

# プラズマ・複相間輸送

Transports in Plasma Multi-Phase Matters System

増崎 貴

# 核融合としての課題

- 磁場閉じ込め核融合炉の開いた磁力線領域から対向壁へ、そして対向壁を冷却する冷媒、あるいは排気装置を経て燃料循環系に至る系における粒子・エネルギー・運動量の輸送現象の理解と予測、制御



# 学術的な特徴付け（何の研究だといえるか）

- 学術的課題：「プラズマと、固体、液体、気体が接する系における、熱・粒子・運動量輸送の理解と予測、制御」
- 主軸となる研究：磁化されたプラズマと固相、液相、気相の複相間輸送現象の物理、プラズマと固・液・気相が連成する非平衡・非線形系の物理の研究
- 並行して進める研究：原子物理、光－物質相互作用、分子構造形成・制御、プラズマ源、プラズマ計測、異種金属接合、材料分析法、データ解析手法など

# アプローチ（定式化）

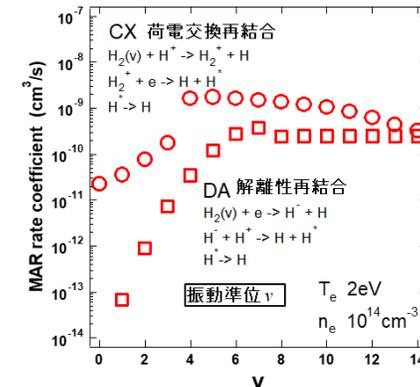
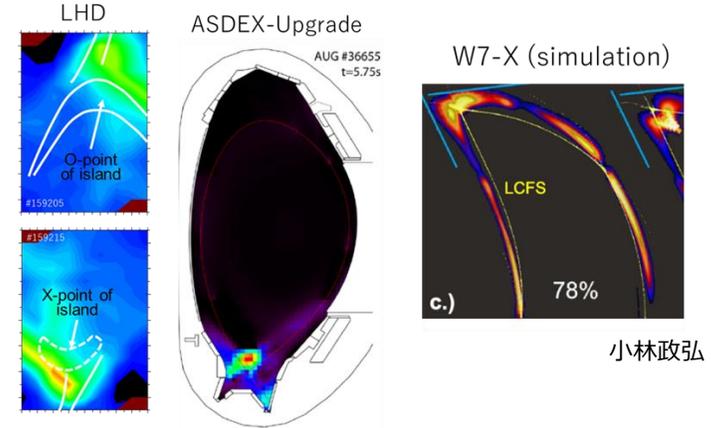
- 非接触プラズマ生成・維持のためのプラズマと気体との相互作用、プラズマと固体・液体対向壁との相互作用、対向壁中の粒子・エネルギー輸送と粒子蓄積、およびこれらの、動的現象への応答など、素過程の研究を進める。
- 開いた磁力線領域から壁・冷媒・排気装置に至る系の、時間・空間スケールが異なる素過程のつながりに焦点を当て、この系における輸送に対するモデリング、および制御方法を得る。
- プラズマと、固体、液体、気体という複数の相間にまたがる研究を一つのユニットで協同して行うことにより、それぞれの研究分野間のsynergy効果を促進する。

