

ペブルダイバータ概念設計のための ペブル落下実験

大阪大学大学院工学研究科

奥井隆雄 北原崇博 松田浩昌 松廣健二郎 磯部倫郎 西川雅弘

1. はじめに
2. ペブルダイバータの概略
3. ペブルダイバータの排気特性
4. ペブル落下装置の開発



移動表面式プラズマ対向機器概念の導入

プラズマ壁相互作用の問題点

- プラズマからの粒子による損耗

ダイバータ板からの損耗は得に激しく、場合によっては一日にミリ単位で損耗される可能性がある。

- プラズマ対向壁のリサイクリング

壁コンディショニングによる壁排気の効果
がプラズマ対向壁の表面近傍での捕獲粒子
の飽和によりなくなる。

- プラズマ対向壁の冷却

ダイバータ板に流入してくる熱負荷はたと
えばITERの工学設計ではピーク時定常熱負
荷で10 MW/m、プラズマ過渡現象時で20
MW/m と極めて大きなものとなる。

移動表面式プラズマ 対向機器概念の導入

- 損耗にともなうプラズマ対
向壁の保守を炉を運転しな
がらおこなうことができる。

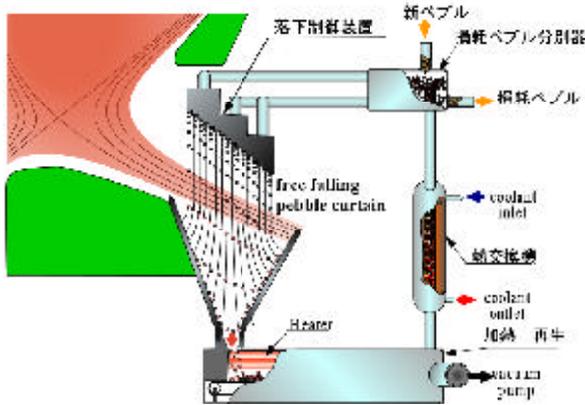
- 炉外で壁部分の処理をほど
こすことによって定常的な
壁排気をおこなうことがで
きる。

- プラズマ対向壁の移動によ
り表面の熱負荷を緩和する
ことができる。

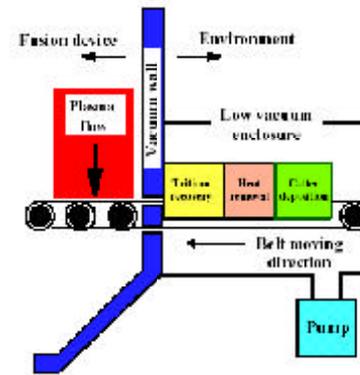


さまざまな移動表面式プラズマ対向機器概念

固体

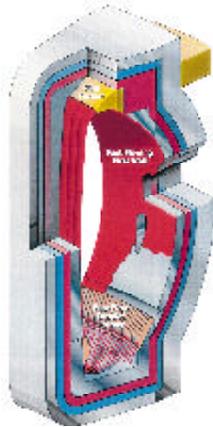


ペブル型

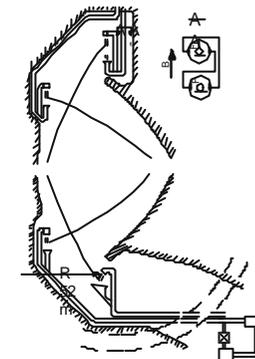
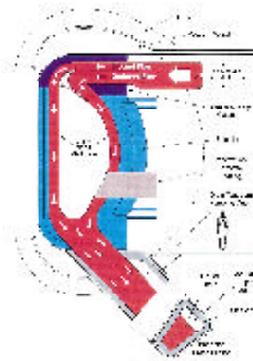


