

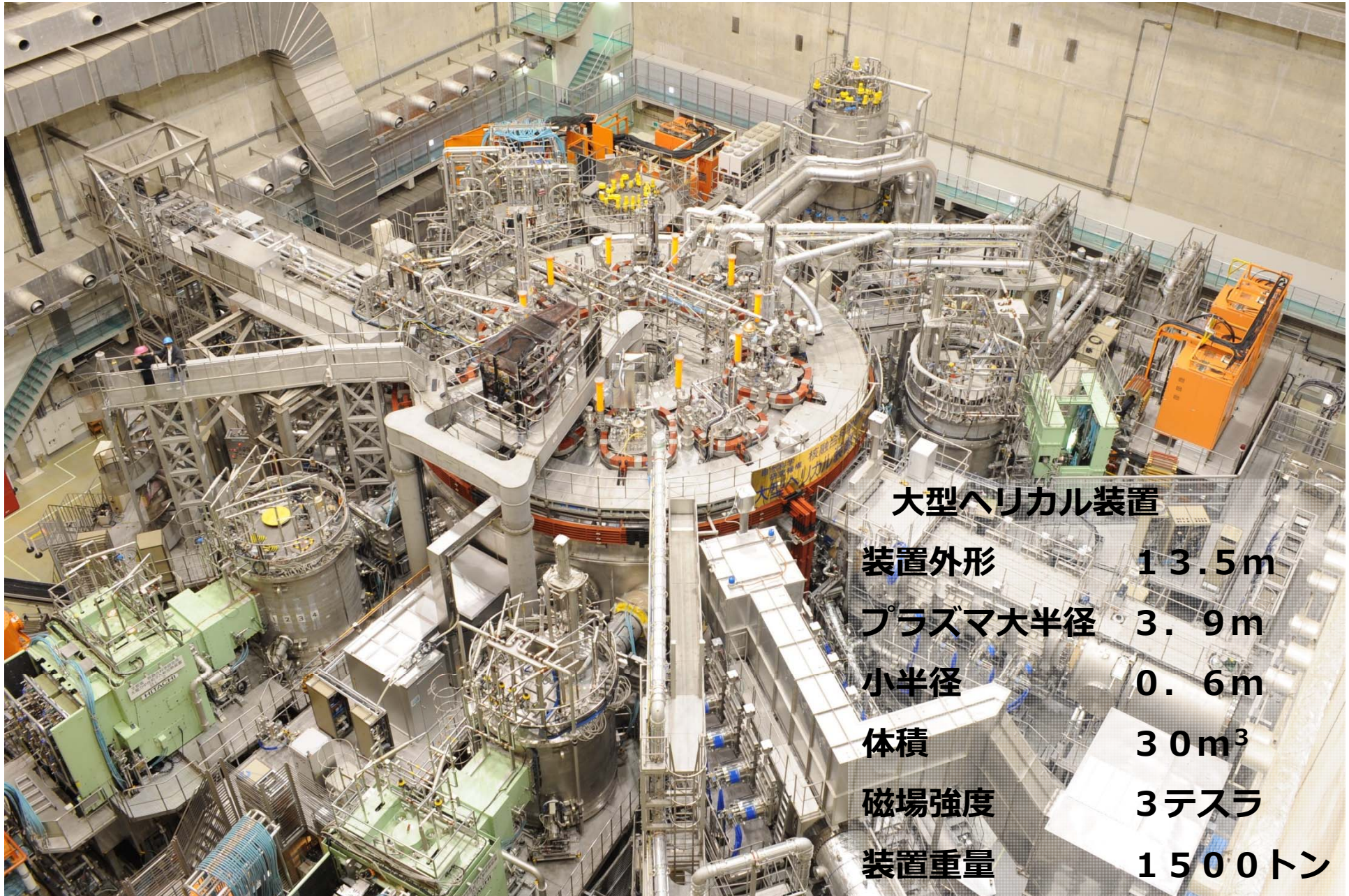
大型ヘリカル装置(LHD)周辺プラズマにおけるダストの軌道の三次元計測

核融合科学研究所・高密度プラズマ物理研究系 庄司 主

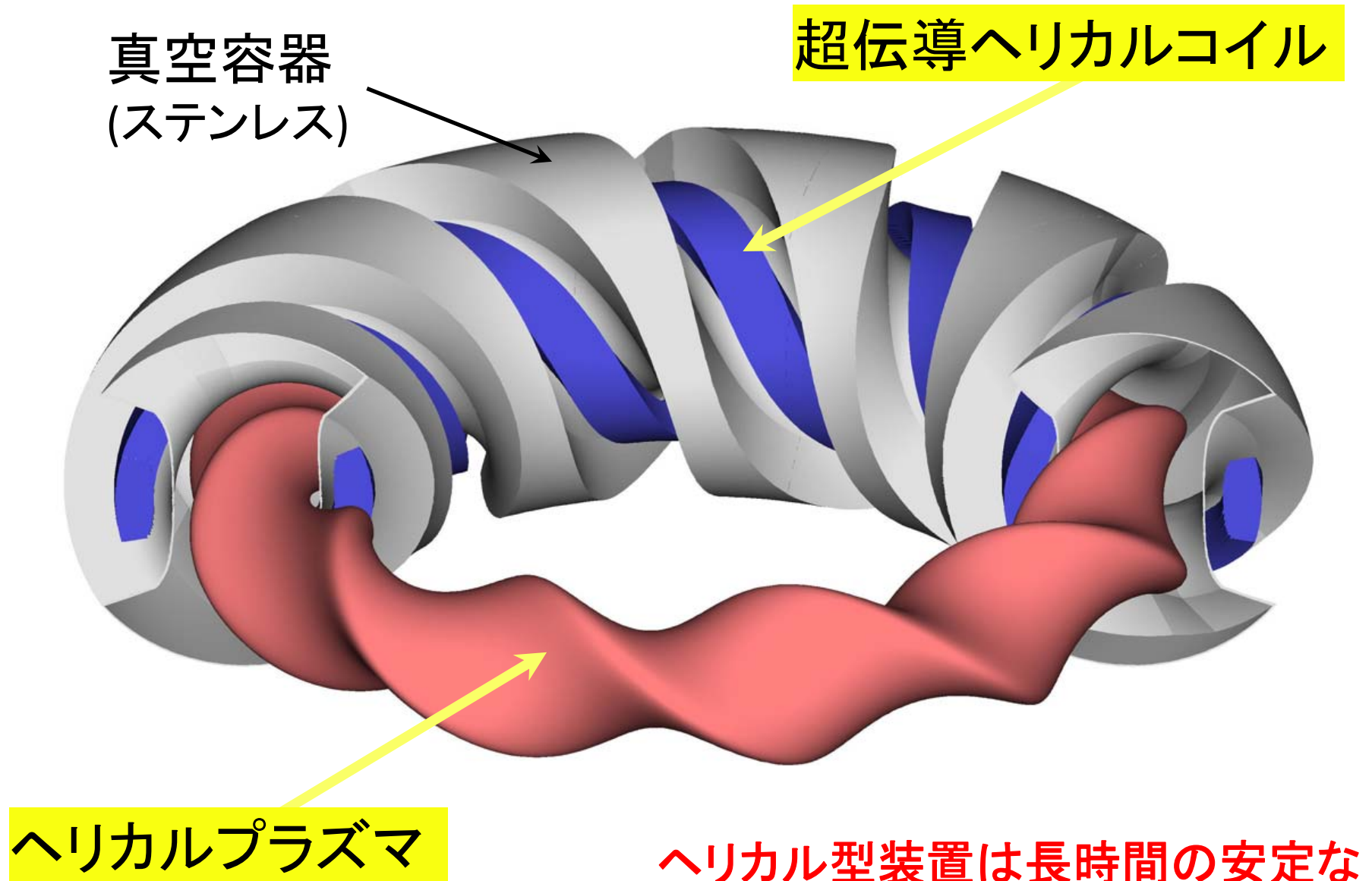
大型ヘリカル装置(LHD)では、真空容器内部あるいはプラズマ加熱用のICRFアンテナ内部からのダスト発生によって、プラズマ放電時間の伸張などが妨げられている。ダストがLHD周辺プラズマに及ぼす影響を明らかにするために、ステレオ視光学系付き高速カメラによってダストの三次元的軌道を計測した。さらに、ダストの光の帯の映像からプラズマ周辺部の磁力線構造の可視化に成功した。

- ・ 大型ヘリカル装置(LHD)について
- ・ プラズマ監視用CCDカメラ、高速カメラについて
- ・ 高速カメラによるLHDプラズマのダストの観測結果の例
- ・ ステレオ視高速カメラによるダストの三次元軌道の計測
- ・ ダストの光帯を利用したプラズマ周辺部の磁力線構造の可視化
- ・ まとめ

大型ヘリカル装置(LHD)

