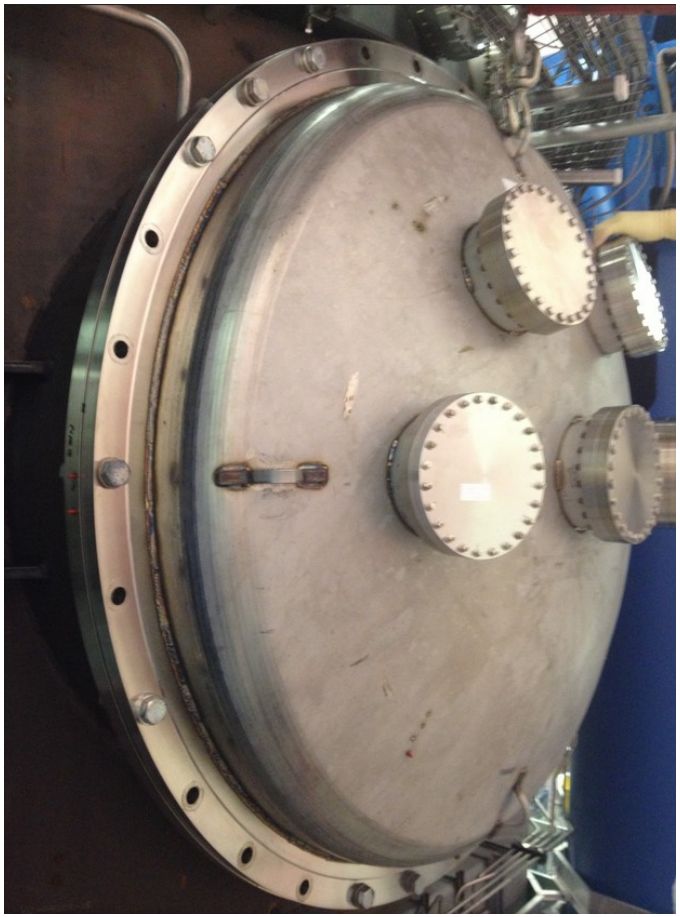
LIGO aLIGO とインストレーションとワタシ



Keita KAWABE, LIGO Hanford, Caltech

LIGO

このトークについて

- 知らなくても困らない旧聞 = aLIGO インストレーション状況 (軽く。)
- まあまあうまく行っているところ
  - それは何故か
- いまいちなところ
  - それは何故か
- インストレーションについての河邊の体験
  - はまるパターンなどを絡めて
- 途中適当に飛ばす可能性
- 質問随時 (スルーあり)

LIGO 過去のスライドより : aLIGO について

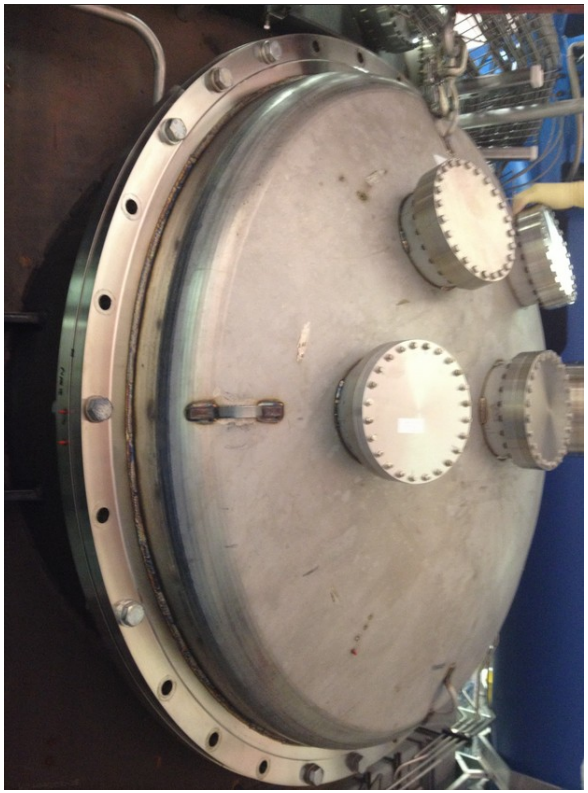
aLIGO について

- LIGO≠aLIGO(後者は aLIGO というハードを作るためだけのプロジェクト)
- 数 % の「面白い」作業 (e.g. ある種の設計) の上に、セクシーでない作業 (別の種の設計、全てのレビュー、製造、インストール) を延々と積み重ねるところまでが aLIGO
- 2 時間ロック = aLIGO プロジェクトの成功
- 性能を出す茨の道は LIGO Operation の仕事

LIGO

LLO Installation 状況

- 祝！Apr/01/2014, 全ての真空コンポーネントのインストレーション完了！
- Tail end of DRMI test in progress.
- HIFO-X test in progress.
- Soon (本日 ?) Y open.
- then XY, then full.



LIGO

LHO Installation 状況

- 1st HIFO-Y test (with pilot EY/IY) success.
- PRMI test (with pilot IY) success.
- HIFO-X test (with real optics) in progress.
- Peeked down Y arm for 8 hours and locked green ALS light to both X and Y arm!
- Y arm is closed for now for further pumping down, 2nd HIFO-Y (real EY and pilot IY) starts 1 week from now.

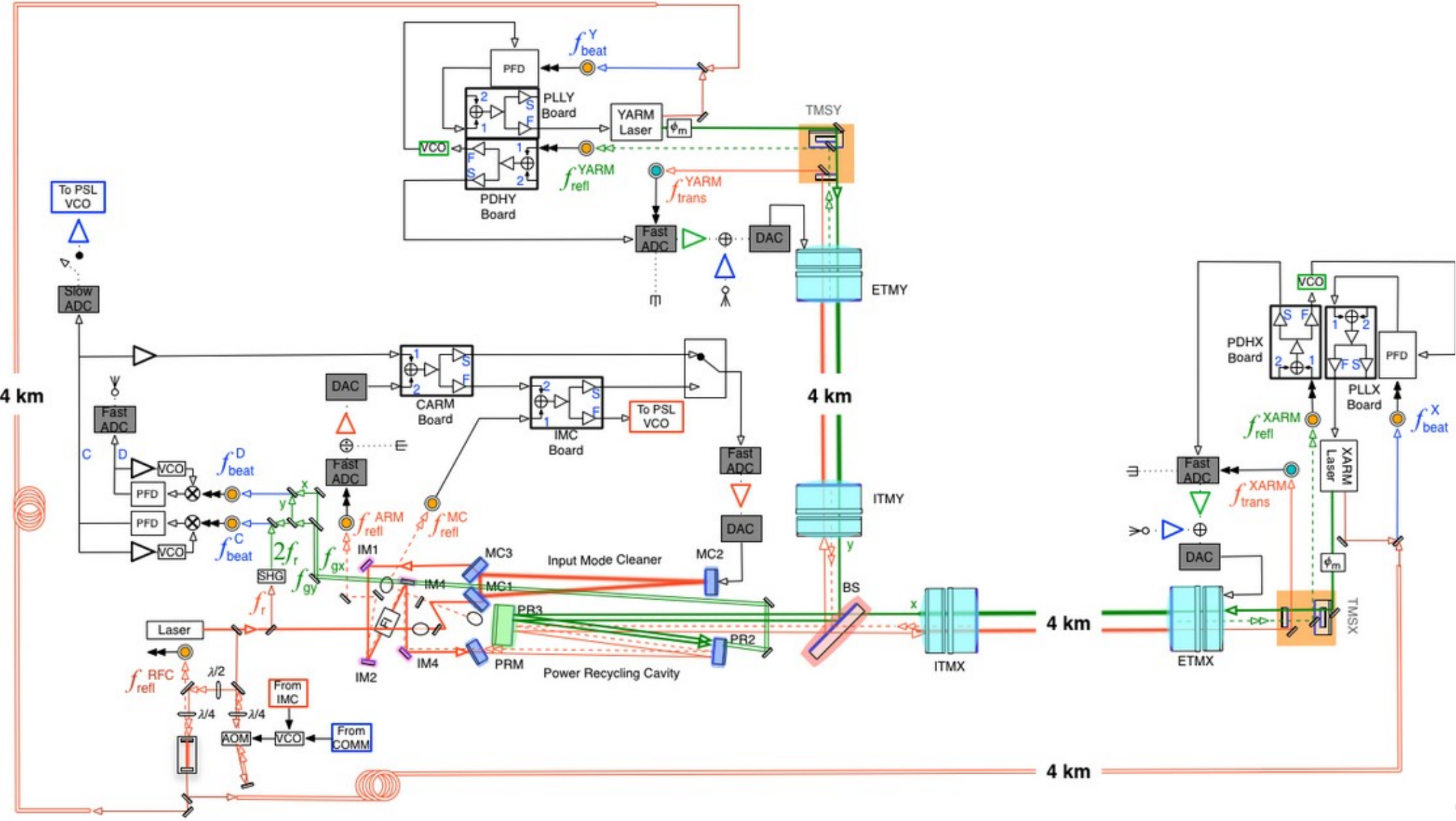
LIGO

Green ALS beam in both arms!

いまだに白黒カメラ ...

LIGO

LHO: 今後 1 週間ほど Xarm のみ、 2 週間ほど Yarm に専念、 1.x 月ほど X-Y, その後 full install へ。



LIGO

LHO Y arm peek で学んだ事 : X の時に週単位かかった事が何故 8 時間で ?

- 緑入射系と腕自身の初期 alignment に 3hr
  - X では 300urad 程度の PIT オフセットに苦しんだ。
  - レビュー → 大気中初期調整手順見直し (の結果 ?)

LIGO

LHO Y arm peek で学んだ事 : X の時に週単位かかった事が何故 8 時間で ?

- 緑入射系と腕自身の初期 alignment に 3hr
  - X では 300urad 程度の PIT オフセットに苦しんだ。
  - レビュー → 大気中初期調整手順見直し (の結果 ?)
- 緑出射系の初期 alignment/ 腕の alignment 追い込みに 2hr
  - X インストール時に確立された手順の再利用

LHO Y arm peek で学んだ事 : X の時に週単位かかった事が何故 8 時間で ?

- 緑入射系と腕自身の初期 alignment に 3hr
  - X では 300urad 程度の PIT オフセットに苦しんだ。
  - レビュー → 大気中初期調整手順見直し (の結果 ?)
- 緑出射系の初期 alignment/ 腕の alignment 追い込みに 2hr
  - X インストール時に確立された手順の再利用
- 2 時間程度でフリンジ速度と角度揺れが大きすぎる事を確認し、原因が ISI のチューニングと推測。 ISI のアイソレーションを切って、一回に一秒程度 TEM00 にロックできる事を確認。
  - Empirical knowledge が共有 / 継承される事の重要性。
  - (更に言えば、これで我々から SEI に文句が行ったので、 SEI が即改良の努力をはじめる事が出来た。)

LIGO

LHO Y arm peek で学んだ事 : X の時に週単位かかった事が何故 8 時間で ?

