

## Unit 提案：課題番号No.33

# 負イオンプラズマ※と粒子ビームの学理と応用

プラズマ加熱物理研究系

中野 治久

※【負イオンプラズマ】

狭義には、負イオンを含むプラズマ（正負電荷粒子が等質量のペアプラズマも含む）と定義する。

広義には、負イオンのみの非中性プラズマも含む。

## 研究課題

- 負イオンプラズマ-物質相互作用を含む負イオンプラズマの基本的な物理特性を実験的に明らかにする。
- 負イオンビーム輸送および粒子ビーム-物質・光相互作用の基本的な物理特性を明らかにするとともに、関連する基盤技術を獲得する。
- 負イオンプラズマおよび粒子ビームの応用・関連研究により、負イオンプラズマおよび粒子ビーム研究の広い他分野への波及を図る。

# ITER/原型炉に求められる中性粒子ビーム入射装置(NBI)

## ITER

- 加速電圧：1 MV
- 負イオンビーム電流：40 A
- 低随伴電子電流比：<1
- ビーム発散角：< 7 mrad
- 1時間連続運転 他

高出力、低発散角ビーム、  
長時間運転の基盤技術の  
確立

## DEMO

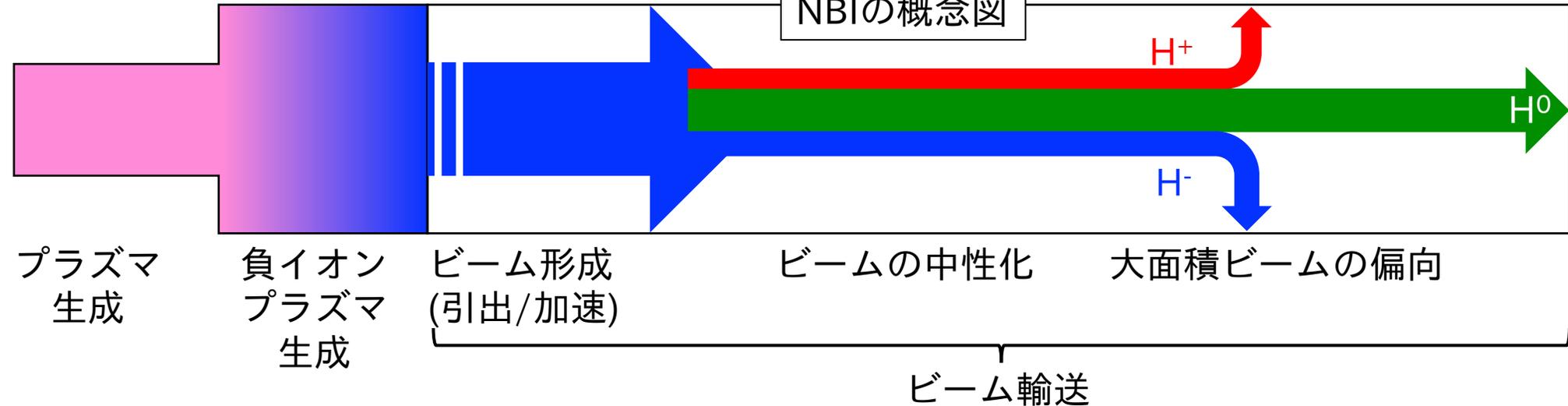
- メンテナンスレス化
  - セシウムフリー大電流負イオン源生成技術の確立
  - 高周波負イオン源のメンテナンスレス化
- 高効率化（経済性向上）
  - 光中性化 他

