ダイバータシミュレータ研究の今後の展開

大野哲靖

名古屋大学工学研究科

エネルギー理工学専攻

ダイバータシミュレータ研究

周辺プラズマは開いた磁力線構造を有する

→直線型装置を用いたダイバータ模擬研究

直線型ダイバータ模擬試験装置

- 定常で高密度プラズマの生成が可能
- プラズマパラメータの制御性が高い
- 計測器の配置が容易
- 単純な幾何学的配位

QED, PISCES-A (B), PDS, TPD-I (II) , PSI-2, LENTA, ULS, MAP-II, TPD SHEET-IV, Magnum-PSI, ASEDAS, ..., GAMMA10

NAGDIS-I → NAGDIS-II → NAGDIS-T,　PS-DIBA

装置の特徴を明確にすることが重要

ダイバータシミュレータ研究の課題

次期核融合装置(ITER, JT-60SA)や原型炉への寄与の明確化

ダイバータプラズマ環境の模擬

適切な課題抽出

学術的研究成果-普遍化、データベース(予測性能を有する)

名古屋大学での取り組み

W損傷過程，非接触プラズマ物理(原子分子)，アーキング，非線形シースダイナミクス，ダスト形成･輸送，周辺プラズマ輸送

新しい研究基盤の構築

プラズモイドー定常高熱流プラズマ複合照射装置の開発

- ELM熱負荷の模擬

高熱流プラズマ照射-イオンビーム解析複合装置の開発

- 水素同位体リテンション量のその場計測

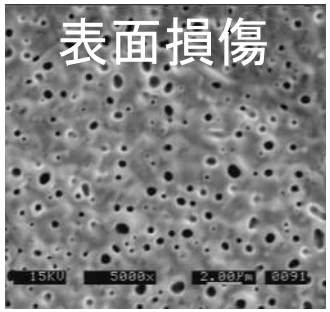
先進プラズマ-壁相互作用(PWI)研究

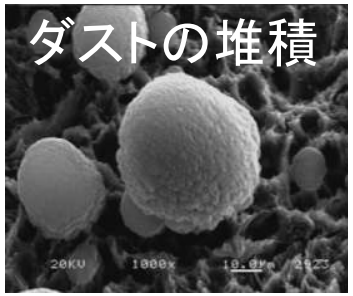
■静的PWI研究

材料選定

1年、1日、
1ショット後

電子顕微鏡等





材料観察

プラズマ照射時の吸蔵過程？？
物理機構？？

■動的PWI研究

（動的状況下で実証⇒物理機構の解明）

量子ビーム技術を用いたその場計測(表面構造、リテンション計測)

本研究では、ダイバータ模擬試験研究で開発された高熱流直流プラズマ源とバンデグラフ加速器を用いたイオンビーム解析装置を結合した装置を開発

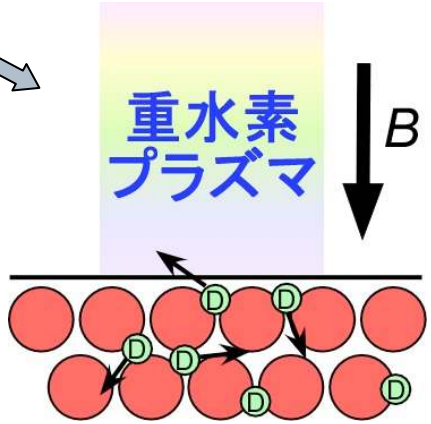
#材料を非破壊のまま解析可能
#様々な計測手法

- ラザフォード後方散乱法(RBS)：試料の分析
- 核反応分析法(NRA)：重水素計測
- 反跳粒子検出法(ERD)：軽水素計測

水素同位体リテンションに関する様々な現象

照射中

プラズマ照射開始



■動的リテンション(dynamic retention)

⇒プラズマ照射中又は直後において材料中を可動する粒子
粒子の供給(プラズマ照射等)が絶たれると材料中から放出

▼核融合発電実現において重要な研究

・核融合発電時、燃料補給の最適タイミング
・化学スパッタリングのフラックス依存性の調査
(プラズマ照射中の材料表面での吸蔵量に依存)

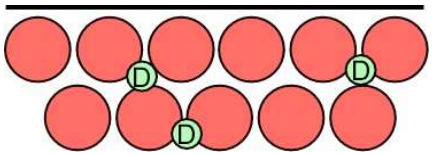
➡ 動的状況での実証例なし

プラズマ照射停止

動的リテンション≠静的リテンション

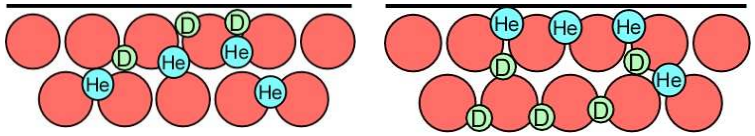
■静的リテンション(static retention)

