高エネルギー加速器セミナー OHO'19 真空システム

石橋拓弥*1

2019年9月27日

*1高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設、総合研究大学院大学・高エネルギー加速器科学研究科、 e-mail: takuya.ishibashi@kek.jp

目次

はじめに

7

2

1 超高真空入門		9
1.1 真空の基礎	• •	9
1.1.1 真空の定義	• •	9
1.1.2 圧力の単位		10
1.1.3 圧力が及ぼす力		10
1.1.4 圧力と気体分子数		10
1.1.5 気体分子の平均速度		11
1.1.6 気体分子の平均自由行程	• •	12
1.1.7 入射頻度	• •	12
1.1.8 気体分子と真空容器表面との領	 野突	12
1.1.9 粘性流と分子流	• •	13
1.1.10 真空排気	• •	14
1.1.11 表面滞在時間とベーキング .		15
1.1.12 コンダクタンス	• •	17
1.1.13 真空システムの構成例	• •	18
1.1.14 超高真空システム製作の要点	• •	20
1.2 真空計と計測原理		21
1.2.1 機械的現象に基づく全圧計 .		21
1.2.2 気体の輸送現象に基づく全圧言	∦.	22
1.2.3 電離現象に基づく全圧計		23
1.2.4 分圧計		26
1.2.5 リークテスト		29
1.2.6 気体の流れと圧力測定		31
1.2.7 熱遷移		31
1.2.8 熱的適応係数		32
1.3 真空ポンプと排気原理		33
1.3.1 気体輸送式ポンプ	• •	33
1.3.2 気体溜め込み式ポンプ		35
1.4 真空用材料	• •	39
1.4.1 無機材料	• •	39
1.4.2 有機材料	• •	43
1.4.3 表面洗浄	•••	45
1.5 真空用部品	• •	47
1.5.1 永久固定シール	•••	47
1.5.2 着脱可能シール		49
1.5.3 軸シール	• •	51

1.5.4	シール剤	52
1.5.5	ベローズ	52
1.5.6	真空バルブ	53
1.5.7	電流導入端子	54
1.5.8	ビューポート	54
1.5.9	配線材料	55
1.5.10	ボルト類	55
1.5.11	ガス導入ライン	55
1.5.12	潤滑剤	55
Su	ıperKEKB の真空システム	57
2.1 税	要	57
2.2 各	種真空機器	59
2.2.1	アンテチェンバー付きビームパ	
	17	59
2.2.2	MO フランジ	61
2.2.3	ベロースチェンパー・ケートパ	
0.0.4		62
2.2.4		64 62
2.2.5		60
2.2.0	IR の具空機器	08
 のの 一種	DR の具空機 G · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	74
2.3 电 		74
2.3.1	ECE 内東 Dhage 1 における ECE	14 89
2.3.2	Dhase 2 / to 1 Z ECE	02 83
2.3.3	Filase-2 における LCE	00 04
2.3.4	Γ Hase-3 における LCE (述取)	04 85
2.4 1		85
2.4.1	エハノリンク ······· キックファクター	87
2.4.2 2.5 制	御システム	90
2.5 1	システム構成	90
2.5.2	各種制御機器	93
2.5.3	インターロックロジック	101
2.5.4	CCG Patrol	105
2.5.5	DR の真空機器制御	108
2.6 ⊐	ミッショニングの状況	111
2.6.1	焼き出し状況	111
2.6.2	コリメータの稼働状況	112
2.6.3	ダストイベント	116

2.6.	4 真空機器の異常等	118
2.6.	5 真空とバックグラウンド	120
	おわりに	123
付録 A	ビームと残留ガスの相互作用	124
A.1	ラザフォード散乱	124
A.2	メラー散乱	124
A.3	制動放射	124
A.4	ビーム寿命	125
A.5	イオントラッピング	125
付録 B	シンクロトロン放射光	126
	参考文献	127

図目次

1	余弦則の模式図	13
2	真空排気過程のモデル	14
3	各種ガス放出がある場合の圧力の	
	推移	15
4	分子が排気されるまでのモデル	16
5	導管で接続された2つの容器	18
6	超高真空システムの構成例	19
7	代表的な全圧計の測定圧力範囲	21
8	ブルドン管真空計の概略構造	22
9	絶対圧型隔膜真空計の概略構造	22
10	ピラニ真空計の概略構造	23
11	ピラニ真空計のガス種依存性	23
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	24
13	熱陰極電離真空計の概略構造	24
14	逆マグネトロン型 CCG の概略構造	26
15	リークがある場合のマススペクト	
	ル例	27
16	ヘリウムリークディテクタの構成例	29
17	真空法(スプレー法とフード法) .	31
18	真空計の取付位置	31
19	温度の異なる真空容器......	31
20	代表的な真空ポンプの動作圧力範囲	34
21	KEKB で観測されたアルゴン不安	
	定性	36
22	スパッタイオンポンプの概略	37
23	オーステナイト系ステンレス鋼の	
	系統図	41
24	圧力に応じた表面洗浄のフローチ	
	ヤート	46
25	金属とセラミックの接合概略	48
26	フランジとシール材の概略	49
27	テーパーシールの概略	50
27 28	テーパーシールの概略	$50\\51$
27 28 29	テーパーシールの概略	50 51 53
27 28 29 30	テーパーシールの概略	50 51 53 54

32	ベントシステムの構成例 55
33	Phase-3 初期における Su-
	perKEKB MR の概略 58
34	MR 東トンネルアーク部 59
35	アンテチェンバー付きビームパイ
	プの概略 59
36	ビームパイプと四重極電磁石コア
	の取り合い 60
37	ウィグラー部のアンテチェンバー
	付きビームパイプ 60
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 61
39	MR における MO フランジ 61
40	MO フランジにおける真空シール
	の模式図 62
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 63
42	損傷したフィンガー型 RF シール
	ドの実例 63
43	櫛歯型ベローズチェンバーの概略図 63
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 63
45	アンテチェンバー付きビームパイ
	プ用ゲートバルブ 64
46	LER 1 セルの放射光パワー線密度
	と光子数線密度 65
47	LER 1 セルの圧力分布 65
48	HER アーク部のコリメータ 66
49	LER および HER 筑波直線部の新
	型コリメータ 67
50	新型コリメータのヘッド 68
51	CST による新型コリメータの固有
	值解析結果 68
52	IR の概略 69
53	衝突点チェンバー 70
54	BPM 付きベローズチェンバー 71
55	QCSL クライオスタットとビーム
	パイプ 71
56	QCSR クライオスタット先端部の
	RVC

57	DR の概略	72
58	DR アーク部の構成	72
59	Synrad3d による DR ビームパイ	
	プ内の光子分布..........	73
60	電子雲発生のプロセス	74
61	電子雲による不安定性	74
62	試験用アンテチェンバー付きビー	
	ムパイプにおける RFA	75
63	KEKB LER における円形および	
	アンテチェンバー付きビームパイ	
	プ内の電子電流	76
64	KEKB LER における TiN コーテ	
	ィング有無による電子雲密度	76
65	TiN コーティング設備	77
66	TiN コーティング装置の概略	78
67	TiN コーティングを施した表面の	
	様相	78
68	TiN コーティングしたアルミ合金	
	サンプルの SEY	79
69	SEY 測定部の構成	79
70	ベーキング装置	79
71	グルーブ構造..........	80
72	KEKB LER におけるグルーブ有	
	無による電子電流	80
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	80
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	81
75	CLOUDLAND による LER ドリ	
	フト部の電子密度	81
76	クリアリング電極付きビームパイプ	81
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	82
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	82

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 <i>P</i> / <i>I</i>	82
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	83
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	84
82	ビーム電流に対する D03 アーク部	
	$\mathcal{O} P/I$	84
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	84
84	アパチャに対するコリメータのロ	
	スファクター	86
85	バンチ長に対するコリメータのロ	
	スファクター	86
86	アパチャに対するコリメータのキ	
	ックファクター	88
87	バンチ長に対するコリメータのロ	
	スファクター	88
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	89
89	制御システムの構成概略.....	91
90	真空システムのメイン OPI	91
91	制御機器間の接続概略.....	92
92	CAMAC と cRIO の比較	92
93	19 インチラック内の PLC ユニット	93
94	19 インチラック内の IP コント	
	ローラ	94
95	19 インチラック内の CCG コント	
	ローラ	94
96	CCG 接続導管の永久磁石	95
97	19 インチラック内の NEG ポンプ	
	活性化用電源	95
98	19 インチラック内の DA100	96
99	19 インチラック内の MW100	96

100	加速器トンネル内で使用している	
	流量計の内部写真	97
101	19 インチラック内の流量検出器	97
102	コリメータ制御システムの概略	98
103	コリメータ駆動部構成	98
104	19 インチラック内のコリメータ制	
	御機器	98
105	コリメータ制御の OPI	99
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 .	100
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	100
108	SuperKEKB MR における粗排気	
	の例	101
109	主ポンプ立ち上げ時の圧力推移の例	102
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	103
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	104
112	ビームストッパーの制御システム .	105
113	CCG Patrol の概略図	106
114	ネットワークトリガー処理のシー	
	ケンス	107
115	$\operatorname{CCG}\operatorname{Patrol}\operatorname{\mathcal{O}}\operatorname{OPI}\ldots\ldots\ldots$	107
116	ビームアボート時の圧力跳ねと	
	LER ビーム電流	108
117	圧力跳ねによるビームアボートの例	109
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	110
119	SuperKEKB MR における焼き出	
	し状況	112
120	KEKB MR と比較した Su-	
	perKEKB MR における焼き出し	
	状況	112
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	113
122	SuperKEKB DR における焼き出	
	し状況	113

124	Phase-2 における HER のコリ
	メータスタディの例113
123	Phase-3 における LER のコリメー
	タスタディの例 114
125	Phase-3 におけるコリメータと
	QCS のアパチャ 115
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115
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 116
128	EGS による各材料にビーム照射し
	たときの到達温度117
129	CCG の指示値から推定したダスト
	イベントの発生箇所117
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 117
131	ビーム運転時間とダストイベント . 118
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 118
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 . 119
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 119
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 119
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120
137	ZDLM チェンバーの概略図 120
138	改良型 ZDLM チェンバーの概略図 120
139	HER 富士直線部のテーパー型ビー
	ムパイプ 121
140	Phase-3 における LER vacuum
	bump study
141	Phase-3 における MR の圧力分布 . 122

表目次

1	圧力による真空の区分	9
2	真空工学における流れの分類	13
3	各温度における水分子の排気時間	16
4	熱陰極電離真空計の比感度係数	25
5	真空装置内の主なガス種.....	28
6	各種真空装置における許容リーク	
	量の目安	30
7	タングステン表面に対する希ガス	
	分子の熱的適応係数 [6]	32
8	種々の表面に対する He の熱的適	
	応係数 [6]	32
9	真空ポンプの性能指標......	33
11	真空用金属・合金材料のガス放出	
	速度	39
10	真空用金属・合金材料の性質	40
12	真空用セラミック材料の性質	43
13	真空用セラミック材料のガス放出	
	速度	43
14	真空用有機材料の性質......	44
15	真空用有機材料のガス放出速度	44
16	固体潤滑剤の機械的性質.....	56
17	SuperKEKB のパラメータ(設計	
	值)	58
18	SuperKEKB LER における ECE	
	対策	75
19	SuperKEKB LER におけるロス	
	ファクターの概算	87
20	SuperKEKB MR における真空関	
	連機器の入出力点数	90

はじめに

本テキストは大きく分けて2つの章から構成され ている。

1章は加速器の真空に限定することなく、超高真 空システム全般を取り扱う上で持っていたい知識・ 事柄についてまとめた。

私は日本表面真空学会で真空工学関連講座の講師 等を務める機会があるのだが、そこで受講生から、 「今使用している真空システムは研究室や部署に配 属された時点で既に存在しているもので、マニュア ル通りボタンを押せば目標の圧力が実現されるよう になっていた」という話をよく聞く。そのような境 遇で真空システムのトラブルや、新たに真空システ ムを設計するような機会に遭うと、どこからどう手 をつけて良いのか、何に配慮して事を進めれば良い のか分からないということが当然起きてしまう。そ して、これが動機となって講座に参加したという方 が少なくない。

また、過去の OHO のテキストを改めて読み直し たところ、実務を念頭に置いて書かれた内容が少な い印象を受けたため、この章では私が講師を務めた 真空工学関連講座(例えば、[1–4])で使用している スライド等を参考に、実務を意識した実践的な内容 を目指した。

当セミナーは「高エネルギー加速器セミナー」の ため、加速器に限らない内容を書くことには少し躊 躇したが、このような内容は真空に関わっているよ り多くの方々に役立つかと思い、書き進めた。この 章を一読しておくと、次の SuperKEKB に関する 真空システムの章もスムースに読み進めることがで きるだろう。

また、この章にはいくつか問題を載せた。どの問 題も本文に登場する式等を使って、それほど時間も かけずに解くことができるかと思う。実際に手を動 かさないと知識はなかなか定着しないので、ぜひ一 度解いてみて欲しい。

なお、この章の内容は真空工学を広く浅く解説し たものであり、各論はどれを取っても深淵である。 さらに勉強を進めたい方は真空工学に関する教科書 等を紐解いていただきたい [4–13]。また、日本表面 真空学会 [14] への入会、および学会が開催する各種 講座 [15] への参加も理解を深める一助になるため、 おすすめできる。

2章は SuperKEKB の真空システムに的を絞っ て解説している。特に、OHO シリーズでは真空シ ステムにおけるコリメータ、電子雲不安定性への具 体的な対策、制御システムについて書かれたものが 少ないため、これらについては重点的に解説してい る。この章は OHO シリーズのテキストでこれまで に書かれた事柄とはできる限り重複しないように書 いたつもりである。SuperKEKB の真空に関する ビーム寿命やシンクロトロン放射光についての話 題は、OHO'94 末次 [16]、OHO'04 柴田 [17] にお いて、KEKB の真空についてではあるが述べられ ており、基本的にこの内容を SuperKEKB にも同 様に適用することができる。そのため、これらの事 柄については付録で簡単にまとめるだけに留めて いる。

その他、加速器に関する真空をさらに勉強したい 方は、これまでの OHO のテキストを web からダ ウンロードできるので [18]、これらを参照していた だきたい。ごく簡単にではあるが、過去の真空に関 わるテキストを紹介すると、OHO'15 谷本 [19] で は cERL における真空システムについて実例を交 えながら解説されており、光刺激脱離の理論モデル や真空容器の 3D モデル内の圧力分布を計算するソ フトウェア Molflow+ [20]、NEG コーティングに ついても記述されている。OHO'15 魚田 [21] では J-PARC の主リングにおける真空システムについ て実例を交えながら解説されている。OHO'09 金 澤 [22] では蓄積リングにおける真空工学全般に関 して解説されており、表面に吸着している分子の排 気過程を理論モデルによって理解する試みがされて いる。OHO'01 齊藤 [23] では加速器における真空 工学全般に関する解説、特に真空用材料および表面 でのガス吸着・放出について詳しく書かれている。 OHO'01 金正 [24] では大強度陽子加速器における ビームパイプ、特にセラミック製ビームパイプの設 計について詳しく書かれている。OHO'93 堀 [25]

では放射光リングにおける真空システムについて実 例を交えながら解説されており、光刺激脱離および 電子刺激脱離を実験ラインで測定した例等が紹介さ れている。OHO'90 齊藤 [26] では真空中の放電に ついて解説されている。OHO'87 小林 [27] では蓄 積リングにおける真空システム全般について解説 されており、特に圧力特性曲線の計算方法や、これ による真空システムの総合的評価について詳しく 書かれている。低エミッタンスリングにおけるビー ムと残留ガスの相互作用、ビーム寿命については、 OHO'91 中村 [28] や OHO'86 坂中 [29] を参照して いただきたい。ビームと残留ガスの相互作用による ビームエミッタンスの増加については、OHO'91 金 澤 [30] を参照していただきたい。

1 超高真空入門

この章では加速器における真空に限定せず、超高 真空システム全般を取り扱う上で最低限必要と思わ れる事柄を解説する。

1.1 真空の基礎

1.1.1 真空の定義

ー般に産業等で利用されている真空は、JIS (Japanese Industrial Standards、日本工業規格) で、「通常の大気圧より低い圧力の気体で満たされ た空間の状態」と定義されており [36]、圧力が真空 を測る指標として使用される。

圧力とはある物体に単位面積あたりに働く力で あり、L⁻¹MT⁻²の次元を持つ。SI (international system of units、国際単位系)では長さ L、質量 M、時間 T の各次元はそれぞれ、m、kg、s に対応 し、圧力の単位は Pa (パスカル)である。この単 位名はパスカルの原理等で知られる Blaise Pascal (1623–1662) に由来し、1 Pa = 1 N·m⁻² である。

問)SI単位系における圧力の単位 Pa の次元が、
 L⁻¹MT⁻² であることを確認せよ。

この圧力は、空間を運動する膨大な数の気体分子 がある物体へ衝突した際の力の総和に由来してお り、温度一定の環境下で気体分子数が減れば圧力が 下がることが直感的にも推測できる。標準大気圧は 1 atm = 101325 Pa = 1013 hPa と定義される(単 位の接頭辞 h はヘクトと読み、10² を表す)。JIS による真空の定義で、「通常の大気圧」と記述され ている通り、標準大気圧以下の圧力でも環境によっ ては真空とは呼べないことがある。例えば、富士山 頂における気圧は通常 630 hPa 程度であり、これ より低い圧力の気体で満たされた空間の状態が真空 と呼べる。

さらに JIS では表 1 のように真空を圧力によっ て区分けしている (大まかにではあるが各区分にお ける利用分野も併記した)。少しややこしいが、圧 力が低くなるにつれて空間の残留気体数は少なくな り、言わば真空の純度が高くなると一般的には言え るため、区分名に「高」や「high」という言葉が入っ てくる。必要なビーム寿命等の条件にもよるが、一 般的に加速器では超高真空以下の圧力領域を利用 する。

日常、真空度という言葉をよく耳にすることが あるが、真空度という物理量はない。「真空度が高 い」と言われると、それが「圧力が高い」と「真空 の純度が高い」のどちらの状態を指しているのか分 からず、混乱してしまうこともある。そのため、用 語は真空度ではなく圧力に統一して議論するべきで ある。

現在は JIS と ISO(International Organization for Standardization、国際標準化機構)規格で超高 真空(ultra high vacuum、UHV)の定義が同一で あるが、かつては UHV の定義がアメリカ合衆国で $10^{-7}-10^{-10}$ Pa、ヨーロッパで $10^{-6}-10^{-10}$ Pa と異 なっていた。また、JIS では定義されていないが、 日本国内では 10^{-9} Pa 以下を極高真空(extreme high vacuum、XHV)と呼ぶことがあり、アメリ カ合衆国では 10^{-10} Pa 以下の圧力で定義されてい

表1 圧力による真空の区分

区分名	対応する英語名	圧力範囲	主な利用分野
低真空	low (rough) vacuum (LV)	$10^510^2\mathrm{Pa}$	空調機器
中真空	medium vacuum (MV)	$10^2 - 10^{-1} \mathrm{Pa}$	掃除機、真空乾燥、真空包装
高真空	high vacuum (HV)	10^{-1} – 10^{-5} Pa	蛍光灯、放電管、蒸着
超高真空	ultrahigh vacuum (UHV)	10 ⁻⁵ Pa 以下	ブラウン管、電子顕微鏡、加速器

る。このように UHV/XHV の定義は国によって異 なる場合もあるため、論文や海外製品のカタログ等 を参照する際は注意が必要である。

1.1.2 圧力の単位

前述の通り、国際標準では圧力の単位として Pa を用いることになっているが、この単位の他にも歴 史的理由等から次の非 SI 単位系が現在も使用され ている。

- Torr 水銀柱 1 mm の質量を基準にした単位。読 み方はトルで、トリチェリの真空等で知られ る Evangelista Torricelli (1608–1647)に由来。 水銀柱ミリメートルと完全に同一の定義で、 1 Torr = 1 mmHg = 133 Pa。
- bar CGS 単位系 (長さ cm、質量 g、時間 s) にお ける単位で、1 bar = 1 dyn · cm⁻² = 10⁵ Pa。 dyn (ダイン) は CGS 単位系における力の単 位。10⁻³ bar である mbar はかつて気象分野 でよく使われていた。
- atm 海面での大気圧を基準とした単位で、大気 を意味する atmosphere に由来。標準値として 1 atm = 101325 Pa = 760 Torr と定義されて いる。
- psi FPS 重力単位系(長さ in、重量 lbf、時間 s) における単位。1 平方インチあたりに1 ポンド 重の力が作用する圧力。1 psi = 1 lbf · in⁻² = 6895 Pa。

この他にも圧力の単位として、CGS 重力単位系の gf・ cm^{-2} 、FPS 単位系の pdl・ in^{-2} (pdl は FPS 単位系における力の単位で、パウンダルと読む)、 MKS 重力単位系の kgf・ m^{-2} が使われることが ある。

非 SI 単位系の中でも Torr 、mbar が真空機器に おいては現在でもよく使用される。Torr、mbar の 指示値に 10² を掛ければ、おおよそ Pa に換算で きることを覚えておくと便利である(この換算にお いて mbar では誤差はないが、Torr では約 33% の 誤差が出る)。また、関数電卓や web(例えば [37]) 等にある単位換算ツールを利用すると簡単に正確な 単位変換ができる。

問) Torr、 bar、 psi を Pa に変換せよ。水銀の比重を $1.3595 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、重力加速度を $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 1 ポンドを 0.4536 kg、 1 インチを 0.0254 m とす る。

1.1.3 圧力が及ぼす力

質量 m、重力加速度 $g = 9.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ とすると、 運動方程式は F = mg であることから、標準大気 圧 1.013×10^5 Pa で単位面積あたりにかかる力は、 約 10523 kg もの質量に相当する。このように大気 圧によって非常に大きな力が真空容器には加わるこ とから、真空容器等を設計する際には強度(容器の 厚さや固定方法等)を十分に検討する必要がある。

例えば、ICF152 規格のビューポート (view port) は窓の直径が約 100 mm で、ここには 81.2 kg の質 量に相当する力が加わる。そのため、この力に十分 耐えられるようにビューポートは設計されている。 ただし、ビューポートは逆方向からの力には弱く、 ビューポートを使用している真空容器を加圧すると 簡単に窓が破損してしまうので注意が必要である。

問)真空装置の外部が1 atm、内部が0.01 atm と し、この装置で使用している直径400 mmのフラ ンジに大気圧よりかかる力を求めよ。また、その力 に相当する質量はいくらか求めよ。

1.1.4 圧力と気体分子数

気体分子数 N [molecules] は次の理想気体の状態 方程式で計算することができる。

$$pV = NkT \tag{1}$$

ここで、圧力 p[Pa]、体積 V[m³]、ボルツマ ン定数 (Boltzmann constant) $k = 1.381 \times 10^{-23}$ [J·K⁻¹·molecules⁻¹]、温度 T[K] である。 圧力 1.0×10^5 Pa、温度 298 K (25 °C)、体積 1 m³ とすると、この容器 (空間)の中にある気体分子の 数は 2.4×10^{25} molecules となる。先で述べた大き な力は、この膨大な数の気体分子が及ぼす力の総和 に起因している。また、温度と体積を一定として圧 力を 1 Pa まで排気すると、式 (1) で圧力と気体分 子数が比例関係にあることからも、容器内の気体分 子数は 2.4×10^{20} molecules に減少する。

なお、個数は無次元量のため通常は書かかない が、本テキストでは明示的に単位に個数を書いてお り、気体分子数は [molecules]、光子数は [photons]、 電子数は [electrons]、イオンの数は [ions] と区別し ている。

物質量 (mol、モル)を使って議論する場合、物質 量 n_M [mol]、気体定数 $R = 8.315 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ を使った次の状態方程式を使った方が便利である。

$$pV = n_M RT \tag{2}$$

気体分子数を使った式 (1) では単位の分母に個数 (molecules) が入ったボルツマン定数が、物質量を 使った式 (2) では単位の分母に物質量が入った気体 定数が現れる。

問) ボルツマン定数 k と気体定数 R は、アボ ガドロ定数 (Avogadro constant) $N_{\rm A} = 6.02 \times 10^{23}$ molecules · mol⁻¹ を使って $R = kN_{\rm A}$ とかけ る。これにより式 (1) から式 (2) を導け。

真空工学における流量は、単位時間にある面積 を通過する pV 値 で定義し、これにより議論さ れることが多い。pV 値 は式 (1)の左辺等に現 れ、平衡状態の系では一定値をとり、エネルギー の次元を持つ。SI 単位系における pV 値による 流量は $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ であるが、非 SI 単位系の mbar · L · s^{-1} や Torr · L · s^{-1} が使われることも ある。本テキストにおける流量は SI 単位系の pV値 による定義を使用する。

問) 1 mbar · L · s⁻¹ および 1 Torr · L · s⁻¹ を $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ に換算せよ。

この他に、単位時間にある面積を通過する体積、 気体分子数、物質量等で定義した流量が使用され ることもある。例えば、ガス導入システムで使用 されるフローメーターやバリアブルリークバルブ (variable leak valve)等の機器では、sccm(standard cubic centimeters per minute)や slm (standard liter per minute)が製品仕様として用いられるこ とがある。これらの流量は標準状態 (0 °C、1 atm) において、1 分間にある面積を通過する体積で定義 される。温度 T [K] における sccm は、

$$1 \operatorname{sccm} = \frac{101325 \operatorname{Pa} \times 10^{-6} \operatorname{m}^{3}}{60 \operatorname{s}} \frac{T}{273.15 \operatorname{K}}$$
$$\approx 6.18 \times 10^{-6} T \left[\operatorname{Pa} \cdot \operatorname{m}^{3} \cdot \operatorname{s}^{-1} \right] \quad (3)$$

であり、1 slm はこれの 10³ 倍である。フローメー タ等は室温で使用することも多いため、25 ℃、 1 atm での流量を表示する機種もあり、注意が必要 である。

問) 式 (1)、(2) を用いて、1 Pa · m³ · s⁻¹ を molecules · s⁻¹ および mol · s⁻¹ に換算せよ。温 度は 25 ℃ とする。

1.1.5 気体分子の平均速度

熱平衡状態にある気体分子の速度は、マクスウ ェルーボルツマンの速度分布(Maxwell-Boltzmann velocity distribution)と呼ばれる、速度空間にお ける確率密度分布に従う。この統計平均は平均速度 \bar{v} [m·s⁻¹] と呼ばれ、気体分子速度の代表値として 使用される。

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \propto \sqrt{\frac{\Xi}{\Xi}}$$
 (4)

ここで気体分子 1 個あたりの質量 $m [\text{kg} \cdot \text{molecules}^{-1}]$ 、物質量あたりの気体分 子質量(モル質量) $M [\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$ である。298 K (25 °C)における水素分子及び窒素分子の平均速度 はそれぞれ 1773 m · s⁻¹、475 m · s⁻¹ であり、こ れは標準大気中の音速 340 m · s⁻¹ よりも早い。

1.1.11 項でも述べているが、このような高速度で 気体分子は運動しているため、空間に存在している 気体を排気するために要する時間は短い。超高真空 を実現する上で問題になるのは、容器等の表面に吸 着した分子や、材料内部から空間へ拡散する分子で

ある。

問) 温度 25 ℃ の水素分子の平均速度を求めよ。水素の分子量を 2.02 とする。

1.1.6 気体分子の平均自由行程

空間を運動している気体分子は他の気体分子とも 絶えず衝突を繰り返している。ある分子が他の分子 と衝突した後、次に他の分子と衝突するまでの移動 距離の平均を平均自由行程 λ [m] と呼ぶ。

ある気体分子が速度 \bar{v} で進行しているとすると、 この気体分子は時間 dt の間に距離 $\bar{v} dt$ だけ進む。 気体分子の直径を σ [m] とすると、気体分子間の最 近接距離は σ であるため、今着目している気体分 子は体積 $\pi\sigma^2 v dt$ の円筒内に存在する気体分子と 衝突することになる。ただし、ここでは他の気体分 子は静止していると仮定している。したがって、気 体分子の密度を n = N/V [molecules · m⁻³] とす ると、平均自由行程は、

$$\lambda := \frac{分子の移動距離}{分子の衝突回数} = \frac{\bar{v} dt}{n\pi\sigma^2 \bar{v} dt} = \frac{1}{\pi\sigma^2 n}$$
(5)

で与えられ、分母の $\pi\sigma^2$ [m²] は円筒の断面積に相当する。

実際は他の気体分子もマクスウェル-ボルツマン の速度分布にしたがって運動しており、これを考慮 すると平均自由行程は次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 n}$$
$$= \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p}$$
(6)

ここで、式(6)の導出に式(1)を使用している。

空気の分子直径を 0.376 nm とすると、298 K (25 °C)、1 Pa における空気の平均自由行程は 6.6 mm である。式 (6) で $\lambda \propto 1/p$ であることからも、 室温における空気の平均自由行程は、

$$\lambda \approx \frac{6.6}{p} \,[\text{mm}] \tag{7}$$

によりおおまかに求められる。この式を覚えておく と真空計の指示値から、現場でも簡単に平均自由行 程を見積もることができ、現状が真空容器の寸法か らして粘性流領域なのか分子流領域なのか(1.1.9 項を参照)等の見当がつけられる。

問)式(6)から温度25 ℃、空気の平均自由行程を 求めよ。

1.1.7 入射頻度

真空容器表面の単位面積に毎秒衝突する気体分子 数は入射頻度 Γ [molecules \cdot s⁻¹ \cdot m⁻²] と呼ばれ、 次式で与えられる。

$$\Gamma = \frac{1}{4}n\bar{v} = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}} \tag{8}$$

入射頻度は開口のコンダクタンスや、表面での単分 子層形成時間等を見積もる際に使用する。入射頻度 を気体分子数ではなく、体積で表した量を体積入射 頻度 Γ_V と呼び、気体分子1個の占有する体積が 1/n であることから、

$$\Gamma_{\rm V} = \frac{1}{4}\bar{v} \tag{9}$$

となる。例えば、298 K (25 °C) の空気の体積入射 頻度は 117 m³⋅s⁻¹⋅m⁻² (=11.7 L⋅s⁻¹⋅cm⁻²) であり、この値を記憶しておくと開口のコンダクタ ンスや理想排気速度を概算することができる。

問)式(4)と式(9)から体積入射頻度を求めよ。空 気のモル質量は28.98 g·mol⁻¹とする。

1.1.8 気体分子と真空容器表面との衝突

気体分子が容器表面に衝突すると、ある分子は表 面で直接的に散乱され、ある分子は表面に吸着す る。直接的な散乱により、気体分子のエネルギーや 速度分布は変化する。また、吸着した分子は表面を 拡散し、ある時間が経過したのちに表面から脱離す るか、表面から固体内部へ拡散する。拡散している うちに表面にある別の分子と反応し、分子の種類が 変化することもある。



図1 余弦則の模式図 [1]。矢印の長さは気体が放 出される方位角方向の確率に相当する。例えば、 容器に対して垂直な方向($\theta = 0, \cos 0 = 1$)へ放 出される確率が最も高く、平行な方向($\theta = \pi/2, \cos \pi/2 = 0$)へ行くにつれて放出される確率が低 くなる。

表面で散乱されて空間へ放出される分子数の方向 分布は余弦 ($\cos \theta$) 則に従う (図 1)。余弦則では 方位角 θ 方向へ散乱される頻度が $\cos \theta$ に比例す るため、表面に対して浅い角度へ散乱される頻度は 低く、表面に対して垂直方向へ散乱される頻度は 高い。

日常目にする現象(ビリヤードの玉がクッション で反跳する様子等)を思い描くと、余弦則は直感的 に理解し難いのだが、余弦則では気体分子が表面に 衝突する前の入射角度の情報はリセットされ、どの 角度から入射されても気体分子が散乱する方位角方 向は余弦分布にしたがうことを意味している。空間 を運動する分子は等方的な速度分布を持っており、 気体と表面の間に熱的平衡が成り立っていれば、表 面から放出される分子の方向分布は表面がないとき の速度分布と同じになる。角度 θ 方向の立体角は cos θ に比例するため、方向分布は cos θ に比例す ると直感的に理解することができる。

余弦則は実験的にも検証されており、例えば、鉄 鋼とアルミニウム表面での窒素分子の散乱分布は余 弦則と一致している [38]。このように通常使用され る真空容器のような材料表面では余弦則が成り立つ と考えて良いが、清浄で均質な金属表面では表面の 原子配列等を反映し、散乱後の方位角方向分布が余 弦則に従うとは限らない [39]。

表2 真空工学における流れの分類

分類	判定範囲
分子流	$0.3 < K_{\rm n}$
中間流	$0.01 < K_{\rm n} < 0.3$
粘性流	$K_{\rm n} < 0.01$

1.1.9 粘性流と分子流

圧力が高く、空間を運動する気体分子同士の衝突 が主となる流れは粘性流と呼ばれ、これは液体の流 れに近く、気体分子は流れやすい。一方、圧力が低 く、気体分子と容器表面との衝突が主な流れは分子 流と呼ばれ、表面から散乱された分子の方向分布が 余弦則に従うことからも流れにくい。超高真空シス テムでは分子流領域の流れを扱うことになる。

着目する流れがどちらなのかを判定するには、平 均自由行程と真空容器の代表的寸法 *d*[m] を比較す ればよく、これらの比はクヌーセン数 *K*_n(無次元 量)と呼ばれている。

$$K_{n} := \frac{\Psi \beta \beta \beta \beta d \beta}{\mathcal{R}_{\overline{z}} \beta \delta \beta}$$
$$= \frac{\lambda}{d}$$
$$= \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^{2}pd}$$
(10)

ここで、式(10)の導出に式(6)を使用している。 真空工学ではクヌーセン数を用いて流れを表2の ように分類している。粘性流と分子流の中間の流れ は中間領域と呼ばれている。なお、他の分野では分 類名やクヌーセン数の判定範囲が異なる場合がある ので、注意が必要である。

問) 直径 220 mm の真空容器内で、温度 298 K (25 ℃) の空気の流れが分子流領域に入る圧力を求 めよ。流れの分類は表 2 に従うものとする(式(7) を使うとより簡単に計算できる)。



図 2 真空排気過程のモデル [1]

1.1.10 真空排気

真空排気とはどのような過程なのか考える。図 2 のようなモデルを考える。

- ある時刻 t₀ [s] に真空容器(分子密度 n [molecules · m⁻³])に箱(体積 v [m³])が取 り付けられる。このとき、箱の中は空とする。
- (2) 箱と中が気体分子で満たされる。このとき、箱 の中の分子数は nv となる。
- (3) 短い時間 dt 後に箱を取り除くと、真空容器の
 気体分子数は nv 減る。
- (4) (1)-(3) の過程が繰り返される。

このモデルにおいて、箱に相当するものが真空ポ ンプである。真空ポンプの排気能力は単位時間に 持ち去ることのできる(排気できる)気体の体積で 表され、排気速度と呼ばれる。単位は $m^3 \cdot s^{-1}$ や $L \cdot s^{-1}$ 等で与えられる。

当然のことではあるが、排気を開始して真空容器 内の密度が下がると、この一過程で箱が持ち去るこ とのできる気体分子の数は少なくなる。また、こ のモデルからも分かるとおり、排気の過程はあくま で受動的であり、箱を取り付けた場所(真空ポンプ) にたまたま入り込んできた気体分子のみが容器外へ 持ち去られることになる。

真空容器内の圧力の時間変化は、次の排気の式と 呼ばれる微分方程式を解くことにより得られる。

$$V\frac{dp}{dt} = -Sp + Q_{\rm s} \tag{11}$$

ここで真空容器の内容積 V[m³]、排気速度

 $S[\mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{s}^{-1}]$ 、真空容器表面等からの総ガス放出量 $Q_{\mathbf{s}}[\mathbf{Pa} \cdot \mathbf{m}^3 \cdot \mathbf{s}^{-1}]$ である。t = 0での圧力を定数 $p_0[\mathbf{Pa}]$ 、 $Q_{\mathbf{s}}$ を一定として、式 (11)を圧力 p(t)に ついて解くと次式が得られる。

$$p(t) = \left(p_0 - \frac{Q_s}{S}\right) \exp\left(-\frac{S}{V}t\right) + \frac{Q_s}{S} \qquad (12)$$

このことから、排気開始直後は圧力が時間とともに 指数関数的に減少し、時間が十分経過すると $p = Q_s/S$ [Pa] に近づくことがわかる。ここでは Q_s を 一定としたが、実際には時間の関数であり、式 (12) よりも複雑な振る舞いとなる。なお、 $\tau := V/S$ は 排気の時定数と呼ばれる。

問)排気速度 60 L · min⁻¹ の真空ポンプを使い、体 積 0.1 m³ の容器を大気圧から 1 Pa まで排気する のに要する時間を式 (12) から求めよ(排気速度の 単位に注意)。ガス放出はないもの($Q_{\rm s}=0$)とす る。

理想的な排気システムにおいて、各種ガス放出が ある場合の圧力の推移を図(3)に示す。図中の各過 程は次のとおりである。

- (1) 真空容器空間中を運動する気体分子の排気。圧 力は時間 t に関して指数関数的に減少。
- (2) 真空容器表面に吸着した分子(主に水分子)の
 排気。圧力は t⁻¹ に比例して減少。
- (3) 真空容器材料内から拡散してきた気体分子の排
 気。圧力は t^{-1/2} に比例して減少。



図3 各種ガス放出がある場合の圧力の推移 [1,40]

(4) 大気から真空容器材料を透過してきた気体分子の排気。排気システムの排気速度と透過による気体放出速度が平衡状態となり、圧力は時間に関して一定値を取る。

このように、排気を開始してから十分時間が経過した後にはガス放出は時間に関して緩やかに変化するため、

$$p(t) = \frac{Q_{\rm s}(t)}{S} \tag{13}$$

とすることができる。

単位面積あたりから放出されるガス流量はガス 放出速度と呼ばれ、単位は $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ や $Pa \cdot m \cdot s^{-1}$ で表記される。真空容器内の平均ガス 放出速度 q_{ave} [$Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$] = 一定、真空容 器内の表面積 A [m^2] とすると、式 (13) から到達圧 力 p_f [Pa] は次のように書くことができる。

$$p_{\rm f} = \frac{q_{\rm ave}A}{S} \tag{14}$$

1.1.11 表面滞在時間とベーキング

真空容器表面に吸着していた分子が排気されるま でのモデルを図 4 に示す。表面に吸着していた分 子が表面滞在時間 τ_i [s] 経過後に脱離し、空間を飛 行時間 t_i [s] 進行し、真空表面に再び衝突すると吸 着する、という過程を気体分子が真空ポンプへ突 入して排気されるまで *i* 回繰り返す。ここで、*i* は 1.1.12 項で述べるコンダクタンスに反比例する量 で、図 (2) の場合は i = 6 である。このとき、気体 分子が真空ポンプへ入るまでの時間 t_p [s] は次式で 与えられる。

$$t_p = \sum_i t_i + \sum_i \tau_i \tag{15}$$

真空容器の代表的寸法を d [m]、分子の平均速度を \bar{v} [m·s⁻¹]、表面における分子の平均滞在時間 τ [s] とすると、

$$t_p \approx i \left(\frac{d}{\bar{v}} + \tau\right) \tag{16}$$

と近似できる。

平均滞在時間は脱離に要する活性化エネルギー $E_{\rm d} [J \cdot {\rm molecules}^{-1}]$ によって次式で与えられる。

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_{\rm d}}{kT}\right) \tag{17}$$

ここで、 τ_0 は固体表面での分子の熱運動による振動周期と同程度の大きさで、一般には $\tau_0 = 10^{-13}$ s とされる ($A_{\text{freq}} = 1/\tau_0$ は頻度因子とも呼ばれる)。 また、式 (17) から分かる通り、 τ は活性化エネル ギー E_{d} と温度 T に強く依存することがわかる。

超高真空システムにおいて目標圧力への到達を妨 げる主なガス種は、平均滞在時間の長い水と油であ る。大気の成分は $N_2: 78.08\%$ 、 $O_2: 20.95\%$ 、Ar: 0.93%、 $CO_2: 0.03\%$ 、水蒸気: 0.5-3%、油蒸気: 0-0.0001%であり、油については努力により真空容 器内に持ち込むことを防ぐことができる。しかし、 大気中の水の分圧は(水の飽和蒸気圧)×(相対湿 度)で与えられる通り、真空容器を大気に晒す以上 は水分子の持ち込みを防ぐことはできず、これが目 標圧力の達成を妨げる主要因となる。ちなみに、大 気の成分がおおよそ $N_2: O_2 = 4:1$ であることを 覚えておくと大気リークの有無を判定できることが あり、便利である(1.2.4 項では具体例を紹介して いる)。

ステンレス表面の場合、水分子は酸化クロム表面 に化学吸着しており、脱離に要する活性化エネル ギーは約 890 meV · molecules⁻¹ である。また、ガ ラス表面の場合、水分子は酸化シリコン表面に化 学吸着しており、脱離に要する活性化エネルギー



図4 分子が排気されるまでのモデル [1]

表3 各温度における水分子の排気時間

	$25 \ ^{\circ}\mathrm{C}$	100 °C
総飛行時間 $[s]$	0.0152	0.0136
総表面滞在時間 $[s]$	1162	0.6135
排気までにかかる時間 [<i>s</i>]	1162	0.6273

は約 920 meV · molecules⁻¹ である [41]。図 4 の モデル (i = 6) において、ステンレス表面におけ る水分子の脱離に要する活性化エネルギー $E_d =$ 890 × 10⁻³ × 1.6 × 10⁻¹⁹ J · molecules⁻¹ として、 排気されるまでの時間 t_p [s] を各温度について計算 すると、表 3 になる。この結果からわかるように、 真空容器の温度を上げることにより水分子の排気に 要する時間を大幅に短縮できる。

真空装置を加熱し、水分子を短時間で排気する工 程はベーク(bake)またはベーキングと呼ばれる。 ベーキングは真空装置全体を均一に100-150 °C 程 度まで加熱し、経験的にはその温度を24時間程度 保持する。水を短時間で排出するために、超高真空 装置ではこの温度範囲でベーキングができる仕様に する。定量的には RGA (Residual Gas Analyzer、 残留ガス分析計。1.2.4 項を参照)を用いて、水分 子の強度が十分に下がったことを確認した後にベー キングを終える。ベーキング対象の真空容器は均一 に加熱することが望ましく、温度が低い領域がある とそこへ水分子が吸着し、ベーキング後にそこから 水分子が再放出されてしまう。また、ガス導入ライ ンを使用する場合、これもベーキングできるような 仕様にしておく。ただし、ガス導入ラインで使用し ているバルブ等の機器には耐熱温度が低いものもあ るため注意する。

問)温度 150 ℃ のステンレス表面における水分子 の平均滞在時間を求めよ。

ヒーターを使った標準的なベーキングの手順は次 の通りである。

- ベーキングを始める前に、テスター等でヒー ターに地絡がないこと、ヒーターが断線してい ないことを確認する。可能であれば漏電ブレー カーを使用する。
- (2)常用温度が150 ℃以下の機器(ターボ分子ポンプやトランスファーロッド等)には熱電対を設置して温度を常時モニターする。可能であれば異常な温度上昇の検出でベーキングを自動中止するインターロックシステムを構築する。
- (3) 真空容器に可能な限り均一にヒーターを巻く。 さらに真空容器全体をアルミホイルで覆い、可 能であればこの周りをスパッタシート等の断熱 シートで包む。
- (4) ヒーターへの通電を開始した後、クランプメー タ等で漏洩電流が1mA以下であることを確認 する(漏電はないに越したことはないが、電気 設備技術基準等では低圧電路の許容漏洩電流が 1mA以下とされている[42])。異常発熱、漏 電、発煙、異臭等がないか定期的に確認しなが ら150 ℃程度で均一に24時間程度加熱する。
- (5) ベーキング終了後の水分子の再吸着を避けるため、真空容器が冷めないうちに熱陰極電離真空計等の脱ガスを伴う装置を立ち上げる。

油については種類によって表面滞在時間が大きく 異なる。Octoil と呼ばれる油拡散ポンプ (Diffusion Pump、DP)用のエステル系作動油では温度 25 $^{\circ}$ C で約3 s、DC705 と呼ばれるシリコン系作動油では 温度 25 $^{\circ}$ C で約5 ×10⁴ sの平均滞在時間と見積も られている [43]。また、油やプラスチックは熱分解 すると質量が大きく、平均滞在時間の長い炭化水素 分子が生成される。例えば、鎖長9の炭化水素分子 における物理吸着のエネルギー約 75.2kJ·mol⁻¹ を使うと [44]、平均滞在時間は温度 25 ℃ で約 2.6 s と見積もられ、このような質量の大きい炭化水素分 子を排気するためにもベーキングが必要となる。そ のため、真空容器内に潤滑油や 150 ℃ 以下で熱分 解するプラスチックを入れてはいけない。

真空容器内に油等を持ち込まないためにも、次の 事項を守って作業をする。

- 真空装置を設置する部屋は清浄に保つ。油蒸気
 厳禁。禁煙。
- 作業台および周辺は純度 95%の特級エタノー ルを染ませたワイパーで洗浄しておく。ワイ パーは塵を発生しない製品(キムワイプやベン コット等)を使用する。純度 99.5%のエタノー ルには微量のベンゼンが残留しているため、 使用しない(ベンゼンの吸着エネルギーは 48-77 kJ・mol⁻¹で平均滞在時間が長い[45-47])。
- 真空内部品はワイパーあるいは清浄なアルミホイルの上に置く(アルミホイルにも油が付着していることがあるため、使用前にエタノールとワイパーで洗浄しておくと良い)。
- 真空内部品、真空容器内を触るときは手をよく洗い、清浄な使い捨てビニール手袋を着用する。喫煙直後の呼気で真空容器内を汚染する可能性があるため、喫煙者はマスクを着用する。
- 真空内部品を扱う工具は全て脱脂洗浄してお く。
- 脱脂には原則として試薬瓶に入った純度 95% の特級エタノールを使用する。

かつては脱脂洗浄にアセトンを使用することが あったが、アセトンは「有機溶剤中毒予防規則」に より第2種有機溶剤に指定されているため、原則と して使用しない。また、アセトンは爆発物の原料と なり得る化学物質であるため、管理・取扱は厳しく なってきている。やむを得ずアセトンを使用する場 合は、ドラフト内で使用し、廃液は適正に処理する こと。洗浄瓶に入ったアセトンにはプラスチックが 溶け込んでいることがあるため使用不可である。

