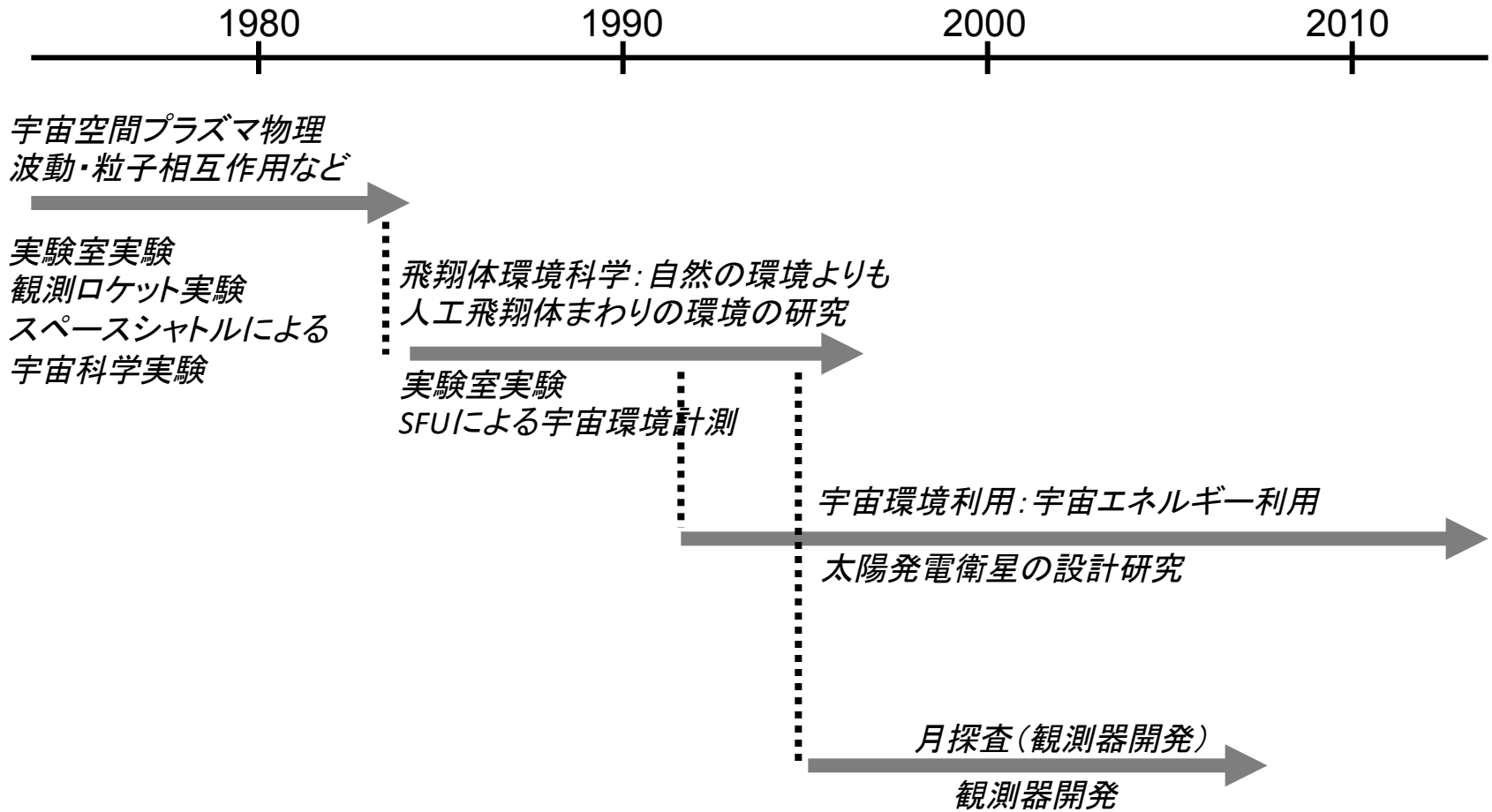


# 退職記念講演会

—37年間の研究生生活をふり返って、感慨と教訓—

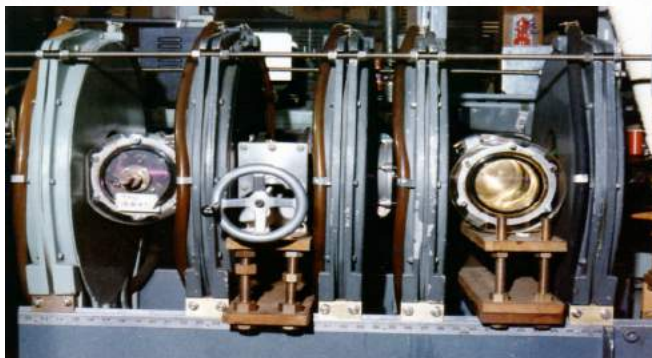
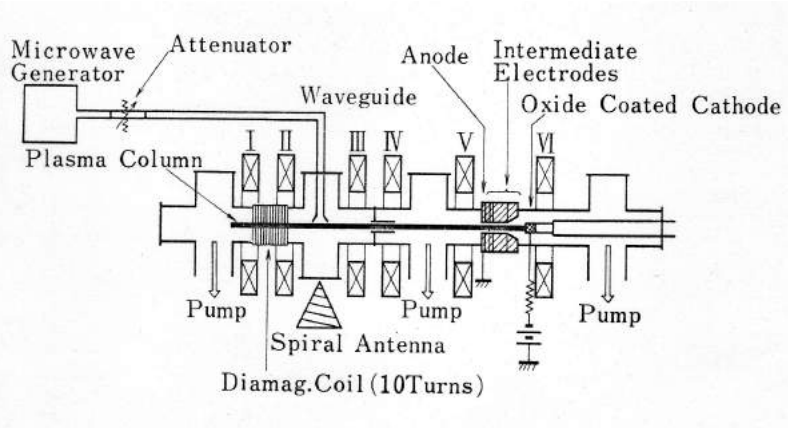
平成24年3月27日

# 参加した主な研究・プロジェクト



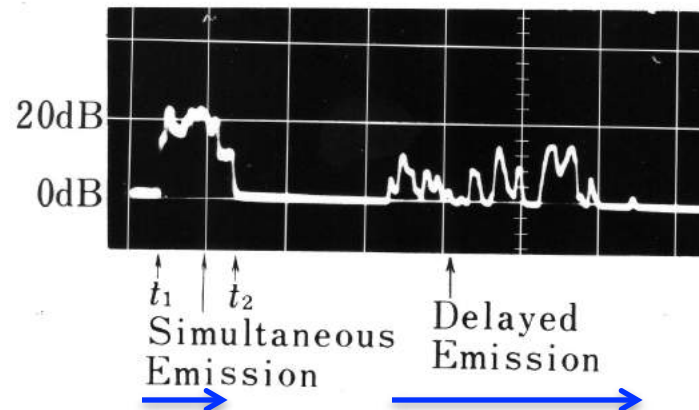
# 宇宙空間プラズマ物理/実験室実験

波動粒子相互作用の研究(マイクロ波などの波動による粒子加熱、粒子ビームによるプラズマ波動の励起)



高密度プラズマ発生装置

## 不思議なプラズマ現象



マイクロ波のプラズマへの照射  
遅れてプラズマから放射されるマイクロ波帯の波動

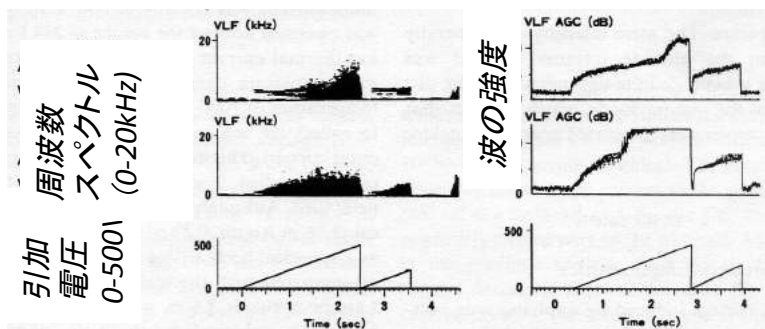
プラズマによるマイクロ波エネルギーの吸収(パラメトリック不安定性)による静電波の励起  
→ 静電波による電子加熱  
→ ミラー場による電子の捕捉  
→ 静電不安定性によるサイクロトロン波の励起

実験室実験は自らの手で工夫しながら、次々と未知の現象を解明していくという独特の面白さ

# 宇宙空間プラズマ物理/観測ロケット実験

宇宙空間を巨大なプラズマ物理実験室として  
利用—ロケットによるエレクトロダイナミックテ  
ザー実験

観測ロケットK-10-11、K-10-12、L-3H-8、  
K-9M-46、K-9M-51、K-9M-57、K-9M-69、  
S-520-2、  
Black-Brant V(1)、Black-Brant V(2)



不思議な波動現象 時間(秒/div)

低周波帯のプラズマ波動の励起  
イオンの運動が低域混成波 (Lower Hybrid  
Resonance Wave) の励起

外国の研究者との共同作業の難  
しさと楽しさ

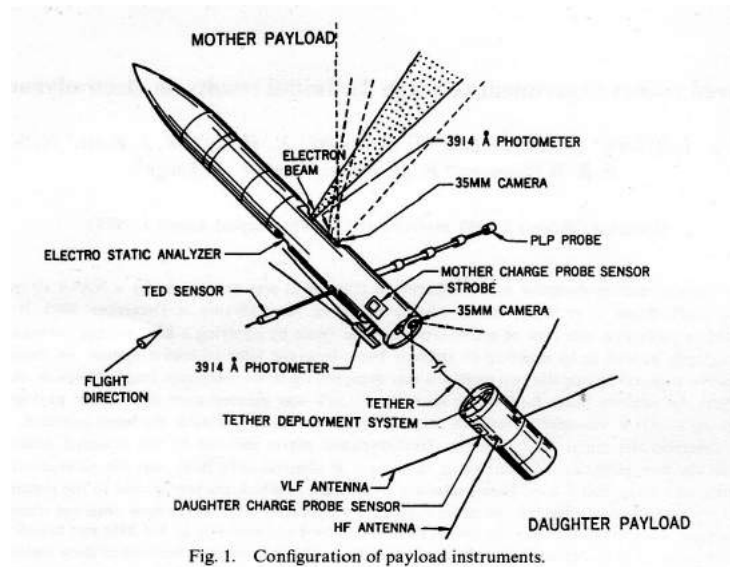
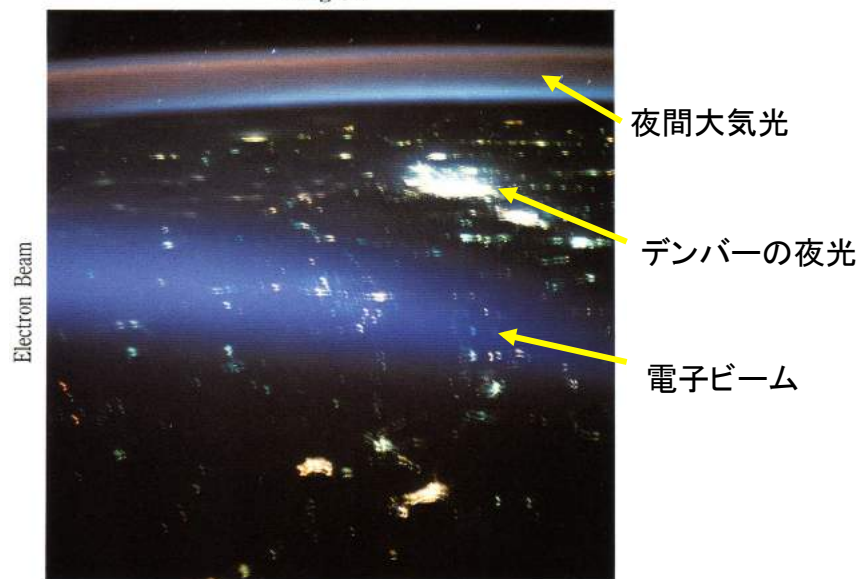


Fig. 1. Configuration of payload instruments.