⇒材料中の結晶欠陥等に捕捉され続ける粒子



▼近年活発に行われている研究

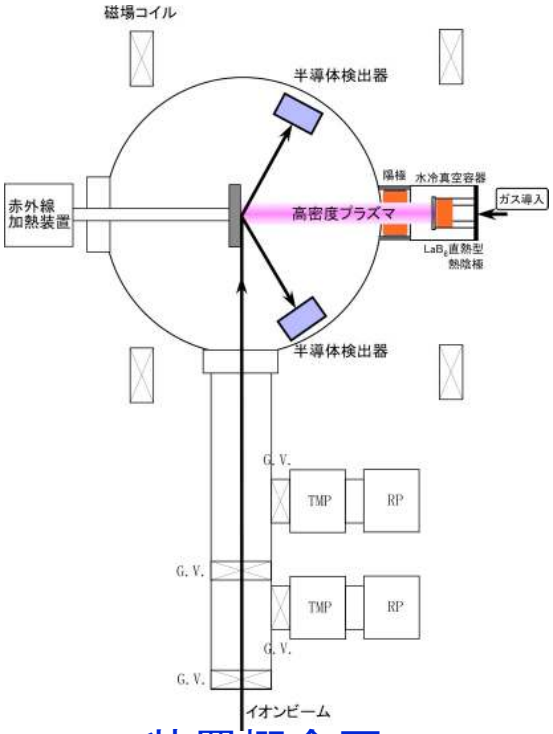
・Heプラズマ照射が水素同位体吸蔵量に影響



He予照射　　吸蔵後のHe照射

詳細な物理機構の解明が必要

その場計測装置を開発する上で解決すべき課題



装置概念図

プラズマ照射環境下でのイオンビーム計測

課題

①イオンビーム装置に導入可能な小型プラズマ照射装置の開発及びダイバータ領域(電子密度~$10^{18}m^{-3}$)の模擬が可能なプラズマの実現

②プラズマ照射環境下でビーム源、半導体検出器(SSD)を高真空に保ち、ビームの計測を可能にする。

①・・・小型化を行いつつ、高密度のプラズマを生成可能な六ホウ化ランタン(LaB_6)製熱陰極を開発

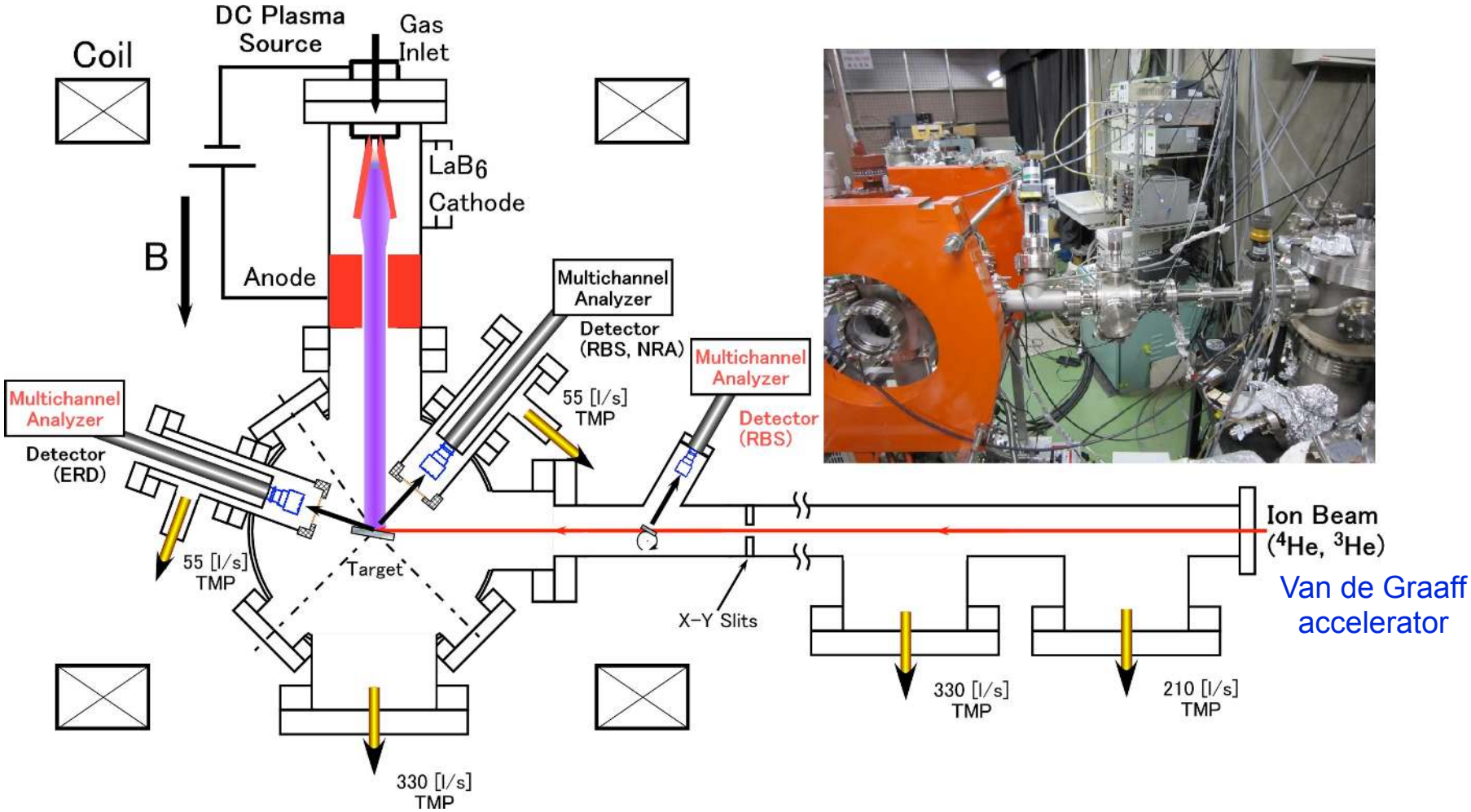
②・・・高真空を維持しつつ、イオンビーム分析に必要な計測粒子を通すマイラー膜を用いた差動排気の検討及びプラズマ照射中でのビーム照射量のモニタリング

