

目 次

序	1
I プラズマの基本的事項	5
1.1 プラズマの定義と特徴	5
1.1.1 定義	5
1.1.2 特徴	7
1.2 プラズマの生成	8
1.2.1 電離と再結合	8
1) 電離現象	8
2) 再結合現象	10
3) 電離平衡	11
1.2.2 生成方法	11
1) 直流放電	11
2) 高周波放電	13
3) マイクロ波放電	14
4) 衝撃波	14
5) 高エネルギービーム	14
6) 燃 焼	15
1.3 プラズマの特徴的ふるまい	15
1.3.1 荷電粒子のふるまい	15
1) 電磁場での運動	15
2) ドリフト運動	16
3) 粒子間衝突	16
4) 壁面との干渉	17
1.3.2 電磁流体力学的ふるまい	18
1) 基礎式	18
2) 電磁流体力学での主なパラメータ	19
3) 流れの例	20
1.3.3 振動・波動現象	22
1) 振動例	22
2) アルヴェン波	22
3) 光の放出	22
1.3.4 不安定性	23
1) ソーセージ不安定とキンク不安定	23
2) 異常拡散	23
1.4 プラズマの応用	24
1.4.1 化学的利用	24
1) 熱プラズマの化学的利用	24
2) 低温プラズマの化学的利用	25
1.4.2 高熱源利用	26
1.4.3 エネルギー源・動力源への利用	27
1) 核融合	27
2) MHD発電	29
3) 電気推進	30
1.4.4 電磁波の利用	30

II	プラズマの熱物性	33
2.1	プラズマ熱物性一般	33
2.1.1	特徴	33
2.1.2	平衡物性と非平衡物性	34
1)	平衡状態	34
2)	2温度状態	35
2.2	プラズマの組成	35
2.2.1	平衡組成	35
1)	算出方法	35
2)	結果例	36
2.2.2	2温度プラズマの組成	37
2.3	プラズマの熱力学的定数	37
2.3.1	算出方法	37
1)	分配関数	37
2)	熱力学的定数の算出式	38
2.3.2	平衡状態での熱力学的 定数	39
1)	平衡エンタルピー	39
2)	平衡定圧比熱	40
3)	2温度プラズマのエンタル ピー	40
2.4	プラズマの輸送係数	40
2.4.1	算出方法	40
1)	シンプル法	40
2)	リゴラス法	41
3)	修正シンプル法	42
2.4.2	平衡状態での輸送係数	43
1)	粘性係数	43
2)	熱伝導率	43
3)	電気伝導度	45
4)	拡散係数	47
2.4.3	非平衡状態での輸送係数	47
2.4.4	磁場の影響	48
2.4.5	金属蒸気の影響	49
III	プラズマ伝熱の基礎	53
3.1	プラズマ伝熱の特徴	53
3.1.1	物性面での特徴	54
1)	クローン衝突	54
2)	電子の存在	54
3.1.2	電離反応の存在	54
3.1.3	電磁場による影響	55
3.2	プラズマ伝熱を支配する式	55
3.2.1	流体力学保存式	55
1)	基礎式	55
2)	特有な項	57
3.2.2	電磁場の式	58
3.2.3	支配する式の扱い	58
3.2.4	生成速度の扱い	59
3.2.5	物性変化の扱い	60
3.3	電磁場のない場	61
3.3.1	特徴	61
3.3.2	ヌッセルト数による方法	61
3.3.3	理論計算による方法	62