1.1.12 コンダクタンス

ある真空容器 1 と 2 の間を導管で接続した場合 を考える (図 5)。容器 1 から 2 へ流れる正味の流量 $Q = Q_1 - Q_2 [\operatorname{Pa} \cdot \operatorname{m}^3 \cdot \operatorname{s}^{-1}]$ と圧力の関係は、比例 係数 $C [\operatorname{m}^3 \cdot \operatorname{s}^{-1}]$ を用いて次のように書くことがで きる。

$$Q = C(p_1 - p_2)$$
(18)

この比例係数 $C [m^3 \cdot s^{-1}]$ は導管のコンダクタン ス (conductance) と呼ばれ、排気速度と同じ単位 を持つ。コンダクタンスは導管または開口での気 体の流れやすさを表し、電気回路における抵抗の 逆数に相当する。このことからも、導管1(コンダ クタンス $C_1 [m^3 \cdot s^{-1}]$)と導管2(コンダクタンス $C_2 [m^3 \cdot s^{-1}]$)を並列または直列に接続した場合の 合成コンダクタンス $C [m^3 \cdot s^{-1}]$ は、

(並列接続)
$$C = C_1 + C_2$$
 (19)

(直列接続)
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$
 (20)

で与えられる。なお、直列接続で $C_1 > C_2$ とする と、 $C = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2} = \frac{C_2}{1+C_2/C_1} < C_2$ となり、合成コ ンダクタンス C は小さい方のコンダクタンス C_2 よりも必ず小さくなることに注意が必要である。

また、図 5 において容器 2 を真空ポンプに見 立て、この排気速度を $S_2 [m^3 \cdot s^{-1}]$ 、容器 1 の導 管接続口での排気速度を $S_1 [m^3 \cdot s^{-1}]$ とすると、 $Q = S_1 p_1 = S_2 p_2$ であることと、式 (18) から、

$$S_1 = \frac{S_2 C}{S_2 + C} := S_{\text{eff}}$$
(21)

となる。 S_{eff} は実効排気速度と呼ばれる (式 (11) 等で出てくる S にはこの S_{eff} が実際には入る)。 $S_{\text{eff}} = \frac{S_2}{S_2/C+1} < S_2$ であることからも、実効排気 速度は真空ポンプ単体が持つ排気速度 S_2 よりも必 ず小さくなる。真空ポンプがコンダクタンスの小さ い導管を介して真空容器に接続されていると、実効 排気速度はコンダクタンスで制限され、排気速度の 高い真空ポンプを使用しても (次の問題の解答の ように) 無意味になってしまう場合がある。そのた め、真空排気システムを構築する上でコンダクタン



図 5 導管で接続された 2 つの容器 [1]

スを評価することは非常に重要である。

問)真空容器と排気速度 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ の真空ポンプ を、コンダクタンス $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ の導管を介して接 続した。真空容器における実効排気速度を求めよ。 また、真空容器と排気速度 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ の真空ポン プを、導管を介さずに直接接続した場合の実効排気 速度と比較せよ。

コンダクタンスは流れやすさを表す量であること からも、同じ導管であっても粘性流と分子流で異 なる値をとり、前者におけるコンダクタンスは後 者のものより大きいことが推測される。実際、温度 293 K (20 ℃) の空気における、長い円筒導管のコ ンダクタンス C [m³ · s⁻¹] は次式で与えられる [9]。

(粘性流)
$$C = 1349 \frac{d^4}{L} \bar{p}$$
 (22)

(分子流)
$$C = 121\frac{a}{L}$$
 (23)

ここで、円筒導管の直径 d[m]、円筒導管の長さ L[m]、円筒導管の平均圧力 \bar{p} [Pa] である。した がって、コンダクタンスを大きくするためには可能 な限り真空配管を太く短くする必要がある。また、 粘性流でのコンダクタンスは平均圧力 \bar{p} [Pa] に比 例するのに対し、分子流でのコンダクタンスは圧力 に依存しない。これは分子流領域で分子の移動量が 容器表面との衝突だけで決まることを意味してい る。

1.1.13 真空システムの構成例

超高真空排気システムの典型的な構成例を図 6 に示す。真空容器を目標の圧力まで排気し、その圧 力を維持するためのポンプを主ポンプと呼び、この ポンプが動作可能な圧力領域まで大気圧から排気す るポンプを粗引きポンプと呼ぶ。この構成例では、 主ポンプとしてターボ分子ポンプ (Turbomoleculer Pump、TMP)を使用しているが、TMP は吸気側圧 力が1 Pa 以上になると排気速度が大幅に低下する。 このため、TMP は油回転ポンプ (Rotary Pump、 RP)等の粗引きポンプと組み合わせて使用する。

なお、粗引きポンプと似た言葉に補助ポンプとい うものがある。補助ポンプは主ポンプが正常に動作 できる臨界値以下の圧力を維持するためのポンプを 指す。例えば、TMP や DP は補助ポンプがなけれ ば定常的に動作できない。これに対して、主ポンプ にイオンポンプ (Ion Pump、IP)、チタンサブリ メーションポンプ (Titanium Sublimation Pump, TSP)、クライオポンプ (cryopump)、非蒸発型ゲッ タ (Non-Evaporable Getter、NEG) ポンプ等を使 用する場合、粗引きポンプで臨界値以下の圧力に到 達させた後、主ポンプを一度動作させてしまえば、 それ以降は粗引きポンプを動作させる必要が通常 はない。そのため、これらの主ポンプに補助ポンプ は必要ない(IPや NEG ポンプ単体使用での到達 圧力より、粗引きポンプの到達圧力が高い場合もあ り、粗引きポンプが到達圧力を上げてしまうことも ある)。ただし、圧力がこれら主ポンプの動作範囲 より高くなってしまった場合等には、再度粗引きポ ンプを使用する必要はある。

RP は圧力差の維持や潤滑のためにオイルを使用 しており、このオイルで吸気側および排気側を油蒸 気等で汚染する。そのため、RP と TMP の間には 油蒸気や水蒸気を捕獲し、真空装置側にこれを拡 散させないためのフォアライントラップ(foreline trap)と呼ばれる装置を設置する。フォアライント ラップの中には乾燥した活性アルミナが充填されて おり、これが汚れた場合は捕獲能力が下がるため、 定期的に交換する必要がある。

停電等で RP が停止した場合、ポンプ内のオイ



図6 超高真空システムの構成例 [1]

ルが圧力差で空容器へ上がってしまうことがある。 このオイルの逆流を防止するために、フォアライン トラップと RP の間にアイソレイトバルブ(isolate valve)と呼ばれる装置を取り付ける。アイソレイ トバルブは、油回転ポンプが停止した後に自動で真 空容器側を真空封止し、さらに油回転ポンプ側を大 気開放(ベント、vent)するため、オイルの逆流を 防止することができる。このバルブは RP の真空排 気を使って駆動するため、圧縮空気は不要である。 また、バルブ付属の電磁弁への電力供給をポンプの 電動機と連動させて行うため、特別な制御回路は不 要である。なお、アイソレーションバルブは真空グ リースを使用しているため、これを設置する場合は 真空容器側にフォアライントラップが必要となる。

RP は油蒸気が排気側から排出されるため、排気 口にはオイルミストフィルタ (oil mist filter) と呼 ばれる装置を設置する。ただし、このフィルタでは 油蒸気の 90% 程度しか取り除くことができないた め、たとえこのフィルタを使ったとしても室内に油 蒸気を放出し、同じ部屋に置いてある他の真空機器 等を汚染する可能性がある。そのため、オイルミス トフィルタの排気側に塩化ビニル製のチューブ等を 接続して、排気を室外へ誘導することによりこれを 防ぐことができる。また、フィルタは定期的に交換 する必要がある。フィルタに吸着したオイルが酸化 するとフィルタが目詰まりし、内部の圧力が上昇し てオイルミストトラップが破損することがある(実 際、私もオイルミストトラップを破裂させたことが あるが、非常に大きな破裂音がして腰が抜けた)。

さらに、RP からのオイル漏れ等で部屋の床を汚 染しないためにも、ポンプの下には油吸収シートを 敷いておくと安全である。油汚染が厳禁な環境等に おいては粗引きポンプに RP 等ではなく、オイルフ リーのドライポンプ (dry pump)を使用する。

ここでは TMP の背圧側圧力をモニターするた めにピラニ真空計 (pirani gauge)を使用してい る。RP で排気を開始してからこの真空計で圧力が TMP の動作範囲に入ったことを確認した後、TMP を立ち上げる(教科書的ではないが、実際は圧力が 動作範囲に入っていない状態で TMP を立ち上げて もコントローラが自動制御し、不具合があればイン ターロックで動作を止めるため、そこまで神経質に ならなくても良い)。

メンテナンス性を確保するため、この例では TMP の吸気側にゲートバルブ (gate valve)、背 圧側にアングルバルブ (angle valve) を取り付けて いる。例えば、真空ポンプのメンテナンス等で真 空容器内をベントせずに TMP を取り外したい場 合にこのゲートバルブを使用する。リークテスト (leak test、漏れ試験)を行うためのリークディテ クタ(leak detector)と呼ばれる装置等を取り付け るため、TMP とアングルバルブの間に T 字管を取 付、ここにバルブをもう 1 台設置する場合もある。

1.1.14 超高真空システム製作の要点

ここでは到達圧力 10⁻⁸ Pa 台の超高真空システ ムを製作する際に留意すべきポイントをまとめる。 要は式 (14) の分子を小さく、分母を大きくする。

- 超高真空装置内の平均ガス放出速度 q_{ave} と表 面積 A を小さくする。
 - 室温でガス放出が少ない材料を使用する。
 - 真空容器内の水分子を排気できるように、
 150 ℃ 程度でベーキングできる仕様に
 する。
 - 半田、真鍮、亜鉛など 150 ℃ での蒸気圧
 が高い金属は使用しない。
 - 150 ℃ で熱分解する高分子材料等は使用 しない。
 - 多孔質(ポーラス、porus)構造を持つ材料
 はガス放出量が多いため、使用を避ける。
 - ガス導入ラインを使用する場合、これも ベーキングできる仕様にする。ただし、機 器によっては耐熱温度が低いものがあり、 このような機器を使用する場合は 80 ℃ 程 度の少し低い温度で長時間ベーキングして も効果的である。
 - 水を含んだ材料は使用しない。大気圧ベン
 トは乾燥窒素で行う。
 - 真空容器表面と真空容器内部品は電解、あるいは化学研磨して純水洗浄する。
 - ベアリング、配線材料等は特級エタノール
 で脱脂洗浄する。
 - 真空内部品は清浄なビニール手袋を着用して扱う。
 - 真空内部品を扱う場合は脱脂洗浄した工具 を使用する。
 - 磁気浮上型 TMP、NEG ポンプ、IP 等の

オイルフリーの真空ポンプを使用する。

- 潤滑油、真空グリースは使用不可。摺動部 には固体潤滑剤を使用する。
- ガス導入ラインもオイルフリーとする。
- 実験室内の空気をオイルフリーに保つ。
- リークを完全になくす。封じ切りではない
 超高真空装置における全リーク量は 1×
 10⁻¹¹ Pa・m³・s⁻¹ 以下が望ましい (1.2.5)
 項を参照)。
- 実効排気速度 S_{eff} を大きくする。
 - TMP、NEG ポンプ、IP 等の超高真空領 域で高い排気速度を持つ真空ポンプで排気 する。
 - 排気システムに使用する配管は太く・短くして、コンダクタンスを可能な限り大きくする。

1.2 真空計と計測原理

真空計は全圧計と分圧計に分類できる。真空容器 内には様々なガス種が存在しているが、前者はそれ らを区別せずに全ての気体分子の圧力を測定し、後 者は気体の種類ごとの圧力を測定する。全圧計は測 定に利用している現象により分類され、機械的現 象、気体の輸送現象、気体の電離現象に基づいて圧 力を測定する。図7の通り、各種全圧計はいずれも 測定できる圧力範囲が限られている。分圧計は気体 の電離現象を利用しており、イオン化したガスの分 析方式で分類される。

本節では代表的な真空計について解説する。圧力 の計測をする上で注意する事柄として、真空計の取 付位置と熱遷移ついても簡単に触れる。

1.2.1 機械的現象に基づく全圧計

弾性体を隔壁媒体とし、差圧による弾性体の変位 から圧力を求める真空計は弾性真空計と呼ばれ、大 気圧から中真空領域の圧力測定に使用される。

ブルドン管真空計

ブルドン管真空計(Bourdon tube gauge)は弾 性真空計の一種で、図 8 のような構造を持つ。ブ ルドン管は弾性体で作られた断面が楕円形の中空管 を指し、ブルドン管の内部が減圧または加圧される と、外部との圧力差でブルドン管が変形する。この 変形量を指針の動きに変換して圧力値を指示する。

このようにブルドン管は測定対象の圧力と大気圧 の差を測定しており、指示値0は大気圧に相当する (これは相対圧力、ゲージ圧力等と呼ばれる)。測定 圧力が大気圧以下の場合は真空計、大気圧以上は圧 力計、どちらも測定できる場合は連成計と呼ばれて いる。

ブルドン管真空計の特徴は以下の通りである。

- ・ 圧力の測定範囲は絶対圧力で大気圧以上から
 100 Pa 程度である。
- ガス種依存性がない。
- 設置姿勢の影響があり、メーカーで取り付け姿勢を指定している場合がある。
- 温度依存性があり、メーカー指定の使用温度範



図7 代表的な全圧計の測定圧力範囲 [1]。測定圧力範囲は機種にもよるため、詳細はメーカーのカタログ等を参照。



図8 ブルドン管真空計の概略構造 [1]

囲がある。

- 相対圧力計のため、指示値に環境大気圧の依存 性がある。
- 真空系に電気的・熱的影響を与えない。

隔膜真空計

隔膜真空計(diaphragm gauge)は弾性真空計の 一種で、内部はダイアフラムと呼ばれる圧力差によ り弾性変形する薄い金属製またはセラミック製の膜 によって空間が隔たれている(図9)。一方の参照側 空間は真空封止され、内部に固定電極を設置する。 他方の空間は測定側空間で、真空容器等の測定対象 に接続する。ダイアフラムの変形量は両空間の圧力 差に比例し、この変形量を固定電極とダイアフラム 間の静電容量の変化量として測定する真空計であ る。参照側空間の圧力を低く保つために、ゲッター 材(気体を吸着する材料)を封入している機種もあ る。図9の参照側を真空封止せず、測定側と同様、 接続配管を配置して両空間の差圧を測定する差圧型 隔膜真空計もある。

隔膜真空計の特徴は以下の通りである。

- 圧力の測定範囲は大気圧以上から 10⁻² Pa である。
- ガス種依存性がない。
- 温度依存性があり、通常カタログにデータが記載されている。
- 1台の隔膜真空計で測定できる圧力範囲は3桁
 程度。幅広い圧力を測定するためには測定範



図9 絶対圧型隔膜真空計の概略構造 [1]

囲の異なる複数の隔膜計を組み合わせて使用 する。

- 真空系に電気的・熱的影響を与えない。
- 信頼性が高く、校正基準に使用されることが ある。

1.2.2 気体の輸送現象に基づく全圧計

熱伝導や、運動する個体の表面と気体分子との運 動量授受が気体の圧力に依存することを利用した真 空計であり、中真空から高真空領域の圧力測定に使 用される。

ピラニ真空計

ピラニ真空計は熱伝導真空計の一種で、図 10 に 示しているように、内部は Pt や金メッキしたタン グステン等で作られたフィラメント(直径 10 μm 程度の金属細線)を張っただけの簡単な構造をして おり、粘性流から分子流領域においてフィラメント に気体分子が衝突して持ち去る熱量を測定して圧力 を求める。

ピラニ真空計を動作させる電気回路には定温度型 と呼ばれるものが一般的には採用されている。この 方式ではフィラメントをブリッジ回路に組み込み、 フィラメントの温度(抵抗)が一定になるように ジュール加熱電流を制御する。フィラメント温度を 一定にするために要する電力が圧力に依存して変化 することを利用して圧力を求める。

測定範囲の上限を広げるため、フィラメントと



図 10 ピラニ真空計の概略構造 [1]

ケースの間に中間円筒等を入れて対流を促進した形 式では大気圧まで測定可能なコンベクトロン真空計 (Convectron® gauge)等の製品もある。ただし、 対流を利用する場合は真空計の取り付け姿勢が測定 値に影響する場合がある。

ピラニ真空計の特徴は以下の通りである。

- 圧力の測定範囲は 10³ Pa から 10⁻² Pa である。コンベクトロン真空計は大気圧から測定可能。
- 熱的適応係数に応じたガス種依存性がある (1.2.8 項を参照)。
- フィラメントが汚れると正しい圧力を示さなく なる。
- 真空系に電気的・熱的影響がわずかにある。

ピラニ真空計におけるガス種依存性の例を図 11 に示す。ピラニ真空計に限らず、通常真空計は窒素 分子に対して校正されており、 他のガス種に対し て圧力を測定する場合には測定値を補正する必要が ある。感度が低圧力側で高くても、高圧力側で低い ガス種があることに注意が必要である。

真空計の指示値が大気圧以下でも、実際の圧力が 大気圧以上になっていることがある。例えば、ピラ ニ真空計の指示値を見ながら真空容器をアルゴンガ スパージ(purge、置換の意)する場合、実際のア ルゴンの圧力が1kPa以上になっていてもピラニ 真空計の指示値は変化しない。このとき、ピラニ真 空計の指示値を鵜呑みにしてしまうと真空容器内は 高圧となり、最悪の場合ビューポート等が内側から 破損する可能性があり大変危険である。同様にヘリ ウムガスでパージする場合、ピラニ真空計では圧力



図 11 ピラニ真空計のガス種依存性 [1,48]

が目標に達していても、実際のヘリウムの圧力は低 いということが起こりうる。

水晶摩擦真空計

水晶摩擦真空計(crystal gauge)は粘性真空計の 一種で、水晶振動子を共振周波数で発振させ、気体 分子との摩擦によって生じる交流インピーダンスの 変化を利用して圧力を測定する(図12)。気体の抗 力によるインピーダンスは分子流領域で分子量の 1/2 乗と圧力に比例し、粘性流領域では気体の密度 と粘性係数の積の1/2 乗に比例する。

水晶振動子の寸法は長さ数 mm、幅 1 mm 程度 と小さいため、CCG 等の真空計と組み合わせた複 合真空計として大気圧から超高真空領域の圧力まで 測定できる製品もある。

水晶摩擦真空計の特徴は以下の通りである。

- 圧力の測定範囲は大気圧から 10⁻² Pa である。
- 分子流領域では分子量、粘性流領域では分子量
 と粘性係数に応じたガス種依存性がある。
- 温度依存性があるが、補正機能を持つ製品も ある。
- 真空系に電気的・熱的影響を与えない。

1.2.3 電離現象に基づく全圧計

気体分子を電離(イオン化)し、イオン電流(気 体密度)を測定して圧力を求める真空計は電離真空



図 12 水晶摩擦真空計の音叉型振動子(左)と共振状態における交流インピーダンス(右) [1,48]



図13 熱陰極電離真空計の概略構造 [1]

計と呼ばれ、超高真空領域の圧力測定ができる唯一 の真空計である。イオン化には電子を利用する方式 が一般的である。

熱陰極電離真空計

熱陰極電離真空計 (hot cathode ionization gauge) は図 13 に示している通り、電子源のカ ソード (cathode、陰極)、集電子電極のアノード (anode、陽極)、集イオン電極のイオンコレクタの 三要素から構成されている。

ー般的に熱陰極にはタングステン製のフィラメントが使用される。フィラメントに通電・ジュール加熱して放出された熱電子はアノード電圧 V_A により加速される。アノードには 100–300 V が印加され、これが気体をイオン化する電子のエネルギーを決める。熱電子が周囲のアース電位へ逃げないようにするため、カソードには 10–100 V のカソード電圧 V_C が印加される。印加され気体分子に衝突させ

ることによりイオン化する。カソードからアノード へ到達する電子電流 $I_{e}[A]$ 、電離により生成された イオン電流 $I_{i}[A]$ とすると、

$$I_{\rm i} = S_{\rm h} I_{\rm e} p \tag{24}$$

となり、比例係数 S_h [Pa⁻¹] は感度と呼ばれる。感 度は気体のイオン化断面積に比例し、イオン化断面 積は電子エネルギー 100–150 eV にピークを持つこ とから、アノードには 100–150 V を印加するのが 一般的である。また、ガス種によってイオン化断面 積は異なるため、感度にはガス種依存性がある。電 離真空計も通常は窒素で校正されており、窒素の感 度 S_{N_2} 、ガス種 x の感度 S_x 、ガス種 x の真の圧力 p_x [Pa] とすると、真空計の指示値 p' [Pa] は次式で 与えられる。

$$p' = p_{\rm x} \frac{S_{\rm x}}{S_{\rm N_2}} \tag{25}$$

ここで、 $S_{
m rx}:=S_{
m x}/S_{
m N_2}$ は比感度係数と呼ばれている。

参考にメーカーの取扱説明書に記載されている比 感度係数を表4に示す。電離真空計の種類が変わっ ても比感度係数は10%程度で一致するため、測定 するガス種がわかっていればこの表を元に指示値を 補正しても大きな差異は出ない。正確には製品ごと の比感度係数を使って補正する必要がある。

熱陰極電離真空計の特徴は次の通りである。

 熱陰極電離真空計を構成する三要素の形状・ 配置により、複数種類の真空計がある。これ らを総合すると圧力の測定範囲は 10 Pa から $10^{-11} \,\mathrm{Pa} \,\, \mathrm{cbs}$

- イオン化断面積に応じたガス種依存性がある。
- 真空系に電気的・熱的影響を与える。大気ベント等をした後にフィラメントに通電するとそこからガスが放出されるため、正確な測定には十分時間を置く必要がある。
- アノード表面での電子刺激脱離(Electron Stimulated Desorption、ESD)等があるため、 超高真空領域での正確な圧力測定には十分に脱 ガスする必要がある(アノードとイオンコレク タを 500 ℃まで加熱できる製品もある)。た だし、脱ガスを過度に行うと電極を変形させる ことがあるため、注意が必要である。
- フィラメントには寿命がある。特に、水や酸素の分圧が高い環境下での使用や、通電を止めずに大気ベントするとフィラメントが酸化して断線する場合がある。また、通電を止めた直後もフィラメントは高温になっているため、1時間程度待ってからベントする。
- 長寿命の熱陰極電離真空計として、アノードと イオンコレクタに白金クラッドモリブデンを使 用した製品もある。

熱陰極電離真空計で加速された熱電子がアノード に衝突すると、そこから制動放射により軟 X 線が 放出される。この軟 X 線がイオンコレクタに入射 すると、光電効果により電極から光電子が放出し、 これによりイオンコレクタには正の電流が流れる。 これは軟 X 線効果と呼ばれ、熱陰極電離真空計の 測定下限を決める。

三極管型電離真空計はイオンコレクターの面積が 大きいため、軟 X 線による光電子電流は 10^{-10} A (圧力に換算して 10^{-5} – 10^{-6} Pa) にもなり、測定 圧力の下限は 10^{-5} Pa 程度である。軟 X 線効果が 小さくなるように電離真空計を構成する各要素の 形状・配置等に工夫が施された機種に BA 真空計 (Bayard-Alpert gauge) やエクストラクタ真空計 (extractor gauge) があり、測定圧力の下限が前者 は 10^{-8} – 10^{-9} Pa、後者は 10^{-10} Pa 程度まで下げ られている。

表4 熱陰極電離真空計の比感度係数 [49]

ガス種	比感度係数	ガス種	比感度係数
He	0.18	O_2	1.01
Ne	0.30	CO	1.05
H_2	0.46	H_2O	1.12
N_2	1.00	Ar	1.29
Air	1.00	CO_2	1.42

メーカーによっては真空計の電極類を囲うケース がなく、真空計を直接真空装置に取り付けるヌード 型熱電離真空計と呼ばれる機種が用意されている場 合がある。これを使用すると、測定対象と真空計を 繋ぐ導管による圧力の測定誤差を無くすことがで きる。

冷陰極電離真空計

ガラス管の両端に電極を取り付けて高電圧(High Voltage、HV)を印加すると、ガス管内部の気体の 種類と圧力によって様々な色やパターンの放電が観 察される。この色やパターンからガラス管内の圧力 を見積もる真空計はガイスラー管(Geissler tube) と呼ばれている。ガイスラー管では圧力を数値とし て得ることはできないが、圧力と放電電流の相関を 取ることで定量的に圧力を求めることができる。

しかし、分子流においてガイスラー管では放電が 持続せず、圧力は測定できない。分子流領域で放電 を持続させるため、永久磁石により外部から磁場 を加えて電子を螺旋運動させ、気体との衝突確率 を高めた真空計が冷陰極電離真空計(Cold Cathode Gauge、CCG)である(図 14)。アノードに は 3–6 kV が印加される。放電電流 I_d [A]、感度 S_c [Pa·A⁻¹] とすると、圧力は次式で与えられる。

$$p = S_{\rm c} I_d^l \tag{26}$$

ここで、l = 1-4の値をとり、これは電極の構造や 圧力に依存する。このため、熱陰極電離真空計と比 べて放電電流 I_d と圧力の線型性は劣る場合が多い。

CCG においても式 (25) が適用でき、測定するガ ス種がわかっていれば表 4 を元に指示値を補正し ても大きな差異は出ない。正確には製品ごとの比感 度係数を使って補正する必要がある。

CCG の特徴は次の通りである。

- 電極配置等によりペニング型、マグネトロン 型、逆マグネトロン型がある。これらを総合す ると圧力の測定範囲は 1Pa から 10⁻¹⁰ Pa で ある。
- 熱フィラメントを持たないため、大気圧で高電
 圧を印加しても壊れない。
- イオン化断面積に応じたガス種依存性がある。
- 高真空以上の圧力領域では CCG に高電圧を印 加するとすぐに放電が始まるが、超高真空では 放電が始まらないことがある。一度放電が始ま ればそれはしばらく持続する。
- 真空系に電気的・熱的影響を与える。放電が始まるとガス放出があり、正確な測定には十分時間を置く必要がある。
- ⅠP と同じ構造をしており、10⁻⁵-10⁻⁶ m³·s⁻¹ 程度の排気速度を持つ。
- 電極に汚れが蓄積すると実際の圧力より低い値 を示す。汚れの蓄積を避けるため、高真空領域 以上での使用を避ける。
- 軟 X 線効果がない。
- $B \approx 0.2$ T の磁束密度を印加するため、真空 計周辺に磁場の影響がある。例えば、KEK の compact ERL (Energy Recovery Linac、エネ ルギー回収型リニアック) では CCG の漏洩磁 場がビームに悪影響を及ぼした事象が報告され ている [50]。

逆マグネトロン型は放電空間ほぼ全域にわたっ て一様な磁場が得られ、*l*が1に近い値をとる。ま た、イオンはアース電位の真空計ケースへ、電子は 棒状電極へ加速・衝突するため、棒状電極がスパッ タされて細くなってくることがない。このような理 由から、現在は逆マグネトロン型が多く使用されて いる。



図 14 逆マグネトロン型 CCG の概略構造 [1]

1.2.4 分圧計

全圧が同じでも真空容器内に含まれるガス種に よっては真空の性質が異なる場合がある。この真空 の質を判断するために、ガス種ごとの圧力を測定 する分圧計を使用する。気体を質量分離(正確には *m/z*分離)して測定することから、質量分析計とも 呼ばれる。また、真空容器内の残留ガス分析に用い られることから、RGA とも呼ばれる。

基本的な構造は熱陰極電離真空計に類似してお り、熱フィラメントから放出した熱電子により気体 をイオン化し、生成されたイオンをコレクタに集め てイオン電流として気体密度を測定する。分圧計の 場合は、これらイオン化部と検出部の間にイオンの 質量を分離する質量分析部が配されていることに熱 陰極電離真空計と違いがある。イオン化部には熱陰 極電離真空計と同様の構造をした開放型イオン源が 一般的には使用されている。質量分析の方式には四 極子型(Quadrupole Mass Spectrometer、QMS。 通称キューマス)、磁場偏向型、飛行時間型、イオン トラップ型等に大別される。分圧計では検出部での 電流が微小となる場合があることから、ファラデー カップ(Faraday cup)だけでなく二次電子増倍管 (Secondary Electron Multiplier tube、SEM) 等を 備える機種もある。また、リークテストに使用する ヘリウムリークディテクタは、ヘリウムの測定に特 化した分圧計である。

分圧計の特徴は次の通りである。

 測定範囲はおよそ 10⁻² Pa から 10⁻¹² Pa であ るが、1 Pa 付近まで測定できる製品もある。

- イオン化断面積に応じたガス種依存性がある。
- 真空系に電気的・熱的影響を与える。フィラメントに通電するとそこからガスが放出されるため、正確な測定には十分時間を置く必要がある。
- 動作させるためには PC が必要で、通常メー カーにより製品専用のソフトウェアが用意され ている。
- 四極子型とイオントラップ型は残留ガス分析
 に、磁場偏向型はヘリウムリークディテクタに、
 飛行時間型は高分子ガス分析に使用される。

横軸を m/z (m over z と読む。イオンの質量 を統一原子質量単位で割り、さらにイオンの価数で 割って得られる無次元量)、縦軸をイオン電流や分圧 で示したグラフをマススペクトル (mass spectrum) と呼ぶ。

m/zは質量電荷比と呼ばれることがあるが、日本 質量分析学会ではこれを推奨していない [51]。なぜ ならこれを文字通り取ると、質量電荷比はイオンの 質量をイオンの電荷数で割った値であり、例えば、 窒素(分子量 28.01)の1価イオンの質量電荷比は 28.01 u÷1.60×10⁻¹⁹ C等となり、m/zの定義と は全く異なるためである(単位 u は統一原子質量 単位で、1 u = 1.66×10⁻²⁷ kg)。また、例えば窒 素の1価イオンは厳密には $m/z \approx 28$ であるため、 m/z = 28と表記することは非推奨で、m/z 28 と 表記することが推奨されている(本テキストもこれ を踏襲している)。

マススペクトルの例を図 15 に示す。ここでまず 目に留まるのは m/z 18 の H_2O^+ による高いピー クである。m/z が 39 以上における主なピークは 炭素数が 3 以上の炭化水素であることからも、こ の真空容器はベーキング不足であることがわかる。 m/z 28、32 のピークはそれぞれ N_2^+ と O_2^+ による 信号であり、1.1.11 項でも述べた通り、その強度比 が 4:1 であることから、真空容器内部に大気が入 り込んでいる状態、つまり大気リークがあることを 示している。

このようにマススペクトルの横軸には概ね各ガス



図 15 リークがある場合のマススペクトル例 [1]

種の分子量にピークが出現するが、これら以外にも ピークが現れることがある。例えば、m/z 44 は CO_2^+ であるが、これに対応して CO_2^{2+} 、 CO^+ 、 C^+ 、 O^+ のような CO_2 が解離して生成されたイオンも 観測されることがある。図 15 では N⁺ や O⁺ が 検出されているが、これらはそれぞれ窒素分子と酸 素分子が解離して生成されたイオンである。これら はクラッキングパターン(cracking pattern)また はフラグメンテーションパターン(fragmentation pattern)と呼ばれる。クラッキングパターンの各 ピーク比は、質量分析部の種類や RGA の機種にも 依存する。

m/z 28 の信号のみを見ていると、CO⁺ と N₂⁺ を区別することができないが、一酸化炭素であれば C⁺ の m/z 12 と O⁺ の m/z 16 に、窒素分子で あれば N⁺ の m/z 14 に子ピークが現れる。この ようにクラッキングパターンを調べることによって m/z 28 のガス種を特定することができる。残留ガ ス分析で検出される主なガス種や子ピークを表 5 に 示す。

ヘリウムリークディテクタは、ヘリウム専用の質 量分析計と排気システムが一体となった漏れ検査装 置であり、真空容器の容量にもよるが、リークディ テクタ1台で排気からリーク試験までを行える。ヘ リウムリークディテクタの構成例を図 16 に示す。 一般的に質量分析部には磁場偏向型、排気システム の主ポンプには TMP が用いられる。校正するため にヘリウム標準リークが内蔵されている。イオン化

表5 真空装置内の主なガス種

m/z	イオン	残留ガス種	備考
1	$\rm H^+$	H ₂ 、H ₂ O、炭化水素	-
2	H_2^+	H ₂ 、H ₂ O、炭化水素	主な発生源は真空容器材料内からのガス拡散ま
			たはガス分子から解離した水素の再結合。
12	C^+	CO、CO ₂ 、炭化水素	-
14	N_2^{2+} , CO^{2+} , CH_2^+	N ₂ 、CO、炭化水素	-
15	CH_3^+	炭化水素	-
16	O_2^{2+} , O^+ , CH_4^+	O_2 、酸素化合物、 CH_4	CH ₄ であれば <i>m</i> /z 15、14、13 に子ピークが現
			れる。TSP や NEG ポンプは CH ₄ を排気しに
			くいため、これらを使用した真空容器では多く
			検出されることがある。
17	OH^+	H_2O	H ₂ O の子ピーク。
18	H_2O^+	H_2O	ベーキング不足の真空容器で多く検出される。
			<i>m/z</i> 17、16 に子ピークが現れる。
20	Ar^{2+}	Ar	Ar の子ピーク。
22	CO_2^{2+}	CO_2	CO ₂ の子ピーク。
28	CO^+ , N_2^+ , $C_2H_4^+$	CO、N ₂ 、炭化水素	炭化水素であれば、 $m/z \; 27 \; ({ m C_2H_3^+}) \; も子ピー$
			クとして検出される。 ${ m N}_2$ であれば m/z 14 に
			子ピークが現れる。 <i>m/z</i> 28、32 に対して 4:1 で
			検出されていた場合は大気リークの可能性あり。
			CO ₂ の子ピークでもある。
32	O_2^+	O_2	-
39	$C_3H_3^+$	炭化水素	-
40	Ar^+ , $\operatorname{C}_3\operatorname{H}_4^+$	Ar、炭化水素	Ar であれば m/z 20 に子ピークが現れる。クラ
			イオポンプ以外の気体溜め込み式ポンプは Ar
			を排気しにくいため、これらを使用した真空容
			器では多く検出されることがある。また Ar は
			大気に約 1% 存在するため、大気リークの可能
			性あり。
41	$C_3H_5^+$	炭化水素	-
42	$C_3H_6^+$	炭化水素	-
43	$C_3H_7^+$	炭化水素	-
44	CO_2^+	$\rm CO_2$	ベーキング不足の真空容器で多く検出される。
			<i>m</i> / <i>z</i> 28、16、12 に子ピークが現れる。



図 16 ヘリウムリークディテクタの構成例 [1]

部ではフィラメントを使用しているため、 10⁻² Pa 以下にならないと動作できない。しかし、検査時間 を短縮したい場合や、ガス放出が大きくて圧力が下 がらない場合でもリーク試験ができるよう、ヘリウ ムが TMP を逆拡散(カウンターフロー、counter flow)することを利用した漏れ検査ができるように なっている。

TMP の圧縮比は He や H₂ 等の質量の小さい ガスに対して小さく、これより質量の大きいガス に対しては大きい。そのため、真空容器の圧力が 100 Pa 程度のとき、バルブ1と2は閉じ、バルブ3 とフォアバルブを開けると水や窒素などの残留ガ スは TMP を逆流せず、粗挽きポンプで排気される が、ヘリウムの場合はある程度の割合で TMP を逆 拡散して質量分析計へ到達する。これにより真空容 器の圧力が高くてもリークテストを実施できる。

この場合、テストができる下限のリーク量は高く なるため、微小リークの検査は難しい。真空容器の 圧力を下げ、バルブ2、さらにバルブ1からガスを 導入して試験した方がより微小なリークを検出でき る。通常、どのバルブを用いて試験をするかはリー クディテクタが判断し、真空容器の圧力に応じて自 動でバルブの切り替えが行われる。

1.2.5 リークテスト

真空装置を組み上げた後、その気密性を調べるた めにリークテストを行う。許容できる漏れの大きさ は目標到達圧力や装置構成等にもよるが、基本的に は真空装置内の全ガス放出量に比べてリーク量が無 視できる(2桁)ほど小さければ許容できると考え る。例えば、排気速度 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ のポンプで排気 している超高真空システムにおいて、全ガス放出量 が $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ であると、ガス放出由来 の圧力は $2 \times 10^{-8} \text{Pa}$ となる。全リーク量がこれ より2桁小さい $1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ であれば、 リーク由来の圧力は $2 \times 10^{-10} \text{Pa}$ となり、このリー クは許容できるであろう。

したがって、最大許容リーク量 L_{\max} [Pa·m³·s⁻¹] は、平均ガス放出速度 q_{ave} [Pa·m³·s⁻¹·m⁻²] と真空容器内表面積 A [m²] により、

$$L_{\rm max} = 10^{-2} q_{\rm ave} A \tag{27}$$

と書ける。

気体輸送式ポンプを使用した真空システムではこの許容リーク量でほとんど問題になることはないが、気体溜め込み式ポンプを使用した封じ切りの真空システムでは、装置の内容積 $V [m^3]$ 、装置が稼働できる最大圧力 p_{max} [Pa]、装置の想定稼動時間T [s]により、

$$L_{\max} = \frac{p_{\max}V}{T} \tag{28}$$

と書ける。一般的にこのような封じ切りシステムの 方が許容リーク量は小さく、リークテストの合否水 準が厳しくなる。

許容リーク量のおおよその目安を表 6 にまと める。

リークテストは、減圧されている真空容器のフラ ンジや溶接部等のリークが疑わしい箇所ヘガス等を 吹きかけ、このガスが容器内に侵入しているかを調 べる方法(真空法)が一般的である。このとき、吹 きかけるガスはプローブガス(probe gas)と呼ば れ、このような漏れ探しの手法をプローブガス法ま たはサーチガス法と呼ぶ。プローブガス法の中で

表6 各種真空装置における許容リーク量の目安

装置	許容リーク量 Pa・m ³ ・s ⁻¹
小型封じ切り超高真空	≈1×10 ⁻¹³ (検出限界)
大型封じ切り超高真空	1×10^{-12} 以下
小型超高真空	1×10^{-12} 以下
大型超高真空	1×10^{-11} 以下
大型高真空	1×10 ⁻⁷ 以下

も、プローブガスにヘリウムガスを適用した真空吹 付け法 (スプレー法)または真空外覆法 (フード法) がよく用いられる。ヘリウムは次のようなプローブ ガスに適した特徴を持つ。

- ヘリウムイオンは m/z4 であるが、m/z4 に なるガス種はヘリウムの他にはほとんどなく、 また m/z3,5 になるガス種も少ないため、ヘ リウムイオンは識別がしやすい。
- 分子直径が小さいため、リーク箇所から真空容
 器内へ容易に侵入する。
- 毒性、引火性がなく、不活性で取り扱いが容易 である。
- 吸着エネルギーが小さいため、真空容器内へ侵入しても短時間で排気できる。
- ・
 ・
 質量が小さく、分子速度が速いため、リーク箇 所から真空容器内へ短時間で侵入し、遠方にも 短時間で到達する。真空容器内へ侵入しても短 時間で排気できる。
- 大気中に極微量にしか存在しないため、バック グラウンドが小さい。

小型真空容器において、リークディテクタのみで 排気および漏れ探しする場合の構成を図 17 に示す。 スプレー法はスプレープローブから射出されるヘリ ウムガスを真空容器へ吹き付けるため、簡単にリー クテストすることができる。ただし、射出されたガ スは大気中で拡散するため、リーク箇所をピンポ イントで特定することが難しい場合がある。また、 リークディテクタとは別に粗排気を並行して稼働さ せている場合、ヘリウムは粗排気のラインで使用し ているバイトン製 O リング等を透過し、TMP 等を 逆拡散してリークディテクタで検出されてしまうこ とがある。さらに、ガラス製のビューポート等もへ リウムが透過しやすく、透過したヘリウムがリーク ディテクタで検出されてしまうこともある。

フード法は試験対象をビニル袋等のフードで囲 い、その中にプローブを挿し入れてヘリウムガスを 局所的に充満させる手法である。フードを設置する 必要があるが、フードによりバイトン等からのヘリ ウム透過を避けることができ、リーク箇所の特定が 容易になる。また、図 17 のように試験対象全体を フードで囲わず、リークの疑わしいフランジ等のみ にビニルテープを巻きつけ、その中にヘリウムガ スを吹きかけることにより、さらに局所的に漏れ 探しをする場合もある。この場合、プローブをビニ ルテープ内へ挿し入れることが通常はできないた め、注射器のようなものにヘリウムを充填し、針先 をビニルテープに挿し入れてガスを注入する方法も ある。

この他に、真空容器内をヘリウムガスで加圧し、 リーク箇所から外部へ噴出してくるプローブガスを スニファー(sniffer)と呼ばれる吸い込みノズルに より漏れ探しをする方法(スニファー法)もある。 スニファー法はリーク箇所を通して外部に噴出する ガス量が微量で、ガスの分布もリーク箇所の近傍に 限られることから前述の真空法より感度が低いが、 耐圧性の低い容器の気密性を調べる場合にはこの方 法を使うしかない。このテスト方法は冷却水配管・ 継手等のリークテストにも使用できる。

リークディテクタがない場合は熱電離真空計とエ タノールで簡易的にリークテストを行うことができ る。熱電離真空計の指示値をモニターしながらリー クが疑われる箇所にエタノールを吹き付けると、熱 電離真空計のエタノールに対する感度は窒素の約 2.9 倍であるため、リークがあれば熱電離真空計の 指示値が上昇する。なお、ヘリウムを吹き付けた場 合、熱電離真空計のヘリウムに対する感度は窒素の



図 17 真空法 (スプレー法とフード法) [1]

約 0.17 倍であるため、リークがあれば熱電離真空 計の指示値は低下する。

1.2.6 気体の流れと圧力測定

通常、真空容器は真空ポンプで連続的に排気して いるため、容器内には圧力に分布が生じている(例 えば、真空ポンプ近傍は圧力が低い)。真空計が測 定している圧力は、それが取り付けられたフランジ 近傍の圧力 p_g [Pa] を測定しており、実際に圧力測 定したい場所の圧力 p [Pa] はその間のコンダクタ ンス C [m³·s⁻¹] と 流量 Q [Pa·m³·s⁻¹] を使っ て次のようにかける。

$$p = p_g + \frac{Q}{C} \tag{29}$$

したがって、コンダクタンスが大きく(真空計設置 場所と測定したい場所の距離が短く、配管を太く) するほど p_g と p の差を小さくできる。また、図 18 の (2)、(3) のように、ほぼ同じ位置に真空計が設 置されていても、気体の流れ方向に口が向いている (3) は流れの影響が大きく、指示値が高めに出る。 真空計の設置位置は、図中 (1) のように、圧力を測 定したい場所近くで気体の流れ方向と垂直方向に口 を向けることが望ましい。

1.2.7 熱遷移

図 19 に示すような真空容器があり、内部が直径 D[m]の穴が空いている壁で隔てられている。左右 空間の圧力を $p_1[Pa]$ 、 $p_2[Pa]$ 、温度を $T_1[K]$ 、 $T_2[K]$ とする。



図 18 真空計の取付位置 [1]



図 19 温度の異なる真空容器 [1]

$\lambda >> D$ で分子流の場合

開口を通過する気体の温度は直前に脱離した側の 容器温度であり、開口両側からの入射頻度には次の 平衡条件が成り立つ。

$$\frac{p_1}{\sqrt{2\pi mkT_1}} = \frac{p_2}{\sqrt{2\pi mkT_2}}$$
(30)

これにより次式が得られる。

$$p_1 = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} p_2 \tag{31}$$

$\lambda << D$ で粘性流の場合

開口周辺の温度に分布が生じ、分子流領域のよう な入射頻度の平衡条件が成り立たない。気体同士の 衝突と比べて開口の空間的スケールは十分大きいた め、局所的に圧力が釣り合って次式が成り立つ。

$$p_1 = p_2 \tag{32}$$

このように平均自由行程 λ が長くなると温度 差により圧力差が生じる現象を熱遷移(thermal transpiration)という。分子流領域において、測定 対象と真空計に温度差がある場合、熱遷移を考慮し た補正が必要になる。特にガスが堆積することを防 ぐためにセンサー部を昇温した隔膜真空計や、熱 フィラメントを使用する熱陰極電離真空計、クライ オポンプ内部等の圧力を測定する際には熱遷移の補 正が必要になる場合がある。

1.2.8 熱的適応係数

温度 T_{in} [K] の気体が、温度 T_s [K] の固体表面で 散乱された後、温度が T_{out} [K] になったとすると、 熱的適応係数 α は次式で定義される。

$$\alpha := \frac{T_{\rm out} - T_{\rm in}}{T_{\rm s} - T_{\rm in}} \tag{33}$$

熱的適応係数は気体分子が散乱される際の温度の なじみやすさの度合いを 0 から 1 までの値で表し たものである。例えば、散乱後の気体の温度が固体 表面の温度と等しい場合 $(T_s = T_{out})$ は $\alpha = 1$ 、散 乱後の気体の温度が入射前の温度と変わらない場合 $(T_{in} = T_{out})$ は $\alpha = 0$ となる。

なじみやすさを決める重要な要素は気体分子と表 面を構成する分子の質量である。表面分子の質量を M [kg]、入射気体分子の質量をm [kg] とし、気体 分子が速度 $v_{\rm in}$ [m·s⁻¹] で静止した表面へ垂直に弾 性衝突する場合を考える。

衝突前後の運動量保存とエネルギー保存より、衝 突後の気体分子の速度 $v_{\text{out}} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ は、

$$v_{\rm out} = -\frac{M-m}{M+m} v_{\rm in} \tag{34}$$

で与えられる。m << Mのときは $v_{\rm out} \approx -v_{\rm in}$ となり、気体分子は入射とほぼ同じ速さで跳ね返る。

表 7 タングステン表面に対する希ガス分子の熱的適応係数 [6]

He	Ne	Ar	Xe
0.029 - 0.067	0.059 - 0.094	0.3 - 0.44	0.61 - 0.67

表8 種々の表面に対する He の熱的適応係数 [6]

