PNC TN8410 98-032

コールドクルーシブル誘導溶融法による
ガラス溶融基礎試験（III）

１９９８年2月

動力炉・核燃料開発事業団
東　海　事　業　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下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－３３
動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所　技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

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

PNC TN8410 98-032
1 9 9 8 年 2 月

コールドクルーシブル誘導溶融法によるガラス溶融基礎試験(III)

実施責任者　河村　和廣[1)]
報　告　者　谷川　克也[1)]　篠崎　貢[2)]
小林　洋昭[1)]

要　旨

コールドクルーシブル誘導溶融法(以下CCIM)の放射性廃棄物処理への適用の一環として、溶融性能向上を目指し、スリット数16を有するステンレス(以下SUS)製クルーシブルによるガラス溶融試験を実施した。模擬廃棄物ガラスとして、P0935, PF-N10ガラス(動燃ガラスコード)を用いた。

P0935ガラス溶融試験では、SUS製クルーシブルを用いた場合、陽極電力が7.9～31.8kW、表面温度は793～1508℃であり、インコネル製クルーシブル(陽極電力16.7～22.0kW、表面温度1170～1291℃)に対し、溶融運転可能な範囲が拡大した。また熱収支は、陽極電力22kWで比較すると、SUS製クルーシブルでのガラスの発熱割合は陽極電力に対し21.9%であり、インコネル製クルーシブル17.9%に対し、陽極電力に対する発熱割合は1.2倍となった。

PF-N10ガラス溶融試験では、インコネル製クルーシブルで溶融が継続できなかったのに対し、SUS製クルーシブルの場合は溶融が可能であった。SUS製クルーシブルでは陽極電力が35.5～50.0kW、到達温度は1352～1483℃であった。また熱バランスは、陽極電力が35.5～50.0kWの範囲では陽極電力に対するガラスの発熱割合は13.3～16.4%であった。

さらに、SUS製クルーシブルを用いたPF-N10ガラスを対象とした溶融試験において、熱流動解析検証用データ取得のため、内部温度・表面流動を調査した。径方向の内部温度は表面温度と同じ分布傾向であり、中心から25mm位置より外側に温度ピークが存在し、表面と内部の温度差は 11～122℃であった。また観察された表面流動はすべて中心方向へ向いており、中心から21mm位置で流速は1.0～1.6mm/秒であった。

---

1)　環境技術開発部　環境技術第一開発室
2)　原子力技術株式会社

目　次

1. はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.1 はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.2 試験概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
1.2.1 水冷 SiC の加熱試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
1.2.2 SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験 ・・・・・・・・・・ 2
1.2.3 SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験 ・・・・・・・・・・ 2
1.2.4 解析検証用データ取得試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
1.3 結果概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
1.3.1 水冷 SiC の加熱試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
1.3.2 SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験 ・・・・・・・・・ 2
1.3.3 SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験 ・・・・・・・・・ 3
1.3.4 解析検証用データの取得試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3

2. 基礎試験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.1 装置概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.2 溶融ガラス組成と物性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5

3. 水冷 SiC の加熱試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.1 目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.2 試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.2.1 試験方法概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.2.2 試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.2.3 発熱量計算方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
3.3 水冷 SiC の試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.3.1 陽極電力と陽極電流 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.3.2 コイル発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.3.3 クルーシブル発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.3.4 SiC 発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.3.5 各部発熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16
3.4 水冷 SiC の加熱試験まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

4. SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験 ・・・・・・・・・ 32
4.1 目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
4.2 試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32

4.3 SUS製クルーシブルでのP0935ガラス溶融試験結果 ・・・・・・・・・ 32
4.3.1 試験推移写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
4.3.2 ガラス表面温度推移 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 32
4.3.3 溶融時の表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
4.3.3.1 ガラス表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
4.3.3.2 表面温度分布比較ガラス表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・ 38
4.3.4 安定時の電力とガラス温度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
4.3.4.1 陽極電圧と陽極電流 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
4.3.4.2 安定溶融時陽極電力とガラス表面温度 ・・・・・・・・・・・・ 39
4.3.5 抜熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
4.3.5.1 ガラス上面輻射熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
4.3.5.2 クルーシブル冷却水抜熱・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
4.3.5.3 コイル冷却水抜熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
4.3.5.4 抜熱量で整理した熱収支について ・・・・・・・・・・・・・・ 40
4.4 考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.4.1 発熱・抜熱モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.4.2 電源停止後冷却水温推移 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.4.3 クルーシブル発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.4.4 ガラスからクルーシブルへの伝熱 ・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.4.5 発熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
4.5 SUS製クルーシブルでのP0935ガラス溶融試験まとめ ・・・・・・・ 43

5. SUS製クルーシブルでのPF-N10ガラス溶融試験 ・・・・・・・ 74
5.1 目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74
5.2 試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74
5.3 SUS製クルーシブルでのPF-N10ガラス溶融試験結果 ・・・・・・・・ 75
5.3.1 試験推移 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 75
5.3.2 ガラス表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
5.3.2.1 ガラス表面写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
5.3.2.2 ガラス表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
5.3.2.3 表面温度分布比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
5.3.3 安定時の電力とガラス温度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3.3.1 陽極電圧と陽極電流 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3.3.2 ガラス表面温度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78

5.3.4 抜熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3.4.1 クルーシブル冷却水抜熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3.4.2 コイル冷却水抜熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
5.3.4.3 抜熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.3.5 発熱割合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.3.5.1 ガラスからクルーシブルへの伝熱・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.3.5.2 クルーシブル発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.3.5.3 ガラス発熱 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.3.5.3 発熱収支 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79
5.4. SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験まとめ ・・・・ 80

6. 解析用データの取得試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.1 目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.2 試験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.2.1 試験方法概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.2.2 ガラス内部温度測定試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.2.3 表面流動測定試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.2.4 スカル層観察試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 99
6.3 解析検証用データ取得試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
6.3.1 ガラス内部温度測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
6.3.1.1 表面温度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
6.3.1.2 電源停止後温度推移 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
6.3.1.3 内部温度結果まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 101
6.3.2 表面流動測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 102
6.3.2.1 トレーサー挙動評価・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 102
6.3.2.2 表面流速 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.3.3 スカル層観察結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.3.3.1 スカル層断面写真 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.3.3.2 気泡位置整理結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.3.3.3 解析用メッシュ図への反映 ・・・・・・・・・・・・・・・ 103
6.4. 解析検証用データの取得試験まとめ ・・・・・・・・・・・・・・ 104

7. あとがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 119

8. 参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 120

図リスト

図 2.1　試験装置概要
図 2.2　インコネル製クルーシブル図(ｽﾘｯﾄ数 10)
図 2.3　SUS 製クルーシブル図(ｽﾘｯﾄ数 16)
図 3.1　水冷 SiC 加熱試験装置概要
図 3.2　水冷 SiC 加熱試験における SiC 位置関係図
図 3.3　陽極電圧と陽極電流の関係
図 3.4　陽極電力とコイル発熱量の関係
図 3.5　陽極電力とクルーシブル発熱量の関係
図 3.6　陽極電力と SiC 冷却水温上昇量の関係
図 3.7　SiC 位置による発熱量
図 3.8　陽極電力に占める発熱の割合
図 4.1　試験方法概要
図 4.2　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 4.0kV)－ケース 1
図 4.3　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 4.1kV)－ケース 2
図 4.4　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 4.3kV)－ケース 3
図 4.5　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 4.5kV)－ケース 4
図 4.6　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 4.7kV)－ケース 5
図 4.7　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 5.1kV)－ケース 6
図 4.8　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 5.3kV)－ケース 7
図 4.9　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 5.5kV)－ケース 8
図 4.10　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 6.0kV)－ケース 9
図 4.11　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 6.2kV)－ケース 10
図 4.12　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 6.4kV)－ケース 11
図 4.13　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 6.8kV)－ケース 12
図 4.14　SUS 製クルーシブル P0935 溶融試験推移(陽極電圧 7.1kV)－ケース 13
図 4.15　安定状態でのガラス表面温度分布-SUS 製クルーシブル，P0935-
図 4.16　安定状態でのガラス表面温度分布-SUS 製クルーシブル，P0935-
図 4.17　安定状態でのガラス表面温度分布-SUS 製クルーシブル，P0935-
図 4.18　SUS 製クルーシブル P0935 ガラス表面温度分布比較
図 4.19　陽極電圧と陽極電流の関係
図 4.20　陽極電力とガラス表面温度の関係
図 4.21　陽極電力と表面輻射熱計算値の関係
図 4.22　陽極電力とクルーシブル冷却水抜熱量の関係
図 4.23　陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係
図 4.24　SUS 製クルーシブルにおける各部抜熱量の関係
図 4.25　インコネル製クルーシブルにおける各部抜熱量の関係
図 4.26　CCIM における発熱と抜熱バランス模式図
図 4.27　電源停止後のクルーシブル冷却水出入口温度差推移

図リスト

図 4.28　陽極電力と発熱量の関係
図 4.29　陽極電力と伝熱量の関係
図 4.30　陽極電力に対する各部発熱量割合
図 5.1　試験方法概要
図 5.2　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 7.5kV)－ケース 1
図 5.3　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 7.7kV)－ケース 2
図 5.4　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 7.8kV)－ケース 3
図 5.5　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 8.1kV)－ケース 4
図 5.6　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 8.3kV)－ケース 5
図 5.7　SUS 製クルーシブル PF-N10 溶融試験推移(陽極電圧 8.6kV)－ケース 6
図 5.8　安定状態での表面温度分布-SUS 製クルーシブル，PF-N10-
図 5.9　安定状態での表面温度分布-SUS 製クルーシブル，PF-N10-
図 5.10　ガラス表面温度分布比較
図 5.11　陽極電圧と陽極電流の関係
図 5.12　陽極電力と到達温度の関係
図 5.13　陽極電力とクルーシブル冷却水抜熱量の関係
図 5.14　陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係
図 5.15　陽極電力に対する各部抜熱量割合
図 5.16　電源停止後のクルーシブル冷却水出入口温度差推移
図 5.17　陽極電力と伝熱量の関係
図 5.18　陽極電力とクルーシブル発熱量の関係
図 5.19　陽極電力とガラス発熱量の関係
図 5.20　SUS 製クルーシブルにおける陽極電力に対する各部発熱量割合
図 6.1　ガラス内部測温試験方法
図 6.2　ガラス表面温度分布(SUS 製クルーシブル,PF-N10,陽極電圧 8kV)
図 6.3　電源停止後熱電対温度推移
図 6.4　内部温度と表面温度の関係
図 6.5　ガラス中心方向への表面流速分布
図 6.6　気泡深さ分布

表リスト

表 2.1　装置概要
表 2.2　模擬廃棄物ガラス組成
表 3.1　水冷 SiC 仕様
表 3.2　SUS 製クルーシブルにおける陽極電力に占める各部発熱割合
表 3.3　インコネル製クルーシブルにおける陽極電力に占める各部発熱割合
表 3.4　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 3.5　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 3.6　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 3.7　ｲﾝｺﾈﾙ製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 3.8　ｲﾝｺﾈﾙ製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 3.4　ｲﾝｺﾈﾙ製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
表 4.1　SUS 製クルーシブルでの安定溶融時の陽極電力と冷却水温度変化、表面温度
表 4.2　ｲﾝｺﾈﾙ製クルーシブルでの安定溶融時の陽極電力と冷却水温度変化、表面温度
表 4.3　SUS 製クルーシブルでの各部熱バランスと陽極電力に対する割合
表 4.4　インコネル製クルーシブルでの各部熱バランスと陽極電力に対する割合
表 5.1　SUS 製クルーシブルでの安定溶融時の陽極電力と冷却水温度変化、表面温度
表 5.2　SUS 製クルーシブルでの各部熱バランスと陽極電力に対する割合
表 6.1　SUS 製クルーシブルにおける気泡分布

写真リスト

写真 2.1　装置全体図
写真 4.1　試験推移(SUS 製クルーシブル-P0935)
写真 4.2　溶融安定状態(SUS 製クルーシブル-P0935)
写真 5.1　溶融安定状態(SUS 製クルーシブル，PF-N10，陽極電力 42.8kW)
写真 6.1　トレーサー推移 1
写真 6.2　トレーサー推移 2
写真 6.3　トレーサー推移 3
写真 6.4　トレーサー推移 4
写真 6.5　トレーサー推移 5
写真 6.6　トレーサー推移 6
写真 6.7　ガラス断面観察 1
写真 6.8　ガラス断面観察 2

1. はじめに

1.1 はじめに

コールドクルーシブル誘導溶解法（Cold Crucible Induction Melting, CCIM）は、高周波コイルの中にスリットを有する分割型の水冷式金属製炉体を設置し、炉体内の物質を直接誘導加熱して溶融するものである。この方法は、溶融物を浮上、あるいは溶融物と炉体が接触する部分に未溶融の固体層を形成することにより、溶融物と容器を直接接触させずに溶融ができることから高温溶融することに加え、容器の寿命が長いという特徴をもっている。

事業団では、コールドクルーシブルの高温溶融および溶融物による炉体の侵食がない点に着目し、低レベル雑固体廃棄物の処理法としてコールドクルーシブル誘導溶解法を適用することを検討している。

これまで、4MHz, 50kW 電源を用い、インコネル製クルーシブル(インコネル 690 製, スリット数 10, φ100mm）を用いて、模擬廃棄物ガラス(P0935)の溶融試験を実施してきた。[1]その結果、インコネル製クルーシブルでは表面温度を 1300℃とした溶融運転ができないことがわかった。そこで、クルーシブルの冷却と加熱性能の向上を目的としたステンレス製クルーシブル(以下 SUS 製クルーシブル, SUS304 製, スリット数 16, φ100mm)を製作した。

本報では、SUS 製クルーシブルを用いて、模擬廃棄物ガラス P0935 と PF-N10(各々動燃ガラスコード)を溶融し、その安定溶融条件、表面温度および熱収支を明らかにした。また、同時に平行している進めている CCIM 熱流動解析の検証データとして、SUS 製クルーシブルを用いたガラス溶融時のガラス内部温度測定・表面流速測定・スカル部観察をおこなった。

1.2. 試験概要

1.2.1　水冷 SiC の加熱試験

SUS 製クルーシブルとインコネル製クルーシブルにおいて、SiC 円柱（φ30mm×20mmH）を水冷した容器に入れ加熱することにより、SiC，クルーシブル等の発熱から加熱性能を評価した。

1.2.2　SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験

模擬廃棄物ガラス P0935 を 1200g 溶融し、安定運転条件を調査した。溶融試験は棒状の起動材(SiC)を用いて起動し、その後陽極電圧一定で 1 時間保持し溶融継続の可否、定常状態での表面温度と熱収支を調査した。

1.2.3　SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験

模擬廃棄物ガラス PF-N10 を 1200g 溶融し、安定運転条件を調査した。溶融試験は棒状の起動材(SiC)を用いて起動し、その後陽極電圧を一定で 1 時間保持し溶融継続の可否、安定状態での表面温度と熱収支を調査した。

1.2.4　解析検証用データの取得試験

SUS 製クルーシブルにおいてガラスビーズ(PF-N10)を溶融し、1.2.3 の方法で安定状態での温度分布および表面流速を測定した。温度分布は、表面温度は赤外線放射温度計で、内部温度は接触式熱電対を測定点に入れ電源停止直後の温度から内部温度を推定した。表面流速は 1～2mm のジルコニアをガラス上部に投入し、3 秒毎の写真撮影データから測定した。スカル層観察は試験後ガラスを取り出し、樹脂埋めした後、光学顕微鏡にて観察した。

1.3　結果概要

1.3.1　水冷 SiC の加熱試験

クルーシブルの発熱量は同じ陽極電力においてインコネル製クルーシブルに対し SUS 製クルーシブルでは 0.8 倍であった。一方、SiC の発熱量は、同じ陽極電力においてインコネル製クルーシブルに対し SUS 製クルーシブルでは 1.8 倍に向上した。また陽極電力に占める発熱割合は、ＳＵＳ製クルーシブルではクルーシブルが 29.27%、コイルが 5.23%、SiC が 0.58～0.83%、インコネル製クルーシブルはクルーシブルが 36.0%、コイルは 5.41%、SiC が 0.28～0.45%であった。

1.3.2　SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験

安定保持可能な最低電力はインコネル製クルーシブルが約 16kW に対し、SUS 製クルーシブルでは約 7.9kW であった。また、SUS 製クルーシブルでは安定運転可能な電力と表面温度は広くなり、陽極電力が 7.9～31.8kW、表面温度は 793～1508℃で運転可能であった。

また熱収支を調査した結果、SUS 製クルーシブル試験での陽極電力に対する各部発熱割合は、クルーシブル発熱が 19.1～22.9%、コイル発熱が 2.5～3.7%、ガラスの発熱が 17.9～21.9%であった。また同じ陽極電力(22kW)で比較すると、ガラス発熱割合は SUS 製クルーシブルが 21.9%、インコネル製クルーシブルが 17.9%となり、SUS 製クルーシブルの加熱性能が 1.2 倍に向上していることがわかった。

1.3.3 SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験

P0935 ガラスに比べ、PF-N10 ガラスでは安定溶融保持に必要な最低陽極電力は増加し、陽極電力が 35.5～50.0kW、最大表面温度で 1352～1459℃の範囲で安定保持が可能であった。

また熱収支を整理した結果、陽極電力に対しクルーシブル発熱は 23.3～25.2%、コイル発熱は 2.3～3.2%、ガラス発熱は 13.3～16.3%であった。

1.3.4 解析検証用データの取得試験

①内部温度調査

表面温度と内部温度の温度分布は同じ傾向であり、1/2r 位置から外側よりに温度ピークが存在した。表面では中心から 32mm 位置に温度ピークがあり、内部温度では 38mm 付近が最大と考えられる。(測定点の中では中心から 38mm、深さ 10mm で表面温度より 122℃高い)。また内部と表面の温度差は 11～122℃で内部の方が高かった。

②表面流動測定

トレーサーを用いた表面流速を測定した結果、中心から 39mm 位置より内側で中心へ向かう流動が見られた。流速が最大の位置は中心から 21mm 位置で、秒速 1.0～1.6mm であった。

③スカル部観察

スカル部を観察した結果、クルーシブル側面から 1.1～1.7mm の深さで気泡が多数観察された。

2. 基礎試験装置

2.1 装置概要

基礎試験装置の概略を図 2.1 に、全体写真を写真 2.1 にそれぞれ示す。
本装置は、電源盤、高周波発振器、操作盤、高周波フィーダ、高周波コイル、コールドクルーシブル（溶融炉体）から構成される。（表 2.1 参照）以下に主要機器の機能について示す。

(1) 電源盤

三相 200V の電源を受電し、整流用電圧変換器で 200V 直流電圧を発生させる。

(2) 高周波発生装置

200V 直流電圧を発振用真空管の陽極に印加して所定の高周波（4MHz）を発生させる。発振用真空管は東芝製 8T61A を使用し、最大出力は 50kW である。

(3) 高周波フィーダ

高周波発振器から発生した高周波をコイルへ給電する。

(4) 高周波コイル

高周波電源を受けてコールドクルーシブル内の被溶融物に磁場を与え、誘導加熱する。コイル形状は縦 8mm、横 15mm、肉厚 4mm の中空状の四角形である。SUS、インコネル製クルーシブル用は 8 ターン巻きである。材質は純銅製であり、またコイル内部には冷却水が流れている。

(5) 操作盤

4MHz 高周波を選択し、陽極電圧により出力を調整する。

(6) コールドクルーシブル（炉体）

インコネル製クルーシブル本体を図 2.2 に示す。クルーシブル本体は、円筒形をしており、スリットにより 10 のセグメントに分かれている。それぞれのセグメントの中は冷却水が流れている。素材はインコネル 690 である。

SUS 製クルーシブル本体を図 2.3 に示す。クルーシブル本体は、円筒形をしており、スリットにより 16 のセグメントに分かれている。それぞれのセグメントの中は冷却水が流れている。素材は SUS304 である。

(7)ガラス表面温度測定

溶融表面温度の測定には、CINO製IR-AQIC二色温度計(温度測定範囲1000～3100℃)でコールドクルーシブルから測定する。また表面温度分布測定用として、日本アビオニクス社製TVS-2000赤外線画像解析装置(温度測定範囲100～2100℃)を使用した。

(8)冷却水系

コイル、クルーシブル内には冷却用として水を循環している。この冷却水は出入口に熱電対を差し込み、冷却水入側・出側の温度を測定している。また抜熱量を把握するためそれぞれの冷却水の流量を測定できるようにした。

(9)データ記録計

データ記録用は横河電気社製HR2300ハイブリットレコーダーとNEC社製PC-9801RXにて、またパソコンーハイブリットレコーダー間を通信(GP-IB)方式でおこなった。記録データは時刻、陽極電圧、陽極電流、格子電流、冷却水入側温度、コイル冷却水出側温度、クルーシブル冷却水出側温度、二色温度計であった。これらのデータは10秒ごとに記録した。但し、赤外線画像解析装置は1分毎であった。

2.2 溶融ガラス組成と物性

表2.2に今回の試験で用いた模擬廃棄物ガラスP0935とPF-N10の組成を示す。これらはどちらもホウ珪酸系ガラスでNa_2Oを10wt%含んでいる。P0935ガラスは模擬廃液を固化したガラスを粉砕したもので、黒色、外寸は1～3mmのカレット状である。またPF-N10ガラスは透明で、外寸は1～3mmのビーズ状である。

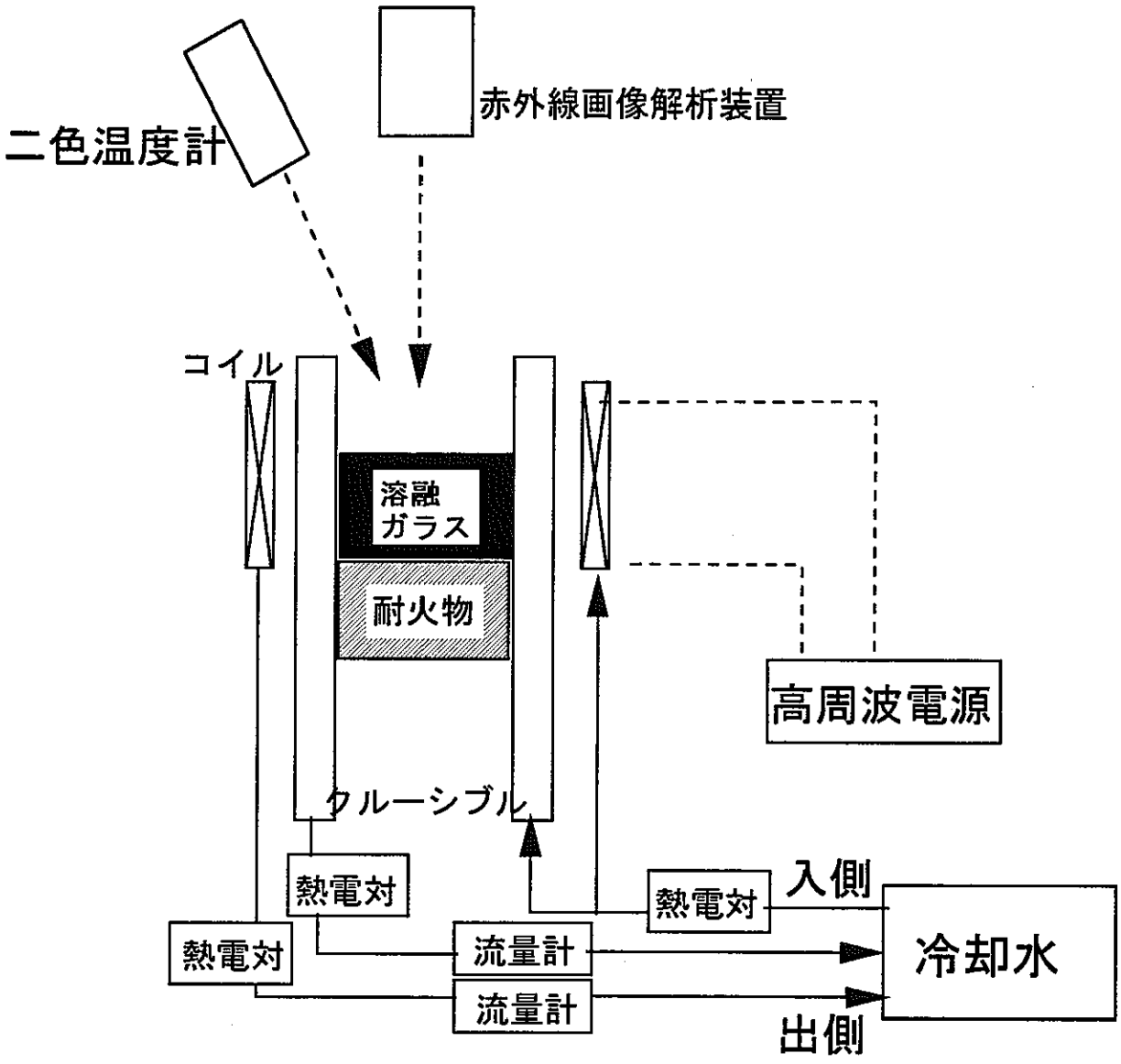

赤外線画像解析装置
二色温度計
コイル
溶融
ガラス
耐火物
高周波電源
クルーシブル
熱電対
熱電対
熱電対
入側
流量計
流量計
冷却水
出側

図 2.1　試験装置概要

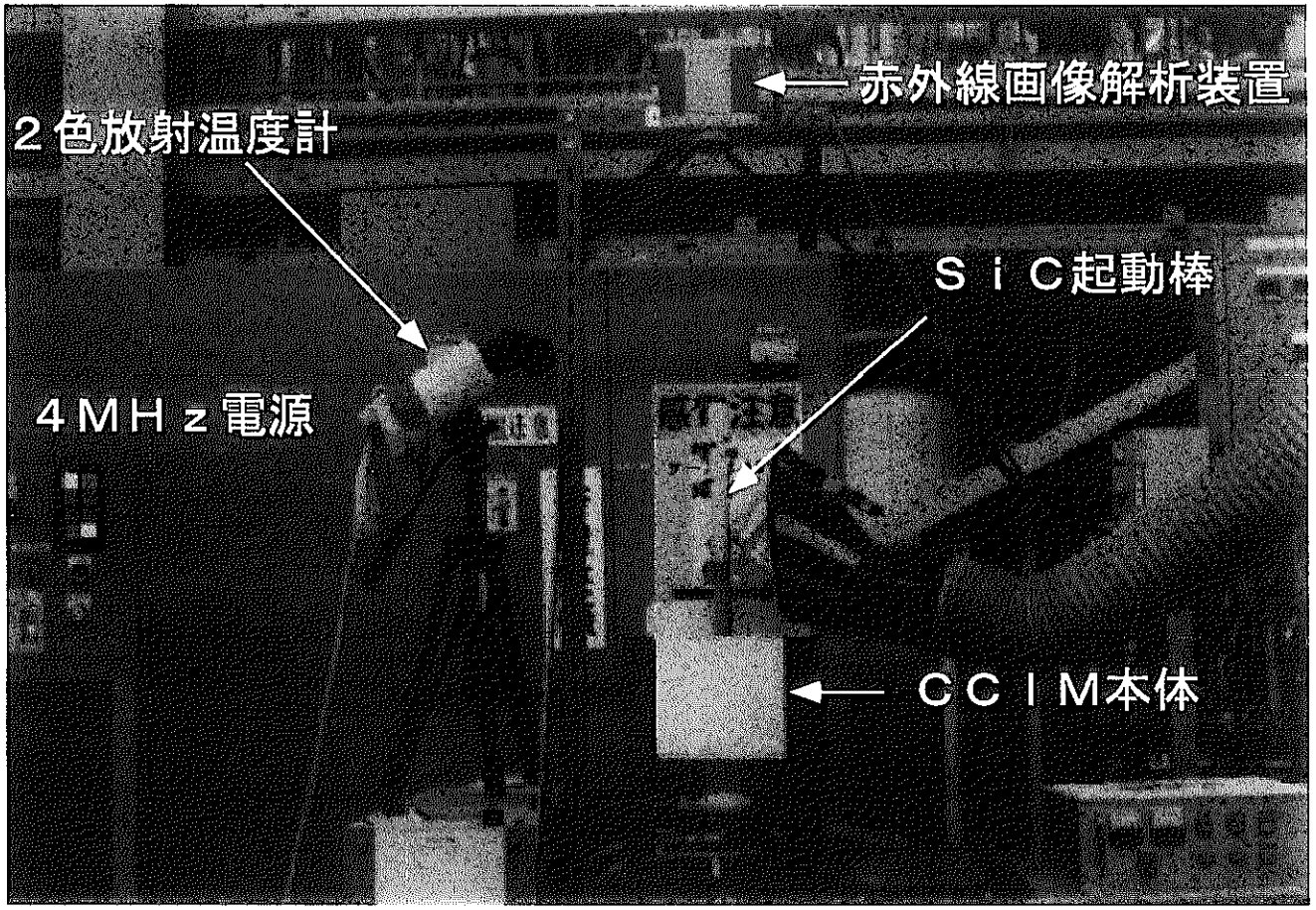


写真2.1　装置全体図

表 2.1　装置概要

		インコネル製クルーシブル	SUS製クルーシブル
炉体（ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ）	材質	インコネル690	SUS304
	内径 外径 高さ 溶融部深さ	100mm 140mm 350mm 113mm	100mm 140mm 350mm 113mm
	スリット数	10	16
高周波電源	周波数	4MHz	4MHz
	最大出力	50kW	50kW
加熱ｺｲﾙ	内径 外径 高さ	185mm 215mm 100mm	185mm 215mm 100mm
	ターン数	8	8
	コイル位置	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上端より10mm下	
冷却水量	クルーシブル	80.0～110.0 l/min.	
	コイル	11.0～14.0 l/min.	

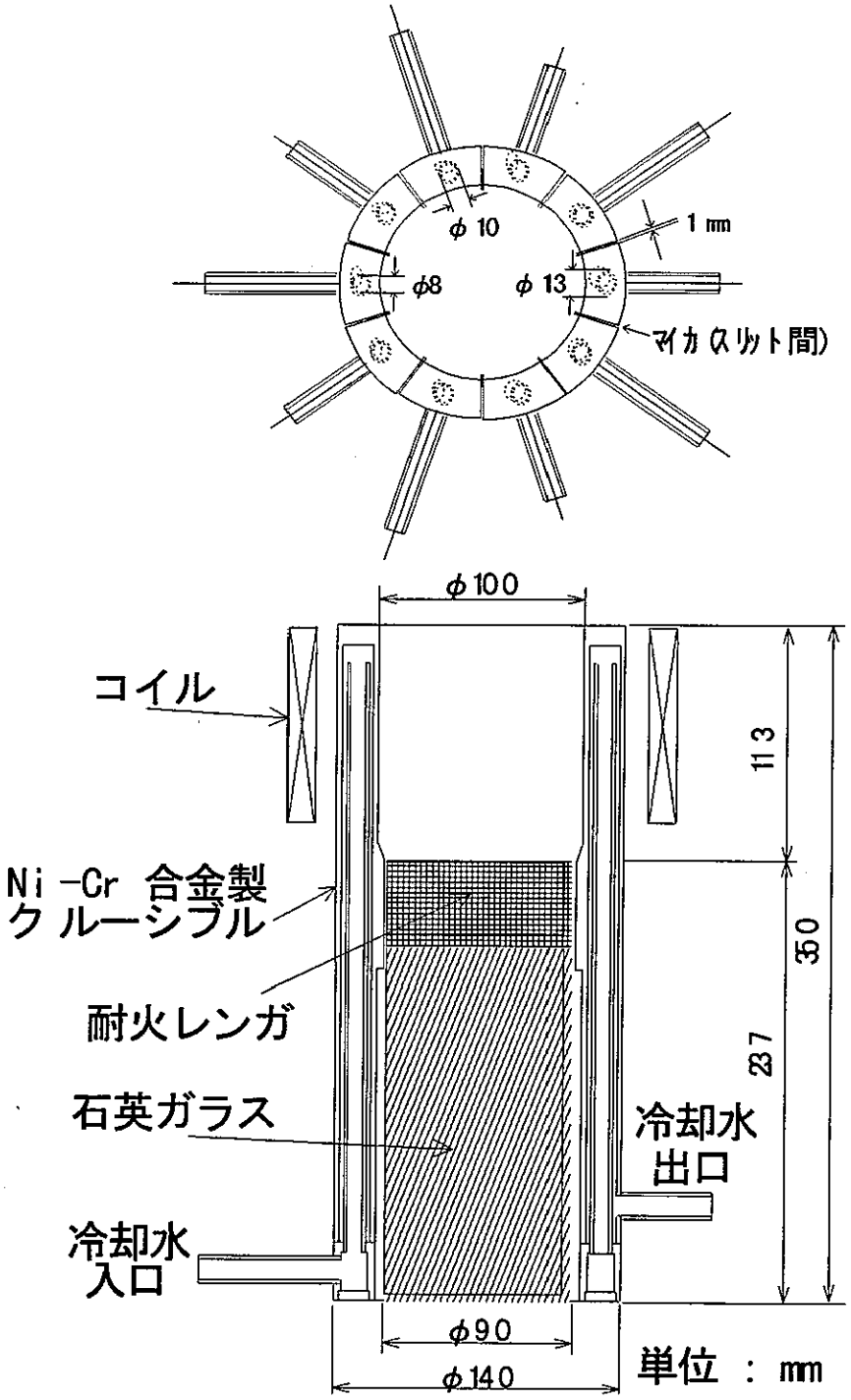


図 2.2 インコネル製クルーシブル図(スリット数 10)

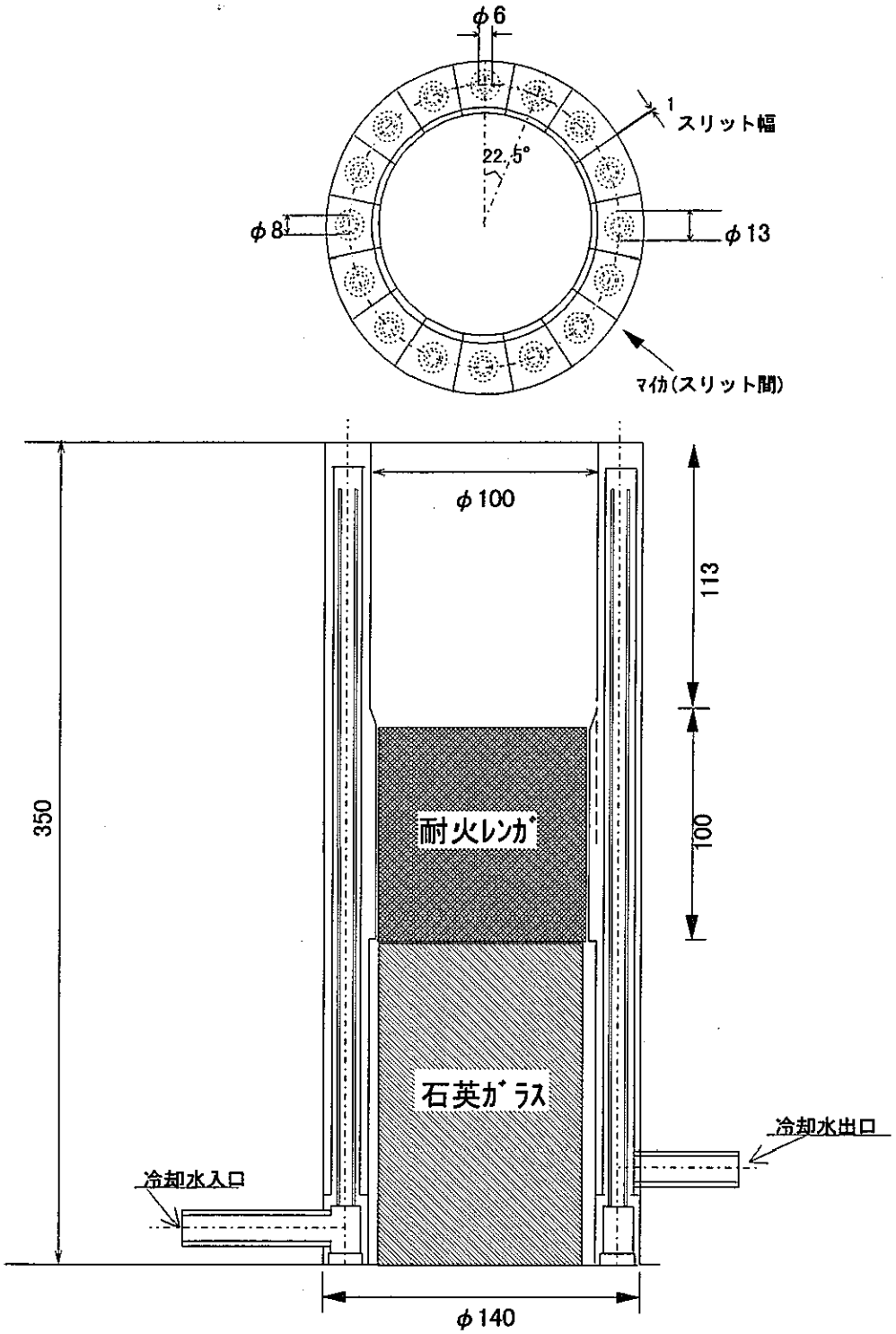


図 2.3　SUS 製クルーシブル図(スリット数 16)

表 2.2　模擬廃棄物ガラス組成(wt%)

	成　分	P0935	PF-N10
組成成分	SiO_2	46.73	56.1
	B_2O_3	14.25	17.1
	Al_2O_3	5.03	6.0
	CaO	3.00	3.6
	ZnO	3.00	3.6
	LiO_3	3.00	3.6
	Na_2O	10.42	10.0
	Fe_2O_3	1.94	—
	ZrO_2	1.40	—
	MoO_3	1.41	—
	RuO_2	0.91	—
	Cs_2O	0.78	—
	NiO	0.45	—
物性特性	軟化点		618℃
	転移点		500℃
	熱膨張係数		81.3×10^{-7}／℃(0～300℃)
	粘度		913℃(10^2Pa・s)
			801℃(10^3Pa・s)
	熱伝導率		1.21Ww/mK(25℃)
			1.75Ww/mK(400℃)
電気抵抗	比抵抗値 (50Hz)		$10^{14.5}$Ω・cm(30℃)
			$10^{11.7}$Ω・cm(100℃)
			47 Ω・cm(800℃)
			14 Ω・cm(900℃)
			3.9Ω・cm(1000℃)
			1.1Ω・cm(1100℃)
密度	真比重		2.52(g/cm^3)
	嵩比重		1.53(g/cm^3)

3. 水冷SiCの加熱試験

3.1 目的

SUS製クルーシブルの加熱性能評価するため、SUS製クルーシブルとインコネル製クルーシブルを用いて、水冷容器に入れたSiC円柱を誘導加熱し、SiCの発熱特性およびクルーシブルの発熱量を調査する。

3.2 試験方法

3.2.1 試験方法概要

クルーシブルはSUS製(スリット数16)とインコネル製(スリット数10)を用いた。図3.1に試験装置の概念図を示す。コイル、クルーシブル、SiC容器の冷却水の出入口で熱電対により水温を測定する。また発熱量を計算するため、各冷却水の流量を測定した。表3.1に使用したSiCの形状・特性を示す。

表3.1 水冷SiC仕様

品名	東芝セラミックス製テコランダム
形状	円柱形 直径30mm、高さ20mm
重量	43.2g
電気抵抗率	0.001Ω・m (常温)
冷却水量	2.0 l/min.

3.2.2 試験方法

図3.2には横断面から見たクルーシブル、コイルおよびSiCの位置関係を示す。水冷容器は上下方向に可動でき、SiC容器の下端部とクルーシブル上端面の距離が10～110mmになるようにSiC水冷容器を設定する。その後、陽極電圧2～9kVを印加し、この時のSiC、クルーシブルおよびコイルの冷却水の入口と出口温度の差を測定し、それらの温度差と冷却水量からSiCの深さ位置による発熱量を求めた。

3.2.3 発熱量計算方法

各部の冷却水温度および流量の測定結果から、各部における発熱量を以下のように計算した。

①SiCにおける発熱量

SiC冷却容器における熱の授受を考えると以下のようになる。（なお、以下で使用する熱量はすべて単位時間あたりの熱量を意味する）

$$Q_S = Q_{S-W} + Q_{S-R} + Q_{S-CR}$$

ここで、Q_S ：SiCにおける発熱量(kW)
Q_{S-W} ：冷却水の温度上昇で消費される熱量
Q_{S-R} ：SiC冷却容器面から空気中への放熱量
Q_{S-CR} ：SiC冷却容器面とクルーシブル間の移動熱量

Q_{S-R}およびQ_{S-CR}は小さいと考え、SiCにおける発熱がすべて冷却水の　温度上昇によって消費されるものとして、SiC による発熱量は次式で計算した。

$$Q_S\ (kW) = \frac{F_S \cdot \Delta T_{W-S} \cdot C_{pw} \cdot 4.185}{60} \quad \cdots (1)$$

ここで、Q_S ：SiCにおける発熱量(kW)
F_S ：SiC冷却水流量（l/min.）
ΔT_{W-S} ：SiC冷却容器入口と出口の温度差(℃)
C_{pw} ：水の熱容量（＝1kcal/kg℃）

②クルーシブルにおける発熱量

クルーシブルにおける熱の授受を考えると以下のようになる。

$$Q_{CR} = Q_{CR-W} + Q_{CR-R} + Q_{S-CR} + Q_{CR-CO}$$

ここで、Q_{CR} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙにおける発熱量(kW)
Q_{CR-W} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水の温度上昇で消費される熱量
Q_{S-CR} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ表面から空気中への放熱量
Q_{CR-C} ：SiC冷却容器面とクルーシブル間の移動熱量
Q_{CR-CO} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙとｺｲﾙ間の移動熱量

Q_{S-R}、Q_{S-CR}およびQ_{CR-CO}は小さいと考え、クルーシブルにおける発熱量は次式で計算した。

$$Q_{CR}\ (kW) = \frac{F_{CR} \cdot \Delta T_{W-CR} \cdot C_{pw} \cdot 4.185}{60} \quad \cdots (2)$$

ここで、Q_S ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙにおける発熱量(kW)
F_S ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水流量（l/min.）
ΔT_{W-S} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水の入口と出口の温度差(℃)
C_{pw} ：水の熱容量（＝1kcal/kg℃）

③コイルにおける発熱量

コイルにおける熱の授受を考えると以下のようになる。

$$Q_{CO} = Q_{CO-W} + Q_{CO-R} + Q_{CR-CO}$$

ここで、 Q_{CO} ：ｺｲﾙにおける発熱量(kW)

Q_{CO-W} ：ｺｲﾙ冷却水の温度上昇で消費される熱量

Q_{CO-R} ：ｺｲﾙ表面から空気中への放熱量

Q_{CR-CO} ：ｸﾙｰｼﾌﾞﾙとｺｲﾙ間の移動熱量

Q_{CO-R}およびQ_{CR-CO}は小さいと考え、コイルにおける発熱量は次式で計算した。

$$Q_{CO}\ (kW) = \frac{F_{CO} \cdot \Delta T_{W-CO} \cdot C_{pw} \cdot 4.185}{60} \quad \cdots (3)$$

ここで、 Q_{CO} ：SiCにおける発熱量(kW)

F_{CO} ：SiC冷却水流量（l/min.）

ΔT_{W-CO} ：ｺｲﾙ冷却水の入口と出口の温度差

C_{pw} ：水の熱容量（＝1kcal/kg℃）

3.3 水冷SiCの加熱試験結果

SiC位置を変更しても、SiC発熱量以外は影響が見られなかった。そこで、SiC冷却水温上昇量（発熱量）以外はSiCの位置による区別をせずに陽極電圧・陽極電力との関係で整理した。

参考として、SiC位置・陽極電力による陽極電流、コイル・クルーシブル・SiCの水温上昇量および発熱量計算結果の全データを表3.4～3.9に示す。また発熱量計算は(1)～(3)式を用いた。

3.3.1 陽極電圧と陽極電流

陽極電流はSiC位置によって変化は見られなかった。そこで、陽極電圧と陽極電流の関係をSiCの位置の区別なしで図3.3に示した。陽極電流は陽極電圧のみに比例して増加することが確認された。最大陽極電圧8.98kVでは、3.45Aであった。

また、SUS製クルーシブルとインコネル製クルーシブルでは陽極電圧と陽極電流の関係にはっきりとした有意差が見られなかった。

3.3.2 コイル発熱

コイルの発熱量もSiC位置によって変化は見られなかった。そこで、SiCの位置による区別をしないで陽極電力との関係を図3.4に示した。コイル発熱量は陽極電力に比例して増加することが確認された。

また、陽極電力に対するSUS製クルーシブルでのコイル発熱量はインコネル製クルーシブルとほぼ同等であり、30kWで1.7kWであった。

3.3.3 クルーシブル発熱

クルーシブル発熱量もSiC位置によって変化は見られなかった。そこでSiCの位置による区別をしないで陽極電力とクルーシブル発熱量の関係を図3.5に示す。クルーシブル発熱量もコイルと同様に陽極電力と比例していることが確認された。

また、SUS製クルーシブルでは陽極電力30kWに対し8.8kW、インコネル製クルーシブルでは10.8kWであり、SUS製クルーシブルでのクルーシブルの発熱量はインコネル製クルーシブルの0.8倍であり、SUS製クルーシブル本体の発熱量が減少していることがわかった。

3.3.4 SiC発熱

SiC発熱による冷却水の温度上昇はSiC位置によって大きく変化した。

まず、SiC位置を一定とした場合の陽極電力とSiC冷却水温上昇量を示す。

一例として、SiCの下端位置がクルーシブル上端からそれぞれ10、40、70mmの場合についてのSiC冷却水温上昇量と陽極電力の関係を図3.6に示す。SiC位置が同じ場合、SiC冷却水温度上昇量は、コイル・クルーシブルと同様に陽極電力に比例して増加する。

しかし、SiCの位置によって、発熱量に差が見られた。例えば、40mm位置と10mm位置

を比べると、約2倍の水温上昇量の差が見られた。

そこで、SiC位置による発熱量の違いを整理するため、陽極電力10、20、30kWにおけるSiC位置による発熱量の変化を図3.7に示す。SUS製クルーシブルでもインコネル製クルーシブルと同じ傾向が見られた。つまり、クルーシブル上端から30～40mm付近に発熱ピークが現れている。また、50mmより下では発熱量の減少が見られる。

また、インコネル製クルーシブルと比べると、同じ陽極電力に対しSUS製クルーシブルでは平均1.8倍のSiC発熱量が観察された。

3.3.5 各部発熱量割合

図3.8、表3.2、表3.3に陽極電力に対する各部の発熱割合を示す。
SUS製クルーシブルでは、陽極電力に対しクルーシブル発熱平均量は平均29.3%、コイル発熱平均量は5.2%であった。またSiC発熱量は0.58～0.83%の範囲で変動した。
インコネル製クルーシブルと比較すると、クルーシブル本体の発熱に寄与する割合がSUS製クルーシブルでは0.8倍と低く抑えることができる。一方、SiC発熱割合は逆に1.8倍であった。

3.4 水冷SiCの加熱試験まとめ

SUS製クルーシブルでの水冷SiC加熱試験を実施し、加熱効率向上等ほぼ期待通りの結果を得ることができた。

1) SUS製クルーシブルにおいてもインコネル製クルーシブルと同様にSiC、コイルおよびクルーシブルの発熱量は陽極電力に比例して増加した。
2) SiCの発熱量は、SiCの位置により変化し、本試験条件ではSiC下端がクルーシブル上端より30～40mm位置で発熱のピークが存在し、インコネル製クルーシブルと同じ傾向を示した。
3) インコネル製クルーシブルと比較すると、SUS製クルーシブルでは同じ陽極電力に対しSiC発熱量が1.8倍、クルーシブル発熱量が0.8倍であり、実際の溶融物の加熱効率向上が達成できる目処を得た。また、クルーシブル発熱量減少によりクルーシブルの温度の低減も期待できる。
4) 熱収支を調査した結果、SUS製クルーシブルでは陽極電力に対し、SiC0.58～0.83%、クルーシブル29.3%、コイル5.2%であった。