1983年当時世界最長(400m)を記録したテザーワイヤー伸展実験  
Airglow



# スペースシャトルSEPAC実験への参加

宇宙空間を巨大なプラズマ物理実験室として利用—粒子ビームを用いた  
宇宙科学実験 (Space Experiments with Particle Accelerators)

スペースシャトル9号機スペースラブ1に電子  
ビーム装置、プラズマ加速器、計測器パッケージ、  
低照度TVカメラを搭載

## 目的

- (1) 飛翔体帯電と中和の研究
- (2) ビームプラズマ相互作用の研究
- (3) ビーム大気相互作用の研究 (人工オーロラ)

宇宙研とNASAの共同研究 (初めての大型の日  
米共同宇宙科学実験)

PI: 大林辰蔵先生

1978年スタート、1983年実験実施、1992年フ  
ローオン実験終了



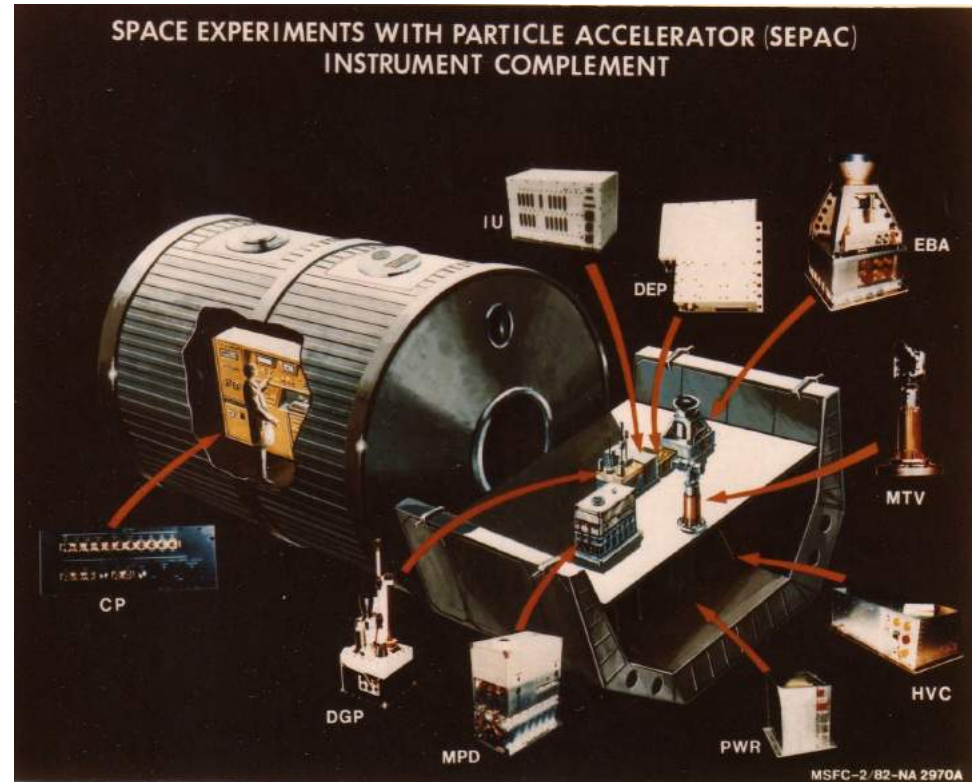
# SEPAC搭載機器

## 日本側装置

- (1)電子ビーム加速器: 7.5kV, 1.6 A, 10ms~1sec
- (2)MPDアークジェット(プラズマ加速器): 2kJ/pulse, 1ms, アルゴンガス作動
- (3)中性ガス放射装置: 窒素ガス作動
- (4)観測機器: 低照度TVカメラ, フォトメーター, 電子エネルギー分析器, プラズマプローブ, 波動受信機

## 米国側装置

- (1)クーラー用コントロールパネル
- (2)実験コンピュータとインターフェイスユニット



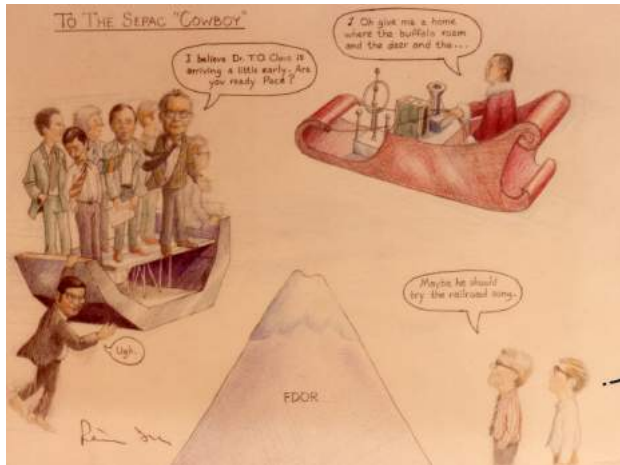
SODA-QL(科学  
データ実時間処理  
解析装置)



# SEPAC実験の実施

日本側チーム:

大林辰蔵 (ISAS), 河島信樹 (ISAS)  
栗木恭一 (ISAS), 長友信人 (ISAS)  
二宮敬虔 (ISAS), 江尻全機 (ISAS, NIPR)  
佐々木進 (ISAS), 柳澤正久 (ISAS)  
矢守章 (ISAS), 清水幸夫 (ISAS)  
工藤勲 (ETL)



米国側チーム:

W.T.Roberts (MSFC), C.R.Chappell (MSFC)  
D.L.Resoner (MSFC), J.Burch (SWRI)  
W.L.Taylor (TRW), P.M.Banks (Stanford Univ.)  
P.R.Williamson (Stanford Univ.), O.K.Garriott (JSC)



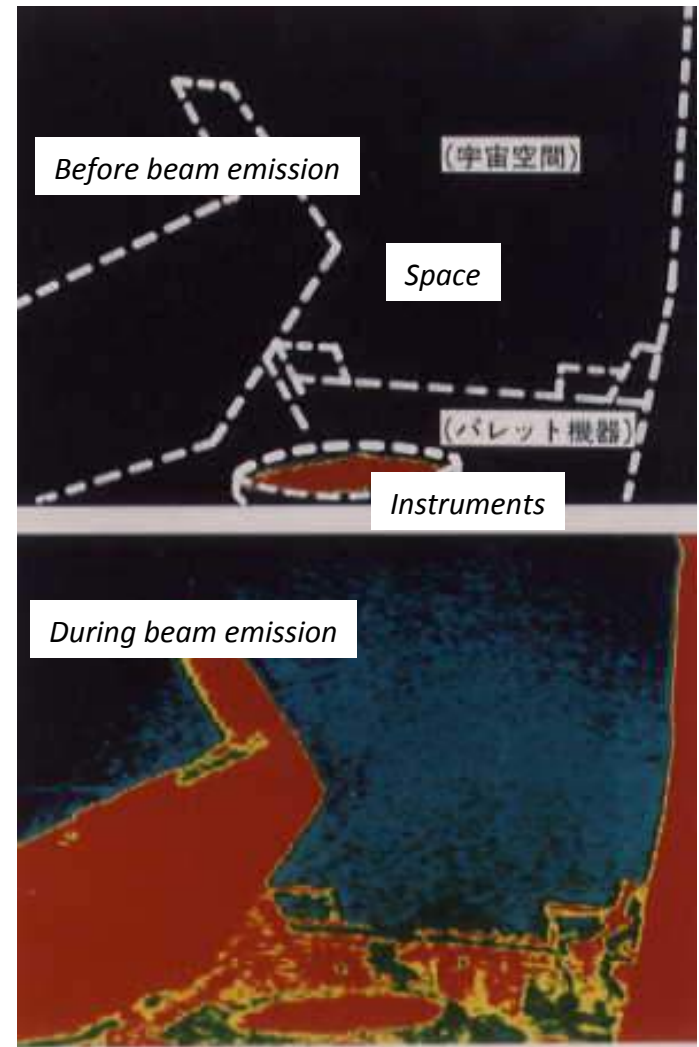
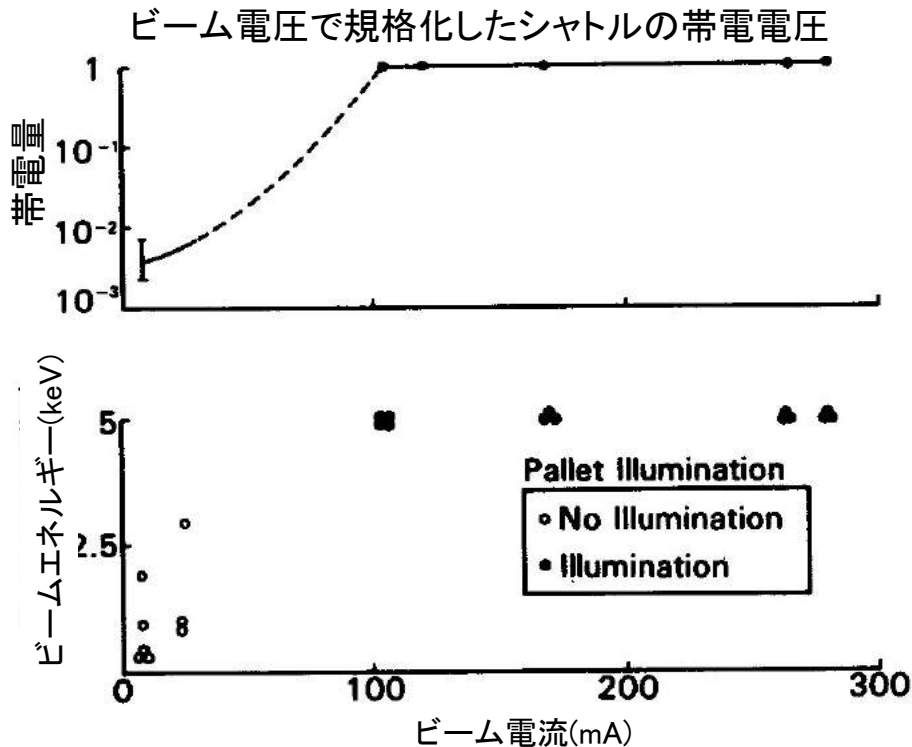
1983年打上



3シフトでの日米混成チームによる運用

# 帯電スペースシャトルがキロボルトまで帯電した！

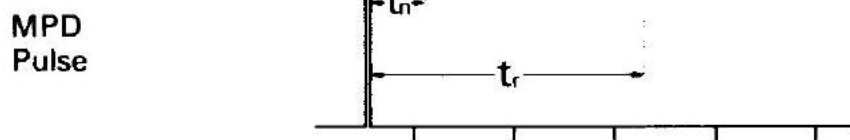
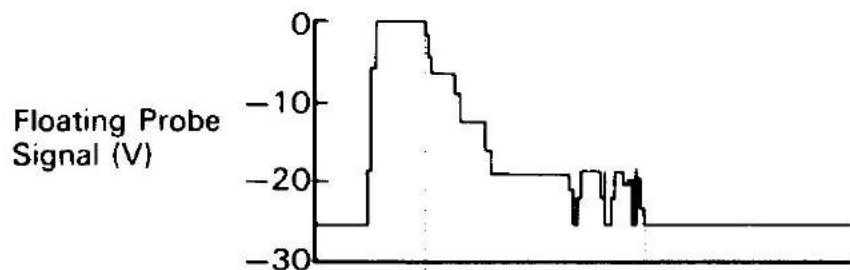
帯電電圧が計測され、帯電中和装置(プラズマ放射、中性ガス放射装置)を動作しない限りオービターはビームの電圧付近まで帯電するというモデルが実証された。



