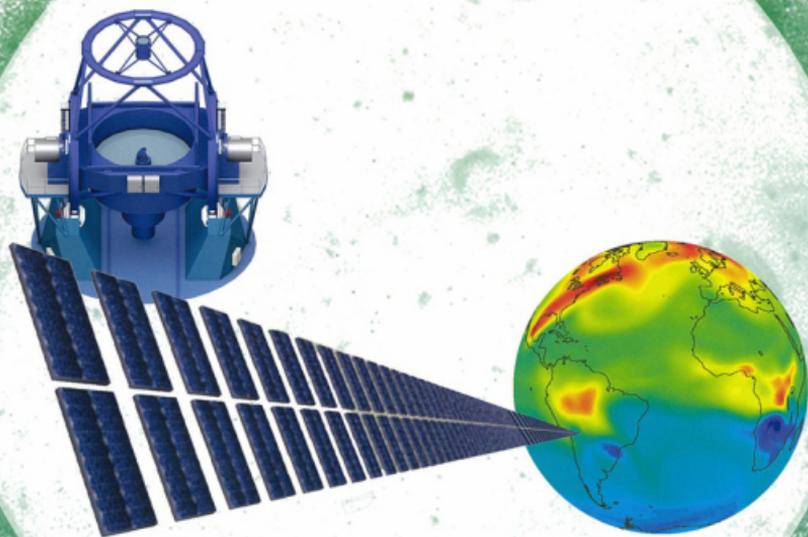


Solar TAO Project

アタカマ砂漠での太陽光発電と観測天文学の融合



東京大学の提案

Solar New Deal



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO

Solar TAO Project

提案の趣旨

人類の夢と科学技術の舞台は地球上から、光と熱の恩恵で生命を維持する太陽、そして無限の宇宙へと広がっています。TAO (University of Tokyo Atacama Observatory) は宇宙からの微弱な光を通して銀河や惑星の誕生を解明するため、東京大学が南米チリのアタカマ砂漠の標高5,600mの高山に大口径赤外線望遠鏡を建設する計画です¹。一方、21世紀の地球は環境の世紀と言われます。地球温暖化の影響はすでに世界中で顕在化しており、また化石燃料の枯渇から生じるエネルギー問題も深刻の度合いを増しています。これらは人類の存在基盤すら揺るがしかねない問題であり、すべての人間活動を変革して持続可能な社会システムを構築する、いわゆる「サステナビリティ」社会の実現が強く望まれています。その点において基礎科学研究をはじめとした大学の研究教育活動も例外ではなく、持続可能な形への変革が求められています。

エネルギーと環境の問題を同時に解決する最も可能性の高い技術は太陽光の有効利用です。1億5千万km²の核融合炉から地球に向けて、人類が消費するエネルギーの1万倍を定常的に供給しエネルギーバランスを保つ太陽光の発電利用は、夢の世界から経済的にも成立つ真に有効な技術になりつつあります。宇宙への夢と地球上の現実を、太陽光発電によって結びつけ、アンデスの地域住民にも貢献する環境新時代の基礎科学研究の新しい形、Solar TAO計画を提案します。

Solar TAO計画は先端研究施設である望遠鏡を太陽光発電によるクリーンエネルギーで運用します。砂漠の良好な気象条件は天体観測はもとより、太陽光発電にも最適です。豊富に得られる太陽光からのクリーンエネルギーは近隣の都市にも供給し、都市インフラの整備に貢献します。これは都市と科学研究の共生を目指す新しい試みです。送電には日本が誇る高温超伝導送電技術を用い、エネルギーロスをゼロに抑えます。太陽光発電+超伝導送電技術は地球規模でのクリーンエネルギーネットワークプロジェクトであるSahara Solar Breeder計画²やGENESIS計画³の基礎をなすものであり、Solar TAO計画はそれらに先駆けたショウケースの役割を果たします。

Solar TAO計画は地球温暖化の問題にも貢献します。微弱な光も高精度に測定できる望遠鏡施設を使うことで、従来は難しかった温暖化ガスの精密測定が可能になります。アタカマ砂漠は世界最大の二酸化炭素消費地であるアマゾン近くに位置しており、地球全体の二酸化炭素循環を探るのに不可欠な観測拠点となります。2009年に打ち上げられた日本の「いぶき」衛星のデータとも合わせ、地球規模での温暖化ガスの様子を描き出すことが期待できます。