■その場計測装置開発によるPWI研究への展開

・水素同位体リテンションの静的・動的挙動の解明

・ダイバータ模擬環境での照射損傷が壁材料の水素同位体リテンション量へ与える影響の解明

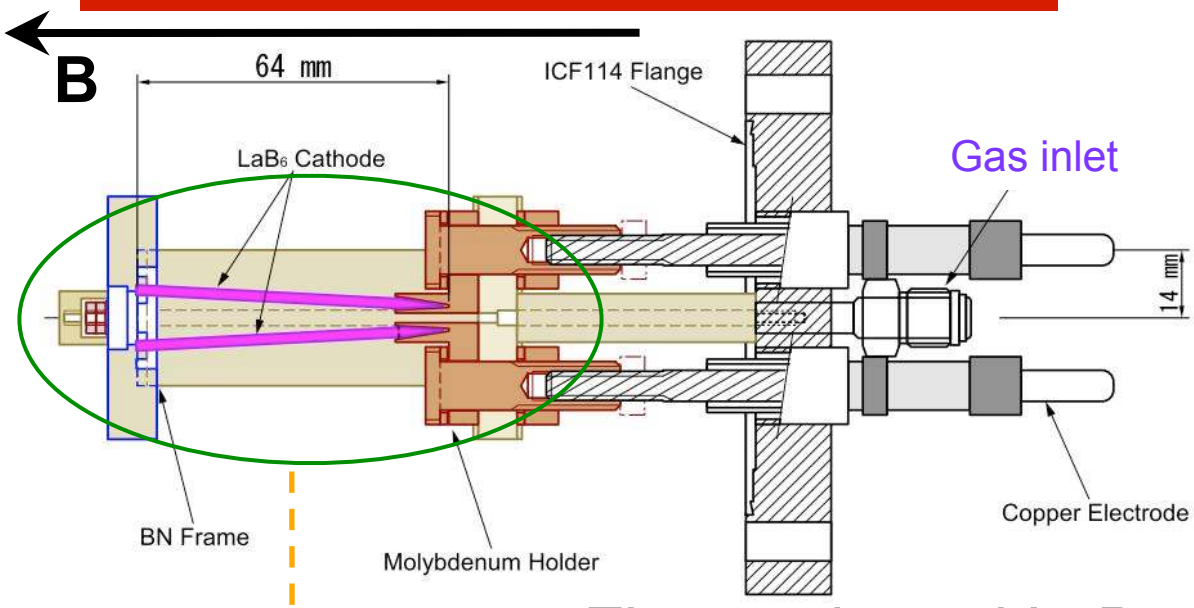
Plasma Surface Dynamics with Ion Beam Analysis (PS-DIBA)

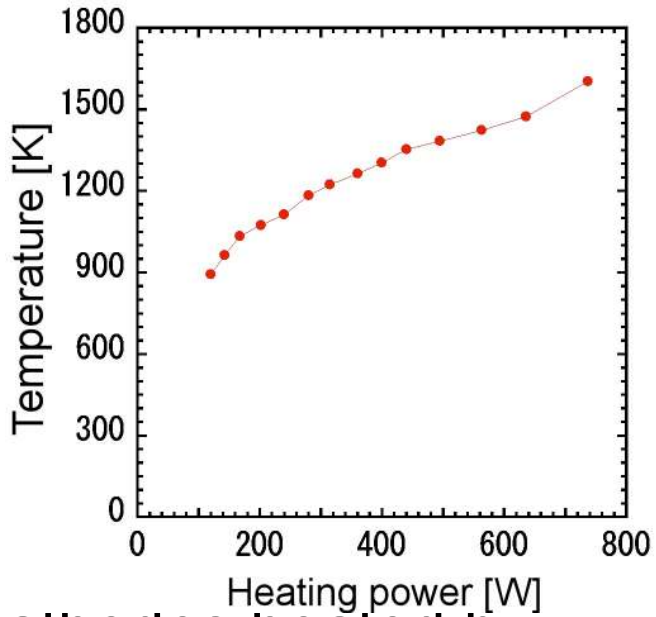


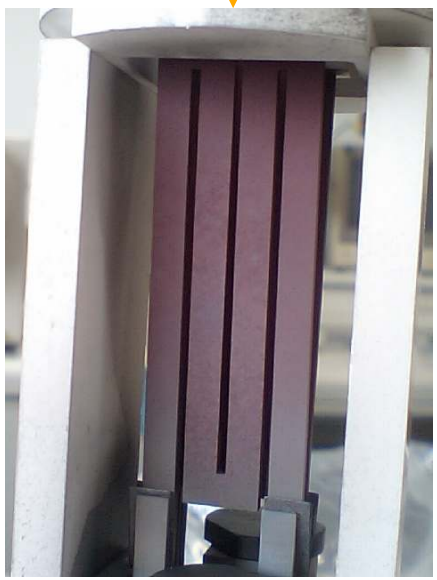
Van de Graaff accelerator

i) Compact and powerful plasma source
ii) Differential pumping to protect detectors and Van de Graaff accelerator
iii) Ion beam monitoring system during plasma exposure

