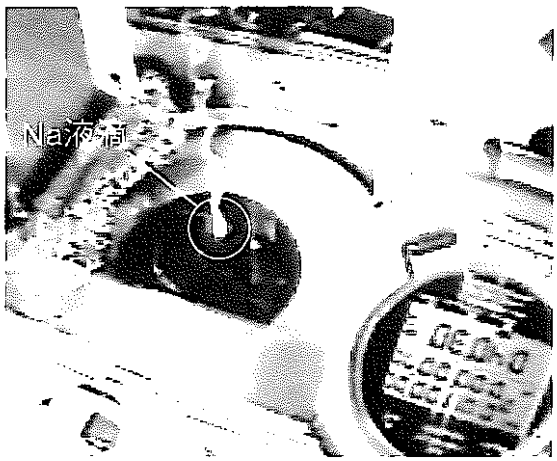
a．Na液滴生成状況



b．Na液滴落下状況
（容器上部）

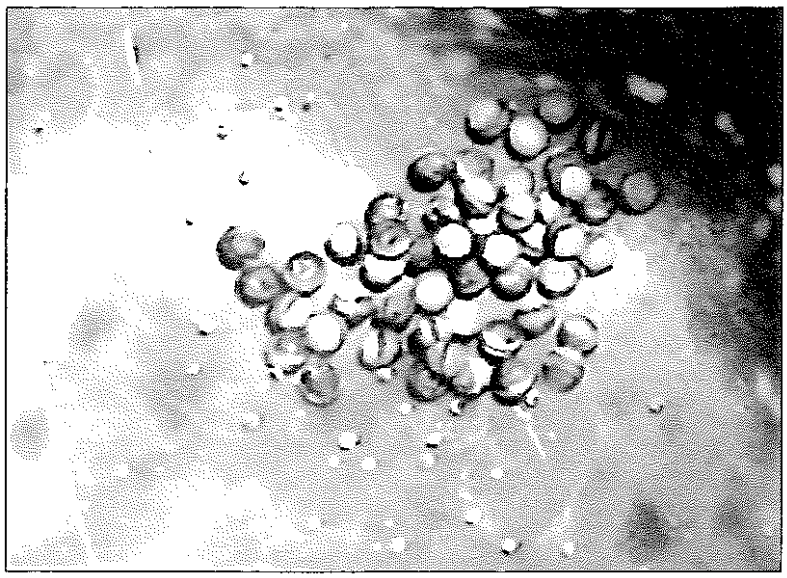


c．Na液滴落下状況
（容器下部）



d．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによる
Na液滴の回収状況

写真 3.2-11 大気雰囲気実験（第１回目）



大気雰囲気実験，第1-1回目

大気雰囲気実験，第1-2回目

写真 3.2-12　回収したNa粒子

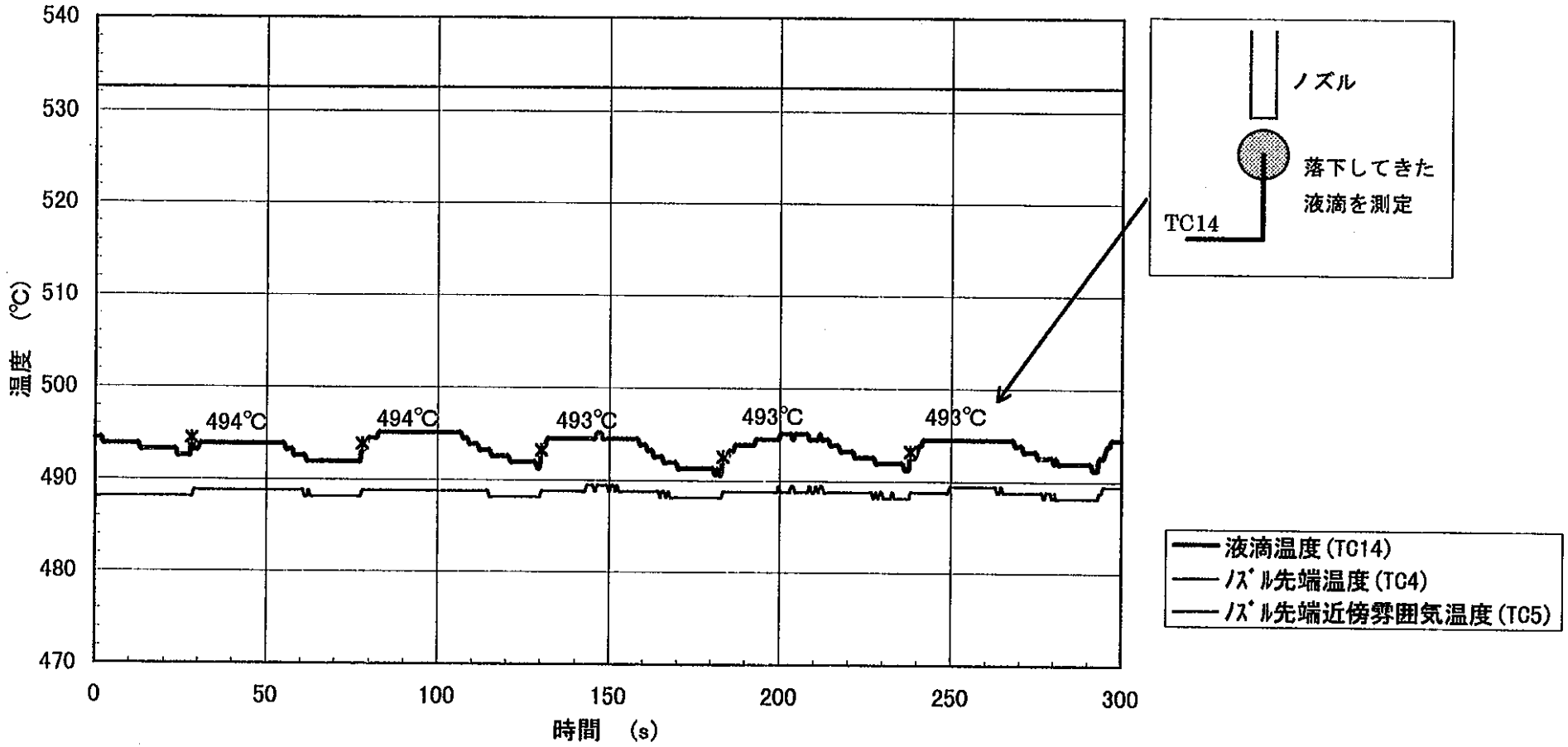


図 3.2-27 滴下Na温度(大気雰囲気実験, 第1回目)

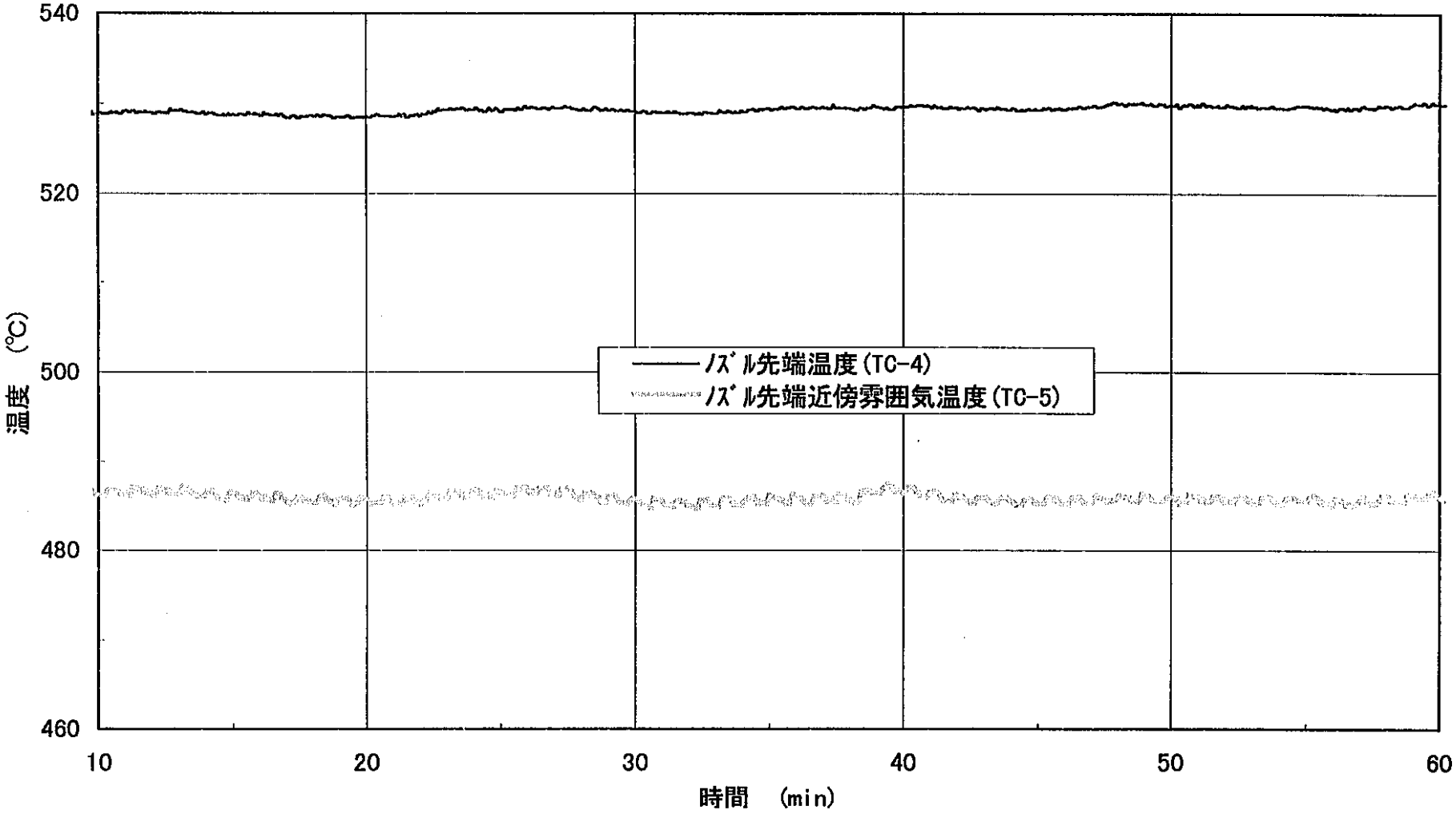


図 3.2-28 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験, 第1-1回目)

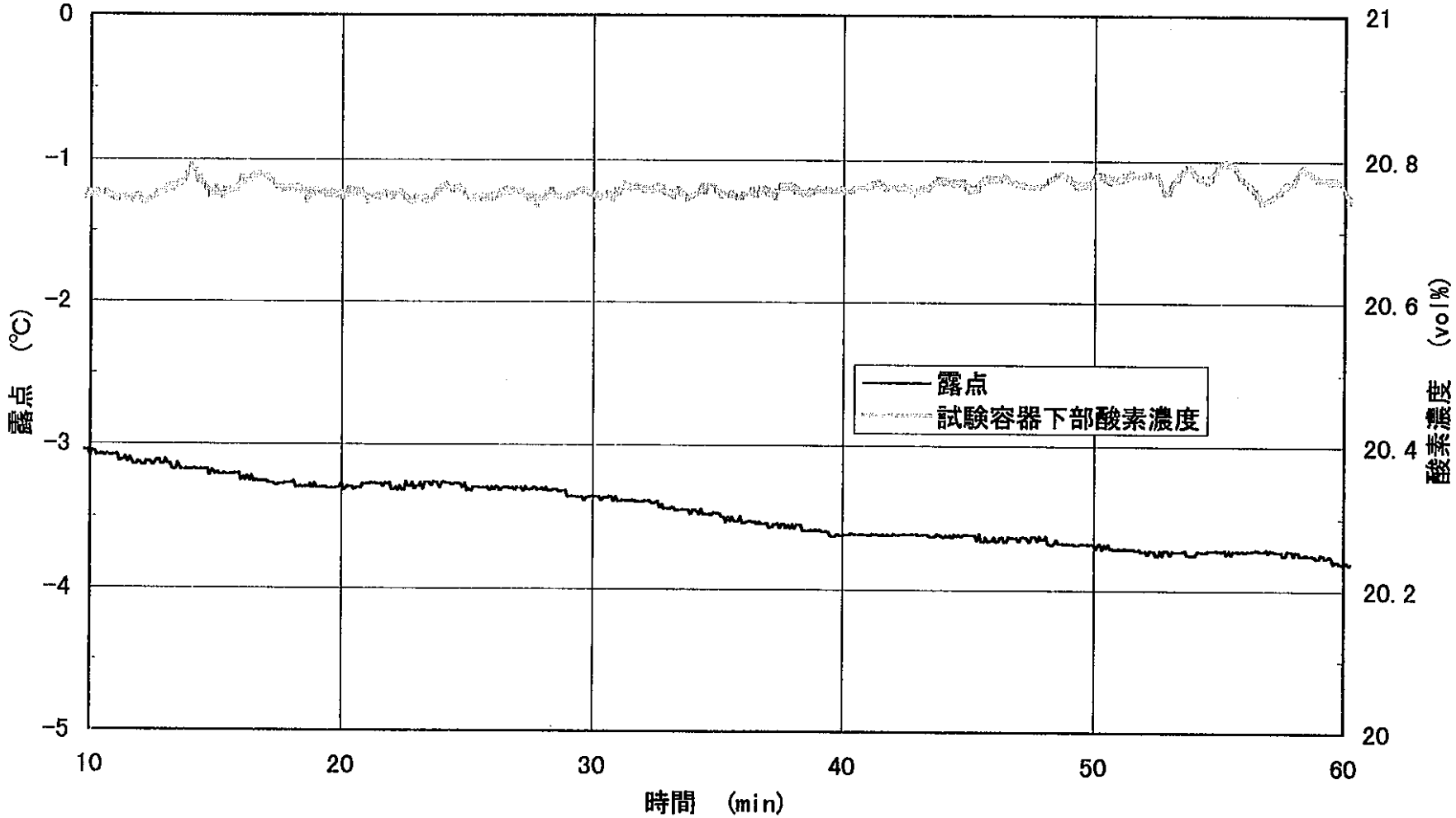


図 3.2-29 滴下試験中の酸素濃度及び露点(大気雰囲気実験, 第1-1回目)

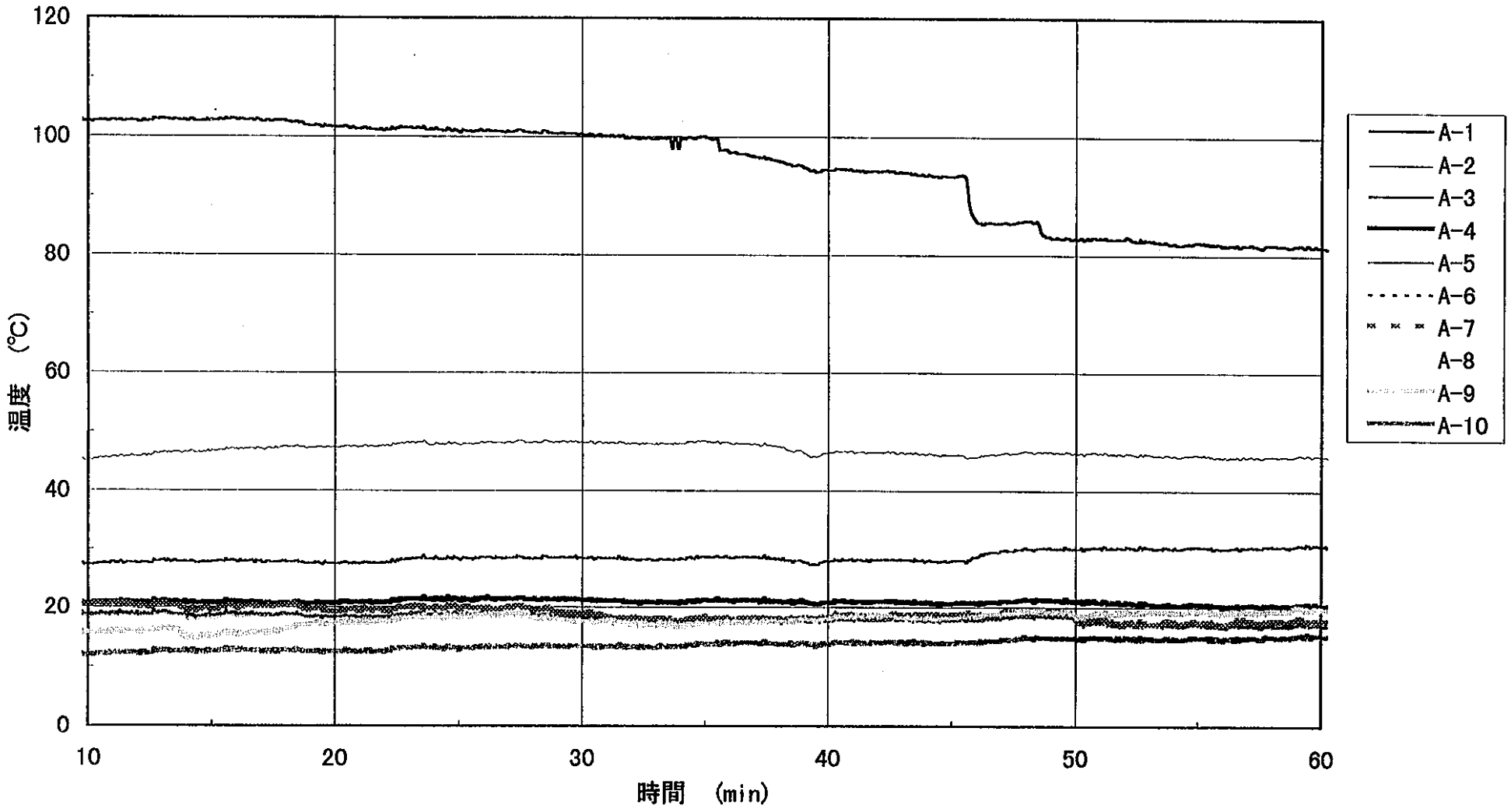


図 3.2-30 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第1-1回目)

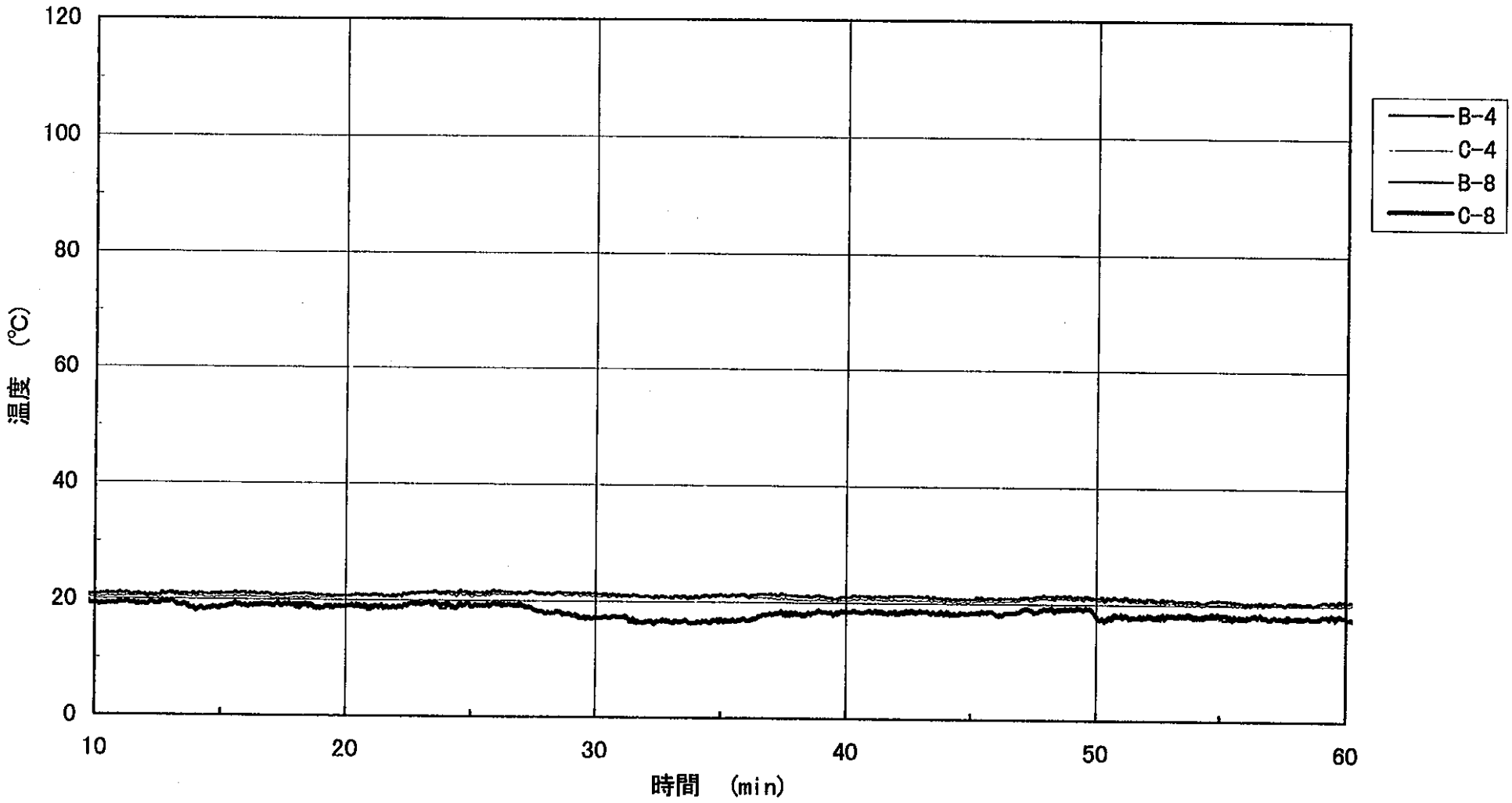
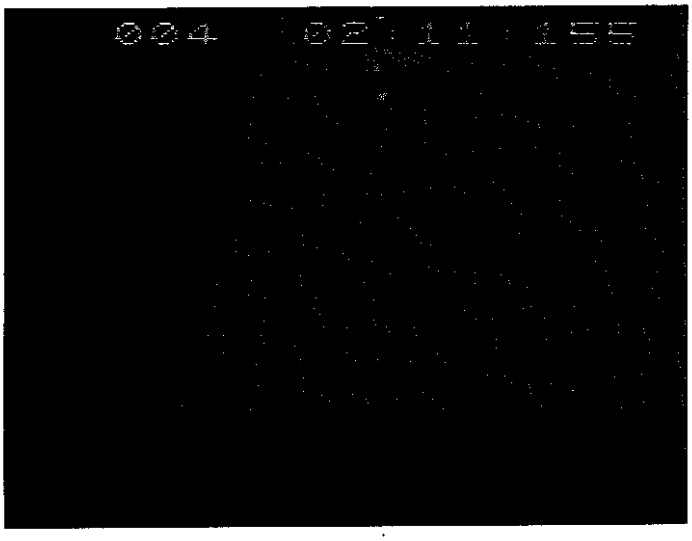


図 3.2-31 滴下試験中の周方向温度分布(大気雰囲気実験, 第1-1回目)

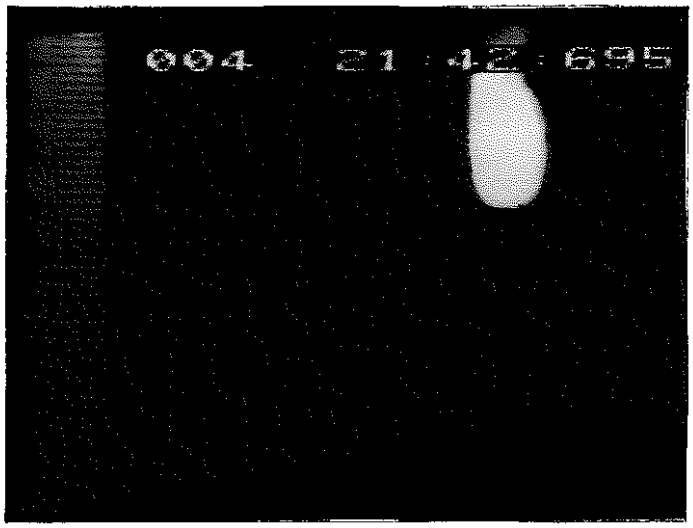
表 3.2-9 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第1-1回目)

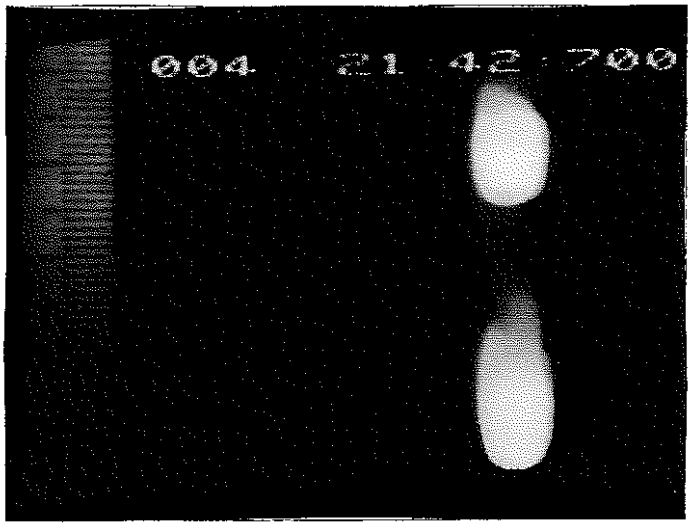
No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.006	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.006	—	—	—		—:時間計測不可
No.3	2.006	48.73	0.02329	3.76		
No.4	2.006	49.77	0.02379	3.79		
No.5	2.006	49.88	0.02384	3.79		
No.6	2.006	50.22	0.02400	3.80		
No.7	2.006	50.35	0.02407	3.81		
No.8	2.006	50.33	0.02406	3.81		
No.9	2.006	50.14	0.02397	3.80		
No.10	2.006	48.54	0.02320	3.76		
No.11	2.006	50.08	0.02394	3.80		
No.12	2.006	50.69	0.02423	3.81		
No.13	2.006	51.72	0.02472	3.84		
No.14	2.006	50.4	0.02409	3.81		
No.15	2.006	51.28	0.02451	3.83		
No.16	2.006	51.5	0.02462	3.83		
No.17	2.006	51.5	0.02462	3.83		
No.18	2.006	51.6	0.02466	3.84		
No.19	2.006	51.67	0.02470	3.84		
No.20	2.006	51.54	0.02463	3.84		
No.21	2.006	51.44	0.02459	3.83		
No.22	2.006	51.57	0.02465	3.84	総Na量(g)	
No.23	2.006	51.55	0.02464	3.84	1.03225	電荷量評価
No.24	2.006	51.6	0.02466	3.84		平均Na量(g): 0.02480
No.25	2.006	51.9	0.02481	3.84	平均Na量(g)	標準偏差(1σ): 0.00075
No.26	2.006	51.63	0.02468	3.84	0.02065	
No.27	2.006	51.75	0.02474	3.84		平均換算径(mm): 3.84
No.28	2.006	52.12	0.02491	3.85	換算径(mm)	標準偏差(1σ): 0.04
No.29	2.006	52.2	0.02495	3.85	3.62	
No.30	2.006	52.09	0.02490	3.85		
No.31	2.006	52.21	0.02496	3.85		
No.32	2.006	52.23	0.02496	3.85		
No.33	2.006	51.87	0.02479	3.84		
No.34	2.006	55	0.02629	3.92		
No.35	2.006	53	0.02533	3.87		
No.36	2.006	53	0.02533	3.87		
No.37	2.006	52.88	0.02528	3.87		
No.38	2.006	52.82	0.02525	3.87		
No.39	2.006	52.8	0.02524	3.87		
No.40	2.006	53.2	0.02543	3.88		
No.41	2.006	53.18	0.02542	3.88		
No.42	2.006	53.36	0.02550	3.88		
No.43	2.006	53.5	0.02557	3.88		
No.44	2.006	53.79	0.02571	3.89		
No.45	2.006	58	0.02772	3.99		
No.46	2.006	52.3	0.02500	3.85		
No.47	2.006	52.42	0.02506	3.86		
No.48	2.006	52.75	0.02521	3.87		
No.49	2.006	52.75	0.02521	3.87		
No.50	2.006	52.08	0.02489	3.85		



液滴No：3
落下距離：67mm
落下間隔：50ms
落下速度：1.3m/S

写真 3.2-13 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第１回目-1)





液滴No：26
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

写真 3.2-14　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-1)

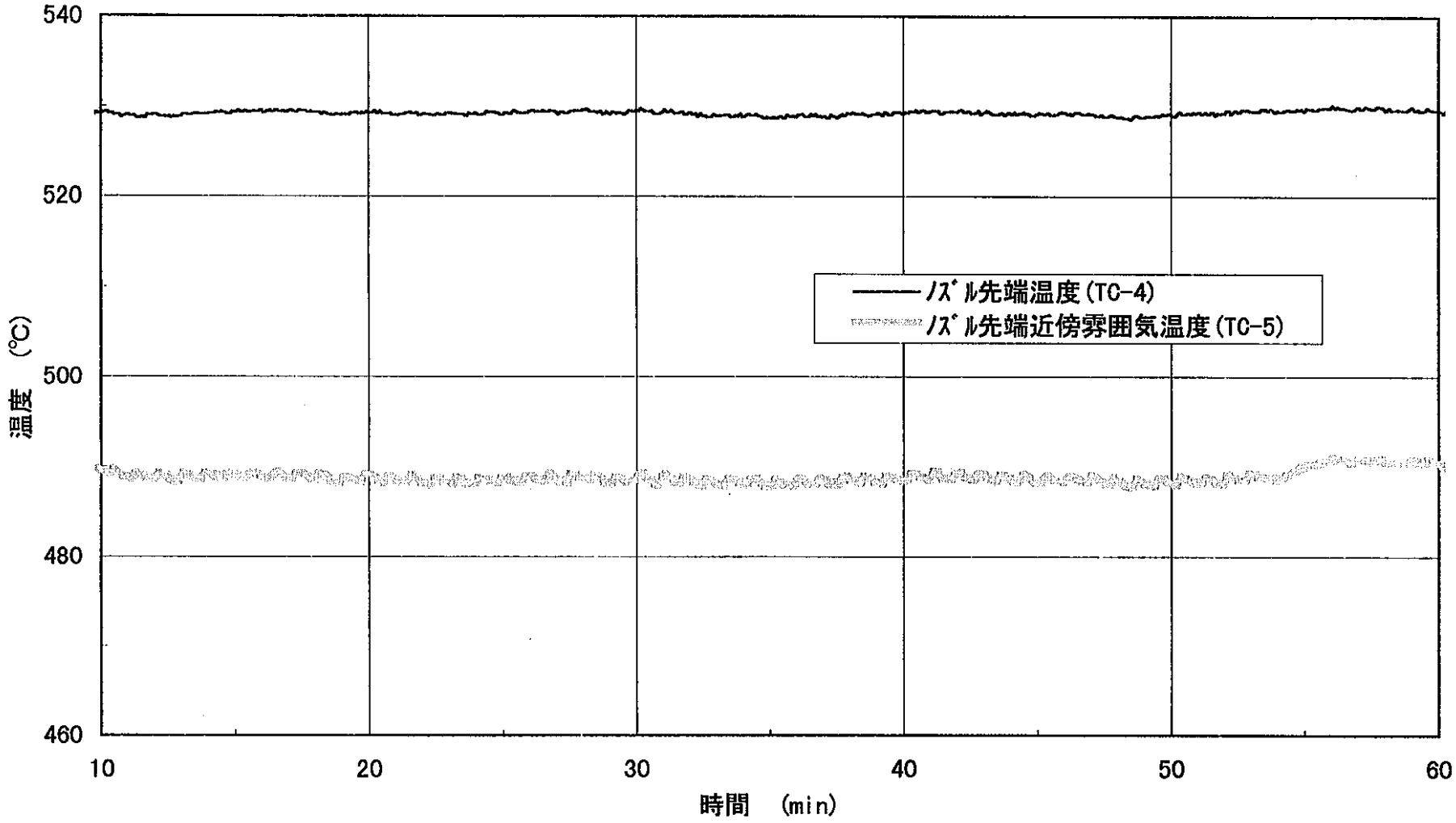


図 3.2-32 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験、第1-2回目)

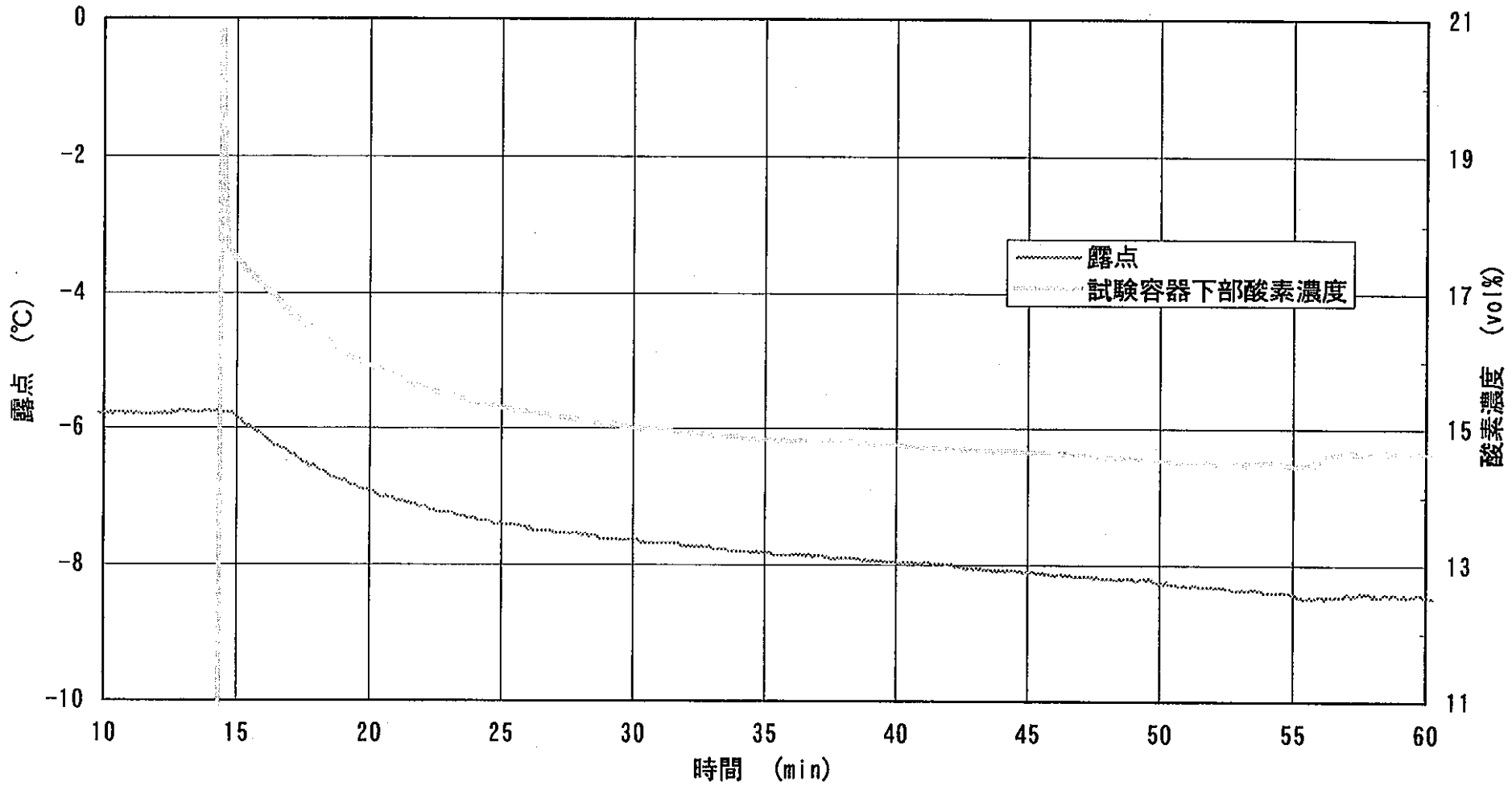


図 3.2-33 滴下試験中の酸素濃度及び露点(大気試験雰囲気実験,第1-2回目)

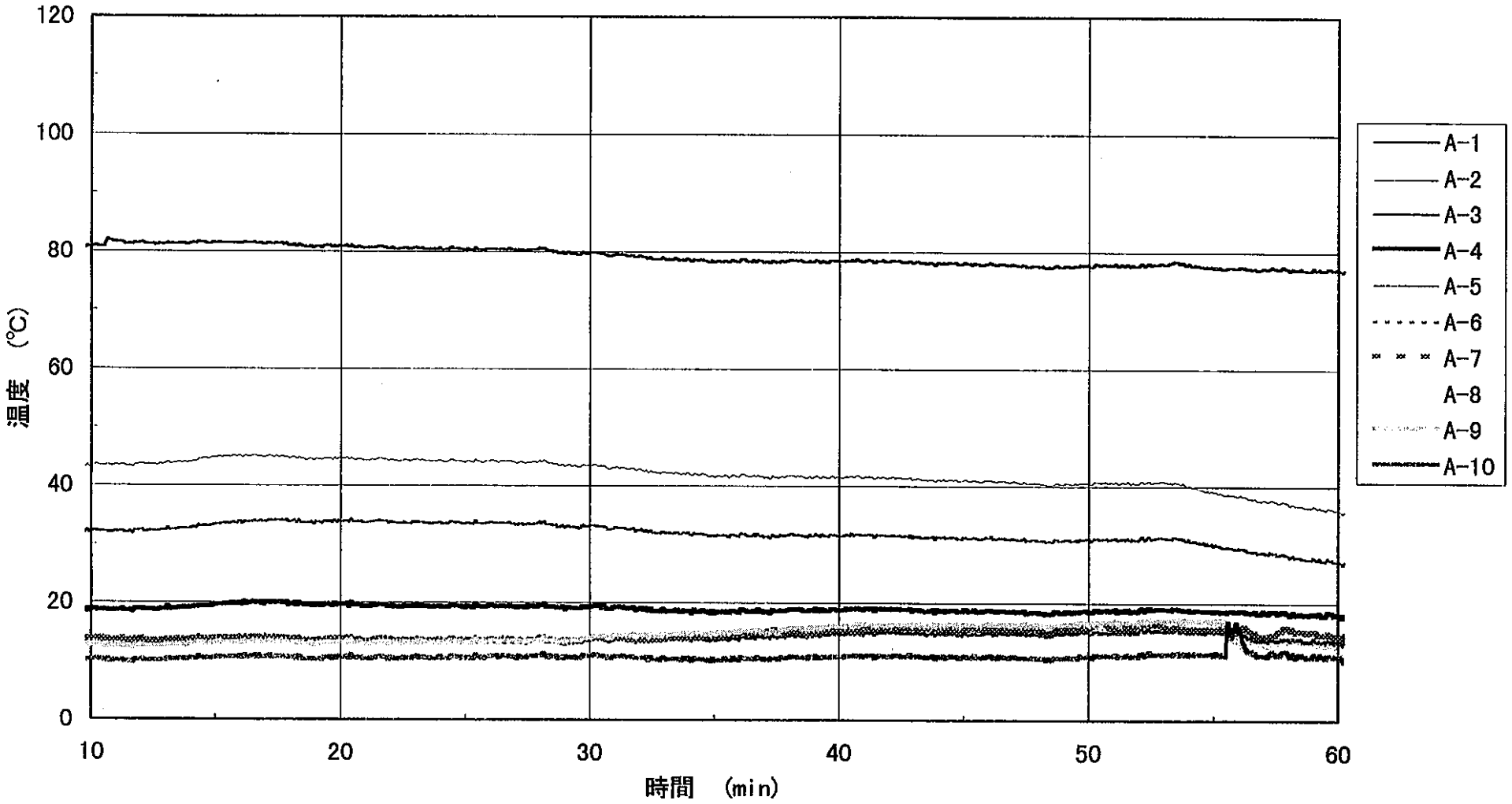


図 3.2-34 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第1-2回目)

