

# 目 次

## 真空システム(1)(2)

はじめに .....	12-1
1 超高真空入門 .....	12-3
1.1 真空の基礎 .....	12-3
1.1.1 真空の定義 .....	12-3
1.1.2 圧力の単位 .....	12-4
1.1.3 圧力が及ぼす力 .....	12-4
1.1.4 圧力と気体分子数 .....	12-4
1.1.5 気体分子の平均速度 .....	12-5
1.1.6 気体分子の平均自由行程 .....	12-6
1.1.7 入射頻度 .....	12-6
1.1.8 気体分子と真空容器表面との衝突 .....	12-6
1.1.9 粘性流と分子流 .....	12-7
1.1.10 真空排気 .....	12-8
1.1.11 表面滞在時間とベーキング .....	12-9
1.1.12 コンダクタンス .....	12-11
1.1.13 真空システムの構成例 .....	12-12
1.1.14 超高真空システム製作の要点 .....	12-14
1.2 真空計と計測原理 .....	12-15
1.2.1 機械的現象に基づく全圧計 .....	12-15
1.2.2 気体の輸送現象に基づく全圧計 .....	12-16
1.2.3 電離現象に基づく全圧計 .....	12-17
1.2.4 分圧計 .....	12-20
1.2.5 リークテスト .....	12-23
1.2.6 気体の流れと圧力測定 .....	12-25
1.2.7 熱遷移 .....	12-25
1.3 真空ポンプと排気原理 .....	12-27
1.3.1 気体輸送式ポンプ .....	12-27
1.3.2 気体溜め込み式ポンプ .....	12-29
1.4 真空用材料 .....	12-33
1.4.1 無機材料 .....	12-33
1.4.2 有機材料 .....	12-37
1.4.3 表面洗浄 .....	12-39
1.5 真空用部品 .....	12-41
1.5.1 永久固定シール .....	12-41
1.5.2 着脱可能シール .....	12-43
1.5.3 軸シール .....	12-45
1.5.4 シール剤 .....	12-46
1.5.5 ベローズ .....	12-46
1.5.6 真空バルブ .....	12-47
1.5.7 電流導入端子 .....	12-48
1.5.8 ビューポート .....	12-48
1.5.9 配線材料 .....	12-49
1.5.10 ボルト類 .....	12-49
1.5.11 ガス導入ライン .....	12-49
1.5.12 潤滑剤 .....	12-49

<b>2 SuperKEKB の真空システム</b> .....	12-51
2.1 概要 .....	12-51
2.2 各種真空機器 .....	12-53
2.2.1 アンテチェンバー付きビームパイプ .....	12-53
2.2.2 MO フランジ .....	12-55
2.2.3 ベローズチェンバー・ゲートバルブ .....	12-56
2.2.4 真空ポンプ .....	12-58
2.2.5 コリメータ .....	12-60
2.2.6 IR の真空機器 .....	12-62
2.2.7 DR の真空機器 .....	12-65
2.3 電子雲不安定性と対策 .....	12-68
2.3.1 ECE 対策 .....	12-68
2.3.2 Phase-1 におけるECE .....	12-76
2.3.3 Phase-2 におけるECE .....	12-77
2.3.4 Phase-3 におけるECE (速報) .....	12-78
2.4 インピーダンス .....	12-79
2.4.1 ロスファクター .....	12-79
2.4.2 キックファクター .....	12-81
2.5 制御システム .....	12-84
2.5.1 システム構成 .....	12-84
2.5.2 各種制御機器 .....	12-87
2.5.3 インターロックロジック .....	12-95
2.5.4 CCG Patrol .....	12-99
2.5.5 DR の真空機器制御 .....	12-102
2.6 コミッショニングの状況 .....	12-105
2.6.1 焼き出し状況 .....	12-105
2.6.2 コリメータの稼働状況 .....	12-106
2.6.3 ダストイベント .....	12-110
2.6.4 真空機器の異常等 .....	12-112
2.6.5 真空とバックグラウンド .....	12-114
 おわりに .....	 12-117
 <b>付録A ビームと残留ガスの相互作用</b> .....	 12-118
A.1 ラザフォード散乱 .....	12-118
A.2 メラー散乱 .....	12-118
A.3 制動放射 .....	12-118
A.4 ビーム寿命 .....	12-119
A.5 イオントラッピング .....	12-119
 <b>付録B シンクロトロン放射光</b> .....	 12-120
 <b>参考文献</b> .....	 12-121