- 緑入射系と腕自身の初期 alignment に 3hr
  - X では 300urad 程度の PIT オフセットに苦しんだ。
  - レビュー → 大気中初期調整手順見直し (の結果 ?)
- 緑出射系の初期 alignment/ 腕の alignment 追い込みに 2hr
  - X インストール時に確立された手順の再利用
- 2 時間程度でフリンジ速度と角度揺れが大きすぎる事を確認し、原因が ISI のチューニングと推測。 ISI のアイソレーションを切って、一回に一秒程度 TEM00 にロックできる事を確認。
  - Empirical knowledge が共有 / 継承される事の重要性。
  - (更に言えば、これで我々から SEI に文句が行ったので、 SEI が即改良の努力をはじめる事が出来た。)
- 一時間メシを喰う (メシは喰え)

LIGO

いまいちな例：鏡問題

- ETM の緑透過率問題 (ロックアキジション ?)
- ETM HR 遊星パターン問題 (雑音 ?) (飛ばす)
- ITM AR 問題 (雑音 ?) (飛ばす)
- aLIGO プロジェクトの目的 (2 時間フルロック) には多分致命的で無いが (河邊の個人的見解) 、更なる研究が必要。
- LMA によるコーティングの見直し。
- 新しい鏡を作るかどうかは今のところ決定していない (はず) 。

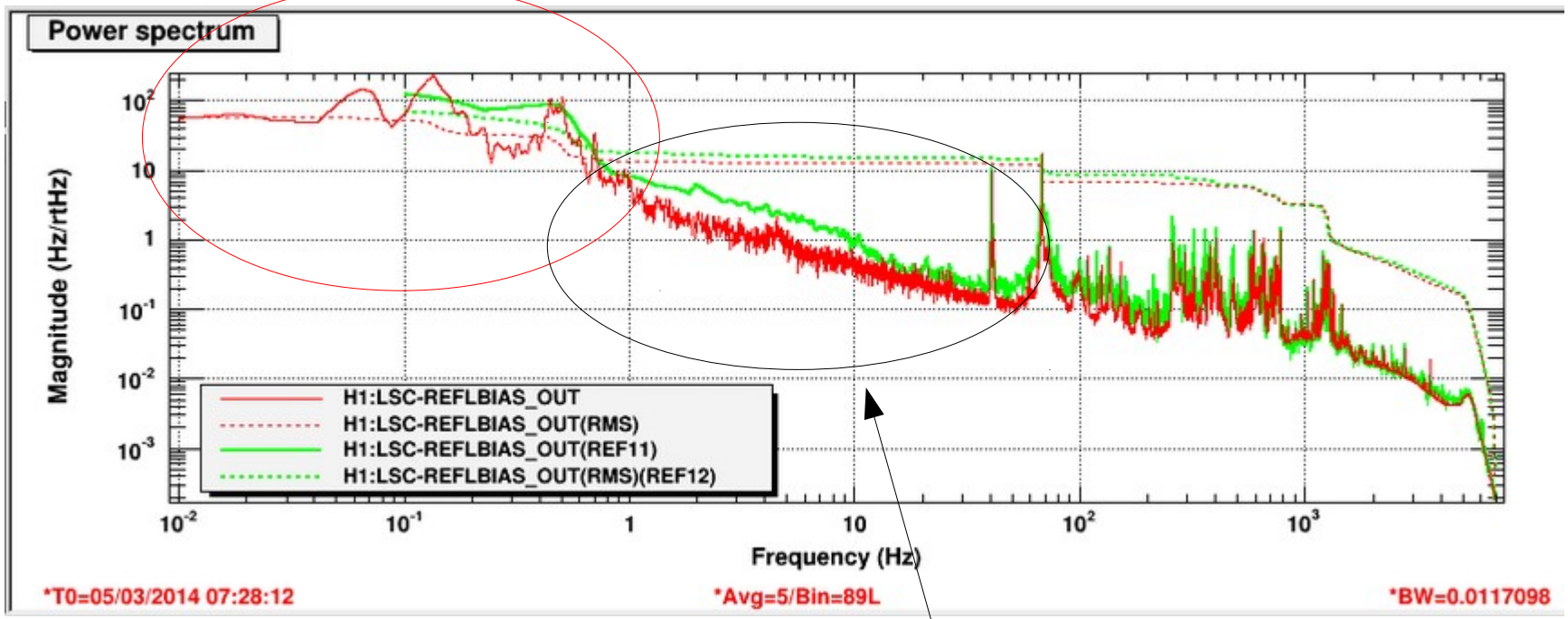
LIGO

ETM 緑透過問題

- Early 2014: HR コーティングの緑透過率が高すぎる事が現場で発覚。
- 仕様 3-15% だが、実測では 30% 超、ベンダー報告書でも仕様外の実測値を記載、しかし現場でインストールされるまで誰も気にしていなかった。
  - 納品 → 必ず仕様を満たすかチェック！
- キャビティの幅が広すぎて、高次モードの PDH 信号が００モードのそれと混じってしまうために余剰雑音が生じる。

LIGO

余剰雑音：この辺。



(この辺は何か違うメカニズムらしい。)

LIGO

ETM 緑透過問題

- Early 2014: HR コーティングの緑透過率が高すぎる事が現場で発覚。
- 仕様 3-15% だが、実測では 30% 超、ベンダー報告書でも仕様外の実測値を記載、しかし現場でインストールされるまで誰も気にしていなかった。
  - 納品 → 必ず仕様を満たすかチェック！
- キャビティの幅が広すぎて、高次モードの PDH 信号が００モードのそれと混じってしまうために余剰雑音が生じる。
- iLIGO RFOMC 問題の再来。

History: iLIGO RFOMC 問題とは？

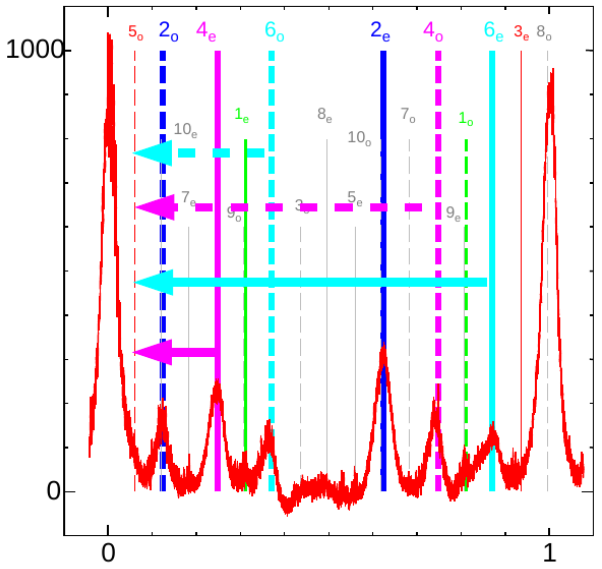
- Tiny OMC (50MHz BW) transmits both RFSB and C.
- 5th HOM generated by misalignment from large 4 and 6th contents, contaminates 00 PDH.
- One of the reasons why DC OMC is so much better.

Higher Order Mode Leakage

Scanning AS using OMC, very large 4- and 6-th order modes were observed

n+m=5, n=odd mode close to resonance

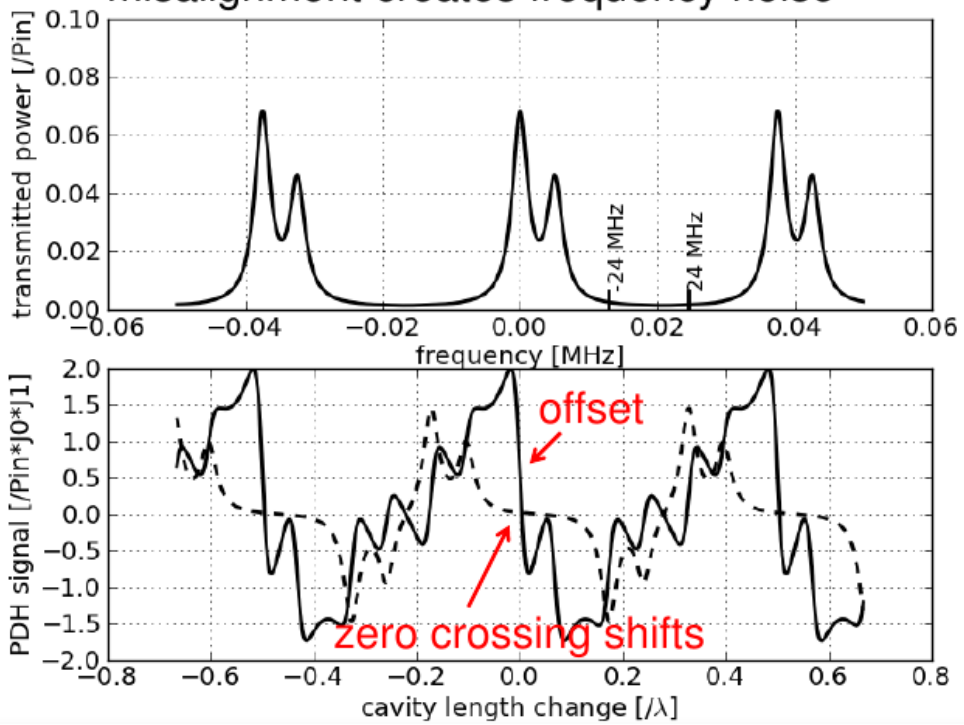
Misalignment “scatters” e.g. (4,0) and (6,0) into (5,0)



LIGO今回は問題の同定と解析に道村君大活躍！

PDH signal combined

- misalignment shifts zero crossing point (locking point)
  → misalignment creates frequency noise



- 道村くん 2014/Jan-Mar (二ヶ月)
- 武勇伝は本人に聞くべし
- https://dcc.ligo.org/LIGO-G1400074

LIGO

ETMX 緑透過問題

- HOM の揺らぎはアラインメント制御で抑えられる。 → WFS
- LLO X、緑 WFS で ~<10Hz (comparable to 第一次 HIFO-Y) 。しかし WFS のチューニングを頻繁に繰り返す必要あり。
- LHO X、 WFS のトラブルシュート継続中。
- 鏡を作り直す可能性は未だにゼロでは無い。

LIGO

インストレーションを乗り切る

- 時間と戦う
  - プレッシャーで自滅しないために
  - 無駄な遅れを防ぐために
  - 時間節約に時間をかける
- インストレーションの大まかな流れ
  - 悪い流れ
  - 現状を打破する
  - 良い流れ

LIGO

時間と戦う

負けパターン

- プレッシャー問題
  - 心理的にきつい
  - 質を落としても時間を優先
- 無駄に質の高い仕事で時間を無駄にする問題
- 忙しいので必要最低限の用意しか出来ません問題 (今回省略)

LIGO の攻め方

- コンティンジェンシーの設定
- 手順書の整備、許容値の明記
- 許容値を熟知し、判断を下せる人が現場に居るか、すぐに連絡がつく事
- 時間を節約するために時間を使う
  - インストレーション ツーリング (省略)
  - 手順書 (省略)
  - 人に任せる (省略)

