

超伝導空洞用大電力入力カプラに関する研究

来 島 裕 子

博 士 (理 学)

総 合 研 究 大 学 院 大 学
数 物 科 学 研 究 科
加 速 器 科 学 専 攻

平成 13 年度

(2001)

目 次

序章	本研究の目的と概要	-----	1
第1章	超伝導空洞及びカプラの動向と KEK B-Facory	-----	4
1. 1	超伝導空洞及びカプラの動向		4
1. 1. 1	超伝導空洞の動向		4
1. 1. 2	カプラの現状		10
1. 2	KEK B-Facory		16
1. 2. 1	KEKB とその加速器		16
1. 2. 2	RF システム		19
1. 2. 3	KEKB 超伝導空洞の構造		21
第2章	大電力入力カプラの開発と試験	-----	23
2. 1	開発の目標		23
2. 2	カプラの結合係数		25
2. 2. 1	結合係数設計の考え方		25
2. 2. 2	KEKB 用加速空洞の結合係数		27
2. 3	カプラの形状		30
2. 3. 1	カプラの基本構造とその特徴		30
2. 3. 2	カプラの構造とパラメータ		31
2. 3. 3	カプラのセラミック窓の位置		41
2. 4	結合係数とカプラの設定		43
2. 4. 1	結合係数とアンテナ突き出し量、中心からの位置ずれ精度の関係		43
2. 4. 2	冷却による縮み		44
2. 4. 3	横測定での入力カプラの外部Q値の測定		48
2. 5	カプラスタンドでの大電力試験		50
2. 5. 1	カプラスタンドのシステム構成		50
2. 5. 2	最大入力電力の確認		50
2. 6	カプラ周りのモニタ		54
2. 7	発熱の検討		57
2. 8	表面処理方法とガスの影響		61
2. 8. 1	オゾン水洗浄		61
2. 8. 2	パージ方法		66

2. 9	コンディショニング方法の検討	68
2. 9. 1	バイアス電圧印加によるコンディショニングの採用	68
2. 9. 2	コンディショニングの手順	69
第3章	マルチパクタリングの計算とレベルの確認	----- 72
3. 1	マルチパクタリングに起因する現象	72
3. 2	マルチパクタリングの理論と解析解	73
3. 2. 1	マルチパクタリング発生の機構	73
3. 2. 2	解析解	73
3. 2. 3	同軸ラインの定在波のスケーリング則	74
3. 3	同軸のマルチパクタリングシミュレーション解析の手法	77
3. 4	同軸部のマルチパクタリングの計算	80
3. 4. 1	透過波でマルチパクタリングの発生する電力レベル	80
3. 4. 2	全反射及び部分反射でマルチパクタリングの発生する電力レベル	89
3. 5	窓部のマルチパクタリングの計算	95
3. 5. 1	窓部の電界分布	95
3. 5. 2	窓部でマルチパクタリングの発生する電力レベル	98
3. 6	バイアス電圧の利用	101
3. 6. 1	バイアス電圧によるマルチパクタリングの抑制	101
3. 6. 2	バイアス電圧を印加したコンディショニングの効果	104
3. 6. 3	マルチパクタリングの計算まとめ	111
第4章	カプラ内表面の二次電子放出係数	----- 112
4. 1	カプラの電子放出、放電現象と二次電子放出係数	112
4. 2	二次電子放出の機構	113
4. 3	測定装置と測定方法	115
4. 4	KEKB のカプラ材料	117
4. 5	セラミック窓	118
4. 5. 1	製作工程とサンプル	118
4. 5. 2	測定結果	121
4. 6	金属表面	127
4. 6. 1	同軸金属表面での現象	127
4. 6. 2	材料とサンプル	127
4. 6. 3	測定結果	128
4. 6. 4	まとめ	129

第5章	カプラの検証試験	-----	134
5. 1	検証試験とカプラテストスタンドの製作, 整備		134
5. 2	カプラからの放出ガス		139
5. 3	初期コンディショニング		143
5. 3. 1	ベーキングの効果		143
5. 3. 2	全反射と透過波のコンディショニング効果の比較		143
5. 4	マルチパクタリングの発生する電力レベルの検証		149
5. 4. 1	同軸のマルチパクタリング		149
5. 4. 2	窓部の放電発生の電力レベル		149
5. 4. 3	窓部の放電とマルチパクタリング		153
第6章	KEKB 超伝導空洞用カプラのコンディショニング及び運転状況	-----	157
6. 1	KEKB の運転経緯		157
6. 2	実機のカプラコンディショニングの現状		160
6. 3	バイアス電圧を用いたコンディショニングの効果		168
6. 3. 1	バイアス電圧を用いたコンディショニングの状況		168
6. 3. 2	バイアスマッピングの意味		176
6. 4	ビーム運転の状況		179
6. 4. 1	ビーム運転中のマルチパクタリングの発生状況		179
6. 4. 2	超伝導空洞への影響		183
第7章	まとめと今後の課題	-----	184
7. 1	まとめ		184
7. 2	今後の課題と提案		186
謝辞		-----	187
参考文献		-----	188
Appendix			
1.	電力収支とロビンソン不安定性		194
2.	アークセンサーの応答		200
3.	ピロリン酸銅鍍金面の RRR の測定		205

序章 研究の目的と概要

大電流ビームを加速する超伝導空洞へ安定に大電力を入力するためのカプラに関する研究を行った。この研究では、大電力入力カプラを開発し、カプラの性能を制限するマルチパクタリングや放電の要因を解明するとともに、カプラを安定に運転するための表面処理方法、コンディショニングについてその手法を確立することを目標とした。

大電流ビームを加速する超伝導空洞は、KEK B-factory（以下、KEKBと略す）において必要となる。KEKBは、B中間子を大量に発生させるための2リング衝突型加速器であり、8 GeVの電子を蓄積する電子リング（HER）と3.5 GeVの陽電子を蓄積する陽電子リング（LER）からなる。KEKBの目標ルミノシティである $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成するためには、電子リングには1.1 A、陽電子リングには2.6 Aという大電流を蓄積する必要がある。電子リングには超伝導空洞が用いられており、1.1 Aという大電流を蓄積するためには空洞1台あたり300 kWという電力をカプラを通して供給する必要がある。しかしKEKB以前には、超伝導空洞のカプラで200 kW以上のCW電力を供給してビームを加速した例は無く、大電力用の入力カプラの開発が必要であった。

また、B中間子の衝突イベントの総数を上げるためには、ビームトリップの少ない安定な運転が要求され、超伝導空洞においてマルチパクタリングや放電は大きな問題となる。マルチパクタリングが発生すると、空洞がトリップするだけでなく、セラミック窓の破損を引き起こす危険性がありマルチパクタリングのメカニズムの解明が必要であった。超伝導空洞を4 Kに冷却すると空洞がクライオポンプの役割を果たし、カプラからのアウトガスも空洞Nb表面に吸着し、空洞性能が劣化する可能性がある。また、ウォームアップでは、空洞Nb表面の吸着ガスが放出されカプラおよび空洞内は 10^{-2} Pa台の圧力になり、カプラ内の表面が汚染される。このため、再び空洞を冷却する前にはカプラのコンディショニングが必要となる。何故コンディショニングが必要かを理解し、コンディショニングの最適な手法を確立することが重要であった。

この研究では、まず大電力用カプラを開発し、無反射で800 kW以上入力でき、さらに300 kWでビーム運転が可能であることを確認した。次に、実際のKEKBでのビーム運転を分析し、またカプラ単体の大電力試験で検証を行い、カプラ内でのマルチパクタリングの電力レベル及びその現象を調べた。超伝導空洞用のカプラはビーム電流により全反射から無反射まで反射率が広

い範囲で変化し、ビーム運転の条件範囲にマルチパクタリングの電力レベルがあることがわかった。このことから、カプラのコンディショニングが重要であると判断し、カプラの外導体と内導体の間にバイアス電圧をかけ、バイアス電圧を有効に活用したコンディショニング方法を開発した。さらに、このコンディショニングの効果を調べるため、表面の二次電子放出係数を測定し表面洗浄と電子照射によるクリーニングについて評価した。また、カプラの形状に起因するマルチパクタリングについて、シミュレーションによりバイアス電圧をかける効果について解析した。さらに、コンディショニング後にバイアス電圧の設定を変えて、圧力上昇と電子発生の電力レベルを調べるバイアスマッピングのデータにより、カプラのコンディショニングの効果や状況を診断できる可能性を示した。

現在、KEKB 超伝導空洞は安定にビームを加速し、ビーム電流 780 mA で約 300 kW、ビーム調整では最大入力電力は 380 kW に達した。これは超伝導空洞用のカプラとしては世界でも最高の水準になる。このような方式で製作され、十分にコンディショニングされたカプラは安定に運転できることが実証された。今後、更なる大電流化と安定な運転のためにはマルチパクタリングを回避する形状にすることが望まれる。

各章の概要を以下に示す。

第 1 章では、KEKB 加速器及び超伝導空洞の概要を示し、超伝導空洞に用いられるカプラの現状についてまとめた。

第 2 章では、KEKB に用いられる大電力用カプラの開発状況をまとめた。カプラのテストスタンドを整備してカプラの大電力試験を行い、カプラ単体の試験では最大 870 kW の入力電力が導入可能であることを確認した。

第 3 章では、カプラの形状に起因するマルチパクタリング現象を同軸構造部と窓部について解析した。KEKB の同軸構造では 300 kW 以下でマルチパクタリングの発生する電力レベルがある事がわかった。このマルチパクタリングを抑えるためにはコンディショニングにより二次電子放出係数を下げることが重要となる。計算により、全反射状態でバイアス電圧を変化させることにより同軸部の広い範囲でマルチパクタリングが誘起されバイアス電圧を用いたコンディショニングが効果的であることを示した。またセラミック窓部でも低い電力領域でマルチパクタリングが発生する可能性があることを述べた。

第 4 章では、カプラのセラミック窓及び金属表面の二次電子放出係数の測

定結果を示す。セラミック窓に対しては TiN コーティングが二次電子放出係数を下げるのに有効であることを確認し、またその後のロウ付け工程での表面の汚れを除去するためにはオゾン水洗浄が効果的であることを述べる。金属表面に対しては、電子を照射すると二次電子放出係数が小さくなることを確認した。

第 5 章ではカプラのテストスタンドで、マルチパクタリングの検証試験をおこなった結果を述べる。カプラ外導体同軸部に電子測定用のモニターポートを設け、マルチパクタリング発生個所を調べた。その結果、同軸部で圧力上昇及び電子が発生する電力レベルは、3 章に示すマルチパクタリングの発生する電力レベルとほぼ一致することを確認した。また、窓付近での放電ではエネルギー吸収があり、窓破損に繋がる可能性があることを述べる。

第 6 章では、KEKB 加速器トンネル内に据え付けられた超伝導空洞用カプラのコンディショニング及び運転状況をまとめ、今後の改造点を探る。ビーム運転中にもマルチパクタリングが発生し、その電力レベルは計算結果と概ね一致する結果となった。しかし、バイアス電圧を印加したコンディショニングを十分に行えば、その効果は記憶され、安定にビーム加速できることを確認し、バイアス電圧を用いたコンディショニングが有効であることを述べた。さらに、バイアスマッピングによりコンディショニング効果とカプラの状況を診断できる可能性を示した。

第 7 章では全体のまとめを述べ、今後の更なる大電力化、安定な長期運転を望む場合の課題を提起し、マルチパクタリングを回避する形状にすることが望まれることを述べる。

第 1 章 超伝導空洞及びカプラの動向と KEK B-Factory

1. 1 超伝導空洞及びカプラの動向

1. 1. 1 超伝導空洞の動向

超伝導空洞は、高電界を発生できるので単位長さあたりの加速電圧が高く、また壁損失が非常に小さいため CW (continuous wave) 運転も可能である。このため、高エネルギー物理では新粒子発見を目的に 1977 年頃から超伝導空洞を用いて加速器の高エネルギー化が進められてきた。KEK TRISTAN では、世界最初の大規模な超伝導加速システムが実用化され、その後 CERN の LEP、DESY の HERA、CEBAF (現在 Thomas Jefferson-lab.) でも実用化が続いた。これらの大型加速器では、エネルギー増強のため徐々に超伝導空洞の数が増やされ、数十台から数百台規模で加速電界 5MV/m 付近でのビーム加速が実現されている。加速効率を上げるために、図 1.1.1 に示すような多連の超伝導空洞を使用している。ビーム電流は大きくても 20 mA 程度であり、多連空洞でも必要電力は 200 kW 以下であった[1][2][3]。

近年、超伝導空洞は、より高電界を実現し加速効率の向上を目指す動きと、大電流を安定に加速できる“single mode cavity[4]”(単一セル単一モード型空洞)の開発の 2 つの大きな流れがある。

より高電界の超伝導加速空洞の建設計画としては、高エネルギー実験のための DESY の TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Collider) 計画、中性子利用のための米国 SNS (Spallation Neutron Source) の陽子リニアック、日本原子力研究所に建設予定の JHF (Japan Hadron Facility) の実験用陽子リニアックなどが進められている。陽子加速には低 β の超伝導空洞で表面電界 40 MV/m 以上の高電界を目標に、多連の超伝導空洞が開発されている。TESLA 計画及び SNS の超伝導空洞モジュールの構造を図 1.1.2 に示す。

一方、LHC (Large Hadron Collider)、KEK B-Factory (以後、KEKB と記す) や Cornell 大の CESR-Phase III (以後 CESR III) ではアンペア級のビーム電流を加速する。大電流のビーム加速では高周波 (RF) 電力は大きくなるとともに、ビームが誘起する高次モード (HOM) がビームを不安定にする可能性があり高次モードを減衰することが重要となる。このため超伝導空洞は、高次モードを減衰する単一セル単一モード型空洞“single mode cavity”とし、その先がけとして、Cornell CESR III[5]と KEBK の超伝導空洞が開発された。現在大電流でビーム運転が行われ、カプラには 300 kW 以上の大電力が入力されている。Cornell CESR III と KEBK の超伝導空洞のモジュール構造を図 1.1.3(a)(b)に、また計画中の LHC の構

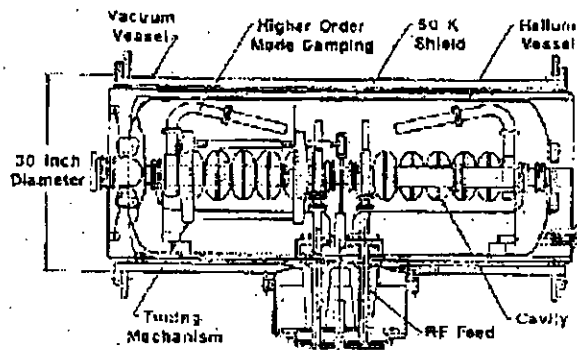
造を図 1.1.3(c) に示す。Cornell の超伝導空洞は、大口径の 高次モード取り出し部の形状が fluted pipe といわれる 4 回対称の溝がある構造であり、カプラは導波管タイプであることが KEKB と大きく異なる。単一セル単一モード型超伝導空洞は、Canada や英国 Diamond 計画、中国の IHEP、上海放射光など大電流の SR 装置への応用が検討されている。

表 1.1.1 に加速器および超伝導空洞、カプラの特徴を示す。

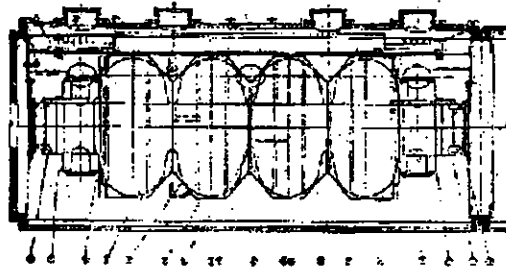
現在では、500 MHz 帯で 10 MV/m の加速電界での運転も現実的なものとなり、さらに安定な運転を実現するための手法も研究され、超伝導空洞の適用分野が広がってきている。

表 1.1.1 カプラの運転開発状況

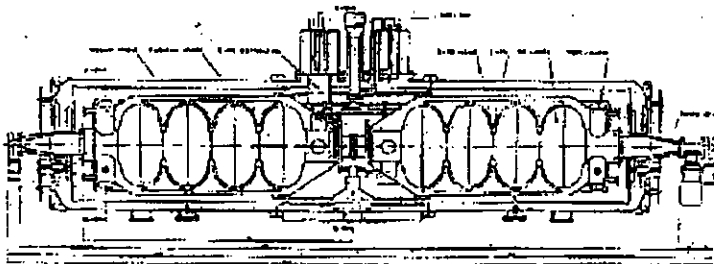
	Operated machines				High current machines			High gradient machines in future plan		
Laboratory	KEK	CERN	DESY	CEBAF	KEK	Cornell	CERN	DESY	TJ-lab.	JAERI
Accelerators	TRISTAN	LEP2	HERA		B-factory	CESR III	LHC	TESLA	SNS	JHF
Particles	e ⁺ , e ⁻	e ⁺ , e ⁻	e ⁻ , p	e ⁻ recycle linac	e ⁺ , e ⁻	e ⁺ , e ⁻	p, p	e ⁻ linacs	p linacs	p linacs
Energy	32-32GeV	94.5-94.5GeV	30-800GeV	4GeV	3.5-8GeV	6-6GeV	7-7 TeV	1600MeV	4GeV	600MeV
No. of cavity	32unit	240unit		338unit	8unit	4unit	2*4unit		β0.61:35 + β0.8:50unit	
Frequency	508MHz	352MHz	500MHz	1.5GHz	508MHz	500MHz	400.8MHz	1.3GHz	805MHz	927MHz
No. of cell	5cell	4cell	4cell	5cell	1cell	1cell	1cell	9cell	6cell	9cell
RF voltage	5MV/m	6MV/m	5MV/m		1.5MV	2.0-2.5MV		>15MV/m	10.2MV/m, 12.5MV/m	
Input power	70kW	120kW	65kW	5kWpulse	280kW	294 kW	176kW	200kWpulse	110kW	
Coupler										
Feeder	50 Ω-coaxial	75 Ω-coaxial	Coaxial	wave-guide	50 Ω-coaxial	wave-guide	Coaxial	Coaxial	50 Ω-coaxial	50 Ω-coaxial
Window	Disk	Cylinder	Cylinder		Disk		Cylinder	2windows	disk	disk
	Choke				Choke			Cylinder/taper	Choke	Choke
	Warm	Warm		Warm	Warm	Warm	Warm	Cold & warm	Warm	Warm
Coupling	Fixed	Adjustable/Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Adjustable	Fixed	Fixed



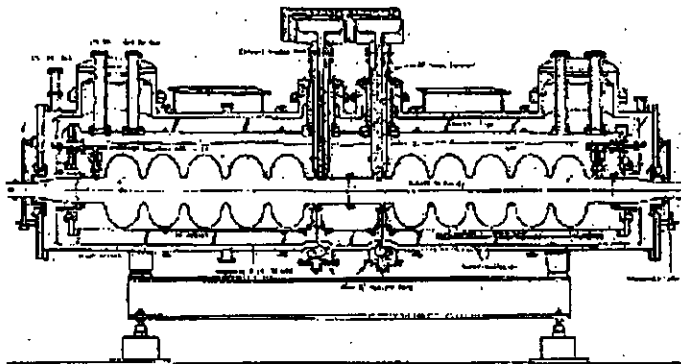
CEBAF



CERN



DESY



KEK

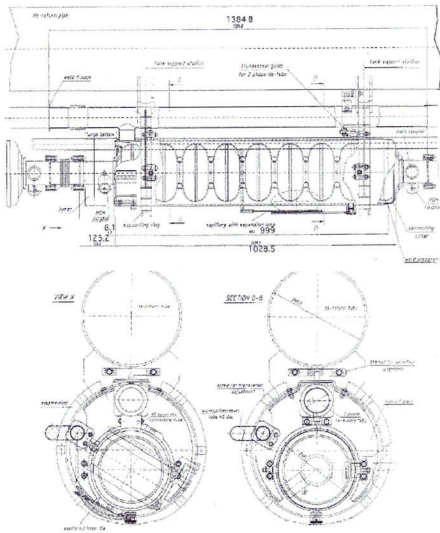
Table 9 RF s.c.-based electron accelerators or accelerators with s.c. cavities permanently installed

Laboratory	Year	Freq. [GHz]	Total installed voltage [MV] ^(a)	Total obtained voltage [MV]	Max. gradient obtained [MV/m]
HEPL	1977	1.3		50	2.2 ^(b)
U Illinois (MUSL-2)	1977	1.3		13	2.3 ^(b)
CERN (SPS)	1988-1991	0.35	8.5	12	7.1
U Darmstadt (SDALINAC)	1989-1991	3.0	50	~43	6.7
KEK (TRISTAN)	1989-1991	0.5	240	220	8.6
CERN (LEP)	1990-1991	0.35	68	54	5.0
DESY (HERA)	1991	0.5	48	32	5.0
CEBAF	1991	1.5	25	28	8.0

(a) Design gradient 5 MV/m.
 (b) Structure design not multipactor free.

図 1.1.1 多連の超伝導空洞モジュールの構造 (operated machines) [2]

TESLA



SNS

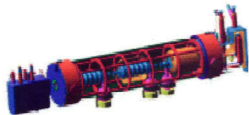
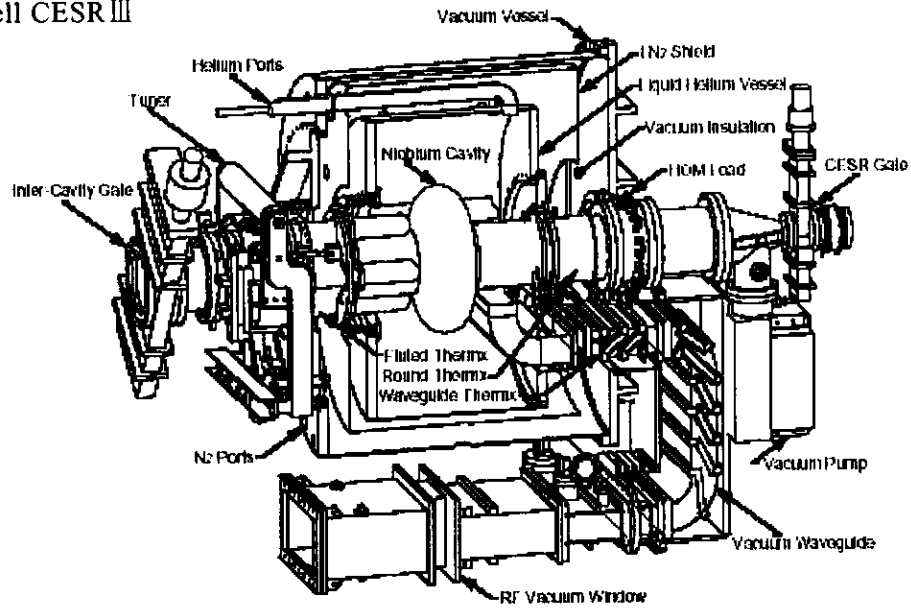
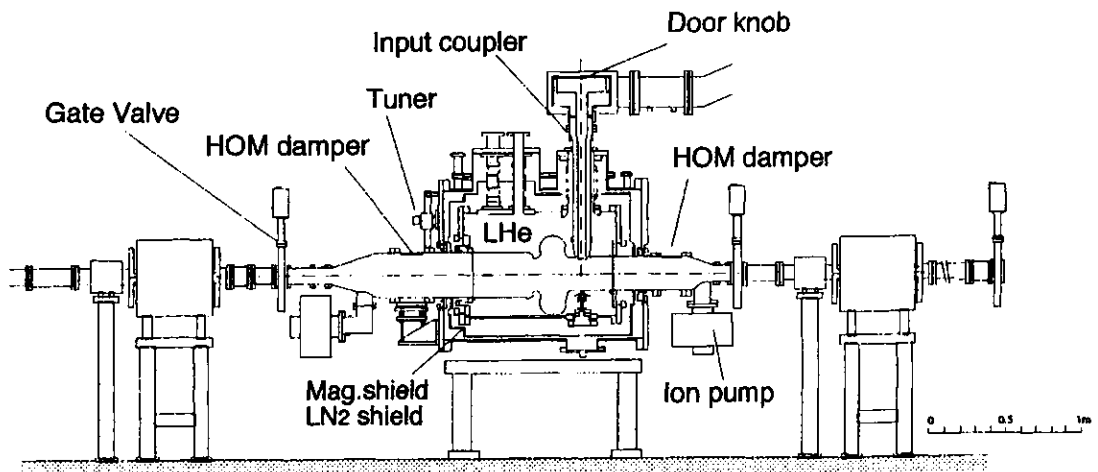


図 1.1.2 計画中の超伝導空洞モジュールの構造 (High gradient machines)

(a) Cornell CESR III



(b) KEKB



(c) LHC

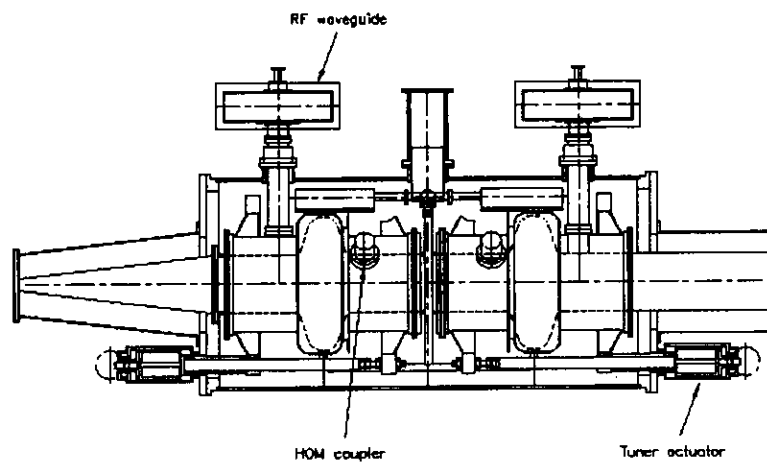


図 1.1.3 高次モード減衰型超伝導空洞モジュールの構造 (High current machines)

1. 1. 2 カプラの現状

大電流を加速する超伝導空洞において、カプラは重要なコンポーネントの一つである。表 1.1.1 に示したように KEKB 建設開始当初、TRISTAN[6]、LEP[7][8]、HERA[9][10]、CEBAF[11][12] で超伝導空洞のビーム運転の実績はあったが、カプラからの入力電力はいずれも 200 kW 以下であった。その後、KEKB を始め CESRⅢ、LHC[13]では 300 kW 以上の安定な CW の入力電力の供給が要求されている[14]-[16]。また将来、TESLA[17][18]、SNS、JHF では 200 kW 以上のパルスピーク電力が必要になる。

これまで開発されたカプラについて、各部の形状、機能の観点から分類すると次のような特徴をもつ。

(1) カプラ伝送部形状

導波管と同軸管がある。周波数により使い分けられることが多く、一般に高い周波数 (S-Band より高い周波数) で導波管が使用されている。500 MHz 帯でも Cornell の CESRⅢ 用超伝導空洞のカプラで導波管タイプが採用されている。導波管タイプでは窓部を pillbox 構造にしたり、マッチングポストを挿入してインピーダンス整合を取っている。また、空洞との結合は調整が難しく、低い周波数では導波管及び取り付け部の構造が大きくなる。Cornell 導波管タイプのカプラは、窓部のコンディショニングに時間を要し、当初はビーム運転を行うことでカプラのコンディショニングを実施していた。

同軸のカプラでは、クライストロンからの伝送に導波管が使用されるため、カプラ上流で同軸-導波管変換を行う必要がある。同軸のインピーダンスは KEK では 50 Ω を採用し、CERN では 75 Ω を採用している。

(2) 窓部構造、セラミック窓の形状

窓は空洞を真空に保つために使用される。したがって大気圧に対して強度が十分に余裕があること、また少ない高周波損失で電磁波が通過できることが重要になる。窓材料には通常、アルミナやサファイヤなどが使用され、誘電率 ϵ が大きいことから窓近傍の構造を工夫して窓部でのインピーダンス整合をとっている。また、窓で電場の集中がなく、放電を回避できる構造にすることが望ましい。

導波管では、S-Band より高い周波数では円形ディスク形状の窓を pillbox 空洞内に挟み込み、整合をとった pillbox window といわれる形状になっている。CESRⅢの 500 MHz 用カプラでは、窓の枚数、大きさをパラメータに最適化し、マッチングポストを挿入してインピーダンス整合を取っている。

同軸カプラでは、窓はシリンダー、ディスクまたはテーパ形状が採用されている。ディスク形状の窓は、KEK TRISTAN 500 MHz 帯クライストロンの出力窓に使用され、透過波で耐電力 1 MW CW の運転実績を持つ。KEK TRISTAN 超伝導空洞のカプラもこのタイプであり、窓近傍はチョーク構造にしてインピーダンス整合をとっている。チョーク構造では、チョーク突き出し部の電界は高いがセラミックと金属の接合部 (3-junction) の電界が低くできる利点がある。同じディスク形状の窓でも、KEKB の常伝導 ARES 空洞ではオーバアンダーカット構造とし窓部の電界集中を下げている。シリンダー形状の窓は CERN で採用され、窓部のマルチパクターリングを避けるためバイアス電圧を印加して運転が行われている。シリンダー窓は同軸-導波管変換部に置かれ、窓部で電場の集中が起こる可能性があり、電場分布を考慮した設計を行う必要がある。

DESY の TESLA 計画の超伝導空洞用カプラは現在、数種類の形状を試作しテストしている。いずれも窓を 2 重構造とし、1 枚は室温部に置かれもう 1 枚は 70 K 以下に冷却されている。窓の破損は超伝導空洞の性能にダメージを与えるため、2 枚のセラミック窓の間を真空に保ち、リーク事故の影響を小さくしている。

(3) カプラと空洞の結合

カプラの結合係数はビーム電流により最適値が変化し、最適値からずれると反射電力が増加し、必要電力が大きくなる。同軸カプラの結合方式は、電場で結合するアンテナ式 (C 結合) と磁場で結合するループ式 (L 結合) がある。アンテナ式ではアンテナ突き出し量で、ループ式ではループサイズと回転角で結合係数が決まる。超伝導空洞では常温側からの熱侵入を極力小さくするため、内導体を外部から切り離れたアンテナ式を採用している。これまでは、組み立て前にフランジシール厚さなどで結合を調整し一旦空洞に取り付けた後は決まった結合係数で運転されていた。TESLA では同軸部にベローズを設け、アンテナの突き出し量を調整し、空洞に取り付け後もカプラの結合係数を調整できる構造としている。

ここで、現在主に使用されているカプラの形状を表 1.1.2 にまとめ、その構造例を図 1.1.4 ~ 図 1.1.9 に示す。

加速器の高エネルギー化と大電流化が進む中、超伝導空洞の制約条件の一つがカプラの入力電力である。300 kW 以上の大電力入力カプラを開発し、安定なビーム運転を実現することで、超伝導空洞の大電力応用、大電流加速への道を開くことができる。

表 1.1.2 超伝導空洞用カプラの分類

Feed	Window	Matching	No.	Coupling	Position	Accelerator
Coaxial	Disk	Choke	1	fixed	warm	KEK TRISTAN KEKB
	Disk	O/U-cut*	1	fixed(loop)	warm	KEKB ARES(normal)
	Cylinder		1	fixed	warm	LEP2
	Taper		2	adjustable	cold/warm	TESLA
	Cylinder		2	adjustable	cold/warm	TESLA
Wave guide	Disk	post	3/1	fixed	warm	Cornell
	Disk	pillbox	1	fixed	warm	s-band linac(normal)

* Over Under cut

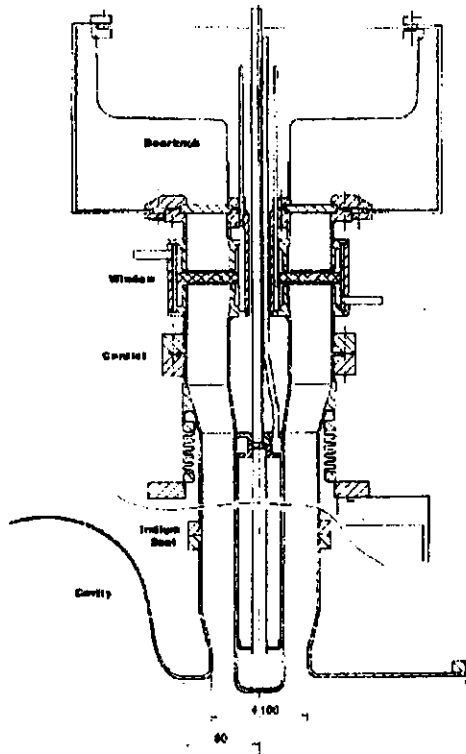


図 1.1.4 KEK TRISTAN のカプラ
50Ω 同軸 disk 形状窓
choke 構造

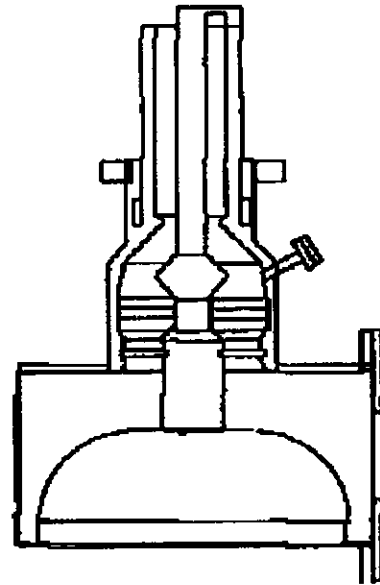


図 1.1.5 KEKB 常伝導 ARES 空洞のカプラ
50Ω 同軸 disk 形状窓
over-under cut 構造

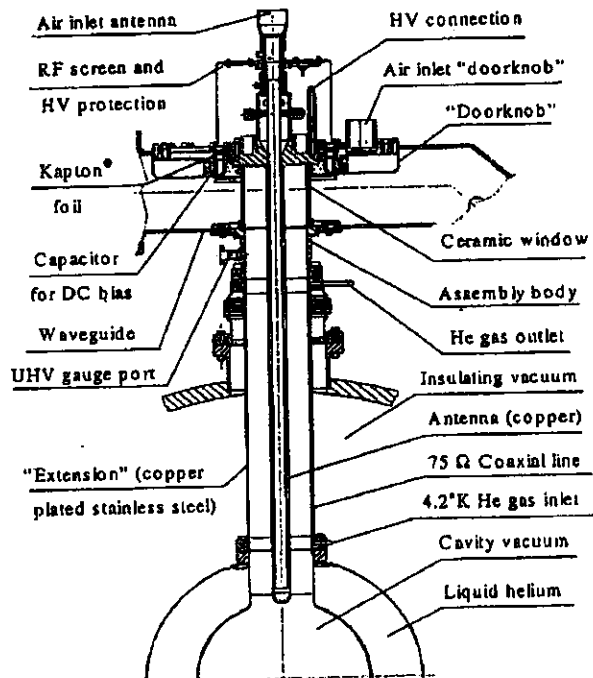
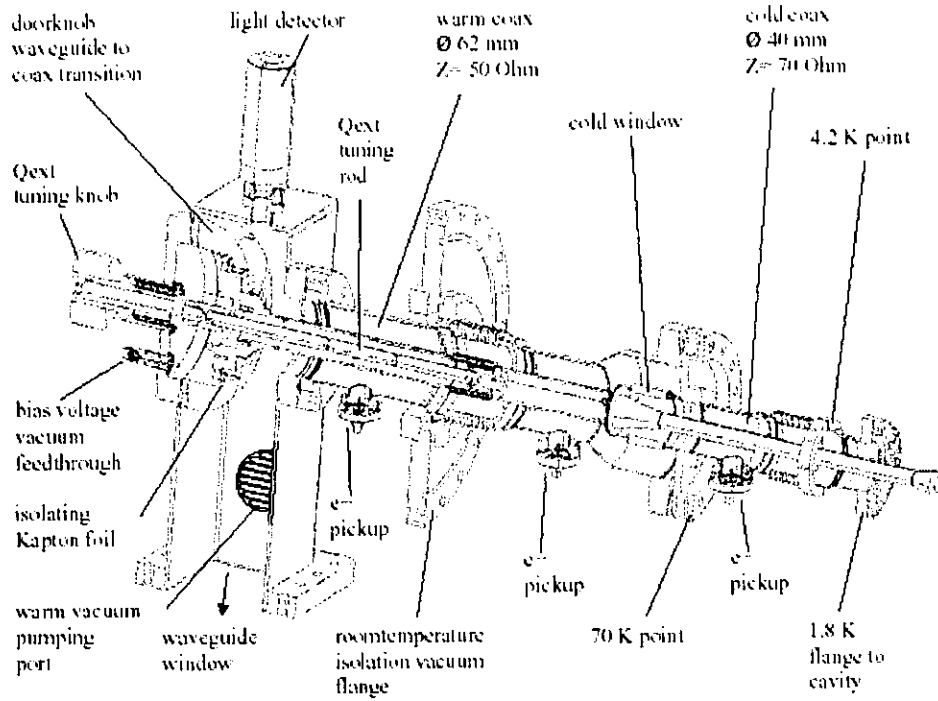
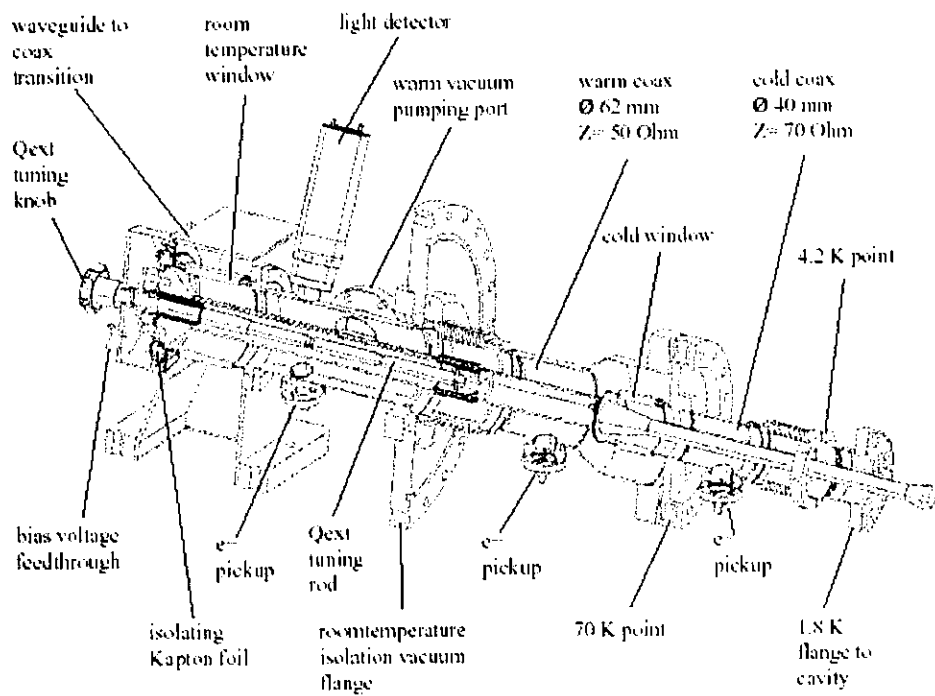


図 1.1.6 CERN LEP2 のカプラ



The TIF2 coupler design has a wave guide window. The insulating Kapton foil is in the vacuum.



The TIF3 input coupler design with a cylindrical window in the wave guide to coax transition. The Kapton isolation is not in the vacuum.

図 1.1.7 TESLA のカプラ(1 例)
可変型, 2window タイプ

Thomson Tubes Electroniques High Power RF Waveguide Window

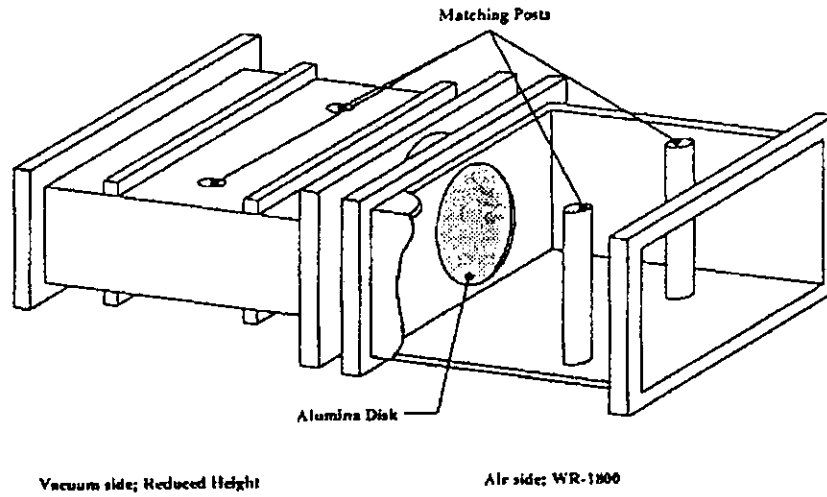


図 1.1.8 Cornell B-factory のカブラの窓
導波管タイプ

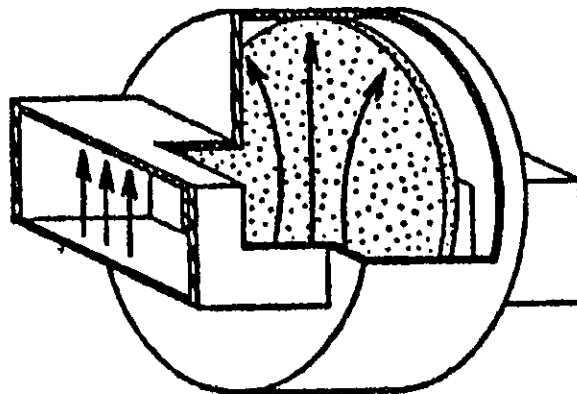


図 1.1.9 Pillbox タイプの窓

1. 2 KEK B-factory

1. 2. 1 KEKB とその加速器

KEKBはCP対称性の破れをB中間子の崩壊現象で測定し,小林・益川理論[19]の正否を検証することを主たる目的で建設された非対称2リング型電子陽電子加速器である。8 GeVの電子を蓄積する電子リング High Energy Ring (HER) と3.5 GeVの陽電子を蓄積する陽電子リング Low Energy Ring (LER) から構成され,電子と陽電子の衝突により,B中間子と反B中間子を対生成する。CP対称性の破れを測定するのに用いられるプロセスは稀であるため,B中間子と反B中間子の対を大量に生成する必要がある,KEKBの目標ルミノシティーは $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ という,これまでの電子陽電子衝突型加速器で実現された値の10倍以上の大きな値となっている。この目標を達成するためには,電子は1.1 A,陽電子は2.6 Aの大電流をリングに蓄積する必要がある[20]。

加速器のパラメータを表1.2.1に,加速器の構成概略図を図1.2.1に示す[21][22]。KEKBの加速器は,電子を8.0 GeVまで加速し,陽電子を3.5 GeVまで加速する各入射LinacとLinacにより加速された粒子をリング入射点まで輸送するビーム輸送系,電子と陽電子を蓄積し衝突実験を行うHERとLERから構成される。電子,陽電子は,FUJI実験室の直線部で各々HER及びLERに最終的なエネルギーで入射される。HER及びLERは共に3016.26 mの周長を持ち,トンネル内に左右に並べて設置されている。各々のリングは4つの曲線部と,4つの直線部からなる。その1つのTSUKUBA直線部では衝突実験が行われ,ビームを絞り高いルミノシティーを得るために,衝突点での β 値は1 cmという小さな値に設計されている。その対称位置のFUJI直線部においては電子及び陽電子がリングに入射されると共にLERにはRF加速用の常伝導ARES空洞が設置されている。他の直線部は共にHERのRF加速部にわりあてられ,NIKKOには超伝導空洞が,OHOには常伝導ARES空洞が設置されている。

KEKBのプロジェクトは,1994年4月に発足し,1996年よりトンネル内の加速器の建設に着手し,約3年後の1998年12月にKEKB加速器の試験運転を開始し,翌年6月より衝突実験が始まった[23]。

2002年中には,加速空洞はLERに常伝導ARES空洞を20台,HERにARES空洞12台と超伝導空洞8台が設置される計画であるが,建設当初はLERにARES空洞12台,HERにARES空洞6台と超伝導空洞4台で運転を開始した。1999年12月でピークルミノシティーは $6.7 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であったが,その後しだいに空洞が増設され,2001年末にはビーム電流はHERで780 mA,LERで1150 mA,ピークルミノシティーは $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に達し世界記録を更新している。

KEKB における実験にとって重要なのは積分ルミノシティである。その値は $3 \times 10^{41} \text{ cm}^{-2}$ が目安とされ、2001 年末で積分値は $4.7 \times 10^{40} \text{ cm}^{-2}$ に達している。

KEKB は実験開始以来、順調に運転を続け、2001 年夏には 6σ 以上の確率で CP 対称性の破れを検出するのに成功した[24]。

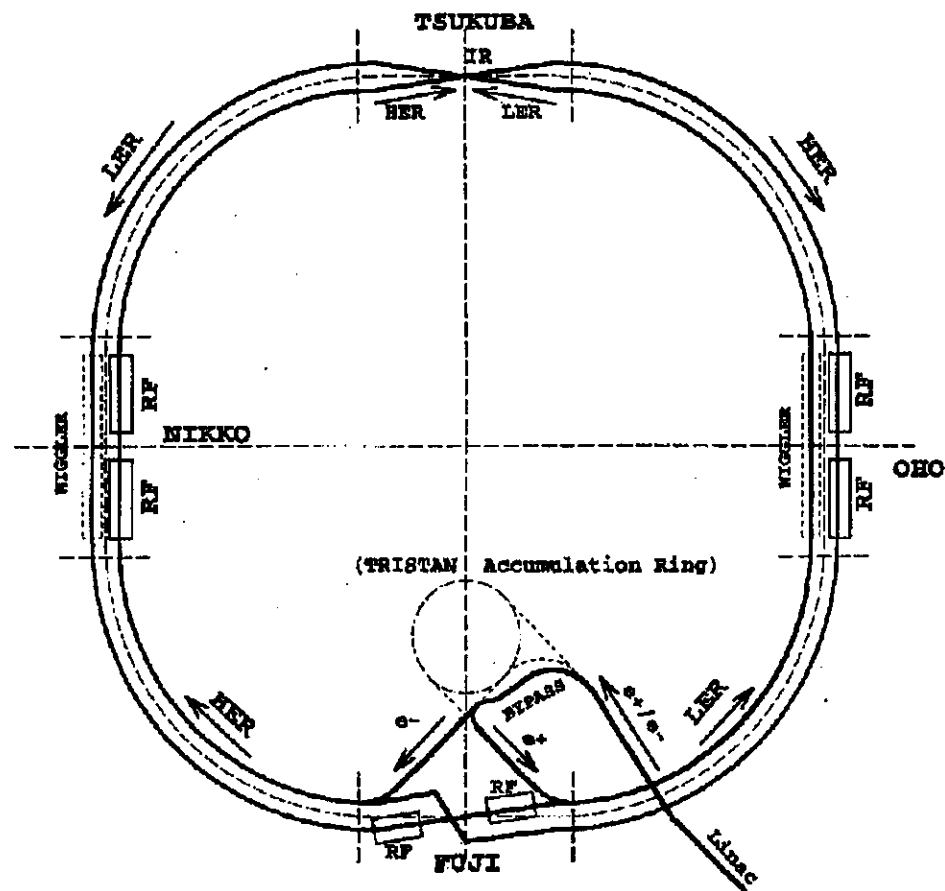


図 1.2.1 KEKB 加速器の構成

表 1.2.1 KEKB のパラメータ

項 目	記号	LER	HER	単位
エネルギー	E	3.5	8.0	GeV
電流	I	2.6	1.1	A
周長	C	3016.26		m
ルミノシティ	L	$.1 \times 10^{34}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
チューンシフト	ξ_x/ξ_y	0.039/0.052		
衝突点の β 関数	β_x/β_y	0.33/0.01		m
ナチュラルバンチ長	σ_z	0.4		cm
エネルギー分散	σ_e	7.1×10^{-4}	6.7×10^{-4}	
粒子数/バンチ	N	3.3×10^{10}	1.4×10^{10}	
エミッタンス	ϵ_x/ϵ_y	$1.8 \times 10^{-8}/3.6 \times 10^{-10}$		m
シンクロトロンチューン	ν_s	0.01-0.02		
ベータトロンチューン	ν_x/ν_y	45.52/45.08	47.52/43.08	
モーメントコンパクションファクター	α_p	$1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$		
放射損失	U_0	$0.81^{*1}/1.5^{*2}$	3.5	MeV
加速電圧	V_c	5 - 10	10 - 20	MV
RF 周波数	f_{RF}	508.87		MHz
ハーモニック数	h	5120		
減衰時間	τ_e	$43^{*1}/23^{*2}$	23	msec
ビーム電力	P_b	$2.7^{*1}/4.5^{*2}$	4.0	MW
放射電力	P_{sr}	$2.1^{*1}/4.0^{*2}$	3.8	MW
HOM 電力	P_{HOM}	0.57	0.15	MW
曲率半径	ρ	16.3	104.5	m
偏向電磁石長	l	0.915	5.86	m

*1 ウィグラー無し *2 ウィグラー有り

1. 2. 2 RF システム

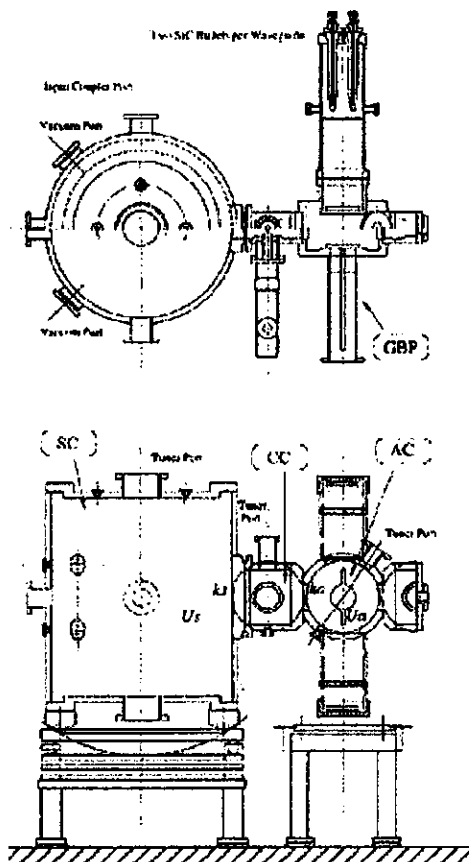
KEKB のリング中では放射損失で失われるエネルギーを補給するため、LER では 10 MV の電圧を常伝導 ARES 空洞で、HER では 17.9 MV の電圧を常伝導 ARES 空洞と超伝導空洞で併用して供給している[25][26]。LER では常伝導 ARES 空洞が FUJI 実験室付近に 20 台、HER では常伝導 ARES 空洞が OHO に 12 台、超伝導空洞が NIKKO 実験室近傍に 8 台設置される。周波数は TRISTAN 同様 508 MHz であり、1 MW 級のクライストロンから、常伝導 ARES 空洞へは 2 台、超伝導空洞へは 1 台に電力が供給されている。KEKB の RF パラメータを表 1.2.2 に示す。

HER は 1.1 A、LER は 2.6 A という大きな電流が数千個におよぶ多バンチで蓄積されるために、高次モードによる結合バンチ不安定性が深刻な問題になる。このため空洞は高次モードを抑制した単一セル単一モード型空洞が用いられる。さらに KEBK のような大電流を加速する周長の大きなリングにおいては、加速モードが引き起こす結合バンチ不安定性が問題となる。加速モードによる結合バンチ不安定性を抑えるためには、空洞の蓄積エネルギーが大きくなってはならない。そのため、常伝導空洞としては蓄積空洞を持つ 図 1.2.2 に示すような常伝導 ARES 空洞が開発された。また、超伝導空洞は電界が高いために空洞の蓄積エネルギーは本来大きく、有効に加速モードによる結合バンチ不安定性を抑えることができる。

仕様の空洞台数が全数運転された場合、空洞 1 台あたりの供給電力は常伝導 ARES 空洞で 300 kW 以上、超伝導空洞で 250 kW となる。

表 1.2.2 KEKB の RF 系のパラメータ

項 目	LER			HER			単 位
	ARES	ARES	SCC	ARES	ARES	SCC	
空洞タイプ	ARES	ARES	SCC				
台数	20	12	8				
位相	—	10					degree
全加速電圧	10	17.9					MV
R/Q	14.8	14.8	93				Ω
負荷 Q	3.0×10^4	3.0×10^4	7.0×10^4				
結合係数	2.7	2.7	—				
加速電圧/空洞	0.5	0.5	1.5				MV/cav.
入力電力	375	340	250				kW/cav.
壁損失	154	154	—				kW/cav.
ビーム電力	221	173	240				kW
クライストロン数	10	6	8				
クライストロン電力	~810	~730	~270				kW



AC : Accelerating Cavity
 CC : Coupling Cavity
 SC : Storage Cavity

図 1.2.2 常伝導 ARES 空洞 [27]

1. 2. 3 KEKB 超伝導空洞の構造

大電流のビーム加速には，ビームが誘起する高次モードが結合バンチ不安定性を引き起こすことから，高次モードを減衰した単一セル単一モード型空洞の開発が要求された．また，超伝導空洞は高電界の加速電場が立ちその性能は表面状態に依存することから表面形状の滑らかな構造が望ましい．そこで，単一セル空洞に接続するビームパイプ径を大きくして高次モードを取り出し，ビームパイプに取り付けた ferrite の吸収体で高次モードを減衰する構造とした．図 1.2.3 に空洞の形状と ferrite 取り付け位置を示す[28]-[30]．

ビームパイプ径は 508.87 MHz の基本モード以外を取り出せるよう cut-off 周波数から口径を決め，大口径側パイプ (LBP) は 300 mm ，小口径側パイプ (SBP) は 220 mm とした．取り出された 高次モードを SBP 及び LBP 双方に取り付けた ferrite の高次モード減衰器で吸収するため，ferrite は問題となる広い周波数帯域において透磁率の虚数部の高い高周波吸収体を使用し，磁界により高次モードを吸収している．空洞内にはビームにより種々の高次モードが誘起され，モード毎に磁界の大きな場所が異なる．空洞セル部からビームパイプに取り出した全高次モードが減衰できるよう ferrite の長さや位置を決めている．KEKB では高次モードの Q 値を 150 以下にすることを目標に空洞及びビームパイプの形状を決定した．

高次モード減衰器は ferrite を使用し，真空中のビームから見える位置に設置されることから，ビーム運転中の発熱によるアウトガスを考慮して，SBP，LBP 側とも 300 l/s のイオンポンプを空洞近傍に取り付けている．また 高次モード減衰器取り付け前には単体で十分なベーキングを実施している．

超伝導空洞モジュールの構造は図 1.1.3 に示したとおりである．

空洞はクライオスタット内に挿入され，4 K に冷却される．クライオスタットは断熱真空槽，液体 N₂ 断熱シールド，液体ヘリウム槽からなり，4 K の液体ヘリウム槽への熱浸入量をできるだけ小さくするよう，ビームパイプ，カプラを薄板構造にし，サーマルアンカを設ける等配慮している．KEKB では入力電力のない状態での熱浸入量，すなわち static loss を 30 W 以下に抑えている．また，外部磁場による超伝導状態の破れを抑制するため，空洞セル近傍で 50 mGauss 以下となるように，断熱真空槽を純鉄で製作し，磁気シールドを行っている．

高周波電力はクライストロンより導波管を通り，同軸-導波管変換器で 50 Ω 同軸に変換され，カプラを経由して空洞に供給される．カプラは SBP 側のできるだけ空洞セルに近い位置にポートを設け，空洞セルとの結合を大きくしている．また内導体は同軸のアンテナ構造で，クライオスタットの上部から挿入し容易に

取り付け可能な構造にした。また、カプラから空洞への熱浸入を小さくするため、カプラ外導体を液体ヘリウム槽内のヘリウムガスで冷却し、外導体は室温から 4 K までの温度分布を持つこととなる。

現在、ビーム運転において高次モードは十分に減衰され、これまで結合バンチ不安定性の問題は発生していない。

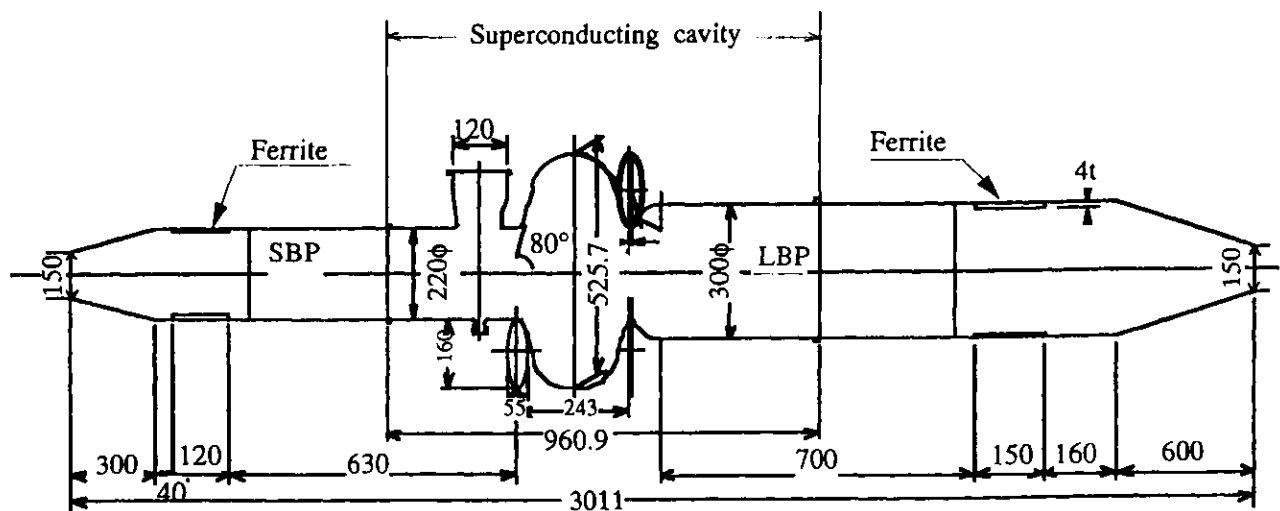


図 1.2.3 空洞の形状と ferrite 取り付け位置

第2章 大電力入力カプラの開発と試験

2. 1 開発の目標

超伝導空洞によるアンペア級大電流の加速運転を目的に、大電力を入力するため1994年よりカプラ開発を開始した。TRISTANでは最大150kWまでの電力入力に留まっており、開発開始当時は200kWがカプラの入力電力の限界と言われていた。

大電流の加速を目的にした超伝導空洞用カプラには、以下のことが要求される。

(1) 大電力の入力が可能である。

① 全反射から透過波まで反射率の広い範囲で大電力の入力が可能であること。

超伝導空洞の壁損失は常伝導空洞と比較して1/10000以下と非常に小さいので、ビームがないときには入力された電力はほぼ完全な全反射状態となる。ビーム電流が増加するに従い反射電力が減少し、最適な運転状態では反射はなくなるように設計される。このようにビーム電流により反射率の変化範囲の広いことが超伝導空洞の特徴としてあげられる。

② 液体ヘリウムへの熱浸入量を抑える。

入力電力に比例してカプラでの発熱は増加する。カプラでの発熱を抑え、カプラから液体ヘリウムへの熱浸入を小さくする必要がある。

(2) 長期安定なビーム運転が実現できる。

① 空洞の性能劣化を防ぐ。

超伝導空洞及びカプラ外導体はビーム運転では4Kに冷却される。冷却された空洞表面はクライオポンプの役割を果し、カプラからのアウトガスがあると空洞表面に凝縮される。この凝縮ガスの影響で空洞内の電界が制限されるなど、空洞の性能劣化につながる可能性がある。運転中のカプラ各部からの放出ガスを抑えるよう安定な表面を保つことが重要である。

② カプラの性能劣化を防ぐ。

冷却時にはカプラ外導体は4Kから室温まで温度分布を持つ。特に低温部の表面にガスが凝縮されカプラの放電が誘起される可能性がある。また、空洞をウォームアップする時には、空洞表面に凝縮された多量のガスが放出され、カプラ及び空洞内は 10^{-2} Pa 台の圧力となりカプラ表面は放出ガスで覆われる。カプラ内表面を安定に保つための、洗浄方法、取り扱い方法を確立する。

③ 最適なコンディショニング方法を確立する。

運転中のカプラ内のマルチパクタリングや放電を抑えるために、その要因を解明するとともに、コンディショニングの最適手法を確立する必要がある。

(3) 事故を防止する.

① 運転中の事故を防止する.

カブラの窓破損や真空リークの事故を減らすため、モニタ系を強化する。特に冷却中の事故は、液体ヘリウム蒸発に伴う圧力上昇、ヘリウム放出が起こるだけでなく、空洞表面にガスを凝縮して空洞性能に大きなダメージを与える。窓破損、真空リークの事故を未然に防ぐことが重要である。

② 経年変化、寿命の予測を行う.

長期ビーム運転による経年変化を観測し、将来、窓破損などの寿命を予測し、カブラの交換時期を判断できることが望ましい。

以上のような要求項目を満足することを目標に KEKB 超伝導空洞用大電力カブラの設計開発を行った。この章では KEKB の超伝導空洞用カブラの開発状況をまとめた。まず運転条件から結合係数を決定し、KEKB 超伝導空洞形状のアルミモデルで、low-power 試験を行い、アンテナ長を決定した。電力試験用のカブラスタンドを整備し、大電力試験を行い、カブラには透過波で最大 800 kW 以上入力可能であることを確認した。またカブラのモニタ系を強化しその有効性を検証した。さらに、発熱対策、洗浄方法について検討し、その改善を行った。

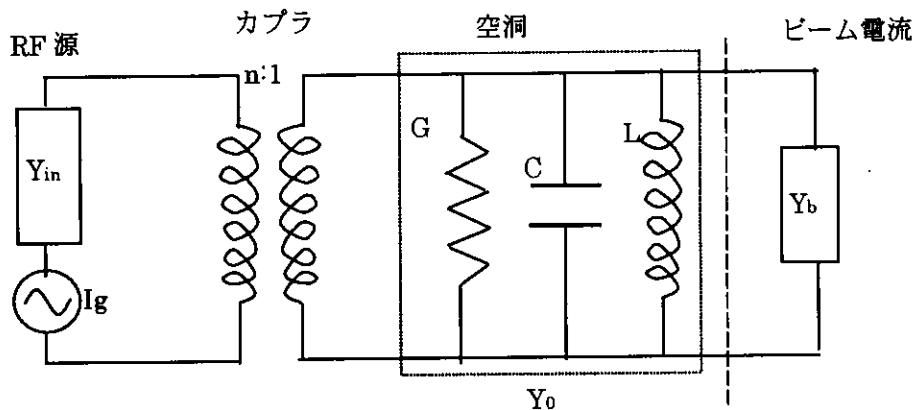
2. 2 カプラの結合係数 (coupling factor)

カプラの結合係数と空洞のパラメータ及び入力電力との関係を述べ、KEKBの超伝導空洞の結合係数の設計値を示す。

2. 2. 1 結合係数設計の考え方

(1) 等価回路

カプラ及び空洞の等価回路は、図 2.2.1 で示される。



- Y_{in} : カプラ, 伝送のアドミッタンス
- G : 空洞の損失コンダクタンス
- Y_b : ビーム負荷相当のアドミッタンス
- C, L : 空洞の容量, インダクタンス

図 2.2.1 カプラ及び空洞の等価回路

空洞から見たカプラ及び伝送側のアドミッタンス Y_e は,

$$Y_e = n^2 Y_{in} \quad (2.2.1)$$

ビーム電流がない時の空洞のアドミッタンス Y_0 は,

$$Y_0 = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (2.2.2)$$

となる。空洞が共振状態で空洞電圧 V_c が誘起されるとき、空洞の Q 値 Q_0 は,

$$Q_0 = \frac{\omega \cdot U}{P_{loss}} = \frac{\omega \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_c^2}{\frac{V_c^2 G}{2}} = \frac{\omega C}{G} \quad (2.2.3)$$

カプラの外部 Q 値 Q_{ext} は,

$$Q_{ext} = \frac{\omega \cdot U}{P_{in}} = \frac{\omega \cdot \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_c^2}{\frac{V_c^2 n^2 Y_{in}}{2}} = \frac{\omega C}{n^2 Y_{in}} \quad (2.2.4)$$

となる。ただし、 P_{loss} は空洞壁でのエネルギー損失、 P_{in} は空洞へ入力電力を切ったときに空洞から出てくる電力を示す。結合係数 β は、その定義より、

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} = \frac{n^2 Y_{in}}{G} \quad (2.2.5)$$

となる。ビームがない条件では、

$$Y_e = Y_0 \quad (2.2.6)$$

の時整合が取れ、共振周波数 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ では、

$$\beta = 1 \quad (2.2.7)$$

が成立する。

ビーム電流が加わると、空洞の beam loading のアドミッタンス Y_b を考慮して、

$$Y_{ob} = G + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) + Y_b \quad (2.2.8)$$

となる。 Y_b はビーム電流に依存し、インピーダンス整合の条件は、

$$Y_e = Y_{ob} \quad (2.2.9)$$

であり、最適な結合係数 β は、beam loading に依存することになる。

(2) 結合係数と入力電力

空洞への入力、反射電力はカップラの結合係数に依存し、ビーム定常運転状態で反射電力を小さくするように結合係数を設定することが望ましい。また、RF 源より空洞に導入される電圧に対してビームの加速位相が不安定位相に入るとビーム電流が制限され、ロビンソン不安定性を引き起こす。結合係数は安定条件を満たす範囲で反射電力が最小となる条件で設定する[1]-[3]。詳細は Appendix 1 に示す。

空洞のカップラの結合係数を β 、tuning 角を ψ とすると、入力電力は、

$$P_s = \frac{(1+\beta)^2}{4\beta} \cdot \frac{V_c^2}{R \cdot \cos^2 \psi} \left[\left(\cos \phi_s + \frac{I \cdot R}{V_c(1+\beta)} \cos^2 \psi \right)^2 + \left(\sin \phi_s + \frac{I \cdot R}{V_c(1+\beta)} \cos \psi \sin \psi \right)^2 \right] \quad (2.2.10)$$

ただし β : 結合係数

I : ビーム電流 [A]

V_c : 加速電圧 [V]

ϕ_s : 加速位相

R : 空洞のシャント抵抗 [Ω]

ψ : tuning 角

で表される。ここで tuning 角を

$$\tan \psi = -\frac{I \cdot R}{V_c(1+\beta)} \sin \phi_s \quad (2.2.11)$$

とすると、反射電力が最小となり、入力電力 P_g は、

$$P_g = \frac{(1+\beta)^2}{4\beta} \frac{1}{R} (V_c + V_{br} \cos \phi_s)^2 \quad (2.2.12)$$

となる。 P_g を最小にするように結合係数 β を選べば最適値 β_0 が求められる。

$$\frac{\partial P_g}{\partial \beta} = 0 \quad \text{となる } \beta \text{ は,}$$

$$\beta_0 = 1 + \frac{I \cdot R \cos \phi_s}{V_c} \quad (2.2.13)$$

であり、ビーム電流が I の時反射電力が 0 となり、必要な入力電力は、

$$P_g = \frac{V_c^2}{R} + I \cdot V_c \cos \phi_s \quad (2.2.14)$$

で最小値となる。

また、ビーム運転では安定位相にビームを乗せる必要があり、ロビンソン安定条件、

$$V_c \sin \phi_s + V_b \sin \psi > 0 \quad (2.2.15)$$

を満たすことが要求される。

2. 2. 2 KEKB 用加速空洞の結合係数

KEKB HER では、常伝導 ARES 空洞と超伝導空洞とでリング 1 周あたり必要な加速電圧、放射損失分をまかなう必要がある。ビーム電流の増加、空洞台数の増設の可能性を考慮してその係数を決定している。運転条件の 1 例を、表 2.2.1 に示す[4]。

超伝導空洞の運転条件として加速電圧 1.5 MV、加速位相 81.7 deg、tuning 角の offset 0 deg の時のビーム電流と入力電力の関係を図 2.2.2 に示す。また tuning 角の offset、Q 値、電圧をパラメータとした場合の電力変化を Appendix 1 に示す。

表 2.2.1 運転条件

項目	記号	値	単位
ビーム電流	I	1.1	A 最大
放射損失	V_a	3.63	MV
加速電圧	V_c	17.9	MV
超伝導空洞			
空洞台数		8	台
加速電圧	V_c	1.5	MV
R/Q	R/Q	93	
加速位相	Φ_s	81.7	deg
負荷 Q	Q_L	7×10^4	
tuning 角 off-set	α	-10.0	deg
常伝導 ARES 空洞			
空洞台数		12	台
加速電圧	V_c	0.5	MV
シャント抵抗	R	1.66	M Ω
加速位相	Φ_s	71.7	deg
結合係数	β	2.70	
tuning 角 off-set	α	-10.0	deg

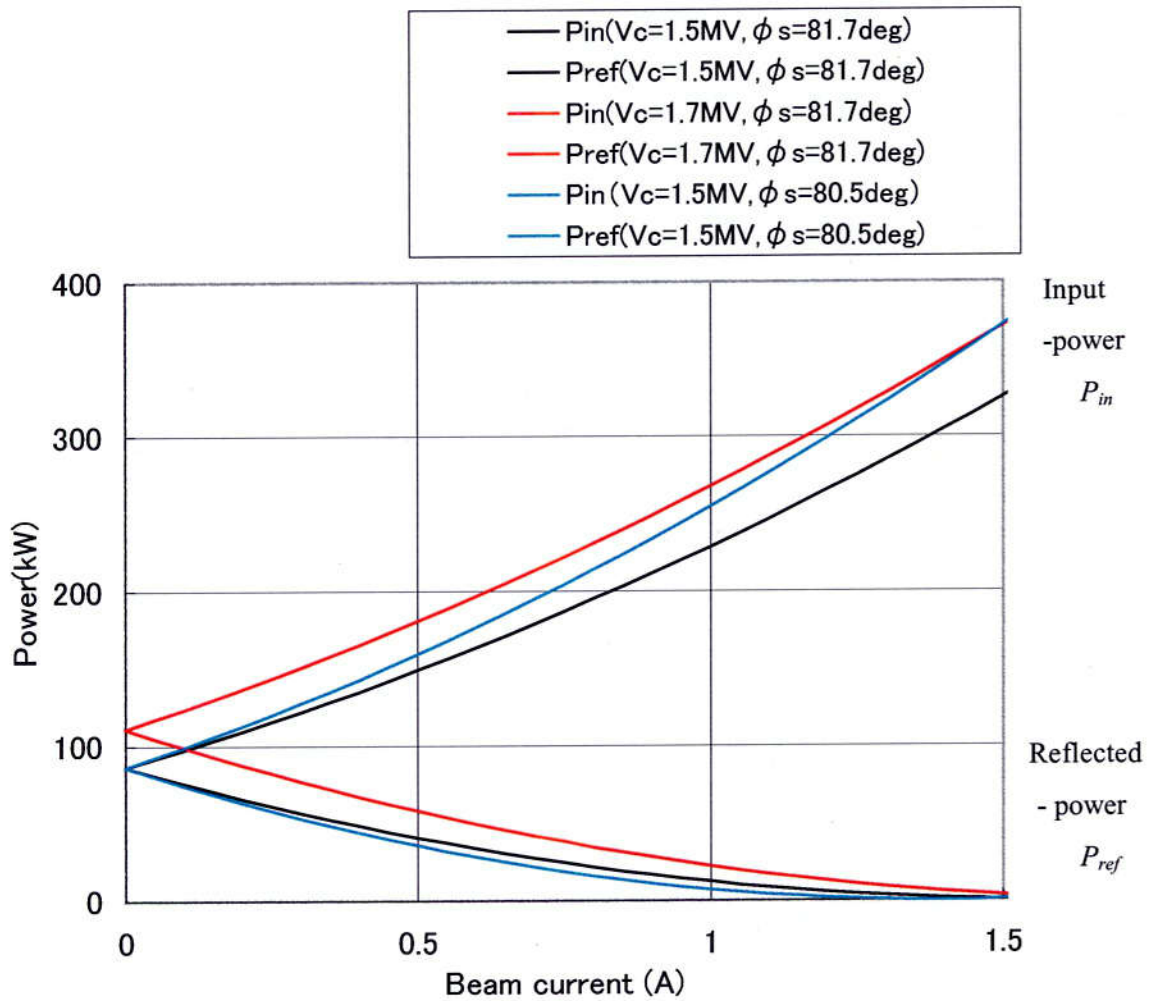


図 2.2.2 ビーム電流と入力電力の関係

2. 3 カプラの形状

2. 3. 1 カプラの基本構造とその特徴

KEKB 超伝導空洞用入力カプラについて、伝送部、窓の構造、空洞との結合方式についてその特徴を示す。

(1) 同軸タイプの採用

500 MHz 帯では、導波管タイプはクライオスタットへの取り付け部の構造が大きくなることと TRISTAN での実績を考慮し、KEK は同軸タイプを採用している。また同軸管のインピーダンスは他のコンポーネントとの整合性から 50Ω としている。同軸サイズ及びインピーダンスについてはマルチパクタリングの観点から、第 3 章で比較検討する。

(2) 窓の構造

KEKB では、500 MHz 帯クライストロンの出力窓にディスク形状を使用し、透過波で耐電力 CW 1 MW 以上の実績を持つ[5]。カプラの窓もクライストロン出力窓と同様に、ディスク形状を採用し、インピーダンス整合をとるため窓接合部をチョーク構造にしている。チョーク構造は、チョーク部の電界は高くなるがセラミックと金属の接合部 (3-junction) の電界が低くできる。

(3) 空洞との結合方式

電場で空洞と結合するアンテナ式 (C 結合) と磁場で結合するループ式 (L 結合) があるが、超伝導では常温側からの熱侵入を極力小さくするため、内導体を切り離れたアンテナ式を採用する。結合係数は、空洞組み立て段階で、外導体と内導体の接合フランジシール厚さで調整する。ただし、一旦空洞に取り付けた後の調整機構はなく固定式の結合である。

2. 3. 2 カプラの構造とパラメータ

KEKB 超伝導空洞用カプラは $50\ \Omega$ 同軸構造で、アンテナ状の内導体、外導体、セラミック窓から構成されている。クライストロンからの入力電力は WR1500 の導波管でカプラまで伝送され、カプラ上流の同軸導波管変換器ドアノブを経由して $50\ \Omega$ 同軸アンテナより空洞に供給される。超伝導空洞用カプラの構造及びパラメータを図 2.3.1, 表 2.3.1 に示す。

空洞との結合は、内導体アンテナ長で決定される。冷却後に空洞へのアンテナ突き出し量が設計値になるよう、組み立ての時に外導体と内導体の接続フランジのシール厚さで製作誤差分を調整している。

窓は空洞を真空に保ち、かつ RF 電力を通す役割を持つ。KEKB では窓は同軸ディスク形状のアルミナセラミックを用いている。アルミナは誘電率が高いので、窓枠近傍をチョーク構造にして $50\ \Omega$ にインピーダンス整合を取っている。図 2.3.2 にカプラセラミック窓部のチョーク構造を示す。チョーク構造では金属とセラミック間の間隙が狭いのでセラミック表面電界が高くなる。そこで TRISTAN 超伝導空洞用カプラで採用されたチョーク間隙 $3\ \text{mm}$ を KEKB では $4\ \text{mm}$ に広げ、セラミック表面電界を 70% に低減した。(この結果は第 3 章に記載。) さらに、二次電子放出を下げ、放電を抑えるためセラミック窓の真空側表面には $10\ \text{nm}$ の TiN コーティングを施した。窓材はメタライズ性が良く、高周波損失の小さい 95% のアルミナ (HA95) セラミックを使用している。アルミナ特性のメーカーカタログ値を表 2.3.2 に示す[6]。セラミック窓は誘電損があるため通過電力に比例して発熱し、また放電やマルチパクタリングが発生すると局所的に発熱する。セラミック窓の温度分布を小さくして熱応力を低減するため、内導体側面は水冷、外導体側は Cu の熱伝導により空冷している。

アンテナ同軸部は内導体外径 $\Phi\ 52\ \text{mm}$ 、外導体内径 $\Phi\ 120\ \text{mm}$ の $50\ \Omega$ で、熱浸入を小さくするため長い同軸構造になっている。空洞取り付け Nb ポート部は空洞加工性の観点から径を $\Phi\ 100\ \text{mm}$ にシテーパ状に細くしている。外導体は、熱浸入量を小さくするためステンレス薄肉構造とし、内面に $30\ \mu\text{m}$ のピロリン酸銅鍍金を施し RF 損失を小さくしている。アンテナは無酸素銅で製作され $30\ \mu\text{m}$ の電界研磨を行った後、クリーンな雰囲気です窓部と電子ビーム溶接で接合される。内導体、外導体共にマルチパクタリングや放電を抑えるため、このように表面処理を行い、いずれも取り付け前にオゾン水洗浄を行う。同軸部の冷却は、内導体は上部より $1\ \text{l/min}$ 以上の冷却水を流して水冷し、外導体は空洞冷却後に $8\ \text{l/min}$ で $4\ \text{K}$ のヘリウムガスを流している。外導体には周方向に均一に冷却するため、fin を取り付けている。図 2.3.3 に fin を取り付けたカプラ外形の写真を示す。

