PNC TN8410 91−048

公開資料

大強度CW電子線形加速器の要素開発

1991年2月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については，下記にお問い合わせ下さい。
〒319－11　茨城県那珂郡東海村大字村松４－33
動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所
技術開発推進部・技術管理室
Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to : Technology Management Section Tokai Works Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation Tokai 4 - 33, Muramatsu, Tokai - mura, Naka - gun, Ibaraki - ken 319 - 11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団（Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation）1991

公　開　資　料
PNC TN8410 91-048
1 9 9 1 年 2 月

大強度ＣＷ電子線形加速器の要素開発

遠山伸一　尾下博教　平野耕一郎
小無健司　笹尾信之　佐藤　勇

要　旨

高レベル廃棄物中の Fission Productに関する消滅処理研究は、東海事業所技術開発部フロンティアグループにて昭和６３年度に開始した。平成元年度には同グループを核燃料技術開発部先端技術開発室に改組し、消滅処理用加速器の要素開発研究を本格的に開始した。

本年度の上記テーマの研究内容は、大電力 Continuous Wave（以下ＣＷと略す）加速管、大電力ＣＷクライストロンの設計及び試作、大電力ＣＷクライストロン用電源の設計等である。これらは平成元年度から引き続き行っており、現在のところＣＷ運転時の電気的、熱的設計を中心に扱い、データとしては加速管、クライストロン等の試作要素の特性が得られている。また、これと並行して加速器建屋の設計を行った。

本資料は、上記テーマに関して平成２年度の活動成果を中心にまとめたものである。内容は、消滅処理要素技術開発用の大強度ＣＷ電子線形加速器の研究開発の計画及び現状から成っている。第１章では、消滅処理に使用する核変換装置として加速器に要求される性能とその開発計画について述べ、以下の章では、大強度ＣＷ電子線形加速器の要素技術開発に関する今年度の開発成果について述べる。

平成３年２月
核燃料技術開発部　先端技術開発室　核変換グループ（加速器担当）

<目　次>

ページ

第１章　研究計画

1.1　はじめに…… 1

1.2　大強度加速器の必要性…… 1

1.3　大強度加速器の開発課題…… 2

1.4　実験項目…… 4

1.5　スケジュール…… 6

1.6　協力体制及び実施場所…… 6

第２章　クライストロン

2.1　クライストロンに要求される性能…… 11

2.2　クライストロン各部の設計…… 13

2.3　高周波特性試験…… 22

2.4　ＣＷクライストロンの性能比較…… 22

2.5　本年度の成果と今後の課題…… 25

第３章　クライストロン電源

3.1　各部の設計…… 27

3.2　本年度の成果と今後の課題…… 43

第４章　加速管

4.1　進行波還流型加速管…… 45

4.1.1　基本仕様…… 45

4.1.2　加速管の冷却方法…… 50

4.1.3　還流部導波管…… 52

4.2　定在波型加速管…… 55

4.2.1　はじめに…… 55

4.2.2　基本設計…… 55

4.2.3　二つの冷却チャンネル（周辺冷却とウェブ冷却）…… 56

4.2.4　性能の評価…… 57

4.2.5　工学的設計…… 59

4.3　本年度の成果と今後の課題…… 65

第５章　インジェクション・システム

5.1　100kV電子銃…… 67

ページ

5.2 ビーム・チョッピングとビーム・バンチング…… 69
5.3 インジェクション・システムのまとめ…… 74
5.4 本年度の成果と今後の課題…… 76
第6章 加速器の運転
6.1 ビームの始動と制御…… 77
6.1.1 インジェクション・システムのパルス運転…… 77
6.1.2 高周波パワーシステム（クライストロン）のパルス運転…… 79
6.2 ビーム・トランスポート…… 79
6.2.1 ＡＥＣＬビームトランスポートシステムの特徴…… 79
6.2.2 ビーム・ブレイクアップ…… 80
6.3 本年度の成果と今後の課題…… 84

第１章　研究計画

1. 研究計画

1.1 はじめに

放射性廃棄物は、原子炉からの使用済み燃料から発生する。その中には、長寿命の放射性核種が含まれており長年に渡ってこれらの安全性を確保する必要がある。現在のところこれらの放射性廃棄物の処理処分方法としては、これらをガラス固化体として厳重に封じ込めて人間環境より隔離し、崩壊によりその放射能が減少してくるのを待つ方法の研究開発が進められている。これに将来代わる可能性のある処理処分方法として、核変換によって長寿命放射性核種の短寿命化または安定化する方法、いわゆる消滅処理が研究されている。

長寿命放射性廃棄物は、核種に関してTRU(超ウラン原素）とFP（核分裂生成物）に分類することができる。この内TRUについては、本来核分裂の可能性を持っている核種があり、燃料として核燃料サイクルの中に取り込むことが可能なものがある。最近の消滅処理研究は、このTRU の消滅処理に集中している。一方、FP核種の中で中性子の吸収断面積の小さい核種については、原子炉単独で消滅処理を行うことは難しく、何らかの新しい消滅処理手法を開発する必要がある。原子炉以外の核変換装置として加速器の利用が考えられている。ここでは、加速器をFPの消滅処理に利用しようとした場合必要な加速器開発研究について述べる。

1.2 大強度加速器の必要性

ここでは、1基の原子炉から発生する放射性核種を1台の消滅処理装置で処理する場合を考えてみる。発電炉の出力、稼働率、熱ー電気変換効率をそれぞれ、E_R(W), h, η_Rとすると、核分裂収率 Yの核種の発生速度 S(sec^{-1})は、

$$S = \frac{h}{\eta_R} \cdot \frac{Y \cdot E_R}{1.6019 \times 10^{-19}} \cdot \frac{1}{E_{fiss}} \qquad (1)$$

となる。ここで、E_{fiss}(MeV)は、一回の核分裂で放出されるエネルギーである。これを、消滅処理エネルギー E_{tr}(MeV)で消滅する場合には、消滅処理装置のビーム出力D(W)は

$$D = 1.6019 \times 10^{-19} \cdot E_{tr} \cdot S = \frac{h \cdot Y \cdot E_R \cdot E_{tr}}{\eta_R \cdot E_{fiss}} \qquad (2)$$

となる。例えば、h=0.75, η_R=0.33, Y=0.06, $E_R=10^9$We, E_{tr}=100MeV, E_{fiss}=200MeVとすると、D = 68MWとなる。即ち、消滅処理エネルギーとして、100MeVというエネルギーコストの良い値を用いても、ビームパワーとして68MWという大出力の加速器が必要である。これは、加速粒子エネルギーとして100MeVを選ぶと0.68A の電流値が必要となることを意味する。この例より、加速器を消滅処理に利用しようとする場合には、100MW ビーム出力を開発目標として設定する必要がある。

1.3 大強度加速器の開発課題

上述したように、消滅処理には既存の加速器のレベルを越えたエネルギー効率の高い大電流ビームの加速方式の開発が必要になる（図1.3.1参照)。そこで、初期の要素技術開発段階として比較的低コストで試験が行える電子線加速器を取り上げ加速管及びクライストロン等の開発を行う。尚、これらの加速器要素については、電子加速器と陽子加速器には共通する部分が多く、ここで得られた結果の多くは陽子加速器の開発にも有用なデータとなる。

要素開発にあたっては試験時の加速目標として、エネルギー、平均電流をそれぞれ10MeV、20mAとする。この要素開発用ＣＷ電子線形加速器の基本性能と仕様をそれぞれ表1.1.1及び表1.1.2に示す。

大電流電子加速器の開発課題の主なものとしては次のようなものが考えられる。

ビーム不安定現象対策

大電流の電子加速器としては100MeV程度のエネルギーであれば電子ライナックが最も適していると考えられる。しかし、電子ライナックで加速電流を増やしていくと、ある値を越えたところでビームが進行方向に対して垂直な方向に不安定になり、加速管中心軸からそれて加速管壁に当たってしまう現象がある。この現象をビームブローアップ(Beam Blow up 略してBBU)と呼ぶ。この現象は加速管内部にビーム自身によってそれを横方向にそらすようなモードの電磁波が発生するために起こるものであり、大電流の加速器を開発する場合の最も大きな問題点となる。

加速管の熱変形対策

duty factor を大きくして大電流を加速しようとすれば、加速管の内表面が電磁場との相互作用によって加熱されることになる。この加速管の加熱によって加速空胴の変形を生じ加速空胴内の周波数にずれが発生し、このため加速ビームの制御が困難になる。この熱の問題を解決するためには熱計算とモデル試験により加速管の冷却構造の改良、温度制御の強化等の対策を講じる必要がある。

加速管の効率改善

エネルギー効率を向上させるためにはマイクロ波からビームへの変換効率を上げる必要

がある。そのために種々の加速管の設計及びモデルテストを通して、８０％以上のビームローディングを目標とし加速管の効率改善を図る。また、実際に産業用の装置となるためにはコンパクトで経済的なものでなければならず、この点でも考慮が必要である。

クライストロンの開発

エネルギー効率を向上させるためのもう一つの重要な開発要素はマイクロ波発生源であるクライストロンである。特にＣＷの高出力クライストロンはこれまで製作された経験がなく、①高効率（６５％）、高安定動作の可能な高周波部、②高電圧で安定動作する電子銃、③大電力に耐え得るコレクタ、④1MW以上の大電力に耐え得る出力窓等を開発する必要がある。

表1.3.1　基本性能

エネルギー	(MeV)	10
最大ビーム電流	(mA)	100
平均ビーム電流	(mA)	20
パルス幅	(ms)	4
繰り返し数	(Hz)	50
デューティー	(%)	20

表1.3.2　仕様

加速周波数	(MHz)	1249.135
マイクロ波波長	(cm)	24.0
加速管の本数		8
加速管の長さ	(m)	1.2
加速器の全長	(m)	16.0
クライストロン数		2
クライストロン出力	(MW)	1.0

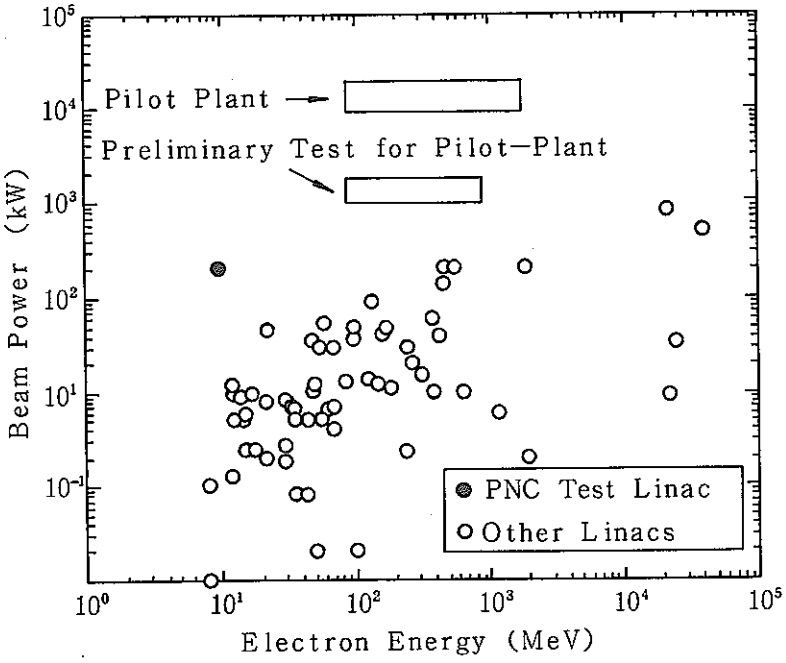


図1.3.1　世界における電子線形加速器のビーム出力

横軸は加速エネルギーである。

1.4 実験項目

① 大電力ＲＦテスト（図1.4.1参照）

このテストは、クライストロン及び加速管の大電力マイクロ波に関する特性値を得て、その後の要素製作にフィードバックすることが目的である。

［試験項目］

・大電力クライストロン出力安定度

・クライストロン系導波管のＲＦ特性

・加速管冷却

・還流部導波管のＲＦ特性

・ＲＦパワー制御

② 入射器ビームテスト

このテストは、高出力ビームテストの前段階として特に重要な入射器の特性試験を行う。また、高出力ビームテストの段階で必要となる加速器の付帯設備（空調、熱交換器等）の設計に必要なデータを収集する。

［試験項目］

・電子銃出力安定度

・電子銃エミッタンス

・ビームバンチング特性

・バンチャーエミッタンス

・第１レギュラー部加速特性

③ 高出力ビームテスト（図1.4.2 参照）

このテストは、要素を組み合わせ加速効率、ビーム安定性等の総合試験を行い、大電流加速の基礎的技術を確立することを目的とする。

［試験項目］

・エネルギー利得特性

・電流出力特性

・BBU特性

・ビームトランスポート最適化

・ビームエミッタンス、分解能最適化

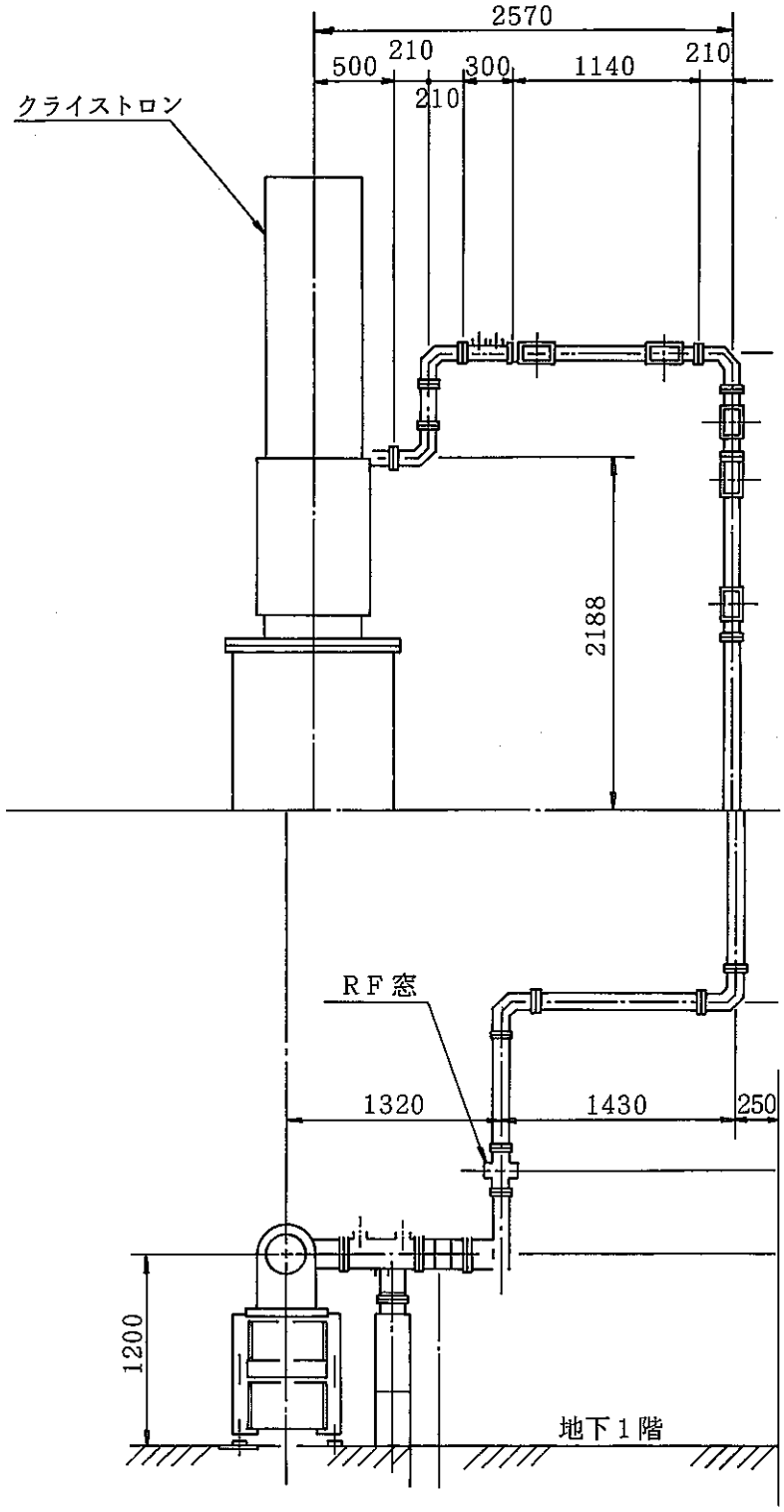


図1.4.1　大電力ＲＦテスト

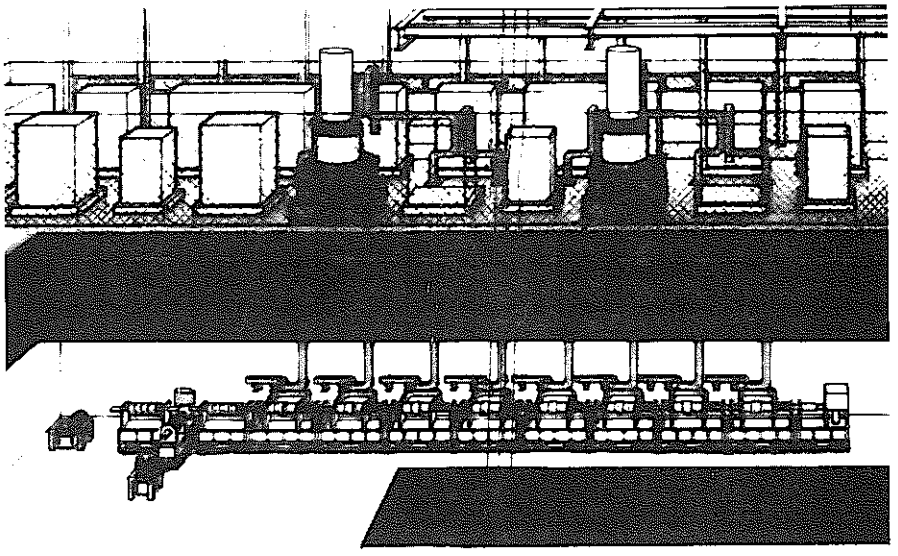


図1.4.2 大電力ビームテスト

1.5 スケジュール

表1.5.1 に本計画のスケジュールを示す

1.6 協力体制及び実施場所

本研究は動燃事業団が、以下のような協力体制のもとに実施する。

客員研究員

佐藤勇　（高エネルギー物理学研究所）

王元林　（平成３年度予定）

早川建　（日本大学）

田中俊成　（日本大学）

共同研究

高エネルギー物理学研究所　（代表　佐藤勇）

日本大学（予定）　（代表　鳥塚賀治）

委託研究

CHALK RIVER 国立研究所（AECL、カナダ）

国内メーカー

また、本研究の計画、成果を広く国内の研究者で検討するため加速器委員会を設置する（予定）。

主査

平尾泰男　（放射線医学総合研究所）

実験の実施場所としては、次のようにする。

① 大電力RFテスト

平成３、４年度に行う実験は、電源設備等の使用可能性を考慮して高エネルギー物理学研究所とする。実験の主体は動力炉・核燃料開発事業団とし、上記の協力体制のもとに実施する。特に加速管については高エネルギー物理学研究所、日本大学が研究を分担する。

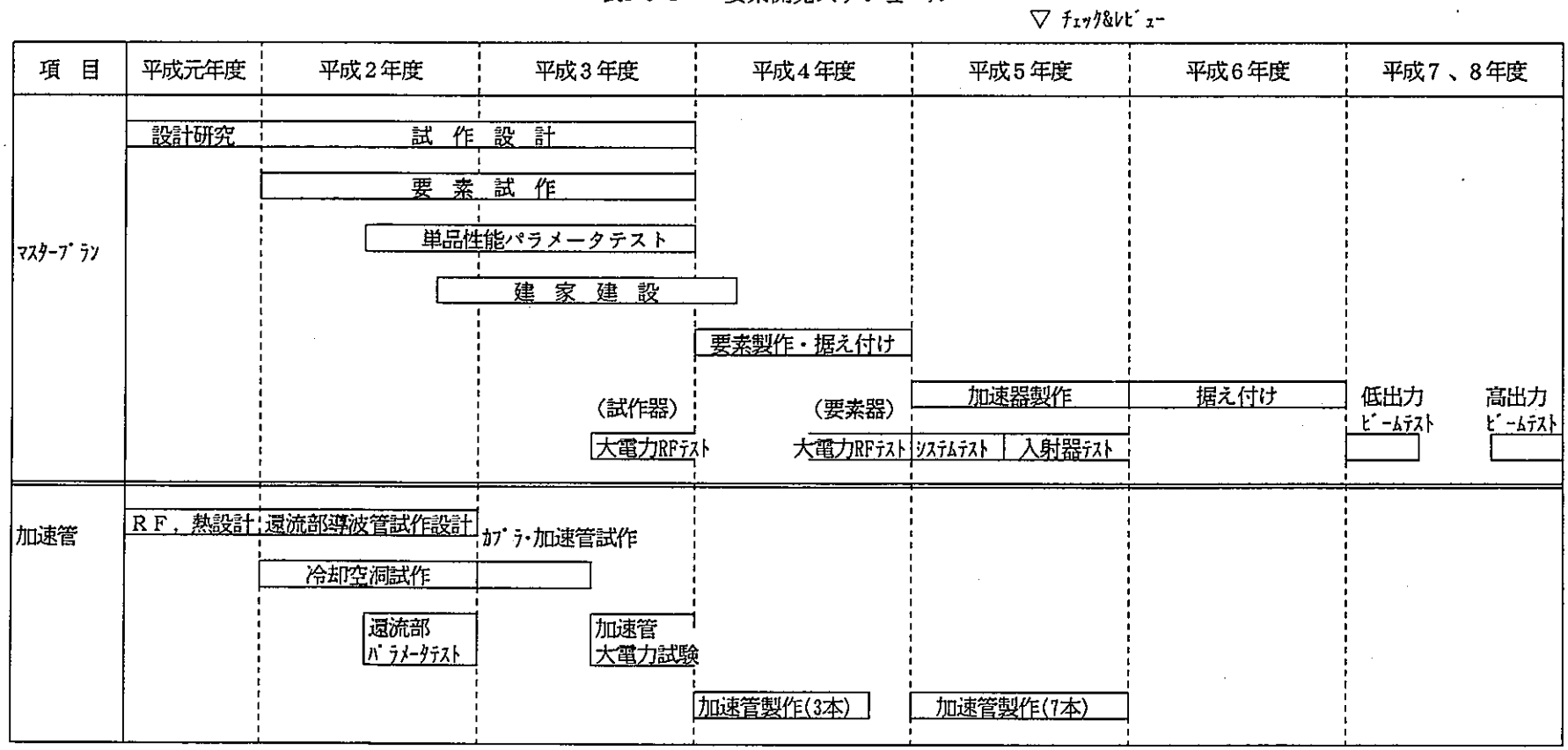
② 入射器ビームテスト

平成４年度に施設が完成し、電源・測定器材等の整備を行い平成５年度の入射器ビームテストは加速器技術開発施設で行う。特に電子銃、バンチャー系、第１レギュラー部加速管については高エネルギー物理学研究所、日本大学が研究を分担する。

③ 大電力ビームテスト

平成６年度に施設の変更許可申請を行い、②と同様な体制で加速器技術開発施設で行う。

表1.5.1　要素開発スケジュール



項　目	平成元年度	平成２年度	平成３年度	平成４年度	平成５年度	平成６年度	平成７、８年度
ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ	高能率設計	ｺﾚｸﾀ・高電力設計	CW管設計				
		ＣＷ試験管試作					
		ＣＷ試験管 ﾊﾟﾗﾒﾀﾃｽﾄ	ＣＷ管 大電力試験				
				ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ製作(1本)	ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ製作(1本)		
ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ用 高圧電源	回路設計	応答・電圧安定化設計	実設計				
				電源製作(1台)	電源製作（1台）		
立体回路		基本設計	接合法設計				
			導波管試作				
				立体回路製作(1式	立体回路製作（7式）		
制御系			システム設計				
				制御系製作	制御系製作(増強)		

項　目	平成元年度	平成２年度	平成３年度	平成４年度	平成５年度	平成６年度	平成７、８年度
電子銃		基本設計	高出力設計 ｶｿｰﾄﾞ試作	電子銃製作			
真空・冷却系			システム設計	製作(1式)	製作（7式）		
計測器		高周波測定系購入	ビーム計測系購入		照射系計測系購入		

第２章　クライストロン

2. クライストロン

2.1 クライストロンに要求される性能

動力炉・核燃料開発事業団が開発を進めている大強度ＣＷ電子線形加速器には、高周波エネルギー源として大電力クライストロンが使用される。その大電力クライストロンには動作周波数1.249135GHz においてＣＷモードとパルスモードの両方で使用できることが要求されている。

クライストロンは、ＣＷモードの動作条件で高周波特性が最適となる設計である。ただし、電子銃については、パルスモードの最大ビーム電圧、電流を満足するものである。また、集束コイルはパルスモードの電子ビームでも集束する磁界を発生できるものである。

クライストロンの仕様を表2.1.1に示し、概略構造を図2.1.1に示す。

表2.1.1 クライストロンの仕様

パラメータ	仕様値	
動作モード	ＣＷ	パルス
周波数 (GHz)	1.249135	1.249135
ヒータ加熱電力 (W)	約 250	約 250
ビーム電圧 (kV)	最大 90	最大 147
カソード電流 (A)	最大 25	最大 56.5
ビーム電力 (MW)	約 1.9	約 8.3
励振電力 (W)	約 12	約 15
目標出力 (MW)	1.2	4.7
目標効率 (%)	65以上	50以上
電力利得 (dB)	59以上	53以上
パルス幅 (ms)	――	約 0.8
繰返周波数 (pps)	――	50以上
デューティファクタ (%)	――	4以上