LIGOプレッシャーによる自滅を防ぐ：コンティンジェンシーを設定せよ

- 有限の時間で、出来れば前もって設定した期限内に , ものを入れて調整して終わりにしなければならない。
  - かなりなプレッシャー。
- 「真空に引いた後に間違いが判明したら、やり直すのに X 週間かかるから、拙速よりも慎重に調整」は正しい考え。
  - コンティンジェンシーを必ず設定。
  - コンティンジェンシーを使う事を前提にしない。
  - 使ったからといってこの世の終わりでは無い。
- 個々の作業レベルでも、うまく行かなかった場合にどの程度の時間が食われるのか、可能な限り予測してマネジメントや他のインストレーションチームに周知。

LIGO

コンティンジェンシー無し = 無理

- 無いと精神的にも肉体的にももたない (もちろん時間的にも予算的にも)
- 経験則 : 「この作業時間は T だろう」と思っても、やってみると nT (n=2~3)
- 計画立案時にコンティンジェンシーが組み込まれている様にするのは、 Subsystem の責任。それを精査するのは計画をレビューする人の責任。 (どちらも LIGO の人。)

LIGOプレッシャーで自滅しない：「終わらせなきゃ仕方ない」という負けパターン

- ものをインストール
- 調整後測定、理想から離れているので再調整。
- これを数回やるうちに期日が迫る。
- 「時間ないから、仕方ないこれで終わらそう」
  - (「お金無いから」や「頭数無いから」でも可)
- 時間をおいて、後からはまる

LIGO「終わらせなきゃ仕方ない」1: どこまでやらねばならないのか定義せよ

- メカものや光学ものの調整許容値を考えて文書化しておく事が極めて重要。
- インストレーション手順書の整備。
  - × 「ETM と TMS の高さが等しくなるよう調整せよ」
  - ○ 「ETM と TMS の高さをトータルステーションで測定し、 8mm 以内になるように」
  - LIGO でも徹底されていない場合あり。

LIGO「終わらせなきゃ仕方ない」2: 迷った時に迅速な判断を下せる人材を現場に置け

- 設計者とインストール作業者は違う事が多い。文書化されている場合でも、許容値ぎりぎりだと作業者は迷う。
- 「許容値 8mm に対して、今 8.8mm なんですけど、実際どうなんだろう」という疑問に対して、
  - 「それ放置すると後でこれこれの障害が出るかもしれんから、作業 3 日伸びるけれど修正するようにかけあおう」
  - 「いや、 8.8mm は致命的じゃないし、それよりも 3 日が惜しいから今回は放置するように話し合います。」とか判断出来る人が必要。
- 従って、許容値の理由を深く理解している人がインストール現場に居るか、少なくともインストール日に電話連絡のつく場所に居るべき。

迷いました。じゃあ誰にかけあうのか、誰が何の責任を持つのか (の一例)

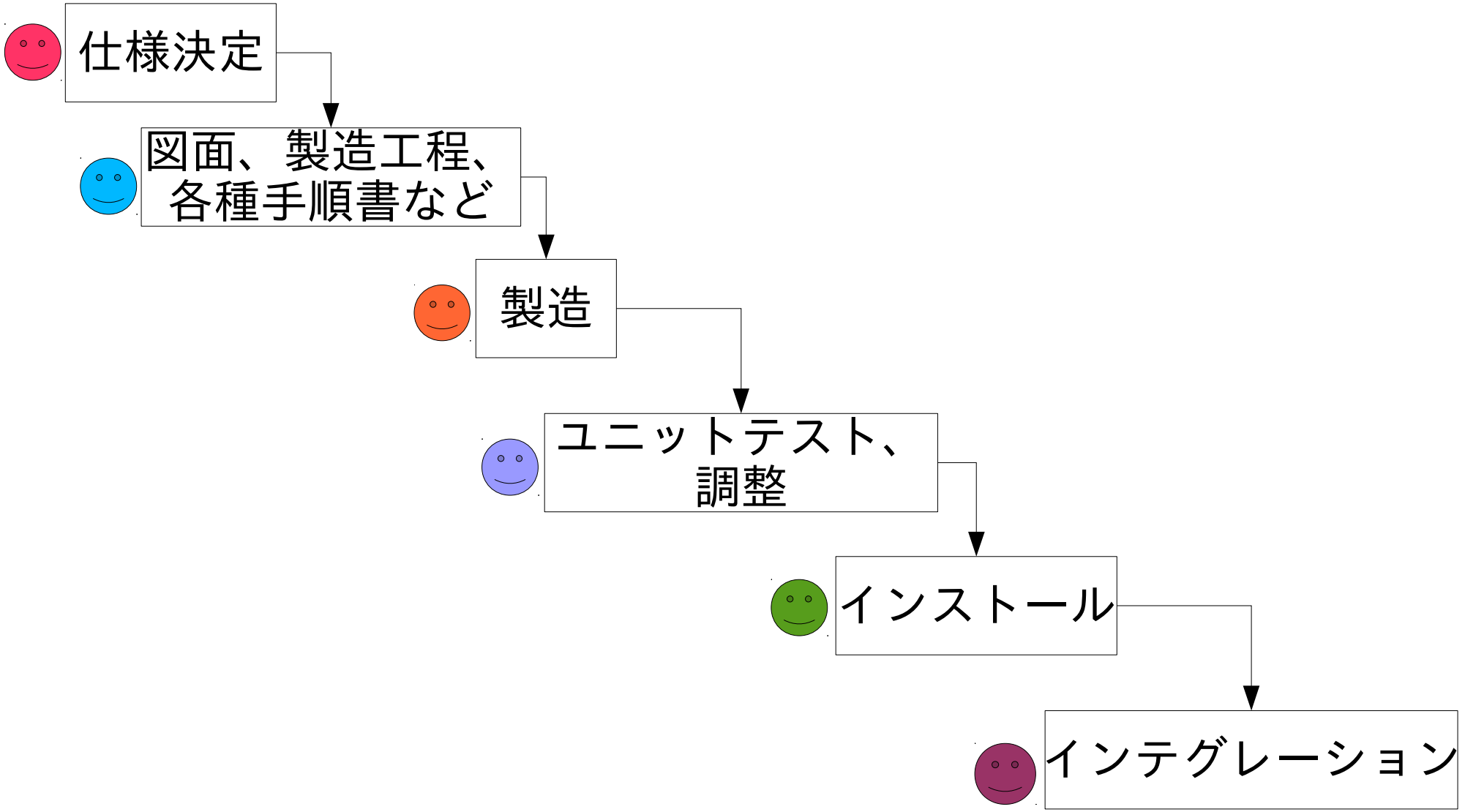
- 作業者 /Subsystem はインストレーションマネージャに状況 (「許容値 8mm だけど今 8.8mm 」) と自分の判断 (「これこれの理由で修正すべき」「修正するならあと X 日」) を逐一伝える。
- Ins マネは Systems に作業者の判断の正当性をチェックさせる。
- Systems と Ins マネは、現場がどうするかを決定すると同時に、 aLIGO 事務方と折衝。

LIGO

Flip side of the coin:
無駄に素晴らしい仕事で時間を食う問題

- 本来もう十分許容範囲内のはずなのに、「拙速よりも慎重に調整」の心理により、無駄に素晴らしい微調整に何日も費やす事もありがち。
- 許容値、インストレーション手順書 (略)
- 分かっている人を現場に置け (略)

Subsystem インストレーションまでの大まかな流れ

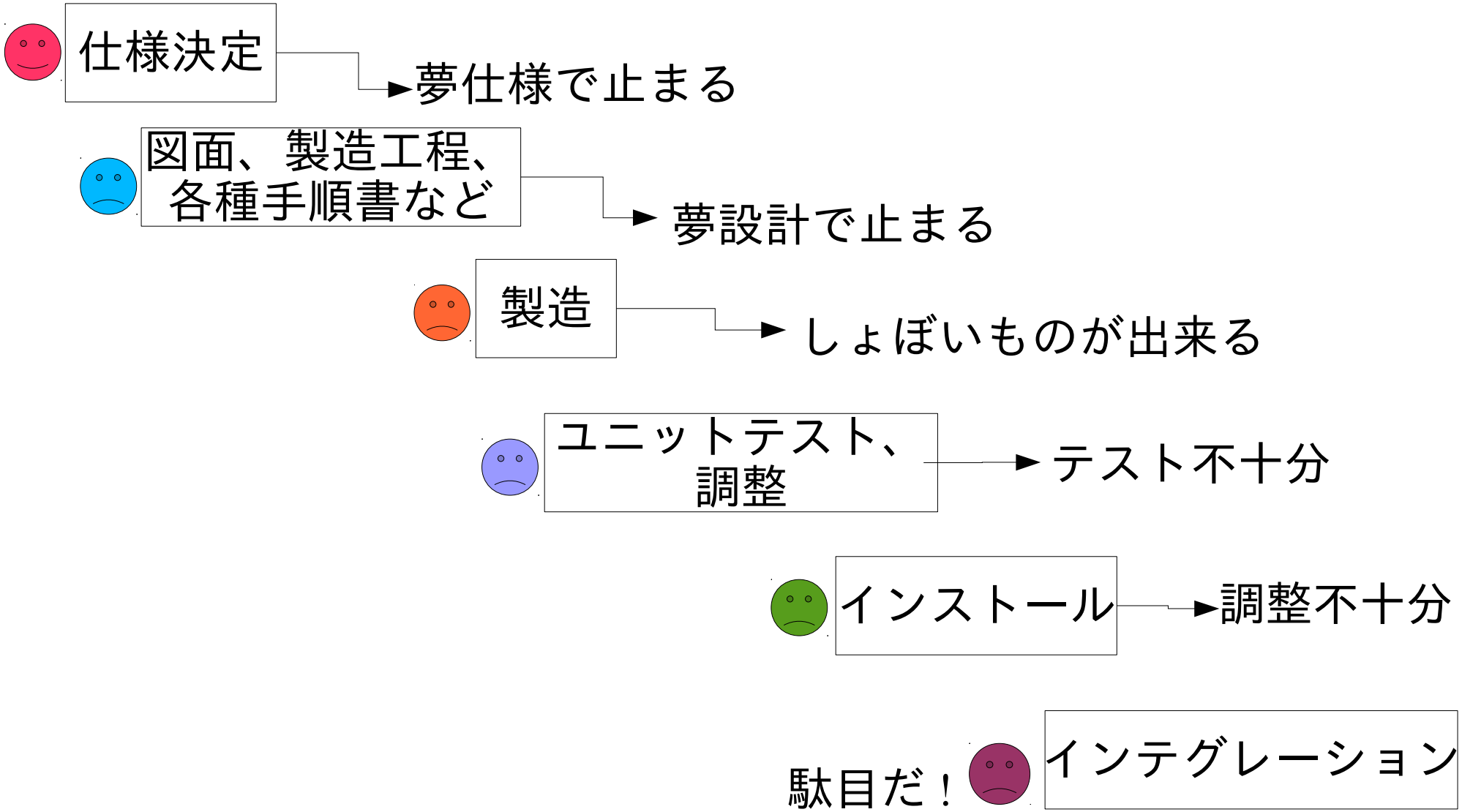


LIGO

LIGO での住み分け

- 一人が一つ以上の役割
  - 私もネジ締めたり図面も引かないとプロジェクトが回らない。
  - 製造だけやる人とか、居ないわけではないが少ない。
- しかし、自分のキャパシティに限度がある以上、ある程度信用して任せないとプロジェクトが回らない。
- しかし丸投げすると、個人による仕事の抱え込みによって、はまる可能性 (2012/04/16 河邊国内会議資料の「夢世界問題」参照) 。問題が最後の瞬間まで露呈しない可能性。
  - 「決まった事だから仕方ない」も同じ。ものが自分の手に渡るまで問題が露呈しない。

