

TAMA300 PROJECT DESIGN REPORT

**Design for a 300-m Laser Interferometer
Gravitational Wave Detector**

TAMA integration group

November 1996

目次

1	Introduction	4
1.1	目的	4
1.2	概要	5
2	Design	7
2.1	光学デザイン	7
2.1.1	モードクリーナー	9
2.2	制御デザイン	11
2.2.1	フリッジコントロール	11
2.2.2	アライメントコントロール	11
3	パワーリサイクリング	13
3.1	目標リサイクリングゲインの設定値	13
3.2	制御信号の分離	14
3.3	動作点への引き込み(ロッキングアクイジション)の問題	16
3.4	リサイクリングミラー製作と検査	16
3.5	phase I から phase II への移行	16
3.6	レーザーと光学部品	17
3.6.1	レーザー	17
3.6.2	光学部品	17
3.7	ミラー	20
3.7.1	口径	20
3.7.2	弾性モードと形状	20
3.7.3	素材の光学特性	20
3.7.4	研磨	20
3.7.5	コーティング	21
3.8	テストマス懸架	21
3.8.1	テストマスの位置精度に対する要求	23
3.8.2	干渉計設置場所の予想雑音レベル	23
3.8.3	design	24
3.9	防振	24
3.9.1	スタック防振	25
3.9.2	X pendulum 防振	25
3.9.3	鉛直方向能動防振	25
3.10	データ取得・デジタル制御	30
3.10.1	ネットワーク	30
3.10.2	低レートデータ取得・デジタル制御機器	30
3.10.3	高レートデータ取得・記録機器	30
3.10.4	ソフトウエアとデータシステム全体の構成	31
3.11	真空	35
3.12	施設	40
4	研究組織	45

5	年次計画	48
6	Appendix	53
6.1	ミラーの熱雑音	53

TAMA300 (多摩300)

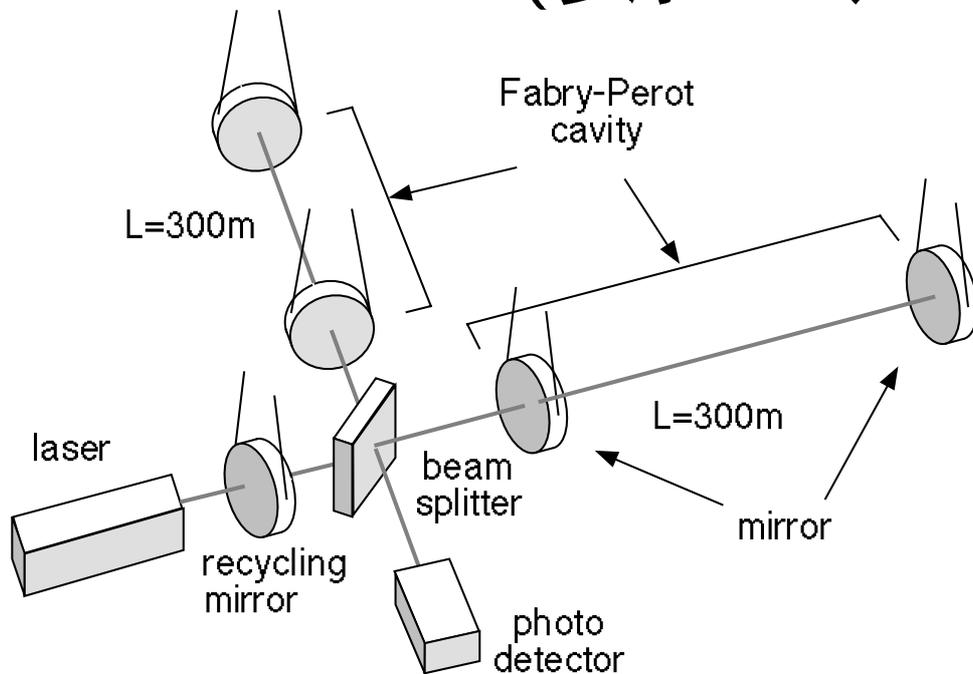


図 1: 日本の TAMA300 プロジェクト. 300m 基線長レーザー干渉計の概念デザインを示す.

1 Introduction

1.1 目的

本計画の 300m 基線長レーザー干渉計 (TAMA300) は、既に存在する数 10m 規模のプロトタイプと次期将来計画 3km 干渉計を技術的につなぐ役割をもっている。本装置を建設することによって km クラス干渉計に必要な技術を確認する。本格的な「重力波天文学」のためには km クラスの干渉計がどうしても必要となる。しかし重力波検出技術の困難性と特殊性を考えると、一気に最終目標をめざすより、一桁ずつスケールアップをしながら確実に前進する方が得策であると判断される。本計画を達成することにより次期計画の青写真を確信をもって作り上げることが可能となる。また、300m 基線長レーザー干渉計は実証型検出器としての機能ももっている。つまり検出器の技術開発だけが本計画の目的ではなく、最終段階では実際に重力波観測も試みる。これを実証型検出器として機能させることにより、「重力波天文学」のきっかけをつかむことも不可能ではない。この装置はわれわれの銀河系内 ($r \sim 20\text{kpc}$) で起きた重力波イベントに対しては十分な感度をもつように設計されている。さらに、アンドロメダ銀河 ($r \sim 700\text{kpc}$) までの距離までも守備範囲としている。もちろんこのような距離範囲で数年の間に大イベントが起きる可能性は大きくは無いが、幸運に恵まれれば重力波検出も夢ではない。世界的にいくつかの大型検出器計画が進行中であるが、今後の国際的な観測ネットワークの中で本装置は重要な役割を果たすことになる。

国	プロジェクト名	設置場所	タイプ、基線長	完成予定
アメリカ	LIGO	Hanford(Washington) Livingston(Louisiana)	FP 4km(2基)	2000
イタリア/フランス	VIRGO	Pisa(Italy)	FP 3km	1999
ドイツ/イギリス	GEO	Hannover(Germany)	DR 600m	1998
日本	TAMA	三鷹	FP 300m	1998

表 1: 世界で現在進行中の大型レーザー干渉計計画 (FP:Fabry Perot, DR: Dual Recycling)

目標感度	$h_{\min} = 3 \times 10^{-21}$ @300Hz (帯域幅 300Hz)
干渉計タイプ	Fabry-Perot-Michelson
基線長	300m
ファブリー・ペロー共振器フィネス	520
光源	注入同期方式Nd:YAG レーザー、出力 10W、波長 1064nm
パワーリサイクリング	利得 10 倍 (干渉計入力実効パワー 30W)
真空容器内真空度	10^{-6} Pa
真空パイプ直径	40cm

表 2: TAMA300 レーザー干渉計の基本仕様

1.2 概要

300m×300mのL字型をしたマイケルソン型レーザー干渉計を開発・建設し、近傍銀河系からの重力波検出をめざす。連星中性子星の合体にともなう重力波を考えた場合、300Hzあたりが周波数としては重要になる。そこで本装置は300Hzにおいて最高感度が達成されるように設計されている。具体的には、中心周波数300Hz帯域幅300Hzにおいて $h = 3 \times 10^{-21}$ の重力波を検出可能とすることを目標とする。図1に概念図を示したように、本レーザー干渉計はファブリー・ペロー・マイケルソンとよばれるタイプであり、マイケルソン干渉計の両側の腕がファブリー・ペロー光共振器からできている。これによって実質的に光路長をかせぎ低周波数での感度をかせいでいる。さらに、レーザーと干渉計の間にリサイクリングミラーを置き、レーザー側に戻る光を打ち返すことにより実質的に干渉計内部のレーザーパワーを増加させている。本装置の基本仕様を表2にまとめてある。出力10WのNd:YAGレーザーとリサイクリングを組み合わせて干渉計の実効入射パワー30Wを達成する。波長はNd:YAGレーザーの基本波1064nmを用いる。干渉計の等価的な折り返し回数に対応するフィネスは520とする。光ビームが通過する全長600m直径40cmのパイプの内部は残留空気の屈折率ゆらぎによる光路長変化を避けるために 10^{-6} Paの真空中に保たれる。図2に本装置の期待される感度曲線を示している。低周波数においては地面振動が主な雑音源となる。中間周波数ではミラーの熱雑音が支配的であり、さらに高周波数ではレーザー光のショット雑音によって感度が制限される。本プロジェクトは研究開発的な側面も強いいため、利便性の良い国立天文台三鷹キャンパスが干渉計の設置場所として選ばれた。なお本プロジェクト名TAMAは三鷹が属する多摩地区の多摩よりとられたものである。

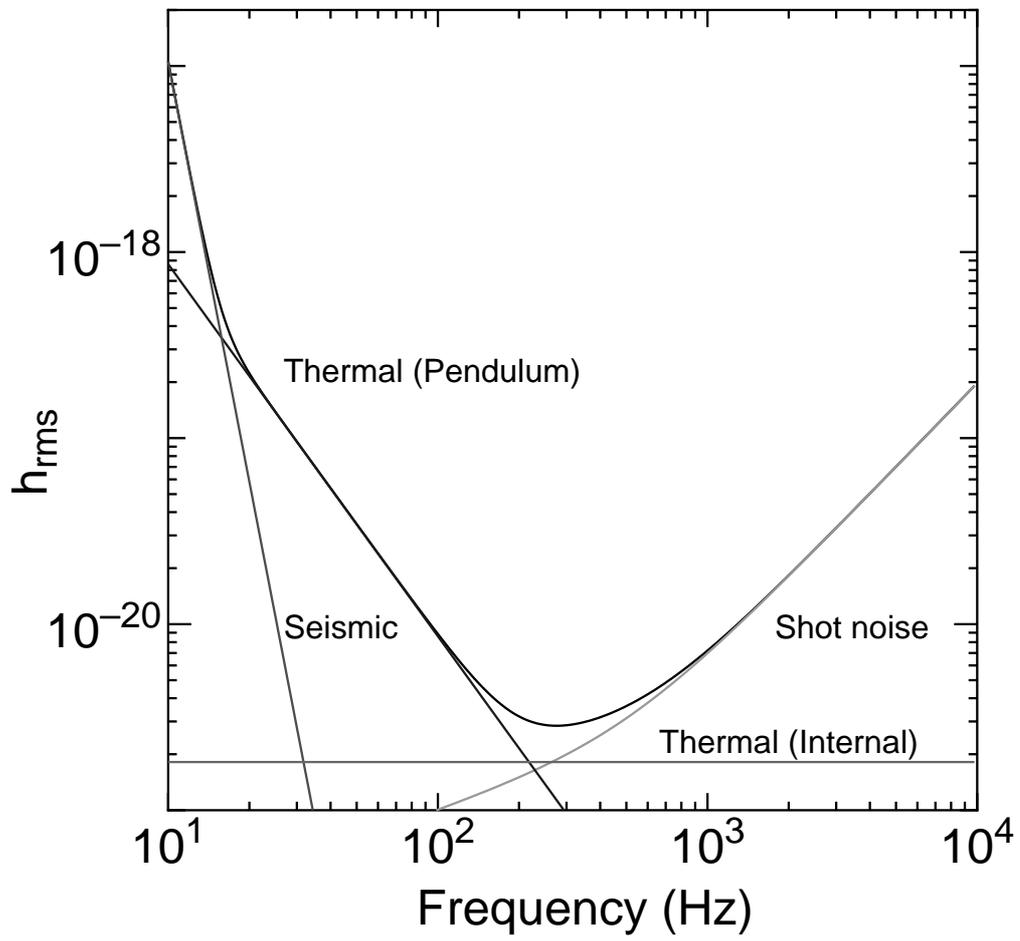


図2 TAMA300で予想される感度曲線

2 Design

次に干渉計の各部分のデザインについて説明する．

2.1 光学デザイン

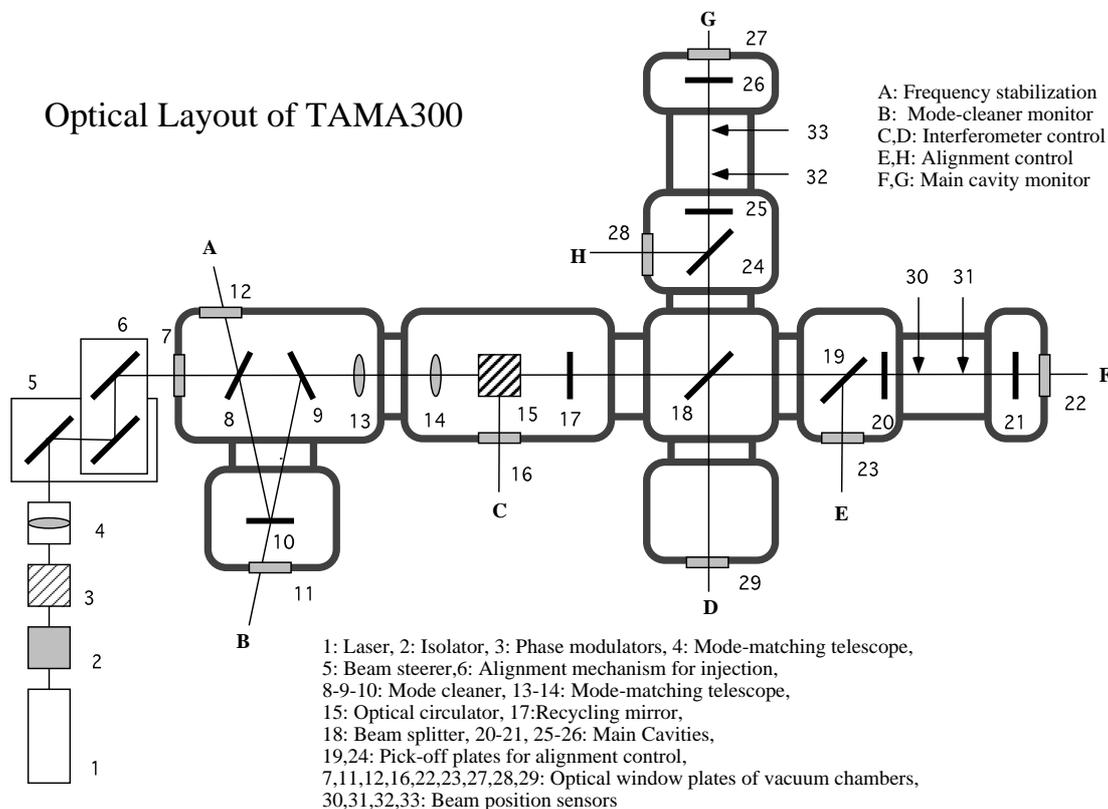


図 3: TAMA300 の基本光学デザイン．

光学デザインは次の制御系デザインとともに干渉計の根幹をなすものである．図3には干渉計全体の基本的な光学系デザインが描かれている．あらかじめ周波数安定化が施されたレーザー出力はEOM(Electro-Optical Modulator)により15.25MHzの変調がかけられる．その後入射光のパラメータを調整するためのレンズ類を通過した後、モードクリーナーとよばれるリング型の光共振器に入射される．モードクリーナーを出た光はもう一度モードマッチングのためのレンズをとおり、リサイクリングミラーから干渉計本体に入射する．ビームスプリッターによって2つに分けられた光はそれぞれ300m長さのファブリー・ペロー共振器に入射されるが、ビームスプリッターとそれぞれのファブリー・ペロー共振器の手前のミラーの間の距離は両方向で50cmの差がある．これはpre-modulationというテクニックであり、2つの腕からの反射光が干渉するさい、先ほど述べた15.25MHzの変調が残るようにするためのものである．この変調を利用することにより信号の復調が可能となる．それぞれのファブリー・ペロー共振器の手前には反射光を一部抜き取るピックオフとよばれるプレートがある．これは光ビームとミラーの間のアライメントの情報を取り出すために使われる．

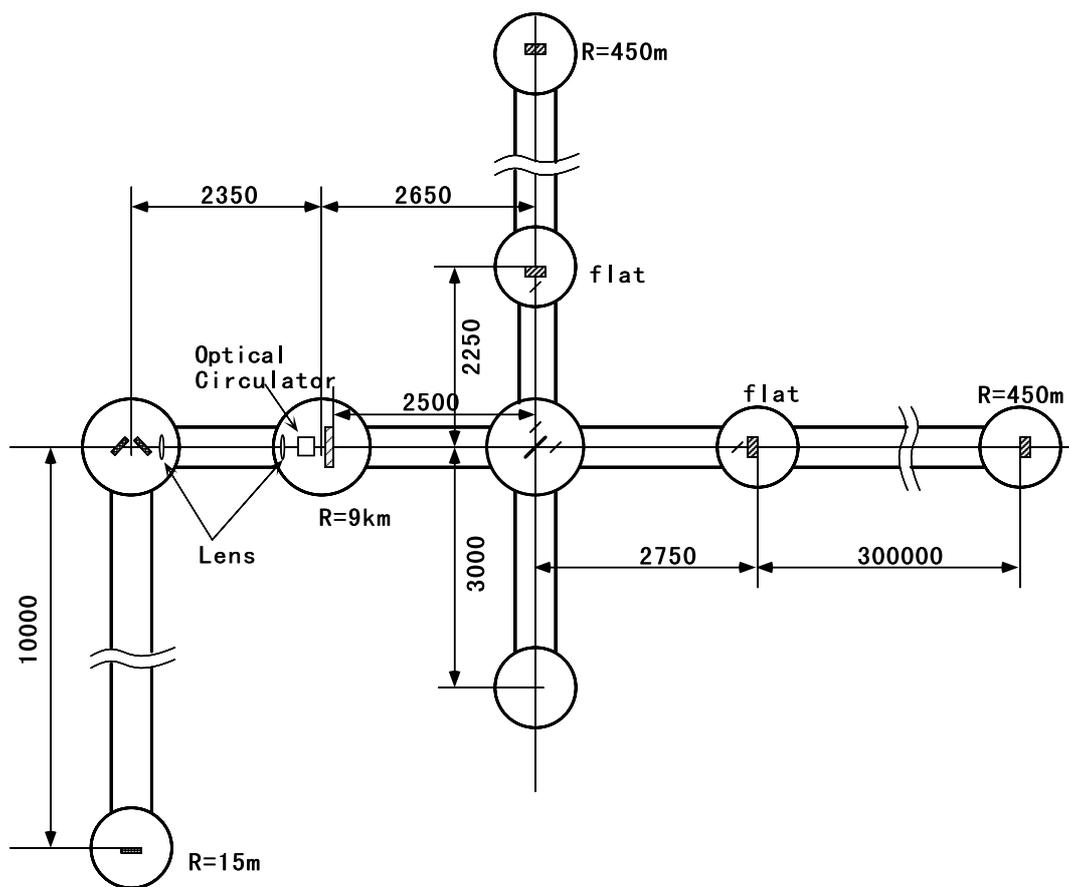


図 4: TAMA300 の光学デザイン .