窓部は、破損防止のためモニタリングを強化し、窓近傍に 3 本のモニタポートを設

けた。各ポートには、電子の測定用プローブと放電光を検知するアークセンサー、真空圧力ゲージを取り付け、アークセンサーと真空圧力ゲージはインターロック用として使用している。ビーム運転では、カプラ真空が 10^{-4} Pa 以上になるとクライストロンを落とすよう設定している。

同軸導波管変換部のドアノブ構造を図 2.3.4 に示す。マルチパクタリングを抑えるため内導体にバイアス電圧 ± 2000 V の範囲で印加できるよう、内外導体間に $125\ \mu\text{m}$ のポリミドフィルムを二重に巻いて絶縁している。ドアノブの VSWR は 508.58 MHz で 1.1 以下、バイアス電圧の絶縁耐電圧は 10 kV 以上としている。導波管では全反射の場合 400 kW 以上で放電が発生する可能性がある。このため、現在は 300 kW 以下に入力電力を制限すると共に大気側にもアークセンサーを取り付けている。

以上をまとめると、KEKB は TRISTAN 用超伝導空洞のカプラを出発点とし、大電力運転用のカプラに向け次のような改造を行った。

- ① チョーク部の金属とセラミック表面間隙を 3 mm から 4 mm に広げ、セラミック窓表面の電界を 70% に低減できた。
- ② 窓部のモニタを 1 ポートから 3 ポートに増加し、アークセンサーに加え、電子電流をモニタし、真空のインターロックを増強し、その有効性を確認した。
- ③ 外導体を液体ヘリウム槽内のヘリウムガスで冷却する構造とした。
- ④ ドアノブ内導体側にバイアス電圧を印加できる構造とし、結果として、コンディショニングにバイアス電圧を利用することとなった。
- ⑤ コンディショニング時間短縮のため、オゾン水洗浄を採用した。

表 2.3.1 入力カプラのパラメータ

Coupler	
Loaded Q	7×10^4
Impedance	50Ω
Window	
Structure	choke : gap 3 or 4 mm
Size	ceramic : $\phi 170$ - $\phi 42 \times 10\text{mm}^3$
Material	95% purity alumina
Coating	$\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ 10 nm
Inner conductor	
Structure	antenna $\phi 53\text{mm}$
Material	Copper (OFHC)
Surface treatment	Electro polishing
Setting position	12mm into the beam pipe
Outer conductor	
Structure	inner diameter $\phi 120\text{mm}$
Material	30 μm Copper plated Stainless steel
Surface treatment	plated, pyro-phosphoric acid
Outer conductor connected to the cavity	
Structure	inner diameter $\phi 100\text{mm}$
Material	Nb
Surface treatment	Electro polishing

表 2.3.2 アルミナの特性 メーカーカタログ値 [6]

材料名		アルミナ							アルミ										
項目(単位)	HA-92	HA-95	HA-96	HA-995	HA-921	BA-901	BA-903	BA-914	BA-916	HA-997	HAP-99	KP-84	KP-85	KP-95	KP-903	KP-921	KP-990	UHA-99	
NTK材質名	HA-92	HA-95	HA-96	HA-995	HA-921	BA-901	BA-903	BA-914	BA-916	HA-997	HAP-99	KP-84	KP-85	KP-95	KP-903	KP-921	KP-990	UHA-99	
外観	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	多孔質	多孔質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	ち密質	
色	白色	白色	白色	白色	白色	黒褐色	あざき色	黒褐色	黒褐色	白色	白色	あざき色	白色	白色	白色	白色	白色	白色	
アルミナ含有量(%)	92	95	96	99.5	92	90	90	91	90	99.7	99	77	85	95	92	92	99.5	99	
比重	3.6	3.6	3.7	3.9	3.6	3.7	3.6	3.7	3.6	3.9	3.4	3.6	3.3	3.7	3.5	3.6	3.9	3.9	
曲げ強度(MPa)	380	350	330	400	350	270	350	350	300	300	200	180	250	350	280	450	500	520	
圧縮強度(GPa)	>2.0	>2.0	—	—	2.0	1.6	>2.0	2.0	1.6	>2.0	—	—	>1.5	>2.5	>1.5	>2.5	>2.5	>2.5	
ヤング率(GPa)	280	320	320	370	280	310	290	280	260	320	230	—	—	320	—	320	380	380	
硬度(ロックウェル15N)	94	94	—	—	—	—	93	—	—	96	—	—	92	94	93	95	97	97	
破壊靱性(MPa・m ^{1/2})	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	4	4	5	
熱膨張係数(×10 ⁻⁶ /K)	7.6	7.7	7.7	8.1	7.6	8.0	7.9	7.6	7.6	8.1	7.8	7.9	6.8	7.8	7.6	7.8	8.0	8.0	
熱伝導率(W/mK)	23	27	24	30	18	13	17	18	17	31	22	11	13	24	18	17	29	28	
耐熱衝撃温度(°C)	160	160	160	—	170	—	150	170	150	140	200	220	180	160	—	200	160	160	
体積固有抵抗(Ω・m)	25°C	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹³	>10 ¹³	>10 ¹²	>10 ¹⁰	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	>10 ¹²	—	>10 ⁹	>10 ¹²	>10 ¹¹	>10 ¹¹	>10 ¹²	>10 ¹²	
	500°C	10 ⁸	10 ⁸	3×10 ⁷	8×10 ⁹	—	—	10 ⁹	—	—	10 ⁹	10 ⁸	—	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁹	
	700°C	10 ⁶	10 ⁶	4×10 ⁶	1×10 ⁷	—	—	10 ⁶	—	—	10 ⁷	10 ⁶	—	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	
誘電率	1MHz	9.0	9.2	9.8	10.1	9.4	9.6	9.8	10.2	10.0	—	—	8.2	9.2	—	9.0	10.1	9.9	
	10GHz	8.6	8.8	9.2	9.7	8.8	—	9.0	9.0	9.9	—	—	—	9.2	—	—	9.7	9.7	
誘電体損失	1MHz	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁴	—	4×10 ⁻⁴	3×10 ⁻³	<1×10 ⁻⁴	—	—	—	—	—	—	2×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	
	10GHz	8×10 ⁻⁴	6×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	1×10 ⁻³	—	1×10 ⁻³	7×10 ⁻³	4×10 ⁻⁵	—	—	—	9×10 ⁻⁴	—	—	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴	
絶縁破壊電圧(kV/mm)	15	15	14	18	15	13	—	15	15	17	—	—	13	15	—	15	16	16	
主な特長	・メタライズ性良好 ・高周波特性良好	・メタライズ性良好 ・高強度 ・高周波特性良好 ・低損失 ・磁力透過性良好	・表面平滑 ・印刷性良好	・表面平滑	・メタライズ性良好	・透光性大	・メタライズ性良好 ・電気絶縁性良好	・メタライズ性良好 ・透光性大	・メタライズ性良好 ・透光性大	・高周波特性良好 ・低誘電損失	・脱ガス容易 ・耐熱衝撃性良好 ・電気絶縁性良好	・耐熱性大 ・耐熱衝撃性良好	・耐食性 ・耐摩耗性良好	・高強度 ・耐食性 ・耐摩耗性良好	・高強度 ・耐食性 ・耐摩耗性良好	・耐熱衝撃性良好 ・高強度 ・耐摩耗性良好	・耐食性優美 ・耐摩耗性良好 ・高強度	・高強度 ・耐摩耗性良好 ・高周波特性良好 ・高硬度	
主な用途	・電子部品 ・高真空型 ・シール部品 ・真鍮部品	・電子部品 ・高真空型 ・シール部品 ・真鍮部品	・HIC ・厚膜基板 ・グレース ・基板 ・導電用基板	・HIC ・薄膜用基板 ・グレース ・基板	・IC ・パッケージ ・トランジスタ用 ・パッケージ ・多層基板	・IC ・パッケージ	・サイリスタ ・容器 ・各種気密 ・容器	・IC ・パッケージ	・IC ・パッケージ	・電子部品 ・高真空型 ・シール部品 ・IC ・パッケージ ・基板	・電子部品 ・ヒータ ・保持材 ・耐熱部品	・バーナー ・ノズル ・溶接用 ・ノズル	・精子 ・絶縁部品 ・電極	・高精度構造 ・部品 ・シール ・リング ・耐熱部品	・ガイド ・ローラ ・球石	・耐熱構造 ・部品 ・ノカニカル ・シール ・ライナ材	・ポンプ部品 ・スライダ ・耐食部品 ・耐摩耗部品 ・半導体製造 ・治具	・耐摩耗 ・構造部品 ・高真空部 ・メカニカル ・シール	

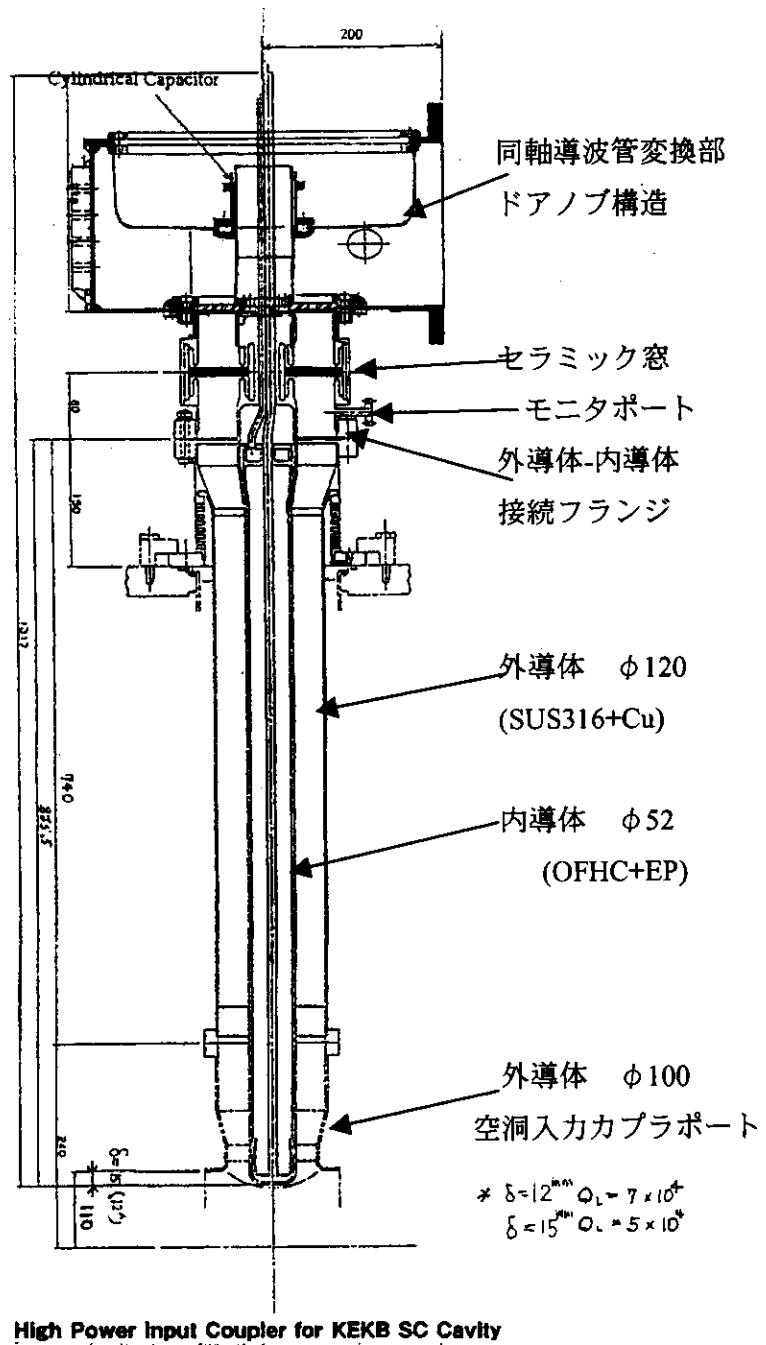


図 2.3.1 (1) KEKB 超伝導空洞用カプラの構造 組み立て図

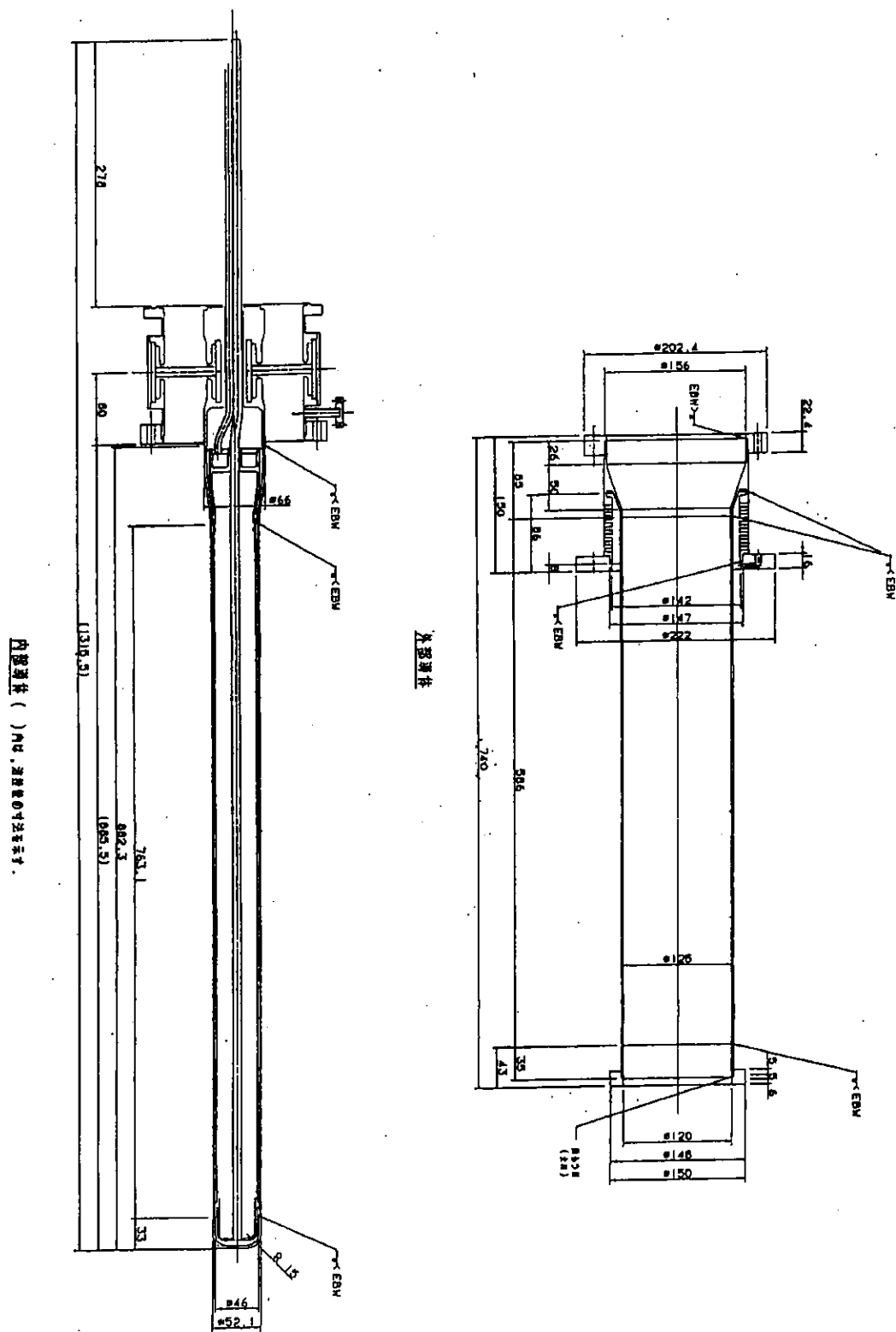


図 2.3.1 (2) KEKB 超伝導空洞用カップラの構造 寸法図

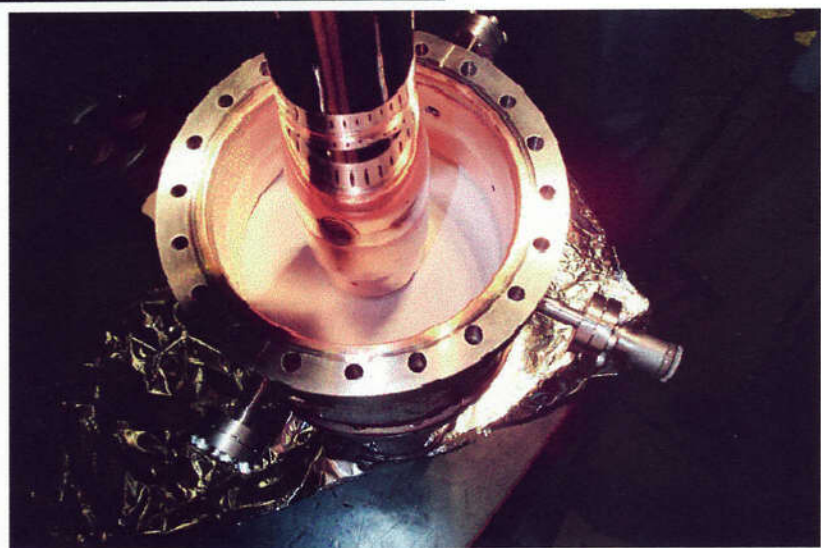


図 2.3.1 (3) KEKB 超伝導空洞用カプラの構造 内導体とセラミック窓

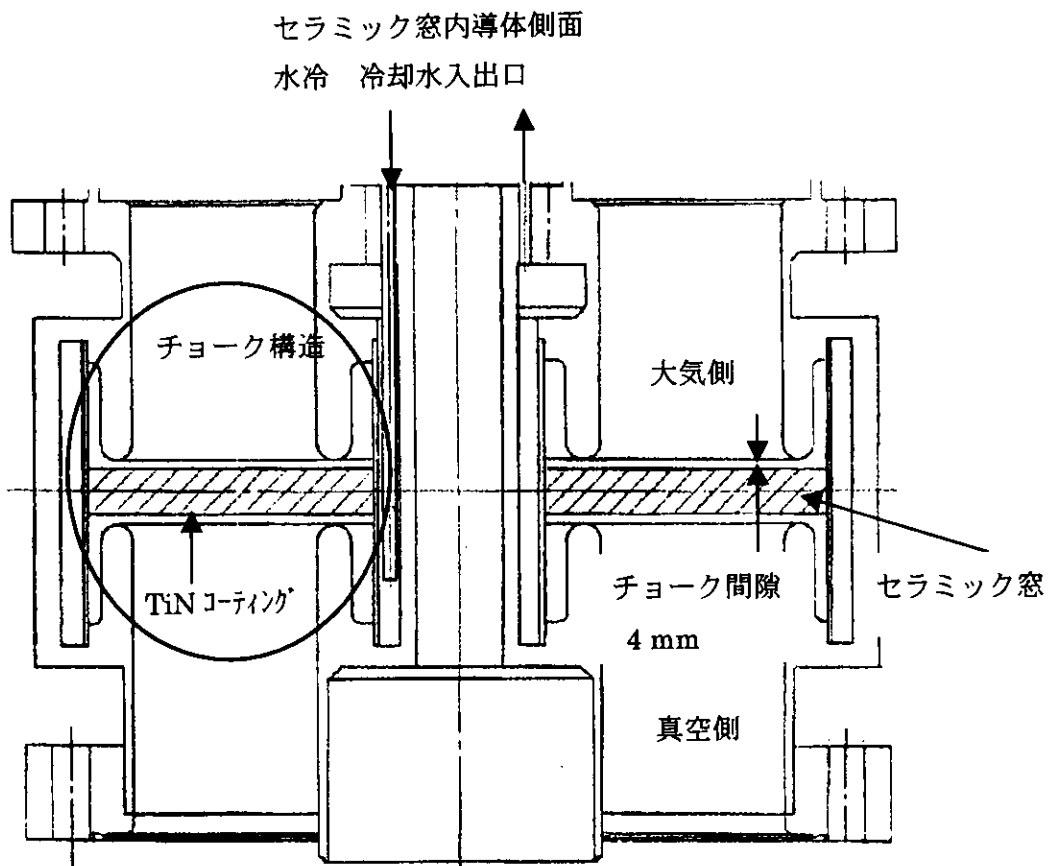


図 2.3.2 セラミック窓のチヨーク構造

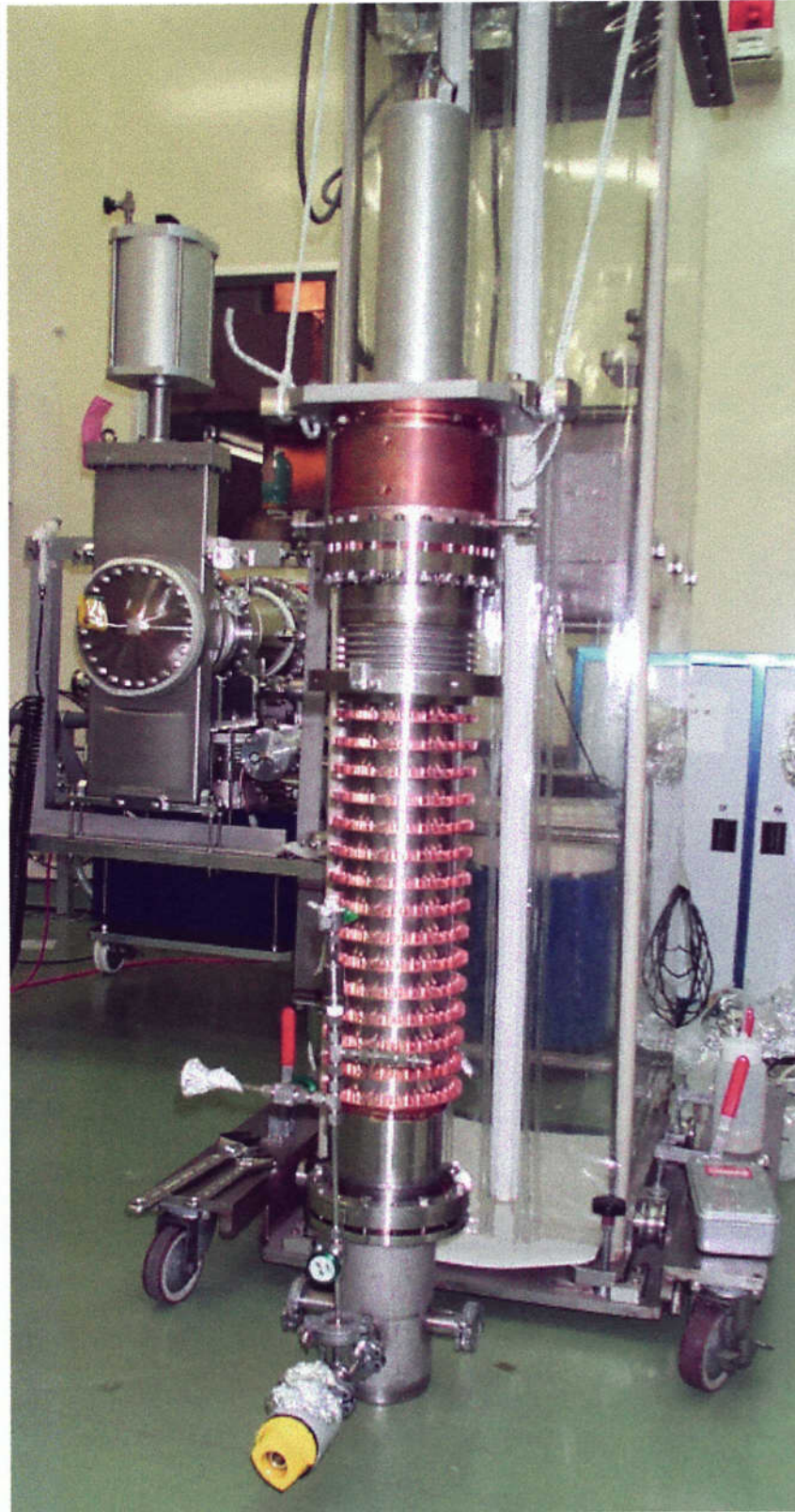
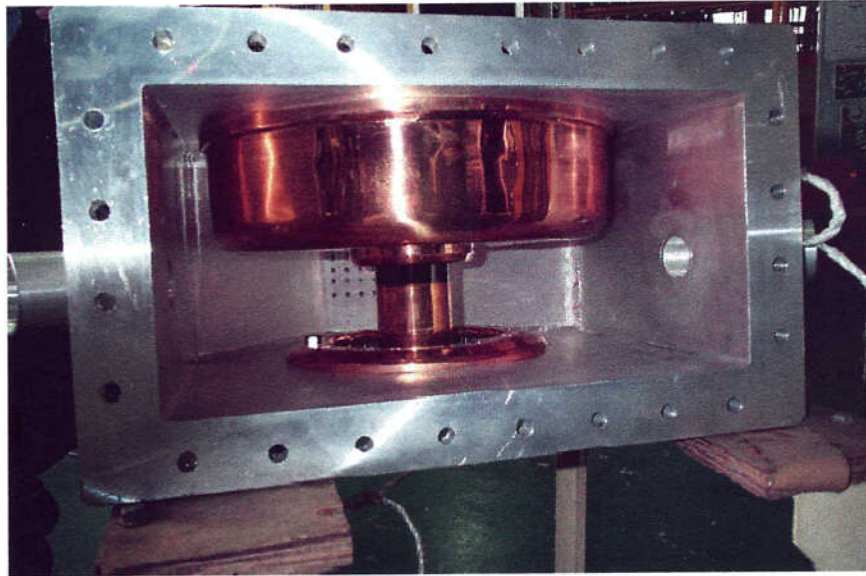
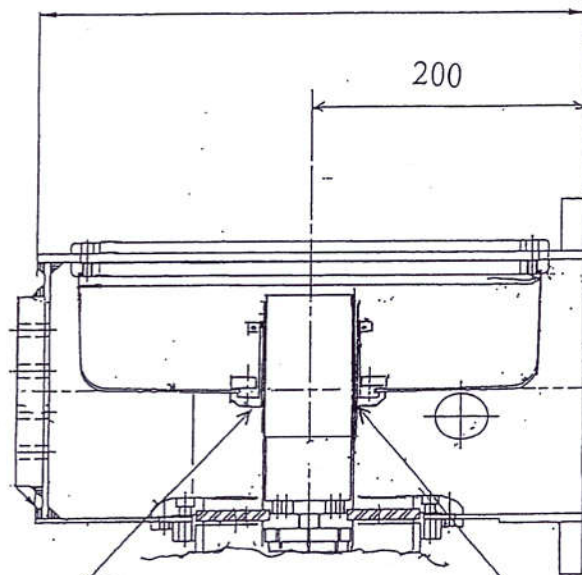


図 2.3.3 カプラ外導体 fin 取り付け状況



400



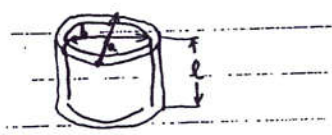
Cylindrical Capacitor

Poryimide Film (125 μ m X 2)

$$C = 2\pi\epsilon \cdot l / \ln \frac{a}{b}$$

ϵ : Poryimid 3.45
 $l = 60 \text{ mm}$

$$C = 1.52 \times 10^{-9} \text{ (F)}$$



$a = 66.5$, $b = 66$

図 2.3.4 同軸導波管変換部 ドアノブの構造

2. 3. 3 カプラのセラミック窓の位置

カプラのセラミック窓の位置を各運転条件で電圧最大値にならず、かつ反射条件により変動のすくない位置に設定する。KEKB 超伝導空洞用カプラは一旦空洞に取り付けると結合の調整ができないので、室温でのカプラコンディショニングやビーム運転の各条件で、セラミック窓の位置がカプラ同軸内で定在波の山（電場最大位置）にならないように設定する。

カプラ内の定在波分布を図 2.3.5 に示す[7]。これは AR リングで超伝導空洞を用いたビーム加速試験を行い、カプラ外導体の温度分布を測定した結果より換算した値である。この測定は室温のカプラコンディショニング (RT-aging) の場合と 4 K に冷却し低温で空洞に電圧を誘起した tuning 状態 (on resonance) の場合について行われた。図は温度分布に相当する磁場エネルギー (H^2) の分布とその値より換算した磁場 (H) 分布を示している。

室温のカプラコンディショニング (RT-aging) では、空洞を共振点から外して detune 状態にするため、カプラに入力された電力は空洞との結合部分で全反射される。室温では空洞とカプラ伝送側の結合はアンダーカップルとなり、カプラと空洞結合部で電界は open の境界条件になる。

4 K 冷却後に空洞内に電界を誘起した tuning 状態 (on resonance) では tuning 角の offset が 0 deg の時は、カプラから入力される電界の位相と空洞の電界位相は同じになるように制御されている。空洞から反射される電界は空洞と同位相であり、測定結果からカプラと空洞の結合部であるアンテナ先端付近でほぼ電界の short 条件となっていることがわかった。

これらの測定結果よりカプラと空洞との結合は室温のコンディショニングと 4K 冷却後の空洞 tuning 状態で各々境界条件が異なり、その境界となる場所はカプラと空洞の結合部であるカプラ先端付近であることがわかった。

以上の結果より各運転条件で、カプラのセラミック窓の電界が最大にならないよう、セラミック窓の位置を位相角 45 deg の奇数倍となるように設定した。KEKB では、カプラのアンテナ先端からセラミック窓位置まで 965.5 mm の長さにし、半波長 $\lambda/2 = 295$ mm で換算すると位相角で 45 deg の約 13 倍に位置する。

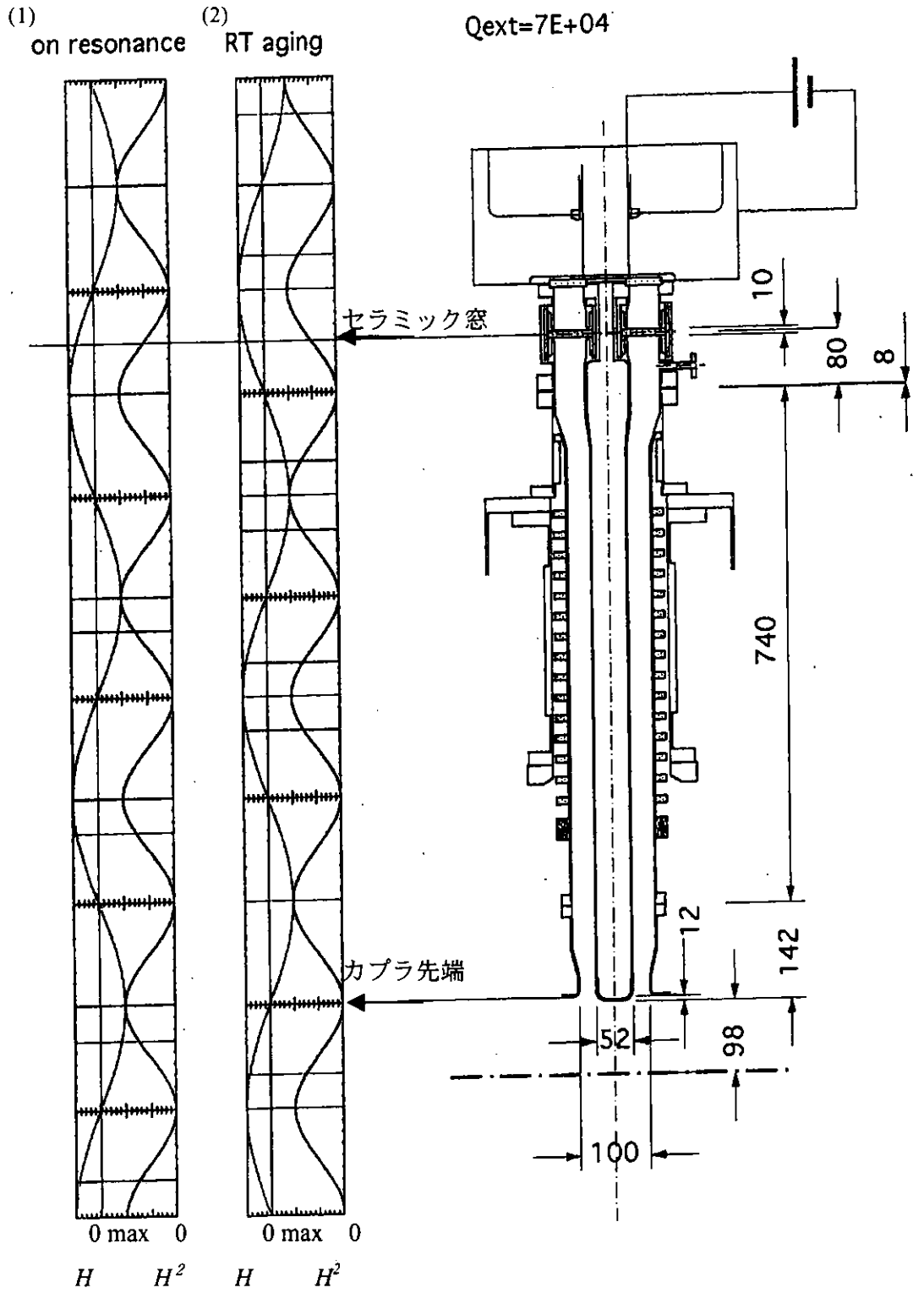


図 2.3.5 カプラ内の磁場定在波分布の換算

- (1) 4 K 運転で空洞が tuning 状態の場合：カプラ先端は short の境界条件
- (2) 室温コンディショニングの全反射運転の場合：カプラ先端は open の境界条件

2. 4 結合係数とカプラの設定

2. 4. 1 結合係数とアンテナ突き出し量，中心からの位置ずれ精度の関係

(1) 測定

カプラと空洞との結合は，カプラ内導体のアンテナ突き出し量を変えることにより調整する．外部 Q 値 Q_{ext} を 7×10^4 にするため，突き出し量と中心からのずれの影響を KEKB 超伝導空洞と同等の形状を持つ Low-power 試験用のアルミモデル空洞を用いて測定した．

測定は発信器から 508 MHz，数十 W の電力 P_{in} を空洞セルの pick up アンテナより入力し反射電力 P_r とカプラからの透過電力 P_o を測定し，電力収支から外部 Q 値 Q_{ext} を求めた．

測定は次の手順で，カプラのアンテナ突き出し量及び，中心位置ずれを変更しながらすすめた．

- ① サーキュレータ及びケーブル損失の校正値を測定する．
- ② Pick up アンテナの結合を小さくして，カプラの結合 β と比較してその値が無視できる強さに設定する．
- ③ カプラのアンテナ突き出し量，またはカプラの中心位置ずれを設定する．
- ④ 共振周波数で入射，反射，透過電力 (P_{in} , P_r , P_o) を測定する．
- ⑤ 結合係数 β ，外部 Q_{ext} を以下の式で算出する．

$$Q_{ext} = \frac{\omega U}{P_o} = \omega \frac{P_{in} - P_o - P_r}{P_o} = \frac{Q_0}{\beta} \quad (2.4.1)$$

ただし，無負荷 Q 値 Q_0 は KEKB 超伝導空洞形状でアルミの場合に換算し $Q_0 = 2.1 \times 10^4$ を用いた．

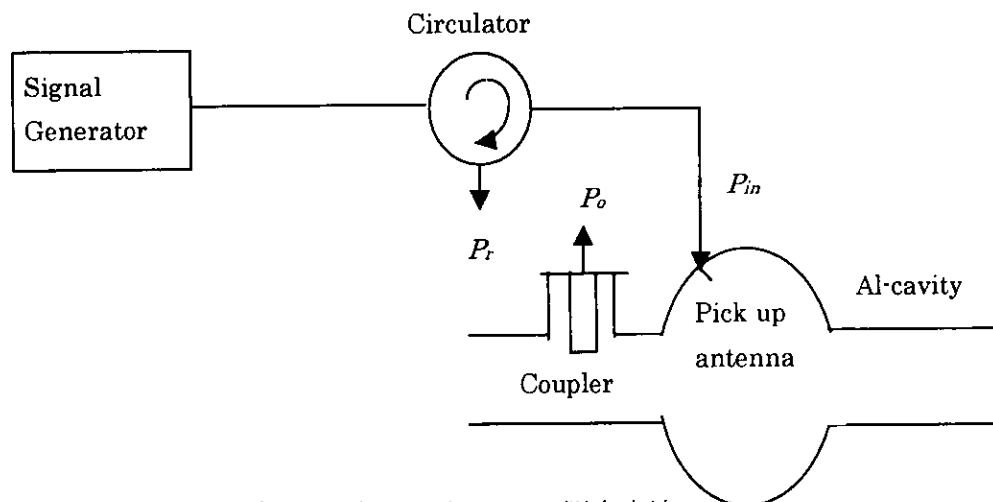


図 2.4.1 カプラの外部 Q 値 Q_{ext} の測定方法

(2) 結果

測定されたカプラのアンテナ突き出し量 $L(\text{mm})$ と Q_{ext} の関係を図 2.4.2 に示す。これより、

$$\begin{aligned} L &= a \log Q_{ext} + b & (2.4.2) \\ a &= -28.85 \\ b &= 151.8 \end{aligned}$$

の関係があることがわかった。 Q_{ext} を 7×10^4 とするとアンテナ突き出し量 L は 12 mm となる。実績より $\pm 5\%$ 範囲内の精度で調整すると、突き出し量は、

$$11.4 \text{ mm} < L < 12.7 \text{ mm}$$

の範囲となり、1.3 mm の調整幅が必要である。そこで、長さ調整は内導体、外導体間のフランジ(コフラット)の銅シール厚さを 1mm ピッチで準備し調整することとした。ただし、銅シール厚さは、シールの締め付け量を約 0.5 mm 加え調整するシールの厚みを求めておく必要がある。

測定された内導体の中心位置軸ずれと軸方向の $1/\beta$ の関係を図 2.4.3 に示す。

$$Q_{ext} = Q_0 \frac{1}{\beta} \quad (2.4.3)$$

の関係より、カプラの Q_{ext} を 7×10^4 に対し $\pm 5\%$ 範囲内精度で調整するためには、

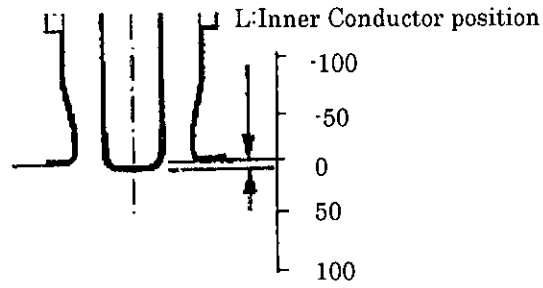
$$\text{ビーム軸方向} \quad -3 \text{ mm} < x < +3 \text{ mm}$$

$$\text{ビーム軸垂直方向} \quad -2 \text{ mm} < y < +4 \text{ mm}$$

の範囲にある必要がある。この精度と余裕を考慮し、軸中心から ± 2 mm の精度で取り付けることとしてフランジ面の精度を決定した。

2. 4. 2 冷却による縮み

測定結果よりアンテナ突き出し量は 12 mm に設定した。これは 4 K に冷却した後のビーム運転での値である。内導体は水冷を行い常に室温であるが、外導体はヘリウムガスで冷却し 4 K から室温まで温度勾配を持つため、冷却による縮みを調べておく必要があった。図 2.4.4 に 2000 年にトンネル D10 内に設置した追加の 4 台の空洞の横測定でのカプラ外導体の縮み量を示す。測定結果より外導体の縮みは約 1.6 mm となり、室温でのアンテナ突き出し量は 10.4 mm に設定する。



Coupler Position - Q_{ext}

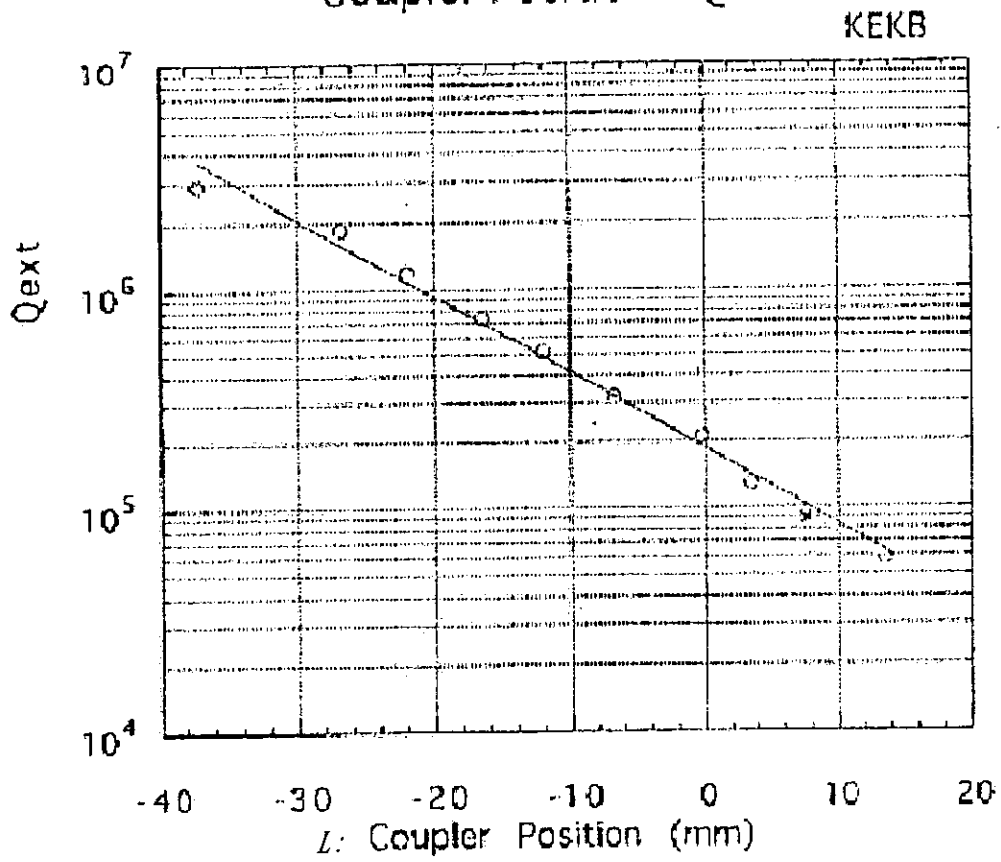
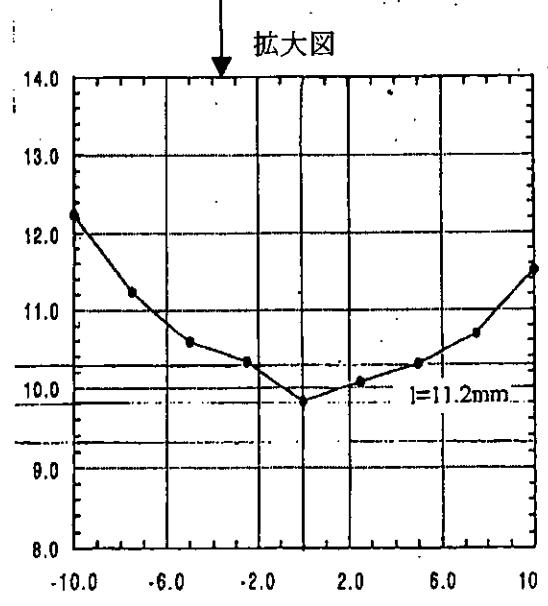
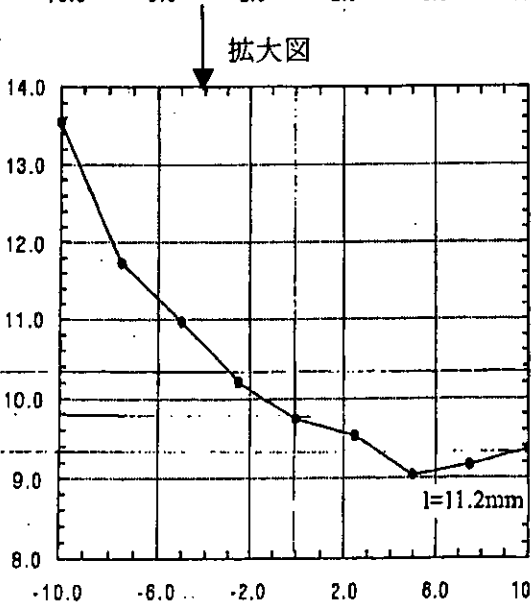
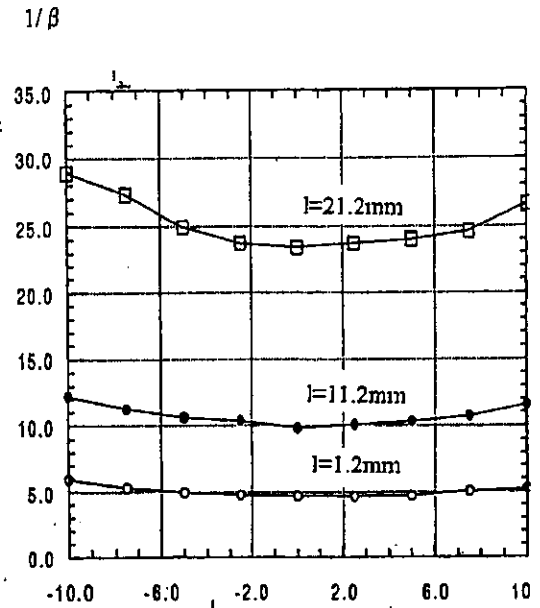
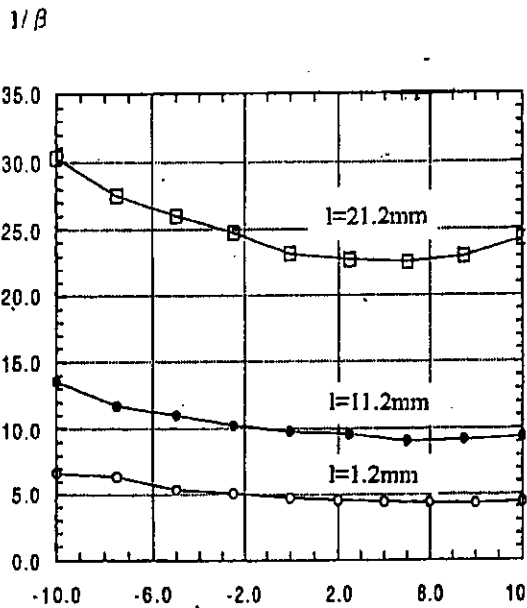
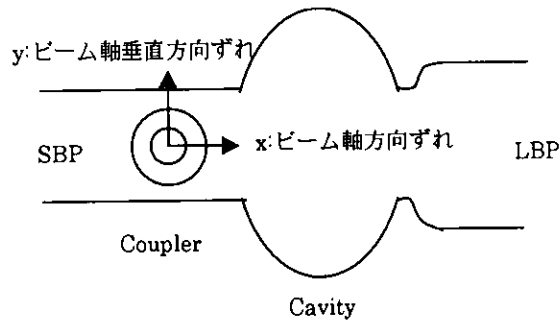


図 2.4.2 カプラアンテナ突き出し量と外部Q値 Q_{ext} との関係

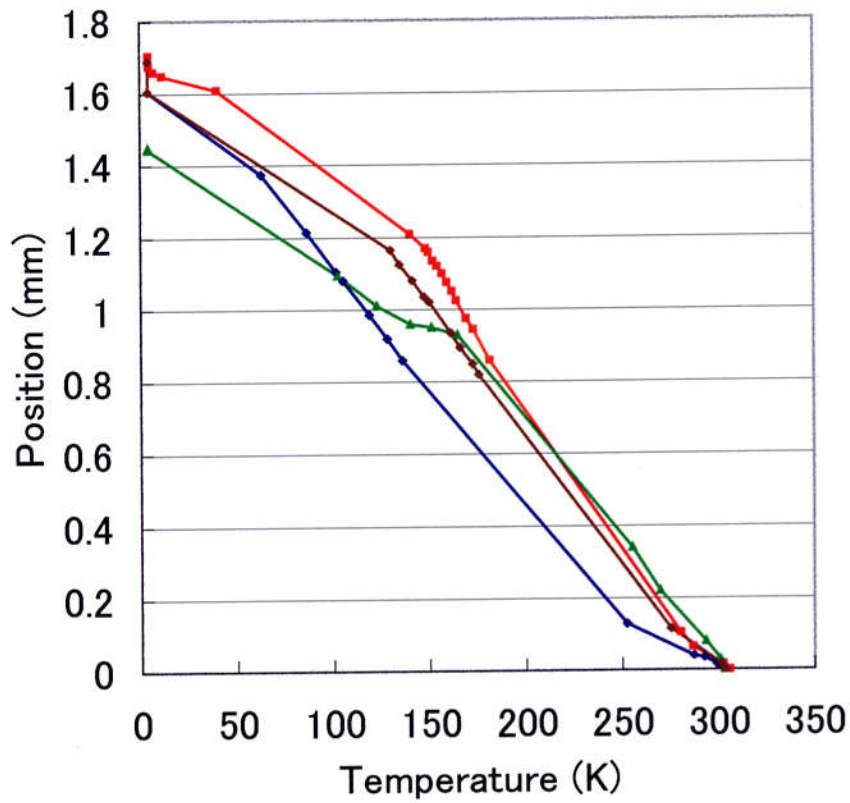


カプラ中心位置軸ずれ
 ビーム軸方向 Δx (mm)

カプラ中心位置軸ずれ
 ビーム軸垂直方向 Δy (mm)

図 2.4.3 カプラアンテナ中心位置からの軸ずれと結合係数 β との関係

外導体縮み



D10A: #5 D10B: #6 D10C: #7 D10D: #8

図 2.4.4 カプラ外導体の冷却による縮み

2. 4. 3 横測定における入力カプラの外部 Q 値の測定

超伝導空洞をクライオスタット内に組み込んだ後、空洞性能とシステム機能の確認のためクライオモジュール単体を 4K に冷却して横測定を実施する。横測定では、空洞の蓄積エネルギーの減衰時間を測定して入力カプラの外部 Q 値 Q_{ext} を求める。

(1) 基本式

空洞内に一定電圧を印加して定常運転している時に入力電力 P_{rf} を off すると空洞内の蓄積エネルギーは壁の損失及びカプラ等からのエネルギー放出により減衰する。その減衰時間から負荷 Q 値 Q_L を求めることができる。

蓄積エネルギー U は、減衰時間を τ_L 及び周波数 ω とすると、

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\tau_L} \cdot U \quad (2.4.4)$$

$$U(t) = U(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_L}\right) \quad (2.4.5)$$

$$\tau_L = Q_L / \omega \quad (2.4.6)$$

で減衰する。超伝導空洞では壁損失は放出電力と比較して無視できることから、蓄積エネルギーの減衰はカプラからの放出電力による減衰のみと考える。入力電力 P_{rf} を off した時のカプラからの放出電力 P_r は、入力カプラの結合係数 β と減衰時間 τ_L の関数として表され、

$$P_r = \frac{4\beta^2}{(1+\beta)^2} P_{rf} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_L}\right) \quad (2.4.7)$$

と指数関数的に減衰する。ただし、 P_{rf} は定常運転状態での空洞の入力電力を示す[8]。放出電力 P_r が 1/2 に減衰する時間を $\tau_{1/2}$ とすると、

$$\exp\left(\frac{\tau_{1/2}}{\tau_L}\right) / \exp\left(\frac{0}{\tau_L}\right) = \frac{1}{2} \quad (2.4.8)$$

の関係より τ_L が得られる。このように入力電力を off した時のカプラからの放出電力 P_r の 1/2 減衰時間 $\tau_{1/2}$ を測定して、空洞の負荷 Q 値 Q_L を求めることができる。

壁損失、モニタ用の他の外部 Q 値 Q'_{ext} が、入力カプラの外部 Q 値 Q_{ext} に比べて無視できると考えると、

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{ext}} + \frac{1}{Q'_{ext}} \approx \frac{1}{Q_{ext}} \quad (2.4.9)$$

より、カプラの外部 Q 値 Q_{ext} が得られる。

(2) 測定結果

2000 年にトンネルに設置した追加 4 台の空洞の測定結果を表 2.4.1 に示す。また、図 2.4.5 に空洞からの放出電力の減衰時間を測定した結果の例を示す。

表 2.4.1 超伝導空洞用カプラの外部Q値

空洞	D10A : #5	D10B : #6	D10C : #7	D10D : #8
1/2 減衰時間	16.8 μ sec	15.2 μ sec	14.2 μ sec	12.8 μ sec
外部 Q 値	7.78×10^4	7.01×10^4	6.55×10^4	5.91×10^4

(注)#5 カプラは破損のため、最初に install したカプラの値を示す。

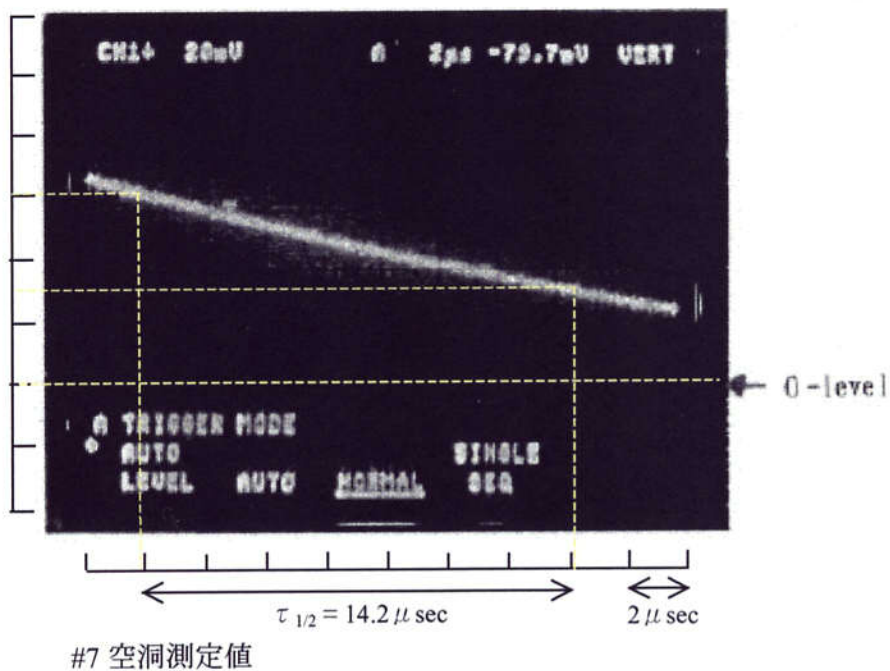
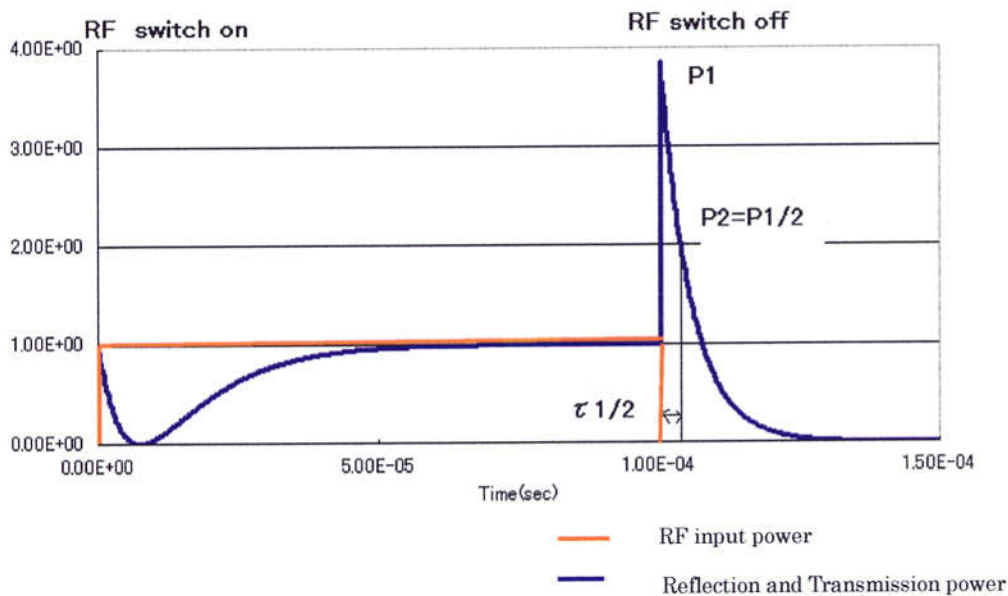


図 2.4.5 反射電力の減衰時間測定

2. 5 カプラスタンドでの大電力試験

カプラ試験用システム（カプラスタンド）を整備して、カプラの大電力試験を行った。カプラに透過波で 870 kW の電力まで入力することができた。

2. 5. 1 カプラスタンドのシステム構成

カプラの大電力入力の試験を行うため 1 MW 級のクライストロンを準備し、図 2.5.1 に示すシステムを組んだ。カプラ 2 本を導波管 WR1500 の断面形状を持つ空洞でつなぎ、クライストロンからの電力をカプラ内に入力し、終端のダミーロードで電力を吸収する構成である。終端ダミーロードの冷却水量上限から、入力電力は透過波連続で 800 kW に制限された。また、カプラ及び導波管空洞には 450 l/sec のターボポンプを用い、 10^{-4} Pa の真真空に保った。

インターロック(IL) は、サーキュレータ、ダミーロードの電力、温度制限などのシステム側のインターロックと、カプラ窓近傍のアークセンサーからの光と真空圧力、入力と反射電力、冷却水水量、温度などのカプラ側のインターロックを準備し、異常時にはクライストロンを落とすように設定した。

カプラ間を繋いだ導波管タイプの空洞は、カプラのアンテナの突き出し量を変更すると反射率が変わる。一方のアンテナを反射なしの突き出し量 102 mm に固定して、もう一方の突き出し量を変えて、low-power で反射電力を調べた。結果を図 2.5.2 に示す。カプラスタンドではアンテナ突き出し量を双方共に 102 mm 付近に設定して入力電力が 100 % 透過するシステムにして大電力試験を行った。KEKB のカプラは、外導体長がカプラスタンドの外導体に比べ短く、内外導体を同時に取り付けると 1 カプラあたり反射率は約 30 % となった。

カプラスタンドを組み立て、冷却水による電力校正、モニタの校正等のシステムの動作確認を行った後、電力試験を開始した。

2. 5. 2 最大入力電力の確認

カプラの大電力試験は、反射無しの透過波で実施し、その結果最大電力 800 kW 以上入力できることを確認した。この入力電力の最大値はダミーロードの容量で制限された。結果を図 2.5.3 に示す。約 10 時間かけて、コンディショニングを行い、透過波で CW 800 kW まで入力できることを確認した。さらに、ダミーロードの温度をモニタしながら、870 kW まで短時間ながら入力することができた。

カプラは透過波で静的に 800 kW 以上の電力を入力できることがわかった。

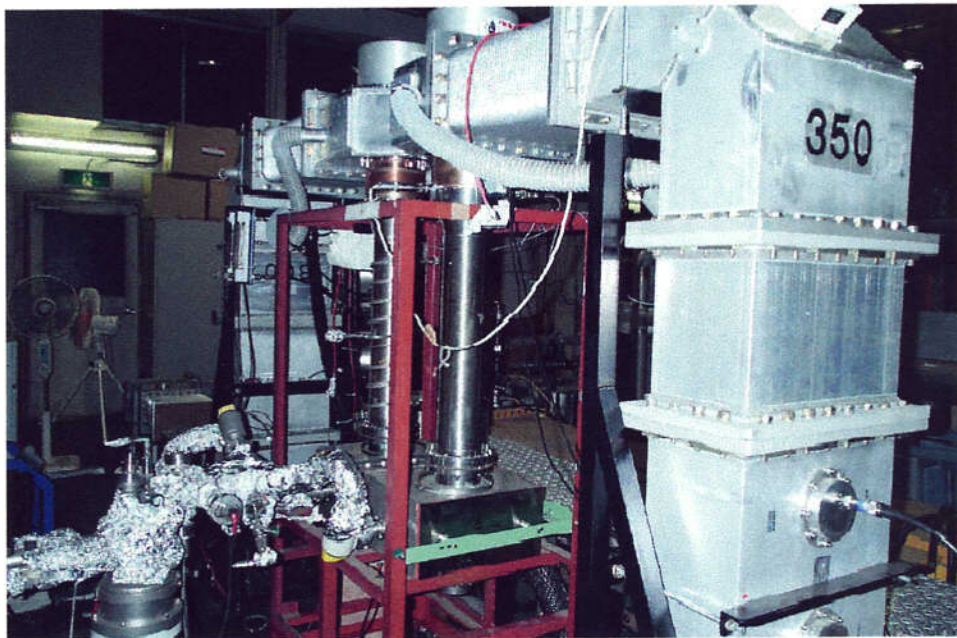
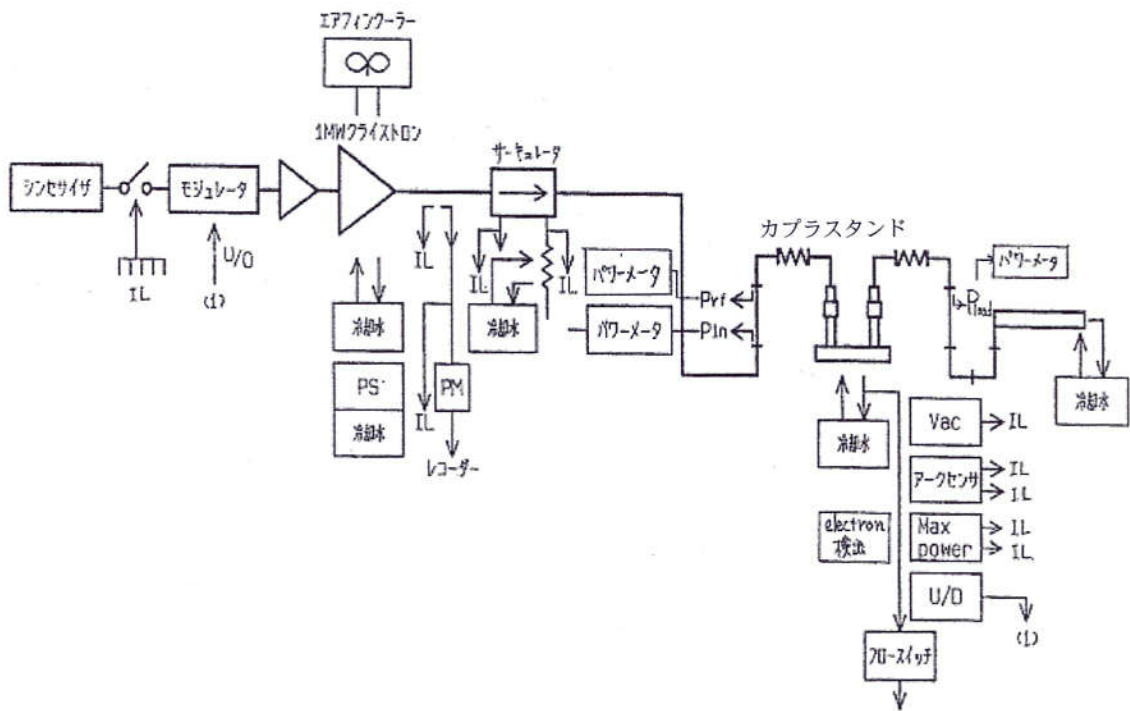
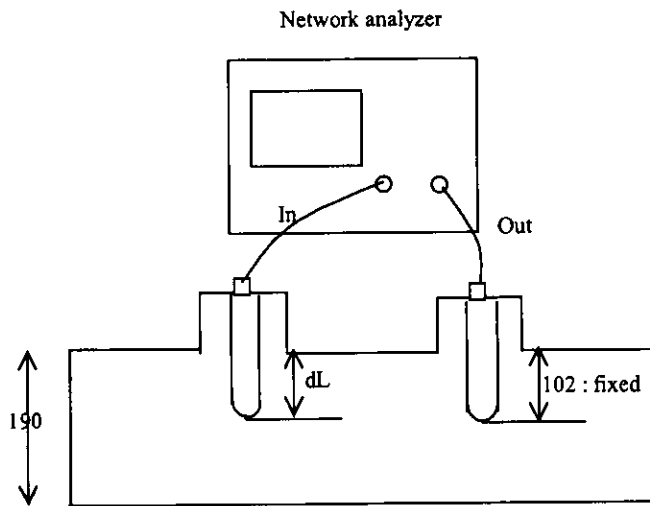


図 2.5.1 カプラスタンドのシステム構成



一方のカプラを反射なし条件
102 mm に固定し、もう一方の
突き出し量 dL と反射率を測定

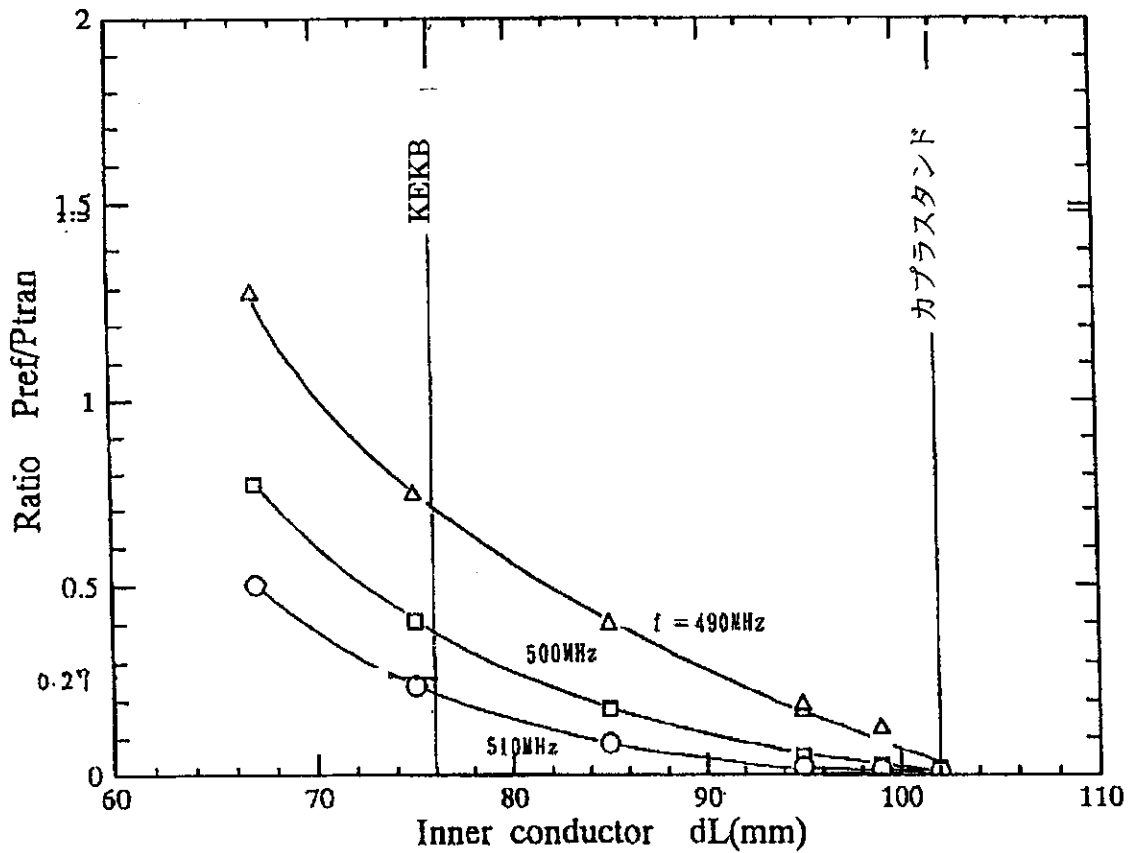


図 2.5.2 カプラスタンドの内導体アンテナ突き出し量と反射電力の関係

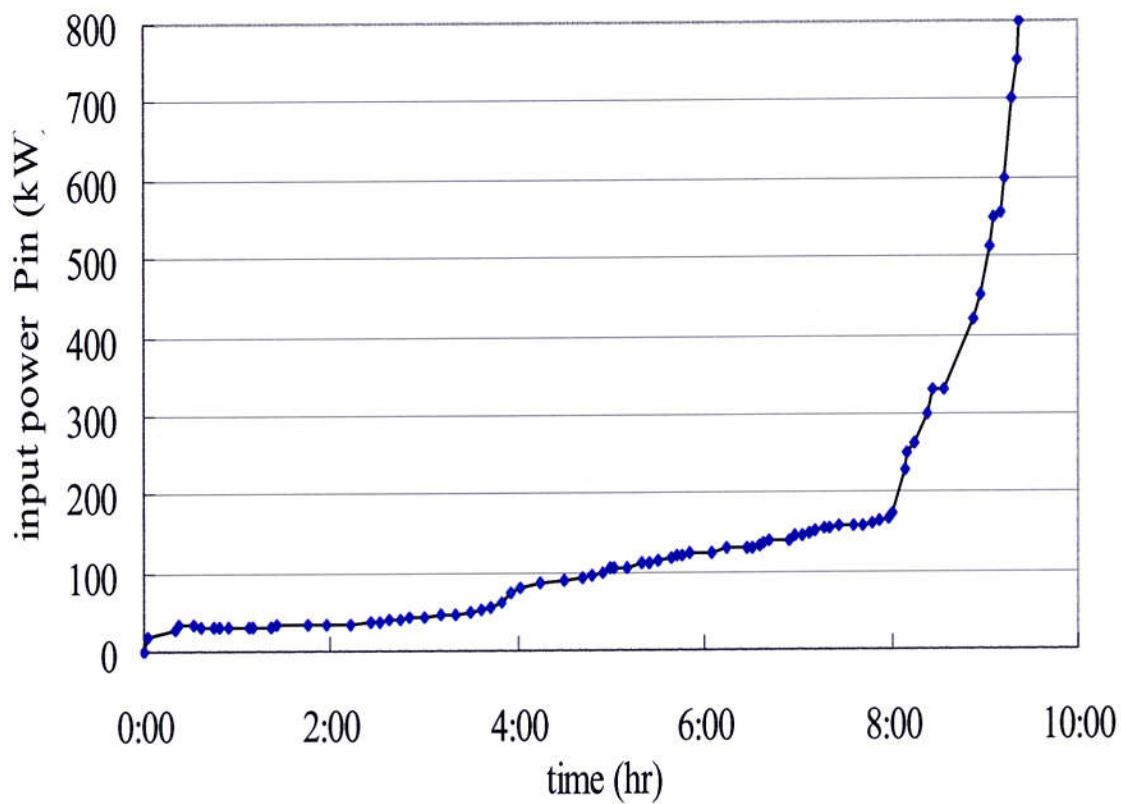


図 2.5.3 カプラスタンドでの最大入力電力の確認
窓部チョーク構造: 3 mm, 純水洗浄

2. 6 カプラ周りのモニタ

カプラの大電力試験のため、カプラ窓近傍のモニタをこれまでの1ポートから3ポートに増強し、次のモニタを準備した。

(1) アークセンサー

TRISTAN で使用していたものと同様、紫外から可視光 (190~1060 nm) 波長領域に感度をもつフォトダイオードを使用している。出力レベル 30 mV でインターロックが働くように設定した。これはコピー用白紙 6 枚挟んで約 5 m 離れた蛍光灯にかざし反応するレベルの感度であった。また、アークセンサーの反応速度は 0.85 msec であり、放電が成長するスピードである数 msec~数十 msec に十分対応できる。アークセンサーの応答速度の測定については Appendix 2 に説明する。

(2) 真空モニタ

窓近傍にイオンゲージを取り付け真空の測定及びインターロック機能を追加した。コンディショニングではシステムの真空度に応じインターロックレベルを変更しているが、KEKB のビーム運転では、 10^{-4} Pa 以上でインターロックが働くように設定されている。

(3) 電子モニタ

径 10 mm のモニタポートに電解研磨した径 4 mm 長さ 52 mm のアンテナを外導体の面位置より約 4 mm 引込み状態で取り付けている。図 2.6.1 に電子モニタの形状を示す。当初は、電子を集めるためアンテナにプラスのバイアス電圧をかけていたが、なしでもモニタできることから、現在はバイアス電圧なしで電流を測定している。

各センサーの応答を図 2.6.2 に示す。

カプラスタンドの試験より、アークセンサーは放電に対して早い応答を示し窓の破損を防ぐため重要であり、電子モニタは放電の前兆を観測でき破損の予知対策用として活用できることがわかった。一方、真空モニタは、電子発生から 50 msec 以上遅れて徐々に立ち上がり、早い応答を必要とする放電などによる破損防止用としては、その応答速度は十分ではない。しかし、真空モニタにより窓の破損やリーク事故を正確に判断することが可能となる。特に空洞の冷却中は空洞表面がクライオポンプ作用を持ち、空洞側の真空ゲージでは小さいリークは検出できない。窓近傍の真空モニタでカプラ側のリークを検出することができ、空洞のダメージを少なく、大事故に至るのを防ぐことができる。

これらのモニタは室温でのコンディショニングにおいてもカプラの状況を判断する上で重要である。

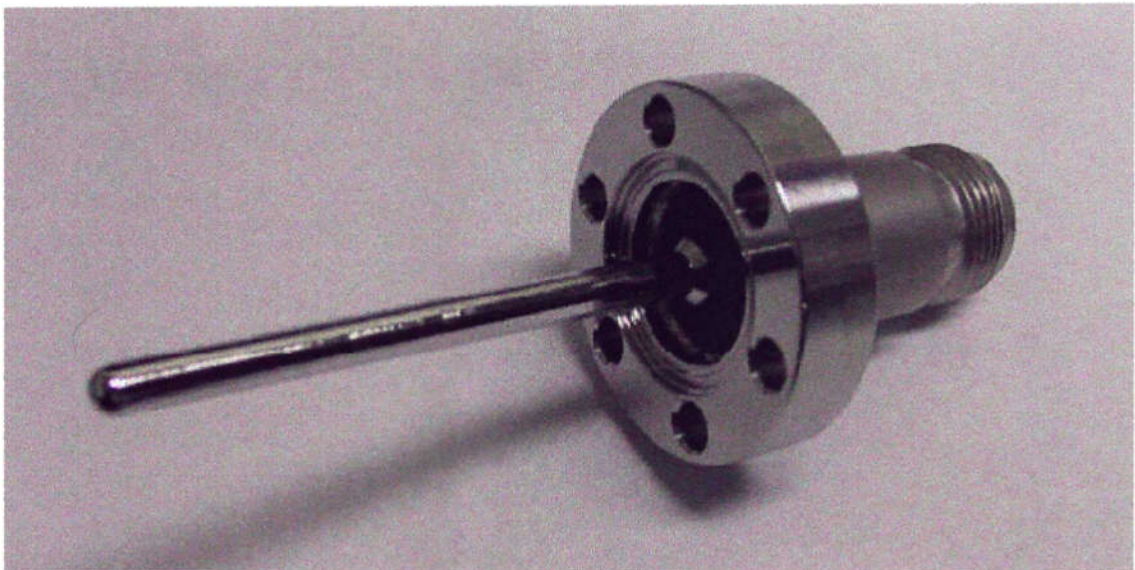
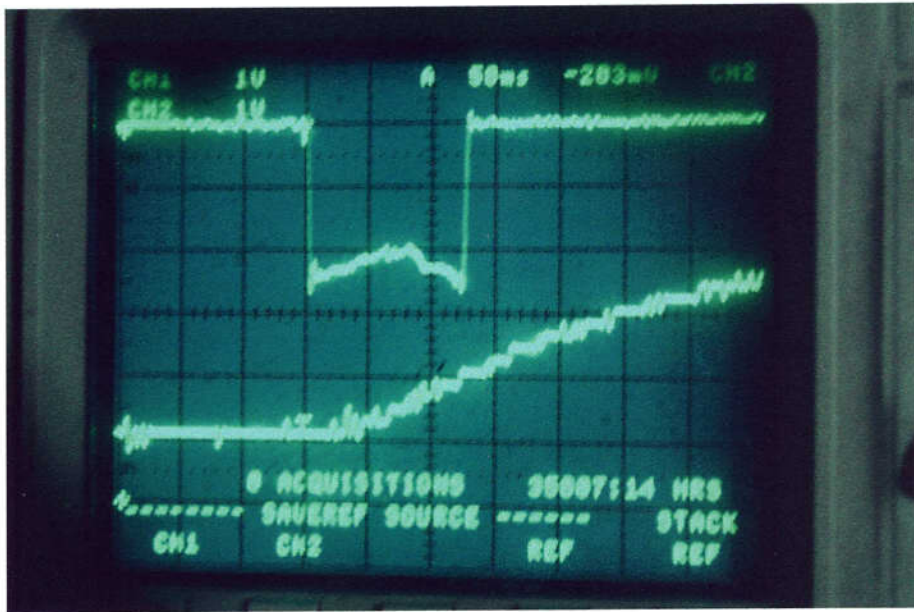


