

2004年3月17日～19日

第7回若手科学者によるプラズマ研究会

ペブルダイバータ研究におけるこれまでの成果

奥井隆雄 岩本洋太郎 北原崇博 筒井信介 上田良夫 西川雅弘

大阪大学大学院

- ・研究背景
- ・ペブルダイバータ概念
- ・これまでの研究概観
- ・ペブル落下装置の開発
- ・ペブルへの粒子負荷・熱負荷特性の評価
- ・まとめ

研究背景

ダイバータへの熱負荷の問題

ダイバータに流入する熱流束が大きいため、デタッチプラズマ状態をとることで、ダイバータ板への熱負荷の印加を小さくする。

より耐熱限界の大きいシステムを用いることで、ダイバータ付近での中性ガス圧をさげることが可能となる。

プラズマの閉じ込め性能向上寄与

ダイバータ板の交換の問題

現在のダイバータ板はカセット構造方式になっている。

カセットの交換に時間と労力を要する(全カセットの交換に0.5年)

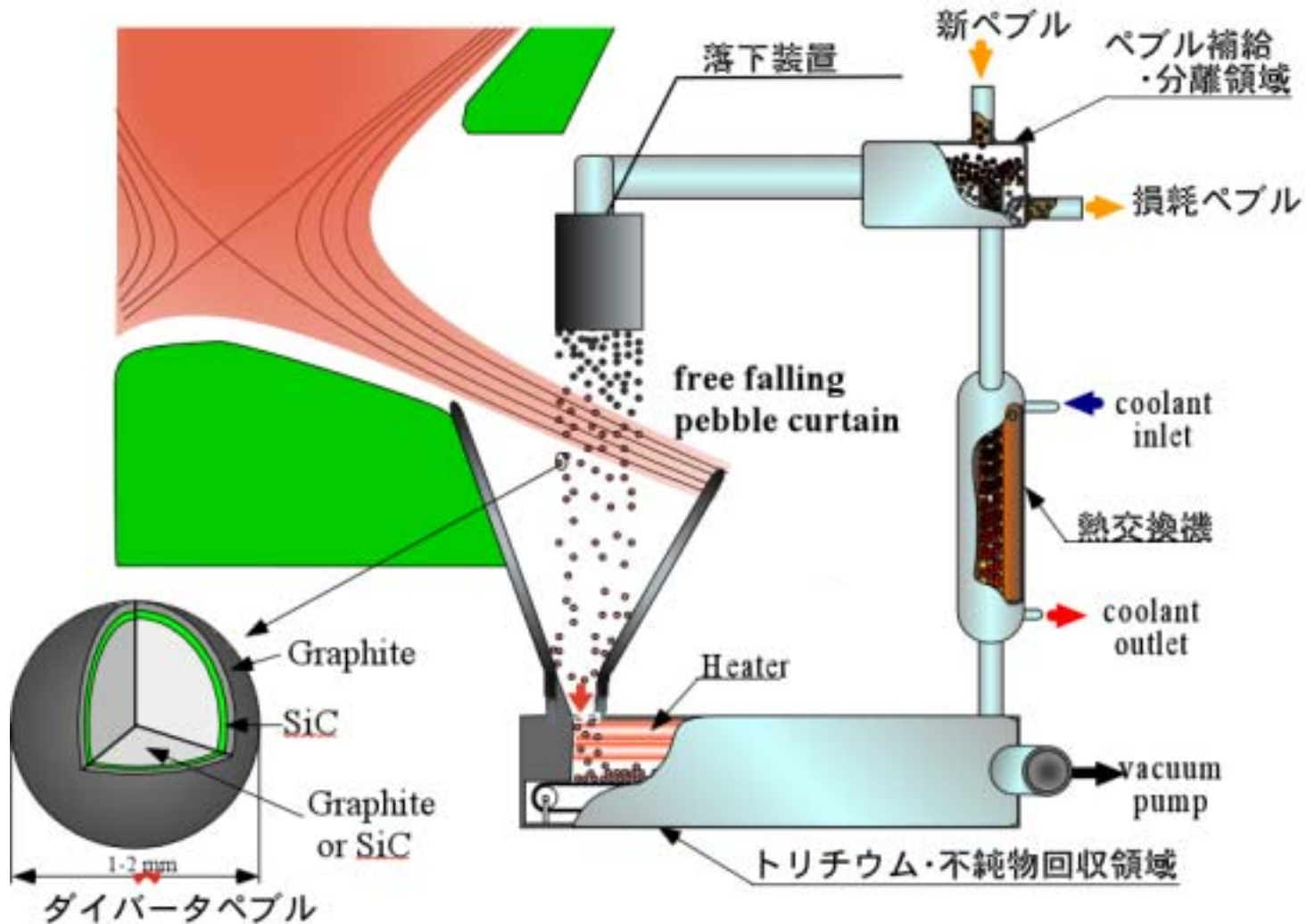
定常核融合炉における壁コンディショニングの問題

炉壁の脱ガスがコアプラズマの閉じ込め性能の改善に寄与している。

しかし、定常運転の核融合炉においては、壁の脱ガス効果が時間の経過とともに失われてしまう。

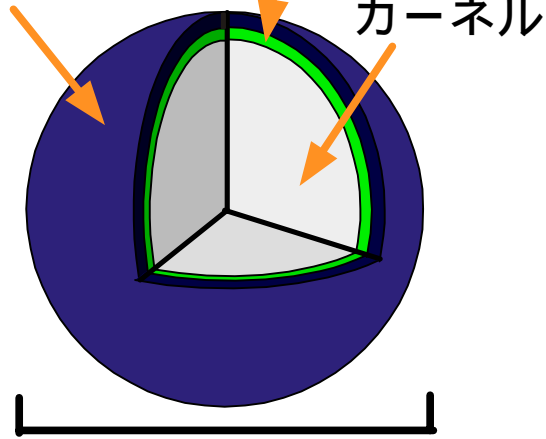