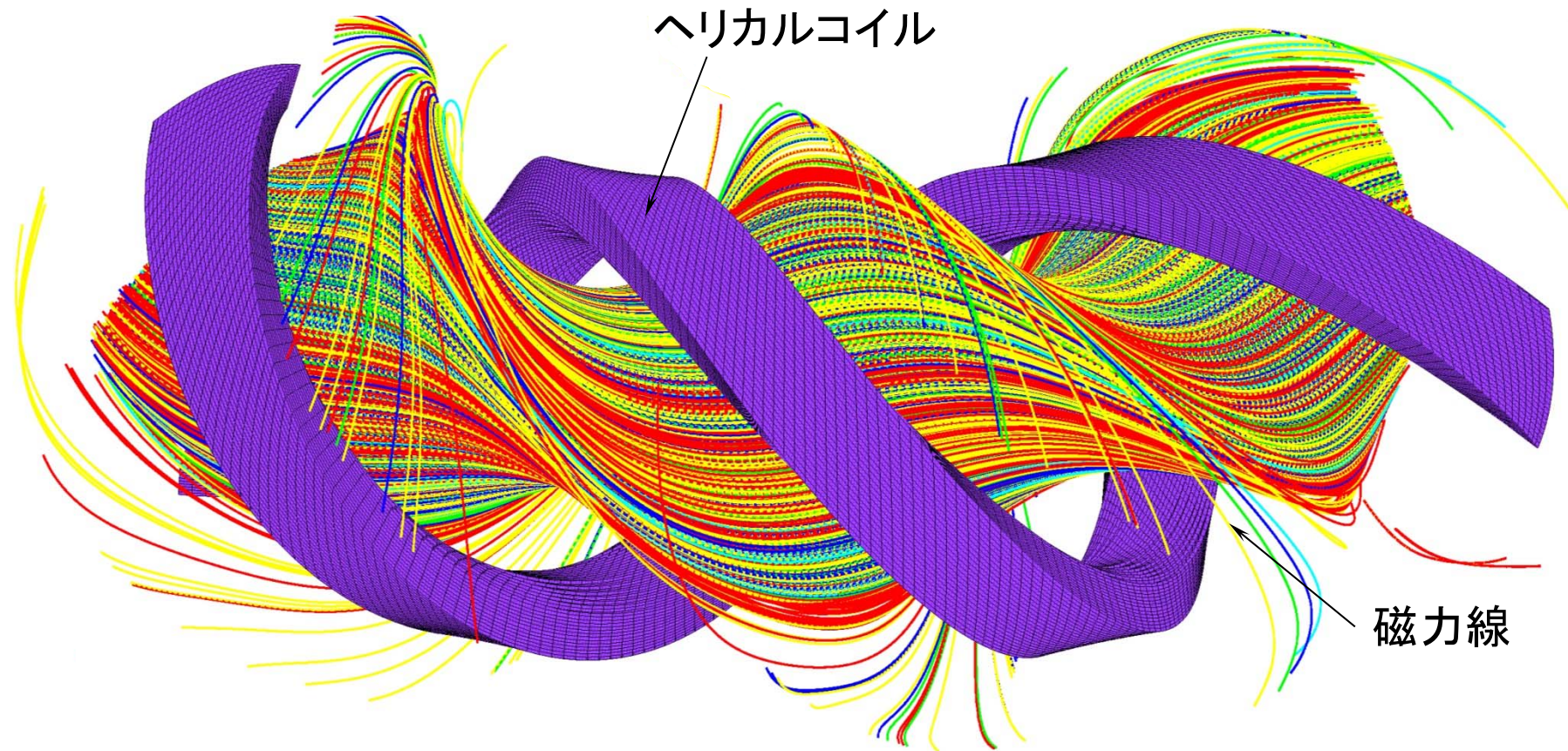


超伝導ヘリカルコイルとヘリカルプラズマ



ヘリカル型装置は長時間の安定な
運転に向いている！

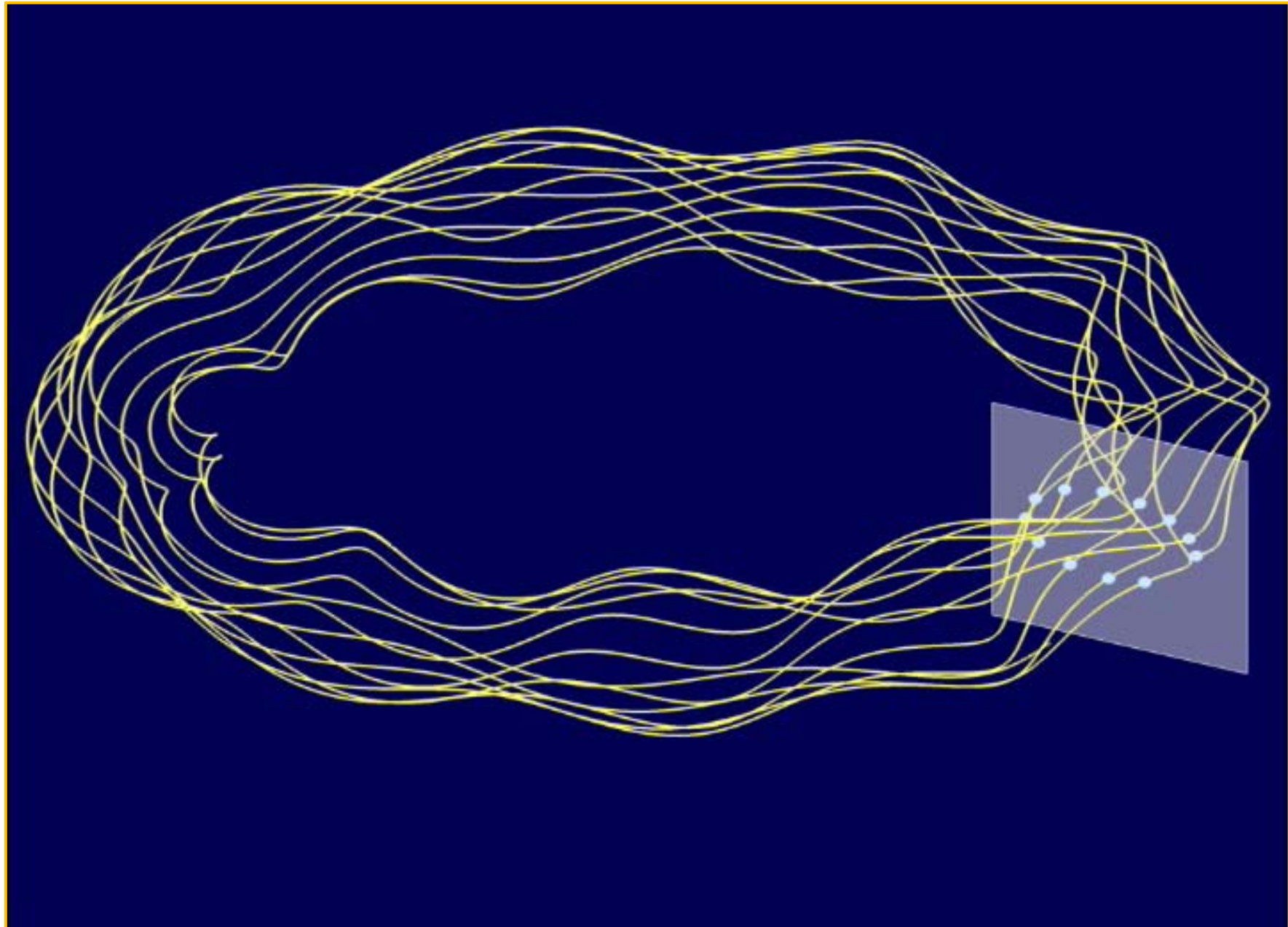
超伝導ヘリカルコイルとヘリカルプラズマ



ヘリカルプラズマ

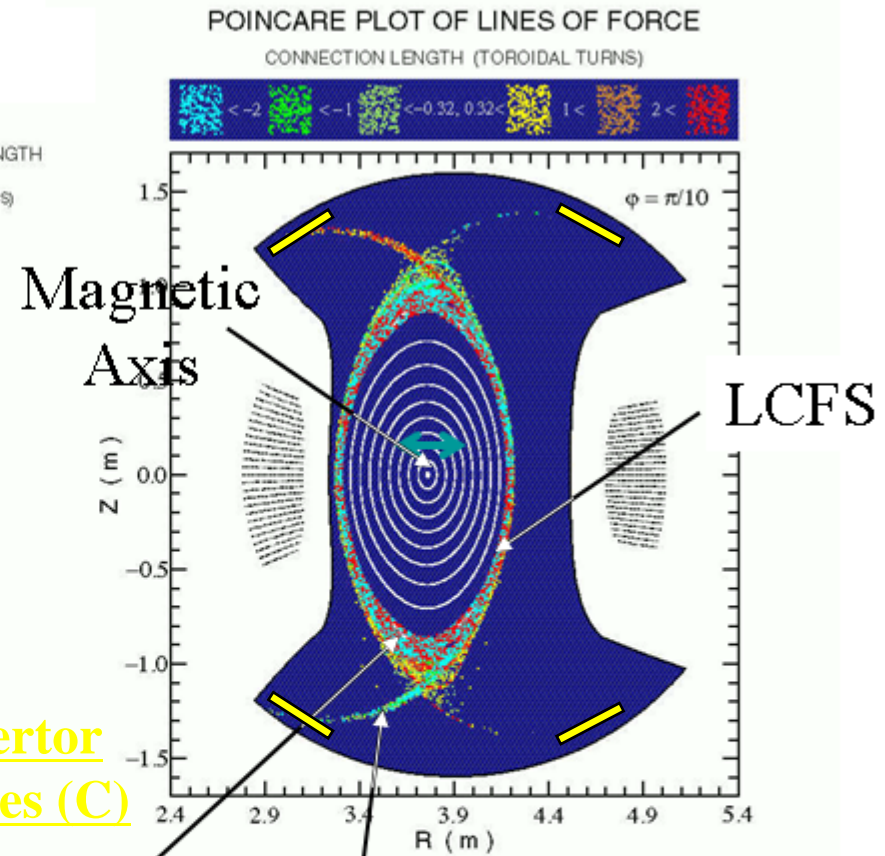
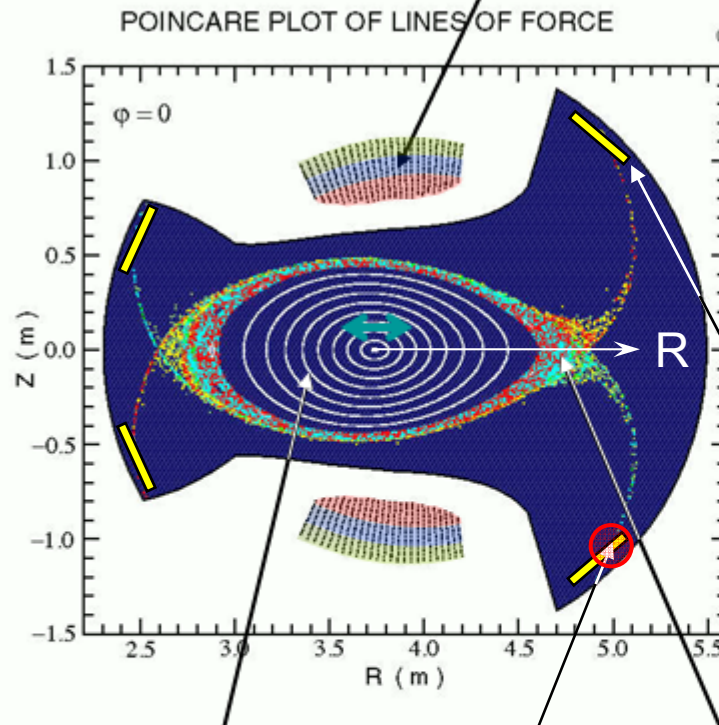
ヘリカル型装置は長時間の安定な
運転に向いている！

大型ヘリカル装置(LHD)の磁力線構造



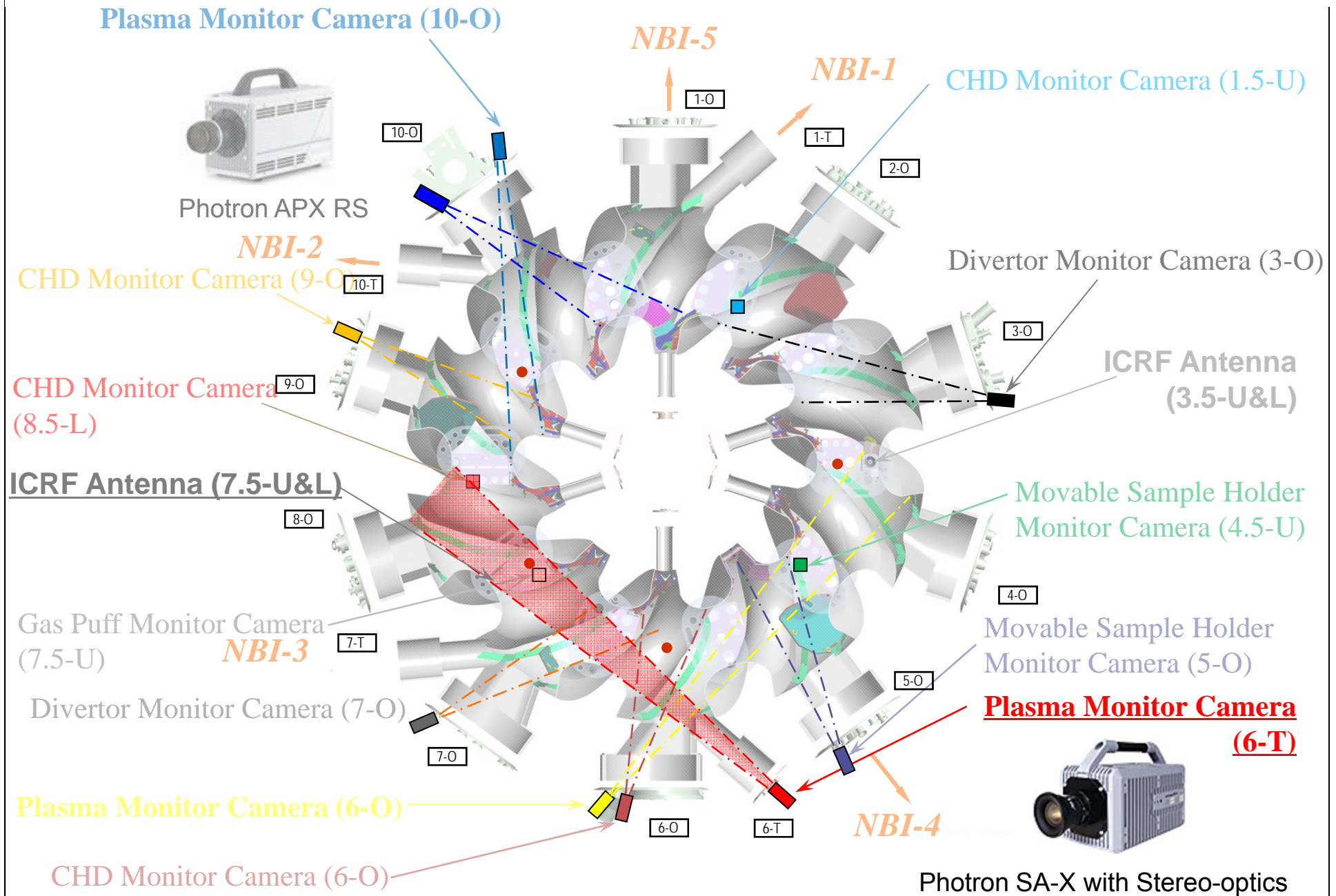
大型ヘリカル装置(LHD)における磁力線貫通図

$R_{ax}=3.75m$ Helical Coil

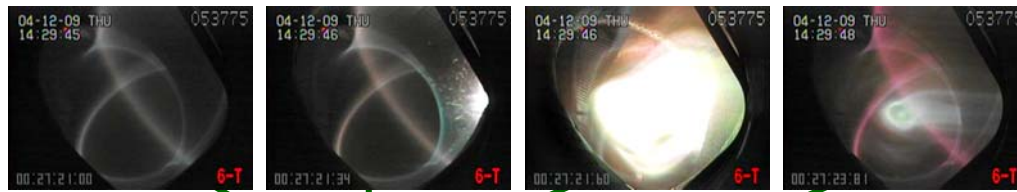


LHDでは、乱雑な磁力線構造(エルゴディック層)が、入れ籠状の磁気面構造を持つ主プラズマ閉じ込め領域(最外殻磁気面の内側)を取り囲む配位となっている。さらに、エルゴディック領域からは4つの足(ダイバータレッグ)が真空容器壁まで伸びている構造となっている。ダイバータレッグが当たる場所にはダイバータタイル(等方性黒鉛製)が設置されている。

長時間放電実験時のプラズマ監視用カメラの配置



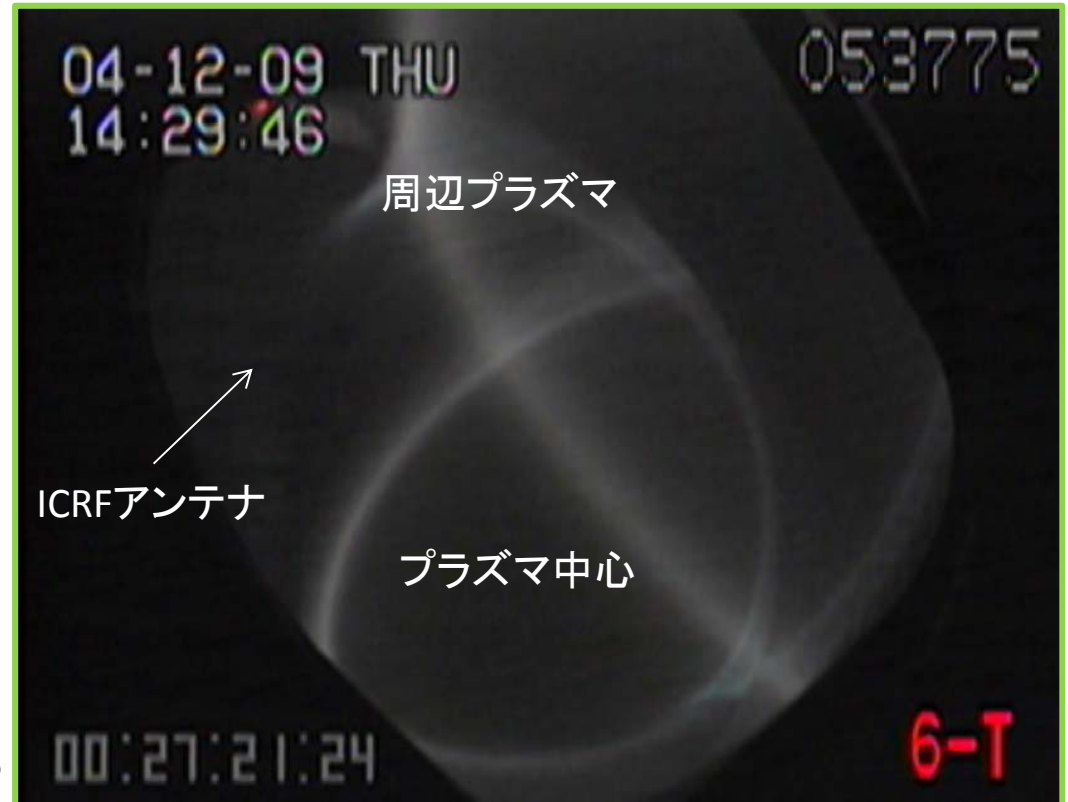
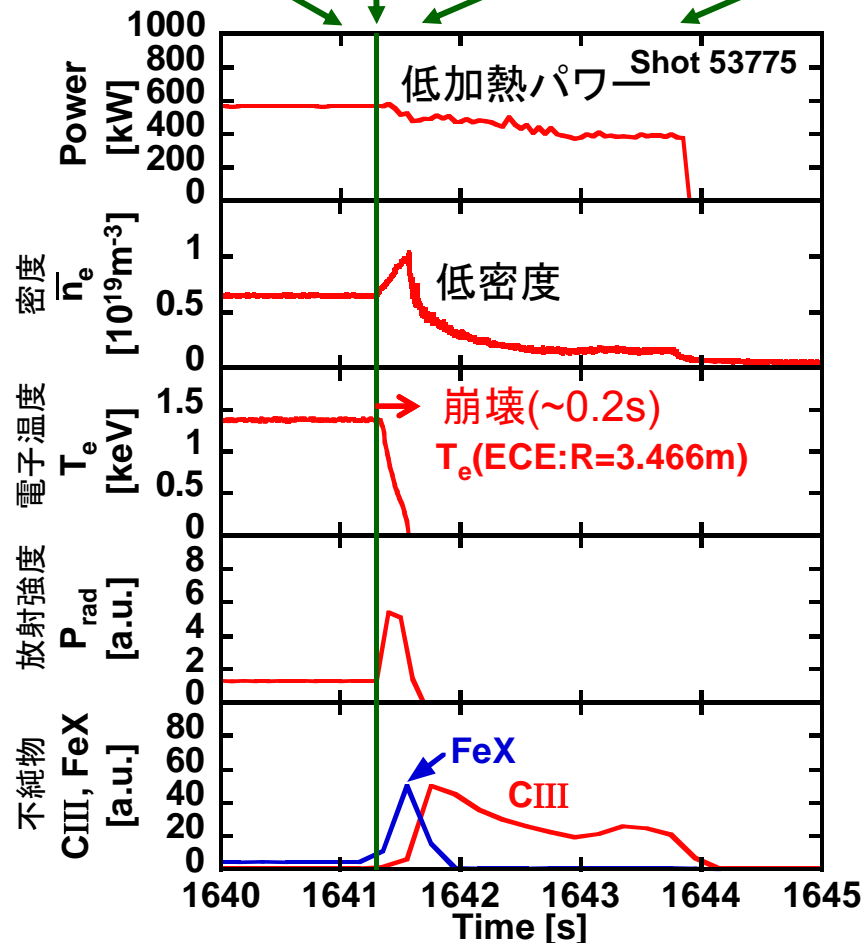
真空容器壁内のダストの発生によって長時間放電が停止



