

# プラズマ・複相間輸送ユニット設立報告

報告者 増崎 貴

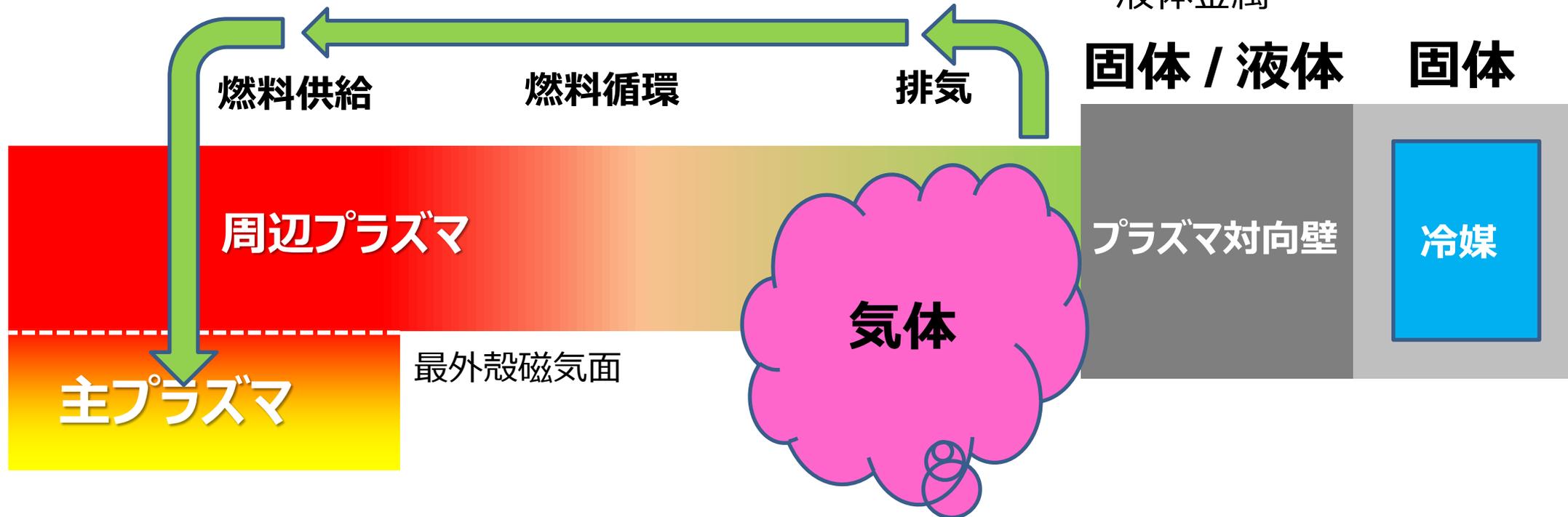
# プラズマ複相ユニットの研究目的

- **磁場閉じ込め核融合炉**の開いた磁力線領域から壁へ、そして壁を冷却する冷媒、あるいは排気装置を経て燃料循環系に至る、プラズマと固体、液体、気体が接する系における熱・粒子・運動量の輸送現象を理解し、予測し、制御する
- **他の様々な分野**に、核融合に関する研究から得られる知見や技術を展開し、その進展に寄与する

# 核融合システムにおける研究対象

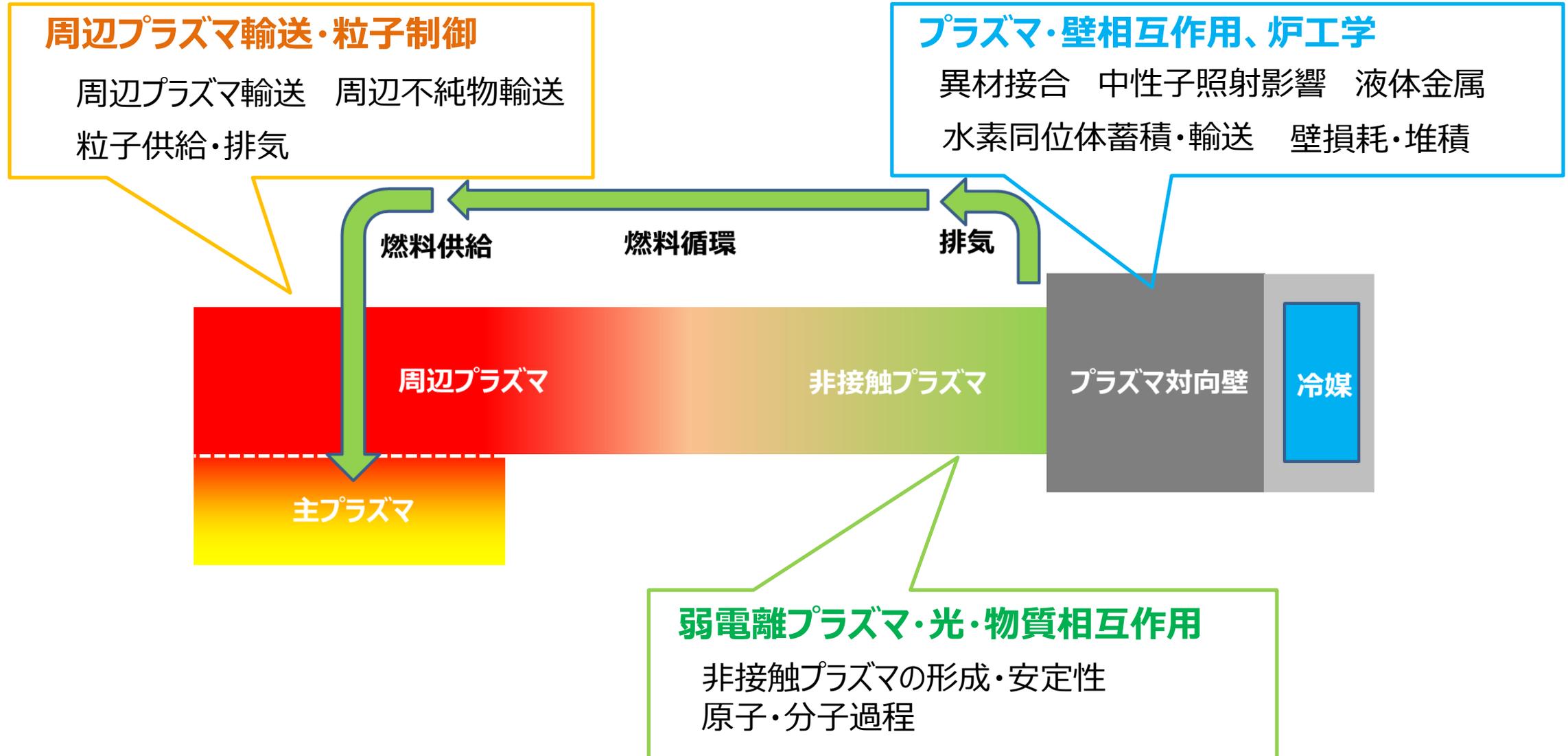
磁化プラズマと固体・液体・気体が結合した非平衡・非線形系の物理や、輸送現象の物理に関する研究を行う

- 高融点金属
- 溶融層
- 液体金属



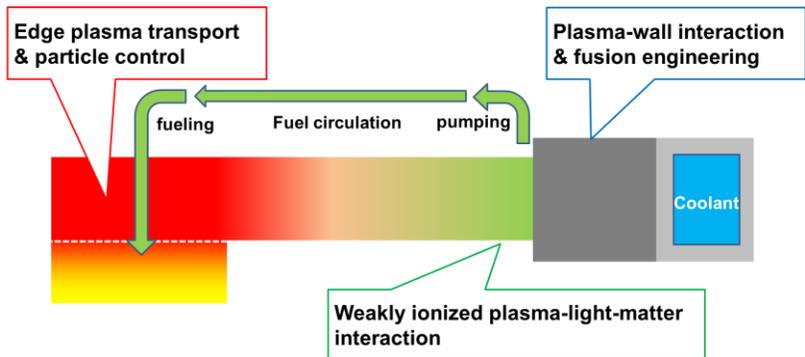
- プラズマ温度低減のための不純物ガス導入
- 壁からのリサイクリング粒子

# プラズマ複相ユニットにおける研究の三本柱

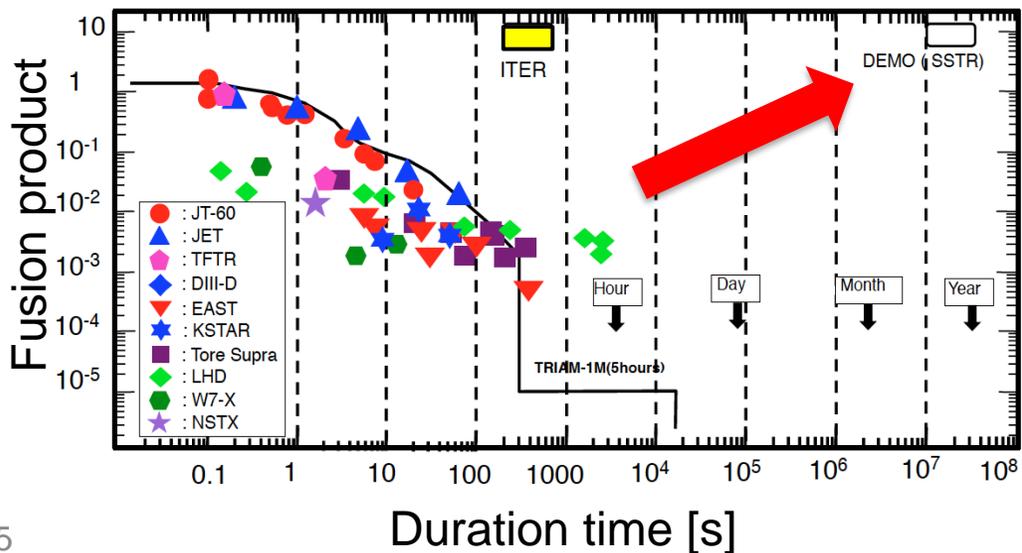


# 核融合炉における定常プラズマ・粒子循環/ 核融合研究で得られてきた知見、技術、手法の他の研究分野への展開

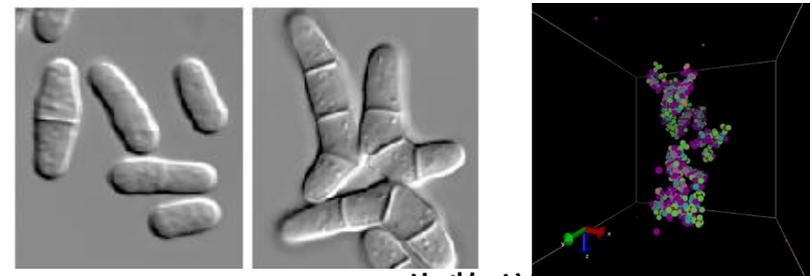
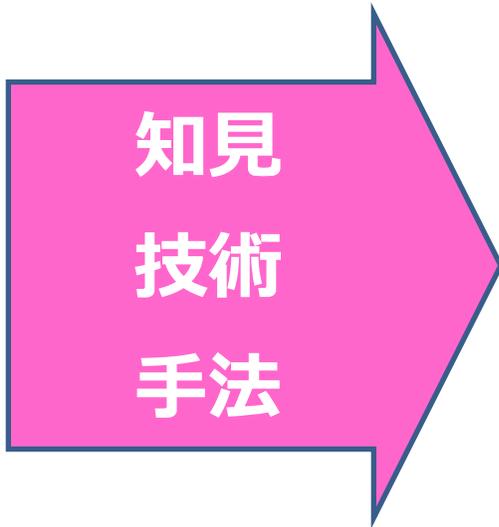
## 核融合研究



