

校正ライフサイクルの活用による 地球観測衛星データの不確かさの低減

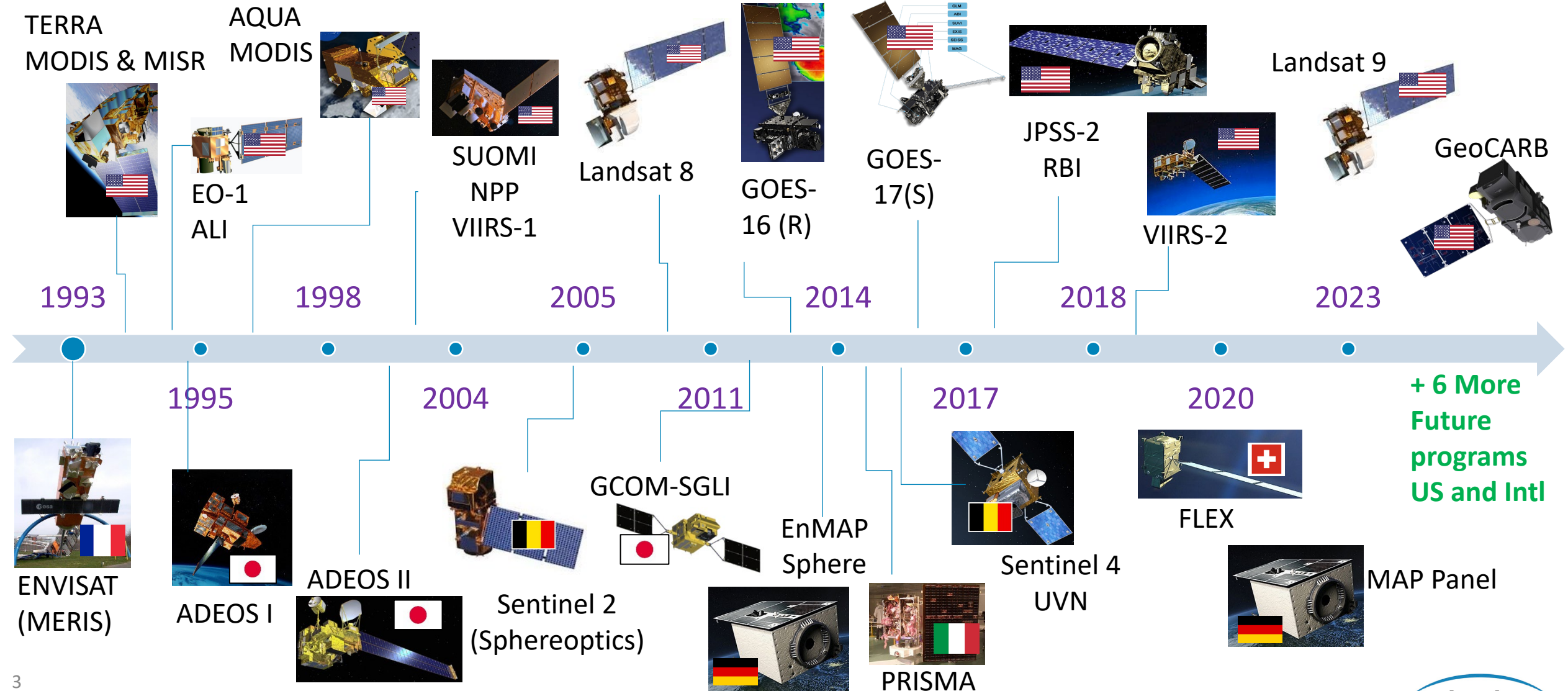
ISIEX January 28, 2026

Theodore Schwarz, Optical Applications Engineer,
Labsphere (NH USA), tschwarzlabsphere.com, C: +1 617-304-4255

発表内容

- **Labsphere社**
 - 地球観測校正における歩み
- **不確かさを低減する必要性**
 - 価値と収益…そして校正？
- **不確かさの詳細**
 - 最終結果
 - 算出方法
- **校正ライフサイクル**
 - 不確かさの低減を達成する手法

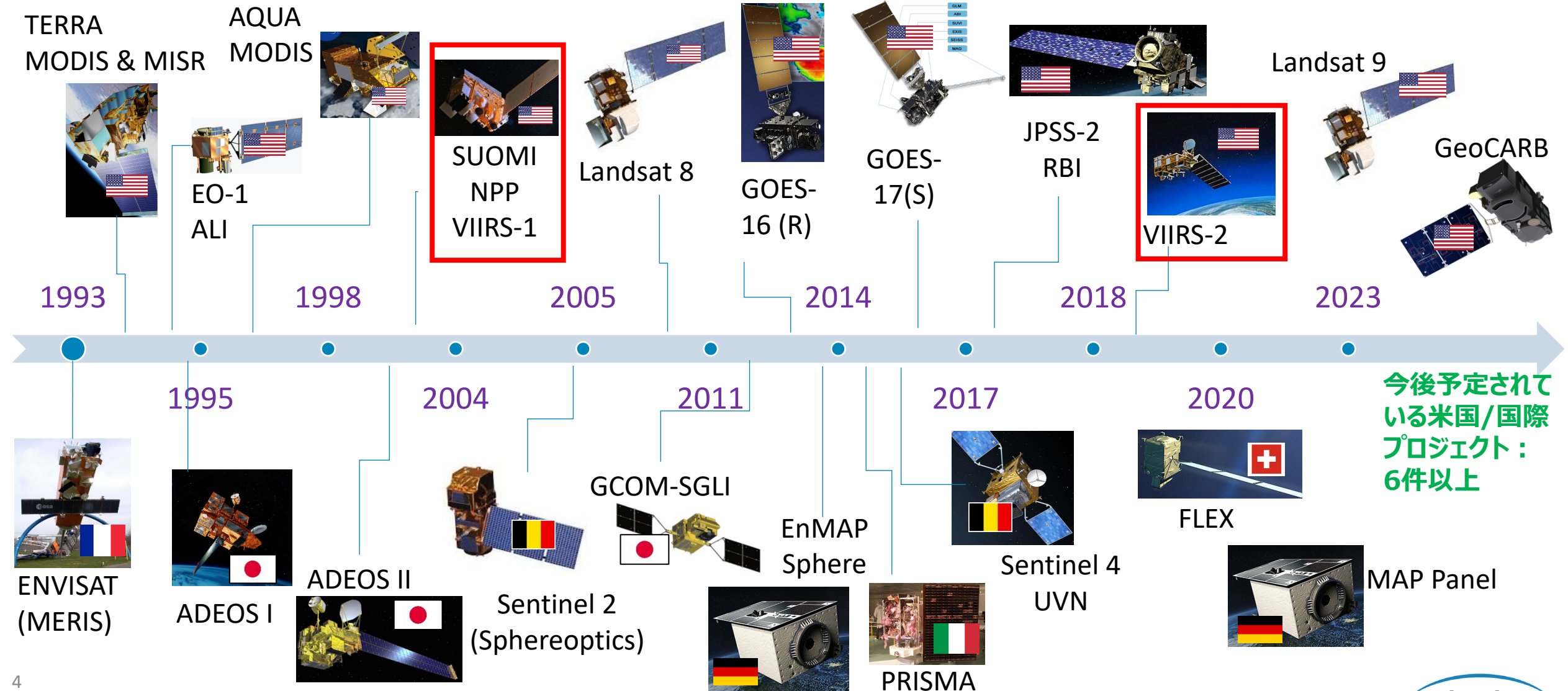
Labsphere 衛星上EOS 校正の歩み



Timeline Dates are Labsphere Product Completion (not launch)

Labsphere

衛星上EOS 校正の歩み



タイムラインの日付は、Labsphere製品の完成日（打ち上げ日ではない）

NOAA JPSS-VIIRS 装置



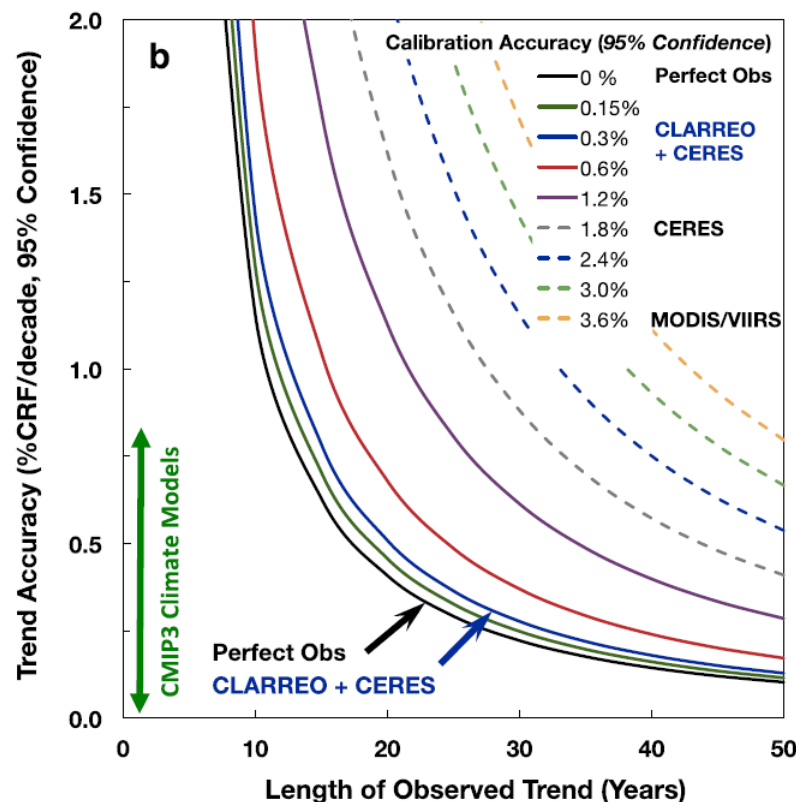
- 極軌道環境観測衛星
- JPSS 2, 3, 4 機に搭載された VIIRS
- 大気およびTVACキャンペーン中の打ち上げ前校正
- Labsphereが提供する斬新な均一光源ソリューションを活用



不確かさ低減の必要性

- 10年ごとの調査（ディケイダル・サーベイ）ベンチマーク測定
 - 地球から宇宙空間へ放出される赤外線エネルギー（ λ ）（温度精度 0.065K）
 - 宇宙への太陽放射の波長別反射率（0.3%）
 - SIワットへのトレーサビリティ
- 臨界強制力に関する情報：
 - 大気温、水
 - 放射流速
 - 雲/地表面アルベド
 - 温度/放射率

Reflected Solar Accuracy and Climate Trends



Climate Sensitivity Uncertainty is a factor of 4 (IPCC) which = a factor of 16 uncertainty in climate change economic impacts

Climate Sensitivity Uncertainty = Cloud Feedback Uncertainty = Low Cloud Feedback = Changes in SW CRF/decade (y-axis of figure)

Higher Accuracy Observations = CLARREO reference interval of CERES = narrowed uncertainty 15 to 20 years earlier

Wielicki et al. 2013, Bulletin of the American Meteorological Society



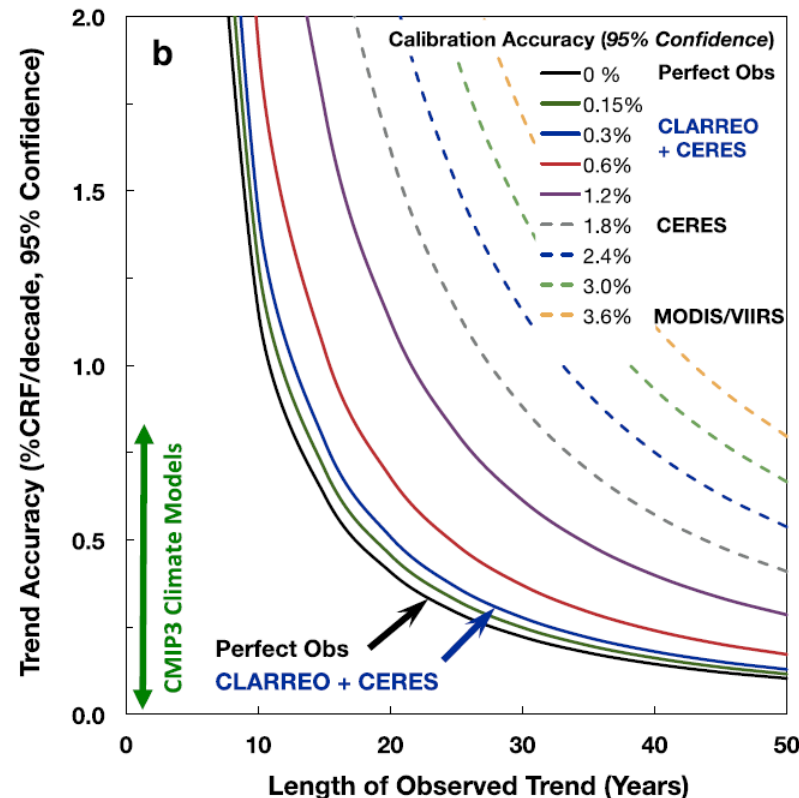
High accuracy is critical to more rapid understanding of climate change



