

JT-60SAの加熱実験に向けた体制と 研究計画

量子科学技術研究開発機構
先進プラズマ第1実験グループリーダー
JT-60SA実験リーダー
吉田 麻衣子

ITER/BA/原型炉 科学技術意見交換会
令和7年6月3日
オンライン(MS-Teams)

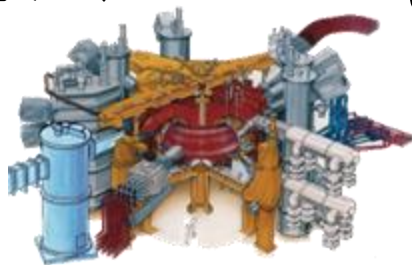
JT-60SA計画



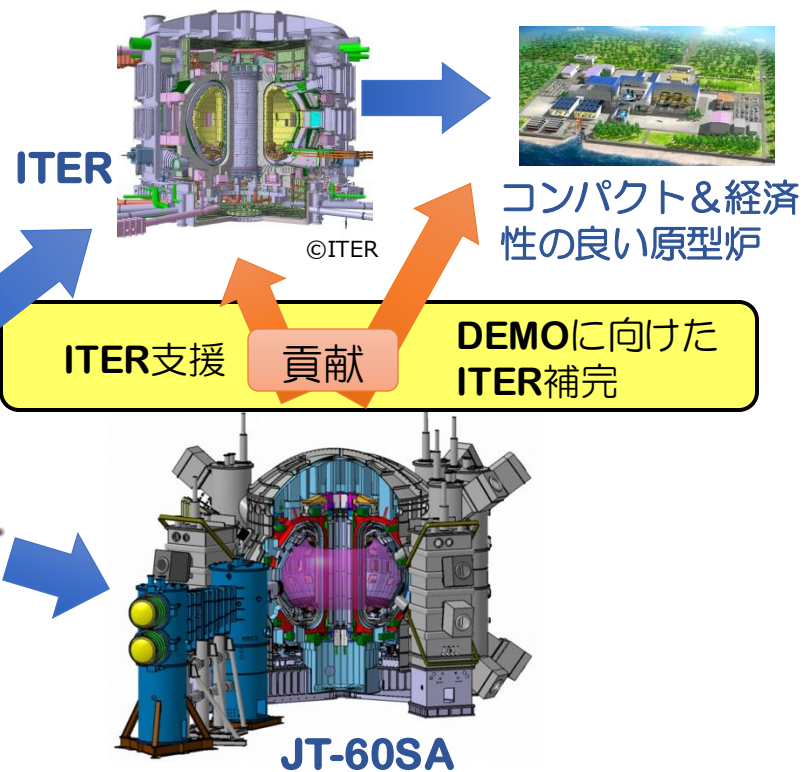
JT-60SA計画は、幅広いアプローチ活動として日欧共同で実施するサテライト・トカマク計画と、
日本のトカマク国内重点化装置計画の合同計画

本プロジェクトの大目標は、核融合炉早期実現
“2030年代の発電実証”への貢献

- ❖ **ITER**の技術目標達成のための支援研究
 ITER運転シナリオの最適化、リスク低減等
- ❖ **原型炉**に向けたITERの補完研究
 高出力の核融合炉を実現に向けた、
 高い圧力のプラズマを長時間
- ❖ **人材育成**
 核融合研究開発を主導できる
 研究者・技術者