●  
●  
●  
未だ性能達成に向け  
て楽観視できない。

各要素に関して物理/工学的な  
研究（学術研究）による課題  
解決が不可欠。

●  
●  
●  
様々な方法が提案され、一部、初期的  
な検証されているが、先が見通せる段  
階にない。

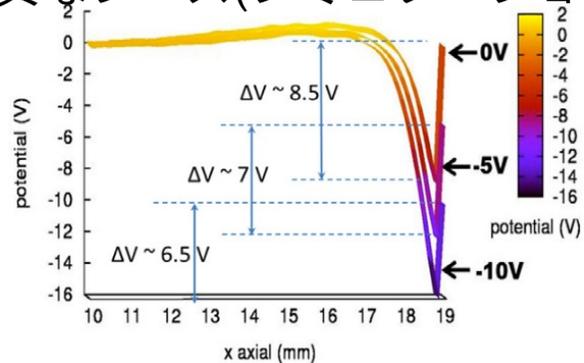
NBIの概念図



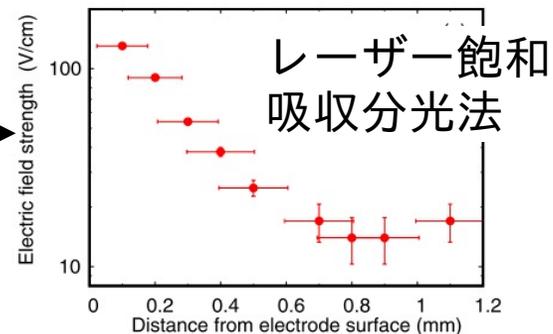
# 負イオンプラズマの学理

負イオン生成（体積生成, 表面生成/放出）および負イオンプラズマ中の粒子輸送等、負イオンプラズマ特性を物理的に明らかにすることがNBI用負イオン源の性能達成および更なる高性能化の基盤となる。

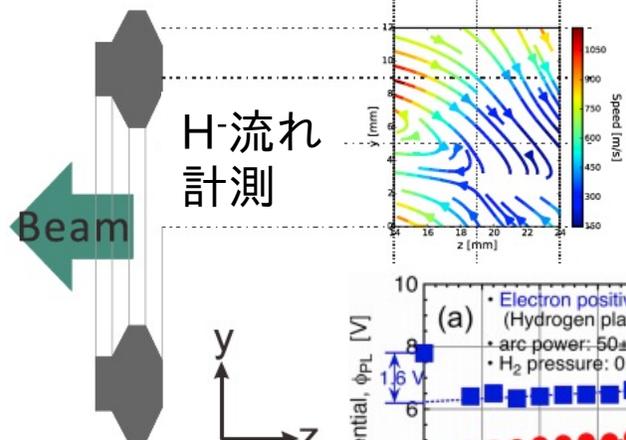
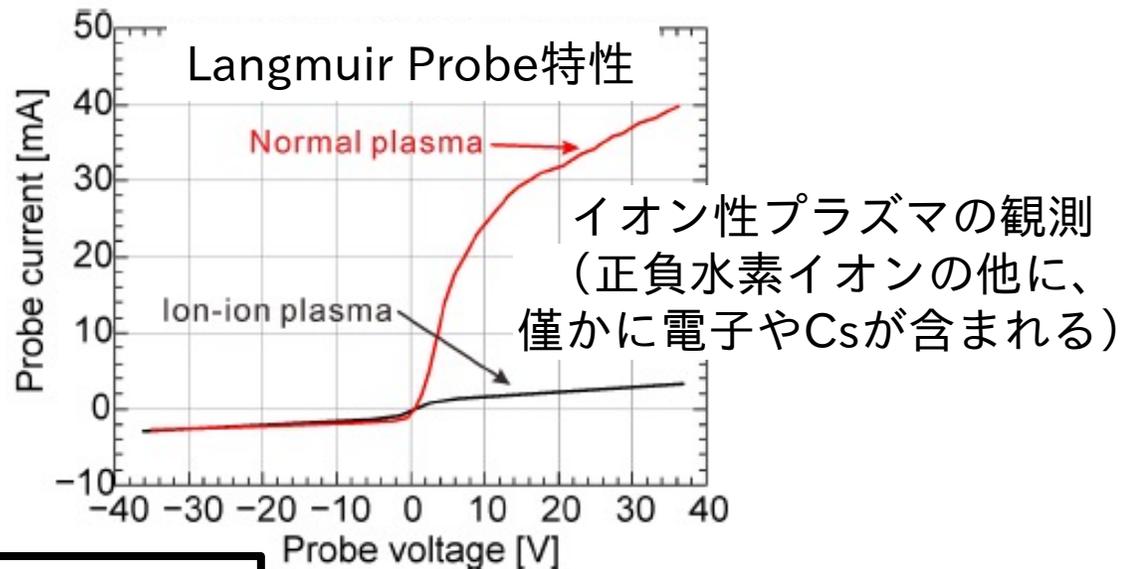
特異なシース(シミュレーション) 高空間分解能電場計測の挑戦