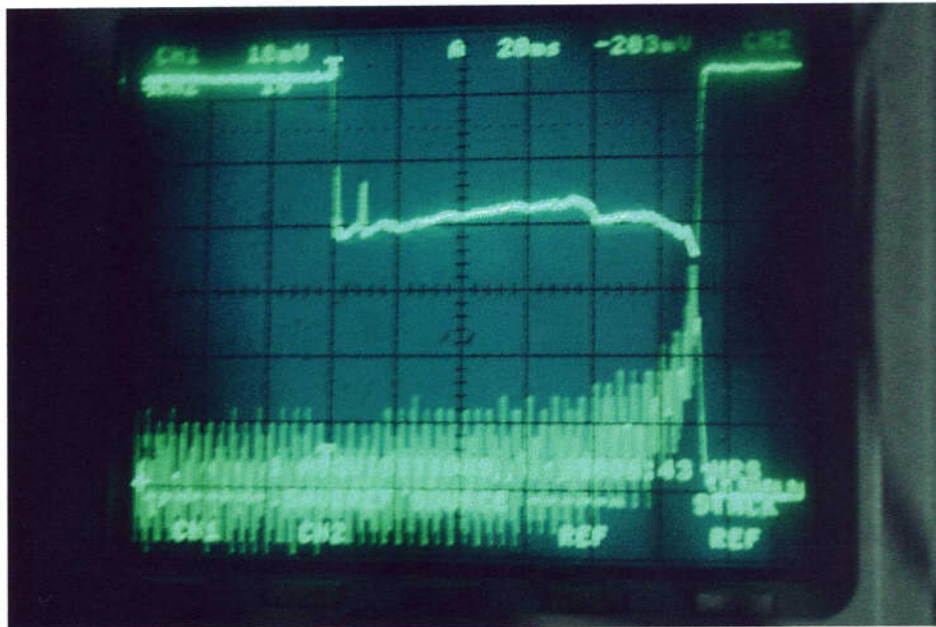
図 2.6.1 電子モニタの構造



▲I/L : アークセンサー作動

電子モニタ (上) と真空度 (下)

横軸 50 msec/div



▲I/L : アークセンサー作動

電子モニタ (上) とアークセンサー (下:10 mV/div)

横軸 20 msec/div

図 2.6.2 各センサーの応答

2. 7 発熱の検討

内導体，外導体，セラミック窓近傍の発熱量を測定し計算結果と比較した．内導体とセラミック窓部の発熱は冷却水温度上昇から，外導体の発熱量は熱平衡状態から電力を切った時の温度変化より求めた．また，計算は以下の式を用いた．

(1) 発熱量の計算

① 同軸内導体と外導体の発熱

同軸管の単位長さあたりの電力損失 P_{loss} は同軸 z 方向の入力電力 P と減衰率 α より，

$$P_{loss} = -\frac{dP}{dz} = 2\alpha P \quad (2.7.1)$$

で求めることができる．同軸の場合，

$$\alpha = \frac{\sqrt{\epsilon_0/\mu_0}}{2 \cdot \sigma \cdot \delta} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) / \ln \frac{b}{a} \quad (2.7.2)$$

ただし Z_0 : 同軸のインピーダンス

H_r : 同軸内磁場

σ : 電導度 (Cu 5.8×10^7 1/ Ω m)

δ : 表皮厚さ ($\sqrt{2/\omega \mu \sigma}$)

$2a$: 内導体径 $\phi 53$ mm

$2b$: 外導体径 $\phi 120$ mm

である．電力損失 P_{loss} の内導体，外導体比率は $1/a$: $1/b$ となり，

$$P_{loss}(\text{inner}) = 7.1 \times 10^{-4} \cdot P \quad [\text{W/m}] \quad (2.7.3)$$

$$P_{loss}(\text{outer}) = 3.1 \times 10^{-4} \cdot P \quad [\text{W/m}] \quad (2.7.4)$$

内導体の冷却部長さを 884 mm，外導体の長さを 740 mm とすると透過電力 300 kW を入力した時の発熱量は各々 188 W，69 W となる．

② セラミックの発熱

円筒平板と仮定して誘電損を求める．

セラミック内平均電場を E とすると，セラミック発熱密度 W は，

$$W = \omega \epsilon E^2 \tan \delta \quad (2.7.5)$$

体積 Δu のセラミック損失 Δw は，

$$\Delta w = W \cdot \Delta u \quad (2.7.6)$$

で与えられる．誘電率 ϵ は $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ であり， ϵ_r は比誘電率， ϵ_0 は真空の誘電率を示す．アルミナのメーカーカタログ値より

$$\epsilon_r = 9 \quad (9.2 @ 1\text{MHz}, 8.8 @ 10\text{GHz})$$

$$\tan \delta = 5 \times 10^{-4} \quad (3 \times 10^{-4} @ 1\text{MHz}, 6 \times 10^{-4} @ 10\text{GHz})$$

とすると、透過波 300 kW を入力した時の発熱量は 155 W となる。

(2) 測定結果

内導体とセラミック窓部については冷却水の温度上昇より発熱量を求めた。図 2.7.1, 図 2.7.2 に測定値を示す。外導体については熱平衡状態から入力電力を切った時の温度変化より熱放出量を求め、その値を発熱量とした。入力電力 P で、

$$P_{loss}(outer) = 2.1 \times 10^{-4} \cdot P \quad [\text{W/m}] \quad (2.7.7)$$

の値を得た[9]。

表 2.7.1 に発熱量の計算及び測定の結果をまとめた。計算値と測定値は概ね一致していることがわかる。

表 2.7.1 カプラ発熱量 計算と測定の比較
室温 カプラスタンドで測定

	計算	測定
	300 kW 入力換算	300 kW 入力時
窓 セラミック	155 W	} 250 ~ 300 W
Cu 冷却部	18 W	
内導体	188 W	180 ~ 200 W
外導体	69 W	46 W

(3) 外導体の冷却による発熱量の変化

空洞が 4 K での運転に入ると、外導体もヘリウムガスで冷やされ 4 K から室温まで温度分布を持つ。カプラスタンドで測定した外導体の発熱量は室温の値であり、4 K での発熱量に比較換算する。

外導体表面のピロリン酸銅鍍金の抵抗率 ρ と RRR (residual resistance ratio) の測定を行った。その結果、

$$\rho(4\text{K}) = 0.45 \times 10^{-8} \quad [\Omega\text{m}]$$

$$\rho(300\text{K}) = 2.5 \times 10^{-8} \quad [\Omega\text{m}]$$

$$\text{RRR} = 5.5$$

の値を得た。測定方法及び結果詳細は Appendix 3 に示す。発熱量は $\sqrt{\rho}$ に比例することから 4 K では、43% に減少する。

また、確認のため文献の RRR と抵抗率 ρ の関係と、今回の測定値を図 2.7.3 に示す。

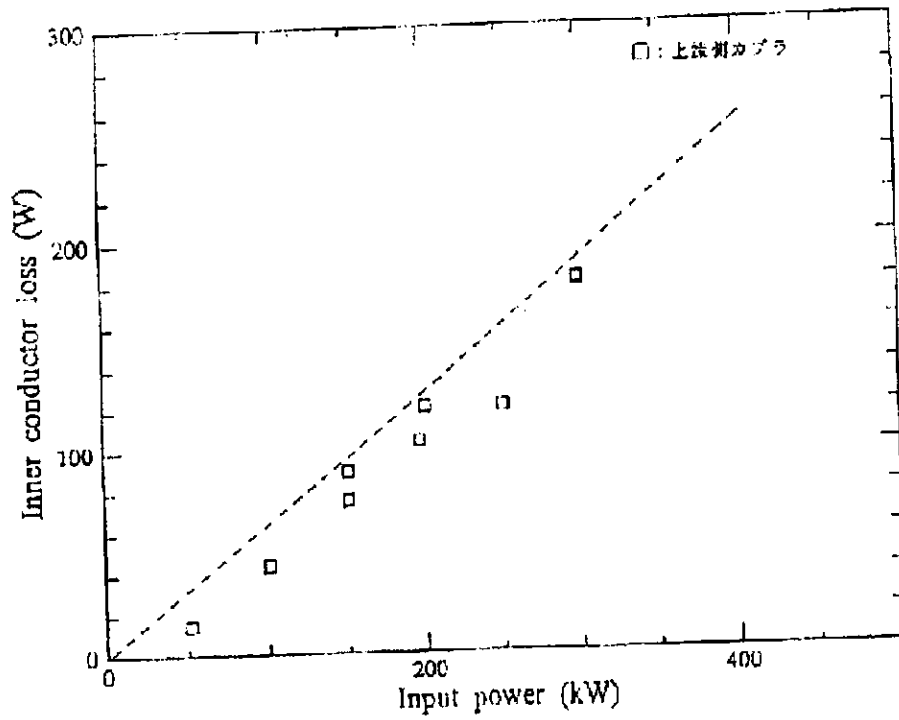


図 2.7.1 入力電力と内導体の発熱量 (透過波入力)

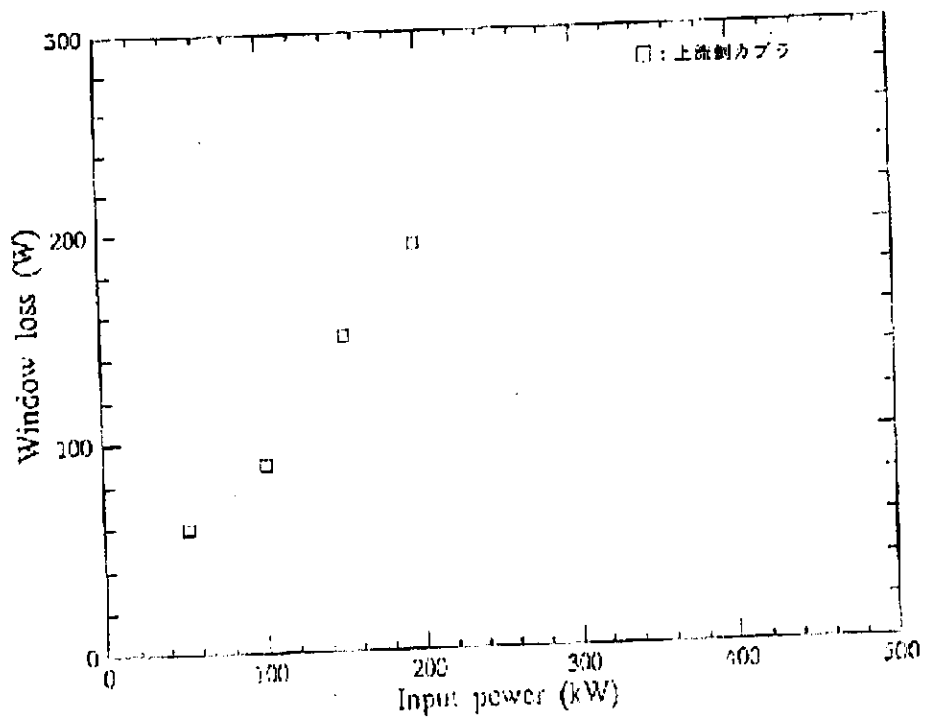
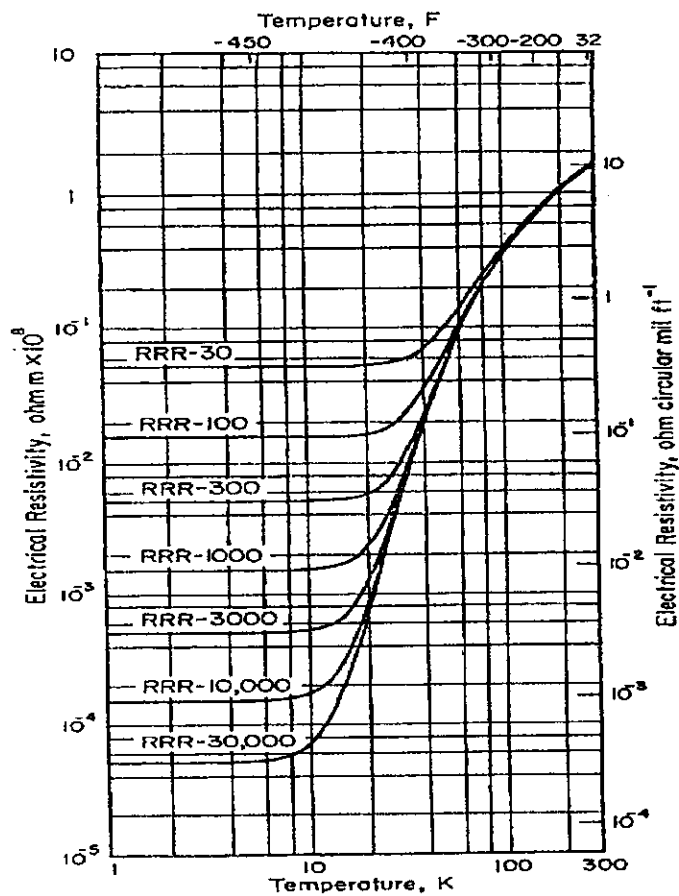


図 2.7.2 入力電力と窓部の発熱量 (透過波入力)



ELECTRICAL RESISTIVITY VERSUS TEMPERATURE FOR COPPER [10]

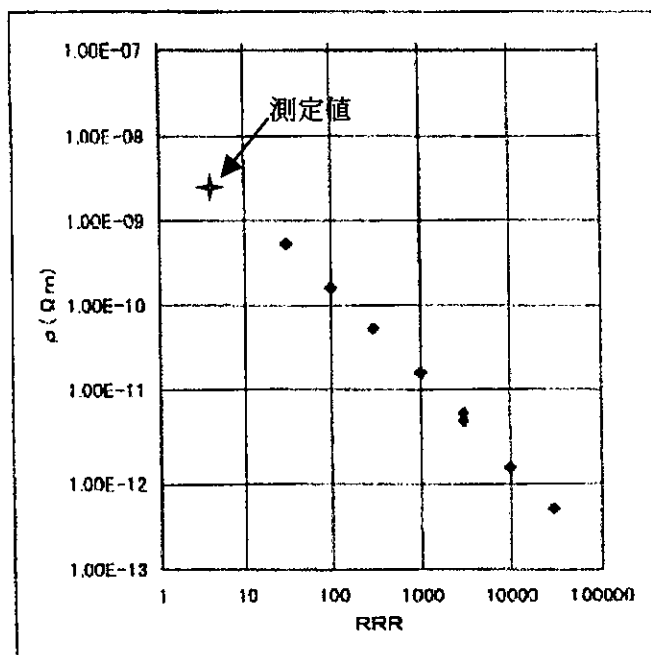


図 2.7.3 銅の残留抵抗 (RRR) と 4 K での抵抗率 ρ の関係

2. 8 表面処理方法とガスの影響

2. 8. 1 オゾン水洗浄

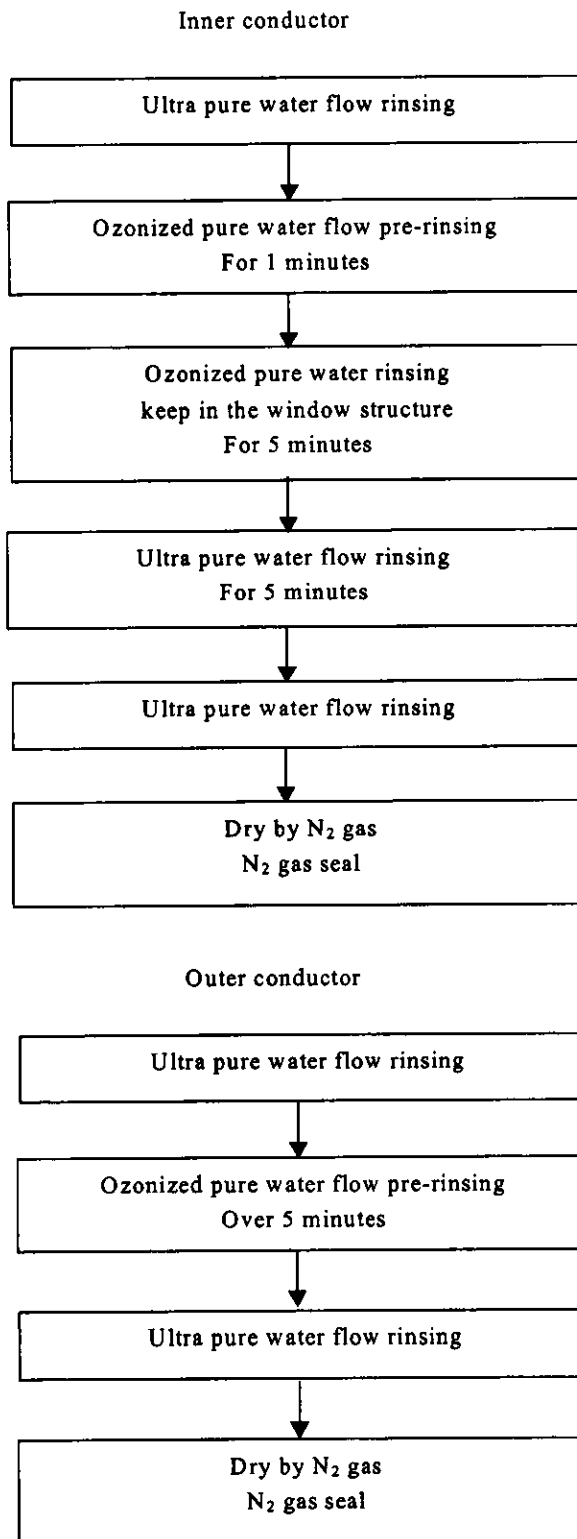
洗浄効果を比較するため、超純水洗浄後とオゾン水洗浄後のコンディショニング時間とインターロック作動回数を確認した。図 2.8.1, 図 2.8.2 にその結果を示す。超純水洗浄では 30~180 kW の入力電力で頻繁にインターロックが作動しこの間のコンディショニング時間は 8 時間も要した。200 kW 以上ではほとんど問題なくパワーをあげることができた。一方、オゾン水洗浄では 200 kW 以下のインターロック作動回数が減少したが、全入力電力にわたり、圧力上昇が観測された。コンディショニングで 800 kW に達する時間は双方変わらないが、200 kW に達する時間はオゾン水洗浄のほうが短く約 1/2 の時間となった。

通常 300 kW までコンディショニングを行うので、その時間が短縮でき有効であると考え、内導体及び外導体共にオゾン水洗浄を実施することにした。オゾン水のかけ洗いを 5 分以上行い、内導体セラミック窓部は 5 分以上オゾン水を溜めている。洗浄手順を表 2.8.1 に、内導体のオゾン水洗浄の写真を図 2.8.3. に示す。

超純水とオゾン水は、各々次の特性を満足する。

超純水	
抵抗値	18 M Ω
フィルター	1 μ m
オゾン水	
オゾン濃度	3 ppm
流量	1 l/min

表 2.8.1 オゾン水洗浄の手順



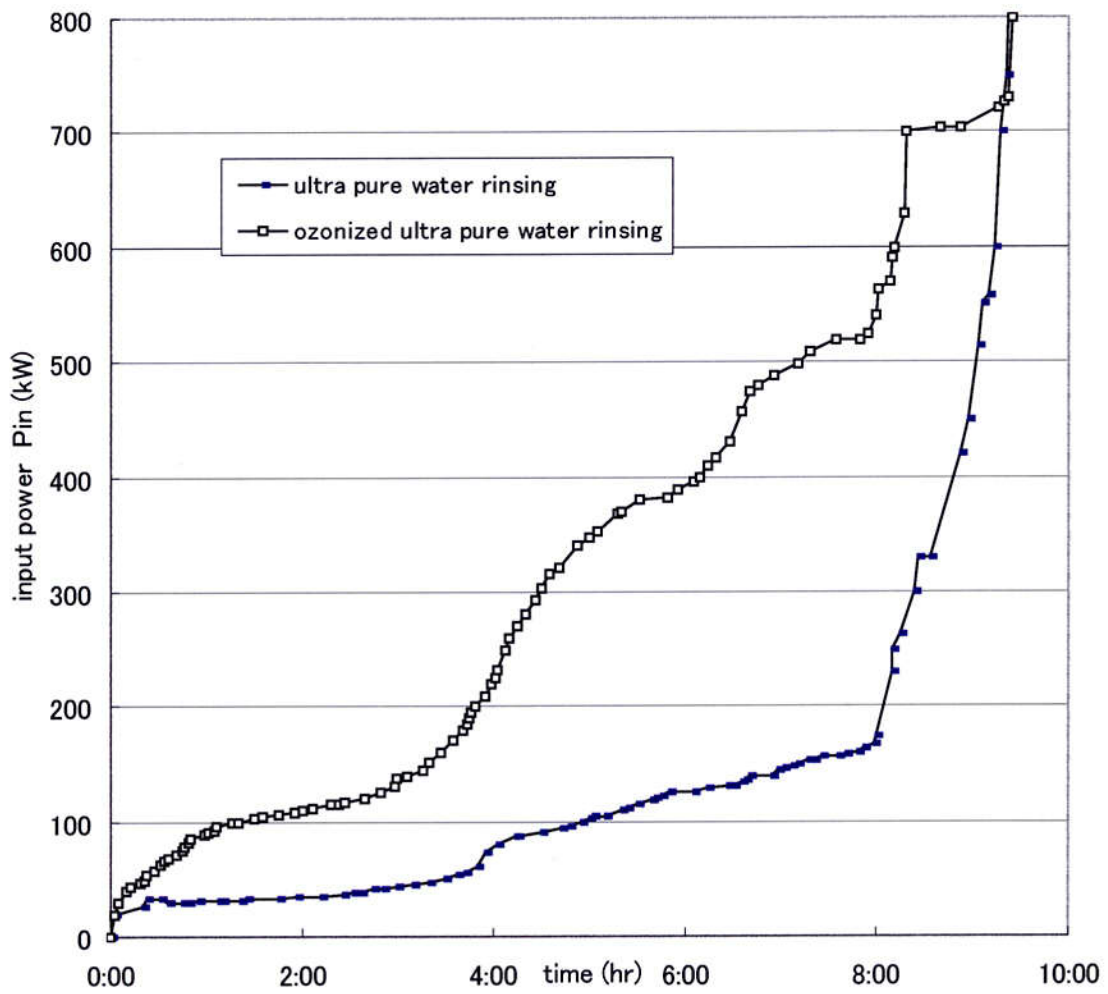
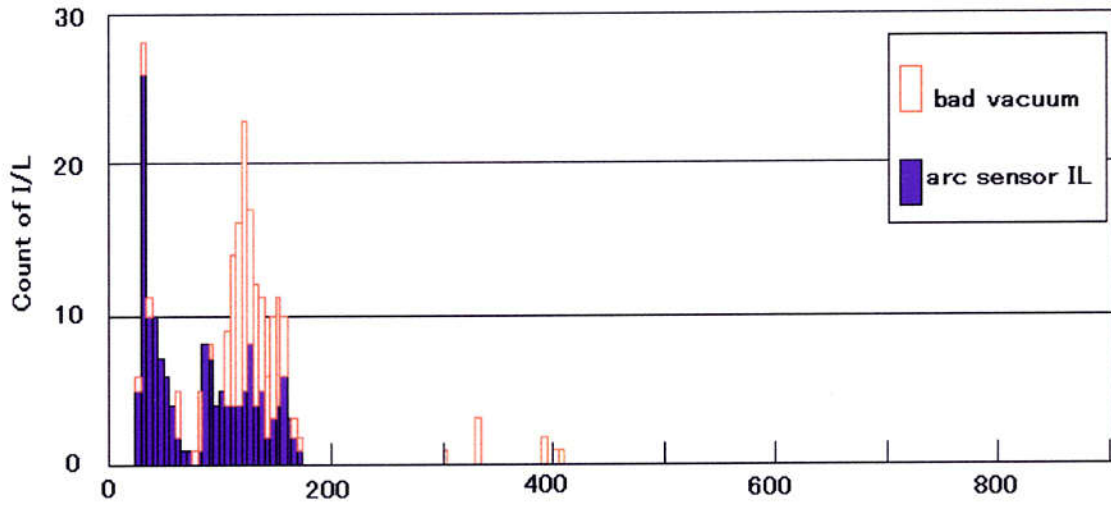


図 2.8.1 洗浄方法によるコンディショニング時間の比較
オゾン水洗浄と超純水洗浄

超純水洗浄



オゾン水洗浄

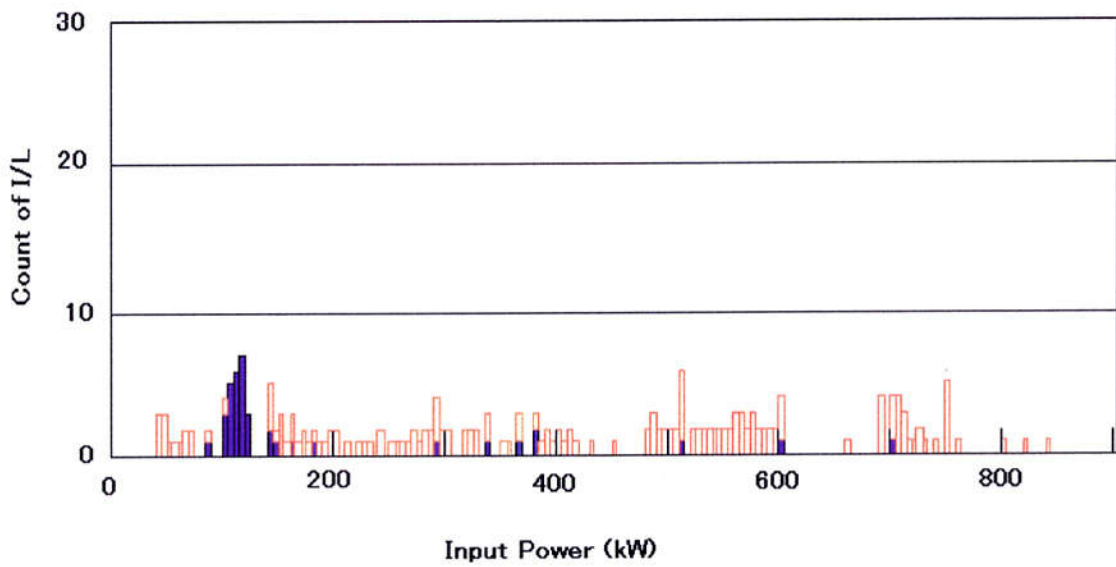


図 2.8.2 洗浄方法によるインターロック作動回数の比較
オゾン水洗浄と超純水洗浄



図 2.8.3 カプラ内導体のオゾン水洗浄

2. 8. 2 パージ方法

カプラ単体のコンディショニングの後、カプラは一旦大気開放されクライオスタットへ組み込まれる。この大気開放の作業工程がカプラに及ぼす影響について測定した。コンディショニングを終了したカプラを、N₂ ガス又は Air でパージしその記憶状況について確認した。その結果より、大気開放時のパージ方法、その取り扱いを決定した。ここでは、清浄なガスを封入することをパージと呼ぶ。

次のステップでパージした後電力を投入し、そのプロセス時間を測定した。

Step1) 超純水洗浄後の電力入力試験

(注：カプラスタンドのコンディショニング時間を含む)

Step2) N₂ パージし 3 時間保持した後の電力入力試験

Step3) N₂ パージし 1 分後に Air パージして 3 時間保持した後の電力入力試験

Step4) Air パージし 3 時間保持した後の電力入力試験

Step5) 真空保持した後の電力入力試験

結果を図 2.8.4 に示す。

Step 1 では純水洗浄した内導体を 440 kW (図は 120 kW までの状況を示した)までコンディショニングを行い、コンディショニング後はインターロック作動せずパワー入力出来ることを確認した。Step 2 - Step 4 では、N₂ パージ、air パージの影響を測定した。この結果より、コンディショニング後はその効果は記憶され、パージするガスによる大きな差異は見られなかった。また、コンディショニング効果の保持のためには、真空保持が有効であることがわかった。

コンディショニング時間が air パージに比べて多少短くできることから、実機では最初に N₂ パージを行い、その後に air に開放する従来の方法を採用した。カプラ単体のコンディショニング終了後は真空に保持し、カプラ取り付け前に N₂ パージし、数時間以内にクリーンブースからカプラ取り付け作業を実施することにした。

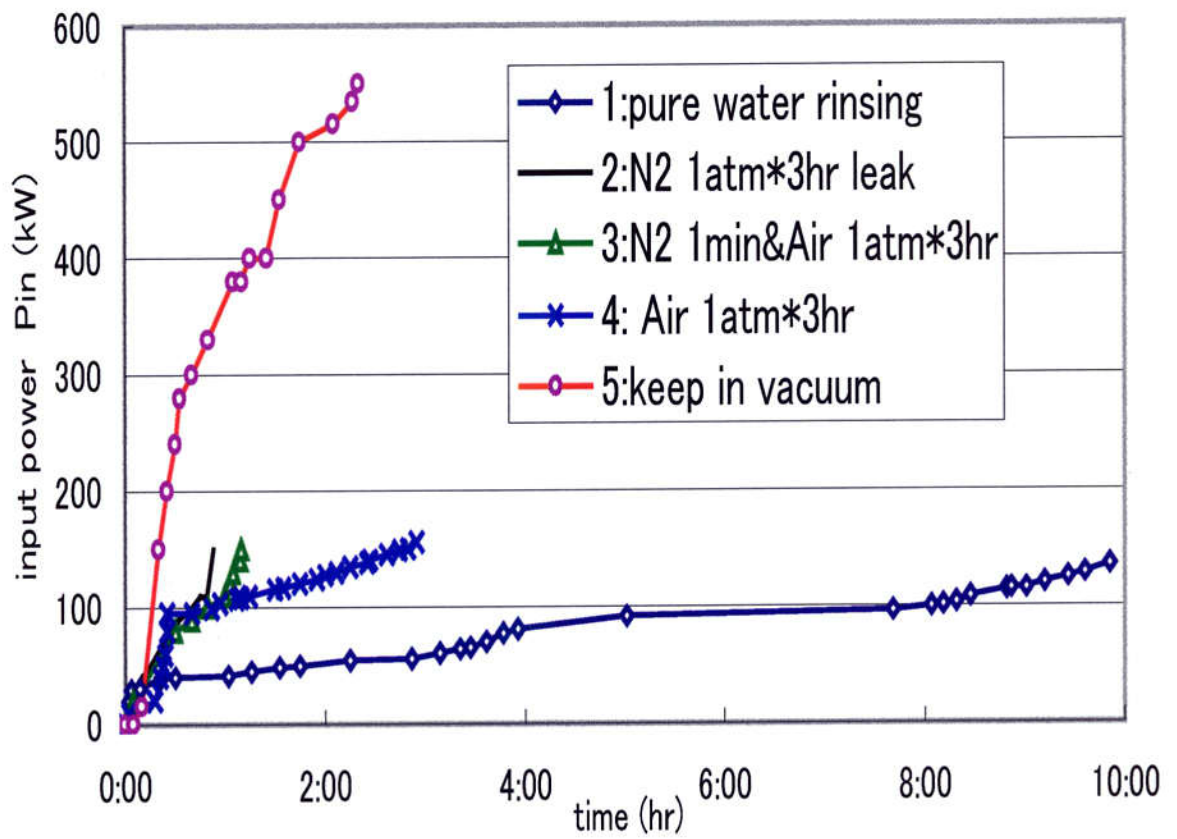


図 2.8.4 パージガスとコンディショニングの効果

2. 9 コンディショニング方法の検討

2. 9. 1 バイアス電圧印加によるコンディショニングの採用

1996年にARリングで大電流加速のため超伝導空洞のビームスタディを行った。このビームスタディ中にカプラ内圧力上昇によるインターロックでビームが落ちる状況が頻発した。そこで、マルチパクタリングを抑える目的でカプラ内導体にバイアス電圧 -700 V をかけて運転した。この時、カプラ窓近傍で一度大きな圧力上昇と、カプラの温度上昇が観測されたが、その後はそういう現象は発生せずビームを安定に加速することができた。バイアス電圧を印加することで、マルチパクタリングが誘起されて、カプラのコンディショニングが進んだと想像された。

この経験から、KEKBではバイアス電圧を印加し、さらにバイアス電圧の極性と大きさを変化させて、積極的にマルチパクタリングを広い範囲で誘起させる方法をコンディショニングに利用することを試みた。この方法は、マルチパクタリングによる電子照射の効果で、表面を放電の起こりにくい状態に変え徐々にカプラを枯らすことができると考えられる。

バイアス電圧を用いたコンディショニングの効果については次章以降で述べる。

2. 9. 2 コンディショニングの手順

カプラのコンディショニング手順を表 2.9.1 に示す[11][12].

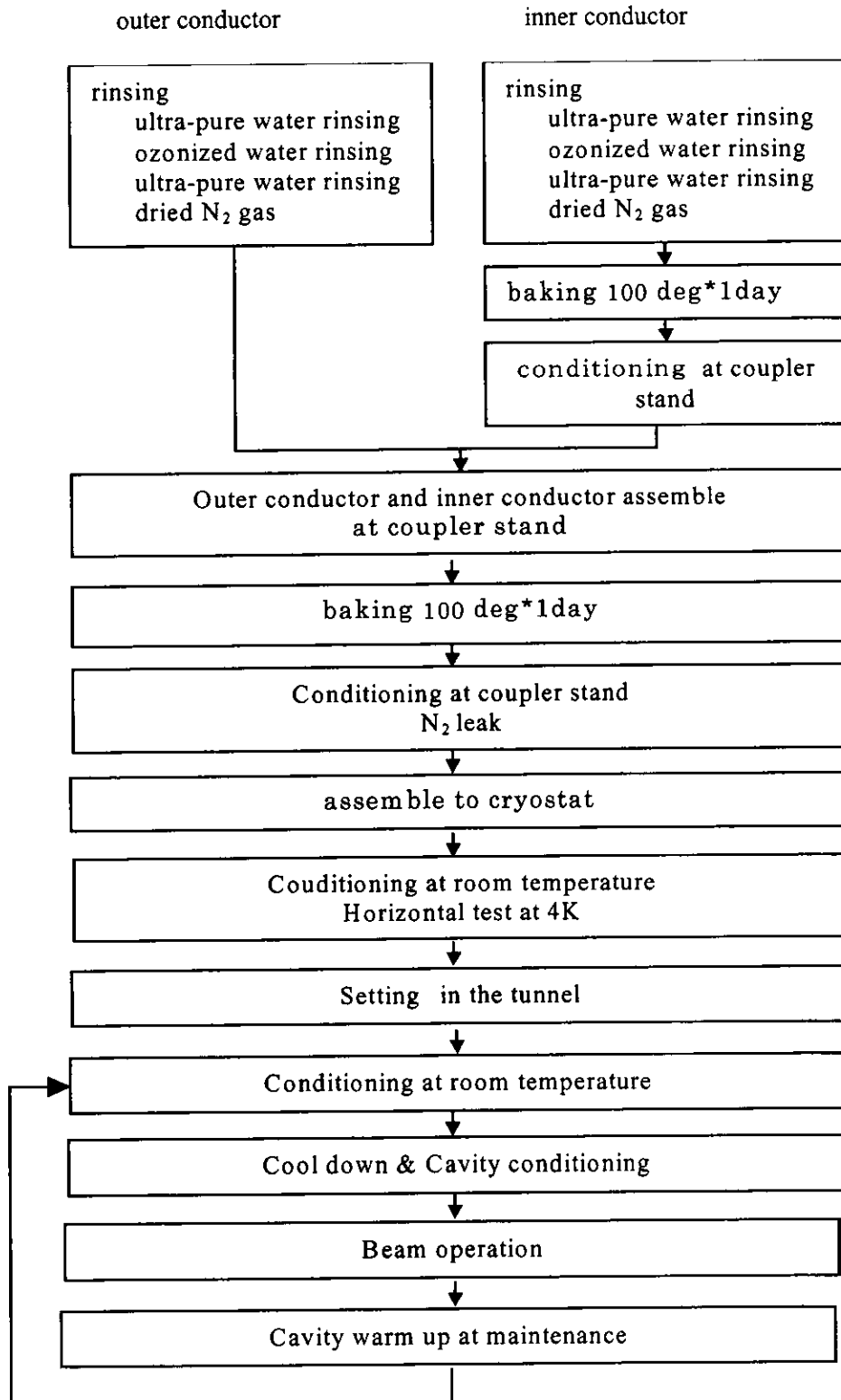
まず、カプラをオゾン水洗浄し、カプラスタンドに取り付け 100℃でベーキングを行った後、室温でコンディショニングを実施する。カプラスタンドでカプラ単体のコンディショニングが終了した後は、N₂ ガスでパージしてクリーンブース内にカプラを取り出し、数時間以内にクライオスタット内の空洞に取り付ける。

カプラの取り付け、取り外しの時にはセラミック窓部へのごみの汚染等が発生しないように取り扱いに十分注意する必要がある。セラミック窓はコンディショニングなどで帯電している可能性もあり、小さなごみを付着しやすい状況にある。KEKB では、セラミック窓真空側は下側に向いているので汚染は少ない構成になっている。また、取り付け時には、カプラと空洞の汚染を避けるため簡易型のクリーンブースで覆い、かつクリーンなエアを片側からファンで送風しごみによる汚染を最小になるよう注意を払っている。図 2.9.1 にクライオスタットへのカプラ取り付け状況の写真を示す。

カプラがクライオスタットに取り付けられた後は、冷却前の室温の状態バイアス電圧を印加してカプラのコンディショニングを行う。その後、空洞はヘリウム温度まで冷却されビーム運転に入る。

ビーム運転後のメンテナンス期間には、空洞はウォームアップされ多量の凝縮ガスを放出するため、室温でカプラのコンディショニングを行う。このように、室温では必ずカプラのコンディショニングを実施して、表面を清浄化してビーム運転に臨んでいる。

表 2.9.1 カブラのコンディショニング手順



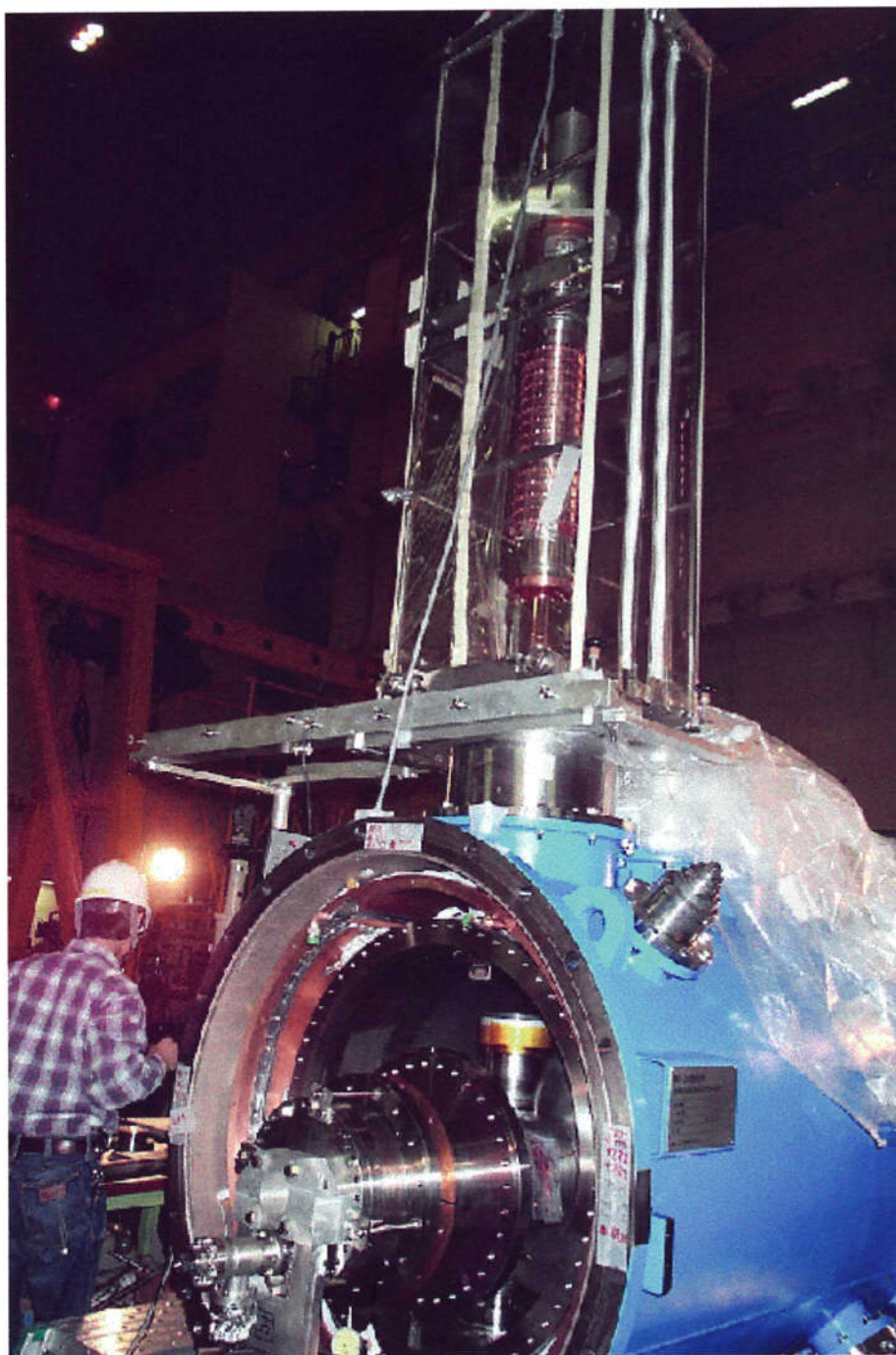


図 2.9.1 クライオスタットへのカプラの取り付け状況

第3章 マルチパクタリングの計算とレベルの確認

3. 1 マルチパクタリングに起因する現象

カプラのコンディショニングやビーム運転では、カプラに取り付けたモニタにより電子の発生及び圧力上昇、放電による光が観測される。カプラ内で発生するこれらの現象は、マルチパクタリングに起因すると考えられる。後の章で説明するように、カプラテストスタンド及び実機コンディショニングにより次のような現象があることがわかっている。

- ① バイアス電圧なしの初期コンディショニングにおいて、セラミック窓近傍に光を伴う放電が発生する。まず、カプラ内の特にセラミック窓部で電子が発生し、セラミック窓近傍で電子が急激に増加するのに伴い、放電による光が発生する。
- ② バイアス電圧なしの初期コンディショニングにおいて、同軸アンテナ部に電子が発生し圧力が上昇する。同軸アンテナ部全体に電子が発生するが、圧力が上昇するのみで放電光は観測されない。
- ③ 内外導体間にバイアス電圧を印加したコンディショニングにおいて、マルチパクタリングを継続的に発生する条件になり、電子はパルス的に継続して発生し、同時に圧力上昇を伴う。
- ④ ビーム運転中に、大きな電力変動と位相変動が発生し、カプラ内圧力が急激に上昇する。
- ⑤ ビーム運転中に、ある電力レベルで連続して圧力上昇が発生する。長期のビーム運転中やトラブルによるカプラ交換直後に発生する。カプラ外導体面の表面状態、ガス凝縮などによると推定される。

これらは表面状態のみでなく、カプラの構造がマルチパクタリングを発生させる周期条件に合う形状になっているためと考えられる。二次電子放出係数と表面に関しては第4章に記載することとし、この章では、同軸部、窓部の構造によって発生するマルチパクタリングの電力レベルを検討した。まず、解析解について述べ、作成した同軸のシミュレーションコードの内容と結果を示す。次に、マルチパクタリング発生電力レベル、反射率が変動した場合の影響、バイアス電圧をかけたコンディショニングの効果について考察する。

3. 2 マルチパクタリングの理論と解析解

3. 2. 1 マルチパクタリング発生の機構

マルチパクタリングは、電子が RF 電磁場に同期して材料表面に衝突し、電子が指数関数的に増加する現象を指し、次のような機構で発生する。

光や電磁場、放射線などが原因で一次電子が構造体の表面から放出される。放出された一次電子は RF 電場で加速され、壁(構造体表面)に衝突する。この衝突の条件により、構造体表面から二次電子が放出される。二次電子は、放出時の RF 電場が二次電子を加速する方向であれば放出され、放出される二次電子数(二次電子放出係数)は一次電子の衝突エネルギーと衝突角度、材料表面により決まる。電子が構造体表面に衝突する周期が RF 電磁場の周期と同期し、かつ表面の二次電子放出係数が 1 以上であるとき、電子発生は継続し、電子数は指数関数的に増加する。このようにマルチパクタリングが継続する場合、電子放出数の上限は、電子による空間電荷効果と RF の入力電力により抑制される。

マルチパクタリングは放出された電子が元の場所に戻ってくる 1 ポイントマルチパクタリングと対向する二点間で衝突を繰り返す 2 ポイントマルチパクタリングなどがある。

3. 2. 2 解析解

(1) 1 ポイントマルチパクタリング

磁場が支配的で放出した電子が磁場により円軌道を描き、再び放出した表面位置に戻るといったモデルを想定する。周波数 ω 、磁束密度 B の高周波内では、

$$\omega/n \sim e \cdot B/m \quad (3.2.1)$$

の条件を満たす場合に周期条件が成立する。ここで n は二次電子が発生して次に衝突するまでの RF の次数、 e と m は電子の電荷及び質量を示す。このモデルは電場の影響が小さく磁場の大きな部分—例えば超伝導空洞の赤道部付近—では良い近似を得るが、電場が支配的な領域や分布が一様でないモデルでは正確な電力レベルの評価は難しい。ここで問題としているカプラにおいて、1 ポイントマルチパクタリングは発生するが、カプラ内では電場がマルチパクタリングの条件を決定しているため、このモデルには当てはまらない。

(2) 2 ポイントマルチパクタリング

平行平板電極間の 2 ポイントマルチパクタリングは電場のみ考慮した条件で厳密解が得られている。

運動方程式は、

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{eE}{m} \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3.2.2)$$

となり、時間 t での電子の位置は、

$$x = -\frac{eE}{\omega^2 m} [\sin(\omega \cdot t + \phi) - \sin \phi] + \frac{eE}{\omega m} \cdot t \cdot \cos \phi \quad (3.2.3)$$

となる。電極間距離を d とすると $x = d$ で対向する電極に衝突する。電子が飛び出す時の電場が電子を加速する方向で、かつ対向電極に衝突するときの位相が一次電子を放出した時の位相と逆位相であれば、電子は加速され衝突を繰り返す。すなわち、

マルチパクタリングの条件は $0 \leq \phi \leq \pi/2$, $t = \frac{(2n-1)\pi}{\omega}$ の時、

$$d = \frac{eE}{\omega^2 m} \cdot [2 \sin \phi + (2n-1)\pi \cos \phi] \quad (3.2.4)$$

を満たせば良い。これを解くと

$$\text{一次} : n = 1 \quad \phi = 32.48 \text{ deg} \quad 0.267 \leq \frac{eE}{\omega^2 md} \leq 0.5 \quad (3.2.5.a)$$

$$\text{二次} : n = 2 \quad \phi = 11.98 \text{ deg} \quad 0.103 \leq \frac{eE}{\omega^2 md} \leq 0.5 \quad (3.2.5.b)$$

$$\text{三次} : n = 3 \quad \phi = 7.26 \text{ deg} \quad 0.063 \leq \frac{eE}{\omega^2 md} \leq 0.5 \quad (3.2.5.c)$$

の範囲でマルチパクタリングが発生する。ただし、 E は平行平板の電界、 ω は電磁界の RF 周波数、 m は電子の質量を示す[1]。

3. 2. 3 同軸ラインの定在波のスケーリング則

同軸ラインの全反射定在波 (Standing Wave) で磁場を考慮しない場合のスケーリング則が E.Somelsano[2][3] らにより求められている。1 ポイント、2 ポイントのマルチパクタリングに対して各々

$$P_{1\text{-point}} \propto (f \cdot d)^4 \cdot Z \quad (3.2.6)$$

$$P_{2\text{-point}} \propto (f \cdot d)^4 \cdot Z^2 \quad (3.2.7)$$

の場合にマルチパクタリングの同期条件に合うことが示されている。その結果を図 3.2.1 に示す。ここで f は RF 周波数、 d は外導体内径、 Z は同軸インピーダンス、 P はマルチパクタリングの発生する電力レベルである。

スケーリング則より周波数 508 MHz で換算した値を表 3.2.1 に示す。Case 1 は KEKB 超伝導空洞用カプラ 50 Ω 同軸部を、Case 2 は外導体を空洞接続部の Nb ポ

ート径 100mm にした場合, Case 3, 4 は 75 Ω 同軸で内導体径または外導体径を変更した場合の結果を示す。

この結果より, Case 1, 2 の KEKB 超伝導空洞用カプラに使用している同軸では, ビーム運転で全反射となる電力レベル 100 kW 以下にも 1 ポイントマルチパクタリングの高次の周期条件に合うレベルが存在することがわかった。

そこで, シミュレーションコードを作成し, 磁場を含み, 二次電子放出係数の影響, 反射率を考慮に入れた条件でマルチパクタリングの発生する電力レベルと二次電子放出量について調べた。

表 3.2.1 カプラ同軸部のマルチパクタリングの電力レベル
(定在波で磁場を考慮しない場合, scaling 則の評価式による)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
外導体内径 (mm)	120	100	120	181.4
内導体内径 (mm)	52	52	34.4	52
インピーダンス (Ω)	50		75	75
1 ポイントマルチパクタリングの電力レベル (kW)				
周期の次数				
8 次	52	20	74	403
7 次	60	27	100	545
6 次	82	37	134	735
5 次	118	49	181	992
4 次	172	67	284	1640
3 次	265	122	446	2697
2 次	545	245	804	
1 次	1070	492	1330	
2 ポイントマルチパクタリングの電力レベル (kW)				
	837	347	1340	

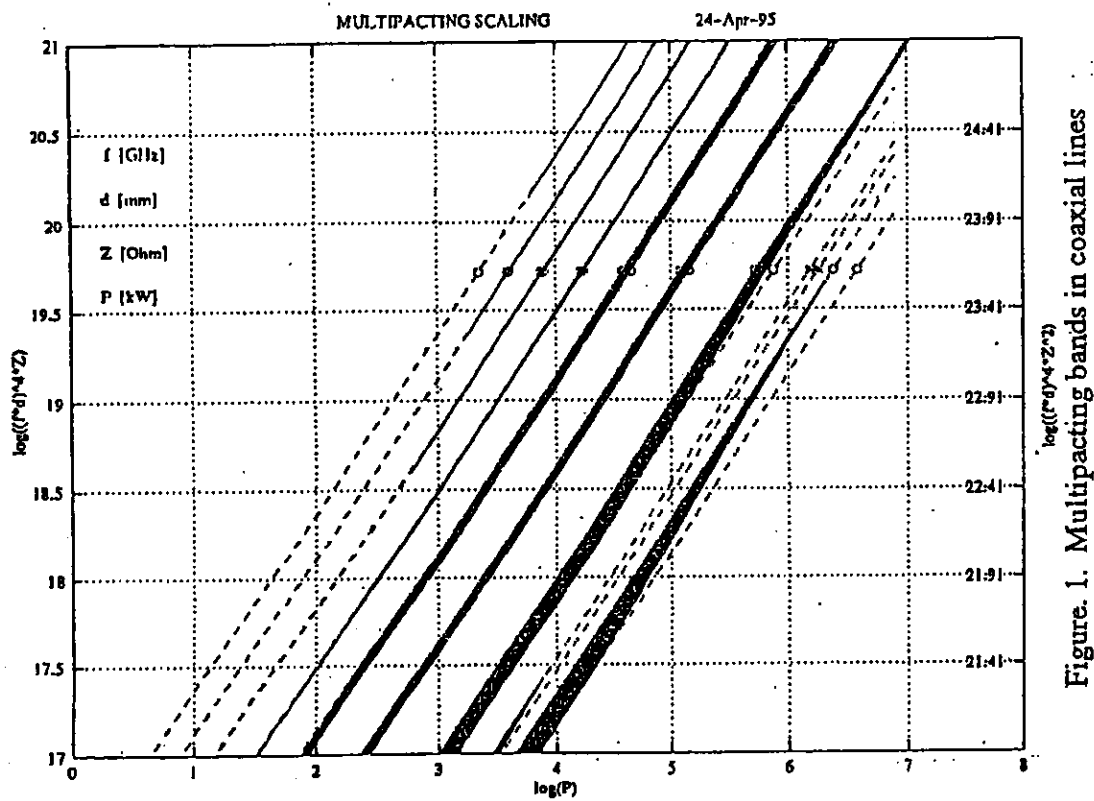


Figure 1. Multipacting bands in coaxial lines

図 3.2.1 同軸ライン定在波のマルチパクタリングのスケーリング則

3. 3 同軸のマルチパクタリングシミュレーション解析の手法

これまで、多くのマルチパクタリングのシミュレーション結果が報告されている[4]～[9]。KEKB 超伝導空洞用カプラのコンディショニングやビーム運転の条件でマルチパクタリングのメカニズムを調べるために、同軸二次元モデルのシミュレーションコードを作成したので、その内容について述べる。

電子は、電磁場 E 、 B の中で、相対論的な運動方程式、

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{e}{m \gamma} (\vec{E} - \vec{v} \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} (\vec{v} \cdot \vec{E}) \vec{v}) \quad (3.3.1)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \vec{v} \quad (3.3.2)$$

で既定される軌道を描き運動する。ただし、 v 及び $x = (r, \phi, z)$ は電子の速度と位置ベクトルを、 γ はローレンツガンマを示す。また、反射率 Γ_r 、内導体バイアス電圧 V_b を考慮し、同軸内外導体間の電圧 U での同軸の電磁場は、

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln(b/a)} \cdot \left\{ \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot z - \psi\right) - \Gamma_r \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot z + \psi\right) \right\} + \frac{V_b}{r \cdot \ln(b/a)} \quad (3.3.3)$$

$$B_\phi = \frac{U}{c \cdot r \cdot \ln(b/a)} \cdot \left\{ \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot z - \psi\right) + \Gamma_r \cdot \cos\left(\frac{\omega}{c} \cdot z + \psi\right) \right\} \quad (3.3.4)$$

$$\psi = \omega \cdot t + \psi_0$$

となる。ただし、 a 、 b は同軸内導体、外導体の半径、 ψ_0 はトラッキングをはじめる初期値の位相、 c は光速を示している。

計算は次の手順で行った。

- ① 電磁場の条件として、入力電力、反射率 Γ_r 、内導体バイアス電圧 V_b を設定し、また一次電子の初期条件として、放出エネルギー、RF 位相、放出位置を設定する。
- ② 設定条件で、電子の運動方程式 (3.3.1)(3.3.2) を Runge Kutta Gill 法で解き、電子軌道を求める。
- ③ 電子の軌道が壁に衝突したら、トラッキングを止める。
- ④ 一次電子が壁に衝突した時のマルチパクタリングの判定条件を確認する。判定条件は RF 電場が放出二次電子を加速する方向であることとした。
- ⑤ マルチパクタリングの判定条件を満たす場合は、一次電子の衝突エネルギーより、

二次電子放出係数を求める。同時に衝突までの RF の次数，衝突場所を記録しておく。

- ⑥ そして，放出される二次電子の初期エネルギーと放出角度を設定し，衝突点から再び運動方程式を解き，電子の軌道計算を開始する。ここでは，二次電子の初期エネルギーは一律 5 eV ， 放出角度は面垂直方向とした。
- ⑦ これを設定した衝突回数 N_{max} まで繰り返す。そして，1 個の電子から発生した全電子数 δ_{total} を求める。

$$\delta_{total} = \prod_{i=1, N_{max}} \delta_i$$

また，平均の RF 次数，壁への平均衝突エネルギーを求める。

- ⑧ マルチバクタリングの判定条件を満たさない場合，または設定した衝突回数に達したならば，計算を終了する。
- ⑨ 次の新たな初期条件として一次電子の位相，位置，RF 電力を変更して計算を開始する。通常，一次電子の位相，位置は設定した刻み幅で全領域にわたり網羅的に計算している。

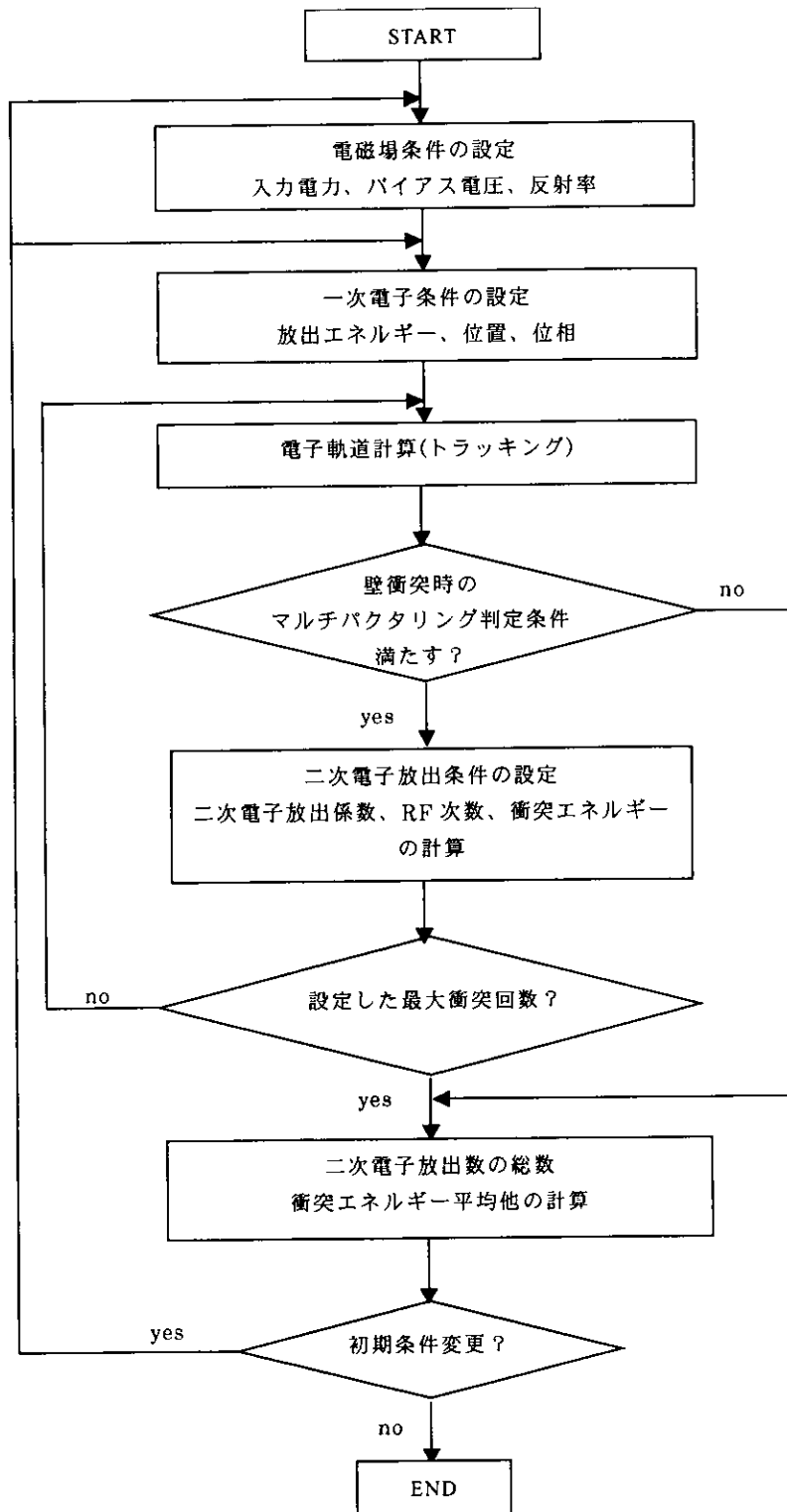
二次電子放出係数 δ は，

$$\delta = \frac{c_1 \cdot \delta_0 \cdot (u_i / u_{max})^{c_2}}{c_3 + (u_i / u_{max})^2 \cdot |\cos \theta|} + c_4 \quad (3.3.5)$$

で近似[10][11]し， $c_1 \sim c_4$ をパラメータとして材質に応じ設定できるようにした。ここで， θ は一次電子の入射角， u_i は一次電子のエネルギー， u_{max} は二次電子放出係数が最大となる一次電子のエネルギーを示す。

解析のアルゴリズムを表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 マルチパクタリング解析のアルゴリズム



3. 4 同軸部のマルチパクタリングの計算

KEKB 超伝導加速空洞でビームを加速する時は図 2.2.2 に示すように、ビームなしでは入力電力は全反射され、ビーム電流 1.1 A で透過波となり、ビーム電流とともに徐々に反射率が変化する。そこで、まず KEKB の 50 Ω 同軸形状における透過波のマルチパクタリングの発生する電力レベルを求め、いくつか同軸寸法を変えた場合と比較した。次に同軸 50 Ω で反射率が変化したときのマルチパクタリングのレベルを求めた。

3. 4. 1 透過波でマルチパクタリングの発生する電力レベル

同軸の形状を、3. 2 章で示した case と同様、次の 4 種類の場合についてマルチパクタリングが発生する電力レベルを求めた。

(Case1) KEKB 超伝導空洞用カプラの 50 Ω 同軸で外導体径 120 mm 内導体径 52 mm の場合

(Case2) 空洞との接続部カプラポートを想定し、外導体径 100 mm にした場合

(Case3) 75 Ω 同軸となるように内導体径を 34.4 mm に変更した場合

(Case4) 75 Ω 同軸となるように外導体径を 181.4 mm に変更した場合

シミュレーションはバイアス電圧 0 V で、二次電子放出エネルギーを一律 5 eV とし、入力電力、高周波の位相を初期条件として変えていき、同期する条件を求めている。壁への衝突回数を最大 100 回として電子が最後まで残った初期条件をマルチパクタリングの同期条件に合うものと判定した。また、二次電子放出係数を仮定して、放出される全電子数を求めた。仮定した二次電子放出係数の曲線を図 3.4.1 に示す。二次電子放出係数はコンディショニングが進んだ金属を想定し 200 ~ 800 eV の範囲で 1 以上の放出係数をもつと仮定した。

検討結果を図 3.4.2 ~ 図 3.4.5 に示す。図は上より電子の壁への最大衝突回数、RF 周期の次数、二次電子放出係数を考慮したときの放出電子数の総合計、生き残った電子の初期位相を示す。また、表 3.4.1 にマルチパクタリングの同期条件に合う電力レベルの結果をまとめた。

KEKB 超伝導空洞用カプラの形状である Case 1 及び Case 2 の場合に 300 kW 以下の電力で外導体の 1 ポイントマルチパクタリングのレベルが存在する。Case 1 の同軸 50 Ω では、入力電力 225 kW で 7 次のマルチパクタリングの同期条件が成立する。空洞との接続部を想定した外導体径 100 mm の Case 2 では、高次の電力レベルは下がり 290 kW で 4 次のマルチパクタリングが発生する。一方、75 Ω 同軸の Case 3, 4 では 300 kW 以下の電力でマルチパクタリングのレベルはないことがわかった。透過波でマルチパクタリングの発生する電力レベルは、表 3.2.1 に示す scaling

則で換算した全反射定在波の場合の約 4 倍であることがわかる。

マルチパクタリングは、表面の二次電子放出係数が大きい時に継続することから、二次電子の放出量に関係する一次電子の壁への衝突エネルギーを求めた。図 3.4.6 に Case 1 の 50 Ω 同軸における入力電力と一次電子の壁衝突エネルギー平均値の関係を示す。また Case 1 及び Case 2 のマルチパクタリングが発生する条件で、一次電子の衝突エネルギー分布を求めた。結果を図 3.4.7 ~ 図 3.4.9 に示す。Case 1 の 50 Ω 同軸において 7 次のマルチパクタリングでの一次電子の衝突エネルギーは 392 eV に鋭いピークがある。Case 2 において 5 次のマルチパクタリングでの衝突エネルギーは 200 eV 以下であり、4 次のマルチパクタリングでは 255 ~ 310 eV となった。一次電子の衝突エネルギーは 200 ~ 800 eV の範囲で二次電子放出係数が高いとしてマルチパクタリングの発生を判断すると、透過波の運転では同軸部 50 Ω で入力電力 225 kW 付近、Nb 接続部で 290 kW 付近にマルチパクタリングの発生する電力レベルがあり、注意が必要であることがわかった。

表 3.4.1 カプラ同軸部のマルチパクタリングの電力レベル
(透過波でシミュレーション結果による)

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
外導体内径 (mm)	120	100	120	181.4
内導体内径 (mm)	52	52	34.4	52
インピーダンス (Ω)	50		75	75
1 ポイントマルチパクタリングの電力レベル (kW)				
周期の次数				
7 次	225		336	—
6 次	372		555	1200kW 以 下にレベル
5 次	460, 520	195	680, 770-780	
4 次	728, 762-790	290	1140, 1150-1180	なし
3 次	1190	470-485	-	
2 次		900-990		
1 次				
2 ポイントマルチパクタリングの電力レベル (kW)				
	—	1020-1150	—	—

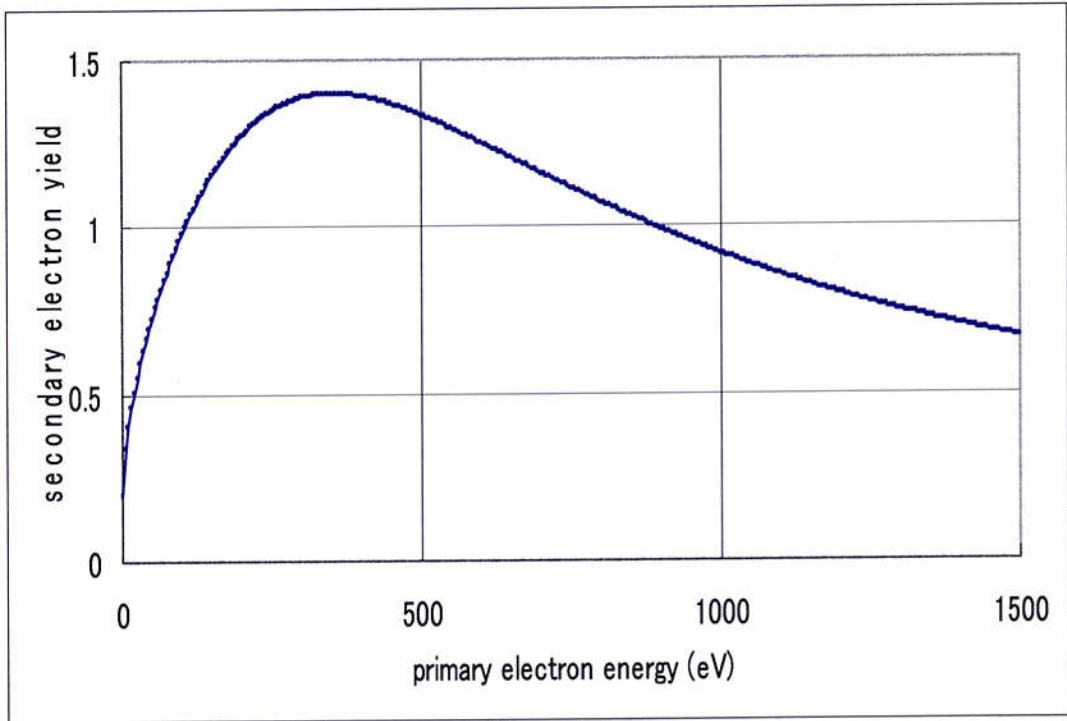


図 3.4.1 二次電子放出係数の設定

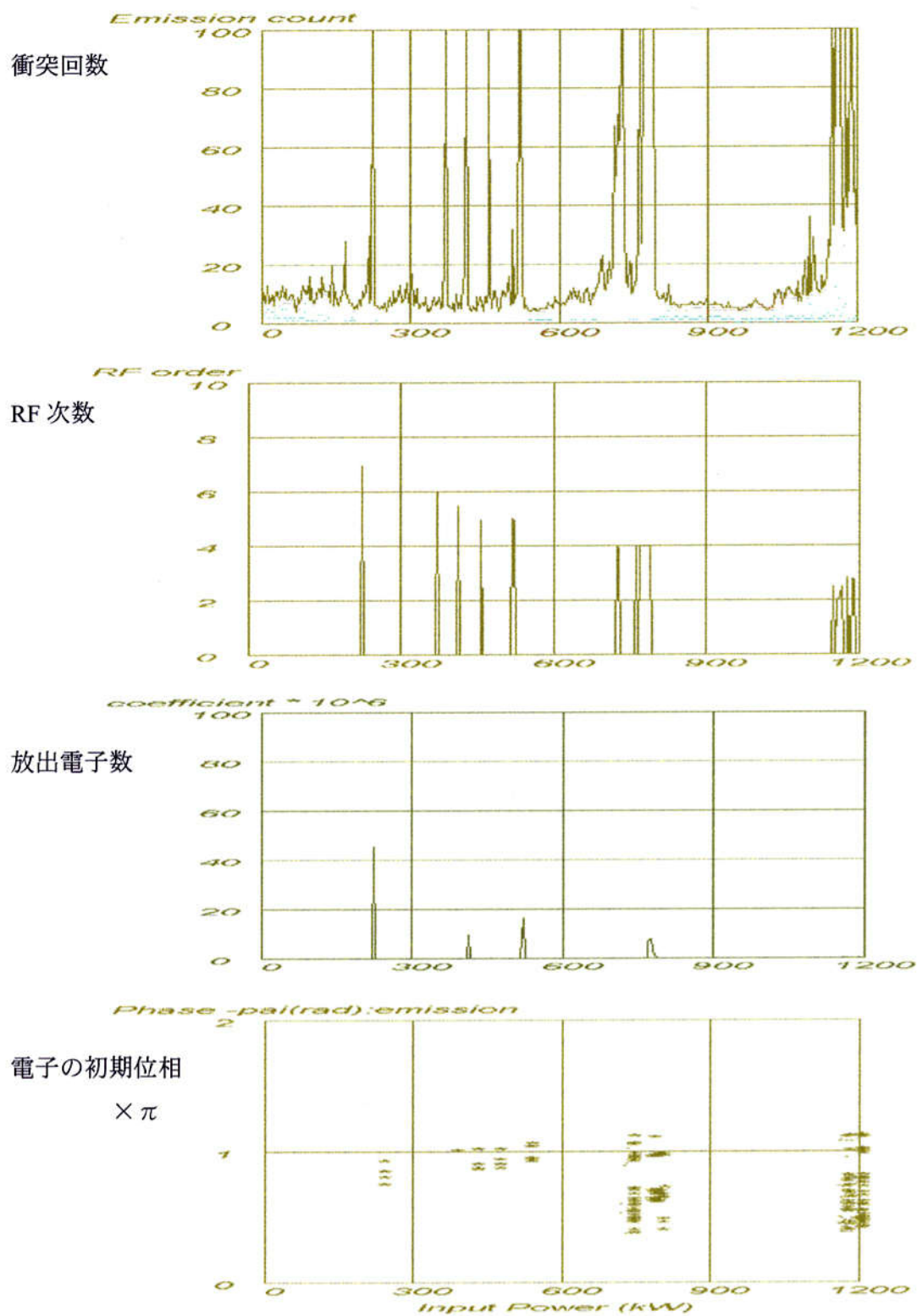


図 3.4.2 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル 透過波
(case1) 同軸 50Ω 内外導体径 a=52mm b=120mm

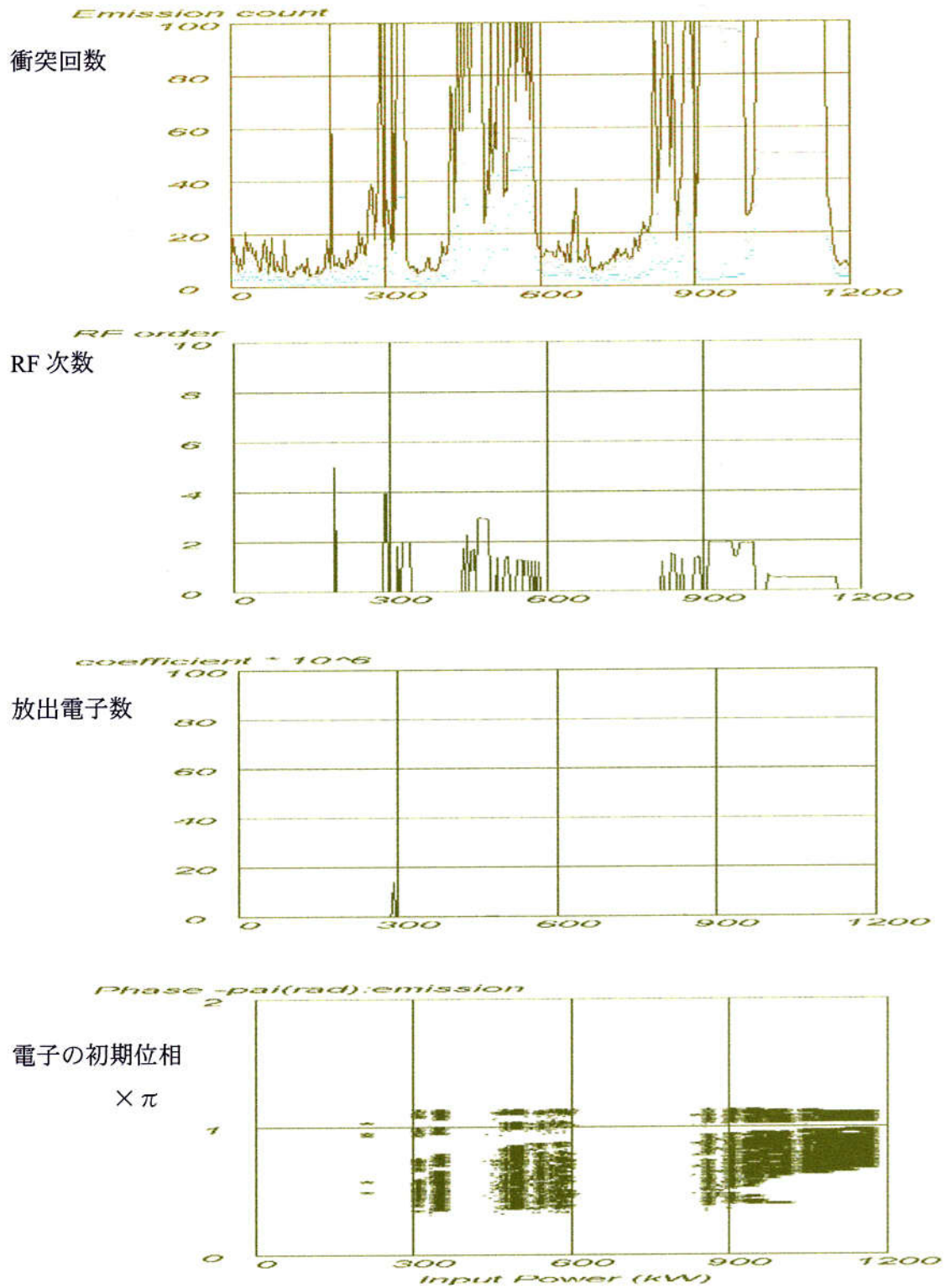


図 3.4.3 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル 透過波
(case2) 内外導体径 a=52mm b=100mm

