

第11回宇宙環境シンポジウム 2014年12月10-11日 大阪府立大学

EISCAT_3D

(次世代欧州非干渉散乱レーダー) による宇宙環境研究と監視

Investigation and monitoring of space environment with EISCAT_3D (Next-Generation IS Radar Project for Atmospheric and Geospace Science)

宮岡 宏¹、野澤 悟徳²、小川 泰信¹、中村 卓司¹、大山 伸一郎²、藤井 良一²、C.Heinselman³
¹国立極地研究所 ²名古屋大学太陽地球環境研究所 ³EISCAT 科学協会

H. Miyaoka¹, S. Nozawa², Y. Ogawa¹, T. Nakamura¹, S. Oyama², R. Fujii² and C. Heinselman³
¹ National Institute of Polar Research
² Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University
³ EISCAT Scientific Association

EISCATレーダーとは？

Associate countries and institutes



Contributing:



- EISCAT科学協会(1975年設立、1996年に日本加盟)
- UHFレーダー、VHF3局レーダー、電離層加熱装置
- スバル第1、第2レーダー



Tromsø VHF radar (224MHz)
1986



Tromsø UHF radar (930MHz)
1981



北欧レーダーの
更新計画
(EISCAT 3D)



EISCAT Svalbard radar (500MHz)
① 32m antenna 1996~
② 42m antenna 1999~



Kiruna UHF radar

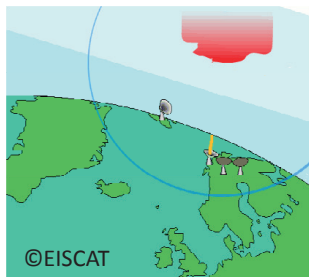


Sodankylä UHF radar

非干渉散乱(Incoherent Scatter)レーダーとは？

高度70kmから2,000kmまでの広範囲を高精度に観測できる強力な大型大気レーダー
大気中の電子によって散乱される微弱な電波を用いて、電子密度や温度などの物理量を測定する。微弱な電波から物理量を測定するには、**大口径(直径30m以上)**の送受信アンテナと**大きな送信出力(1メガワット以上)**が必要。

3局方式のEISCATレーダー



直接観測できる物理量：
電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度(ベクトル)

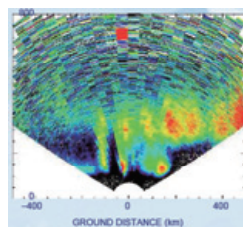
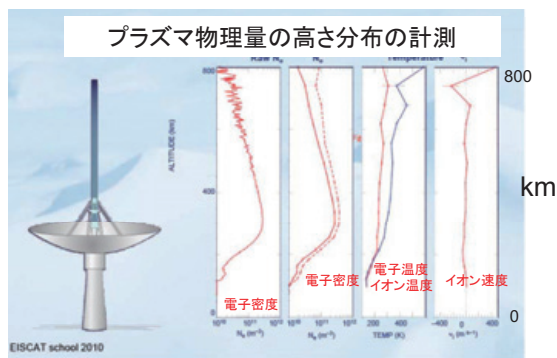
$$E = -V_i \times B \rightarrow E(\text{ベクトル})$$

E : 電場

V_i : イオン速度

B : 磁場

プラズマ物理量の高さ分布の計測

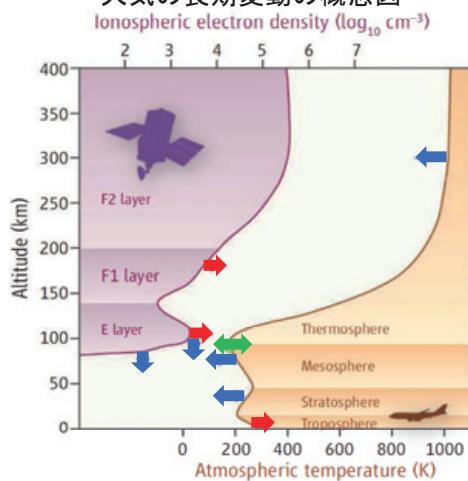


アンテナ掃引による2次元電子密度観測

超高層大気の長期変動と太陽活動の影響

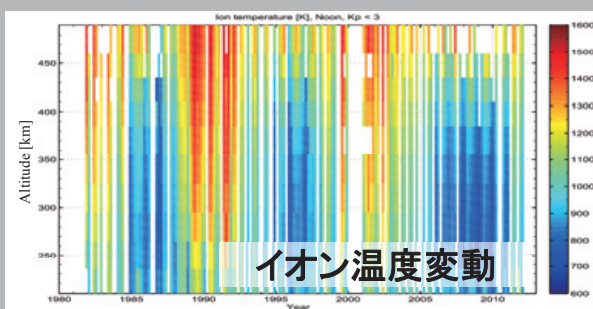
超高層大気は下層大気よりも変動幅が大きい。→ 人工衛星軌道への影響、環境変動シグナルの検出。