Mochalsky+2015



西山+2017

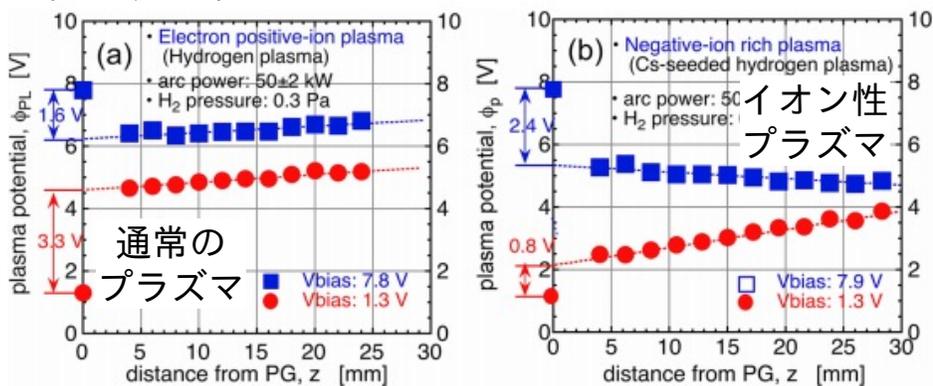


H流れ計測

流れと矛盾？

イオン性プラズマでの  
ビーム引出電場の浸透

Geng+2017  
津守+2016



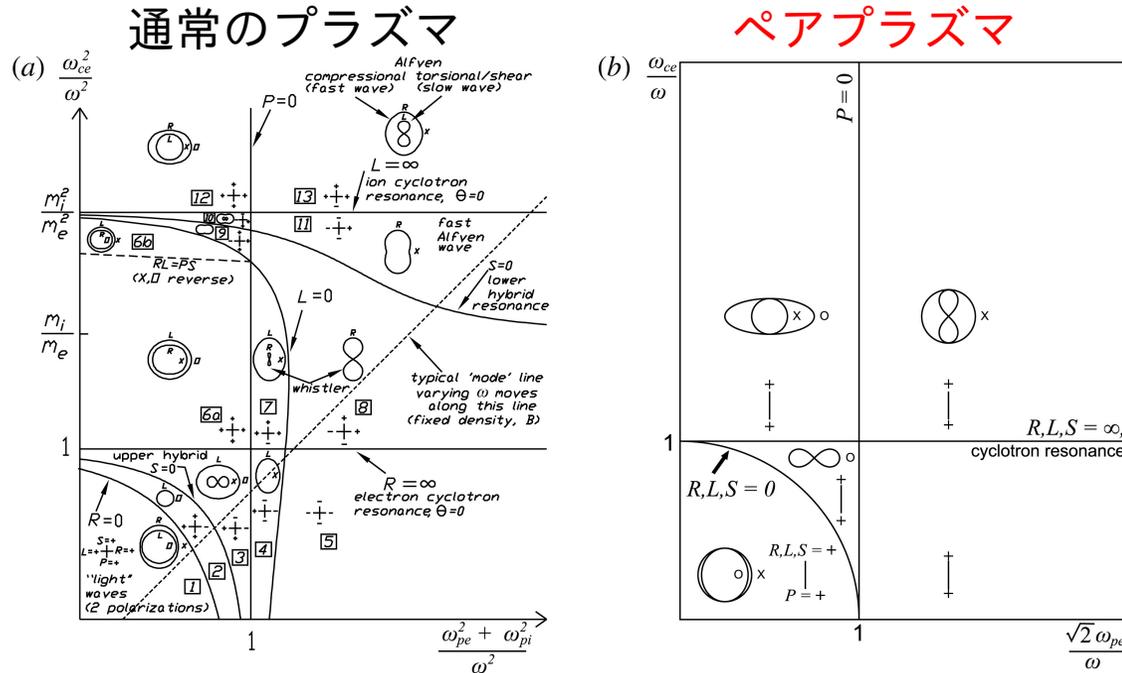
## 関連研究・技術

- プラズマ生成技術（高周波/直流、磁場配位）
- 低電子温度化（横磁場、拡散）
- 原子分子過程/プラズマ-物質相互作用/分子動力学（荷電粒子と中性粒子との相互作用、負イオンの体積生成/表面生成）
- 計測技術（電気・磁気計測、受動分光、レーザー分光、マイクロ波計測、他）
- シミュレーション（PIC、MD、他） 他

# 負イオンプラズマの学理 (ペアプラズマ)

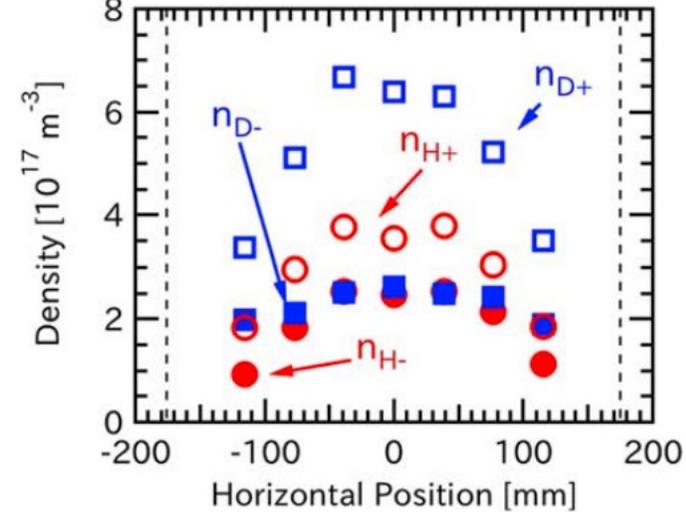
【電子・陽電子ペアプラズマ】

