

Understanding and control of hydrogen circulation in fusion experimental devices

実機での水素循環の理解と制御

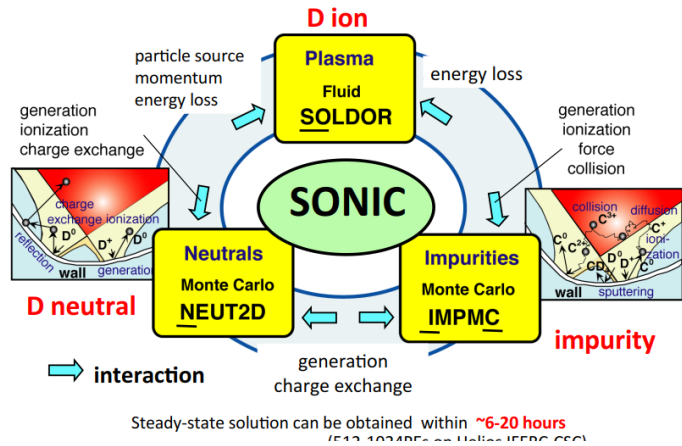
花田 和明

九州大学応用力学研究所

本講演をまとめるにあたり、多くの共同研究者に実験、試料分析、考察にご協力いただきました。
ここに感謝申し上げます。

原型炉での粒子バランス (QST 星野氏、朝倉氏提供)

suite of integrated divertor code SONIC



壁へのフラックスに関連した仮定 (Slim CS 3GW)

プラズマ:

解析領域の端から径方向へ流出したイオンは、すべて境界で中性化し、イオン温度を持った中性原子として追跡。 $(\Gamma_n = \Gamma_i \text{ at wall side boundary})$ 従って、現状のモデルでは、第一壁表面への重水素イオン粒子束は0。ダイバータへ到達したイオンについては、100%中性粒子としてリサイクリング。

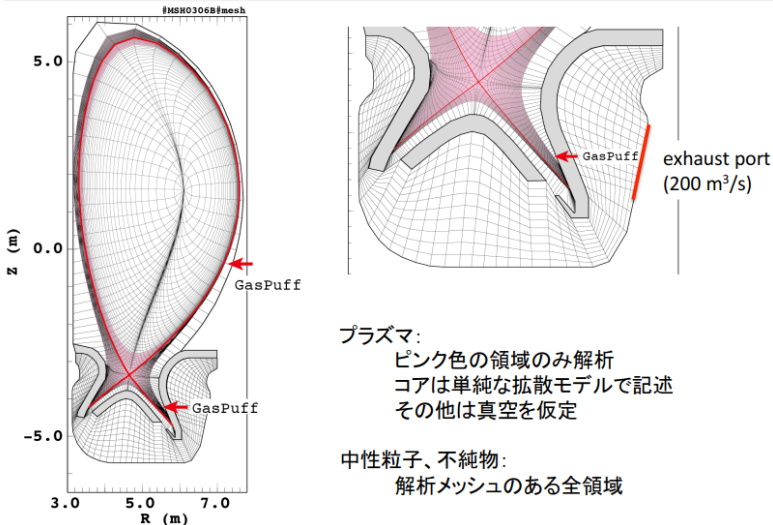
中性粒子:

壁側のプラズマ解析領域端、ダイバータへのイオン粒子束を100%中性粒子ソースとして扱う。ガスパフ、堆積再結合も同様。壁では100%リサイクリングを仮定しているため、イオン化or排気されるまで輸送を追跡。

不純物:

ガスパフされたAr、コア境界から発生したHeは、イオン、中性粒子問わず排気されるまで追跡。排気領域を除き、プラズマ領域と壁との間は真空を仮定しているため、イオンのまま磁力線に沿って壁にぶつかる成分が存在。中性粒子と同様、壁では100%リサイクリングを仮定。

SONICの解析領域



プラズマ:
ピンク色の領域のみ解析
コアは単純な拡散モデルで記述
その他は真空を仮定

中性粒子、不純物:
解析メッシュのある全領域

DT粒子 1×10^{23} /sを供給して 1.06×10^{21} /sのDT反応が起きている



燃焼率約1%

最近設計されている1.5GW原型炉でのDTペレットによる燃焼率5%程度

イオン化率20-50%

燃焼率 ~5%

半分以上の粒子がイオン化されずそのまま排気か吸蔵

SlimCS 3GW出力の主な解析条件

条件・解析結果の詳細は、N.Asakura, FEC2012, NF

コア境界: $Q_i=Q_e=250\text{MW}$ 、 $\Gamma_{\text{ion}}=0.5 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 、

ガスパフ、排気: $\Gamma_{\text{puff}}=1 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 、 $S_{\text{pump}}=200 \text{ m}^3/\text{s}$

輸送係数: $D=0.3\text{m}^2/\text{s}$ 、 $=1.0\text{m}^2/\text{s}$ 、

Ar不純物ガスパフ: 解析領域における放射損失パワーが460MWになるよう自動調整

He: 3GW出力に対応するHeフラックスをコア境界から一様に発生 ($1.06 \times 10^{21} /\text{s}$) 計算終了後にポスト処理として輸送解析

中性粒子については、壁では100%リサイクリングを仮定。粒子・エネルギー反射係数には壁温度を考慮

ダイバータ: 1200°C 、その他: 500°C

ASDEX-Uにおけるhigh gas flux discharge

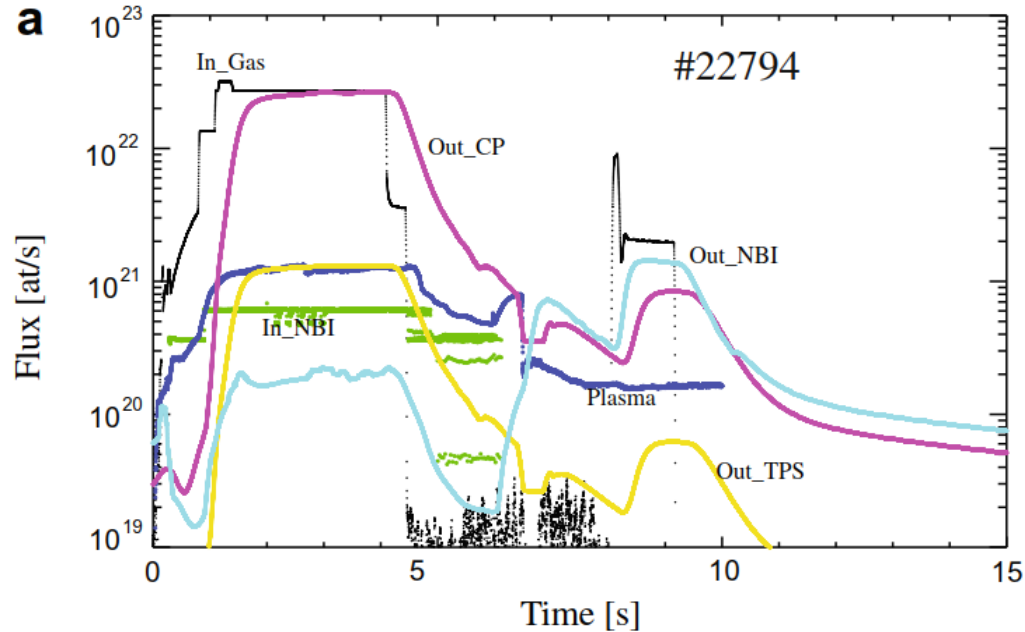
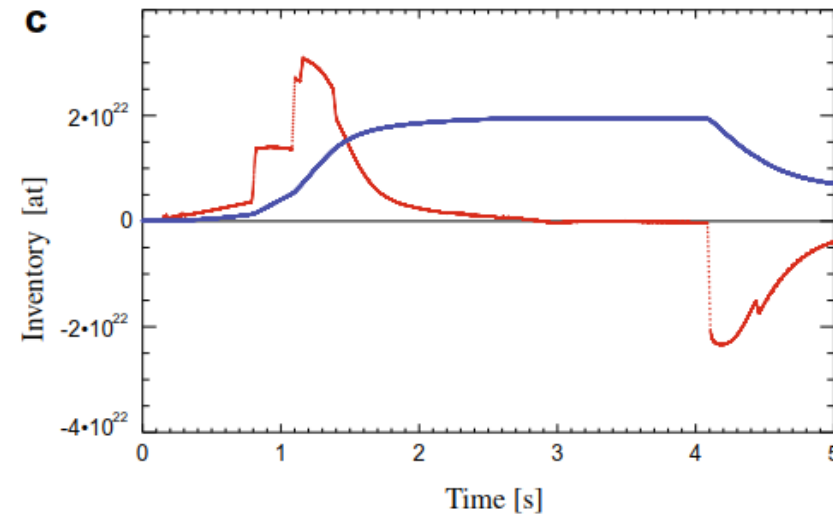
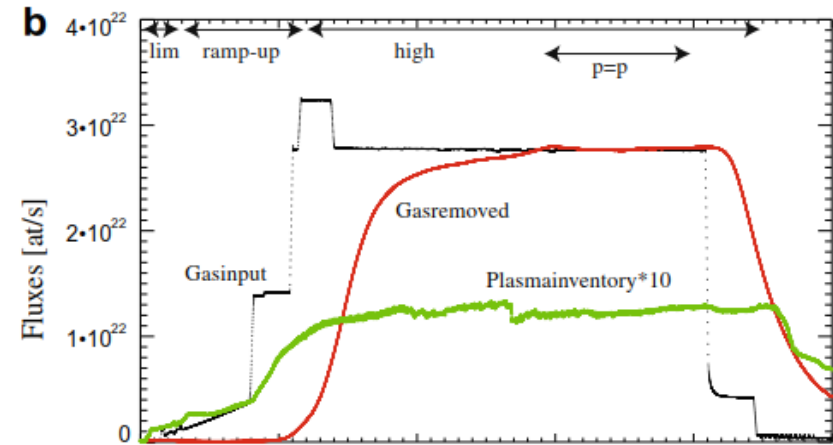


Table 1
Used effective pumping speeds as a function of the pressure p (mbar).