下層大気から超高層大気までの大気の長期変動の概念図

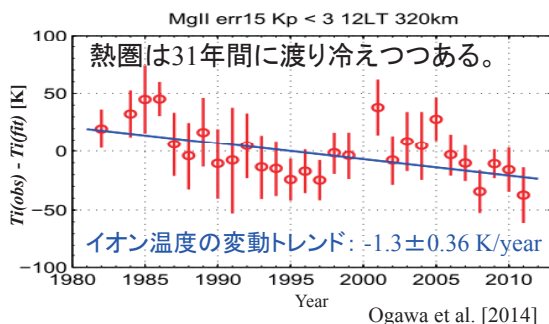


Lastovicka et al. Science [2006]

EISCATトロンソUHFレーダー(ノルウェー)で観測された過去31年間のイオン温度変動



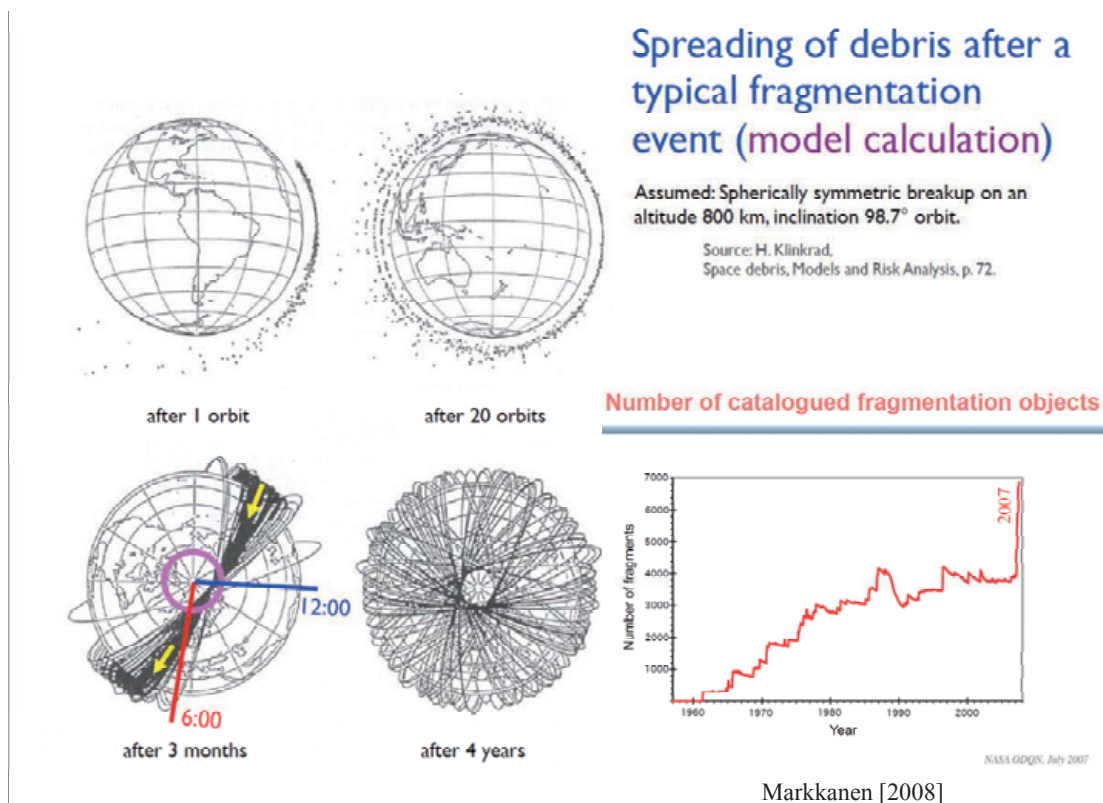
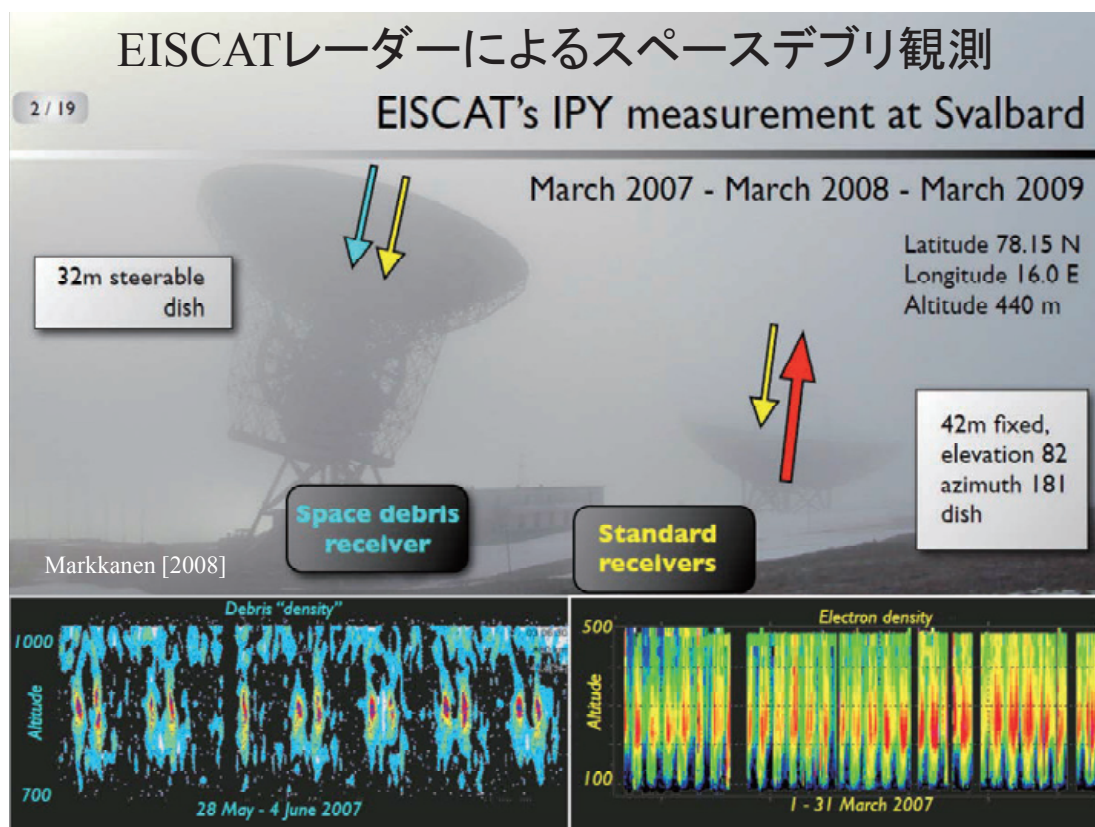
イオン温度変動

