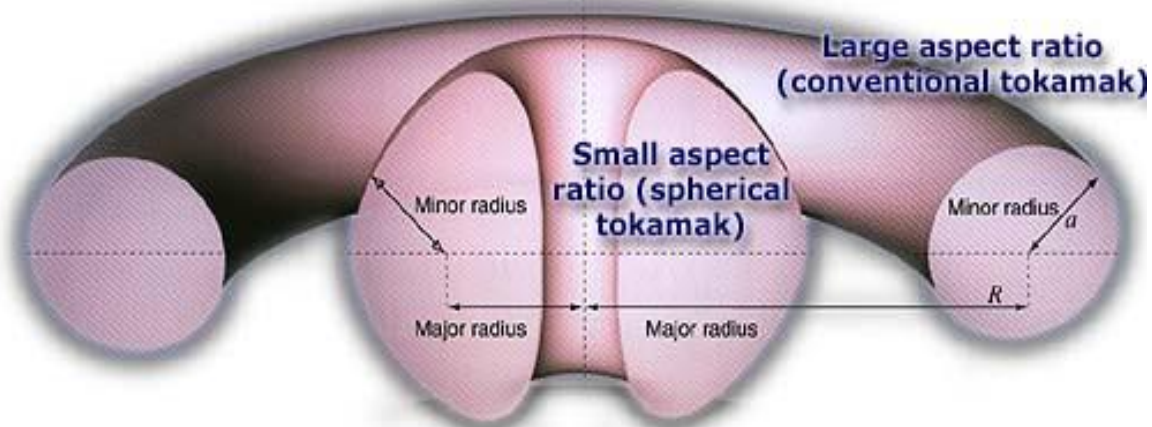


球形环简介与SUNIST-2研究进展

高 喆

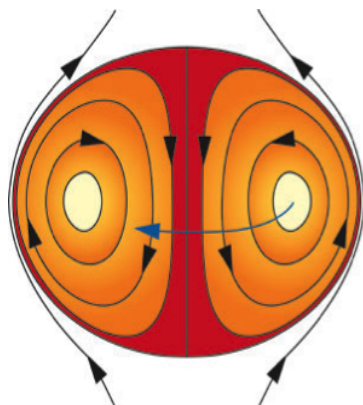
清华大学工程物理系

球形环 $\approx$ 球形托卡马克 $\neq$ 球马克



球形环、球形托卡马克 (ST) :

“Spherical” 为其“形”，
“Tokamak” 为其“实”，即小环径
比托卡马克



球马克 (Spheromak) :

- 紧凑环的一种
- 等离子体未被导体或真空室分割
- 自组织的等离子体

Review article: Zhe Gao, Compact magnetic confinement fusion: Spherical torus and compact torus, Matter and Radiation at Extremes 1 (2016) 153-162

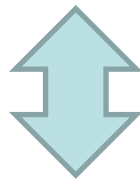
低环径比带来了什么？

Scientific advantages

- High beta
- Good MHD stability
- Good confinement

Scientific disadvantages

- Difficulty in non-inductive startup and current drive

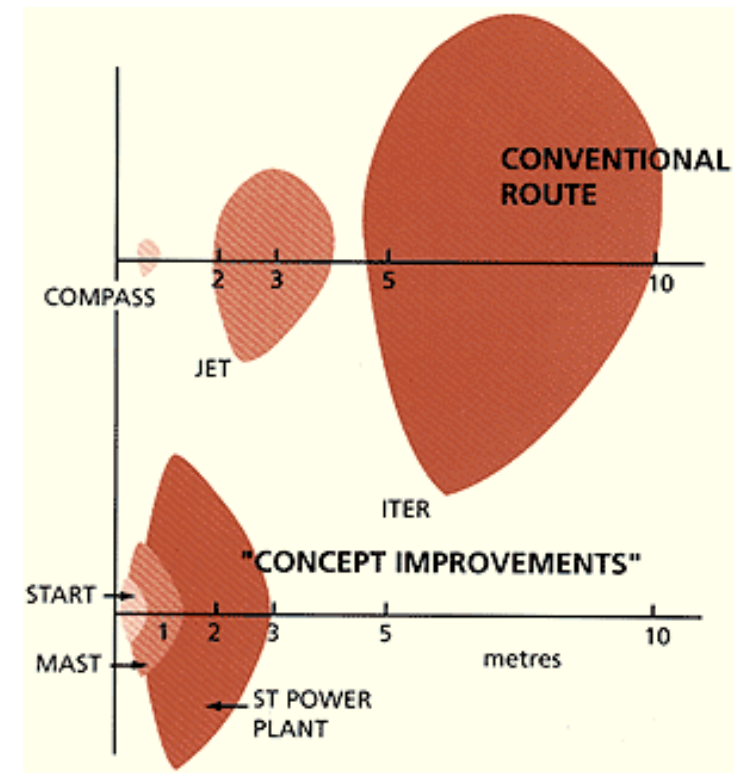


Technological advantages

- Compact
- High effective TF coils

Technological disadvantages

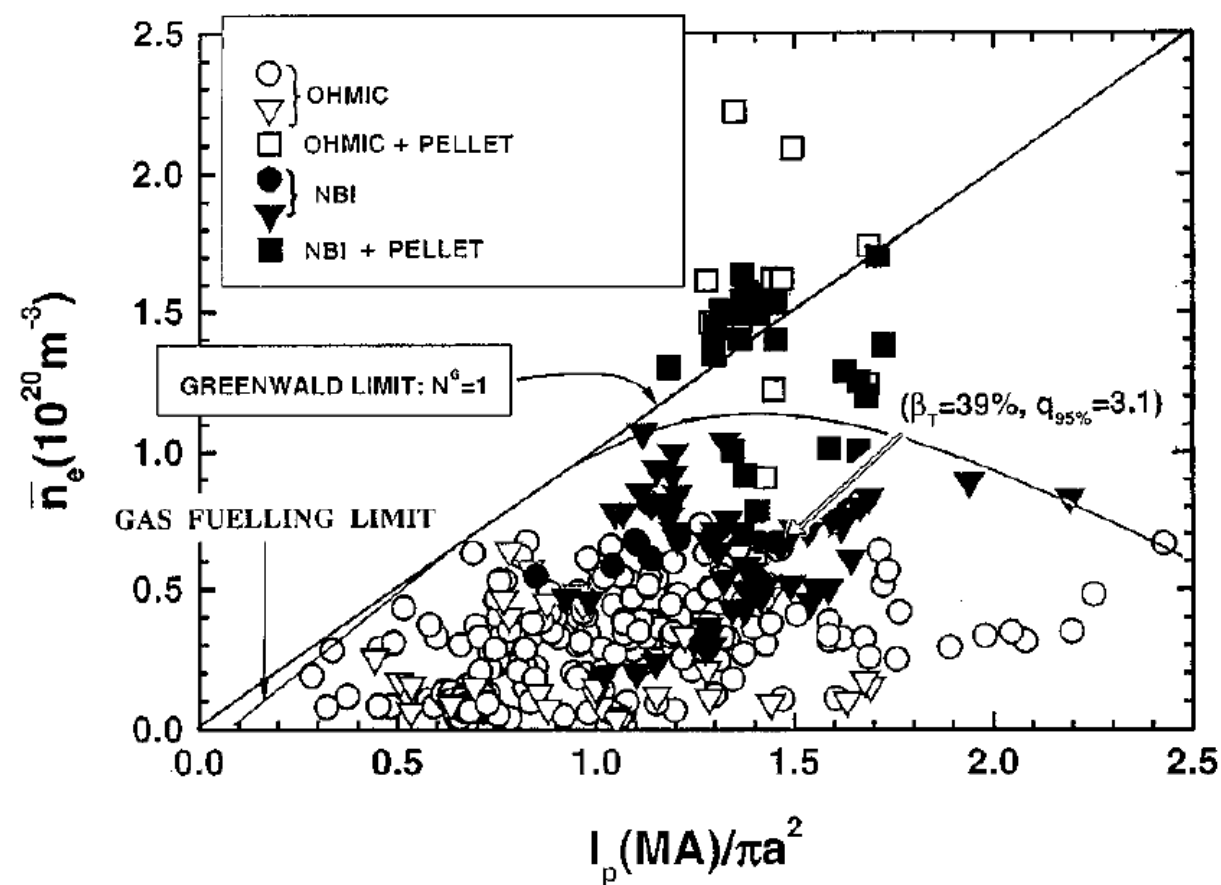
- Relative low magnetic field at axis
- Narrow center post
- Intense wall loading



更高的等离子体电流和密度

- 高等离子体电流
- 高密度

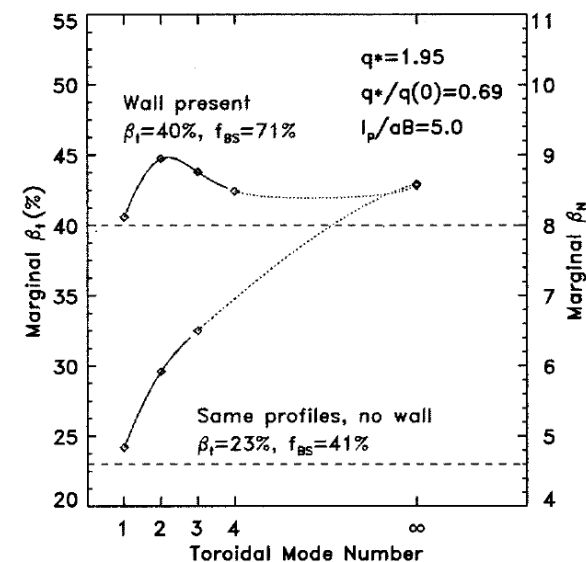
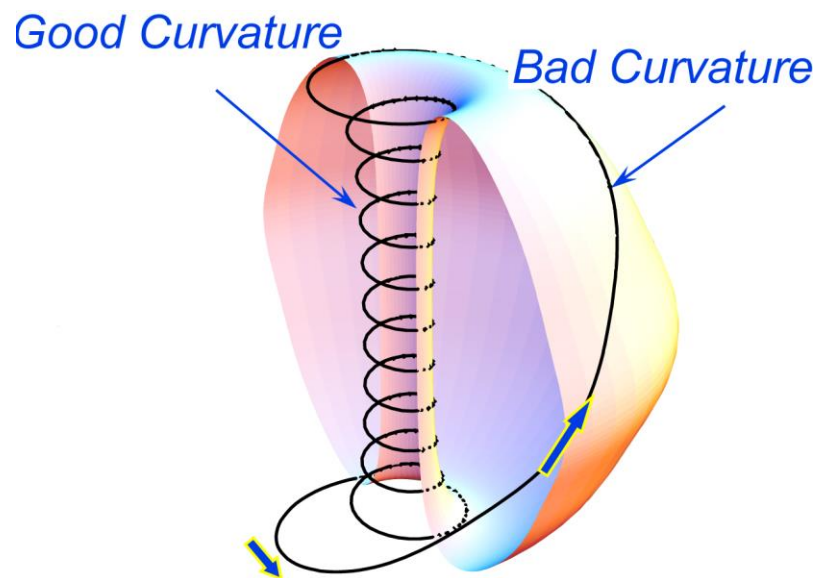
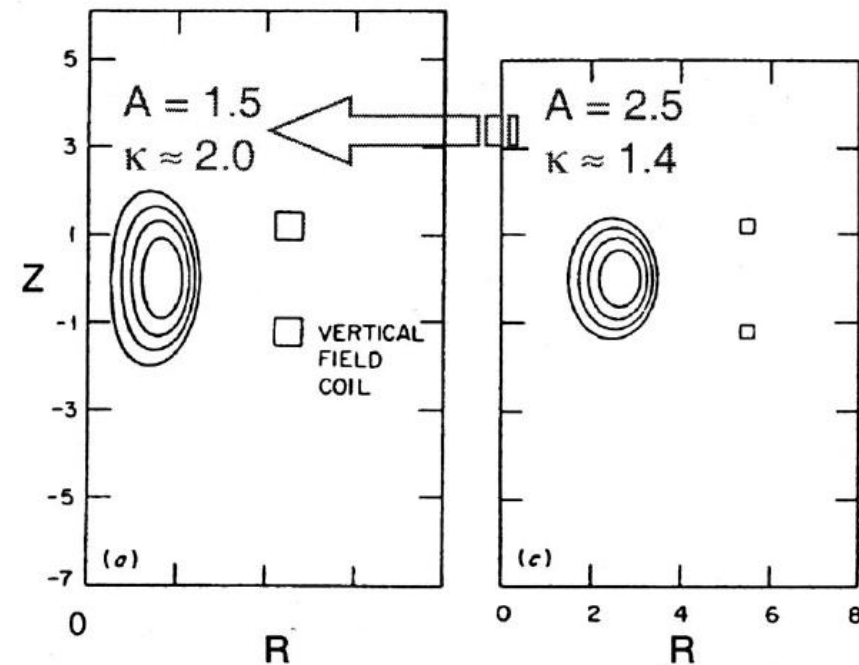
$$I_{TF}/I_p \sim (2A^2 q^*) / (1 + \kappa^2)$$



更好的MHD稳定性

- 高边界安全因子
- 自然拉长
- 极少大破裂, 而取代以IREs等小破裂行为

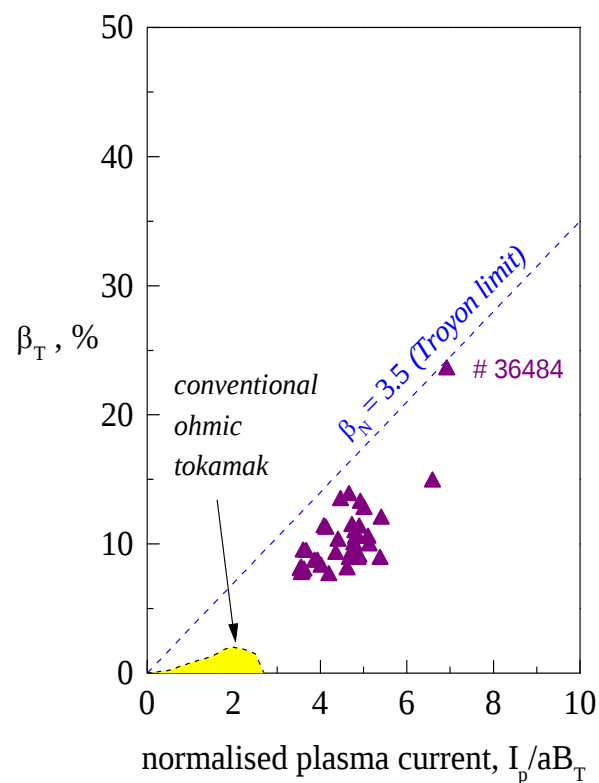
$$q_a \propto \frac{aB_T}{I_P} \frac{\kappa}{A}$$