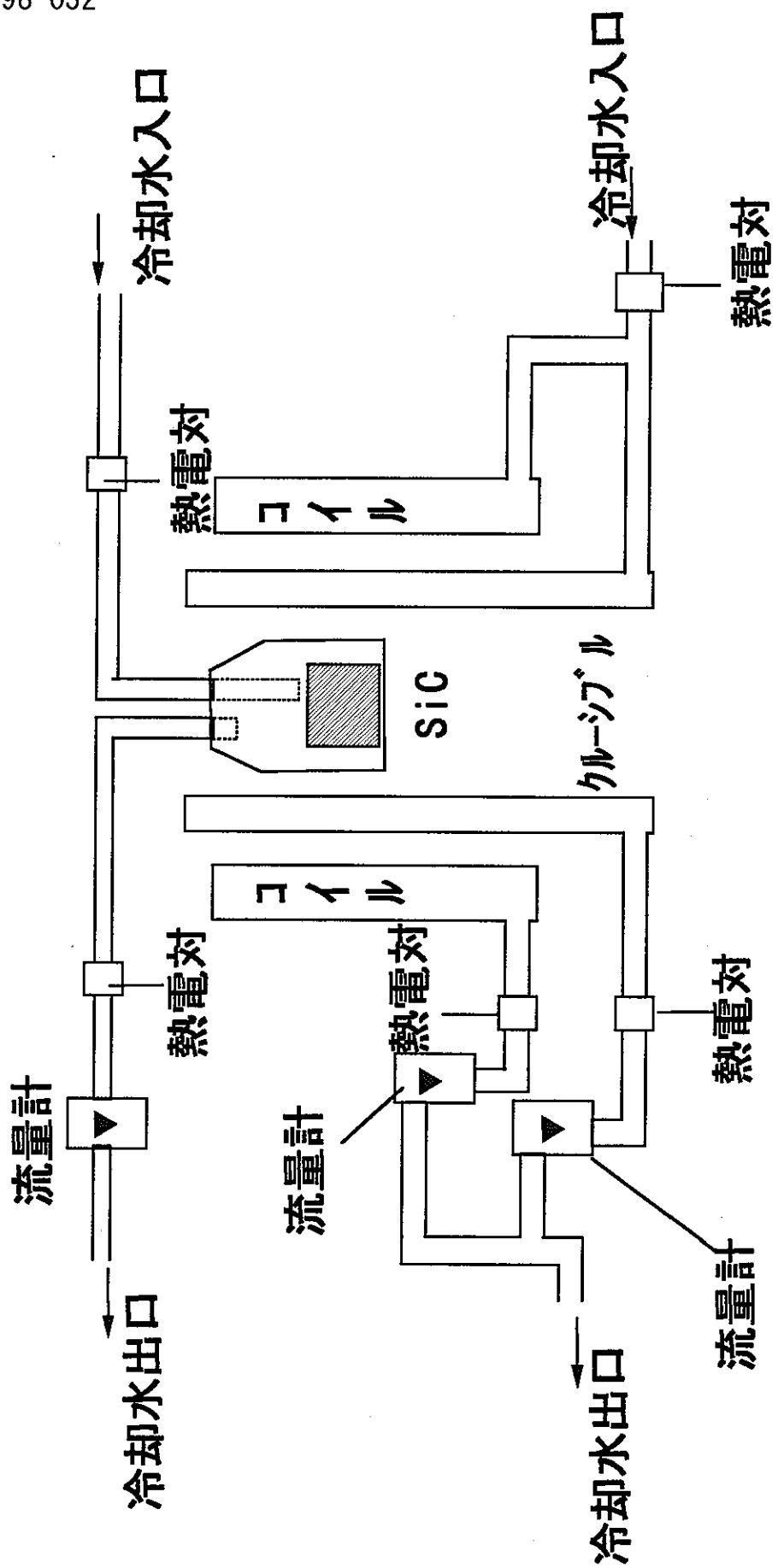


図 3.1　水冷 SiC 加熱試験設備概要

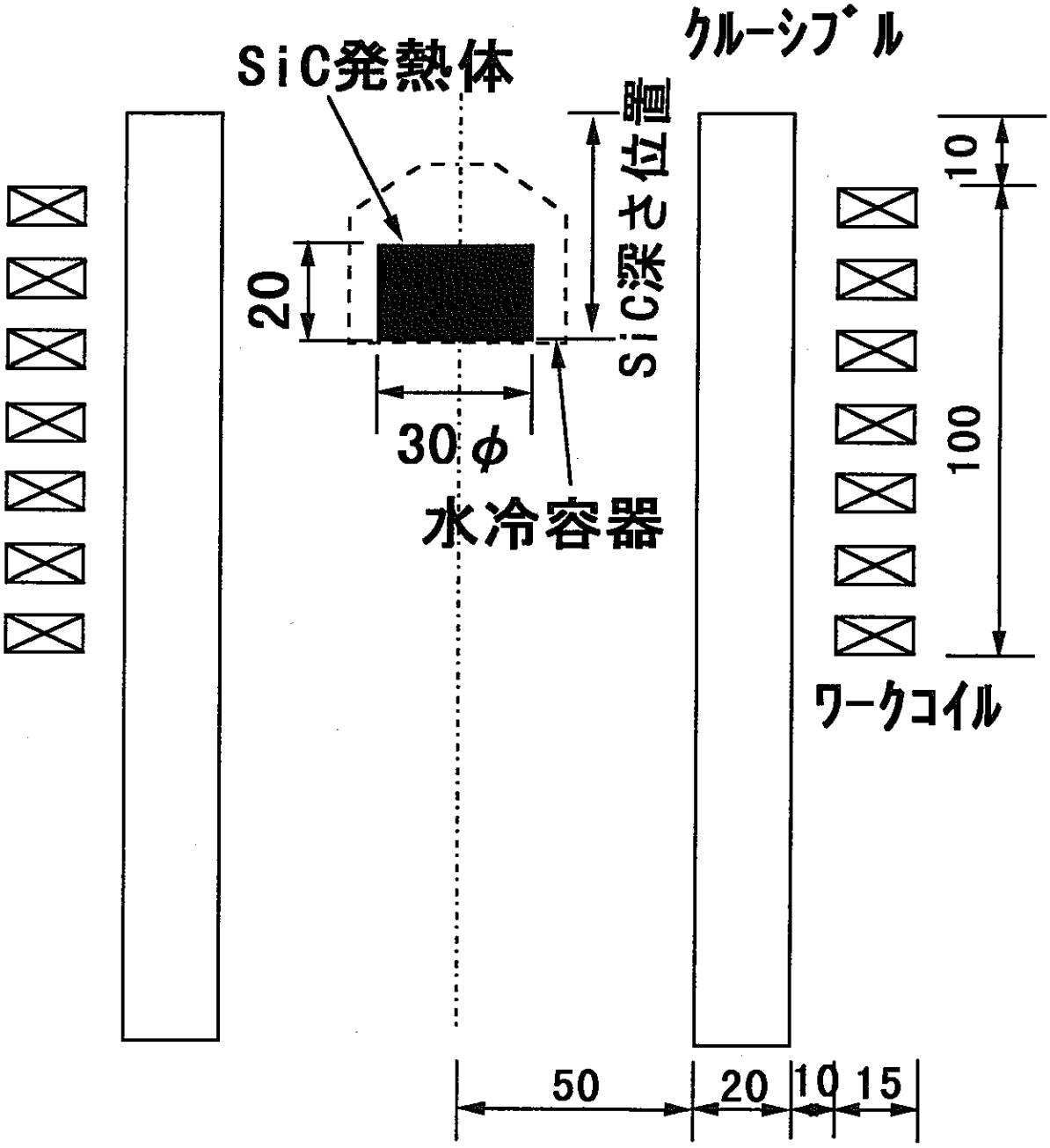


図 3.2　水冷 SiC 加熱試験における SiC 位置関係図

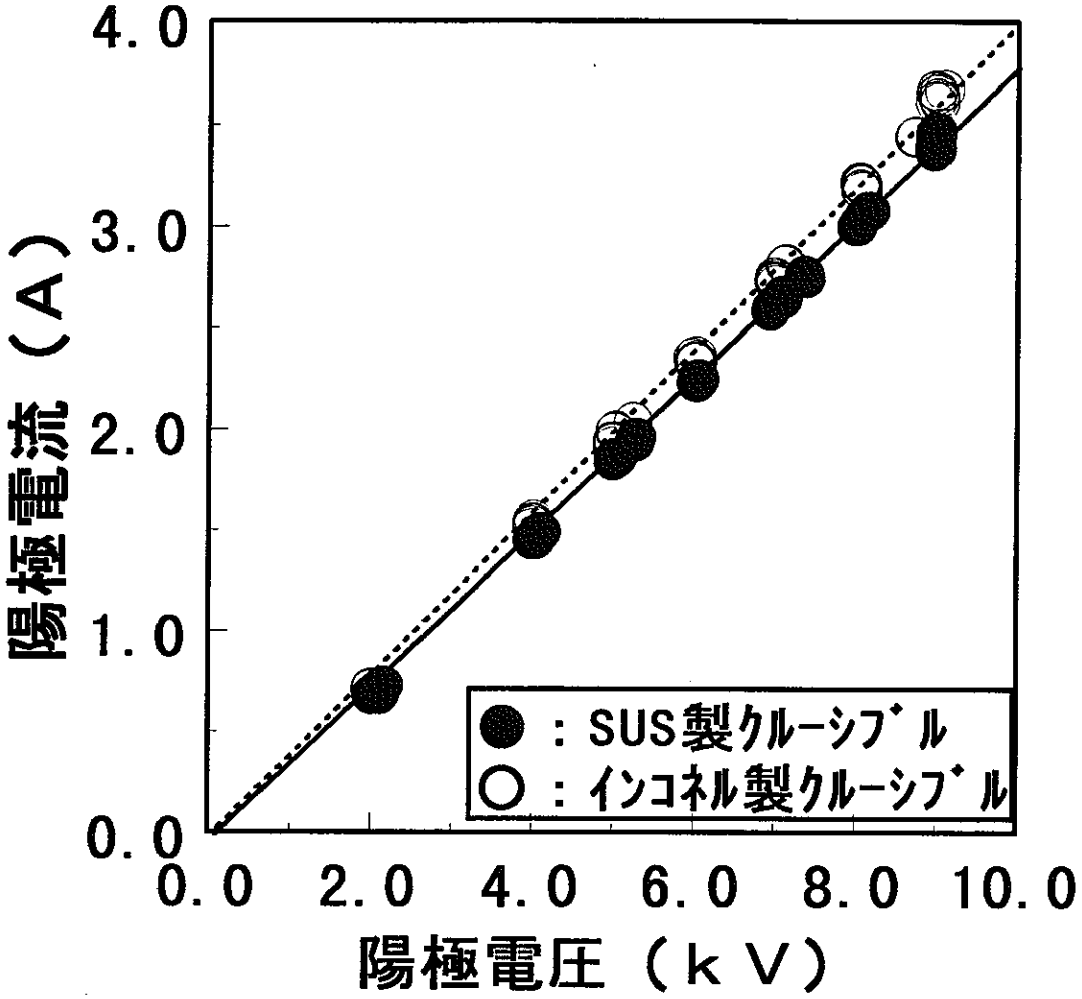


図 3.3　陽極電圧と陽極電流の関係

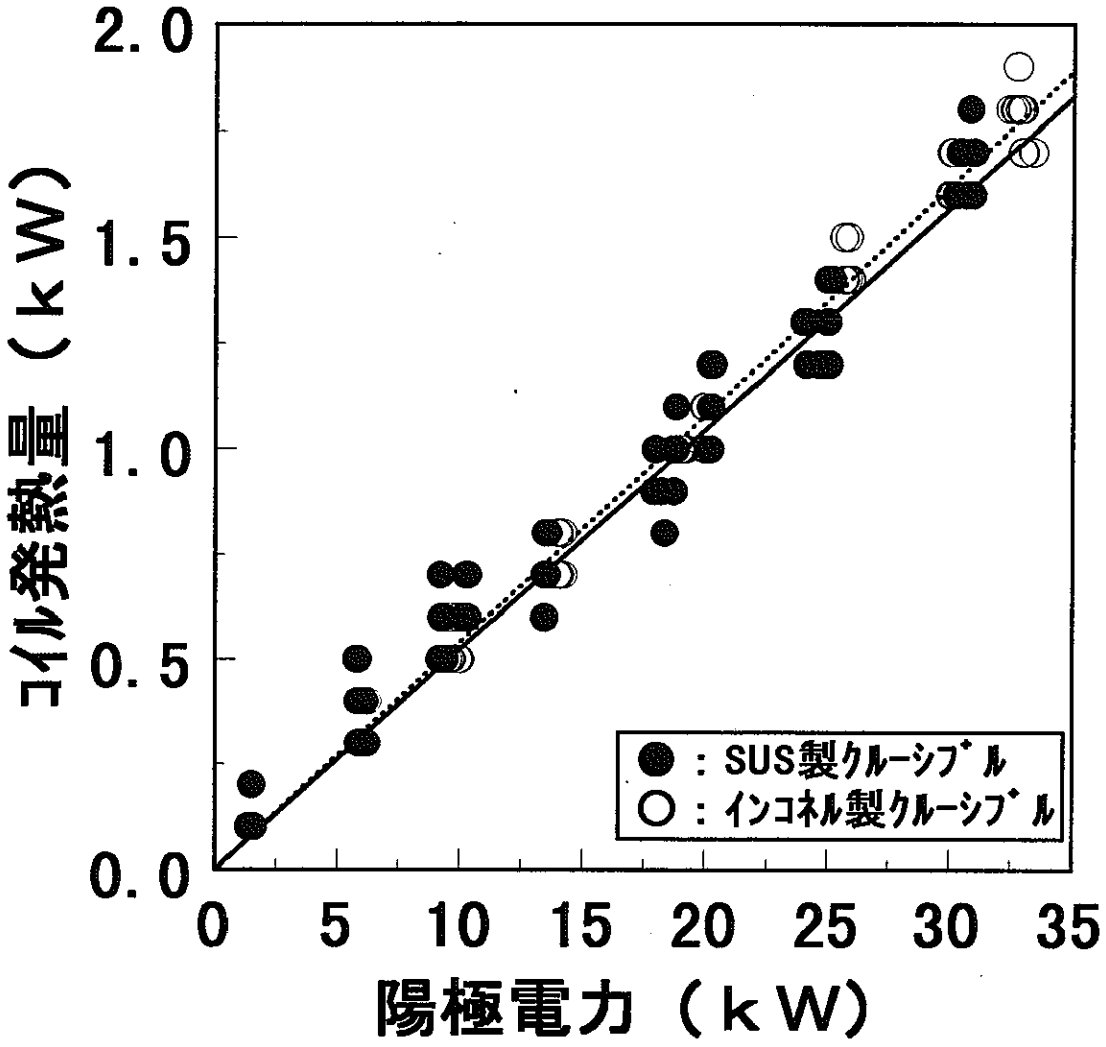


図 3.4　陽極電力とコイル発熱量の関係

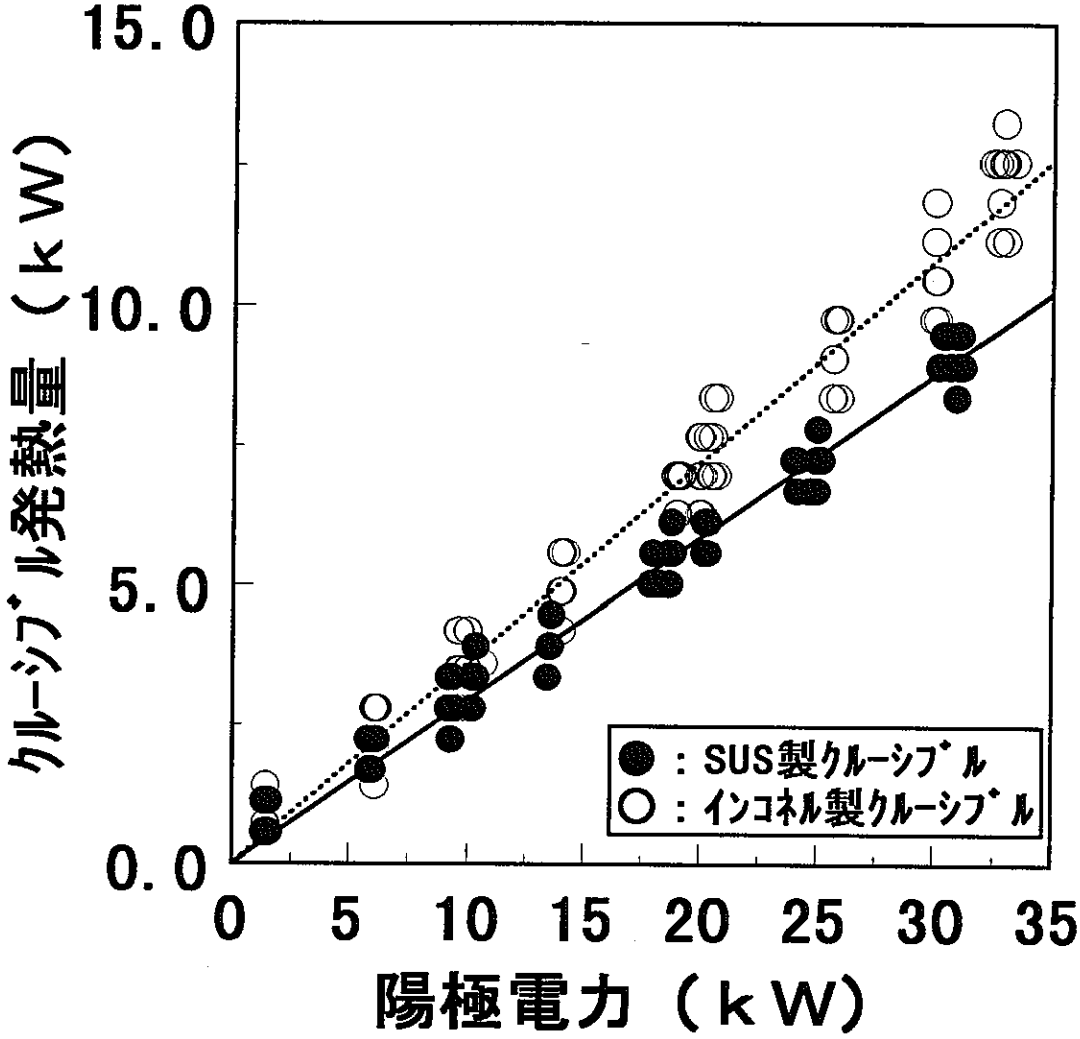


図 3.5　陽極電力とクルーシブル発熱量の関係

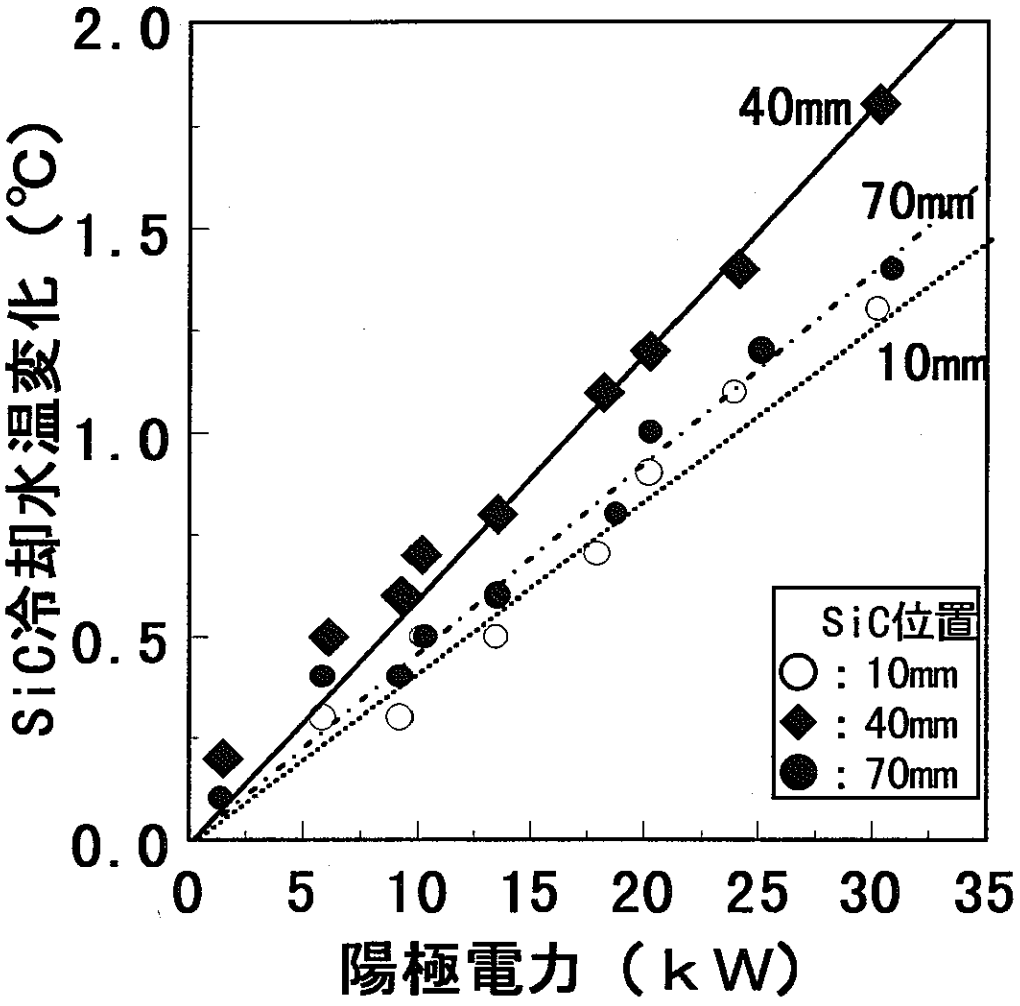
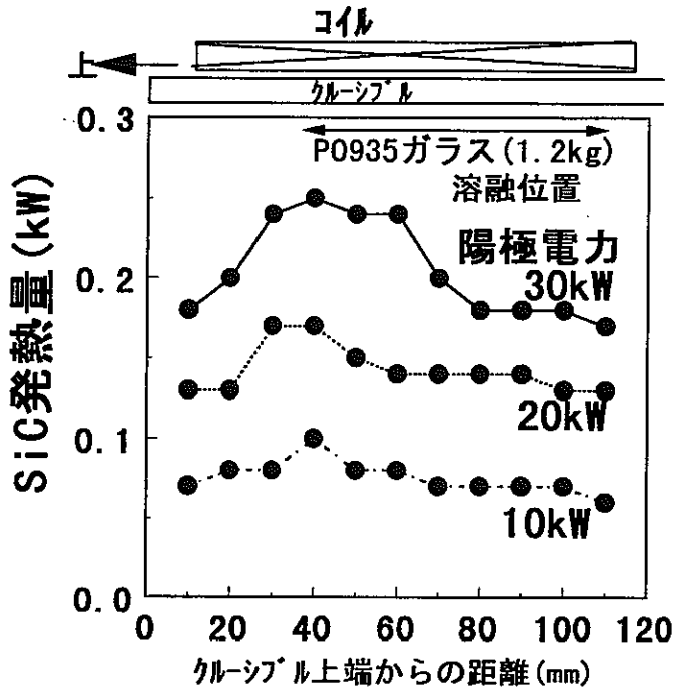
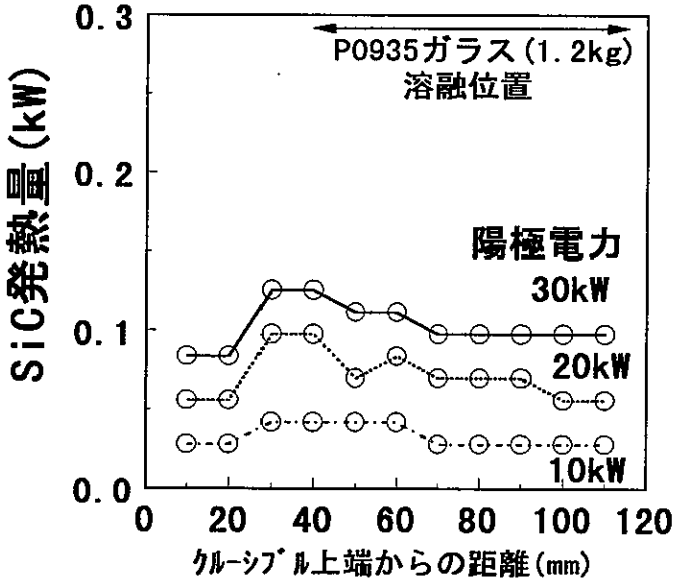


図 3.6　陽極電力と SiC 冷却水温上昇量の関係



（a）SUS 製クルーシブル



（b）インコネル製クルーシブル（比較）

図 3.7　SiC 位置による発熱量

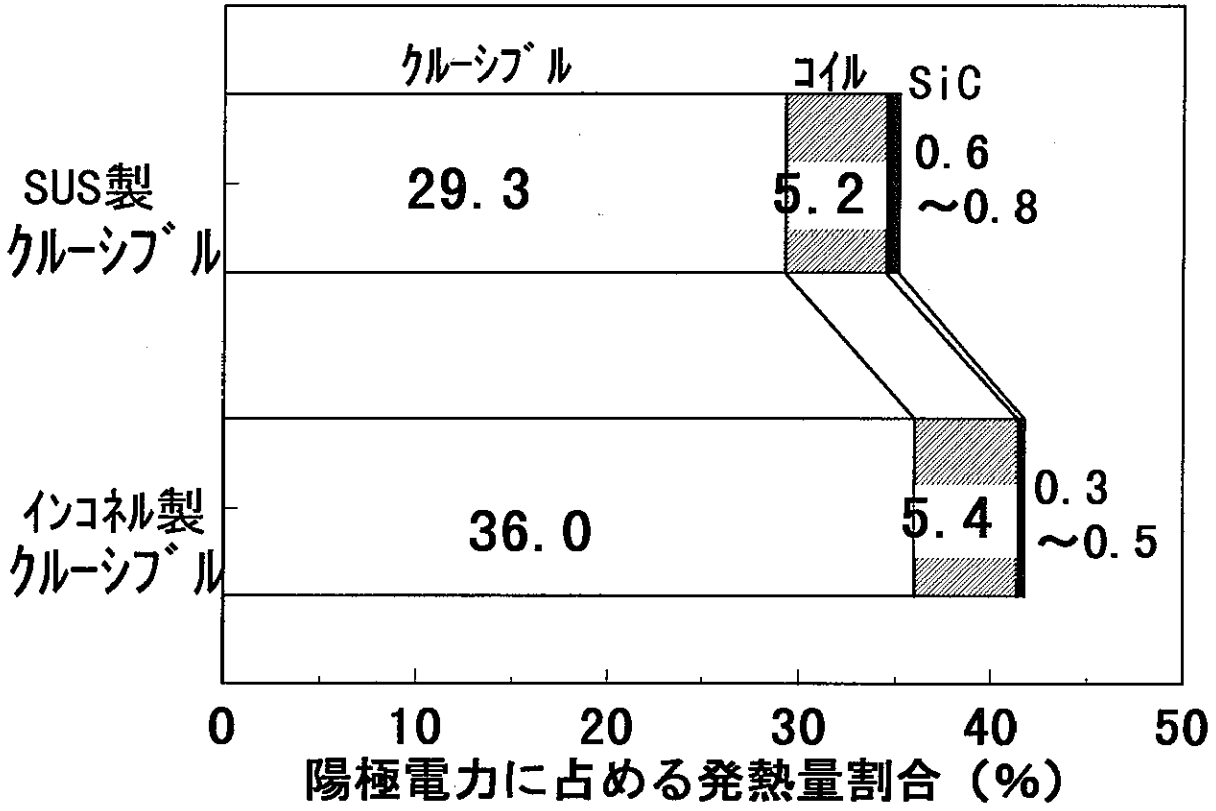


図 3.8　陽極電力に占める発熱の割合

表 3.2　SUS 製クルーシブルにおける陽極電力に占める各部の発熱割合

クルーシブル上面からの距離	陽極電力に対する各部の発熱割合（%）		
	SiC	クルーシブル	コイル
10mm	0.60	30.02	5.25
20mm	0.65	28.78	5.04
30mm	0.80	28.60	5.26
40mm	0.83	29.80	5.22
50mm	0.76	29.77	4.73
60mm	0.73	28.06	4.81
70mm	0.64	28.82	5.57
80mm	0.65	30.51	5.46
90mm	0.65	30.18	5.33
100mm	0.64	29.01	5.33
110mm	0.58	29.39	5.57
平均	0.68	29.27	5.23

表 3.3　インコネル製クルーシブルにおける陽極電力に対する各部の発熱割合

クルーシブル上面からの距離	陽極電力に対する各部の発熱割合（%）		
	SiC	クルーシブル	コイル
10mm	0.28	34.1	5.7
20mm	0.28	34.7	5.5
30mm	0.44	34.4	5.4
40mm	0.45	38.4	5.5
50mm	0.37	36.0	5.3
60mm	0.39	33.9	5.2
70mm	0.34	36.5	5.4
80mm	0.33	36.9	5.4
90mm	0.33	37.5	5.3
100mm	0.32	37.5	5.4
110mm	0.31	37.1	5.4
平均	0.35	36.0	5.4

表 3.4　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：80l/min.，ｺｲﾙ：14l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(kV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
10mm	8.99	3.38	30.39	1.3	1.7	1.7	0.18	9.5	1.7
	8.00	3.00	24.00	1.1	1.3	1.3	0.15	7.3	1.3
	7.36	2.75	20.24	0.9	1.0	1.0	0.13	5.6	1.0
	6.95	2.59	18.00	0.7	1.0	1.0	0.10	5.6	1.0
	6.04	2.24	13.53	0.5	0.7	0.8	0.07	3.9	0.8
	5.28	1.95	10.30	0.5	0.6	0.7	0.07	3.3	0.7
	5.02	1.85	9.29	0.3	0.5	0.5	0.04	2.8	0.5
	4.03	1.46	5.88	0.3	0.3	0.3	0.04	1.7	0.3
	2.16	0.73	1.58	0.2	0.2	0.1	0.03	1.1	0.1
20mm	8.97	3.37	30.23	1.4	1.6	1.6	0.20	8.9	1.6
	8.02	3.00	24.06	1.2	1.3	1.3	0.17	7.3	1.3
	7.36	2.75	20.24	0.9	1.0	1.0	0.13	5.6	1.0
	6.94	2.58	17.91	0.8	0.9	0.9	0.11	5.0	0.9
	6.04	2.23	13.47	0.6	0.6	0.6	0.08	3.3	0.6
	5.28	1.94	10.24	0.6	0.6	0.6	0.08	3.3	0.6
	5.07	1.86	9.43	0.5	0.5	0.5	0.07	2.8	0.5
	4.07	1.47	5.98	0.4	0.4	0.4	0.06	2.2	0.4
	2.15	0.72	1.55	0.2	0.1	0.1	0.03	0.6	0.1
30mm	8.98	3.39	30.44	1.7	1.7	1.7	0.24	9.5	1.7
	8.02	3.01	24.14	1.3	1.2	1.2	0.18	6.7	1.2
	7.36	2.75	20.24	1.2	1.0	1.1	0.17	5.6	1.1
	6.94	2.59	17.97	1.1	0.9	1.0	0.15	5.0	1.0
	6.03	2.23	13.45	0.8	0.6	0.7	0.11	3.3	0.7
	5.28	1.94	10.24	0.6	0.6	0.6	0.08	3.3	0.6
	5.03	1.85	9.31	0.6	0.5	0.5	0.08	2.8	0.5
	4.07	1.47	5.98	0.3	0.3	0.3	0.04	1.7	0.3
	2.18	0.73	1.59	0.2	0.1	0.1	0.03	0.6	0.1
40mm	8.97	3.40	30.50	1.8	1.7	1.7	0.25	9.5	1.7
	8.02	3.01	24.14	1.4	1.3	1.3	0.20	7.3	1.3
	7.36	2.75	20.24	1.2	1.1	1.1	0.17	6.1	1.1
	6.99	2.61	18.24	1.1	0.9	0.9	0.15	5.0	0.9
	6.04	2.24	13.53	0.8	0.7	0.7	0.11	3.9	0.7
	5.28	1.93	10.19	0.7	0.6	0.6	0.10	3.3	0.6
	5.03	1.85	9.31	0.6	0.5	0.5	0.08	2.8	0.5
	4.11	1.49	6.12	0.5	0.4	0.4	0.07	2.2	0.4
	2.11	0.71	1.50	0.2	0.1	0.1	0.03	0.6	0.1

表 3.5　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：80l/min.，ｺｲﾙ：14l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(kV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
50mm	8.98	3.42	30.71	1.7	1.6	1.6	0.24	8.9	1.6
	8.09	3.05	24.67	1.3	1.2	1.2	0.18	6.7	1.2
	7.38	2.74	20.22	1.1	1.0	1.0	0.15	5.6	1.0
	7.01	2.62	18.37	1.0	0.9	0.8	0.14	5.0	0.8
	6.45	2.24	14.45	0.8	0.7	0.7	0.11	3.9	0.7
	5.29	1.94	10.26	0.6	0.6	0.6	0.08	3.3	0.6
	5.01	1.84	9.22	0.5	0.5	0.5	0.07	2.8	0.5
	4.13	1.49	6.15	0.4	0.4	0.3	0.06	2.2	0.3
	2.12	0.71	1.51	0.2	0.2	0.2	0.03	1.1	0.2
60mm	8.99	3.44	30.93	1.7	1.6	1.6	0.24	8.9	1.6
	8.16	3.07	25.05	1.3	1.3	1.2	0.18	7.3	1.2
	7.35	2.75	20.21	1.0	1.0	1.0	0.14	5.6	1.0
	7.10	2.64	18.74	1.0	0.9	0.9	0.14	5.0	0.9
	6.06	2.24	13.57	0.8	0.7	0.7	0.11	3.9	0.7
	5.27	1.94	10.22	0.6	0.5	0.6	0.08	2.8	0.6
	5.04	1.85	9.32	0.6	0.4	0.5	0.08	2.2	0.5
	4.05	1.45	5.87	0.3	0.3	0.3	0.04	1.7	0.3
	2.03	0.68	1.38	0.1	0.2	0.1	0.01	1.1	0.1
70mm	8.99	3.44	30.93	1.4	1.7	1.7	0.20	9.5	1.7
	8.18	3.08	25.19	1.2	1.3	1.4	0.17	7.3	1.4
	7.37	2.76	20.34	1.0	1.1	1.2	0.14	6.1	1.2
	7.10	2.65	18.82	0.8	1.0	1.1	0.11	5.6	1.1
	6.06	2.24	13.57	0.6	0.7	0.8	0.08	3.9	0.8
	5.30	1.96	10.39	0.5	0.6	0.7	0.07	3.3	0.7
	5.03	1.85	9.31	0.4	0.5	0.6	0.06	2.8	0.6
	4.05	1.45	5.87	0.4	0.3	0.4	0.06	1.7	0.4
	2.05	0.69	1.41	0.1	0.1	0.1	0.01	0.6	0.1
80mm	8.98	3.45	30.98	1.3	1.7	1.7	0.18	9.5	1.7
	8.15	3.07	25.02	1.2	1.4	1.4	0.17	7.8	1.4
	7.36	2.75	20.24	1.0	1.1	1.2	0.14	6.1	1.2
	7.08	2.64	18.69	0.9	1.0	1.0	0.13	5.6	1.0
	6.04	2.24	13.53	0.6	0.7	0.8	0.08	3.9	0.8
	5.28	1.95	10.30	0.5	0.6	0.6	0.07	3.3	0.6
	5.01	1.85	9.27	0.5	0.6	0.7	0.07	3.3	0.7
	4.01	1.45	5.81	0.3	0.4	0.5	0.04	2.2	0.5
	2.02	0.68	1.37	0.1	0.1	0.1	0.01	0.6	0.1

表 3.6　SUS 製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：80l/min.，ｺｲﾙ：14l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(kV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
90mm	8.99	3.45	31.02	1.3	1.6	1.7	0.18	8.9	1.7
	8.14	3.07	24.99	1.2	1.3	1.4	0.17	7.3	1.4
	7.37	2.75	20.27	1.0	1.1	1.1	0.14	6.1	1.1
	7.10	2.65	18.82	0.9	1.1	1.0	0.13	6.1	1.0
	6.05	2.24	13.55	0.7	0.7	0.7	0.10	3.9	0.7
	5.29	1.96	10.37	0.5	0.6	0.6	0.07	3.3	0.6
	5.04	1.85	9.32	0.5	0.6	0.6	0.07	3.3	0.6
	4.04	1.46	5.90	0.4	0.3	0.3	0.06	1.7	0.3
	2.03	0.68	1.38	0.1	0.1	0.1	0.01	0.6	0.1
100mm	8.98	3.45	30.98	1.3	1.5	1.7	0.18	8.4	1.7
	8.14	3.07	24.99	1.2	1.3	1.4	0.17	7.3	1.4
	7.36	2.75	20.24	0.9	1.1	1.1	0.13	6.1	1.1
	7.10	2.65	18.82	0.9	1.0	1.0	0.13	5.6	1.0
	6.06	2.24	13.57	0.7	0.7	0.7	0.10	3.9	0.7
	5.28	1.95	10.30	0.5	0.6	0.6	0.07	3.3	0.6
	5.04	1.86	9.37	0.5	0.5	0.6	0.07	2.8	0.6
	4.03	1.45	5.84	0.3	0.4	0.4	0.04	2.2	0.4
	2.05	0.69	1.41	0.1	0.1	0.1	0.01	0.6	0.1
110mm	8.99	3.43	30.84	1.2	1.7	1.8	0.17	9.5	1.8
	8.14	3.07	24.99	1.0	1.2	1.3	0.14	6.7	1.3
	7.36	2.75	20.23	0.9	1.1	1.2	0.13	6.1	1.2
	7.10	2.65	18.82	0.8	1.0	1.1	0.11	5.6	1.1
	6.06	2.25	13.64	0.6	0.8	0.8	0.08	4.5	0.8
	5.28	1.94	10.24	0.4	0.6	0.6	0.06	3.3	0.6
	5.04	1.86	9.37	0.4	0.5	0.6	0.06	2.8	0.6
	4.03	1.45	5.84	0.3	0.3	0.5	0.04	1.7	0.5
	2.03	0.68	1.38	0.1	0.1	0.1	0.01	0.6	0.1

表 3.7 インコネル製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：100l/min.，ｺｲﾙ：12.5l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(kV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
10mm	9.01	3.63	32.75	0.7	1.7	2.2	0.10	11.9	1.9
	8.73	3.44	30.06	0.6	1.5	1.9	0.08	10.5	1.7
	8.06	3.19	25.66	0.5	1.3	1.7	0.07	9.1	1.5
	7.13	2.81	20.05	0.4	0.9	1.3	0.06	6.3	1.1
	6.99	2.73	19.09	0.4	0.9	1.2	0.06	6.3	1.0
	6.02	2.33	14.02	0.3	0.8	0.9	0.04	5.6	0.8
	5.04	1.99	10.02	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	5.01	1.93	9.67	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	4.01	1.52	6.10	0.1	0.2	0.4	0.01	1.4	0.3
	2.01	0.71	1.43	0.0	0.1	0.1	0.00	0.7	0.1
20mm	9.02	3.62	32.68	0.7	1.6	2.1	0.10	11.2	1.8
	8.74	3.45	30.13	0.6	1.5	1.9	0.08	10.5	1.7
	8.08	3.17	25.65	0.6	1.2	1.6	0.08	8.4	1.4
	7.12	2.81	20.00	0.4	1.0	1.3	0.06	7.0	1.1
	7.00	2.71	18.97	0.3	1.0	1.2	0.04	7.0	1.0
	6.04	2.33	14.07	0.3	0.7	0.9	0.04	4.9	0.8
	5.05	1.99	10.06	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	5.00	1.92	9.58	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	4.02	1.52	6.10	0.2	0.3	0.4	0.03	2.1	0.3
	2.01	0.71	1.43	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
30mm	9.09	3.67	33.38	1.0	1.8	2.0	0.14	12.6	1.7
	8.74	3.45	30.13	0.9	1.5	1.8	0.13	10.5	1.6
	8.06	3.19	25.68	0.8	1.3	1.6	0.11	9.1	1.4
	7.12	2.81	20.00	0.7	0.9	1.3	0.10	6.3	1.1
	6.99	2.73	19.05	0.6	0.9	1.2	0.08	6.3	1.0
	6.02	2.33	14.02	0.5	0.8	0.8	0.07	5.6	0.7
	5.05	1.99	10.06	0.3	0.6	0.7	0.04	4.2	0.6
	5.00	1.93	9.65	0.3	0.6	0.7	0.04	4.2	0.6
	4.01	1.53	6.14	0.2	0.4	0.5	0.03	2.8	0.4
	2.02	0.72	1.45	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
40mm	9.02	3.65	32.94	1.0	1.9	2.1	0.14	13.3	1.8
	8.73	3.44	30.06	0.9	1.7	1.9	0.13	11.9	1.7
	8.08	3.21	25.93	0.8	1.4	1.6	0.11	9.8	1.4
	7.13	2.81	20.05	0.7	1.1	1.3	0.10	7.7	1.1
	7.00	2.74	19.18	0.7	1.0	1.2	0.10	7.0	1.0
	6.02	2.33	14.02	0.5	0.8	0.8	0.07	5.6	0.7
	5.03	1.98	9.98	0.3	0.5	0.6	0.04	3.5	0.5
	5.00	1.93	9.65	0.3	0.5	0.6	0.04	3.5	0.5
	4.02	1.53	6.15	0.2	0.4	0.4	0.03	2.8	0.3
	2.01	0.71	1.43	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1

表 3.8　インコネル製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：100l/min.，ｺｲﾙ：12.5l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(KV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
50mm	9.03	3.61	32.62	0.9	1.8	2.1	0.13	12.6	1.8
	8.73	3.44	30.06	0.8	1.7	1.9	0.11	11.9	1.7
	8.07	3.19	25.71	0.7	1.4	1.6	0.10	9.8	1.4
	7.14	2.82	20.11	0.5	0.9	1.1	0.07	6.3	1.0
	6.99	2.72	19.02	0.5	0.9	1.1	0.07	6.3	1.0
	6.04	2.33	14.07	0.4	0.6	0.8	0.06	4.2	0.7
	5.04	1.99	10.02	0.3	0.4	0.6	0.04	2.8	0.5
	5.01	1.93	9.67	0.2	0.4	0.6	0.03	2.8	0.5
	4.01	1.51	6.06	0.2	0.4	0.4	0.03	2.8	0.3
	2.02	0.72	1.44	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
60mm	8.99	3.67	33.01	0.9	1.6	2.0	0.13	11.2	1.7
	8.72	3.44	29.99	0.8	1.4	1.8	0.11	9.8	1.6
	8.06	3.22	25.96	0.8	1.2	1.6	0.11	8.4	1.4
	7.12	2.81	20.00	0.6	1.0	1.2	0.08	7.0	1.0
	7.00	2.75	19.25	0.5	1.0	1.1	0.07	7.0	1.0
	6.00	2.35	14.09	0.4	0.8	0.8	0.06	5.6	0.7
	5.04	1.99	10.02	0.3	0.6	0.6	0.04	4.2	0.5
	5.00	1.94	9.70	0.3	0.6	0.6	0.04	4.2	0.5
	4.02	1.52	6.11	0.2	0.4	0.4	0.03	2.8	0.3
	2.03	0.72	1.46	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
70mm	8.97	3.62	32.44	0.8	1.8	2.1	0.11	12.6	1.8
	8.73	3.44	30.06	0.7	1.6	1.9	0.10	11.2	1.7
	8.07	3.19	25.71	0.6	1.3	1.6	0.08	9.1	1.4
	7.14	2.82	20.11	0.5	1.0	1.2	0.07	7.0	1.0
	7.00	2.73	19.11	0.5	1.0	1.1	0.07	7.0	1.0
	6.01	2.33	13.99	0.4	0.7	0.8	0.06	4.9	0.7
	5.04	1.99	10.02	0.2	0.6	0.6	0.03	4.2	0.5
	5.01	1.93	9.67	0.2	0.6	0.6	0.03	4.2	0.5
	4.02	1.53	6.15	0.2	0.4	0.5	0.03	2.8	0.4
	2.03	0.72	1.46	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
80mm	8.99	3.65	32.82	0.8	1.8	2.1	0.11	12.6	1.8
	8.73	3.44	30.06	0.7	1.6	1.9	0.10	11.2	1.7
	8.06	3.21	25.86	0.6	1.4	1.7	0.08	9.8	1.5
	7.14	2.82	20.11	0.5	1.0	1.2	0.07	7.0	1.0
	6.98	2.73	19.06	0.4	1.0	1.1	0.06	7.0	1.0
	6.03	2.34	14.10	0.3	0.7	0.8	0.04	4.9	0.7
	5.03	1.98	9.98	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	5.02	1.94	9.74	0.1	0.5	0.6	0.01	3.5	0.5
	4.01	1.54	6.18	0.1	0.4	0.4	0.01	2.8	0.3
	2.02	0.71	1.43	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1

表 3.9　インコネル製クルーシブルにおける陽極電圧・電流、冷却水温変化および発熱量
冷却水量（SiC 容器：2.0l/min.，ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ：100l/min.，ｺｲﾙ：12.5l/min.）

ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ上面からの距離	陽極電圧(kV)	陽極電流(A)	陽極電力(kW)	冷却水温差（℃）			発熱量（kW）		
				SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ	SiC	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	ｺｲﾙ
90mm	8.98	3.66	32.89	0.8	1.8	2.1	0.11	12.6	1.8
	8.73	3.44	30.06	0.7	1.6	1.8	0.10	11.2	1.6
	8.05	3.21	25.83	0.6	1.4	1.6	0.08	9.8	1.4
	7.13	2.81	20.05	0.5	1.1	1.2	0.07	7.7	1.0
	6.99	2.75	19.23	0.4	1.0	1.1	0.06	7.0	1.0
	6.03	2.36	14.22	0.4	0.8	0.8	0.06	5.6	0.7
	5.04	1.99	10.02	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	5.00	1.94	9.70	0.2	0.5	0.6	0.03	3.5	0.5
	4.03	1.54	6.21	0.1	0.4	0.4	0.01	2.8	0.3
	2.03	0.72	1.46	0.1	0.1	0.1	0.01	0.7	0.1
100mm	8.99	3.67	32.96	0.7	1.8	2.0	0.10	12.6	1.7
	8.73	3.44	30.06	0.7	1.6	1.8	0.10	11.2	1.6
	8.05	3.22	25.92	0.6	1.4	1.6	0.08	9.8	1.4
	7.12	2.81	20.00	0.5	1.1	1.3	0.07	7.7	1.1
	7.00	2.75	19.25	0.4	1.0	1.2	0.06	7.0	1.0
	6.03	2.36	14.22	0.3	0.8	0.9	0.04	5.6	0.8
	5.04	1.99	10.02	0.2	0.5	0.7	0.03	3.5	0.6
	5.00	1.94	9.70	0.2	0.5	0.7	0.03	3.5	0.6
	4.03	1.55	6.25	0.2	0.4	0.5	0.03	2.8	0.4
	2.02	0.72	1.45	0.1	0.2	0.1	0.01	1.4	0.1
110mm	8.99	3.67	32.96	0.7	1.7	2.0	0.10	11.9	1.7
	8.73	3.43	29.98	0.6	1.6	1.8	0.08	11.2	1.6
	8.05	3.22	25.92	0.6	1.4	1.6	0.08	9.8	1.4
	7.10	2.81	19.94	0.5	1.1	1.3	0.07	7.7	1.1
	6.99	2.75	19.23	0.4	1.0	1.2	0.06	7.0	1.0
	6.03	2.36	14.22	0.3	0.8	0.9	0.04	5.6	0.8
	5.04	1.99	10.02	0.2	0.5	0.7	0.03	3.5	0.6
	5.00	1.94	9.70	0.2	0.5	0.7	0.03	3.5	0.6
	4.03	1.55	6.25	0.2	0.4	0.5	0.03	2.8	0.4
	2.02	0.72	1.45	0.1	0.2	0.1	0.01	1.4	0.1