不確かさ低減の必要性

- データ記録は、自然な変動によるばらつきに制約される
- 複合的な変動性
 - ENSO 3-5 年
 - 日射量 11年
 - 太平洋十年規模振動 10-30年
- 理想的な観測システム – 12年
 - 測定における不確かさは、必須記録時間の増大を招く
- 不確かさの低減によりもたらされる価値は、**数兆ドル**規模と推定されている

Reflected Solar Accuracy and Climate Trends



Climate Sensitivity Uncertainty is a factor of 4 (IPCC) which = a factor of 16 uncertainty in climate change economic impacts

Climate Sensitivity Uncertainty = Cloud Feedback Uncertainty = Low Cloud Feedback = Changes in SW CRF/decade (y-axis of figure)

Higher Accuracy Observations = CLARREO reference interval of CERES = narrowed uncertainty 15 to 20 years earlier

Wielicki et al. 2013, Bulletin of the American Meteorological Society

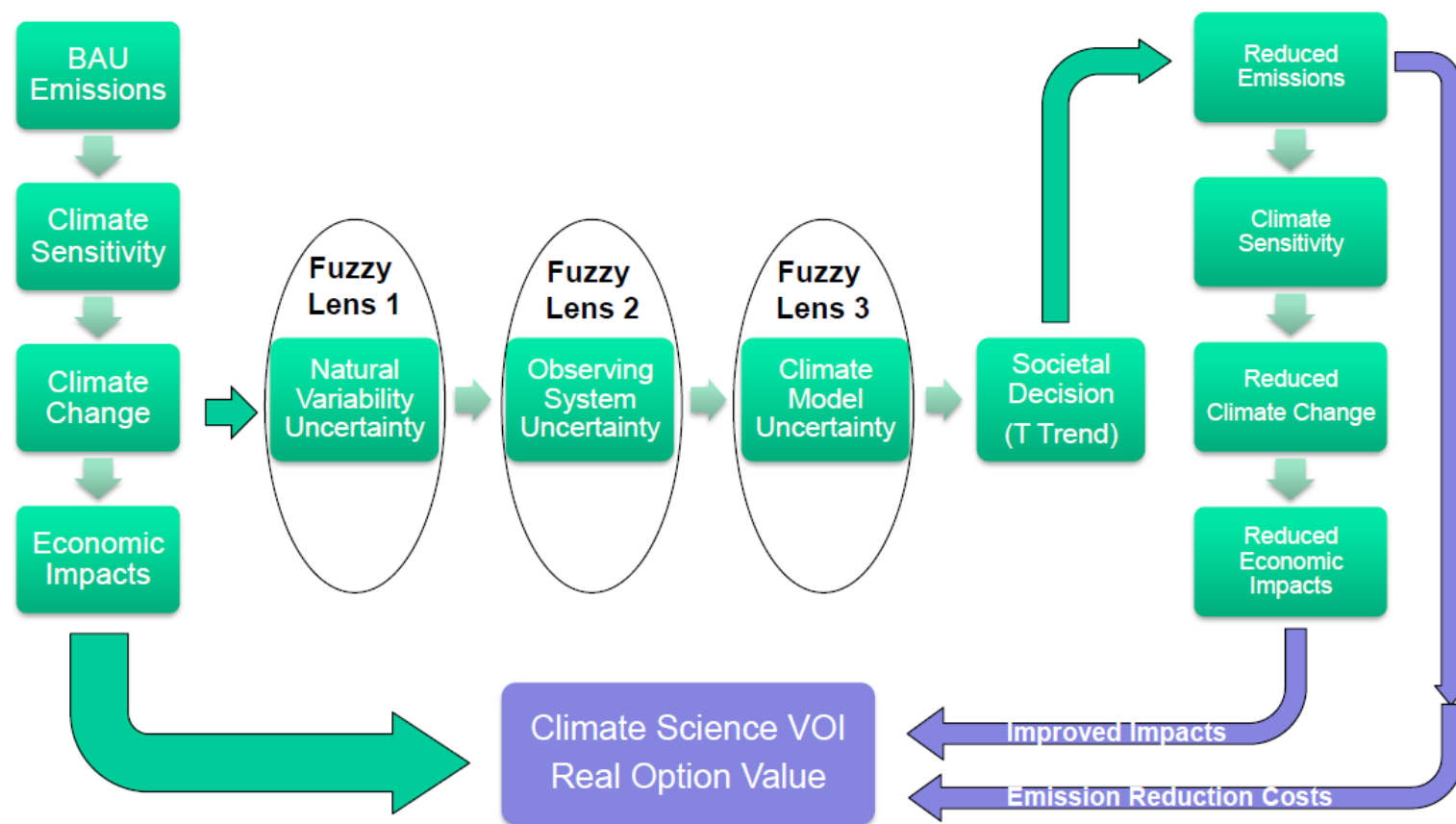


High accuracy is critical to more rapid understanding of climate change



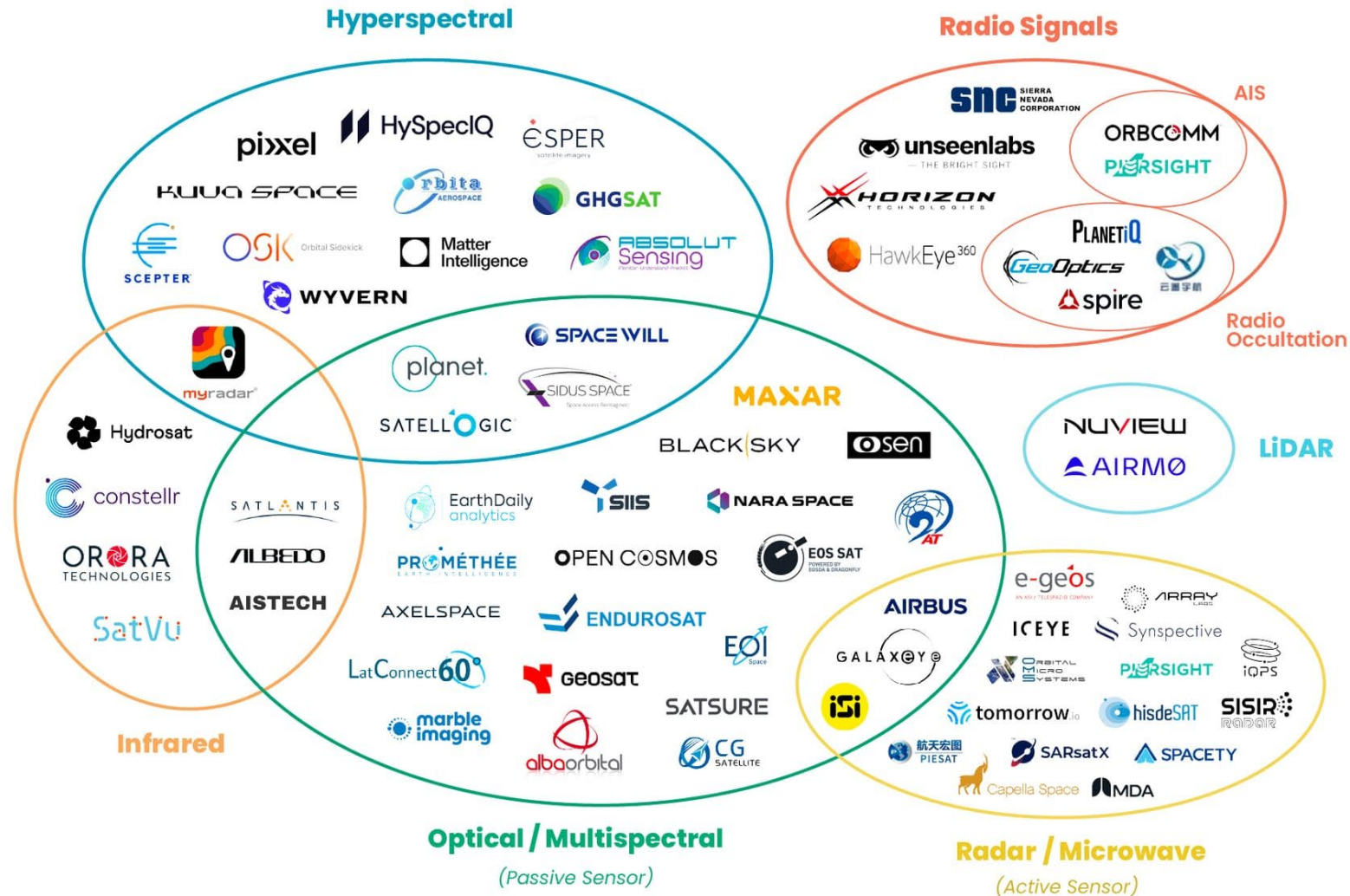
不確かさ = 価値?

VOI Estimation Method: Cooke et al. 2016a



- 高精度なモデリング
- 予測精度の向上
- 長期インフラ計画
- 知覚を変え、人間に「正しい行動」を取らせる

Earth Observation Commercial Satellite Companies



相互運用性

- **最も価値のあるデータとは相互運用可能なデータである = データの有用性がその情報源に依存せず、他の情報源からのデータと容易に統合できる場合**
- **しかし、たとえ「同じ」衛星であっても、全く同じではない**
 - それらを一致させるにはかなりの努力が必要
 - 共通の参照基準を持たない、異なるタイムゾーンに設定された二つの時計に喩えられる。
- **例: Landsat 8号と9号は同一設計であったが、打ち上げ当初は修正が必要な差異が存在した。現在は1%以内の誤差に収まっているが、これは校正後の数値である。**
 - 根本的に、データが正しくない場合、ソフトウェアで「修正する」能力…他の何かを壊さずに…が、そのデータの有用性の限界である。
- **例: Sentinel 2 と Landsat 8の相互運用性を実現するには、何年もかかり、何千時間もの労力を要した。**
 - これは衛星 2 基のケース。衛星コンステレーション規模となったら、どのように実現できるのか？

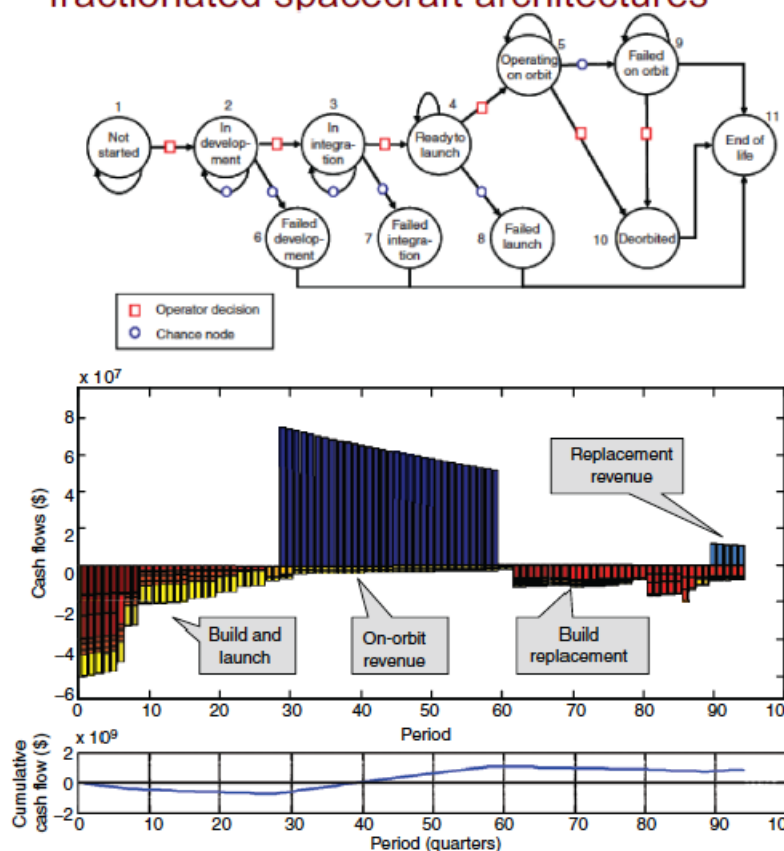
1衛星 vs. 1コンステレーション

- 現在、年間数十基の低コストEO衛星を打ち上げている…そして、均一イメージングシステムとして稼働する異なる世代の衛星群
- これらのセンサーを「科学」レベルに到達させるためには、何を変える必要があるのか？
- ターゲット観測の本質を支えるために、校正技術は進化する必要がある。
- **校正はコピキタス、自動化、専門家の介入に頼らず…そして「安価」でなければならない。このニーズを満たすために、校正能力をどのように強化できるか？**
- **例:スペクトルバンド補正係数（SBAF）を用いると、データの一貫性は向上する。**
 - しかし、これらの手法は単にエネルギーを酷使しているだけで、根本的な問題を解決していないのでは？
 - SBAFは「校正」なのか、それともデータの一貫性への近道なのか？

