

PANTA, PLATO, QUESTが拓く核融合の未来

九州大学応用力学研究所 核融合力学部門
極限プラズマ研究連携センター
藤澤彰英

謝辞：稲垣滋、糟谷直宏、小菅佑輔、渡辺英雄、徳永和俊、
長谷川真、文賛鎬、西澤敬之、花田和明、出射浩、井戸毅、
永島芳彦、池添竜也、恩地拓己、大澤一人、
伊藤公孝、松岡啓介、吉田直亮



燃焼プラズマの時代

新しい時代に向けて

燃焼プラズマの新時代

実証
開発
研究

ITER



QUEST 6h 定常運転
2020

JT60SA

Triam 5h 定常運転
2003

W7X

閉じ込め最適化



LHD



JT60 JET



TFTR
アイソトープ効果
パワーデグラデーション

帯状流の検証

JET
59 MJ 達成
nature 2022

Hモードの発見
1982 ASDEX

2004 CHS
非局所輸送

改善閉じ込め

基礎学術研究

核融合プラズマ
未解決問題の解決

遠非平衡強非線形
新しい物理学

核融合炉技術基盤
の確立

極限材料と極限状態
の制御

多世代にわたる人材
確保と伝承

スペシャリストと
ジェネラリスト

炉実証と学理探求のバランスの取れた研究が重要

九大 核融合プラズマグループ

高温プラズマ理工学センター

教授 5名 出射、花田、井戸、藤澤、稲垣

準教授 4名 永島、池添、渡辺、徳永

助教 2名 恩地、長谷川

学術研究員 1名 黒田



QUEST

双方研究拠点



PANTA

磁場閉じ込めプラズマ
実験・理論・シミュレーション
材料と壁相互作用



PLATO

核融合力学部門

教授 2名 藤澤、稲垣

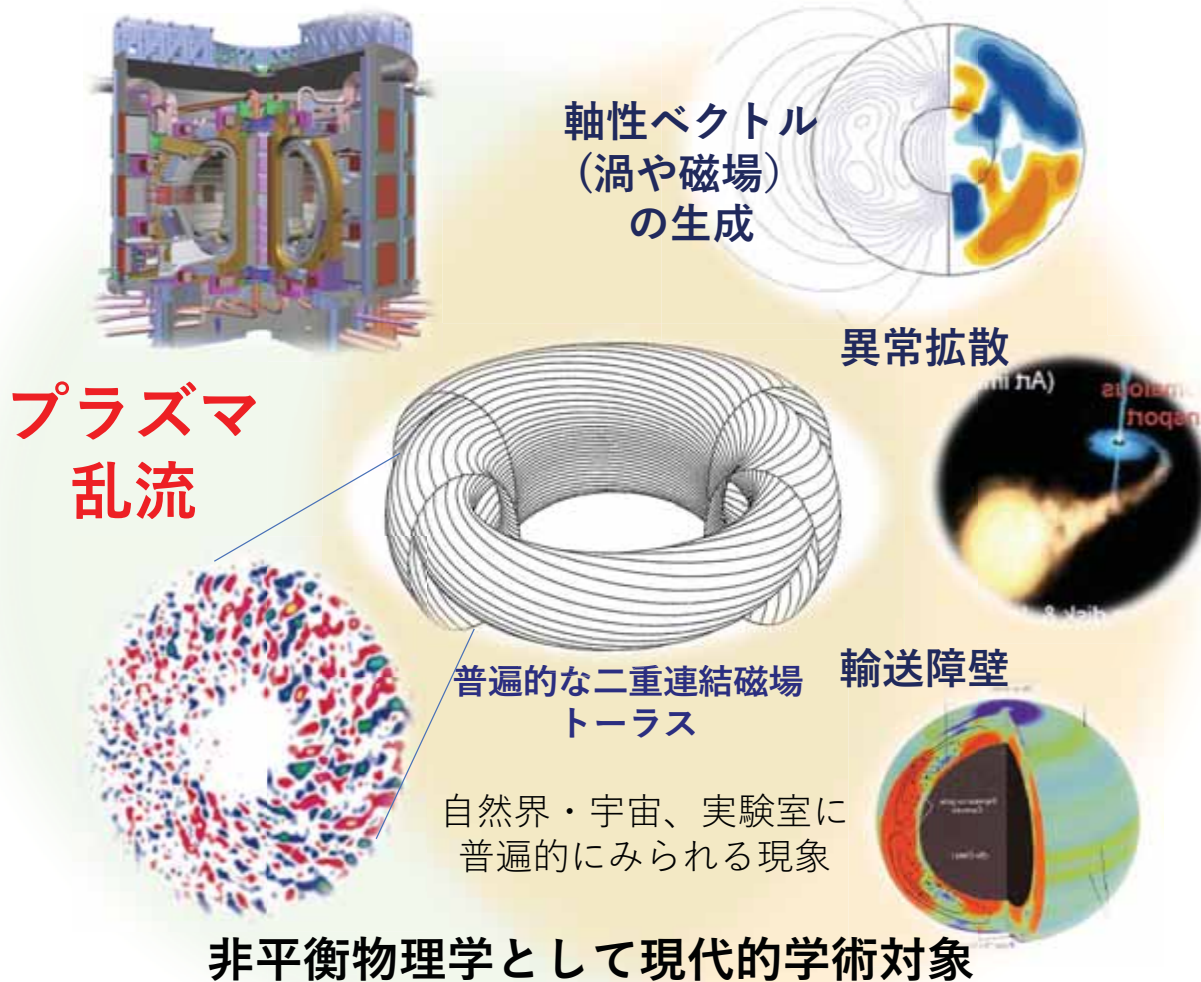
准教授 4名 渡辺、徳永、糟谷、小菅

助教 3名 大澤、長谷川、文、西澤

プラズマ核融合の統合的研究環境が実現

核融合力学部門 プラズマ乱流研究

多数の競争的資金獲得による運営



プラズマ
乱流

特別推進研究(2004-2008)
基盤研究S(2009-2013)