Be	Al	W	Pt
0.145	0.073	0.029 - 0.067	0.03

これに対して m < M の範囲で m が大きくなる と $|v_{out}|$ は徐々に小さくなる。これは入射分子の質 量が大きくなると衝突によってエネルギーを失い、 これにより衝突後の速さが小さくなることを意味し ており、表面になじみやすいことに対応する(直感 的には、質量の大きい壁に質量の小さいピンポン球 や、質量の大きいボーリング球をぶつけた場合の跳 ね返りの違い等から想像できる)。

参考にタングステン表面に対する希ガス分子の熱 的適応係数を表7に、種々の表面に対するHeの熱 的適応係数を表8に示す。前者ではHe、Ne、Ar、 Xeの順に質量が大きくなり、それとともに熱的適 応係数も大きくなり、後者では基盤原子の質量が大 きくなるにつれて熱的適応係数が小さくなっている ことがわかる。

1.3 真空ポンプと排気原理

真空ポンプは排気原理から気体輸送式と気体溜め 込み式の二種類に大別される。気体輸送式ポンプは 真空容器内の気体分子をポンプで大気側へ輸送し、 系外へ排出する。このポンプに固有の性能指標に圧 縮比 K がある。圧縮比は吸気側圧力 p_{in} [Pa] と排 気側圧力 p_{out} [Pa] により次のように定義される。

$$K := \frac{p_{out}}{p_{in}} \tag{35}$$

気体溜め込み式ポンプはそこへ入射してくる気体 分子を吸着作用によって溜め込むため、気体分子は 系外へ排出されない。このポンプ固有の性能指標は 最大吸着量 N_{max} [Pa・m³・g⁻¹] 等で表される。多 層吸着させるクライオポンプや、ゲッター材内部へ の拡散を伴って吸着させる NEG ポンプでは最大吸 着量は大きな値をとる。

代表的な真空ポンプの性能指標を表9に示す。真 空ポンプにはその種類によって動作可能な圧力の範 囲がある。図20には代表的なポンプの動作圧力範 囲を示す。

なお、本テキストにおいて複雑な構造の真空ポン プについては構造概略図を掲載していない。これら の具体的な構造図については真空機器メーカー各社 のカタログ等に掲載されているため、そちらを参照 していただきたい。また、YouTube 等の動画配信 サイトでは真空ポンプメーカーにより動作原理の説 明動画が公開されており、これらは直感的で非常に 分かりやすいため、ぜひ参照していただきたい。

1.3.1 気体輸送式ポンプ 油回転ポンプ

RP は圧縮比が 10⁵ 以上にもなるポンプで、低圧 の気体を大気圧以上の圧力に圧縮し、大気中へ吐出 することで排気する。通常は真空容器を大気圧から 1 Pa 程度まで粗引きするために使用される。

RPの形式には回転翼型(ゲーテ型)、カム型(セ ンコ型)、揺動ピストン型(キニー型)の三種類があ る。シリンダ内には溝付きのローターがあり、回転 翼型の場合はそこにベイン(vane,翼)が取り付け られている。ベインはバネによって常にシリンダ内 面へ押し付けられており、この状態のままローター が回転する。シリンダ部全体はオイルに浸されてお り、これは圧力差を維持するシール、摺動部の潤滑、 最終圧縮死容積の充填と気体の放出、放熱の役割を している。RP の到達圧力は使用するオイルの蒸気 圧や状態に影響されるため、脱ガスされた真空ポン プ用オイルを使用する必要がある。また、水分子の ような凝縮性の気体を排気するとオイル中に水が混 入して到達圧力が高くなってしまう。このような凝 縮性気体の圧縮過程のおいて、ガスバラスト(gas ballast)弁から空気または乾燥気体を圧縮空間内へ

表 9 真空ポンプの性能指標。性能は機種にもよるため、詳細はメーカーのカタログ等を参照。圧縮比と 最大吸着量で括弧書きがない場合は N₂ に対する値である。

気体輸送式ポンプ	RP	ドライポンプ	TMP	DP
排気速度 $S[\mathbf{L} \cdot \mathbf{s}^{-1}]$	0.1 - 250	0.1 - 2500	10-6000	$10^2 - 10^5$
圧縮比 K	$10^4 - 10^6$	$10^2 - 10^6$	$200({\rm H_2})10^{11}({\rm N_2})$	$10^3 - 10^7$
到達圧力 [Pa]	$10^{-1} - 10^{1}$	$10^{-1} - 10^4$	$\approx 10^{-8}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
回転数 [min ⁻¹]	300 - 1500	1500 - 10000	13000-90000	-
気体溜め込み式ポンプ	クライオポンプ	TSP	NEG ポンプ	IP
排気速度 $S[\mathbf{L} \cdot \mathbf{s}^{-1}]$	$10^2 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	$10^2 - 10^4$	$10 - 10^3$
最大吸着量 $[Pa \cdot m^3 \cdot g^{-1}]$	$10^410^6Pa\cdot m^3$	$10^{-3} - 10^{-2}$	$2.7 (H_2) - 0.3 (CO)$	-
排気しにくい気体	H ₂ , He	希ガス、CH ₄	希ガス、CH ₄	希ガス



図 20 代表的な真空ポンプの動作圧力範囲 [1]。動作圧力範囲は機種にもよるため、詳細はメーカーの カタログ等を参照。

導入し、凝縮性気体の分圧が凝縮圧以上になること を防いで気体の状態でポンプ外へ吐出させることが ある。

RP を使用する際は次のことに注意する。

- オイルは劣化するため、定期的に交換する必要 がある。
- 過電流保護機能付き漏電ブレーカーに接続して 使用することが望ましい。
- 排気口と吸気口は同じ形式の取り口になっていることが多く、排気口を超高真空容器側へ接続できてしまう。この状態で RP を始動すると、真空容器側を加圧するだけでなくオイルミストで汚染してしまうため、接続状態が間違っていないか排気前に十分確認すること。
- RP が停止した場合は吸気口側を大気圧に戻す 必要がある。アイソレイトバルブを使用することが望ましい。
- フォアライントラップ、オイルミストフィルタ を使用する。

超高真空用の RP を選定する際に留意すべきポイントは次の通りである。

- 到達圧力が低い。3×10⁻¹ Pa 以下が望ましい。
- 長期間にわたりオイル漏れを起こさない。シャ フトシールがないマグネットカップリングを採 用している機種が望ましい。
- 消費電力が少ない。
- 水蒸気を排気できるようにガスバラスト弁を備 えている。
- オイル逆流防止弁を備えている。
- コンパクト、静音、低振動である。
- 腐食性ガスを排気する場合はケミカル仕様を選 定する。

ドライポンプ

ドライポンプは特定のポンプの形式ではなく、圧 縮室内および気体流路内でオイルまたは液体を使 用しない気体輸送式ポンプの総称である。JIS Z-8126-2 では、「油または液体を運動する部分の隙間 を密閉する目的に使用しない容積移送式真空ポン プ」と規定されている。ドライポンプはオイルミス トの逆流を嫌う半導体産業、液晶産業等の分野で、 製品の歩留まり改善やメンテナンス作業の低減のた めに RP の代わりに使用される。

ドライポンプは大きく分けて回転式と往復動式の

二種類に分けられ、前者にはルーツ型、スクリュー 型、クロー型、スクロール型等、後者にはピストン 型、ダイアフラム型、ベローズ型等がある。一般的 に RP と比べるとドライポンプは高価である。

ドライポンプを使用する際は次のことに注意する。

- 過電流保護機能付き漏電ブレーカーに接続して 使用することが望ましい。
- 排気口と吸気口は同じ形式の取り口になっていることが多いため、間違って排気口と真空容器を接続しないよう注意する。
- ドライポンプでも潤滑油を使用している場合が あるため、慎重を期するのであればメーカーに 潤滑油による汚染可能性について問い合わせる か、油蒸気対策(フォアライントラップ等の設 置等)を行う必要がある。

ターボ分子ポンプ

動いている固体表面に入射した分子が再放出され る際、温度に対応した分子速度に表面の運動方向の 速度成分が加わる。表面の運動速度が分子速度と同 程度であれば、この速度合成による運動方向の変化 は有意となり、静止系から見ると表面の運動方向と 同一方向へ気体分子が放出しているように見える。

TMP は 13000-90000 min⁻¹ で高速回転する タービン翼(動翼)と回転しない固定翼が交互に 多段で配されており、これにより吸気側から排気側 への気体分子の透過確率と、排気側から吸気側への 透過確率に差を作る。動翼に乗った座標系から見 ると、固定翼は高速回転しているように見えるた め、固定翼においても排気側へと向かう確率が高く なる。

翼の支持方式には様々なものがあるが、オイルミ ストの逆流を嫌う場合は潤滑油フリーの磁気浮上 型 TMP が使用されることが多い。また、低真空か ら中真空で良好な排気特性を持つねじ溝ポンプ(ド ラッグポンプ、drag pump)を TMP の背圧側に配 して、1 つの筐体に収めた複合分子ポンプと呼ばれ る機種もある。

TMP の特徴は次の通りである。

- 水素分子のような質量の小さい気体分子に対して圧縮比が低い。
- 気体溜め込み式ポンプではないため、高真空の 環境下でも長時間連続運転ができる(中真空で は発熱により長時間運転できないことがある)。
- クライオポンプ等に比べて起動時間が短い。
- ・
 ・
 質量の大きい気体分子ほど圧縮比が高いため、
 潤滑油が使用されていてもオイルミストの逆流
 による汚染の可能性は低い。

TMP を使用する際は次のことに注意する。

- 運転中の急な大気突入や異物侵入により容易 に故障する。このとき、TMPには大きなトル クが発生することがあり、非常に危険なため、 TMP本体は真空装置等に強固に固定する。ま た、異物侵入防止用のメッシュを使用する。
- 運転中に電源を切らない。
- 大気圧に戻す際は TMP が完全停止した後に乾 燥窒素を導入する。
- 移動、取り外しは動作が完全に停止した後に 行う。

TMP は取り付け姿勢の自由度が高いものを選ぶ と、設置方法の融通が利くので便利である。その 他、超高真空用の TMP を選定する際に留意すべき ポイントは次の通りである。

- 到達圧力が 10⁻⁸ Pa 台である。
- オイルフリー。
- 高圧縮比。
- 吸気口側が 80 ℃ 程度までベークキング可能。
- 長期間メンテナンスフリー。

1.3.2 気体溜め込み式ポンプ

クライオポンプ

クライオポンプは低温に冷却した表面に気体分子 を凝縮、吸着させて排気する。冷却する方法として 液体ヘリウムを使用する場合もあるが、通常の真空 装置で使用される機種は小型ヘリウム冷凍機を使用 する。冷凍機の第1段ステージに取り付けられてい る輻射シールドとバッフル (buffle) は 80 K 程度ま
で冷却され、 H_2O や CO_2 等を凝縮して排気する。 冷凍機の第2段ステージに取り付けられているソー プションパネル (sorption panel) とコンデンセー ションパネル (condensation panel) は 15 K 程度 まで冷却され、 H_2 、 O_2 、Ar 等を凝縮して排気する。 ソープションパネルには活性炭等の吸着剤が使用さ れており、 H_2 、Ne、He 等の 15 K においても蒸気 圧が高いガス種はこれにより吸着して排気する。

クライオポンプの消費電力、騒音、振動は機種に 依存するため、機種選定の際はこれらに留意する。 また、ベーキングが可能な機種は少ない。

クライオポンプの特徴は次の通りである。

- 排気速度が大きい。
- オイルフリーで、ほとんどのガス種を排気で きる。
- ポンプ内面の大部分が低温であるため、ポンプ からのガス放出が少ない。
- オイルミスト等の質量の大きい分子は低温面から放出されないため、オイルによる汚染を防 げる。
- クライオポンプ運転中に粗引きポンプを停止で
 きる(補助ポンプ不要)。
- 一定量の気体を排気すると排気性能が低下するため、室温に戻して吸着している気体を排出させる再生操作が必要になる。

スパッタイオンポンプ

IP は超高真空から高真空領域で排気性能を持つ ポンプで、図 22 のような CCG と同様の構造を持 つ。円筒状のアノードと板状のカソードの間には 3-7 kV 程度の高電圧を印加する。この高電圧でカ ソードから放出された電子は、磁場により螺旋運動 しながら対向するカソードとの間を往復運動する。 この空間に飛び込んだ気体分子、原子の一部は電子 と衝突してイオン化し、電場により加速されてカ ソード表面に打ち込まれて排気される。カソードは チタン製であり、このイオンの衝撃によってチタン 原子がスパッタされてポンプ内面に活性な表面が生 成される。ここに気体が化学吸着する効果によって も排気される。このような排気原理のため、IP の



図 21 KEKB で観測されたアルゴン不安定性(金 澤健一先生提供)。この圧力を測定している場所 の近傍でリークがあったため、大気からアルゴン がビームパイプ内へ供給されていたと考えられる。

排気速度はガス種によって大きく異なり、特に希ガ スに対する排気速度は非常に小さい。

IP で He を排気すると、He はイオンとしてカ ソードに入り込み、後から飛来したチタンによって 埋め込まれる。そのため、カソードの温度上昇や、 後続イオンのカソードへの打ち込みによって He と チタンが同時に放出される。これは履歴現象と呼ば れ、同様な現象は He 以外のガスでも見られる。

IP で Ar を排気した場合は He と同様にカソー ドに入り込んで埋め込まれるが、原子直径が大きい ため、カソードへ深く入り込みにくく、排気速度が 小さい。特にチタン製カソードの二極型 IP で Ar を一定量排気すると、Ar の分圧が周期的に上昇す ることがある(図 21)。この現象はアルゴン不安定 性と呼ばれ、Ar 以外の希ガスでも同様の現象が発 生することがある。

このような現象および希ガスに対する低い排気速 度への改善策として、カソードの一方をタンタルに した二極型 IP がある。このポンプではカソードに 打ち込まれた Ar を質量の大きいタンタルで埋め込 んで再放出を防ぐ。この他には三極型 IP があり、 ノーブルポンプ (noble pump) やエクセルポンプ (excel pump) とも呼ばれる。このポンプはアノー ド、カソード、コレクタ(ポンプケース)から構成 されており、カソードはすのこ形状になっている。



図 22 スパッタイオンポンプの概略 [1]

イオン化した一部の希ガスはカソード近傍で電荷交 換をして電気的に中性となり、ポンプケースへ高速 のまま深く打ち込まれることが期待される。また、 ポンプケース表面はカソードに比べて高速粒子の衝 撃を受ける確率が低いため、打ち込まれた気体の再 放出を防ぐことができる。ただし、カソードがすの こ形状で面積が小さいため、窒素等に対する排気速 度は二極型に比べて若干劣ることがある。

IP の特徴は次の通りである。

- オイルフリー、無騒音、無振動である。
- 機械的に動く箇所が全くなく、信頼性が高い。
- 10⁻⁹ Pa 台まで排気が可能。
- 放電電流からポンプ内の圧力をモニターできる。
- 大流量の気体の排気には適さない。電極の汚染 を防ぐため、10⁻⁶ Pa 以下の圧力で使用することが望ましい。
- 希ガスのような不活性な気体に対する排気速度 が小さい。
- 漏洩磁場、スパッタされたチタンによる汚染に 注意が必要。
- 一定のガス負荷で使用を続けると排気速度が 減少する。排気速度を回復させるにはベーキ ングが必要。大気ベントした後も排気速度は低 下するため、再立ち上げの際にもベーキングが 必要。

 放電開始時にガス放出があり、放出量は IP の 履歴に依存する。

チタンサブリメーションポンプ

活性な金属表面は気体分子を吸着し、排気作用を 有する。蒸発型ゲッタポンプ(evaporatable getter pump)はゲッタ材を蒸発・昇華させ、周囲のポン プ内壁面等に活性な膜を常時作り、その薄膜の吸着 作用(ゲッタ作用)により排気するポンプである。 固体表面に吸着されるガスの総量には限度があるた め、連続して排気作用を持たせるためにはこの吸着 気体分子を除去するか、活性な金属表面を作り続け る必要がある。

ゲッタ材としてはチタン、モリブデン、タンタル、 ニオブ等が使用され、特にチタンを使用したポンプ を TSP と呼んでいる。フィラメント式 TSP では チタン製フィラメントに直接通電、加熱してチタン を昇華させる。ポンプケースも温度上昇するため、 通水等により冷却する。

TSP の特徴は次の通りである。

- ・ 排気速度は 1 cm² あたり 3−9 L · s⁻¹ である。
- 小型、軽量である。
- オイルフリー、無騒音、無振動である。
- ポンプの大きさに比例して排気速度が大きい。
- 希ガスのような不活性な気体に対する排気速度 が小さい。

- メタンは金属表面に極めて弱く吸着するため、 排気しにくい。さらに、後から来るより強く吸 着するガスによってメタンは置き換えられ、メ タンが真空中へ再放出される(これは置換脱 離と呼ばれる)。メタンを排気するには IP や TMP を併用する。
- 昇華されたチタンによる汚染の可能性がある。

非蒸発型ゲッターポンプ

TSP では活性な表面を常時作成するが、NEG ポ ンプでは吸着気体をゲッタ材中に拡散していくこ とで表面での排気能力を持続させる。ゲッタ材とし ては Zr-Ar 合金や、Zr-V-Fe 合金等が使用される。 NEG ポンプで水素を排気する場合、合金内に固溶 体を形成して可逆的に収着する。この水素の収着は ゲッタ材内部の水素濃度が周囲の水素分圧と平衡に なるまで継続し、平衡圧はゲッタ材の種類や温度に よって決まる。

NEG ポンプに排気作用を持たせるには活性化 (activation)と呼ばれる工程が必要になる。NEG ポンプには通常ヒーターが設置されており、これに 通電することによりゲッタ材を高温にすると(Zr-Ar 合金では約400°C、Zr-V-Fe合金では約280°C)、 吸着分子のゲッタ材内部への拡散速度が増し、吸着 分子を固体内部に取り込んで蓄積できるため、表面 の排気作用が回復する。

さらに高温にすると (Zr-Ar 合金では約 700°C、 Zr-V-Fe 合金では約 550°C)、固体内部に取り込ま れた気体の大部分を再放出して排気作用が回復す る。活性化により放出する気体は他の IP や TMP により排気する。CO₂ 等のガスは高温にしても再 放出されにくいため、徐々にこれらの気体がゲッタ 材内部に蓄積されていき、これが NEG ポンプの寿 命につながる。

NEG ポンプはメタンを排気しにくいため、IP や TMP と併用されることがある(NEG ポンプと IP を組み合わせた NEXTorr (R) [52] 等の製品もある)。 NEG ポンプの特徴は次の通りである。

 ・ 排気速度は 1 cm² あたり 0.1−0.3 L·s⁻¹ で ある。

- 小型、軽量である。
- オイルフリー、無騒音、無振動である。
- ポンプの大きさに比例して排気速度が大きい。
- 希ガスのような不活性な気体に対する排気速度 が小さい。
- メタンは排気しにくく、置換脱離が見られる。
 メタンを排気するには IP や TMP を併用する。
- 活性化を行う必要がある。
- 無電力でも排気作用が持続する。
- 活性化やベントの過程でダストが発生する。
 ダストの発生を低減したゲッタ材(例えば、 ZAO(R) [53])を使用した製品もある。

1.4 真空用材料

真空用材料を選定する際は、目標圧力、化学、熱 源・レーザー光・荷電粒子・放射線・磁場等の有無、 温度、残留ガス成分等の諸使用条件を決めた上で検 討する。特に、熱源やレーザー光等が真空装置内に 存在する場合、昇温脱離(thermal desorption、熱 的なガス放出)や光刺激脱離(Photon Stimulated Desorption, PSD)によりガス放出が増大すること を考慮に入れる必要がある。

次に、大気圧に対して十分な機械的強度を有し、 半永久的にリークの発生しない真空装置を目指して 材料・構造を検討する。超高真空システムの場合は ベーキングが必須であるため、温度による強度の変 化も考慮して検討する必要がある。

使用材料の蒸気圧やガス放出特性を把握しておく 必要もある。各元素の温度と平衡蒸気圧の関係は各 種ハンドブック等にまとめられている(例えば [40] 等)。ベーキング温度付近で蒸気圧の高い元素には Mg、Zn、Cd 等があり、これらが存在する真空容 器をベーキングする際には注意が必要になる。

この項では各種材料の物性値等を掲載している が、これらは製品のグレードや製造ロット等によっ ても異なるため、あくまで参考値として捉えていた だきたい。正確な値は、各メーカーのカタログや、 ミルシート(mill test report、金属材料等の質を証 明する添付書類)等により確認していただきたい。

1.4.1 無機材料

真空容器や内部部品に使用される金属・合金材料 の性質を表 10 に、ガス放出速度を表 11 にまとめ ている。真空機器に使用される材料はステンレス綱 とアルミニウム合金が主である。加速器等の特殊な 分野では銅やチタンが使用されることもある。真鍮 と鋳鉄は内部に金属が固化する際にできる、細く長 い穴(鬆)ができやすいため、高真空から超高真空 では使用しない。軟鋼は安価で加工性も良いが、耐 食性に乏しく、さらにガス放出速度も大きいことか ら使用しない。また、真鍮は蒸気圧の高い亜鉛を含 み、鋳鉄と軟鋼は酸化しやすく水を吸着し、水素も 吸蔵しやすいため、使用しない。

表11 真空用金属・合金材料のガス放出速度 [58]。 q_1, q_{10} はそれぞれベーキングなしの排気 1 時間、10時間後のガス放出速度で、単位は ×10⁻⁷ Pa・m³・s⁻¹・m⁻² である。

材料	q_1	q_{10}
SUS304	27	3.3
SUS304 (酸洗)	40	2.0
純アルミニウム	130	13
A6061	530	53
純銅	530	55
純銅(機械研磨)	47	4.8
無酸素銅	250	17
無酸素銅(機械研磨)	25	2.2
真鍮	5300	130
軟鋼	7200	670
ニッケル	8000	2000 (4h)
ニッケルメッキ/アルミ	2500	240
ニッケルメッキ/軟鋼	110	9.4
金	2100	6.8
モリブデン	69	4.9
チタン	53	4.9

ステンレス鋼

ステンレス鋼は強度、溶接性、耐食性に優れ、ガ ス放出も小さくできることから、広く使用されてい る。真空容器に用いられるのは Cr を 18%、Ni を 8% 含み、非磁性のオーステナイト系(SUS300 番 系)ステンレス鋼である。図 23 には SUS302 を起 点とした特性改善の系統図を示す。真空用材料とし て最もよく使われている材料は SUS304 と SUS316 の系列である。これらは TIG 溶接 (Tungsten Inert Gas welding、タングステン-不活性ガス溶接の意) において気密性が高く、リークのない接合ができ、 電解研磨処理とベーキングによりガス放出速度 を 10^{-10} Pa · m³ · s⁻¹ · m⁻² 以下にすることもで きる。

ただし、冷間加工等によりオーステナイト組織の 一部がマルテンサイトに変態すると透磁率が上昇

材料	密度 [g · cm ⁻³]	融点 [°C]	線膨張係数 ×10 ⁻⁶ [°C ⁻¹]	熱伝導率 [W · m ^{−1} · K ^{−1}]	固有抵抗 $[\mu \Omega \cdot \mathrm{cm}]$	引張強さ [MPa]
SUS304	7.93	1400 - 1427	17.3	16.7	72	≥ 520
SUS316	7.98	1371 - 1400	16.1	16.7	74	≥ 520
A1100	2.7	660	24	237	2.7	89.2
A2014	2.8	507 - 638	23	150	2.3	482
A5052	2.68	595 - 640	23	140	5	191
A6063	2.71	605 - 650	23	200	3.1	241
銅	8.9	200 - 250	16.5	390	1.7	200 - 250
$0.2\%{\rm BeCu}$	8.75	1004 - 1070	17.6	205 - 260	2.9 - 3.4	490 - 635
AL-15	8.9	1083	16.6	365	2.21	441
ニッケル	8.9	1455	13.3	82.8	8.7 - 9.5	290 - 780
Inconel625	8.44	1290 - 1350	12.8	9.8	129	950
金	19.3	1064	14.2	300	2.4	120-200
白金	21.5	1768	10.2	71	10.6	180 - 200
銀	10.5	962	18.9	428	1.47	220
チタン	4.5	1663 - 1673	8.5	23-25	50	510 - 720
タングステン	19.3	3387	4.5	174	5.65	1080
モリブデン	10.22	2623	4.9	138	5.78	690–980
タンタル	16.65	3017	6.5	58	12.4	980
パイレックス	2.23	820(軟化点)	3.6	1.1	10^{22}	44 - 69
バイコール	2.2	1050(転移点)	0.55	1.5	10^{17}	34 - 62

表 10 真空用金属・合金材料の性質 [54-57]。AL-15 は GLIDCOP のグレード名である。

する。合金中の Ni 量を増加させるとオーステナイ トが安定化し、マルテンサイト変態しにくくなる。 SUS304 に比べて SUS316 と SUS310 は Ni を多く 含むため、冷間加工等により透磁率はあまり変化し ない。特に非磁性が強く要求される静電アナライ ザー等の装置には、オーステナイトの安定性が高い SUS310 を使用するのが良い。

ステンレス鋼を 550-700 °C 付近まで加熱すると 粒界に炭化物が析出し、その近傍にクロム欠乏層が 形成されて粒界が腐食されやすくなる。その防止の ために炭素量を 0.03% 以下にした L 種(SUS304L や SUS316L。Low carbon に由来)や、チタンやニ オブを少量添加した SUS321 と SUS347 が用いられ ることもある。炭素量を低くすると強度が下がるた め、窒素を添加して強度を上げた LN 種(SUS304LN や SUS316LN。Low carbon Nitrogen added に由 来)がある。ステンレス鋼は 600 ℃ 程度に加熱しても機械的強度は低下しないが、銅ガスケットを用いた ICF フランジの場合、銅の焼き付きが生じることからベーキングの温度は 450 ℃ に限定される。

なお、押し出し成形されたステンレス丸棒には押 し出し方向に鬆が入っていることがあり、リークの 原因になるため、原則丸棒材でフランジ、パイプを 製作しない。

アルミニウム合金

アルミニウムは完全非磁性、軽量、熱伝導率が大 きく、ガス放出もステンレス鋼と同程度に小さくで きる。また、加速器においては残留放射能の減衰が 早いことからも採用されることがある。ステンレス 鋼に比べると強度、硬さ、溶接性で劣る。真空用材 料として用いられるアルミ合金は純アルミニウム (A1000 番系)、Al-Cu 系合金 (A2000 番系でジェ



図 23 オーステナイト系ステンレス鋼の系統図 [1]

ラルミンとも呼ばれる)、Al-Mg 系合金(A5000 番 系)、Al-Mg-Si 系合金(A6000 番系)である。一般 的に真空容器には A6063、フランジには CrN イオ ンプレーティング被覆して耐摩耗性、耐腐食性を高 めた A2219 が使用される。

アルミニウム合金は 200 °C 以上で強度が著し く低下するため、ベーキング温度は最高 150 °C 程 度に留める。また、アルミニウム自体の蒸気圧は 1×10^{-26} Pa と低いが、合金元素である Mg は 1×10^{-7} Pa、Zn は 1×10^{-6} Pa と高いため、注意 が必要である。高湿度大気中への放置や加工後の水 洗により、表面に多孔性の水酸化物層を形成しやす く、水の吸着量が多くなる。このため、特殊押出し や特殊切削により、表面に緻密で安定した酸化層を 形成させる必要がある。

ステンレス同様、押し出し成形されたアルミニウ ム丸棒には押し出し方向に鬆が入っていることがあ り、リークの原因になるため、原則丸棒材でフラン ジ、パイプを製作しない。

銅

銅は熱伝導・電気伝導性に優れているため、バッ フル、冷却配管、電子菅、加速器等に使用され、放 射線のシールド効果も高い。ステンレス鋼に比べる と強度、硬さ、溶接性で劣る。真空用材料として無 酸素銅(Oxygen Free High Coductivity copper、 OFHC)のC1020(純度 99.96%以上、酸素含有量 0.02%以下)等が用いられる。銅中の酸素は融点以 下で取り除くことが難しく、酸素が存在するとろう 付けの際に水素脆化の原因となるため、ろう付けす る場合は無酸素銅を使用する。

ベリリウム銅は熱伝導性・強度に優れているた め、電子増倍管等に用いられる。また、ステンレ スの輻射率(0.36)と比べてベリリウム銅の輻射率 (0.05以下)は低いため、熱フィラメント等の近く で用いると材料の温度上昇が抑えられ、結果ガス放 出も抑えられる。加速器ではベローズチェンバーに おけるコンタクトフィンガー(contact finger、ベ ローズの蛇腹構造等を高周波電磁場からシールドす るための部品。図 41 を参照)等の真空機器の材料 に採用されることがある。

グリッドコップ(GLIDCOP®)は銅・アルミニ ウム合金にアルミナ粒子を分散強化した材料で、高 温においても軟化することなく、高強度・高熱伝導 性・高電気伝導性を保持するため、ヒートシンク、 X線管等に使用される。加速器ではミラーやクロッ チ(crotch、ビーム路と放射光路が分岐する箇所) 等の放射光を直接受けて発熱する機器等でグリッド コップが採用されることがある。

ニッケル

ニッケルは加工がしやすく融点が高い。蒸気圧も 低いため、カソード、アノード、熱遮蔽板等に使用 される。また、インコネル(Inconel®)やモネル (MONEL®)等のニッケル合金は高い強度と耐熱 性を有することから、ガスケット、ヒーター、耐熱 部材として使用される。ニッケルは水素溶解度が高 いが、400-500 ℃に加熱することによって機械的 強度を低下させることなく水素を排出することがで きる。

インコネルはニッケルをベースとした鉄、クロ ム、炭素等の合金で、高温における耐熱性、耐腐食 性、耐酸化性、耐クリープ性に優れている。高温に おいても高い弾性性能を有し、種類によっては非磁 性であることから、加速器ではベローズチェンバー におけるスプリングフィンガー(spring finger、コ ンタクトフィンガーを内筒へ押さえつけるための内 筒裏側に設置する部品。図 41 を参照)等の真空機 器の材料に採用されることがある。ただし、熱伝導 率は悪く、加工性が劣る。

貴金属

金、白金、銀は酸化雰囲気でも安定で、加工が容 易である。銀は固体潤滑材、白金は高温用るつぼ、 熱電対、フィラメント等に使用される。また、ベー キング中の酸化膜形成を抑え、メタルガスケット取 り外し時に剥離した酸化膜がチェンバー内へ飛散す ることを防ぐためにガスケットに金または銀メッキ を施すことがある。これによりシール面の密着性を 向上させる効果も得られる。

チタン

チタンは軽量、高強度、低ガス放出速度、非磁性、 低放射化材料で、真空容器に使用されることもあ る。ステンレス鋼に比べると強度、硬さ、溶接性で 劣る。活性な金属で気体と反応しやすいため、ゲッ タ材として使用される。

高融点材料

試料周りや高温になる箇所に使用する高融点材 料としてタングステン、タンタル、モリブデン等が ある。

タングステンは融点が最も高く、高温でも強度 が高い。蒸気圧も低いため、ガス放出速度も小さい ことからフィラメント、ヒーター等に使用される。 真空計のフィラメント等には蒸気圧の低いトリア (ThO₂、二酸化トリウム)を含有させ、高温での再 結晶化を抑制し、トリウムによる仕事関数の低減効 果で熱電子放出を容易にしたワイヤが用いられる。 ただし、高温では水蒸気がタングステン表面で分 解して蒸気圧の高い酸化タングステン(WO₂)と 原子状水素が形成され、酸化タングステンは蒸発、 原子状水素は酸化タングステンから酸素を奪って 水蒸気に戻るというプロセスを繰り返す。これは ウォーターサイクル(water cycle)と呼ばれ、フィ ラメントの消耗を早めるため、酸素や水には注意 が必要である。また、タングステンは粒界脆性があ り、1200 °C 以上の高温に晒すと再結晶脆化し、さ らに放射線照射により照射脆化することが知られて いる [59]。

モリブデンはタングステンより柔軟で加工しやす く、熱遮蔽板、反射板、高温部の指示材、グリッド 等に用いられる。ただし、600 ℃ 以上で酸化され やすいため、注意が必要である。

タンタルは耐腐食性に優れており、延性が高いた め曲げ、打ち抜き、プレスといった成形加工が容易 である。ただし、タンタルは高価であるため、他の 材料では耐腐食性等の観点から不適合な場合に採用 が検討される。

ガラス

現在では真空用構造材料としてガラスを使用する ことはほとんどないが、真空容器内部の状態を確認 等するためのビューポートや、導入金属端子の封着 等に使用されている。ビューポートにはパイレッ クス(Pyrex®)で知られるホウケイ酸ガラスや、 バイコール(Vycor®)で知られる石英ガラス、コ バール(Kovar®)ガラスが用いられる。使用温度 や観測したい波長領域を考慮して材質を選定する必 要がある(1.5.8 項を参照)。

封着用には相手の金属に応じてコバール・ホウケ イ酸ガラス、パーマロイ・ソーダライムガラス、モ リブデン・ホウケイ酸ガラス等を使い分ける。ガラ スは蒸気圧が低いが、ヘリウムを透過するのでリー クテストの際には注意が必要である。

セラミック

セラミック材料の性質を表 12 に、ガス放出速度 を表 13 にまとめている。セラミックは真空中のる つぼや、潤滑材、絶縁材、スペーサー、ヒーター用 サポート等に使用される。セラミックは粉体原料に

表 12 真空用セラミック材料の性質 [60]

材料	密度 [g · cm ⁻³]	融点 [°C]	熱伝導率 [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	絶縁耐力 $[kV \cdot mm^{-1}]$	体積抵抗率 $[\Omega \cdot \mathrm{cm}]$	曲げ強さ [MPa]
SiC	3.2	3000	200	-	10^{5}	540
AlN(高密度材)	3.4	1900	150	14	$> 10^{14}$	310
サファイア	3.97	2050	41	48	$> 10^{14}$	690
アルミナ(99%)	3.8	1700	29	15	$> 10^{14}$	310

助剤を添加し、常圧または高圧環境下で高温焼結し て製造される。そのため、助剤や不純物偏析が存在 する多結晶体になり、セラミック粒子自体からのガ ス放出は少なくても、粒界に存在する不純物に起因 するガス放出や、気孔内に残存するガス放出が大き い場合があるため、注意が必要である。

非酸化物セラミックの炭化ケイ素(SiC)、窒化ア ルミ(AlN)は高融点、高硬度で化学的に安定で、 ガス放出速度も小さい。セラミックとしては高い熱 伝導率を持つことから、高周波電磁場(RF)を吸収 するための吸収体として使用されることがある。

酸化物セラミックはガラスに比べて熱衝撃に 強く、電気絶縁性に優れている。特にアルミナ (Al₂O₃)は真空用材料として最もよく使用される。 アルミナは純度が高いものほど機械的特性、絶縁性 に優れる。アルミナの単結晶であるサファイアは特 に高温での絶縁性に優れ、熱伝導率も高い。光の透 過率が広い波長領域で高いため、紫外光用の窓材と して使用される。

酸化物セラミックは一般的に二次電子放出率 (Secondary Electron Yield、SEY)が高く、真空 中での高電圧印加や電子衝撃等によりチャージアッ プや沿面放電が誘起される。特に RF 中ではマルチ パクタ (multipactor)と呼ばれる、二次電子の共鳴 増殖現象が起き、材料を破壊することもある。SEY を低減させるため、窒化チタン (TiN)等で酸化物 セラミックをコーティングすることもある。

1.4.2 有機材料

高弾性、低摩擦係数、電気絶縁性、加工性からガス ケット、Oリング、絶縁部品、摺動部品等で有機材

表 13 真空用セラミック材料のガス放出速 度 [61-65]。 q_1 、 q_{10} はそれぞれベーキングなし の排気 1 時間、10 時間後のガス放出速度で、単位 は $\times 10^{-5}$ Pa · m³ · s⁻¹ · m⁻² である。

材料	q_1	q_{20}
SiC(黒鉛被覆)	15	0.48
AlN(高密度材)	3.2	0.19
アルミナ(96%)	67	11
ジルコニア	160	6.7
マコール	11	0.69

料が使用されている。有機材料は金属材料に比べて 使用可能温度が低く、気体の透過率も高い。ガス放 出速度も大きいため、使用条件を十分考慮して選定 する必要がある。特に、有機材料は放射線により劣 化するため、放射線環境下での長期使用には適さな い。真空機器に使用される有機材料の性質を表 14 に、ガス放出速度を表 15 にまとめている。有機材 料は充填剤や可塑剤、硬化剤の使用量により性質に ばらつきが出るため、注意を要する。

プラスチック

高真空から超高真空ではテフロン(Teflon®)に 代表されるフッ素樹脂や、カプトン(Kapton®) で知られるポリイミドが用いられる。テフロンは 四フッ化エチレン樹脂(polytetrafluoroethylene, PTFE)で、使用温度範囲は-80-200 °C と広く、 またガス放出が低い。テフロンは真空中での摩擦係 数が低いため、軸受や摺動部にも使用される。ただ し、耐放射線性が低い(使用上限線量は 10^3 Gy 程

材料	密度 [g · cm ⁻³]	耐熱温度 [℃]	伸び [%]	絶縁耐力 $[kV \cdot mm^{-1}]$	体積抵抗率 $[\Omega \cdot \mathrm{cm}]$	引張強さ [MPa]
ケル–F	2.1	200	100 - 200	19	1.2×10^{15}	40
テフロン	2.13 - 2.22	280	200 - 400	19	$> 10^{18}$	13-34
カプトン	1.36 - 1.43	275	5 - 7	20	$10^{14} 10^{15}$	73–87
バイトン	1.80 - 1.92	150	100 - 500	20	10^{12}	6.9 - 19
カルレッツ	1.9 - 2.0	275	140	-	-	13

表 14 真空用有機材料の性質 [66]

度 [68]) ことに注意が必要である。

カプトンは実用化されているプラスチックの 中で最も耐熱性に優れ、短時間では最高使用温 度が 482 °C、連続では 260 °C で使用可能であ る。そのため、ベーキングに対応したバルブの シールとしても使用される。ただし、吸水率が 0.24% と高く、ベーキング前のガス放出速度も 10^{-4} Pa · m³ · s⁻¹ · m⁻² と高いが、ベーキングに より 4 × 10⁻⁸ Pa · m³ · s⁻¹ · m⁻² 程度まで低減す ることができる。

エラストマー

エラストマー (elastomer) は弾性、伸縮性がある 高分子材料の総称で、ガスケットや O リングに使 用される。高真空から超高真空ではバイトン (Viton (\mathbb{R})) で知られるフッ化ビニリデン (vinylidene fluoride, FKM)、ケル–F (Kel-F (\mathbb{R})) で知られるポ リクロロトリフルオロエチレン (polychlorotrifluoroethylene, PCTFE)、カルレッツ (KALREZ (\mathbb{R})) で知られるパーフロロエラストマー (perfluooroelastomer, FFKM) が用いられる。

バイトン A のガス放出速度はベーキング前 で $10^{-3}-10^{-4}$ Pa·m³·s⁻¹·m⁻² と高いが、真空 脱ガスにより 10^{-7} Pa·m³·s⁻¹·m⁻² 台に低減 させることができる。また、空気に対して約 5×10⁻¹³ Pa·m³·s⁻¹·m⁻²·Pa⁻¹のガス透過が あり、空気はおよそ5×10⁻⁸ Pa·m³·s⁻¹·m⁻²の 速度で大気から真空容器側へ透過する。この容器を 排気速度 0.1 m³·s⁻¹のポンプで排気していると、 空気分圧は5×10⁻⁷ Pa となる [69]。リークチェッ

表 15 真空用有機材料のガス放出速度 [58,67]。 q_1 、 q_{10} はそれぞれベーキングなしの排気 1 時間、10 時間後のガス放出速度で、単位は × 10^{-5} Pa·m³·s⁻¹·m⁻² である。

材料	q_1	q_{10}
エポキシ	1500	-
塩化ビニル	110	2.7
ケル-F	5.3	2.3
テフロン	470	250
カプトン	11	-
バイトン A	150	-
カルレッツ	0.4	-

クの際にはヘリウムを透過するため、注意が必要で ある。

カルレッツはベーキングなしでもガス放出が 4×10^{-6} Pa·m³·s⁻¹·m⁻² と低いが、バイトン A と 比べると高価で、カルレッツ 4079 のヘリウムに対 するガス透過率は約4倍高い [70]。

1.4.3 表面洗浄

材料は通常鍛造、圧延等の工程を経ており、これ に切削、研磨、塑性加工、溶接等の加工をして真空 容器や部品を製作する。そのため、未洗浄の表面に はオイルや粉塵等の多量の汚染物質が付着してお り、ガス放出速度も大きい。そのため、目標とする 圧力領域と材料に応じた表面処理をし、ガス放出を 低減させる必要がある。目標圧力に応じた洗浄工程 のフローチャートを図 24 に示す。

予備洗浄 (機械研磨)

ブラシ、砥石、バフ等による研磨や、サンドブラ スト、ガラスビーズブラストにより厚い酸化膜や大 きな傷を除去する。この工程で表面に小さな傷が形 成され、研磨剤等が表面に埋め込まれてしまう。例 えばサンドブラストで表面に付着する粉体は水蒸気 洗浄や酸洗で除去する。

脱脂洗浄

機械加工等で表面に付着したオイル等の汚染物を 除去する工程で、従来は有機溶剤による蒸気洗浄や 超音波洗浄が実施されていたが、環境保全の観点か ら、より安全な薬品(主にアルカリ洗浄剤)による 洗浄に切り替えられている。

化学研磨

脱脂洗浄後に材料表面に形成されている自然酸化 膜を除去し、緻密な酸化膜を形成させるとともに、 脱脂工程で除去しきれなかった汚染物質を除去す るための工程。酸洗浄やアルカリ洗浄により研磨 する。

電解研磨

酸中で電解により表面層を溶解させ、汚染物質や 変質層を除去する工程。仕上がりは研磨前の表面粗 さに左右されるため、バフ研磨等を実施して平坦に した表面に対して実施することが多い。最大表面高 さ R_z で 0.2-0.4 µm 程度が得られる。

放電洗浄

真空中でのガス放電により、表面の不純物をス パッターして除去する。ガスには Ar、Ar + O_2 等 が使用される。Ar では物理的スパッター、Ar + O_2 は物理的スパッターに加えて化学反応による洗浄効 果も得られる。

すすぎと乾燥

湿式の洗浄、研磨ではすすぎ洗いと乾燥が重要 な工程となる。最終的なすすぎには純水、温純水洗 浄、超音波洗浄等が行われ、乾燥には熱風や乾燥窒 素によるブローが行われる。



図 24 圧力に応じた表面洗浄のフローチャート [71]。括弧書きの工程はオプショナル。

1.5 真空用部品

1.5.1 永久固定シール

大気圧からガスの侵入を止め、ある空間の真空状 態を維持することを一般的に真空シール(vacuum seal)と呼ぶ。真空シールは固定シールと軸シール に大別され、固定シールは永久固定シールと着脱可 能シールに分けられる。

永久固定シールは材料同士の接合により真空容 器・部品を密封する方法で、TIG 溶接、ろう付け、電 子ビーム溶接(Electron Beam Welding、EBW)、 摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding、FSW)、熱 間等方圧接合(Hot Isostatic Pressing、HIP)、ガ ラス封着、セラミック封着等が使用される。

TIG 溶接

TIG 溶接は電気を用いたアーク溶接の一種で、主 に同種金属同士を接合する際に用いられる。TIG 溶接ではアーク放電による高温にも耐え、ほとんど 溶融しないタングステンが電極に使用される。この 電極とは別に溶接棒(溶加材)をアーク中で溶融し て母材を接合する。溶接時は母材が高温になるた め、大気を遮断して表面の酸化等を防止する目的で 不活性ガスを多量に吹き付ける。通常、不活性ガス にはアルゴンが使用される。

アルミニウム合金や銅等は熱伝導率が高く、加え られた熱が急速に母材へ拡散することにより接合不 良等の欠陥が発生しやすい。さらに、線膨張係数が 大きく、溶接時の変形量も大きいことからも、溶接 が非常に難しい材料である。

大気側から溶接した場合、真空側溶接部に小さな 隙間ができてしまうことがある。この隙間はコンダ クタンスが小さいため、中にある気体を排気しにく い。これはスローリーク(slow leak)と呼ばれ、目 標圧力への到達を妨げることがあるため、原則真空 側から溶接する必要がある。止むを得ず大気側から 溶接する場合は、溶接ビードが真空側まで繋がるよ うに開先を大きくする等の処置をする必要がある。 また、この場合は溶接面の反対面からも不活性ガス を吹き付ける必要がある。

TIG 溶接は比較的安価であるが、局所的に加熱されるために歪みが発生する場合があり、寸法精度は

ろう付けや EBW に劣る。

ろう付け

ろう付けは母材よりも融点の低いろう材と呼ばれ る合金を溶かし、母材自体はほとんど溶融させずに 複数の部材を接合させる接合方法である。異種金属 の接合も可能で、あらかじめ部材にろう材を組み込 んだ状態で炉へ入れて加熱し、ぬれと毛細管現象に よって接合部の隙間に溶融したろう材を浸透させて 接合する。材料の酸化を防ぐために炉内を高真空に した真空炉、炉内を 10⁻² Pa 程度まで排気した後 に不活性ガスで置換した不活性ガス炉、炉内を同じ く 10⁻² Pa 程度まで排気した後に水素ガスで置換 した水素ガス炉等で処理される。

ろう付けは数百℃で処理されるため、ベーキング 効果も期待できる。また、寸法精度が良く、ぬれと 毛細管現象によってろう材が母材の隙間へ入って いくため、複雑な形状で接合部が多数ある部品の接 合が可能である。接合する部材間の隙間が大きいと リークの原因になり、狭いとろう材が接合部へ十分 浸透しないため、ろう材の仕掛け方や寸法管理等に 対するノウハウが必要となる。

ろう材は半田付けに用いる溶融材とは融点によっ て区別され、融点が 450 ℃ 以上の場合をろう材と 呼ぶ。真空機器のろう付けには Au を主成分とした 金ろうや、Ag を主成分とした銀ろうがよく使用さ れる。一般のろう材は蒸気圧の高い素材(Zn、Pb、 P、Cd 等)が含まれているため、真空機器の接合に はこれらの含まれていないろう材(BVAu、BVAg 等)を使用しなければならない。