# アプローチ (定式化) 2

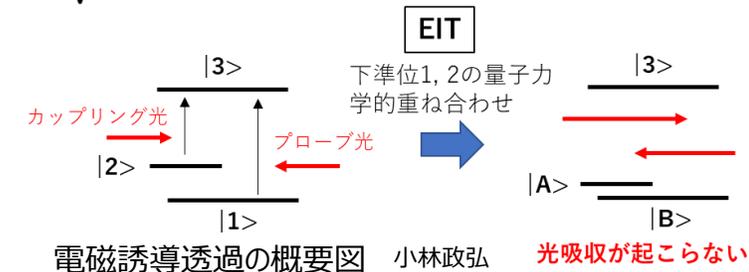
- 非接触プラズマの生成・安定維持

- 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。

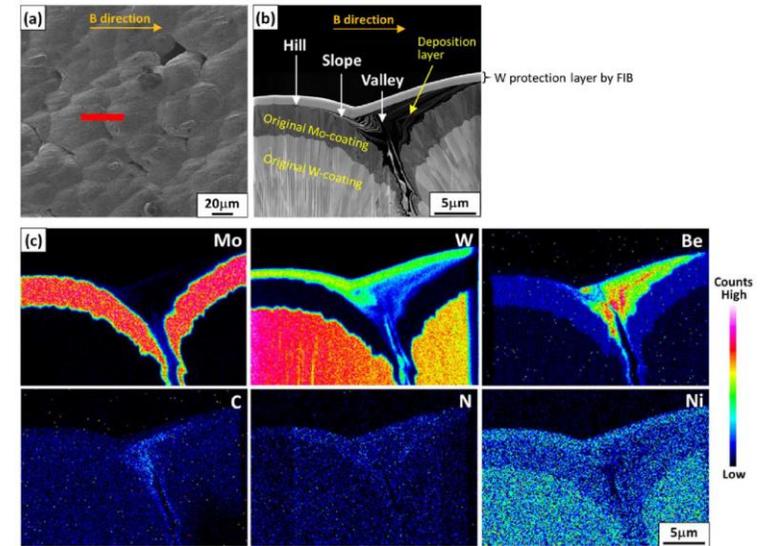


分子活性化再結合速度係数の水素分子の振動準位への依存性



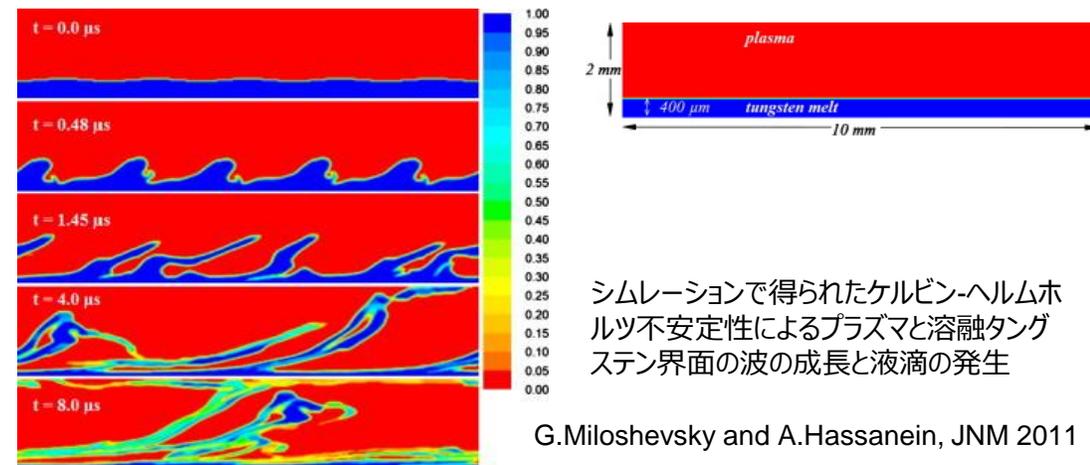
# アプローチ（定式化） 3

- 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

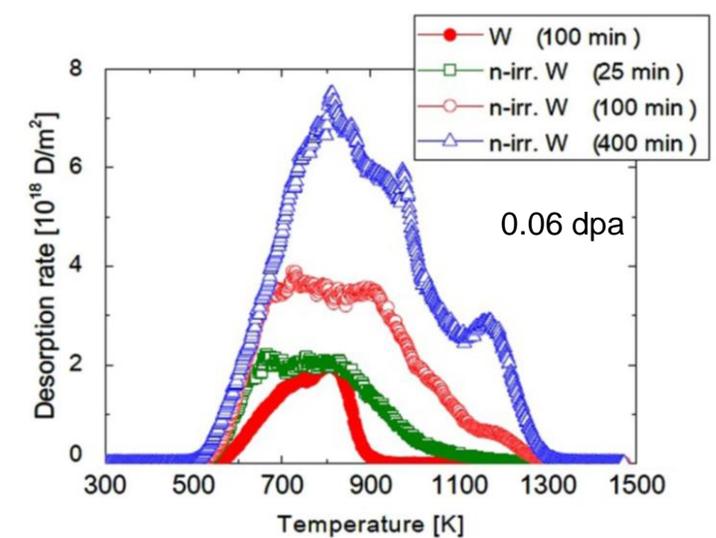


シミュレーションで得られたケルビン-ヘルムホルツ不安定性によるプラズマと溶融タンゲステン界面の波の成長と液滴の発生

G.Miloshevsky and A.Hassanein, JNM 2011

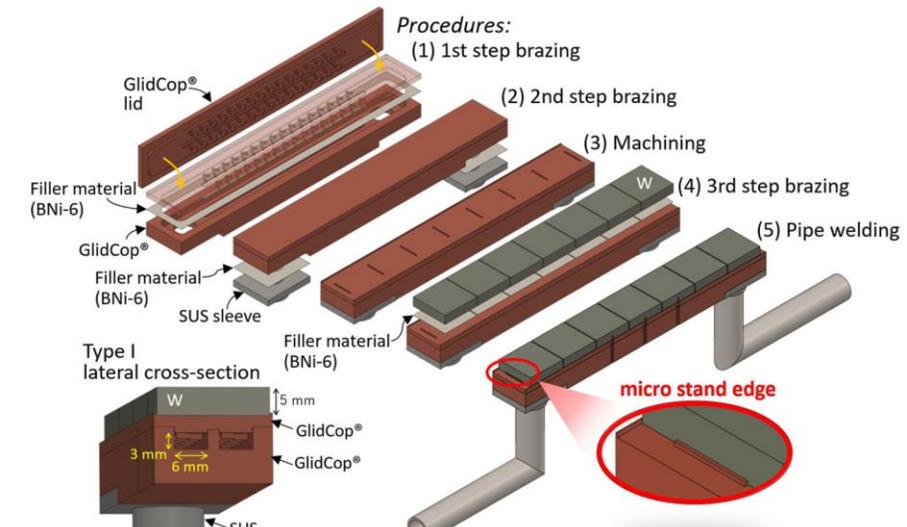
# アプローチ（定式化） 4

- 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

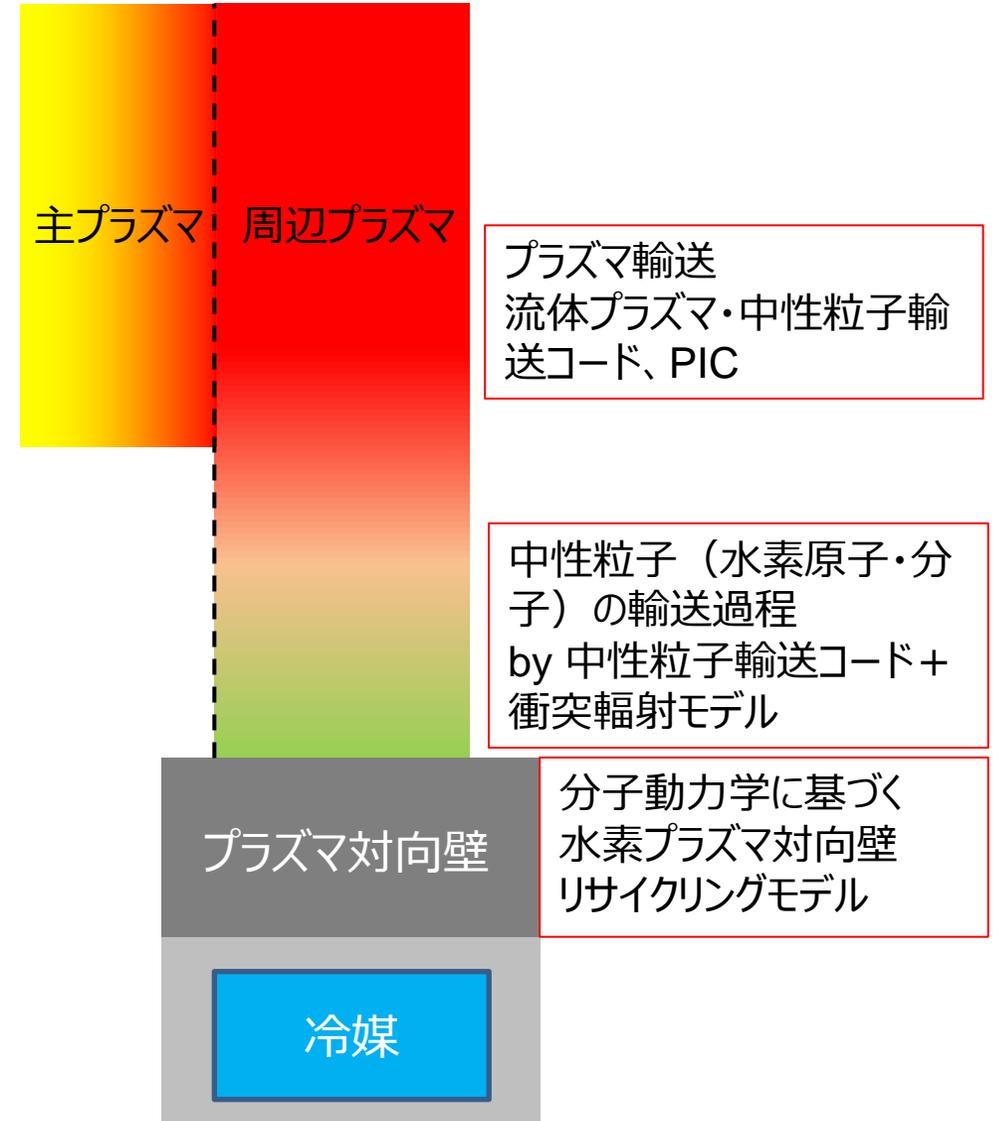


複数回のろう付けによる複雑構造の作成

M. Tokitani et al, Nucl. Fusion 2021

# アプローチ（定式化） 5

- 理論・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。



# アプローチ（定式化） 6

- 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电離プラズマ、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。
- 研究を進めるために必要な、プラズマ源、プラズマ計測、異種金属接合法、材料分析法、データ解析手法の研究を並行して行う。
- 大学共同利用機関の役割を意識し、特徴ある装置、所外研究者にとって魅力的な装置の開発も進める。
- 双方向拠点をはじめとする大学等や自然科学研究機構の各機関、QST、海外研究機関での共同実験・共同研究を推進する。

# 学際的展開

- プラズマ中や壁材料中の粒子輸送研究は、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）」など、他分野との協同ができる。
  - ソレー効果（濃度勾配、温度勾配のカップリング）
  - 材料界面（金属接界面や結晶粒界における、並行・垂直拡散と熱拡散や空孔拡散の交差）
  - 非局所輸送（平行方向、垂直方向の拡散のカップリング）
  - 非拡散的輸送
  - 選択的粒子輸送、水素・ヘリウム分離
  - プラズマ中の温度勾配による熱応力 thermal forceによる不純物のダイバータから上流への輸送