JT-60



内容



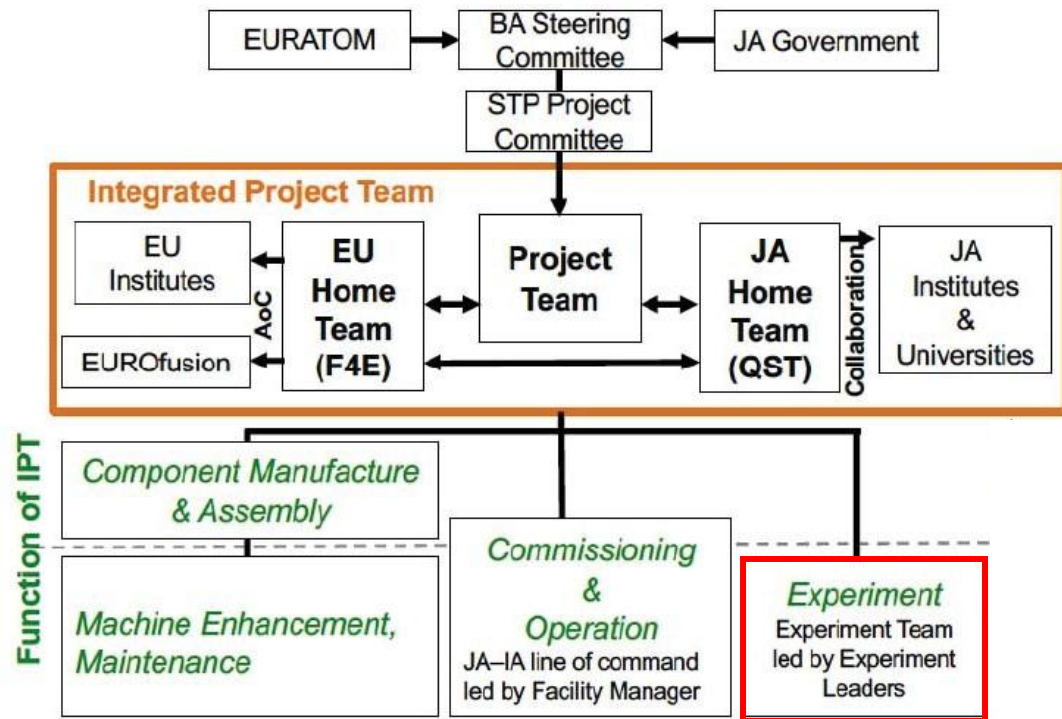
1. JT-60SAの実験体制
2. JT-60SAの研究計画

JT-60SA計画の体制

JT-60SA計画では、装置増強／維持、統合試験／運転、プラズマ実験の3つの活動がある。

- 装置増強／維持と統合試験／運転は、日欧の実施機関(QSTとFusion for Energy)により実施される。
- プラズマ実験はJT-60SA実験チームの下で実施される。

2023年の統合試験運転の終了を受けて、2024年5月から実験チーム員が正式に発足し、活動を開始。



JT-60SA実験チーム

JT-60SA

実験リーダー

日欧調整



欧州



日本



Maiko Yoshida, Jeronimo Garcia, Hajime Urano

目的達成のためのワンチーム精神
当初から日欧の研究者・技術者が一緒に研究・開発を行うことで、国際的な感覚を養う。壁をなくす。

専門グループリーダー

Operation Regime Development

Takuma Wakatsuki
(QST, Japan)



運転領域開発

MHD Stability and Control

Gianluca Pucelli
(ENEA, Italy)



MHD安定性と制御

Transport and Confinement

Luca Garzotti
(UKAEA, U)



輸送と閉じ込め

High Energy Particle Behavior

Yevgen Kazakov
(LPP-ERM/KMS, Belg)



高エネルギー粒子

Pedestal and Edge Physics

Nobuyuki Aiba
(QST, Japan)



周辺ペデスタル物理

Divertor, SOL and PMI

Tomohide Nakamura
(QST, Japan)



ダイバータ・SOL及び
プラズマ対向材料

JT-60SA実験チームの主な役割:

- 実験計画の立案と遂行、実験結果の総括
- JT-60SAのプラズマ実験に関するデータ解析、モデリング・シミュレーション
- JT-60SAのプラズマ研究に関する外部発表の議論
- 研究ニーズに応じた装置増強の提案

各研究者は専門グループに所属し、
JT-60SA実験に向けた研究活動を行う。

JT-60SA実験チームの活動内容



2024-2025年の主目標と活動

- 次期実験フェーズの運転シナリオ及び運転領域の評価
 - プラズマモデル・シミュレーションコードを用いた予測研究
- 次期実験フェーズの実験計画の具体化
 - 先の統合機能試験結果のデータ解析と上記のプラズマ予測研究を基に、実験計画を立案
 - ITERのHigh priority issuesを踏まえた優先研究項目の検討
- タングステン壁・ダイバータ移行要件の評価
 - 既存のタングステン壁・ダイバータ装置の実験結果、研究項目の評価
 - プラズマモデル・シミュレーションコードを用いたシナリオ検討
- 実験チーム会合、専門グループ会合を定期的に行う
 - 実験チーム会合：年度計画、各種方針、JT-60SA計画の進捗を共有
 - 専門グループ会合：データ解析やモデリングの結果、実験提案を議論

国内における研究活動の強化



「JT-60SA計画は、幅広いアプローチ活動として日欧共同で実施するサテライト・トカマク計画と、**日本のトカマク国内重点化装置計画の合同計画**」

JT-60SA実験チームに参加頂く際は、QSTとの共同研究契約(トカマク炉心プラズマ共同研究、オンサイトラボ契約等)を締結して頂く。

- QSTの研究協力者からの科学的なサポート
- 交通費・滞在費のサポート(条件有り)

2025年開始時の募集は終了したが、上記の共同研究を締結して頂くことで、**随時応募が可能**。



The screenshot shows the official website of the JT-60SA team. The top navigation bar includes links for HOME, 協賛について, 研究開発体制, 外部連携, お知らせ・ご案内, and 特刊/データベース. The main content area features a large image of the tokamak facility and a section titled 'JT-60SA実験チーム' (JT-60SA Experiment Team). Below this, there is a detailed description of the team's goals and activities, including a list of team members and their roles. The right sidebar contains social media links and a list of recent news items.