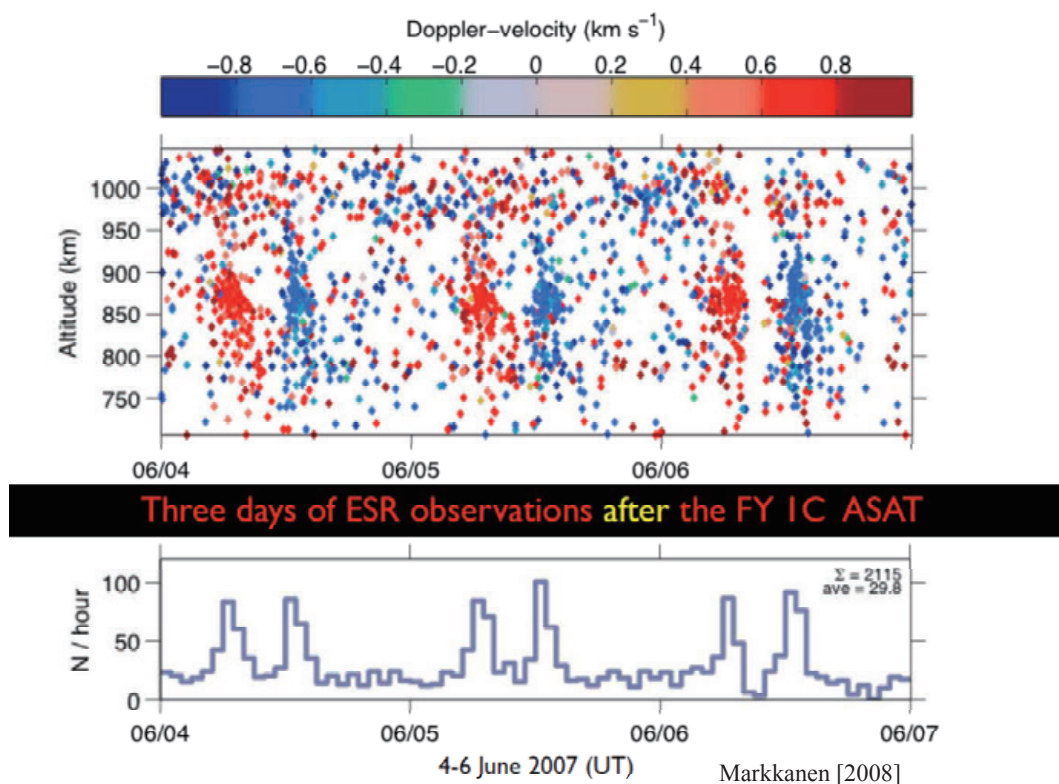


熱圏は31年間に渡り冷えつつある。

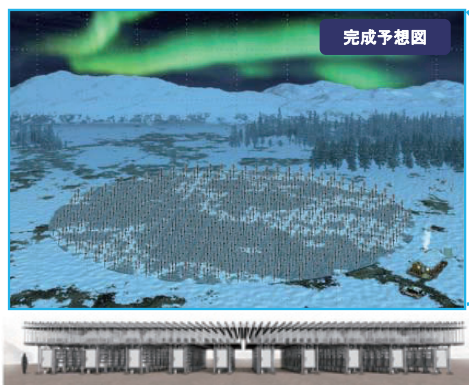
イオン温度の変動トレンド: $-1.3 \pm 0.36 \text{ K/year}$

Ogawa et al. [2014]

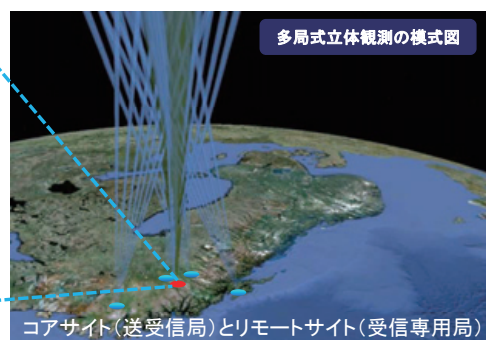




EISCAT_3D計画の概要



アンテナアレイを横から見た図。積雪対策のため、地上から約2mの高さにアンテナを配置。



利用計画・準備状況

- ・本設備はEISCAT科学協会加盟国との共同運営により、**全国・国際共同利用設備**として日本の研究者の利用に供される。
- ・2008年12月に欧州大型研究設備計画(ESFRI)のマスタープランに採択され、EU枠組み計画(FP-6、FP-7)の支援を得て技術的課題の検討などを進めるとともに、国際EISCATコミュニティによる**サイエンスプランの集約やコミュニティの合意形成(新協定書作成)**を進めてきた。これらに基づき、ノルウェーやスウェーデンがレーダー建設のための予算申請を開始し高評価を受けている(2013年)。 → **実現に向けた準備が整いつつある**

EISCAT_3Dレーダーを国際協力で北欧に新設

- ・**太陽活動が地球システム/人間生存圏に及ぼす影響と仕組みの解明**
- ・**宇宙天気監視と社会インフラへのリスク軽減対策**

EISCAT_3Dレーダーの基本諸元

高度70～2000 kmのプラズマ物理量や
3次元風速を高精度に観測

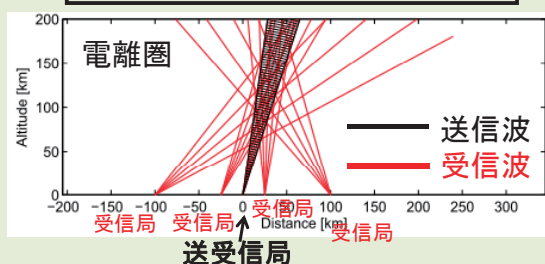
システム	パルスドップラーレーダー 多局アクティブ・フェイズド・アレイ方式
中心周波数	233 MHz(波長:1.3 m)
アンテナ	コア(送受信)局:約10,000本の直交八木アンテナ 4か所の受信局:約10,000本の直交八木アンテナ コア局から約110 kmと250 kmの距離に配置
送受信機	送信ピーク電力10MW、デューティ比 0-25%で可変 干渉法により、高度100 kmで最高50 mの空間分解能
運用	遠隔制御による通年連続運用

