



TAO project

東京大学アタカマ天文台(TAO)6.5m望遠鏡

東京大学 大学院理学系研究科 天文学教育研究センター

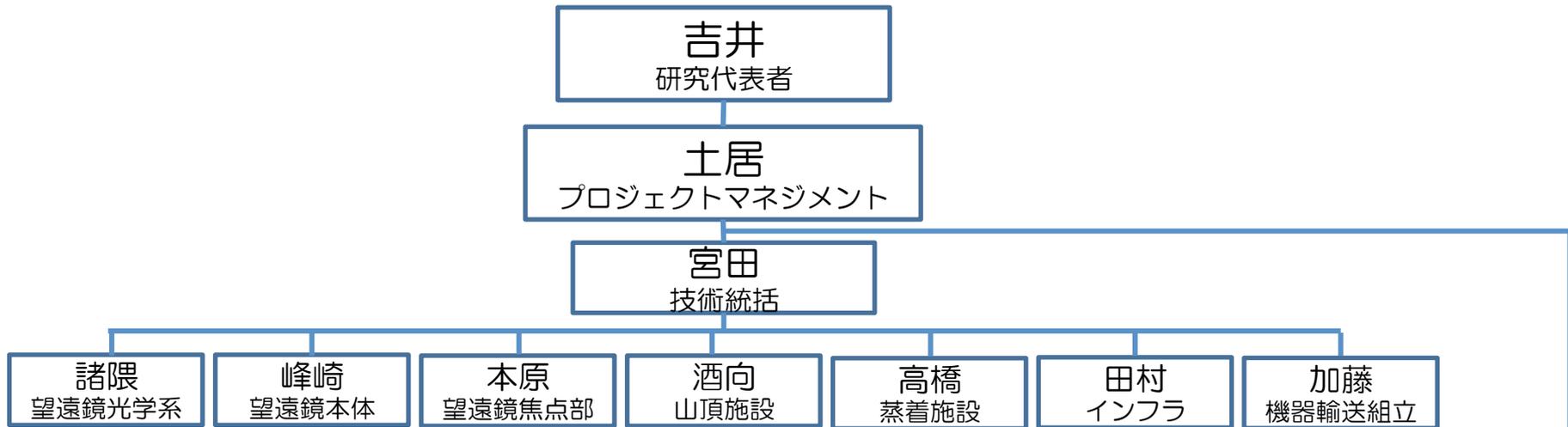
高橋 英則

峰崎 岳夫、小西 真広、TAOプロジェクトチーム



TAO Project Group

東大天文センターの常勤スタッフ16名・特任助教ポスドク4名が中心



Nishimura CO., LTD.



小西
近赤外線装置

上塚
中間赤外線装置

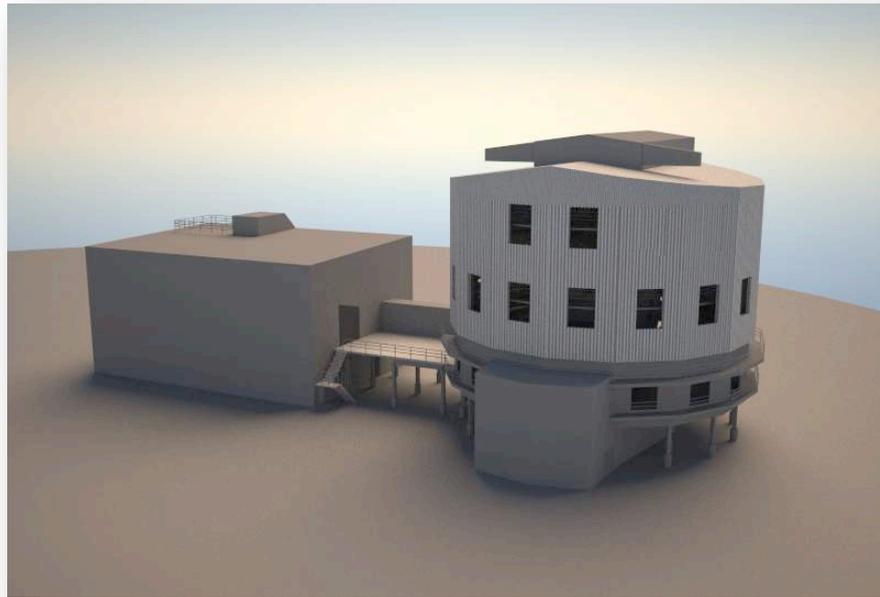


第3回TAO拡大技術検討会
2015年11月6日



本日のお話

- TAO6.5m望遠鏡計画の概要と特徴
- 望遠鏡光学系の能動制御
- ミラーコーティング
- 望遠鏡エンクロージャーの設計と風雪対策





Brief Summary of the TAO project

TAO : The University of Tokyo Ataacama Observatory

- 東京大学・理・天文センターを中心とした大型赤外線望遠鏡計画
- 現在はパイロット望遠鏡のmini-TAO 1mが山頂に。
- 将来的に口径6.5m赤外線望遠鏡をチリ・チャナントール山山頂に建設。
- 抜群の赤外線透明度を活かして広範な分野のサイエンスを展開。
- 大学望遠鏡として若手育成を重視、サーベイ・萌芽的観測を推進。



チャナントール山

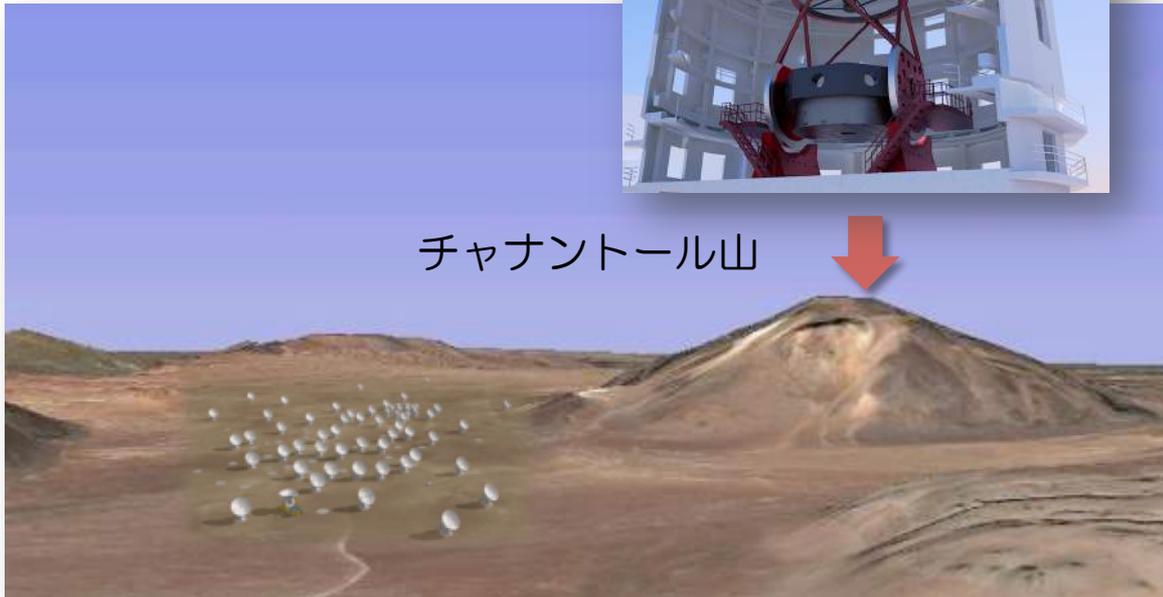


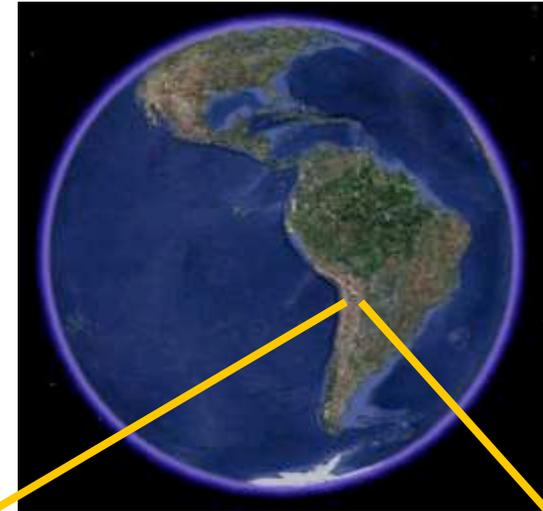
Image credit : google



Brief Summary of the TAO project

TAO望遠鏡建設予定地

- チリ共和国北部、
チャナートル山山頂(標高5640m)
- 世界でもトップクラスの赤外線観測環境
 - 高い晴天率 (82%)
 - 良好なシーイング(0.69" @ V band)
 - **低い可降水量(PWV~0.85mm median)**



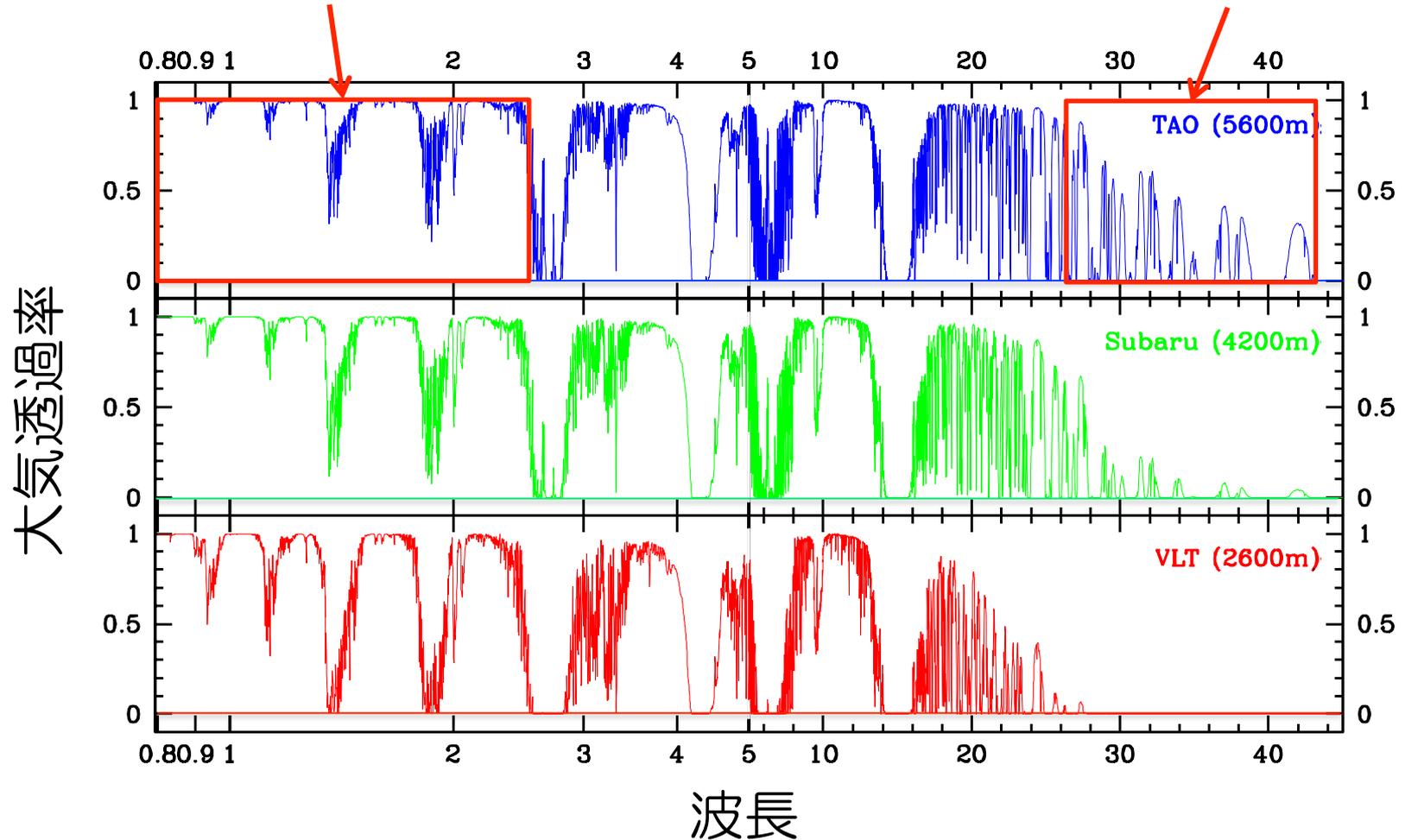


Brief Summary of the TAO project

最高の赤外線観測条件

近赤外線波長域のほぼ全域にわたり
天体からの光が地上に到達する

これまで地上に届かなかった
中間赤外線波長域の光が届く





History & Schedule





6.5m Telescope

TAO 6.5m望遠鏡の概要

□ 最大の特徴：大望遠鏡を5640mに建設

- 赤外線観測性能の追求
 - ✓ 副鏡瞳光学系
 - ✓ エンクロージャ・望遠鏡の換気冷却
- 保守運用の容易さ、作業安全
 - ✓ 第3鏡回転による迅速な装置切替
 - ✓ 主鏡をセルから外さずに再蒸着



□ TAO望遠鏡の仕様概要

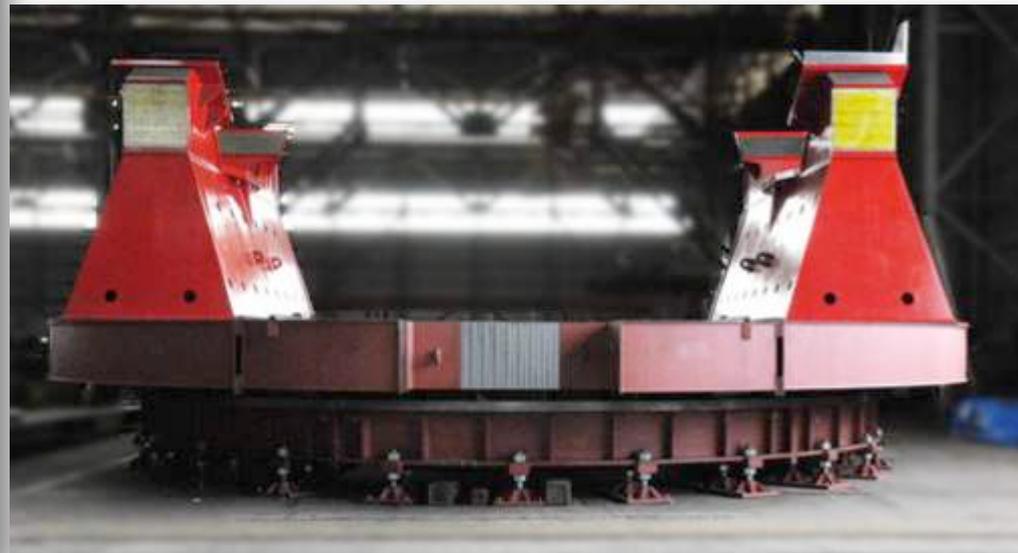
光学系	R-C カセグレン、F/12.2、視野 ϕ 25分角	
	焦点面	ナスミスx2、ベントカセグレンx2
	主鏡	口径6.5m ガラスハニカム軽量鏡
	副鏡	赤外線観測用副鏡(副鏡瞳)
機械系	架台	Tripod-Disk 型経緯台 静油圧軸受、フリクシヨンドライブ



6.5m Telescope

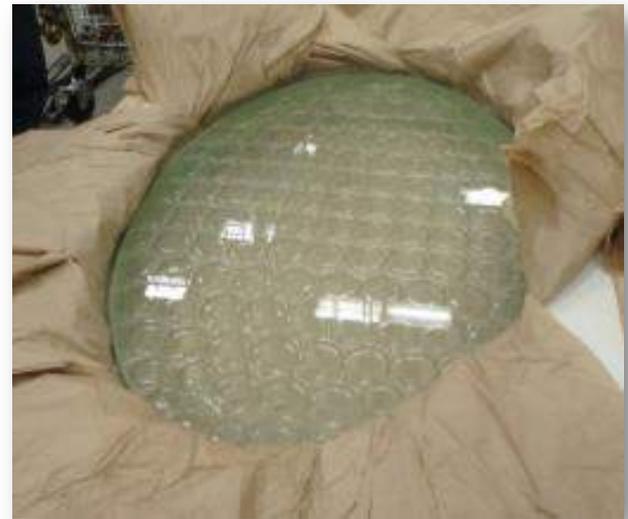
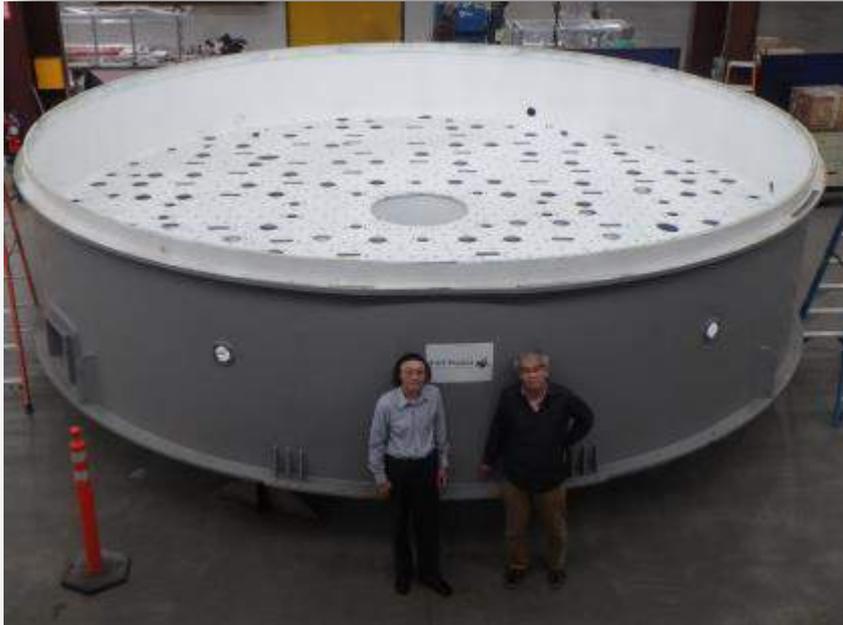
Nishimura CO.,LTD.

TAO 6.5m望遠鏡本体



写真提供

Nishimura CO.,LTD.