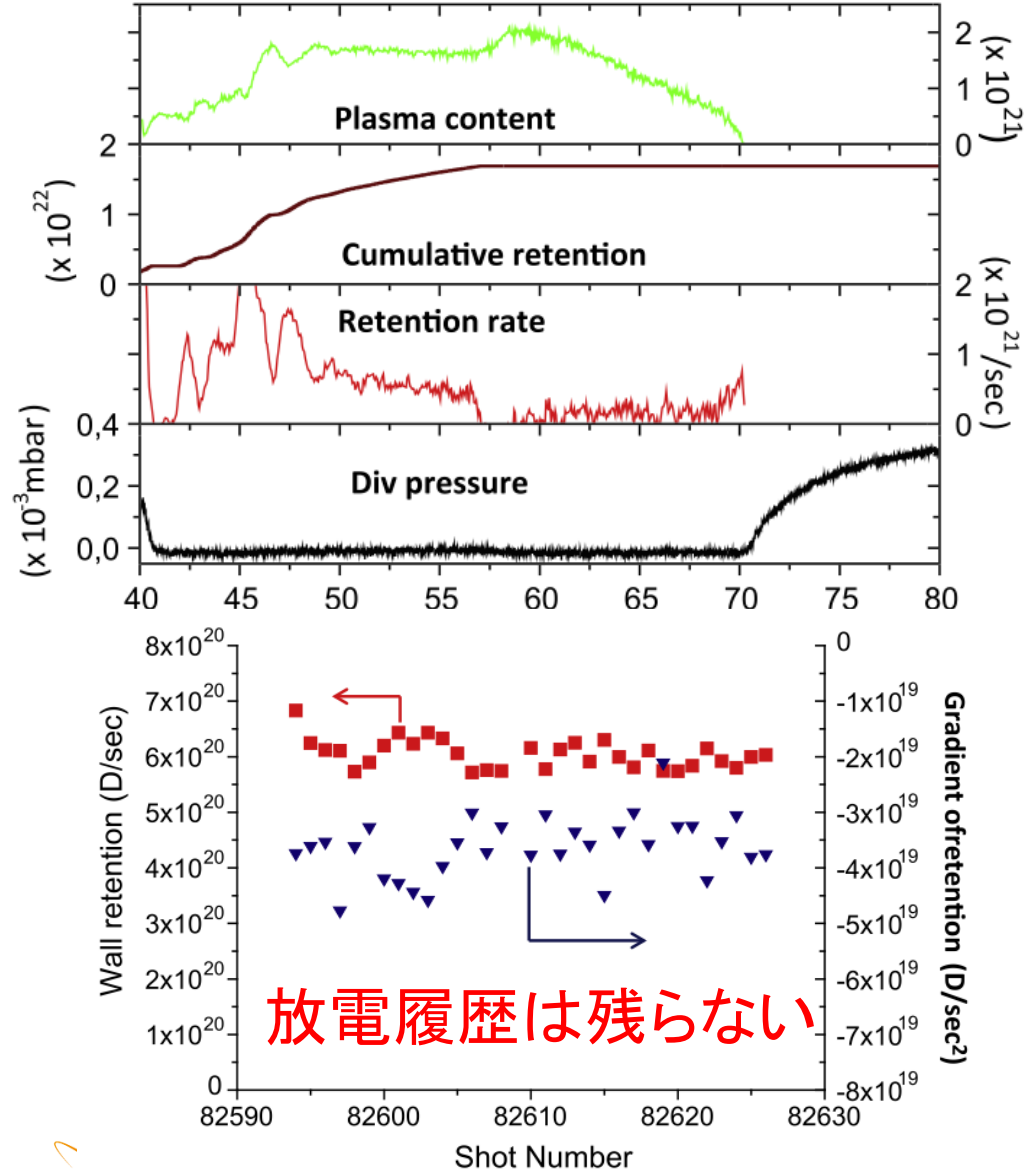
Pump	D_2 pumping speed (l/s) (1×10^{-5} mbar $\leq p \leq 1 \times 10^{-2}$ mbar)
Turbomolecular pumps	$6.85 \times 10^3 + 5.0 \times 10^3 \cdot p$
Cryo pump	$1.15 \times 10^5 + 1.5 \times 10^7 \cdot p$
NBI Box 1	$2.9 \times 10^4 + 5 \times 10^6 \cdot p$
NBI Box 2	$2.3 \times 10^4 + 4.1 \times 10^6 \cdot p$
Diagnostics	≤ 500

V. Rohde et al. / Journal of Nuclear Materials 390–391 (2009) 474–477

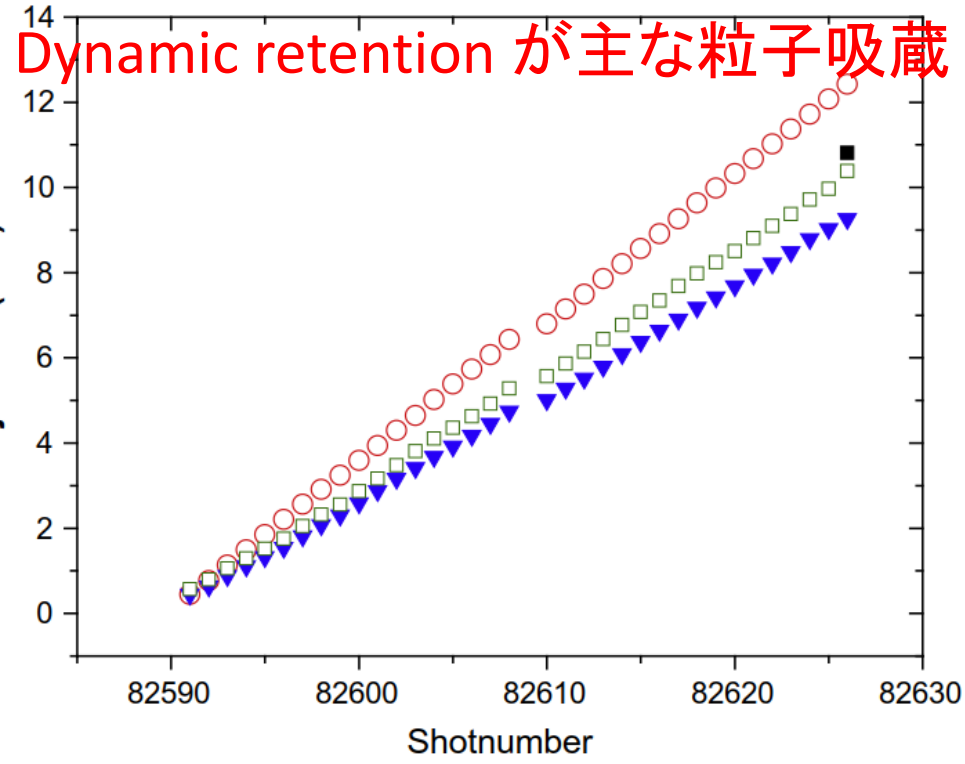


プラズマ放電中にGas puffとNBIの粒子 in-Fluxを外部ポンプで完全に排気

JET ILW (limiter) の実験結果



放電履歴は残らない



Dynamic retention が主な粒子吸蔵

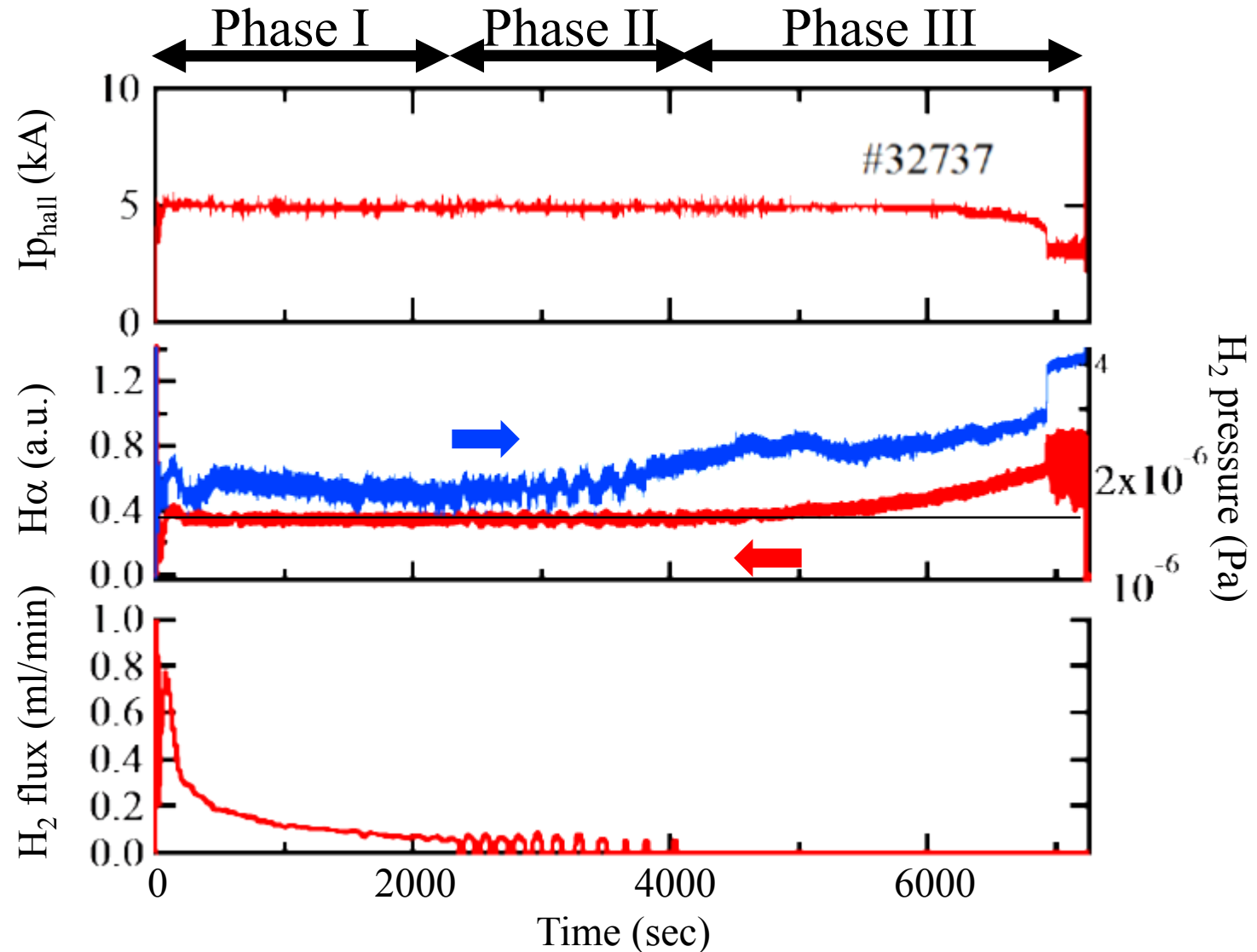
- 吸蔵率は放電時間とともに下がる
- 放電履歴は残らない

Plasma discharge of 1hour 55min

- Gas fueling is feed-back controlled with mass flow controller to keep $H\alpha$ constant.
- Temperatures of hot wall and vessel wall are kept 120°C constant.
- Plasma current is measured with hall sensors.