Spark

真空容器で火花とダストの発生を観測
鉄の急激な増加後に、プラズマが崩壊
電子密度上昇・電子温度低下を観測
プラズマ崩壊の時定数 ~ 0.2 秒程度

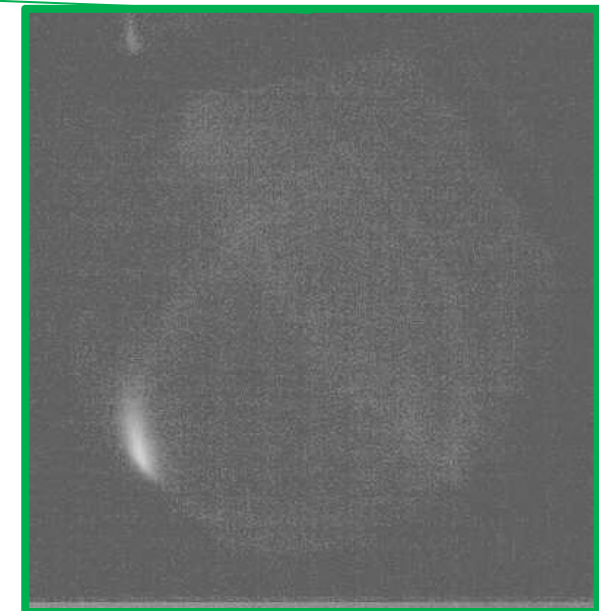
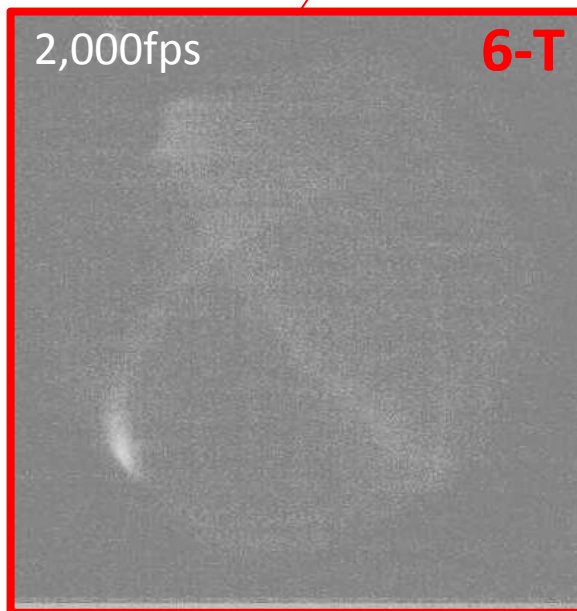
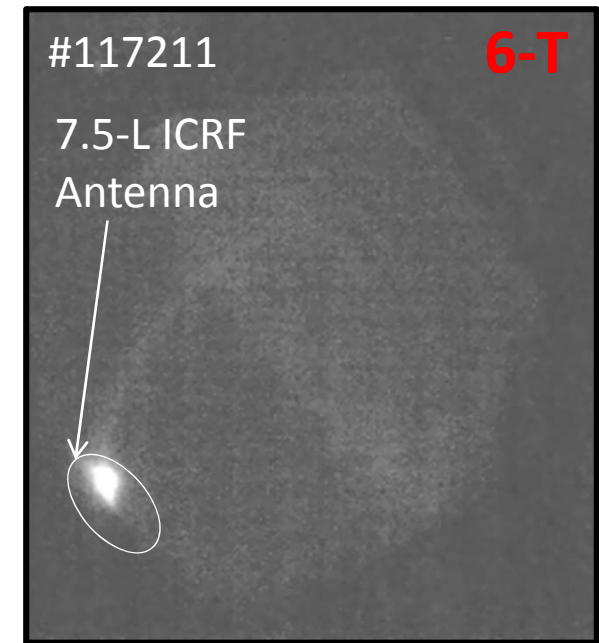
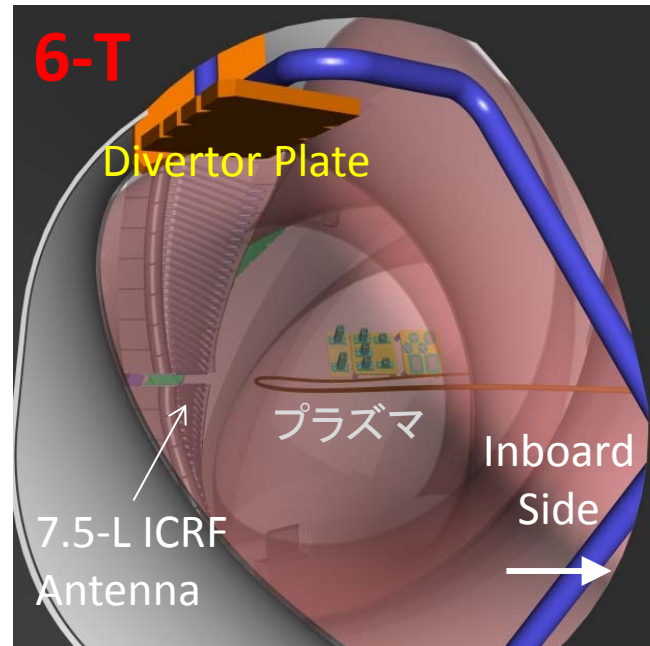
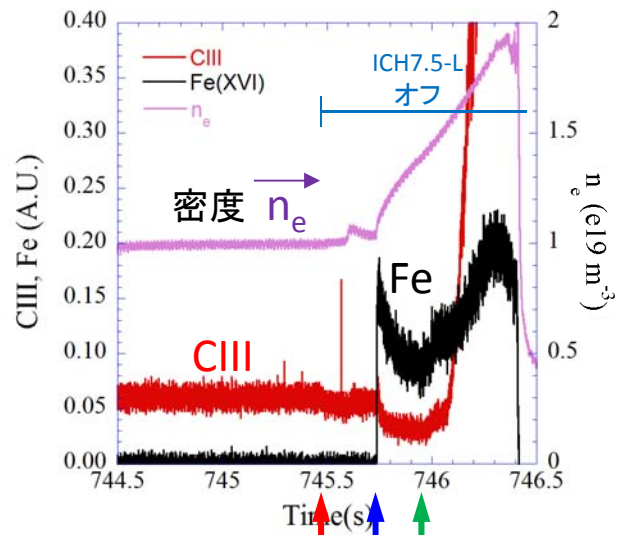
長時間放電時のCCDカメラの映像



これまでのICRF長時間放電では真空容器内の火花とダスト(C, Feなど)の発生でプラズマ放電が終了していた。昨年度の実験では従来よりも高いパワーで実験を実施した。

ICRFアンテナ内部の火花・ダストの発生による放電停止

各パラメータの時間変化



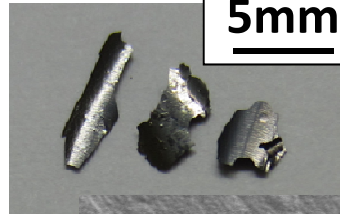
ICRFアンテナ内部のフレーク状堆積物(ダスト)

採取場所

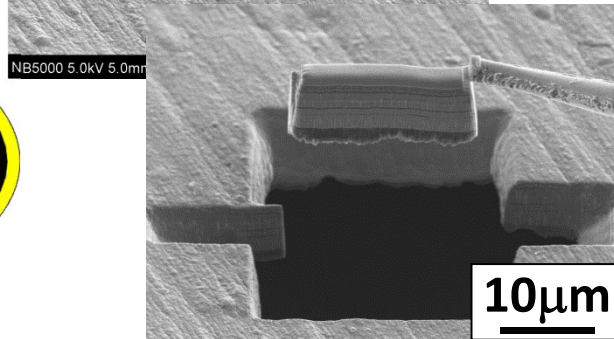
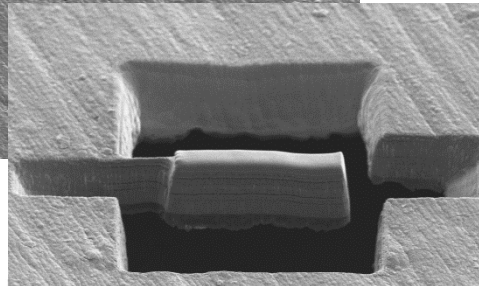
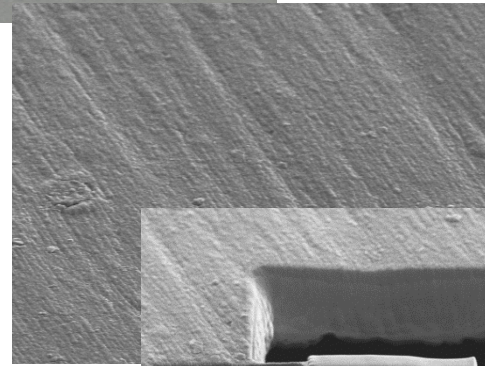


ファラデーシールドの背面に大量のフレーク状堆積物が存在

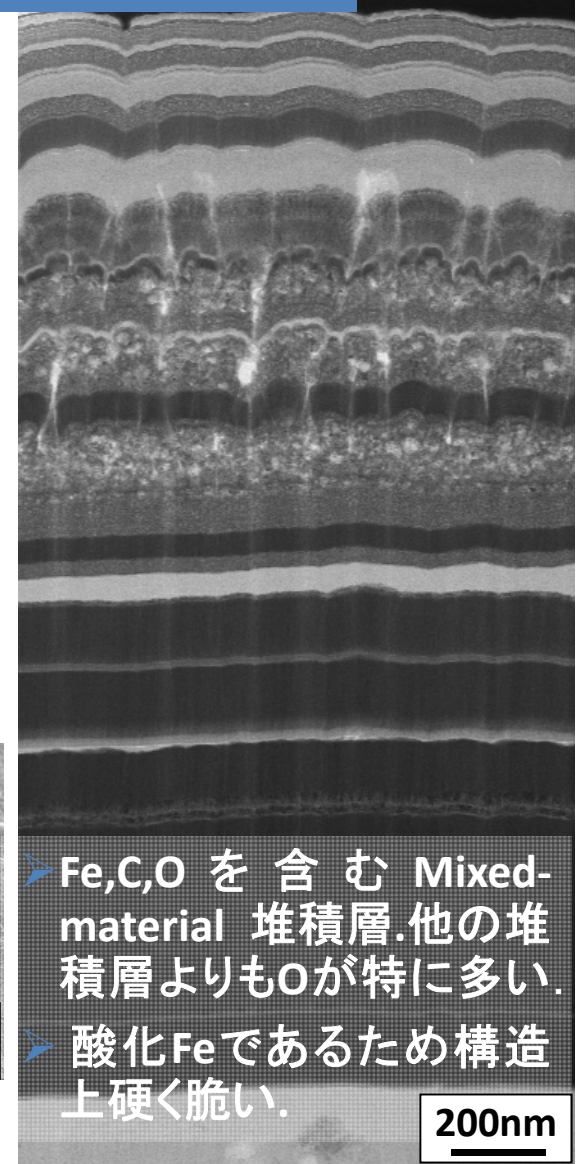
ナノ加工



Courtesy of M. Tokitani

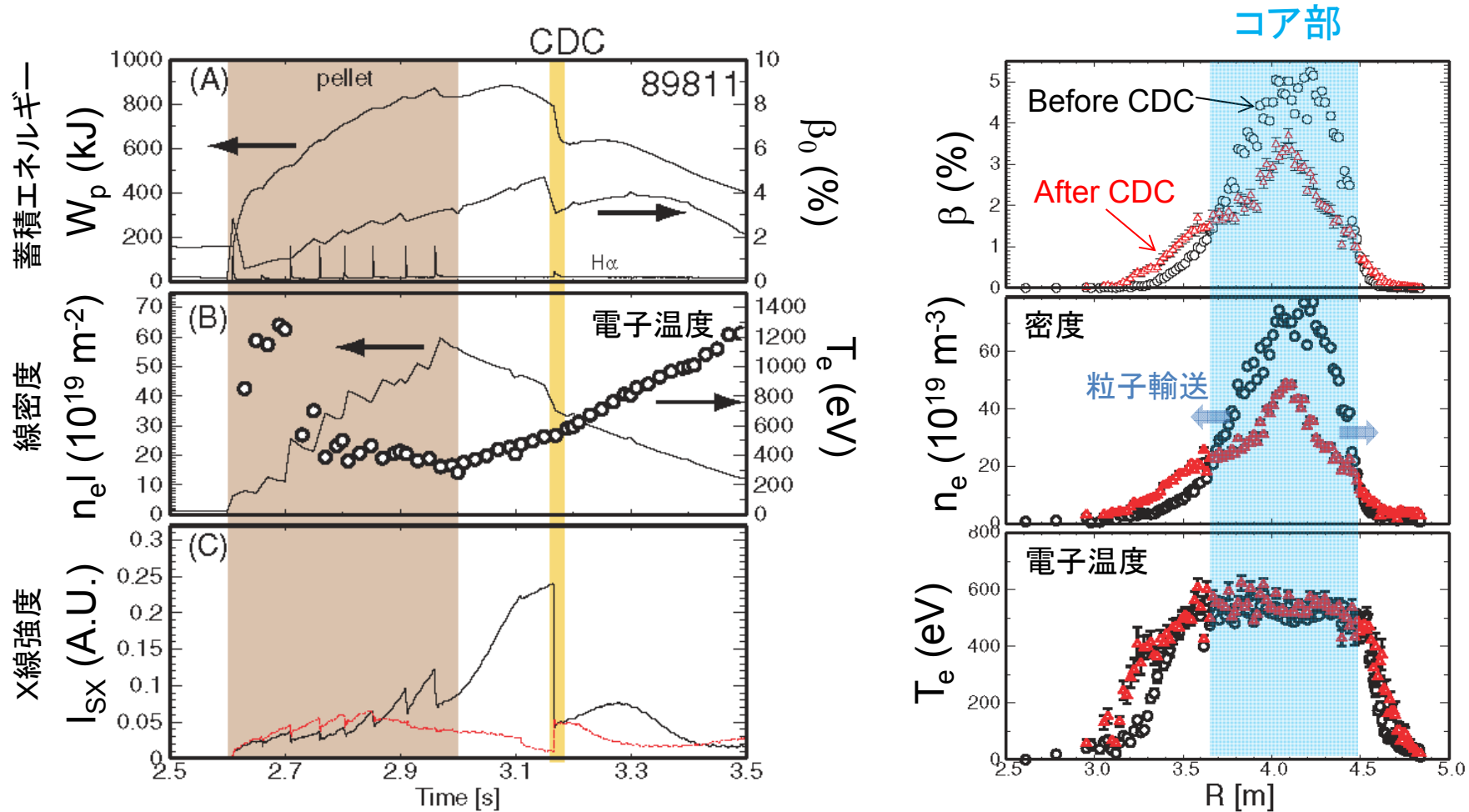


断面 TEM 像



- Fe,C,O を含む Mixed-material 堆積層.他の堆積層よりもOが特に多い.
- 酸化Feであるため構造上硬く脆い.