ペブルダイバータ概念

ペブルダイバータシステムについて



ペブルの構造

中間層(トリチウム不透過層)
プラズマ対向層



1 ~ 2mm

プラズマ対向層

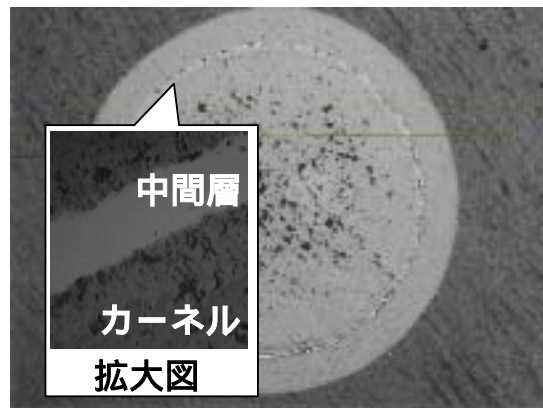
ガス吸蔵性の材料を用いることで、ガス排気ができる。
現在は、グラファイトの脱ガス特性を評価している。

トリチウム不透過層

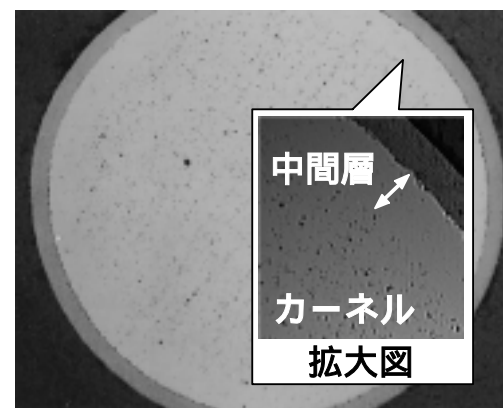
ペブル中心部へのトリチウムの拡散を防ぐことで、トリチウムの蓄積量を減らす。候補としてCVD-SiCのコーティングを考えている。

カーネル

ペブルの熱容量・強度など、ペブルの熱的・機械的特性に大きく作用する。SiCとグラファイトを候補に考えている。

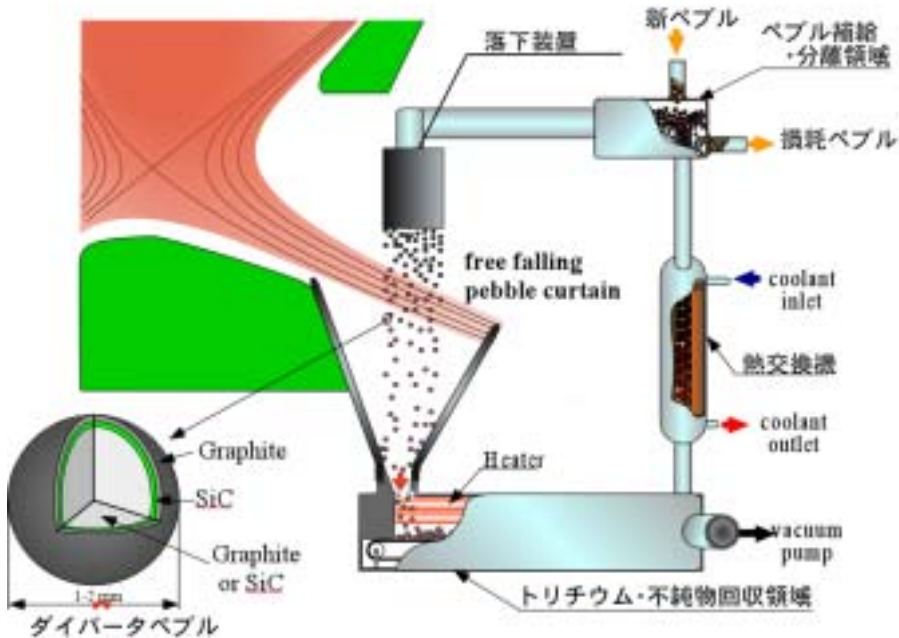


炭素カーネル多層被覆粒子



SiCカーネル多層被覆粒子

これまでの研究概観



ペブル落下装置の開発

- ・矩形容器にペブルを蓄えて、容器の底にスリットをあけたものをペブル落下装置として開発
- ・スリット幅とペブル落下流量の関係を計算するための計算モデルを作成し、妥当性を実験的に評価
- ・入射するフラックスの遮蔽に必要なペブル落下流量の評価