2.1.1 モードクリーナー

モードクリーナーに要求される性能は、

- 入射レーザー光の高次モードを低減すること
- ビームジッターを低減すること

の2つである．前者は干渉計のコントラストを上げることに寄与し、モードクリーナーによる高次横モードのTEM₀₀に対する suppression ratio は

$$S_{m,n} = \sqrt{1 + \left(\frac{2}{\pi \mathcal{F}} \sin[(n+m)\Psi] \right)^2}, \quad (\cos \Psi = 1 - \ell/R) \quad (1)$$

で与えられる．ここで \mathcal{F} はフィネスであり、これが高ければ suppression ratio が上げることになるが、実際には共振器のロック条件（フィネスが高い共振器はロックが難しい）とミラー損失による効果（透過率が下がる）を考慮して、フィネスは1000ぐらいに設計されるのが一般的である．後者のビームジッターはビーム方向の角度揺らぎであるが、これはダイナミックな高次モードととらえることができるので、これに対する性能も同様に考えて良い．つまりフィネスが高いほど良いモードクリーナーになる．ただし、ビームジッターの実測値がほとんど無いため、要求性能が明らかではないのが現状である．そのため、安全を見込んで2段のリング型共振器でモードクリーナーを構成する計画もある (GEO600) ．

具体的なモードクリーナーの光学設計であるが、3枚鏡のリング型共振器としている．これは共振器からの戻り光が直接レーザーに返って optical feedback の原因となることを防ぐ目的のためであり、現在進行中の大型計画では全てこのタイプを採用している．フィネスが1000ぐらいのリング型共振器の場合、2枚鏡の共振器に対し、光アイソレータ1個を省けることになるので非常に好都合であり、共振器の制御信号の取り出しも楽である．さらに偏光選択性も有していて、片方の偏光に共振すると、もう一方の偏光はほとんど通さないという特性を持っている．リング型共振器で注意することは、共振器が3角形であるため基本モードが完全な円にならないことである．しかし、実際には直線的な鋭角3角形であるため影響はほとんど無い．

光学設計でもう一つの重要な点は、干渉計を制御するのに必要な変調サイドバンドを透過させる必要があることである．そのために変調周波数がちょうど共振器のFSRに等しくなるように共振器長を決めなくてはならないのである．

ここでTAMAモードクリーナーの仕様を下に示す（図5参照）

反射率	平面鏡 (S 偏光)	0.9982 (loss 50ppm)
	球面鏡 (R=15m)	0.9999 (loss 50ppm)
フィネス		1,800
ミラー間隔	平面鏡間	0.2m
	球面鏡と平面鏡	9.74m
FSR		15.25MHz

ここまではモードクリーナーの受動的な役割について述べたが、モードクリーナーは周波数安定化のための基準共振器としても使われる．方法自体は一般的な Pound-Drever 法なのでここでは触れないが、DC的な基準とはならない（伸縮が大きい）ので、固定型共振器を用いた Pre-Stabilization が必要である．主干渉計がロックした後は、この周波数安定化回路は共存しない可能性もあるので、最終的にはフリーランになる可能性もある．

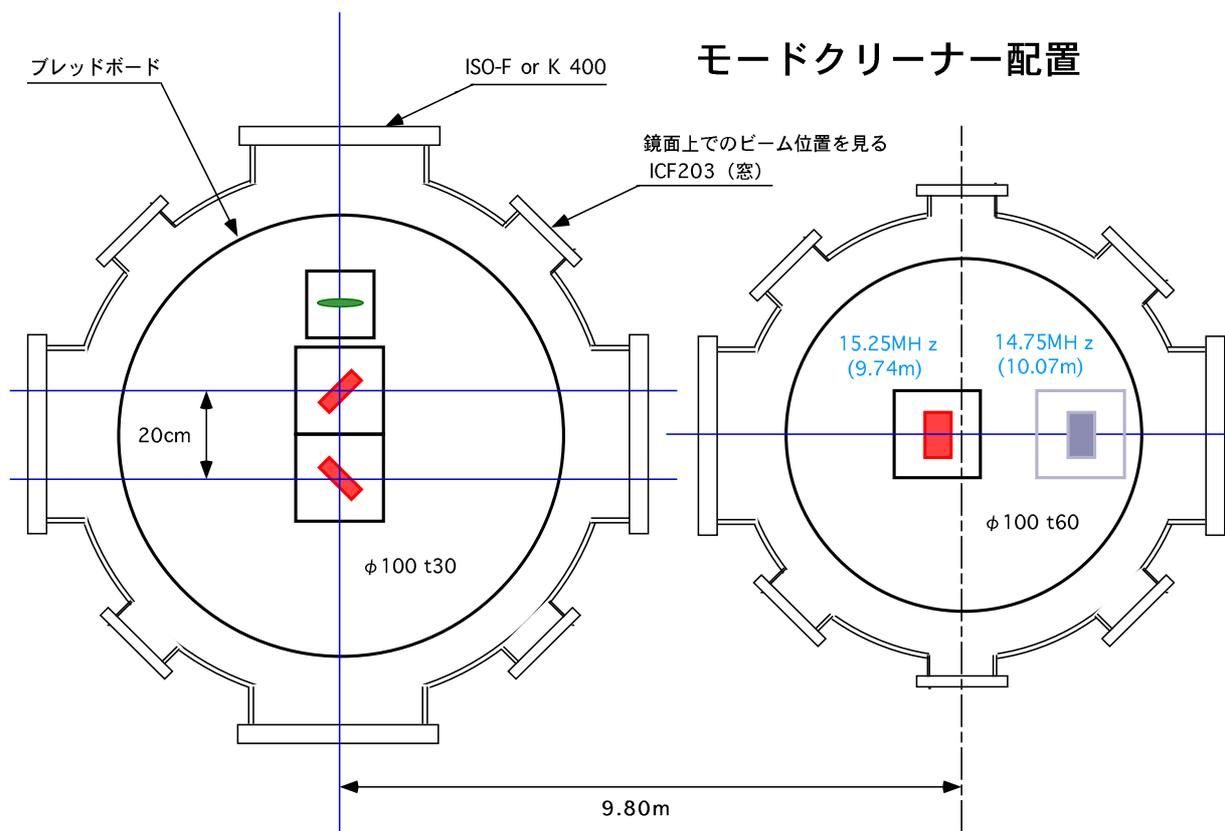


図 5: モードクリーナーの配置図 .

2.2 制御デザイン

干渉計の制御は大きく分けて3つの部分に分かれる．ひとつはフリンジ制御とよばれる干渉縞の制御であり、ミラーの光軸方向の位置を調整する．ふたつめはビームアライメントであり、この場合は光ビーム軸方向に対してミラーの姿勢を制御する．3つ目はパワーリサイクリングのための制御である．

2.2.1 フリンジコントロール

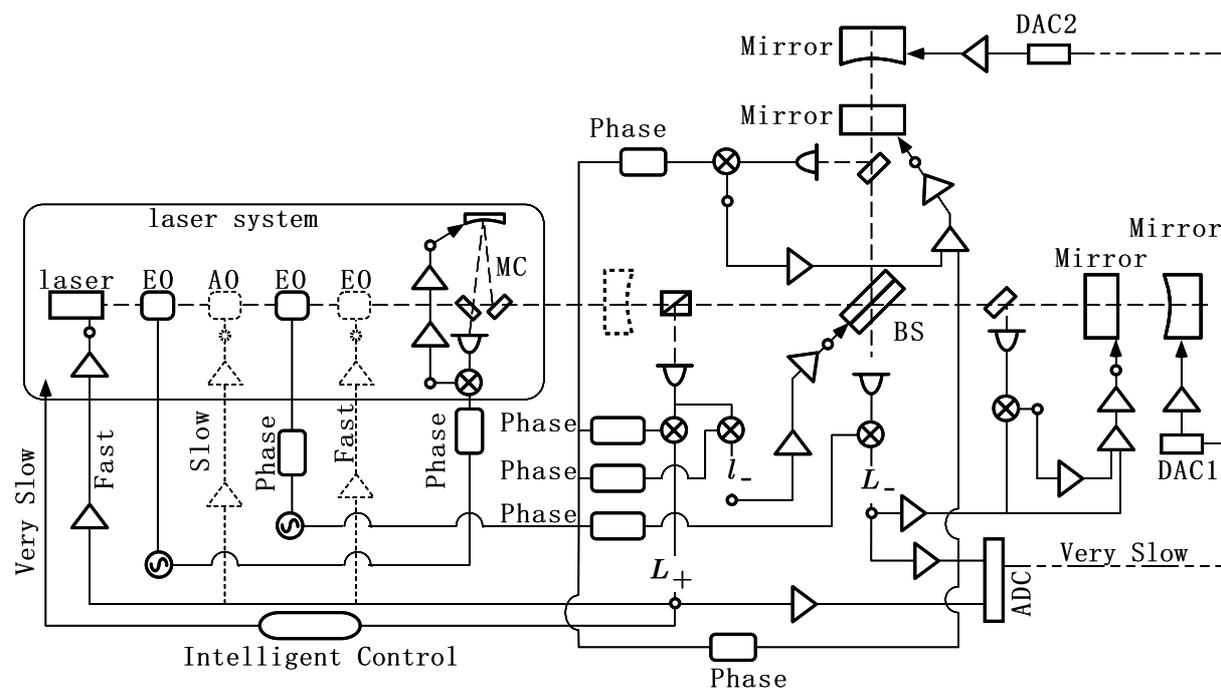


図 6: TAMA300の基本制御デザイン．

まずフリンジ制御について説明する．各ミラーの光軸方向の位置制御の問題である．300m 基線長は長時間の間には温度変化や潮汐効果などにより距離が変化する．この大きさは最大2mm程度と見積もられるが、2枚のミラーの位置を制御することによりこれを補正する必要がある．これはゆっくりした距離の変化であるが、干渉縞を常にダーク（暗縞）に保つには速い変化も抑え込む必要がある．この速い制御については、ミラーの後に貼り付けた磁石とコイルをアクチュエーターとして用いる．フリンジ制御を考えると、2つのファブリー・ペロー共振器の同相変化(L_+)と差動変化(L_-)およびファブリー・ペロー共振器の手前のミラーが作るマイケルソン干渉計の同相変化(ℓ_+)と差動変化(ℓ_-)の4つの独立自由度に対する制御と考えた方がわかりやすい．これをブロックダイアグラムの形で表したのが図6である．重力波信号が含まれているのは L_- の信号の中であり、ミラーに対する制御信号から取り出すことができる．

2.2.2 アライメントコントロール

ビームアライメントに関しては wave front sensing 法という方法を用いる．これはファブリー・ペロー共振器からの反射波をピックアップで一部取り出し、その反射光の光路上の適当な位置に4分割の光検出器を置き、変調周波数(15.25MHz)と同じ周波数で復調することにより、2枚のミラーの傾き（あおり (pitch)）と横回転 (yaw)）に関する情報を独立に抜き出す方法である．この信号を適当に処理してミラーの懸架部分の

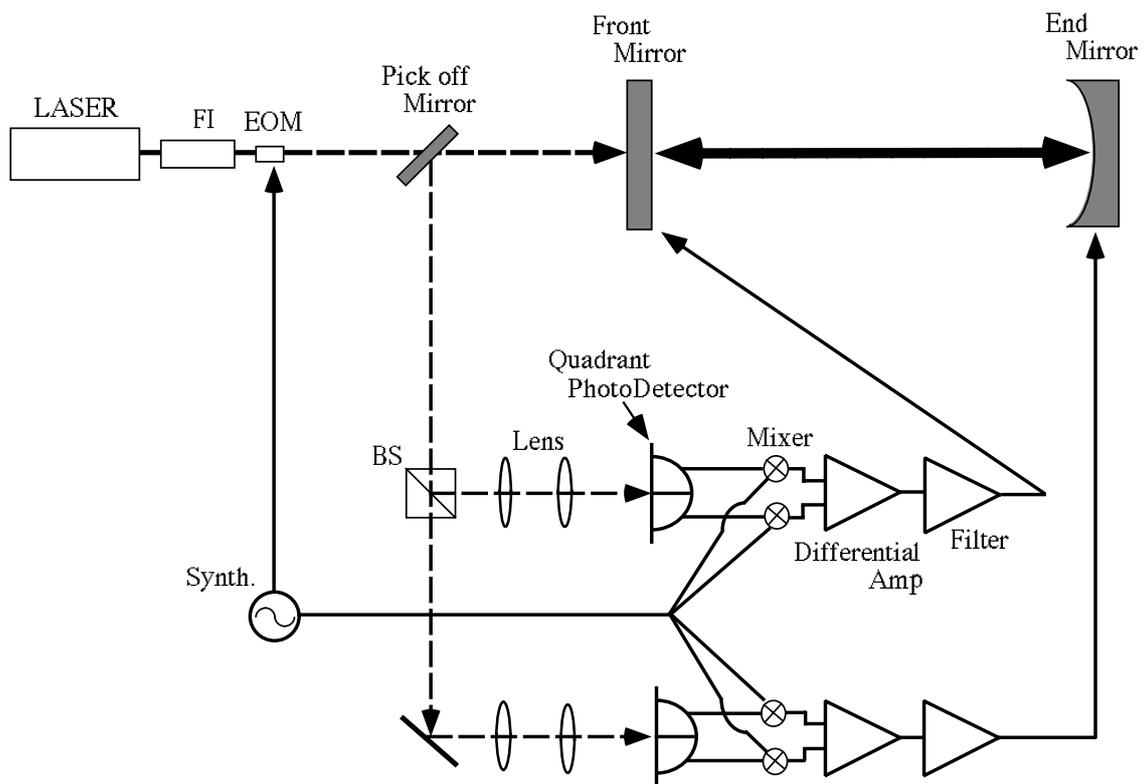


図 7: アライメント制御の原理図 .

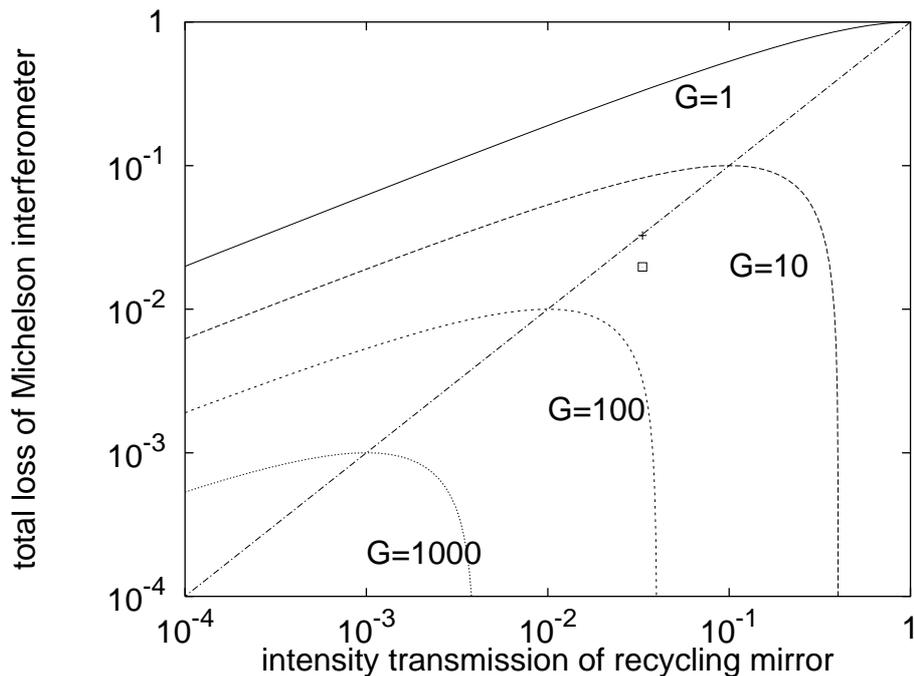


図 8: リサイクリングミラーの損失を無視した場合の，Michelson 干渉計の反射率とリサイクリングミラーの透過率の変化に対する内部パワーゲインの依存性．

アクチュエーターに返すことにより、ミラーの姿勢を制御する．どの程度の大きさの傾きまで抑えるべきかは、アライメントのずれによりどの程度干渉光のコントラストが劣化するかによって決められる．この場合計算によると 10^{-7} rad が許容範囲であり、アライメント制御によりこれ以下に抑える必要がある．リサイクリングミラーのアライメントも同様な方法で制御される．

3 パワーリサイクリング

Fabry-Perot-Michelson 干渉計にパワーリサイクリングを組み込む際にもっとも問題となるのは、制御信号の分離であると考えられる．干渉計を構成するミラーの温度(勾配)が高くなることによる、不安定性の増大についても配慮しなくてはならない．

まず最初に、TAMA300 で予定されているリサイクリングゲインの値に関してふれ、その後の節で予想される問題点と対策について議論する．

3.1 目標リサイクリングゲインの設定値

リサイクリングゲインの大きさは、理想的には、Michelson 干渉計の動作点における反射率とリサイクリングミラーの反射率によって決まる．Michelson 干渉計の反射率は、アーム共振器を構成するミラー、ビームスプリッター、ピックオフミラーの損失という制御の難しい量に依存しており、これらの損失が大きいにも関わらず大きなリサイクリングゲインの値を狙ってリサイクリングミラーの反射率を高くとると、Fabry-Perot-Michelson 干渉計本体のミスアライン等による変動に呼応する、干渉計内部パワーの変動が大きくなるなどの弊害が現れる．