- パルサー中性星、超新星残骸などで生成が予測されている。
- 理論研究は行われている。
  - 波の分散関係



Stenson+2017

負イオンプラズマの同位体効果



中野+ 2020

- ペアプラズマの特性に質量依存性はあるのか？
- ペアイオンプラズマへ電子や異質量イオン（同位体等）の混入は何をもたらすのか？
- これまでのペアプラズマの理論は正しいのか？

ペアプラズマの実験研究

||

One of the

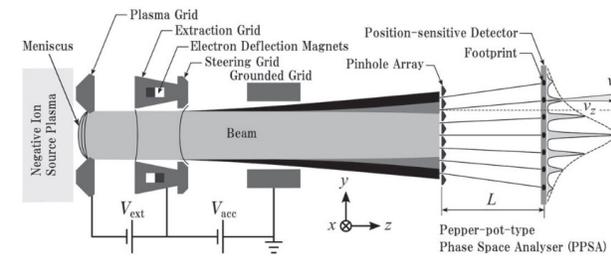
実験室宇宙物理学

- 乱流の抑制。 他。
- 実験研究はほとんど行われていない。
  - フラーレンペアプラズマ  $C^{60\pm}$  (、水素イオン性プラズマ(山口大, NIFS))
  - 加速器や原子炉を用いた低温電子陽電子磁化ペアプラズマ実験 (準備中)
  - 大強度パルスレーザーを用いた相対論的電子陽電子プラズマ

