

Input Faraday Isolator for KAGRA

K.Somiya, K.Yano, and Y.Kataoka

August 9, 2015

1 Input Faraday Isolator の特徴

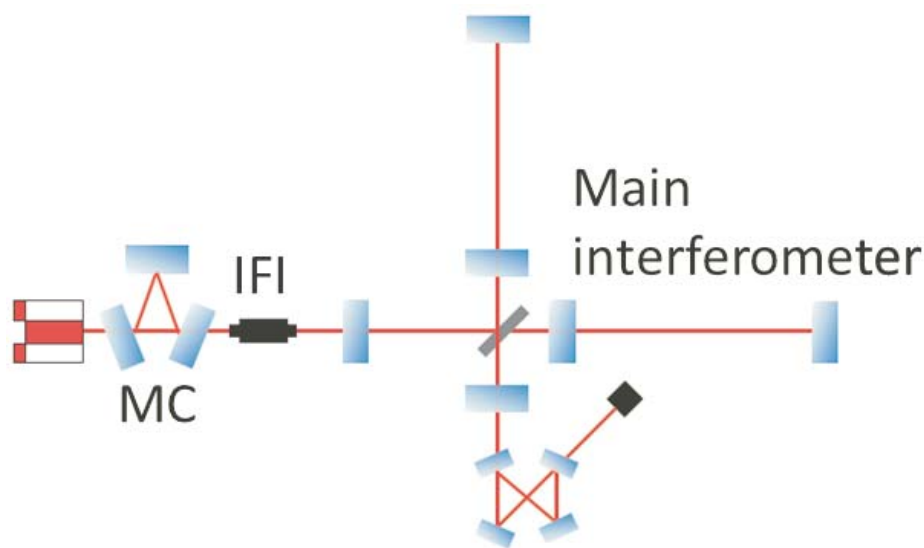


Figure 1: IFI は Mode-cleaner(MC) と主干渉計の間に配置される。

KAGRA は線形の光共振器を組み込んだ干渉計であり、反射光がレーザー光源に戻って不具合を起こさないよう、Faraday Isolator を導入する必要がある。その中でも Mode-cleaner と主干渉計の間に配置されたものを Input Faraday Isolator (IFI) と呼ぶ (Fig. 1)。IFI の特徴は次の 2 つである。

- 最大で 100 W 近いハイパワーのレーザーが透過する
- 真空槽の中に置かれる

まず 1 つ目の特徴に関しては、常に 100 W が照射されるわけではないという点に注意しなければならない。文献 [1] の図 1 で示されているように、入射パワーが固定されていれば、レンズを導入するだけで 8 割程度の基本ガウスモードの光を透過させることが可能だが、実際には入射パワーを変更することが予想されるため、そのつどレンズをチューンすることは現実的ではない。レンズではなく熱補償光学素子が必要となる。

MCより上流にも Faraday Isolator が必要となることもあるかもしれないが、Power Controllerより上流であれば入射パワーは 150W 程度に固定されるため、Faraday Isolator への要求は緩和される。ちなみに、aLIGO では IFI 以外に本流に Faraday Isolator が置かれることはない。EOM にはウェッジ角がつけてあり、散乱光量は Faraday Isolator よりも小さいと見積もられている。

次に、2つ目の特徴に関しては、レンズのチューニングができないことに加えて、排熱に気をつけなければならないということにつながる。まず、IFI を構成する結晶の光吸収率が低い必要がある。IFI にはヒートリンクがついており、ブレッドボードからスタックを通して排熱が行なわれる。aLIGO ではヒートリンクは不要であるとの情報もある [2] が、ブレッドボード以下の構造が KAGRA と aLIGO で異なるので、排熱に関する検討はしておいた方がよいだろう。また、真空内に配置したときの脱ガスが感度に影響を及ぼさないように、全てのパーツが超高真空仕様である必要がある。

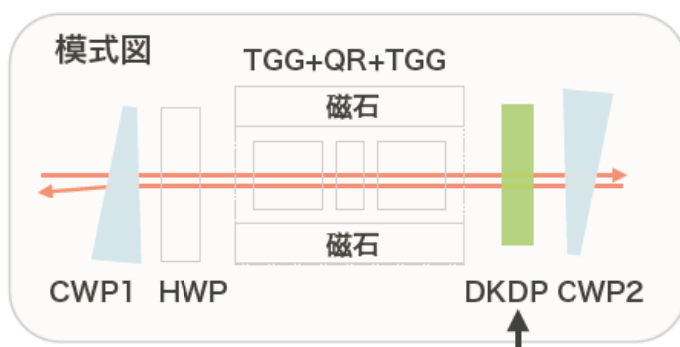


Figure 2: IFI の模式図。IFI は 7 つの結晶で構成される。

通常の Faraday Isolator は、偏光ビームスプリッター (PBS) 2 つと Faraday 素子と呼ばれる結晶 1 つで構成される。Faraday 素子は偏光を往路で 45 度回転させ、復路でさらに 45 度回転させる (半波長板の場合に往路と復路で反対方向に偏光が回転するのは異なることに注意)。Faraday 素子の前に配置した PBS により、往路と復路の光路を変えることができ、レーザー光源に反射光が戻らないようにすることができる。