ろう材の融点は種類によるが、金ろうの融点は 890-1010 °C、銀ろうの融点 620-900 °C 程度であ る。複数回ろう付けすることにより、部材を順次接 合していく工程の場合、通常は一次ろう付けでは融 点の高いものを選択し、二次、三次とろう付け工程 を重ねるに従って融点の低いものを使用していく。 電子ビーム溶接

EBW は母材溶融のために加速した電子ビームを 接合箇所へ照射する接合方法であり、ステンレス 鋼、アルミニウム合金、銅などの薄い板や小型の部 材の接合に適している。真空下で処理され、溶接部 はほとんど酸化しない。EBW は接合箇所にパワー が集中するため、溶接ビードを小さくかつ短時間で 処理できる。また、溶接部に加えられる入熱が少な く、溶接後の歪みが少なく、寸法精度に優れている。 EBW は溶接深さよる電子エネルギーの選択や部材 のセッティング等に対するノウハウも必要で、処理 費も高価である。

摩擦攪拌接合

FSW は高速で回転するロッドを接合箇所へ強い 力で押し付け、これによって摩擦熱(400-500 °C) を発生させて母材を軟化させるとともに、ロッドの 回転力によって接合部周辺を塑性流動させて練り混 ぜることで複数部材を一体化させる接合方法であ る。接合可能な部材は軟化温度の低い金属が多く、 主に溶接の難しいアルミニウム合金や銅等の接合に 適用される。部材の溶融を伴わないため、溶接で発 生するブローホール(blow hole)や割れ等の欠陥 が起こりにくく、シールドガスも不要である。ただ し、複雑な形状の部材を接合するのは不向きで、接 合可能な材質や板厚にも制限がある。

熱間等方圧接合

HIP は複数部材をカプセルにパッケージングした 後に内部を排気し、これを炉に入れて 100-2000 ℃ に加熱、同時にアルゴンガス等で被処理体を 10-200 MPa で等方的に加圧することにより拡散接合 する。異種材料の接合や、粉体の焼結とバルクへの 接合を同時に行うことも可能である。また、被処理 体内に存在する空孔等の欠陥を等方的圧力により拡 散、除去することができる。複雑な形状でも接合す ることができ、信頼性も高い方法であるが、高価で ある。

ガラス封着

ガラス封着は金属とガラスを接合する技術で、 ビューポートや真空計等に使用される。金属とガラ スの接合では両者の熱膨張差が問題となる。金属の 線膨張係数は温度に対してほぼ一定値をとる。一般 的にガラスの線膨張係数は室温で金属より小さい値 をとり、転移温度を超えるとこれが金属より大きい 値となる。この熱膨張差により、封着処理した後の 冷却過程で接合部が破壊されてしまうことがある。



図 25 金属とセラミックの接合概略。括弧書きの 工程はオプショナル。

そのため、封着には線膨張係数の温度変化がガラス に近い特殊な合金が使用され、特に Fe、Ni、Co の 合金であるコバールがよく使用される。ただし、コ バールは磁性体のためアナライザー部等でガラス封 着する場合はハウスキーパーシール(housekeeper seal [72])やコンプレッションシール(compression seal [73])等の封着方式が採用される。

セラミック封着

金属とセラミックの接合は図 25 に示すように、 セラミックと金属をろう付けする方法が一般的であ る。セラミックの表面改質(主にぬれ性の改質)の ため、メタライズ(metalize)と呼ばれる工程によ り金属面(メタライズ層)をセラミック表面に形成 してろう付けする方法(メタライズ法)と、メタラ イズ層を形成せず、Ti、Zr 等の活性金属合金をろ う材として用いた直接ろう付け法が適用される場合 が多い。

セラミック、金属、ろう材、メタライズ層、メッ キ等の種類や、ろう付け時の温度・昇温・降温速度 等、非常に多くの組み合わせ・パラメータがあり、 セラミックと金属の接合には残留応力等のシミュ レーションや試作・試験を繰り返し行ってようやく モノになるため、各メーカーが独自のノウハウを蓄 積していることが多い。特に、ろう付け時の高温で ガス放出の大きいセラミックや、接合するセラミッ クと金属の熱膨張率差が大きく異なる組み合わせで は接合が困難となる。

1.5.2 着脱可能シール

着脱可能シールの基本部品はフランジとシール材 である。フランジは配管等を接続する際に用いる円 盤形状部品を一般的には指すが、矩形形状等であっ てもフランジと呼ばれることがある。シール材はフ ランジ間に気密性を持たせるための部品で、本来は 形状・材質に関わらずガスケットと呼ぶ(実務の現 場では、断面形状が円形のシール材はOリング、平 形・矩形のシール材はガスケットと呼ばれる傾向に ある)。

使用するシール材がエラストマーシール (elastomer seal) かキャプチャーシール (capture seal) かでフランジの形状が大別される。フランジとシー ル材の概略を図 26 に示す。

エラストマーシール

エラストマーシール用フランジは、二枚のフラン ジのシール面間にバイトン等のエラストマー製シー ル材を仕込み、これをボルト・ナット等で締め込む。 シール面にシール材を閉じ込めるための溝(ガス ケット溝)が加工がされている場合もある。

シール材は材質や形状により様々な種類のものが あるが、高真空から超高真空にはバイトン製 O リ ングが最も多く使用されている。150 ℃ を超える ような高温環境下で使用する場合は、ポリイミドや パーフロロエラストマー製の O リングが使用され る。耐放射線性を要する場合はポリイミドが用いら れることもある。

シール材の太さは極端な体積圧縮を受けないよ う、ガスケット溝の断面積とシール材の断面積がほ ぼ等しくなるように選択する。ただし、このような 選定条件では仕上げの粗いフランジで接触圧が不十 分のためにリークすることがあるため、フランジ面 及び溝部の仕上げを良くする必要がある(R_z で 6S 程度)。また、エラストマー材の劣化によるひび割 れはほぼ確実にリークを起こすため、使用前にシー ル材を湾曲させながら表面状態を目視で確認した方 が良い。

粗排気システム等における低真空から高真空領域 の配管では NW/KF (Klein Flange) 規格が最もよ く使用される。この規格のフランジにはガスケット 溝がなく、シール材は O リングとその支持金具で あるセンターリングから構成されている。一対のフ ランジは平形で全く同形のため、互換性が高い。フ ランジの締結部はテーパー構造になっており、接続 と締め付けはクランプ (clamp、締金の意)を用い てほぼワンタッチで行うことができる。

腐食性ガス・放射線による劣化やガス透過を避 けるため、金属製のシール材を用いる場合もある。 材質や形状により様々な種類のものがあるが、中 空 O リング (メタル O リング) とフレキシブルメ タルシール (flexible metal seal) がよく使用され る。フレキシブルメタルシールは断面が C 字型で、 中にスプリングを仕込んでシール材の弾性復元量 を増すことにより、金属でエラストマーのような 弾性の実現を目指したシール材である。ヘリコフ レックス (HELICOFLEX(**R**) やユータイトシール (U-TIGHT SEAL(**R**) の商品名でも知られている。 キャプチャーシール

キャプチャーシール用フランジのシール面はシー ル材を閉じ込めるための特殊な加工が施されてお



図 26 フランジとシール材の概略

り、二枚のフランジに金属製のシール材(メタルガ スケット)を仕込み、これをボルト・ナット等で締 め込む。

キャプチャーシールで最も良く使用されているの は ICF フランジである。ICF フランジは国際標準 規格に準じたコンフラット(ConFlat®)フランジ のことで、コンフラットは Varian 社の商品名だが、 現在では一般名称のように用いられている。ICF フランジのシール部にはナイフエッジ(knife edge) が加工されており、これがガスケットを押しつぶす と、ナイフエッジ周辺面(図 26 の A 面)で高い面 圧が得られる。また、ガスケットは変形して図 26 の B 面に押し付けられ、そこでも高い面圧が得ら れるため、信頼性の高い真空シールが実現される。 ICF フランジは 350 ℃ 程度での繰り返しベーキン グにも耐えることができる。

ナイフエッジを横切るような傷はリークに直結す るため、取り扱いには十分注意する。特に、回転フ ランジはナイフエッジを剥き出しの状態にでき、傷 をつけやすいので注意が必要である。なお、ナイフ エッジ周方向の傷は、大気から真空容器内へ通じる までの流路が長く、コンダクタンスが小さいため、 致命的でないことがある。

ICF フランジの側面に突っ切り加工の痕がある ものは板材から、痕のないものはパイプ材から製作 したフランジである。ICF フランジにはリークテ ストの際にヘリウムガス等を導入するための溝が加 工してある。フランジのサイズが ICF356 以上にな ると規格がメーカーによってまちまちになるため、 寸法等を十分確認する必要がある。また、ICF フラ ンジに適用する導管(パイプ)のサイズはメーカー によって異なる。

ガスケットには無酸素銅製を使用するのが一般的 である。ベーキング中の酸化膜形成を抑え、メタル ガスケット取り外し時に剥離した酸化膜がチェン バー内へ飛散することを防ぐために金または銀メッ キを施したガスケットを使用することがある。これ によりシール面の密着性を向上させる効果も得ら れる。

この他にもアルミ合金製ガスケットを使用するこ



図 27 テーパーシールの概略

とがある。特に、アルミ合金製フランジ等に銅ガス ケットを使用した場合にナイフエッジが鈍ってしま うことがあるため、アルミ合金製ガスケットが使用 される。ステンレス製フランジ等とアルミ合金製ガ スケットを組み合わせて使用した場合、ベーキング で熱膨張差によるリークを起こすことがあるため、 注意が必要である。

ガスケットは使い捨てで、原則1回しか使わな い。また、テーパーシール型と呼ばれるガスケット があり、これはコンフラットフランジのテーパー部 分を利用してシールするガスケットである(図27)。 通常のガスケットより信頼性は若干劣るが、ナイフ エッジが傷ついた場合でもシールができ、便利で ある。

フランジの取り扱い

フランジの種類に関わらず、ボルトとナットでフ ランジを推奨締め付けトルクまで均一に締め付けな ければいけない。締め付けトルクはフランジの種類 や口径による。金属製ガスケットで、特に口径の大 きなフランジにおいて締め付けが均一でない片締 めの状態になると、推奨締め付けトルクで締めても シールが不完全になってしまう場合がある。

これを避けるため、はじめはレンチで締める前に ボルトとナットを手で一周締め、次にトルクレンチ を使って推奨締め付けトルクの 1/3 程度で一周締 め付ける。このとき、ボルトは図 28 に示す通り、 対角線上に締めていく(対角線ルールと呼ばれる)。 推奨締め付けトルクの 1/3 程度ずつトルクを小幅 に増やしながら、トルクレンチを使って三巡程度で 推奨締め付けトルクまで締めていく。締め付けの過 程でも適宜、フランジ面間の距離等に偏りがないか 等を確認しながら作業をする。

推奨締め付けトルクでもリークが止まらない場 合、さらにトルクを大きくして締め付ける(増締 め)とリークが止まることがあるが、トルクを大き くし過ぎるとナイフエッジが鈍ってしまったり、ボ ルトが噛んでしまうこともあるため、注意が必要で ある。特に、フランジ面同士が接触(面タッチ)し てもリークしているようであれば無理はせず、一度 ボルトを外して、ガスケットについたナイフエッジ の食い込み痕等からリーク原因を探り、ガスケット を交換してやり直した方が良い。1.5.4 項のシール 剤を使って応急処置的にリークを止める方法もある が、基本はできる限りこれらには頼らずにリークを 止める。

トルクの管理には通常トルクレンチを使用する が、ボルトやナットの仕上げ具合や材料で摩擦係数 が異なるため、トルクレンチの設定トルクが同じで も実際のボルトの締め付け力は異なることがある。 そのため、ボルト、ナットは ICF フランジ用等と して市販されている信頼性の高い製品に統一して使 用し、ネジ部には潤滑剤を少量塗布する。潤滑剤は ベーキングしても性能が劣化しない、二硫化モリブ デン (MoS₂)と鉱油を含むペースト状潤滑剤(モ リコート、MOLYKOTE®)を使用するのが一般 的である。ただし、モリコートは真空容器内で使用 不可のため、真空容器内をこれで汚染しないように 注意して取り扱う。

ガスケットの取り付け姿勢がガスケット溝から脱 落しやすい場合、ガスケットクリップと呼ばれる市 販のガスケット転落防止用治具を使用すると便利 である。板ナットまたは一体型ナット等と呼ばれる ナット(例えば、[74])を使用すると、ナット1個 1個を工具で押さえながらボルト締結作業をする必 要がないため、作業効率が向上する(特に口径の大 きいフランジでは効果絶大である)。

1.5.3 軸シール

真空シールしながら大気側から真空容器内へ運動 を伝達する機構に軸シールが用いられる。運動を伝



図 28 ボルト締結の順序(ボルト 8 本の場合)

達する機器には回転導入器、直線導入器、トランス ファーロッド(transfer rod)等がある。軸シール は接触シールと非接触シールに大別され、前者には ウィルソンシール(Wilson seal)、Oリングシール、 リップシール(lip seal)、後者にはベローズシール (bellows seal)、磁気カップリングシール、磁気流 体シールがある。

接触シールはエラストマー製 O リングや真空グ リース、オイルを使用しており、また磁気流体シー ルはシール部が耐えられる圧力差に限界があるた め、これらの軸シールは中真空から高真空で使用さ れる。ベーキングを行う超高真空システムに使用で きるのは非接触シールのベローズシールと磁気カッ プリングシールである。

ベローズシール

ステンレス製の薄い板で作られた金属ベローズを 用いた軸シールで、ベローズカップリングシールと も呼ばれる。ベローズの伸縮を利用した直線導入器 や、傾き(みそすり運動)を利用した回転導入器が ある。真空容器側と大気側が溶接ベローズで隔たれ ており、エラストマーや真空グリース等を使用し ていないため、ベーキングを行うことができる。ベ ローズには疲労破壊による寿命があるため、注意が 必要である。

磁気カップリンングシール

大気側に置かれた磁石で、真空中に置かれた強磁 性体や磁石を隔壁を通して動かすことで運動を伝達 する軸シールである。隔壁は非磁性のステンレスや アルミニウム合金が使用される。磁気結合力を大き くするために隔壁の厚さは薄く設計されている。エ ラストマーや真空グリース等を使用していないた め、ベーキングを行うことができる。

磁気カップリングシールは回転運動と直線運動 が1つのマグネットペアで行える。また、ベローズ シールのような疲労破壊による寿命がなく、直線運 動の可動範囲に制限がない(機器全長を長くするこ とにより可動範囲を広げることができる)。強磁性 体や磁石を使用しているため、アナライザー部付近 等での使用には適さない。負荷が大きい場合は空回 りすることがあるため、注意が必要である。

1.5.4 シール剤

接合箇所やフランジ間、ビューポートの窓材等で リークが発生した場合、これを止めるために当該部 材を交換または修復することが最善ではあるが、対 処に時間がかかることもあり、真空システムの稼働 率という観点からは応急処置的にこれらのリークを 止めたい場合がある。このような状況では真空シー ル用接着剤のトールシール(Torrseal®)やバック シール(VACSEAL®)で処置することがある。

トールシールは主成分がエポキシ樹脂で、リーク を止めるだけでなく、真空中の接着剤としても用 いられる。大気圧から 1.3 × 10⁻⁷ Pa まで使用でき る。使用温度範囲は –45 ℃ から 120 ℃ であるた めベーキングも行えるが、高温になりすぎないよう に注意する必要がある。

使用方法は白色の主剤と灰色の固化材を2対1 の割合で混ぜ、処置箇所に塗布する。また、銃型の ミキシングシステム(mixing system)が販売され ており、これにトールシールのカートリッジを装着 してトリガーを引くと、正しい割合で二液が混合さ れて射出される。二液を混合したのち、80 ℃ 程度 まで加熱すると粘度が下がるため、この状態でリー ク箇所へ塗布すると、毛細管現象による浸透が期待 できる。また、塗布する箇所に付着している汚れ等 はあらかじめ除去し、乾燥させておく必要がある。 トールシールの硬化時間は室温で1-2時間である。 トールシールは 2018 年の毒物及び劇物取締法改正 により劇物該当となっており、毒物劇薬一般販売 業登録票のない販売店からは購入することができ ない。

バックシールの主成分はシリコン樹脂で、ガス ケット等にあらかじめ塗布してリークを防いだり、 発生したリークを止めるために使用される。圧力は 1.3×10⁻¹⁰ Pa まで使用可能である。使用温度範囲 は-200 ℃から450 ℃であり、ベーキングが行え る。使用方法は液をリーク箇所周辺に塗布して、乾 燥させる。トールシール同様、塗布する箇所に付着 している汚れ等はあらかじめ除去し、乾燥させてお く必要がある。粘度が低いため、リーク箇所へ塗布 すると毛細管現象による浸透が期待できる。ビンに 入ったブラシ塗り型と、スプレー缶に入った吹き付 け型が販売されている。

1.5.5 ベローズ

真空システムを構成する各部品は必ず製作誤差を 持っており、また機器をベーキング等で高温にする 場合は熱膨張・収縮により各機器が動く。この変位 量を吸収するためにベローズを使用する。ベローズ には製作方法によって成型ベローズと溶接ベローズ に大別される。

成型ベローズは油圧により薄肉金属材料に蛇腹形 状を成形した後、両端にフランジを溶接する。断面 形状は円筒型だけでなく、レーストラック型等も製 作可能である。製作する数が多い場合は安価である が、伸縮量が±10%程度と小さく、硬いため取り回 しが悪い(ただし、チタン製の成形ベローズは非常 に柔らかい)。また、製作できる長さに制限がある。

溶接ベローズは薄肉・ドーナツ型金属材料1枚 1枚を溶接によって接合して蛇腹構造を作り、両端 にフランジを溶接する。高価であるが、伸縮量が ±50%程度と大きく、軟らかいため取り回しが良 い。製作できる長さに制限がない。蛇腹内の構造は 狭小であるため、内部の洗浄性は成形ベローズに劣 る。また、溶接不良や異物混入する可能性がある。

ベローズの繰り返し耐久寿命は材質と、一山あた りの伸縮限界値に対する使用伸縮量の割合による。 最もよく使用される SUS304、SUS316 の場合、伸 縮量に余裕を持たせて使用すると、寿命は成形ベ ローズで10万回、溶接ベローズで50万回程度とな る。インコネルやハステロイ(HASTELLOY®) の場合、寿命は SUS の約 10 倍程度になる。また、 ベローズは伸縮性はあるが、ねじれに対しては融通 性がないため、ねじれの吸収に回転フランジと併用 することがある。

ベローズの内外で圧力差がある場合、ベローズは 力を受けて変形する。これを避けるため、タイロッ ド(tie rod、ベローズ両端のフランジ間に取り付け る治具。長尺のスタッドボルトがよく使われる)を 用意しておくと良い。

1.5.6 真空バルブ

真空バルブはカットオフバルブ (cut-off valve) とコンダクタンス可変バルブに大別される。

カットオフバルブ

カットオフバルブは真空配管の途中に設置し、真 空と大気を隔離するためのバルブである。バルブは 図 29 に示すように形式によって L 字型バルブ (ア ングルバルブ)、ゲートバルブ、ストレートバルブ、 バタフライバルブ (butterfly valve)に分類される。 バルブのシール材にはバイトン製 O リングが最も よく使われる。金属製シール材を使用したバルブも あるが、開閉の繰り返し寿命が短い。バルブの開閉 操作は手動または圧空で行う。バルブの締め過ぎは シール材の寿命を縮めてしまうため、手動バルブは トルク管理して使用することが望ましい。

バルブの軸シールに O リングを使用している機 種は中真空から高真空での使用に限られ、ベーキン グを必要とする超高真空システムでは軸シールにベ ローズを使用した機種を使用する。また、潤滑剤フ リーの機種を選定する。真空装置側にはバルブ内の 体積が小さくなる方を接続する。

カットオフバルブは通常、単体で真空装置とその 外界の大気圧を隔離できる仕様になっているが、金 属製シール材と比べてエラストマー製シール材の信 頼性は劣り、シール材の劣化等が起きた場合は真空 装置と大気が直結する可能性がある。これを防止す るためにティップオフ(tip-off)と呼ばれる処置を



することがある。ティップオフは図 30 に示すよう に、主バルブを閉じた状態で、主バルブの大気側を 導管と補バルブを取り付けたフランジで封止する。 導管をドライポンプや RP 等に接続して補バルブを 開け、真空ポンプでしばらく排気した後、補バルブ を閉じて真空ポンプを停止・撤去する方法である。 主バルブと補バルブの間は低真空から中真空程度の 圧力ではあるが、直接大気と超高真空装置が通じて しまうような大事故を防ぐことができる。

コンダクタンス可変バルブ

特定のガス種を真空装置に導入し、その分圧を一 定に保ちたい場合にコンダクタンス可変バルブを 使用する。真空ポンプの吸気側にコンダクタンス可



図 30 ティップオフの構成

変バルブを設置して実効排気速度を制御する方法 と、ガス導入ラインにコンダクタンス可変バルブを 組み込んでガス導入量を制御する方法がある。前者 はバタフライ型やフラップ型(flap、窓のブライン ドのような構造)のバルブが用いられ、後者はバリ アブルリークバルブとも呼ばれ、主にテーパーピン (taper pin)型と平行平板型がある(図 31)。

バリアブルリークバルブは大気圧に近い圧力から 真空容器ヘガスを導入するため、コンダクタンスを 絞り込む必要がある。このため、バルブ弁と弁座間 の非常に狭い間隔を微調整する。弁座にはテフロン 等の軟らかい有機材料が使用されることもあるが、 このような機種ではバルブを閉めすぎると弁座が変 形し、流量の再現性が劣化してしまうので注意が必 要である。

バルブ弁の制御には小ピッチのネジを使う手動方 式と、圧電素子を使う電動方式がある。圧電素子を 使ったバリアブルリークバルブとマスフローメー ターを組み合わせ、マスフローコントローラ(mass flow controler)としても販売されている。

1.5.7 電流導入端子

真空容器で隔離された大気と真空間で電気信号等 を伝達する機器は電流導入端子、フィードスルー (feedthrough)等と呼ばれる。気密を保ち、電極と フランジ間を電気的に絶縁するため、1.5.1 項で述 べたガラス封着とセラミック封着が使用される。電 流導入端子は高電圧用、高電流用、弱電用等があり、 BNC や N 型等のコネクターが使用されている製品 もある。ガラス封着を使用した電流導入端子は安価



図 31 コンダクタンス調整方式

であるが、外部からの衝撃に弱い。一般的に、ガラ ス封着に比べてセラミック封着は丈夫ではあるが、 強い衝撃には弱いので注意を要する。

1.5.8 ビューポート

中真空から高真空用ビューポート(真空窓とも呼 ばれる)の真空シールには、窓材とフランジとの間 にエラストマー製 O リングを挟み込み、大気圧で 押し付ける方式が一般的に用いられている。超高真 空用では窓材と金属を封着する方式が用いられる。 ビューポートは外部の大気圧に耐えられるよう設計 されているが、内部からの圧力には弱いため、加圧 しないよう注意が必要である。

透過させたい光の波長に合わせて窓材を選定する 必要がある。コバールガラスは可視光領域で 90% 程度の透過率であるが、紫外領域に吸収端がある。 紫外領域で高い透過率が必要な場合は石英ガラスか サファイアを使用したビューポートを選定する。そ の他、RF 用のセラミック窓や、X 線用のベリリウ ム窓等がある。ヘリウムはガラスを透過するため、 リークテストの際には注意する。

ガラス封着は熱衝撃に弱く、特に大口径の窓は熱 的破壊の危険性がある。ベーキング等の熱サイクル に晒す場合は、熱的負荷が均一にかかるようにガラ ス部分を金属で覆うカバーが市販されている。

1.5.9 配線材料

超高真空装置内で使用する配線材料は、定格電流 を十分考慮して超高真空環境下で使用可能な材料で 製作された品を選定する。最高使用温度が150°C 以下の場合は超高真空使用のポリイミド絶縁被覆電 線がよく使用される。

超高真空中で配線等を電気的に接合する場合、一 般的な半田は蒸気圧が高く、使用できない。圧着等 の物理的接合方法か、スポット溶接を用いる。

1.5.10 ボルト類

超高真空装置内で使用するボルト、ナット、ワッ シャ等は、超高真空用として市販されている純チタ ン製、チタン合金製、SUS304 製の製品を使用する。 特に、チタン製は機械的強度があり、低ガス放出で ある。電気的絶縁が必要な箇所には高純度アルミナ 製の部品を使用する。使用する前には特級エタノー ルで脱脂洗浄後、乾燥させる。

タップ穴とボルト間に密閉空間ができる場合、そ の空間内に閉じ込められた気体は、ネジ山で作られ た小さいコンダクタンスの流路を通じて真空容器内 へ放出されるため、通常のボルトはスローリークの 原因となり使用できない。このような場合はガス抜 き用穴付きボルトを使用する。

1.5.11 ガス導入ライン

ガス導入ラインのレギュレータ、継手等には高 真空排気ができる製品を使用する。Swagelok 社の VCR 規格継手がよく使用される。継手は使用前に 特級アルコールで脱脂洗浄する。ガス導入ラインに も水が存在するため、コードヒーター等を使って ベーキングできるようにする。ただし、ガス導入ラ インで使用しているバルブ等の機器には耐熱温度が 低いものもあるため注意する(このような機器を使 用する場合、80 ℃ 程度の少し低い温度で長時間 ベーキングしても効果的である)。

大気圧乾燥窒素導入(ベント)システムはベローズ バルブ、フィルター、NW-VCR 変換継手、VCR 継手 付きフレキシブルチューブ等から構成する(図 32)。 ベローズバルブ、フィルターは排気時に 100 ℃ 程 度でベーキングして、ダストと水分を除去する。

通常はベローズバルブとレギュレータ間の接続に フレキシブルチューブ等を使用するが、すでに排気 されている真空容器にボンベを後付けしてベントす る場合、バルブとレギュレータ間に存在する水を含 んだ空気もベントの際に真空容器へ導入されてし まう。これを避けるためには窒素ガスを吹き出しな がらフレキシブルチューブをベローズバルブに接 続し、その空間の空気を追い出す必要があり、特に ベーキングされた真空容器をベントする際にはこれ に留意する。

1.5.12 潤滑剤

大気環境下に比べて真空中では物質間の摩擦係 数が増加する。これは界面に存在する酸化物、オイ ル、水等が摺動によって押しのけられ、その後真空 中ではそれらの物質が供給されないことと、摩擦 熱により表面の清浄化が進むことに起因している。 真空中で可動機構を設計する際、次のことに注意 する。

- できる限り摺動機構は避け、転がり接触とする。
- 摩擦が起こる接触部は異なった材質の組み合わせにする。
- 真空中での力の方向転換をなくす。
- 摺動機構はできる限り大気側に設置する。
- 潤滑剤(材)を使用する。

摩擦係数を下げ、摺動部でのダスト発生を抑える



図 32 ベントシステムの構成例

材料	引張強さ [kgf · mm ⁻²]	曲げ強さ [kgf · mm ⁻²]	圧縮強さ [kgf · mm ⁻²]	摩擦係数 μ	硬さ	使用温度 [°C]
$MoS_2 + WS_2$	-	14–20	35–50	0.1-0.16 (真空中)	$95~\mathrm{H_{RB}}$	850
$\mathrm{Si}_3\mathrm{N}_4$	-	60–70	170 - 190	0.6 (大気中)	$1500~{\rm H}_{\rm V}$	1000
Ag	12–15	-	-	0.3 (大気中)	$26~{\rm H}_{\rm B}$	-
MoS_2	-	-	-	0.02-0.1 (真空中)	-	1100
ポリイミド	7.4 - 8.9	-	-	0.15-0.5 (大気中)	-	275

表16 固体潤滑剤の機械的性質 [75]

ためには潤滑剤を用いる。中真空から高真空におい て、蒸気圧の低いオイルやグリースはそのまま真空 装置内で使用することができ、真空グリースとして 市販されている。超高真空では真空グリースは使用 不可で、軟質金属や高分子材料等の固体潤滑剤を 使用する。固体潤滑剤の機械的性質を表 16 にまと める。

軟質金属 (Au、Ag、In) は摺動部へコーティング して用いられることが多く、これにより摩擦係数を 減らすことができる。この接触相手となる金属には 真接触面積が小さい、硬度の高い物質 (Si₃N₄ に代 表されるセラミックや Rh 等の金属コーティング) がよく用いられる。

PTFE やポリイミド等の高分子材料は大気中と 真空中での摩擦係数がほとんど変わらないため、潤 滑剤として用いられる。後述の層状固体と呼ばれる 材料を混合して摩擦係数を低減した高分子材料も ある。

層状固体の摩擦係数は小さいことが知られてお り、二硫化モリブデンや二硫化タングステン(WS₂) 等は摺動部品へコーティングや焼結処理等をして用 いられる。

コーティングした固体潤滑剤は長時間の使用で剥 離が発生することがあるため、注意が必要である。

2 SuperKEKB の真空システム

2.1 概要

SuperKEKB は電子と陽電子の非対称エネルギー 衝突型加速器である。衝突実験を行うメインリング (MR) は陽電子蓄積リングと電子蓄積リング、2つ のリングから構成されており、ビームエネルギーの 大小からそれぞれ LER (Low Energy Ring)、HER (High Energy Ring) と呼ばれている。MR の概 略を図 33 に示す。MR は4箇所のアーク部 (arc section、ビームがリングの主円弧を描く区間)と4 箇所の直線部から構成されている。

筑波直線部はビーム衝突およびローカルクロマテ ィシティ(local chromaticity、ビーム衝突近傍にお ける色収差)補正のための区間であり、Belle II 検出 器と QCS (超電導最終収束電磁石) もこの区間に設 置されている。大穂直線部は放射光の放出によって ビームが失ったエネルギーを補充する ARES (Accelerator Resonantly coupled with Energy Storage)空洞とビームエミッタンス(emittance、位相 空間でのビームの広がり)および放射減衰時間を低 減するためのウィグラー (wiggler) 電磁石が置かれ ている。富士直線部は、ライナック(linear accelerator、linac) および BT (Beam Transport、ビー ム輸送路)からのビームを MR に入射するための セプタム (septum) やキッカー (kicker) 電磁石や、 フィードバックキッカー (feedback kicker)、HER には ARES 等の機器が設置されており、また、こ の区間で陽電子ビームと電子ビームは互いに上下に 交差する。LER の日光直線部にはウィグラー電磁 石が、HER には電子ビームにエネルギーを補充す る超電導空洞(SC、Superconducting Cavity)等 が設置されている。

SuperKEKB で目標としているルミノシティ (luminosity、素粒子反応が起きる頻度) は 8 × 10^{35} cm⁻²·s⁻¹ であり、これを実現するにはビー ムエミッタンスを小さくする必要がある。そのた め、IR (Interaction Region、衝突点領域) および その近傍と、LER アーク部の電磁石の種類と配置 は KEKB から大幅に変更された。 SuperKEKB の要であるナノビームスキーム (nano beam scheme [95])のためには、ライナック から MR ヘエミッタンスの非常に小さいビームを 入射する必要があり、陽電子ビームに関してはライ ナックの途中に DR (Damping Ring)が新たに建 設され、電子ビームに関しては RF 電子銃が開発・ 導入された [97,98]。

DR はレーストラック (race track) 形状をした周 長 135.5 m の陽電子蓄積リングである。ライナッ クで 1.1 GeV に加速された陽電子ビームが DR に 入射され、40 ms 以上蓄積して十分に放射減衰され た後、DR から出射される。出射されたビームはラ イナックで 4 GeV まで加速され、BT で輸送され た後、LER へ入射される。

真空システムの観点から SuperKEKB に特徴的 なパラメータを表 17 に示す。SuperKEKB MR は アンペア級の大電流ビームを自由空間中に蓄積する ことから、ビームから放出されるシンクロトロン放 射光(Synchrotron Radiation、SR)のパワーが強 く、光子数も多くなる。この大強度放射光は真空容 器に照射されるため、真空システムには高い熱的強 度が要求され、熱を取り除くための冷却構造も必要 になる。また、MR・DR 共にバンチ長が短いこと によりインピーダンス(真空容器からビームが受け る電磁相互作用)が大きくなる。リングが持つイン ピーダンスが大きくなると、シングルおよびマルチ バンチ不安定性 (sigle/multi bunch instability) に より、ビームエミッタンス劣化等が生じてしまうた め、真空容器内側に段差を極力なくす等の対処が必 要になる。さらに、陽電子リング固有の問題に電子 雲効果 (Electron Cloud Effect、ECE) によるビー ム不安定性があり、これの対策が必要となる。

なお、加速器物理の分野において縦方向はビーム 進行方向、横方向はそれに垂直な方向を一般的には 指し、本テキストでもこれを踏襲している。



図 33 Phase-3 初期における SuperKEKB MR の概略。D03V1 および D06V1 コリメータについては 2020 年に設置予定。

	HER	LER	DR
ビームエネルギー [GeV]	7.0	4.0	1.1
ビーム電流	2.6 A	3.6 A	70.8 mA
バンチ数	25	500	2 bunches/train \times 2 trains
バンチ電流 [mA · bunch ⁻¹]	1.04	1.44	17.7
バンチ長 [mm]	5	6	6.57
周長 [m]	30	016	135.5
偏向電磁石曲率半径 [m]	104.46	$74.68\ 6$	2.632/2.967
1 リングあたりの放射光全パワー	$5.3 \ \mathrm{MW}$	$1.1 \ \mathrm{MW}$	7.2 kW
放射光の臨界エネルギー [keV]	7.3	1.9	0.93/0.82

表 17 SuperKEKB のパラメータ(設計値)。DR のバンチ長は加速空洞電圧が 1.4 MeV での値。

2.2 各種真空機器

LER は約 93%、HER は約 18%、DR は全ての真 空機器が新規に製作された。本節ではこれらの中で 主要な機器について解説する。

2.2.1 アンテチェンバー付きビームパイプ

MR アーク部の写真を(図 34) に示す。

MR で新規に導入されたビームパイプのほとんど は、ビームが通るビームチャネル (beam channel) の両側にアンテチェンバー (antechamber、側室の 意)を持つ構造が採用されている [76]。LER アー ク部のアンテチェンバー付きビームパイプを図 35 に示す。

ビームパイプのアパチャ(aperture、口径)は大 きいほどコンダクタンスが大きく、インピーダンス も小さくなるが、加速器においては、電磁石のコア の寸法によってビームパイプのアパチャが制限さ れることが多い(図 36)。SuperKEKB MR の場合 は、KEKB の電磁石を再利用しているため、これに



図 34 MR 東トンネルアーク部。東トンネルは 図 33 中 D03 の地下に位置している。写真左側の リングが LER、右側が HER。

合うようにビームパイプの断面形状が決められた。 LER の標準的なビームパイプの断面形状は、ビー ムチャネルの直径が 90 mm、アンテチェンバー部 の高さが 14 mm、アンテチェンバー部を含む全幅 が 220 mm である。HER、LER 合わせて合計約 1230 本のビームパイプが新たに製作された。

なお、HER の標準的なビームパイプの断面形状 は高さ 50 mm、全幅 104 mm のレーストラック型 である。KEKB の時代から、HER では TRISTAN (Transposable Ring Intersecting Storage Accelerator in Nippon)で使用していた電磁石を再利用し ており、偏向電磁石の磁極間距離によりビームパイ プの垂直方向のアパチャが制限されている。ビーム 入射時には水平方向に振動があり、さらにアーク部 では水平方向にディスパージョン(dispersion)が あることから、水平方向のビームパイプのアパチャ は四重極電磁石の磁極と干渉しない範囲で広げら れている。また、レーストラック型ビームパイプ は BPM の取り付けが容易であるという利点がある (詳細は [16,17] の beam stay clear に関する記述 を参照)。

リング外側のアンテチェンバーは放射光チャネ ル(SR channel)と呼ばれ、放射光を受ける目的 で使用される。放射光による熱負荷を取り除くた め、その大気側には冷却水路が設けられている。通 常のビームパイプと比べてアンテチェンバー付き ビームパイプは、放射光の発光点から照射面までの 距離が長いため、放射光がアンテチェンバー内壁に 到達するまでに空間的に広がり、放射光のパワー



図 35 アンテチェンバー付きビームパイプの概略 [76]

密度を低減できる。LER アーク部(ビームパイプ 断面の半幅 110 mm)における放射光のパワー密度 は、ビーム電流 3.6 A のとき、最大約 2.3 kW・m⁻¹ (2.2 W・mm⁻²) である。

放射光チャネルのビーム進行方向下流側には、放 射光マスクと呼ばれる下流にある真空機器を放射 光から守るための突起構造がある。このような突起 構造は通常、インピーダンスを増やす要因となる が、これをアンテチェンバーの中に隠すことによっ てインピーダンスが低減される。また、放射光の反 射光や、放射光によって放出される光電子がビーム チャネルへ侵入する確率を下げることができるた め、LER については電子雲不安定性を低減するこ とができる(2.3.1 項を参照)。

リング内側のアンテチェンバーは、ストリップ型 (strip type、細い帯状の) NEG ポンプを収めるポ ンプチャネル (pump channel) として使用され、ポ ンプチャネルとビームチャネルの間には、ビームに より励振された RF の侵入を防ぐための RF スク リーン (φ4 mm の穴が6 mm ピッチで多数開い た板)が設置されている。このような構造物もイン ピーダンスを増加させる要因となるが、これもアン テチェンバーの中に隠すことによってインピーダン スを低減している。ICF70 フランジには、NEG ポ ンプ活性化用ヒーターへ大気側から通電するための フィードスルーが取り付けられる。

なお、ウィグラー電磁石の中でビームは左右に 蛇行運動するため、放射光はリング両側へ照射さ れる。そのため、ウィグラー部のアンテチェンバー は両側共に放射光チャネルとして使用される。こ



図 36 ビームパイプと四重極電磁石コアの取り合い

のビームパイプではアンテチェンバー内の垂直方 向に RF スクリーンを通してカートリッジ型 NEG ポンプが設置されている (図 37)。LER のウィグ ラー電磁石から放出される放射光のパワー密度は 約 14 kW·m⁻¹ (3 W·mm⁻²) と高いため、ビー ムパイプの材質には無酸素銅 (C1011 相当) が採 用されている。放射光マスクでのパワー密度は約 50 kW·m⁻¹ (9 W·mm⁻²) であるため、耐熱性 に優れるクロム銅 (CrCu、C18200) が使用されて いる。

ビームパイプの全長は約0.6-6 m で、多種多様 なものが製作されている。偏向電磁石内のビームパ イプはビーム軌道に合わせた曲率で曲げられてい る。ビームパイプの材質は、基本的には設置場所の 放射光強度によりアルミ合金(A6063)と無酸素銅 で使い分けている。前者は押し出し、後者は冷間引 き抜きで製作された。また、アルミ合金製ビームパ イプから漏れ出す放射線量は無酸素銅製ビームパイ プの 100 倍以上であるため、外へ漏れ出す放射線 を小さくする目的で無酸素銅を採用している場合 もある。例えば、放射線量及び放射光パワーの高い HER は、全周にわたって無酸素銅製ビームパイプ が使用されている。ビームパイプから漏れ出た放射 線が Belle II 検出器のバックグラウンド源になって しまうため、検出器近くの領域でも無酸素銅製ビー ムパイプが使用されている。



図 37 ウィグラー部のアンテチェンバー付きビー ムパイプ



図 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

四重極電磁石に据え付けられたビームパイプに はビーム軌道を測るための BPM (Beam Position Monitor)が設置されている。図 38 に示すように、 BPM ブロックは二枚の板材により固定されてい る。この板材は測量にも利用している。ICF034 の フランジには BPM のピックアップ電極が取り付け られ、シール材はヘリコフレックスデルタを使用し ている。

2.2.2 MO フランジ

SuperKEKB におけるビームパイプの接続フラン ジには、1)ビームの通過に伴う壁電流(wall current、 ビーム電場によって金属製ビームパイプ表面に誘起 される鏡像電荷(image chage)による電流)に対 応した確実な電気的接触を持つこと、2)ビームが 誘起する高次高周波(HOM、Higher Order Mode) の励振を防ぐために接続部の内面にできるだけ段差 なしで滑らかに接続すること、が要求される。

従来の標準的な加速器用接続フランジは、ビーム パイプの断面形状に合わせた金属製のフィンガー (RF コンタクト)を組み込んだり、シール材に金属 製 O リング等を使用して電気的な接触を取ってい る。しかし、SuperKEKBのように大電流・短バン チ長ビームで運転される加速器は、より確実で段差 の少ない接続が要求される。これに加えて、アンテ チェンバー付きビームパイプのように複雑な断面形



図 39 MR における MO フランジ。上:銅合金 製アンテチェンバー付きビームパイプ用 MO フラ ンジ、下:アルミ合金製レーストラック型ビーム パイプ用 MO フランジ。

状のビームパイプにも適応できなければならない。

SuperKEKBのMRでは、導波管用に開発された MO (Matsumoto-Ohtsuka [77–79]) フランジを加 速器ビームパイプに適用するべく、開発研究がされ てきた (図 39)。これまでにステンレス (SUS316L) 製、銅合金 (C18200) 製、アルミ合金 (A2219-T851) 製のフランジが開発され、これらをアンテチェン バー付きビームパイプやベローズチェンバー等に適 用している。

MO フランジのシール部の模式図を図 40 に示 す。このフランジの縁には、真空容器側の断面に 沿った凸状の平面(シール面)が加工してあり、こ れにより金属製ガスケットを潰してシールするた め、真空容器側内面の段差は 0.3 mm 以下と、非常 に小さい。また、MO フランジはコンフラットのよ うなエッジではなく面でシールするため、複雑な断



図 40 MO フランジにおける真空シールの模式図 [79]

面形状でも製作が可能である。

ガスケットはノックピンにより固定することがで き、フランジ合わせ面の位置決め精度を上げられ、 フランジ締め付け作業時のガスケットの脱落も防止 できる。さらに、金属製ガスケットにより確実な電 気的接触が得られ、RF コンタクトを取り付ける必 要もない。LER、HER 合わせて合計約 4200 個の フランジが製作された。

MR のために開発された MO フランジは、 締め付けトルク 13-20 N·m 程度でリーク量 1×10^{-11} Pa·m³·s⁻¹ 以下のシールが可能であ る。複数回のベーキング (ステンレス製は 250 °C、 それ以外は 150 °C) も可能である。ただし、銅合 金製とアルミ合金製フランジの組み合わせでは、熱 膨張率の違いによってベーキング後にリークが発生 してしまう。

フランジの締め付けに使用するボルトとガスケッ トの材質は、フランジの材質に合わせたものを使 用している。例えば、アルミ合金製フランジ同士 の締め付けにはアルミ合金(A5052)製ガスケット とアルミ合金(A2024)製ボルトを使用している。 銅合金製フランジ同士、ステンレス製フランジ同 士、銅合金製およびステンレス製フランジの接続に は、無酸素銅(C1020)製のガスケットとステンレ ス(SUS316L)製ボルトを使用している。ボルトに はモリコートを塗布し、最初は5N・m 程度の小さ いトルクで締め、徐々にトルクを上げて締め込んで いく。標準的な締め付けトルクは、アルミ合金製で 約13N・m、銅合金製で約15N・m としている。 このトルクでもリークが発生する場合は、アルミ合 金製ボルトで約 18 N・m、ステンレス製ボルトで約 20 N・m 程度までは増し締め可としている。

2.2.3 ベローズチェンバー・ゲートバルブ

ベローズチェンバーはビームパイプ等の製作誤差 を吸収し、それらの接続を容易にする真空機器であ る。ビーム運転中はビームパイプの熱膨張/収縮を 吸収する役割も担っている。ベローズチェンバー の内部には、インピーダンスを低減し、ビームの 通過により励振される HOM の発生を防ぐための RF シールド(RF shield)と呼ばれる機構があり、 従来のベローズチェンバーではフィンガー型の RF シールドが使用されてきた(図 41、[80,81])。この タイプの RF シールドは、内筒に接触して電気的 コンタクトを取るためのコンタクトフィンガーと、 コンタクトフィンガーを内筒へ押さえつけて電気的 コンタクトを確実にするためのスプリングフィン ガーで構成されている。蓄積電流が高くなるとフィ ンガーの隙間から侵入する HOM、特に TE モード (Transeverse Electric mode) によって発熱しやす く、また、フィンガー部は薄くて熱的にも弱いため に図 42 のように損傷することがあった。

SuperKEKB MR では、図 43 に示す櫛歯型と呼 ばれる RF シールドを採用している [82,83]。この RF シールドは従来の薄いフィンガーを使用せず、 櫛歯が互いに噛み合った構造をしている。標準的 な櫛歯の寸法は、長さ 10 mm、幅 1 mm、櫛歯間 隔 2 mm、櫛歯の径方向の厚みは 10 mm である。 ビームが励振する壁電流の高周波成分は、主に噛み 合った櫛歯間の静電容量で、低周波成分は櫛歯の外 側(ビームチャネル側ではなくベローズ側)の RF フィンガー(outside-shield)を通して流れる。

櫛歯型 RF シールドはフィンガー型に比べて、1) TE モードの HOM が漏れにくい、2) 櫛歯は 1 mm 厚の銅であるため、耐熱性に優れる、3) ビームチャ ネル内面に段差が少なく、インピーダンスが小さ い、4) ビームチャネル内面に摺動部がなく、伸縮 時のダストの発生が少ない、等の特長がある。アン テチェンバー付きビームパイプに使用する櫛歯型 ベローズチェンバーを図 44 に示す。通常は自然長





図 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 [81]



図 42 損傷したフィンガー型 RF シールドの実例

から ±4 mm の範囲内で使用するが、機構的には ±6 mm が可動範囲である。接続するビームパイプ の材質や断面に合わせ、複数種類の櫛歯型ベローズ チェンバーを製作している。HER、LER 合わせて 合計約 1240 台のベローズチェンバーが製作された。 ゲートバルブはリングの真空をいくつかの区間 に分け、真空作業する際に大気開放する領域を限



図 43 櫛歯型ベローズチェンバーの概略図 [84]