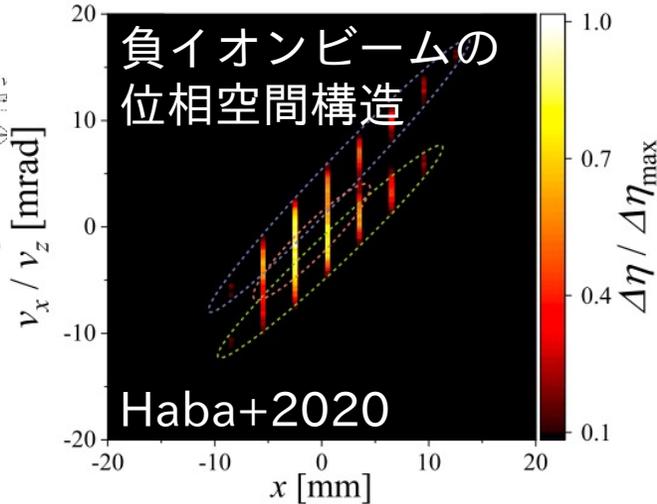
# 粒子ビーム輸送関連の学理

- 磁場がある負イオンプラズマから引き出される負イオンビーム。

➢ プラズマ-ビーム境界（メニスカス）の形成機構。



単一ガウスビームでない  
水素負イオンビーム



- 数10A級の大電流MeV加速の基盤技術研究。
  - 静電加速：ビームを含む耐電圧の物理。電極損傷。
  - 高周波加速：高周波空洞ビーム加速物理。

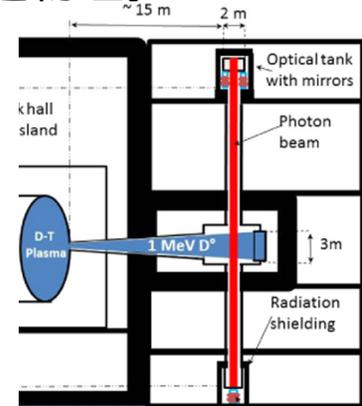
- 負イオンビーム中性化の基盤技術研究。

➢ 光中性化の基盤技術の研究  
(中性化効率~100%)。

- ✓ 粒子-光相互作用。
- ✓ 高効率光利用  
(光(レーザー)の高効率リサイクリング)