4. SUS 製クルーシブルでの P0935 ガラス溶融試験

4.1. 目的

SUS 製クルーシブルを用いて、模擬廃棄物ガラス(P0935)を溶融し陽極電圧を一定で60 分保持することにより、60 分間の溶融保持運転の可否、表面温度および熱収支を調査した。

4.2 試験方法

試験方法は、①～⑧の手順で実施した。（図 4.1 参照）

①模擬廃棄物ガラスカレット（P0935）1kg をクルーシブルに充填する。
②中央部に SiC 棒（外径 30mm、内径 15mm）をガラス表面から 100mm の深さまで挿入した。
③陽極電圧 7kV 印加する。
④陽極電流が 3.5A 以上で SiC 棒引き抜く。
⑤陽極電流が 3.5A 以上に到達したら陽極電圧を 5.3kV へ変更する。
⑥表面が完全に均一に溶解した時点で、ガラス 200g 追加する。
⑦追加したガラスが溶融し表面が一様になった時点で、陽極電圧を試験条件（4～7.2kV）へ変更する。
⑧試験条件にて、60 分間保持する。

また、各陽極電圧での安定条件を評価するため、目標の陽極電圧に調整後約 1 時間経過時点での陽極電圧、陽極電流、表面温度の平均値を比較した。また、表面温度は２色温度計の測定値を用い、平均温度が 1000℃以下になる場合は、1/2r 位置での赤外線温度計の測定値を代用した。

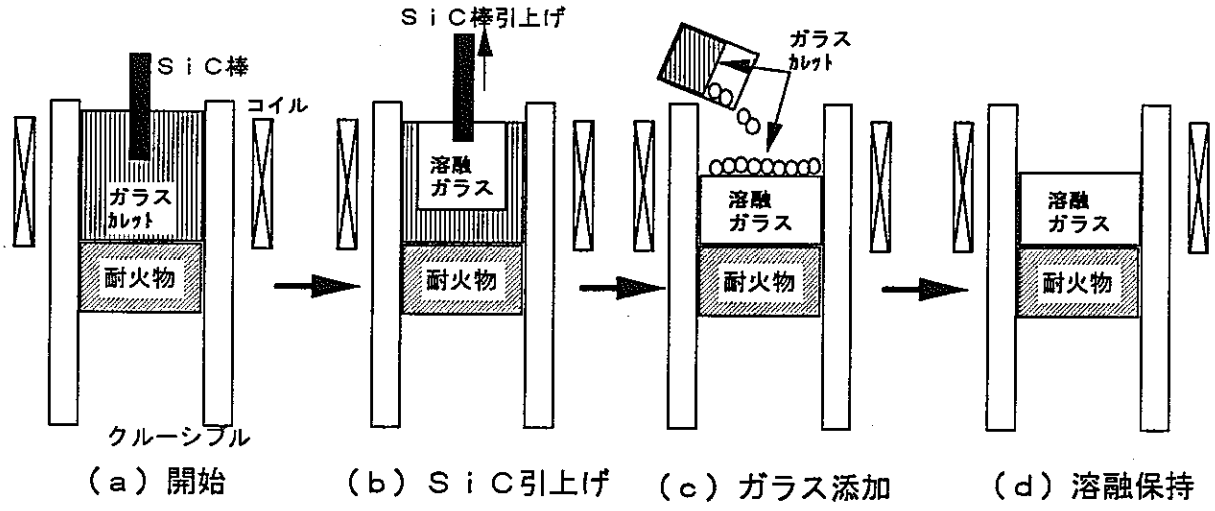


図 4.1 試験方法概要

4.3 SUS 製クルーシブルでの P935 ガラス溶融試験結果

4.3.1 試験推移写真

試験中のガラス上面からの観察結果を写真 4.1～4.2 に示す。

写真 4.1（a）では SiC 棒を引抜く直前であり、誘導磁場によって SiC 棒が赤熱しており、またその周りのガラスも溶融している。写真 4.2 にはガラス追加後の安定保持（陽極電圧一定）が開始された状態を示している。安定保持開始時には上面全体に溶融部が広がっており、表面に気泡が多く観察された。この後、陽極電圧一定で６０分間保持した。

写真 4.2（a）～（c）に、4.11kV(7.9kW)、5.54kV(17.5kW)、7.12kV(31.8kW)で安定溶融時（陽極電圧一定保持 60 分後）のガラス上面からの観察結果を示す。それぞれの写真は 1/500 秒、自動露光にて撮影した。

陽極電圧 4.11kV の場合、ガラスの明るさが暗く、5.54kV, 7.12kV ではガラス表面の照度が高いため、クルーシブルの輪郭は明確でなかった。

また、どの条件でもガラスの外周（クルーシブルと接している部分）が暗く、その内側に最も明るい部分があり、中心部は若干暗くなっていた。また、陽極電圧（陽極電力）が高い方が、最も明るい部分がより外側にシフトした。

4.3.2 ガラス表面温度推移

①陽極電圧 4.0kV（ケース１）

加熱開始後 16.9 分で SiC 棒を引き抜き、21 分で陽極電圧を 5.4kV にした。26.3 分でガラス 200g を追加し、37.3 分で陽極電圧を 4.0kV に下げた。この時陽極電流は 2.11A であったが、陽極電流が時間と共に減少し、81 分で 1.54A まで低下した。この陽極電流は溶融物を入れない空状態での陽極電流 1.5A と同じであり、また表面温度も低下し続け、赤外線温度計で 600℃以下になった。以上から陽極電圧 4kV では溶融が継続できないことがわかった。（図 4.2）

②陽極電圧 4.1kV（ケース２）

加熱開始後 19.3 分で SiC 棒を引き抜き、23 分で陽極電圧を 5.4kV にした。26.7 分でガラス 200g を追加し、35.7 分で陽極電圧を 4.1kV に下げた。この時の陽極電流は 2.18A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり減少し、53.3 分で 1.88A まで低下した。その後、ゆっくり上昇し 99.5 分で 1.93A であった。

保持溶融 60 分での平均値は、陽極電圧が 4.11kV、陽極電流が 1.93A、1/2r 位置での表面温度は 793℃であった。（図 4.3）

③陽極電圧 4.3kV（ケース３）

加熱開始後 16 分で SiC 棒を引き抜き、21.2 分で陽極電圧を 5.4kV にした。30.5 分でガラス 200g を追加し、33.3 分で陽極電圧を 4.3kV に下げた。この時点での陽極電流は 2.31A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり減少し、42.3 分で 2.08A まで低下した。その後、ゆっくり上昇し 58.7 分で 2.15A に到達し以降ほぼ一定であった。

保持溶融 60 分での平均値は、陽極電圧が 4.3kV、陽極電流が 2.15A、1/2r 位置での表面温度は 861℃であった。（図 4.4）

④陽極電圧 4.5kV（ケース４）

加熱開始後 16.2 分で SiC 棒を引き抜き、21.5 分で陽極電圧を 5.4kV にした。26.3 分でガラス 200g を追加し、36 分で陽極電圧を 4.5kV に下げた。この時陽極電流は 2.43A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり減少し、41.5 分で 2.26A まで低下した。その後、ゆっくり上昇し 70.8 分以降は 2.35A まで上昇した。その後ほぼ一定値で推移した。

保持溶融 60 分での平均値は、陽極電圧が 4.51kV、陽極電流が 2.35A、1/2r 位置での表面温度は 881℃であった。（図 4.5）

⑤陽極電圧 4.7kV（ケース５）

加熱開始後 15.3 分で SiC 棒を引き抜き、21 分で陽極電圧を 5.4kV にした。25.5 分でガラス 200g を追加し、36.2 分で陽極電圧を 4.7kV に下げた。この時の陽極電流は 2.60A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり減少し、41.5 分で 2.41A まで低下した。その後、ゆっくり上昇し、78.5 分で 2.50A まで上昇し、その後、ほぼ一定であった。

保持溶融 60 分での平均値は、陽極電圧が 4.69kV、陽極電流が 2.50A、1/2r 位置での表面温度は 953℃であった。（図 4.6）

⑥陽極電圧 5.1kV（ケース６）

加熱開始後 18 分で SiC 棒を引き抜き、22.5 分で陽極電圧を 5.4kV にした。24.7 分でガラス 200g を追加し、34.7 分で陽極電圧を 5.1kV に下げた。この時の陽極電流は 2.83A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり減少し、40.5 分で 2.72A まで低下した。その後、ゆっくり上昇し 52 分で 2.78A まで上昇し、その後安定して推移した。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 5.12kV、陽極電流は 2.69A、1/2r 位置での表面温度は 1007℃であった。（図 4.7）

⑦陽極電圧 5.3kV（ケース７）

加熱開始後 8.2 分で SiC 棒を引き抜き、21 分で陽極電圧を 5.4kV にした。28.8 分でガラス 200g を追加し、陽極電圧を 5.3kV に下げた時点（33.3 分）での陽極電流は 2.90A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり増加し、74.7 分で 3.16A となりその後安定に推移した。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 5.34kV、陽極電流は 3.16A、1/2r 位置での表面温度は 1035℃であった。（図 4.8）

⑧陽極電圧 5.5kV（ケース８）

加熱開始後 18.7 分で SiC 棒を引き抜き、22.2 分で陽極電圧を 5.4kV にした。25.7 分でガラス 200g を追加し、35.3 分で陽極電圧を 5.5kV に上げた。この時の陽極電流は 3.17A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり上昇し、60.8 分で 3.23A まで上昇した。その後、ほぼ一定であった。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 5.54kV、陽極電流は 3.16A、1/2r 位置での表面温度は 1150℃であった。（図 4.9）

⑨陽極電圧 6.0kV（ケース９）

加熱開始後 20.5 分で SiC 棒を引き抜き、24 分で陽極電圧を 5.4kV にした。28.8 分でガラス 200g を追加し、44 分で陽極電圧を 5.7kV に、65.5 分で陽極電圧を 6.0kV に上げた。この時の陽極電流は 3.70A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり上昇し、70.8 分で 3.77A まで上昇した。その後ほぼ一定推移した。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 5.99kV、陽極電流は 3.57A、1/2r 位置での表面温度は 1267℃であった。（図 4.10）

⑩陽極電圧 6.2kV（ケース１０）

加熱開始後 20.2 分で SiC 棒を引き抜き、23 分で陽極電圧を 5.4kV にした。26.8 分でガラス 200g を追加し、38.2 分で陽極電圧を 5.7kV に、53.7 分で陽極電圧を 6.2kV に上げた。この時陽極電流は 3.80A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり上昇し、60.5 分で 4.03A まで上昇した。その後、ほぼ安定した推移が得られた。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 6.16kV、陽極電流は 3.84A、1/2r 位置での表面温度は 1303℃であった。（図 4.11）

⑪陽極電圧 6.4kV（ケース１１）

加熱開始後 20.5 分で SiC 棒を引き抜き、24.5 分で陽極電圧を 5.4kV にした。29.7 分でガラス 200g を追加し、39.8 分で陽極電圧を 5.7kV に、54.3 分で陽極電圧を 6.4kV に上げた。この時陽極電流は 4.04A であったが、その後陽極電流が時間と共にゆっくり上昇し、60.2 分で 4.35A まで上昇した。その後、ほぼ安定した推移が得られた。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 6.43kV、陽極電流は 4.09A、1/2r 位置での表面温度は 1381℃であった。（図 4.12）

⑫陽極電圧 6.8kV（ケース１２）

加熱開始後 16.8 分で SiC 棒を引き抜き、19.2 分で陽極電圧を 5.4kV にした。22.3 分でガラス 200g を追加し、34.5 分で陽極電圧を 6.4kV に上げた。この時の陽極電流は 3.66A であったが、その後陽極電流は時間と共にゆっくり上昇し、39.3 分で 4.35A まで上昇した。その後、ほぼ安定して推移した。

保持溶融 60 分での陽極電圧は 6.77kV、陽極電流は 4.24A、1/2r 位置での表面温度は 1468℃であった。（図 4.13）

⑬7.1kV（ケース１３）

加熱開始後 17.5 分で SiC 棒を引き抜き、19.7 分で陽極電圧を 5.4kV にした。22.8 分でガラス 200g を追加し、34.8 分で陽極電圧を 7.1kV に上げた。この時点での陽極電流は 4.34A であったが、その後陽極電流は時間と共にゆっくり上昇し、43.8 分で 4.93A まで上昇した。その後、ほぼ安定して推移した。保持溶融 60 分での陽極電圧は 7.12kV、陽極電流は 4.46A、1/2r 位置での表面温度は 1508℃であった。（図 4.14）

4.3.3 溶融時の表面温度分布

4.3.3.1 ガラス表面温度分布

陽極電圧を60分保持した後の赤外線画像図を図4.15～4.17に示す。
保持陽極電圧は4.1～7.2kVであった。

ガラス表面温度は、陽極電力が高い方が温度も高く、また表面温度の差も大きい。ガラス表面温度は周方向に対称ではなく、特に陽極電力が高い条件において多くのホットスポットが存在した。ただし、ホットスポットの位置は中心から同距離であった。

また、半径方向の温度分布は、ガラス外側はクルーシブルと接触しており、ガラス表面温度は急激に低下している。このため、ガラスとクルーシブル境界の温度がはっきりせず、また陽極電圧が低い条件でのガラス外側は測定下限の 600℃以下であり、ガラス全体の平均温度は計算できなかった。今回は到達温度とガラス中心の温度について整理した。

陽極電圧4.11kV保持では、陽極電流は1.93Aであり、陽極電力7.93kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は880℃であり、中心での平均温度は764℃であった。（図4.15（a））

陽極電圧4.30kV保持では、陽極電流は2.15Aであり、陽極電力9.25kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は892℃であり、中心での平均温度は817℃であった。（図4.15（b））

陽極電圧4.51kV保持では、陽極電流は2.35Aであり、陽極電力10.58kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1144℃であり、中心での平均温度は821℃であった。（図4.15（c））

陽極電圧4.69kV保持では、陽極電流は2.50Aであり、陽極電力11.73kWであった。この時のｶﾞﾗｽ表面最高温度の平均は 1073℃であり、中心での平均温度は 827℃であった。(図4.15（d））

陽極電圧5.12kV保持では、陽極電流は2.69Aであり、陽極電力13.74kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1100℃であり、中心での平均温度は970℃であった。（図4.16（a））

陽極電圧5.34kV保持では、陽極電流は3.15Aであり、陽極電力16.86kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1250℃であり、中心での平均温度は970℃であった。(図4.16（b））

陽極電圧5.54kV保持では、陽極電流は3.16Aであり、陽極電力17.51kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1364℃であり、中心での平均温度は907℃であった。（図4.16（c））

陽極電圧5.99kV保持では、陽極電流は3.57Aであり、陽極電力21.38ｋWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1372℃であり、中心での平均温度は976℃であった。（図4.16（d））

陽極電圧6.16kV保持では、陽極電流は3.83Aであり、陽極電力23.59kWであった。この時のガラス表面最高温度の平均は1470℃であり、中心での平均温度は1109℃で

あった。（図 4.17（a））

陽極電圧 6.43kV 保持では、陽極電流は 4.09A であり、陽極電力 26.30kW であった。この時のガラス表面最高温度の平均は 1529℃であり、中心での平均温度は 1065℃であった。（図 4.17（b））

陽極電圧 6.77kV 保持では、陽極電流は 4.24A であり、陽極電力 28.75kW であった。この時のガラス表面最高温度の平均は 1559℃であり、中心での平均温度は 1189℃であった。（図 4.17（c））

陽極電圧 7.12kV 保持では、陽極電流は 4.46A であり、陽極電力 31.75kW であった。この時のガラス表面最高温度の平均は 1576℃であり、中心での平均温度は 1123℃であった。（図 4.17（d））

4.3.3.2 表面温度分布比較結果

ガラスの表面温度についてガラス上面から観察した温度分布の直径方向断面を図 4.18 に比較した。代表として、陽極電圧 4.1，5.5，7.1kV のデータを比較した。

まず、4.1kV では半径 40mm 付近より外側が 600℃以下となり、半径 36～40mm 付近で大きな温度勾配がみられ、半径 27.5mm 付近より内側は約 800℃でほぼ一定であった。

次に、5.5kV では半径 31.5mm 付近をピークとして、外側に急激な温度低下がみられ、内側は中心を下限として温度低下がみられた。この断面でのピーク温度は 1108，1356℃であり、中心温度は 907℃で、左右のピークと中心の温度差は 201，449℃であった。

最後に、7.1kV では半径 33～36mm 付近をピークとして、外側に急激な温度低下がみられ、内側は中心を下限として温度低下がみられた。この断面でのピーク温度は 1460，1503℃であり、中心温度は 1123℃で、左右のピークと中心の温度差は 337，380℃であった。

陽極電圧（陽極電力）が高い方が、表面温度が高く、また中心と最高点での温度差も大きい。温度ピークは、温度が高い方がより外側に位置していた。

陽極電圧が高いほどピーク位置が外側にある原因としては、ガラスの温度が高くなることによるガラスの比抵抗の低下と考えられる。つまり温度が高いほどガラスの比抵抗が低くなり、電磁浸透深さも小さくなっていき、発熱がより狭い領域で起こるようになり、且つこの発熱領域がガラスの外側にシフトしていくためである。また発熱領域が外側にシフトすることにより、中心への熱伝達量はピーク温度が高くなる割には増加が少なくなる。このため、ピーク温度と中心の温度差は大きくなると考えられる。

4.3.4 安定時の電力とガラス温度

4.3.4.1 陽極電圧と陽極電流の関係

ガラス安定溶融時の陽極電圧と陽極電流の関係を図 4.19 に示す。
インコネル製クルーシブルと比較すると、SUS 製クルーシブルでは同じ陽極電圧に対し、陽極電流が若干高く推移した。例えば、陽極電圧が 6.0kV では、SUS 製クルーシブルでは 3.83A であり、インコネル製クルーシブルでは 3.43A であった。

4.3.4.2 安定溶融時陽極電力とガラス表面温度

溶融を安定に継続可能な最小の陽極電力は、インコネル製クルーシブルでは、16kW であったが、SUS 製クルーシブルでは 8kW であり、インコネル製クルーシブルの半分の陽極電力でも溶融継続が可能であった。

ガラス安定溶融時の陽極電力とガラス表面温度の関係を図 4.20 に示す。
SUS 製クルーシブルでもインコネル製クルーシブルでも、陽極電力に対し 1/2r 位置でのガラス表面温度は、見かけ上直線関係となった。
ここで、SUS 製クルーシブルでは、陽極電力 31.75kW でガラス表面温度平均が最高値を示し、1508℃であった。
溶融継続可能な表面温度範囲は、インコネル製クルーシブルでは 1150℃～1300℃で 150℃の範囲でしかなかった。しかし、SUS 製クルーシブルでは非常に広い範囲で安定溶融を維持でき、800℃～1508℃の範囲で安定溶融を保持できることがわかった。

4.3.5 抜熱割合

SUS 製クルーシブルとインコネル製クルーシブルでのガラス溶融時の定常状態における陽極電力、冷却水温度上昇、表面温度を整理した。表 4.1，4.2 に陽極電圧、陽極電流、クルーシブル冷却水温上昇値、クルーシブル冷却水抜熱量、コイル冷却水温上昇値、コイル冷却水抜熱量、および 1/2r 位置でのガラス表面温度の関係を示す。
以下に冷却水抜熱量および表面輻射熱量と陽極電力の関係を示す。

4.3.5.1 ガラス上面輻射熱

1/2r 位置でのガラス表面温度を代表値と仮定すると、(4)式よりガラス表面輻射量は図 4.21 の関係になる。

$$Q_{top} = \pi r^2 \varepsilon \sigma_s (T^4 - T_a^4) \qquad \cdots (4)$$

ここで、r はクルーシブル内径、T はｶﾞﾗｽ表面温度、T a は周囲温度、ε はチャージの放射率、σ_s はステファンーボルツマン定数である。

例えば、800℃，1000℃，1500℃ではそれぞれ 0.18kW，0.35kW，1.32kW となり温度が高くなるにつれ輻射熱量も増加する。

4.3.5.2 クルーシブル冷却水抜熱

図4.22に陽極電力とクルーシブル冷却水抜熱量の関係を示す。SUSクルーシブルでもインコネルクルーシブルでもクルーシブル抜熱量は、陽極電力に対し見かけ上直線関係であった。

また、インコネル製の方がSUS製クルーシブルよりクルーシブル冷却水の抜熱量が0.6kW程度多かった。

4.3.5.3 コイル冷却水抜熱

図4.23に陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係を示す。

SUS製クルーシブルでもインコネル製クルーシブルでも、コイル抜熱量はクルーシブル冷却水抜熱量と同様に、陽極電力に対し見かけ上直線関係であった。

SUS製クルーシブルとインコネル製クルーシブルのコイル冷却水抜熱量はほぼ同等であった。例えば、陽極電力21kWではSUS製クルーシブルでは0.8kW、インコネル製クルーシブルでは0.7kWであり、同等であった。

4.3.5.4 抜熱量で整理した熱収支について

図4.24,4.25にSUS製、インコネル製クルーシブルにおける陽極電力に対するクルーシブル、コイル冷却水抜熱量、ガラス上面放熱量の割合の関係を示す。

抜熱のほとんどはクルーシブル冷却水によって熱が奪われていることがわかった。また、全抜熱量はSUS製クルーシブルではクルーシブル抜熱量が陽極電力に対し36.6～42.2%、コイル抜熱量が2.5～5.1%、上部放熱が2.2～4.2%であった。インコネル製クルーシブルではクルーシブル抜熱量が39.9～41.6%、コイル抜熱量が3.0～3.3%、上部放熱が3.3～3.8%であった。

22kW付近の陽極電力レベルでクルーシブル抜熱量を比較すると、SUS製クルーシブルでは38.0%、インコネル製クルーシブルでは40.6%であり、インコネル製クルーシブルの方がクルーシブル抜熱量の割合が多かった。

4. 4 考察

4.4.1 発熱・抜熱モデル

ガラス発熱量とクルーシブル発熱量を考える場合、図 4.25 の概念図に示すようになる。つまり、クルーシブル冷却水の抜熱量Q_{Cr-w}は、クルーシブル発熱量とガラスからの伝熱量の和であり、(5)式で表される。

$$Q_{Cr-w} = Q_{Cr} + Q_{C-Cr} \quad \cdot\cdot\cdot (5)$$

一方、電源停止後のクルーシブル冷却水温変化量は誘導加熱がなくなるため、減少する。この時の温度変化量は、図 4.26 に示すように 50 秒までとそれ以降では温度変化の傾きが変わっている。これは電源を停止した後、クルーシブルとガラスに対する誘導加熱がなくなり、Q_{Cr}とQ_{C-Cr}は減少する。クルーシブル発熱による抜熱減少は速いため、急速に低下する。しかし、ガラスから伝熱による熱移動は遅いため、徐々に低下する。

この熱移動速度差からクルーシブル本体の発熱とガラスからの伝熱を分離することができる。

4.4.2 電源停止後冷却水温推移

図 4.26 に電源停止後のクルーシブル冷却水温変化を示す。そこで、クルーシブル発熱による抜熱Q_{Cr}とガラスからの伝熱Q_{C-Cr}をそれぞれ直線として近似することにより、電源停止時のガラスからの伝熱量を推定することができる。例えば、陽極電力が 31.7kW では 0.58℃で 4.36kW あると計算できる。同様に、28.8kW では 0.54℃で 4.14kW、26.3kW では 0.55℃で 4.31kW、23.6kW では 0.47℃で 0.47kW、21.4kW では 0.53℃で 4.05kW、またインコネル製クルーシブル 22.0kW では 0.49℃で 3.2kW であった。

4.4.3 クルーシブル発熱

図 4.27 に陽極電力とクルーシブルの発熱量の関係を示す。SUS 製クルーシブルでは陽極電力が 31.8kW でクルーシブル発熱量計算値が 7.3kW、21.4kW では 4.1kW であった。インコネル製クルーシブルでは陽極電力が 22.0kW で 5.7kW であった。陽極電力 22kW で比較すると、インコネル製クルーシブルに対し、SUS 製クルーシブルの方が 28%高かった。

4.4.4 ガラスからクルーシブルへの伝熱

ガラスからクルーシブルへの伝熱量を整理した結果を図 4.28 に示す。今回の試験範囲では陽極電力増加により伝熱量も若干増加しているものの、大きな変化見られなかった。またインコネル製クルーシブルに対し、SUS 製クルーシブルの伝熱量の方が陽極電力 22kW では 20%程度多くなっており、冷却が強化されていることがわかった。

4.4.5 発熱割合

図4.29に各部発熱量で整理した発熱バランスと陽極電力の関係を示す。

陽極電力21.4～31.7kWの範囲では、SUS製クルーシブルではクルーシブル発熱量が22.9～19.1%、コイル発熱量が2.5～3.7%、ガラスからクルーシブルへの伝熱が13.7～21.6%、上部放熱が3.0～4.3%であった。またガラス発熱量は17.9～21.9%となる。

インコネル製クルーシブルではクルーシブル発熱量が26.1%、コイル発熱が3.4%、ガラスからクルーシブルへの伝熱量が14.5%、上部放熱が3.4%であった。またガラス発熱量は17.9%となる。

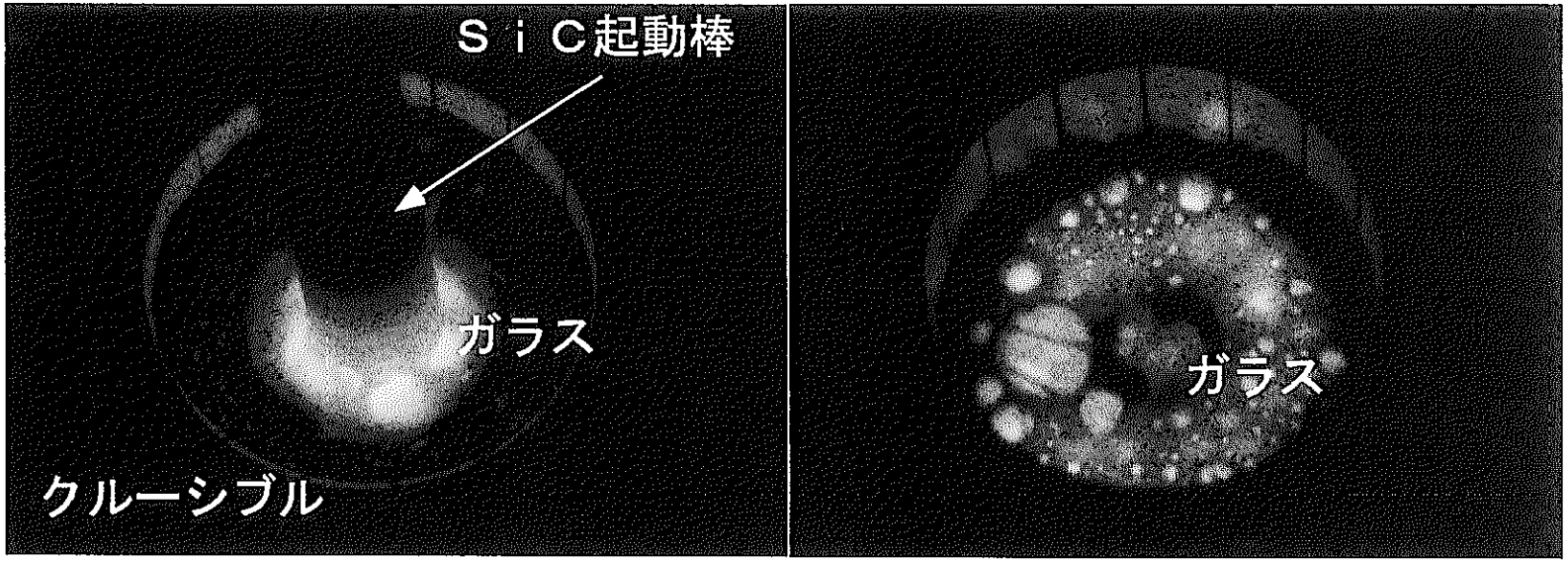
陽極電力をそろえて比較すると、SUS製クルーシブル21.4kWでクルーシブル発熱割合19.1%に対し、インコネル製クルーシブル26.1%でクルーシブル本体の発熱割合は、SUS製クルーシブルの方が少なかった。またガラスの発熱割合は21.9%に対し、インコネル製クルーシブル17.9%でガラスの発熱量は、SUS製クルーシブルの方が多く。陽極電力が22kWではSUS製クルーシブルでのガラス発熱量はインコネル製クルーシブルの1.2倍となった。

また、SUS製クルーシブルで陽極電力増加に対し、クルーシブル発熱割合は増加し、ガラスの発熱割合が減少している。

4.5 SUS製クルーシブルでのP0935ガラス溶融試験まとめ

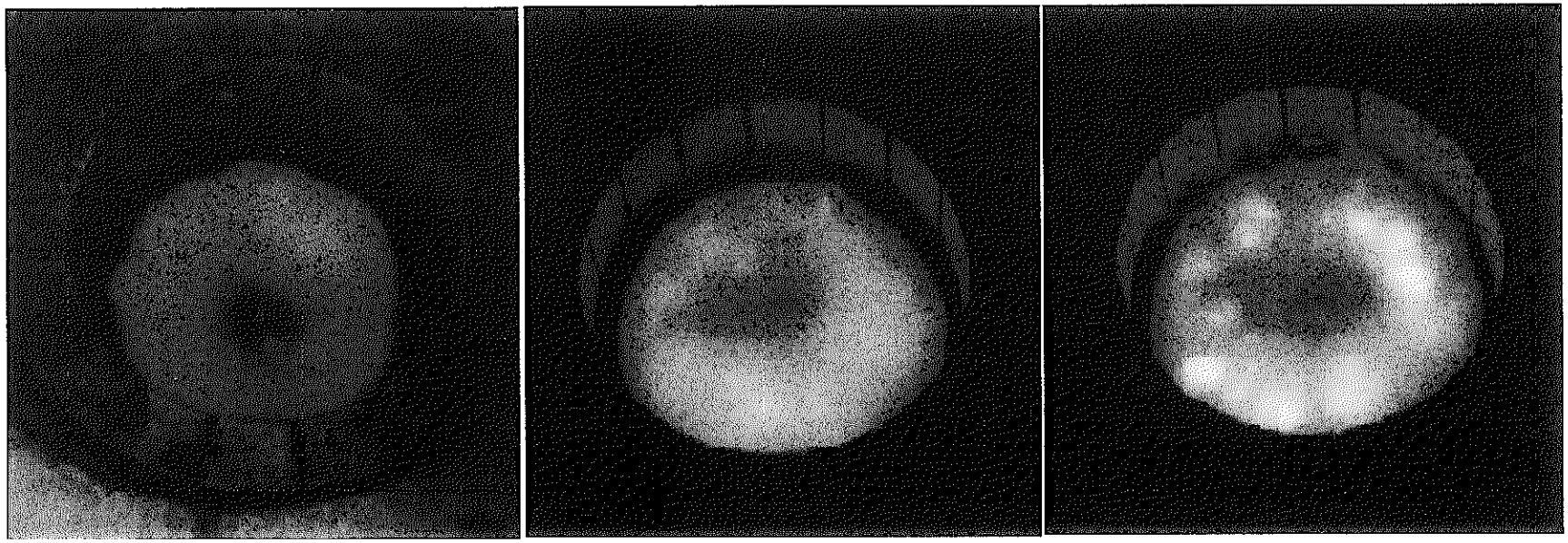
SUS製クルーシブルを用いて、模擬廃棄物ガラス(P0935)を溶融しSUS製クルーシブルの安定溶融条件を調査した結果、インコネル製クルーシブルに対しSUS製クルーシブルの方がクルーシブルとして良好であることがわかった。

1) SUS製クルーシブルでの60分保持の溶融継続可能な最低電力は8kWであり、インコネル製クルーシブル16kWに対し1/2であった。
2) 安定溶融保持可能な陽極電力範囲は、インコネル製クルーシブルが17～22kWで1/2r位置の表面温度が1150～1300℃の範囲であるのに対し、SUS製クルーシブルでは陽極電力7.8～31.8kWで保持可能あり、1/2r位置での表面温度も800℃～1510℃の範囲で溶融保持が可能であることがわかった。
3) 安定溶融時の表面温度分布を調査した結果、陽極電力31.8kWで到達温度は1576℃であり、表面温度の最大の位置は1/2r位置より若干外側に存在した。
4) 全抜熱量は、陽極電力に対し、SUS製クルーシブルではクルーシブル抜熱量が36.6～42.2%、コイル抜熱量が2.5～5.1%、上部放熱が2.2～4.2%であった。インコネル製クルーシブルではクルーシブル抜熱量が39.9～41.6%、コイル抜熱量が3.0～3.3%、上部放熱が3.3～3.8%であった。
5) SUS製クルーシブルでは陽極電力21.4～31.7kWにおいて陽極電力に対する各部の発熱割合を調査した結果、クルーシブルの発熱割合が22.9～19.1%、ガラスの発熱割合は17.9～21.9%であり、インコネル製クルーシブルでは陽極電力22kWにおいて陽極電力に対するクルーシブルの発熱割合が26.1%、ガラスの発熱割合は17.9%であった。
6) 陽極電力が22kWの条件で比較すると、SUS製クルーシブル試験でのクルーシブル本体の発熱割合19.1%に対し、インコネル製クルーシブル試験でのクルーシブル本体の発熱割合26.1%であり、SUS製クルーシブルの方がクルーシブルの発熱割合は少なかった。またガラスの発熱割合はSUS製クルーシブル試験では21.9%であり、インコネル製クルーシブル試験での17.9%に対し、SUS製クルーシブルでのガラスの発熱量はインコネル製クルーシブルの1.2倍となった。



（ａ）ＳｉＣ起動棒引抜き前　（ｂ）安定保持開始時
（ガラス追加後）

写真4.1　試験推移(SUS製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ, P0935)



(a) 陽極電力7.9kW
(陽極電圧4.11kV)

(b) 陽極電力17.5kW
(陽極電圧5.54kV)

(c) 陽極電力31.8kW
(陽極電圧7.12kV)

写真4.2　溶融安定状態写真(SUS製クルーシブル, P0935)

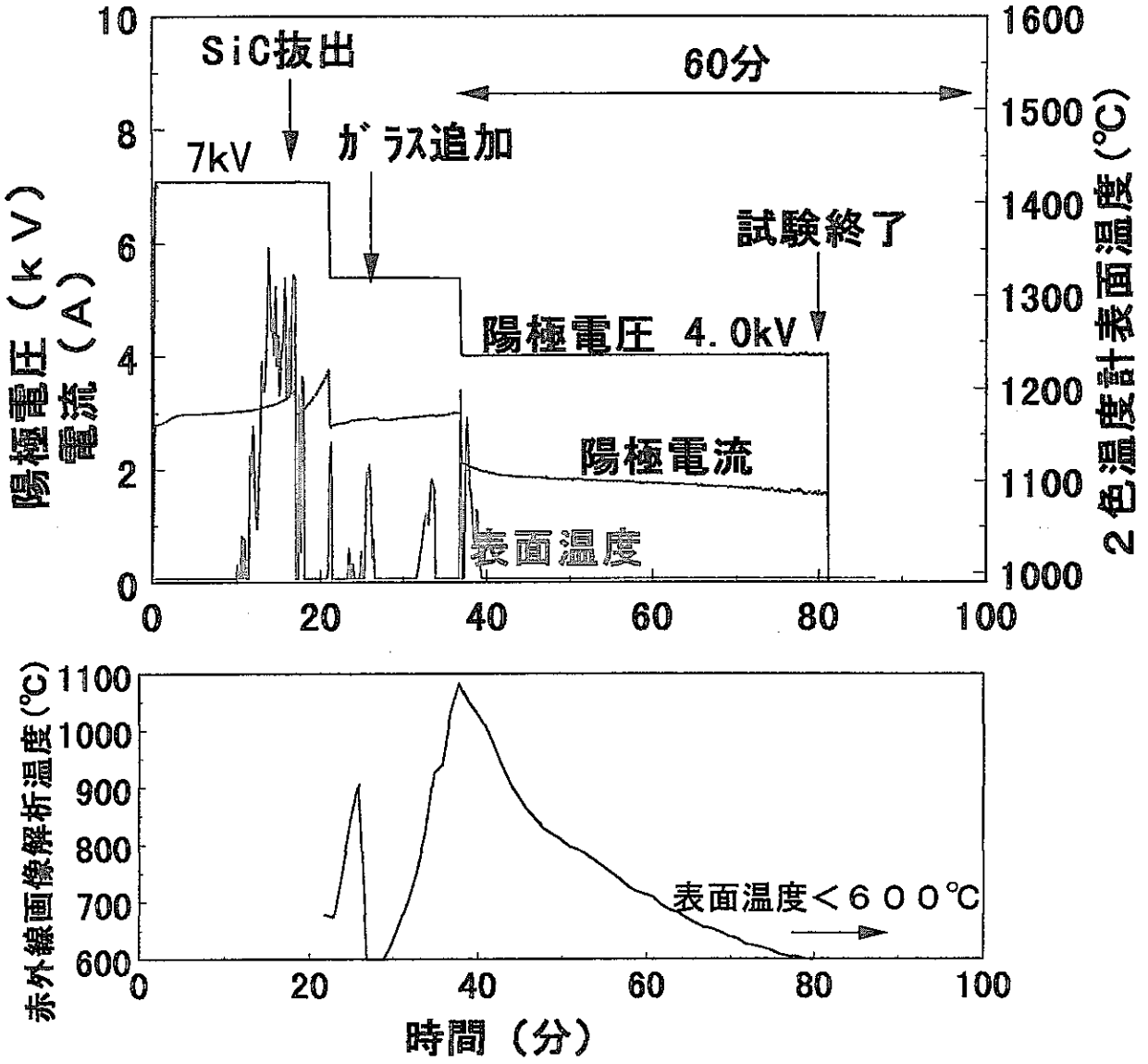


図 4.2　SUS 製クルーシブル P0935 ガラス溶融試験温度推移（陽極電圧 4.0kV）ーケース 1

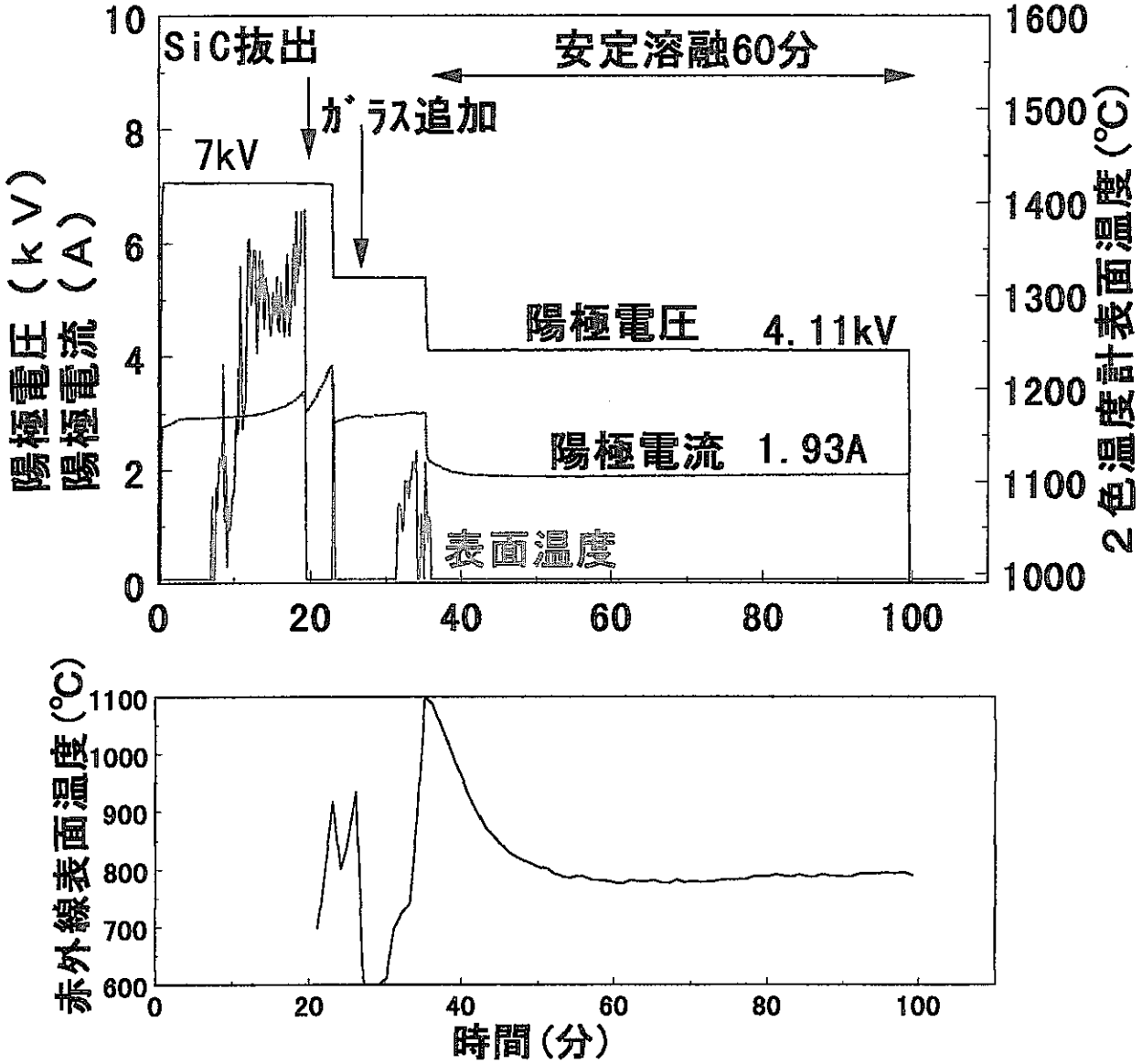


図 4.3　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移（陽極電圧 4.1kV）ーｹｰｽ 2

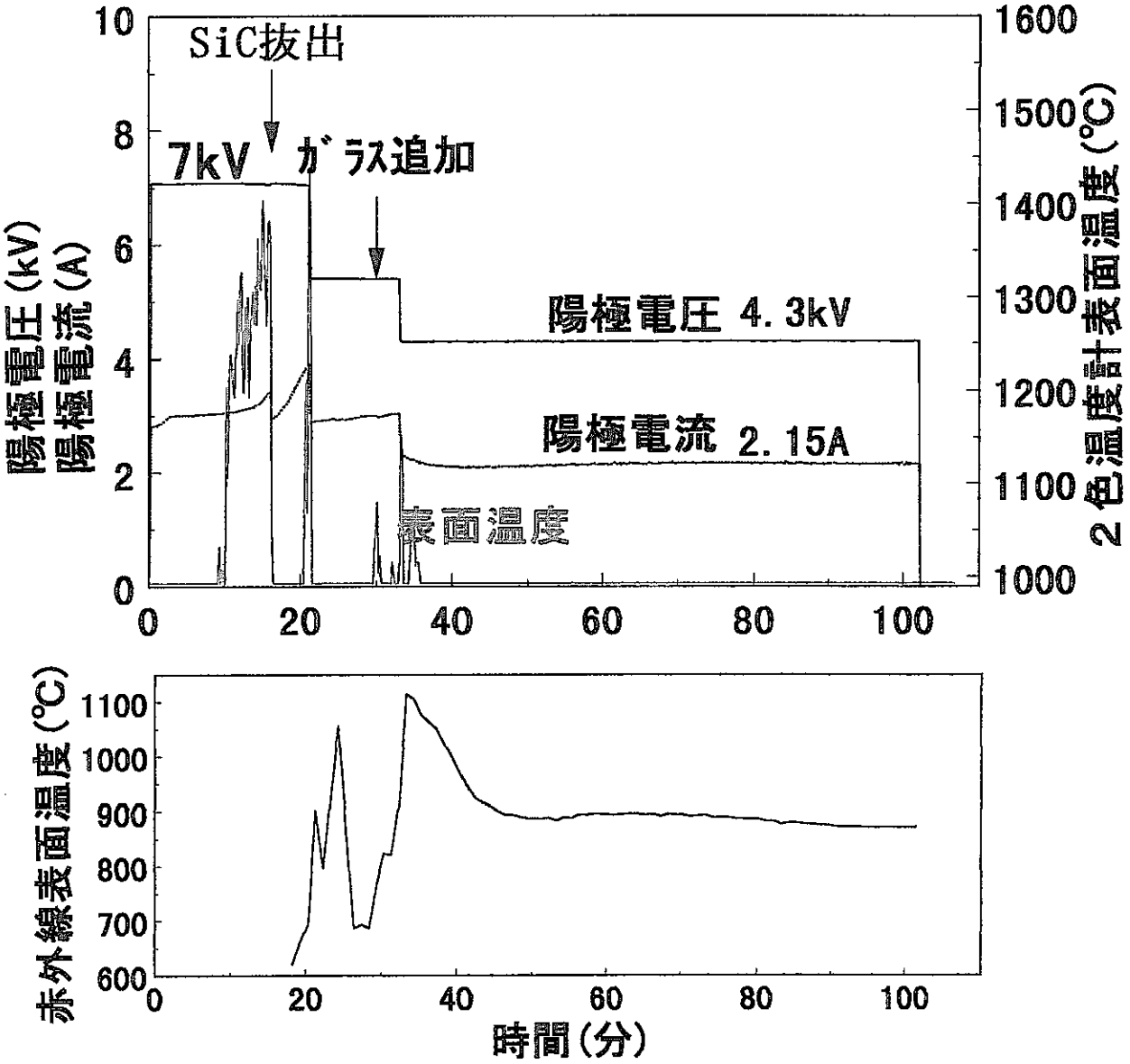


図 4.4　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 4.3kV) ーｹｰｽ 3

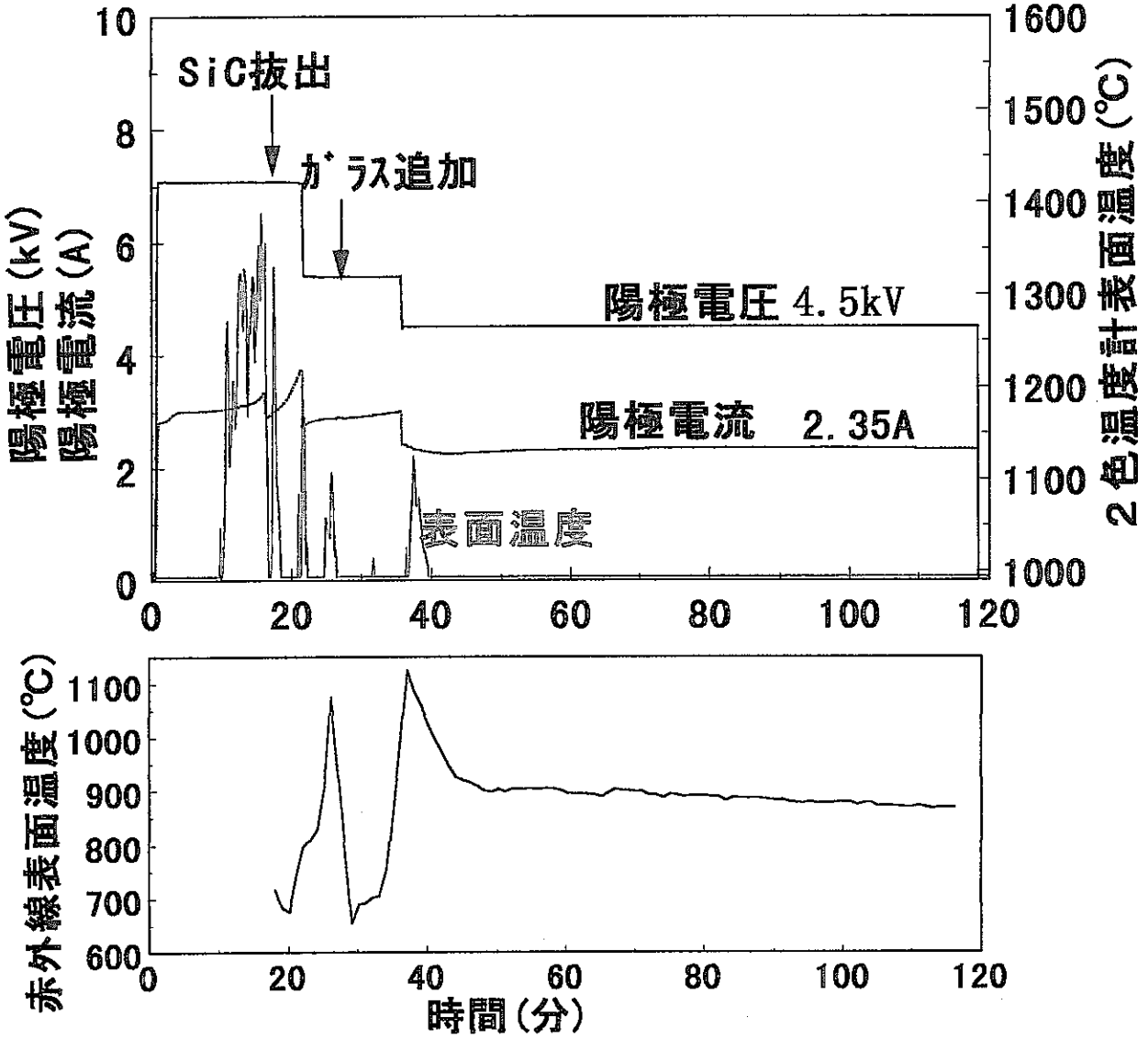


図 4.5　SUS 製クルーシブル P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 4.5kV) ーケース 4