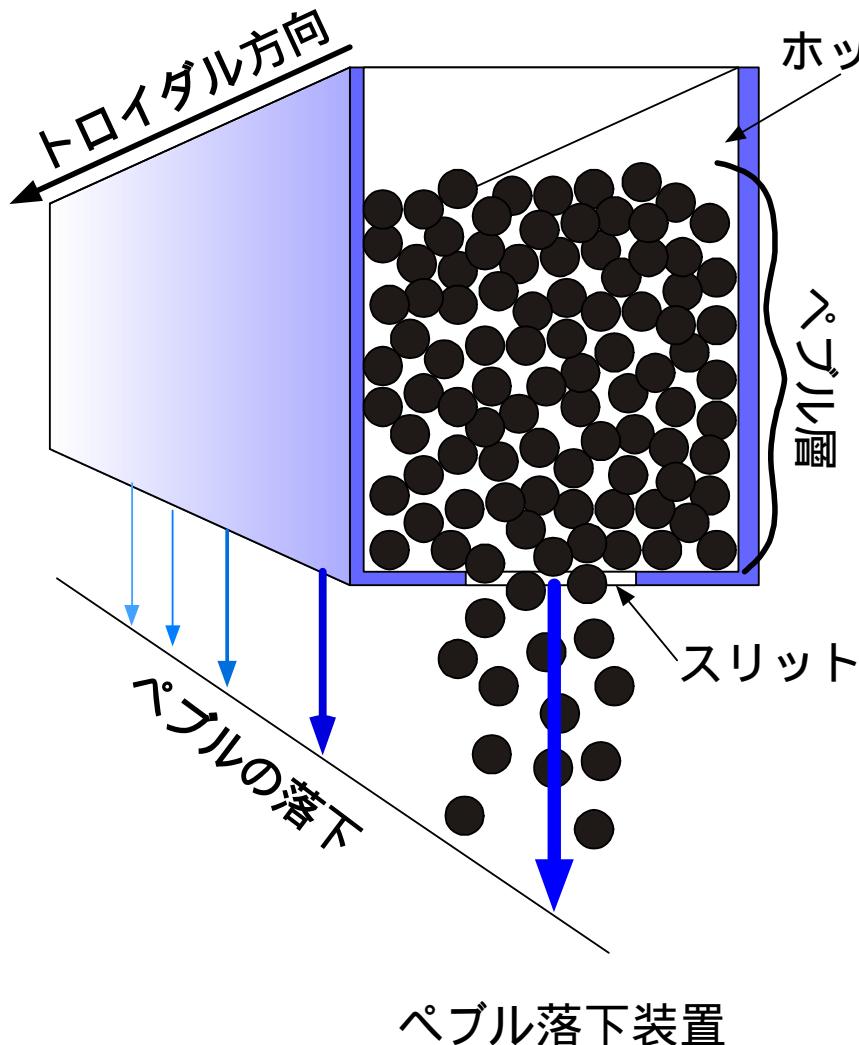
ペブルへの熱負荷・粒子負荷特性の評価

- ・ペブルがプラズマ中で帯電したときに発生する周囲の電場の影響を考慮に入れてプラズマ挙動を計算するモデルを作成
- ・ペブルへ印加される最大熱負荷を計算
- ・ペブルフローの遮蔽効果について考察

ペブルのガス吸蔵・排気特性に関して

黒鉛平板試料への水素もしくはヘリウムビーム照射に対するガス吸蔵・排気特性の評価

ペブル落下装置の概念



ペブル落下装置への要求

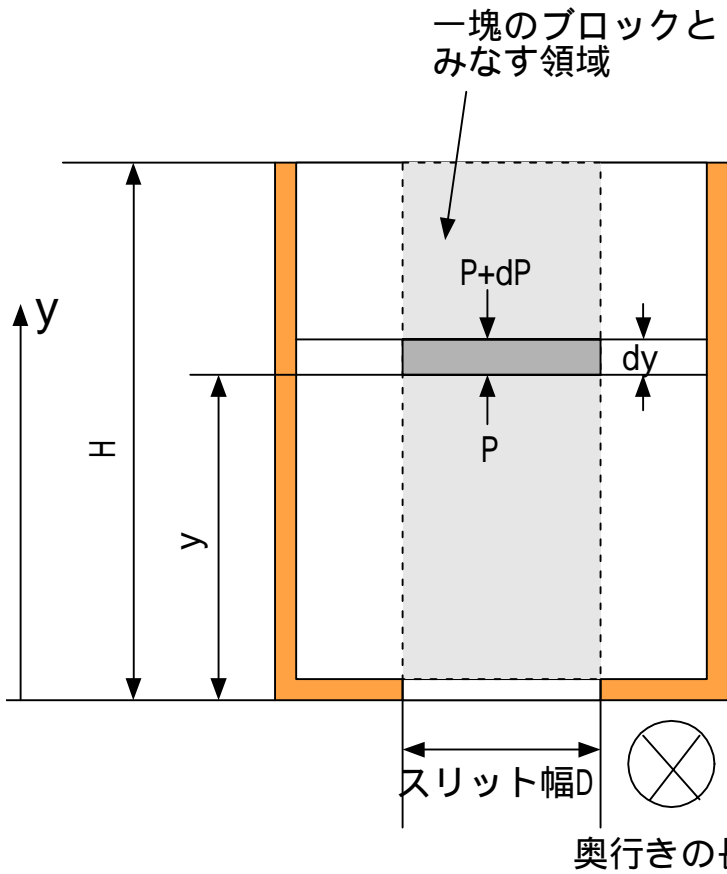
- ・一定の精度でのペブルの落下
- ・真空・高温でも安定して動作する信頼性の高さ
- ・コンパクトな構造

ペブル落下装置からの落下流量の評価

- ・スリットの幅と長さ
- ・ペブル層の高さ
- ・ペブルの特性
(かさ密度、摩擦係数)

多層被覆ペブルを用いたときのペブル落下装置の仕様を定める。

ペブル落下流量の評価モデル



ペブル落下装置断面図

ブロックに対する運動方程式

$$DLH\rho_b A_c = DLH\rho_b g - 2(D + L) \int_0^H (\mu_i kP + C_s) dy$$

慣性項
重力
摩擦力・粘性力

ペブル落下流量 (kg/sec)