Novel compact and powerful dc plasma source

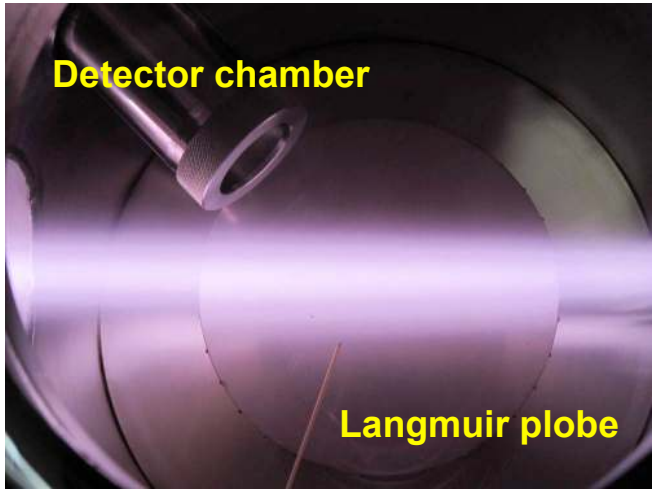


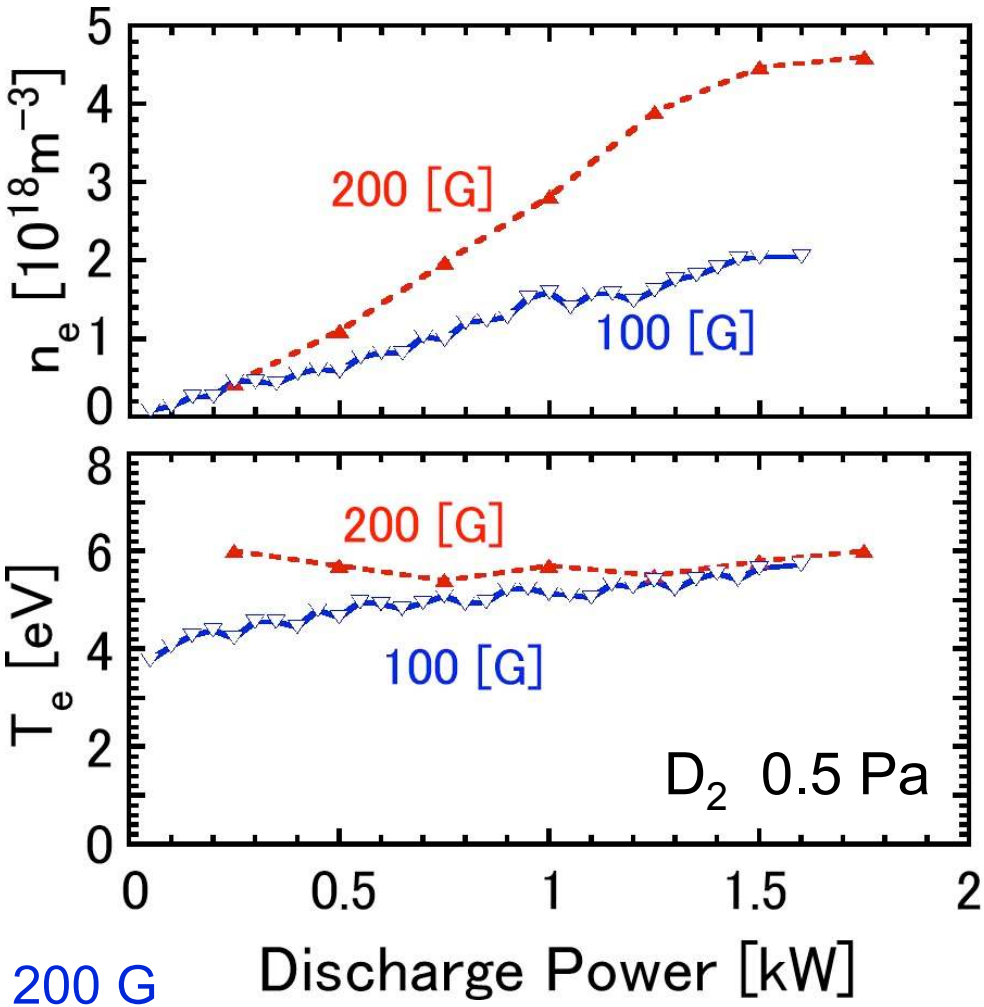




- Zigzag-shaped LaB_6 cathodes heated by direct Joule heating.
  - ➡ Efficient heating (1600 K at 730 W)
- Magnetic field is inclined to two cathode surfaces at a shallow angle.
  - ➡ Large effective cathode area
- Discharge gases are introduced between the two cathodes.
  - ➡ Efficient usage of neutral gas for discharge

Discharge power dependences of the electron density n_e and temperature T_e at a center of plasma column



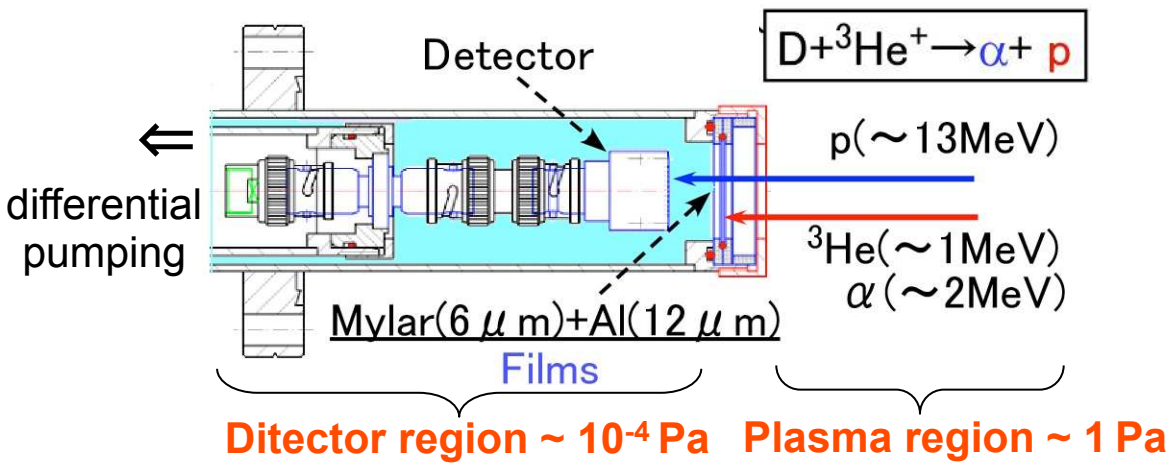


- Density is proportional to the discharge power.
- Electron temp. is almost constant around 5 eV.
- Higher *B*-field leads to higher density.