Figure 2 に示すように、KAGRA の IFI では、PBS ではなく Calcite Wedged Polarizer (CWP) を用いる。eLIGO では Thin Film Polarizer (TFP) を用いていたが、消光比を向上するために aLIGO では CWP を用いることになった経緯がある。PBS や TFP は反射膜で偏光を分けているが、CWP のような複屈折結晶の方が分離比がよい。

KAGRA の IFI で用いる Faraday 素子は Terbium Gallium Garnet (TGG) と呼ばれる鉍石である。Garnet は日本語ではざくろ石と呼ばれる。Thorlabs など市販の Faraday Isolator にも用いられる一般的な材料である。文献 [3] によると、aLIGO では吸収率を考慮して TGG を選択したとのことで、計測結果から見積もられた吸収率は、2 つの TGG について 2300 ± 100 ppm/cm および 2600 ± 100 ppm/cm であった。KAGRA では偏光角を 22.5 度回転させる TGG を 2 つ配置している。TGG の間には偏光を 67.5 度回転させる Quartz Rotator (QR) が挟んであり、熱による脱分極効果を相殺するように工夫されている (文献 [4] 参照のこと)。QR は波長板のようなものであるが、回転させても偏光角は変わらない。

TGG の熱レンズ効果を減らすため、さらに Deuterated Potassium Dihydrogen Phosphate (DKDP) という結晶が組み込まれている。図 3 に文献 [5] で示されている TGG および DKDP の熱レンズ効果を転載する。屈折率の温度依存性の符号が TGG と DKDP で異なるため、適度な

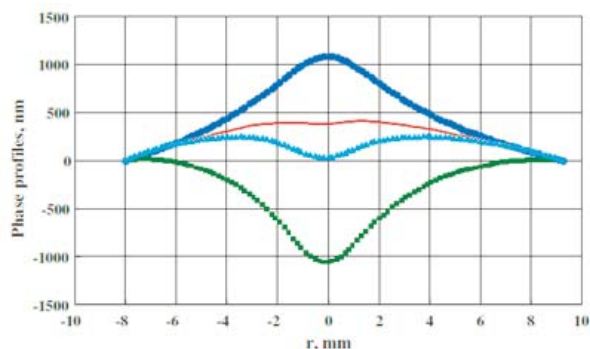


Figure 3: 文献 [5] で示されている DKDP による熱レンズ補正。青丸が TGG の熱レンズ、緑四角が DKDP (5 mm 厚) の熱レンズ、水色三角がそれらを組み合わせたときの熱レンズ、赤実線は TGG と DKDP (3 mm 厚) を組み合わせたときの熱レンズ。基本ガウスモードのロス、青・水色・赤のそれぞれで 63%、11%、1%。ここでレーザーパワーは 90 W、ビーム径は 2.8 mm を想定している。

厚みの DKDP を組み合わせることで熱レンズ効果による基本モードの光学ロスを抑制できる。

KAGRA IFI は上記の結晶に半波長板 (HWP) を加えた 7 つの結晶で構成されている。HWP はピコモーターにより回転することが可能である。ピコモーターは New Focus のピコモータードライバ 8701 により駆動する。KAGRA IFI は入射も出射も S 偏光であり、HWP による偏光回転角は 22.5 度に設定されている。IFI の各結晶の前後における偏光角を表 1 に示す。

入射 →	HWP	→	TGG1	→	QR	→	TGG2	→	DKDP	→
0	(+22.5)	22.5	(+22.5)	45	(-67.5)	-22.5	(+22.5)	0	(0)	0
反射 ←	HWP	←	TGG1	←	QR	←	TGG2	←	DKDP	←
90	(-22.5)	112.5	(+22.5)	90	(+67.5)	22.5	(+22.5)	0	(0)	0

Table 1: IFI の各結晶前後の偏光角。

2 IFI の製作と組立

KAGRA IFI の製作はフロリダ大と東工大の共同研究として 2014 年の夏から秋にかけて行われた (2014 年春に LIGO India 用の IFI の製作が行なわれたので、東大の中野氏に依頼し、フロリダ大へ訪問して製作過程の視察を行ってもらった [6])。製作過程は以下の通りである [7]。

- 材料の調達：結晶、マウント、磁石の購入、および部品の工作 (フロリダ大)
- 最低限のテスト：部品が合うかのチェック
- クリーンアンドベイク：LIGO Hanford サイトにて熱処理

購入した材料の主な発注先を表 2 に示す。マグネットリングの組立はフロリダ大で行なった。

部品名	発注先	備考
TGG	Northrop Grumman, Photon Laser Optik	LIGO-E080125
QR	Precision Photonics	LIGO-E1100122
Magnet rings	K&J Magnetics	
DKDP	United Crystals	
Indium	ESPI metals	
HWP	Precision Photonics	LIGO-E1100222
CWP	Kahl Lambrecht	LIGO-E0900330
HWP/CWP mounts	Siskiyou	LIGO-D1000874
Posts and clamps	Alltech	
Onboard baffles	Ceradyne	
UHV picomotor	New Focus	LIGO-E1100323