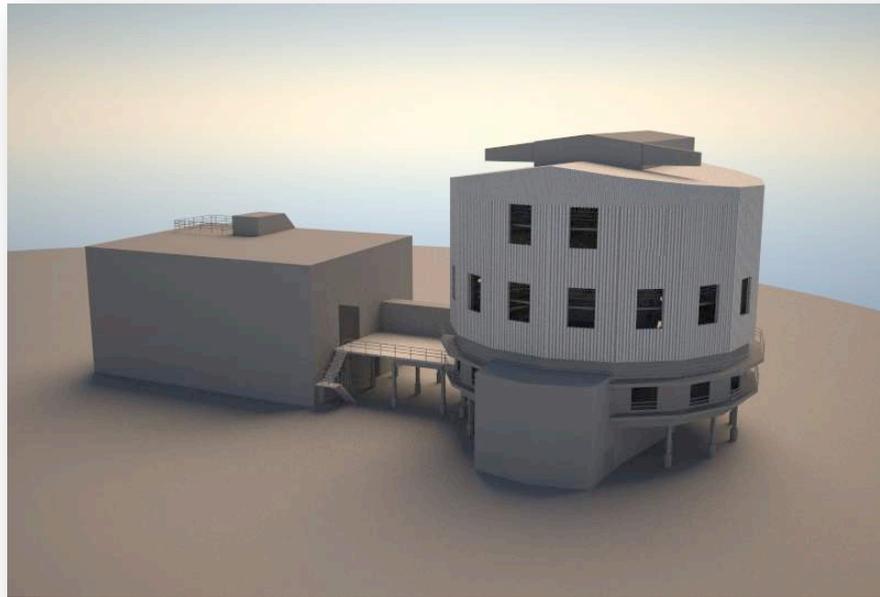


写真提供



本日のお話

- TAO6.5m望遠鏡計画の概要と特徴
- 望遠鏡光学系の能動制御（峰崎）
- ミラーコーティング
- 望遠鏡エンクロージャーの設計と風雪対策



望遠鏡光学系の能動制御

□ 伝統的な小型望遠鏡

- 望遠鏡鏡筒を**堅固**に製作し、自重変形を抑制し主鏡副鏡光軸を保持
- **厚い主鏡**と受動的な支持機構により、主鏡形状と位置を保持

□ 望遠鏡の大型化

- 望遠鏡鏡筒の受動的な重力変形を許す
- 主鏡副鏡の相対位置傾きを保持（セルリエトラス）
- **能動的に副鏡位置傾きを補正して光軸を保持**
- **主鏡の重力変形をアクチュエータで支え、形状を保持**

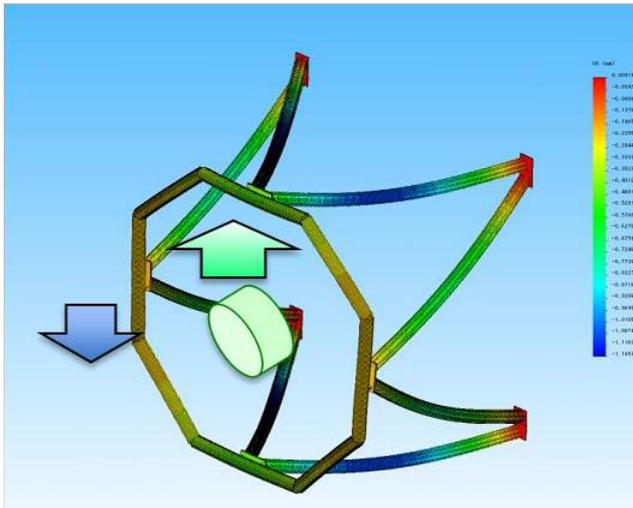


Image Credit : 西村製作所

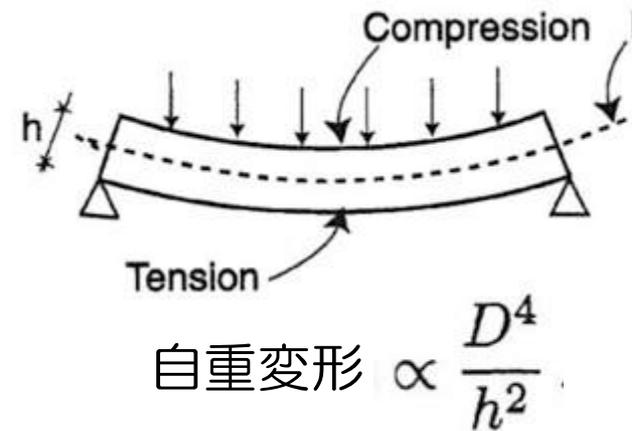


Figure from Pierre Ed. The Design and Concept of Large Optical Telescopes

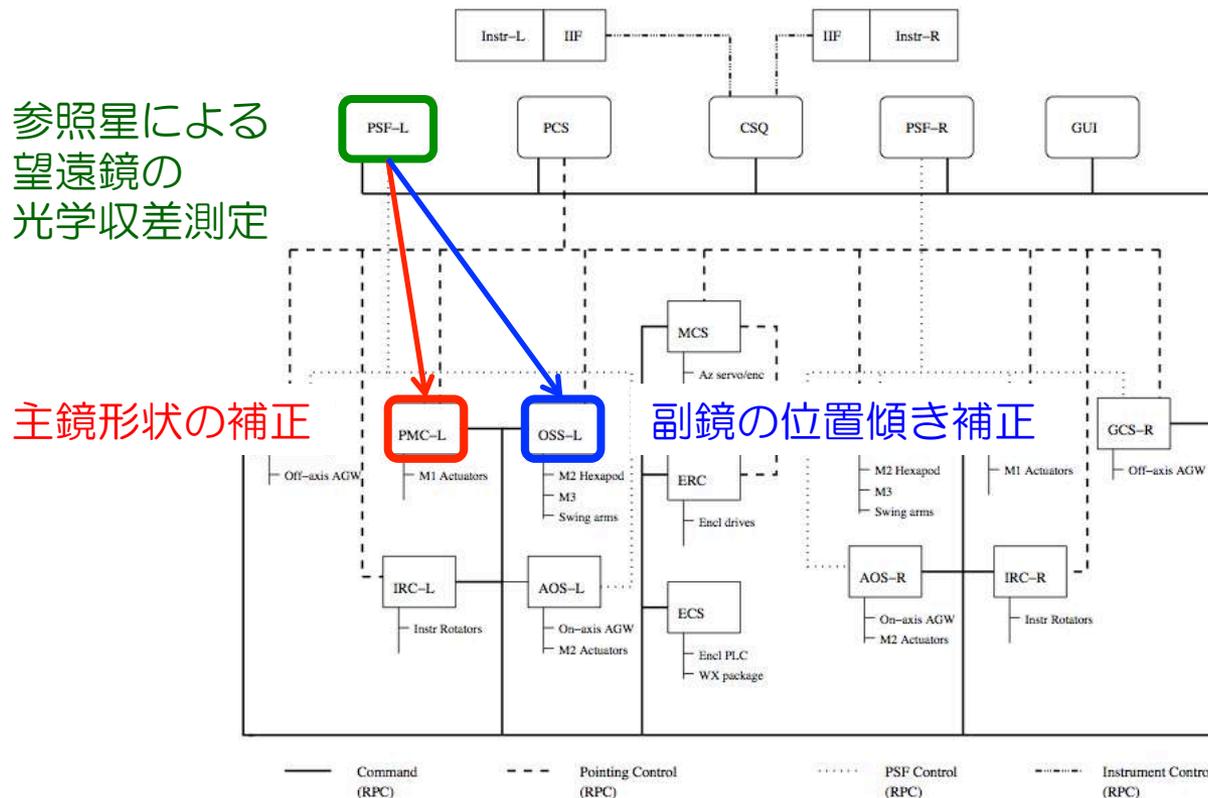


Active Optics

望遠鏡光学系の能動制御

□ 望遠鏡光学系の能動制御

- 能動的に副鏡位置傾きを補正して光軸を保持
- 主鏡の重力変形をアクチュエータで支え、形状を保持
- 望遠鏡を通った参照星の光学収差（波面誤差）を測定、そのデータに基づき副鏡光軸と主鏡形状を補正

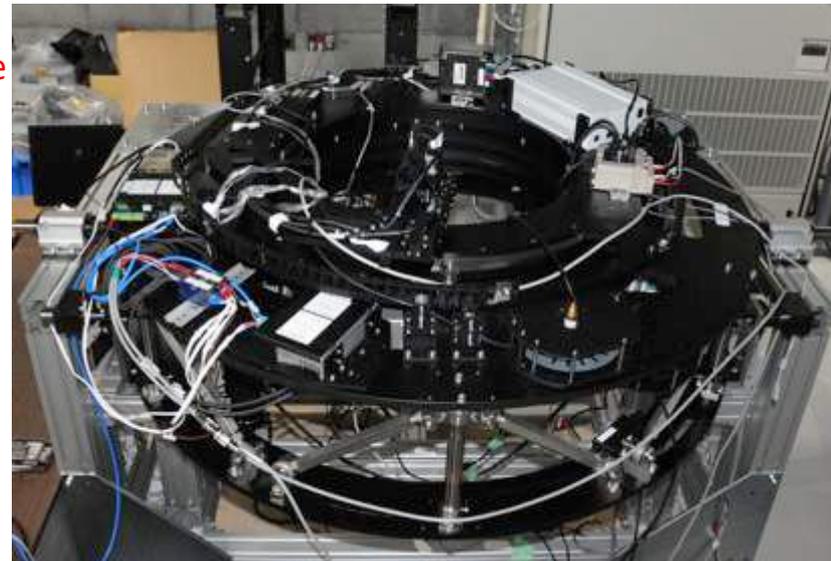
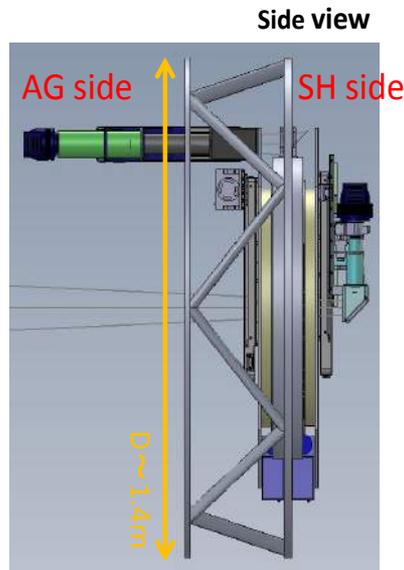
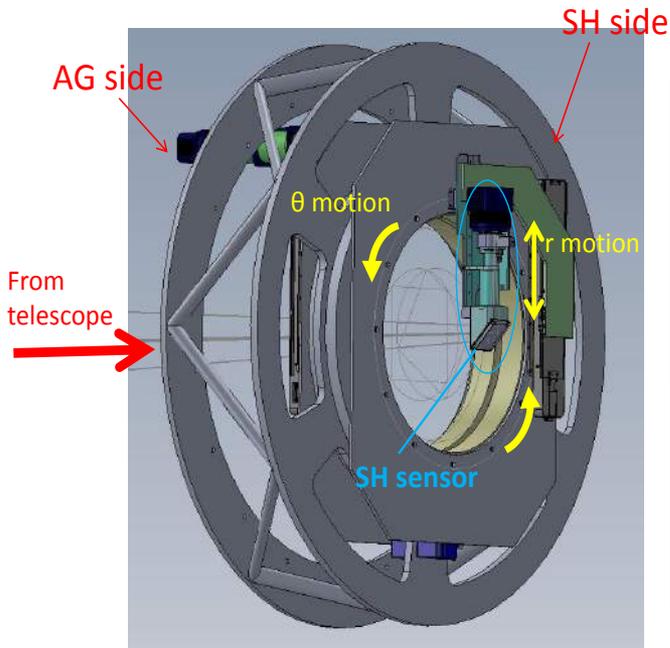


LBT の望遠鏡制御システムブロック図 (Axelrod & de La Pena 2004)

望遠鏡光学系の能動制御

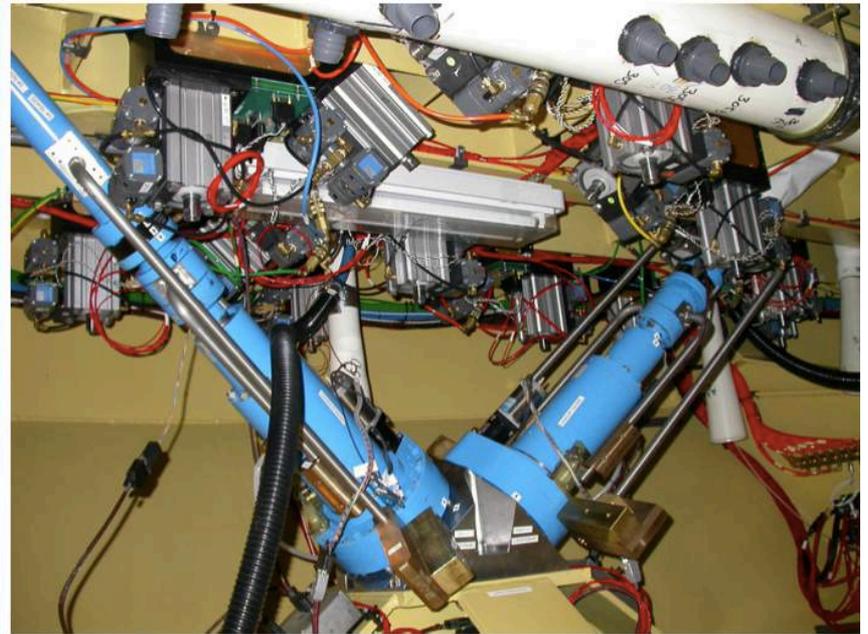
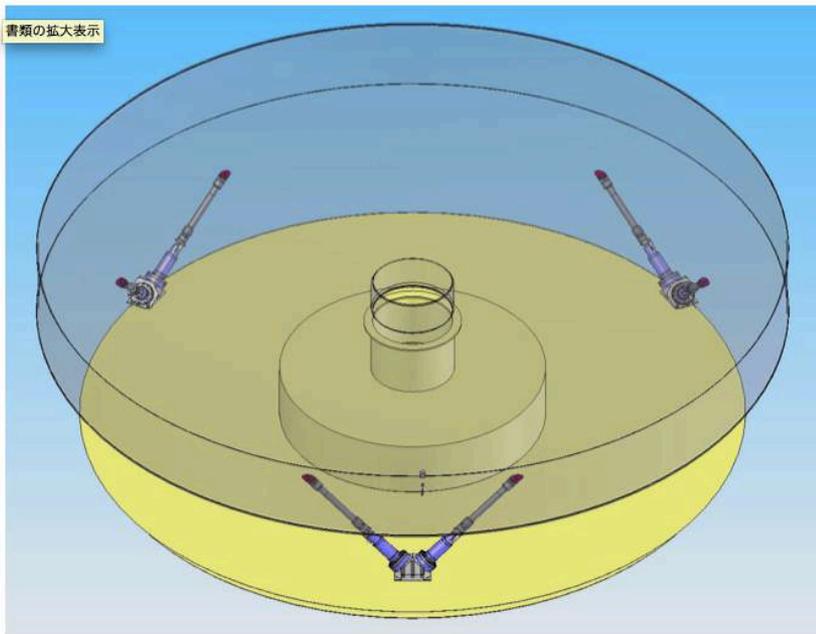
- 観測中の望遠鏡光学系収差測定
 - シャックハルトマンセンサーによる星像波面測定
 - 各焦点に搭載、オフセットプローブを備える
 - 焦点調整、コマ収差 → 副鏡位置調整
 - 高次収差 → 主鏡支持機構調整

LBTの測定例



6.5m主鏡の能動支持機構

- Truncated hexapod 型固定点アクチュエータ
 - ・主鏡の位置決め、調整された光軸の維持

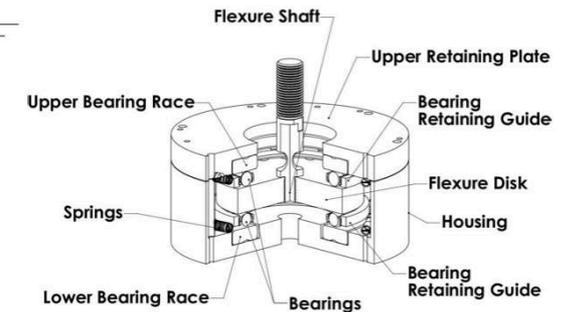
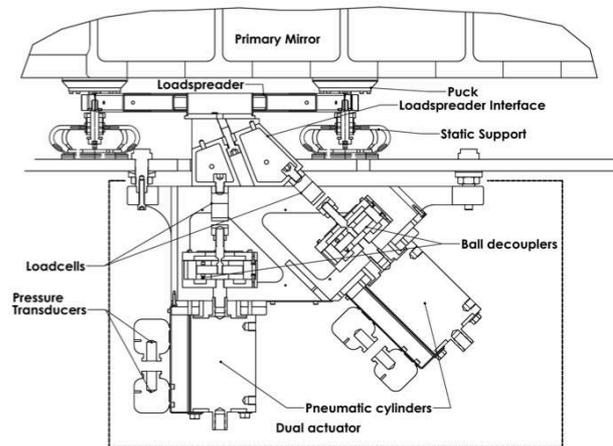
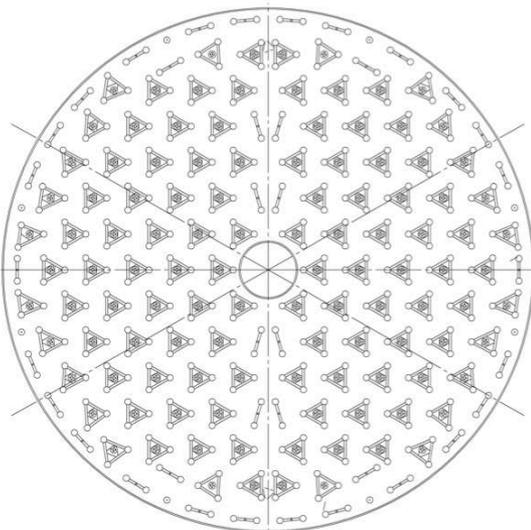