  ~ 4.5×10^{18} m^{-3} at 1.8 kW and 200 G

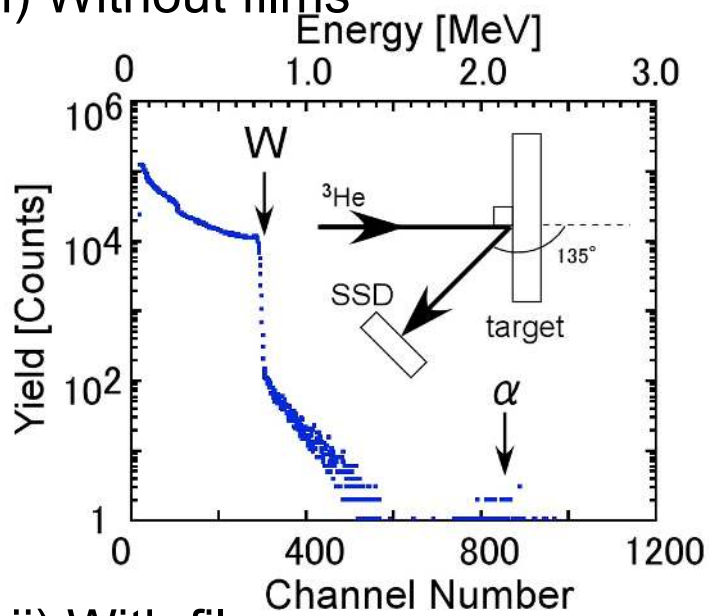
Capability of magnetic coils ~ 1.4 kG ➡ $>10^{19}$ m^{-3}

Differential pumping to protect detectors and Van de Graaff

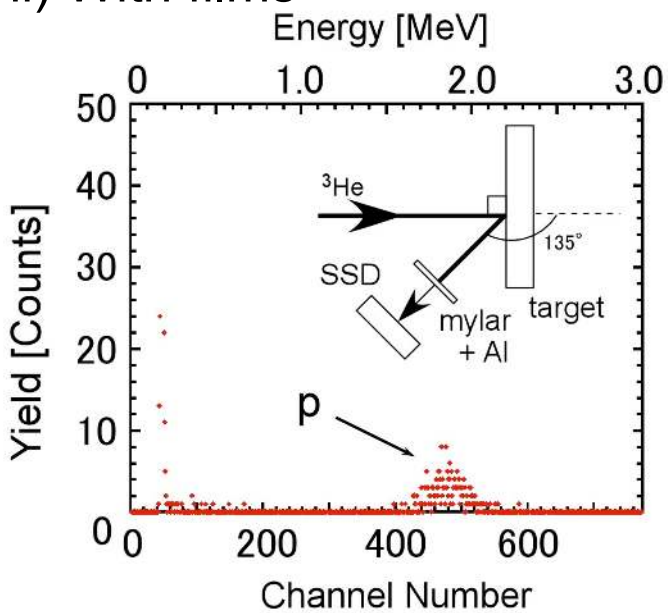


- Detector region is sealed by mylar film to maintain high vacuum state and Al film is used to repel plasma photons.
- Protons in NRA can be detected through the films.

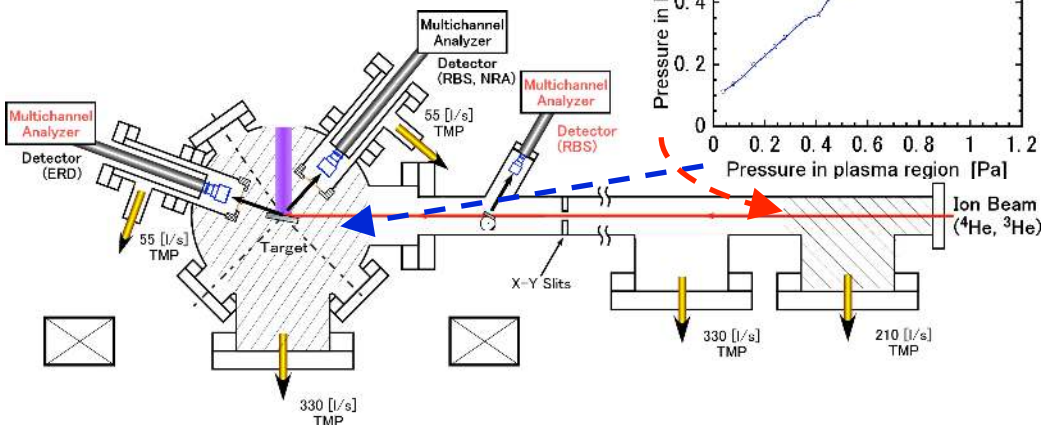
i) Without films

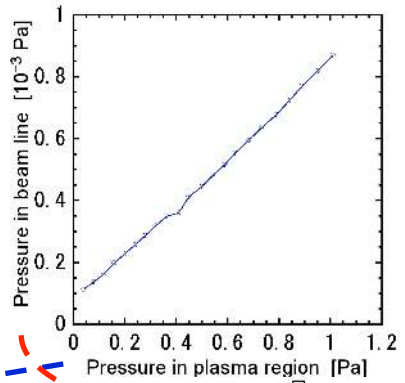


ii) With films



Pressure in beam line is kept less than 10^{-3} Pa.