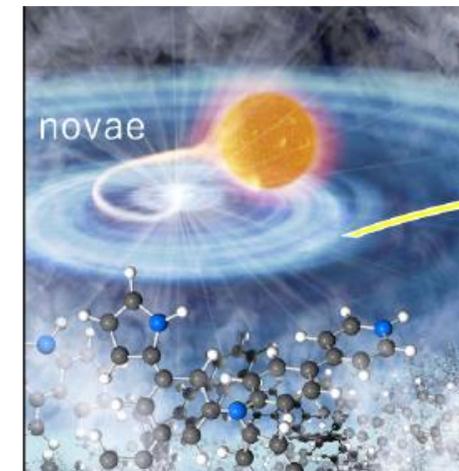
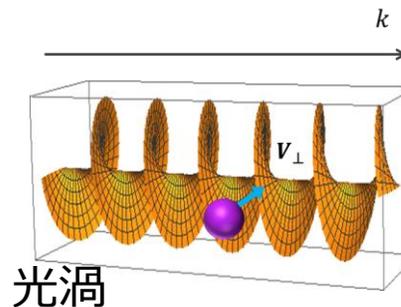
## 核融合炉



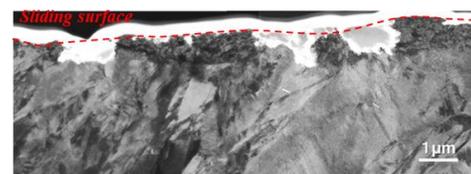
## 他の分野の研究



生物学



宇宙プラズマ  
アストロバイオロジー



Sliding surface of the mechanical gear (TEM image)  
産業応用

# プラズマ複相ユニットのメンバー

## 所内メンバー

| 氏名                  | 研究分野                   |
|---------------------|------------------------|
| 宇佐見俊介               | プラズマ物理学                |
| 菅野龍太郎               | プラズマ物理学                |
| 後藤勇樹                | 光・物質相互作用               |
| 小林政弘                | プラズマ物理学                |
| 庄司 主                | プラズマ物理学、周辺プラズマ・PWI解析など |
| 時谷政行                | 核融合炉材料学                |
| 中村浩章                | 物性物理学理論                |
| 浜地志憲                | プラズマ・材料相互作用            |
| 林 祐貴                | プラズマ理工学                |
| 増崎 貴<br>(R5年度ユニット長) | プラズマ理工学                |
| 本島 巖                | プラズマ理工学                |
| 森崎友宏                | プラズマ理工学                |
| 矢嶋美幸                | プラズマ・材料相互作用            |
| 吉村信次                | プラズマ物理学                |

## R5年度研究戦略会議所外メンバー

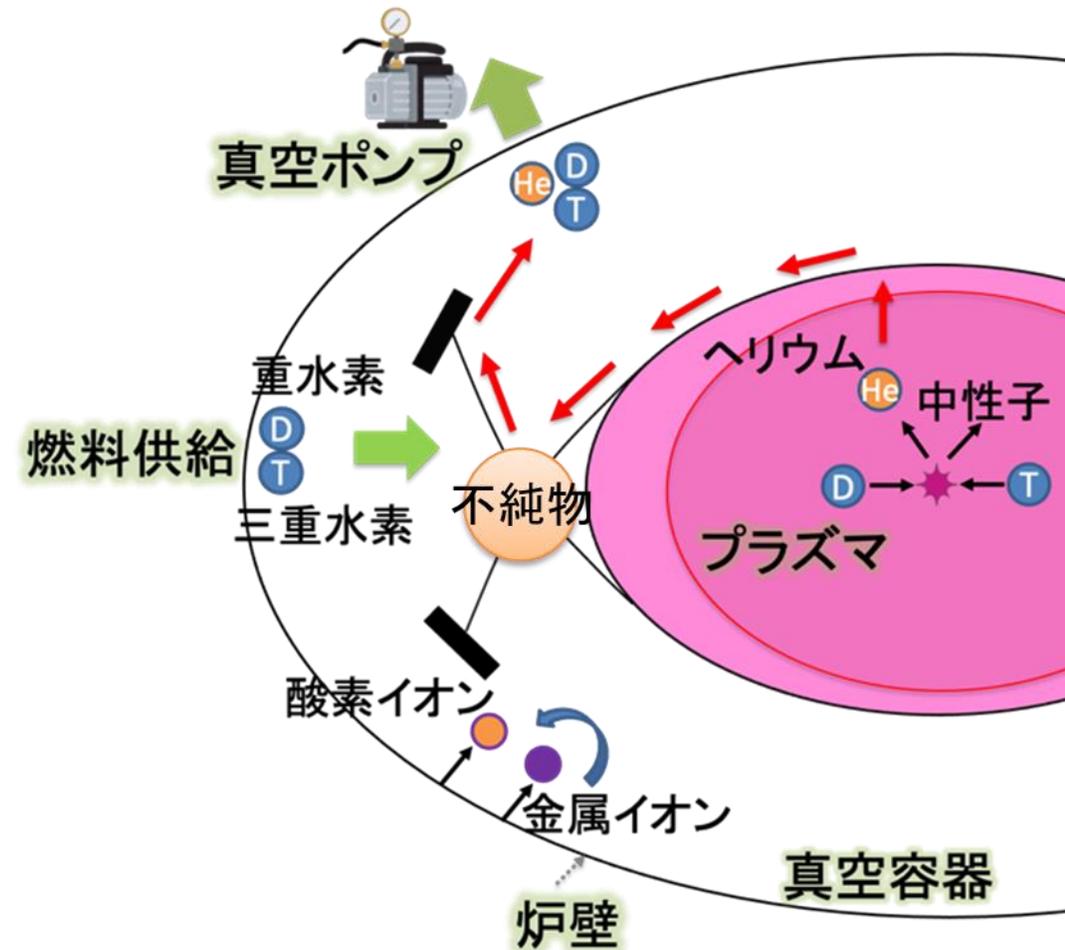
| 氏名    | 所属     |
|-------|--------|
| 荒巻光利  | 日本大学   |
| 井戸 毅  | 九州大学   |
| 加藤政博  | 広島大学   |
| 川口秀樹  | 空蘭工業大学 |
| 久保 伸  | 中部大学   |
| 小林憲正  | 横浜国立大学 |
| 齋藤誠紀  | 山形大学   |
| 坂本瑞樹  | 筑波大学   |
| 田中宏彦  | 名古屋大学  |
| 豊田浩孝  | 名古屋大学  |
| 蓮尾昌裕  | 京都大学   |
| 波多野雄治 | 富山大学   |

# 研究の進め方

- 非接触プラズマ生成・維持のためのプラズマと気体との相互作用、プラズマと固体・液体対向壁との相互作用、対向壁中の粒子・エネルギー輸送と粒子蓄積、およびこれらの、動的現象への応答など、素過程の研究を進める。
- 開いた磁力線領域から壁・冷媒・排気装置に至る系の、時間・空間スケールが異なる素過程のつながりに焦点を当て、この系における輸送に対するモデリング、および制御方法を得る。
- プラズマと、固体、液体、気体という複数の相間にまたがる研究を一つのユニットで協同して行うことにより、それぞれの研究分野間のsynergy効果を促進する。

# 周辺プラズマ・不純物・中性粒子輸送研究

- 核融合プラズマを構成する様々な粒子（燃料粒子、ヘリウム、不純物）の、様々な輸送を定式化する
- 既存のコアから周辺、ダイバータに至るシミュレーションコード群、それぞれの利点を兼ね備えたハイブリッド的な新たな計算手法の創出を目指し、国内、国際共同研究として展開する
  - 周辺プラズマ・中性粒子輸送 EMC3-EIRENE
  - 不純物輸送 IMPGYRO, KEATS
  - 壁を含めた不純物輸送 ERO2.0
- 実験データの蓄積と解析、実験データの再現によりシミュレーションコードの改良を進める
- LHDで実装したダイバータ排気を例に、中性粒子制御における高性能プラズマとの関係性を明らかにしていく
- 原型炉を見据えた中性粒子制御（粒子排気を含めた）の確立を目指す

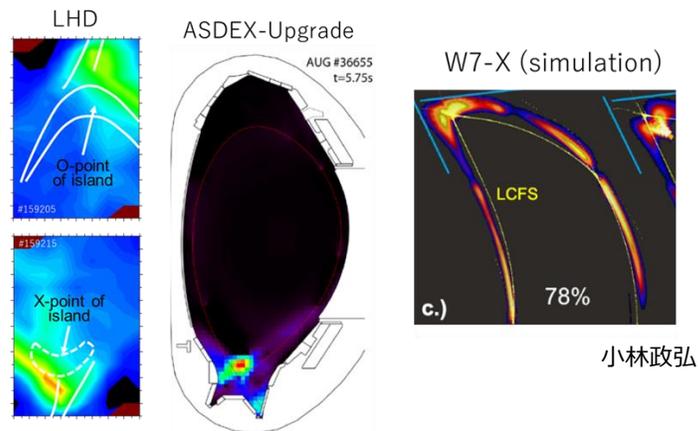


# 非接触プラズマ研究

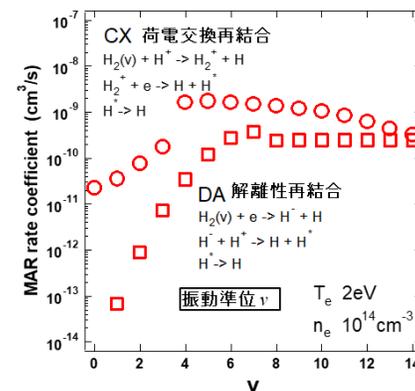
- 非接触プラズマの生成・安定維持

- 光とプラズマ（物質）の相互作用として捉え、磁力線構造とプラズマの熱的不安定性および乱流等の微視的不安定性に起因する輸送の時空間スケールが、原子分子過程による輻射とどのように相互作用しているかという観点からアプローチする。
- この研究には低温高密度プラズマ中の輻射輸送や、水素分子の回転・振動状態の原子・分子過程への影響、負イオンの効果などが含まれ、トラスプラズマの密度限界研究にも関わる。
- 電磁誘導透過(EIT, Fano効果)等を用いた光によるプラズマの光学的特性の積極的な制御へと発展させる。