機動性の高い
乱流プラズマ実験

PANTA



特別推進研究(2017-2021)

乱流研究の新パラダイムに基づき

PANTA+PLATO

乱流場の大域精密観測
トモグラフィー+HIBP

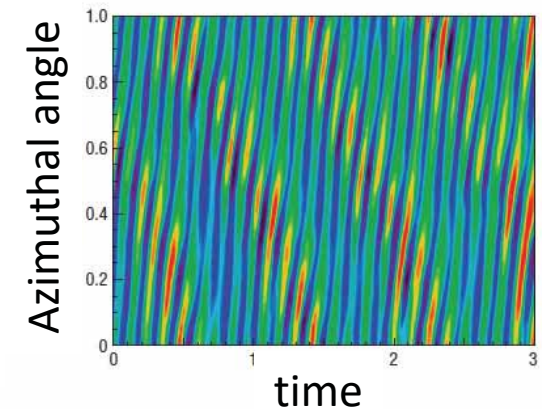
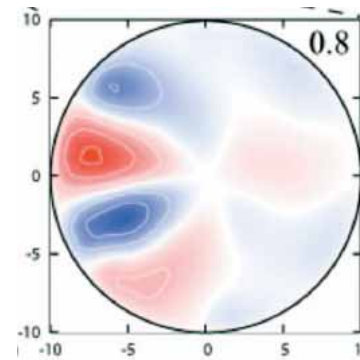
核融合プラズマ未解決問題の解決

自然と炉心プラズマの理解を目指した乱流プラズマ研究

PANTA 帯状流 ストリーマ 強相関乱流など

特別推進研究(2004-2008) 基盤研究S(2009-2013)

ストリーマの発見



LETTERS

乱流と帯状流の相互作用 強相関乱流の概念の提唱

Anatomy of plasma turbulence

TAKUMA YAMADA^{1*}, SANAE-I. ITOH¹, TAKASHI MARUTA², NAOHIRO KASUYA³, YOSHIHIKO NAGASHIMA¹, SHUNJIRO SHINOHARA², KENICHIRO TERASAKA², MASATOSHI YAGI¹, SHIGERU INAGAKI¹, YOSHINOBU KAWAI¹, AKIHIDE FUJISAWA³ AND KIMITAKA ITOH³

¹Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

²Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga, Fukuoka 816-8580, Japan

³National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki, Gifu 509-5292, Japan

*e-mail: takuma@riam.kyushu-u.ac.jp



プローブによる成果 (双子のソリトンの発見など)

F. Kin et al, Phys. Plasmas **25**, 062304 (2018)

F. Kin et al, Phys. Plasmas **26**, 042306 (2019)

H. Arakawa et al, Phys. Plasmas **26**, 052305 (2019)

T. Yamada et al, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 034501 (2018)

Y. Kawachi et al., Plasma and Fus. Res., **13** 3401105 (2018)

www.nature.com/scientificreports

SCIENTIFIC REPORTS

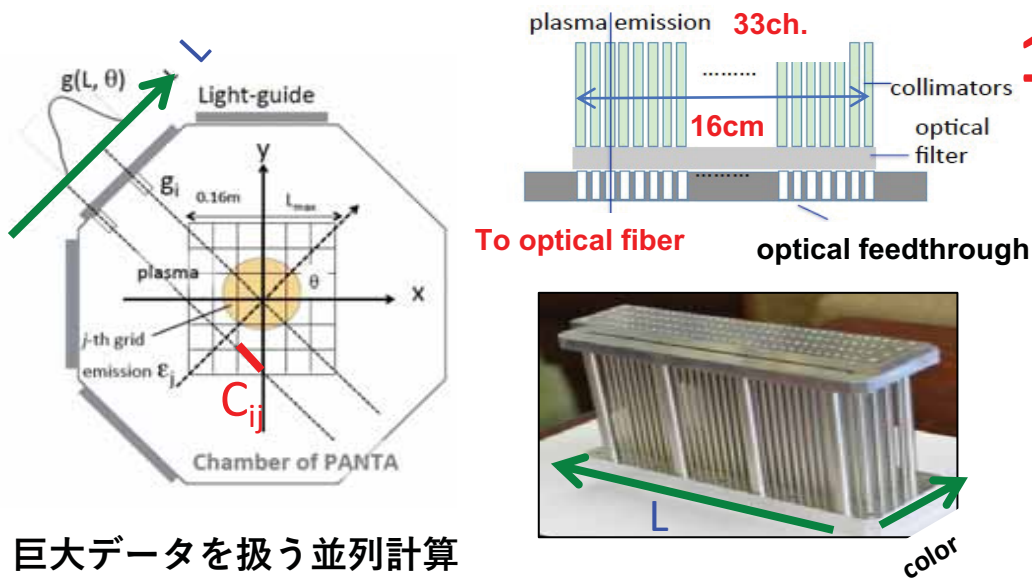
OPEN A Concept of Cross-Ferroic Plasma Turbulence