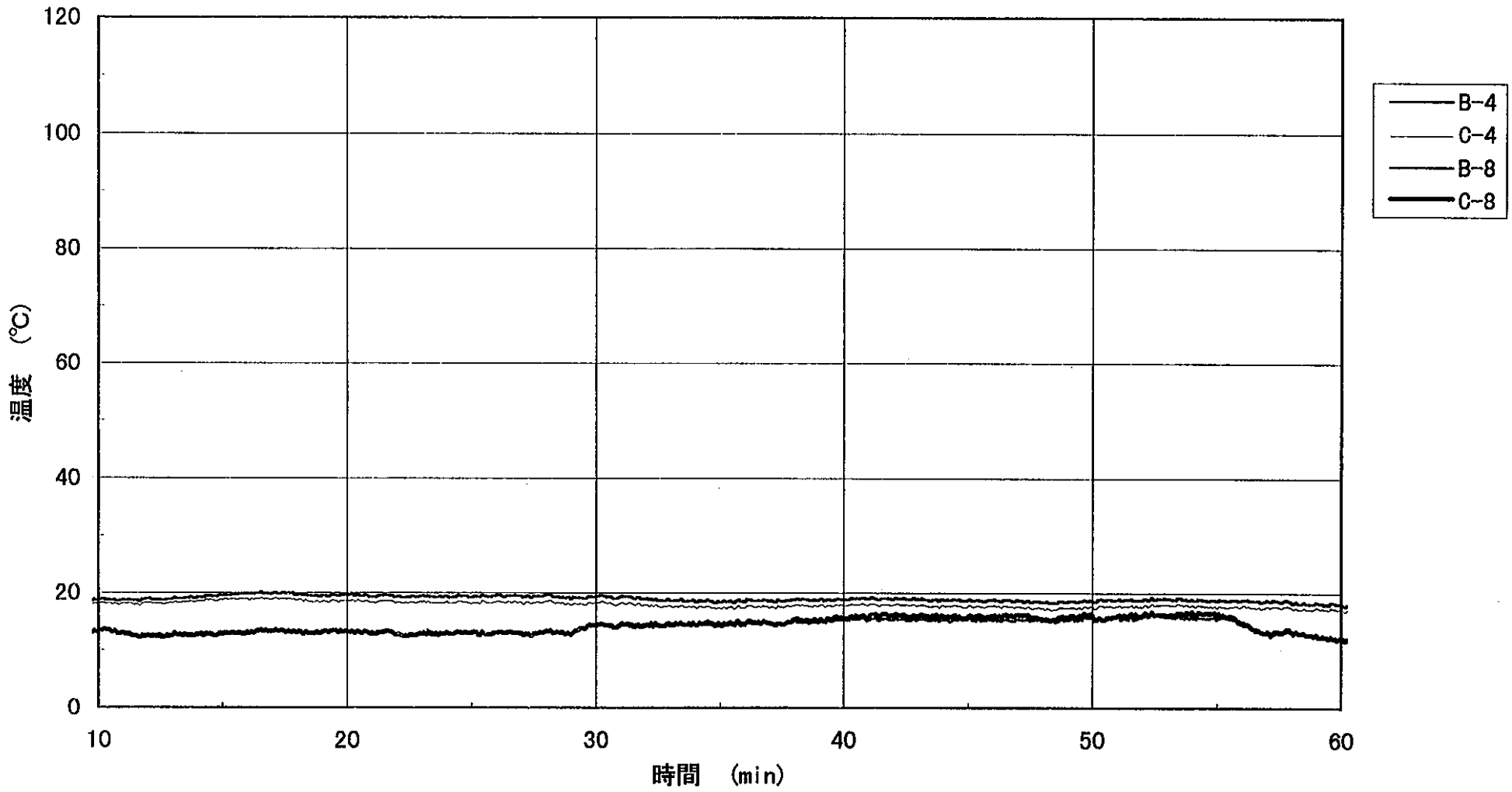
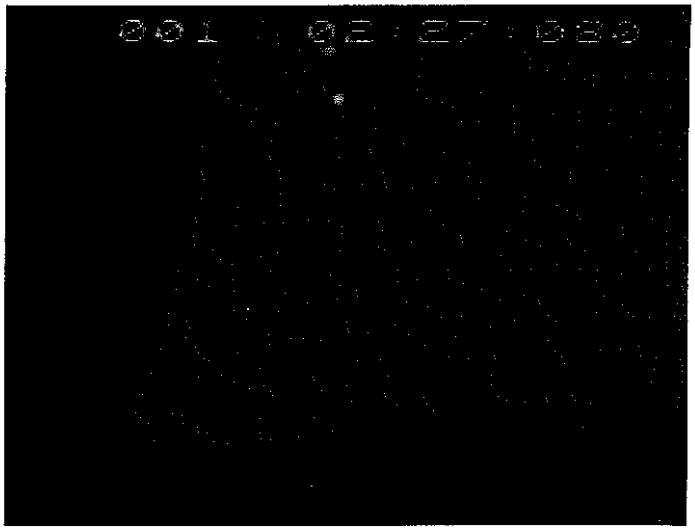
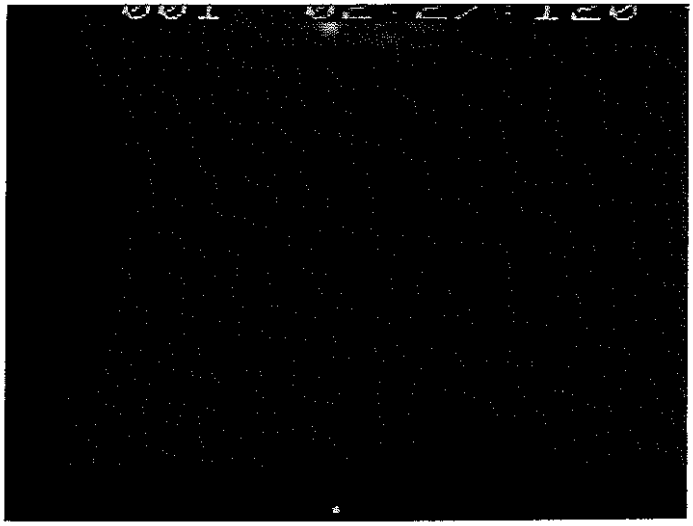


図 3.2-35 滴下試験中の周方向分布(大気雰囲気実験, 第1-2回目)

表 3.2-10 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第1-2回目)

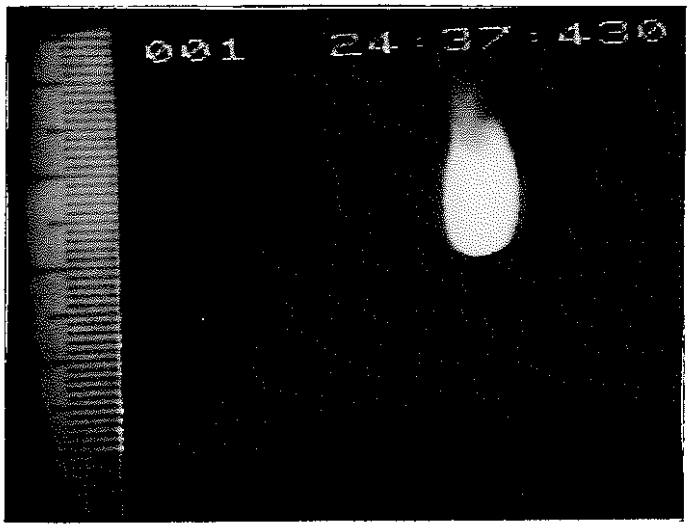
No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.006	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.006	50.78	0.02427	3.82		
No.3	2.006	50.5	0.02414	3.81		
No.4	2.006	50.6	0.02419	3.81		
No.5	2.006	51.8	0.02476	3.84		
No.6	2.006	51.1	0.02442	3.82		
No.7	2.006	51.18	0.02446	3.83		
No.8	2.006	51.08	0.02441	3.82		
No.9	2.006	51.58	0.02465	3.84		
No.10	2.006	52.44	0.02506	3.86		
No.11	2.006	51.72	0.02472	3.84		
No.12	2.006	51.5	0.02462	3.83		電荷量評価
No.13	2.006	51.37	0.02455	3.83		平均Na量(g): 0.02437
No.14	2.006	51.29	0.02452	3.83		標準偏差(1σ): 0.00045
No.15	2.006	50.94	0.02435	3.82		
No.16	2.006	50.72	0.02424	3.81		平均換算径(mm): 3.82
No.17	2.006	51.12	0.02443	3.82		標準偏差(1σ): 0.02
No.18	2.006	51	0.02438	3.82		
No.19	2.006	51.06	0.02441	3.82		
No.20	2.006	51.12	0.02443	3.82		
No.21	2.006	50.98	0.02437	3.82		
No.22	2.006	—	—	—	総Na量(g)	—:時間計測不可
No.23	2.006	—	—	—	1.06977	—:時間計測不可
No.24	2.006	—	—	—		—:時間計測不可
No.25	2.006	51	0.02438	3.82	平均Na量(g)	
No.26	2.006	51.18	0.02446	3.83	0.02140	
No.27	2.006	50.9	0.02433	3.82		
No.28	2.006	50.7	0.02423	3.81	換算径(mm)	
No.29	2.006	50.7	0.02423	3.81	3.66	
No.30	2.006	50.8	0.02428	3.82		
No.31	2.006	50.8	0.02428	3.82		
No.32	2.006	51	0.02438	3.82		
No.33	2.006	50.8	0.02428	3.82		
No.34	2.006	50.9	0.02433	3.82		
No.35	2.006	50.5	0.02414	3.81		
No.36	2.006	50.61	0.02419	3.81		
No.37	2.006	50.99	0.02437	3.82		
No.38	2.006	50.82	0.02429	3.82		
No.39	2.006	50.78	0.02427	3.82		
No.40	2.006	54.8	0.02619	3.91		
No.41	2.006	46.7	0.02232	3.71		
No.42	2.006	50.62	0.02420	3.81		
No.43	2.006	50.86	0.02431	3.82		
No.44	2.006	50.74	0.02425	3.82		
No.45	2.006	50.78	0.02427	3.82		
No.46	2.006	50.71	0.02424	3.81		
No.47	2.006	50.86	0.02431	3.82		
No.48	2.006	50.73	0.02425	3.82		
No.49	2.006	50.8	0.02428	3.82		
No.50	2.006	50.62	0.02420	3.81		

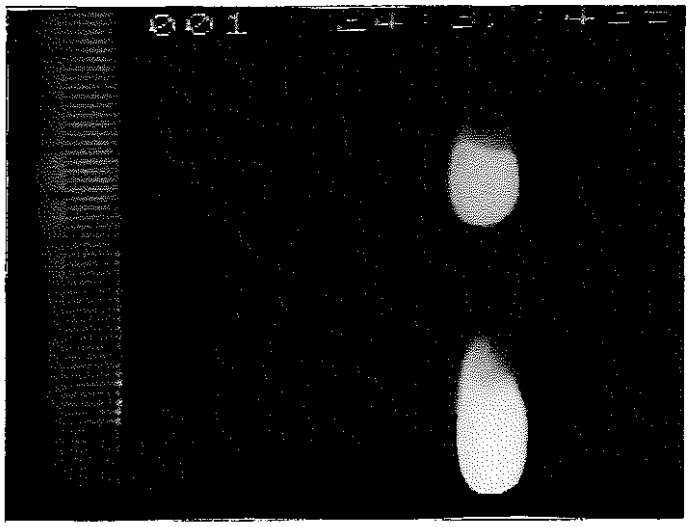




液滴No：3
落下距離：53mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.3m/S

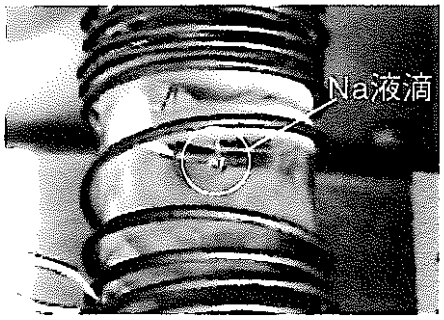
写真 3.2-15 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第１回目-2)



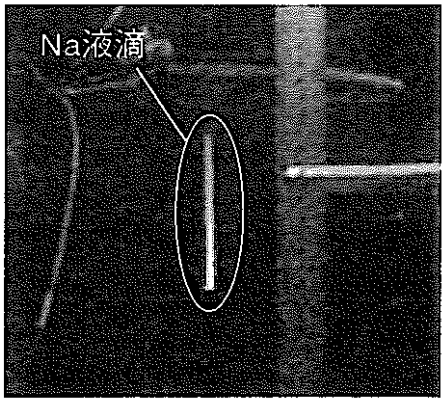


液滴No：29
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

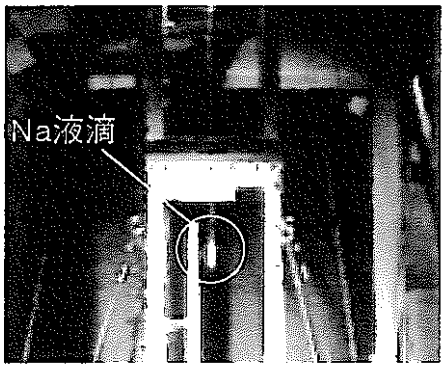
写真 3.2-16　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)



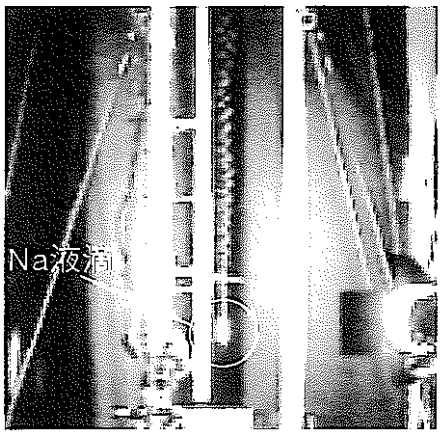
a．Na液滴生成状況



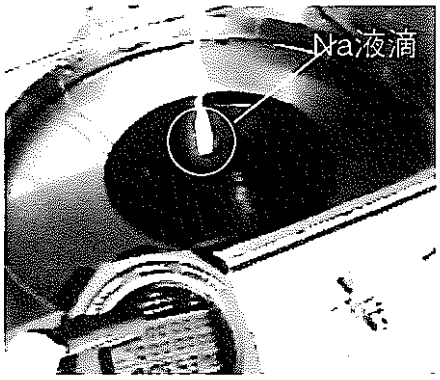
b．Na液滴落下状況
（架台上部）



c．Na液滴落下状況
（容器上部）

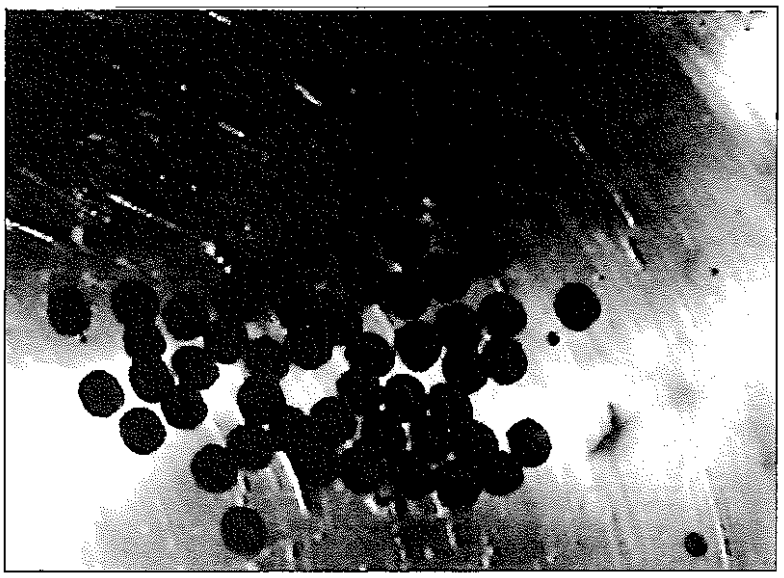


d．Na液滴落下状況
（容器下部）

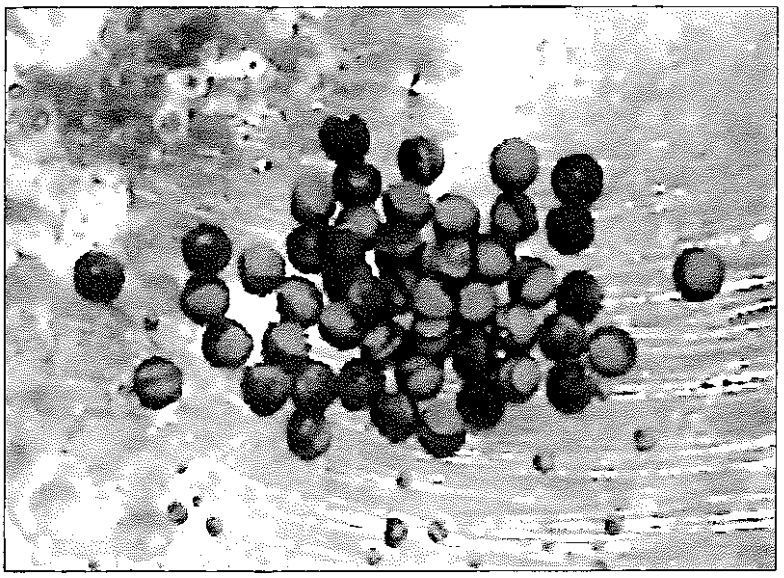


e．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによる
Na液滴の回収状況

写真 3.2-17 大気雰囲気実験（第２回目）



大気雰囲気実験，第2-1回目



大気雰囲気実験，第2-2回目

写真 3.2-18　回収したNa粒子

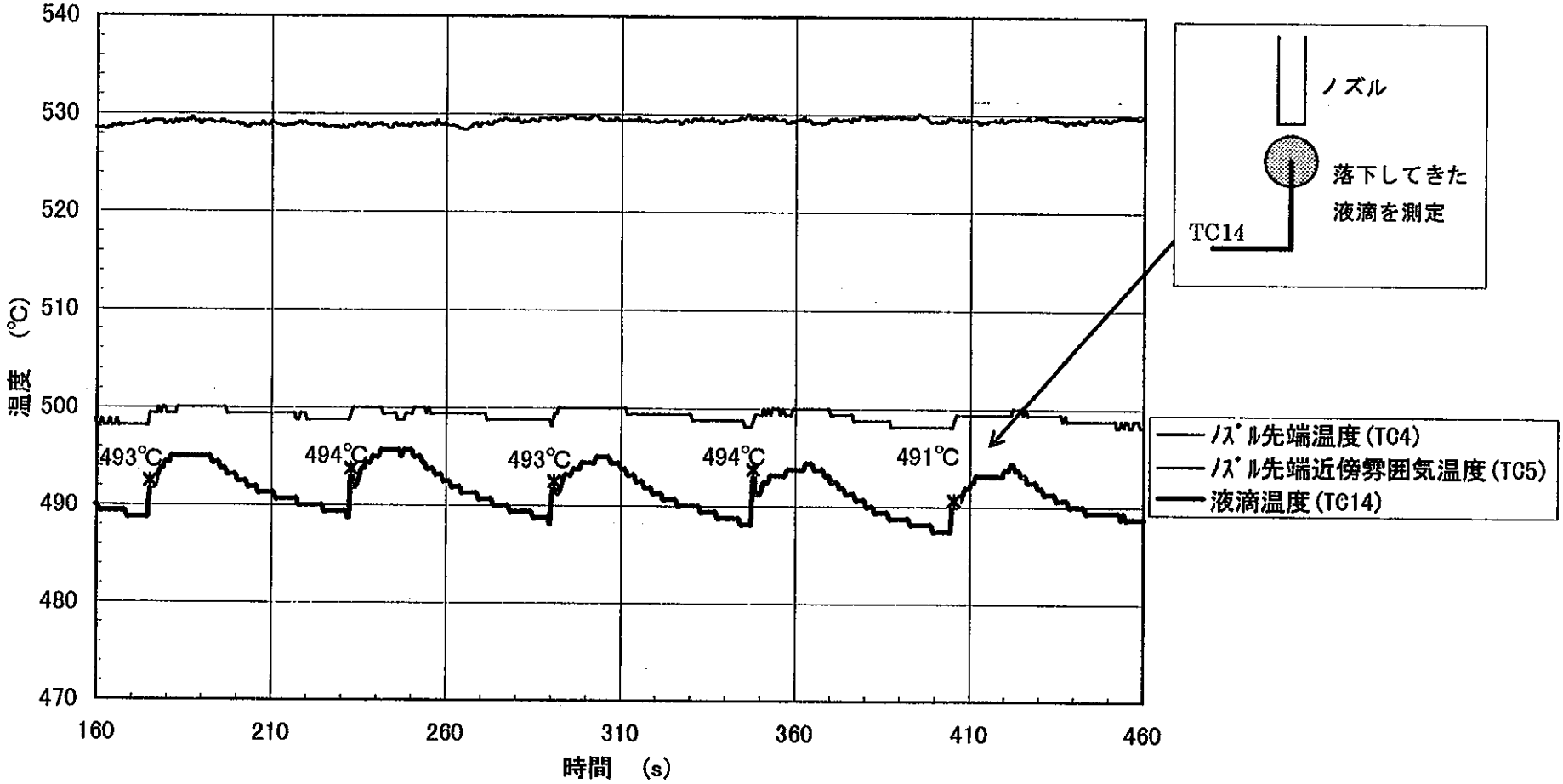


図 3.2-36 滴下Na温度(大気雰囲気実験, 第2回目)

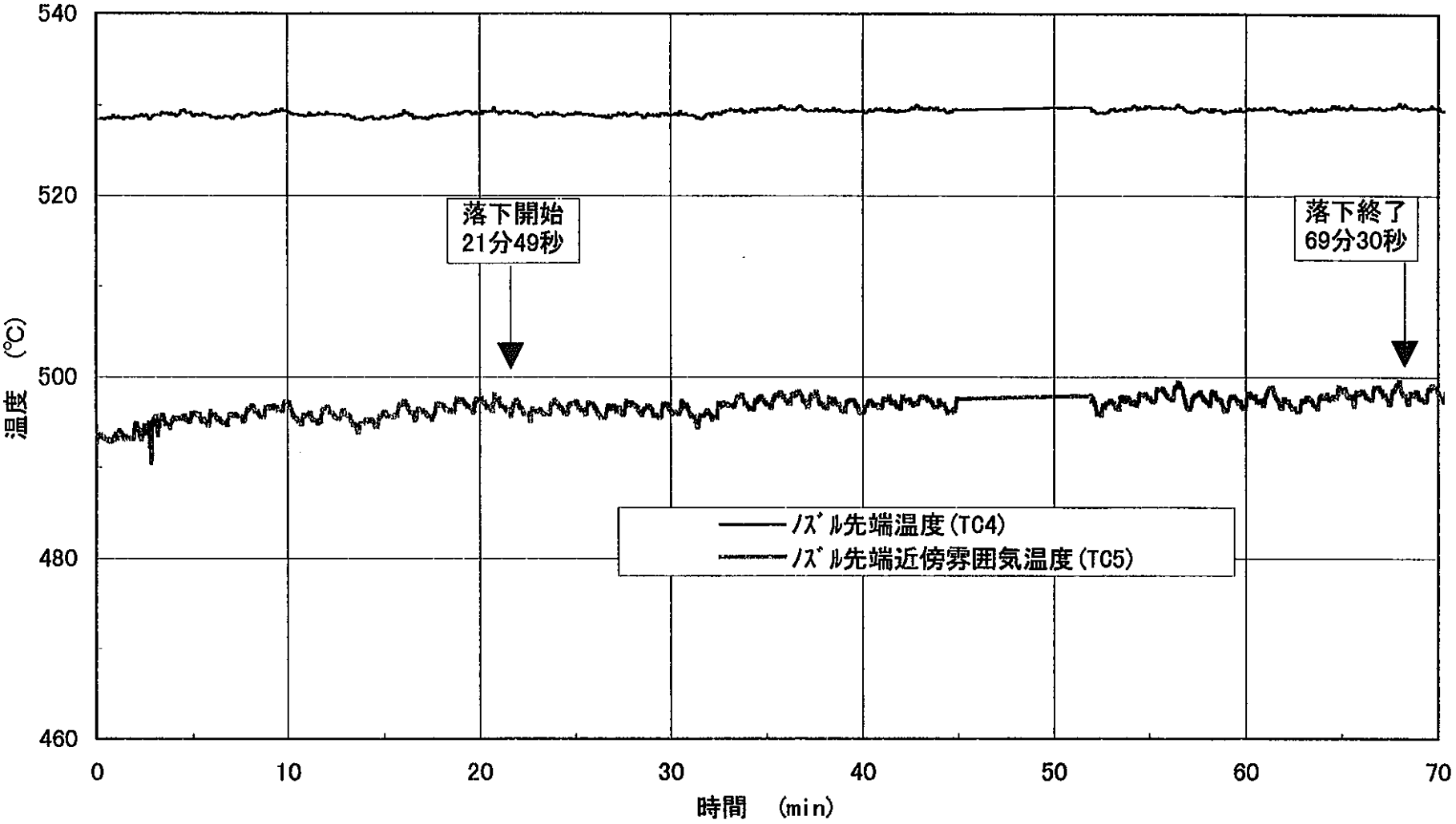


図 3.2-37 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験，第２－１回目)

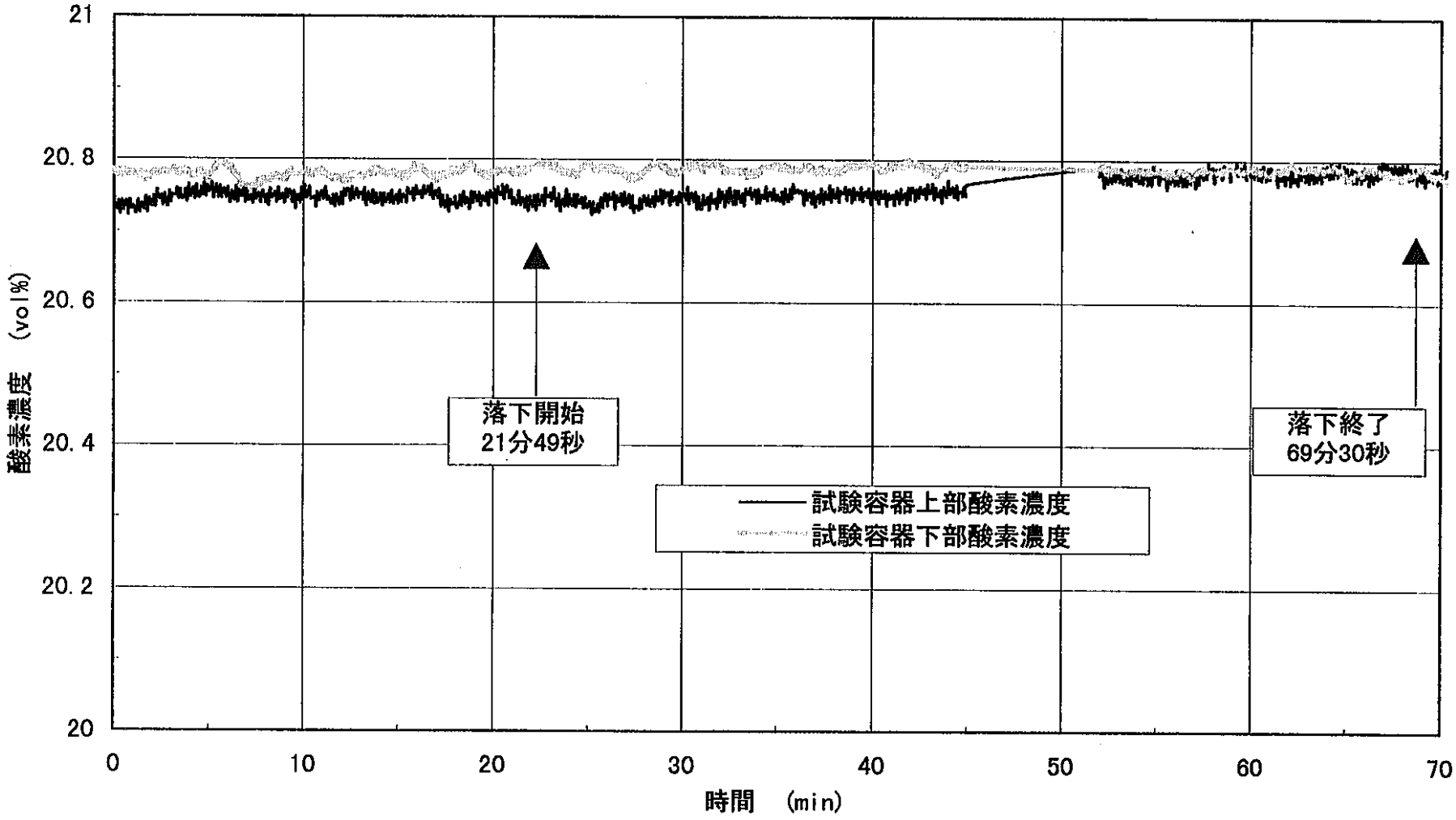


図 3.2-38 滴下試験中の酸素濃度(大気雰囲気実験, 第2-1回目)

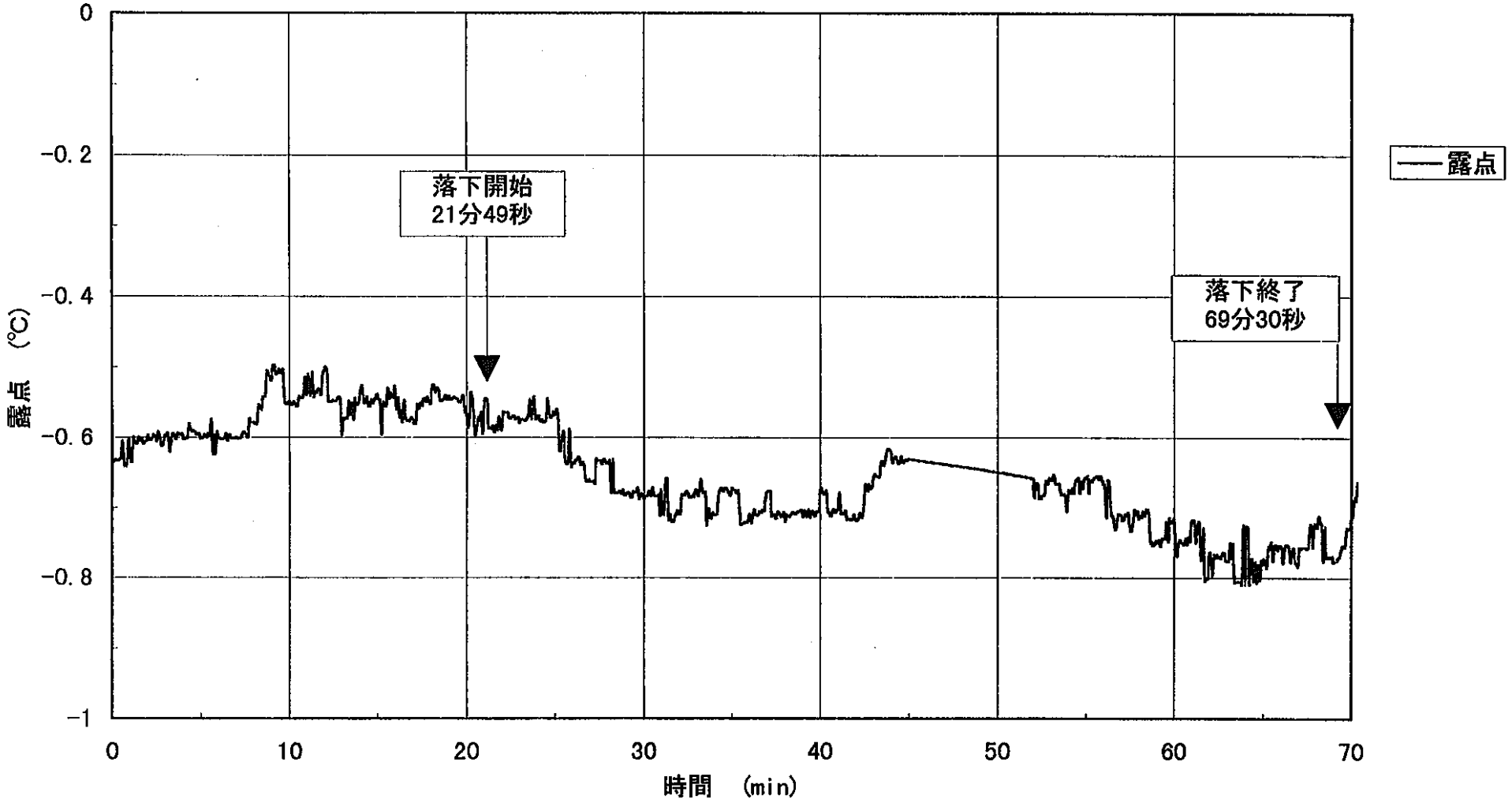


図 3.2-39 滴下試験中の露点(大気雰囲気実験, 第2-1回目)

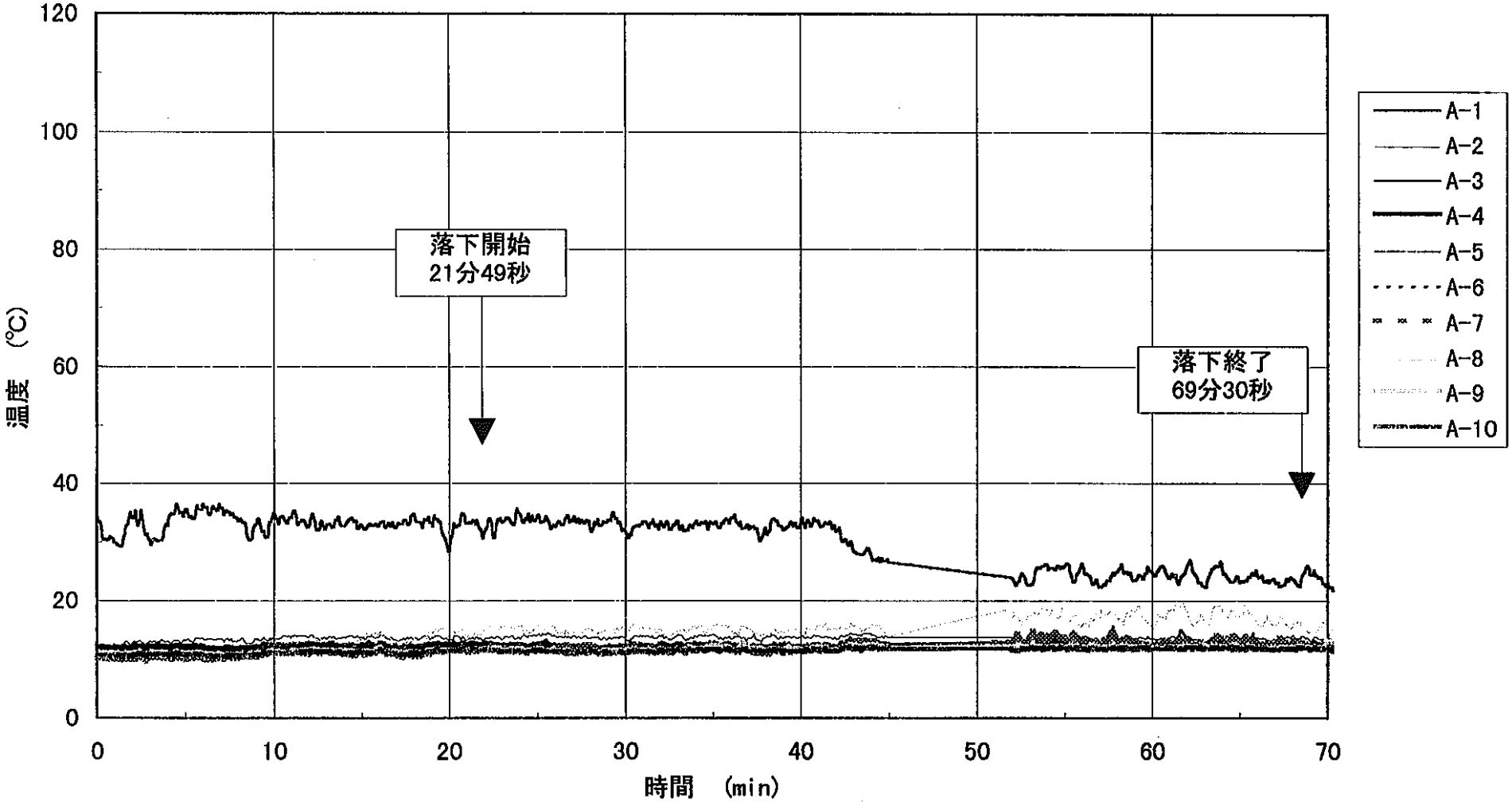


図 3.2-40 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第2-1回目)

