



大学共同利用機関としての 核融合科学研究所への期待

安藤 晃

東北大学工学研究科



出身は京大・理・田中研(WT-2, 3トカマクとECH実験)
ECCD実験やジャイロトロン開発

1987-1989 名古屋大学 プラズマ研究所
NBI実験と負イオン源開発 (第一実験棟)
JIPPT-IIU, CHS, SPAC-II, RFC-XX, ...

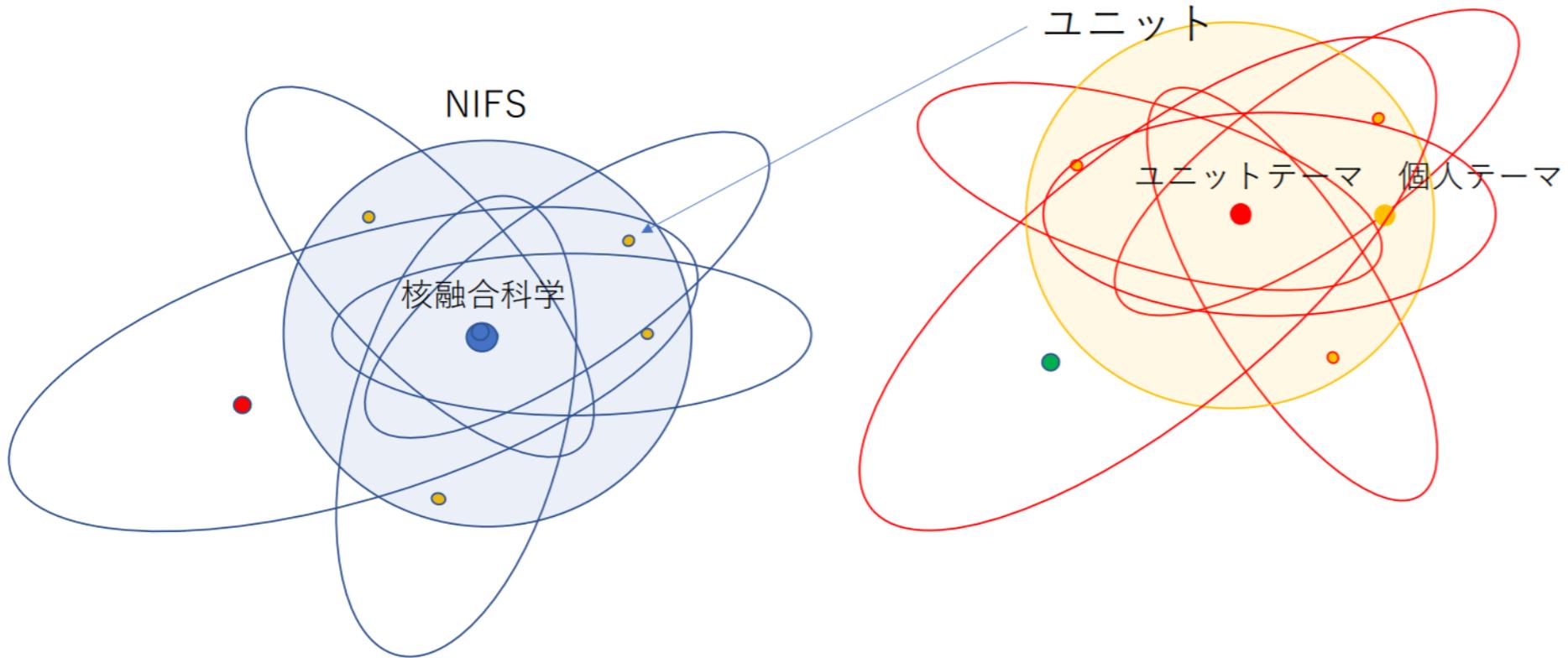
1989-1994 核融合科学研究所
NBI実験と負イオン源開発
土岐サイト 加熱実験棟

1995-現在 東北大学 工学研究科
MPD(高密度プラズマ流源)を用いたプラズマ流れ実験
電気推進研究(磁気ノズル重畳型MPD, Hall thruster,
高速流中のイオン加熱加速,...)
RF負イオン源開発(NBI用)
ビーム光中性化、RFビーム加速(シミュレーション+実験)

プロジェクト研究

大学での
研究

プラズマ+加熱(大電力)技術 → スピンオフ研究へ



- ・ 未来志向であること (既存のテーマの後追いでない)
- ・ 目標を具体的に示していること (永遠のテーマでない)
- ・ 10年後に学术界に輝くテーマに育つこと (月並みでない)
- ・ 多様な「個人のテーマ」を包摂できること (独りよがりでない)

規模感として



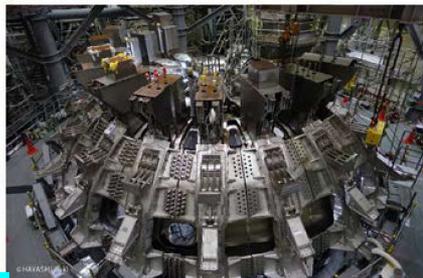
- 1千万のテーマか？
- 1億円のテーマか？
- 10億円のテーマか？



Fusion Research Activities in Japan

for FY 2019

Kyoto Univ.
Heliotron J Helical System
National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) Naka-site
JT-60SA Tokamak



Hokkaido Region

5 Institutes including
- Hokkaido Univ.

National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) Rokkasho-site



IFMIF-EVEDA

Tohoku Region

11 Institutes including
- Iwate Univ.
- Tohoku Univ.



Univ. of Tsukuba
GAMMA 10 Mirror

双方向

Hokuriku Region

6 Institutes including
- Toyama Univ.
- Kanazawa Univ.
- Fukui Univ.

Chugoku, Shikoku Region

16 Institutes including
- Okayama Univ.
- Yamaguchi Univ.

Kyushu Region

20 Institutes including
- Kyushu Univ.
- Saga Univ.
- Kyushu Tokai Univ.

Tokai Region

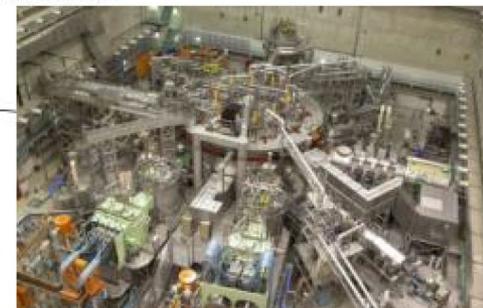
20 Institutes including
- Nagoya Univ.
- Chubu Univ.

Kinki Region

23 Institutes including
- Kyoto Univ.
- Osaka Univ.

Kanto, Koshinetsu Region

65 Institutes including
- Univ. of Tsukuba
- The Univ. of Tokyo
- SOKENDAI
- Tokai Univ.
- National Astronomical Observatory of Japan
- JAMSTEC
- JAEA



NIFS LHD



Kyushu Univ.
TRIAM-QUEST ST

双方向



Osaka Univ.
GEKKO-XII Laser

双方向

Total numbers of universities and research institutes under collaboration with NIFS: **166**

その他
北海道大、東北大、東大、日大、東工大、名古屋大、富山大、広島大、...各大学にプラズマ研究拠点がある。

双方向



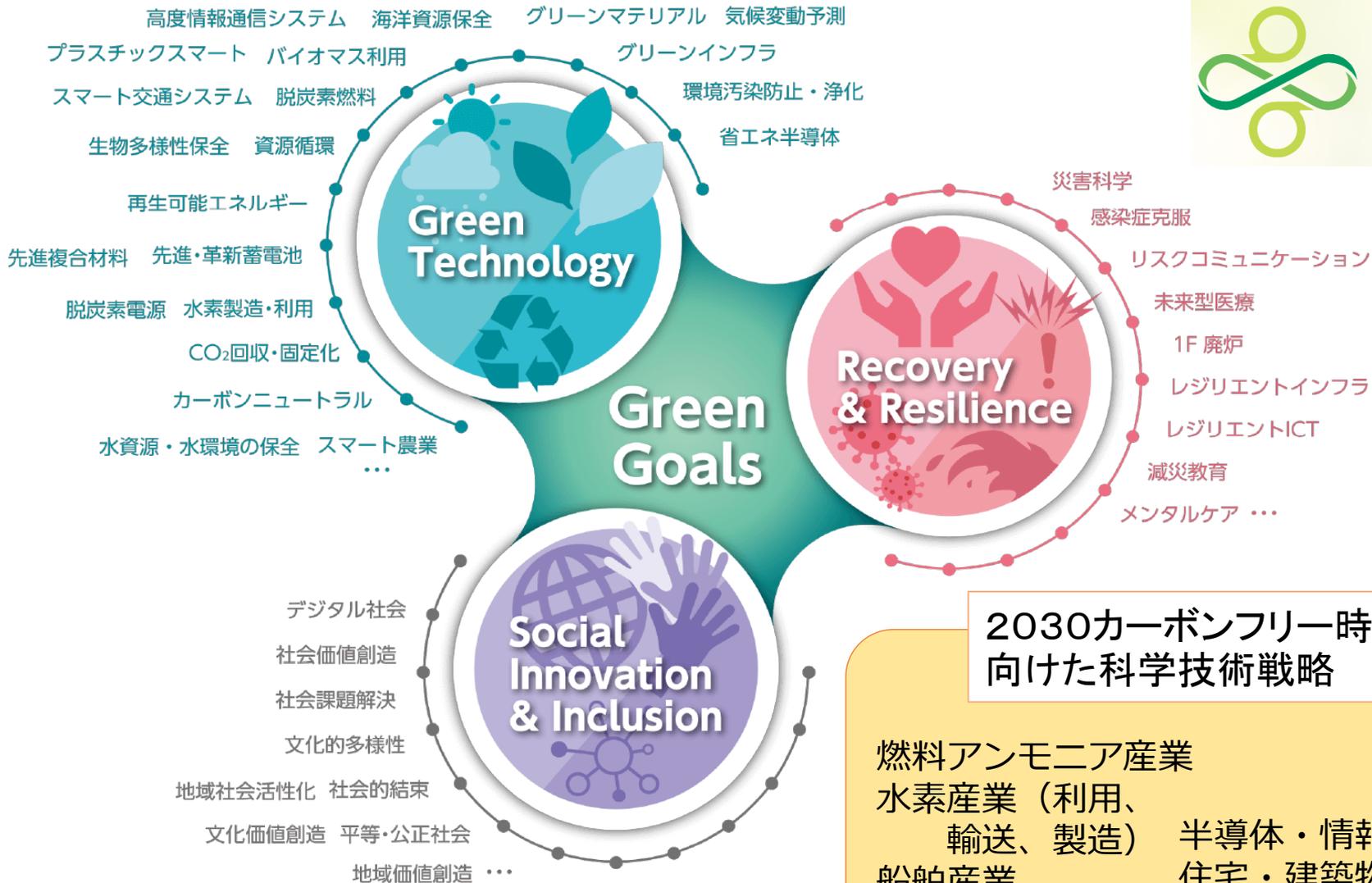
多彩なユニット構築(核融合研究以外の分野にも展開を期待)