$$F = DL\rho_b v$$

垂直圧力のy方向の分布

dy幅の板にかかる力のつりあいの式

$$DL(P + dP) + DL\rho_b g dy$$

上からの圧力 dyの板にかかる重力

$$= DLP + 2(D + L)(\mu_i kP + C_w) dy$$

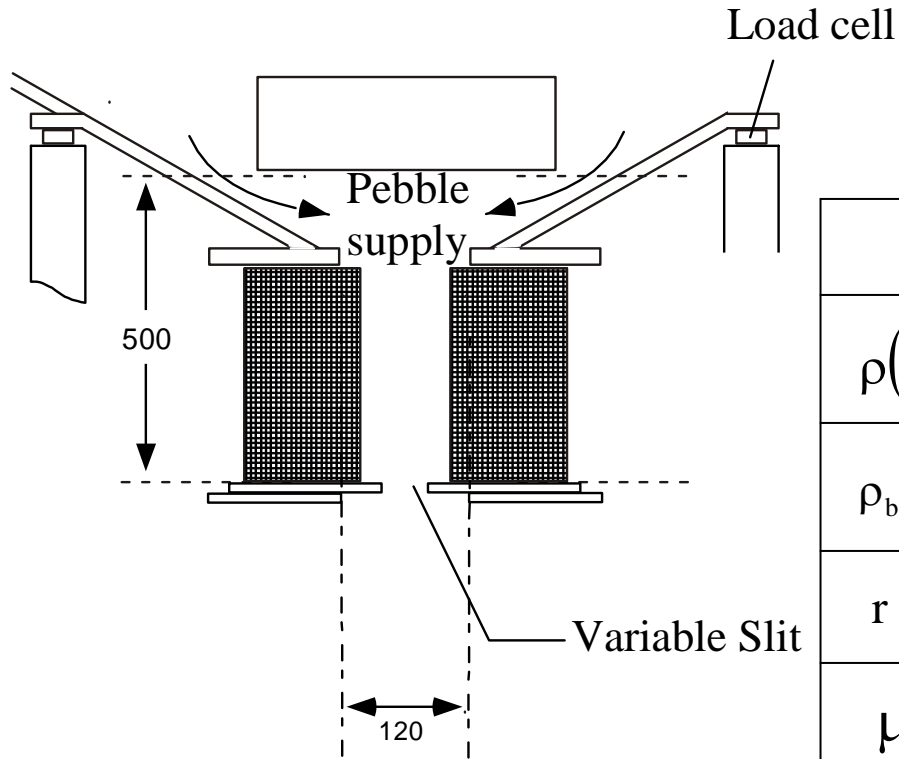
下からの圧力

摩擦力・付着力

かさ密度 ρ_b 、摩擦係数 μ_i をあらかじめ測定しておくことで、ペブルの落下流量を予測できる。

ペブル落下実験装置

The vertical cross section of the experimental device

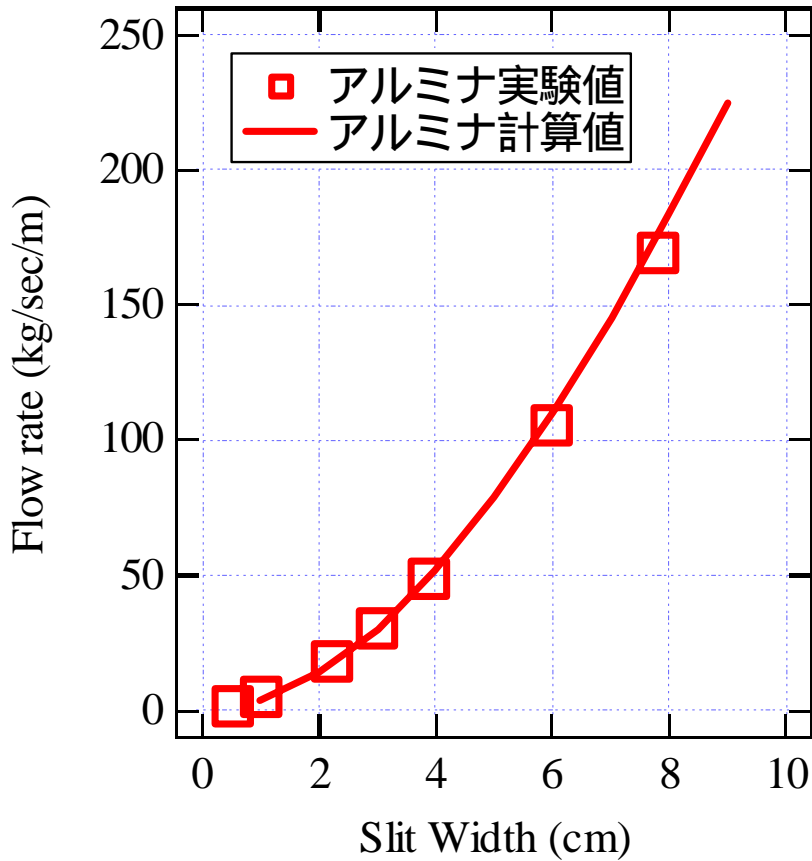


試料ペブルの物性値

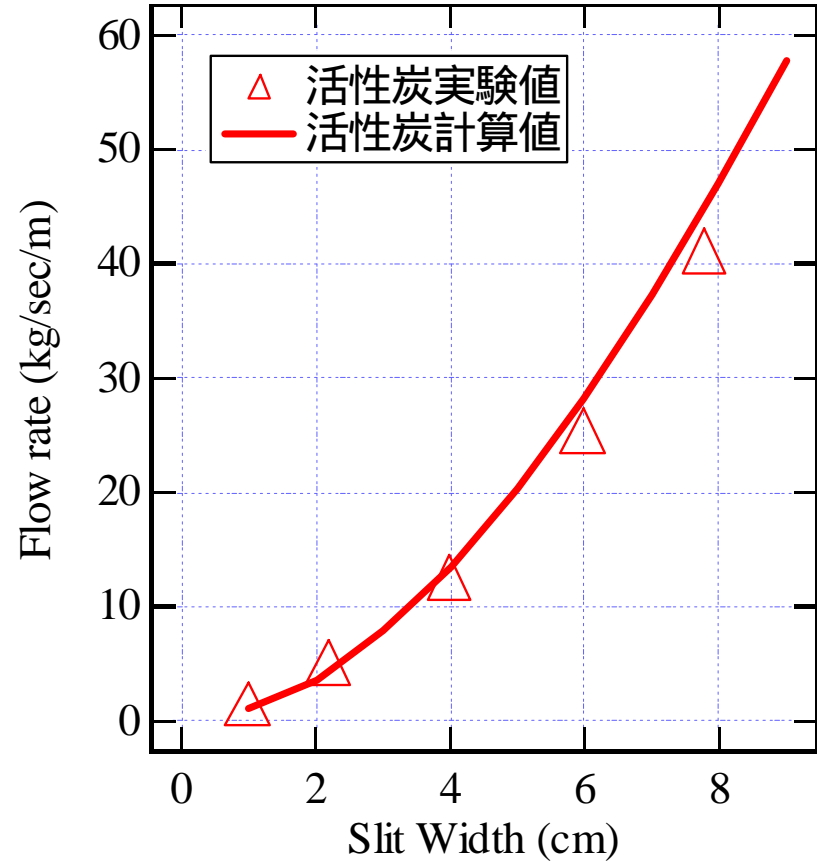
	アルミナ	活性炭
$\rho(\text{g/cm}^2)$	3.7	2.2
$\rho_b(\text{g/cm}^2)$	2.2	0.73
$r(\text{mm})$	1	1
μ_i	0.563	0.642