図 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

定し、また、リーク等のトラブルが発生した際には ゲートバルブを閉じて当該箇所を閉じ込め、被害の 影響を最小限に抑える役割を担っている。ゲート バルブもベローズチェンバーと同じく、櫛歯型 RF シールドを使用している。アンテチェンバー付き ビームパイプに使用する櫛歯型ゲートバルブの外観 を図 45 に示す。ゲートバルブの場合、本体はステ ンレス製であるが、櫛歯は銅製で、ステンレス部分 のビームチャネル側内面には銀メッキが施されてい る。HER、LER 合わせて合計約 40 台のゲートバ ルブが製作された。



図 45 アンテチェンバー付きビームパイプ用ゲー トバルブ

2.2.4 真空ポンプ

リング全体(または着目するある区間)の排気速 度が一様に分布していると仮定すると、静的な系 におけるリングの平均到達圧力は式(13)で決まる が、加速器の真空システムのようにイオンや電子、 放射光等が存在する系では、これに動的なガス放出 $Q_{\rm d}$ [Pa · m³ · s⁻¹] が加わる。つまり、

$$p = \frac{Q_{\rm s} + Q_{\rm d}}{S} = p_{\rm s} + p_{\rm d} \tag{36}$$

ここでの Q_s は静的なガス放出 (static gas desorption)、 Q_d は動的なガス放出 (dynamic gas desorption)、これらによって決まる圧力 $p_s = Q_s/S$ 、 $p_d = Q_d/S$ はそれぞれ静的圧力 (static pressure)、動的圧力 (dynamic pressure) と呼ばれる。

加速器の真空システムにおける動的なガス放出源 には、熱的ガス放出やイオン刺激脱離(ion stimulated desorption)等があるが、SuperKEKBの真 空システムにおける到達圧力は、主に放射光に起因 するガス放出、すなわち PSD によって決まってい

る。したがって、式(1)からも動的圧力は、

$$p_{\rm d} \approx \frac{Q_{\rm PSD}}{S} = \frac{kT n_{\rm ph} \eta}{S}$$
(37)

で与えられる。ここで、PSD によるリングの平均 ガス放出量 Q_{PSD} [Pa·m³·s⁻¹]、放射光によるリ ング内の光子数 n_{ph} [photons·s⁻¹]、リングの平均 光刺激脱離係数(光子 1 個あたりに放出される気体 分子数) η [molecules·photons⁻¹] である。

実際には放射光がビームパイプ表面に照射された 際に発生する光電子や、この電子がビームパイプ 表面に衝突して発生する二次電子も存在するため、 光刺激脱離と電子刺激脱離によるガス放出が共存 している。特に、ECE が発現すると電子刺激脱離 によるガス放出 Q_{ESD} の寄与が大きくなり、場合 によっては光刺激脱離よりこちらが支配的になる (2.3.2 項では具体例を紹介している)。本テキスト では、特に断らない限り、光刺激脱離係数 η は ESD の寄与を含んでいるものとする。

η はビームダクトの材質や表面状態等にも依存 する。放射光を見ていない新規のビームパイプに おいて、 η は 10–10⁻² molecules · photons⁻¹ 程度 の値をとる。η はビームパイプに照射された光子数 の積算(photon dose、単位長さあたりの積分光子 数 $\int n_{\rm ph} dt/L$ 。ここで、L はビームパイプ内で光 子が照射されるリングに沿った長さである。フォト ンドーズを単位面積当たりの積分光子数で定義しな いのは、実際上、放射光はビームパイプの片側に一 次元的に照射され、この他のビームパイプ内の領域 には散乱・反射した光子のみが照射され、一般的に これらによる寄与は非常に小さいと考えられるため である)とともに減少する。この放射光によるビー ムパイプのエージングは焼き出し (SR scrubbing、 SR conditioning)等と呼ばれており、この焼き出 しにより η を 10^{-6} molecules · photons⁻¹ 以下に することも可能である。

放射光によるガス放出には、ビームパイプに沿っ た排気システム(これは分布型排気システムと呼ば れる)がビームパイプ内の平均圧力を下げるのに



図 46 LER 1 セルの放射光パワー線密度と光子 数線密度 [89]

効果的であるため、MR ではアンテチェンバーの 片側をポンプチャネルとして使用し、ここにスト リップ型 NEG ポンプを設置する方策が採られてい る [89]。DR では放射光がビームパイプの両側に照 射されることから、分布型排気システムを採用して いない(2.2.7 項を参照)。

図 46 には LER の典型的な 1 セル (光学系の 1 単位)の放射光パワー線密度と光子数線密度を示し ている。各偏向電磁石(図中 B)の直下流が最もパ ワー線密度が高い。ビームパイプ中心に向かって 高く突き出た放射光マスクを置くことにより、こ のパワー線密度を局在化させ、その近傍に排気速 度の大きいポンプを設置する方法もあるもあるが、 SuperKEKBの MR では、ビームパイプのインピー ダンスの小さい、単純な断面形状のビームパイプが 好ましいことから、大部分の放射光をビームパイプ に沿ったアンテチェンバー内で受け止め、分布型の ポンプを配置する方法を採っている。なお、ビーム パイプ下流のベローズチェンバーと真空シール部 (ガスケット)を守るため、ビームパイプ中心に向 かって小さく(5 mm 程度)突き出た放射光マスク をビームパイプ下流側のアンテチェンバー内に置い ている。

残留ガスとビームとの衝突で決まるビーム ライフタイム (beam life time、ビーム寿命。付 録 A を参照)を十分長く確保するため、また、



Belle II 検出器におけるバックグラウンドを低 減するために、LER の目標圧力はビーム運転時 で 10⁻⁷ Pa としている。アーク部の平均光子密 度は 5×10^{18} photons \cdot s⁻¹ · m⁻¹ であり、 η を焼 き出しにより現実的に十分達成可能な値として、 1×10^{-6} molecules · photons⁻¹、温度を 25 °C と すると、ガス負荷は $2 \times 10^{-8} \operatorname{Pa} \cdot \mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ となる。 ビームパイプに沿って、単位長さあたり 平均実効排気速度が $0.1 \,\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ であれば、 10⁻⁷ Pa の平均圧力を実現できる。

図 47 には各ビームパイプに平均排気速度 0.12 m³ · s⁻¹ · m⁻¹ のポンプを使用した場合の圧 力分布を示している。この場合、2.3×10⁻⁷ Paの 平均圧力が得られている。

MRのアーク部等では、前述の通り、分布型ポンプ としてリング内側のポンプチャネルに入るストリッ プ型 NEG ポンプを使用している。このポンプは 3 層の NEG ストリップ (ST707、SAES GETTERS Co. Ltd.、幅3 cm) で構成され、それらの間には 活性化時に使用するマイクロヒーターが組み込まれ ている。マイクロヒーターの端末はフィードスルー と接続される。活性化の際はこのヒーターに通電す ることにより、約 400 °C まで加熱することができ る。通常は NEG ストリップに直接通電してジュー ル加熱する方法が採られるが、この方法では加熱中 に NEG ストリップがビームパイプ内壁と接触し、 短絡する可能性があることから、マイクロヒーター

を使用している。

この NEG ストリップの窒素に対する排気速度 は、活性化直後で約 0.2 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ である。 PSD で放出される主要なガス種は一酸化炭素で あるが、これに対しては約 2.0 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ に 相当する。実際は RF スクリーンが 1 m あたり約 0.2 $m^3 \cdot s^{-1}$ のコンダクタンスを有するため、実効 排気速度は窒素に対して約 0.1 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ 、一 酸化炭素に対して約 0.18 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ となる。 HER、LER 合わせて合計約 1130 本の NEG ポン プが製作された。

2.2.5 コリメータ

MRにはコリメータ(collimator)と呼ばれる真 空機器が設置されている。コリメータの目的は、1) 大電流ビームから加速器および Belle II 検出器の 各コンポーネントを防護する、2)Belle II 検出器 におけるバックグラウンドを低減する、3)QCS ク エンチ(quench)を防ぐ、ことである。コリメータ は、可動の金属製ブロックが周回ビームにアプロー チして不要なビーム成分を除去するため、可動マス ク(movable mask)や可動コリメータと呼ばれる こともある。本テキストでは、実際にコリメートす る部品をコリメータヘッド等と呼んでいるが、論文 等では jaw(顎、狭い入り口等の意)と一般的には 呼ばれているようである。コリメータは水平または 垂直方向からビームへアプローチするものを用意し ている。

HER のアーク部は KEKB から変更がないため、 コリメータも KEKB で設置されたものを引き続き 使用している (図 48、[90,110])。HER の標準的な ビームパイプの断面形状は、高さ 50 mm、全幅 104 mm のレーストラック型であり、コリメータの断面 形状もこれに適合している。コリメータチェンバー 内には傾斜がつけられており、その一部 (図 48 中の Mask Head 部)がコリメータとして機能する。コ リメータヘッド部は長さ 40 mm のチタンで製作さ れており、交換することができる。コリメータヘッ ド部以外はアルミ合金で製作されている。ビーム軌 道とコリメータヘッド間の距離は 10 mm を基準と



図 48 HER アーク部のコリメータ

して、±10 mm 程度の範囲を可動する。この動き を吸収するため、コリメータの上下流にそれぞれ2 台のベローズチェンバーを設置している。これらは ビームパイプと同じくレーストラック型の断面形状 をしたベローズチェンバー(フィンガー型 RF シー ルド)である。これらベローズチェンバーも含めた コリメータの全長は約 2000 mm である。

LER や HER の筑波直線部ではアンテチェン バー付きビームパイプが使用されているため、この 断面形状に対応したコリメータを新たに開発した (図 49、[85-87]。このコリメータは1台のチェン バー内に対向する二枚の可動コリメータへッドが収 められている。チェンバーとコリメータへッドは主 に無酸素銅で製作されている [88]。

ビーム軌道とコリメータヘッド先端間の距離は水 平方向型で 2–30 mm、垂直方向型で 0.5–25 mm 程 度の範囲で使用することを想定している。コリメー タヘッドの寸法は長さ 360 mm,厚さ 12 mm で、 ビームにより損傷した場合には新しいものに交換で きる構造になっている。垂直方向型の下側に設置し ているコリメータヘッドは、通常姿勢では交換でき ないため、チェンバー両脇に取り付けた円盤形状の 治具を使い、コリメータ全体を回転してヘッドを交 換することになる。







図 49 LER および HER 筑波直線部の新型コリメータ

ビームによるヘッドの損傷を避けるため、ヘッド の先端部には融点の高いタングステンを使用して いる。タングステンは HIP 接合により銅製ヘッド と接合する。この行程では同時に、ヘッド内にステ ンレス製冷却水配管が組み込まれる。また重金属で あるタングステンの放射長(radiation length、物 質中で電子のエネルギーが平均して 1/e になる長 さ [96]。)は約 3.5 mm と短く、これによる遮蔽効 果が期待できる。ヘッド先端のビーム軸方向の長さ は放射長の2倍以上である10mmとしている。な お、Phase-2およびPhase-3コミッショニングでは コリメータヘッドにビームが直撃する事故が発生し た(2.6.2項を参照)。Phase-3前のシャットダウン 期にヘッドを交換した際、損傷したタングステンの 先端は照射脆化により粉状でポロポロ落ちる状態に なっていたため、ヘッド先端部の材質を脆化しにく いタンタルに変更したものも現在開発している。

コリメータはビームに対して非常に大きな突起物 であるため、リングにインストールされている各種 機器の中でも主要なインピーダンス源の一つである (2.4 項を参照)。インピーダンスを低減するために は、一般的にコリメータの壁がビームへアプローチ するスロープを緩やかな角度にするが [91]、この方 法ではコリメータの全長が大きくなってしまい、リ ング内で設置できる場所が限られてしまう。この問 題に対処するため、新型のコリメータはスロープの 一部をアンテチェンバー内に納めることにより、コ リメータ全長が 800 mm とコンパクトながらも低 いインピーダンスを実現している。

また、このスロープは放射光のパワー密度を低減 する役割もある。例えば、コリメータの場所に垂直 壁があると仮定すると、そこに照 射される放射光 のパワー線密度は 19.3 kW・m⁻¹ となる。 新型コ リメータは、スロープの角度が約 23° であり、 こ れによりパワー線密度は 7.5 kW・m⁻¹ にまで下が る。 これは冷却水を使用すれば問題にならない値 である。

ビームはヘッド近くを通過するため、HOM が励 振される。特に捕捉モード(trapped mode)の励 振を避けるため、コリメータチェンバーはテーパー 構造にしている(LER 標準のビームチャネル直径 ϕ 90 mm が、ヘッド部に向かって ϕ 27 mm まで絞 られている)。さらに垂直方向のコリメータでは捕 捉モード励振を避けるため、水平方向両サイドのア ンテチェンバー内もテーパー構造にしている。

また、ヘッドの周辺には RF シールドを置くこと により、ヘッド背後にある空洞構造 (ヘッド収納室) への HOM の侵入を防いでいる (図 50)。コリメー タヘッドの長辺には従来型のフィンガー型 RF シー



図 50 新型コリメータのヘッド

ルドが、短辺には櫛歯型 RF シールドを採用してい る。このフィンガーにはインコネルに銀メッキした ものを、フィンガーが接触する相手側の板にはステ ンレスにロジウムメッキしたものを使用している。

CST Studio [103] の Eigenmode Solver によっ て RF シールドの有効性を評価した例を図 51 に 示す。ヘッド収納室は共振器として機能するため、 共振周波数は 1.10141 GHz から高い周波数まで、 多数の共振モードが存在する。ビームパイプの基 本モードは共振周波数が 1.95571 GHz のヘッドが ある方向(x 軸方向)へ電界成分を持つ TE_{111,x} で、次に共振周波数が 1.98486 GHz のヘッドと垂 直の方向(y軸方向)へ電界成分を持つ TE_{111,y} で ある。続いて、 TE_{112,x/y} (2.00661 GHz/2.01287 GHz) 、 TE_{113,x/y} (2.06278 GHz/2.08390 GHz) 、 TE_{114,x/y} (2.13454 GHz/2.15322 GHz)と続く。

TE_{111,x} における最大電界強度は 1.7 × $10^7 V \cdot m^{-1}$ であり、これに対してコリメータヘッドとチェンバー壁間の隙間における電界強度は 10 V · m⁻¹ 程度と6桁ほど低い。図 51 において もヘッド収納室内の薄い青色で確認できるが、ビームパイプ側で励振している電磁場がヘッド収納室へ 侵入し、ヘッド収納室でも共振モードが励振されて いる様子が見える。ただし、ビームパイプ側との結合は弱く、ヘッド周辺の RF シールドは機能してい る。

2.2.6 IR の真空機器

電子および陽電子ビームが互いに衝突する場所は 衝突点(Interaction Point、IP)と呼ばれ、この周 辺の領域を IR と呼んでいる。IR の概略を図 52 に



図 51 CST による新型コリメータの固有値解析結果(渡邉謙先生提供)



図 52 IR の概略 [92,93]

示す。なお、本テキストではイオンポンプの表記に IP を使用しているため、混同を避けるため、衝突点 の表記には極力これを使用していない。

衝突点チェンバーは、図 53 に示している通り、 二股形状と直線形状のビームパイプを組み合わせた X 字型の真空容器である。衝突点の前方 5 cm か ら後方 3 cm の領域は検出器の受容領域で,ここは 衝突点で生成された粒子を透過させる必要があるた め、物質量の小さいベリリウムで製作されている。 直線部分の主な熱負荷は壁電流によるもので、その パワーは 80 W 程度である [94]。この熱負荷を冷 却するため、ベリリウム部は二重管になっており、 管の間には液体パラフィン (paraffin、C₁₀H₂₂)を 流す (ベリリウムは反応性があるため水は使用しな い)。内筒と外筒間の 0.5 mm の隙間をパラフィ ンが流れる。

当初、直線部分はベリリウムとステンレスを接合 して製作される設計であったが、両材料の熱膨張の 差により接合部分への応力が問題となることが判明 したため、ベリリウムとの熱膨張差が小さいチタン がステンレスの代わりに採用された。ベリリウムと チタンはろう付けされる。直線型チェンバーには約 10 μm 厚の金メッキが施されており、これにより 光子を吸収する。

直線部両側の二股チェンバーは, できる限りバッ クグラウンド源となる粒子をビームパイプ外へ透 過させないため、物質量の大きいタンタルで製作さ れている。二股チェンバーのうち、衝突点に入って くるビームのチェンバーは $\phi 20 \,\mathrm{mm}$ から $\phi 10 \,\mathrm{mm}$ へ絞られたテーパー構造になっており、衝突点直前 の偏向電磁石で生成された放射光はこの内壁に照射 される。また、衝突点上流側のビームパイプ内壁に はリッジ構造が加工されており、これにより光子が 直線部分に向かって散乱されないようにしている。 直線部と二股部は HIP 接合される。細いベリリウ ムの両端に重いタンタルが接合されるため、タンタ ルの重心近くを保持するサポート構造が置かれてい る。タンタルは抵抗率が高いため、二股チェンバー の内面には銅メッキが施され、チェンバーは水冷さ れる。

衝突点チェンバーと QCS の間には BPM 付きべ







図 53 衝突点チェンバー [92,93]

ローズチェンバーが設置される(図 54)。このベ ローズは径が小さく、櫛歯型 RF シールドでは十 分な柔軟性が得られないため、従来のフィンガーを 使ったシールドを採用している。ベローズを伸ばし 過ぎるとフィンガーが脱落する可能性があるため、 それを防止するためのリミット機構を備えている。

QCS の中のビームパイプ(以下、QCS ビームパ イプ)とクライオスタット(cryostat)の取り合いを 図 55 に示す。QCS ビームパイプは4 mm 厚のス テンレスで製作され、その中に冷却水チャネルが組 み込まれている。ステンレスは抵抗率が高いため、 内面に銅メッキが施されている。LER のビームパ イプについては、さらにその上に電子雲対策として TiN コーティングを施している。

QCS のクライオスタット先端部には作業スペー スがほとんどなく、手でボルトを締めてビーム パイプを接続することができないため、DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron、ドイツ電子 シンクロトロン)が開発した RVC (Remote Vacuum Connection)と呼ばれるリモートでフラン ジ間を接続するシステムが設置されている (図 56、 [92])。衝突点チェンバーと BPM 付きベローズチェ ンバーのユニットを QCS ビームパイプへアプロー チさせ、RVC の回転式ロックシリンダーでこれを 捕捉し、乾燥窒素ガスでフランジ部に圧力をかけて 真空シールをする。



図 54 BPM 付きベローズチェンバー [92,93]



図 55 QCSL クライオスタットとビームパイプ [92,93]



図 56 QCSR クライオスタット先端部の RVC [93]

2.2.7 DR の真空機器

DR の概略を図 57 に示す。DR はゲートバルブ で区切られた 5 つの領域から構成されている。主 要な区間は合計約 118 m ある東・西アーク部で ある。北直線部には入射セプタムが、南直線部に は出射セプタムが設置されている。西アーク部と 南直線部の間には RF 空洞が設置された区間があ る [101,102]。西アーク部の上流側と下流側にはそ れぞれ、入射キッカーおよび出射キッカーが設置 されている。東アーク部には SRM (Synchrotron Radiation Monitor、放射光を用いたビームサイズ モニター)、DCCT (ビーム電流モニター)、フィー ドバックモニターおよびフィードバックキッカーが 設置されている。

アーク部では reverse FODO (reverse forcusing


図 57 DR の概略 [104,105]

drift deforcusing drift [99])と呼ばれる特殊なラ ティス (lattice) が採用されており、このラティス では陽電子ビームを逆方向へ曲げる二種類の偏向 電磁石 (B1, B2) が主に設置され、これに合わせ てビームパイプも Type I と Type II の二種類を用 意している (図 58)。MR 同様、アンテチェンバー 付きビームパイプが採用され、アルミ合金で製作 されている (押し出し材: A6063-T6、フランジ: A2219-T815、ポンプポート: A5052、BPM ブロッ ク: A5083)。reverse FODO ラティスではビーム が左右に振られ、放射光はビームパイプの左右に 照射されるため、2 つのアンテチェンバーは放射光 チャネルとして使用される。

DR の主ポンプである IP と NEG ポンプは、ポ ンプポートに設置される。IP が接続されるポンプ ポートには十字管が接続され、1 ポートは IP、1 ポートは粗排気セット等を接続するためのアングル バルブ、1 ポートは CCG/RGA/真空スイッチに使 用している。各アーク部には約 6 m おきに、合計 11 台の IP が設置されている。

図 58 に示している通り、ビームパイプの断面積 (コンダクタンス)が小さく、NEG ポンプの活性化 時に放出されるガスの排気に長時間を要する(2.5.5 項を参照)。各アーク部には最大 11 台の粗排気を取 り付けることができ、ビームパイプを設置してから 初回の NEG 活性化では多くのガスが放出されるた め、11 台の粗排気を使用した。2 回目以降の活性化 では、使用する粗排気セットの数を 6 台程度に間引





図 58 DR アーク部の構成 [104, 105]

いて活性化している。

ゲートバルブで区切られた各区間には CCG: 1 台、真空スイッチ:1 台が設置されている。東 アーク部には RGA を1 台設置している。また、電 子雲対策として、DR のビームパイプは長手方向に グルーブ (groove、溝) 構造を有しており、TiN コー ティングを施している (2.3 節を参照)。

アンテチェンバー内のグルーブには放射光を散乱 させる効果があり、これによりできるだけ光子が ビームチャネルへ入らないようにしている。Synrad3D [100] によりビームパイプ内の光子分布を評 価した例を図 59 に示す。シミュレーションにおけ るビームパイプの RMS 表面粗さ *R*_q と自己相関長 は実測から算出している。アンテチェンバー内で放 射光が照射される面がフラットな場合、散乱された 光子がビームチャネル内にも侵入してしまう。放射 光の照射面がグルーブになっている場合、放射光は アンテチェンバー内で散漫的に散乱され、光子が ビームチャネル内へ侵入することを防いでいる。

DRは2018年1月に完成し、Phase-2コミッショ ニングから DR が導入された(2016年の Phase-1 では DR なしで、MR のみでビーム運転がされた) [105,216]。





図 59 Synrad3d による DR ビームパイプ内の光 子分布。このシミュレーションにおいて放射光は リング外側にのみ照射されている。横軸 0 はリン グ外側、0.5 はビームパイプの上方向、1 は内側を 表している。黄色塗りつぶしはアンテチェンバー 内の領域を示している。 $R_q:508$ nm、自己相関 長:10 μ m。

2.3 電子雲不安定性と対策

図 60 に電子雲が発生する様子を示す。偏向電磁 石等で曲げられた高エネルギービームは放射光を発 し、その放射光はビームパイプ内壁へ照射される。 放射光が照射された場所からは光電子(photoelectron)が発生し、さらにこの光電子がビームパイプ に衝突すると、二次電子(secondary electron)が 発生する(実際にはビームパイプ表面での光子の反 射や、ビームが作る電場で加速された電子の表面衝 突による二次電子の発生等もある)。

周回している荷電粒子が正電荷を持つ陽電子や陽 子の場合、このプロセスで発生した電子がビーム の周りに雲のようにまとわりつく。ビームパイプ 内の電子数が増え続けて電子雲の密度がある閾値 を超えると、真空容器内の圧力上昇や、ビームサイ ズおよびエミッタンス増大をもたらす。このビー ム不安定性は ECE または ECI (Electron Cloud Instability) と呼ばれ、近年の大電流陽子リングま たは陽電子リングで深刻な問題となっている。

これまでの OHO シリーズでも電子雲不安定性 について述べられているため、OHO'00 家入 [32]、 OHO'06 陳 [33]、OHO'11 大見 [31] 等も参照して いただきたい。

ECE では、電子雲が媒体となって先行バンチ の変位が後続バンチに影響を与える結合バンチ不 安定性 (coupled bunch instability、図 61(a))と、 電子雲が媒体となってバンチ内後方の正電荷粒子 に影響を与える単バンチ不安定性 (single bunch instability/head tail instability、図 61(b))が引 き起こされる。前者はフィードバックシステムに よりある程度は抑え込むことが可能であるが、後 者はバンチ内の現象であるため、フィードバック



図 60 電子雲発生のプロセス

で抑えることが非常に難しい。単バンチ不安定性 によるビームサイズの増大はルミノシティ低下に 直結するため、SuperKEKB では ECE 対策が徹 底的に行われている。なお、SuperKEKB におけ る ECE の閾電子密度は、シミュレーションによ り約 3×10^{11} electrons · m⁻³ と見積もられてい る [108, 109]。

2.3.1 ECE 対策

これまでに KEK [110–128]、CERN [129– 137]、コーネル大学 [138–141]、SLAC [142–145]、 INFN [146,147]、BNL [148,149]、BINP [150] 等 の研究所で様々な ECE の対策方法が研究されてい る。これらの研究結果を踏まえて SuperKEKB で は、1) アンテチェンバー、2) TiN コーティング、 3) 縦方向磁場、4) グループ構造、5) クリアリング 電極 (clearing electrode、電子雲除去電極)、の対 策が施されている。表 18 には SuperKEKB LER



図 61 電子雲による不安定性

表 18 SuperKEKB LER における ECE 対策。各対策の括弧内は、コーティング等の対策を施してい ない銅製丸型ビームパイプの場合と比べた電子雲密度の低減率。ウィグラー区間において、TiN コー ティングはクリアリング電極のないビームパイプに対してのみ施している。CE はクリアリング電極 の意。

区間	長さ [m]	電子密度 [electrons · m ⁻³]	アンテチェンバー (1/5)	TiN (3/5)	縦方向磁場 (1/50)	グルーブ (1/2)	CE (1/100)
ドリフト	1629	2×10^{10}	0	0	0		
補正電磁石	316	2×10^{10}	0	0	0		
偏向電磁石	519	6×10^{10}	0	0		0	
ウィグラー電磁石	154	5×10^9	0	0			0
四極・六極電磁石	254	5×10^9	0	0			
RF	124	1×10^9		0	0		
IR	20	6×10^9		0	0		
合計	3016						
平均		2.4×10^{10}					

の各区間において適用している ECE 対策について まとめている。

本項で紹介しているビームパイプ内の電子電流お よび電子密度は、試験用ビームパイプに設置した RFA (Retarting Field Analyzer [151])により測定 されている(図 62)。RFA はビームチャネルの真下 にあり、電子コレクターにはDC+100Vを印加して いる。電子コレクターの前にはエネルギーを弁別す る retarting grid が置かれている。retarting grid で高いエネルギーの電子のみを測定することで、 ビーム軌道近くの電子密度を測定することができる (ビーム軌道近くの電子はバンチが作る電場から力 を受けるため、高いエネルギーを持つ) [110,151]。 アンテチェンバー

LER のほぼ全周にわたって、2.2.1 項でも述べた アンテチェンバー付きビームパイプを使用してい る。アンテチェンバーには、アンテチェンバー内で 反射された光子と、アンテチェンバー内で発生した 光電子がビームチャネルへ侵入することを防ぐ効果 がある。放射光が乱反射されるよう、放射光が照射 される面は Ra = 7-20 と粗くしている。

KEKB LER において、RFA により測定した円 形断面チェンバーとアンテチェンバー付きビームパ イプ内の電子電流を図 63 に示す。円形断面チェン バーと比べたアンテチェンバーの電子雲密度低減



図 62 試験用アンテチェンバー付きビームパイプ における RFA

効果は、100 mA 以下の低ビーム電流で $\approx 1/100$ 、 1000 mA 以上の高ビーム電流で $\approx 1/5$ である(低 ビーム電流では光電子が支配的であり、アンテチェ ンバーはこれらに対する低減効果が高いことを意味 している)。

なお、本テキスト中のフィルパターン (fill pattern) は「トレイン数/バンチ数/RF バケット (1 RF-bucket = 2 ns)」で表されており、1/1284/3.06 はリング内のバンチトレインの数が1で、そのトレ インの中に 1284 のバンチがあり、その各バンチの



図 63 KEKB LER における円形およびアンテ チェンバー付きビームパイプ内の電子電流 [115]。 フィルパターン:1/1284/3.06、円形ビームパイ プの半径:47 mm、retarding bias V_r:-30 V。

間隔が(平均すると)3.06 RF バケットであること を示している(RF バケットが整数でないのは、バ ンチ間隔を不均等にしているためである。このよう にしている理由は、ライナックからの2 バンチ入 射に対応するためである[152,153]。2 バンチ入射 において、ライナックから MR へ入射できるのは 96.3 ns に 1 回で、これは MR の 49 RF バケット に相当する。これを3 RF バケット×15+4 RF バ ケット×1 の繰り返しパターンで実現すると、平均 3.06 RF バケットになる)。

TiN コーティング

LER のほぼ全てのビームパイプには、SEY 低減 効果のある TiN コーティングを施している [116, 117,154–156]。偏向電磁石内のビームパイプにお いては上底面長手方向にはグルーブ構造が置かれて おり、この上から TiN コーティングを施している。

KEKB LER において、RFA により測定した TiN コーティングの有無による電子雲密度を図 64 に示 す。TiN コーティングによる電子雲密度低減効果 は $\approx 3/5$ である。

SuperKEKB MR の建設時、2 年間で 1200 本以 上のビームパイプにベーキングを、その内約 1000



図 64 KEKB LER における TiN コーティング 有無による電子雲密度 [110]。フィルパターン: 4/200/3。

本は TiN コーティングを施す必要があり、また、多 くのビームパイプは全長 2-5 m と長尺であるため、 KEK の大穂実験棟に 4 台のベーキング装置と 7 台 のコーティング装置が新たに建設された(図 65)。

ビームパイプを加速器へ設置する前には次の前作 業が行われる。

- (1) KEK つくばキャンパス内の倉庫に保管されて いるビームパイプをトラックで大穂実験棟に搬 入する。
- (2) 大穂実験棟のクリーンルームでビームパイプの 目視検査を行う。
- (3) 目視検査が合格であれば、TiN コーティングを 施す。不合格であれば職員で手入れをするか、 製造業者に対処依頼をする。
- (4) ビームパイプに NEG ポンプや BPM 電極を取り付ける。
- (5) ベーキングする。
- (6) ビームパイプに乾燥窒素を充填し、倉庫等へ移送する。

コーティング装置の概略を図 66 に示す。ビーム ダクトの中心軸上にチタン電極を設置し、アルゴン (窒素換算 ≈ 2 Pa)および窒素 (≈ 2 Pa) 雰囲気中 でマグネトロン放電を起こすことでコーティングす



図 65 TiN コーティング設備 [156]

る。このとき、チタン電極には −400 V が印加され る。ビームパイプはソレノイドコイル (≈ 16 mT) の中に設置され、ビームパイプの一端は排気ポンプ に、もう一端はガス導入ラインに接続される。パイ プ状のチタン電極 (外径 φ27.2 mm、長さ 5-6 m) を介して、ガスはビームダクト内にほぼ均等に供給 される。導入ガスの分圧は排気システムのオリフィ スと、ガス導入ラインのマスフローコントローラー で制御される。放電電流 6.3 A で約 70 分間放電を 行うことで、ビームパイプ内面に厚さ約 200 nm の TiN 薄膜がコーティングされる。

コーティング装置には熱風によるベーキング機構 が備わっており、ビームパイプはコーティング前に 150 ℃ で 24 時間以上ベーキングする。コーティ ング前のビームパイプ内圧力は、温度 150 ℃ で 10⁻⁵ Pa 台以下となる。コーティング作業では、ア ルゴンと窒素雰囲気中で TiN コーティングを行う。 コーティング中はビームパイプの温度が約 150 ℃ になるように温度調整を行なっている。ビームパイ プの設置から取り外しまでに約4日を要する。

コーティング装置には縦置き型5台と横置き型2 台がある。縦置き型では、ビームパイプおよびチタ ン電極は垂直に立てて設置され、高さは約8mあ る。横置き型では、ビームパイプおよびチタン電極 は水平方向に置かれ、チタン電極はセラミック製の サポートを用いて設置される。横置き型の全長は約 10mである。主に縦置き型は直線型のビームパイ プ、横置き型は偏向電磁石用の曲率を持ったビーム パイプに使用される。

1 台のコーティング装置にはビームパイプを最大 2 列まで設置できる。最長 5.5 m 程度のビームパイ プをコーティングすることができ、長さの短いビー ムパイプは数本連結して、複数本を同時にコーティ ングすることも可能である。



図 66 TiN コーティング装置の概略 [156]

この装置でコーティングされたアルミ合金製ビー ムパイプの写真と、銅サンプル表面の電子顕微鏡画 像を図 67 に示す。TiN コーティングした表面は黒 色になり、図 67 のような 100 nm のスケールでギ ザギザした構造を持つ。この構造により二次電子が 捕捉され、実効的に SEY が低くなると考えられて いる。

厚さ 200 nm の TiN コーティングを施したアル ミ合金サンプルの SEY 測定結果を図 68 に示す。 ここでの SEY 測定には実験室内の SEY 測定装置 を使用している [123]。この装置の電子銃で生成さ れる電子ビームのエネルギーは 100-2000 eV の範 囲で掃引でき、ビーム電流は $\approx 20 \,\mu$ A 程度である。 SEY 測定部はサンプルとコーン (cone) で構成さ れている (図 69)。通常のサンプルサイズは直径 15 mm 程度である。

図 68(a) は入射エネルギーを 250 eV 、照射面積 25 mm² の電子ビームを照射し続けた場合のドーズ (照射された電荷量の積算、C・mm⁻²) による SEY の変化を、図 68(b) はビームエネルギーに対する SEY のスペクトルを示している。スクラビングを



(a) TiNコーティングされたアルミ合金製ビームパイプ



(b) TiNコーティングされた銅サンプルの表面
 図 67 TiN コーティングを施した表面の様相

ドーズ量 10^{-1} C·mm⁻² まで進めると、どのエネ ルギーでも SEY は 1 以下に減少しており、SEY の 低減に効果的であることがわかる。

大穂実験棟のベーキング装置の写真を図 70 に示 す。ビームパイプを断熱材で包んだオーブンの中に 入れ、オーブン内に熱風を循環させることでベーキ ングを行う。7.5 kW の熱風発生器を使用し、約 2 時間でビームパイプの温度を 150 ℃ まで昇温でき る。排気ポンプはオーブンの外に設置されており、 これらはリボンヒーターを用いてベーキングされ る。一部のベーキング装置には RGA を設置してお り、ベーキング後の残留ガス成分を調べることがで きる。ベーキングは約 150 ℃ で 26 時間行われる。 ビームパイプに NEG ポンプを設置している場 合、ベーキングと併せて NEG ポンプの活性化を行 う。ベーキング終了後の目標圧力は 1 × 10⁻⁷ Pa 以





(b) エネルギー依存性

図 68 TiN コーティングしたアルミ合金サンプ ルの SEY。flat:平らなサンプル、groove:グルー ブ構造付きサンプルの意。



図 69 SEY 測定部の構成 [123]



図 70 ベーキング装置

下としている。ベーキング終了後、ビームパイプに は乾燥窒素が充填され、封止フランシで封じ切った 状態で保管される。

グルーブ

ソレノイドコイルや永久磁石を置くスペースのな い偏向電磁石用ビームパイプでは、ビームパイプの 上底面・長手方向にグルーブと呼ばれる溝構造を押 し出し加工の際に形成している(図 71)。偏向電磁 石内のダイポール場に沿って電子は螺旋運動し、グ ルーブ構造内に電子が入ると、その中で電子は繰り 返し衝突して吸収される確率が高まる。これにより 実効的にビームパイプの SEY を低減することがで きる。

図 72 には、グルーブの対向にある電子モニター で測定した電子電流を示す。グルーブ付きビームパ イプの電子雲密度低減効果は ~1/2 である。



図 71 グルーブ構造



図 72 KEKB LER におけるグルーブ有無 による電子電流 [110, 123]。フィルパターン: 1/1585/3.06、V_r = -1kV、ビーム電流 1450-1560 mA。

縦方向磁場

縦方向(ビーム軸方向)に磁場を印加すると、低 エネルギーの電子は磁場に捕捉され、ビーム近傍 の電子雲密度が低減する。KEKB LER において、 RFA により測定した縦方向磁場の有無による電子 雲密度を図 73 に示す。この磁場による電子雲密度 低減効果は < 1/1000 である。隣り合うソレノイド コイルまたは永久磁石間のギャップと、磁場極性が 反転する領域を考慮すると、実際には、縦方向の磁 場による電子雲密度低減効果は ~ 1/50 程度として いる。

KEKB LER では、ドリフト区間にソレノイドコ イルを置いていたが、SuperKEKB のアンテチェン バー付きビームパイプでは、Phase-2 コミッショニ ングから永久磁石をビームパイプ上下に設置して縦



図 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(半径:47 mm)における 縦方向磁場の有無による電子電流 [110]。フィル パターン:8/100/2。

方向に磁場を印加している(図 74)。この永久磁石 は長さ 160 mm の鉄ヨーク(yoke)に ϕ 30 mm の 永久磁石を 8 個取り付けている。電磁石近傍には非 磁性のアルミ板を使った永久磁石を設置している。

この永久磁石の有無による、ドリフト部チェン バーの電子密度を図 75 に示す。この電子密度は CLOUDLAND [158] により計算された。ビームパ イプ中心から半径 8 mm 以内における電子密度は 磁場なし 4.5×10^{11} electrons · m⁻³、永久磁石あり 4.0×10^{10} electrons · m⁻³ であり、これは ECE の 閾値より 1 桁程度小さく、電子密度の低減に効果的 であることがわかる。

クリアリング電極

クリアリング電極は、ビームパイプ内に薄い電極 を置き、そこに DC 電圧を印加することで電子を正 電荷ビームから排除し、電子雲密度を低減する装置 である (図 76、[110,120–122])。低インピーダンス かつ、良好な熱伝導を実現するため、非常に薄い電 極を絶縁物状に形成する必要がある。

SuperKEKB のクリアリング電極では、絶縁体と なるアルミナ(0.2 mm 厚)とその上の電極となる タングステン(0.1 mm 厚)が溶射により作られてお







図 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 [157]



(a) 磁場なし



(b) 永久磁石あり

図 75 CLOUDLAND による LER ドリフト 部の電子密度(福間均先生提供)。単位は [electrons・m⁻³]。SEY ピーク値: 1.2、ビーム 電流: 3.6 A、フィルパターン: 1/2500/2。



図 76 クリアリング電極付きビームパイプ

り、ビームパイプと一体の構造をしている。電極の 幅は 40 mm である。SuperKEKB では LER の直 線部にあるウィグラー電磁石部(全長 120–140 m) にクリアリング電極付きビームパイプを設置して いる。

図 77 には、ビームドーズ (beam dose、積分ビー ム電流 *∫ I dt*) に対するクリアリング電極の対向 にある電子モニターで測定した電子電流を示す。



図 77 KEKB LER ウィグラー電磁石内 (\approx 0.78 T)におけるビームドーズに対するビーム近傍 の電子電流 [120]。フィルパターン:1/1585/3.06、 V_{elec} はクリアリング電極への印加電圧。 $V_{\text{r}} =$ $-1 \, \text{kV}$ 、ビーム電流:1450–1560 mA [120]

 $V_{
m elec} > 300 \, {
m V}$ での電子電流は、TiN コーティング された平面の場合と比べた電子電流は pprox 1/100 で ある。

2.3.2 Phase-1 における ECE

Phase-1 では当初、全てのビームパイプおよびベ ローズチェンバーに永久磁石を設置していなかっ た。Phase-1 で標準的に採用していたバンチフィ ルパターン(1/1576/3.06)におけるビーム運転時、 ベローズチェンバーに永久磁石を取り付ける前は、 ビーム電流約 600 mA から垂直方向のビームサイ ズ増大が観測された(図 78)。

ビームエネルギーが一定の場合、光子数はビーム 電流に比例する(付録 B を参照)。ガス放出量が放 射光による PSD で決まっているとすると、P/I は ビーム電流に対して一定値をとるが、ベローズチェ ンバーに永久磁石を設置していない場合、アーク部 ではビーム電流が約 600 mA 以上でビーム電流に 対する圧力の非線形的な振る舞いが観測されている (図 79)。これは電子のマルチパクタ現象により、 ESD によるガス放出の寄与が大きいためである。 なお、図 79 において、低ビーム電流領域で P/I が 高いのは、静的圧力(ビーム電流 0 mA での圧力) の影響による。



図 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 [125]。フ ィルパターン:1/1576/3.06、PM は Permanent Magnet (永久磁石) の意。



図 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* [Pa·mA⁻¹] [125]。*P*/*I* はアーク部の平均 圧力をビーム電流で割った値。フィルパターン: 1/1576/3.06、PM は Permanent Magnet の意。

これらのビーム電流に対するビームサイズの増 大や圧力の非線形的上昇は ECE による典型的な現 象である。ECE が比較的低ビーム電流で発現した のは、LER のアルミ合金製ベローズチェンバーに は TiN コーティング等の ECE 対策を施していな かったことに原因があると考えられた。このベロー ズチェンバーは全長 200 mm で、リング内に合計 830 台ある。これはリング周長に対して 5.5% 程度 であるため、当初は ECE への寄与は小さいと考え、 TiN コーティングを施していなかった。しかし、 SuperKEKB LER の RFA で TiN コーティングを 施していないビームパイプ内の電子密度を測定した ところ、電子密度は 10^{12} electrons · m⁻³ であった。 これは ECE の閾値である 3×10^{11} electrons · m⁻³ よりも 1 桁高く、ベローズチェンバーの ECE に対 する寄与が想定より非常に大きいことが判明した。 ベローズチェンバー内の ECE 対策として、永久磁 石 (2.3.1 項を参照)を設置したところ、ビーム電流 600–900 mA でのビーム電流に対するビームサイズ 増大と圧力の非線形的上昇は見られなくなった。

各フィルパターンにおける、電流線密度 I_{d} [mA · bunch⁻¹ · RF-bucket⁻¹] に対する垂直 方向ビームサイズを図 80 に示す。電流線密 度はバンチ電流 I_{b} [mA · bunch⁻¹] をバンチ間 隔で割った値として定義され、リング内の ビーム電流の密度に相当するような値である。 ECE によるビームサイズ増大が発現する電子 線密度の閾値 $I_{d_{th}}$ [mA · bunch⁻¹ · RF-bucket⁻¹] は、どのフィルパターンでもほぼ同じ値を 取り、ベローズに永久磁石を設置する前は $I_{d_{th}} = 0.1-0.12$ mA · bunch⁻¹ · RF-bucket⁻¹ で あるが、永久磁石を設置したことにより、 $I_{d_{th}} \approx$ 0.2 mA · bunch⁻¹ · RF-bucket⁻¹ に引き上げられ ている。

なお、KEKB LER (銅製 ϕ 94 mm 丸型 パイプ)の初期段階 (2000 年頃)における、 ビーム軸方向の磁場がない場合の閾値は $I_{d_{th}} \approx 0.04 \text{ mA} \cdot \text{bunch}^{-1} \cdot \text{RF-bucket}^{-1}$ であり (図 78(c))、SuperKEKBのベローズチェンバーに 永久磁石を設置した場合の閾値はこれより約5倍高 く、ECE 対策の効果が現れている。

2.3.3 Phase-2 における ECE

図 78 から、ベローズチェンバーに永久磁石を設 置した後でも、ビーム電流が 900 mA を超えたあた りからビームサイズのブローアップが始まっている ことが見て取れる。そのため、Phase-2 開始前にド リフト部のビームパイプの約 86% に永久磁石を設 置した(図 74 参照)。



図 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 [125]



図 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 [125]

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を図 81 に示す。Phase-2 では $I_d = 0.4 \text{ mA} \cdot \text{bunch}^{-1} \cdot \text{RF-bucket}^{-1}$ までの間でビームサイズの増大は観測されず、これはベローズチェンバーのみに永久磁石を設置していた Phase-1 の状況と比べて、閾値は少なくとも2倍大きくなっている。

図 82 は D03 アーク部における *P*/*I* の推移を示 している。Phase-1 ではビーム電流が 300 mA を超 えたあたりから *P*/*I* の増大が見られるが、Phase-2 では 300 mA を超えてもそれが見られず、Phase-2 では電子によるマルチパクタ効果がより低減されて いることがわかる。Phase-2 では縦方向のビーム不 安定性の発現により、*I*d の最大値が制限された。

2.3.4 Phase-3 における ECE(速報)

Phase-3 コミッショニング開始前には、ドリフ ト部の約 91% を永久磁石で覆っている。Phase-3 における、電流線密度に対する垂直方向ビー ムサイズを図 83 に示す。どのフィルパター ンでも $I_d = 0.55 \text{ mA} \cdot \text{bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ ま で垂直方向ビームサイズの増大は見られない。 Phase-3 における I_d は HOM Limit (2.4.1 項 を参照)で制限されたが、デザイン値の $I_d =$



図 82 ビーム電流に対する D03 アーク部の *P*/*I* [Pa·mA⁻¹] [125]。*P*/*I* はアーク部の平均 圧力をビーム電流で割った値。フィルパターン: 4/120/2、PM は Permanent Magnet の意。



図 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(福間均先生 提供)

0.72 mA · bunch⁻¹ RF-bucket⁻¹ (ビーム電流: 3.6 A、フィルパターン: 1/2500/2)まであと一歩である。

2.4 インピーダンス

通常、ビームは金属製のビームパイプに囲まれて 進行しており、バンチからは電気力線がビームパイ プに向かって生じている。そのため、バンチと共に ビームパイプ表面には鏡像電荷が進行し、ビームパ イプが完全導体で滑らかに繋がっていれば、鏡像電 流もバンチと共に滑らかに進行する。

しかし、実際の加速器ではビームパイプの一部 に段差があり、この段差で鏡像電流は進行方向を 変え、これにより電磁波が放出される。この電磁波 は、これを励起させたバンチが通過した後にもそ の構造の周辺に存在し、時間の経過とともに減衰 する。

このように、ビーム周辺のコンポーネント(ビー ムパイプ、ベローズチェンバー、加速空洞、コリメー タ等)とビームが相互作用することで放出される電 磁場はウェイク場(wake field)と呼ばれる。水上を 航行する船の後の航跡になぞらえて、航跡場とも呼 ばれる。ウェイク場は真空機器の発熱だけでなく、 船の航跡が後続する船に影響を与えるように、ウェ イク場を励起させたバンチに後続するバンチにも影 響を与える。また、バンチ内の先頭電荷が励起した ウェイク場が、バンチ内後方の電荷にも影響を及ぼ す。このウェイク場とインピーダンスはフーリエ変 換(Fourier transform)によって結び付いており、 これらはビーム不安定性とも強く関係している。