核融合技術を活かした研究展開



グリーン未来
創造機構
GREEN GOALS INITIATIVE



2030カーボンフリー時代に向けた科学技術戦略

燃料アンモニア産業

水素産業（利用、
輸送、製造）

船舶産業

洋上風力発電

航空機産業

半導体・情報通信産業

住宅・建築物産業

自動車・蓄電池産業

カーボンリサイクル産業

資源循環関連産業



TOHOKU UNIVERSITY

INTERDISCIPLINARY RESEARCH CENTER FOR NON-EQUILIBRIUM PLASMA

東北大学大学院工学研究科
非平衡プラズマ学際研究センター

IRCNP

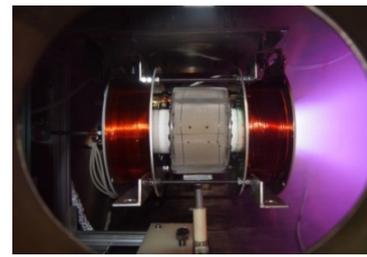
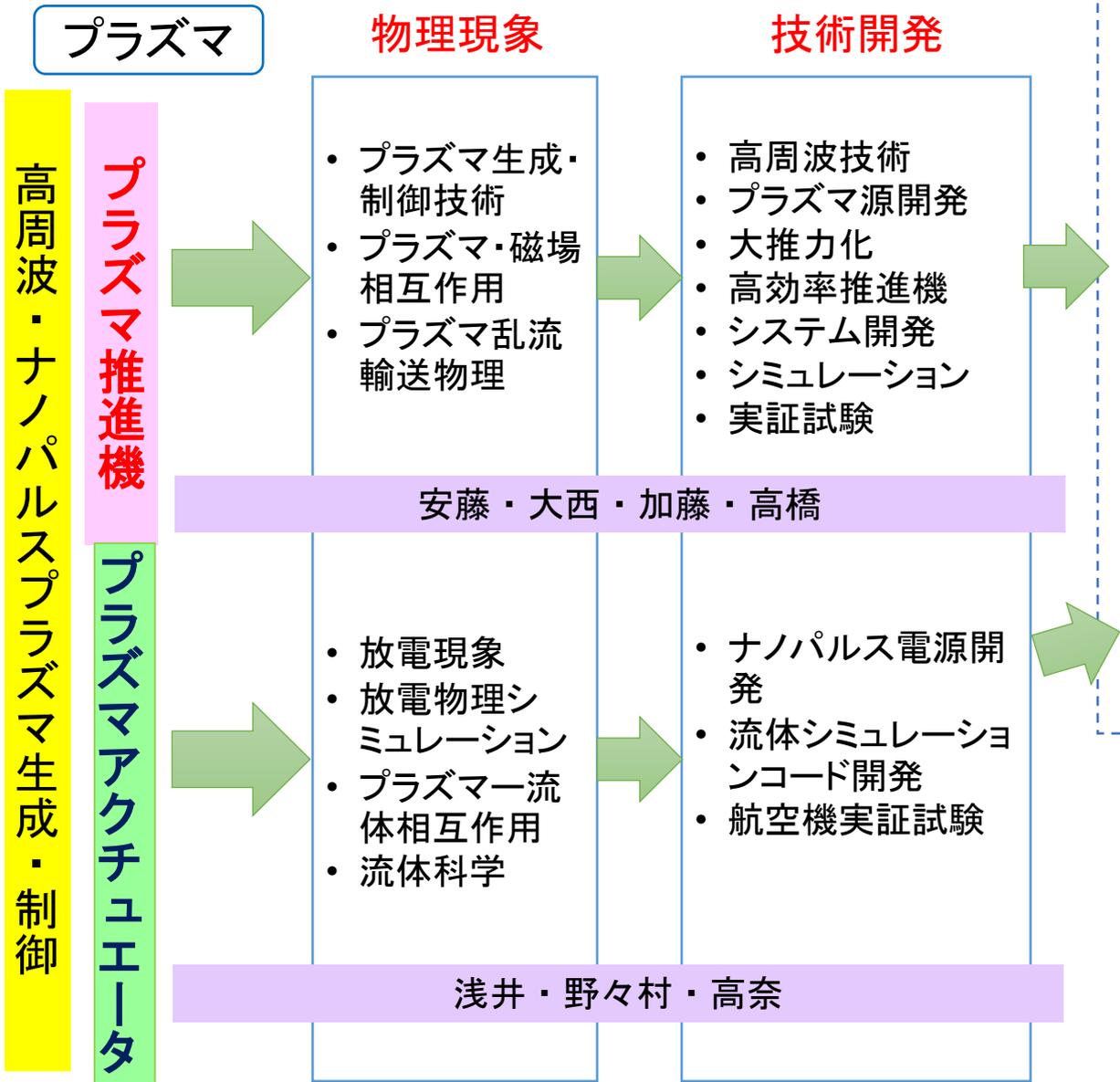
センター長 金子俊郎教授



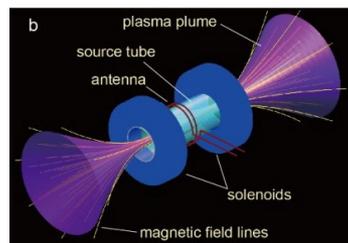
2021年1月に完成した、非平衡プラズマ学際研究センターが入る電子情報システム・応用系 教育研究実験棟



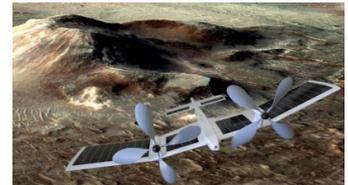
プロトタイプ・実用化開発



大電力プラズマ推進機

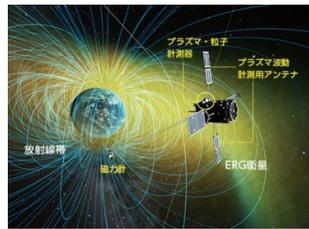


宇宙ゴミ除去衛星



火星飛行機

スピナウト研究



地球・惑星科学

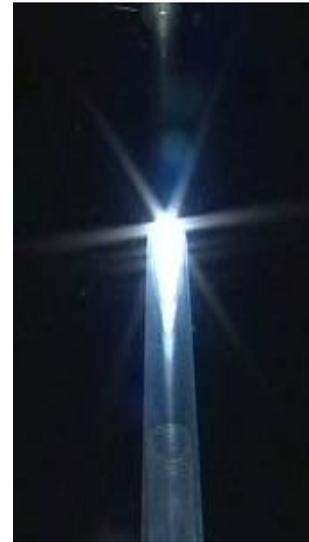
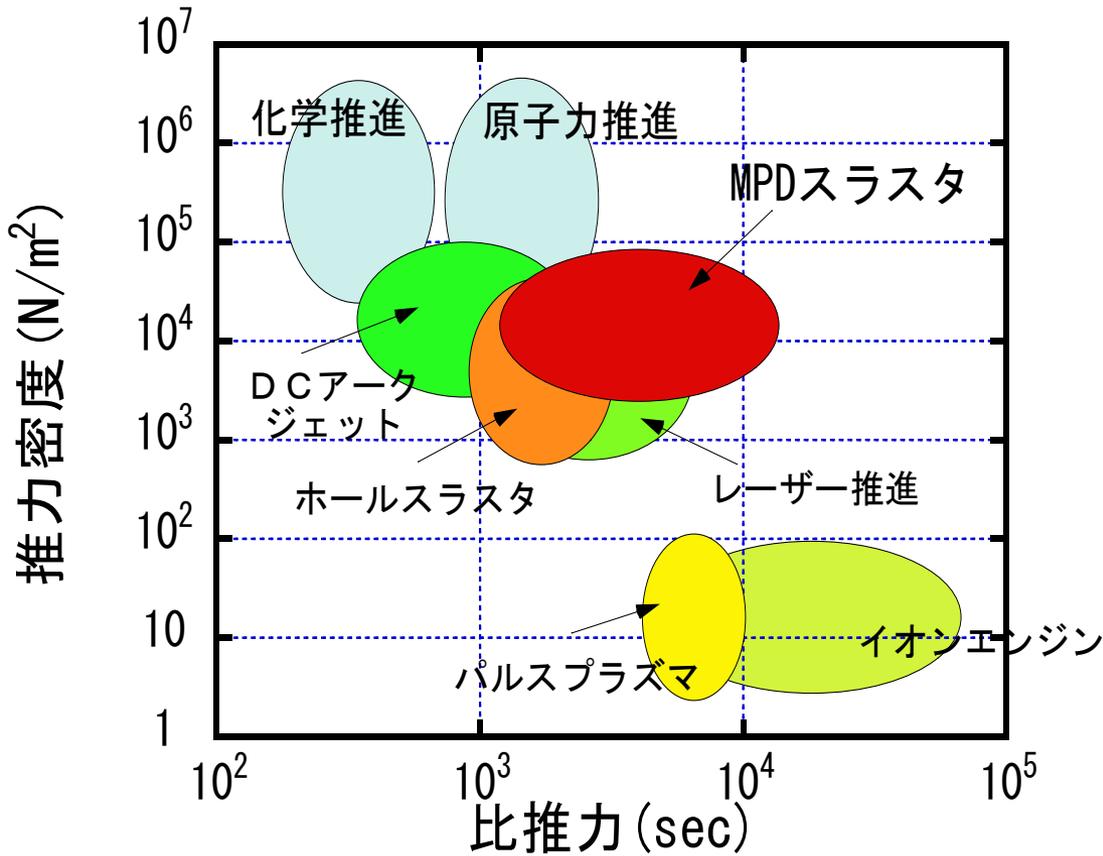