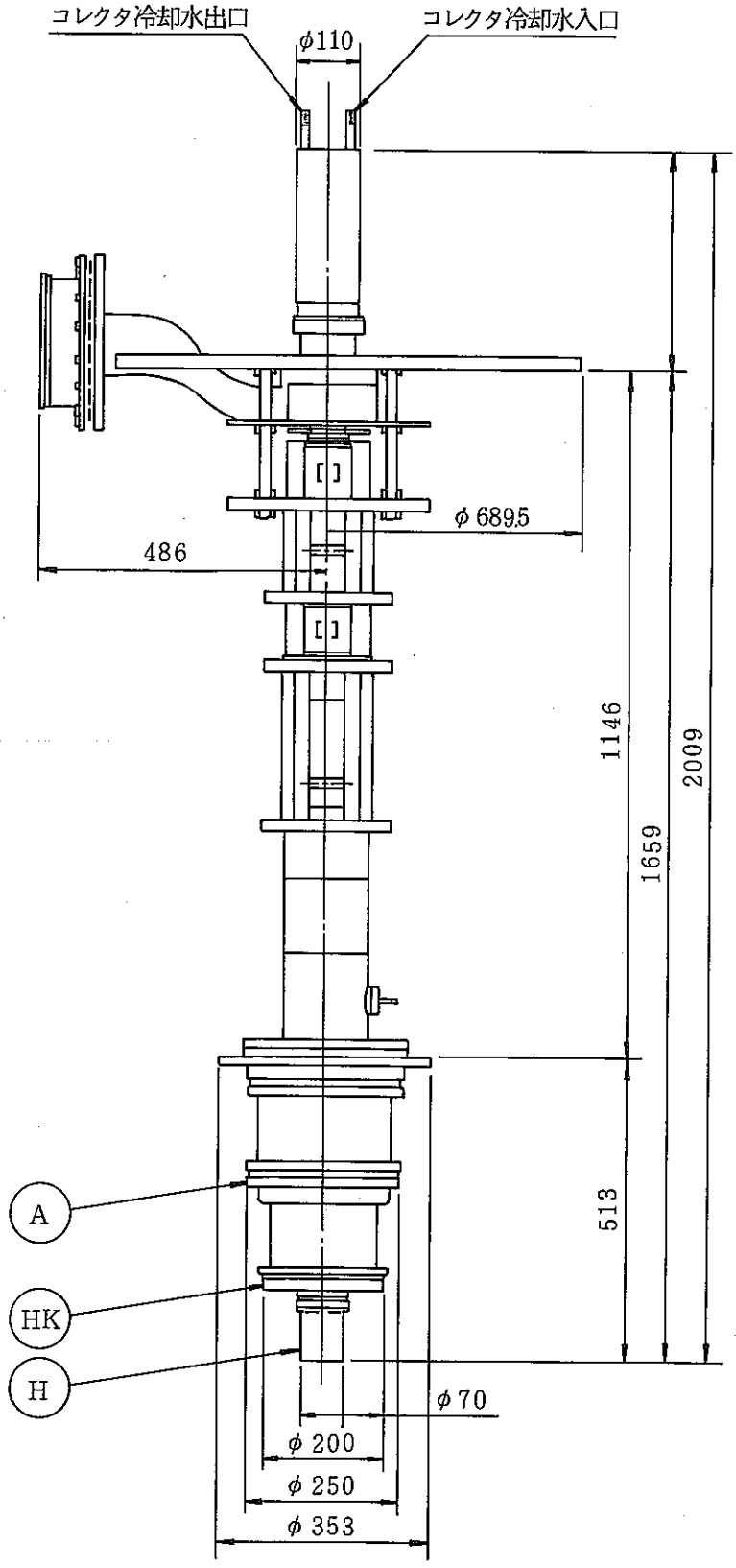


図2.1.1 クライストロン概略構造

2.2 クライストロン各部の設計

(1) 電子銃

以下に電子銃の開発項目及び設計内容を示す。

① 電極（カソード、アノード）の形状の最適化及び高耐電圧の評価（図2.2.1，図2.2.2）

・アノードでビーム電流のスイッチングを行う。(アノードモジュレーション)

・電子銃のパルス動作対応となる際の最大の問題は、ビーム電圧上昇に伴う耐電圧設計である。設計では耐電圧基準として動作時の最大電界の目標値を80 kV/cm とした。電極間の距離を大きくしたり電極の曲率半径を大きくしたりして電界の集中を避け、パルスモードの最大ビーム電圧、電流を満足させた。

② ビームの引き出しと集束磁場の最適化（図2.2.3）

・クライストロンの効率を高めるためには、加速空胴に入射するビームは細く、平行なものほどよい。このため、拘束集束とブリリュアン集束の中間のような集束系を利用し、安定した電子ビームを射出させた。

③ 長寿命化の検討（図2.2.1，2.2.2）

・カソードの材質には耐電圧の劣化を防止するため、カソードから蒸発するBaOの量の少ないディスペンサーカソードMタイプを採用した。

・カソード径の大きさはカソードローディング(ビーム電流とカソード表面積の比)と集束化（カソード断面積とビーム断面積の比）及び動作温度から最適なものを選択した。

表2.2.1 電子銃パラメータ

ビーム電圧		90	(kV)
ビーム電流		22	(A)
ビームパービアンス		0.9×10^{-6}	$(A/V^{3/2})$
ビーム半径		10.5	(mm)
正規化ビーム半径		0.47	(rad)
ドリフト半径		15.0	(mm)
ブリリュアン磁界		217	(gauss)
カソード直径		70	(mm)
カソード面電流密度	CW	0.6	(A/cm^2)
	パルス	1.5	(A/cm^2)
集束化		11:1	

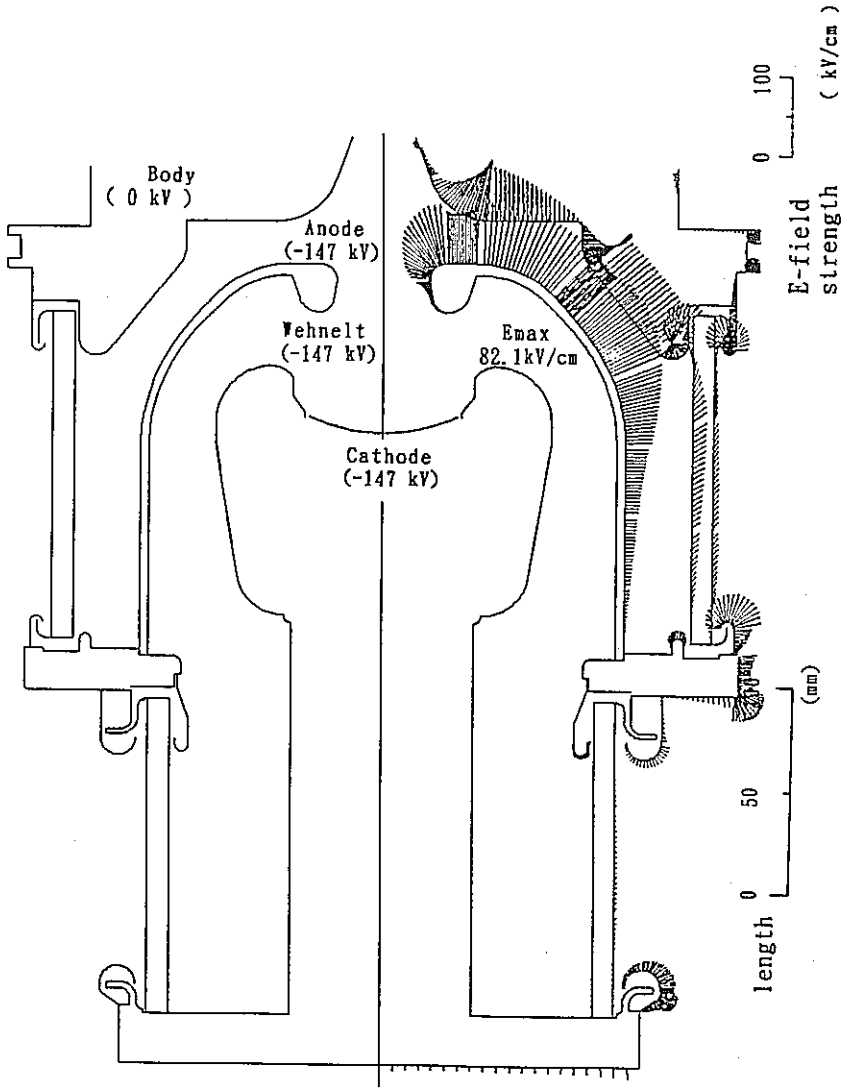


図2.2.1　電子銃電界強度計算結果（アノード・スイッチ・オフ）

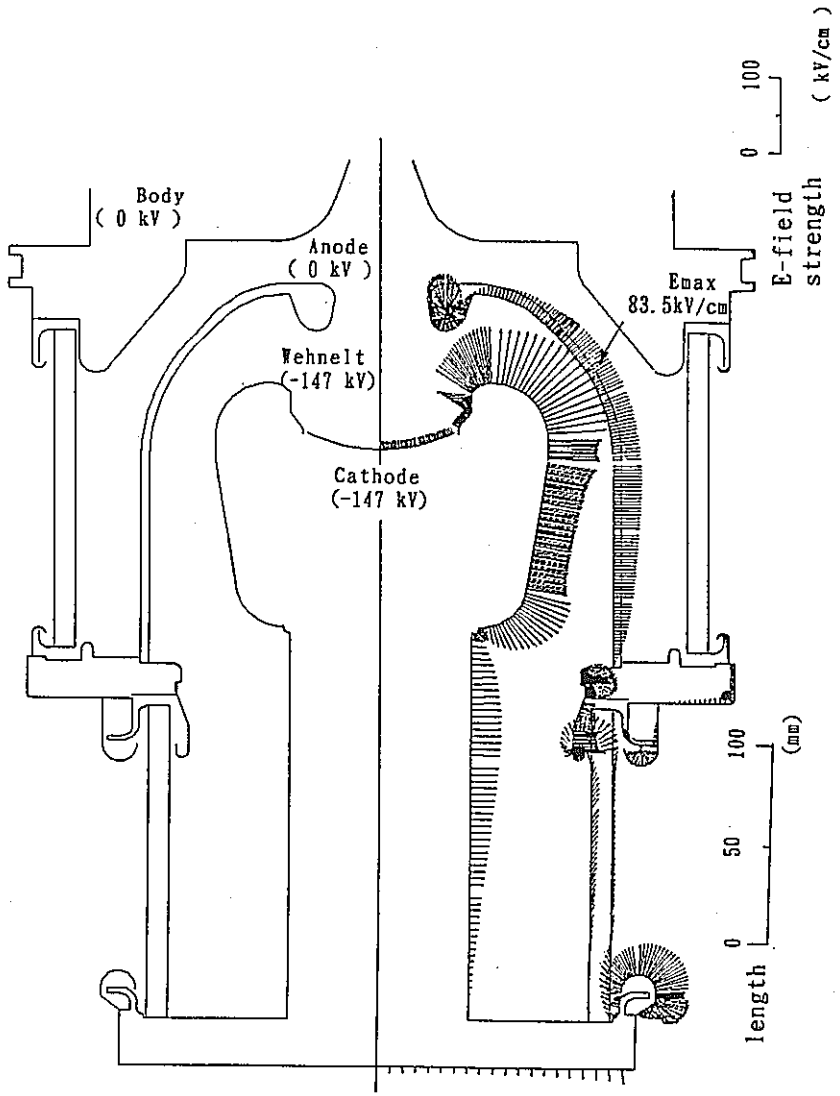
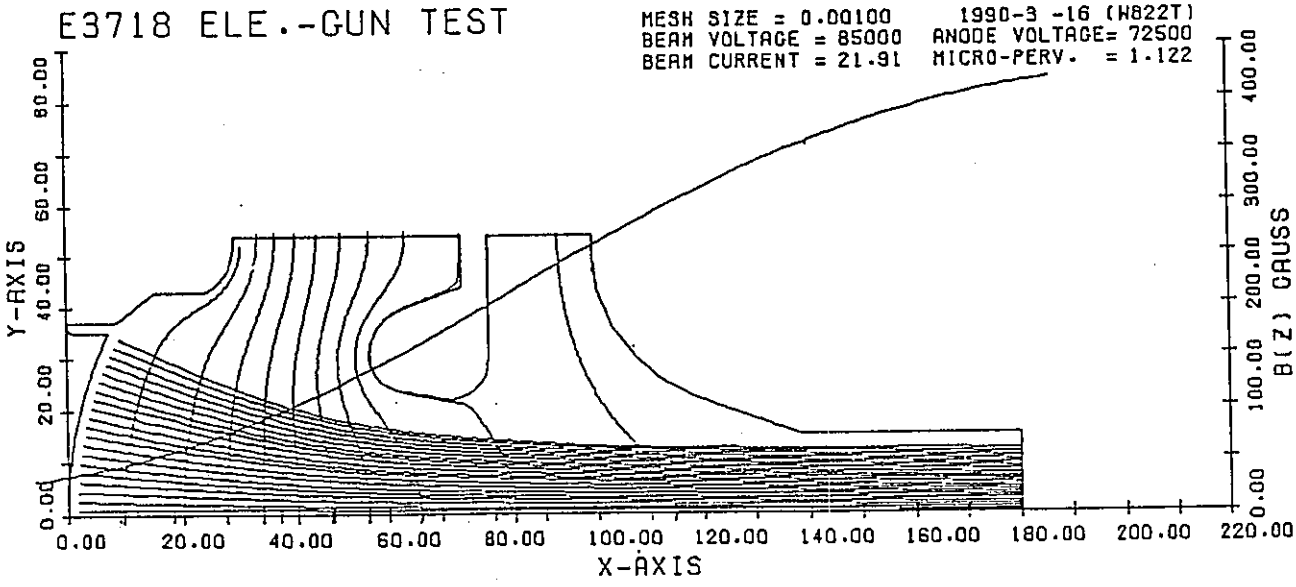


図2.2.2　電子銃電界強度計算結果（アノード・スイッチ・オン）



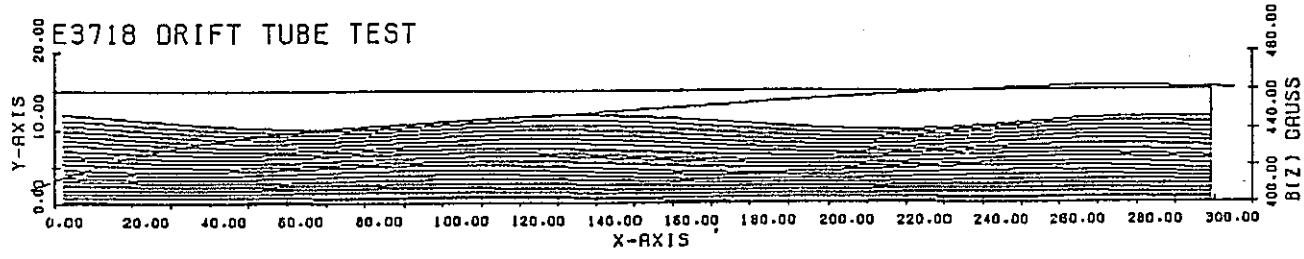


図2.2.3　電子ビーム軌道計算結果（ＣＷ動作時）

(2) 高周波相互作用部

目標効率65%及び飽和電力利得50dBという高い目標仕様から空胴は6空胴とした。

ディスクモデルシミュレーションにより図2.2.4 に示すような高周波動作時の電子ビームの集群の解析を行った。

効率を上げるため、空間電荷力の2次成分を利用して第2高周波の集群を行った。

表2.2.2 に示すようにコレクタに近いほどドリフト半径が大きいのは飽和出力時などに電子ビームが広がった場合でもドリフトに電子が当たらないようにするためである。

表2.2.2 ドリフト半径

入力～第3空胴	15 (mm)
第4～第5空胴	16.5 (mm)
出力空胴	18 (mm)

出力空胴では高周波電界が最も強いため耐電界設計を行い、電子が最も落ち易いので熱負荷に耐える設計を行った。出力空胴のインピーダンスをビームインピーダンスにほぼ等しくさせると、Q＝60MHzで効率が75%となった。

基本となる4空胴（入力、第2、第3及び出力）を設定し、この状態で効率が最大になるドリフト管長と各空胴の離調周波数を調べる。次に、残りの2空胴を取り入れこの空胴の離調周波数を調整することで効率改善を図った。高周波相互作用部の長さを1mとした状態で効率が76%となる結果を得た。また、飽和出力時における利得は53dBとなった。

(3) 出力窓

出力窓セラミックスの材質は熱伝導率が大きく大電力化に適するベリリアを使用した。

マルチパクタリング対策として、セラミックス表面にTiNをコーティングした。

ピルボックスウィンドウを採用した。

セラミックス窓の周囲に冷却水路を設けた。

電磁界計算、熱応力計算により出力窓の寸法値を決定した。

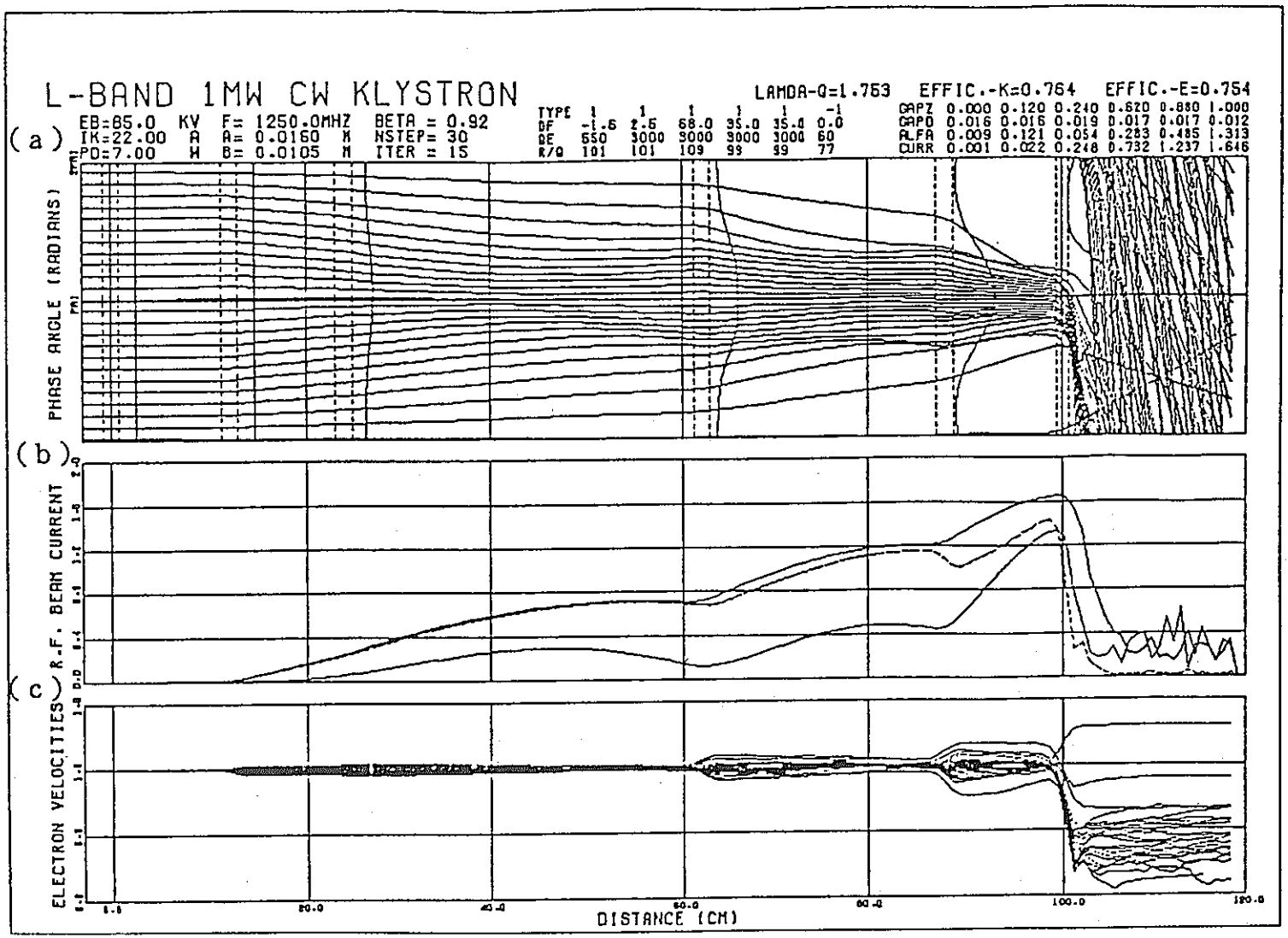


図2.2.4 ディスクモデルシュミレーション計算結果

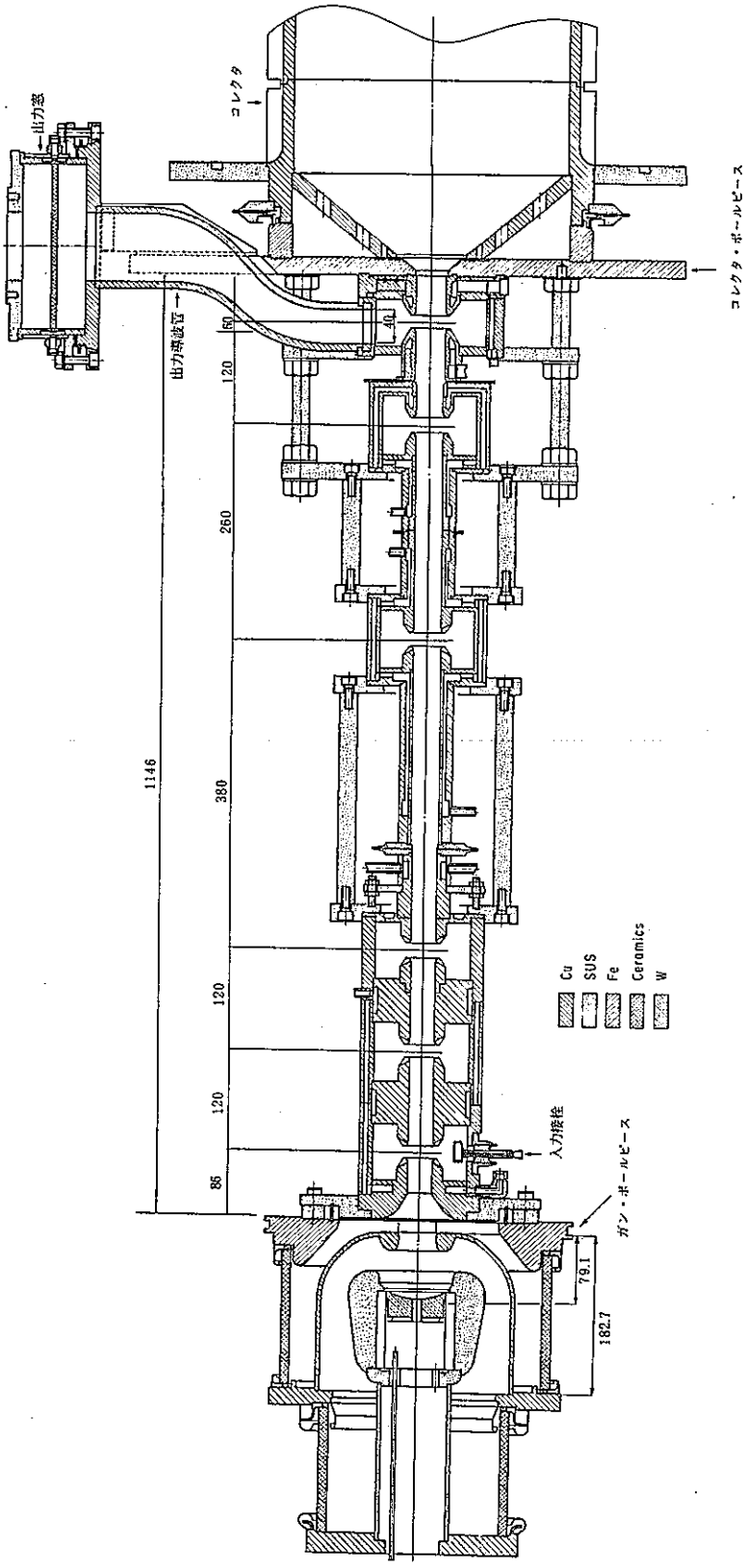


図2.2.5　クライストロン断面図

表2.2.3 出力窓の設計パラメータ

構造形式	ピルボックス形
誘電体材料	ベリリア (BeO)
誘電体窓外径	190.5 (mm)
誘電体窓暑さ	6.6 (mm)
ピルボックス長さ	106.0 (mm)
出力導波管	WR650
帯域幅 (VSWR1.1以下)	70 (MHz)
VSWR	1.006
冷却	水冷

(4) コレクタ

コレクタの耐電力を直流入力時で1.3MW、最大電力損失密度が500W/cm² 以下になるようにコレクタの形状を検討した。(図2.2.6)