Solar TAO計画は天文学研究でも重要な成果が期待できます。アタカマ砂漠の赤外線透過度は世界最高であり、先端の大口径望遠鏡によって従来は観測が難しかった新しい赤外線での観測が可能になります。これによって「銀河の誕生」「惑星の誕生」という天文学最大の2つの謎に答えを出すことが期待できます。

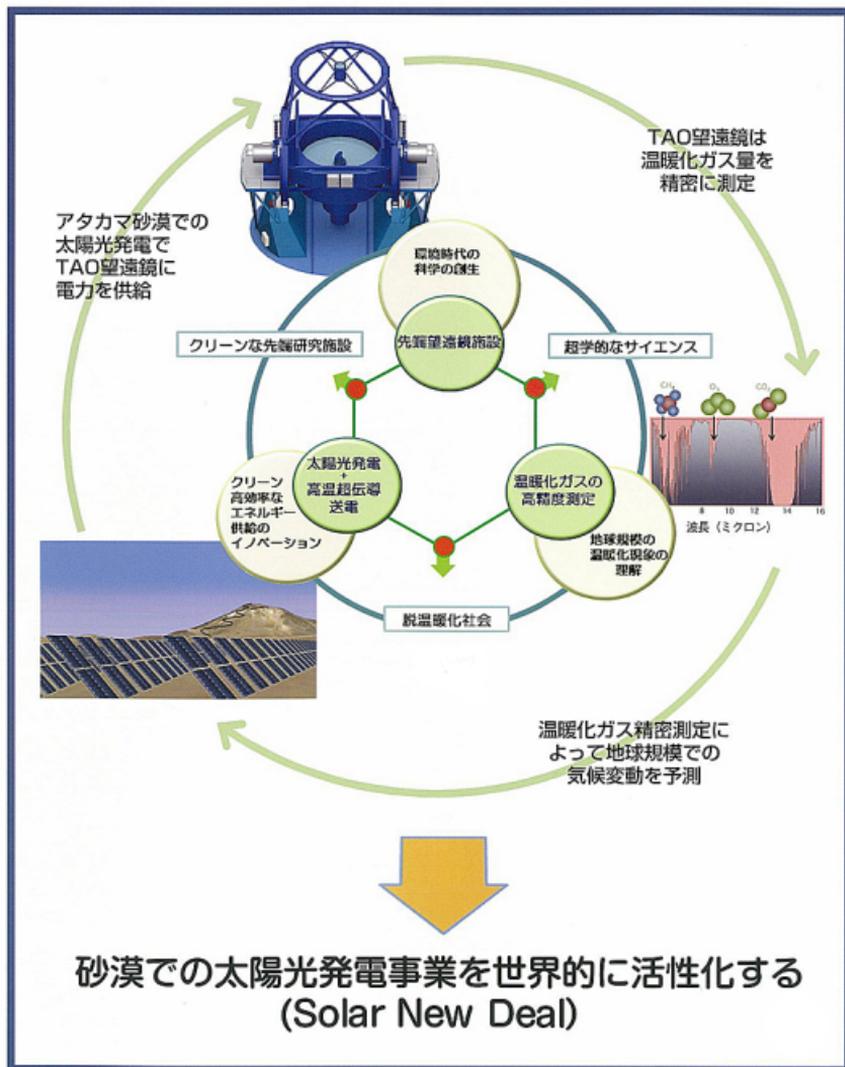
東京大学は内外の大学、研究機関および産業界と密接な連携のもと Solar TAO計画を推進し、環境世紀の新しい科学の発展に貢献したいと思っております。ご理解とご支援をお願いいたします。

[1] <http://www.iaa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/index.html>

[2] G8+5 Academies' meeting (Rome, Mar.26-27, 2009) への日本学術会議提案 "Sahara solar breeder plan directed towards global clean energy super highway"

[3] Y. Kuwano "GENESIS: Global Energy Network Equipped with Solar Cells and International Superconductor Grids" proposed at PVSEC (Australia, 1989)