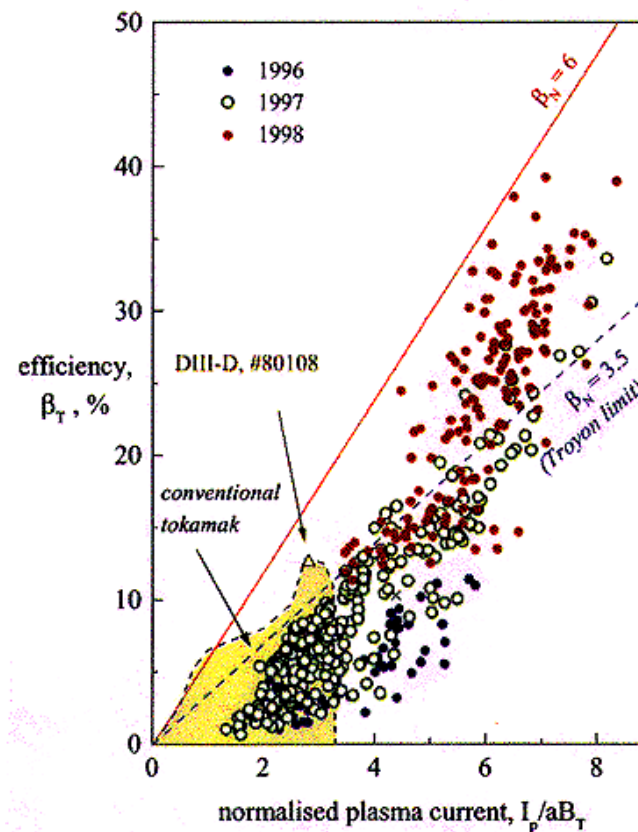
更高的比压

$$\beta_T = \beta_N I_p / (a B_{T0}) \sim \beta_N 5(1 + \kappa^2) / (2 A q^*)$$

RECORD OHMIC β ON START
(achieved through self-heating)

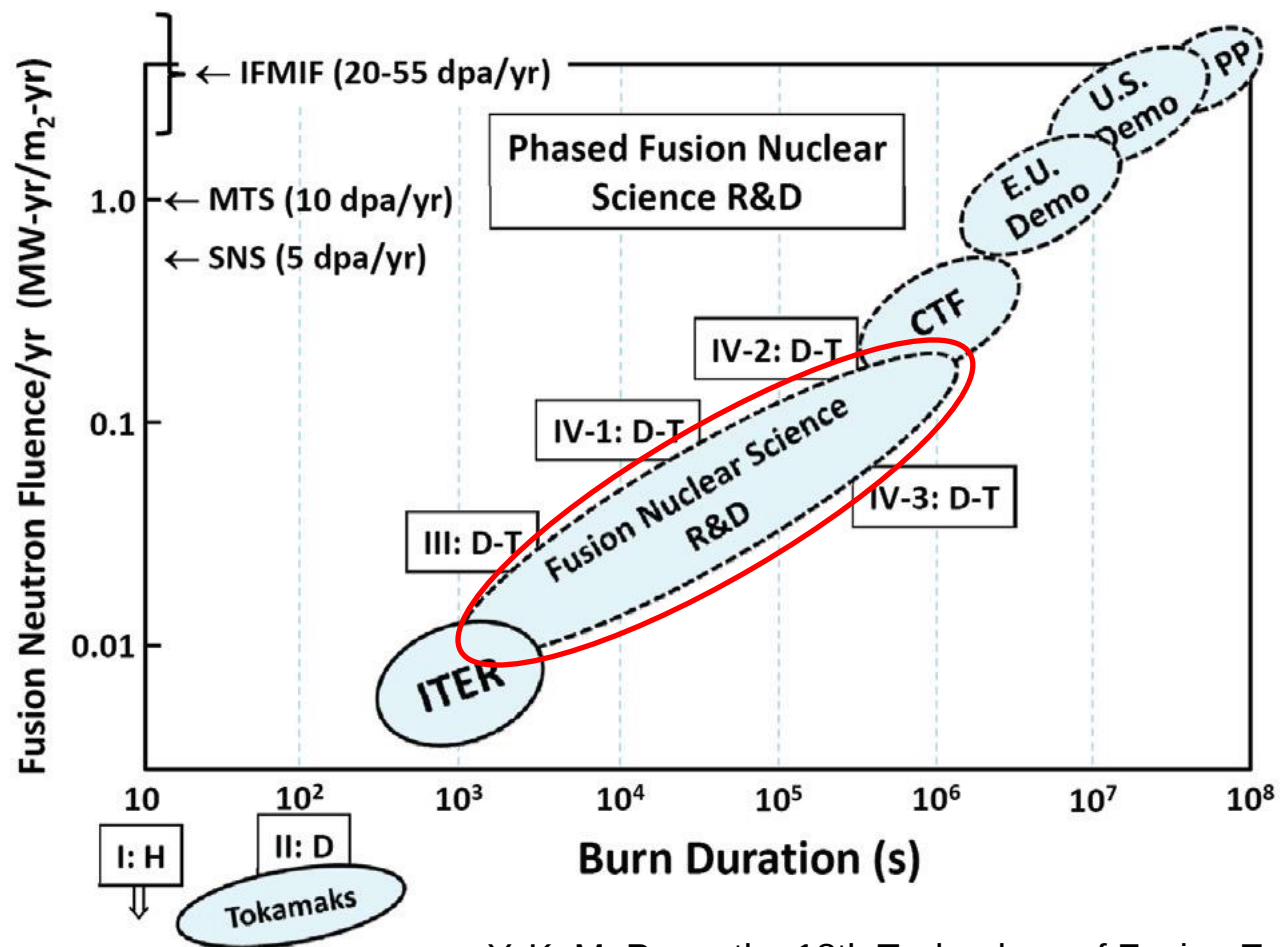


RECORD β ON START



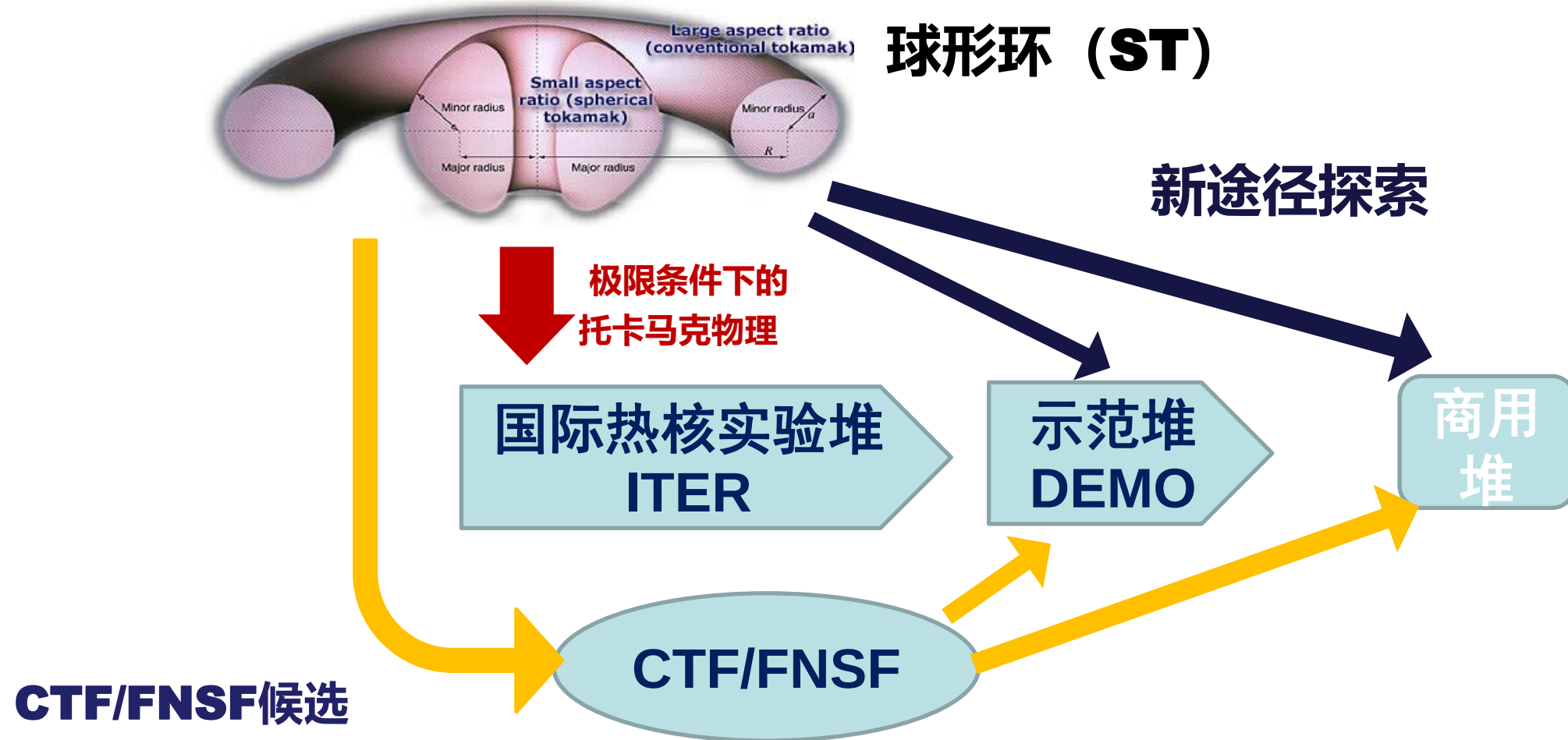
低Q下的聚变核物理研究平台

- 从聚变中子通量来衡量，ITER到DEMO之间的差距极大

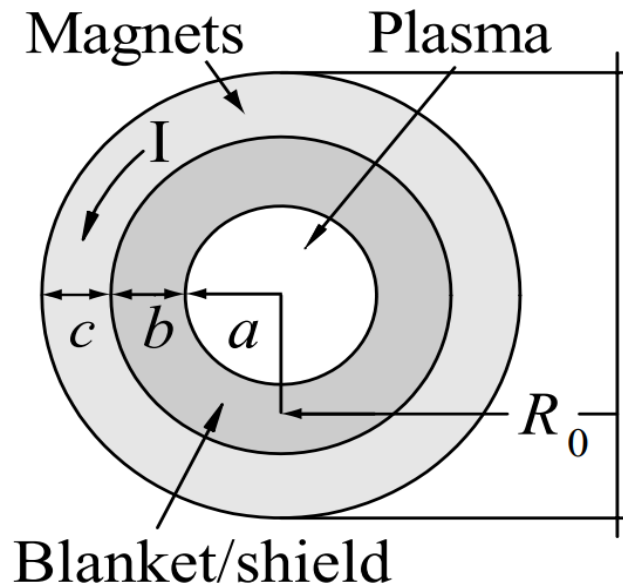


Recall Abdou:
"Skipping FNSF is like skipping JET/TFTR/DIII-D/JT-60/KSTAR/EAST and go directly to ITER, or skipping ITER and go directly to DEMO!"

球形环对聚变的可能贡献



等离子体性能提升需要更高的磁场

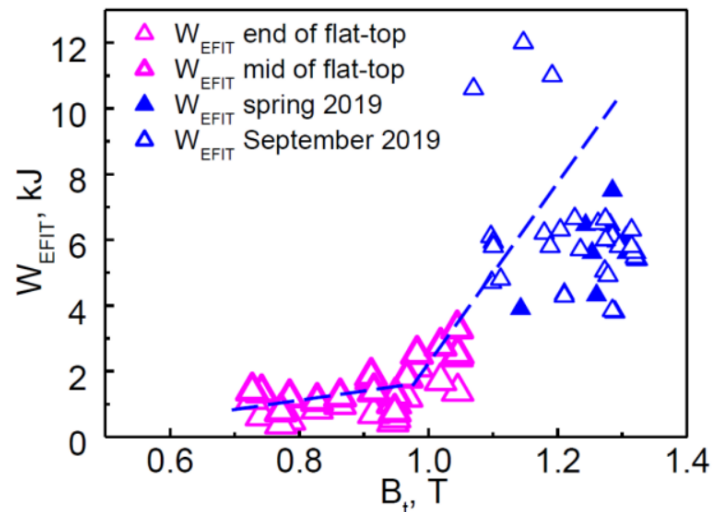


- 紧凑的位形导致较小的中心磁场
- 中心柱接头承受巨大的结构压力

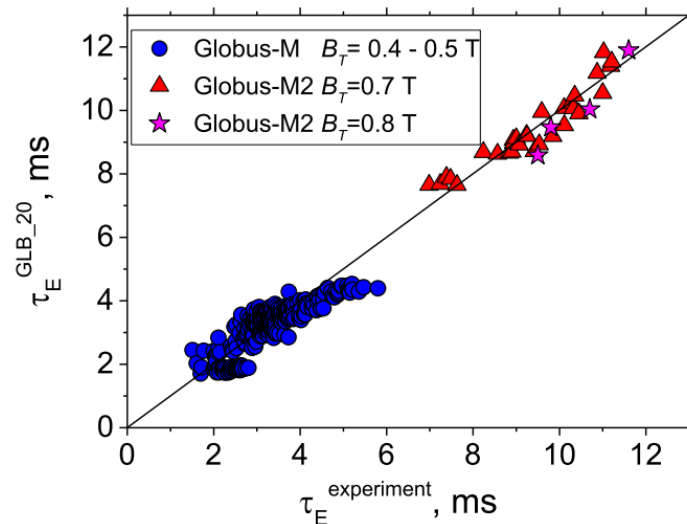
$$B_0 = B_{\max} \left(1 - \frac{a + b}{R_0} \right)$$

等离子体性能提升需要更高的磁场

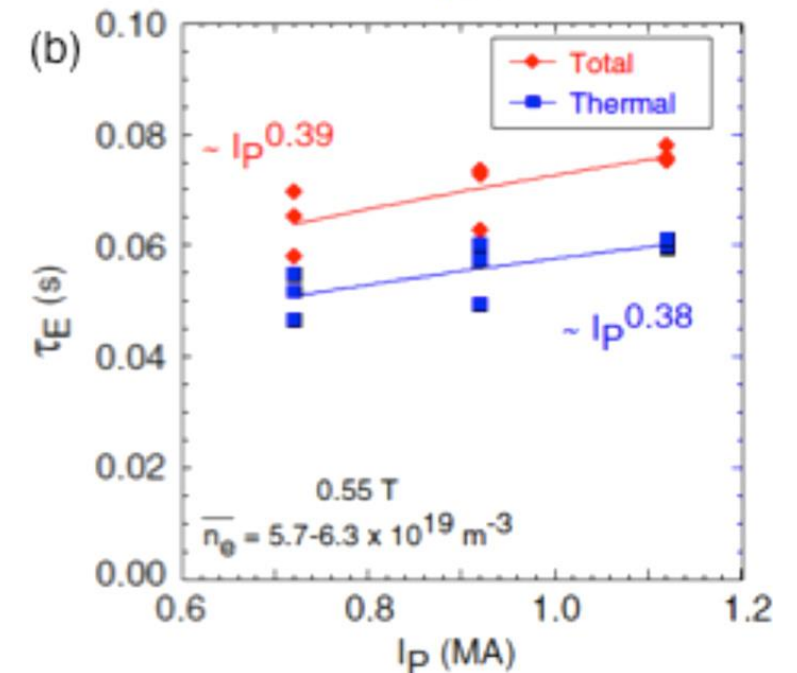
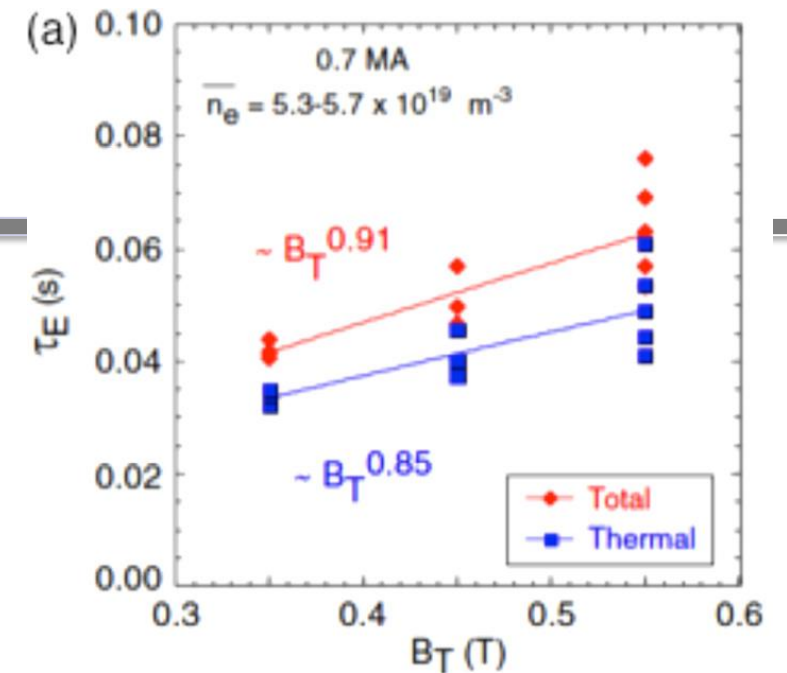
- Tokamaks: $\tau_{E,th} \propto I_p^{-0.93} B_T^{-0.15}$
- STs: $\tau_{E,th} \propto I_p^{-0.4-0.5} B_T^{-0.9-1.0}$
- ✓ 提高 B_T (不是 I_p) 可以显著改善约束