JT-60SA実験チームのご案内
<https://www.qst.go.jp/site/jt60/team.html>

目的に応じた共同研究や教育の場を整備

炉心プラズマ共同研究:

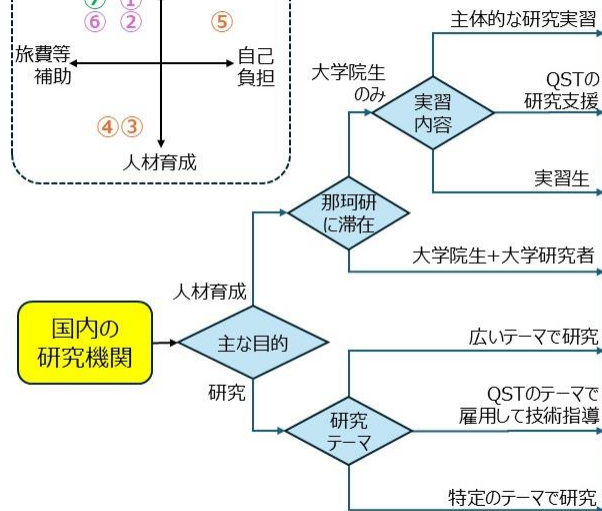
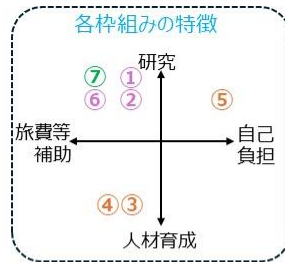
JT-60SAを活用した研究を行う制度

オンサイトラボ共同研究:

JT-60SAを活用した教育を行う制度

研究環境・生活環境の整備:

研究サイト、居室・研究議論用のスペース、移動手段・宿泊施設を整備中



QST全体の枠組み、連携協定に基づく枠組み、炉心プラズマ共同企画委員会

制度名	募集	期間	交通費	滞在費	奨励金 給与等	報告書	報告会
① スチューデント リサーチャー	11月	～1年	○	—	月 10万円	要	—
② リサーチ アシスタント (競争的資金)	年3回	～1年	○	—	1日 8100円	要	—
③ 連携協定に 基づく実習生	随時	～1年	○	1日 8700円	—	要	—
④ オンサイト・ラボ 共同研究 (単年度)	随時	～1年	○	○	—	要	—
⑤ オンサイト・ラボ 共同研究 (複数年)	随時	～3年	—	—	—	要	—
⑥ クロス アポイントメント	随時	～5年	○	○	○	—	—
⑦ トカマク 炉心プラズマ 共同研究	11月	～3年	○	○	—	要	有

那珂研とオンサイト・ラボ連携協定を締結の上で

※ 共同研究等を締結してJT-60SAに関する研究を実施する研究者は、JT-60SA実験チームに参加頂きます。 <https://www.qst.go.jp/site/jt60/team.html>