→ 地球大気・ジオスペース環境研究
のための国際共同レーダー

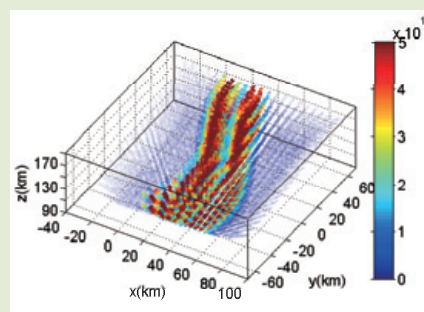
EISCAT/EISCAT_3Dレーダーの3次元観測

プラズマ物理量@高度	現EISCAT	EISCAT_3D	性能比
Ne,Ti,&Te@110km	5秒	0.05秒	100倍
Ne,Ti,&Te@300km	20秒	0.3秒	67倍
Vector Vi@110km	500秒	10秒	50倍
Vector Vi@300km	100秒	1秒	100倍

EISCAT_3Dレーダーによる3次元観測



送受信局から送信された複数本の電波が電離圏で散乱する。その散乱波を地上の5つの局で受信することにより、3次元の電離圏観測を実現。



EISCAT_3Dレーダーによる電子密度の3次元分布観測

EISCAT_3D計画の進捗状況

- 2012年10月: ノルウェーが予算申請(〜38億円)
→7段階の内、最高評価(2013年5月)
- 2013年 3月: スウェーデンが予算申請(〜38億円) →高評価
マスタープラン2014に応募: 「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」
- 5月: 地球惑星連合国際セッション「EISCAT_3D: 極域における大気および
ジオスペース科学のための新ISレーダー」開催
- 10月: ノルウェー極地研と北極研究公開セミナー・ワークショップをトロムソで開催
- 2014年 2月: NordE3D Network Application に応募(北欧3カ国中心、日本・英国は協力)
: フィンランドの大型研究マスタープランにEISCAT_3Dが採択
- 3月: EISCAT_3Dを含む「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」が
マスタープラン2014の重点大型研究計画(全27件)に採択
: 極地研より概算要求申請
- 6月: EISCAT_3Dに関する円卓会議、4段階実施計画案
- 7月: 同計画がロードマップ2014(新規10件)に採択
: 送信機モジュールの検討開始
: EISCAT_3D Science Case ver3.0 作成
- 9月: EISCAT_3D準備フェーズ(FP7: 2010-2014年)終了
: スウェーデンが予算化を決定(第1ステージ分の建設分担金18億円)
- 10月: ノルウェーが予算申請(再提出)
: EISCAT_3D 'Cost Book' 作成
- 11月: 第2回円卓会議
- 2015年 1月: EISCAT_3D実施フェーズ開始、EISCAT新協定を締結(予定)
: EUのInfradev-3に応募(6億円、予定)

『マスタープラン2014』

2014年3月に重点大型研究計画27件の1つに選出

太陽地球系結合過程の研究基盤形成

Study of Coupling Processes in the Solar-Terrestrial System

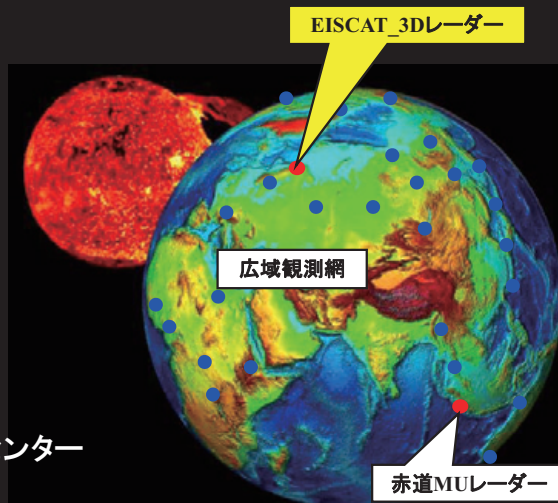
提案者 津田敏隆(京大大学生存圏研究所長・教授)