プラズマプロセス

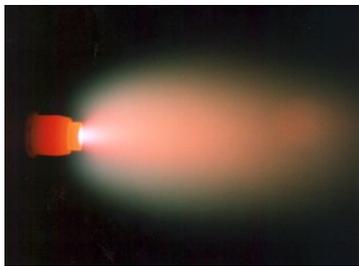
電気推進 (推力と比推力)



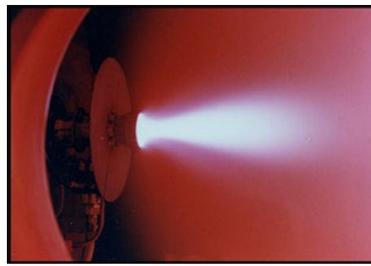
化学ロケット噴射



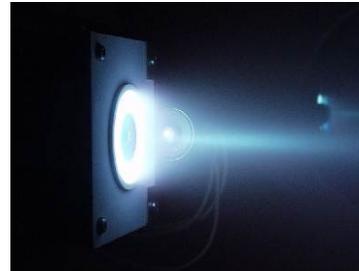
レーザー推進機



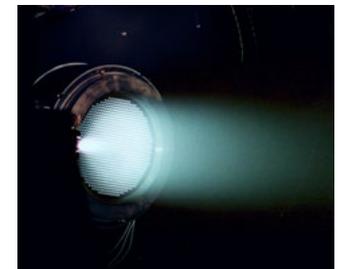
DCアークジェット



MPDスラスタ



ホールスラスタ

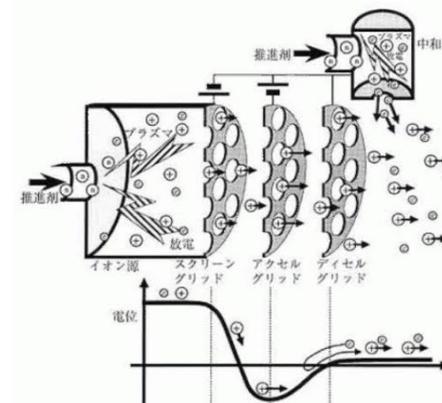
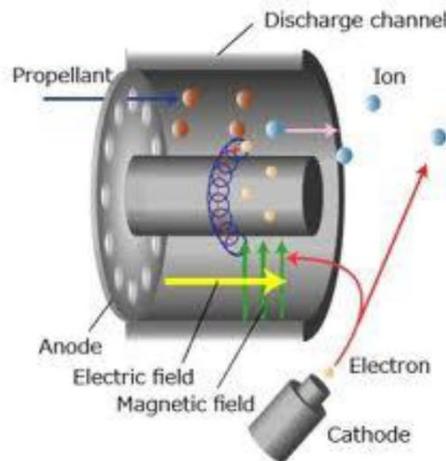
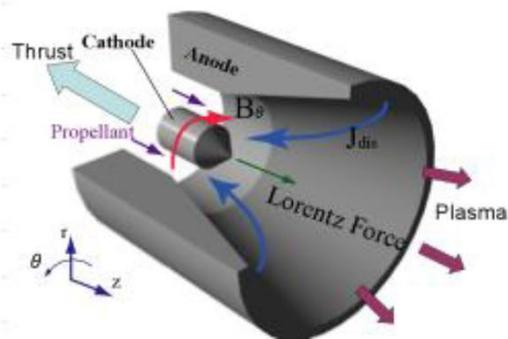


イオンエンジン

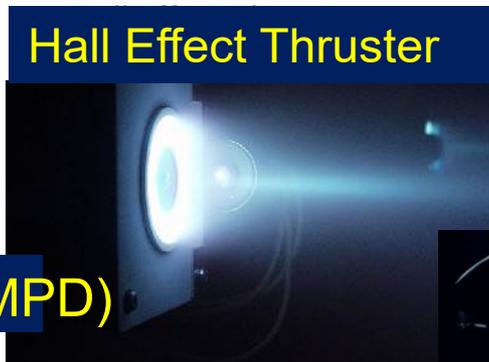


電磁加速

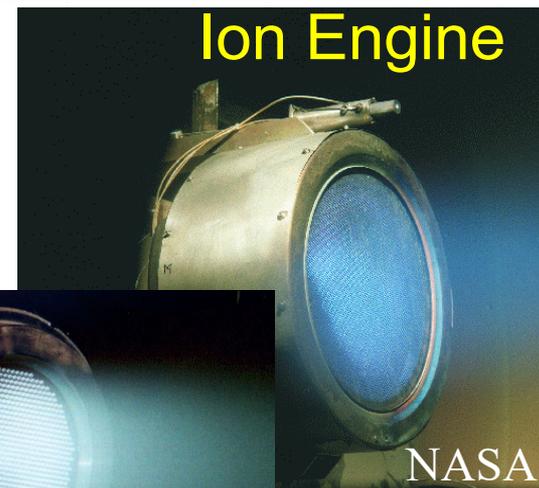
静電加速



Magneto-Plasma Dynamic (MPD)



Hall Effect Thruster



Ion Engine

日本のイオンエンジンはNBI
イオン源のスピンアウト技術



中和器

無電極プラズマ加速 (磁気ノズル)

エネルギー損失評価と抑制 (Sci Rep 2020, New J Phys 2020)

永久磁石のみを用いた磁気ノズル形成 (Appl Phys Lett 2009)

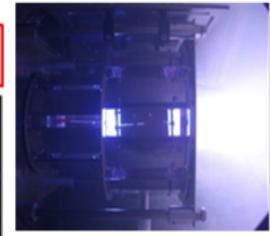
地上産業展開
ミニマルスパッタ装置
(Vacuum 2020)

プラズマ-ガス相互作用 (Appl Phys Lett 2016)

磁力線の伸長の観測 (Phys Rev Lett 2017)

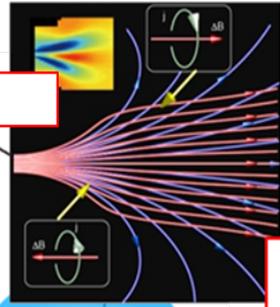
運動量損失機構 (Phys Rev Lett 2015)

電子の断熱膨張 (Phys Rev Lett 2018)

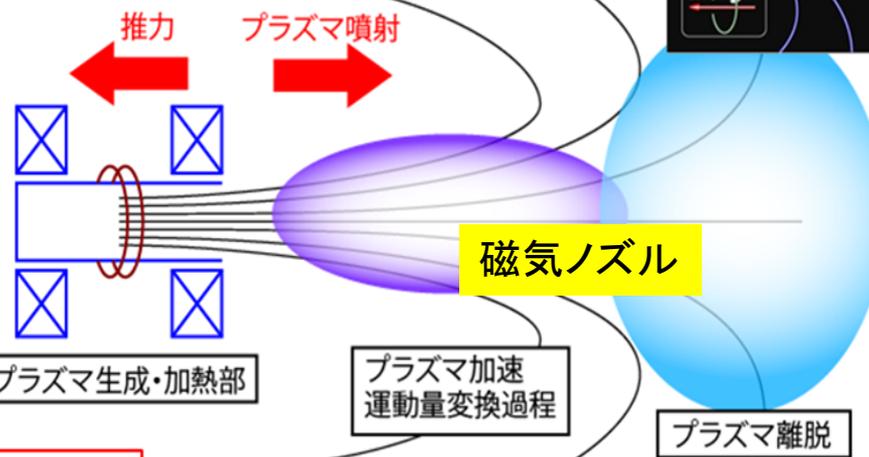
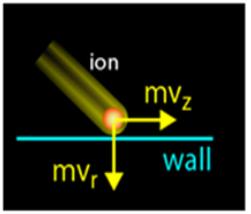


電子の熱力学特性 (Phys Rev Lett 2020)

推進性能記録更新 (Sci Rep 2021)

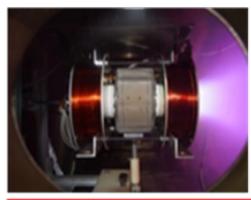


小型・自律制御RFシステム
(Front Phys 2020)



実用化

RFプラズマ生成



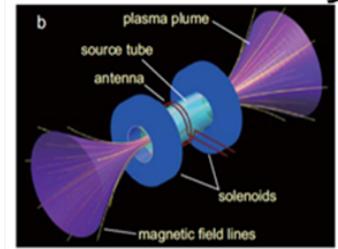
推力直接計測 (Appl Phys Lett 2011)

電子エネルギー分布関数の評価とモデリング
(Phys Rev Lett 2011b)

磁気ノズルによる推力発生の実証
(Phys Rev Lett 2011a)

定在波ヘリコンによる高密度プラズマ生成
(Phys Rev Lett 2016)

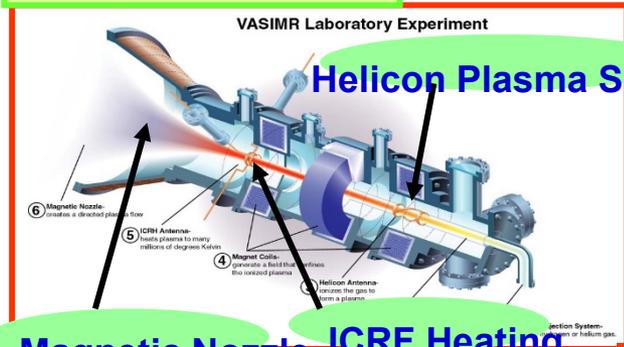
プラズマ拡散抑制による磁気ノズル推力の制御
(Phys Rev Lett 2013)



スペースデブリ除去法
(Sci Rep 2018, 日経産業新聞, 日刊工業新聞
Phys Org, Euretek Alert, Yahoo!, Big Think, etc...)