Solar TAO – CONCEPT –

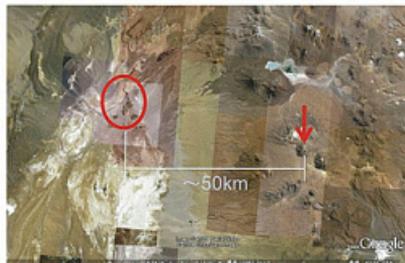


Solar TAO計画の舞台

■ Solar TAO計画の舞台：アタカマ砂漠

Solar TAO計画の舞台となるのは南米チリ共和国北部に広がるアタカマ砂漠である。この領域は標高5,000mを超すアンデス山脈が連なる山岳地帯で、また同時に世界有数の砂漠地帯でもある。乾いた空気と高い標高のおかげで、この地域は天文観測研究に最も適した地域のひとつである。また安定した天候は太陽光による発電にも恰好の環境を提供する。さらにアタカマ砂漠はアマゾンがある南米の中心に位置しており、地球規模での温暖化ガス循環を知る上でも不可欠な場所である。

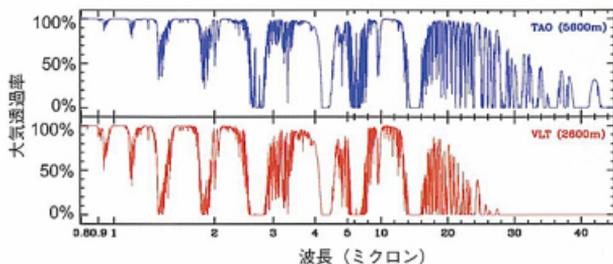
Solar TAO計画では、太陽光による発電で天体観測施設を運用し、その天体観測施設では最新の温暖化ガス測定を実施、測定結果から地球規模での環境変動を予測する。本計画はアタカマ砂漠の特性を活用し「赤外線宇宙観測」「地球温暖化調査」「太陽光発電」という3分野を有機的に結びつけた学融合的計画であり、新たな学術・技術領域の創生が期待される。



地球上でのアタカマ砂漠の位置(左)と地形図(右)。ともにGoogle Earthより。右図の円で囲ったのがSan Pedro de Atacama市、矢印の地点が望遠鏡建設地であるチャヌートル山。

■ 抜群の大気透過率

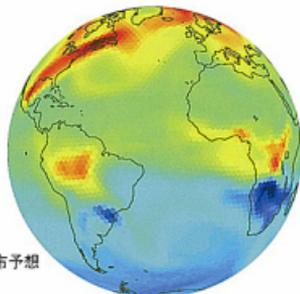
アタカマ砂漠は世界有数の天体観測適地であり、多数の天文台がこの地に建設されている。5,000mにあるバンパラボラ平原には日米欧共同の電波望遠鏡ALMA (Atacama Large Millimeter Array) 計画が進められており、欧米諸国の望遠鏡群も稼働中である。Solar TAO計画ではこれらよりも標高の高い5,640m地点に大口径6.5mの望遠鏡を建設する。建設地の大気透明度は世界最高クラスであり、特に波長20-40ミクロンの中間赤外線での透過率はすばる望遠鏡があるハワイマウナケア山(標高4,200m)や南米最大のVLT望遠鏡群があるパラナル高原(標高2,600m)よりも圧倒的に高い。抜群の大気透明度を活かすことで世界最高の観測成果が期待される。



TAO望遠鏡を建設する5600m(上)とVLTのある2600m(下)での大気透過率を示したグラフ

■ 南北大気循環路の通り道

南米大陸には二酸化炭素の大消費地であるアマゾンがあり、地球大気における二酸化炭素循環を知る上で要となる場所である。アタカマ砂漠はこの南米の中央に位置しており、ここに南米初の温暖化ガス測定拠点を築くSolar TAO計画は、北半球と南半球の大気循環を考える上で不可欠なデータを与えると期待される。



地球大気循環シミュレーション
による大気二酸化炭素濃度の分布予想

■ クリーンエネルギーの宝庫

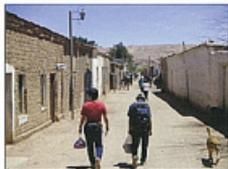
アタカマ砂漠は太陽光発電にも最適の場所である。雨はほとんどなく、緯度が低い（南緯～20度）。他の砂漠地帯に比べても日照量が高く、太陽光発電を行うには世界最高の環境である。砂漠地帯は1万km²以上に渡って広がっており、太陽パネルを展開する土地も十分にある。Solar TAO計画はアタカマ砂漠に世界に先んじて太陽光発電施設を建設するもので、世界規模のクリーンエネルギー創造に向けた絶好の試験環境を提供すると期待される。