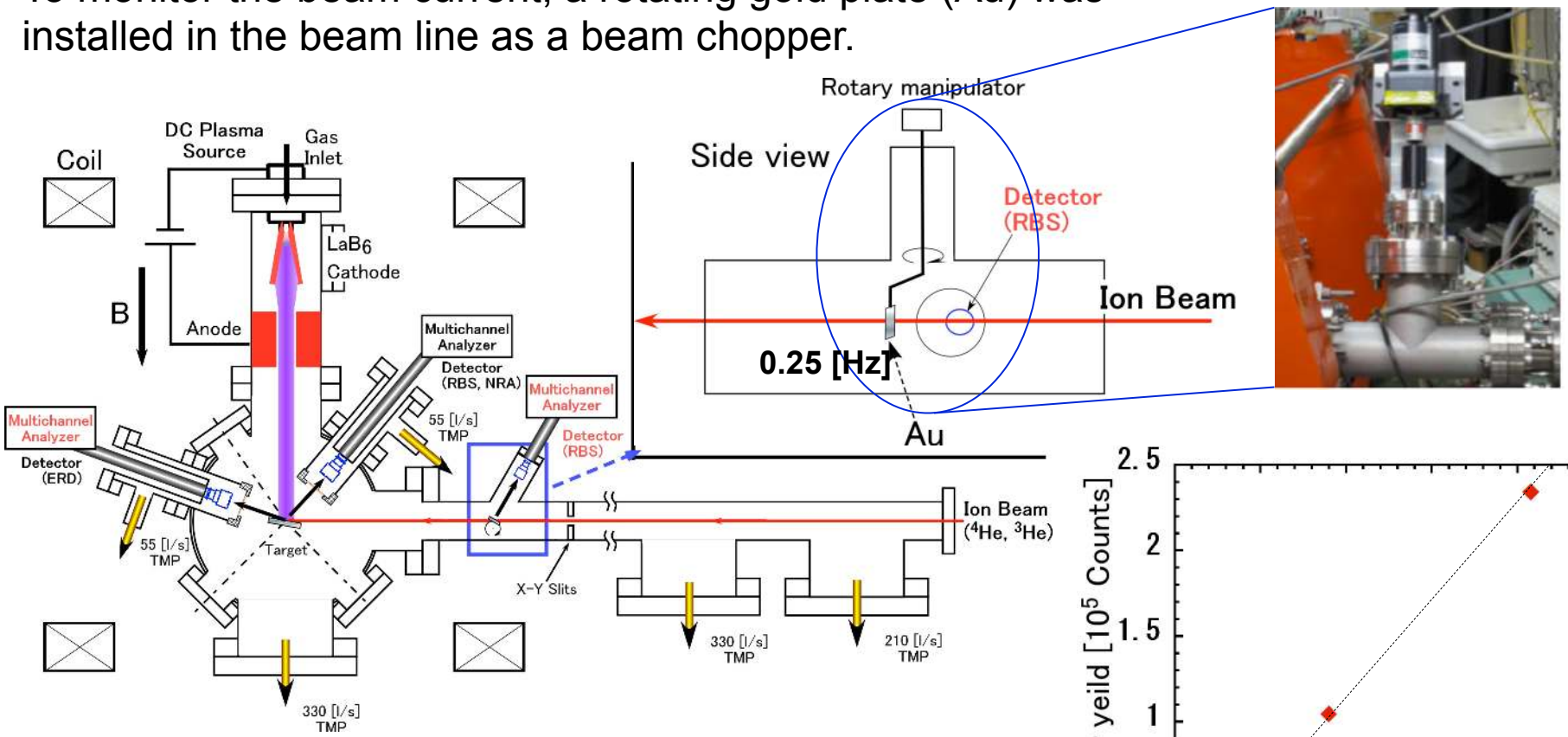


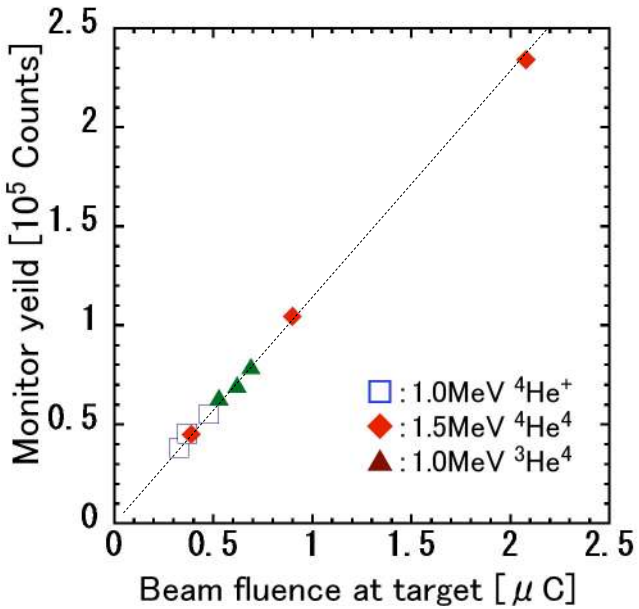


Ion beam monitoring system during plasma exposure

It is impossible to measure the ion beam current at samples during plasma exposure.

To monitor the beam current, a rotating gold plate (Au) was installed in the beam line as a beam chopper.





- Beam fluence [μC] at target is proportional to monitor yield [Counts] by Au plate.
- Capable of measuring ion beam fluence during plasma irradiation

Time dependence of deuterium retention of isotropic graphite

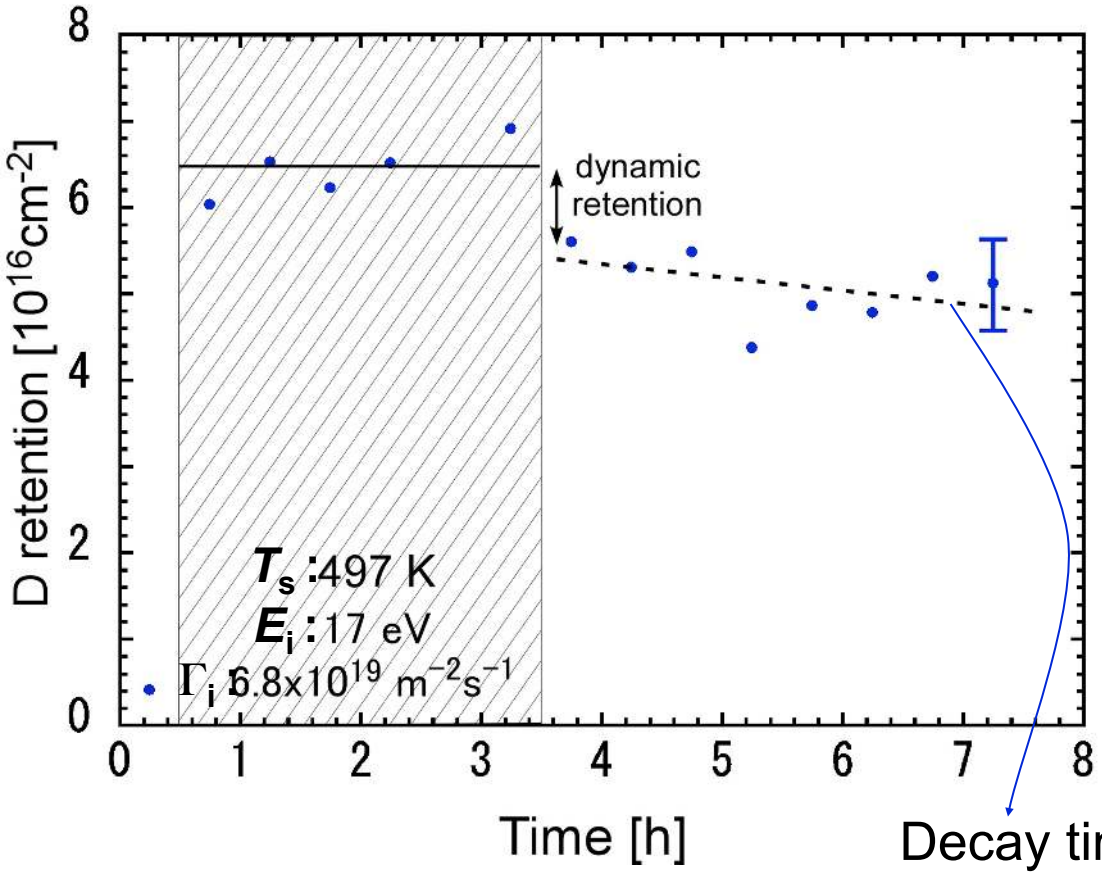
sample：isotropic graphite (IG-110U)