研究課題

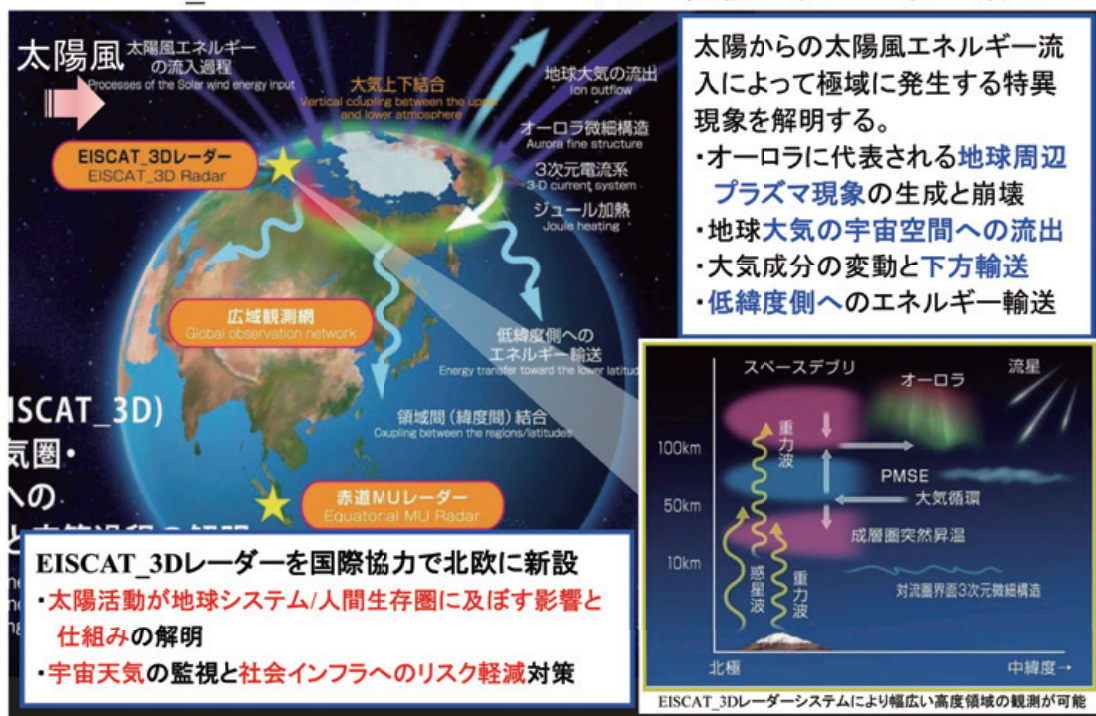
- (1) 赤道ファウンテン
- (2) 極域エネルギー流入過程
- (3) グローバル結合過程

参画機関:

京大大学生存圏研究所
国立極地研究所
名古屋大学太陽地球環境研究所
九州大学国際宇宙天気科学・教育センター



地球大気とジオスペース環境の理解に向けて - EISCAT_3Dによる極域エネルギー流入・変換過程の全容の解明 -



非干渉散乱(IS)レーダー性能

System	Frequency (MHz)	Power (MW)	Quoted Gain (dBi)	Aperture (m ²)	Duty Cycle (%)	System Noise Temperature (K)	PA (GWm ²)	FOM
EISCAT VHF (1 klystron)	224	1.5		3110	12.5	300	4.67	1.00
EISCAT VHF (2 klystrons)	224	3		3110	12.5	300	9.33	2.00
EISCAT UHF	930	2	48	522	12.5	120	1.04	0.13
EISCAT Svalbard	500	1	45	905	25	65	0.90	0.57
Sondrestrom	1290	3.5	49	341	3	85	1.19	0.08
PFISR	449	2	43	708	10	120	1.42	0.34
EISCAT_3D Core	233	9		10000	20	190	90.00	37.04
Jicamarca	50	4.5		75000.0	6	3000	337.50	22.46
Arecibo	430	2.5		55000.0	6	90	137.50	35.46

$$\text{Figure-of-merit (FOM)} = \frac{PA \sqrt{\text{Duty cycle}}}{T_{\text{SYS}} f_{\text{RADAR}}}$$

Wannberg et al., EISCAT_3D: A Next-Generation European Radar System for Upper-Atmosphere and Geospace Research, 2010.