Table 2: 調達部品のリスト。

部品の調達および LIGO サイトでの熱処理の後、結晶以外の部品は 2 回に分けて神岡へ輸送された。結晶についてはフロリダ大の C. Mueller 氏に手荷物で日本まで運んでもらった。その後、フロリダ大の Mueller 氏、Goetz 氏、Tanner 氏と東工大の 3 名により、KAGRA のレーザー部屋 (クリーンルーム) にて IFI の組み立てを行なった。

KAGRA のレーザークリーンルームは KOACH フィルタを用いた ISO Class 1 の清浄度を保持するクリーンルームである。ただし除湿はしていない。トンネル内はエタノール以外の有機溶剤の使用が禁止されているので、機器や部品をクリーンルームに持ち込む際は前室の外でブローした後、前室で希釈エタノールで洗浄し、クリーンルーム内で純エタノールで洗浄してから持ち込む。また、クリーンルームに入室する際には一体型無塵服 CB1310、オーバーシューズ G7050、手袋、マスク、保護メガネを着用する。クリーンルームの中央に 2400×1200 mm の PSL 用光学定盤が設置されており、IFI はその最上流 (フィルタ側) のスペースを使って組み立てられた。IFI の部品は米国でクリーンな状態でバックされて届けられているので、バックをエタノールで洗浄してクリーンルームに持ち込んでから開封した。2014 年 12 月当時、クリーンルーム内の床は、光学定盤設置用に施された縁切りの部分から地下水が染み出ている箇所があった。そのような箇所は静電シートやラップでカバーしておいた。

図 4 に PSL 光学定盤上のレイアウトを示す [8]。光学定盤はスチールでできているため、IFI のマグネットによって磁化してしまい、そのまま調整すると真空槽内にインストールしたときに消光比が悪化するという事例が LIGO で発覚している。そのことをふまえて、L650×W200×H150 mm の花崗岩の台座を IFI と光学定盤の間に設置した。花崗岩 (G603) は富山にある藤田石装に発注した。表面は #800 水磨き仕上げを施した。花崗岩の四隅には M12 で長さ 50 mm のネジ穴を切り、花崗岩運搬用のアイボルトをつけられるようになっている。花崗岩はエタノールで洗浄した後、1 mm 厚のゴムシートを敷いて、最上流から 570 mm ほど開けて光学定盤上に設置した。この開けたスペースに工具を置き、結晶の装着などの作業をする。IFI 本体に触れる工具は、フロリダ大から輸送したクラス A (クリーンアンドベイクしたもの) の工具である。花崗岩の上に All Foils の厚さ 0.0015 インチの UHV ホイルを二重に敷いてから、IFI システム一式を搭載したブレードボードを載せる。ホイルを二重にしているのは、全ての調整作業を終えて真空槽内にインストールする際に外側のホイルを剥がして内側のホイルにくるんで移動するためである。LIGO の図面を元に矢野氏が製作した IFI 一式の 3D 図面を図 5 に示す。この一式の総重量はおよそ 45 kg ほどである。