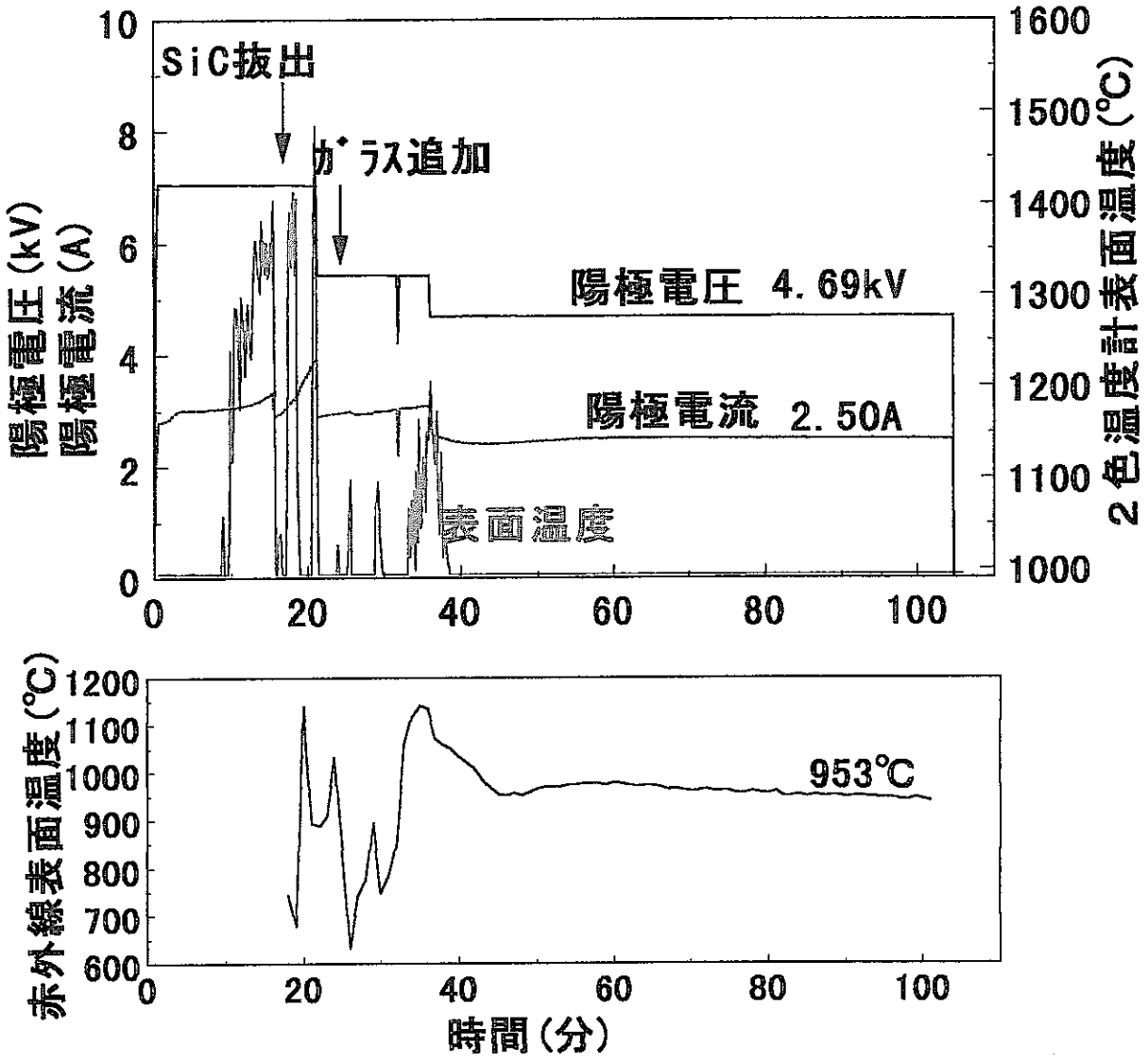


図 4.6　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 4.7kV) ーｹｰｽ 5

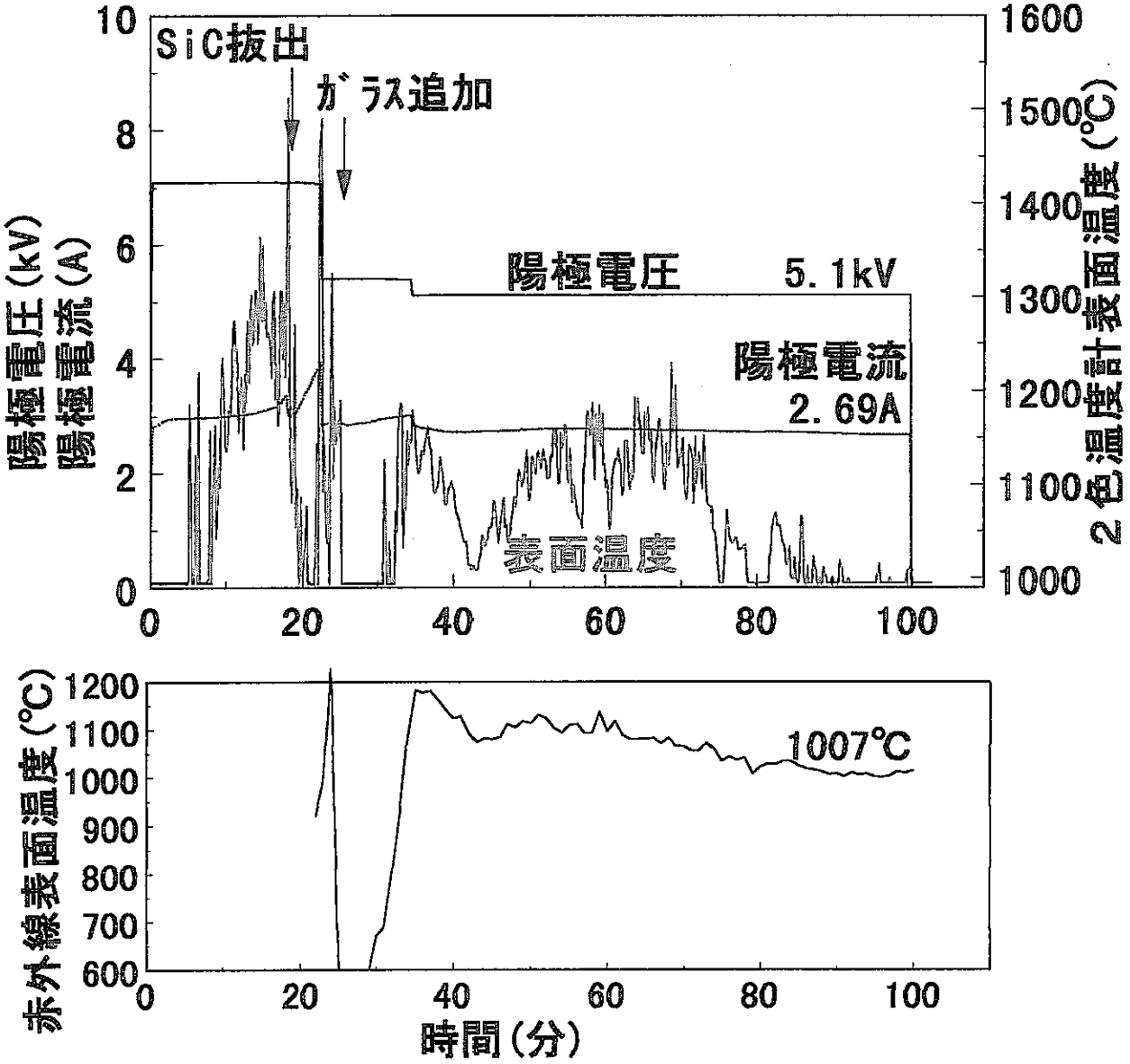


図 4.7　SUS 製クルーシブル P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 5.1kV) ーケース 6

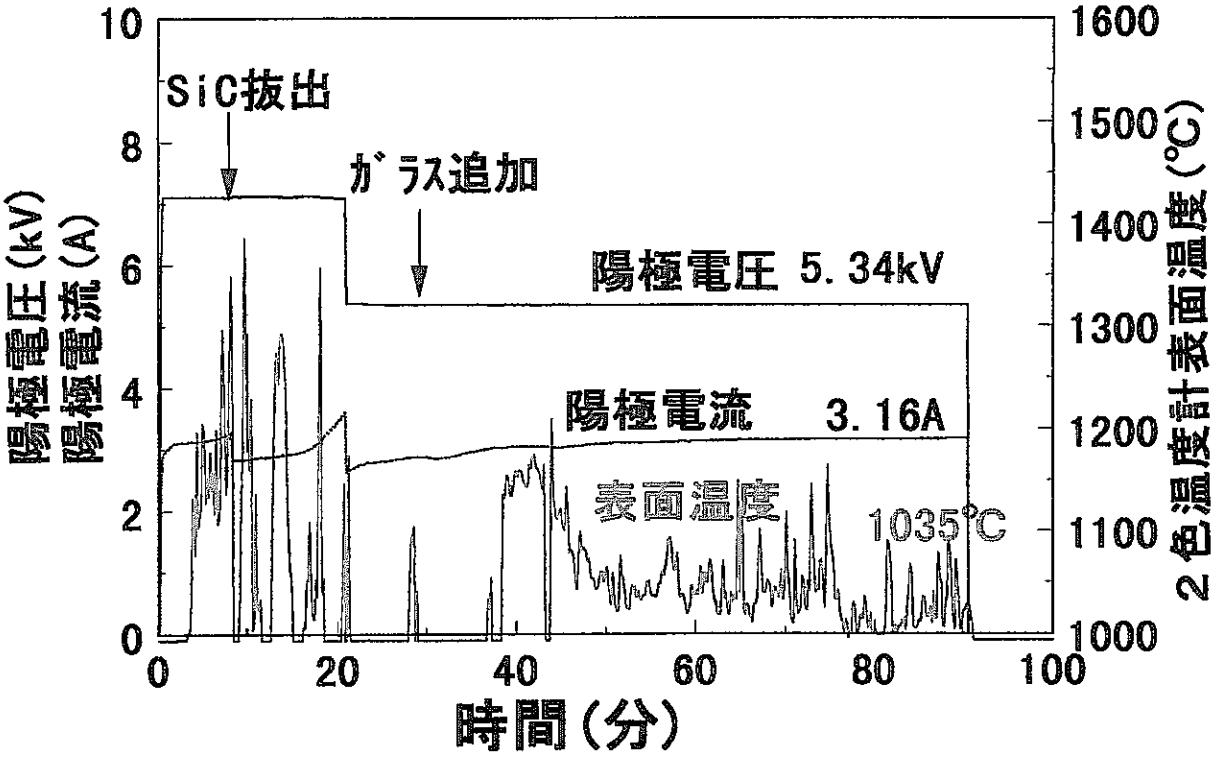


図 4.8　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 5.3kV) ーｹｰｽ 7

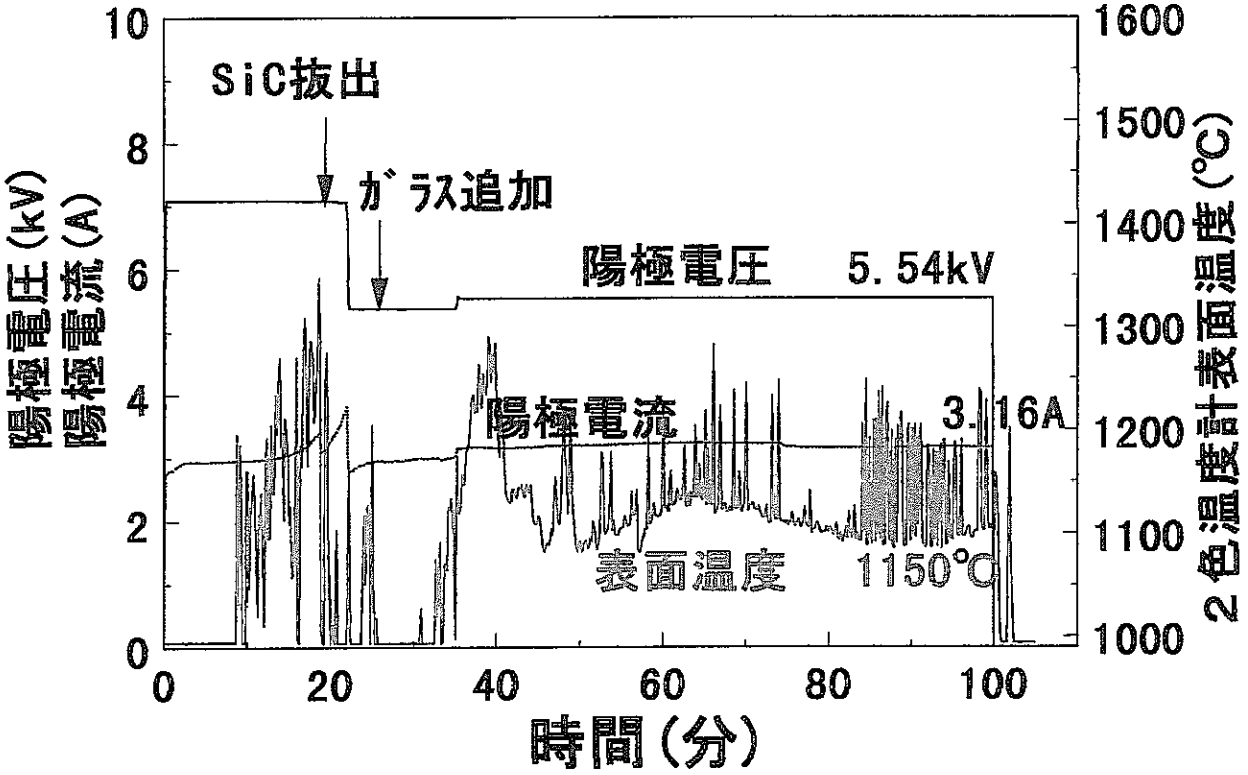


図 4.9　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 5.5kV) ーｹｰｽ 8

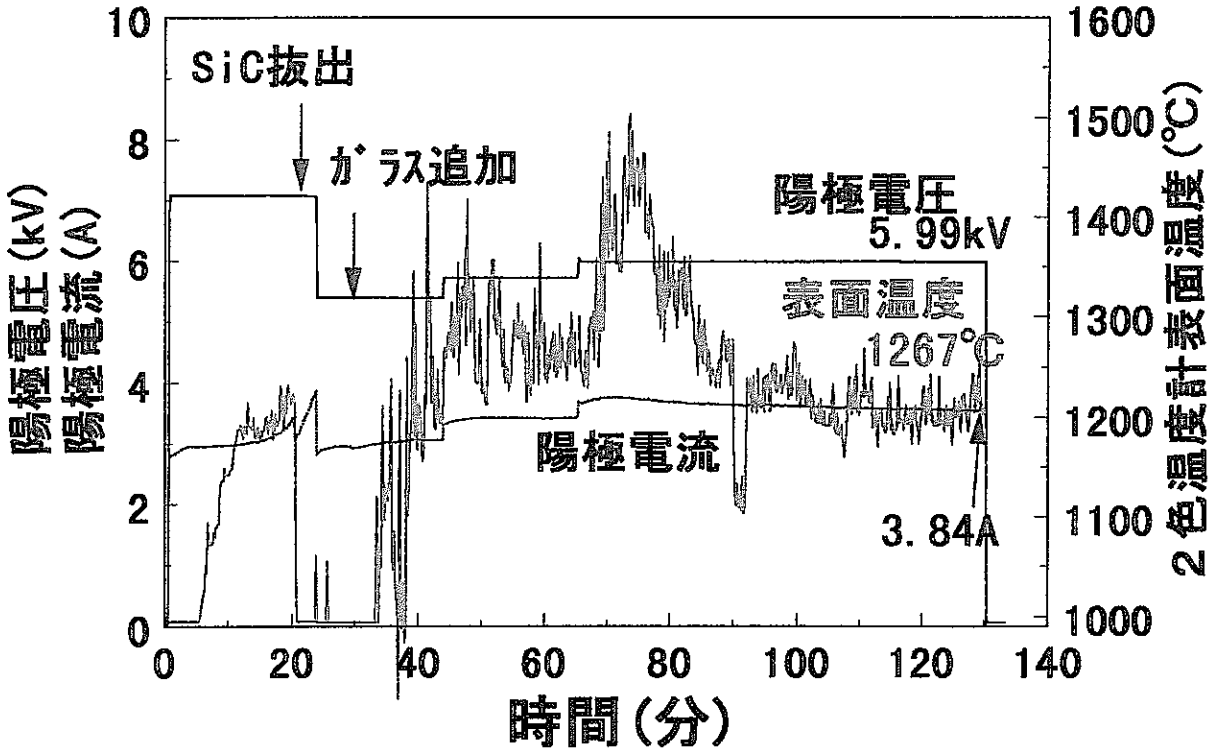


図 4.10　SUS 製ｸﾙｰｼﾞﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 6.0kV) ーｹｰｽ 9

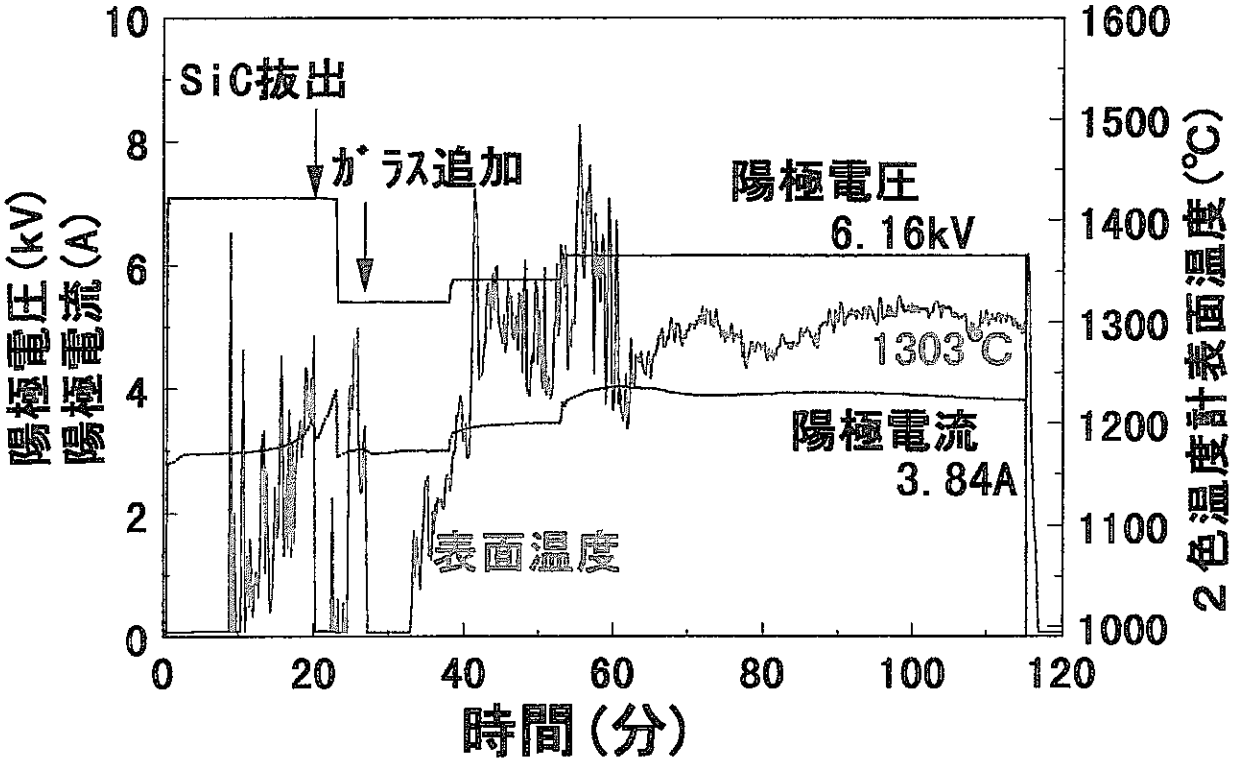


図 4.11　SUS 製ｸﾙｰｼﾞﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 6.2kV) :ｹｰｽ 10

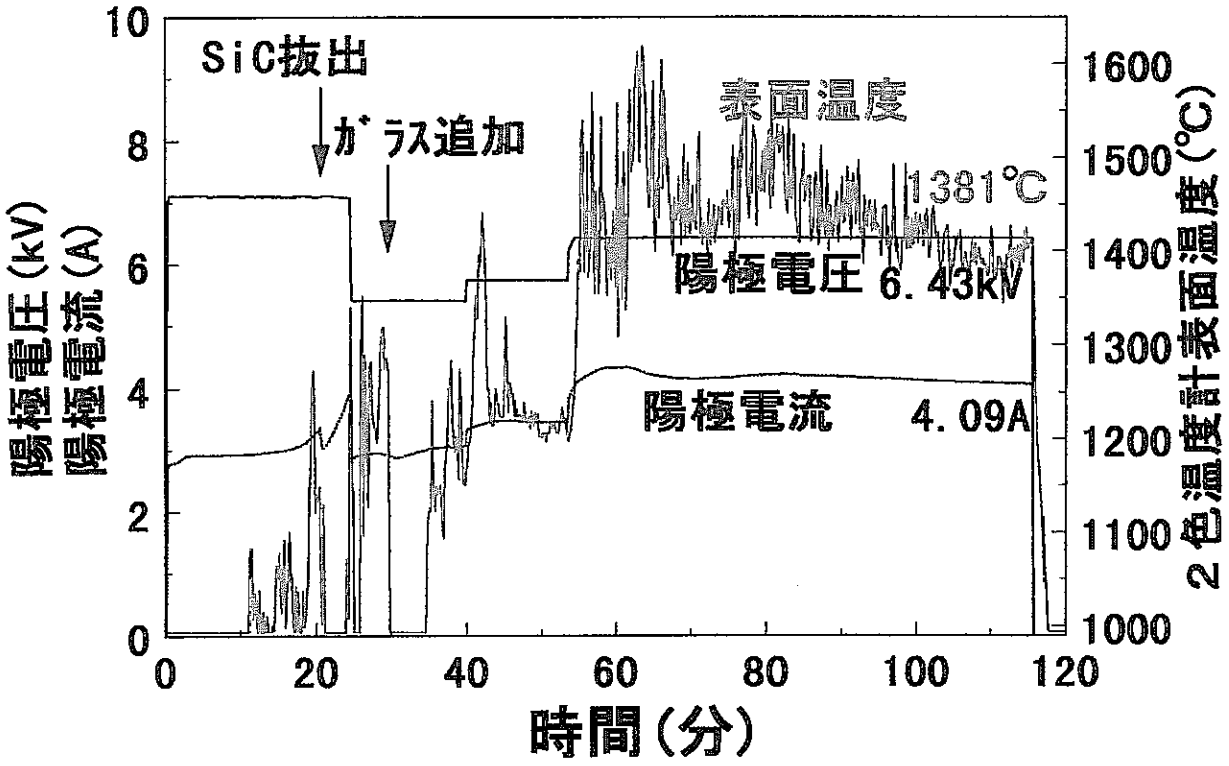


図 4.12　SUS 製ｸﾙｰｼﾞﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 6.4kV) :ｹｰｽ 11

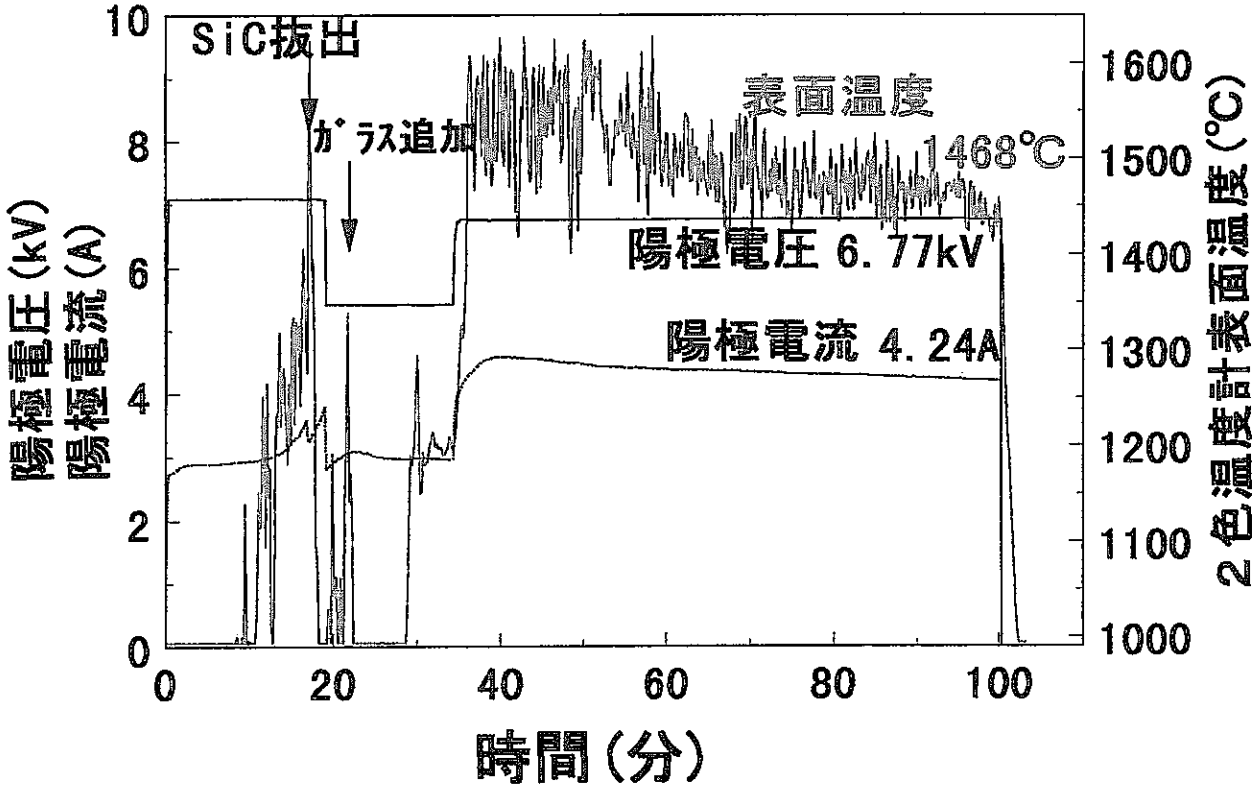


図 4.13　SUS 製ｸﾙｰｼﾞﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 6.8kV) :ｹｰｽ 12

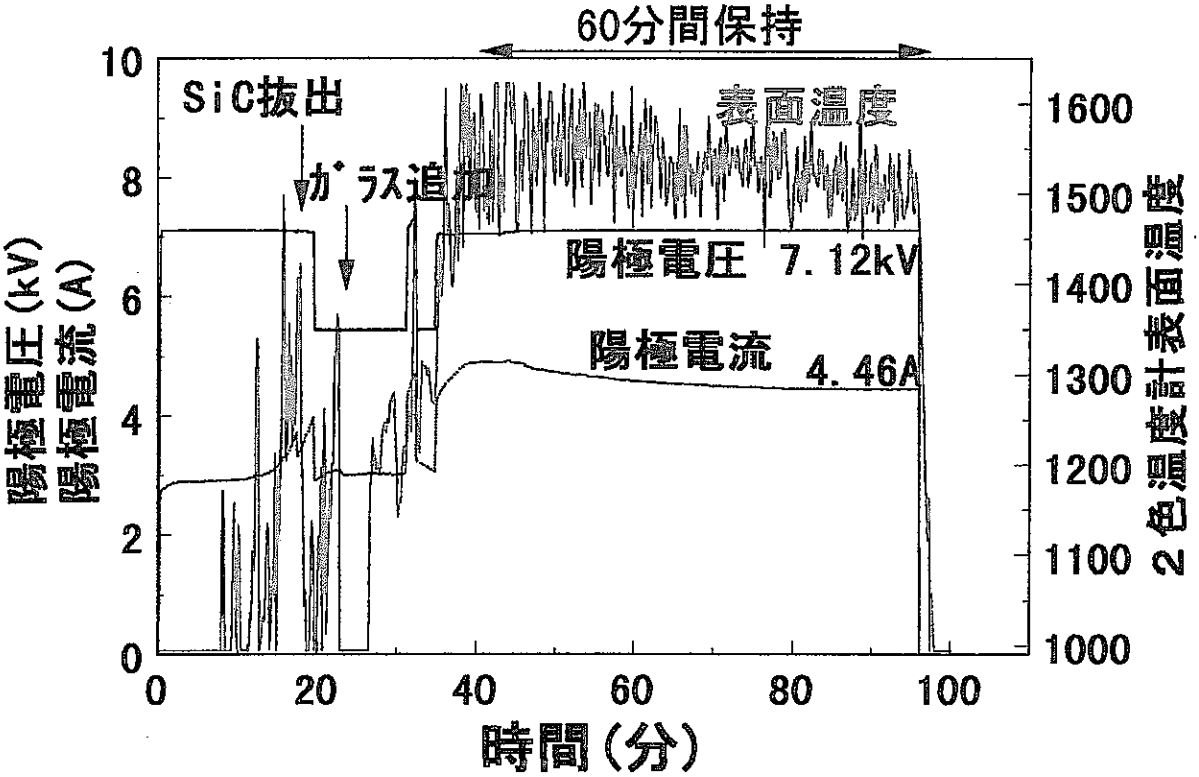
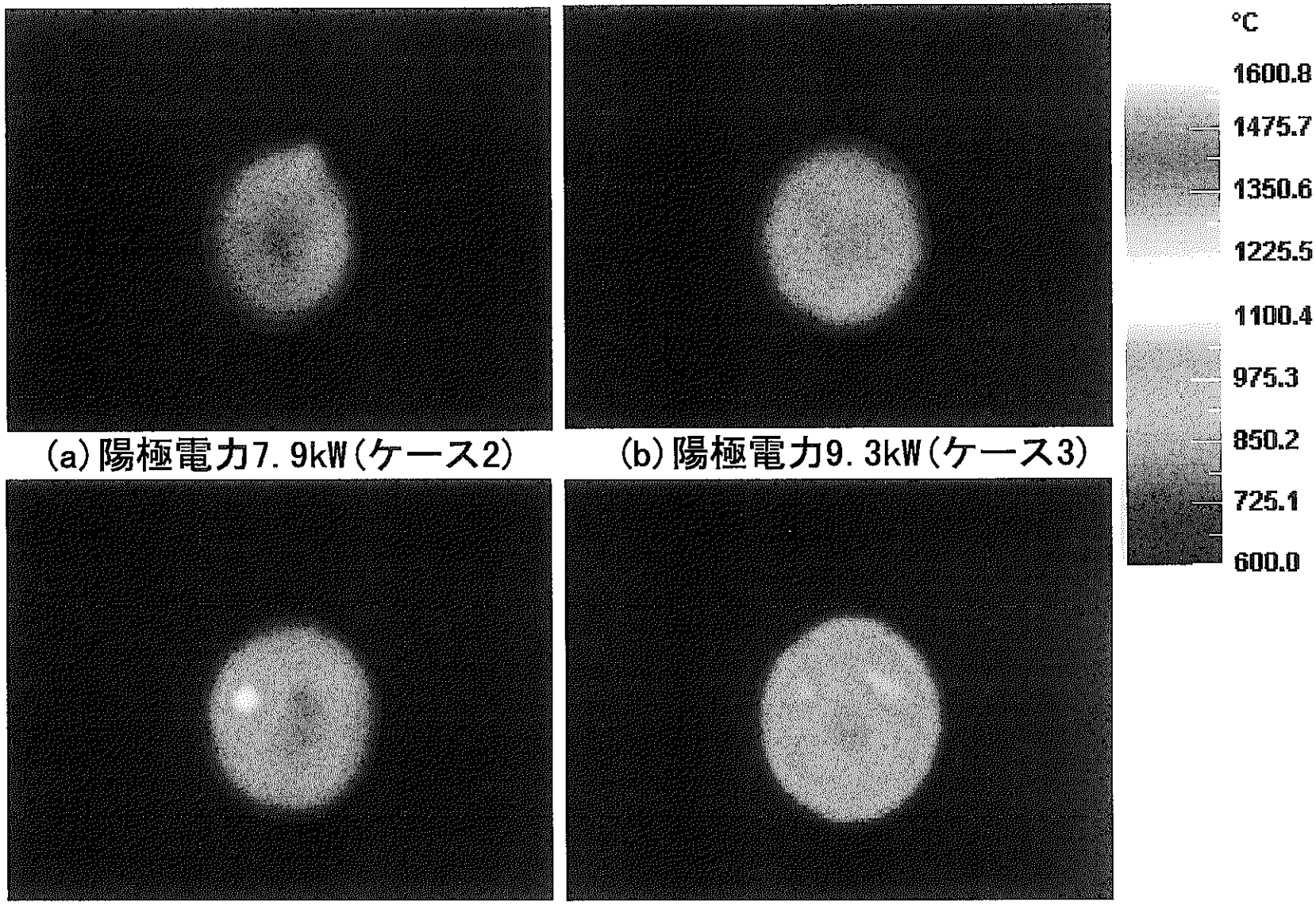


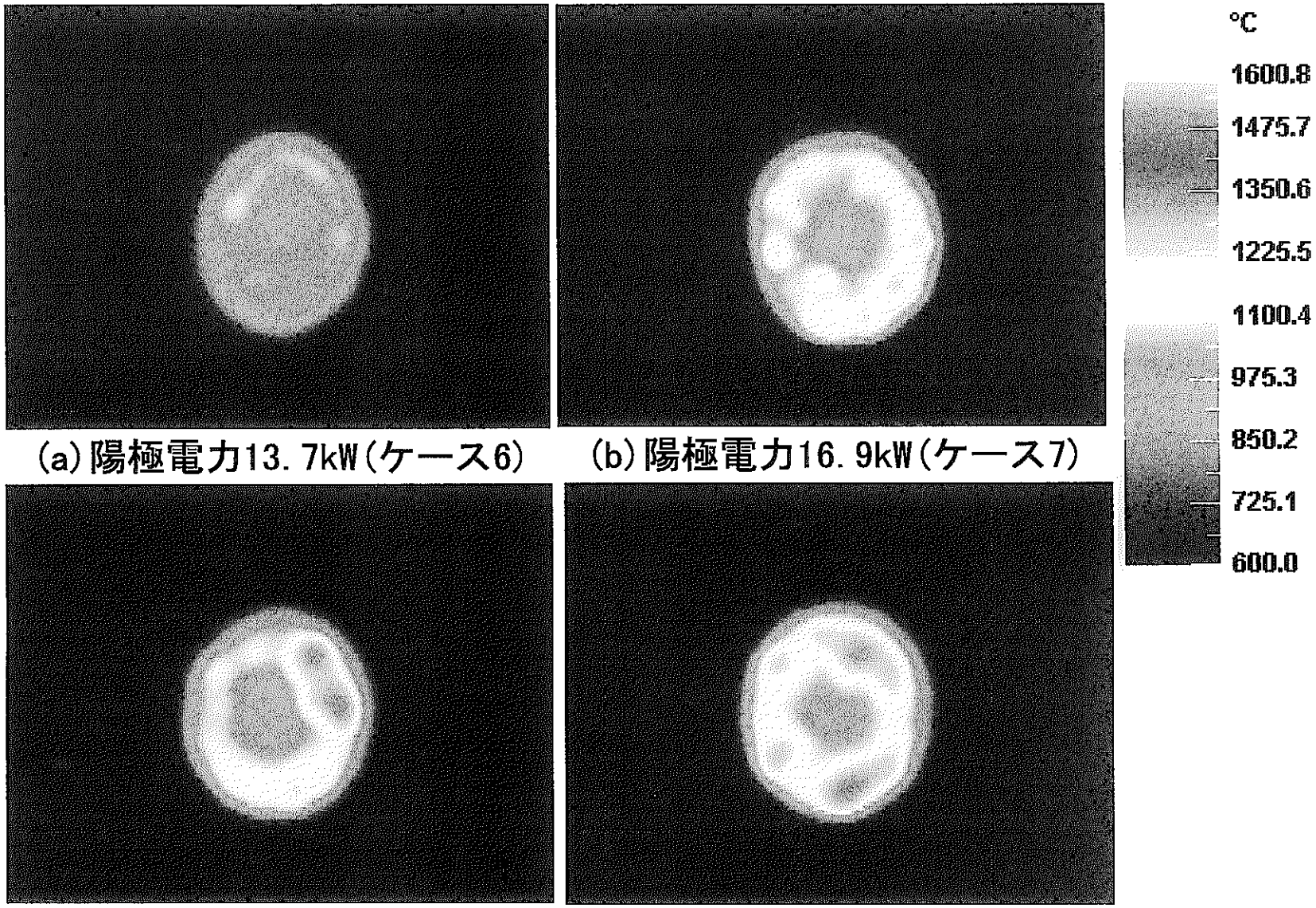
図 4.14　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ P0935 ガラス溶融試験温度推移(陽極電圧 7.1kV) : ｹｰｽ 13



(a) 陽極電力7.9kW(ケース2)　(b) 陽極電力9.3kW(ケース3)

(c) 陽極電力10.6kW(ケース4)　(d) 陽極電力11.7kW(ケース5)

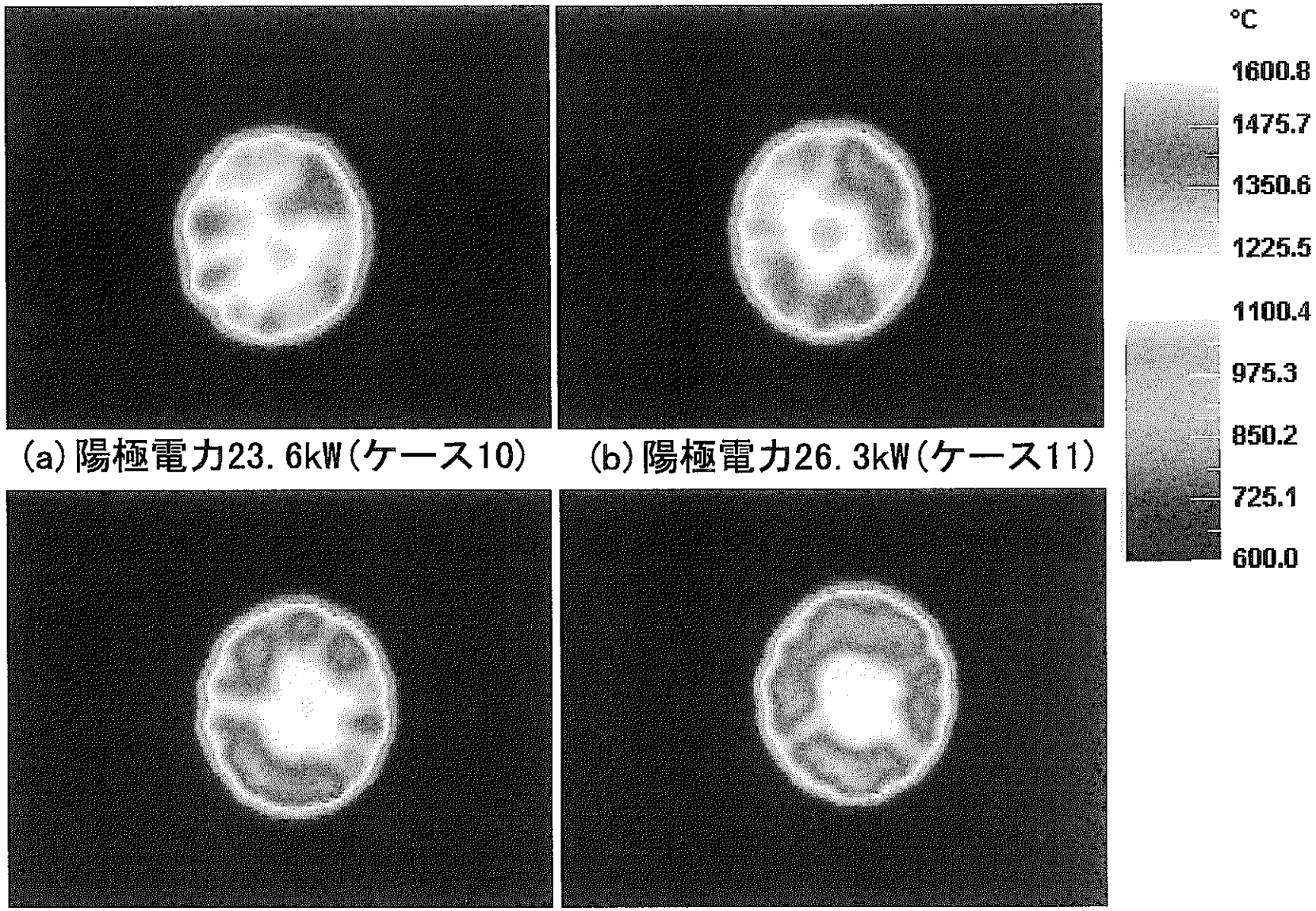
図4.15　安定状態でのガラス表面温度分布
—SUS製クルーシブル, P0935—



(a) 陽極電力13.7kW(ケース6)　(b) 陽極電力16.9kW(ケース7)

(c) 陽極電力17.5kW(ケース8)　(d) 陽極電力21.4kW(ケース9)

図4.16　安定状態でのガラス表面温度分布
ーSUS製クルーシブル, P0935ー



(a) 陽極電力23.6kW(ケース10)　(b) 陽極電力26.3kW(ケース11)

(c) 陽極電力28.8kW(ケース12)　(d) 陽極電力31.8kW(ケース13)