◇Ion beam

Ion beam energy：1.0 [MeV]
Ion species：$^3He^+$
Beam current：1～10 [nA]
Measurement time：1800 [s]

◇Plasma parameter

Discharge power：50 [W]
B - field：100 [G]
Discharge gas ：D_2
Pressure：0.48 [Pa]
Irradiation time：10800 [s]



Decay time = 31±4 [h]

・Decreased by ~20 % just after the end of plasma irradiation
⇒Dynamic retention

・Deuterium retention decreases slowly after plasma termination.

Deuterium retention of tungsten during plasma exposure

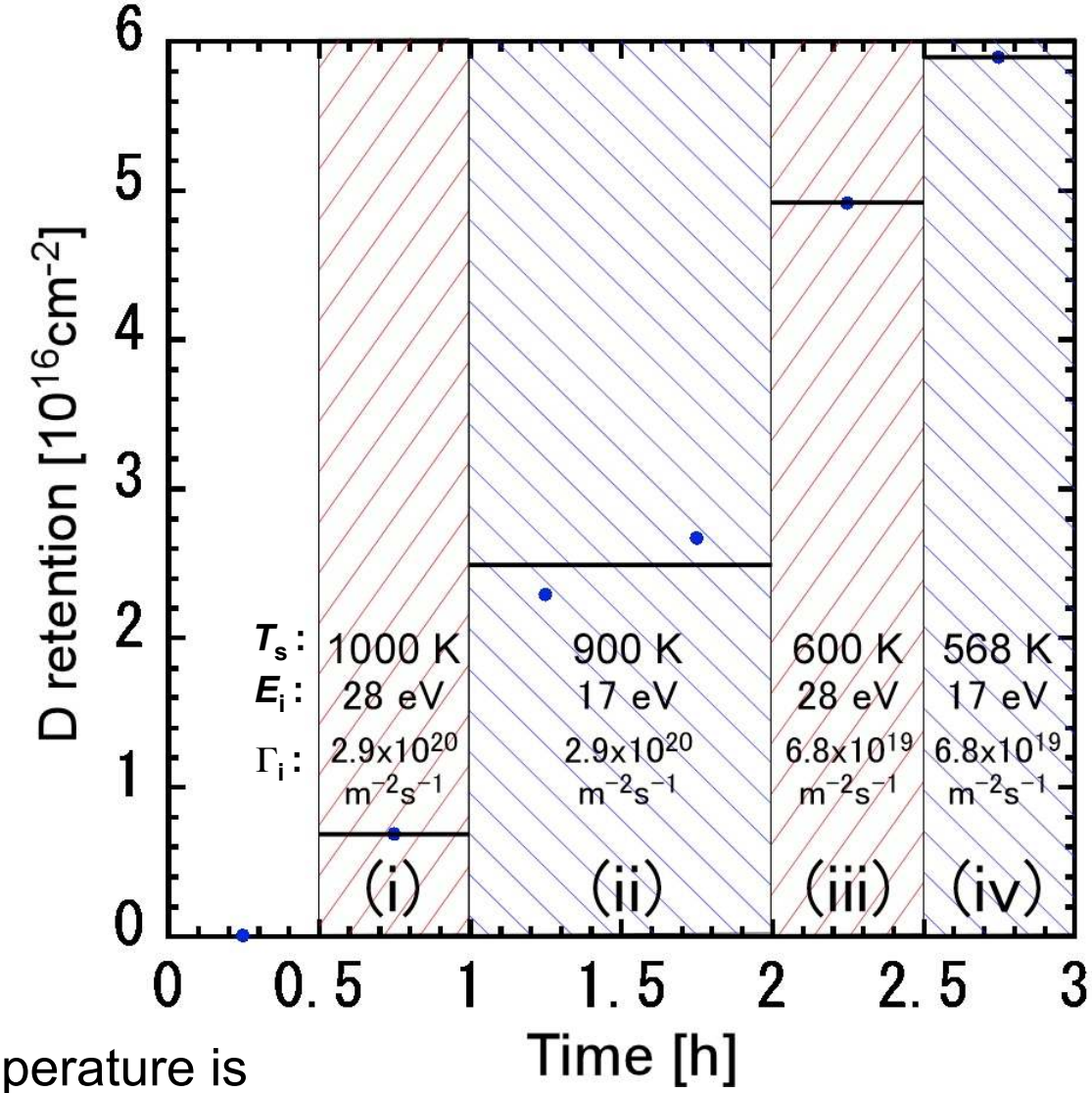
sample：ITER R&D W

◇Ion beam

Ion beam energy：1.0 [MeV]
Ion species：$^3He^+$
Beam current：1～10 [nA]
Measurement time：1800 [s]