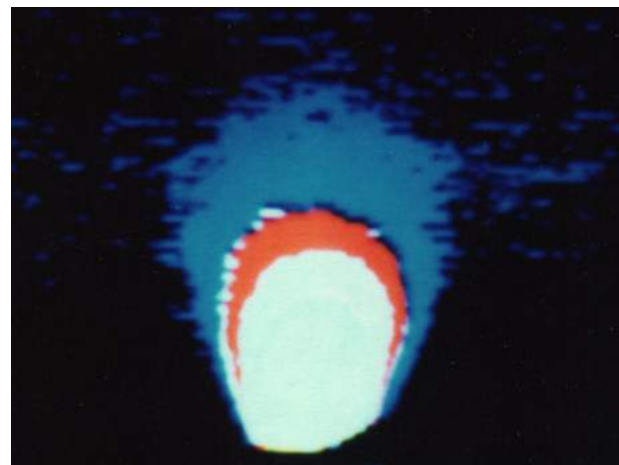
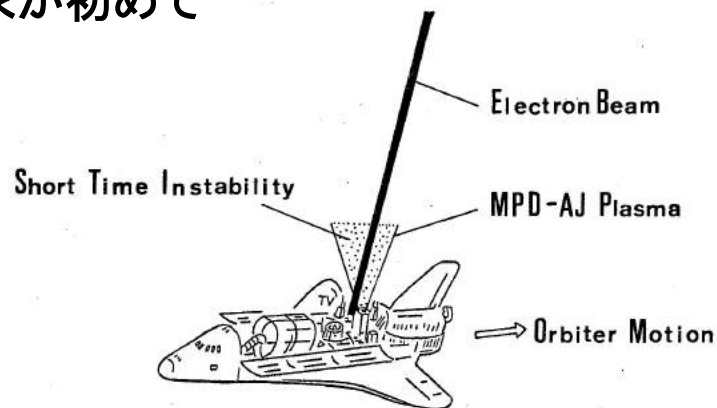


# 帯電中和ーガスやプラズマ放射により帯電が予定通り中和した

プラズマ放射にともなう飛行体の帯電中和現象が初めて明確に示された。



GMT 335/7 : 28 : 30



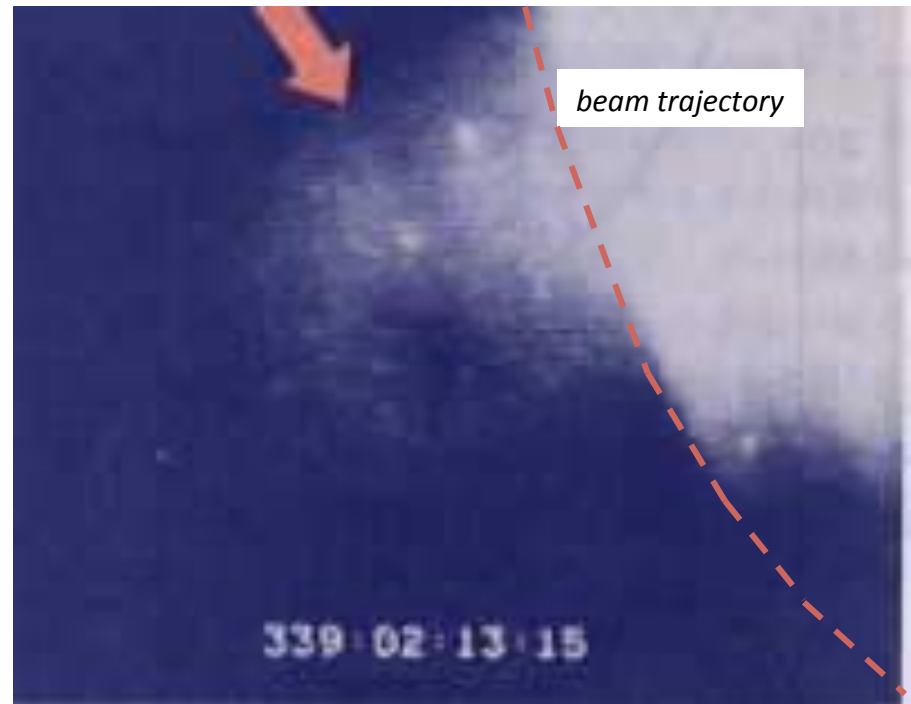
# ビームプラズマ放電現象が宇宙空間で実証された

壁のない宇宙空間でビームプラズマ放電現象が初めて検証された。

*BPD in Laboratory*



*BPD in space*



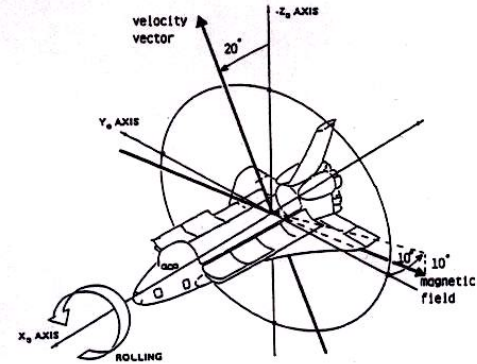
# 臨界速度放電現象が宇宙空間で実証された



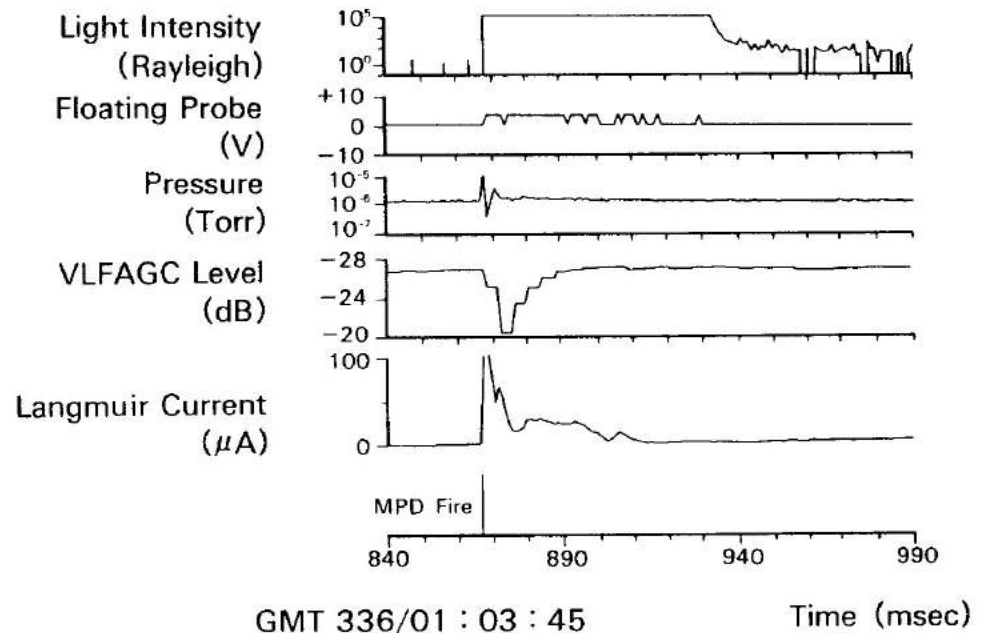
Alfvenの臨界速度放電現象：  
磁場中を中性ガスが高速で流れると  
き運動エネルギーが電離ポテンシャル  
と等しくなると自己電離する。

Experiment	Year	Increase Ionization
SEPAC	1983	yes
XANI	1989	yes
STS 39	1991	no
ATLAS 1	1992	yes
APEX	1993	yes
North Star	2000	yes
ARGOS	2000 and 2001	no

宇宙空間での臨界速度放電現象の検証



ガス放射時の現象



# SEPAC 実験の宇宙科学・宇宙開発への貢献

1. 宇宙プラズマ物理上新しい発見と驚きがあった。特に粒子・波動相互作用や宇宙帯電現象など。
2. 宇宙能動実験 (Active Experiments) の分野の研究を切り開いた。その後スペースシャトルによる20km級テザー実験、衛星によるガス雲放射実験、などの先がけとなった。
3. 最初の大型の国際協力の宇宙科学実験として、科学者、技術者を育てた。メーカーの技術者の方を含め参加した多くのメンバーがその後の日米の宇宙科学、宇宙開発の場で活躍した。



# SEPAC実験の感慨、教訓

1. 電子銃が不具合を起こし最大出力の実験(人工オーロラの生成)はできなかった。全体として科学成果は挙げたが、新聞や政府筋から非常に厳しい批判を受けた。⇨是非は別として、大型計画に対する日本の社会の見る目は厳しい(米国での反応と比較して)。
2. 最大出力での人工オーロラ生成を目指したりフライト実験は、その後チャレンジャー事故の影響により、9年後の1992年に実施され成功したが、科学成果として大きく注目されることはなかった。⇨科学研究にもタイミング(旬)がある。

## たかがナット、されどナット — 1回目の失敗

いろいろと幸運も重なり、大林の実験計画はいわゆるアクティブ実験として、スペースラブの最初の飛行で行われることになった。日本側は主要機器である電子ビームとプラズマの加速器および観測機器を開発し、米国側はスペースラブ搭載用管制装置とソフトウェアを担当した。大林からその装置を開発する日米合同チームのプロジェクトエンジニアに任命されたのが、長友信人だった。

ただしそれからが大変だった。アメリカ人同士でも言いたいことは表現を変えて3回は繰り返さなければならないような複雑なシステムの中で、会話そのものをスピーディに出来ない日本人チームは随分と言勞を重ねた。しかしアメリカ側の辛抱強さにも大いに助けられ、最終的には大切なことはもれなくコミュニケーションができ、日本人チームは最終的にはスペースラブの搭乗科学者の訓練計画まで作成し、参加した宇宙飛行士たちが評価表に賛辞を書き連ねるほどの実施計画が完成した。

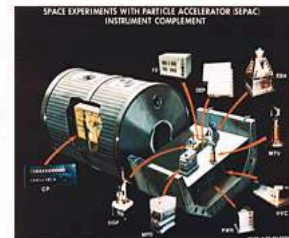
スペースラブ1号の飛行は遅れに遅れた。その間、東京大学宇宙航空研究所は1981年に文部省宇宙科学研究所になり、世の中で宇宙ステーションが話題になり始めた1983年11月、SEPACはSTS-9に搭載されて打ち上げられた。SEPACが軌道上の最初のチェックアウトを無事にパスしたとき、長友は救われた気持ちでジョンソン宇宙センターの管制室から解放され、宇宙ステーションのワークショップが開かれるワシントンDCに移動した。

ホテルの部屋で、テレビに映し出されるスペースラブの様子を見つめていた長友は、画面が時々明るくなるのを見て、「あ、これはMPDアークジェットの光だな。いいぞ、いいぞ」と思いつつも、電子ビームが出てくる様子がないので、「電子ビームはテレビには映りにくいのだ」と勝手に判断していた。まさかその時すでに電子銃の電源が故障していたことは知る由もなかったのである。

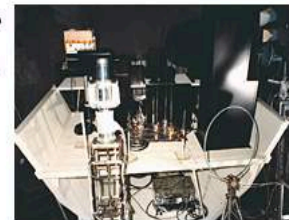
シャトルが地球に帰還して、電源の中にナットが1個見つかった。これが宇宙で浮遊して悪さをしてフューズがとび、人工オーロラの生成を含む高エネルギーの実験は実施できなかった。実験は失敗と評価され、計画は事実上打ち切りとなった。