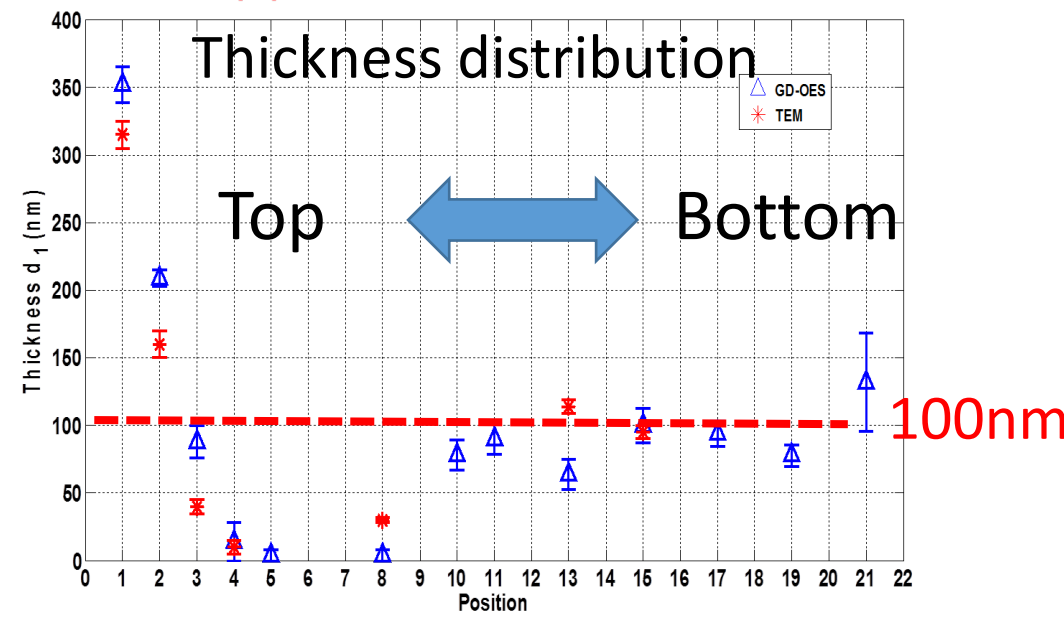
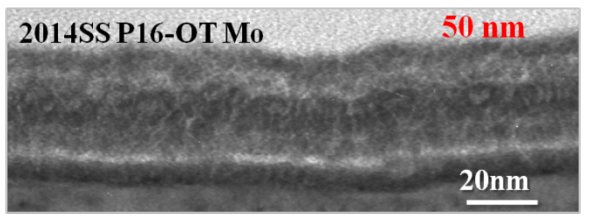
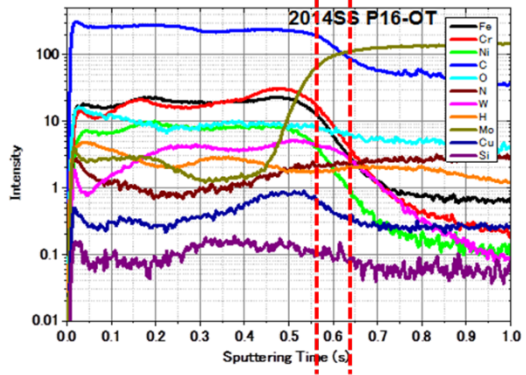
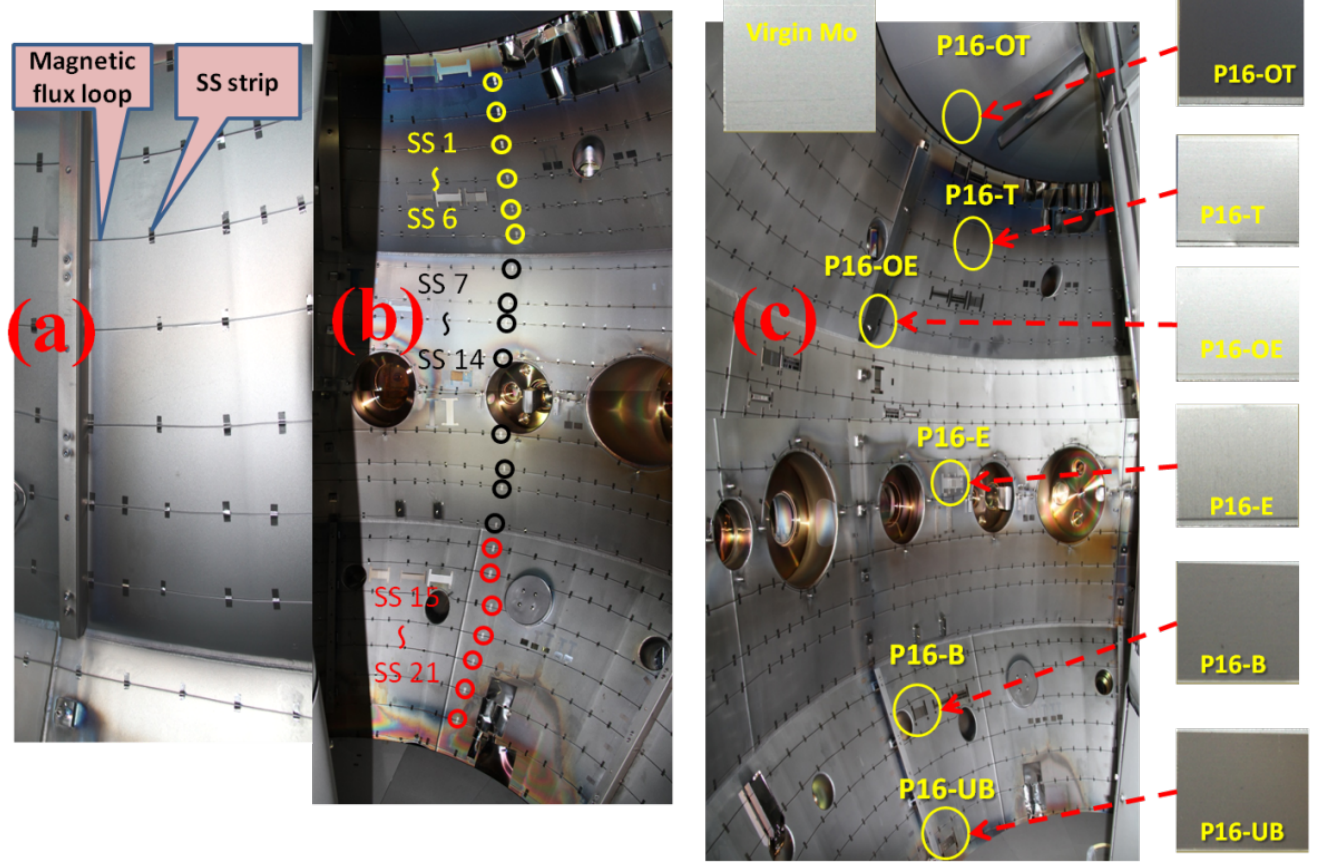
- Fueling rate is decreased gradually to keep $H\alpha$ constant, and it finally become zero.
- After that, $H\alpha$ increases gradually, and finally plasma discharge is terminated spontaneously.



Investigation of Plasma facing wall with TEM, Ellipsometry and Colormetry

Photo of inner vessel and specimen for TEM and Ellipsometry before installation of the hot wall

Component and thickness of plasma-induced thin film on the surface

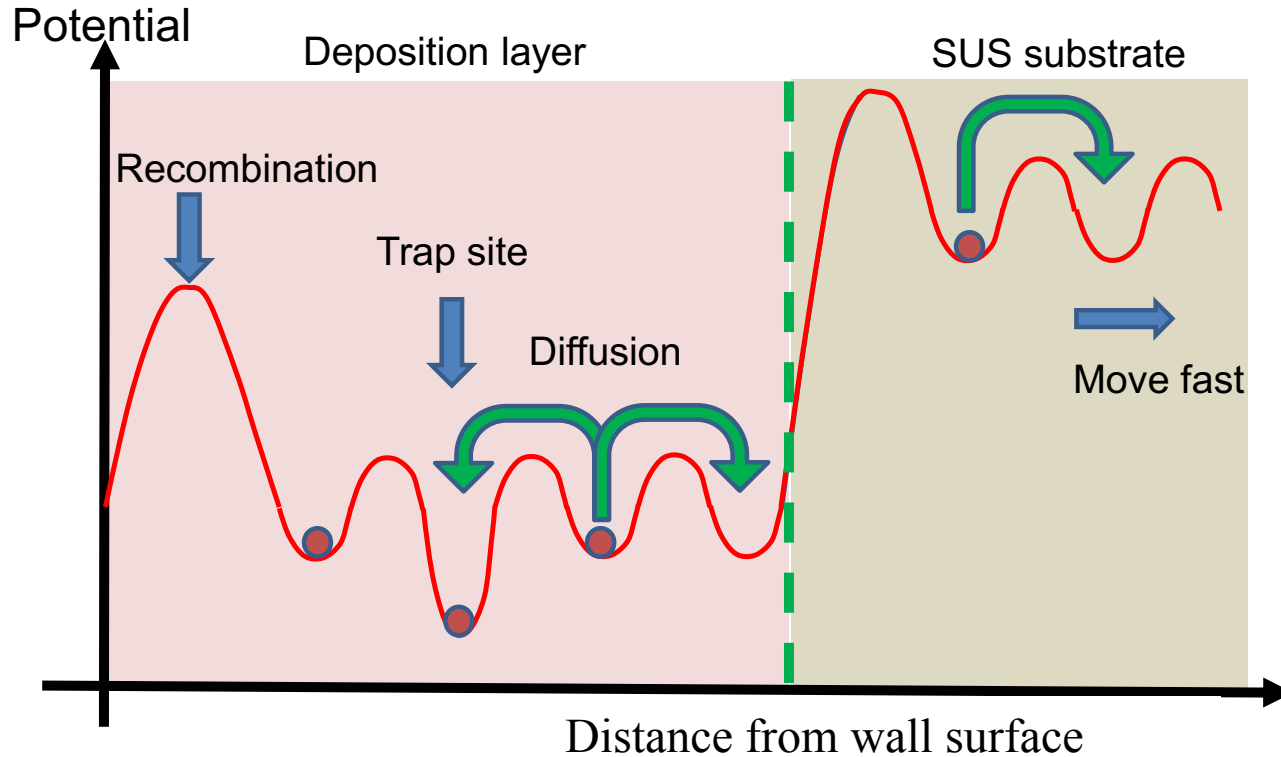


Published to RSI, Z.Wang et al.



A wall model with hydrogen barrier (HB) is proposed

In this model, H atoms don't move from deposition layer to SUS substrate and vice versa due to high chemical potential. H_W and H_T are total numbers of H atoms in deposition layer.



26th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P4-49, K. Hanada, et. al.
To be published in Nuclear Fusion, K.Hanada, et. al.

$$\frac{d(H_W + H_T)}{dt} = \underbrace{\Gamma_{in} S}_{\text{Influx to the deposition layer}} - \underbrace{\frac{k}{S d_R^2} H_W^2}_{\text{Release due to recombination}}$$

$$\frac{dH_T}{dt} = \underbrace{\alpha H_W \left(1 - \frac{H_T}{H_T^0}\right)}_{\text{Trapping}} - \underbrace{\gamma H_T}_{\text{De-trapping}}$$