コレクタの材質は無酸素銅とした。

X線が発生するのでボイラージャケットに鉛を巻いた。

コレクタ冷却方式は冷却フィンを設け蒸発冷却を採用した。

(5) 集束コイル

集束コイルは全高約1.2m、重量約800Kgである。

冷却効率、製作上の利便を考えコイルは6個に分割した。空間電荷力により電子が広がるため下流側のコイルには導線の巻数を増やし集束力を強める対応策を取っている。

この集束コイルは、ソレノイドが作る磁界によって電子ビームを集束する一様磁界集束法を利用している。

ガンポールピースから磁束の一部が漏れるので磁界計算、電子ビーム軌道計算を行うことにより、ガンポールピースの位置をうまく調整して、電子ビームの最適入射条件を与える集束系を採用した。この時、電子銃部における最大強度の条件を満足した。(図2.2.7)

図2.2.7 は軸対象である集束コイルの片側断面を表示したもので各コイルの巻数と電流量、そして磁極とコイルの位置関係を表している。

単位：mm
尺度：χ

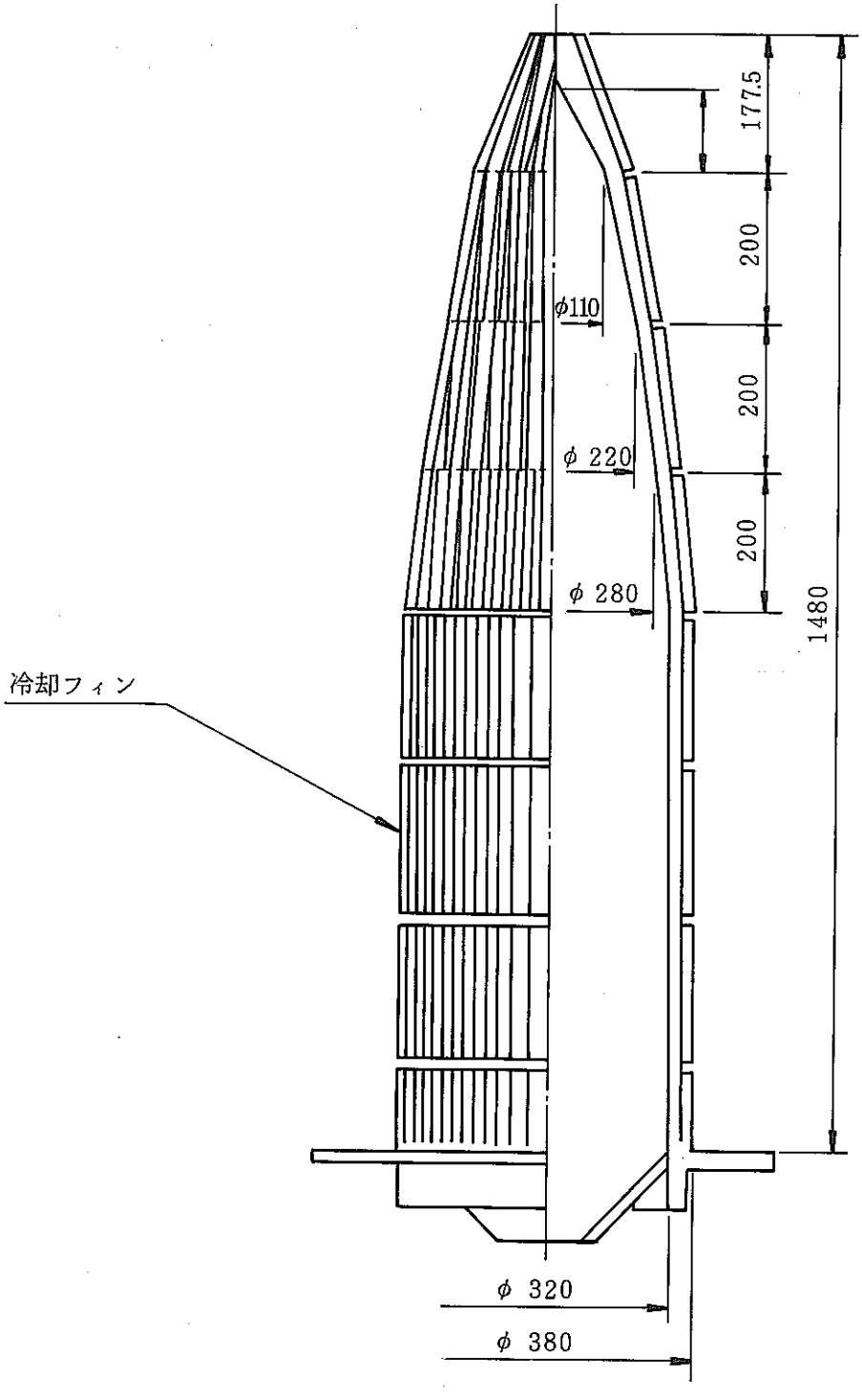


図2.2.6　コレクタの構造

MAGNET FOR E3718

MAGNETIC FLUX LINES

POLE NO	RI (CM)	RO (CM)	ZL (CM)	ZR (CM)	EMU
1	9.9	17.7	18.6	19.1	3000
2	9.6	17.0	17.6	18.6	3000
3	9.9	17.5	17.1	17.6	3000
4	10.8	16.1	16.1	17.1	3000
5	11.8	16.1	15.1	16.1	3000
6	12.8	14.3	14.2	15.1	3000
7	17.7	20.5	16.7	20.7	3000
8	20.5	35.6	16.7	18.7	3000
9	34.6	35.6	17.5	131.5	3000
10	30.5	37.0	131.5	136.0	3000
11	2.0	30.6	134.0	136.0	3000

IMAX= 240
JMAX= 100
HZ = 0.60
HR = 0.60
W = 1.95
NOI = 350

COIL NO	RI (CM)	RO (CM)	ZL (CM)	ZR (CM)	N (T)	I (A)
1	21.0	26.0	23.0	37.0	800	10.0
2	21.0	26.0	45.5	62.0	900	10.0
3	21.0	26.0	70.5	87.0	900	10.0
4	21.0	26.0	95.5	112.0	900	10.0
5	21.0	26.5	117.5	125.0	400	10.0
6	27.5	32.0	117.5	127.5	600	10.0

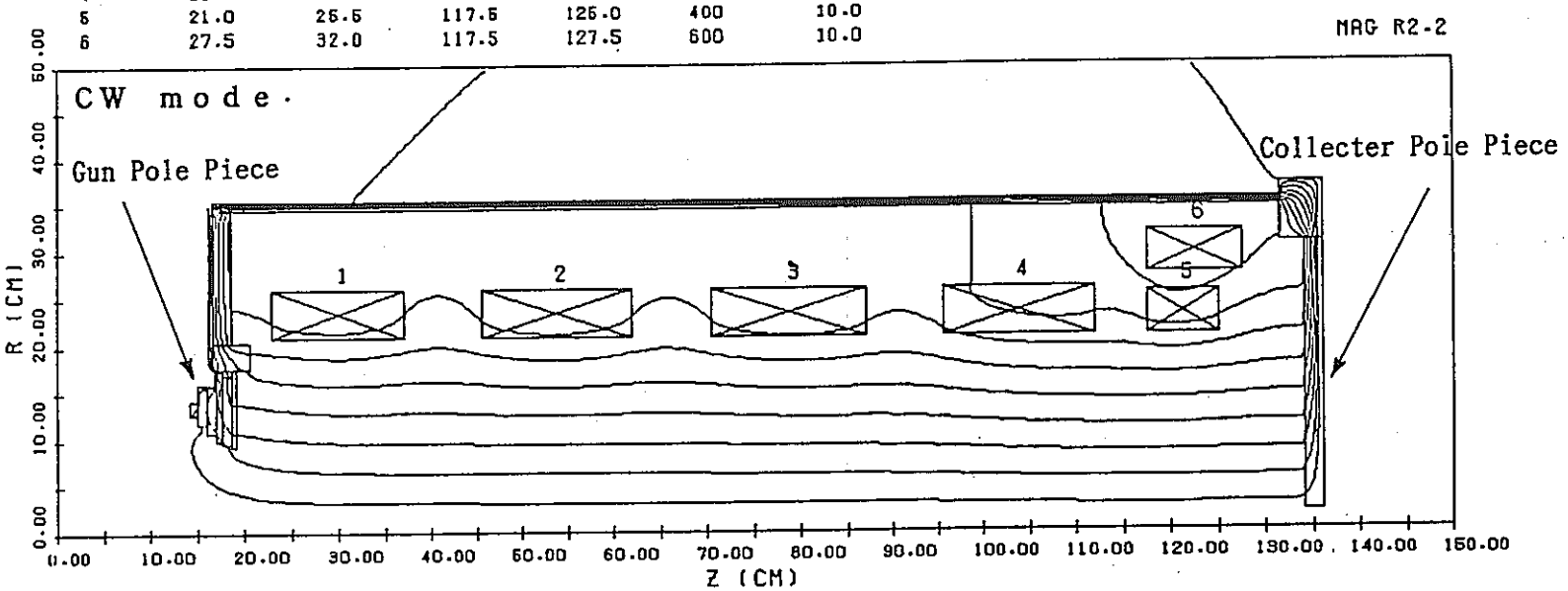


図2.2.7 集束コイルと磁場等高線

2.3 高周波特性試験

クライストロンのＣＷモード／パルスモードの動作条件における高周波相互作用部の設計妥当性を評価するために、実験用パルスクライストロンを試作した。表2.1.1 に示すＣＷモード及びパルスモードの動作条件のうち、パルス幅、繰返数、デューティファクタをそれぞれ15μsec、100pps、0.15%に変えて、ショートパルスでの動作試験を行った。

電子銃はトリスタンに用いられているクライストロンの電子銃を基にカソードの曲率半径、アノードの先端部形状、ウェーネルト先端部形状を変更して使用した。

出力窓にはアルミナセラミックスを用いた。

ショートパルスで動作させた、ＣＷモードにおける実験結果及びパルスモードにおける実験結果を図2.3.1及び図2.3.2にそれぞれ示した。ショートパルスで動作させたＣＷモードにおいて目標効率に近い値が得られた。ショートパルスで動作させたパルスモードにおいて不安定現象がみられた。この不安定現象がもどり電子によって発生しているのかどうかは不明であり、現在調査中である。

2.4 ＣＷクライストロンの性能比較

1250(MHz)において出力1200(kW)、効率65(%) の開発中のクライストロンは表2.4.1に示す既存のＣＷクライストロン中で世界最大である。

表2.4.1 大電力ＣＷクライストロンの性能の比較

企業	形式	クライストロンの主なパラメータ			納入実績
		周波数(MHz)	出力(kW)	効率(%)	
東芝	E3718	1250	1200	65	PNC試作 ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ
	E3786	508.6	1200	65	KEK
THOMSON	TH2089	353	1000	65	CERN
	——	1300	1000	65	開発納入済
VALVO	YK1303	508	1100	61	DESY
	YK1250	1000	400	60	DESY
VARIAN	VKS-8269	2450	480	52	Princeton Univ.

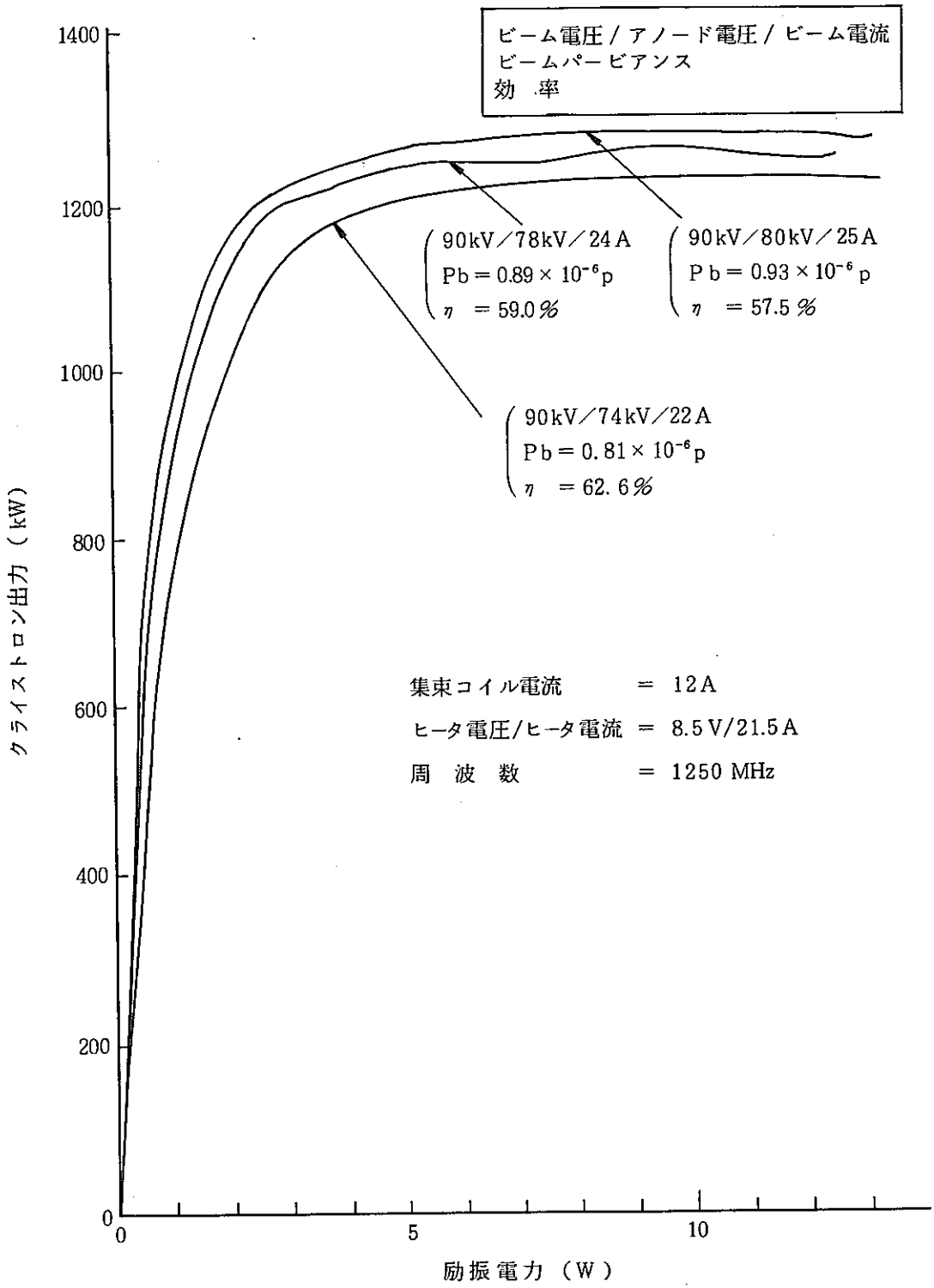


図2.3.1 CWモードにおいてビームパービアンスを変えたときの入出力特性
（ビーム電圧90kV）

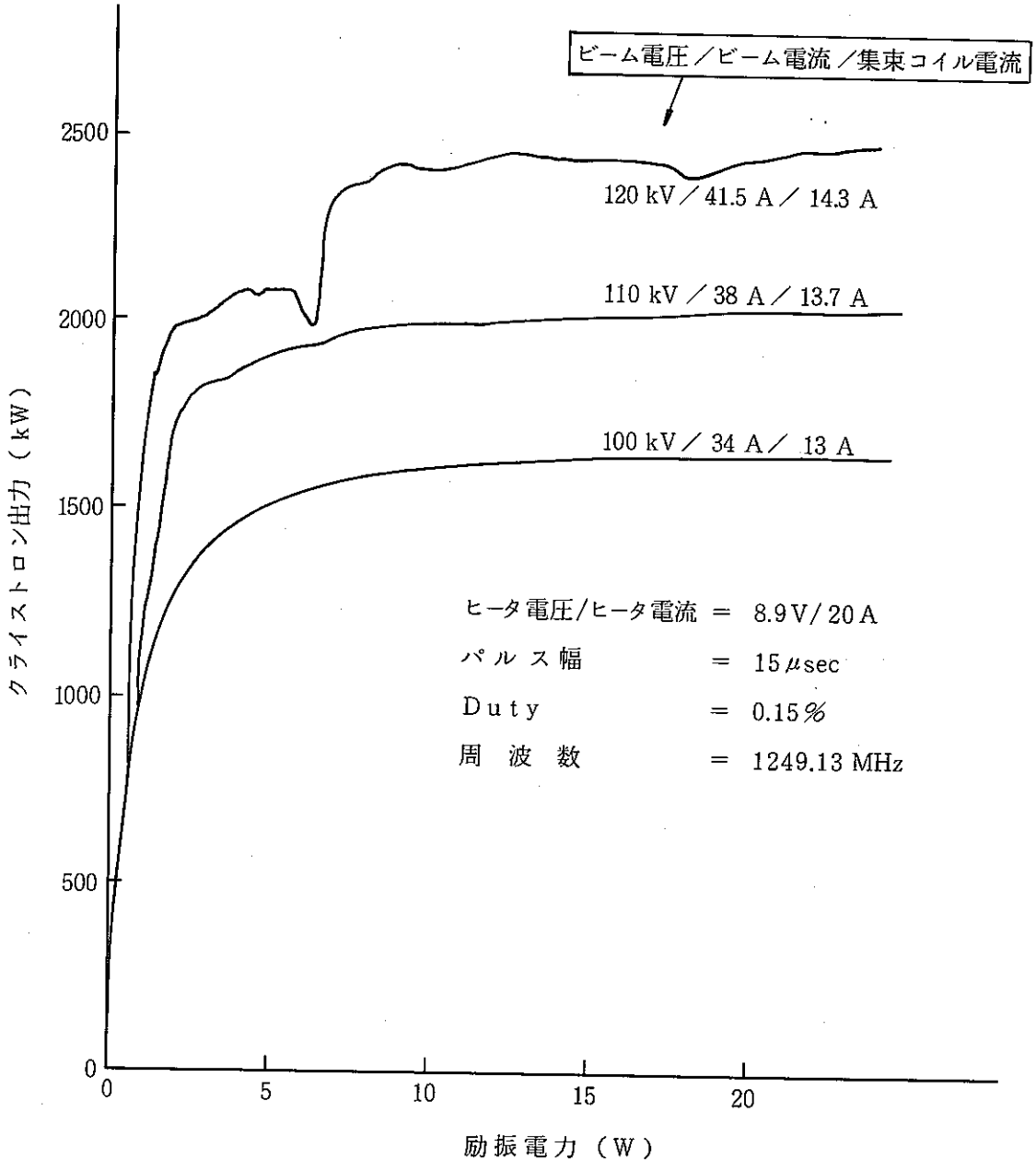


図2.3.2 パルスモードにおいてビーム電圧を変えたときの入出力特性

2.5 本年度の成果と今後の課題

平成２年度に試作するクライストロンの高周波相互作用部と同じものを使用する実験用パルスクライストロンを試作し、ショートパルス（パルス幅 15μsec、デューティファクタ 0.15%）で動作特性試験を実施した。その結果、ショートパルスで動作させたＣＷモードにおいて目標効率に近い値が得られた。さらに平成元年度の基本設計に基づき、また、実験用パルスクライストロンの試験結果を踏まえて、高効率ＣＷモード、大電界パルスモード（マイクロ波出力はそれぞれ 90kV、147kV）の両方の動作モードで使用できる大電力クライストロンの試作を行った。また、このクライストロンを試験する上で必要な集束コイル、ソケットを製作した。

平成３年度は、試作クライストロンの動作特性試験を行う。また平成４年度以降に試作するクライストロンに改良を加えるため、実施した動作特性試験の結果の検討を行う予定である。

第３章　クライストロン電源

3. クライストロン電源

3.1 各部の設計

要素開発用ＣＷ電子加速器では直流高圧電源が必要となる。また、加速器の性能試験の一環として、デューティを下げて高電界加速が出来るように90keV、147keV の２つの電圧モードで運転出来るように設計されている。また、この電源は出来るだけコンパクトである必要がある。電源の設計はＣＷ運転を考慮して行なわれるが、加速器の実際の運転に当たっては、供給電力の事情からパルス幅４msで運転される予定である。

以下にクライストロン電源の基本的な構成について述べる。

表3.1.1 クライストロン電源の入出力特性

	ＣＷモード		パルスモード
	20%パルスモード	500KVAモード	
ピーク出力電圧	90KV	90KV	147KV
ピーク出力電流	25A×2	25A×2	56.5A×2
パルス幅	4msec	4msec	0.8msec
パルスくり返し	50pps	18pps	25pps
デューティ	20%	7.2%	2%
パルス出力	4.5MW	4.5MW	16.6MW
平均出力	900KW	324KW	332KW
制御系電源電力	30KW	30KW	30KW
全平均電力	930KW	354KW	362KW
電源効率	90%	90%	90%
必要電力	1033KW	393KW	403KW
力　率	80%	80%	80%
必要KVA	1292KVA	492KVA	504KVA

表3.1.2 クライストロン電源の性能の仕様

*推定値

項目 ＼ モード		CWモード モードⅠ	CWモード モードⅡ	パルスモード
負荷特性	RF出力（ピーク）		1MW×2	5MW×2
	アノード電流		＜5 mA	＜5 mA
	パルス幅		4msec	0.8msec
	パルスくり返し		50pps	50pps
	デューティ		20%	4%
	平均RF出力		200KW×2	200KW×2
	RF効率		* 60%	* 51%
	ｸﾗｲｽﾄﾛﾝ入力電力（平均）		667KW	784KW
電源特性	出力電圧		90KV	147KV
	出力電流		25A×2	56.5A×2
	パルス幅		4msec	0.8msec
	パルスくり返し		50pps	50pps
	デューティ		20%	4%
	ピーク出力		2.25MW×2	8.3MW×2
	平均出力		900KW	664KW
	電圧安定度		1%	1%
アノード変調器	アノード電圧		0～70KV	0～130KV
	パルス幅		4msec	0.8msec
	パルスくり返し		50pps	50pps
	パルス立上げ		<400μsec	<100μsec