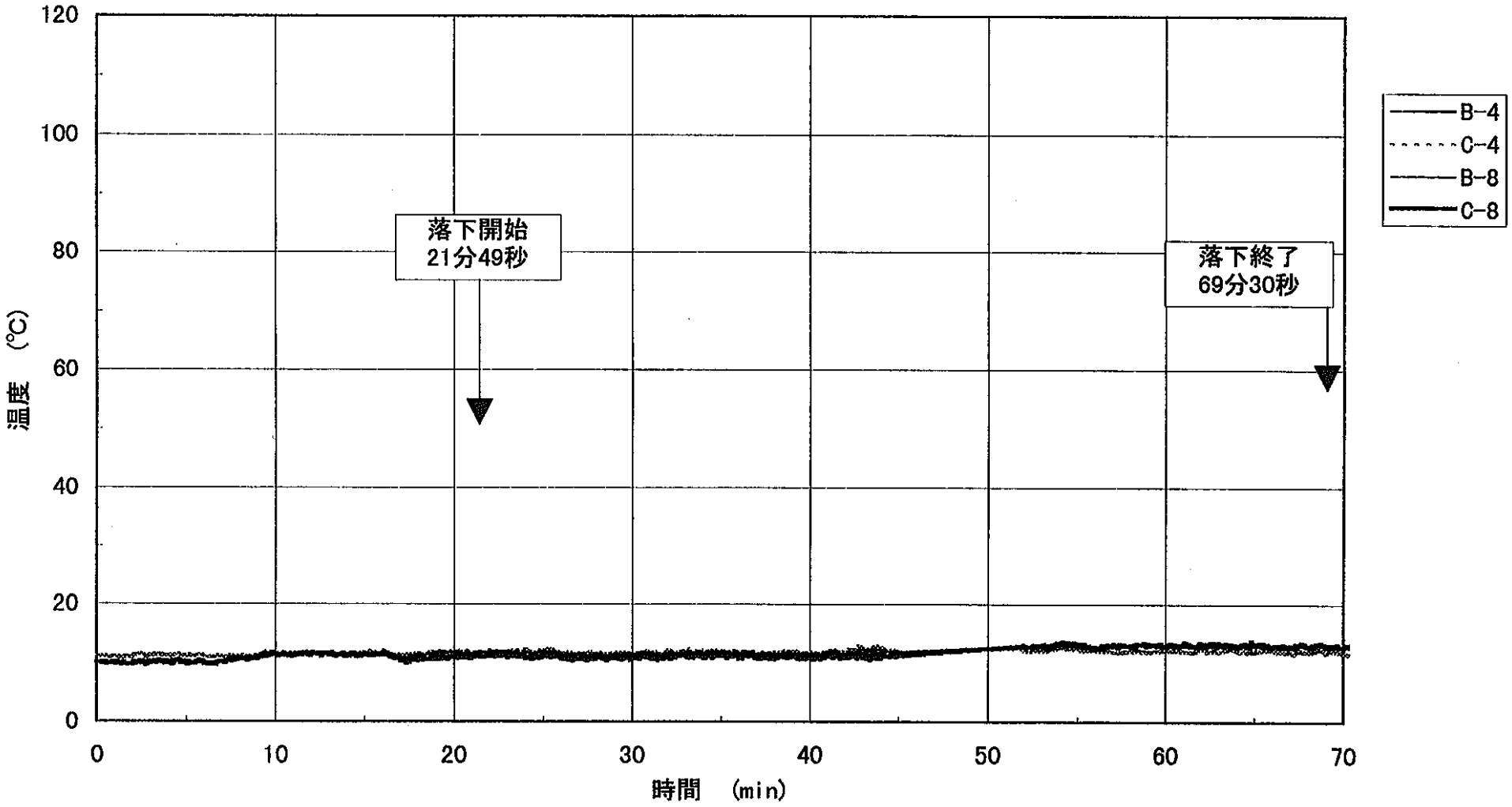
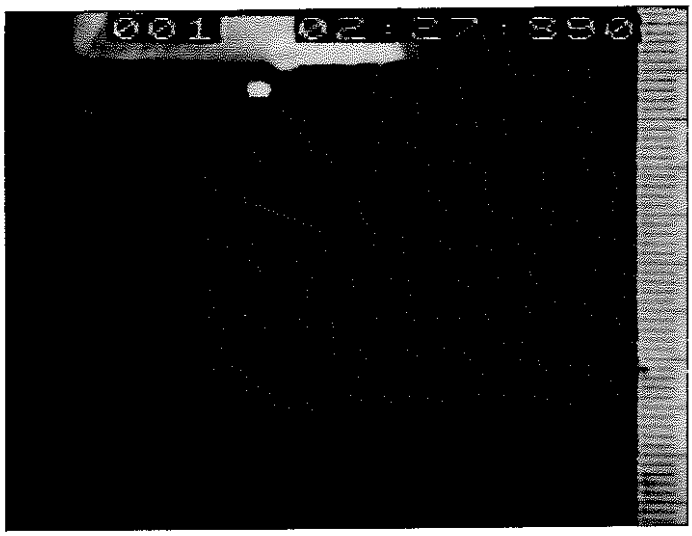
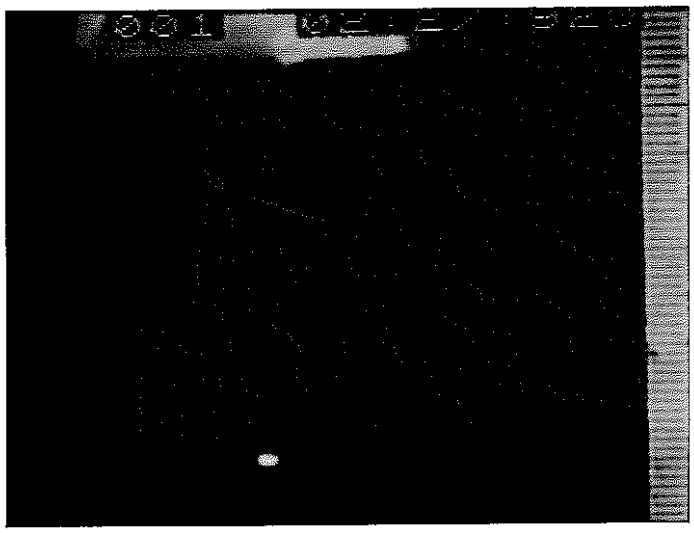


図 3.2-41 滴下試験中の周方向温度分布(大気雰囲気実験, 第2-1回目)

表 3.2-11 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第2-1回目)

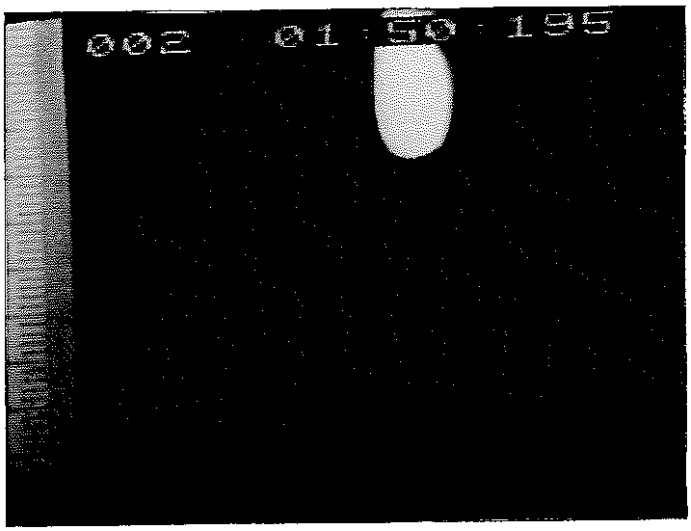
No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.018	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.018	58.8	0.02827	4.02		
No.3	2.018	58.2	0.02798	4.00		
No.4	2.018	58.4	0.02808	4.01		
No.5	2.018	59.6	0.02866	4.03		
No.6	2.018	58.9	0.02832	4.02		
No.7	2.018	58.9	0.02832	4.02		
No.8	2.018	58.5	0.02813	4.01		
No.9	2.018	58.4	0.02808	4.01		
No.10	2.018	58.3	0.02803	4.00		
No.11	2.018	57.7	0.02774	3.99		
No.12	2.018	57.1	0.02746	3.98		
No.13	2.018	57.5	0.02765	3.99		
No.14	2.018	57.5	0.02765	3.99		
No.15	2.018	57.6	0.02770	3.99		
No.16	2.018	57.2	0.02750	3.98		
No.17	2.018	57.4	0.02760	3.98		
No.18	2.018	57.4	0.02760	3.98		
No.19	2.018	57.1	0.02746	3.98		
No.20	2.018	57.1	0.02746	3.98		
No.21	2.018	56.9	0.02736	3.97		
No.22	2.018	58.3	0.02803	4.00	総Na量(g)	電荷量評価
No.23	2.018	57.9	0.02784	3.99	1.11743	平均Na量(g): 0.02753
No.24	2.018	57.7	0.02774	3.99		標準偏差(1σ): 0.00042
No.25	2.018	57.3	0.02755	3.98	平均Na量(g)	
No.26	2.018	57.3	0.02755	3.98	0.02235	平均換算径(mm): 3.98
No.27	2.018	57.1	0.02746	3.98		標準偏差(1σ): 0.02
No.28	2.018	57.3	0.02755	3.98	換算径(mm)	
No.29	2.018	57.5	0.02765	3.99	3.71	
No.30	2.018	57.7	0.02774	3.99		
No.31	2.018	56.4	0.02712	3.96		
No.32	2.018	56.8	0.02731	3.97		
No.33	2.018	56.6	0.02722	3.96		
No.34	2.018	56.8	0.02731	3.97		
No.35	2.018	56.4	0.02712	3.96		
No.36	2.018	56.5	0.02717	3.96		
No.37	2.018	56.5	0.02717	3.96		
No.38	2.018	56.9	0.02736	3.97		
No.39	2.018	56.9	0.02736	3.97		
No.40	2.018	56.1	0.02697	3.95		
No.41	2.018	55.8	0.02683	3.95		
No.42	2.018	56.5	0.02717	3.96		
No.43	2.018	56	0.02693	3.95		
No.44	2.018	56.1	0.02697	3.95		
No.45	2.018	56.3	0.02707	3.96		
No.46	2.018	57.1	0.02746	3.98		
No.47	2.018	56.3	0.02707	3.96		
No.48	2.018	56.2	0.02702	3.96		
No.49	2.018	56.4	0.02712	3.96		
No.50	2.018	56.3	0.02707	3.96		

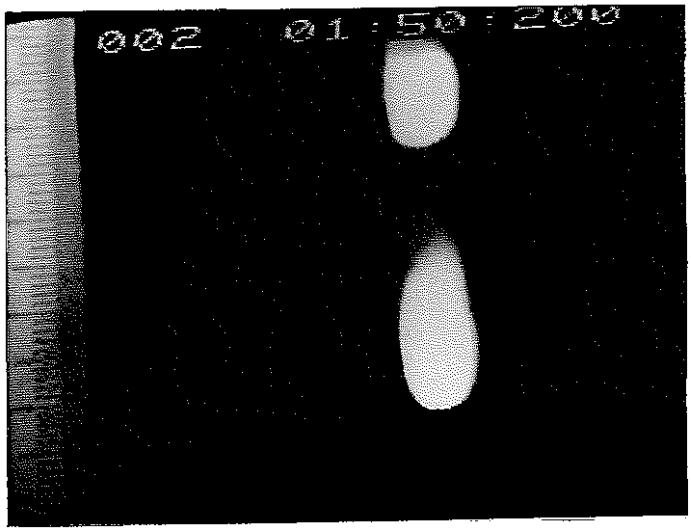




液滴No：3
落下距離：38.5mm
落下間隔：30ms
落下速度：1.3m/S

写真 3.2-19 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第２回目-1）





液滴No：29
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

写真 3.2-20　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)

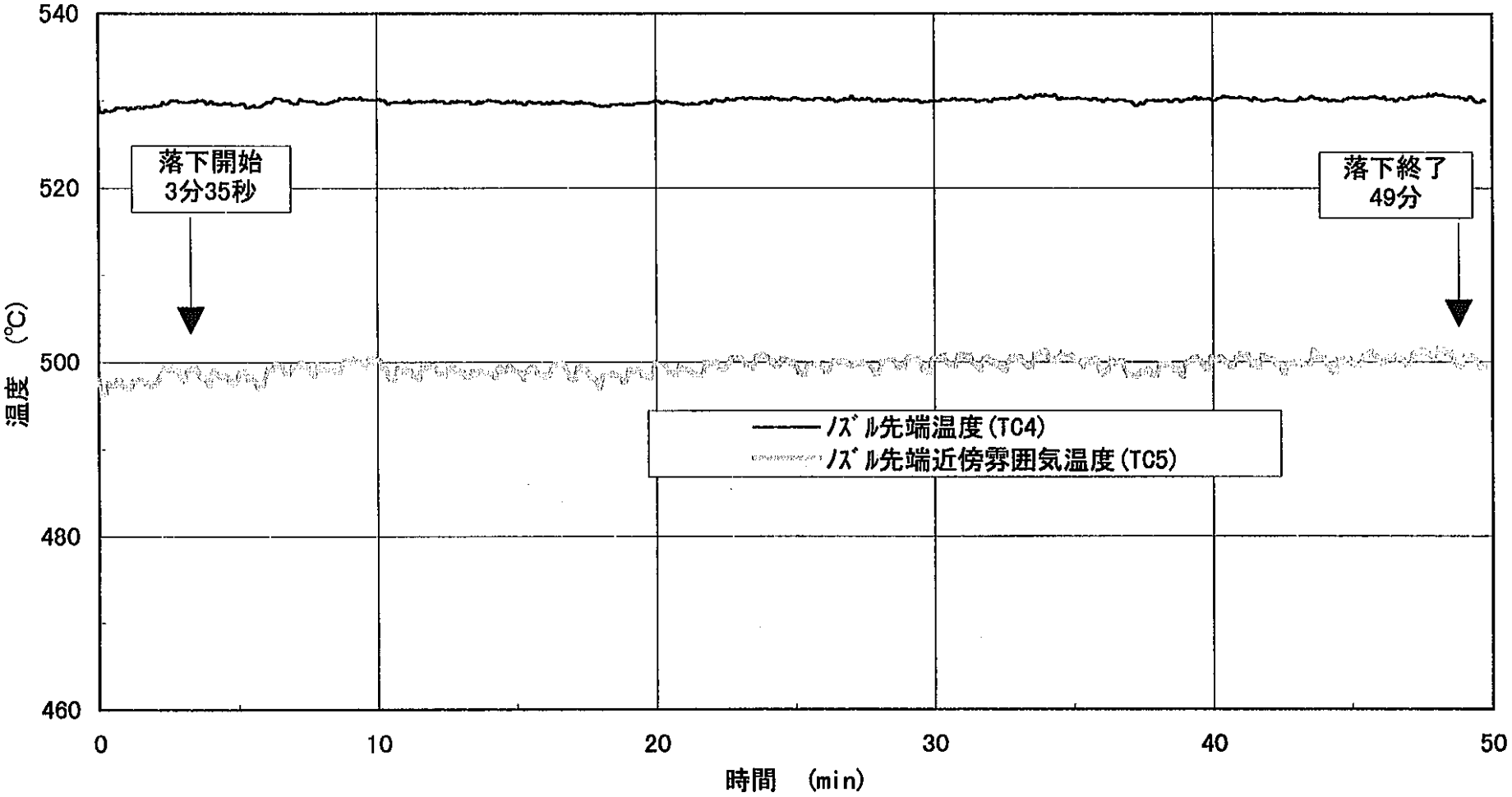


図 3.2-42 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

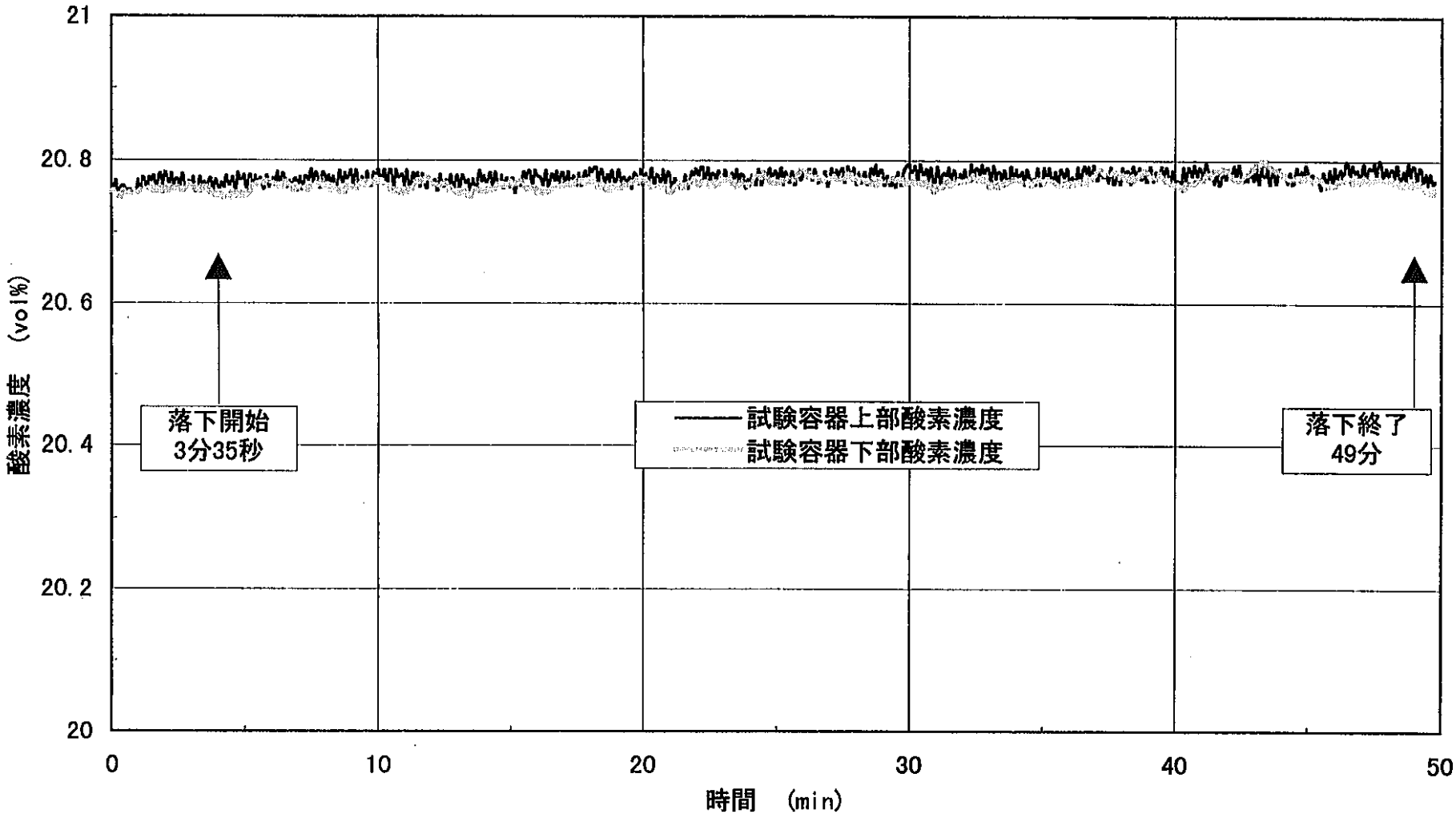


図 3.2-43 滴下試験中の酸素濃度(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

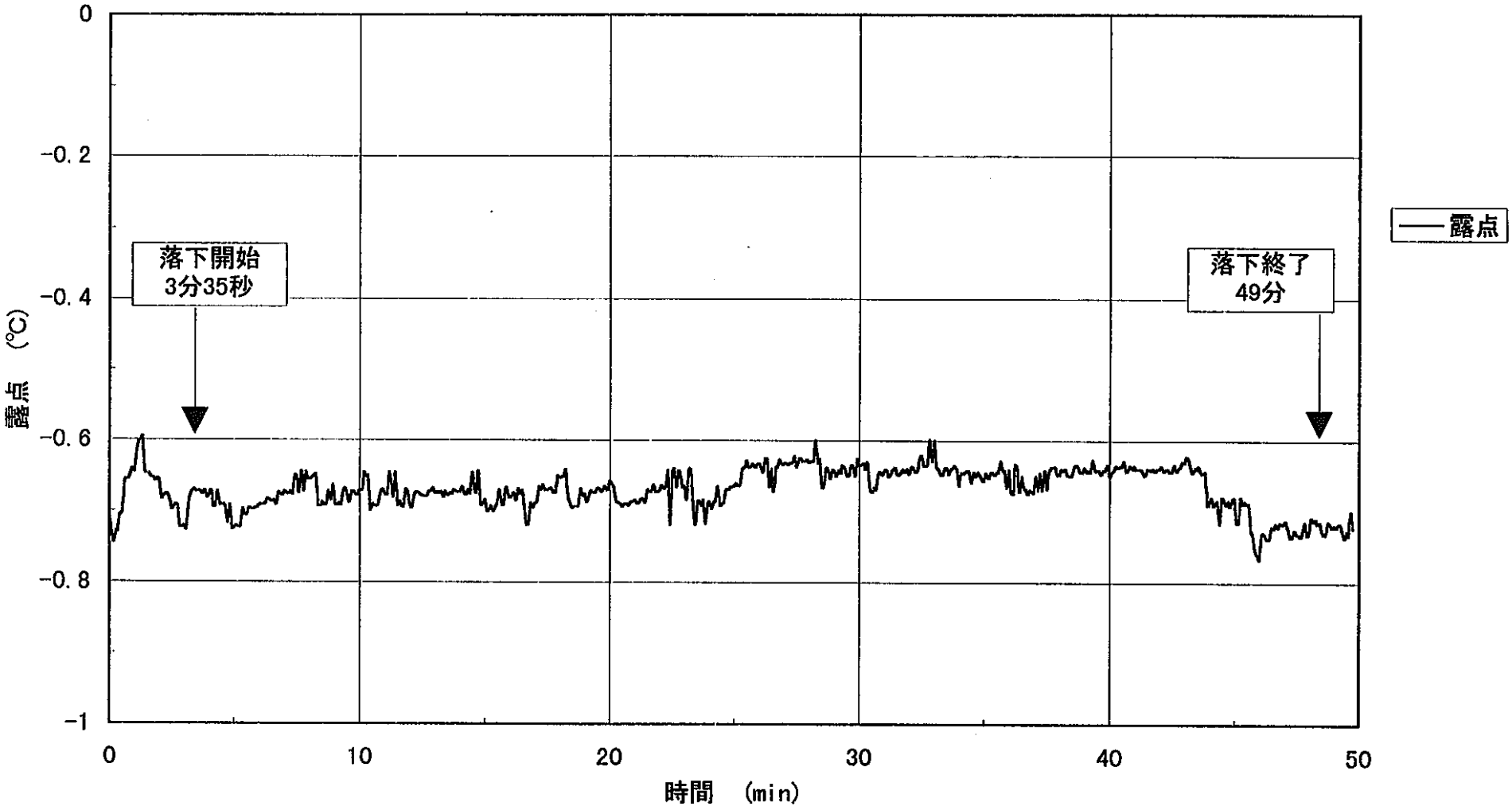


図 3.2-44 滴下試験中のノズル近傍露点(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

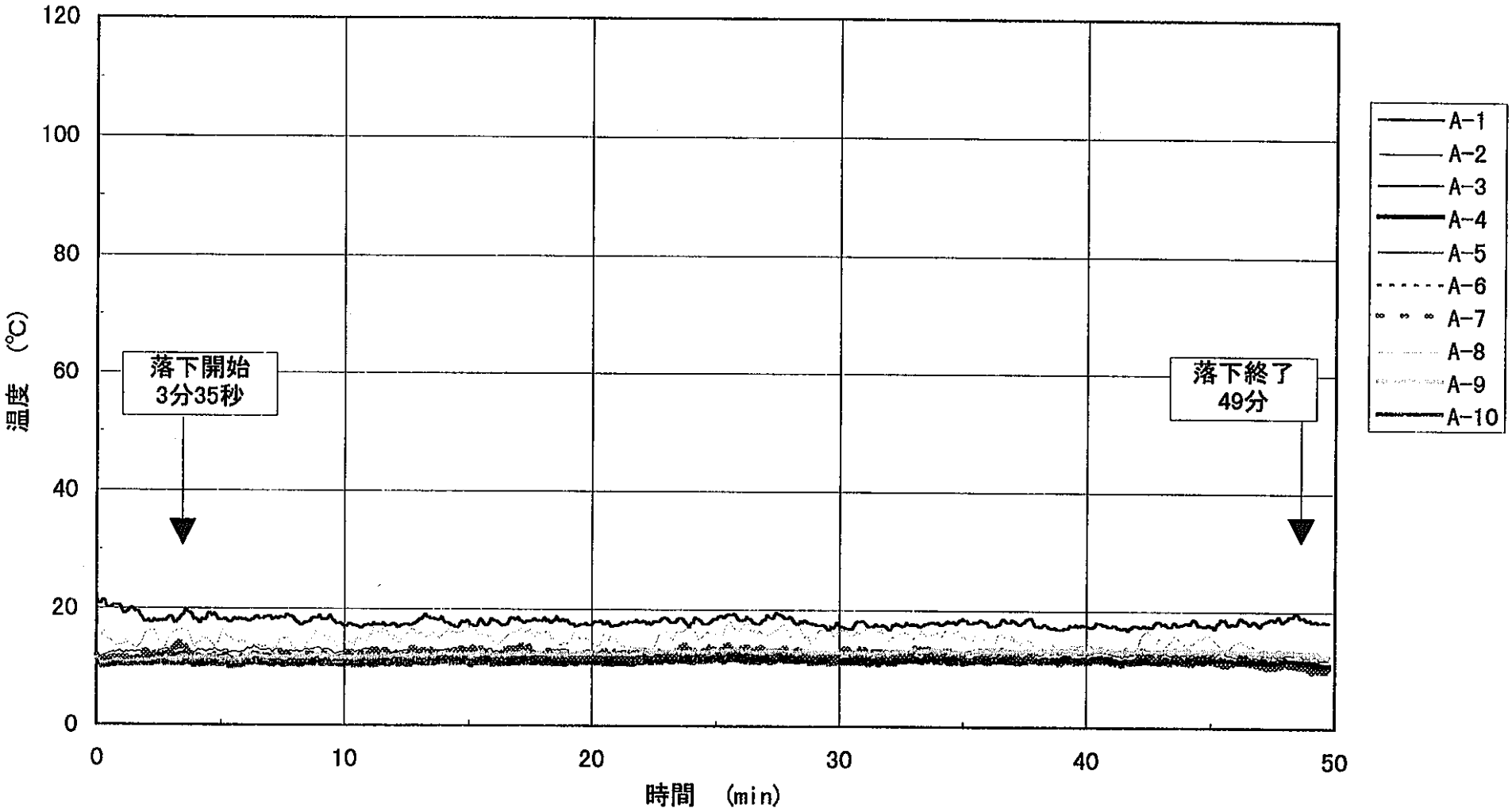


図 3.2-45 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

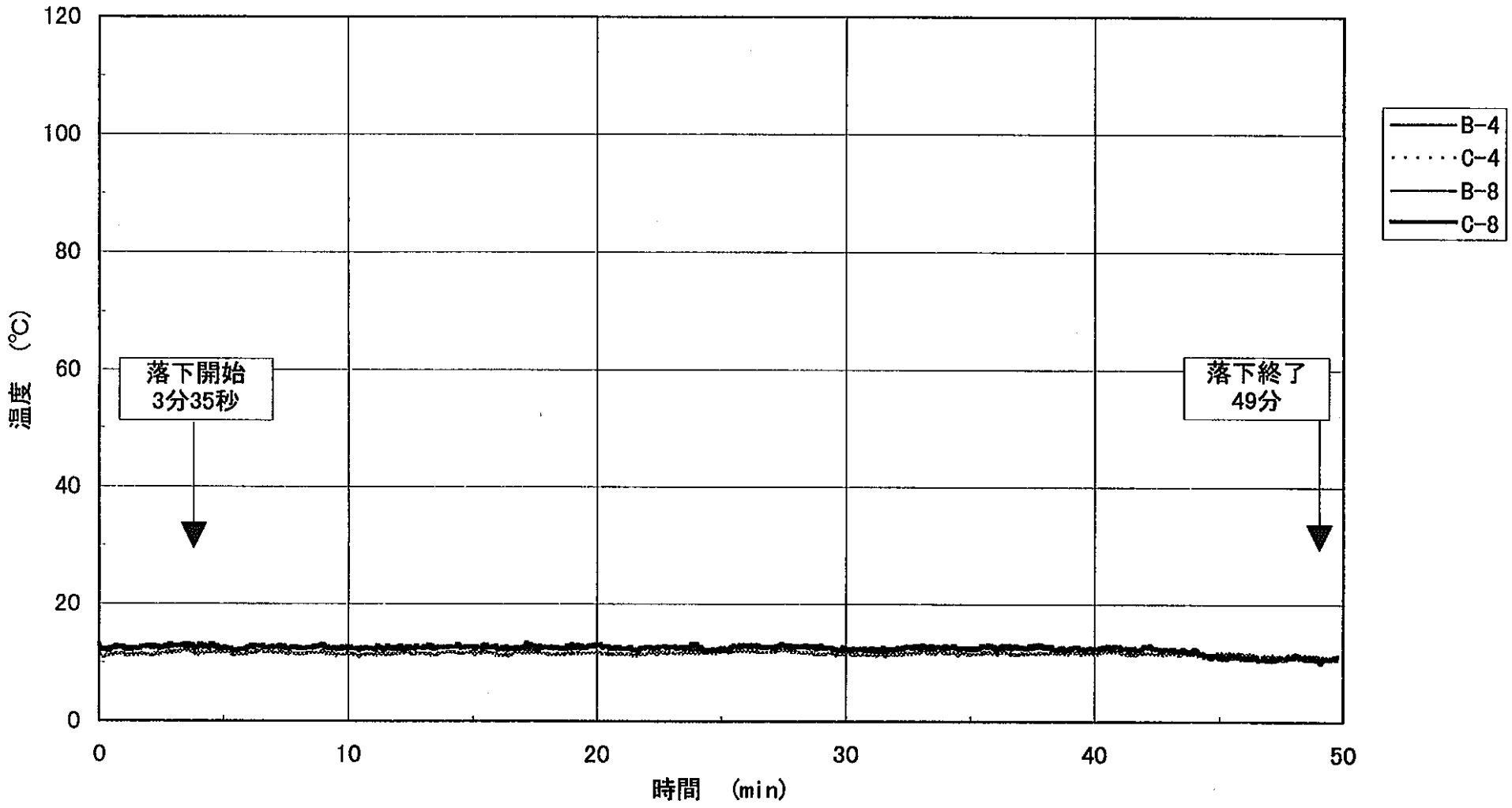
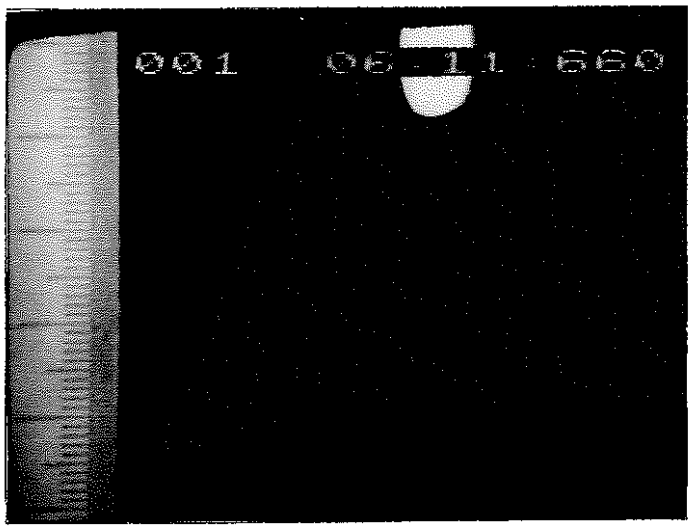
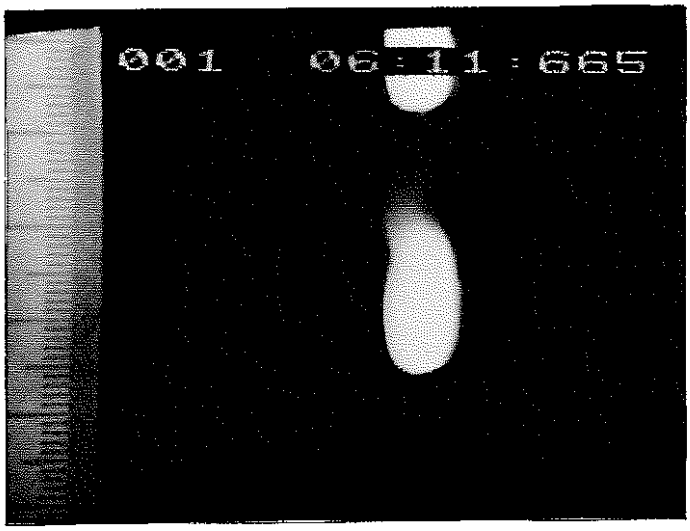


図 3.2-46 滴下試験中の周方向温度分布(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

表 3.2-12 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第2-2回目)

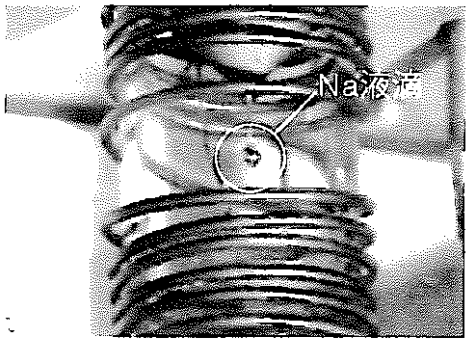
No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.018	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.018	52.8	0.02539	3.87		
No.3	2.018	60.1	0.02890	4.04		
No.4	2.018	56.2	0.02702	3.96		
No.5	2.018	56.1	0.02697	3.95		
No.6	2.018	55.9	0.02688	3.95		
No.7	2.018	56	0.02693	3.95		
No.8	2.018	56.4	0.02712	3.96		
No.9	2.018	56.1	0.02697	3.95		
No.10	2.018	56.2	0.02702	3.96		
No.11	2.018	55.9	0.02688	3.95		
No.12	2.018	51.2	0.02462	3.83		
No.13	2.018	59.9	0.02880	4.04		
No.14	2.018	56	0.02693	3.95		
No.15	2.018	54.5	0.02621	3.92		
No.16	2.018	54.7	0.02630	3.92		
No.17	2.018	54.9	0.02640	3.92		
No.18	2.018	55.2	0.02654	3.93		
No.19	2.018	55	0.02645	3.93		
No.20	2.018	55	0.02645	3.93		
No.21	2.018	55.2	0.02654	3.93		
No.22	2.018	54.8	0.02635	3.92	総Na量(g)	
No.23	2.018	54.8	0.02635	3.92	1.07484	電荷量評価
No.24	2.018	55.2	0.02654	3.93		平均Na量(g): 0.02644
No.25	2.018	54.8	0.02635	3.92	平均Na量(g)	標準偏差(1σ): 0.00066
No.26	2.018	54.6	0.02625	3.92	0.02150	
No.27	2.018	54.5	0.02621	3.92		平均換算径(mm): 3.93
No.28	2.018	54.8	0.02635	3.92	換算径(mm)	標準偏差(1σ): 0.03
No.29	2.018	54.6	0.02625	3.92	3.67	
No.30	2.018	53.9	0.02592	3.90		
No.31	2.018	55.5	0.02669	3.94		
No.32	2.018	54.4	0.02616	3.91		
No.33	2.018	54.6	0.02625	3.92		
No.34	2.018	54.3	0.02611	3.91		
No.35	2.018	54.4	0.02616	3.91		
No.36	2.018	54.3	0.02611	3.91		
No.37	2.018	54.7	0.02630	3.92		
No.38	2.018	54.4	0.02616	3.91		
No.39	2.018	54.5	0.02621	3.92		
No.40	2.018	54.7	0.02630	3.92		
No.41	2.018	54.4	0.02616	3.91		
No.42	2.018	54	0.02597	3.90		
No.43	2.018	54.2	0.02606	3.91		
No.44	2.018	54.5	0.02621	3.92		
No.45	2.018	54.8	0.02635	3.92		
No.46	2.018	54.5	0.02621	3.92		
No.47	2.018	54.3	0.02611	3.91		
No.48	2.018	54	0.02597	3.90		
No.49	2.018	54.3	0.02611	3.91		
No.50	2.018	54.5	0.02621	3.92		



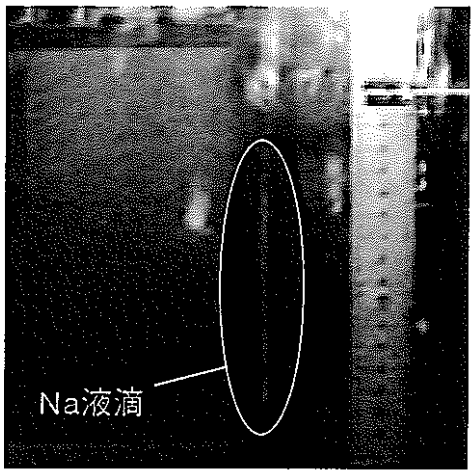


液滴No：9
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

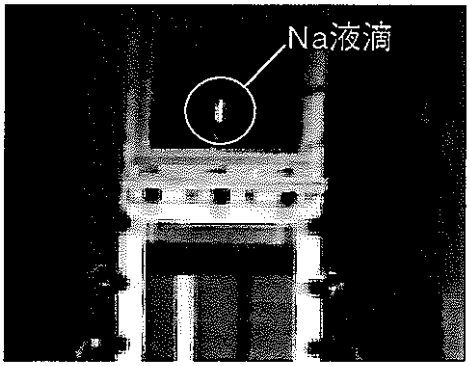
写真 3.2-21　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-2)



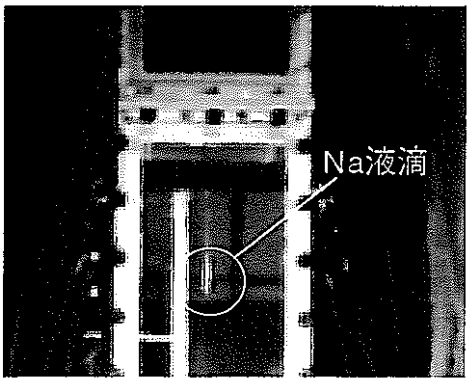
a．Na液滴生成状況



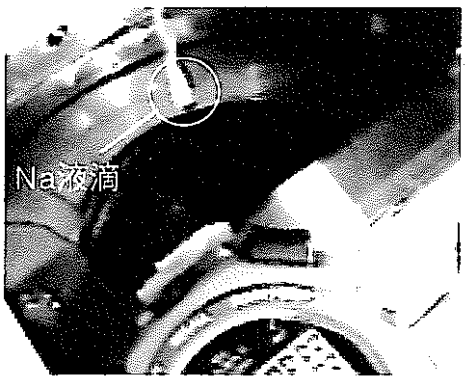
b．Na液滴落下状況
（架台上部）



c．Na液滴落下状況
（容器上部）



d．Na液滴落下状況
（容器下部）



e．流動ﾊﾟﾗﾌｨﾝによる
Na液滴の回収状況

写真 3.2-22 大気雰囲気実験（第３回目）

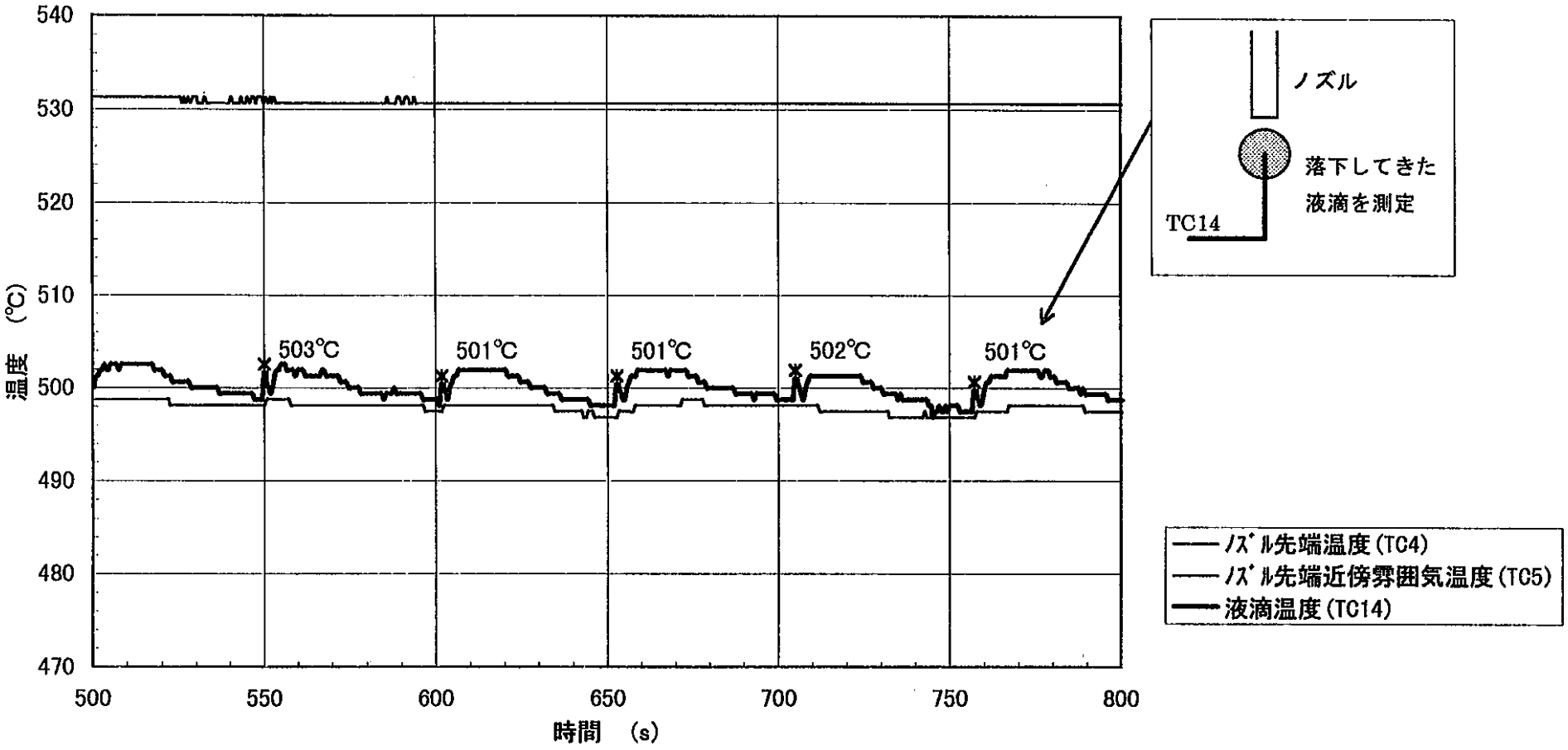


図 3.2-47 滴下Na温度(大気雰囲気実験, 第3回目)