H_W : the number of H dissolved in wall material

H_T : the number of H trapped in defects

H_T^0 : the upper-limit number of H_T

Γ_{in} : net influx per unit area into wall material

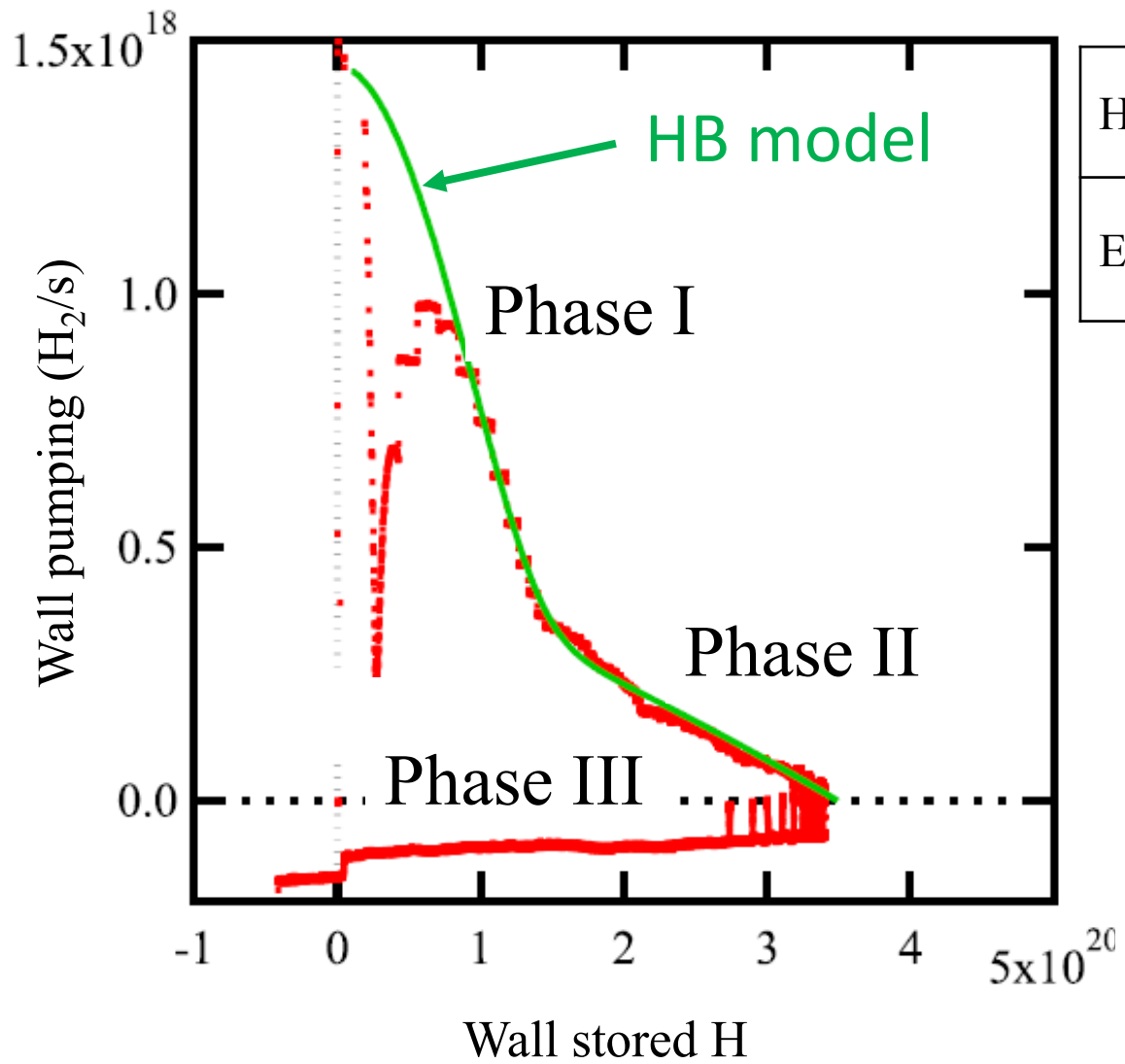
S : surface area

k : surface recombination coefficient of H atoms

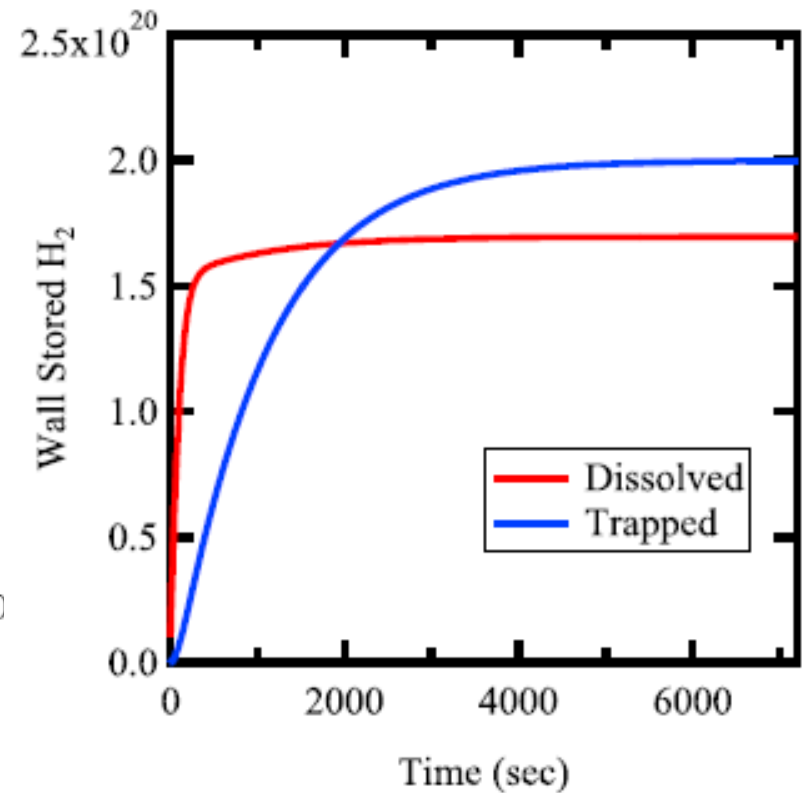
d_R : thickness of deposition layer

α : H trapping rate γ : H de-trapping rate

Comparison between experimental results and HB model

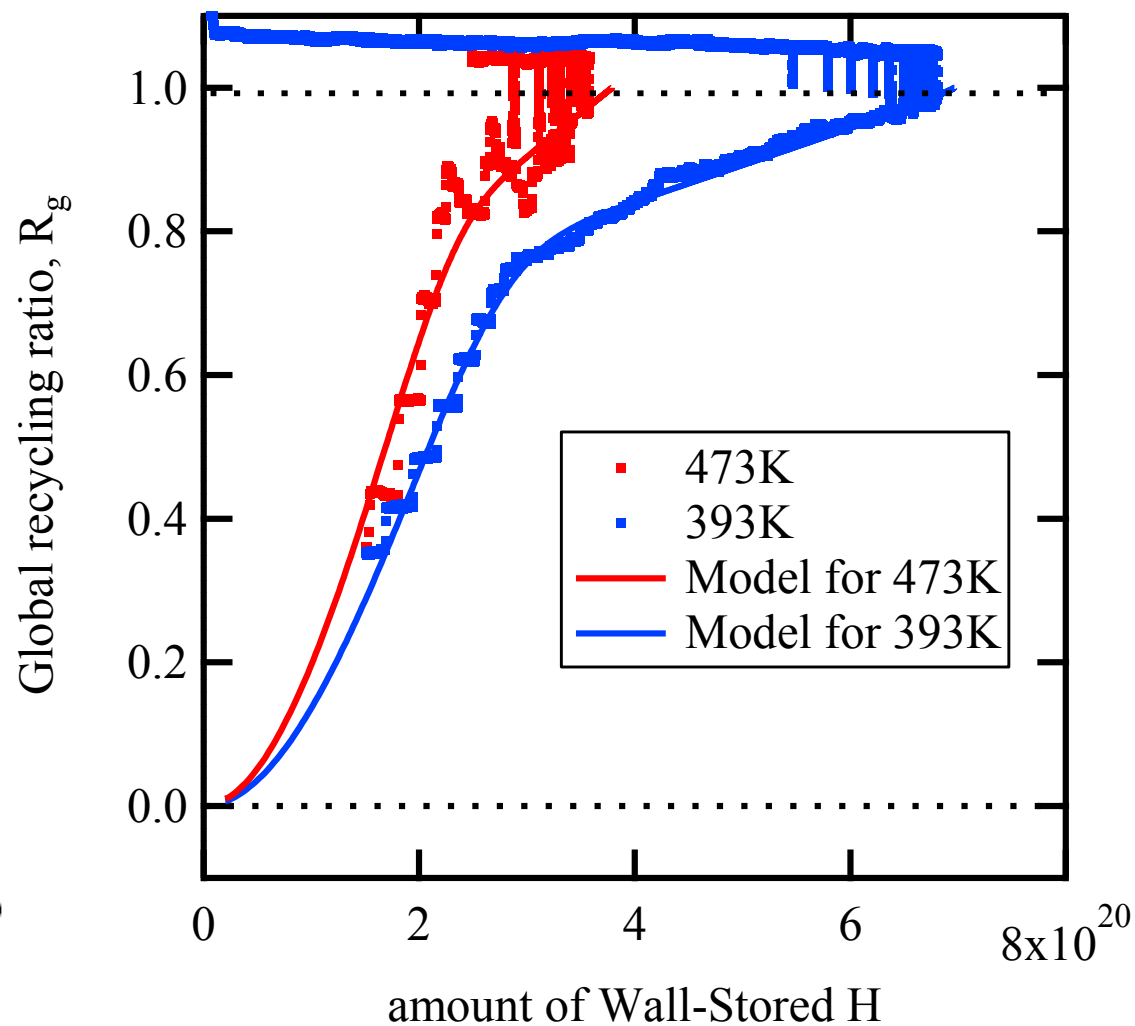
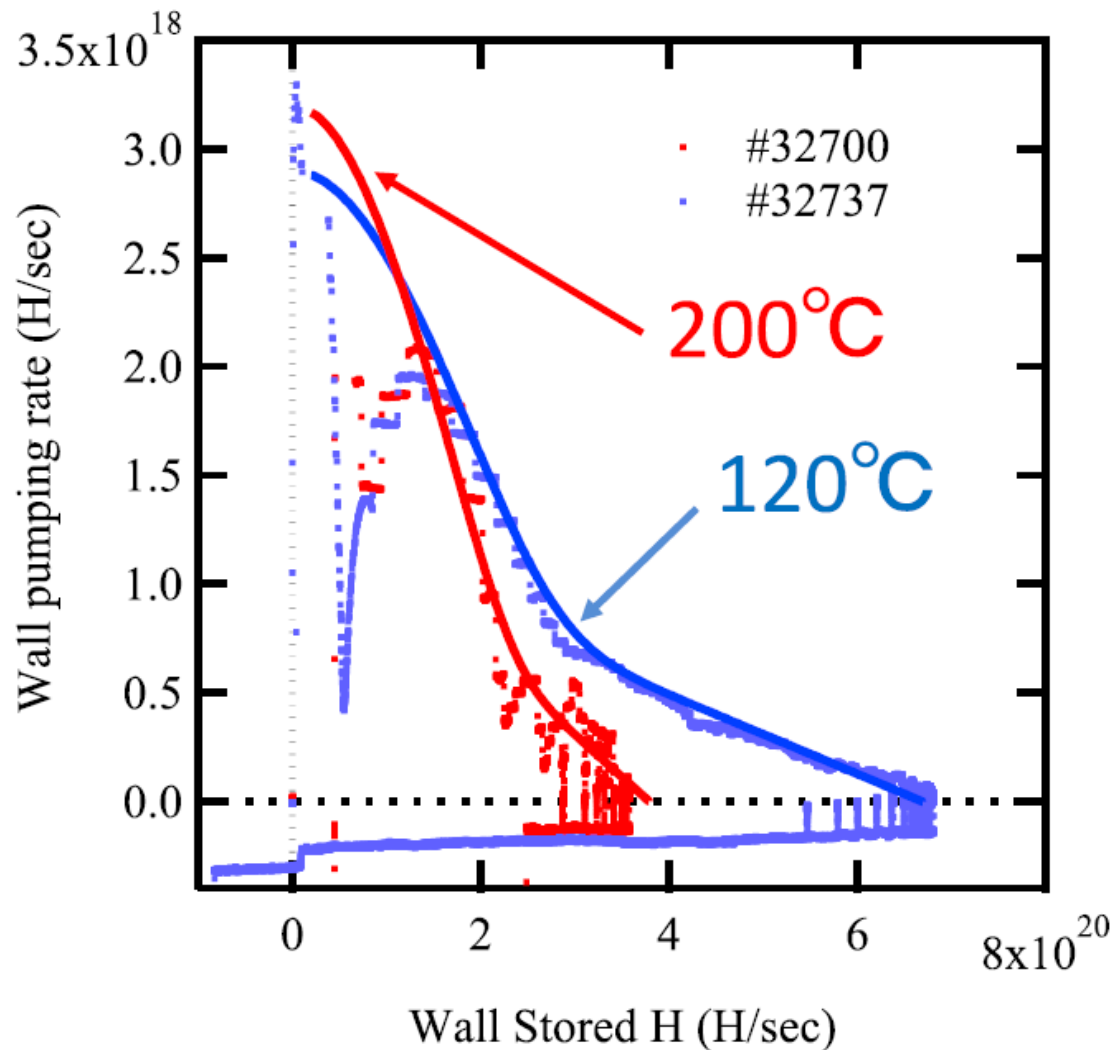


	Wall pumping rate (H/sec)	Wall stored H
HB model	$\frac{d(H_W + H_T)}{dt}$	$H_W + H_T$ (=0 @t=0)
Experimental	$q_{fuel} - q_{pump}$	$\int_0^t (q_{fuel} - q_{pump}) d\tau$



- The wall-stored H gradually increase with the decrease of wall pumping rate.
- In phase III, wall release starts with the decrease of wall stored H.

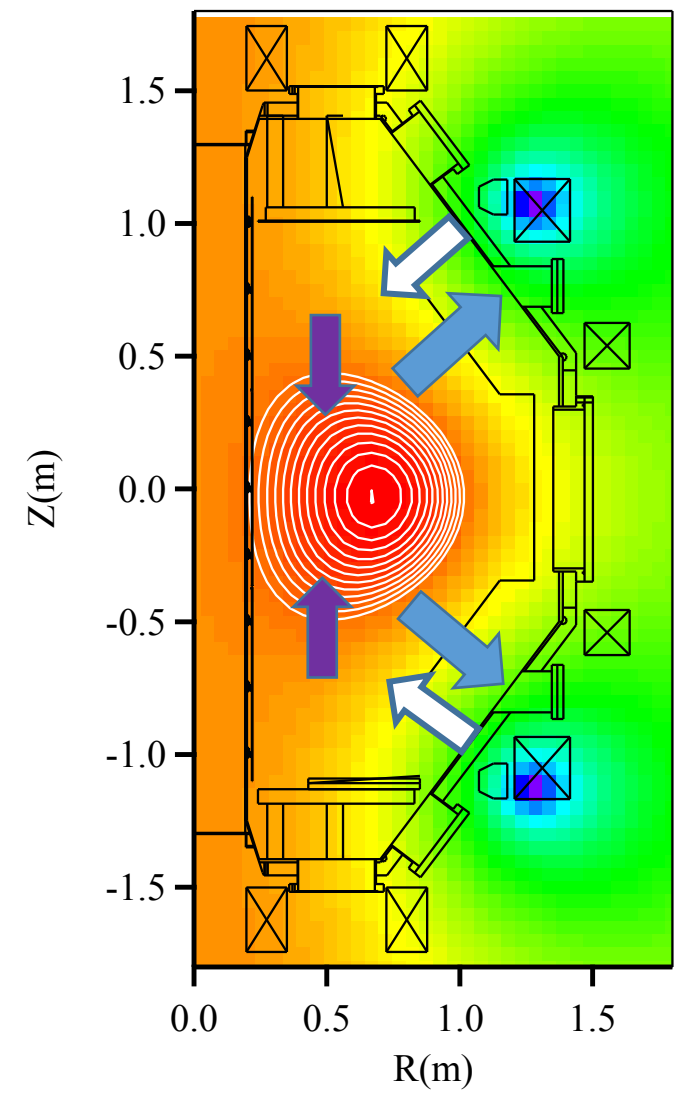
Hot wall can modify wall pumping rate and H recycling rate