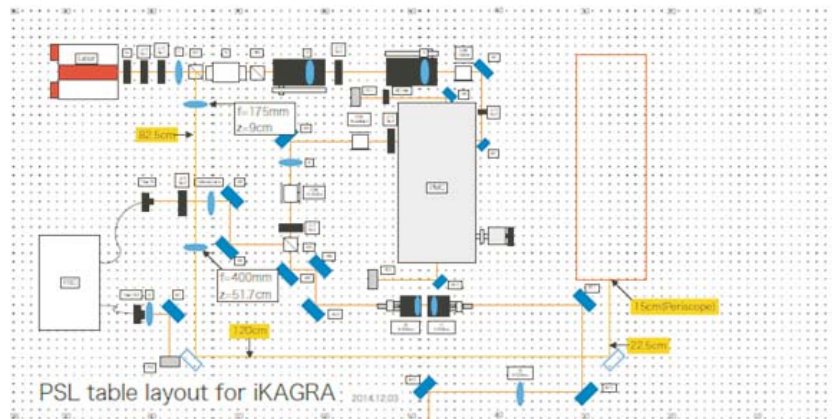


Figure 4: IFI の組み立ておよび性能試験をした際の PSL 光学定盤上のレイアウト。

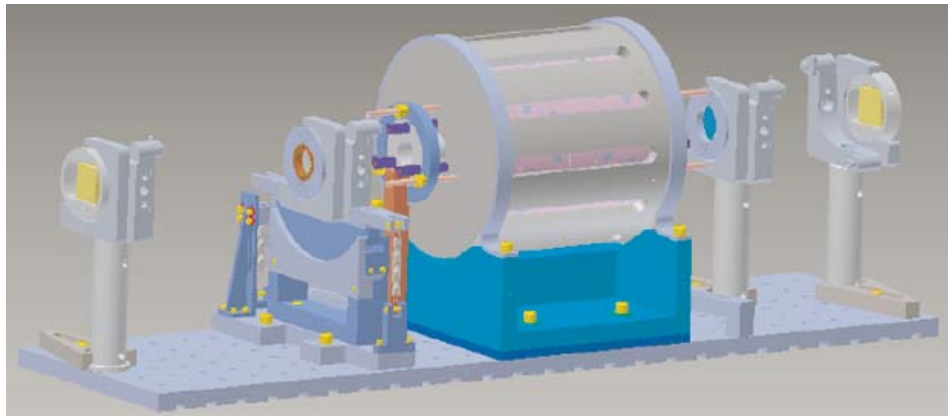


Figure 5: IFI の外観。左から CWP1、HWP、マグネットリング (TGG1、QR、TGG2)、DKDP、CWP2 の順にブレッドボードに搭載されている。

IFI の組み立てについての詳細を以下に記す。LIGO の Faraday Isolator の組み立ておよび KAGRA IFI のプリアセンブリの経験がある Mueller 氏と Goetz 氏が中心となって 1 回目の組み立てを途中まで行なった後、CWP の向きを変えなければならないことが分かったため (Sec. 6 参照)、2 回目は矢野氏と片岡氏が実際に手を動かす形で作業を進めた。

光学系のセットアップ KAGRA IFI を通るビームのウェストは MC を構成する 2 枚の平坦鏡の中間にあり、IFI を通るビームの半径は 2.4 mm 程度である [9]。aLIGO の IFI を通るビームの半径は 2.1-2.2 mm [10] なので KAGRA の方が少しだけ大きいことになる。PSL 定盤上での組み立て作業では、実際に IFI を通るビームに近いビームを用いて、透過率や消光比のチューニングをしなければならない。片岡氏が解析ソフト JamMT を用いて光学系を設計し、PSL 光学定盤上では IFI を通るビーム径は実測値で 3 mm ほどとなった。クリーンルームの清掃が長引いた影響で 12 月の時点では PMC がまだ安定にロックしておらず、IFI の組み立て作業は光源直後の PBS の反射光を用いて行うことになった。光源は 2 W 出力で、IFI 側にはおよそ 1.5 W の光を用いた。モードマッチング用のレンズは Thorlabs の BK7 レンズである。焦点距離が 175 mm のものと 400 mm のものを 1 枚ずつ用いた。IFI は高さ 150mm の台座の上に搭載されているため、ペリスコープを製作して CWP1 の直前から CWP2 の直後までビーム径を持ち上げた。

CWP のアライメント IFI のその他の結晶を組み込む前に CWP1 に光を通し、それを透過する P 偏光と S 偏光が水平に分離するよう CWP1 のアライメントをとる。CWP は台形で、下端が平坦で上端にネジのついているホルダーに入れ、熱で膨張しても CWP に負荷がかからないようにインジウムをはさんでネジでおさえつけて留めている。ホルダーは円形になっていて、マウントに組み込んで回転させることができる。この回転の自由度で CWP の水平面でのアライメントをとる (Fig. 8 の右パネル)。P 偏光と S 偏光を水平に分離する設置方法は 2 通りあるが、CWP1 については入射側から見て右側が厚い側となるように設置し、CWP2 については入射側から見て左側が厚い側となるように設置する¹。CWP2 のアライメントは P 偏光が最小になるようにとる。CWP2 と比較すると CWP1 からは P 偏光が多めに出ているが、これは CWP のせいではなく、上流にある PBS の分離比が悪いせいである。

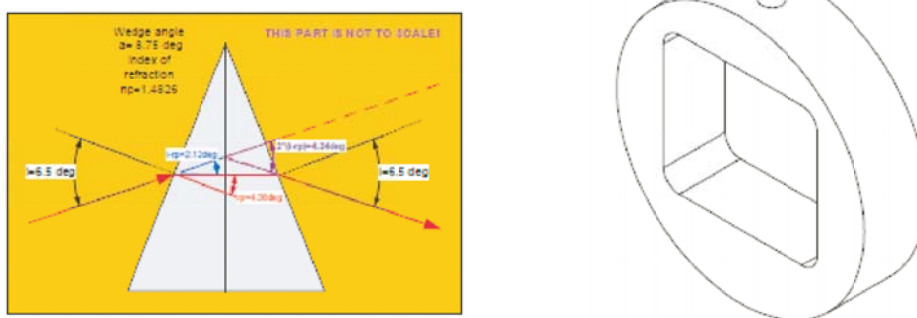


Figure 6: 左：CWP のウェッジ角と複屈折。右：CWP ホルダー [11]。

¹1 月の作業で CWP2 の向きを逆にしてしまったことに後で気がついた。次回の神岡訪問で CWP2 の付け替えを行う。その後、むしろ CWP1 の向きを逆にしなさいといけなことに気がついた。第??章参照。