➤ 磁場構造との関係：セパトリクスのX点付近で放射損失が促進されることが様々な装置で観測されている。

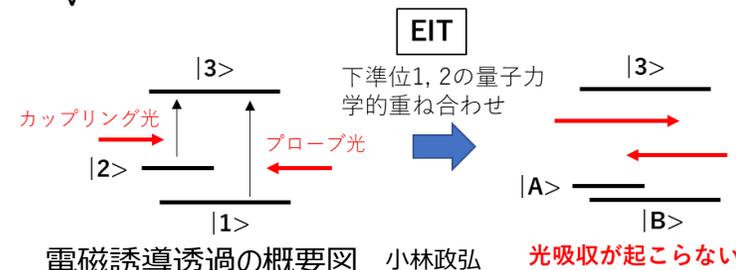


小林政弘



分子活性化再結合速度係数の水素分子の振動準位への依存性

信州大澤田先生

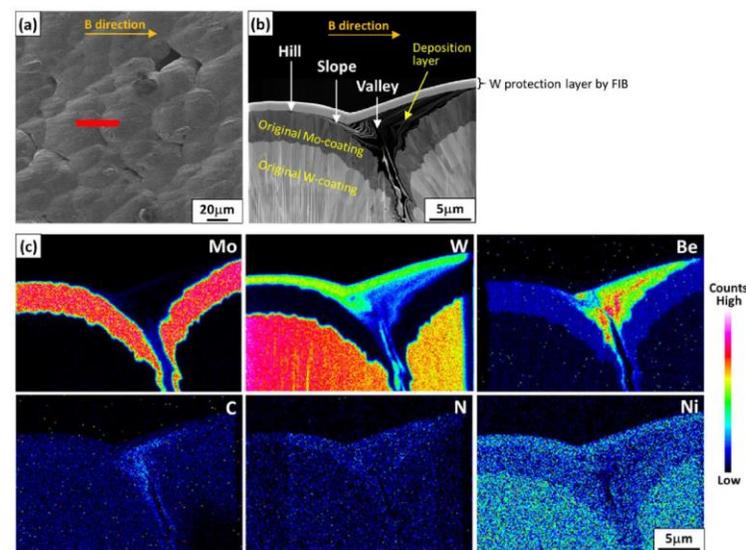


電磁誘導透過の概要図 小林政弘

光吸収が起こらない

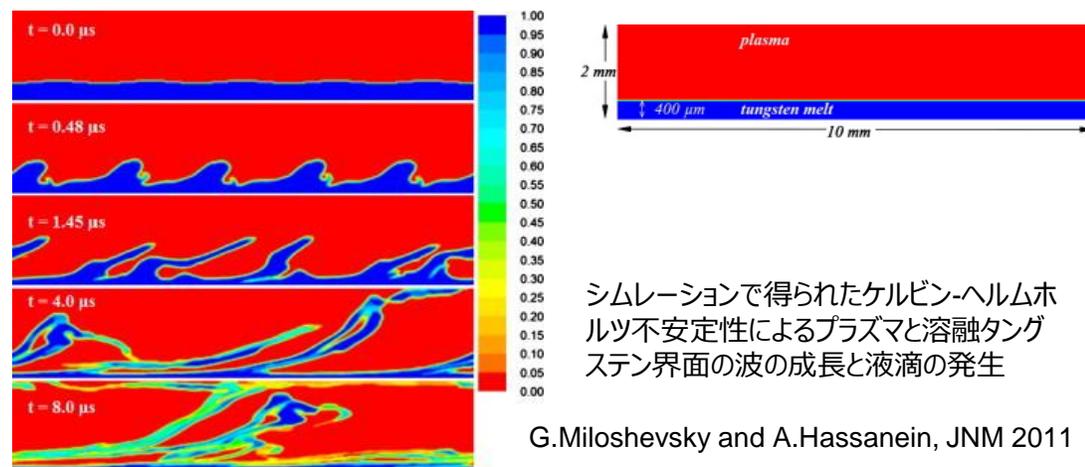
# プラズマと固体・液体壁との相互作用研究

- 固体あるいは液体金属壁とプラズマの相互作用
  - プラズマ照射による表面微細構造の変化や、中性子照射による固体材料の物性の変化による相互作用の変化を、中性子照射材や重イオン照射材へのプラズマ照射を行い、表面微細構造、照射損傷の詳細な分析から明らかにする。
  - 原型炉の次を見据え、液体金属で構成するプラズマ対向壁について、プラズマと液体金属界面の不安定性、液体金属中の水素同位体やヘリウム蓄積に注目して研究を進める。



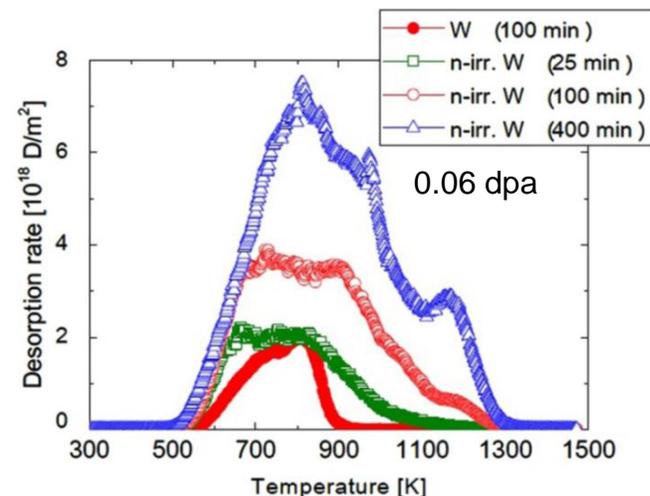
JETのダイバータ板で観測されたマイクロな損耗・堆積分布

M. Tokitani et al, FED 2018



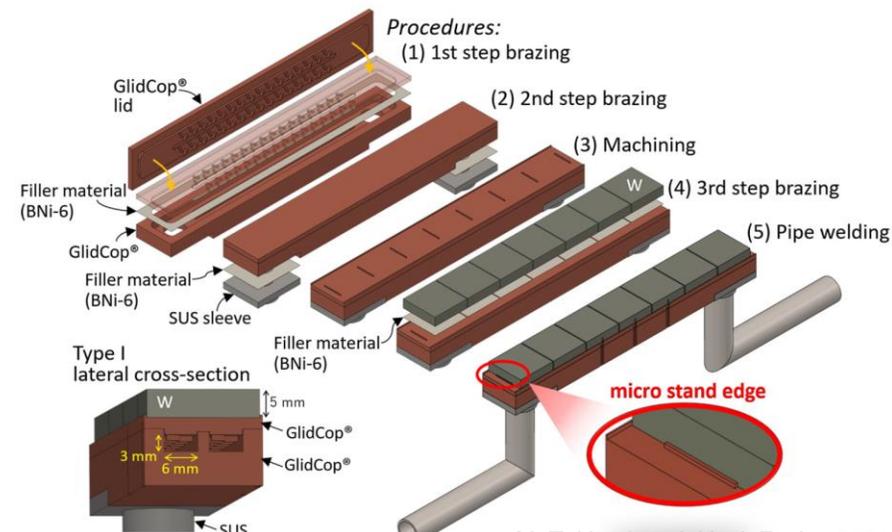
# プラズマと固体・液体壁との相互作用研究

- 対向壁中の粒子・エネルギー輸送
  - 対向壁中の水素同位体・ヘリウム挙動について、中性子照射損傷の影響や、プラズマ対向面と冷却管間の急峻な温度勾配下での挙動に注目した研究を行う。
- 粒子・エネルギー輸送制御
  - タングステンやタングステン合金と低放射化材の異材接合など、工学的な研究を行う。