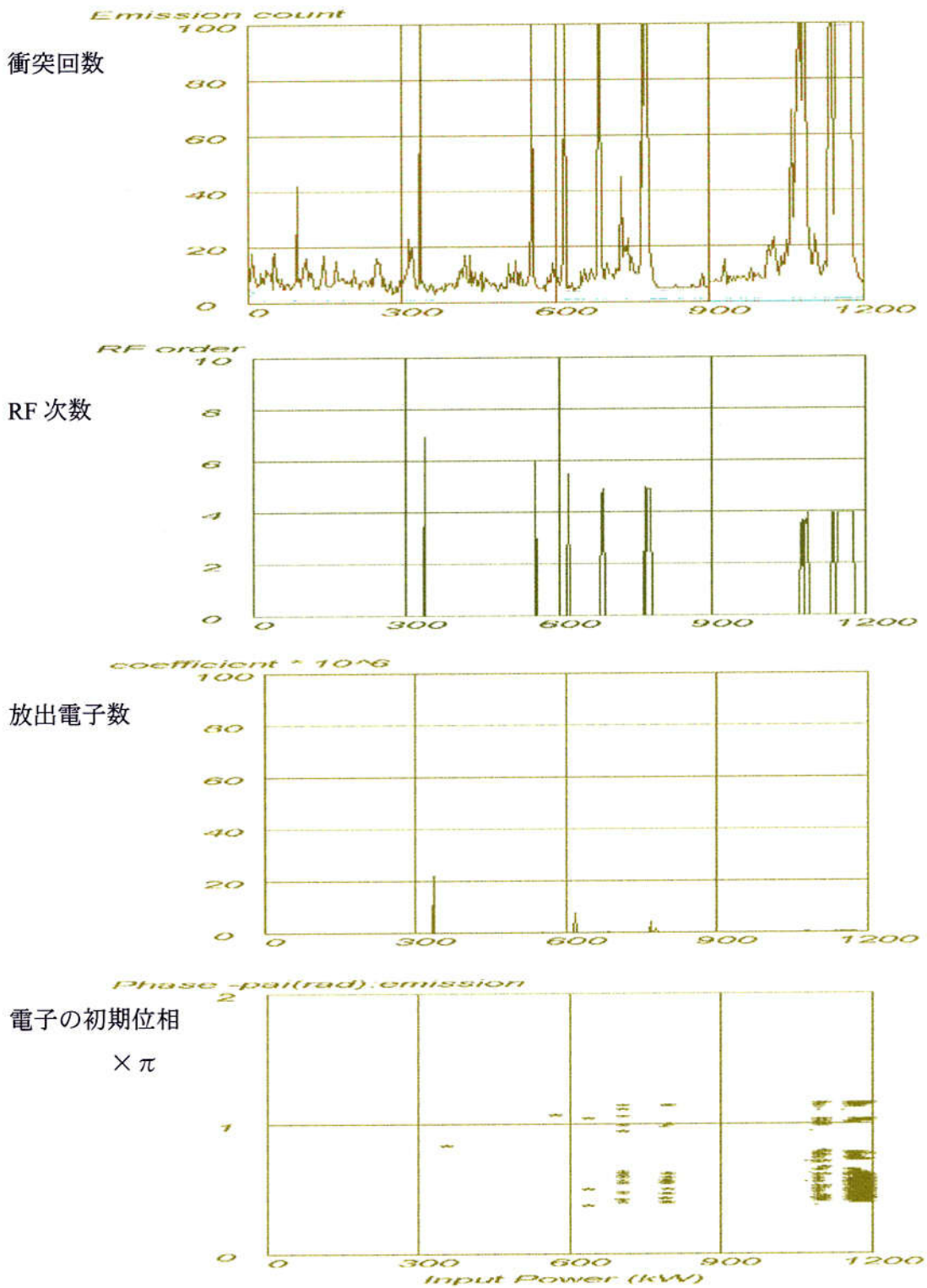
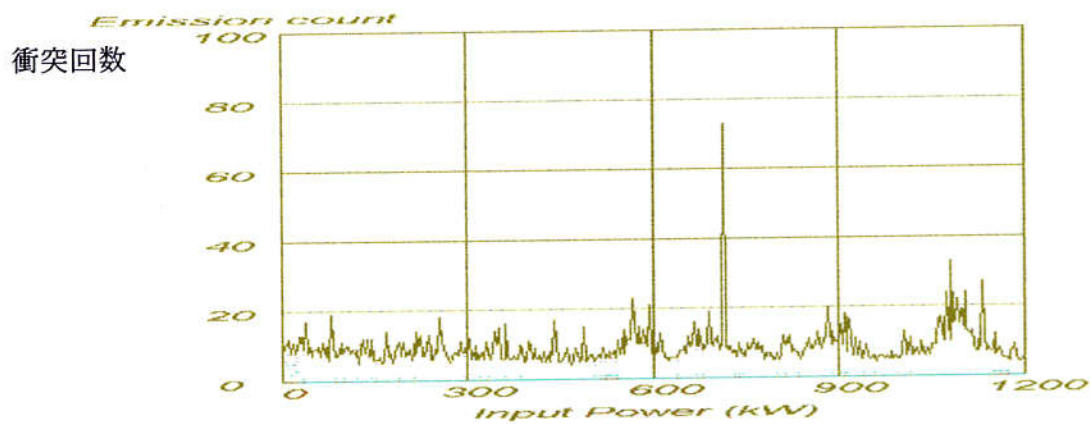


図 3.4.4 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル 透過波
(case3) 同軸 75Ω 内外導体径 a=34.4mm b=120mm



マルチパクタリング条件を満たす電力レベルがないため、RF 次数、放出電子数、電子の初期位相のデータはない。

図 3.4.5 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル 透過波
(case4) 同軸 75Ω 内外導体径 $a=52\text{mm}$ $b=181\text{mm}$

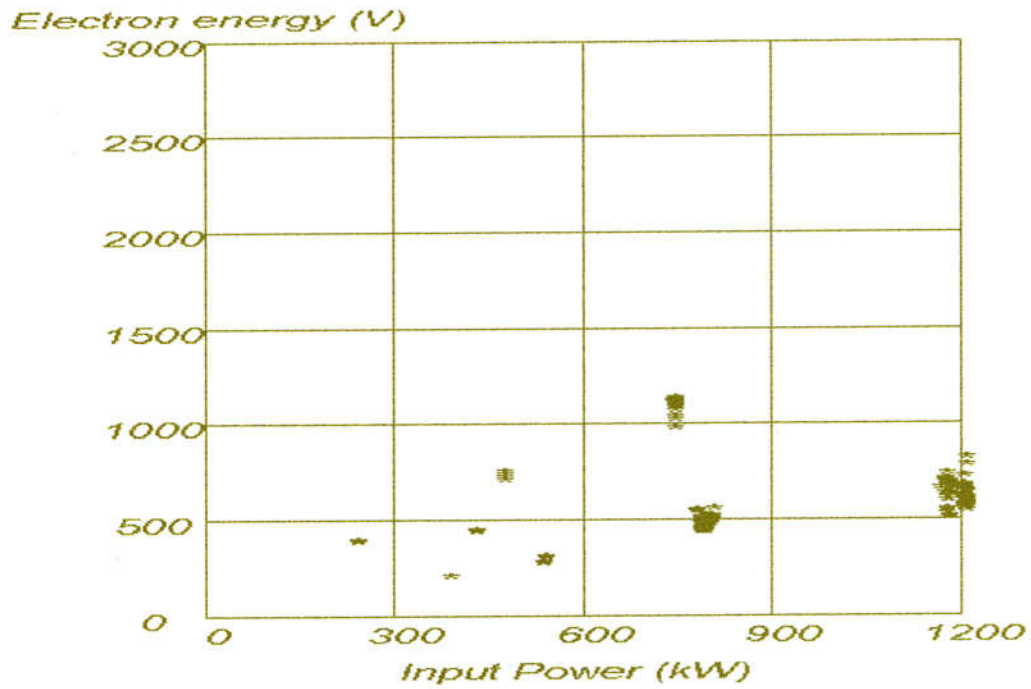


図 3.4.6 マルチパクタリングの一次電子の衝突エネルギー 透過波
(case1) 同軸 50Ω 内外導体径 a=52mm b=120mm

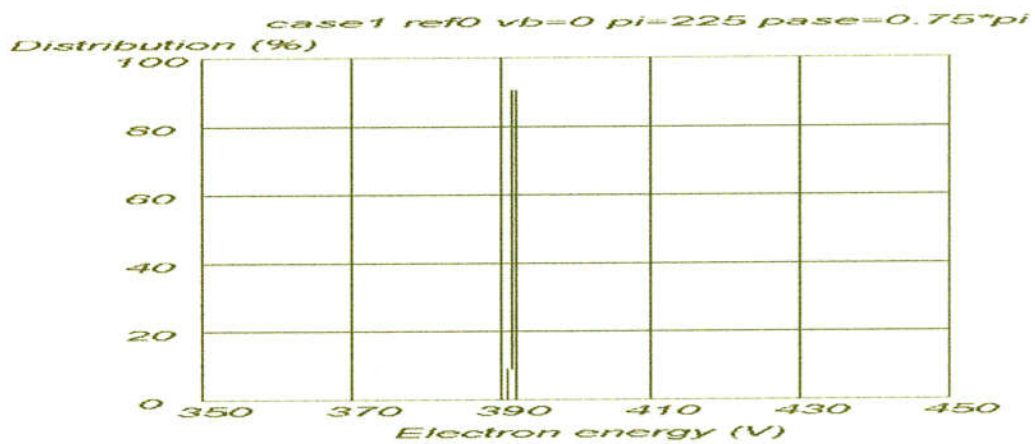


図 3.4.7 マルチパクタリングの一次電子の衝突エネルギー分布 透過波
(case1) 同軸 50Ω 内外導体径 a=52mm b=120mm RF-7次 入力電力 225kW の場合

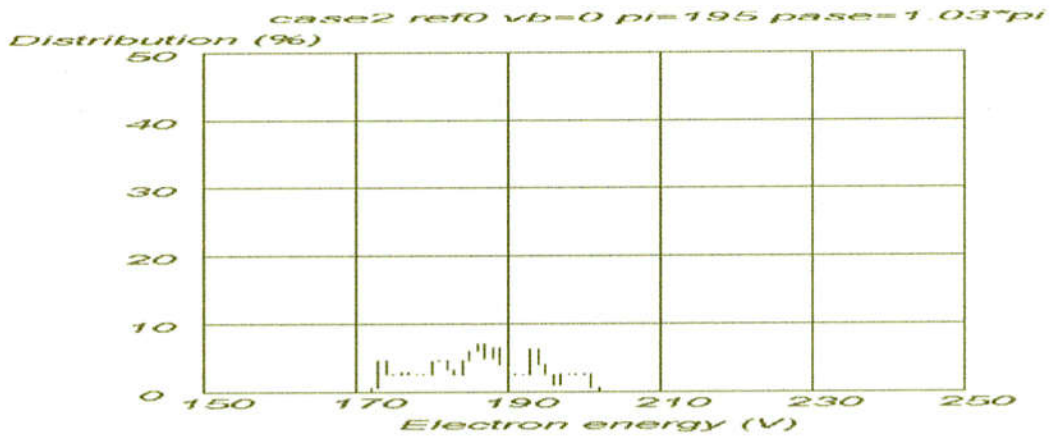


図 3.4.8 マルチパクタリングの一次電子の衝突エネルギー分布 透過波
 (case2) 内外導体径 a=52mm b=100mm RF-5 次 入力電力 195kW の場合

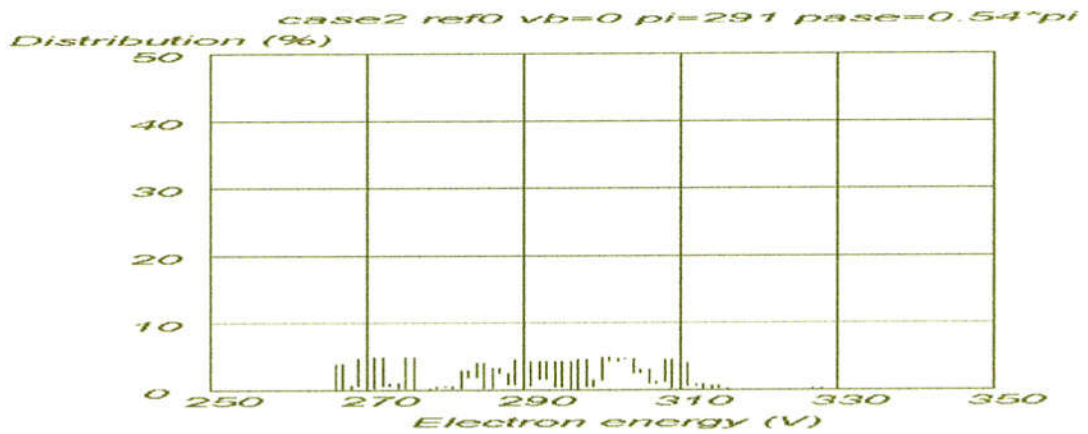


図 3.4.9 マルチパクタリングの一次電子の衝突エネルギー分布 透過波
 (case2) 内外導体径 a=52mm b=100mm RF-4 次 入力電力 290kW の場合

3. 4. 2 全反射及び部分反射でマルチパクタリングの発生する電力レベル
 ビーム運転を考慮して全反射から反射無し透過波まで反射率を変えて、50 Ω 同軸カプラ内でマルチパクタリングが発生する電力レベルを確認した。マルチパクタリングの発生する条件は、周期条件が成立し、かつ二次電子放出係数が1以上となる場合で一次電子の衝突エネルギーが200~800Vの範囲とした。結果を表3.4.2にまとめる。

表 3.4.2 マルチパクタリング発生レベル
 (衝突エネルギーが 200 ~ 800 eVの範囲)

反射率	入力電力レベル
10 %	160-170, 210-225, 260-280, 295
20 %	213, 255-265
30 %	265-280, 297
40 ~ 80 %	なし
100 %	93,102,114-117,129,153,159,174-198,252-261,282,291,300

反射率20%, 40%, 60%, 80%, 全反射でのマルチパクタリング同期条件で残る電力レベルとそのときの一次電子の衝突エネルギーを図3.4.10~図3.4.14に示す。

反射率が低いレベルでマルチパクタリングの発生する電力レベルが存在するが、反射率が増加すると一次電子の衝突エネルギーが低くなり、コンディショニングが進めばマルチパクタリングは発生する可能性は少ない。しかし、全反射条件では、多くの電力レベルがマルチパクタリングの同期条件を満たし、また一次電子衝突エネルギーも300-600 eVにあることから注意が必要である。

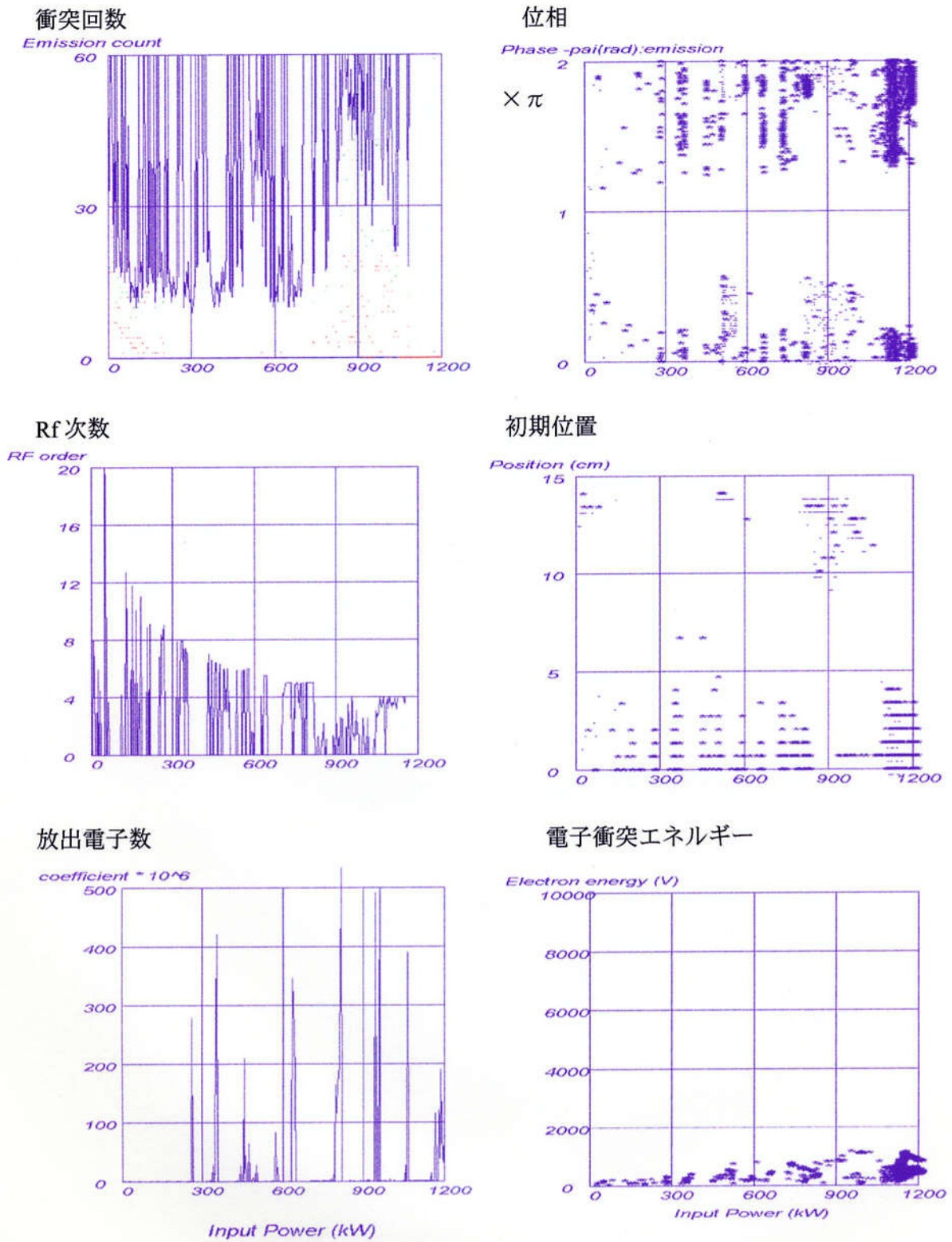
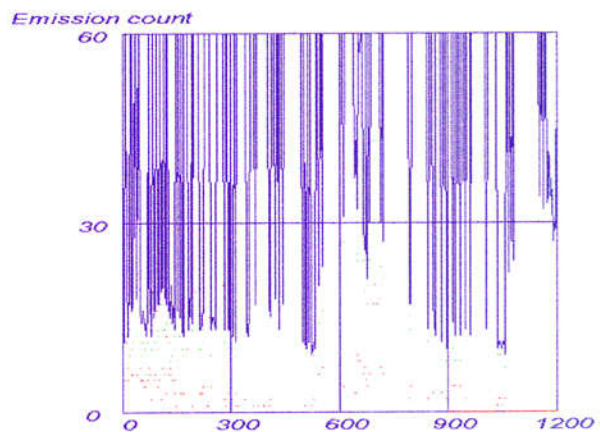
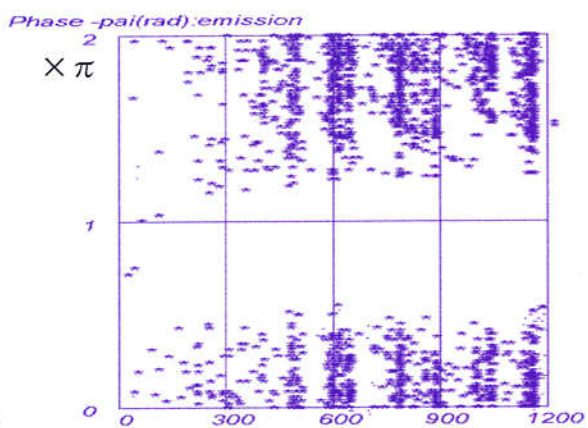


図 3.4.10 マルチパケット同期条件が成立する電力レベル
反射率 20%

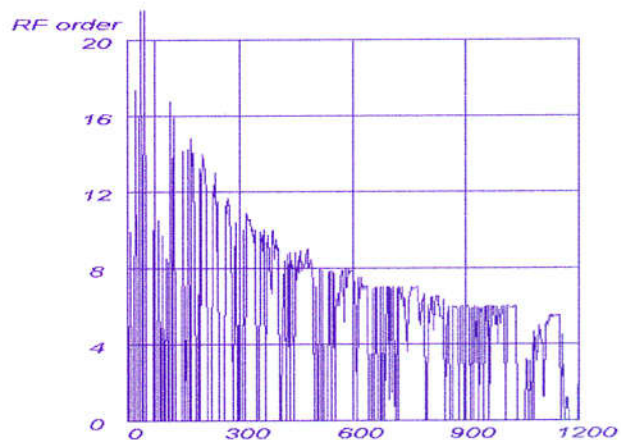
衝突回数



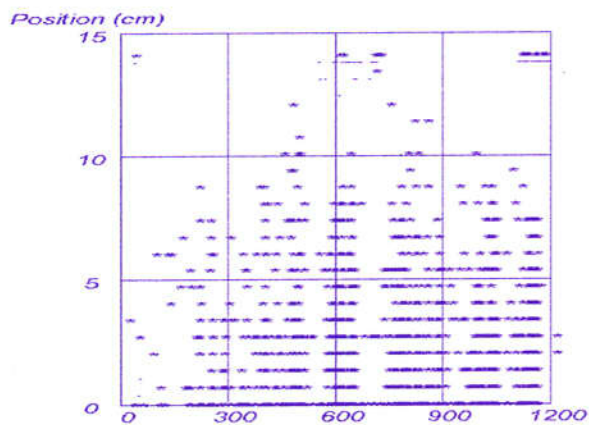
位相



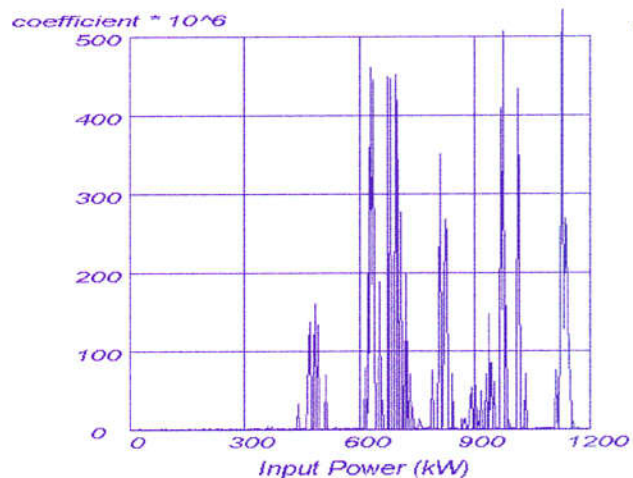
RF 次数



初期位置



放出電子数



電子衝突エネルギー

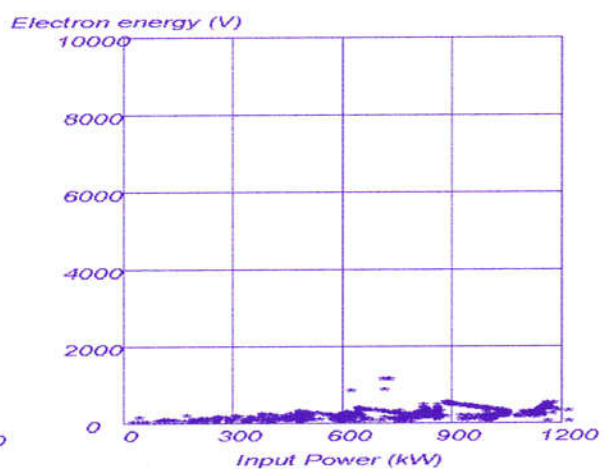


図 3.4.11 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル
反射率 40%

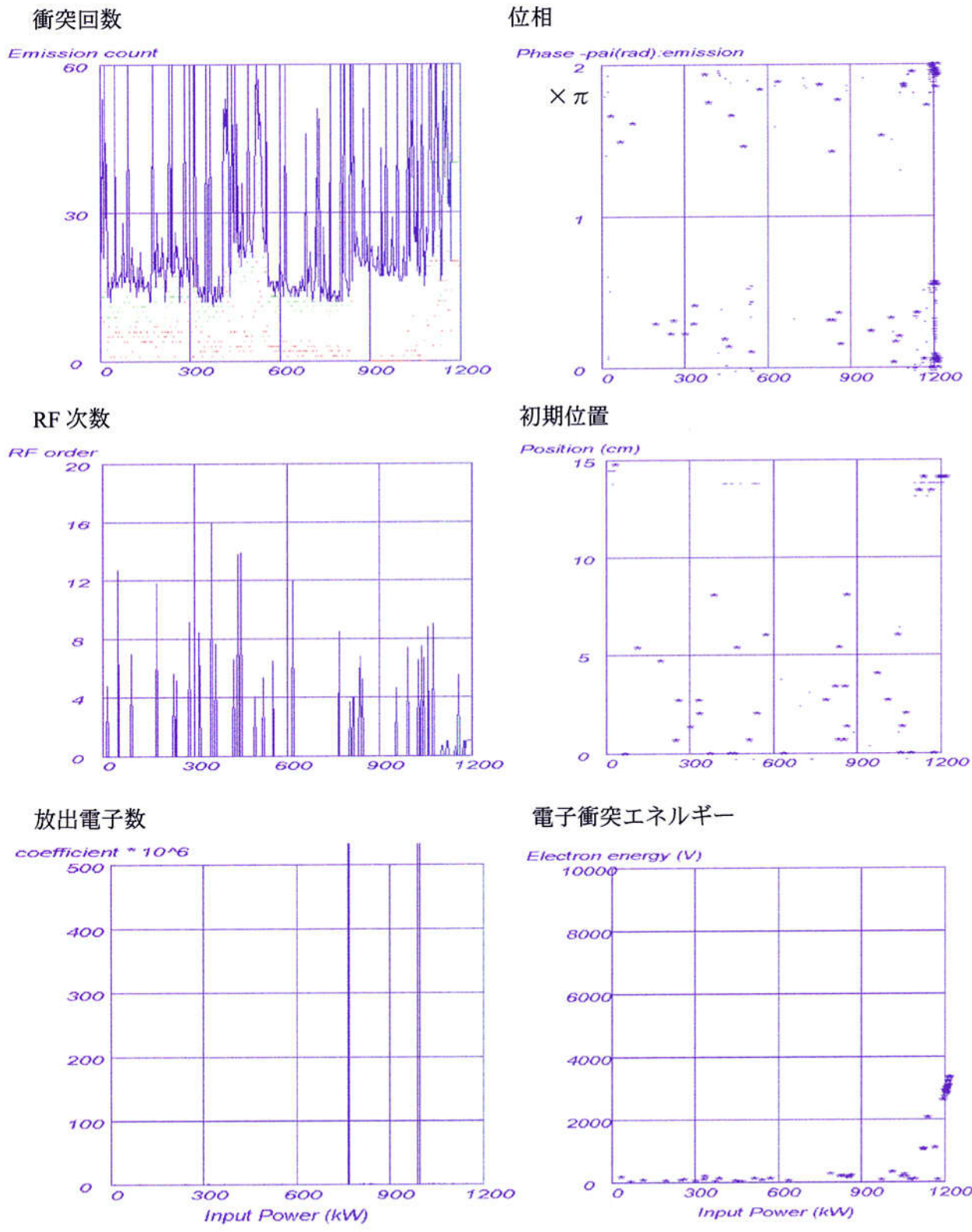


図 3.4.12 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル
 反射率 60%

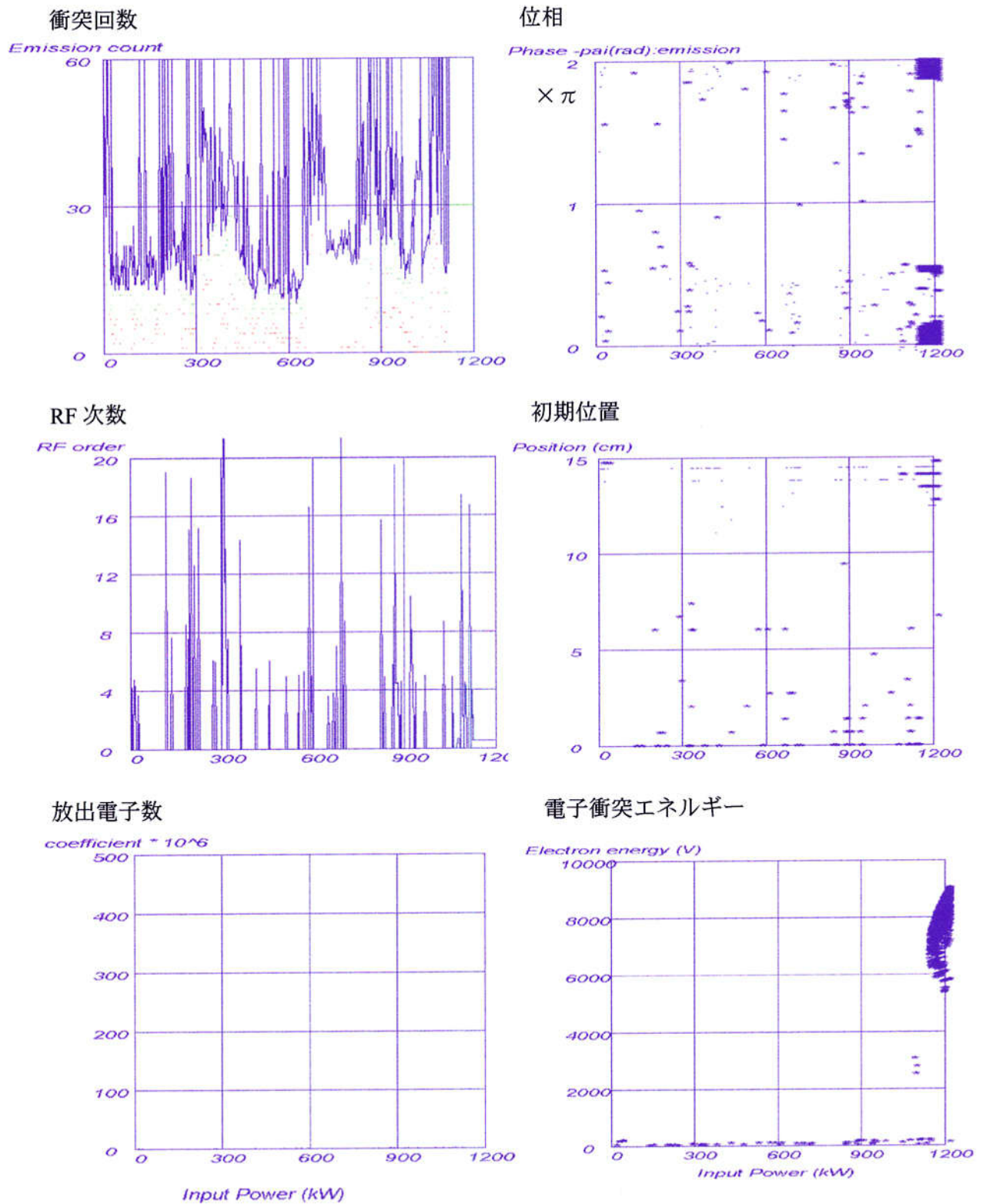


図 3.4.13 マルチパケット同期条件が成立する電力レベル
反射率 80%

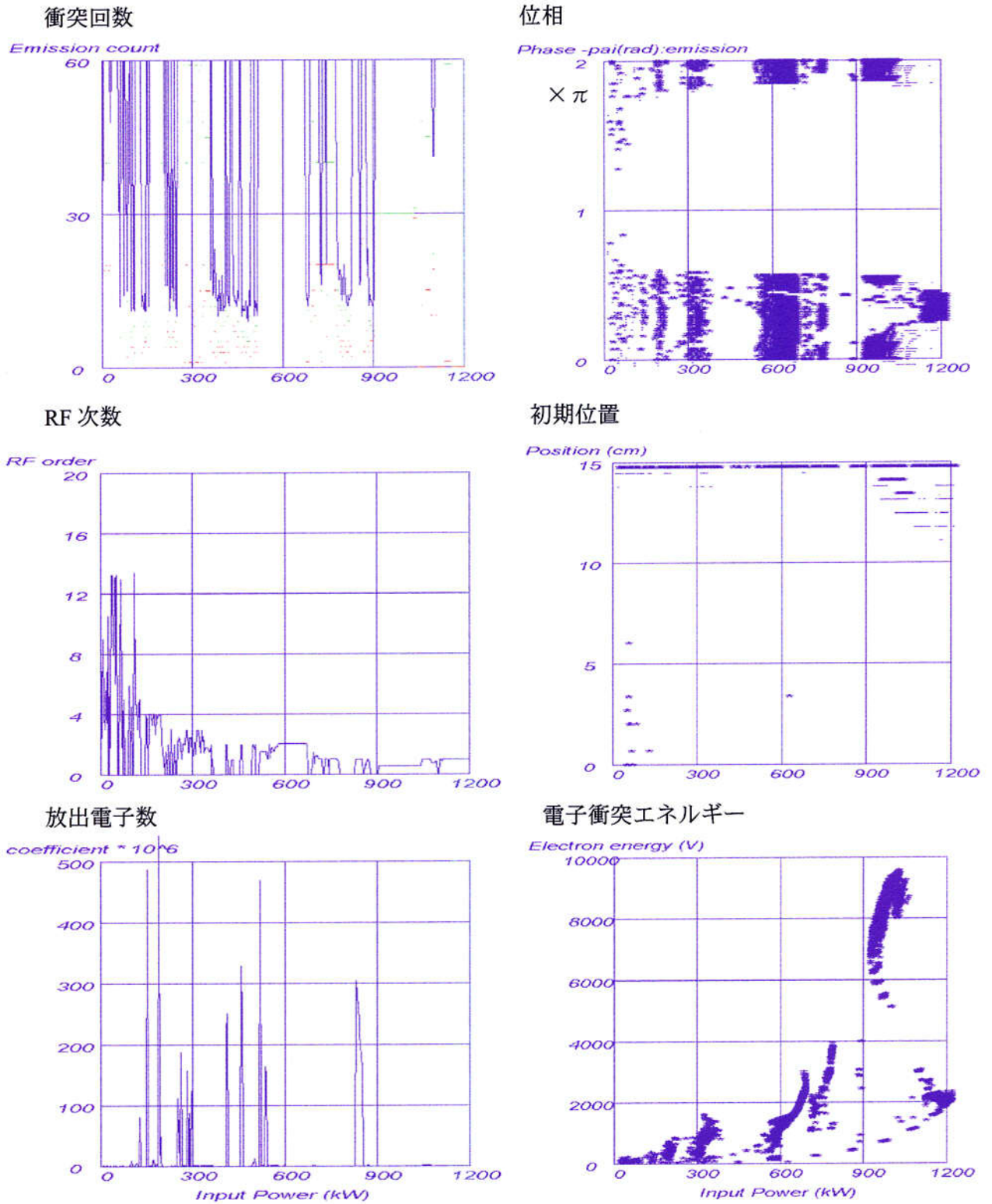


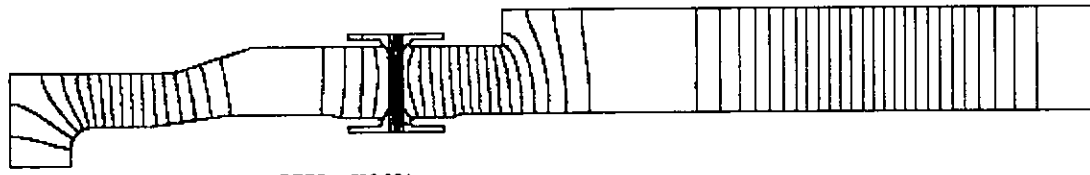
図 3.4.14 マルチパクタリング同期条件が成立する電力レベル
反射率 100%

3. 5 窓部のマルチパクタリングの計算

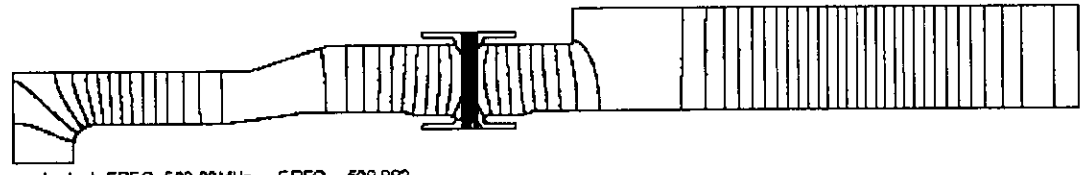
3. 5. 1 窓部の電界分布

セラミック窓周辺は、インピーダンス整合を取り、セラミック溶接部の電界を低くするため、チョーク構造にしている。窓周辺の電界分布を SUPERFISH で計算した。まず、電界分布の時間推移を調べるために、セラミック窓の位置を変更して定在波分布を求めた。図 3.5.1 に電界分布図を示す。

次にチョーク構造の金属とセラミック窓の間隙を 3 mm 4 mm とした場合の、セラミック窓表面の電界分布を求めた。全反射 50 kW の電力を入力し、セラミック窓が定在波の山で電界最大位置にある時のセラミック窓真空側表面の電界強度の分布を図 3.5.2 に示す。間隙は TRISTAN では 3 mm であったが、KEKB 超伝導空洞用カプラでは 4 mm に変更して、セラミック窓表面の電界を 70 % に下げることができた。電界分布は内導体のチョーク構造部が最大となり、外導体チョーク部分の約 3 倍の電界となる。窓が定在波の山に位置する時全反射で 50 kW 入力すると、セラミック窓表面の最大電界は 110 kV/m となり、最大点での電界の向きは窓表面に対してほぼ垂直となる。KEKB 超伝導空洞用カプラは、全反射状態では窓部は定在波の山と谷の中間に位置することから全反射 50 kW の電力で窓部の最大電界は約 72 kV/m となる。全反射で軸方向に窓の位置を動かしたときの窓チョーク部の最大電界強度の変化を図 3.5.3 に示す。

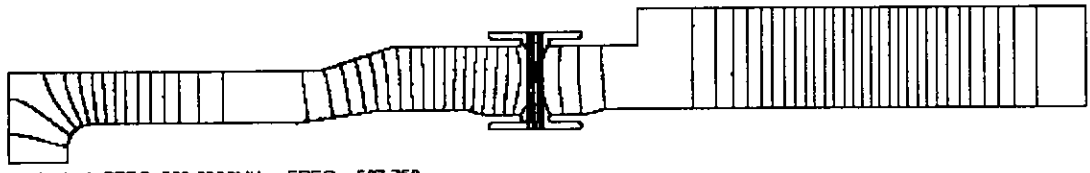


coupler test FREQ=508.00MHz FREQ= 509.024



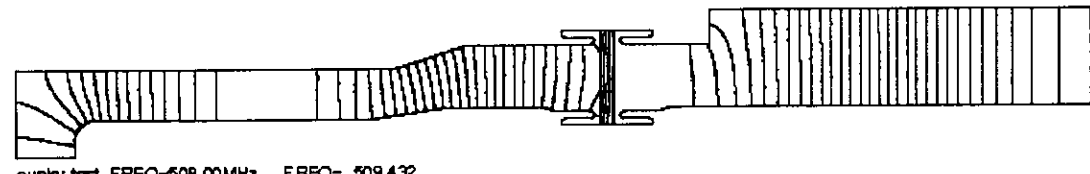
coupler test FREQ=508.00MHz FREQ= 509.992

-5cm



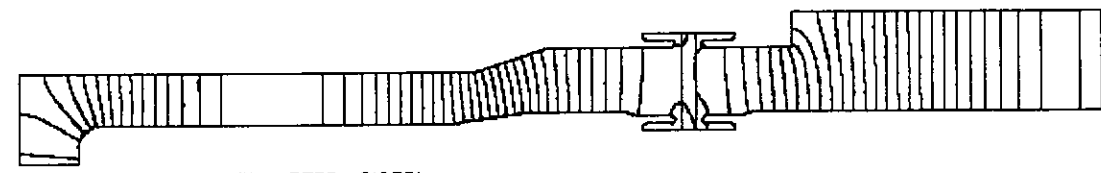
coupler test FREQ=508.0000MHz FREQ= 507.750

0cm



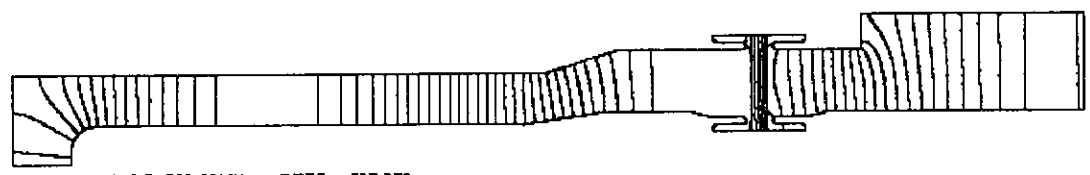
coupler test FREQ=508.00MHz FREQ= 509.432

+5cm



coupler test FREQ=508.00MHz FREQ= 510.754

+10cm



coupler test FREQ=508.00MHz FREQ= 507.978

+15cm

図 3.5.1 電界分布の時間推移

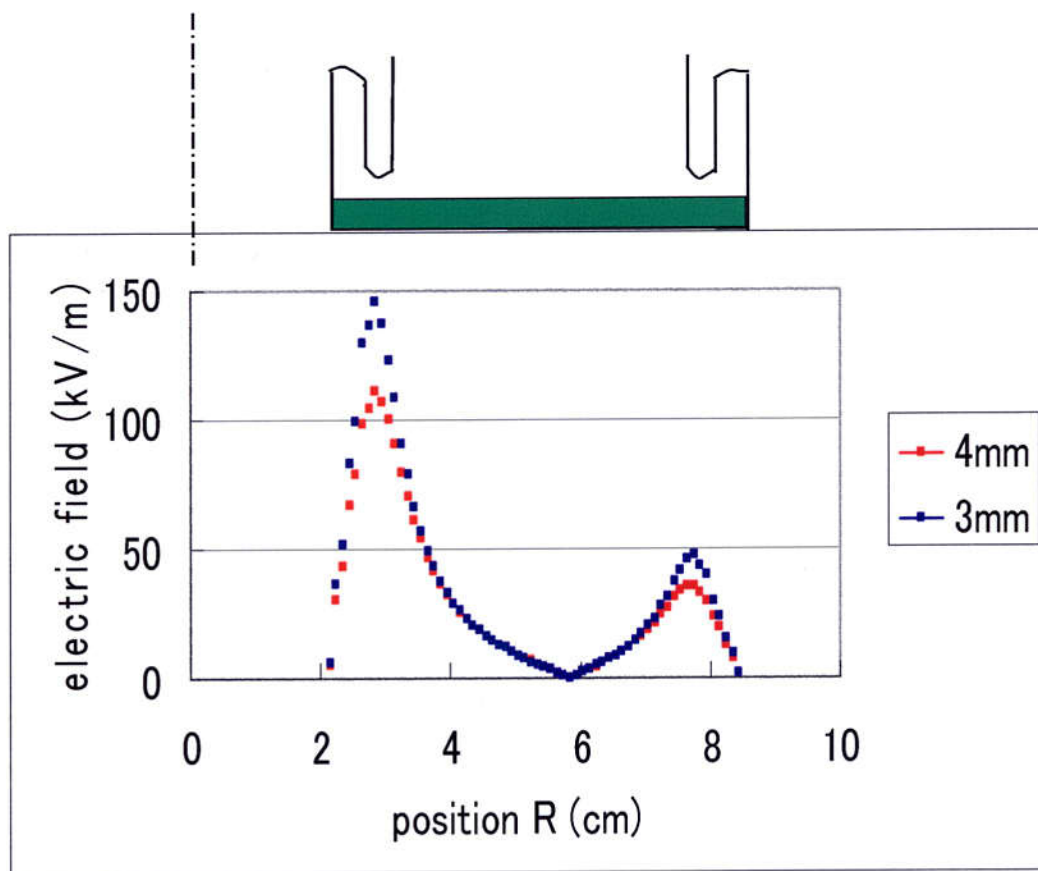


図 3.5.2 セラミック窓真空側表面の電界強度分布 入力電力 全反射 50 kW
 チョーク部 3 mm と 4 mm の比較

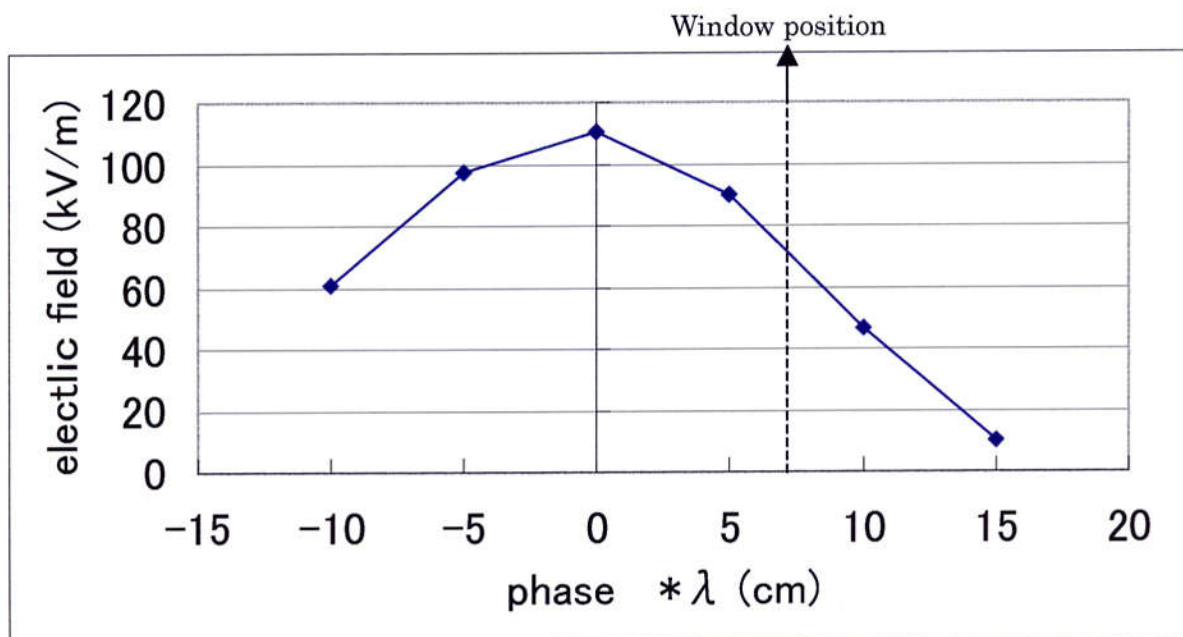


図 3.5.3 定在波での窓の位置 (RF 位相) とセラミック窓表面電界のピーク値

3. 5. 2 窓部でマルチパクタリングの発生する電力レベル

カプラのコンディショニングの初期には、低い電力レベルで放電が発生し、窓近傍の電子の増加に伴い光が発生しアークセンサーが作動する。この窓部の放電の原因の1つにマルチパクタリングが考えられる。KEKB 超伝導空洞のカプラのコンディショニング初期には、図 2.8.2 (上)に示すように 180 kW 以下で放電光によるインターロックが作動している。このカプラはチョーク部の間隙 3 mm で、純水洗浄の後透過波でコンディショニングを行ったものである。

KEKB 常伝導 ARES 空洞ではチョーク構造とオーバアンダーカット構造の2種類のタイプのカプラを使用している[12]-[14]。ARES 空洞のカプラのコンディショニングの時間を比較すると、チョーク構造のほうが透過波 100 kW 以下の電力レベルで圧力上昇が多くコンディショニングに時間を要している。図 3.5.4 に ARES 空洞カプラのコンディショニング履歴を示す。

これらの事実から、200 kW 以下の低い電力レベルの放電及び圧力上昇は、窓部チョーク構造でマルチパクタリングが発生している可能性が高いと考えた。そこで、窓のチョーク部で発生するマルチパクタリングの電力レベルを概算で求めることにした。窓部のチョーク構造の間隙を平行平板電極の間隙に近似し、マルチパクタリングの同期条件を満たす電力レベルを見積もってみた。表 3.5.1 に(3.2.5)式で求めたマルチパクタリングの周期条件に合う電力レベルを示す。平行平板で2ポイントマルチパクタリングの条件にあう電界は間隙 4 mm で 116 kV/m 以下にそのレベルがある。これを電力換算すると透過波では 222 kW 以下、全反射の空洞チューニング状態では 129 kW 以下になる。また、間隙 3 mm では電界 87 kV/m 以下にそのレベルがあり、電力に換算すると透過波では 125 kW 以下、全反射の空洞チューニング状態では 71 kW 以下になり、4 mm と比べるとその電力レベル範囲は低くなる。また、磁場を含まない平行平板のモデルでシミュレーションを行った結果を図 3.5.5 に示す。

チョーク構造を平行平板で近似したマルチパクタリングの検討は磁場、及び構造を考慮していない概算値であり、実際の運転や試験で検証する必要がある。第5章に、カプラテストスタンドでの放電の測定結果を示す。

表 3.5.1 平行平板モデルでのマルチパクタリング発生電界と電力レベル

間隙 (mm)	次数	電界 (kV/m)	電力レベル換算 (kW)		
		— —	透過波	全反射 窓:定在波 山	全反射 窓:49 度
4	1	62~116	64~222	16~56	37~129
	2	24~116	10~222	2.4~56	5.6~129
	3	15~116	3.5~222	0.9~56	2.1~129
3	1	47~87	36~125	9.0~31	21~71
	2	18~87	5.3~125	1.3~31	3.0~71
	3	11~87	2.0~125	0.5~31	1.2~71

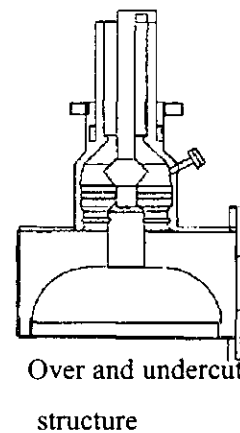
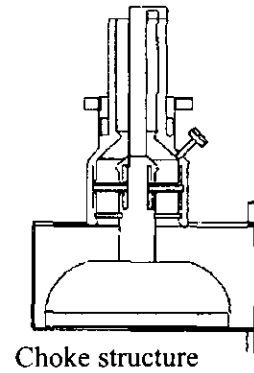
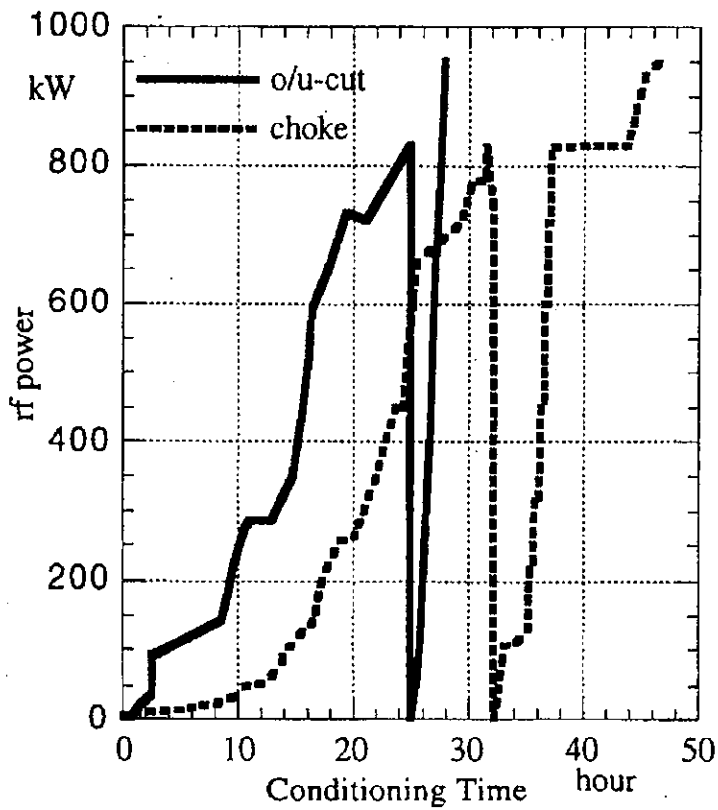
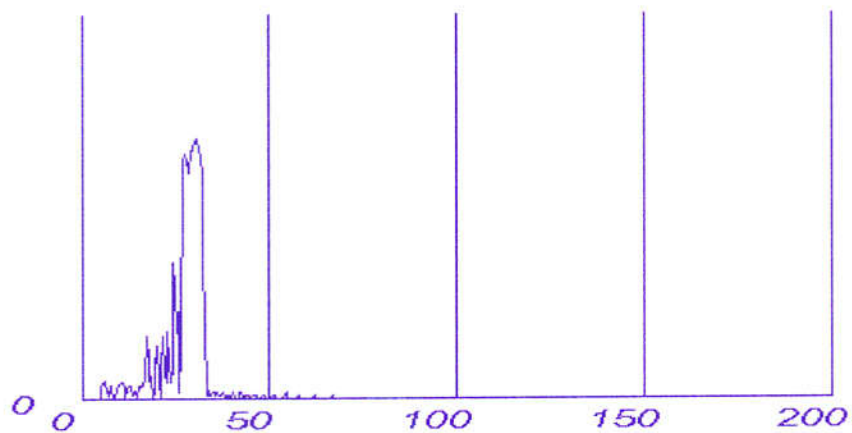
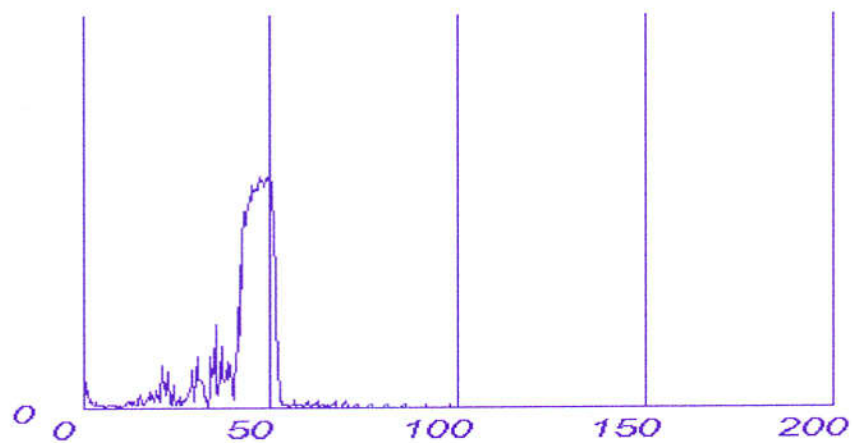


図 3.5.4 KEKB ARES 空洞用カプラのコンディショニング時間
 チョーク構造とオーバアンダーカット構造の比較[12]

(a) 間隙 3 mm



(b) 間隙 4 mm



(c) 間隙 5 mm

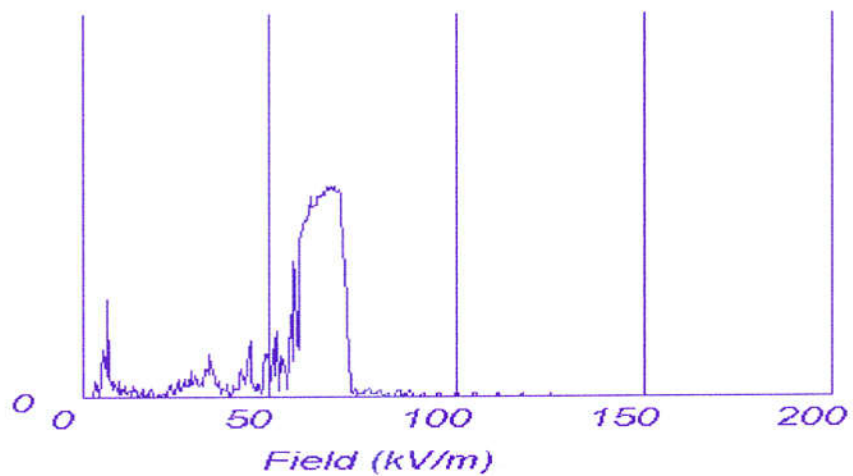


図 3.5.5 平行平板モデルでのマルチパクタリングが発生する電界レベルシミュレーション結果

3. 6 バイアス電圧の利用

CERN ではシリンダー型窓のマルチパクタリングが問題になり，ビーム運転では常時バイアス電圧を印加してマルチパクタリングの抑制を行っている[15][16]. KEKB でもその可能性を想定し，同軸導波管変換部のドアノブ構造に改造を加え内導体にバイアス電圧を最大 10 kV まで加えることができる構造にしている．ここでは，マルチパクタリングを抑制するためのバイアス電圧を求め，次にバイアス電圧を利用したコンディショニングの効果について述べる．

3. 6. 1 バイアス電圧によるマルチパクタリングの抑制

マルチパクタリングを抑制するために必要なバイアス電圧を求めた．バイアス電圧は入力 RF 電圧に加算され off-set として寄与し，バイアス電圧のプラス又はマイナスにその絶対値を大きくすると，0 kW に近い電力レベルにマルチパクタリングの発生しない領域が広がる．

図 3.6.1 ， 図 3.6.2 に透過波及び全反射定在波でマルチパクタリングが発生する電力レベルを示す．バイアス電圧 -2000 V を引加すると透過波で 300 kW 以下，全反射で 100 kW 以下の入力電力で外導体のマルチパクタリングは抑制され，バイアス電圧 $+2000\text{ V}$ を印加すると，透過波で 250 kW 以下，全反射で 70 kW 以下で内導体のマルチパクタリングが抑制されることがわかる．入力電力が 300 kW 以下でマルチパクタリングを抑制するのに必要なバイアス電圧レベルを表 3.6.1 に示す．バイアス電圧を $\pm 4400\text{ V}$ 以上印加すれば，全反射でも 300 kW 以下でマルチパクタリングは発生しないことがわかった．

実際のカプラでは十分にコンディショニングを行えば，バイアス電圧なしでもマルチパクタリングは発生しないので，ビーム運転には使用せず，コンディショニングにバイアス電圧を使用している．

表 3.6.1 マルチパクタリングを抑制するためのバイアス電圧
(300 kW 以下でマルチパクタリングが発生しない場合)

条件	マルチパクタリングを抑制できるバイアス電圧
透過波	外導体側 < -1800 V
	内導体側 > $+2200\text{ V}$
全反射	外導体側 < -3300 V
	内導体側 > $+4400\text{ V}$

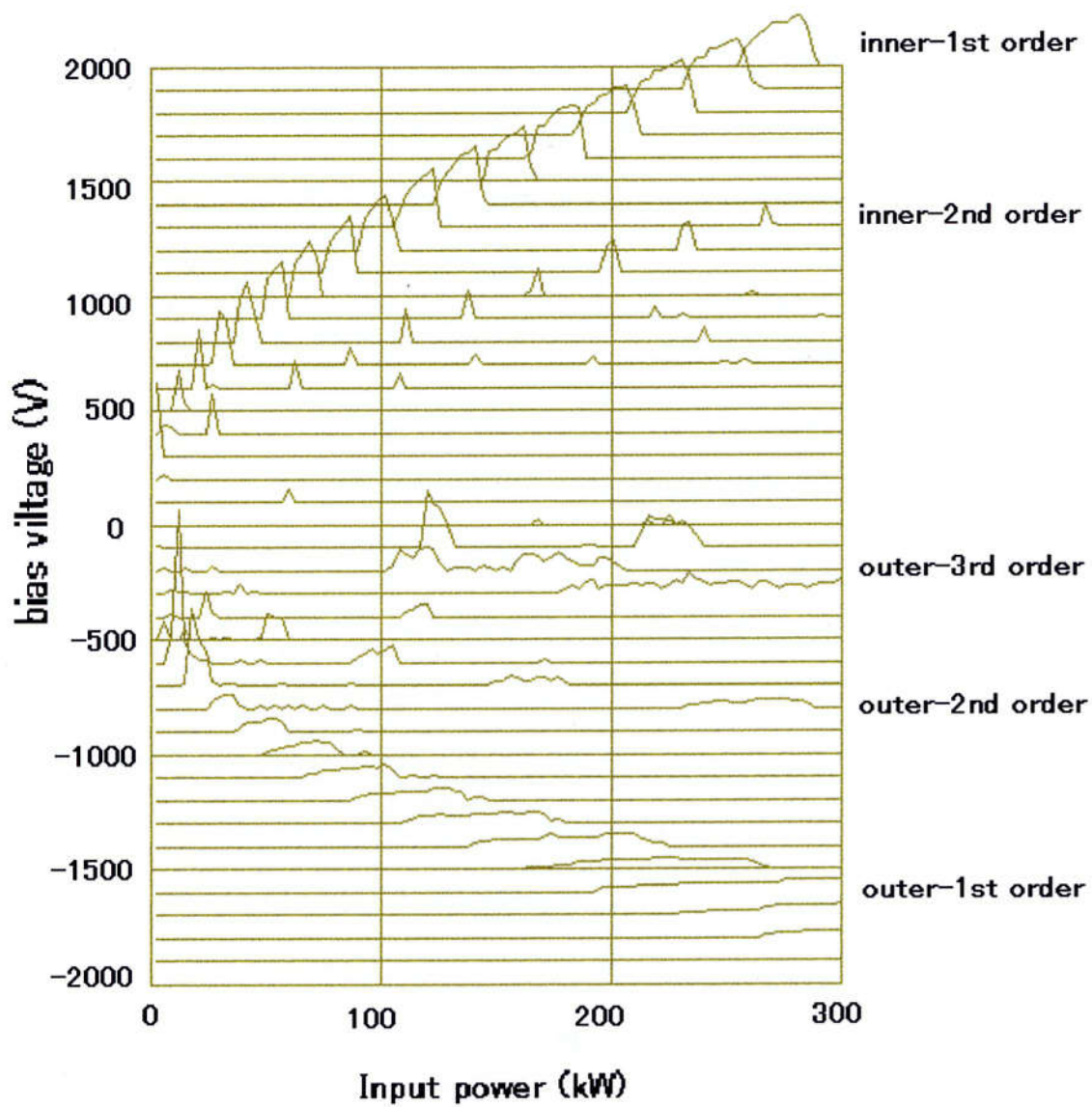


図 3.6.1 バイアスマルチパクタリングの同期条件を満たす電力レベル透過波の場合

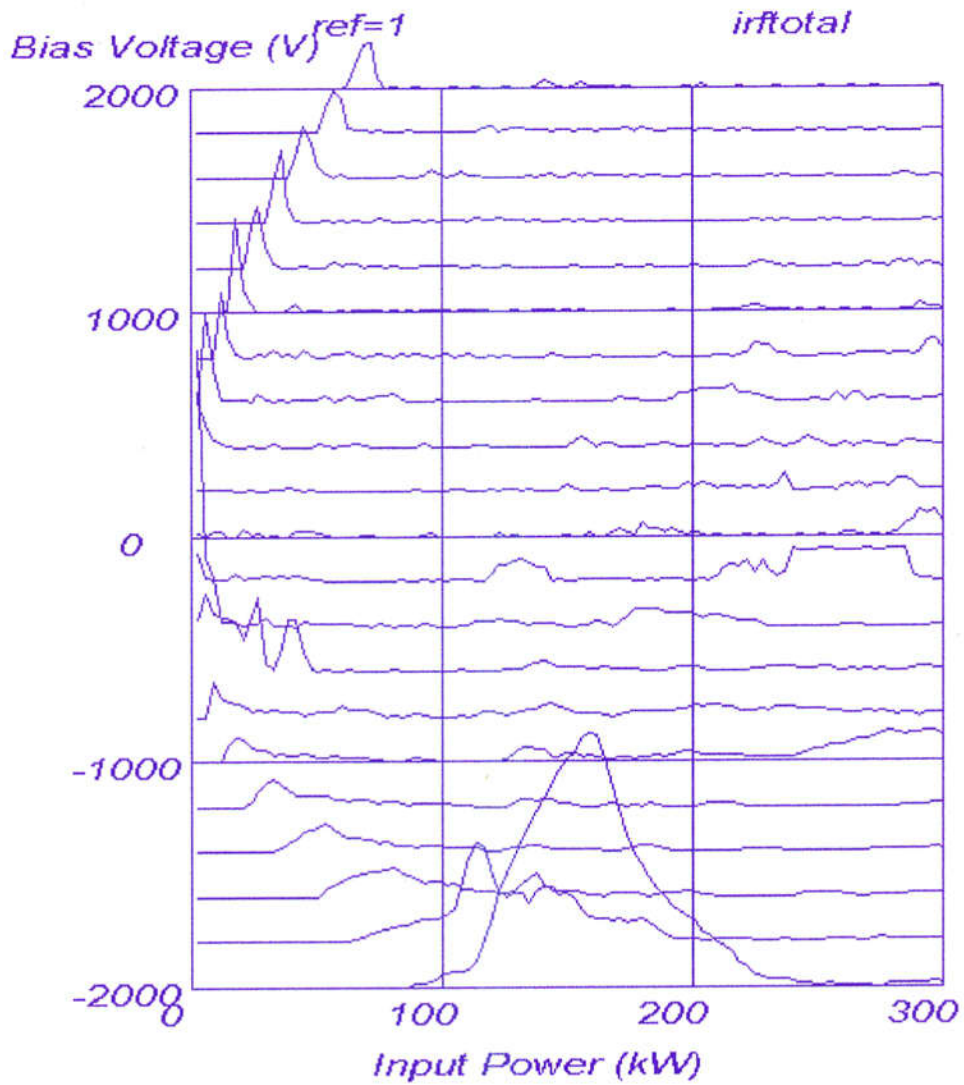


図 3.6.2 バイアス電圧とマルチパクタリングの発生する電力レベル
全反射定在波の場合

3. 6. 2 バイアス電圧を印加したコンディショニングの効果

バイアス電圧を印加するとマルチパクタリングが誘起される条件が広がり、これをコンディショニングに利用すると効果的であると考えた。バイアス電圧を変えてマルチパクタリングが発生する電力レベルと場所をシミュレーションにより求めその効果について調べた。

超伝導空洞では、ビームがない時は入力した電力は全反射され、横測定やトンネル内では全反射定在波状態でカプラ内のコンディショニングを行うことが要求される。計算は KEKB のコンディショニングを想定し、同軸 50 Ω の全反射条件で、バイアス電圧を変えてマルチパクタリング同期条件に合う電力レベルを求めた。図 3.6.3 にマルチパクタリングの発生する部分とその特性を示す。内導体にプラスのバイアス電圧をかけた場合は、低い電力領域で内導体の 1 ポイントマルチパクタリングが誘起され、電力が増加し電場が大きくなると内外導体間の 2 ポイントマルチパクタリングに移行する。内導体にマイナスの電圧をかけた場合は、外導体の 1 ポイントマルチパクタリングが誘起される。バイアスなしでは、2 ポイントまたは外導体のマルチパクタリングが発生することがわかった。

次に、マルチパクタリングの同期条件が成立する時の一次電子の衝突エネルギーを求めた。一次電子の衝突エネルギーは、次の 3 段階に分けた。

レベル 1 : 200 - 800 eV コンディショニングが終了しても二次電子放出係数は 1 以下に下がらず、構造に起因するマルチパクタリングの残るレベル。

レベル 2 : 800 - 1500 eV コンディショニングで二次電子放出係数を 1 以下にできるレベル。コンディショニングが必要なレベル。

レベル 3 : 200 eV 以下 1500 eV 以上
初期のコンディショニングで消えるレベル。

マルチパクタリング同期条件に合う同軸内の定在波位置と一次電子衝突エネルギーの関係を図 3.6.4 に示す。バイアス電圧をかけない場合は、定在波の電圧最大の山と電圧最小の谷で外導体のマルチパクタリングが発生する可能性があるが、その範囲は限られた狭い範囲であることがわかる。内導体にプラスの電圧をかけると広い領域で内導体のマルチパクタリングを誘起する。また、マイナス電圧では外導体の広い領域でマルチパクタリングを誘起する。

さらに詳細に見るため、一次電子の衝突エネルギーと入力電力レベル、バイアス電圧との関係を図 3.6.5 及び図 3.6.6 に示す。

二次電子放出係数が 1 以下に下がらない衝突エネルギーレベル 1 は十分なコンデ

イショニングを行った後も構造に起因するマルチパクタリングが残る。したがって、コンディショニングには衝突エネルギーレベル 2,3 で示すマルチパクタリングの領域をなくすよう実施するのが望ましい。図より、内導体のコンディショニングにはバイアス電圧 0 ~ +1400 V で、外導体はバイアス電圧 0 ~ -1200 V の領域を使用するのが適切であると考えられる。バイアス電圧 -1400 ~ -2000 V では電力、場所とも広い領域でマルチパクタリングが発生し、コンディショニングには有効であるが、長時間使用すると電子照射による表面の変色や発熱が問題になるので注意が必要である。

以上より全反射でのコンディショニングにおいて、範囲と考慮すべき事項を表 3.6.2 にまとめる。

表 3.6.2 コンディショニングにおける範囲と状況

バイアス電圧	状況
+側	低い入力電力では内導体の 1 ポイントマルチパクタリングが発生する。入力電力が大きくなると内外導体間の 2 ポイントマルチパクタリングが発生する。
+800 ~ +1400 V	入力電力 200 kW 以下で内胴体のマルチパクタリングが発生する。特に 50 kW 以下のマルチパクタリングは同軸の広い範囲で発生しコンディショニング後も消えない。
-側	外導体のマルチパクタリングが発生する。
-200 ~ -600 V	100 kW 以下で広範囲のマルチパクタリングが発生する可能性はあるがコンディショニング後は消滅する。
-1400 ~ -2000 V	広範囲のマルチパクタリングが発生し、コンディショニング後も消滅しない。コンディショニングには有効であるが、窓付近でもマルチパクタリングが発生し、その状態を保持すると発熱があり、危険である。