アタカマ砂漠の写真。砂漠地帯が1万km²に渡って続いており、莫大な太陽光発電が期待できる

■ 隣接するSan Pedro de Atacama市

San Pedro de Atacamaは人口3千人のアタカマ砂漠の拠点都市であり、世界最古のミイラが発見されるなど考古学上の価値も高い。また観光都市としての面も持ち、年間8万人以上の観光客がこの地を訪れる。Solar TAO計画では天文台施設のほかこのSan Pedro市にも太陽光送電を行い、都市インフラの整備に貢献する。これは先端研究施設と地域共生の新しいモデルとなることが期待される。



San Pedro de Atacama市街の様子

世界最高高度の赤外線望遠鏡

■ TAO6.5m赤外線望遠鏡

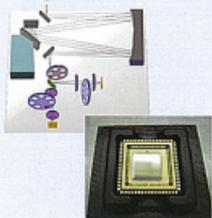
Solar TAO計画の一つの柱は赤外線による宇宙観測である。これを実行するためにアタカマのチャナントール山（標高5,640m）に口径6.5mのTAO望遠鏡を建設する。アタカマ砂漠の抜群の大気透明度を活かすため、TAO望遠鏡は赤外線観測に最適化する。高い透明度と先端の望遠鏡システムによって従来は観測が不可能であった赤外線を高い解像度で観測することができ、世界最高の天文学的成果が期待できる。

超軽量ハニカム構造の
口径6.5m主鏡

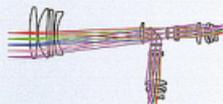


アリゾナ大学提供

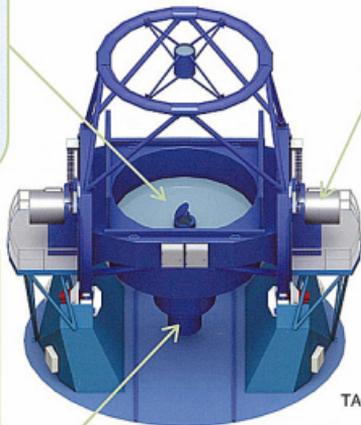
波長30ミクロンを世界で
初めて観測する
中間赤外線撮像分光器



広い視野で高い
観測効率を誇る
近赤外線撮像分光器



フォトコーディング社提供



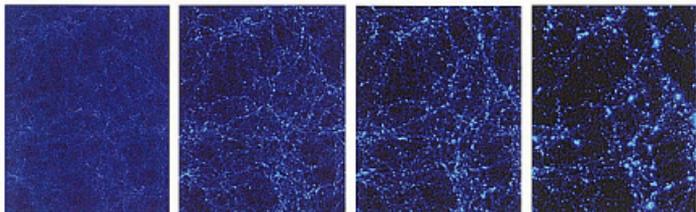
TAO望遠鏡デザイン

TAO望遠鏡が建設される
チャナントール山（標高5640m）
山肌には東京大学が建設した
アクセス道路（全長5.7km）が見える。

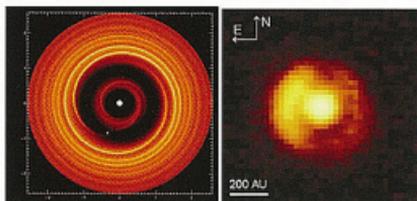


■ TAOが解き明かす宇宙の謎

ではTAO望遠鏡で赤外線を観測すれば何が見えるのだろうか？よく知られているように遠くの銀河からの光は宇宙膨張のため波長が延びて観測される。したがって遠い=過去の宇宙を観るためには波長が長い赤外線による観測が本質的に重要となる。また、惑星が生まれている恒星周囲の絶対温度は50-300度程度に温められており、ここを観るにも赤外線が最適な波長である。TAO望遠鏡ではこれら赤外線の特徴を活かし、天文学究極の2つのテーマである「銀河の誕生」「惑星の誕生」を解き明かすことが期待される。



国立天文台提供



ロンドン大学提供

国立天文台提供

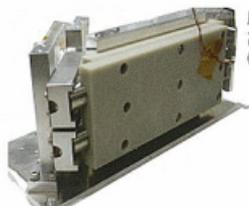
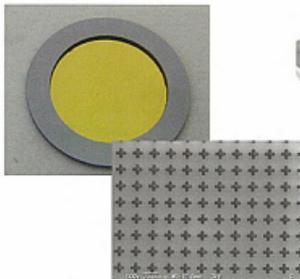
(上) 銀河構造形成のシミュレーション
TAO望遠鏡による観測では130億光年の彼方の宇宙空間を探索して生まれ来る銀河の姿を捉え、銀河誕生の謎を解き明かす。