コア密度崩壊(CDC)時のプラズマ監視カメラの映像



S. Ohdachi, et al., Contributions to Plasma Physics, Vol. 50, 6-7, p552-557.

高 β 放電時にプラズマ密度を増加させると、中心部(コア部)の密度がプラズマ外部に突然吐き出される現象(CDC: Core Density Collapse)が発生することがある。このCDC発生直後にはプラズマ周辺部とダイバータ板上が強く発光する現象が観測された。

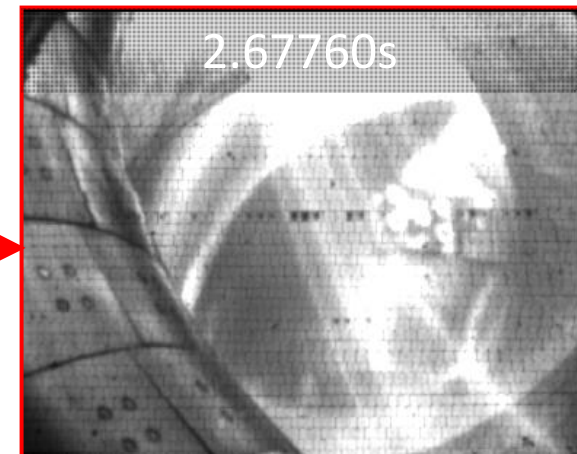
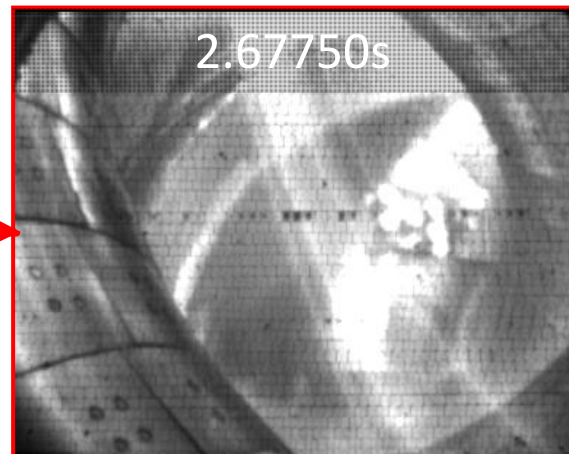
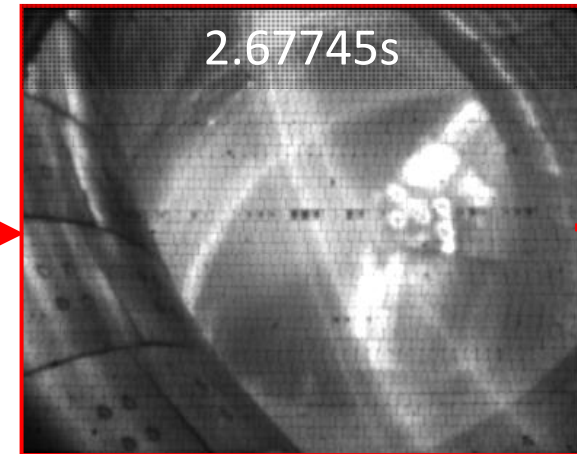
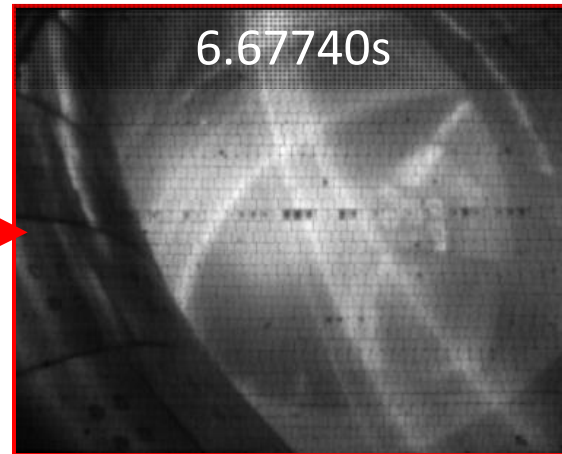
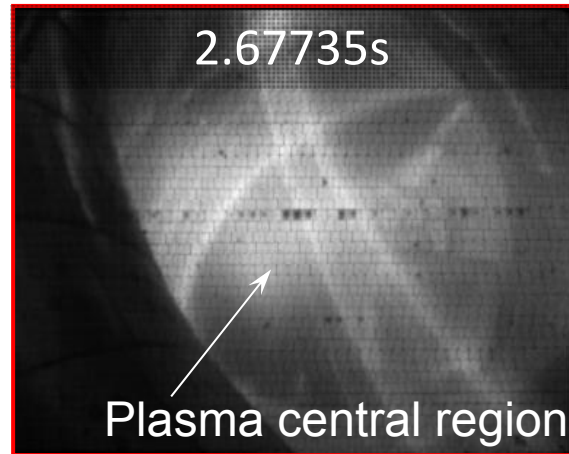
コア密度崩壊(CDC)時のプラズマ監視カメラの映像



高 β 放電時にプラズマ密度を増加させると、中心部(コア部)の密度がプラズマ外部に突然吐き出される現象(CDC: Core Density Collapse)が発生することがある。このCDC発生直後にはプラズマ周辺部とダイバータ板上が強く発光する現象が観測された。

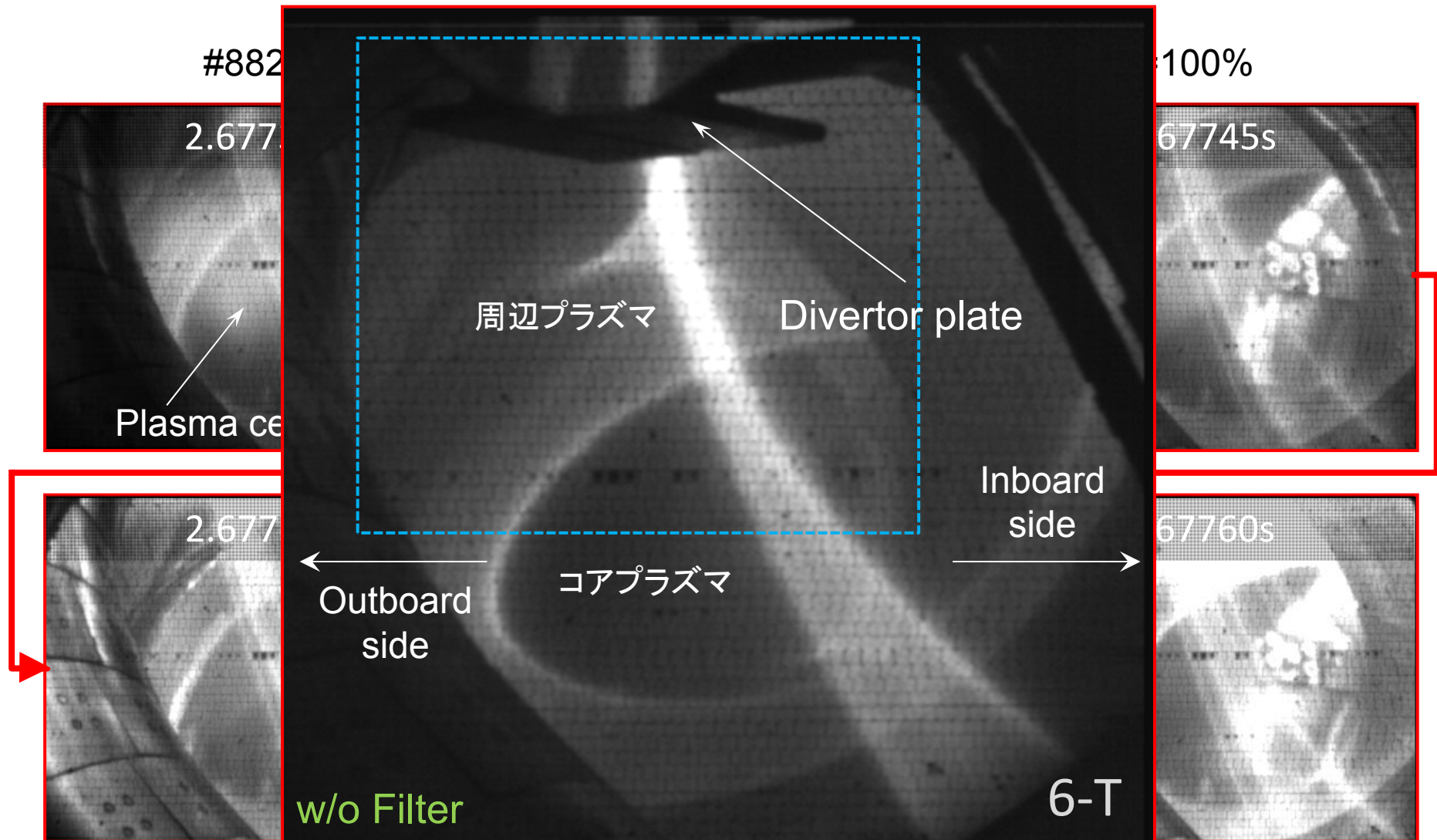
コア密度崩壊後に高速カメラで観測されたダスト

#88281, 20000fps, $R_{ax}=3.80\text{m}$, $B=-2.6053\text{T}$, $\gamma=1.2538$, $B_q=100\%$



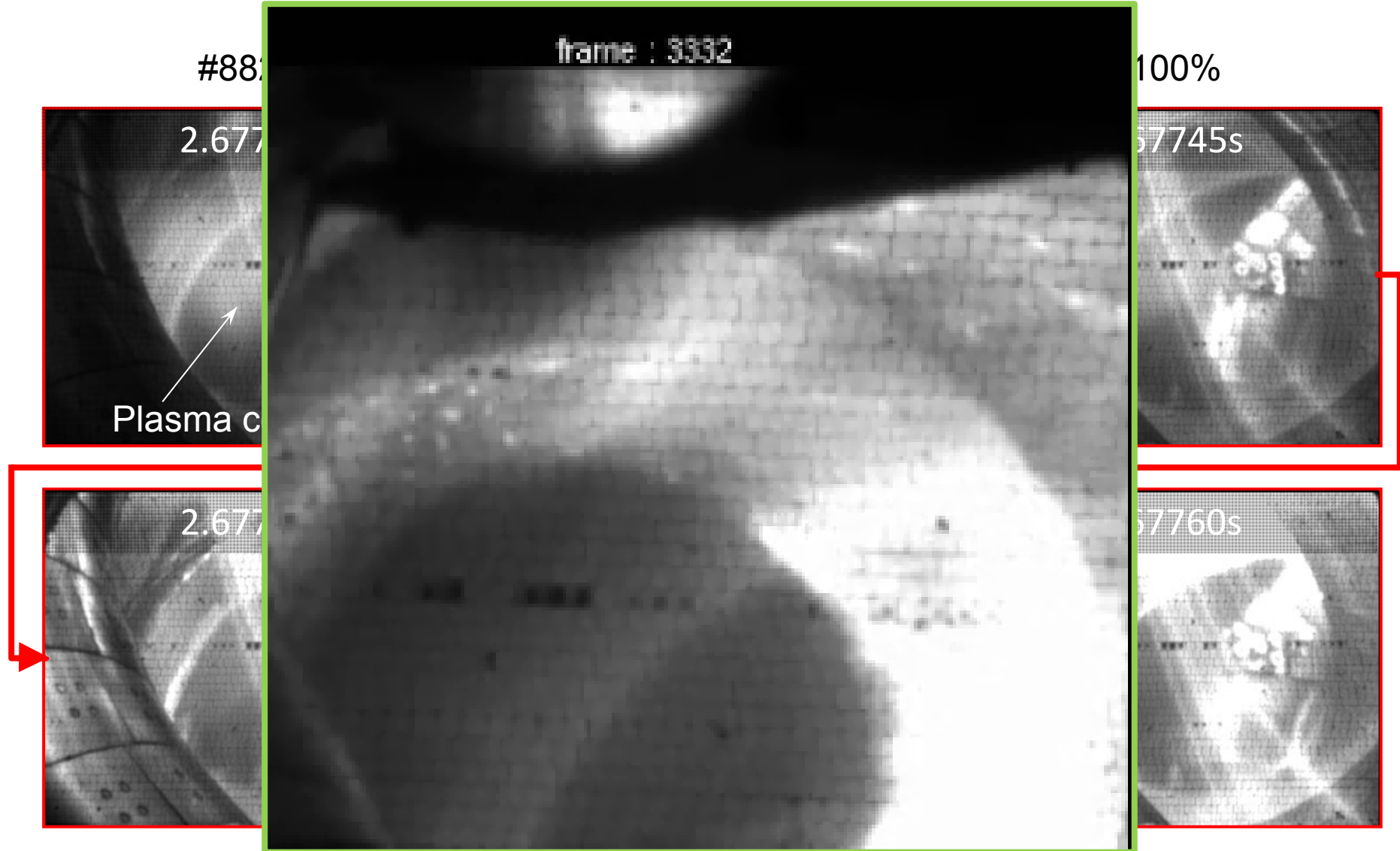
高速カメラ(6-T)によって、CDC発生時にプラズマ周辺部および、ダイバータ板上に強い発光現象を観測した。CDC発生後しばらくすると、真空容器内の上部から大量のダストが発生・落下して、プラズマを消失させてしまう場合がある。→ **ダストの挙動を明らかにする必要がある。**