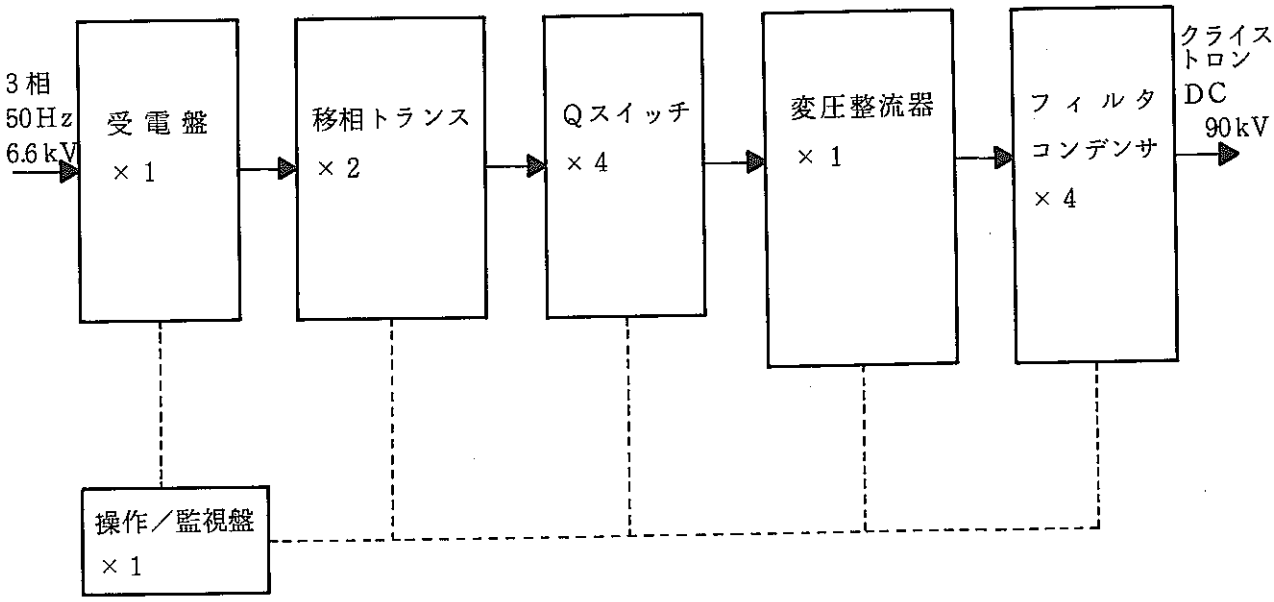


図3.1.1 クライストロン電源結線図

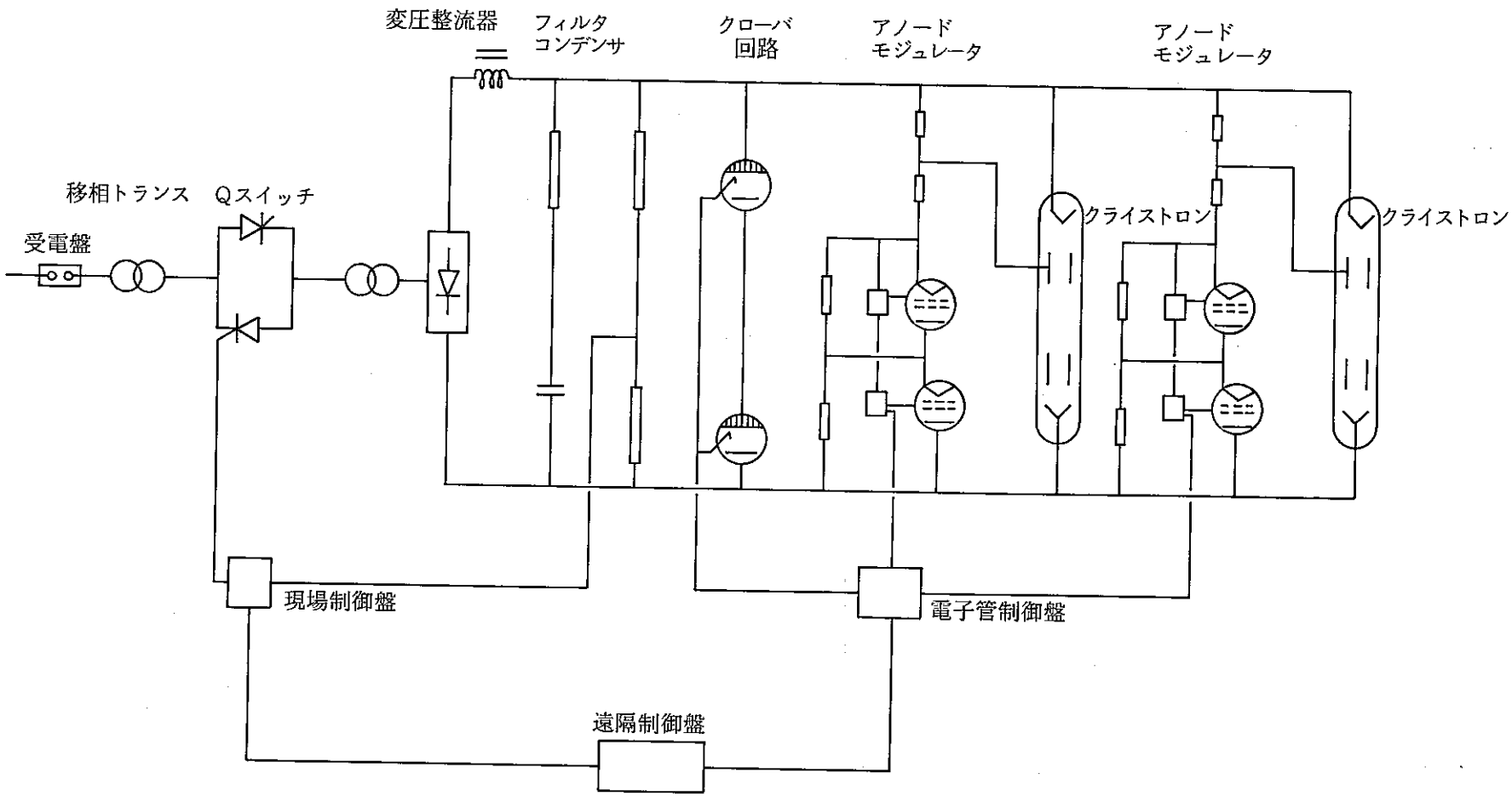


図3.1.2　クライストロン電源システム構成図

Qスイッチ

受電された交流電流をより高い周波数にし、整流器にかける負担を小さくする。

＊３相サイリスタ逆並列接続４重構成
（相互に15度の移相差を持つ。）

50Hz×24 ＝ 1200Hz
（高速応答性）

＊移相トランス１次側にタップを設ける。
（ＣＷモード、パルスモードでのリップルを同程度にするため）

90kV時	0.66kV
147kV時	1.1 kV

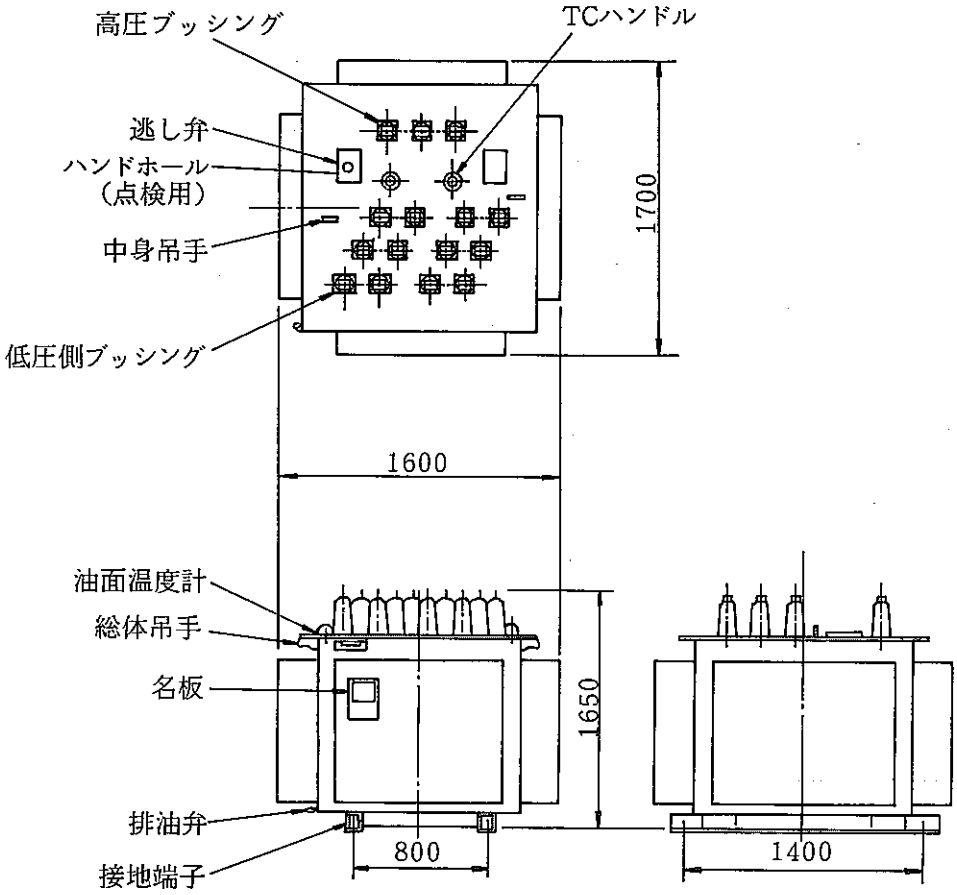
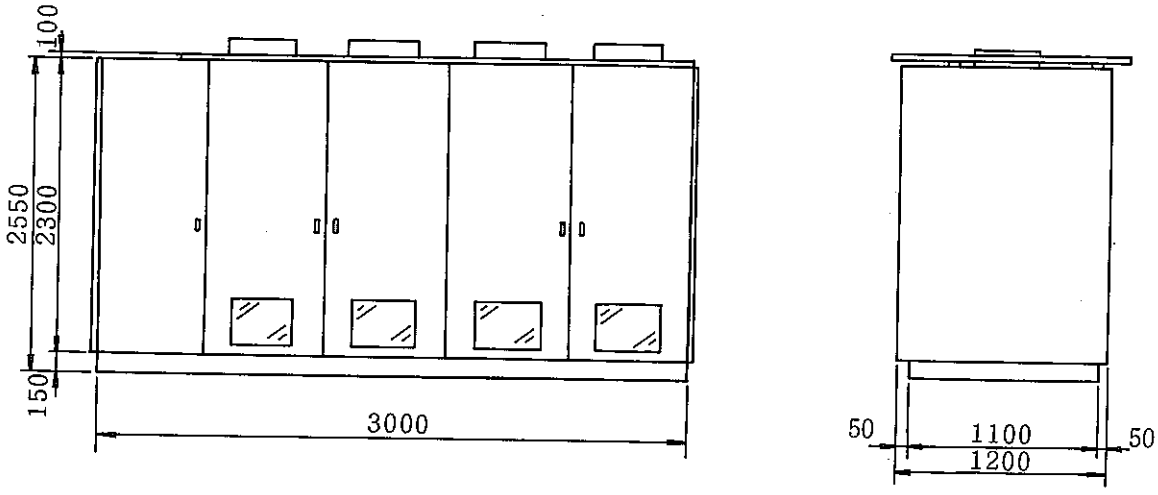


図3.1.3　移相トランス



Qスイッチ　3φ　1.1kV　500kVA×4
風冷形
損　失　約12kW
総重量　約1,500 kg

図3.1.4　Qスイッチ盤

変圧整流器

Ｑスイッチからの電流を昇圧し検波整流する。原理的にはトランスとブリッジダイオードからなる。

電圧定格はパルスモードで、電流定格はＣＷモードで決定される。

電圧定格

147kVモード　1.1kVから32.7kVへ

（実際の逆耐圧は最大値の２倍を取り100kVとする。）

電流定格

クライストロンビーム電流は25Aであるから、

25A×2×0.2 ＝ 10A

（実際には更にダミーロード電流0.8Aが加わる。）

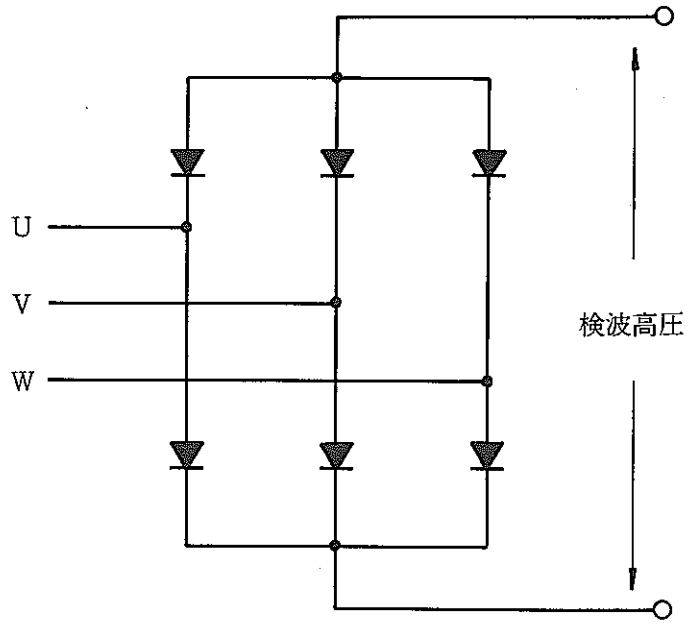
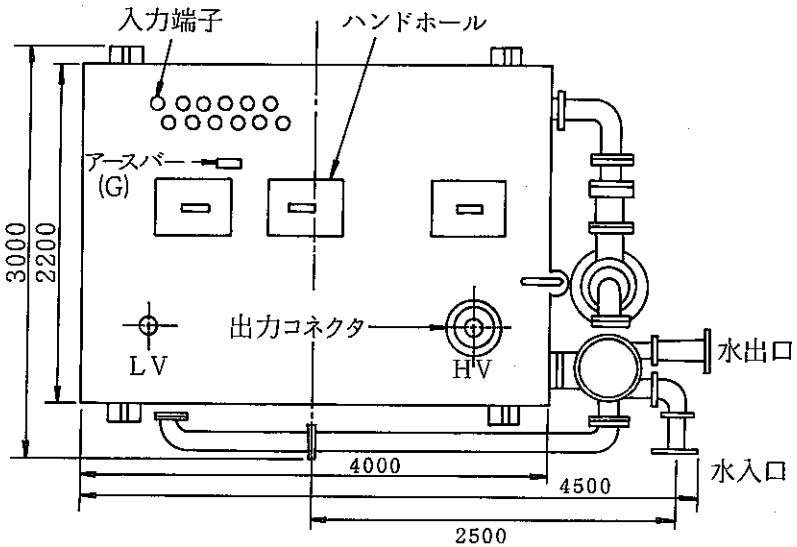
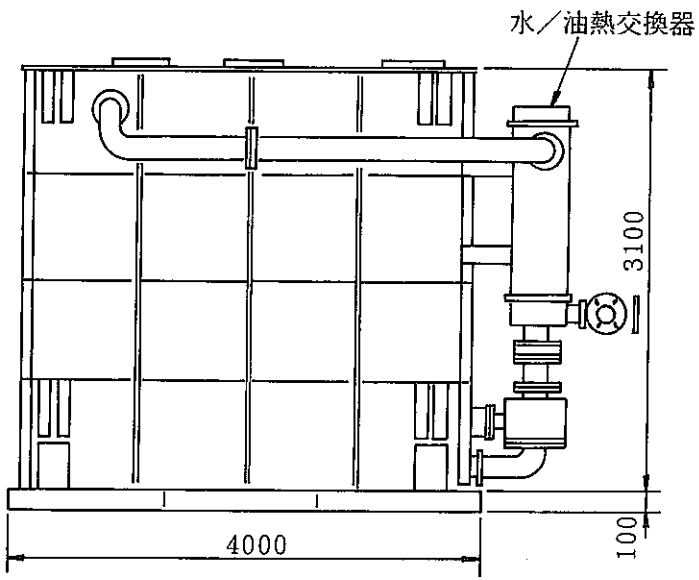


図3.1.5　ブリッジダイオード

入　力　3φ　1.1 kV　500 kVA×4
出　力　DC　147kV　10.8 A
送油水冷（工水 100 ℓ/分）
損　失　約70 kW
総重量　約 15000 kg
油量　約 7000 ℓ





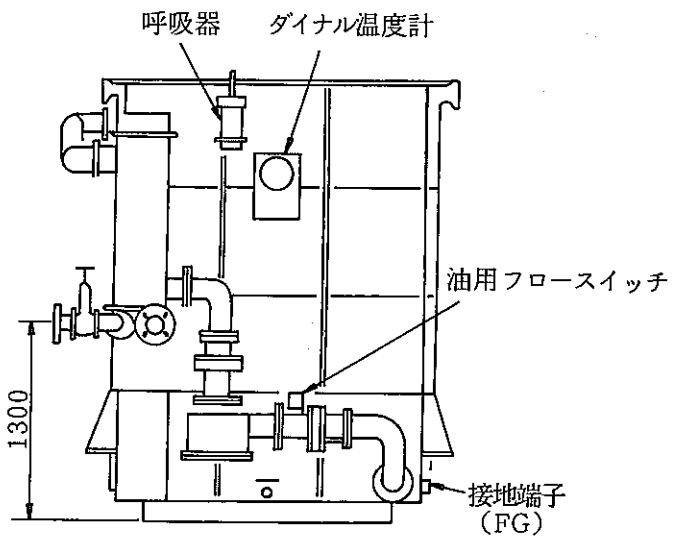


図3.1.6　変圧整流器

フィルタ及びダミーロード

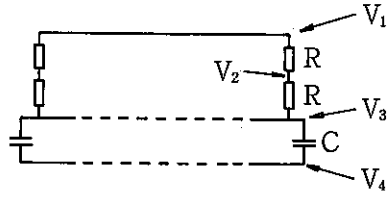
変圧整流器からの直流電圧はクライストロンを定格通りに動作させる制度がないため、ＬＣフィルタを通すことにより電圧精度を確保する。

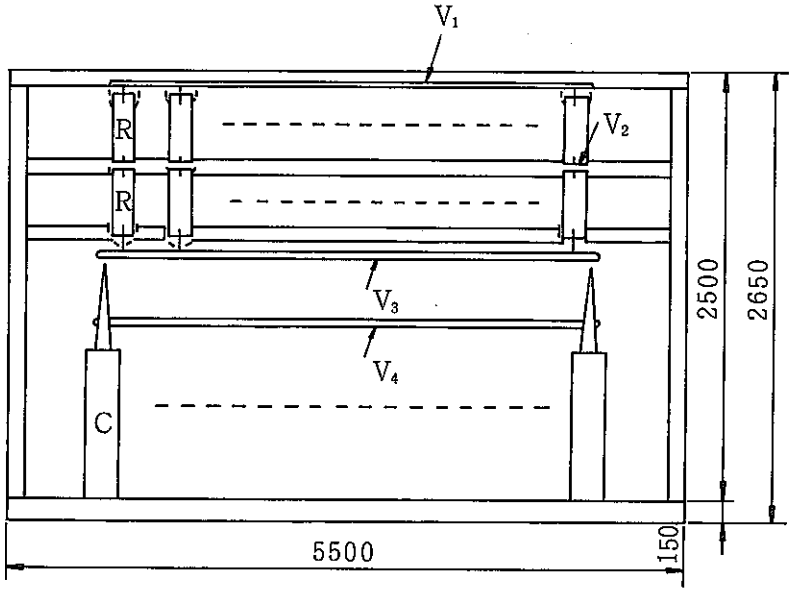
Ｃ － 直流出力を供給する。
（精度１％確保のためには、60μF）

Ｌ － 電圧リップル低減、クローバ動作時の整流回路保護。

ダミーロード － 過充電の際のフィルタコンデンサ電圧の放電用。
電子管制御を行なう。

フィルタコンデンサ	75 kV 2.5 μF 1S24P (60μF)
直列抵抗	25 Ω 270W 30kJ 2S10P (5Ω)
総重量	約 9,000 kg
本枠	2白使用





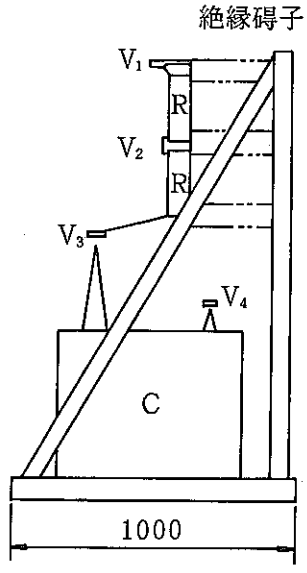


図3.1.7 フィルタコンデンサ

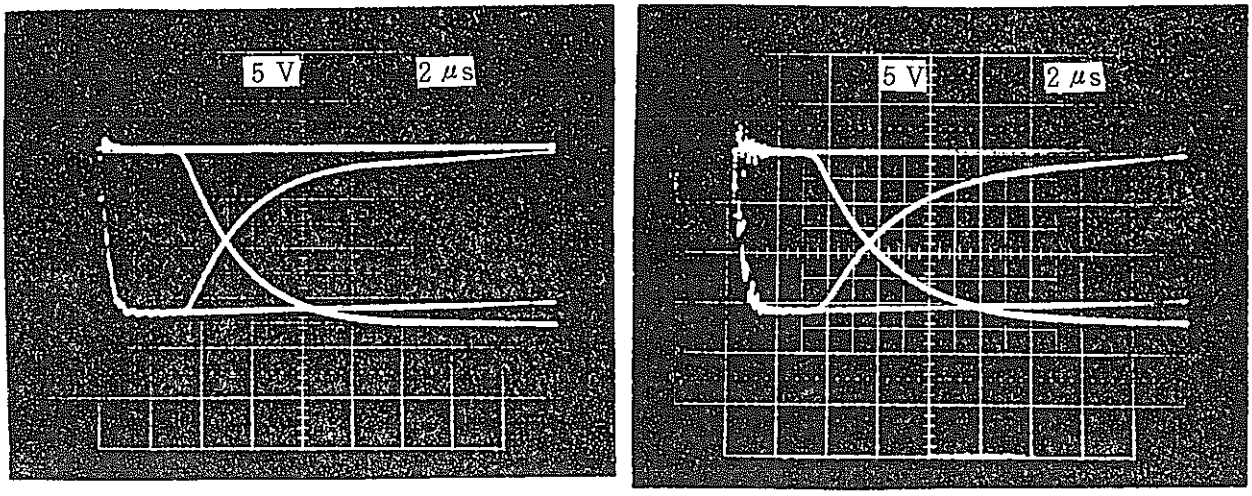
クローバ回路

クライストロンにアーキング（異常放電）が生じた際の保護回路。異常信号を検出し作動する。

スイッチング素子 − イグナイトロン ×8
油タンク内におかれる。
（1本辺りの耐電圧は25kV）

遮断速度 − 6 μs

$$T_{delay} = t_{detec} + t_{driv} + t_{ig} + t_{cable}$$



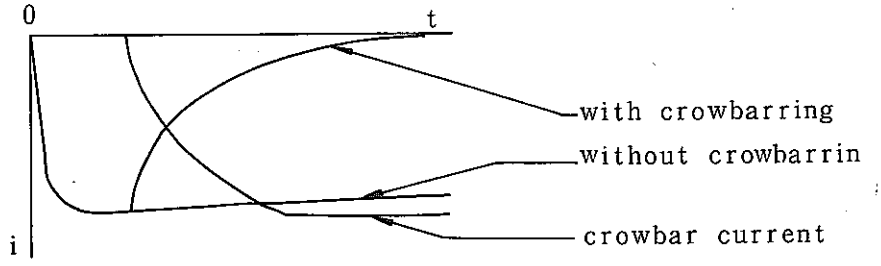
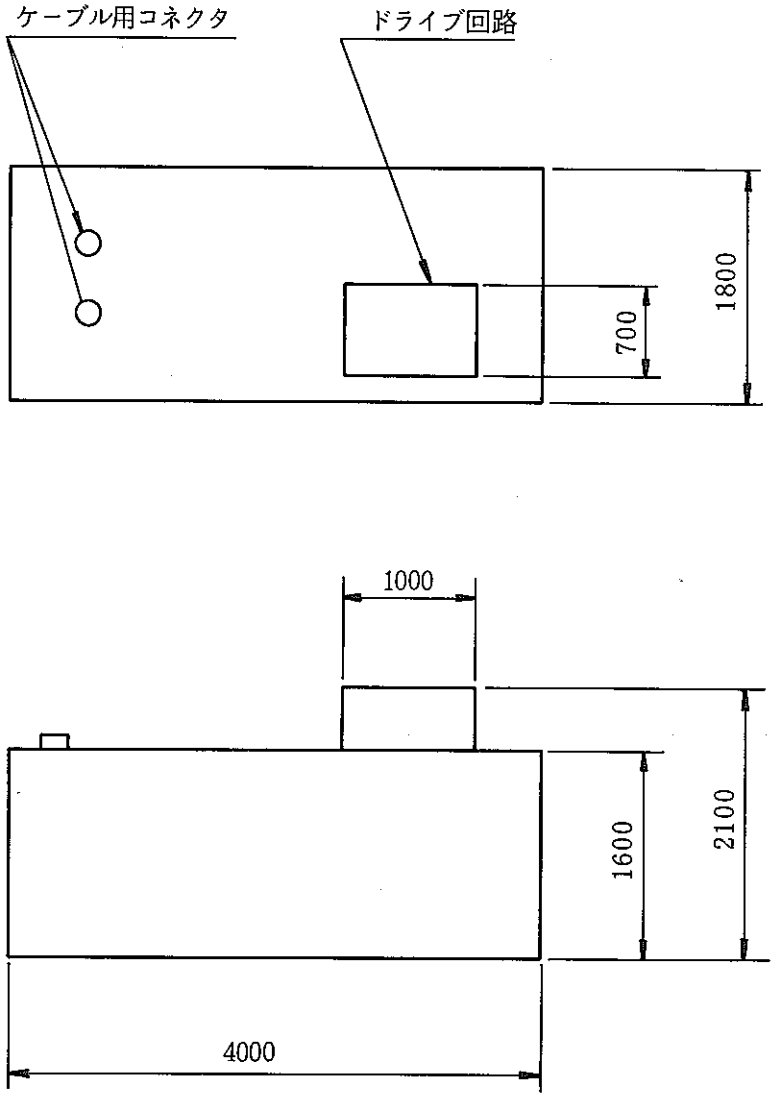


図3.1.8 クローバ電流の波形



総　重　量	約 16000 kg
油　　量	約 10000 ℓ
内部部品総吊上げ式	
吊り上げ重量	約　5000 kg

図3.1.9　クローバ回路

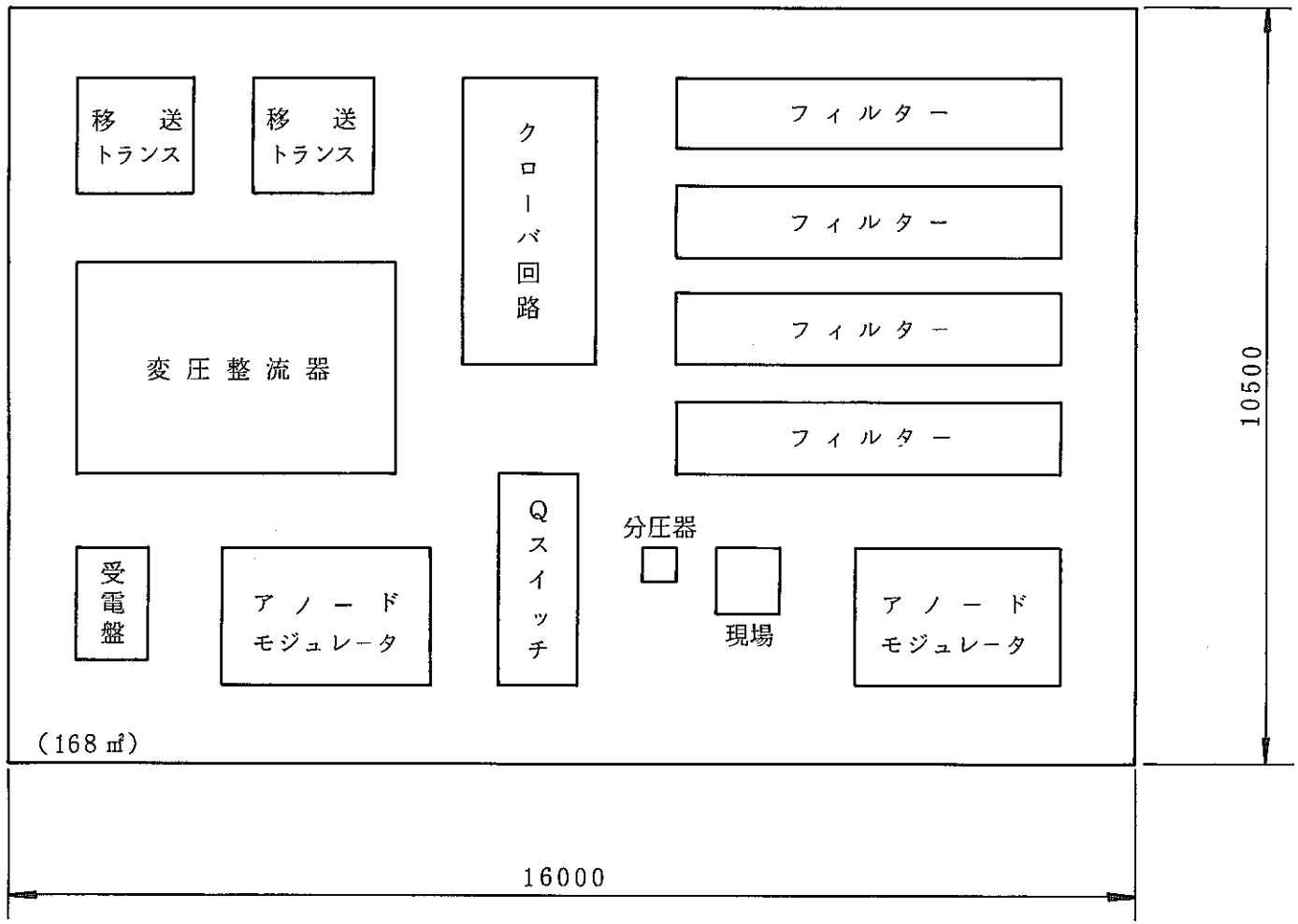


図3.1.10　20%デューティクライストロン電源の配置

サイリスタ

半導体のスイッチング素子。順方向電圧を加えたとき、ゲート信号により通電開始時間を制御する。等価構造としては、2つのトランジスタによる正帰還を原理として動作している。