S. Inagaki^{1,2}, T. Kobayashi¹, Y. Kosuga⁴, S.-I. Itoh^{1,2}, T. Mitsuono⁵, Y. Nagashima^{1,2}, H. Arakawa⁶, T. Yamada⁷, Y. Miwa⁸, N. Kasuya^{1,2}, M. Sasaki^{1,2}, M. Lesur¹, A. Fujisawa^{1,2} & K. Itoh^{2,3}

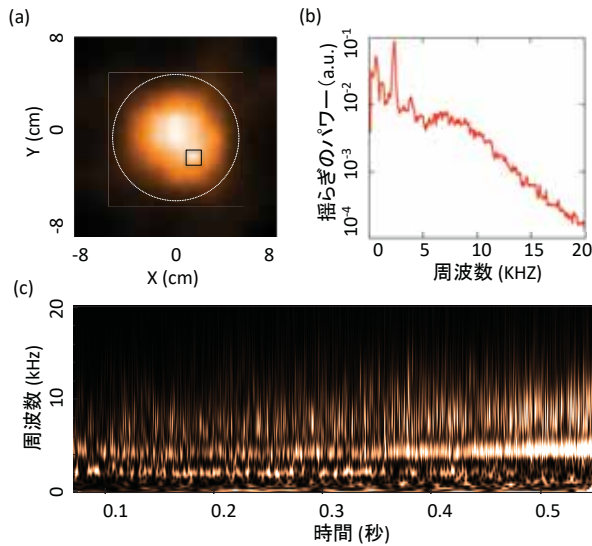
Received: 23 July 2018

プラズマ中には不均一に起因する様々な揺動が存在。
構造やダイナミクスを決定づける

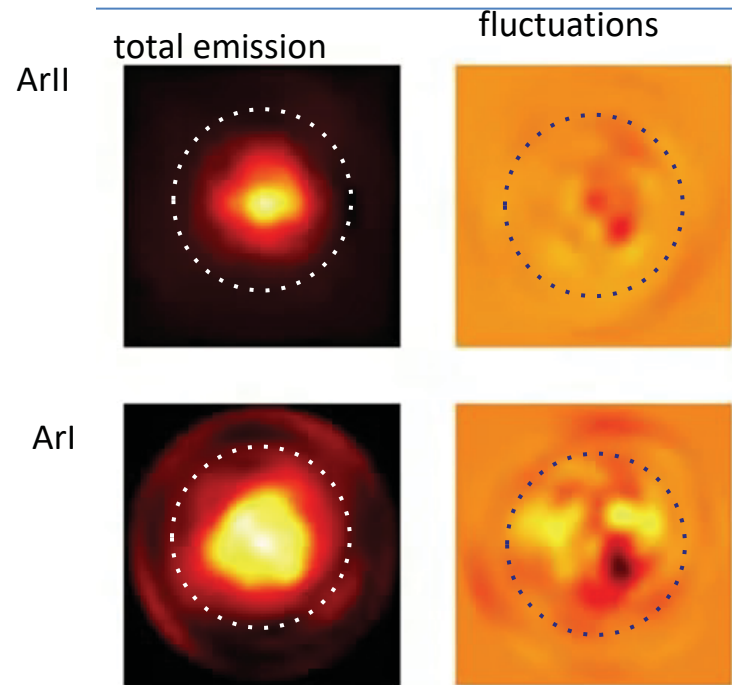
PANTA 乱流トモグラフィの開発



巨大データを扱う並列計算



PLATO, PANTAの
トモグラフィ 観測がパリティに



トモグラフィによる乱流計測 (多波長) に成功

PANTA & PLATO

乱流トモグラフィーの開発

乱流の多次元計測へ向けて

scientific reports

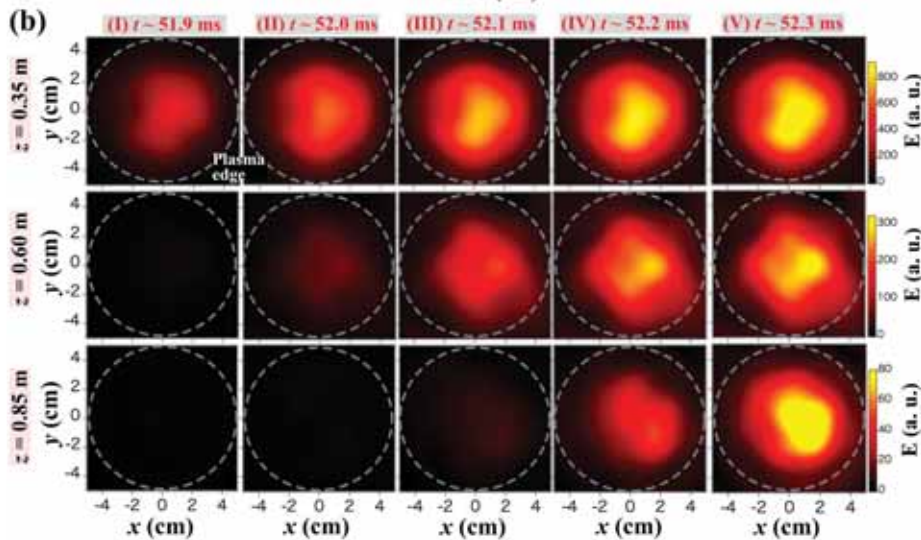
132 ch x 2 + 128 = 392

Check for updates

~ 1 Gb

OPEN The first observation of 4D tomography measurement of plasma structures and fluctuations