ペブルの質量流量

アルミナペブル



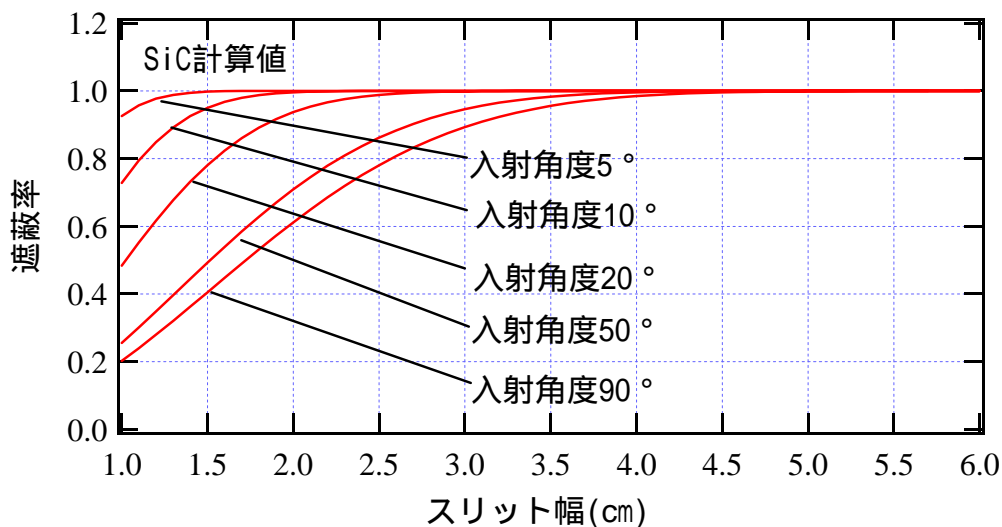
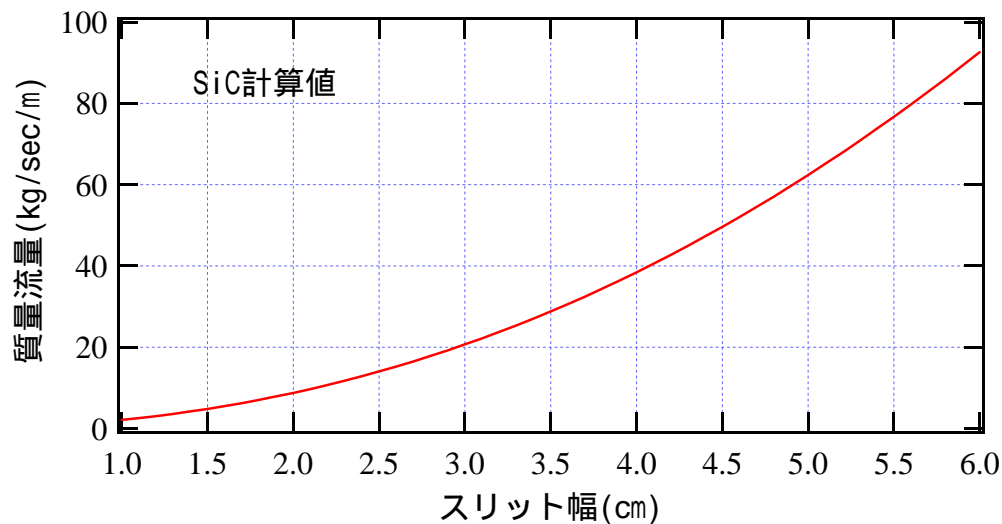
活性炭ペブル