固定点アクチュエータの構造（写真は LBT のもの; Ashby et al. 2008）

6.5m主鏡の能動支持機構

□ 空力アクチュエータによる能動支持

- 重力変形の補償、鏡面形状の制御；支持点数～100



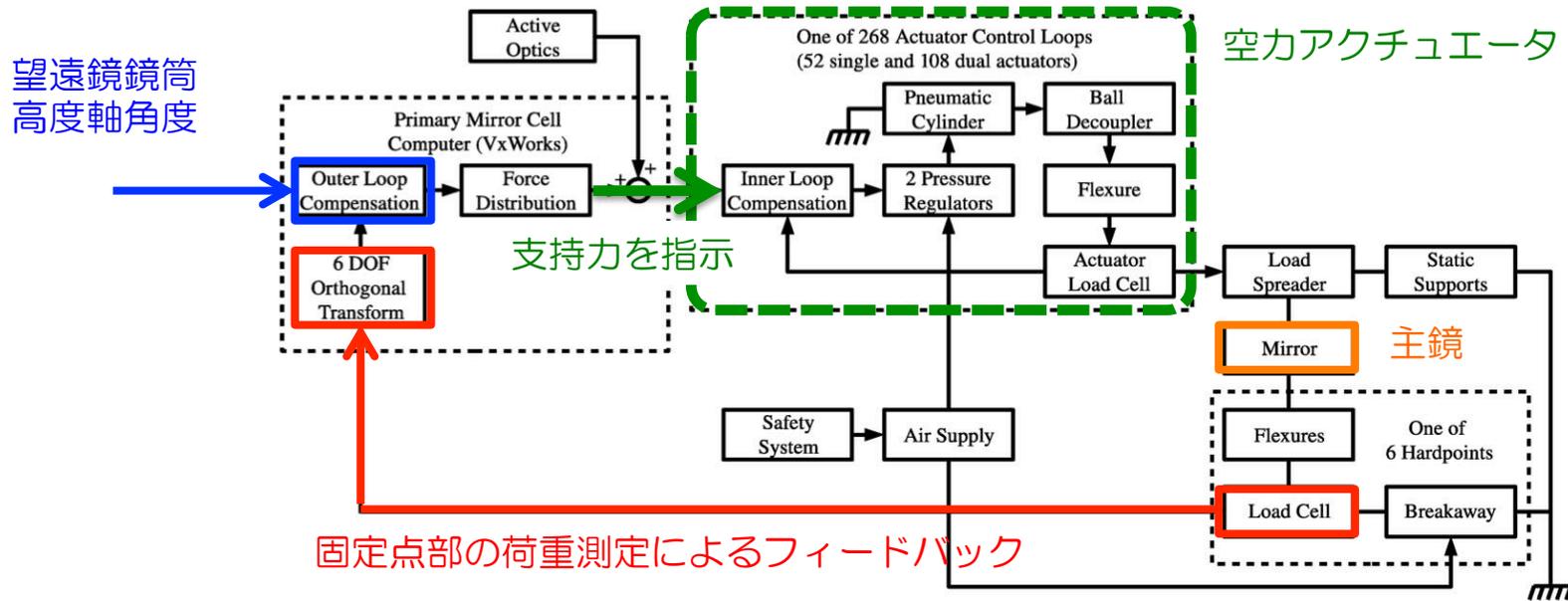
空力アクチュエータの配置（左）と支持構造
（中、右；図は LBTのもの; Ashby et al. 2008）



Active Optics

6.5m主鏡の能動支持制御

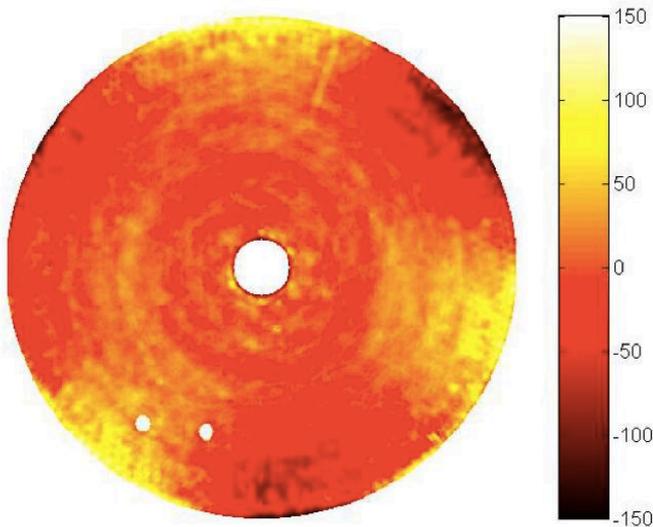
- 固定点アクチュエータに荷重がかからないよう、空力アクチュエータの支持力を制御



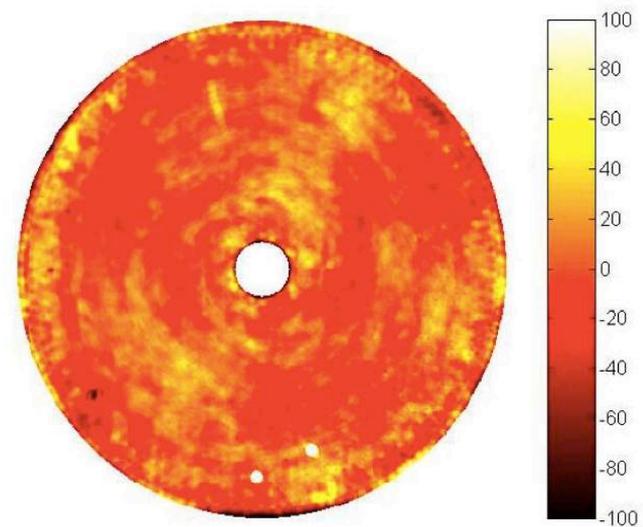
制御ブロック図 (LBT のもの; Ashby et al. 2008)

6.5m主鏡の能動支持制御

- 観測中に天体光を使って主鏡鏡面形状を測定、形状誤差を補正するよう空力アクチュエータの支持力を制御



主鏡研磨後形状：RMS~32nm



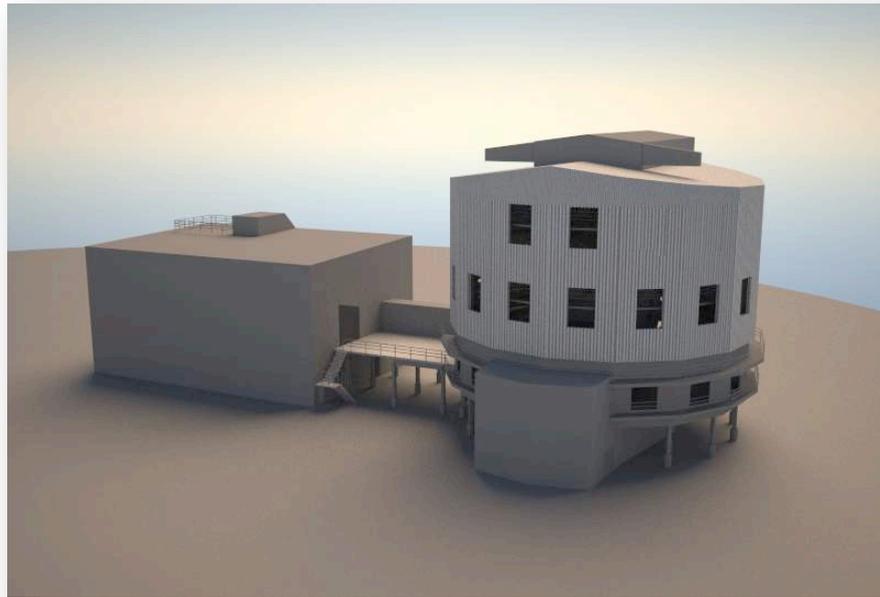
アクチュエータ支持力調整後：RMS~19nm



TAO Project

本日のお話

- TAO6.5m望遠鏡計画の概要と特徴
- 望遠鏡光学系の能動制御
- ミラーコーティング（高橋）
- 望遠鏡エンクロージャーの設計と風雪対策





Mirror Coating for Telescope

成膜装置の目的

- 観測効率をあげるために、**鏡面反射率を高く**する。
(損失・背景放射を低減させる。)
- 定期的に反射面を再コーティングすることで、**長期的に高反射率を保つ**。
(観測効率を高める。)



Magellan Telescope



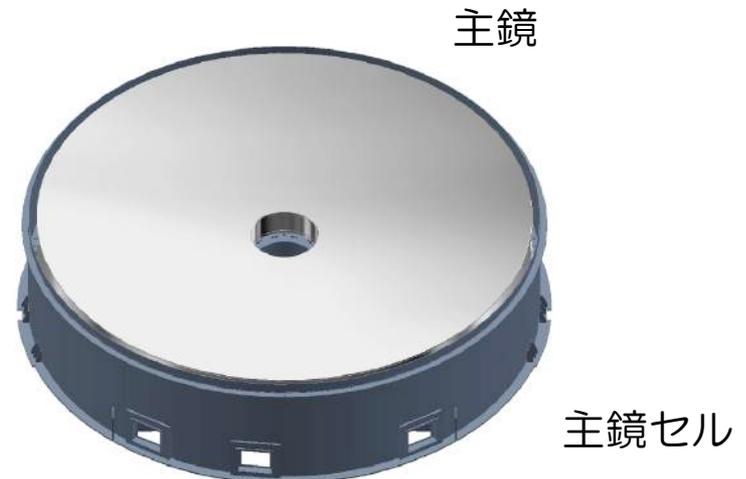
Gemini North



Mirror Coating System of TAO 6.5m

TAO特有の条件

- **広い波長範囲**（可視～中間赤外線：0.3～40um）に対応すること。
- 運用は高高度・低気圧環境での動作を保障。
- 設置環境の点から、作業の安全性・簡便性を考慮したもの。
- **オールインワン**（他への移動や機材・物資の搬入出を最小限にすること。）
- **副鏡・第3鏡の成膜**にも対応すること。
- **主鏡をセルから出すことなく成膜**を行うこと。
 - **主鏡セルがチャンバーの一部**を兼ねる。
 - **蒸着は下向き！**





Method of Mirror Coating

成膜方法

□ 蒸着

- 真空中で蒸着材料を加熱することで気化あるいは昇華させ、それを基板表面に付着させることで薄膜を形成する技術
- **Conventional (成熟した技術)**
- 一様性のために**大きなボリューム**が必要
- 多層膜コートには複数の蒸発源が必要
- 蒸発源の配置（スプレーパターン）の計算が必要
- 蒸着材料の保持・加熱方法：「ボート式」「フィラメント式」…

□ スパッタリング

- 高い真空中におかれたターゲットにイオン化させた希ガスを衝突させ、ターゲット原子をはじき飛ばすことで、基板に薄膜を成長させる技術
- **チャンバーがコンパクト**
- **多層膜成膜**が可能（容易）
- 多様な手法：複極・マグネトロン、対向ターゲット、ミラートロン、イオンビーム、etc..



Mirror Coating for Telescope

アイディアインフォメーション



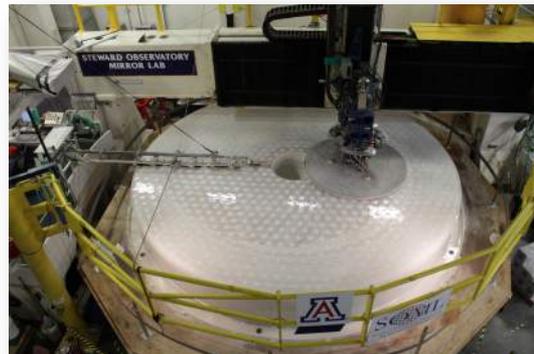
□ マゼラン望遠鏡

- PMCがチャンバーの一部
- Inflatable sealを使った真空分離
- カート（移動昇降台車）



□ すばる望遠鏡

- 蒸着システム概念設計
- スプレーパターン
- プレウェットフィラメントの製作
- フィラメントの配置
- フィラメントの取付端子
- 運用・作業手順
- 衛生・安全管理



□ MMT, LBT

- 山頂への運搬
- 付帯機器の仕様

□ アリゾナ大学ミラーラボ

- PMCコンタクト
- 洗浄時の条件

TAOでは蒸着を選択



Mirror Coating System of TAO 6.5m

蒸着に必要な設備

□ 蒸着装置

- 金属蒸発装置
- イオンボンバード装置
- 電源（高電力～500kW）

□ 蒸着釜

- チャンバー上部
- チャンバー下部
- 真空設備
 - ：ロータリーポンプ
 - ：クライオポンプ（液体窒素循環装置）
 - ：分子ターボポンプ

□ 洗浄（蒸着面剥離）設備

- 薬剤、洗浄水噴射装置
- 洗浄液混合タンク
- 廃液処理設備
- コンプレッサー
- 配管（原水、純水、薬品）

□ 自走台車

観測運用棟天井に設置

主鏡セル (from アリゾナ)

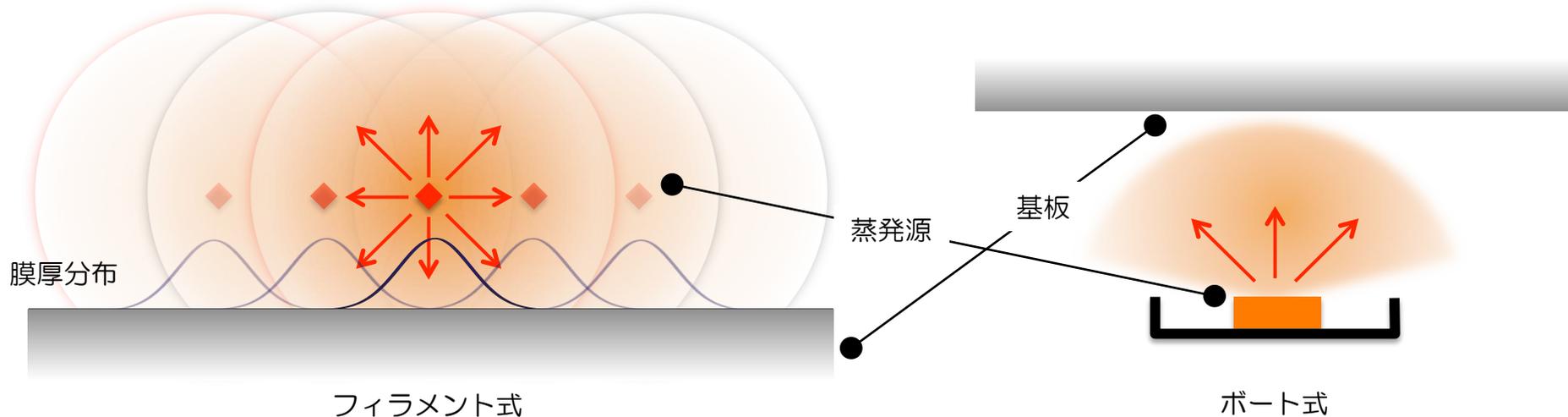
一体化 (@チリ)



Mirror Coating System of TAO 6.5m

フィラメント

- 基板に乗せる金属を予めフィラメントに含浸しておく（プレウェットイング）
- 基板が上下どちらでも蒸着可能
- プレウェット量とスプレーパターンによって蒸着膜の厚みをコントロールできる
- 大量の金属の含浸は難しい（ボート式に比べて）
- フィラメントの保持方法に工夫が必要

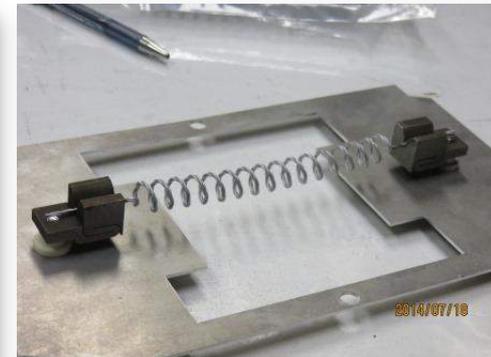




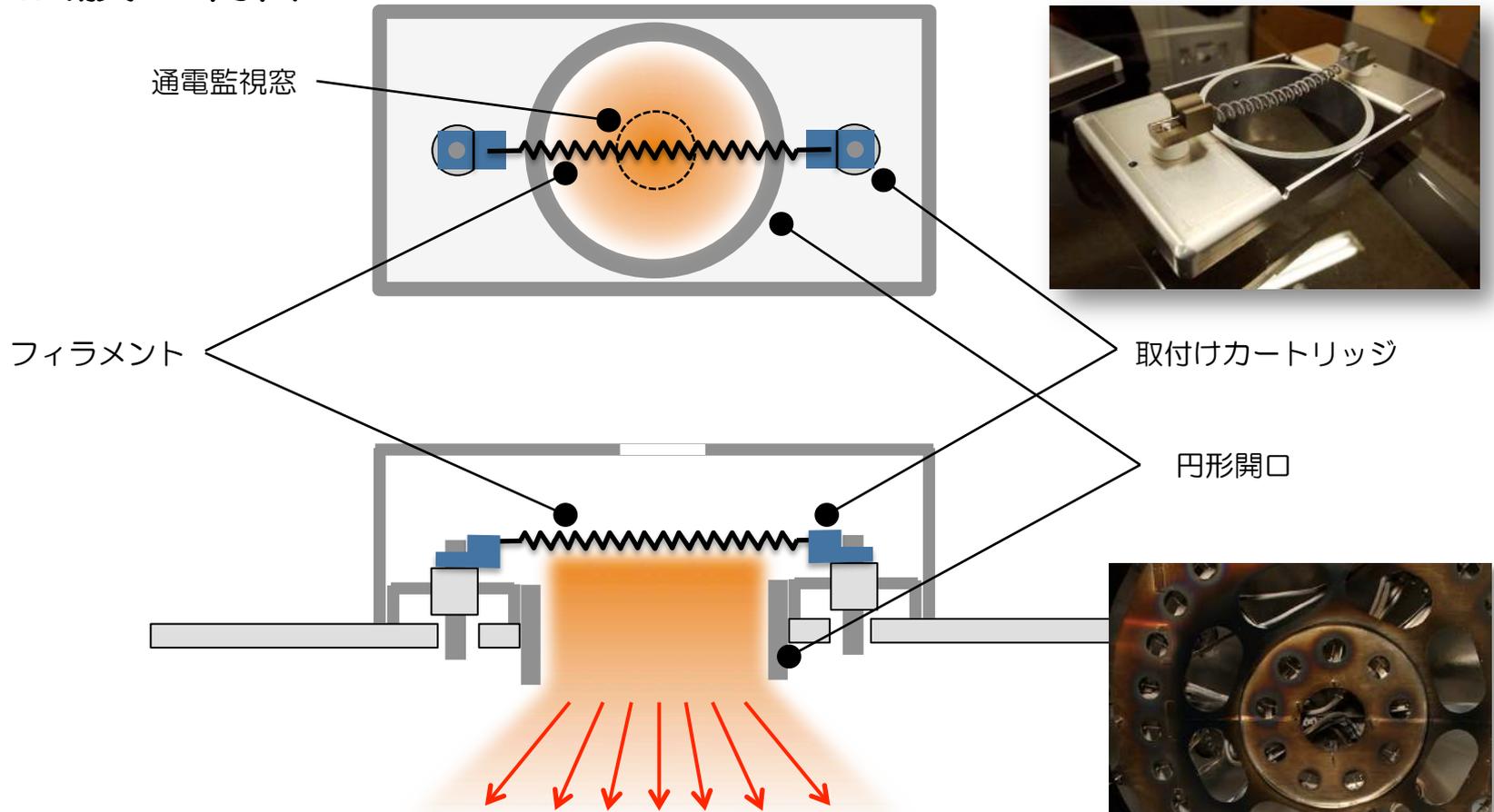
Mirror Coating System of TAO 6.5m

TAO用フィラメントの特徴

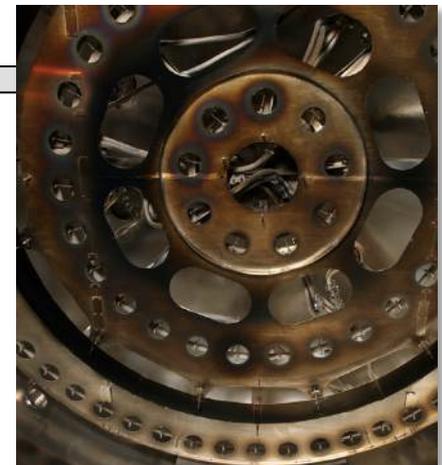
- 3本のタングステン撚り線
- 「緩やかに」巻くことで含浸量を増大： $>10-15\%$
- アルミ含浸量は元の $\sim 80\%$ をプレウエット
- **タングステンネット**を巻くことで、
 - 均一な含浸→理想的なスプレーパターンの実現
 - 液適（液塊）の落下を防止
- ワンタッチ取付けカートリッジ
 - 確実なフィラメントの**固定**を実現
 - **確実な導通**を実現
 - 作業性の向上