M. Gryaznevich, 2021, IAEA 2nd CRM CRP F13019

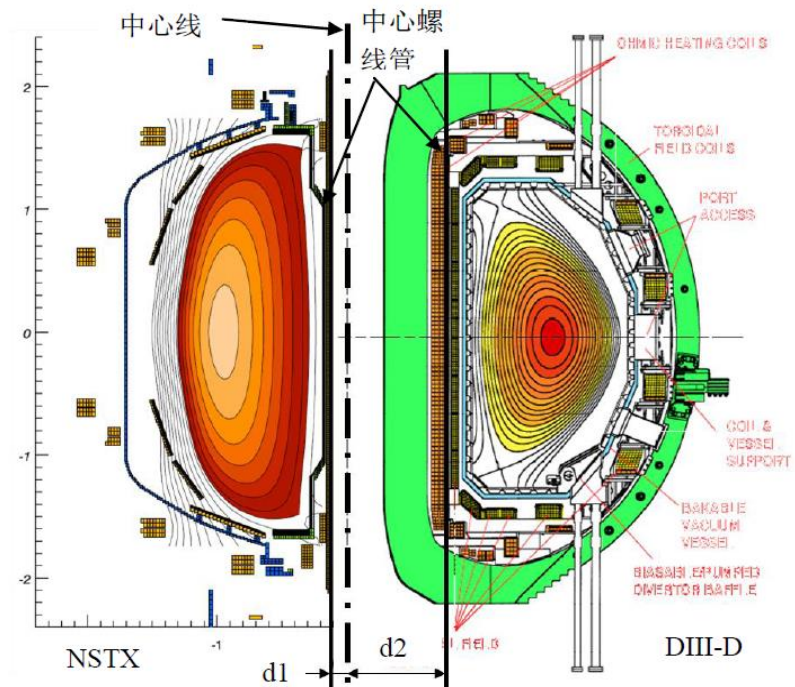


Yu.V. Petrov et al 2022 Nucl. Fusion 62 042009



波加热和电流驱动面临挑战

- 更高的自觉电流份额
 - 但电流维持更加困难
 - ✓ 低欧姆磁通
 - ✓ 高介电常数 ($\omega_{pe} \gg \omega_{ce}$)
- 电流驱动更困难



中国之ST计划

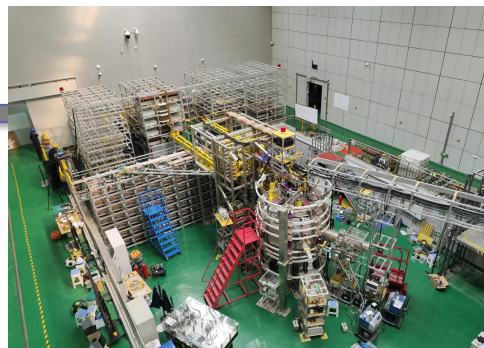


SUNIST

- Tsinghua University, Beijing
- Construction started at 2000, first plasma in 2002
- R_0 / a : 0.3 / 0.23 m
- B_{TO} : 0.15 (0.27) T
- I_p : 50 (120) kA
- Black: design, red: achieved

Research topics

- Basic properties of spherical tokamak plasmas
- EBW heating / Alfvén eigenmodes

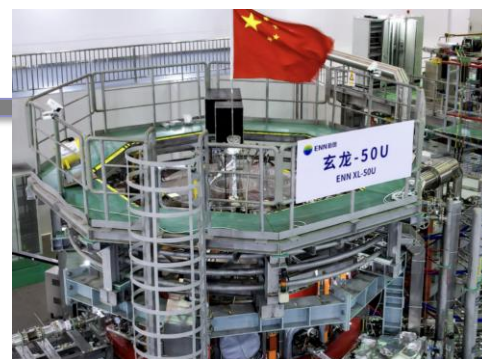


SUNIST-2

- Tsinghua University, Xi'an
- Construction started at 2020, first plasma in 2023
- R_0 / a : 0.525 / 0.325 m
- B_{TO} : 1 (0.81) T,
- I_p : 500 (220) kA

Research topics

- Confinement of spherical tokamak at 1 Tesla
- Reconnection heating

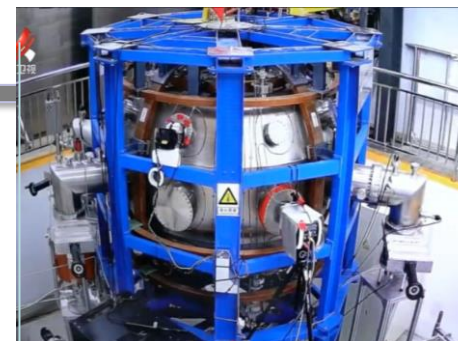


EXL-50U

- ENN, Langfang, Hebei
- Upgrade from 2023, first plasma in 2024
- R_0 / a : 0.73 / 0.43 m
- B_{TO} : 1.2 T
- I_p : 1000 kA
- EC waves: 1.75 MW 28 / 50 GHz

Research topics

- EC+CS Current drive scenarios
- p-B¹¹ ST reactor

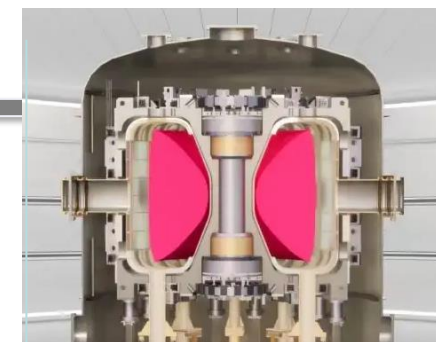


NCST

- Nanchang University, Jiangxi
- Construction started at 2018, first plasma in 2021
- R_0 / a : 0.4 / 0.24 m
- B_{TO} : 0.36 T
- I_p : 100-300 (100) kA

Research topics

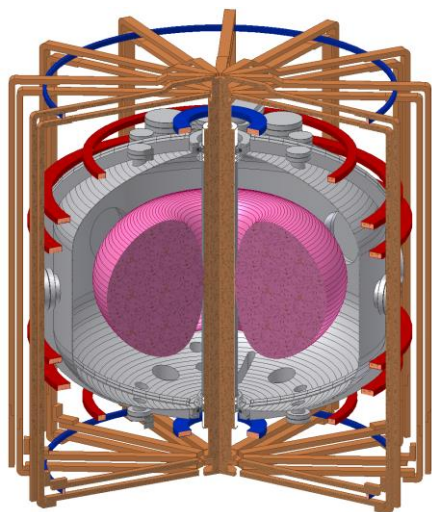
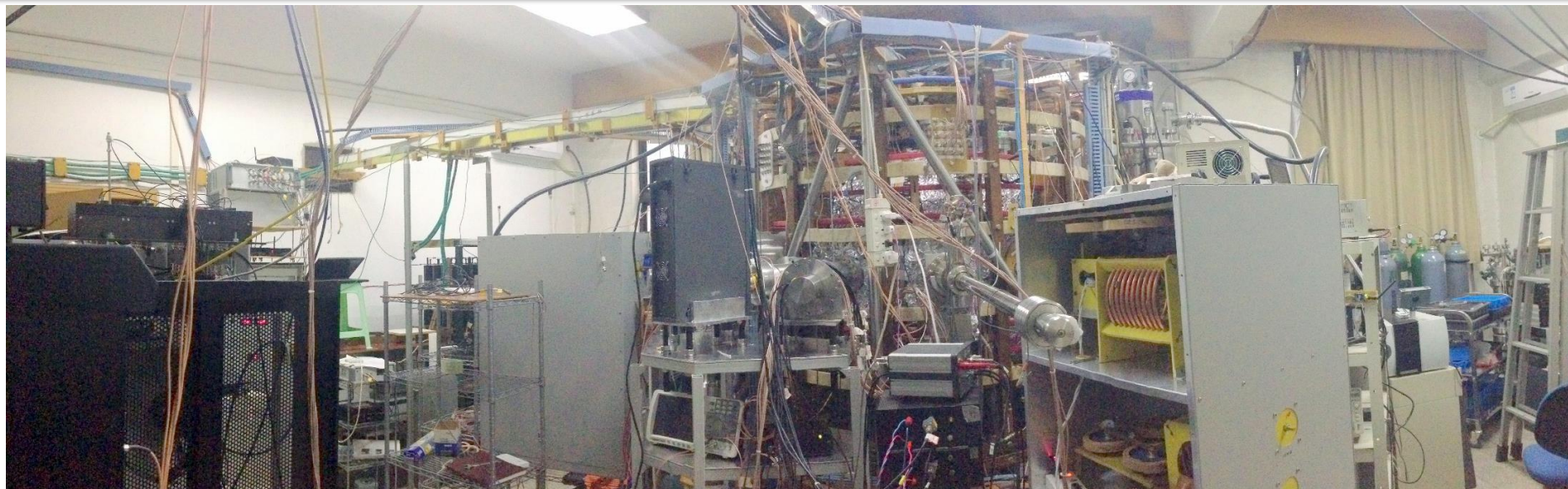
- Solenoid-free startup by merging
- Basic properties of spherical tokamak plasmas



NTST

- Startorus Fusion
- $-0.8 < \delta < 0.8$
- R_0/a : 0.72/0.4 m
- B_{TO} : 1 T
- To be constructed
- Copper, liquid nitrogen cooled, start to construct @ 2025

SUNIST — 我国第一台ST装置



- R_0/a : 0.3 m/ 0.23m
- A : 1.3
- κ : 1.8
- B_0 : < 0.15 T (0.27T)
- I_p : ~ 50 kA (100kA)
- n_e : $0.2 \sim 3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
- T_e : ~ 100 eV

• SUNIST的研究兴趣

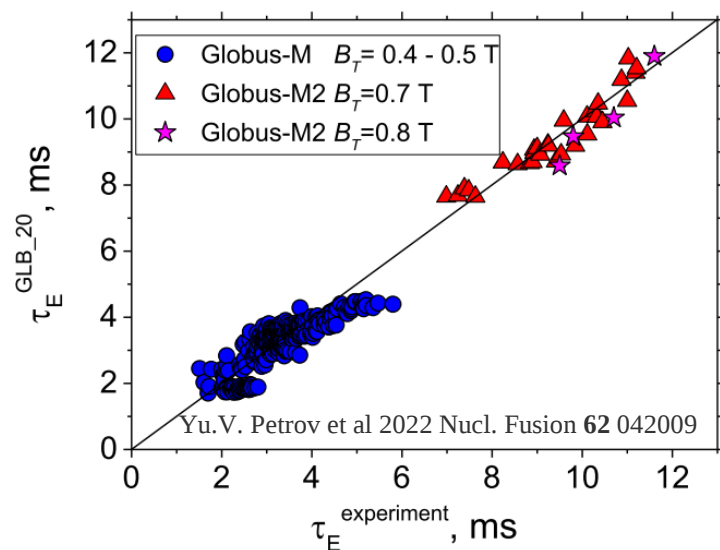
- 低环径比环形等离子体的基本特性
- 非中心螺线管启动和电流驱动

SUNIST-2: 带有明确研究目标的新一代装置

- 球形托卡马克 (ST) 的约束

$$\tau_{E,ST} \propto I_P^{0.5} B_T^{1.0} \quad (\tau_E \propto I_P^{0.93} B_T^{0.15})$$