SEPACのオーロラ生成実験イメージ図



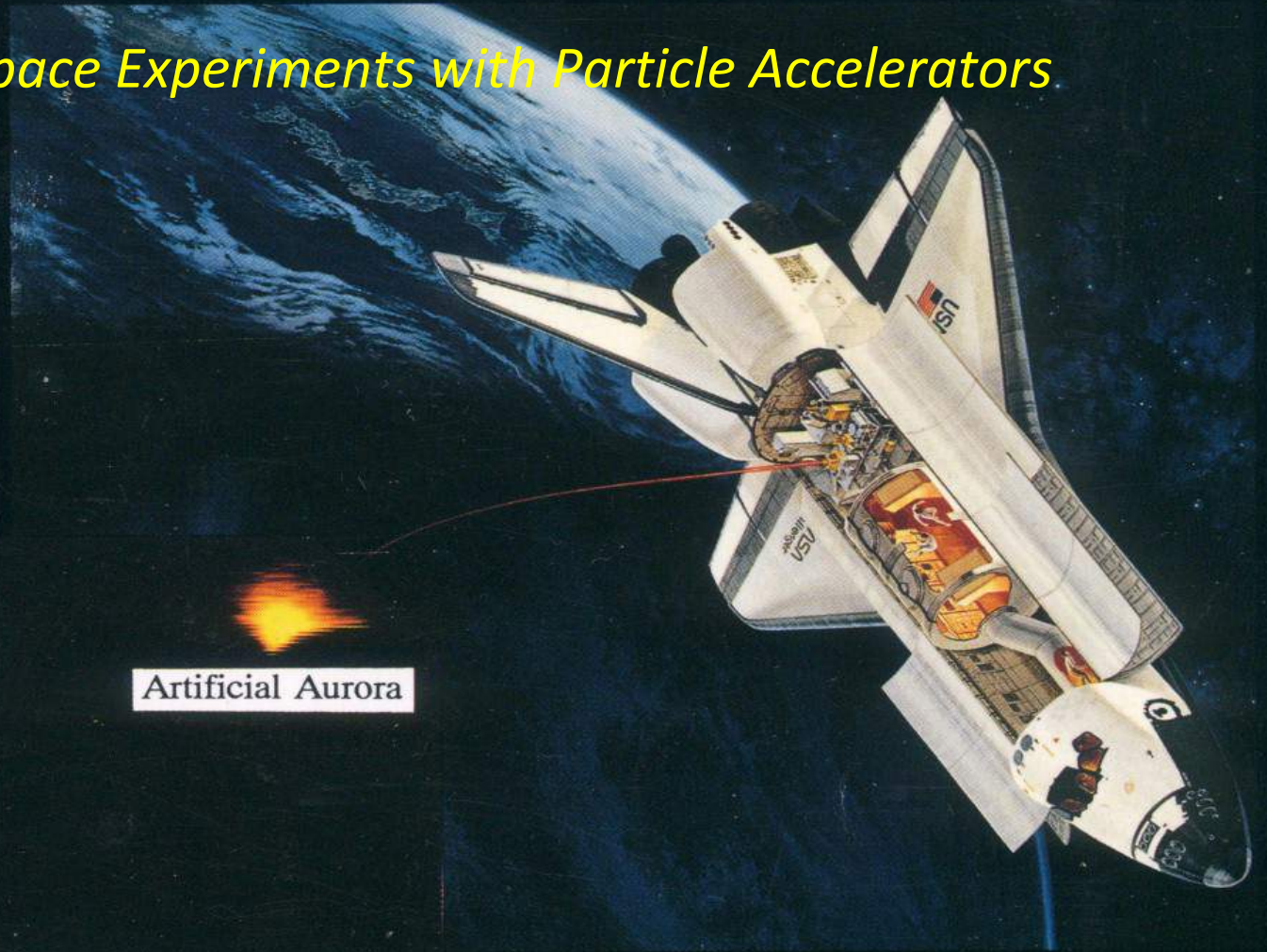
SEPAC実験装置配置図



SEPAC実験装置

# Space Experiments with Particle Accelerators

Edited by  
Nobuki Kawashima



Artificial Aurora

Natural Aurora

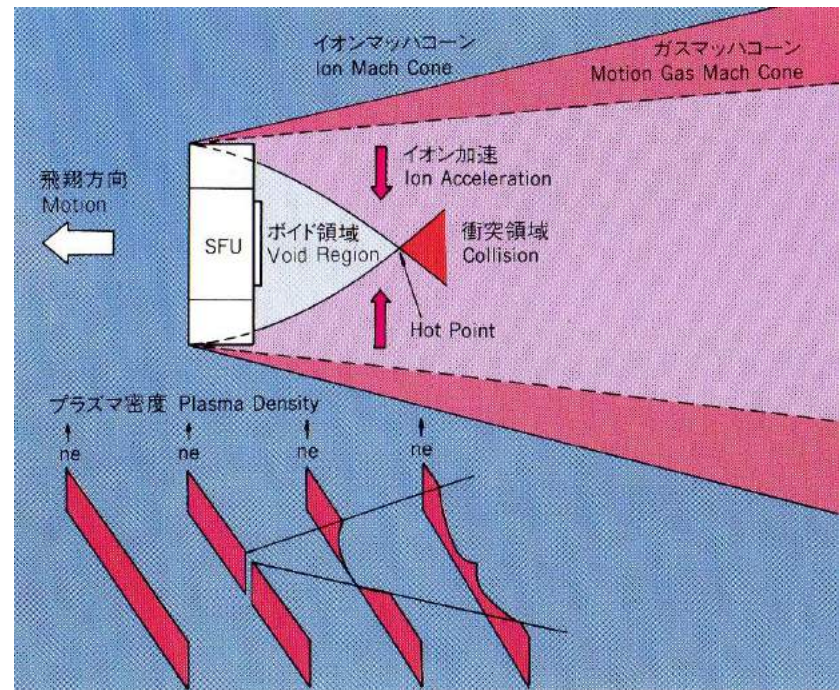
# 飛翔体環境科学の研究

人類が宇宙に出て行くとき、飛翔体周辺にどのような環境が形成されるのか？  
宇宙機や搭乗員にどのような影響をあたえるのか(宇宙植民地にはどのような周辺環境が形成され居住者はどのような環境に住むことになるのか)。

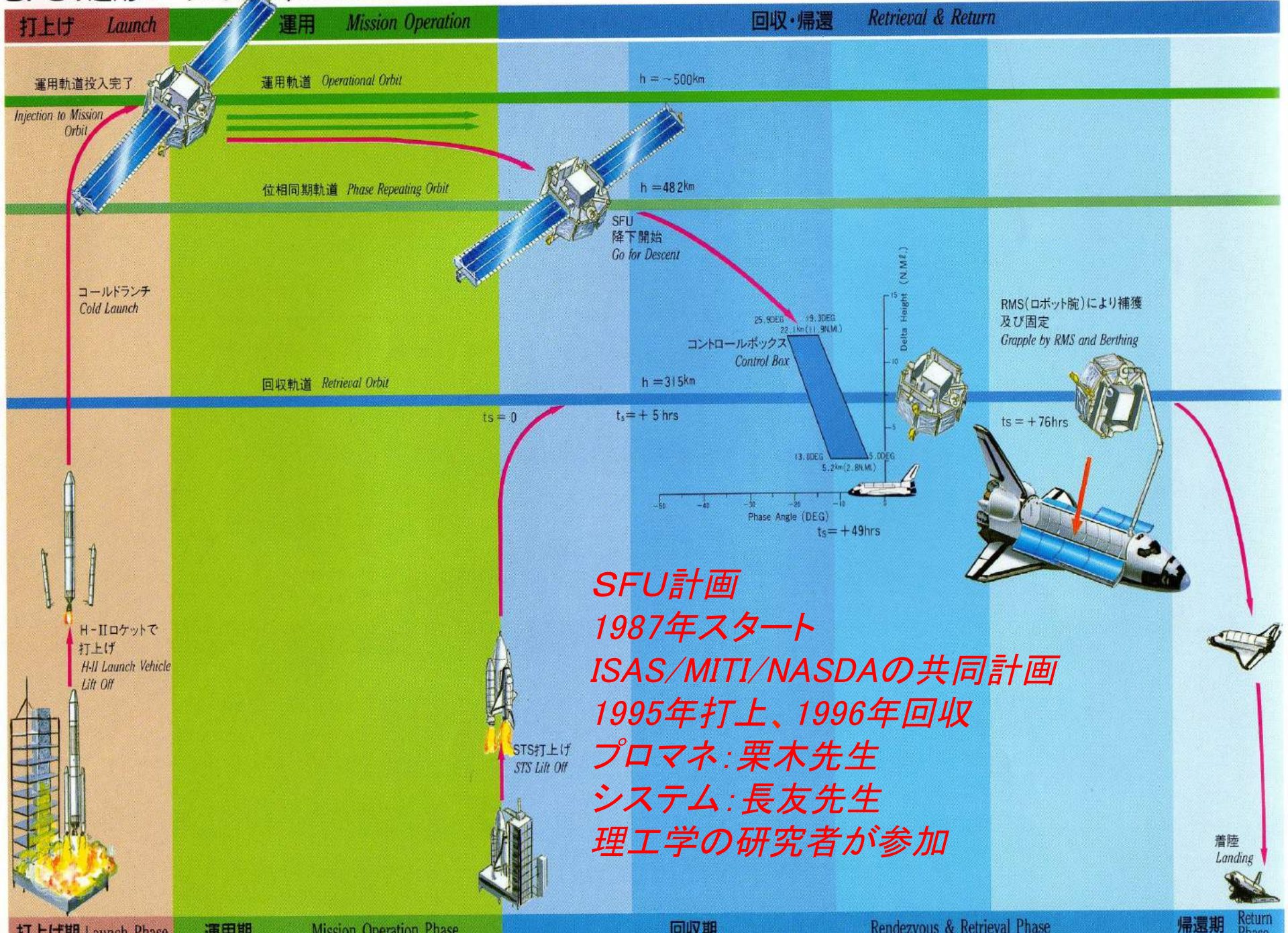
SIE(Spacecraft Induced Environment)という新語を作った。(Space whetherという新語も米国で生まれかけていた)。

国際協力による宇宙基地の周辺環境研究計画(PIMS計画)・・・実現されず(一部JEMで実現)

SFU (Space Flyer Unit)を用いた小型宇宙プラットフォームの環境研究・・・実現



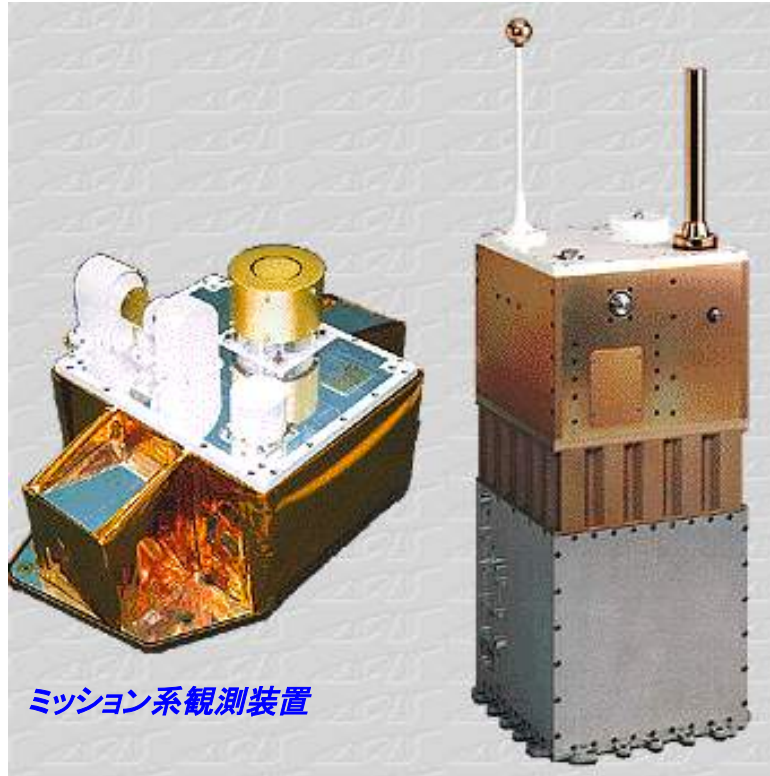
# SFU1運用シーケンス Operation Phase and Events of SFU 1