成膜の制御



- 円形開口でスプレーパターンを制御。
- 複数フィラメントユニットの配置と鏡面までの高さをコントロールし、広範囲の一様な成膜を行う。
- スプレーパターンを制御する専用設置ユニット。
- トータル155本



開口配置の例
(NTT Telescope)

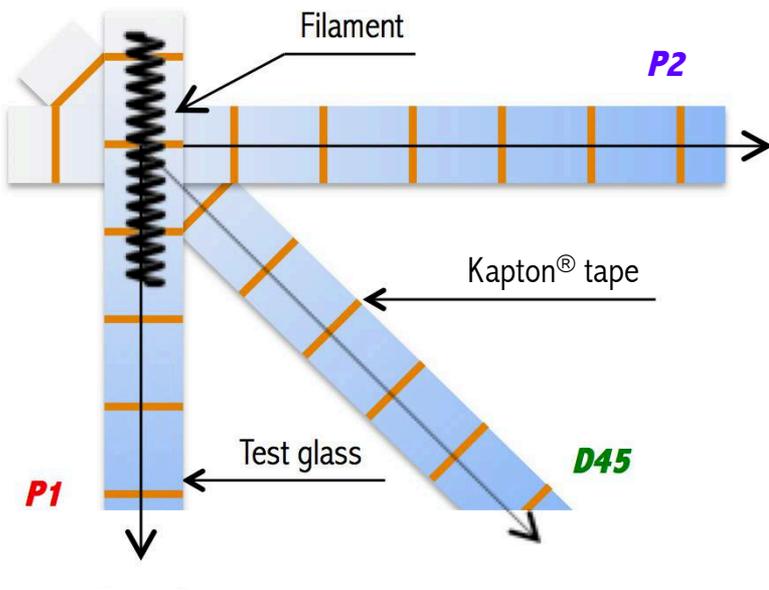


Mirror Coating System of TAO 6.5m

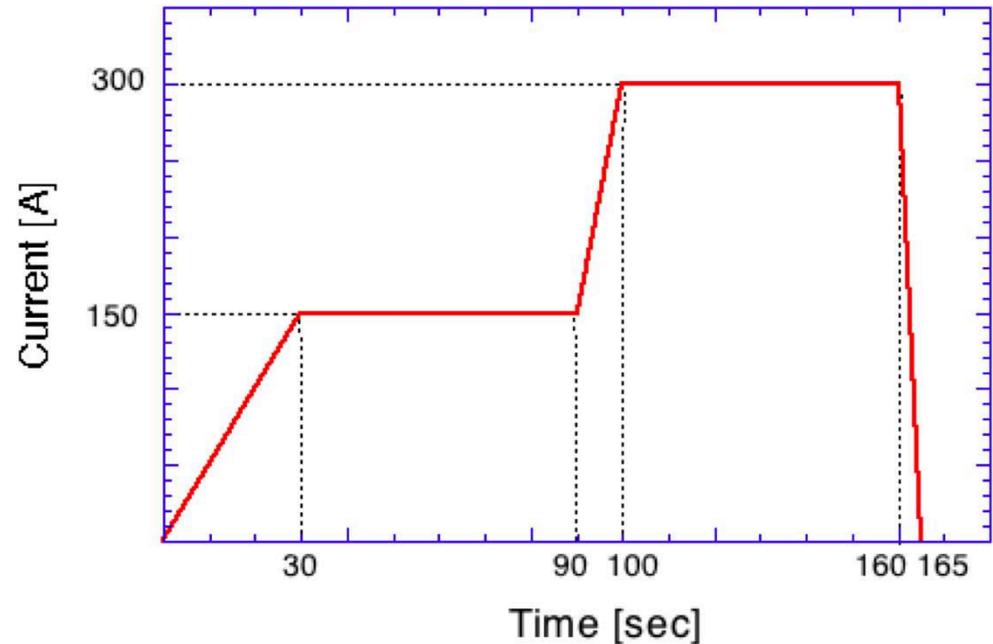
スプレーパターンテスト（基礎編）

設定・条件

- 単一フィラメント、マスクなし
- フィラメントと蒸着面との距離：530mm
- 真空度： 1.5×10^{-6} torr ← nominal
- 蒸着前のAlの染み込み量：1.186g, 蒸着後残存量：0.03g.
→ 97.5% が蒸発.



▲蒸着テストのセッティング



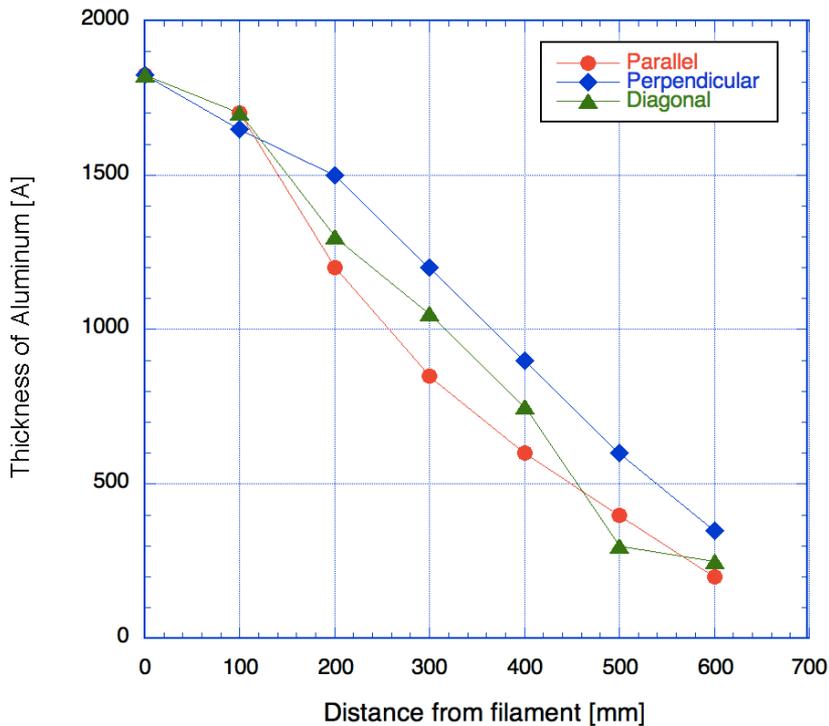
▲付加電流パターン



Mirror Coating System of TAO 6.5m

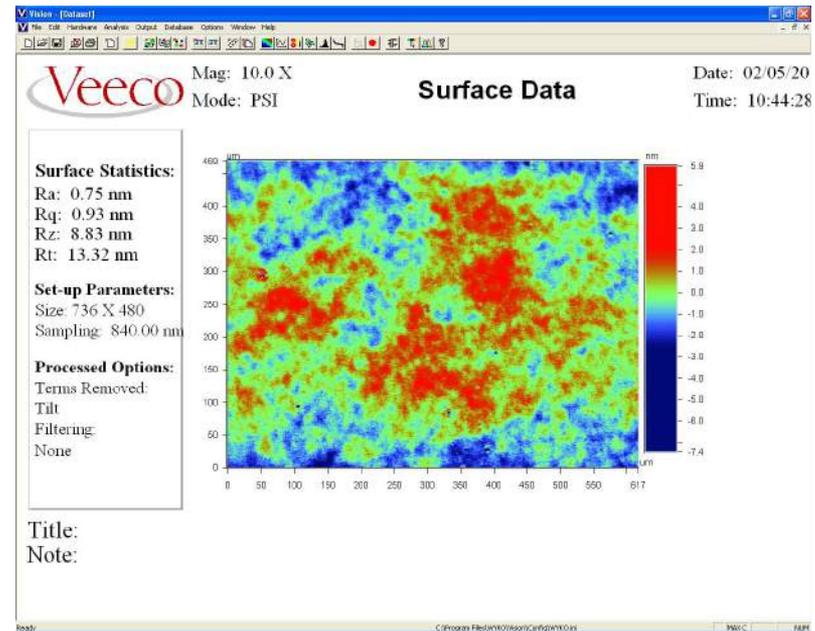
スプレーパターンテスト（基礎編）

- あらゆる方向に均一に分布
- 仕様を満たす面精度



Single filament pattern

Ra = 0.75nm, Rz = 8.8nm



サンプルミラーの膜厚測定結果



Mirror Coating System of TAO 6.5m

スプレーパターンテスト（実用編）



▲複数のフィラメントによるスプレーパターンテスト
(in 4500mmチャンバー：三光精衡所@つくばみらい工場)

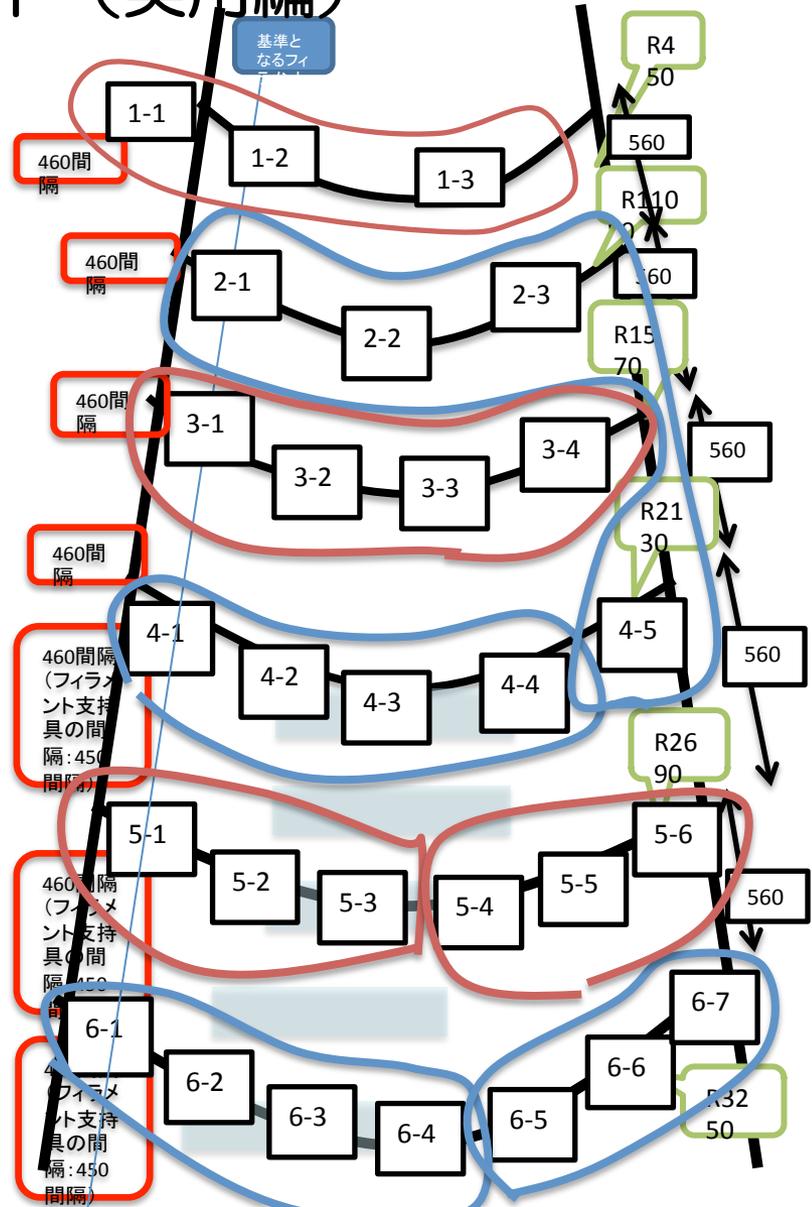


Mirror Coating System of TAO 6.5m

スプレーパターンテスト (実用編)

設定・条件

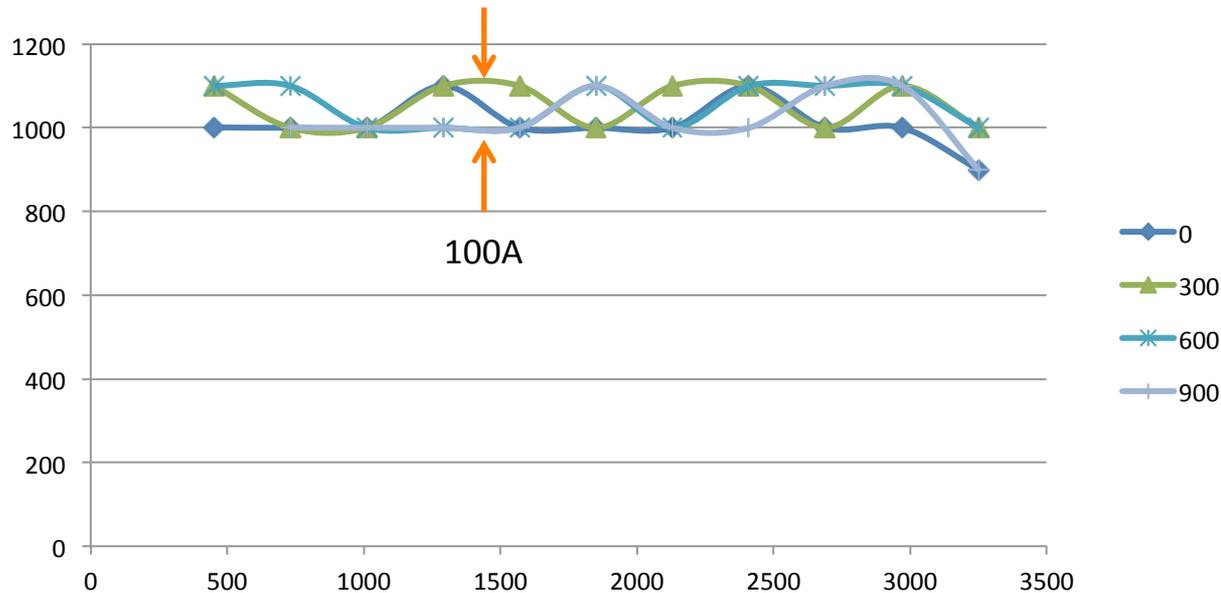
- フィラメント配置：右図
- フィラメント本数：26本
- フィラメントと蒸着面の距離：630mm
- アルミ量（平均）：0.873g
- 蒸発したアルミ量：0.826g (95.7%)
- 印加電流：150→300A
- 電源：2系統





Mirror Coating System of TAO 6.5m

スプレーパターンテスト（実用編）



□ 結果（膜厚分布）

- 膜厚のコントロールはほぼOK！
- 動径方向の不均一はフィラメントの位置を反映
→ 鏡面とフィラメントの間隔を大きくすることで解消

□ 今後の実験で最適解を見つける.