# 学際的展開

- プラズマと固体あるいは液体界面では、母材、界面、そしてプラズマへと「多層間」でのフォノン・光子・電子の受け渡しがあり、多層間の多様な相互作用が起きている。このように複雑な系を現す数理モデルの構築のため、半導体プロセッシング・物性物理・光物性物理・統計基礎論などの分野を横断した共同研究を展開できる。
- 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発展し得る。

# 学際的展開

- 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考えられる。
- 本テーマで用いる、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も期待できる。

# 独自性、優位性など

- 非軸対称系システムであるLHDにおいて蓄積された実験データを有することは、RMP運転時のトカマク装置を含む非軸対称トロイダルシステムにおける周辺およびダイバータプラズマ研究において優位性をもつ。
- 分子動力学法に基づくプラズマ・壁相互作用の計算機シミュレーション研究が進展している。
- 本テーマは、基礎プラズマ、核融合プラズマ、材料、水素同位体、そして理論シミュレーション研究者の共同提案であることが大きな特徴であり、多様な研究テーマを包摂することができる。
- 既設の設備である、直線型プラズマ装置Hyper-IおよびTPD-II、熱負荷試験装置ACT2、NBIテストスタンド等を用いた実験、集束イオンビーム装置、透過型電子顕微鏡、イオンビーム分析装置など表面分析機器群を用いた試料分析等、また、これまで開発および導入してきたコードを用いた計算機シミュレーション研究が、協同して進められる。
- 核融合炉の実現のために必要なプラズマ対向壁への中性子照射影響に関する共同研究や、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知見を活かした学際的な共同研究が進行中である。

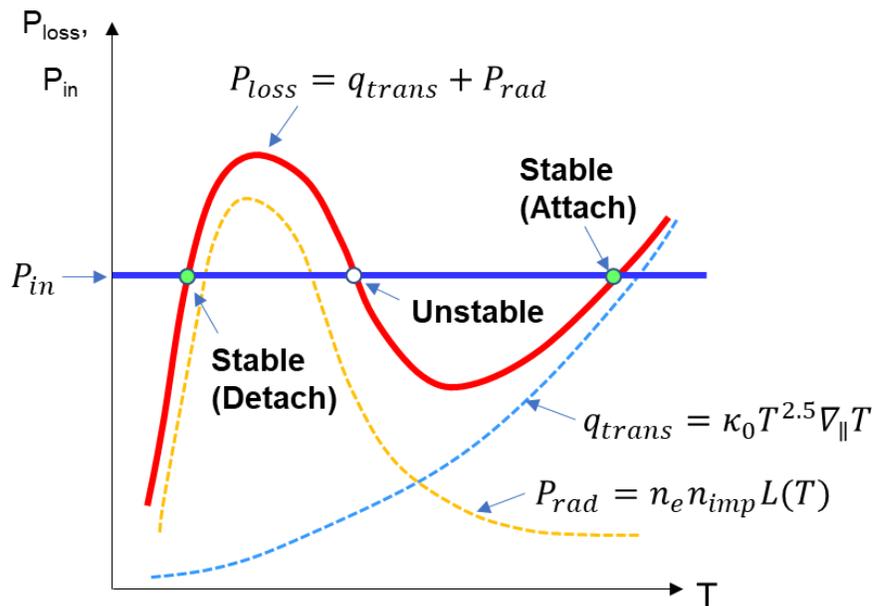
# まとめ

- 核融合研の新しい研究体制であるユニットの一つとして、プラズマ・複相間輸送、を提案している
- 研究の主軸は、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、エネルギー、粒子、運動量輸送の理解と予測、制御であり、素過程の研究の融合によりこれを進める
- 多様な研究テーマを包摂できる
- 双方向拠点をはじめとする大学等や自然科学研究機構の各機関、QST、海外研究機関での共同実験・共同研究を推進していきたい

[PMI@nifs.ac.jp](mailto:PMI@nifs.ac.jp)

# 非接触(デタッチメント)プラズマの安定維持：光とプラズマ（物質）の相互作用

- デタッチメントは**熱的不安定性**によって駆動され、デタッチメント運転の安定性はプラズマの**熱的安定性**に強く依存する。



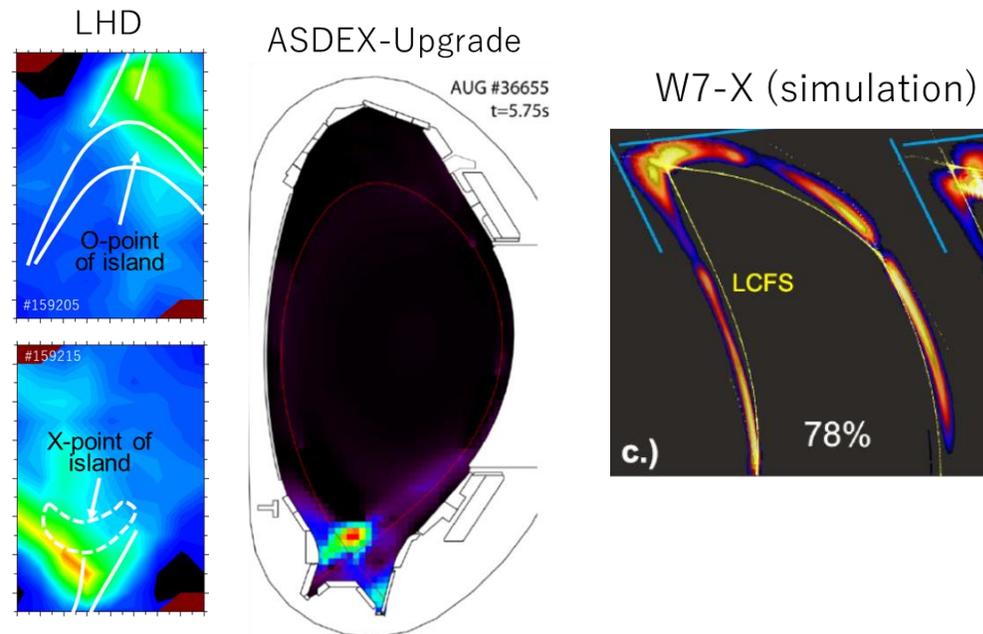
- デタッチメント時の周辺領域:

$$\frac{R}{L_{\perp}} \sim 100, T_e \sim 10-100 \text{ eV} \rightarrow \tilde{\beta} > 1, \tilde{\mu} > 1, C > 1$$

**電子は非断熱的**  
→ ドリフト波による輸送  
→ **抵抗性MHDモードの不安定化**

$$\gamma_{interchange} \propto \eta^{1/3} L_{\perp}^{-2/3} \propto L_{\perp}^{-2/3} T_e^{-0.5}$$