高周波イオン加速を用いた推進技術開発

VASIMR型推進機



RF Power

Variable

Plasma Production

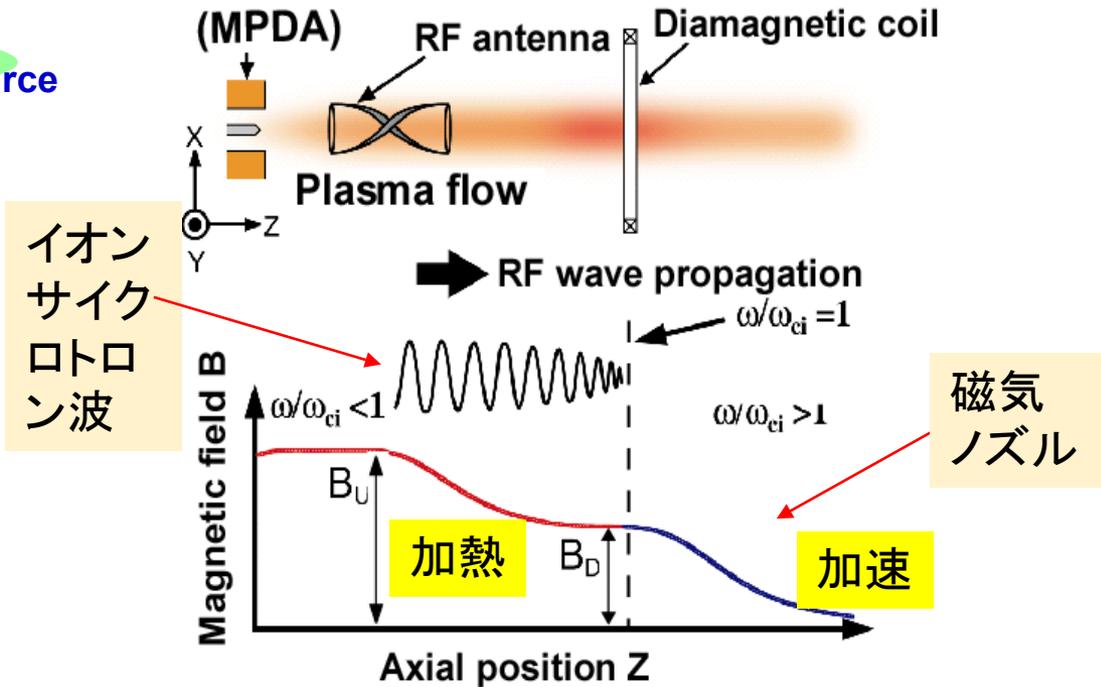
Plasma Heating

Thrust

Specific Impulse

- ➡ Variable *Isp* (more than 10000sec)
- ➡ controlled by RF power distribution
- ➡ no electrode system

Plasma source (MPDA)



東北大での研究

- 高周波加熱と磁気ノズル制御の実証
- He及びHでの研究成果
→ ArやKrなどの利用へ
- MPDから完全RF化へ
→ FET電源を用いたRFプラズマ生成

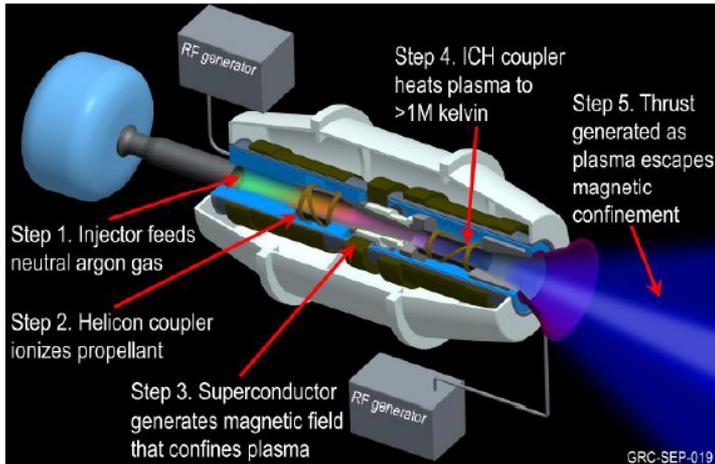


Figure 1. Schematic of the VASIMR technology elements.

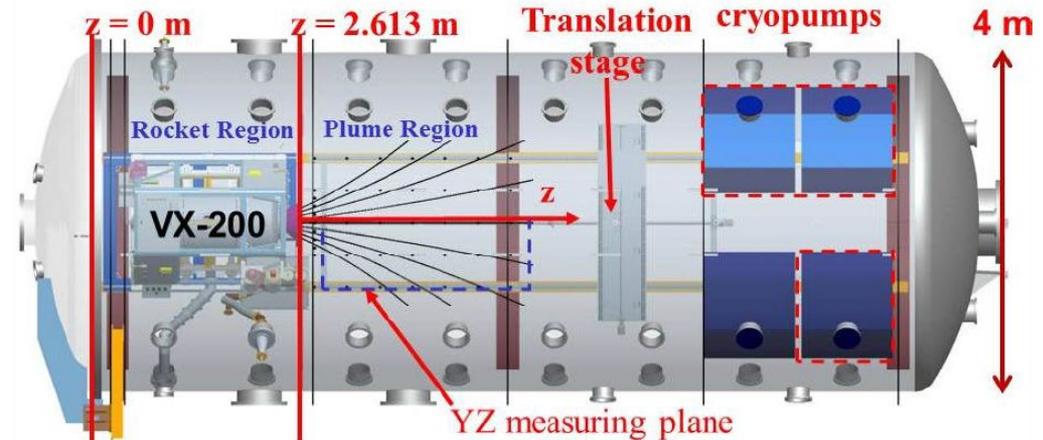


Figure 2. VX-200 installed in the vacuum chamber with translation stage and coordinate system noted. The reference for $z = 0 \text{ m}$ is the large end flange of the chamber and the last physical structure attached to the rocket ends at $z = 2.613 \text{ m}$.

Chamber: 24 m³, Pump: 150 kL/s

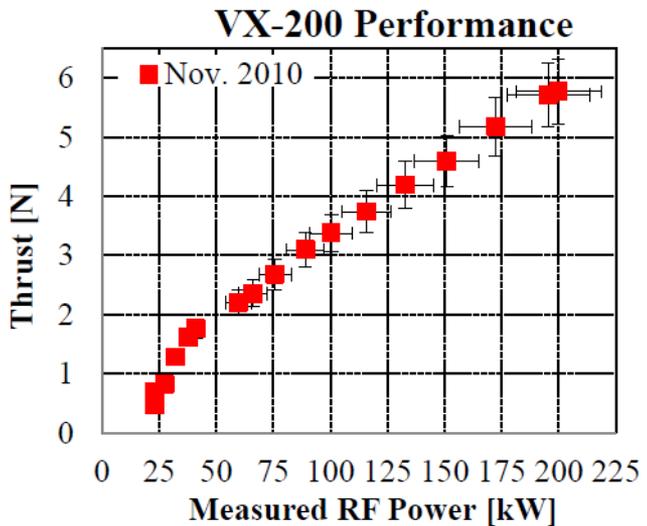
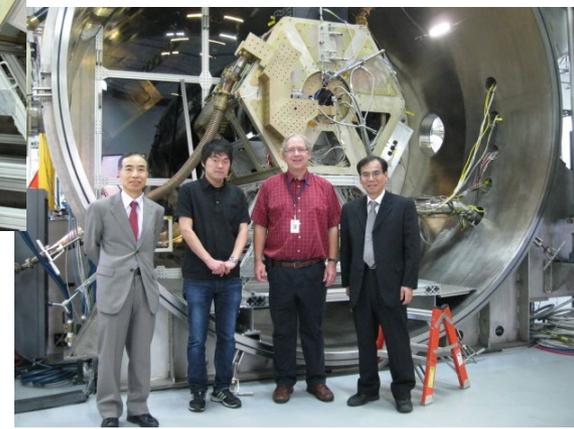