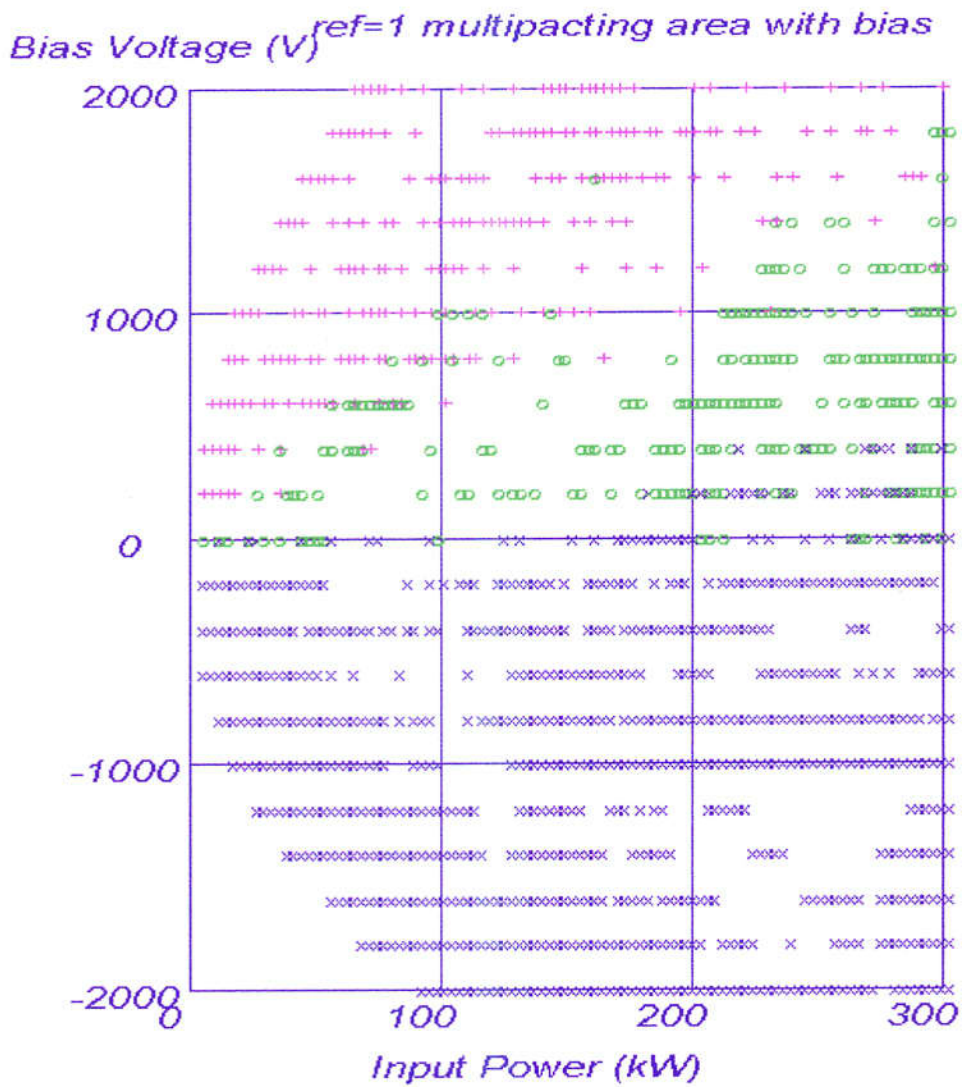


図 3.6.3 マルチパクタリング同期条件が成立する場合の
電力レベルと発生部分の特性
定在波でバイアス電圧を変えた場合

- + : 内導体 1 ポイントマルチパクタリング
- x : 外導体 1 ポイントマルチパクタリング
- o : 内外導体間 2 ポイントマルチパクタリング

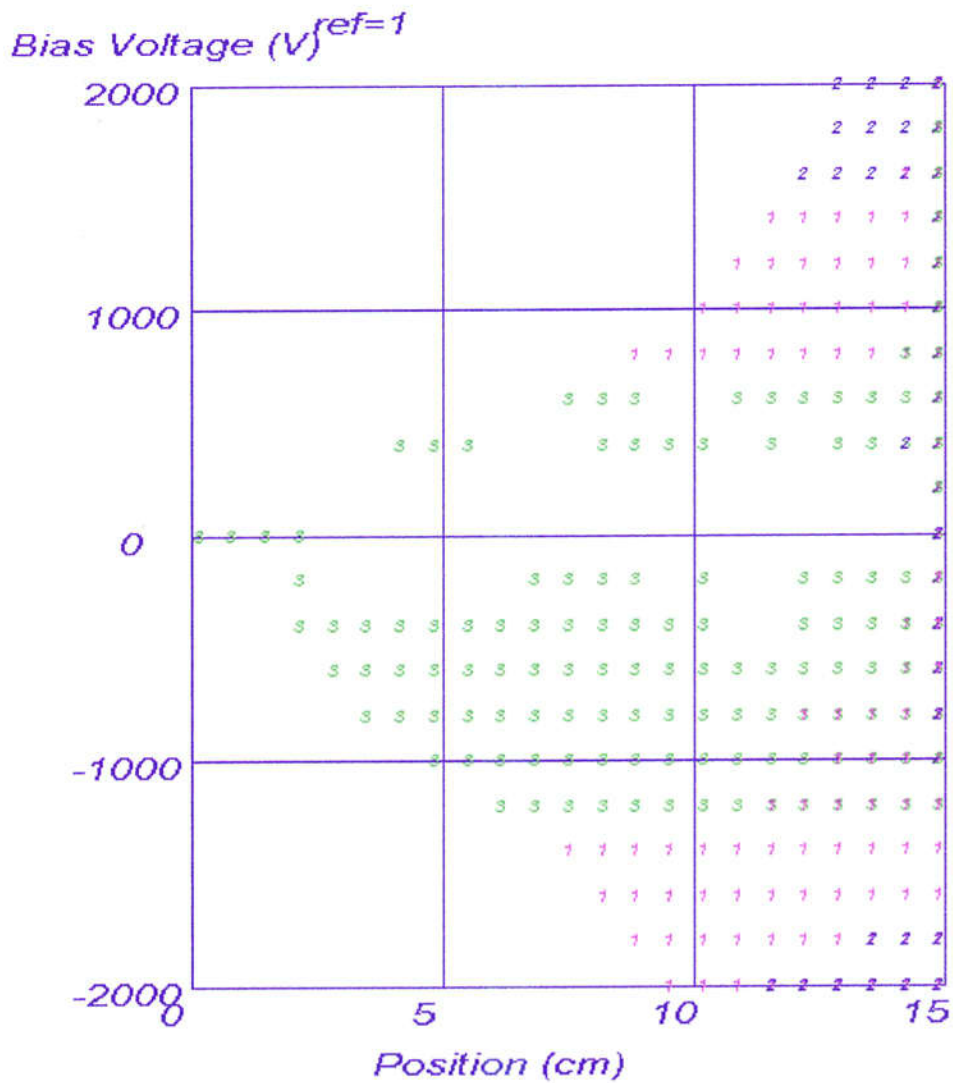


図 3.6.4 マルチパクタリング同期条件が成立する場合の同軸内の定在波位置と電子衝突エネルギーの関係

- 電子衝突エネルギー
- 1 : 200 – 800 eV
 - 2 : 800 – 1500 eV
 - 3 : 200 eV 未満, 1500 eV 以上

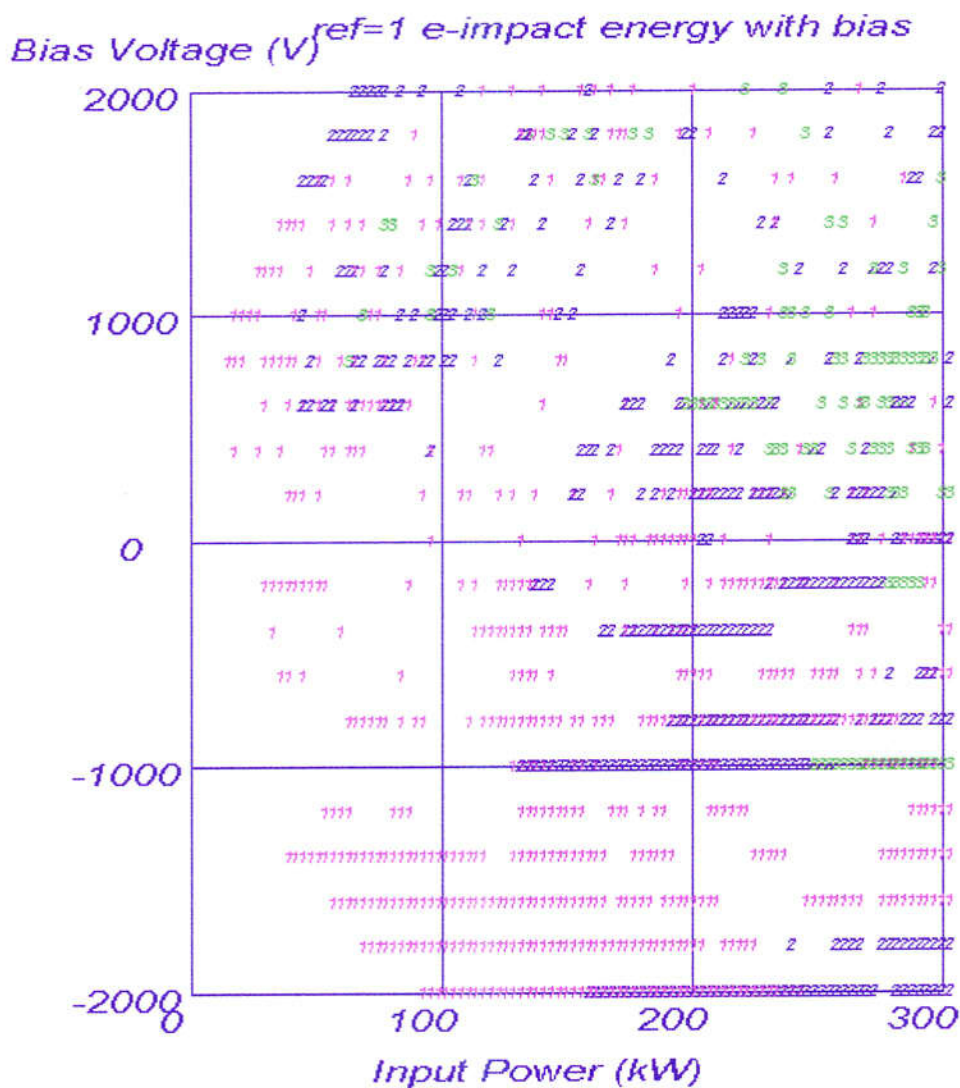


図 3.6.5 マルチパクターリング同期条件が成立する場合の
電力レベルと電子衝突エネルギーの関係
定在波でバイアス電圧を変えた場合

電子衝突エネルギー

- 1 : 200 – 800 eV
- 2 : 800 – 1500 eV
- 3 : 200 eV 未満, 1500 eV 以上

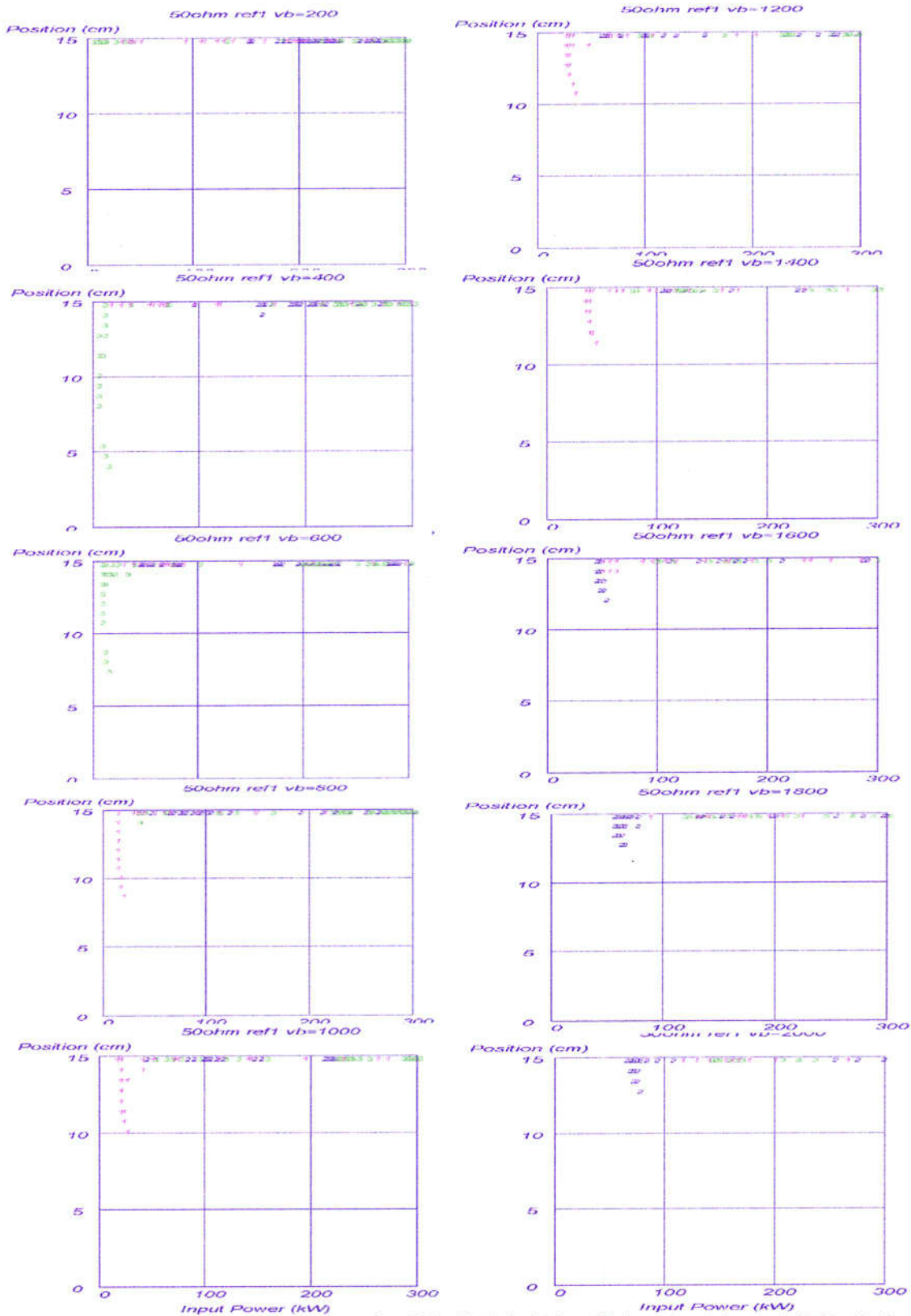


図 3.6.6 (a) マルチパケタリング同期条件が成立する場合の各バイアス電圧による
同軸内定在波位置と電子衝突エネルギーの関係

電子衝突エネルギー 1 : 200 – 800 eV 2 : 800 – 1500 eV 3 : <200eV, >1500eV

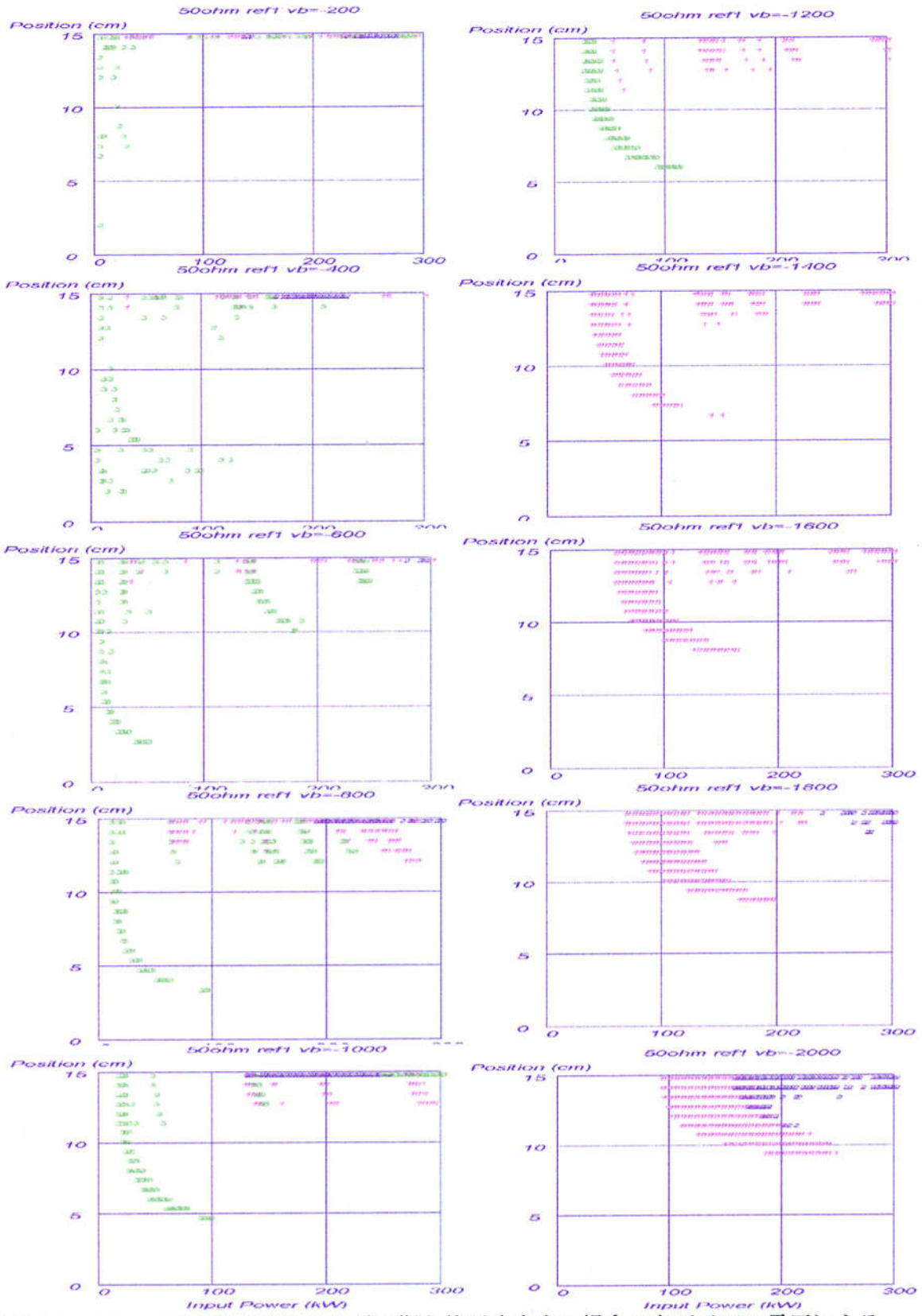


図 3.6.6 (b) マルチバクタリング同期条件が成立する場合の各バイアス電圧による同軸内定在波位置と電子衝突エネルギーの関係

電子衝突エネルギー 1 : 200 - 800 eV 2 : 800 - 1500 eV 3 : <200eV, >1500eV

3. 7 マルチパクタリングの計算まとめ

解析およびシミュレーション結果より、以下のことがわかった。

- (1) 同軸のマルチパクタリング発生の電力レベルを求めた。

透過波では同軸 $50\ \Omega$ で 225 kW 近傍に、空洞取り付け Nb ポート部では 290 kW 近傍にマルチパクタリングを誘起する電力レベルが存在する。

全反射の条件では広い範囲でマルチパクタリングの発生する電力レベルが存在する。

- (2) 窓部のチョーク構造のマルチパクタリング発生の電力レベルを概算した。

平行平板の近似計算では 4 mm の間隙で透過波 222 kW 以下にマルチパクタリング同期条件をみたす電力レベルがある。

低い電力レベルで、チョーク間隙での 2 ポイントマルチパクタリングが発生していると推測できる。窓部表面の二次電子放出係数を下げる必要がある。

- (3) カプラのコンディショニングにはバイアス電圧を用いるのが有効である。

定在波ではバイアス電圧をかけることで広い同軸領域のマルチパクタリングを誘起できる。

内導体にプラスのバイアス電圧をかけると低い電力では内導体のマルチパクタリングが発生し、電力が大きくなるに従い、内外導体間の 2 ポイントマルチパクタリングが発生する。マイナスのバイアス電圧では、外導体のマルチパクタリングが発生する。バイアス $-1400 \sim -2000\ \text{V}$ は広い領域で構造に起因するマルチパクタリングが発生し注意が必要である。

以上のことをふまえ、二次電子放出係数の測定と、カプラテストスタンドでの検証試験を行う。

第4章 カプラ内表面の二次電子放出係数

4.1 カプラの電子放出，放電現象と二次電子放出係数

カプラは、ビーム運転前に単体で脱ガスのためのコンディショニングが行われる。コンディショニング初期においては、電子の発生、圧力上昇、さらに発光現象が観測される。これらの要因の1つとして、マルチパクタリングが考えられ、カプラの材料表面を電子がたたくことにより、表面に吸着していた H_2 、 CO 、 CO_2 を主とするガス分子が放出される。しかし、十分なコンディショニング後はマルチパクタリングを発生させていた電力を入力しても圧力上昇はなくなり、表面状態が変化したことがわかる。セラミック窓の近傍では、電子が発生しその増加とともに、放電による発光と同時に大きなエネルギー吸収が測定された。これは、セラミック窓表面の電子照射によりガスが発生し、ガスによる発光及びエネルギー吸収が起こった可能性が考えられる。

J.Halbritter の XPS の測定によると、ニオブ 表面の場合、酸化膜の上に C、O の 2 分子層程度の吸着があり、その上に hydrocarbon の吸着があることが報告されている。この表面に電子照射を行うと、表面の H_2O が脱離し、hydrocarbon 層が変化することが示されている[1][2]。

このように二次電子放出係数の測定はこれまで多くの材料について行われている[3][4]が、表面の汚染、吸着ガスや結晶粒の状態が敏感に影響し、材料の加工工程、表面処理方法によりその値は大きく異なる。

ここでは、カプラの構成材料である、アルミナセラミック及び金属について二次電子放出係数を測定し、洗浄や電子照射によるコンディショニングの効果について調べ、マルチパクタリング抑制の可能性を検討した。セラミックについては TiN コーティングの効果と製作工程の影響について確認し、金属では電子照射の効果について調べた。

4. 2 二次電子放出の機構

表面に電子が衝突する時の散乱として、運動エネルギーが保存される弾性散乱と、材料と相互作用しエネルギーが変化する非弾性散乱に大別できる。非弾性散乱には、表面近傍の電子が電子衝突で放出される真の二次電子放出のほかに、材料の結晶構造（格子）と相互作用するフォノン励起や、金属の自由電子と相互作用するプラズモン励起、電子の励起順位に対応するオージェ遷移による電子放出がある[5][6]。図 4.2.1 に励起の種類を示す。

真の二次電子は通常 2 ~ 5 eV のエネルギーで放出される。その放出確率は表面の仕事関数に依存し、仕事関数が小さいものほど二次電子放出係数は大きい。真の二次電子に対し、他の非弾性散乱での放出電子や弾性散乱の電子まで含めたものを、広義の二次電子と呼ぶ。

エネルギー E [eV] の電子の金属内の平均自由行程 λ_e [nm] は、

$$\lambda_e \approx \frac{0.014E}{\ln(E/15)} \quad (4.2.1)$$

で近似でき、図 4.2.2 に示すように 40 eV 付近で最小値を示す。減衰距離 λ_a (attenuation length) は、平均自由行程より

$$\lambda_a \approx \lambda_e / 0.6 \quad (4.2.2)$$

で近似できる。一方、一次電子の浸入深さ R [nm] は、密度 ρ [g/cm³] の材料中では、

$$R = 90 \cdot \rho^{-0.8} \cdot (E/1000)^{1.3} \quad (4.2.3)$$

で表される。発生した二次電子の減衰距離 λ_a が、一次電子の浸入距離より大きい時、

$$R < \lambda_a$$

二次電子は材料表面に到達し表面より放出される[1][7][8]。

一次電子の入射エネルギーが低いときは浸入深さ R は小さく、二次電子は容易に放出される。エネルギーの増加に伴い浸入深さが増加し、衝突回数も多くなることから、二次電子数はエネルギーにほぼ比例して増加する。しかし入射エネルギーが高くなると浸入深さ R は二次電子の減衰距離より大きくなり、二次電子は表面から放出されにくくなり、エネルギー増加に伴い二次電子は減少する。このように、二次電子放出係数は入射エネルギーをパラメータとして、金属では 600 ~ 800 eV でピークとなるような図 4.2.3 に示すような特性を示す。

通常、浸入深さ R は入射エネルギー 10 keV で 1 μ m、減衰距離 λ_a は、金属では数 nm、絶縁体では金属の約 10 倍となる。

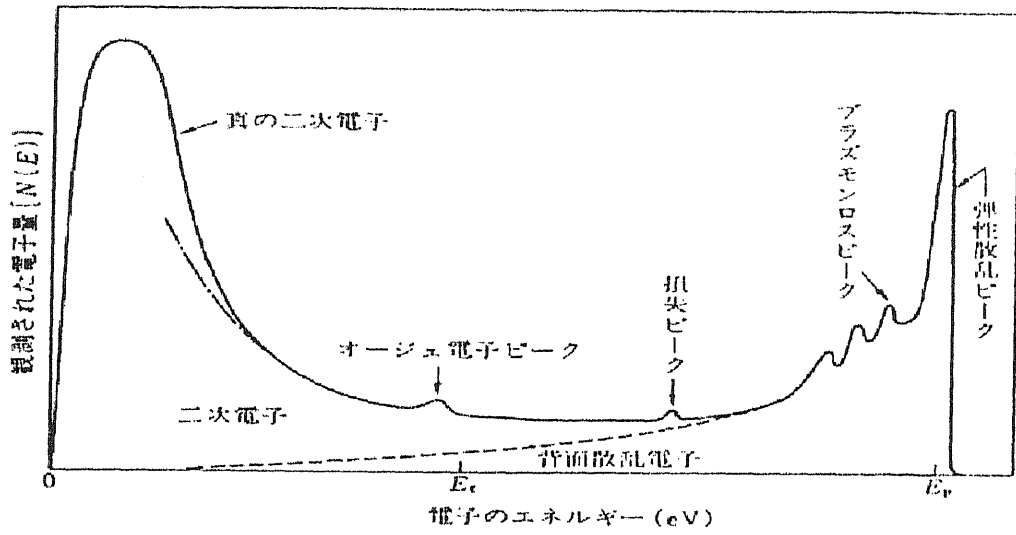


図 4.2.1 二次電子のエネルギー分布

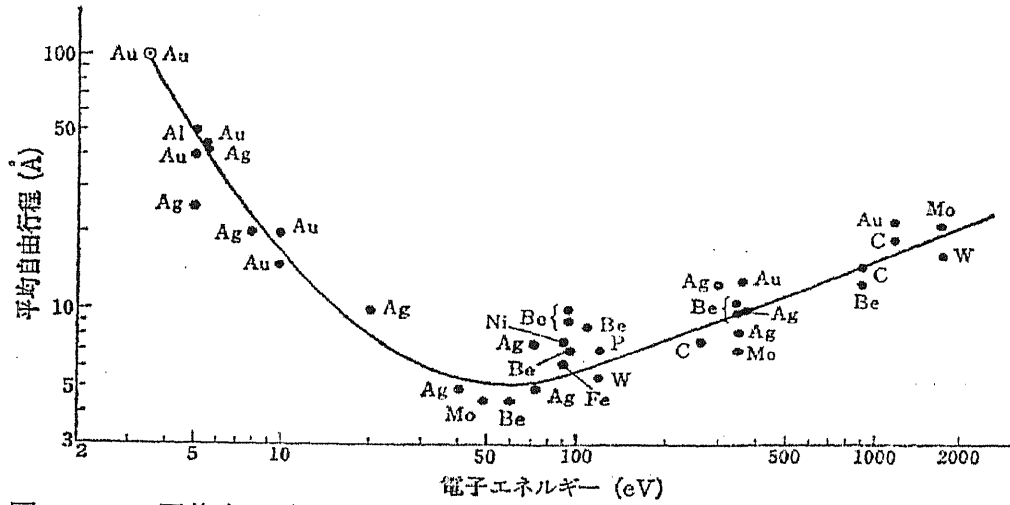
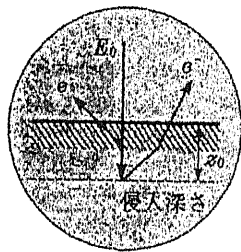


図 4.2.2 固体内の電子の平均自由行程のエネルギー依存性 [6]

(a) 低エネルギー一次電子



(b) 高エネルギー一次電子

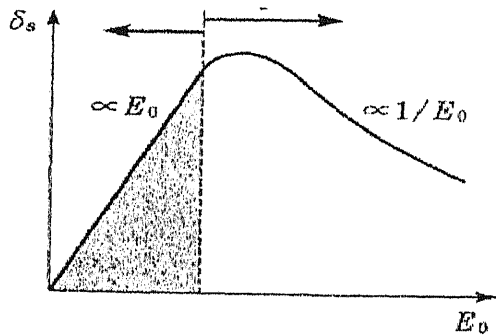
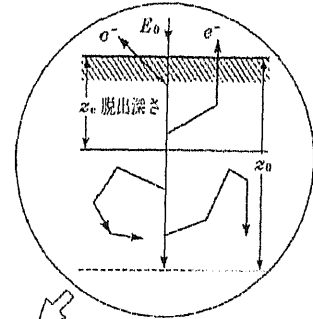


図 4.2.3 一次電子エネルギーと二次電子放出係数の関係 [5]

4. 3 測定装置と測定方法

二次電子放出係数は走査型電子顕微鏡(SEM:Elionix ESM-3200)を改造した装置を使用した。二次電子放出係数測定用装置[9]~[11]は、電子銃とその収束電磁石系、電子測定用のファラデーカップと駆動式サンプルホルダーから構成されている。構成を図4.3.1に、使用条件を表4.3.1に示す。

電子銃からの電子ビームを入射電子(一次電子)とし、試料表面を数 μm^2 から数 mm^2 の領域で走査する。また、電子ビームの取り出し部にある偏向電磁石にパルス電圧を印加することにより数 msec のパルス幅で電子ビームのパルス照射も可能となっている。

入射する一次電子のエネルギー範囲は 0.6 keV から 30 keV であるが、試料に -0.25 kV のバイアス電圧をかけることにより、最低 0.35 keV の測定ができるよう設定した。一次電子電流はファラデーカップを上向き的一次電子測定位置にセットして測定し、基準電流(通常 100~200 pA)に設定する。その後孔の開いた下向きのファラデーカップを挿入して、二次電子電流を測定する。一次および二次電子電流はファラデーカップに +50 V のバイアスを印加して捕獲し、微小電流計で測定している。

二次電子放出係数 δ は一次電子電流 I_p と二次電子電流 I_s より、

$$\delta = I_s / I_p$$

から求めることができる。ここで測定する二次電子放出係数は一次電子の弾性散乱まで含む広義の二次電子であり、マルチパクタリングを評価する場合は、広義の二次電子放出係数のほうがより実際の現象に近い。

測定による表面の変化を小さくするために、金属試料の二次電子放出係数の測定には、電流値 200 pA、パルス幅 2 msec のパルスビームを繰り返し 30 Hz で照射した。照射面積 0.1 mm^2 では 1 パルスあたり 4 pC/ mm^2 と照射量は小さく、測定での電子照射の影響を無視できる。誘電体では電子照射により照射領域が帯電する。この影響を避けるため 1 パルス照射して測定する毎にサンプルホルダーを 3 mm 間隔で移動させて 3 回の平均値を求めている。

測定中の到達真空度は $2 \times 10^{-4}\text{ Pa}$ であり、KEKB のビーム運転中の超高真空を模擬することはできないが、マルチパクタリングが発生しカプラの圧力が上昇した状態を想定することができる。真空ポンプは、表面汚染を抑えるためオイルフリーのポンプに交換した。

表 4.3.1 装置使用条件

一次電子エネルギー	0.6 ~ 30 keV
到達真空度	1.2×10^{-4} Pa
倍率	30 - 200000
分解能	6 nm
走査分割	1000 × 1000
試料ステージ径	φ100 mm
試料ステージ駆動幅	x: 0 - 32 mm y: 0 - 50 mm

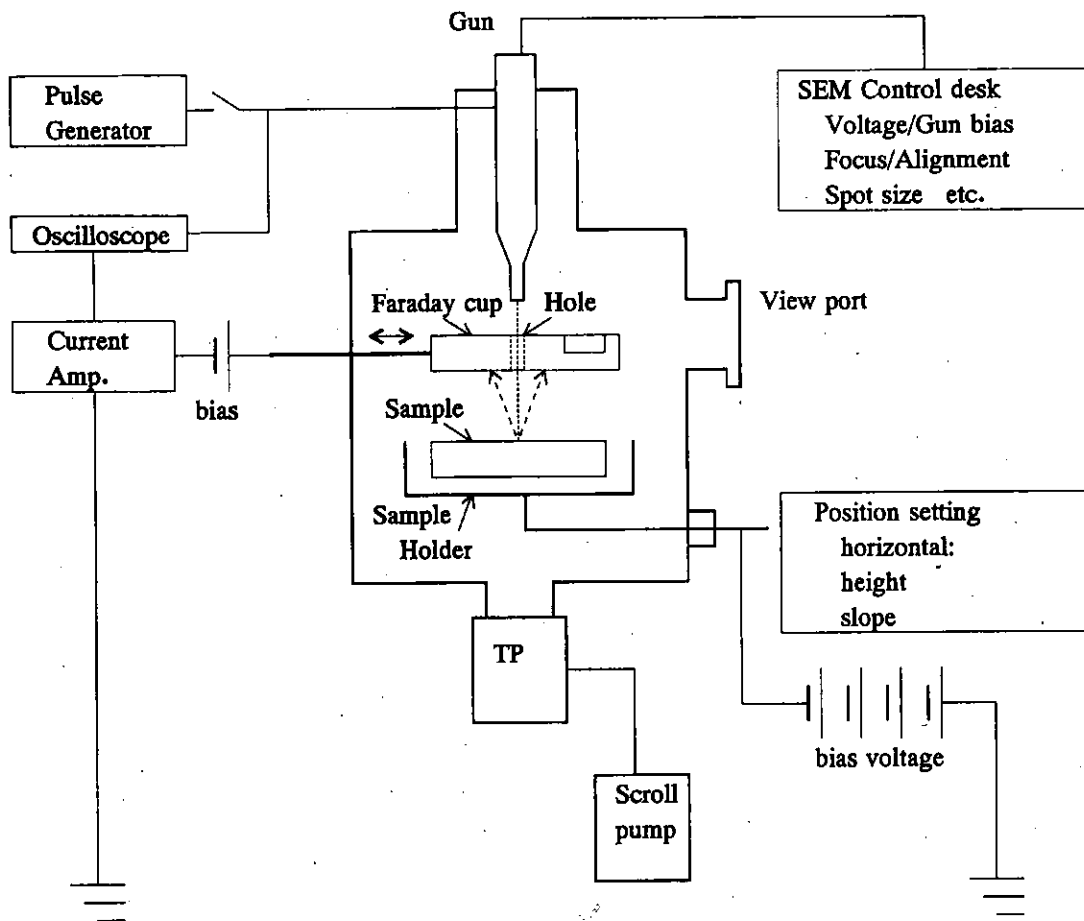


図 4.3.1 二次電子放出係数測定装置

4. 4 KEKB のカプラ材料

カプラ同軸部は、無酸素銅 (OFC) をアンテナ形状に成形した内導体、熱侵入を減らすため SUS パイプ内面に銅鍍金した外導体からなる。超伝導空洞との接続部はニオブ (Nb) の外導体、真空封じ用にはディスク形状のセラミック窓が用いられている。材料及び処理方法を表 4.4.1 に示す。

表 4.4.1 Material and treatment of the input couplers

Window	
Material	HA95 : 95% purity alumina
Coating	TiN _x O _{1-x} : 10 nm
Rinsing	Ozonized rinsing
Inner conductor	
Material	Copper (OFHC)
Surface treatment	Electro polishing
Rinsing	Ozonized rinsing
Outer conductor	
Material	Stainless steel plated with 30 μm Copper
Surface treatment	Plated by piro phosphoric acid
Rinsing	Ozonized rinsing
Outer conductor of Nb	
Material	Niobium
Surface treatment	Electro polishing
Rinsing	Ozonized rinsing

4. 5 セラミック窓

4. 5. 1 製作工程とサンプル

窓には 95%純度のアルミナ (HA95) セラミックを使用している. 佐藤らが測定した材料特性値を表 4.5.1 に示す[12]. この HA95 は, メタライズ性が良好であり, 機械強度が 350 MPa (flexural strength) で高く, RF 損失 $\tan \delta$ が 2.2×10^{-4} と低いという特性を持つ.

また, セラミック窓の真空側表面には二次電子放出係数を下げるためコーティングが施されている. Linac の大電力パルスクライストロン用の窓では通常, 0.5 ~ 5 nm の膜厚で TiN コーティングが施されている[13]-[15]. 一方, KEKB 超伝導空洞用カプラ窓は, トリスタン 1 MW クライストロン用窓で実績のある TiN 酸化膜 ($\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$) をコーティングしている. TiN 酸化膜では TiN 膜より RF 損失が小さくなり, 膜厚も 10 倍程度に厚くできる.

(この後, TiN 酸化膜, $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ コーティングを TiN 膜及び TiN コーティングと記す.)

セラミック窓の製作は以下の手順で行われる.

- ① アルミナ焼成
- ② ロウ付け部をメタライズ
- ③ 汚染の検査のための空焼き 800℃
- ④ 真空側表面への TiN-コーティング 10nm
- ⑤ Au ロウ付け 1000℃ 水素炉
- ⑥ Ag ロウ付け 800℃ 水素炉

TiN コーティングは DC スパッタ法により, 温度 100 °C 以上, 圧力 5 Pa 以上の Ar と N₂ 混合ガス雰囲気で行われる. スパッター装置内の到達圧力は成膜前には 10⁻⁴ Pa 程度であり, 酸化された TiN 膜 $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ ($x \sim 0.5$) が生成される. 膜厚は, 過剰な RF 誘電損失を避け, また十分な二次電子放出係数の抑制を行うという観点から 10 nm に設定されている[16].

コーティング後は, 金ロウ付, 銀ロウ付の過程で水素炉中で 1000 °C 及び 800 °C に焼かれる. 1 MW のクライストロン用窓は, 表面状態の変化や汚染を避けるためにロウ付け後に TiN コーティングを行っているが, 超伝導空洞用カプラは製作上の制約から, TiN コーティング後にロウ付を行う工程をとらざるをえない. このロウ付け工程で, 表面状態は変化していることが予想される.

窓用アルミナセラミックについて, 純度, TiN 膜の厚さ, 製作工程が, 二次電子放出係数に, どのように影響を与えているかを調べた.

アルミナセラミックのサンプルは KEKB のカプラで使用している 95 % 純アルミナ (HA95) と, 大電力パルスクライストロン窓に使用している 99.7 % 純アルミナ

(HA997) とを準備した(表 4.5.2 参照). また, アルミナ表面に膜厚 5 nm , 10 nm , 20 nm の TiN コーティングを施し, ロウ付けに用いる水素炉内で 1000 °C , 800 °C の加熱処理を行った. 測定は, 表 4.5.3 に示すとおり, 焼成後のアルミナ表面, TiN コーティング後, 1000 °C 及び 800 °C の熱処理後のそれぞれについて行い, 各工程での影響を確認した. また, 実運転に使用している TiN 10 nm をコーティングした HA95 のサンプルについてはオゾン水で 10 分かけ洗いを行いその洗浄効果を確認した.

表 4.5.1 アルミナ材料の特性値

Material	HA95	HA997		
Alumina content	95	99.7	%	
Specific gravity	3.65	3.95		
Flexural strength	350	300	MPa	
Young's modulus elasticity	320	390	GPa	
Thermal expansion coefficient	7.7	8.1	$\times 10^{-6}/K$	
Thermal conductivity	27.18	31	W/mK	
Thermal shock resistivity	160	140	°C	
Volume resistivity	80 deg	5.3×10^{14}	8.0×10^{12}	$\Omega \cdot m$
	200 deg	1.6×10^{13}	1.4×10^{11}	$\Omega \cdot m$
Dielectric constant	9.1 (*)	9.95 (*)		
Dielectric loss tangent	2.2×10^{-4} (*)	4.2×10^{-5} (*)		

(*) Measurement at 3.4 GHz

表 4.5.2 サンプル材料

Ceramic	Size	Thickness of TiN_xO_{1-x} coating
95 % pure alumina HA95	$\phi 92 \times t 3.5$ mm	no coating / 5 nm / 100 nm / 200 nm
99.7 % pure alumina HA997	$\phi 53 \times t 2.5$ mm	no coating / 100 nm

表 4.5.3 サンプルの処理とその測定

New ceramic	
↓	⇒ measurement
TiN _x O _{1-x} coating by DC Sputter	
↓	⇒ measurement
Brazed at 1000 degrees (Au brazing)	
↓	
Brazed at 800 degrees (Ag brazing)	
↓	⇒ measurement
Ozonized water rinsing	
	⇒ measurement

4. 5. 2 測定結果

TiN コーティングを施した HA95 および HA997 アルミナ表面について各工程後に測定した二次電子放出係数を図 4.5.1 及び図 4.5.2 に示す。また、HA95 表面の TiN コーティング膜厚の影響を図 4.5.3 に示す。また測定結果のまとめを表 4.5.4 に示す。アルミナ表面の 'no coating' の測定は、測定によるチャージアップがコーティングに影響を及ぼす可能性があるため、別のサンプルを準備した。同じ材質の測定結果と 15 % 以内のばらつきで傾向は一致している。コーティング後と加熱処理後の測定は、1000 °C の熱処理によりチャージアップは緩和されると考え、同一のサンプルを使用した。熱処理後の TiN コーティング表面は Ti 金属に近い灰色に変色した。その写真を図 4.5.4 に、表面の SEM 像を図 4.5.5 に示す。

測定結果より、以下のことがわかった。

(1) アルミナ純度と二次電子放出係数

95 % 純アルミナ (HA95) と 99.7 % 純アルミナ (HA997) の二次電子放出係数は純度及び誘電率の高い HA997 の方が高い値となった。この結果は、佐藤、道園らの報告内容[10][12]とも一致する。

(2) TiN コーティング膜の効果

アルミナ表面の二次電子放出係数は最大 4~6 と大きな値を示すが、TiN コーティング後は最大値でも 2 以下の値となった。また、膜厚を 5 nm, 10 nm, 20 nm と変えても、二次電子放出係数に大きな差はみられなかった。

(3) ロウ付け工程とオゾン水洗浄

コーティング後に行われる 1000 °C, 800 °C のロウ付け工程を想定した水素炉中熱処理後には二次電子放出係数が増加した。これは炉内での加熱時に表面が汚染されたためと考えられる。オゾン水洗浄により、ロウ付け工程前の低い値にまで下げることができ、オゾン水洗浄は、ロウ付け工程での表面の汚染除去に効果的であることがわかった。

TiN コーティングにより二次電子放出係数を下げることができた。しかし、コーティング後のロウ付け工程で材料表面を汚し、二次電子放出を増大させる結果となった。浅野より、オージェ電子分光 (AES) による分析の結果、ロウ付け工程後には表面の炭素 C が多くなり、C 除去にはオゾン水洗浄が有効であるとの報告がある[17][18](表 4.5.5 参照)。今回実施した二次電子放出係数の測定からも、水素炉中でのセラミック窓表面の汚れを落とすために、オゾン水洗浄が有効であることが実証された。

表 4.5.4 アルミナセラミック窓の二次電子放出係数測定結果のまとめ

		New Al ₂ O ₃ No coating	TiN coating	Brazed 1000°C&800°C	O ₃ water rinsing
SEE coefficient					
HA-95	5 nm	4.8	1.8	3.3	—
HA-95	10 nm	—	1.9	3.3	1.8
HA-95	20 nm	—	1.5	2.4	—
HA-997	10 nm	6.5	1.8	2.7	—
Surface-conductivity		Resistive (charge up)	—	Conductive	—

表 4.5.5 アルミナセラミック窓の AES 測定[18]

	New Al ₂ O ₃	Brazed 800°C	TiN-coating	Brazed 1000°C	Brazed 800°C	Ozonized Water
1) Conductivity By AES	Resistive charge up	Conductive	Resistive charge up	Conductive	Conductive	Less conductive
2) Carbon- Contamination	1	1.7		2.0	1.8	0.27
3) TiN _x O _{1-x} :x @Ar-ion*11min				0.68	0.48 0.66	0.67 0.67

セラミックの各製作工程後に、次の測定を行っている。

- 1) オージェ電子分光装置による表面状態の測定
- 2) 炭素 C による汚染状況，オージェ分光装置による測定
- 3) TiN_xO_{1-x} の x の割合の測定 アルゴンガス照射前（上）と照射後(下)

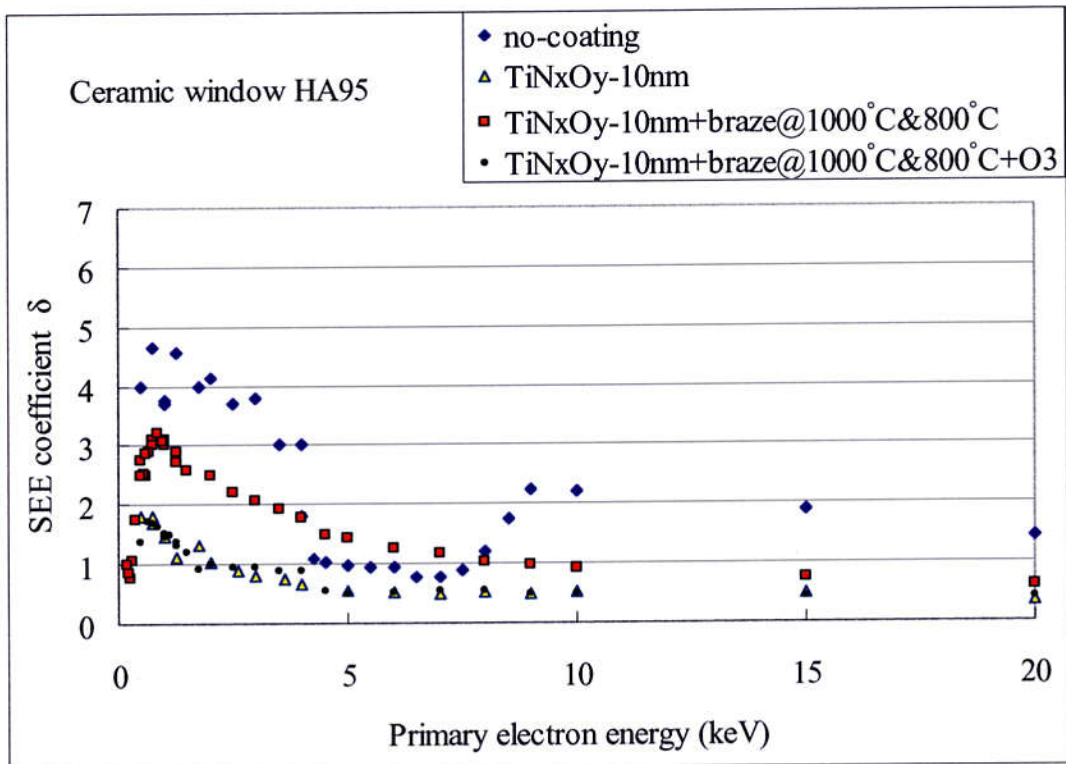


図 4.5.1 アルミナ HA95 と TiN コーティング表面の二次電子放出係数
 HA95 + 10 nm TiN-coating + brazed at 1000°C, 800°C + O₃ water rinsing

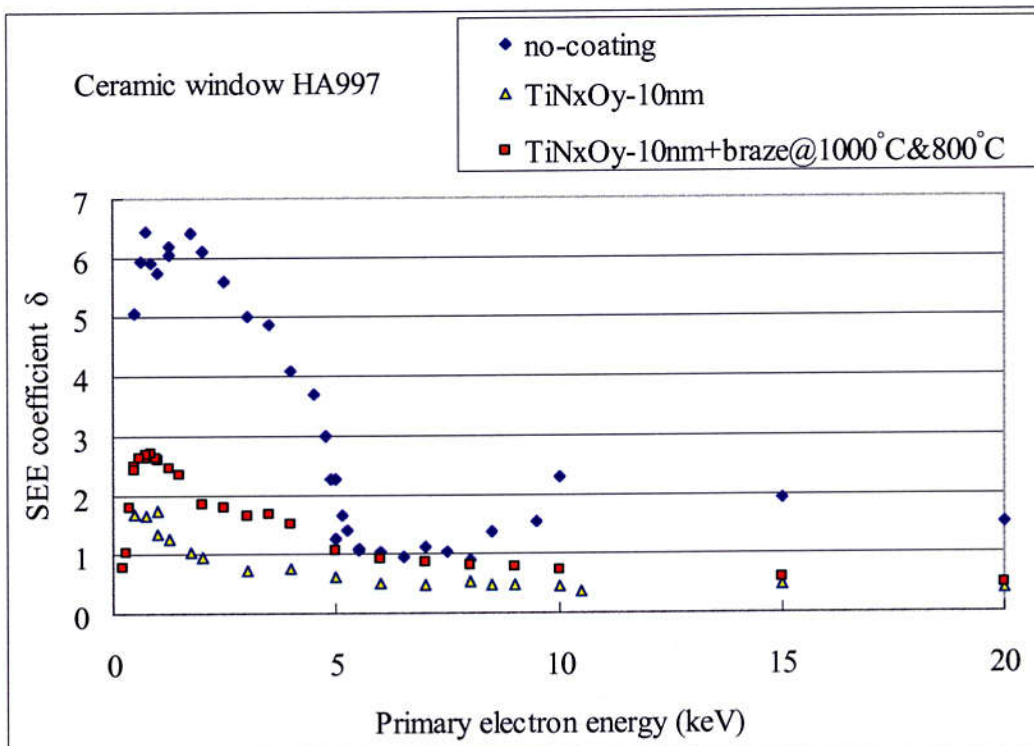


図 4.5.2 アルミナ HA997 と TiN コーティング表面の二次電子放出係数
 HA997 + 10 nm TiN-coating + brazed at 1000°C, 800°C + O₃ water rinsing

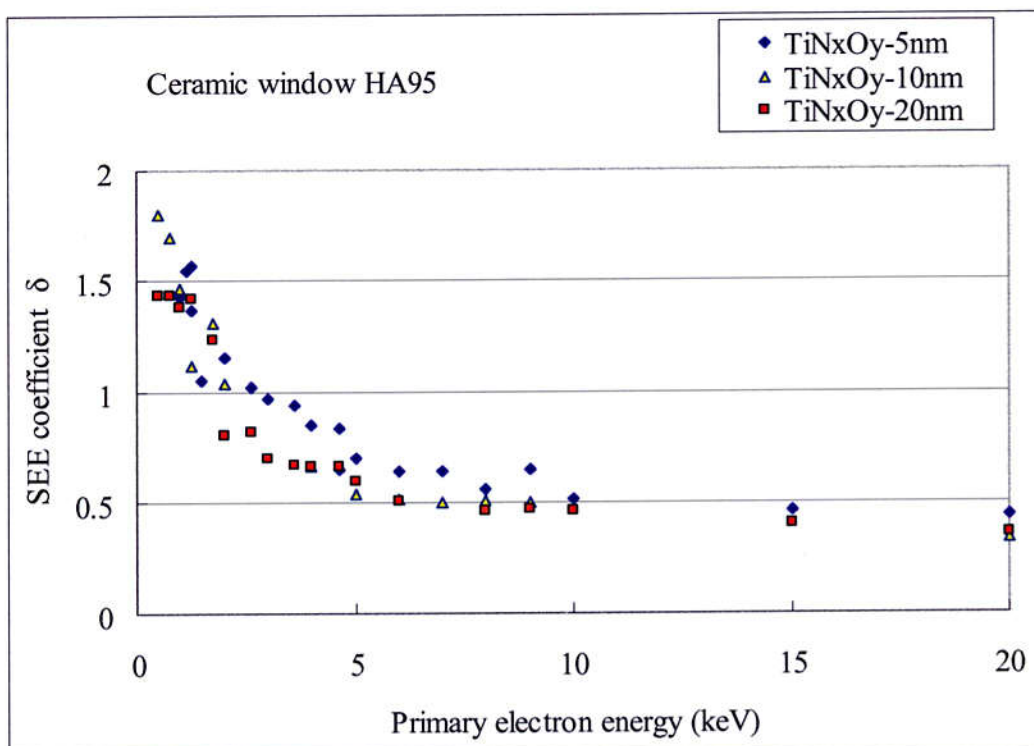


図 4.5.3 TiN コーティング膜厚 5 nm, 10 nm, 20 nm と二次電子放出係数アルミナ HA95

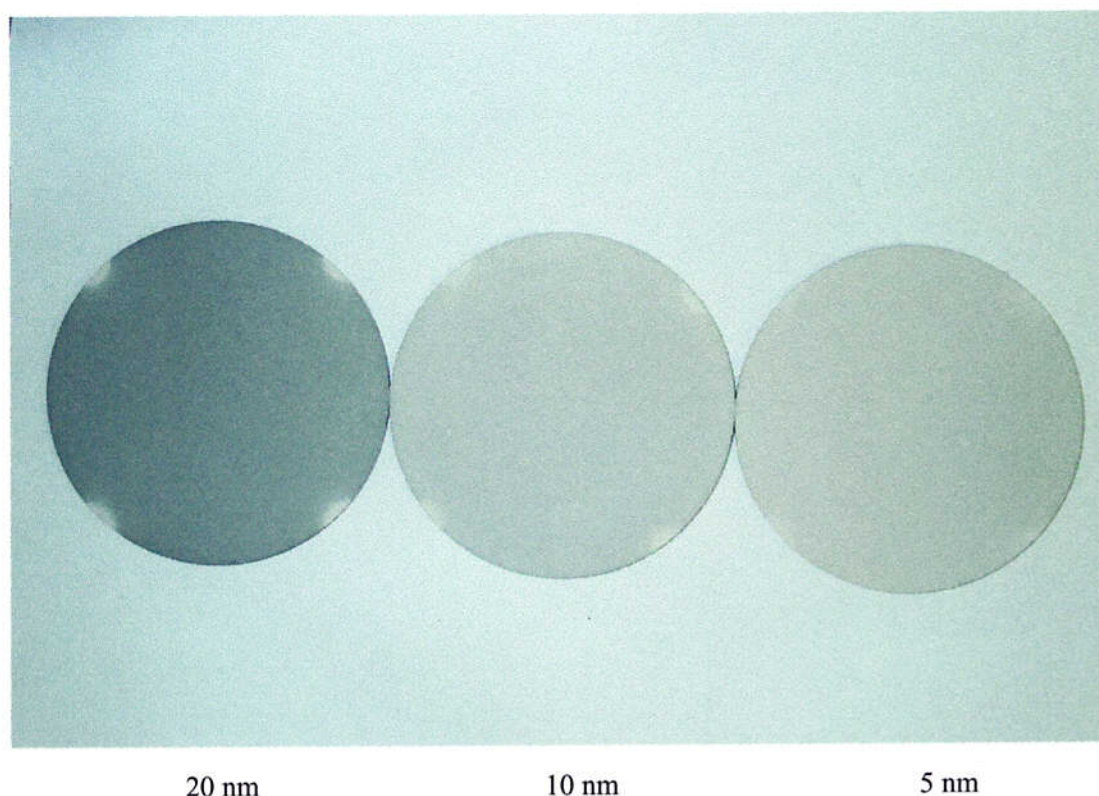
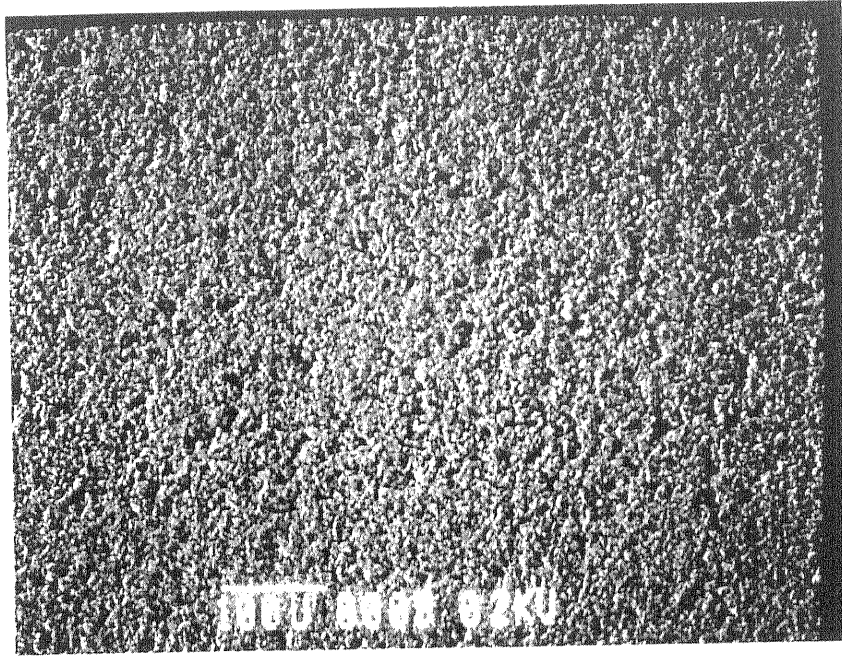
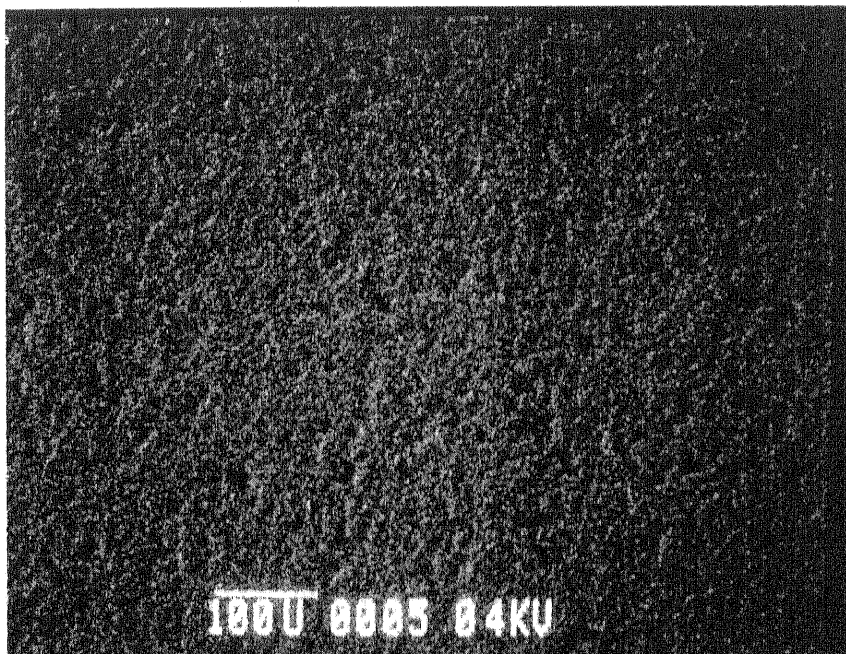


図 4.5.4 1000°C, 800°Cロウ付け工程後のアルミナ(HA95)の TiN コーティング表面



(a) HA95-5 nm TiN-coating

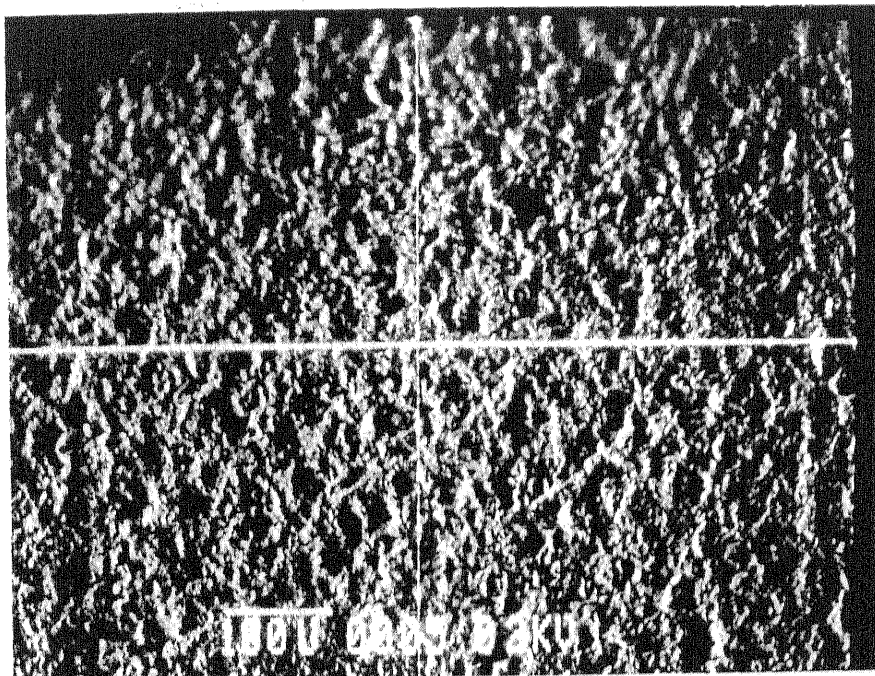


(b) HA95-10 nm TiN-coating

図 4.5.5 (1) 1000℃, 800℃ロウ付け工程後のアルミナの TiN コーティング表面 SEM 像



(c) HA95-20 nm TiN-coating



(d) HA997-10nm TiN-coating

図 4.5.5 (2) 1000°C, 800°Cロウ付け工程後のアルミナの TiN コーティング表面 SEM 像

4. 6 金属表面

4. 6. 1 同軸金属表面での現象

カプラのコンディショニングにおいて、電力投入初期に観察される電子放出及び圧力上昇は、十分なコンディショニングにより減少し、安定に電力を入力できるようになる。これは、マルチバクタリングにより金属表面を電子が照射することで表面が清浄化され、二次電子放出係数が下がるためと考えられる。そこで、金属試料に電子ビームを照射して二次電子放出係数の変化を調べた [19]。

また、KEKB ではカプラ内導体、外導体ともオゾン水洗浄を行っている。オゾン水洗浄によりセラミック表面汚染除去の効果が確認され、またカプラのコンディショニングでは低い電力でのコンディショニング時間の短縮に効果があるという結果を得ている。洗浄方法による二次電子放出係数を測定し、金属表面へのオゾン水洗浄の効果を確認した。

4. 6. 2 材料とサンプル

同軸部に使用されている 3 種類の金属を準備した。

(1) 無酸素銅 (size 20×10×t5)

電解研磨(EP)処理を行ったもの。

(2) ピロリン酸銅鍍金 (size 100×10×t3)

SUS 表面にピロリン酸銅鍍金を 30 μm 施したもの。

ピロリン酸鍍金液はピロリン酸銅 ($\text{Cu}_3\text{P}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) と ピロリン酸カリウム ($\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) を主成分とする。

(3) ニオブ : Nb (size 20×10×t3)

超伝導空洞の表面処理工程を想定し、電界研磨, アニール, ベーキングを行った。

EP 100 μm + アニール 700 °C + EP 15 μm + ベーキング 150 °C。

4. 6. 3 測定結果

洗浄効果と電子照射効果について測定を行い、次のような結果を得た。

(1) 洗浄効果

無酸素銅と鍍金銅について洗浄方法を変えて二次電子放出係数を比較した。

サンプルには、超純水洗浄、オゾン水洗浄を順次行い、処理無し、超純水洗浄後、オゾン水洗浄後の3段階で二次電子放出係数を測定した。超純水洗浄では10分間純水でかけ洗いをした後クリーンルーム内で乾燥し、また、オゾン水洗浄では、オゾン水かけ洗いを10分行った後、純水で洗い流し、クリーンルーム内で乾燥した。いずれも洗浄後、約1時間大気中で乾燥のために放置したが、実際のカプラも取り付けまで数時間は大気にさらされ、現実のカプラに近い取り扱いとなっている。

無酸素銅及び鍍金銅の測定結果を図4.6.1，図4.6.2に示す。無酸素銅及び銅鍍金面いずれも洗浄による大きな差異は見られなかった。

(2) 電子照射の効果

無酸素銅、鍍金銅、ニオブ表面に電子を照射し二次電子放出係数の変化を測定した。一次電子エネルギー0.6 keV，1 keV，4 keVの電子ビームを、電流1 nAで0.02～0.07 mm²の領域を走査してサンプル表面に照射した。

無酸素銅、鍍金銅、ニオブ面の電子照射量と二次電子放出係数の関係を図4.6.3～図4.6.5に示す。いずれも、二次電子放出係数は概ね電子照射量の対数に比例して減少し、10³ C/mm²の電子照射積算量で約70%となり、それ以降はあまり変化しないことがわかった。真空圧力は2×10⁻⁴ Paで電子照射中もほぼ一定であった。

銅鍍金面、ニオブの照射前後の、二次電子放出係数を図4.6.6，図4.6.7に示す。装置の一次電子エネルギー可変範囲と真空圧力の制限から、0.5 keV以下で二次電子放出係数の減少は測定できなかったが、1～4 keVで二次電子放出係数が大きく減少することがわかった。

図4.6.8に示すように、電子照射面のSEM像からも照射領域は暗く見え、二次電子放出係数が減少したことがわかる。また、目視でも変色が見られた。これらの結果より、金属表面への電子照射により表面が清浄化され、さらに表面状態が変化したことがわかる。

4. 6. 4 まとめ

以上の測定結果より次のことが考察できる。

(1) オゾン水洗浄の効果

金属面の洗浄による二次電子放出係数の変化は見られなかった。これは金属表面の汚染が少なかったためと考えられる。オゾン水洗浄は表面汚染の除去、脱脂に効果的である。

(2) 電子照射量と二次電子放出係数

二次電子放出係数は、電子照射量の概ね対数に比例して減少し、 10^3 C/mm² の電子照射量 (電子数 6.2×10^{16} 個/mm²) でほぼ減衰の limit に達し、約 70 % に減少する。照射後の変色からも表面状態が変化したことがわかる。

(3) 電子照射エネルギーの効果

真空圧力 2×10^{-4} Pa 中での測定では、二次電子放出係数に関して、一次電子の照射エネルギー 0.6, 1, 4 keV による大きな差異は現れなかった。

一次電子の平均自由行程は照射エネルギーの関数となり、図 4.2.2 より

0.6 keV 約 1 nm

1 keV 約 2 nm

4 keV 約 4 nm

である。今回の測定では電子照射により 1 ~ 4 nm 近傍の酸化膜の表面状態が変化していると考えられる。

二次電子放出係数の高い 0.3 ~ 0.5 keV の照射エネルギーに相当する表層 1 nm 以下の表面状態について、電子照射による変化を議論するためには、より高真空での測定が望まれる。

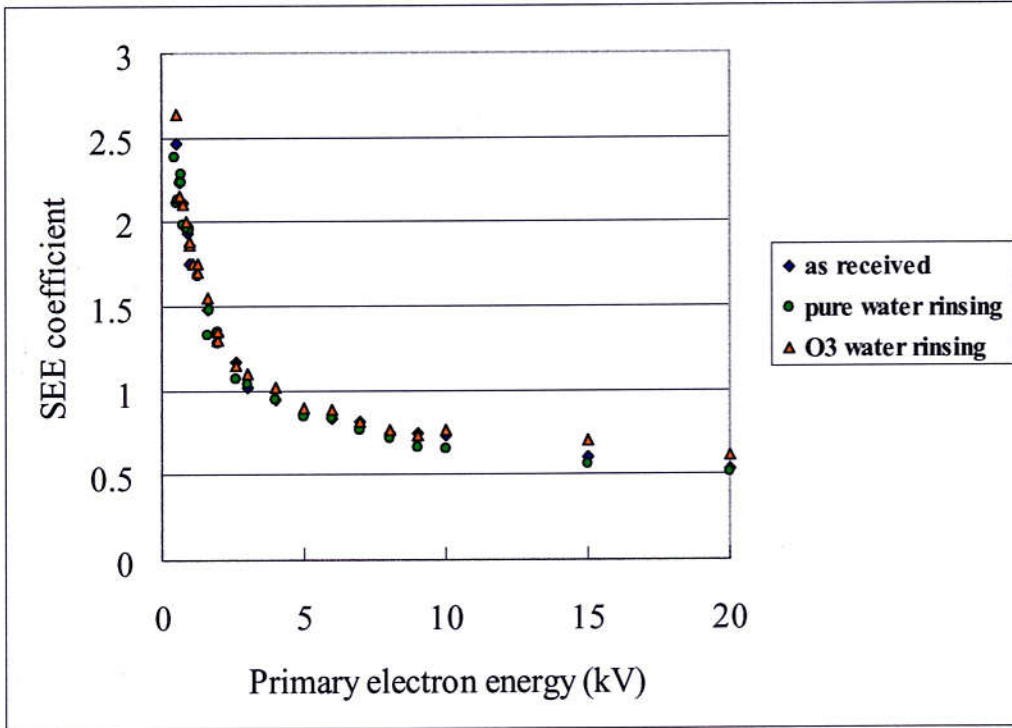


図 4.6.1 表面洗浄と二次電子放出係数 — 無酸素銅

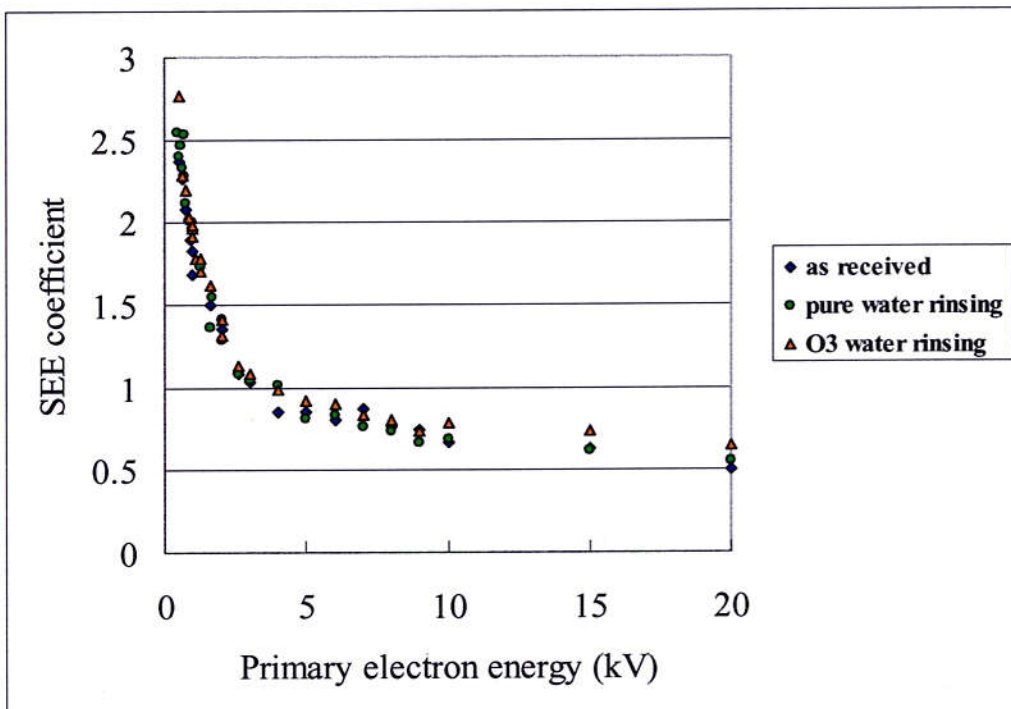


図 4.6.2 表面洗浄の二次電子放出係数 — ピロリン酸鍍金銅

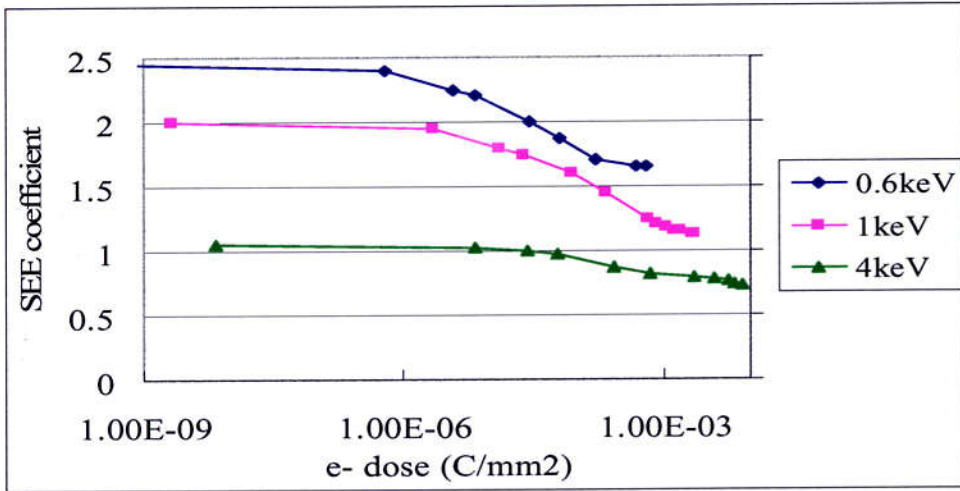


図 4.6.3 電子照射量と二次電子放出係数 - 無酸素銅

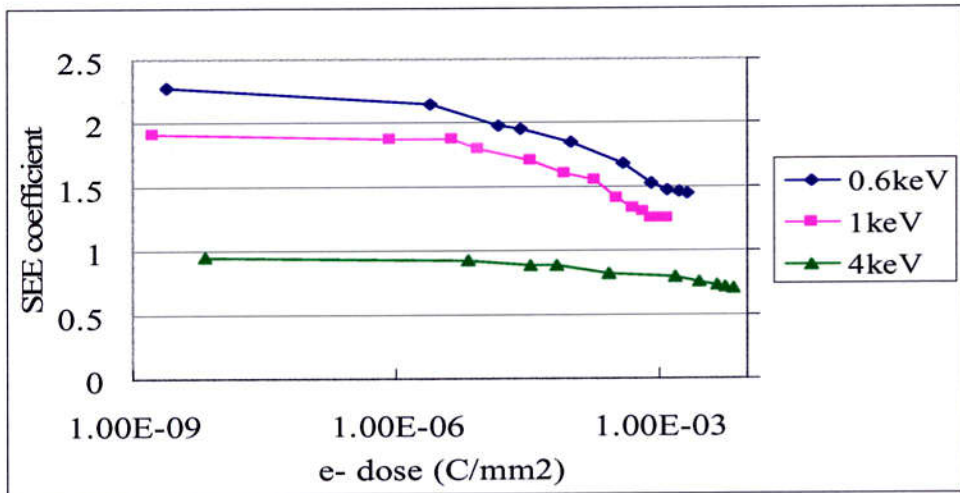


図 4.6.4 電子照射量と二次電子放出係数 - ピロリン酸鍍金銅

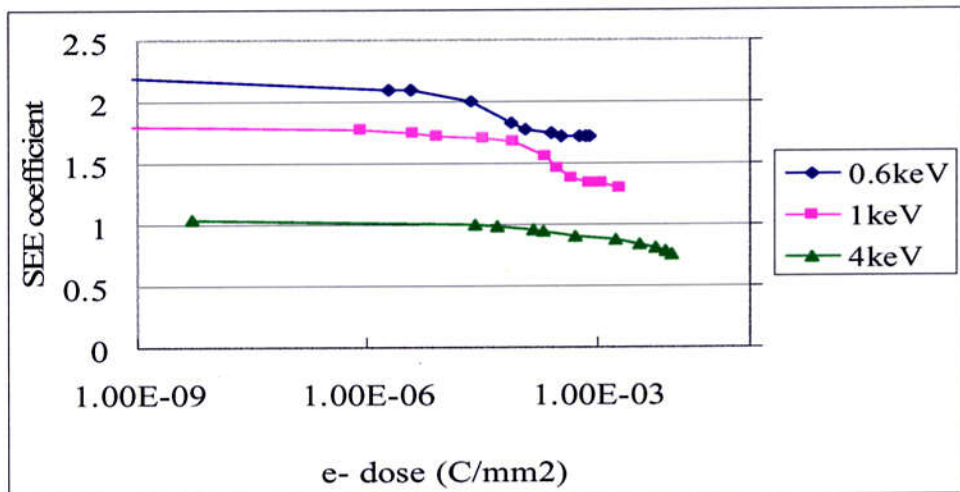


図 4.6.5 電子照射量と二次電子放出係数 - Nb

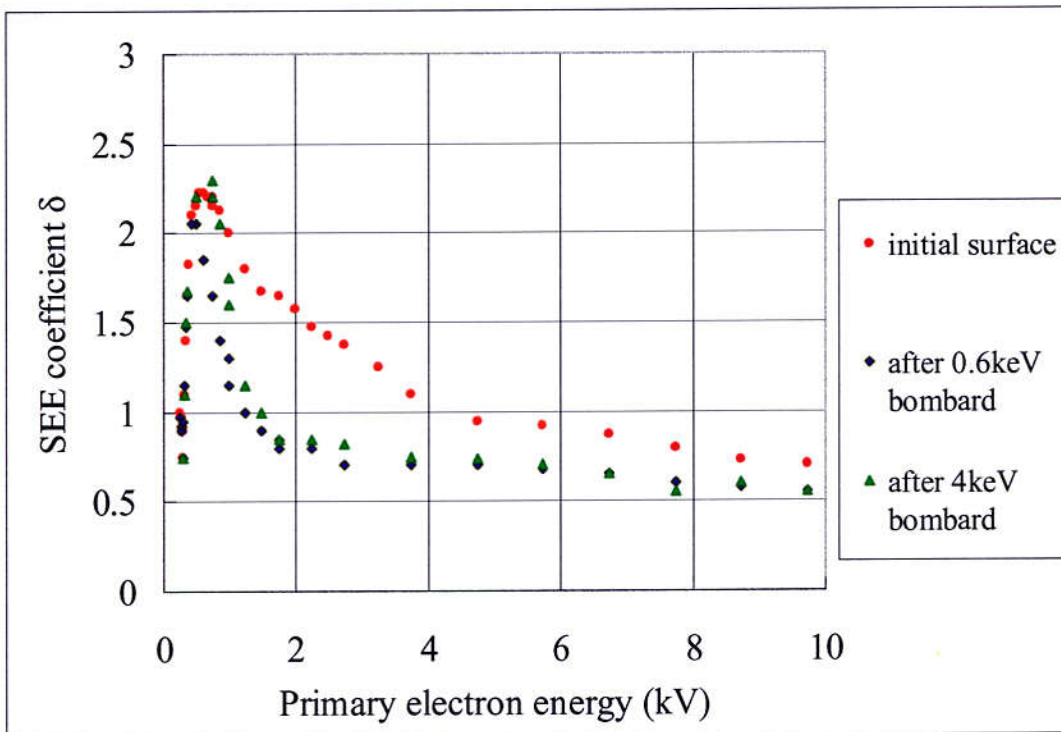


図 4.6.6 電子照射前後の二次電子放出係数 -ピロリン酸鍍金銅

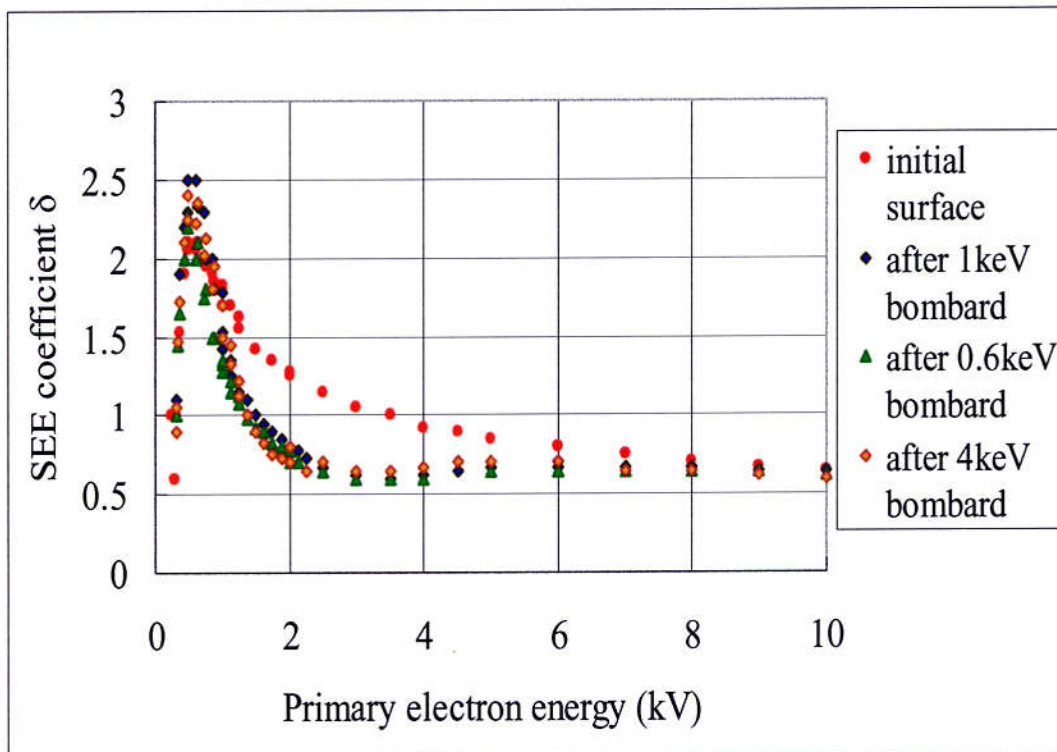


図 4.6.7 電子照射前後の二次電子放出係数 -Nb

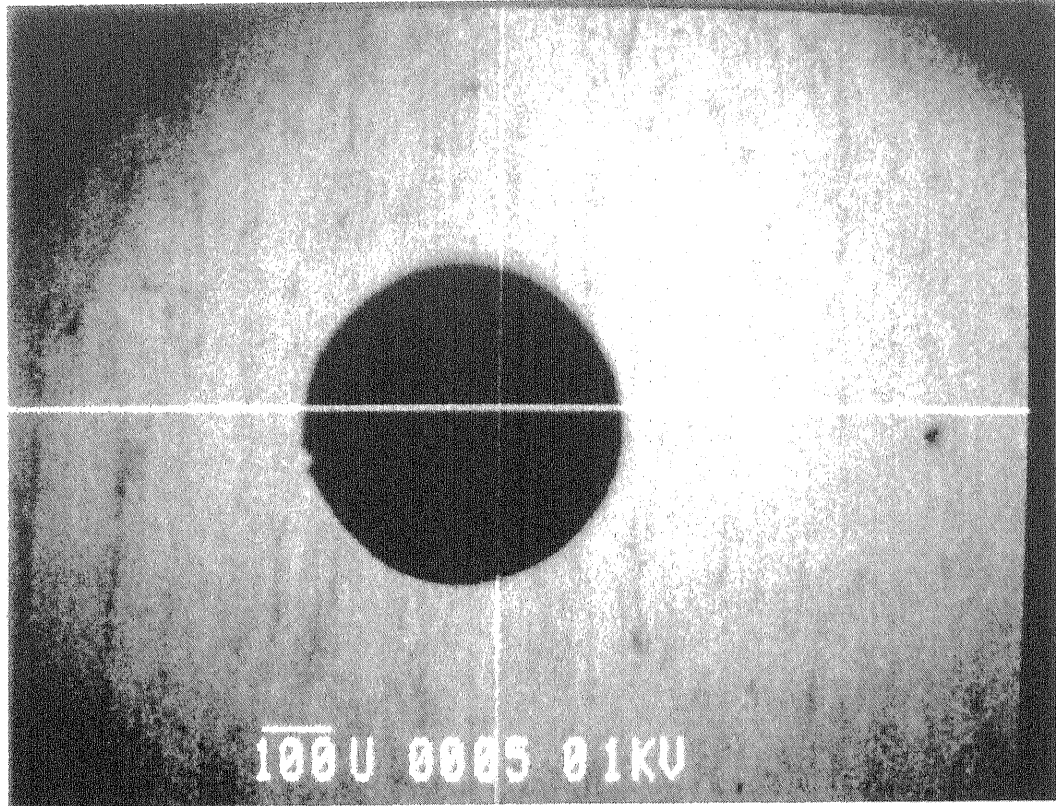


図 4.6.8 電子照射後の SEM 像
ピロリン酸鍍金銅表面に 1 keV の一次電子を照射した後

第5章 カプラの検証試験

5.1 カプラテストスタンドの製作，整備

カプラに大電力を通して，カプラ内で発生している現象とその要因を研究するため新たにテストスタンドを製作した。

これまでカプラのコンディショニングを行っていた装置（カプラスタンド）は製品の初期コンディショニングを目的にしたもので，到達圧力は 5×10^{-5} Pa であった。これは，カプラスタンドの有効排気速度が 9 l/sec と低く，またカプラと導波管空洞との接続部にインジウムシールを使用していたため，150 °C 以下のベーキングに制限されていたことによる。このカプラスタンドでは，マルチパクタリングや放電の早い応答の現象について詳細な構造を測定するには不十分であった。