図 8 は、Michelson 干渉計から戻ってくるキャリアの反射率とリサイクリングミラーの透過率の変化に対する内部パワーゲイン G の変化を等高線で示したものである。ただし、リサイクリングミラーの損失を無視するという近似を入れてある。図中の直線は、リサイクリングミラーの反射率が Michelson 干渉計の反射率に一致する点を連ねたものである。この条件を満たすとき、リサイクリングミラーの反射率の変動に対してゲイン G の値は極大となり、変動は二次の効果でしかなくなるので、最適点といえる。しかし、Michelson 干渉計の反射率の低下に伴う G の低下の割合が大きいので、最適反射率をそのままミラーの仕様とするのはリスクが大きい。TAMA300 では、アーム共振器を構成するミラーの仕様上の目標値は、エンドミラーで透過率 60ppm、フロントミラーで透過率 1.2% である。この値を用いて、ビームスプリッタやピックオフプレートでの損失を無視した場合、Michelson 干渉計の反射率は 98.03%、リサイクリングゲインは $G = 47$ となる。図中に記号 \ominus で表された点がこれに対応している。

Michelson 干渉計の反射率を下げる要因としてもっとも大きなものは、アーム共振器のミラーの反射率の低下によるものである。仮にフロントミラーの損失が無視できて、エンドミラーは仕様のワースト値である損失 40ppm を仮定すると、Michelson 干渉計の反射率は 96.74% に低下し、リサイクリングゲインは $G = 31$ となる。図中の記号 $+$ がこれに対応している。リサイクリングの効率を極力下げずに、かつ干渉計の損失の変動に対しても実効的なパワーの変動が少なくなるようにミラーの反射率の仕様が選ばれているといえる。

フロントミラーやビームスプリッタ、ピックオフプレート、さらにはリサイクリングミラーの汚染による損失の増加、また鏡の熱変形・熱レンズ効果によるミスマッチ成分の増加により、さらにリサイクリングゲインが低下してしまうことも予想される。リサイクリングゲインの値として 10 が確保できると仮定すると、光源レーザーの出力パワーとして 10W が見込まれているので、モードクリーナの透過効率とアイソレータ、変調器の透過率の積が 30% 程度であるとしても、主干渉計での実効パワーとしては約 30W が期待される。

3.2 制御信号の分離

アームに Fabry-Perot 共振器を持つ Michelson 干渉計にパワーリサイクリングのための鏡を付加すると、リサイクリング共振器の同相長の誤差信号 (δl_+) にアーム共振器の同相長の信号 (δL_+) が大きな割合で混入し、SN の良い分離が難しくなることが知られている。この対策として、リサイクリング共振器のサイドバンドに対する反射率をゼロにする方法、二種類のサイドバンドを使う方法を並行して検討している。リサイクリング共振器の内部の光をモニタするためのポートとしては、アーム共振器のアラインメントの信号を取得するためのピックオフプレートを利用する方法を検討している。図 9 にあるように、両腕のピックオフプレートから、リサイクリング共振器内の順方向と逆方向の巡回光がサンプルできるので、前者を δl_+ の制御信号、後者をアラインメント制御信号のポートとして利用することができる。

リサイクリング共振器の反射ポート、対称ポートと合わせ、3種類のポートから光路長制御に必要な 4 自由度の信号を取り出す。現在、15.25MHz ($f_{m(\text{main})}$) の位相変調に加えて、別の周波数 ($f_{m(\text{sub})}$) の変調を加えることで、4つの信号の SN が向上するかどうかを検討中である。

TAMA300 のインフラストラクチャの整備の期間に、構成を比較的容易に変更できる、3mFP 干渉計、およびその他のテーブルトップの干渉計をもちいた実験で、安定性などを検証し、TAMA300 へ組み込むリサイクリング系の構成に反映する予定である。

なお、アーム共振器の透過光の情報は、光路長制御には直接用いない予定であるが、後述のロッキングアクイジションのキーシグナルとして利用できる可能性が高いので、ディテクタを配することになっている。

3.3 動作点への引き込み(ロッキングアクイジション)の問題

TAMA300 では、光路長制御ループには信号が一旦デジタル化されてDSP で制御信号を作るような系は挟まないという方針になっている。したがって、アクイジション前と後でサーボの特性をもし変更するとすれば、制御ループ内にアナログスイッチかボルテージコントロールドアンプを導入し、その制御端子に計算機からの信号を加えることになるであろう。振り子で防振されたテストマスと組み合わせた場合に特有のサーボコントロールの問題が重要になると考えられる。これはTAMA300 へのリサイクリング組み込みに先立ち、3mFP 干渉計と 20mFP 干渉計の双方を利用して検証実験をおこなう。

3.4 リサイクリングミラー製作と検査

TAMA300 の光学デザインでは 9km の曲率半径をもつ鏡を用いる予定である。このような長い曲率半径を持つミラーの形状評価をする方法は現在のところ確立していないので、開発を手掛ける。ヘテロダイン干渉計を用いた表面計測システムを構築してミラー基材の曲率半径と精度を評価する予定である。

TAMA300 phase I の運用により、キャリア、サイドバンドに対する干渉計の反射率に関する情報が得られる。これをリサイクリングミラーの反射率設定に反映させ、誘電体他層膜の蒸着をおこなう。

3.5 phase I から phase II への移行

干渉計が動作点から外れた時に、損傷を残すほどのハイパワー光がフォトディテクタに入射してしまうという問題がもっとも深刻なのは、モードクリーナの反射光ポートであり、次に著しいのは主干渉計からモードクリーナに戻る光をモニタする部分である。Phase I では後者のポートでは全パワーをモニタする必要はないが、phase II ではこのポートで制御信号を得なければならないので、モードクリーナの反射光ポートに用いているのと同等のフォトディテクタを用意する必要がある。しかし、モードクリーナが既に稼働しているであろうことから、技術的に新しく要求されることはないと考えられる。移行時の主な仕事はリサイクリング用サスペンションの追加とサーボ系改変になると考えられる。パワーリサイクリング下での FPMI の 4 自由度の信号の分離が実現できたと仮定すると、変調・復調の問題と独立して計算機を利用した模擬実験を進めることができるはずなので、前もって検討する。phase I での制御サーボ系の実績を反映して具体的な phase II のサーボ系を設計する。

オートアラインメントとの共存(両腕のアラインメント誤差信号の分離)において困難が生じることも予想されるので、これについても前もって解析しておく必要があると思われる。

3.6 レーザーと光学部品

3.6.1 レーザー

SONY high power laser set up

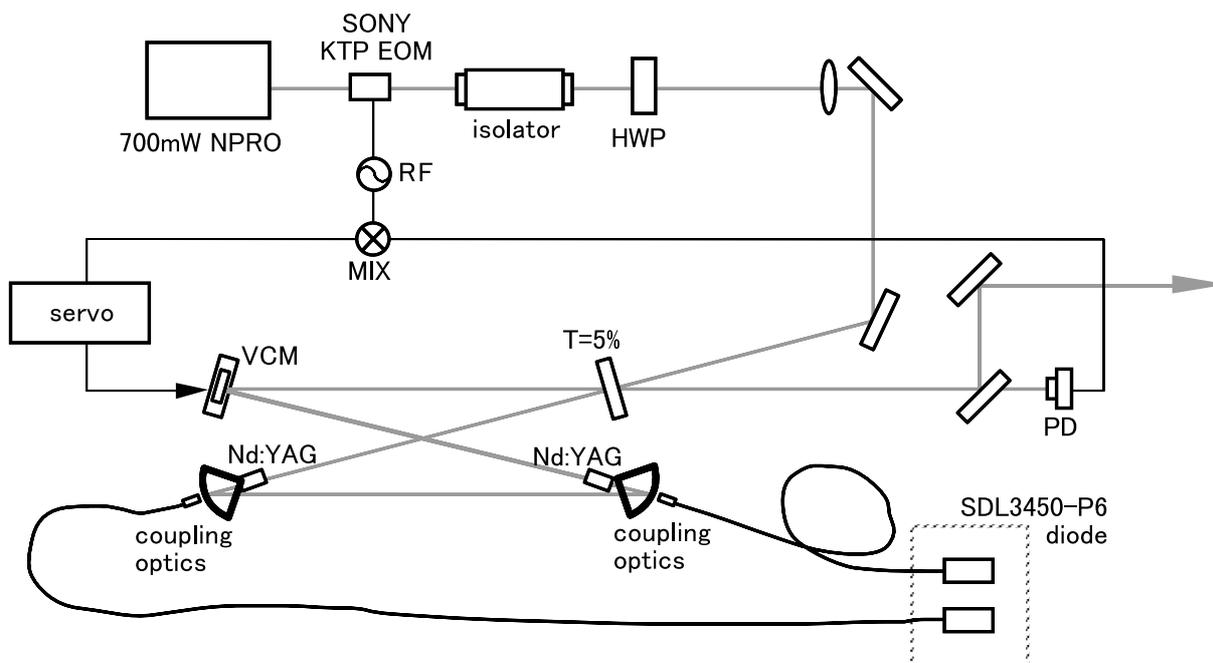


図 10: 注入同期方式 10W Nd:YAG レーザーのダイアグラム .

レーザー光源としては半導体レーザー励起のNd:YAG レーザーを用いる。いわゆる end pump 方式のスレーブレーザーは約 20W の半導体レーザーによりポンピングされる。一方で高安定なマスターレーザーとして 700mW 出力のレーザーがあり、これにスレーブが注入同期されることにより、マスターと同じだけの安定度をもった高出力レーザーが実現する。またマスターレーザーは外部から周波数調整を行う入力端子を備えているため、全体として周波数可変の高出力レーザーとなっていることが特徴である。これによりメインの干渉計を利用して光源の周波数安定化を行うことが可能となる。波長は 1064nm であり可視光では無いが、真空中で用いるものであり取り扱い上特に問題は無い。しかしこのままでは周波数等の安定度が不足するため、メインの干渉計に入射する前に予備的な安定化が必要となる。そのため固定ミラーを用いたファブリー・ペロー共振器を利用した周波数安定化が準備されている。

3.6.2 光学部品

レーザーの他にも、例えば光検出器に関しては必要とされるハイパワー入力のもので製品として存在しないため、光パワー分割型の多素子による検出器を開発中である。また、光変調器 (EOM) や光アイソレーターについても光ビームの直径が大きいこと、高真空中に置くため真空仕様をみたすものであることなどが要求される。

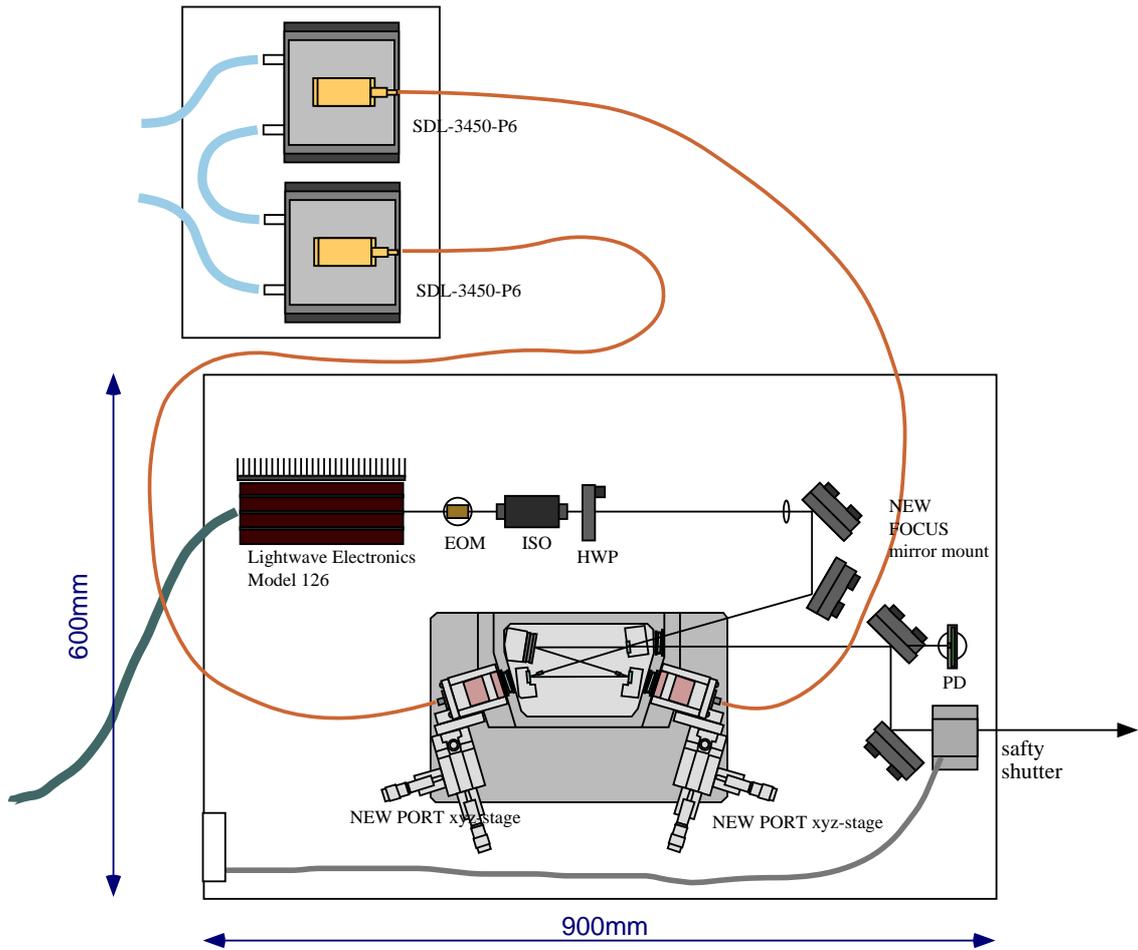


図 11: 10W Nd:YAG レーザーの配置図 .

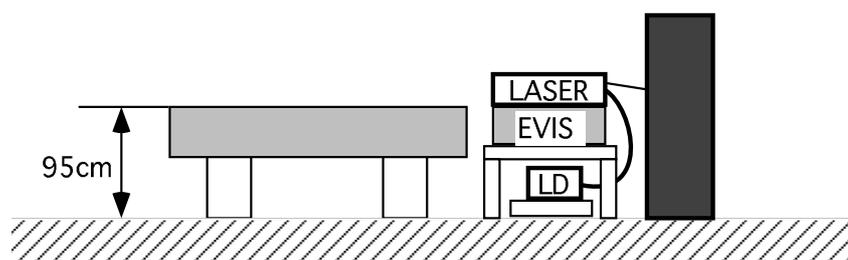
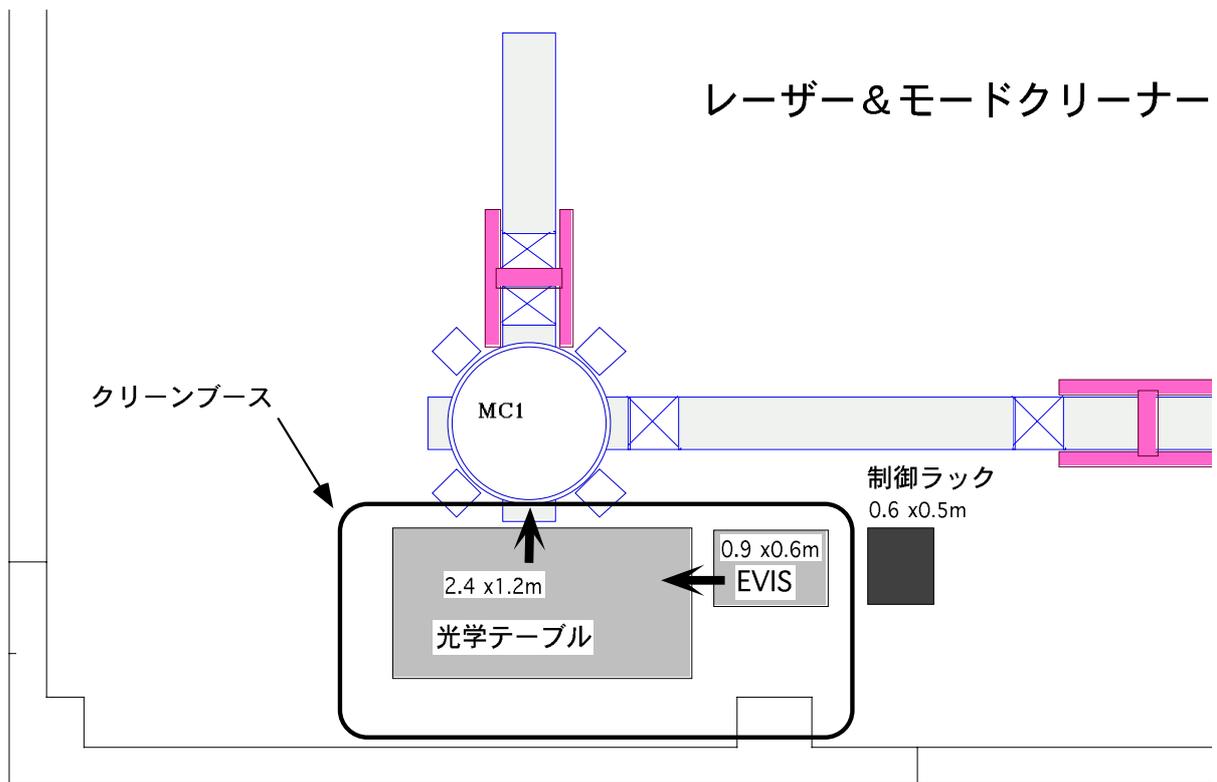


図 12: レーザーとモードクリーナーの配置 .