PANTA プラズマ三断面の同時観測



高解像度トモグラフィーの実現

K. Yamasaki et al., Rev. Sci. Instrum. **91**, 033502 (2020)

Fourier-Bessel 関数を使った先進構造解析

K. Yamasaki et al., Rev. Sci. Instrum. **88** 93507 (2017)

Fourier-Rectangular Function Analysis の提案

K. Yamasaki et al., J. Appl. Phys., J. Appl. Phys. **126** 043304 (2019)

モニター用の速いアルゴリズムの開発

K. Yamasaki et al., Plasma Fus. Res. **12**, 1201045(2017)

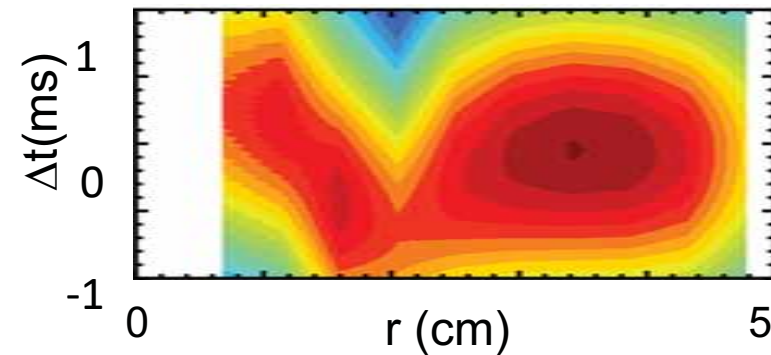
Stokes Parameterによるダイナミクスの解析

A. Fujisawa et al., Phys. Plasmas **26** 012305 (2019)

多波長観測による温度と密度測定の実現

Y. Nagashima et al., JPSJ **89**, 093501 (2020).
(Received May 7, accepted Jun 30 2020)

FRF解析—結合の伝搬の可視化



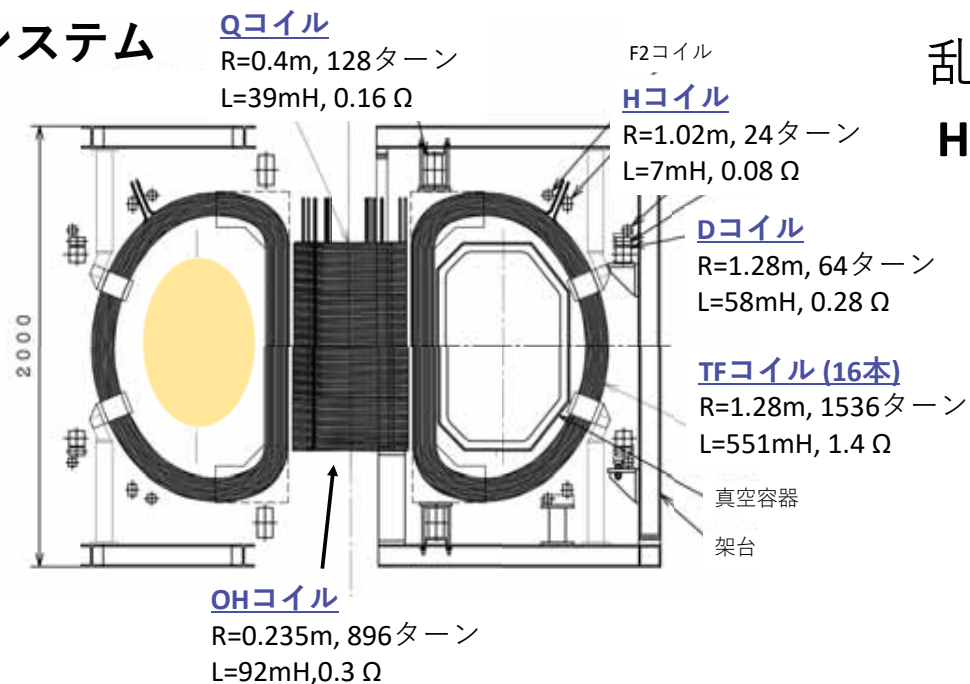
科学新聞に掲載

乱流の画像診断法の開発

PLATO 装置概要

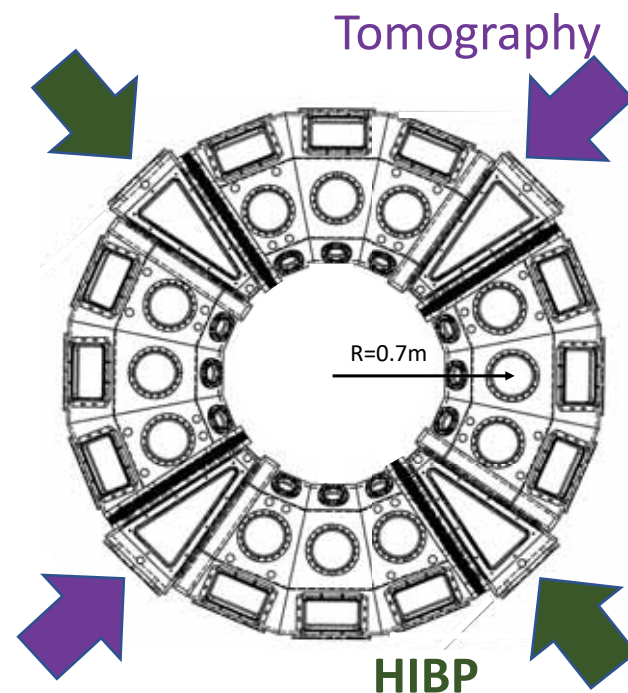
特別推進研究(2017-2021)

コイルシステム



乱流トモグラフィーによる大域計測

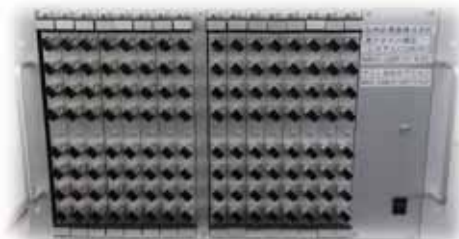
HIBPによる局所精密計測



Ha, UV, SXによる乱流トモグラフィー

256 ch x6=1536

低コスト化の試み



2万円/ch

高い近接性! 112個のポート群!
内側アクセス可能!