ウェイク場を解析的に計算できる構造物の形状は 非常に限られており、通常は CST Studio の Wakefield Solver や ABCI [106] 等の計算機コードを使 用して計算する。SuperKEKB では、各種機器の ウェイク場を計算するために GdfidL [107] と呼ば れる高周波電磁場シミュレーターが広く使用されて いる [107]。

本テキストでは、バンチにより励起されたウェイ ク場により、そのバンチ自身が受けるキックの大き さを表す、ロスファクター(loss factor、縦方向ロ スファクター)とキックファクター(kick factor、 横方向ロスファクター)について紹介する。

ビームパイプのインピーダンスとビーム不安定性の詳細については、OHO'06 陳 [33]、OHO'10 菖蒲

田 [34]、OHO'11 陳・菖蒲田 [35] 等も参照していた だきたい。

2.4.1 ロスファクター

バンチが構造物を1回通過する際に、ウェイク場 によりバンチが損失するエネルギー $\Delta E[J]$ は、バ ンチの電荷量 q[C] とすると、

$$\Delta E = k_{\rm L} q^2 \tag{38}$$

と表される。ここで、比例定数 $k_{\rm L}$ [V·C⁻¹] (添字 のLは longitudinal の頭文字)はロスファクター と呼ばれ、ビーム周辺の構造物の形状とバンチ長 σ_z [m] で決まる量である。ビームの進行方向におけ る電荷線密度がガウス分布している場合、ロスファ クターは縦方向インピーダンス $Z_{\rm L}(\omega)$ の実部によ り次のように表される。

$$k_{\rm L}(\sigma_z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Re Z_{\rm L}(\omega) \exp(-\omega^2 \sigma_z^2) \, d\omega \quad (39)$$

ビーム電流を I[A]、バンチ間隔を $T_b[s]$ とする と、バンチあたりの電荷量は $q = IT_b$ であるため、 ある機器でそのロスファクターにより損失するビー ムパワー P[W] は、

$$P = \frac{\Delta E}{T_{\rm b}} = k_{\rm L} I^2 T_{\rm b} = I^2 Z_{\rm p} \tag{40}$$

で与えられる。ここで、 $Z_{\rm p} := k_{\rm L}T_{\rm b}$ はパラスティッ クモードロスインピーダンス(parasitic mode loss impedance)と呼ばれる。なお、バンチの周回時間 を T_0 [s]、バンチ数を $N_{\rm b}$ とすると、 $T_{\rm b} = T_0/N_{\rm b}$ であるため、損失するビームパワーはビーム電流の 2 乗に比例し、バンチ数に反比例することがわかる ($\propto I^2/N_b$)。

ここでは具体例として、リングを構成する機器の 中でも主要なインピーダンス源であるコリメータ (2.2.5 項を参照)を挙げる。GdfidL により計算し たコリメータのロスファクターを図 84 に示す。コ リメータヘッドをビームに近づけるほど、ロスファ クターが増加する傾向にある。例えば、新型水平方 向コリメータのアパチャ 8 mm におけるロスファ クターの計算値は約 0.04 V・pC⁻¹ であり、ビーム



図 84 アパチャに対するコリメータのロスファク ター [86]。d [mm] はコリメータヘッド先端とビー ム間の距離。SKEKB:新型コリメータ、KEKB: 従来型コリメータ、hori:水平方向コリメータ、 vert:垂直方向コリメータ、sz:バンチ長 [mm] の意。

電流 3.6 A、バンチ数 2500 (*T*_b = 4 ns) の場合、式 (40) から、このコリメータ 1 台でビームが損失す るパワーは、

 $P = 0.04 \times 10^{12} \times 3.6^2 \times 4 \times 10^{-9} \approx 2.1 \,\mathrm{kW} \ (41)$

である。この損失したビームパワーは、最終的には 周辺の真空機器の発熱に費やされる。

バンチ長に対するロスファクターを図 85 に示す (縦軸が対数であることに注意)。バンチ長が短くな るにつれてロスファクターは急激に増加することか らも、バンチ長の短い加速器では、各種機器のイン ピーダンスを低減することが重要であることがわ かる。

GdfidL により計算した、SuperKEKB LER に おける各機器のロスファクターを表 19 にまとめ ている。resistive wall (抵抗性壁インピーダンス) は、ビームパイプが非完全導体でできていることに 起因するインピーダンスで [159,160]、断面形状が 円形のビームパイプについて計算している。LER の RF システムが許容できる合計ロスファクター は 25 V・pC⁻¹ とされており [161]、これに比べて 概算値は約 14.2 V・pC⁻¹ と十分小さい。このロス



図 85 バンチ長に対するコリメータのロスファク ター [86]。SKEKB:新型コリメータ、KEKB:従 来型コリメータ、hori:水平方向コリメータ、vert: 垂直方向コリメータ、d: コリメータへッド先端と ビーム間の距離の意。

ファクターについて先と同様にビームが損失するパ ワーを計算すると約 740 kW である。

SuperKEKB MR では、最大ビーム電流と HOM Limit と呼ばれる2つの上限を設定して運転してい る。これらの制限値は、ビーム電流を積み上げてい き、各種機器の健全性等を見定めるための大電流 スタディ(high current study)の結果等により決 定される。真空機器の発熱が $\propto I^2/N_b$ であること から、通常 HOM Limit は、安定にビーム運転でき た最大ビーム電流の2乗を、そのときのバンチ数 で除した値に設定される。HOM Limit があること により、リング内のバンチ数が変更された場合で も、ビームの損失パワーによる発熱を基準とした 制限をかけることができる。例えば、HOM Limit を $635 \text{ mA}^2 \cdot \text{bunches}^{-1}$ と設定すると、バンチ数 1576 ではビーム電流が約 1000 mA、バンチ数 789 ではビーム電流が約 707 mA でビームの入射が止 められる。

また、縦方向インピーダンスのビームに対する効 果に、potential well distortion によるバンチ長の 伸延 (bunch lengthening) がある。ビーム電流が

表 19 SuperKEKB LER におけるロスファクターの概算(バンチ長:6 mm) [162,163]。MO フラン ジ接続部は、幅 1 mm のガスケットがビームチャネル側へ 0.2 mm 出ているとして計算。

機器	$k_{\rm L} \left[{\rm V} \cdot {\rm C}^{-1} \right]$	数量	$k_{\rm L,total} \left[{\rm V} \cdot {\rm p} {\rm C}^{-1} ight]$
Resistive wall (Al)	1.03×10^9	$2200~\mathrm{m}$	2.26
排気ポート(RF スクリーン)	3.65×10^2	$2200~\mathrm{m}$	8.04×10^{-7}
MO フランジ接続部	1.28×10^7	2000	0.03
櫛歯型ベローズチェンバー	3.00×10^9	1000	3.00
ゲートバルブ	3.00×10^9	30	0.09
放射光マスク	1.82×10^{-3}	1000	1.82×10^{-12}
垂直方向コリメータ $(d = 2 \mathrm{mm})$	3.37×10^{10}	3	0.10
水平方向コリメータ $(d = 5 \mathrm{mm})$	4.10×10^{10}	10	0.41
テーパー管	3.83×10^8	16	6.13×10^{-3}
BPM	1.63×10^8	440	0.07
フィードバック用 BPM	5.90×10^8	10	5.90×10^{-3}
横方向フィードバックキッカー	5.01×10^{11}	1	0.50
衝突点チェンバー	8.00×10^8	1	8.00×10^{-4}
RF 空洞(ARES)	4.35×10^{11}	18	7.83
合計			14.2

ゼロにおけるバンチ長はリングの光学系によって決 定されるが、ビーム電流が有限になると、バンチの 形状はバンチ自身のポテンシャルによって決まる。 縦方向のインピーダンスはこのポテンシャルを歪め るため、これによりバンチ長が変化する。バンチ長 の変化は次式から得られる [164]。

$$\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}}\right)^3 - \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z0}}\right) - \frac{\alpha I\Im(Z_{\rm L}(\omega)/n)}{\sqrt{2\pi} E\nu_{\rm s}} \left(\frac{R}{\sigma_{z0}}\right)^3 = 0$$
(42)

ここで、bunch lengthening 前のバンチ長 σ_{z0} [m]、bunch lengthening 後のバンチ長 σ_{z} [m]、 モーメンタムコンパクションファクター (momentum compaction factor) α 、シンクロトロンチュー ン ν_{s} 、リングの平均半径 R [m] である。円形加速 器の中でビームは周回周波数の整数倍の周波数での みインピーダンスを誘起するため、リングの角周回 周波数 ω_{0} [Hz] (= $2\pi \times$ 周回周波数)、整数 n とし て、 $\omega = n\omega_{0}$ を使ってインピーダンスが表記されて いる。

SuperKEKB で採用されているナノビームスキー ムでは、衝突点における電子ビームと陽電子ビーム の水平方向の交差角を $2\phi_c$ とすると、衝突点におけ る水平方向の有効ビームサイズは $\sigma_{x,eff} = \sigma_z \sin\phi_c$ となり、バンチ長が伸びると有効ビームサイズが増 大してルミノシティが減少する。そのため、ルミノ シティを増やす上で bunch lengthening は将来的 に問題になる可能性がある。

2.4.2 キックファクター

横方向のロスファクターは、バンチが励起した ウェイク場により、そのバンチ自身が横方向に受け るキックの大きさを表し、キックファクターとも呼 ばれる。キックファクター $k_{\rm T}$ [V·C⁻¹·m⁻¹] (添 字の T は transverse の頭文字) は、ビームの進行方 向電荷線密度がガウス分布している場合、横方向イ ンピーダンス $Z_{\rm T}(\omega)$ の虚部により次のように表さ



図 86 アパチャに対するコリメータのキックフ ァクター [86]。d [mm] はコリメータヘッド先端 とビーム間の距離。SKEKB:新型コリメータ、 KEKB:従来型コリメータ、hori:水平方向コリ メータ、vert:垂直方向コリメータ、sz:バンチ長 [mm] の意。

れる。

$$k_{\rm T}(\sigma_z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Im Z_{\rm T}(\omega) \exp(-\omega^2 \sigma_z^2) \, d\omega \quad (43)$$

GdfidL により計算したコリメータのキックファ クターを図 86 に示す。コリメータヘッドをビーム に近づけるほど、キックファクターは急激に増加す る傾向にある。

キックファクターにより誘起されるビーム不安 定性に TMCI (Transverse Mode Coupling Instability、横方向モード結合不安定性) がある。TMCI はバンチ電流を制限する要因の一つで、この不安定 性が発現するバンチ電流の閾値 $I_{b,th}$ [A · bunch⁻¹] は次式で与えられる [164]。

$$I_{\rm b,th} = \frac{C_1 f_{\rm s} E}{\sum_i \beta_i k_{\rm T,i}(\sigma_z)} \tag{44}$$

ここで、 $C_1 \approx 8$ 、シンクロトロン周波数 f_s [Hz]、機器 i のキックファクター $k_{T,i}(\sigma_z)$ [V·C⁻¹·m⁻¹]、 機器 i におけるベータ関数 β_i [m] である。GdfidL による計算結果から、衝突点上流の垂直方向コリ メータ1台(機器名称:D02V1、図 33 を参照)の アパチャを 2 mm まで絞ると、キックファクター



図 87 バンチ長に対するコリメータのロスファク ター [86]。SKEKB:新型コリメータ、KEKB:従 来型コリメータ、hori:水平方向コリメータ、vert: 垂直方向コリメータ、d: コリメータへッド先端と ビーム間の距離の意。

は約 430 V · pC⁻¹ · m⁻¹ となり、このコリメータ でのベータ関数(設計値)は 110 m であるため、 $I_{b,th} = 1.67 \text{ mA} \cdot \text{bunch}^{-1}$ となる。SuperKEKB LER のバンチ電流の設計値は 1.44 mA · bunch⁻¹ であるため、このコリメータ 1 台では TMCI は発 現しない。

SuperKEKB LER では最終的に 3 台の垂直方向 コリメータを設置する予定だが、例えば、これら全 てについてアパチャを 2 mm まで絞ると、前述以 外のコリメータでのベータ関数を 17 m とすると、 $I_{b,th} = 1.28 \text{ mA} \cdot \text{bunch}^{-1}$ となり、TMCI により バンチ電流が制限されることになる。

バンチ長に対するキックファクターを図 87 に示 す。ロスファクター同様、バンチ長が短くなるにつ れて急激に増加することがわかる。

キックファクターによるビームのコヒーレントな ベータトロンチューンのシフトは、

$$\Delta \nu_{\rm T} = \frac{k_{\rm T} I_{\rm b} T_0 \beta_i}{4\pi E} \tag{45}$$

で与えられる。ここで、横方向のベータトロンチ ューン $\nu_{\rm T}$ 、ビームエネルギー E [eV] である。 コミッショニングでは、コリメータのアパチャに よるチューンシフトを測定している。ここでは例 として、Phase-1 コミッショニングにおける新型水 平方向コリメータ 2 台のアパチャによるチューン シフトの測定を挙げる(図 88)。このコミッショニ ングでは、LER に設置されていたコリメータはこ の 2 台のみであった。2 台のコリメータのアパチャ を 25 mm から 5 mm へ絞った際のチューンシフト を約 1 A⁻¹、このときのコリメータでのベータ関 数 24.2 m、 $T_0 = 1 \times 10^{-5}$ s、 $E = 4 \times 10^9$ eV と して、式(45)から、アパチャ 5 mm でのコリメー タ 1 台あたりのキックファクターを計算すると、 $k_{\rm T} = 103.85$ V · pC⁻¹ · m⁻¹ となり、GdfidL によ るバンチ長 6 mm での計算値約 78 V · pC⁻¹ · m⁻¹ と同程度の値となっている。



図 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

2.5 制御システム

SuperKEKB における真空関連機器の制御シス テムは、10 年以上にも渡るコミッショニングでも 健全かつ堅牢に稼働する必要がある。そのため、 KEKB から SuperKEKB ヘアップグレードする際 に制御機器も全て更新することが望ましかったが (実際は最新が最良でないことも多々あるが)、表 20 に示す通り SuperKEKB MR の入出力点数は膨大 であり、建設スケジュールおよび予算の観点からも 全てを更新することは困難であった。

そこで、再入手性が著しく低下している機器や劣 化している機器を選定・更新し、これら以外につい ては TRISTAN または KEKB で使用していたもの を引き続き使用することとなった [165]。そのため、 現在でも使用している機器の中には 1980 年代に製 作されたものもある。

2.5.1 システム構成

KEKB では、EPICS (Experimental Physics and industrial Control System [166])の IOC (Input Output Controller)として VME 計算機が、デー タロガーとして CAMAC (Computer Automated Measurement And Control)が使用されていた。 VME 計算機は横河電機社製 PLC (Programmable Logic Controller)の Linux CPU モジュールであ る F3RP61 [167] に置き換えることにより、シス テム構成が簡略化された。CAMAC はメンテナ ンス性および再入手性が低下していることから、 NI (National Instruments) 社製の cRIO (compactRIO [168]) へ置き換えた。システムの構成と 各機器の接続をそれぞれ図 89、91 に示す。ただし、 ビーム運転を開始してから、F3RP61 への CPU 負 荷が想定以上に大きいことが判明したため、その後 継機である F3RP71 に順次置き換えていく予定で ある。

真空関連機器の制御システムは、SuperKEKBの 地上部に分散的にある 12 の電源棟(図 33 等にお ける D01–D12)に設置している。電源棟には制御 ネットワーク、ビームモニター関連機器、電磁石 電源、RF 関連機器棟が設置されている。全ての F3RP61 は SuperKEKB の制御ネットワークに、 cRIO は制御ネットワークの真空関連機器専用の Virtual LAN に接続されている。

なお、OPI (OPerator Interface) は CSS (Control System Studio [206]) により構築されている (図 90)。

cRIO

1 つの電源棟に cRIO は 2 ユニットあり、1 ユ ニット (cRIO-9025 [169]) は主に各機器からのア ナログ出力信号を集録しており、

- CCG の圧力値のモニター
- IP の放電電流値のモニター
- IPのHVステータスのモニター

機器	アナログ入力	アナログ出力	デジタル入力	デジタル出力
真空スイッチ	-	-	67	-
ゲートバルブ	-	-	501	167
ビームストッパー	-	-	16	10
CCG	605	-	677	240
IP	605	-	677	240
NEG ポンプ活性化用電源	488	40	200	400
流量計	≈ 700	-	-	24
温度計	≈ 4000	-	-	48

表 20	SuperKEKB	MR におけ	る真空関連機器の入	、出力点数
------	-----------	--------	-----------	-------







図 90 真空システムのメイン OPI

- 冷却水流量値のモニター
- CCG Patrol と圧力跳ねによるビームアボート リクエスト(beam abort request、周回ビーム を捨てる要求。詳細は 2.5.4 項を参照。)

を行なっている。このユニットはセカンドイーサネ ットポートを有しており、これを使って EtherCAT ユニット (NI-9144 [170])を1台を追加してスロッ ト拡張している。

他方のユニット(cRIO-9073 [171])は NEG ポン プ活性化用電源の制御に使用しており、

- 主電源の on/off 制御およびモニター。
- 制御モード (local/remote) の制御およびモニ ター。
- 出力電流のモニター。
- 出力電圧の制御およびモニター。
- 各種ステータス(ファン異常や温度異常)のモニター。

を行なっている。

cRIO で構築したシステムは、図 92 からも見て取 れる通り、CAMAC のものに比べて非常にコンパ



図 91 制御機器間の接続概略

クトで軽量であり、アナログ入力のチャンネル密度 が高い。例えばアナログ入力モジュールである NI-9205 [172] は 32 channel/module ものデータを集 録することができる。また、全ての cRIO ユニット は制御ネットワーク上にある NTP (Network Time Protocol) サーバーと同期させている。

cRIO上では RTOS (Real-Time Operating System) が走っており、LabVIEW で作ったプログラ ムを RTOS 上で実行できる。LabVIEW2011 以降 のバージョンから EPICS がサポートされており、 CA サーバー (Channel Access Server) と CA ク ライアント (Channel Access Client) を cRIO 上 に実装できる。cRIO のシャーシは FPGA (Field-Programmable Gate Array) を備えており、Lab-VIEW により作成した FPGA のプログラムをコン パイル・実行することができる。これらの機能に より 2.5.4 項で述べる CCG Patrol は構築されて いる。

流量測定システムとして、この FPGA 上に構築した RMS 変換機能 (Root Mean Square converter) により、流量計からの AC 信号を DC 信号に変換 し、さらにこれを流量へ変換する機能も開発した。 しかし、FPGA のリソースが不足していることと、1 つの cRIO 上に CCG Patrol と流量測定の 2 つのシ



図 92 CAMAC と cRIO の比較 (上: CAMAC、 下: cRIO)

ステムが存在し、システムが複雑化して保守性や堅 牢性の低下が懸念されたことから、流量測定システ ムのために別途、周波数-電圧変換器 (Frequency to Voltage converter, F-V converter)を使った NIM ビン (Nuclear Instrument Modules bin)を開発 し、これを使用して流量測定をしている(2.5.2 項 を参照)。

PLC

横河電機社製の PLC ユニットを使用している (図 93)。このユニットは主にデジタル入出力を 担っており、

- CCGのHV on/off 制御およびモニター。外部 インターロックの制御およびモニター。
- IP の HV on/off 制御。外部インターロックの 制御およびモニター。



図 93 19 インチラック内の PLC ユニット

- ゲートバルブの開閉制御および開閉ステータスのモニター。制御モード(local/remote)の制御およびモニター。圧空系統の圧力ステータスのモニター。
- UNIWIRE モジュール (F3SVH64) による NEG ポンプ活性化電源の外部インターロッ ク制御およびモニター。
- 光リンクモジュール (optical link module、 F3LP12-0N [173]) による各電源棟に設置した PLC 間での各種ステータス情報のやりとり。
- GPIB モジュール (General Purpose Interface Bus module、GB01-0N) による温度計データ ロガー(横河電機社製 DA100)の制御および モニター。

を行なっている。F3RP61 は FA-M3V シリーズの Linux CPU モジュールで、この Linux OS 上に EPICS を実装している [174,175]。インターロック ロジックの構築は WideField3 [176] のラダープロ グラムによって構築し、これをシーケンス CPU モ ジュール (sequence CPU module, F3SP71 [177]) にデプロイして運用している。Linux CPU モジ ュールとシーケンス CPU モジュールは、PLC ユ ニットのバックプレーンを介して、共有メモリヘア クセスすることで簡単に互いに情報をやりとりする ことができる。

2.5.2 各種制御機器

IP コントローラ

IP のコントローラのほとんどは TRISTAN で 作られた図 94 に示しているものを引き続き使用 している [178]。この電源のサイズは NIM ビンの 2/12 であり、この電源により 10^{-4} – 10^{-6} Pa レン ジの放電電流を測定することもできる。電源の動 作圧力は定常時で 10^{-4} Pa 以下であるが、IP に HV を印加し始めてしばらくは自身からのガス放 出があるため、一時的にインターロックを無効に することによって 10^{-3} Pa 台の圧力でも HV を印 加することができる。この電源はマルチビット操 作によって外部インターロック制御することがで き、この制御には PLC のデジタル出力モジュール (F3WD64 [179])を使用している。出力電圧と容量 はそれぞれ +5 kV と 25 mA である。

このコントローラは老朽化が進んでいるため、こ れらの一部は Agilent Technologies 社製 4UHV コ ントローラ [180] に置き換えている。このコント ローラは19インチラックのハーフサイズで、1台 の電源で最大4台の IP を制御することができる。 最大出力電圧は +7 kV で、全ての出力チャンネル を使用した場合、1 チャンネルあたりの最大容量 は 40 mA である。HV 出力のコネクターはデフォ ルトで Fischer タイプであるが、SuperKEKB MR の IP はコントローラ側に SHV コネクタを使用し ているため、特注でコネクターを SHV に変更して いる。これに伴い、SHV コネクターの定格電圧は 5 kV であるため、コントローラ側で最大出力電圧 が +5 kV に制限している。4UHV コントローラで は放電電流から 10⁻⁸ Pa 台の圧力が測定可能とさ れている。

このコントローラはシリアルインターフェースを 有しており、RS-232C か 2 線式 RS-485 でリモー



図 94 19 インチラック内の IP コントローラ

ト制御することができる。当初は、イーサネット と RS-485 の変換機器 (MOXA NPort5150 [181]) 1 台を使用して、制御ネット経由でシリーズで複数 台の 4UHV コントローラをリモート制御するシス テムを構築したが、電文の値が抜けることが度々あ り、実用に耐えないことが判明した。そのため現在 は、イーサネットと RS-232C の変換機器 (MOXA NPort5610-16 [182]。RS-232C ポートを 16 口有す る)を使用して、パラレルに複数台の 4UHV コン



図 95 19 インチラック内の CCG コントローラ

トローラを制御している。

しかし、NEG ポンプ活性化等の高圧力環境下 (10⁻⁴ Pa 台) で 4UHV を使用していると、非常に 稀ではあるが、電源ボードの抵抗の1つが焼損する という問題を抱えており、この原因は今なお解明さ れていない。

CCG コントローラ

MR の圧力を測定する CCG の測定子とコント ローラには、それぞれ大亜真空社製 C-5 と CG-28 を使用しており、これらは KEKB 建設時に導入さ れた (図 95)。CG-28 は 1 枚のモジュールで最大 2 台の CCG を制御することができ、1 台の電源ラッ クに 14 枚挿すことができる。出力電圧は +3 kV で、測定圧力範囲は 10^{-2} – 10^{-8} Pa である。CCG の汚染を避けるため、1× 10^{-3} Pa 以上になると内部 インターロックで HV off にするよう設定されてい る。2.5.4 項の CCG Patrol は、このコントローラ からのアナログ出力を cRIO で高速集録している。

なお、MRではビームパイプ内の電子数が多く、 これが CCG の測定値に影響を及ぼす。そのため、 CCGを接続している導管に永久磁石を設置し、 CCG測定部への電子の侵入を防いでいる(図 96)。 NEG ポンプ活性化用電源

KEKB 建設時に導入された CHINO 社製のサイ リスタ(Thyristor)電源を使用している(図 97)。こ の電源は 40 kW と 2 kW の二種類があり、最大出 力電圧は 200 V である。活性化電源と各 NEG ポン プのヒーターは並列に接続している。SuperKEKB MR では機種や全長により多種多様な NEG ポンプ を使用しており、それに伴って活性化用ヒーターの 抵抗値も多種多様となっている。これに対応するた



図 96 CCG 接続導管の永久磁石

め、NEG ポンプの種類・全長に応じた変圧器を多 種類用意し(図 34 中の Transformer)、これの一次 側を電源に、二次側を NEG ポンプ(ヒーター)に 接続している。

この電源の出力電圧は、電源内蔵のコントロー ラによりローカル制御、0-10 Vの外部入力により リモート制御することができる。リモート制御に は cRIO の±10 V アナログ出力モジュール (NI-9269 [183])を使用している。外部インターロック は PLC の UNIWIRE モジュールによって制御し ており、これによりゲートバルブに区切られた領域 に対して、どの区間を活性化するかを選択すること もできる。

NEG ポンプ活性化中には各ヒーターへ AC 電圧 が印加されるため、通電中の電磁石内に設置された NEG ポンプを活性化するとヒーターが振動し、最 悪の場合はヒーターが破損してしまう。そのため、 KEKB では NEG ポンプを活性化する際に電磁石 への通電をその都度止めていたが、これにより運転



図 97 19 インチラック内の NEG ポンプ活性化用電源

再開に際して電磁石の初期化が必要となることから 運転時間をロスしていた。

SuperKEKB LER では、四重極電磁石と偏向電 磁石の中に設置された NEG ポンプについてはそれ ぞれ整流器(図 34 中の Rectifier)を取り付けるこ とにより DC 電圧で通電し、これにより電磁石の通 電を止めなくても NEG ポンプの活性化が行えるよ うになった。

LER の偏向電磁石は磁束密度は最大 0.3 T 程度 で、整流器に使用するコンデンサーの静電容量が 4700 µF であると、電圧のリップルは約 3% にな り、このリップルで NEG ポンプが振動しないこと が実験によっても確かめられた。HER では偏向電 磁石は磁束密度は最大 0.8 T 程度であり、リップル を数 % に抑えるには、整流器に静電容量 15000 µF のコンデンサーを使用する必要があるため、HER では NEG 活性化電圧は現状直流化していない。 温度データロガー

温度のデータ収集には KEKB から使用している 横河電機社製 DA100 [184] を使用している (図 98)。 温度計の測定子は Pt100 の測温抵抗体 (Resistance Temperature Detector, RTD) を主に使用してい る。DA100のインターフェースはデータレートの 遅い GPIB で、モニターする点数も非常に多いこ とから、PLC の GPIB モジュールについて EPICS の非同期デバイスサポート (asynchronouse device support)を開発し、これを使用して DA100 を制 御・モニターしている。IOC は最大 300 点の温度 データをスキャン周期は5秒で取得する。非同期の システムであるため、このデータ取得のプロセスに おける遅延発生や、DA100 がエラーや無効値を返 してきても、IOC は構わず5秒周期でデータの取得 を試みる。DA100 には温度集録用モジュールだけ でなく、デジタル出力モジュールも使用しており、 このモジュールは温度上昇によるビームアボートリ クエスト等を担っている。

SuperKEKB MR の大穂および日光直線部には ウィグラー電磁石が追加された。この区間ではビー ムパイプ等へ大強度の放射光が照射されることか ら、そこの温度をモニターすることが非常に重要 である。そこで、SuperKEKB へのアップグレー ドに際し、ウィグラー区間には合計 400 個もの測 温抵抗体を追加した。前述の DA100 はすでに販売 を終了しているため、この温度計には横河電機社 製 MW100 (図 99、[185]) を採用することとなっ た。MW100 はイーサネットポートを有しており、 制御ネットワークに直接接続して制御している。 StreamDevice [186, 187] を使った非同期デバイス サポートを開発し、MW100 を制御・モニターし ている。DA100 同様、MW100 にも温度集録用モ ジュールだけでなく、デジタル出力モジュールも使 用しており、このモジュールはビームアボートリク エスト等を担っている。

ここ数年、DA100 に不具合が出ることが稀にあ り、一部は MW100 に置き換えている(ただし、残 念なことに MW100 は 2019 年 3 月 31 日で販売終 了となった)。

冷却水流量測定

大強度放射光による熱負荷の増加に対応するた め、ウィグラー区間は冷却水システムが大幅に増



図 98 19 インチラック内の DA100



図 99 19 インチラック内の MW100

強された。ウィグラー区間には約8m間隔で純水 系統のバルブが設置され、1つのバルブから最大約 120 L·min⁻¹の流量が供給される。この大流量を 通水するためには、このバルブの往還で圧力損失を 約0.8 MPa 以下にする必要があったため、1つの バルブに対して1台のヘッダーを設置し、そこから 系統を最大10分割して冷却水を供給している。

流量の測定には電子回路が載っておらず、耐放 射線性に優れた水車型の流量計を使用している (図 100)。この流量計の中にはピックアップコイル と羽根車が収められており、羽根車の先端には永久 磁石 (ϕ 3 mm × 10 mm のサマリウムコバルト磁石) が埋め込まれている。通水により羽根車が回転する とピックアップコイルに交流起電力が発生し、この 信号を計測することによって流量を測定している。 各流量計の出力にはバラツキがあるため、トンネル に設置する前に実験室で全数が校正されている。

ウィグラー区間の流量計測定点数は合計約400、



図 100 加速器トンネル内で使用している流量計 の内部写真

それ以外のアーク部等区間では合計約 300 ある。 アーク部の測定点数は KEKB から変更がないた め、引き続きこのシステムを使用している。このシ ステムでは流量計の AC 電圧を DC 電圧に変換する NIM ビンモジュールが用いられており、この出力 を cRIO のアナログ入力モジュールで測定し、IOC 上で流量に換算している。ウィグラー区間に追加さ れた流量計については、F-V 変換する NIM ビンモ ジュールを開発した(図 101)。このモジュールか らの電圧出力を cRIO のアナログ入力モジュールで 測定し、これを IOC 上で流量に換算している。こ のモジュール 1 台で最大 32 点の流量測定が可能で ある。

またここ数年、旧来の NIM ビンモジュールに不 具合が出ることが稀にあり、一部は WFD-320 に置 き換えている。

コリメータ

コリメータ制御システムには横河電機社の PLC を使用しており、コントローラの CPU と して F3RP61 モジュールを使用している。従来 の KEKB コリメータ制御機器の構成は、この CPU モジュール以外に、モーターを制御する 位置決めモジュール (F3NC01 [189])、緊急停止



図 101 19 インチラック内の流量検出器。左 2 台 は旧来の流量測定モジュール、右 1 台は WFD-320 [188]。

リクエストの信号を出力する DO モジュール (F3YC16 [190])、リミットスイッチ信号やホーム スイッチ信号のステータスを取得する DI モジュー ル (F3XD16 [191])、コリメータヘッドの位置測定 用 DMM (Keysight Technologies 社 Digital Multi Meter 34970A [192])、これと接続するための GPIB モジュール (F3GB01 [193])という構成である。 DMM にはポテンショメータ (potentiometer、可 変抵抗)が接続され、4 線式抵抗測定でコリメータ の位置を算出している。ここでの位置決めモジュー ル 1 台で、最大 2 軸を制御することができる。

新型コリメータの制御システムの概略、駆動部の 構成、制御機器の写真をそれぞれ図 102、図 103、 図 104 にそれぞれ示す。この構成では、 CPU と 位置決めモジュールのみという簡単な構成となっ ている。位置決めモジュールには 1 台で 15 軸の モーター制御が可能で、MECHATROLINK-III 通 信の機能を持つ(F3NC97 [194])を採用している。 MECHATROLINK-III はターゲットへの伝送速度 100 Mbps(12.5 Mbyte \cdot s⁻¹)、伝送周期 31.25 μ s の高速通信が可能な通信方式である [195]。

モーター側にも MECHATROLINK-III をイン ターフェースとするネットワークコンバータ(オ



図 102 コリメータ制御システムの概略



図 103 コリメータ駆動部構成

リエンタルモーター社 NETC01-M3 [196]) およ びモータードライバー(オリエンタルモーター社 CRD-514KD [197])を用意する必要があるが、 従 来の構成に比べて 1 台の位置決めモジュールで多 軸の制御が可能となった。リミットスイッチ、ホー ムスイッチ、緊急停止などの DI/DO もモータドラ イバーに既に搭載されているため、これのための PLC モジュールを別途用意する必要は無くなって いる。

コリメータヘッドの位置を測定する DMM は、 イーサネットによる通信が可能な Keysight Technologies 社 34972A に変更した [198]。変位計は、 measurement SPECIALITIES 社の LVDT(Linear Variable Differential Transformer、線形可変差動変 圧器)、HCA2000-4019 [199] を使用しており、これ



図 104 19 インチラック内のコリメータ制御機器

のシグナルコンディショナー (signal conditioner、 measurement SPECIALITIES 社 ATA2001 [200]) からのアナログ出力を DMM で測定し、ヘッドの 位置を算出している。これにより GPIB モジュー ルも不要となり、また伝送速度も 1 Mbyte \cdot s⁻¹ か ら 10 Mbyte \cdot s⁻¹ 以上へと向上した。これら新し い構成は、高い拡張性も有することとなった。

加速器運転中の加速器トンネル内は放射線レベル が高く、位置決めモジュールやモータードライバー をコリメータ本体近傍に設置することができない。 そのため、これらの機器は地上にある電源棟の制御 室に設置している。モータードライバーからコリ メータ部へは最長 300 m に渡ってケーブルを敷設 しており、電圧降下を防ぐため5芯×8 mm²のケー ブルを使用している。モーターはオリエンタルモー ター社の5相ステッピングモーター CRK564BKD-H50を使用している [201]。メーカー仕様ではこの ようにモーターとドライバー間を離して使用するこ とは保証されていないため、実験室で約 300 m の ケーブルを使用して事前に試験をし、問題なくモー ターが駆動可能なことを確認している。

ボールねじは THK 社の BIF2805-10G0 を耐放 射線グリス (モレスコ社 Gk-1 または RG-42R-1 [202]) で置換したものを使用している。リー ド長は 5 mm でモータのステップ角は 0.0144° に設定しているため、可動ヘッドは計算上最小 0.2 μ m·step⁻¹ で動く。また、耐放射線性の観点 からオールメタルのリミットスイッチ (オムロン社 XE-Q22-2 [203]) を使用している。

LER			2019	/06/19 1	6:42:49	
Auto Set for Injec	tion					
hfs/sadnas/proj/cont/cont/epics314/ap	p/KEKB/VA_softioc/OPERAT	ON_collimator/CLMsavefile/I	gtPosLER_20180517001	5_Forinjection.list	🗳 Load Save	Open Diff
Auto Set for Phys	sics					
hfs/sadnas/proj/cont/cont/epics314/ap	p/KEKB/MA_softioc/OPERAT	ON_collimator/CLMsavefile/L	ER20190518_By3mmBx2	200mmFortCollisionR	😂 Load Save	Open Diff
Manual Set						
nfs/sadnas/proj/cont/cont/epics314/ap	p/KEKB/MA_softioc/OPERAT	ON_collimator/CLMsavefile/L	ER20190613_By3mmBx2	200mmForCollisionR	😂 Load Save	open Diff
mfs/sadnas/proi/cont/cont/epics314/ap	ID/KEKBAWA softioc/OPERAT	ON collimator/CLMsavefileA	ER20190607 By3mmBx2	200mmForCollisionF	🖂 : Load Save	
						open on
Current: -	0.007 m	∆ life.	8 080	min	Man1	
current.	0.007 11	A LIIC.	0.005		Manit	
LER A	ALL GU . No	rma ២				
ID HeadPos TargetP	05 Go Pulse 1 0 -75174	hot BeamPosXBeamPos	26 18	GH StopErrClr	LossMonitor	v
006-H1-IN -11 5 -11 5	5066564	0 -1 09 1 11	-24.9		0x0	-
D06-H3-OUT 13.04 13.00	362276	0 99 -2.28	25.38		0x0 0V 0	v
D06-H3-IN -13.04 -13.0	062385	0.99 -2.28	-25.18		0×0	
D03-H1-OUT 12 01 12 00	3 9 -121573	0 2 01 -2 12	26.29		0v0 0.V	
D03-H1-IN -12.03 -12.0	0 -122166	0 2.01 -2.12	-26, 19		0x0	
	-14206E I	0 0 0 0 11	26.2		0-0 0 V	
002-H1-IN -9 01 -9 00	-139317	0 0.63 0.11	-25.51		0x0 0v	
D02-H2-OUT 11 02 11 0	0 -128299	0 -0 19 0 48	26.14		0x0 0.V	
D02-H2-IN -11.01 -11.0	0130938	0 -0.19 0.48	-26,48		0×0	
D02-H3-OUT 22, 97 23, 00	Image: -13641	0 3.21 0.14	25,71		0x0 0.V	
D02-H3-IN -22,99 -23,0	0 0 -16011	0 3,21 0,14	-26,13		0×0	
D02-H4-OUT 10.49 10.5	0 0 -75470 1	0 1.13 -0.76	25.45		0x0 0 V 0	v
D02-H4-IN -10.5 -10.5	0 0 -80184	0 1.13 -0.76	-26,64		0×0	
ID HeadPos Target	Pos Go Pulse	shot ReamPostReamPo	SYHomePos L O H F	GH StonFmCh	LossMonito	
D06-V2-TOP 2 6 2 60	-78665	0 -0 27 -0 15	21.29		0x0 0 V	
D06-V2-BTM -2 29 -2 3	378303	0 -0 27 -0 15	-21.26		0×0	
D02-V1-TOP 2.5 2.50	· -96027	0 -0.84 0.18	21.68		0×0 0 V	
D02-V1-BTM -2.21 -2.20	94192	0 -0.84 0.18	-21.02		0×0	

図 105 コリメータ制御の OPI

コリメータ制御の OPI は、コミッショニングの 状況に合わせて、またユーザーらからのリクエス トを元にソフトウェアに順次機能を追加している (図 105)。この OPI では各コリメータの目標位置 設定、位置決め開始リクエスト、位置決めの中止、 ホームポジション (ホームスイッチ) 探索、エラー クリア等の制御が行える。また、変位計(LVDT) の指示値の確認、リミットスイッチのステータス、 エラーのステータス等を常時監視している。さらに コリメータ近傍に設置したロスモニターの電圧値 や、ビーム電流、ライフタイム、コリメータ近傍の BPM を使って計算したコリメータでのビーム重心 位置等のコリメータ調整時に使用する情報も表示し ている。なお、図 105 では OPI を一部抜粋してい るが、実際の OPI では両リング全てのコリメータ を1枚のパネルで制御・監視できる。またコリメー タの設定をテキスト形式で保存、読み出せるように なっている。

コリメータ制御ソフトウェアは大きく分けてモー ター制御用と OPI 用の 2 つで構成されている。後 者は、1)全てのコリメータに対して同時に位置決 め操作をする一括指令制御、2)外部トリガー信号 やオペレータ操作の監視、3)設定ファイルの読み 書きおよび自動ログ出力等のファイル制御、を担っ ている。

これらを連動させた機能の1つに、外部トリガー を基にコリメータヘッドを自動的に予め指定した目 標値まで動作させる auto set と呼んでいる機能が ある。オペレータが入射用、物理ラン用、手動用の 設定ファイルをロードまたはセーブの操作を実行す ると、ソフトウェアではその時点での設定ファイル のパス情報をログとして毎回保存するようにしてい る。ソフトウェアが外部トリガー(入射モードまた は物理ランモードの)信号を感知すると、保存され ているパス情報から各々のコリメータ用の設定値を 抽出し、モーター制御用ソフトウェアにパラメータ として渡している。このとき運転開始リクエストも 併せて発行する仕組みにしているため、オペレータ は一切の OPI 操作をせずに、コリメータへッドを 自動で入射または物理ランに合せた目標位置に移動 させることができる。

位置決めの速度は通常 2000 Hz で行っている。 これは1秒間位置決め動作をさせるとモーターは 2000 ステップ回転し、コリメータヘッドが0.4 mm 移動することを意味する。EPICS のシーケンサー では、このうち1秒間に移動するステップ数と、実 際に移動させるステップ数を設定して位置決め開始 のリクエストを発行する。

例えば、目標位置と LVDT の読み値の差が 0.1 mm であれば、EPICS シーケンサーは「0.25 秒間、500 ステップ」という動作仕様書をモーター ドライバーに渡し、その後に位置決め指令を出す。 LVDT の指示値と目標位置の差が 0.5 mm 以内に 入った場合は速度を 1000 Hz に落としている。な お、Phase-3 運転からコリメータの変位に対して Belle II 測定器のバックグラウンドが非常にセンシ ティブになることから、1 パルスのみヘッドを動か すといった制御方法を実装している。

OPI の裏では位置決め操作を実行するたびに操 作対象のリング名、操作した日時をファイル名にし たコリメータ目標位置のリストを自動的に保存する アーカイブ機能が動いている。

冷却水インターロック

放射光等からの熱負荷を取り除くためにコリメー タヘッドにはステンレス製パイプが仕込んであり、 運転時はそこに常に冷却水を流している。ビームが 衝突して可動ヘッドが溶融し、そこから漏れ出た冷



図 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

却水がビームパイプや真空機器を汚染する、という 最悪のケースを想定し、ヘッドの冷却系は図 106 に 示すようなインターロック機構を備えている。冷却 水の往側側に励磁時開のソレノイドバルブ(SMC 社 VXD242KB [204])を、還側に逆止弁(SMC 社 INA-14-85-04 [205])を取り付けている。

ソレノイドバルブは AC100 V/DC24 V を変換す る中継盤を介して、PLC のデジタル出力 (DC24 V) と接続されている。コリメータが設置されている区 間の真空ステータス (2.5.3 項を参照)が正常であ れば、ソレノイドバルブを自動的に励磁して通水す る。水漏れ等により真空ステータスが異常となれば ソレノイドバルブおよび当該区間を挟む 2 台のゲー トバルブを閉じ、被害を最小限に止める。このイン ターロックシステムは、コリメータヘッドと同じく 冷却水が真空容器内に漏れ出る可能性がある SRM のクロッチ部 (MR から放射光を取り出す箇所で、 大強度の放射光が二股構造したビームパイプに照射 される)でも使用されている。

また、少し特殊な例として、QCS ビームパイプ の冷却水インターロックを紹介する。2018 年 2 月 16 日に QCSL のビームパイプに冷却水を流そうと したが、両リングの系統共に通水しなかった。ビー ムパイプが低温になっており、冷却水が凍結したこ とが原因である。通水する前、各系統に乾燥窒素を 5 分程度流していたが、これでは不十分であった。

対処として、このときは QCSL を一度加温して 水を溶かし、その後、通水しながら QCSL を冷却 した(通水していれば、冷却水は凍らない)。QCSL が冷やされている状態で通水が止まった場合は、再 び水は凍結してしまい、最悪の場合はこれにより冷



図 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

却水配管が破裂してしまうため、QCS ビームパイ プの冷却水系統では、凍結防止のインターロックシ ステムを構築している(図 107)。

通水を開始する前に、図中のソレノイドバルブ E3 と E4 が開、E1 と E2 が閉の状態で、まずは冷 却水配管に乾燥窒素を 3 時間以上流してビームパ イプを室温近くに戻す。その後、E3 と E4 を閉め、 E1 と E2 を開けて冷却水を QCS ビームパイプへ 通水する。通水をモニターするために流量スイッチ (図中の Flow switch)を設置しているが、通水開 始時は配管内に窒素が入っており、これにより流量 スイッチがしばらくは正常に動作しないため、通水 を開始してから約 5 分はインターロックを無効に する。しばらく通水して流量が安定したのちにイン ターロックを有効にする。

なんらかの理由で通水が止まって流量スイッチ が離れた場合、アボートリクエストの発行ととも に E1 と E2 が閉まり、E3 と E4 が開いて乾燥窒 素が冷却水を押し出してピットへ捨て、水の凍結を 防ぐ。

ソレノイドバルブには、使用方向と逆方向に対す る流れを止める能力はないため、乾燥窒素が冷却水 系統へ逆流しないようにチェックバルブ C1 を設置 している。同様の理由から、バルブ E2 はその下流 の冷却水を止める能力がないため、チェックバルブ C2 を設置している。



図 108 SuperKEKB MR における粗排気の例

2.5.3 インターロックロジック

SuperKEKB MR の真空システムにおける主ポ ンプは NEG ポンプと IP で、真空計は CCG を使用 している。各リングにはおよそ 10 m おきに CCG と IP が 1 セット設置されている。真空機器のメン テナンス性確保や、リーク等のトラブルが発生した 場所の隔離のため、ゲートバルブにより真空領域が 区切られている。

主ポンプを立ち上げるために可搬式の排気システム(我々はこれを粗排気セットと呼んでいる)を用意している。粗排気セットのポンプは取付姿勢自在のTMP(磁気浮上ではなくセラミックボールベアリング型だが、取付姿勢自在の製品)とドライポンプ(スクロールポンプまたはルーツポンプ)から構成され、その他にリークディテクタやコンベクトロン真空計等を取り付けるための手動バルブと、ドライポンプを切り離すための電磁バルブ、ポンプとバルブのコントローラを備えている。TMPでエラーが発生すると、ドライポンプ吸気側に設置した電磁バルブが閉じるようになっている。

SuperKEKB MR で大気圧から主ポンプを立ち 上げる手順は次のとおりである。

 (1) 粗排気セットを加速器のトンネルに搬入し、 IP・CCGの傍に設置されているアングルバル ブ(ICF152 規格の L 字型バルブ)に粗排気 セットを図 108 のように接続する。

