

# 東京大学アタカマ天文台6.5m望遠鏡の蒸着設備

○高橋 英則（東京大学大学院理学系研究科・天文学教育研究センター）

吉井謙<sup>a</sup>, 土居守<sup>a</sup>, 河野孝太郎<sup>a</sup>, 川良公明<sup>a</sup>, 田中培生<sup>a</sup>, 宮田隆志<sup>a</sup>, 本原顕太郎<sup>a</sup>, 田辺俊彦<sup>a</sup>,  
峰崎岳夫<sup>a</sup>, 酒向重行<sup>a</sup>, 諸隈智貴<sup>a</sup>, 田村陽一<sup>a</sup>, 青木勉<sup>b</sup>, 征矢野隆夫<sup>b</sup>, 樽沢賢一<sup>b</sup>, 加藤夏子<sup>a</sup>,  
小西真広<sup>a</sup>, 上塚貴史<sup>a</sup>, 越田進太郎<sup>c</sup>, 半田利弘<sup>d</sup>

<sup>a</sup> 東京大学・天文学教育研究センター、<sup>b</sup> 天文学教育研究センター・木曾観測所、

<sup>c</sup> 国立天文台・ハワイ観測所、<sup>d</sup> 鹿児島大学

## 概要

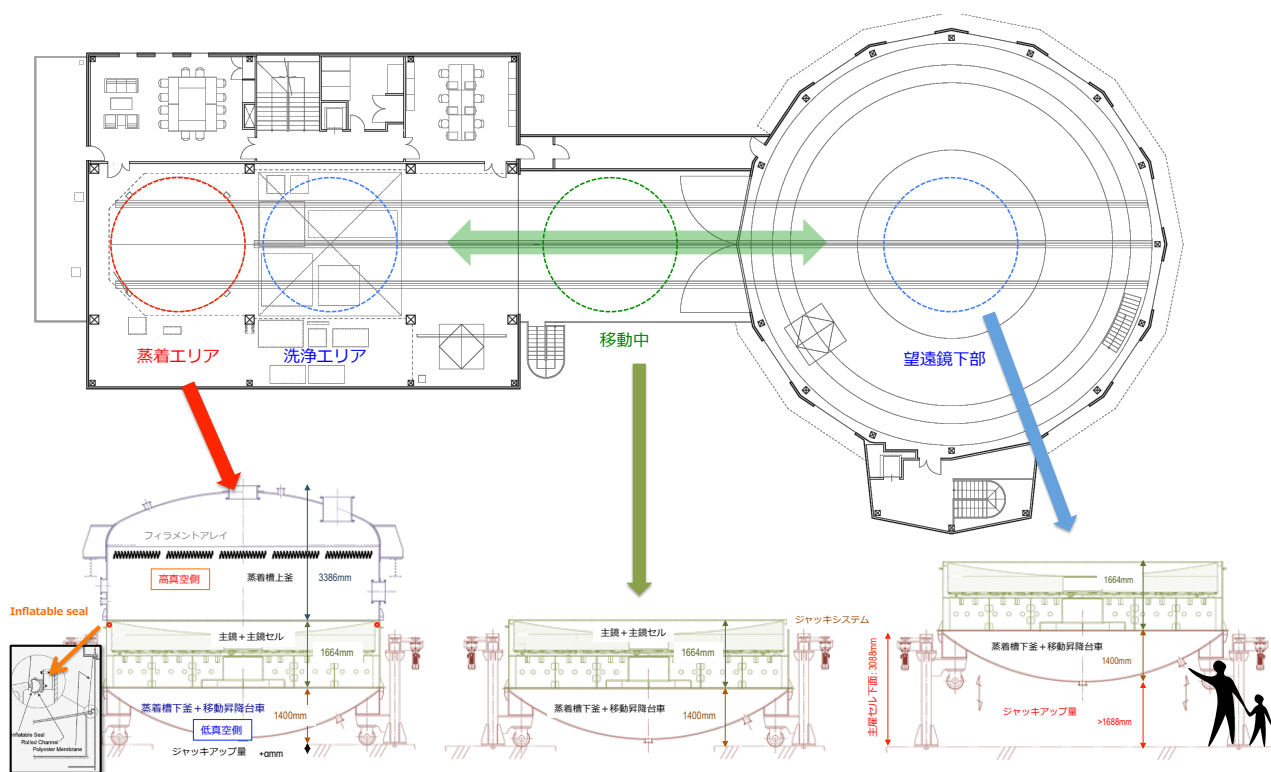
東京大学アタカマ天文台（TAO）は、南米チリ共和国アタカマ高地にあるチャナントール山山頂（標高5,640m）に建設される口径6.5mの赤外線望遠鏡である。現在、望遠鏡本体・エンクロージャー・観測運用棟・主鏡をメインとする光学素子・蒸着設備の検討が進んでいる。TAO望遠鏡はその設置ロケーションや大きさ故、重量物を調整や修繕の際に山頂から降ろすことは現実的ではない。特に主鏡を含む鏡は軽量化・温度制御のためハニカム構造をしており、その取り扱いには注意を要する。そのため主鏡は主鏡セルに入ったまま洗浄・蒸着される。つまり主鏡セルは蒸着チャンバーの一部を兼ねる構造になっている。このような工程を実現するために蒸着装置下部は大型昇降移動台車と一体化した構造となっている。また、蒸着は鏡面が上向き状態で行われるため、蒸着時の液滴落下を防ぐための特殊な形状のフィラメントの開発も進められている。洗浄・剥離工程に関しては、鏡面の古いコーティングを効率的且つ安全に剥離するための洗浄液・薬剤の検討、条件最適化のための実験も進められている。