**SFU計画**  
**1987年スタート**  
**ISAS/MITI/NASDAの共同計画**  
**1995年打上、1996年回収**  
**プロマネ: 栗木先生**  
**システム: 長友先生**  
**理工学の研究者が参加**



# 飛翔体環境計測システム



ミッション系観測装置

バス系観測装置

## バス系観測装置

電離真空計(方向を変えて2ヶ)

ピラニゲージ4セット分散

質量分析器

プラズマプローブ(センサーは4ヶ所)

フローティングプローブ

インピーダンスプローブ

波動受信機(VLF帯、HF帯の2帯域)

マイクロGメーター(3軸)4セット分散

曝露材料劣化試料(回収後分析)

## ミッション系観測装置

分光器+材料劣化試料(実時間分析)

曝露材料劣化試料(回収後分析)

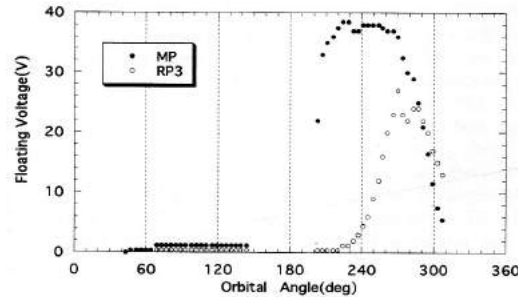
磁力計

電子密度変動計測器

共同研究者: 佐川先生(通総研)、賀谷先生(神戸大)、横田先生(愛媛大)、大田先生(都立大)、遠山先生(東海大)、渡辺勇三さん(宇宙研)

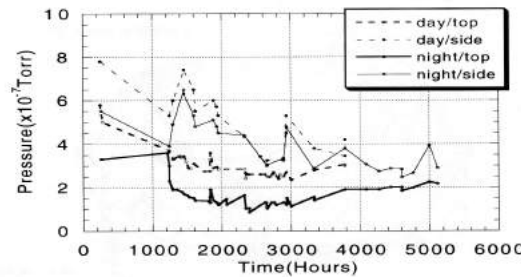
# SFU環境計測で解明された主な新しい結果

## 電位変動



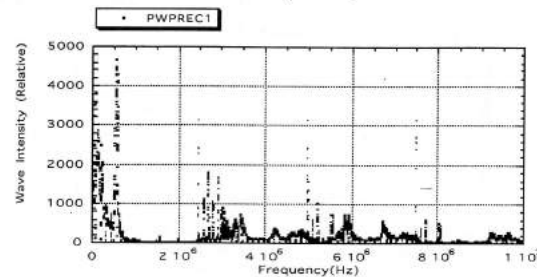
太陽電池パネルを持つ衛星の電位は、周辺プラズマとの作用により、太陽電池起電力により決定されることを示した。

## 長期ガス密度の推移



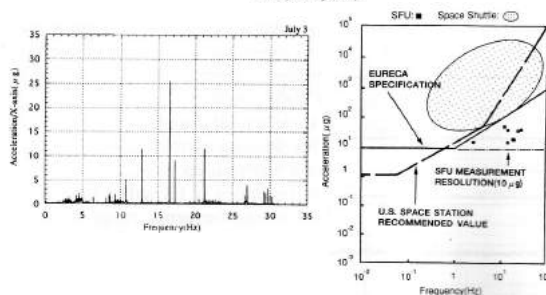
衛星表面の真空度は、軌道投入半年程度までは、表面からのアウトガスが支配的。主成分は水。

## 電磁環境



大型衛星衛星周辺には、飛翔体が形成する周囲のプラズマ密度勾配に基づくと思われる低周波のブロードバンドノイズが常時存在する。

## マイクロG環境



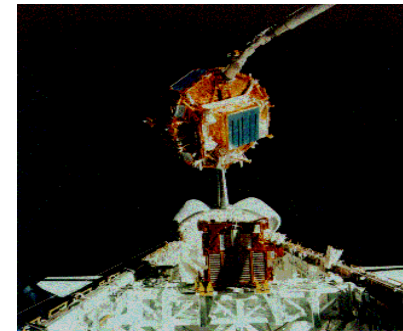
無人の小型宇宙プラットフォームの  $\mu g$  環境は宇宙基地よりはるかに良い。ただし構造の特性周波数は常時残存。

# SFU 計画の感慨、教訓(飛行運用計画について)

1. 分野の全く異なる合計10のテーマの実験に対し、SEPAC実験で学んだNASAのタイムライン方式を適用して全体の実験計画を管理。運用要求に基づく運用計画計算機によるリソース調整を行いスムーズな実験運用ができた。
2. 実験運用期間が終了し、お守り運用フェーズに入った段階で、運用頻度を落とした(運用メンバーの負担軽減、経費節減)ことにより、推進系の不具合に基づくSafe Modeへの移行に気づくのが遅れ一時危険な状況に陥った。⇨**衛星運用に妥協は禁物。**
3. 回収時太陽電池パドル収納に失敗し、シャトルによる回収直前にパドルを切り離すという”まさかの運用”を行ったが、担当シフトチームが予めこれを想定した訓練を行っていたため事なきを得た。⇨**全損に至る事故モードについては想定しうる全ての不具合に対し訓練が必要。**



思案。セーフモード対応。



太陽電池パネルを切り離しての回収。

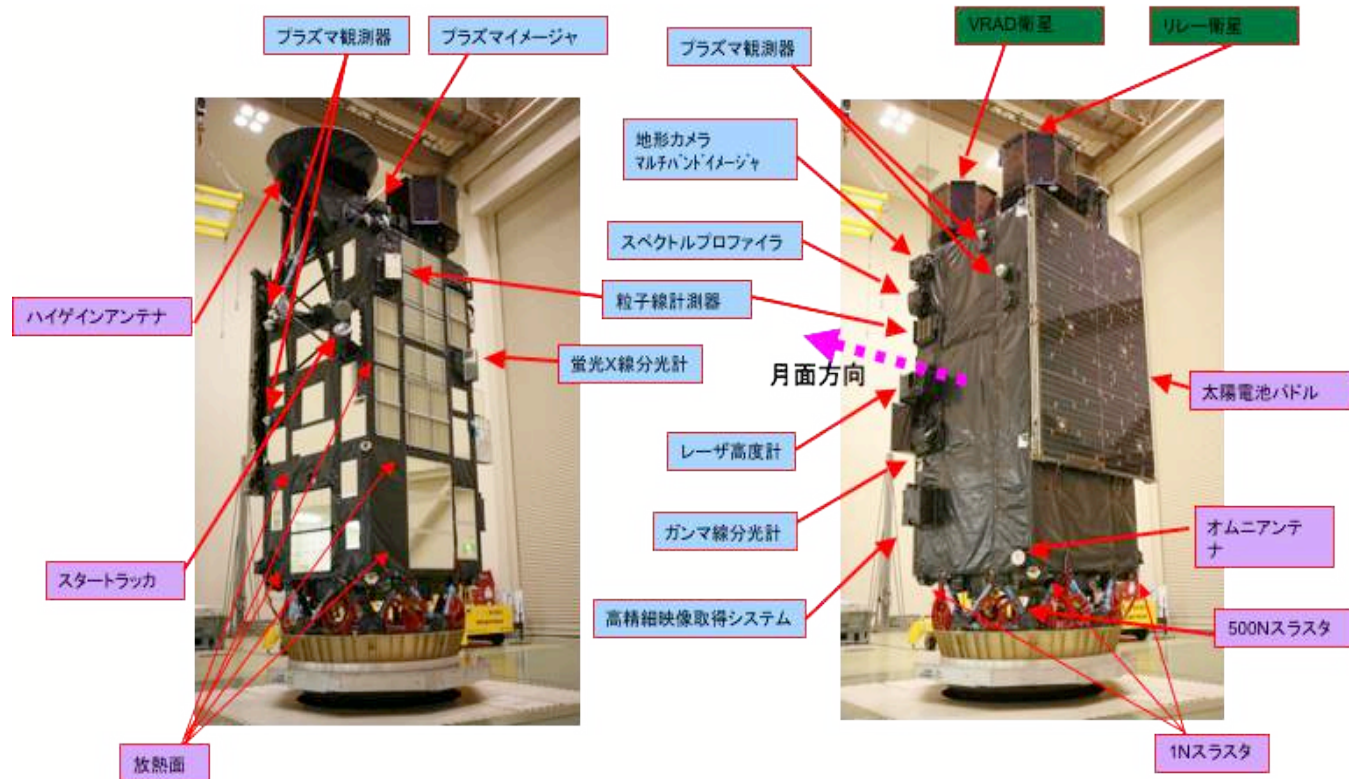


厳しい状況を乗り越えて回収に成功し計画を完遂した後のよろこび。

# 月探査計画“SELENE”計画への参加

SEPAC計画とSFU計画で各種の観測機器開発を行ったことから、各種の観測機器の搭載を目指した“SELENE”の観測機器開発のとりまとめを担当することになった。

表面の元素、鉱物の組成を調べる機器・・・4台  
表面の地形と地下の構造を調べる機器・・・3台  
重力場を調べる機器・・・2台  
環境を調べる機器・・・5台(1台は重力場用機器と同じ機器)  
広報用機器(ハイビジョンカメラ)・・・1台