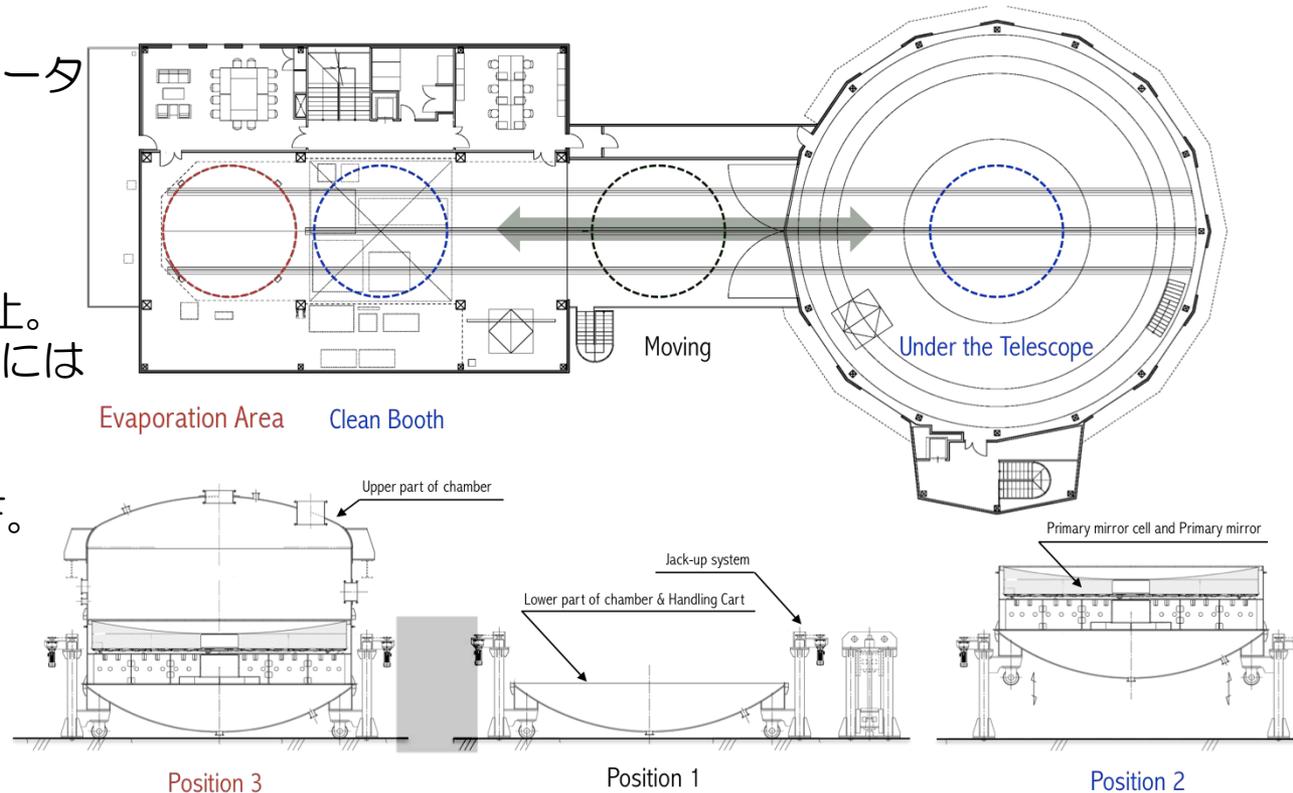
- フィラメントと蒸着面の距離
- フィラメントの数
- フィラメントの配置
- マスクの形状
- アルミの飛ばす量（印加時間）
- イオンボンバードの高さ



Mirror Coating System of TAO 6.5m

移動昇降台車

- 望遠鏡下で主鏡セルをセットし、洗浄エリア、蒸着エリアへと運ぶ専用台車。
- 望遠鏡エンクロージャー床と観測運用棟2Fに敷かれた直線レール上を移動。
- 台車はチャンバー下部と一体。
- 最大定格付加重：40ton、最大負荷荷重：64ton
- 4つの独立した昇降モータ
 - 同期して動くように制御
 - 移動量（4つの高さの差）がある範囲を越えると自動的に停止。
 - 独立に高さが可変
- 2つの独立した移動モータ
- 停止位置
 - 望遠鏡下
 - 蒸着エリア
 - 洗浄エリアにて位置検出し自動停止。
- ジャッキアップ位置床には重量センサー
- ハンドセットで動作。
- 異常時は自動電源OFF。

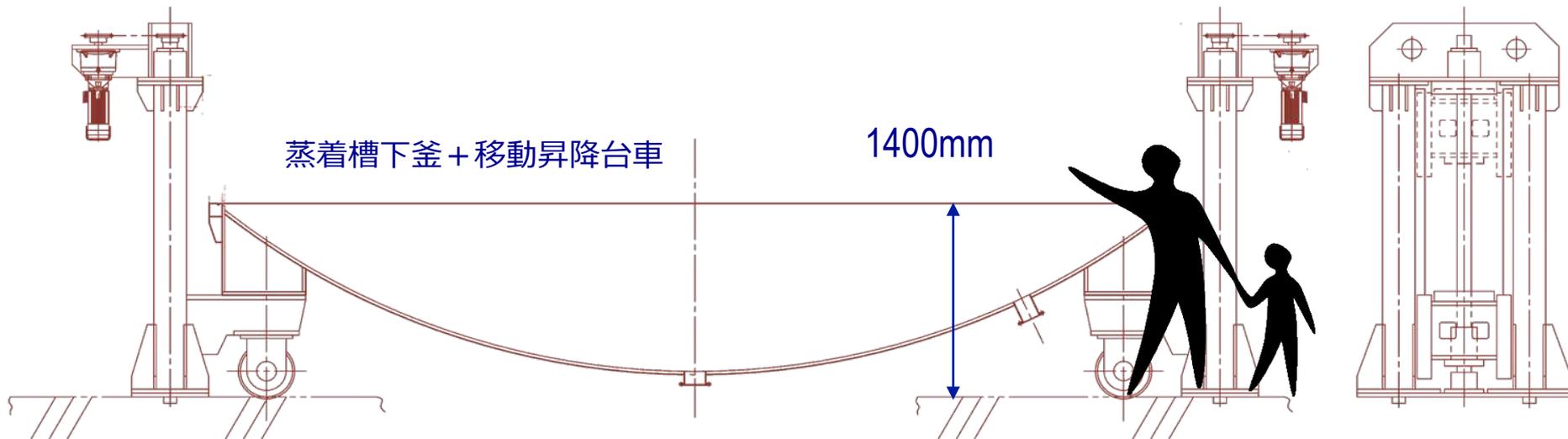




Mirror Coating System of TAO 6.5m

Position 1 : Traveling w/o PMC

- ❖ チャンバーは 3 層構造.
- ❖ **Infratable seal**によって、高真空側（上部）と低真空側（下部）に分かれる.
- ❖ 蒸着上釜の中に、蒸着装置とイオンボンバード装置が設置される.