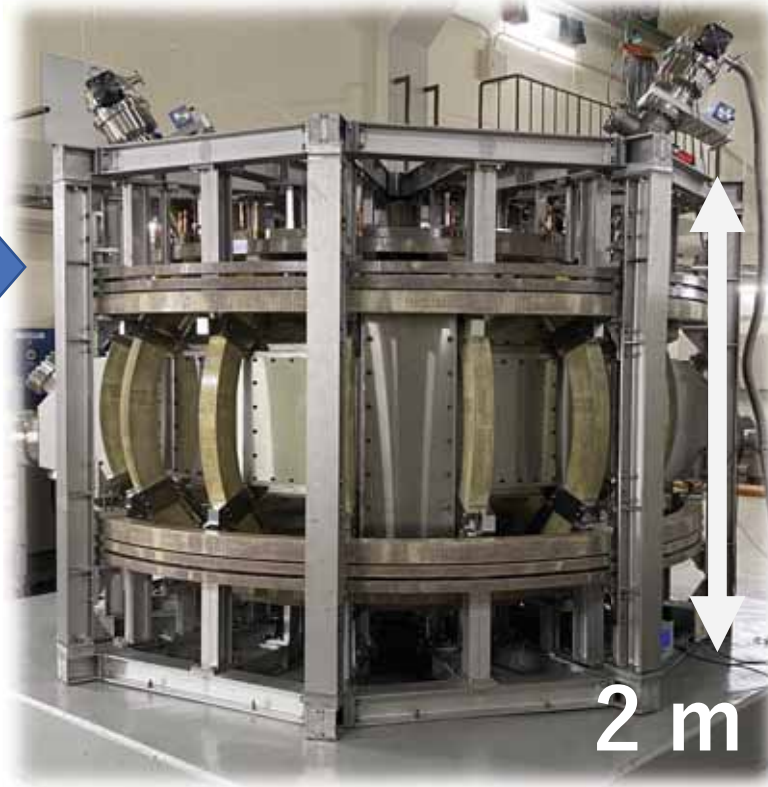
PLATO 現状

PLATO (PLAsma Turbulence Observatory)