新たに製作したテストスタンドでは，ビーム運転条件を想定し，到達真空度 10^{-7} Pa を目標にイオンポンプ，ターボポンプを併用し，有効排気速度約 80 l/sec まで増強した。また，カプラ接続部分は高温でベーキングを行えるようメタルシールにした。さらに，外導体には測定のためのモニタポートを複数設置し電子のモニタに使用した。カプラテストスタンドの構造を図 5.1.1 に，全体構成，部品の写真を図 5.1.2 に示す。またシステム構成を図 5.1.3 に示す。

全体のシステムは，1 MW 用クライストロン，サーキュレータ，カプラ，可変長導波管，ダミーロードから構成される。導波管下流に反射板を取り付けたときは，反射率 100%（全反射），取り外した時は反射なし（透過波）の条件を設定することができる。また，適当な反射板を挿入することで部分反射の測定も可能である。反射運転では，可変長導波管で線路長を半波長 $\lambda/2$ 分変化させることにより，定在波の山と谷の位置を自由に設定できる。クライストロンからの入力電力は反射なしの透過波の条件では導波管最下流のダミーロードで吸収され，反射がある場合には，サーキュレータに設けたダミーロードで電力吸収される。いずれのダミーロードも吸収電力は 400 kW までは入力できることを確認した。

以上まとめると，このカプラテストスタンドの特徴は，次のとおりである。

- ・モニタポートを増設した試験用外導体を製作し，カプラ内の早い応答の現象を同軸部，窓部の場所で分離して測定できるよう構成した。
- ・超高真空を実現し，小さな圧力上昇やその構造を見えるようにした。
- ・高温のベーキングが可能な構造とし，ガス成分を詳細に分析可能にした。
- ・大電力入力で反射率の変更ができ，また反射波の位相の変更ができる構成としカプラの運転を模擬できるシステムにした。

この章では，この新規製作したテストスタンドを用いて次の観点から検証試験を行

ったのでその結果についてまとめる。

- (1) ベーキングとコンディショニングを比較し、各々の放出ガス成分と脱ガスの効果と、その差異について調べた。
- (2) 効果的な初期コンディショニング方法を探るため、全反射と反射なし(透過波)の条件でその有効性を検討した。
- (3) マルチパクタリングの発生する電力レベルを確認し、3章のシミュレーション結果と比較した。
- (4) 同軸、窓部の放電及びマルチパクタリングが発生した時の電子発生状況を測定した。

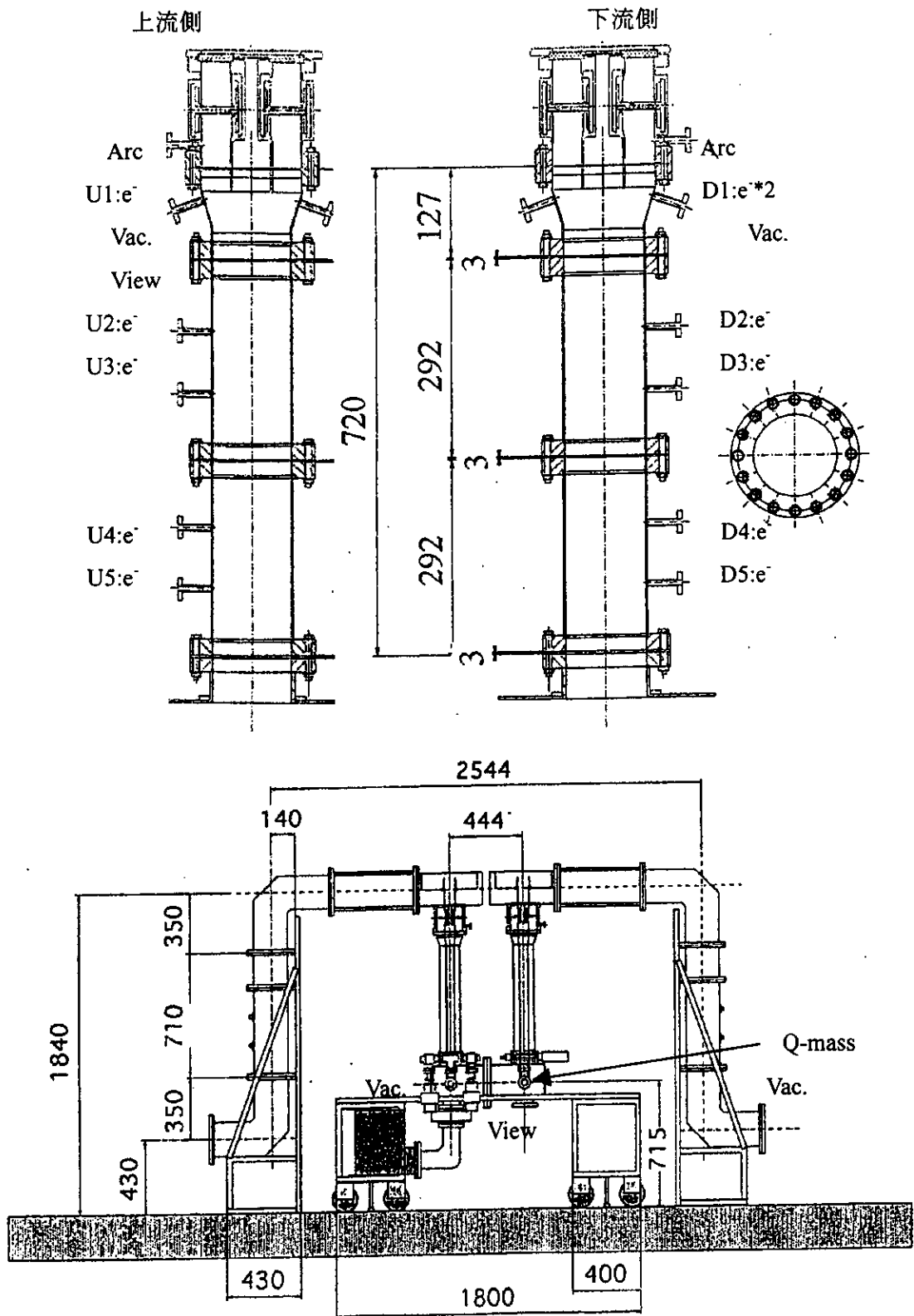


図 5.1.1 カプラテストスタンドの構造とモニタ位置

Arc:アーケソ e⁻:電子モニタ Vac.:真空ゲージ View:ビューポート Q-mass:ガス分析器

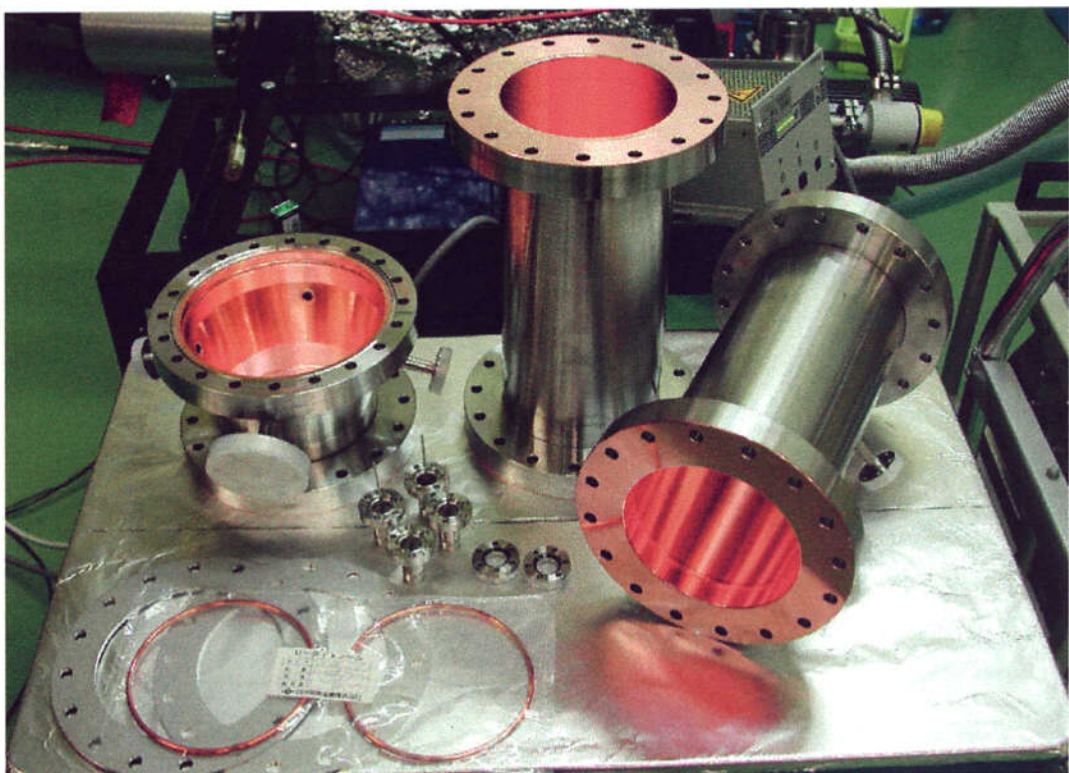
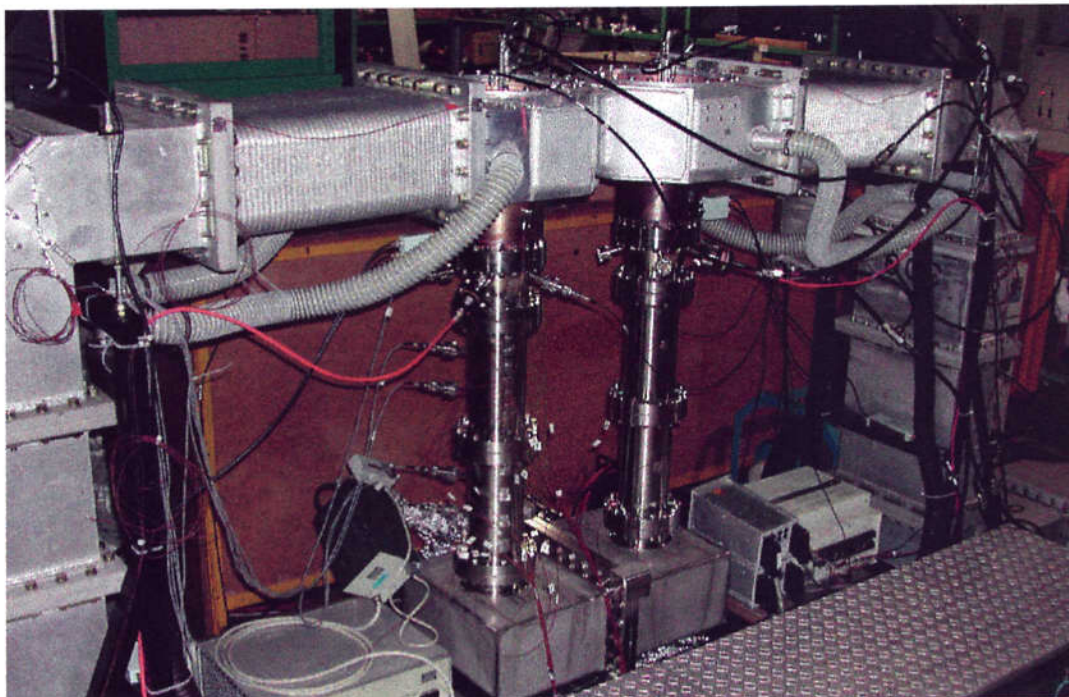


図 5.1.2 カプラテストスタンドの全体と部品

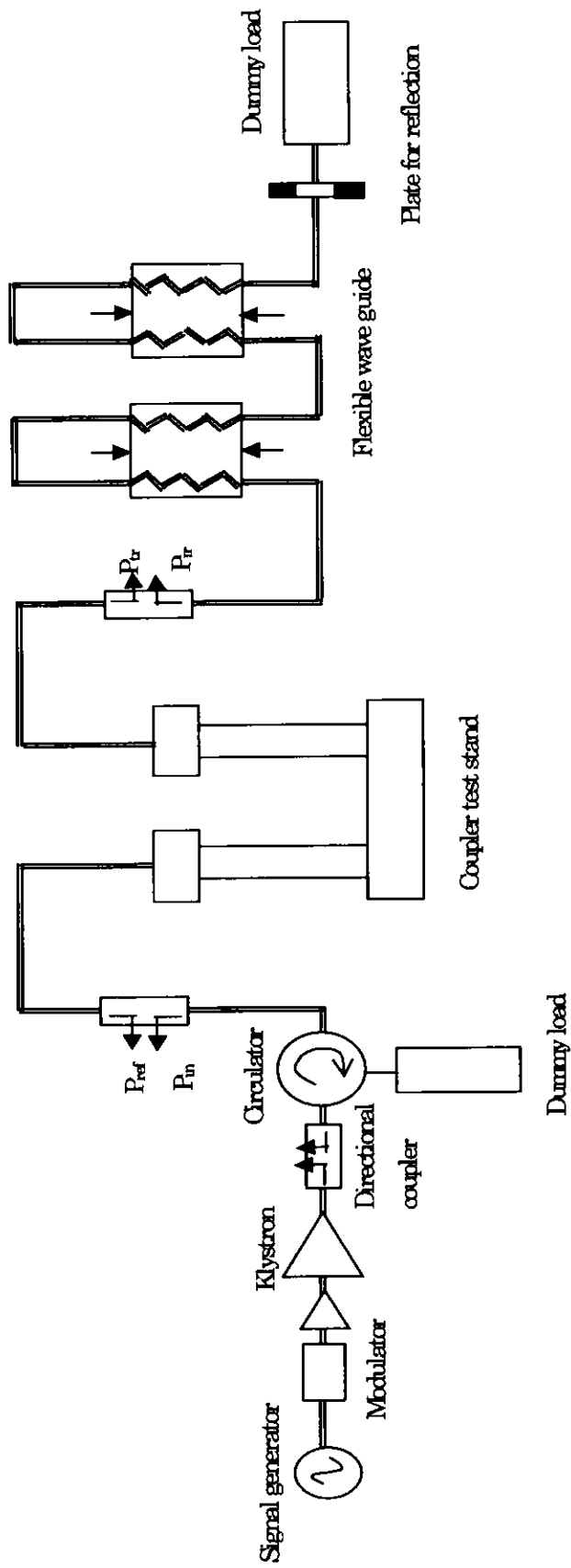


図 5.1.3 カプラテストスタンドのシステム構成

5. 2 カプラからの放出ガス

ベーキングとコンディショニングの放出ガス成分について調べた。

(1) ベーキングでのガス放出

テストスタンドでベーキングを行い、放出ガス成分を測定した。ベーキング温度 100 °C 以上で H₂ 成分の放出割合が徐々に増加し 130 °C 以上ではその主成分は H₂ になった。温度約 200 °C で 2 日以上ベーキングし、到達圧力 3×10⁻⁷ Pa に至った。その後、場所を特定したベーキングを行い、外導体の一部のみ加熱した場合と、内導体とセラミック窓近傍を加熱した場合の放出ガス成分を測定した。結果を図 5.2.1 と図 5.2.2 に示す。

外導体からは主に H₂ が多く放出されていることがわかった。ベーキング温度 130 °C でも外導体からの H₂ 放出量は顕著に大きいことがわかる。外導体の温度が 150 °C 以上では、さらに H₂ 成分が増加し、高温でのベーキングは H₂ 成分の放出に効果的であった。

一方、内導体とセラミック窓周辺からは 200 °C 以下のベーキングでは H₂, CO, CO₂ がほぼ一様に放出されていることがわかった。

(2) コンディショニングでのガス放出

反射なしの透過波の条件で電力を入力しコンディショニングを行った時の放出ガス成分とその発生場所の関係を調べてみた。電力を 200 kW 入力し外導体でマルチパクタリングを起こしている時のガス成分と、400 kW 以上で窓部の電子が測定された時のガス成分を図 5.2.3 に示す。

外導体の 1 ポイントマルチパクタリングが発生していると考えられる 200 kW を入力した時には、圧力上昇に伴い、H₂ が大きく増加し、CO, CO₂ の増加は小さいことがわかった。400 kW 以上を入力してセラミック窓近傍のマルチパクタリングが発生した時は、圧力上昇に伴い H₂, CO, CO₂ の放出量が一様に増加した。外導体、内導体及び窓のいずれのマルチパクタリングが発生したときにも H₂O 成分の変化は見られなかった。

以上より、150 °C でのベーキングとコンディショニングでは共に放出ガス成分に大きな差異はなかった。いずれも、外導体のピロリン酸銅鍍金面からは H₂ の放出が多く、内導体及びセラミック窓からは H₂, CO, CO₂ の放出量が一様に多かった。また、H₂ 成分の脱ガスには 150 °C 以上のベーキングが効果的であることがわかった。

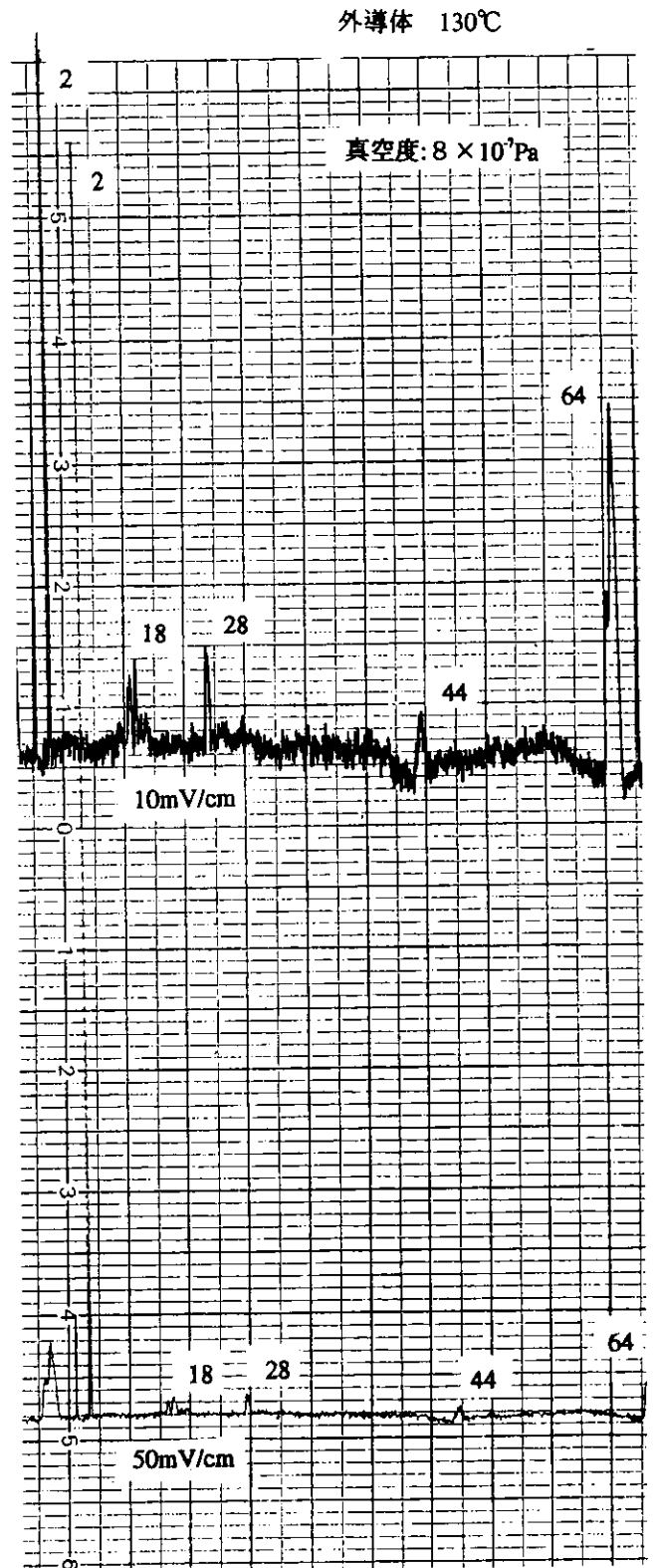
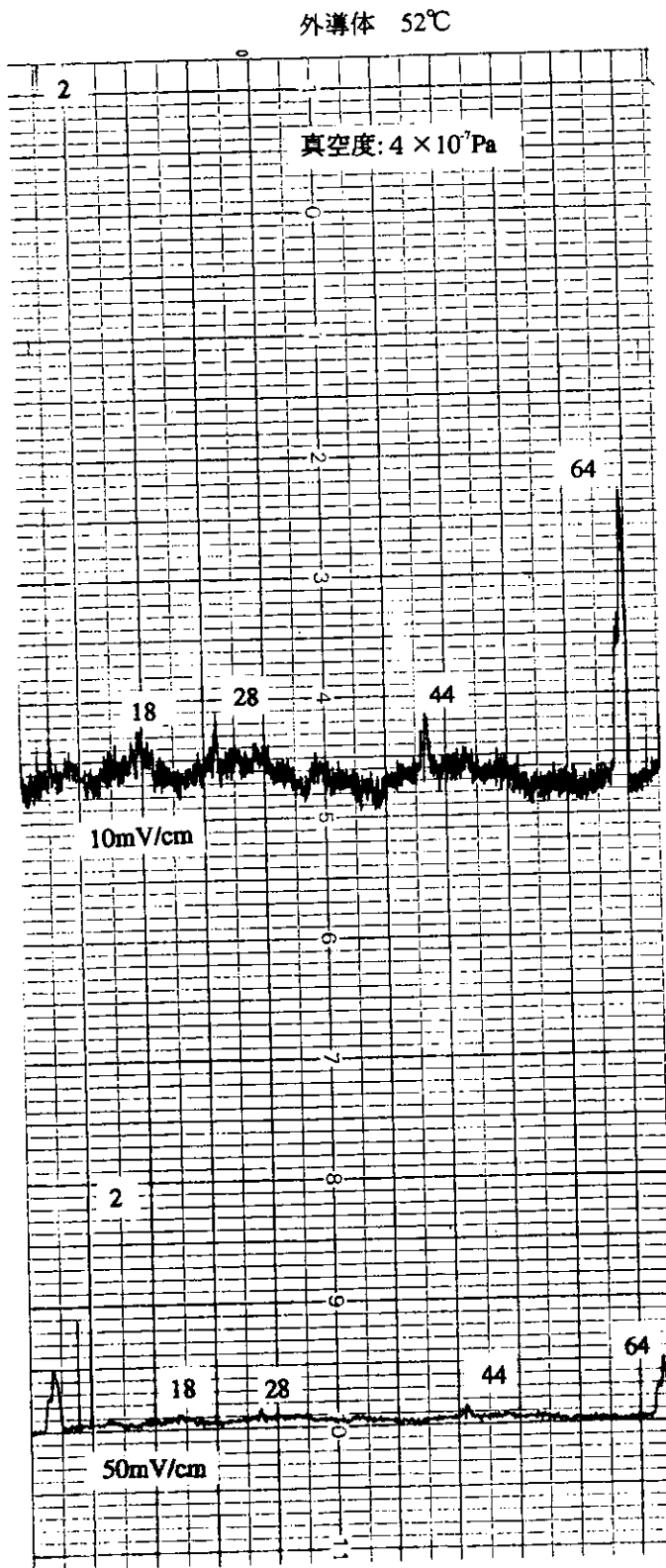


図 5.2.1 ベーキング温度とガス成分 外導体のみベーキングした場合

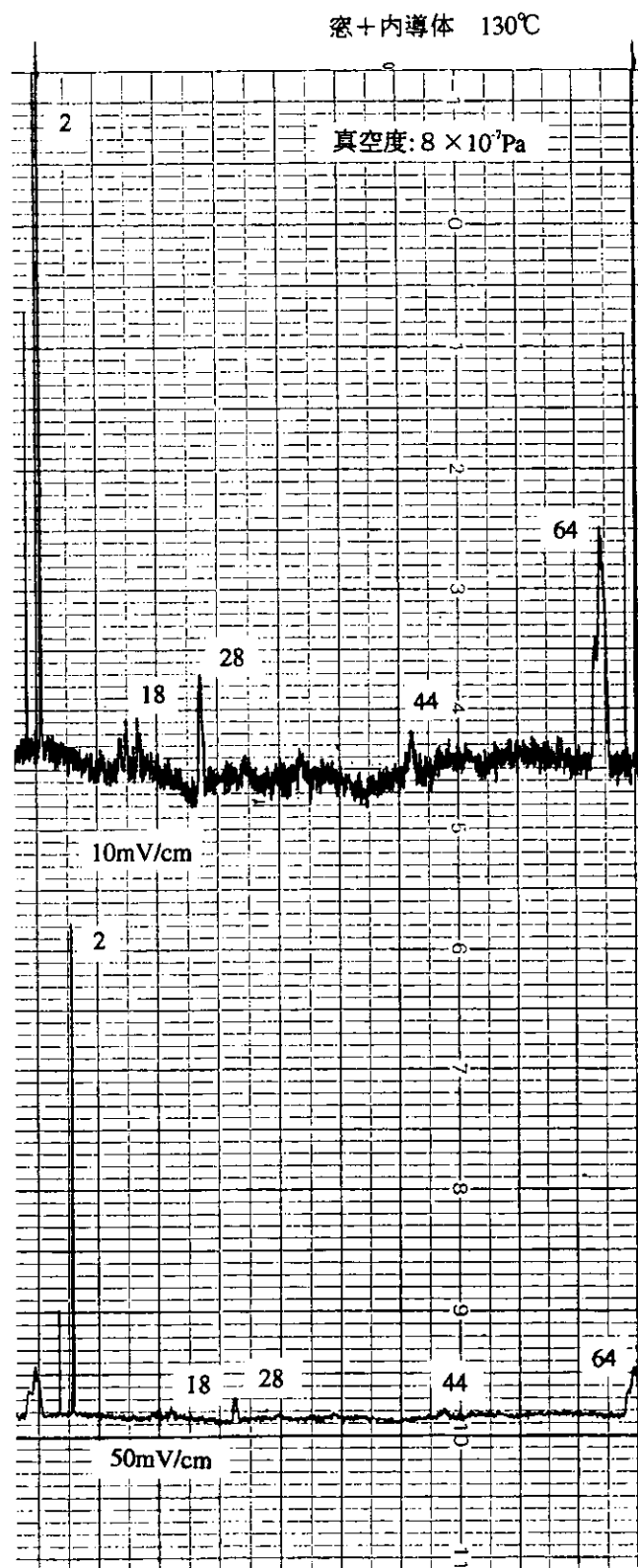
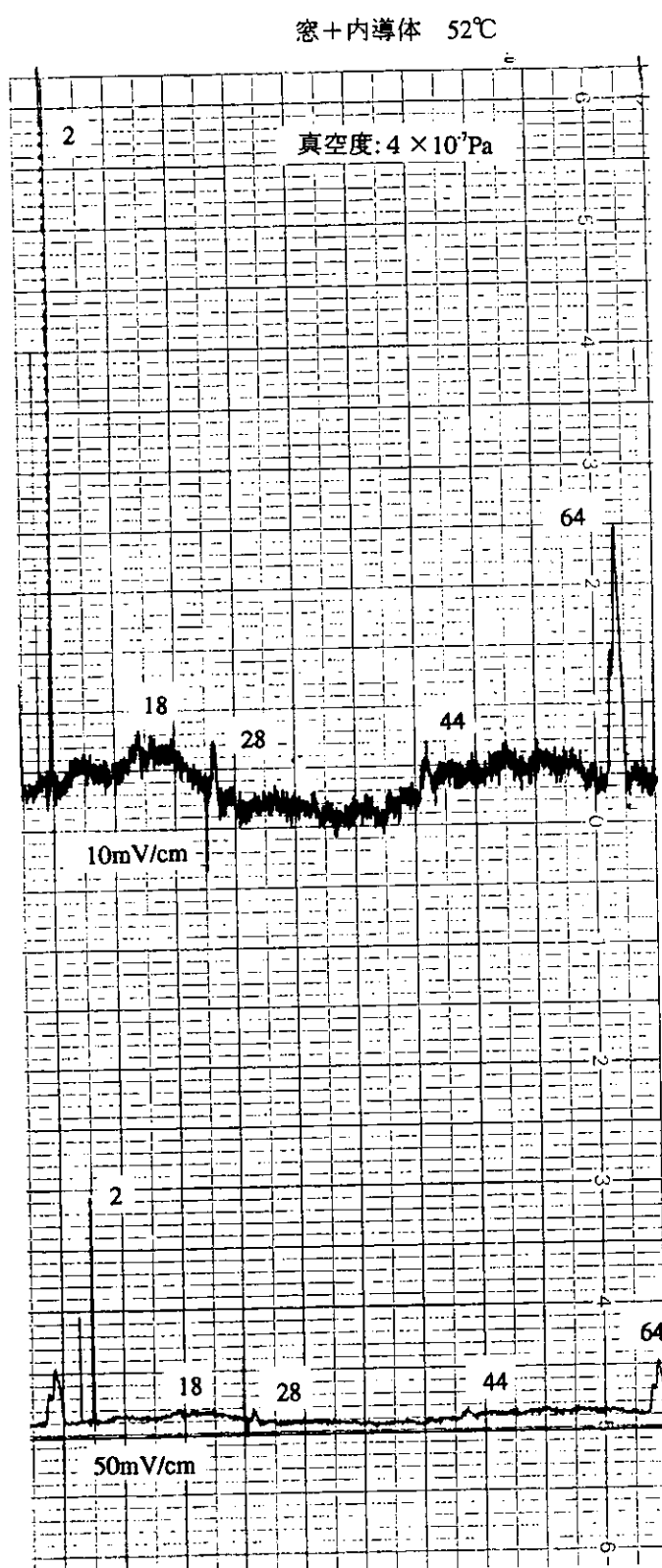
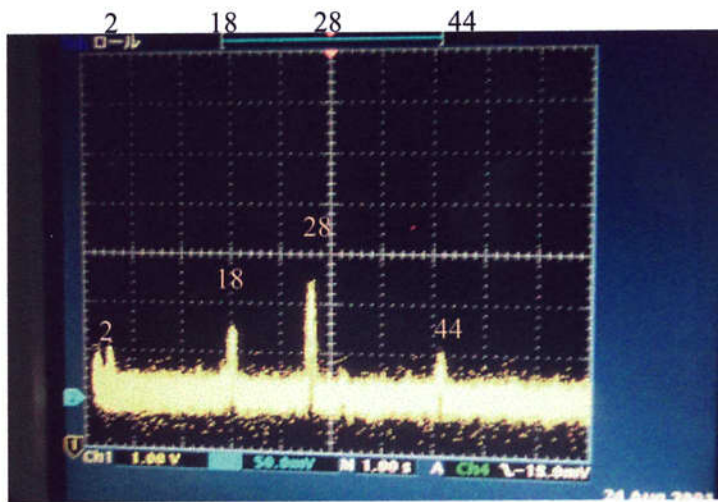
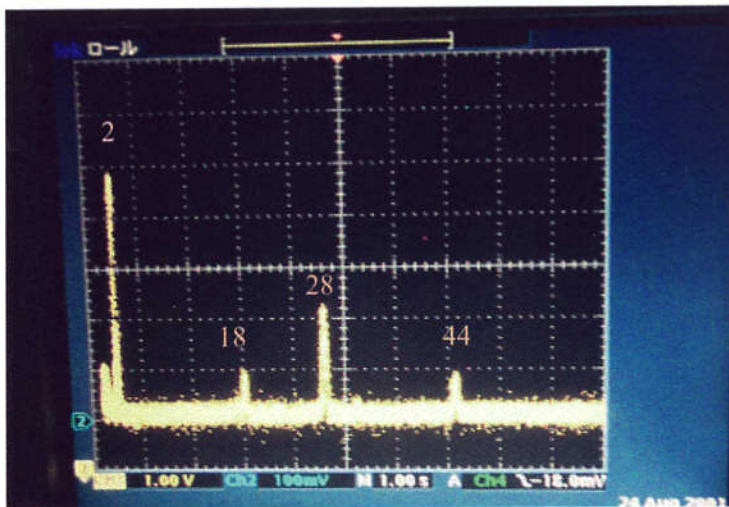


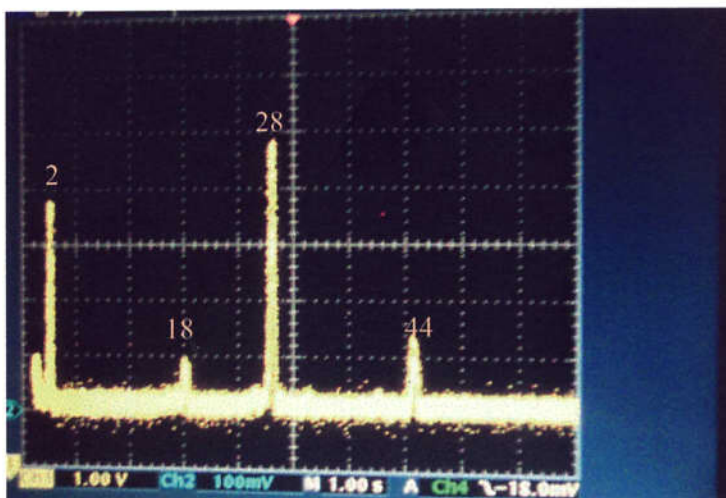
図 5.2.2 バーキング温度とガス成分 内導体及び窓をバーキングした場合



$P_{in} = 0 \text{ kW}$ based-data 真空度: $1 \times 10^{-6} \text{ Pa}$



$P_{in} = 200 \text{ kW}$ 上流側同軸外導体より電子発生 真空度: $6 \times 10^{-6} \text{ Pa}$



$P_{in} = 400 \text{ kW}$ 上流側セラミック窓近傍より電子発生 真空度: $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

図 5.2.3 コンディショニング中の放出ガス成分

5. 3 初期コンディショニング

5. 3. 1 ベーキングの効果

KEKB 超伝導空洞のカプラのベーキングはインジウムシールを使用しているのものでその融点以下の 80 ~ 100 °C で実施している。100 °C 以下のベーキングでは H₂O の脱ガスが主であり、コンディショニング中の放出ガスの主成分である H₂ 及び CO, CO₂ の脱ガスは十分でなかった。そこで、5. 2 章で述べたように、テストスタンドで高温でのベーキングを十分に行い、コンディショニングへの効果を調べた。

ベーキング温度 200 °C 以上で合計約 5 日保持し、到達真空度も 3×10^{-7} Pa と低い圧力になった後、コンディショニングを開始した。しかし、初期のコンディショニングのインターロック作動回数は減少せず、これまでの 100 °C 以下でのベーキングと大きな差異は見られなかった。このインターロック作動は、主にエネルギーの低い範囲でセラミック窓近傍の放電によるものであり、この範囲の窓近傍のコンディショニングにはベーキングによる H₂ の脱ガスの効果は小さいと考えられる。また、十分なベーキングを実施した後も RF 電力を入力したコンディショニングは必要であることがわかった。

5. 3. 2 全反射と透過波のコンディショニング効果の比較

初期のカプラ単体のコンディショニングには反射のない透過波を用いている。シミュレーション結果からも全反射と比べると透過波では同軸部の広い範囲を均一にクリーニングできるという結果となった。しかし、同じ入力電力で透過波の最大電界は全反射状態の 1/2 であり、透過波では 4 倍の電力でコンディショニングを行う必要がある。したがって、可変長の導波管を用い定在波の位相を変化させながら、同軸の広い範囲をコンディショニングするのが有効であろうと考えた。

そこで、全反射と透過波のコンディショニングの効果を確認するために、

- (1) 全反射定在波条件で 100 kW 入力。全位相変化。
- (2) 透過波で 400 kW 入力。
- (3) 全反射定在波で 400 kW 入力。全位相変化。

の手順でコンディショニングを実施した。

全反射状態で定在波の全位相を変化させるために、半波長 $\lambda/2$ に相当する導波管長を 23 ステップにわたり変えながら、電力を入力して圧力上昇と電子の発生を測定した。半波長 $\lambda/2$ に相当する導波管長は 468 mm であり、この範囲に相当する可変導波管の設定目盛 ± 117 mm を 10 mm 間隔で 23 回長さを変えている。

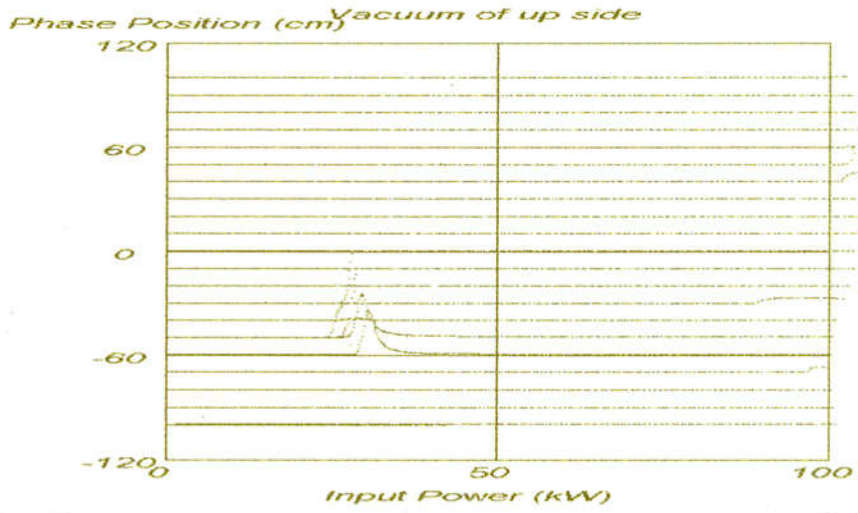
測定結果を次に示す。

- (1) 全反射定在波で 100 kW まで入力し導波管長を変え、カプラ内全領域にわたり全位相を変化させてコンディショニングを実施した。初期コンディショニング終了後、半波長 $\lambda/2$ 分の位相を移動して圧力上昇と電子発生状況を測定した。結果を図 5.3.1 に示す。十分なコンディショニング後も、40 kW で上流側の同軸 U4 ポート (図 5.1.1 参照) 付近に電子が発生し、100 kW 以下で小さな圧力上昇が残った。しかし、圧力上昇は小さいことから、次の段階に進み、透過波で 400 kW まで投入してコンディショニングを行った。
- (2) 透過波で全反射の 4 倍の電力 400 kW を投入しコンディショニング効果を確認した。透過波での圧力上昇と電子発生状況を図 5.3.2 に示す。全反射定在波でほとんど圧力上昇がなかったにもかかわらず、低い電力レベルからカプラ内の全表面にわたり電子発生が観測され、全電力レベルでのコンディショニングが必要となった。このことから全反射状態では、コンディショニングは限られた狭い範囲に限定され、その効果が少ないことがわかった。
- (3) 透過波 400 kW までのコンディショニング終了後、全反射で 400 kW まで電力を投入し、導波管長を変え、カプラ内全領域全位相でのコンディショニング効果を確認した。全反射での圧力上昇と電子発生状況を図 5.3.3 に示す。透過波 400 kW に相当すると考えられる全反射 100 kW 以下では圧力上昇は見られなかったが 100 kW 以上では同軸部、セラミック窓近傍に電子発生を伴う圧力上昇が見られた。

以上より、初期のコンディショニングには透過波を用いカプラの全領域にわたりクリーニングを行うのが有効であることがわかった。しかし、透過波では全反射の 4 倍の電力を入力する必要がある。

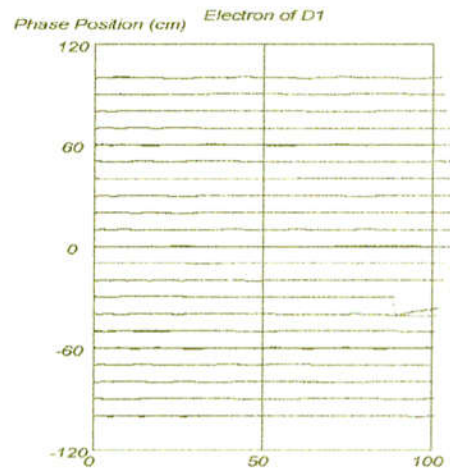
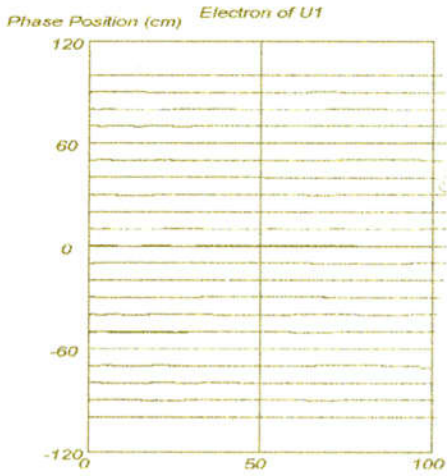
全反射状態で電力を投入した時の温度分布より、可変導波管の設定と定在波の位置の関係を求めた。結果を図 5.3.4 に示す。温度分布は磁場の二乗 H^2 に比例しており、これによりマルチパクタリングの発生する定在波の位相が推定できる。この温度分布は、圧力上昇のない電力レベルで測定したもので、一旦マルチパクタリングが発生すると、温度分布はこの位相と逆位相となり、磁場の低く、電場の大きな部分の発熱が大きくなり、電場の大きなところでマルチパクタリングが発生していることがわかった。

真空圧力



窓近傍の電子発生 (上流側カプラ)

(下流側カプラ)



同軸部の電子発生

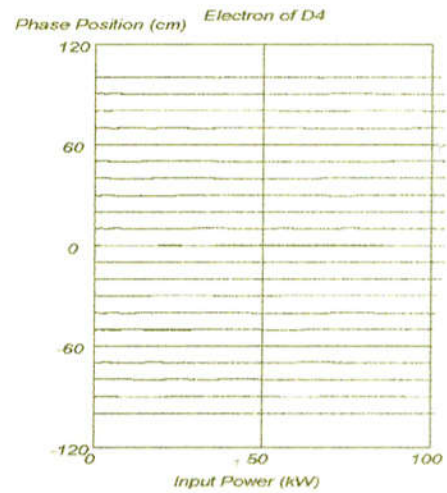
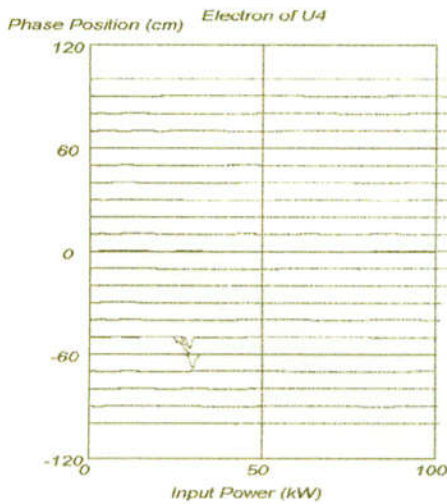
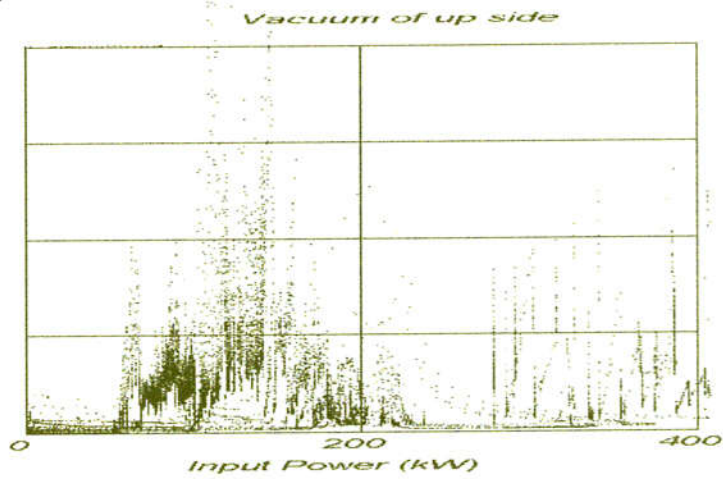


図 5.3.1 全反射でのコンディショニング状況 入力電力 100 kW

真空圧力

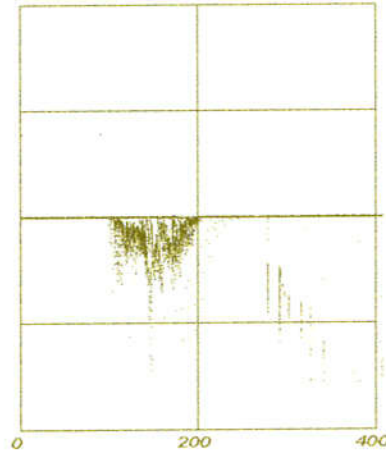
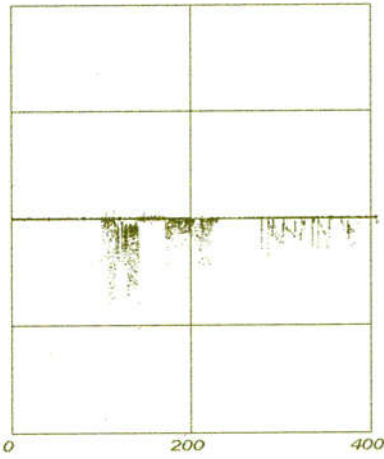


窓近傍の電子発生 (上流側カプラ)

(下流側カプラ)

Electron of U1

Electron of D1



同軸部の電子発生

Electron of U4

Electron of D4

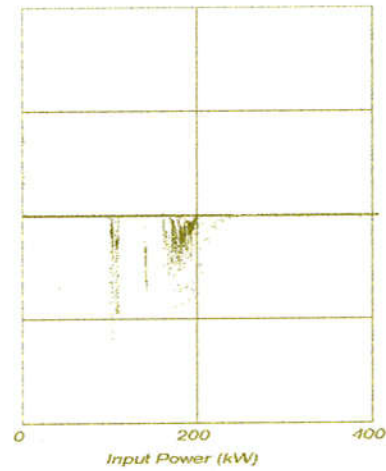
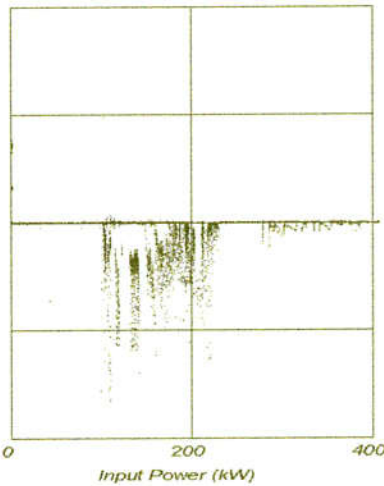
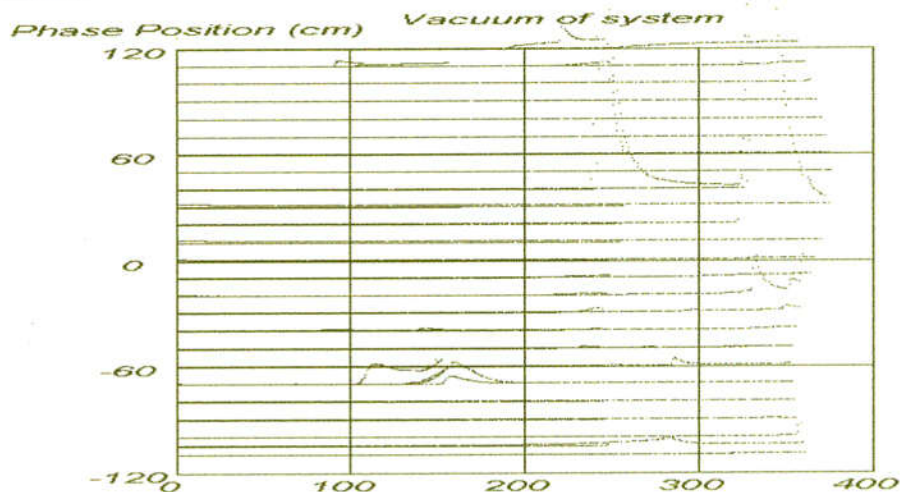
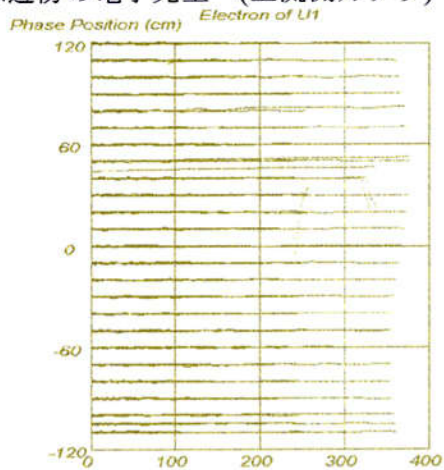


図 5.3.2 透過波でのコンディショニング状況 入力電力 400 kW
(全反射 100 kW までのコンディショニング終了後)

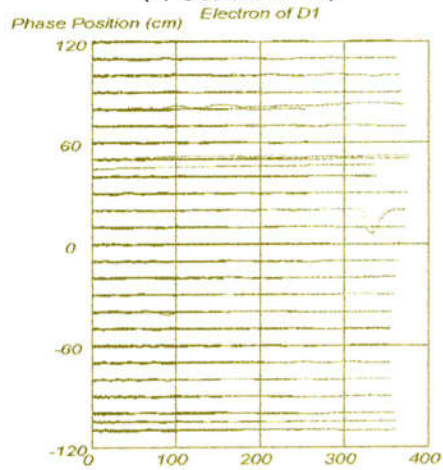
真空圧力



窓近傍の電子発生 (上流側カプラ)



(下流側カプラ)



同軸部の電子発生

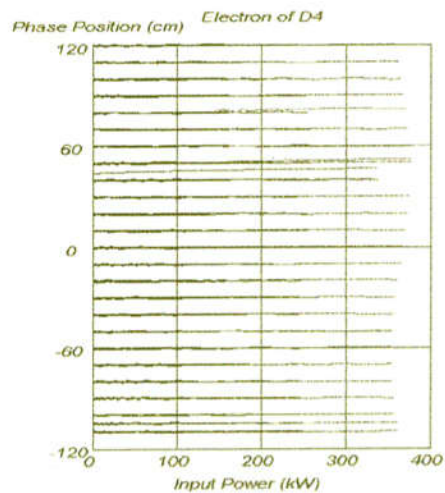
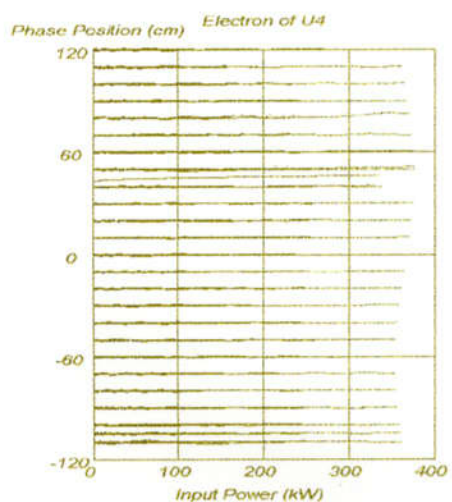
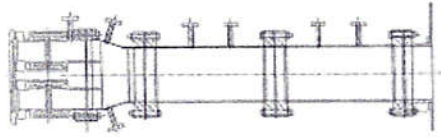
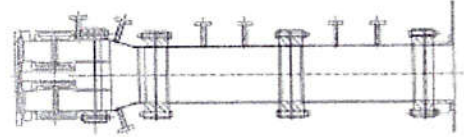


図 5.3.3 全反射でのコンディショニング状況 入力電力 400 kW
(透過波 400 kW までのコンディショニング終了後)



窓 U1

U4



窓 D1

D4

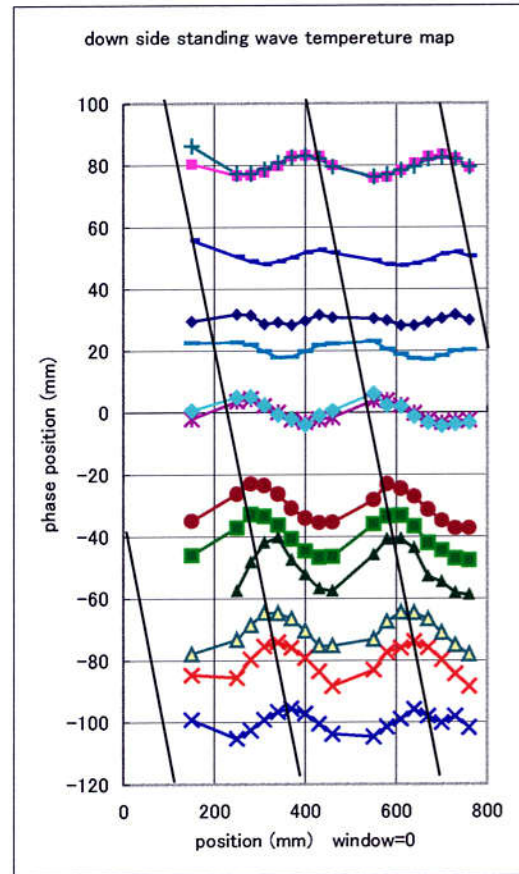
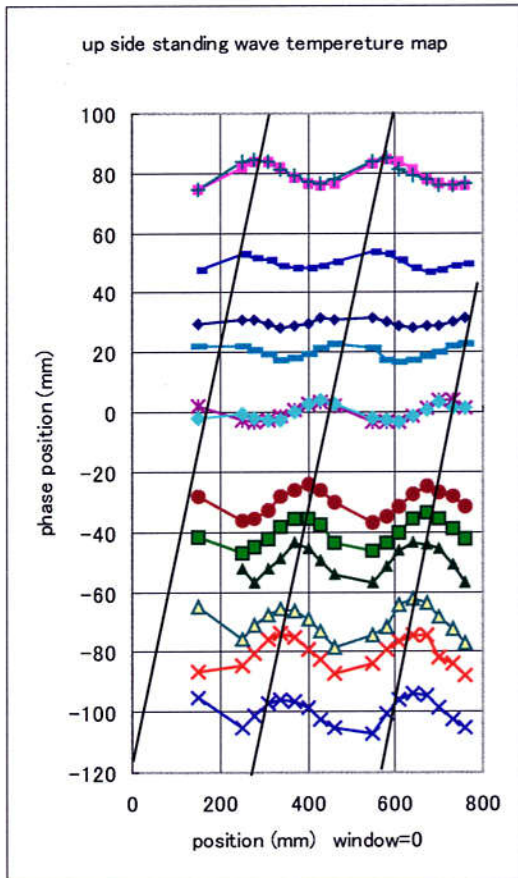


図 5.3.4 カプラ内の全反射定在波の温度分布
 実線は電場の谷を示す。
 縦軸は導波管位相器の設定長さで $\lambda/2$ に相当する
 -117~+117cm の長さを変化させた。

5. 4 マルチパクタリングの発生する電力レベルの検証

5. 4. 1 同軸のマルチパクタリング

カプラの初期コンディショニング終了後も圧力上昇が消えない電力レベルが残った。反射なしの透過波で 200 kW 近傍で、圧力が上昇し、同軸部からより多くの電子が発生しているのを観測することができた。透過波での入力電力と圧力上昇及び電子発生を関 5.4.1 に、また、その時の各部での電子発生を関 5.4.2 に示す。

電子は広範囲に観測され、同軸部でより多く発生していることから同軸でのマルチパクタリングと判断した。これは、シミュレーションによる同軸のマルチパクタリングが発生する電力レベル 225 kW と概ね一致する結果となった。

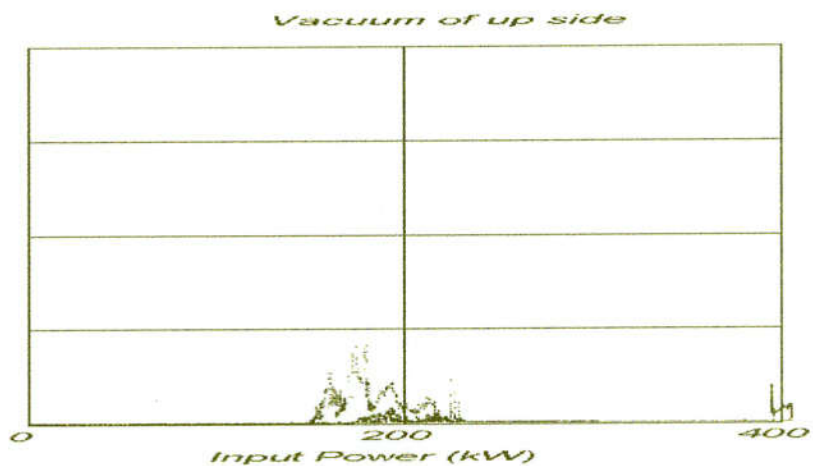
また、マルチパクタリングは継続し、電子は数 msec のパルス幅で断続的に発生していることがわかった。

5. 4. 2 窓部の放電発生電力レベル

初期のコンディショニングにおいて、放電が発生し、アークセンサーによるインターロックが作動した電力レベルを調べた。テストスタンドでは、全反射定在波のセラミック窓部が電界最大になる位相条件で、関 5.4.3 に示すように 50 kW 以下で放電によるアークセンサーのインターロックが作動した。また、透過波では第 2 章の関 2.8.2 に示すように 30~180 kW の範囲で放電によるアークセンサーのインターロック作動が発生している。この放電がマルチパクタリングと関係があると仮定すると、いずれも第 3 章で述べたチョーク間隙を平行平板で近似したマルチパクタリング発生を概算値、透過波で 222 kW 以下、全反射窓部電界最大の条件で 56 kW 以下の値と概ね一致する結果となった。

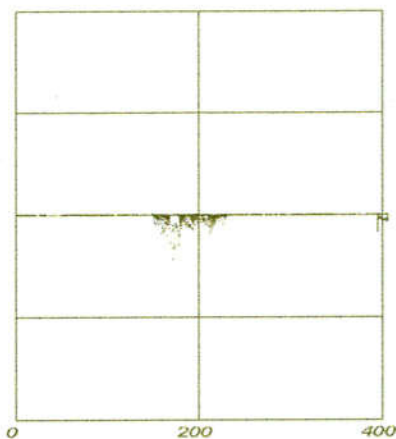
しかし、コンディショニング終了後真空状態に保っておけば、その効果は保持されアークセンサーは作動しないことを確認し、これまで安定なビーム運転を実現している。

圧力



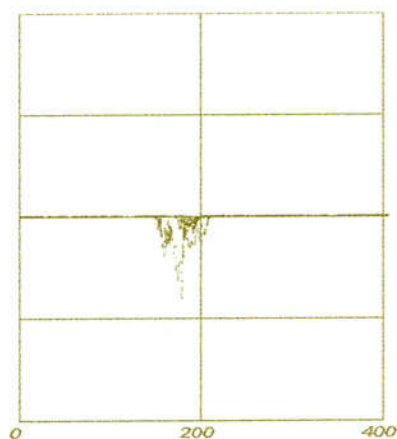
窓近傍の電子発生 (上流側カプラ)

Electron of U1



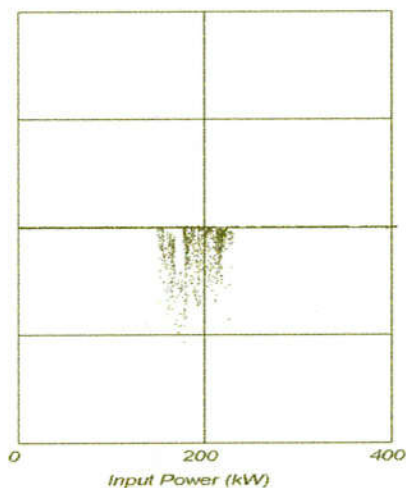
(下流側カプラ)

Electron of D1



同軸部の電子発生

Electron of U4



Electron of D4

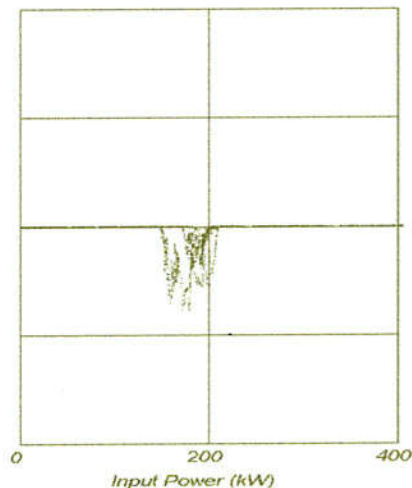
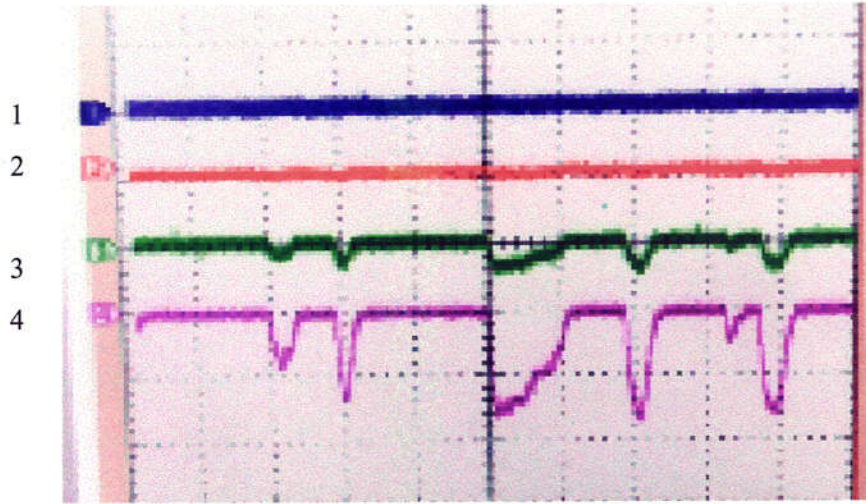


図 5.4.1 透過波での同軸マルチパクタリング発生状況
入力電力と圧力上昇及び電子発生の関係



x-axis:10ms/1div

- 1: D1 electrons near the window in the downstream coupler
- 2: D4 electrons in the coaxial line in the downstream coupler
- 3: U1 electrons near the window in the upstream coupler
- 4: U4 electrons in the coaxial line in the upstream coupler

図 5.4.2 透過波での電子発生状況

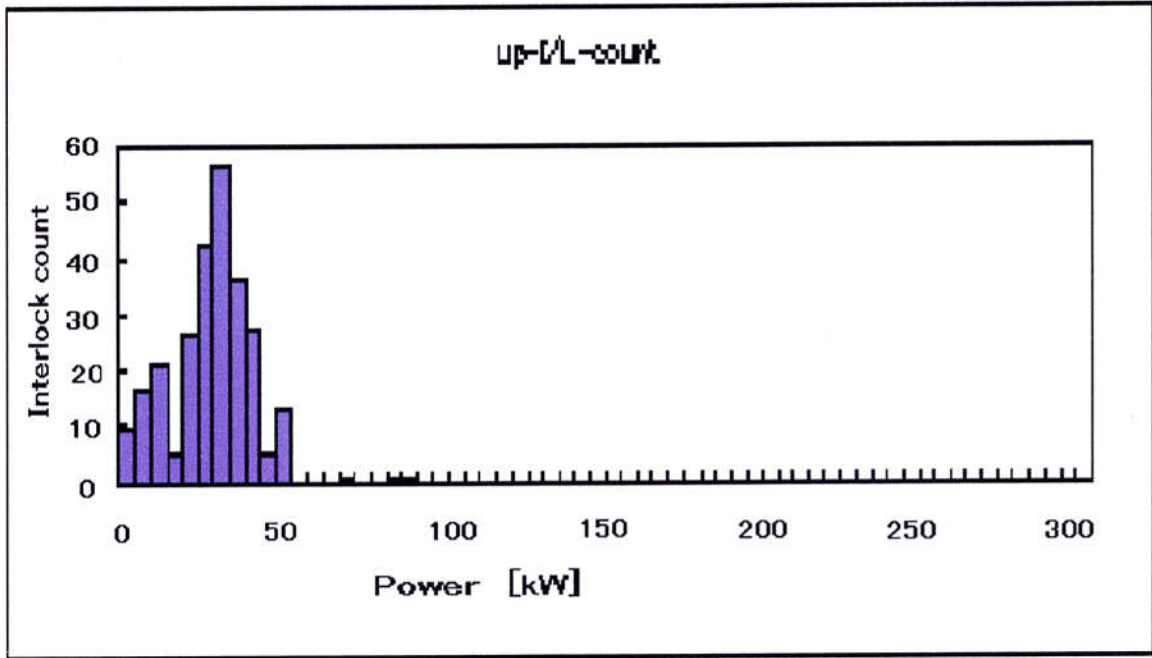


図 5.4.3 全反射運転で初期コンディショニングでのアークセンサーによるインターロック作動回数

5. 4. 3 窓部の放電とマルチパクタリング

これまでセラミック窓が破損する時には、放電を伴いアークセンサーが作動している。放電は窓の破損にかかわることが、これまで多く報告されてきている[1]-[4]。

ここでは、初期のコンディショニングで発生する放電を観測し、その応答と発生状況を調べた。

(1) 放電による光と電力の関係

放電による光強度の上昇に伴い、電力吸収が発生している。入力電力を一定にして反射電力を測定しその吸収電力を求めると、入力電力 40 kW に対して 20~30 kW の電力が吸収されていることがわかった。オシロスコープでの測定データを図 5.4.4 に示す。吸収電力に追従同期してアーク光の強度が変化している様子が見られる。電子発生のみでは、このような電力吸収は観測されず、むしろ電子の量は減少している。

したがって、この電力吸収は、発生したガスがイオン化してプラズマ状になり、そのプラズマ状のガスがエネルギーを吸収し発光していると推測している。

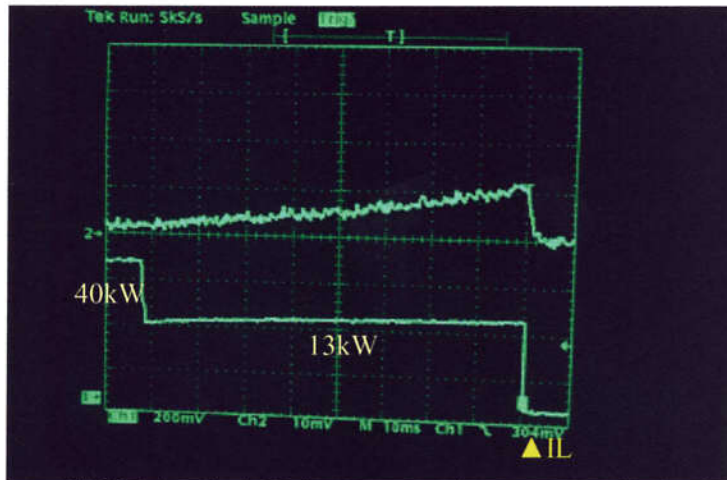
(2) 電子発生と光の関係

セラミック窓近傍で電子が発生しそれが指数関数的に成長をはじめると、電子発生から 1~2 msec で電子量があるレベルに達し、放電が発生、光が増加し始める。光が増大しはじめると、モニタからの電子量は減少していることがわかる。この間の同軸部の電子発生は変化していない。図 5.4.5 に放電が起こったときの電子発生状況を示す。この結果から、エネルギー吸収を伴う放電はセラミック窓近傍の電子放出の急激な増加、マルチパクタリングをトリガに誘起されるものと考えられる。

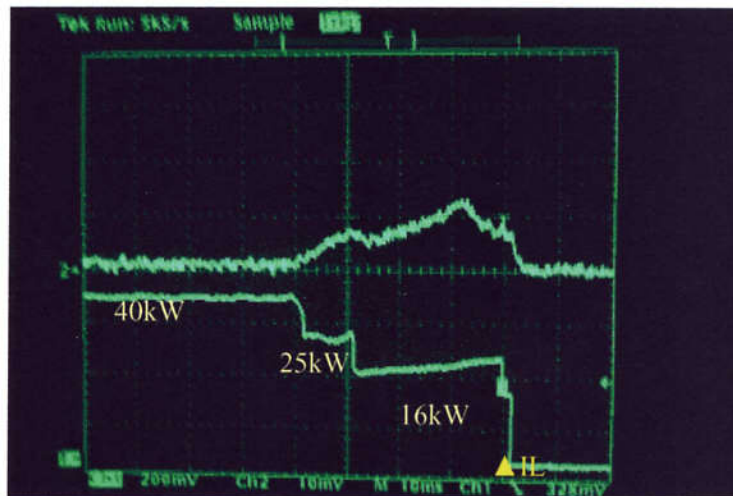
(3) 放電時の放電電流

放電発生時の内外導体間に流れる電流を測定するとピーク値で 0.5A レベルの電流が流れている。図 5.4.6 に同軸内外導体間の電流測定結果を示す。

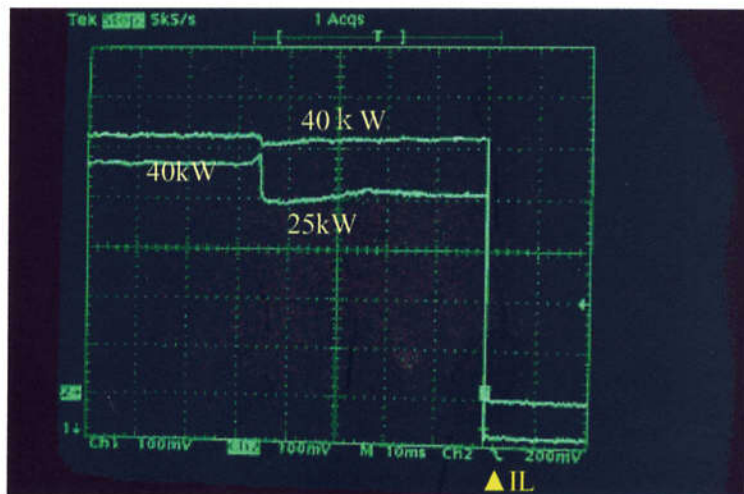
なお、ここで使用したアークセンサーは実機のものと同等で、紫外から可視光範囲(190~1060nm)の感度を持ち、出力レベル 30mV でインターロックが働くようセットされている。また、Appendix 2 に示すように、その応答速度は 0.85 msec である。



Ch1: 反射電力 (入力電力 40 kW 一定) Ch2: 7-ケルナー出力電圧 (上流側)

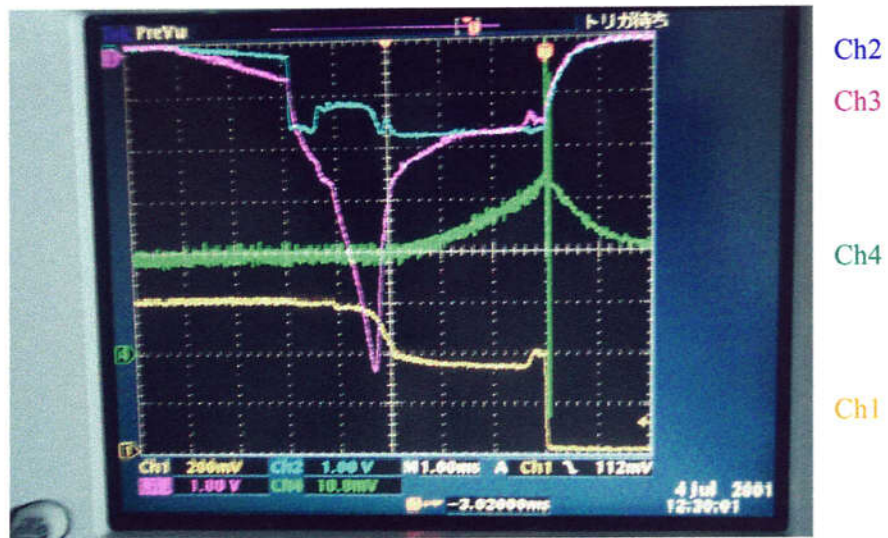


Ch1: 反射電力 (入力電力 40 kW 一定) Ch2: 7-ケルナー出力電圧 (上流側)

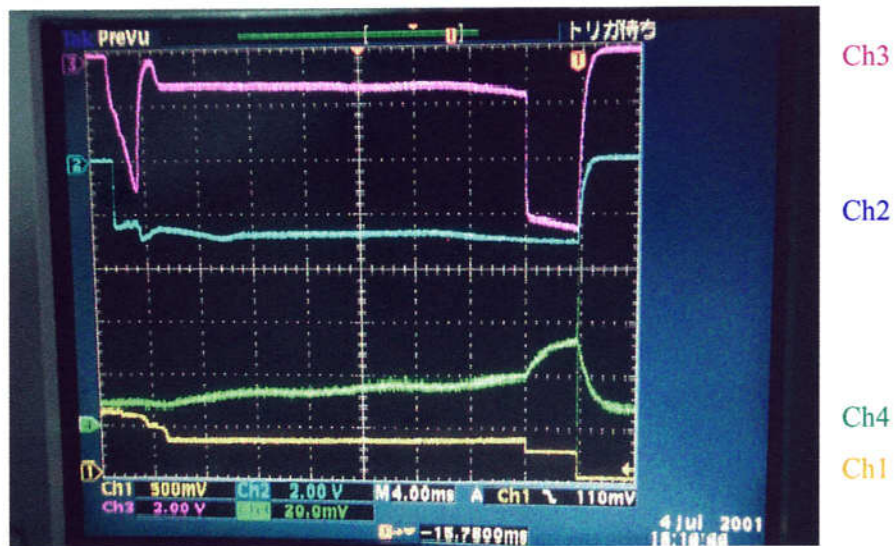


Ch1: 反射電力 Ch2: 入力電力 40 kW 一定

図 5.4.4 放電と電力吸収



▲IL



▲IL

上/下同様

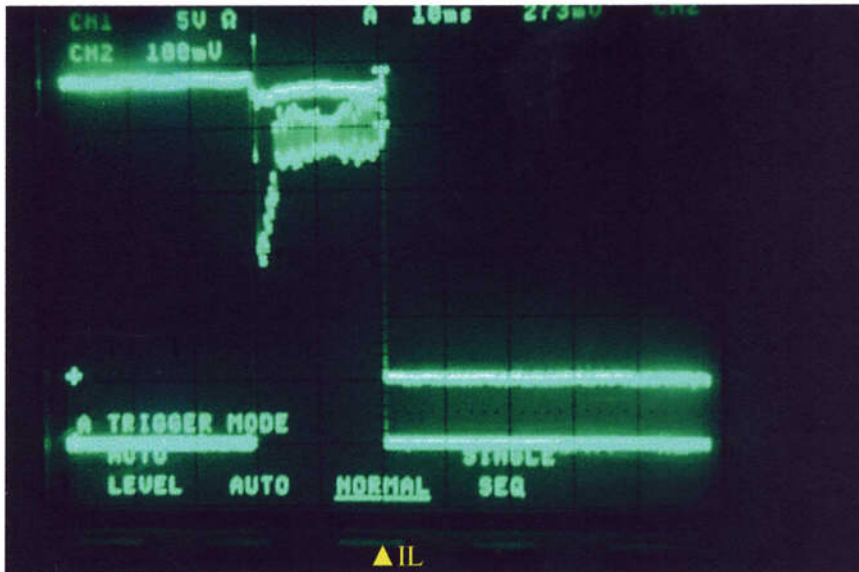
Ch1:反射電力

Ch2:同軸部下方での電子モニタ

Ch3:窓近傍の電子モニタ

Ch4:アークセンサー出力

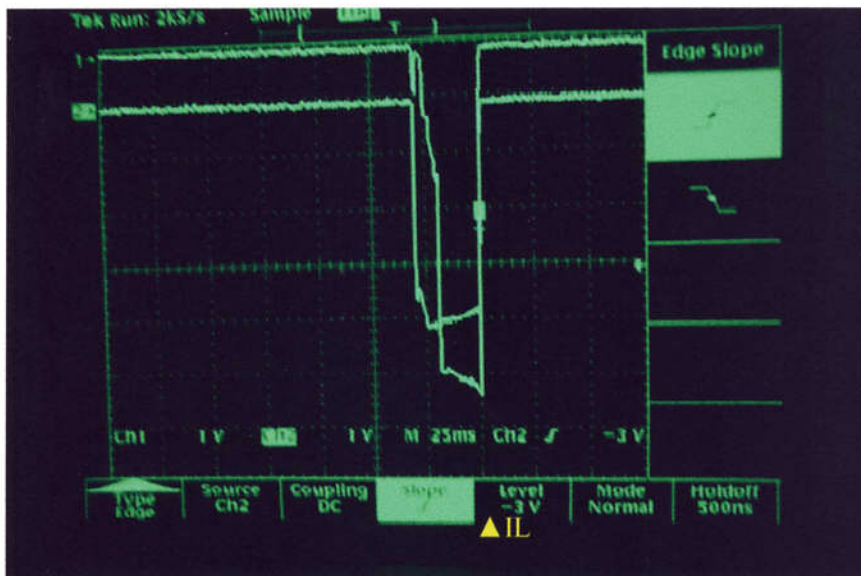
図 5.4.5 放電と電子発生



Ch2:入力電力

Ch1:内外導体間の電流

Ch1:下流側内導体外導体間の電流 $I_b=0.5A$ Ch2:入力電力 $P_{in}=22kW$



Ch1:上流窓電子

Ch2:下流窓電子

Ch1:上流側 窓部発生電子 Ch2:下流側 窓部発生電子

図 5.4.6 放電で同軸内導体と外導体間に流れる電流

第6章 KEKB 超伝導空洞用カプラのコンディショニング及び運転状況

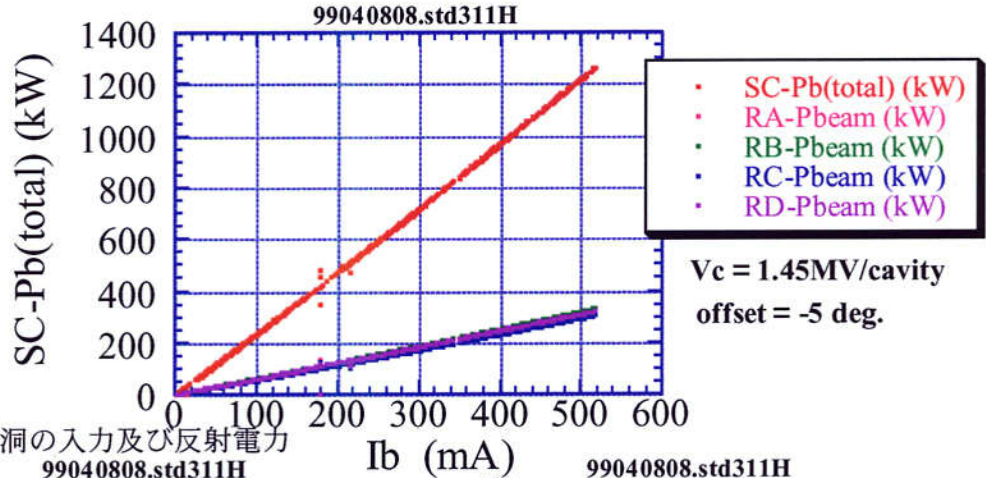
6.1 KEKB の運転経緯

1998年12月に最初の4台がHERに設置され、物理実験開始までの運転調整期間中に、HERのビーム電流は514 mAに、超伝導空洞の加速電圧は4.8–8 MVに達した。4台の超伝導空洞でビームへ1.4 MWの電力を供給し、1台あたり最大380 kWの入力電力で安定にビーム運転できることを確認している。図6.1.1に運転調整期間中に測定したビーム電流と超伝導空洞への入力及び反射電力の関係を示す[1]。