コア密度崩壊後に高速カメラで観測されたダスト



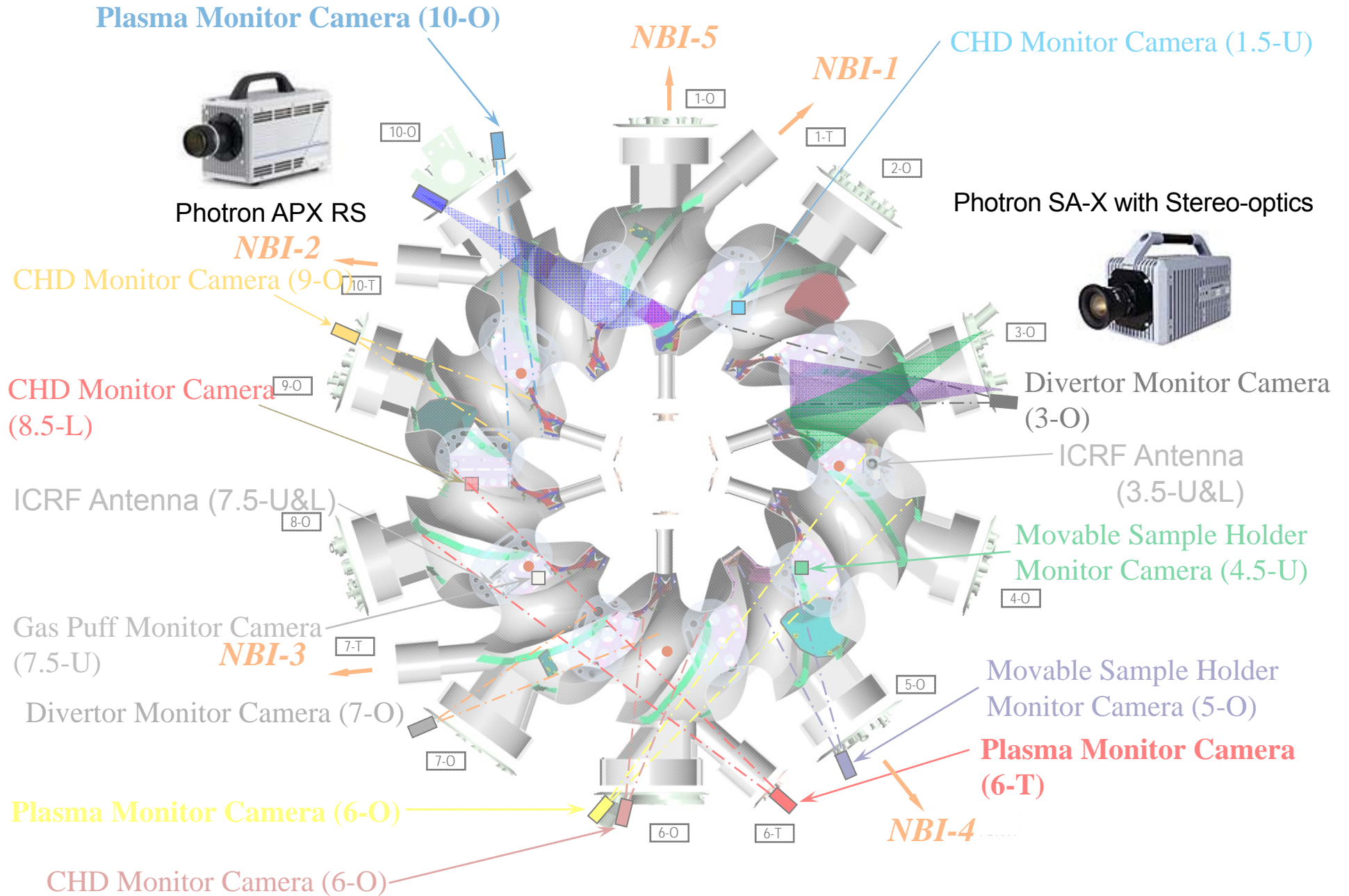
高速カメラ(6-T)によって、CDC発生時にプラズマ周辺部および、ダイバータ板上に強い発光現象を観測した。CDC発生後しばらくすると、真空容器内の上部から大量のダストが発生・落下して、プラズマを消失させてしまう場合がある。→ **ダストの挙動を明らかにする必要がある。**

コア密度崩壊後に高速カメラで観測されたダスト

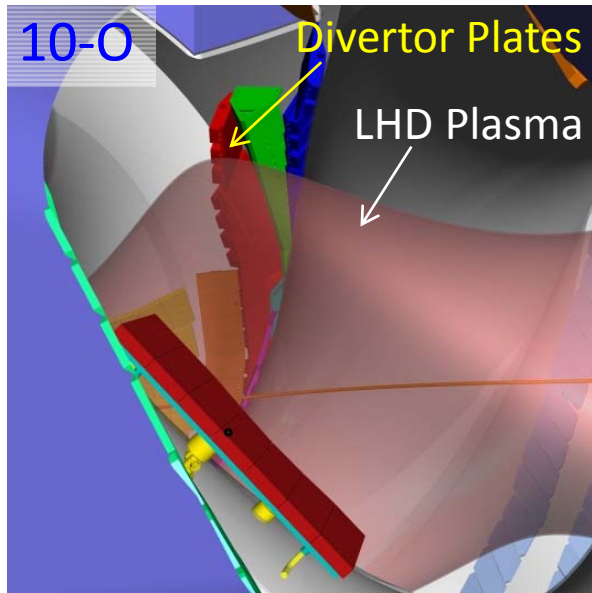


高速カメラ(6-T)によって、CDC発生時にプラズマ周辺部および、ダイバータ板上に強い発光現象を観測した。CDC発生後しばらくすると、真空容器内の上部から大量のダストが発生・落下して、プラズマを消失させてしまう場合がある。→ **ダストの挙動を明らかにする必要がある。**

ダスト軌道観測用高速カメラ配置図



10-0ポートの高速カメラによるダストの観測例



長時間放電時のダスト



高イオン温度放電時のダスト

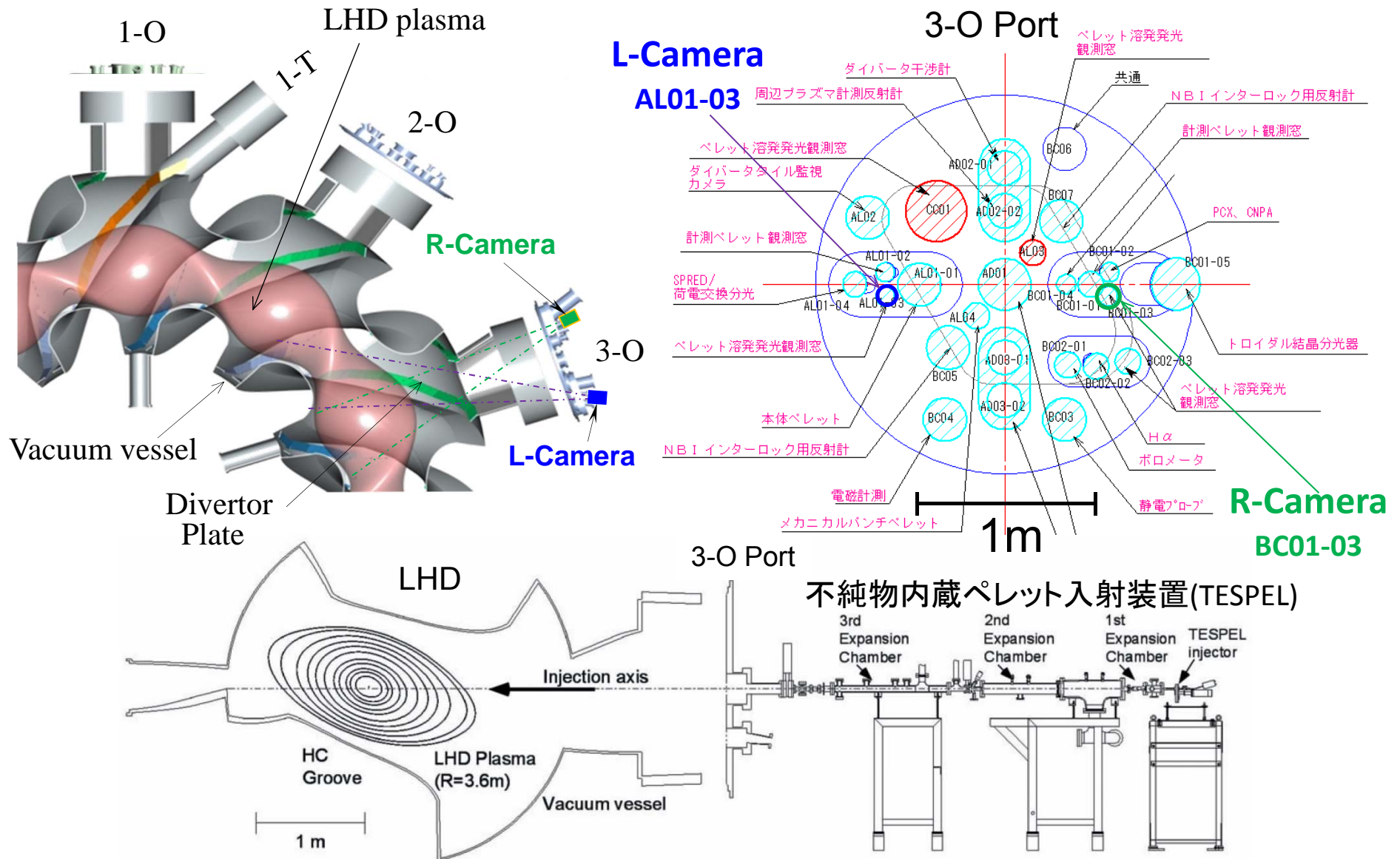


突然軌道が変化するダスト



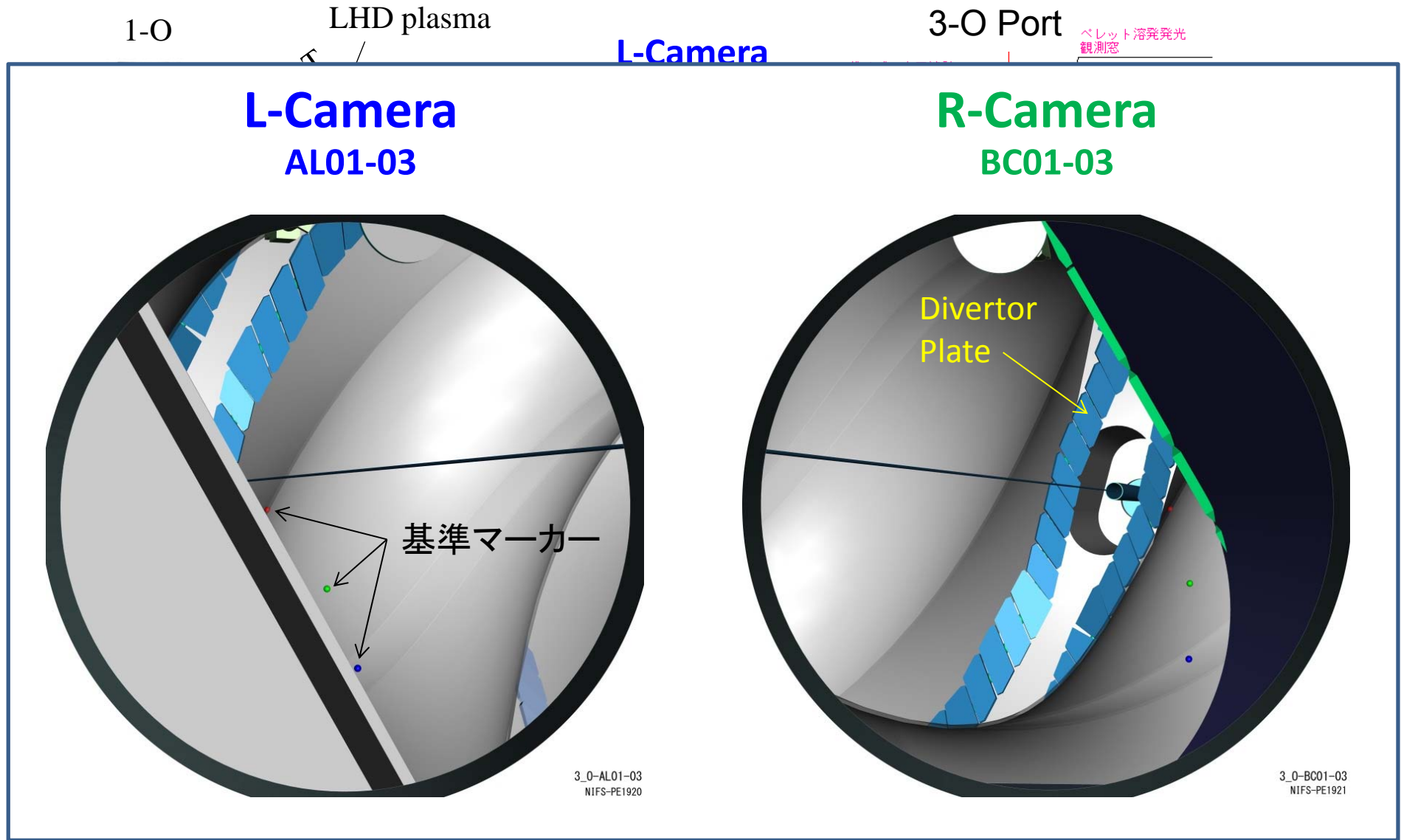
移動中に粉砕するダスト

ダスト軌道観測用のステレオ視高速カメラ配置図 (3-0)



3-0ポートの左右両側にズームレンズと石英製イメージファイバーを設置して、ステレオ視光学系付き高速カメラを使用してダストの三次元軌道の計測を行った。

ダスト軌道観測用のステレオ視高速カメラ配置図 (3-0)

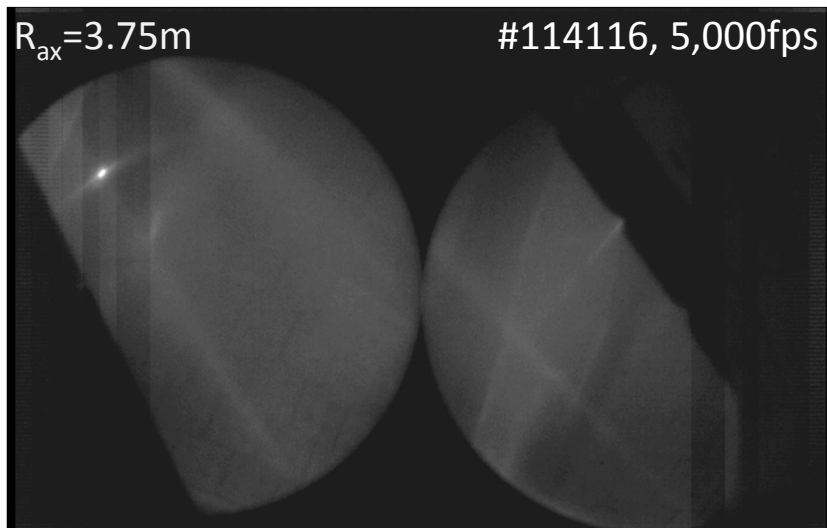


3-0ポートの左右両側にズームレンズと石英製イメージファイバーを設置して、ステレオ視光学系付き高速カメラを使用してダストの三次元軌道の計測を行った。

ステレオ視高速カメラで観測されたダストの軌道の例(1)