壁モデルと水素の原子・分子過程を入れた粒子バランス

- 0次元モデルで水素の原子・分子・イオン化の過程を計算
- 主量子数 $n=3$ までの水素原子の励起を計算して $H\alpha$ 線強度を計算
- 中性の原子・分子については分圧に排気速度をかけて排気
- 荷電交換された中性水素原子は壁への粒子束として計算
- イオンは粒子閉じ込め時間(質量の $-1/2$ 乗の依存性あり)で壁への粒子束として計算
- 反射率も考慮
- プラズマ体積で壁への粒子束は計算し、発生した分子は真空容器体積で割ることで密度に直している。
- 壁モデルは水素バリアモデルでトラップはなし

プラズマ対向壁の粒子バランスへの影響



➡ プラズマから壁への粒子入射

$$\Gamma_{p \rightarrow W} = V_{plasma} \left(\frac{H^+}{\tau_p} + \frac{H_2^+}{\sqrt{2}\tau_p} + \frac{H_3^+}{\sqrt{3}\tau_p} + \gamma_{cx} H \right) [H] : \tau_p = \frac{a^2}{2\alpha D} \approx 50ms$$

⇨ 壁から真空領域への粒子放出と壁での反射

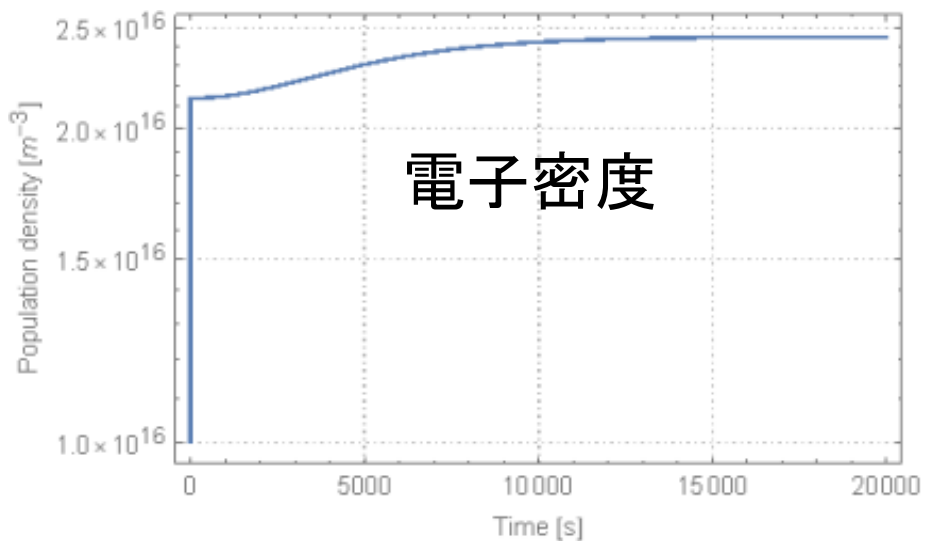
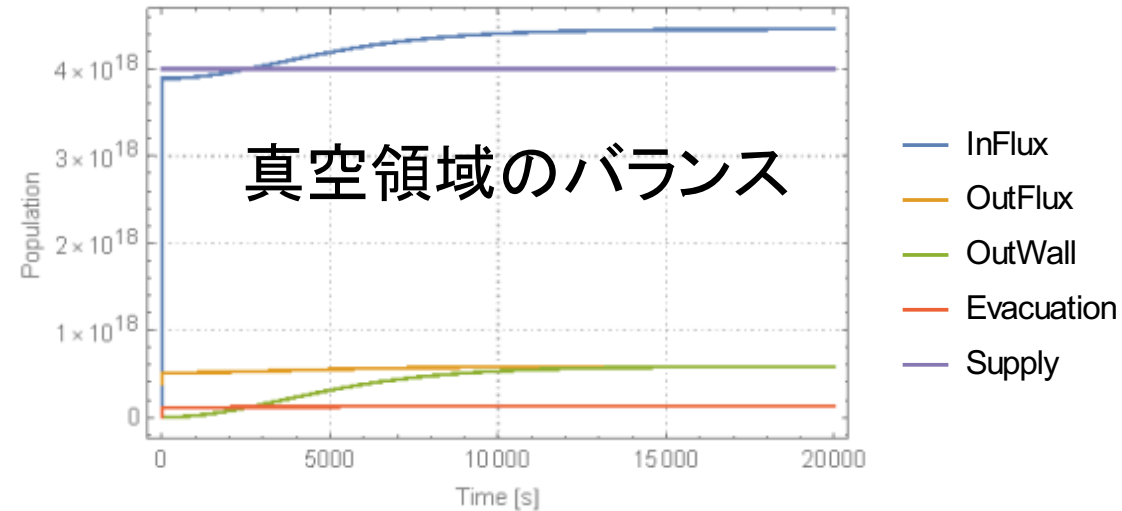
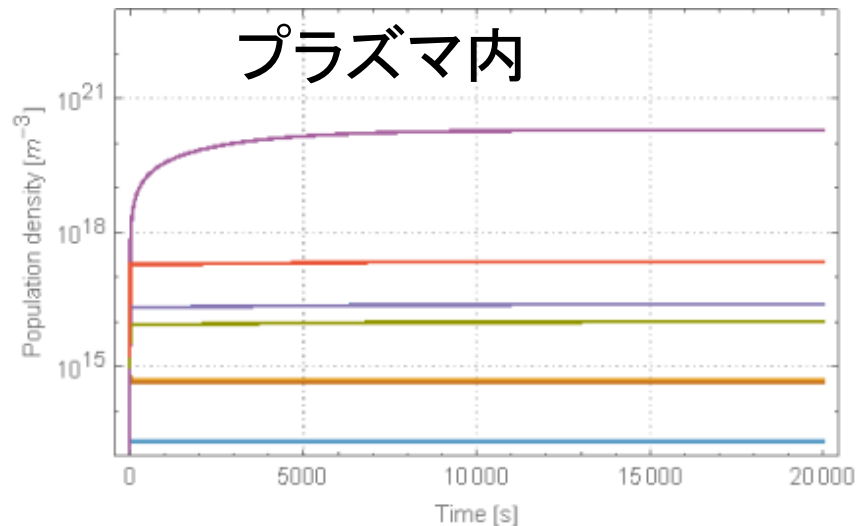
$$kS_W \frac{H_W^2}{(S_W d_{dep})^2} [H_2] + R_{re} \Gamma_{p \rightarrow W} [H] :$$

$$k = 1 \times 10^{-38} m^4 / s : S_W = 26m^2 : d_{dep} = 100nm$$

➡ 真空領域からプラズマへの粒子供給

$$\frac{(H + H_2)}{\tau_n} : \tau_n \approx 5ms$$

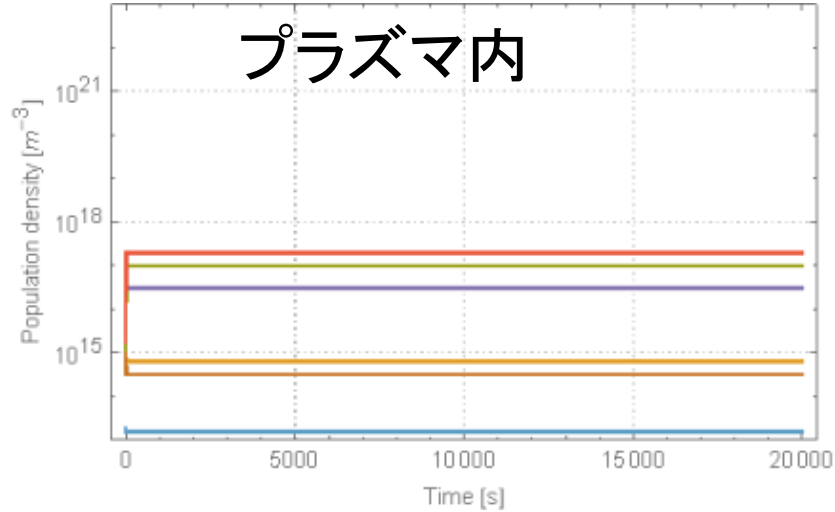
QUESTの粒子バランス(粒子反射率=0.15)



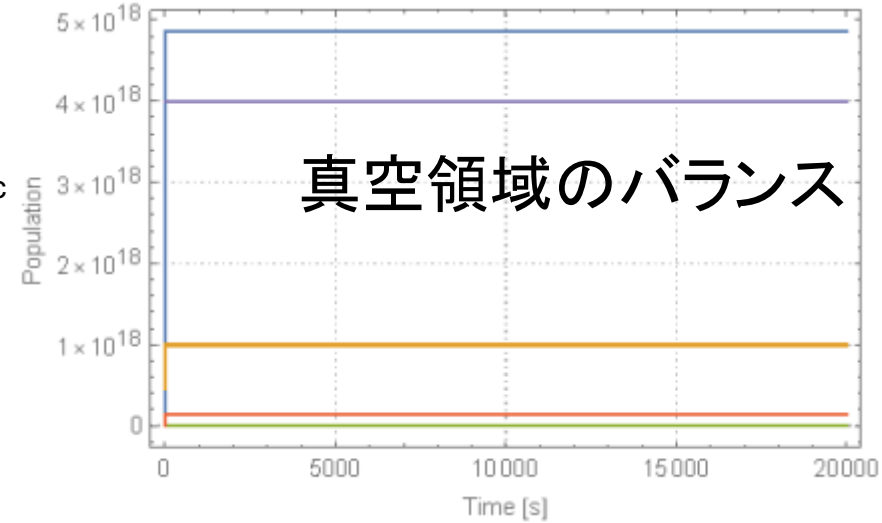
Gas H2 $2 \times 10^{18}/s$, $T_e=10eV$, $\tau_p=200ms$,
 $\tau_n=100ms$, $Spump=4m^3/s$, $R_{re}=0.15$

壁からの脱離は粒子補給の30%程度
 真空領域への粒子の排気は小さい
 電子密度は定常になる ($2.4 \times 10^{16} m^{-3}$)
 粒子補給効率は0.6%