- MAST/NSTX/ST-40/Globus-M2

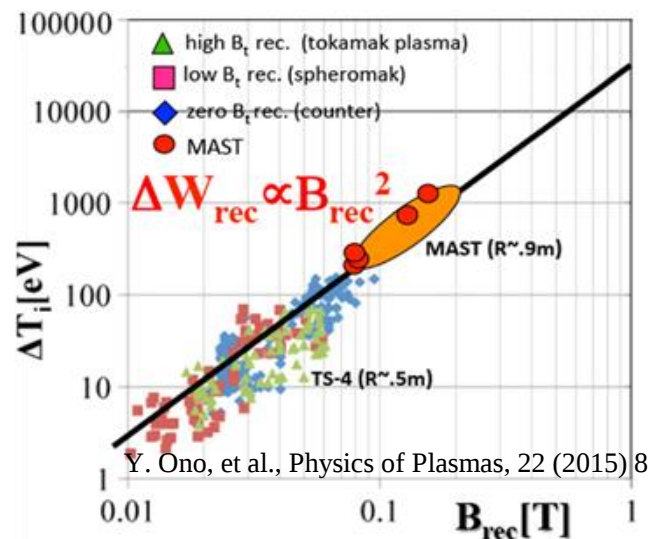


较强磁场

- 磁重联加热

$$\Delta W \propto B_{rec}^2 \propto I_p^2$$

- 高效率、无上限

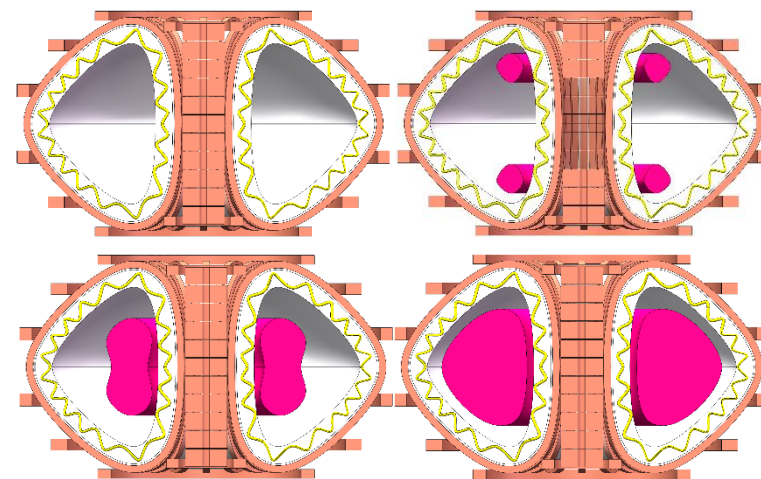


融并压缩加热

- 脉冲堆的运行方式

紧凑: $R \downarrow \Rightarrow n \uparrow$

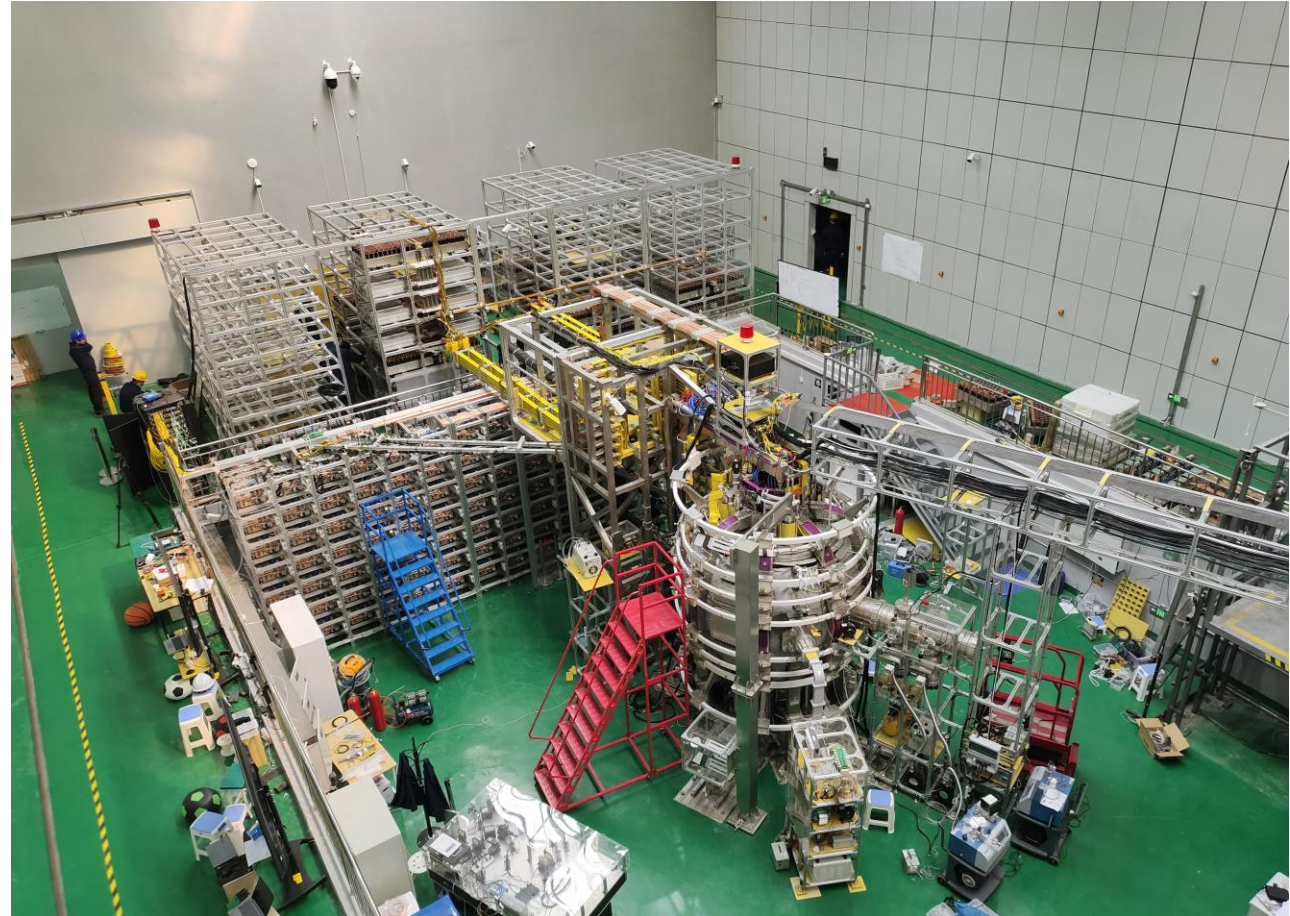
- 紧凑聚变堆电流驱动更难了



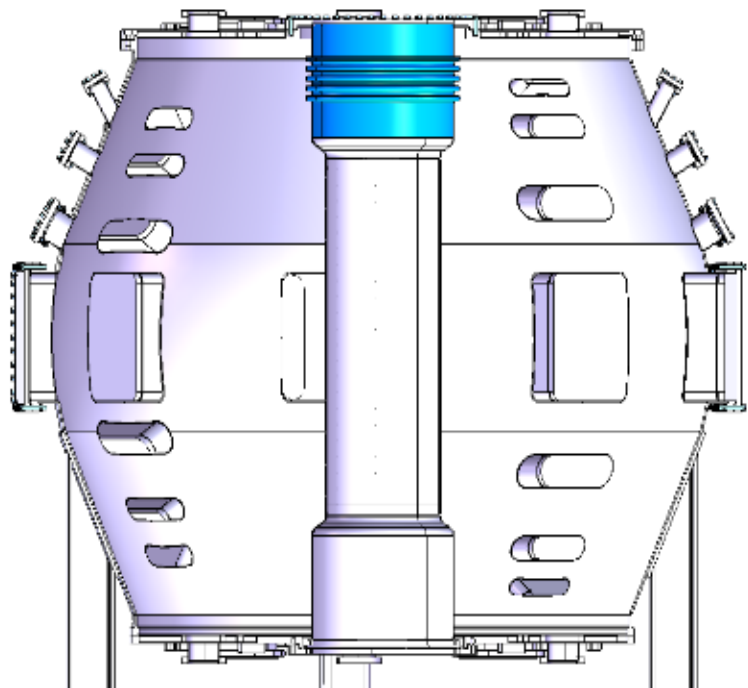
重复运行

SUNIST-2 : 带有明确研究目标的新一代装置

- 设计参数
 - 0.53 m / 0.33 m / 0.4 (1) T / 200 (500) kA
- 目前达到参数
 - 0.81 T / 408 kA
 - Divertor (0.61 m / 0.38 m)
 - Negative triangularity (0.57 m / 0.33 m)
- 时间表
 - Construction started at 2022
 - Completed in 2023
 - 5 campaigns of experiments

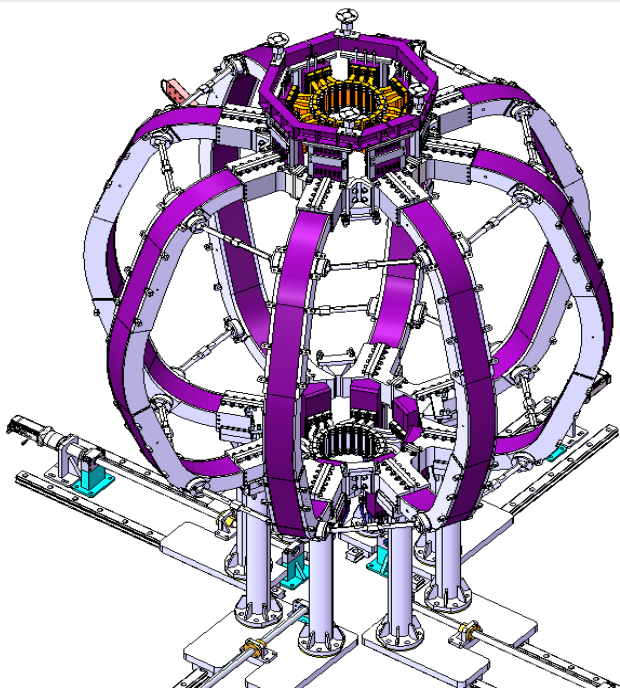


SUNIST-2：真空系统



- 大容量真空室
 - ✓ 超薄壁 (7mm/1mm)
 - ✓ 真空密封
- 真空泵组
- 真空烘烤、辉光放电清洗
- 真空测量、质谱

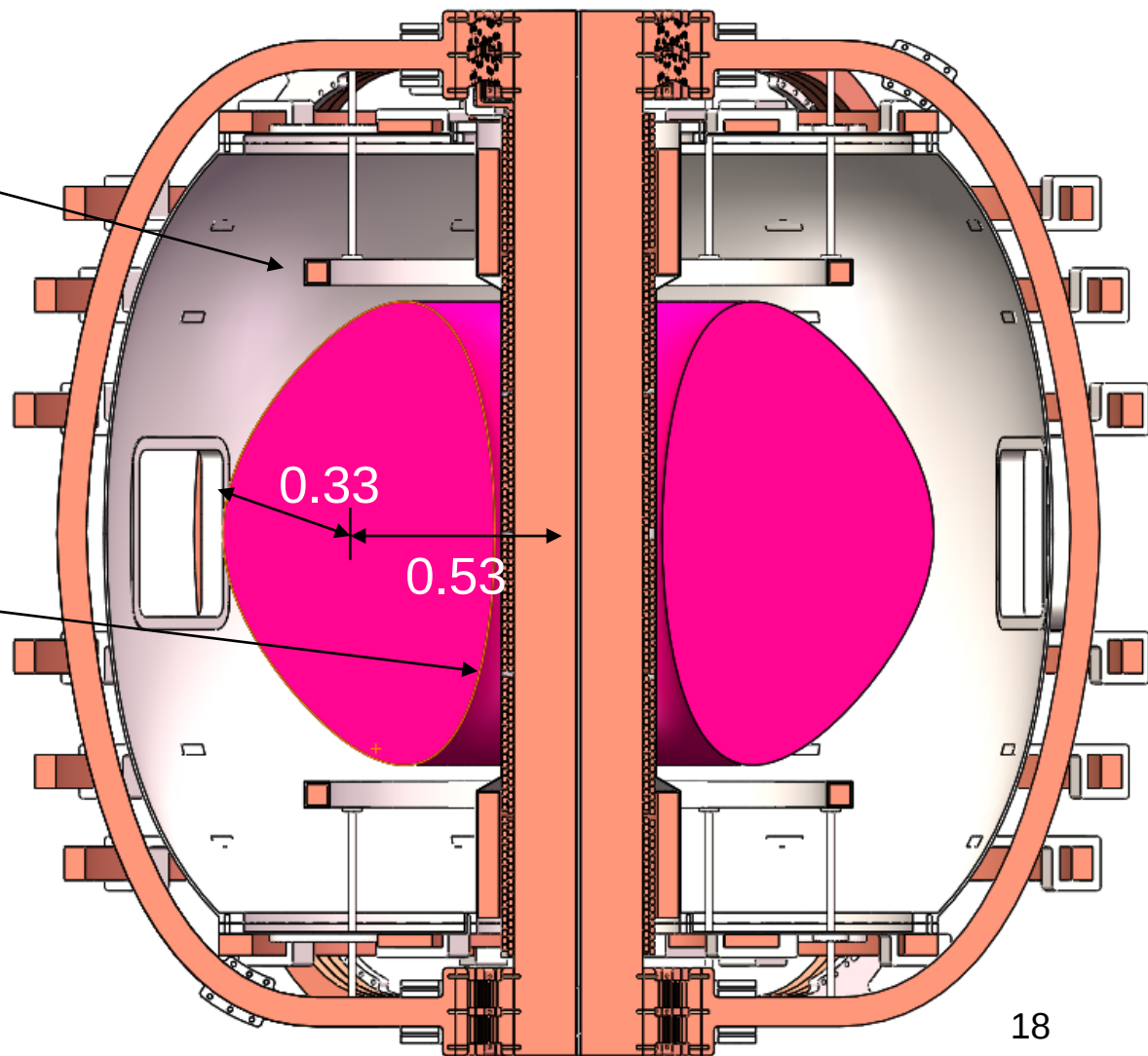
SUNIST-2: 环向场



- 通过接头优化设计和电源能力提升，目前装置中心磁场达到0.81T，未来可达1T以上，在ST中居于第一集团。

SUNIST-2: 极向场

- 可移动的内部感应线圈
 - 垂直移动距离200 mm
 - 更灵活的融并加热研究
 - 可完全退出等离子体区
- 唯二CS分段的ST
 - 紧凑的空间内分出6段CS
 - 更加精细地配合融并过程
- 多组外极向场线圈和偏滤器线圈
 - 为平衡位形和重联控制提供了可能性



SUNIST-2: 电源

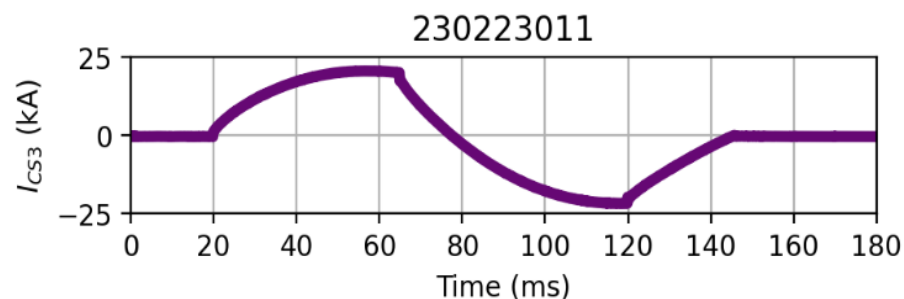
环向磁体电源

- 126 kA / 129 V
- 超级电容储能，模块化
- 126单元（可自由串并联）



螺线管电源

- ± 22 kA / 450 V
- 电解电容储能
- IGBT全控开关
- 3组



秒级瞬态总功率超过70 MW

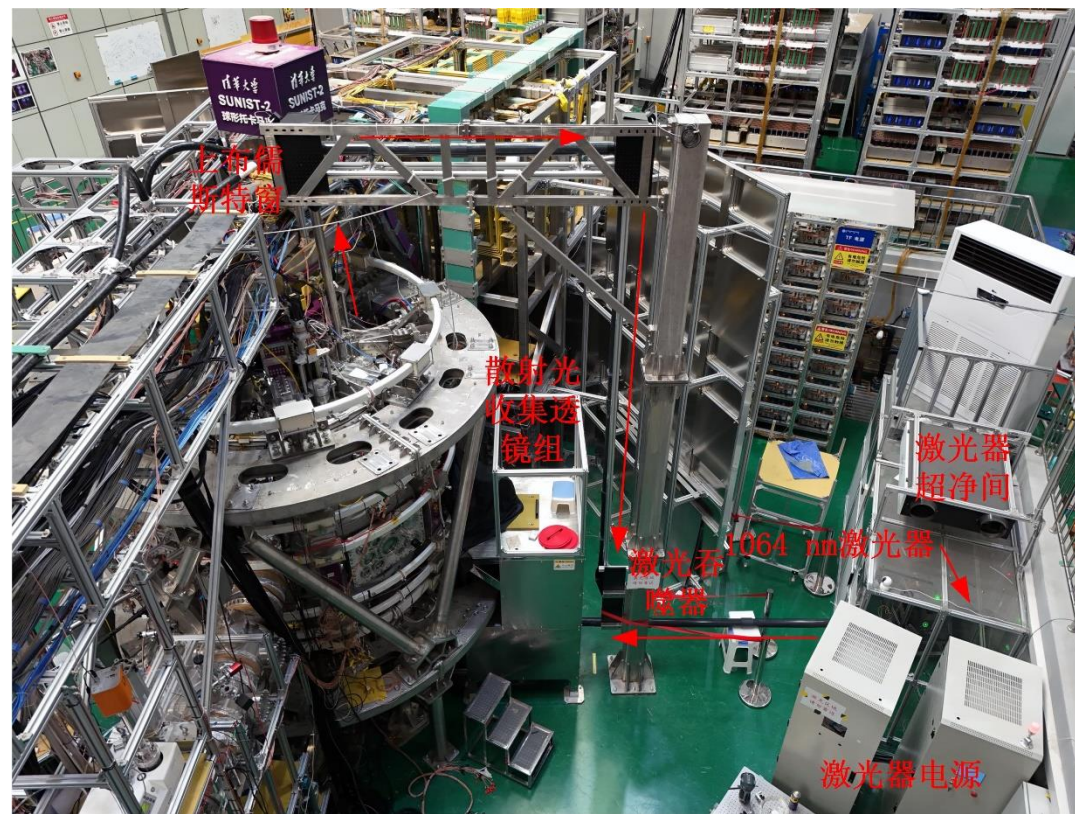
其他电源

- PF: 10 kA / 7电平 / 5 kHz / 6组
- MC: 10 kA / 10 kV / 1组
- 补偿: 2组



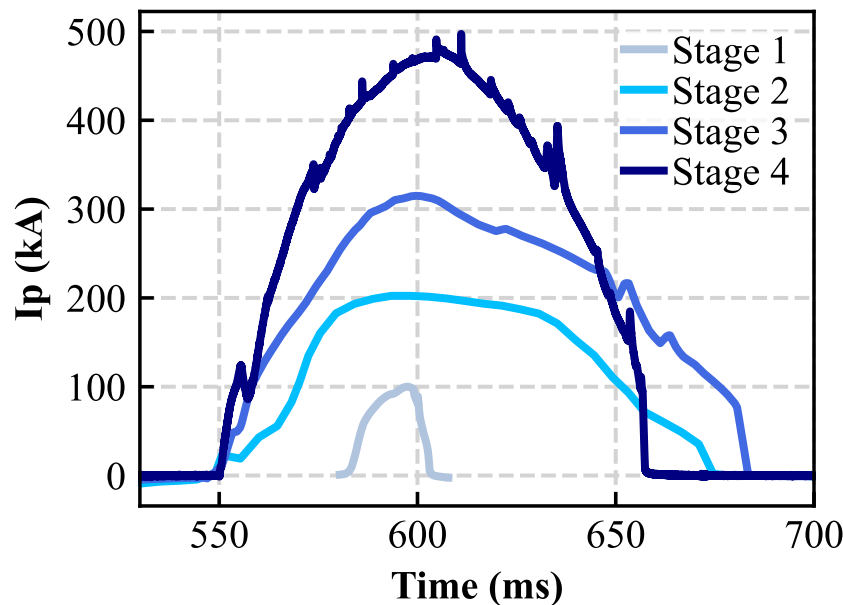
SUNIST-2: 诊断

- 罗科
- 光纤电流传感器
- 磁诊断
 - 200路
- 滤波谱仪
 - 7线 $\times$ 6弦
- 干涉仪
 - 100 GHz $\times$ 5
 - 300 GHz $\times$ 1
- 高速相机 $\times$ 2
- 离子多普勒展宽
- 汤姆逊散射
 - (与西物院合作)
- 主机监测
 - 接头电阻 $\times$ 62
 - 噪声、振动 $\times$ 20
 - 温度 $\times$ 166
 -
 - 共672通道