3.7 ミラー

ミラーに要求されるのは、

- 回折損失が無視できる十分な口径
- 観測帯域での熱雑音が無視できるような音速と機械的Q値
- 透過光の波面乱れが無視できる光学的均一性
- 熱レンズ効果が無視できる熱膨張率と熱伝導率
- マイケルソンの干渉効率を高めるための設計値通りの反射率
- レーザーパワーを充分活かすための非常に小さな吸収損失と散乱損失

である．数値をあたってみると、これら全てを満たすことはかなり困難であることが分かるが、不可能ではない．以下に具体的に検討する．

3.7.1 口径

300mの長さの Fabry-Perot 共振器について、フロントミラーが平面だとすれば、モードの安定性を考慮して、エンドミラーの曲率は450mとなる．この場合、エンドミラーの位置でのビーム径は約15mm（半径）である．回折損失を1ppm以下に抑えるためにはコーティング領域は直径90mmが必要であり、ミラー素材は最低でも直径10cmとなる．

3.7.2 弾性モードと形状

ミラーの弾性モードに関し、共振周波数はなるべく高い方がよい．これは数値計算によりアスペクト比5:3ぐらいが選ばれた．つまり直径10cmに対し、厚さは6cmとなる．ミラー素材の音速は石英で6km/s、サファイアで9km/s程度である．最低次の共振周波数は石英の場合でも40kHz以上であるから充分と言える．問題はQ値であり、サファイアの方が高いことが報告されているが、素材本来のQ値を出すことは難しく、実際にはミラーに張り付けられたマグネットやワイヤーでの吊り下げ方で決まってしまうことが多いので、現段階では石英を選ぶ．

3.7.3 素材の光学特性

これについては合成石英にまさるものはないであろう．光通信や半導体産業の要求にこたえるため、石英の光学特性は極限にまで高められている．これを利用しない手はない．具体的な値としては、屈折率揺らぎが 5×10^{-7} 程度が得られるので、厚さ6cmに対し、透過光の波面乱れは $\lambda/30$ となり許容範囲内である．また合成石英はサファイアのような複屈折率を持たないので、この点も有利である．TAMAミラーの素材としては、信越石英のSuprasil-P10を選定した．

3.7.4 研磨

まず、安定な光共振モードのためには設計通りの曲率半径を持つことが必要である．また、2つの共振器に対し、この曲率半径の相対値は良く一致していなければならない．さらに、散乱損失を抑えるために表面粗さが非常に小さいこと（1オングストローム以下）が要求される．これはSuperPolishという方法で既に実現されているが、直径10cmという広い領域で可能かどうかは未知である．

	diameter (mm)	thickness (mm)	curvature (m)	reflectivity (%)	trans.	injection angle	wedge	pol.	N
300mFP front	100	60	flat	98.80		0	1'		2
300mFP end	100	60	450±25	≥ 99.99	≥ 60ppm	0	1°		2
300mFP BS	150	40	flat	50±0.1		45°		S	1
10m ring MC near	100	30	flat	99.82 ± 0.05		45°		S	2
10m ring MC far	100	60	15 ± 1	≥ 99.99	≥ 60ppm	0			1
recycling mirror	100	60	9,000	96.67		0			1

表 3: TAMA300 ミラー仕様

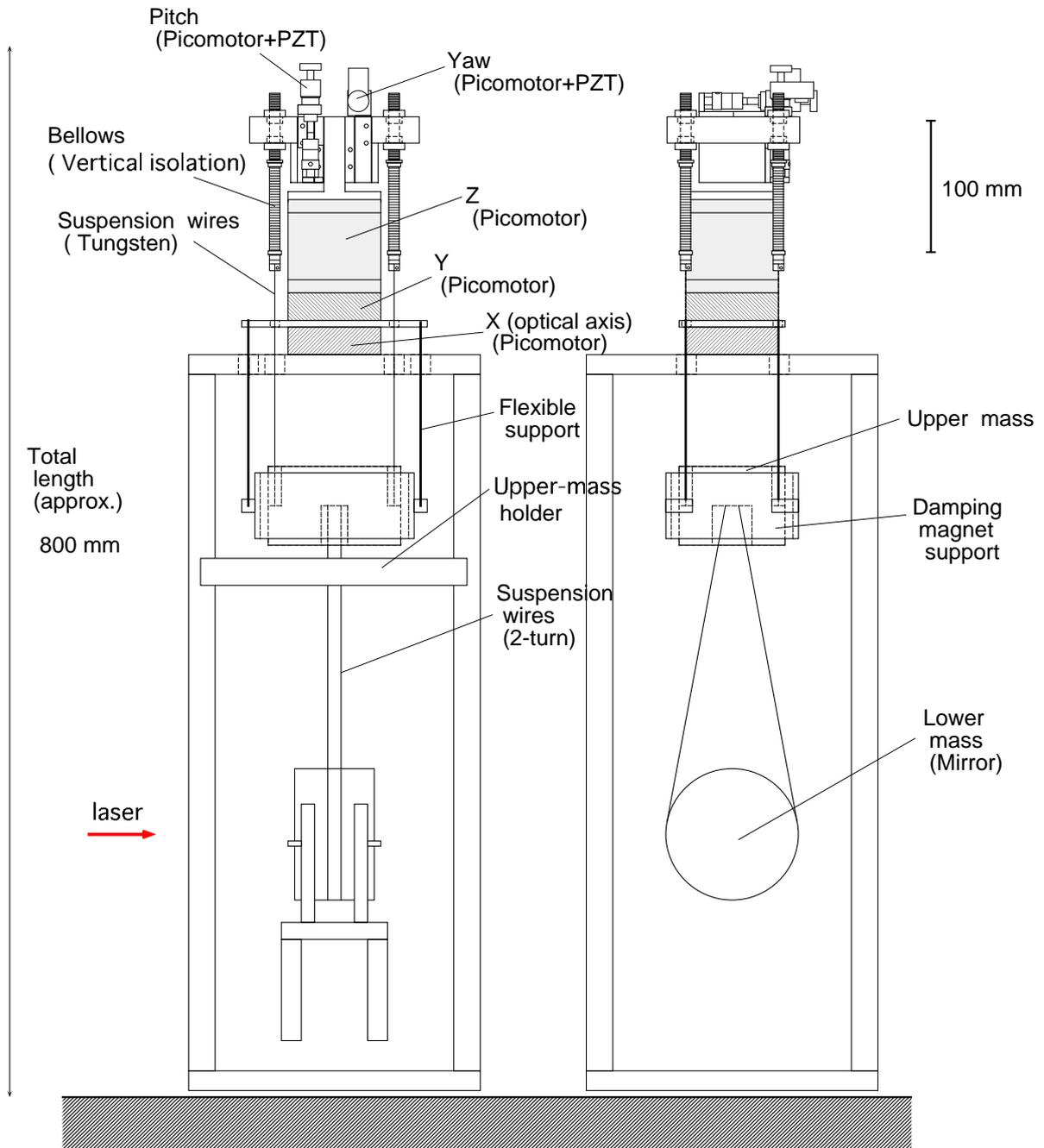
3.7.5 コーティング

ミラーで最も重要なのがコーティングである。FP 共振器の性能はコーティングで決まると言っても過言ではない。まず、2つのFPのフィネス（反射率）を揃えるためには、非常に良く制御された成膜が必要である。特にエンドミラーに関してはなるべく高い反射率が要求されるので、これは損失の問題に直結している。例えば損失が10ppmあると、可能な最高反射率は99.99950ppm以下という仕様になる。ニアミラーの場合は反射率は低いのだが、レーザーパワーを有効に使うために、やはり低損失であることが要求される。共振器中では等価的に光パワーはフィネス倍になるので、50ppmといっても、そこで発生する熱はかなり大きい。この熱によりミラー基材が変形してレンズのようになるので、熱膨張率が小さく、熱伝導率が高い素材を選ぶことが大事である。この点に関しては合成石英はあまり良い素材とは言えないので、損失は低ければ低いほど良いことになる。このようなコーティングはIom Beam Sputter法で唯一可能であり、直径1cm程度の小さなサンプルでは1ppmのオーダーの吸収損失が報告されている。TAMAミラーのコーティングはそのような技術を持つ日本航空電子に発注される。

以上の検討により、表3のような仕様が決められた。

3.8 テストマス懸架

ミラーなどのテストマスを懸架する部分のデザインは制御性、防振特性、熱雑音などを考慮して決められる。基本的なデザインはミラーを2重振り子で懸架し、光軸方向の並進以外は振り子の支点で制御するというものである。2重振り子の上側のマスのまわりには強力な永久磁石が配置されていてeddy currentの効果により振り子の振動に制動がかかる。これにより通常行われるローカルコントロールといわれる制御系が不要になり、大幅にデザインが簡素化され信頼性が向上する。防振特性も単振り子に比べて向上するはずであるが、縦方向の振動が横方向に結合する効果が比較的大きいためこれを軽減する対策が必要となる。振り子の支点にはXYZ方向および2つの回転方向を制御するためのアクチュエーターが取り付けられている。粗調にはピコモーターという電動マイクロメータを用い、微調のためにはPZT（圧電素子）を併用する。熱雑音の効果としては振り子運動にともなうものと、ミラーの弾性体としての固有振動にともなう熱振動がある。振り子運動は周期1秒程度であるが、その熱雑音のスペクトルの裾である300Hz周辺の成分が雑音に寄与する。同様にミラーの内部モードは共振周波数が30kHz以上であるが、スペクトルの低周波数部分が効いてくる。振り子のQ値としては 10^5 以上、内部モードのQ値は 10^7 以上が要求される。



Preliminary Suspension Design for TAMA300

(A. Araya, 96/10/4)

図 13: ミラー懸架システム .

3.8.1 テストマスの位置精度に対する要求

重力波検出に対する目標感度を達成するためには、test mass(mirror, BS, Pick-off) がある精度でその位置を保つ必要がある。ここでは最も要求の厳しいミラーに対する精度を考えるが他の光学素子もこれに準じる。考えるべきは3つの並進および2つの回転の計5つの自由度である。それらの記号を以下のように定める。

Notation

X : longitudinal position(光軸方向)

Y : lateral position

Z : vertical position

θ_Y : pitch(Y 軸まわりの回転)

θ_Z : yaw(Z 軸まわりの回転)

test mass の位置精度と言ったとき、これはレーザー光軸と test mass の間の相対的な位置精度を表すものとする。位置精度を指定するには3つのやり方がある。1つは accuracy であり、これは目標値からどの位ずれているかを示す。例えばレーザービームのスポットとミラーの中心が1mmの offset 以内なら良いという場合、これは accuracy である。これは平均値であるが、これがそのまわりでどの位揺らいでもいいかを示すのが rms noise(precision) である。この場合については rms noise は accuracy と同程度が要求される。3つめの精度は重力波信号領域(150-450Hz)における揺らぎであり、通常最も厳しい150Hzにおける power spectrum density によって表される。

position	accuracy	rms noise	spectral noise @150Hz
X			$< 5 \times 10^{-20} \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$
Y	$< 1 \text{mm}$	$< 1 \text{mm}$	$< 5 \times 10^{-20} \text{m}$
Z	$< 1 \text{mm}$	$< 1 \text{mm}$	$< 5 \times 10^{-20} \text{m}$
θ_Y θ_Z	$< 5 \times 10^{-7} \text{rad}$	$< 5 \times 10^{-7} \text{rad}$	$< 10^{-17} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$

表 4: test mass の位置精度に対する要求

X の accuracy は FP cavity の共振 (L_+, L_-, ℓ_+, ℓ_-) をどの位の精度で保つべきかによって決まる。この時両腕の storage time の mismatching、レーザー強度および周波数雑音の効果を考慮する。spectral noise は地球の曲率のため吊られたミラーが鉛直からずれる ($\theta \sim 300/6, 500 \times 10^3 \sim 5 \times 10^{-5} \text{rad}$) ことから $Z \rightarrow X$ の変換が生じると考える。 Y, Z に対する accuracy はミラーの回転が並進雑音に変換されたいための制約から決まる。 θ_Y, θ_Z に対する accuracy は干渉計のコントラスト(99%) および recycling gain の misalignment による低下が10%以内という要請から決まる。また、spectral noise は beam centering が1mmずれているとき、角度揺らぎが並進雑音に変換される効果を計算したものである。

3.8.2 干渉計設置場所の予想雑音レベル

三鷹TAMA300レーザー干渉計建設場所における位置雑音レベルを推定する。 XYZ 並進および $\theta_Y \theta_Z$ 角度の initial position error(mode-cleaner chamber と FP cavity chamber の当初の相対的位置のずれ等)は、

ブレッドボードのレベリングによって2mm程度以内および1°以内におさめられる．また、温度変化や地殻変動、防振系等の経年変化を考えると、並進(XYZ)においては300mについて2mm以内のドリフトが予想される．角度(θ_Y, θ_Z)については防振に使用するスタックの傾きが支配的であると予想されるので、表にはこの値を示している．スタックの実測によると1mrad以内の変化が見られる．三鷹地区の地面振動データによると、150Hzにおける seismic noise level は $10^{-12}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となっている．また rms noise は低周波 (0.1Hz-10Hz) のゆらぎによって決定される．

position	initial error	drift & rate	spectral noise @150Hz	rms noise
X	< 2mm	< 2mm	$10^{-12}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$	10 μm
Y		< 50 $\mu\text{m}/\text{h}$		
Z				
θ_Y	< 5mrad	< 1mrad		
θ_Z		< 30 $\mu\text{rad}/\text{day}$		

表 5: 干渉計設置場所の予想位置雑音レベル

3.8.3 design

suspension point においては粗調に picomotor($\pm 3\text{mm}$)、微調に PZT($\pm 0.6\mu\text{m}@\pm 10\text{V}$)、test mass の位置では magnet & coil を actuator として用いる．suspension point では5つの可動stageを利用して $X, Y, Z, \theta_Y, \theta_Z$ の制御を行う．test mass の位置では magnet & coil により X のみを制御する．

suspension point stages

X : with picomotor

Y : with picomotor

Z : with picomotor

θ_Y : with picomotor+PZT

θ_Z : with picomotor+PZT

test mass

X : magnet & coil

3.9 防振

三鷹地区の地面振動レベルは静かな山間部などに比べると大きい、例えば東京大学本郷キャンパスなどに比べると約1桁小さい．例えば150Hzにおける振動レベルは $10^{-12}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ となっている．もちろんこのままでは重力波信号が覆い隠されてしまうので、目標信号以下に抑えるためにはミラーの振動としては $5 \times 10^{-20}\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで落とす必要がある．つまり約8桁の防振が必要となる．これを3段階の防振システムで実現する．そして最後に懸架システムの2重振り子があり、やはり数Hz以上の周波数帯域における防振を受け持つ．

Model 8302	
resolution	30nm
traveling	10-50mm
max. load	2.5kg
speed	1mm/min
vacuum spec.	(10^{-8} torr)

表 6: NEWFOCUS picomotor の特性

Model ASB090C801MP0	
expansion	$9\mu\text{m}@150\text{V}$
length	29.15mm
diameter	11.5mm-13.1mm
vacuum spec.	$1 \times 10^{-8}\text{atm cc/sec}$

表 7: TOKIN 金属ケース封入タイプ圧電素子

3.9.1 スタック防振

まずスタックとよばれるゴムと金属のおもりを交互に重ねた防振構造を用いる。このシステムは10Hz程度から防振効果が効き始める。真空中でゴムをそのまま用いると脱ガスによりミラーなどの汚染の恐れがあるため、ゴムをベローズで封入したものを使用する。

3.9.2 X pendulum 防振

スタックの上にはブレッドボードが置かれその上にX振り子とよばれる低周波防振システムが設置される。X振り子は低周波防振のために開発されたシステムであり、周期10秒程度の振り子を実現できるため1Hz程度からの防振が期待できる。これは25m長さの振り子に匹敵する周期であるが、全長1m足らずの装置で達成可能である。ただ傾きに対してはやはり25m長さの振り子のように振る舞うため、何らかの傾斜補正装置を必要とする。

3.9.3 鉛直方向能動防振

この装置は水平面内の2次元防振システムとして拡張可能であるが、鉛直方向の防振は不可能である。そこで鉛直方向には加速度計とPZTアクチュエータを組み合わせた能動防振システムを組み込む。

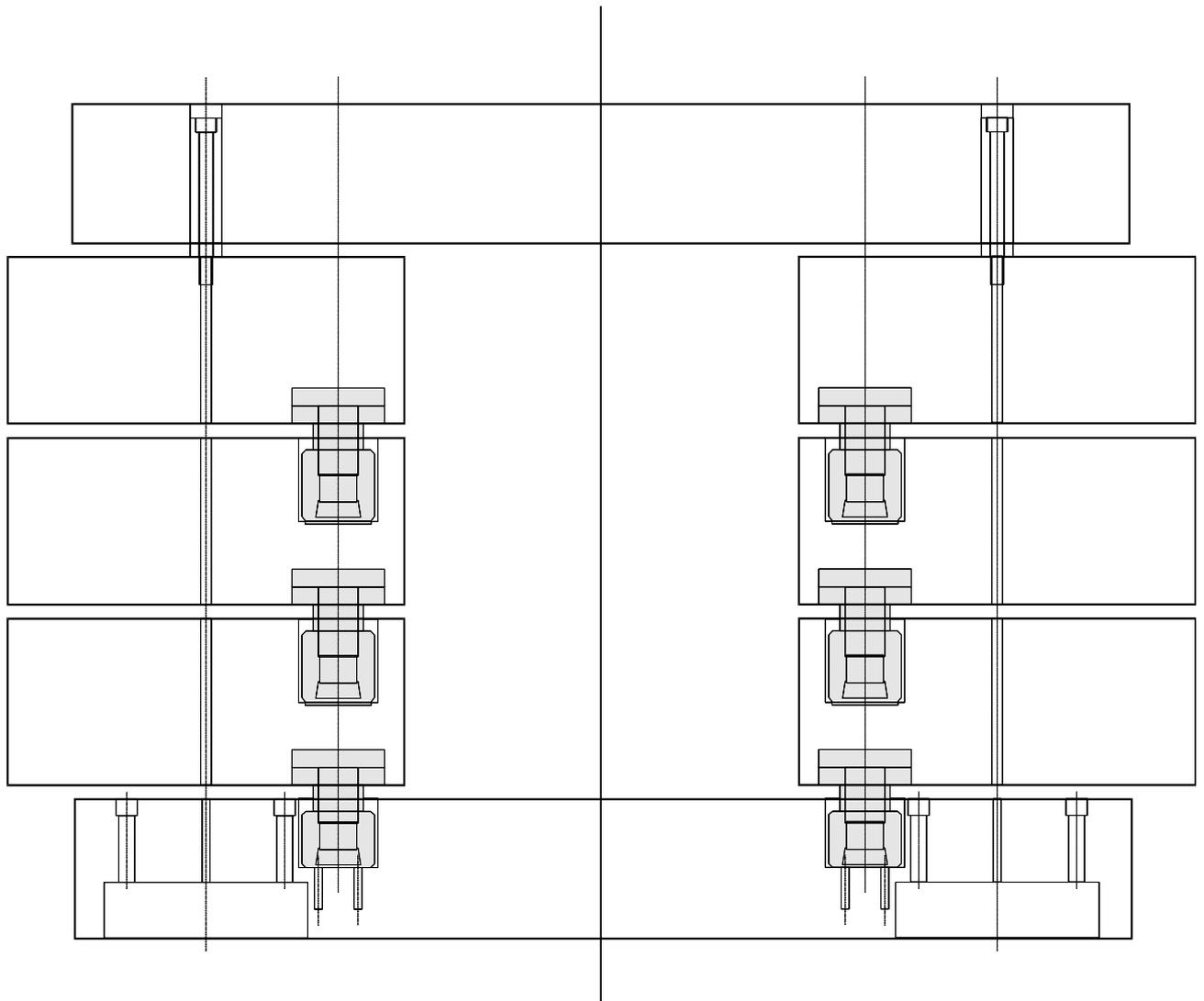


図 14: スタック防振系 .