- (2) アングルバルブを開けた後、粗排気セットにより CCG と IP が動作可能な圧力範囲まで排気し、順次 CCG と IP に HV を印加する。
- (3) その後、圧力が安定に減少してきたのを見計ら い、IP のベーキングを開始する。
- (4) 24 時間程度 IP をベーキングした後、NEG ポ ンプ活性化を開始する。なお、活性化開始時に おいて NEG ポンプおよびその周辺から放出さ れた水分子が IP に付着しないよう、IP のベー キング工程は活性化開始から2時間程度重ねて いる。
- (5) NEG ポンプが活性化前に置かれていた状況に もよるが、活性化には 8–12 時間程度を費やす。 通常は活性化用電源の出力電圧を 5 時間かけて 徐々に 120 V まで上げていき、その電圧で 0.5 時間程度保持する。その後、0.5 時間程度かけ て徐々に 160 V まで上げていき、その電圧で 1.5 時間程度保持して活性化終了となる。この シーケンスは圧力上昇によって CCG の HV が インターロックで落ちないよう、経験的に決め られている。
- (6)活性化終了後、アングルバルブを閉じ、粗排気 セットを撤収して主ポンプの立ち上げ工程が完 了となる。

実際に主ポンプを立ち上げた際の CCG 指示値の 推移を図 109 に示す。

真空関連機器のインターロックロジックはノーマ リークローズ (Normally Close、NC)を原則とし て、PLC のシーケンス CPU モジュールとデジタ ル入出力モジュールで構築している。図 110 には ラダープログラムによるインターロックロジックの 例を示している。

ゲートバルブに区切られた各領域に真空スイッチ (vacuum switch)が1台ずつ設置されている。真 空容器内の圧力が「(大気圧)-10kPa」程度にな ると真空スイッチの接点は閉じ、これによりその区 間が真空状態になっていることを最低限保証して



図 109 主ポンプ立ち上げ時の圧力推移の 例 [165]。Heater Voltage は活性化電源の最大 出力電圧 200 V に対する出力電圧の割合。

いる。真空スイッチの接点(X00301)が閉じると、 CCG に HV を印加できる状態になる。CCG のコ ントローラーは約 5×10⁻⁵ Pa 以下になると、定常 圧力のセットポイント (X00317) が閉じるが、CCG は放電開始時にガス放出があるため、これを勘案し て 60 s の時間窓 (T00201) を設けている。CCG HV on のリクエストを出すと E00201 が閉じ、前 述の窓が 60 s 開き (T00201(NOT) のリレーが閉 じ)、HV を on する信号が Y00601 から出力される。 HV on のリクエストを出してから 60 s 経過しても 圧力が高く、CCG のセットポイント(X00317)が 閉じなければ、T00201(NOT)の接点が離れて HV を off する (Y00601 のリレーが離れる)。 定常圧 力で CCG に HV を印加でき、X00301、E00201、 X00317 のリレーが全て閉じると、HV を on する 信号が Y00601 から出力され続ける。

ゲートバルブに区切られた領域内にある複数台の CCG のセットポイントを使って、その真空区間の 定常状態を定義している。真空スイッチ(X00301) が閉じていることを大前提とし、隣接する3台の CCG(約30mの領域)のセットポイントでAND を取っている。図110の例では、ゲートバルブに区 切られた領域内に合計9台のCCGを設置している ことになる。約30m毎の領域内で少なくとも1台 のCCGがセットポイントを閉じると、このゲート バルブで区切られた領域内の真空状態は定常と判定 され、内部リレー(I00301)が閉じる。この信号が 閉じると、IP への HV 印加、NEG ポンプ活性化が 行えるようになる。

ゲートバルブを開けるためには、着目する真空 領域が定常状態になっており(I00301が閉じてお り)、開けようとするゲートバルブの向こうにある 真空領域が定常状態になっている必要がある。この 隣り合う真空領域が共に同じ PLC ユニットに管理 されていれば、この「向こう側」の定常状態は内部 リレーが使用される。隣り合う真空領域がそれぞれ 別の PLC ユニットに管理されていれば、図 110 の 例のように、「向こう側」の定常状態には FA-Link モジュールによるリレー(L00002)が使用される。 ゲートバルブを挟んだ2つの真空領域が定常にな り(I00301とL00002が閉じ)、クローズリクエス トが off (E04101(NOT) が閉)、オープンリクエス トが on (E04001) になると、ゲートバルブをオー プンする信号(圧空系統のソレノイドバルブを開 ける信号)が Y00803 のリレーから出力される。こ のロジックにクローズリクエストを入れている理 由は、このリクエストを優先するためである。つ まり、クローズリクエストを出して E04101(NOT) のリレーが離れると、オープンリクエストを出して E04001 が閉じていても、ゲートバルブをオープン する信号(Y00803)は遮断される。

IP 電源の HV を on するためには、まず外部イン ターロックを解除する必要があり、この解除信号を Y00813 のリレーが担っている。前述の真空領域が 定常状態になっていると (I00301 が閉じていると)、 IP の外部インターロックは解除され、各 IP に HV を印加することができる状態となる。NEG 活性化 時等に、CCG のセットポイントが離れていても IP に HV を印加したい状況があるため、真空領域が定 常状態になっていなくても、外部インターロックを 解除できるリレー (E00501)を入れており、I00301 とは OR の関係になっている。しかし、圧力測定で きない状況で IP を使用するのは危険なため、最低 限真空スイッチ (X00301) でインターロックをか けるようにしている。

NEG ポンプ活性化用電源からヒーター電圧を 出力するためには、まず活性化用電源の外部イ

ンターロックを解除する必要があり、この解除 信号を UNIWIRE モジュールの U00001 リレー が担っている。活性化対象の真空領域を制限で きるよう、E00701(NOT) のリレーを入れている。 LER の場合は活性化電圧が直流化されているため、 E00701(NOT) のリレーが閉じていれば活性化対象 の真空領域が定常状態で活性化が行える。HER の 場合は直流化されていないため、電磁石の通電信号 が off になって X00529(NOT) のリレーが閉じない 限り、活性化は行えない。CCG のセットポイント が離れていても IP に HV を印加したい状況がある ため、真空領域が定常状態になっていなくても、外 部インターロックを解除できるリレー(E00601)を 入れており、I00301とは OR の関係になっている。 しかし、やはり圧力測定できない状況で NEG ポン プを高温にすることは非常に危険であるため、最低 限真空スイッチ(X00301)でインターロックをか けるようにしている。

ビームアボート

加速器の運転中に何らかのトラブルが起きた 場合、シーケンス CPU がこれを判定してデジタ ル出力モジュールからアボート要求信号を出す (図 111)。このロジックもノーマリークローズで構 築されている。直接的にビームアボートのトリガー となる機器は、温度計、流量計、ゲートバルブ、ビー ムストッパーである。

DA100 で温度異常の判定がされており、二種類 の閾値を設けている。低い方の閾値は通常の温度異 常で、100 ℃ を超えるとデジタル出力から接点信 号が出力される(X00312 のリレーが閉じる)。高 い方の閾値は温度計の誤動作を知らせるもので、測 温抵抗体の場合、コネクタの酸化やケーブルの破断 で温度計の指示値が数千℃等となるため、閾値は 500 ℃ に設定している。温度計の指示値がこの閾 値を超えると、デジタル出力から別の接点信号が出 力され(X00311(NOT)のリレーが開き)、この信 号ではアボートは出さない。温度計指示値の一時的 なふらつきを勘案して5 s の時間窓(T01001)を 設けており、X00312 と X00311(NOT) のリレーが 最初に閉じてから5 s 経過してもなお、X00312 と



図 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。E: 共有リレー(シーケンス CPU と Linux CPU が共有するリレー)、I: 内部 リレー、X: デジタル入力リレー、Y: デジタル出 力リレー、L: FA-Link リレー、U: UNIWIRE リ レー、T: 遅延タイマーリレーの意。

X00311(NOT) のリレーが閉じていたら、T00201 のリレーが閉じてアボートリクエストが I01005 に 出力される。

流量計は誤作動することが多いため、単独でア ボートリクエストを出すことはせず、温度計のマ イナーアラームと組み合わせてアボート判定をし ている。前述の温度異常はハードワイヤによるも のであるが、ここでの温度異常は EPICS で設定 したソフトウェア上のアラーム情報である。温度 計のマイナーアラームは通常 80 ℃ に設定してい る。流量異常も EPICS 上のアラーム情報で、マイ ナーアラームは定格流量の 40% 以下、メジャーア ラームは 30% 以下に設定している(ここでいうマ イナー、メジャーとは EPICS におけるアラームの 深刻度を分ける用語で、マイナーに比べてメジャー がより深刻な状態を指す)。温度計がマイナーア ラームを発報し(E01001 のリレーが閉じ)、流量 計がマイナー/メジャーと問わずアラームを発報す ると(E01101/E01102 のリレーが閉じると)、測 定値の一時的なふらつきを勘案した 5 s の時間窓 (T01101)が作動する。E01001 と E01101/E01102 のリレーが最初に閉じてから 5 s 経過してもなお、 E01001 と E01101/E01102 のリレーが閉じていた ら、T01101 のリレーが閉じてアボートリクエスト が I01006 に出力される。

最終的には、図 111 の 00105 行でアボートの判 定がされる。ゲートバルブには開閉、両方の状態に 対してリミットスイッチが設置されており、開方向 のリミットスイッチが叩かれていると、ゲートバル ブがオープン状態の接点(X00417、X00421)が閉 じる。なお、クローズ状態信号の NOT をこの判定 に使用していないのは、ゲートバルブは開でも閉で もない中間状態があり、安全サイドでオープン状態 でなくなったらアボートリクエストを出すようにし ているためである。

ゲートバルブがオープン状態(X00417、X00421 が閉)かつ、温度異常なし(I01005(NOT)が閉)か つ、流量異常なし(I01006(NOT)が閉)の状態とな ると、アボートリクエストが解除され、Y00819の リレーが閉じられる。これらのアボート判定に使用 しているステータスのうち、どれか1つでも接点が 離れれば Y00819 のリレーは離れ、ビームはアボー トされる。

ビームストッパー

これら真空機器とは別に、ビームストッパー (beam stopper)によるインターロックシステム を構築している。ビームストッパーはゲートバルブ と構造的に似た真空機器だが、真空シールを目的と したものではなく、金属製の板をビームパイプ内に 挿入してビーム周回路を遮ることにより、リング内

温月	度異常判定					
	X00311	X00	312			
00101				TIMER	T01001	5 sec.
	warning (cable disconnection)	ala (major thres	(close after 5 sec.)			
00102	X00311 warning	X00312	T01001 delayed timer status	t	I0100	95 e alarm

冷却水異常判定



アィ	ドート判定			
0105	X00417 X00421	I01005	101006	Y00819
0105	 GV1 open status GV2 open status	temperature alarm	flow rate alarm	abort LER

図 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。E: 共有リレー、I: 内部リレー、 X: デジタル入力リレー、Y: デジタル出力リレー、 T: 遅延タイマーリレーの意。

に周回ビームが確実にないことを担保するための人 的安全装置である。ビームストッパーは Belle II 検 出器を挟んで、各リングに1台ずつ、合計4台が筑 波直線部に設置されている。

ビームストッパーは安全システムに関する機器で あるため、真空機器の制御系統とはインターロック システムを構築している(図 112)。トンネル内の ビームストッパー傍にはソレノイドバルブ、圧力 計(図 112(b)中の ch23、24)、リミットスイッチ (ch19–22)等で構成されたコントロールユニットが 設置されており、これとストッパーコントローラが 接続されている。

図 112 中の PLC は真空グループが管理・運用 しているもので、D-SUB コネクタを介してストッ パーコントローラと接続されている。この PLC の DO モジュール (ch5-8) でビームストッパーの開 閉リクエストを、DI モジュール (ch9-16) でストッ パーの状態監視 (O1、C1、A1、E1) を行っている。 D-SUB の ch1-4 は安全グループが管理している システムに接続されている。クローズリクエストの 否定 (ch7、8)、オープンリクエスト (ch5、6)、安 全システムからのオープン許可信号 (ch1、2) で論 理積 (AND) をとっており、これら全てのリレーが 閉じるとソレノイドバルブ (ch17、18) が作動して ビームストッパーが開く。ストッパーコントローラ から安全システムへはストッパーのクローズステー タスの信号 (ch3-4) のみを渡している。

また、図 112 には書かれていないが、ビームス トッパーのオープンステータスのリレーが開くと (not open になると)、ストッパーコントローラか らアボートリクエストが出力される。

2.5.4 CCG Patrol

加速器の運転中にビームロスや軌道の急変、CCG の異常放電に起因する圧力の跳ねが発生した場合、 通常のデータ収集システムではそれが発生した場所 や CCG の個体を即座に特定することが困難な場合 がある。そこで圧力を常時監視し、圧力の跳ねが起 きた場合にはその CCG を即座に特定してオペレー タ等にその情報を知らせるシステム、CCG Patrol を開発した。

CCG Patrol システムの概略を図 113 に示す。 CCG Patrol は、1) cRIO に実装されている FPGA による圧力およびビーム電流の高速データ収集、 2) cRIO 上の RTOS による循環バッファ (circular buffer) 実装および cRIO 間でのシェア変数 (shared variable) によるトリガー情報のやりとり、3) Windows PC での圧力データの取得および表示、によ り実現している。

CCG の圧力値については 1 ユニットの cRIO に 対して 64ch 分用意し、SuperKEKB MR 全周で合 計 768ch 分のデータを集録している。CCG Patrol と並行して、cRIO の RTOS 上では EPICS の CA サーバーが構築されており、ここが発行している PV (Process Variable)に各種真空関連機器のアナ ログ出力値を 1 秒間隔で渡している。真空機器、特 に CCG や IP の放電電流値は通年に渡りデータ収 集する必要があるため、このような長いスキャン間 隔にしてデータ量をできるだけ小さくしている。ま た、各 cRIO は NTP サーバーと同期しており、サ



(a) ストッパーコントローラ



(b) チャネルアサイン

図 112 ビームストッパーの制御システム。O1: オープンステータスのリレー、C1:クローズス テータスのリレー、A1:圧空ステータスのリレー、 E1:オープン許可のリレーの意。



図 113 CCG Patrol の概略図

ブミリ秒の同期精度で cRIO 間の時刻を合わせている。

F3RP61 上に構築した IOC が cRIO 上の PV に CA (Channel Access) し、取得したデータを IOC 上で各種物理量に換算等している。この物理量を IOC 上で発行している PV に渡しているが、IOC 上の PV 名はその名前から値がどの機器の何の物理 量を指しているのか直感的に理解しやすいように名 付けられている。

FPGA による圧力値の高速集録

加速器の運転中に圧力跳ねを伴うビームアボート が発生した場合、圧力跳ねによりビームロスが発生 してアボートしたのか、または何らかの原因でロス したビームがビームパイプ等に衝突し、圧力跳ねが 発生したのか等を判定したい場合がある。しかし、 通常の1秒間隔のデータ収集では事象が発生した 順序を判定することが困難である。また圧力跳ねが 観測された CCG の順序から圧力跳ねが発生した場 所を推測したい場合があるが、この場合も通常のス キャン間隔では順序を決定することが困難なことが ある。

圧力の高速データ収録のため、cRIO のスキャン モードによる 10 ms 間隔のデータ収集を試験した ところ、CPU 使用率が常に約 100% に張り付いて しまった。高速データ収録は圧力データを集録して いる 64ch に対してのみ適用すれば良いが、cRIO のスキャンモードではスキャン間隔をチャンネルご とに設定することができず、cRIO の1ユニットで データ収集している全 416ch に対してスキャン間 隔が適用されてしまう。このモードによる高速デー タ収録は非常に高負荷であるため、システムの長期 に渡る安定的な運用には適さないと判断した。

そこで cRIO の FPGA モードを CCG に割り当 てられたチャンネルのみに適用して 10 ms 間隔で データ収集することにした。これにより最終的なシ ステムにおける CPU 使用率は約 40% となってい る。なお、できる限りビーム電流と圧力値との間の 時間同期を取るために各リングに対する DCCT の アナログ出力も CCG に割り当てたチャンネルの 2 つに入力している。

RTOS 上での循環バッファとトリガー

10 ms 間隔で収録した圧力値を cRIO 上に全て保 存することは現実的でないため、RTOS 側に一時保 管場所である循環バッファを用意し、そこに FPGA で集録したデータを保存する。循環バッファには直 近3分間のデータを保存し続ける。データの保存量 は可変である。

圧力値が 1×10^{-7} Pa 以上、かつ 1 秒前の圧力 値と比べて現在の圧力値が 20% 以上、上昇した 場合にトリガーがかかる(これらの値は可変であ る)。RTOS 上でトリガー情報を受け取ると、それ を受け取った後の 3 分間のデータを集録する。トリ ガー後のデータ収集が終了した後にこれと循環バッ ファに入っているデータとマージして合計 3 分間分 のデータとして cRIO に TDMS(Technical Data Management Streaming)形式でファイル保存され る。なお、集録する圧力値のデータ量(データ収 集時間)も可変である。また各 CCG の個体名称と それらにそれぞれに対するトリガー閾値等の情報 は cRIO 上に保存された CSV(Comma-Separated Values)形式のファイルで管理されている。

トリガー情報にはローカルトリガー(local trigger)とネットワークトリガー(network trigger)の 二種類ある。前者は cRIO 内で検出されたトリガー である。後者はネットワークを介して接続された他 の cRIO で検出されたトリガーで、各 cRIO およ び Windows PC でシェア変数を用いて共有されて いる。

ネットワークトリガーはネットワーク内の各 cRIO の IP アドレスを取得し、cRIO 同士の順番 (指標)を決める (図 114(a))。ローカルトリガー



図 114 ネットワークトリガー処理のシーケンス

が発生すると、ネットワークトリガーの自分の指 標にタイムスタンプ、トリガーステータス、最初 にトリガーをかけた CCG の個体名称を入力する 図 114(b))。ネットワークトリガーにデータが入力 されたことが他の cRIO で確認されたら、各 cRIO は現在のローカルトリガーの状況を確認し、ローカ ルトリガーがかかっていなかった場合はトリガー ステータスのみネットワークトリガーに入力する 図 114(c))。ネットワークトリガーのトリガース テータスが全ての cRIO に対してアクティブになっ たら、ネットワークトリガーの各指標間のタイムス タンプ情報を比較し、各 cRIO と Windows PC は ネットワークトリガーの最も古い情報を共有する。 Windows PC によるファイル取得とデータ表示

CCG Patrol の OPI を図 115 に示す。トリガー が発生すると Windows PC 上ではそのことをトリ



図 115 CCG Patrol の OPI

ガーをかけた CCG の名称と共に加速器のオペレー ターに知らせる。トリガー発生後のデータ収集が終 了すると、Windows PC は各 cRIO から当該デー タが納められている TDMS ファイルをローカルに 保存し、cRIO からはそれらファイルを削除する。 その後、CCG の名称から LER, HER どちらで圧 力跳ねが発生したかを判断し、トリガーを最初にか けた CCG およびその近傍の圧力値と当該リングの ビーム電流を自動的にプロットする。トリガーが発 生した時刻、トリガーをかけた CCG の名称はアー カイブされ、これらをプロットすることもできる。

また、cRIO の状態を監視するため、ネットワー クハートビート (network heart-beat) を実装して いる。Windows PC はメッセージの受信者、cRIO は送信者となっており、受信者はハートビート周期 で指定した周期内にメッセージが届かなかった場合 はカウンタを増分し、これがタイムアウトとなると そのことをオペレータに知らせるようにしている。

圧力跳ねの実例

Phase-2 コミッショニング中の 2018 年 6 月 25 日 11 時 20 分頃に LER で発生した QCS クエンチ を伴ったビームアボートにおける、ビーム電流と 圧力跳ねの様子を図 116 に示す。通常のデータ収 集(1s周期、図 116(a)) ではビームがアボートさ れた後に圧力跳ねが起きたように見えるが、CCG Patrol によるデータ収録 (10 ms 周期、図 116(b)) ではビームがアボートされる約2秒前から CCG
D02_L28の圧力値が上がり始めているのがわかる。

通常のデータ収集においてビームアボートより後 に圧力跳ねが起き始めているように見えてしまうの は、1)ビーム電流の PV を発行している IOC と CCG の PV を発行している IOC との間で時間同 期が取れていない、2)スキャン間隔が1秒のため に圧力の立ち上がりを捉えられていない、3) IOC 上では並行して他の処理も走っていることから厳密 に1秒間隔で PV の値が更新されておらず、アーカ イバーが周期的にデータを取得した場合にタイミン グによっては同一の値を記録してしまう、という複 合的な原因が考えられる。

この圧力跳ねが起きた CCG は垂直方向コリメー タ近傍に置かれたものであり、ビーム軌道が何らか の原因で動き、ビームがコリメータに直撃して圧力 が上昇したと推測している(2.6.2 項を参照)。また ビームがコリメータに衝突したことにより発生した シャワーが QCS に突入し、QCS クエンチが起きた と考えられている。この事象の後にビームコリメー タ先端のタングステン部に傷が入っていることを目 視で確認している。

圧力跳ねによるビームアボート

Phase-2 において前述のビーム衝突によるコリ メータ損傷が起きたことを受け、これを少しでも緩 和するため、コリメータ近傍の CCG で圧力値が跳 ねた際に即座にビームアボートするシステムを開 発した。特に図 116 において、ビームアボートの 約 2 秒前から圧力上昇が見られることが、このシ ステムを開発する動機となった。アボートリクエ ストを出すモジュールは cRIO のリレーモジュー ル (NI-9485 [207])を採用している。このリレーモ ジュールの接点開にかかる時間は 0.5 ms で、圧力 跳ねを検知する時間より十分早い。アボートリクエ ストを出すように設定した CCG で圧力跳ねが検知 されると、RTOS 上でリレーモジュールに FALSE を書き込み、接点が離れる。

このシステムは Phase-3 から導入され、これによるアボートが数回起きている(図 117)。当初は圧力計の指示値に変化が出てからアボートをしては遅すぎるかと思われたが、ロスモニターより早くこの



(b) CCG Patrolのデータロギング

図 116 ビームアボート時の圧力跳ねと LER ビーム電流

システムがアボートリクエストを出すこともあり、 また、ダストイベントによりビームが縦方向に異常 な振動を始めてから2ターン後にアボートしている 例もあるため、一定の効果はありそうである(確か めようがないが、図 117 の例でも、ビームアボー トしていなかったらコリメータは損傷して圧力はさ らに上昇していた、ということがあるのかもしれな い)。

2.5.5 DR の真空機器制御

DR における真空関連機器の制御システムは、 MR におけるそれと基本的には同じである。MR と 異なる主な点は次のとおりである。

 周長 135.5 m のリングであり、MR と比べて 制御点数が格段に少ない。



図 117 圧力跳ねによるビームアボートの例

- (2) IP の放電電流から圧力を測定している (MR に 比べてビームパイプ内の電子数が少ないため、 IP で圧力測定ができる)。CCG はゲートバル ブで区切られた真空区間に1台ずつ設置してい るが、これは圧力の校正等に使用している。
- (3) NEG 活性化には直流電源を使用し、各 NEG ポンプのヒーターはこれと直列に接続されて いる。
- (4) ビームパイプの断面積が小さい(コンダクタン スが小さい)ため、NEG ポンプの活性化に長時間を要す。

DR とライナックの間には BT があり、DR の入 射側を LTR (Linac To Ring)、出射側を RTL (Ring To Linac) と呼んでいる。DR にはゲートバルブに 区切られた領域が 4 つあり、LTR と RTL もゲート バルブによって DR およびライナックと区切られ ている。DR の真空関連機器はゲートバルブ:7台、 真空スイッチ:6台、CCG:6台、IP:44台、NEG ポンプ:124台、流量スイッチ:10台、温度計:30 台、NEG ポンプ活性化用電源:6台、RGA:1台、 ビームストッパー:1台を使用している。IP が設 置された箇所には粗排気セットを取り付けるための アングルバルブが1台ずつ設置されている。なお、 LTR と RTL は NEG ポンプを設置しておらず、IP のみで排気している。

DR の IP コントローラには Gamma Vacuum 社製 QPCe [208] を使用している。4UHV 同様、 1 台の筐体で4台の IP を制御することができ、
 10⁻⁸ Pa 台の圧力まで測定することができる。MR
 では CCG のセットポイントにより真空領域の定常
 状態を定義していたが、DR では IP のセットポイントによりこれを定義している。

NEG ポンプの活性化用電源には菊水電子工業社 製の直流電源 PAG600-4 [217] を使用している。こ の直流電源 1 台に対し、最大 29 台の NEG ポンプが 直列に接続される。NEG ポンプは SAES Getters 社の GP50 を使用している。実験室で実際のビーム パイプの構成を組み、MR と同様の活性化シーケン スで NEG ポンプ活性化試験を行ったところ、NEG ポンプのゲッター材は黒く、SUS のサポートは青く 変色して排気性能が失われてしまった。NEG ポン プ活性化中の許容圧力は 1×10⁻¹ Pa 以下とされて いるが、これを超えてしまったものと考えられる。 特に、DR のビームパイプはコンダクタンスが小さ いため、IP で測定している圧力に比べて NEG ポ ンプ部の圧力は 20–30 倍にもなることがわかった。

NEG ポンプ活性化中は NEG ポンプ部の圧力が 許容圧力以下になるように注意しながら、ヒーター の温度を徐々に上げなければならない。そのため、 IP での圧力値が 3×10^{-5} Pa を超えた場合はシー ケンスをポーズし、 5×10^{-5} Pa を下回ったらシー ケンスを再開する制御を実装した(圧力の閾値は可 変)。この活性化工程は 1 週間以上かかり、その間 に人が常時監視することも難しいため、粗排気セッ トの TMP や真空計のアラーム発報により活性化を 終えるインターロックシステムを構築した。

DR 東アーク部における主ポンプ立ち上げ時の圧 力推移を図 118 に示す。この区間には NEG ポン プ:57 台、IP:11 台がある。粗排気セットを 11 台 設置し、2017 年 10 月 25 日から 2017 年 11 月 10 日まで活性化を行なった。圧力が 1×10^{-4} Pa を 超えないよう、IP の放電電流等をモニターしなが ら慎重に長時間かけて活性化を行った。活性化終了 後、IP で測定した圧力の平均値は 1×10^{-8} Pa ま で下がっている。

DR の真空システムに重大な異常が起きた場合 は、アボートリクエストではなく入射禁止リクエス トを出す。この入射禁止システムは基本的に MR のアボートシステムと同じ構成になっており、GV の not open、温度計異常で PLC または MW100 の DO から入射禁止リクエストを発行する(リレーを 開く)。



図 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 [105]

2.6 コミッショニングの状況

加速器の構成および運転目的の別により、SuperKEKB のコミッショニングは Phase-1-3 の 3 期に区分けされている。

- Phase-1 DR なし、QCS なし、Belle II なし、ビーム衝突なしでの運転 [209-212]。主目的は真空機器の焼き出し、加速器の調整(ハードウェアの健全性確認等)、バックグラウンド等の各種スタディ等。最大ビーム電流は LER: 1010 mA、HER: 870 mA。実施期間は 2016 年の 2月1日から6月28日。
- Phase-2 QCS あり、Belle II あり(一部検出器はなし)でのビーム運転 [213-215]。この運転から DR が導入された [105,216]。主目的は光学系の調整、衝突調整、ナノビームスキームの検証、バックグラウンド等の各種スタディ、入射システムの確立等。最大ビーム電流は LER:860 mA、HER:800 mA。実施期間は 2018 年の3月19日から7月17日。
- Phase-3 2019 年春季運転 Belle II ありでのビーム 運転。主目的はルミノシティを増大させながら (衝突調整、衝突点における β 関数の絞り込 み、ビーム電流増強を行いながら)、衝突実験。 最大ビーム電流は LER: 830 mA、HER: 940 mA。実施期間は 2019 年の 3 月 11 日から 7 月1日。

本テキストでは、Phase-3 コミッショニング休止時 (2019 年春季運転終了後)までの真空システムに関 するコミッショニング状況について紹介する。

2.6.1 焼き出し状況

SuperKEKB MR のこれまでの焼き出し状況を 図 119 に示す。リング内の平均圧力をビーム電流 で規格化した値を dP/dI [Pa·A⁻¹] とすると、真空 機器が見たビームドーズおよびフォトンドーズの増 大と共に、dP/dI と光刺激脱離係数 η が減少してお り、順調に焼き出しが進んでいることがわかる (フォ トンドーズや η の算出方法については付録 B を参 照)。Phase-1 コミッショニングでは、主目的が真 空機器の焼き出しであり、大電流で継続的に長時間 ビーム運転していたため、この期間のビームドーズ は大きい。この運転期間において、LER で目標の 1 つとしている $\eta = 1 \times 10^{-6}$ molecules · photons⁻¹ に近い値が達成されている。

Phase-2、3 の開始直後に dP/dI および η が一時的に上昇しているが、これはコミッショニングの前にリングの一部区間で大気開放して真空作業を行い、そこで焼き出しの状況が若干巻き戻されたことと、焼き出しのされていない新しい真空機器が追加されたことによる。2.2.4 項でも述べた通り、ここでの η は ESD による影響も含んでいる。

KEKB MR と比較した SuperKEKB MR の焼き 出し状況を図 120 に示す。HER は大部分の真空機 器を再利用しているため、すでに η は KEKB よ りも小さい値となっており、これはメモリー効果 (memory effect) 等と呼ばれる [218, 219]。一方、 LER では大部分の真空機器がアップグレードされ たため、 η は KEKB より大きい値で、まだまだこ れは下がる余地があることが伺える。

Phase-3 におけるビーム電流で規格化した分圧の 推移を図 121 に示す。運転時間の経過とともに残 留ガスの分圧が下がっており、焼き出しが進んでい ることがわかる。この分圧を測定している RGA は LER の衝突点上流・筑波直線部のイオンポンプ直 上に設置されている。分圧の測定には SEM を使用 している。ビーム運転中の主なガス種は水素、一酸 化炭素、水、メタン、二酸化炭素であり、これらは PSD によって放出されるガス種として典型的なも のである。Phase-3 開始前、真空作業のためにこの 区間は大気開放されており、この影響で水の分圧が 比較的高い。

DR の Phase-2 からこれまでの焼き出し状況を 図 122 に示す。MR と比べて DR ではビーム電流 が小さく、またビームが蓄積されている時間も短 いため、ビームドーズは少ないが、焼き出しは順調 に進んでいることがわかる。DR の東アーク部には RGA を設置しており、ビーム運転中の主なガス種 は MR 同様、PSD によって放出される典型的なも のが観測されている。



図 119 SuperKEKB MR における焼き出し状 況。排気速度を LER:0.06 m³ · s⁻¹ · m⁻¹、HER: 0.03 m³ · s⁻¹ · m⁻¹ と仮定。

2.6.2 コリメータの稼働状況

コリメータはこれまでのところ異常な発熱等は 見られず、順調に稼働している。Phase-2 コミッ ショニング以降、コリメータはほぼ絶えずに調整が 行われ、QCS のビームからの防護、衝突実験時の Belle II 検出器におけるバックグラウンドの低減に 多大な貢献をしており、コリメータ無くしてビーム 運転ができない状況にある。ここではコリメータの 稼働状況について簡単に紹介する。



図 120 KEKB MR と比較した SuperKEKB MR における焼き出し状況。排気速度を LER: $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、HER: $0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ と仮定。

バックグラウンドの低減

2019 年 5 月 9 日 (Phase-3) にバックグラウンド スタディの一項目として行われた、コリメータスタ ディの例を図 123 に示す。現状、バックグラウンド に最も影響している D02V1 コリメータについて、 上下にあるヘッドを 2 mm から 2.5 mm へ広げる と、ビームライフタイムと Belle II 検出器の VXD (Vertex Detector、崩壊点位置検出器) システムの 一部にあるダイヤモンドセンサー [221] で測定して いるバックグラウンドが増加していることがわか



図 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。縦軸の分圧(強 度)はビーム電流で規格化している。下向き矢印 は NEG ポンプ活性化の実施日を表している。



図 122 SuperKEKB DR における焼き出し状況 [105]

る。この 0.5 mm のアパチャの違いにより、ビーム ライフタイムおよびバックグラウンドは約 20% 変 化しており、ヘッド位置に対してバックグラウンド が非常に敏感に反応していることがわかる。

ただし、コリメータを挿入しすぎると、ヘッド先 端で散乱した粒子が Belle II 検出器に到達し、バッ クグラウンドを増やしてしまうことがある。これは



図 124 Phase-2 における HER のコリメータ スタディの例。コリメータ位置は LVDT で測 定した値で、ビームパイプ中心とヘッド先端 間の距離を表す。バックグラウンドは VXD の ダイヤモンドセンサーで測定した値。このとき の衝突点におけるベータ関数は両リング共に (β_x^*, β_y^*) = (200 mm, 4 mm)。フィルパターンは 1/789/6.12、ビーム電流は LER:0 mA、HER: 230 mA。

tip-scattering と呼ばれ、これまでのコリメータス タディでも度々観測されている。図 124 には、2018 年 6 月 9 日 (Phase-2) における HER のコリメー タスタディの例を示す。図中①では衝突点上流に 設置された垂直方向コリメータ D01V1 (図 33 を参 照)の上下にあるヘッドを 2.2 mm まで閉めたとこ ろ、バックグラウンドが大きく減少していることが わかる。

図中②では同じく衝突点上流に設置された水平 方向コリメータ D01H4 のリング内外のヘッドを 15 mm 程度まで閉めていったところ、バックグラウン ドが急増した。これは tip-scattering に起因してい ると考えられる。

Phase-2 コミッショニングの中盤頃までは、ビー ム入射時と衝突実験時(ビーム蓄積時)のコリメー タ設定をその都度、自動的に変えていた。入射時の コリメータは、Belle II 検出器における入射ビーム によるバックグラウンド低減と QCS 防護のために 使用されるが、入射効率を落とさないようにアパ チャは開き気味に設定される。一方、衝突実験時の コリメータは、蓄積ビームによるバックグラウンド 低減と QCS 防護のために使用され、各種検出器に HV の印加が可能な限りビームライフタイムを落と



図 123 Phase-3 における LER のコリメータスタディの例。コリメータ位置は LVDT で測定した値 で、ビームパイプ中心とヘッド先端間の距離を表す。バックグラウンドは VXD のダイヤモンドセン サーで測定した値。このときの衝突点におけるベータ関数は LER (β_x^*, β_y^*) = (200 mm, 3 mm)、HER (β_x^*, β_y^*) = (100 mm, 3 mm)。フィルパターンは 1/789/6.12、HER のビーム電流は 0 mA。

さないようにアパチャが調整される。また、光学系 の変更(主に衝突点におけるベータ関数の絞り込 み)の度にコリメータの再調整を行なっている。

Phase-2の中盤以降は、日々の入射調整の成果に より衝突調整用のアパチャの絞ったコリメータ設定 でも問題なく入射ができるようになった。Phase-3 コミッショニングから連続的に入射(continuous injection)をしながら衝突実験することが可能にな り、入射と衝突実験でコリメータの設定を変えるこ とはなくなっている。

QCS の防護

コリメータの調整が十分されていなかった Phase-2 コミッショニング初期において、入射調 整、RF 位相調整、衝突点のベータ関数の絞り込み 等を試みた際、ビームロスによる QCS クエンチが 度々発生した。クエンチが発生してしまうと再立ち 上げに 1-2 時間を要し、大変なタイムロスとなる。

2019 年 5 月 8 日の運転時(Phase-3) において、 ビームの空間的広がりがガウス分布していると仮定 して、各コリメータと QCS のアパチャがビームサ イズ(σ)の何倍に相当しているかを図 125 示して いる。このように、QCS よりもアパチャが小さく なる場所をコリメータで作ることにより、ビームは まずコリメータでロスする確率が高いため、QCS クエンチの発生頻度は劇的に下がった。

ヘッド損傷

2018 年 6 月 25 日 11 時 20 分頃 (Phase-2) に、 LER の衝突点上流に設置された垂直方向コリメー タ D02V1 において、急激な圧力上昇を伴うビーム アボートがあり (図 116)、ほぼ同時に QCS クエ ンチが発生した。ビーム電流は 728 mA であった。 QCS を再立ち上げし、入射調整・衝突調整等を実 施した後、6 月 26 日の早朝に衝突実験を試みたが、 Belle II 測定器でのバックグラウンドが非常に高 く、各検出器に HV を印加できなかった。LER 単 独で運転してもバックグランドは高く、またコリ メータの位置を調整してもバックグラウンドが下が ることはなかった。

その後、現場で D02V1 コリメータのヘッドを ビューポートから確認したところ、下側ヘッド先端 タングステン部において、ビーム進行方向に傷が 入っていた。また、上側ヘッドの先端には下側ヘッ ドでスパッタされたタングステンが蒸着したと見ら れる突起形状が確認された。何らかの原因でビーム 軌道が急変し、ビームがコリメータに直撃したと推 測されているが、アボート直前にビーム振動や軌道 逸脱は観測されておらず、原因はわかっていない。

この問題への対処法を検討するため、ヘッドの損









図 125 Phase-3 におけるコリメータと QCS のアパチャ。赤色の横線が QCS のアパチャ を表す。衝突点におけるベータ関数は LER $(\beta_x^*, \beta_y^*) = (200 \text{ mm}, 3 \text{ mm})$ 、HER $(\beta_x^*, \beta_y^*) = (100 \text{ mm}, 3 \text{ mm})$ 。

傷箇所を回避するように D02V1 コリメータにおい て、水平方向にビーム軌道のバンプ (bump)を立て ることにより、損傷したラインからオフセットした 領域がコリメータとして機能しているか調査した。

D02V1 コリメータ近傍の BPM を使って計算 した D02V1 コリメータでの水平方向ビームポジ ション、コリメータヘッドの位置、電磁カロリメー



図 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 (hit rate)

ター (Electromagnetic Calorimeter、ECL [222]) により測定したバックグラウンドを図 126 に示す。 D02V1 コリメータにおいてビーム軌道をリング内 側へ約 1.2 mm、2 段階で動かしている。その後、 D02V1 コリメータを 3.5 mm から 2.6 mm まで閉 めると、ECL のバックグラウンドレベルが急落し ていることがわかる。

この水平方向バンプでも運転可能なことは分かっ たが、ルミノシティを減少させてしまう可能性が あったことから軌道は元に戻し、現場で D02V1 コ リメータ本体をリング外側に 1.5-2 mm 程度シフト することで損傷箇所を回避させた。運転中のヘッド 交換も検討したが、これを行う場合、加速器が運転 可能な状態になるまでに、1) 当該区間の窒素パー ジ、2) コリメータの切り離し、3) ヘッドの交換、4) コリメータのつなぎ込み、5) 粗排気、6) リークテ スト、7) IP のベーキングおよび NEG ポンプの活 性化、という行程が必要となる。2) は垂直方向コリ メータ下側のヘッドを交換する際に必要な作業で、 ビームラインからコリメータを切り離した後、架台 に取り付けられた回転機構を使ってコリメータ本体 を回転させ、ヘッドを交換する作業である。これら は多大なタイムロスになることから、ヘッドの損傷 については Phase-2 コミッショニングの最後まで コリメータ本体のシフトで対応した。

Phase-2 終了後に取り外した、D02V1 コリメー タヘッドの写真を図 127 に示す。タングステンの



(a) 下側ヘッド先端

(b) 下側ヘッド先端

図 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

放射長は約 3.5 mm であり、下側ヘッドにはこの 長さを過ぎてから傷が拡大している様子が見える。 上側ヘッドの表面には蒸着したタングステンが見え る。また、2.2.5 項でも述べたが、脆化により表面 からはポロポロとタングステンの粉が落ちるような 状態になっていた。

また、2018 年 7 月 9 日 11 時 20 分頃 (Phase-2) に、同様の事象 (前触れのない圧力急上昇を伴 う QCS クエンチ)が HER の垂直方向コリメータ D01V1 でも発生した。ビーム電流は 766 mA で あった。その後、現場で D01V1 コリメータの上 側ヘッド先端をビューポートから確認したところ、 ビーム進行方向に傷が入っていた。ただし、この損 傷による Belle II 測定器でのバックグラウンド増大 は確認されなかったため、Phase-2 の最後まで対処 しなかった。LER と同じく軌道が急変してビーム がヘッドに直撃したと推測される。Phase-2 コミッ ショニング終了後、D01V1 および D02V1 コリメー タのヘッドは予備品と交換した。

さらに、2019 年 7 月 9 日 22 時 11 分頃 (Phase-3) に、またも同様の事象 (前触れのない圧力急上 昇を伴う QCS クエンチ)が LER の垂直方向コリ メータ D02V1 で発生した。ビーム電流は 660 mA であった。その後、現場で D02V1 コリメータの下 側ヘッド先端をビューポートから確認したところ、 ビーム進行方向に傷が入っていた。バックグラウン ドが高く、衝突実験が行えなかったため、やはりこ のコリメータ部で約 1 mm の軌道バンプを作って 傷を回避した。Phase-3 では、コリメータ本体は移 動させず、軌道バンプを作った状態で 2019 年夏の シャットダウンまでビーム運転をした。2019 年夏 のシャットダウン中に損傷したヘッドを交換する予 定である。

なお、Phase-3 コミッショニングの事象では、ビー ムアボート前に圧力跳ねに伴うビームエネルギーロ スが観測されたことから、ビーム軌道を急変させる 原因候補の1つとして、2.6.3 項で述べる、ダストイ ベントが挙げられている。EGS (Electron Gamma Shower [223])で評価したビーム照射時の到達温度 を図 128 に示す。バンチ電流 16 mA・bunch⁻¹ の ビームが衝突すると、ほぼ全ての材質で最大到達温 度が融点を超えていることがわかる。リングを周回 しているビームがヘッドに直撃した場合、ヘッドの 損傷は免れない。これを回避するには、異常なビー ム軌道を引き起こしている原因を取り除くか、異常 の検知で即座にビームをアボートするシステムが必 要となる。

2.6.3 ダストイベント

Phase-1 コミッショニングから現在に至るまで、 MR ではビームロスを伴う 1×10^{-5} Pa 程度までの 圧力跳ねが度々発生している。なお、CERN(欧州 原子核研究機構)のLHC(Large Hadron Collider) においても、UFO(Unidentified Falling Objects) と名付けられた類似の事象が発生している [224]。

図 129 に示しているように、上昇した圧力の分布 から、特に LER の偏向電磁石内のビームパイプで 頻発していることがわかった(頻度は低いが、HER



図 128 EGS による各材料にビーム照射したと きの到達温度。 1×10^{12} electrons · bunch⁻¹ (16 mA · bunch⁻¹)、実効バンチ半径 : 50 μ m、0.5 × (放射長)。



図 129 CCG の指示値から推定したダストイベ ントの発生箇所

でも発生している)。このビームパイプは上下にグ ルーブ構造があり、この構造に洗浄では取り除けな かったダストがあり、これがビームによる熱負荷が 影響して落ちてきていることが原因として推測さ れた。

検証のため、ノッカー(knocker。圧縮空気を動 力として対象に衝撃を与える装置で、通常は食品工 場の粉落とし等に使われる)を偏向電磁石内のアル ミ合金製ビームパイプに取り付け、これによりビー ム運転中にビームパイプへ衝撃を与えたところ、7 回中7回、ビームロスを伴う圧力跳ねが再現され た。また、ドリフト部におけるグルーブ構造のない アルミ合金製ビームパイプでも同様のことを実施し たが、ここでは事象が再現されなかった。さらに、 偏向電磁石内の同仕様のビームパイプであっても、 製造メーカーによって事象の起きる頻度が異なるこ



図 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。ビームパイプ内にカプトン シートを敷いた状態でノッカーを作動させ、カプ トンシートを引き抜いた。

とがわかった。

実験室に保管している予備のビームパイプにも同 様の衝撃を与え、落ちてきたダストを採取したとこ ろ、図 130 のように、アルミ合金を主成分とする金 属片が多数確認されたことからも、この事象を起こ している原因は、ビームダクト内にあるダストが有 力となっている。

LER における、Phase-1 から現在までのダスト イベントの発生頻度および場所を図 131 に示す。 Phase-1 ではビーム電流を増強する度にダストイベ ントが発生し、到達した最大ビーム電流付近でしば らく運転すると、徐々に発生頻度が下がっていった (エージング効果がある)。Phase-2 開始前には、ダ ストを落とすために、ダストイベントが頻発してい たビームパイプを叩いて回った。Phase-2 以降の運 転では、ダストイベントの発生頻度は激減した。

発生頻度が減った要因として、1) ノッカーによ りダストが落ちた、2) Phase-2 以降は衝突調整・実 験が主目的であり、300 mA 以下の比較的低い電流 での運転時間が長かった、3) Phase-2 以降からダイ ヤモンドセンサー等でアボートを出すようになり、 これによって圧力跳ねが発生する前にアボートされ ている、等が考えられる。2020 年秋季運転前にも ノッカーでダストを落とすこと試みる予定である。





(b) ダストイベントの発生箇所

図 131 ビーム運転時間とダストイベント

2.6.4 真空機器の異常等

SuperKEKB で導入された新規の基本的真空機器(MO型フランジ、櫛歯型のRFシールドを採用したベローズチェンバーやゲートバルブ、コリメー タ等)では、今のところ異常な発熱等は見られず、 健全である。フランジやベローズチェンバー、ゲー トバルブの温度上昇は、LER の最大ビーム電流約 1 A (フィルパターン: 1/1576/3.06)においても、 1–5 ℃ であり、問題ない。ここでは、これら以外 の発熱等が見られた機器について紹介する。

発熱

HER において、QCS で発生した放射光が、下流 15-20 m にあるステンレス製ビームパイプ(図 132) に照射され、発熱が起きている。当該箇所のビーム パイプをリング外側へ約 15 mm ほど傾け、また、 温度が下がるようにビーム軌道を調節してビーム運 転した。Phase-2 コミッショニング中には、フラン



図 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

ジ部で合計3回リークが発生し、うち2回は増し締 めとバックシールで、1回はガスケット交換で対処 した。

ビームパイプに取り付けた温度計の指示値では最 大ビーム電流でも 50 °C 程度であったが、フラン ジの材質がステンレス製と、クロム銅製の組み合 わせであったため、線膨張率の違い、熱伝導率の違 い(ステンレス製フランジ側で局所的に温度上昇し た)、熱サイクル等の理由でリークしたものと思わ れる。対策として、Phase-3 開始前に、当該ビーム パイプの上流側 2 箇所に放射光マスクを設置した。 この対策による発熱の低減効果は限定的であった が、現在までにリークは発生していない。また、将 来的にはステンレス製フランジをクロム銅製にした ビームパイプに置き換える計画もある。