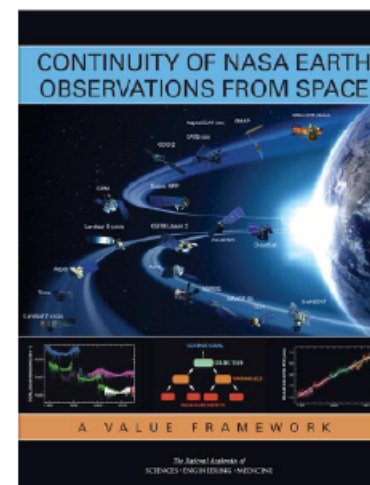
小型衛星 データの 評価

Value-centric design methods were developed for fractionated spacecraft architectures

- Value-centric design methodology* has been used to quantify life-cycle value of fractionated spacecraft architectures



- NRC Recommendation: “NASA should establish a value-based decision approach...” [2015]
- “a value-centered framework is capable of distinguishing among competing Earth measurements” – [NRC committee, 2015]



$$V = B \times A = (I \times U \times Q \times S) \times A$$

Siddiqi, A., Magliarditi, E., and de Weck, O. L., “Valuing New Earth Observation Missions for System Architecture Trade Studies” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, (2019)

解析準備済みデータ (ARD)とは何か？

- “2006年、クライブ・ハンビーは「データは新たな石油である」と提唱。マイケル・パーマーはハンビーの言葉を引用し、石油と同様にデータは「価値があるが、未加工なままだと真に活用できない。[石油] はガスやプラスチック、化学製品などに変換されて初めて収益を生み出す価値ある存在となるように、データも細分化・分析されて初めて価値を持つのだ。」と述べた。 - Wikipedia
- **現在利用可能な航空機搭載型および衛星の電気光学データの量は指数関数的に増加しているが、その固有の光学性能、信号品質、効率性、および実用性はそれに追いついていない。**
- **より多くのデータだけではなく、より良いデータが必要。**

データ抽出 & センサフュージョンを実現

センサー群におけるデータの整合

- 1つのコンステレーション内で100

プラットフォーム間の整合

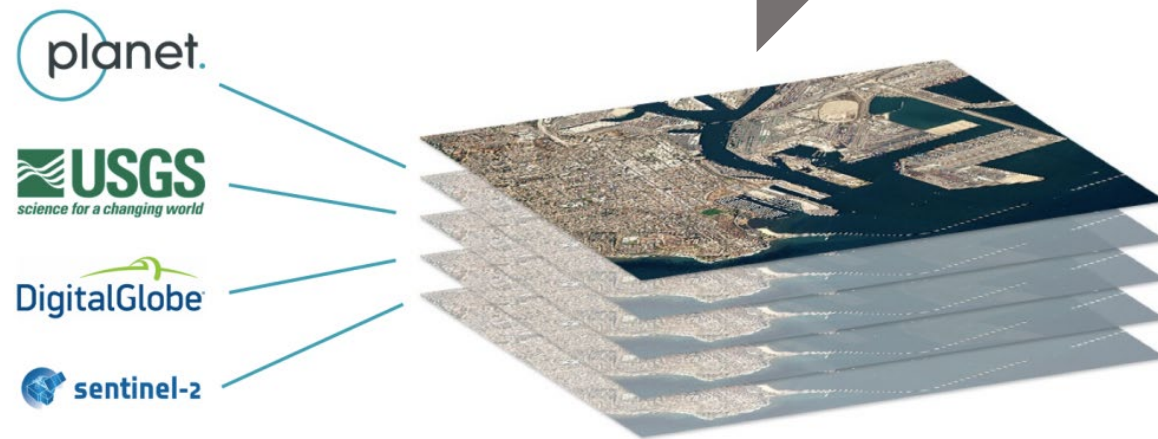
- 大型衛星/小型Sat/UAV

技術間のセンサフュージョン

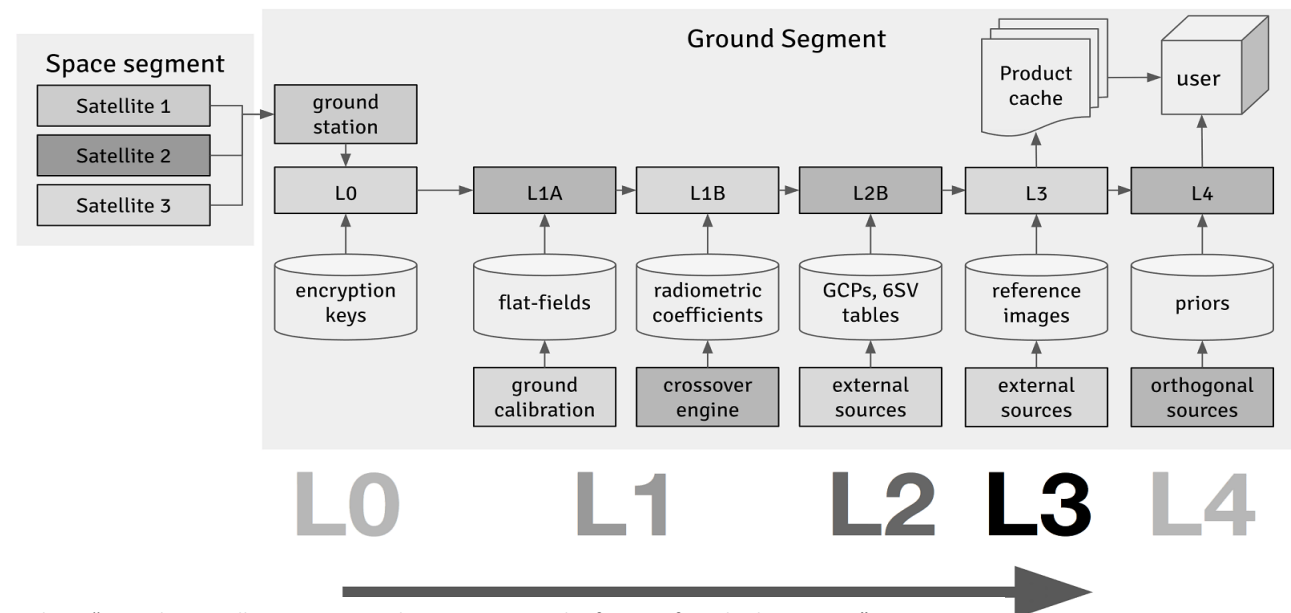
- 衛星 / SAR / 仮想衛星群

機械学習 (ML)/人工知能 (AI)の最適化

- より多くの価値/知見を引き出す



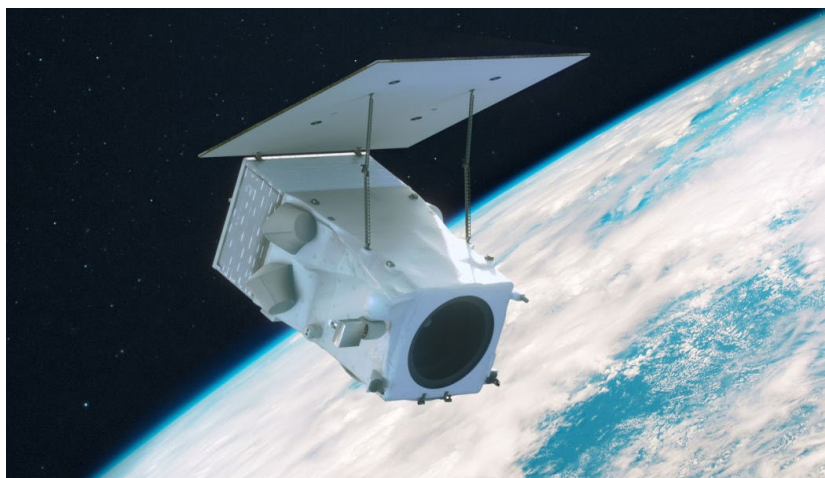
<https://www.planet.com/pulse/satellite-interoperability-workshop/>



不確かさの評価 – 結果

Vantor WoldView-Legion

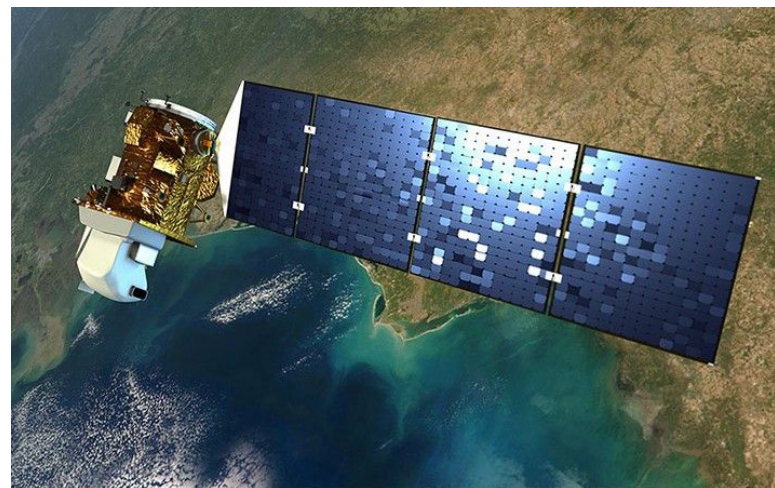
- 最先端の商用EO衛星コンステレーション
- 打ち上げ: 2024
- 乾燥重量: 630kg
- スペクトルバンド: 8
- GSD: 1.36m (multi-spectral)



Credit: Maxar

LandSat-8

- 政府フラッグシップEOミッション
- 打ち上げ: 2013
- 乾燥重量: 1512kg
- スペクトルバンド: 9 (OLI)
- GSD 30m (multi-spectral)



Credit: NASA

不確かさの評価 – 結果

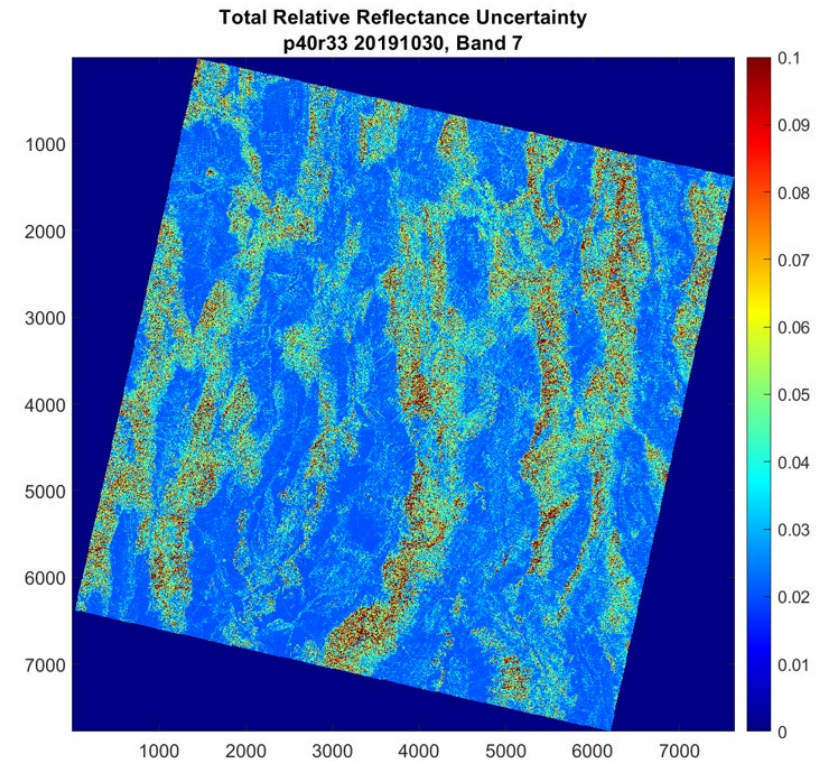
Vantor WoldView-Legion

Vantor WorldViewクラスセンサの不確かさ仕様（校正済み放射計データ製品向け）：

- ダイナミックレンジの10%未満については、仕様は存在しないものとする
- ダイナミックレンジの10%～85%については、絶対放射応答仕様は、VNIRセンサでは不確かさ $\pm 5\%$ を、SWIRセンサでは不確かさ $\pm 10\%$ を超えてはならない
- IOCにおいては、VNIRセンサでは不確かさ $\pm 10\%$ 、SWIRセンサでは不確かさ $\pm 15\%$]
- ダイナミックレンジの85%以上については、仕様は存在しないものとする

Source: Kuester, “Radiometric Performance of Maxar Legion Earth-Observing Sensors” JACIE 2025

LandSat-8



Relative reflectance total uncertainty image (left) and histogram (right) for Landsat 8, p40r33, 10/30/2019, Band 7.