(下) 惑星形成シミュレーションと実際の観測例
TAO望遠鏡による観測では惑星を育む円盤を星から300億km離れた場所まで詳細に捉え、惑星誕生の謎を解き明かす。1AUは約1億4千km。

■ TAOを支える最先端技術

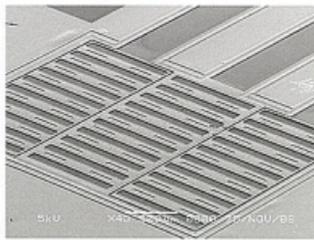
高精度かつ高感度な観測研究を実現するため、TAO望遠鏡および観測装置には光デバイス・薄膜・MEMSなど最新技術が用いられる。これら技術は次世代天文観測の中核を担うものであり、また天文学はもとより、光学や低温・マイクロメカニクスなど様々な分野への応用も期待できる。

薄膜状に形成した十字パターン(幅1ミクロン)により透過波長を制御するメッシュフィルタ



圧電素子を用いた極低温
高速ビームスイッチシステム
(スイッチ速度は<0.03秒)

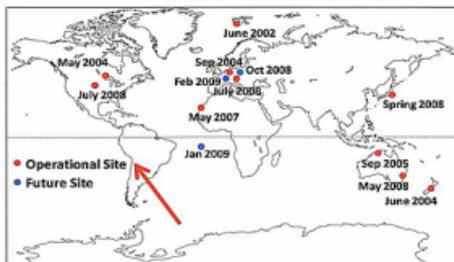
MEMS 技術を用いて
製作されたスリットアレイ
(スリット幅 100 ミクロン)



地球温暖化ガス測定の新手法

■ 温暖化ガス測定におけるアタカマ砂漠の重要性

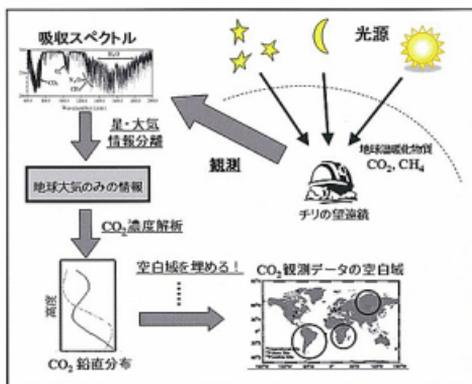
地球温暖化を正しく認識しその解決を図るには、その原因物質と言われる二酸化炭素やメタンなどのいわゆる地球温暖化ガスを正確に測定することが不可欠である。これまで温暖化ガスの測定は世界中に数十カ所ある地上観測点を中心に行われているが、測定地点は北米や欧州に偏っており、全世界規模での温暖化ガス分布はよく分かっていない。特に南米は二酸化炭素の大消費地であるアマゾンがあり、ここでの測定は全世界の大気収支を知る上で重要となる。Solar TAO計画は南米に初めて温暖化ガス測定拠点を設け測定を行うものであり、地球温暖化を理解する上で不可欠なデータを提供すると期待される。



世界の主要な二酸化炭素測定拠点。南米地区には計画中のものを含めても測定拠点が存在しない。矢印はアタカマ砂漠の位置

■ 新手法による温暖化ガスの測定

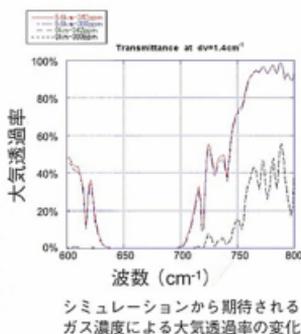
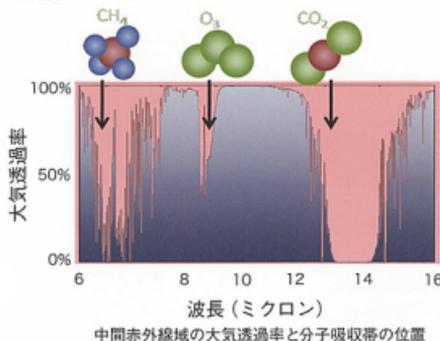
Solar TAO計画では天体観測機器を用いた新しい手法で温暖化ガスを測定する。高高度の天体観測機器を用いることで従来より高精度の測定が可能になる。また吸収測定的光源として星を利用できるため、日中だけでなく夜間も測定が可能になる。さらに市街地から離れた高山で測定を行うことで、局所的な人間活動の影響を受けないグローバルなガス分布を正確に知ることができる。本手法による測定はこれまでの測定では得られない新しい情報を得るものであり、温暖化ガスの大気循環について貴重な情報が得られると期待される。