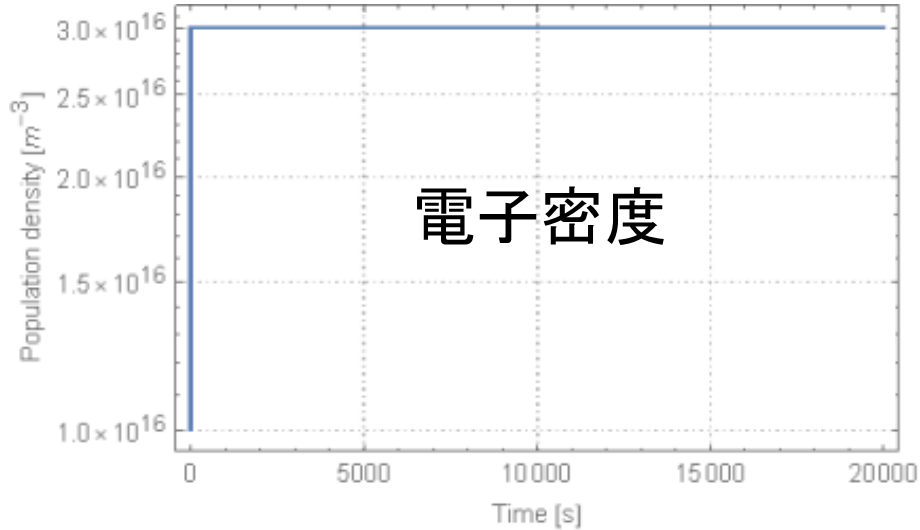
粒子反射率 = 1 での粒子バランス



- e
- H
- Hex
- Hex2
- Hion
- H2
- H2ion
- H3ion
- NHw
- NHvac
- NH2vac



- InFlux
- OutFlux
- OutWall
- Evacuation
- Supply

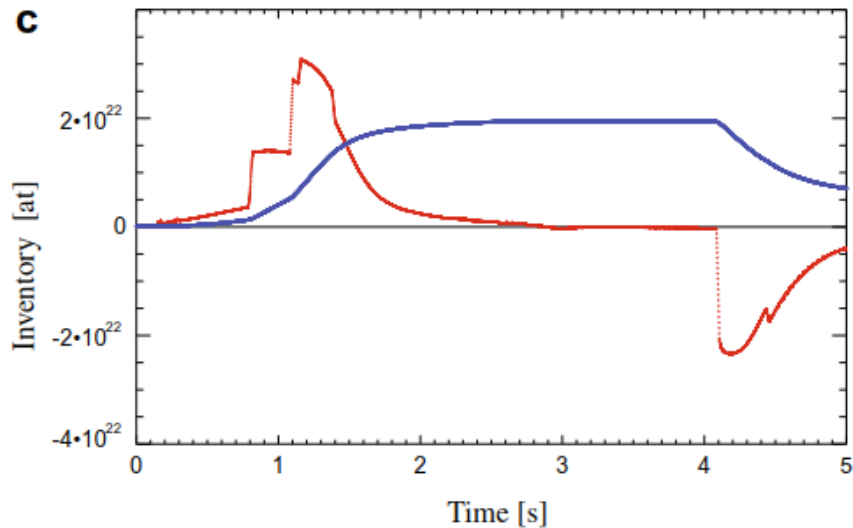
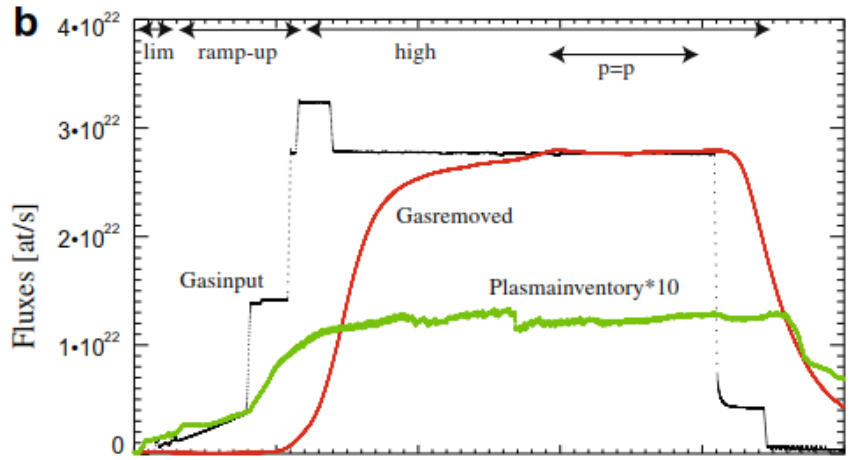


- e

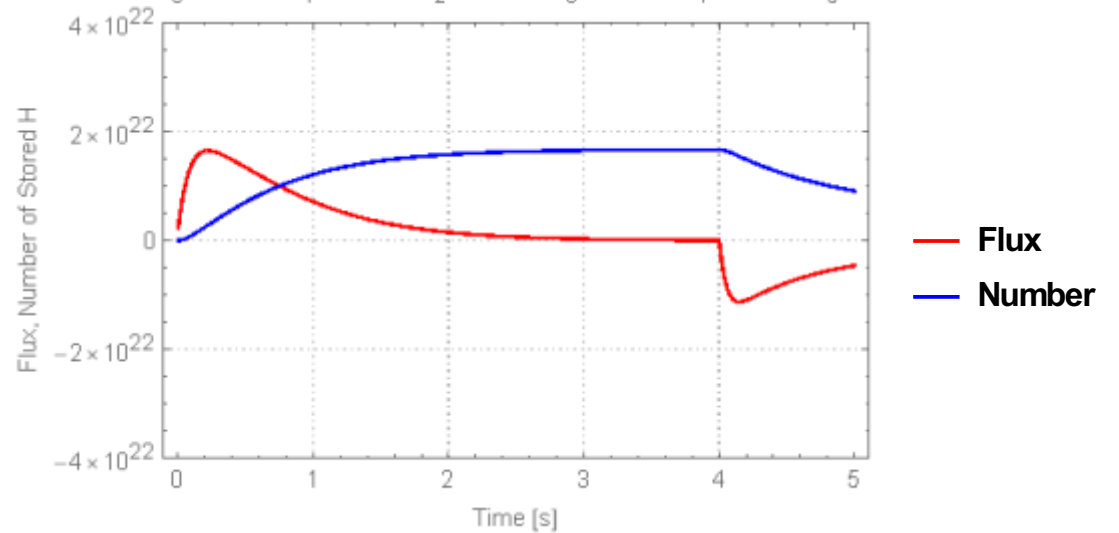
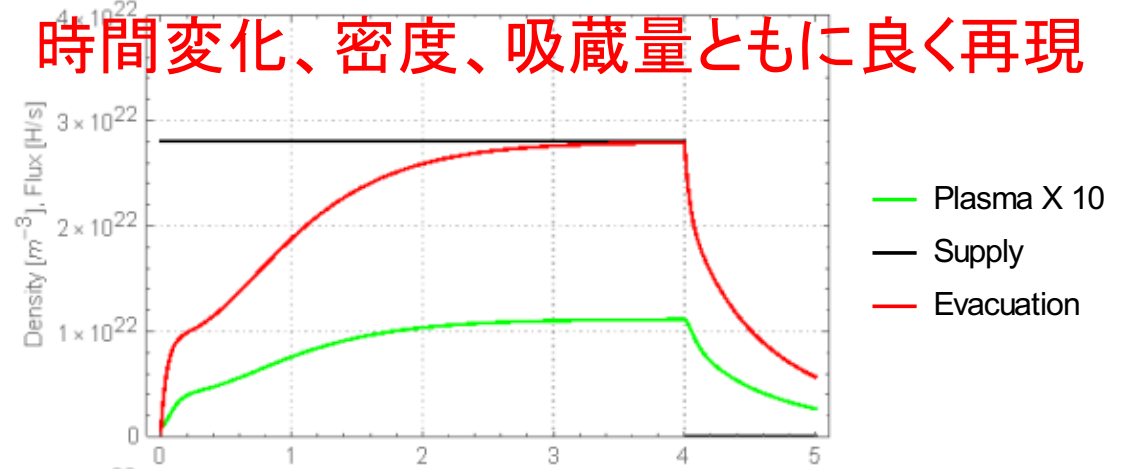
Gas H2 $2 \times 10^{18}/s$, $T_e = 10eV$, $\tau_p = 100ms$,
 $\tau_n = 200ms$, $S_{pump} = 4m^3/s$, $R_{re} = 1$

壁からの脱離は粒子補給に関係なし
 電子密度はすぐに定常になる
 電子密度 ($3 \times 10^{16} m^{-3}$) は壁モデルの有無で異なる
 原子か分子かの違いか？ (排気効率)
 粒子補給効率は0.75%

ASDEX-Uにおけるhigh gas flux dischargeのモデル計算



時間変化、密度、吸蔵量ともに良く再現



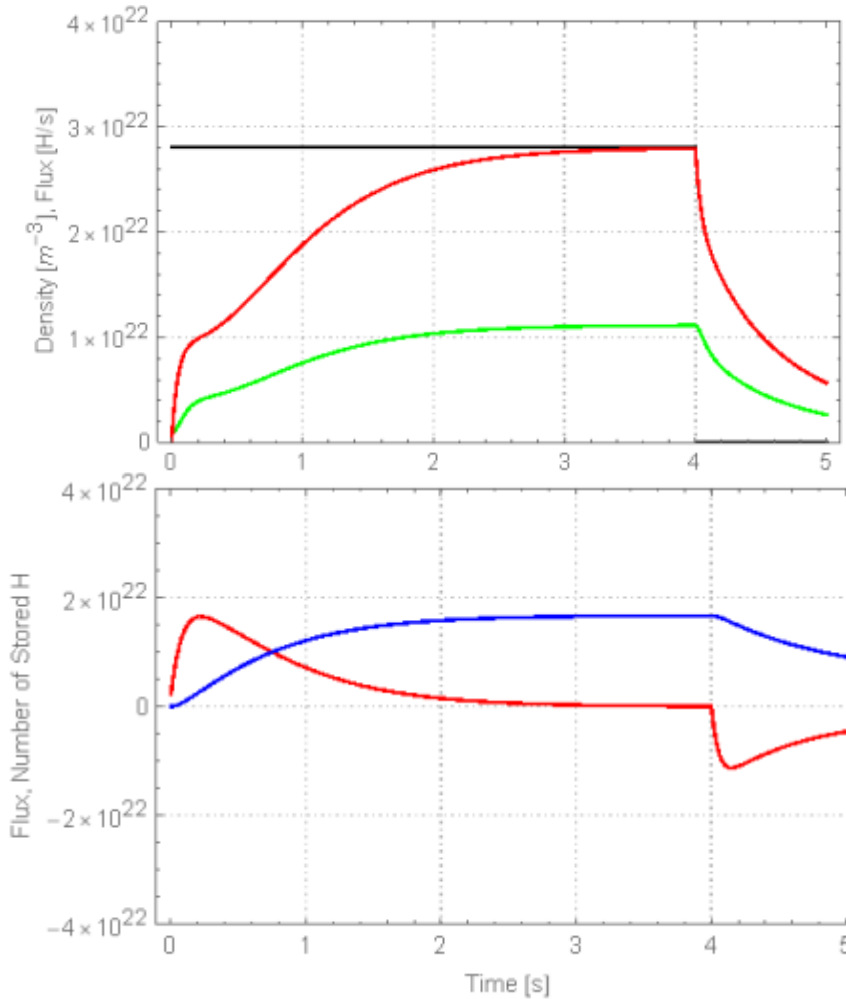
V. Rohde et al. / Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) 474-477



再結合係数がQUESTの70万倍
再結合以外の粒子放出の可能性？

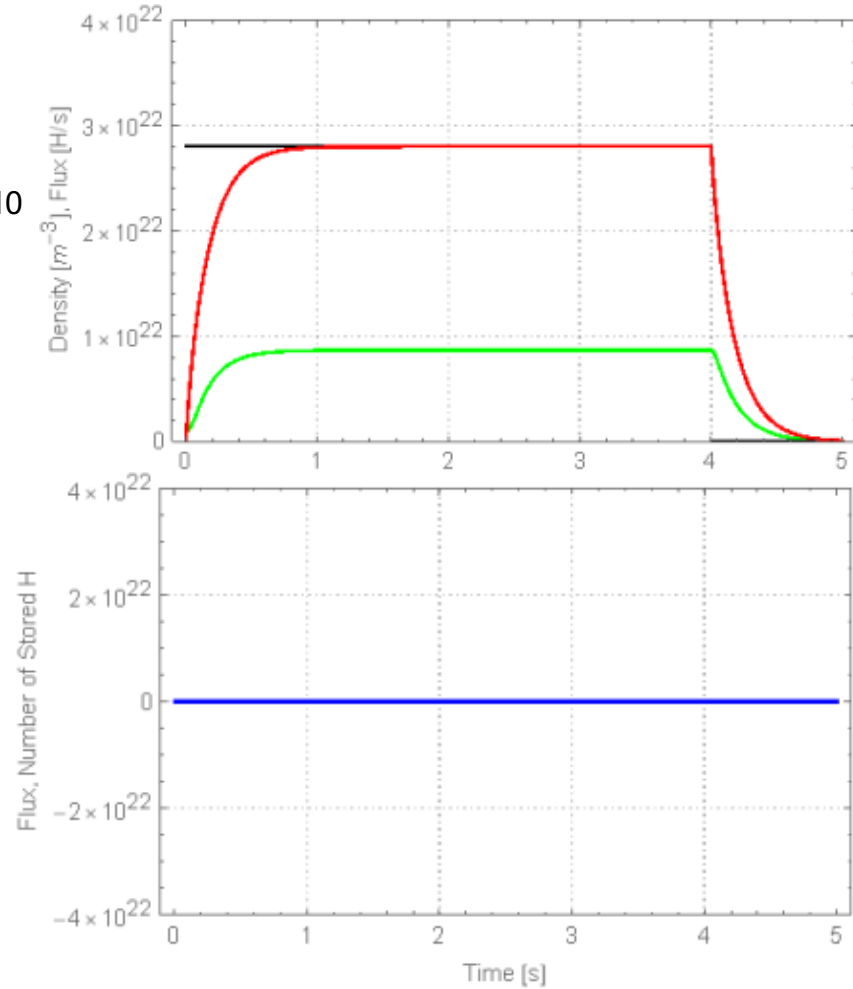
ASDEX-Uにおけるhigh gas flux dischargeのモデル計算