## 1. 蒸着装置製作の背景と特長

チリ共和国アタカマ高地・チャナントール山頂（5,640m）に設置される東京大学アタカマ天文台6.5m望遠鏡は、**0.3~40um（可視光~中間赤外）の広い波長範囲をカバー**するために、近赤外2色同時多天体分光撮像装置（SWIMS：Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph）と、中間赤外線分光撮像装置（MIMIZUKU：Mid Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe）2つの観測装置を焦点面装置に持つ望遠鏡である。広い波長範囲で高い反射率を実現するために、鏡の成膜には**アルミニウム**を用いる。主鏡は口径6,521mm、材質はオハラE6ボロシリケート材で、**ハニカム構造**で成形されている。TAO望遠鏡はそのロケーションや大きさ故、重量物は調整や修繕の際にも山頂から下ろすことは現実的ではない。特に主鏡を含む鏡は軽量化や温度制御のためハニカム構造をしており、取り扱いには非常に注意を要する。そのため主鏡の再蒸着を行うための設備を山頂に建設する必要がある。これには洗浄剥離装置・設備も含まれる。

▼ 表1：TAO6.5m 蒸着装置の仕様

チャンバー	
直径	7200 mm
高さ	6600 mm
重量（含む台車、主鏡、主鏡セル）	70 tons
他の機能	グローブディスチャージャー機能 <b>Inflatable seal</b> による2つの真空パート
移動昇降台車	
最大昇降重量	60 tons
最大ストローク	1700 mm
成膜部	
成膜手法	<b>蒸着</b>
膜材	<b>アルミニウム</b>
フィラメント数	~200
膜厚	80-100 nm
膜厚精度	RMS=10 nm, P-V~20 nm
反射率	<b>&gt;85% (0.35 - 0.9um)</b> <b>&gt;90% (0.9 - 1.2um)</b> <b>&gt;95% (1.2 - 40um)</b>
反射率精度	<1% (RMS)
剥離・洗浄部	
クリーンブース	<b>Class 10,000</b> (ISO7 standard)
剥離薬剤	<b>Sodium Hydroxide</b>
洗浄水	温超純水 (~45°C)
その他の機能	検査ブリッジ



▲図1：望遠鏡エンクロージャー～観測運用棟の台車の位置（上）と上下方向の移動の様子（下）。

## 2. 蒸着設備の設計

### 2-1 チャンバー

TAOの主鏡は前述の通り非常に繊細に扱わなければならないため、蒸着においては主鏡セルに入ったまま蒸着を行うことが要求される。そのため、主鏡セルが蒸着チャンバーの一部を兼ねるといった独特の構造を成す。3つのパートの各々には以下の機能（機構）が装備される。

- (1) 上部チャンバー：真空ポンプ（ロータリー、クライオ、分子ターボ）、蒸着装置、イオンボンバードシステム。
- (2) 中間パート＝主鏡セル：Inflatable sealによって2つの真空パートに分割される。  
鏡面側は高真空（ $<7 \times 10^{-6}$  torr）、鏡裏面（能動制御装着側）は低真空（ $\sim 1 \times 10^{-3}$  torr）
- (3) 下部チャンバー：移動昇降台車と一体。望遠鏡下～蒸着エリアまでの約50mを移動することができる。

### 2-2 移動昇降装置

移動昇降装置とは、蒸着作業の際に望遠鏡から主鏡セルを外し、洗浄エリア・蒸着エリアへと移動させるための機能を持ったカートで、エンクロージャーから観測運用棟まで設置された2本のレールの上を移動する。特徴は、4つの走行モータと独立したジャッキを有していることである。ジャッキアップポイントは望遠鏡下部（Azimuth テーブル）、洗浄エリア、蒸着エリアで、各々耐荷重施工が施される。水平面制御のために、4つのジャッキの下（底）に荷重センサーが設置され、昇降時の荷重を独立に測定し傾きを制御することができる。