# “かぐや”の歴史

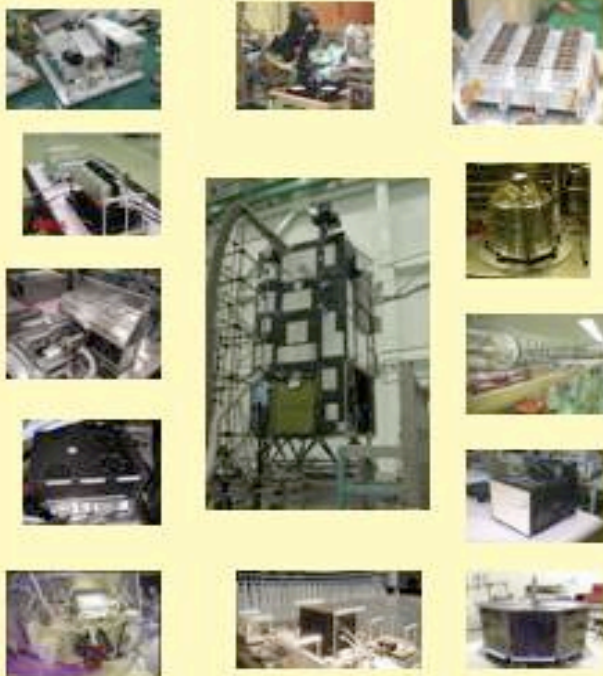
1995-1998年

準備・提案



1999-2004年

衛星本体・観測機器の製作



2005-2006年

組立・試験



2007-2009年

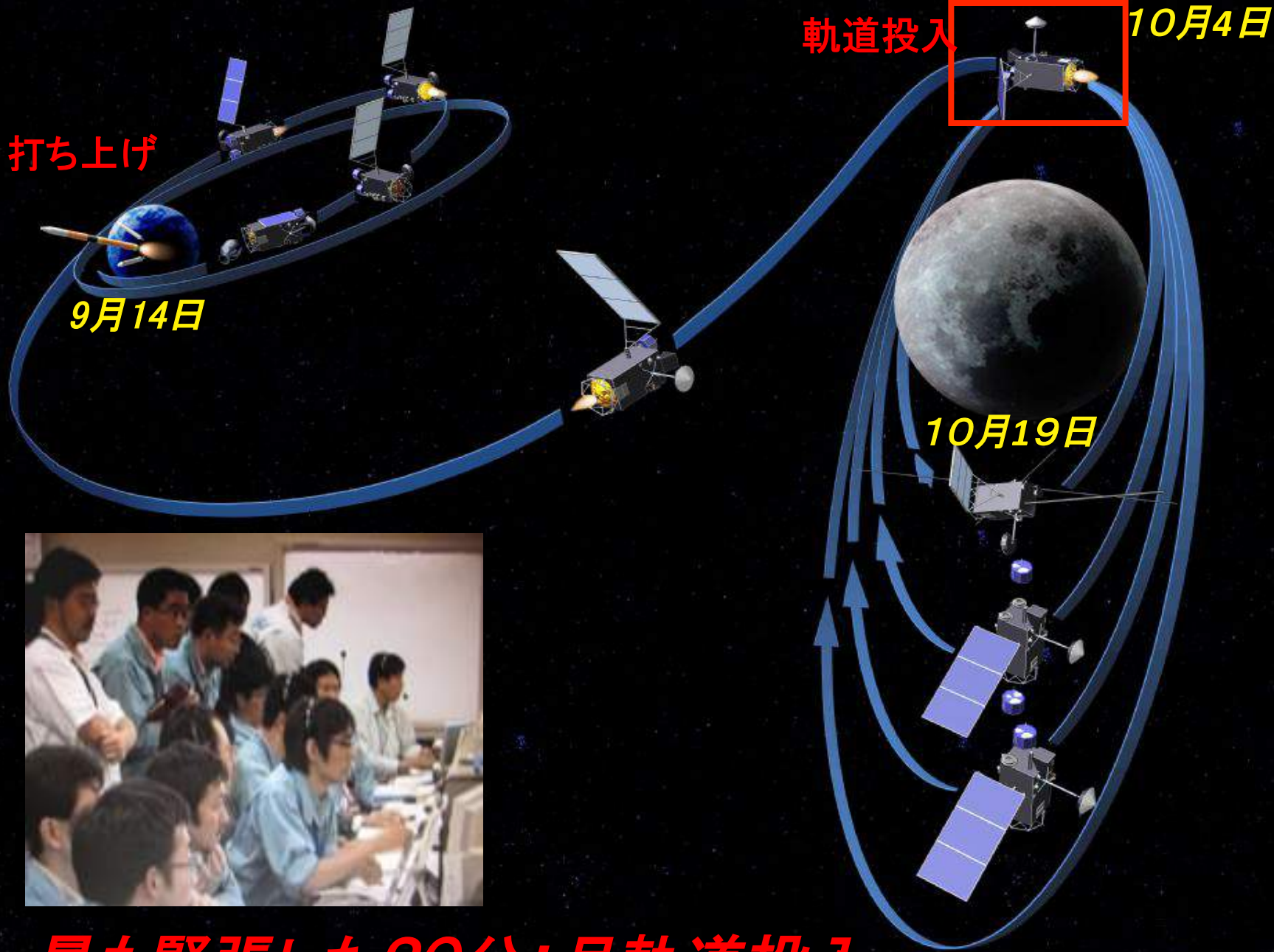
打上・運用



ISAS側の提案書のとりまとめ(鶴田先生、水谷先生、飯島さん)

観測機器開発・試験のとりまとめ

観測機器運用のとりまとめ



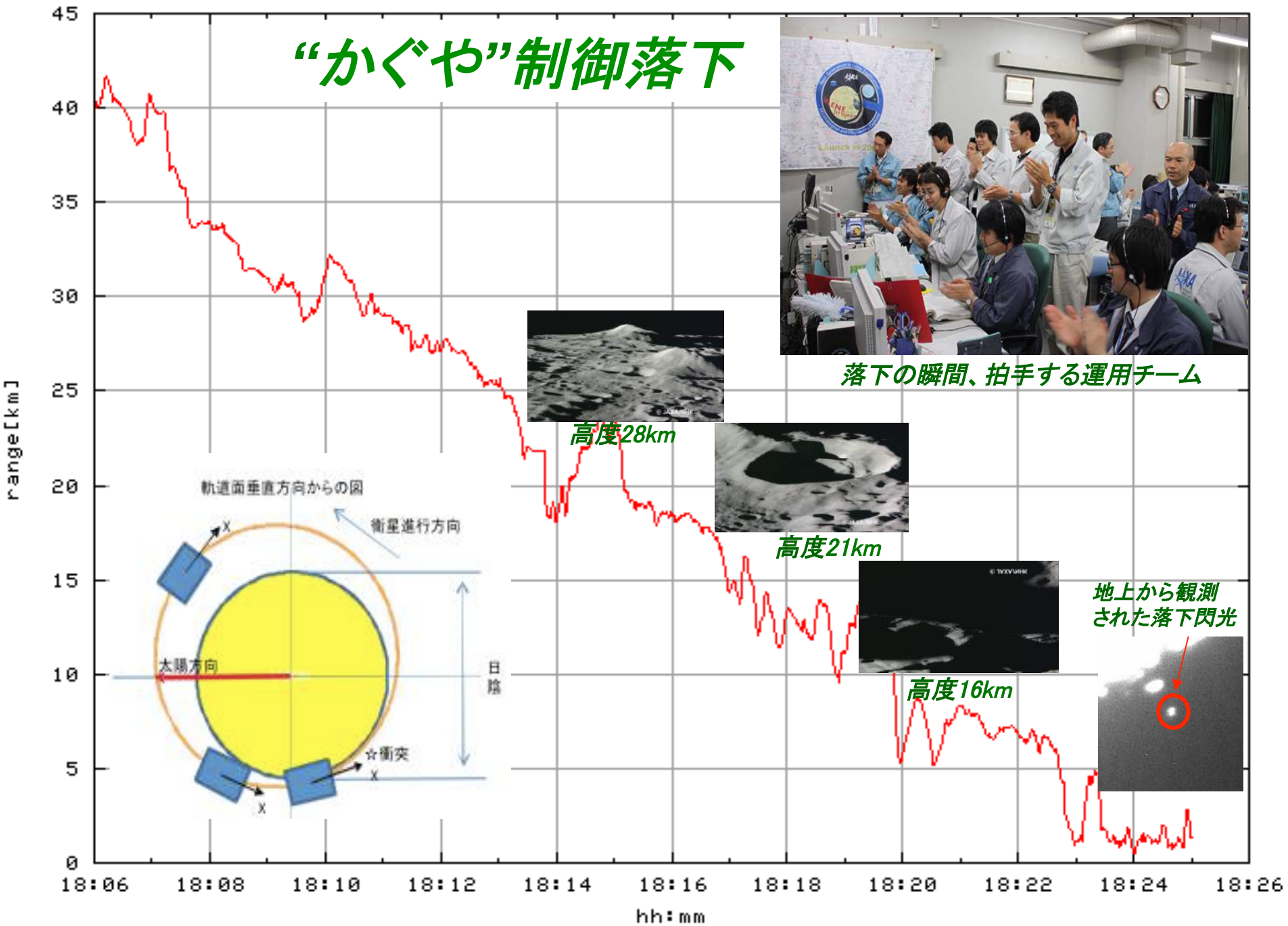
最も緊張した20分：月軌道投入

# 月から見た地球のハイビジョン画像



打ち上げ前に想像していた映像

# “かぐや”制御落下





## SELENE計画の感慨、教訓

1. 規模的(開発経費、参加者数)には最も大きなプロジェクトで困難さや苦労も多かったが、達成感も素晴らしく大きかった。
2. プロジェクトチームは、多くの異なる立場、異なる価値観、異なるコミュニティの複合体であったが、異なるが故に組織としてロバストだった(様々な方向での難局に対し、対応できるメンバーが揃っていた)。⇨組織は単一の考え方のメンバーの集合体よりも、異なる考えのメンバーの集合体の方がロバスト。
3. 問題点については、個人のエキスパートの判断に頼らず、関係者で議論して解決策を見いだすことを原則とした。⇨機動性という点では劣る場合があるが、誤判断のリスクが少なくなる。SELENEのような大型で複雑なプロジェクトでは必要な原則と思われる。



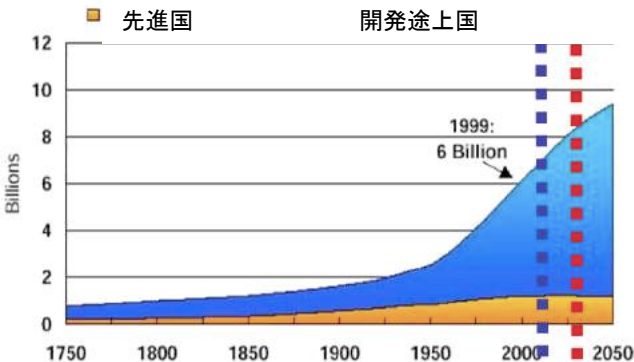
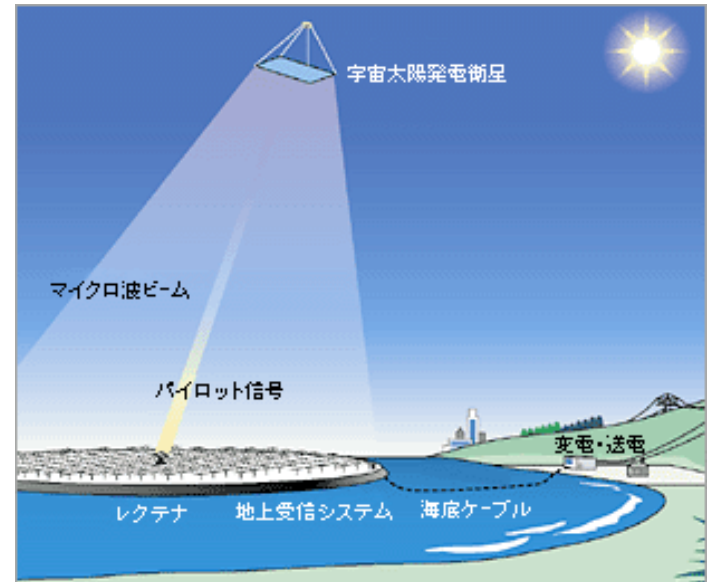
主衛星落下運用を完了して



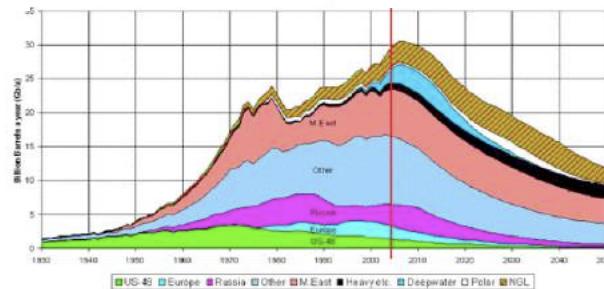
最終運用のおうな(副衛星)の停波運用

# 太陽発電衛星の研究

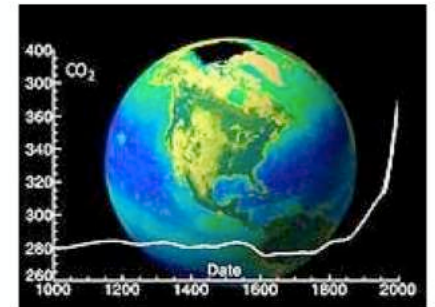
太陽発電衛星 (SPS) とは、宇宙で太陽電池を用いて発電し、その電力をマイクロ波など無線で地上へ送電する、将来のクリーンで大規模なエネルギーシステム。エネルギー資源問題とCO2問題を根本的に解決する可能性を持つ。1968年に発案されたが、技術的実現性、社会的実現性(コスト、パブリックアクセプタンス)に大きな壁があると考えられることから未だ実現の一步を踏み出せず。実現すれば人類の福音だが、多分野・長期間にわたる極めて大きな技術的なチャレンジが必要。