CWP 落下防止策 CWPホルダーはインジウムを介して結晶を上面から留めているだけなので落下しやすいという難点がある。12月の作業中、CWP1がホルダーから外れて光学定盤の上に落下し、破損するという事故が起きた。その後、予備のCWPを米国から取り寄せ、簡単な落下防止機構を追加して、2015年1月に交換作業を実施したが、また落下してしまった。そのときは幸運にも光学定盤に当たることなく床まで落ちたため破損しなかったが、表面に汚れがついた可能性は否めない (Sec. 3 参照)。そこで、真空槽へのインストール前にとりつけるべく、フロリダ大でCWPホルダーの落下防止機構を製作してもらうことにした。



Figure 7: TGG マウント。

TGGのアライメント TGGの偏光角の回転は、光が透過する結晶の長さに依存するので、TGGホルダーのアライメントを微調整して偏光角の回転が22.5度になるようにする。具体的には、S偏光とP偏光の比が $\tan^2(22.5)$ となるようにすればよい。TGGホルダー (LIGO-D070467)には中心から1.41インチ離れた3か所にネジ(A)がついている。さらにTGGホルダーを抑える部品 (LIGO-D070468)には中心から2.36インチ離れた3か所にネジ(B)がついている。ネジAでTGGのアライメントを決め、ネジBでホルダーを抑えるという構造になっている (図7)。このネジBでとめる部品がフロリダ大から送られていなかったことが判明し、急ぎよ製造して送ってもらったが、サイトでのクリーンアンドベイクをしている時間がなかったため、この部分だけクラスBの洗浄度となった²。TGG2のホルダーにはQRも装着されている。QRのアライメントは重要ではない。測定されたTGG1の偏光回転角は22.53度、TGG2の偏光回転角は22.54度であった。

DKDPの取り付け DKDPのアライメントも重要ではない。DKDPはTGGの熱レンズ効果を抑制するために必要な結晶であり、その厚さが重要である。KAGRAのDKDPは3mm厚である。LLOのFaraday Isolatorに用いられているDKDPは3.5mm厚であり、KAGRAのTGGの方が少しだけ熱レンズが大きいことを考えると逆の方がよかったかもしれない、とTanner先生が言っていた。最適値はそれぞれ3.3mmと3.2mmくらいらしいが、DKDPの厚さが0.5mm刻みなので仕方ない、とのことである。DKDPは湿度に弱いとのことで、12月に測定を行なった後、ホルダーから外し、東工大に持ち帰ってデシケーターに保管している。IFIを真空槽に移動するときに再度装着する。

²元々、KAGRAの他の真空部品はクラスAではないものが多いため、IFIだけクラスAにしていることにそれほど意味があったわけではない [12]

HWP の回転角の調整 HWP ホルダーはベアリングのついたマウントに搭載されており、ピコモータで回転できるようになっている。12月および1月の段階ではピコモータドライバは接続しておらず、手でピコモータのノブを回して調整した。部品の1つが米国から輸送された際にわずかに変形してはまらなかったため、ヒートガンで熱して調整した。また、ベアリングがスムーズに回らなかったため、ベアリングを抑える部品の間にワッシャーをはさむことで解決した。HWP を回転させると IFI の透過率と消光比が変わるが、最適な HWP の回転角は異なる。これは、TGG による偏光角の回転が 45 度からずれた場合、HWP で調整して往路で S 偏光が最大になるようにすると、反射してきた S 偏光の HWP による回転は往路と逆になり、一部 P 偏光に移ってしまうためである。実際には、消光比が最小になるよう HWP を調整して用いることになる。

透過率と消光比の測定 IFI のセットアップは 2 度行われた (2014 年 12 月と 2015 年 1 月)。12 月は主にフロリダ大のメンバーで行なったが、作業の途中で CWP を落下して破損してしまったため、そのまま真空内に入れることは危険と考え、1 月に新しい CWP と交換して再度セットアップ実験を行なったものである。新しい CWP も落下してしまったが、破損はしておらず、そのまま使用することとした。透過率の測定において 12 月の実験結果の方が少しよい結果を得たが、これは 2 度目の落下による表面の汚れが原因の可能性もある。

12 月にまず CWP1 と CWP2 の分離比を測定したところ、CWP1 の分離比 (S 偏光/P 偏光) が -28.8dB、CWP2 の分離比が -43dB という結果となった。前者は上流に設置した PBS の分離比と合わせて測定されており、CWP 単体の分離比を表してはいない。後者は、CWP1 と CWP2 の分離比をそれぞれ a_1 、 a_2 とすると、

$$\frac{a_1(1-a_2)P_s + (1-a_1)a_2P_p}{a_1a_2P_s + (1-a_1)(1-a_2)P_p} \simeq a_2 \quad (P_s \ll P_p, \quad a_2 \ll 1) \quad (1)$$