Subsystem インストレーションまでの悪い流れ：任しときゃいんじゃね？

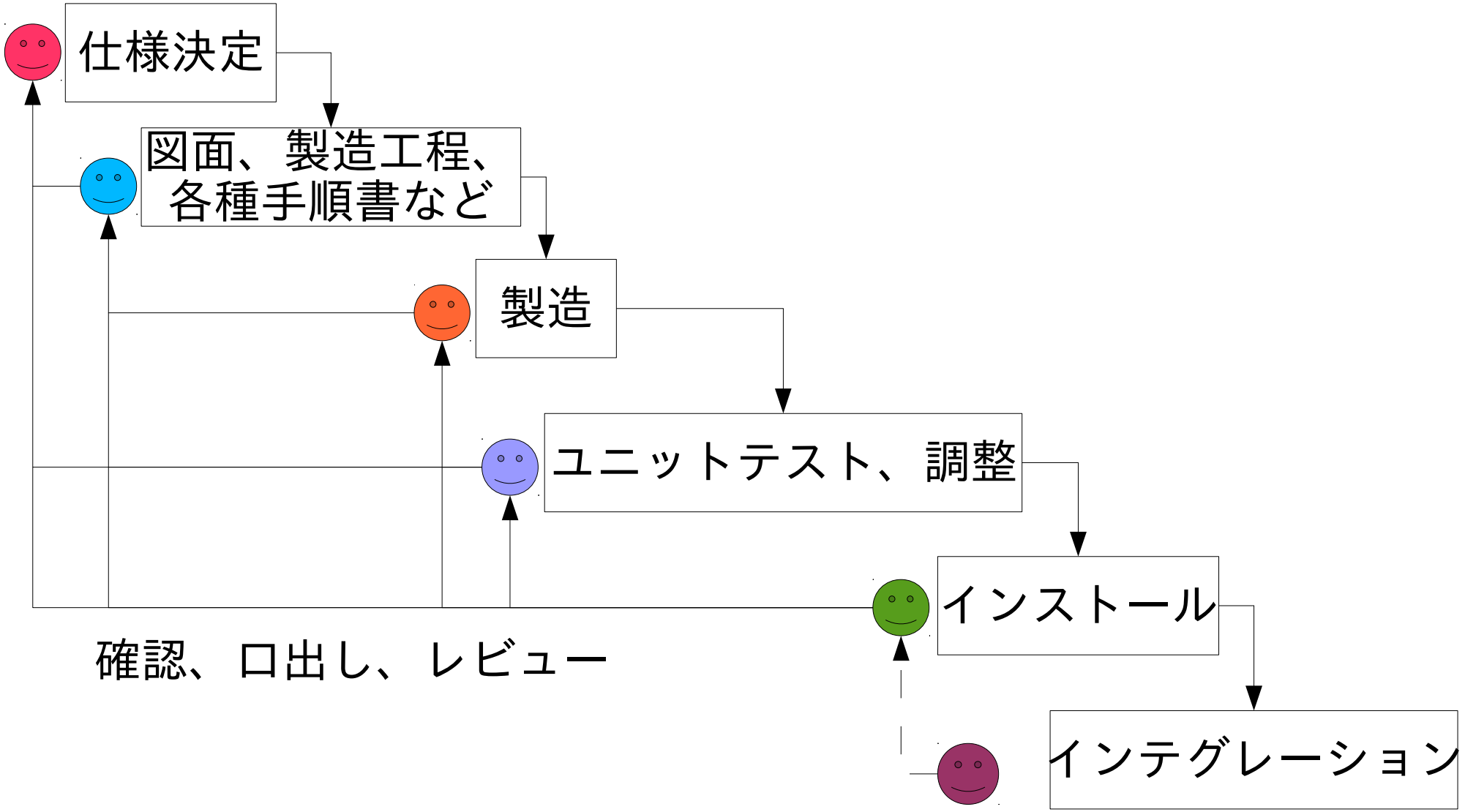


LIGO

はまりパターンを断ち切る：確認、口出し、レビュー

- 公式なものでなくても、確認、口出しやレビューを行い現状を打破するべし
- 見直し結果を公式なものとするためのメカニズムの存在 (ECR etc.)
  - 例) AD8675 系の power sequence を要する IC の誤動作による RF diode 破壊など→ 代替 IC の使用
  - 例) TMS (2012/04/16 資料)
  - あとでもう一例話す。
  - 遅すぎた例) ポラリティを逆に挿せないはずだが、実は出来る電源コネクタ → 代替コネクタはあるが、台数が多すぎるためか、ちゃんとさせば良いという理屈なのか、置き換え計画は無し

Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復



LIGO

この仕組みをまわす鍵 : Systems は現状打破の実質主体たれ

- 問題をひろいあげる : 人々からの「訴え」を取りこぼさない様にリサーチ。対面 / 電話 / メール /alog 。
- 問題を同定し、議論を促進する : 対面 / 電話 / メール /Systems 会議 (LIGO のすべての人に開かれた場) 。
- Systems は独自の判断でどちらかを支持、もしくは新しい解を提案、最終的に方向性を決定。
- 議論は決断を下すためのもの。「 A さん B さん擦り合わせてください」では決まらない事も決めなくてはならない。
- リソース有限の中、何が大事なのか優先順位をつけて、自分で擦り合わせる。
- 決まった事でもダメージがあると判断したら柔軟に変更すべし。

LIGO

例）本日の Systems 会議 (Watchdog の「改良」について)

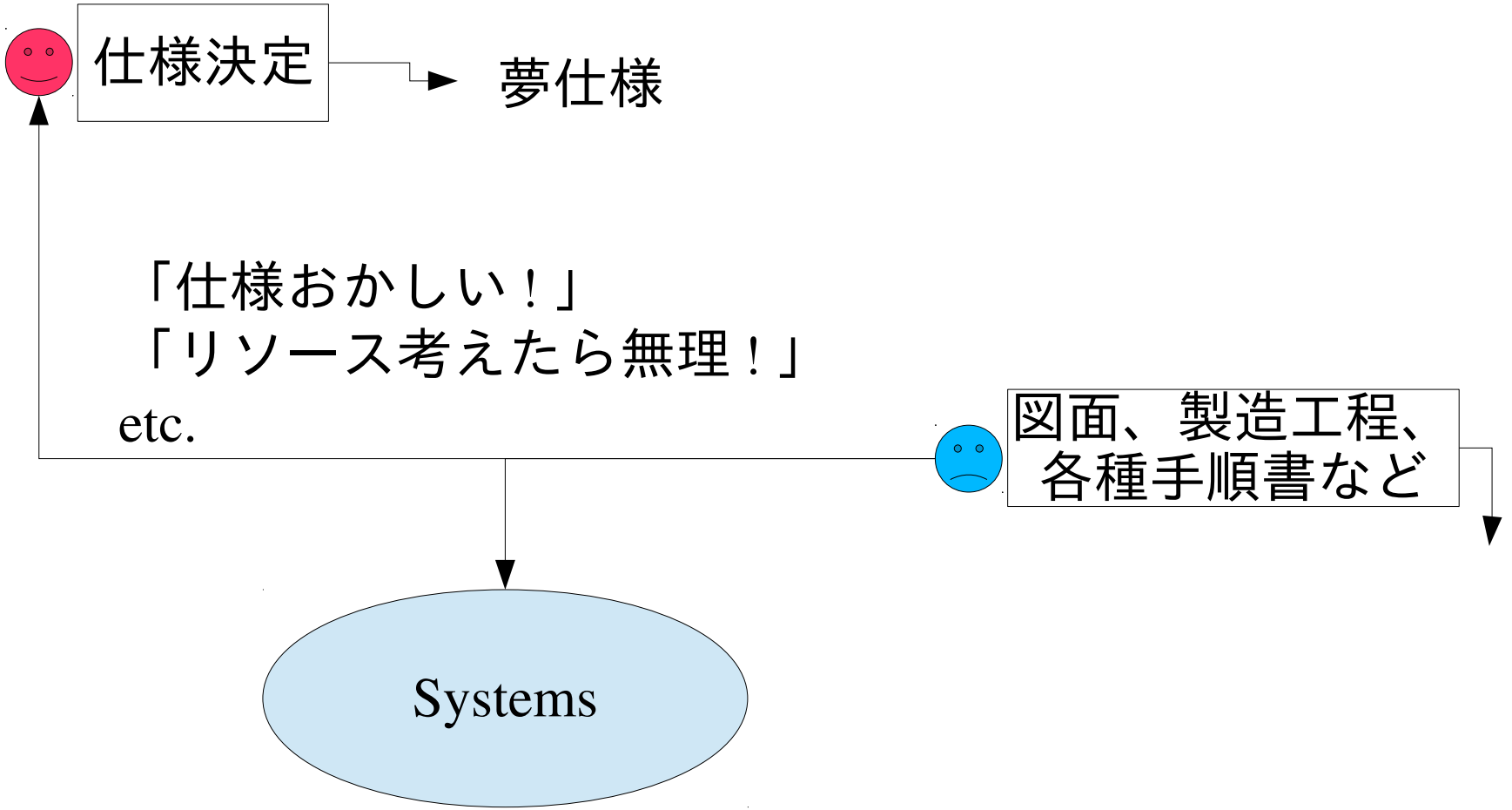
- (Watchdog: 石英ファイバ破断を防ぐため、大きな揺れを検出したらアクチュエータの出力を落とすという仕組み。意味不明のロジックで評判が悪かった。)
- サブシステムの人 : 今までは大きな揺れが検出されたらークロック目で落としていたが、これにカウンタを加えて、大きな信号をトータル 10 サンプル検出するまで落とさない様にした。カウンタのリセットは手動。
- (不満の声、議論省略)
- 使う人 : カウンタのスレッショルドを 1 万ぐらいにしないと、 10 じゃ意味無し
- サ : 10000 回のサチりを許容して、鏡の安全を守れると思わない。

LIGO

例）本日の Systems 会議 (Watchdog の「改良」について)