◇Plasma parameter

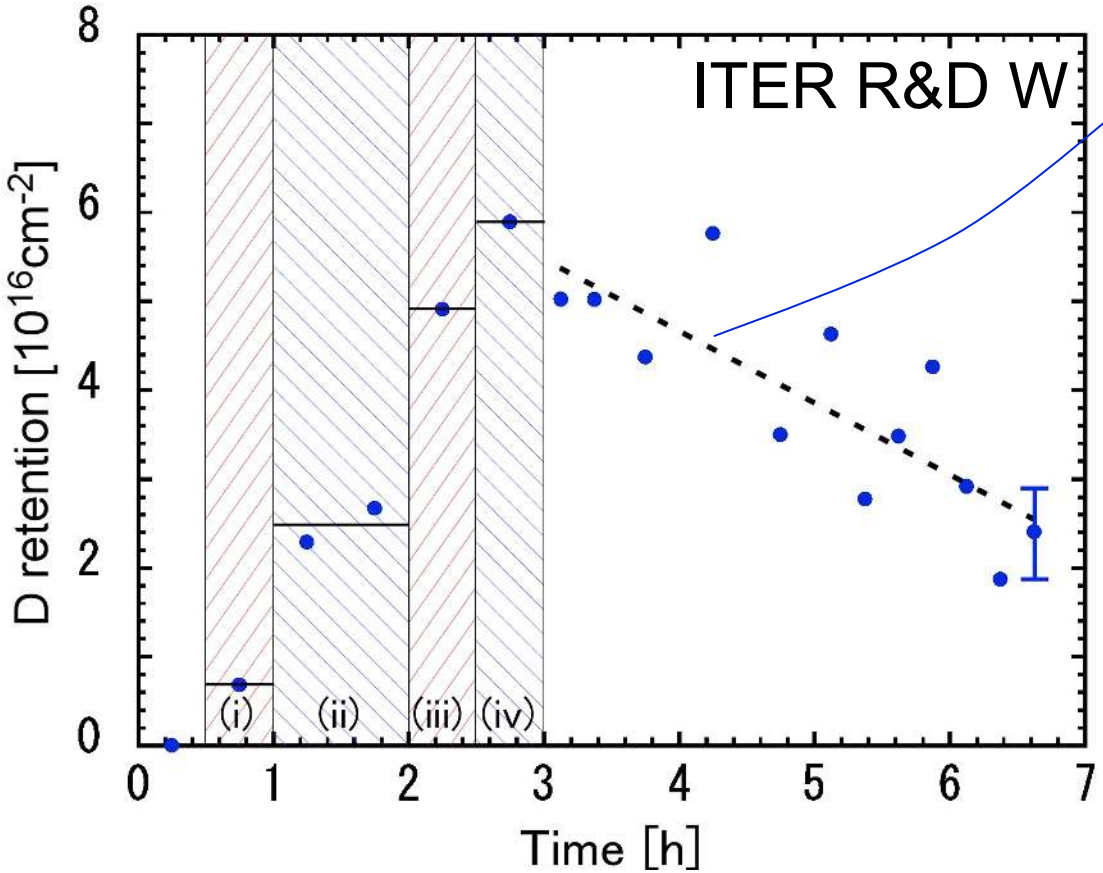
Discharge power：50, 250 [W]
B - field：100 [G]
Discharge gas ：D_2
Pressure：0.48 [Pa]
Irradiation time：9000 [s]



・Deuterium retention is mainly determined by sample temperature *T*s.

・Precise control of surface temperature is required independently plasma condition.

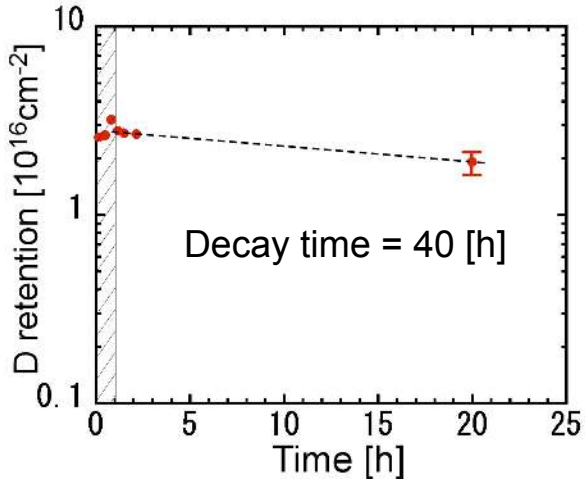
Deuterium retention of tungsten after plasma termination



Decay time = 4.0±0.8 [h]

- Decay time of deuterium retention of ITER R&D W is much shorter than that of isotropic graphite (IG-110U).
- Need to care about post-measurement of deuterium retention of W.

Preliminary result for powder metallurgy W (PM-W)



- Decay time could be different depending on manufacturing methods for W.

まとめと今後の課題

まとめ

□動的リテンション分析の可能な、高熱流プラズマ照射装置とイオンビーム解析装置が一体となったその場計測装置の開発を行った。

- LaB_6製熱陰極の小型化を行い、ダイバータ模擬の可能な高密度(~10^{18} m^{-3})定常プラズマの生成に成功した。
- 半導体検出器(SSD)部とビームライン領域で異なる差動排気及び、ビーム照射量のモニタリングを行い、プラズマ放電用ガス導入時においても、イオンビーム分析ができるような高真空度を維持することが可能となった。

□開発した装置を用いて、プラズマ照射中の重水素リテンションのダイナミックスを計測することに成功した。

今後の課題

□動的リテンション量の粒子束依存性や温度依存性
□同位体置換効果（ERDの整備）