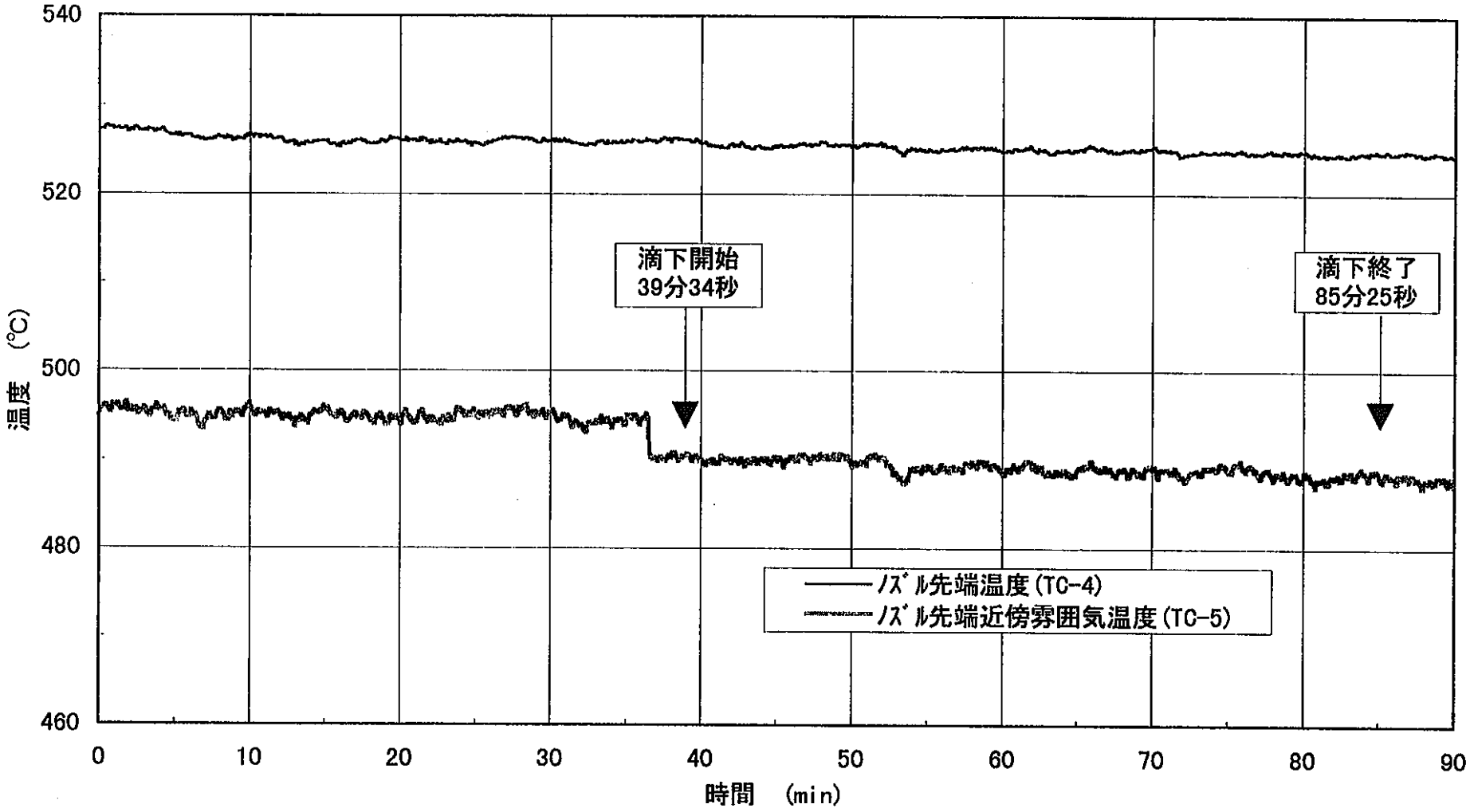


図 3.2-48 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

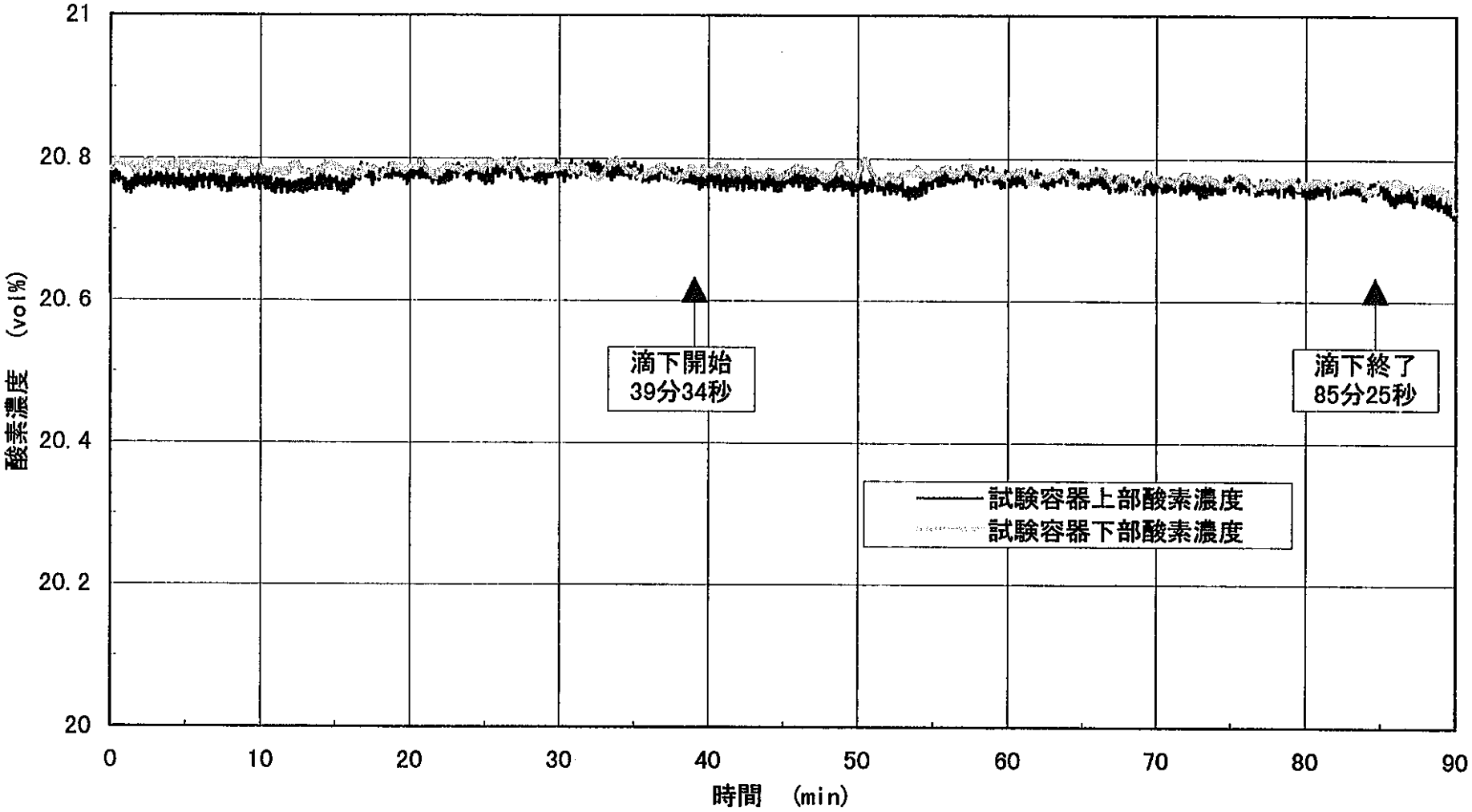


図 3.2-49 滴下試験中の酸素濃度(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

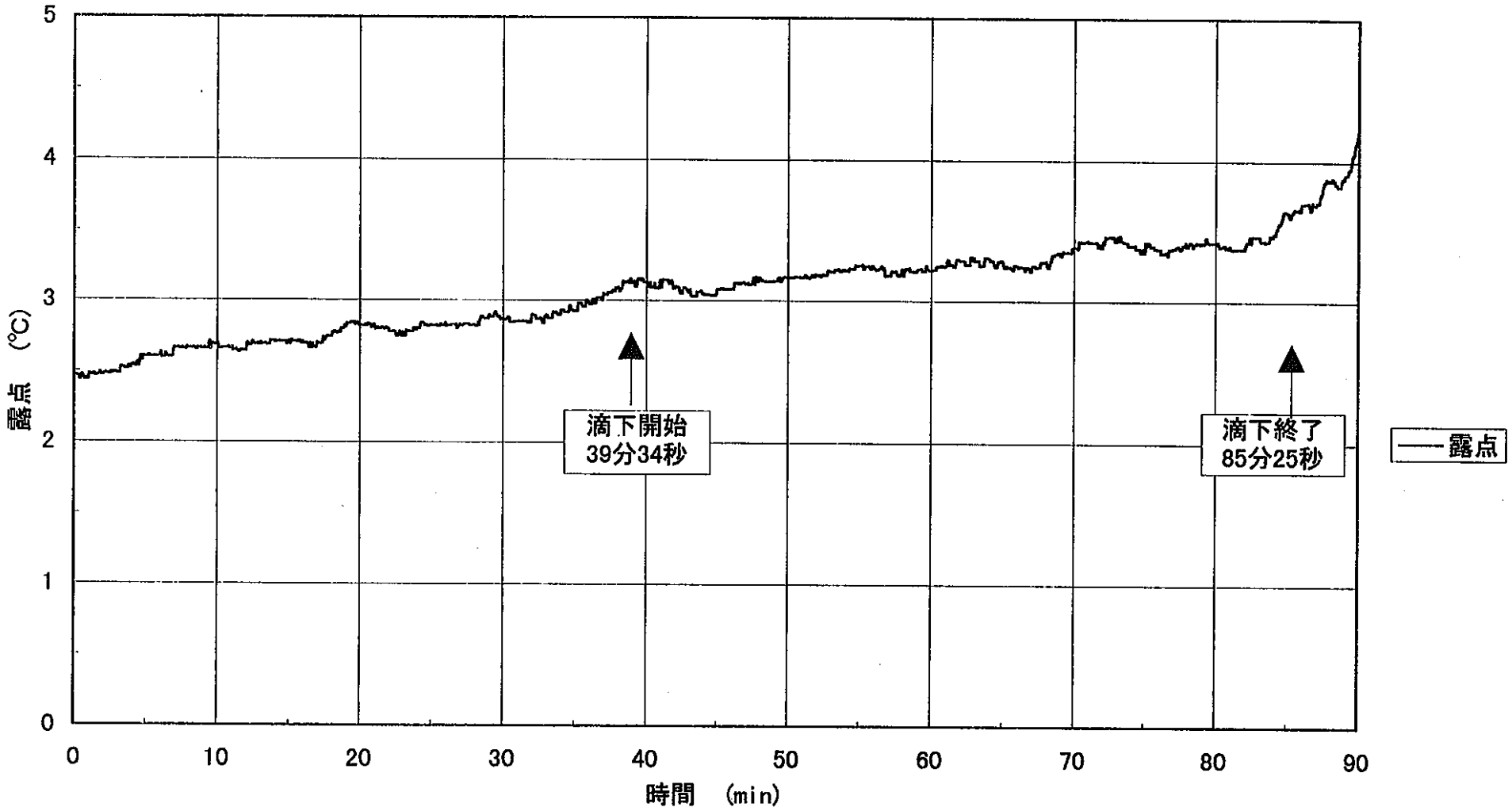


図 3.2-50 滴下試験中の露点(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

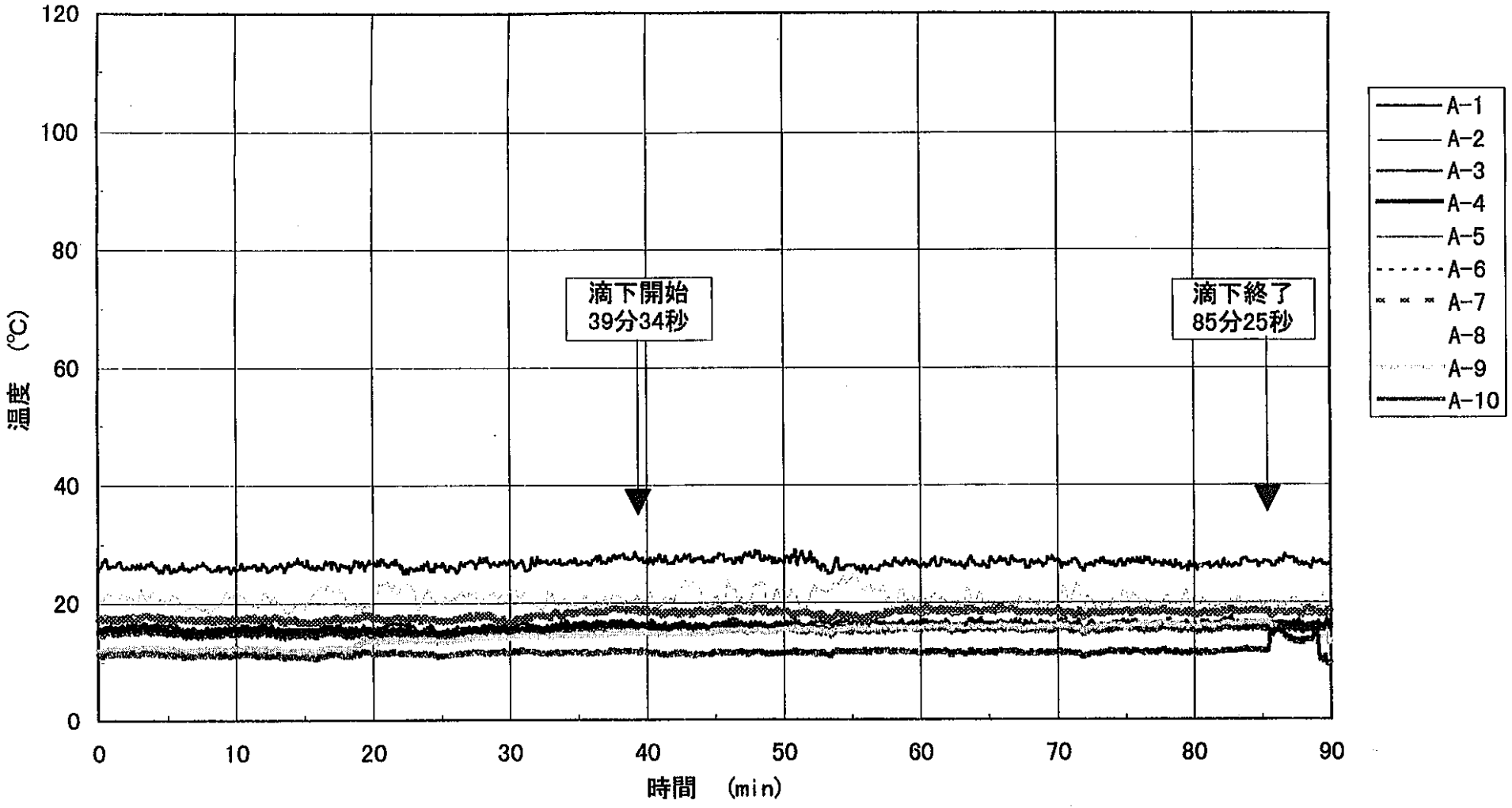


図 3.2-51 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

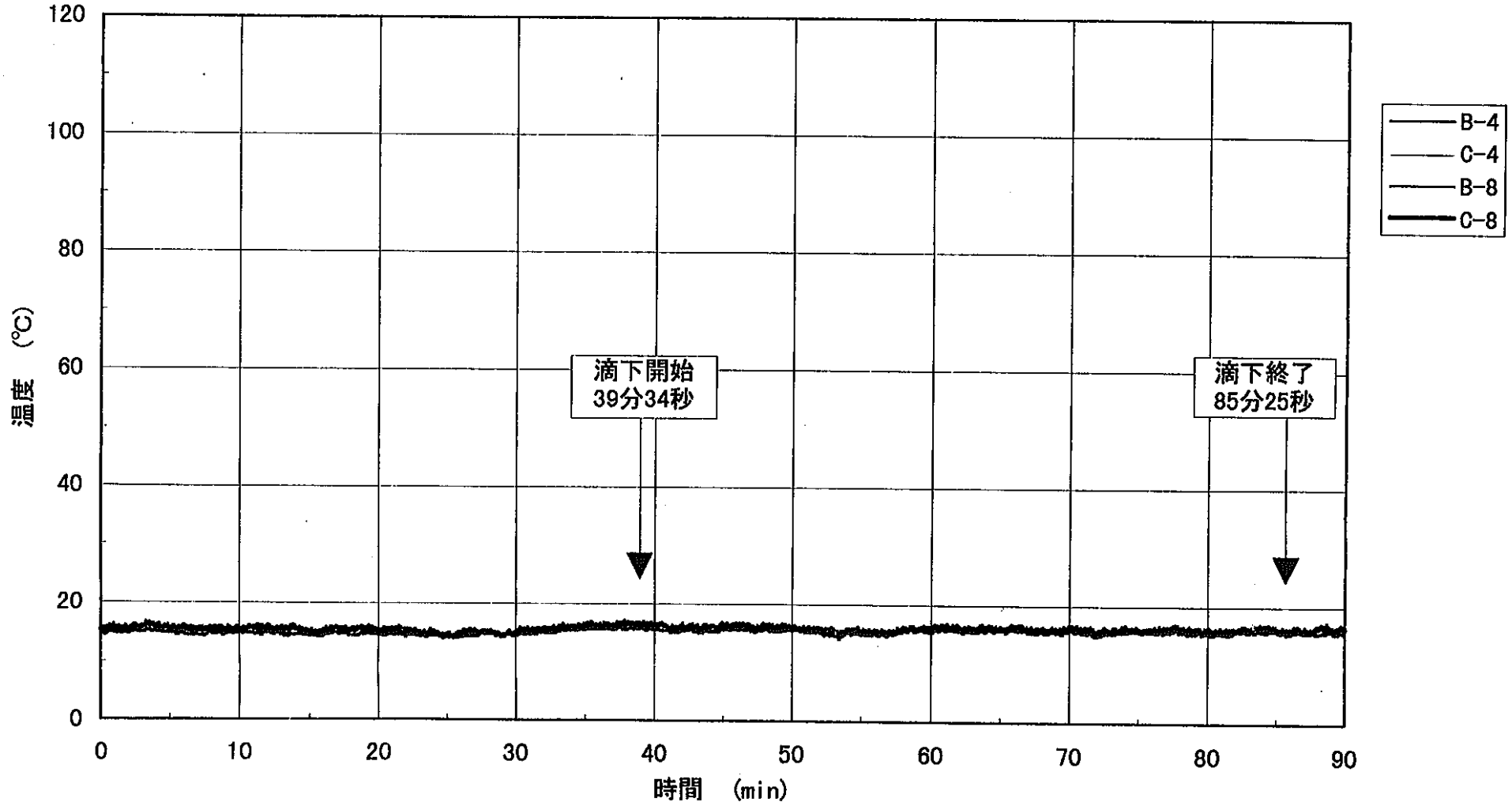
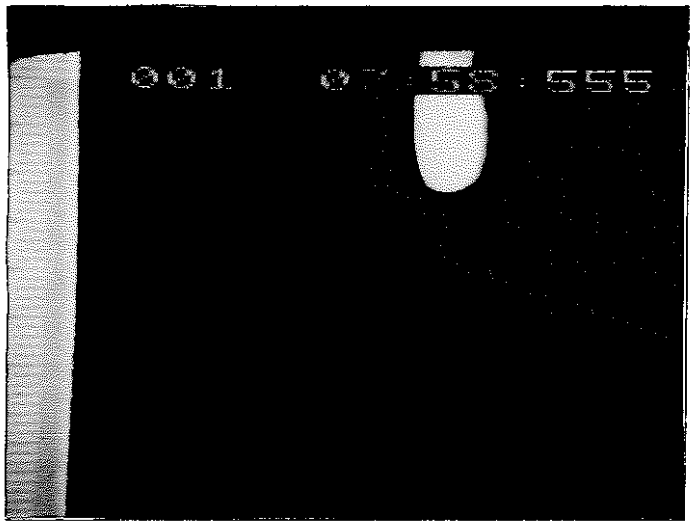
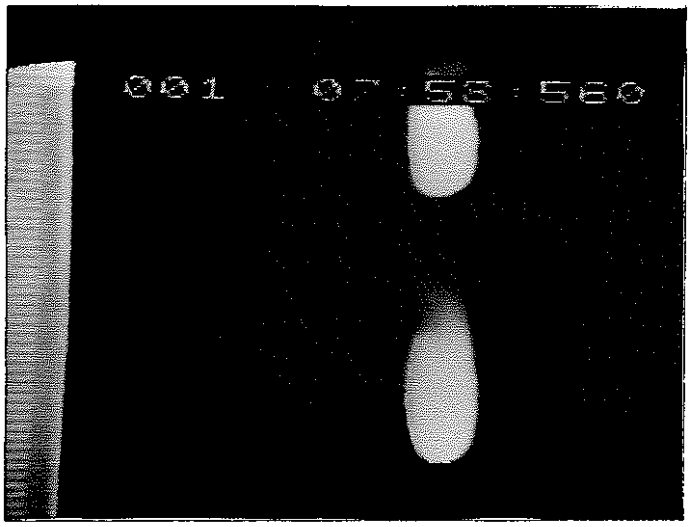


図 3.2-52 滴下試験中の周方向温度分布(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

表 3.2-13 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第3-1回目)

No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.001	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.001	52.98	0.02526	3.87		
No.3	2.001	52.69	0.02512	3.86		
No.4	2.001	52.78	0.02516	3.86		
No.5	2.001	52.9	0.02522	3.87		
No.6	2.001	53.03	0.02528	3.87		
No.7	2.001	52.6	0.02508	3.86		
No.8	2.001	53.12	0.02533	3.87		
No.9	2.001	53.25	0.02539	3.87		
No.10	2.001	53.69	0.02560	3.88		
No.11	2.001	54.41	0.02594	3.90		
No.12	2.001	55.22	0.02633	3.92		
No.13	2.001	54.68	0.02607	3.91		
No.14	2.001	55.16	0.02630	3.92		
No.15	2.001	54.69	0.02608	3.91		
No.16	2.001	54.15	0.02582	3.90		
No.17	2.001	55.1	0.02627	3.92		
No.18	2.001	55.18	0.02631	3.92		
No.19	2.001	54.82	0.02614	3.91		
No.20	2.001	55.12	0.02628	3.92		
No.21	2.001	54.78	0.02612	3.91		
No.22	2.001	54.91	0.02618	3.91	総Na量(g)	
No.23	2.001	55	0.02622	3.92	1.00082	電荷量評価
No.24	2.001	55.5	0.02646	3.93		平均Na量(g): 0.02626
No.25	2.001	56.03	0.02671	3.94	平均Na量(g)	標準偏差(1σ): 0.00092
No.26	2.001	58.59	0.02793	4.00	0.02002	
No.27	2.001	62.6	0.02985	4.09		平均換算径(mm): 3.92
No.28	2.001	54.22	0.02585	3.90	換算径(mm)	標準偏差(1σ): 0.04
No.29	2.001	54.18	0.02583	3.90	3.58	
No.30	2.001	54.22	0.02585	3.90		
No.31	2.001	54.82	0.02614	3.91		
No.32	2.001	54.43	0.02595	3.90		
No.33	2.001	56.85	0.02711	3.96		
No.34	2.001	56.75	0.02706	3.96		
No.35	2.001	57.34	0.02734	3.97		
No.36	2.001	57.81	0.02756	3.98		
No.37	2.001	58.13	0.02772	3.99		
No.38	2.001	57.4	0.02737	3.97		
No.39	2.001	57.5	0.02742	3.97		
No.40	2.001	56.47	0.02692	3.95		
No.41	2.001	57.53	0.02743	3.98		
No.42	2.001	56.63	0.02700	3.95		
No.43	2.001	54.34	0.02591	3.90		
No.44	2.001	54.16	0.02582	3.90		
No.45	2.001	53.97	0.02573	3.89		
No.46	2.001	53.78	0.02564	3.89		
No.47	2.001	54.69	0.02608	3.91		
No.48	2.001	54.9	0.02618	3.91		
No.49	2.001	53.07	0.02530	3.87		
No.50	2.001	52.65	0.02510	3.86		





液滴No：9
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

写真 3.2-23　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-1)