となることから求めたものである。ここで P_s 、 P_p は CWP1 に入射する前の各偏光のパワーである。CWP のスペックでは 50dB の分離比が想定されており [13]、落下の影響で分離比が低下した可能性も考えられる。なお、1 月に CWP2 を交換した後に新しい CWP2 の分離比を測定していない。

IFI を組み立て、入射光パワーと出射した S 偏光のパワーを同時に測定し、比をとることで IFI の透過率を求めた。12 月の測定では透過率は 97% であった。1 月の測定では透過率は 94% であった。なお、12 月の測定では DKDP も入っていたが、1 月の測定では DKDP は入れていない。入射光は 1.5 W 程度で熱レンズの影響はないと考えられる。透過率の低下の原因は CWP2 を落下させたことによる表面の汚れにあるかと思われたので、CWP2 を外して透過率を測定してみたが変わらなかった。12 月の測定では入射ペリスコープの後と出射ペリスコープの前で光量を測定しており、1 月の測定では入射ペリスコープの前と出射ペリスコープの後で光量を測定しているため、ペリスコープのロスが含まれてしまっている。そのせいで透過率が低下したと考えられる。ペリスコープの鏡は S 偏光を水平面内で用いるためのものであり、独立に測定したロスは 1% 程度であった。おおよそこれが原因であると考えられる。

出射側ペリスコープの後にレトロリフレクターを設置し、IFI の消光比を測定した。レトロリフレクターというのは、入射角 0 度の鏡のことである。レトロリフレクターで反射されるのは S 偏光のみであり、P 偏光はダンプされている。レトロリフレクターのアライメントをすこしだけずらすことで、反射光の S 偏光成分を入射光からずらすことができる。反射してきた S 偏光の光と P 偏光の光のパワーを測定し、その比をとることで消光比を求める。12 月の測定では 44.7dB であった。1 月の測定では 44dB であった。

LIGO の Faraday Isolator のスペックと比較したものを表 3 に示す。

	L1	H1	KAGRA
Isolation ratio (in-air)	40.6 dB@20 W	47.0 dB@0.24 W	44 dB@1.5 W
Isolation ratio (in-vac)	29.1 dB@1 W	33.5 dB@1 W	TBM
Optical throughput	96.3 %	98±0.5 %	94 %

Table 3: LIGO と KAGRA の Faraday Isolator のスペック比較。

未完成の部分 以下に挙げたのはは未完成もしくは修正が必要な項目である。2015 年夏くらいに再度作業をして完成させる予定である。

- 1 月の組み立てで CWP2 の向きが逆であった。このままだとレイアウトと合わないので CWP2 を裏表逆にする必要がある。むしろ CWP1 の向きが逆でないといけないことが分かったので、CWP1 からインストールし直す必要がある
- CWP2 の表面を薬剤できれいにする。坑内ではエタノールしか使用できないというルールがあるが、少量に限定して使用許可を申請し、アセトンとエーテルで適切に洗浄する
- CWP に落下防止機構をとりつける
- ヒートリンクをつけていないのでとりつける。Tanner 先生が言うにはヒートリンクは必要ないとのことであるが、いちおうとりつける予定である
- HWP のピコモーターをドライバにつないでいないので接続作業をする。圧着端子をケーブルにとりつけ、真空槽のフィードスルーにとりつけられるようにする
- IFI ブレッドボードに搭載する 4 つのバッフル (アパーチャタイプ) を設置する

3 Ghost beam の計測とシミュレーション

IFI の各結晶の表面には AR コーティングが施されているが、それでもなお反射してくる光 (Ghost beam) が存在する。Ghost beam については場所と光量を特定し、適切なバッフルやビームダンパを設置する必要がある。また、結晶表面から乱反射してくる光もあり、それらがもたらす散乱光雑音が KAGRA の感度に影響を及ぼさないよう注意しなければならない。表 5 に各結晶の AR 面の反射率要求値と乱反射の度合いを表す *bidirectional reflectance distribution function* (BRDF) を示す。BRDF に立体角と入射光量をかければ、後方散乱光量が求まる [14]。見込まれる立体角は aLIGO の場合で $3.9e-7(1/sr)$ であるが、KAGRA の場合どれくらいかはまだ計算されていない。

センサーカードを用いて CWP1 から 160 cm 離れたところで Ghost beam を探したところ、入射光の周りに 2 つのビームが確認できた (図 8)。これらは TGG および QR の AR 面から反射された S 偏光と P 偏光の光であり、CWP での 2 偏光の分離角が 1.4 度であることと整合性がとれている。CWP からの Ghost beam はもっと IFI に近いところで光軸から離れる。Ghost beam の光量をまとめたものを表 6 に示す。TGG2 を入れた状態では Ghost beam の光量を測定していない。HWP からの Ghost beam は確認されておらず、光量が小さいか、入射光軸と重なっているか、TGG からの Ghost beam と重なっているか、どれかであると考えられる。

	AR reflectivity	BRDF
TGG	<1500 ppm	1e-2
QR	<500 ppm	1e-2
CWP	<1200 ppm	1e-6
HWP	<300 ppm	1e-2
DKDP	<1500 ppm	1e-2