中性子照射の有無とプラズマ照射時間によるタングステンからの重水素放出特性の変化

M. Yajima et al, Nucl. Mater. Energy 2019

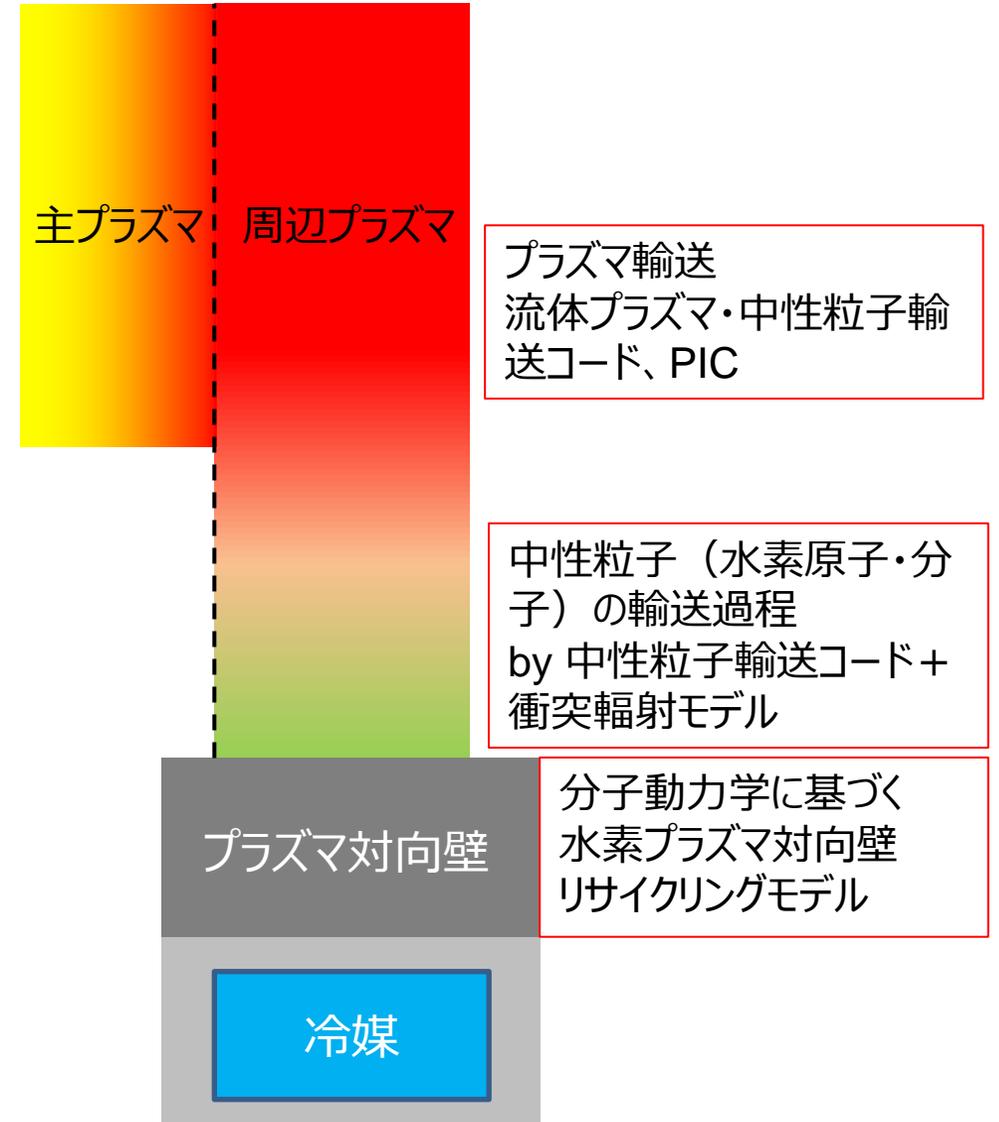


複数回のろう付けによる複雑構造の作成

M. Tokitani et al, Nucl. Fusion 2021

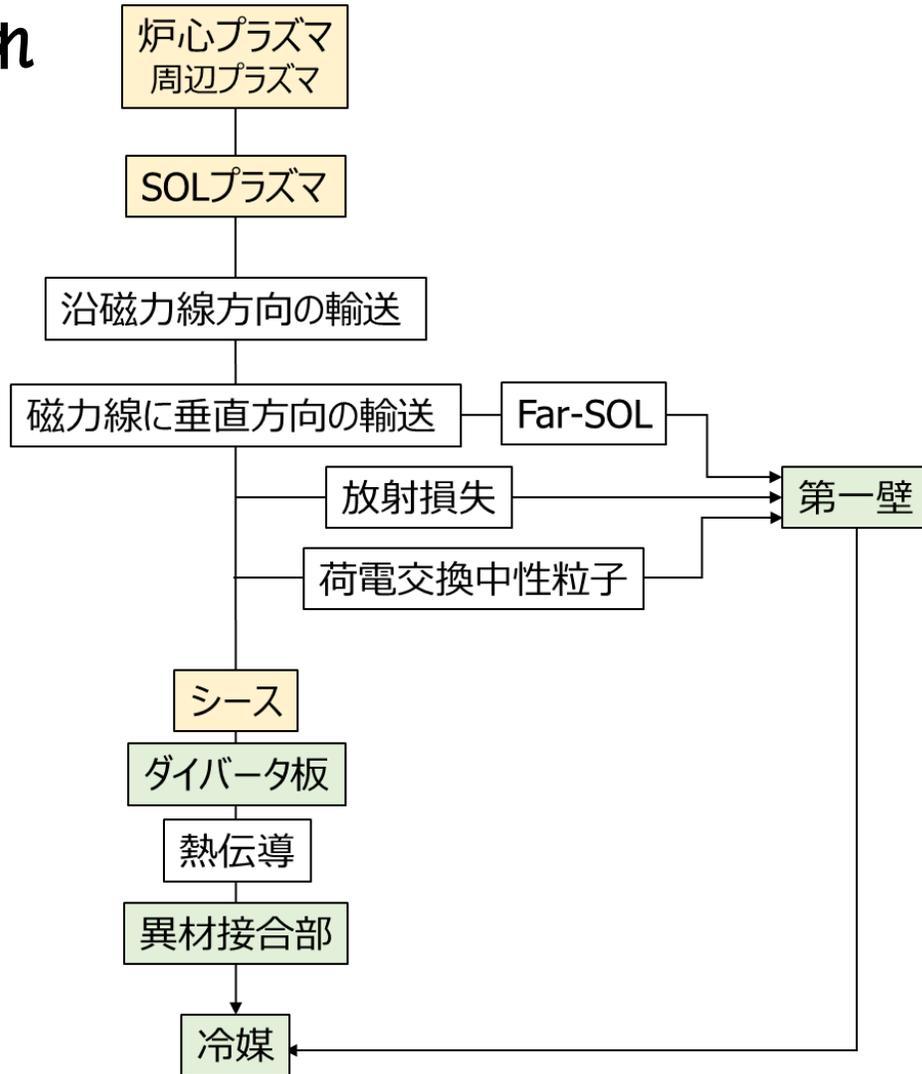
# シミュレーション研究

- シミュレーション
  - 国内外の研究者と連携し、光と原子・分子の相互作用には量子力学理論、固体原子分子の動的な振舞には分子動力学法、周辺プラズマ輸送には流体プラズマ・中性粒子輸送コードやPICを用いたシミュレーション研究を行う。
  - 実験及び理論・シミュレーション研究の成果を統合、モデル化し、周辺プラズマから非接触領域の弱電離プラズマ、プラズマ対向壁、そして冷媒に至る多様な現象を繋ぐ予測精度の高い熱・粒子・運動量輸送シミュレーションを可能とする。

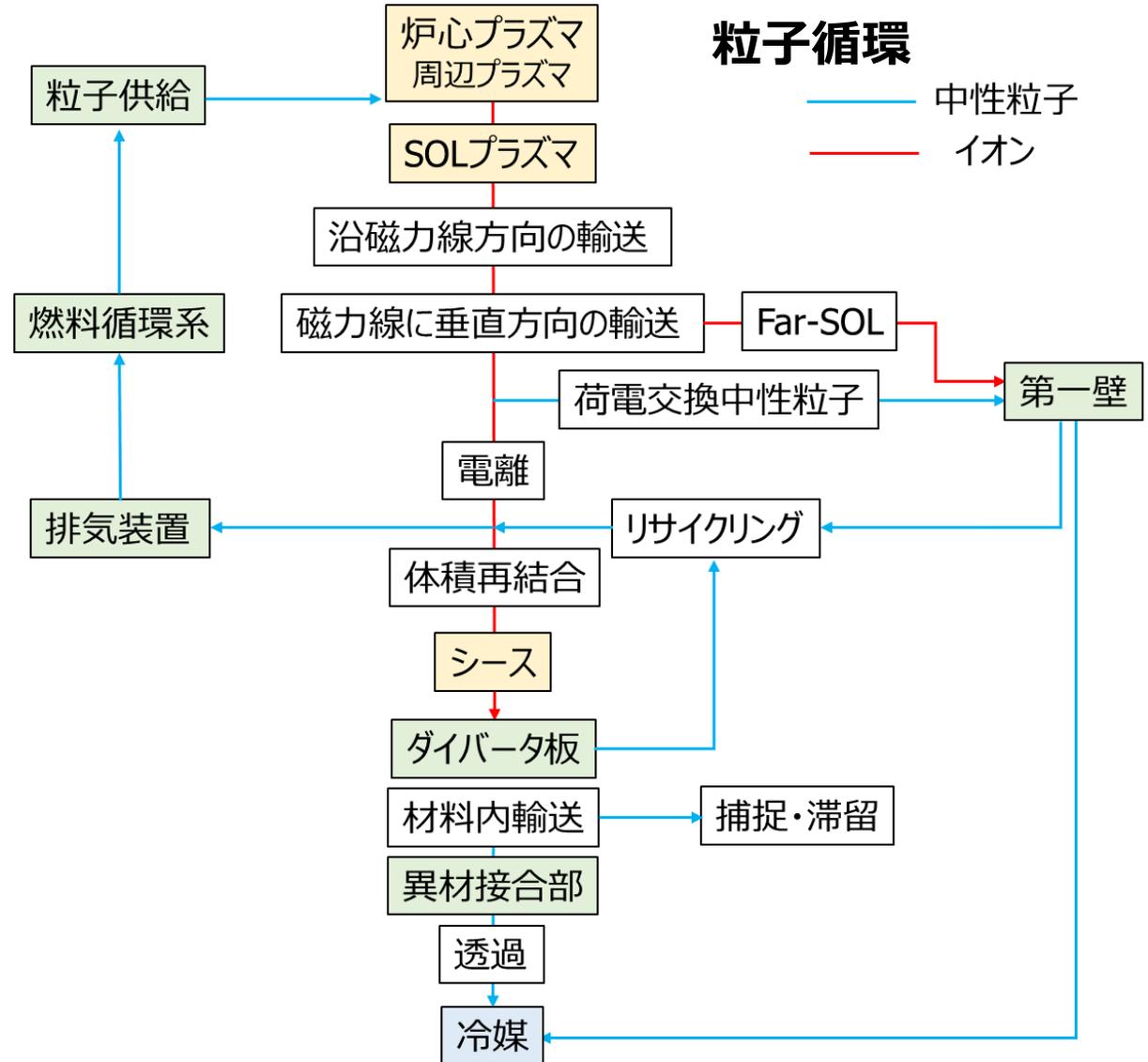


# 素過程の研究を進めるとともに俯瞰的視点からの研究も展開 定常プラズマ実験、要素モデルの改良とシミュレーションコードの連結

## 熱の流れ



## 粒子循環



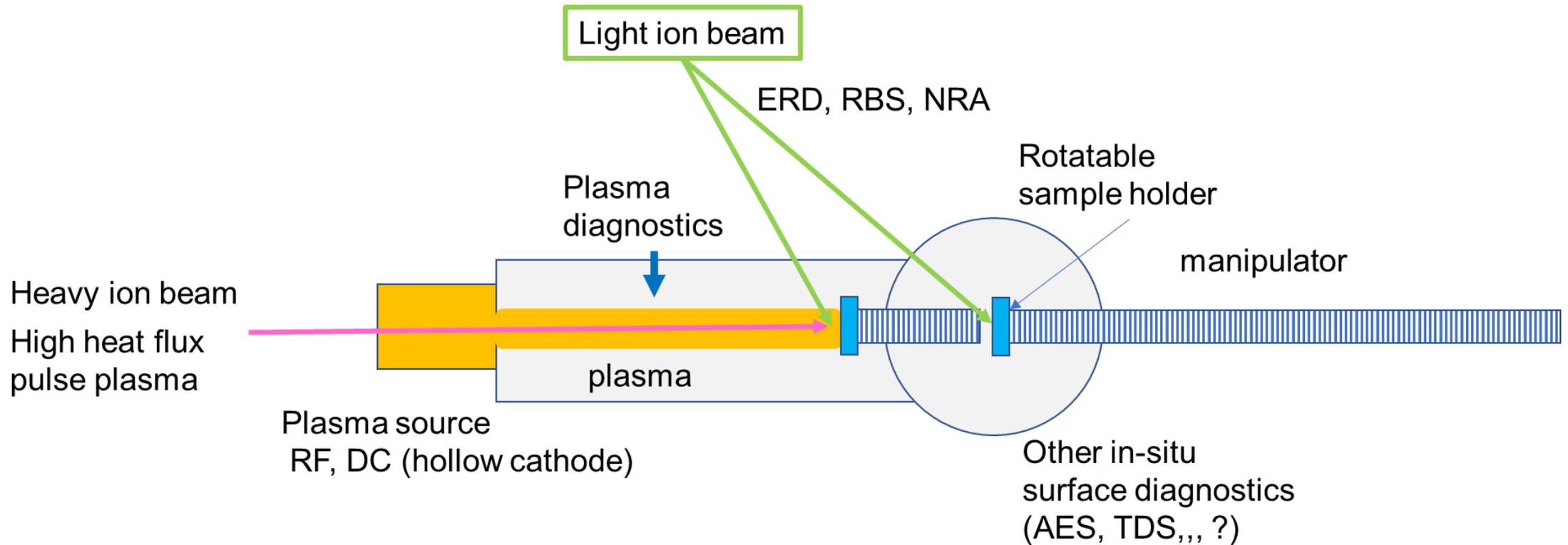
実験での観測、シミュレーションによる再現

# 学際的展開

- 非接触プラズマにおける原子・分子過程の研究で得られる「光とプラズマ」に関する知見を、弱電離プラズマの総合理解、光によるプラズマ物性の計測・制御法の確立、固体・ソフトマター（生体分子）等物質との相互作用の解明、プラズマ中の化学物質の形成・分解過程などの研究に適用する。さらに「光とプラズマ」に関する知見は、プラズマバイオや、SDGs、ひいては宇宙空間における生命材料物質の形成メカニズム解明などへも展開する。
- プラズマ中や壁材料中の粒子輸送研究、例えばソレー効果のように複数の勾配が駆動する「非平衡交差輸送（クロス効果）」の研究などを、他分野と協同して進める。
- 研究対象となる現象のアナロジーを活用し、例えば熱プラズマや、液体金属を用いたプラズマプロセスへの展開も検討する。
- 本ユニットの研究で用いる、あるいは新たに開発する機器や実験・計測手法などを他分野の研究に適用した新たな展開をもたらす。

# ユニット間連携

- 超高流束協奏材料ユニットと連携し、プラズマおよび複数種のイオンビームの同時照射が可能な実験装置の検討を進めている。



- 今後さらに、研究推進のためユニット間連携を進める。

# 所内メンバーの研究計画

開発中の大域的モデル（コア - 周辺領域）：

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v}_{\parallel} \mathbf{b} + \mathbf{v}_{\text{md}}) \cdot \nabla + \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right\} \delta f_Z = S_0(f_{M,Z}) + C_F^{Zi} f_{M,Z}$$

従来のドリフト運動論局所近似モデル（新古典論）：

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v}_{\parallel} \mathbf{b} \cdot \nabla + \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right\} \delta f_Z = S_0(f_{M,Z}) + C_F^{Zi} f_{M,Z}$$

※流体モデルによる温度・密度分布などの物理量が前提

※これまで、コアにおけるモデル検証を行ってきた

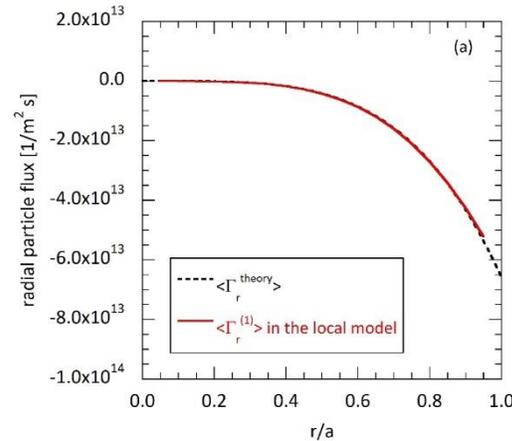
- 局所近似モデルに基づく計算結果は、局所的評価である新古典論と一致
- 大域的モデルに基づく計算結果では、隣り合う位置の分布が互いに影響  
⇒ 5次元位相空間における分布に対する新たな有限軌道幅効果の発見