Source: Ryan, “Landsat 8 L1T Product Radiometric Pixel Uncertainty” JACIE 2025

不確かさの「用語」

- **測定値** – 測定対象の数量
- **誤差** – 測定値と真の値の差
- **精度** – 測定値と真の値の近さ
- **不確かさ** – 測定結果に関連付けられたパラメータで、測定対象物に合理的に帰属し得る値の分散を特徴付けるもの¹
 - 定義された基準値に対するあらゆる測定の不確かさの性質（ランダム／系統的）に寄与する要因について、厳密かつ詳細な予算を確立すること²
 - 任意の時点における測定値を指し、計測装置そのものではない

$$error = Reading - True Value$$

$$Accuracy = \frac{Error}{True Value} \times 100\%$$

1. NPL, <https://www.npl.co.uk/resources/q-a/difference-accuracy-uncertainty>
2. SI-Traceable Space-based Climate Observing System a CEOS and GSICS Workshop NPL, Sept 9-11, 2019.

不確かさの「用語」

- 包含係数 – k 、近似信頼水準を持つ区間を定義する値
- 標準不確かさ、 u 、標準偏差として表される不確かさ
- 合成標準不確かさ – u_c 、RSSの不確かさの合成で、各項が1標準偏差 (σ) を表す
- 拡張不確かさ – U_c 、包含係数適用後の不確かさ
- トレーサビリティ – あらゆる測定値とその一次標準器との関連性を文書化し、証明すること¹

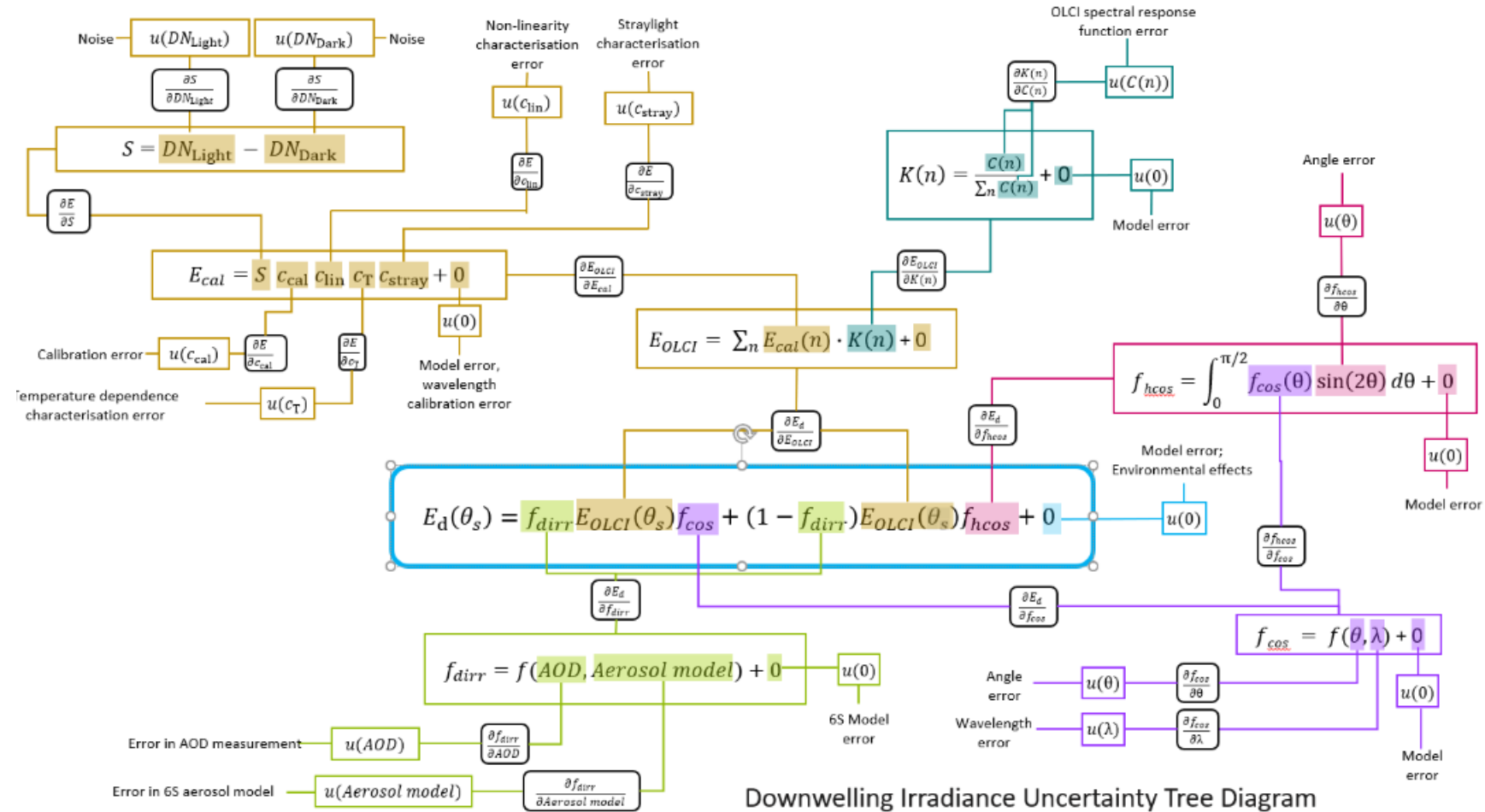
$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$$

$$U_c(y) = u_c(y) \cdot k$$

1. SI-Traceable Space-based Climate Observing System a CEOS and GSICS Workshop
NPL, Sept 9-11, 2019.

例:下向き放射照度

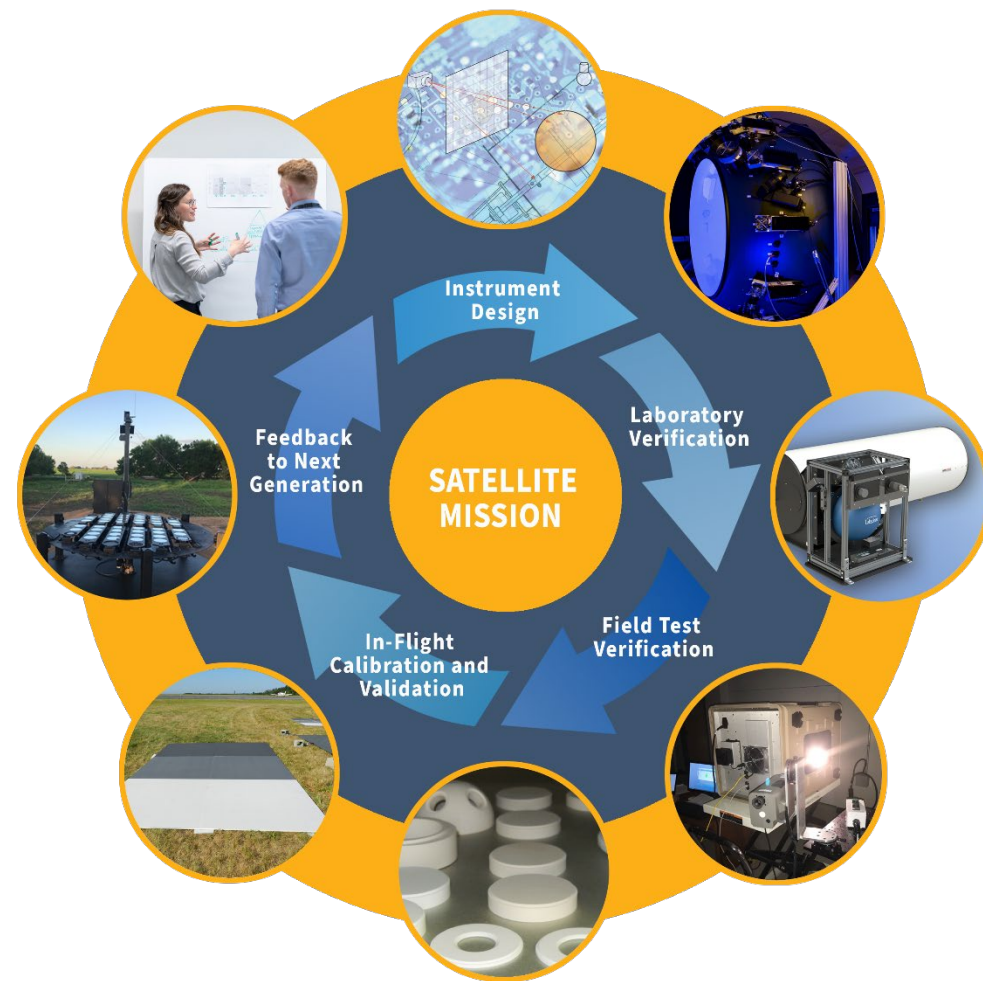
- すべての変数と不確かさは測定方程式 $E_d(\theta_s)$ に入力される
- これは離水放射輝度の計算に入力される
- 各変数には確率分布関数と不確かさが存在する



Downwelling Irradiance Uncertainty Tree Diagram

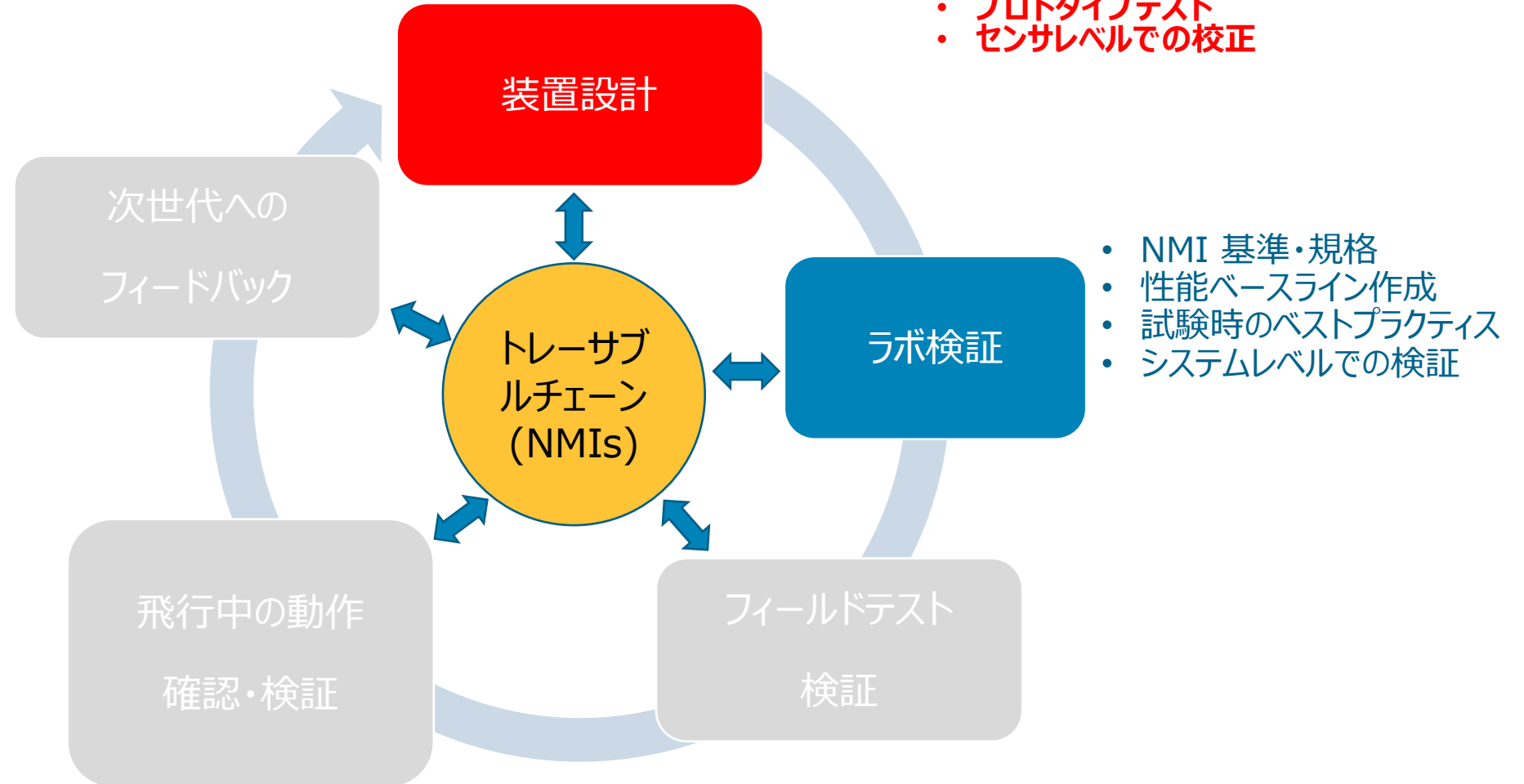
EO 校正ライフサイクルとは何か？

- 不確かさの低さと解析準備済みデータ（ARD）の鍵
- ミッション計画
 - 装置配置
 - 校正
- 装置設計 & ラボでの検証
 - 地上支援機器（GSE）
 - 衛星上校正
 - 代替校正計画
- フィールド & 動作検証
 - 代替校正
- 次世代フィードバック
 - 設計