内容



1. JT-60SA実験体制

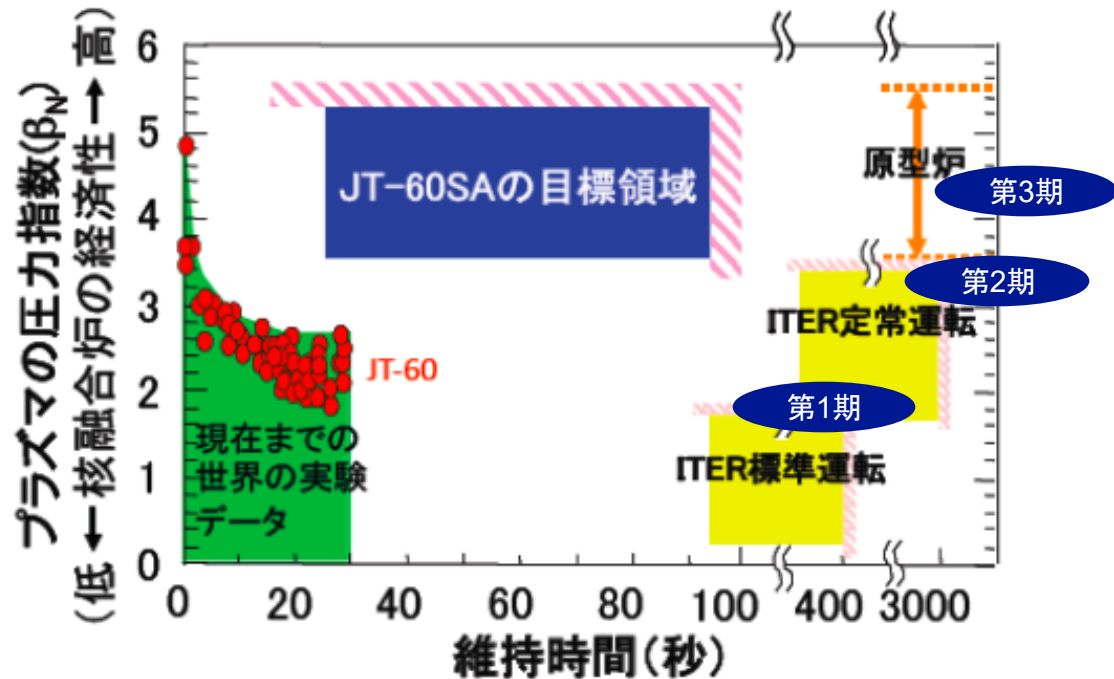
2. JT-60SA研究計画

JT-60SAでの科学的なミッション

ITERサイズ原型炉を実現するために必要な壁無し理想MHD安定性限界を超えた完全非誘導電流 定常高ベータ・プラズマを開発

- ダイバータとも成立する高性能プラズマを、電流拡散時間より充分長く維持
- プラズマの制御性、物理を解明
⇒ ITER運転シナリオ、原型炉設計に指針を与える。

ITERサイズ原型炉の第1期～第3期で想定している規格化プラズマ圧力とJT-60SAの目標領域の関係

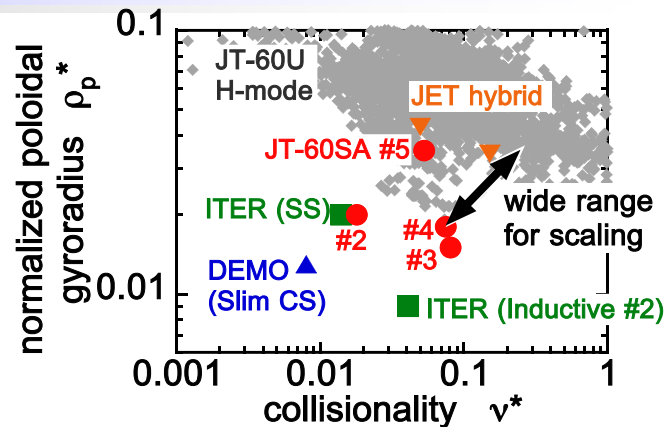


ITERサイズ原型炉に向けた研究開発



プラズマ物理研究

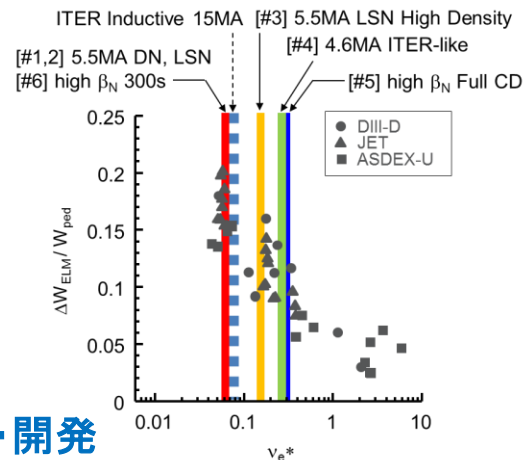
- ITER・原型炉級の無次元量, 高電子加熱割合, 高プラズマ形状ファクターにおける輸送研究
- ECCDや分布制御による新古典テアリングモード制御
- 壁 / コイル / 高エネルギー粒子 / プラズマ回転による抵抗性壁モード安定化効果
- 高速イオンベータ値領域でのアルヴェン固有モード, 高速粒子モードの研究



ITERリスク低減

- 高プラズマ電流, 低衝突周波数における摂動コイル / ペレットによるELM制御, 無・小振幅ELM開発
- 高プラズマ電流, 高蓄積エネルギーにおけるディスラプション回避や逃走電子の低減
- 高熱・粒子束下における不純物混合入射を用いた放射冷却ダイバータの長時間維持・制御