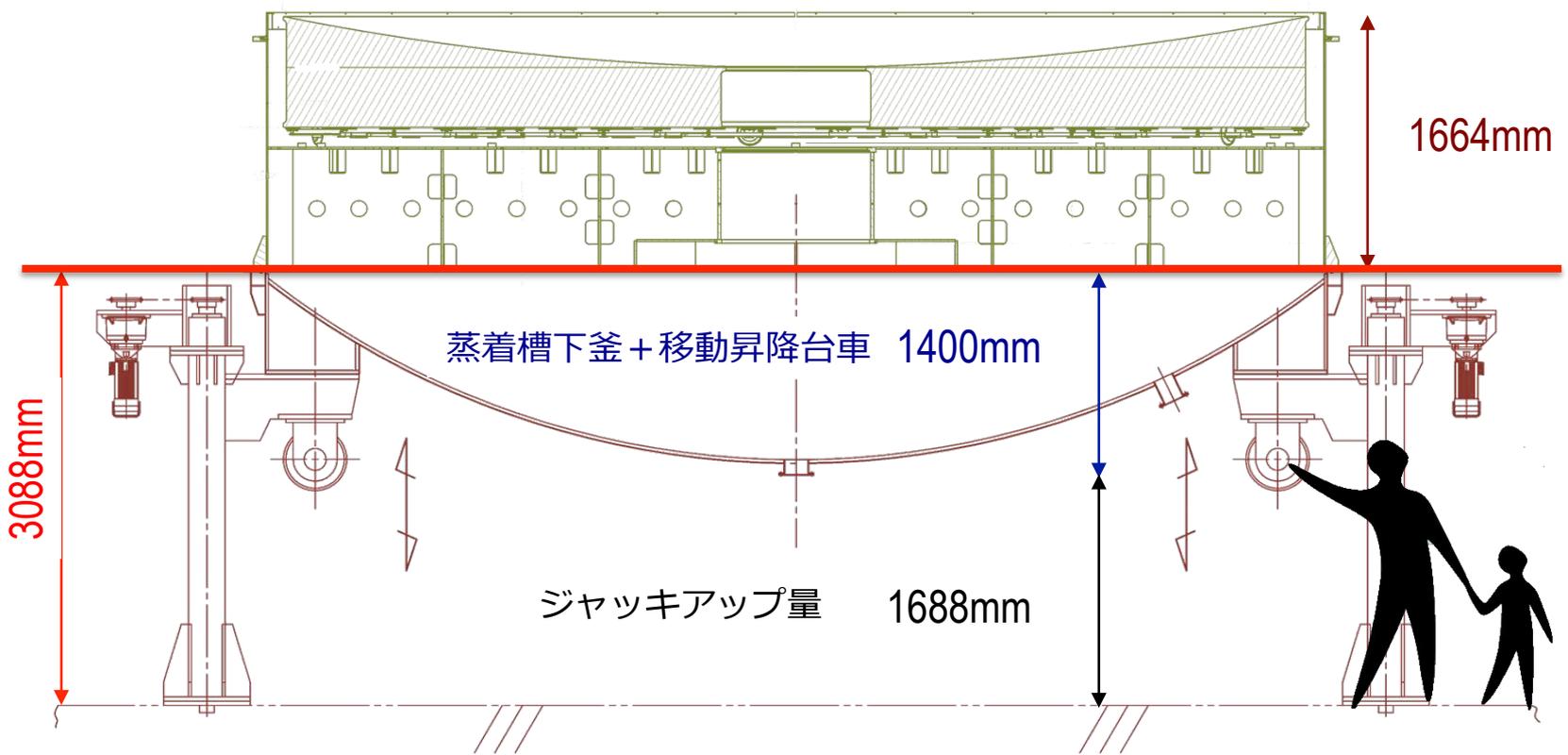


Mirror Coating System of TAO 6.5m

Position 2 : receiving PMC & washing process

最大ジャッキアップ量 > 1688mm

主鏡セル

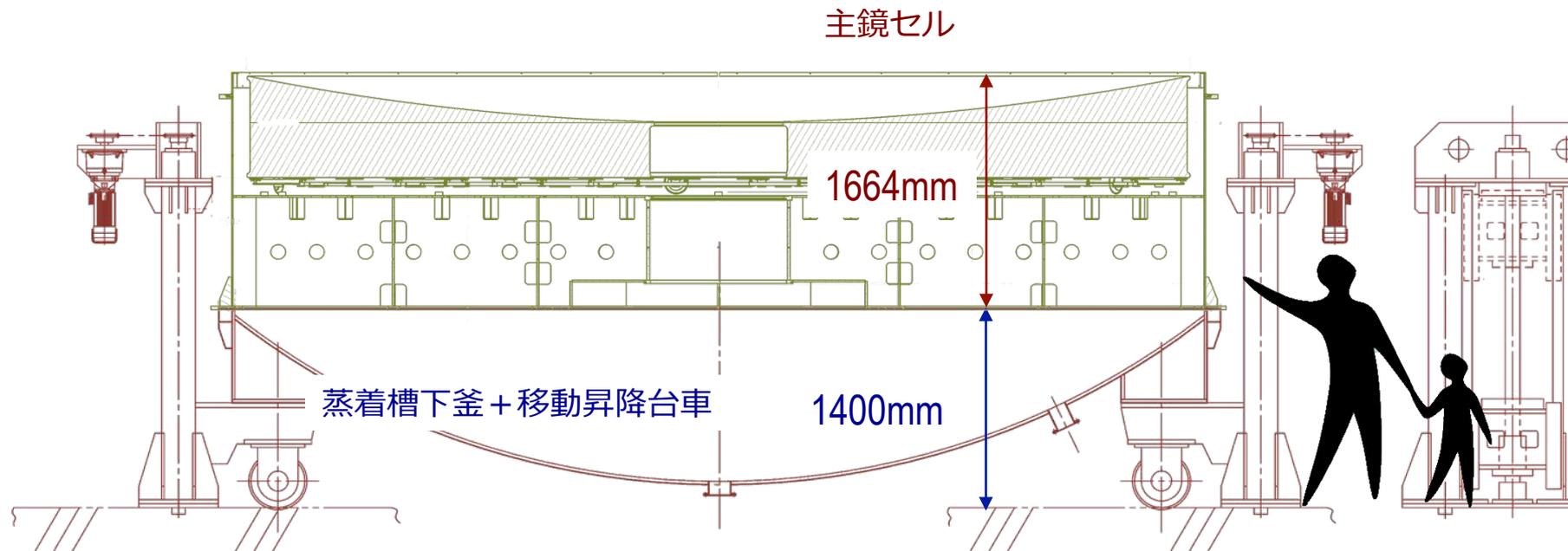




Mirror Coating System of TAO 6.5m

Position 1 : Traveling w/ PMC

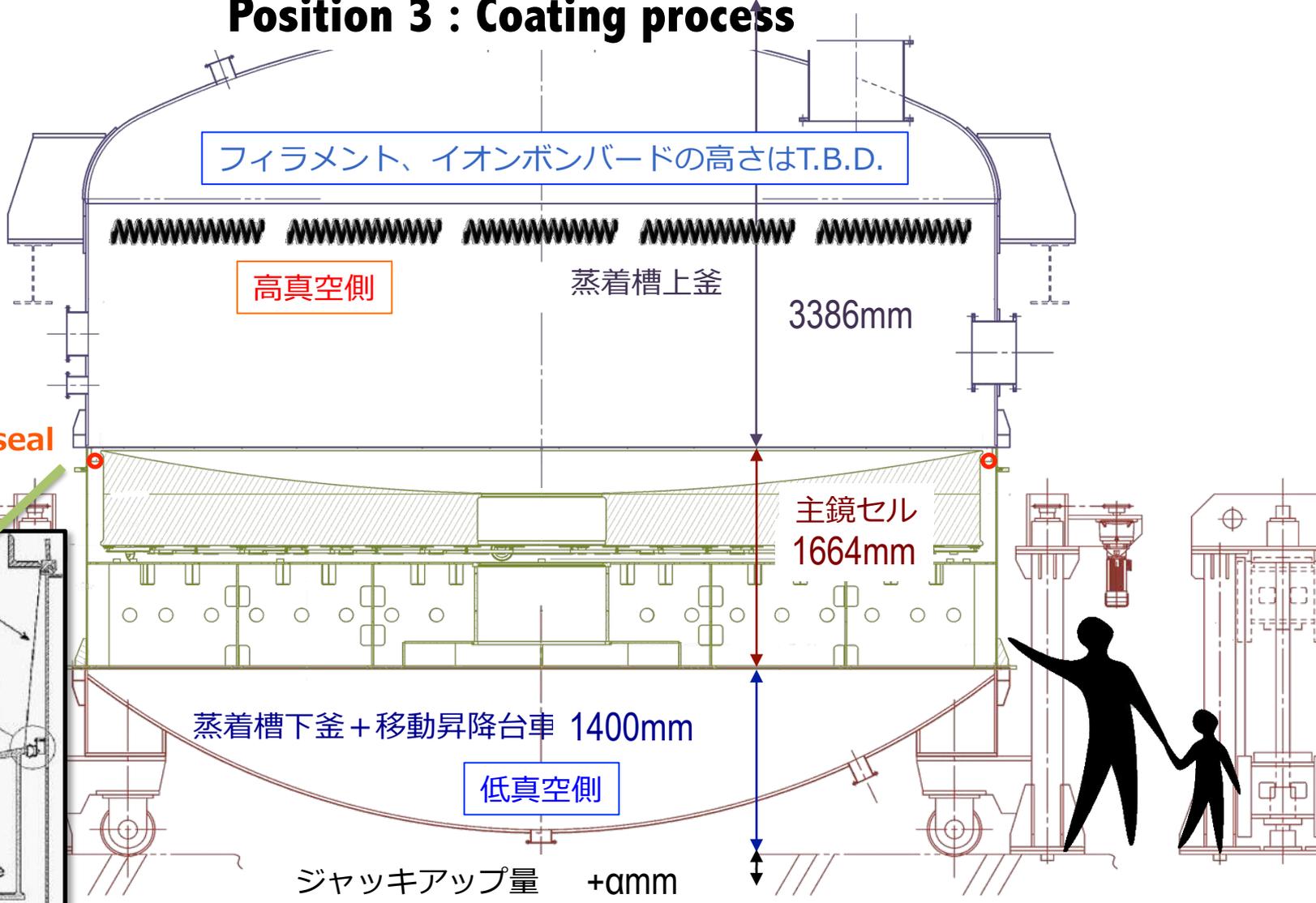
ドームおよび観測運用棟の入口の高さ > 3064mm



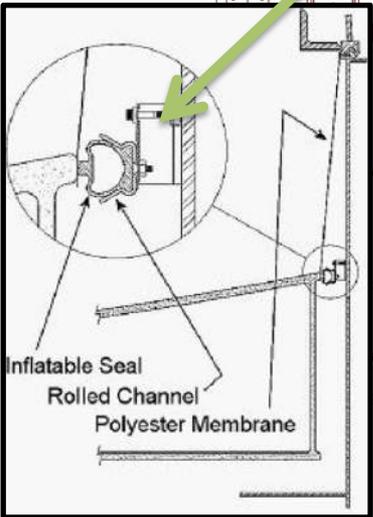


Mirror Coating System of TAO 6.5m

Position 3 : Coating process



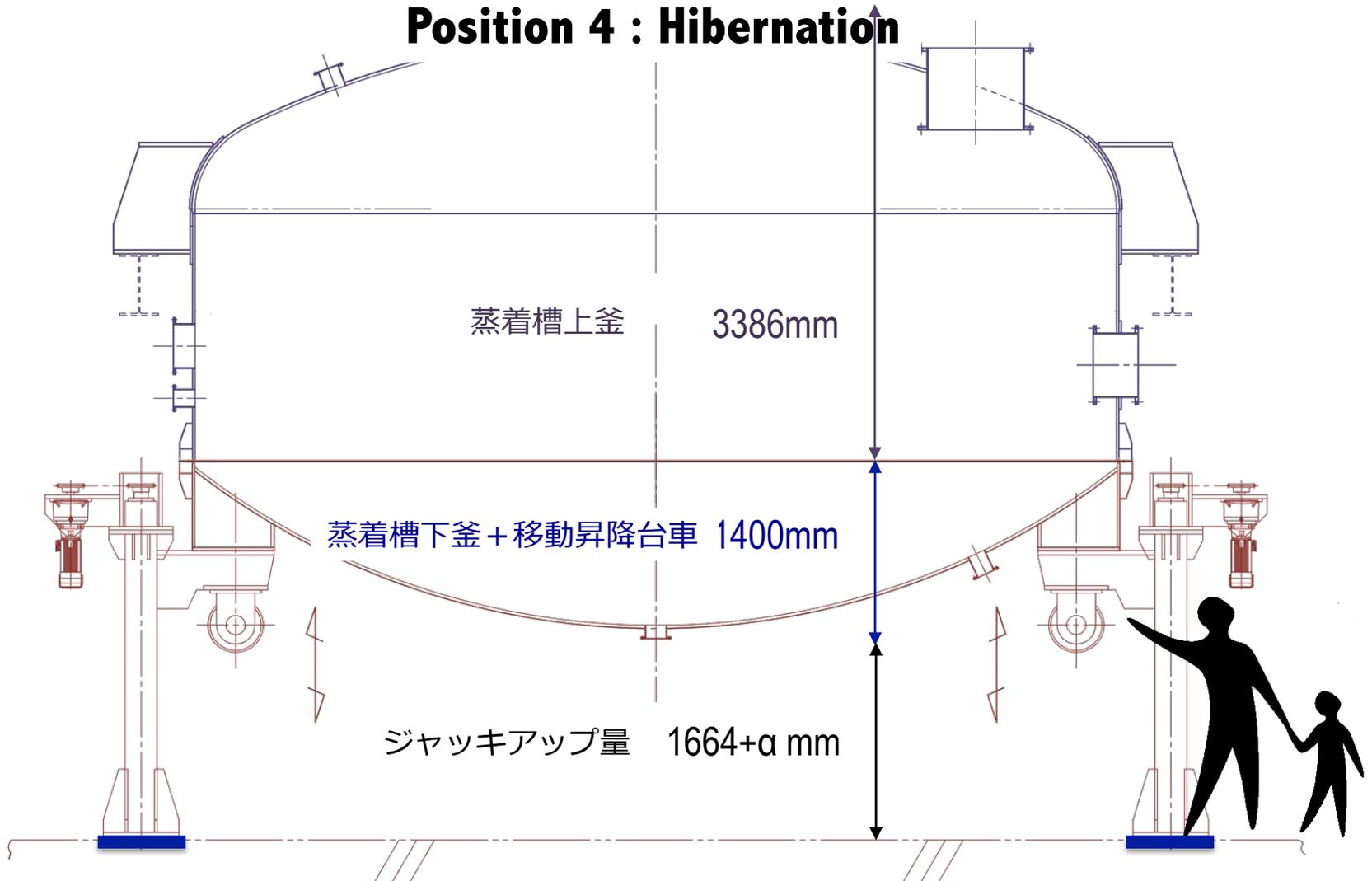
Inflatable seal





Mirror Coating System of TAO 6.5m

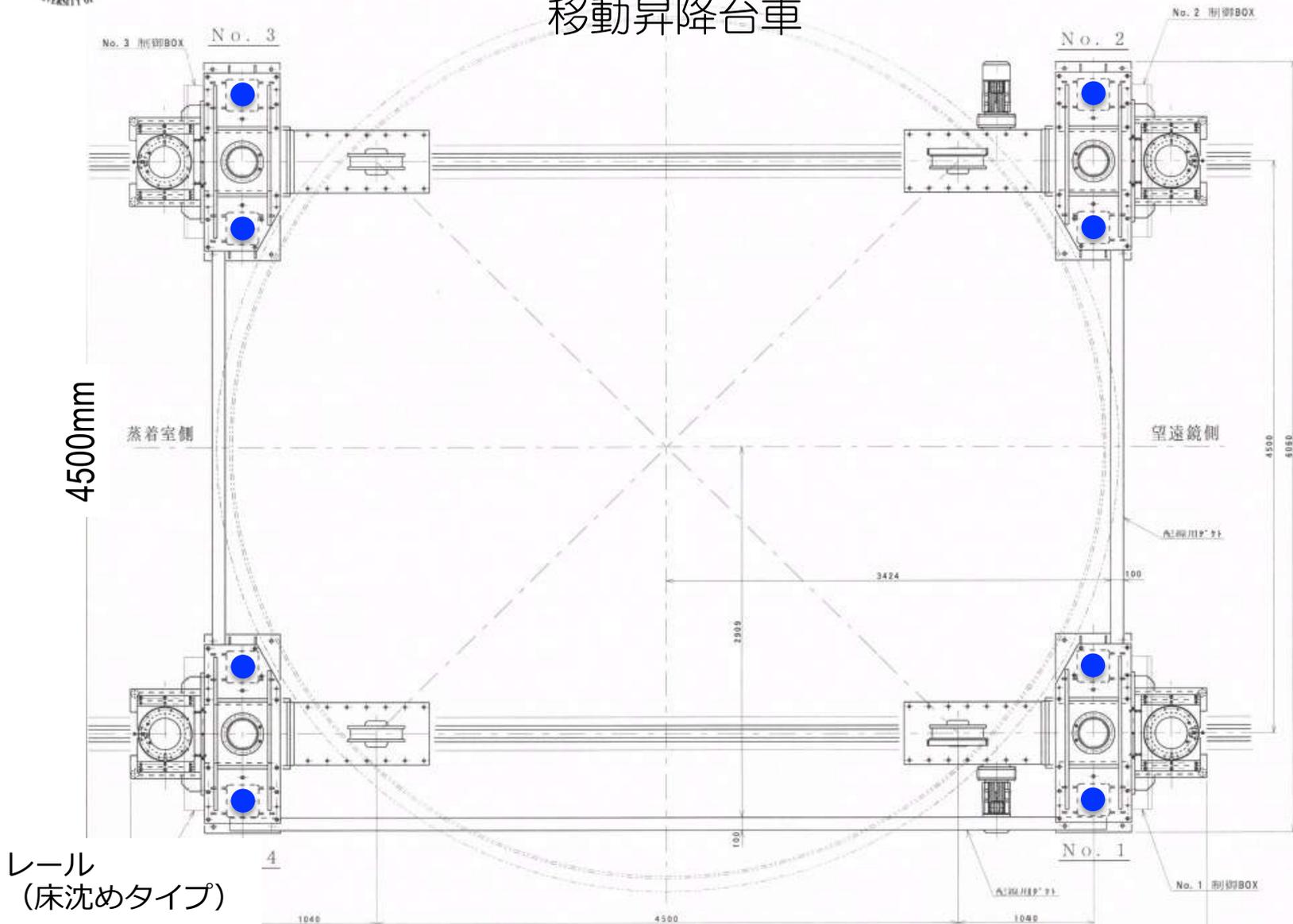
Position 4 : Hibernation



床に埋め込まれた負荷センサーにより、常にジャッキにテンションがかかるようにする。

Mirror Coating System of TAO 6.5m

移動昇降台車



床に埋め込まれた重量センサー（●）により、常にジャッキにテンションがかかるようにする。



Mirror Coating System of TAO 6.5m

移動昇降台車

- 最大定格付加重：40ton、
- 最大負荷荷重：64ton
- 4つの独立した昇降モータ
 - 同期して動くように制御
 - 移動量（4つの高さの差）がある範囲を越えると自動的に停止。
 - 独立に高さが可変
- 2つの独立した移動モータ
- 停止位置
 - 望遠鏡下
 - 蒸着エリア
 - 洗浄エリアにて位置検出し自動停止。
- ジャッキアップ位置床には重量センサー
- ハンドセットで動作。
- 異常時は自動電源OFF。



2015年3月納品済み



Mirror Coating System of TAO 6.5m

移動昇降台車



荷重計制御盤



ハンドセット



走行モータ制御盤

上昇の様子

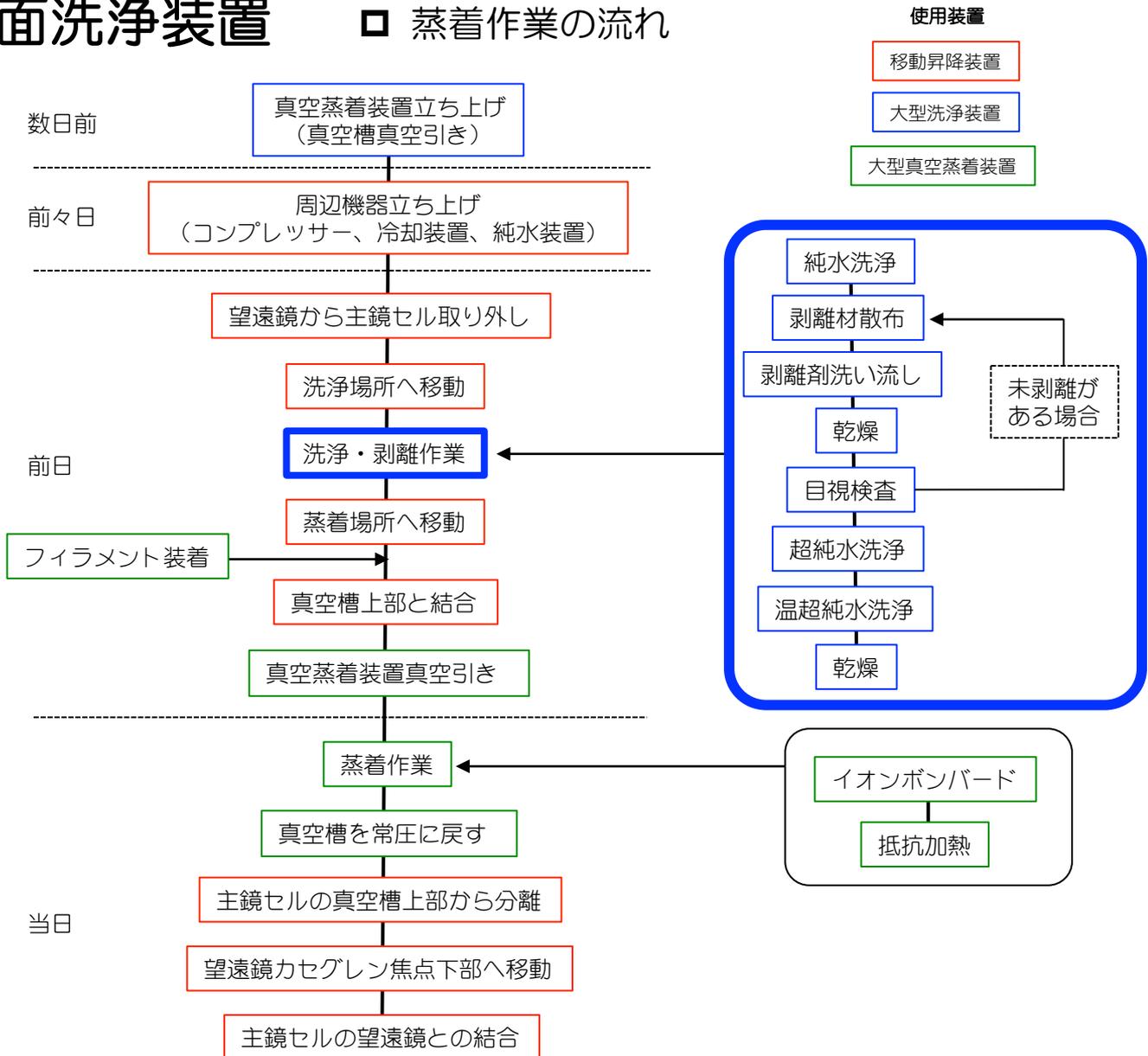




Mirror Coating System of TAO 6.5m

大型鏡面洗浄装置

□ 蒸着作業の流れ



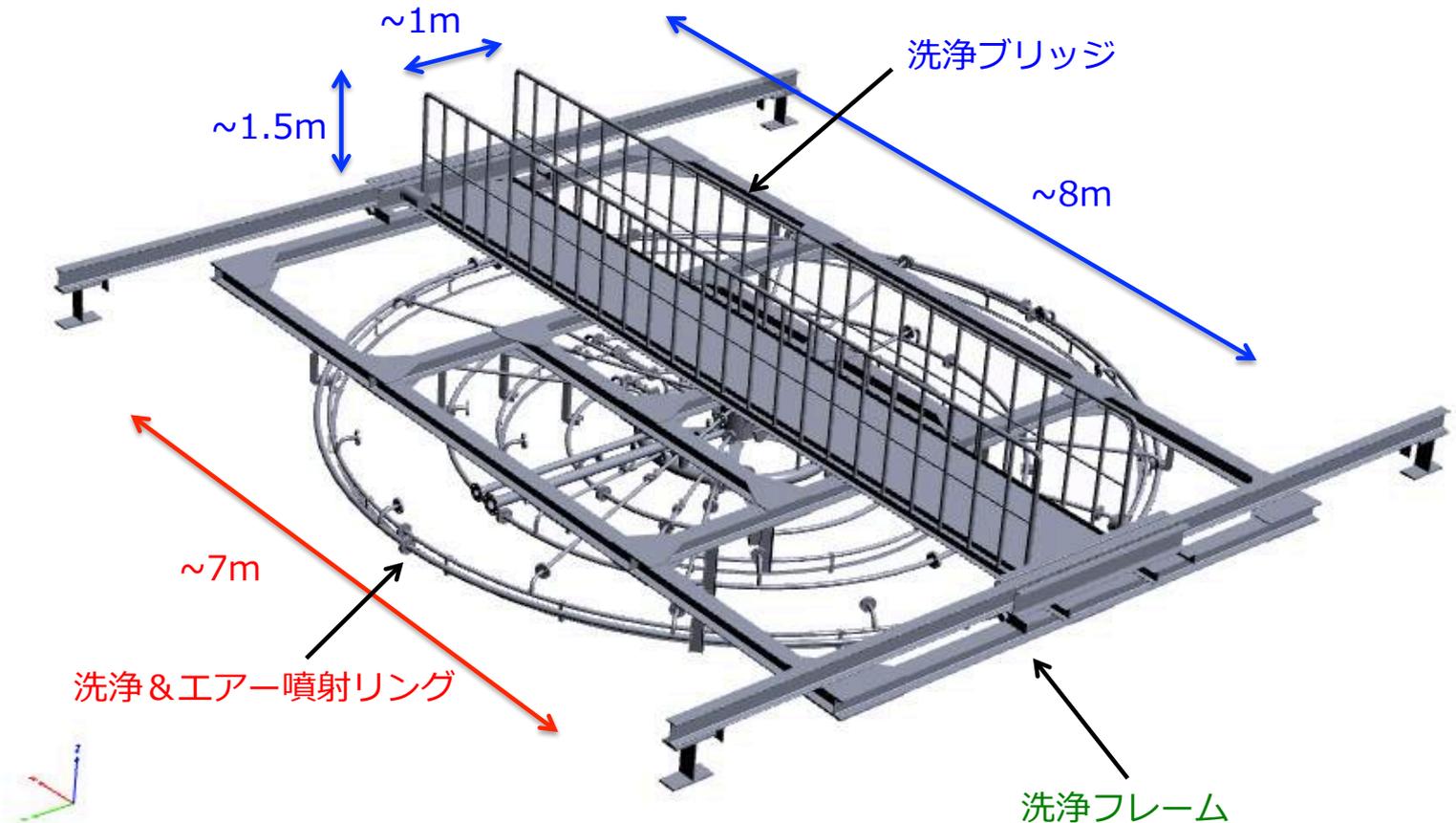


Mirror Coating System of TAO 6.5m

大型鏡面洗浄装置

□ 目的と要求されること

- 蒸着前に古い蒸着膜を剥離
- 蒸着面にムラ、ホコリなきよう洗浄
- 高高度での使用→シーケンサーによる半自動制御
- インスペクションが出来る設備





Mirror Coating System of TAO 6.5m

大型鏡面洗淨装置

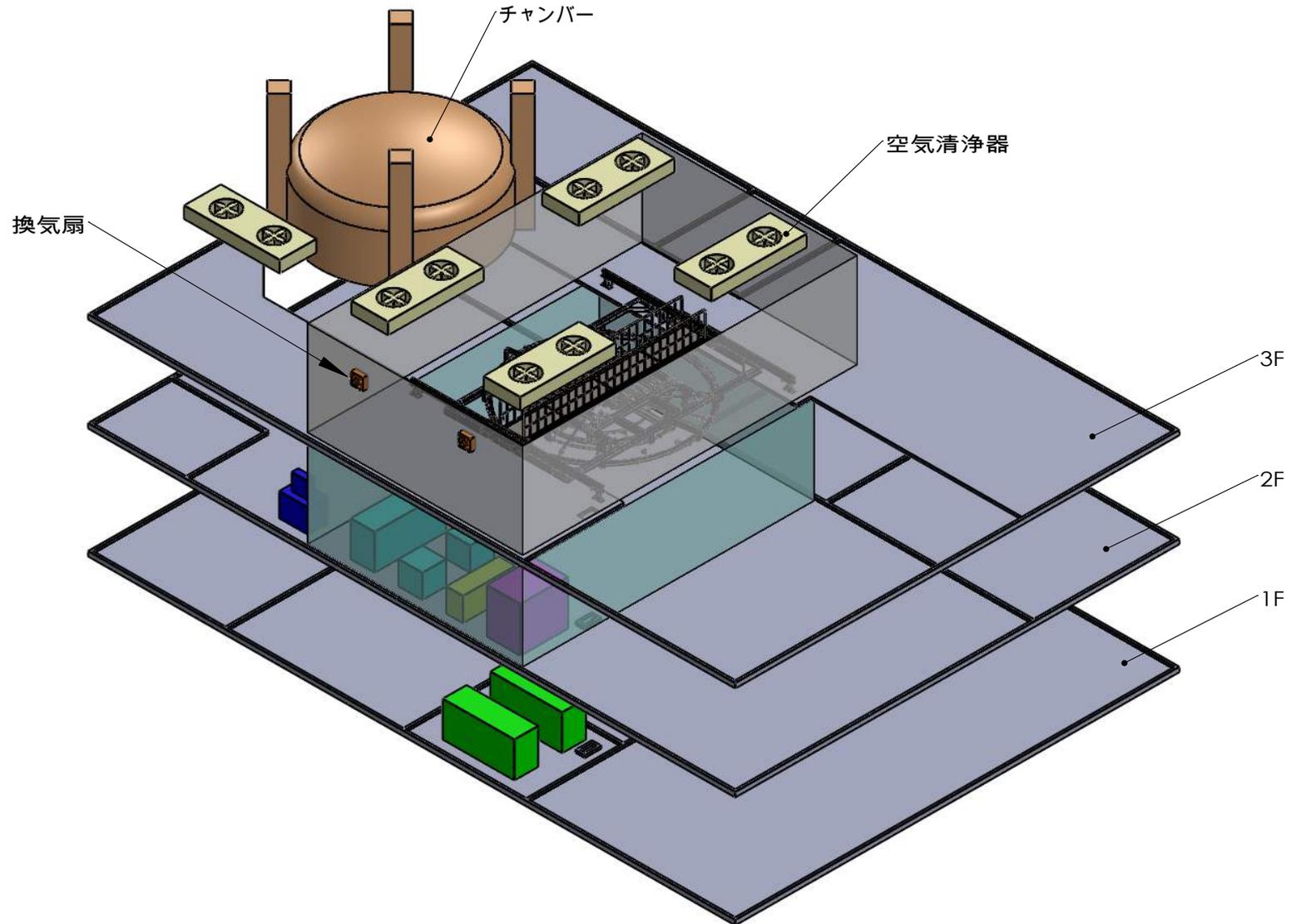
- 剥離試験済み
- 薬剤は水酸化ナトリウム (アルカリ)
- リング固定式
- 純水・薬剤噴射
- エアーも独立