Solar TAO計画での温暖化ガス測定の模式図

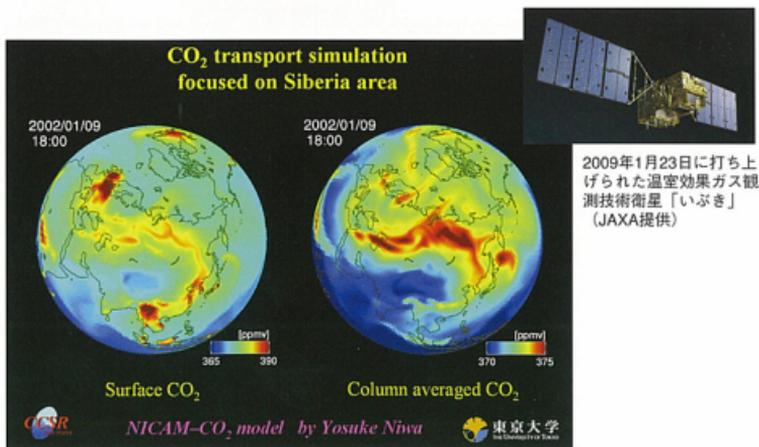
■ 鍵を握る中間赤外線の吸収測定

温暖化ガスの測定は主に5-15ミクロンの中間赤外線域を用いる。ここでは二酸化炭素やメタンといった温暖化ガスの吸収ほか、オゾンによる吸収バンドも存在する。これらの吸収を星からの微弱な光も測ることができる高感度の分光器で測定し、計算機シミュレーションで得られた地球大気モデルと比較することで、各ガス量を正確に求めることができると期待される。



■ 従来測定を補完するSolar TAO計画

Solar TAO計画で得られるデータは、地理的にもまた時間変動という点でも貴重なものがあり、従来の温暖化ガス測定をよく補完するものとなる。たとえば日本の温暖化ガス観測衛星「いぶき」のデータと合わせて解析を行うことで、地球温暖化ガスが地球規模でどのように分布するかを明瞭に描き出す事ができると期待される。