=> ITERサイズ原型炉に向けたモデルの検証・開発

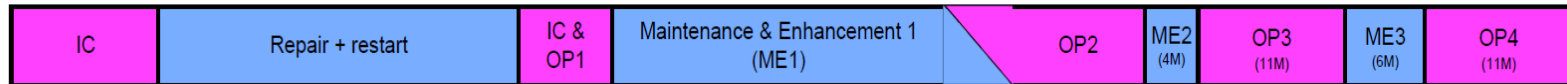


JT-60SAの中期計画



2030

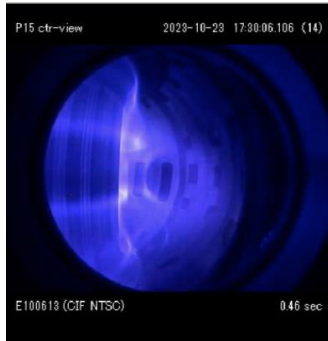
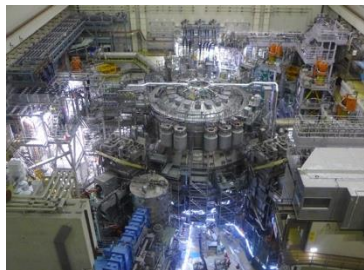
ITERサイズ原型炉の スケジュール案



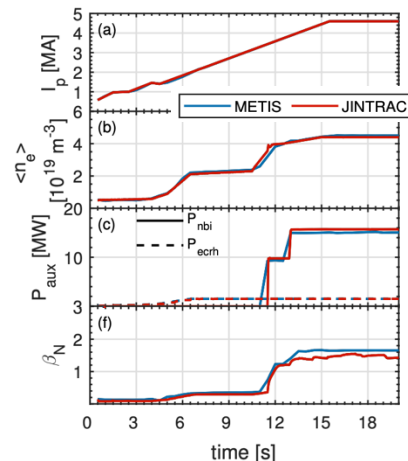
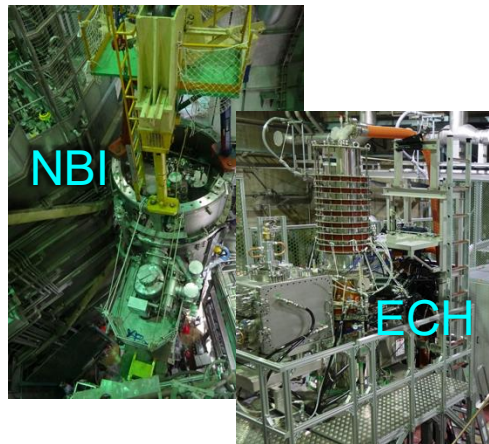
2020年完成

2023年初プラズマ
統合試験運転2024-2025年
加熱増強中

2026年~プラズマ加熱実験

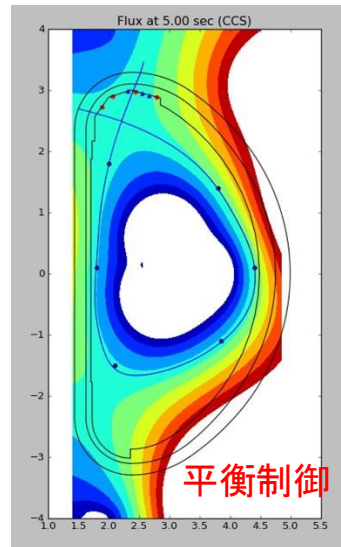
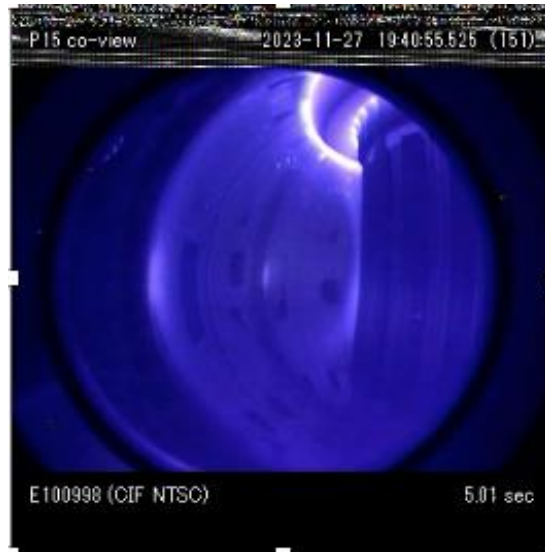


1 MAダイバータプラズマ成功！
運転開始記念式典で披露



(シミュレーション)