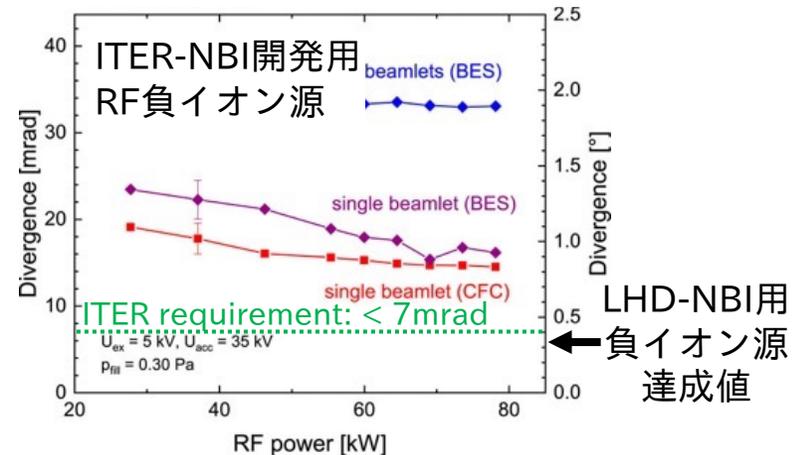
➢ プラズマ中性化の基盤技術研究(中性化効率>90%)。

- ✓ 負イオンビーム(非中性プラズマ)からビームプラズマ生成。



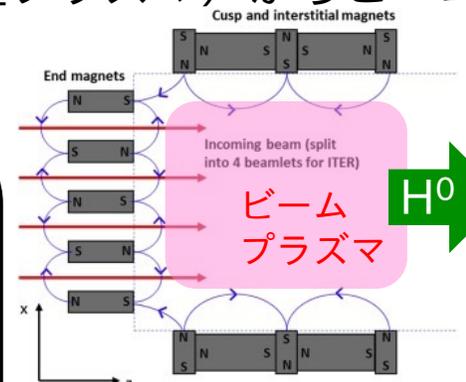
- 放電方式によるビーム発散角の相違。

➢ 物理的な理由は何か？



## 関連研究・技術

- 放電と負イオンを含むシースの物理
- 原子分子過程
- 荷電粒子(プラズマ)-中性粒子-光の相互作用
- レーザー技術
- 計測技術(電気・磁気計測、受動分光、レーザー分光、マイクロ波計測、他)
- シミュレーション(PIC、他) 他