R. Kanno *et al.*, NF **60** (2020) 016033.

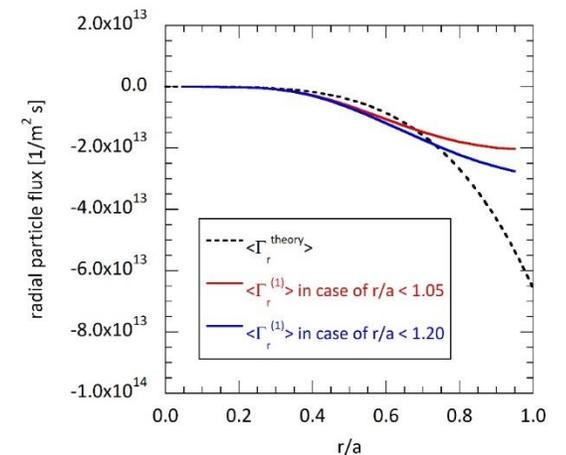
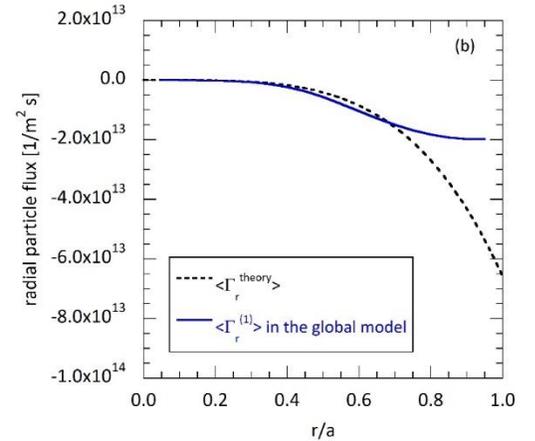
- 静電ポテンシャルの影響評価のため、モンテカルロ・ポアソンソルバを新規開発

R. Kanno *et al.*, PFR **17** (2022) 1403029.

局所近似モデルにおける計算結果

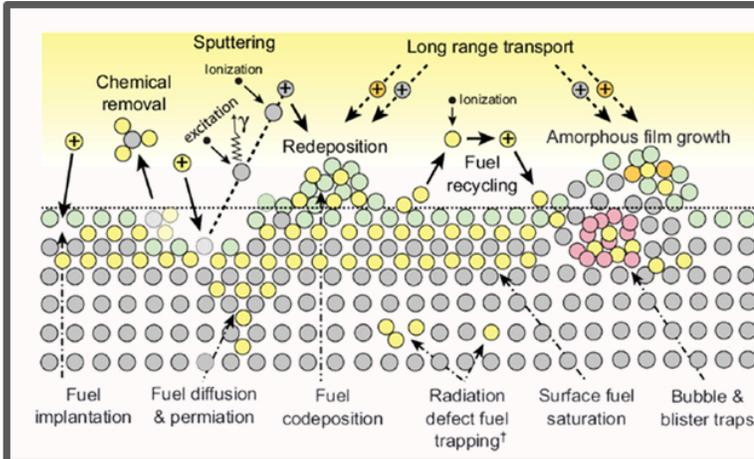


大域的モデルにおける計算結果

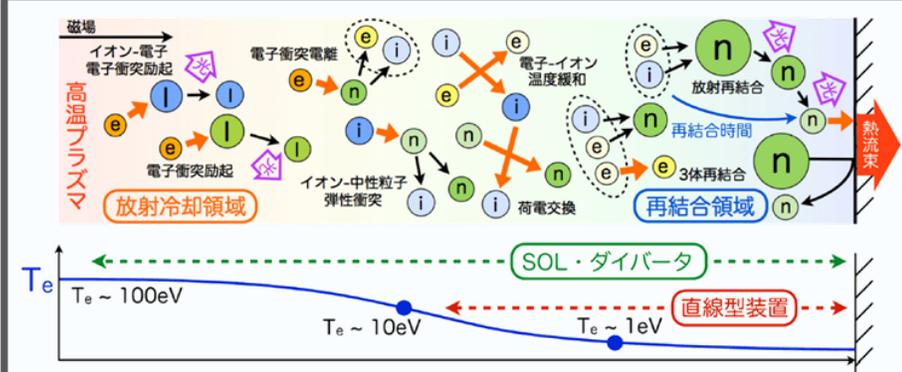


**流体モデルおよび複相間モデルと組み合わせ、周辺領域における不純物輸送に対する運動論効果の影響を評価 ⇒ 粒子循環の理解に対して貢献**

# プラズマ・気体・固体相互作用の実験・シミュレーション研究 庄司主

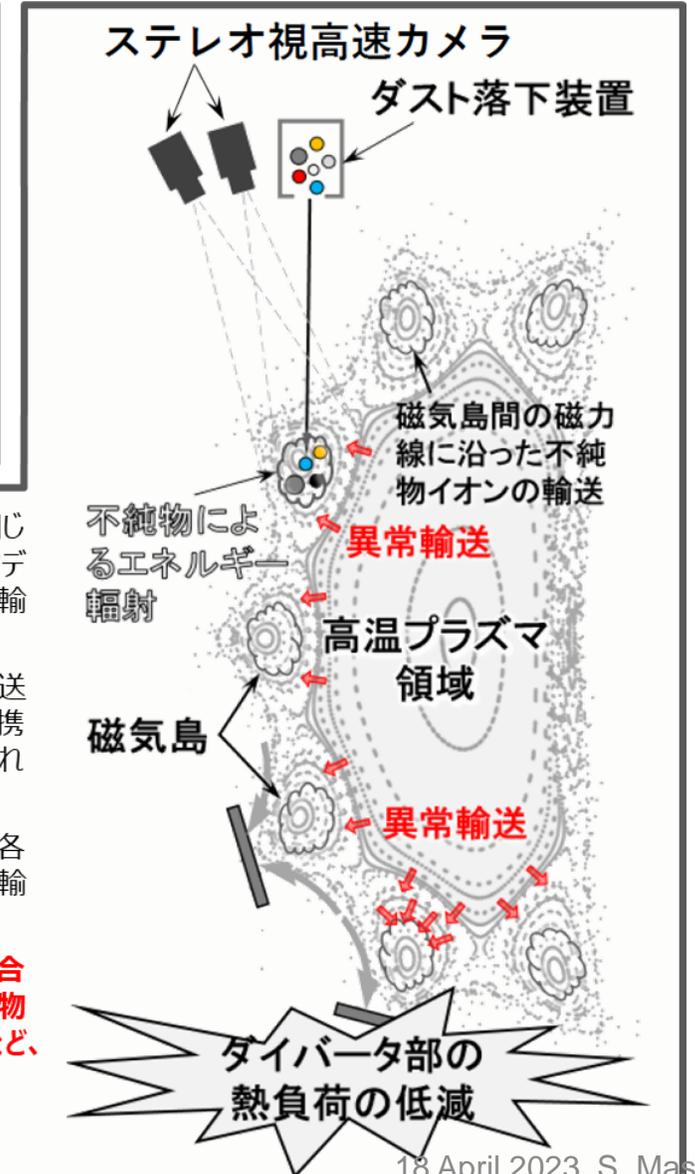


- プラズマ・壁相互作用シミュレーションコードであるERO2.0では、プラズマ対向壁表面上で異なった原子から構成される混合層中の物質の損耗・堆積・移送を正確に取扱うことができていない。
  - 既存のERO2.0コードでは、再堆積した物質層は表面で純粋かつ整列したバルク材の様な堆積層が形成されると仮定している(現実とは大きく異なる)。
- 分子動力学シミュレーション・表面分析の研究者と連携・協力して、現状に即したプラズマ表面相互作用の研究とシミュレーションコードの更なる精密化に挑戦する。



- 既存のEIRENEコードに水素分子の回転・振動・励起過程を繰り込む。
  - 改良されたEMC3-EIRENEコードを利用して、各種磁場閉じ込め装置のダイバータプラズマ領域の原子分子過程のシミュレーションを行う。
  - 各種磁場閉じ込め装置におけるダイバータプラズマの測定結果(周辺プラズマ計測、分光計測、熱粒子計測など)と比較&検討する。
  - プラズマ壁相互作用シミュレーション(分子動力学的手法で得られたシミュレーション結果をPWIデータベースとして活用)との連携。
- 様々なコードを駆使して、ダイバータデタッチメントの再現を狙う。

- 不純物ダスト落下装置(IPD)を利用して磁場プラズマ閉じ込め装置内における粒子・エネルギー循環、ダイバータデタッチメント、プラズマ周辺領域・磁気島内の不純物の輸送の物理を研究する。
  - 周辺プラズマ輸送コード(EMC3-EIRENE)、ダスト輸送コード(DUSTT)、プラズマ・壁輸送コード(ERO2.0)を連携させることによって、IPDによって周辺プラズマ中に投入されたボロン等による壁コンディショニングの効果を検証する。
  - 磁場プラズマ閉じ込め装置の真空容器内部で発生した各種不純物の固体・液体・気体・プラズマ間の複相間の輸送を研究する。
- 様々なシミュレーションコードを連携させた解析、核融合炉内部の物質の移送、プラズマ周辺部における不純物の輸送、ダストとプラズマとの間の相互作用の研究など、従来と比較して精密かつ総括的に研究を進めていく。



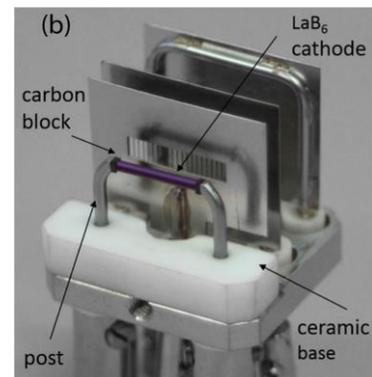
# 非平衡交差輸送の理解

## 原型炉に貢献する、中性粒子排気の学術研究

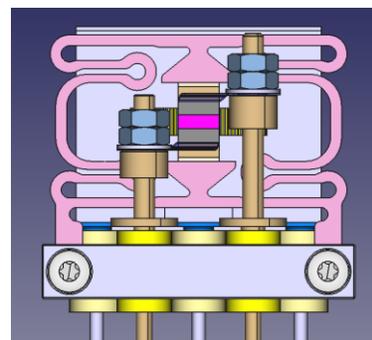
本島 巖

水とエタノールのような単純な系でもソレー効果の定量的な予測ができていない（単なる拡散系であっても）。核融合炉（プラズマおよび対向壁）のような複雑系の粒子輸送（拡散、対流など）を解き明かすことで、その理解に貢献する

### 新しい中性粒子計測



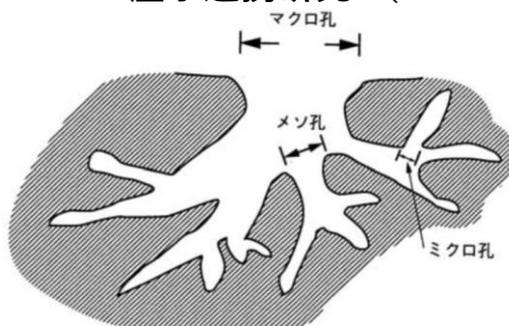
新しいフィラメント開発  
→IPPとの国際共同研究へと発展



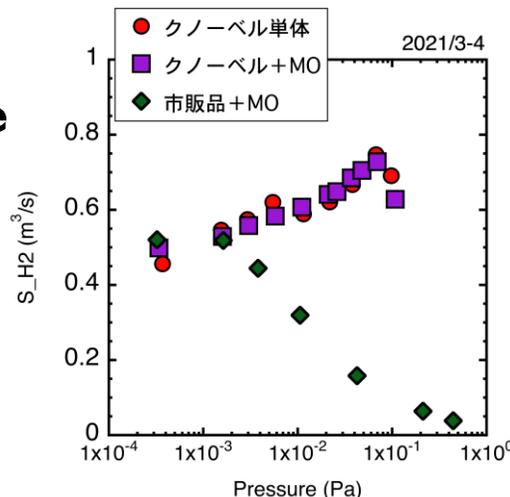
ITER design sandwich cathode with ZrC emitter