L-Camera

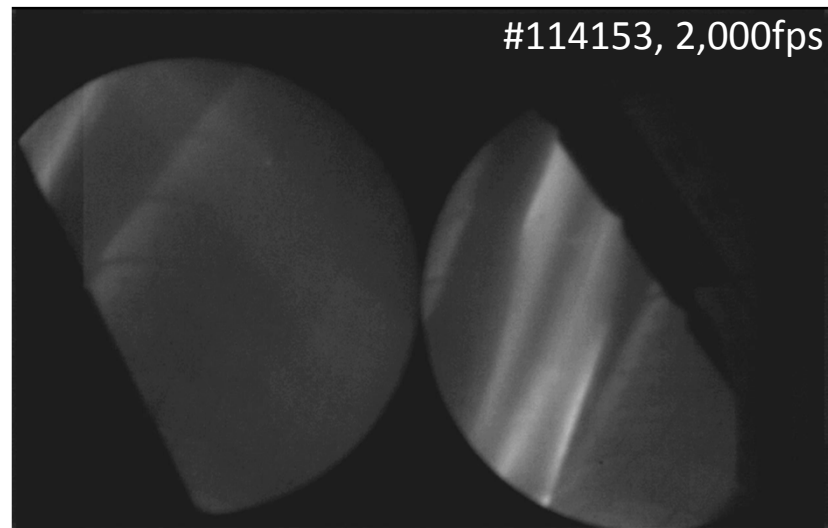
R-Camera



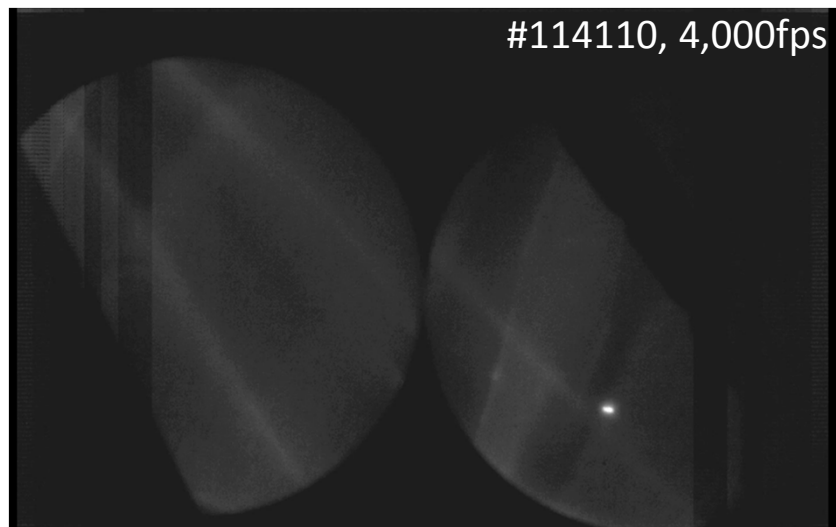
分離するダスト

L-Camera

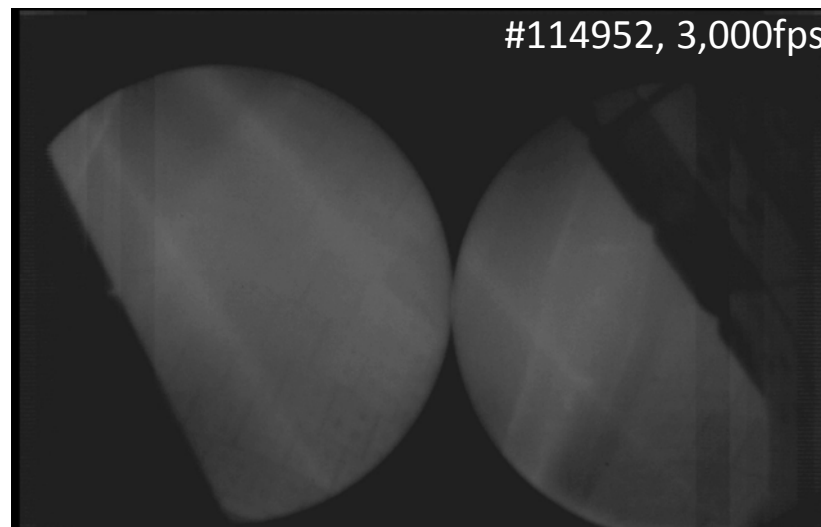
R-Camera



真空容器壁に衝突するダスト



軌道が屈曲するダスト



分離後に逆方向へ移動するダスト

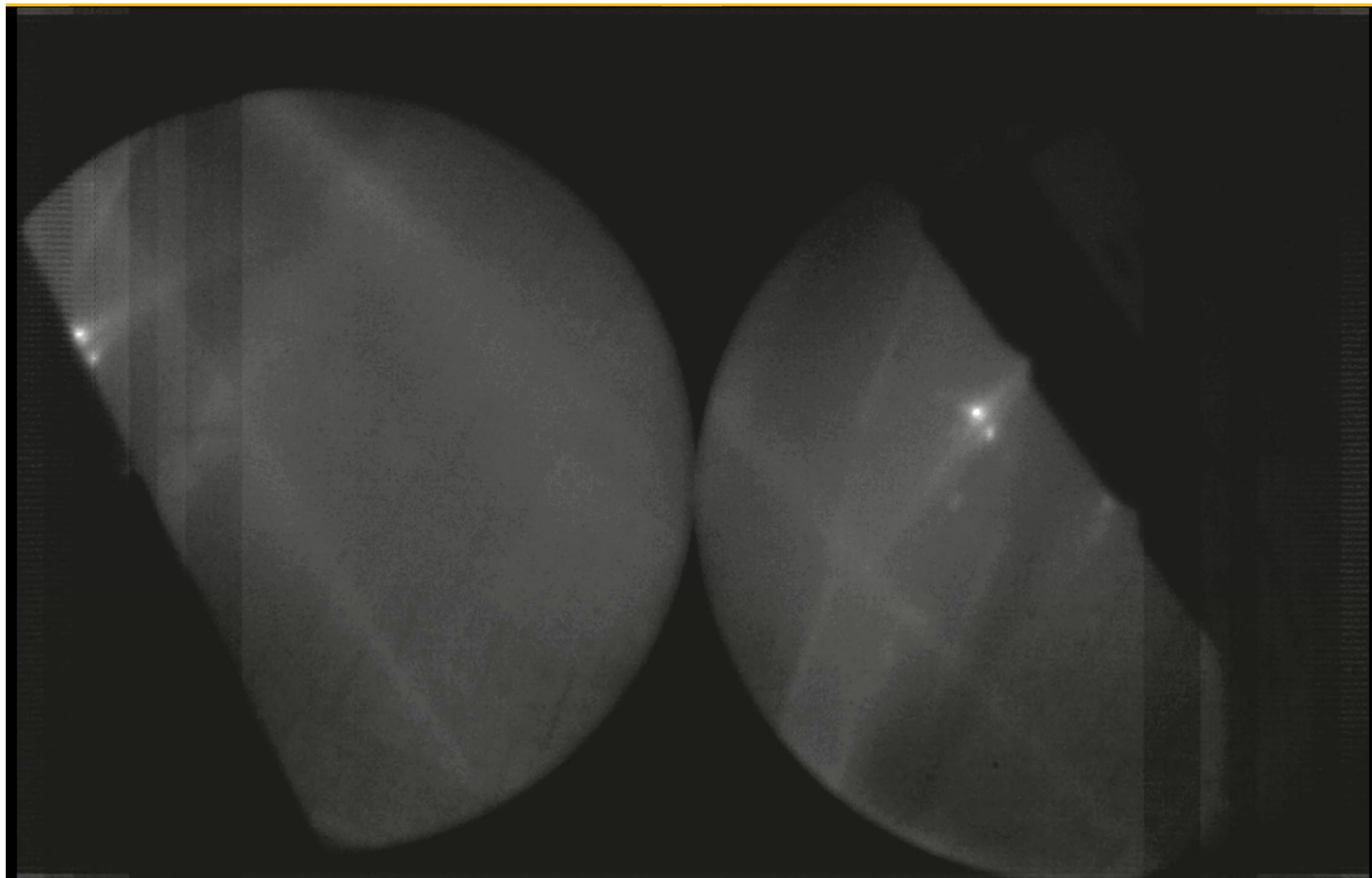
ステレオ視高速カメラで観測されたダストの軌道の例(1)

L-Camera

R-Camera

L-Camera

R-Camera



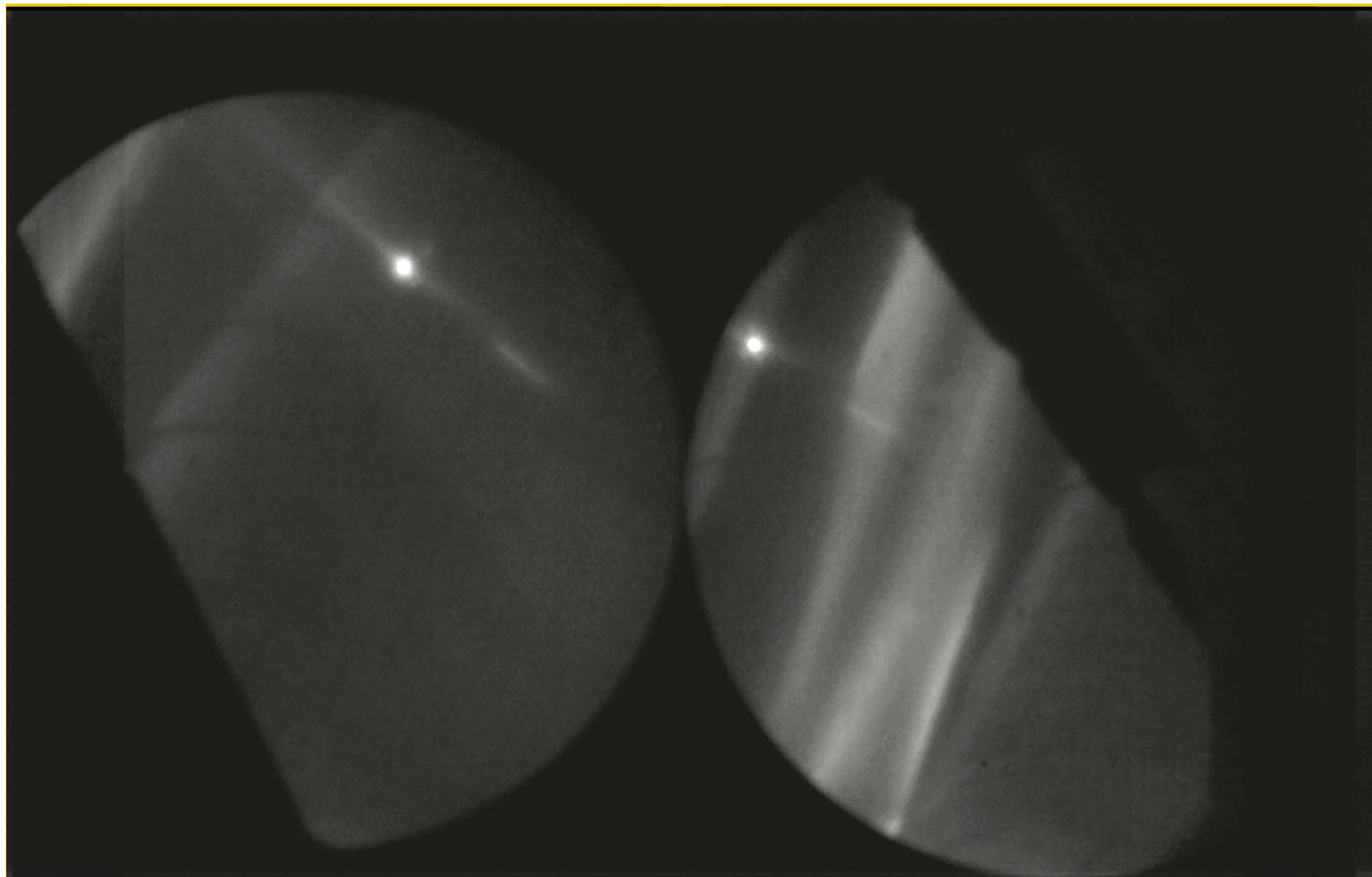
ステレオ視高速カメラで観測されたダストの軌道の例(2)

L-Camera

R-Camera

L-Camera

R-Camera



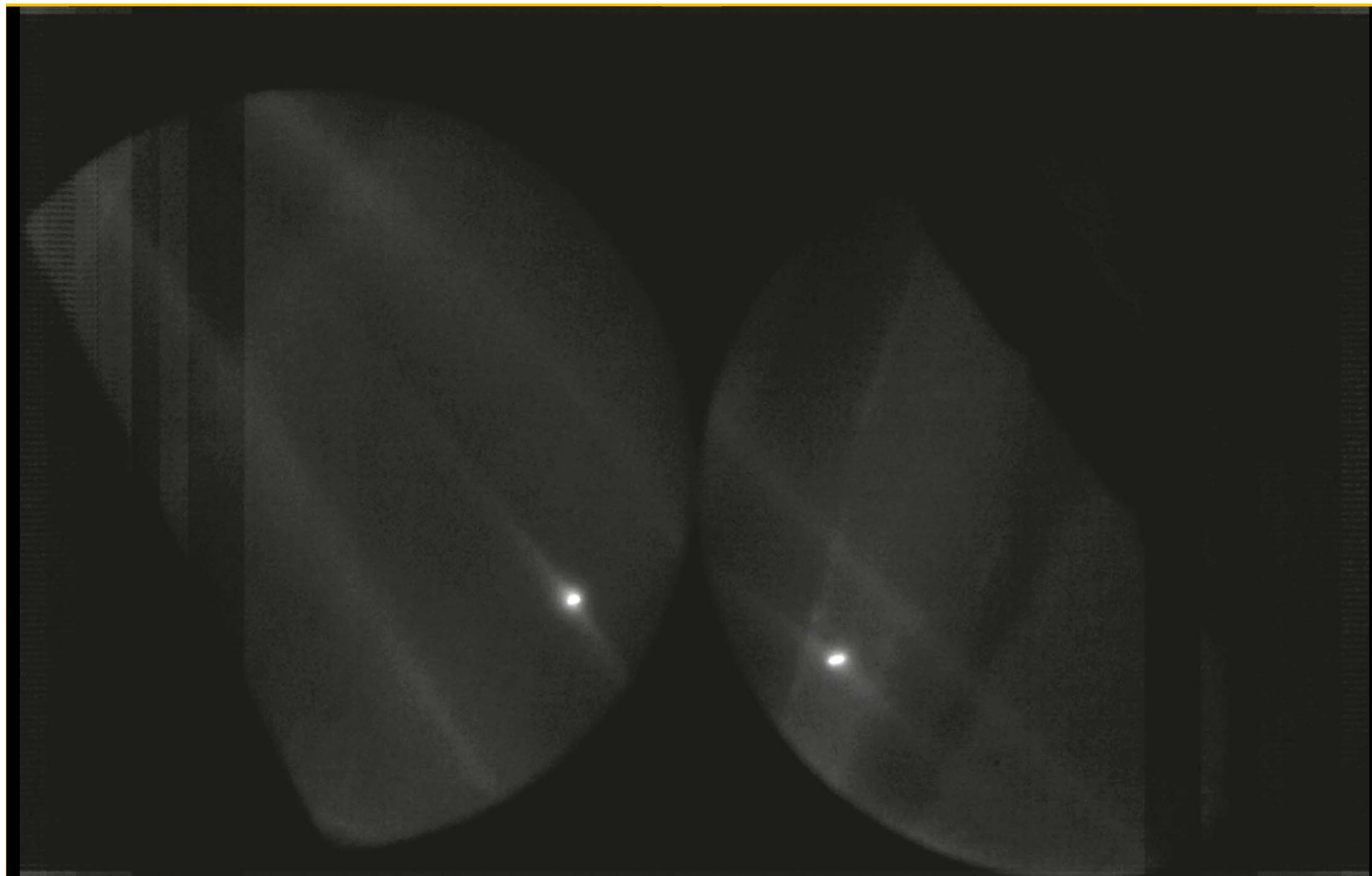
ステレオ視高速カメラで観測されたダストの軌道の例(3)