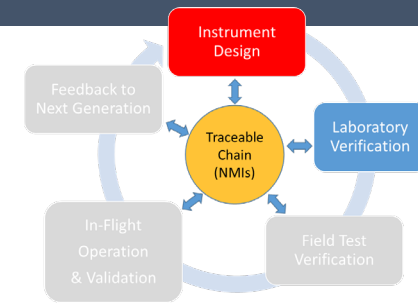
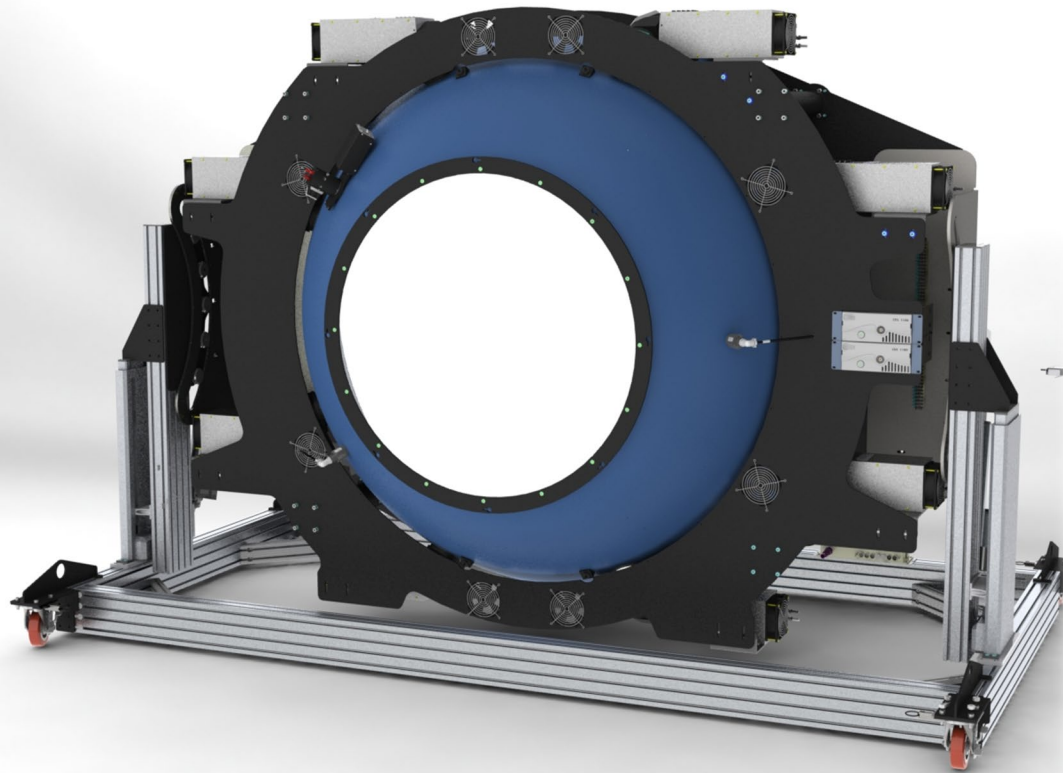
EO 校正ライフサイクル

- ・ 性能 vs. 目標
- ・ 校正/検証コンセプト
 - 衛星上、代替、ラボ・サービス
- ・ プロトタイプテスト
- ・ センサレベルでの校正



実験室環境下における絶対値校正

- 積分球の構成素材
- 積分球サイズ
- ダイナミックレンジ
- 光源タイプ
 - プラズマ光源, Xeランプ, LED, レーザー光源, ハロゲン光源, UV/IR
- 必要な波長バンド
- 必要な波長範囲
- メカニカルな特注要素
- 使用環境



その他:

- 安定性と制御
- ソフトウェアへの特注要素の追加
- 温度制御
- 納期

真空隔壁

LED Power, TEC
温度フィードバック

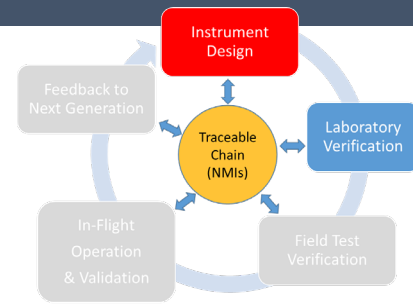
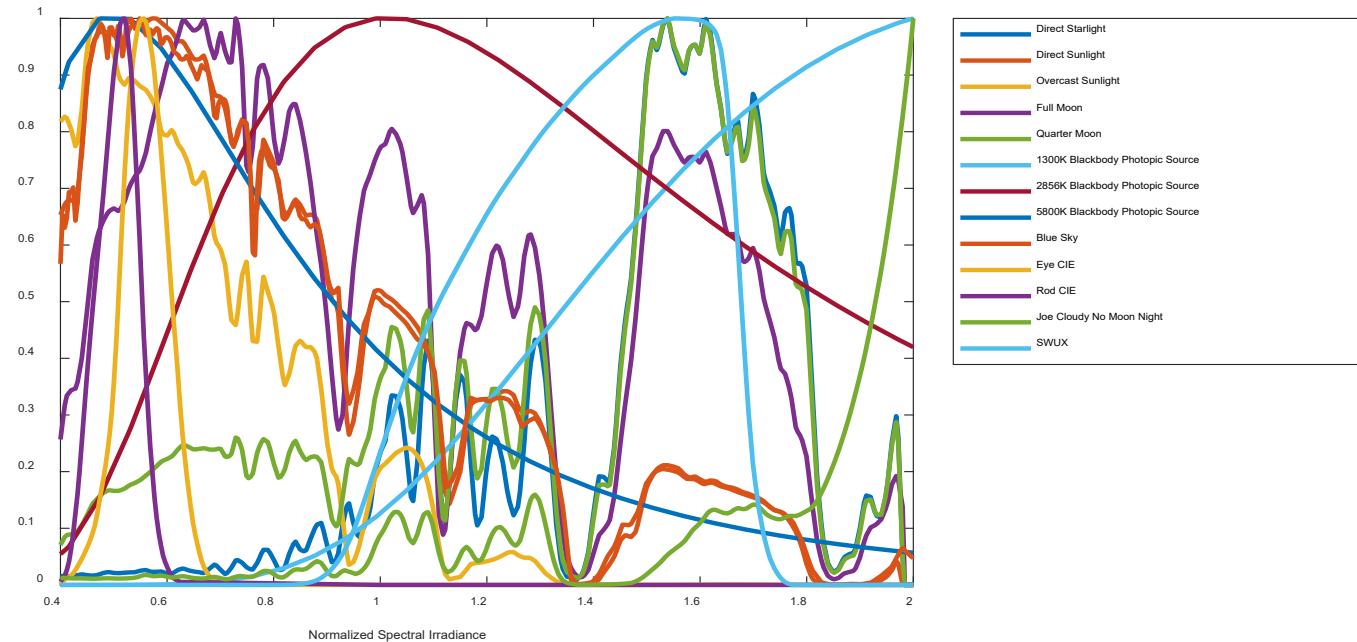
光出力フィードバック

冷媒の循環



要求される光スペクトル仕様

- 光スペクトルマッチング
 - 複数ランプタイプの組み合わせ使用
 - 光学フィルタや光源への厳しい仕様要求
- 青色光エネルギーの出力確保
 - プラズマランプ
 - 青色LED光源
- 近赤外エネルギーの出力確保
(長波長側 : >1200nm)
- 複数バンドにおける同時仕様達成



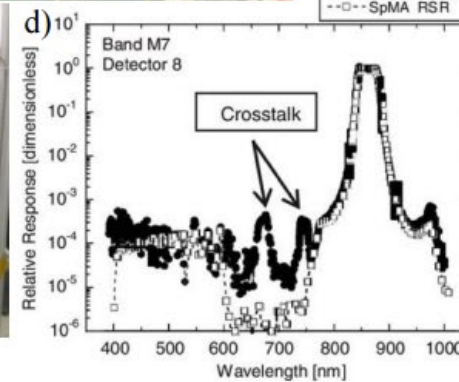
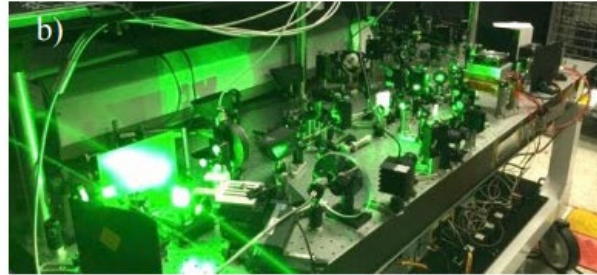
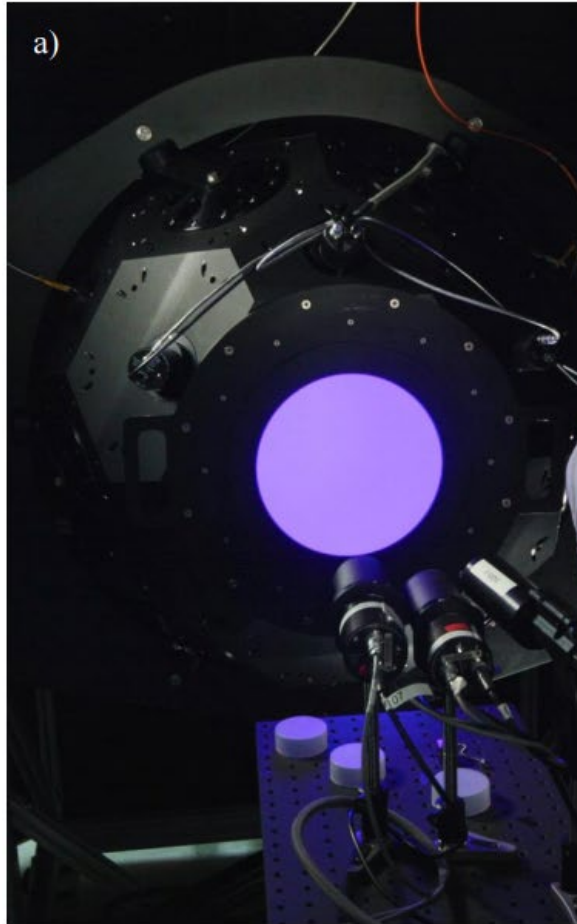
NASA GLAMR Primary Calibrator (<0.25% $k=2\sigma$ 不確かさ).