人口の増大



限界あるエネルギー資源



CO<sub>2</sub> 問題

# 太陽発電衛星の研究 (SPS2000)

1991年～

理学部門(超高層大気物理学)から工学部門(宇宙エネルギー工学)へ異動。長友先生の下でSPS2000の設計研究に参加

S2-A1-1

SPS2000研究の手引

SPS2000研究案内の説明会資料および補足・

目次  
 研究目的と成果-----2  
 研究参加・協力・助成-----4  
 研究組織-----6  
 権利と義務-----8  
 主要日程-----9

付録：Task Areaと実施中の研究

1992年2月14日

宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ  
 SPS2000タスクチーム

\*91年10月から12月に5回開かれた説明会で使用した資料と質疑等のまとめ。

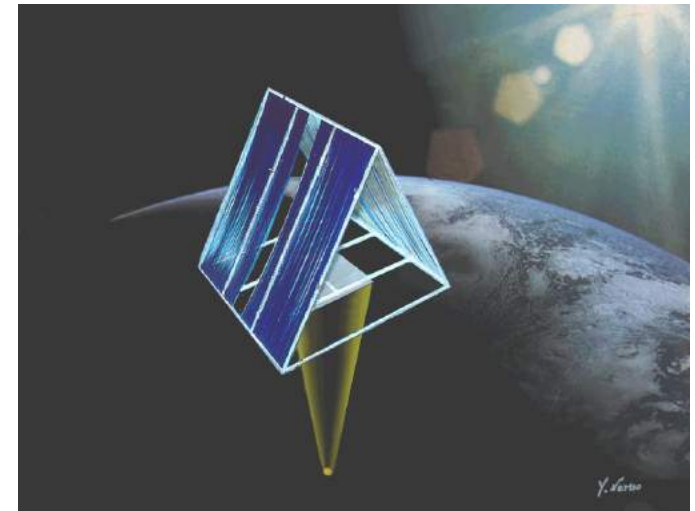
-1-

太陽発電衛星ワーキンググループ歴史年表

年	月	日	事項	関連事項 (特記しないものは年度対応)
1987	11	30	設置趣意書提出	SFU計画発足
1988	3		工学委員会にて設置承認。 主査：後川教授	
1989	3		サブグループ編成、各研究計画作成	
	11	17	エネルギーミッション等で小研究会	
1990	2		マイクロユーズガーデン提案 (H2年度宇宙研特定研究として実施) 主査：三浦教授	政府「地球再生計画」提唱
1991	4		国際宇宙年ISY-METS参加募集	
	8		SPS2000、SPS'91 論文賞	
	9		WG概要(冊子)発行	
1992	7		SSPPに協力	ISY(国際宇宙年) ISU Design Project, SSPP
1993	2	18	S-520-16, ISY-METS打ち上げ成功	H5年度科研費総合研究(B)
	7	30	SPS2000計画概念書発行	
1994	12		SPS2000モデル招待展示 (95-6まで、仏レユニオン県)	H7発足重点領域申請不採択 H6年度科研費総合研究(B)
1995				3月18日、H-II-3、SFU-1打ち上げ H8発足重点領域申請不採択
1996				1月20日、STS-72、SFU-1回収 H9発足重点領域申請不採択
1997	2	27	最終定例会議	H10発足重点領域申請中

1997.3.17工学委員会資料用

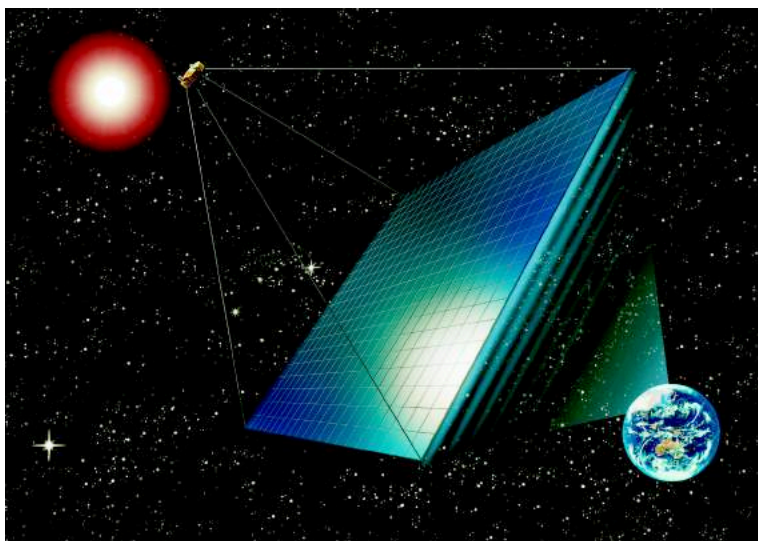
SPS2000  
 日本で初めての本格的なSPSの  
 設計研究  
 10 MW出力  
 高度1100km(赤道軌道)



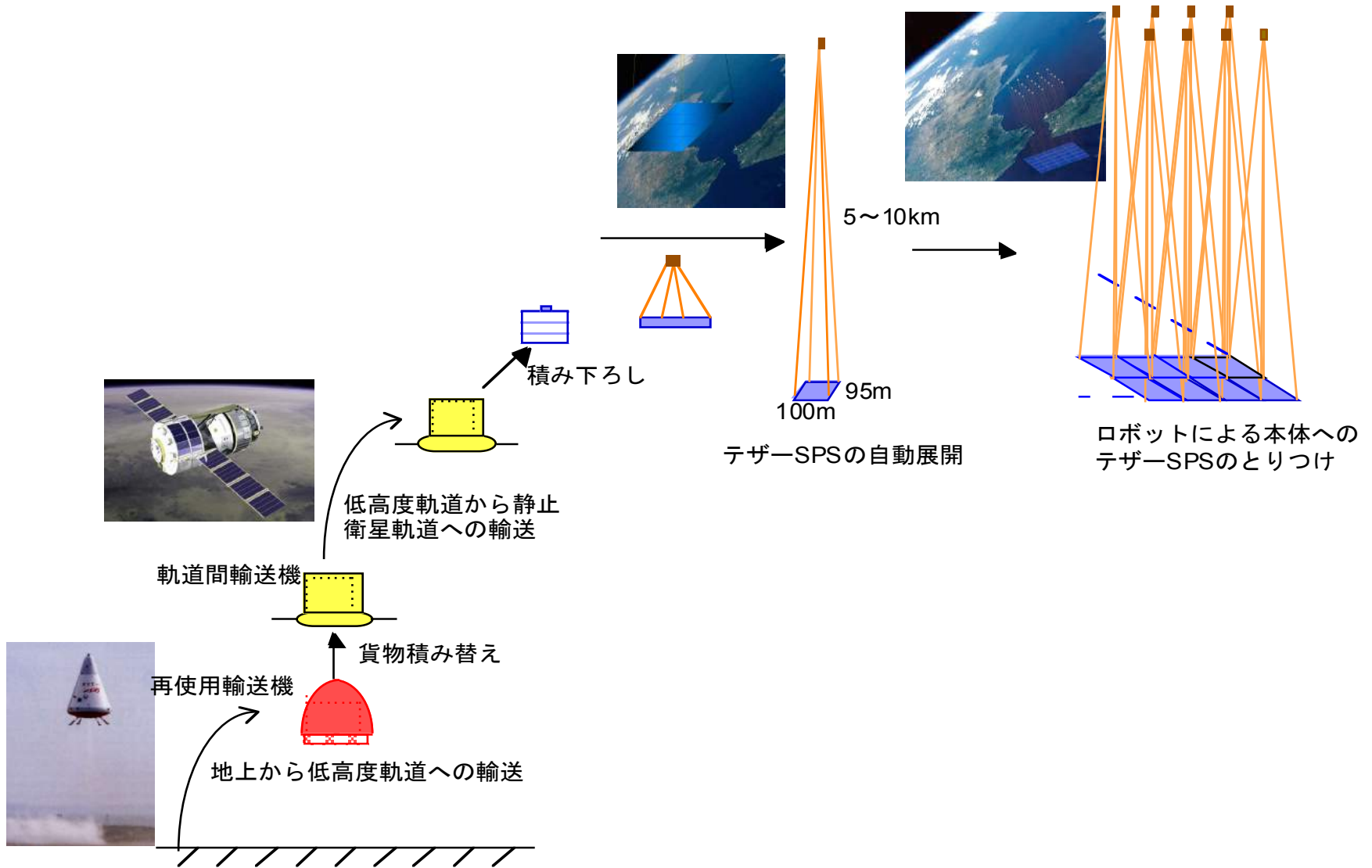
# 太陽発電衛星の研究(USEF委員会)

2000年～ USEFでの設計研究(宇宙研、大学・研究所の研究者、メーカーの技術者)

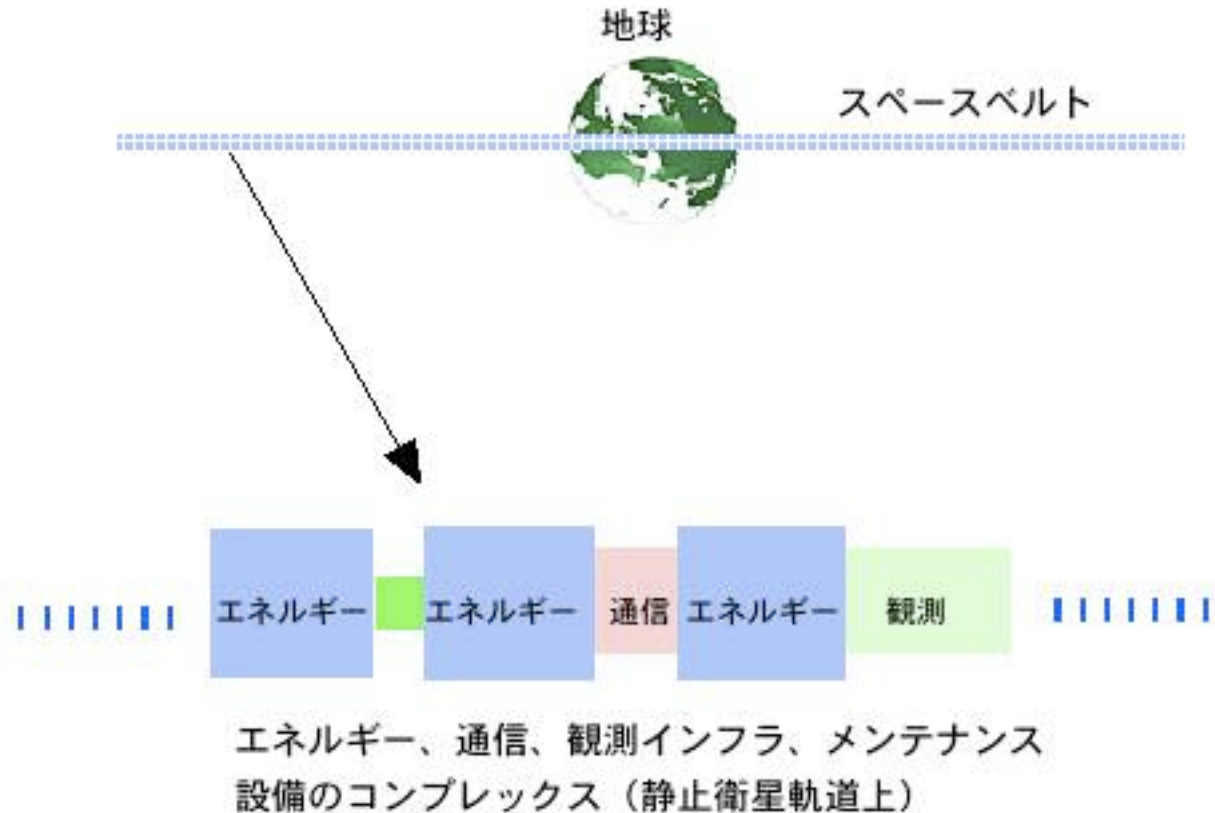
エネルギー取得効率が少し位悪くても単純・ロバスト、可動部・姿勢制御無し  
徹底したモジュール構成を原則(小さい同機能のモジュールを寄せ集めて大規模システムへ)  
電力は分散管理(集電せず発電電力はモジュール単位でマイクロ波へ)、情報は集中管理