図4.17　安定状態でのガラス表面温度分布
ーSUS製クルーシブル, P0935ー

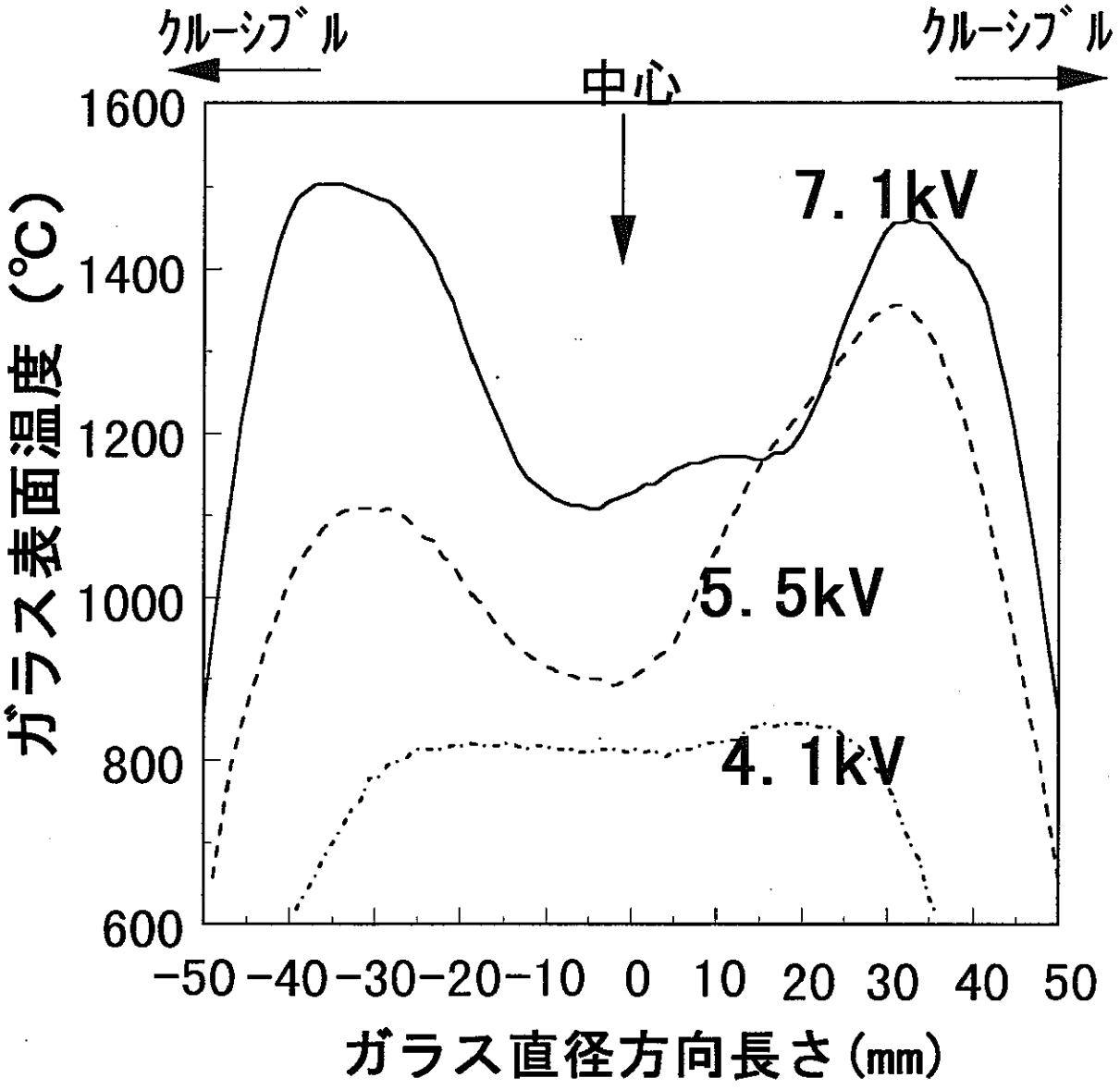


図 4.18　SUS 製クルーシブル P0935 ガラス表面温度分布比較

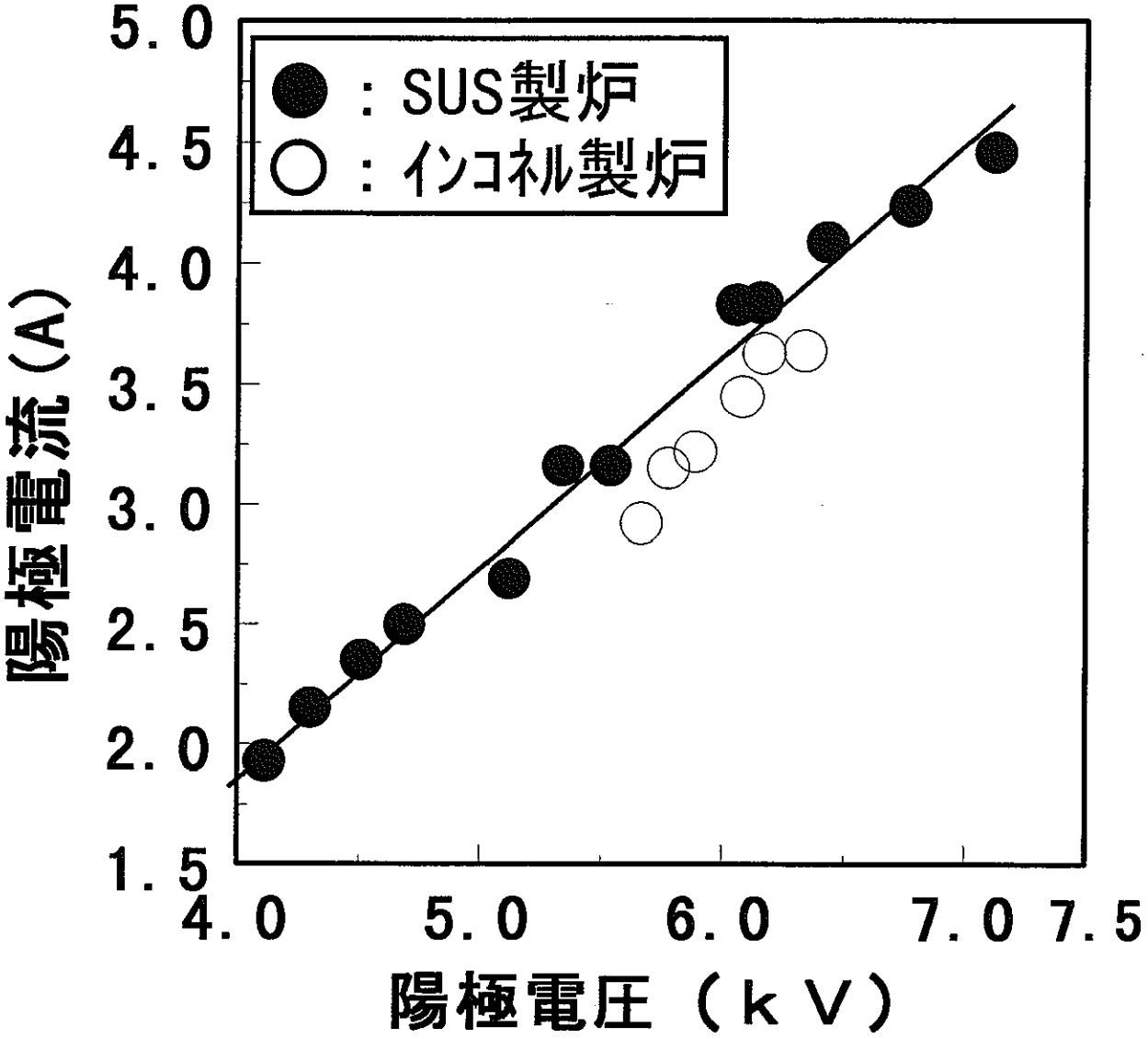


図 4.19　陽極電圧と陽極電流の関係

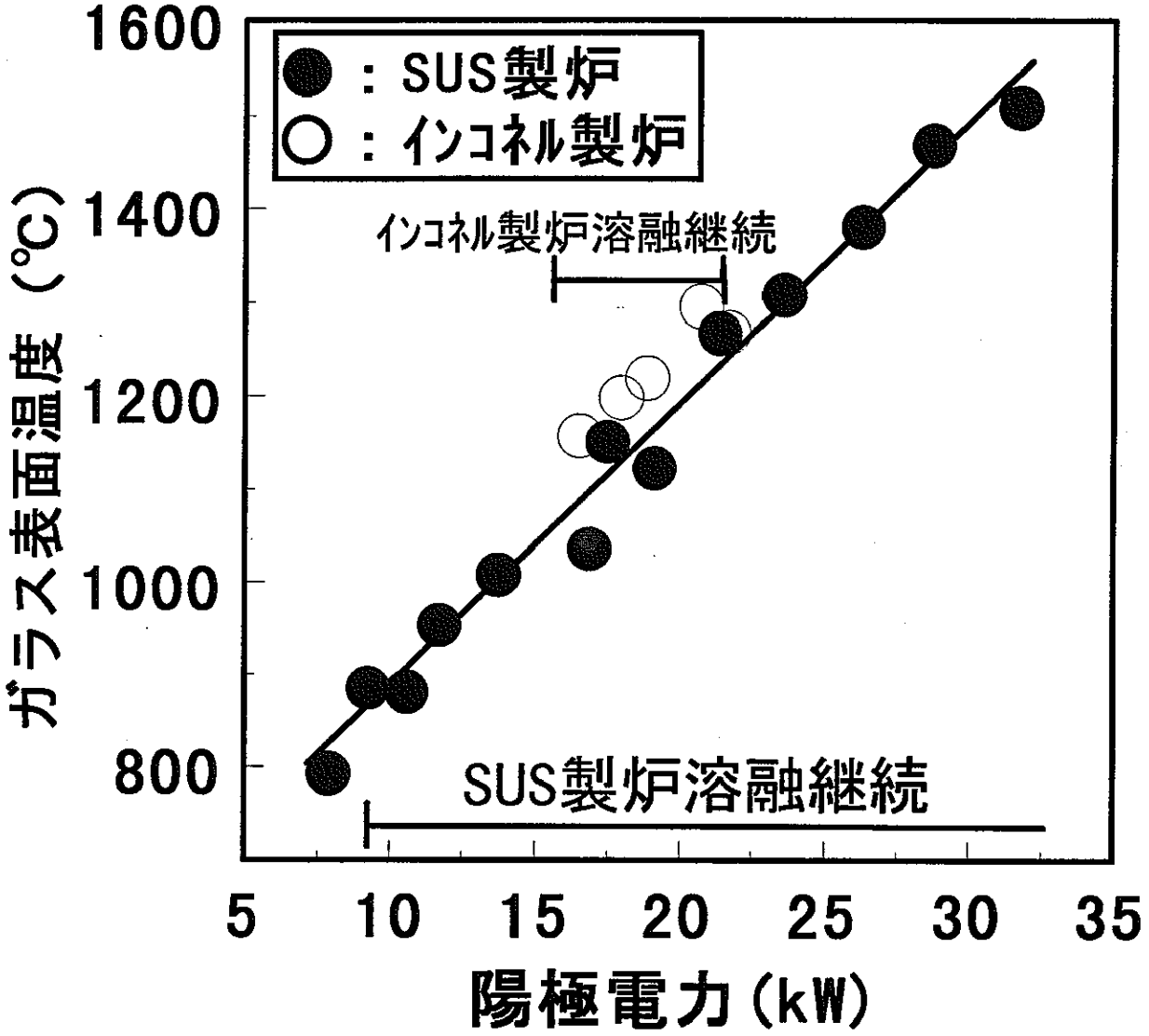


図 4.20　陽極電力とガラス表面温度の関係

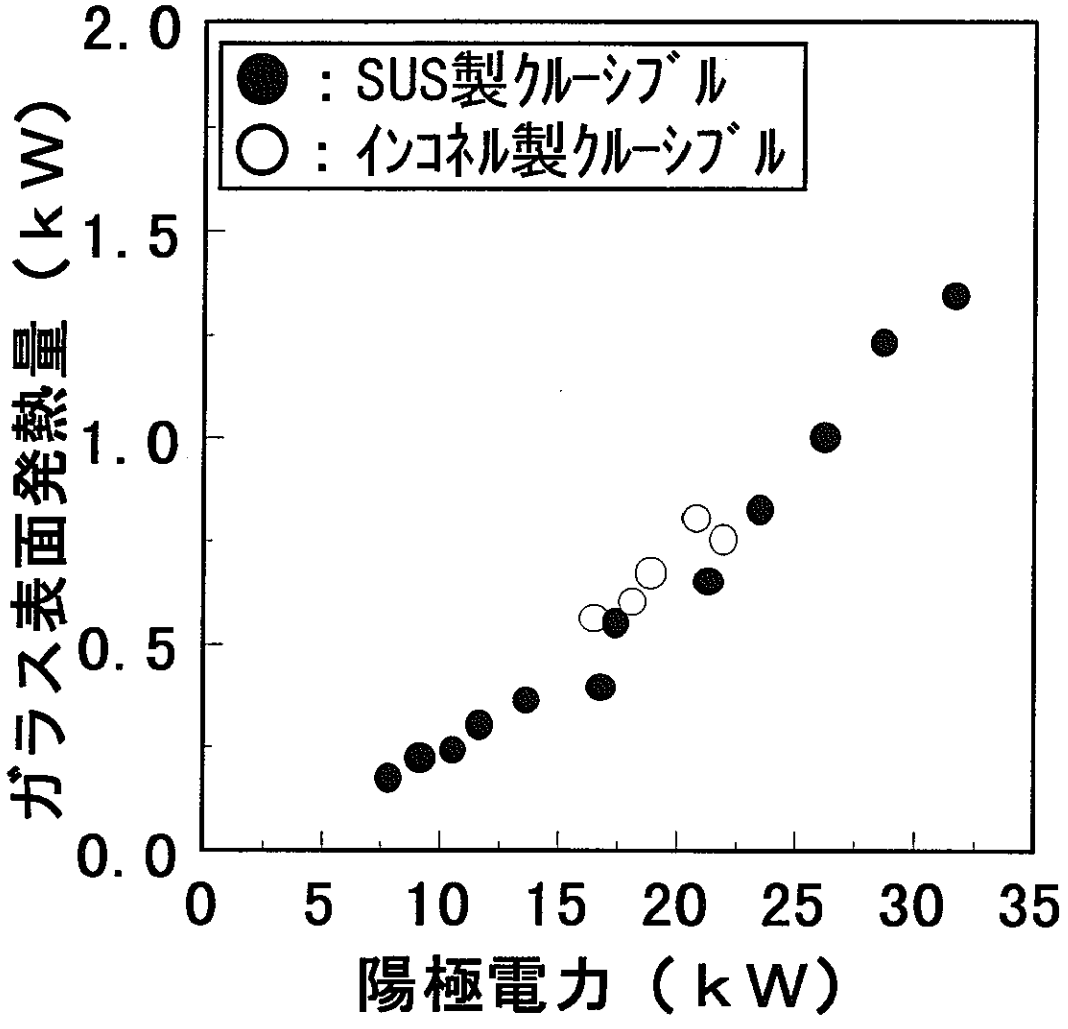


図 4.21　陽極電力と表面輻射熱計算値の関係

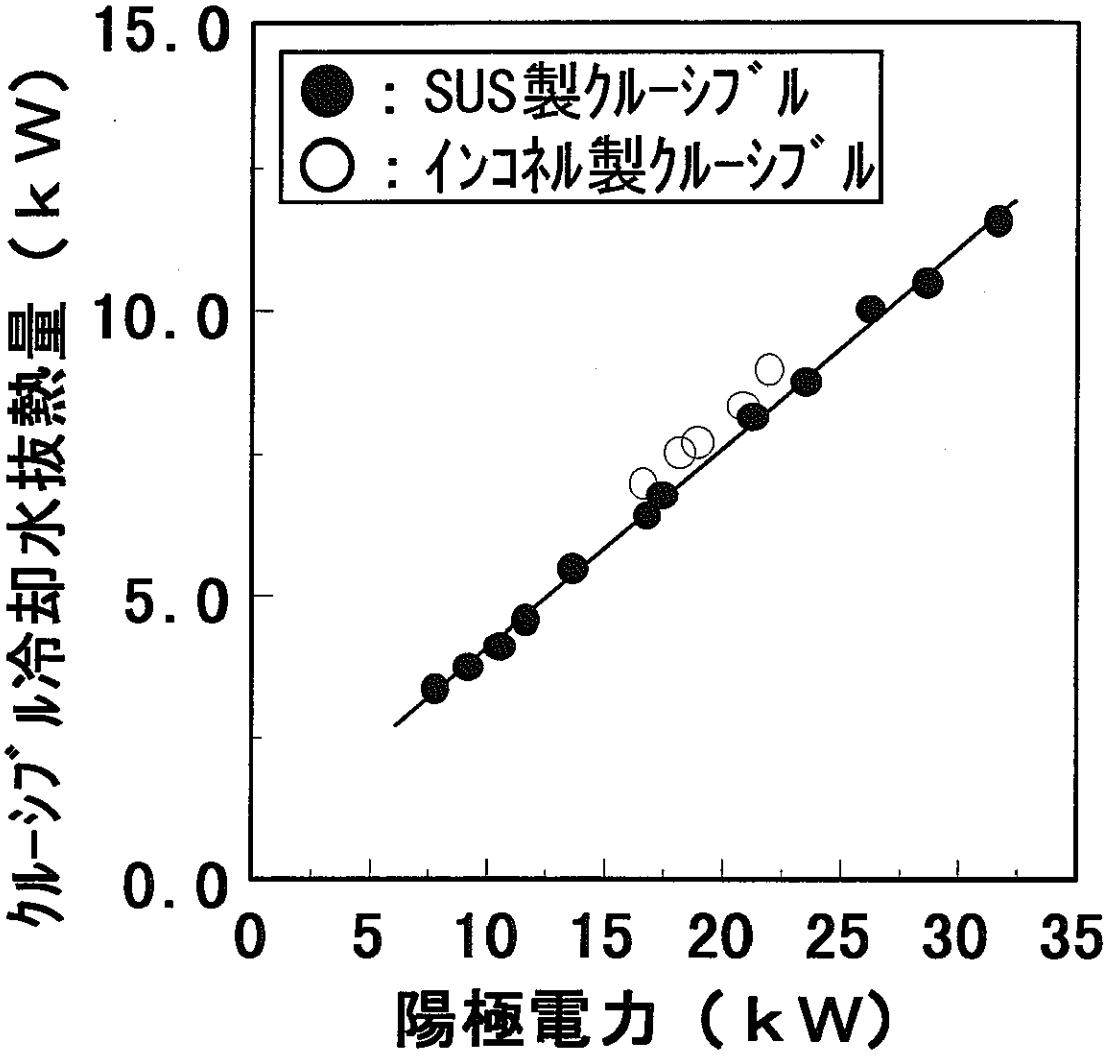


図 4.22 陽極電力とｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水抜熱量の関係

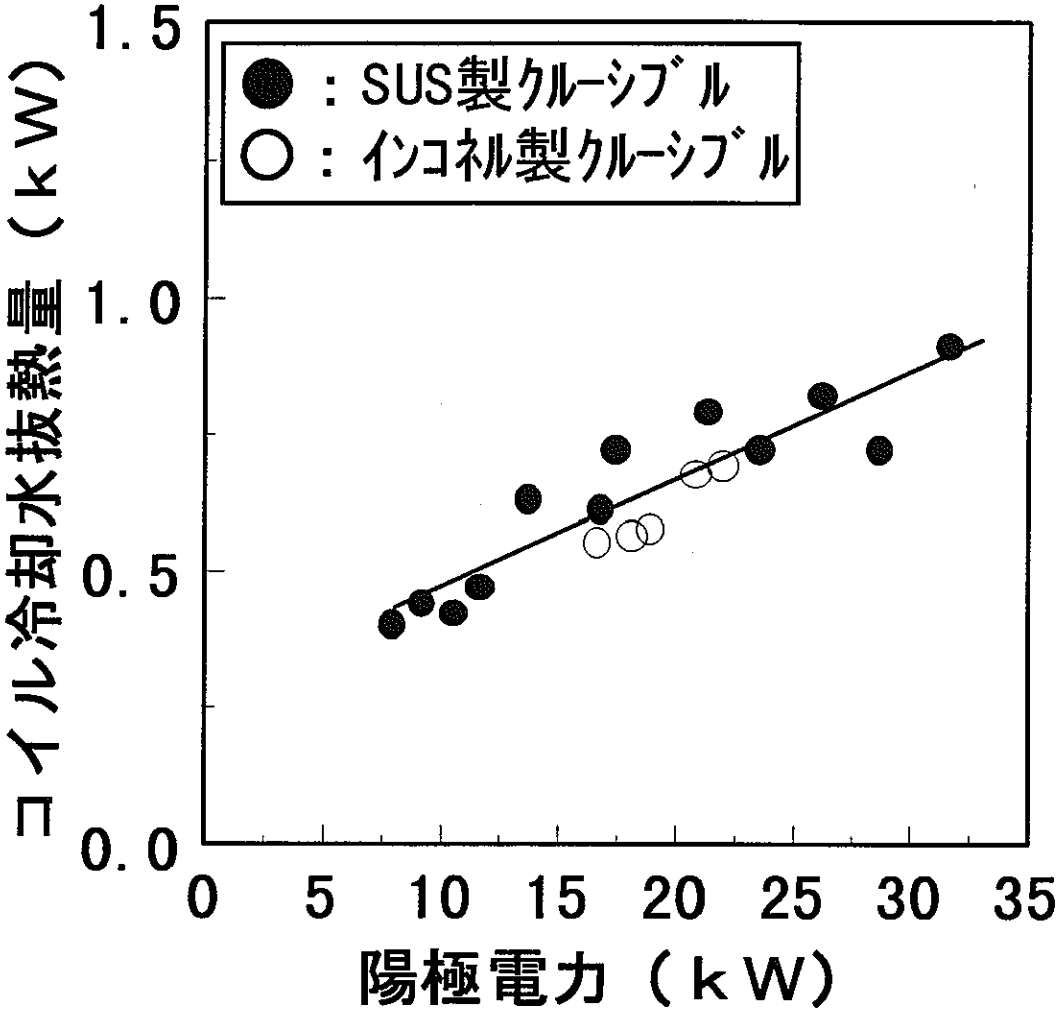


図 4.23　陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係

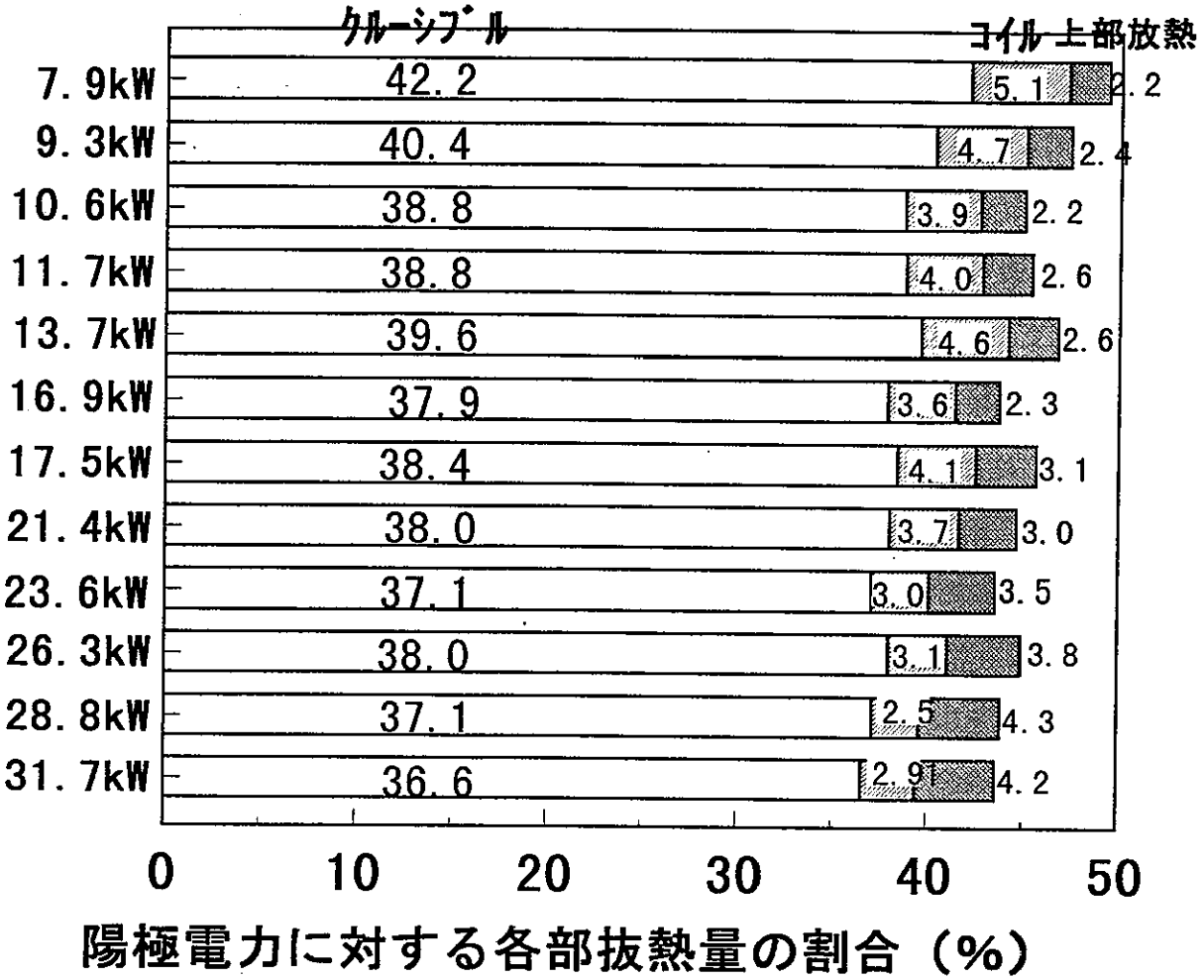


図 4.24　SUS 製クルーシブルにおける各部の抜熱量割合

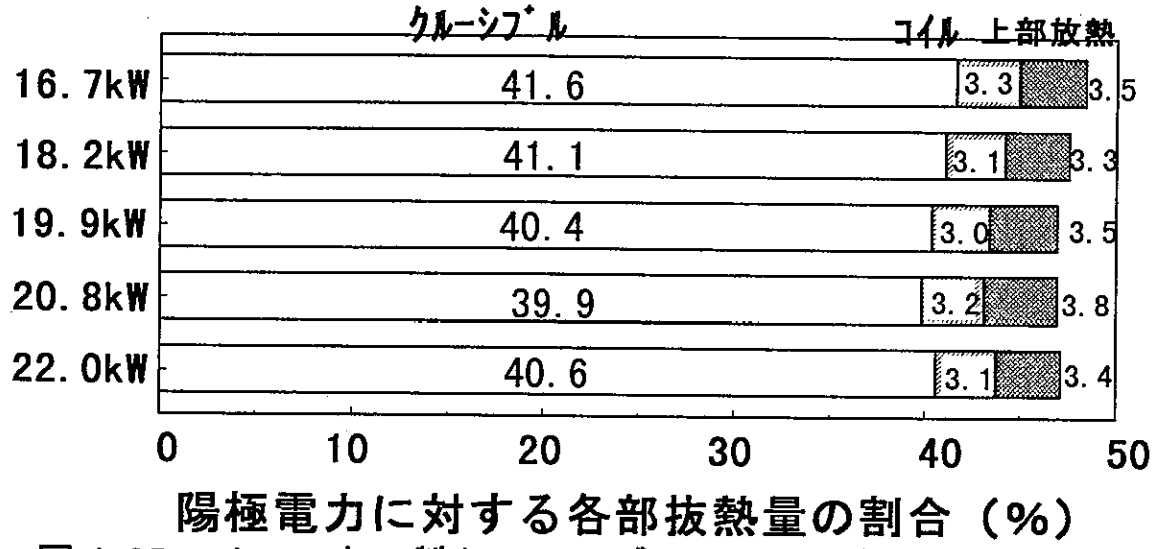
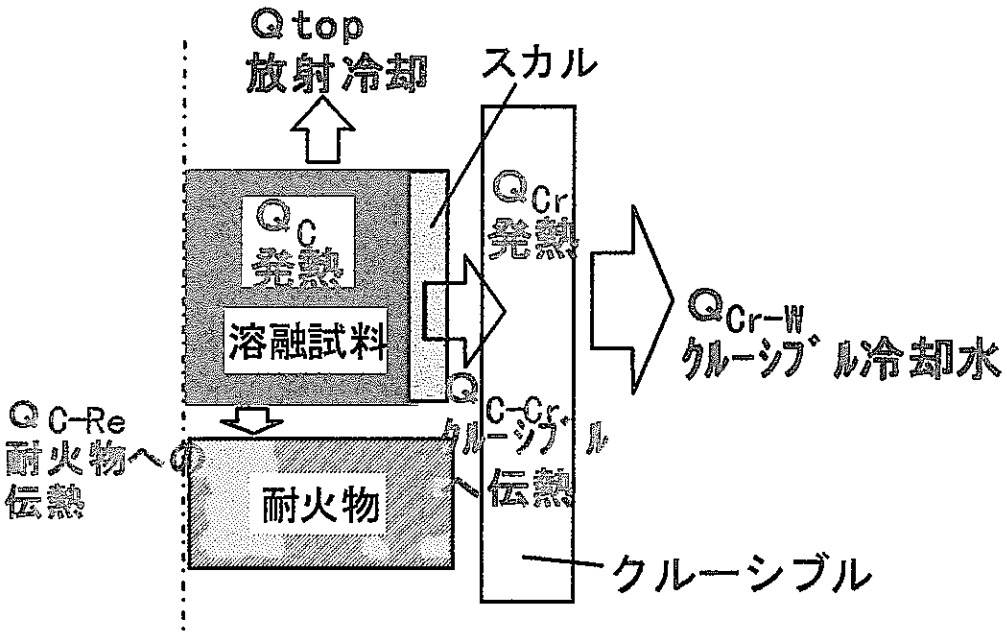
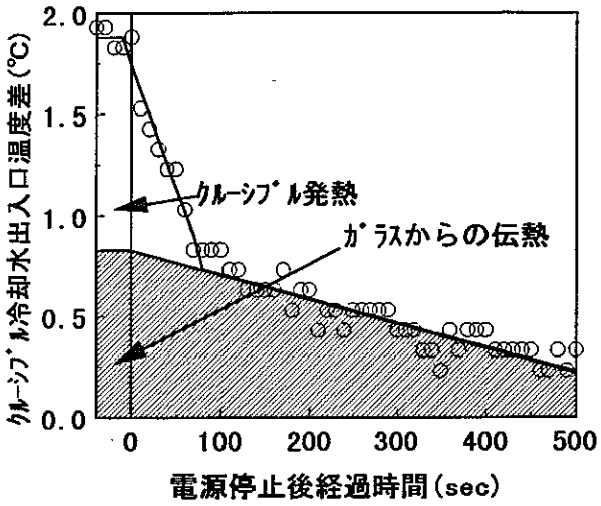


図 4.25　インコネル製クルーシブルにおける各部抜熱量の割合

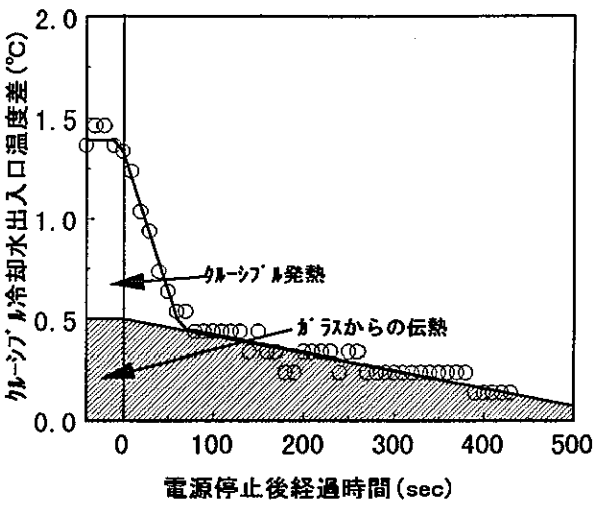


$$Q_c = Q_{c-Cr} + Q_{top} + Q_{c-Re} \fallingdotseq Q_{c-Cr} + Q_{top}$$
$$Q_{Cr-W} = Q_{Cr} + Q_{c-Cr}$$

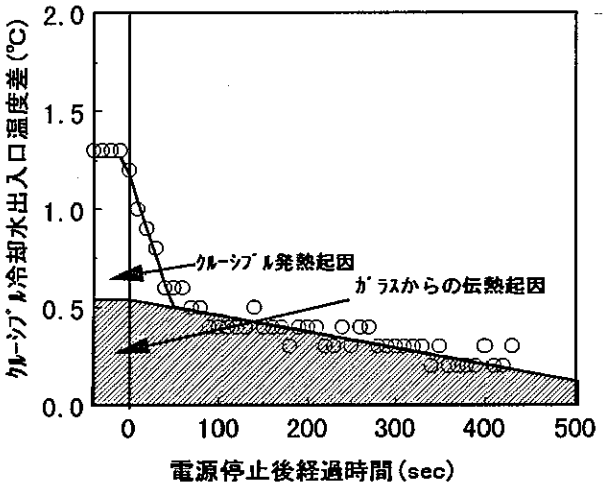
図 4.26　CCIM における発熱と抜熱収支模式図



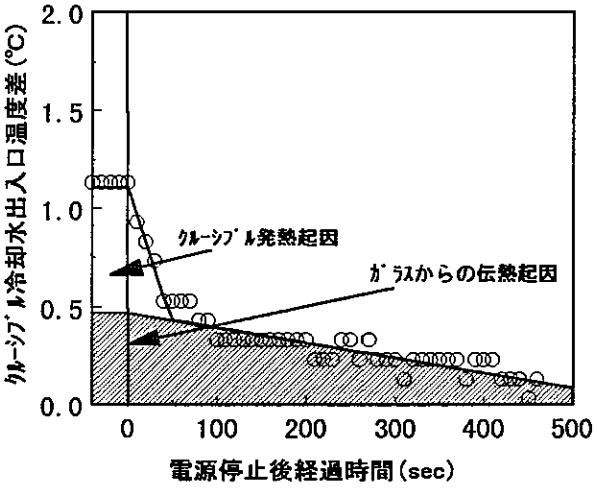
(a) SUS 製炉 31.7kW(7.1kV)



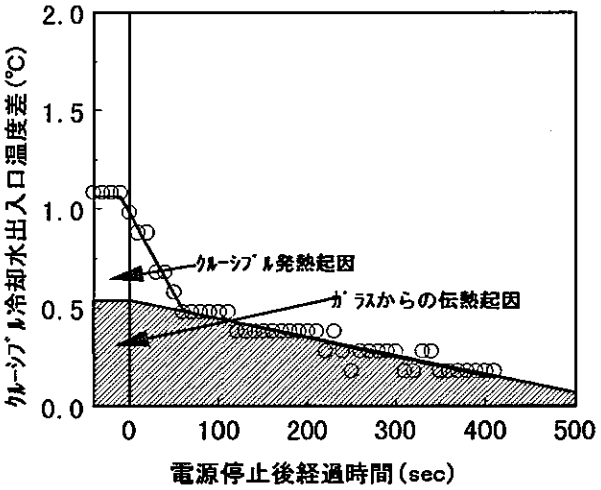
(b) SUS 製炉 28.8kW(6.8kV)



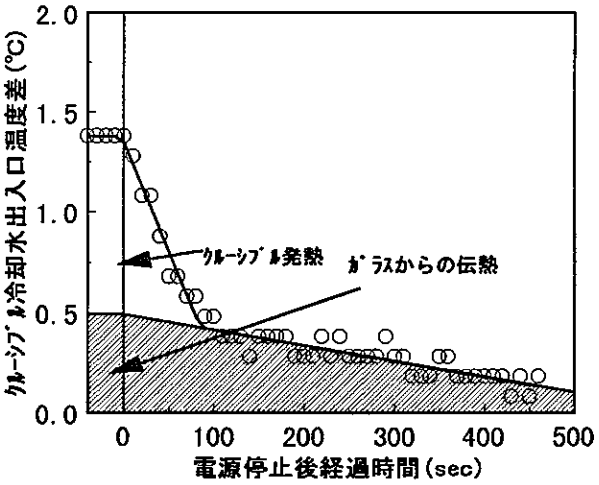
(c) SUS 製炉 26.3kW(6.4kV)



(d) SUS 製炉 23.6kW(6.2kV)



(e) SUS 製炉 21.4kW(6.0kV)



(f) インコネル製炉 22kW(6.2kV)

図 4.27　電源停止後のクルーシブル冷却水出入口温度差推移

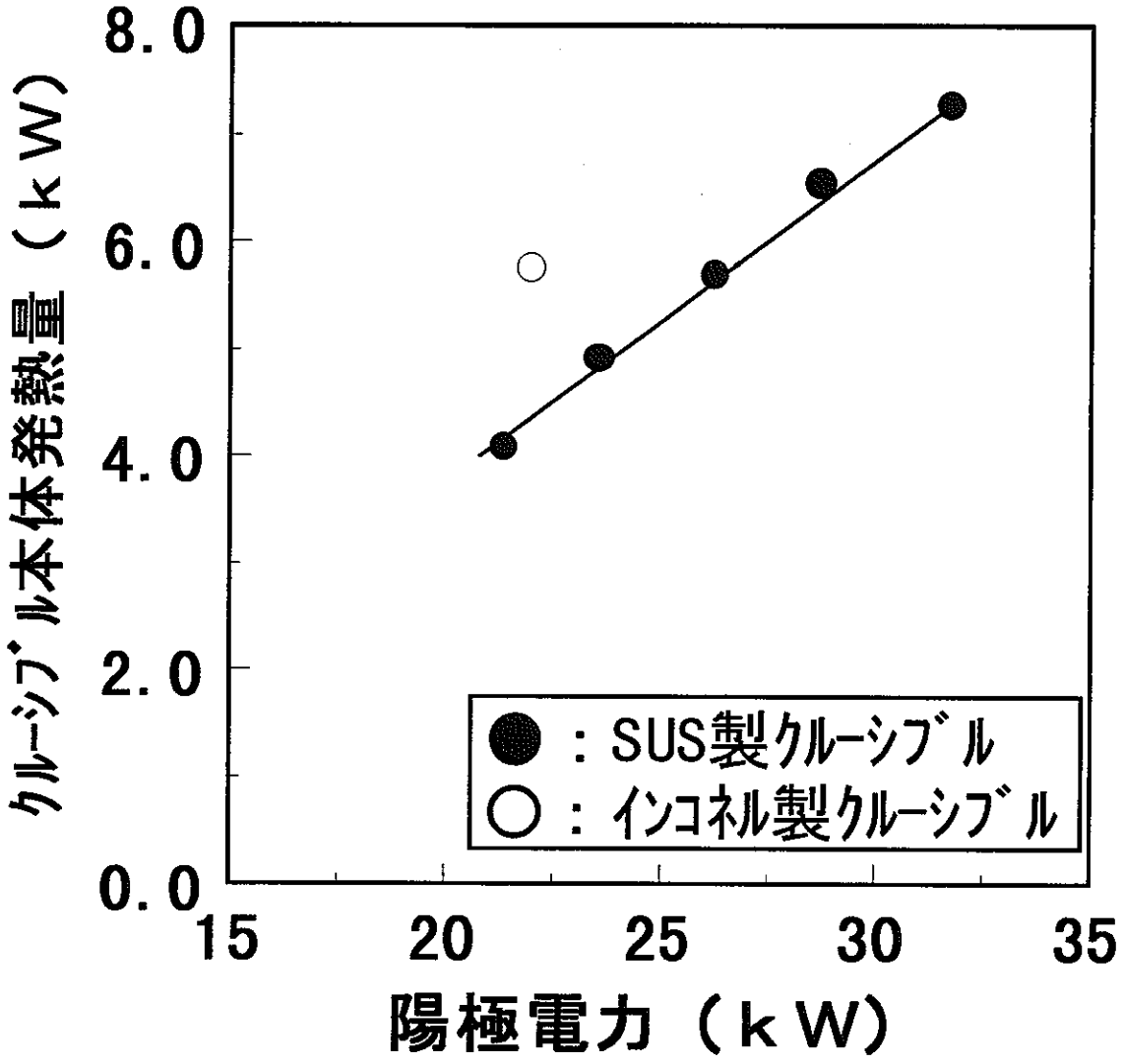


図 4.28　陽極電力とクルーシブルの発熱量の関係

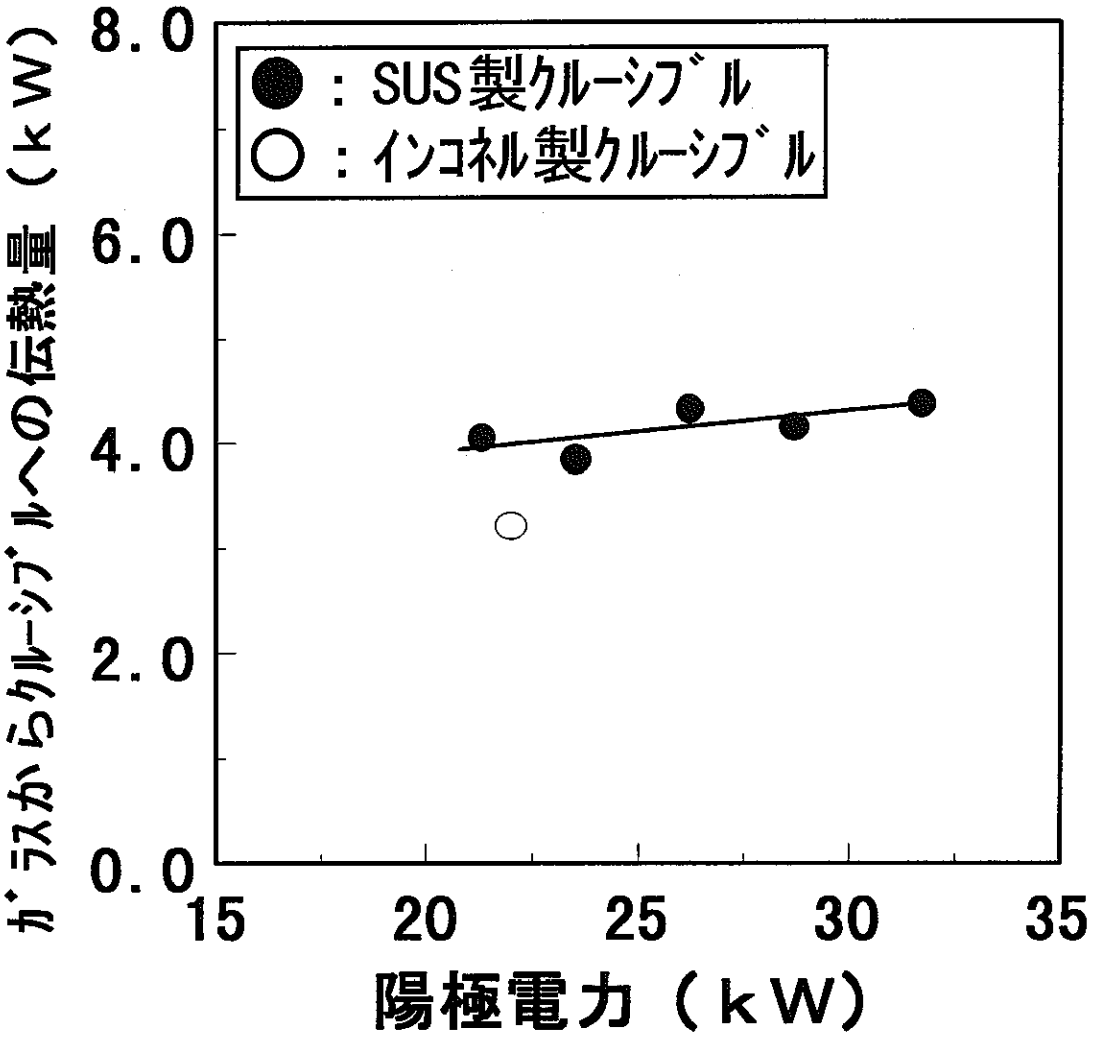


図 4.29　陽極電力と伝熱量の関係

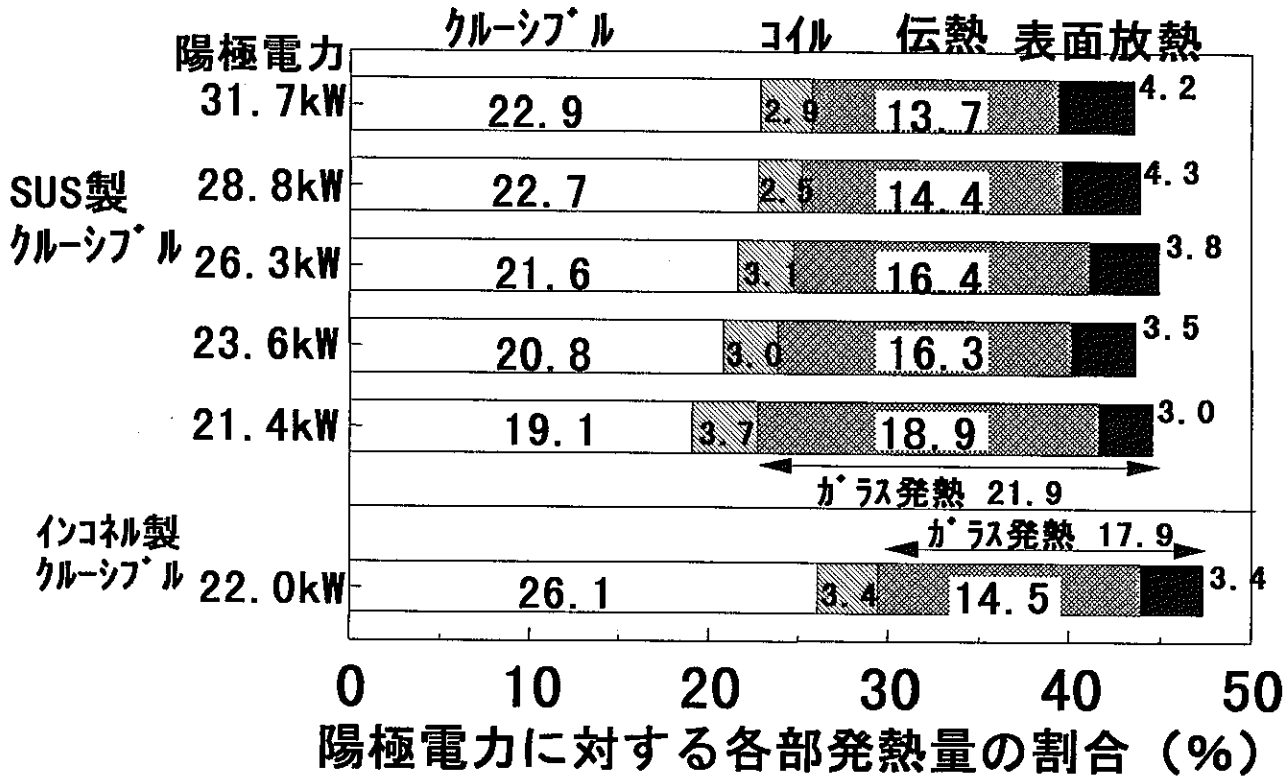


図 4.30　陽極電力に対する各部発熱量割合

表 4.1　SUS 製クルーシブルでの安定溶融時の陽極電力と冷却水温変化、表面温度

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水温度変化 (℃)	ｺｲﾙ冷却水温変化 (℃)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水量 (l/min.)	ｺｲﾙ冷却水量 (l/min.)	表面温度代表値 (℃)	抜熱量 クルーシブル (kW)	抜熱量 コイル (kW)	抜熱量 上部放熱 (kW)	溶融継続可否
1	4.00	—	—	—	—	—	—	<600	—	—	—	継続不可
2	4.11	1.93	7.93	0.44	0.43	110	13.5	793	3.34	0.40	0.17	可
3	4.30	2.15	9.25	0.50	0.48	107	13.0	861	3.73	0.44	0.22	可
4	4.51	2.35	10.58	0.55	0.46	107	13.0	881	4.10	0.42	0.24	可
5	4.69	2.50	11.73	0.60	0.52	109	13.0	953	4.55	0.47	0.30	可
6	5.12	2.69	13.74	0.70	0.69	112	13.1	1007	5.44	0.63	0.36	可
7	5.34	3.16	16.86	0.84	0.62	109	14.0	1035	6.38	0.61	0.39	可
8	5.54	3.16	17.51	0.85	0.73	114	14.2	1150	6.73	0.72	0.55	可
9	5.99	3.57	21.38	1.06	0.81	110	14.0	1213	8.13	0.79	0.65	可
10	6.16	3.83	23.59	1.08	0.79	116	13.0	1302	8.75	0.72	0.82	可
11	6.43	4.09	26.30	1.27	0.86	113	13.8	1381	9.99	0.82	1.00	可
12	6.77	4.24	28.75	1.39	0.79	110	13.0	1468	10.68	0.72	1.23	可
13	7.12	4.46	31.75	1.53	0.99	110	13.1	1508	11.61	0.91	1.34	可

表 4.2　インコネル製クルーシブルでの安定溶融時の陽極電力と冷却水温変化、表面温度

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水温度変化 (℃)	ｺｲﾙ冷却水温変化 (℃)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水量 (l/min.)	ｺｲﾙ冷却水流量 (l/min.)	ｶﾞﾗｽ表面温度 (℃)	抜熱量			溶融継続可否
									クルーシブル (kW)	コイル (kW)	ｶﾞﾗｽ上面放熱 (kW)	
14	5.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	継続不可
15	5.67	2.95	16.71	1.05	0.56	95	14.0	1170	6.96	0.55	0.58	可
16	5.79	3.15	18.24	1.13	0.58	95	14.0	1189	7.50	0.57	0.61	可
17	5.89	3.22	18.99	1.17	0.59	94	14.0	1225	7.67	0.58	0.67	可
18	6.09	3.42	20.89	1.28	0.69	93	14.0	1291	8.30	0.68	0.80	可
19	6.17	3.57	22.04	1.38	0.71	93	14.0	1265	8.95	0.69	0.75	可
20	6.30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	冷却不足

表 4.3　SUS 製クルーシブルでの各部熱収支と陽極電力に対する割合

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ本体発熱計算値(kW)	ｶﾞﾗｽからｸﾙｰｼﾌﾞﾙの伝熱量(kW)	ｺｲﾙ発熱量 (kW)	ｶﾞﾗｽ表面放熱(kW)	陽極電力に対する割合(%)			
								ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	コイル	伝熱	上面放熱
9	5.99	3.57	21.38	4.08	4.05	0.79	0.65	19.1	3.7	18.9	3.0
10	6.16	3.84	23.59	4.91	3.84	0.72	0.82	20.8	3.0	16.3	3.5
11	6.43	4.09	26.30	5.68	4.31	0.82	1.00	21.6	3.1	16.4	3.8
12	6.77	4.24	28.75	6.54	4.14	0.72	1.23	22.7	2.5	14.4	4.3
13	7.12	4.46	31.75	7.26	4.36	0.91	1.34	22.9	2.9	13.7	4.2

表 4.4　インコネル製クルーシブルでの各部熱収支と陽極電力に対する割合

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ本体発熱計算値(kW)	ｶﾞﾗｽからｸﾙｰｼﾌﾞﾙの伝熱量(kW)	ｺｲﾙ発熱量	ｶﾞﾗｽ上面輻射熱量 (kW)	陽極電力に対する割合（%）			
								ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	コイル	伝熱	上面放熱
19	6.17	3.57	22.04	5.75	3.20	0.69	0.75	26.1	3.4	14.5	3.4

5. SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験

5.1 目的

SUS 製クルーシブルを用いて、インコネル製クルーシブルでは溶融できなかった模擬廃棄物ガラス PF-N10 を溶融し、運転可能電力範囲、到達温度および熱バランスを調査した。

5.2 試験方法

5.2.1 試験方法

試験方法は、①～⑧の手順で実施した。（図 5.1 参照）

①模擬廃棄物ビーズガラス（PF-N10）1kg をクルーシブルに充填する。
②中央部に SiC 棒（外径 30mm、内径 15mm）をガラス表面から 100mm の深さまで挿入した。
③陽極電圧 8kV 印加する。
④陽極電流が 4A 以上で SiC 棒引き抜く。
⑤陽極電流が 4A 以上に到達したら陽極電圧を 8kV へ変更する。
⑥表面が完全に均一に溶解した時点で、ガラス 200g 追加する。
⑦追加したガラスが溶融し表面が一様になった時点で、陽極電圧を試験条件（7.5～8.5kV の 6 条件）へ変更する。
⑧試験条件にて、60 分間保持する。