- **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。



磁場構造と熱的不安定性

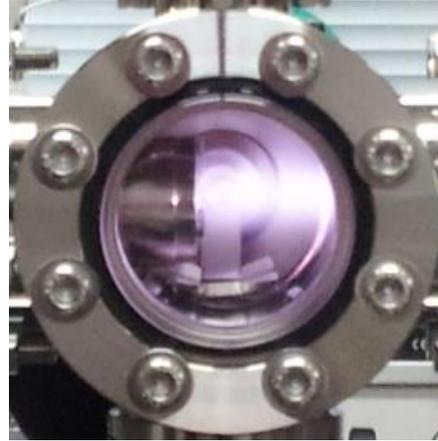
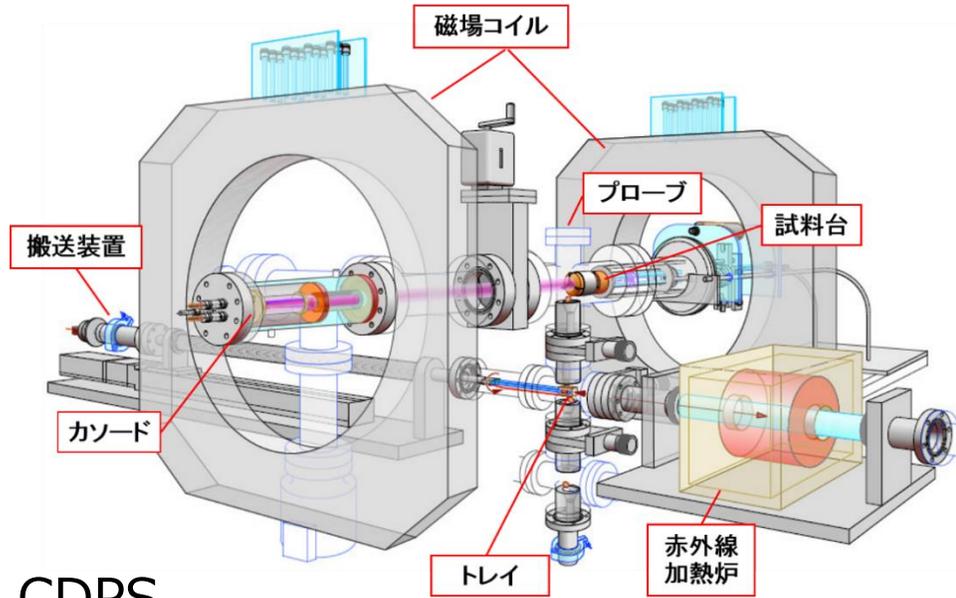
原子・分子過程による輻射

ドリフト波乱流

電磁乱流

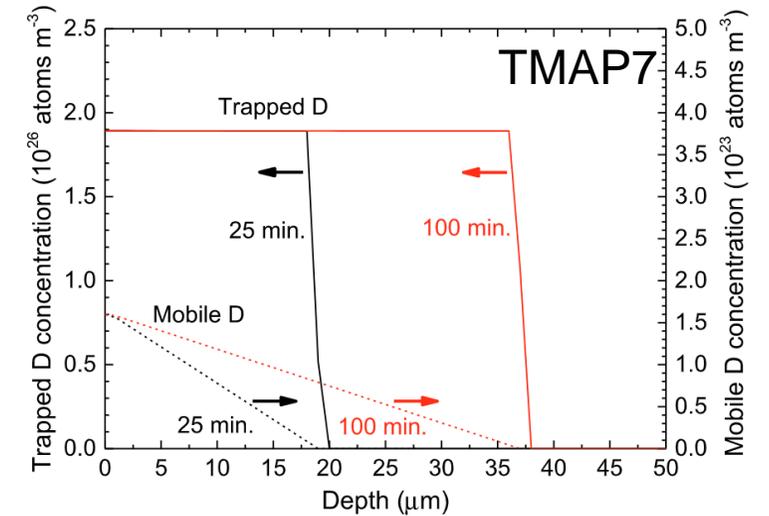
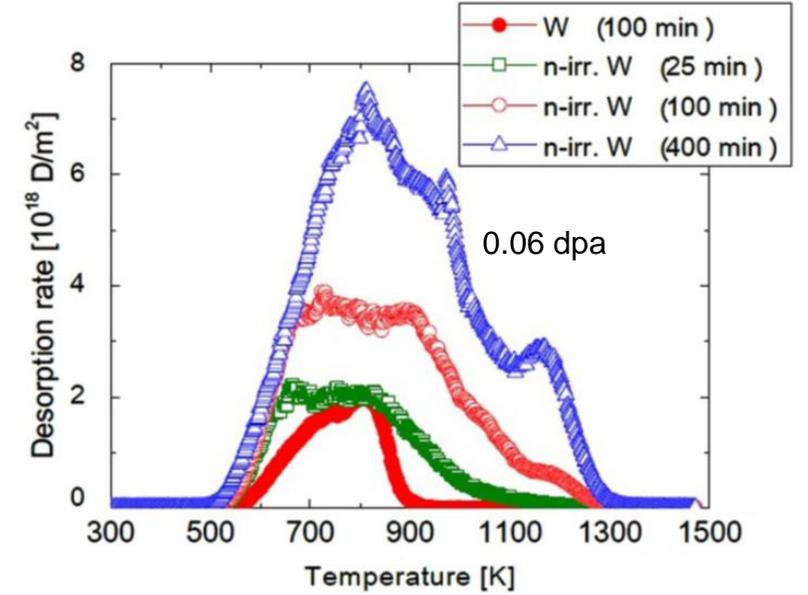
磁力線構造とプラズマの熱的不安定性、乱流等の微視的不安定性に起因する輸送の時空間スケールが、原子分子過程による輻射とどのように相互作用しているか？

# 東北大学大洗センターにおけるプラズマ・固体間相互作用研究



## CDPS

- 管理区域内に設置
- 中性子照射試料の分析が可能
- 高密度定常重水素プラズマ ( $\sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ,  $T_e \sim 10 \text{ eV}$ , プラズマコラム直径 $\sim 20 \text{ mm}$ ) が生成可能
- プラズマ照射後、試料を大気に曝露することなく昇温脱離ガス分析の実施が可能



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

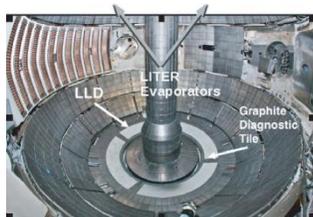
# 液体金属プラズマ対向壁研究

## 液体金属PFC

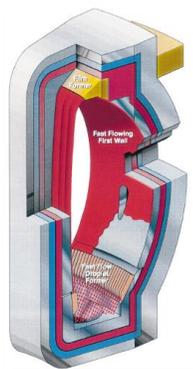
- ・ トカマクでの実績
- ・ 複数の先進的提案
- 基礎研究は少ない



LTX (Lithium Tokamak eXperiment)



NSTX LLD (Liquid Lithium Divertor)



CLiFF in ARIES-RS

M.A. Abdou, FED 54 (2001) 181

装置/計測

システム/ノウハウ

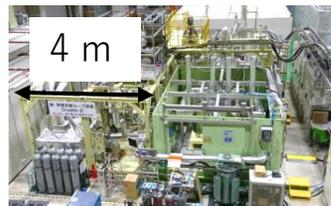
## TPD-II (NIFS)

- ・ 直線型プラズマ
- ・ 可視~VUV分光、プローブなどのプラズマ計測



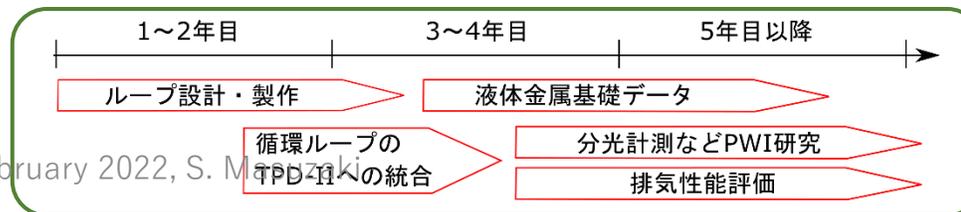
## Oroshhi-2 (NIFS)

- ・ LiPb(融点~230°C)
- ・ ~130 L, 定常循環
- ・ CFD(ANSYS)