Mirror Coating System of TAO 6.5m

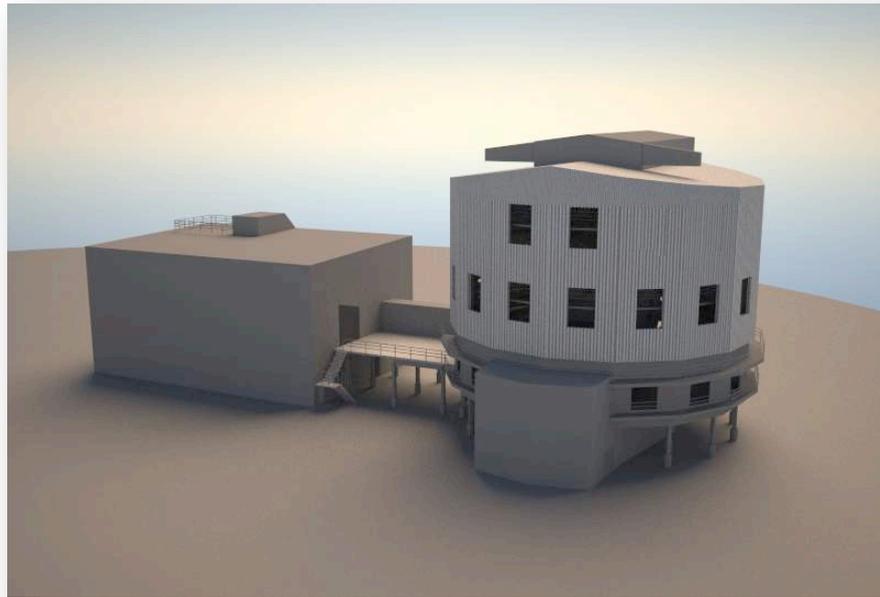
山頂観測運用棟設置（案）





本日のお話

- TAO6.5m望遠鏡計画の概要と特徴
- 望遠鏡光学系の能動制御
- ミラーコーティング
- 望遠鏡エンクロージャーの設計と風雪対策（小西）

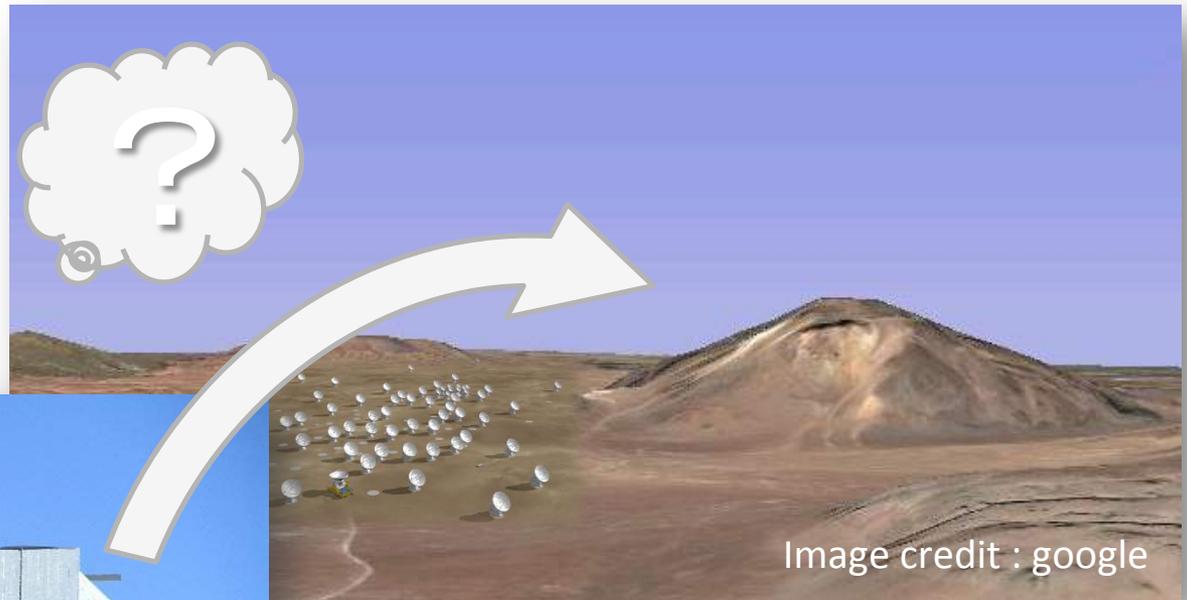




望遠鏡エンジニアの設計と風雪対策

Magellan望遠鏡 (@La Serena) のデザインをベースとしているが、**大きく異なる地理的条件**において、何か問題が生じないだろうか？

地形 (標高 etc)
気象条件 (気温 etc)

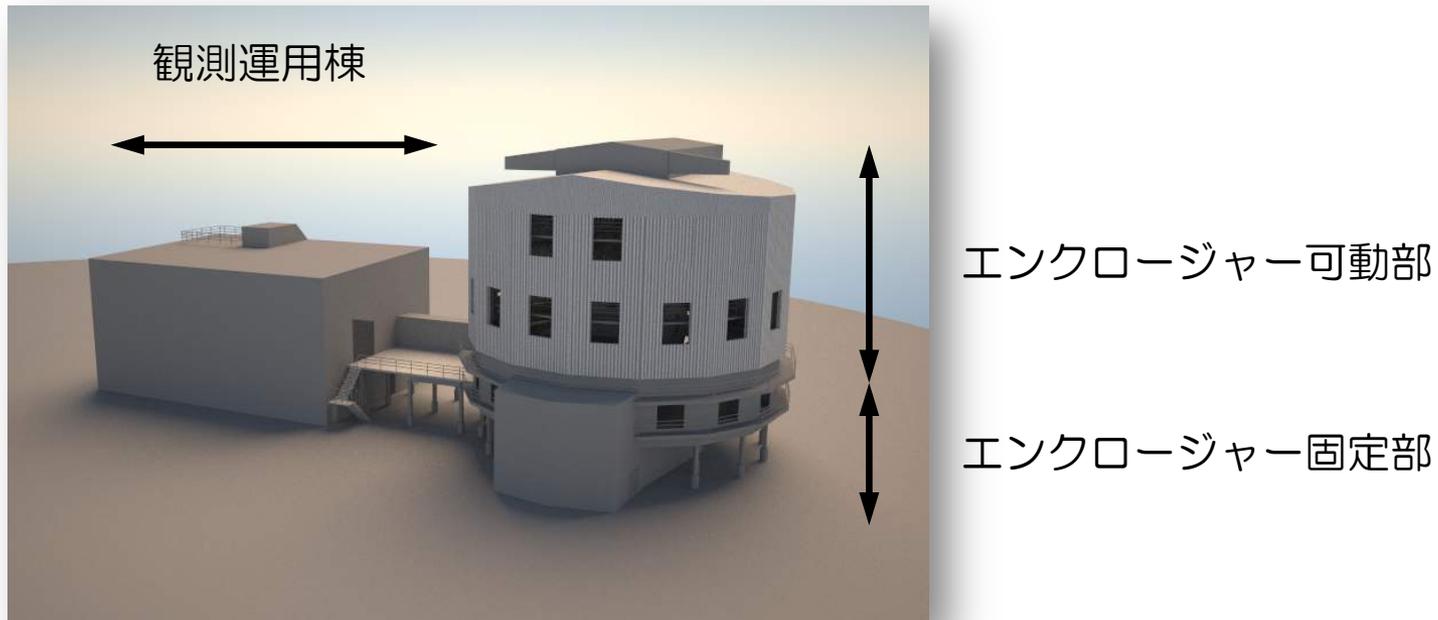




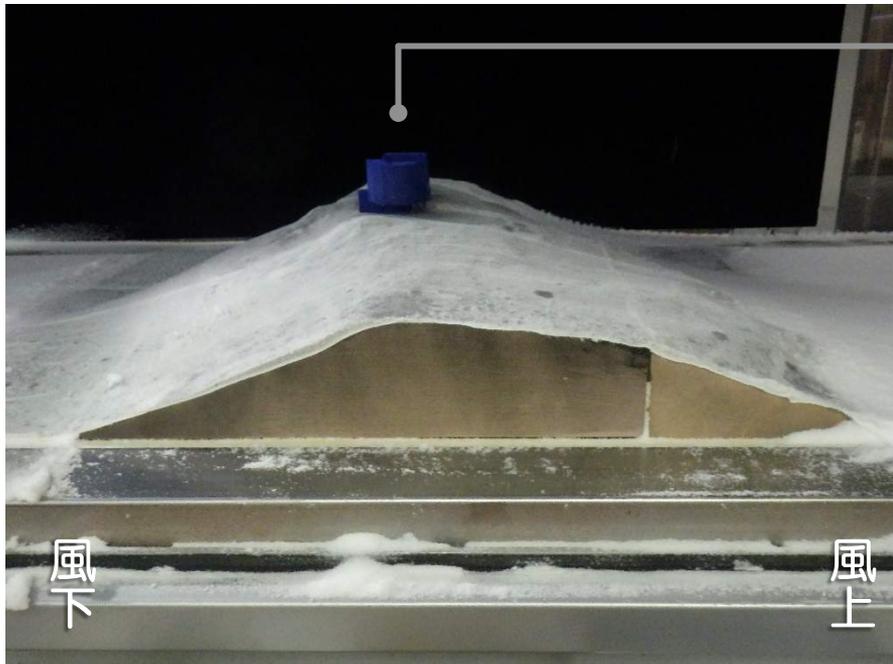
望遠鏡エンクロージャーの設計と風雪対策

- 運用における雪氷の影響と、建物の形状・配置による気流の乱れを評価し、詳細設計を進める。

雪氷防災	国立極地研極地工学グループ (金先生) 神奈川工科大学機械工学科 (山岸先生)
風流体計算	九州大学応用力学研究所 (内田先生) 環境GIS研究所



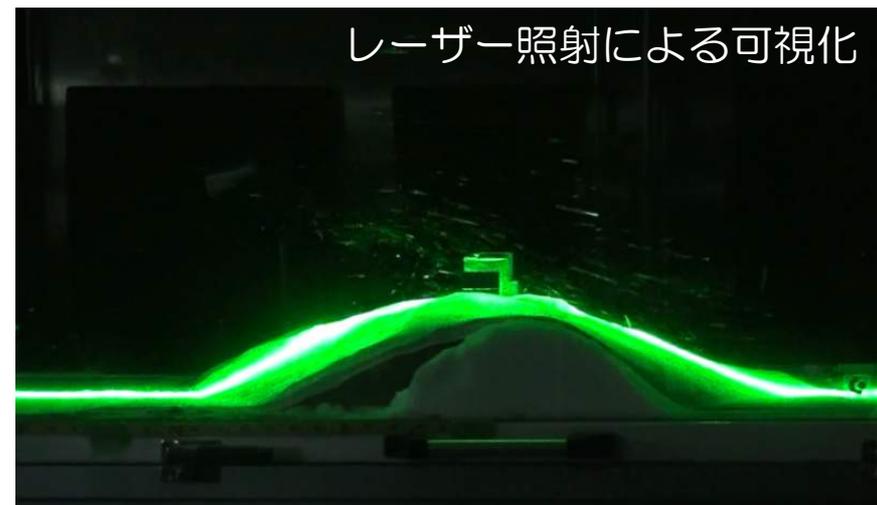
於：独立行政法人防災科学技術研究所
雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所（山形県新庄市）
日時：2014年6月23-25日



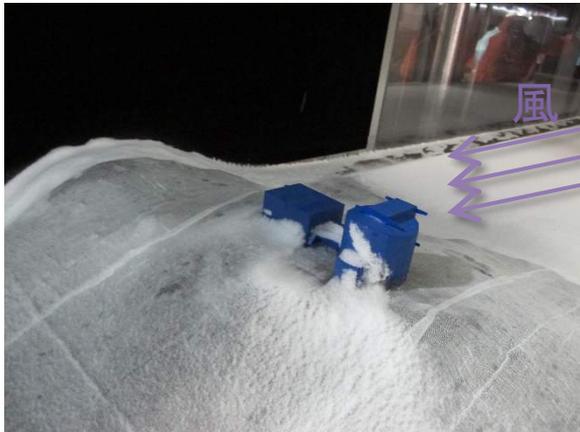
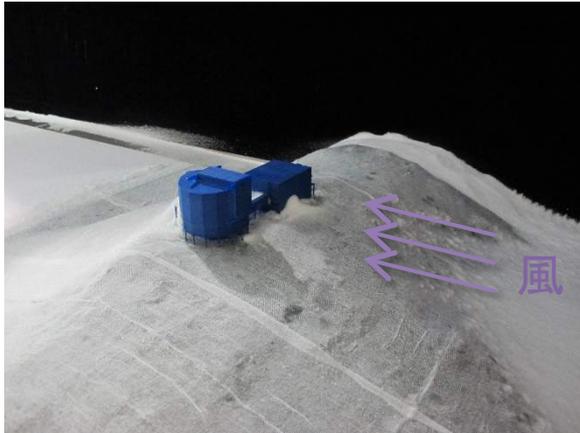
調査項目

- 建物への着雪、周辺の吹き溜まりの影響
- それらに対する、地形・風向の寄与
- (建物周辺の風速分布)

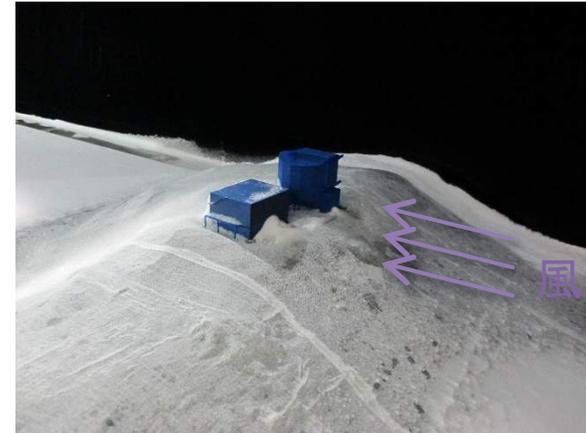
- 建物設計に反映させる必要があるか？



Case1: 西風 (80%卓越風)



Case2: 東風 (20%卓越風)



地形効果により、**建物の風下側に吹き溜まり**が発生・成長するが、
建物の形状による悪影響は見られない。

→ 建物設計は (大きくは) 変更せず、運用のために吹き溜まる箇所を把握しておく。



風CFDシミュレーション

九州大学応用力学研究所・内田研究室、
環境GIS研究所との共同研究

- チャンントール山丸ごと&山頂施設の3次元モデルを構築
- 九州大学・応用力学研究所のスーパーコンピューターを用いて気流場の時間変化を非定常解析

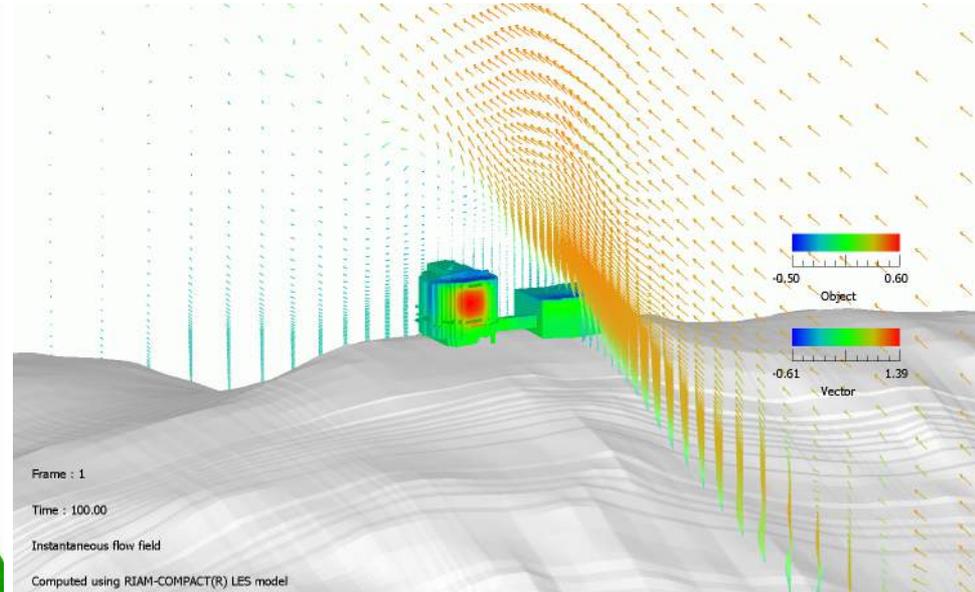
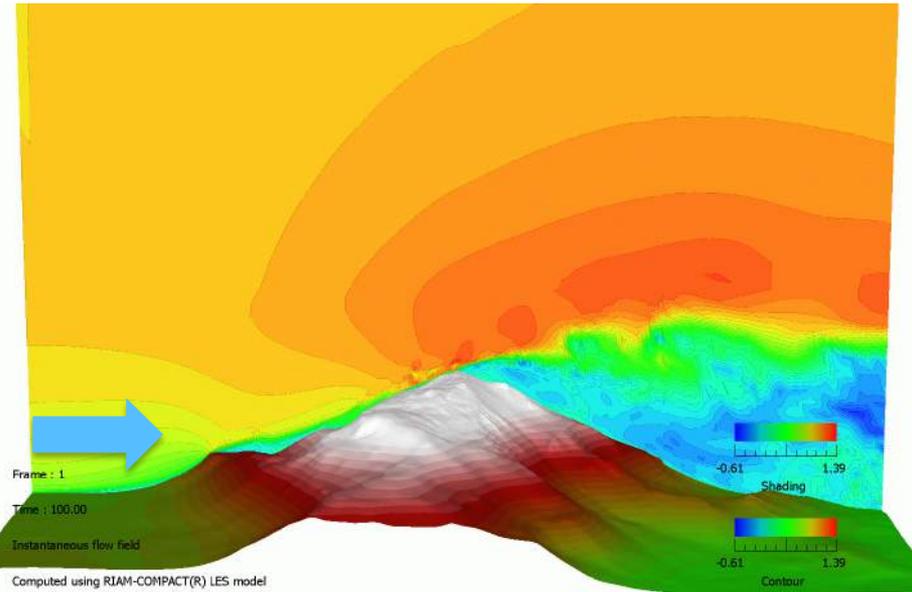
数値風況予測モデル®「RIAM-COMPACT」