Table 4: 各結晶における AR 面の反射率要求値と BRDF の推定値。

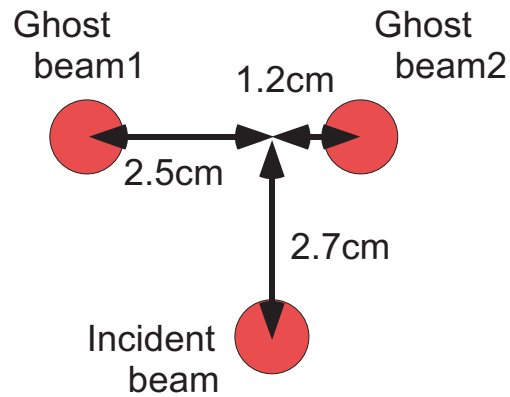


Figure 8: IFI から反射してきた Ghost beam の様子。

	Ghost beam の反射率
TGG1	575 ppm
TGG2+QR	NA
HWP	NA
CWP1(1)	124 ppm
CWP1(2)	496 ppm
CWP2(1)	389 ppm
CWP2(2)	838 ppm
CWP2(old)	407 ppm
DKDP	NA

Table 5: 各結晶からの Ghost beam の測定値。CWP1 と CWP2 に関しては表面と裏面の両方をそれぞれ計測しており、その他の結晶については表裏の合計で計測している。TGG2 については計測していない。HWP と DKDP については Ghost beam を確認できていない。

4 防振システムへの要求

IFI を懸架するかどうかの議論は参考文献 [15][16][17] に記載されている。争点となったのは、(1)IFI が及ぼす磁場揺らぎの IMMT への影響 [15]、(2) 散乱光の影響 [16]、(3)IFI のアパーチャーによる光のクリップの影響 [17]、の 3 点である。IFI はスタックの上に配置されており、神岡の地面振動が小さいことにより、10 Hz で LIGO の HAM テーブルの振動より 1 桁程度小さい。磁場雑音については IMMT から 40 cm 以上離せば、LIGO の IFI の影響より小さいことが確認されており、散乱光については周波数雑音へのカップリングと REFL ポートでの信号への影響が計算され、問題ないことが確認された。クリップの影響も全く問題ないことが確認された。

5 IFI のレイアウト

図 9 に IFI のレイアウトを示す。左側が 5 月の時点で想定していたもの、右側が 7 月になってからアップデートしたものである。CWP1 の向き次第で STM1,2 の位置を左側のような S 型にも右側のような Z 型にもできる。PO 鏡から光を真空槽の外に出すまでに何回折り返さないといけなさを考えると左側の方がよいのであるが、IMMT2 と IFI が近すぎて IMMT2 のサスペンションのフレームが IFI のブレッドボードに干渉しかねないことが分かったため、右側を選択した。STM1,2 の入射角は 8.44 度である。ビーム半径はおよそ 2.4 mm であり、STM1,2 および PO 鏡を配置する位置における入射光と反射光の距離は、1.32 cm、0.78 cm、2.05 cm である。PO 鏡では入射光と反射光が十分離れているので、入射光をクリップすることなく反射光のみを取り出すことができる。STM2 の近くを反射光が通っているが、2 インチ鏡を使用するとして、その距離は 4.26 cm である。

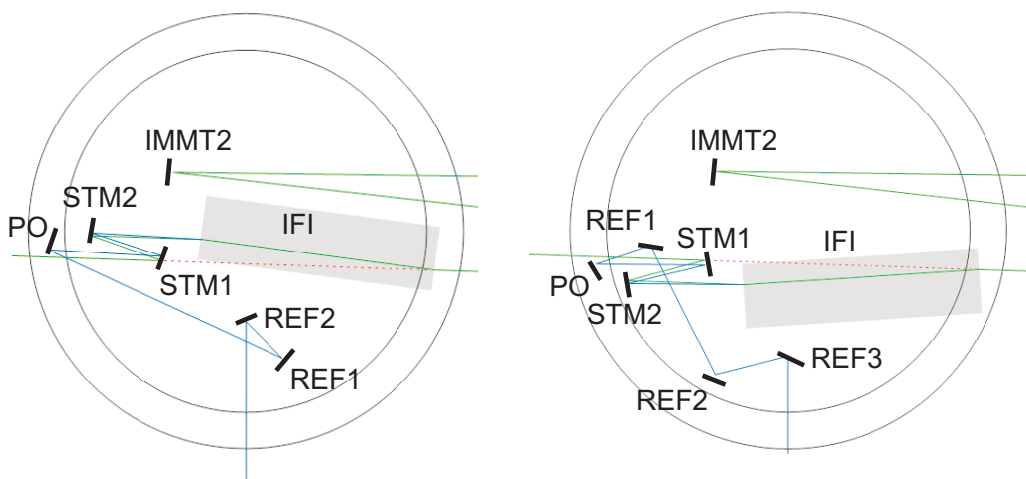


Figure 9: IFI のレイアウト。赤点線は IFI がない場合の光軸で、IFI のレイアウトを決定する前にその他の光学素子の配置が決まっていたため、IFI を置いても前後の光軸が変わらないように IFI を構成した。緑線は IFI がある場合の光軸で、青線は干渉計から反射してきて IFI で偏光が変わった P 偏光の光である。反射光は Pick-off 鏡 (PO) で反射された後、何回か折り返されてから真空槽の外に出される。