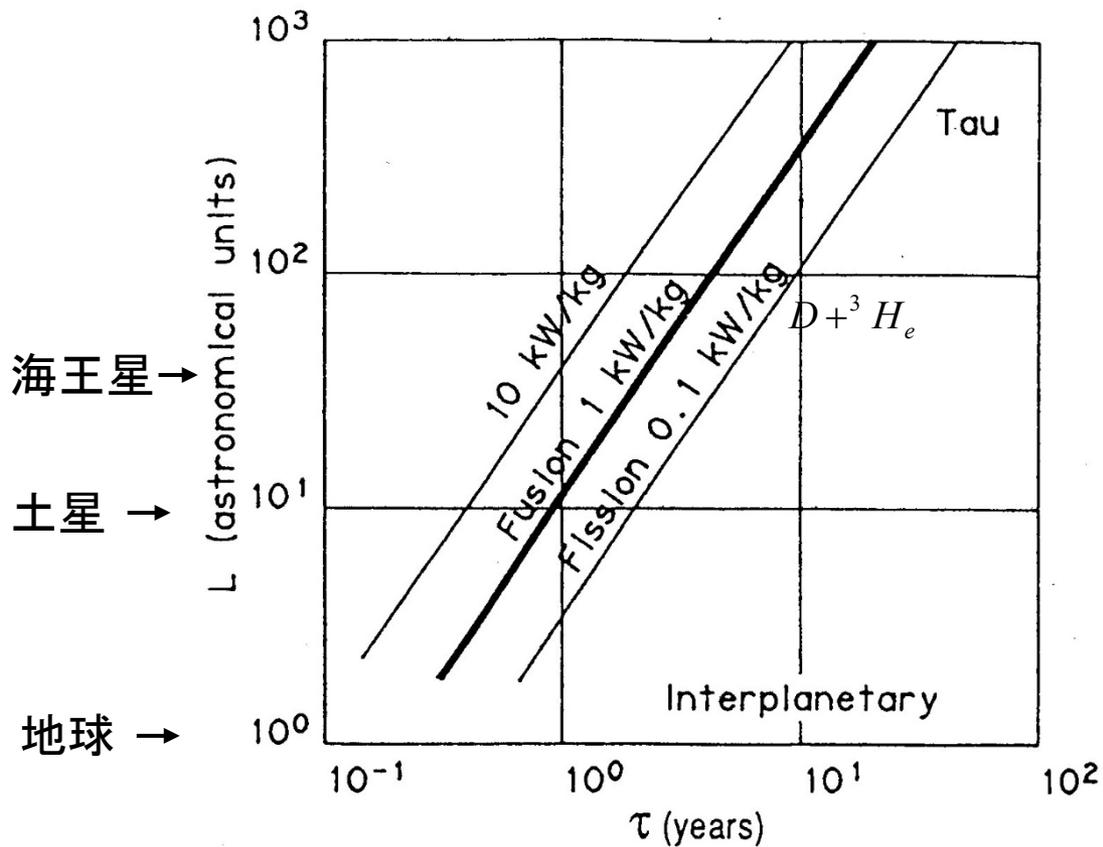
Figure 5. Thrust versus input RF power.



VX-200SS : 80kW RF endurance test for 80hours (2021 June)



飛行距離と時間に対する比出力



VISTA宇宙船

核融合ロケット

大推力 + 高比推力 + 発電が同時に可能。



レーザー核融合ロケット実現に向けた共同研究を開始 —推進システムの原理実証に向けて—

お知らせ

公開日：2020.01.23

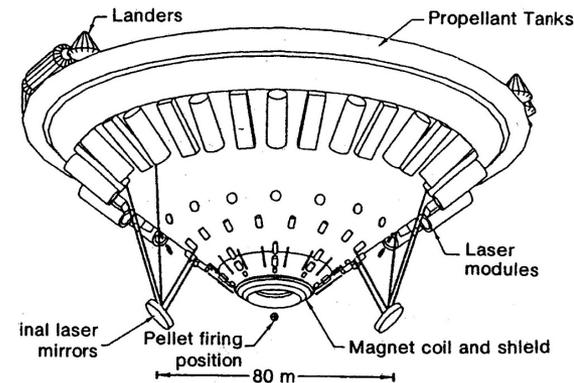
九州大学大学院総合理工学研究院の森田太智助教と山本直嗣教授のグループは、レーザー核融合ロケットの実現に向け、株式会社IHIエアロスペース、光産業創成大学院大学、大阪大学レーザー科学研究所、広島大学、パデュー大学、明石工業高等専門学校と共同研究を開始しました。

現在、有人月・火星探査に向けた研究開発が各国で開始されています。核融合プラズマを推進材とするレーザー核融合ロケットは、他の技術と比べて圧倒的な大推力と低燃費を実現できます。そのため航行時間の大幅な短縮（火星まで約3ヶ月で到達）が可能であり、宇宙推進のゲームチェンジャーとなる技術として期待されています。一方、課題も多く、失敗を恐れず開発に果敢に挑戦するスピリッツが求められ、ムーンショットと呼ぶにふさわしい研究テーマです。

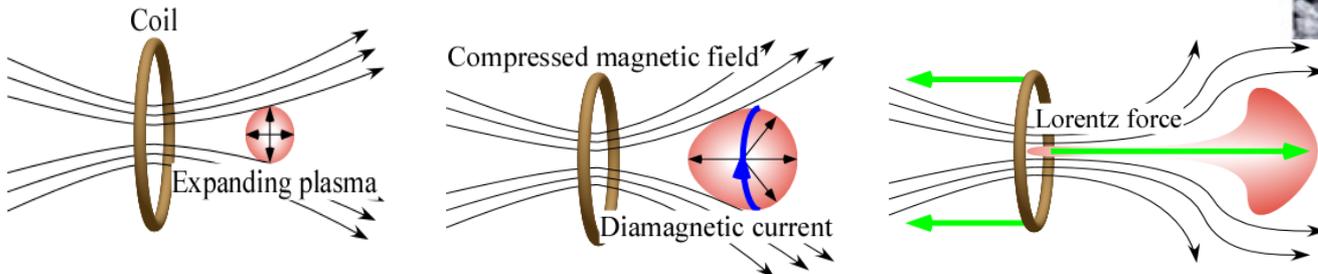
阪大レーザー研と九大、IHI社などが参画した共同実験

九大、IHIエアロスペース、光産業創成大、阪大レーザー研、広島大、パデュー大、明石高専

九大 中島、山本、森田、他

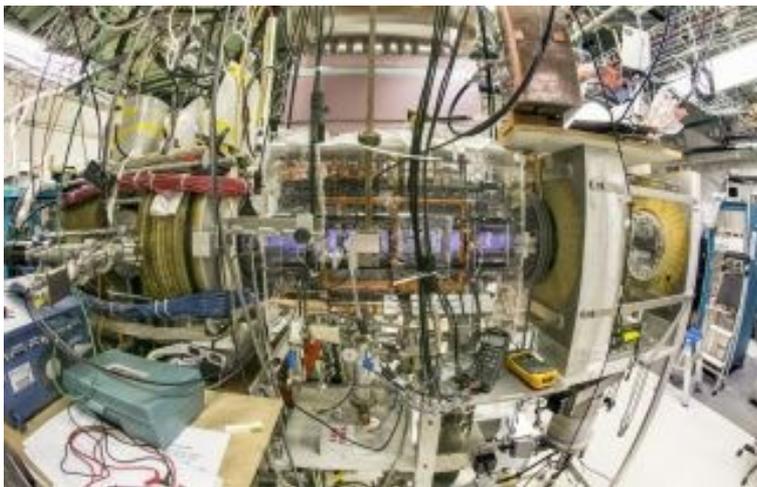


1月14-17日に行われたレーザー核融合ロケットの模擬実験では、大阪大学の大型レーザーを用い、写真のように多くの共同研究者・学生が参加しました。



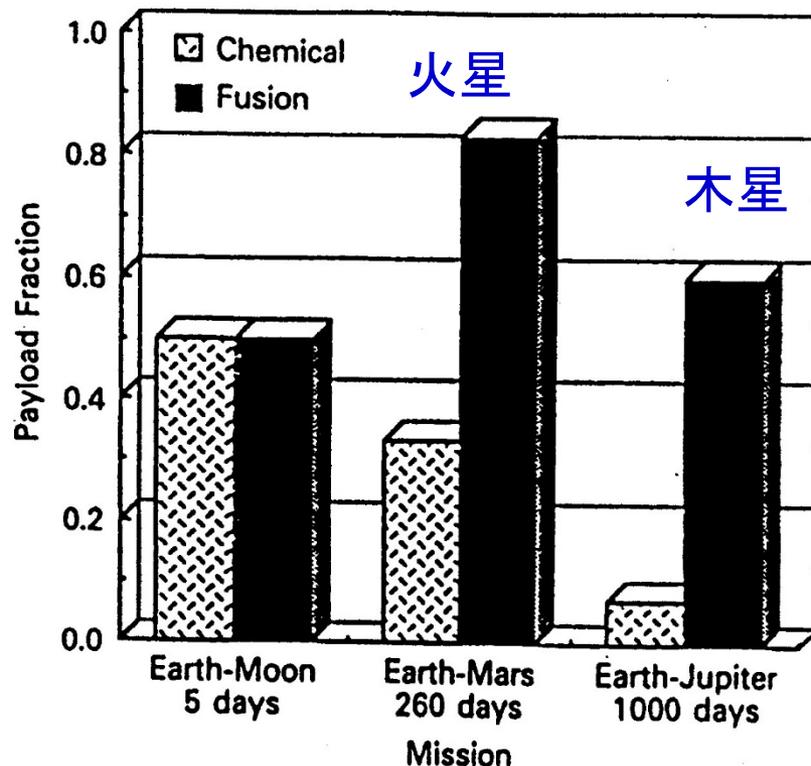
<http://art.aees.kyushu-u.ac.jp/research/LFR/No-11-1.htm>

➡ プラ核学会誌 (R03、10月号) に特集記事を準備中



<https://www.space.com/>

The Princeton Field Reversed Configuration device, the PFRC-2, at Princeton Plasma Physics Laboratory



核融合推進の魅力は、ペーロード比(ロケット質量に対する搬送可能な質量比)が高いという電気推進の特性を持ったまま搬送可能質量が大きいいため、短期間で大量の荷物を他天体に運べること。 → 宇宙航行におけるゲームチェンジャー

NASAは2039年に有人火星探査用として原子力を利用した推進機開発を進めている。核融合ロケットはその重要なオプション。 → 共同研究に参画、推進する方募集中

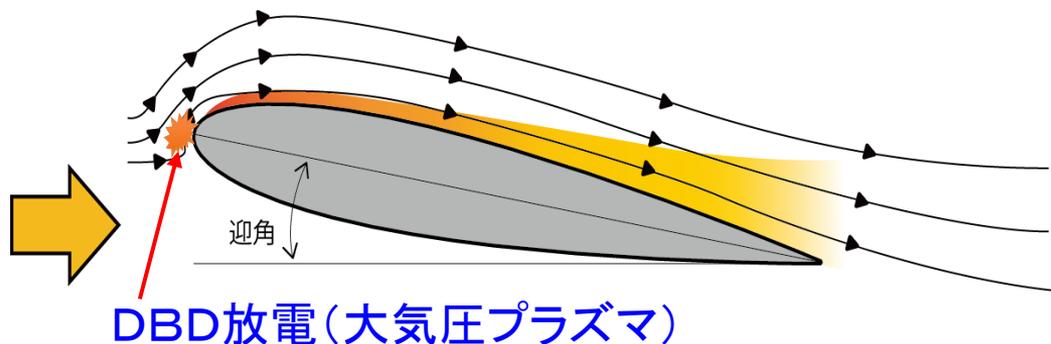
FRC+磁場慣性核融合、Fission-Fusionハイブリッドターゲット+磁場慣性核融合、...