統合試験運転期のプラズマ実験



実験開始**2**日後に初プラズマ
11日後に**MA**級プラズマ生成に成功！

- ✓ $I_p=1.0$ MA, $B_T=2.04$ T、フラット
トップ3 sec
- ✓ $I_p\sim 1.2$ MA, $\bar{n}_e\sim 5\times 10^{18}$ m⁻³, $T_e(0)\sim 1$ keV
- ✓ ECH 82 GHz-1 sec、110 GHz-3.5 sec

- 初プラズマ、プラズマ制御、ディスラプション、壁洗浄といった**主要なテーマを主導したのは、30代-40代前半の若手・中堅。**=> 成果を国際会議の場で発表。
- 東大TST-2での共同実験を基に、プラズマ着火シナリオを開発。
- 国内研究機関（N/阪/九/筑/京）との共同研究により、壁洗浄のフローを作成。
- QSTにて独自に開発したプラズマ制御システムを適用。

装置増力

統合試験運転(IC)

容器内機器: リミター、上側ダイバータ(炭素タイル)
計測装置: CO₂干渉計/偏光計、可視カメラ/分光器、他
加熱装置: ECRF(入射パワー1.5 MW)



装置増強(ME)

安定化板: 冷却水配管付きヒートシンク+炭素タイル

真空容器内コイル:

誤差磁場補正コイル(EFCC)

抵抗性壁モード安定化コイル(RWMC)

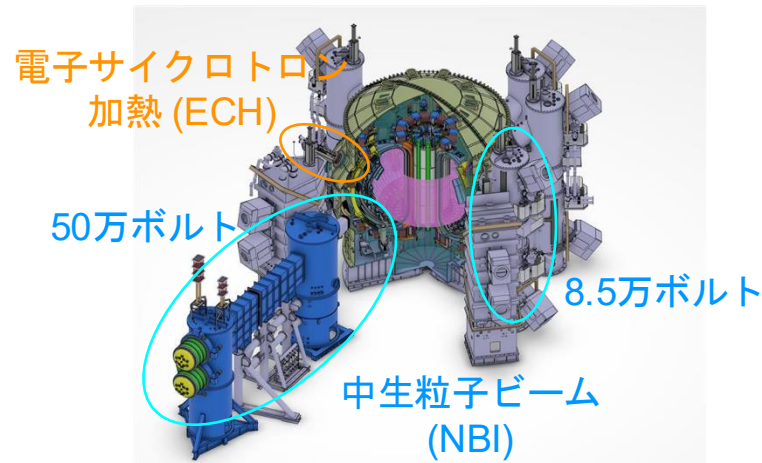
高速プラズマ位置制御コイル(FPPC)