2019年6月 現地調査時



2019年12月 組立完了時



2020年7月



低コスト化の試み

東工大 飯尾嶋田研
自励型フライホイール

トロイダル系電源 ~ 1 MJ



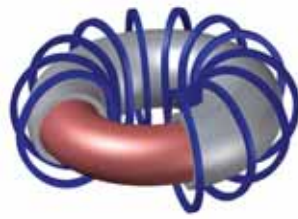
ポロイダル系電源 ~ 1 MJ

**2022年度
局所ヘリシティ入射実験開始**

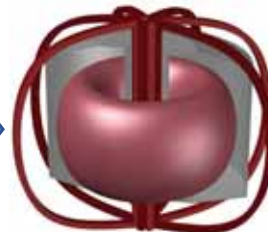
高温プラズマ工学センター

定常維持と壁相互作用

トカマクの定常制御（極限制御）を目指して



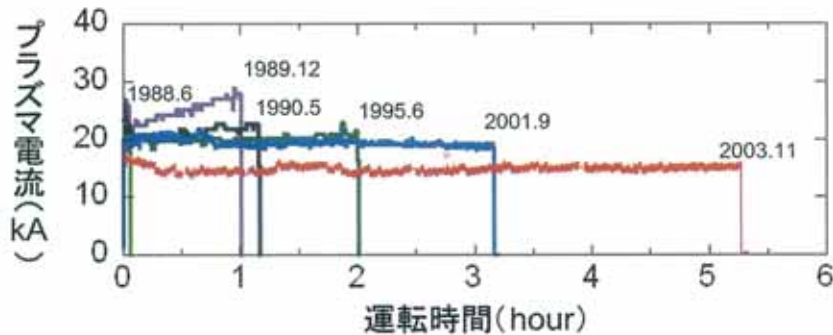
超伝導強磁場
高アスペクト比
ステンレス壁
LHCD



常伝導
低アスペクト比
タングステン高温壁
ECCD



九州大学における連続運転記録更新の歴史



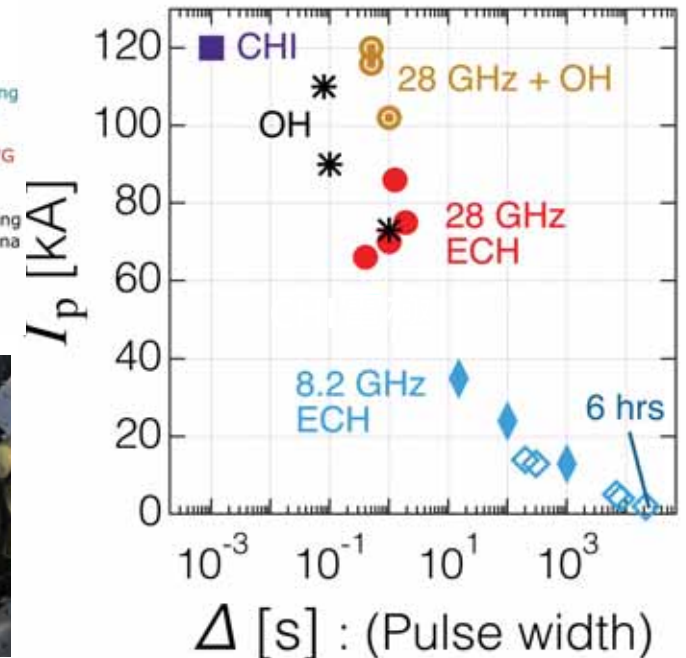
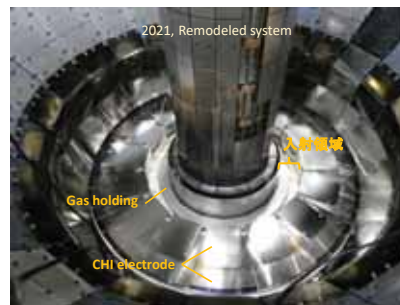
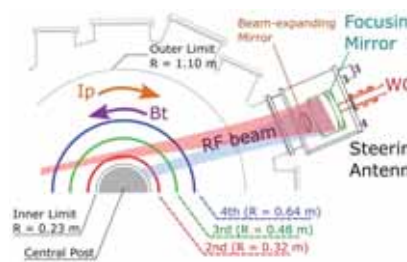
解明 堆積薄膜+水素共堆積と再放出

Mizuki Sakamoto et al. NF誌 2004



解決法：能動的壁制御→高温壁

ECH/CDシステム

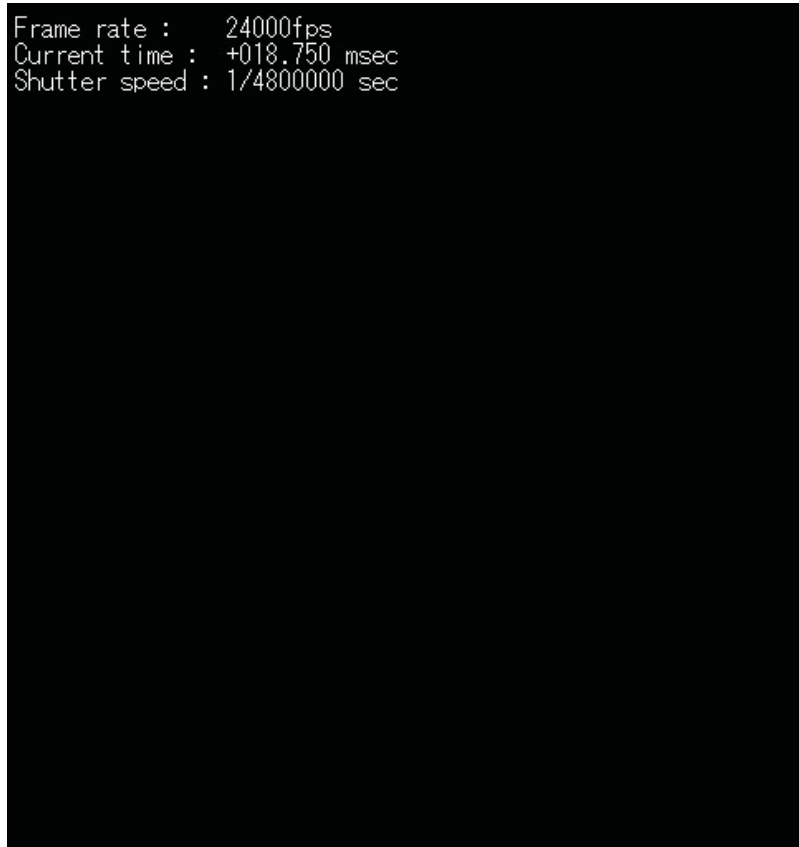
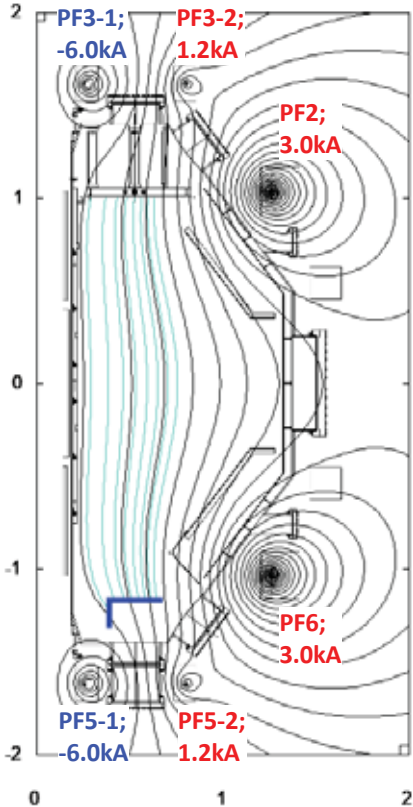