完全反射と比較すると密度が高い



— Plasma X 10
— Supply
— Evacuation

— Flux
— Number



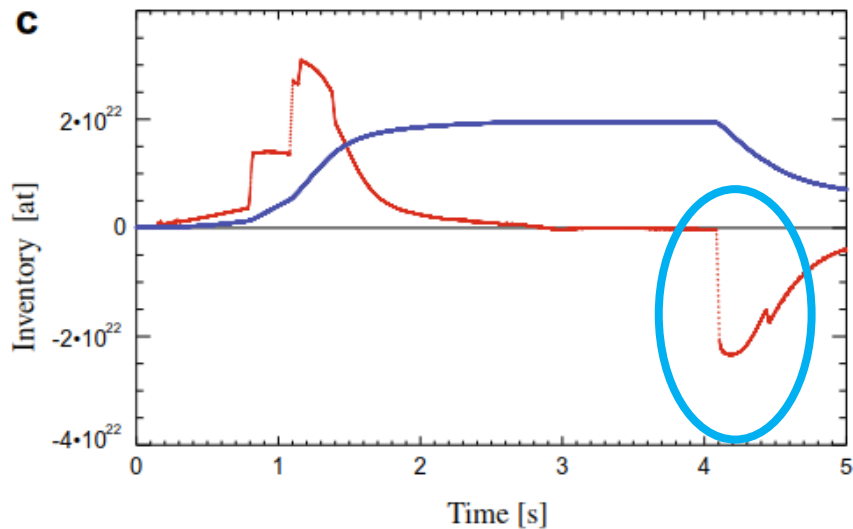
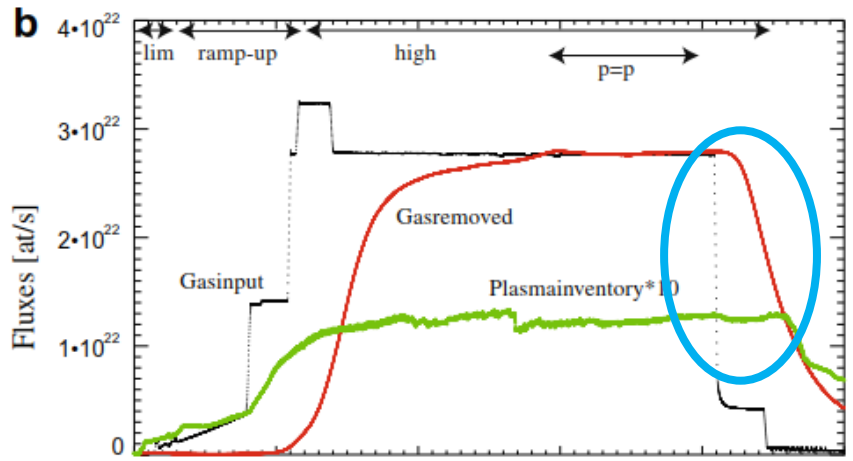
— Plasma X 10
— Supply
— Evacuation

— Flux
— Number

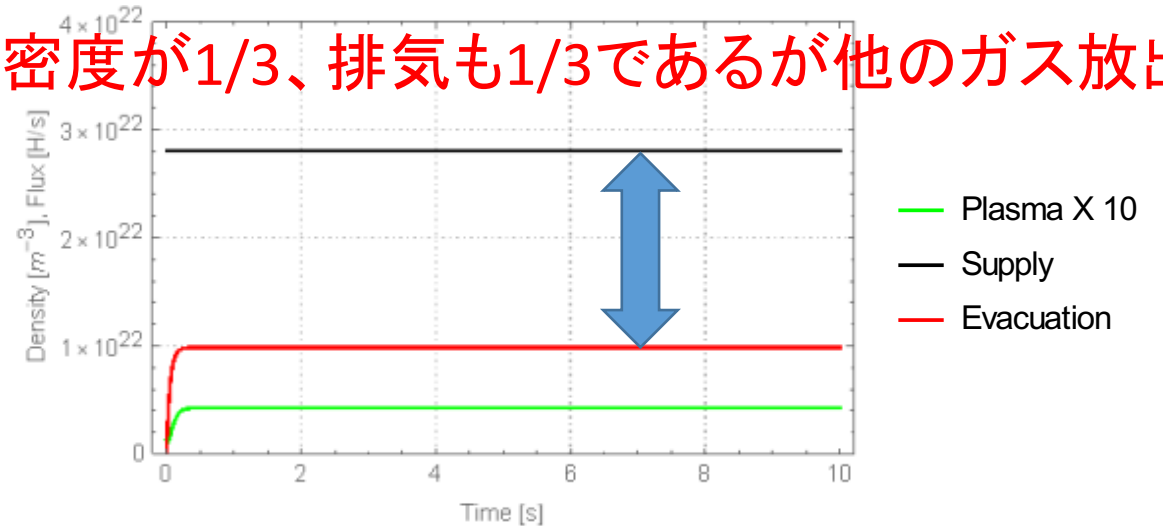
定常での電子密度が減少する
壁への吸蔵はまったくなし

V. Rohde et al. / Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) 474-477

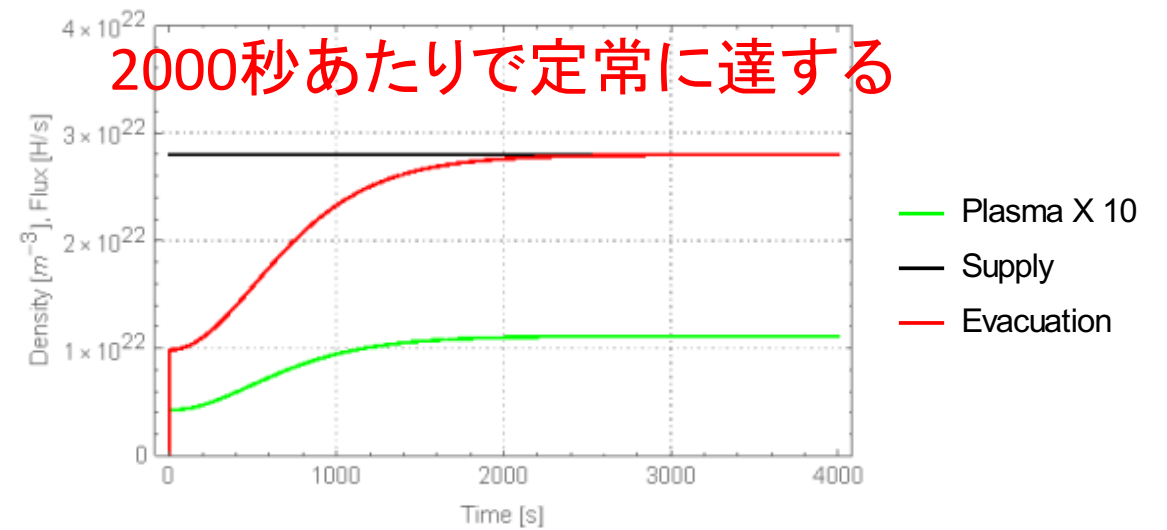
ASDEX-Uにおけるhigh gas flux dischargeのモデル計算 QUESTの再結合係数での計算との比較



密度が1/3、排気も1/3であるが他のガス放出？



2000秒あたりで定常に達する

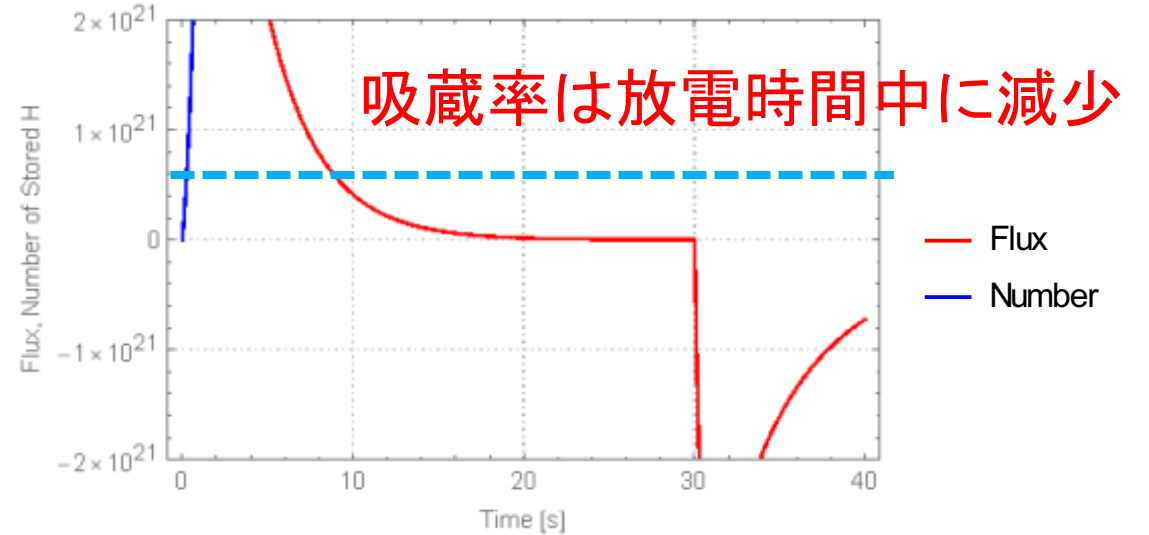
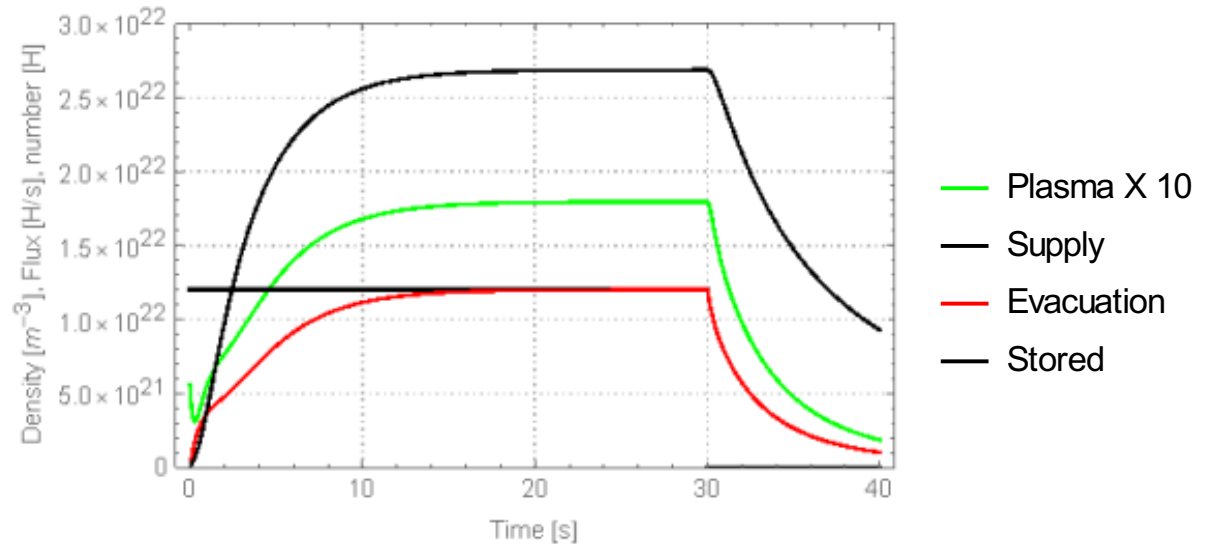
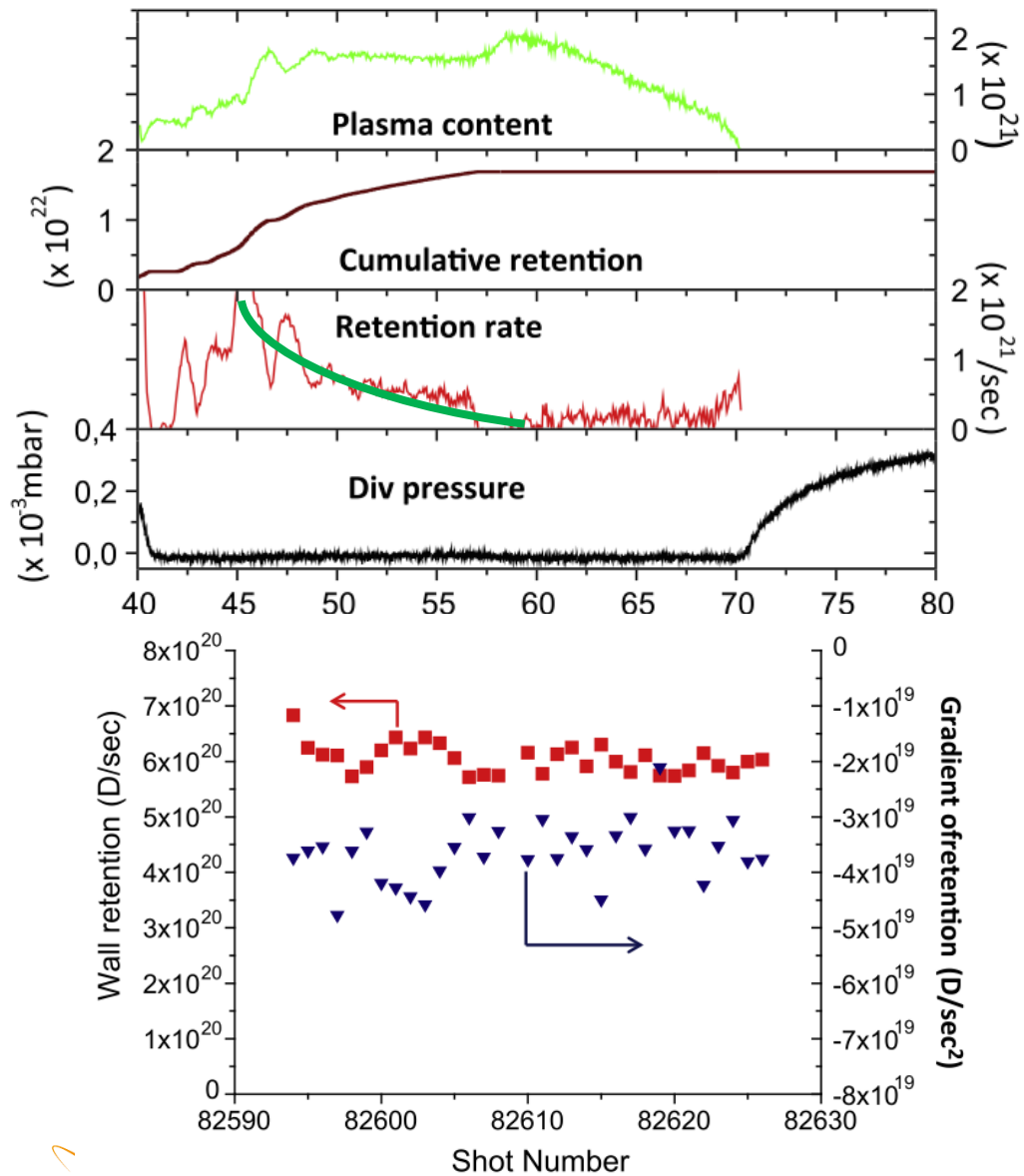