ダイバータ: 第一壁(炭素)+ CuCrZrヒートシンク

加熱装置: NB 23.5 MW + ECH 3 MW = 26.5 MW

計測装置: トムソン散乱、CXRS、他

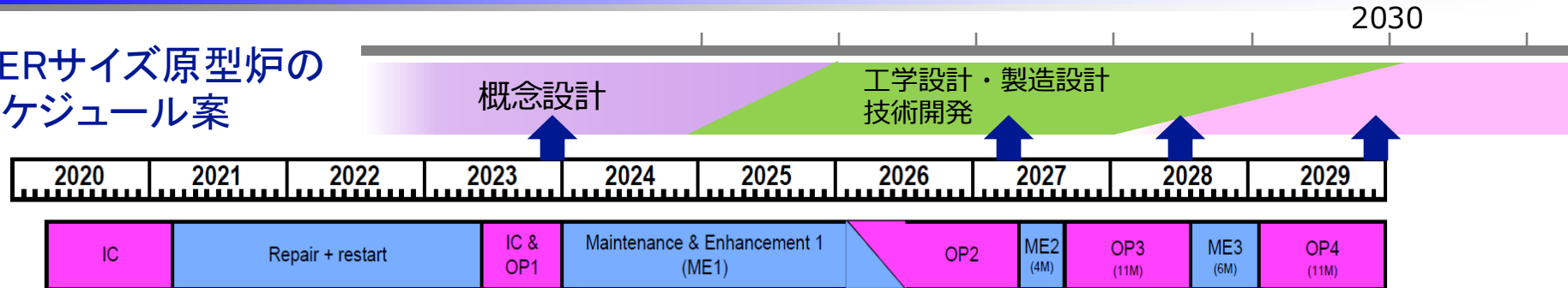
その他: 大量ガス入射(MGI)、ポート、他



JT-60SAの実験計画:ITERサイズ原型炉への貢献



ITERサイズ原型炉のスケジュール案



- 統合試験運転(IC&OP1)を完遂。=> **トカマク本体の統合技術を確立。原型炉・ITERの試験運転&初プラズマの効率化とリスク低減。**
- 高いプラズマ電流での**閉じ込め改善モード**を開発。誤差磁場制御等、増強システムの検証。
=> **原型炉・ITERでの閉じ込め改善モードの性能予測。**
- ITER級の高性能プラズマの開発**($H_{98}(y,2) \sim 1$, $\beta_N \sim 1.8$)と、**ELM及びディスラプション制御。**
=> **原型炉・ITERのリスク低減手法の提言。**
- 原型炉に向けた高ベータ実験・リスク低減実験**に注力。長パルス実験の準備研究を完了。
=> **原型炉の目標領域、原型炉・ITER性能予測コード。**
- 電子加熱増強、タングステン壁での統合シナリオ開発 => **第2,3期運転シナリオ提唱。**

プラズマ加熱実験フェーズでの主な実験項目



特に ITERサイズ原型炉に貢献

例: 次期実験フェーズ (OP2)

Op-2	運転期間 装置増力後 9ヶ月		
ダイバータ	下側慣性冷却(カーボン) 耐熱負荷 < 10 MW/m ² x ~5 s		
NBI	16 MW in H 23.5 MW in D	最大	26.5 MW
ECRF	3 MW, 82/110/138 GHz		
炉内機器	・カーボン第一壁 ・安定化板(表面カーボンタイル) ・炉内コイル ・大量ガス入射		
計測	・磁気センサー ・CO₂レーザー干渉計・偏光計 ・可視カメラ, EDICAM ・軟X線強度計測 ・ダイバータプローブ ・Dαエミッションモニター ・不純物計測(TESPEL) ・赤外カメラ ・ECE, CXRS, MSE, VUV, etc		

主要目標

重水素運転に向けた軽水素運転でのコミショニング

- ・ プラズマ着火及び電流ビルドアップ
- ・ プラズマ電流・形状, 密度等の基本的な制御
- ・ 誤差磁場の評価と制御
- ・ NB加熱入射試験(シャインスルー研究も含む)

ITERリスク低減実験

- ・ L-H遷移条件や物理研究, 軽水素と重水素の比較.
- ・ プラズマ崩壊現象の物理と抑制研究
- ・ 逃走電子発生 of 物理と抑制研究

運転シナリオ開発

- ・ ITER標準Hモード運転に向けた初期的な統合シナリオ開発
- ・ 高ベータに向けた初期シナリオの開発

JT-60SA実験計画 (初版)

実験計画

- 重要実験項目と、そのフローを記載。
- ITER標準運転シナリオ開発を幹に、関連する物理実験、誤差磁場制御やITERリスク低減を、最重要実験として優先的に実施。

実験提案の募集

- 10月頃、実験提案を募集する予定。
- 専門グループリーダー、実験リーダーのレビューを受け、採択が決まる。
- 日本 6: 欧州4のマシントイム。

Scenario Development in Deuterium

Initial scenario development towards ITER-relevant H-mode scenario ② => ③ => ④

Goals: Achieve stable H-mode plasma ($H_{98} \sim 1$). High I_p ITER-relevant H-mode of $I_p/B_T = 4.6 \text{ MA/2.25 T}$ ($q_{95} \sim 3$) or $I_p/B_T = 3.5 \text{ MA/2.25 T}$ ($q_{95} \sim 4$) c.f. $P_{110} = 8.1\text{--}13.3 \text{ MA}$ ($0.4\text{--}0.8 n_{0W}$) for $I_p = 4.6 \text{ MA}$

In case of lack of P_{110} , do high I_p in L-mode

- H-mode confinement and heat flux to divertor
- L-H power threshold, pedestal and ELM

Power and I_p available

If only power available

Highest I_p in (L- and) H-mode ⑤

Goal: SOL width scaling in H-mode

End of Op2

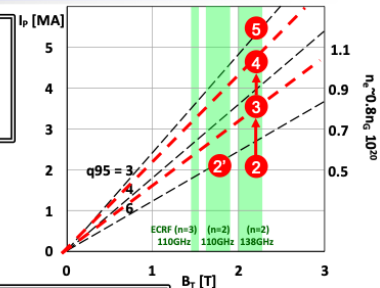
High beta access try ②'

Goal: Initial high beta ($H_{98} > 1$, $\beta_N \sim 3$, transient)