L-Camera

R-Camera

L-Camera

R-Camera



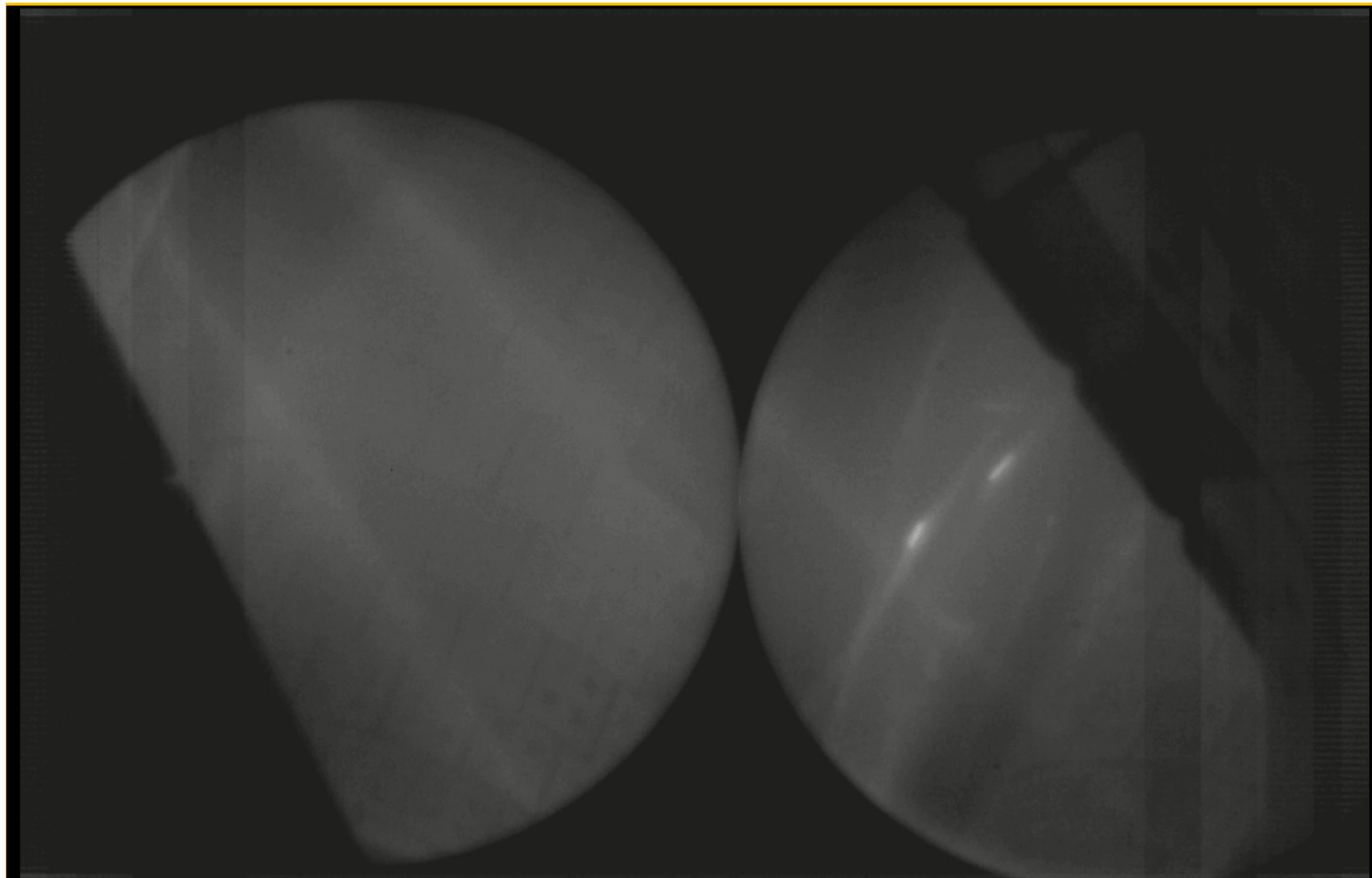
ステレオ視高速カメラで観測されたダストの軌道の例(4)

L-Camera

R-Camera

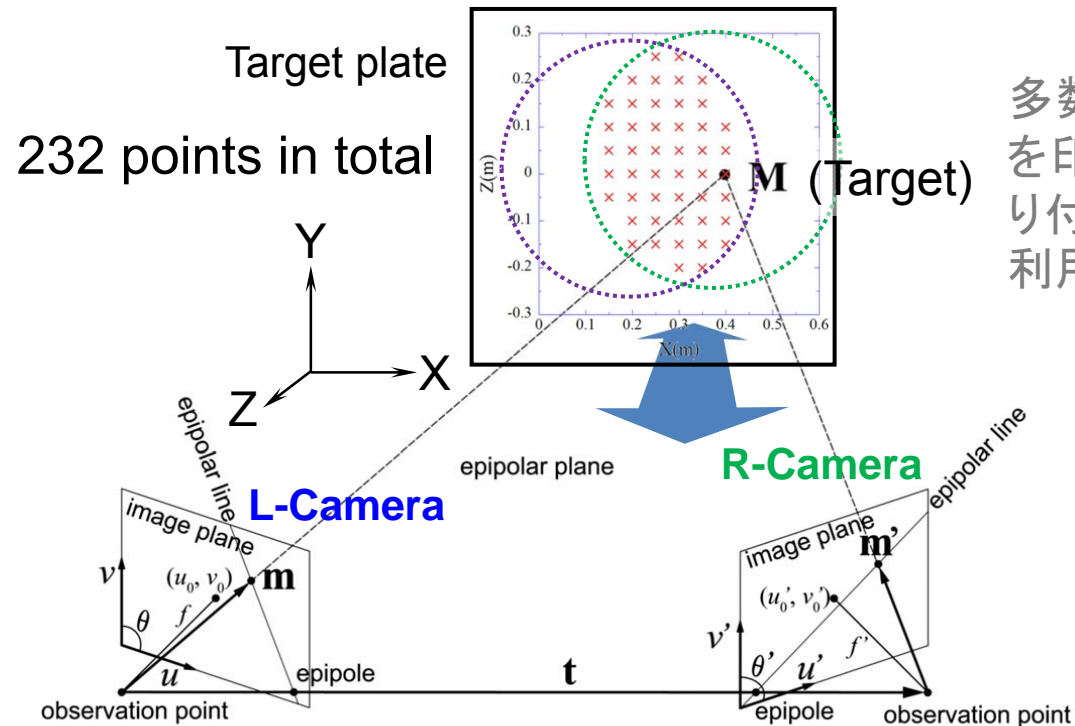
L-Camera

R-Camera



ステレオ視高速カメラによるダストの三次元軌道の解析手法

Pinhole Camera Model



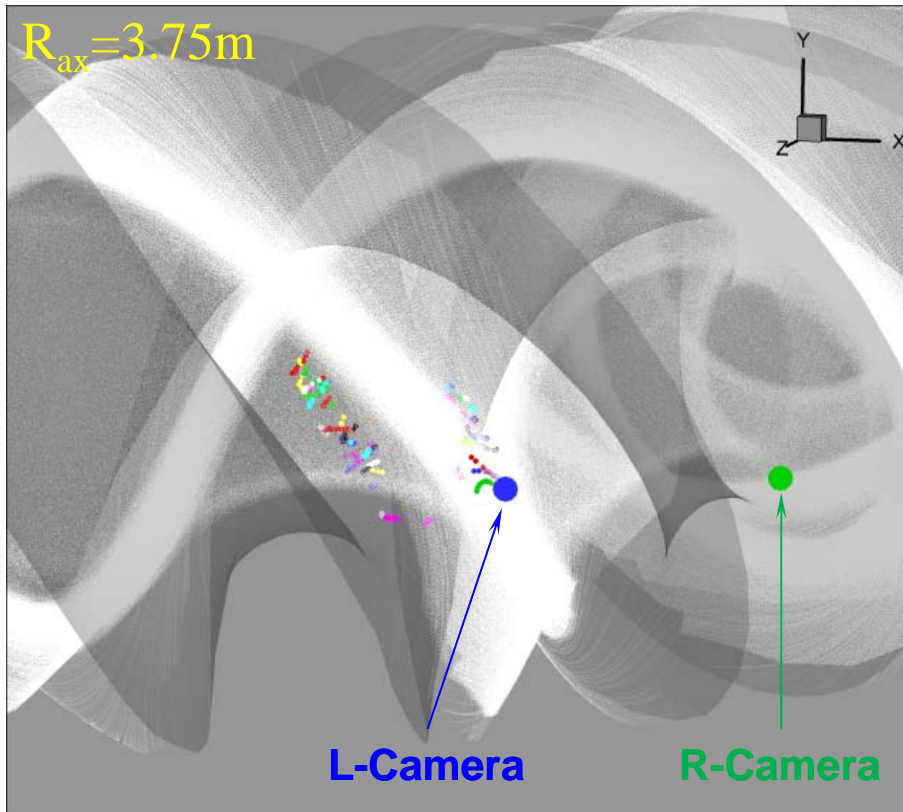
多数の格子状のマーカ
を印刷した紙を白板に貼
り付けて空間較正実験に
利用した。

Ref. R. Sakamoto et al., Rev. Sci. Instr. 76, 103502 (2005).

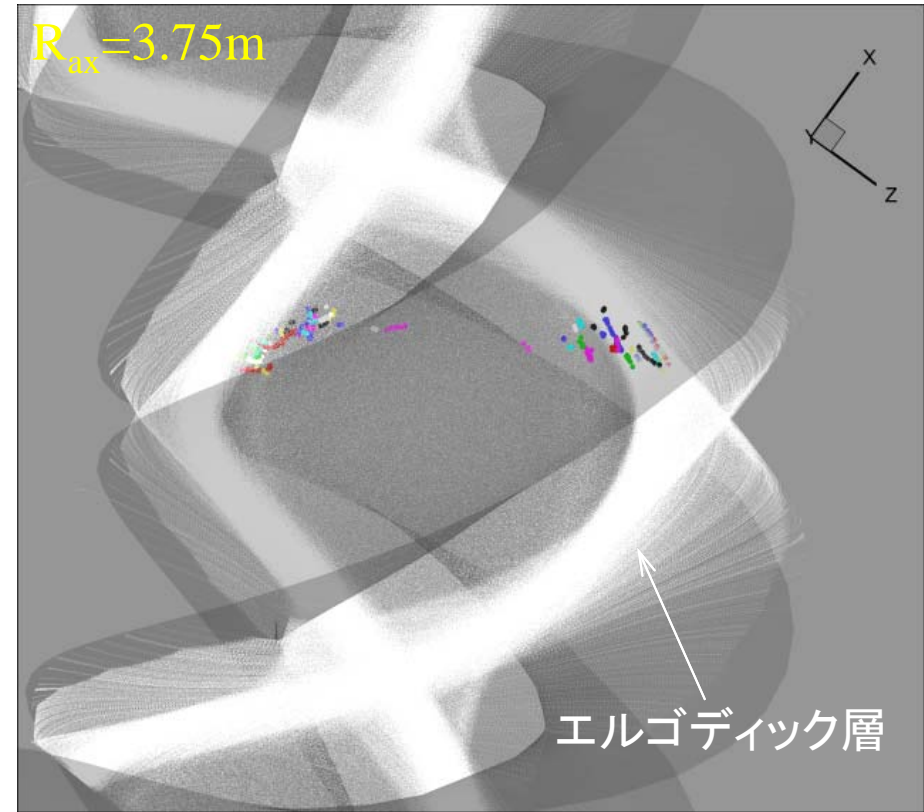
Calibration of the stereo fast camera system was carried out to check the spatial resolution of the reconstruction of the stereoscopic measurement using a movable target plate, showing the spatial accuracy of the stereoscopic measurement on the Y coordinate is about $\pm 10\text{mm}$ at least.

ダストの三次元軌道の解析結果

鳥瞰図



上面図



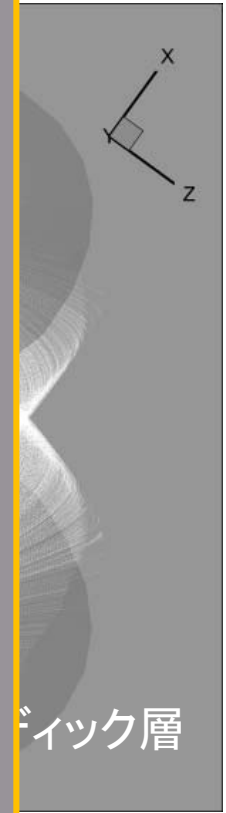
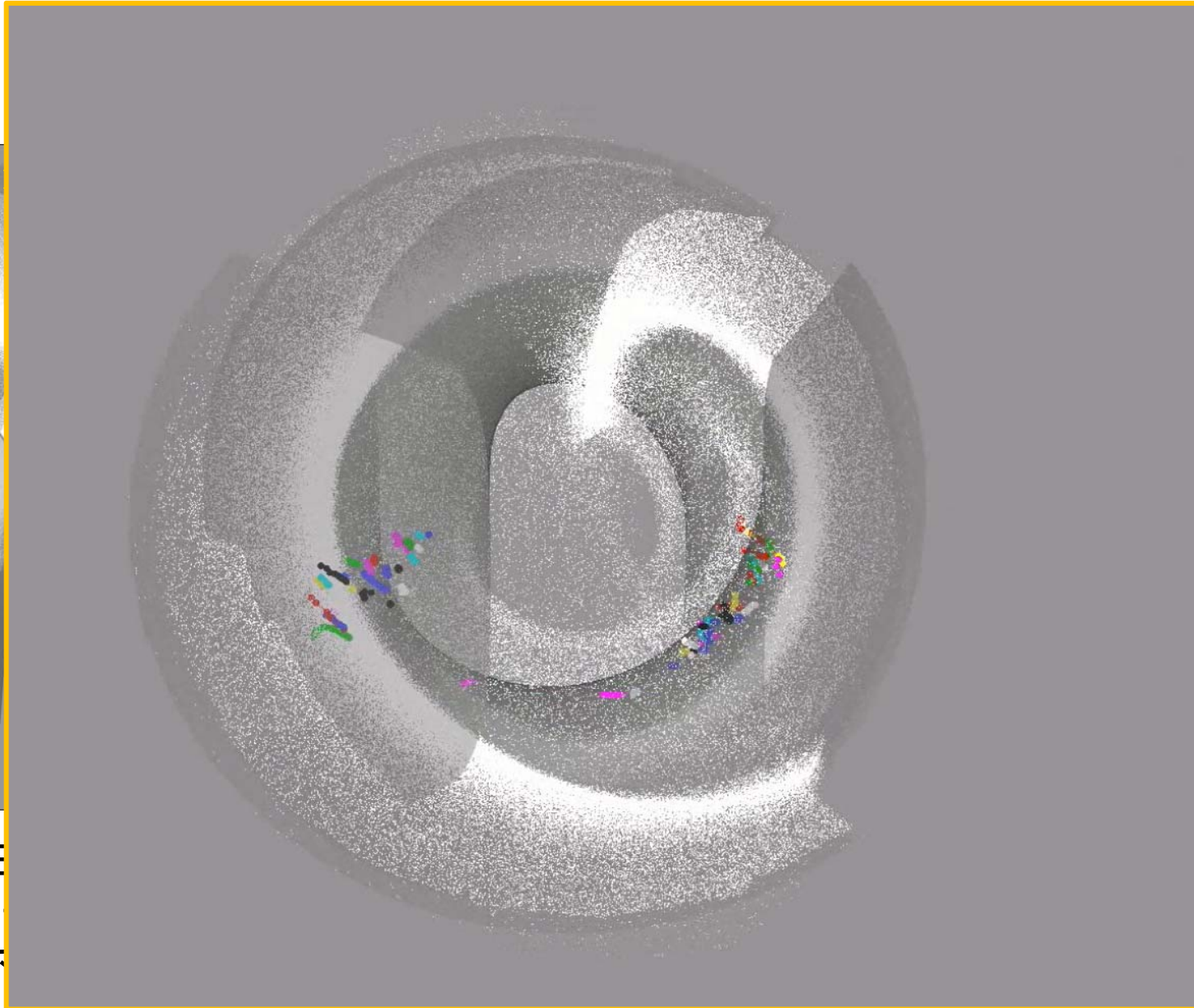
ダストの三次元軌道の解析の結果、ステレオ視高速カメラによって観測されたダストはいずれもエルゴディック層の外縁部に存在していることが判明。(白い細かい点群はプラズマ周辺部の磁力線($R_{ax} = 3.75\text{m}$))