V. Rohde et al. / Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) 474-477

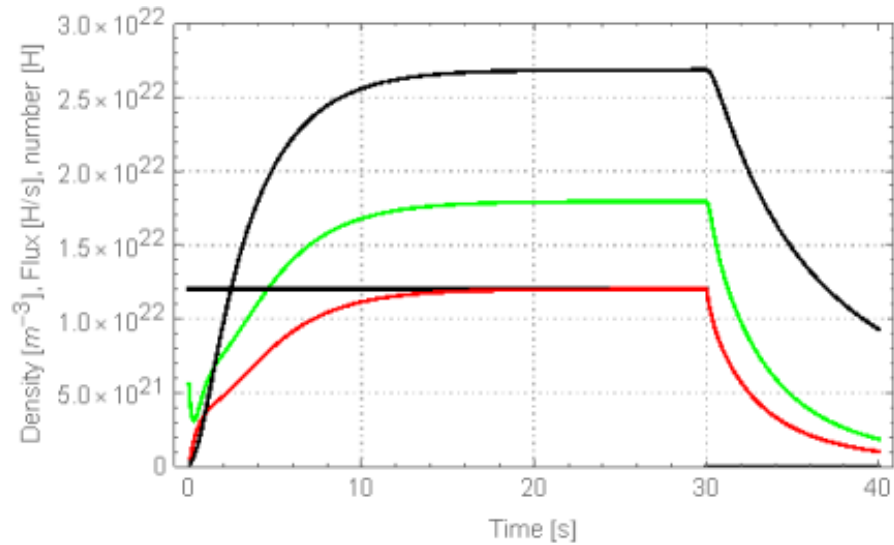


再結合係数をQUESTと同じ
再結合以外の粒子放出の可能性？

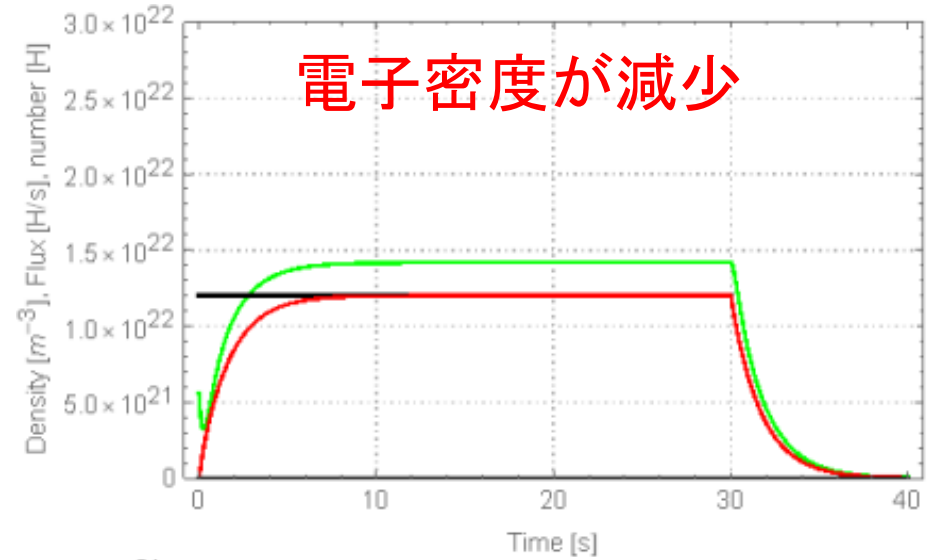
JET ILW (limiter) の実験結果のモデル計算



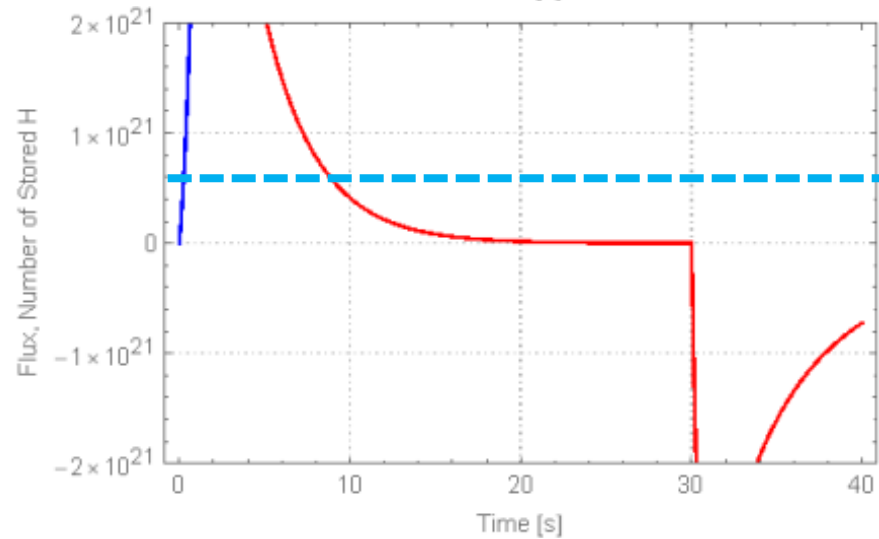
JET ILW (limiter) のモデル計算 (完全反射との比較)



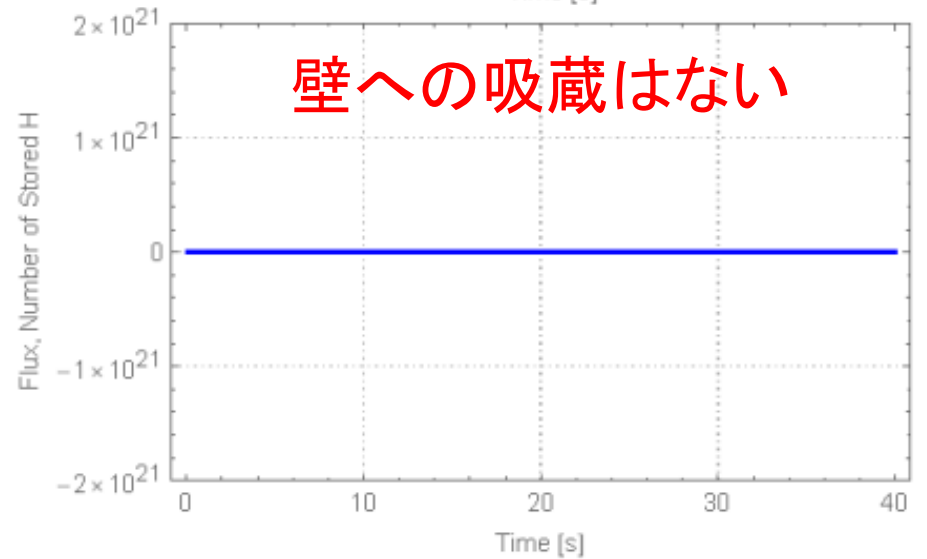
- Plasma X 10
- Supply
- Evacuation
- Stored



- Plasma X 10
- Supply
- Evacuation
- Stored



- Flux
- Number



- Flux
- Number

まとめ

- 原型炉での粒子バランスを考察することを目標に粒子バランスにおける壁の影響を考察する。
- 原型炉でもDT燃焼率が5%程度、イオン化効率20-50%であることを考えると、イオン化されない燃料粒子、壁に吸蔵される燃料粒子等の影響をモデル化して取り込むことが必要。
- 壁モデルとして、金属壁実機ベースで解析が進んでいる水素バリアモデルを採用して考察する。水素バリアモデルは、再堆積層と母材の水素溶解ポテンシャルの差により母材側には溶解しないと仮定したモデルである。捕獲サイト、プラズマ誘導脱離、共堆積は取り扱わない。
- QUESTの再堆積層のパラメータで壁モデルをつくり、水素原子、分子、イオンを含めた粒子バランスを解くことでQUESTの粒子バランスを再現することができた。
- ASDEX-UやJETでも同様に粒子バランスを再現できた。ただし、再結合係数がQUESTの100万倍程度大きく設定する必要がある。また再結合以外の粒子放出の可能性も示唆される。
- 反射率1の場合と壁モデルを使用した場合に、定常状態での電子密度に違いが生じた。これは壁から分子で戻るか原子で戻るかの違いから生じていると考えられる。