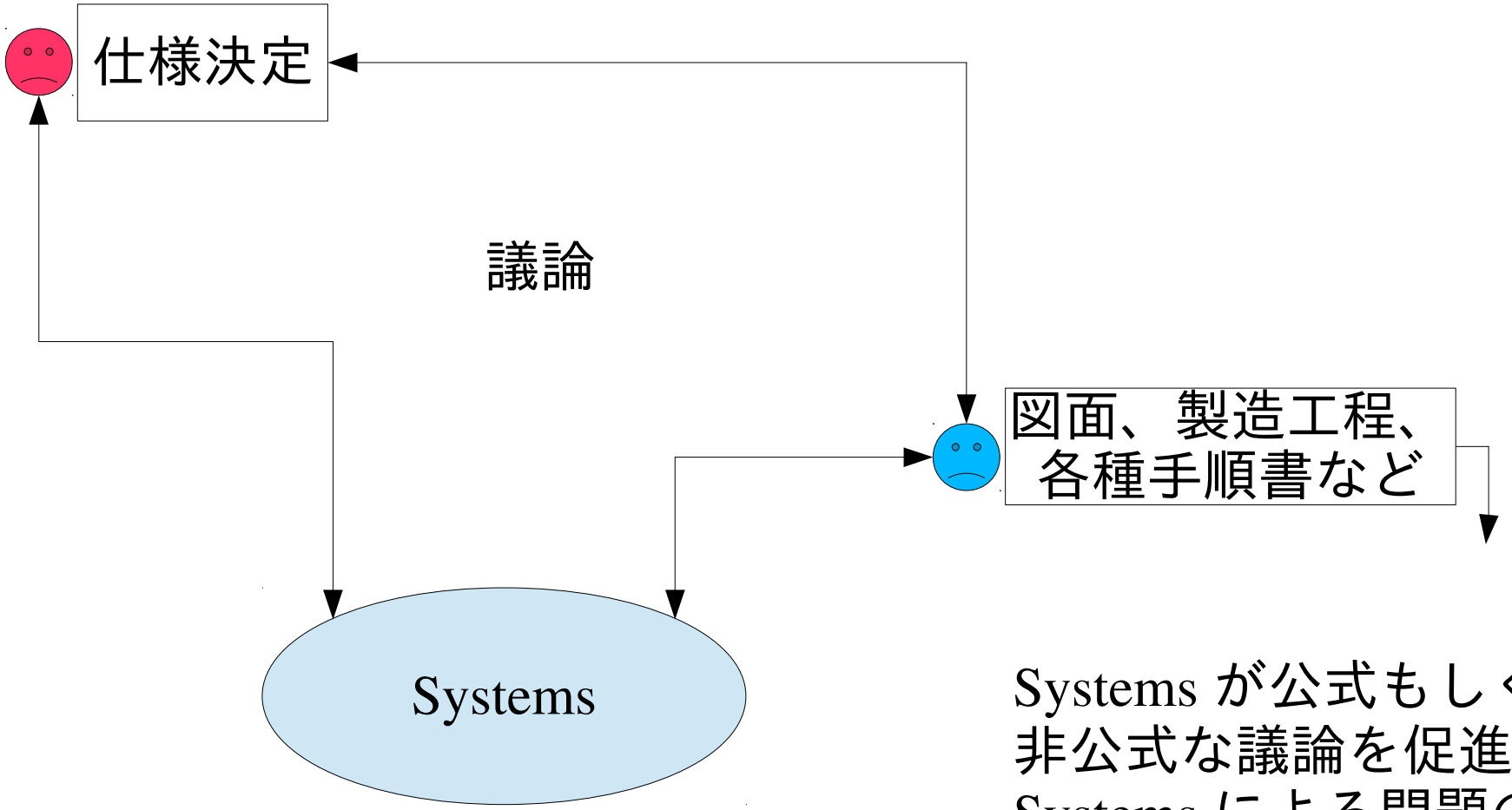
- 使 : 昨日 9 回さちったけど鏡は無事で、今日一回さちったから、合計 10 回で出力を落とすというのはおかしい。過去の履歴は自動的に消していくべき。
- サ : すべての問題を即解決しようとしていない。この仕組みで行きたいと、前からデニスと Peter には言ってあったはずで、コードは既にテスト済みである。新しい仕組みを作るには時間がかかるのだから、今そんな話をされても困る。これを今インストールさせろ。
- デニス (Systems のトップエンジニア): すぐに新たなコードを書くのでなく、 10 回じゃなくて千回とかをスレッショルドにして、将来的には適当なタイムコンスタントで過去の履歴を捨てる様にするのでどうか。
- サ : むむ。ちょっと考える時間をください。

Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復を細かく見た例



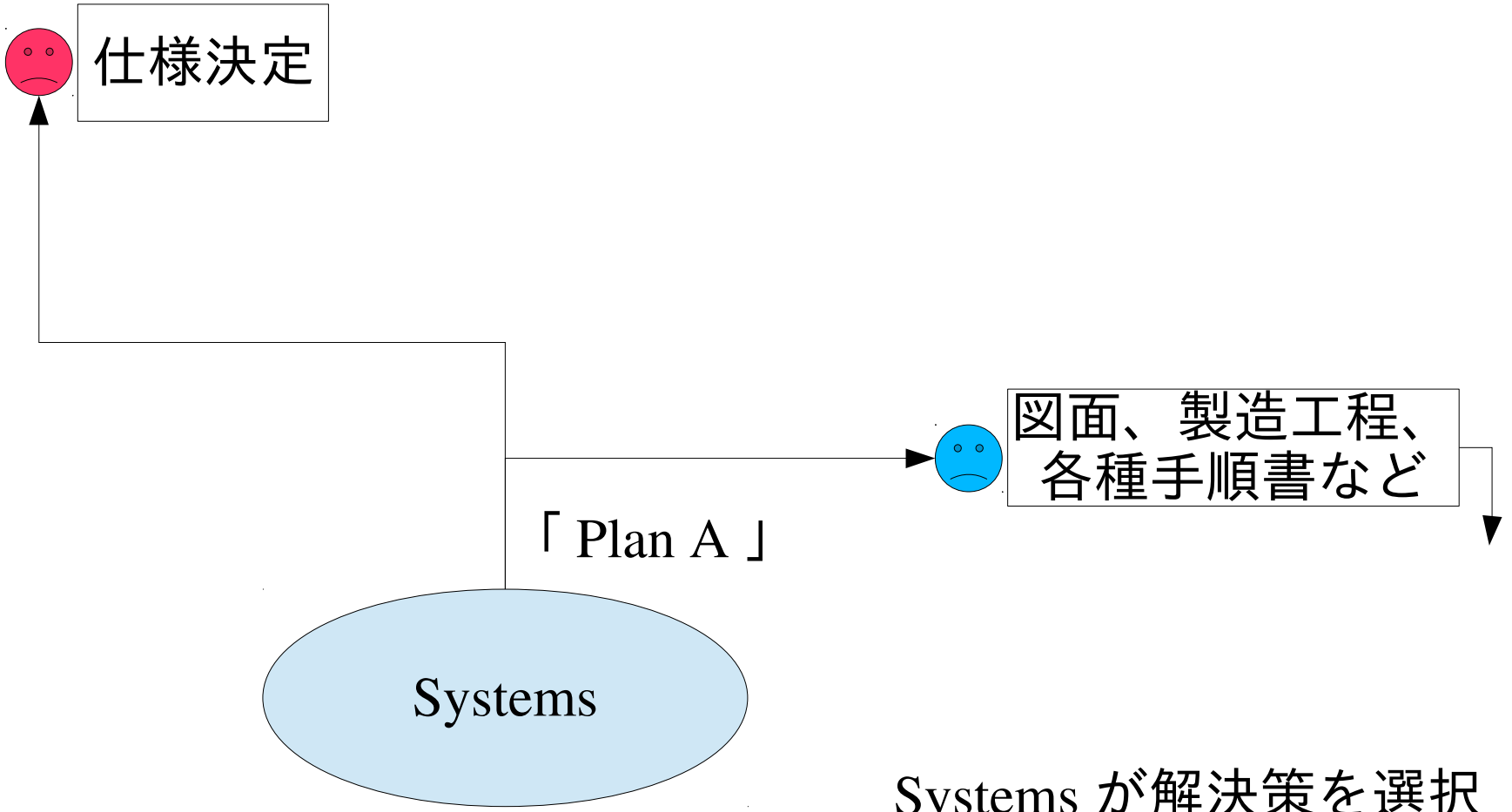
問題が露見し、 Systems が把握。

Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復を細かく見た例



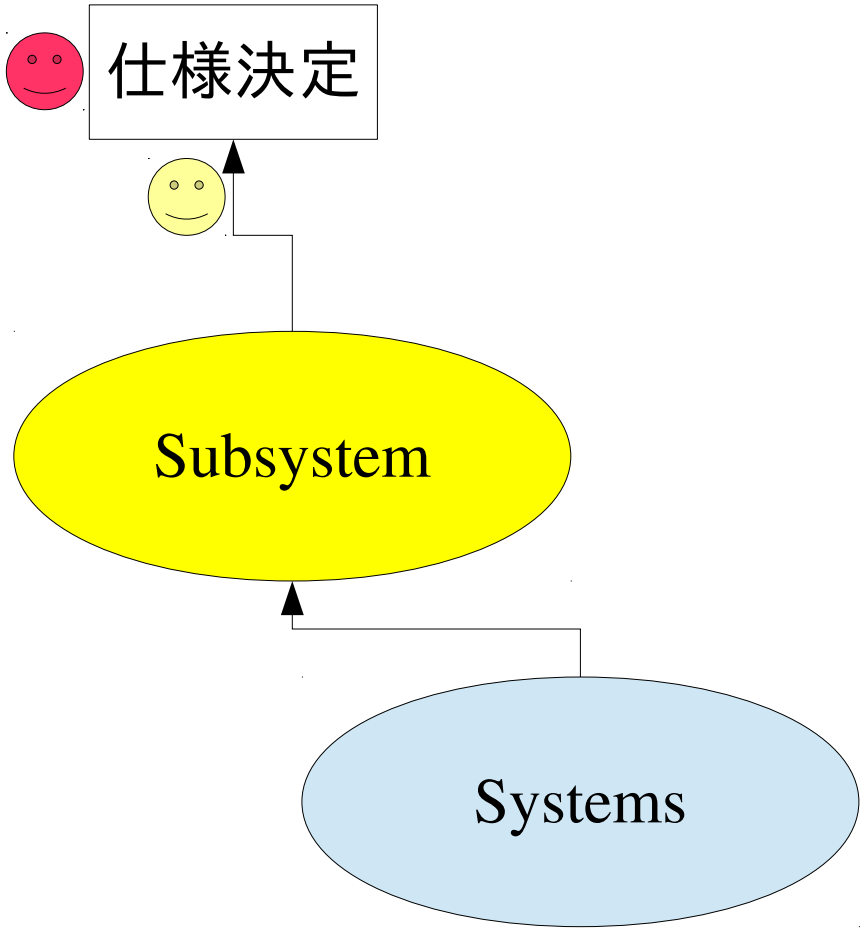
Systems が公式もしくは
非公式な議論を促進。
Systems による問題の理解。
当事者による解決策の提案。