方式は違えど、要素技術は同じ



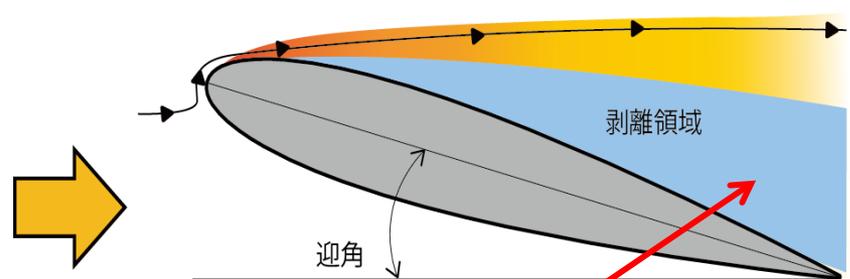
プラズマを翼面上で発生させ、剥離した気流の制御を行う

付着流れ = 揚力が発生している

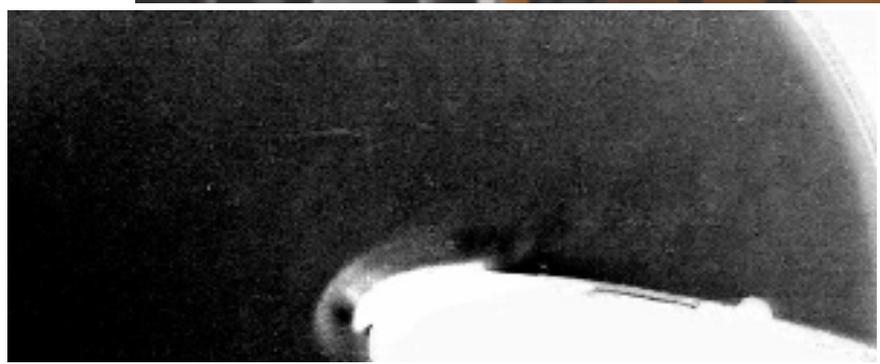


フラップ(高揚力装置): 翼面積を増やすことで揚力を増す装置

剥離流れ = 揚力が発生していない



剥離領域
 流れの速度が低下し、逆流が発生してしまっている



プラズマアクチュエータ

火星探査飛行機

軌道衛星やローバーにはできない高解像度でかつ広範囲をカバーする探査を行う。

火星は地球に比べ、低密度であり、大気温度が低い

惑星	地球	火星
圧力 (Pa)	100,000	700
温度 (K)	288	210(133~293)
重力加速度(m/s ²)	9.80	3.71
大気成分	N ₂ (78.1%) O ₂ (20.9%) Ar(0.93%) CO ₂ (0.03%)	CO ₂ (95.3%) N ₂ (2.7%) Ar(1.6%) O ₂ (0.13%)
備考	水が存在	ダストの存在



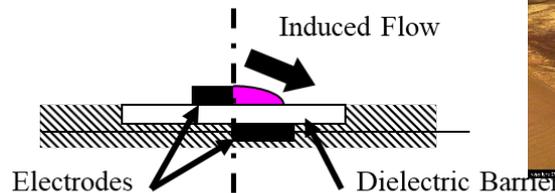
低Re数
高Mach数

機体	レイノルズ数	マッハ数
NASA (ARES)	1.8×10^5	0.65
JAXA/ISAS	1.0×10^5	0.48



ARES (NASA Langley)

<http://marsairplane.larc.nasa.gov/multimedia.html>



Plasma actuatorの概略図

Plasma Actuator Concept



プラズマアクチュエータによる気流剥離・失速防御が重要視

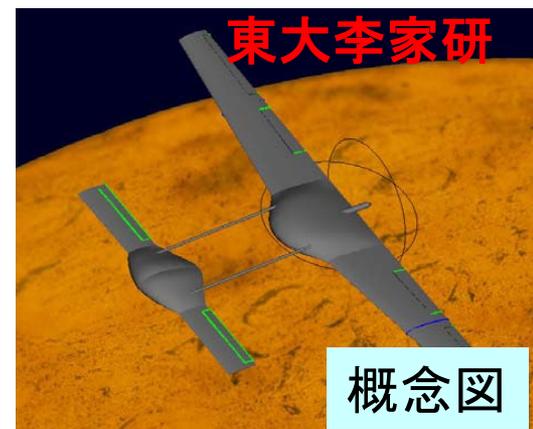


Mars - Syrtis Major - March 10, 1997 HST - WFPC2

マリネリス峡谷
(幅100-200km, 深さ2-7km)

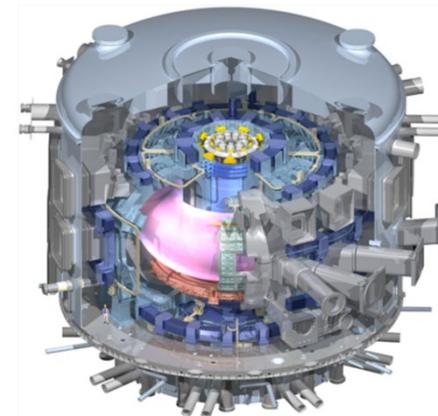
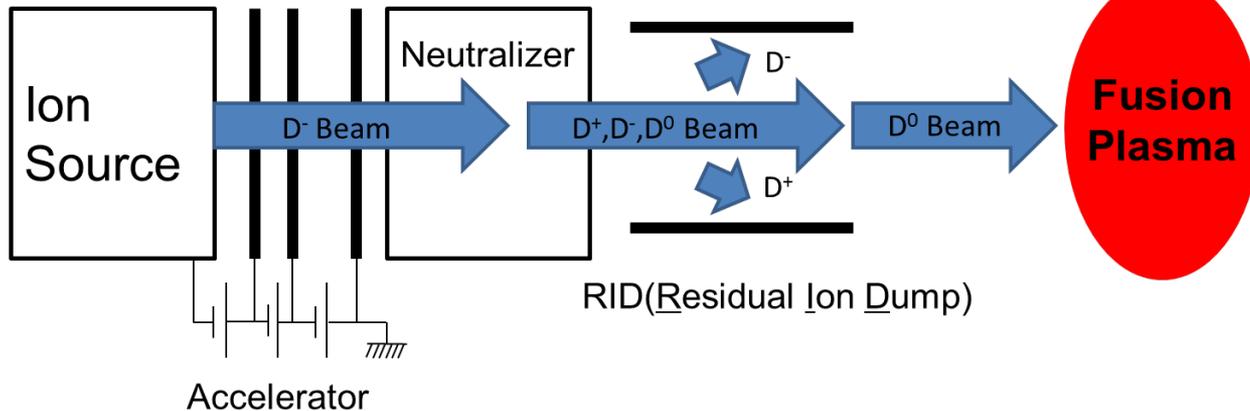