⇒ エルゴディック層による主プラズマ内へのダストの侵入抑制効果

ダストの三次元軌道の解析結果



ダストの三
はいずれ
はプラズマ



ディック層

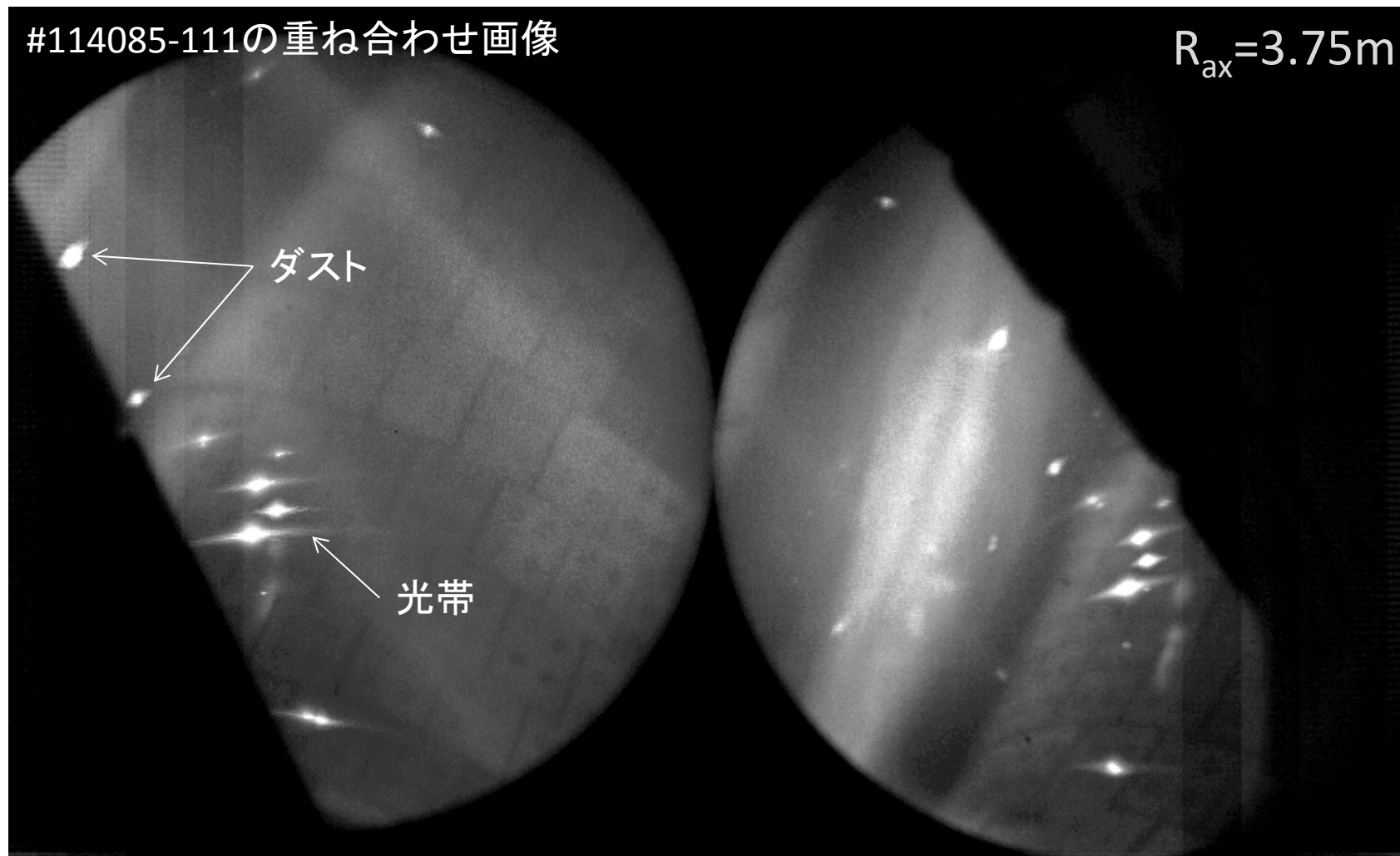
たダスト
い点群

⇒ エルゴディック層による主プラズマ内へのダストの侵入抑制効果

ダストによる磁力線の可視化

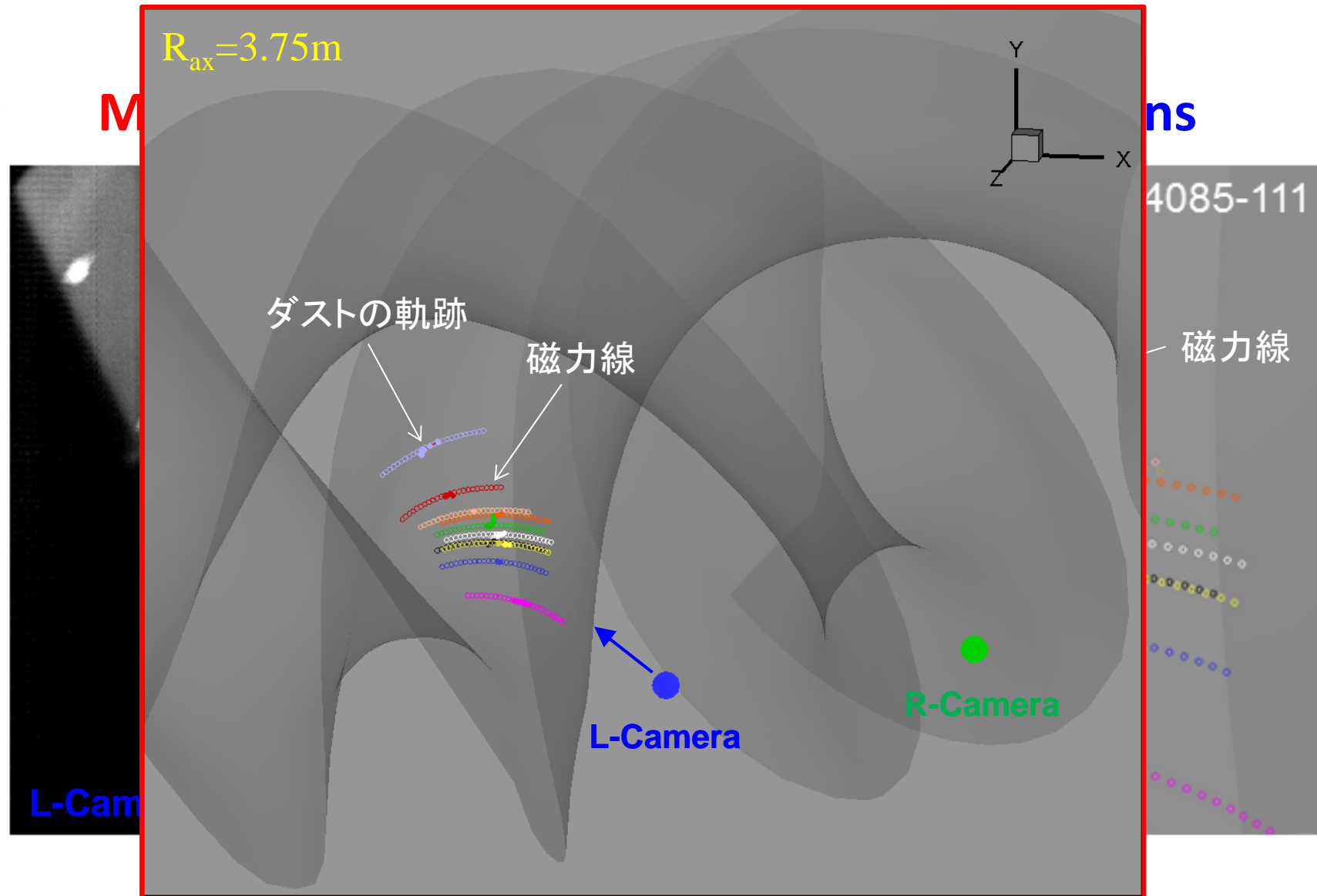
L-Camera

R-Camera



ダストの光帯は横に伸張した形状で観測される。ダストに含まれる各種不純物(C, Feなど)が磁力線に沿って拡散し、プラズマによって励起・発光したためと考えられる。

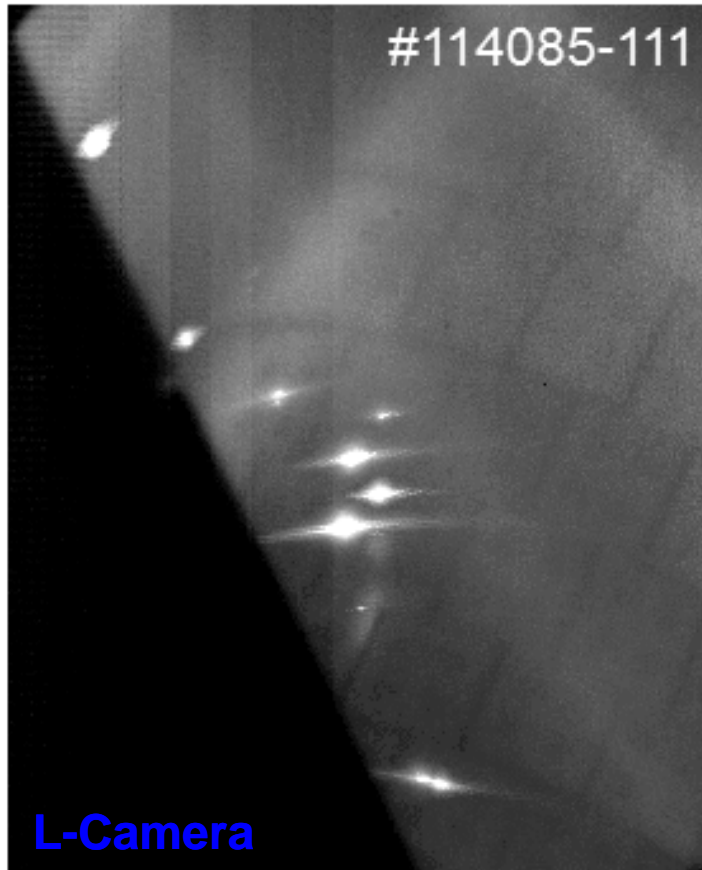
ダストの映像と磁力線構造との比較



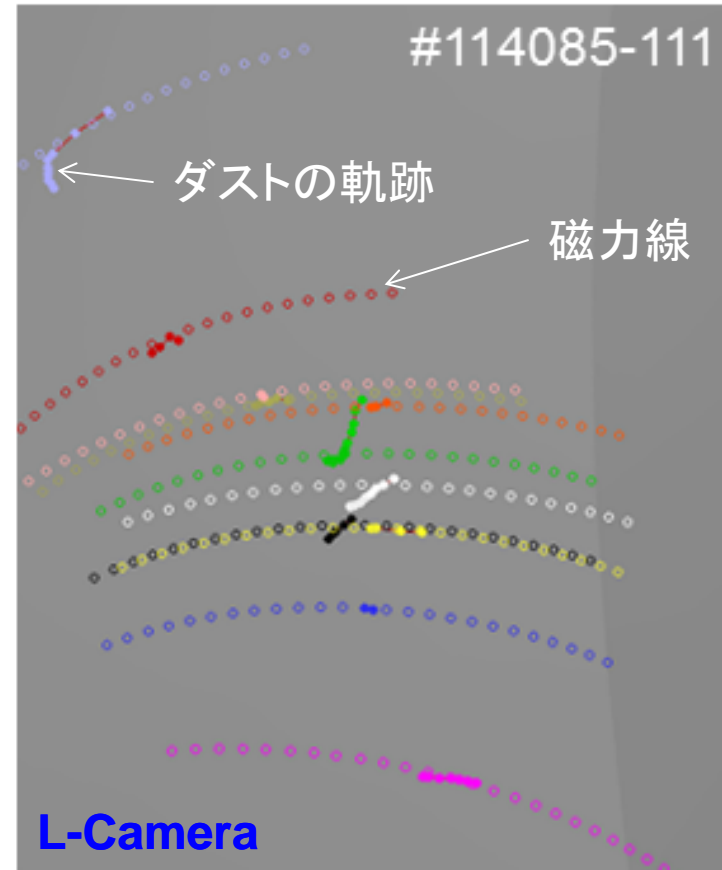
ダストの位置から磁力線を追跡計算した結果、ダストの光帯の伸張方向と一致した。
 → プラズマ周辺部の磁力線構造の実時間計測として利用できる可能性がある。

ダストの映像と磁力線構造との比較

Measurements



Calculations



ダストの位置から磁力線を追跡計算した結果、ダストの光帯の伸張方向と一致した。
→ プラズマ周辺部の磁力線構造の実時間計測として利用できる可能性がある。

まとめ

大型ヘリカル装置(LHD)では、真空容器・ICRFアンテナ内部の火花を伴うダスト(C,Feなど)の発生によって、長時間放電実験時のプラズマが消失する場合がある。また、コア密度崩壊時にはダストの放出・落下によって、その後のプラズマの生成・維持が出来なくなる場合がある。

→ プラズマ周辺部のダストの挙動を明らかにすることが重要である

ステレオ視光学系付きの高速カメラシステムによって、プラズマ放電中におけるダストの三次元的挙動を計測した。

- ・ダストは突然向きを変える。移動する途中で分離あるいは粉砕するなど複雑な振る舞いをする。

- ・ステレオ画像の解析の結果、ダストが観測される領域は主プラズマ閉じ込め領域の外側にあるエルゴディック層の外縁部であることが判明

→ エルゴディック層による主プラズマ内へのダストの侵入抑制効果を示唆

- ・ダストの光の帯は横方向に伸張した形状で観測される。ダストが観測された位置(三次元座標)から磁力線を追跡計算したところ、その磁力線構造はダストの光帯の伸張方向と一致する。

→ プラズマ周辺部の磁力線構造の実時間計測に利用できる可能性

終