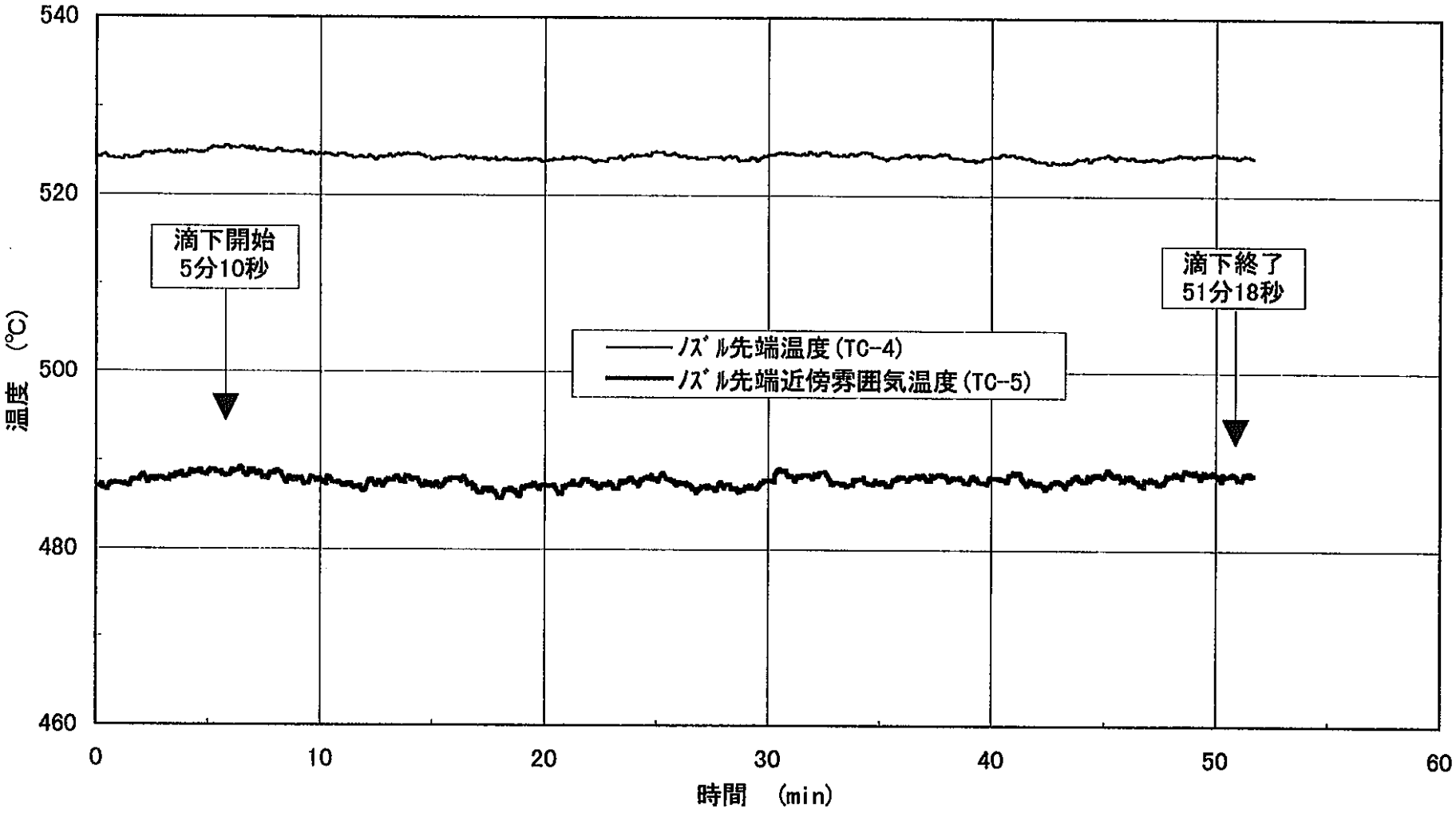


図 3.2-53 滴下試験中のノズル近傍温度分布(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

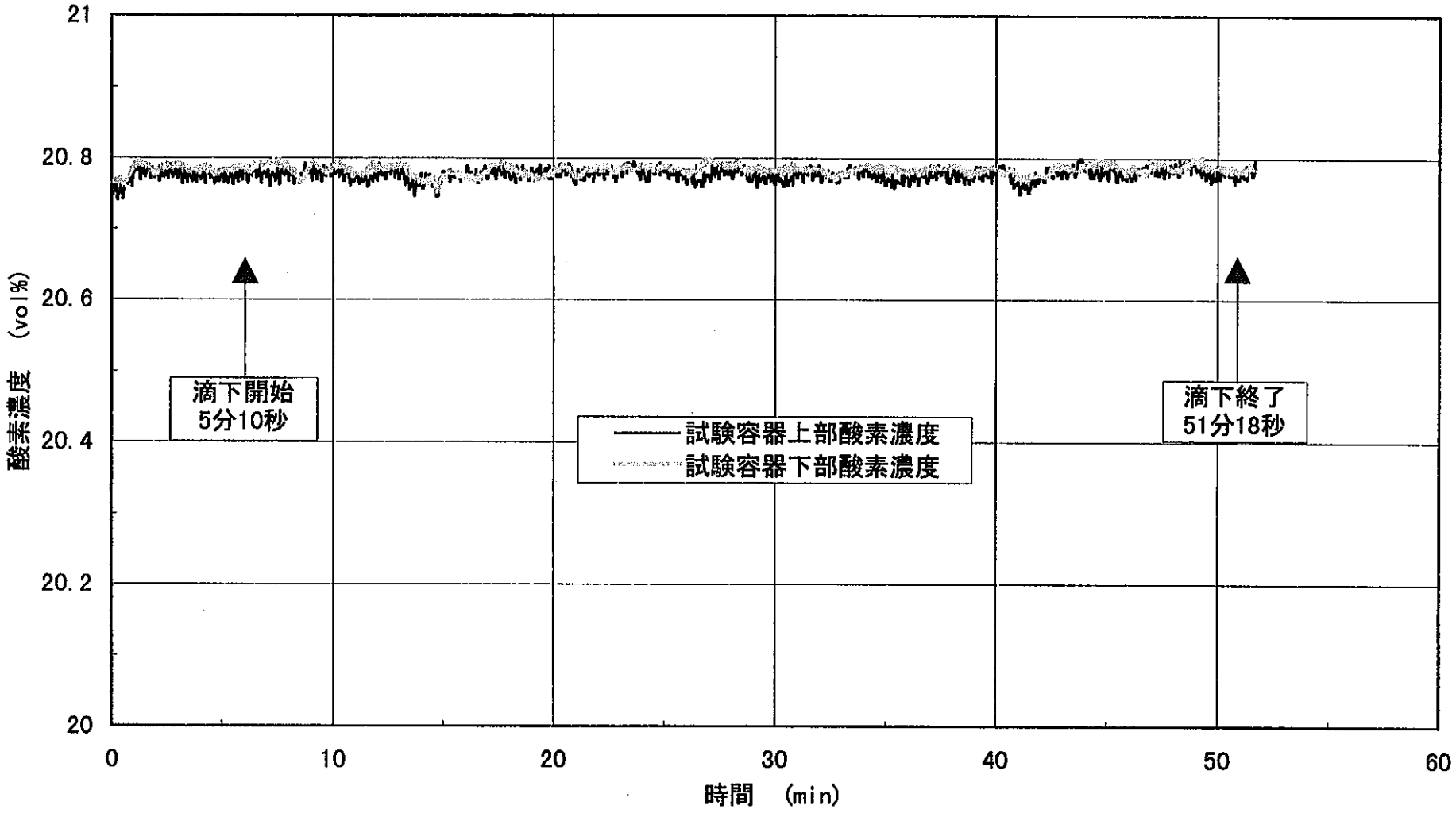


図 3.2-54 滴下試験中の酸素濃度(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

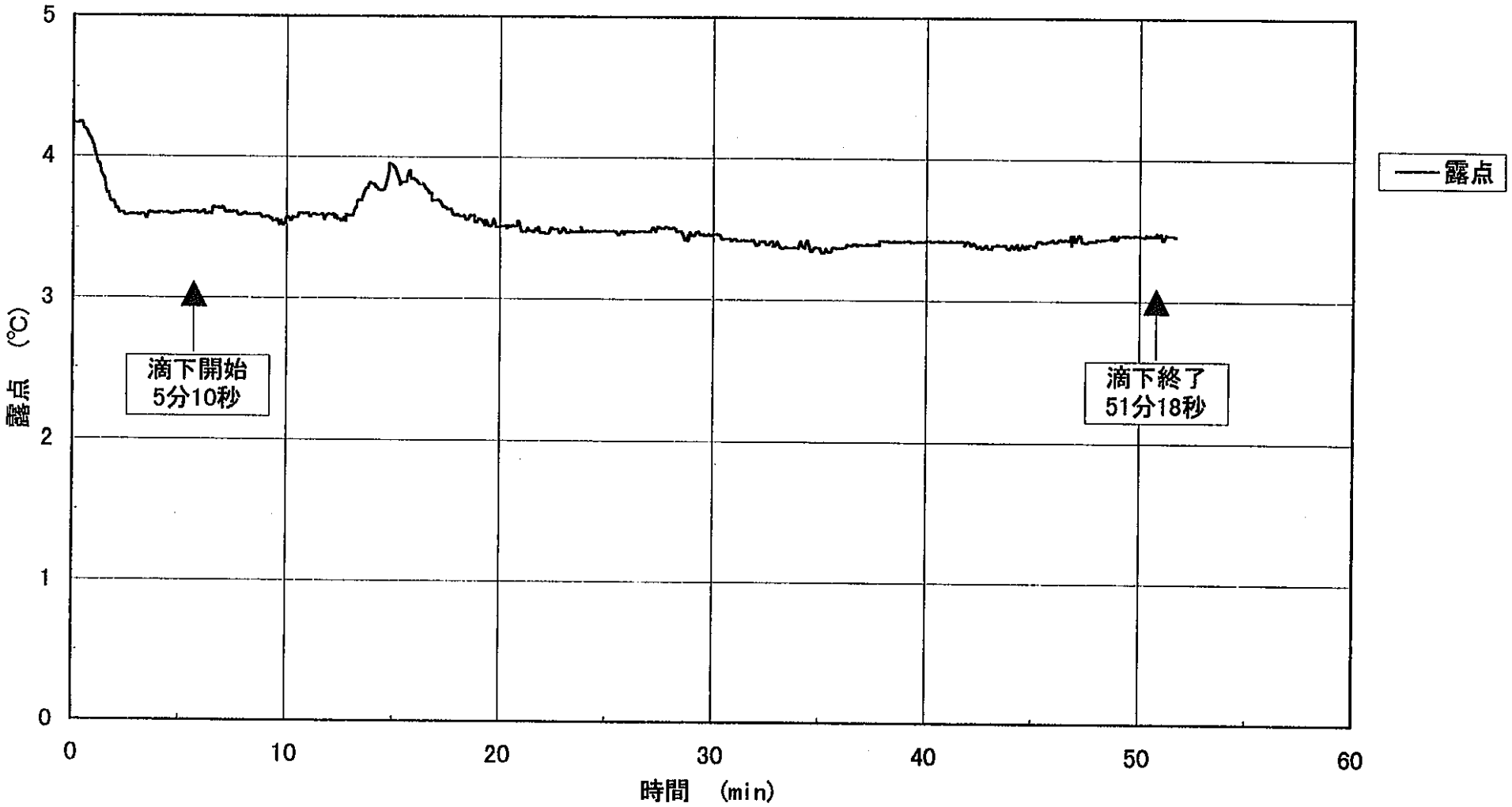


図 3.2-55 滴下試験中の露点(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

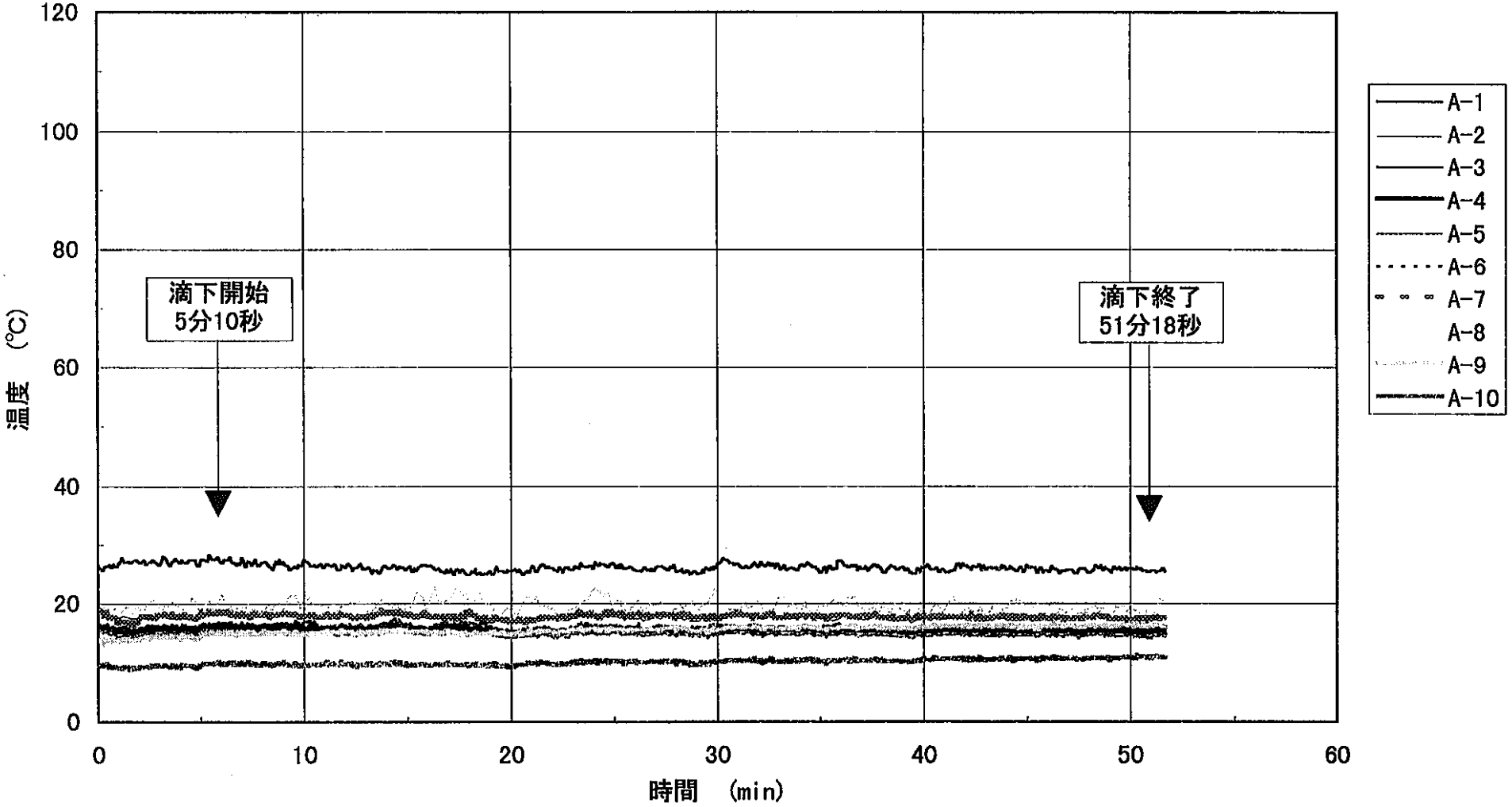


図 3.2-56 滴下試験中の軸方向温度分布(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

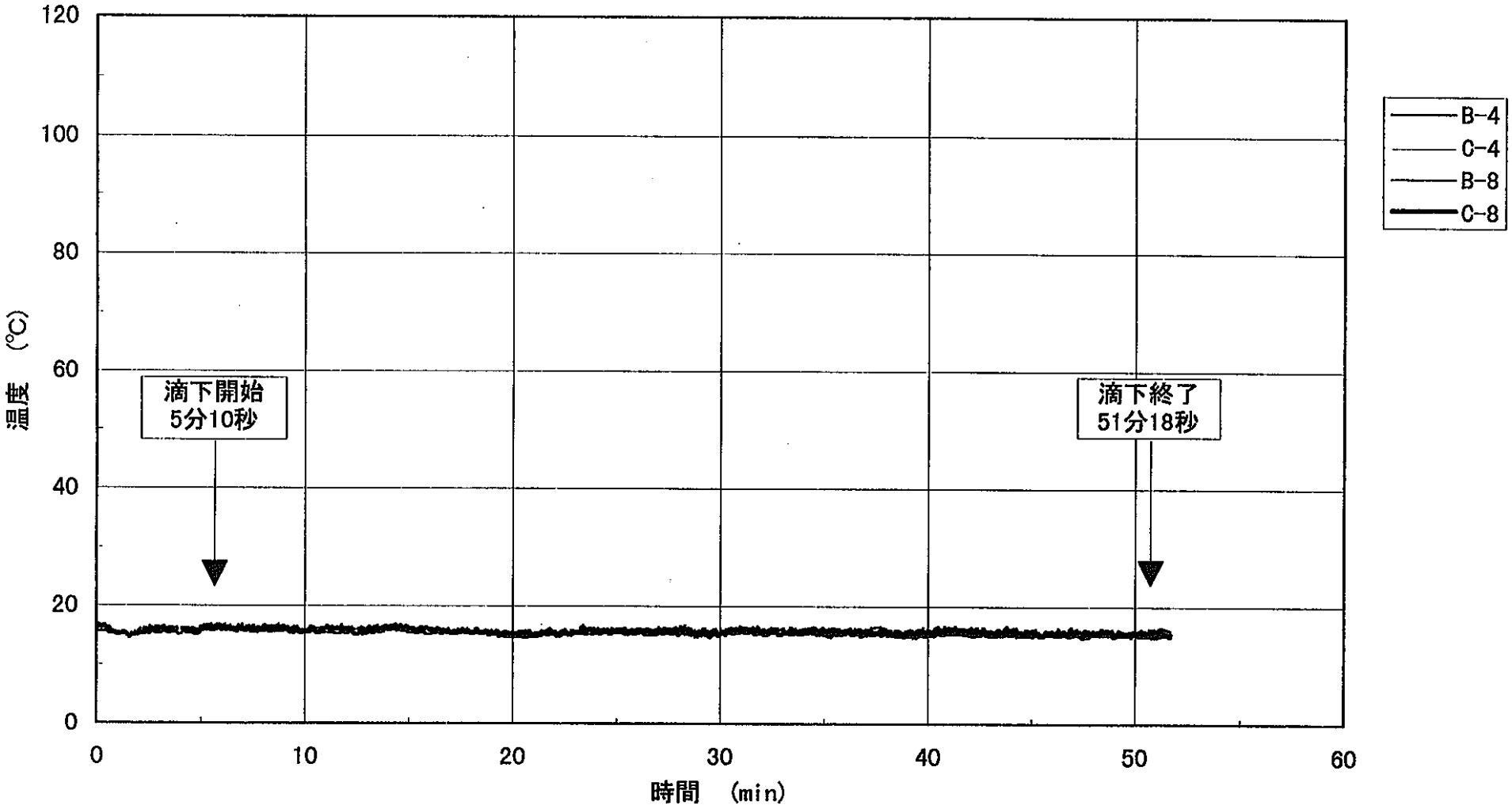
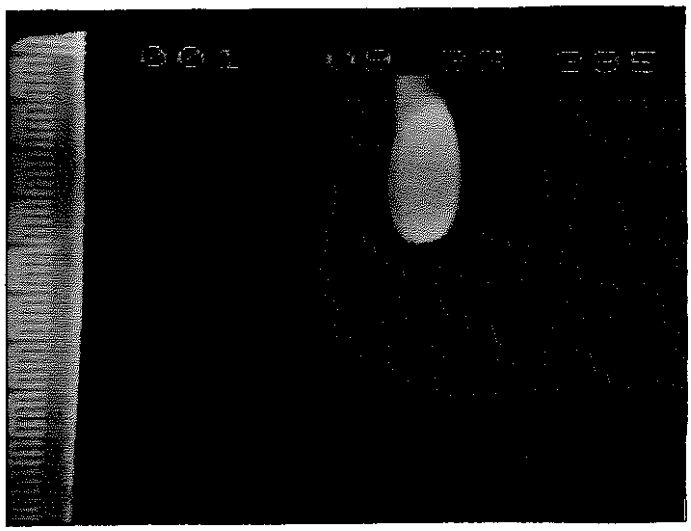
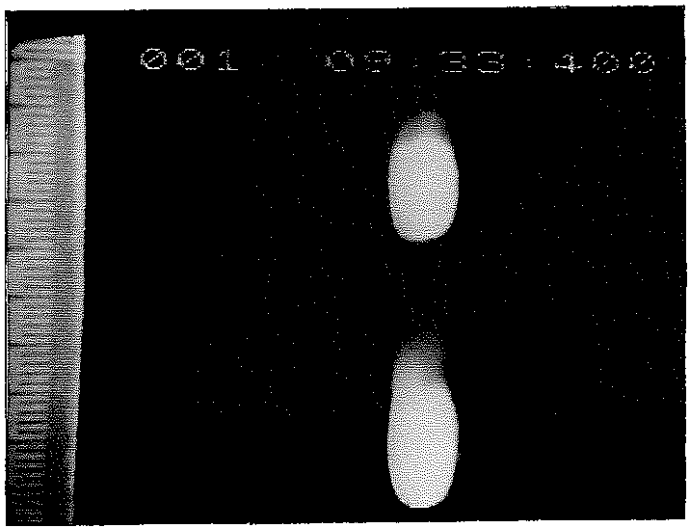


図 3.2-57 滴下試験中の周方向温度分布(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

表 3.2-14 液滴径の分布(大気雰囲気実験, 第3-2回目)

No.	電荷量評価				分析評価	備考
	電流(A)	時間(s)	Na量(g)	換算径(mm)		
No.1	2.001	—	—	—		—:時間計測不可
No.2	2.001	52.44	0.02500	3.85		
No.3	2.001	52.03	0.02481	3.84		
No.4	2.001	52.5	0.02503	3.86		
No.5	2.001	52	0.02479	3.84		
No.6	2.001	51.66	0.02463	3.84		
No.7	2.001	51.91	0.02475	3.84		
No.8	2.001	52.34	0.02495	3.85		
No.9	2.001	—	—	—		—:時間計測不可
No.10	2.001	—	—	—		—:時間計測不可
No.11	2.001	52.06	0.02482	3.84		
No.12	2.001	51.66	0.02463	3.84		
No.13	2.001	52.19	0.02488	3.85		
No.14	2.001	52.09	0.02484	3.85		
No.15	2.001	58.09	0.02770	3.99		
No.16	2.001	50.32	0.02399	3.80		
No.17	2.001	51.46	0.02454	3.83		
No.18	2.001	52.57	0.02506	3.86		
No.19	2.001	52.28	0.02493	3.85		
No.20	2.001	51.8	0.02470	3.84		
No.21	2.001	51.7	0.02465	3.84		
No.22	2.001	51.9	0.02475	3.84	総Na量(g)	
No.23	2.001	52.19	0.02488	3.85	1.01096	電荷量評価
No.24	2.001	52.5	0.02503	3.86		平均Na量(g): 0.02487
No.25	2.001	52.19	0.02488	3.85	平均Na量(g)	標準偏差(1σ): 0.00046
No.26	2.001	52.59	0.02507	3.86	0.02022	
No.27	2.001	52.08	0.02483	3.85		平均換算径(mm): 3.85
No.28	2.001	51.95	0.02477	3.84	換算径(mm)	標準偏差(1σ): 0.02
No.29	2.001	51.6	0.02460	3.83	3.59	
No.30	2.001	51.75	0.02467	3.84		
No.31	2.001	51.87	0.02473	3.84		
No.32	2.001	52.38	0.02497	3.85		
No.33	2.001	52.56	0.02506	3.86		
No.34	2.001	52.22	0.02490	3.85		
No.35	2.001	51.99	0.02479	3.84		
No.36	2.001	52.42	0.02499	3.85		
No.37	2.001	51.96	0.02477	3.84		
No.38	2.001	51.97	0.02478	3.84		
No.39	2.001	52	0.02479	3.84		
No.40	2.001	52.57	0.02506	3.86		
No.41	2.001	52.43	0.02500	3.85		
No.42	2.001	51.38	0.02450	3.83		
No.43	2.001	51.62	0.02461	3.83		
No.44	2.001	52.35	0.02496	3.85		
No.45	2.001	52.22	0.02490	3.85		
No.46	2.001	52.46	0.02501	3.85		
No.47	2.001	52.29	0.02493	3.85		
No.48	2.001	52.15	0.02486	3.85		
No.49	2.001	52.39	0.02498	3.85		
No.50	2.001	52.46	0.02501	3.85		





液滴No：9
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

写真 3.2-24　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-2)

表3.2-15　大気雰囲気実験のまとめ

試験No.	単位	低酸素雰囲気	大気雰囲気					
			第1回目		第2回目		第3回目	
			1	2	1	2	1	2
雰囲気酸素濃度	vol%	0.2*1	約21*1	18～15*1	約21*2			
雰囲気露点	℃	-45	-3.5	-7.5	−0.5～−0.7		2～4.5	
滴下時の液滴温度	〃	493	493				502	
電荷量評価液滴重量	mg/滴	24.76±0.13	24.80±0.75	24.37±0.45	27.53±0.42	26.44±0.66	26.26±0.92	24.87±0.46
電荷量評価誤差	%	0.5	3.0	1.8	1.5	2.5	3.5	1.8
電荷量評価液滴径	mm	3.84±0.01	3.84±0.04	3.82±0.02	3.98±0.02	3.93±0.03	3.92±0.04	3.85±0.02
分析液滴重量	mg/滴	23.26	20.65	21.4	22.35	21.50	20.02	20.22
分析評価誤差	%	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	1.5
分析評価平均液滴径	mm	3.76	3.62	3.66	3.71	3.67	3.58	3.59
ガイド管直下での平均落下速度	m/s	1.4	1.4	1.3	1.3	−	−	−
約2.4m下での平均落下速度	〃	5.5	5.5	5.6	5.6		5.5	

*1：試験容器下部の上部計測ポート位置
*2：試験容器上部の下部計測ポート位置

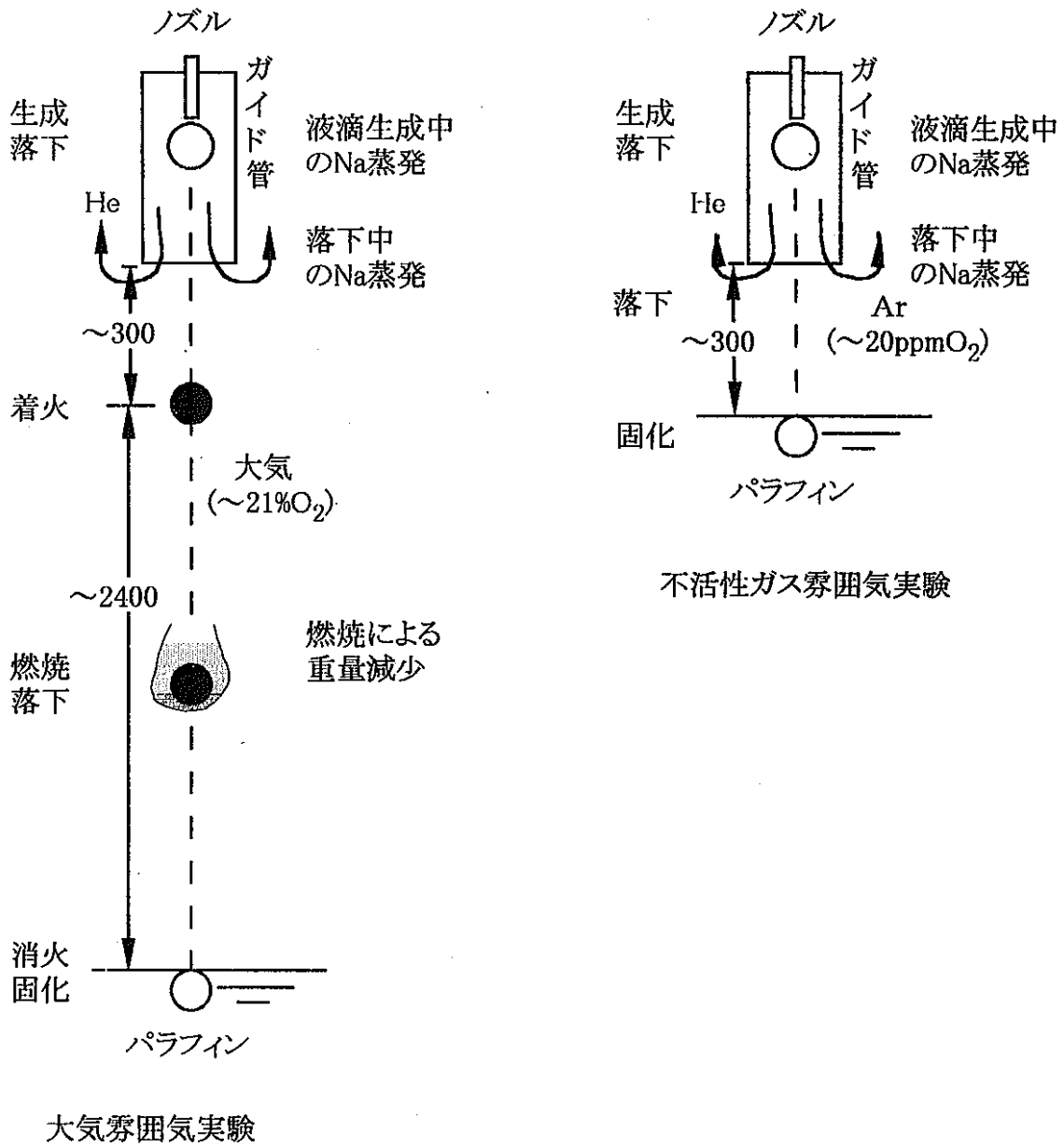


図 3.2- 58　Na液滴落下実験の模式図

表3.2-16　不活性ガス雰囲気実験におけるNa蒸発量の推定

試験No.	単位	不活性ガス雰囲気 第3回目	
		1	2
雰囲気酸素濃度	vol%	18ppm	17ppm
雰囲気露点	℃	-54	-57
滴下時の液滴温度	〃	499	493
電荷量評価液滴重量($m_c \pm \sigma_1$)	mg/滴	25.08±0.46	24.99±0.12
電荷量評価誤差(σ_1/m_c)×100	%	1.8	0.5
分析液滴重量($m_a \pm \sigma_2$)	mg/滴	23.37±0.23	22.95±0.25
分析評価誤差(σ_2/m_a)×100	%	1	1.1
電荷量評価平均液滴重量と分析評価平均重量の差(m_c-m_a)$\pm\sqrt{(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}$	mg	1.71±0.51	2.04±0.28
推定Na蒸発量($m_v \pm \sigma_3$)	〃	1.88±0.58	

表3.2-17　大気雰囲気実験における燃焼量

試験No.	単位	不活性ガス雰囲気（２回の平均）	大気雰囲気					
			第1回目		第2回目		第3回目	
			1	2	1	2	1	2
雰囲気酸素濃度	vol%	(17～18volppm)	約21	18～15	約21			
雰囲気露点	℃	-57～-54	-3.5	-7.5	−0.7～−0.5		2～4.5	
滴下時の液滴温度	〃	493～499	493				502	
電荷量評価液滴重量($m_c \pm \sigma_1$)	mg/滴	25.04±0.48	24.80±0.75	24.37±0.45	27.53±0.42	26.44±0.66	26.26±0.92	24.87±0.46
電荷量評価誤差(σ_1/m_c)×100	%	1.9	3.0	1.8	1.5	2.5	3.5	1.8
分析液滴重量(m_a)	mg/滴	23.16	20.65	21.4	22.35	21.50	20.02	20.22
分析評価誤差(統計誤差1%+Na溶出誤差)	%	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	1.7	1.5
分析液滴重量の標準偏差(σ_2)	−	0.24	0.24	0.27	0.32	0.31	0.34	0.31
電荷量評価平均液滴重量と分析評価平均重量の差(m_c-m_a)	mg	−	4.15	2.97	5.18	4.94	6.24	4.65
不活性ガス雰囲気推定蒸発量($m_v \pm \sigma_3$)	mg	1.88±0.58	−	−	−	−	−	−
液滴燃焼量(m_b)	〃	−	(2.27)	(1.09)	3.30	3.06	4.36	2.77
標準偏差($\sqrt{(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2)}$)	−		(±0.97)	(±0.78)	±0.78	±0.93	±1.14	±0.80
相対誤差($\sqrt{(\sigma_1^2+\sigma_2^2+\sigma_3^2)}/m_b$)×100	%	−	−	−	23.6	30.4	26.1	28.9

注）：()内数値は実験中に雰囲気の酸素濃度が低下したため参考値とする

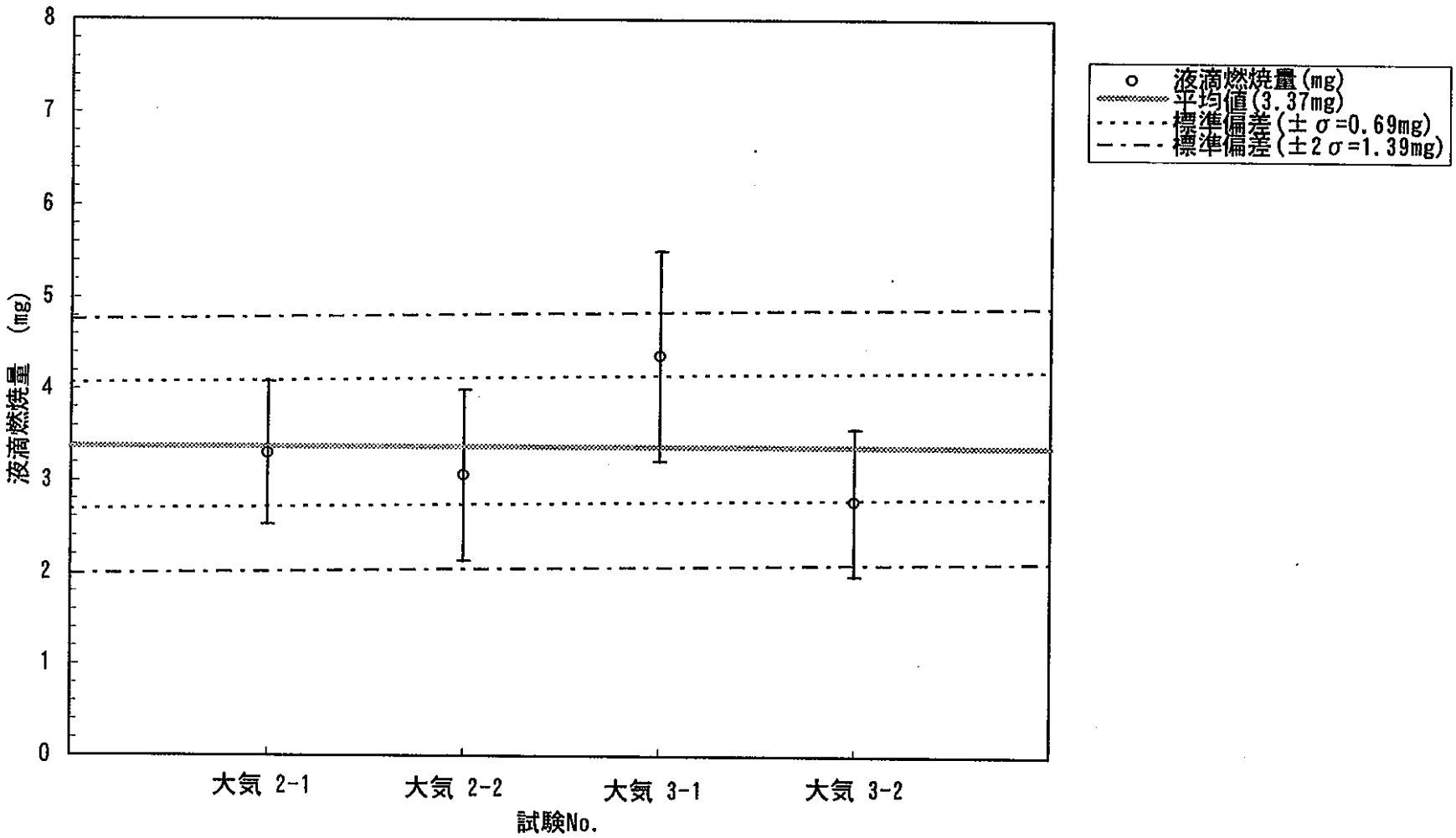


図 3.2-59 燃焼量の誤差

4．まとめ

ナトリウム液滴の滴下中の燃焼挙動を把握するとともに、解析コードへの検証用データを提供することを目的にナトリウム液滴の燃焼落下実験を実施した。

本研究の主要な成果は以下の通りである。

(1)実験装置の設計及び製作

直径3.5±1.0mm、温度500±10℃の液滴を安定して生成し、不活性ガス雰囲気及び大気雰囲気中で滴下できる実験装置を設計・製作した。

(2)不活性ガス雰囲気実験によるナトリウム液滴径の測定

生成した液滴を燃焼させないように不活性ガス雰囲気中で50滴滴下する試験を4回実施した。回収した個々の液滴のナトリウム重量測定値から算出した生成時の平均液滴径は約3.8mmであった。

(3)大気雰囲気実験によるナトリウム液滴の燃焼量及び落下速度の測定

大気雰囲気で 2.7m の高さから液滴を 50 滴滴下する試験を 6 回実施した。落下前後のナトリウム重量変化からナトリウム液滴の生成過程でのナトリウム減少量を減算して算出した。

(a) 直径約 3.8mm のＮａ液滴を 2.7m 落下させた時の平均燃焼量は、約 3.37±0.69mg であった。

(b) 滴下途中の液滴の高速度写真の撮影結果から算出した約 2.4 m落下後の液滴速度は、燃焼液滴及び燃焼していない液滴とも 5.5±0.1m/s であった。

(c) 直径 3.8mm の 500℃Ｎａ液滴は、ノズル直下から約 63mm の不活性ガス領域を通過後、大気に晒されガイド管下端面から 240～300mm 落下した時点で着火した。

5．謝辞

本作業の遂行にあたり、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センタープラント安全工学室の宮原信哉主任研究員、川田耕嗣研究員、下山一仁研究員、高井俊秀研究員、原子炉工学室の荒邦章担当役、熱流体技術開発室の山口彰室長代理、岡野靖研究員をはじめとする関係各位に御討論、御指導いただきました。ここに改めて謝意を表します。

6．参考文献

1) 大平博昭、山口彰：ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(1)、化学平衡反応モデルによる液滴燃焼直接シミュレーション:日本原子力学会「1997 秋の大会」予稿集、G59

2) 飯田将雄、山口彰：ナトリウム燃焼解析評価手法の開発(2)、粒子法による 3 次元ナトリウム漏洩燃焼挙動解析コードの開発:日本原子力学会「1997 秋の大会」予稿集、G60

3) 化学工学便覧：改定四版、丸善 p788～p796 (1978)

4) 橋口功、姫野嘉昭、根井弘道：高速炉カバーガスの伝熱流動と機器開発、日本原子力学会、vol.30,No.12 (1988),p1084-p1091

5) 生井武文、井上雅弘:機械工学基礎講座 粘性流体の力学、理工学社、p59-p61(1980)

6) H.A.Morewitz,R.P.Johnson and C.T.Nelson : Experiments on Sodium Fires and Their Aerosols, Nuclear Engineering and Design 42 (1977) p123-p135

7．付録

7.1 予備試験

不活性ガス雰囲気実験及び大気雰囲気実験に使用する実験装置のノズル仕様及びノズルとガイド管の位置関係を設定するために、本試験に先立ち予備試験を実施した。

7.1.1 ノズル仕様の検討

3.5±1.0mm のＮａ液滴を安定して生成するには、Ｎａの表面張力に対して適切なノズル径、先端形状及び長さを選定する必要がある。

(1)ノズル径及び先端形状の設定

ノズル仕様を２種類、表面張力の異なる液体を 3 種類用いて、室温における表面張力・ノズル形状と液滴径の関係を明らかにすることにより、本試験に適切なノズル径及び先端形状を選定することとした。液滴径は、ノズルと液滴との接触部の濡れぶち長さと液体の表面張力が大きいほど大きくなる。従って、

a.安定した径の液滴を生成するには、ノズルと液滴との接触部の濡れぶち長さが変化しにくくする必要がある。

b.液滴を小さくするには、ノズルと液滴との接触部の濡れぶち長さが小さくなるように、小径とする必要がある。

そこで、表 7.1-1 に示すノズル先端形状の検討により三角錘型ノズルと薄肉型ノズルを選定し、純水、純水＋30%エタノール、純水＋界面活性剤（レオコール SC90）を用いて液滴生成試験を実施した。これらの液体の表面張力は、ステンレス上での液滴の端面接触角の測定結果から算出した（表 7.1-2）。液滴は、マイクロシリンジ（容量 0.1cm^3、1 push 当り 0.002cm^3 排出）の先端に上記のノズルを接続する方法で生成した。

試験結果を図 7.1-1 に示す。試験により、下記が分かった。

a.薄肉型ノズルの方が安定した液滴生成が可能。

b.濡れ性の良い液体では、ノズルの外径で液滴径が決定される。

c.Ｎａで 3.5±1.0mm の液滴を生成するには、外径 0.5mm 程度が適切。

d.濡れ性の良い液体では、ノズル先端で液滴が偏って生成する傾向がある。

(2)ノズル長さの設定

上記(1)で選定した外径 0.5mm のノズルについて、外径 0.5mm 部の長さをどの程度設ければ 3.5±1.0mm のＮａ液滴が安定して生成できるかを検討した。

表 7.1-3 に試験結果を示す。Ｎａは濡れ性が良いために、0.5mm 部が短い場合には上方の太径部まで液滴がずり上がる現象が生じた。これより、0.5mm 部の長さを 15mm とした。

7.1.2 ノズルとガイド管の位置関係の検討

本実験装置では、ノズル先端部のＮａ液滴の酸化を防止するためガイド管内にＨｅガスを流すことによりノズル先端部を不活性雰囲気に維持する方法を採用することとした。このような構造の場合には、ガイド管下端とノズル先端との距離を十分確保して、ガイド管内へ容器雰囲気の逆流が生じてもノズル先端の不活性雰囲気が確保されるようにする必要がある。

そこで、ガイド管内下端から上部方向への酸素濃度の分布を測定することにより、ノズル先端の適切な設定位置を求めることとした。

試験は、Ｈｅ流量を３～５Ｌ min^{-1} として図 7.1-2 に示す体系で実施した。

測定結果を図 7.1-3 に示す。ガイド管内の酸素濃度は下端から約 20mm 上方では測定下限レベルまで低下することが分かった。これより、ガイド管長さを 150mm とした。

また、図 7.1-3 から、酸素濃度が大気中と同等レベルに回復するのはガイド管下端の下方約 15mm の位置であることが分かった。

表7.1- 1　　ノズル先端形状の検討

寸法は暫定値

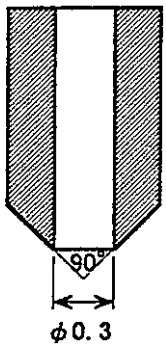
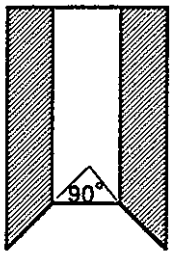
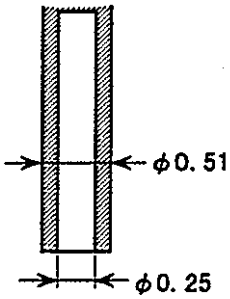
	三角錐型ノズル	凹型ノズル	薄肉ノズル
ノズルの形状			
生成液滴径の予想	最悪ノズルの外径で液滴径が決まる	同左	同左
液滴径の変動要因	濡れぶちの拡大により変動大	同左	濡れぶちの拡大領域が小さく変動小
影響度	大	大	小
総合判定	△	△ (加工性難点)	◎ (加工性難点)

表7.1- 2　　各液体の表面張力

液　体	表面張力(dyn/cm)*1	接触角θ(度)*2	備　　考
純　水 (25℃)	71.97	53	
純水+30%エタノール(23℃)	36.70	44	
純水+界面活性剤(25℃)	32.59	13	
Na　(500℃)	156.7	約19度(350℃)*3 約5分後に0度	後退濡れ角度

*1；ディヌーイ氏表面張力計を使用、＊２；写真撮影による測定
*3；M.J.Todd and S.TURNER:The Surface Tension of Liquid Sodium and its Wetting Behaviour on Nickel and Stainless Ateels, TRG Report 1459(R),1968

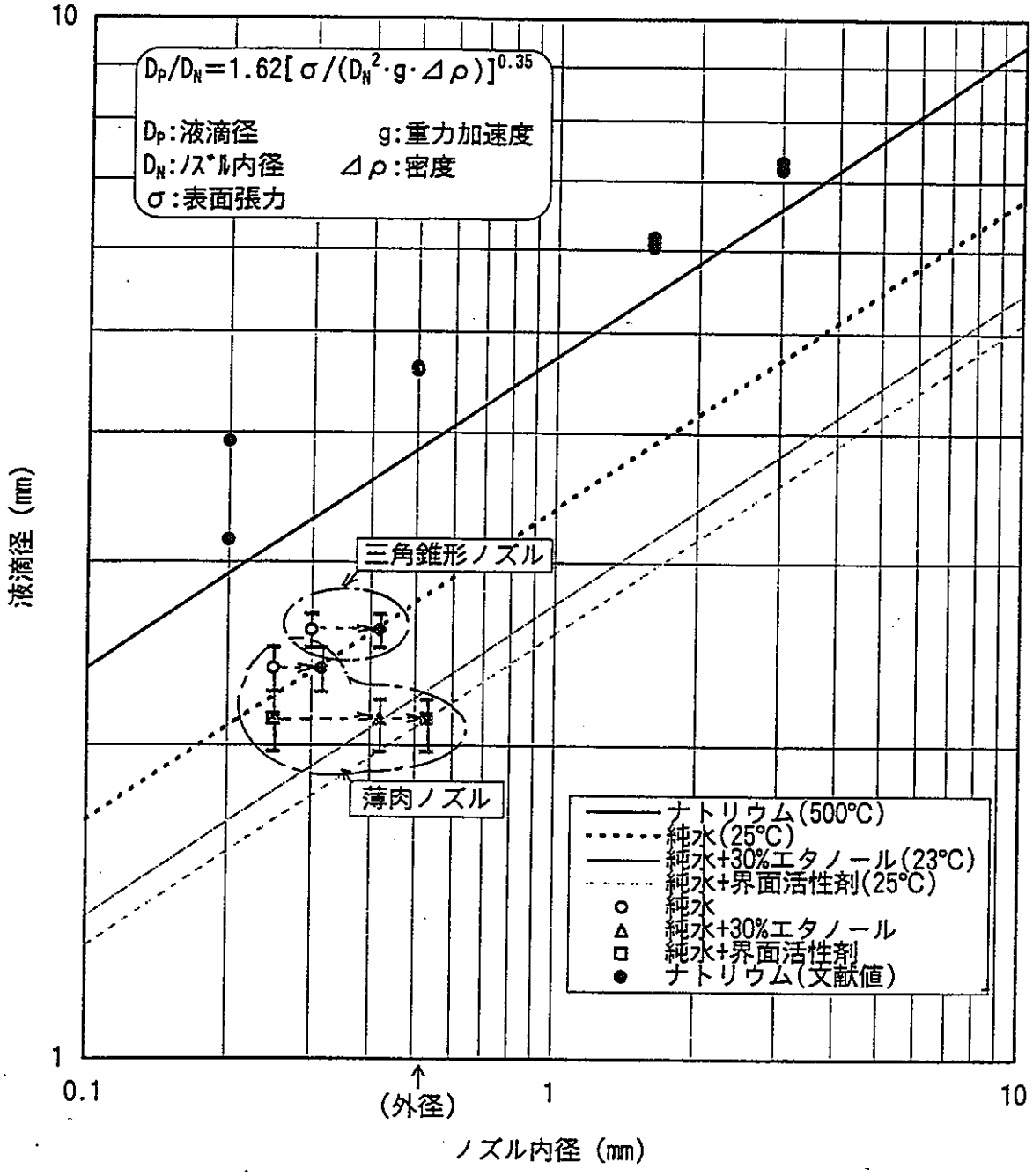
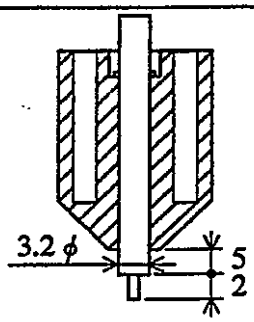
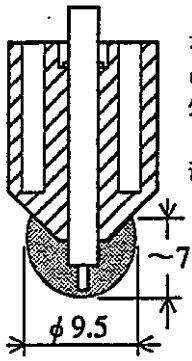
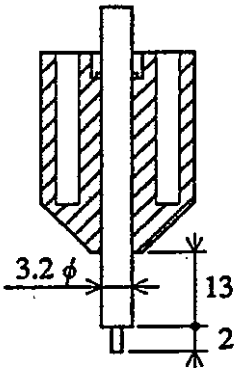
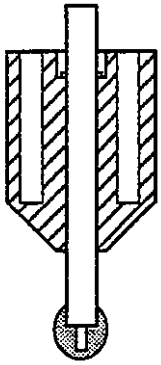
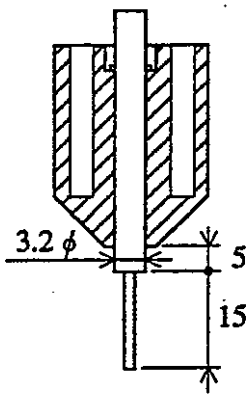
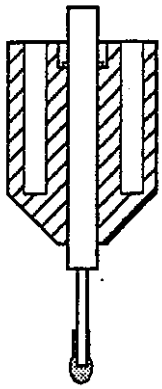


図7.1- 1　　ノズル内径と液滴径の関係

表7.1- 3　　ノズル長さの検討結果

実験 No.	ノズルの形状	滴下方式	結　果
1	 先端部径：OD=0.5 φ ID =0.3 φ	Arガス加圧方式 ・Na充填部：　約120℃ ・ノズル部：　約500℃ ・Arガス圧力：～0.02kgf/cm^2	滴下時の状況  最初、コラム状に流出。その後、ノズル外表面をNaが上昇、ノズルホルダー先端部から液滴落下 ↓ Na粒子径 7.5～9.5mm (ﾉｷﾞｽで測定)
2	 先端部径：同上		 最初、コラム状に流出。その後、ノズル外表面をNaが上昇、ノズルの異径溶接部から液滴落下 ↓ Na粒子径 6.2～8.6mm (ﾉｷﾞｽで測定)
3	 先端部径：OD=0.5 φ ID =0.2 φ	β"アルミナ電流制御方式 ・Na充填部：　250～200℃ ・ノズル部：　約500℃ ・β"アルミナ部印加電流： ～3A	 細径ノズル外表面をNaが上昇、薄い皮膜を形成するが、ノズル先端部から液滴滴下 ↓ Na粒子径 3.2～4.5mm (ﾉｷﾞｽ測定値)