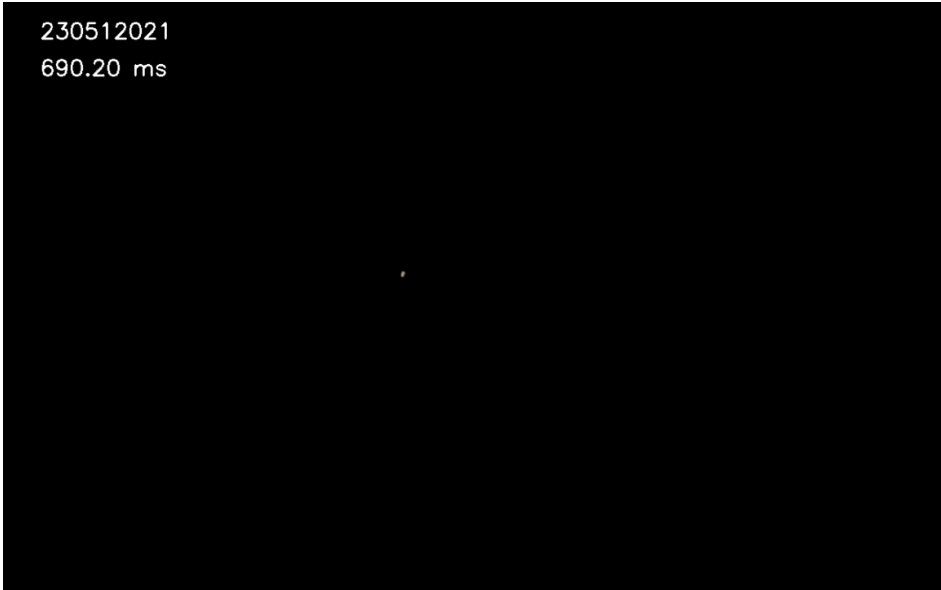
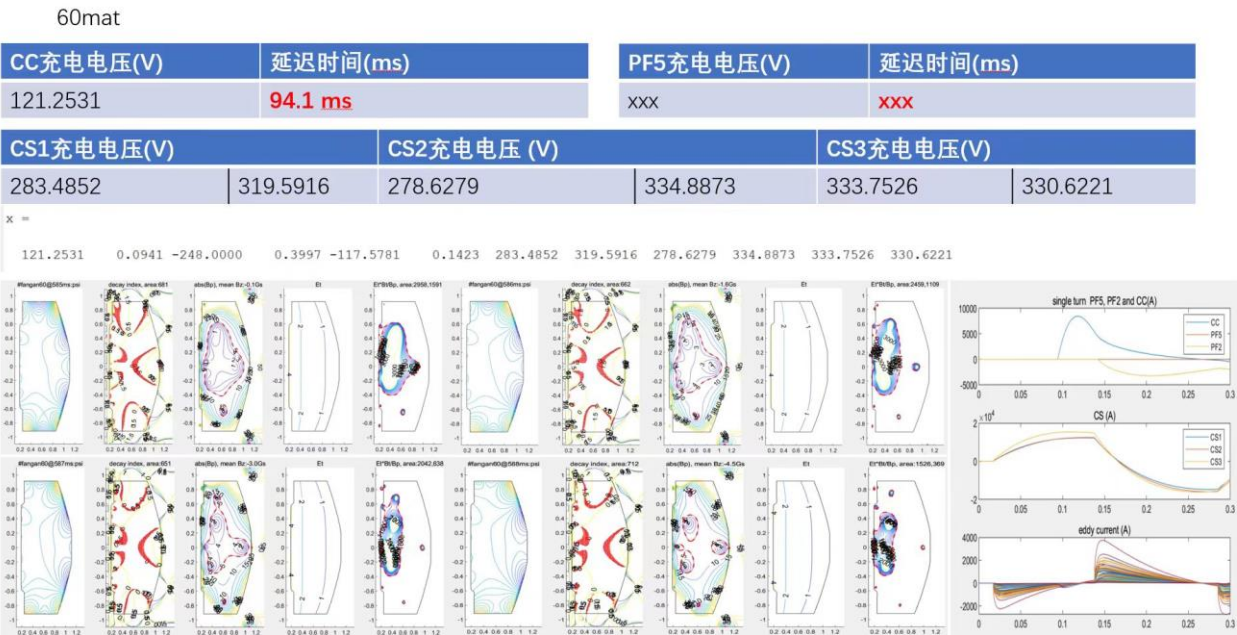


顺利实现等离子体放电

- 2023年3月12日，第一次等离子体
- 2023年5月：达到100 kA
- 近期：接近500 kA



典型等离子体电流波形
 $B_{T0} \sim 0.4 - 0.8 \text{ T}$

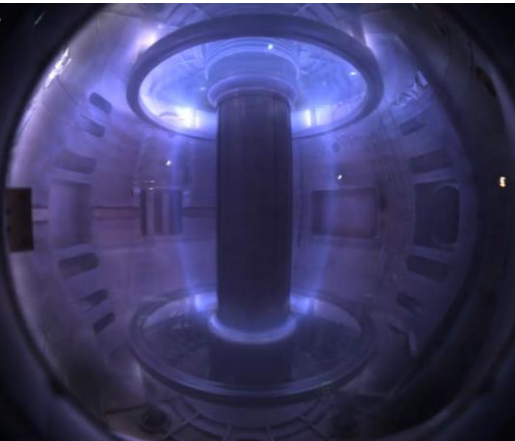
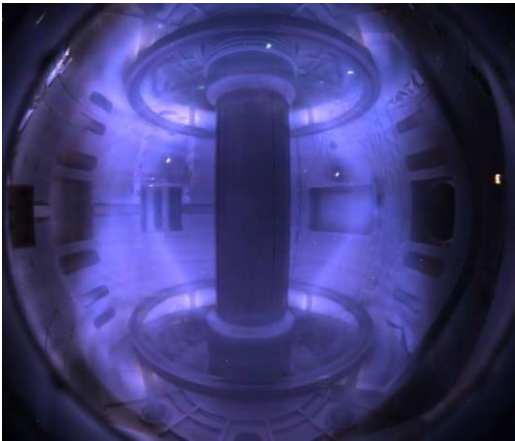
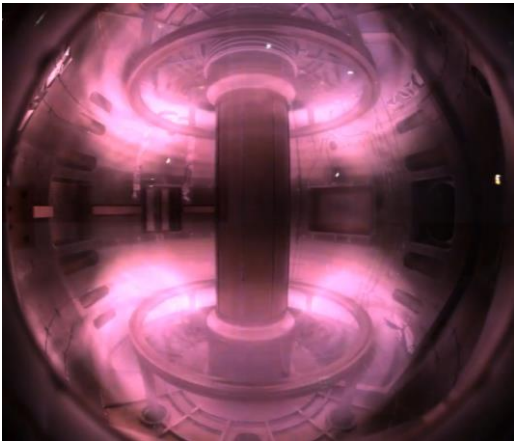
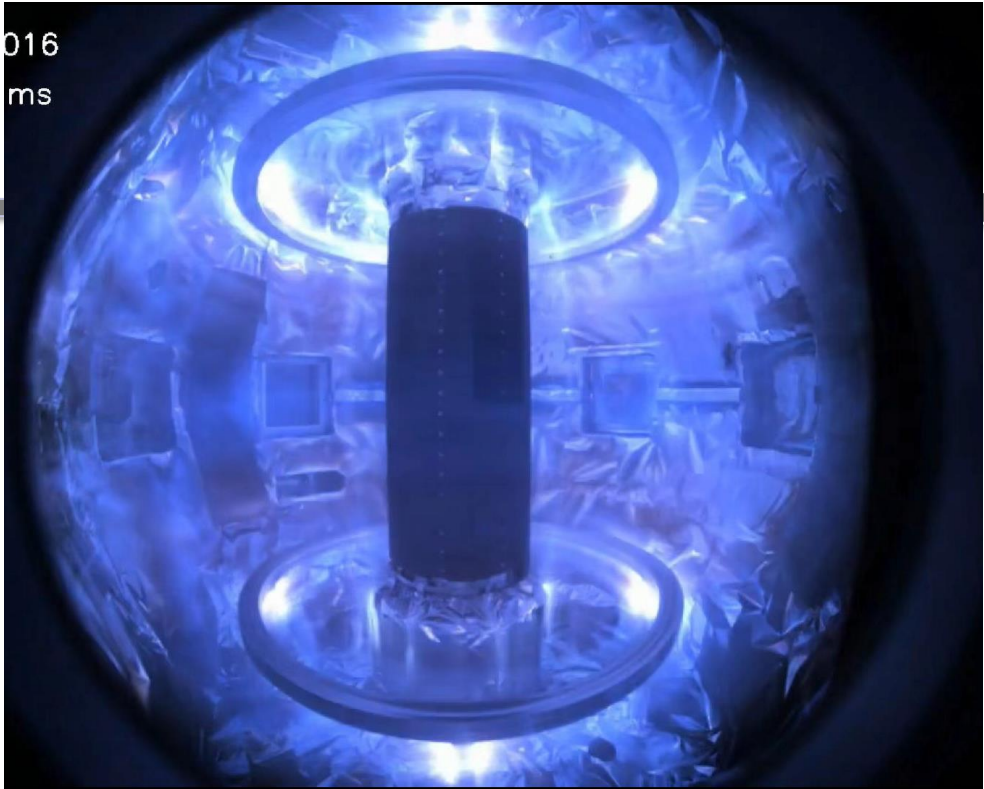
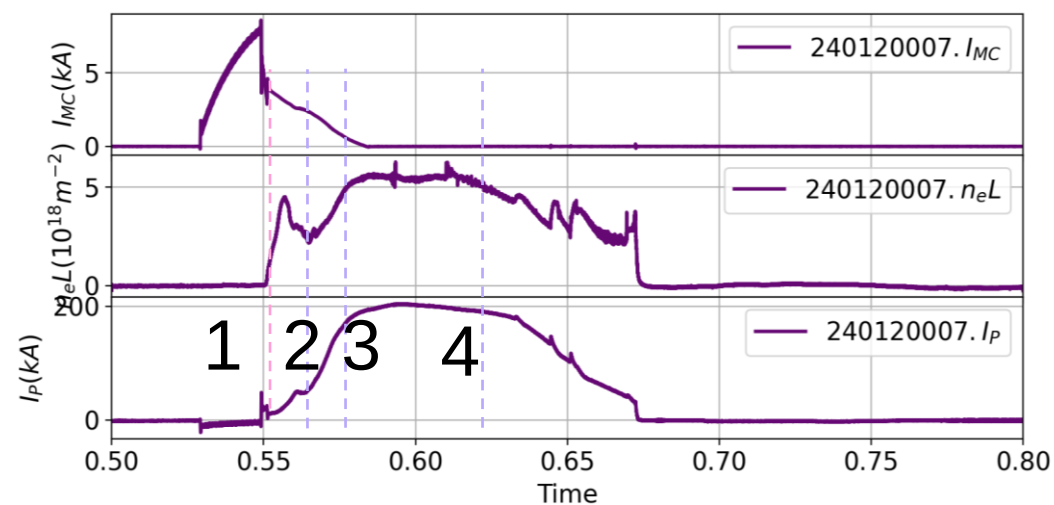


第一轮装置改造

- 将TF电源提高到额定容量
 - 环向磁场 $\sim 0.7\text{--}0.8\text{ T}$
- 增加MC/PF电源
- 完善各子系统
 - 精密进气