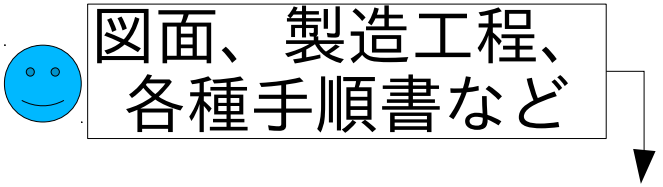
Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復を細かく見た例



Systems が解決策を選択
もしくは新しい策を提示。

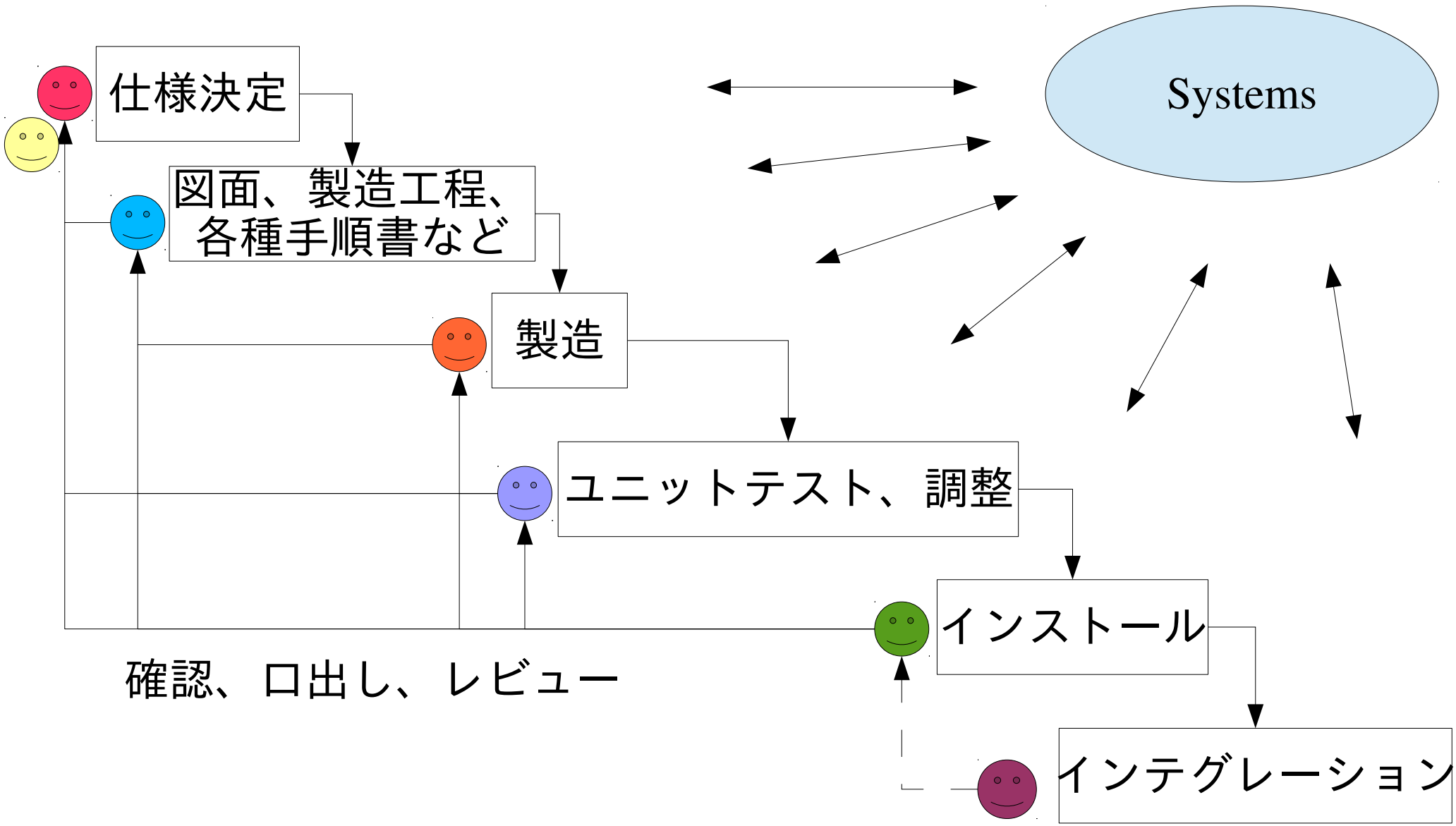
Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復を細かく見た例





Systems が必要ならリソースの再分配を促す

Subsystem インストレーションまでの良い流れの回復



インストレーションを乗り切るための LIGO の攻め、まとめ

- No contingency, no installation
- 「仕方ない」で質を落とし見切り発車、または無駄に素晴らしい調整で時間を無駄にする
  - 手順書の整備、許容値の明記、わかっている人の配備
- 丸投げ問題、「決まった事だ」問題
  - 口出し、確認、レビューで現状打破
  - Systems は現状打破の実質主体たれ
    - 皆が満足する解は無いが、皆が納得出来る解を模索し、決断

LIGO

おまけ

LIGO

時間節約に時間をかける例：インストレーションツーリング

- インストレーションに使う様々な道具、補助具の類をこう呼んでいる。
- 時間短縮、危険回避等
- 真空槽内での時間はオフィスの時間より高価である
- インストール前に準備し、レビュー、試作によって使える事を確認しておくべき
  - LIGO でこれが必ずしも徹底されているわけでは無いが、試作試用無しのものは大概評判が悪い

LIGO

例 1) Ergo Arm

- https://dcc.ligo.org/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=9076
- 40kg の鏡を扱うためのマジックハンド付きのカート
- 人間が 40kg を手で保持する事は絶対に無い。
- 評判は良い。

LIGO

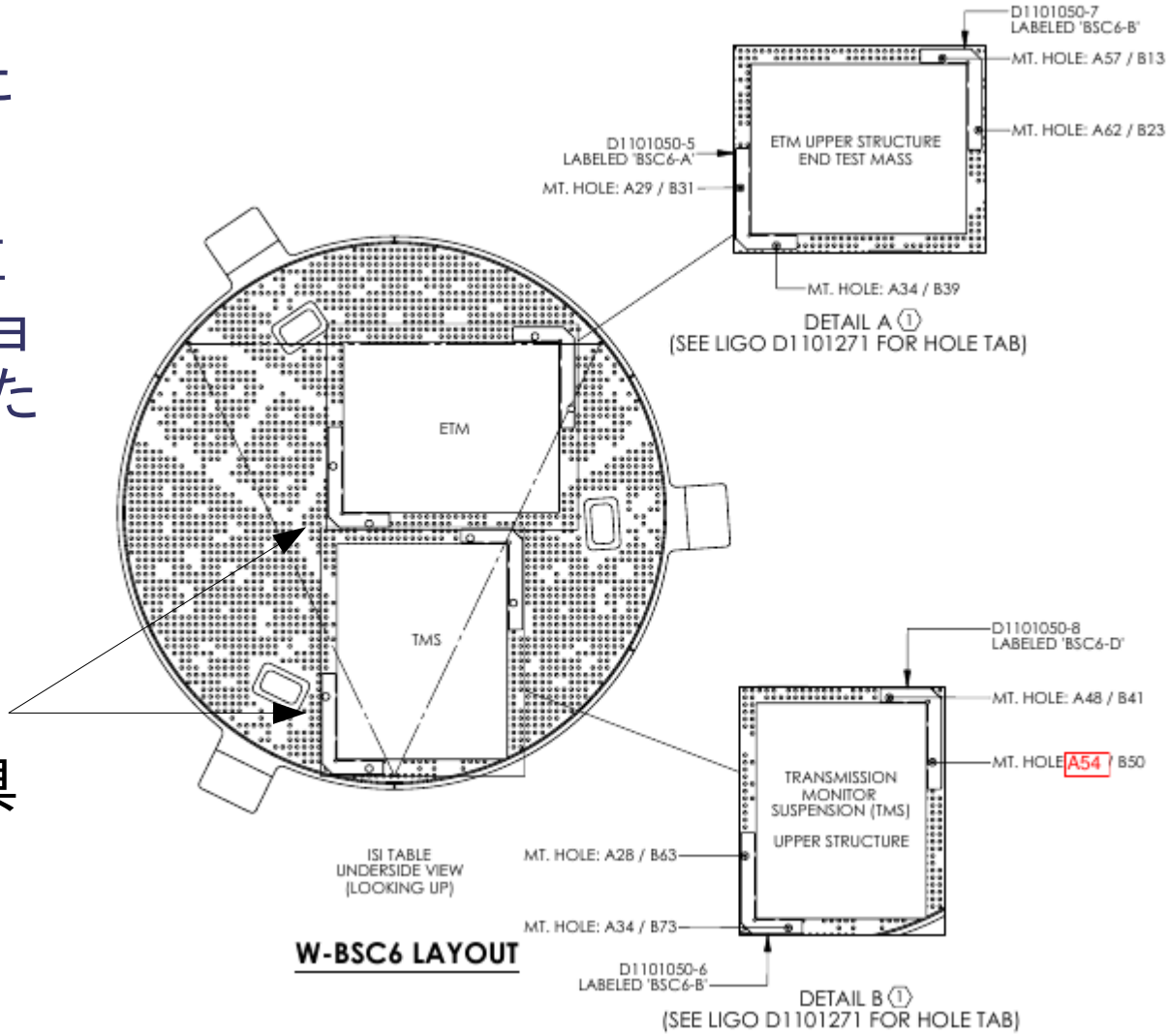
例 2) HAM installation arm

- HAM に横から small optic suspension を入れるための自在腕。
- 評判は良い。

例 3) Cookie Cutter

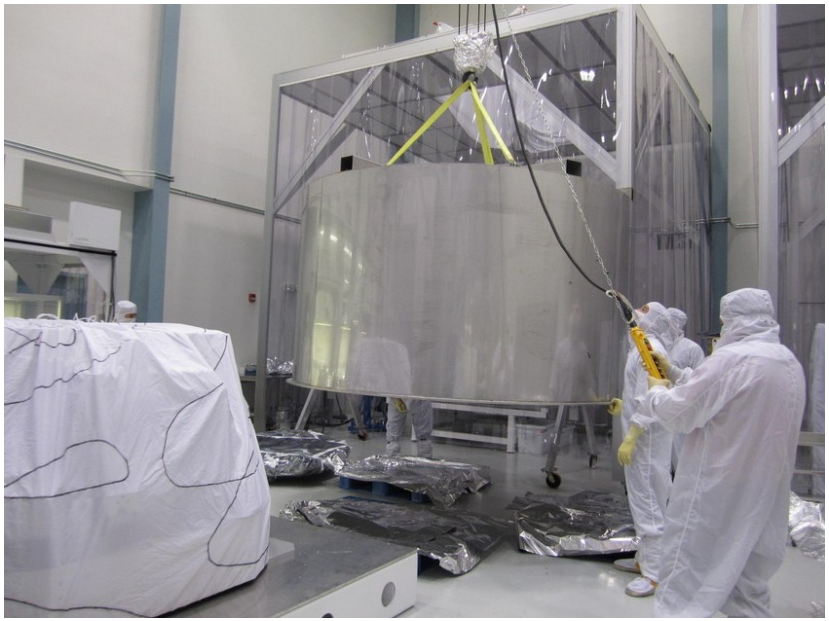
- Suspension 位置決めのためのジグ
- ISI 上の決まったネジ穴位置に装着し、サスペンションの角をそこに合わせるためのもの。
- 無いよりマシ。