また、各陽極電圧での保持条件を評価するため、目標陽極電圧に調整後約 1 時間経過した時点での陽極電圧、陽極電流、表面温度の平均値を用いた。

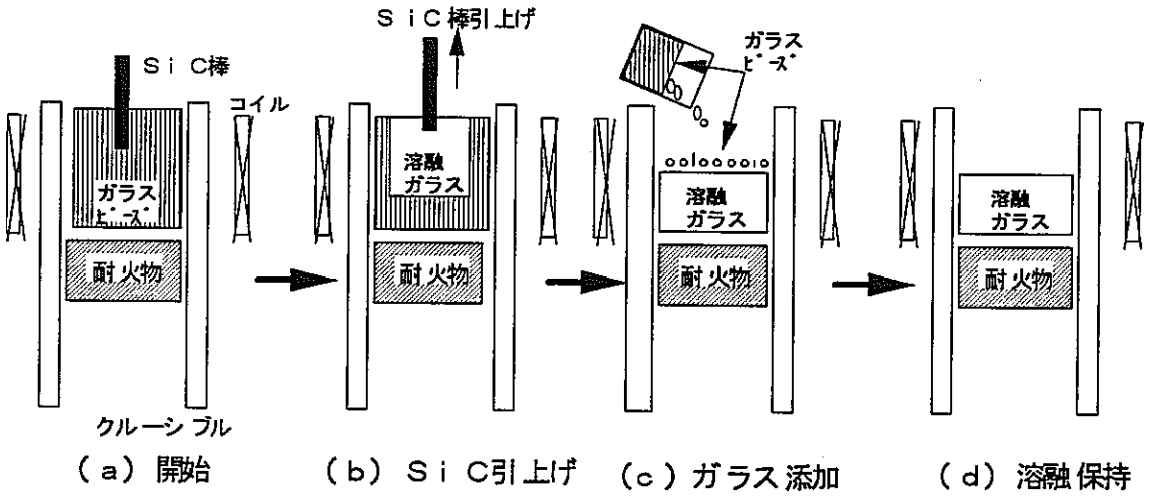


図 5.1 試験方法概要

5.3 SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験結果

5.3.1 試験推移

①陽極電圧 7.5kV（ケース１）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、24 分で SiC 棒を引き上げた。28.3 分で陽極電圧を 7.8kV に下げ、30.2 分でガラス 200g を追加し、35.2 分で陽極電圧を 7.5kV に設定した。この時、陽極電流は 4.6A であったが、時間と共に減少し、103.2 分で 2.7A まで低下した。また到達温度も保持中低下し続け、到達温度が 600℃以下になった。陽極電圧 7.5kV では溶融が継続できないことがわかった。（図 5.2）

②陽極電圧 7.7kV（ケース２）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、22.2 分で SiC 棒を引き上げた。24.3 分で陽極電圧を 7.7kV に下げ、27.3 分でガラス 200g を追加し、32.2 分で陽極電圧を 7.7kV に設定した。陽極電流はこの時 4.7A であった。その後陽極電流はほぼ一定で推移し試験終了直前では 4.6A であった。

保持溶融時での平均値は、陽極電圧が 7.71kV、陽極電流が 4.60A、到達温度が 1352℃であった。（図 5.3）

③陽極電圧 7.8kV（ケース３）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、23.3 分で SiC 棒を引き上げた。27 分で陽極電圧を 7.7kV に下げ、29.2 分でガラス 200g を追加し、34.2 分で陽極電圧を 7.8kV に設定した。陽極電流はこの時 4.8A であった。その後陽極電流はほぼ一定で推移し試験終了直前では 4.7A であった。

保持溶融時での平均値は、陽極電圧が 7.83kV、陽極電流が 4.70A、到達温度が 1352℃であった。（図 5.4）

④陽極電圧 8.1V（ケース４）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、23.3 分で SiC 棒を引き上げた。24.5 分でガラス 200g を追加し、26.5 分で陽極電圧を 7.8kV に下げ、41.3 分で陽極電圧を 8.1kV に設定した。陽極電流はこの時 5.2A であった。その後陽極電流は一旦上昇し、44.8 分で 5.4A であった。その後、ほぼ一定で推移し試験終了直前では 5.29A であった。

保持溶融時での平均値は、陽極電圧が 8.09kV、陽極電流が 5.29A、到達温度が 1443℃であった。（図 5.5）

⑤陽極電圧 8.3kV（ケース５）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、23.3 分で SiC 棒を引き上げた。26.3 分で陽極電圧を 7.8kV に下げ、28.2 分でガラス 200g を追加し、43.2 分で陽極電圧を 8.3kV に設定した。陽極電流はこの時 5.50A であった。その後陽極は一旦上昇し、49.5 分で 5.71A であった。その後、ほぼ一定で推移し試験終了直前では 5.57A であった。

保持溶融時での平均値は、陽極電圧が 8.31kV、陽極電流が 5.77A、到達温度が 1469℃

であった。（図 5.6）

⑥陽極電圧 8.5kV（ケース６）

陽極電圧を 8kV 印加し加熱を開始し、22.7 分で SiC 棒を引き上げた。25.8 分で陽極電圧を 7.9kV に下げ、27.3 分でガラス 200g を追加し、37.3 分で陽極電圧を 8.5kV に設定した。陽極電流はこの時 5.64A であった。その後陽極電流は一旦上昇し、45.5 分で 5.93A であった。その後、ほぼ一定で推移し試験終了直前では 5.84A であった。保持溶融時での平均値は、陽極電圧が 8.55kV、陽極電流が 5.85A、到達温度が 1483℃であった。（図 5.7）

5.3.2 ガラス表面の温度分布

5.3.2.1 ガラス表面状態

写真 5.1 に陽極電力 42.8kW での保持溶融写真を示す。中心部およびクルーシブルに接した外周部は温度が低く、他の部分は見かけ上同じ状態であった。

5.3.2.2 ガラス表面温度分布

保持溶融時（陽極電圧一定保持 60 分）の赤外線画像図を図 5.8～5.9 に示す。保持陽極電圧は 7.7～8.6kV であった。

陽極電力が高い方が、ガラス表面温度が高くまた表面温度の差も大きい。ガラス表面温度は周方向にほぼ対称であった。

また、半径方向の温度分布は、クルーシブルと接触している外周部は、表面温度が急激に低下している。最高到達温度とガラス中心の温度について比較した。

陽極電圧 7.71kV 保持では、陽極電流は 4.60A であり、陽極電力 35.48kW であった。到達温度は 1352℃であり、中心での平均温度は 1082℃であった。（図 5.8(a)）

陽極電圧 7.83kV 保持では、陽極電流は 4.70A であり、陽極電力 36.76kW であった。到達温度は 1352℃であり、中心での温度は 1073℃であった。（図 5.8(b)））

陽極電圧 8.09kV 保持では、陽極電流は 5.29A であり、陽極電力 42.77kW であった。到達温度は 1443℃であり、中心での平均温度は 1182℃であった。（図 5.8(c)）

陽極電圧 8.31kV 保持では、陽極電流は 5.77A であり、陽極電力 47.93kW であった。到達温度は 1469℃であり、中心での温度は 1186℃であった。（図 5.8(d)））

陽極電圧 8.55kV 保持では、陽極電流は 5.85A であり、陽極電力 50.02kW であった。到達温度は 1483℃であり、今回の試験範囲では最高温度であった。また中心での温度は 1222℃であった。（図 5.9(a)））

5.3.2.3 表面温度分布比較

ガラス表面温度についてガラス上面から観察した温度分布の直径方向断面を陽極電圧 7.7，8.5kV のデータで図 5.10 に比較した。

陽極電圧 7.7kV では中心から 30.2，34.4mm をピークとして、外側に急激な温度低下がみられ、内側は中心を下限として温度低下がみられた。この断面でのピーク温度は 1288，1318℃であり、中心温度は 1073℃であった。

また陽極電圧 8.5kV では中心から 32.8，33.9mm をピークとして、外側に急激な温度低下がみられ、内側は中心を下限として温度低下がみられた。この断面でのピーク温度は 1404，1456℃であり、中心温度は 1215℃であった。

5.3.3 溶融時の電力とガラス温度

5.3.3.1 陽極電圧と陽極電流

ガラス保持溶融時の陽極電圧と陽極電流の関係を図5.11に示す。
範囲が狭いので、断言はできないが、PF-N10を溶融した場合、P0935に比べ傾きが大きいようである。ここで、陽極電圧が8.55kVでは陽極電流は5.85Aであった。

5.3.3.2 ガラス表面温度

図5.12に陽極電力とガラス表面の到達温度の関係を示す。
インコネル製クルーシブルでは溶融保持できなかったが、SUS製クルーシブルでは陽極電力35.5kW以上で溶融継続が可能であった。
SUS製クルーシブルでPF-N10ガラスビーズを溶融した場合、陽極電力で35.5～50.0kW、到達温度では1352～1483℃の範囲で安定保持ができた。
ガラスによる違いを比較すると、溶融保持可能な最小陽極電力は、P0935ガラスでは8kWであったが、PF-N10では35.5kWであった。また、到達温度では、P0935ガラスに比べ、PF-N10ガラスビーズでは同じ陽極電力に対し到達温度が250℃以上低くかった。

5.3.4 抜熱割合

ガラス溶融時の定常状態における陽極電力、冷却水温度上昇、表面温度を整理した。表5.3に陽極電圧、陽極電流、クルーシブル冷却水温上昇値、クルーシブル冷却水抜熱量、コイル冷却水温上昇値、コイル冷却水抜熱量、および到達温度を示す。
以下に冷却水抜熱量および表面輻射熱量と陽極電力の関係を示す。

5.3.4.1 クルーシブル冷却水抜熱

図5.13に陽極電力とクルーシブル冷却水抜熱量の関係を示す。クルーシブル抜熱量は、陽極電力に対し見かけ上直線関係であった。
また、P0935ガラス溶融試験での抜熱量とほぼ同じ直線上であった。例えば、陽極電力50.0kWではｸﾙｰｼﾌﾞﾙの抜熱量は18.6kWであった。

5.3.4.2 コイル冷却水抜熱

図5.14に陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係を示す。陽極電力に対し、コイル抜熱量は正の相関が見られた。またP0935ガラス溶融試験と比較してほぼ同じ直線上に見える。ただし、PF-N10ガラス溶融試験の範囲が狭いため、はっきりしない。

5.3.4.3 抜熱割合

図5.15に陽極電力に対するクルーシブル、コイル冷却水抜熱量、ガラス上面放熱量の割合の関係を示す。ここで、ガラス上面輻射熱はガラス表面温度分布(図5.8,5.9)と(4)式よりを計算した。

抜熱のほとんどはクルーシブル冷却水によって熱が奪われていることがわかった。また、陽極電力に対し、全抜熱量はクルーシブル抜熱量が 34.9～39.2%、コイル抜熱量が2.3～3.2%、上部放熱が1.7～2.0%であった。

5.3.5 発熱割合

5.3.5.1 ガラスからのクルーシブルへの伝熱

図5.16に電源停止時のクルーシブル冷却水出入口温度差推移を示す。4.4.1と同様に、直線近似によってガラスから伝熱量を計算し、伝熱量は陽極電力が35.5kWでは5.2kW、36.8kWでは5.0kW、42.8kWでは5.9kW、47.9kWでは5.47kW、50.0kWでは6.1kWであった。

図5.17に陽極電力とガラスからの伝熱量の関係を示す。陽極電力が 35.5～50.0kWの範囲で伝熱量は5.0～6.1kWであった。

5.3.5.2 クルーシブルの発熱

図 5.18 に陽極電力とクルーシブルの発熱量の関係を示す。陽極電力が 35.5～50.0kWの範囲でクルーシブル発熱量は8.7～12.5kWであった。

また、クルーシブルの発熱量はP0935ガラス溶融試験での結果と見かけ上同一直線上であった。

5.3.5.3 ガラス発熱

誘導によるガラスの発熱量はクルーシブルへの伝熱と表面放熱と耐火物への伝熱の和で表される。ここで、耐火物への伝熱は非常に小さいので無視すると、誘導加熱によるガラス発熱量は(5)式となる。

図5.19に陽極電力に対するガラス発熱量計算結果を示す。陽極電力が大きいほどガラス発熱量は多くなっているが、傾きはクルーシブル発熱量と比較すると小さかった。また陽極電力35.5～50.0kWでは、ガラス発熱量が5.9～7.0kWであった。

5.3.5.3 発熱割合

図5.20に各部発熱量で整理した発熱バランスと陽極電力の関係を示す。

陽極電力35.5～50.0kWの範囲では、クルーシブル発熱量が22.9～19.1%、コイル発熱量が 2.5～3.7%、ガラスからクルーシブルへの伝熱が 13.7～21.6%、上部放熱が3.0～4.3%であった。またガラス発熱量は17.9～21.9%となる。

5.5 SUS 製クルーシブルでの PF-N10 ガラス溶融試験まとめ

SUS 製クルーシブルで PF-N10 ガラスの溶融試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

1) インコネル製クルーシブルでは溶融できなかった PF-N10 ガラスを SUS 製クルーシブルでは溶融可能となった。
2) SUS 製クルーシブルでの安定溶融運転可能な範囲は陽極電力で 35.5～50.0kW、到達温度で 1352～1483℃であった。
3) 抜熱バランスで整理した結果、陽極電力に対し、クルーシブル抜熱量が 34.9～39.2%、コイル抜熱量が 2.3～3.2%、上部放熱が 1.7～2.0%であった
4) 発熱量バランスで整理した結果、クルーシブル発熱量が 22.9～19.1%、コイル発熱量が 2.5～3.7%、ガラスからクルーシブルへの伝熱が 13.7～21.6%、上部放熱が 3.0～4.3%、またガラス発熱量は 17.9～21.9%であった。

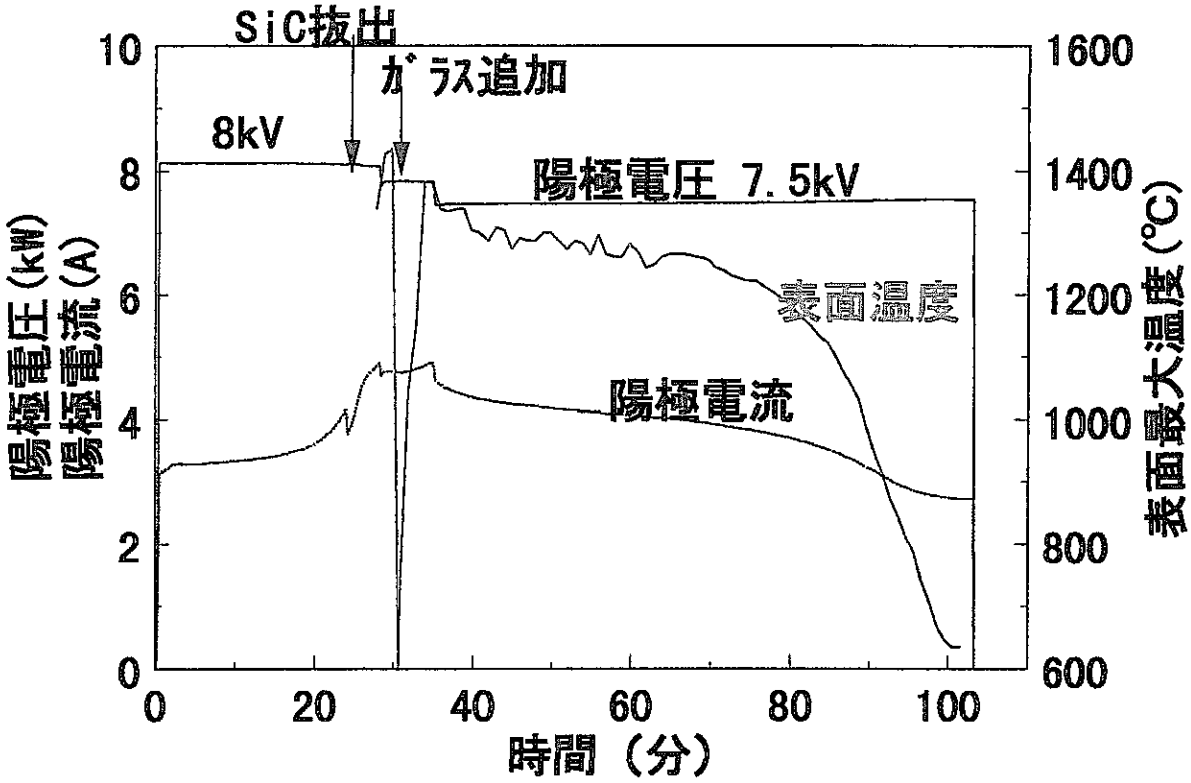


図 5.2　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 7.5kV）-ｹｰｽ 1

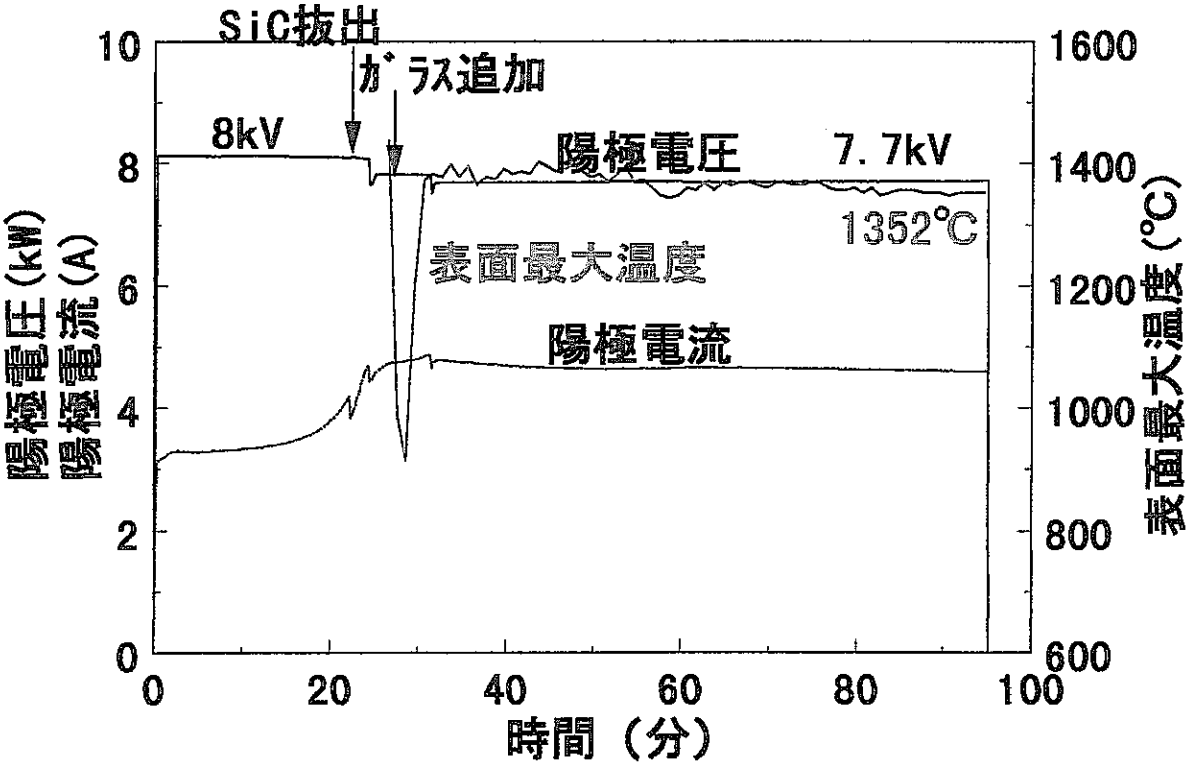


図 5.3　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 7.7kV）ーｹｰｽ 2

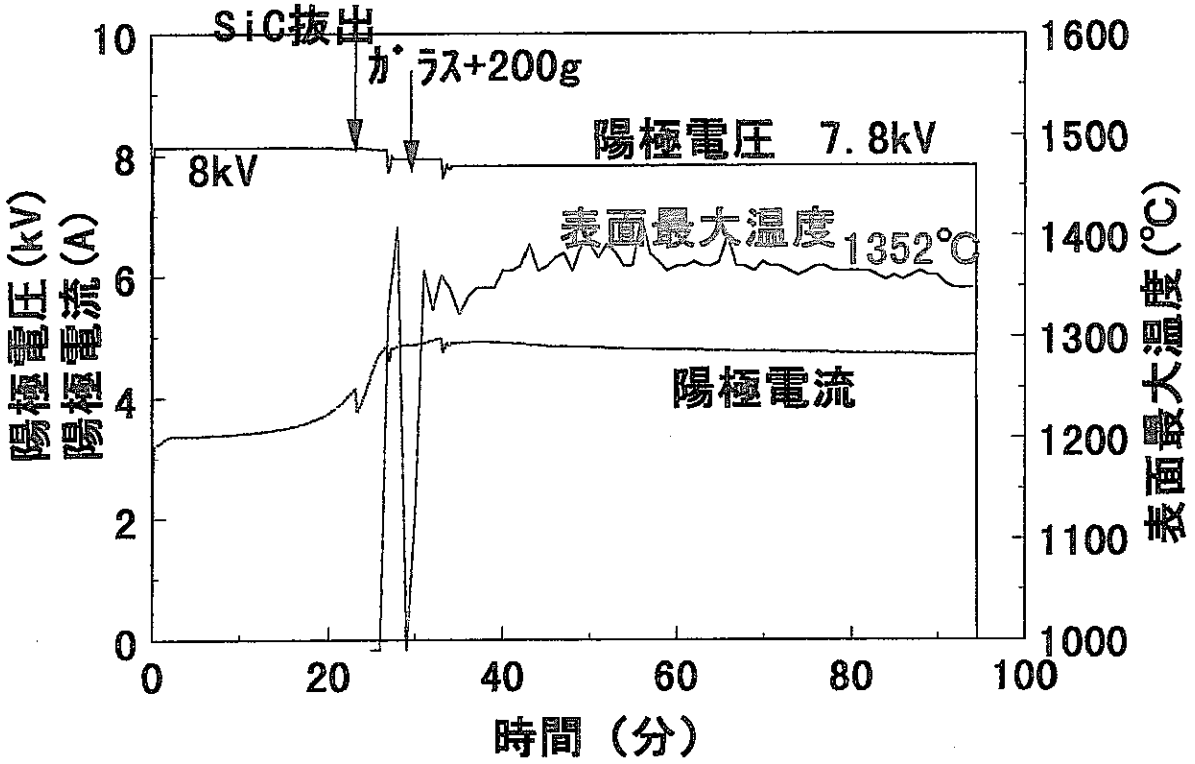


図 5.4　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 7.7kV）ーｹｰｽ 3

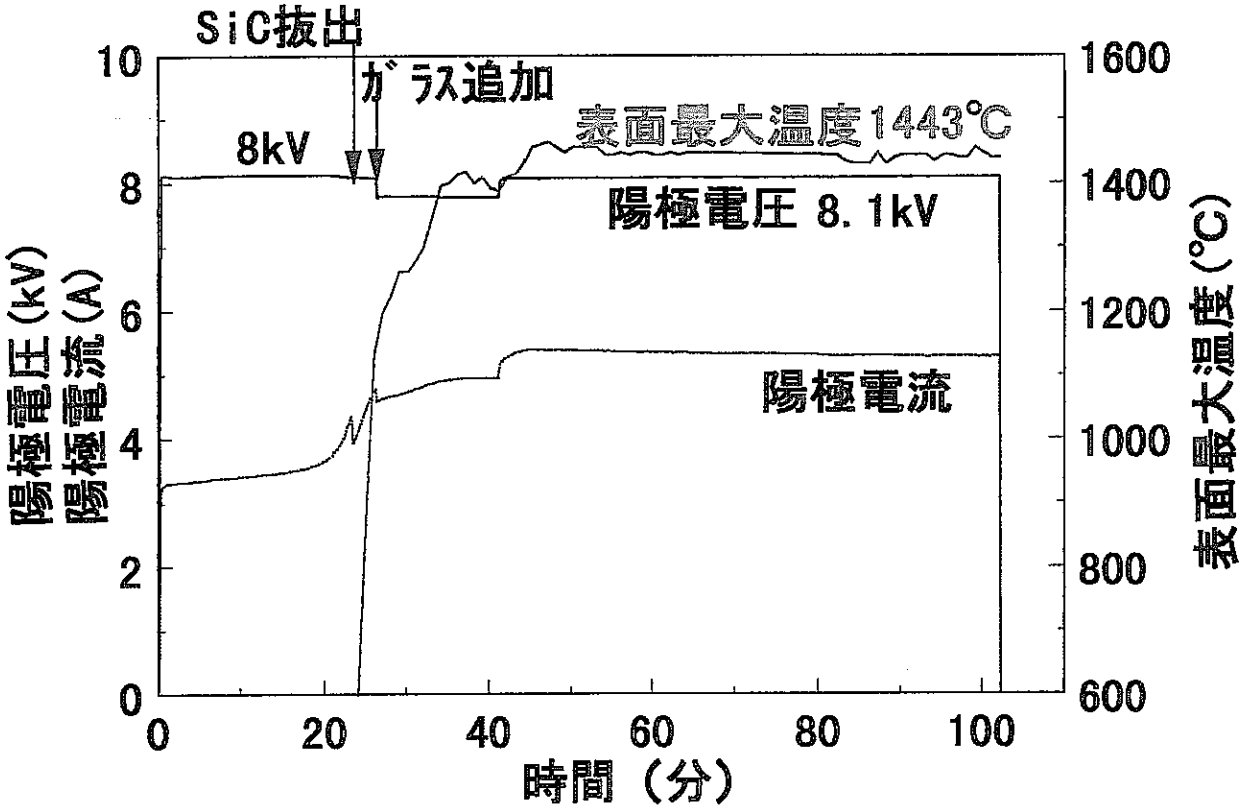


図 5.5　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 8.1kV）ーｹｰｽ 4

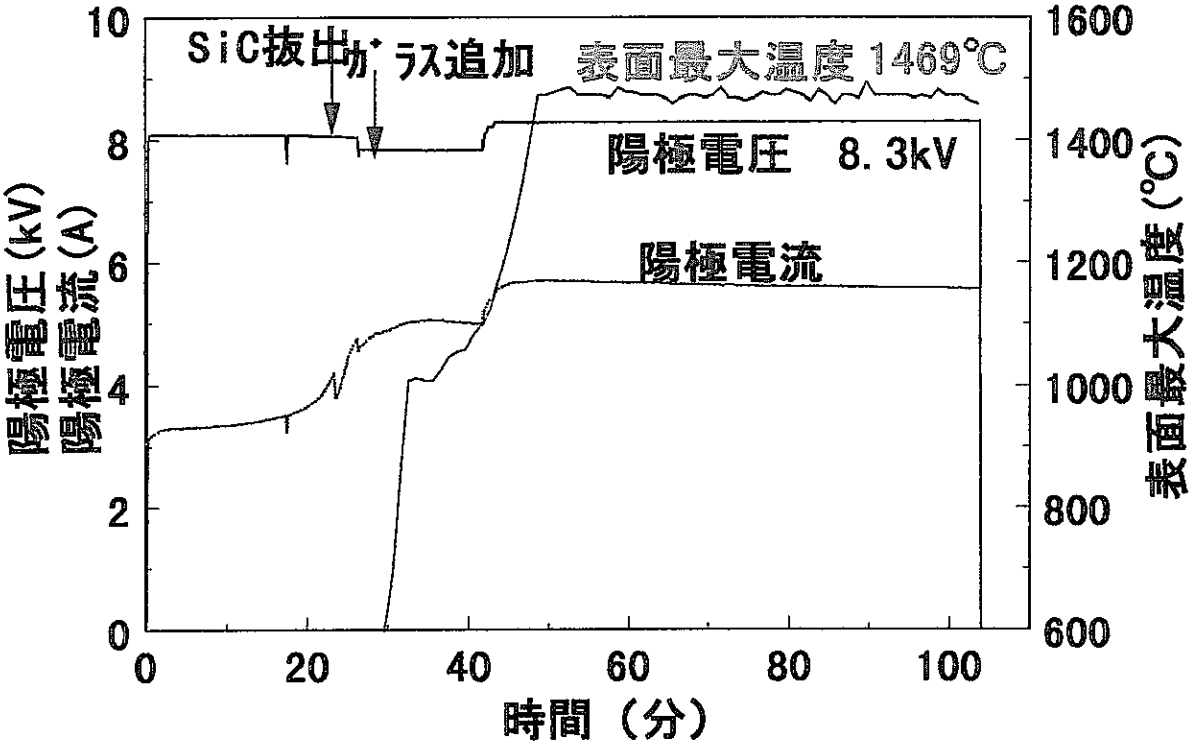


図 5.6　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 8.3kV）ーｹｰｽ 5

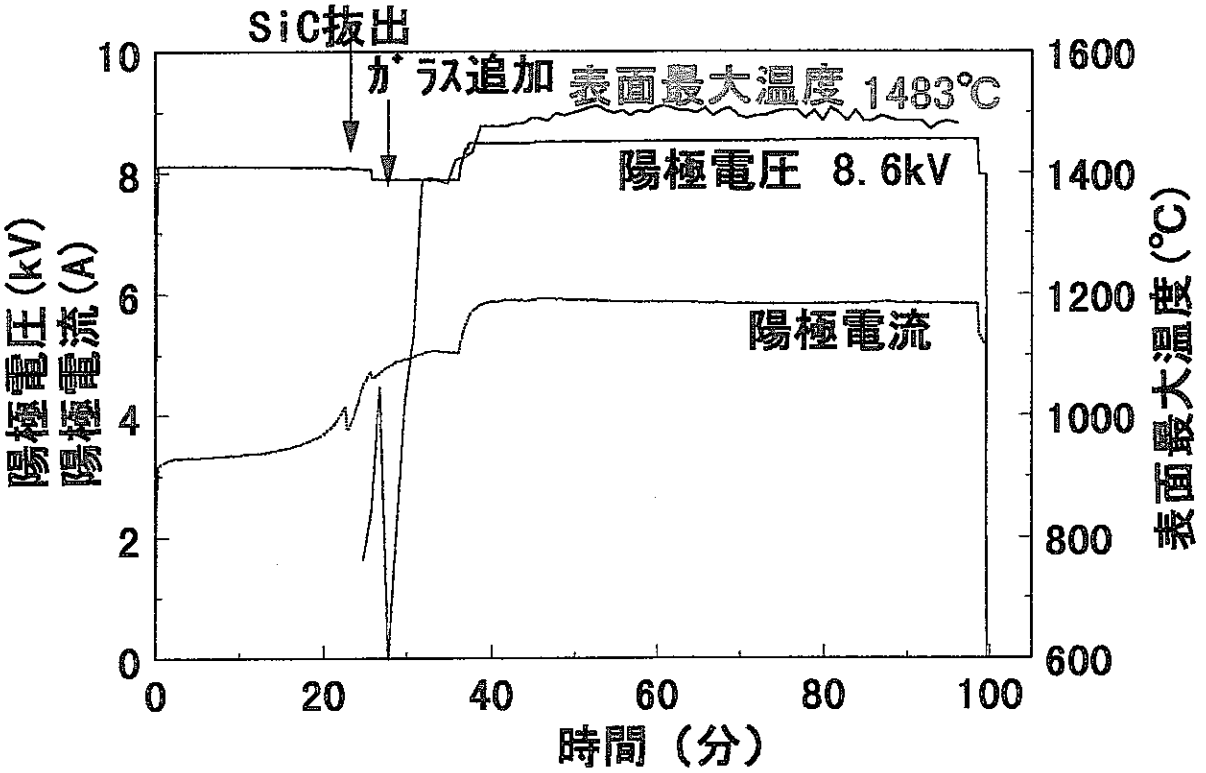


図 5.7　SUS 製ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ PF-N10 溶融試験推移（陽極電圧 8.6kV）ーｹｰｽ 6

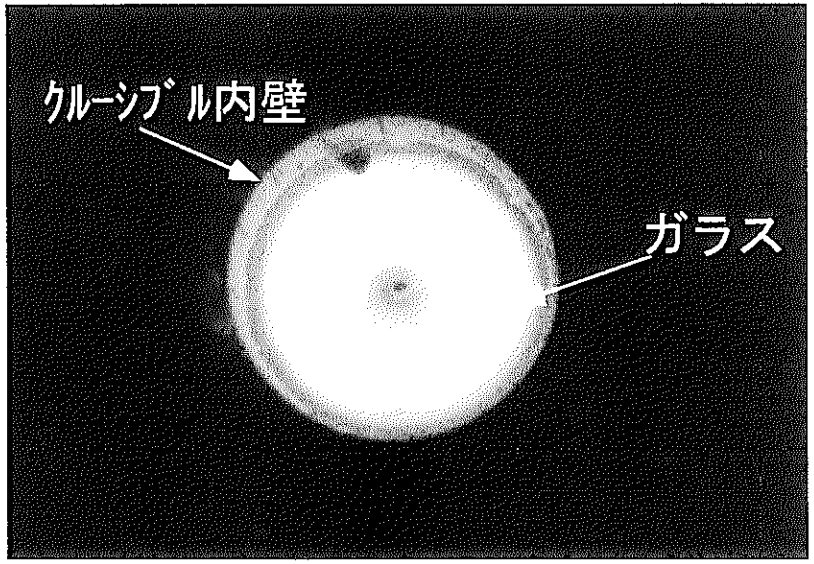
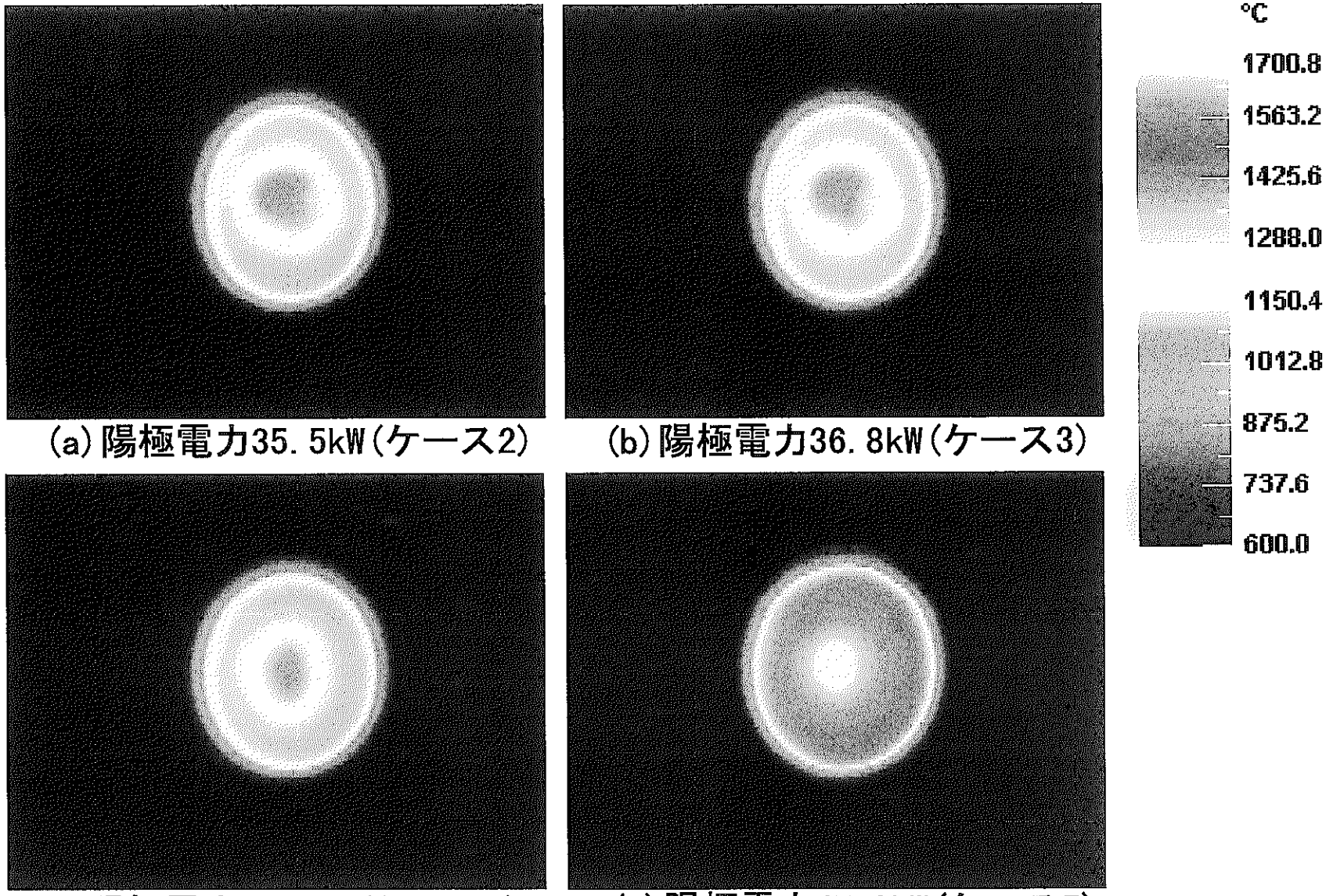


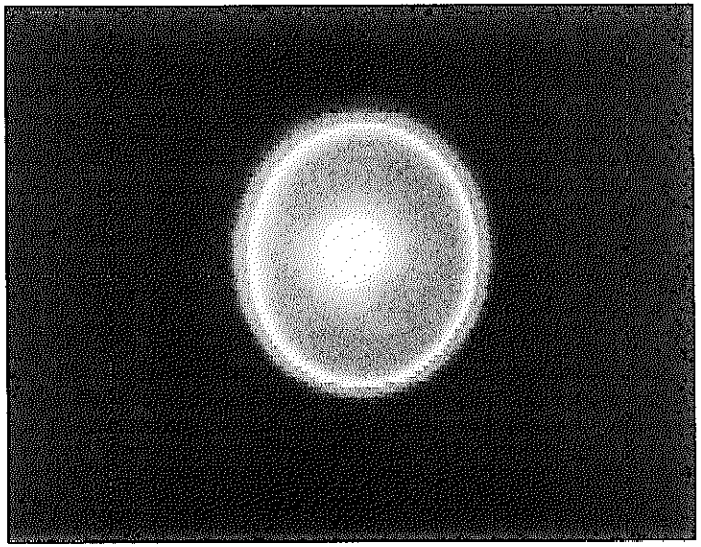
写真5.1　溶融状態
(SUS製クルーシブル, PF-N10, 陽極電力42.8kW)



(a) 陽極電力35.5kW(ケース2)　(b) 陽極電力36.8kW(ケース3)

(c) 陽極電力42.8kW(ケース4)　(d) 陽極電力47.9kW(ケース5)

図5.8　安定状態での表面温度分布
—SUS製ｸﾙｰｼﾞﾌﾞﾙ, PF-N10—



(a) 陽極電力50.0kW(ケース6)