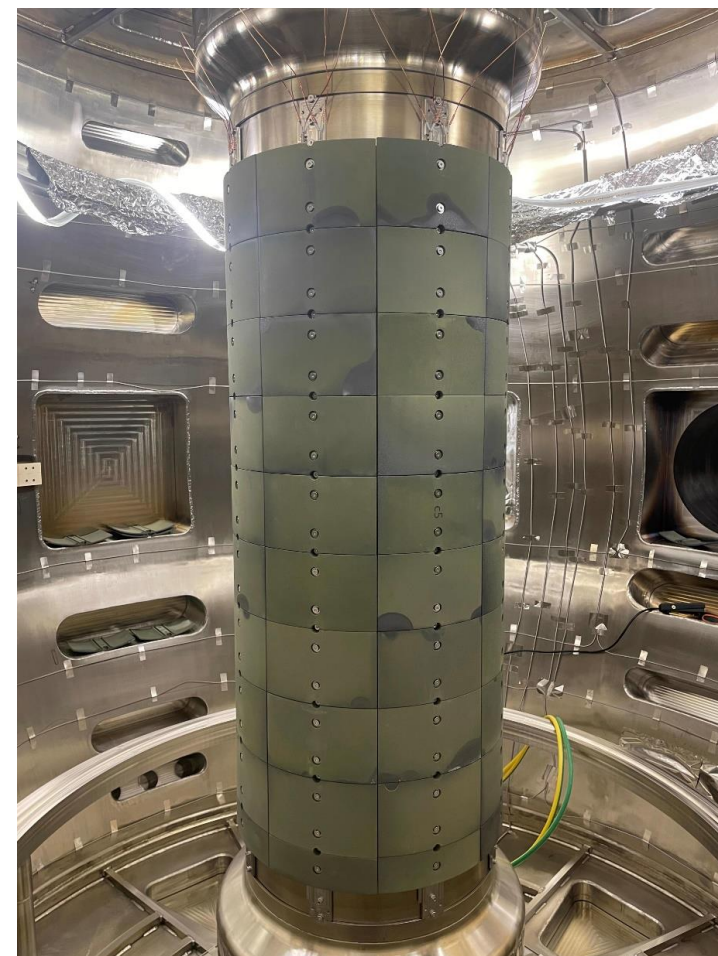
第二轮运行：实现融合-压缩放电



1. 上下双环启动 2. 双环靠拢发生磁重联 3. 双环融合 4. CS维持更高参数运行

第二轮装置改造

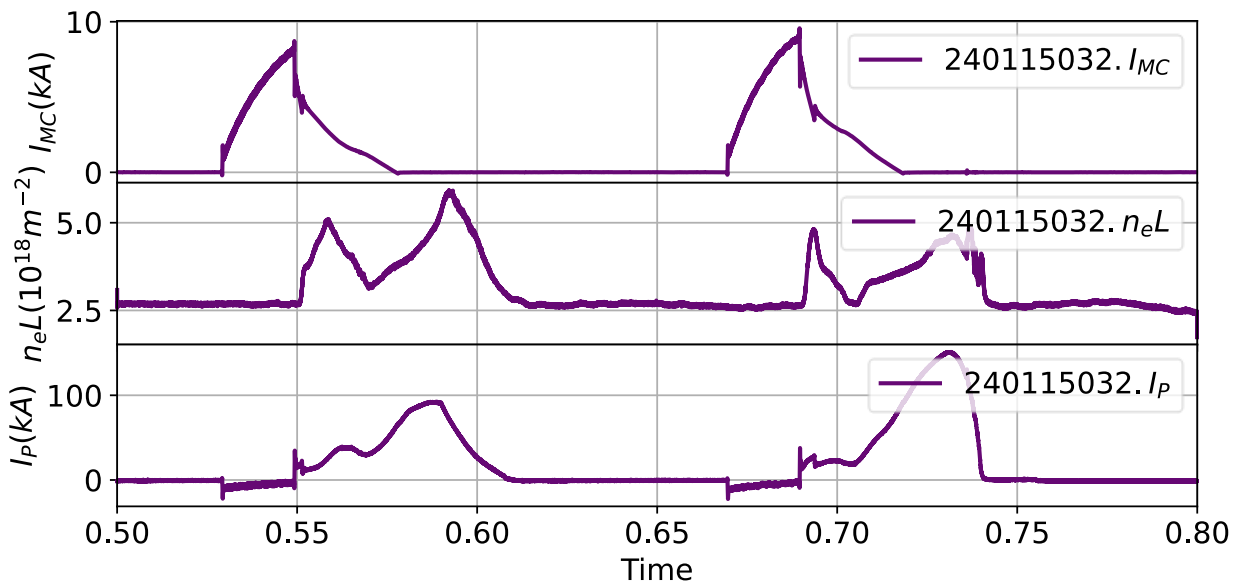
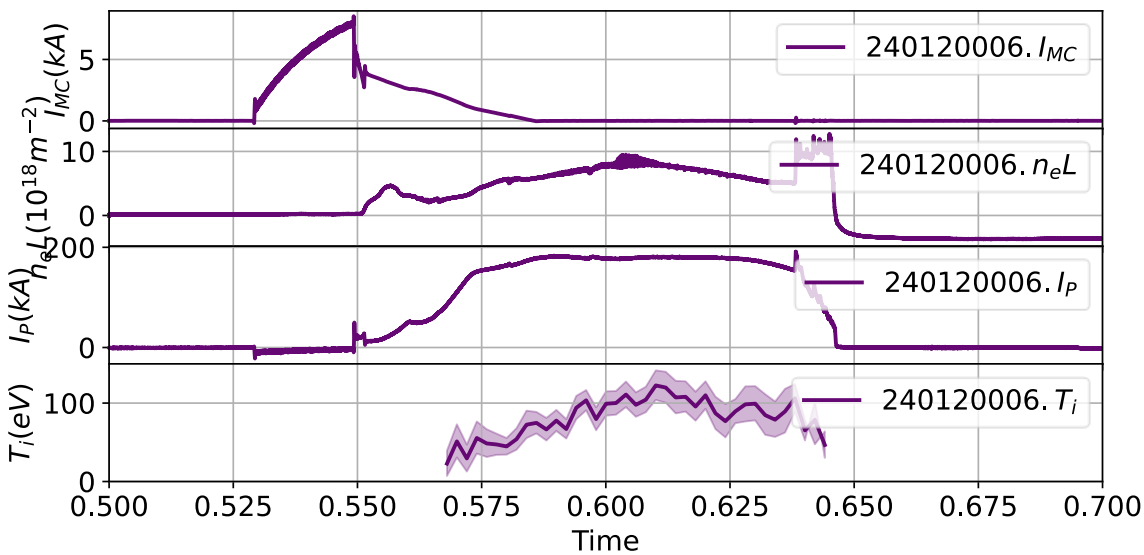
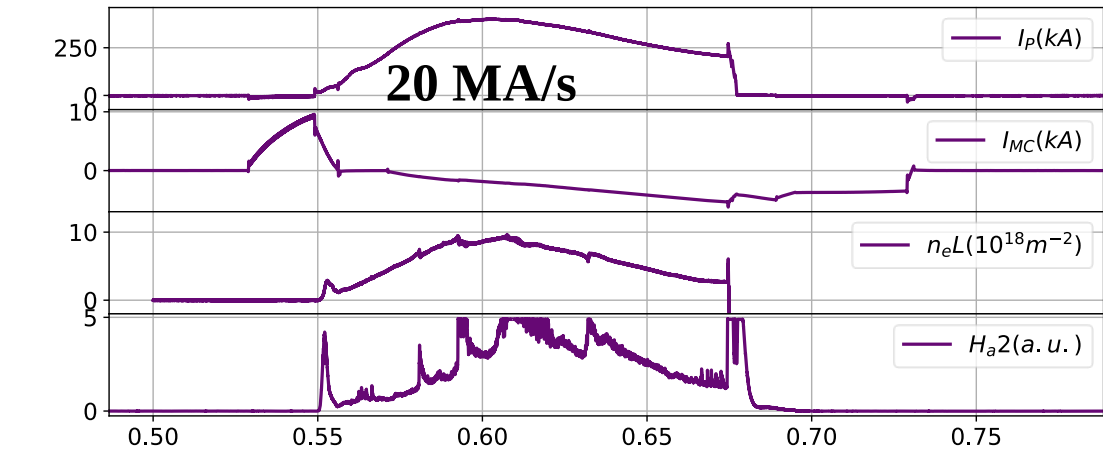
- 第一壁升级
 - 中心柱
 - 低场侧石墨限制器
- 诊断升级
 - 静电探针阵列
 - 光纤电流传感器
 - 逆磁诊断/AXUV/反射计
 - 离子多普勒展宽
 - 汤姆逊散射
- 结构加固
 - 辅助设备
 - 等离子体枪
- 完善各子系统



第三轮运行：实现关键参数测量和连续两次融合-压缩过程

$I_P \times 2, B_T \sim 0.81 T$

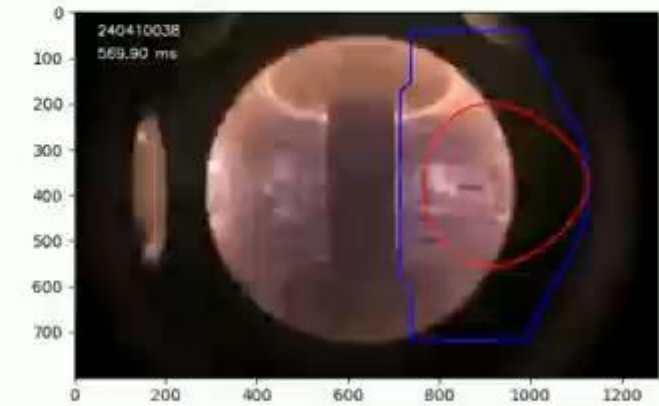
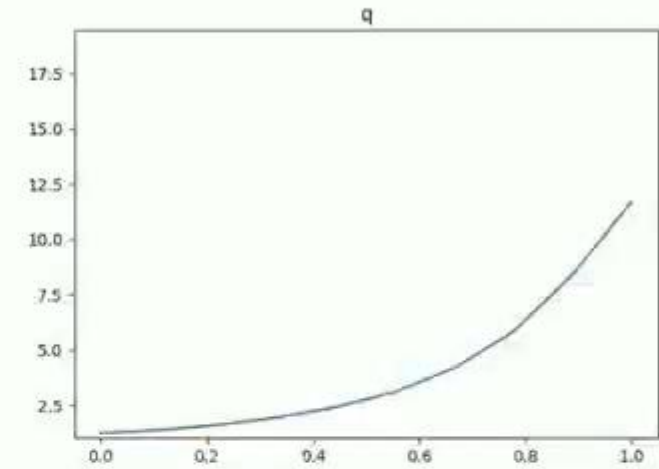
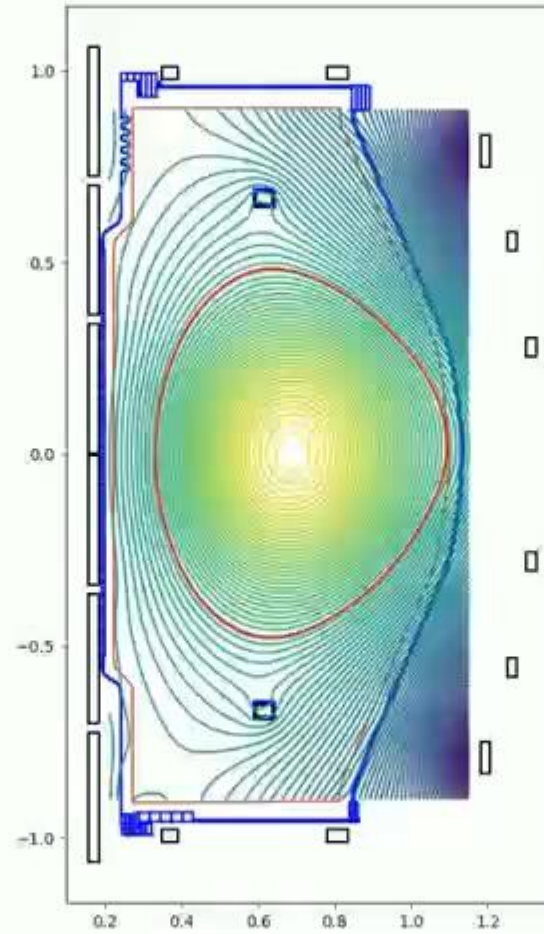
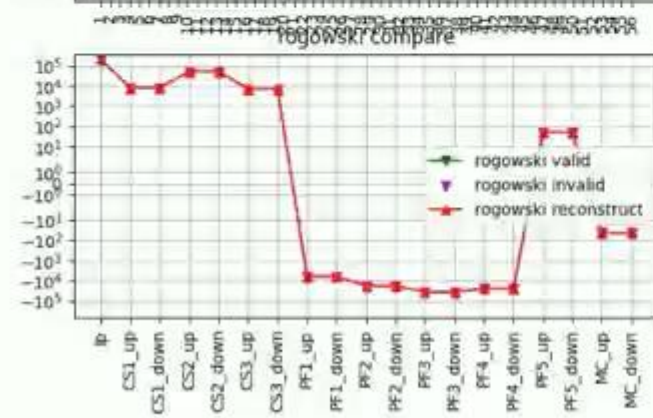
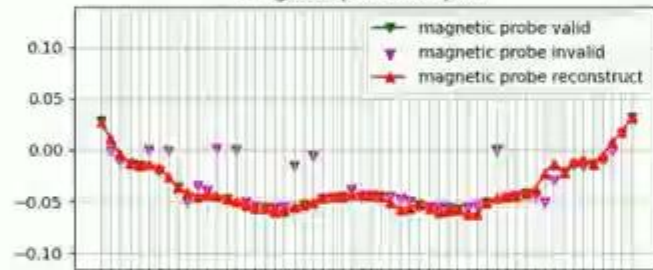
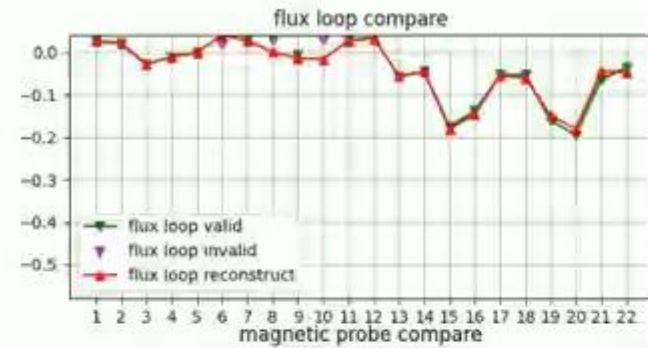
Shot 240410038