多層被覆ペブルを用いた場合のペブル落下装置の性能評価

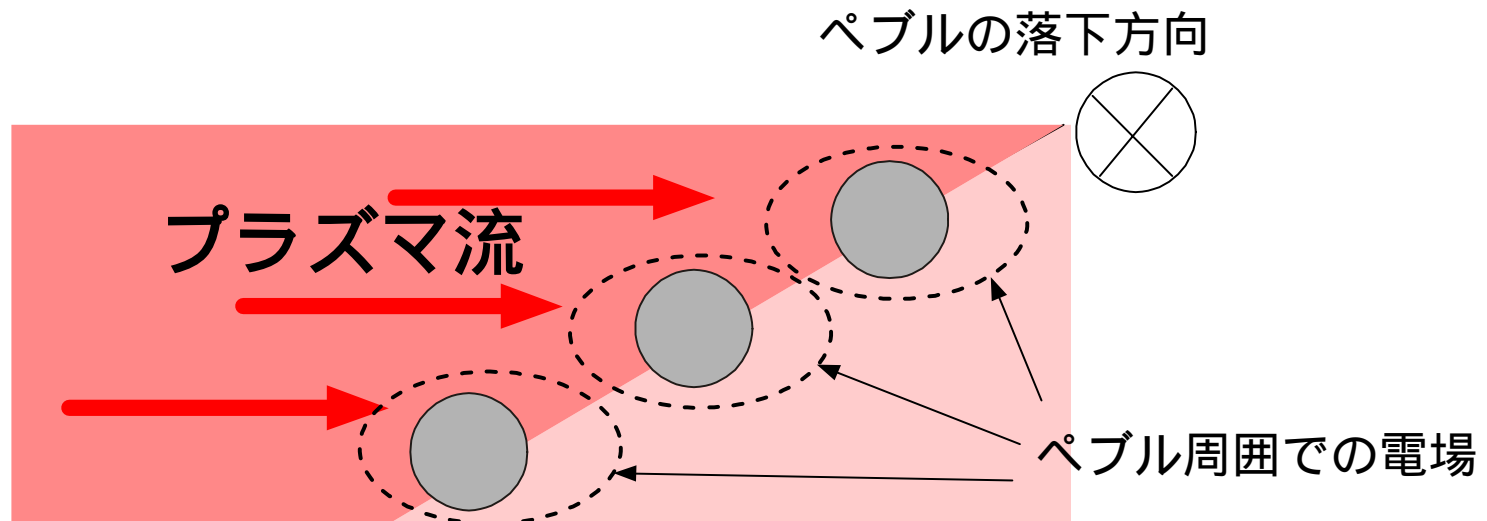
多層被覆ペブルの物性値

	SiCカーネル
$\rho(\text{g/cm}^2)$	3.2
$\rho_b(\text{g/cm}^2)$	1.82
r (mm)	1
μ_i	0.492



ペブルフローへの粒子負荷特性の評価

- ・ペブル表面の電場がペブルへの入射粒子束に与える影響の評価
- ・ペブルに入射する最大熱負荷の評価
- ・ペブルフロー中でのプラズマの減衰の傾向の評価



2Dのペブル周囲での電場の影響を考慮したプラズマ挙動の計算モデルを作成し、ペブルに入射するプラズマの大きさを評価した。

ペブル周囲でのプラズマ挙動の2Dモデル

連続の式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial n_i u}{\partial z} + \frac{\partial n_i v}{\partial y} = 0$$

運動方程式 (磁力線に沿った方向のみ)

$$m_i \left[\frac{\partial n_i u}{\partial t} + \frac{\partial n_i uu}{\partial z} + \frac{\partial n_i uv}{\partial z} \right] - \nabla_{\perp} \cdot (\eta \nabla_{\perp} \vec{u}) = -\nabla p_i + Z e n_i \vec{E}_{\parallel}$$

拡散方程式 (流れに垂直方向)

$$n_i v = -D \frac{\partial n_i}{\partial y}$$

z 方向: 磁力線方向 y 方向: 磁力線に垂直な方向

軸方向の電場

$$n_i = n_{\infty} \exp\left(\frac{\phi}{T_e}\right) \quad E = -\nabla \phi$$

軸方向の圧力

$$\frac{\partial p_i}{\partial z} = \gamma e T_i \frac{\partial n_i}{\partial z}$$

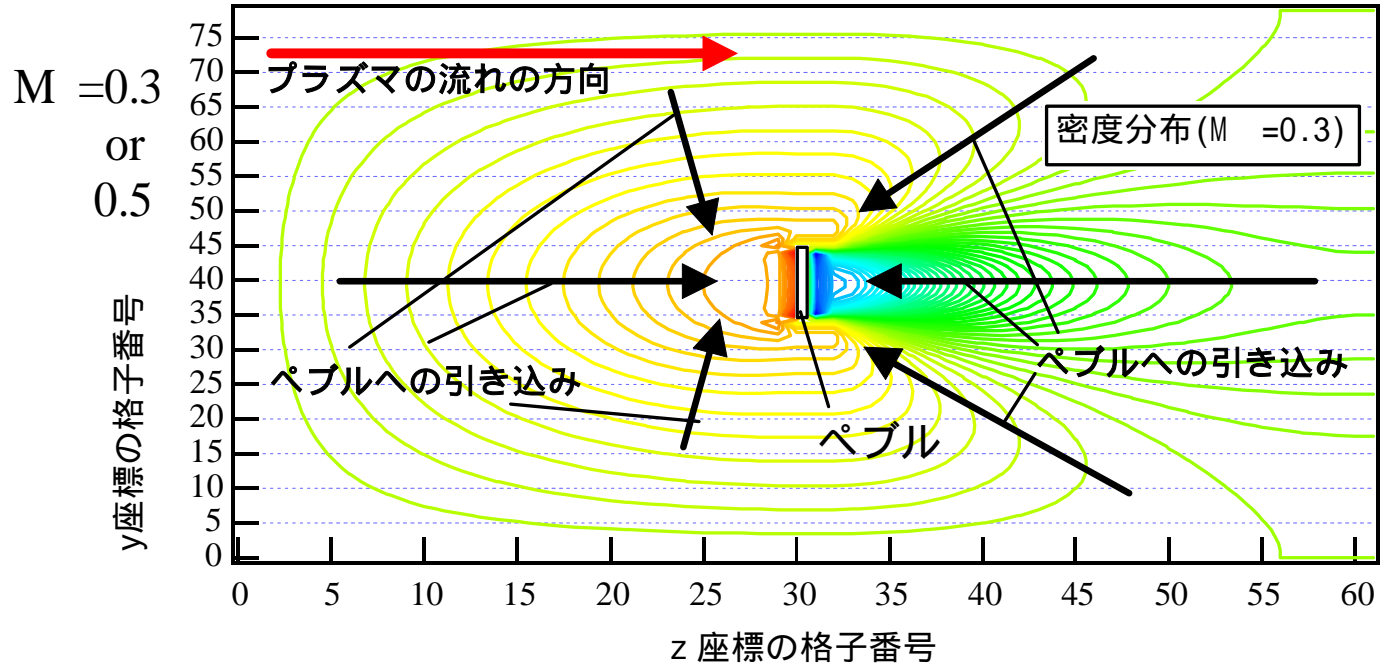
規格化 $y' = \frac{y}{a}$ $dz' = \frac{D}{c_s a^2} dz$ $n = \frac{n_i}{n_{\infty}}$ $M = \frac{u}{c_s}$ $t' = \frac{D}{a^2} t$

密度とフラックのみの式に変換する

$$\frac{\partial U}{\partial t'} + \frac{\partial F}{\partial z'} + \frac{\partial G}{\partial y'} = 0 \quad U = \begin{pmatrix} n \\ \mu \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \mu \\ \frac{\mu^2}{n} + n \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} \frac{\partial n}{\partial y'} \\ -\frac{\mu}{n} \frac{\partial n}{\partial y'} - \alpha \frac{\partial}{\partial y'} \left(\frac{\mu}{n} \right) \end{pmatrix}$$