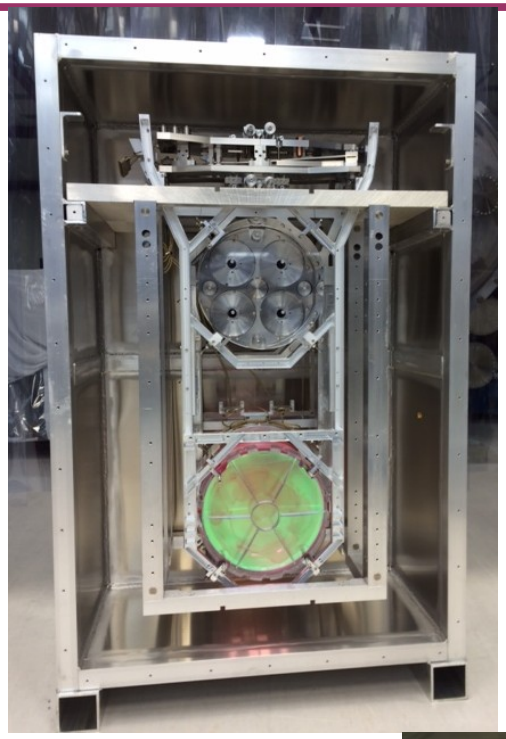
このＬ字の金具

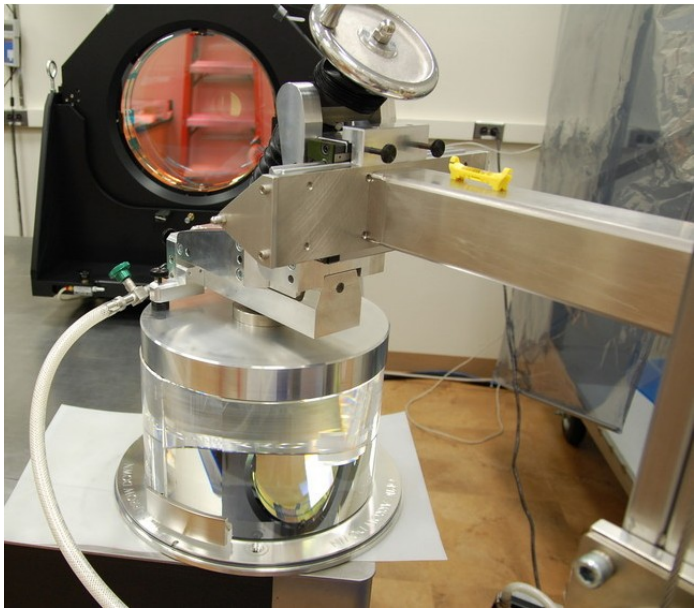


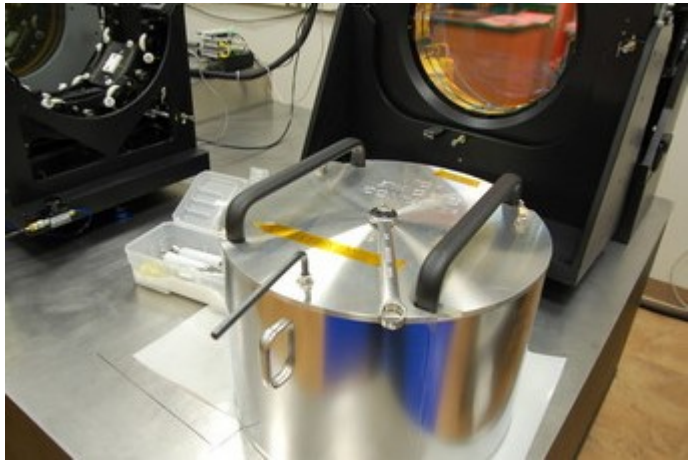
LIGO

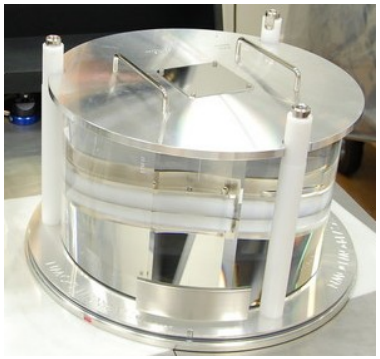
例 4) 各種運搬用容器など

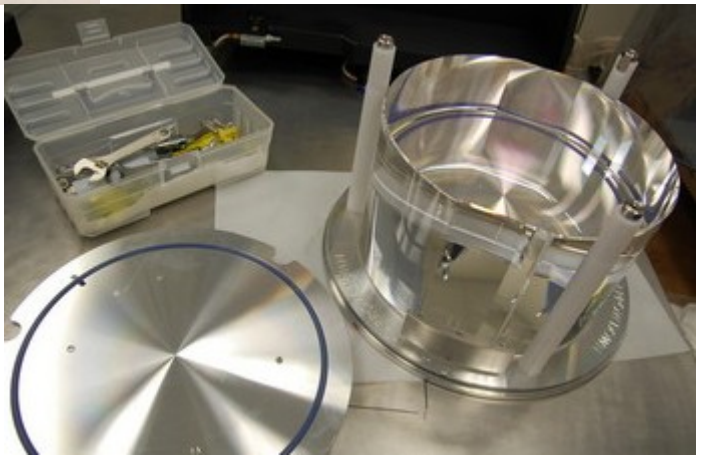




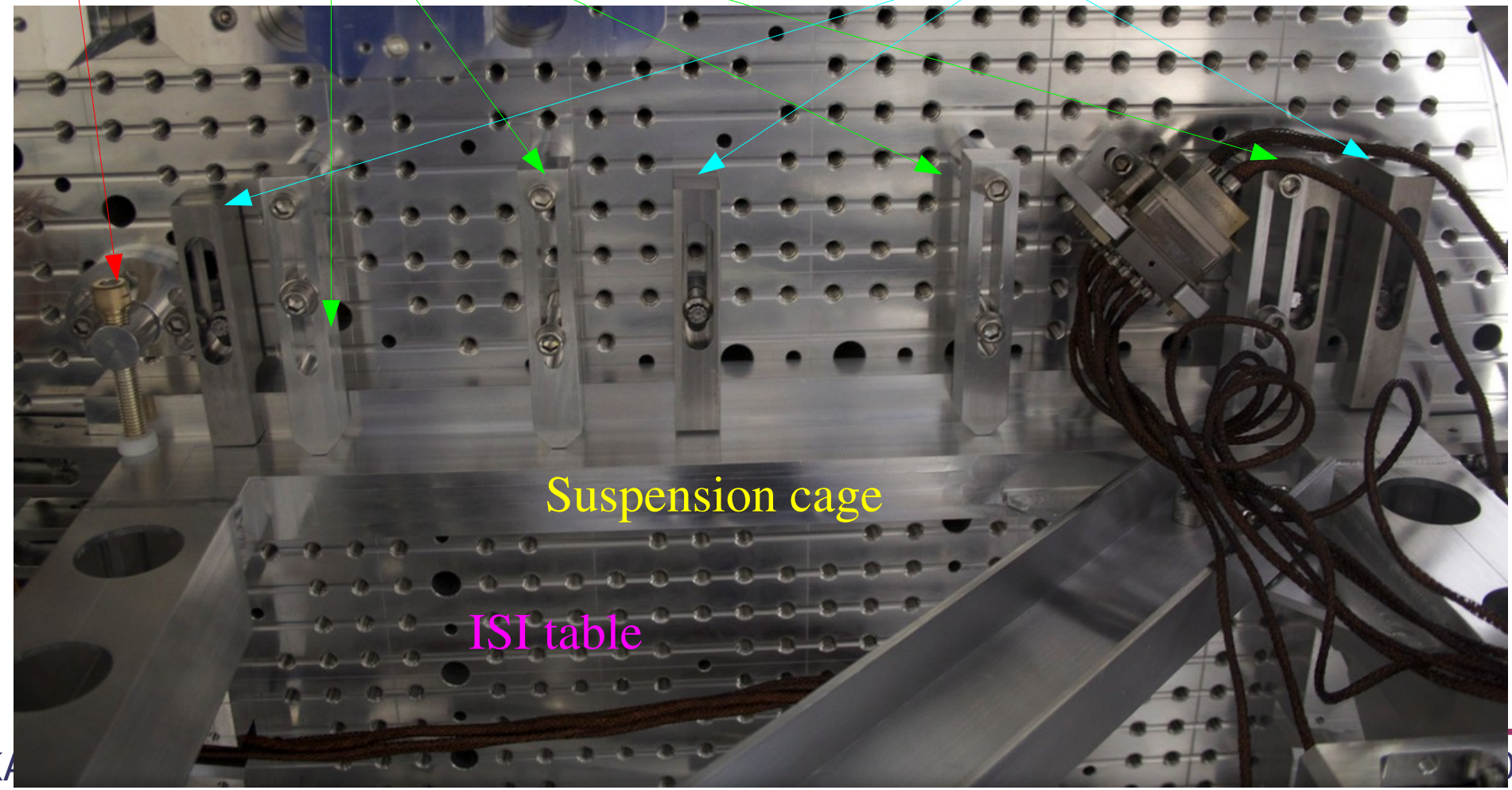








例 5) Suspension pusher (BSC ISI を下から見上げたところ)