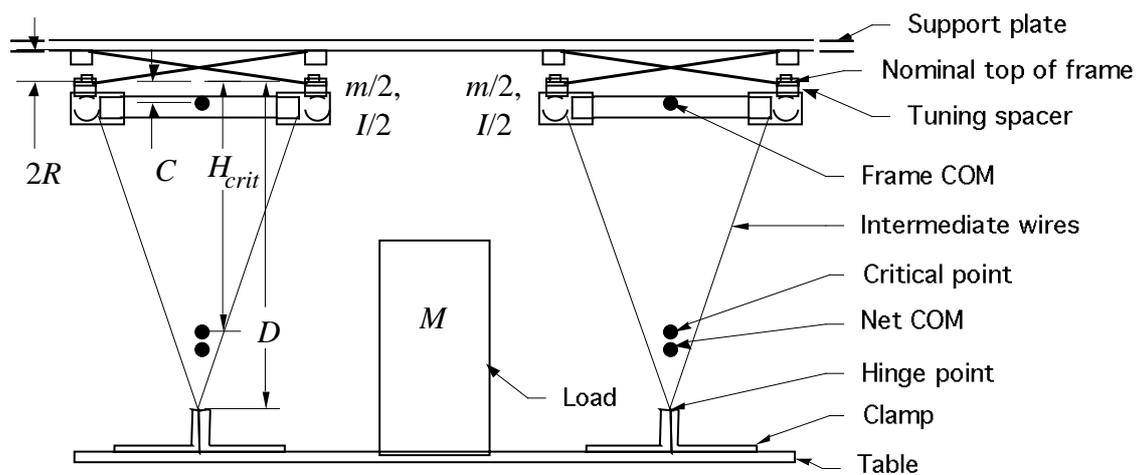


図 15: 1次元X振り子の側面図 .

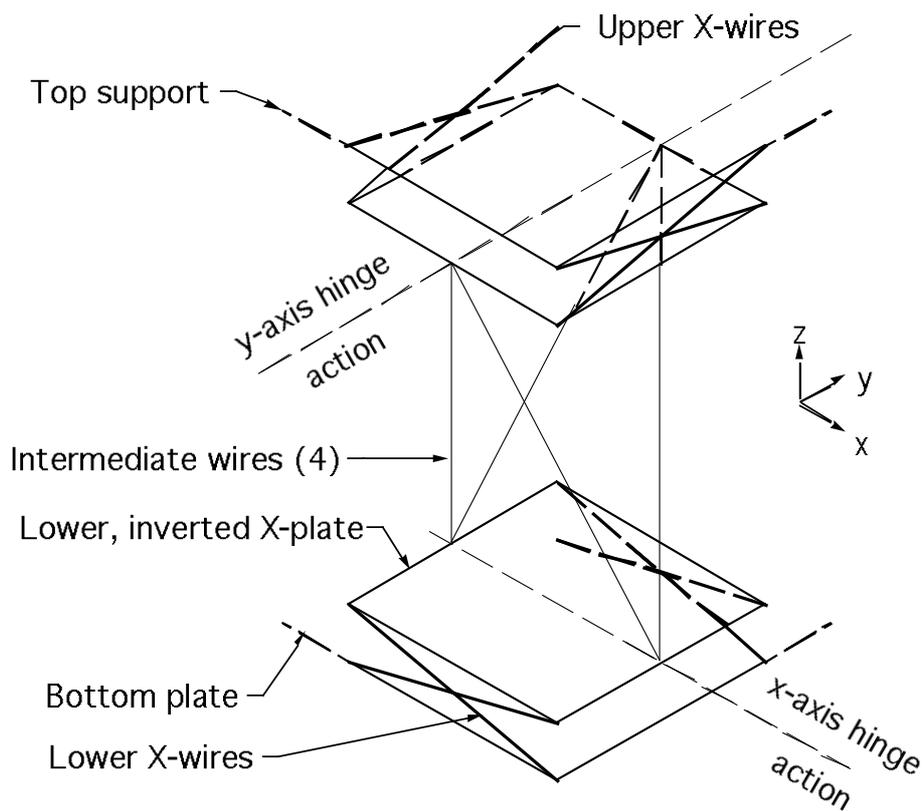


図 16: 2次元X振り子の原理図 .

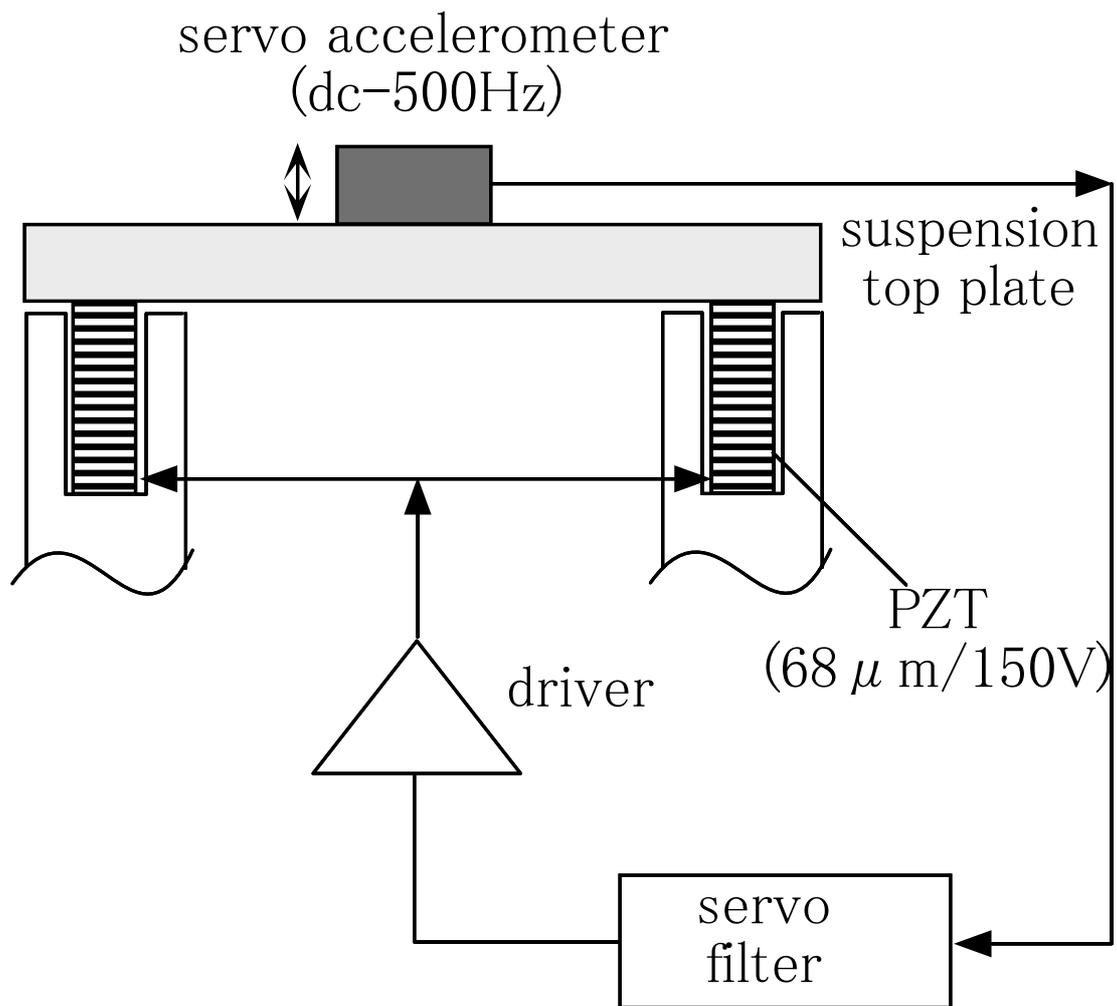


図 17: 垂直方向能動防振システムの原理図 .

Vibration Isolation System for the 300m Interferometer

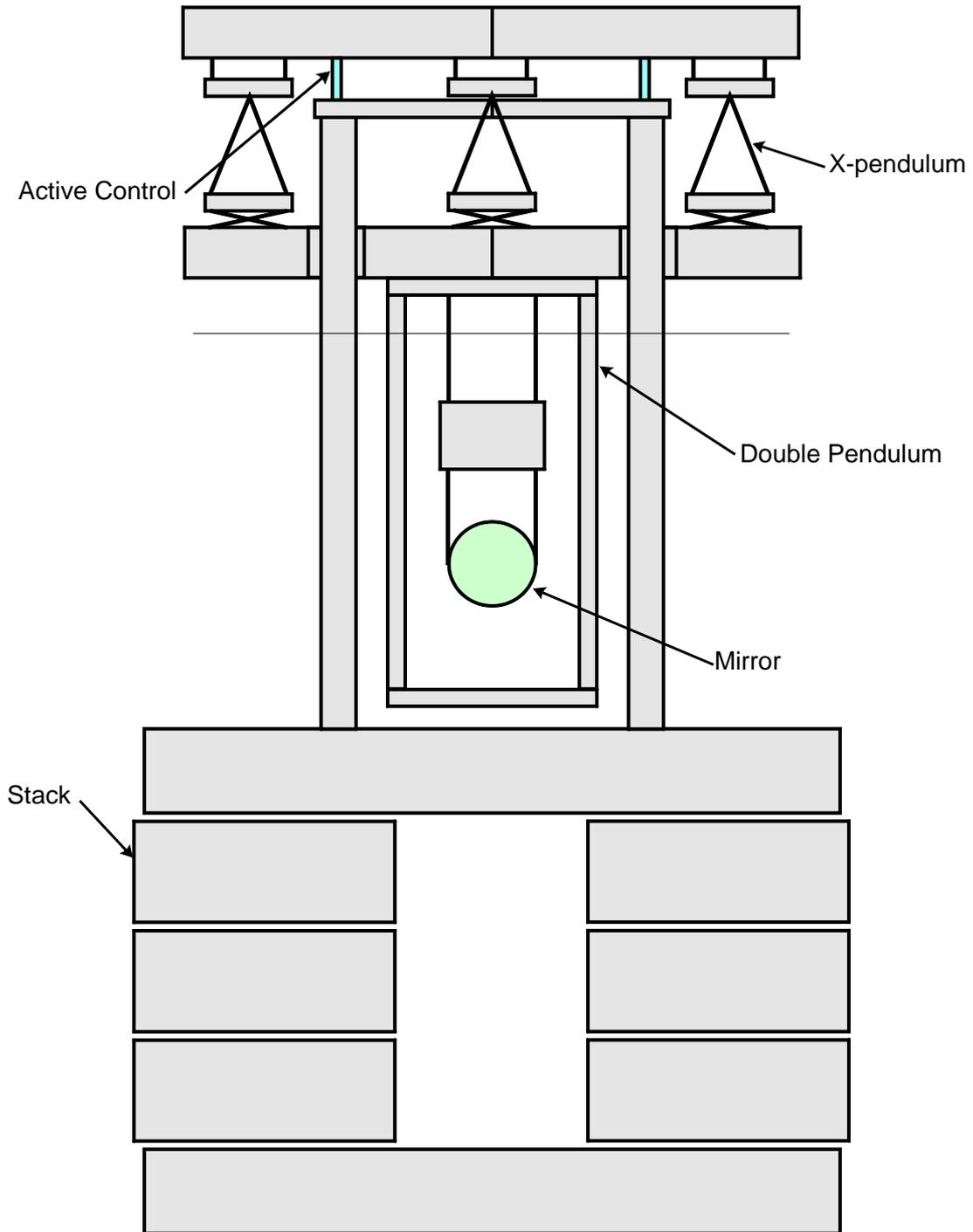


図 18: ミラー懸架を含む防振系全体 .

3.10 データ取得・デジタル制御

ここで述べるのはデータの取得および記録、および計算機を介した制御を含むシステムである。

干渉計の信号は、主干渉信号や Fabry=Perot キャビティへのフィードバック信号のように高いレート (20kHz) のサンプリングを必要とするもの、真空モニターや温度モニターのように更新頻度は低い (10Hz 以下) が干渉計全体に沿って広範囲に信号源が散在するもの、の 2 つに概ね分けられる。表 8 に信号のサンプリングレート、チャンネル数等の概要を示す。一方、温度などの環境変化によるものを長時間にわたって補正するために計算機を介した低速の制御が考えられ、実験装置の一部分で閉じた局所的なデジタル制御、或いは中央真空槽室と東西端室の間でフィードバックするような広域的な制御が要求される。特に後者は干渉計が大きくなったことにより必要になってきた。すなわち、

- 高レートデータの記録 (600KByte/sec, 連続)
- 実験環境に分散 (300m + 300m) した情報を集中的に記録、モニター
- 実験装置のデジタル制御。特に検出器の独立した部分が相互に影響を受けることなく運転をつづけられる

が TAMA 干渉計のデータシステムの目標である。

3.10.1 ネットワーク

TAMA 実験室はデータ取り込みとデジタル制御のために中央真空槽室と各実験室 (東西端室と配管路中間部) 間にそれぞれ 16 芯、8 芯の光ファイバーが敷設されている。ファイバーの内幾つかは計算機ネットワークとは別に、送り側で A/D 変換でデジタルに変化してから転送し、受け側でもう一度 D/A 変換してアナログに戻すというデータ転送方法に用いる。計算機ネットワークは 3 つの閉じたネットワークセグメントで構成され、セグメント毎に中央真空槽室を中心にスター配線の形で別々の光ファイバーで各実験室と結んでいる (図 19 参照)

3.10.2 低レートデータ取得・デジタル制御機器

これらの機器は分散して配置され、データや制御の状況は前述のネットワークを通して計算機に集められることになる。従ってネットワークに接続できる測定機器として、VME クレート+バスマスターの CPU ボード、あるいは VXI クレート+PC 互換コンピューターを用い、必要な ADC, DAC, TTL-IO 等をクレートに追加する。また汎用の GPIB 機器は VME/VXI クレートインターフェイスや GPIB-Ethernet インターフェイスを用いる。

3.10.3 高レートデータ取得・記録機器

レートが総計 600 kByte/sec (2 GByte/hour) 近く、しかも一定のレートで連続である。データ量を鑑みて最終的には磁気テープ (8mm) に記録するが、低レートデータとのマージヤ、テープの記録速度に余裕を持たせるためにハードディスクなどの中間スプールが必要である。市販規格を用いることにした場合、データの流れ全体で律速段階になるのは ADC から中間スプールへの転送である。また高レート部分の ADC のデータは量が多いので、ネットワークを介さずに記録装置と繋ぐ。機器は VXI クレートをベースに用い ADC と中間スプールの為のハードディスクは VXI モジュールとしてクレートに載り、VXI バスに接続される。ADC からハードディスクへの転送は通常のバスマスターの CPU ボードを介さず、ヒューレットパッカー社のソフト (DSP Engine) によって、VXI バス上で直接行う。これによって中間スプールまでは高速で転送し、フォーマット処理を経てバスマスターの CPU ボードに SCSI2 で接続されたテープ装置に記録される。

3.10.4 ソフトウェアとデータシステム全体の構成

機器を制御・統括するためのソフトウェアとして、以下の2つが候補にあがっている。

- EPCIS (Experimental Physics and Industrial Control System)

EPICSは Los Alamos 研究所等で開発されたソフトウェアで、ネットワーク上のUNIXワークステーション、VME(OS: VxWorks)等を扱える。複数の機器の測定や計算を分散型のデータベースとして捉え、特にネットワーク上に散在する機器を扱うのに優れている。データの表示等に関してはエンドユーザーにも扱いやすいGUIを供え、実験の全体のモニターに用いる。またSNCという言葉を用いてスレッド化してシーケンスも扱える。

- HP VEE (Visual Engineering Environment , Hewlett-Packard Co.)