重复运行

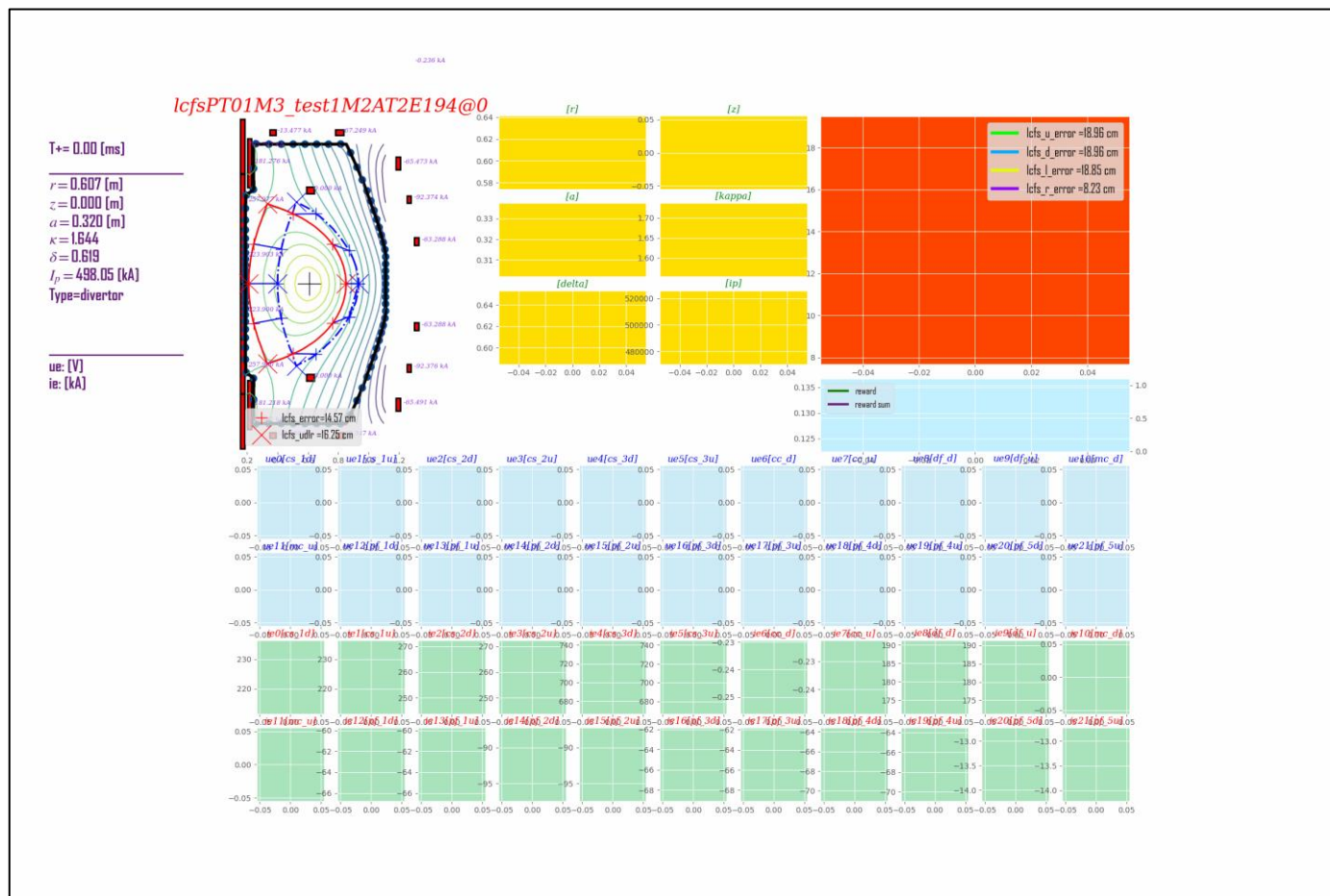
离子温度测量

shot=240410038 t=0.57

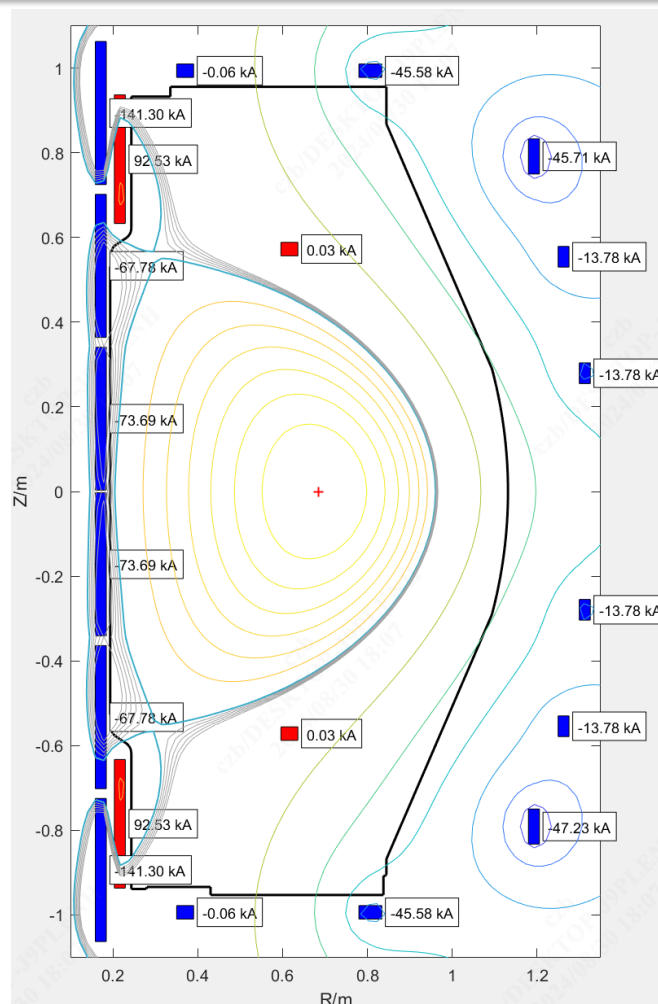


AI+聚变：基于强化学习的等离子体控制器

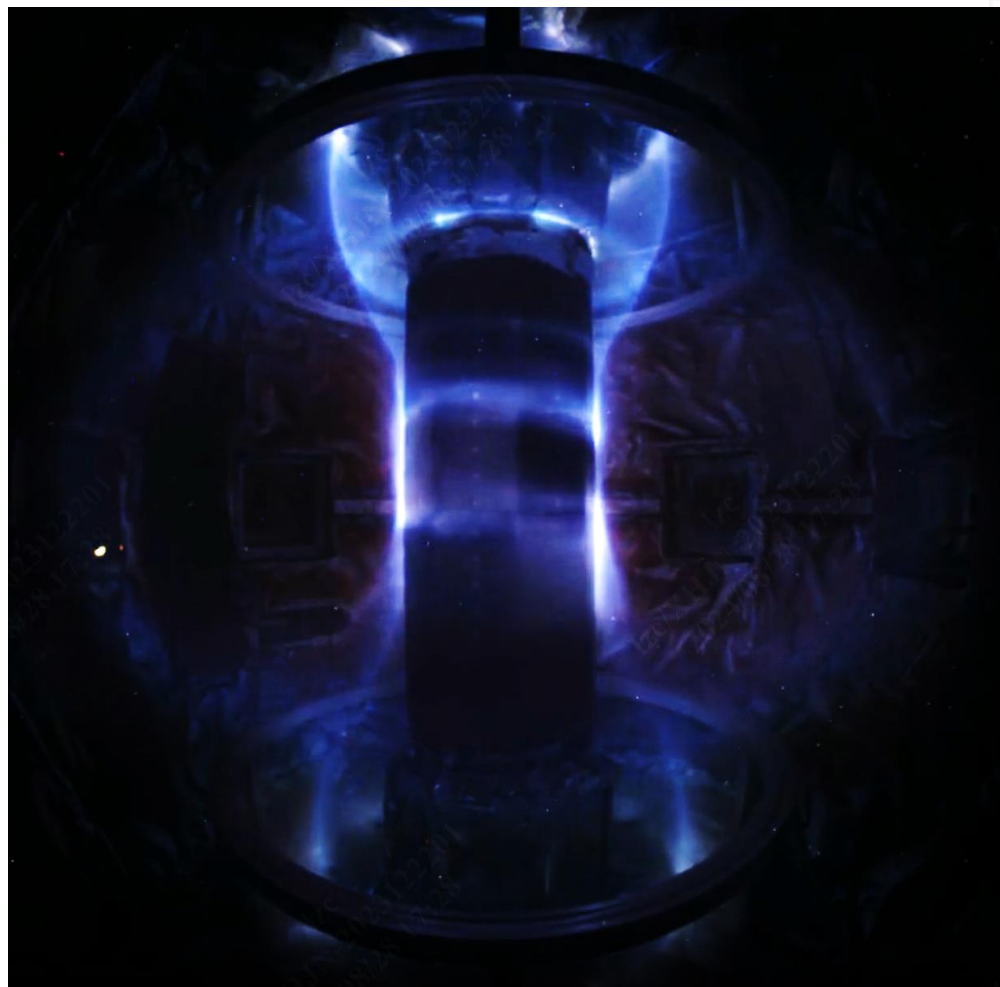
- 基于自研的托卡马克模拟器
+代理
- 更加优化、精确、快速的等离子体控制
 - 形状、位置、等离子体电流等
关键参数
 - 多种控制目标或组合控制目标



第四轮运行：控制能力提升，实现偏滤器放电

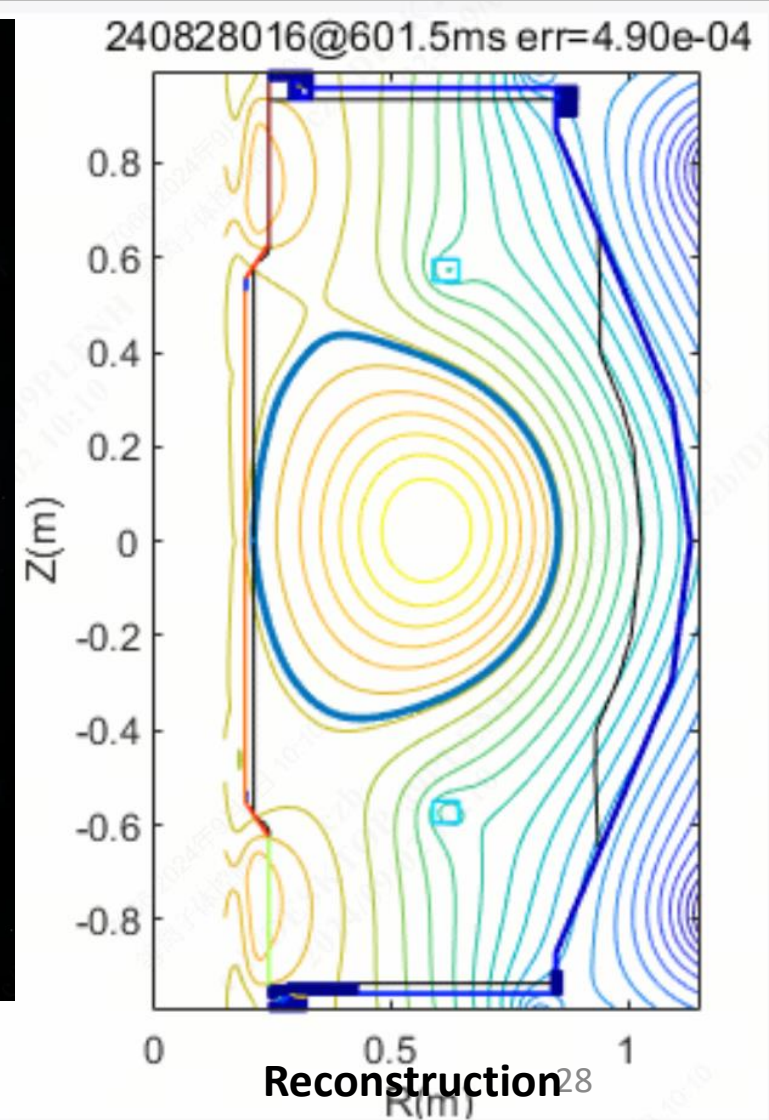


Discharge design

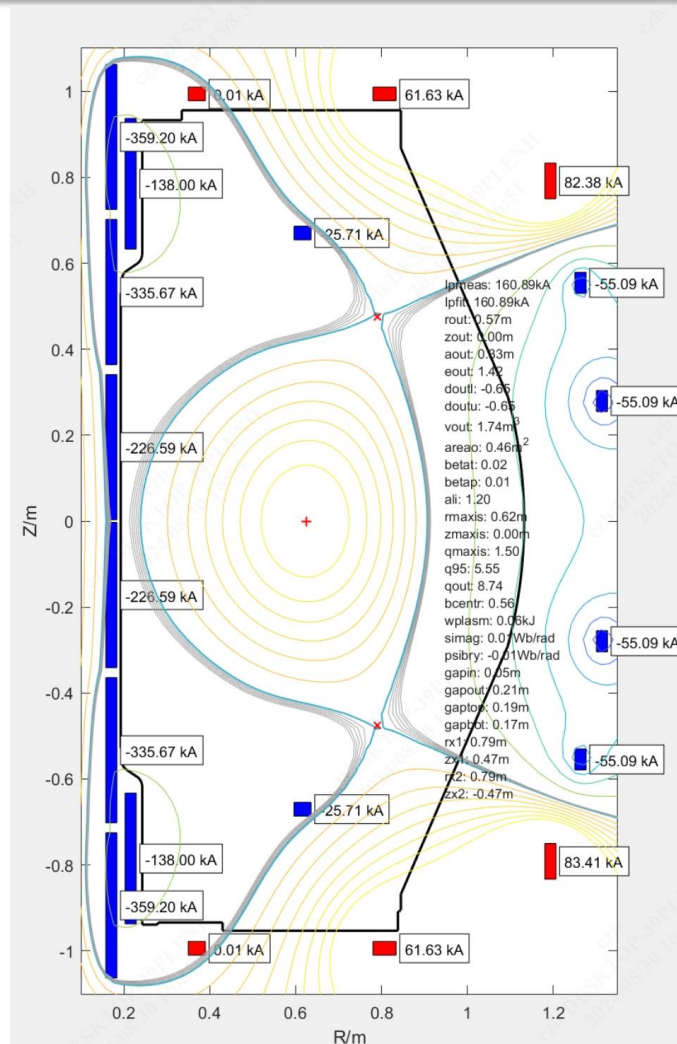


Experiments

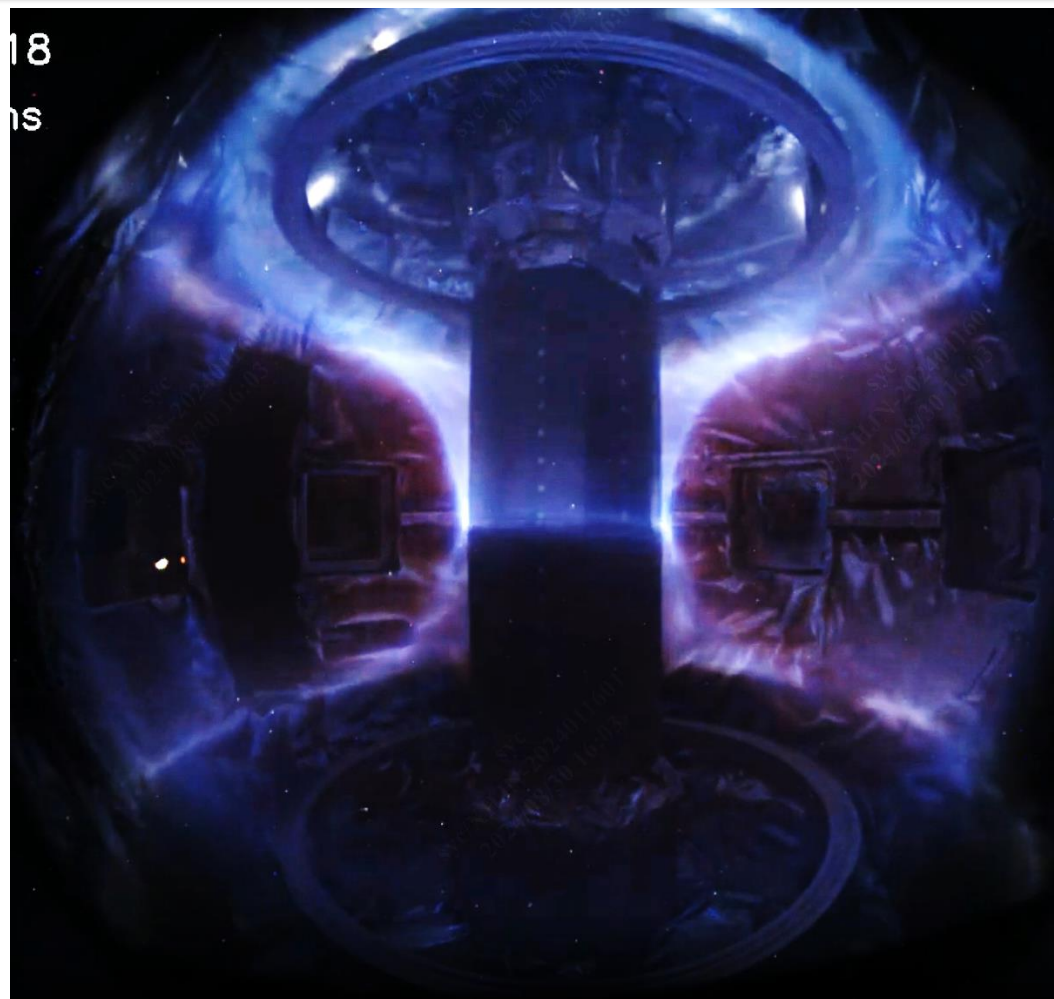
R_0 : 0.61 m, a : 0.38 m, κ : 1.51, δ : 0.6