長　所

動作が早い。

小型軽量

長寿命

短　所

電力容量に限界がある。

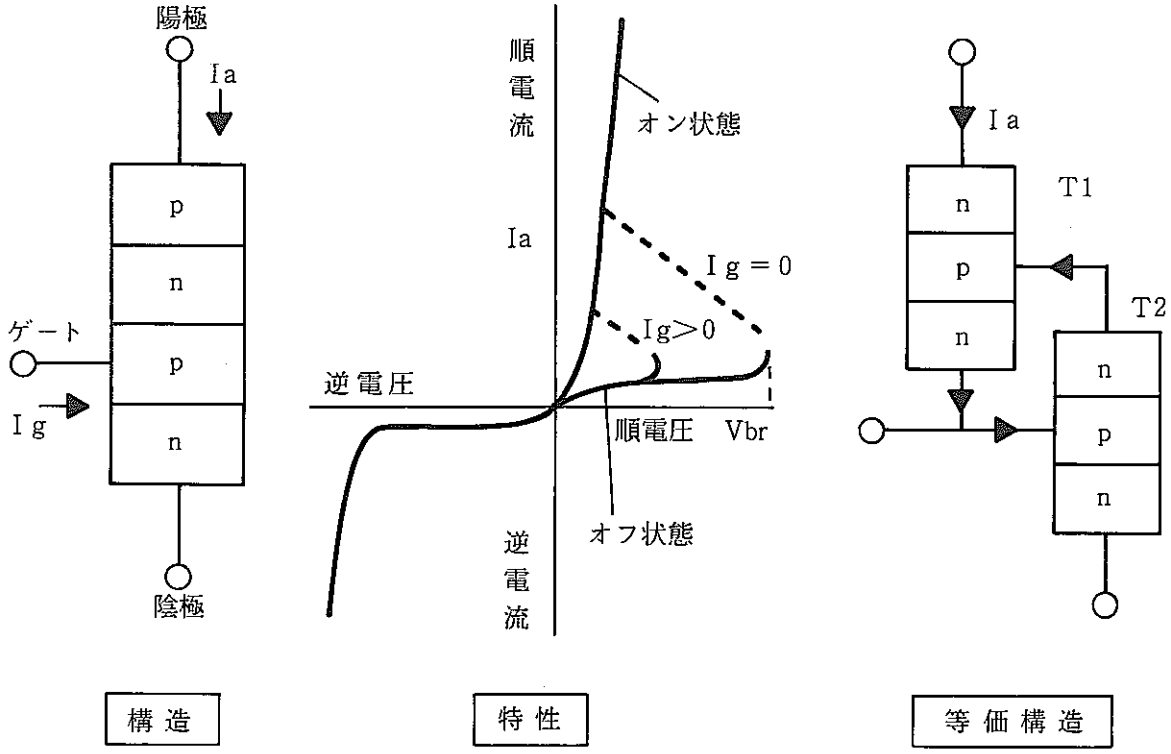


図3.1.11　サイリスタの構造と特性

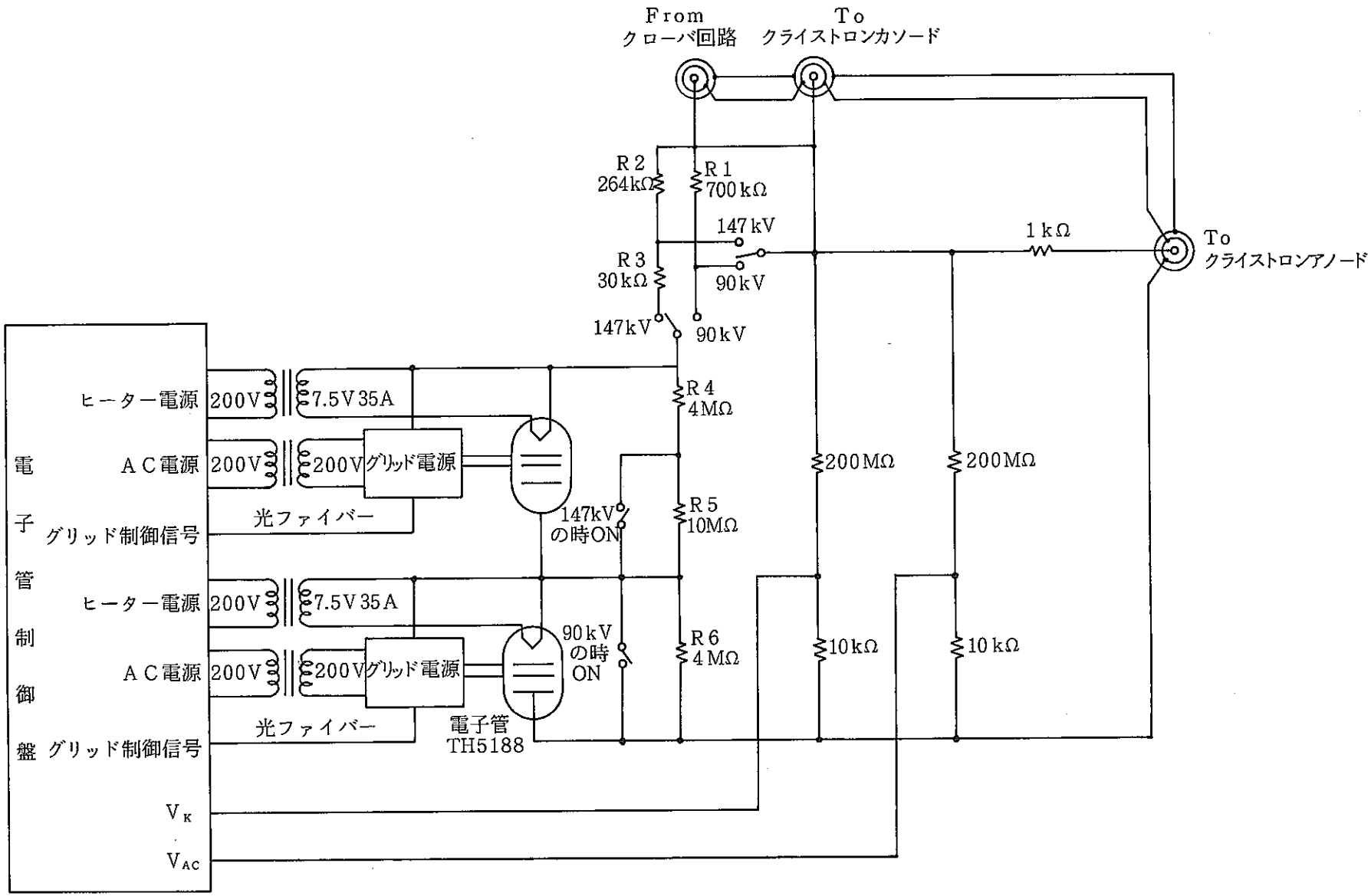


図3.1.12　アノードモジュールレータ

表3.1.3　20%デューティー用クライストロン電源の各機器の外形寸法等

（数値は１台当たり）

機器名称	外形寸法（mm）			重量	冷却方法	放熱量	冷却水	台数
	幅	奥行	高さ	(kg)		(kW)	(l/min)	
受電盤	800	1500	1900	700	自冷			1
移相トランス	1600	1700	1650	3000	油入自冷	10		2
Ｑ－ＳＷ	3000	1200	2550	1500	風冷	18		1
変圧整流器	4500	3000	3100	15000	送油水冷	10	100（工）	1
フィルター	5500	1000	3300	9000	自冷			4
分圧器	500	500	2000	300	自冷	0.6		1
クローバー回路	4000	1800	2100	16000	自冷			1
アノードモジュレータ	3300	2000	3500	13000	送油水冷	1	50（工）	2
現場操作盤	800	800	1900	600	自冷			1
遠隔操作盤	1140	710	2100	300	自冷	0.5		1

3.2 本年度の成果と今後の課題

クライストロンの制御性、位相安定性を考慮して、クライストロン用電源は、アノードモジュレーター付きの１％以内の電圧安定性を確保している。クライストロンコレクタに、90kV、174kV の電圧をかけるために変圧整流器及びフィルター・コンデンサが用いられるが、そのままでは占有面積が大きいためコンパクト化に努めた。また、クライストロン保護用のクローバー回路は、ギャップ方式を用いず、イグナイトロンを用いて信頼性を向上した。現在、概念的な装置構成と取り合いを決定したところである。

第4章　加 速 管

4．加速管

4.1 進行波還流型加速管

4.1.1 基本仕様

(1) 加速モード

πモードは定在波型と呼ばれ、定常状態での加速利得が大きいのが特徴である。しかしビーム電流が増大すると加速利得が減少し、加速管が長くなるとマイクロ波の充填時間(filling time)が長くなり、高周波ロスも大きくなるため、大型大電流加速器には適しない。

$\pi/2$モードや$2\pi/3$ モードは進行波型と呼ばれ、加速管に与えられる高周波電力を波乗りという形で有効に粒子加速に移行させるため、過渡状態の加速利得は定在波型に比べて十数％大きく取れる。また動作特性も安定している。$\pi/2$モードと$2\pi/3$モードを比較したのが、表4.1.1であり、省エネルギーの見地からみて $2\pi/3$モードを採用する。

表4.1.1 $\pi/2$モードと$2\pi/3$モードの比較

$\pi/2$モード	$2\pi/3$モード
filling time 最小	エネルギー利得最大
↓	↓
大電流加速に適す	高効率加速管
加速電界分布単純	加速電界分布複雑
↓	↓
製作容易	ＲＦ測定やや難

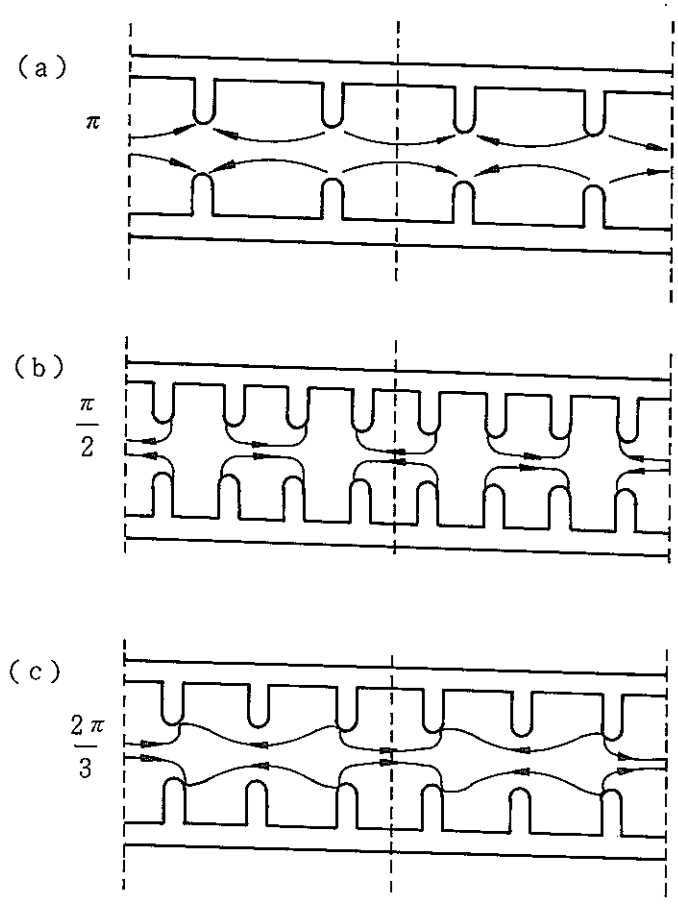


図4.1.1 各モードの加速管内の波形

(2) 進行波還流型

これは、進行波型を改良したもので、これまでダミー・ロードに捨てられていたマイクロ波を回収して再利用しようというものである。図4.1.3 のように加速管、方向性結合器、および導波管を組みマイクロ波を導入すると、加速管には進行波の加速電場が励起される。加速管を通ったマイクロ波は導波管によって回収され、加速電場の励起のために再利用される。このように還流を重ねることにより、小さい高周波源で高電場を励起することができる。今回の加速器の開発目的が核廃棄物消滅処理用であることを考えると、収率の良いことが要求され、そのため省エネルギーが必要であり、進行波還流型の加速管を採用するのが適切であると考えられる。

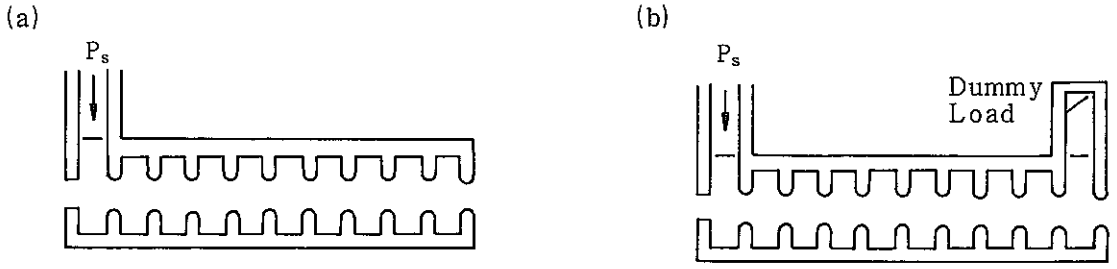


図4.1.2 従来の加速器の加速形態 (a)定在波型 (b)進行波型

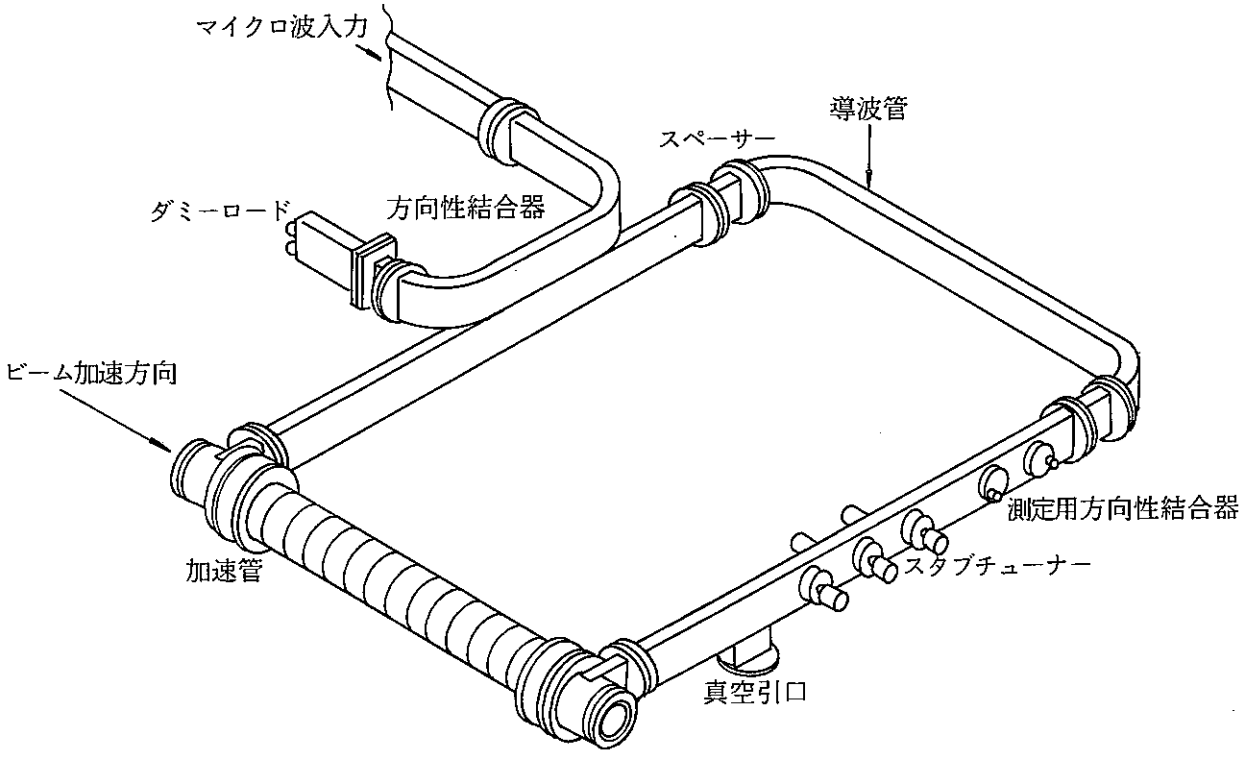


図4.1.3 進行波還流型加速管の概略図

(3) 定インピーダンス型と定電場型

定インピーダンス型は加速空洞の各寸法 (2a, 2b, t, D)がどの空洞でも同じになっている。このタイプの加速管は、構造が単純で製造コストが安いというメリットがあるが、同じ構造の繰り返しであるため、大電流の加速では電子ビームを偏向させる電場成分 (TM_{11}, TE_{11}姿態など)が急成長し、電子が加速管壁に衝突して加速できなくなる(beam blow up 略して BBU)という問題がある。

BBU 解決の手法としては、各加速空洞寸法を微妙に変化させるという方法がある。この手法に加え各空洞での加速電場が一定となるように 2a, 2b寸法を加速管出口へ行くにつれてしぼっていった加速管構造を定電場型という。

今回の目的は大電流を加速できる加速管の開発なので、定電場型を採用する。

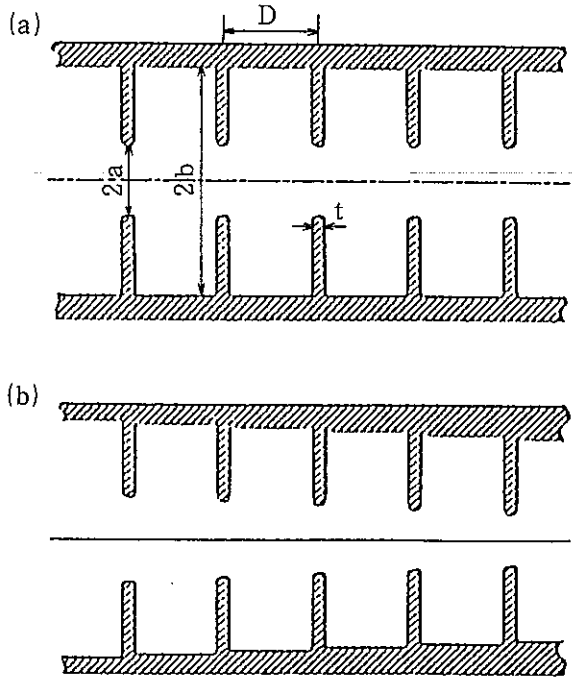


図4.1.4. 定インピーダンス型と定電場型 (a)定インピーダンス型 (b)定電場型

(4) 各部寸法

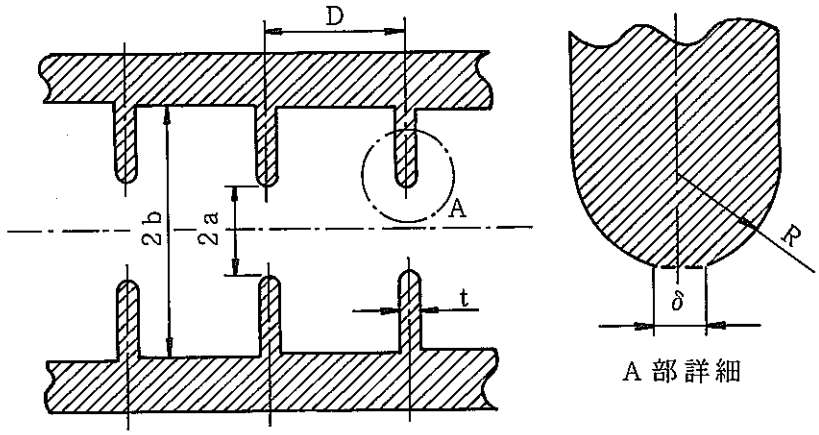


図4.1.5 加速管断面構造(disk loaded type)

表4.1.2 加速空洞各部最適寸法(単位はmm)

	タイプ1 (入口)	タイプ2 (中央)	タイプ3 (出口)
2 a	56.6	54.4	51.6
2 b	189.728	189.153	188.471
D	80.0	80.0	80.0
t	12.0	12.0	12.0
δ	1.62	1.62	1.62
R	6.34	6.34	6.34

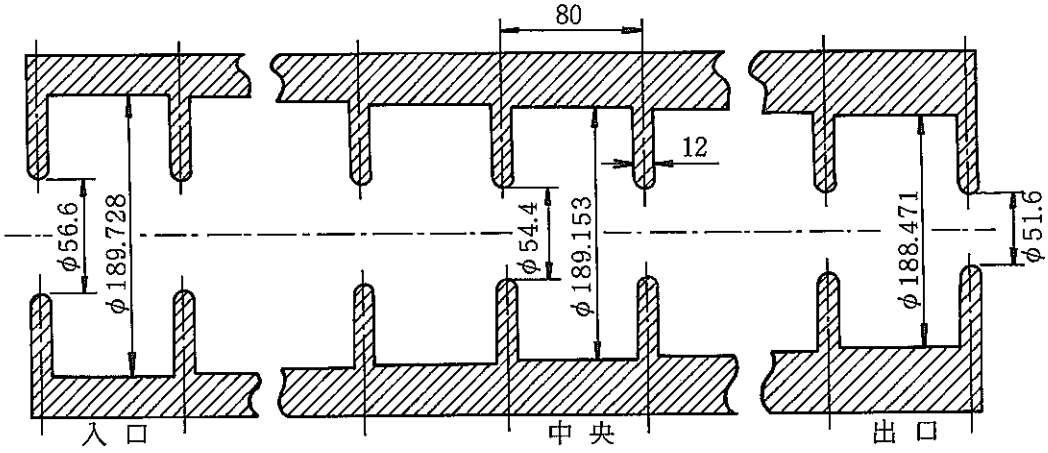


図4.1.6 加速管断面図(概略図)

4.1.2 加速管の冷却方法

(1) 加速管の発熱量

クライストロンからの供給電力250kWに対して、加速管1本(15cell)当たり

ビーム無負荷時 : 166.3kW(1.430×10^5kcal/h)

ビーム負荷時 : 78.1kW(6.72×10^4kcal/h)

合計8本で

ビーム無負荷時 : 1330kW(1.144×10^6kcal/h)

ビーム負荷時 : 625kW(5.38×10^5kcal/h)

(2) 冷却構造

加速管外周部に冷却孔を設けて冷却水を流すと同時に、ディスク部にも冷却孔を設けて冷却水を流す構造をとっている。(図4.1.7参照)。(3)に示すとおり、両者の水温は異なっており、これにより熱負荷時の応力値を計容範囲内にとどめることができる。