ベルト型

液体



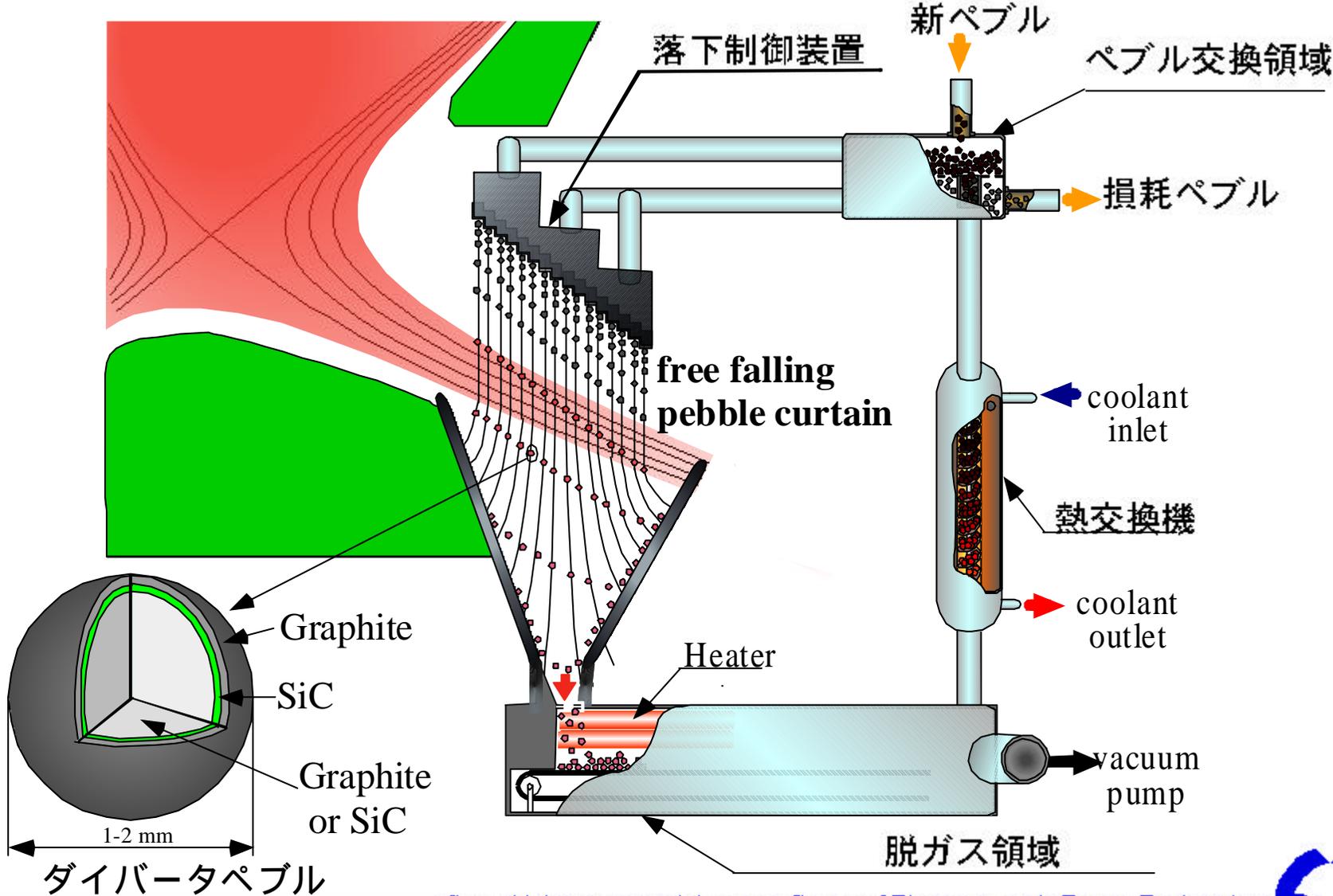
膜流型



液滴型



ペブルダイバータの概念



照射領域：プラズマとの相互作用により黒鉛層に燃料ガス粒子、および、ヘリウムを含む不純物が注入される。

ペブル収集領域：ペブルを収集し、脱ガス領域に搬送する。

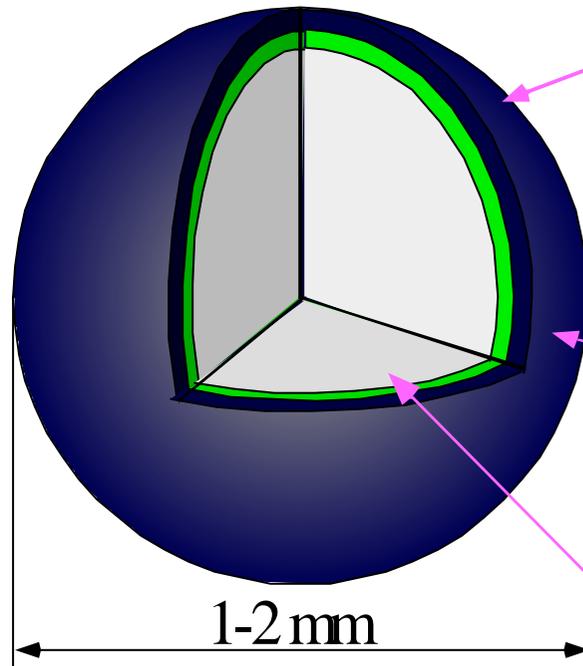
脱ガス領域：ペブルを加熱し、熱放出によって、燃料ガス粒子、およびヘリウムを含む他の不純物の回収をおこなう。