JAXA/ISAS



概念図

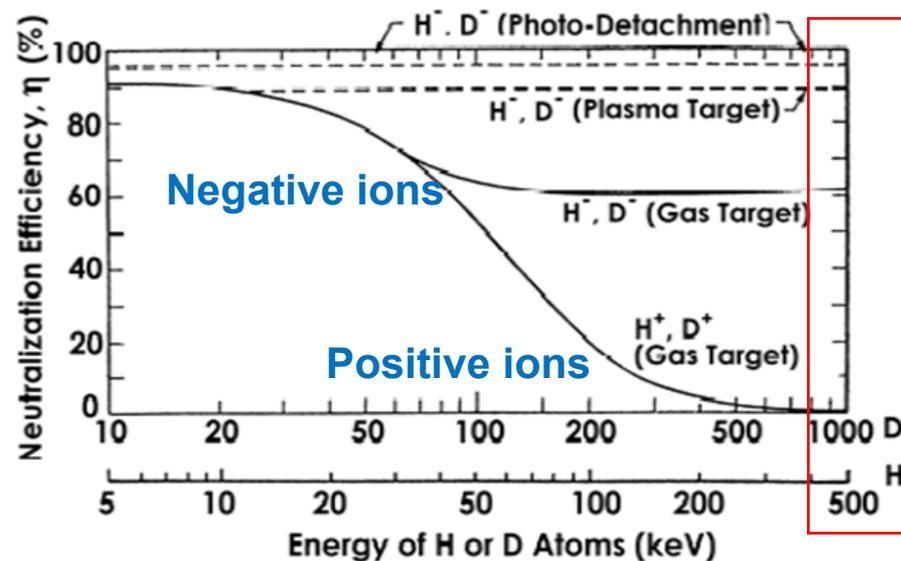
次世代NBIに向けて



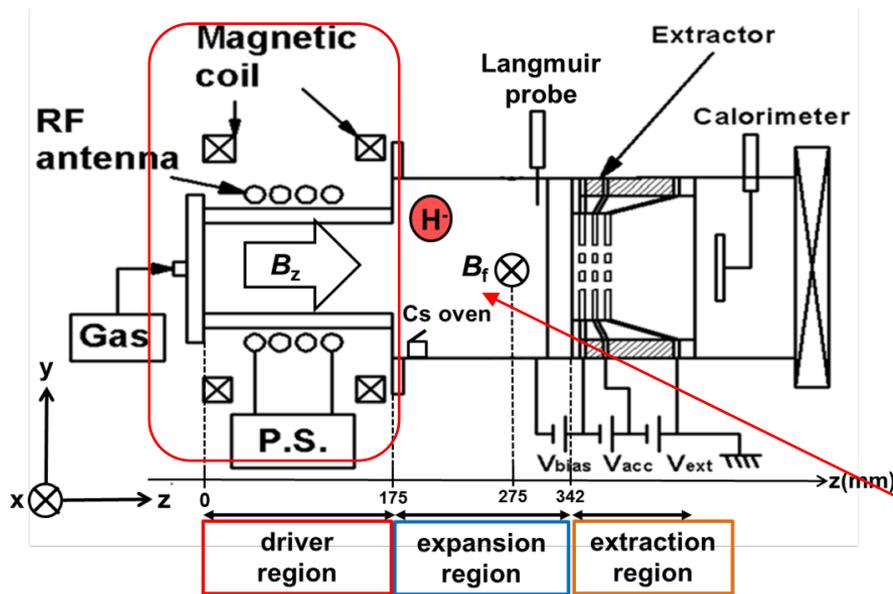
Schematic of ITER

- A neutral beam injection (NBI) system is a powerful tool for heating a fusion plasma.
- The neutralization efficiency from negative hydrogen ions are much larger than from positive ions for the beam energy of 1 MeV.

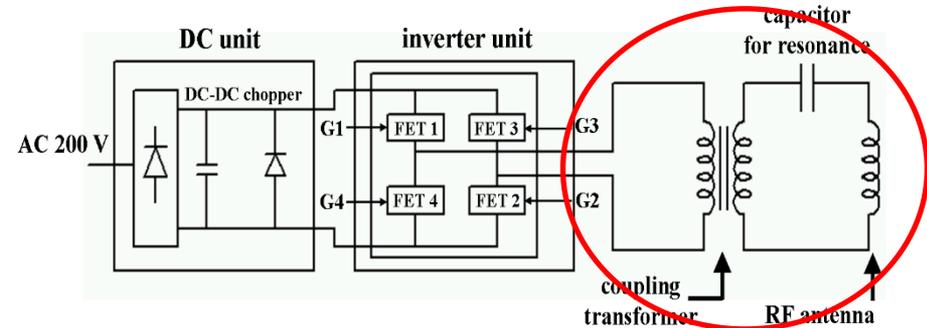
RF beam source
Photo-neutralizer



Ref : Y. Takeiri, high energy acceleration seminar OHO text (2007)

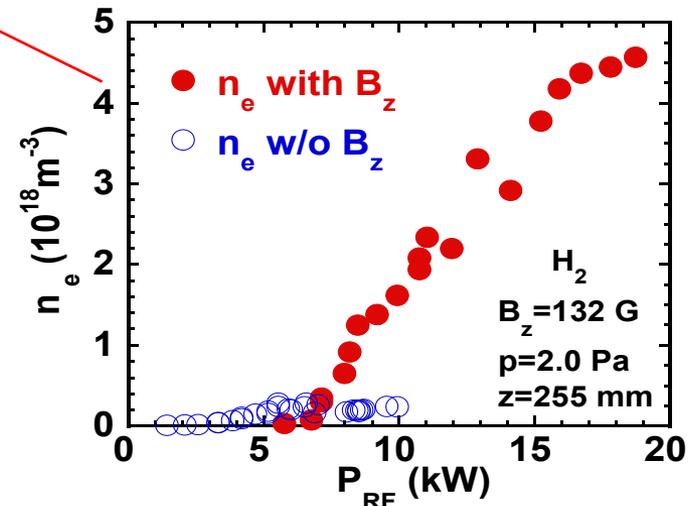


FET-RF system



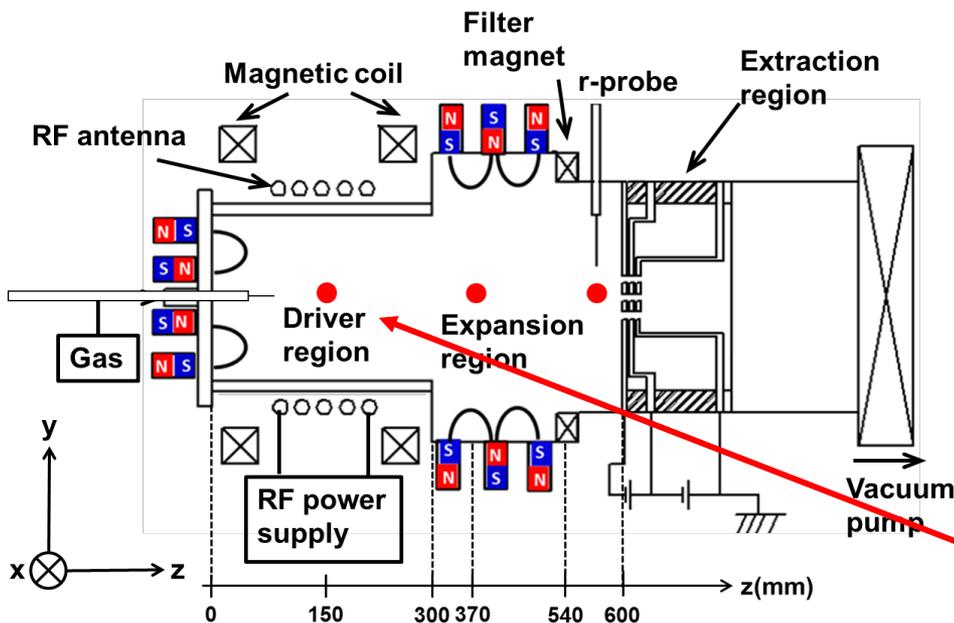
$$P_{RF} = 20 \text{ kW, CW, } f_{RF} < 0.5 \text{ MHz}$$

A. Ando et al, Rev. Sci. Instrum., 81(2010).

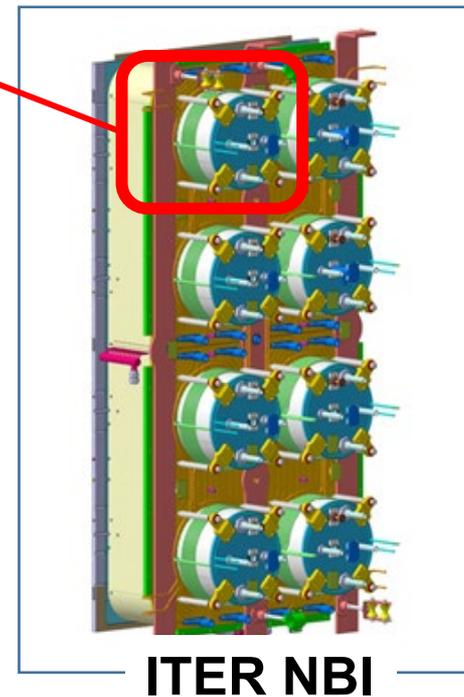
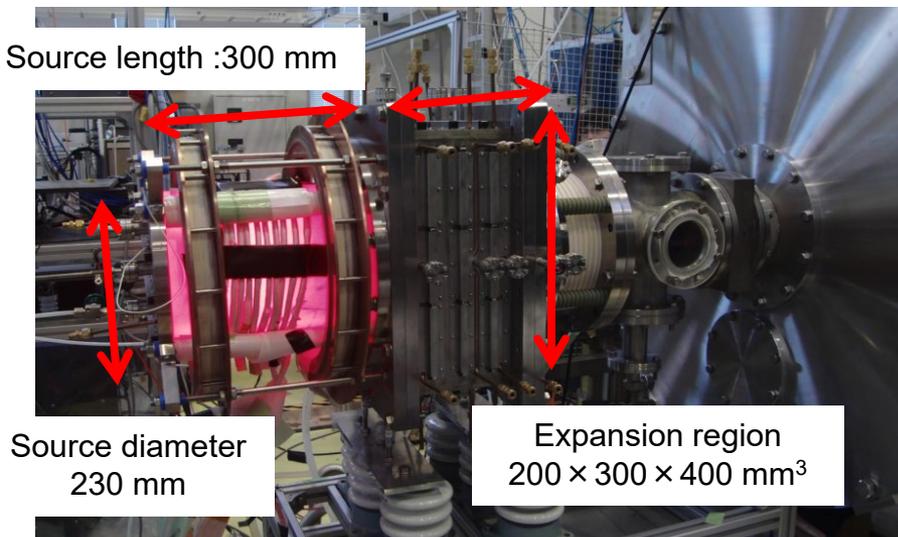


Density increase with axial B-field

- Source diameter : 70mm.
- A high density ($n_e > 10^{19} \text{ m}^{-3}$) hydrogen plasma was produced by RF ($f = 0.3 \text{ MHz}$).
- Helicon wave ($m=0$) was detected in the expansion region with axial B-field.