## 液体金属PFMは成立するか？ そこで何が起きるか？

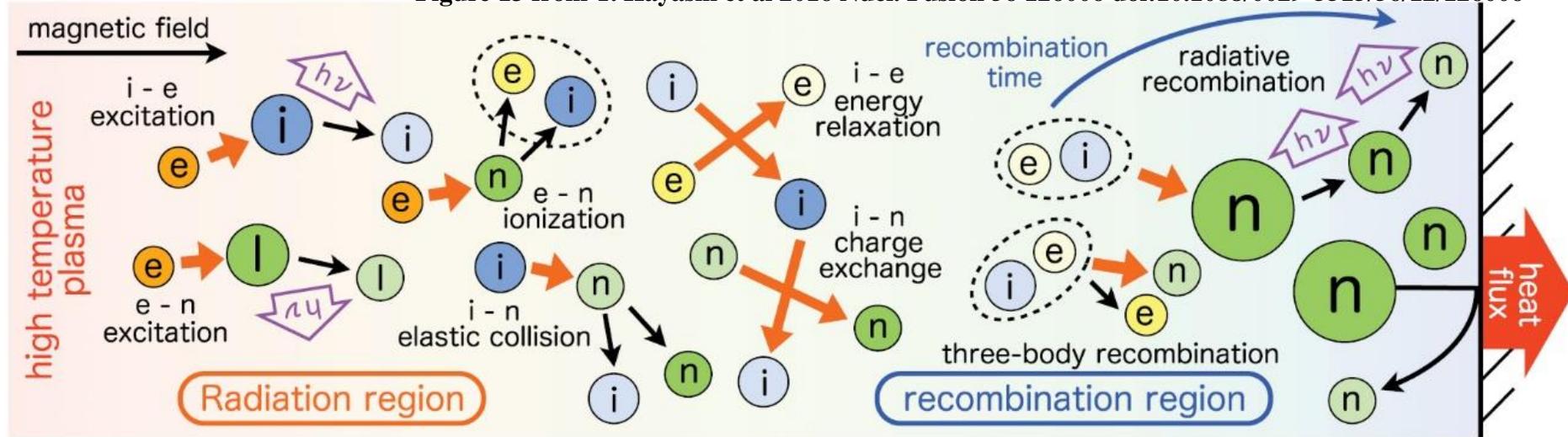
- 整備すべき基礎データ
  - スパッタリング・粒子反射/侵入係数
  - 金属・水素化物蒸気形成
- 複雑現象の理解
  - 水素化物形成を含む表面反応(水素の再結合・放出・水素化物形成/分解)
  - 流体内でのプラズマ駆動拡散(流体力学+表面過飽和)
  - プラズマへの影響 (局所リサイクリング・蒸気遮蔽・原子分子過程)
- 新現象の探求とメカニズム解明
  - 水素プラズマによる発泡現象
- 液体金属PFCの実現可能性
  - 液体金属流の排気性能と熱除去性能
  - 磁場中での流動中のMHD
  - 液体金属流ダイバータ構造の探求



2~3年程度での実験立ち上げを予定

# 固体・中性粒子輸送・プラズマ相互作用のシミュレーション

Figure 13 from Y. Hayashi et al 2016 Nucl. Fusion 56 126006 doi:10.1088/0029-5515/56/12/126006

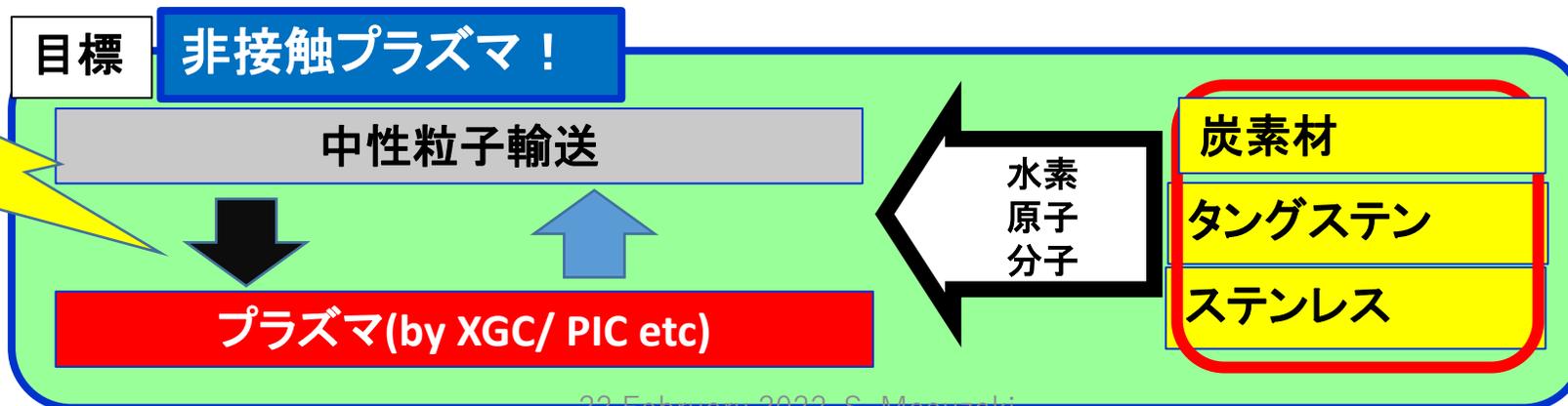


## 分子活性再結合 (Molecular Assisted Recombination: MAR)

荷電交換再結合:  $H_2 + H^+ \rightarrow H_2^+ + H, H_2^+ + e \rightarrow H + H^*, H^* \rightarrow H$

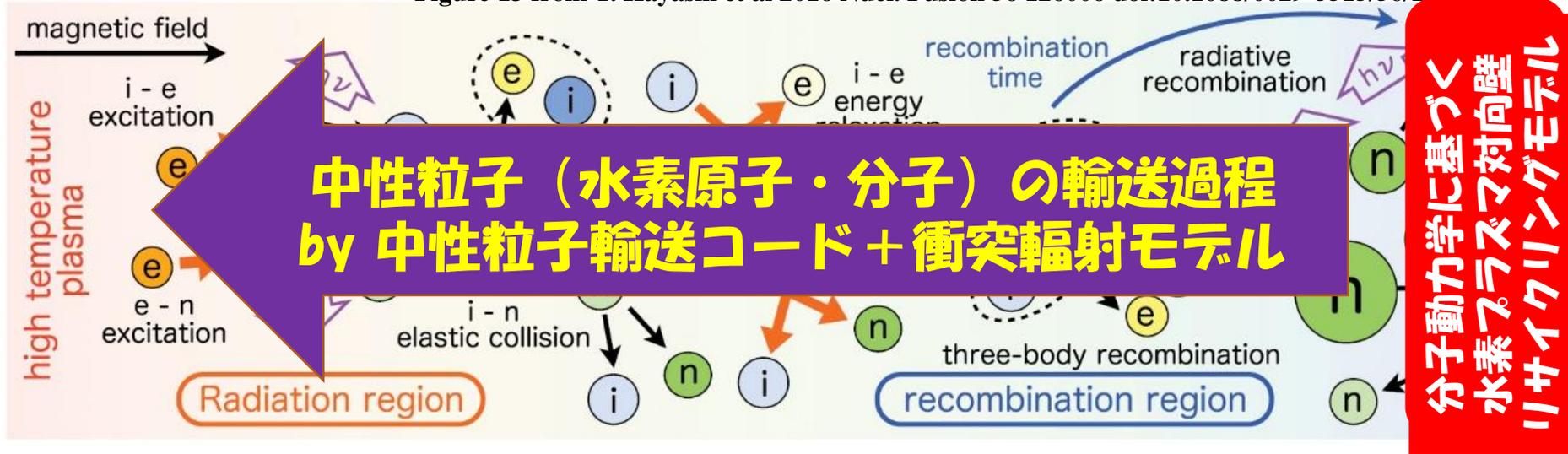
解離性再結合:  $H_2 + e \rightarrow H^- + H, H^- + H^+ \rightarrow H + H^*, H^* \rightarrow H$