VEEはヒューレットパッカード社の開発したGUI環境で、PC互換機やUNIXワークステーションからインターフェイスカードを通してVXIクレート上の機器を使うことができ、データの表示や記録が可能である。直感的なGUIでシーケンスを組めるのが強みである。

さらにデータシステムの動作は用途に合わせて以下の5つの論理層に分けられる。

1. 部分的な制御層 (Local control layer: LCL)

単一の機器(PC+VXIcrate 或いはVME) 上で行う干渉計要素の制御プロセス層。制御のループはネットワークを介さない。他のどのプロセス層および、同一層の他の機器の動作に関わらず、単一機器上で制御プロセスは動作できる。低速データ取得部には制御ループの状態を送る。

2. 広範囲の制御層 (Global control layer: GCL)

複数の機器上で行う干渉計要素の制御プロセス層。制御のループはネットワークを介し、離れた場所(例えば中央真空槽室と東西真空槽室)間での制御ループを構成する。LCL同様、他のどのプロセス層および、同一層の他ループの動作に関わらず、単一ループで制御プロセスは動作できる。2つ以上の互いに相関が必要な制御系は1つのGCLにすることによって統合できる。低速データ取得部にはLCL同様に制御ループの状態を送る。

LCLおよびGCLの機器はd300netの”Control net”と称す1つのネットワークセグメントに接続される。GCLの制御ループはControl netを用いることになる。またLCL、GCLから制御ループの情報を送るにあたって、VEEとEPICSでは多少状況が異なる。EPICSは測定データがネットワーク上に分散したdata baseの形式で管理され、ユーザーがネットワークの操作を意識することなく制御やデータの論理層を切り分けられる。一方VEEは基本的にひとつのホスト上で動くものなので、特にネットワーク経由でデータを送る為には、それぞれについてsocket通信をユーザーが設定するなどの工夫が必要である。

3. 低レートデータ取得層 (Low rate data acquisition layer: L-DAL)

低いrate(0.1 - 10Hz)のデータ取得プロセス層。真空、温度などの環境データにはじまり、長時間でのアラインメントのドリフトなども含まれる。取得すべきデータは干渉計(300m × 300m)に沿ってまばらに分布しており、ネットワーク上に分散した機器で取り込まれる。機器は”Acquisition net”セグメント上に配置される。取り込んだデータのモニターはAcquisition net上の端末(ワークステーションないしPC)でまとめてモニターする。

4. 高レートデータ取得層 (High rate data acquisition layer: H-DAL)

高いレート (20kHz) のデータ取得プロセス層 . 中央真空槽室に集中した、干渉計の主干渉信号、フィードバック信号等の取り込み . 集めたデータは L-DAL 同様にマージ&記録プロセス (MSP) に送られる . 高レートのデータについてはリアルタイムで可能な範囲の重力波信号抜き出しの処理 (Matched filtering 等) を行い、イベントのトリガーを試みる予定がある . このためには、記録データは記録プロセスが走る機器 (VXI ないしワークステーション) とは別のワークステーションに送られるようになっているのが望ましい .

5. データマージと記録層 (Merge and storage process: MSP)

L-DAL、H-DAL のデータを集め、記録するプロセス層 . 実際には H-DAL のデータ量が支配的なため、H-DAL の機器の上に構成されることになる .

データシステム全体の流れを図 20 に示す .

表 8: List of signals to be recorded with the TAMA300 gravitational-wave antenna.

signal category	signal name	sampling	channels
interferometer	main signal	20kHz	1ch
	visibility	20kHz	1ch
interferometer feedback	main	20kHz	2ch
	beam splitter	20kHz	1ch
	recycling mirror	20kHz	1ch
	mode cleaner	20kHz	1ch
laser	power	20kHz	1ch
	frequency stability	20kHz	1ch
	visibility	20kHz	1ch
online analysis	h	20kHz	1ch
	matched filter	20kHz	3ch
mirror control	main(4deg.freedom)	100Hz	4ch
	recycling(4deg.freedom)	100Hz	1ch
	mode cleaner(4deg.freedom)	100Hz	2ch
mirror isolation	main(5deg.freedom)	100Hz	4ch
	recycling(5deg.freedom)	100Hz	1ch
	mode cleaner(5deg.freedom)	100Hz	2ch
	beam splitter(5deg.freedom)	100Hz	1ch
environment	seismic noise, acoustic noise, etc.	100Hz	30ch
	temperature, etc.	1Hz	100ch
vacuum	vacuum status	1Hz	20ch
	valve status	1Hz	50ch
GPS monitor	clock	1Hz	2ch

TAMA300
skematic of network and
data acquisition system

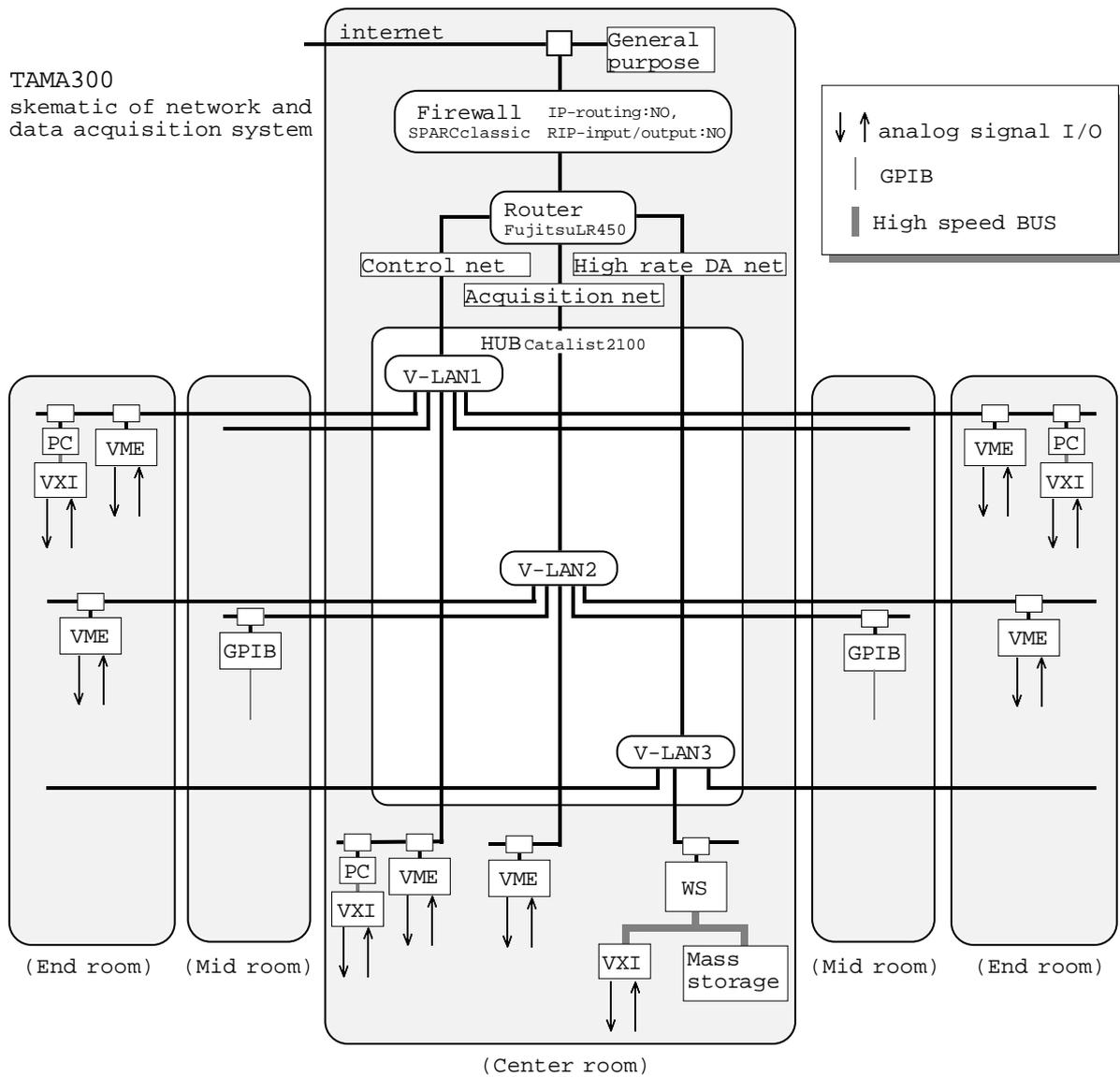


図 19: TAMA300 ネットワークシステム概念図.

Data Flow of TAMA 300

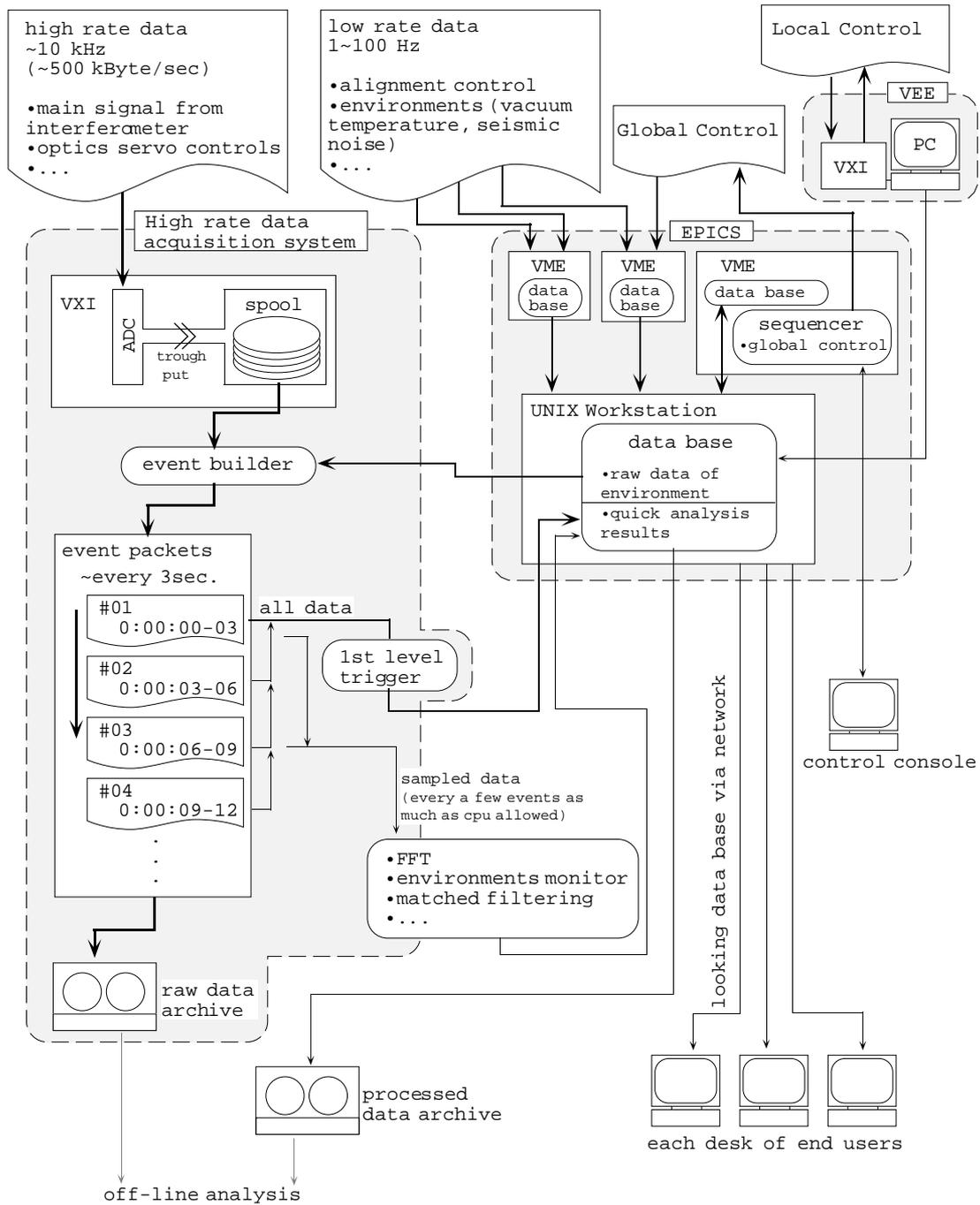


図 20: TAMA300 のデータ流れを示す図 .

3.11 真空

光ビームは直径40cmのSUS304製真空パイプの中を通過する．このパイプは1単位長さ11mのパイプをベローズを介してメタルガスケット (Helicoflex) で結合したものである．ベークンなしで 10^{-6} Paを達成するために、パイプの内面はECB(Electrochemical buffing)加工が施されている．真空ポンプはパイプ150mにつきロータリーポンプ2台、ターボモレキュラーポンプ2台、イオンポンプ4台で構成される．さらにアウトガスを減らすためのTiNコーティングが研究されている．ミラー等を収納する真空チェンバーは直径1mのものと1.2mのものがあり、合計8個が配置される．