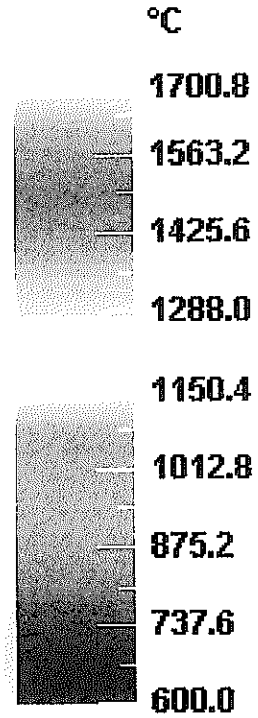


図5.9　安定状態での表面温度分布
—SUS製ｸﾙｰｼﾞﾙ，PF-N10—

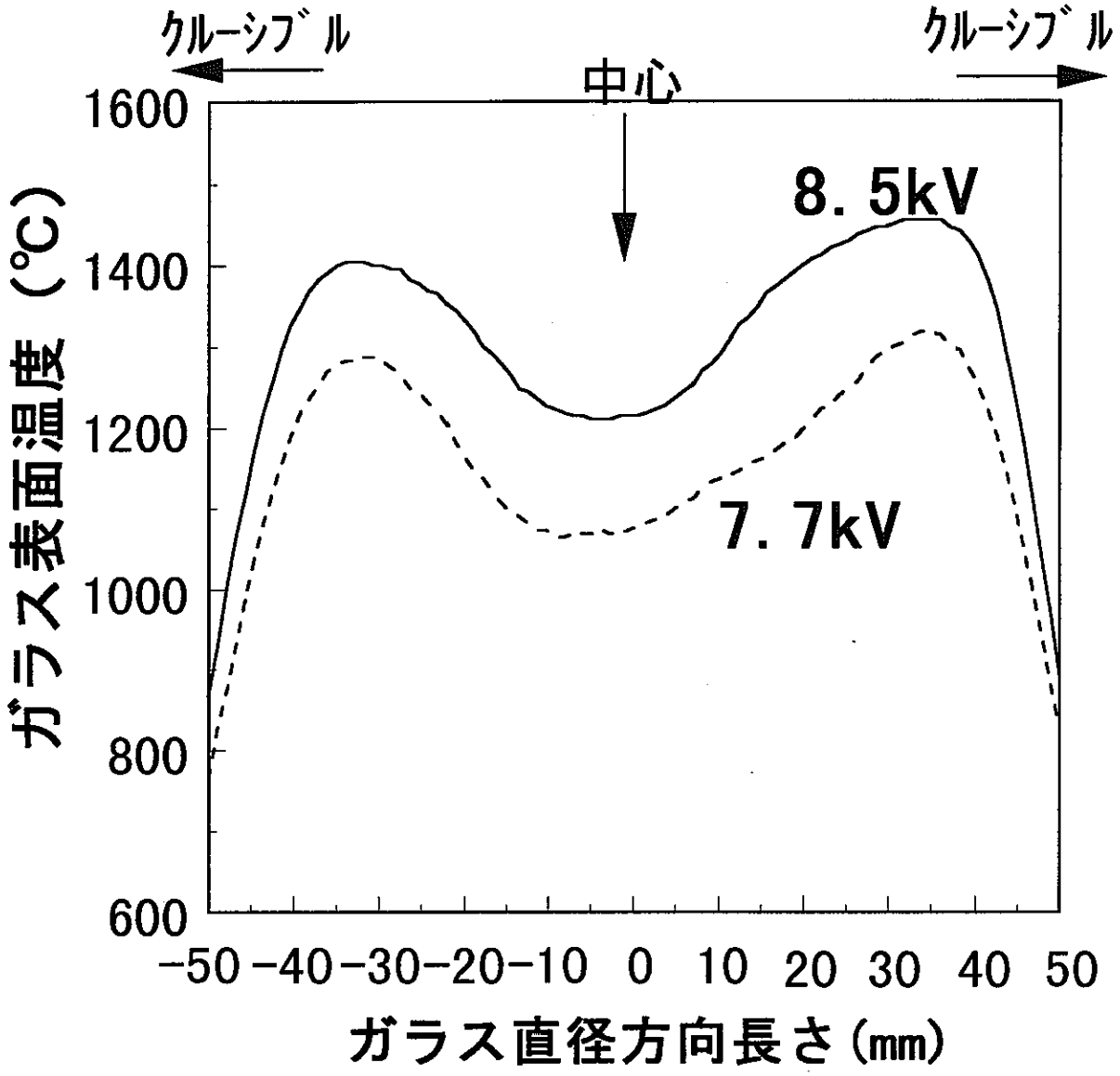


図 5.10　ガラス表面温度分布比較

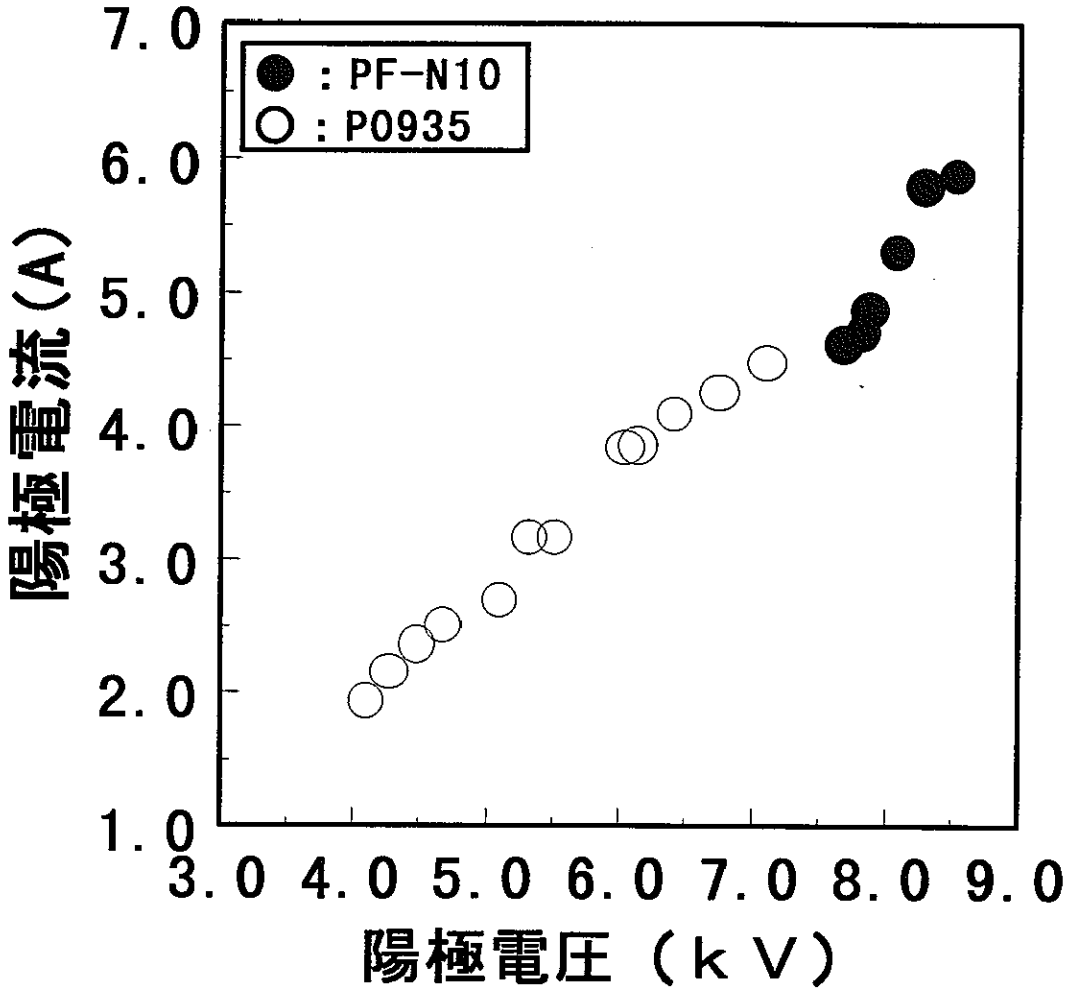


図 5.11　陽極電圧と陽極電流の関係

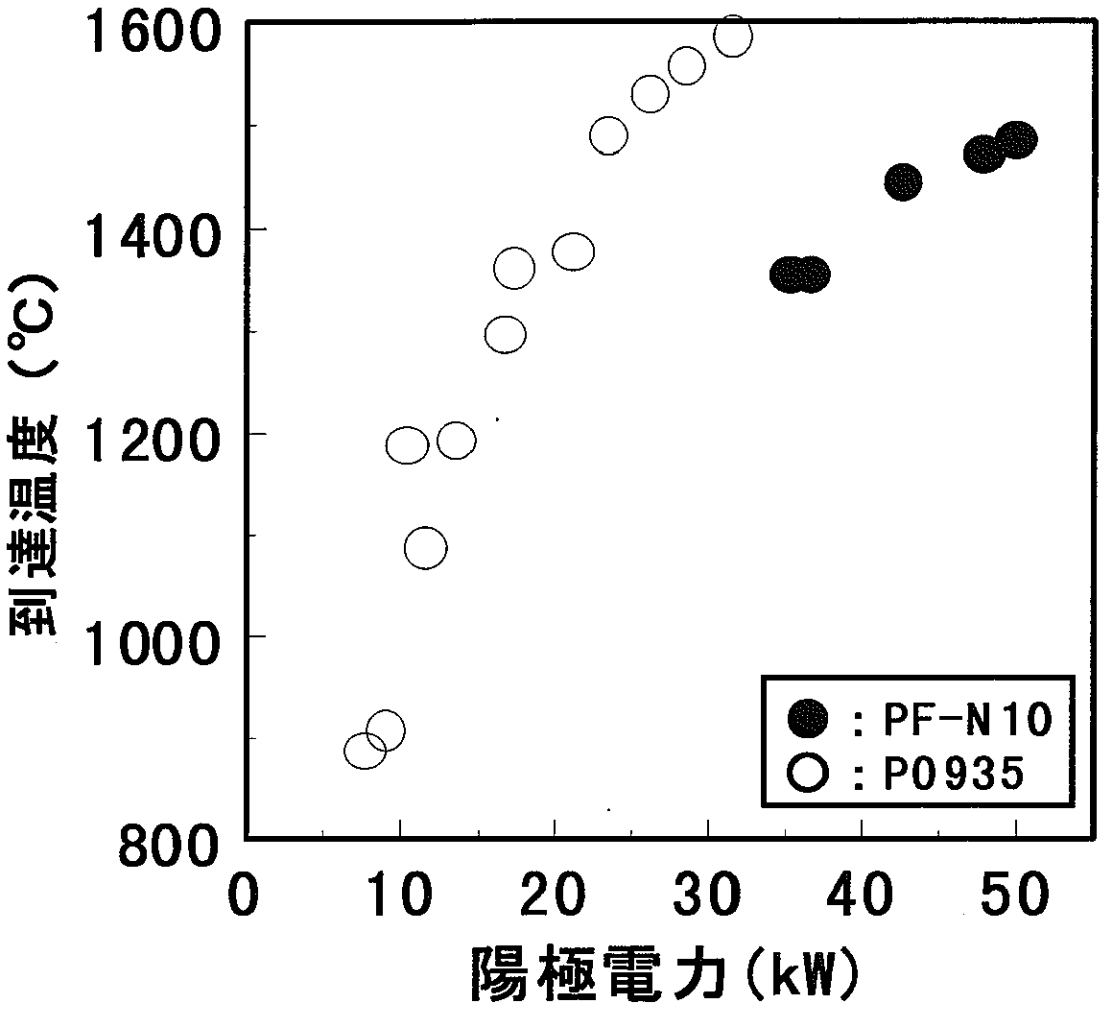


図 5.12　陽極電力と到達温度の関係

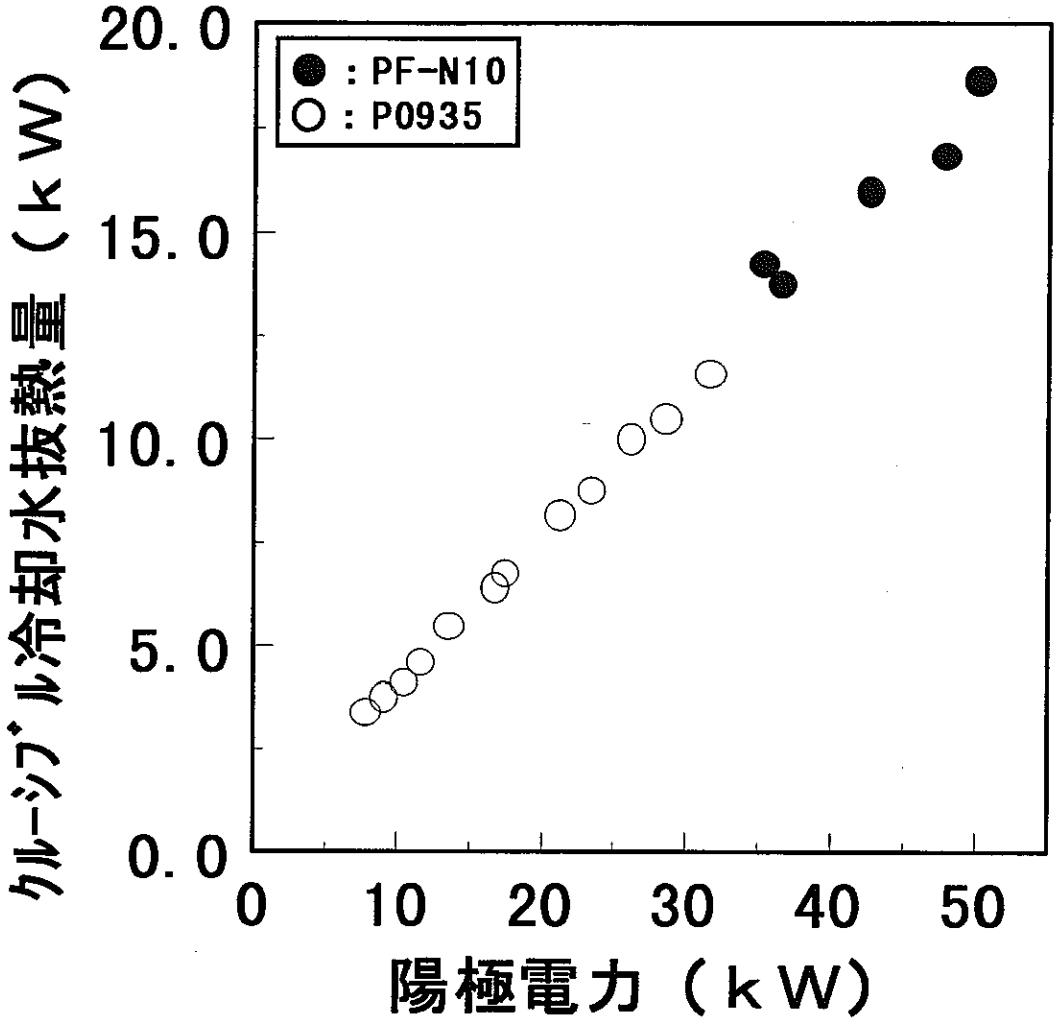


図 5.13　陽極電力とクルーシブル冷却水抜熱量の関係

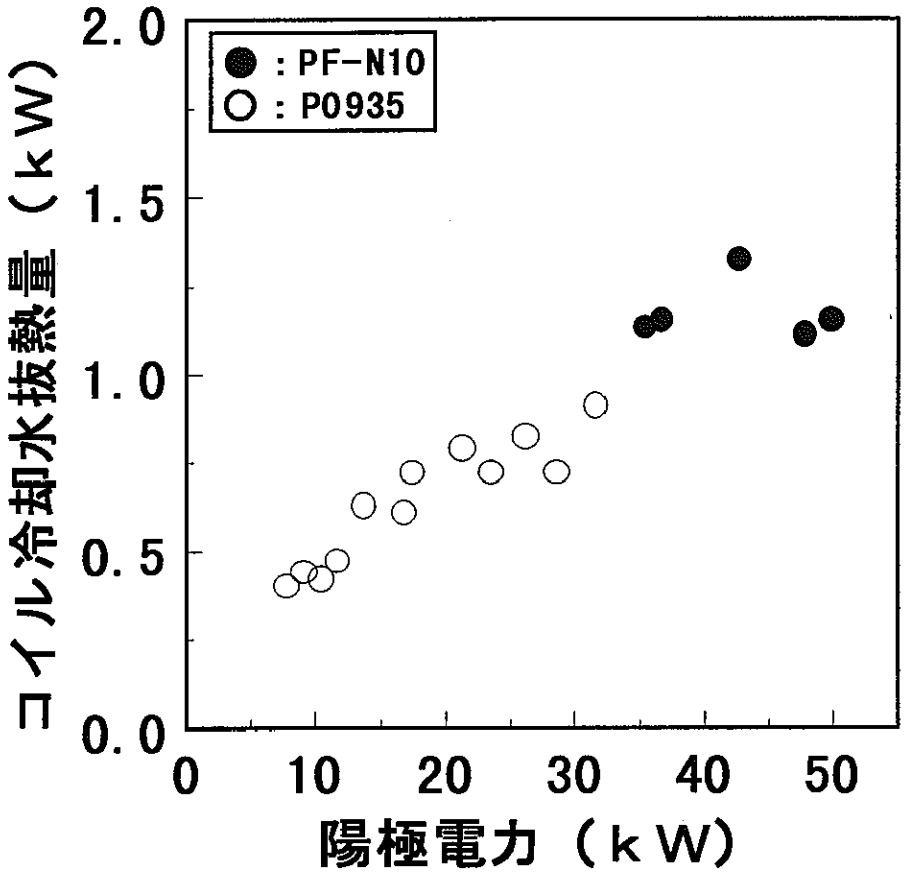


図 5.14　陽極電力とコイル冷却水抜熱量の関係

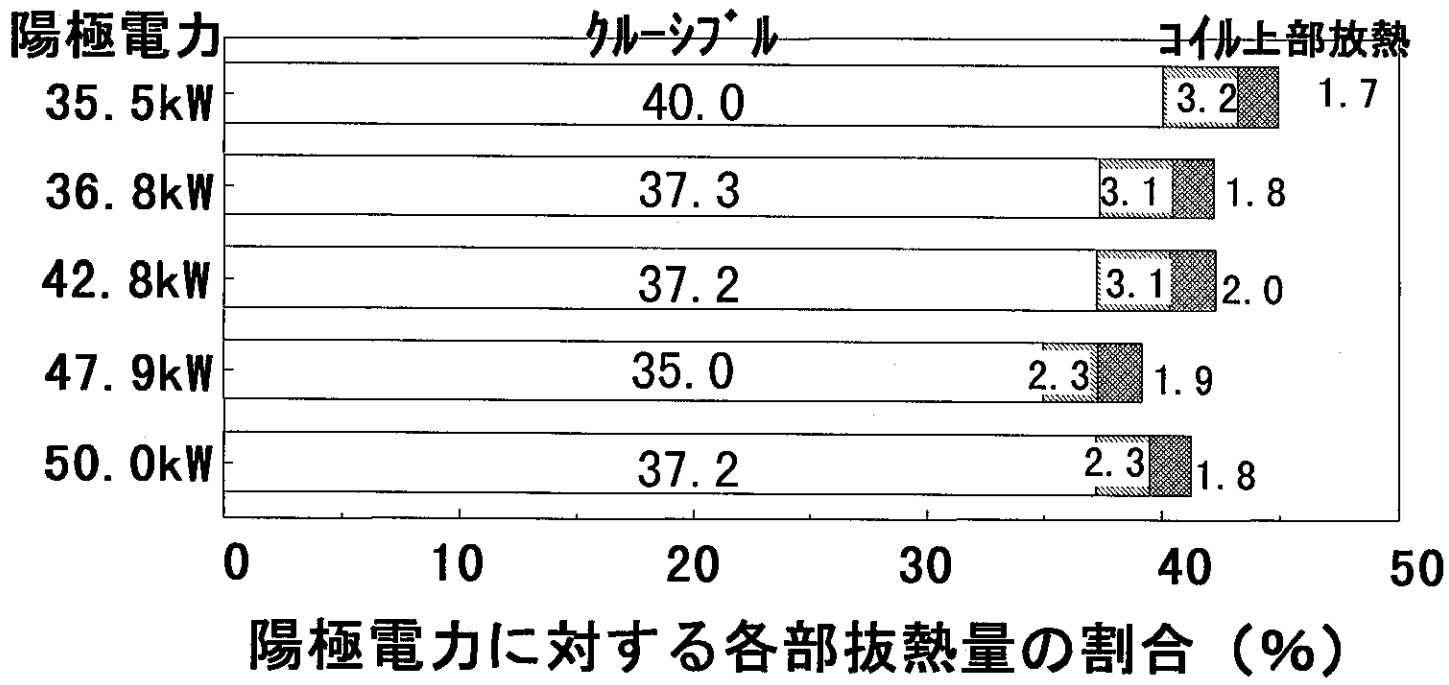
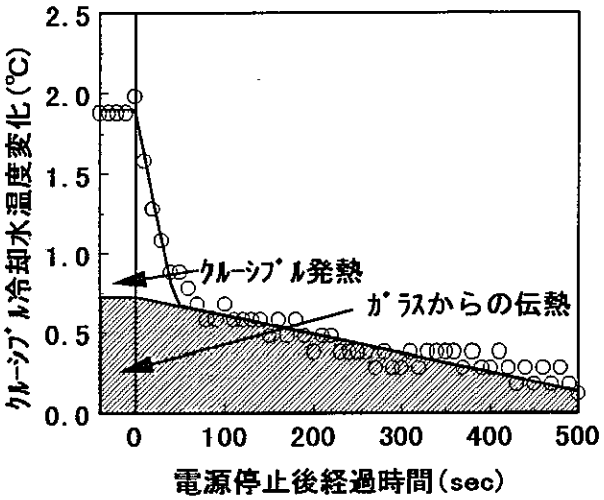
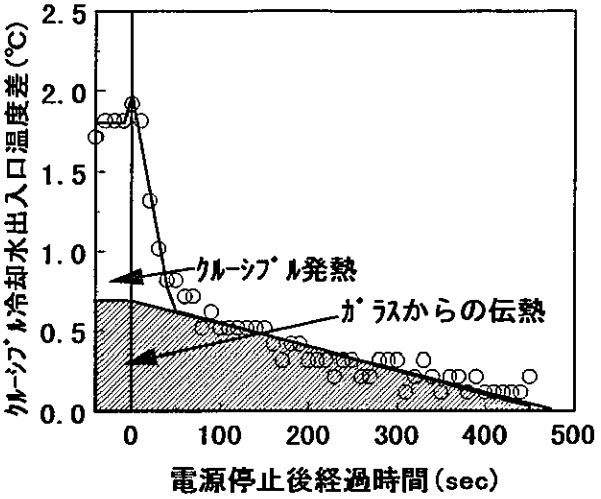


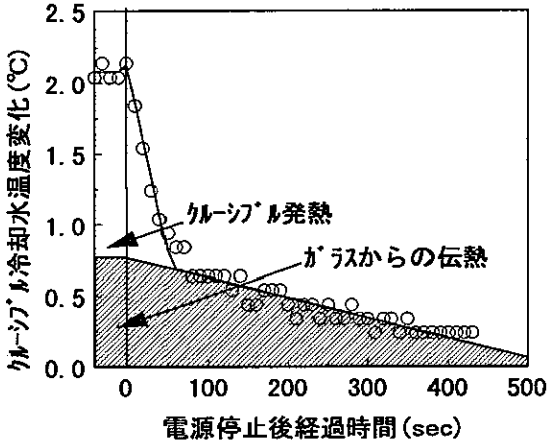
図 5.15　陽極電力に対する各部抜熱量割合



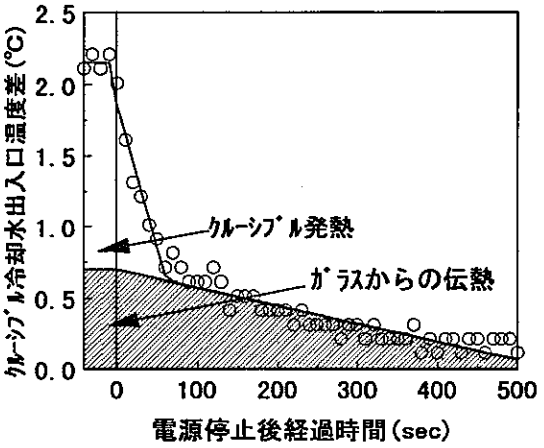
(a)陽極電力 35.5kW(ケース 2)



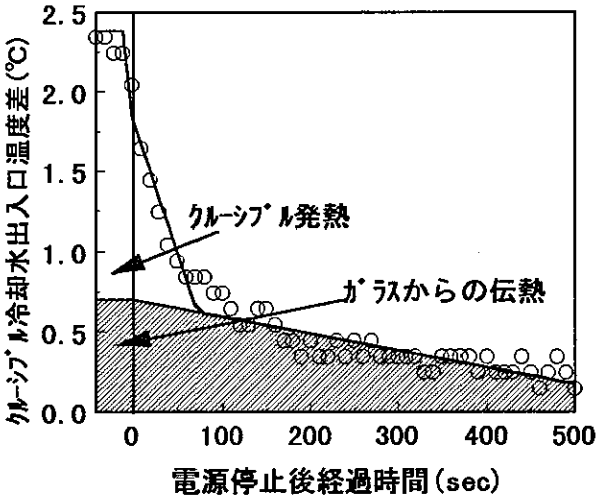
(b)陽極電力 36.8kW(ケース 3)



(C)陽極電力 42.8kW(ケース 4)



(d)陽極電力 47.9kW(ケース 5)



(e)陽極電力 50.0kW(ケース 6)

図 5.16　電源停止後のクルーシブル冷却水温上昇値の推移

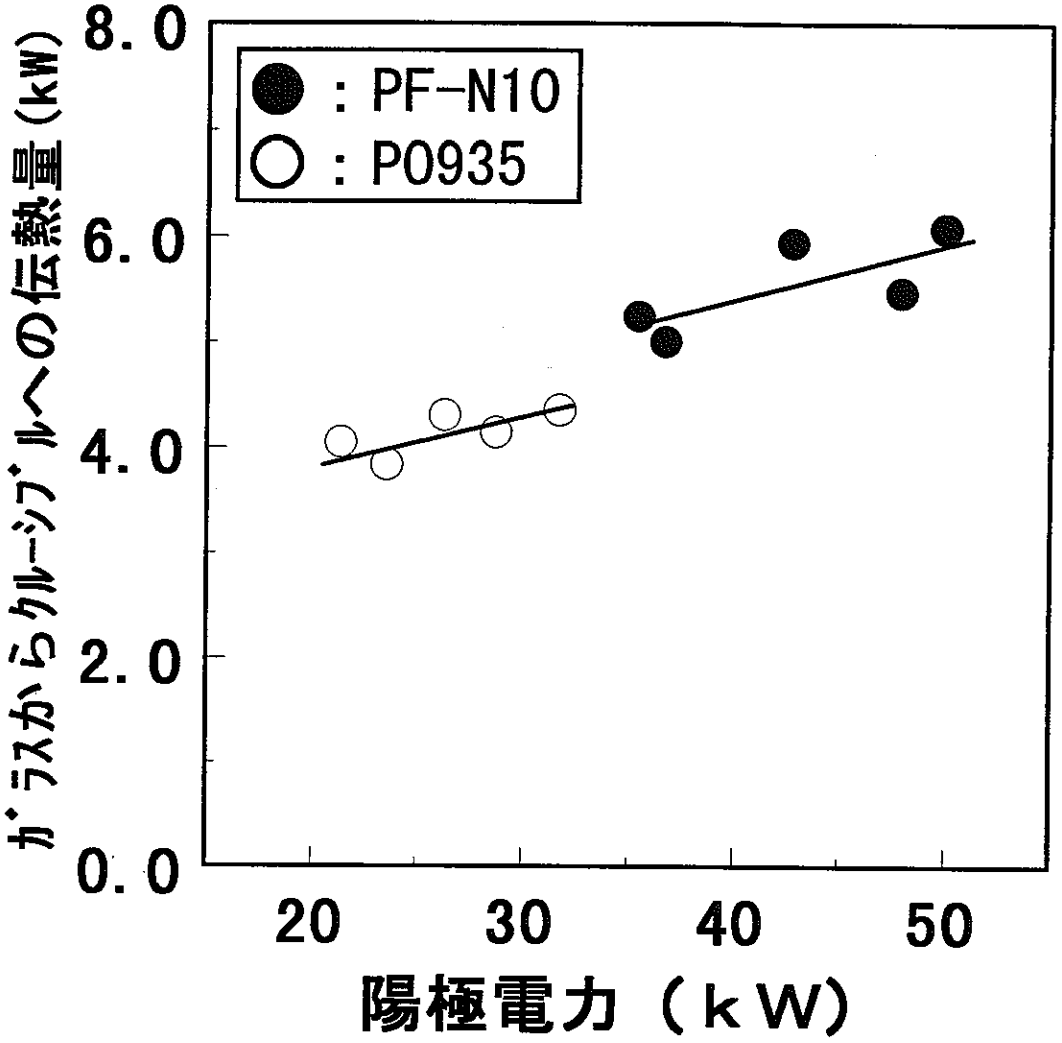


図 5.17　陽極電力と伝熱量の関係

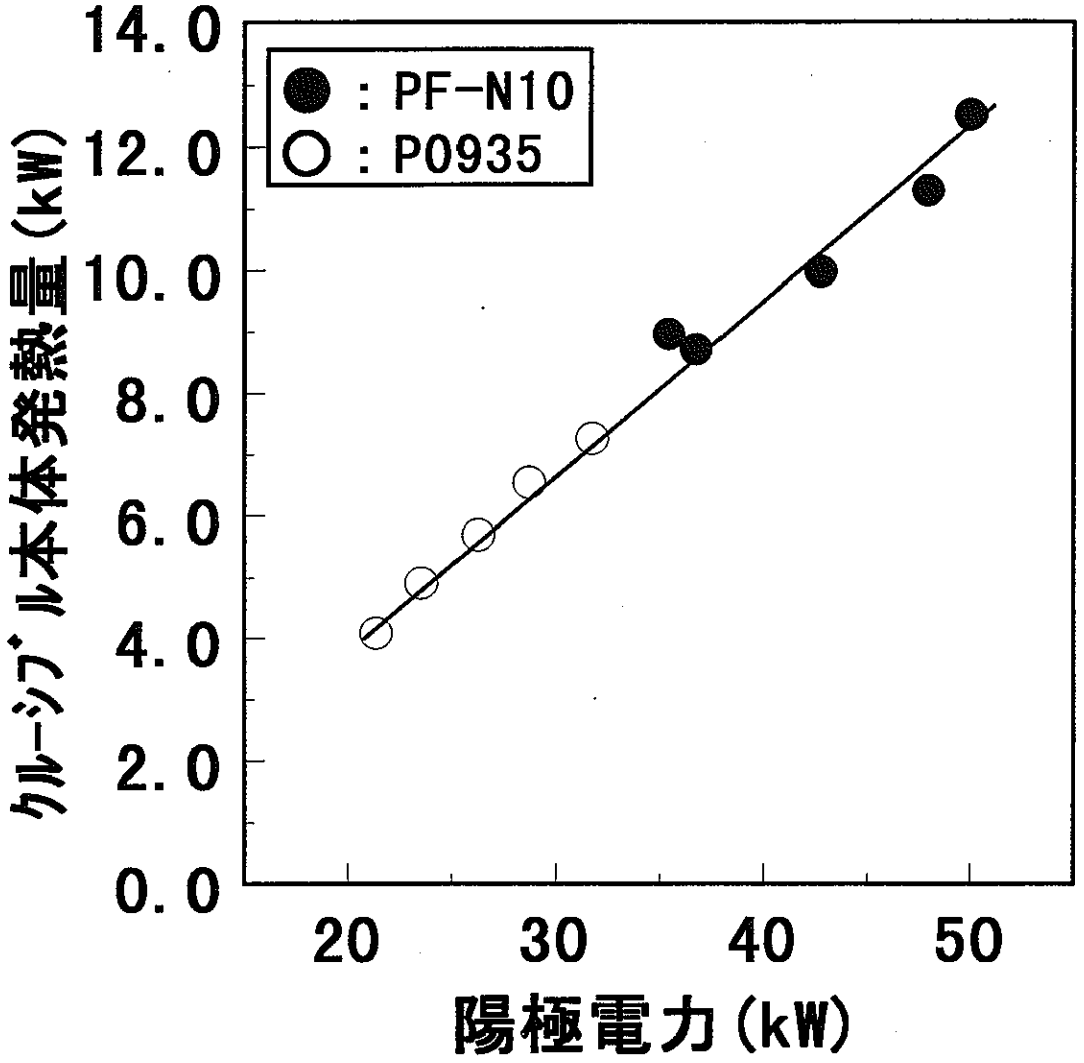


図 5.18　陽極電力とクルーシブル発熱量の関係

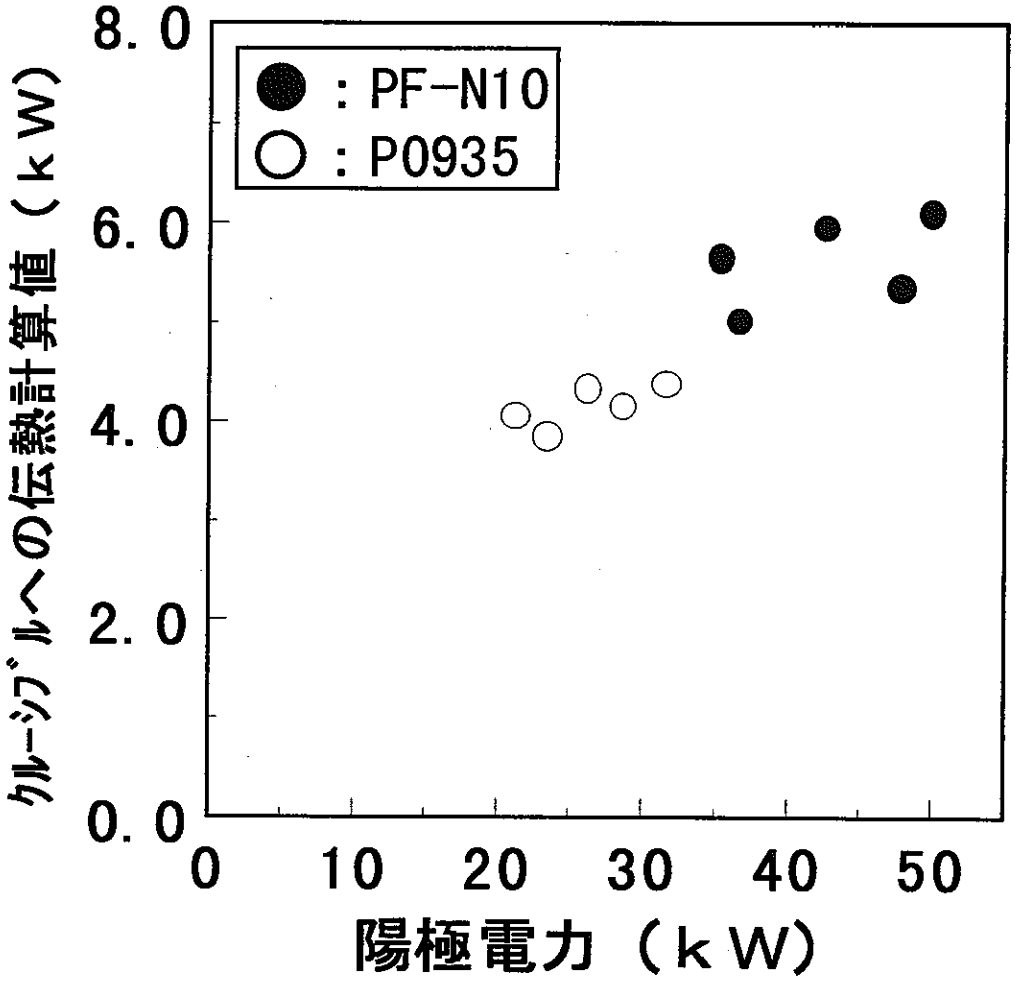


図 5.19　陽極電力とガラス発熱量の関係

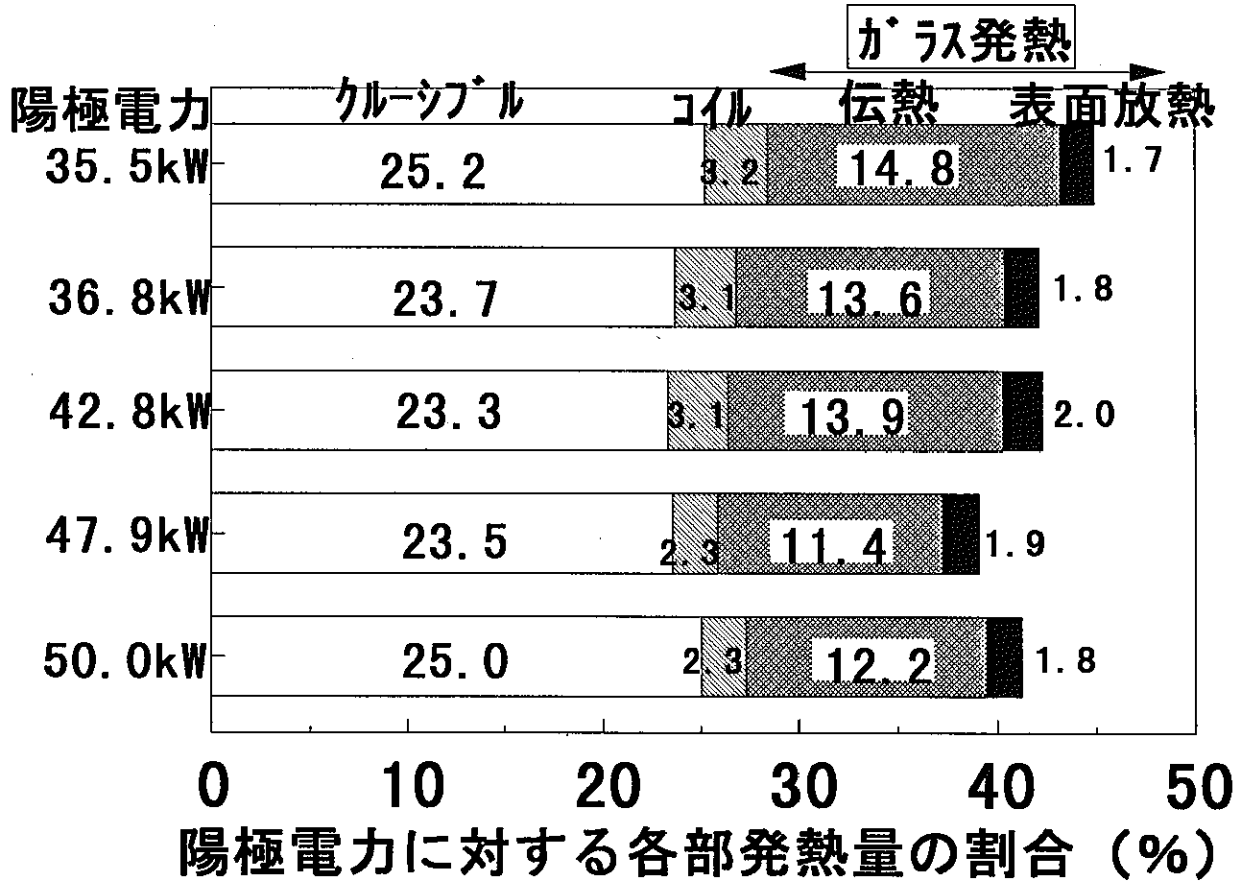


図 5.20　SUS 製クルーシブルにおける各部発熱割合

表 5.3　SUS 製クルーシブルでの保持溶融時の陽極電力と冷却水温変化、表面温度

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水温度変化 (℃)	ｺｲﾙ冷却水温変化 (℃)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ冷却水量 (l/min.)	ｺｲﾙ冷却水流量 (l/min.)	到達温度 (℃)	抜熱量			溶融継続可否
									クルーシブル (kW)	コイル (kW)	ガラス上面放熱 (kW)	
1	7.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	継続不可
2	7.71	4.60	35.48	1.90	1.28	107	12.7	1352	14.19	1.13	0.61	可
3	7.83	4.70	36.76	1.81	1.27	109	13.0	1352	13.72	1.15	0.65	可
4	8.09	5.29	42.77	2.08	1.36	110	13.0	1443	15.92	1.32	0.84	可
5	8.31	5.77	47.93	2.12	1.23	112	13.0	1469	16.76	1.11	0.90	可
6	8.55	5.85	50.02	2.38	1.25	112	13.2	1483	18.60	1.15	0.90	可

表 5.4　SUS 製クルーシブルでの各部熱バランスと陽極電力に対する割合

No	陽極電圧 (kV)	陽極電流 (A)	陽極電力 (kW)	ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ本体発熱計算値 (kW)	ｶﾞﾗｽからｸﾙｰｼﾌﾞﾙの伝熱量 (kW)	ｺｲﾙ発熱量 (kW)	ｶﾞﾗｽ表面放熱 (kW)	陽極電力に対する割合 (%)			
								ｸﾙｰｼﾌﾞﾙ	コイル	伝熱	上面放熱
2	7.71	4.60	35.48	8.96	5.24	1.13	0.61	25.2	3.2	14.7	1.7
3	7.83	4.70	36.76	8.72	5.00	1.15	0.65	23.7	3.1	13.6	1.8
4	8.09	5.29	42.77	9.98	5.94	1.32	0.84	23.3	3.1	13.9	2.0
5	8.31	5.77	47.93	11.28	5.47	1.11	0.90	23.5	2.3	11.4	1.9
6	8.55	5.85	50.03	12.52	6.08	1.15	0.90	25.0	2.3	12.2	1.8

6. 解析検証用データの取得試験

6.1 目的

CCIM 熱流動解析の検証データとして、SUS 製クルーシブルを用いて模擬廃棄物ガラス PF-N10 を溶融した時の内部温度・表面流動・スカル層を調査した。

6.2 試験方法

6.2.1 試験方法概要

SUS 製クルーシブルを用いて PF-N10 ガラスを 5 章と同じ方法で溶融し、定常状態に到達した後、測温、流動測定、またはガラス採取等を行った。陽極電圧は 8kV で保持した。

6.2.2 ガラス内部温度測定

ガラス内部の温度を測定するため、電源停止直前に熱電対をガラス内に挿入し内部温度を測定した。測定方法は以下の①～④の手順で実施した。（図 6.1）

①陽極電圧を 8kV で 30 分間保持する。

②熱電対を入れる。

③熱電対挿入後 5 秒で、高周波電源を停止する。

④高周波電源停止後、直ちに熱電対を測定器につなぐ。

6.2.3 表面流動測定試験

表面流動を測定するため、陽極電圧を 8kV で 30 分保持後ジルコニア砕片をトレーサーとしてガラス上面から添加し、砕片の挙動から表面の流動を測定した。流動を測定するため、クルーシブル上部から 3 秒ごとに写真撮影した。砕片はジルコニアを用い、1～2mm のものを使用した。

6.2.4 スカル層観察試験

流動等と同一条件で溶融し、安定後 30 分で誘導加熱を停止する。凝固後、ガラスを取り出し、側面からガラスを採取する。このガラスを樹脂で固め切断し、光学顕微鏡にて観察し、クルーシブル表面から気泡位置までの距離を測定した。

6.3 解析検証用データ取得試験結果

6.3.1 ガラス内部温度測定試験

6.3.1.1 表面温度分布

図 6.2 に表面温度の横断面分布を示す。温度分布は周方向に対称であり、中心では 1131℃、中心から 25mm(1/2r 位置)では 1441℃、38mm では 1434℃、44mm では 1211℃であった。
また最大温度は中心から 32mm で 1464℃であった。

6.3.1.2 電源停止後温度推移

(a) ガラス中心、深さ 10mm 位置

図 6.3(a)にガラス中心、深さ 10mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 5 秒で 1456℃を示し、その後ゆっくりと降下していった。電源停止前の表面温度は 1394℃であり、最大温度をガラス中心、深さ 10mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 62℃となった。

(b) ガラス中心、深さ 50mm 位置

図 6.3(b)にガラス中心、深さ 50mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 8 秒で 1280℃を示し、その後ゆっくりと降下していった。電源停止前の表面温度は 1187℃であり、最大温度をガラス中心、深さ 50mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 93℃となった。

(c) 中心から 25mm、深さ 10mm 位置

図 6.3(c)に中心から 25mm、深さ 10mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 2 秒で 1476℃を示し、その後ゆっくりと降下していった。電源停止前の表面温度は 1465℃であり、最大温度を中心から 25mm、深さ 10mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 11℃となった。

(d) 中心から 25mm、深さ 50mm 位置

図 6.3(d)に中心から 25mm、深さ 50mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 2 秒で 1455℃を示し、その後ゆっくりと降下していった。電源停止前の表面温度は 1391℃であり、最大温度を中心から 25mm、深さ 50mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 64℃となった。

(e) 中心から 38mm、深さ 10mm 位置

図 6.3(e)に中心から 38mm、深さ 10mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 2 秒で 1444℃を示し、その後降下していった。電源停止前の表面温度は 1322℃であり、最大温度を中心から 38mm、深さ 10mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 122℃となった。

(f) 中心から 44mm、深さ 10mm 位置

図 6.3(f)に中心から 44mm、深さ 10mm での測温結果を示す。最大温度は、電源停止後 2 秒で 1271℃を示し、その後降下していった。電源停止前の表面温度は 1245℃であり、最大温度 1271℃を中心から 44mm、深さ 10mm 位置の内部温度とすると表面との温度差は 122℃となった。

6.3.1.3 内部温度結果まとめ

図 6.4 に内部温度と表面温度の関係を示す。表面温度は中心からの位置によって温度が大きく変化することがわかっており、本試験から内部の温度も表面と同様の温度分布を示すことがわかった。

温度は、中心からの距離が同じ条件では、表面、深さ 10mm、深さ 50mm の順に高くなっていった。

表面と内部の温度差は、ガラス中心では表面からの深さ 10mm では 62℃、50mm では 93℃であった。中心から 25mm 位置では表面からの深さ 10mm では 11℃、50mm では 64 であった。中心から 38mm 位置では表面からの深さ 10mm で 122℃、中心から 44mm、深さ 10mm では 122℃であった。

6.3.2 表面流動測定試験

6.3.2.1 トレーサー挙動評価

ガラス上面にジルコニア砕片を溶融ガラス上に落とし流動を調べた。試験は6回行い、各回毎に1～3個の砕片を用いた。

1回目は写真6.1に示すように2つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から24.1mm位置に、3秒後には20.8mm、6秒後には16.5mm、9秒後には14.2mmに移動した。またB片はトレーサー落下直後は中心から21.9mm位置に、3秒後に18.1mmに、6秒後には14.7mm、9秒後には12.7mmの位置に移動した。

2回目は写真6.2に示すように3つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から32.1mm位置に、3秒後には30.6mm、6秒後には28.4mm、9秒後には26.1mm、12秒後には23.9mmに移動した。またB片はトレーサー落下直後は中心から30.9mm位置に、3秒後に29.9mmに、6秒後には26.1mm、9秒後には23.1mmに移動した。またC片はトレーサー落下直後には中心から23.9mm位置に、3秒後に20.9mmに、6秒後には17.9mm、9秒後には14.2mm、12秒後には12.7mmに移動した。

3回目は写真6.3に示すように2つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から21.5mm位置に、3秒後には15.5mm、6秒後には11.8mmに移動した。またB片はトレーサー落下直後には中心から17.5mm位置に、3秒後に12.0mmに、6秒後には9.0mm、9秒後には7.2mmの位置に移動した。

4回目は写真6.4に示すように2つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から25.6mm位置に、3秒後には20.7mm、6秒後には17.1mm、9秒後には14.6mm、12秒後には12.1mmに移動した。またB片はトレーサー落下直後には中心から21.3mm位置に、3秒後に16.5mmに、6秒後には13.4mm、9秒後には11.6mm、12秒後には9.8mmに移動した。

5回目は写真6.5に示すように1つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から39.0mm位置に、3秒後には37.8mm、6秒後には36.6mm、9秒後には36.0mmに移動した。

6回目は写真6.6に示すように3つ落とした。トレーサーは共に中心方向へ移動した。A片はトレーサー落下直後には中心から31.1mm位置に、3秒後には27.3mm、6秒後には23.0mm、9秒後には19.7mm、12秒後には18.0mmに移動した。またB片はトレーサー落下直後には中心から30.3mm位置に、3秒後に28.8mmに、6秒後には24.2mm、9秒後には21.2mm、12秒後には18.9mmに移動した。またC片はトレーサー落下直後には中心から14.2mm位置に、3秒後に11.7mmに、6秒後には11.1mm、9秒後には10.5mm、12秒後には10.2mmに移動した。

6.3.2.2 表面流速

図 6.5 にトレーサーの移動状態から算出したガラス表面の流動を整理した。測定された表面流動はすべて溶融ガラスの中心方向に向かっていた。流速が最大の位置は中心から 21mm の距離で秒速 1.0～1.6mm であった。また中心から 10mm 付近では秒速 0.1～1.0mm、30mm 付近では秒速 0.3～1.3mm、37mm 付近では秒速 0.2～0.4mm であった。

6.3.3 スカル層観察結果

6.3.3.1 スカル層断面写真

溶融試験終了後のクルーシブル側面に接したスカル層部のガラスの断面観察結果を以下に示す。

写真 6.7 にガラス上面から 10～28.2mm 位置のガラス側断面の観察結果を示した。ガラス側面から約 1mm の距離に気泡が観察され、ガラス上面からの距離が 11mm 深さでは 1.13mm、21mm では 1.18mm で気泡が観察された。写真 6.8 にガラス上面から 41～61mm 位置のガラス側断面の観察結果を示した。ガラス側面から約 1.5mm の距離に気泡が観察され、ガラス上面からの距離が 41mm 深さでは 1.42mm、46mm では 1.54mm、56mm では 1.65mm で気泡が観察された。

6.3.3.2 気泡位置整理結果

図 6.6, 表 6.1 にガラス上面からの深さと気泡位置の関係を示す。気泡位置は側壁から 1.1～1.7mm の範囲であった。今回の観察範囲ではガラス上面に近い方が気泡位置は側表面に近く、深い方が側表面から 0.6mm 遠かった。またクルーシブルの冷却性能が高い銅製クルーシブル(10 ｾｸﾞﾒﾝﾄ)と比較する[2]と、銅製クルーシブルの方が気泡位置は側表面から深く、また傾きも大きかった。

6.3.3.3 解析用メッシュ図への反映

気泡位置の観察結果から、1.1～1.7mm で熱伝導性の違いが発生していると考えられる。そこで、解析でのメッシュではガラスの外側 2mm(中心から 48mm～50mm)を 0.5mm 以下にする必要があると考えられる。現状の熱流動解析では、最外周の 2mm を 0.4mm、外周から 2～4mm を 1mm とし、その内側は 2mm で分割している。

6.4 解析検証用データの取得試験まとめ

熱流動解析検証用データとして、内部温度、表面流動、スカル部を調査した結果、以下の知見が得られた。

(1)表面温度と内部温度の温度分布は同じ傾向であり、1/2r 位置より外側寄りに温度ピークが存在した。表面では中心から 32mm 位置に温度ピークがあり、内部温度では 38mm 付近が最大と考えられる。また内部と表面の温度差は 11～122℃で内部の方が高かった。

(2)トレーサーを用いた表面流動を測定した結果、ガラス中心から 39mm 位置より内側で中心へ向かう流速が見られた。また中心から 21mm 位置で、秒速 1.0～1.6mm であった。

(3)スカル部を観察した結果、側面から 1.1～1.7mm 深さで気泡が多数観察されたことから、溶融ガラスとの物理的境界面が存在するポイントと考えられる。

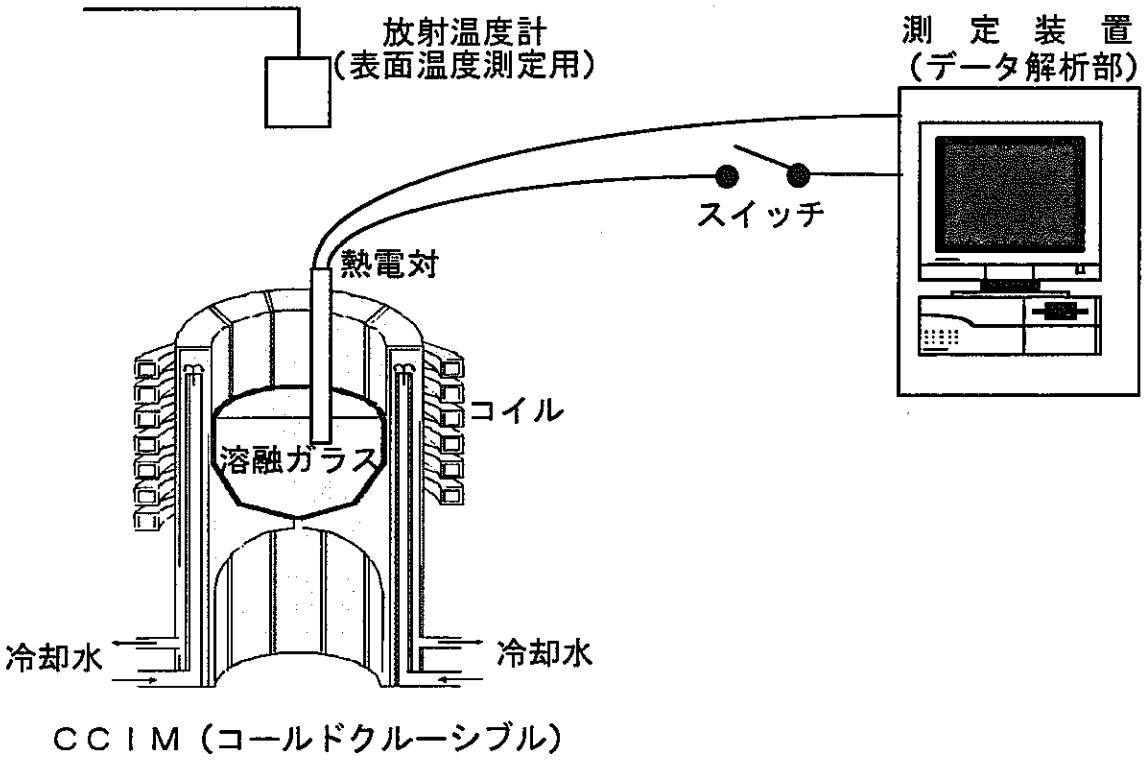


図 6.1　ガラス内部測温試験概念図

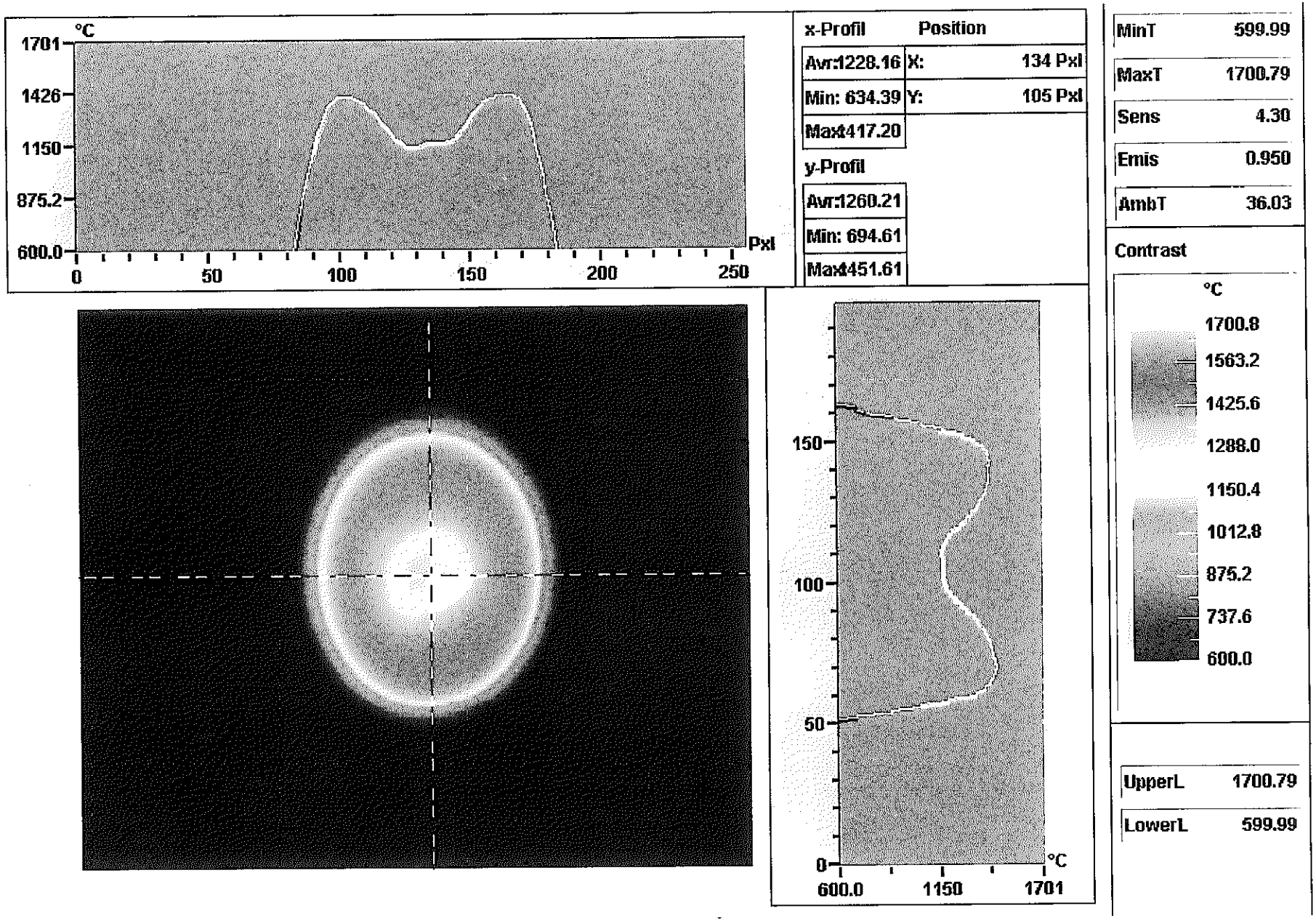
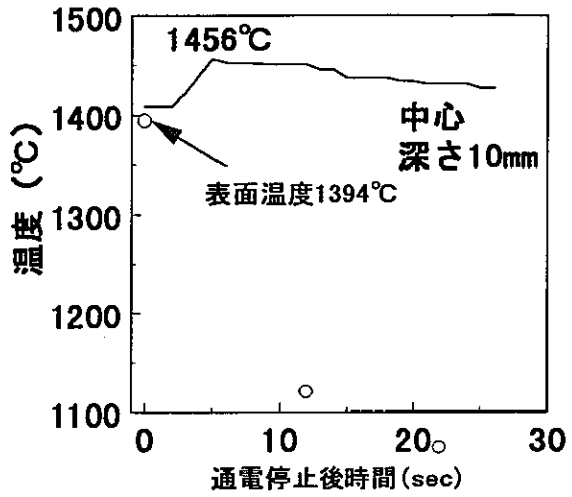
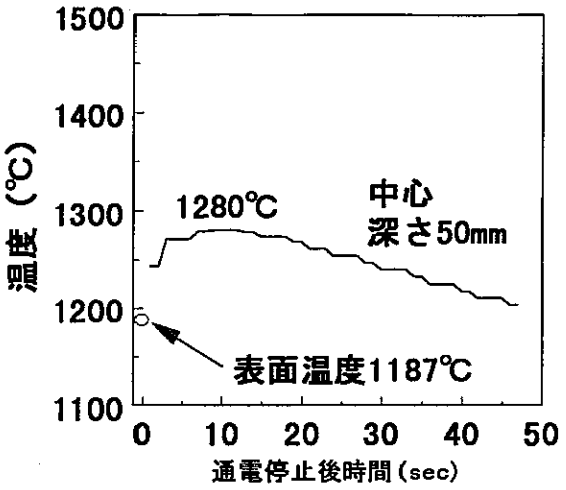