## 図目次

1	余弦則の模式図	7	35	アンテチェンバー付きビームパイプの概略	53
2	真空排気過程のモデル	8	36	ビームパイプと四重極電磁石コアの取り合い	54
3	各種ガス放出がある場合の圧力の推移	9	37	ウィグラー部のアンテチェンバー付きビームパイプ	54
4	分子が排気されるまでのモデル	10	38	無酸素銅製アンテチェンバー付きビームパイプの BPM 部	55
5	導管で接続された 2 つの容器	12	39	MR における MO フランジ	55
6	超高真空システムの構成例	13	40	MO フランジにおける真空シールの模式図	56
7	代表的な全圧計の測定圧力範囲	15	41	ベローズチェンバーにおけるフィンガー型 RF シールドの概略図	57
8	ブルドン管真空計の概略構造	16	42	損傷したフィンガー型 RF シールドの実例	57
9	絶対圧型隔膜真空計の概略構造	16	43	櫛歯型ベローズチェンバーの概略図	57
10	ピラニ真空計の概略構造	17	44	アンテチェンバー付きビームパイプ用櫛歯型ベローズチェンバー	57
11	ピラニ真空計のガス種依存性	17	45	アンテチェンバー付きビームパイプ用ゲートバルブ	58
12	水晶摩擦真空計の音叉型振動子と共振状態における交流インピーダンス	18	46	LER 1 セルの放射光パワー線密度と光子数線密度	59
13	熱陰極電離真空計の概略構造	18	47	LER 1 セルの圧力分布	59
14	逆マグネトロン型 CCG の概略構造	20	48	HER アーク部のコリメータ	60
15	リークがある場合のマススペクトル例	21	49	LER および HER 筑波直線部の新型コリメータ	61
16	ヘリウムリークディテクタの構成例	23	50	新型コリメータのヘッド	62
17	真空法 (スプレー法とフード法)	25	51	CST による新型コリメータの固有値解析結果	62
18	真空計の取付位置	25	52	IR の概略	63
19	温度の異なる真空容器	25	53	衝突点チェンバー	64
20	代表的な真空ポンプの動作圧力範囲	28	54	BPM 付きベローズチェンバー	65
21	KEKB で観測されたアルゴン不安定性	30	55	QCSL クライオスタットとビームパイプ	65
22	スパッタイオンポンプの概略	31	56	QCSR クライオスタット先端部の RVC	65
23	オーステナイト系ステンレス鋼の系統図	35	57	DR の概略	66
24	圧力に応じた表面洗浄のフローチャート	40	58	DR アーク部の構成	66
25	金属とセラミックの接合概略	42	59	Synrad3d による DR ビームパイプ内の光子分布	67
26	フランジとシール材の概略	43			
27	テーパーシールの概略	44			
28	ボルト締結の順序	45			
29	バルブの形式	47			
30	ティップオフの構成	48			
31	コンダクタンス調整方式	48			
32	ベントシステムの構成例	49			
33	Phase-3 初期における Su-perKEKB MR の概略	52			
34	MR 東トンネルアーク部	53			

60	電子雲発生のプロセス	68	84	アパチャに対するコリメータの ロスファクター	80
61	電子雲による不安定性	68	85	バンチ長に対するコリメータの ロスファクター	80
62	試験用アンテナチャンバー付きビームパイプ における RFA	69	86	アパチャに対するコリメータの キックファクター	82
63	KEKB LER における円形およびアンテナ チャンバー付きビームパイプ内の電子電流	70	87	バンチ長に対するコリメータの ロスファクター	82
64	KEKB LER における TiN コーティング 有無による電子雲密度	70	88	Phase-1 における水平方向コリメータの アパチャによる水平方向チューンシフト	83
65	TiN コーティング設備	71	89	制御システムの構成概略	85
66	TiN コーティング装置の概略	72	90	真空システムのメイン OPI	85
67	TiN コーティングを施した表面の様相	72	91	制御機器間の接続概略	86
68	TiN コーティングしたアルミ合金サンプルの SEY	73	92	CAMAC と cRIO の比較	86
69	SEY 測定部の構成	73	93	19 インチラック内の PLC ユニット	87
70	ベーキング装置	73	94	19 インチラック内の IP コントローラ	88
71	グループ構造	74	95	19 インチラック内の CCG コントローラ	88
72	KEKB LER におけるグループ有無による 電子電流	74	96	CCG 接続導管の永久磁石	89
73	KEKB LER でソレノイドコイルを設置した 円形ビームパイプにおける縦方向磁場の 有無による電子電流	74	97	19 インチラック内の NEG ポンプ活性化用 電源	89
74	LER ドリフト部のビームパイプに 設置した永久磁石と縦方向磁場分布	75	98	19 インチラック内の DA100	90
75	CLOUDLAND による LER ドリフト部の 電子密度	75	99	19 インチラック内の MW100	90
76	クリアリング電極付きビームパイプ	75	100	加速器トンネル内で使用している 流量計の内部写真	91
77	KEKB LER ウィグラー電磁石内における ビームドーズに対するビーム近傍の 電子電流	76	101	19 インチラック内の流量検出器	91
78	Phase-1 コミッショニングにおけるビーム 電流に対する垂直方向ビームサイズ	76	102	コリメータ制御システムの概略	92
79	Phase-1 コミッショニングにおけるビーム 電流に対する D03 アーク部の $P=I$	76	103	コリメータ駆動部構成	92
80	Phase-1 コミッショニングにおける電流線 密度に対する垂直方向ビームサイズ	77	104	19 インチラック内のコリメータ制御機器	92
81	Phase-2 コミッショニングにおける電流線 密度に対する垂直方向ビームサイズ	78	105	コリメータ制御の OPI	93
82	ビーム電流に対する D03 アーク部の $P=I$	78	106	コリメータおよびクロッチ部における 冷却水インターロックの構成	94
83	Phase-3 コミッショニングにおける電流線 密度に対する垂直方向ビームサイズ	78	107	QCS ビームパイプにおける冷却水 インターロックの構成	94
			108	SuperKEKB MR における粗排気の例	95
			109	主ポンプ立ち上げ時の圧力推移の例	96
			110	ラダープログラムにおけるインター ロックロジックの模式図	97
			111	ラダープログラムにおけるアボートロジックの 模式図	98
			112	ビームストッパーの制御システム	99
			113	CCG Patrol の概略図	100