EISCAT_3D整備計画

計画	整備内容	年次	建設経費
第1 ステージ	主局 (Skibotn、送信機 50%) 2受信局 (Bergfors, Karesuvanto)	2015ー2021	全体の60%
第2 ステージ	主局の送信機増設 100%	2022	15%
第3 ステージ	1受信局 (Andoya)	2023	12%
第4 ステージ	1受信局 (Jokkmokk)	2024	12%

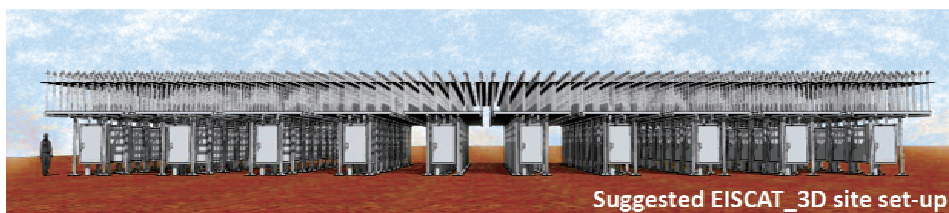


第1-2段階で整備するサイト



第3-4段階で整備するサイト
(完成)

EISCAT_3Dは4段階に分けて計画的に整備を進める。第1段階でEISCAT_3Dの基本的なレーダー観測機能が整い、本格観測が開始される。



主局および受信局のアンテナ外観図。積雪の影響を避けるため、アンテナ全体を数m高の架台上に設置する。

EISCAT_3D整備計画

加盟国	費目	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (H31)	2020 (H32)	2021 (H33)	2022 (H34)	2023 (H35)	2024 (H36)
日本	建設費										
スウェーデン	建設分担金										
ノルウェー	建設分担金										
フィンランド	建設分担金										
英国	建設分担金										
中国	建設分担金										
整備計画	第1段階								第2段階	第3段階	第4段階
	<技術実証>			<本格整備>							
運用計画		実証運用		部分運用			本格運用				
計画内容	① 1サブアレイ(アンテナ91本)の試験システムをトロムソ観測所に整備する。 ② レーダー観測性能や環境性能等を実証運用を行う。(H28) ③ 本格整備での量産モデルの最終設計に実証試験結果を反映させる。			① 主局(シーボトン)+2箇所の受信局(ベルグフォース・カレスバント)を整備する。 ② 主局単独で長時間・空間分解能のレーダー観測を開始する。(H30) ③ 受信局の整備に合わせて、順次2局観測、3局観測を開始する。			① 3局式アレイレーダーとして3次元観測を開始する。(H32) ② 第2段階で送信パワーを増増し、より高い高度領域や高速の観測を開始する。(H34) ③ 第3段階でアンドイヤ(ノルウェー)に受信局を増設する。3次元観測の観測領域が拡大する。(H35) ④ 第4段階でヨックモック(スウェーデン)に受信局を増設する。3次元観測の観測領域がさらに拡大する。(H36)				
日本の分担計画	・送信機プロトタイプ製作 ・送信機製作(91台) ・現地設置調整			・送信機製作(約10,000台) ・現地設置調整							

註1) 第2-4段階の実施計画は、第1段階の進捗状況に応じて調整する。

註2) 建設費・建設分担金と運営分担金は、各加盟国の出資額として実験時間の配分に反映される。

まとめ

- LEO衛星等の宇宙飛行体が周回する上部熱圏・電離圏領域をこれまでにない高い時間・空間分解能で三次元観測することができるEISCAT_3D計画が整備実施段階に入った。
- EISCAT科学協会の正式加盟国である日本も計画検討に加わるとともに、整備分担(送信機モジュール)のため予算要求を開始。
- EISCAT_3Dレーダーは、極域へのエネルギー流入・変換過程の解明を飛躍的に進めるとともに、連続モニタリング観測を通じて、熱圏・電離圏の環境変動やスペースデブリ等のリアルタイム監視にも極めて有用。
- 宇宙環境工学をはじめ、幅広い関連コミュニティとの連携・協力が本計画の実現と成果を最大化する上で不可欠。