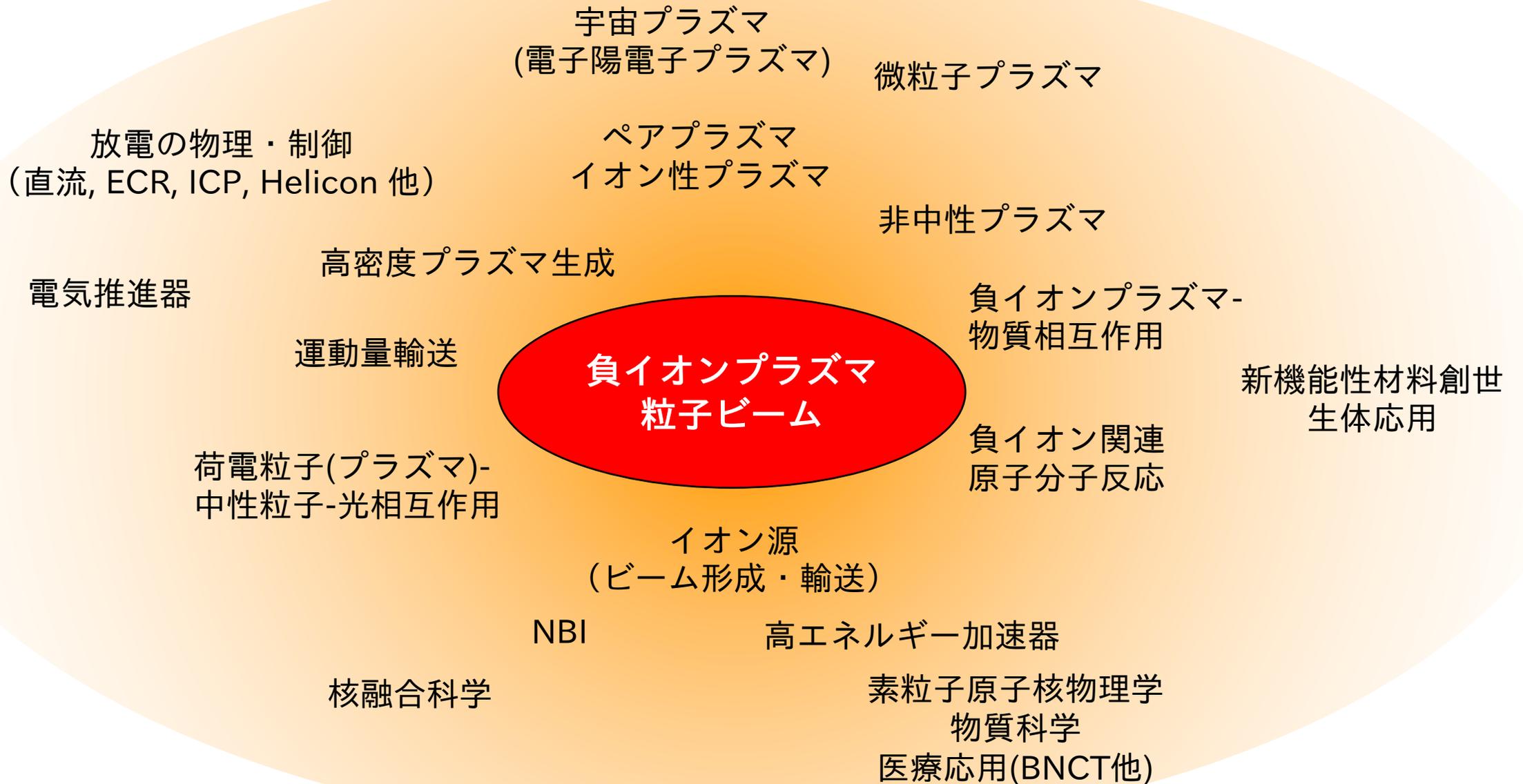


Turner+2019

# 負イオンプラズマと粒子ビームの応用・関連研究

- DEMO-NBIに向けた基盤技術研究 (アクションプランでNIFSの貢献が記載されている)
  - 放電容器内の粒子循環
    - 水素負イオンの大量生成にCsを使う現状（恐らくITERまで）では、放電容器内のCsの循環研究が必須。
  - Csフリー負イオン源、RF負イオン源のメンテナンスフリー化の基盤技術研究。
    - NBI用負イオン源のみならず、物質合成・創世や負イオンと物質との反応を研究するには、Csフリー化やメンテナンスフリー化が必須。
  - 光中性化。
- 負イオン関連の原子分子反応
  - 水素以外の原子、分子および高分子の負イオンの生成。
  - 負イオン/中性粒子ビームの絶縁体表面入射（帯電のないエッジング、有機物、生体との反応）。
  - 正負原子・分子・高分子イオンビームによる物質合成・機能性材料創世。
- 高エネルギー粒子による高熱負荷の材料照射 (ビーム-物質相互作用)
  - 耐高エネルギー粒子かつ耐高熱負荷材料の試験。
  - 新機能性材料創世？
- 電気推進器
  - 制御された高密度プラズマを生成して粒子の運動量を放出・輸送する、という意味でイオン源と同様である。
  - 共通部分（低温プラズマ放電、プラズマ閉じ込め磁場（カスプ、縦磁場）、磁場を横切る粒子拡散・輸送、引出・加速電極、他）が多く、関連研究としてユニット内で実施することで相乗効果が期待される。

# 負イオンプラズマと粒子ビーム研究の広がり



# 研究課題 と 想定している既存装置

## 研究課題

- 負イオンプラズマ-物質相互作用を含む負イオンプラズマの基本的な物理特性を実験的に明らかにする。
- 負イオンビーム輸送および粒子ビーム-物質・光相互作用の基本的な物理特性を明らかにするとともに、関連する基盤技術を獲得する。
- 負イオンプラズマおよび粒子ビームの応用・関連研究により、負イオンプラズマおよび粒子ビーム研究の他分野への波及を図る。

## 想定している既存装置（国内外の様々な機関と連携）

- 所内  
LHD-NBI, NIFS-NBTS, 小型テストスタンド, イオン源研究用汎用装置(EVISS), HIBP関連装置 他
- 国内  
北大（レーザー計測開発装置）、東北大（RF負イオン源、宇宙推進器関連装置）、J-PARC（負イオン源）、QST（NBI関連装置群）、東海大（TPD-SheetIV）、中部大（ヘリコンプラズマ装置）、京都工繊大（酸素負イオン源）、同志社大（各種基礎実験装置）、阪大、山口大（Csフリー負イオン源）、住友重工業、他
- 国外  
IPP (BATMAN, ELISE) , CNR-RFX (NIO1, SPIDER, MITICA), ASIPP(負イオン源), SWIPP (負イオン源), 他
- シミュレーション  
J-PARC, KEK, QST, 慶應大, 鳴門教育大, 徳島文理大, IPP(独), CNR-RFX(伊), 他