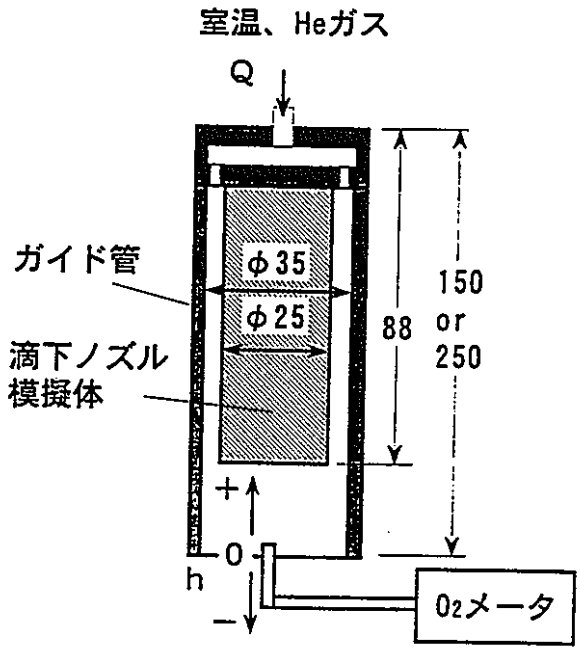


図7.1- 2　　ガイド管内酸素濃度分布測定体系

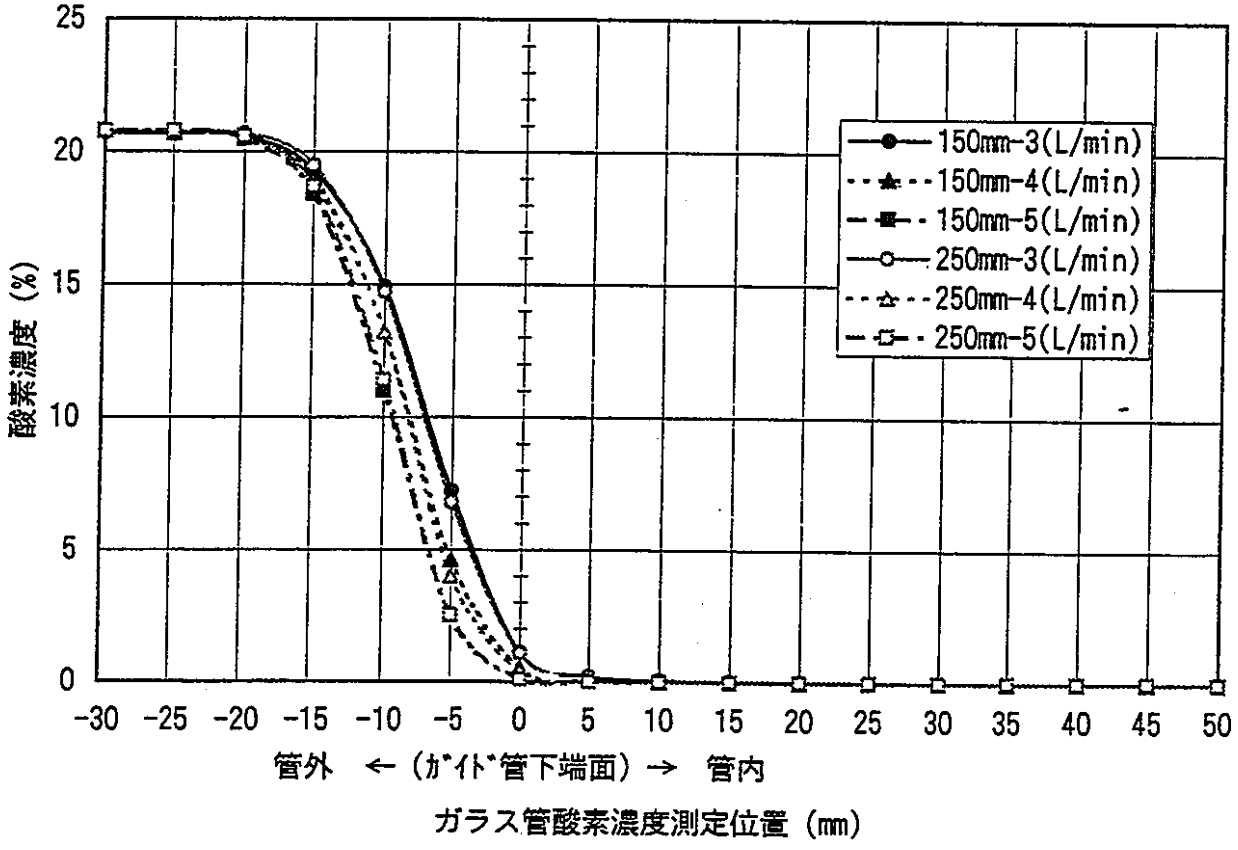


図7.1- 3　　ガイド管内酸素濃度分布測定結果

7.2 液滴落下速度の測定例

大気雰囲気実験において、落下速度を評価するためにガイド管直下及びガイド管下端から約 2.4m 下の位置で撮影した代表的なＮａ液滴を以下の写真に示す。

(1) 低酸素雰囲気実験

ガイド管直下で撮影した液滴 ---------- 写真 7.2-1～写真 7.2-4

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-5～写真 7.2-8

(2) 大気雰囲気実験、第 1-1 回目

ガイド管直下で撮影した液滴 ---------- 写真 7.2-9～写真 7.2-12

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-13～写真 7.2-16

(3) 大気雰囲気実験、第 1-2 回目

ガイド管直下で撮影した液滴 ---------- 写真 7.2-17～写真 7.2-20

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-21～写真 7.2-24

(4) 大気雰囲気実験、第 2-1 回目

ガイド管直下で撮影した液滴 ---------- 写真 7.2-25～写真 7.2-28

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-29～写真 7.2-32

(5) 大気雰囲気実験、第 2-2 回目

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-33～写真 7.2-36

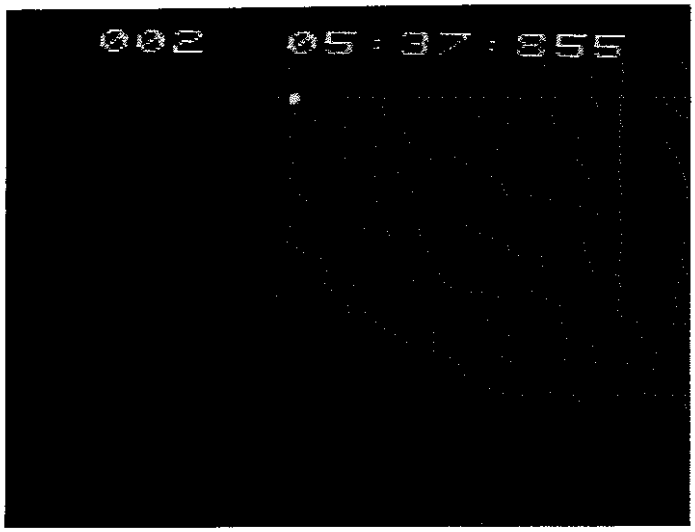
(6) 大気雰囲気実験、第 3-1 回目

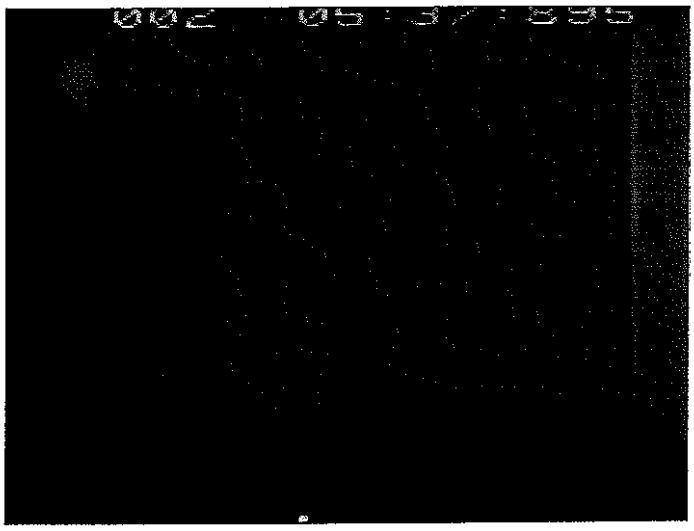
約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-37～写真 7.2-40

(7) 大気雰囲気実験、第 3-2 回目

約 2.4m 落下位置で撮影した液滴 -------- 写真 7.2-41～写真 7.2-44

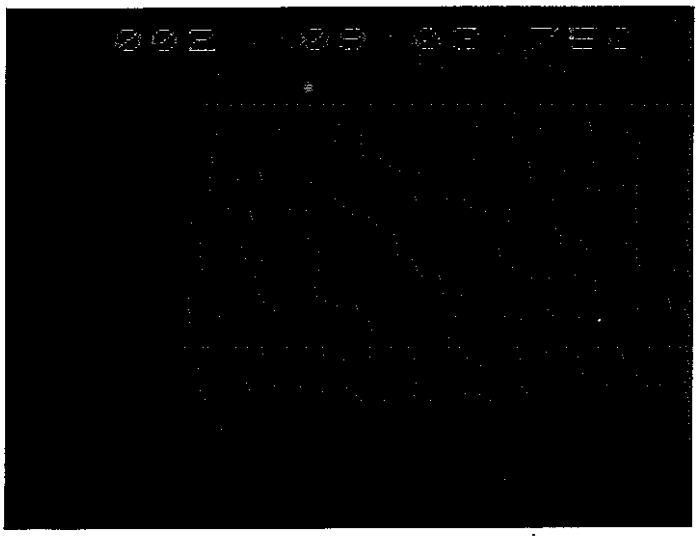
上記した代表液滴と同一手法で他の液滴についても落下速度を求め、一覧表にしたものを表 7.2-1 及び表 7.2-2 に示す。

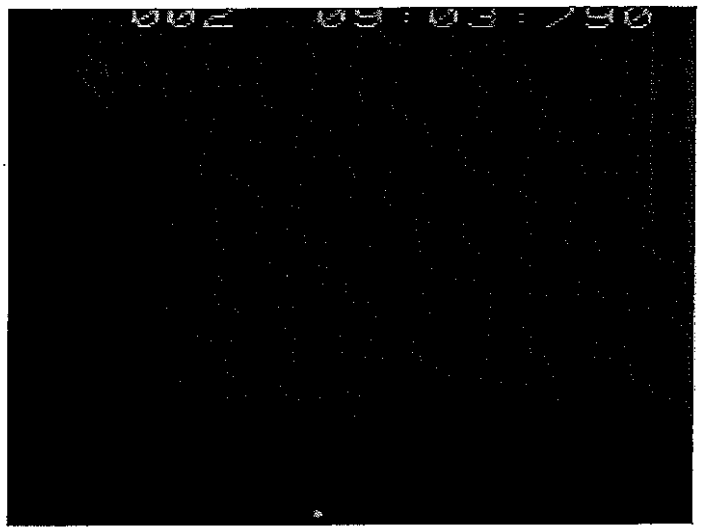




液滴No：7
落下距離：54mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.4m/S

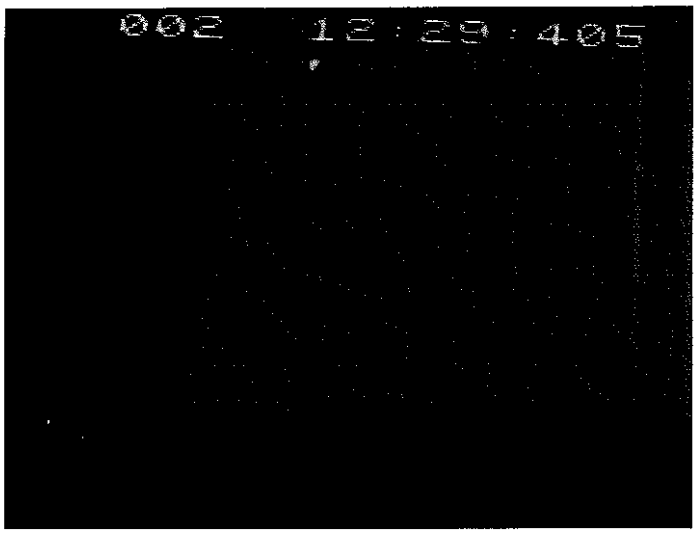
写真 7.2-1 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（低酸素雰囲気実験）

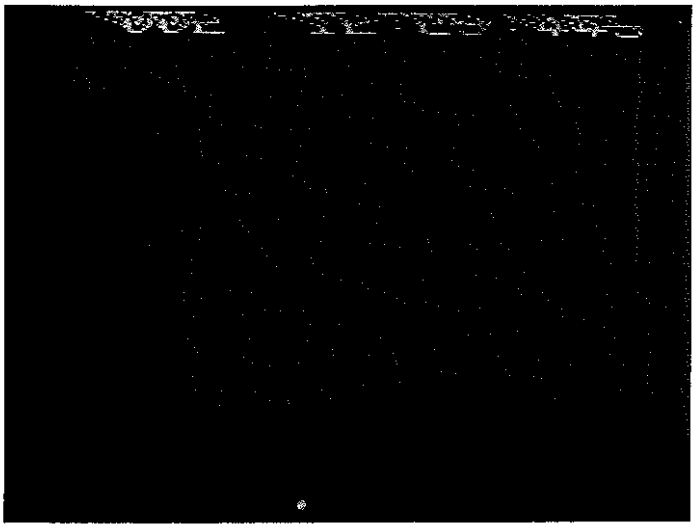




液滴No：11
落下距離：54mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.4m/S

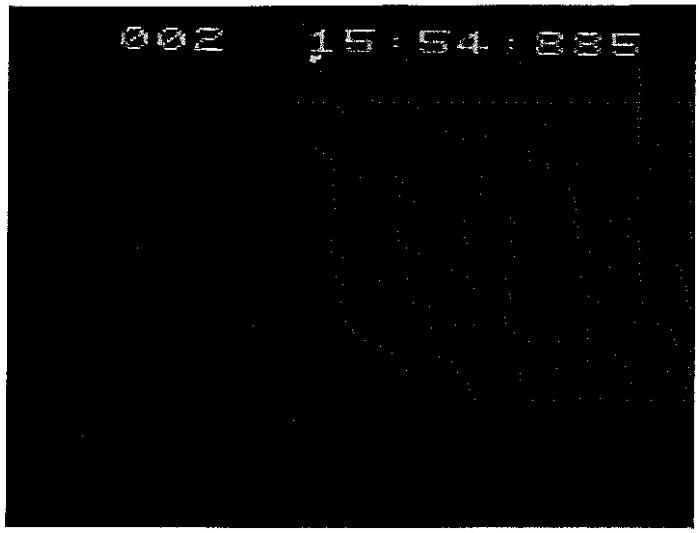
写真 7.2-2 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（低酸素雰囲気実験）

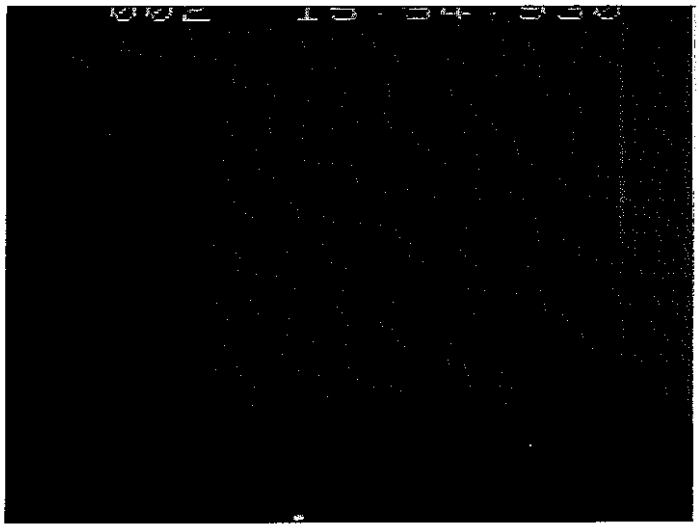




液滴No：15
落下距離：54mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.4m/S

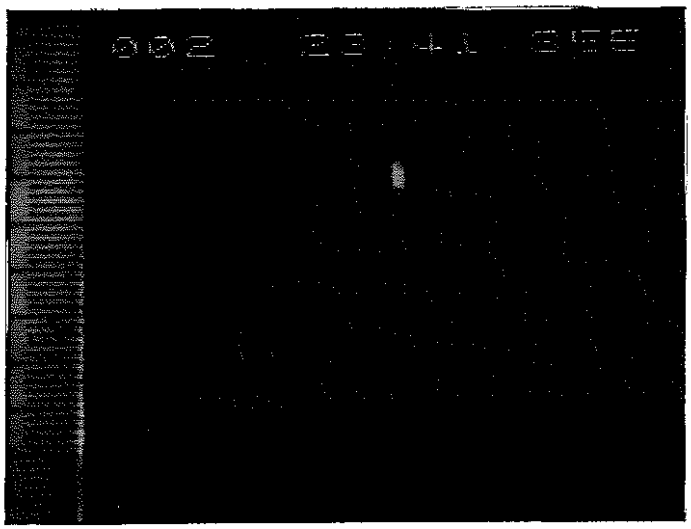
写真 7.2-3 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（低酸素雰囲気実験）

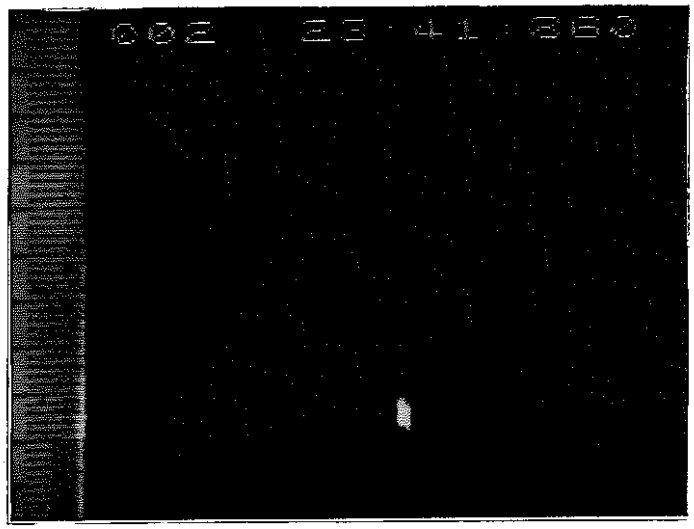




液滴No：19
落下距離：60mm
落下間隔：45ms
落下速度：1.3m/S

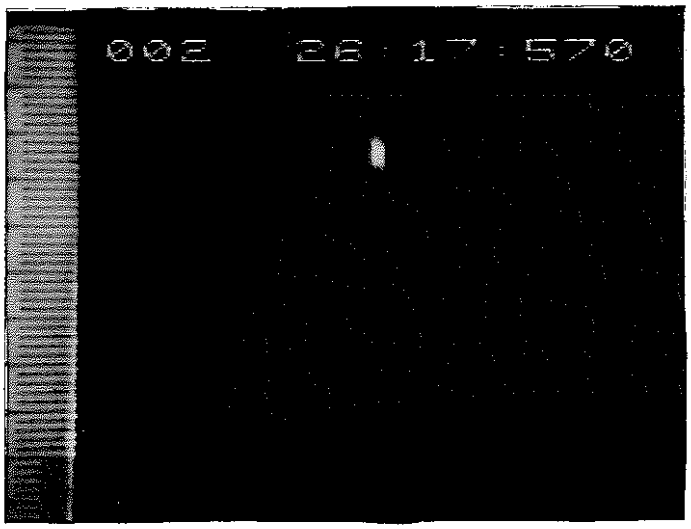
写真 7.2-4 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（低酸素雰囲気実験）

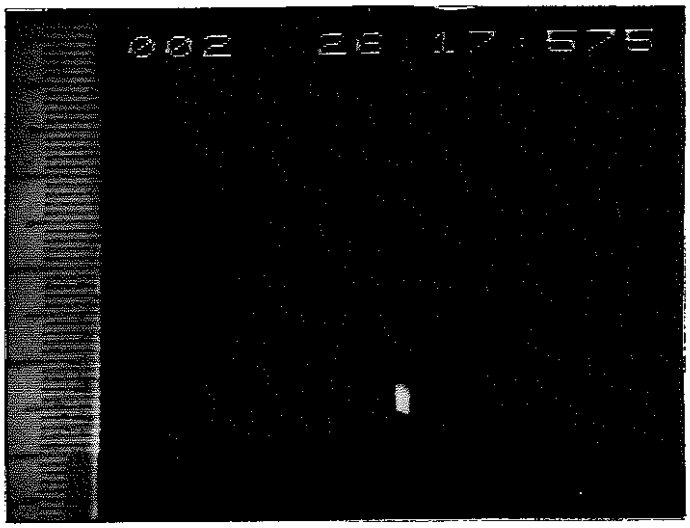




液滴No：28
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

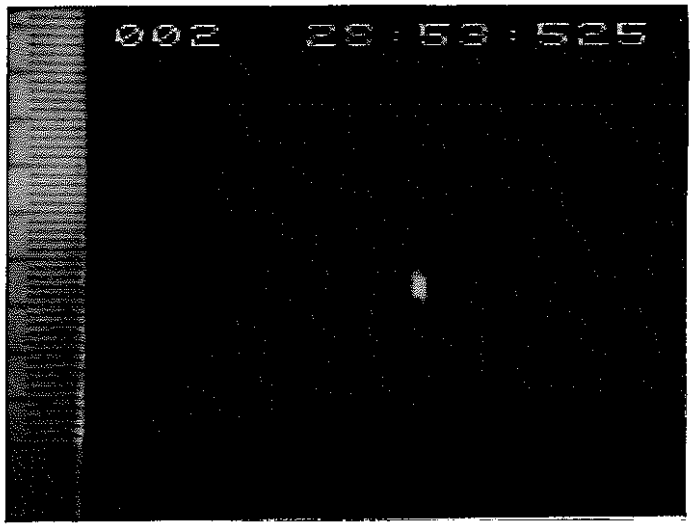
写真 7.2-5　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(低酸素雰囲気実験)

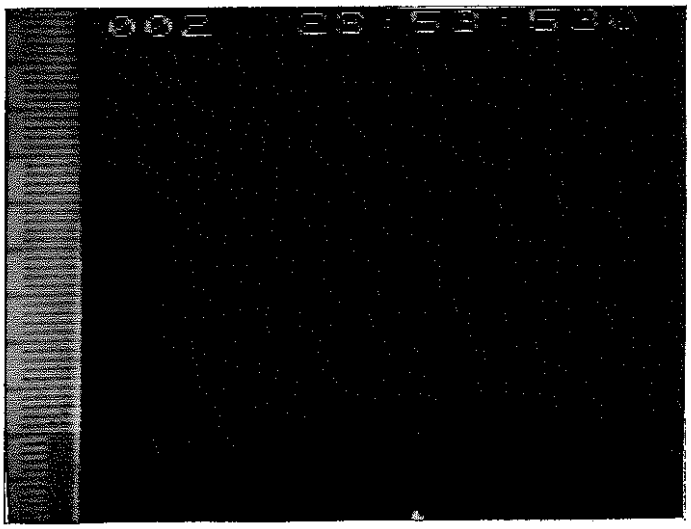




液滴No：31
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

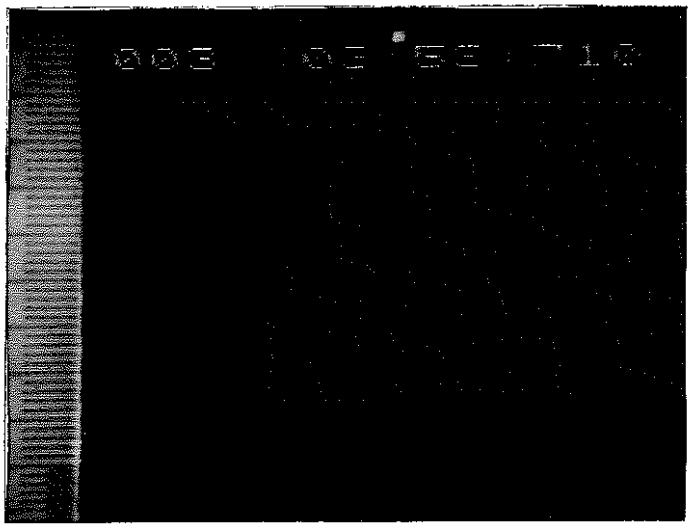
写真 7.2-6　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(低酸素雰囲気実験)

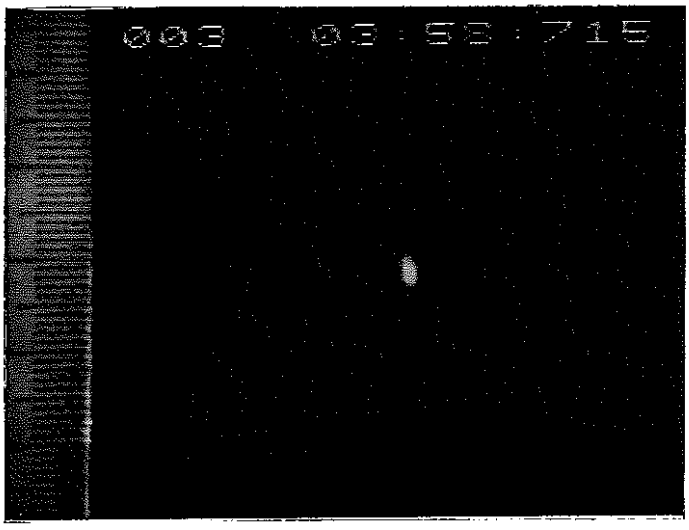




液滴No：34
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

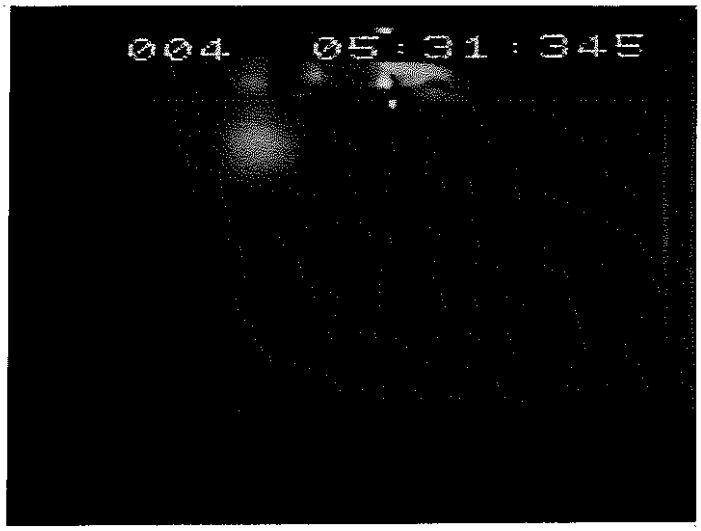
写真 7.2-7　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(低酸素雰囲気実験)

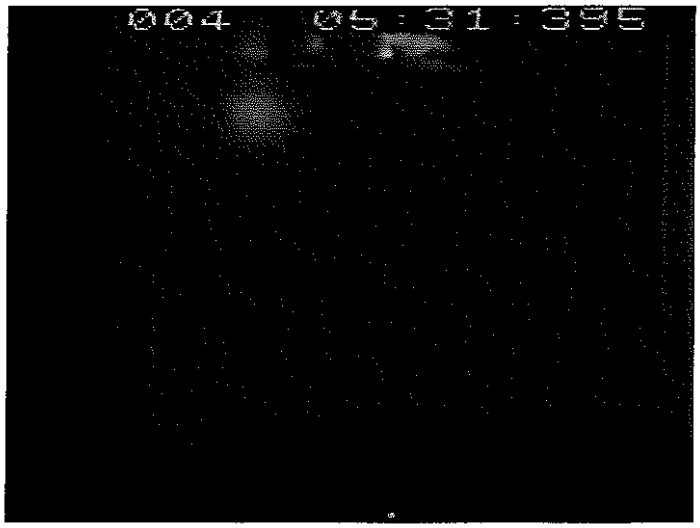




液滴No：48
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

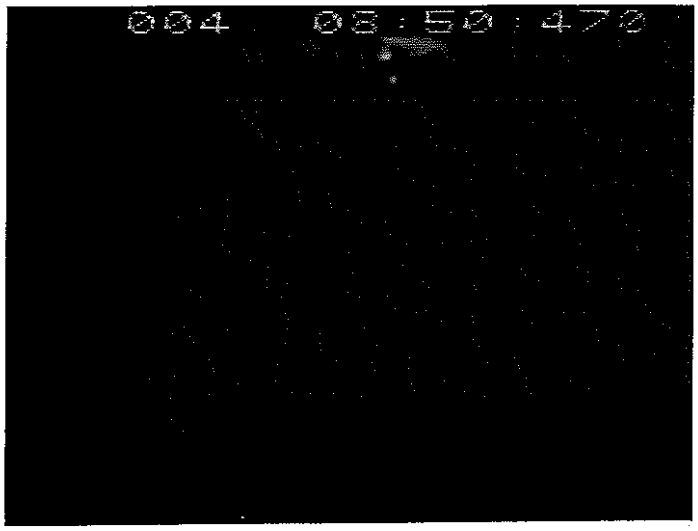
写真 7.2-8　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(低酸素雰囲気実験)

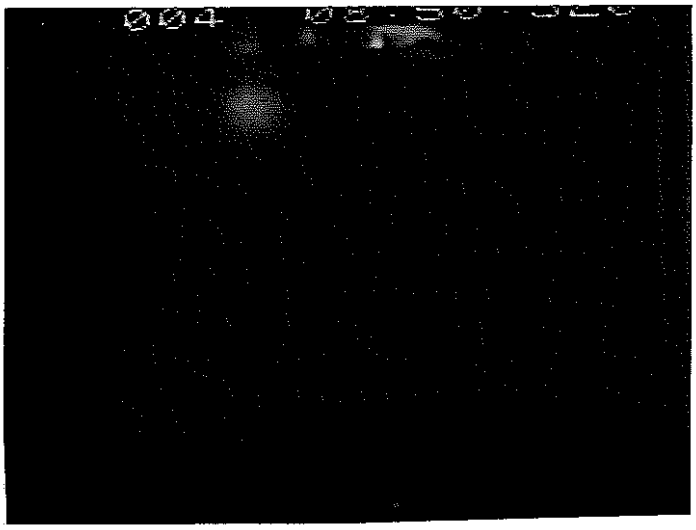




液滴No：7
落下距離：68mm
落下間隔：50ms
落下速度：1.4m/S

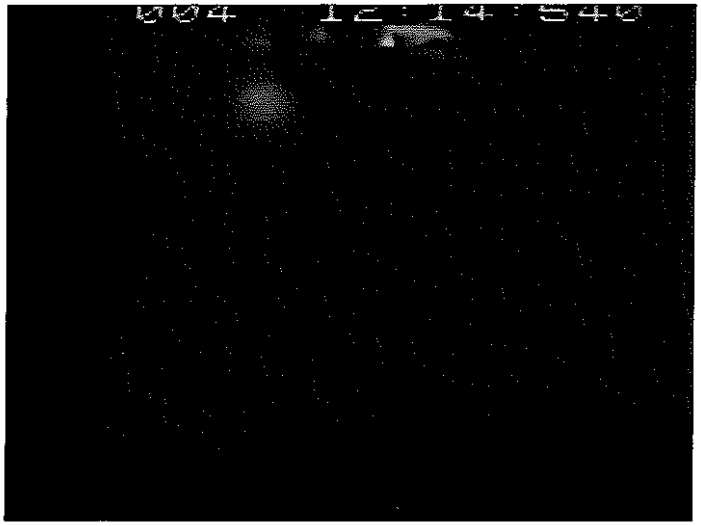
写真 7.2-9 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-1）





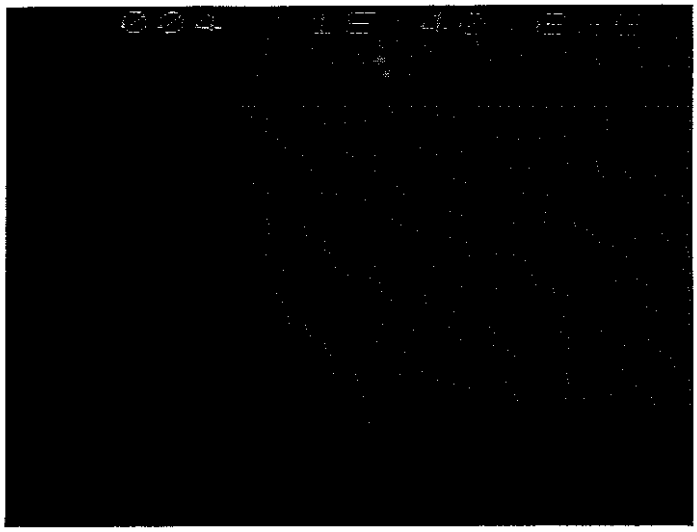
液滴No：11
落下距離：68mm
落下間隔：50ms
落下速度：1.4m/S

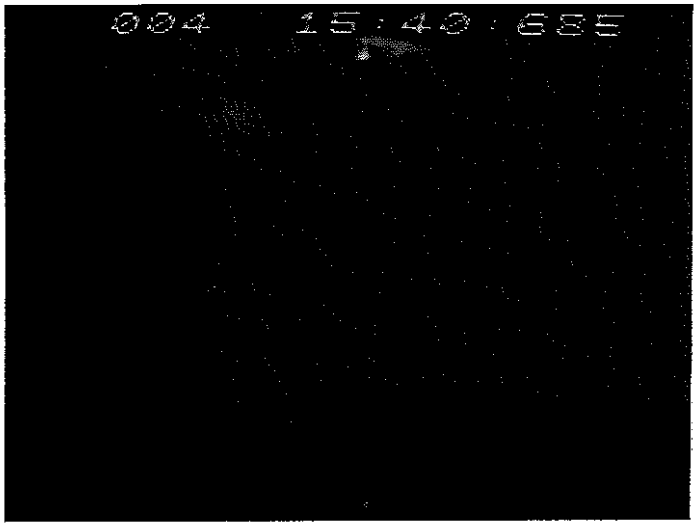
写真 7.2-10 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第１回目-1)



液滴No：15
落下距離：67.5mm
落下間隔：50ms
落下速度：1.4m/S

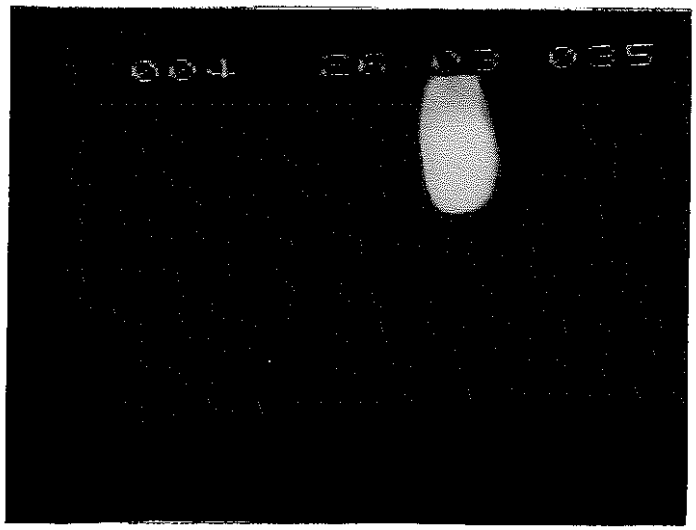
写真 7.2-11 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-1）

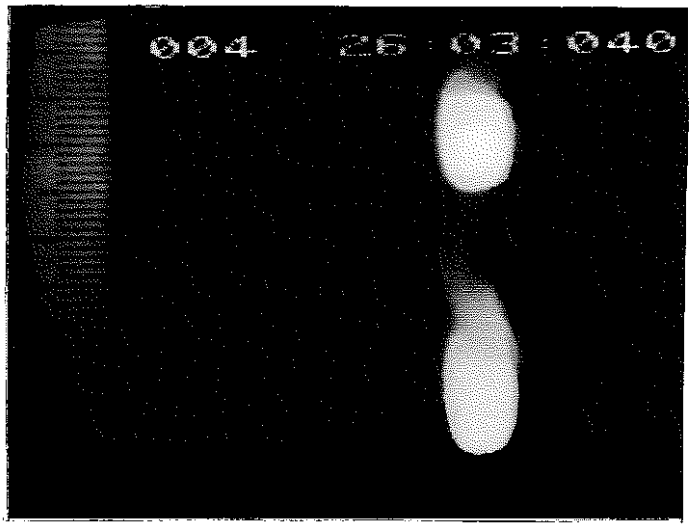




液滴No：19
落下距離：67.5mm
落下間隔：50ms
落下速度：1.4m/S

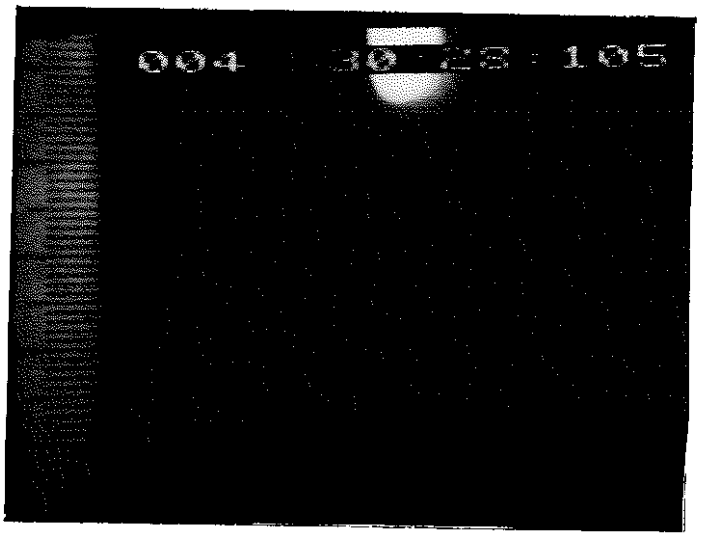
写真 7.2-12 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-1）

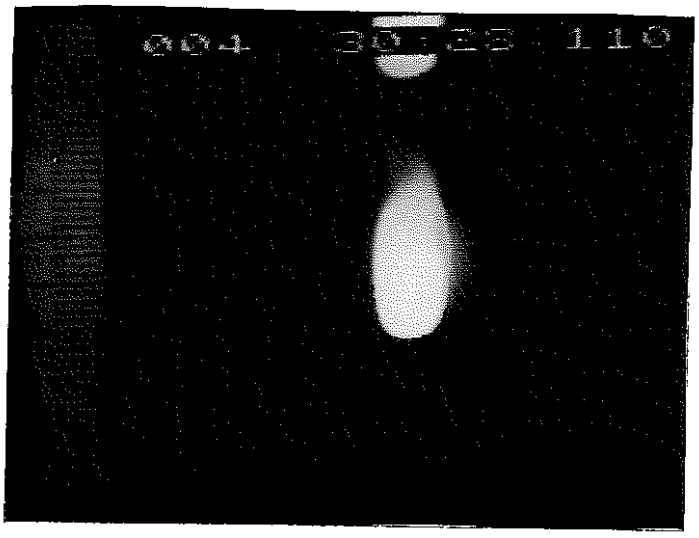




液滴No：31
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

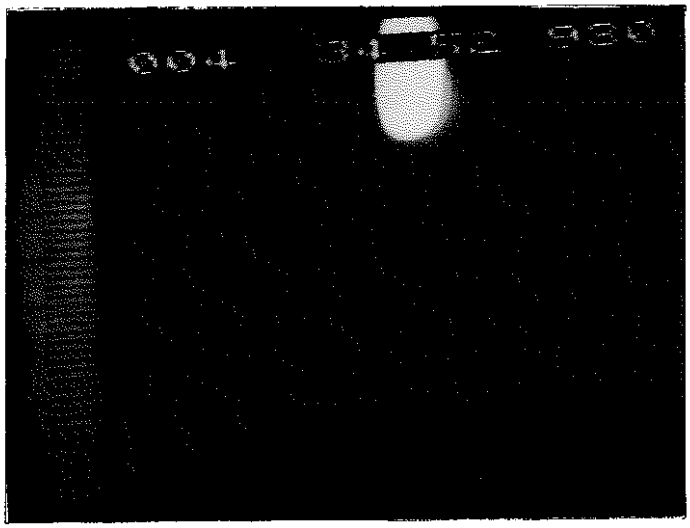
写真 7.2-13　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-1)