QUEST 同軸ヘリシティ入射装置

米国予算で設置 CHIによるプラズマ生成 成功

#47679

入射磁束配位



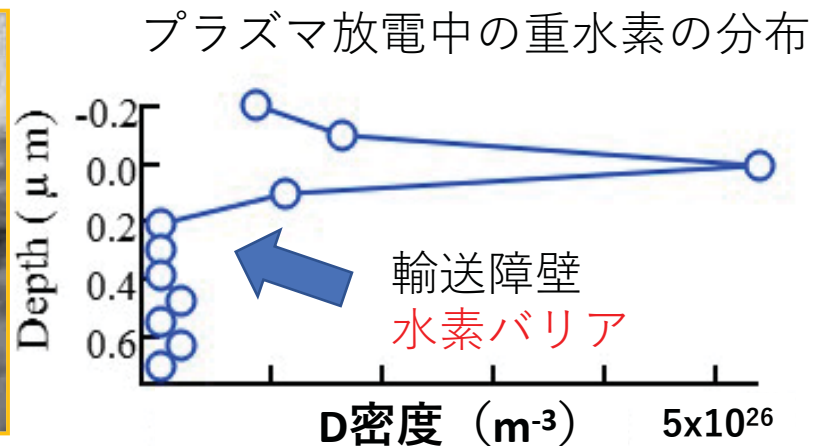
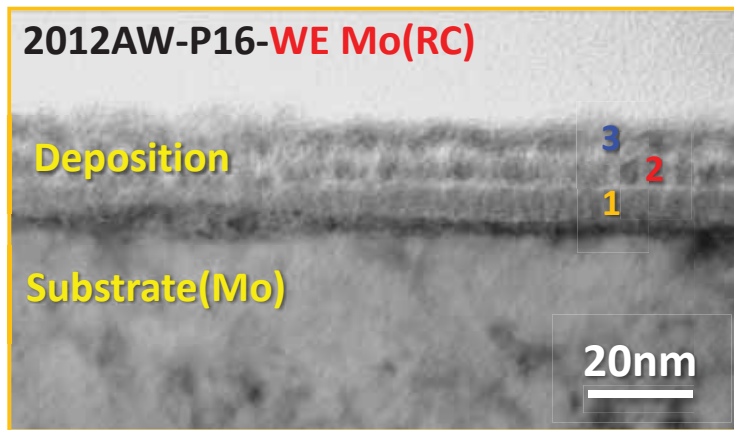
1) 確実なBreakdown発生条件を確立 Breakdown condition,

	Feb.2021	→ Dec.2021
V _{el}	1600V(Max)	>1000V
P _{gas}	1.0MPa	0.1~0.3MPa
Ψ _{inj}	<8mwb	~15mWb
	磁束量が増えるにつれ発生率低下	発生率100%

- 2) 高入射磁束配位放電において100kA以上の電流駆動を安定に達成。
トムソン散乱計測において $n_e \sim 6e19/m^3$ を観測
- 3) 磁束発展に高い垂直磁場(PF26電流)が必要とされる。(発展がし難い。)

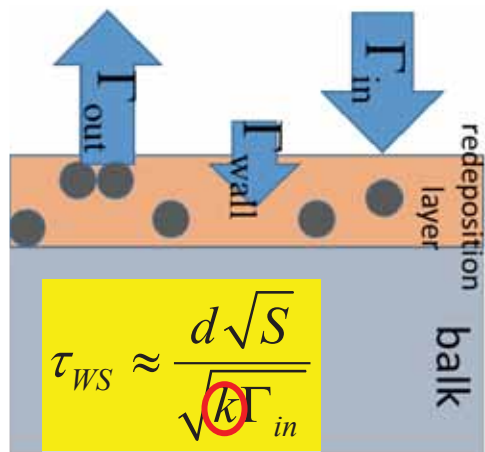
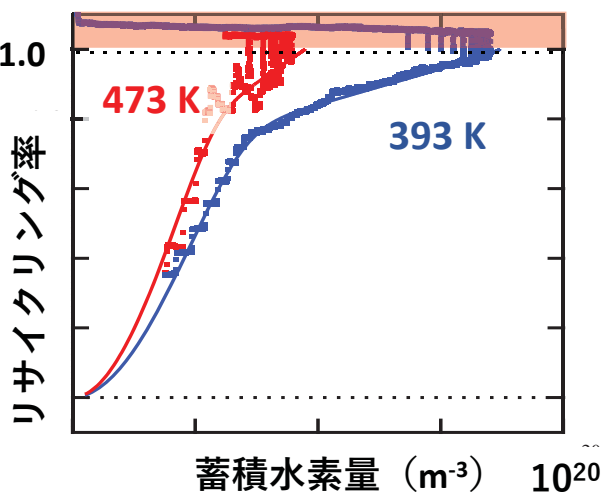
電極配位と入射電流分布に依存する垂直磁場の最適化

QUEST 高温壁 水素輸送バリアー



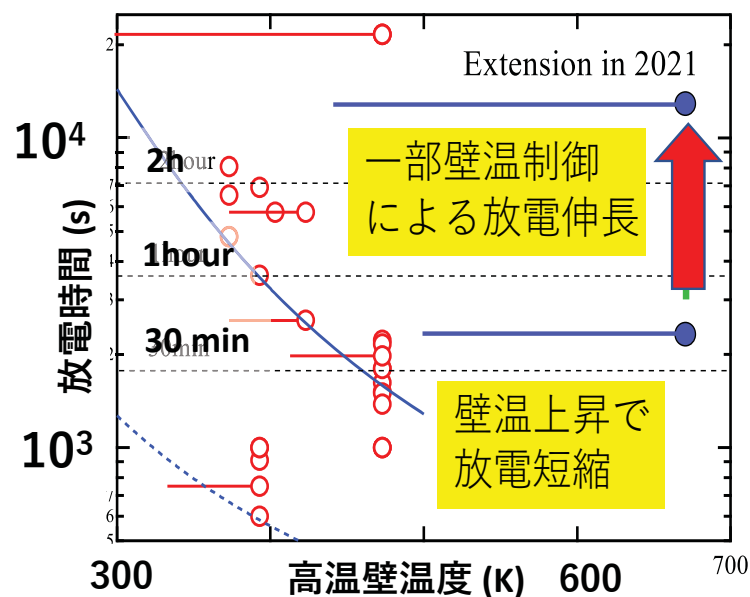
壁温は表面再結合を通じてリサイクリングに影響

リサイクリング率の温度依存性



壁飽和の時定数

Hanada, K., et al., J. Nucl. Mater. (2015)