光の  
輻射・吸収



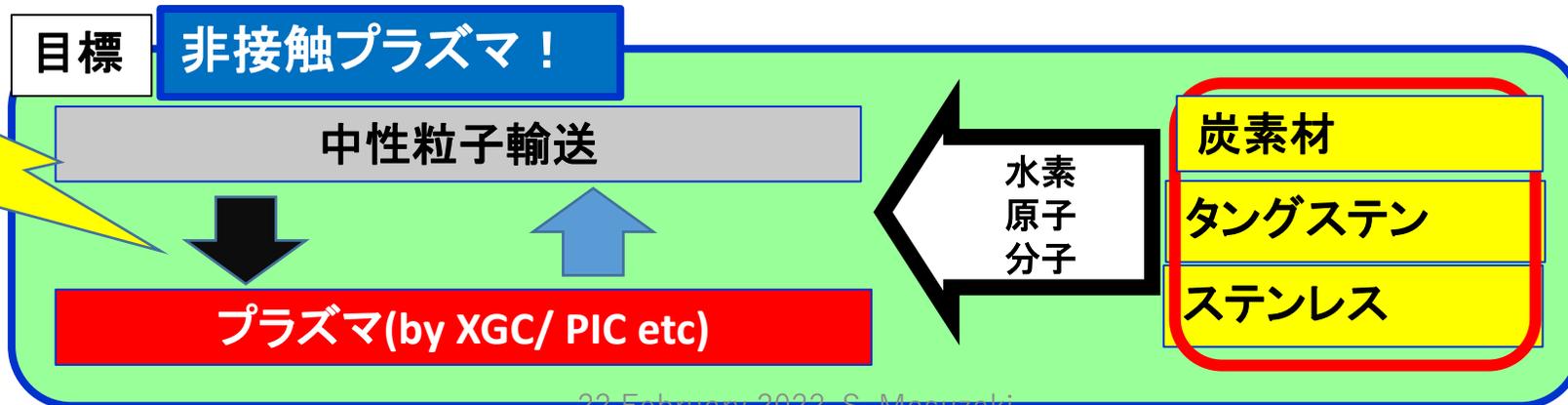
# 固体・中性粒子輸送・プラズマ相互作用のシミュレーション

Figure 13 from Y. Hayashi et al 2016 Nucl. Fusion 56 126006 doi:10.1088/0029-5515/56/12/126006

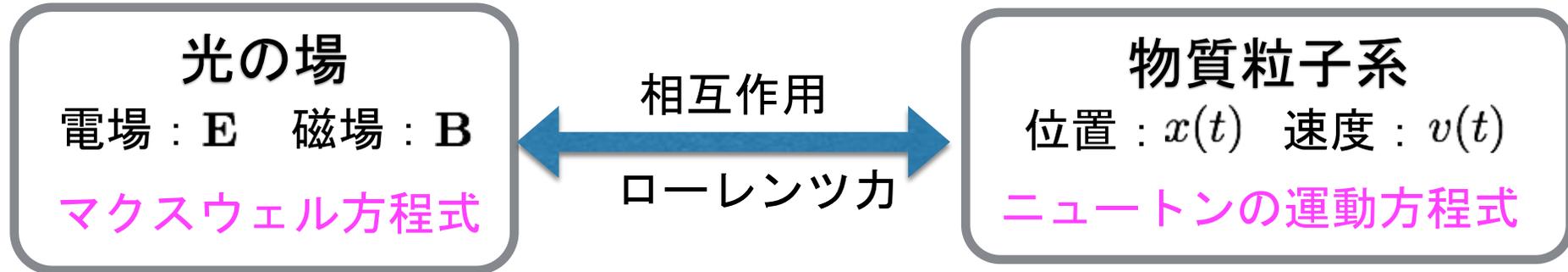


分子活性再結合 (Molecular Assisted Recombination: MAR)  
 荷電交換再結合:  $H_2 + H^+ \rightarrow H_2^+ + H$ ,  $H_2^+ + e \rightarrow H + H^*$ ,  $H^* \rightarrow H$   
 解離性再結合:  $H_2 + e \rightarrow H^- + H$ ,  $H^- + H^+ \rightarrow H + H^*$ ,  $H^* \rightarrow H$

光の  
 輻射・吸収



# 多層間相互作用の例（光・物質相互作用の輻射減衰）



⇒ 反作用による電子の輻射減衰。

物理学の根本問題との関連（不可逆現象、時間対称性の破れ）

- 放射減衰に対する現象論の問題

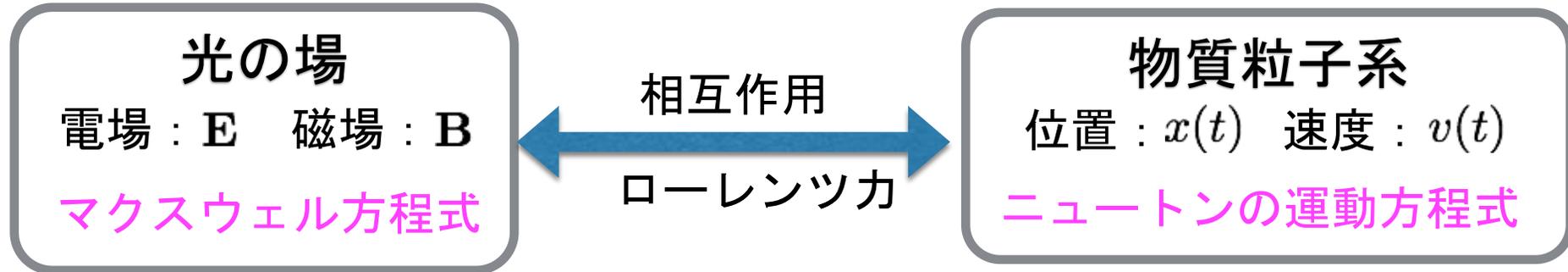
Abraham-Lorentz方程式：
$$m\ddot{x}(t) = -m\omega_0^2 x(t) + \tau m \ddot{\ddot{x}}(t)$$
 3階微分項

- i) runaway solution：発散する解
- ii) preacceleration：因果律が崩壊 (Dirac 1938)

◎力学原理に基づいた放射減衰の理論：物質・光の複合系としての厳密解

- 量子論：拡張ヒルベルト空間におけるハミルトニアンの複素固有値問題  
固有エネルギーが複素数 ⇒ 指数減衰の解 ペトロスキーら(1991)
- 古典論：古典的ボゴリユボフ変換による複素ノーマルモード  
固有振動数が複素数 ⇒ 指数減衰の解 ペトロスキーら(2003)

# 多層間相互作用の例（光・物質相互作用の輻射減衰）



⇒ 反作用による電子の輻射減衰。

物理学の根本問題との関連（不可逆現象、時間対称性の破れ）

- 放射減衰に対する現象論の問題

Abraham-Lorentz方程式：
$$m\ddot{x}(t) = -m\omega_0^2 x(t) + \tau m \ddot{\ddot{x}}(t)$$
 3階微分項