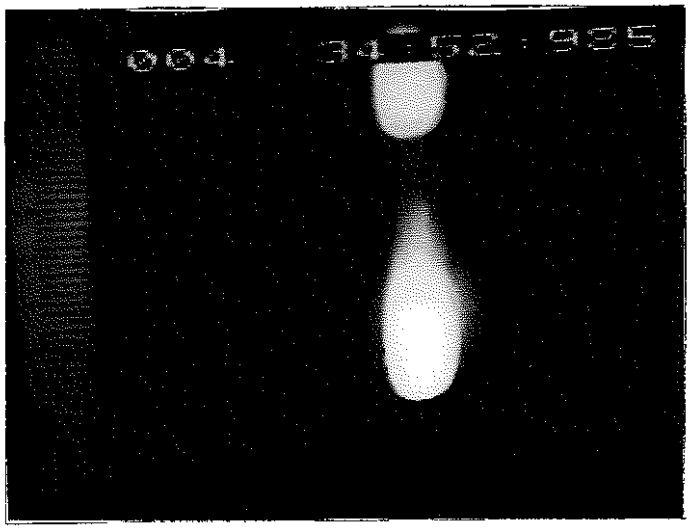




液滴No：36
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

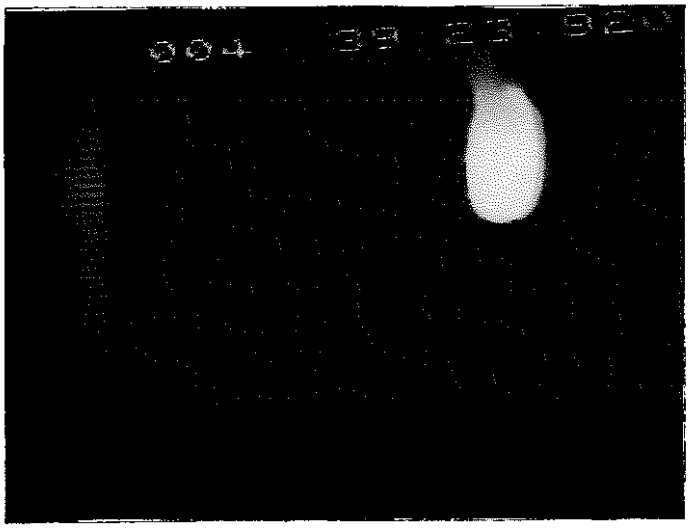
写真 7.2-14　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-1)

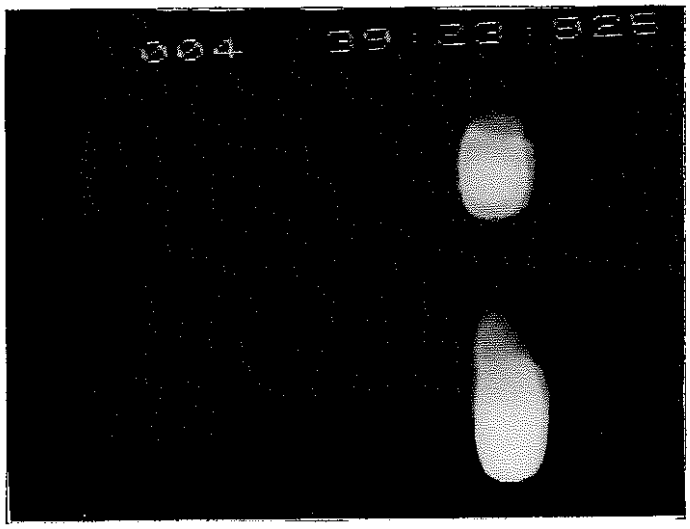




液滴No：41
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

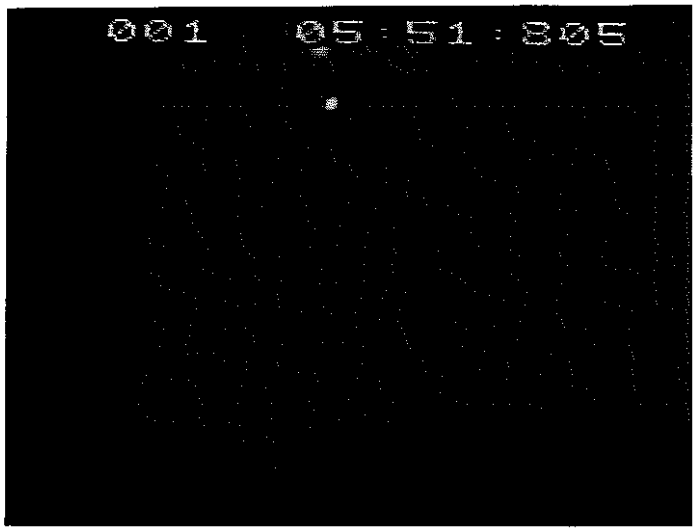
写真 7.2-15　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-1)

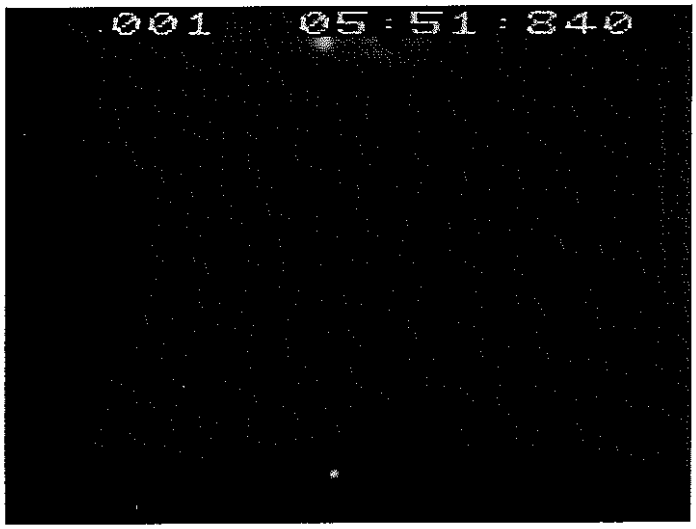




液滴No：46
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

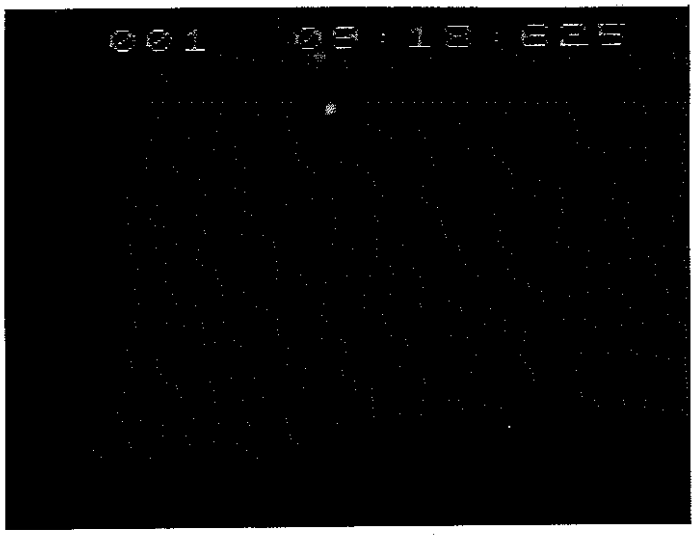
写真 7.2-16　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-1)

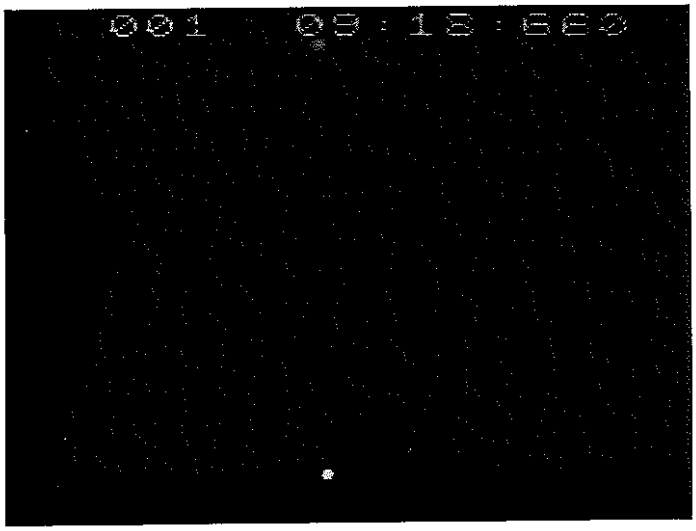




液滴No：7
落下距離：46.5mm
落下間隔：35ms
落下速度：1.3m/S

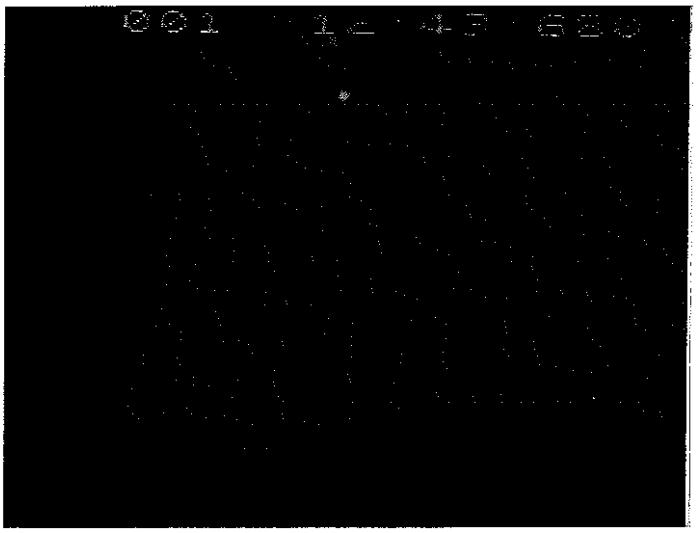
写真 7.2-17 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-2）

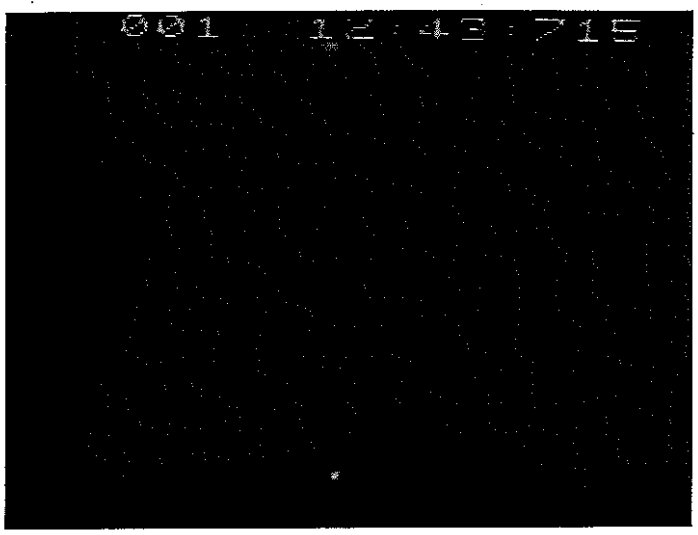




液滴No：11
落下距離：47.5mm
落下間隔：35ms
落下速度：1.4m/S

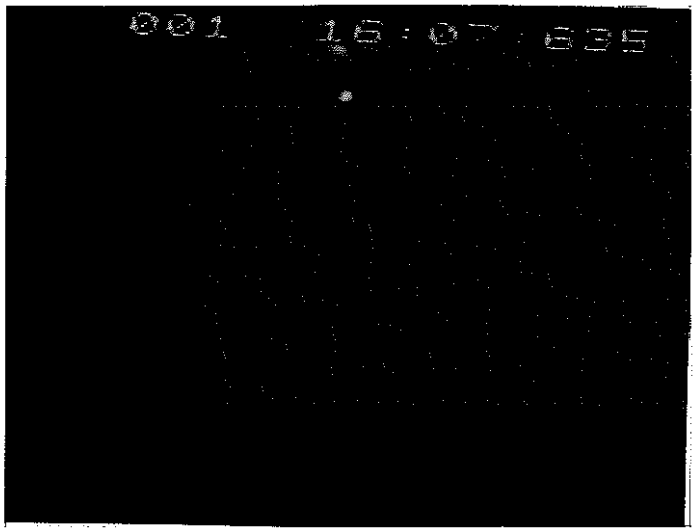
写真 7.2-18 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)

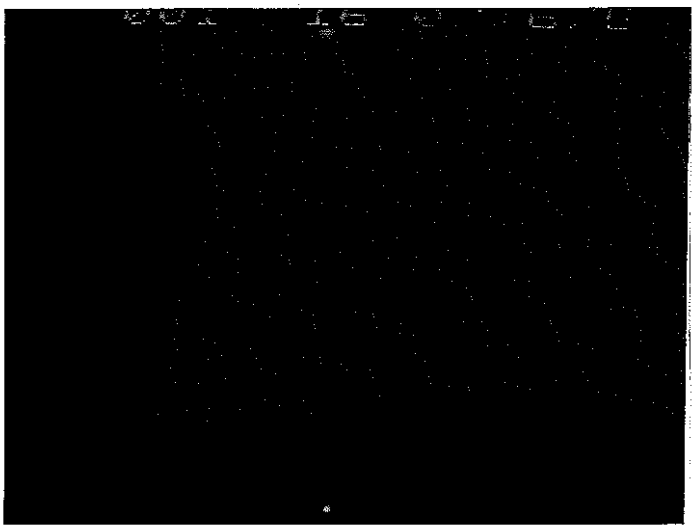




液滴No：15
落下距離：47mm
落下間隔：35ms
落下速度：1.3m/S

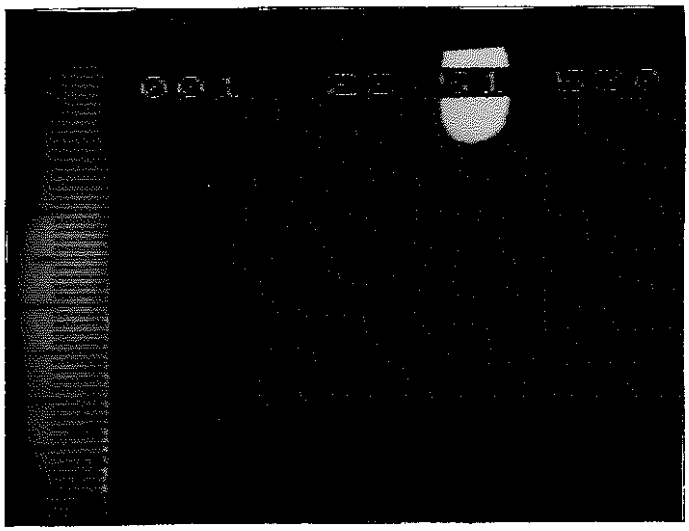
写真 7.2-19 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-2）

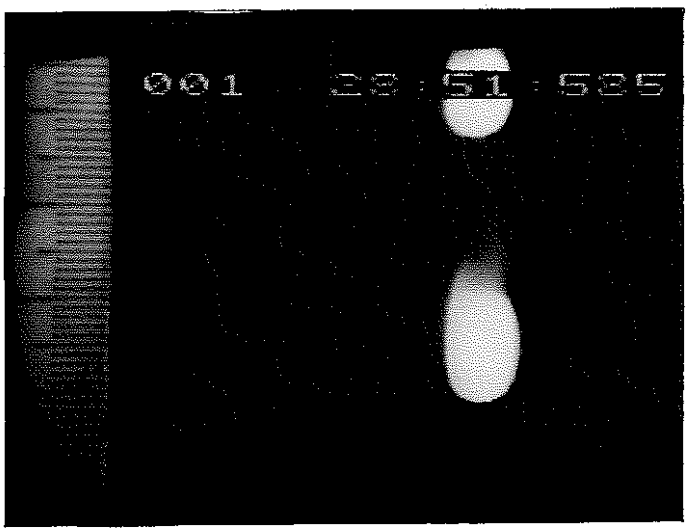




液滴No：19
落下距離：52mm
落下間隔：40ms
落下速度：1.3m/S

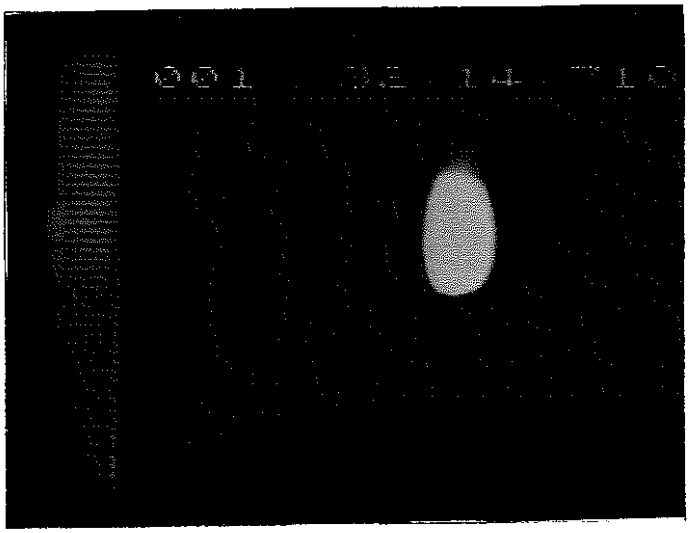
写真 7.2-20 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第１回目-2）

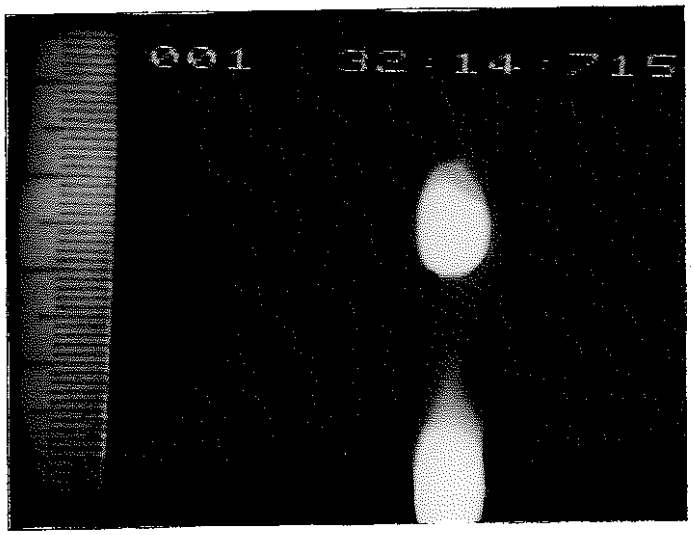




液滴No：34
落下距離：28.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.7m/S

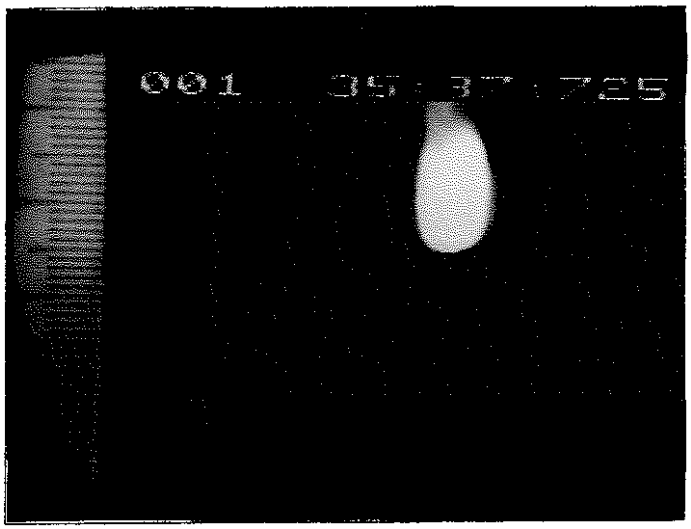
写真 7.2-21　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)

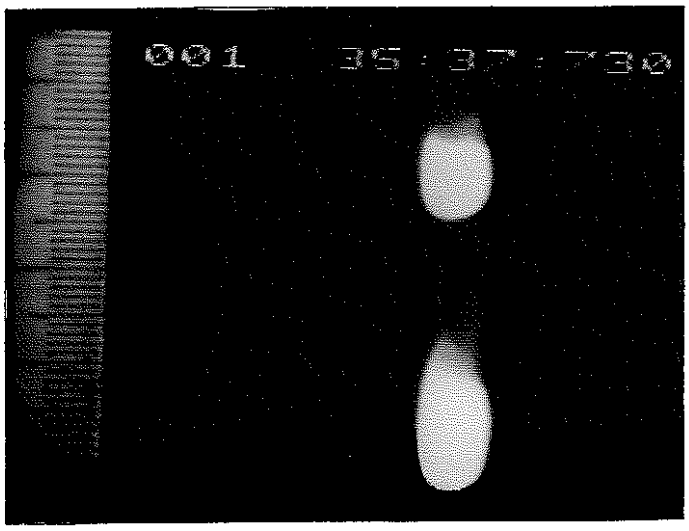




液滴No：38
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

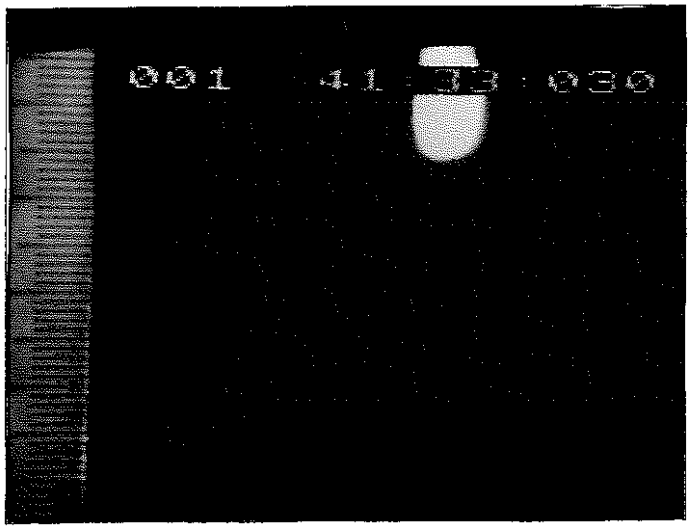
写真 7.2-22　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)

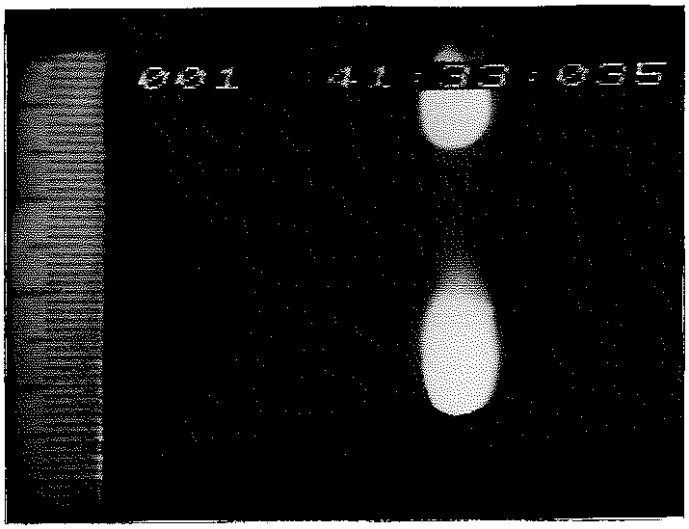




液滴No：42
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

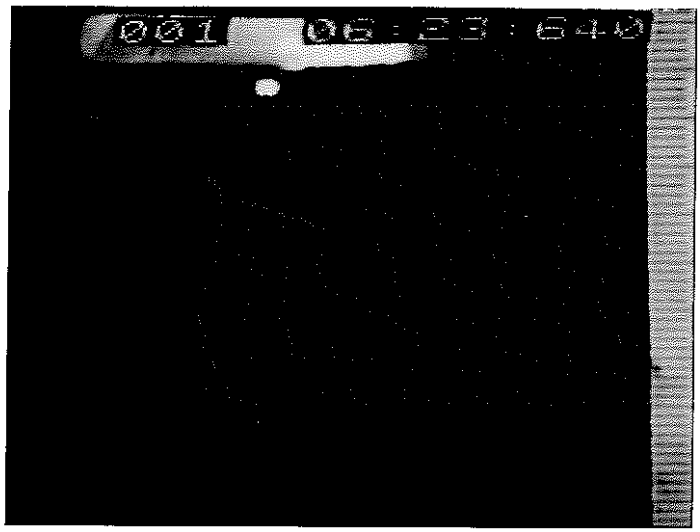
写真 7.2-23　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)

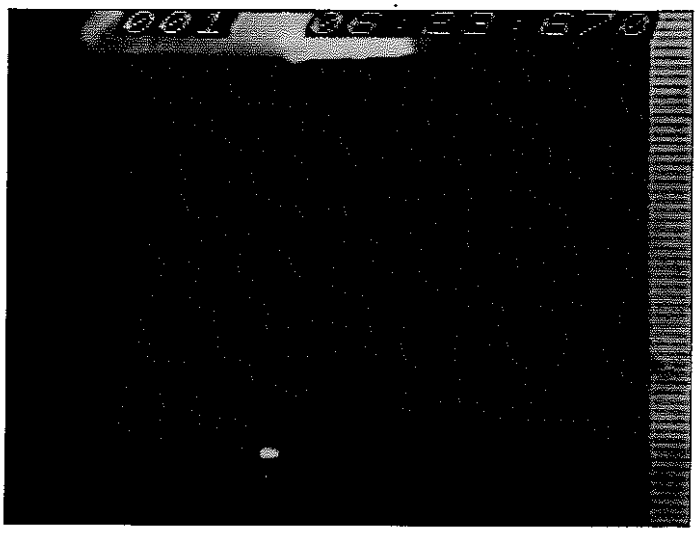




液滴No：49
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

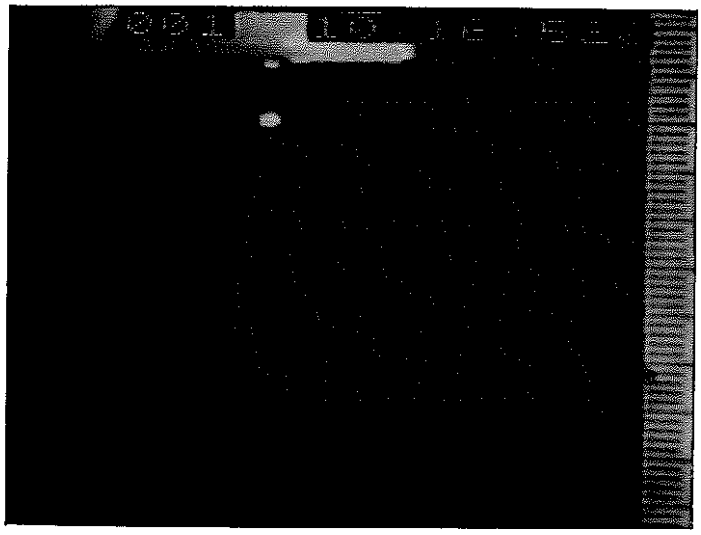
写真 7.2-24　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第1回目-2)

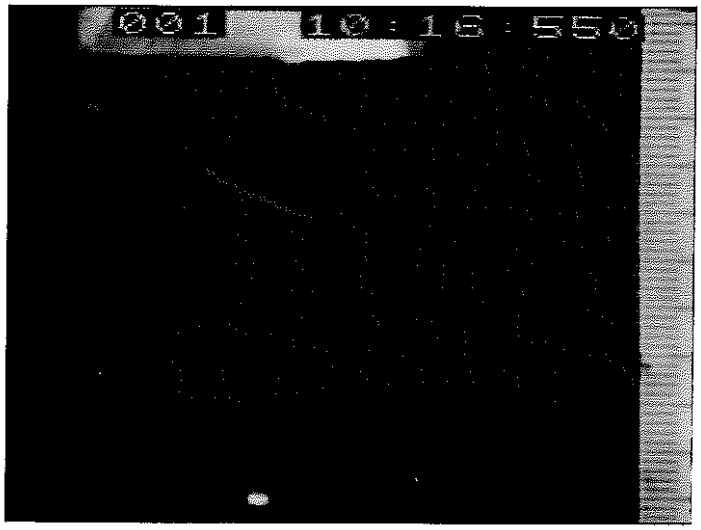




液滴No：7
落下距離：38.5mm
落下間隔：30ms
落下速度：1.3m/S

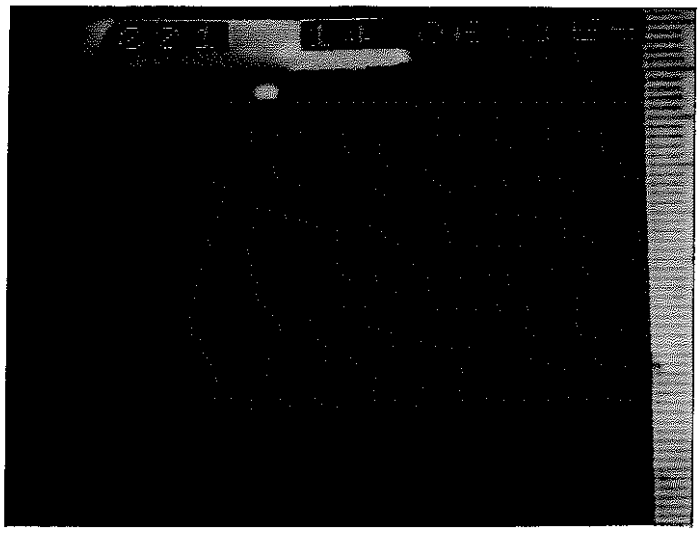
写真 7.2-25 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)

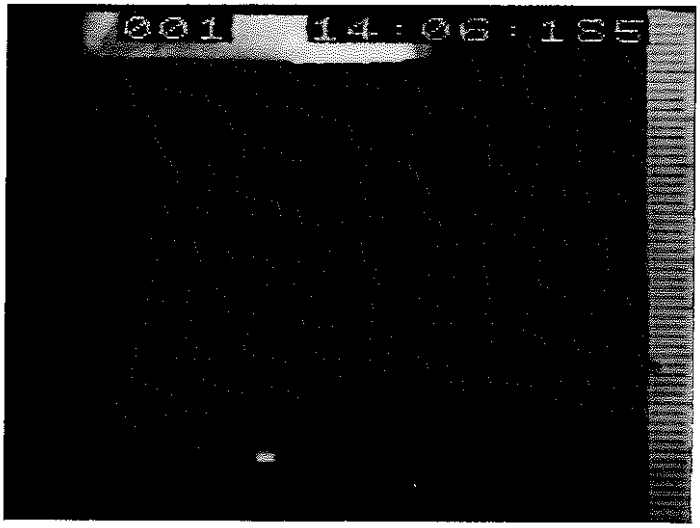




液滴No：11
落下距離：39.5mm
落下間隔：30ms
落下速度：1.3m/S

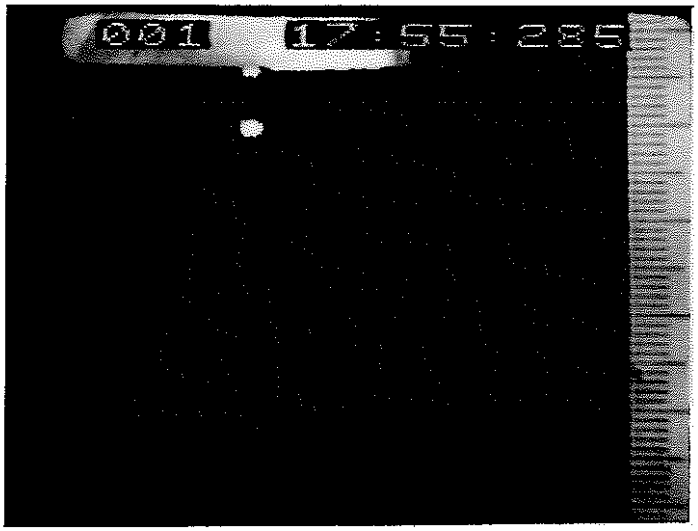
写真 7.2-26 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)

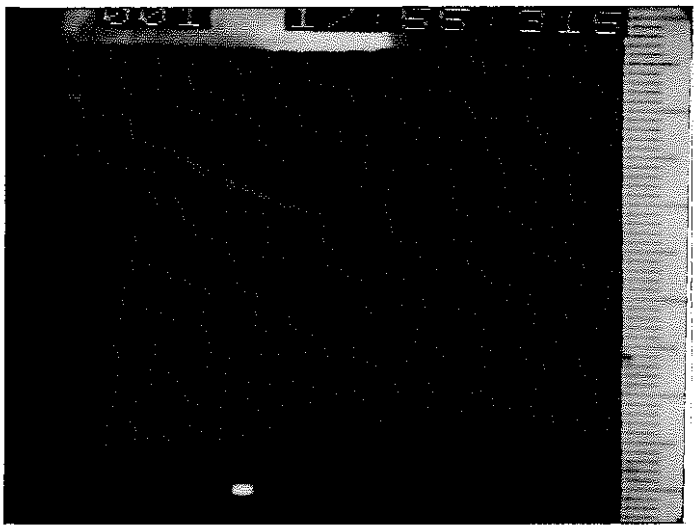




液滴No：15
落下距離：39mm
落下間隔：30ms
落下速度：1.3m/S

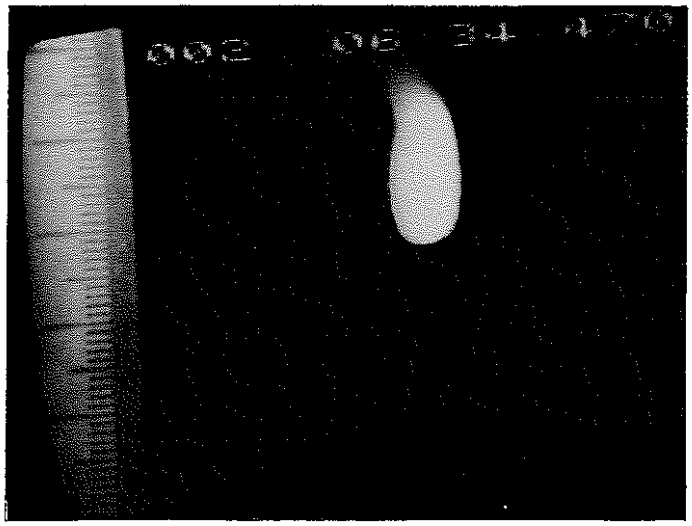
写真 7.2-27 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)

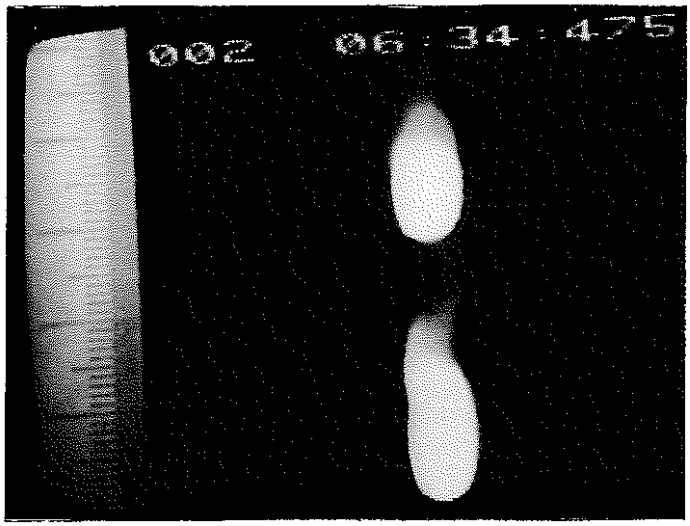




液滴No：19
落下距離：39.5mm
落下間隔：30ms
落下速度：1.3m/S

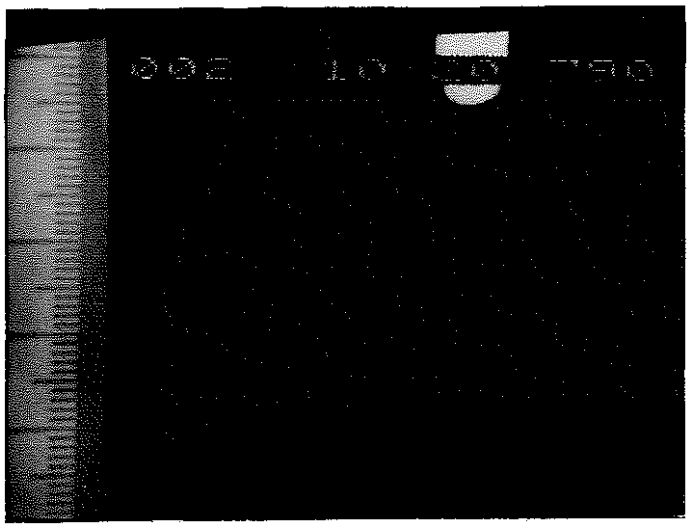
写真 7.2-28 ｶﾞｲﾄﾞ管直下でのNa液滴落下速度の測定
（大気雰囲気実験，第２回目-1）

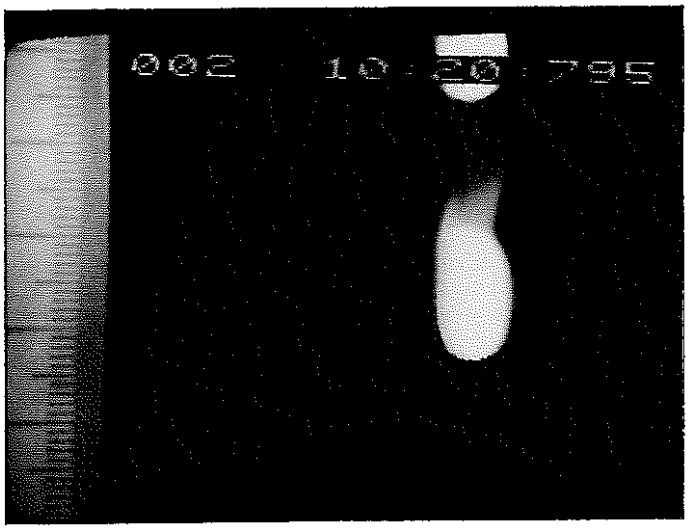




液滴No：34
落下距離：28.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.7m/S

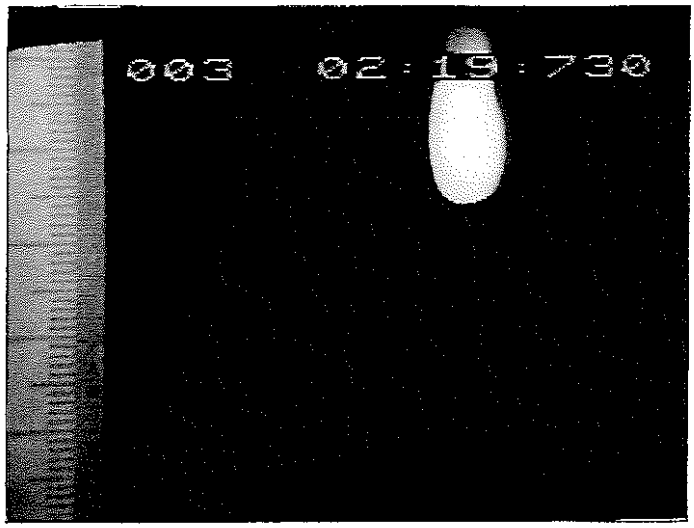
写真 7.2-29　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)