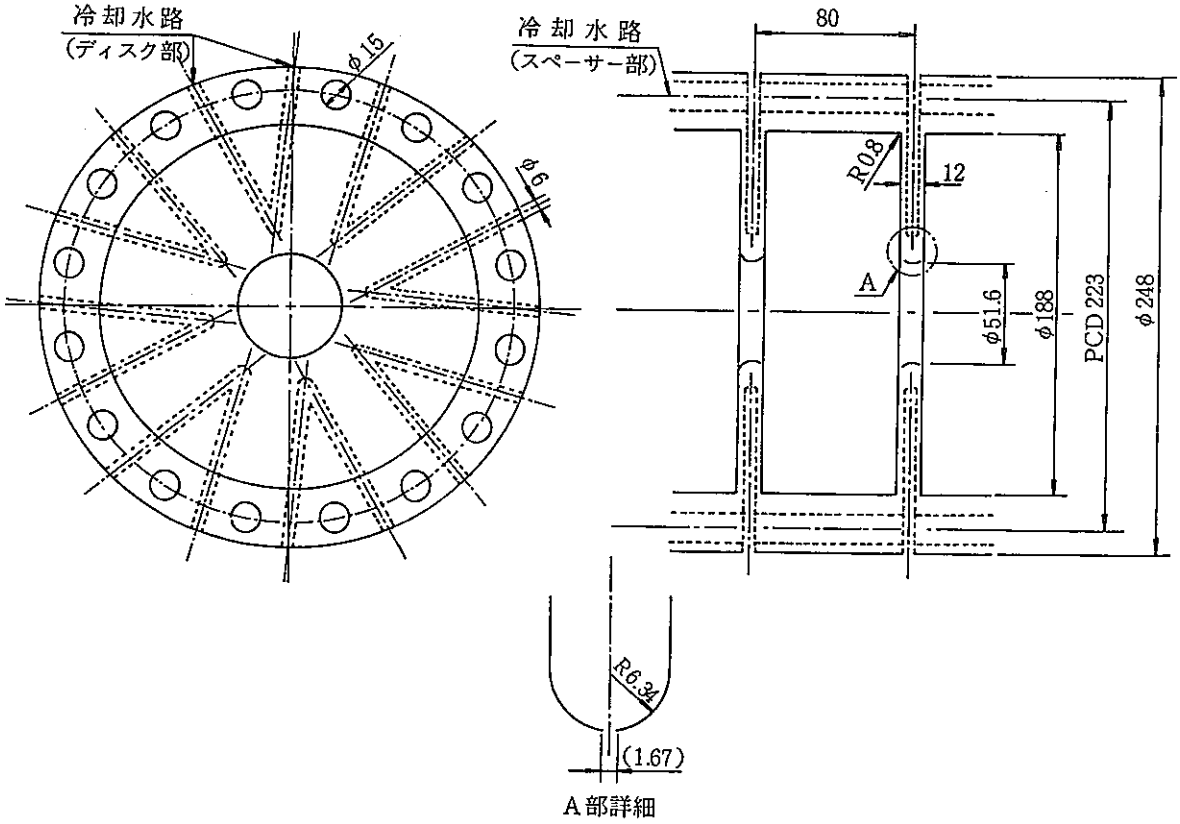


図4.1.7 加速管冷却構造

(3) 水温

ディスク部とスペーサー部に同じ水温(20℃)の冷却水を流すと、両者のb寸法相当部(図4.1.8参照)の熱膨張による変位の差が大きくなり、応力的に問題を生ずると考えられる。そこで材料加工温度20℃を基準として、次のように±5℃で冷却水温に差をつけることにする。

ディスク部入口水温　：　15　℃

ディスク部出力水温　：　18.3℃

スペーサー部入口水温　：　25　℃

スペーサー部出力水温　：　28.1℃

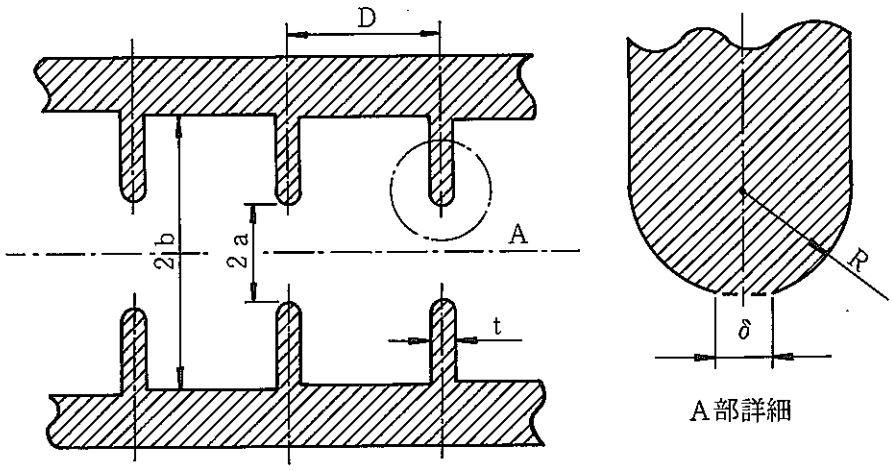


図4.1.8　加速管断面図構造(disk loaded type)

(4) 加速管の温度分布

ビーム無負荷時

ディスク部 : 52℃ ～ 67℃

スペーサー部 : 40℃ ～ 52℃

ビーム負荷時

ディスク部 : 35.5℃ ～ 42℃

スペーサー部 : 31℃ ～ 36.5℃

(5) 冷却水の流速・流量

流 速

2 m/s

流 量

ディスク部 : 3483 ℓ/min

スペーサー部 : 2717 ℓ/min

4.1.3 還流部導波管

(1) 寸法

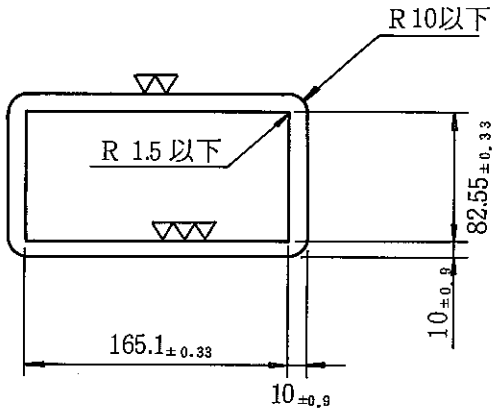


図4.1.9 還流部導波管の断面形状

(2) 媒質

還流部導波管は加速管と結合してレゾナントリングとなっているため、媒質は真空とする。

(3) 材質

媒質が真空であることと、高電力ＣＷのため壁損失が大きいことから無酸素銅とする。種別はC1020T-1/2Hとする。

※ 無酸素銅

高純銅を不活性ガスまたは真空雰囲気中で溶解鋳造して製造される。高い導電率を有し水素脆化を起こさない。真空溶解された無酸素銅は高温真空中で用いられてもガスを放出しないので電子管などの用途に適している。

(4) 冷却方法

検討項目

・導波管の壁損失による発熱量及び発熱分布
・冷却したときの導波管の温度分布
・導波管の温度上昇による移相量

検討条件

・還流部の伝送電力 ： 250kW × 8.07(G) ＝ 2018kW
・冷　媒 ： 冷却水　水温 25℃
・導波管外雰囲気 ： 室内空気 25℃
・温度上昇前の初期温度 ： 25℃

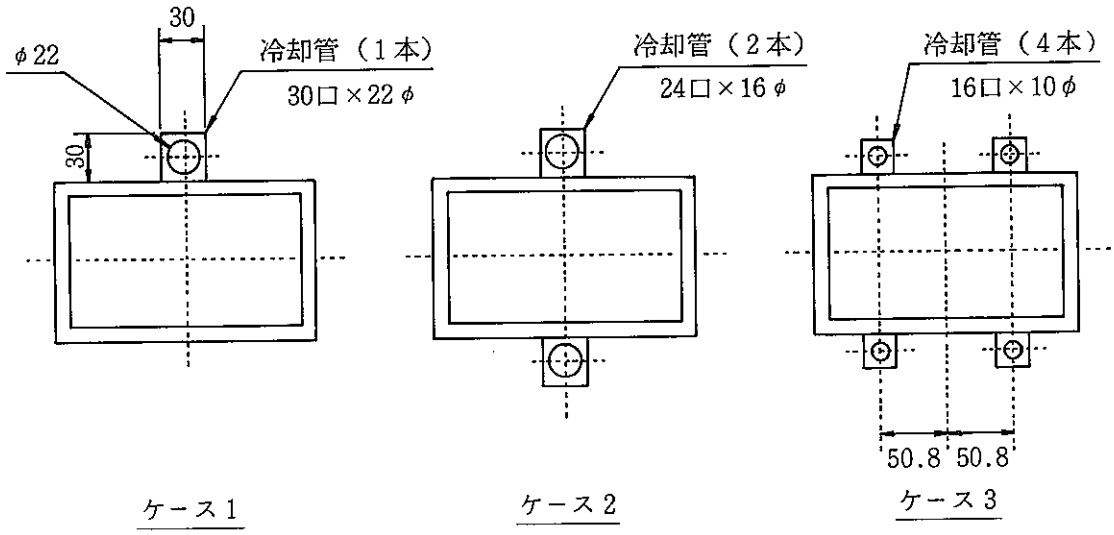


図4.1.10　計算ケース(＝冷却管方式)

表4.1.3 計算結果

計算ケース		1	2	3
冷却管		1本×22φ	2本×16φ	4本×10φ
発熱量		2.6625 kW／m		
冷却水流量(注)		2.29 m³／h・m		
導波管の温度(℃)	最高	79.75	41.83	33.42
	最低	31.0	29.84	28.39
	平均	62.9	37.5	30.9
移相量 °／m		1.407	0.464	0.219

(注) 冷却水流量は、導波管1m当たり冷却水の温度上昇を1℃としてある。

4.2 定在波型加速管

4.2.1 はじめに

高周波効率、加速管内での高周波場の分布の仕方、およびモード・スペーシングが加速管の設計上重要なパラメターである。高周波効率が良いということはシャント・インピーダンスが高いということだといってもよい。またモード・スペーシングとは、加速管の中の高周波には加速モードでないモードが混在しているが、それらが加速モードから周波数的に十分離れているかどうかを表す指標である。

4.2.2 基本設計

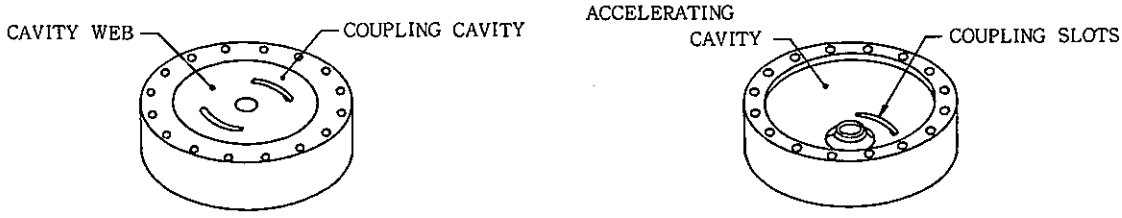


図4.2.1 On-axis coupled standing-wave cavities.

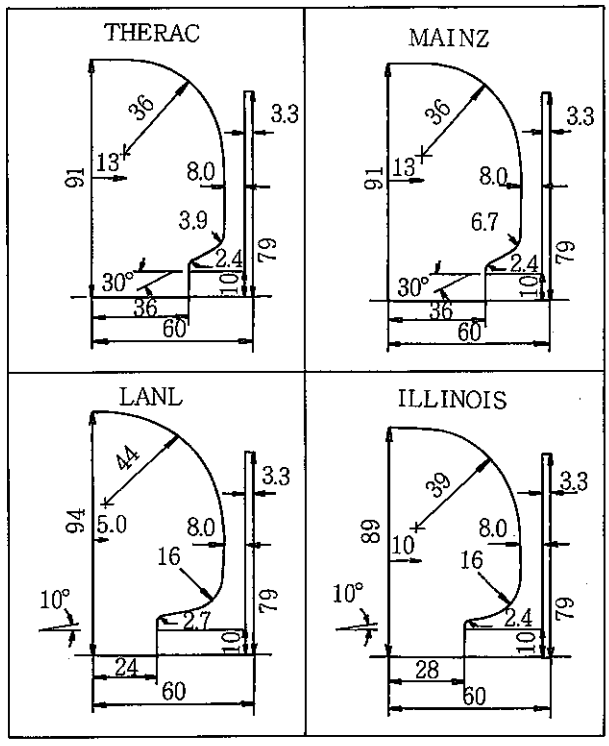


図4.2.2 Profiles of 1249 MHz on-axis coupled cavity segments. (All dimensions in mm.)

表4.2.1 1250 MHz ACCELERATING CAVITY PROFILE OPTIMIZATION
(web thickness = 8 mm, beam aperture diameter = 20 mm)

Profile	Shunt Impedance ZT^2 MΩ/m	Transit Time
THERAC	56	0.81
Mainz	56	0.82
LANL	60	0.88
Illinois	66	0.86

4.2.3 二つの冷却チャンネル(周辺冷却とウェブ冷却)

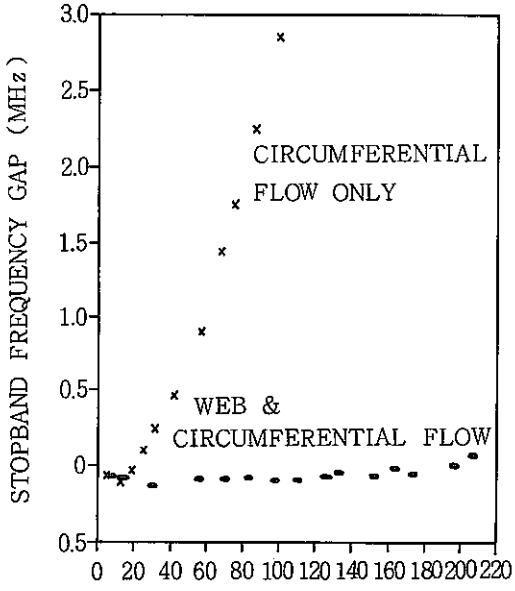


図4.2.3 Changes in the stopband frequency gap as a function of power. Measurements were done with a 2450 MHz on-axis coupled structure cooled with a total water flow were used in measurements with circumferential plus web cooling.

4.2.4 性能の評価(シャント・インピーダンス、高周波場の分布、モード・スペーシング)

ハイパワーで運転するよう設計されたキャビティは、冷却用の孔をあけるためウェブを厚くしなければならず、効率が落ちる。製作上の困難さを増すことなく十分な水流を確保するためには、ウェブの冷却孔の直径は3mm を下回ってはならない。このためキャビティの厚さの最小値は、1249MHzの場合8mmとなる。カップリング・セルによって、ウェブのエフェクティブな厚さを増大すると、$\pi/2$モードの高周波場の安定性は上がるが、シャント・インピーダンスのロスを補いきれなくなる。SUPERFISH による計算によると、シャント・インピーダンスの計算値は通常約15% オーバー・エスティメートしている。1249MHz の加速管のシャント・インピーダンスは、計算上約50MΩ/m と期待されている。$\pi/2$モードの定在波型加速管の高周波場およびモード・スペーシングは、キャビティ間の接合具合と一本の加速管を構成するキャビティの数に依存する。高周波場の振幅は通常、クライストロンからの高周波を入力する位置から離れるにつれて減衰する。モード・スペーシングおよび高周波場の振幅の減衰はコンピューター・コードLOOPXで計算できる。図4.2.4は、first neighbour couplingが8%である加速管について、場の減衰とモード・スペーシングの計算結果を示したものである。計算によるとＰＮＣ向けの5m加速管は、高周波場の振幅の減衰が1%を下回り、$\pi/2$近傍のモード・スペーシングが周波数で表して約5MHzであり、好ましいといえる。

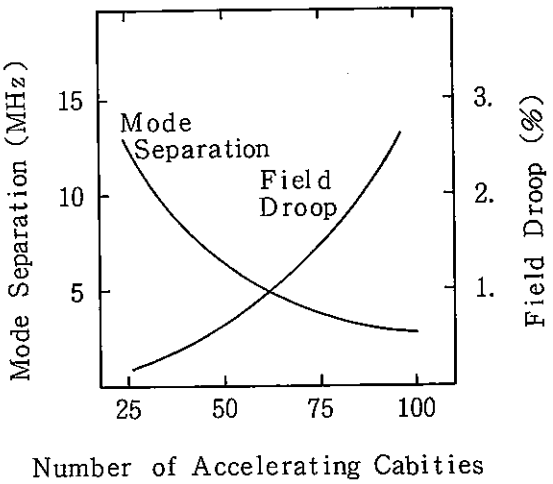


図4.2.4 Mode frequency spacing around $\pi/2$ mode and field droop in standing-wave structure.

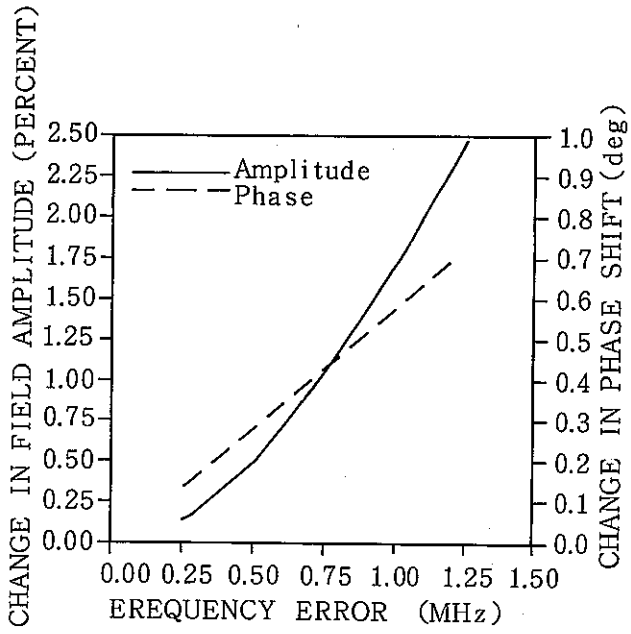


図4.2.5 Field droop and power flow phase shift from random errors in the tuning of cavilities in $\pi/2$ mode standing-wave structure. The value of the frequency error corresponds to the maximum value of the random errors. Reference values are for the case when no tuning error is assumed. Reference values of the field droop and power flow phase shift in a 5m long structure with 8% first neighbour coupling are about 0.5% and 0.4% respectively.

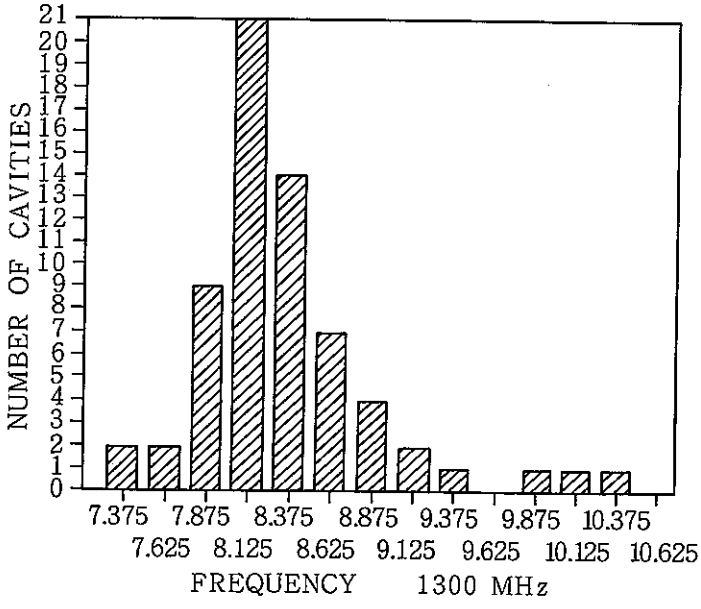


図4.2.6 Histogram of the measured L-band cavity frequency of 70 cavity segments after their machining with a numerically controlled lathe.

4.2.5 工学的設計

ＰＮＣ向けキャビティのチューニング・エラーの許容量は、コンピューター・コードLOOPX で計算される。キャビティの励振周波数に大きな変動があると、加速管内部の高周波場の分布状態や位相に悪影響を及ぼす。チューニング・エラーが1MHzに達すると、5mの長さをもつ加速管では、高周波場の傾斜やパワー・フローの位相のずれが深刻になってくる。

5mの加速管のチューニングは±250kHzの正確さが要求されるが、これはＮＣ旋盤で1300MHzのキャビティを製作した際に既に達成されている。表3.2.2は、1249MHzのon-axis coupled cavityの寸法に誤差が生じた場合、周波数がどのような影響を受けるかを示したものである。これによると、周波数に±250kHzの正確さをだすための製作時のキャビティの寸法の許容量は±0.025mmであることがわかる。

表4.2.2 FREQUENCY SENSITIVITY OF 1249 MHz CAVITY PARAMETERS

(on-axis coupled β=1 cavity segments)

(results of calculations with SUPERFISH)

Cavity Parameter	Sensitivity (MHz/mm)	Tolerance for ± 250 kHz (mm)
Cavity Segment Length	0.752	±0.332
Accelerating Cavity Radius	−13.5	±0.019
Web Thickness	11.6	±0.022
Nose Cone Penetration	−11.3	±0.022
Beam Cavity Radius	−5.87	±0.043
Upper Cavity Radius	−4.19	±0.059
Nose Cone Base Radius	−0.353	±0.709
Nose Cone Radius	−11.4	±0.022
Coupling Cavity Radius	−13.6	±0.019

ＡＥＣＬでは、加速管の熱伝達と熱応力の解析に、コンピューター・コードMARCを使用している。これは有限要素法による計算コードで、原子炉内の核燃料のひずみの計算法を応用したものである。このコードが加速管の中のハイ・パワーのふるまいを模擬する能力は、210kW/m²まで確められている。ここでは、加速器IMPELA(1300MHz) の加速管の熱応力解析について結果を述べる。ＰＮＣ向けの加速器とIMPELAとは類似点があって、どちらの加速管についても計算結果は有効である。熱伝達と熱応力の解析によると、ＰＮＣ向け加速管にはウェブと周囲の両方に冷却が必要である。一方、熱応力が加速管の変形のクリティカル・ポイントを十分下回るためには、単一フェーズ（加速モード）を冷却対象とするだけでよい。図4.2.7に IMPELA 1300MHz on-axis coupled structure のキャビティの見取り図と冷却系の様子を示す。熱力学的解析は、27個のキャビティでできた長さ1.5mのサブ・アセンブリー（加速管の一部）を冷却回路にろう付けしたモデルに基づいて行い、加速管の残りの部分とは独立させて考える。

すでに述べたように加速管の冷却は、周囲とウェブの両方の冷却回路によって行われる。周囲の冷却回路は、加速管の外壁に設けられた20個の孔によって構成され、管の端から端まで水が通り抜けられるようになっている。20個の孔のうち 4個はウェブ冷却のヘッダーとなっている。これらの冷却回路は、加速管の各部の温度差が最小となるよう、カウンターフローで構成されている。

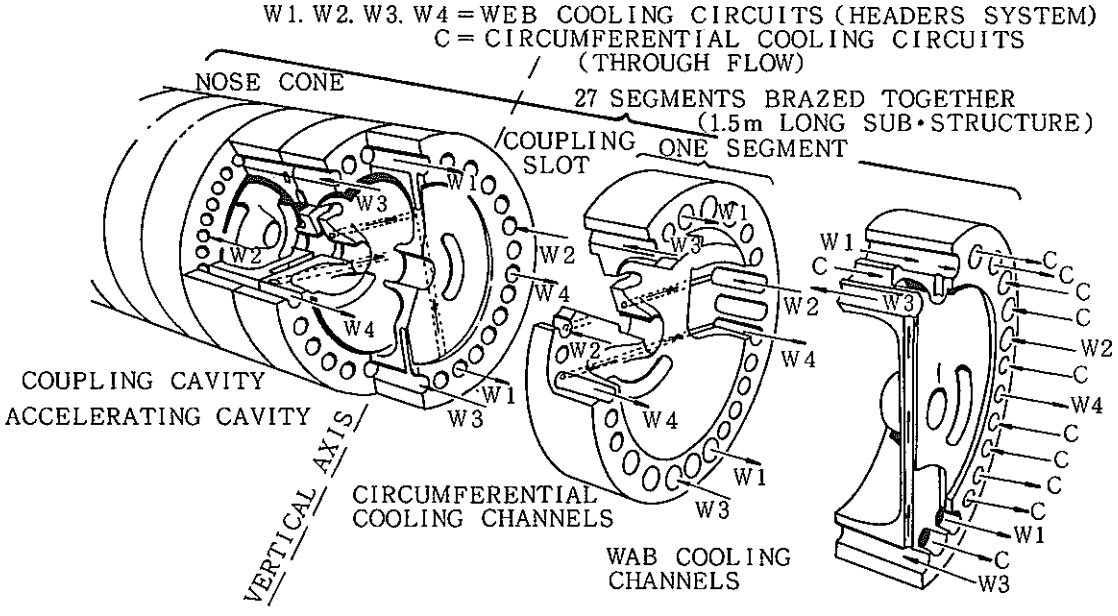


図4.2.7 Cooling arrangement for high-power L-band on-axis coupled structure

加速管の対称性によって、モデルには一つのキャビティの1/4があればよい。モデルの立体図を図4.2.8に示す。このモデルは、1117個の要素に区分され、全部で1638個の頂点をもつ。各要素はいずれもパラメターが同じで8個の頂点をもち、熱伝達に関しては1、熱応力に関しては3の自由度をもつ。

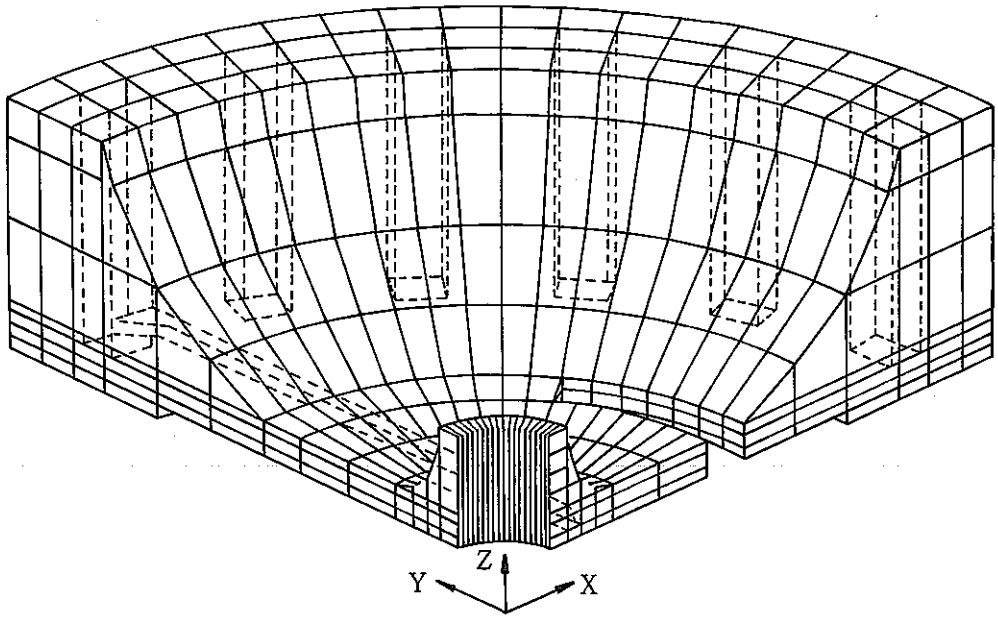


図4.2.8 Three dimensional finite element model of on-axis coupled cavity segment.