その後1999年7月より物理実験を開始し、2000年7月までHERは常伝導ARES空洞10台と超伝導空洞4台で、物理実験のための定常ビーム運転を行い、電流は約460 mAに達した。2000年の夏季停止期間に超伝導空洞4台をHERに追加設置した。2000年7月以降1年の間、この追加した4台の超伝導空洞のうち、モニタケーブルの冷却時の収縮による接触不良が2件、空洞リークが1件、セラミック窓の損傷が1件あり、常時2台はビーム運転に参加できず、超伝導空洞8台のうち6台での運転が続いた。2001年7月の夏季停止期間中に、これらのトラブルを修復した後、2001年秋より超伝導空洞8台の運転に入っている。2001年末の段階でビーム電流値はHERで780 mA、LERで1150 mA、ピークルミノシティは $5.5 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ に達し世界最高記録を更新している。図6.1.2にルミノシティとビーム電流の経緯を示す[2]。

KEKB-SC P(in), P(ref) & P(beam), Apr. 8, '99

(a) ビームへの供給電力



(b) 超伝導空洞の入力及び反射電力

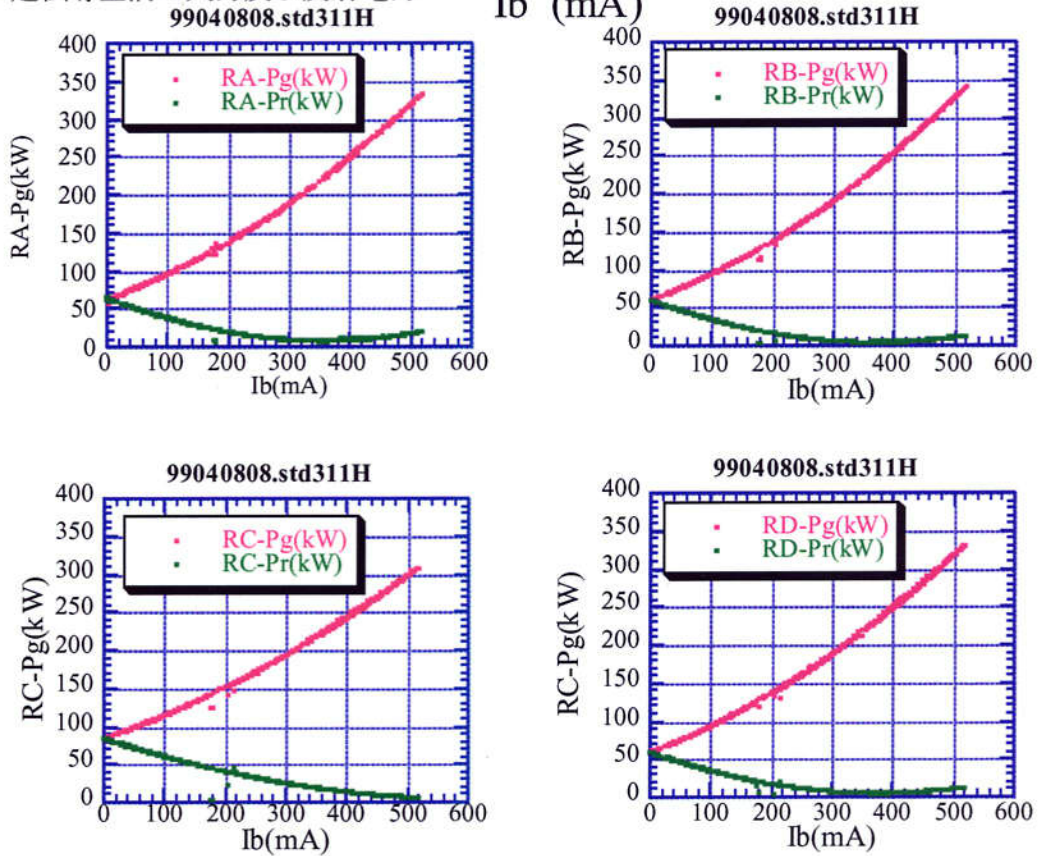


図 6.1.1 超伝導空洞の入力及び反射電力 1999年ビーム運転調整期間中
運転当初から設置された D11A:RA, D11B:RB, D11C:RC, D11D:RD の空洞の場合

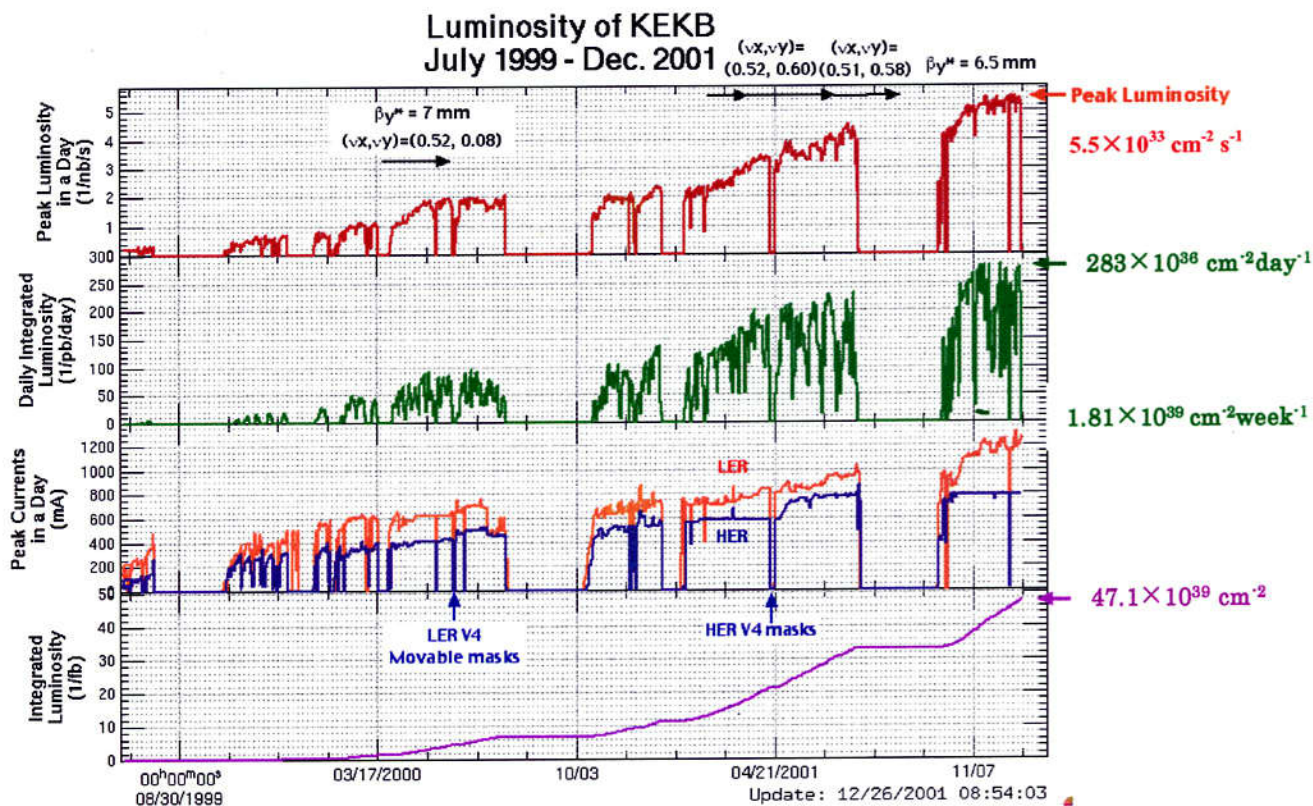


図 6.1.2 KEKB のルミノシティとビーム電流の運転状況
 (2002 年 1 月の KEKB ホームページ KEKB-history より)

6. 2 実機のカプラコンディショニングの現状

実機のカプラコンディショニングの状況を示すために、2000年にHERリングに追加した4台の超伝導空洞のコンディショニング状況を述べる。また、表6.2.1にそのまとめを示す。コンディショニングの手順は表2.9.1に示したとおりである。

(1) カプラスタンドでのコンディショニング

製作後のカプラはオゾン水洗浄し、カプラスタンドに取り付けられる。カプラスタンドでベーキングを行った後、300 kW以上の電力を投入し、バイアス電圧なしの状態、透過波または30%の反射率でコンディショニングを行った。その後、内導体にバイアス電圧を-2000 Vから+2000 Vまで印加して同様に300 kWの電力を投入してコンディショニングを実施している。各プロセスは次のような特徴をもつ。

①ベーキング

カプラと空洞との接続部であるフランジのシールにインジウムを使用していることから、ベーキング温度はインジウムの融点である157℃以下に制限される。カプラのベーキングは表6.2.1に示すように、温度100℃前後で約1日間実施している。ベーキングによるアウトガス量は平均3.5 torr・lで、主なガス成分はH₂Oである。アウトガス量はカプラスタンドの有効排気速度を9 l/secとして換算した値である。ベーキング後のカプラスタンドの到達真空度は10⁻⁷ torr (~10⁻⁵ Pa) 台であり、超高真空には達していない。この状態で、カプラに電力を投入し、コンディショニングを行う。

②バイアス電圧なしの初期コンディショニング

初期のコンディショニングの状況を図6.2.1に示す。透過波または低い反射率で電力を入力するとカプラ表面全体を効率的にコンディショニングできることから、製作後最初の内導体のコンディショニングは反射なしの透過波で、実機の外導体を取り付けた状態では30%の反射率で電力を投入している。最初は、どの入力電力でも圧力上昇が見られるが、一度その電力レベルを通過すると、再び低いレベルから電力を投入してもそれより低い電力レベルでは圧力上昇はほとんど観測されず、コンディショニング効果は記憶されていることがわかった。バイアス電圧なしの初期コンディショニングで放出されるアウトガス量は平均1.4 torr・lである。

③バイアス電圧を印加したコンディショニング

バイアス電圧なしのコンディショニングでは、透過波でも小さな圧力上昇が継続することがあり、圧力上昇がなくなるまでに時間がかかる。そこで、時間短縮のためにカプラスタンドでも内導体にバイアス電圧を印加したコンディショニングを行っている。この間のアウトガス量は平均0.6 torr・lであった。また、バイアス電圧なし及びバイアスを印加して電力を入力した時のアウトガスの成分はベーキングの結果とは異

なり、 H_2, CO, CO_2 が主成分であった。

(2) 横測定での冷却前のコンディショニング

超伝導空洞は縦測定で空洞本体の性能を確認された後、クライオスタットの液体ヘリウム槽内に挿入され、高次モード減衰器が取り付けられ、クライオモジュールとして組み上げられる。この時、カプラスタンドでコンディショニングを終えたカプラも N_2 パージ後、クリーンブース内に吊り下げられ、クライオモジュール上部より挿入され、空洞に取り付けられる。この間カプラは数時間空気にさらされることになる。このため、この後行われる横測定では、超伝導空洞を冷却する前の室温で再度カプラのコンディショニングを行う必要がある。冷却後はカプラのコンディショニングは実施せず、空洞本体の性能試験、チューナなど付属部の機能確認試験、負荷 Q 値の測定等が実施される。横測定におけるカプラコンディショニングの各プロセスでの状況は以下のとおりである。

①室温のバイアス電圧なしのコンディショニング

空洞にカプラを取り付けた後は、ビーム電流がない状態で入力電力は全反射される。空洞冷却前のバイアス電圧なしの状態でも目標電力 300 kW まで入力した時のコンディショニングの状況を図 6.2.2(a) に示す。図より低い電力レベルの圧力上昇が大きく、また窓の近傍で電子が発生していることがわかる。この過程でのアウトガス量は平均 $1.7 \text{ torr}\cdot l$ (有効排気速度 $291 \text{ l}/\text{sec}$ 換算) であり、カプラスタンドでの初期のコンディショニングに近い値となった。

②室温のバイアス電圧を印加したコンディショニング

バイアス電圧なしの状態でも目標電力 300 kW まで投入した後も圧力上昇が残るため、内導体にバイアス電圧を -2000 V から $+2000 \text{ V}$ まで印加してコンディショニングを実施した。コンディショニングの状況を図 6.2.2(b) に示す。バイアスコンディショニング後は、バイアス電圧なしのコンディショニングでは消えなかった圧力が上昇する電力レベルはなくなり、バイアス電圧を印加すると全反射でも広い範囲でのコンディショニングが行われたことがわかる。この過程でのアウトガス量は平均 $0.8 \text{ torr}\cdot l$ であり、この値もカプラスタンドでのバイアスコンディショニングに近い値となった。到達真空度は室温で 10^{-9} torr ($\sim 10^{-7} \text{ Pa}$) 台に達した。

コンディショニング終了後、カプラの状態を確認する意味を兼ねて、バイアスマッピングのデータを収集している。このバイアスマッピングはバイアス電圧を -2000 V から $+2000 \text{ V}$ まで 100 V または 200 V ステップで変更して圧力が上昇する電力レベルと電子が発生する電力レベルをマップにしたものである。この結果は後の項で述べるが、空洞にカプラを取り付けた後に現れる圧力上昇のバイアスマッピングの傾向に

特徴があることがわかった。横測定での室温のカプラコンディショニングは、大気開放による表面のコンディショニングとカプラ先端及び空洞カプラポート周辺の表面のクリーニングを主な目的として行われていると考えられる。

③冷却後のカプラへの電力入力

室温でのカプラコンディショニング終了後、空洞は 4 K に冷却され、到達真空度は 10^{-10} torr ($\sim 10^{-8}$ Pa) 台に達した。4 K 冷却後は、カプラからガスが放出されると冷却された空洞表面に凝縮し性能に悪い影響を及ぼす可能性があるため、カプラのコンディショニングは実施しない。

空洞のコンディショニング及び性能測定を行い、いずれも 2.5 MV 以上の加速電圧を確認している。

(3) HER のトンネル内搬入後のコンディショニング

横測定終了後、4 台の空洞が 2000 年 9 月に KEKB トンネル内に据え付けられた。横測定冷却前と同様、室温でバイアス電圧なしとバイアス電圧を印加したコンディショニングを行った。図 6.2.3 に HER 搬入後のバイアス電圧なしでのカプラのコンディショニング状況を示す。300 kW までの電力入力で、圧力上昇と電子の発生が観測された。これは横測定後のウォームアップで放出されたガスがカプラに影響を与えた可能性があると考えられる。バイアス電圧を印加したコンディショニングを行った後、バイアス電圧なしの条件で圧力上昇や電子発生は観測されないことを確認して、カプラのコンディショニングを終了した。アウトガス量はバイアス電圧なしのコンディショニングで平均 0.4 torr·l、バイアスをした印加コンディショニングも平均 0.5 torr·l と、カプラスタンドや横測定の結果と比較するとその量はかなり少ない値となった。

(4) 長期ビーム運転後のコンディショニング

長期ビーム運転に入るとメンテナンスの期間に、超伝導空洞をウォームアップする。長期ビーム運転中には空洞表面にガスが凝縮し、ウォームアップの時に空洞から放出されるアウトガス量は、3 ~ 30 torr·l [3] におよぶ。したがってウォームアップ時の放出ガスによるカプラの汚染を考慮して、空洞がウォームアップされた後は、室温でカプラのコンディショニングを実施している。図 6.2.4 にコンディショニング状況を示す。アウトガス量を比較すると、長期ビーム運転に使用していた空洞のカプラはバイアス電圧なしで 300 kW 以下の電力では圧力上昇はほとんど観測されず、300 kW まで電力入力可能である事がわかった。

バイアスマッピングから、内導体にマイナスのバイアス電圧を印加すると圧力上昇が大きく外導体表面のコンディショニングが主に行われていることが明らかになった。

表 6.2.1 カプラコンディショニングのまとめ

-	D10-A:#5	D10-B:#6	D10-C:#7	D10-D:#8
Choke gap	4 mm	4 mm	3 mm	3 → 4 mm
1.Processing at the coupler stand (300K)				
Baking	90°C×20hr	80°C×30hr	95°C×30hr	105°C×25hr
Reflection	30%	30%	60%	30%
Process time:no-bias/power	2.0h/360kW	8.1h/420kW	3.8h/300kW	6.7h/420kW
Pressure	2.7×10^{-7} torr	2.7×10^{-7} torr	5.2×10^{-7} torr	3.9×10^{-7} torr
Outgas	-	-	-	-
Baked@90°C*1day	1.7 torr·l	4.4 torr·l	4.6 torr·l	3.4 torr·l
RF process :total	1.1 torr·l	2.8 torr·l	1.4 torr·l	2.5 torr·l
No bias/bias	0.48/0.65 torr·l	2.22/0.61 torr·l	0.80/0.59 torr·l	2.16/0.46 torr·l
2.Horizontal test				
At 300K				
Process time:no-bias/power	2.4h/300kW	3.5h/300kW	6.0h/300kW	2.5h/300kW
Pressure	2.9×10^{-9} torr	2.0×10^{-9} torr	1.8×10^{-9} torr	1.7×10^{-9} torr
Outgas	2.1 torr·l	3.1 torr·l	2.4 torr·l	2.1 torr·l
No bias/bias	1.38/0.76 torr·l	1.88/1.21 torr·l	2.2/0.22 torr·l	1.19/0.91 torr·l
At 4K				
Pressure	1.3×10^{-9} torr	5.5×10^{-10} torr	5.4×10^{-10} torr	4.2×10^{-10} torr
External Qvalue	7.8×10^4	7.0×10^4	6.6×10^4	5.9×10^4
Voltage		2.38 MV	2.59 MV	2.3 MV
	Exchange the coupler			
3.Beam operation in KEKB tunnel				
3.1 After installation in KEKB tunnel (2000.9)				
At 300K				
Process time:no-bias/power	2.5h/300kW	3.6h/300kW	5.5h/300kW	2.6h/300kW
Pressure	1.7×10^{-9} torr	1.2×10^{-9} torr	4.4×10^{-9} torr	1.1×10^{-9} torr
Outgas	2.3 torr·l	1.3 torr·l	1.0 torr·l	0.4 torr·l
No bias/bias	1.61/0.68 torr·l	0.63/0.64 torr·l	0.22/0.73 torr·l	0.34/0.1 torr·l

At 4K			Pick up monitor trouble	Pick up monitor trouble
Pressure	4.9×10^{-10} torr	3.1×10^{-10} torr	2.5×10^{-10} torr	2.5×10^{-10} torr
Voltage	2.52MV	3.02MV		2.52MV
Operation (2000.9-2000.12)	Beam operation	Beam operation	No RF Operation	No RF Operation
3.2 After beam operation at current 600mA [150kW] (2001.1)				
At 300K	Cavity leak			
Process time:no-bias/power		1.0h/300kW	1.0h/300kW	1.5h/300kW
Pressure		1.3×10^{-9} torr	1.2×10^{-9} torr	1.4×10^{-9} torr
Outgas		0.7 torr·l	0.3 torr·l	0.7 torr·l
No bias/bias		0/0.7 torr·l	0/0.3 torr·l	0/0 torr·l.7
At 4K				
Pressure		2.6×10^{-10} torr	2.3×10^{-10} torr	2.3×10^{-10} torr
Operation (2001.1-2001.7)	No cavity	Beam operation	Beam operation	Coupler window leak
3.3 After beam operation at current 800mA [270kW] (2001.9)				
	Assemble a cavity			Exchange the coupler
At 300K				
Process time:no-bias/power	2.1h/300kW	0.4h/300kW	0.9h/300kW	1.7h/300kW
Pressure	2.1×10^{-9} torr	1.1×10^{-9} torr	1.6×10^{-9} torr	2.0×10^{-9} torr
Outgas	1.6 torr·l	0.4 torr·l	0.2 torr·l	1.0 torr·l
No bias/bias	0.6/1.0 torr·l	0.1/0.3 torr·l	0.04/0.19 torr·l	0.4/0.6 torr·l
At 4K				
Pressure	2.5×10^{-10} torr	2.2×10^{-10} torr	3.2×10^{-10} torr	3.8×10^{-10} torr
Voltage	2.28MV	2.50MV	2.06MV	2.56MV
Operation (2001.7-2001.12)	Beam operation			

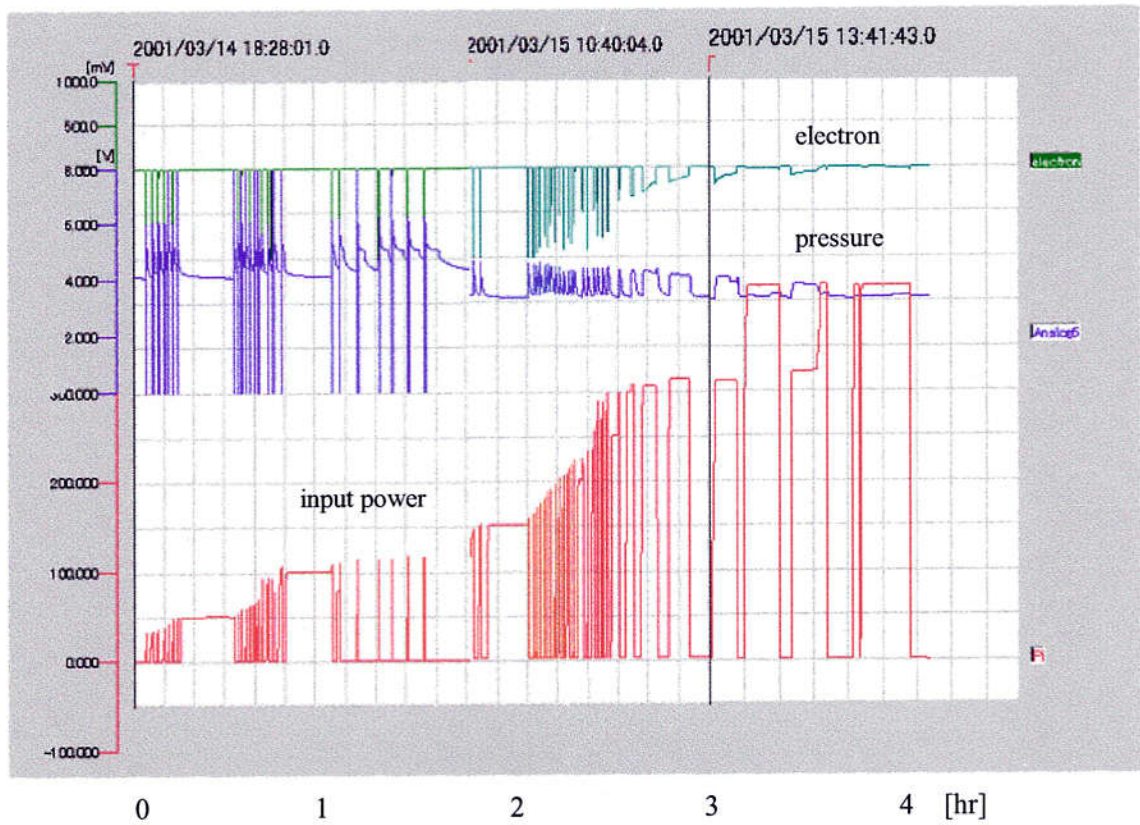


図 6.2.1 カプラスタンドでのコンディショニング 透過波 バイアス電圧なし

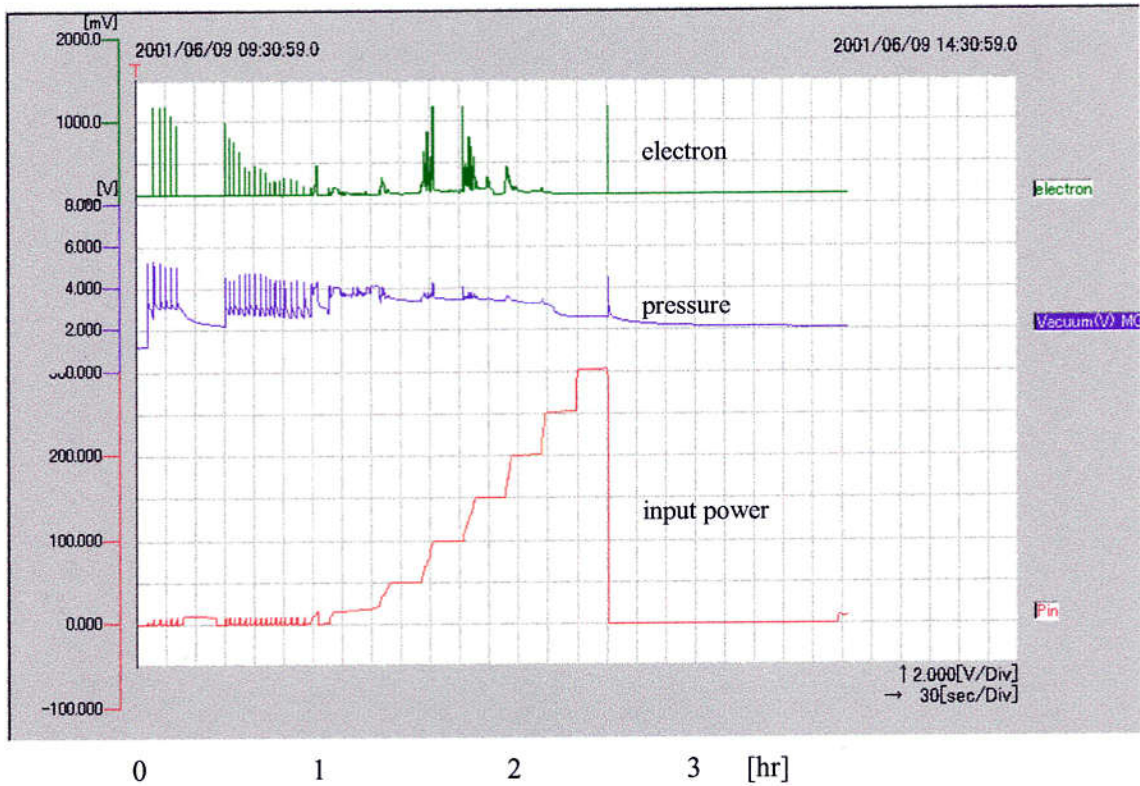


図 6.2.2(a) 横測定冷却前のコンディショニング 全反射 バイアス電圧なし



図 6.2.2(b) 横測定冷却前のバイアス電圧を印加したコンディショニング

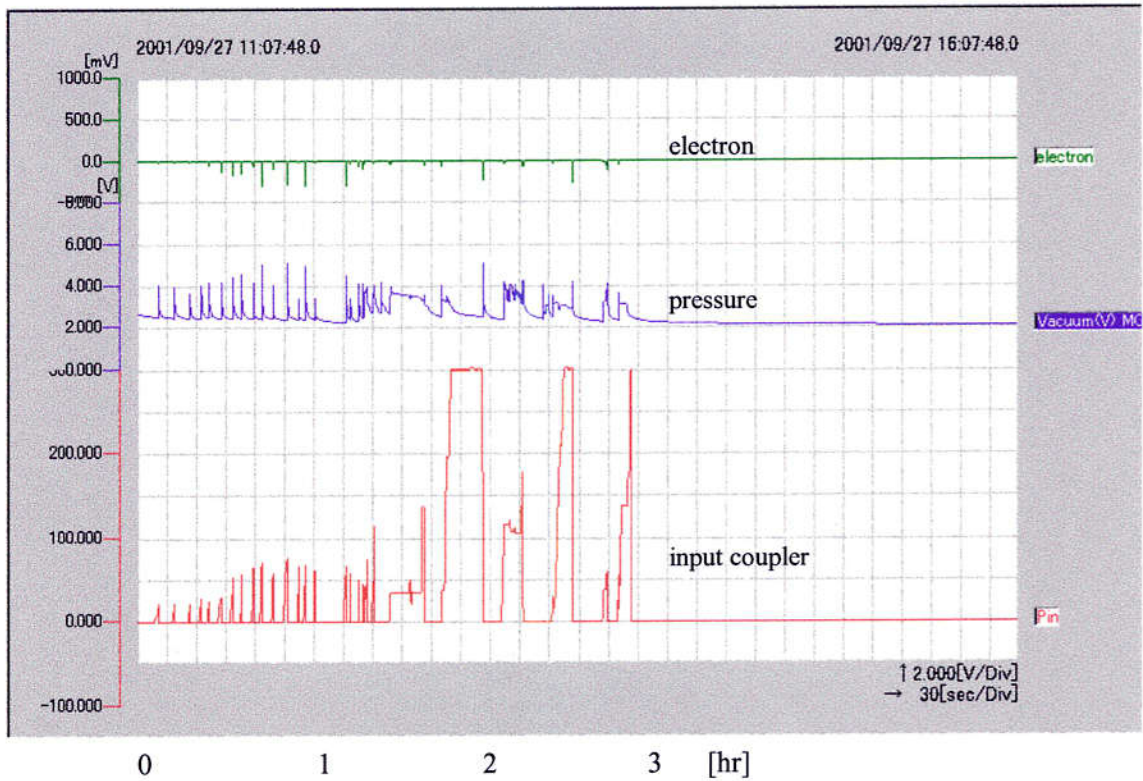


図 6.2.3 HER トンネル搬入後のコンディショニング 全反射 バイアス電圧なし

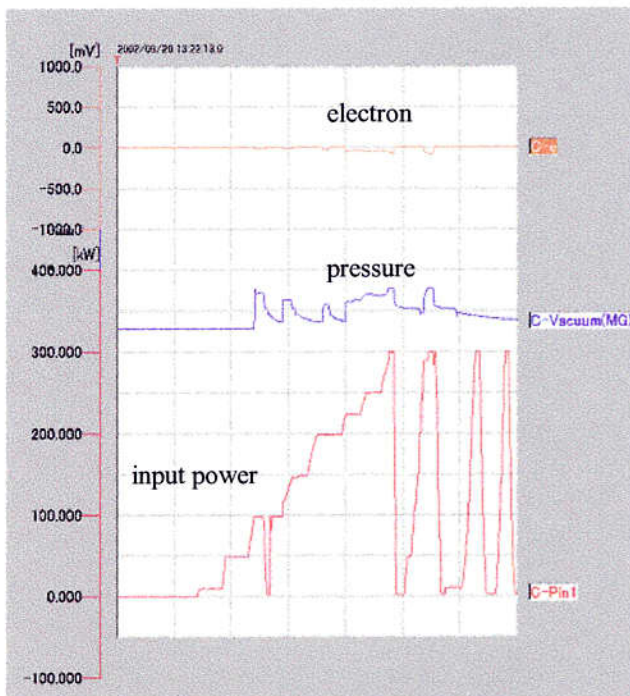


図 6.2.4 ビーム運転後のコンディショニング 全反射 バイアス電圧なし

6. 3 バイアス電圧を用いたコンディショニングの効果

6. 3. 1 バイアス電圧を用いたコンディショニングの状況

カプラスタンド，クライオモジュール組立て後，HER のトンネル搬入後および長期ビーム運転後の各段階で，カプラのコンディショニングを実施してきた．この中で，特にクライオモジュール組立て後や空洞を大気開放した後には，バイアス電圧なしの状態では RF 電力を目標の 300 kW まで入力しても圧力上昇や電子の発生する電力レベルが残るため，バイアス電圧を印加したコンディショニングを行う必要があった．バイアス電圧を印加したコンディショニングを行った後は，バイアス電圧なしの状態では 300 kW の電力を入力すると，それまで消えなかった圧力上昇と電子の発生する電力レベルはなくなり，バイアス電圧を用いたコンディショニングの効果を実証された．

第 3 章で述べたように，全反射状態ではバイアス電圧がないとマルチパクタリングの発生する場所は定在波の山と谷に限られた狭い範囲であるのに対し，バイアス電圧を印加することで，同軸の広い範囲にマルチパクタリングを発生させることができ，第 4 章で述べたように，表面を電子照射することにより表面の二次電子放出係数が下がり表面の清浄化に効果があると考えられる．

そこで，バイアス電圧を印加すると，カプラのどこのコンディショニングが行われているのかを調べるために，各プロセスでバイアス電圧を印加した時のカプラのコンディショニング状況をバイアスマッピングにしてまとめた．測定は 2000 年に HER に追加した 4 台の超伝導空洞 D10A，D10B，D10C，D10D のカプラについて行った．

(1) 横測定での冷却前のバイアスマッピング

4 台のカプラのバイアスマッピングを図 6.3.1 に示す．これは，バイアスコンディショニング終了後に，バイアス電圧を -1800 V から +1800 V まで 200 V の間隔で変更して，電力を全反射で 300 kW まで入力したもので，超伝導空洞 SBP 側の真空排気ポートに取り付けた真空ゲージ圧力とカプラのセラミック窓近傍の圧力及び電子を測定している．空洞 SBP 側の圧力上昇とカプラのセラミック窓近傍の圧力上昇を比較することでマルチパクタリングの場所をおおよそ推定できる．バイアスマッピングの図より，次のことがわかった．

- ・ バイアス電圧プラス側の入力電力 100 kW 近傍の幅広い圧力上昇は空洞 SBP 側の圧力上昇のほうがやや大きい．このことから，カプラの先端や，空洞 Nb 部分のカプラポートのマルチパクタリングが発生しているものと推定できる．
- ・ バイアス電圧 -1800 V 入力電力 100 kW 付近ではカプラ側の圧力上昇が際立って大きく電子発生も見られる．このことから，セラミック窓近傍でマルチパクタ

リングが発生していると考えられる。

(2) ビーム運転後のバイアスマッピング (2001.9)

2001 年 9 月に追加の 4 台の超伝導空洞がそろってビーム運転を開始できる状況になった。その時点の各カプラのコンディショニング状況を図 6.3.2 に示す。ここでは、コンディショニング中とコンディショニング終了後にカプラのセラミック窓近傍の圧力上昇と電子発生を測定し、バイアスマッピングに示した。カプラは表 6.2.1 からわかるように各々異なる経緯を持つ。

D10A: 3 ヶ月間ビーム運転した後空洞リークが発生したため、大気開放して空洞を再組立てしたカプラ。

D10B: 1 年間ビーム運転したカプラ。

D10C: 6 ヶ月間ビーム運転したカプラ。

D10D: 内導体を交換したカプラ。ただし、内導体は横測定まで終了していたもの。これらのカプラのバイアスマッピング結果を比較してみる。

- ・ 空洞を再組立てした D10A のカプラについて、コンディショニング中はバイアス電圧をプラス側マイナス側どちらに印加しても圧力上昇は共に大きい。このことから、空洞及びカプラを大気開放するとカプラの内導体及び外導体共に十分なコンディショニングが必要になることがわかった。
- ・ 空洞を再組立てした D10A のカプラについて、コンディショニング終了後もバイアス電圧プラス側の入力電力 100 kW 近傍の幅広い圧力上昇が残った。横測定のカプラポートから推定したとおり、カプラ先端及び新たに接続した空洞のカプラポートでマルチパクタリングが発生しているものと考えられる。
- ・ 長期ビーム運転を経過した D10B, D10C のカプラについて、コンディショニング中及び終了後ともにバイアス電圧のプラス側の圧力上昇は小さく、マイナス側の広い範囲で圧力上昇が測定された。これは、外導体のコンディショニングが主に行われている結果であると考えられ、カプラ外導体も冷却によるガス凝縮の影響があると推測できる[4]。
- ・ 内導体を交換した D10D のカプラについて、コンディショニング中はバイアス電圧をプラス側マイナス側どちらに印加しても圧力上昇は共に大きい。D10A 空洞と同様に大気開放後は十分なコンディショニングが必要であることがわかった。
- ・ 内導体を交換した D10D のカプラについて、コンディショニング終了後にバイアス電圧プラス側の入力電力 100 kW 近傍の幅広い圧力上昇は見られなかった。この範囲の圧力上昇は、新たに接続した空洞のカプラポートを発生源としてマルチパクタリングが発生しているものと推測できる。

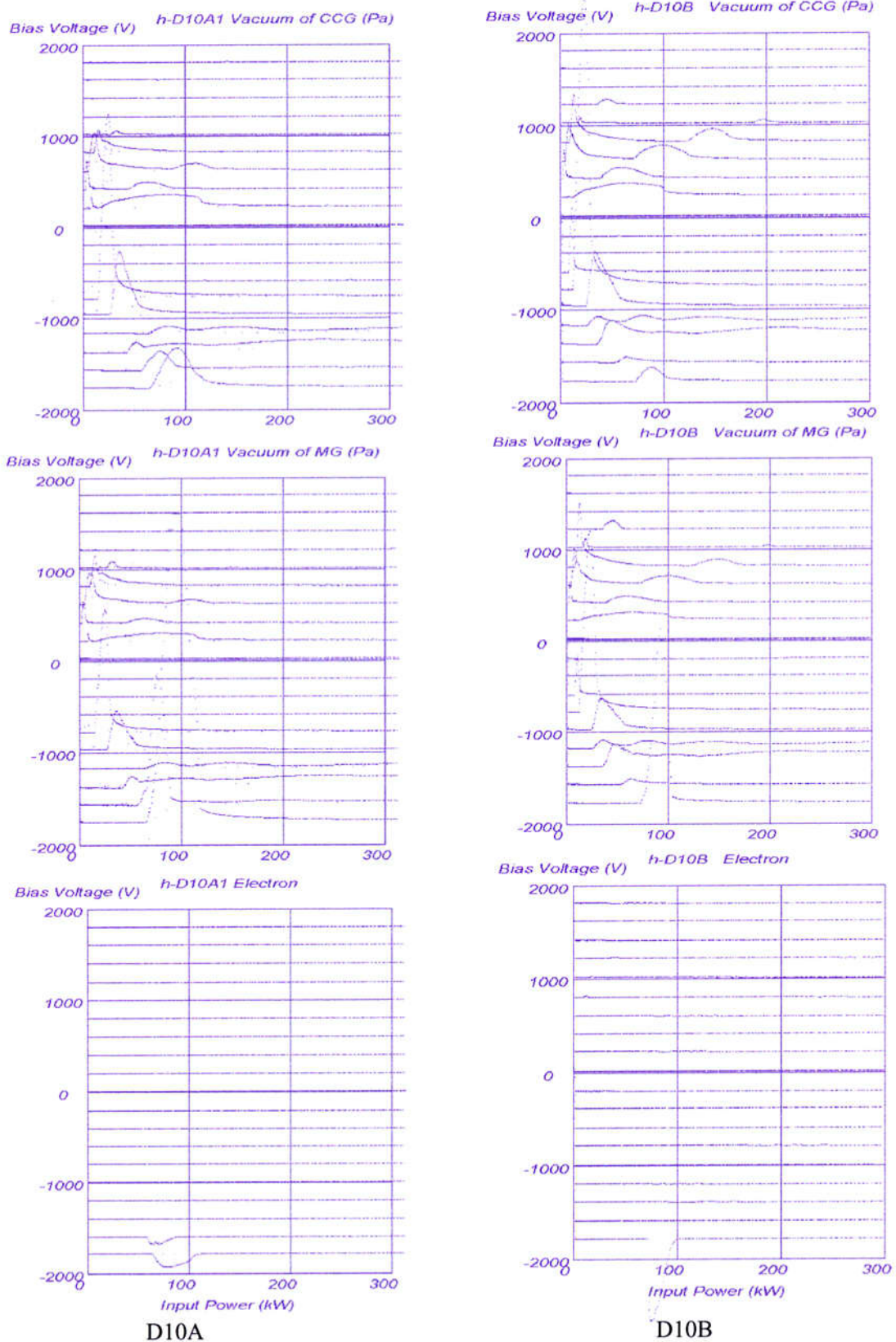


図 6.3.1(a) 横測定冷却前のコンディショニング終了後のバイアスマッピング
 上:空洞 SBP の圧力 中:セラミック窓周辺の圧力 下:セラミック窓近傍の電子発生

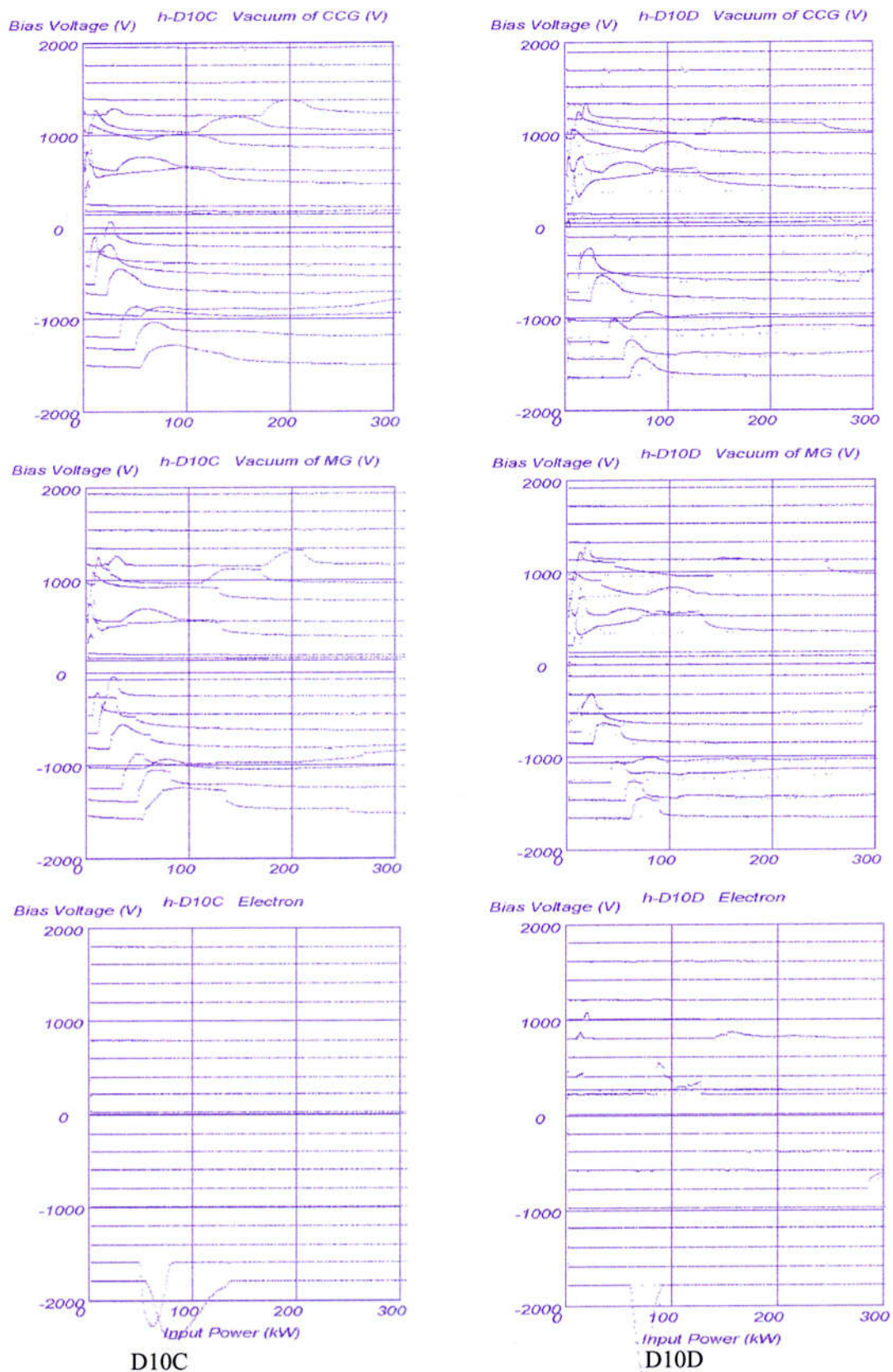
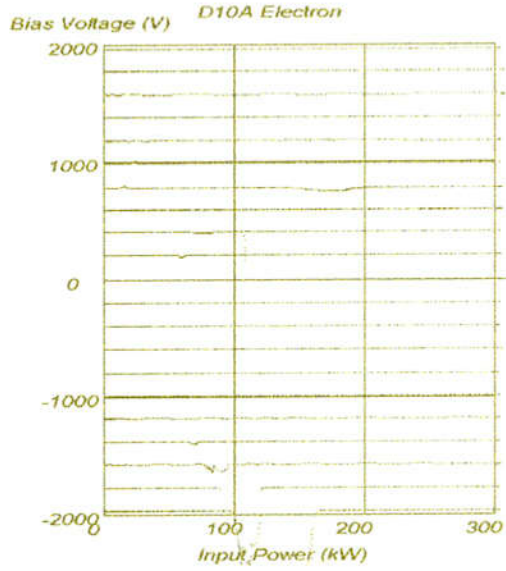
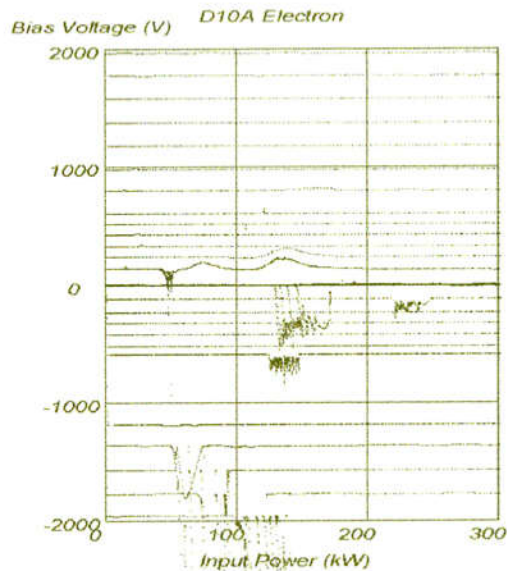
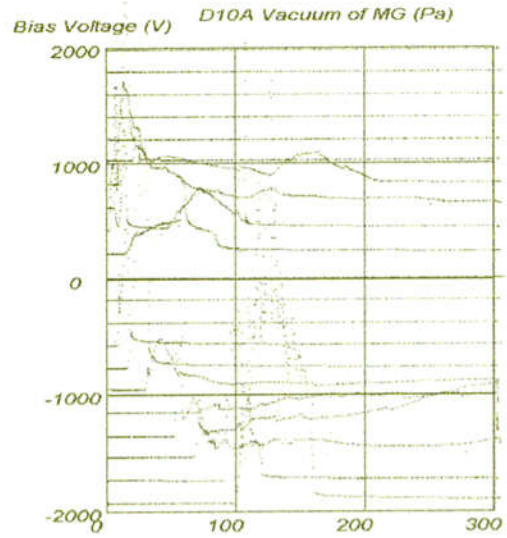
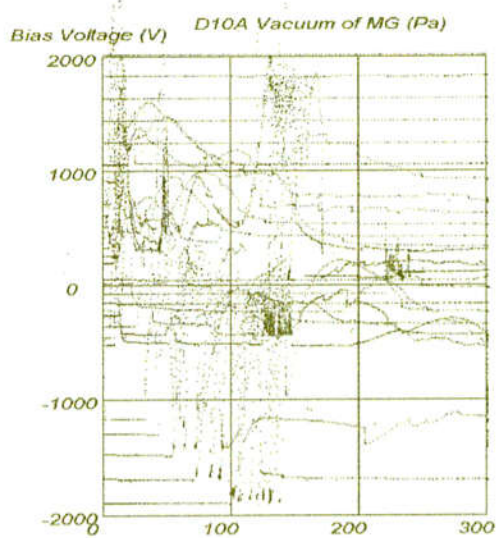


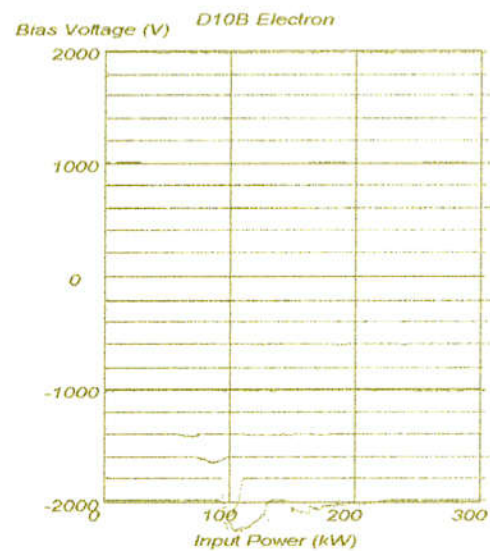
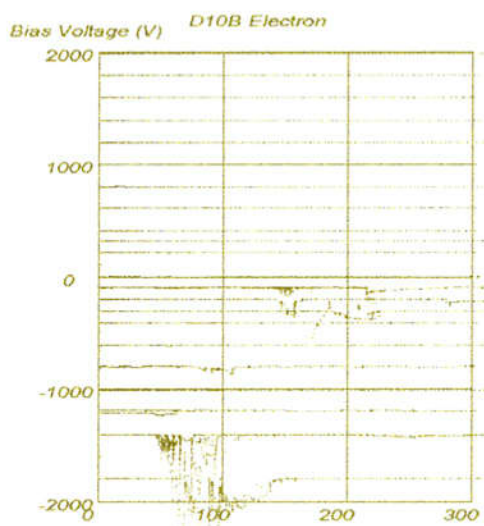
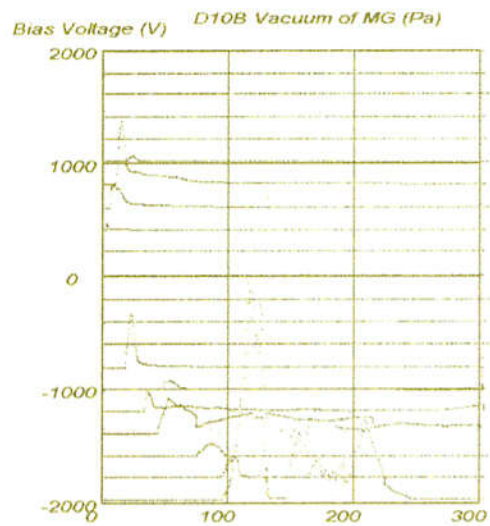
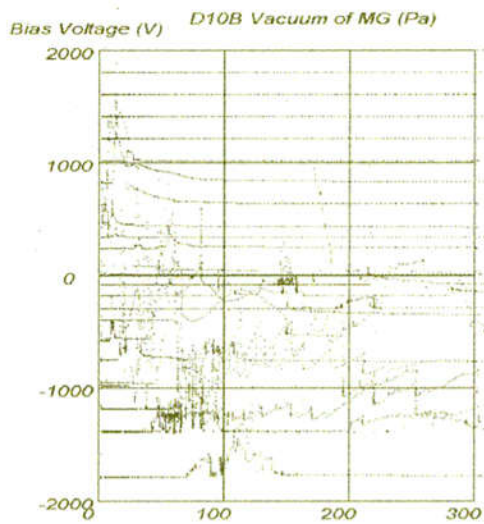
図 6.3.1(b) 横測定冷却前のコンディショニング終了後のバイアスマッピング
 上:空洞 SBP の圧力 中:セラミック窓周辺の圧力 下:セラミック窓近傍の電子発生



On the Conditioning

after the conditioning

図 6.3.2(a) ビーム運転後の室温バイアスマッピング(2001.9)
 D10A: 空洞再組み立て後のカプラ
 上: セラミック窓周辺の圧力 下: セラミック窓近傍の電子発生



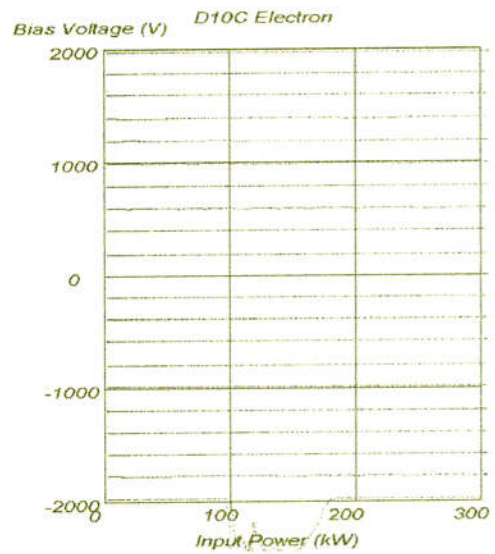
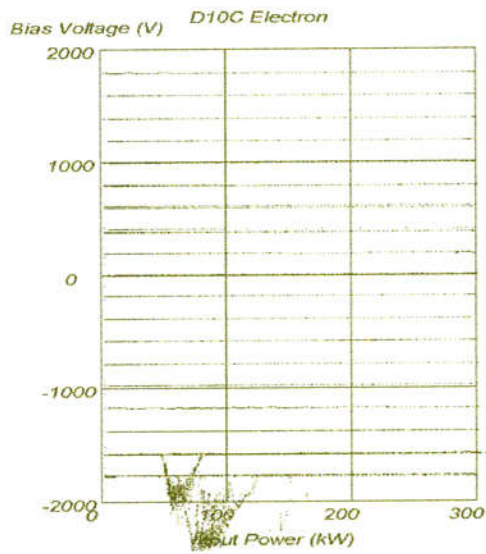
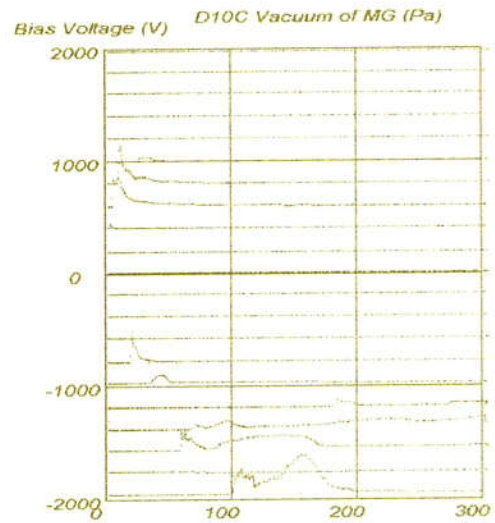
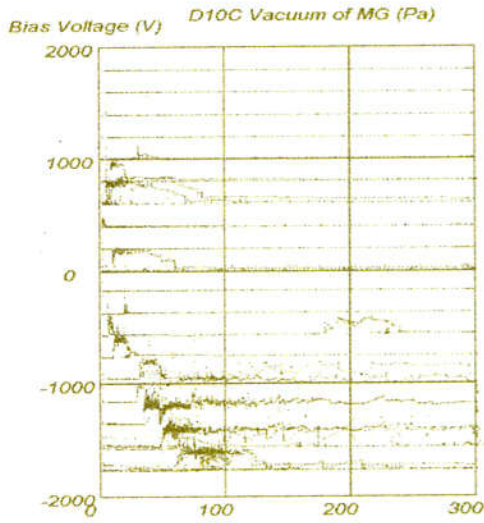
On the Conditioning

after the conditioning

図 6.3.2(b) ビーム運転後の室温バイアスマッピング(2001.9)

D10B: 1年間ビーム運転後のカプラ

上: セラミック窓周辺の圧力 下: セラミック窓近傍の電子発生



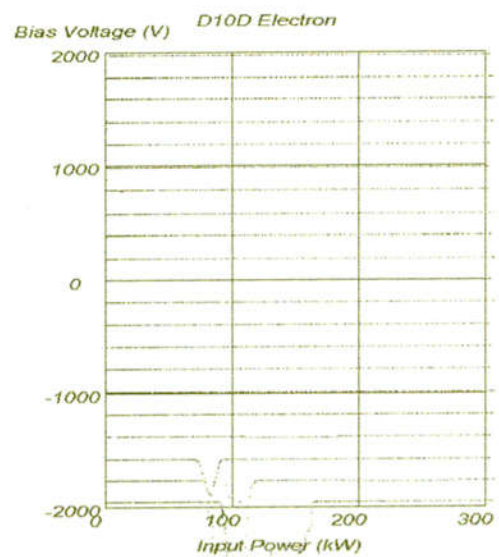
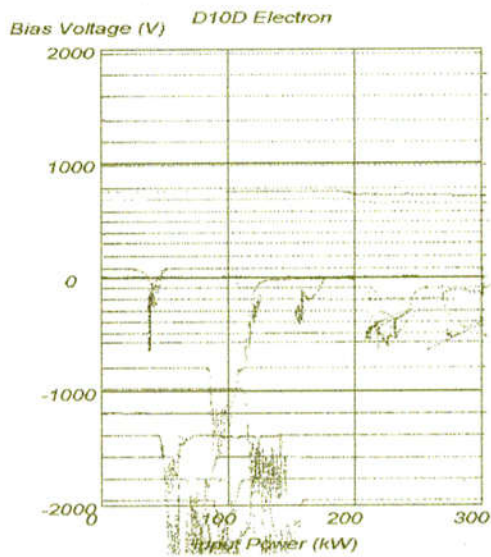
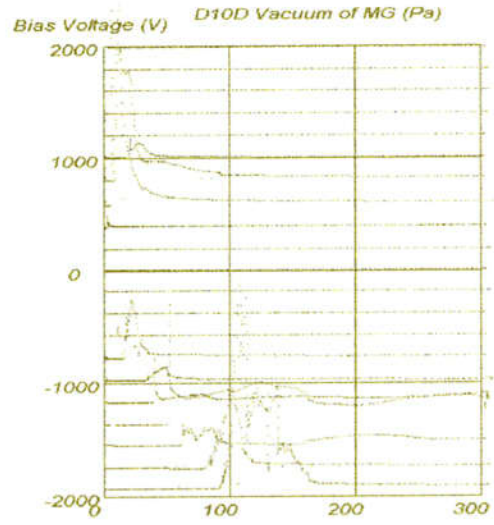
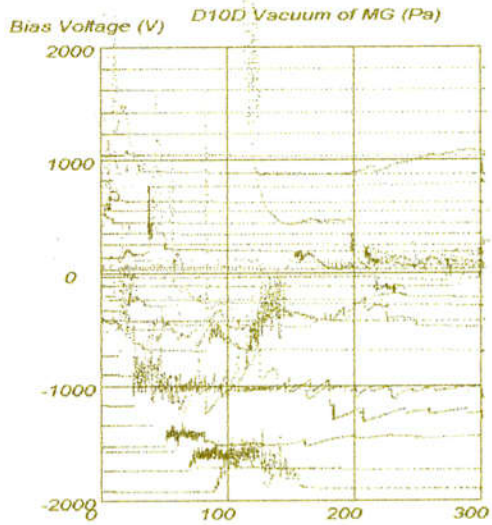
On the Conditioning

after the conditioning

図 6.3.2(c) ビーム運転後の室温バイアスマッピング(2001.9)

D10C : 6ヶ月間ビーム運転後のカプラ

上 : セラミック窓周辺の圧力 下 : セラミック窓近傍の電子発生



On the Conditioning

after the conditioning

図 6.3.2(d) ビーム運転後の室温バイアスマッピング(2001.9)

D10D : 内導体を交換したカプラ

上 : セラミック窓周辺の圧力 下 : セラミック窓近傍の電子発生

6. 3. 2 バイアスマッピングの意味

バイアスマッピングを分析しその結果をまとめる。バイアスマッピングの測定結果と、第3章のシミュレーション結果より、バイアスマッピング上の領域を大きく4つに分類した。図6.3.3にその領域を、以下にその内容と特徴を示す。

(領域 1) 構造に起因するマルチパクタリングでコンディショニング後も現れる領域。

バイアス電圧： -1600～1200 V 入力電力： 100 kW 以下

同軸のシミュレーション結果より次のことがわかる。

- ・ 発生した一次電子の衝突エネルギーが 200 eV から 800 eV の範囲となる条件で二次電子放出係数が 1 以下に下がらず、マルチパクタリングが継続する条件を満たす。同軸構造に起因するマルチパクタリングである。
- ・ 内導体のバイアス電圧をプラス側に印加した場合は内導体の 1 ポイントマルチパクタリングが、マイナス側は外導体の 1 ポイントマルチパクタリングが発生している。

(領域 2) 同軸の広い範囲でマルチパクタリングが発生しコンディショニング後も現れる領域。

バイアス電圧： -2000～-1600 V 入力電力： 100 kW 近傍

同軸のシミュレーション結果より、

- ・ 発生した一次電子の衝突エネルギーが 200 eV から 800 eV の範囲となる条件で二次電子放出係数が 1 以下に下がらず、マルチパクタリングが継続する条件を満たす。同軸構造に起因するマルチパクタリングである。
- ・ 加えて、外導体の定在波の同軸方向の広い範囲で二次電放出係数の高いレベルが広がる。ほぼ同軸全面にわたりマルチパクタリングが継続して発生することから、注意が必要である。

また、測定結果より、

- ・ セラミック窓近傍から電子が発生し、セラミック窓部の発熱も大きい。

ことがわかった。

この領域をコンディショニングに利用するのは効果的ではあるが、マルチパクタリングは消えず、長時間継続すると発熱や金属表面の変色などの変化を起こす可能性がある。特に窓の破損には注意が必要であり、危険な領域である。

(領域 3) 空洞の組立て作業実施後に現れる領域。

バイアス電圧： 200～800 V 入力電力： 100 kW 近傍

同軸のシミュレーション結果より、

- ・ 内導体と外導体間の 2 ポイントマルチパクタリングの発生する領域である。
- ・ 一次電子の壁への衝突エネルギーは主に 800 eV から 1500 eV であり、コンディショニング後は二次電子放出係数が 1 以下に下がると考えられる。

また、測定結果より、

- ・ 空洞組立て後にのみ発生し、長期ビーム運転後には圧力上昇は見られない。

ことがわかった。

この領域は、空洞のカプラポート近傍で 2 ポイントマルチパクタリングが発生していると考えられ、ビーム運転によるコンディショニング後は圧力上昇はなくなるレベルである。

(領域 4) 外導体のマルチパクタリングが発生する領域。

バイアス電圧： マイナス側の広い領域

同軸のシミュレーション結果より、

- ・ 外導体間の 1 ポイントマルチパクタリングの発生する領域であり、一次電子の壁への衝突エネルギーは 200 eV から 1500 eV の範囲にある。

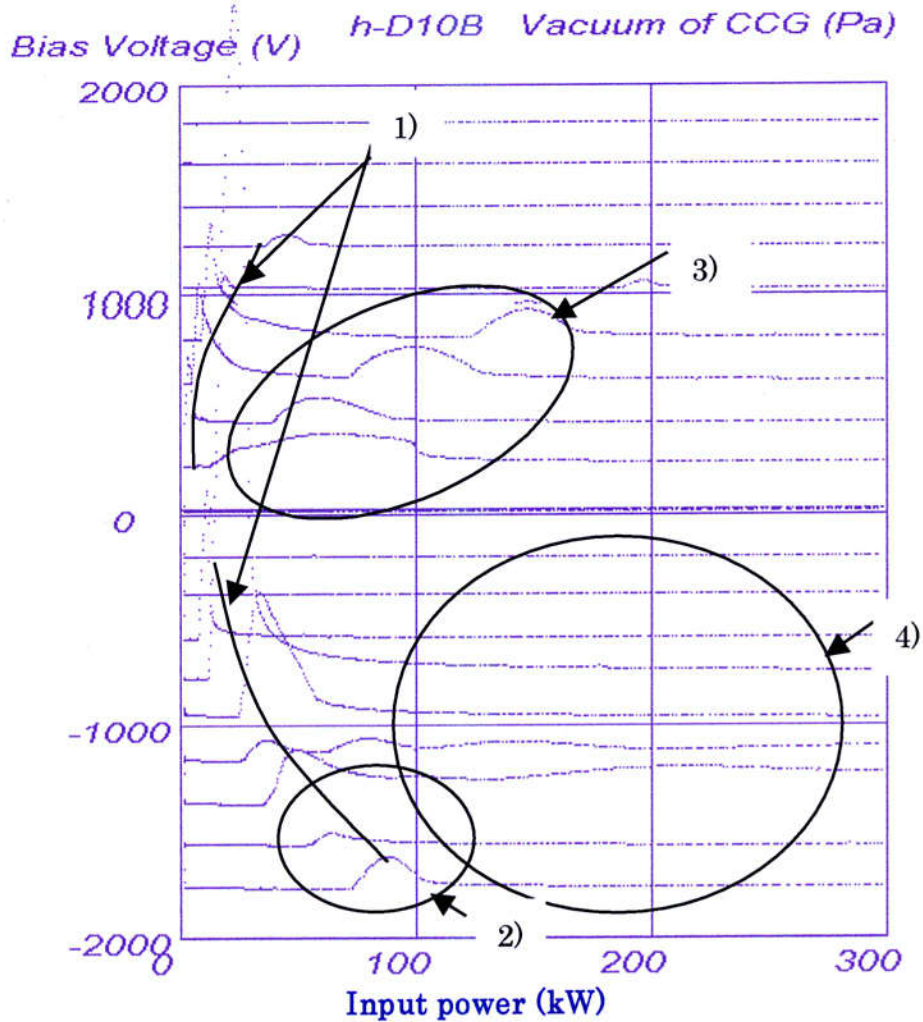
また、測定結果より

- ・ 長期ビーム運転後のコンディショニング中に圧力上昇が現れる。

ことがわかった。

以上より、長期ビーム運転でガスを凝縮した外導体のコンディショニングに有効な領域である。冷却後はカプラの外導体表面にもガスが凝縮されていて、マルチパクタリング発生の要因になっていると考えられ、運転中の圧力上昇にも注意が必要である。

このように、バイアスマッピングからコンディショニングの進捗状況、カプラの状態が推測できる。今後これらのデータを蓄積することにより、カプラの経年変化や寿命の判断材料の 1 要素として活用できる可能性がある。



- 1)The multipacting based on the structure
- 2)The multipacting on wide area of outer conductor.
No decrease after processing.
Dangerous.
- 3)The multipacting near the input port of niobium cavity.
- 4)The surface of outer conductor

図 6.3.3 カプラのバイアスマッピングの領域と意味

6. 4 ビーム運転の状況

6. 4. 1 ビーム運転中のマルチパクタリングの発生状況

追加した 4 台の超伝導空洞は、2001 年 9 月に 4 台共にビーム運転に参加できる状況になった。2001 年末にはビーム電流は 780 mA に達し、入力電力は 220-290 kW の範囲で安定に運転を続けている。図 6.4.1 に 2001 年 10 月の 4 台のカプラのビーム運転状況を示す。ビーム電流値、各カプラの圧力上昇の時間経緯を表している。4 台のうち、D10A D10B D10C の 3 台のカプラは、圧力が 10^{-5} Pa 以上になる回数はカプラあたり 5 回/月以下であった。これらの圧力上昇は、他の原因でインターロックが働きビームが落ちる時や、RF 電源の電力が切られるときに発生している。一方、カプラ D10D は、内導体を交換しコンディショニングが十分でなく、またビーム運転期間も短いことから、インストール後の 1-2 ヶ月は 10^{-5} Pa より高い圧力上昇が 20 回以上観測された。

ビーム運転中のマルチパクタリングの発生状況を調べるために、ビーム電流と各空洞への入力及び反射電力の関係と、カプラの圧力上昇と電力レベルの関係をまとめた。2001 年 10 月の 1 週間、測定した結果を図 6.4.2 及び図 6.4.3 に示す。図 6.4.3 より、D10D のカプラに圧力上昇が観測され、その電力レベルは 230 kW 近傍にあることがわかった。また、図 6.4.2 より D10D カプラの入力電力が 230 kW の時は、反射電力はほぼ 0 であり、透過波の条件とみなすことができる。したがって、圧力上昇の発生する 230 kW は、シミュレーションによる透過波でマルチパクタリングが発生する電力レベル 225 kW と一致する結果となった。

他のカプラも、ビーム運転が継続されると D10D カプラのように、ある電力レベルでパルス的に圧力の上昇を起こし、しばらくその圧力上昇が継続する状況が観測される。しかし、大きな圧力上昇が発生した後は、圧力上昇は発生せず、数週間は安定なビーム運転に戻る。カプラは圧力上昇を数週間の周期で定期的に繰り返しつつ、ビーム運転が継続されている。カプラの真空モニタのインターロックは 10^{-4} Pa に設定されており、これまでビーム運転中に真空によるインターロックはほとんど作動していない。

現在、真空排気用のポンプは超伝導空洞の SBP および LSP に設置されており、ビーム運転中にカプラで放出されたガスは真空ポンプに到る前にそのほとんどが冷却されたカプラ外導体表面及び空洞表面に凝縮される。長期ビーム運転では、カプラの内表面にガスが凝縮し、マルチパクタリングが発生することにより凝縮ガスは放出され、放出ガスは別の場所に凝縮されるという現象が繰り返されていると考えられる。

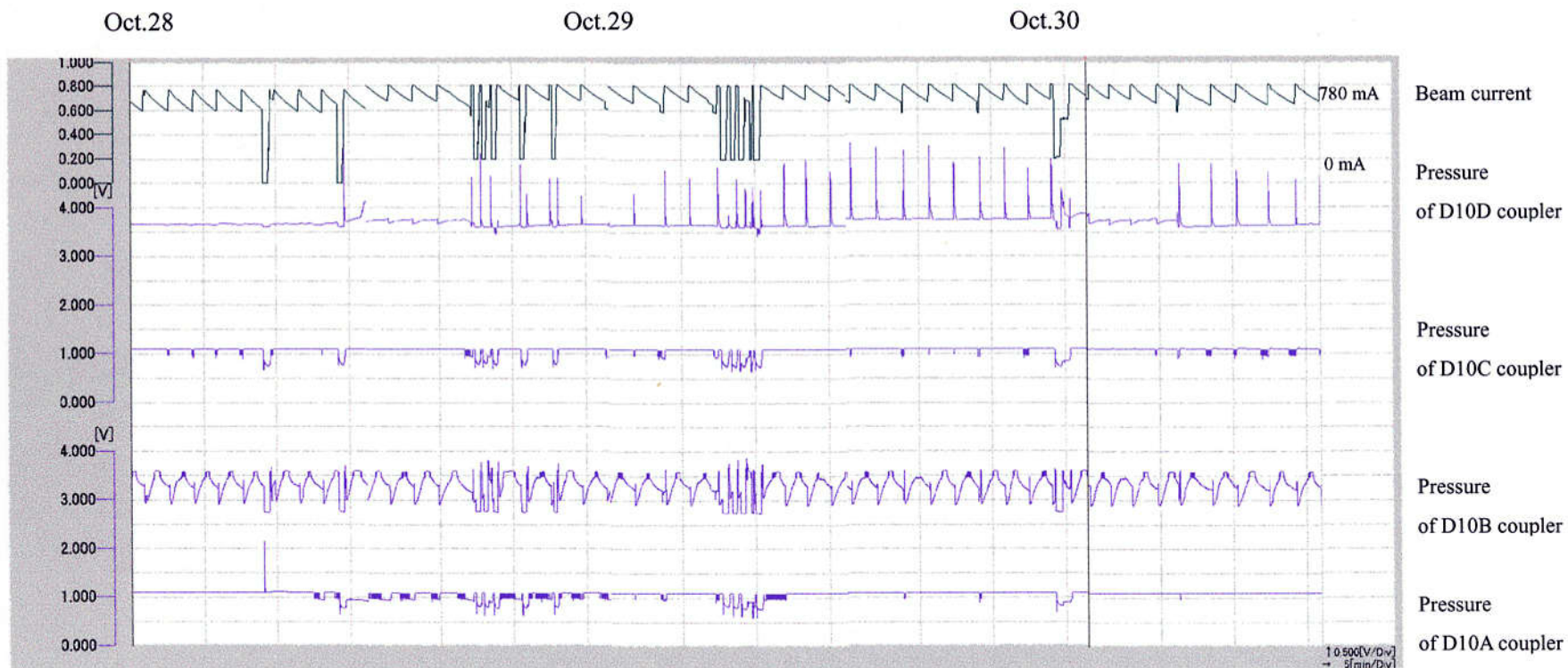


図 6.4.1 ビーム運転の状況 ビーム電流とカプラの圧力

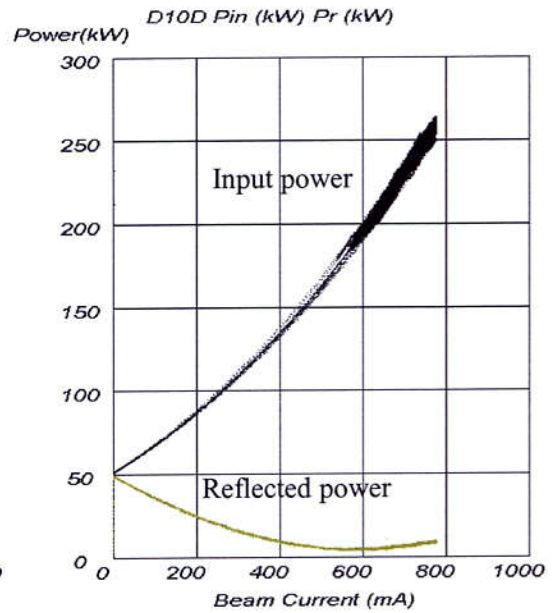
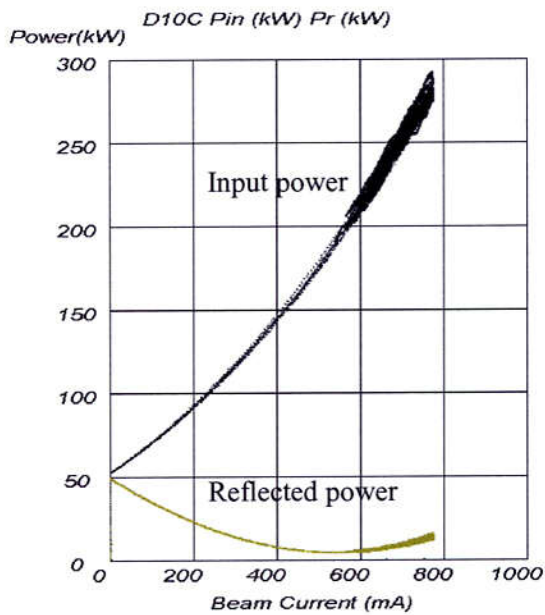
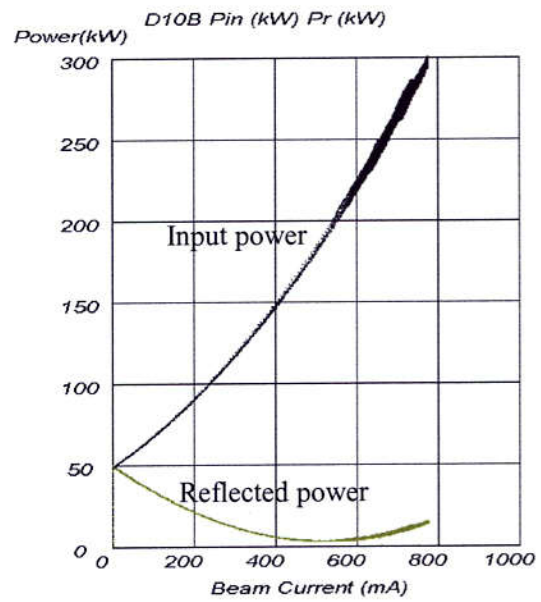
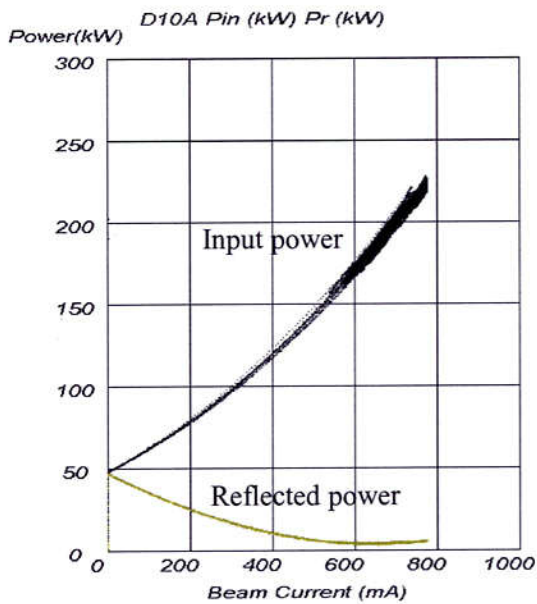