114 ネットワークトリガー処理のシーケンス …	101	137 ZDLM チェンバーの概略図 ……………	114
115 CCG Patrol の OPI ……………	101	138 改良型 ZDLM チェンバーの概略図 ……………	114
116 ビームアポート時の圧力跳ねと LER ビーム電流 ……………	102	139 HER 富士直線部のテーパー型ビームパイプ	115
117 圧力跳ねによるビームアポートの例 ……………	103	140 Phase-3 における LER vacuum bump study	116
118 DR 東アーク部における主ポンプ立ち上げ時の 平均圧力の推移 ……………	104	141 Phase-3 における MR の圧力分布 ……………	116
119 SuperKEKB MR における焼き出し状況 ……………	106		
120 KEKB MR と比較した SuperKEKB MR における 焼き出し状況 ……………	106		
121 LER の筑波直線部に設置した RGA による Phase-3 における分圧の推移 ……………	107		
122 SuperKEKB DR における焼き出し状況 ……………	107		
124 Phase-2 における HER のコリメータ スタディの例 ……………	107		
123 Phase-3 における LER のコリメータ スタディの例 ……………	108		
125 Phase-3 におけるコリメータと QCS のアパチャ ……………	109		
126 D02V1 コリメータにおけるヘッド位置、 水平方向ビームポジションおよび ECL による バックグラウンド ……………	109		
127 Phase-2 コミッショニング終了後に取り外した D02V1 コリメータヘッド ……………	110		
128 EGS による各材料にビーム照射したときの 到達温度 ……………	111		
129 CCG の指示値から推定したダスト イベントの発生箇所 ……………	111		
130 ビームパイプ内から採取されたカプトンシート 上のダスト ……………	111		
131 ビーム運転時間とダストイベント ……………	112		
132 HER において発熱が見られる衝突点下流 ビームパイプの位置 ……………	112		
133 Phase-2 後に取り外した若干の発熱が 見られたベローズチェンバー ……………	113		
134 Phase-3 において発熱の見られた ベローズチェンバーの温度 ……………	113		
135 LER 日光直線部・ウィグラー区間における ビーム電流に対するフランジの温度 ……………	113		
136 HER の横方向フィードバックキッカー 近傍にある CCG で観測した圧力跳ね ……………	114		

## 表目次

1	圧力による真空の区分	3
2	真空工学における流れの分類	7
3	各温度における水分子の排気時間	10
4	熱陰極電離真空計の比感度係数	19
5	真空装置内の主なガス種	22
6	各種真空装置における許容リーク量の目安	24
7	真空ポンプの性能指標	27
9	真空用金属・合金材料のガス放出速度	33
8	真空用金属・合金材料の性質	34
10	真空用セラミック材料の性質	37
11	真空用セラミック材料のガス放出速度	37
12	真空用有機材料の性質	38
13	真空用有機材料のガス放出速度	38
14	固体潤滑剤の機械的性質	50
15	SuperKEKB のパラメータ (設計値)	52
16	SuperKEKB LER における ECE 対策	69
17	SuperKEKB LER における ロスファクターの概算	81
18	SuperKEKB MR における真空関連機器の 入出力点数	94