（ヒート・フラックスの計算）

（クライストロンからの）ＲＦパワーによってキャビティ表面に発生するヒート・フラックスの計算には、コンピューター・コードSUPERFISH が使われる。シャント・インピーダンスが50MΩ/m だと仮定すると、ＰＮＣ向け加速管の場合、パワー・ディシペーション（熱損失）は約32kW/mとなる。パワー分布は軸対称であり、熱損失32kW/mなら、最大10.6 kW/cm²（ノーズ・コーンの部分）、最小3.84kW/cm²（内壁部分）に分布する。

（流量計算）

各チャンネル（周囲の冷却とウェブ冷却）の冷却水の温度と film heat transfer coefficients は、thermohydraulic analysis から見積もられる。異なるウェブ冷却チャンネルでも、つながっているヘッダーが同じなら冷却水の流量は等しいと仮定する。周囲の冷却孔と、ウェブ冷却チャンネルのヘッダーの流量は0.106kg/sと選択された。

（熱変形の計算）

キャビティの熱変形は、高導電率無酸素銅の熱膨張係数の温度依存性を用いて計算される。周辺の大気の対流による冷却は無視する。

キャビティに発生した温度の増分を図4.2.9 に示す。これを見るとノーズ・コーンおよび周囲の温度分布はかなり軸対称であることが分かる。ウェブにはスロットがあってここで熱伝達がさえぎられるために温度上昇が深刻になるが、ウェブ冷却のチャンネルがこれを緩和している。温度が上昇してキャビティ表面の抵抗値が大きくなることによるシャント・インピーダンスのロスは、銅の場合0.2%/°Cである。

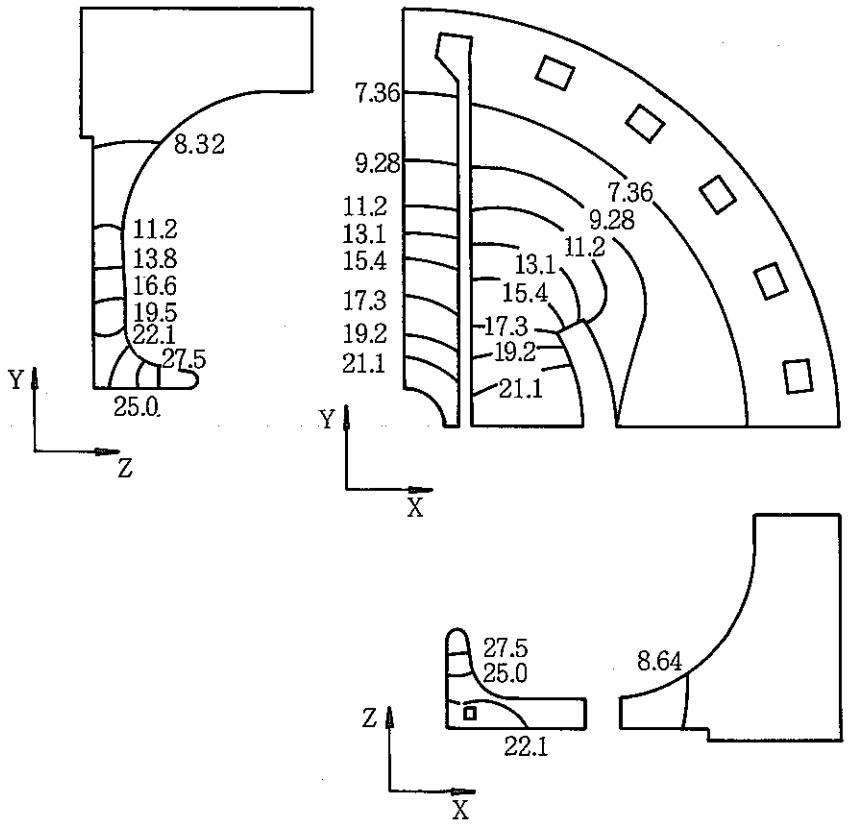


図4.2.9 Isotherms at an rf power dissipation of 32kW/m.
(Temperature increments in ℃.)

キャビティを弾性体として扱った場合の Von Mises Stress のコンタ図が図4.2.10である。応力はキャビティの素材（銅）の降伏点(69MPa) を十分下回っている。ビーム孔とカップリング・キャビティ面とでできる角の部分のXZ平面に面したところで応力は最大で、約30MPaとなっている。

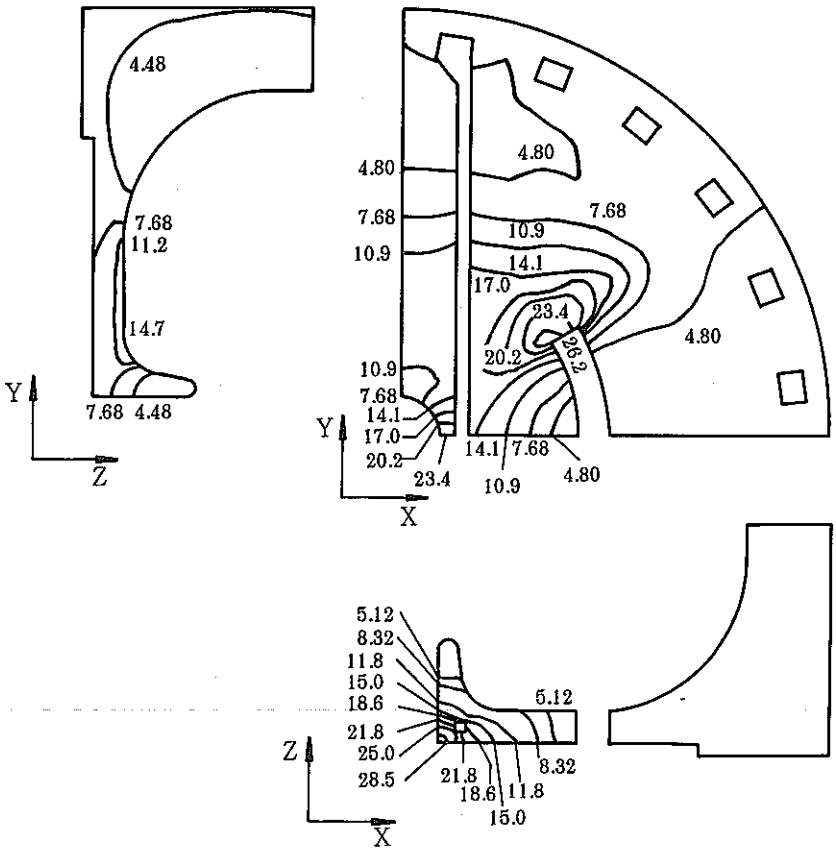


図4.2.10 20 Von Mises stress contours at a power level of 32 kW/m (Stresses in MPa)

4.3 本年度の成果と今後の課題

進行波型加速管

平成元年度の設計・試作（材質はアルミニウム）にて、高周波特性から決まってくる加速セルの基本寸法のデータが得られていた。本年度は、それらの結果をもとに、無酸素銅で個々の加速セルを製作し、それらをろう付けにして接合し、接合時の加熱処理によって生じる熱変形を補正して、高周波特性を確保するチューニングの試験を行った。また実際に加速管はどのような電力負荷で使用されるのかを考え、それに基づいて冷却方法を検討した。平成３年度以降は、実際にクライストロンを接続して、大電力負荷に耐えられるかどうかの試験を行う。

進行波型加速管用の高周波導波管系については、平成元年度の設計・試作にて、還流部およびクライストロン系導波管の基本設計が実施され、直線導波管については真空仕様に耐える構造の導波管が試作されデータが得られていた。本年度は、導波管フランジ構造の部分的見直しを実施し、最終形状とした。更に、還流部の導波管系を構成する主要コンポーネントの一部（方向性結合器、スタブチューナー）の開発を実施した。平成３年度以降には加速管の大電力試験が予定されているので、これら導波管系の部品を取り揃えて、クライストロンと加速管を接続する。

定在波型加速管

すでに製作された稼働している定在波型加速管の実績をもとに基本設計を行い、加速管の性能を決める重要なパラメター（シャント・インピーダンス、モード・スペーシング、加速フィールドの分布）をシミュレーションによって計算、評価した。また性能を保つための冷却方法についても検討し、加速管の熱変形の許容値を算出、応力的には問題ないことがわかった。

第５章　インジェクション・システム

5. インジェクション・システム

5.1 100kV電子銃

電子銃については、ＡＥＣＬには加速器 IMPERA の実績があるので、それを基礎に開発を進めることにする。提案の対象となっている電子銃は、ビーム・カレント調整用の Whenelt aperture と non-intercepting anode がある（図5.1.1参照）。電子銃のカソードは－100kVで運転され、非規格化エミタンスは15πmm•mradである。電子の放出（エミッション）は、ウェーネルト電極に－3kV のバイアスをかけることによって抑制される。従って、－100kVでカソード電流は1.2Aであるが、銃の形状は900mAでエミタンスが最良となるように設計されている。

アノードによって遮られた電子により熱が発生するが、ビームの１％以上が遮断されるということはない。提案の設計によると、アノードは、外壁（Gun housing)へ熱が十分流れて行くように Copper plate の上に乗せられている。外壁からは、Water jacketによって余分な熱が取り除かれる。この冷却システムによって、アノードの部品の温度が最高350°Cになるまで加速器をＣＷ運転することが可能である。

この電子銃は、連続ビーム電流900mAを発生し、±100mAで調整可能、±2%の安定性を持つ。ビーム・バンチングを良くするためには、出力エネルギーに±0.5%つまり±500Vの安定性が必要である。そのためには、電子銃への供給電力（100kV、100kW)のリップルが±0.5%よりも小さく、設定電圧の分解能が±0.5%かそれよりも良くなければならない。

ウェーネルト電極の電源は、絶縁されたデッキの上に置かれており、普段はカソードと同じ－100kVの電位にある。ウェーネルト電極は、この電源による印加電圧が－3kVでオフバイアス（ビーム電流は0）となり、あとは－3kVから0 までの間で適当にビーム電流を調整してオンバイアスにできるようになっている。立ち上げ時のオンバイアス電圧とパルス・トリガリングの制御信号は、ファイバー光学の技術を用いて発され、gun deckに取り付けられた optical converter と論理回路がこの制御情報を解読する。

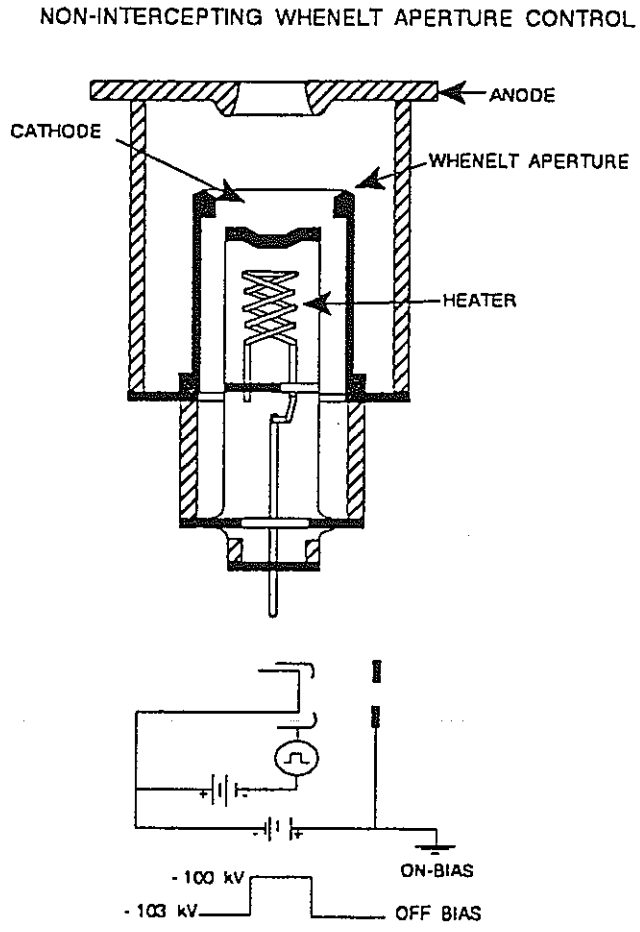


図5.1.1　ウェーネルト電極型電子銃

5.2 ビーム・チョッピングとビーム・バンチング

電子銃によって100keVの直流ビームが発射されるわけであるが、このエネルギーでは電子は高速の0.55倍の速さで進行する。この電子を、過度に相対論的な非線型性をもたらすことなく速度変調することによってバンチングを行い、うまく縦方向に加速されるようにしなければならない。

図5.2.1 に示すように、直流ビームは、線形加速器に入れられる前に、その準備としてチョッピングとバンチングが行われる。これと同様のシステムがＣＲＬの805MHz Electron Test Accelerator(ＥＴＡ）向けに作られており、ＥＴＡに注入されるビームはすべてトランスミッションが可能である。加速管内でのビーム・トランスミッションによるロスは0.01%を下回らなければならない。

電子銃から発射された直流ビームは、まず焦点距離約１ｍの collimating gap lens を横切り、次いでチョッパー・キャビティへと入っていく。直流ビームの中には、効率よく加速することが困難な位相の電子が混じっているが、チョッパー・キャビティ内には位相の固定された高周波場があって、これによってこのような電子は鉛直面の方向に掃きとばされる。チョッパーを出たビームはバンチャー・キャビティへ入っていき、ここでは位相の固定された高周波場が、電子を縦方向に速度変調させる。この後ビームはドリフト空間を走り、その終端でスリットにぶつかる。このスリットの働きによって、バンチは、進行方向に垂直な速度成分および位相の拡がりが小さく、縦方向に圧縮された状態で進行するようになる。

ビーム・チョッパーは円筒型のキャビティで、TM_{110}モード、周波数624.5MHz の低周波で運転される。また、ビーム・バンチャーも円筒型のキャビティであるが、基本周波数1249MHzで運転される。図5.2.2は、基本周波数として1249MHz を採用したときに、チョッピングおよびバンチングのフェーズ・アクセプタンスがどうなるかを示したものである。これを見ると、フェーズ・アクセプタンスの半値幅は40°で、初めの直流ビームの約11%を含んでいることが分かる。つまり、電子銃を出た段階で0.9Aであったビーム電流は、チョッピングおよびバンチングの過程で100mAになっているのである。

すでに述べたように、チョッパー・キャビティは、周波数624.5MHzの低周波で運転される。これは、ビームが第一加速管のところで反射して電子銃へ戻っていくのを最小限に抑えるためである。電子銃へ戻っていくビーム電流は、ＣＷ運転中に、ビーム・パワーのうち10kWを輸送することが考えられ、インジェクション・システムの部品に深刻な発熱をもたらす可能性がある。もし、チョッパー・キャビティを基本周波数（1249MHz)で運転すると、位相が互いに180°ずれた（位相が互いに反転した）バンチが入射されることになってしまう。バンチのうち、あるものは速度変調によって圧縮されて加速位相にある電子を含み、あるものは逆に電子密度が希薄になって加速位相からずれた電子を含んでいる。後者

のバンチは、第一加速管の第一キャビティで減速され、戻り電子となってインジェクション・システムに熱を与えることになり、ハイパワーで運転する場合はとくに懸念される。

チョッパー・キャビティは、直円柱、TM_{110} モードのシンプルな構造で、これで良い結果が得られている。キャビティ内には鉛直面内にこのモードによる磁場が立ち、ビームは進行方向に対して垂直な方向に掃かれる。TM_{110} モードは方位角方向に縮退しているが、摂動を入れることによって解かれ、必要な場の配置が得られる。周波数624.5MHzの円筒型チョッパー・キャビティの直径は、すでに製作されたキャビティの結果より、約60cmとなり、TM_{110}モードのQ値は約24000と期待される。チョッパーに必要なRFパワーは周波数624.5MHzでは100Wであり、ドリフト空間60cm、スリット間隔 6mmである。ドリフト空間を長くすると必要電力は小さくなるが、電子銃のエミタンスの関係で、ビームの焦点をスリットのところに合わせるには限界がある。また、キャビティの周波数安定性を保つには水冷が必要である。

ビーム電流を±2%の安定性に保つには、チョッパー・キャビティの中でビームをスイープする電場に±1%の安定性と±10%の調節レンジが必要である。

バンチャーは、ビームの位相の拡がりがチョッパーを出た段階で半値幅にして 40°であったものを7°に圧縮して第1加速管へ送り込む働きをする(バンチング・ファクター1/6)。バンチャーに必要なRFパワーは10W、ギャップ電圧は8kVであり、60cmのドリフト空間を通って第1加速管に達する。ビーム負荷時にはキャビティの周波数にずれが生じる。

バンチング・ファクター1/6を±6% の安定性に保つためには、バンチャー・キャビティのRFフィールドの振幅に±12% の安定性が要求される。バンチャーを出て第1加速管へと入っていく電子集群（バンチ）は位相の長さが12±1.5°、半値幅7°である。

チョッパー・システムのスリットは、100keVの電子のうち約90kWを遮断して発熱するので水冷が必要である。このパワー・フラックスは、スリット孔の部分（ここには密度の高い電子群が衝突する）で30kW/cm²を越える。チョッパー・キャビティのRFフィールドの振幅を変えると入射バンチの位相の拡がりも変わり、位相幅が狭く、密集した電子群がスリットに衝突すると発熱問題は深刻となる。電子群は、幅が 6mmしかないスリットを通り抜けるため、装置の複雑さを避けて、この発熱問題に対処するには、スリットの設計に工夫が必要である。スリット孔をビームに対して6° の角で先細にすると、パワー・フラックスを3kW/cm² に落とすことができる。それでもやはりスリットへの熱付加が大きい場合は、設計が複雑になってくる。

第一加速管は、電子が同位相（加速場の慣例上−20°)で加速されるように、各セクションのβがだんだんと大きくなっていく構造になっている。ここではビームのバンチングが更に促進され、表5.2.1 に、第一加速管の各キャビティのβの値を示す。キャビティの長さは、$\beta=1$に対して12cmであり、$\beta<1$に対してはそれに応じて寸法が決められる。

図5.2.3は、インプット・フェーズが0°、−20°及び−40°の場合について、インジェクターの Transverse acceptanceの計算値を示したものである。インプット・ビームの位相空間を、この acceptance におさめ、最後のギャップ・レンズの長さを有効に活用することにより、インジェクターでのビーム損失を最小限にとどめることができる。

インジェクターによるビーム・バンチングの様子が図5.2.4 に示されている。位相の拡がり12°で入射したビームは、位相の安定性が±10°で、加速場の振幅の安定性の自乗平均が±1.5%であれば、自乗平均で5°±3°に圧縮される。

要求される位相調整を達成するには、インジェクターの位相を基準とし、バンチャーとチョッパーの位相をこれに固定することが必要である。ビームはインジェクターの入り口では位相の拡がりが大きい。このため、第1加速管へ入っていくビームの位相を基準とするよりも、インジェクターの中に立つ Fieldの位相を基準とするほうが、加速場の振幅の安定性の自乗平均±1.5% は容易に達成されるのである。要求される位相安定性の自乗平均は、バンチャーが±5°、チョッパーが（1249MHzで）±7.5°である。これによって、インジェクターに入力される位相は、時間にして99.8%までの間、−40°と0°の間におさまり、transmission loss も0.01%よりも低く抑えられる。

インジェクターに続く$\beta=1$の加速管は、入射してくるビーム・バンチの位相に合わせ、0°にロックされる。瞬間的なエネルギー幅±2MeVと出力エネルギーrandom variation ±2MeVは、ビーム・バンチのＲＦ fieldに対する位相に依存する。このエネルギー幅は、

$$\triangle E/E = -1/2\,(\alpha/2+\theta^2)$$

で与えられる。αはバンチの長さ、θは位相角で、単位はどちらもラジアンである。これより、位相に誤差が生ずると、加速電圧やビーム・ローディングが低下することが分かる。

出力エネルギーの安定性を±2MeVに保ち、ビーム・ローディングの減少を5%よりも低く抑えるには、$\beta=1$の加速管は、9°よりも小さい位相角に固定され、位相安定性の自乗平均は±6°よりも良くなるよう制御されなければならない。

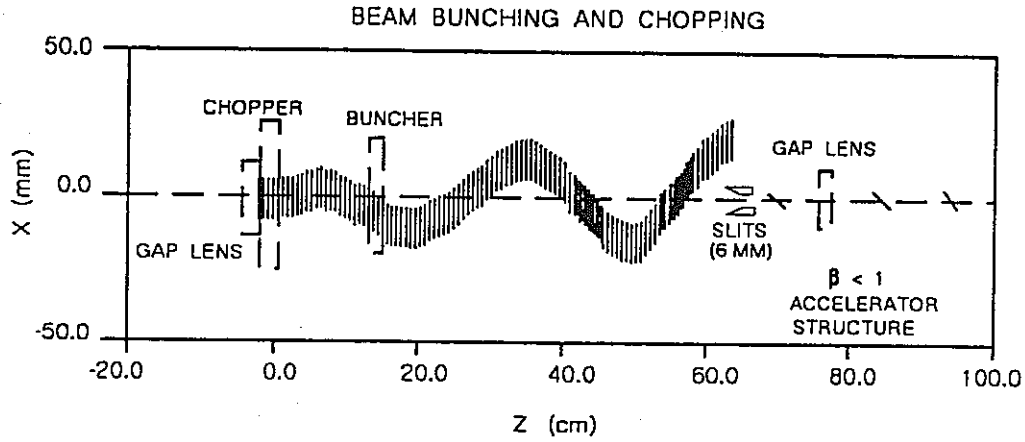


図5.2.1 Beam bunching and chopping. The relative position of the buncher and chopper RF cavities are shown. The electron beam is shown at a fixed time: the individual electrons follow straight paths from the chopper RF cavity.

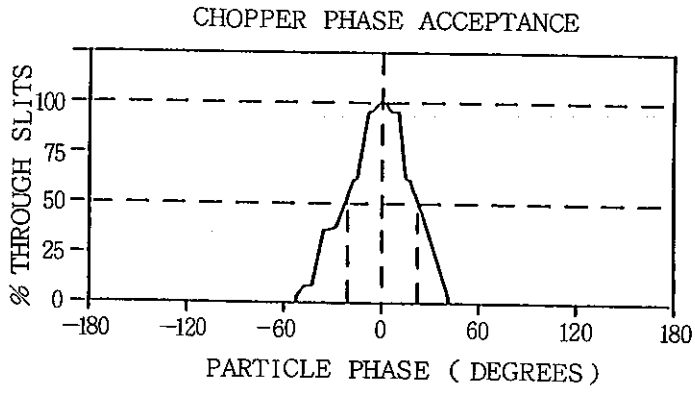


図5.2.2 Chopper Phase acceptance. The chopper slices the dc beam from the electron gun into a series of short pulses, losing roughly 90% of the incident beam current. These pulses are synchronized with the RF fields in the injector accelerator structure.

表5.2.1 Injector accelerator structure

Cavity Beta	Number of cavities
0.6220	1
0.7503	1
0.8226	1
0.8677	1
0.8977	1
0.9186	1
0.9337	1
0.9337	1
0.9590	5
0.9824	9
0.9939	20

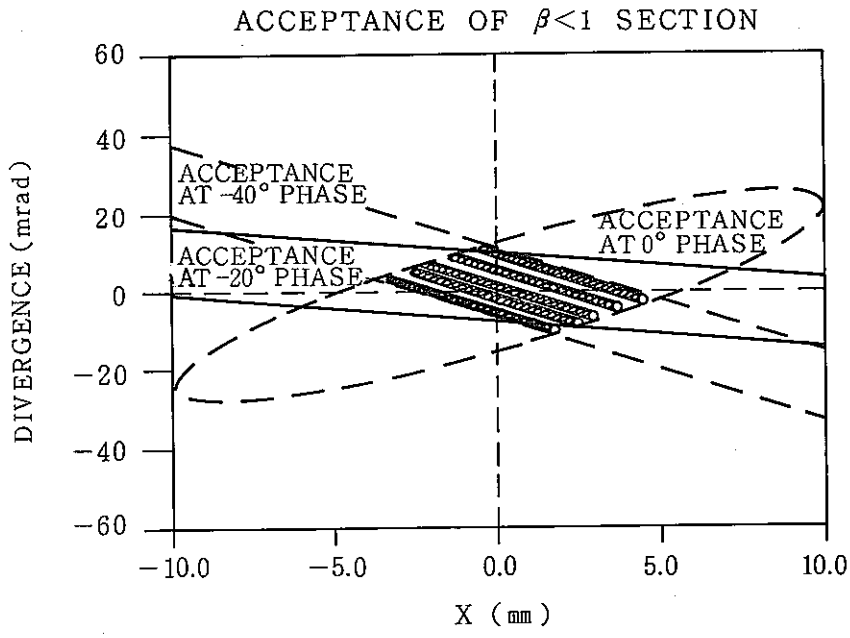


図5.2.3 Transverse acceptance of the injector structure. The small circles represent the calculated emittance of the chopped and bunched beam, and the larger ellipses represent the transverse acceptance calculated at 0 and -40 degrees.