### 水素、ヘリウムを分離できる排気系の確立

本島, 細孔制御された活性炭を活用したクライオ吸着ポンプの開発、NIFS産学連携研究（2019-2022）、プラ核学会誌2022

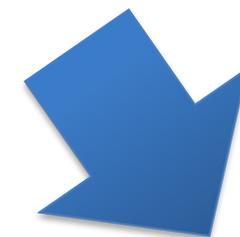


ナノメートル、数十ナノメートルの細孔制御した活性炭による高性能排気ポンプの実現



ナノスケールの機能材料を用いた分子ふるい法の活用検討

本ユニットのアウトカムである「**定常プラズマ・粒子循環**」に資する、核融合プラズマを構成する様々な粒子・熱・運動量の、**様々な輸送を定式化する**



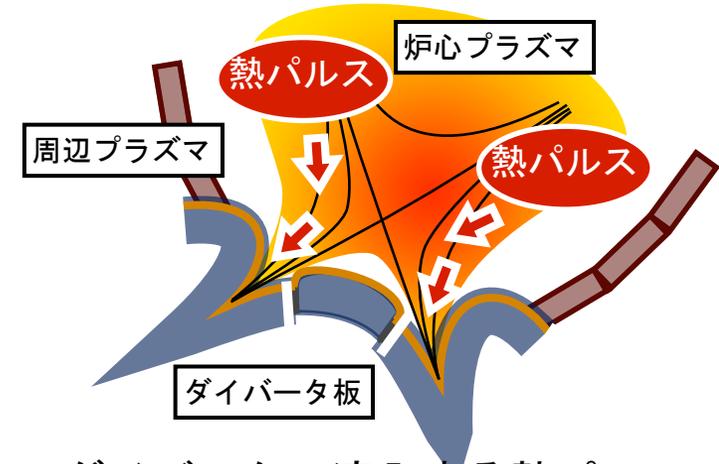
# 非接触プラズマにおける過渡的熱負荷の減衰 林 祐貴

定常的熱負荷 + 過渡的熱負荷

ELMに伴う熱の吐き出し  $\sim 1-3 \text{ MJm}^{-2}$  (Type I)

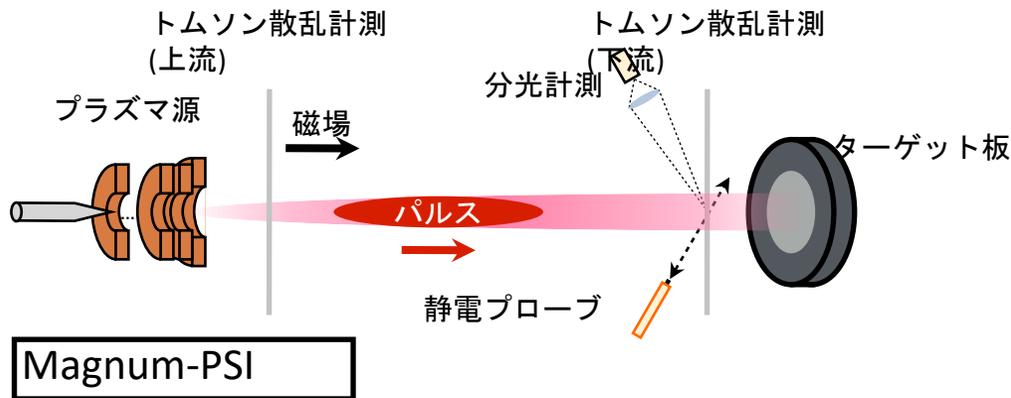
R.A. Pitts NF (2007).

「非接触プラズマが熱パルス緩和への程度有効性を示すのか」  
直線型装置を用いた実験をメインに説明



ダイバータへ流入する熱パルス

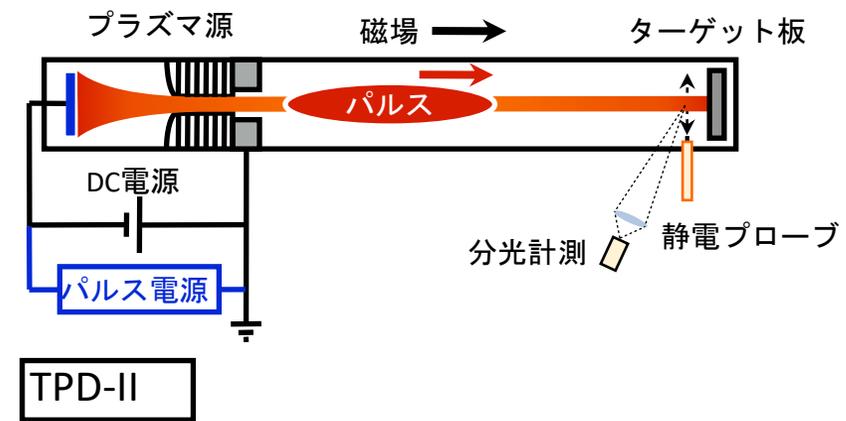
## パルス生成が稼働中の装置での実験



研究テーマ

1. 過渡的熱負荷減衰に要する輸送距離の評価と原型炉への外挿
2. リサイクリング粒子束が関与するパルスプラズマのエネルギー損失過程の解明

## NIFSにおいてパルスプラズマ生成を整備



# 照射損傷材料中の水素同位体挙動研究 矢嶋美幸

## 中性子照射材料を含む照射損傷試料中における 水素同位体の拡散・捕獲・脱離モデルの構築を目指す

➤ 核融合炉の実現を目指す上で、中性子照射損傷を有する核融合炉プラズマ対向壁中の水素同位体挙動を明らかにすることは極めて重要な課題の一つ

- 管理区域に設置された小型プラズマ照射装置（CDPS、東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際センター所有）を用いて、中性子照射試料中の重水素の捕獲エネルギーを実験的に求める
- 分子動力学（MD）シミュレーションを用いて、水素同位体の曝露温度の違いが空孔と水素同位体の相互作用に与える影響について明らかにする

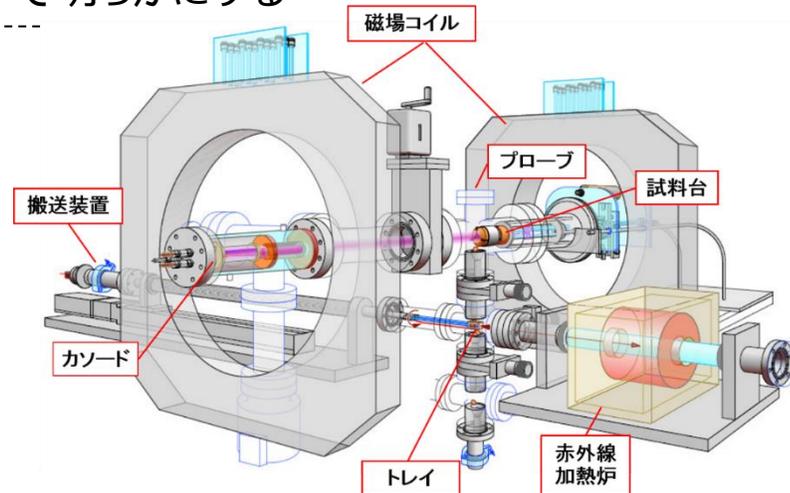


図) 小型プラズマ照射装置

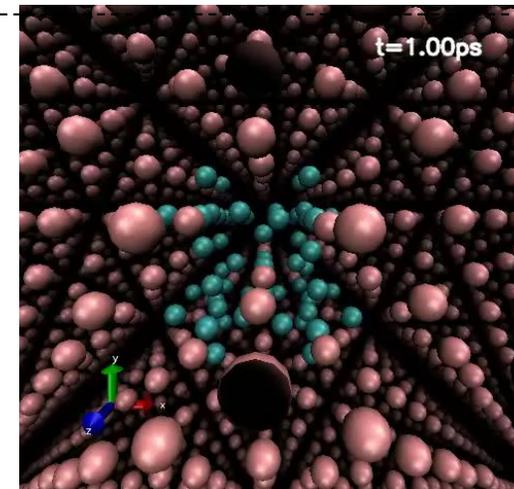
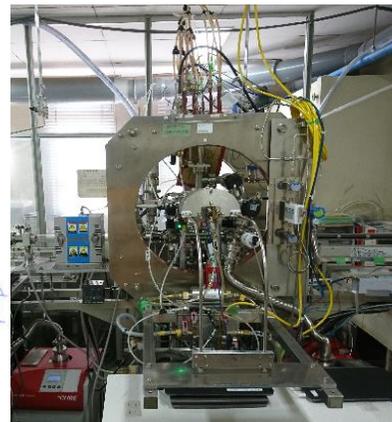


図) MDシミュレーション例

## 核融合研究



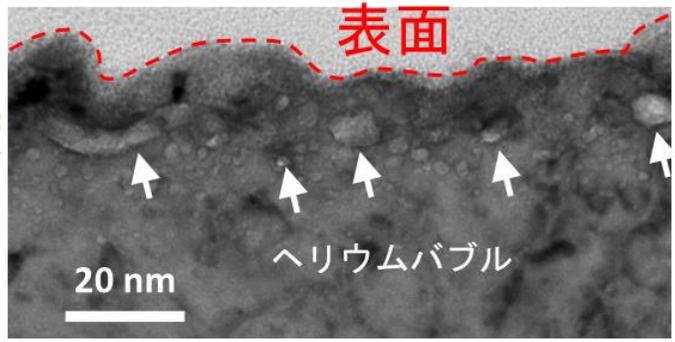
## 核融合先端技術の異分野応用

## 産業界

共通の物理で解釈できる

### ① 材料表面の損傷・損耗・再堆積現象の解明

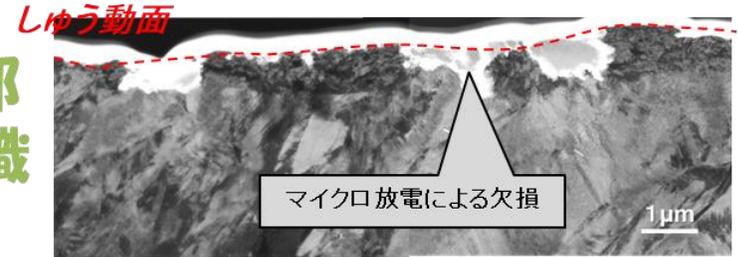
材料表面  
マイクロ組織



しゅう動部  
マイクロ組織



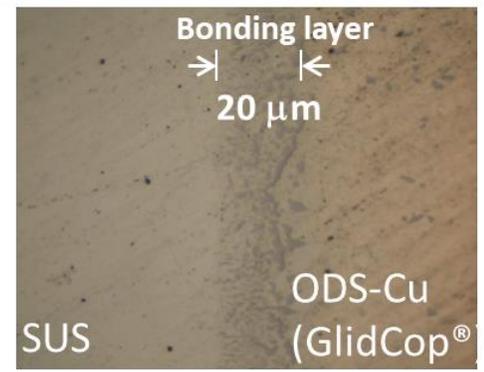
<https://engineer-education.com/>  
ギアの摺動部



しゅう動面(表面直下組織TEM像)