□ 調査項目

- 風が淀む（=吹きだまる）箇所の有無・程度
- 建物にかかる風圧の分布 → 建物強度
- 建物内部の風の通り具合 → 換気効率等

□ 調査範囲

- 広域解析：地形の効果を知る
- 山頂（建物）周辺解析：建物内外の気流を詳細に知る

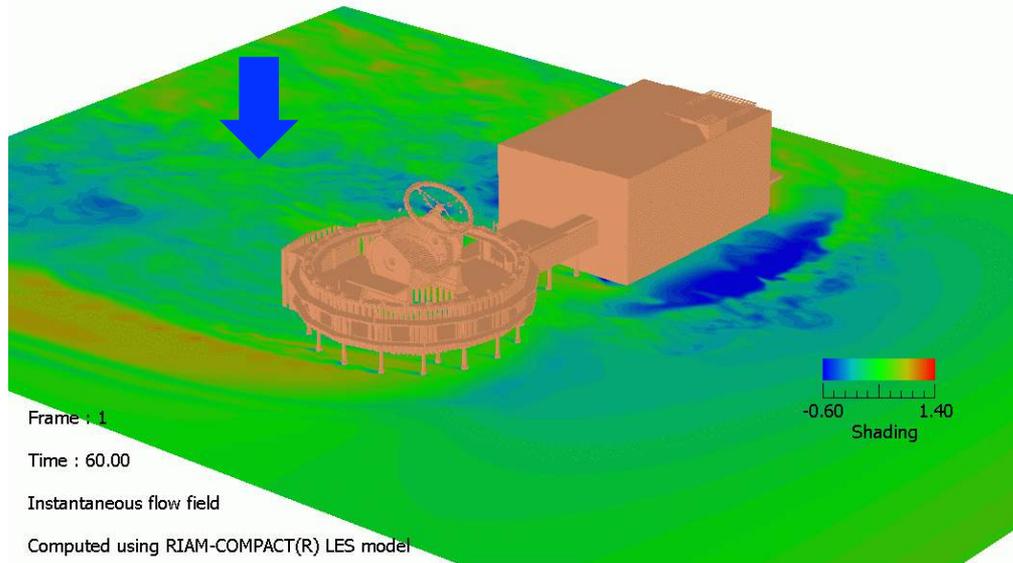


【チャナントール山全域の気流解析】

【山頂施設に及ぼす風圧係数分布】

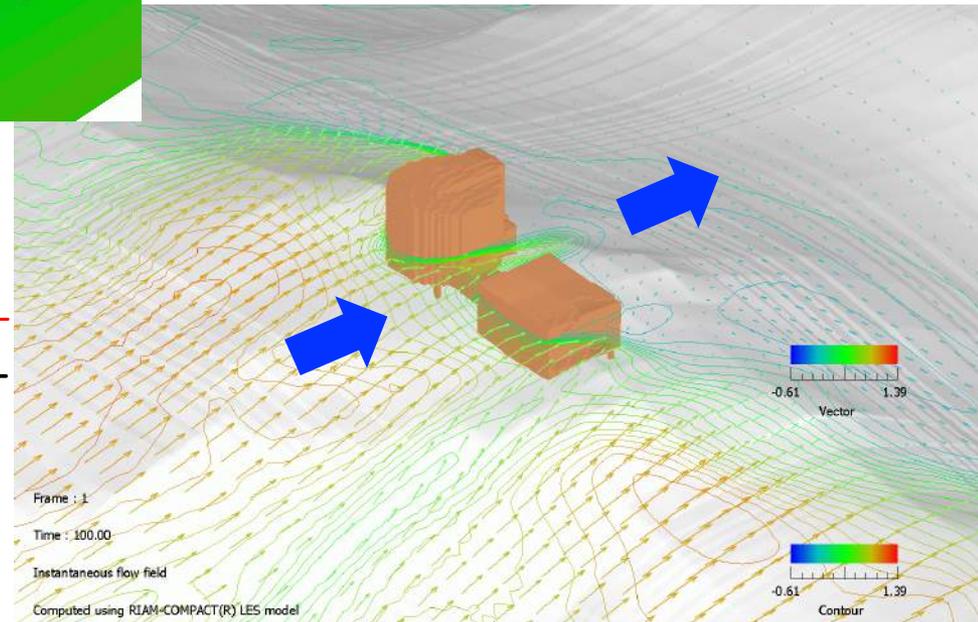
- 標高5,000mの平原から吹き上げてくる風（西風）は、
 - 1.2~1.3倍に加速されて山頂に到達
 - その後剥離して吹き抜けていく。
- 5,000m平原での過去の瞬間最大風速は 65 m/s @地上高約10m
→ 山頂では最大85 m/s と予想される。
- 0.5気圧における風圧は 3850 N/m²
→ 建物の構造計算に反映。

【山頂施設周辺の気流解析】

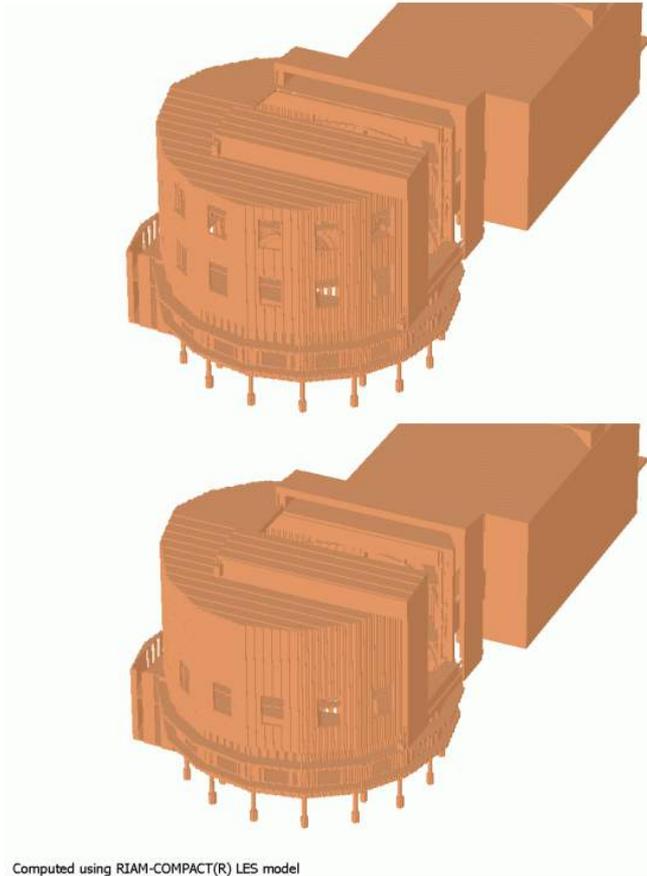


エンクロージャー付近は「**高床式**」
にしているおかげで、風が乱れずに
比較的綺麗に流れている。
→ 地面からのかげろうが望遠鏡の
ビームに入り込むことはないだろう。

エンクロージャーと付帯施設との間に**+**
分な間隔が空いているので、エンクロー
ジャーの両側を均等に風が流れている。
→ 建物の配置に問題はなさそう。



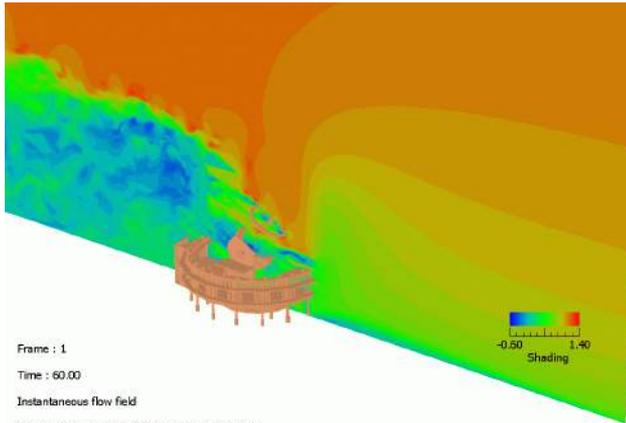
- エンクロージャの換気窓の個数を変えて、内部での気流の変化を検証（西風を向かい風として受ける場合）。



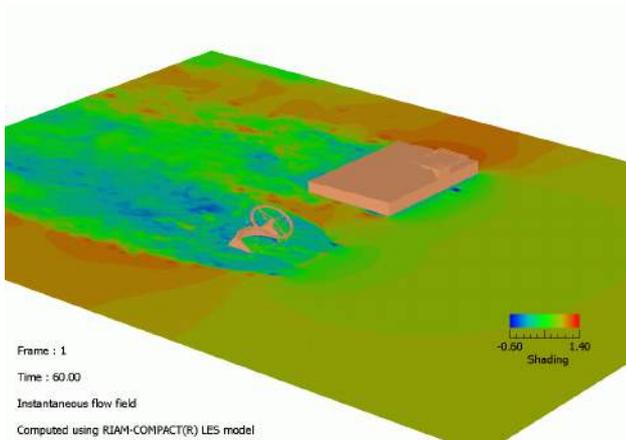
上段12か所、下段12か所に設けた場合

下段12か所にのみ設けた場合

上下段

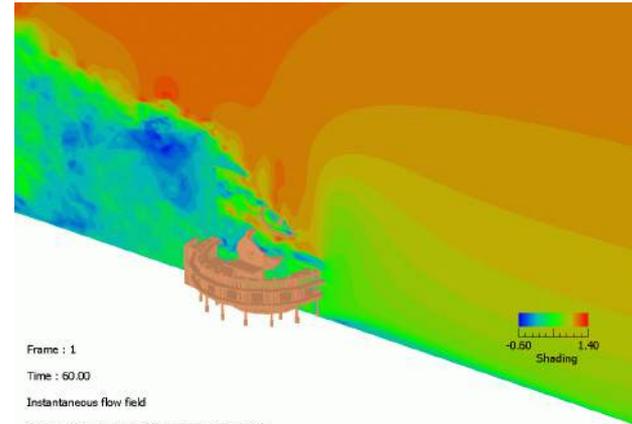


Frame : 1
Time : 60.00
Instantaneous flow field
Computed using RIAM-COMPACT(R) LES model

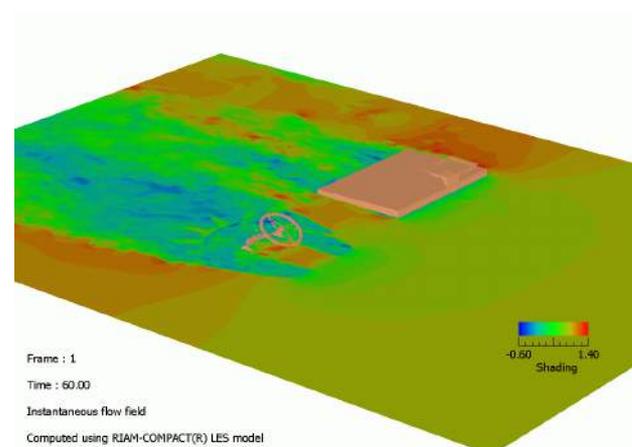


Frame : 1
Time : 60.00
Instantaneous flow field
Computed using RIAM-COMPACT(R) LES model

下段のみ



Frame : 1
Time : 60.00
Instantaneous flow field
Computed using RIAM-COMPACT(R) LES model



Frame : 1
Time : 60.00
Instantaneous flow field
Computed using RIAM-COMPACT(R) LES model

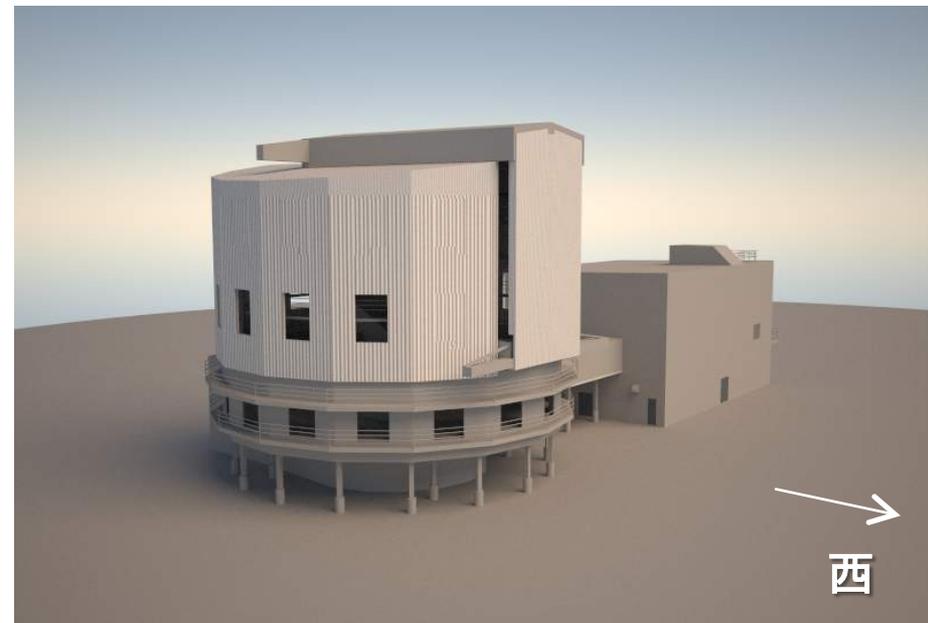
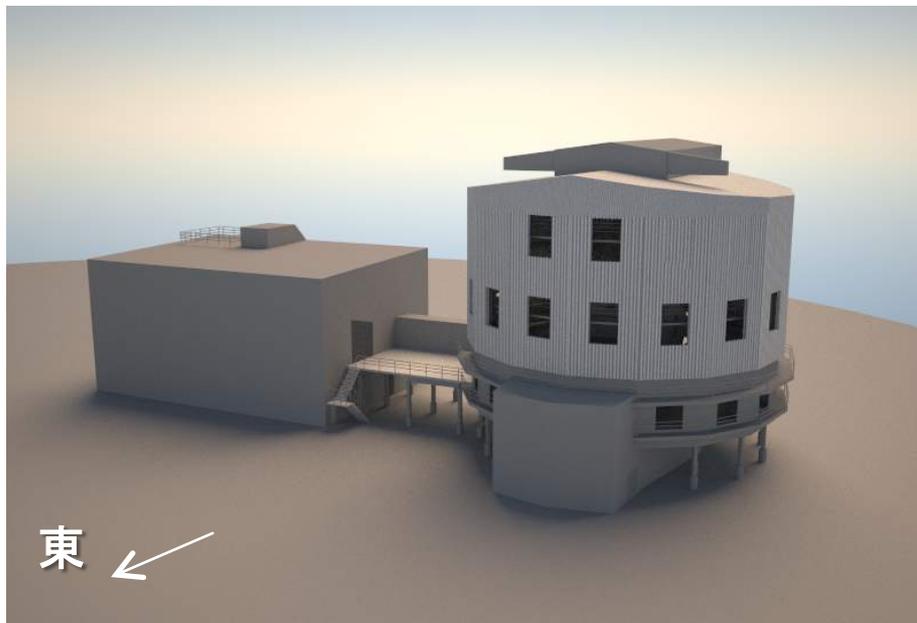
どちらの場合でもエンクロージャー内の淀み（滞留）は十分に少ない。
→ 上段の換気窓は廃止しても問題なさそう。



望遠鏡エンクロージャーの最終設計

□ 結果

- 風を横から受ける場合についても解析した結果、上段の換気窓を除いても**内部の気流はあまり変化しない**ことが分かった。
- 上段は設置に手間がかからない2か所のみを残すデザインに決定。
- →全体として、**上段2か所、下段12か所、+観測床に13か所**となる。



□ 今後

- 換気窓の開き具合とエンクロージャー内部の気流場の関係を解析、運用に活用
- 換気効率の導出



TAO6.5m Others Summary

□ 望遠鏡本体、光学系

- 国内+アリゾナでの製作・試験・調整は順調に進行中
- 2017年初めの輸出を目指す

□ エンクロージャ

- 鉄骨と駆動部の一部が完成
- 2016年度国内で仮組、2017年度に輸出

□ 現地施設

- 山頂施設的设计完了、コスト削減案を策定中
- 山麓施設は竣工、運用済み
- 来年度にチリでの工事が本格化

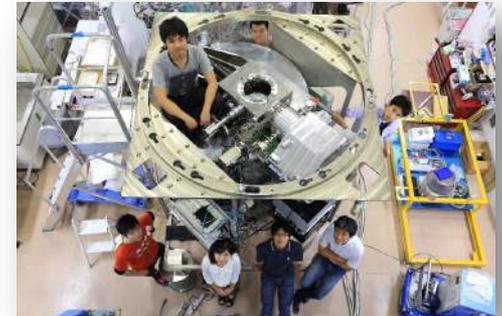
□ 観測装置

- 性能評価試験中@三鷹
- 2016年度～すばる望遠鏡搭載予定

→ 2016年6月まで国内で調整を進める

→ 2018年のファーストライト(@チャナントール) を目指す

SWIMS



MIMIZUKU





TAO6.5m 2017 Debut