壁制御による炉心プラズマ制御法を開拓

プラズマグループの国際連携

中国科学院
EAST (定常運転)
拠点国際化推進



Max-Planck 研究所
極限プラズマ研究連携センター

RIAM プラズマG



中国西南物理研究所
HL2A
極限プラズマ研究連携センター



ソウル大
VEST (日中韓フォーサイト事業)

PPPL
(日米科学技術協力協定)
CHI/EBW-ECCD、高温壁



日仏連携研究所

Aix-Marseille 大学、CNRS、九大、NIFS、阪大



EPS+IoPP

九州大学伊藤プロジェクト賞



Warwick 大学
極限プラズマ研究連携センター



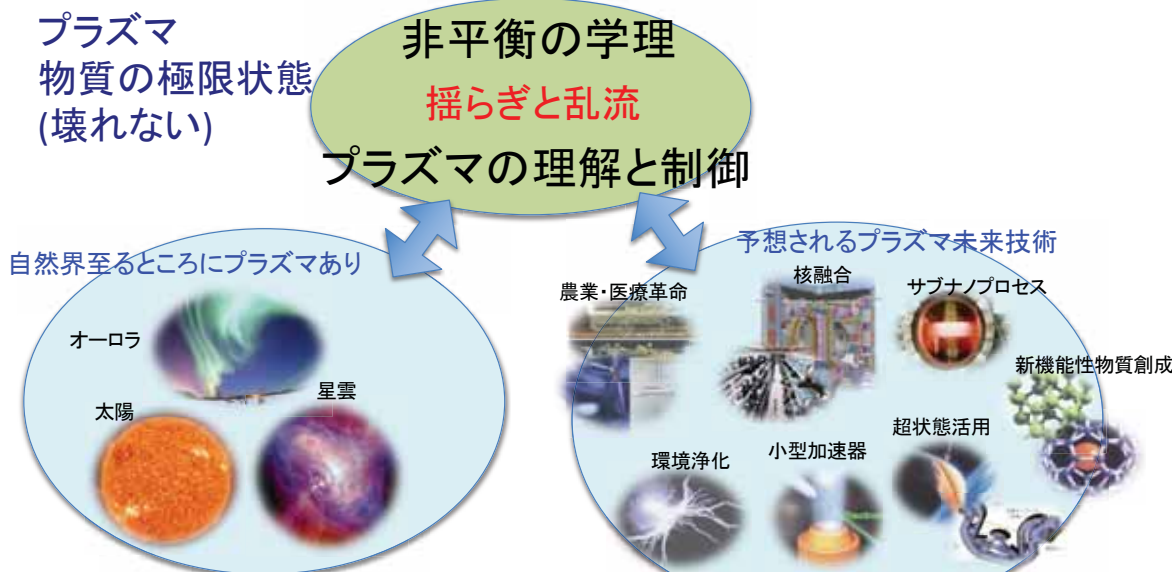
2021 16th Winner

国際教育研究拠点としても顕著な実績

九大 極限プラズマ研究連携センター

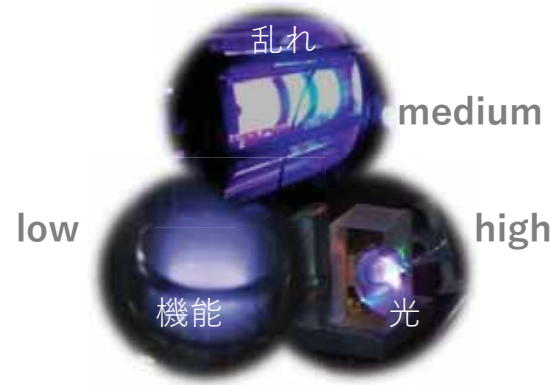
プラズマから非平衡の学理の確立を目指して

プラズマは自然の理解と現代文明の基幹



21世紀の物理学-流転する自然の理解
 自然・宇宙の構造とダイナミクスの解明
 軸性ベクトル(磁場・渦)の生成起源の理解
 複雑系システムの自律形成機構解明
 非平衡プラズマ科学の創始

プラズマ未来技術の実現 SDGs
 極限状態制御: 熱を低温から高温へ
 原子を壊して自由に再構築
 原子レベルの形状(大量)制御
 植物の成長(生物)を制御する



非平衡極限プラズマ全国共同ネットワーク計画

マスタープラン2011, 2014, 2017の優先課題, ロードマップ2011, 2014の重点課題, マスタープラン2020 カテゴリーII



終わりに



○ 燃焼プラズマの実現と核融合研究の新時代

- 多くの未解決問題や開発すべき技術が残されている。
- 今後は、**開発と学術を両輪**としてバランスの取れた研究。
- 大学では、基礎学術研究、長期展望に立った若手の育成が重要。

○ 応用力学研究所はプラズマ核融合の国際総合拠点

- 実験と理論シミュレーションの統合環境。プラズマ核融合の国内外の拠点としての業績あり。
- PANTAとPLATOにおける乱流プラズマの研究。多次元画像解析（局所精密大域計測へ）。
- QUESTにおける定常プラズマ研究、壁制御による炉心の能動制御。
- 炉はプラズマと壁が密接に相互作用する統合システム。新たな学術研究領域。

○ 極限プラズマから新学術開拓と技術革新へ。

July 2022- Jun 2023
IYBSSD and IUPAP100