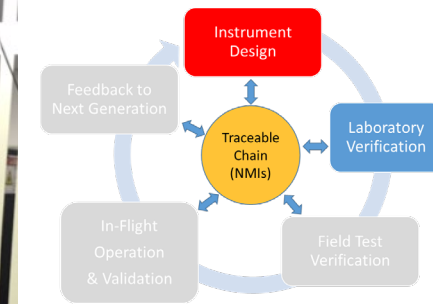
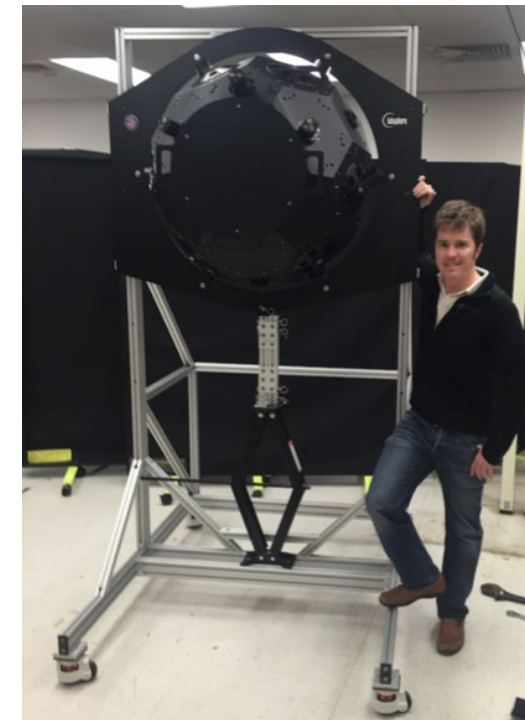
Goddard Laser for Absolute Measurement of Radiance (GLAMR)

Joel McCorkel¹, Brendan McAndrew², Kurt Thome¹, Jim Butler¹

¹Code 618, ²Code 551 – NASA/GSFC



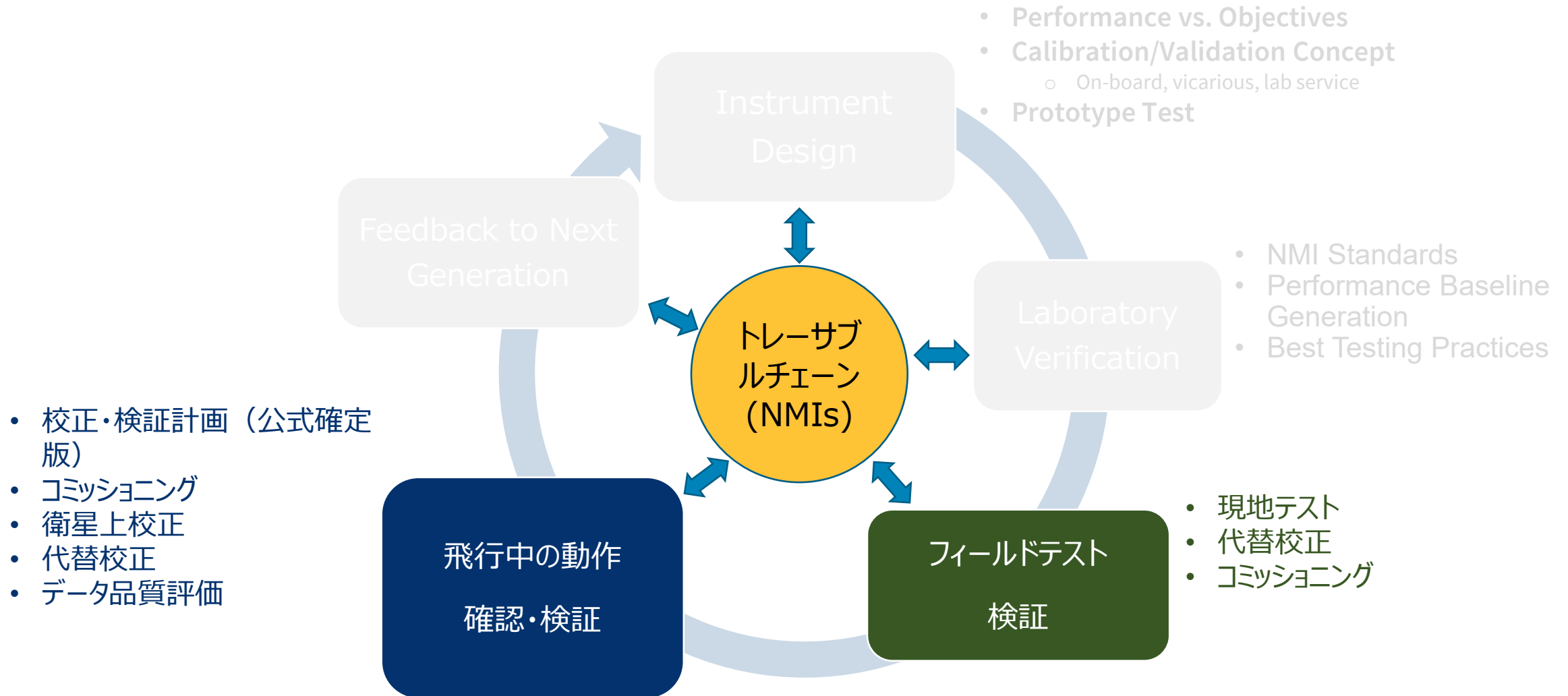
GLAMR is a tunable and high-powered laser system that provides an ideal light source for characterizing the spectral and radiometric response of an instrument. This pure signal allows decoupling of sensor features (e.g. linearity, crosstalk, scattered light) and orders of magnitude better absolute radiometric accuracies.



シーム幅0.5mm未満
の積分球デザイン

McCorkel, NASA/GSFC

EO校正ライフサイクル



卫星上校正: Sources and sphere for ENMAP

- Active calibration from QTH lamps and LEDs

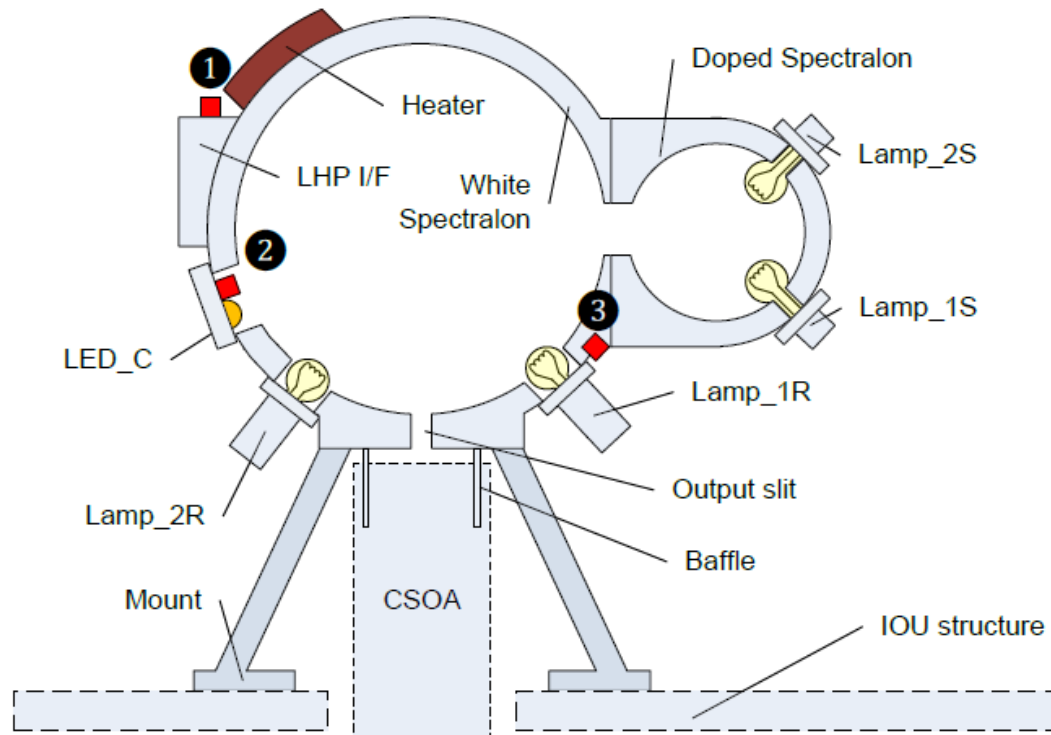
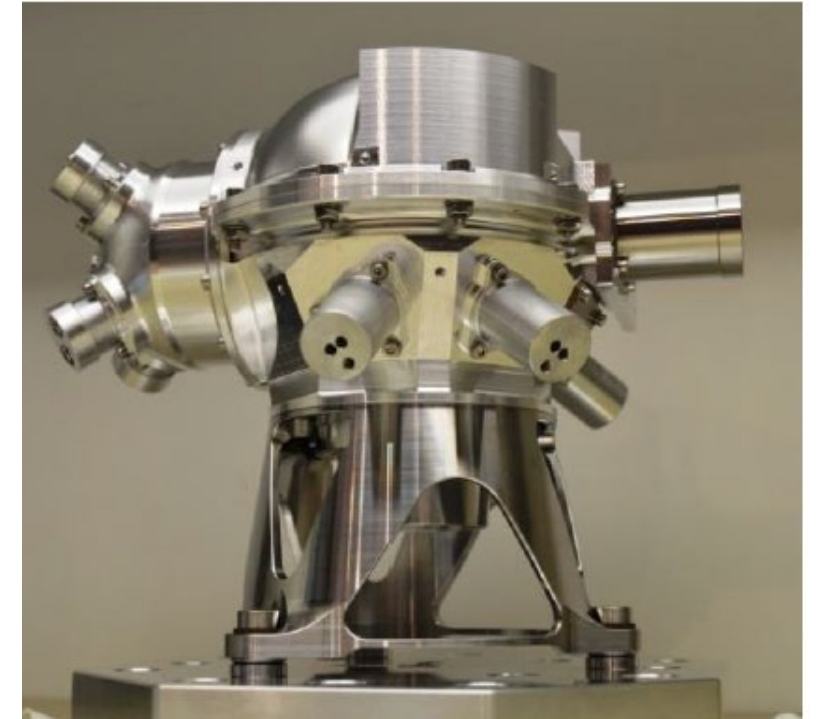
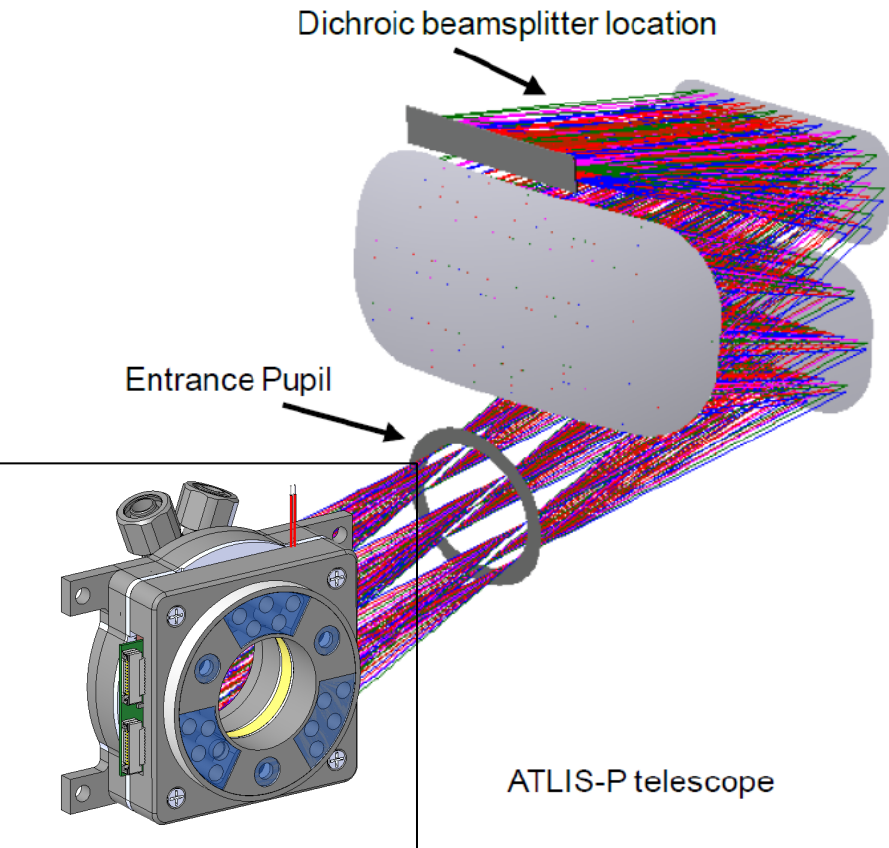


Fig. 4. General design of the OBCA

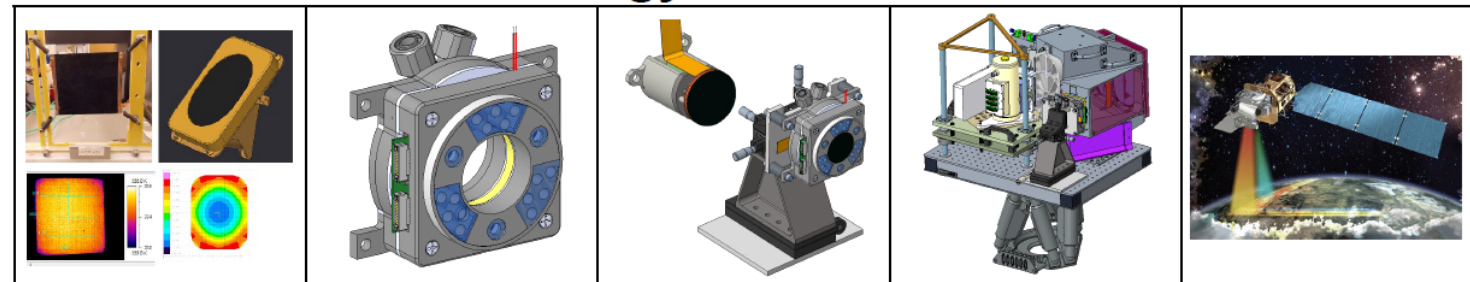


An on-board calibration assembly(OBCA) on the ENMAP satellite, Wilkens, Sang, Erhard, Bittner, et. Al., International Conference on Space Optics, 2016.