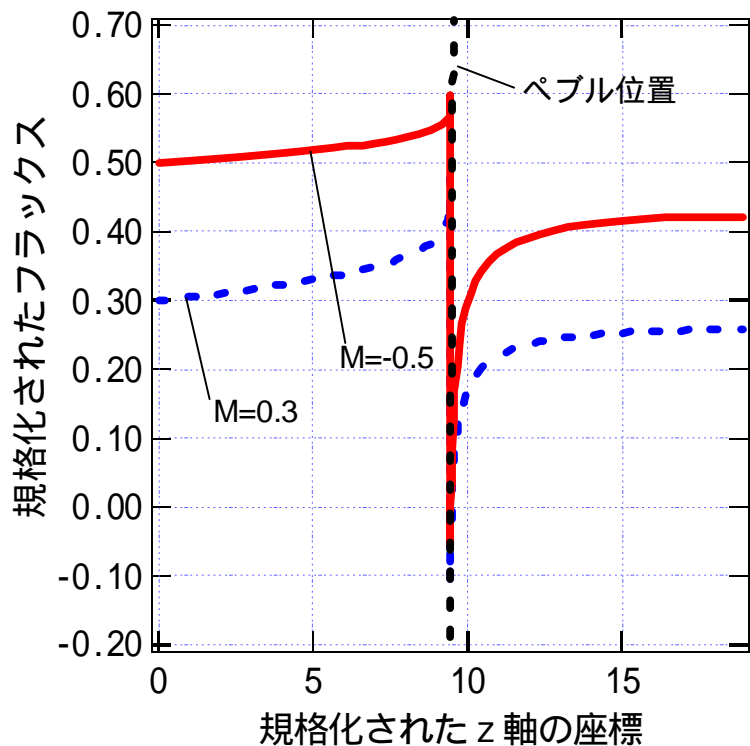
2段階Lax Wendroff法を用いて問いた

ペブルへの最大熱負荷



ペブルへの入射フラックスの最大値

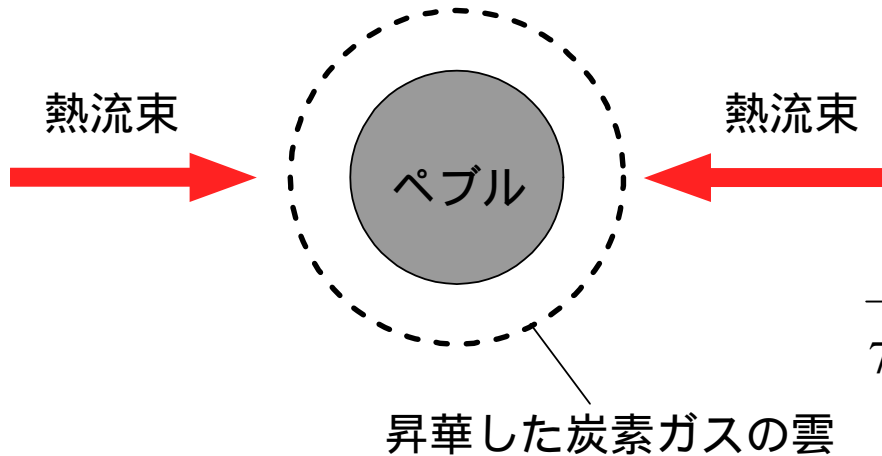
参考: ITERのダイバータ付近



M = 0.3のときについて計算する

	デタッチ	アタッチ
プラズマ密度 n (/m ³)	1×10^{21}	4×10^{19}
電子温度 T_e (eV)	3	200
イオン温度 T_i (eV)	3	200
マッハ速度 c (m/sec)	2.6×10^4	2.2×10^5
上流側規格化フラックス	0.5	0.5
下流側規格化フラックス	0.15	0.15
両サイドから入射してくる フラックスの平均 μ_{ave}	0.32	0.32
粒子束 (/m ² sec)	8.4×10^{24}	2.8×10^{24}
熱流束 (MW/m ²)	45	660

ペブルの昇華



ペブル半径: 0.5mm

入射エネルギー: 700MW/m

上流側・下流側から熱負荷を受ける

グラファイトの昇華エネルギー:
719kJ/mol (7.5eV)

照射時間(幅10cmのストライクゾーン
の上1mから自由落下): 22msec

照射でのペブルへの全入熱量

24J

昇華するペブル表面の厚さ

$$\frac{24\text{J}}{719 \times 10^3 \text{J} \times \frac{\text{ペブル質量}}{\text{炭素の質量数}}} = \frac{4\pi r^2 \Delta r}{\text{ペブルの体積}}$$