第四轮运行：控制能力提升，实现负三角形变放电

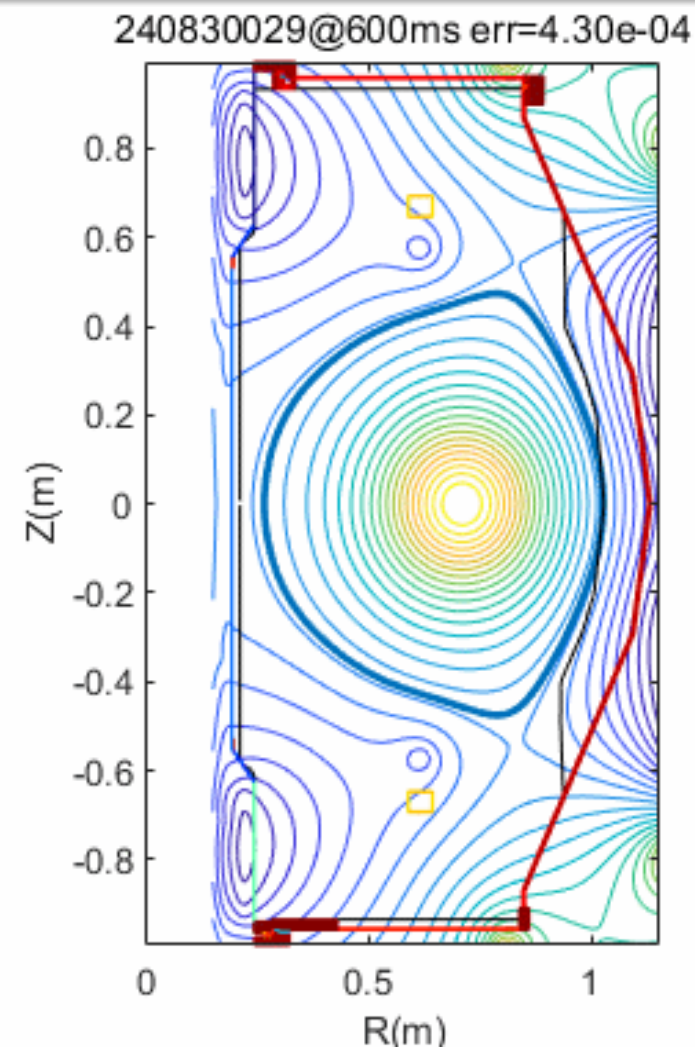


Discharge design



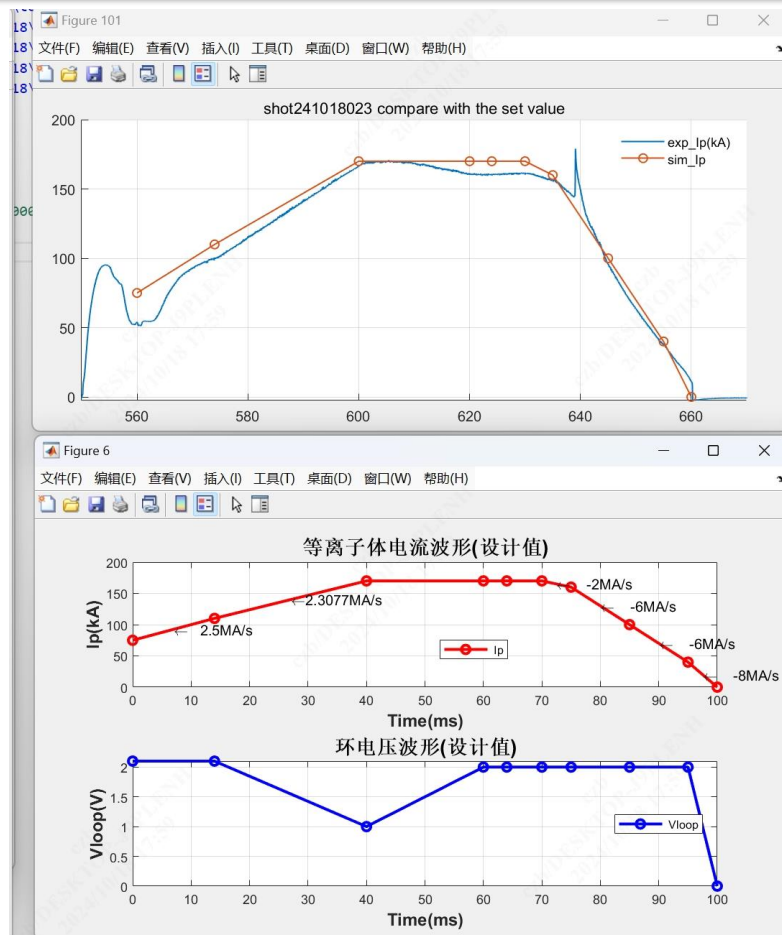
Experiments

R_0 : 0.57 m, a : 0.33 m, κ : 1.42, δ : -0.65



Reconstruction₂₉

第五轮运行：放电控制/锂化

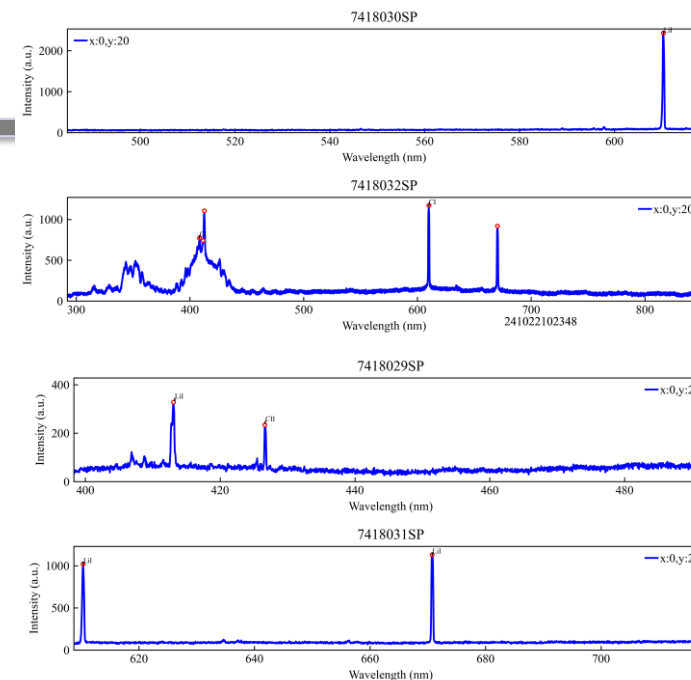


Discharge program

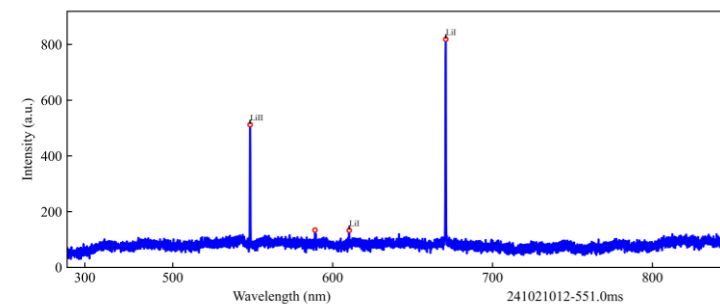


Lithium evaporation

Fully covered by stainless steel foil for easy removal of Li

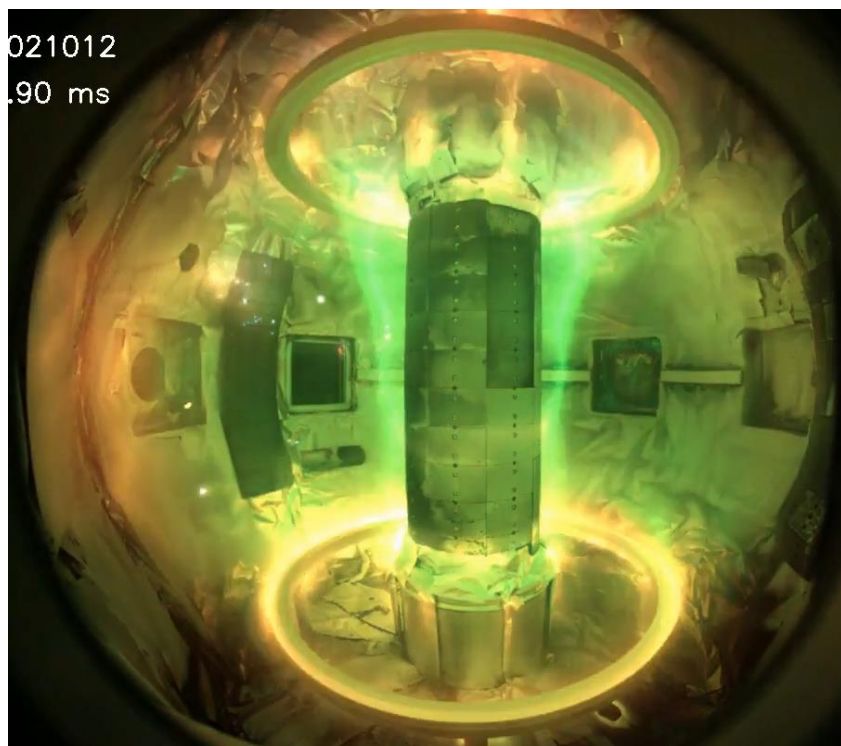


LIBS shows strong lithium coverage

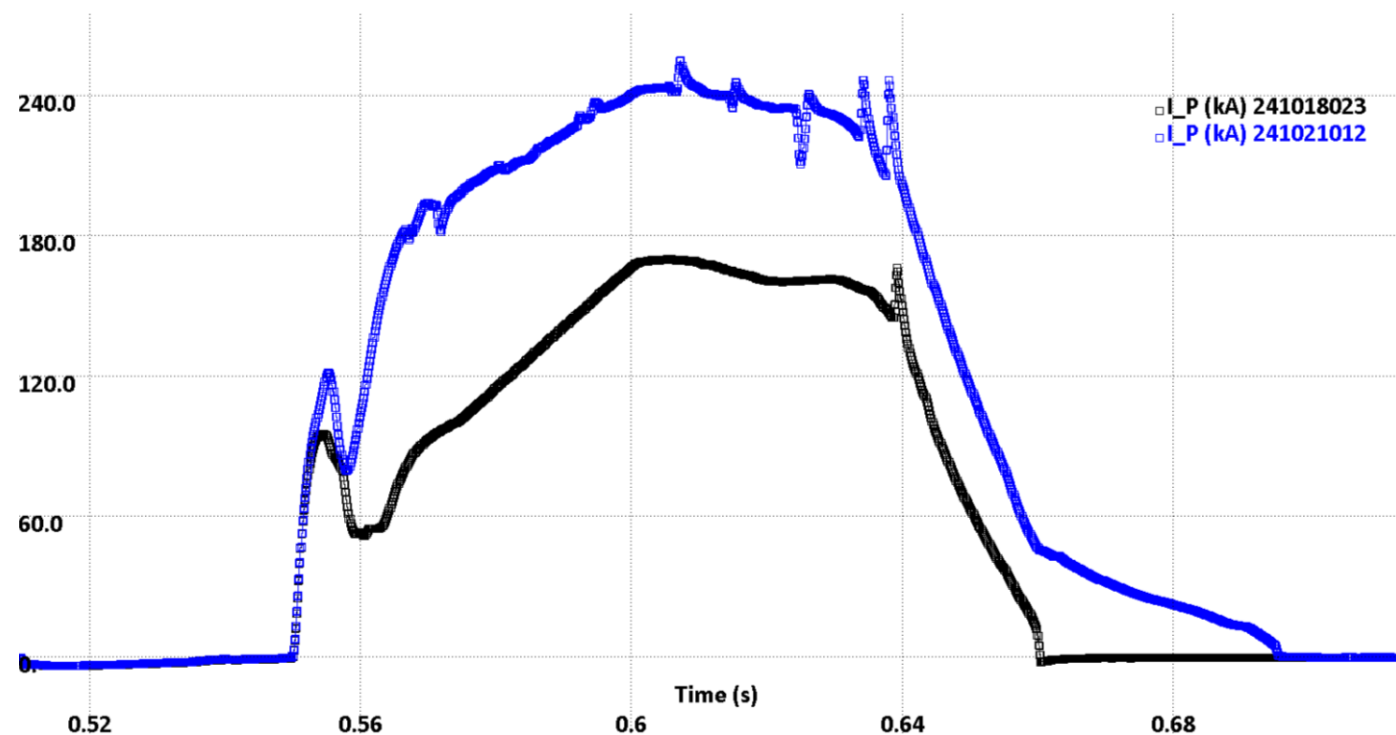


H-alpha eliminated after breakdown

第五轮运行：放电控制/锂化

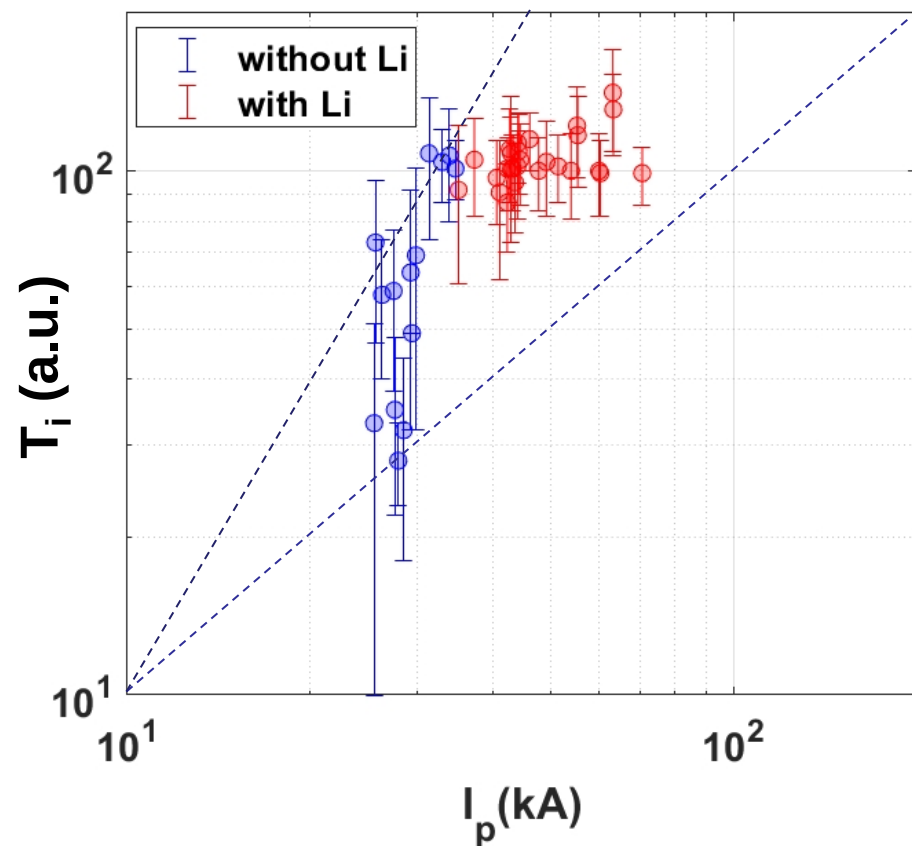


Plasma image after Li-coating



Plasma current with / without Li

下一阶段将主要开展物理研究



- ✓ 良好的融并启动和加热控制
- ✓ 融并启动和加热的精确诊断
- ✓ 融并加热的物理模拟
- ✓ 获得融并加热的定标律和效率

国家磁约束核聚变能发展研究专项2024年指南项目《低环径比聚变等离子体融并压缩的物理和技术研究》支持

总结

- ST有着有趣的特点，SUNIST及国内建成的数个ST将为聚变研究做出贡献
- SUNIST-2在2023年建成，重点在融合压缩启动和加热机制上开展研究，未来也将在高磁场ST下等离子体约束和输运上进行探索
- 近期主要工作：验证融并加热物理，发展相关技术
 - 控制能力的继续提升
 - 高时空诊断能力（ T_i ， T_e ， V 及重联结构）
 - 重联加热过程模拟
 - 磁重联物理理解：加热定标律和效率
- 欢迎大家莅临指导、合作交流！