衛星上校正: Jones' Source FPA Illuminator



Spiral calibration source development yields more mature product for future technology insertion

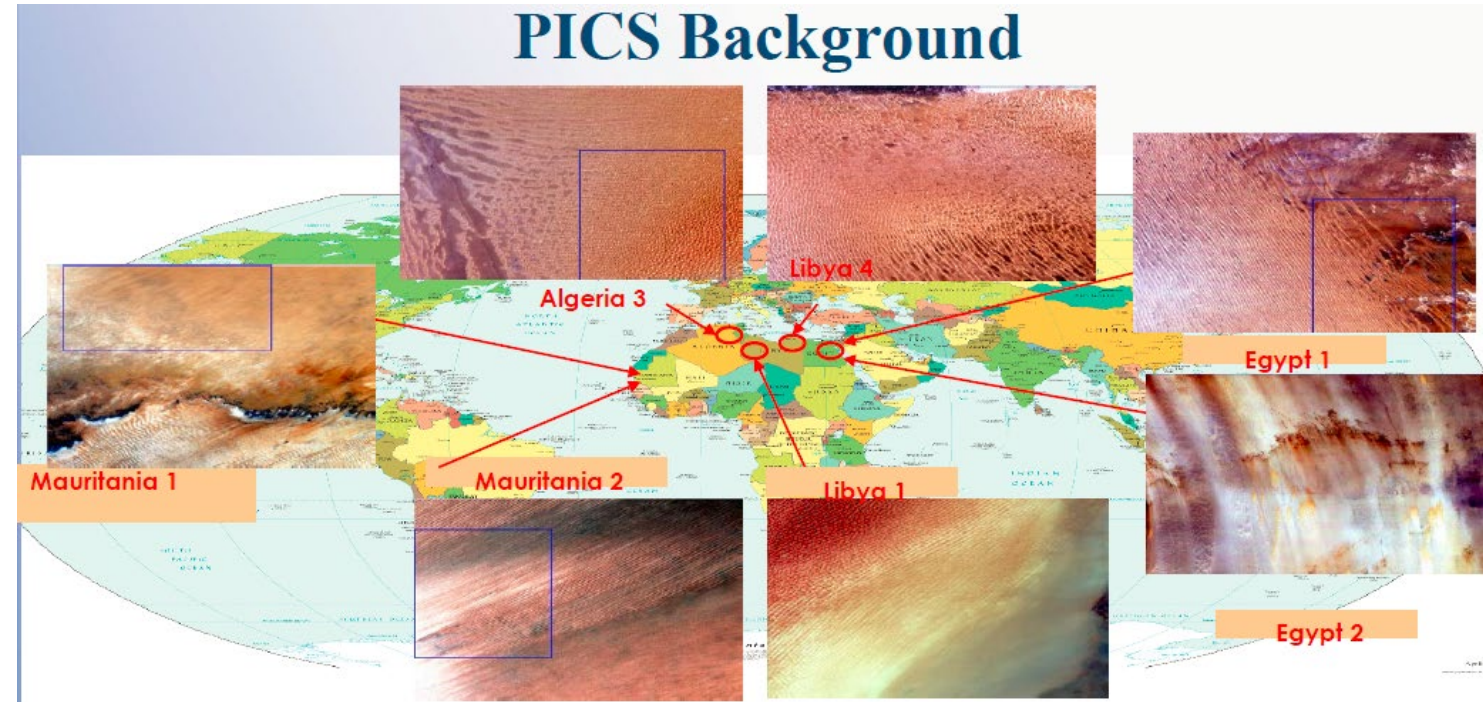


Blackbody Design & Demonstration	Breadboard Design & Procurement	Breadboard Characterization & Brassboard Design	Brassboard MAI&T	Flight Design & Qualification
Phase 0	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
<ul style="list-style-type: none"> Demonstrate thermal uniformity and responsivity Demonstrate active temperature control Demonstrate high (>0.995) emittance 	<ul style="list-style-type: none"> Generate supplier statement of work and specification Procure VSWIR sources Define test setup and equipment 	<ul style="list-style-type: none"> Receive and test breadboard VSWIR sources Design, analyze, and procure brassboard and thermal infrared sources 	<ul style="list-style-type: none"> Demonstrate and characterize the brassboard design with ATLIS-P telescope Demonstrate and characterize mechanical functionality 	<ul style="list-style-type: none"> Finalize Flight design and qualify thru full environmental testing including radiation
Metrics	Metrics	Metrics	Metrics	Metrics
<ul style="list-style-type: none"> Design for thermal infrared blackbody emitter Measurements that anchor thermal model and optical parameters 	<ul style="list-style-type: none"> Generate SSOW and Spec for calibrator procurement Procure FPA, Dewar, and Electronics Finalize test equipment list and procure 	<ul style="list-style-type: none"> Integrate VSWIR calibrator with ATLIS-P telescope Characterize breadboard VSWIR calibrator Identify space qualified sources 	<ul style="list-style-type: none"> Stable, uniform illumination of FPAs across FOV Demonstrated compliance with 2019 RMA Exit TRL 5+ 	<ul style="list-style-type: none"> Calibrator passes environmental qualification Calibrator successfully tested on Engineering Development Unit

PICS校正

- **PICS:擬似不変校正サイト**

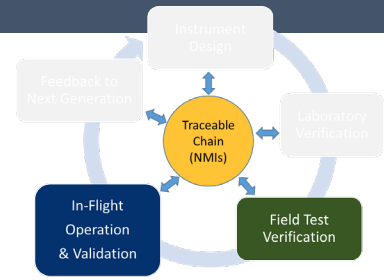
- 地球上または宇宙空間において、反射率プロファイルが一定である物体を使用する
- 測定頻度は高いが、検証頻度は少ない
 - 主として相対参照
- 砂漠 – Libya 4



http://calval.cr.usgs.gov/sites_catalog_ceos_sites.php

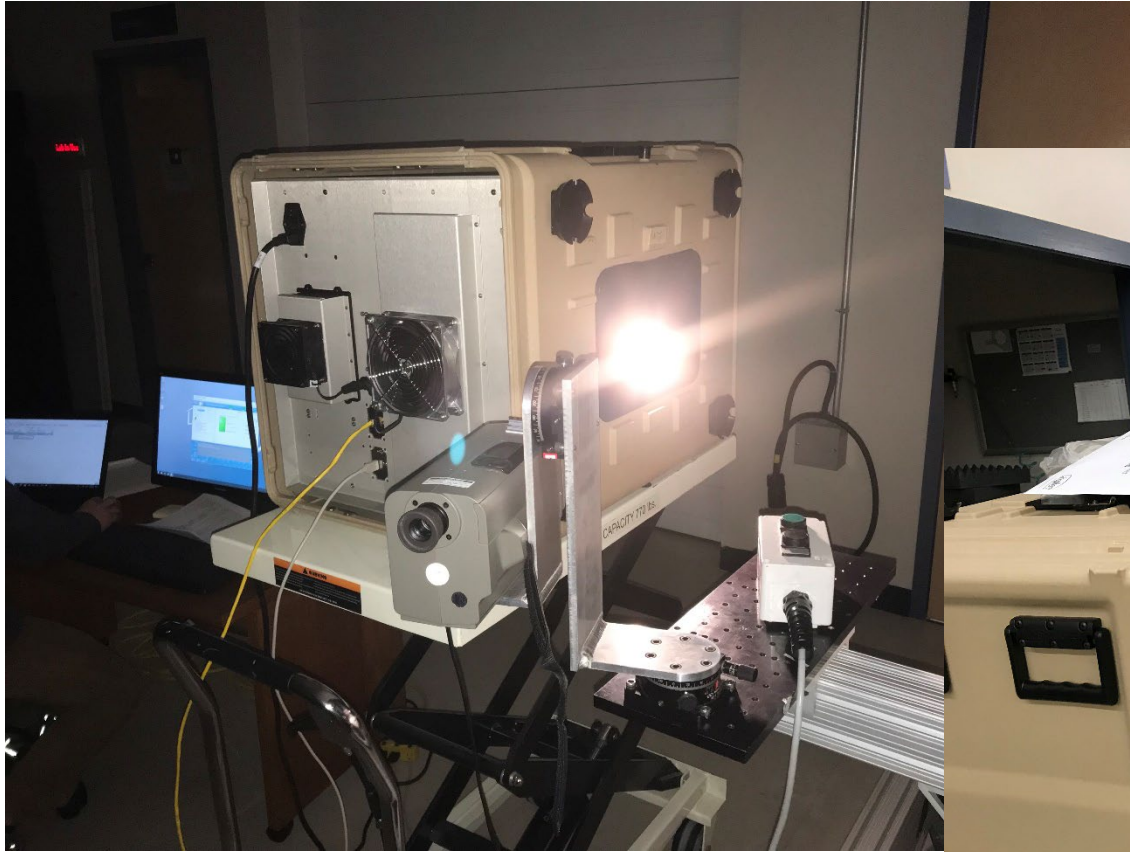
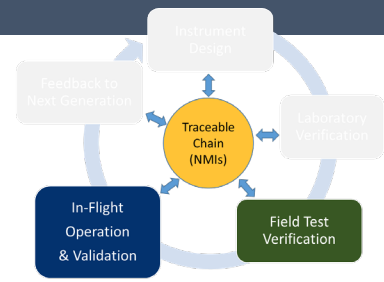
Source: SDSU IP Lab

拡散ターゲットを用いた実用反射率



分光光度計または放射計を「類似」角度でターゲットに向ける

耐環境設計型・フィールド校正用標準器



FLARE

SYSTEM OPERATIONS



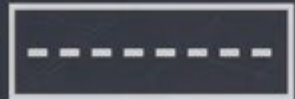
Relayed Solar Signal



Direct Solar Signal



Measured Radiometric Propagation



Data and Telemetry

At Craft Signal



Mirror Reflectance

Downwelling Atmospheric Transmission

Solar Radiometer Calibration

Top of Atmosphere
Solar Irradiance

User Computer/FLARE Portal



Mirror Array Turret



Radiometric Instrument Tower



FLARE 自動可搬型タレット (実装例)