### ② 接合継手部の微細組織制御

接合継手部  
マイクロ組織

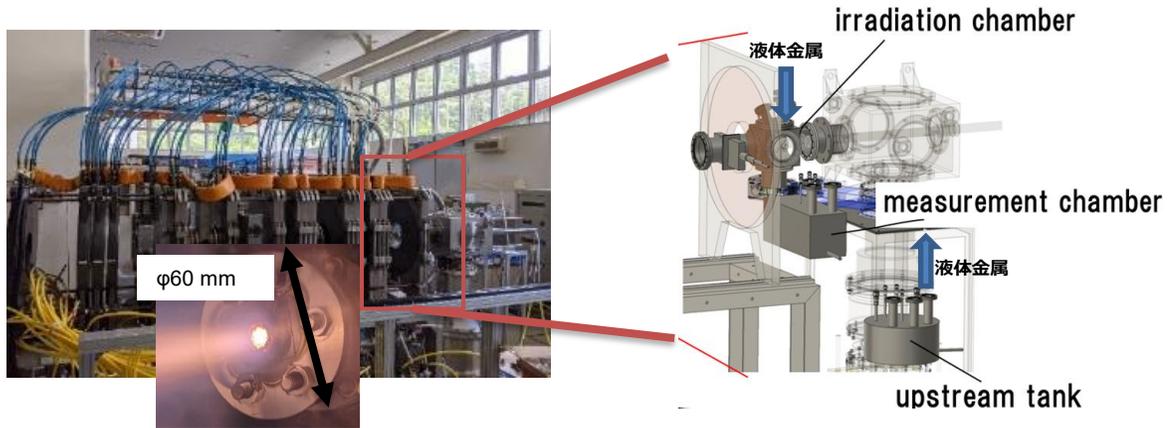


耐熱機器接合継手  
マイクロ組織



# 液体金属プラズマ対向壁研究 浜地志憲

TPD-IIへの液体金属導入（製作中）



## 液体金属PFMは成立するか？ そこで何が起きるか？

- 複雑現象の理解
  - 水素化物形成を含む表面反応(水素の再結合・放出・水素化物形成/分解)
  - 流体内でのプラズマ駆動拡散(流体力学+表面過飽和)
  - プラズマへの影響（局所リサイクリング・蒸気遮蔽・原子分子過程）
- 新現象の探求とメカニズム解明
  - 水素プラズマによる発泡現象
- 液体金属PFCの実現可能性
  - 液体金属流の粒子排気性能と熱除去性能
  - 磁場化流動中のMHD
  - 液体金属流ダイバータ構造の探求

ガス駆動液体金属流動試験と自由表面形成



ガス駆動流動装置



濡れ性改善による自由表面流形成

# 核融合炉を目指したプラズマ・壁相互作用研究 増崎 貴

- 周辺プラズマからダイバータへ至る輸送
  - LHD、W7-X、JT-60SA他の核融合実験装置の周辺・ダイバータプラズマを対象として、ドリフト、不純物ガス入射、非拡散的輸送のダイバータプラズマへの影響に関する実験・データ解析による研究
- プラズマ・固体壁間相互作用
  - LHD、W7-X、JT-60SA他の核融合実験装置、および直線プラズマ装置などを用いた、固体壁中およびその固体壁表面堆積層中の水素同位体およびヘリウムの蓄積、輸送に関する実験研究。
- プラズマ・液体金属間相互作用
  - 直線プラズマ装置などを用いた液体金属プラズマ対向壁の損耗や、水素同位体およびヘリウムの蓄積に関する実験研究。
- 原型炉設計に関わる周辺・ダイバータプラズマおよびPWI
  - ダイバータ設計に関わるプラズマ・PWI、壁コンディショニング等に関する研究。

本ユニットのテーマである、プラズマと異なる物質との相互作用を、実験に軸足を置いて調べて行く。対象とするプラズマはトラス装置の周辺・ダイバータプラズマを想定している。また、この研究テーマが取り組む対象の物理は、ナノ秒から数時間、数日まで非常に広範な時間スケールの現象を包含していることから、少なくとも数10分程度の長時間放電を行う必要がある。

- ⇒ **共同研究** (プラズマ、高熱負荷機器開発): QUEST、W7-X、EAST、WEST、KSTAR...
- ⇒ **LHDデータの活用**

### 令和5年度研究計画

#### 九大応力研共同研究

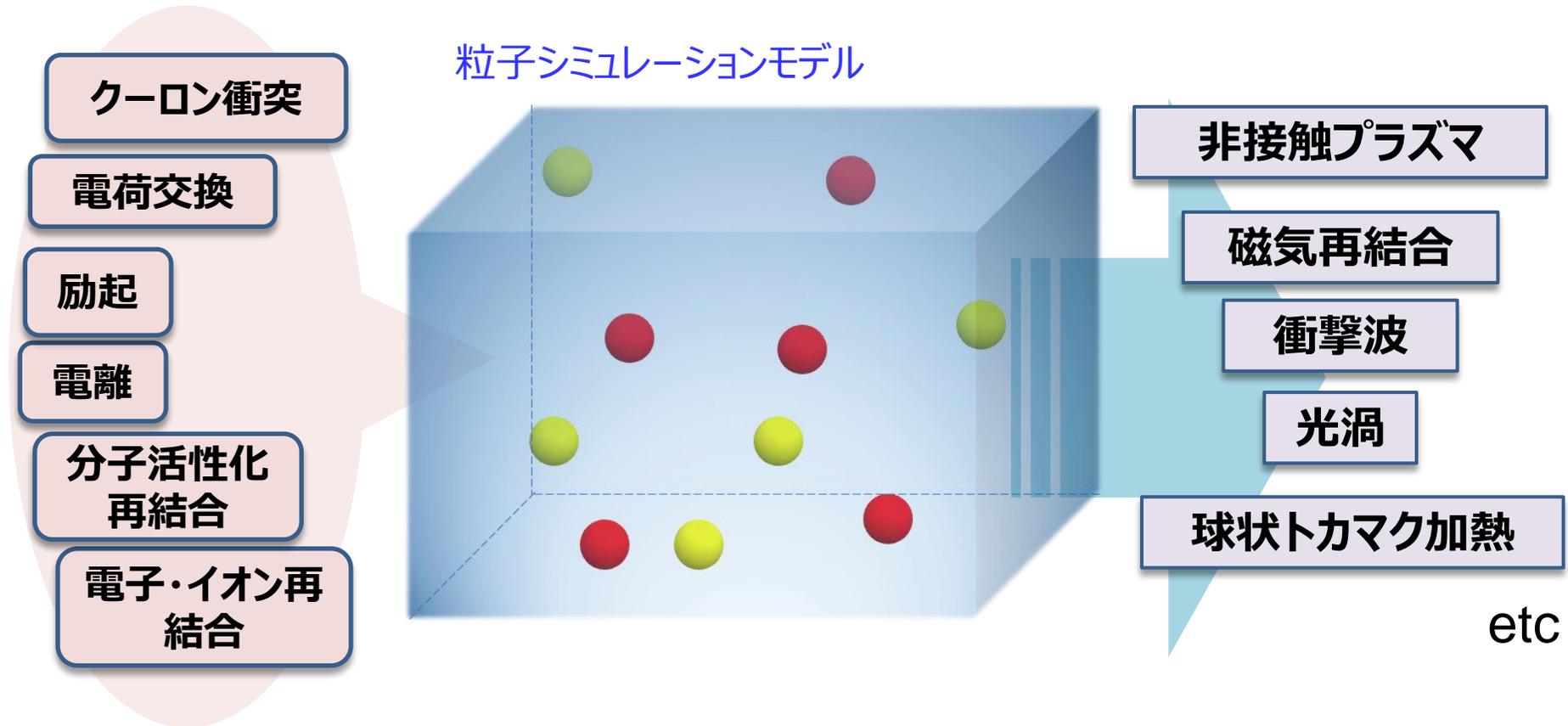
QUESTの金属壁(タングステン&ステンレス)のタングステン部は、W溶射材であるため、表面には多くの細孔が存在し、粒子循環に大きな影響を与えると考えられている。本研究ではWのバルク材を導入し、表面状態の違いが粒子制御性、プラズマ性能に与える影響を調べる。

本年度は、「粉末拡散接合」でWとCuヒートシンクを接合したダイバータ板の小サンプルを製作し、脱ガス特性、熱特性等を調べる試験を実施し、QUESTへの導入を目指す。また、これまでのQUEST実験で得られているダイバータの熱負荷分布や冷却特性等のデータを参照しつつ真空容器内機器の調査を行い、実機ダイバータ板の構造を決定し、工学設計を完成させる。

#### LHD長時間放電データの見直し

- IEA実施協定「定常グループ」で共同執筆を進めている論文に用いるデータのマイニングを行う。
- ⇒ LHD定常実験のレビュー論文に繋げる

# 粒子コードへの素過程組み込みとその適用 宇佐見俊介



- 原子分子過程の物理を、素過程として理解する。
- その素過程をモデル化して、粒子コードに組み込む。
- 素過程組み込み粒子コードを、実際のプラズマ現象に適用する。

# MDを中軸とした研究計画

中村浩章

## 計画1

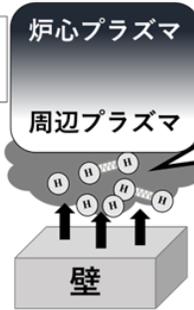
- ①: MD-HCコード・NT-CTコードの連結する。
- ②: 連結したコードを用いて、壁の水素含有量・温度・構造・材質・形状を変えることで、発生する水素分子の振動回転状態が変化する。それによる非接触プラズマへの影響を調べる。

シミュレーション部隊

【G1】ジャイロ運動論  
PIC(XGC)コード  
[森高・洲鎌(協力者)]

【G2】中性粒子  
輸送コード  
[澤田]

【G2】壁材料  
分子動力学  
[中村・齋藤]



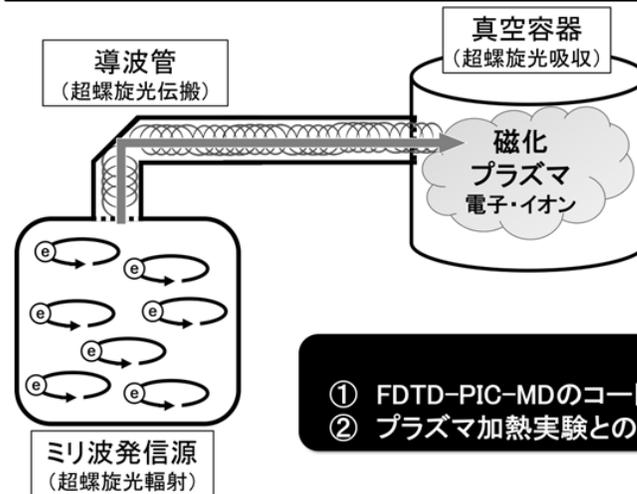
【G1】プラズマ測定  
HIBP/トムソン散乱  
@九大QUEST  
[井戸(協力者)]

【G2】LHDで蓄積された  
分光スペクトル  
データ解析  
[小林(協力者)]

実験部隊

## 計画2

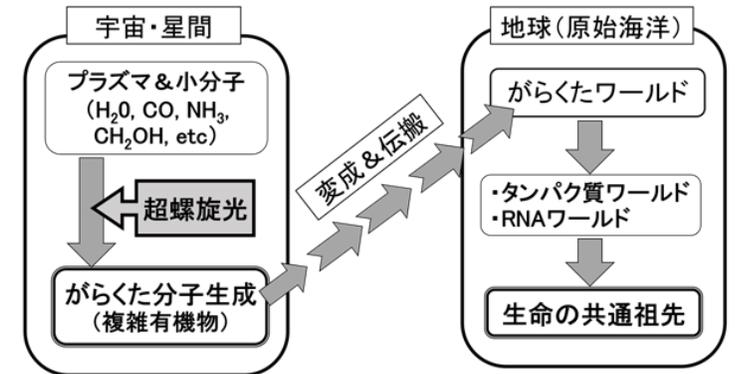
- ① FDTD-PIC-MDを連携し、核融合における磁化プラズマと超螺旋光との相互作用による螺旋性の影響を調べる
- ② 磁化プラズマの超螺旋光加熱実験と比較をし、開発した連携コード群の妥当性検証を行う。