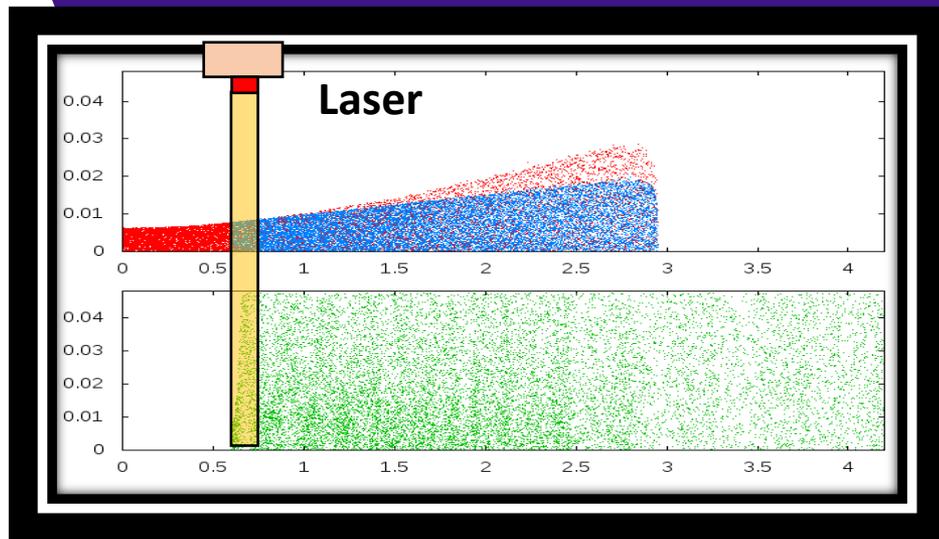


- Source diameter : **230 mm**
- Permanent magnets are installed on the diffusion chamber.
- RF power is applied by the FET-PS.
($f=0.3\text{MHz}$, $P=30\text{kW}$)



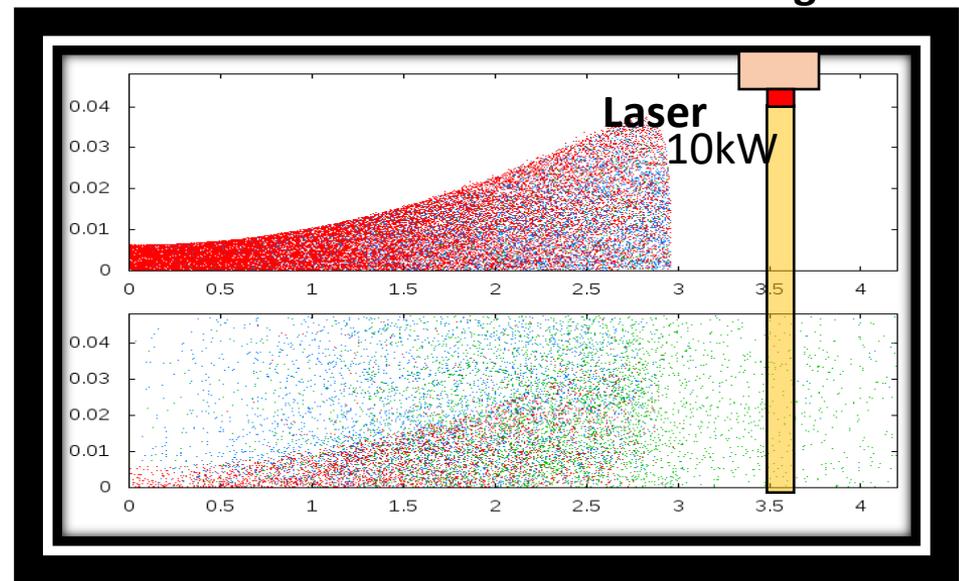


r [m]



Neutral gas : 0.5

r [m]



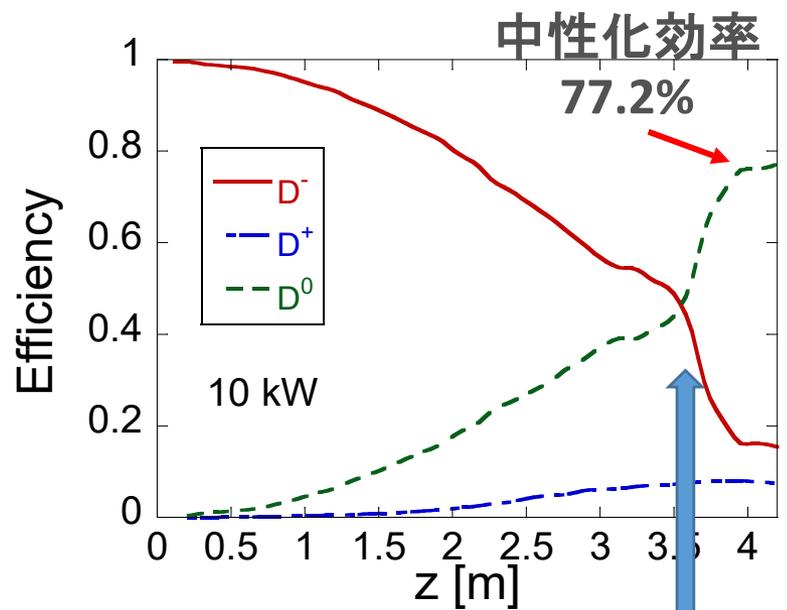
Ion beam

Beam plasma

- D^-
- D^0
- D^+

- Ions
- Electrons
- Electrons (stripped)

Particle fraction in the neutralizer



Laser(10kW)

Ion source

z

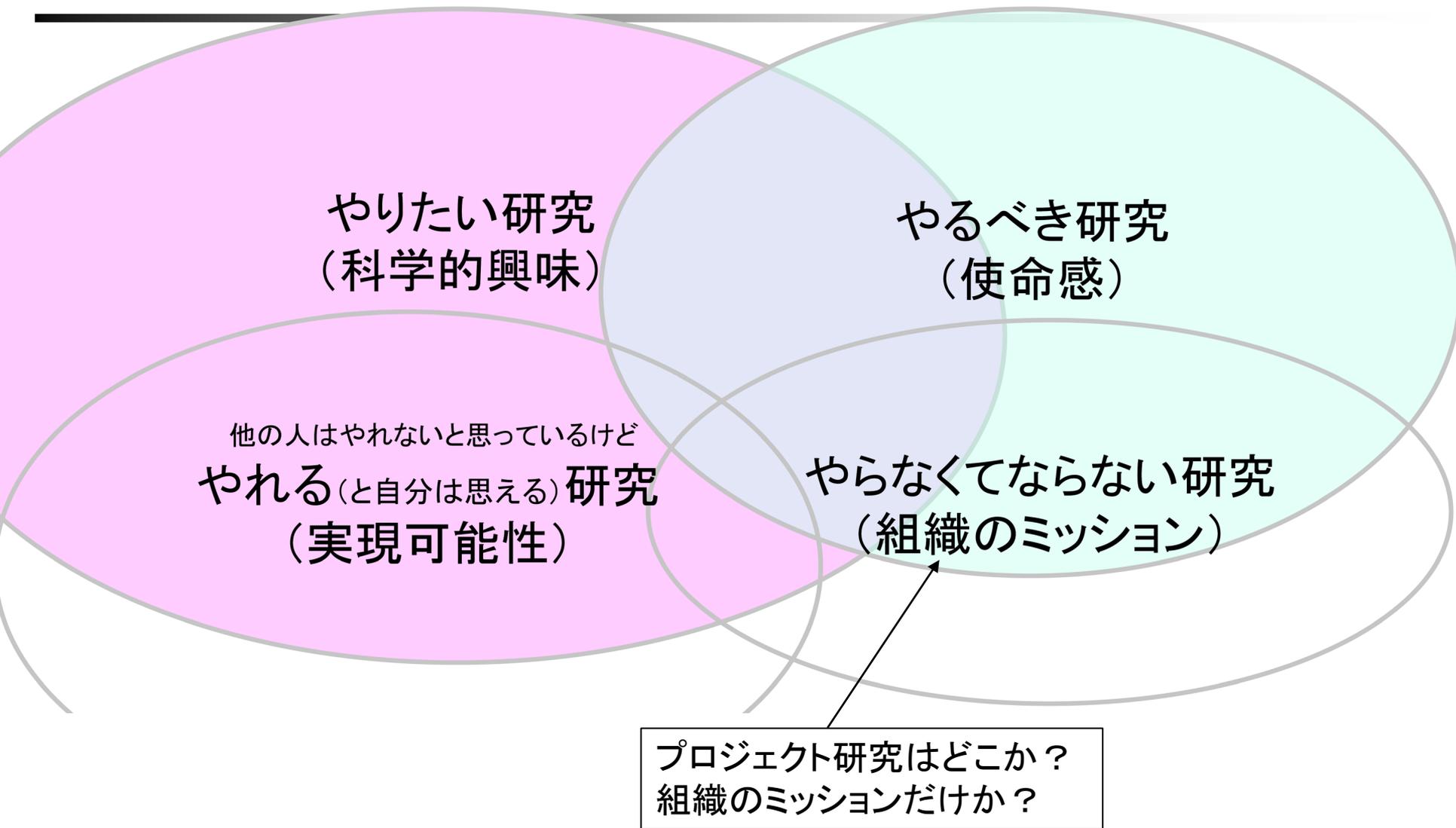
output

[m]

t



何を研究課題に選ぶか





- ・ プロジェクト研究は、自分で構築できる。
（大学研究機関はそうしている。NIFSもそう。）
- ・ プロジェクト規模が大きくなると、仲間が必要。
（自分で雇用するか、共同研究者を集めるか。）
- ・ プロジェクト研究が、所属組織のミッションと合っているか。
（100%の適合はない。組織ミッションも多様化の時代。外部資金、外部評価の重要性大）
  放物線の2つの焦点
- ・ プロジェクト研究をゼロベースで始めるか、スピリアウトではじめるか。
 - ・ 研究対象の規模感
 - ・ 既存課題への挑戦とするか、課題設定から始めるか
 - ・ 研究者個人の強みを生かせるか。（迎合ではなく）

ユニット構築の条件

未来志向、具体的な目標値、テーマの魅力性、研究発展性

 プロジェクト研究にとって必要な要素