1) 基礎式	62	の発生	69
2) 2次元定常の境界層近似式	63	2) 物体への電流の流出入と伝熱	70
3) エネルギー保存式の従属変数の変換	63	3.4.2 計算式	70
3.3.4 計算、実測例	64	3.4.3 実測例	71
1) 平板への伝熱	64	1) 円柱への伝熱	71
2) 円柱への伝熱	65	2) 球への伝熱	73
3) プラズマジェット流を用いた実測	67	3) 燃焼プラズマでの伝熱	73
4) アーク陽光柱を用いた実測	68	3.5 電磁場のある場	74
5) 球への伝熱	68	3.5.1 特徴	74
3.4 電場のある場	69	3.5.2 求め方	74
3.4.1 特徴	69	1) 基本式	74
1) プラズマ中でのジュール熱		2) 流れに平行な磁場	74
		3) 流れに垂直な磁場	75
		3.6 ふく射	77
IV 各種プラズマ伝熱例	81		
4.1 プラズマジェットにおける伝熱	81	1) 基礎式	92
4.1.1 プラズマジェット流	81	2) 計算結果例	94
1) プラズマジェット流の測定例	81	3) 実験例	94
2) 解析	82	4.3 熱プラズマ流に入れた粒子の加熱	96
4.1.2 プラズマジェット流の制御	84	4.3.1 反応がない場合	96
4.1.3 プラズマジェット流から平板への伝熱	86	1) 一様プラズマ流中に置かれた粒子	96
4.2 内部プラズマ流における伝熱	87	2) 管内熱プラズマ流中での粒子の加熱	97
4.2.1 水冷管内熱プラズマ流	87	3) 多孔質管使用による粒子加熱の促進	98
1) 用いる式	87	4.3.2 反応がある場合	100
2) 計算方法および結果	88	1) 一様プラズマ流中に置かれ	
4.2.2 高周波誘導放電トーチ内流れ	92		

た石炭粒子の加熱 ……………	100	の解析 ……………	114
2) 反応性プラズマ流中にお		1) モデルと基礎式 ……………	114
ける粒子の加熱 ……………	101	2) 結 果 ……………	116
4.3.3 プラズマ溶射での伝熱 ……	102	4.5.3 陽光柱から周囲のガスへ	
4.4 希薄気体流 ……………	105	の伝熱 ……………	117
4.4.1 熱適応係数 ……………	105	4.6 低温プラズマプロセスにお	
4.4.2 プラズマの場合 ……………	106	ける伝熱 ……………	117
1) 流れが無視できる場合 ……	106	4.6.1 薄膜生成時の基板温度 ……	117
2) 流れが無視できない場合 ……	108	4.6.2 ウエハへの伝熱 ……………	119
3) 実験と計算結果との比較 ……	109	4.7 溶接・切断における伝熱 ……	121
4.5 放電における伝熱 ……………	112	4.7.1 アークジェットにおける伝	
4.5.1 陽極への伝熱 ……………	112	熱 ……………	121
1) 伝熱機構 ……………	112	4.7.2 溶 接 ……………	124
2) 陽極に入るエネルギー ……	113	4.7.3 切 断 ……………	124
4.5.2 フリーバーニングアーク			
V プラズマ伝熱における測定 ……	129		
5.1 プラズマの測定 ……………	129	5.4 電磁波法 ……………	134
5.2 探針法 ……………	129	5.4.1 マイクロ波診断法 ……	134
5.2.1 静電探針法 ……………	129	5.4.2 レーザー光による干渉法 ……	135
5.2.2 複探針法 ……………	131	5.5 熱量的方法 ……………	136
5.2.3 高周波プローブ法 ……	131	5.5.1 熱量計 ……………	136
5.2.4 探針法での問題点 ……	131	1) 水冷三重管熱量計 ……	136
5.3 光強度法 ……………	132	2) 水冷六重管熱量計 ……	137
5.3.1 線スペクトル強度測定法 ……	132	5.5.2 熱流束計 ……………	137
1) 輝線スペクトルの強度測定 ……	132	5.6 流速測定法 ……………	138
2) 連続スペクトルの強度測定法	134	5.6.1 水冷ピトー管 ……………	138
5.3.2 線スペクトル広がり法 ……	134	5.6.2 粒子追跡法 ……………	138
1) ドプラー効果による広がり ……	134	5.6.3 抗力法 ……………	138
2) シュタルク効果による広がり	134	5.6.4 LDVによる流速測定 ……	138