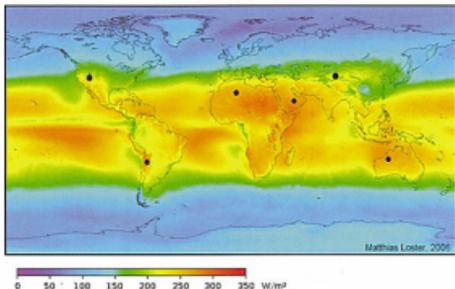


地球大気循環シミュレーションの結果。これと実測値を組み合わせることで二酸化炭素の分布を正確に知ることができる。

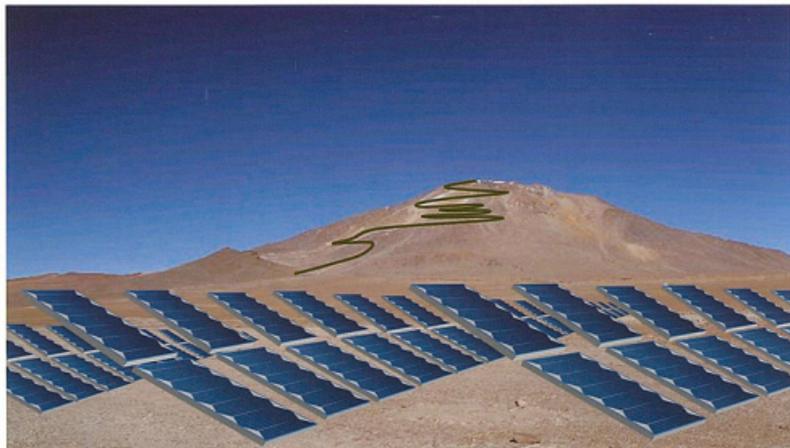
太陽光クリーンエネルギー創生

■ Solar TAO 計画による太陽光発電

太陽光発電は地球環境・エネルギー問題を同時に解決できる最も可能性の高い技術である。太陽からもたらされるエネルギーは人間活動を支えるのに十分な量があり、たとえば世界の砂漠地帯の4%に太陽電池を設置すれば世界の電力消費量をすべて賄うことができる。その意味で日照に恵まれた砂漠地帯は新たなクリーンエネルギーの宝庫である。Solar TAO計画では晴天率に恵まれたアタカマ砂漠に数MWの太陽電池を展開・運用する。これによってTAO望遠鏡の消費電力(約1MW)の全てを賄う。クリーンエネルギーで動く大型先端研究施設は世界で初めての例である。加えてSan Pedro de Atacama市の電力もすべて太陽光発電から供給する。これは先端研究施設と地域が協力し合う新しい形であり、環境新時代の科学と都市の共生のモデルケースとなることが期待される。



世界の日照量を示した図。黒丸印は主な砂漠地帯を表す。世界中の砂漠の中でもアタカマ砂漠は最大の日照量を示しており、太陽光発電に最も向いた地区である。
(http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/より)



アタカマ砂漠に展開された太陽光発電パネルと山肌をかけあがる超伝導ケーブル(想像図)TAO望遠鏡は背後に見えるチャナントル山の山頂に建設される。

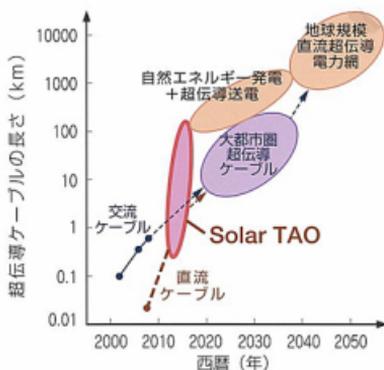
■ 高温超伝導ケーブルによるロスのない送電

太陽光から得られた電力は高温超伝導ケーブルによって遠隔地まで運ばれる。超伝導ケーブルを用いることで途中の電力ロスをなくすことができ、生成したエネルギーを無駄なく有効に使うことができる。ケーブル技術開発はすでに十分なレベルに達しており、Solar TAOは将来の実用化に向けた最適なテスト環境となる。

Solar TAO計画では、太陽電池建設地からSan Pedro de Atacama市への直流超伝導送電、電力貯蔵技術を確立し、約50 km離れた天文台への送電、さらにはチリ北部地域への送電を可能にする。



高温超伝導ケーブル (住友電工提供)



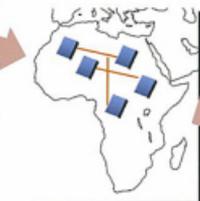
■ Solar TAOからSahara Solar Breeder、そしてGENESIS計画へ

Solar TAOで用いられる発電・送電技術は、2009年3月のG8+5 科学技術会議で日本が提唱したSahara Solar Breeder計画（サハラ砂漠に太陽電池を展開し都市に高温超伝導で送電するとともに、そのエネルギーで新たな太陽電池を増やすという計画）の根幹をなす技術である。また太陽光発電+超電導送電を地球規模で展開しクリーンエネルギーネットワークを形成するという壮大なGENESIS計画にも沿うものである。

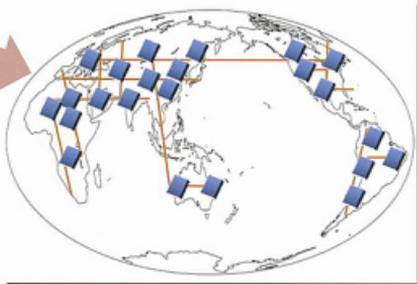
Solar TAO計画は、アタカマ砂漠の良好な環境の基に太陽光発電・送電技術を結集し、実際にクリーンエネルギーを有効活用することで、その有用性を世界に示すショーケースの役割を果たすと期待される。



Solar TAO 計画



Sahara Solar Breeder 計画



GENESIS 計画



Solar TAO Project

代表者：吉井 諒 東京大学理学系研究科天文学教育研究センター教授

連絡先：tao-office@ioa.s.u-tokyo.ac.jp