IFI の中心座標、CWP の屈折面の座標、および IFI 付近にある各鏡の反射面の座標を表 6 に示す。この座標系はビームスプリッターの位置を原点とした 2 次元座標系で、麻生座標と呼ばれているものである。

	x	y
STM1	-24.5083	0.0442
STM2	-24.8026	0.1022
PO	-24.8403	0.0301
IMMT1	-21.3939	-0.06081
IMMT2	-24.4791	0.2897
CWP1	-24.4000	0.0188
CWP2	-23.7538	0.0188
IFI	-24.0769	0.0537

Table 6: IFI およびその周りの鏡の座標。

6 真空槽内へのインストール

2015 年度中に IFI をレーザールームから真空槽内へ移動する。現在、IFI と花崗岩の台座の間に All Foils の高真空用アルミニウムホイルが二重に敷かれているので、それらで IFI を包んでトンネル内を移動する (図 10)。IFI 真空槽用のクリーンブース内で外側のホイルを取り外し、真空槽内で内側のホイルを取り外す。IFI を運ぶ方法については、ブレードボードに取っ手をつけるなどはせず、ブレードボードをアルミホイルごと 2 人で持ち上げて運ぶことを選択した [18]。

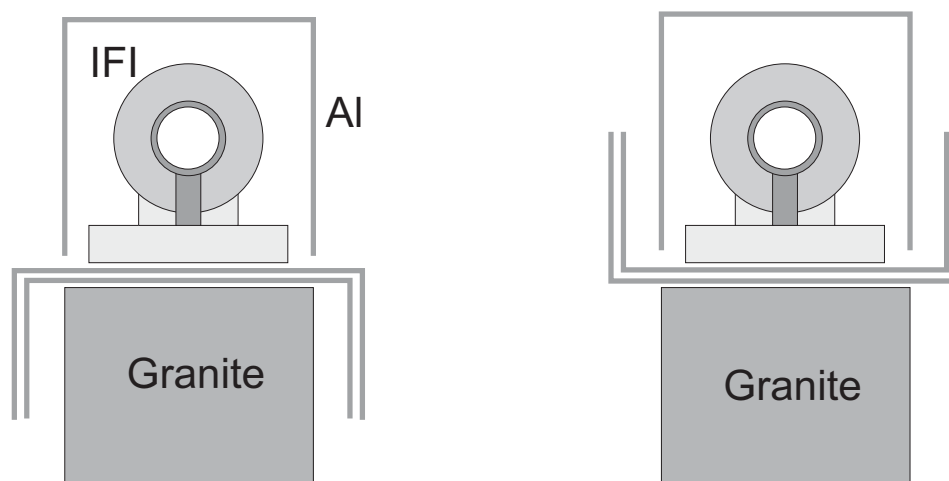


Figure 10: IFI を真空槽に移動するときの手順。レーザールーム内では花崗岩の台座との間に高真空アルミホイルが二重に敷かれているので、それらで IFI を包んで運ぶ。

References

- [1] G. Mueller *et al.*, *Class. Quantum Grav.*, **19**, 1793 (2002)
- [2] D. Tanner, private communication
- [3] O. Palashov, *et al.*, *J. of Opt. Soc. Am. B*, **17**, 99 (2000)
- [4] E. Khazanov, *et al.*, *J. of Opt. Soc. Am. B*, **29**, 1784 (2012)
- [5] V. Zelenogorsky, *et al.*, *Opt. Comm.*, **278**, 8 (2007)
- [6] M. Nakano and K. Somiya, JGW-1402193-v2 (2014)
- [7] <http://gwclio.icrr.u-tokyo.ac.jp/lcgtsubgroup/inoutoptics/> (password required)
- [8] Y. Kataoka, JGW-D1403036-v2 (2014), uploaded by M. Nakano
- [9] <http://gwwiki.icrr.u-tokyo.ac.jp/JGWwiki/KAGRA/Subgroups/IOO/OptParam> (password required)
- [10] R. Martin *et al.*, LIGO-DCC T0900486-v5 (2011)
- [11] LIGO-DCC D070464-00 (2011)
- [12] Y. Saito, private communication
- [13] G. Mueller and D. Tanner, JGW-D1503461-v1 (2015), uploaded by Y. Kataoka
- [14] LIGO-DCC T1000011-v4 (2010)
- [15] K. Somiya, JGW-1402192-v3 (2014)
- [16] K. Somiya, JGW-1402227-v2 (2014)
- [17] K. Somiya, JGW-1402330-v1 (2014)
- [18] D. Tanner, private communication