環境劣化から保護されたシステム

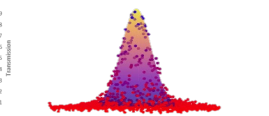
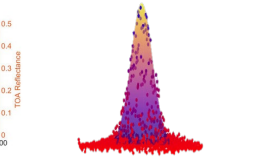
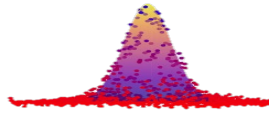
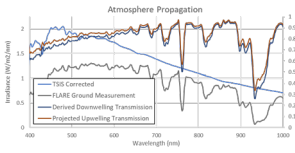
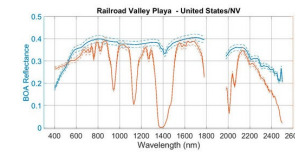
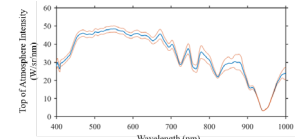
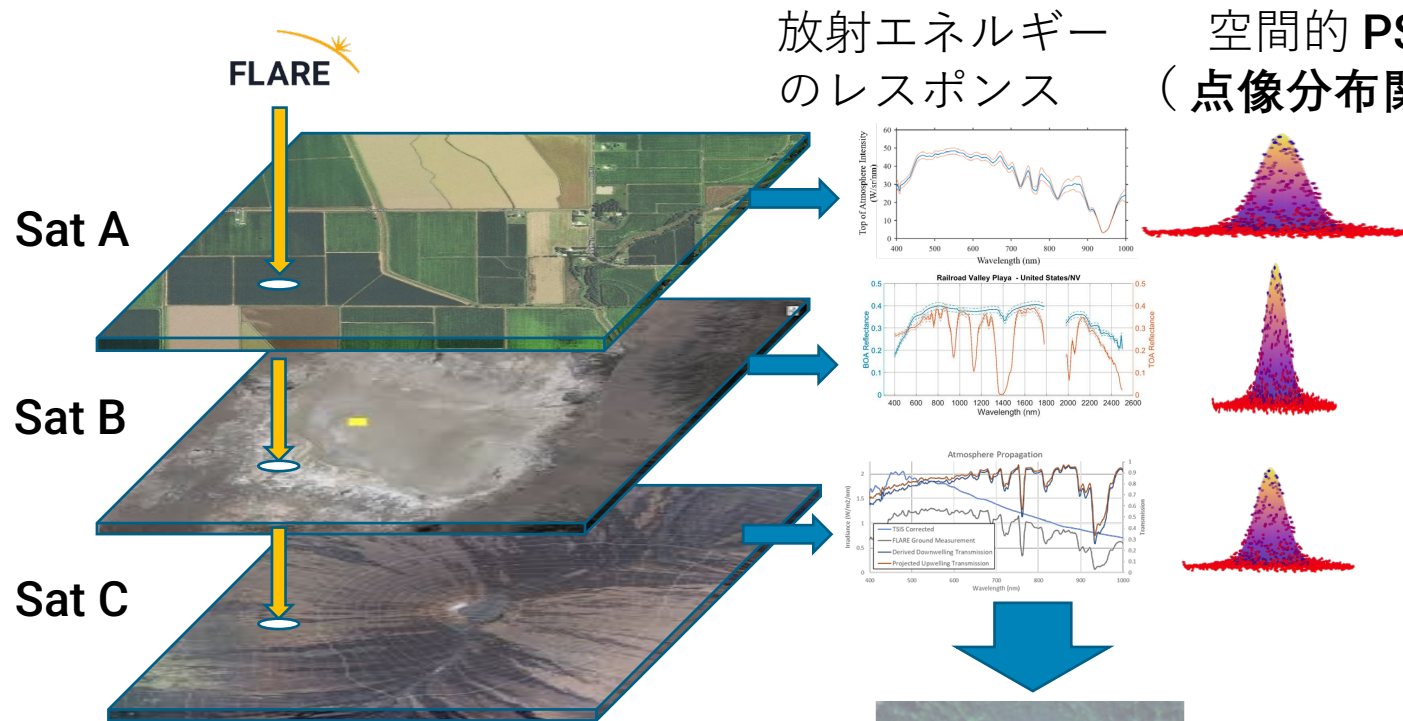
- 不使用時, ミラー面は遮蔽・封入.
- 使用時, ミラー面は全開放または部分開放.



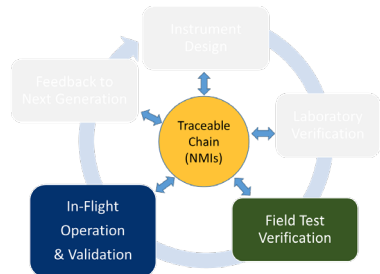
ミラーの選択

- 用途に合わせて調整可能なモジュラープレート
- 選択性
 - 「面」は「オン」または「オフ」に設定可能
 - ミラーグループは角度オフセットが可能, かつ, 他のミラーの視野 (FoV) と排他的に設定可能

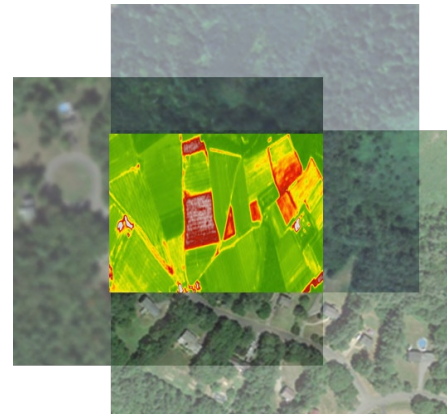
全ての衛星資産の光学校正 – ARDの価値を解放つ



- 表面反射率の直接測定
 - 大気特性の評価と除去
 - 既知信号に対するセンサー応答
 - BRDF (双方向反射分布関数)
- あらゆるGSD/FOVに対応した安定かつトレーサブルな基準の提供
 - 幾何学的な理解 – PSF (点拡がり関数)、MTF (モジュレーション伝達関数)
 - 放射測定的な理解 – 0.35-2.5um
 - 精密な地理位置特定 (GCP)
- 異なる地球観測コンステレーションとアーキテクチャの調和



FUSED DATA
PRODUCT

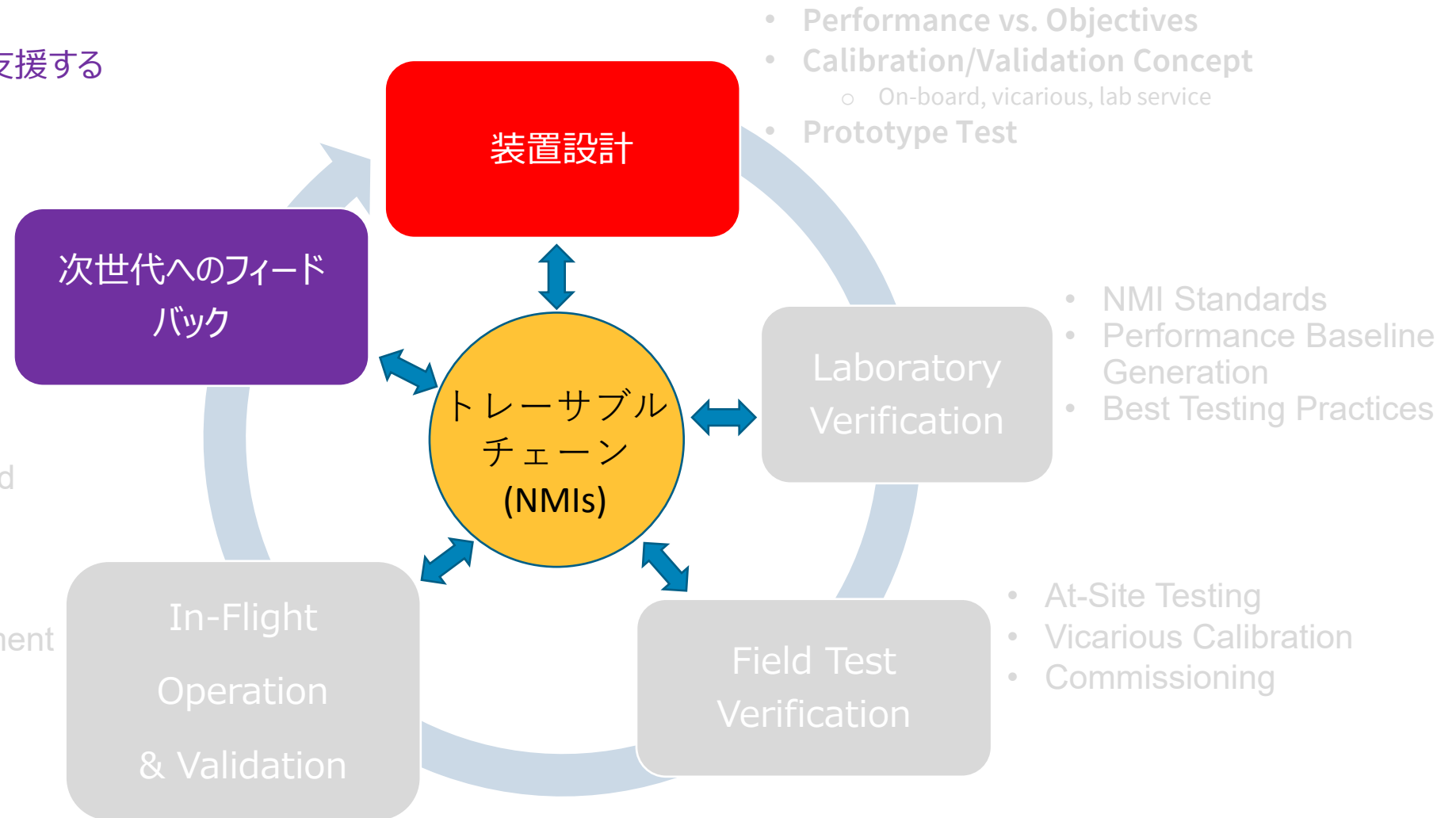


- 時系列／変化検出
- 監視／診断活動
- 機械学習／AI出力の最適化

EO 校正ライフサイクル

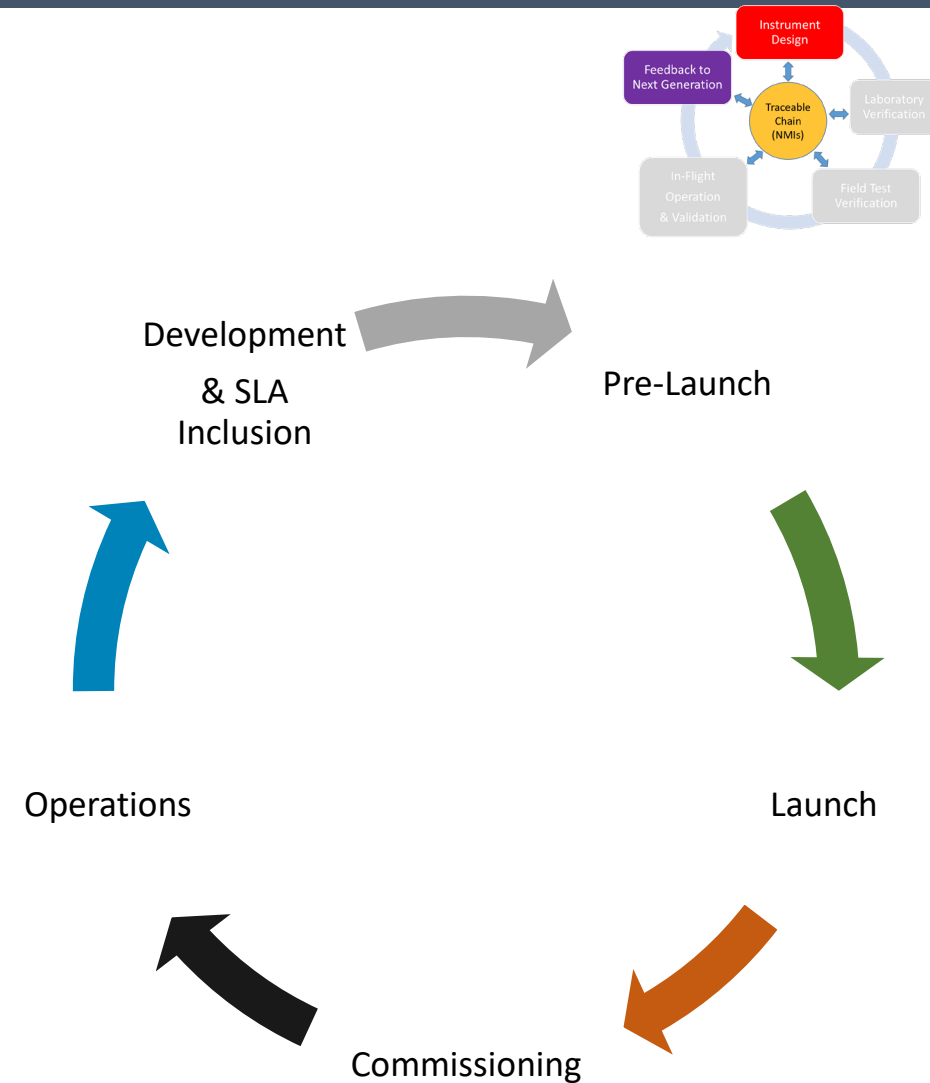
- “Forever Mission”を支援する
- 何が効果的か…
- 新しい技術
- 新しい方法
- レガシー互換性

- Cal/Val Plan of Record
- Commissioning
- Calibration on-board
- Vicarious Calibration
- Data Quality Assessment



次世代へのフィードバック

- **“Forever Mission”を支援する**
 - 各世代が次の世代へフィードバックを提供する
 - ミッションとは心に描いたイメージ…、装置ではない
- **何が効果的か…何がうまくいかなかったか…**
 - 前世代の運用実績から学ぶ
- **新しい技術を追加する**
 - アーキテクチャ、センサ、エレクトロニクス、オプティクスを改善する
- **新しい方法を組み込む**
 - 校正、処理およびソフトウェア
- **レガシー互換性を実現する**
 - 心に描いたイメージがミッションと連続性をもつことを確認する



まとめ

- **不確かさの低いデータは価値を提供する**
 - データ解析を可能にする
 - センサフュージョンを可能にする
- **不確かさのレポーティングは、データ公開の重要な要素である**
 - 競争優位性を生む可能性
- **校正ライフサイクル**
 - 装置設計に校正計画を組み込む
 - 打ち上げ前に装置の性能を理解する
 - 装置の検証手段と方法を構築する
 - 衛星上
 - 代替
 - 相互校正
 - 衛星世代間の製品/データの連続性を構築する