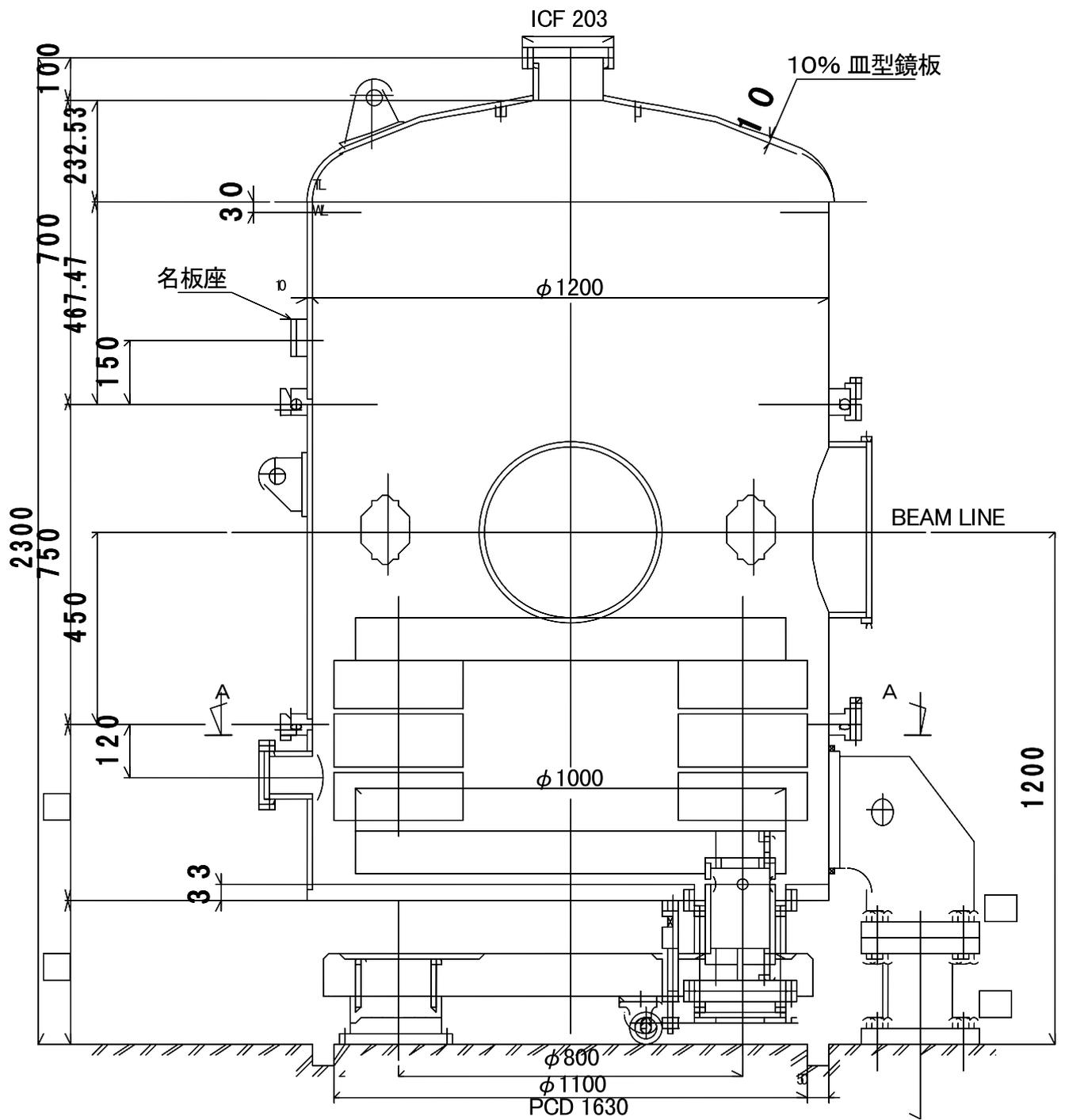


図 22: モードクリーナー用真空タンク

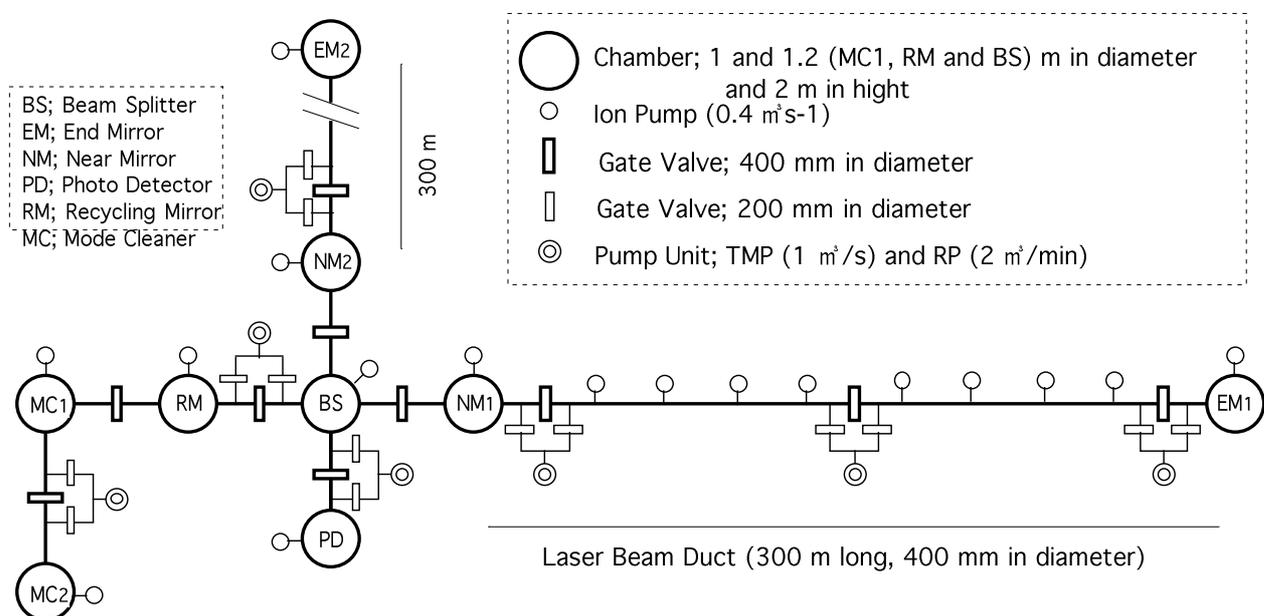
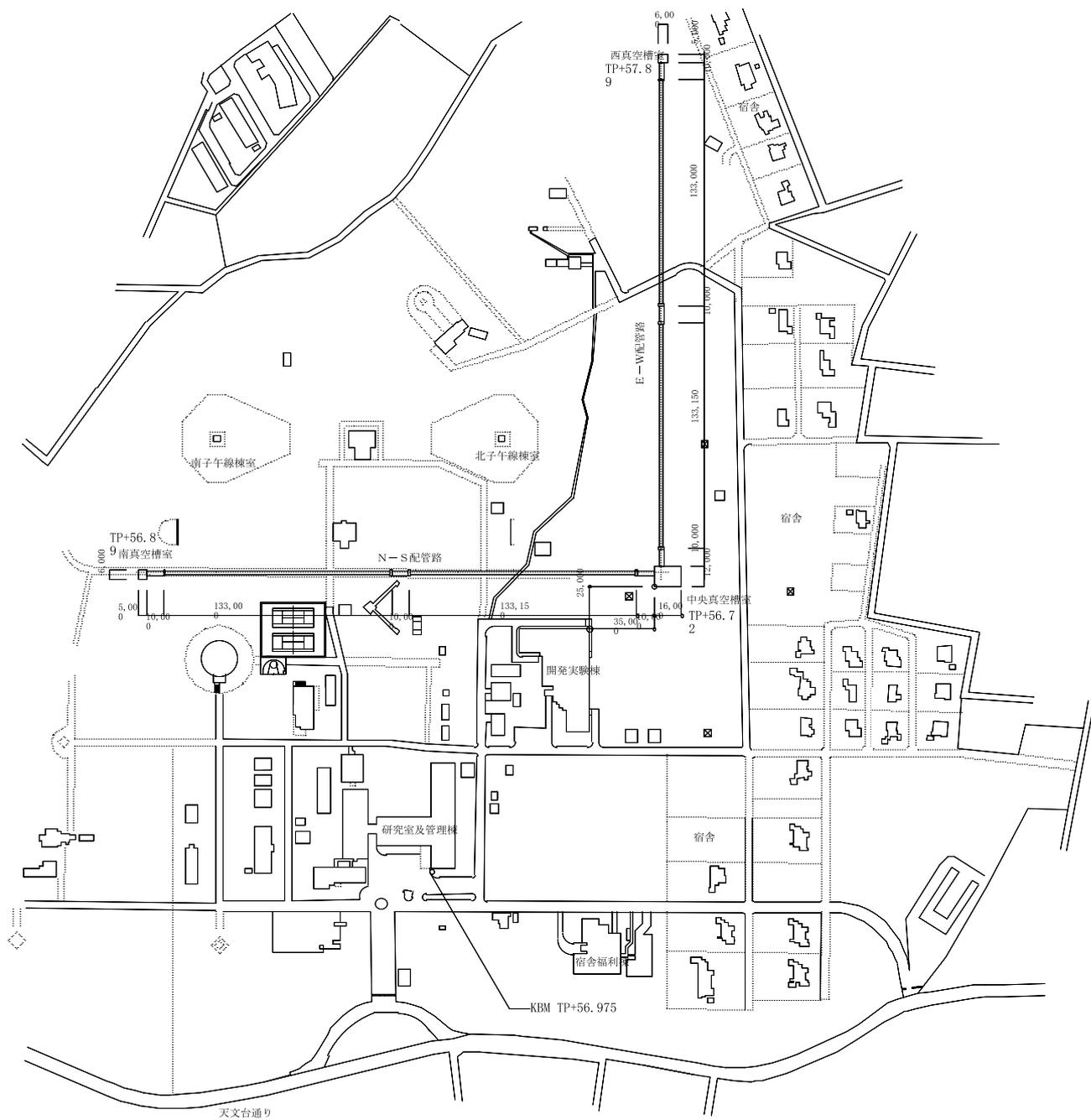


図 24: 真空排気システム .

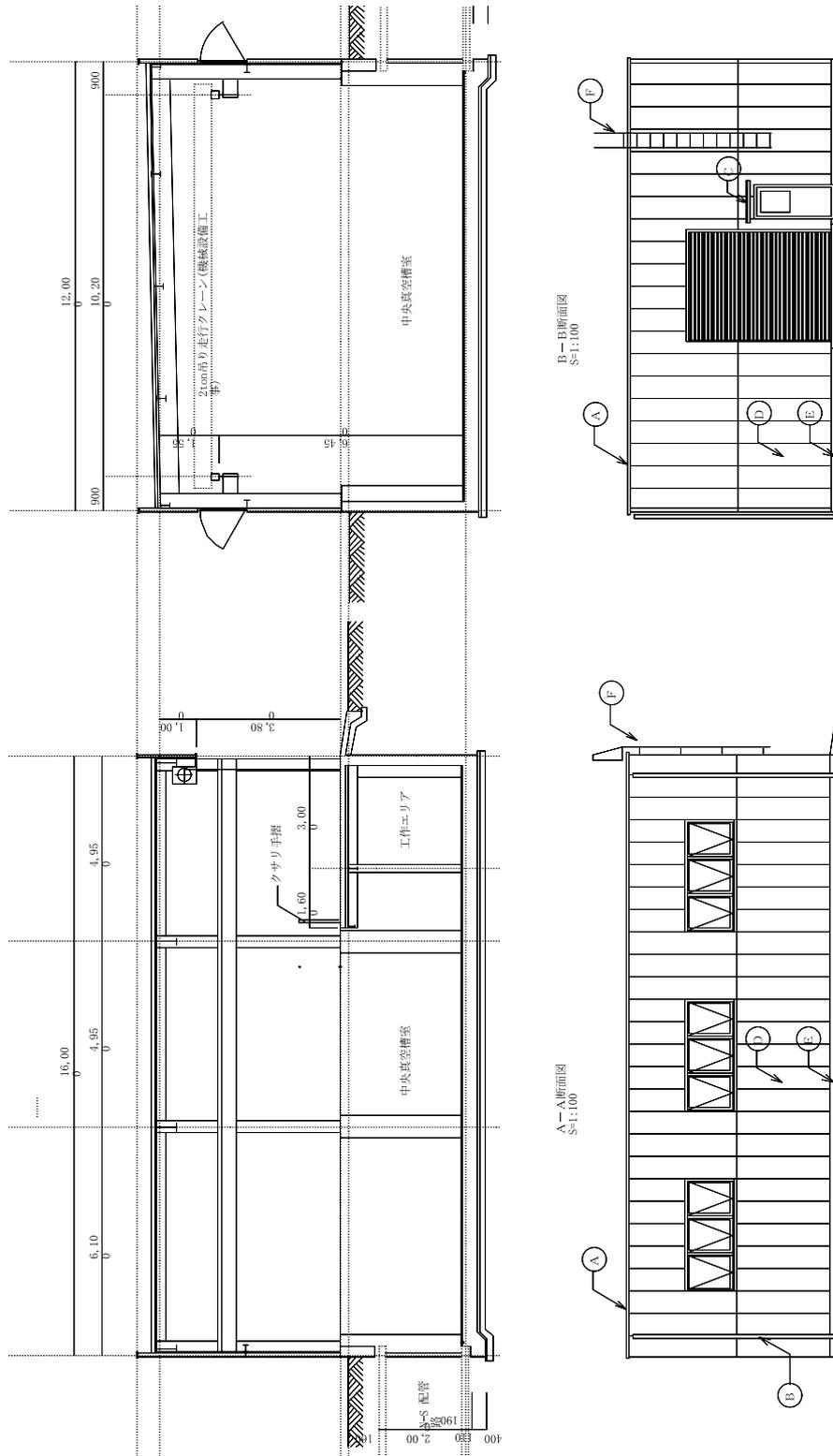
3.12 施設

真空パイプは国立天文台キャンパスの地下に設置される．ボックスカルバートとよばれるコンクリート製の配管路を地面の下に敷設し、その中に真空パイプをとす．配管路の内側寸法は高さ2m 横幅1.5mであり、真空パイプの横を人が一人ようやく通れる位の広さである．真空チェンバーを置くための建物は中央と端部2カ所の計3カ所あり、地上から出入りできるようになっている．



配置図
S=1:2000

図 25: TAMA300の設置場所、三鷹国立天文台キャンパス。



北立面図
S=1:100

東立面図
S=1:100

図 26: TAMA300 の中央真空槽室図面 .

4 研究組織

各組織の役割

project leader: project 全体の統括

advisory committee (総括班): project の評価、提言

executive committee (運営委員会): project 実施に関する決定機関

managing board (幹事会):

project manager: プロジェクト運営全般

coordinator: 将来計画、国際会議、国際協力、広報等

integrator: TAMA300 検出器の integration

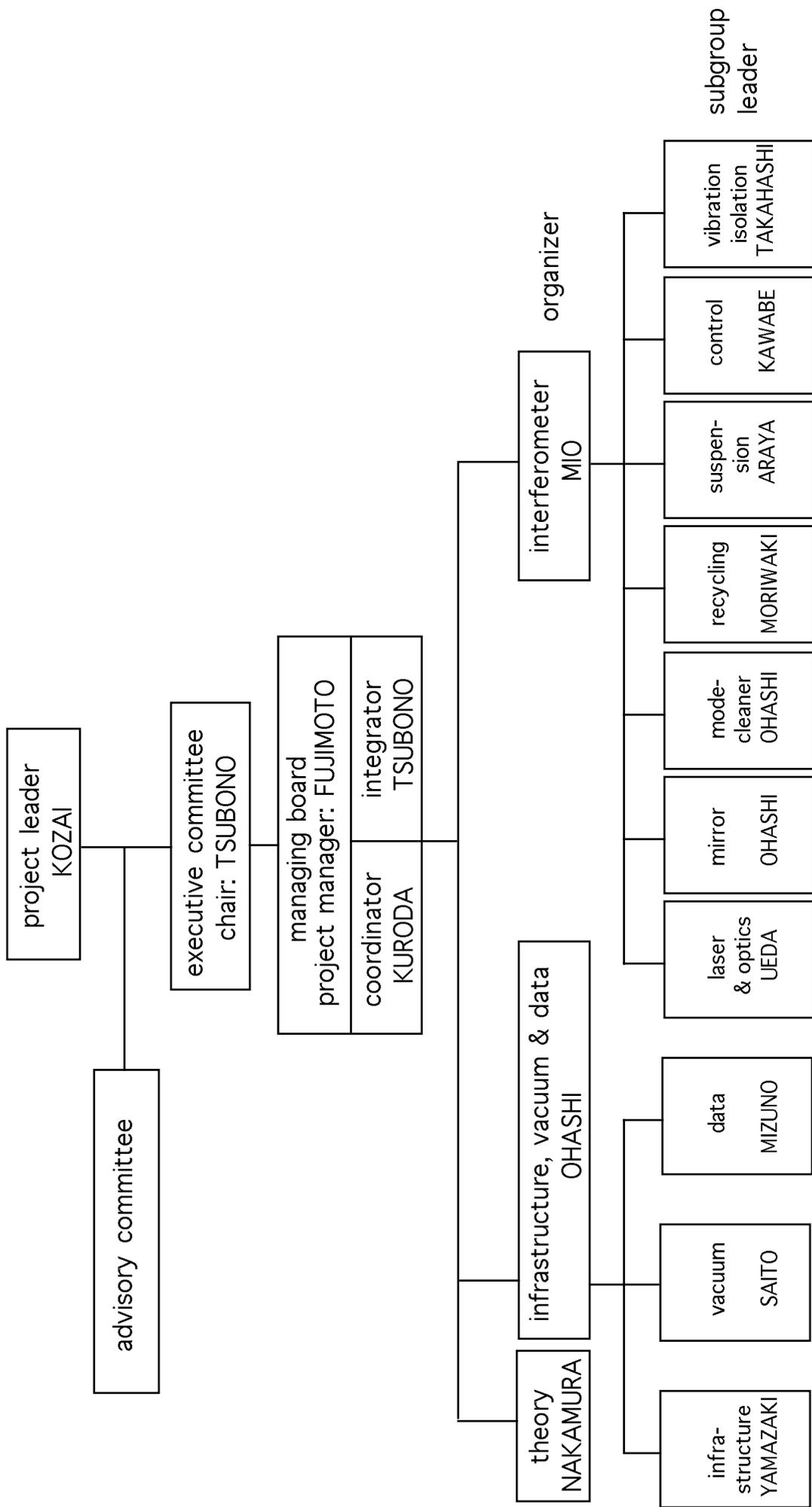
organizer: 干渉計、infrastructure、理論のとりまとめ

subgroup leader: 各サブグループの責任者

integration については、integrator,organizer および各 subgroup から 1-2 名のメンバーでグループを構成し、検出器全体の総合的な調整および干渉計本体建設実施にあたる。

古在 由秀	国立天文台・名誉教授	研究リーダー・総括
坪野 公夫	東京大・理・助教授	運営委員会議長・懸架装置
藤本 眞克	国立天文台・位置・助教授	運営委員会幹事・インフラ整備
黒田 和明	東京大・宇宙線研・助教授	運営委員会副幹事・低周波防振
植田 憲一	電通大・レーザー研・教授	運営委員・レーザー光源
齊藤 芳男	高工ネ研・放射光・助教授	運営委員・真空系
三尾 典克	東京大・工・助教授	運営委員・干渉計の光学設計
中村 卓史	京都大・基礎物理研・教授	運営委員・重力波発生理論
海部 宣男	国立天文台・光学・教授	運営委員・総括補佐
荒船 次郎	東京大・宇宙線研・所長	運営委員・総括補佐
菅原 寛孝	高工ネ研・所長	評価委員
小平 桂一	国立天文台・台長	評価委員
佐藤 文隆	京都大・理・教授	評価委員
江沢 洋	学習院大・理・教授	評価委員
宅間 宏	電通大・名誉教授	評価委員
清水 富士夫	東京大・工・教授	評価委員
霜田 光一	東京大・名誉教授	評価委員
河島 信樹	宇宙研・惑星研究系・教授	観測・モニター系
観山 正見	国立天文台・理論・教授	中性子星形成時の重力波放出
大橋 正健	国立天文台・位置・助手	モードクリーナーの開発・研究
高橋 竜太郎	国立天文台・位置・助手	スタック型防振装置の開発
山崎 利孝	国立天文台・位置・助手	データ取得実験・解析
神田 展行	東京大・宇宙線研・助手	リアルタイムデータ処理・解析
河邊 径太	東京大・理・助手	干渉計アラインメント
森脇 成典	東京大・工・助手	リサイクリング光学系
津田 展宏	東海大学・工・教授	超長焦点距離球面鏡の形状評価法の開発
新谷 昌人	東京大・地震研・助手	モードクリーナーの開発
堀越 源一	高工ネ研・名誉教授	真空系の設計・製作・真空評価

小川 雄二郎	高工ネ研・放射光・助手	真空系の実験測定、データ取得・システム制御
上窪田 紀彦	高工ネ研・放射光・助手	マンマシンインターフェース
鈴木 敏一	高工ネ研・低温・助手	防振系における熱雑音研究
松田 七美男	東京電機大・工・助教授	真空系の製作・実験・評価
中川 賢一	東京工芸大・工・講師	レーザー制御装置の製作
水野 英一	宇宙研・惑星研究系・助手	高速データ取得システム開発
中尾 憲一	京都大・理・助手	重力崩壊による裸の特異点形成とその最終状態
佐々木 節	大阪大・理・教授	数値的相対論の定式化の研究
柴田 大	大阪大・理・助手	3次元コードの開発
大原 謙一	新潟大・理・助教授	連星中性子星の合体と重力波
二間瀬 敏史	東北大・理・教授	重力波の放出と伝播
小嶋 康史	広島大・理・助教授	連星中性子星の合体
福島美津広	国立天文台・位置・技官	施設関連
E. Majorana	国立天文台・外国人研究員	熱雑音研究
Mark Barton	東大宇宙線研・外国人研究員	低周波防振
Li Ying	東大理・外国人学振	レーザー安定化
田越秀行	国立天文台・理論・学振	重力波発生理論
武者 満	国立天文台・位置・学振	レーザー安定化



TAMA300 organization

図29 TAMA300の組織図

5 年次計画

TAMA300
全体年次計画

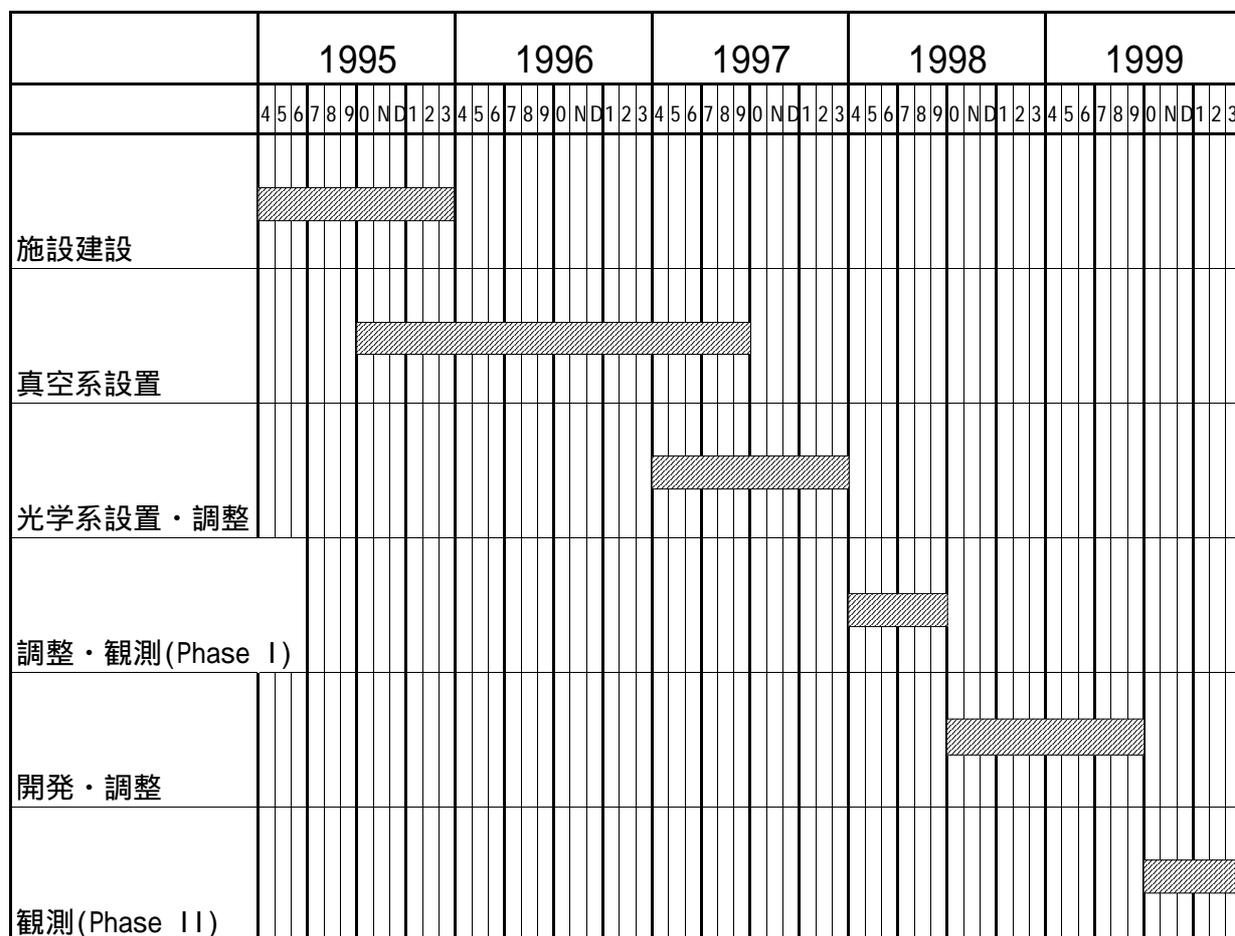


図 30: TAMA300 全体年次計画 .