# 太陽発電衛星の建設方法の例



# 静止衛星軌道は既に沢山の衛星で混雑している 対策は？

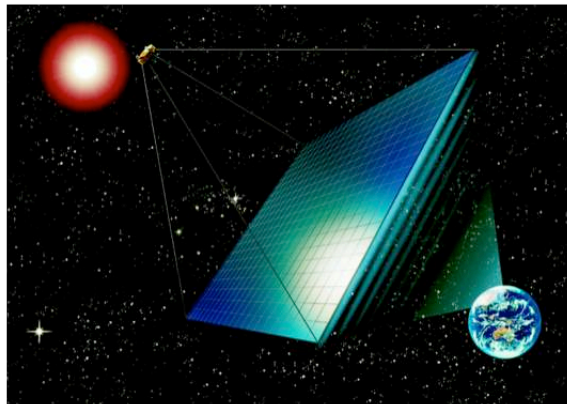


地球上の全ての一次エネルギー(13000 GW)を出力一定型のテザーSPSでまかなうとしたら全長32,500kmとなり、スペースベルト全周の14%を占めることになる。

# 太陽発電衛星の研究(宇宙研・研開本部・USEF・大学の連携)

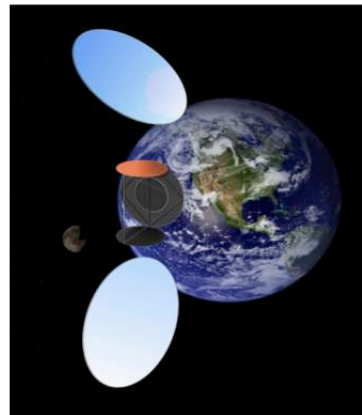
2008年～ 研究開発本部高度ミッション研究グループ併任  
宇宙研・研開本部共同での宇宙太陽光利用の研究

## 共通の目標の設定



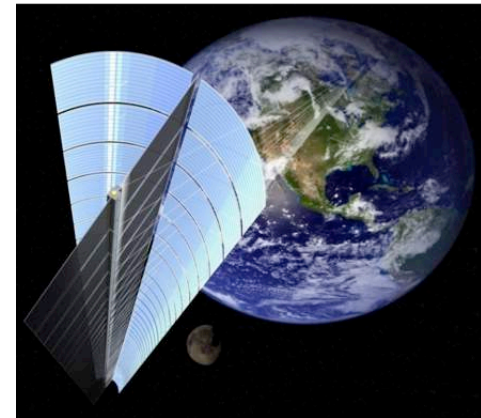
*Basic Model*  
(マイクロ波型基本モデル)

太陽非追尾マイクロ波型  
発電電一体型パネルのモジュール構成  
テザーによる重力安定  
総重量2万トン  
単純、低い電力効率(64%)



*Advanced Model*  
(マイクロ波型先進モデル)

太陽追尾マイクロ波型  
ミラー(反射鏡集光鏡)は編隊飛行  
発電電分離型  
総重量:10,000トン(目標)  
複雑、高い電力取得効率



*Laser Model*  
レーザー型モデル

太陽光直接励起レーザー型  
高倍率反射集光鏡・発電電・  
放熱部のモジュール構成  
総重量:5,000トン(目標)  
複雑、システムが小型

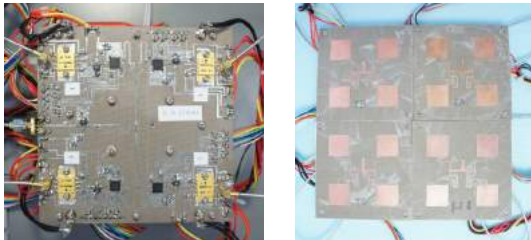
# SPS研究の現状

## 無線送電分野

step1 エネルギー伝送地上実験



kW級マイクロ波送電地上実証(研開本部、宇宙研、USEF、大学等)

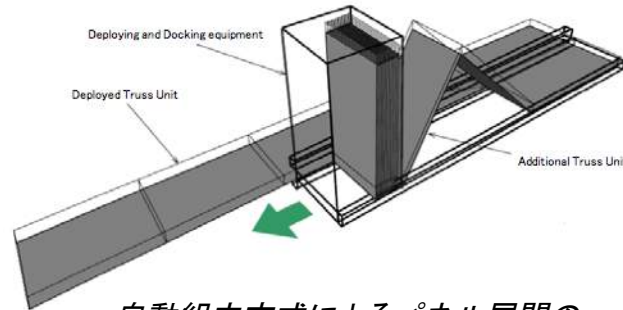


マイクロ波送電先端技術の試作研究(宇宙研)



kW級レーザー送電地上実証(研開本部、大学等)

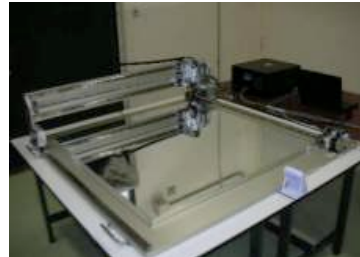
## 大型構造分野



自動組立方式によるパネル展開の地上実証(研開本部、JAXA DE)



新方式のパネル自動展開制御方式の試作研究(宇宙研)



太陽光反射ミラーの性能試験と集光性能シミュレーション(研開本部)

## 耐宇宙環境性分野



二段式軽ガス銃を用いたパネルへのデブリ衝突実験(宇宙研)



スペースチェンバーを用いた高電圧放電実験(宇宙研、大学)



# 太陽発電衛星技術の今と最終目標

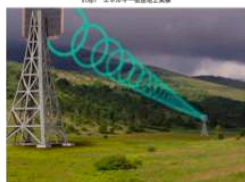
主要な技術	現状の到達レベル	目標レベル	ファクター
宇宙太陽光発電	数十kW（国際宇宙ステーションで80kW）	GW	10,000
マイクロ波送電	数十kW（地上）、1kW（宇宙）	GW	100,000
レーザー送電	数kW（地上）、1W以下（宇宙）	GW	1,000,000
排熱	数十kW	数百MW	10,000
大型構造物	100mクラス（国際宇宙ステーション）	数km	10
宇宙輸送のコスト	100~200万円/kg	2万円/kg	1/100-1/50

1GW=30~50万世帯分

# 実用へ至るまでの道のり



地上実証



小型の軌道上実証

送電方式選択(マイクロ波/レーザー)



100kW 級軌道上実証

コンフィギュレーション選択



開発フェーズ



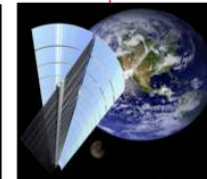
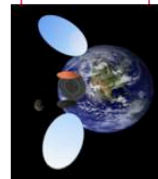
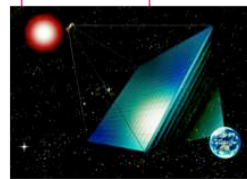
2MW級の軌道上実証

200MW級のプラント実証

実用フェーズ

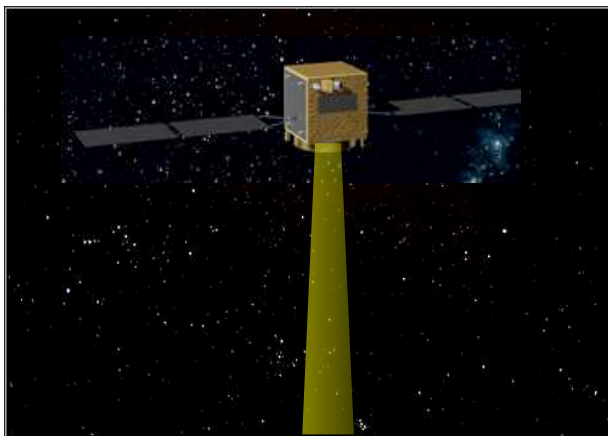


1GW級商用SPS1号機

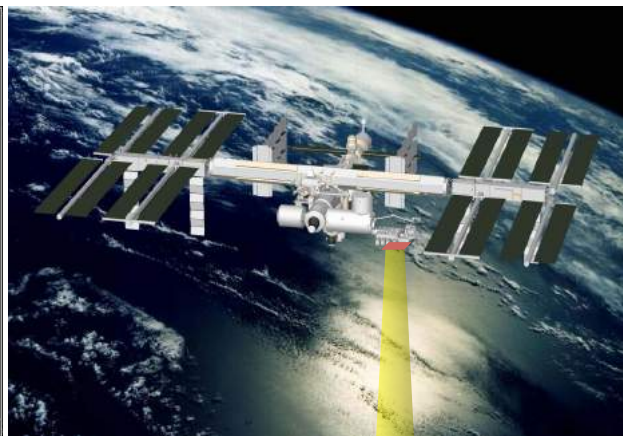


商用SPS本格的建設・運用 (1SPS/year)

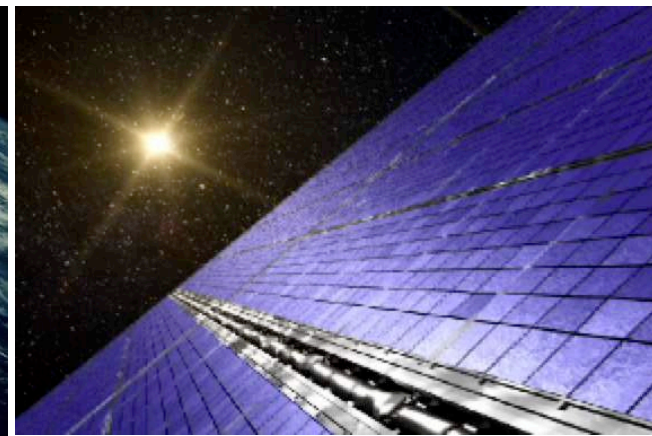
# 無線送電技術実証のための宇宙実験の計画



小型衛星を用いたkW級実験



国際宇宙ステーションを用いた10kW級実験



大型ロケットを用いた100kW級実験 (CG首都大)



高度:400-1000km程度、電力レベル:1-100kW程度  
送電ビーム(マイクロ波あるいはレーザー)の精密方向制御技術の実証  
電離層(マイクロ波の場合)及び大気(レーザーの場合)の通過実証

# SPSが実現したら・・・

環境に優しいエネルギーがふんだんに得られる  
地球環境が修復され自然そのままに維持される  
偏在するエネルギー資源をめぐる争いの終焉  
豊富なエネルギー資源がもたらす穏やかで創造的な社会  
新しい社会の活力による宇宙への発展が生み出す新しい文明と文化……

A painting of a cherry blossom tree at night. The tree is covered in white blossoms, with dark branches visible. A bright yellow full moon is in the upper left corner. The background is a dark, textured blue and green. The overall style is expressive and somewhat abstract.

ご静聴ありがとうございました。

絵：満月祭宴(木村圭吾、1992)