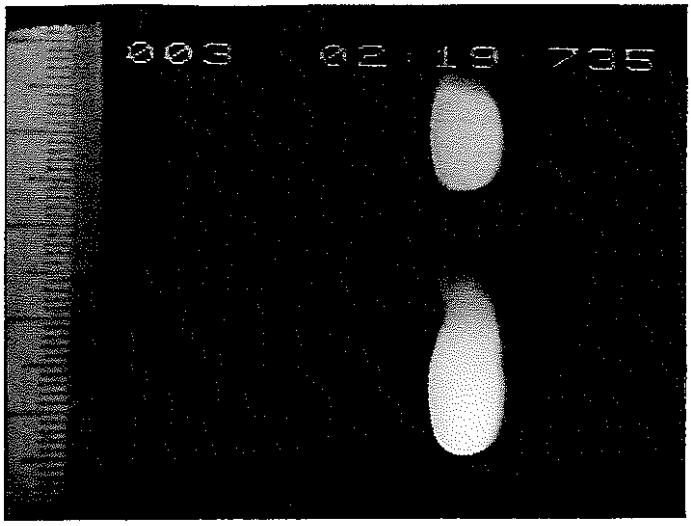




液滴No：38
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

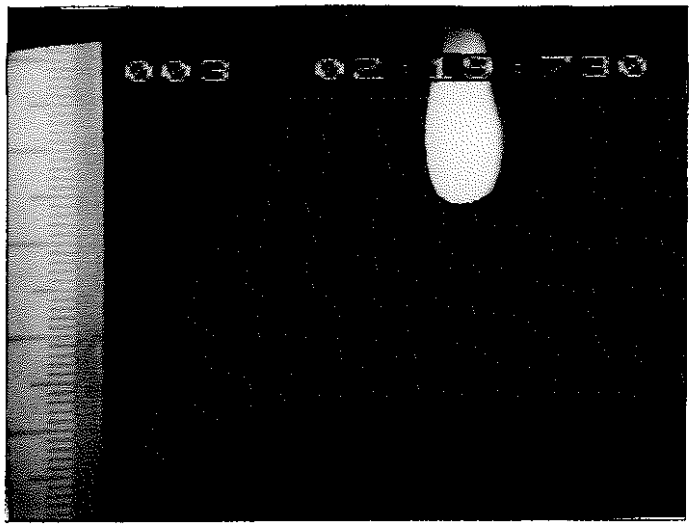
写真 7.2-30　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)





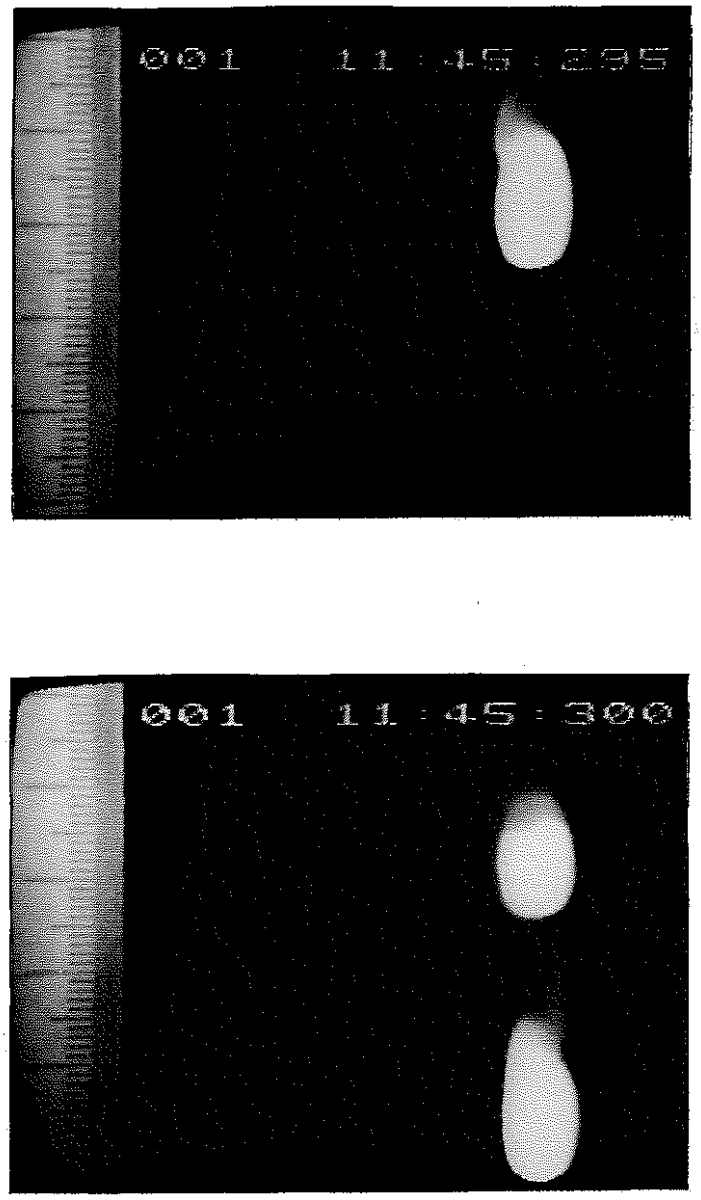
液滴No：49
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

写真 7.2-32　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-1)



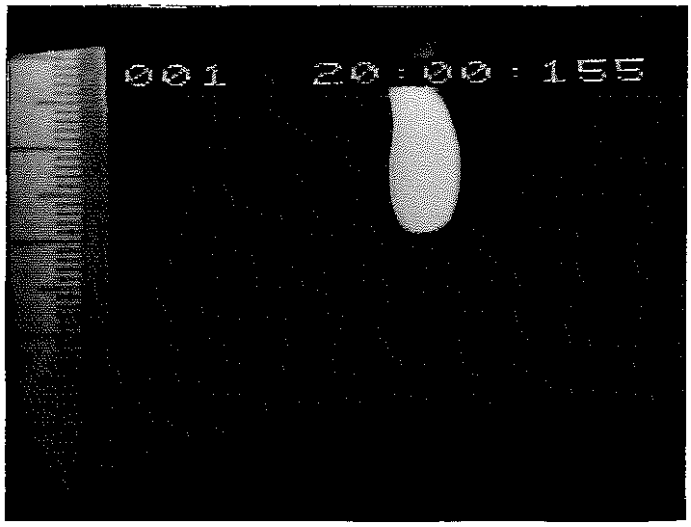
液滴No：49
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

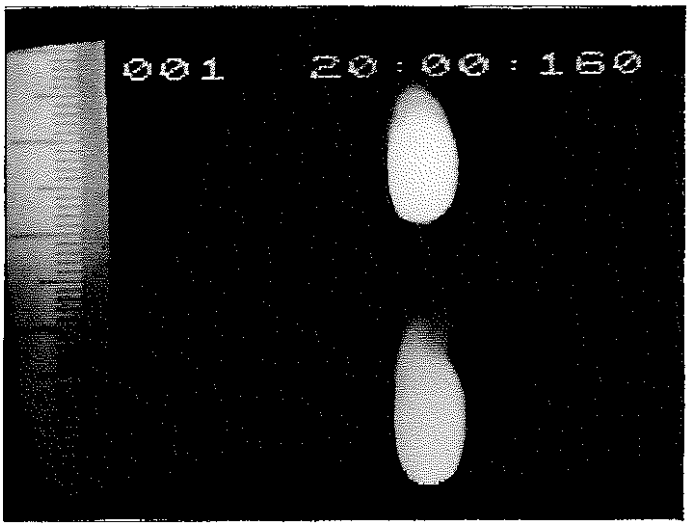
写真 7.2-32　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第2回目-1)



液滴No：15
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

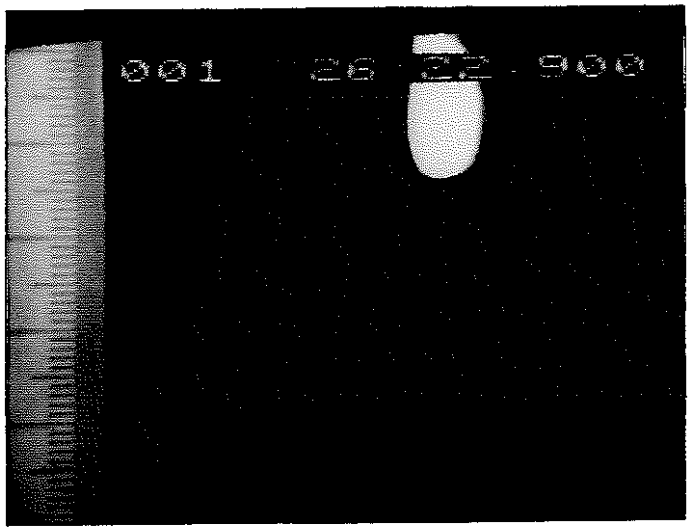
写真 7.2-33　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第2回目-2)

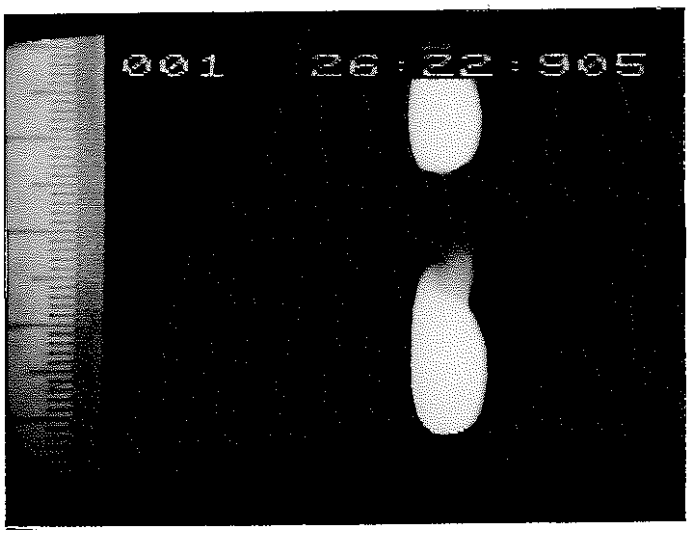




液滴No：24
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

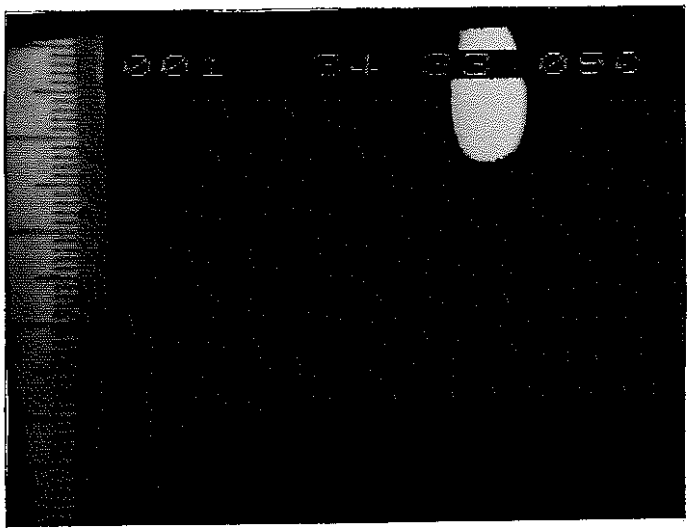
写真 7.2-34　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-2)

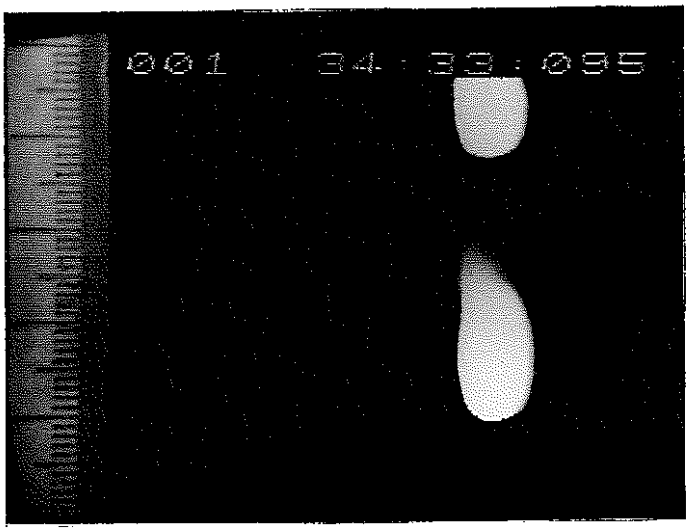




液滴No：31
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

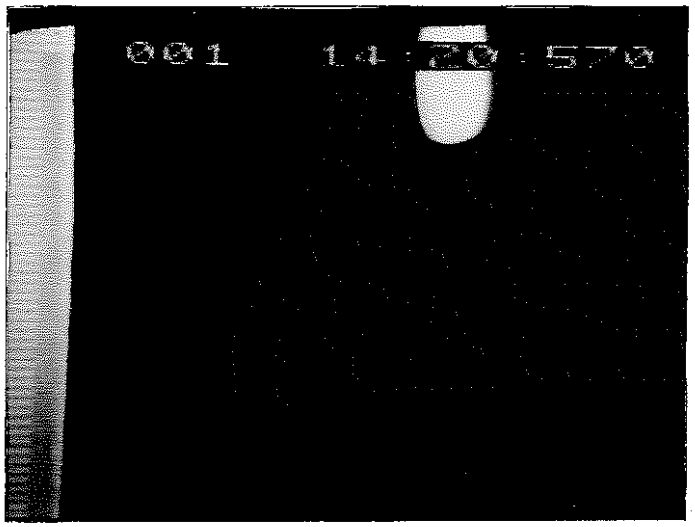
写真 7.2-35　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-2)

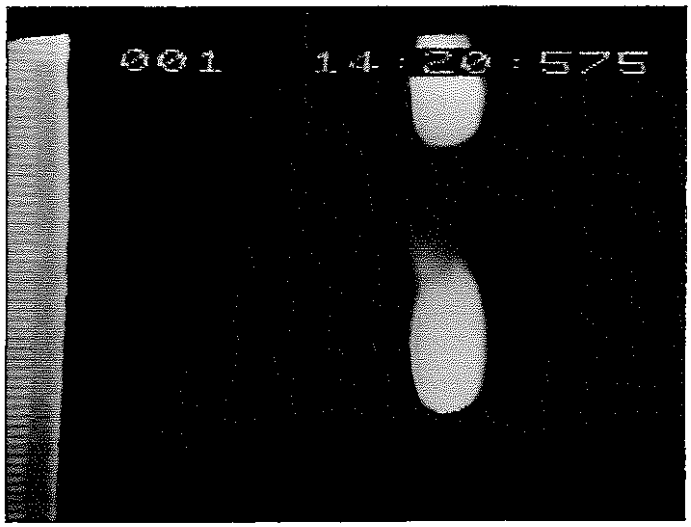




液滴No：40
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

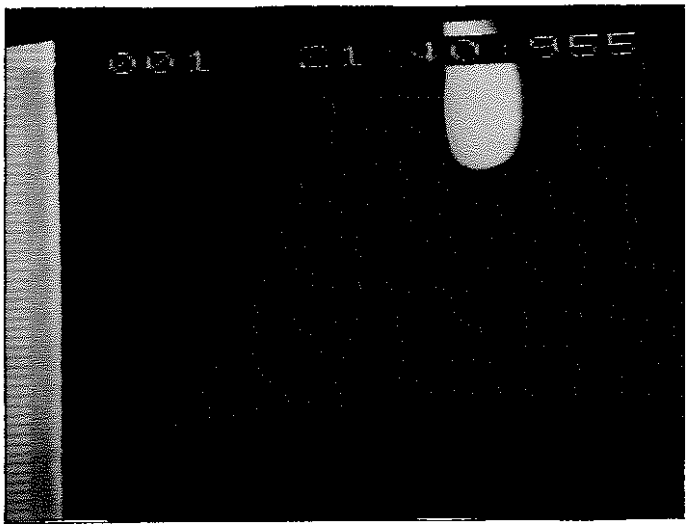
写真 7.2-36　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第２回目-2)

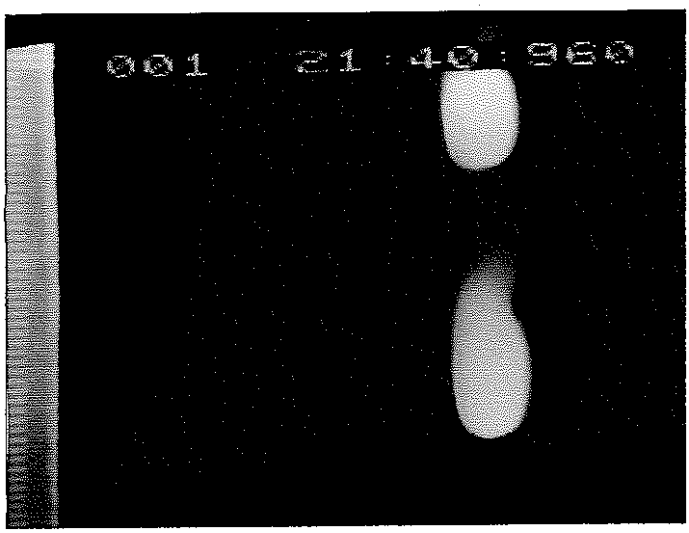




液滴No：16
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

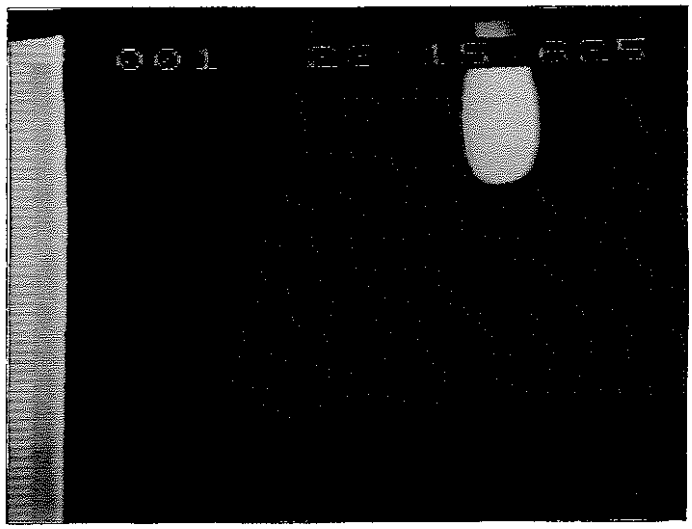
写真 7.2-37　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第３回目-1)

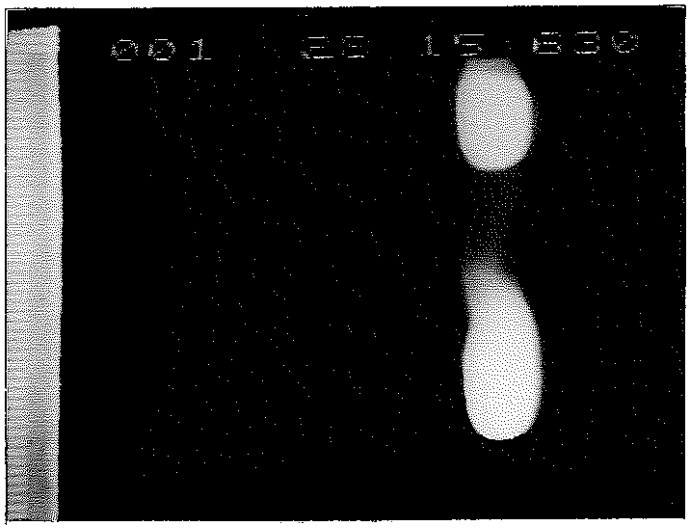




液滴No：24
落下距離：27.5mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.5m/S

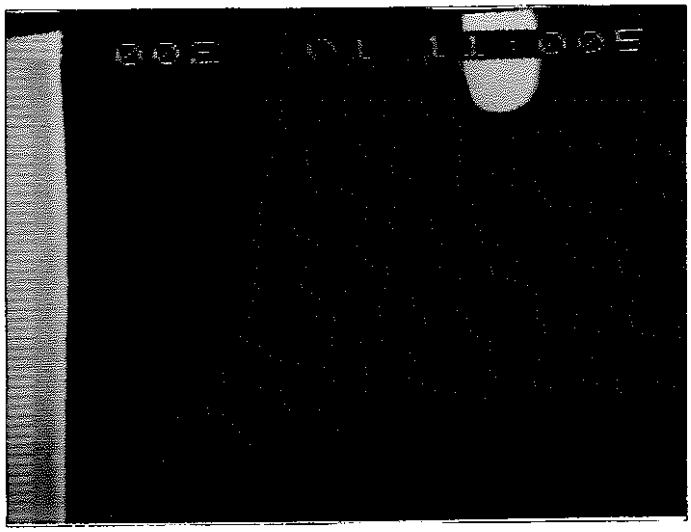
写真 7.2-38　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-1)





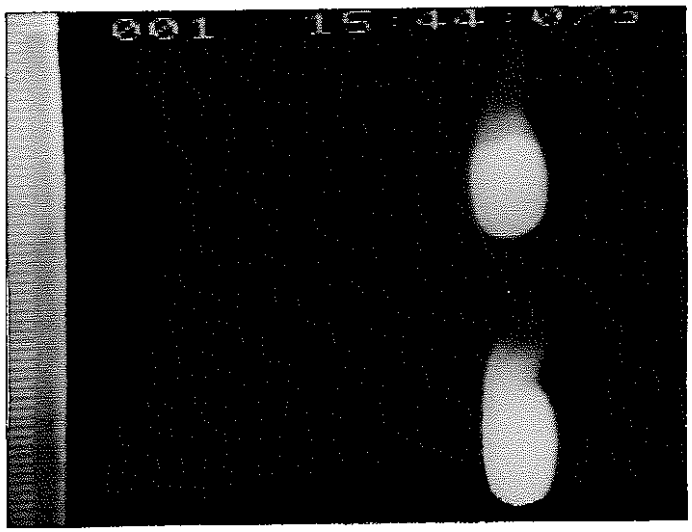
液滴No：31
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

写真 7.2-39　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-1)



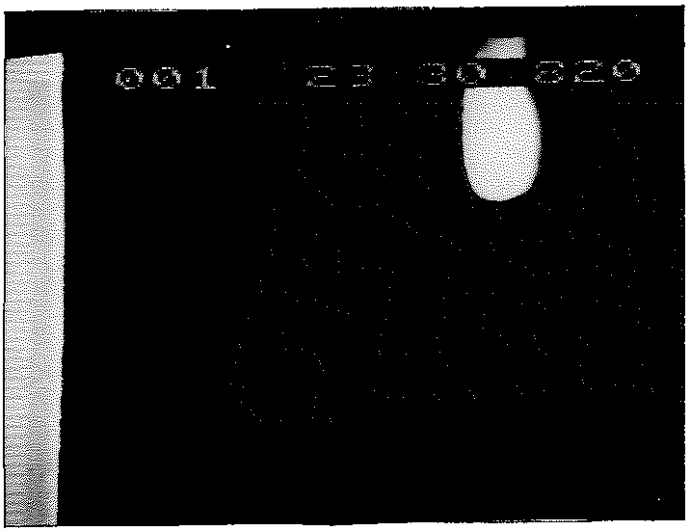
液滴No：42
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

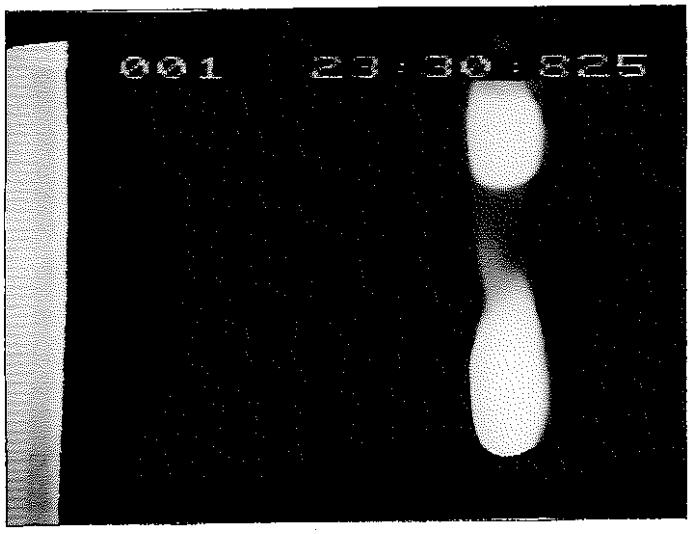
写真 7.2-40　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-1)



液滴No：15
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

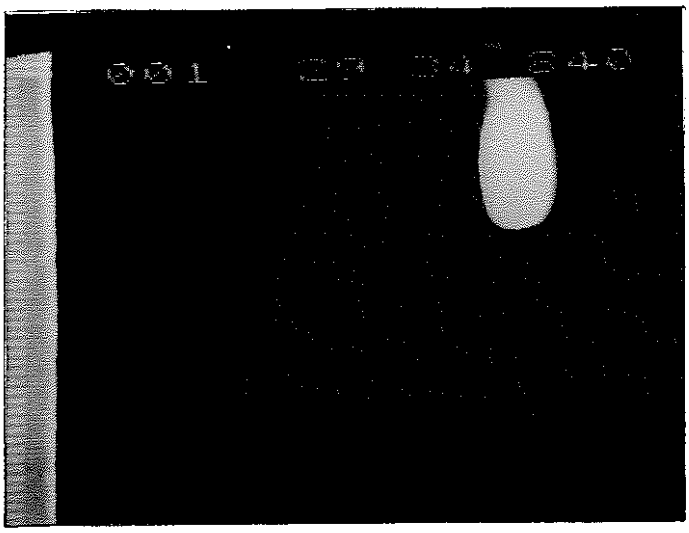
写真 7.2-41　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第３回目-2)

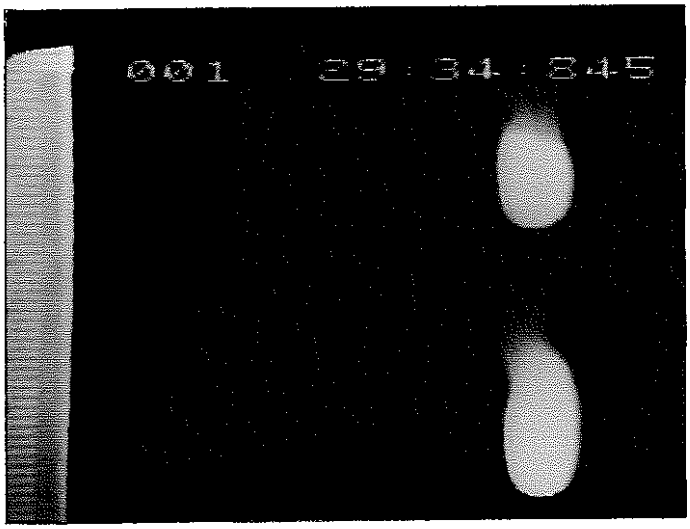




液滴No：24
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

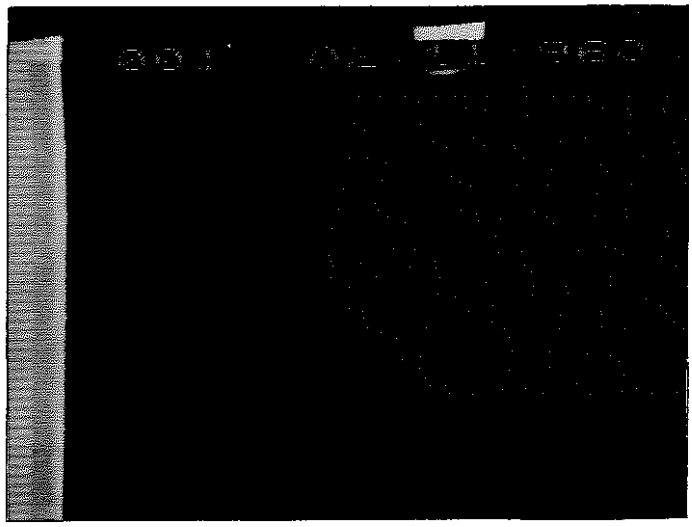
写真 7.2-42　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第３回目-2)

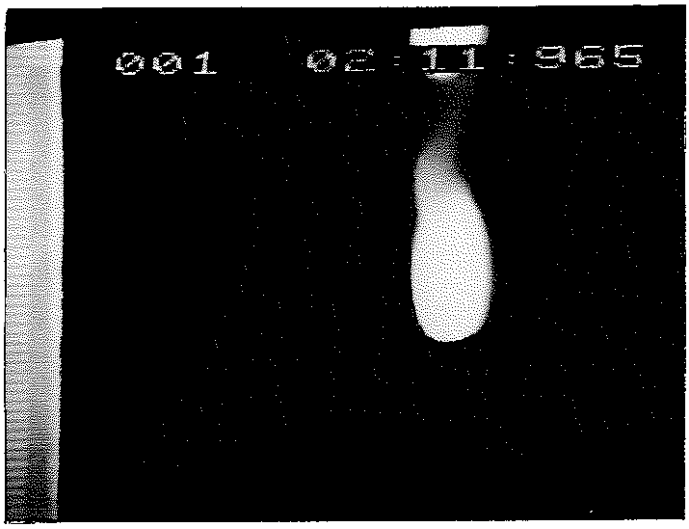




液滴No：31
落下距離：28mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.6m/S

写真 7.2-43　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第３回目-2)





液滴No：40
落下距離：27mm
落下間隔：5ms
落下速度：5.4m/S

写真 7.2-44　約2.4m落下位置でのNa液滴落下速度の測定
(大気雰囲気実験，第3回目-2)

表 7.2-1 Na液滴落下速度一覧表(1/2)

No	低酸素雰囲気実験		大気雰囲気実験 1-1		大気雰囲気実験 1-2		大気雰囲気実験 2-1	
	距離 (mm)	速度 (m/s)	距離 (mm)	速度 (m/s)	距離 (mm)	速度 (m/s)	距離 (mm)	速度 (m/s)
	上部		上部		上部		上部	
1	48.5	1.4	68	1.4	52.5	1.3	39.5	1.3
2	54	1.4	67	1.3	53.5	1.3	39	1.3
3	53.5	1.3	67	1.3	53	1.3	38.5	1.3
4	60	1.3	68	1.4	53	1.3	39	1.3
5	55	1.4	68	1.4	46.5	1.3	38.5	1.3
6	55	1.4	69	1.4	54	1.4	39	1.3
7	54	1.4	68	1.4	46.5	1.3	38.5	1.3
8	55	1.4	67	1.3	47	1.3	39	1.3
9	54	1.4	61	1.4	53	1.3	39	1.3
10	54.5	1.4	67	1.3	53	1.3	39.5	1.3
11	54	1.4	68	1.4	47.5	1.4	39.5	1.3
12	54.5	1.4	67.5	1.4	53	1.3	39.5	1.3
13	54.5	1.4	67	1.3	47	1.3	46	1.3
14	61	1.4	67	1.3	52	1.3	46.5	1.3
15	54	1.4	67.5	1.4	47	1.3	39	1.3
16	54.5	1.4	68.5	1.4	52	1.3	39	1.3
17	55.5	1.4	68	1.4	47	1.3	39	1.3
18	62	1.4	67.5	1.4	47	1.3	39.5	1.3
19	60	1.3	67.5	1.4	52	1.3	39.5	1.3
20	55	1.4	61	1.4	46.5	1.3	39	1.3
21	55	1.4	61.5	1.4	52	1.3	—	—
22	—	—	—	—	—	—	—	—
	平均速度	1.4	平均速度	1.4	平均速度	1.3	平均速度	1.3
	標準偏差	0.02	標準偏差	0.01	標準偏差	0.02	標準偏差	0.01
	下部		下部		下部		下部	
23	—	—	27	5.4	—	—	—	—
24	27.5	5.5	27	5.4	—	—	—	—
25	28	5.6	27	5.4	—	—	—	—
26	27	5.4	27	5.4	—	—	—	—
27	27	5.4	28	5.6	—	—	—	—
28	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6	28	5.6
29	28	5.6	27	5.4	28	5.6	28	5.6
30	27.5	5.5	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6
31	27	5.4	28	5.6	28	5.6	28	5.6
32	28	5.6	28	5.6	28	5.6	28	5.6
33	27	5.4	28	5.6	—	—	—	—
34	27.5	5.5	27.5	5.5	28.5	5.7	28.5	5.7
35	27	5.4	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6
36	27	5.4	27	5.4	28.5	5.7	28.5	5.7
37	—	—	28	5.6	28	5.6	28	5.6
38	—	—	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6
39	—	—	27	5.4	28	5.6	28	5.6
40	—	—	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6
41	—	—	28	5.6	28	5.6	28	5.6
42	—	—	27.5	5.5	27.5	5.5	27.5	5.5
43	—	—	28	5.6	27	5.4	27	5.4
44	—	—	28	5.6	—	—	—	—
45	—	—	28	5.6	—	—	—	—
46	—	—	28	5.6	27.5	5.5	27.5	5.5
47	27	5.4	28	5.6	28	5.6	28	5.6
48	27	5.4	27	5.4	28	5.6	28	5.6
49	27	5.4	27.5	5.5	28	5.6	28	5.6
50	27	5.4	28	5.6	28	5.6	28	5.6
	平均速度	5.5	平均速度	5.5	平均速度	5.6	平均速度	5.6
	標準偏差	0.08	標準偏差	0.09	標準偏差	0.06	標準偏差	0.06

表 7.2-2 Na液滴落下速度一覧表(2/2)

No	大気雰囲気実験 2-2		大気雰囲気実験 3-1		大気雰囲気実験 3-2	
	距離 (mm)	速度 (m/s)	距離 (mm)	速度 (m/s)	距離 (mm)	速度 (m/s)
	下部		下部		下部	
1	—	—	27.5	5.5	28	5.6
2	—	—	27.5	5.5	27.5	5.5
3	28	5.6	28	5.6	28.5	5.7
4	27.5	5.5	28	5.6	—	—
5	28	5.6	28	5.6	—	—
6	—	—	—	—	27.5	5.5
7	28	5.6	27.5	5.5	28	5.6
8	28	5.6	27	5.4	27.5	5.5
9	28	5.6	28	5.6	27.5	5.5
10	28	5.6	27	5.4	28	5.6
11	28	5.6	28	5.6	28	5.6
12	28	5.6	27	5.4	27	5.4
13	28	5.6	27	5.4	—	—
14	27	5.4	28	5.6	27.5	5.5
15	28	5.6	—	—	27	5.4
16	—	—	27	5.4	28	5.6
17	28	5.6	27	5.4	—	—
18	28	5.6	28	5.6	28	5.6
19	28	5.6	28	5.6	—	—
20	28	5.6	28	5.6	28	5.6
21	28.5	5.7	27	5.4	27	5.4
22	28	5.6	27	5.4	27.5	5.5
23	28	5.6	27	5.4	—	—
24	27.5	5.5	27.5	5.5	28	5.6
25	28	5.6	28	5.6	28	5.6
26	28	5.6	28	5.6	27.5	5.5
27	28	5.6	27.5	5.5	—	—
28	28	5.6	27.5	5.5	28	5.6
29	28	5.6	28	5.6	—	—
30	27.5	5.5	28	5.6	—	—
31	28	5.6	28	5.6	28	5.6
32	28	5.6	28	5.6	28	5.6
33	28	5.6	28	5.6	28	5.6
34	28	5.6	27.5	5.5	—	—
35	28	5.6	27.5	5.5	27.5	5.5
36	28	5.6	28	5.6	27	5.4
37	28.5	5.7	28	5.6	27	5.4
38	28	5.6	—	—	—	—
39	28	5.6	—	—	27	5.4
40	28	5.6	28	5.6	27	5.4
41	—	—	27.5	5.5	27	5.4
42	28.5	5.7	27	5.4	27	5.4
43	—	—	27.5	5.5	27	5.4
44	—	—	27	5.4	27	5.4
45	—	—	—	—	27	5.4
46	—	—	—	—	27.5	5.5
47	—	—	27	5.4	27.5	5.5
48	—	—	—	—	—	—
49	—	—	27.5	5.5	27.5	5.5
50	—	—	—	—	27	—
	平均速度	5.6	平均速度	5.5	平均速度	5.5
	標準偏差	0.05	標準偏差	0.09	標準偏差	0.09

7.3　Ｎａ液滴の落下所要時間について

ノズル先端から滴下された Na 液滴が、回収用パラフィンに到達するまでに要した時間をビデオフィルムから読取った。測定対象は、不活性ガス雰囲気実験、大気実験 2-1, 2 及び大気実験 3-1, 2 とした。

(1) 読取方法

ビデオカメラとビデオデッキは、次の特性を有する。ビデオカメラは、1 コマ当たり 1/60 秒で撮影しているが、ビデオデッキでは、1 コマ飛ばしの 1/30 秒で再生される。従って、コマ数をカウントすることにより所要時間(コマ数×1/30)を評価できる。

実際には、ノズル近傍とパラフィン近傍を撮影するカメラの撮影時間を同期させて撮影したビデオフィルムを再生し、ノズル先端から Na 液滴が離れパラフィン上に落下するまでのコマ数をカウントして所要時間を評価した。

(2) 撮影した画像の状況

各試験ケースとも各部の撮影を実施したものの、高速度ビデオカメラによる撮影で多量の光量を必要とするため、ハレーションを起こしているものもあった。以下に、各試験ケース毎の状況を示す。

- 低酸素雰囲気実験：ガイド管が失透し、Na 液滴の滴下前後が不明。
- 大気雰囲気実験 2-1, 2：ハレーションによりノズル近傍が不明。
- 大気雰囲気実験 3-1, 2：辛うじて計測可能。

従って、大気実験 3-1, 2 のみ評価する。

(3) 所要時間

大気雰囲気実験 3-1, 2 の読取り結果を別表に示す。ノズルの下端からパラフィンの液面に到達(落下距離約 2.7m)するまでに要した時間は、50 滴の平均で 0.81 秒であった。

なお、参考までに、報告書に示した(3)式を用い、Na 液滴を剛球と仮定し約 2.7m 落下の所要時間を評価すると約 0.70 秒であった。

表7.3　Ｎａ液滴の約2.7m落下に要した時間

大気雰囲気(第３回目－１、RUN２５)			大気雰囲気(第３回目－２、RUN２６)		
	コマ数	落下時間(sec)		コマ数	落下時間(sec)
1	25	0.83	1	25	0.83
2	25	0.83	2	24	0.80
3	25	0.83	3	24	0.80
4	24	0.80	4	25	0.83
5	24	0.80	5	24	0.80
6	24	0.80	6	25	0.83
7	24	0.80	7	25	0.83
8	25	0.83	8	24	0.80
9	24	0.80	9	24	0.80
10	24	0.80	10	24	0.80
11	24	0.80	11	24	0.80
12	24	0.80	12	25	0.83
13	24	0.80	13	25	0.83
14	25	0.83	14	24	0.80
15	24	0.80	15	24	0.80
16	24	0.80	16	24	0.80
17	25	0.83	17	24	0.80
18	24	0.80	18	24	0.80
19	24	0.80	19	24	0.80
20	24	0.80	20	24	0.80
21	24	0.80	21	24	0.80
22	24	0.80	22	25	0.83
23	25	0.83	23	24	0.80
24	25	0.83	24	24	0.80
25	24	0.80	25	24	0.80
26	25	0.83	26	24	0.80
27	25	0.83	27	24	0.80
28	24	0.80	28	24	0.80
29	24	0.80	29	25	0.83
30	25	0.83	30	24	0.80
31	25	0.83	31	25	0.83
32	24	0.80	32	24	0.80
33	25	0.83	33	24	0.80
34	24	0.80	34	25	0.83
35	25	0.83	35	24	0.80
36	25	0.83	36	24	0.80
37	24	0.80	37	24	0.80
38	24	0.80	38	24	0.80
39	25	0.83	39	24	0.80
40	24	0.80	40	24	0.80
41	24	0.80	41	24	0.80
42	24	0.80	42	24	0.80
43	24	0.80	43	24	0.80
44	24	0.80	44	25	0.83
45	24	0.80	45	24	0.80
46	24	0.80	46	24	0.80
47	24	0.80	47	24	0.80
48	25	0.83	48	24	0.80
49	24	0.80	49	24	0.80
50	25	0.83	50	24	0.80
平均	24.36	0.81		24.22	0.81