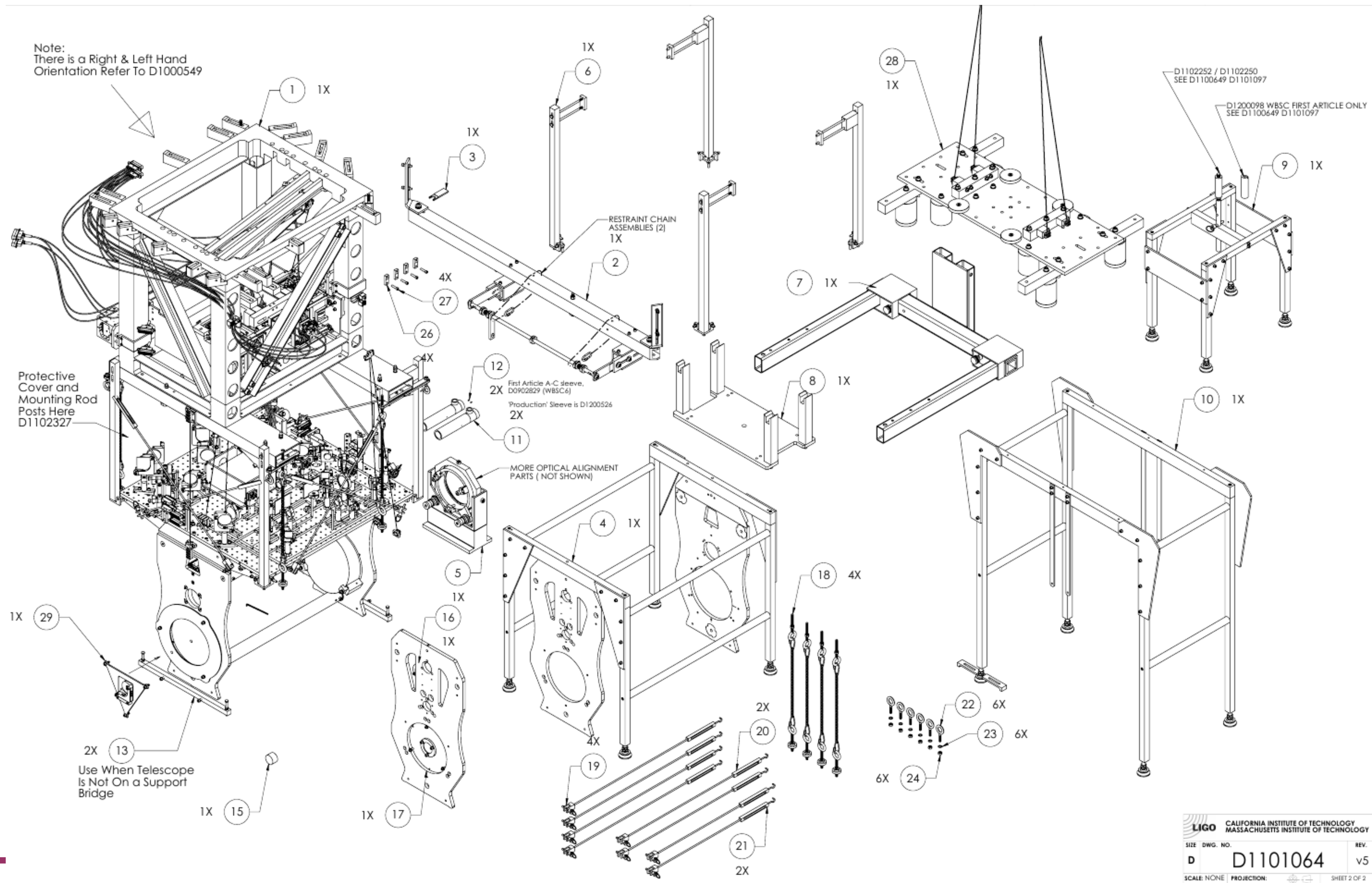
LIGO

例 5) Suspension pusher

- BSC 内に設置された Suspension の位置と角度を微調するためのもの。
- Sus の YAW 角度は真空内で数百 urad しか調整出来ないので、初期調整測量の結果角度が合ってない場合にはこれを使って調整。
- テフロンつきの dog clamp が Suspension の重量を支え、横からネジで Suspension cage の基部を押して角度を変える。

大不評の tooling 例 : TMS tooling(凝った設計はほどほどに)

- https://dcc.ligo.org/LIGO-D1101064



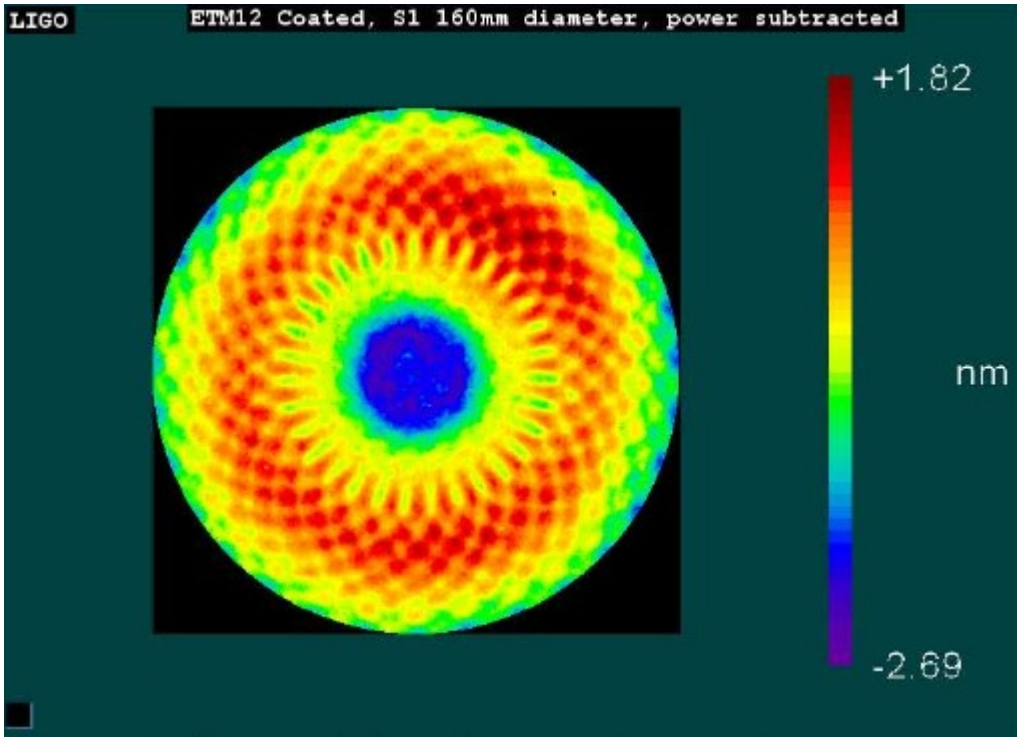
LIGO

大不評の tooling 例 : TMS tooling(凝った設計はほどほどに)

- https://dcc.ligo.org/LIGO-D1101064
- 種類が多い上に、見かけが似たものが多く、どれを何に使うのか混乱する。
- 図面を見た限りでは、どれが tooling でどれがインストールされるものなのか定かでなく、インストール手順書を熟読しないといけない。
- 部品点数の割に、何種類も違う素材 / 径 / 長さのネジとかワッシャとかが指定されており、部品保管の手間とか作る手間が大きい。その上どうしてそうなっているのか不明。

ETM HR 遊星パターン問題

- Fritschel and Yamamoto, https://dcc.ligo.org/LIGO-T1300354



LIGO

ITM 問題

- AR がなかなか難しい事が判明。仕様 (50ppm) を満たす ITM はまだ作られていない。

LIGO

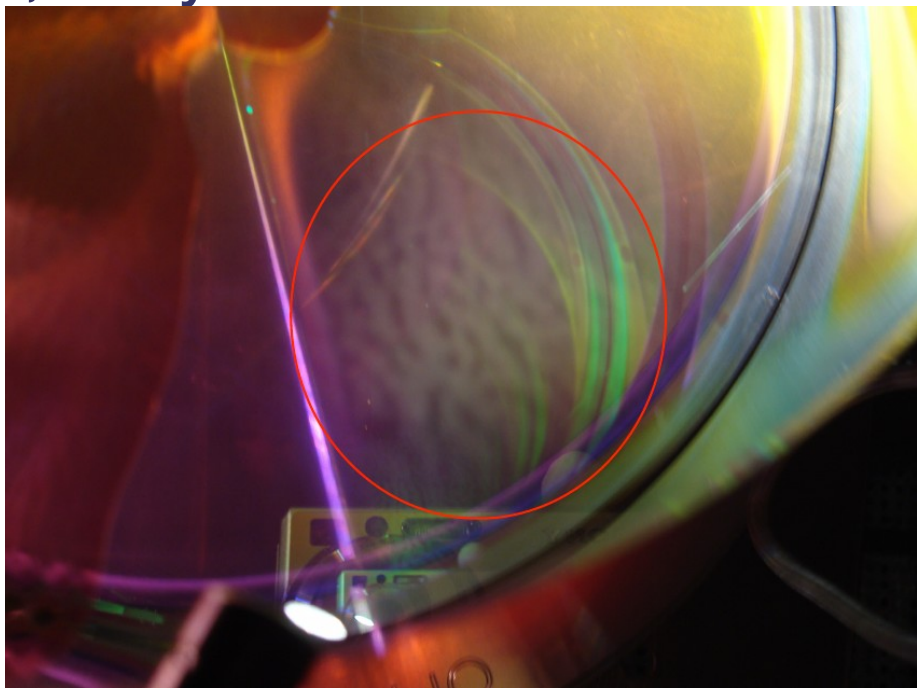
ITM 問題

- AR がなかなか難しい事が判明。仕様 (50ppm) を満たす ITM はまだ作られていない。
- 2012 Aug, LLO ITMs, 250 and 164ppm, OK for lock.

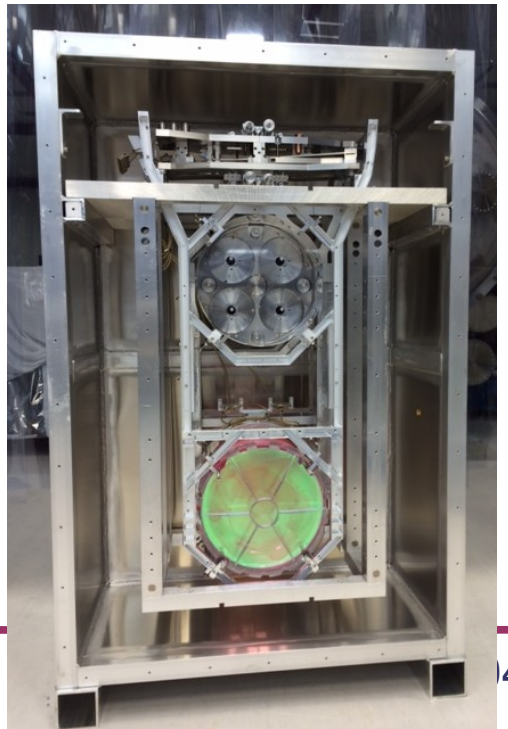
LIGO

ITM 問題

- AR がなかなか難しい事が判明。仕様 (50ppm) を満たす ITM はまだ作られていない。
- 2012 Aug, LLO ITMs, 250 and 164ppm, OK for lock.
- 2013 Jul, LHO ITMX, 630ppm, hazy.



LIGO

ITM 問題

- AR がなかなか難しい事が判明。仕様 (50ppm) を満たす ITM はまだ作られていない。
- 2012 Aug, LLO ITMX/Y, 164/250ppm, OK for lock.
- 2013 Jul, LHO ITMX, 630ppm, hazy.
- 2014 Jan, LHO ITMX/Y, 264/294ppm, OK for lock.
  - ITMY installed, ITMX TBI