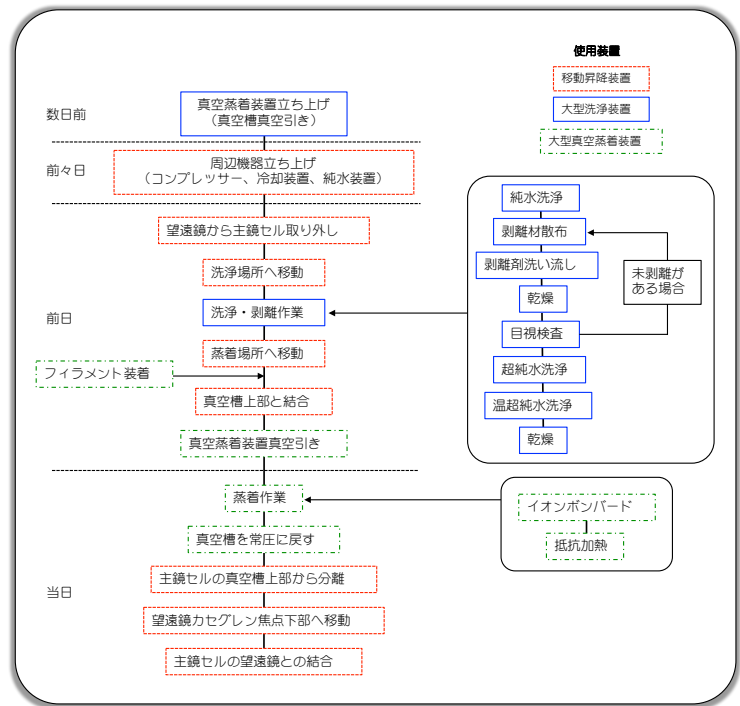
### 2-3 アルミニウム成膜システム

成膜にはコンベンショナルな蒸着方式を採用している。膜材は前述の通り、赤外線波長域で高い反射率を持つアルミニウムを選択した。蒸着時の溶解アルミ液滴落下防止機能を備えたフィラメントが上部チャンバーに予めシミュレーション計算で最適なスプレーパターンを実現するようにアレイ状に設置（約200個）される。あわせて、フィラメントの設置の際に用いられるボックスマスクもスプレーパターンを制御する役割を果たす。また、副鏡、第3鏡も蒸着できるように設計されている（特別な治具を用いる）。

## 2-4 グロウディスチャージャー（イオンボンバード）

グローディスチャージャーとは、チャンバー内を低圧アルゴンガス雰囲気にし、高圧電極から高いエネルギーのイオン粒子をターゲットに照射することで、ターゲット表面の酸化膜や異物を除去する方法である。蒸着前の鏡面洗浄の最終過程で行われる。効能として、膜の密着度が高くなるとともに、最終的な鏡面の反射率が高くなる、また一様性が得られることにある。構造であるが、TAO用蒸着装置では、アーム状電極がチャンバー上部内部に設置され、鏡面上を回転してグローディスチャージャーを行う予定である。

▶図2：洗浄・蒸着工程。全工程でおよそ1週間～10日間。



## 3. 開発の現状

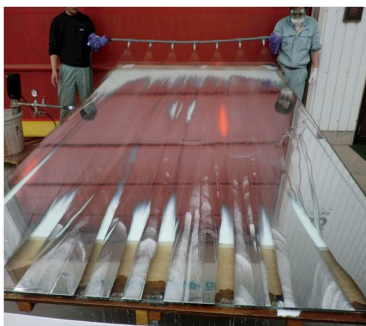
### 3-1 鏡面洗浄工程

蒸着の前工程として、反射率の低下した古い膜を剥がし、鏡面を洗浄するための、専用クリーンブースを設置する。場所は望遠鏡エンクロージャー（ブリッジ）と蒸着エリアの間である（図1）。

洗浄は鏡面ダストによるピンホールを最小限にする他、膜の密着度が高くなる、即ち高反射率の維持にも繋がる。クリーンレベルはClass 10,000 (ISO7 standard)を保持する。旧膜の剥離には水酸化ナトリウムを使用する予定である。機器および作業者の保護を第一に考え、TAOでは一般に使われる酸（塩酸、硫酸）は用いず、**水酸化ナトリウム**を用いる。鏡面の水滴ムラを無くすため、洗浄の最終行程には**超温純水（約45℃）**を使用し、可能な限り拭き作業は行わない。具体的な作業工程を図2に示す。現在は、溶剤の濃度、洗浄液の流量等のパラメータの最適化のための実験を継続している。