$$\Rightarrow \Delta r = 0.08\text{mm}$$

昇華で発生した炭素ガスとの
衝突電離の効果

ガス層厚さ: $1 \times 10^{-2}(\text{m})$

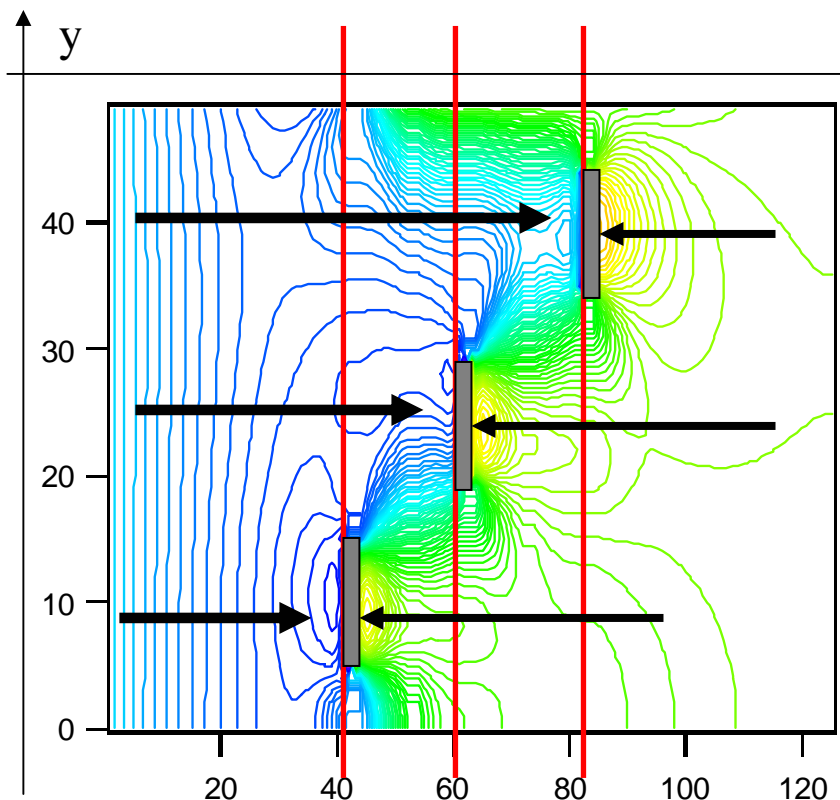
ガス層密度: $2.6 \times 10^{22}(\text{m}^{-3})$

電子衝突電離: 54J

イオン衝突電離: 0.5J

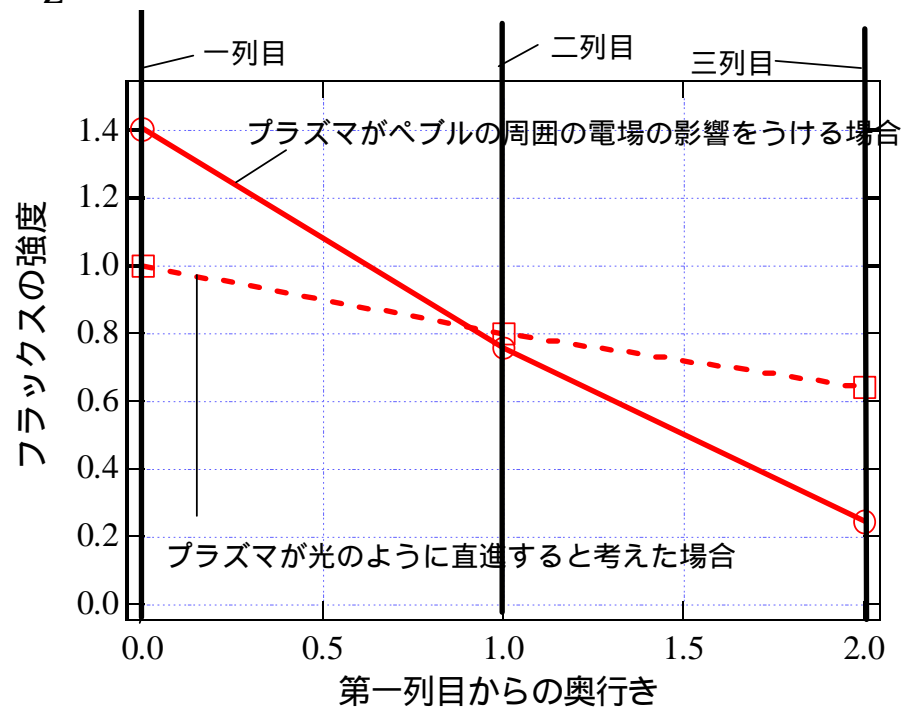
最大熱負荷の入射するペブルは表面の昇華とガス層との衝突により、熱負荷が軽減される。

ペブル周囲の電場を考慮したときのペブルフローによるプラズマ遮蔽効果



1列目 2列目 3列目

計算領域でのフラックス分布



各ペブル列を横切るフラックスの平均値

ペブルフローに対する透過率光の
ように直進すると考えた場合

$$I = I_0 \exp(-a_\lambda x) \quad a_\lambda = \pi r^2 n e_\lambda$$

ペブル落下装置の開発

まとめ

核融合炉という過酷な環境下での信頼性を確保するために矩形の容器の底にペブルを排出するためのスリットを設けた稼動部分のない構造のものをペブル落下装置として採用した。

ペブル落下装置のスリットの幅とペブル落下流量の関係を評価するためのモデルを提案し、そのモデルの妥当性を評価するためにペブル落下実験をおこない、計算結果と実験結果がほぼ一致するという結果が得られたことから、このモデルが妥当なものであると判断した。

試作した多層被覆ペブルを計算モデルに当てはめて、ペブル落下装置の仕様を試算したところ、十分なプラズマの遮蔽を得るためには、ペブルの質量流量として、 5kg/sec/m 必要であり、このとき、スリットの幅が 1.5cm となることがわかった。

ペブルへの粒子負荷特性の評価

まとめ

ペブルによる電場の影響を考慮した二次元のプラズマ挙動計算モデルを作成した

ペブルがプラズマ流れ中に一つだけ曝される最大熱負荷が入射してくる時に、ペブルに入射するフラックスの大きさは、ペブルによる電場の影響を考えない場合に比べて大きくなる。たとえば $M=0.3$ でプラズマフラックスがダイバータに流れ込んでくるとき、ペブルには、ペブルの電場の影響によって、ほぼ倍の大きさのフラックスが流れ込んでくる。

仮にITERのダイバータ板付近でのプラズマパラメータを最大熱負荷の計算結果に適用してみたところ、デタッチ状態をとらないときに 400MW/m の熱負荷が入ってきた。このとき、ペブルは昇華と昇華した炭素がペブルの周囲にガス雲が作られることによって、熱負荷の軽減がなされる。

ペブルフローによるプラズマの遮蔽効果を考えた場合、プラズマがペブルの電場のよって吸い寄せられるため、ペブルの実効断面積は大きくなり、より薄いペブルフローでも、ペブルの遮蔽が可能となる。