┌ i) runaway solution：発散する解

これらは、1体 & 1次元系の解析のみ。

プラズマ中での多体効果 & 3次元系解析へ拡張！

By 理論・Simulation + 実験測定

# 光による原子・分子過程の制御

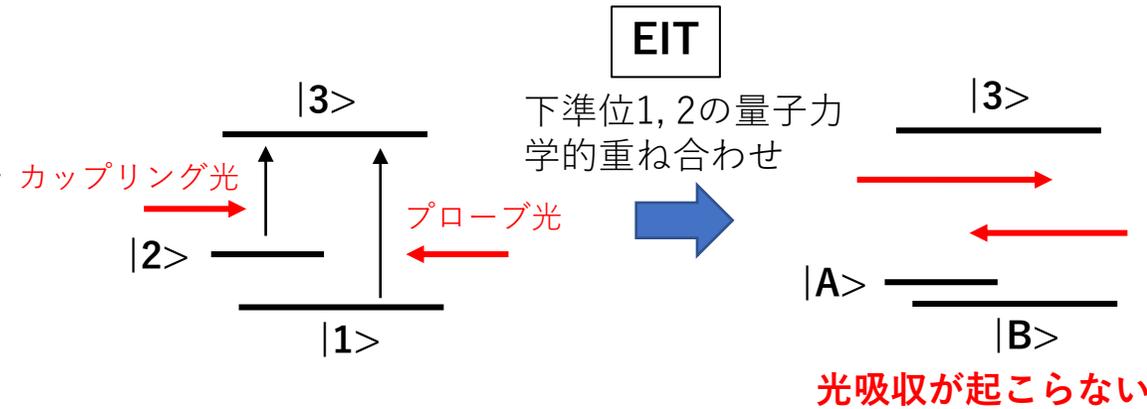
これまで、光は主にプラズマを乱さない計測として使われてきた→積極的にプラズマに影響を与える

**新たな制御手法：外部からの電磁波(光)入射によって積極的に原子・分子過程を制御**

例えば

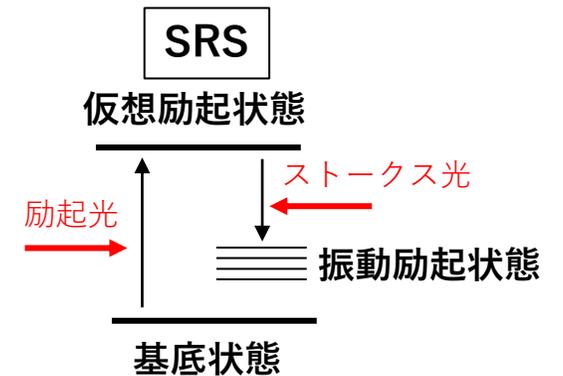
## ・電磁誘導透過(EIT, Fano効果)の応用による透過率の制御

外部からの光入射により、光吸収が起こらない状態を作り出す  
→原型炉の光学的厚さの制御



## ・誘導ラマン散乱 (SRS)による分子の振動状態の制御

外部からの光入射により、分子の振動励起状態を作り出す  
→分子活性化再結合の促進



## ・光渦と原子・分子過程の相互作用

近年の技術開発により可視域、ミリ波→VUV、X線、 $\gamma$ 線の光渦が可能  
→波長  $\leq 1 \text{ \AA}$  →原子・分子内の電子との相互作用

装置：

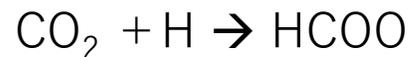
HYPER-I、UVSOR、CoBIT(?), TPD-II(?)  
新たにテーブルトップ装置を製作

計測：

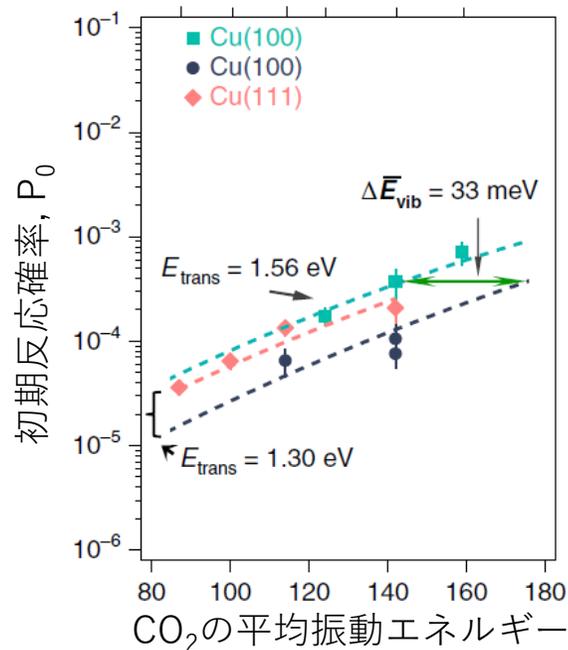
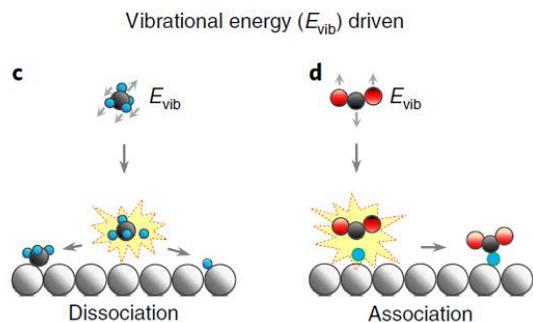
分光、吸収分光  
LIF

# プラズマバイオ, SDGs, 宇宙空間における生命材料物質の形成メカニズム解明への展開

分子の振動状態が化学反応速度に影響を与える例：



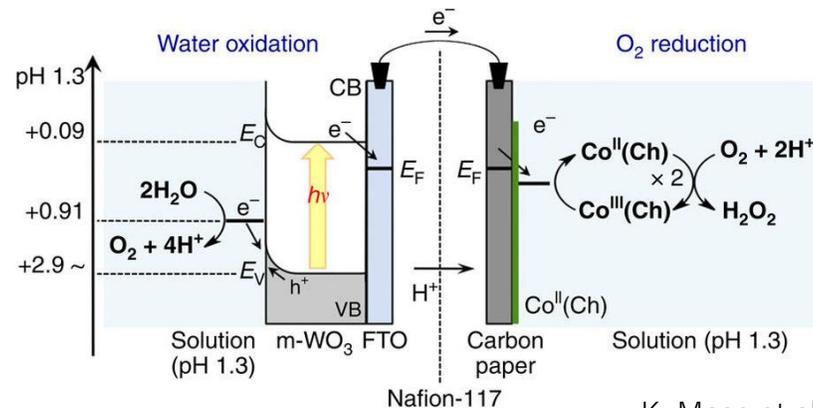
反応速度はCO<sub>2</sub>の振動エネルギーとともに増加。



J. Quan et al., Nat. Chem. **11** (2019) 722.

光、プラズマ等を用いた酸素の生成、CO<sub>2</sub>を分解する試み：  
ソーラー燃料(Solar fuel), OPTIMiSm, MOXIE …

## 光触媒によるH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(ソーラー燃料)の生成

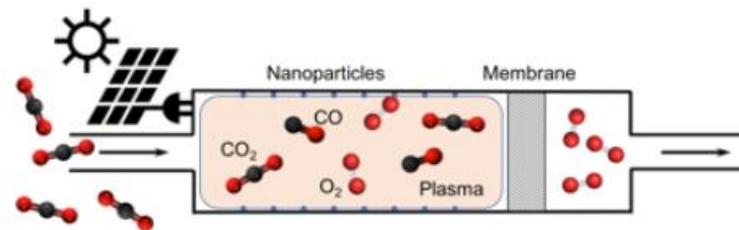


K. Mase et al., Nat. Commun. 7:11470 (2016).

## OPTIMiSm

= Plasmolysis + electrocatalysis  
+ electrochemical separation membrane

プラズマを用いたCO<sub>2</sub>の分解： $2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$



<https://list.solar/solar-fuel/>

22 February 2022, <https://www.ptn.pt/tecnico.ulisboa.pt/OPTIMiSm/index.html>

<https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments/moxie/>

# プラズマバイオ, SDGs, 宇宙空間における生命材料物質の形成メカニズム解明への展開

星間・星周媒質で130種以上の有機物が確認されている → アミノ酸前駆体の形成、生命の起源

Table 2  
Molecules<sup>a</sup> detected in the interstellar or circumstellar medium H. S.P. Mueller et al., J. Mol. Struct. **742** (2005) 215.