衝突点においては、衝突点ベローズチェンバーの 発熱が見られた(2.2.6 項を参照)。Phase-2 コミッ ショニング開始前の設置作業で、4 台中 1 台のベ ローズチェンバーのフィンガーが外れ、これを元に 戻してビーム運転に入ったところ、他のベローズ と比べて温度が若干高かった(ビーム電流 800 mA で当該ベローズは $\Delta T \approx 2 \,^{\circ}$ C、その他のベローズ は $\Delta T \approx 1 \,^{\circ}$ C)。Phase-2 の後、このベローズチェ ンバーを外したところ、フィンガー部に放電痕が 確認された(図 133)。このベローズチェンバーは Phase-3 前に予備品と交換したが、Phase-3 コミッ ショニングでも同じ場所のベローズチェンバーで発 熱が見られた(4 台中 1 台)。

図 134 にはベローズ外側に取り付けた温度計の 指示値を示す。フィルパターンにより、温度上昇の



図 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(写真右側)



図 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

様子が異なるため、フィンガー部の電気的コンタク トが不十分であることが原因と推測される。

LER 日光直線部のウィグラー区間のフランジ温 度を図 135 に示す。このように、ウィグラー区間 のフランジにおいても、放射光による発熱(温度 の高いところで、ビーム電流約 800 mA において ΔT = 30°C 程度)が見られている。ビーム軌道に 垂直方向の傾きがあると、放射光がアンテチェン バーの上側または下側に照射される。特に、LER 日光直線部のウィグラー区間は全長が 150 m 程度 と長いため、上流で発生した放射光が広がり、これ がアンテチェンバー内に収まっていないものと考 えられる。対策として放射光マスク付きのベローズ チェンバーを設置した。また、ビームの軌道をでき るだけ水平にし、フランジに冷却ブロックを取り付 けることを検討している。



図 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

圧力跳ね

ビーム電流を増強していく過程で、圧力跳ねが観 測される箇所がいくつかある。例として、HER の 横方向フィードバックキッカー近傍での CCG によ る指示値を図 136 に示す。ビーム電流を増やして いき、ある閾値を超えると圧力跳ねが発生する。し ばらく、その電流を維持していると、次第に圧力跳 ねが収まるが、ビーム電流をそこからさらに増強 すると、再び圧力跳ねが発生する。このような圧力 跳ねは LER 入射部(入射キッカーとアボートキッ カー)のセラミックチェンバー等でも見られ、電子 のマルチパクタ現象が起きていると推測されてい る。今のところ、圧力跳ねが観測される箇所はいず れも前述のようなエージング効果が見られるため、 ビーム電流を増強する際には、圧力跳ねが収まった のを見計らって電流を増やしている。

LER の衝突点下流にある ZDLM(Zero Degree Luminosity Monitoring [225]、ルミノシティを測 定するモニター)用チェンバーでも発熱および圧 力跳ねが観測されている。ZDLM チェンバーは 図 137 に示すように、ZDLM を設置する箇所が ビームに向かって凸の構造になっている。これに より ZDML チェンバーのロスファクターは約 0.2 $V \cdot pC^{-1}$ と高く、これは新型水平方向コリメータ



図 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



図 137 ZDLM チェンバーの概略図



図 138 改良型 ZDLM チェンバーの概略図

のロスファクター ($\approx 0.04 \text{ V} \cdot \text{pC}^{-1}$)より大きい値 である。また、CST Studio の Eigenmode Solver によると、ZDLM チェンバーには 2.1 GHz 付近に Q 値が 1.6×10⁴ 程度の捕捉モードがある。これら は将来的には問題になる可能性があるため、対策と して、1) ZDLM チェンバー下流に SiC の高周波吸 収体を設置し、基本モードの Q 値を 20 程度まで下 げる、2) 図 138 のようにビームパイプ断面に丸み を付け、基本モードの励振を回避すること、が検討 されている。

リーク

Phase-1 において、HER 富士直線部のテーパー 型ビームパイプ下流側フランジ(図 139(a)の右側 にあるフランジの上側)でリークが発生した。この ビームパイプは全長 1062 mm で、断面形状が上流 側の幅 104 mm、高さ 50 mm のレーストラック型 から、下流側の幅 60 mm、高さ 40 mm のレースト ラック型へ絞られている。このビームパイプの上流 にある偏向電磁石で発生した放射光は、図 139 の下 側に照射されるため、このビームパイプ下流側には 放射光マスクが置かれている。

このビームパイプでは、アボート時に圧力跳ねが 度々観測されていた。また、このビームパイプにお ける残留放射線レベルが高いという報告もあり、さ らに、リークの発生したフランジ内面を観察する と、ビームが照射されたと思われる痕が目視で確認 された(図139(b))。このリーク発生後、コリメー タを調整してアパチャを絞ったところ、圧力跳ねの 最大値が小さくなった。これらの事柄から、アボー ト時に正規軌道から外れたビームがビームパイプに 衝突し、リークが引き起こされたと推察している。

このリークを防ぐため、Phase-2 開始前に改良し たビームパイプ(図 139(c))に置き換えた。この ビームパイプでは、下流側フランジのリークが発生 した側にビームマスクを設置している。また、放射 光マスクからの反射光がシール部に照射され、リー クを引き起こした可能性も指摘されていたため、放 射光マスク部にはリッジ構造を加工し、これにより 放射光の反射光を散乱させている。今のところ、こ のビームパイプで問題は起こっていない。

2.6.5 真空とバックグラウンド

Phase-3 コミッショニングにおけるバックグラウ ンドスタディの結果、Belle II 検出器におけるバッ クグラウンドは LER のビーム–ガス散乱 (ビームと 残留ガスの相互作用) による成分がバックグラウン ド全体の約 70% を占めており、これが支配的であ ることが分かっている。

加速器単独で見ると、ビーム電流 1 A 程度までの 運転も可能で、KEKB と同程度のピークルミノシ ティである $1.22 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ が既に実現され ている。しかし、Belle II 検出器における高いバッ クグラウンドレベルのため、Phase-3 における衝突 実験時のビーム電流は 500-600 mA 程度までにし か上げることができず、これによりピークルミノシ ティが $0.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度に制限されてお



(b) フランジ内面の痕



(c) 改良版テーパー型ビームパイプ

図 139 HER 富士直線部のテーパー型ビームパイプ

り、現状では LER のビーム–ガス散乱による成分を 低減することが大きな課題となっている。

これまでに、NEG ポンプ活性化用ヒーターへ通 電することにより人為的に圧力を上げ、リングのど の区間の圧力がバックグラウンドに効いているか スタディを実施している(vacuum bump study と 呼ばれている)。Phase-3 における LER でのスタ ディ結果を図 140 に示す。リング内の各区間(D01 から D12、図 33 を参照)の圧力を上昇させるに従 い、VXD のダイヤモンドセンサーも上昇している が、同程度の圧力上昇でも区間によってダイヤモン ドセンサーの応答は異なることがわかる。

このスタディの結果、バックグラウンドは D02、 D06、D12 の圧力に敏感であることが分かった。 2020 年に設置を計画している D06V1 と D03V1 の コリメータにより、D03-D12 および D01 の圧力に 起因したバックグラウンドは低減される予定であ る。最もバックグラウンドに敏感な D02 区間の圧 力については、動的圧力が下がる(焼き出しが進む) のを待つしかないのが現状である。

Phase-3 における MR の CCG 指示値の分布を 図 141 に示す。Phase-3 前に大気開放をして真空作 業を行なった区間の圧力が比較的高く、特に LER の D02V1、D02H1、D02H2 コリメータを設置した 区間の圧力が高い(悪いことに、バックグラウンド に敏感な LER D02 区間の圧力が高い)。D02H1 コ リメータは、設置後にヘッドからチェンバー内へ冷 却水が漏れ出た事故が発生しており、このコリメー タ近傍に水が残っている可能性もある。2019 年秋 の運転前には、この区間の圧力を下げるべく、これ らコリメータの in-situ でのベーキングを試す予定 である。また、HER についてはメモリー効果によ り総じて圧力が低いことがわかる。



図 140 Phase-3 における LER vacuum bump study (中山浩幸先生提供)。圧力は各区間に設置された CCG 指示値の平均。



図 141 Phase-3 における MR の圧力分布。ゲートバルブで区切られた各領域には、それを特徴付ける 次の名称が付けられている。IR: interaction region、STP: stopper、WKB: weak bend、ARC: arc、 WIG: wiggler、TST: test、INJ: injection、CRS: cross、FBK: feedback kicker、MON: feedback monitor、ABT: abort、STR: straight、HOM: HOM absorber、SRM: synchrotron radiation monitor、 ARES: RF-cavity、SCC: superconducting cavity。LER D07-INJの CCG-06、07 と HER D08-INJ の CCG-17、18、19、20 はセプタムチェンバー内を測定しているため、圧力が高い。

おわりに

1章は、理想的にはちょっとした研修の代わりに なるようなテキストを目指して書いた(これが達成 できているのか自信はないが)。企業の方等とお話 しさせていただくと、どうやらリーマンショックを 境に企業の教育体制が大きく変わったようである。 経費削減で最初に注目されるのが教育費のようで、 不景気が長引いたことにより教育費の削減が常習 化してしまい、ようやく景気が上向いてきたところ で、教育費削減をしていたおよそ 10 年間に知識や 技術を教育・継承できる人材が社内に居なくなって しまっているというケースが多いようである。企業 に限らず、大学や研究所でも同様のことが起きてお り、このことは先人の方々がこれまで積み上げてき たものが消え去ってしまいかねない、非常に危機的 な状況である。このテキストがその代わりになると は全く思わないが、ほんの少しでもその空いた穴を 埋めることができれば、幸いである。

この章では私が講師を務めた真空工学関連講座 (例えば、[3])で使用しているスライド等を参考に しながら書いたが、その基礎は高エネルギー加速 器研究機構・物質構造科学研究所の間瀬一彦先生と KEKB 真空グループの柴田恭先生により作成され た。この場を借りて先生方には深謝いたします。ま た、この章の一部の図に関しては日本表面真空学 会・教育委員会の許可を得て、営業職・文系にも役 立つ真空技術講座のテキストから転載している。転 載の許可を下さった日本表面真空学会・教育委員会 に感謝の意を表します。

2章では、SuperKEKB における各種真空機器の 紹介から始まり、Phase-3 2019 年春季運転終了時 点における真空システムの状況に至るまで概略的に 書いた。SuperKEKB の設計ビーム電流に到達す るまで、現状 LER は実績値の約4倍、HER は約 3倍もあり、正直なところ、こんな大電流を定常的 に蓄積することが本当にできるのか想像がつかな い。しかし、KEKB 時代からコミッショニングに 携わっている先輩から雑談で、「KEKB が始まった 当初はビーム電流1A を達成するなんてとても信 じられなかった」という話を伺った(実際の KEKB は LER:1.7 A、HER:1.4 A 程度まで蓄積して定 常運転していた)。それを聞くと、SuperKEKB は 運転を開始してから日を経たずして1 A 程度のビー ム電流を蓄積しており、とても快調にコミッショニ ングが進んでいると思える。山は険しいように感じ るが、今年の OHO を受講された方々、本テキスト を読んでくださった方々はこれを機会にぜひ、今後 のルミノシティの動向に目を向けていただきたい。

この章で書いた内容のかなりの部分は、KEKB グループの諸先輩方ならびに同僚の仕事の成果であ る。特に、KEKB 真空グループの金澤健一先生、末 次祐介先生、柴田恭先生、久松広美氏、白井満氏、照 井真司氏、モニターグループの福間均先生、RF グ ループの渡邉謙先生、Belle II の中山浩幸先生、並 びに KEKB コミッショニンググループの皆様に、 この場を借りて深謝いたします。

付録 A ビームと残留ガスの相互作用

蓄積リングにおけるビーム中の荷電粒子(SuperKEKB の場合は電子/陽電子)は、縦方向とそれ に垂直な横方向に働く復元力により、振動しながら リング内を周回している。横方向の振動はベータト ロン振動(betatron oscillation)、縦方向の振動は シンクロトロン振動(synchrotron oscillation)と 呼ばれている。

ビーム中の荷電粒子と気体分子が衝突すると、荷 電粒子の運動量が変化して振動が励振される。この 振幅が加速器を安定に周回できるアパチャより大 きくなると、荷電粒子は安定に周回することができ なくなって失われる。横方向にはビームパイプの寸 法によって決まるアパチャがあり、これはフィジ カルアパチャ (physical aperture)と呼ばれる。縦 方向にはシンクロトロン振動の位相安定性から決 まる、RF バケットハイト (RF bucket height)と 呼ばれるアパチャがある。さらに、主に非線形な 磁場の効果によって決まるダイナミックアパチャ (dynamic aperture)と呼ばれるアパチャがあり、 SuperKEKB ではこのアパチャが支配的である。

SuperKEKB MR の場合、このダイナミックアパ チャから荷電粒子を飛び出させる過程は、1)バン チ内粒子同士のクーロン散乱(Touschek 効果)、2) ビーム・ビーム効果による制動放射、3)ビームと 残留ガスの相互作用(特に制動放射)、が主なもの である。3つ目の過程は、SuperKEKB に限らず一 般的な加速器でも問題になる可能性があり、これを 防ぐためにビームパイプ内に気体分子数の少ない環 境を作り、そこへビームを通すことによって荷電粒 子と気体分子とが相互作用する確率を極力下げる。 これが加速器における真空システムの基本的な役割 である。

ビーム中の電子/陽電子と残留ガスが相互作用する際の散乱断面積は、主に次の3つの過程における 断面積の和となる[27,29,226]。

- ラザフォード散乱 (Rutherford scattering)
- メラー散乱 (Möller scattering)

• 制動放射 (bremsstrahlung)

A.1 ラザフォード散乱

原子核のクーロン場による散乱で、電子/陽電子 は原子核に比べて質量が小さいため、これらはエネ ルギーは変化せずに進行方向が変わる。この過程に おける散乱断面積を $\sigma_{\rm R}({\rm Z})$ [m²] とすると、

$$\sigma_{\rm R}(Z) \approx 4\pi \left(\frac{r_{\rm e}Z}{\gamma}\right)^2 \theta_{\rm c}^{-2}$$
 (46)

で与えられる。ここで、古典電子半径 $r_{\rm e} = 2.82 \times 10^{-15} \,\mathrm{m}$ 、原子番号 Z、ビームのローレンツファク ター $\gamma = E/m_{\rm e}$ 、電子の静止質量 $m_{\rm e} = 0.51 \times 10^{6} \,\mathrm{eV}$ 、臨界角 $\theta_{\rm c}$ である。

臨界角は、散乱により進行方向が変わった荷電粒 子がビームパイプ内壁と衝突する限界角度で、ビー ムパイプの最小アパチャの半幅 a_{\min} [m] と ベータ 関数の代表値 β [m] により、

$$\theta_{\rm c} = \frac{a_{\rm min}}{\beta} \tag{47}$$

で与えられる。

A.2 メラー散乱

ビーム中の荷電粒子が残留ガスの原子核外電子と 衝突する過程で、これにより電子/陽電子には大き な散乱角とエネルギーロスが加わる。この過程にお ける散乱断面積を $\sigma_{\rm M}$ [m²] とすると、

$$\sigma_{\rm M} \approx 4\pi \frac{r_{\rm e}^2}{\gamma_{\rm c}} \qquad (\gamma_{\rm c} <<\gamma)$$
 (48)

ここで、エネルギーロスの臨界値 $\gamma_c = \gamma \Delta E/E$ 、 RF バケットハイト ΔE [eV] である。

A.3 制動放射

原子核のクーロン場による散乱の高次の効果で、 荷電粒子が電場の中でエネルギーロスおよび進行 方向が変えられた際に、電磁波を放射する過程であ る。質量の小さい電子/陽電子ビームにおいて、3つ の散乱過程中で最も断面積が大きい。この過程にお ける散乱断面積を $\sigma_{\rm B}(Z)$ [m²] とすると、

$$\sigma_{\rm B} \approx 4\alpha r_{\rm e}^2 \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) Z(Z+1) \left\{ \frac{4}{3} \ln\left(\frac{\gamma}{\gamma_{\rm c}}\right) - \frac{5}{6} \right\}$$
(49)
ここで、微細構造定数 $\alpha = 1/137$ である。

A.4 ビーム寿命

時刻 t [s] におけるビーム電流を I(t) [A] とする と、ビーム寿命は次の通り定義される。

$$\tau = \frac{I(t)}{-\frac{dI(t)}{dt}} \tag{50}$$

ビームと残留ガスの相互作用により、短時間あた りに失われるビーム電流 $dI(t)/dt [A \cdot s^{-1}]$ は、次 式で表される。

$$\frac{dI(t)}{dt} = -vI(t)\sum_{Z=1} n_Z \,\sigma_T(Z) \tag{51}$$

ここで、全散乱断面積 $\sigma_{\rm T}(Z) [{\rm m}^2] = \sigma_{\rm R}(Z) + Z\sigma_{\rm M} + \sigma_{\rm B}(Z)$ 、残留ガスの各原子(原子番号 Z)の密度 n_Z [molecules · m⁻³]、ビームの進行速度 $v [{\rm m} \cdot {\rm s}^{-1}]$ である。ガス種についてではなく、各 原子について和を取ることに注意する。例えば CO の場合、CO (Z = 14) ではなく、C (Z = 6) と O (Z = 8) について和を取る。

式 (50)、(51) から、真空に関するビーム寿命 τ_{v} [s] は、

$$\frac{1}{\tau_{\rm v}} = v \sum_{Z=1} n_Z \,\sigma_T(Z) \tag{52}$$

と表される。

A.5 イオントラッピング

ビームパイプ内の残留ガスは、ビームや放射光等 との相互作用により、ある確率でイオン化される。 HER のような電子蓄積リングの場合、このイオン が負電荷バンチの作るポテンシャルに引き寄せられ る。質量の小さいイオンの場合、このポテンシャル によって得る加速度が大きいため、次のバンチが来 るまでにイオンはビーム軌道から逸脱する。一方、 質量が大きいイオンの場合、ビーム軌道付近に捕捉 されてしまう。 この現象はイオントラッピング(ion trapping) と呼ばれ、これによりビーム周辺が局所的に圧力が 高まった状態となるため、ビーム寿命が縮められ、 さらにエミッタンスが増大されることもある。

イオントラッピングを起こす臨界質量数 Ac は、

$$A_{\rm c} = \frac{n_{\rm e}}{N_{\rm b}} \frac{r_{\rm p}}{N_{\rm b}} \frac{\pi R}{(v/c)^2 \sigma_y(\sigma_x + \sigma_y)} \tag{53}$$

で 与 え ら れ る 。こ こ で 、古 典 陽 子 半 径 $r_{\rm p} = 1.53 \times 10^{-18} \,\mathrm{m}$ 、バンチあたりの電子数 $n_{\rm e}/N_{\rm b}$ [electrons · bunch⁻¹]、水平/垂直方向ビーム サイズ $\sigma_{x/y}$ [m]、光速度 $c = 3 \times 10^8 \,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ で ある。

ビームおよび捕捉されたイオンの分布にガウス分 布を仮定すると、イオンとの衝突によるビーム寿命 $\tau_{\rm ion}$ は、

$$\frac{1}{\tau_{\rm ion}} = \frac{v}{4\pi\sigma_x\sigma_y C} \sum_{Z=1} N_{\rm ion,Z} \,\sigma_{\rm ion,T}(Z) \qquad (54)$$

で与えられる。ここで、リング周長 $C = 2\pi R$ [m]、 リング内でトラップされたイオンの各原子(原子番 号 Z)の数 $N_{\text{ion},Z}$ [ions]、トラップされたイオンの 全散乱断面積 $\sigma_{\text{ion},T}(Z)$ [m²] である。先と同様、ト ラップされたイオン種についてではなく、イオンの 各原子について和を取ることに注意が必要である。 式(52)と見比べると、イオントラッピングは密度 $n_{\text{ion},Z} = N_{\text{ion},Z}/4\pi\sigma_x\sigma_y C$ [ions・m⁻³] の残留ガス との散乱によるビーム寿命と等価であることがわ かる。

付録 B シンクロトロン放射光

真空システムに関連する放射光の性質について簡 単にまとめる。

リング内で単位時間あたりに放出される放射光の 光子数 $n_{\rm ph}$ [photons \cdot s⁻¹] とエネルギー $W_{\rm ph}$ [W] は、

$$n_{\rm ph} = 8.08 \times 10^{11} IE \tag{55}$$

$$W_{\rm ph} = \frac{8.84 \times 10^{-32} I E^4}{\rho} \tag{56}$$

で与えられる [220]。ここで、ビーム電流 I [A]、ビー ムエネルギー E [eV]、電子/陽電子の曲率半径 ρ [m] である。

放射光は様々なエネルギーの光子を含んでお り、これを特徴付けるものとして臨界エネルギー ϵ_{c} [eV] があり、

$$\int_0^{\epsilon_c} W_{\rm ph}(E) \, dE = \frac{1}{2} W_{\rm ph} \tag{57}$$

と、放射光の全パワーを2分するエネルギーと定義 され、

$$\epsilon_{\rm c} = 2.22 \times 10^{-24} \frac{E^3}{\rho}$$
 (58)

である。

光刺激脱離係数 η の算出方法について、式(36) および式(37)から、

$$\eta = \frac{S(p - p_{\rm s})}{kT n_{\rm ph}} \tag{59}$$

となり、式(55)から、

$$\eta = \frac{S}{8.08 \times 10^{11} kTE} \frac{dp}{I}$$
$$\approx 3 \times 10^8 \frac{S}{E} \frac{dp}{I}$$
(60)

となる。ここで、 $dp = p_{\rm d} = p - p_{\rm s}$ と置き、 $T = 300\,{\rm K}$ とした。

したがって、リングの排気速度 S がわかれば (または仮定すれば)、ビーム運転時とそうでないときの 圧力差 dpをビーム電流 I で割ることにより dp/Iを求め、これらにより η を見積もることができる。 また、長さ L[m] におけるフォトンドーズ $D_{\rm ph}$ [photons \cdot m⁻¹] は、式(55) から、

$$D_{\rm ph} = \frac{\int n_{\rm ph} \, dt}{L}$$
$$\approx 2.9 \times 10^{15} \frac{E}{L} \int I \, dt \tag{61}$$

となる。ここで、ビームドーズ *∫ I dt* の単位を [A h] としている。

参考文献

- [1] 日本真空学会 真空夏季大学:
 https://www.vacuum-jp.org/営業職・文
 系にも役立つ真空技術講座
- [2] 日本真空学会 真空技術演習講座:
 https://www.vacuum-jp.org/真空技術演 習講座
- [3] 石橋拓弥、表面と真空, **62** (2019) 225. https://doi.org/10.1380/vss62.225
- [4] 日本真空学会 真空夏季大学: http://www.vacuum-jp.org/edu/summer
- [5] 堀越源一、真空技術 第 3 版、(東京大学出版 会、2006).
- [6] 熊谷寛夫、富永五郎、真空の物理と応用、(裳 華房、1970).
- [7] E.V. コーネルセン、超高真空の物理、(岩波 書店、1977).
- [8] 日本真空協会、超高真空の物理、(日刊工業新 聞社、1977).
- [9] 真空ハンドブック 増訂版、(日本真空技術株 式会社、1982).
- [10] 最新 実用真空技術総覧、(NTS、2019).
- [11] 日本真空協会関西支部、わかりやすい真空技術第3版、(日刊工業新聞社、2010).
- [12] 堀越源一、小林正典、堀洋一郎、坂本雄一、真 空排気とガス放出、(共立出版、1995).
- [13] 日本真空学会、真空科学ハンドブック(コロ ナ社、2018).
- [14] 公益社団法人 日本表面真空学会: https://www.jvss.jp/
- [15] 日本真空学会 教育·資格認定:https://www.vacuum-jp.org/edu
- [16] 末次祐介、真空システムの設計、OHO'94.
- [17] 柴田恭、加速器のための超高真空、OHO'04.
- [18] 高エネルギー加速器セミナー OHO: http://accwww2.kek.jp/oho/index. html
- [19] 谷本育律、先端光源加速器の真空技術、 OHO'15.

- [20] Molflow+, A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN : https://molflow.web.cern.ch/
- [21] 魚田雅彦、磁石と真空 2: J-PARC 主リング の真空系、OHO'15.
- [22] 金澤健一、真空、OHO'09.
- [23] 齊藤芳男、真空システム (I)、OHO'01.
- [24] 金正倫計、真空システム (II)、OHO'01.
- [25] 堀洋一郎、リング真空、OHO'93.
- [26] 齊藤芳男、高周波放電と表面、OHO'90.
- [27] 小林正典、加速器の真空、OHO'87.
- [28] 中村典雄、ビーム寿命、OHO'91.
- [29] 坂中章悟、ストレージリングにおけるイオン トラッピング現象、OHO'86.
- [30] 金澤健一、エミッタンスと真空度、OHO'91.
- [31] 大見和史、ビーム不安定性-電子雲、イオン、 C 放射光、OHO'11.
- [32] 家入孝夫、KEKB のビーム不安定性、 OHO'00.
- [33] 陳栄浩、大強度陽子ビームの不安定性、 OHO'05.
- [34] 菖蒲田義博、ビームの受けるインピーダンス とビーム不安定性の理論、OHO'10.
- [35] 陳栄浩、菖蒲田義博、ウェイク場、インピー ダンスとロスファクター、OHO'11.
- [36] JIS Z8126 真空用語.
- [37] よく使う単位変換と計算: https://ha2.seikyou.ne.jp/ home/Takehito.Senga/geocity/ unitconversion.html
- [38] F. C. Hurlbut, J. Appl. Phys., 28 (1957) 844.
- [39] T. Engel, J. Chem. Phys., 69 (1978) 373.
- [40] ジョン F. オハロン、真空技術マニュアル、 (産業図書、1983).
- [41] 杉本敏樹、武安光太郎、福谷克之、J. Vac. Soc. Jpn., 56 (2013) 322.
- [42] 電気設備の技術基準の解釈第 14 条第 1 項.
- [43] 小宮宗治、J. Vac. Soc. Jpn., 16 (1973) 352.
- [44] S. M. Wetterer et al., J. Phys. Chem. B,

102 (1998) 9266.

- [45] W. Liu *et al.*, Phys. Rev. B, **86** (2012) 245405.
- [46] L. Burkholder *et al.*, Surf. Rev. Lett., **10** (2003) 909.
- [47] M. Neurock and R. A. van Santen, J. Phys. Chem. B, **104** (2000) 11127.
- [48] Vacuum Components 2014, (キャノンアネ ルバ株式会社、2014).
- [49] ミニチュアイオンゲージ IG-10 取扱説明書 Rev.2.11(東京電子株式会社).
- [50] Miho Shimada *et al.*, J. Particle Accelerator Soc. of Jpn, Vol.11, No.2 (2014) 99.
- [51] マススペクトロメトリー関係用語集第3版 (WWW版)、(日本質量分析学会、2009): http://www.mssj.jp/publications/ books/glossary_01.html
- [52] SAES Getters, NEXTorr : https://www.saesgetters.com/ products/nextorr-pumps
- [53] SAES Getters, ZAO :
 https://www.saesgetters.com/
 products-functions/products/
 neg-pumps%26vacuum-solutions/zao
- [54] 土佐正弘、J. Vac. Soc. Jpn., 57 (2014) 295.
- [55] 高木祥示、真空、31 (1988) 644.
- [56] Höganäs AB, GLIDCOP: https://www.hoganas.com/en/ powder-technologies/glidcop/
- [57] Special Materials Corp., Inconel :
 http://www.specialmetals.com/
 divisions/welding-products/
 products/tradenames/inconel.html
- [58] R. J. Elsey, Vacuum, **25** (1975) 347.
- [59] H. Kurishita *et al.*, J. Nucl. Mater., **398** (2010) 87.
- [60] KYOCERA, CHARACTERISTIS OF KY-OCERA FINE CERAMICS
- [61] B. H. Colwell, Vacuum, **20** (1970) 481.
- [62] 赤石憲也 他、真空、37 (1994) 839.

- [63] H. Yoshikawa et al., Proc. 7th IVC, 1 (1977) 367.
- [64] 祐延悟、五明由夫真空、**25** (1982) 331.
- [65] N. Nguyen-Tuong J. Vac. Sci. Technol., A12 (1994) 1719.
- [66] 金持徹編、真空技術ハンドブック、(日刊工業 新聞社、1988).
- [67] D. H. Holkeboer *et al.*, Vacuum Technology and Space Simulation, AIP (1993) 216.
- [68] 大強度陽子加速器施設開発センター・計画グ ループ、高分子材料の耐放射線特性とデータ 集、(日本原子力研究所、2003)
- [69] N. Yoshimura, J. Vac. Sci. Technol., A7 (1989) 110.
- [70] カルレッツカタログ、DuPont® KALREZ® perfluoroelastomer parts
- [71] B. S. Halliday, Vacuum, **37** (1987) 587.
- [72] Walter, H. Kohl, Materials and Techniques for Electron Tubes, (Reinhold Publishing corp. 1961).
- [73] Alexander Roth, Vacuum Technology, (Elsievier Science Publisher B.V., 1990).
- [74] 北野精機 真空部品 板ナット: https://www.kitano-seiki.co.jp/ shinkuukikibuhin/product/accessary. html
- [75] 小原建治郎、真空、30 (1987) 901.
- [76] Y. Suetsugu *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A, **30** (2012) 031602.
- [77] Y. Suetsugu *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A, 34 (2016) 021605.
- [78] オオツカ MO フランジ: http://mo-ohtsuka.co.jp/features_ of_moflange.html
- [79] Yusuke Suetsugu, Mitsuru Shirai and Michio Ohtsuka, J. Vac. Soc. Jpn., 58 (2015) 150.
- [80] Y. Suetsugu, K. Kanazawa and K. Ohshima, Vacuum, 47 (1996) 629.
- [81] Y. Suetsugu, K. Ohshima and K.

Kanazawa, Rev. Sci. Instrum., **67** (1996) 2796.

- [82] Y. Suetsugu *et al.*, Rev. Sci. Instrum., **78** (2007) 043302.
- [83] Yusuke Suetsugu et al., Proc. of PAC2005, (IEEE, Piscataway, NJ, 2005) 3203.
- [84] Yusuke Suetsugu, Kyo Shibata and Mitsuru Shirai, Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2008) 200.
- [85] Takuya Ishibashi, Yusuke Suetsugu and Shinji Terui, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2010) 1191.
- [86] Takuya Ishibashi, Shinji Terui and Yusuke Suetsugu, Proc. of IPAC2017, (JACoW, CERN, Geneva, 2017) 2929.
- [87] Takuya Ishibashi et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 1167.
- [88] Shinji Terui et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 1172.
- [89] Yusuke Suetsugu *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., 59 (2016) 100.
- [90] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **513** (2003) 465.
- [91] I. Zagorodnov *et al.*, EUROTeV-Report-2006-074.
- [92] Ken-ichi Kanazawa, Interaction Region Construction towards Phase 2, The 21th KEKB Accelerator Review Committee (2016).
 - http://www-kekb.kek.jp/MAC/2016/
- [93] Ken-ichi Kanazawa, IR Assembly, The 22th KEKB Accelerator Review Committee (2018).

http://www-kekb.kek.jp/MAC/2018/

[94] Shinya Sugihara, Design Study of Belle II Interaction Region (2011). http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ wordpress/wp-content/uploads/2016/ 06/mth2011_sugihara.pdf

- [95] P. Raimondi, Proc. of PAC2007, (JACoW, CERN, Geneva, 2007) 32.
- [96] Mukund Gupta, CERN Report No. PH-EP-Tech-Note-2010-013, 2010.
- [97] Takuya Natsui et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2017) 292.
- [98] Mitsuhiro Yoshida et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 200.
- [99] M. Kikuchi, Nucl. Instrum. Methods A, 556 (2006) 13.
- [100] G. Dugan and D. Sagan, Phys. Rev. Accel. Beams, **20** (2017) 020708.
- [101] T. Abe *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **19** (2016) 102001.
- [102] T. Abe et al., Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2014) 605.
- [103] CST Studio Suite 電磁場解析シミュレー ション: https://www.aetjapan.com/software/

CST_Overview.php

- [104] Kyo Shibata et al., Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2016) 680.
- [105] Kyo Shibata *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A, **37** (2019) 041601.
- [106] ABCI (Azimuthal Beam Cavity Interaction):

http://abci.kek.jp/abci.htm

[107] The GdfidL Electromagnetic Field Simulator :

http://www.gdfidl.de

- [108] K. Ohmi and D. Zhou, Proc. of IPAC2014, (JACoW, CERN, Geneva, 2014) 1597.
- [109] Y. Susaki and K. Ohmi, Proc. of IPAC2010,

(JACoW, CERN, Geneva, 2010) 1545.

- [110] K. Kanazawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., (2013) 03A005.
- [111] G. Rumolo *et al.*, *Proc. of PAC2001*, (IEEE, New York, 2001) 1889.
- [112] K. Oide, Proc. of the Chamonix XI, CERN Re-port No. CERN-SL-2001-003, 2001.
- [113] K. Oide *et al.*, CERN Report No. CERN-SL- Note-2000-061 AP, 2000.
- [114] J. R. Calvey *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **770** (2015) 141.
- [115] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **538** (2005) 206.
- [116] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. MethodsA, **556** (2006) 399.
- [117] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **578** (2007) 470.
- [118] K. Shibata *et al.*, *Proc. of EPAC2008*, (EPS-AG, Genoa, Italy, 2008) 1700.
- [119] Y. Suetsugu et al., Proc. of IPAC2010, (ICR, Kyoto, 2010) 2369.
- [120] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **604** (2009) 449.
- [121] Y. Suetsugu *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **598** (2009) 372.
- [122] Y. Suetsugu et al., Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2017) 689.
- [123] Y. Suetsugu et al., Proc. of IPAC2010, (ICR, Kyoto, 2010) 2021.
- [124] Yusuke Suetsugu et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 659.
- [125] Y. Suetsugu *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **22** (2019) 023201.
- [126] M. L. Yao et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 649.
- [127] H. Fukuma, Proc. of PAC2005, (IEEE, Piscataway, NJ, 2005) 868.

- [128] H. Fukuma *et al.*, AIP Conference Proc. No. 642, (AIP, Geneva, 2002) 357.
- [129] G. Rumolo *et al.*, *Proc. of IPAC2017*, (JA-CoW, CERN, Geneva, 2017) 30.
- [130] G. Bregliozzi *et al.*, *Proc. of IPAC2011*, (JACoW, CERN, Geneva, 2011) 1560.
- [131] G. Bregliozzi et al., Proc. of EPAC2000, (EPSAG, Vienna, Austria, 2008) 217.
- [132] G. Bregliozzi *et al.*, Appl. Surf. Sci., **172** (2001) 95.
- [133] J. M. Jimenez et al., Proc. of the LHC Performance Workshop - Chamonix XII, CERN Report No. CERN-AB-2003-008 ADM, 2003, 327.
- [134] V. V. Anashin *et al.*, CERN Report No. LHC Project Report 313, 1999.
- [135] M. Van Gompel *et al.*, *Proc. of IPAC2017*, (JACoW, CERN, Geneva, 2017) 44.
- [136] S. Calatroni *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **20** (2017) 113201.
- [137] C. Yin Vallgren *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **14** (2011) 071001.
- [138] M. A. Palmer *et al.*, *Proc. of IPAC2010*, (JACoW, CERN, Geneva, 2010) 1251.
- [139] M. A. Palmer et al., Proc. of PAC2009, (JACoW, CERN, Geneva, 2009) 4200.
- [140] J. R. Calvey et al., Proc. of IPAC2011, (JA-CoW, CERN, Geneva, 2011) 796.
- [141] J. R. Calvey *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **770** (2015) 141.
- [142] A. Kulikov *et al.*, SLAC Report No. SLAC-PUB-9428, 2002.
- [143] R. E. Kirby and F. K. King, Nucl. Instrum. Methods A, 469 (2001) 1.
- [144] F. Le Pimpec *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, **551** (2005) 187.
- [145] K. Kennedy et al., Proc. of PAC1997, (IEEE, New York, 1997) 3568.
- [146] D. Alesini *et al.*, *Proc. of IPAC2012*, (IEEE, Piscataway, NJ, 2012) 1107.

- [147] D. Alesini *et al.*, *Proc. of IPAC2010*, (JA-CoW, CERN, Geneva, 2010) 1515.
- [148] P. He et al., Proc. of PAC2001, (IEEE, New York, 2001) 2159.
- [149] R. Todd et al., Proc. of PAC2005, (IEEE, Piscataway, NJ, 2005) 3088.
- [150] A. A. Krasnov, Vacuum, **73** (2004) 195.
- [151] K. Kanazawa *et al.*, *Proc. of PAC2005*, (JACoW, CERN, Geneva, 2005) 1054.
- [152] 小川雄二郎 他、KEKB ライナックにおける 陽電子倍増のための大強度 2 バンチ加速、第 26 回リニアック技術研究会 (2001).
 http://conference.kek.jp/LAM26/ LAM26PDF/1B-2web.PDF
- [153] Kazunori Akai, Haruyo Koiso, J. Particle Accelerator Soc. of Jpn, Vol.7, No.3 (2010) 213.
- [154] Kyo Shibata *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., **52** (2009) 99.
- [155] Kyo Shibata et al., Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2007) 209.
- [156] Kyo Shibata et al., Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2013) 1168.
- [157] Yusuke Suetsugu and Hitoshi Fukuma, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2017) 905.
- [158] L. F. Wang *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, 5 (2002) 124402.
- [159] A. W. Chao, Physics of Collective Beam Instabilities in High Energy Accelerators, (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993).
- [160] V. K. Neil and A. M. Sessler, Rev. Sci. Instrum., 36 (1965) 429.
- [161] K. Akai, RF Overview, The 15th KEKB Accelerator Review Committee (2010). http://www-kekb.kek.jp/MAC/2010/
- [162] K. Shibata, Estimation of Impedances &

Loss factors of SuperKEKB LER, The 15th KEKB Accelerator Review Committee (2010).

http://www-kekb.kek.jp/MAC/2010/

- [163] Kyo Shibata et al., Proc. of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2010) 442.
- [164] Handbook of Accelerator Physics and Engineering 3rd Printing, (World Scientific, 2009).
- [165] Takuya Ishibashi *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., 58 (2015) 127.
- [166] EPICS home page: http://www.aps.anl.gov/epics/
- [167] 横河電機 Linux CPU module F3RP61: https://www.yokogawa. co.jp/solutions/ products-platforms/control-system/ real-time-os-controller/rtos-cpu/ rtos-linux-cpu/
- [168] NI CompactRIO :
 http://www.ni.com/ja-jp/shop/
 compactrio.html
- [169] NI real-time controller cRIO-9025 :
 http://www.ni.com/ja-jp/support/
 model.crio-9025.html
- [170] NI-9144 EtherCAT slave chassis :
 http://www.ni.com/ja-jp/support/
 model.ni-9144.html
- [171] NI real-time controller cRIO-9073 :
 http://www.ni.com/ja-jp/support/
 model.crio-9073.html
- [172] NI-9205 C-series voltage input module :
 http://www.ni.com/ja-jp/support/
 model.ni-9205.html
- [173] 横河電機 FA-LINK module F3LP12-0N: http://www.yokogawa.co.jp/itc/ Products/network/itc-prdnw4-ja.htm
- [174] A. Uchiyama et al., Proc. of PCaPAC08, (2008) 145.

- [175] J. Odagiri *et al.*, Proc. of ICALEPCS2009, (2009) 916.
- [176] 横河電機 FA-M3 プログラム開発ツール WideField3: https://www.yokogawa. co.jp/solutions/ products-platforms/control-system/ programmable-logic-controller/ plc-software/plc-programming-tool/
- [177] 横河電機 sequence CPU module F3SP71: http://www.yokogawa.co.jp/itc/ Products/CPU/itc-prdcpu10-ja.htm
- [178] Hiromi Hisamatsu *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., 35 (1992) 579.
- [179] 横河電機 64ch digital input/output module F3WD64: https://www.yokogawa.co.jp/itc/ Products/DI0/itc-prddio8-ja.htm
- [180] Agilent Technologies 4UHV Ion Pump Controller: https://www.agilent.com/cs/library/ usermanuals/public/4UHV_Controller_ User_Manual.pdf
- [181] MOXA NPort5150 :
 http://www.moxa.com/product/NPort_
 5150.htm
- [182] MOXA NPort5610 :
 http://www.moxa.com/product/nport_
 5600.htm
- [183] NI-9269 C-series voltage output module :
 http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/
 lang/ja/nid/207638
- [184] 横河電機 data acquisition unit DA100: http://www.yokogawa.co.jp/ns/daq/ acquisition/da100/ns-da100-01-ja. htm
- [185] 横河電機 data acquisition unit MW100: http://www.yokogawa.co.jp/ns/daq/ acquisition/mw100/ns-mw100-01-ja. htm

- [186] EPICS StreamDevice :
 http://epics.web.psi.ch/software/
 streamdevice/
- [187] N. Yoshifuji et al., Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Chiba, 2016) 1137.
- [188] 東京電子 ウォーターフローディテクタ WFD-320: http://www.toel.co.jp/products/ specialspec/wfd320
- [189] 横河電機 位置決めモジュール F3NC01 取扱 説明書: https://partner.yokogawa.com/japan/ itc/download/GS/GS34M06H51-99.pdf
 [190] 横河電機 デジタル出力モジュール F3YC16:
- [191] 横河電機 デジタル入力モジュール F3XD16: https://www.yokogawa. co.jp/solutions/ products-platforms/control-system/ real-time-os-controller/rtos-io/ rtos-input/
- [192] Keysight Technologies データ収集/データ ロガー・スイッチ・ユニット 34970A: https://www.keysight. com/ja/pd-1000001313% 3Aepsg%3Apro-pn-34970A/ data-acquisition-data-logger\ -switch-unit?cc=JP&lc=jpn
- [193] 横河電機 GPIB 通信モジュール F3GB01: https://www.yokogawa. co.jp/solutions/ products-platforms/control-system/ programmable-logic-controller/ plc-communications/plc-gpib/
- [194] 横河電機 位置決めモジュール

(MECHATROLINK-III 通信対応)
F3NC97:
https://www.yokogawa.
co.jp/solutions/
products-platforms/control-system/
programmable-logic-controller/
plc-counter-positioning/
plc-posit-mechatrolink3/

- [195] MECHATROLINK 協会 MECHATROLINK-III: https://www.mechatrolink.org/jp/ mechatrolink/feature-m3.html
 [196] オリエンタルモーター ネットワークコンバー
- [197] オリエンタルモーター モータードライバー CRD514-KD: https://www.orientalmotor.co.jp/ products/detail.action?hinmei= CRD514-KD
- [198] Keysight Technologies LXI データ収集/ データロガー・スイッチ・ユニット 34972A: https://www.keysight.com/ ja/pd-1756491-pn-34972A/ lxi-data-acquisition-data-logger\ -switch-unit?cc=JP&lc=jpn
- [199] measurement SPECIALITIES 社 LVDT HCAシリーズ: http://www.sensores-de-medida.es/ uploads/hca_ra.pdf
- [200] measurement SPECIALITIES 社 Analog LVDT/RVDT Signal Conditioner: https://www.te.com/commerce/ DocumentDelivery/DDEController? Action=showdoc%DocId=Data+ Sheet%7FATA-2001%7FA2%7Fpdf% 7FEnglish%7FENG_DS_ATA-2001_A2. pdf%7FCAT-PSI0001

- [201] オリエンタルモーター 5 相ステッピン グモーター・ハーモニックギアタイプ CRK564BKD-H50: https://www.orientalmotor.co.jp/ products/detail.action?hinmei= CRK564BKD-H50&seriesCd=HQ00
- [202] モレスコ 耐放射線性潤滑剤・グリス: http://www.moresco.co.jp/products/ radioresistance
- [203] オムロン 汎用封入スイッチ XE-Q22-2: https://www.fa.omron.co.jp/product/ item/11655/
- [204] SMC パイロット形 2 ポートソレノイドバル ブ VXC シリーズ: http://www.smcworld.com/ newproducts/ja/pdf/vxd.pdf
- [205] SMC チェックバルブ INA シリーズ: http://www.smcworld.com/ newproducts/ja/pdf/ina.pdf
- [206] Control System Studio : http://controlsystemstudio.org/
- [207] NI-9485 C-series relay output module :
 https://www.ni.com/ja-jp/support/
 model.ni-9485.html
- [208] Gamma Vacuum quad pump controller QPC: https://www.gammavacuum.com/index. php/product?id=65
- [209] Y. Suetsugu *et al.*, Appl. Surf. Sci., **432** (2018) 347.
- [210] Y. Suetsugu *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn., **60** (2017) 129.
- [211] Y. Suetsugu et al., Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2016) 1197.
- [212] Y. Funakoshi, Proc. of IPAC2016, (JA-CoW, CERN, Geneva, 2016) 1019.
- [213] Yusuke Suetsugu et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (PASJ, Tokyo, 2018) 93.

- [214] Yusuke Suetsugu *et al.*, J. Vac. Soc. Technol., **37** (2019) 021602.
- [215] Y. Ohnishi, Proc. of IPAC2018, (JACoW, CERN, Geneva, 2018) 1.
- [216] Hiroshi Sugimoto, J. Particle Accelerator Soc. of Jpn, Vol.15, No.4 (2018) 239.
- [217] 菊水電子工業 薄型可変スイッチング電源: https://www.kikusui.co.jp/catalog/ ?model=pag&p=1
- [218] C. L. Foerster *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A, **19** (2001) 1652.
- [219] T. Kobari and H. J. Halama, J. Vac. Sci. Technol. A, 5 (1987) 2355.
- [220] O. Gröbner, Vacuum, **33** (1983) 397.
- [221] Giovanni Bassi, RADIATION MONI-TOR WITH DIAMOND SENSORS FOR THE BELLE II EXPERIMENT AT SU-PERKEKB, (2018).
- [222] 宮林謙吉、高エネルギーニュース, Vol.33, No.2 (2014) 108.
- [223] EGS web page: http://rcwww.kek.jp/research/egs/
- [224] P. Belanger *et al.*, CERN Re-port No. CERN-ACC-2018-0009, 2017.
- [225] T. Hirai *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A, 458 (2001) 670.
- [226] S. Kamada, Proc. of the Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Photon Factory Project, (1979) 1.