- ① FDTD-PIC-MDのコード連携
- ② プラズマ加熱実験との比較

## 計画3

- FDTD-DFT-MDを連携し、模擬宇宙プラズマ・星間小分子への超螺旋光の照射による、がらくた分子(複雑有機物・アミノ酸前駆体)の生成シミュレーションを行い、生成物の螺旋特性を調べる。

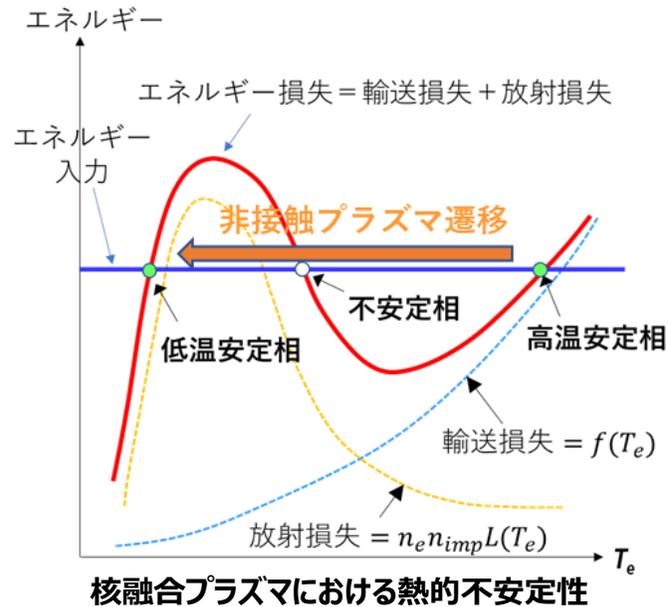


FDTD-DFT-MDのコード連携し、プラズマ・小分子に超螺旋光照射、「がらくた分子」の生成・変成・伝搬をシミュレート。

共同研究者：宇佐見・後藤(勇)・小林(政)・矢嶋・森高(NIFS), 久保伸(中部大), 齋藤誠紀(山形大), ペトロスキー・トミオ(テキサス大), 小林憲正(横国大), 高橋淳一(横国大・同志社大), 藤田宜久(日大), 澤田圭司(信大), 井戸毅(九大), 蓮尾昌裕(京大), 田村祐一(甲南大), 剣持貴弘(同志社大), 安永卓生(九工大), 左近樹(東大), 中田彩子(NIMS), 加藤正博(広大・IMS・NIFS), 川口秀樹(室蘭工大), 藤原進(京都工繊大), 柴田欣秀(岐阜高専), 波多野雄治(富山大)

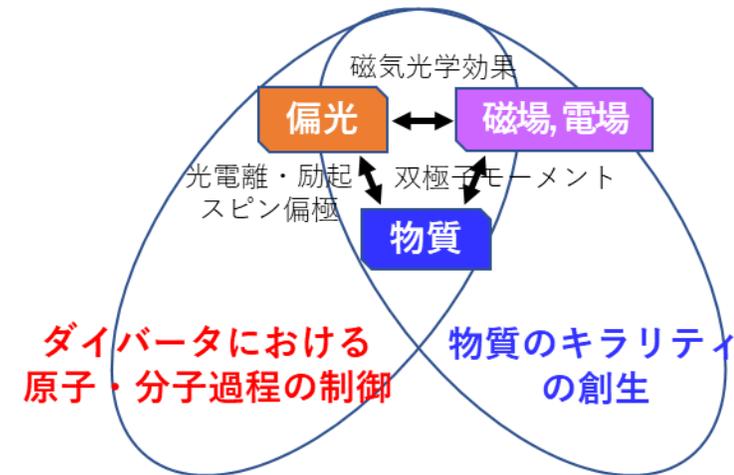
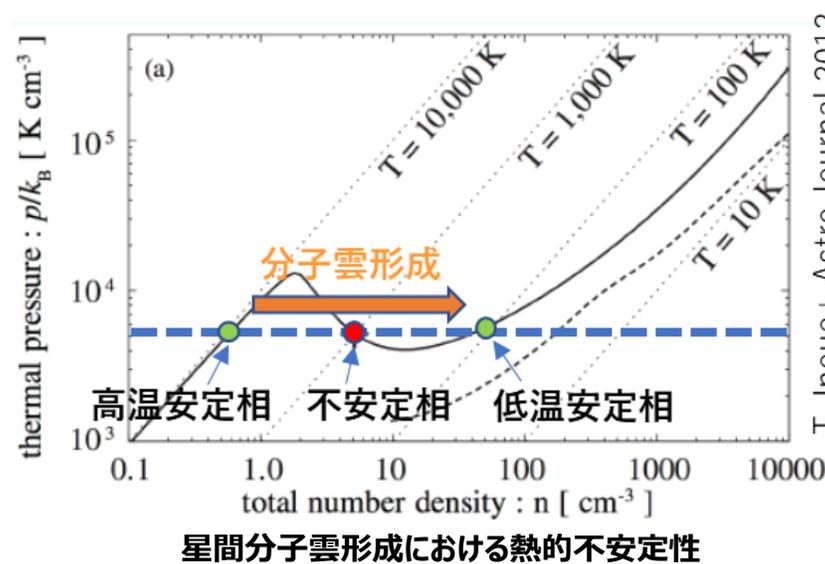
## プラズマ中の熱的不安定性

- 核融合プラズマと星間プラズマにおける熱的不安定性の包括的な理解
- 低温・高温相の二相流体の構造形成・相転移における磁場の効果
- 原子・分子・イオン種の違いによる放射冷却の効果、乱流の効果
- 環状閉じ込めプラズマの放射冷却の安定制御
- 星間分子雲形成のメカニズム理解の深化



## 光と物質の相互作用

- 核融合原型炉を見据えたダイバータ領域の光と原子・分子過程の相互作用
- 放射光源を用いた真空紫外、可視、赤外光の水素分子への照射実験: 振動・回転励起への影響
- 生命の起源・ホモキラリティの起源
- 宇宙における生命材料物質形成におけるプラズマの集団現象・磁場構造、光の効果
- ホモキラリティの地球外起源説の検証: 円偏光、宇宙磁場・電場の効果

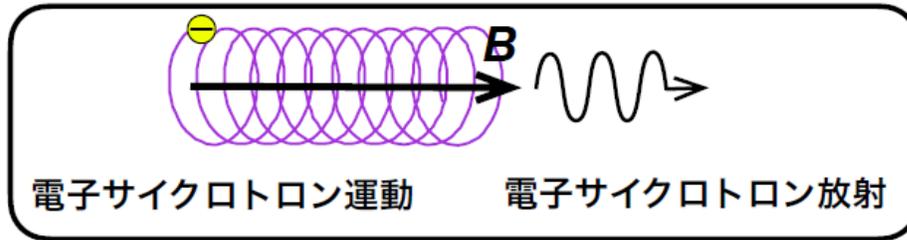


# 電子サイクロトロン運動とその放射場の解の探求 後藤勇樹

目的

時間対称性の破れを物理学の基本方程式から構築する

着目する物理モデル



➡ これらは減衰過程を含む本質的に古典的な現象

Lorentz-Abraham方程式

$$m_e \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{ex}}(t) + m_e \tau \frac{d^3 \mathbf{r}}{dt^3}$$

古典的減衰過程を取り扱うために提案された

問題点

- ▶ 位置の3回微分項の影響により非物理的な解となる
  - 時間的に発散する暴走解
  - 暴走解を取り除くために提案された初期条件が因果律に反している

本研究課題でのアプローチ

古典的リウビル方程式

$$i \frac{\partial f}{\partial t} = L_H f$$



リウビル演算子の拡張ヒルベルト空間での  
複素固有値問題

$$L_{\text{eff}}(z)|F\rangle\rangle = z|F\rangle\rangle$$

固有値に依存する非線形固有値問題



時間の対称性を破る解が物理学の  
基本方程式から演繹される

今後の展開

電子サイクロトロン運動とその放射場が示す解  
の特異性を複素固有値問題から明らかにする

e.g.

“古典的”

Van Hove特異性

“古典的”Fano干渉

# 今後の研究の紹介

吉村信次

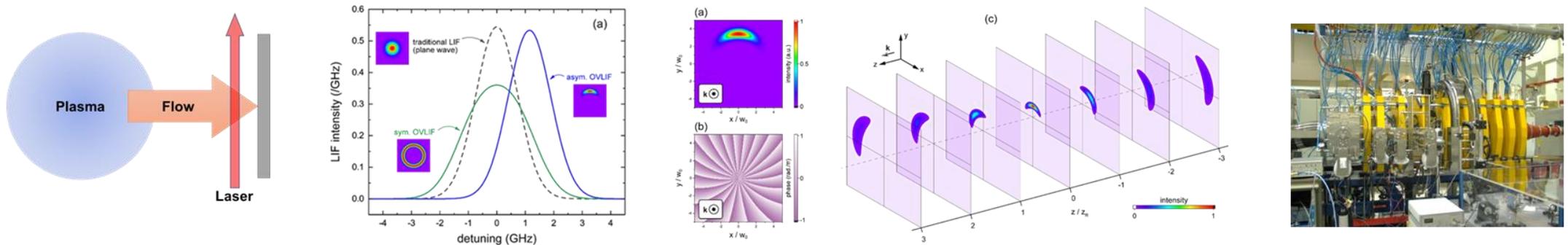
- 光の強度分布・位相分布を能動的に制御することで、レーザー計測に新しい自由度を与える研究

具体的には、非対称Laguerre-Gaussianビームの方位角方向Doppler効果を用いたLIF計測により従来原理的に計測不可能であったレーザーを横切る方向の流れ成分を検出する。

これにより、**トポロジカル光波を用いた単一レーザー光路での3次元速度ベクトル計測の確立**を目指す。

この手法を用いて、直線装置（HYPER-I）弱電離プラズマ中の様々な自発的流れ構造形成の研究を推進する。

（九州大学、日本大学、北海道大学、群馬大学、高知工科大学、ルール大学ポーフムとの共同研究）



- 非平衡大気圧プラズマジェットの直接照射が生体を与える影響に関する研究

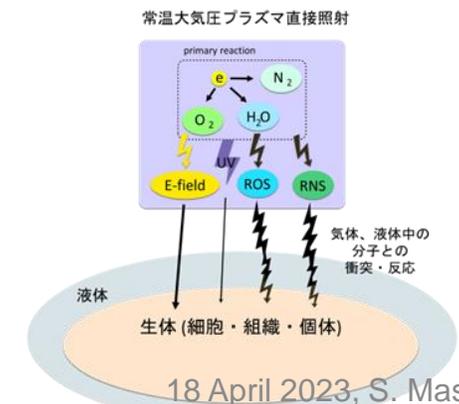
これまでに、生体に直接照射可能な室温大気圧プラズマジェット源を開発した。

このプラズマを複合ストレス源として、真核生物である分裂酵母・出芽酵母に直接照射する。

生物学的には遺伝子変異の網羅的解析を行うことで、プラズマ特異的な細胞応答を調べる。

**プラズマ・気体・液体・固体が共存する非平衡系での熱・エネルギー輸送研究へと繋げたい**

（名古屋大学、九州大学、基礎生物学研究所、アストロバイオロジーセンターとの共同研究）



# まとめ

- 本ユニットでは、核融合炉における周辺プラズマからプラズマ対向壁、そして冷媒・排気系に至る、プラズマと固体、液体、気体が接する系における熱・粒子・運動量の輸送現象を理解し、予測し、制御することであり、素過程の研究の連結によりこれを進める
- 核融合研究で得られた知見・技術を他分野に展開し、その進展に貢献する
- 大学等や自然科学研究機構の各機関、QST、海外研究機関との共同研究を推進する