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	12 atoms	>12 atoms
H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> *	<i>c</i> -C <sub>3</sub> H	C <sub>5</sub> *	C <sub>5</sub> H	C <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N (?)	HC <sub>9</sub> N	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> * (?)	HC <sub>11</sub> N
AlF	C <sub>2</sub> H	<i>l</i> -C <sub>3</sub> H	C <sub>4</sub> H	<i>l</i> -H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	CH <sub>2</sub> CHCN	HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO			
AlCl	C <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> N	C <sub>4</sub> Si	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> *	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> COOH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	(CH <sub>2</sub> OH) <sub>2</sub> (?)			
C <sub>2</sub> **	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> O	<i>l</i> -C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> CN	HC <sub>3</sub> N	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	H <sub>2</sub> NCH <sub>2</sub> COOH, Glycine?			
CH	CH <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	<i>c</i> -C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> NC	CH <sub>3</sub> CHO	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	HC <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO			
CH <sup>+</sup>	HCN	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> *	CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> OHCHO	C <sub>8</sub> H				
CN	HCO	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub> *	CH <sub>3</sub> SH	<i>c</i> -C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	<i>l</i> -HC <sub>6</sub> H* (?)					
CO	HCO <sup>+</sup>	HCCN	HC <sub>3</sub> N	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> CCHOH	CH <sub>2</sub> CHCHO (?)					
CO <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	HC <sub>2</sub> NC	HC <sub>2</sub> CHO							
CP	HOC <sup>+</sup>	HNCO	HCOOH	NH <sub>2</sub> CHO							
SiC	H <sub>2</sub> O	HNCS	H <sub>2</sub> CNH	C <sub>3</sub> N							
HCl	HOCO <sup>+</sup>	HOCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O	<i>l</i> -HC <sub>4</sub> H* (?)							
KCl	HNC	H <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> NCN	<i>l</i> -HC <sub>4</sub> N							
NH	HNO	H <sub>2</sub> CN	HNC <sub>3</sub>								
NO	MgCN	H <sub>2</sub> S	SiH <sub>4</sub> *								
NS	MgNC	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>								
NaCl	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	<i>c</i> -SiC <sub>3</sub>									
OH	N <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> *									
PN	NaCN										
SO	OCS										
SO <sup>+</sup>	SO <sub>2</sub>										
SiN	<i>c</i> -SiC <sub>2</sub>										
SiO	CO <sub>2</sub> *										
SiS	NH <sub>2</sub>										
CS	H <sub>3</sub> <sup>+</sup> *										
UF	H <sub>2</sub> P <sup>+</sup>										

星間物質の化学進化におけるプラズマ-固体相互作用の重要性：  
 プラズマや紫外線、宇宙線が星間微粒子に照射され、微粒子固体表面を“触媒”  
 として作用させることで化学反応が促進する

## 未解明の課題：

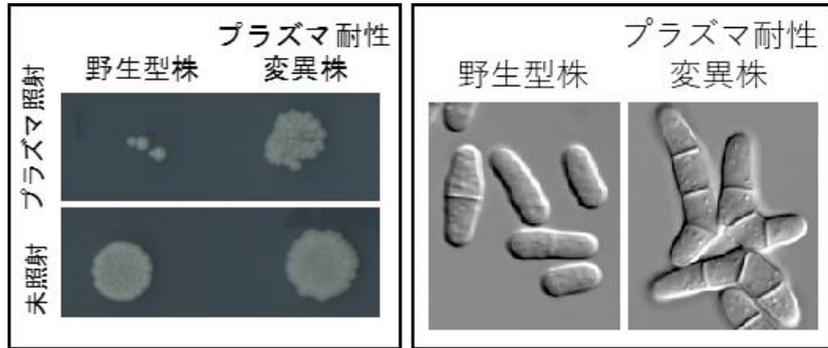
プラズマ中の電磁場と光による原子・分子過程（光解離、光分解、光励起）の相互作用が有機物分子の形成にどのように影響するのか？

- 有機物のラーマ運動と光の向き、偏向の向きによる影響
  - 偏光ビーム等を照射したときのホモキラリティの生成への影響
  - 分子の光吸収が光の進行方向と磁場ベクトルの平行・反平行によって変化する磁気キラル二色性の影響
- 磁場構造の影響（磁気島、ストキャスティック磁場）、磁場強度の影響
- プラズマパラメータ（温度、密度、電離度）の影響

# プラズマバイオ プラズマの直接照射が生物に与える影響の研究

## 真核モデル生物（分裂酵母：*S. pombe*）への照射 （基生研、アストロバイオロジーセンター）

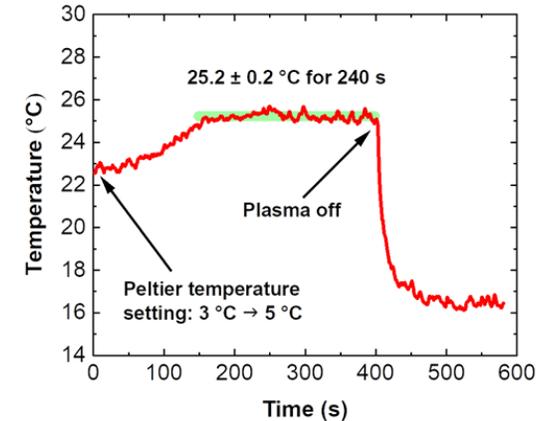
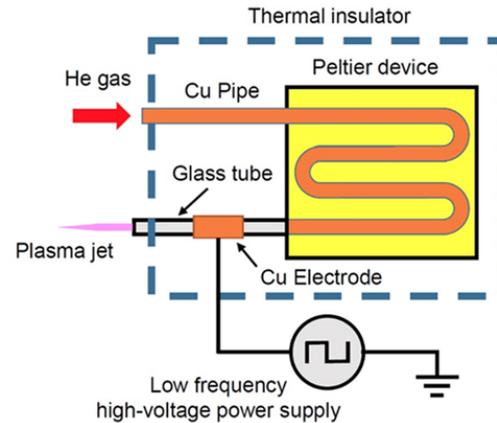
- プラズマ直接照射による遺伝子発現変化の網羅的解析
- プラズマ耐性変異体の単離と解析



プラズマ耐性変異体は野生型株の増殖を著しく阻害するプラズマに耐性を示す

プラズマ耐性変異体は細胞分裂に異常を示す  
→ 変異の原因遺伝子の決定  
細胞分裂終盤に働く遺伝子群の発現を制御する転写因子に欠損？

## 生物に直接照射可能なプラズマジェットの開発 （核融合研、名大低温プラズマセンター）



ペルチェ素子により放電部へ導入するガス温度を制御することにより、照射対象の温度を長時間室温に保つことに成功

真空紫外吸収分光による酸素・窒素単原子計測  
レーザー誘起蛍光法によるラジカル（活性種）計測

プラズマに対する細胞応答の遺伝子レベルでの解明

より複雑な高等真核生物へと研究を展開

- 分裂酵母で見出したプラズマ耐性関連因子の哺乳類相同因子の解析