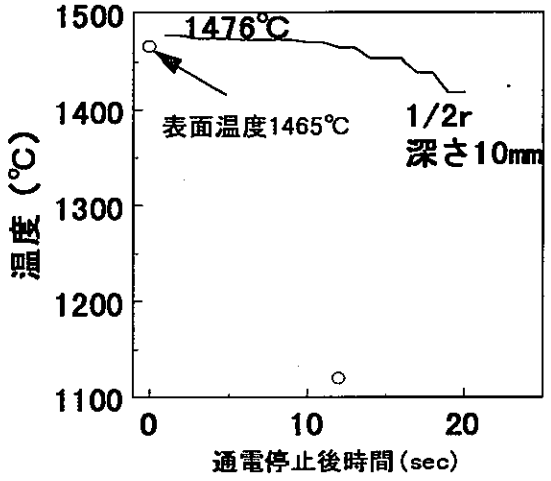
図6.2　ガラス表面温度分布(SUS製炉, PF-N10, 陽極電圧8kV)



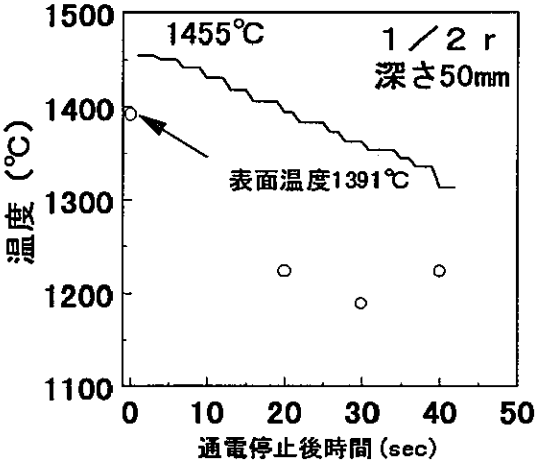
(a)ガラス中心、深さ 10mm



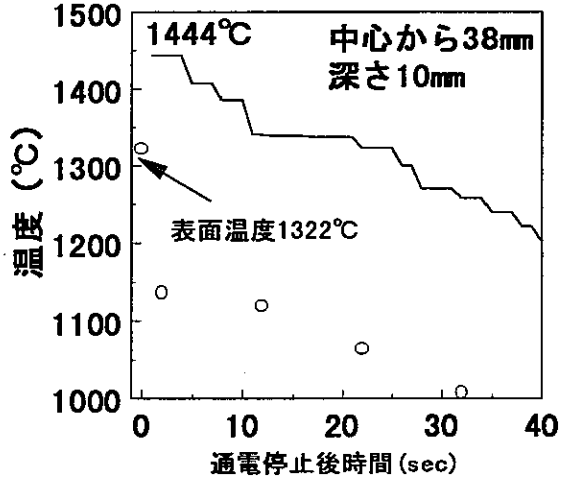
(b)ガラス中心、深さ 50mm



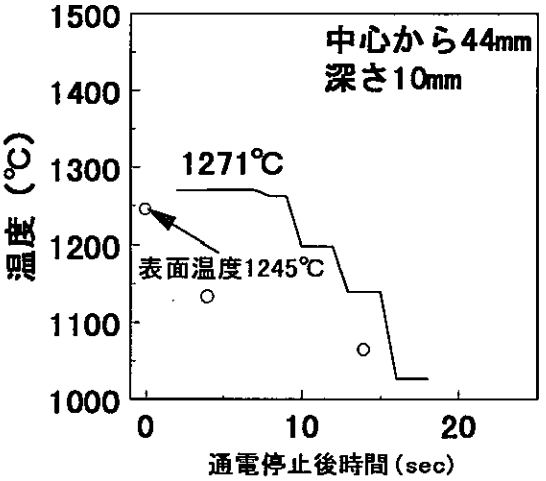
(c)中心から 25mm、深さ 10mm



(d)中心から 25mm、深さ 10mm



(e)中心から 38mm、深さ 10mm



(b)中心から 44mm、深さ 10mm

図 6.3　電源停止後の熱電対温度と表面温度の推移

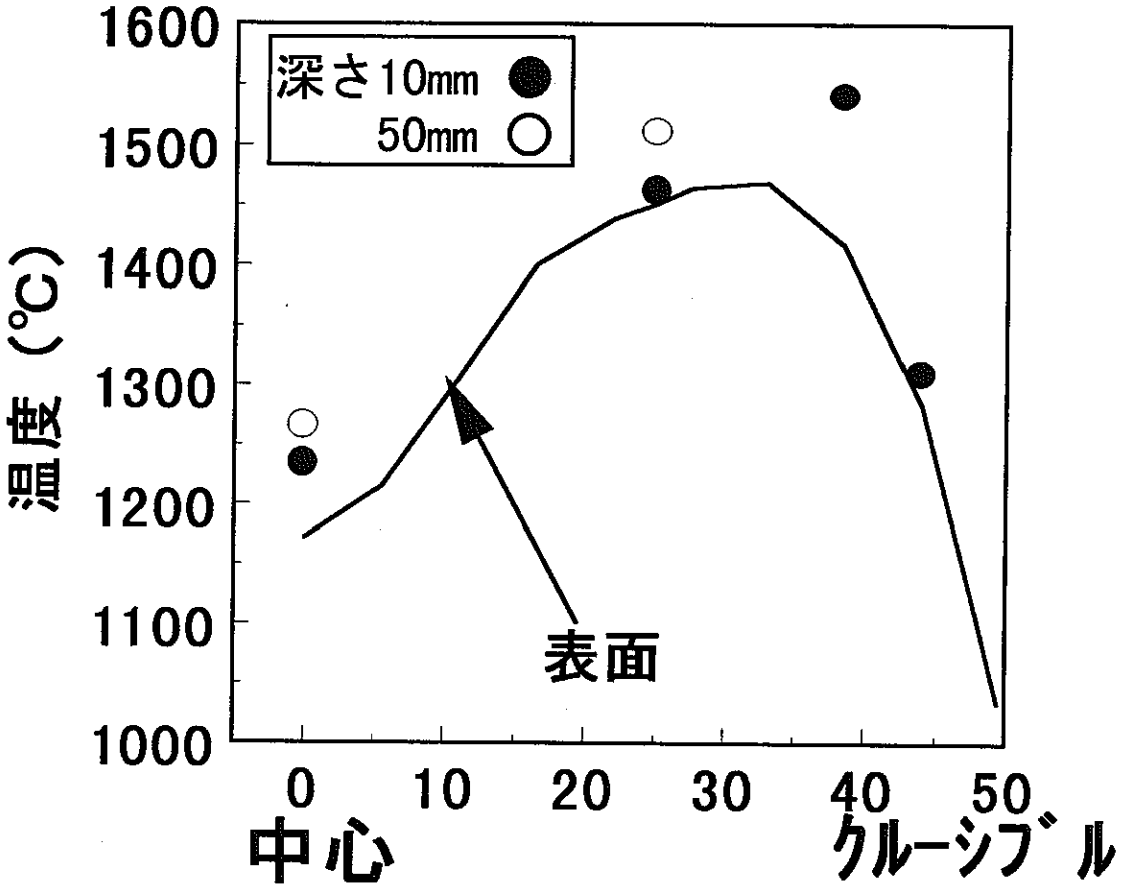
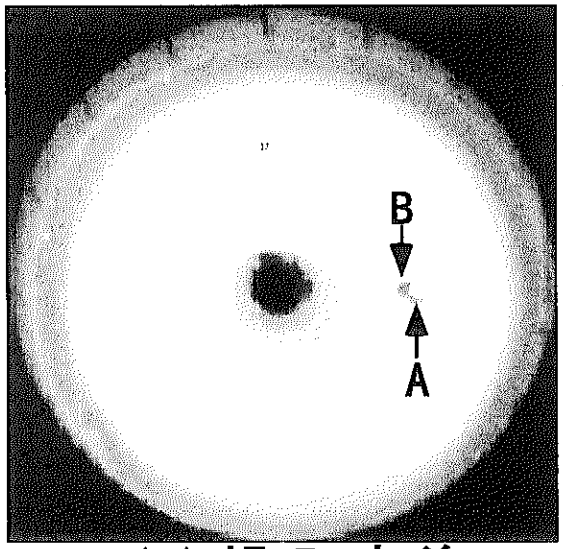
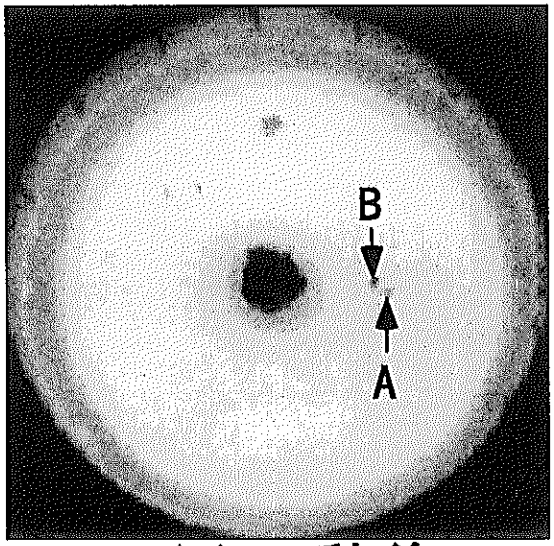


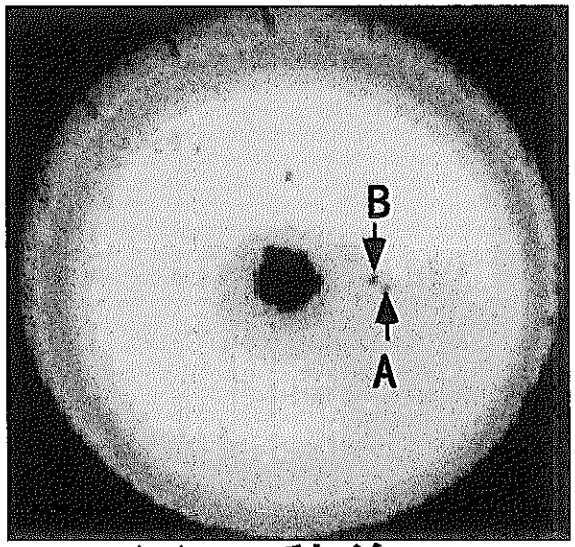
図 6.4　表面温度と内部温度の関係



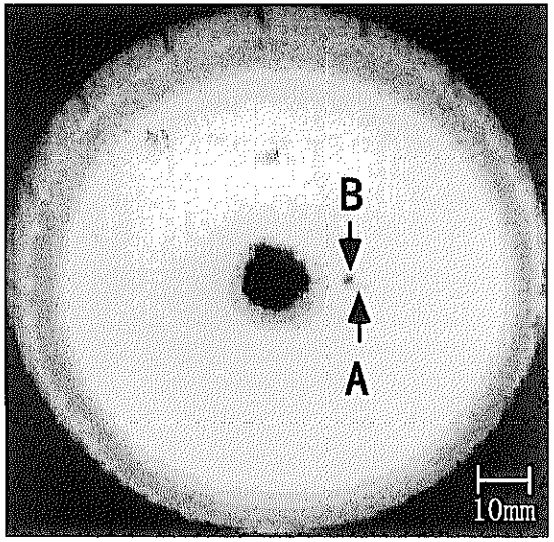
(a) 投入直後



(b) 3秒後

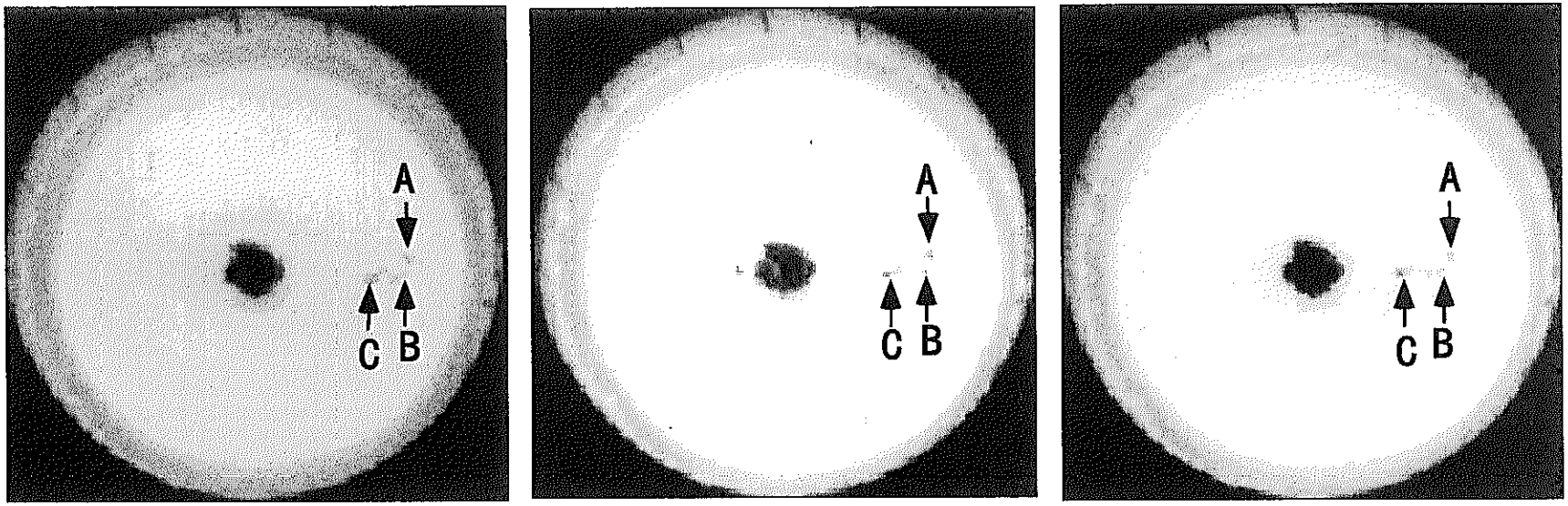


(c) 6秒後

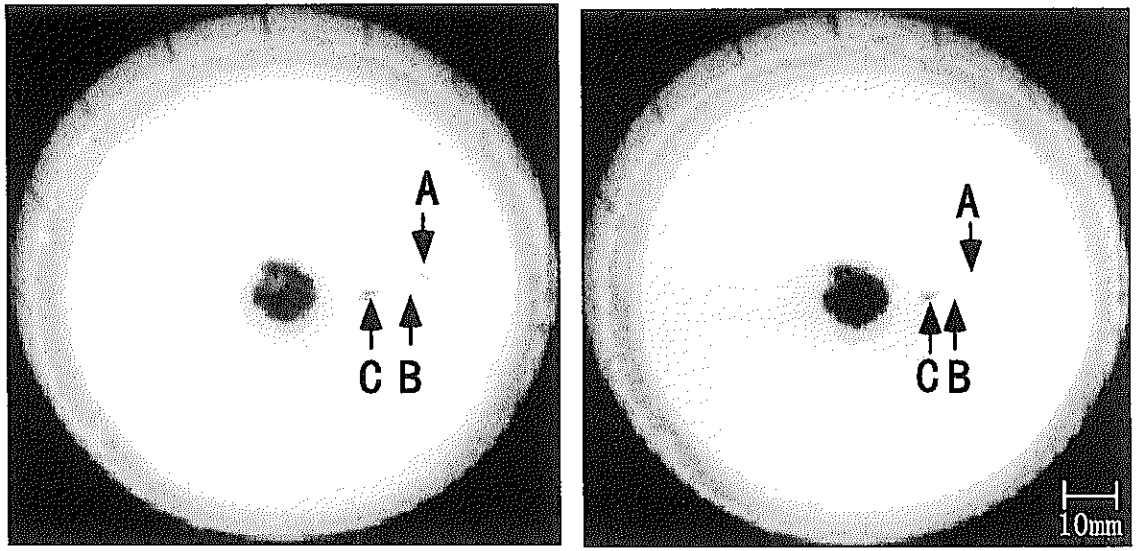


(d) 9秒後

写真6.1 トレーサー推移1

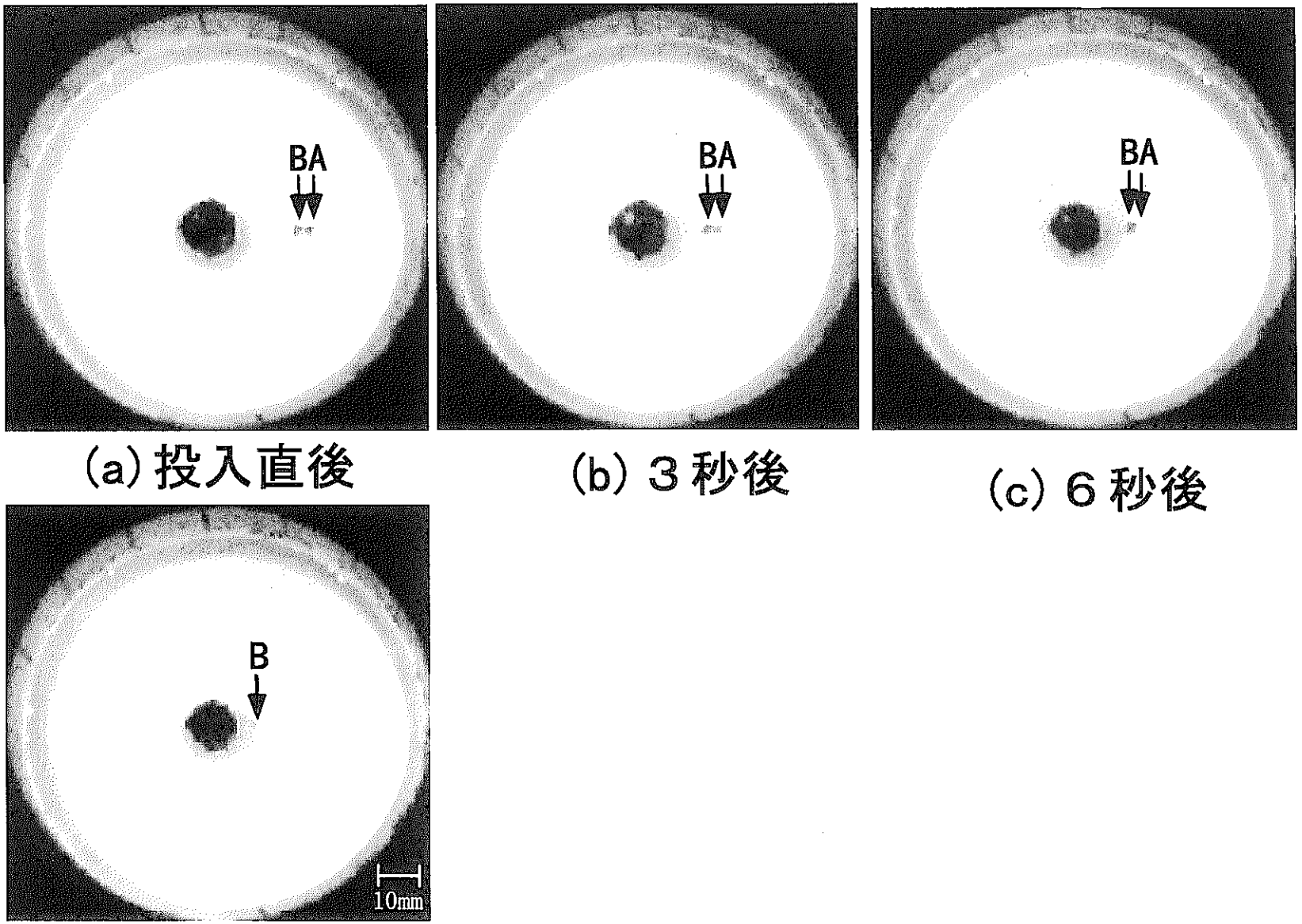


(a) 投入直後　(b) ３秒後　(c) ６秒後



(d) ９秒後　(e) １２秒後

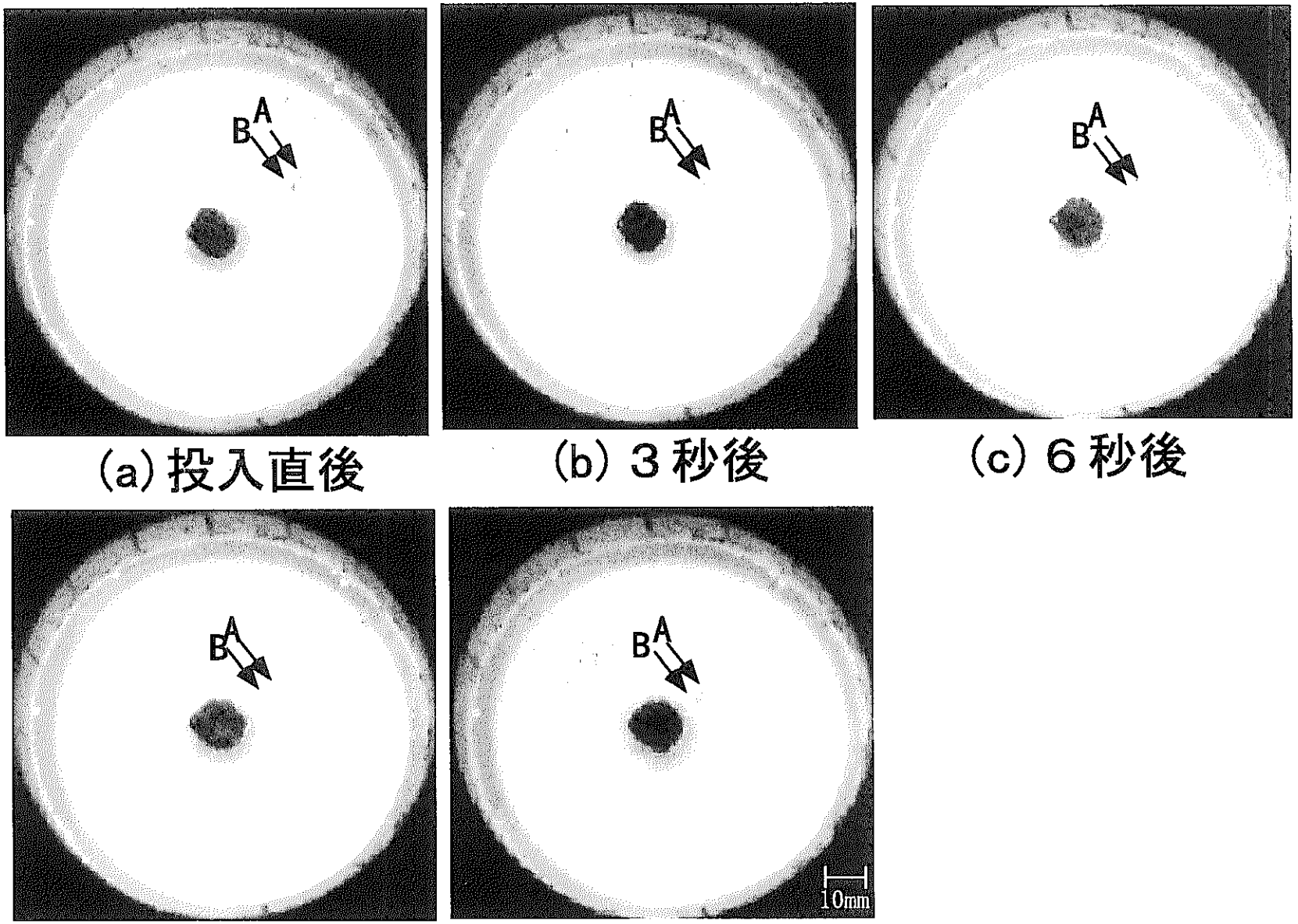
写真6.2 トレーサー推移２



(a) 投入直後　(b) 3秒後　(c) 6秒後

(d) 9秒後

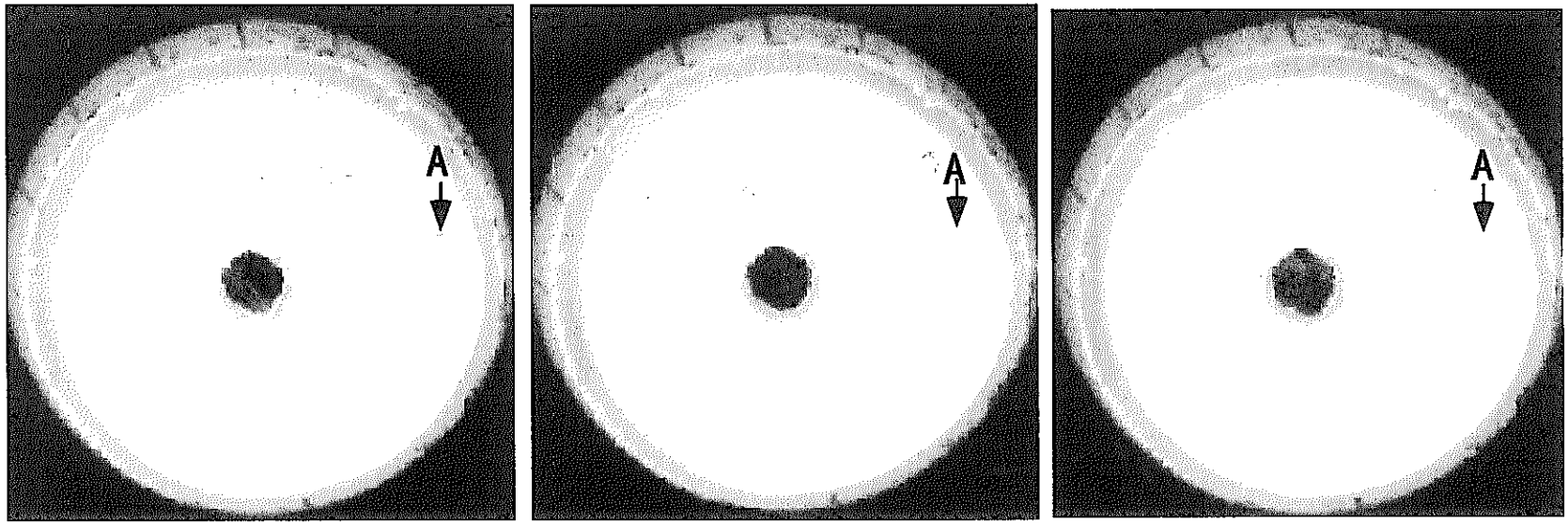
写真6.3 トレーサー推移3



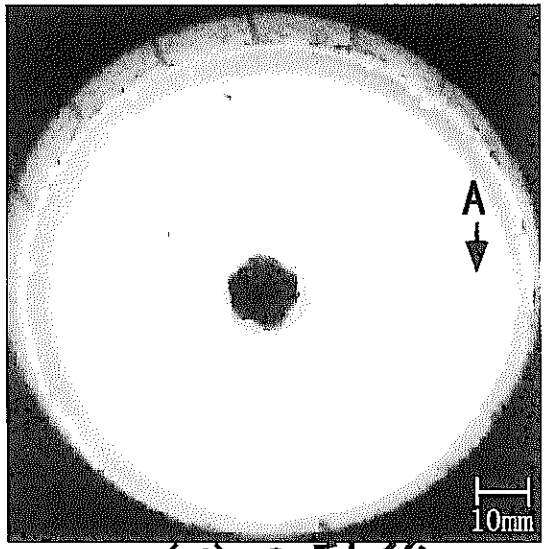
(a) 投入直後　(b) ３秒後　(c) ６秒後

(d) ９秒後　(e) １２秒後

写真6.4 トレーサー推移４

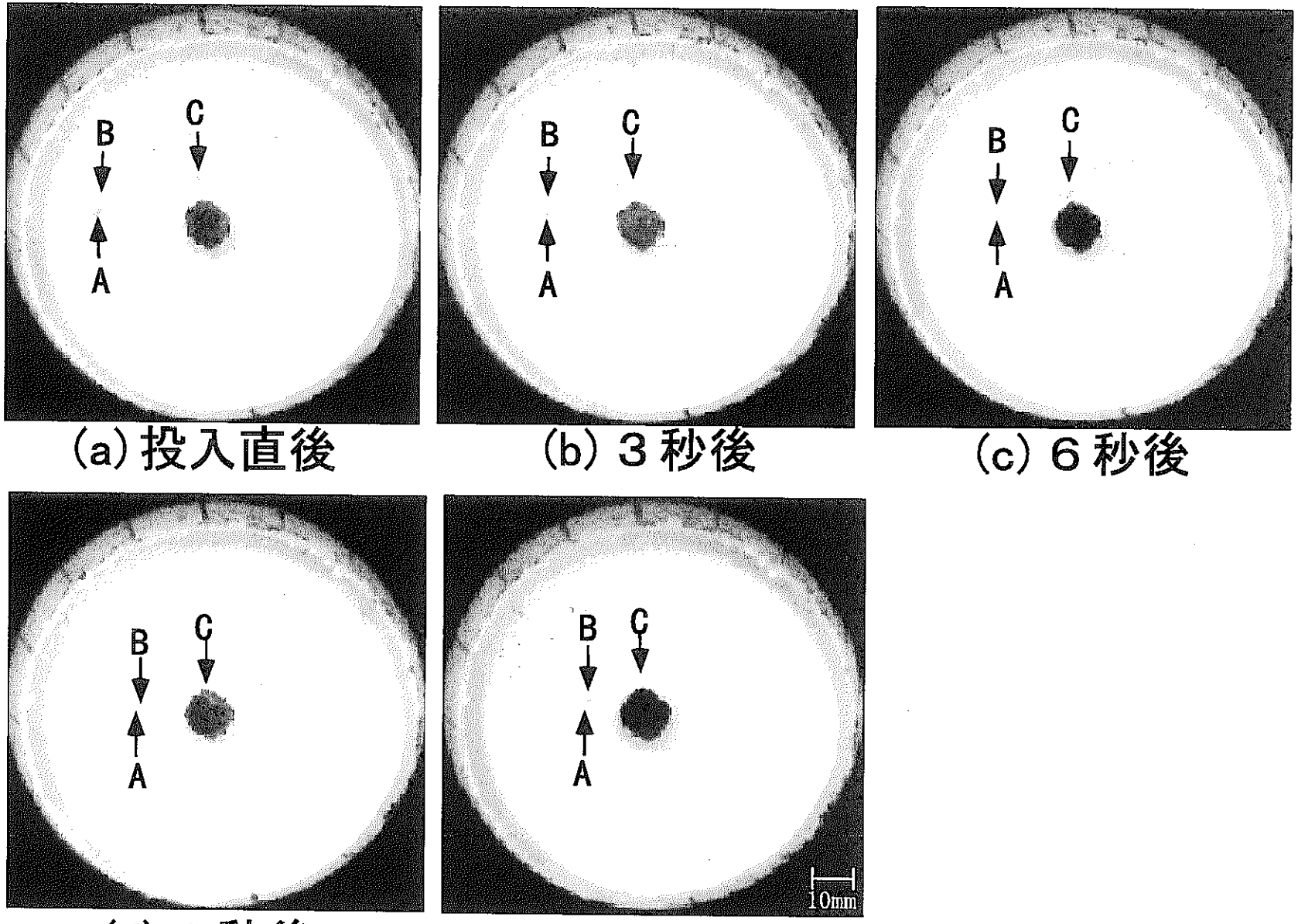


(a) 投入直後　(b) 3秒後　(c) 6秒後



(d) 9秒後

写真6.5 トレーサー推移5



(a) 投入直後　(b) ３秒後　(c) ６秒後

(d) ９秒後　(e) １２秒後

写真6.6 トレーサー推移６

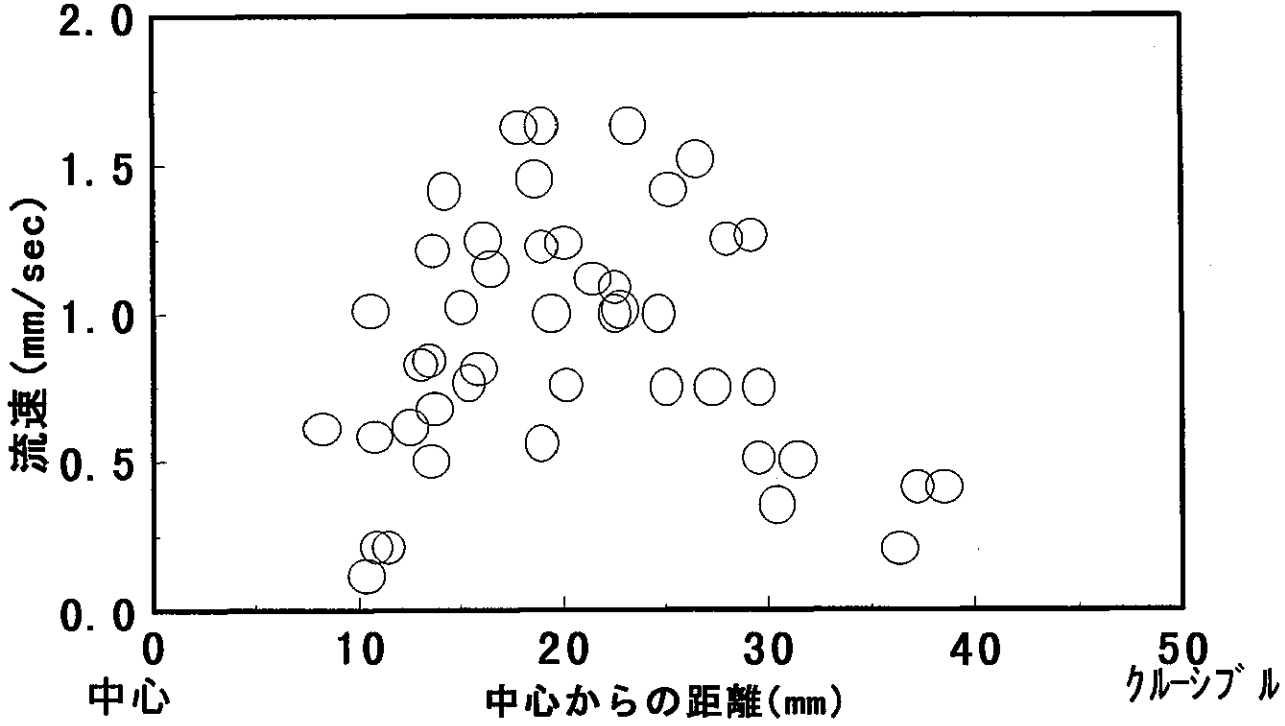


図 6.5　ガラス中心方向への表面流速分布

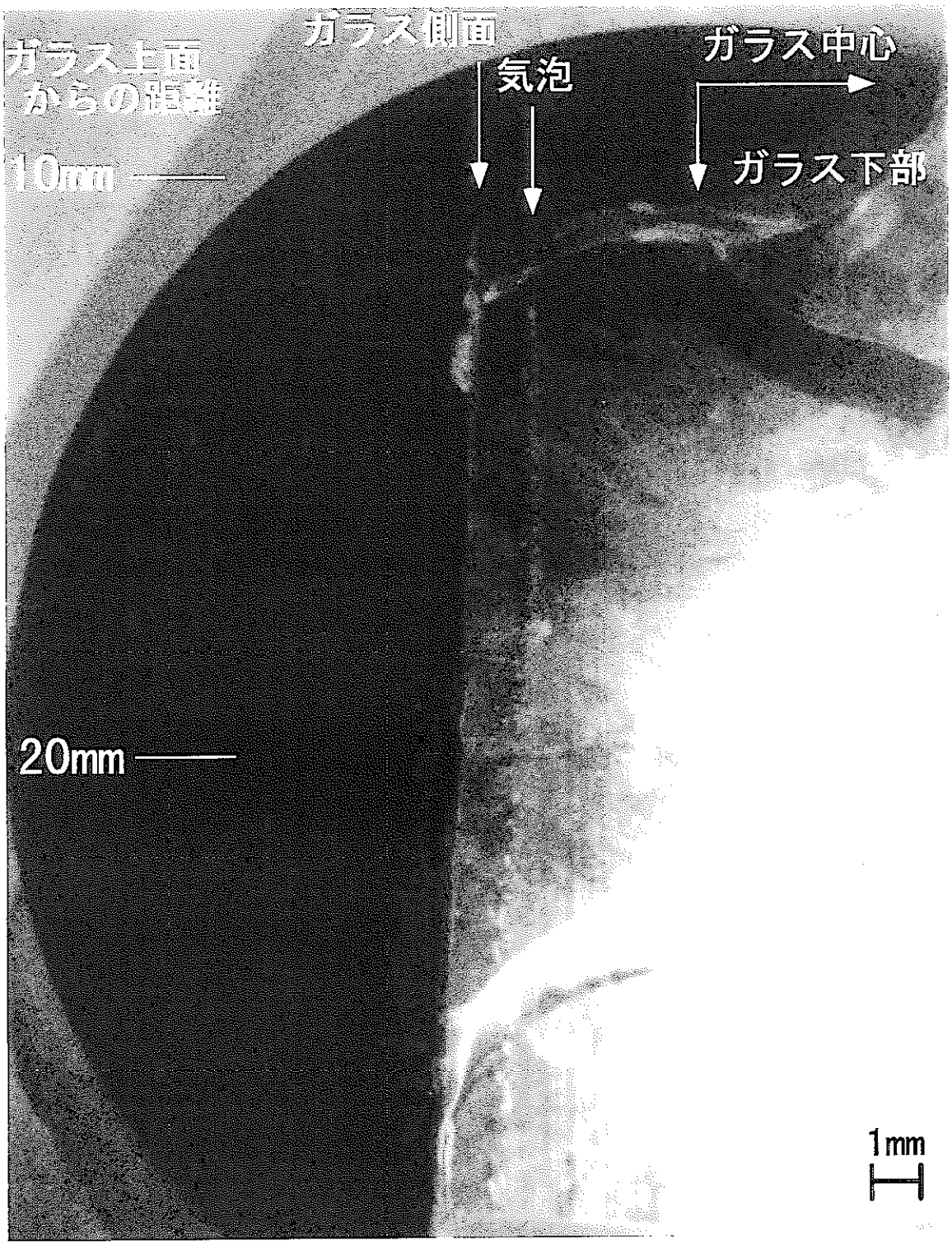


写真6.7 スカル部ガラス断面１

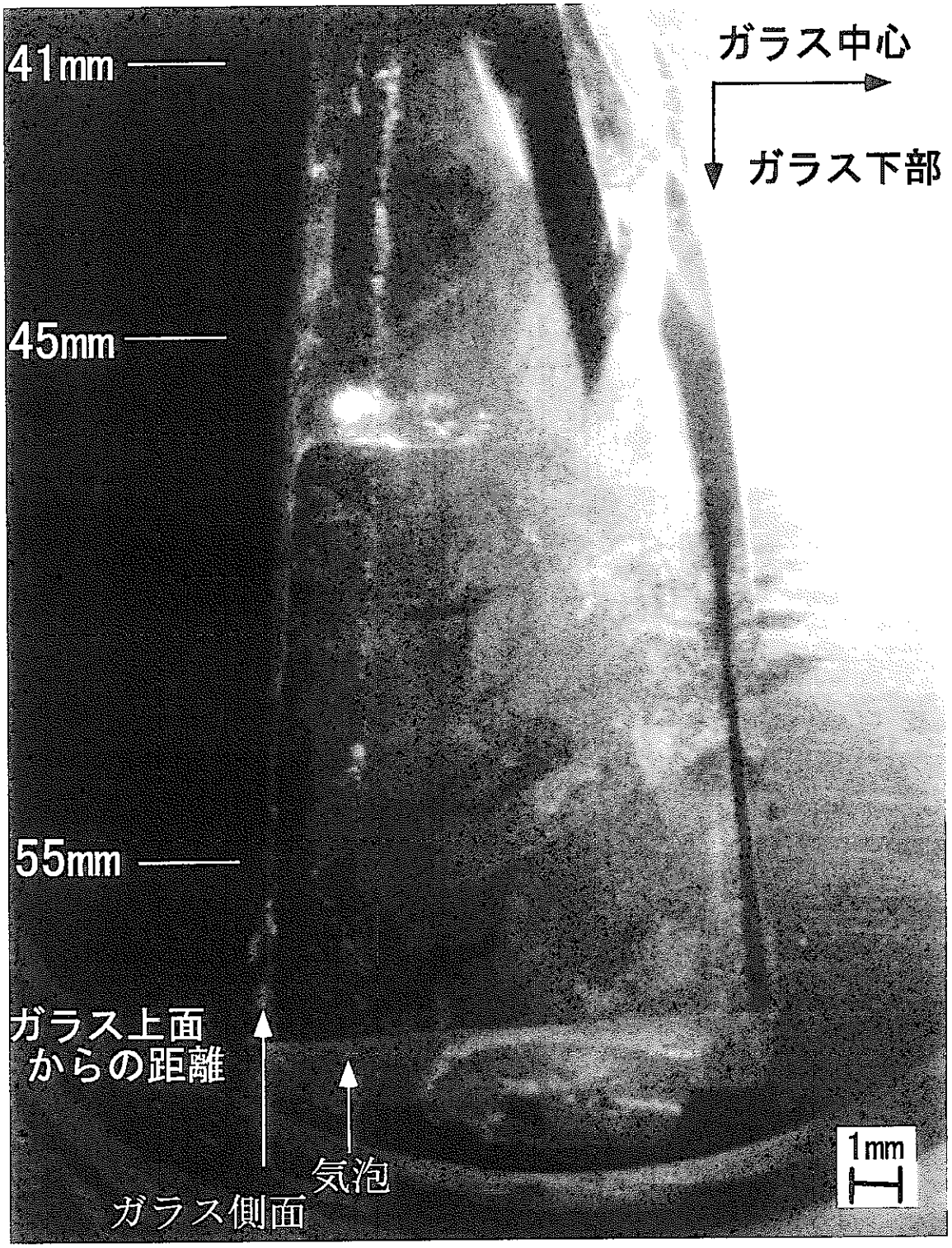


写真6.8 スカル部ガラス断面2

表 6.1　ＳＵＳ製クルーシブルにおける気泡深さ

ガラス上面からの距離(mm)	気泡深さ(mm)
11	1.13
21	1.18
41	1.42
46	1.54
56	1.65

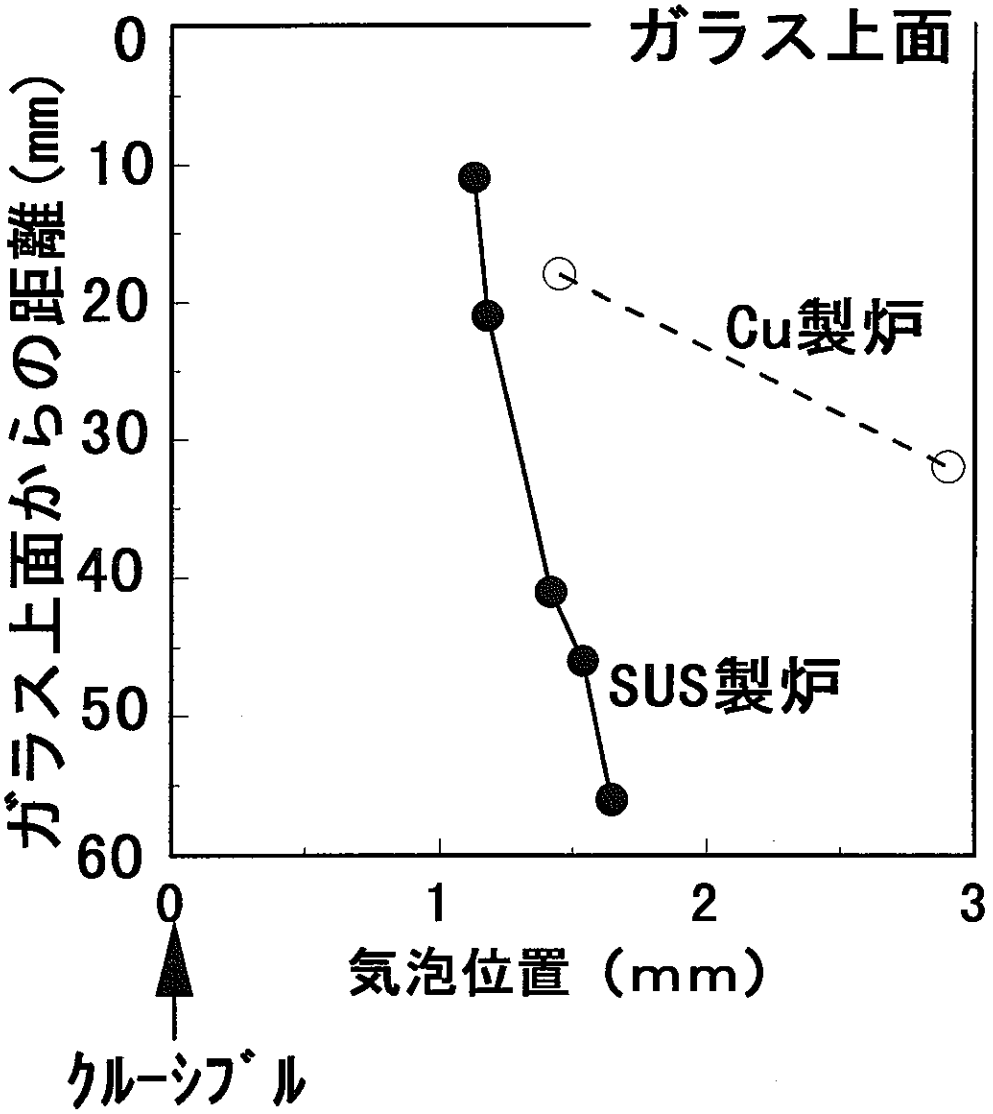


図 6.6　気泡深さ分布

7. あとがき

本試験では、SUS 製クルーシブルを用いたコールドクルーシブル誘導溶融法により、模擬廃棄物ガラスの溶融試験を実施し、インコネル製クルーシブルに対し SUS 製クルーシブルの方が加熱性能が向上していることがわかった。また熱流動解析検証用データも取得した。

今後の検討課題は更にクルーシブルを用いたガラス溶融試験を実施、温度分布や流動データをもとに解析コードの検証を進めていく必要がある。

8. 参考文献

[1]下田他：1995年秋の大会 J35

[2]下田他：コールドクルーシブル誘導溶解法によるガラス溶融基礎試験(II)
,PNC PN8410 95-374,1995年