Runaway electron at low ne and disruption experiments ②, ⑤

Goals: Investigate early RE generation, RE mitigation physics by RMP and CS

Obtain disruption database at high I_p . RT disruption avoidance/mitigation try



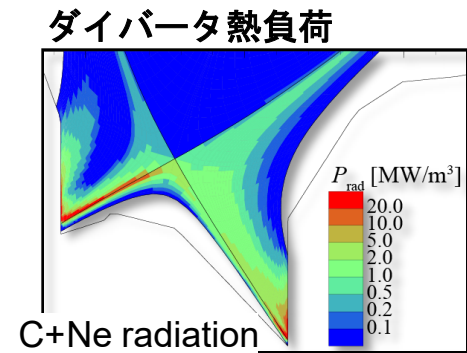
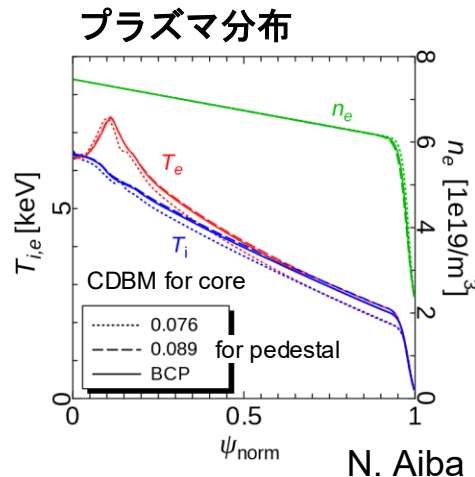
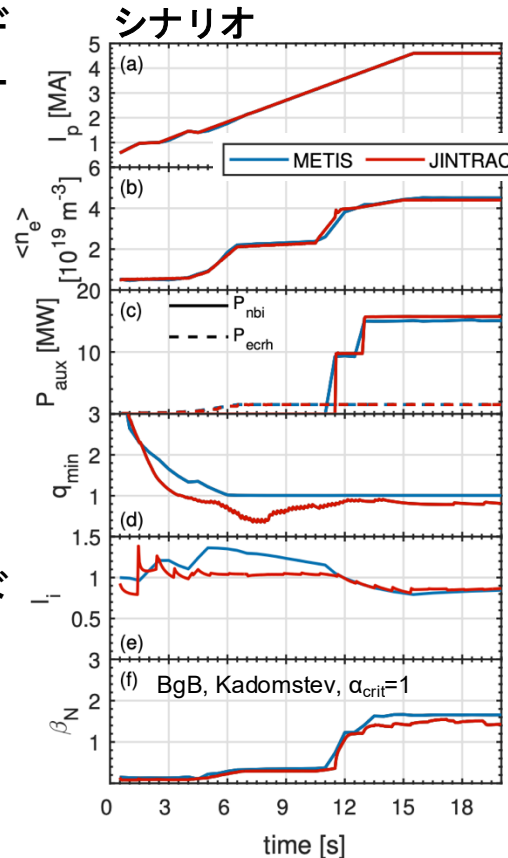
国内分のマシントイムは確保している。
是非、実験提案して頂きたい。
QSTの研究協力者がサポートします！
モデリング、データ解析、協力頂きたい。

運転シナリオの検討

主な運転シナリオについて、プラズマモデルとシミュレーションコードを用いて、シナリオを検討

	I_p/B_T	β_N/β_P
OP2 Baseline	4.6 MA/2.3 T	$\sim 2/<1$
OP2 Hybrid	2.7 MA/1.7 T	$\sim 2\text{-}3/\sim 1$
OP2 ITB	1.7-2.0 MA/1.7 T	$> 3.5/>>1$

加熱パワーにより、ベースライン、ハイブリッドが達成可能領域であることを確認。
ダイバータへの熱負荷、MHD安定性、高エネルギー粒子効果など、より詳細な物理モデルを用いて、整合性を確認している。



まとめ



- JT-60SA計画は、幅広いアプローチ活動として日欧共同で実施するサテライト・トカマク計画と、**日本のトカマク国内重点化装置計画**の合同計画
- 2023年の統合試験運転の終了を受けて、2024年5月から日欧の研究者からなる**実験チーム**が正式に発足し、活動を開始
 - 実験チーム会合、専門グループ会合を定期的に行う
 - JT-60SA実験チームでは、実験計画の立案と遂行、実験結果の解析とまとめ、モデリング・シミュレーション、外部発表の議論、研究ニーズに応じた装置増強を提案
 - Op2実験計画が策定され、実験提案に向けた準備研究を実施
 - **ITERサイズ原型炉の課題となる実験を優先**
- **2030年代の発電実証**に向けて国内での活動を強化するため、目的に応じた共同研究や教育の場を設けて、科学的及び環境的なサポートしている。

Brand-new machine での実験の機会、是非活かしてください。

整備した共同研究や設備を、是非活用ください。

プラズマも、装置も、チームも、ビルドアップしていきたいと思います。