TAMA300年次計画

	1995					1996					1997					1998					1999															
	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3	4	5	6
基本動作テスト																																				
テスト機評価																																				
実機デザイン																																				
実機製作(2)																																				
実機インストール(2)																																				
調整・保守(2)																																				
実機製作(4)																																				
実機インストール(4)																																				
調整・保守(4)																																				
Z-active																																				
テスト機設計																																				
テスト機試作																																				
テスト機テスト、評価																																				
実機設計																																				
実機製作(2)																																				
実機インストール(2)																																				
調整・保守(2)																																				
実機製作(4)																																				
実機インストール(4)																																				
調整・保守(4)																																				
施設																																				
壁塗装																																				
クリーンブース																																				
作業台・洗浄器																																				
スペアナ																																				
オシロ他																																				
ラック																																				
工具																																				

TAMA300年次計画

	1995												1996												1997												1998												1999																	
	4	5	6	7	8	9	10	N	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N	D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	N	D	1	2	3																		
維持費																																																																		
ミラー																																																																		
4mMCミラー	■																																																																	
20m用ビームスプリッター	■																																																																	
リサイクル実験用ミラー	■																																																																	
20m用ミラー	■																																																																	
10mリングMC用ミラー							■																																																											
450mミラー用原器													■																																																					
原器測定																			■																																															
原器修正																									■																																									
300m用ミラー素材研磨																			■																																															
テスト基板製作													■																																																					
コーティングテスト																			■																																															
最終コーティング																			■																																															
天文台IBS																																																																		
モードクリーナー																																																																		
4mMC製作	■																																																																	
4mMC実験	■																																																																	
リング共振器予備実験							■																																																											
10mMCミラー製作							■																																																											
10mMC組立													■																																																					
調整													■																																																					
保守・改良																			■																																															
真空																																																																		
設計	■																																																																	
MC1、MC2製作	■																																																																	
150mダクト製作	■																																																																	
MC1、MC2、150m試験							■																																																											

TAMA300年次計画

	1995					1996					1997					1998					1999												
	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ND	1	2	3
NM1、EM1製作																																	
300mダクト製作																																	
NM1、EM1、300m試験																																	
残り5真空槽製作																																	
150mダクト製作																																	
残り5真空槽、150m試験																																	
保守、制御系整備																																	
防振																																	
スタック																																	
基礎実験																																	
20m実験																																	
設計																																	
プロトタイプ実験																																	
MC1、MC2用製作																																	
MC1、MC2用試験																																	
NM1、EM1用製作																																	
残り4真空槽用製作																																	
保守、改良																																	
熱雑音																																	
熱雑音																																	
ミラーQ測定(300K)																																	
ミラーQ測定(低温)																																	
ワイヤーQ測定																																	

6 Appendix

6.1 ミラーの熱雑音

テストミラー測定データ & 計算結果

- 材質:Fused Silica, Suprasil P-30
- 寸法
 - 直径:100mm
 - 長さ:60mm
 - 質量: $M=1.03\text{kg}$
- 弾性定数
 - 密度: $\rho = 2.19(\text{measured})$
 - ヤング率: $E = 7.24 \times 10^{10}\text{Nm}^{-2}$
 - Poisson ratio: $\sigma = 0.17$
- 光ビーム radius
 - front mirror 8.5mm
 - end mirror 15mm

mode #	cal. freq.(kHz)	obs. freq.(kHz)	$Q(\times 10^5)$	$(1/m_i\omega_i^2)_{\text{front}}$	$(1/m_i\omega_i^2)_{\text{end}}$
1	27.77	27.79	1.9	1.00	0.815
2	35.21	35.26	5.3	0.238	0.224
3	43.39	43.38	2.5	0.539	0.467
4	50.35	50.23	1.1	0.105	0.121
5	51.09	51.23	4.4	0.877	0.664
6	65.75	66.00	2.5	1.46	0.962
7	67.79	68.18	1.4	0.332	0.143
8	83.35	83.62	3.9	0.100	0.0144
9	83.96	84.27	3.1	0.379	0.165
10	89.11	89.51	7.4	0.306	0.197
11	99.42	99.38	4.7	0.176	0.156
total				5.51	3.93

表 9: 100kHz 以下のモードについてテストミラー (P-30) 測定および計算結果のまとめ . Q は真空中での測定値 . m_i はガウシアンビームに対する換算質量 .

上の表で $(1/m_i\omega_i^2)$ の値は front mirror の基本振動モードに対する値で規格化している . 基本モードの換算質量 m_1 は $m_1/M = 0.516$ であり、ほぼ $1/2$ である . 表では 100kHz までのモードを足し合わせたが、600kHz までのモードを足し合わせると front mirror に対しては 2.2 倍、end mirror は 1.4 倍になる . また、front-end のミラーが 2 組あるので 2 倍する必要がある . 結局 total な熱雑音はすべてのモードの Q 値が等しいとして、1 枚の front mirror の基本振動モードだけ考えた場合の 5.9 倍 (振幅で) になる .

以下 $Q = 10^7$ として、また熱雑音は structure damping に従うとして計算する . front mirror の基本モード

m_1 だけの熱振動を計算すると

$$x_N = 1.3 \times 10^{-19} (1/f^{1/2}) \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$$

4枚の mirror について 600kHz のモードまで足し合わせると

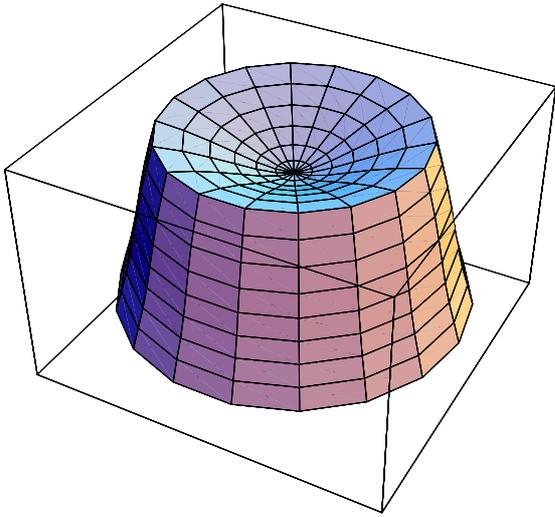
$$x_N = 7.6 \times 10^{-19} (1/f^{1/2}) \text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$$

これを 150Hz~450Hz まで積分すると

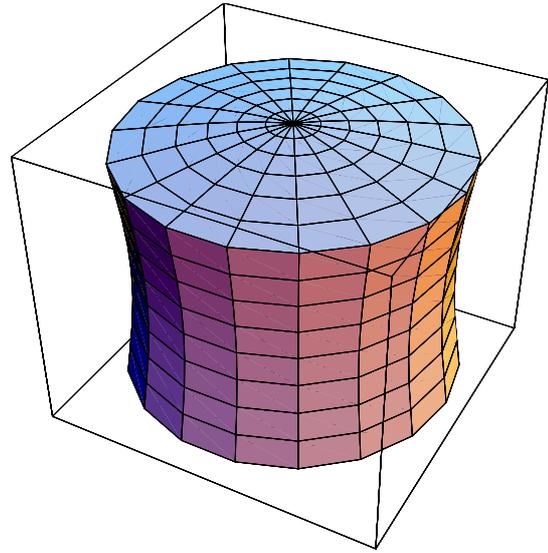
$$x_N = 8.0 \times 10^{-19} \text{m}$$

よってこれによる限界 $h_{\text{thermal-limit}}$ は

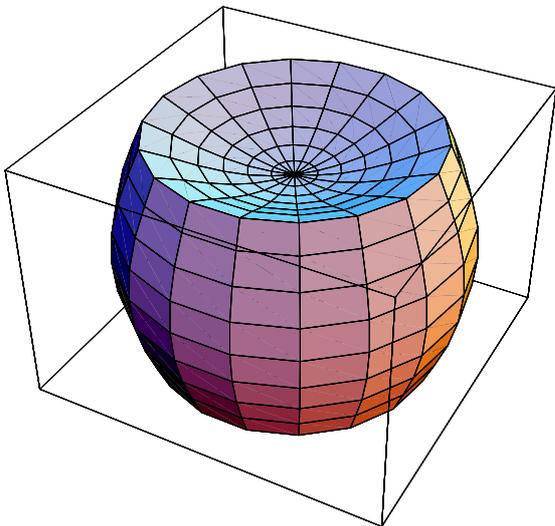
$$h_{\text{thermal-limit}} = 2.7 \times 10^{-21}$$



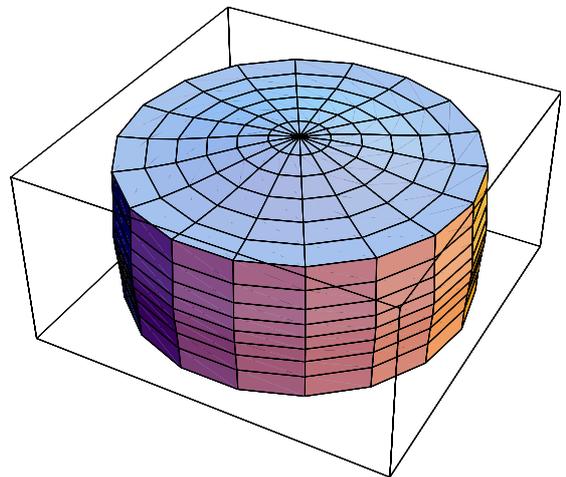
#1



#2

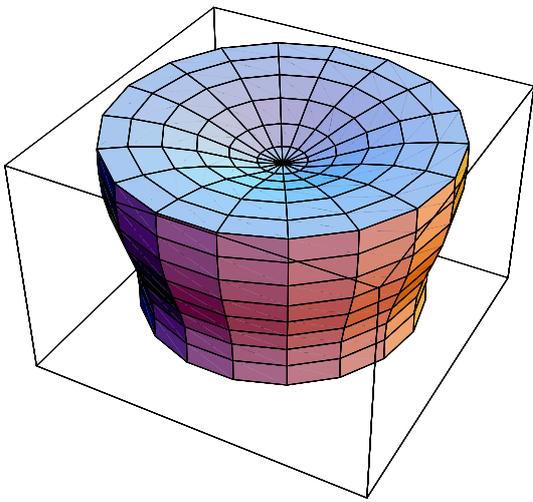


#3

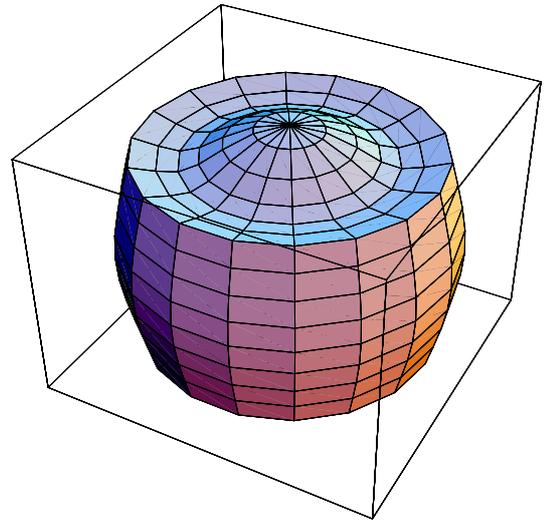


#4

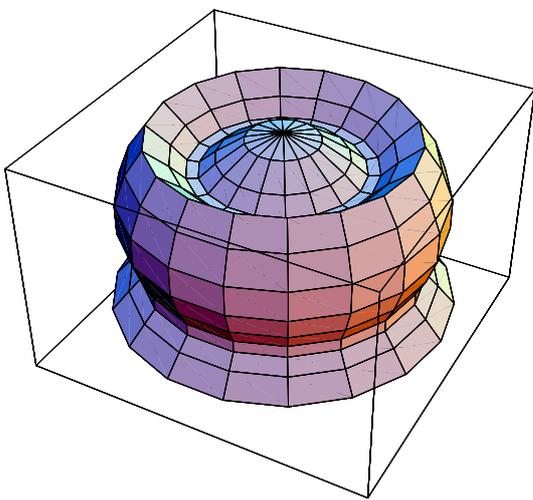
図 35: TAMA ミラーの固有振動モード (1-4)



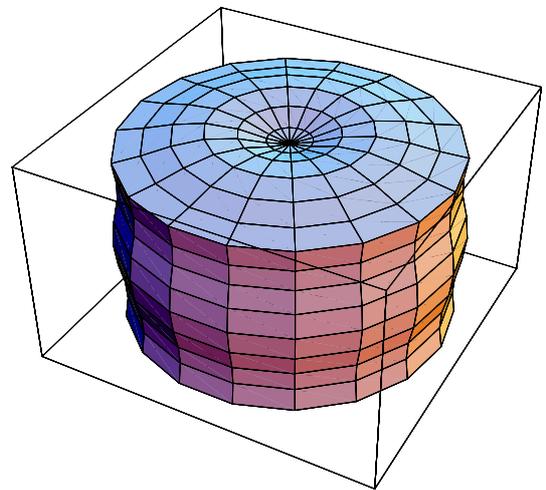
#5



#6

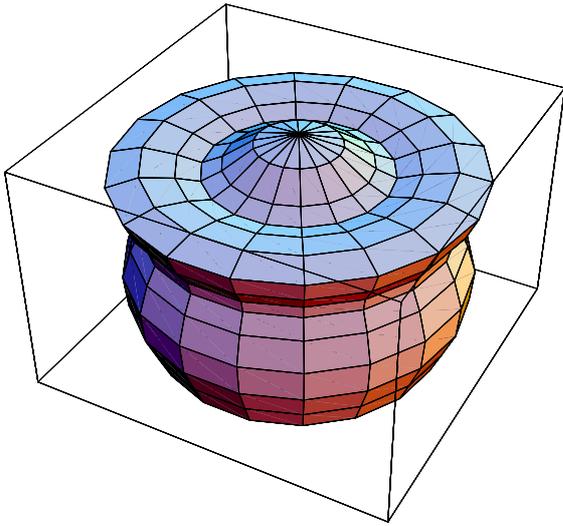


#7

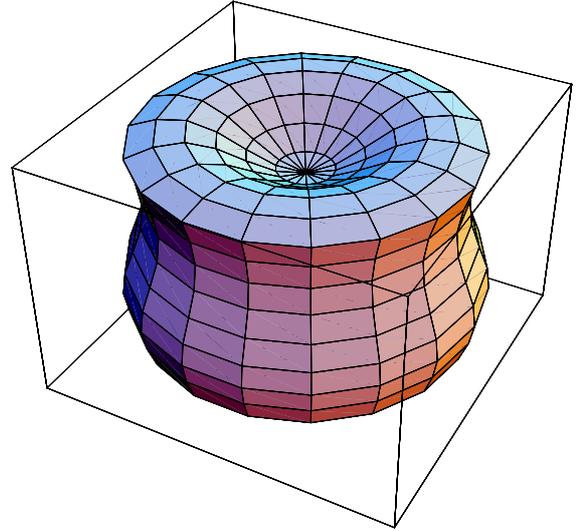


#8

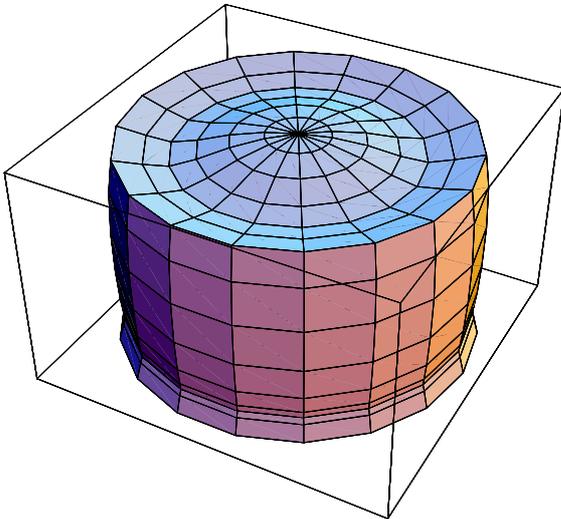
図 36: TAMA ミラーの固有振動モード (5-8)



#9



#10



#11

図 37: TAMA ミラーの固有振動モード (9-11)