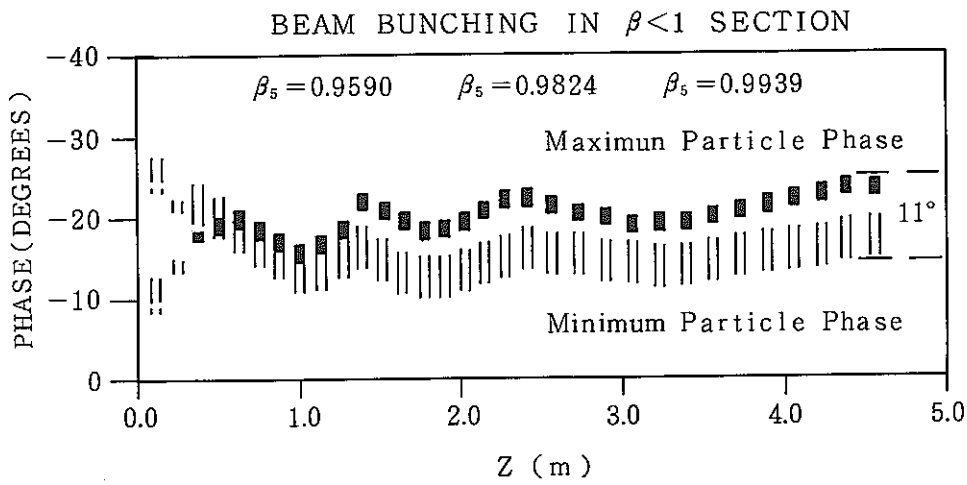


図 5.2.4 Phase compression in the injector accelerator structure. The two cases shown are for -10 degrees injection phase with structure fields at +1.5% above the design level, and for -30 degrees with fields at -1.5% below the design level. There is little phase slip throughout the structure, the design synchronous phase is 20 degrees.

5.3 インジェクション・システムのまとめ

100kV入射器系電子銃

基本性能

・アノード変調によるパルス化

・カソード電圧－100kV　非規格化エミタンス15πmm•mrad

・電流は、ウェーネルト電極に－3kV のバイアスをかけることによって制御される。これによりエミタンスは最良化される。

・カソード電圧－100kVで電流は1.2Aであるが、銃の形状は900mAでエミタンス最良

・連続ビーム電流900mAを発生し、±100mAで調整可能　安定性±2%

・ビーム・バンチングを良くするためには、出力エネルギーが±500V(±0.5%)の安定性をもつことが必要。より具体的にいうと、銃への供給電力（100kV,100kW)のリップルが±0.5%を超えず、電圧の設定値の分解能が0.5%かそれよりも良いことである。

・ウェーネルト電極は－3kVでオフ・バイアス（電子流は0）となり、あとは－3kV～0の間で適当に変えて電子流を調節できるようになっている。

・出力電子エネルギー100KeV　$\beta=0.55$

チョッパー

基本性能

・TM_{110}モード　624.5MHzの低周波　Transverse Field
シングル・キャビティ

・フェーズ・アクセプタンスの半値幅40°(図5.2.1参照)　入射器系電子銃からのビーム電流900mAのうち約11%を含む。従ってチョッパーを出た段階でビーム電流は100mA　TM_{110}モードのQ値＝24000

・需要高周波パワー100W

・ビーム電流を±2%の安定性に保つためにTM_{110} モードの振幅に±1%の安定性および±10%の調節範囲必要

・高周波場の位相安定性±7.5°必要

バンチャー

基本性能

・基本周波数1249MHz　シングル・キャビティ

・ビームの位相の半値幅を40°から7°まで圧縮（バンチング・ファクター1/6）

・需要高周波パワー10W　最大電圧8kV　Longitudinal Field

・バンチング・ファクター1/6 を±6%の安定性に保つために、バンチャー・キャビティ内の高周波場の振幅に±12%の安定性必要

・バンチャーを出て第一加速管へと送られる集群（バンチ）は、長さ12±1.5°、半値幅約7°

・高周波場の位相安定性±5°必要

第一加速管（Graded-β Structure, Injector Structure）

基本性能

・位相角－20°の近傍に集群（バンチ）を乗せて加速　更にバンチングを推進

・高周波場の位相安定性が±10°、振幅安定性が±1.5%ならば、位相の長さ（拡がり）12°で入射したビームバンチを自乗平均で5°±3°に圧縮

5.4 本年度の成果と今後の課題

電子銃開発としては、既存の電子銃の大電力化と、大電流用に新たな構造を考える二つのオプションがあり、現在の所これら二本立てで設計を行っている。安定性を保つための制御は、今回の仕様の範囲内で確保できる。大出力に耐える構造および材料については検討中であるが、高エミタンスビーム加速時には専用の電子銃を設計する方針である。チョッパー、プリバンチャーについては、マイクロ波特性仕様を決定した。なお、チョッパーの耐熱性、プリバンチャーの集群特性の検討は引き続き行う。

第６章　加速器の運転

6. 加速器の運転

6.1 ビームの始動と制御

6.1.1 インジェクション・システムのパルス運転

加速器を早くフルパワーへもっていくためには、始動時にパルス・モードを使うほうがよい。これは、始動時にビーム・トランスミッションの最適化の操作を行う際に、ビームの漏れによって部品に悪影響を与えるのを抑えるためである。ＣＲＬの経験によると、ビーム電流の大きさが変わると、ビームのもつ性質（属性）が大きく変わる。ところが一方、ビーム電流が同じならある周波数でビームをパルス化しても性質（属性）はそれほど変わらないことが分っている。ここでは、100mAの一定電流を、（パルス化したため平均では）数mAの状態からデューティ100%へともっていって、加速器を立ち上げることを考える。

① クローズド・ループ・オペレーション

比較的長いパルス（50μs）でビームの始動を行う。パルスの立っている50μsの間に、クライストロンへの入力高周波を調整して、加速管の中の高周波場を一定に保つ（図6.1.1 左側参照）というもので、クローズド・ループとは、このフィードバック・ループのことである。このタイプの操作には、ウェーネルト型電極をもつ電子銃（図6.1.2左側参照）が使われる。今回の開発ではこのタイプを採用する。

② オープン・ループ・オペレーション

100nsよりも短いパルスでビームの始動を行う。1249MHzの加速管では、フィリング・タイムが約2μsだから、ビームが加速管からエネルギーを喰う割合は、高周波システム（クライストロン）がエネルギーを補給する割合を上回る(図6.1.1右側参照）。このタイプの操作には、メッシュ・グリッドをもつ電子銃(図6.1.2右側参照）が使われる。しかしこのタイプの電子銃によるパルス化は複雑で扱いにくい。

ＡＥＣＬの加速器IMPELAに使われている加速場制御システムを用いると、100MeVの加速器を瞬間最大電流100mA の長いビームパルスで立ち上げることができる。これによるとパルスのでている50μs の間に加速場が一定値に制御され、ビームエネルギーが設定値の±2%以内に規制される。デューティー100%に達した場合にも同じ制御システムでビームエネルギーを規制することができる。加速器は、パルス繰り返し数が数Hzで始動され、これは平均ビームパワー数kWに対応する。そして次第にパワーアップし、連続運転10MWに達する。

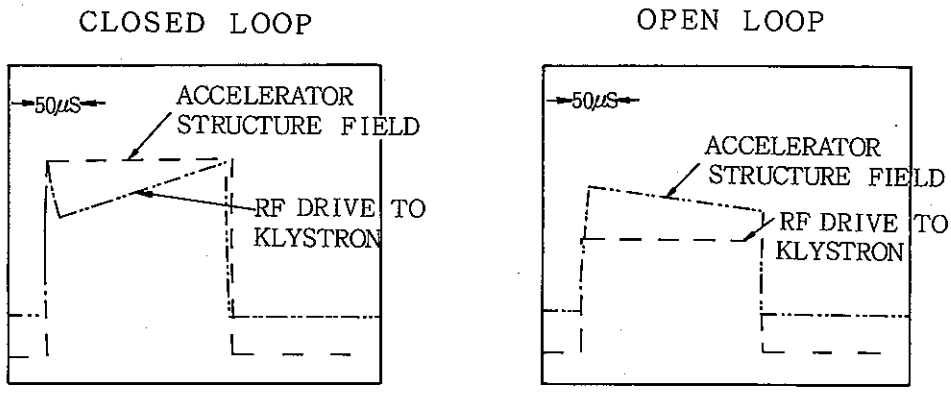


図6.1.1 Accelerating field amplitude control during 200 μs beam pulses in the IMPELA™ industrial accelerators.

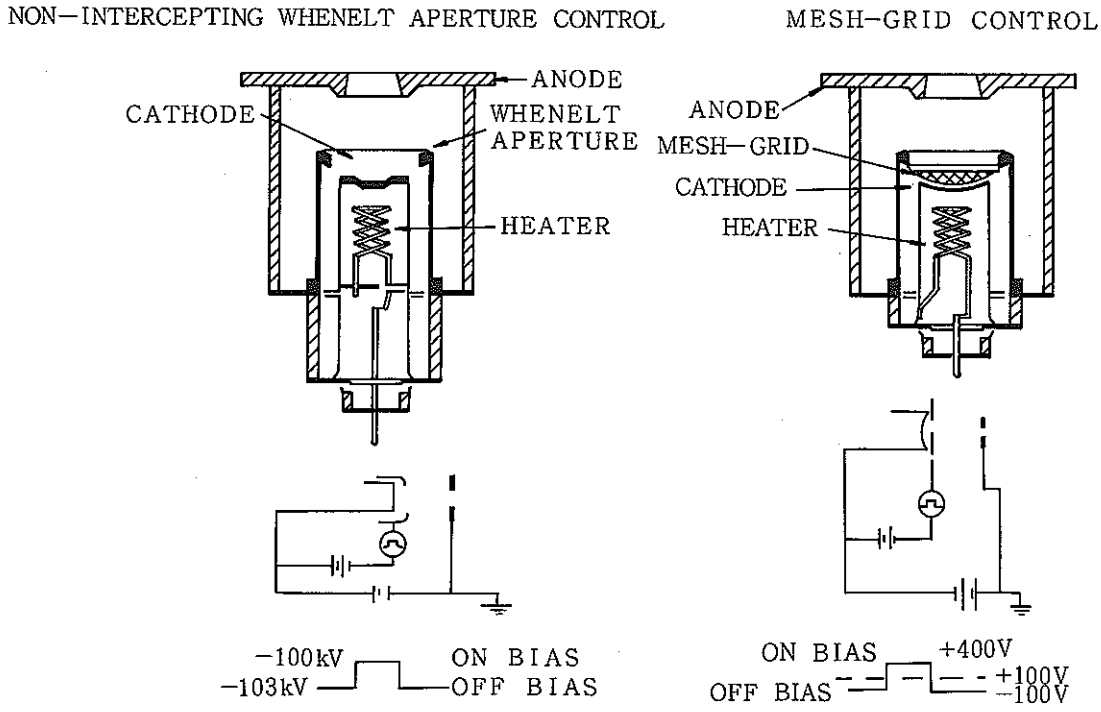


図6.1.2 Pulsed electron gun configurations

6.1.2 高周波パワーシステム（クライストロン）のパルス運転

パルス運転を行うには、クライストロンへの高周波入力を、ＰＩＮダイオードスイッチでパルス化するという方法が好ましい。加速器の始動時にパルス運転を行う際、クライストロンは飽和に近い状態で運転され、これによって加速器は高効率に保たれる。クライストロンのコレクタ部は、フルパワーのクライストロンビーム（85kV×22A)を受けた場合の熱負荷に耐えられるようでなければならない。パルス運転は、クライストロンへの高周波入力をパルス化したり、クライストロン系電子銃をパルス化することによっても可能であるが、クライストロンをアノード変調することによっても可能である。アノード変調でパルス運転を行うと、クライストロンにはデューティータイム以外にはビームが走らないから、コレクターの受けるビームパワーを小さくできる。しかし一方で、そのための高電圧変調器が必要となる。クライストロン系電子銃をパルス化しようとすると、そのリスポンスを加速場の制御ループに組み込まなければならないし、加速管の中の定在波比が大きくなってパルス・オン、パルス・オフの瞬間に大きなパワー・リフレクションが起こるなどの問題が生ずる。

6.2 ビーム・トランスポート

6.2.1 ＡＥＣＬビームトランスポートシステムの特徴

- Ｑトリプレットの間にビーム電流モニタがある。
- 加速管間のドリフト長は 156cm（6.5λ）である。
- ビーム電流モニタとして、ビーム電流はTM_{110} モードの電流で励起された円柱形空胴を使用し、ＤＣビーム電流トランスによって±0.01%の精度で測定される。

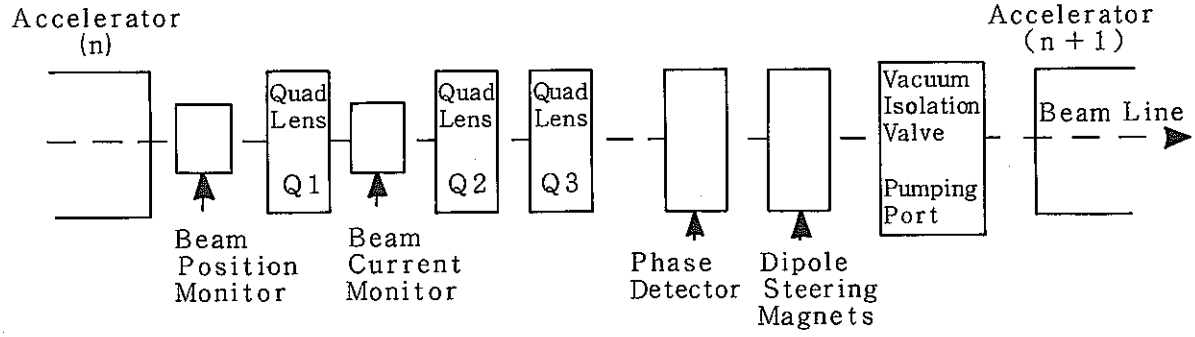


図6.2.1 Inter-linac beam transport arrangement

6.2.2 ビーム・ブレイクアップ

チョークリバーにおいて、直径0.127mmのワイヤにショートパルスの電流を流し、1350MHz加速管構造における軸外ビームによるTM$_{110}$モード励起の模擬実験を行った。モードの振幅は空胴外径につけられている磁場プローブによって測定された。

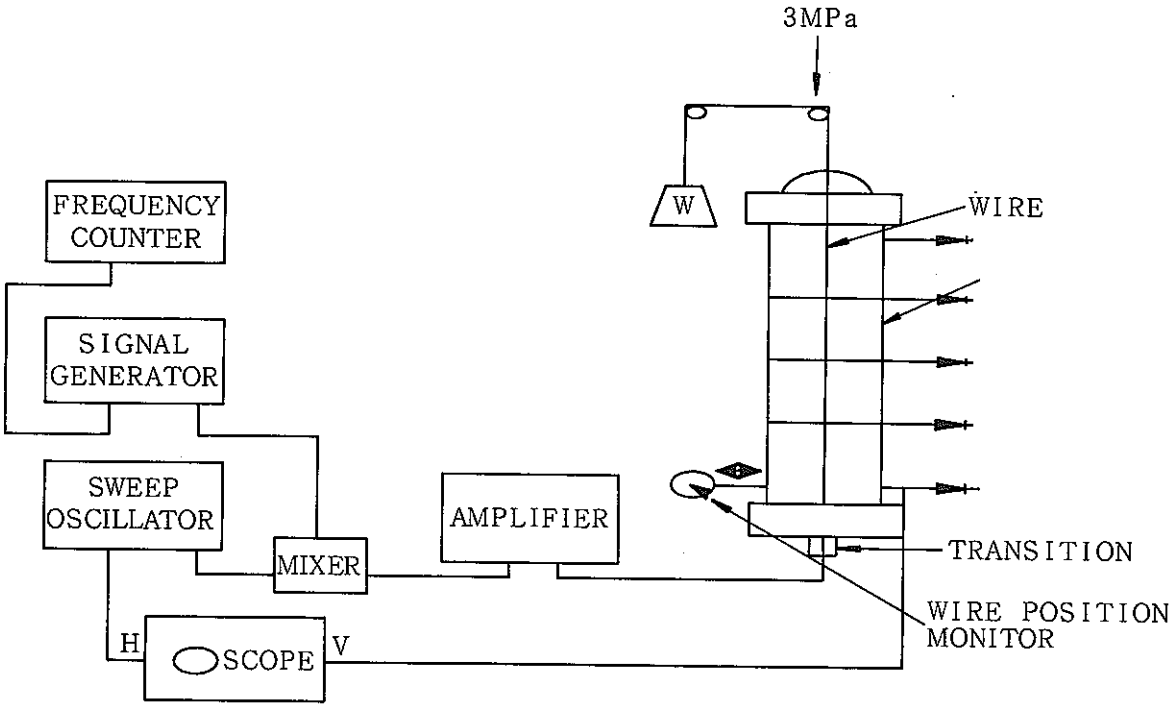


図6.2.2 Experimental set-up for beam-breakup mode excitation measurements

図6.2.3に加速器空胴内のふたつのＴＭ$_{110}$モードの磁場方位が示されている。オンアクシス加速空胴と結合空胴内におけるＴＭ$_{110}$ モードの共振周波数はこれらのモード間の結合が小さくかつ加速管全体にわたる伝播に差がありお互い違ったものが検出される。

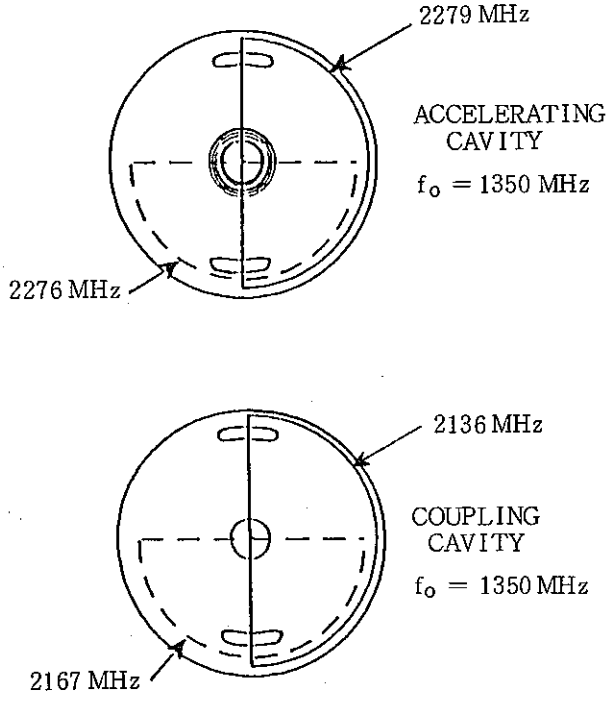


図6.2.3 Beam-breakup modes in the accelerating and coupling cavities of a 1350MHz on-axis coupled structure. The dashed and smooth lines represent the magnetic field orientation of the TM_{110}-like modes.

軸外ワイヤに流れるパルス電流によって励起されたＴＭ$_{110}$ モードの振幅が軸からのワイヤの変位の関数として測定され、結果を図6.2.4 に示した。ビーム・ブレイクアップを起こし得るＴＭ$_{110}$モードの励起はワイヤの軸外変位が±0.4mmを越えると起こるキャビティ部の工作精度は±0.025mmであるため、加速管内のキャビティーの設計誤差によるビームブレイクアップモードの励起は非常に小さくできる。

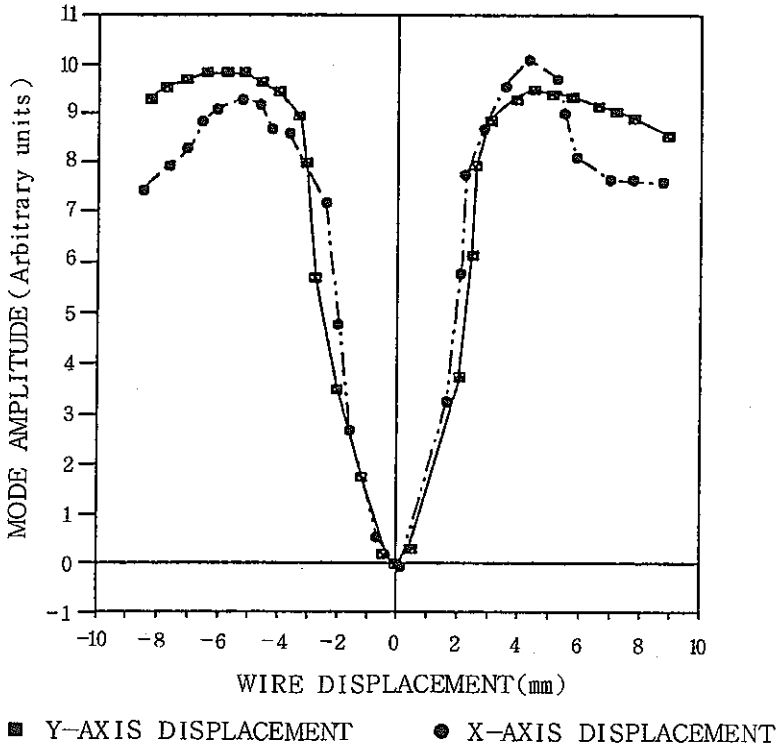


図6.2.4 Beam-breakup mode amplitude in 1350MHz on-axis coupled accelerating cavity.

長さL(m)の定在波周期構造においてビーム・ブレイクアップを起こすスターティングカレントIg (A) は次の経験式で与えられる。

$$Ig = 2.34\ (\lambda_{110}/L^2)\ (1/r_t)\ \beta\gamma$$

2450MHz において、$\lambda_{110}=0.14$ (m) , $r_t=12$ (MΩ/m) である。ここで、ビーム・ブレイクアップ開始電流100mAに対し、計算された加速管長を図6.2.5に示す。

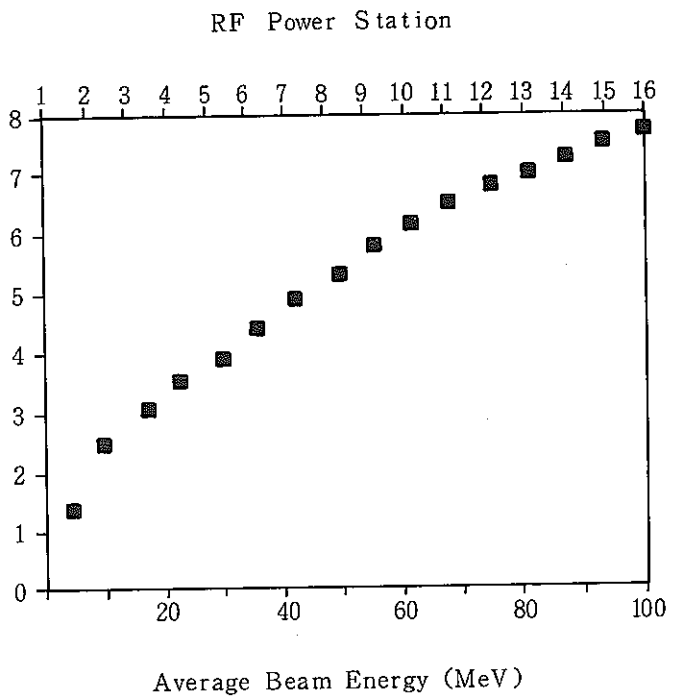


図6.2.5 Periodic lengths of 1249 MHz standing-wave accelerator structures for a beam-breakup starting current of 100 mA.

ＡＥＣＬの工業用加速器 IMPELA (1300MHz、3.25m長、ピーク電流100mA、ビームパルス200μS)を用いてＴＭ$_{110}$モードの検出実験を行った。磁場プローブからの信号はビームパルス100mAの変化によって約2200MHzでのＴＭ$_{110}$ モードの励起を検出するためにスペクトラムアナライザを用いて測定した。基本高調波のみ検出され、ビームブレイクアップモードの励起は測定限界以下であった。

6.3 本年度の成果と今後の課題

ビームの軌道を数値計算によって追跡することにより、加速器の付属機器のパラメターがビームにどのような影響を与えるかのデータが得られ、パラメター最適化の一資料となった。今後は更にデータを増やすとともに、更に洗練されたプログラム（空間電荷効果、非相対論的な効果を導入）を用いてビームを細かく追跡していく。また入射部分(電子銃、チョッパー、プリバンチャー、バンチャー）および出力部分のビームの特性を解析する。更にビームを湾曲させた場合の追跡も行う。これらを総合して、付属機器のパラメターを最終決定するとともに、数年後のビームテストの結果を分析する意向である。