### 3-2 フィラメント

TAOでの蒸着は鏡面が上を向いており、上方から膜材料の沈着を行わなければならない。そのため、通常のボートタイプ蒸着を用いることができない。そこですばる望遠鏡などでも用いられているフィラメントタイプを採用する。膜材であるアルミニウムを予め含浸させた（プレウエット）タングステンチャンバー上部に並べる。このフィラメントは3本のタングステンが緩く巻いてあり、さらに**タングステンネット**で巻かれている。これによって含浸アルミニウムの量を多くできるだけでなく、一様な分布、蒸着時（溶融時）のアルミ液滴の落下を防止するのに役立つ。プレウエットの際の含浸率は約80%を達成している。蒸発率は約96%を実現しているが、どのくらいの蒸発量がよいかは今後の試験で最適化を図る。



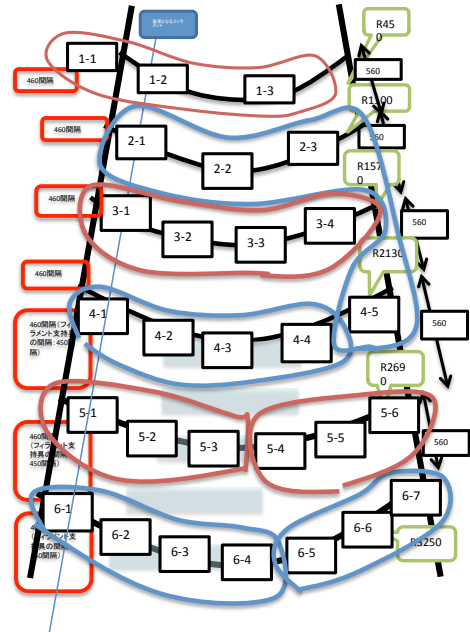
▲図3：大型ガラスを用いた洗浄実験。



▲図4：タングステンフィラメント（上）とタングステンネットを巻いたフィラメント（下）



▲図5：複数のフィラメントによる試験。



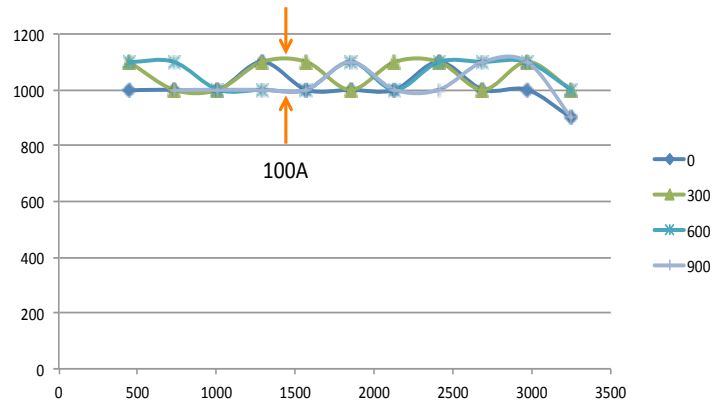
▲図6：フィラメントの配置。水色短冊が膜厚測定用サンプルガラス。

### 3-3 蒸着実験

国内最大の4500mmの蒸着釜を用い、蒸着実験を行った(図5)。TAO6.5mは不可能なので、45度に切り取った扇形で試験を行った。実験のパラメータを表2に、フィラメントやサンプル鏡の配置などを図6に示す。

・フィラメント本数	: 26本
・フィラメントと蒸着面の距離	: <b>630mm</b>
・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
・真空度	: $1.5 \times 10^{-6}$ torr

▲表2：応用実験の蒸着パラメータ。



▲図7：膜厚分布。

結果、膜厚はほぼコントロールできていることがわかった。これは事前のシミュレーションと、ボックスマスクによってスプレーパターンがコントロールできていることを意味している。図7の膜厚分布では、約100Åの幅を持っているが、これはフィラメントと鏡面サンプルの距離が短く、フィラメントアレイのパターンが現れているため、TAO蒸着装置ではこのパラメータを最適化(長くする)ことで一様膜厚が実現できると考えている。

## 4. 今後の予定

チャンバーはTAOの構造物の中で単体で最も重量のある装置である。この点を考慮し、観測運用棟の構造を設計しなければならないが、現在までに構造設計について、観測運用棟(天井)への取り付け最終案がほぼ決定した。チャンバー設計そのものはほぼ終了しており、予算獲得、製作の場所など最終調整段階に入っている。

蒸着装置の実験・製作に関しては、剥離・洗浄パラメータ(流量、溶剤・洗浄水の温度、散布方法等)を最適化し、それを受けて用いられる機器の最終仕様を決めていく。フィラメントは、必要なアルミ含浸量を満たしたフィラメントの量産化に向けて歩留まり率を高めていく。蒸着装置は現在行っているスプレーパターン実験を基に、実際の鏡の大きさへの拡張アレイコンフィギュレーションや高さ方向の最適化を行う。

完成後は、主鏡セルとの噛み合わせ試験、真空試験(@チリ・アントファガスタ)を行い、山頂への設置後、動作試験を行う。TAOのファーストライトは2017年度内を目指す。