図 6.4.2 ビーム電流と電力の関係

条件 加速電圧 : 1.26 MV

位相 offset : -5 度

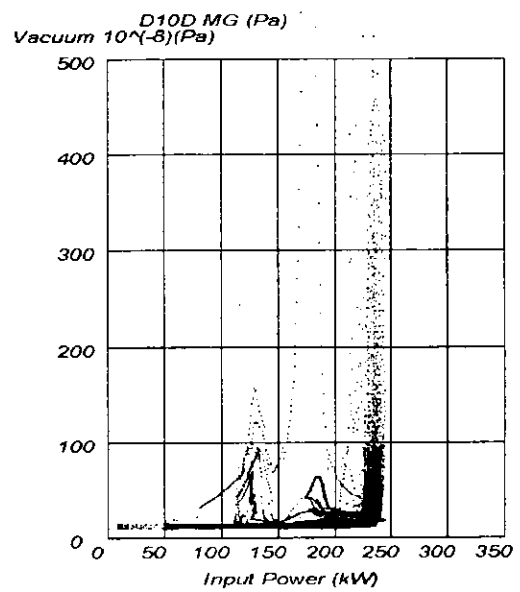
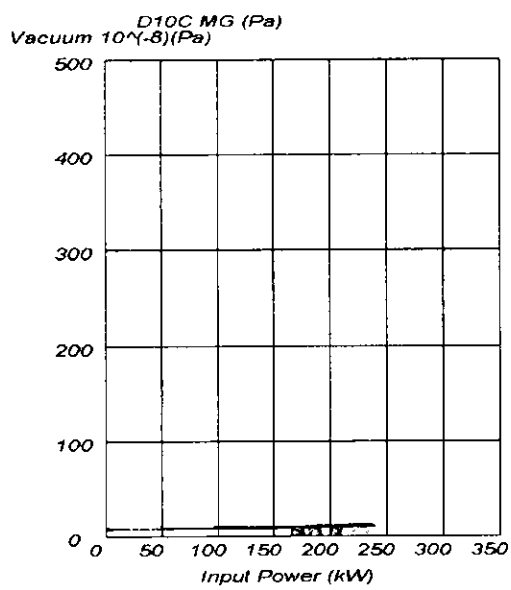
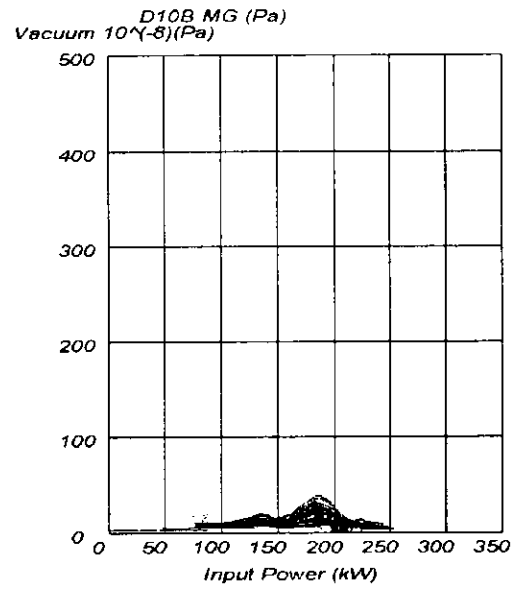
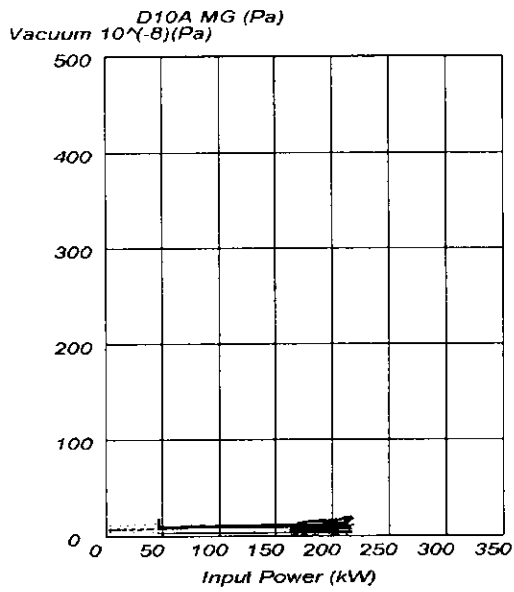


図 6.4.3 ビーム運転中の入力電力とカプラ圧力 (2001.10.24-10.31)

6. 4. 2 超伝導空洞への影響

ビーム運転により高次モード減衰器や超伝導空洞外のビームダクトからのガス、さらにはカプラからの放出ガスも空洞の性能に影響を及ぼす可能性がある。空洞の性能を確認すると、4 K での空洞のコンディショニング後には空洞の最大加速電圧は 2.5 MV に達するが、ビーム運転後の最大加速電圧はどの空洞も約 1.9 MV (7.6 MV/m) の加速電圧で一旦 break down を起こす。長期ビーム運転により空洞表面にガスが凝縮され、加速電圧 1.9 MV のレベルで空洞内のマルチパクタリングが発生していると考えられる。現在、最大加速電圧は 2.5 MV を目標に定期的に空洞のコンディショニングを行っている。KEKB では加速電圧 1.2~1.5 MV でビーム運転を行っており、1.9 MV のマルチパクタリングのレベルは運転上の問題にはなっていない。

今後、より高電界の加速器の実現を視野に入れると、2.0MV 以上の加速電圧での運転が望まれる。そのためには、空洞のマルチパクタリングのレベルが高い形状の空洞設計を行うことが望ましい。さらに、カプラを含めた周辺部からのビーム運転中のアウトガス量を小さくすることが重要である。また、カプラおよび空洞性能に影響を及ぼすガス成分とその量を評価する必要がある。

第7章 まとめと今後の課題

7. 1 まとめ

大電流を加速できる超伝導空洞の実用化には、大電力用のカプラの開発と安定なビーム運転を実現できるシステム、調整手法を確立することが重要であった。本研究ではその開発のターゲットとして KEK B-factory の超伝導空洞用カプラの開発とその安定なビーム運転を目指してきた。

開発を始めた時点では、超伝導空洞用カプラにおいて 200 kW 以上でビーム運転された実績はなかったが、KEKB 超伝導空洞では、ビーム電流 780 mA で入力電力 250 kW 以上で安定にビームを加速し、また調整期間中にはビーム運転の最大入力電力は 380 kW に達した。これは、超伝導空洞用のカプラとしては世界でも最高の水準にある。

大電力用カプラの開発及びカプラのコンディショニングについての研究結果は次のとおりである。

- (1) 大電力用のカプラの開発を行い、透過波で 800 kW 以上の電力を入力できた。セラミック窓付近の電子をモニタし、真空、アークセンサーをインターロックに使用してコンディショニングすれば、クライストロンと同様に大電力用として使用できることを示した。
- (2) カプラ同軸内のマルチパクタリングが発生する電力レベルを計算で求め、カプラのテストスタンド及びビーム運転においてその電力レベルは計算とほぼ一致することを確認した。KEKB 用カプラの 50 Ω 同軸部では透過波で 225 kW 近傍にマルチパクタリングの発生する電力レベルがある。
- (3) 窓部チョーク構造での 2 ポイントマルチパクタリングの発生するレベルを概算で求め、テストスタンドでカプラの放電が発生する電力レベルと概ね一致することを確認した。チョーク構造の間隙部分を平行平板と仮定すると、透過波で約 200 kW 以下の低い電力で 2 ポイントマルチパクタリングが発生する。
- (4) 窓部の放電現象を測定すると、放電は窓近傍の電子が急激に増加するマルチパクタリングにより誘起され、その直後に発光現象が現れ、発光と同時にエネルギー吸収が発生していることがわかった。放電は大きなエネルギー吸収を伴うことから窓の破損につながる可能性があり、セラミック窓近傍に取り付けたアークセンサーは有効なインターロック用モニタであることがわかった。

- (5) カプラ内金属表面のマルチパクタリングの評価を行うため、表面の二次電子放出係数の測定を行った。マルチパクタリングを想定し、電子照射の金属表面への効果を調べ、電子量約 10^{-3} C/mm² 以上の照射で二次電子放出係数が 70% に落ちることがわかった。金属表面への電子照射は二次電子放出を下げ、マルチパクタリングの発生と継続を抑える効果がある。
- (6) 窓部の二次電子放出係数を調べ、その製作工程を評価した。アルミナ表面に TiN コーティングを施すと二次電子放出係数を 2 以下に下げることができるが、後工程のロウ付けで表面が汚染され、再び上昇することがわかった。この汚染はオゾン水洗浄により除去でき TiN コーティング表面と同等の低い二次電子放出係数が確保できた。
- (7) 内導体にバイアス電圧を印加し積極的にマルチパクタリングを誘起するコンディショニング方法を採用した。計算により、同軸内全反射状態では、バイアスをかけることで軸方向の広い範囲でマルチパクタリングを発生させることができ、コンディショニングに有効であることを示した。
- (8) バイアス電圧の設定を変えて、圧力上昇と電子発生の電力レベルを見るバイアスマッピングのデータより、コンディショニング効果、場所が推定できることを示した。今後バイアスマッピングを確認することで、経年変化、寿命などの診断に利用できる可能性がある。

7. 2 今後の課題と提案

コンディショニングの効果をも、ガス放出による圧力上昇がなくなること、さらにマルチパクタリングを含む放電がなくなることとすると、コンディショニングの過程では表面が清浄化され表面状態が変化していると考えられる。この論文では、コンディショニングには電子照射が効果的であること、また、コンディショニング中の放出ガスは、鍍金面では H_2 、セラミック窓部では H_2 , CO , CO_2 が主な成分であることを述べた。しかし、電子照射により表面状態がどのように変化し、またガスの種類による表面に及ぼす影響については、明確にはなっていない。金属部およびセラミック窓部の放電発生には炭素または酸素が起因している可能性が高く、これらのガスの影響とその対応策については今後の研究課題としたい。また、カプラのみではなく、超伝導空洞への放出ガスの影響を調べる必要がある。

より大電力が入力でき、さらに安定なビーム運転ができるカプラを実現するには、マルチパクタリングの発生する条件を回避する構造にするのが望ましい。セラミック窓部のチョーク構造は広い電力領域でマルチパクタリングの同期条件に合うレベルが存在すると考えられ、これらの構造の改造が望ましい。また、同軸部は外導体を大きくすると外径の 4 乗に比例してマルチパクタリングのレベルは上がり、外径をより大きくした構造が望ましい。しかし、製作加工上の問題や制約、空洞との取り合い、発熱や熱侵入などの観点からも、構造を考慮する必要がある。

KEKB ではカプラの十分なコンディショニングを行い、安定なビーム運転を実現している。今後、より簡単なコンディショニング方法で安定な運転を実現できるようなカプラの構造、表面、処理方法を模索し、またバイアスマッピングを利用した故障や、寿命の診断が可能なシステムの構築が望まれる。

謝 辞

本論文を結ぶにあたり、研究に際しご支援・指導いただきました 高エネルギー加速器研究機構の黒川眞一教授に感謝申し上げます。 また、研究全般にわたり適切なご指導・助言をいただきました光延信二助教授、古屋貴章助教授に心から感謝申し上げます。また、カプラの実験では研究員の片野元様、古河電工の田中竜志様にお世話になりました。

表面状態の測定・研究に際し、齊藤芳男助教授、道園真一郎助手、Carleton College の Richard J. Noer 教授に貴重な助言をいただきました。ありがとうございました。

研究をおこなうにあたり、種々のご援助をいただきました 高エネルギー加速器研究機構の方々に感謝致します。

さらに、三菱電機（株）の小島融三顧問始め会社の方々の協力にこの機会を借りてお礼申し上げます。

参考文献

第 1 章

- [1] 小島融三, “加速器用超伝導高周波空洞の開発”低温工学 Vol.20 No.3,144-152(1985).
- [2] W.Weingarten, “Superconducting cavities,” CERN/AT-RF91-9 1 July 1991.
- [3] Y.Kojima, “Superconducting RF Activities at KEK,” Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, 85-95(1989).
- [4] T.Weiland, “Single Mode Cavities,” DESY 83-073 (1983).
- [5] J.Kirchgessner, et al. “Superconducting RF Activities at Cornell University,” Proceedings of the 6th Workshop on RF Superconductivity.
- [6] S.Noguchi, et al., “Couplers – Experience at KEK”, Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, 397-412(1989).
- [7] J.Tuckmantel, et al., “Improvements to Power Coupler for the LEP2 Superconducting Cavities,” 1996, Proc. of PAC96, 1642-1644, (1996).
- [8] H.P.Kindermann, et al., “RF Power tests of LEP2 Main Couplers on a Single Cell Superconducting Cavity,” Proceedings of the 8th Workshop on RF Superconductivity, 732-739(1997).
- [9] B.Dwersteg, Qiao Yufang, “High Power Input Coupler Developments at DESY”, Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, 605-614(1989).
- [10] B. Dwersteg, “ High Power Windows at DESY”, Proceedings of the 8th Workshop on RF Superconductivity, 740-752(1997).
- [11] E. Chojnacki, et al., “Tests and Designs of High Power Waveguide Vacuum windows at Cornell,” Proceedings of the 8th Workshop on RF Superconductivity, 753-761(1997).
- [12] E. Chojnacki, et al., “RF Power Coupler Performance at CESER and Study of a Multipactor Inhibit Coupler”, Proceedings of the 9th Workshop on RF Superconductivity, (1999).
- [13] H.P. Kindermann, et al., “The Variable Power Coupler for the LHC Superconducting Cavity”, Proceedings of the 9th Workshop on RF Superconductivity, (1999).
- [14] B. Dwersteg, “High Power couplers”, Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, 351-376(1989).
- [15] L.Phillips, “An Update on Windows, Couplers, Higher-Order-Mode Damping, and Inter locks,” Proceedings of the 6th Workshop on RF Superconductivity, 267-293(1993).
- [16] M.S. Champion, “RF Input Couplers and Windows: Performances, Limitations, and

Recent Developments,” Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 195-221(1995).

[17] W.D. Moeller, et al., “High Power Coupler for the TESLA Test Facility,” Proceedings of the 9th Workshop on RF Superconductivity (1999).

[18] B.Dwersteg, “Mechanical Concept of TESLA Main Coupler Development at DESY”, DESY Print May 1993, TESLA 93-15.

[19] M. Kobayashi and T. Masukawa, Prog. Theor. Phys. 49,652(1973).

[20] 三田一郎, “CP 非保存と時間反転,” 岩波書店.

[21] Proceedings of International Workshop on B-Factories: Accelerators and Experiments, KEK, Nov. 1992, KEK proceedings 93-7.

[22] KEKB B-Factory Design Report, June 1995, KEK Report 95-7.

[23] 吉岡正和, “KEKB 加速器,” 加速器同好会, Vol.7(1999).

[24] K.Abe, et al., “Observation of Large CP Violation in the Neutral B Meson System,” KEK preprint 2001-50.

[25] K. Akai, “Application of Superconducting cavities to Factories,” Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity, 605-614(1989).

[26] K. Akai, “Commissioning of the KEKB RF System,” Proceedings of EPAC 2000,1939-1941, Vienna Austria (2000).

[27] T.Kageyama, et al., “The ARES Cavity for KEKB,” KEK Preprint 98-45, May (1998).

[28] T.Furuya, et al., “Superconducting Accelerating Cavity for KEK B-Factory,” Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 729-733, KEK Preprint 95-100.

[29] T. Furuya, et al., “Recent Status of the Superconducting Cavities for KEKB,” Proceedings of the 8th Workshop on RF Superconductivity, 740-752(1997).

[30] T.Tajima, et al. “Development of HOM absorber for KEK B-Factory SC Cavities”, Proceedings of the 6th Workshop on RF Superconductivity.

第 2 章

[1] P.B. Wilson, “Beam Loading in High Energy Storage Rings,” PEP-Note 37, SPEAR-163, July(1973).

[2] K. Takata, “Note on the RF system of the 2.5 GeV Electron Storage Ring for the Photon Factory Project,” KEK-77-15, November (1977).

[3] E. Heabel, “Power Couplers: Sources and Consequences of Mismatches,” Proceedings of the 8th Workshop on RF Superconductivity, 725-731(1997).

- [4] 赤井和憲(KEK): private communication.
- [5] S.Isagawa, et al., "Development of high power CW Klystron for TRISTAN", 1987 Particle Accelerator Conference, Washington D.C., U.S.A., March 16-19, 1987.
- [6] 日本特殊陶業：アルミナセラミックカタログ.
- [7] 古屋貴章(KEK): private communication.
- [8] G.A.Loew, "Charging and Discharging Superconducting Cavities," SLAC-TN-68-25, November 1968.
- [9] 仙入克也(三菱重工): private communication.
- [10] "Handbook on Materials for Superconducting Machinery," Material and Ceramics Information Center, MCIC-HB-04, Jun.1977.
- [11] S. Mitsunobu, et al., "High Power Test of the Input Coupler for KEKB SC Cavity," Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 735-739(1995).
- [12] Y.Kijima, et al., "The Conditioning of the Input Coupler for KEKB Superconducting Cavity," Proceedings of the 10th Workshop on RF Superconductivity, (2001).

第 3 章

- [1] W.J.Gallagher, "The Multipactor Effect", IEEE Trans. Nuc. Sci. NS-26, No. 3, 4280-4282, (1979)..
- [2] E. Somersalo, "Electron Multipacting in RF Structures", DESY Print July 1994, TESLA 94-14.
- [3] E. Somersalo, et al., "Computational Methods for Analyzing Electron Multipacting in RF Structures," Particle Accelerators, Vol.59 pp.107-141.
- [4] X.Hanus, A. Mosnier, "Coaxial TW Window for Power Coupler and Multipactor considerations," Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 701-705(1995).
- [5] A.Miura and H.Matsumoto, "Development of an S-Band High Power Pillbox-Type RF Window," 15th Int. Conf. on High Energy Acc., Hamburg, 1992, 942.
- [6] H.Matsumoto, et al., "Development of A High Power RF-Window at S-Band," Proc. of the Joint US-CERN-Japan Internal School.
- [7] S.Yamaguchi, et.al., "Trajectory Simulation of Multipactoring Electrons in an S-Band Pillbox RF Window," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.39, No.2, April 1992.
- [8] R.L.Geng, et al., "Exploring Multipacting Characteristics of a Rectangular Wave guide," Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference.
- [9] G.Devanz, et al., "A 2D Multipactor Simulation Code for RF Components and

Accelerating Cavities”, Proc. of EPAC 2000, Vienna Austria .

- [10] R. Boni et al., “Design and operation of a Multipaction-free 51.4MHz RF Accelerating Cavity,” Nucl. Instr. And Meth. in Pysi. Reseach, A747, 49-55 (1989).
- [11] 築島千尋他, “電子シンクロトロン用加速空洞でのマルチパクタリングの解析,” 日本シミュレーション学会, 第13回計算電気・電子工学シンポジウム, 235-239 (1992).
- [12] F.Naito, et al., “The Input Coupler for the KEKB ARES Cavity,” Proc. First Asian Particle Accelerator Conference, APAC98, KEK preprint 98-44 (1998).
- [13] F.Naito, et al., “Design Features of the Input Coupler for the DTL,” Proc. of the 1990 Linear Accelerator Conference, KEK Preprint 90-99,(1990).
- [14] F.Naito, et al., “Input Coupler for the KEKB Normal Conducting Cavity,” Proc. of the 1995 Particle Accelerator Conference and International Conference on High Energy Accelerators, Dallas, KEK Preprint 95-61,(1995).
- [15] J.Tuckmantel, et al., “Reduction of Multipacting with an Eccentric Coaxial Coupler,” CERN LEP2 Note 94-25.
- [16] J.Tuckmantel, et al., “Multipacting Calculations for a Power DC-biased 75 Ω Coupler,” CERN LEP2 Note 94-26.

第4章

- [1] M.Grundner and J. Halbritter, “On Surface Coating and Secondary Yeild of Nb3Sn and Nb,” J. Appl. Phys. 51(10), October 1980.
- [2] J. Halbritter, “On Contamination on Electrode Surface and Electric Field Limitations,” IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-20, No.4, August 1985.
- [3] K.W. Dudley, “Secondary Electron Emission of Power Tube Matrials” .
- [4] H.Bruining, “Physics and Applocations of Secondary Electron Emission,” Pergamon Press LMD.
- [5] 吉田善一 著「マイクロ加工の物理と応用」 裳華房.
- [6] 二瓶好正 編「固体の表面を測る」 日本分光学会 学会出版センター.
- [7] M.P. Seah, et al., “Quantitative Electron Spectroscopy of Surfaces,” Surface and Interface Analysis, Vol. 1, No. 1,2-11,1979.
- [8] I.M. Bronshteyn, et al., “Inelastic Electron Scattering and the Secondary Electron Emission of Insulators,” Radio Engineering and Electric Physics, Vol.15, No.4, 677-682,1970.
- [9] R.Noer, et al., “Secondary Electron Yield of Nb RF Cavity Surfaces,” Proceedings of the

10th Workshop on RF Superconductivity, (2001).

[10] 道園真一郎他, “アルミナの表面帯電や二次電子放出係数に及ぼすアニールの効果,” 電気論 A, 119 巻 5 号,(1999).

[11] D.Proch, “Measurement of Multipacting currents of Metal Surface in RF Fields,” 1996 IEEE PAC.

[12] 佐藤隆幸他, “アルミナ材料の二次電子放出とカソードルミネセンスに及ぼすアニールと X 線照射の影響,” J. Vac. Soc. Jpn. (真空),Vol.42,No.9,(1999).

[13] S.Michizono, et al., “TiN Film Coatings on Alumina Radio Frequency Windows,” J.Vac.Sci.Tech. A10(4),Jul/Aug 1992, 1180.

[14] 道園真一郎他, “大電力用高周波窓でのマルチパクタ現象,” 第 34 回真空に関する連合講演会プロシーディングス,真空,第 37 巻,第 3 号(1994).

[15] S.Michizono, “Annealing Effect on Breakdown Threshold of Radio-frequency Windows,” J. Vac. Soc. Jpn. (真空),Vol.40,No.5,(1997).

[16] S. Isagawa, et al., “Coating Techniques and Improvement of High Power CW Klystrons for TRISTAN,” Proc. 4th European Particle Accelerator Conference (EPAC 94), 1912-1914(1994).

[17] K.Asano, “Ozonized Ultra pure Water treatment of Nb Surface for Super conducting RF cavities,” 9th Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Accelerators and Storage Rings, KEK preprint 93-216 (1994).

[18] K.Asano, “超伝導空洞の電解放出に対する表面炭素汚染の除去効果,” 電気学会放電研究会, KEK preprint 97-126(1997).

[19] N.Hilleret, et al., “The Secondary Electron Yield of Technical Materials and its Variation with Surface treatments,” Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria (2000).

第 5 章

[1] Y.Saito, et al., “Breakdown of Alumina RF Windows”, IEEE Trans. on Electrical Insulation, 24(6),1029-1032(1989).

[2] T.Power, et al., “Photoemission Phenomena on CEBAF RF Windows at Cryogenic Temperature”, Proceedings of the 1993 PAC conference, May 1993.

[3] L.Phillips, et al., “Some Operational Characteristics of CEBAF RF Window at 2K”, Proceedings of the 1993 PAC conference, May 1993.

[4] L.Phillips, et al., “Arcing Phenomena on CEBAF RF Window at Cryogenic Temperature”, Proceedings of the 1993 PAC conference, May 1993.

[5] Y.Saito, et al., "Surface Flashover on Alumina RF Windows for High-Power Pillbox-Type RF Window," 15th Int. Conf on High Energy Acc.,Hamburg,1992,942.

第 6 章

[1] KEKB home- page.

[2] T.Furuya et al., "KEKB 超伝導空洞の運転状況", 第 3 回超伝導リニアック研究会.

[3] T.Tajima, "Development of Higher-Order-Mode Absorber for KEKB Superconducting Cavities," KEK Report 2000-10,September 2000.

[4] E. Heabel, et al., "Gas condensation on Cold Surfaces, a source of multipacting discharges in the LEP2 Power Coupler," Proceedings of the 7th Workshop on RF Superconductivity, 707-711(1995).

Appendix 1 電力収支とロビンソン不安定性

A 1. 1 電力とその最適化

空洞に誘起される電圧の関係を位相ベクトル図を用いて表す。運転周波数を ω とすると位相ベクトル図内ですべてのベクトルは $e^{i\omega t}$ の周期で変化している。図 A1.1 に電圧ベクトルの関係を示す。図ではビーム電流 I の位相を実軸とし 180 度にとる。外部の高周波源からの入力に対して空洞内の共振がずれている時の位相ずれを tuning 角と呼び、その角度 ψ は、

$$\tan \psi = -2 \cdot Q_L \cdot (\omega - \omega_0) / \omega_0 \quad (\text{A1.1})$$

となる。ここで ω は運転周波数、 ω_0 は空洞の共振周波数を示す。

外部から空洞への入力は高周波源から誘起される電圧 V_g とビーム電流により誘起される電圧 V_b であり、各々次の式で表される。

$$V_g = V_{gr} \cdot \cos \psi \quad (\text{A1.2})$$

$$V_b = V_{br} \cdot \cos \psi \quad (\text{A1.3})$$

$$V_{gr} = \sqrt{R \cdot P_g} \cdot \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \quad (\text{A1.4})$$

$$V_{br} = \frac{IR}{1+\beta} \quad (\text{A1.5})$$

ここで、 V_{gr} 、 V_{br} は空洞共振状態での V_g 、 V_b を、 R はシャント抵抗、 β はカプラの結合係数、 P_g は高周波源からの入力電力を示す。空洞の電圧 V_c はこのベクトル和となり、

$$V_c = V_g + V_b \quad (\text{A1.6})$$

ビーム加速の電圧 V_a は、加速位相 ϕ_s とすると、

$$V_a = V_c \cdot \cos \phi_s = V_{gr} \cdot \cos \psi \cdot \cos(\theta + \psi) - V_{br} \cdot \cos^2 \psi \quad (\text{A1.7})$$

$$V_c \cdot \sin \phi_s = V_{gr} \cdot \cos \psi \cdot \sin(\theta + \psi) - V_{br} \cdot \cos \psi \sin \psi \quad (\text{A1.8})$$

式(A1.4)より、必要な入力電力は、

$$\begin{aligned} P_g &= \frac{(1+\beta)^2}{4 \cdot \beta} \cdot \frac{V_{gr}^2}{R} \\ &= \frac{(1+\beta)^2}{4 \cdot \beta} \cdot \frac{V_c^2}{R \cdot \cos^2 \psi} \left[\left(\cos \phi_s + \frac{IR}{V_c(1+\beta)} \cos^2 \psi \right)^2 + \left(\sin \phi_s + \frac{IR}{V_c(1+\beta)} \cos \psi \sin \psi \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (\text{A1.9})$$

となる。空洞壁でのエネルギー損失 P_c およびビームへ与える電力 P_b はそれぞれ、

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \quad (\text{A1.10})$$

$$P_b = I \cdot V_c \cos \phi_s \quad (\text{A1.11})$$

であるので、保存則より反射電力 P_r は、

$$P_r = P_g - P_b - P_c \quad (\text{A1.12})$$

となる。

入力電力は、空洞内の電圧と高周波源からの入力電流位相の無効成分が打ち消されるときに最小になり、それは V_c と V_{br} の位相が同位相となる条件である。これは、

$$\frac{\partial P_g}{\partial \psi} = 0 \quad (\text{A1.13})$$

より求めることができる。そのときの tuning 角 ψ は、

$$\tan \psi = \frac{V_{br}}{V_c} \sin \phi_s = -\frac{IR}{V_c(1+\beta)} \sin \phi_s \quad (\text{A1.14})$$

となり、入力電力は、

$$P_g = \frac{(1+\beta)^2}{4\beta} \frac{1}{R} (V_c + V_{br} \cos \phi_s)^2 \quad (\text{A1.15})$$

となる。ビーム運転時には自動位相制御 (APC) により、高周波源からの入力位相と空洞内位相との位相差を 0 にすることで実現できる。

また、(A1.15)式を β に関して偏微分をとると運転条件に対して電力を最小にするカプラの結合係数を求めることができる。結合定数が、

$$\beta_0 = 1 + \frac{IR \cos \phi_s}{V_c} \quad (\text{A1.16})$$

のとき、電流 I で入力電力は最小となり、そのときの電力は、

$$P_g = \frac{V_c^2}{R} \beta_0 \quad (\text{A1.17})$$

となる。そのとき、反射電力は 0 になり、そのときの tuning 角は、

$$\tan \psi_0 = -\frac{\beta_0 - 1}{\beta_0 + 1} \tan \phi_s \quad (\text{A1.18})$$

となる。

A 1. 2 ロビンソン不安定性

Transition 後のビームの安定位相は、ビームの位相で加速電圧の傾きがマイナスであることが要求される。ビームの位相は高周波源からの誘起電圧の位相 θ により決まることからその条件は、

$$\frac{dV_a}{d\theta} < 0 \quad (\text{A1.19})$$

(A1.7)式より、

$$\sin(\theta + \psi) > 0 \quad \text{すなわち} \quad 0 < \theta + \psi < \pi \quad (\text{A1.20})$$

を満たすことが要求される。これは V_g が安定位相にある条件である。すなわち、加速電圧はビーム誘起電圧と高周波源からの電圧の和で決まるが、ビーム誘起電圧の位相はビームと共に変化することから、高周波源からの電圧位相が安定位相にあることが要求される。

(A1.20)式の条件は、

$$V_g \sin(\theta + \psi) = V_c \sin \phi_s + V_b \sin \psi > 0 \quad (\text{A1.21})$$

と表すことができる。

このロビンソン不安定により加速電流値は制限されるが、tuning 角に offset α を設定することで、不安定条件を避けることができる。

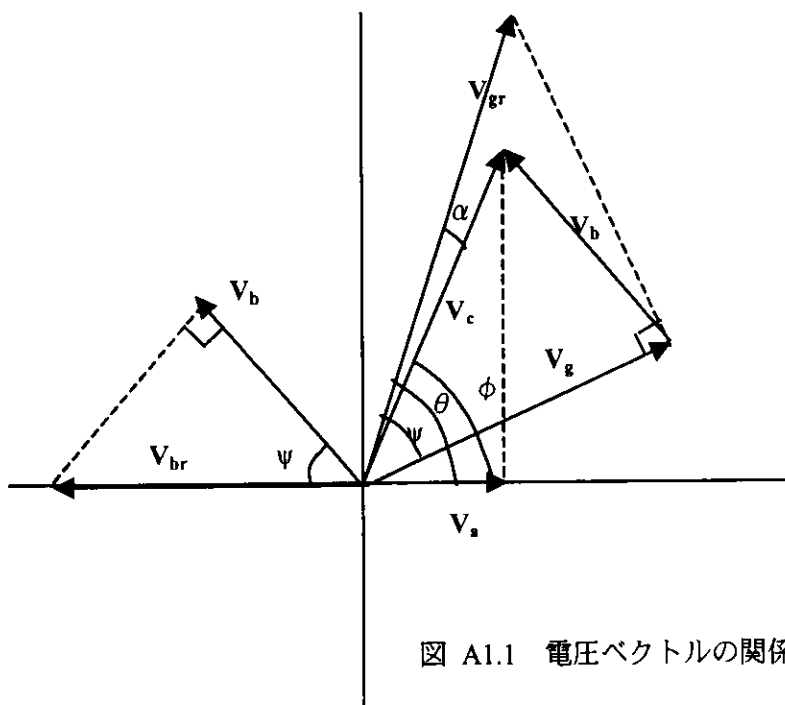


図 A1.1 電圧ベクトルの関係

A 1. 3 KEKB の運転パラメータでの計算

KEKB の運転条件として表 2.2.1 を基本とし、tuning 角の offset、カプラの外部 Q 値 Q_{ext} 、加速電圧を変えたときの入力、反射電力とロビンソン安定条件の変化を調べた。結果を図 A1.2 ~ A1.4 に示す。

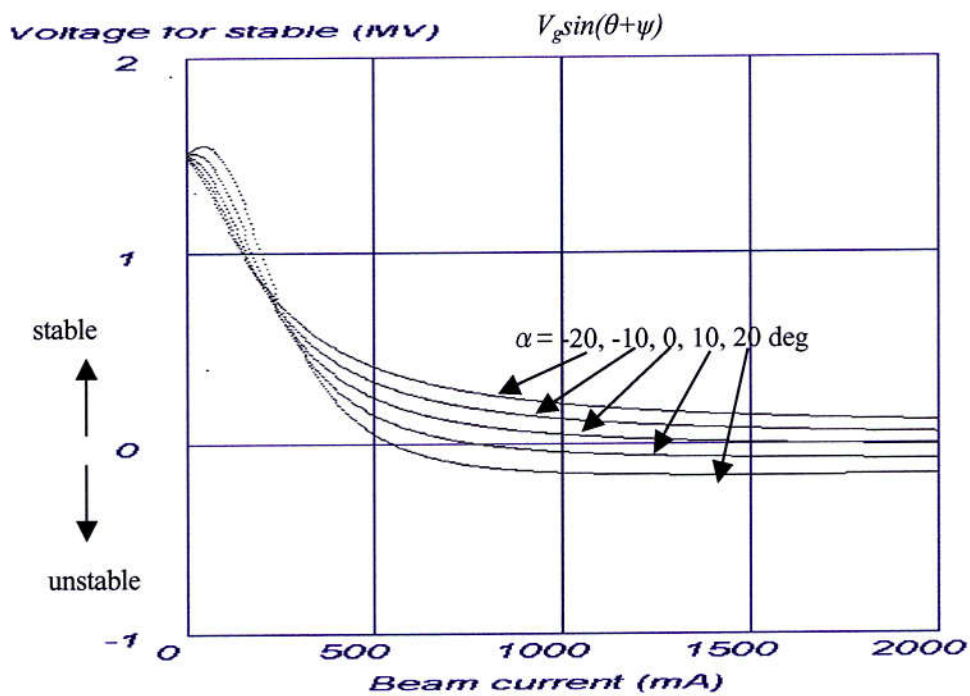
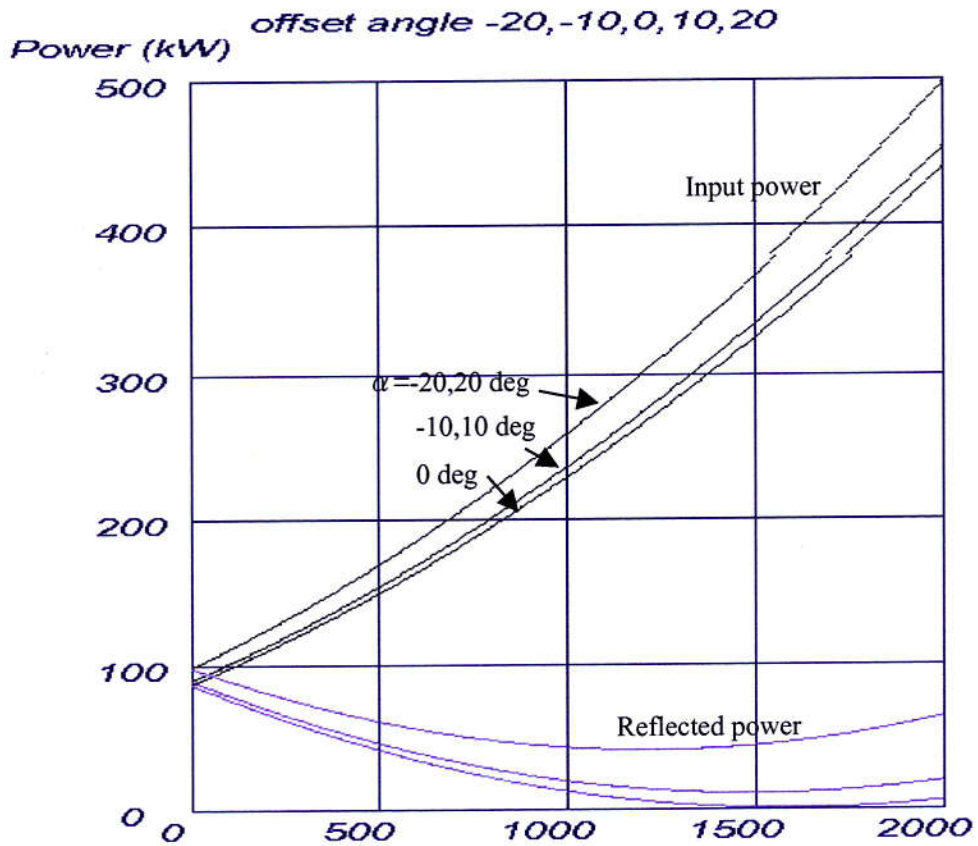


図 A1.2 空洞 tuning 角の offset α に対するビーム電流と電力の関係
及び ロビンソンの安定曲線

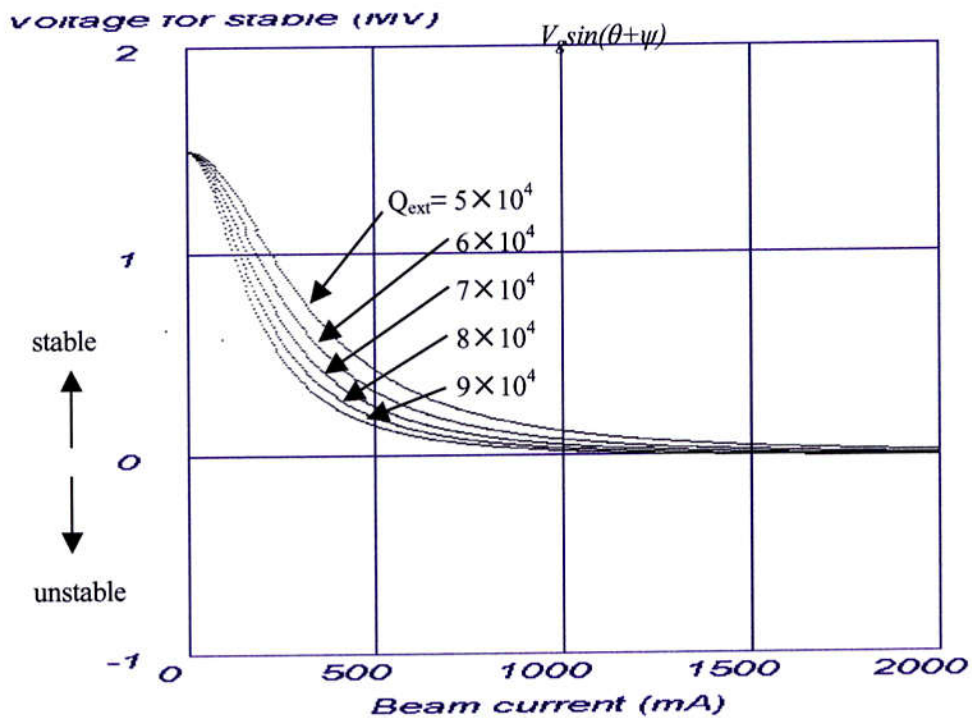
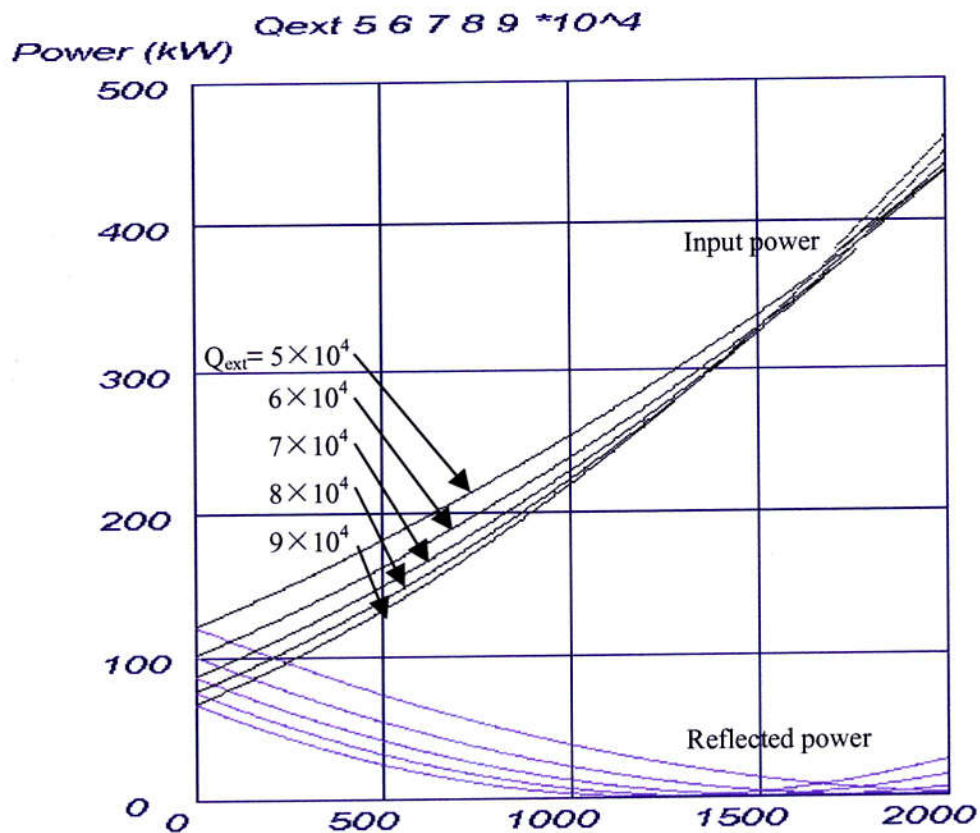


図 A1.3 カプラの外部 Q 値に対するビーム電流と電力の関係
及び ロビンソンの安定曲線

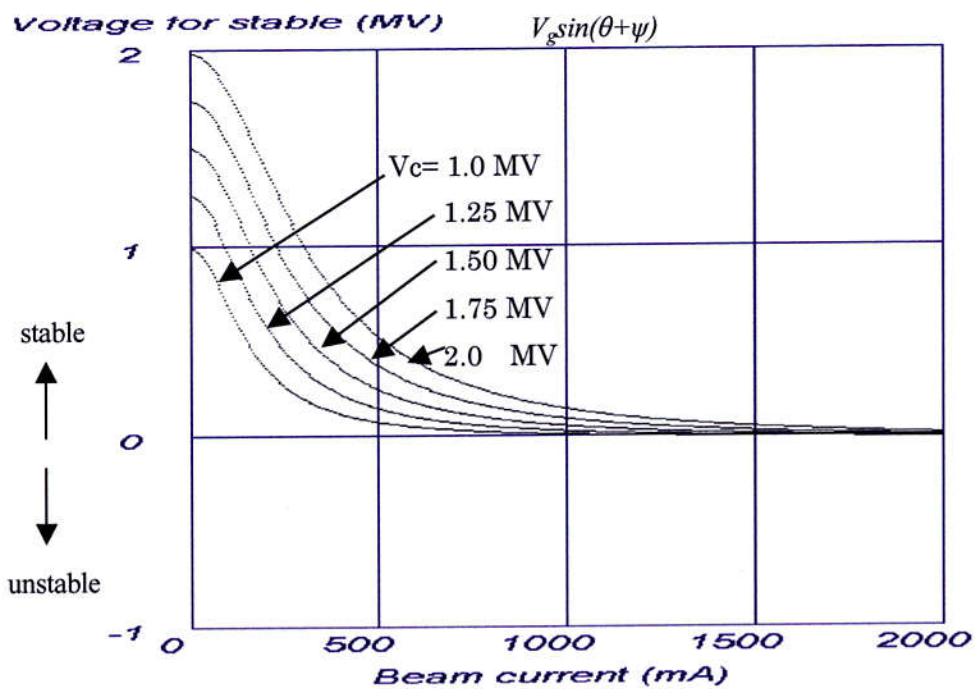
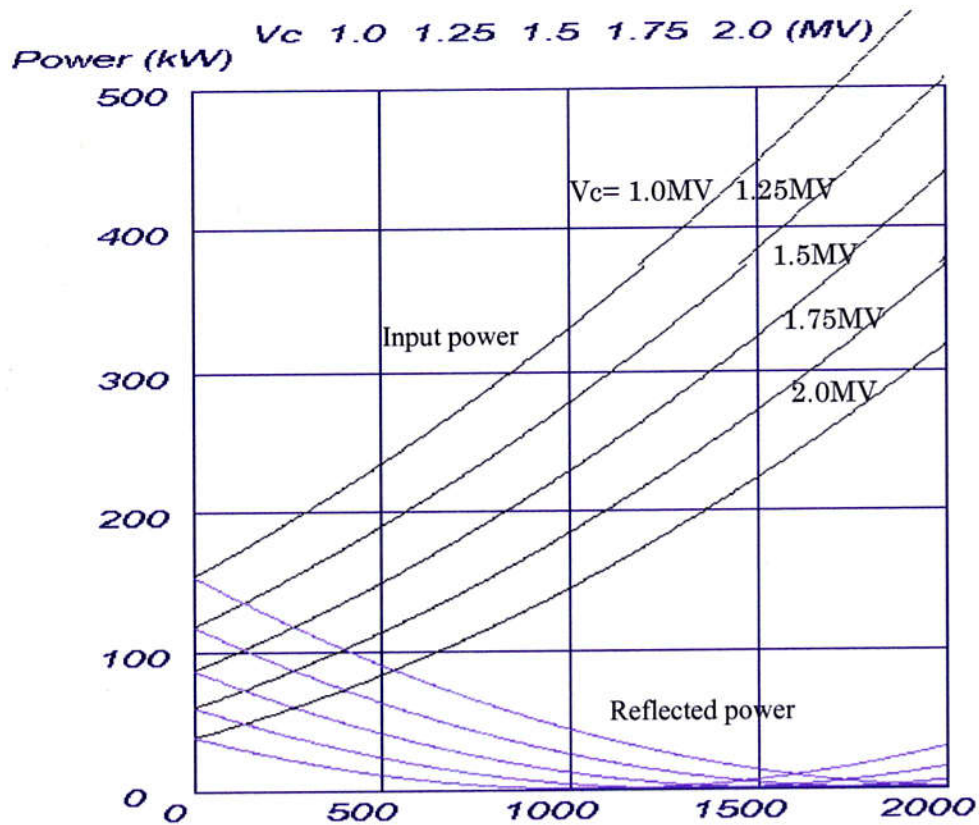


図 A1.4 加速電圧に対するビーム電流と電力の関係
及び ロビンソンの安定曲線

Appendix 2 アークセンサーの応答

アークセンサーの応答速度と感度を確認した。

A 2. 1 測定装置と方法

(1) 測定項目

アークセンサーのパルス応答を測定する。

- ① センサー内のテストパルスの入力電圧に対するセンサー出力電圧の応答速度
- ② センサー出力電圧のインターロック作動レベルの確認

(2) 測定装置

アークセンサーはセンサー部と本体（増幅回路他）から構成されている。センサー部はセンサー用フォトダイオードのほかに試験用の発光ダイオードが内蔵されており、センサーの試験に使用することができる。本体にはインターロック出力のほかにセンサー出力電圧モニタ用の端子のあるものを使用した。測定装置の構成を図 A2.1 に示す。

ここでは試験用発光ダイオードに直接パルス電圧を入力し、センサー出力電圧モニタの応答とインターロック作動レベルを調べた。

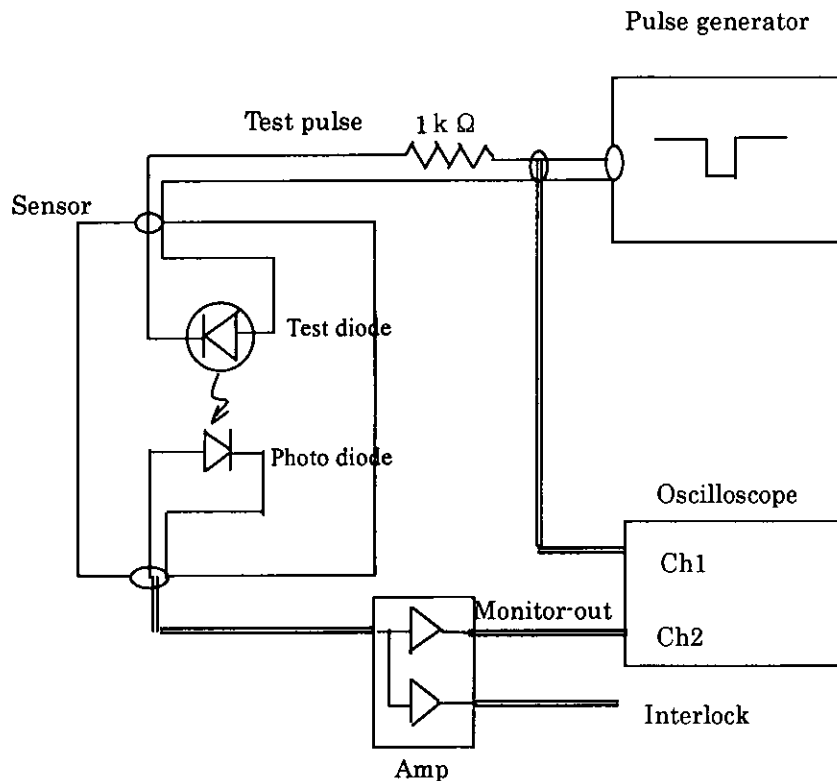


図 A2.1 アークセンサーと測定装置の構成

A 2. 2 測定結果

(1) 応答速度

パルス信号 5 V を試験用の発光ダイオードに入力したときのセンサー出力電圧の応答をモニタ用端子より測定した。測定結果を図 A2.2 に示す。また入力信号のレベルを変えたときの応答を図 A2.3 に示す。

測定結果より、応答速度は入力信号のレベルによらず、

レベル	立上り時間
peak 値の 50 %	0.6 msec
peak 値の 70 %	1 msec

である。ここで、

$$P = P_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (\text{A2.1})$$

P_0 : peak 電圧

t : 時間

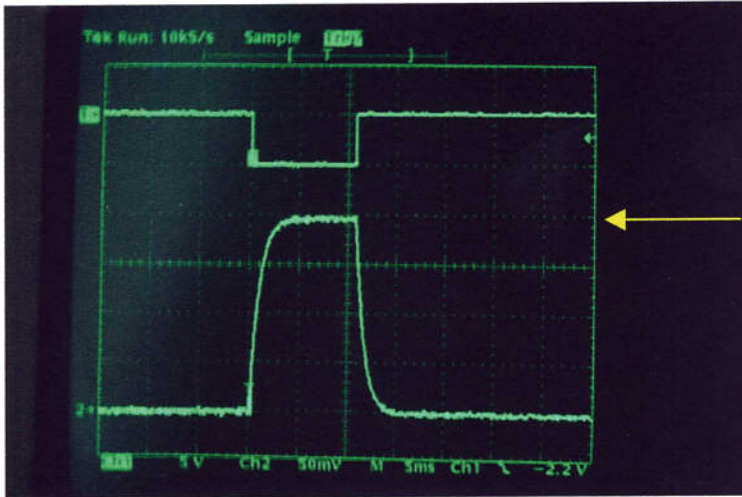
T : 応答時間

より換算すると応答時間 T は 0.85 msec となった。時間遅れは応答時間と比較して無視できる。

(2) インターロック作動レベル

発光ダイオードへの入力信号とアークセンサー出力電圧のモニタ値との関係及びインターロック作動レベルを図 A2.4 に示す。インターロック作動レベルの測定値は 32 mV であった。現在、インターロック作動レベルの設定値は出力 30 mV にしており、10% の範囲で正しい値となった。

パルス応答



Test pulse voltage

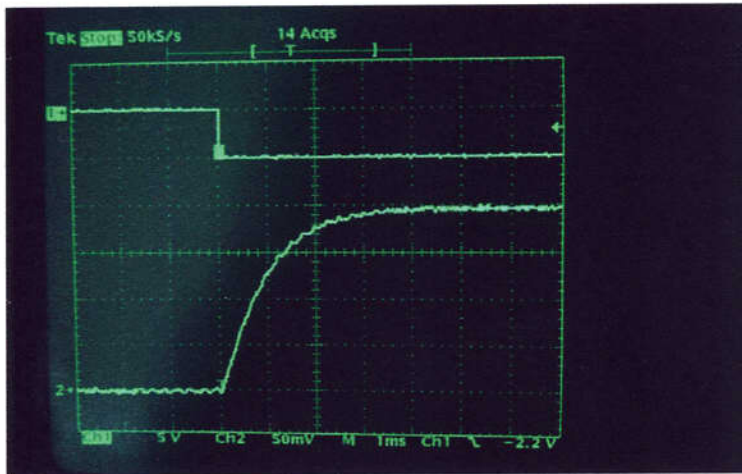
$$V_{\text{test}} = 5 \text{ V}$$

Monitor-out voltage

$$V_{\text{out}} = 200 \text{ mV}$$

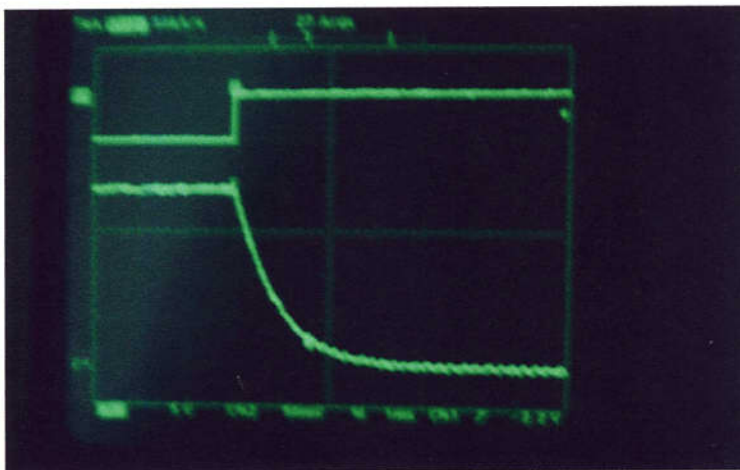
5ms/div

立上り時間軸拡大図



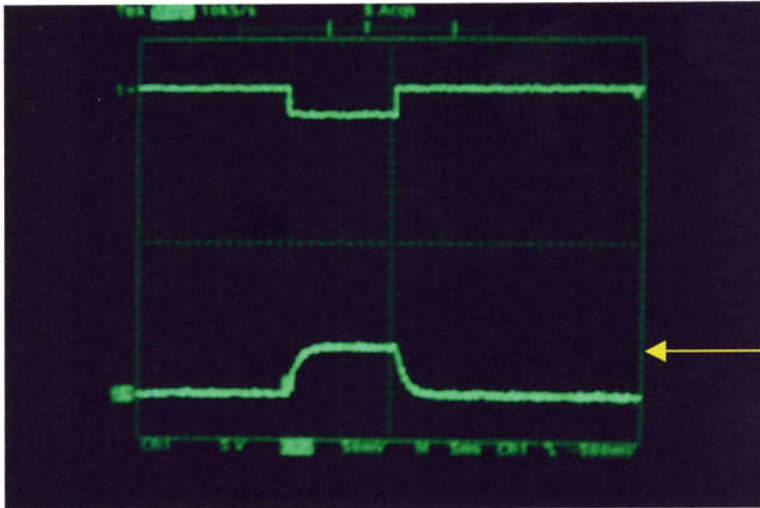
1ms/div

立下り時間軸拡大図



1ms/div

図 A2.2 アークセンサーのパルス応答 試験用パルス信号 $V_{\text{test}} = 5 \text{ V}$

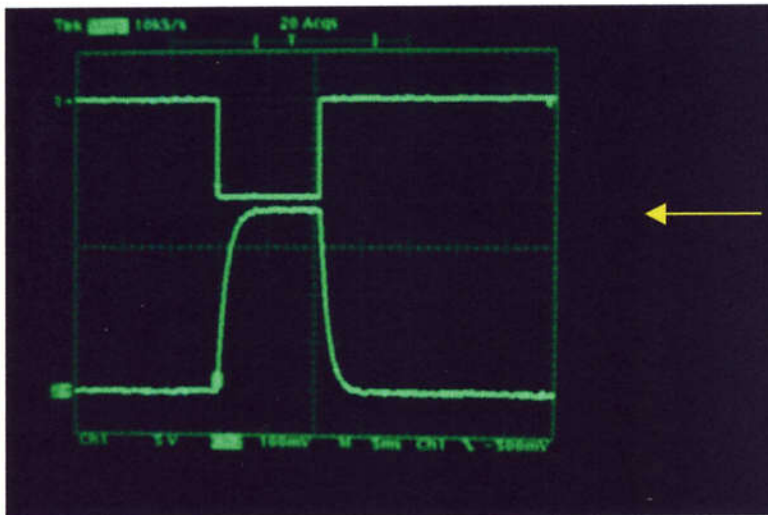


Test pulse voltage

$$V_{\text{test}} = 2.5 \text{ V}$$

Monitor-out voltage

$$V_{\text{out}} = 48 \text{ mV}$$



Test pulse voltage

$$V_{\text{test}} = 10 \text{ V}$$

Monitor-out voltage

$$V_{\text{out}} = 380 \text{ mV}$$

図 A2.3 アークセンサーのパルス応答 試験用パルス信号 $V_{\text{test}} = 2.5, 10 \text{ V}$

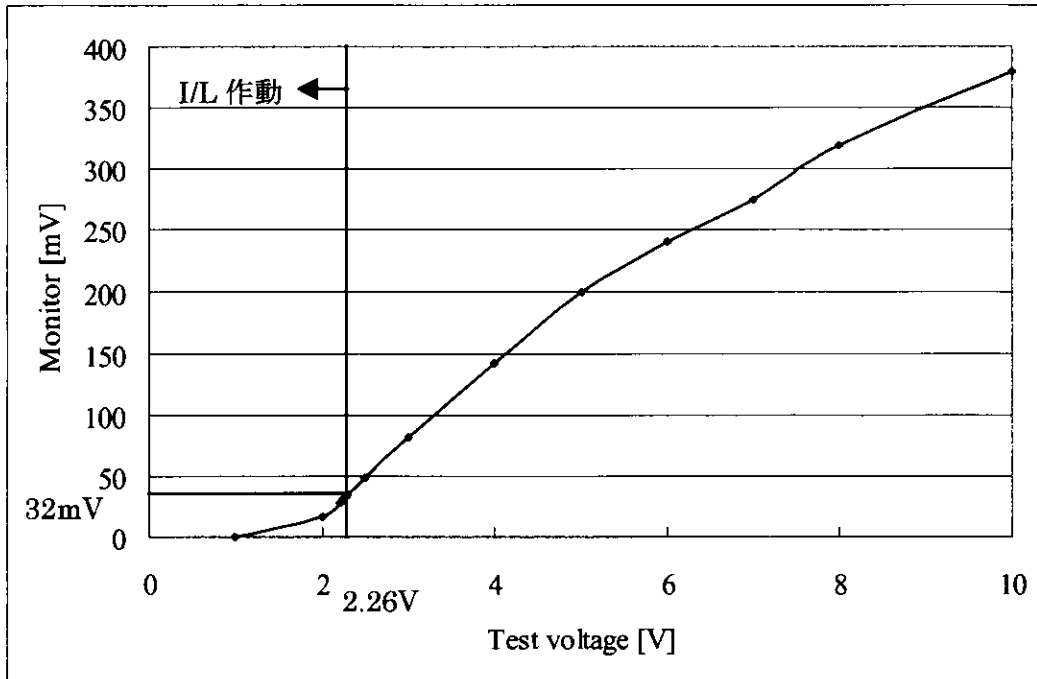


図 A2.4 アークセンサー出力電圧とインターロック作動レベル

Appendix 3 ピロリン酸銅鍍金面の RRR の測定

カプラには高周波が入力され、表皮効果で表面のみに電流が流れるので、発熱低減のため、外導体表面にはピロリン酸銅鍍金が施されている。このピロリン酸銅鍍金材料について、抵抗、熱伝導等の材料特性は明らかでなく、その特性を調べるために、RRR (残留比抵抗) を測定した。

A 3.1 測定装置と方法

(1) 測定装置

装置はサンプルを液体ヘリウム温度まで冷却するためのクライオスタット、ヘリウム面をモニタする液面計、測定後にヘリウムを蒸発させるためのヒータ(100 V, 100 W)からなる。また、計測のために、サンプルに電流を流すための DC 電源と電流計、レコーダを準備した。図 A3.1 に測定装置構成を示す。

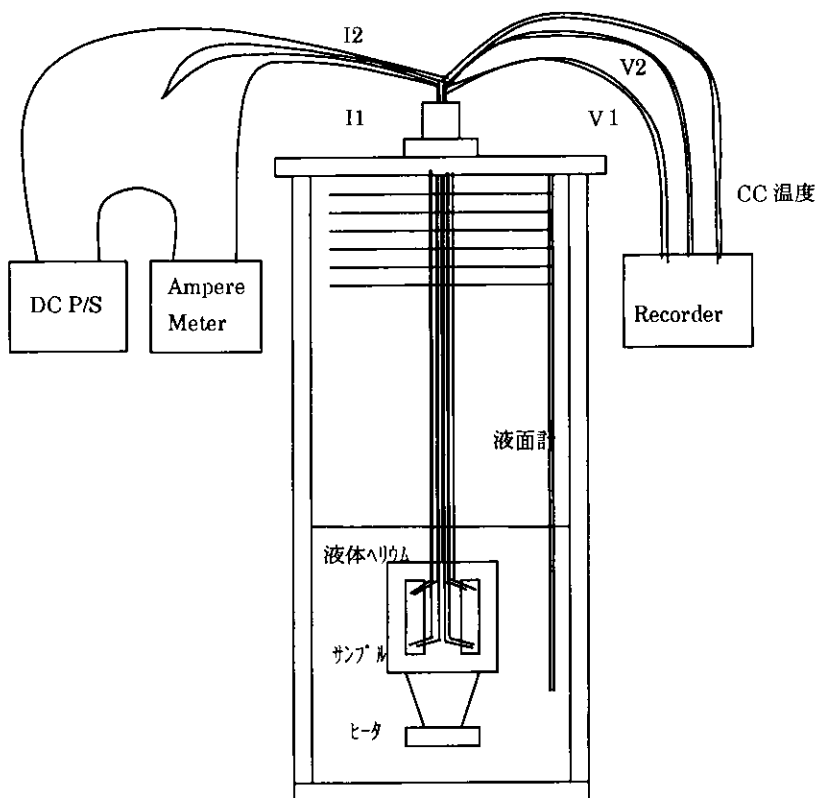


図 A3.1 測定装置の構成

(2) 測定方法

4 K と室温でサンプルの抵抗を測定した。4 端子法で、電圧と電流を測定しながら、液体ヘリウムでサンプルを冷却する。RRR は冷却し超伝導状態になる直前の抵抗 R_{sc} と室温の抵抗 R_{rt} の比で求められる。

$$RRR = \frac{R_{rt}}{R_{sc}} \quad (A3.1)$$

測定では 4 K 付近の低温では抵抗率はほぼ一定になってくるので 4 K の測定値を R_{sc} とした。

DC 電源より一定電流をサンプルに直列に流し、そのときの各サンプルの電圧を並列で測定し、ペンレコーダで記録する。またサンプルに CC (銅-コンスタントン) の熱電対を貼り付け温度をモニタした。

サンプルの測定端子の接続方法は図 A3.2 に示すとおりである。

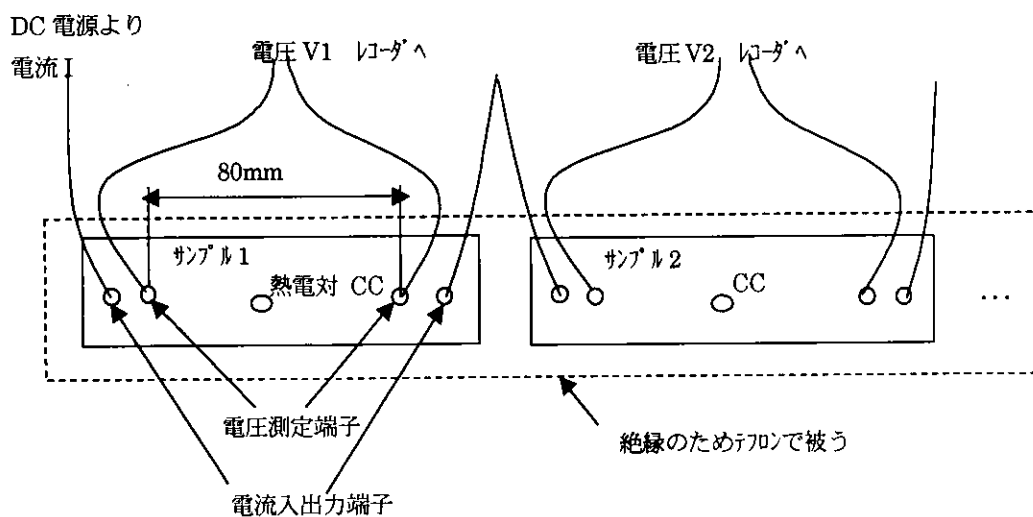


図 A3.2 サンプルの設定

A 3. 2 サンプル

サンプル材料はピロリン酸銅鍍金の銅薄膜 (鍍金面を剥がしたサンプル)、SUS 表面にピロリン酸銅鍍金を $30\mu\text{m}$ 施したサンプルと SUS のサンプルを準備した。準備したサンプルの形状を表 A3.1 に示す。

SUS のピロリン酸銅鍍金と SUS の測定結果より銅鍍金部分の体積抵抗率を換算した。また、銅薄膜の測定値と比較した。

表 A3.1 測定したサンプルの形状

サンプル	サイズ			電圧測定 端子間距離
	幅	厚さ	長さ(参考)	
銅薄膜(ピロリン酸銅鍍金)	20 mm	30 μm	90 mm	80 mm
SUS のピロリン酸銅鍍金	20 mm	2.14 mm	100 mm	80 mm
SUS	20 mm	2.11 mm	100 mm	80 mm

A 3. 3 測定結果

電流 I を 1 A に設定し発生する電圧 V を測定しサンプルのサイズより体積抵抗率 ρ を求めた。

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{s}{l} \quad (\text{A3.2})$$

ここで s はサンプル断面積, l は電圧測定端子間距離とした。

銅薄膜, SUS のピロリン酸銅鍍金及び SUS の体積抵抗率の温度変化を図 A3.3 ~ 図 A3.5 に示す。また, SUS のピロリン酸銅鍍金と SUS の測定結果より, 鍍金銅薄膜に換算した値を図 A3.6 に示す。

以上より, 銅鍍金の RRR は

銅薄膜 (ピロリン酸銅鍍金)の測定値	RRR = 5.5
SUS のピロリン酸銅鍍金と SUS からの換算値	RRR = 5.6

となりほぼ等しい値となった。

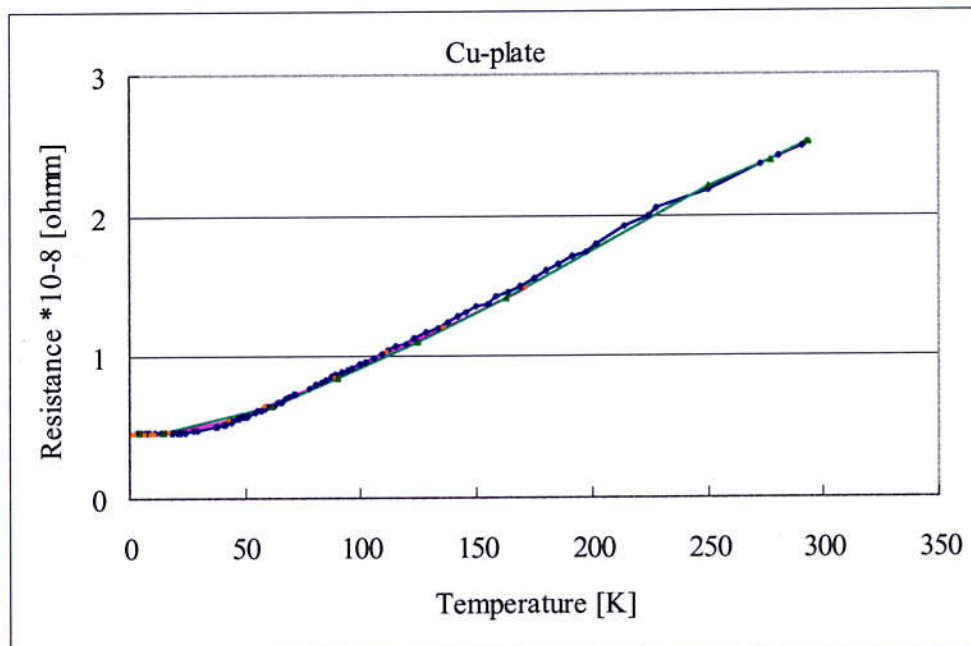


図 A3.3 銅薄膜(ピロリン酸銅鍍金)の体積抵抗率の温度変化

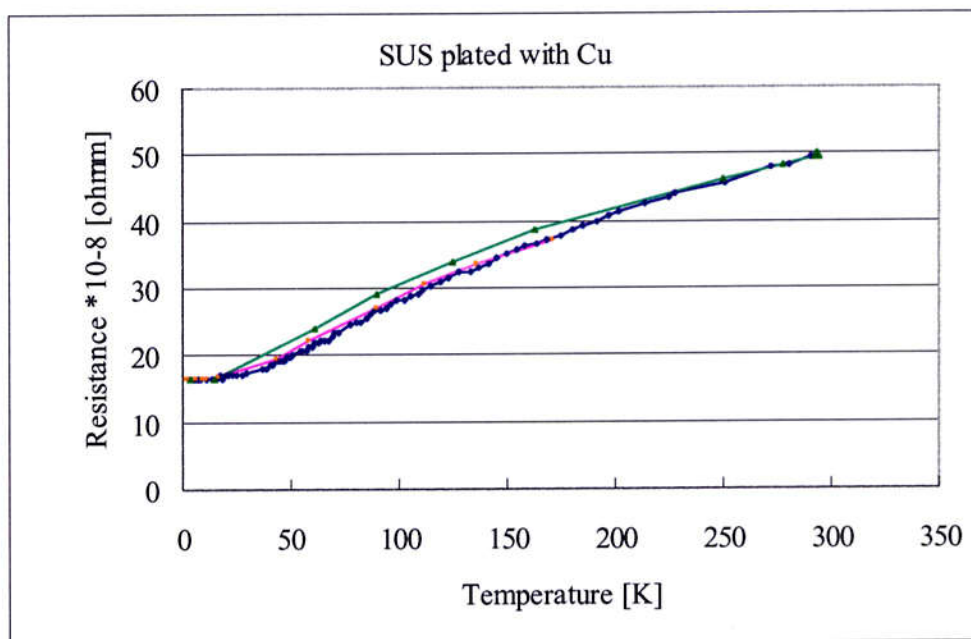


図 A3.4 SUS のピロリン酸銅鍍金の体積抵抗率の温度変化

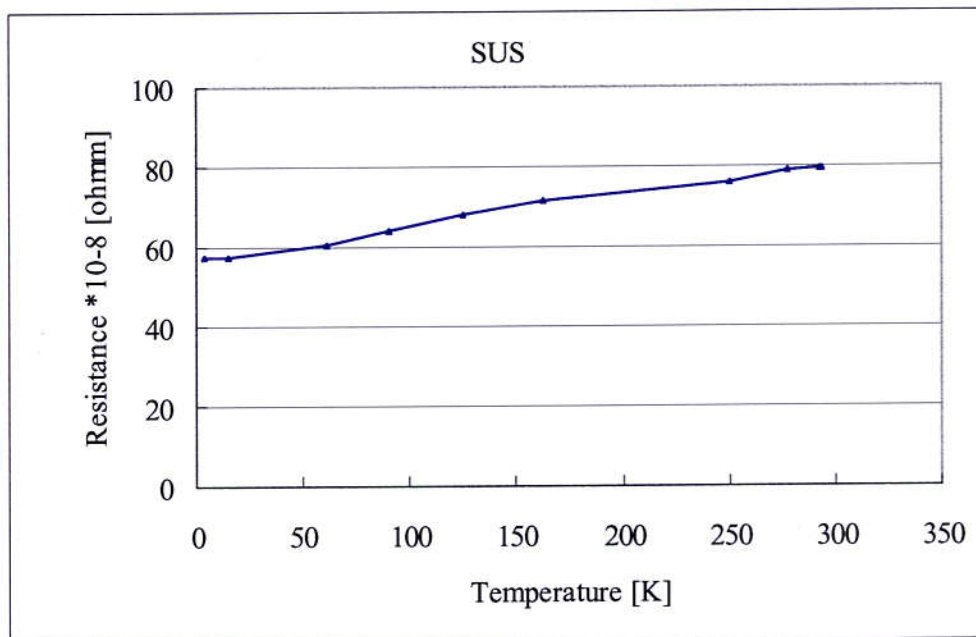


図 A3.5 SUS の体積抵抗率の温度変化

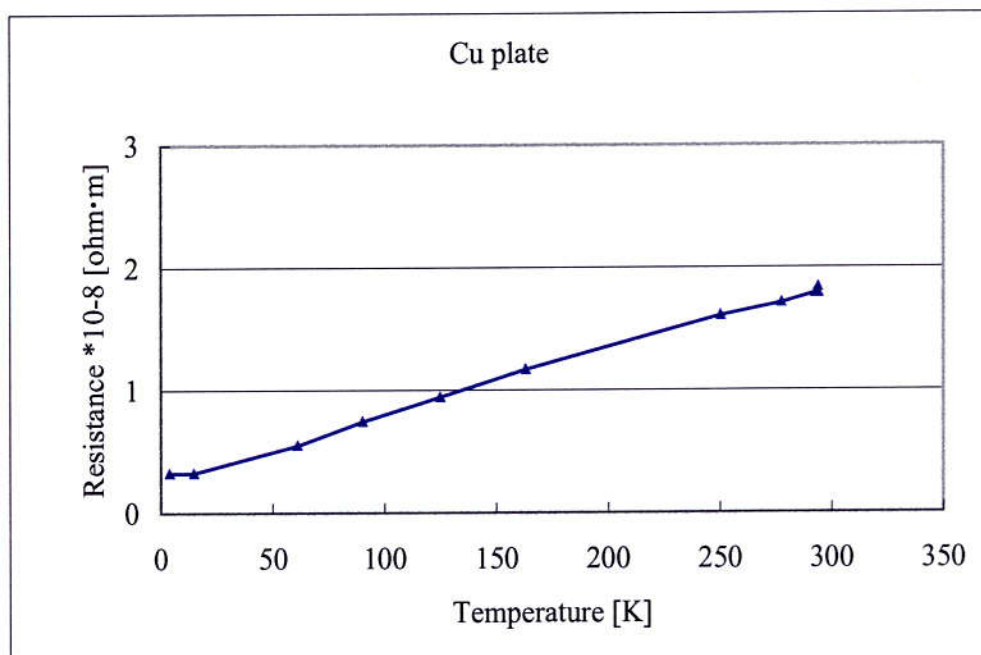


図 A3.6 SUS のピロリン酸銅鍍金と SUS より換算した銅薄膜の体積抵抗率の温度変化