ペブル冷却領域：ペブルを冷却する。

ペブル交換領域：ペブルを分離、補給し、その後再循環させる。



ダイバータペブル



プラズマ対向層

プラズマ中に混入しても影響の少なく、損耗しにくい材料を用いる。また、ガス吸蔵性の材料を用いることにより燃料ガス排気を行うことができる。 グラファイト

トリチウム不透過層

この層にトリチウム不透過層を用いることによってカーネルへのトリチウムの透過を防ぐ。 SiC

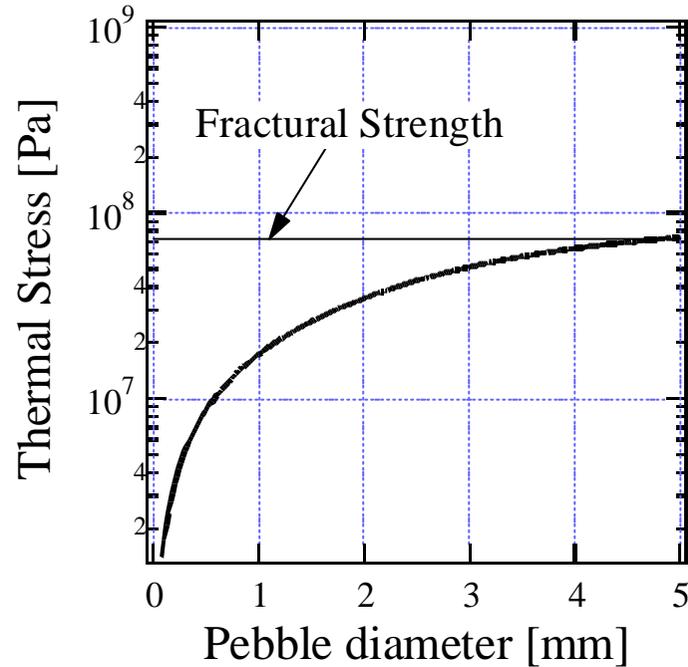
カーネル

機械的強度が強く、熱的特性に優れた材料を用いる。 SiC グラファイト

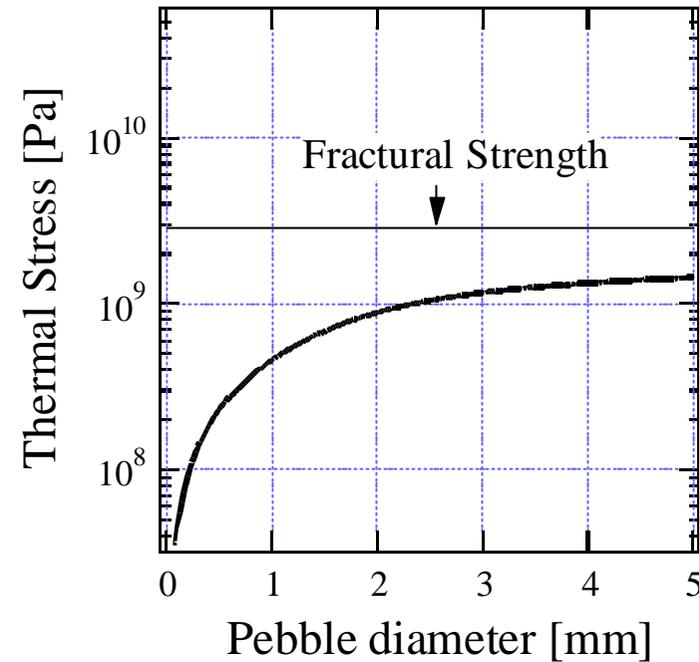


ペブルの発生熱応力

黒鉛カーネル



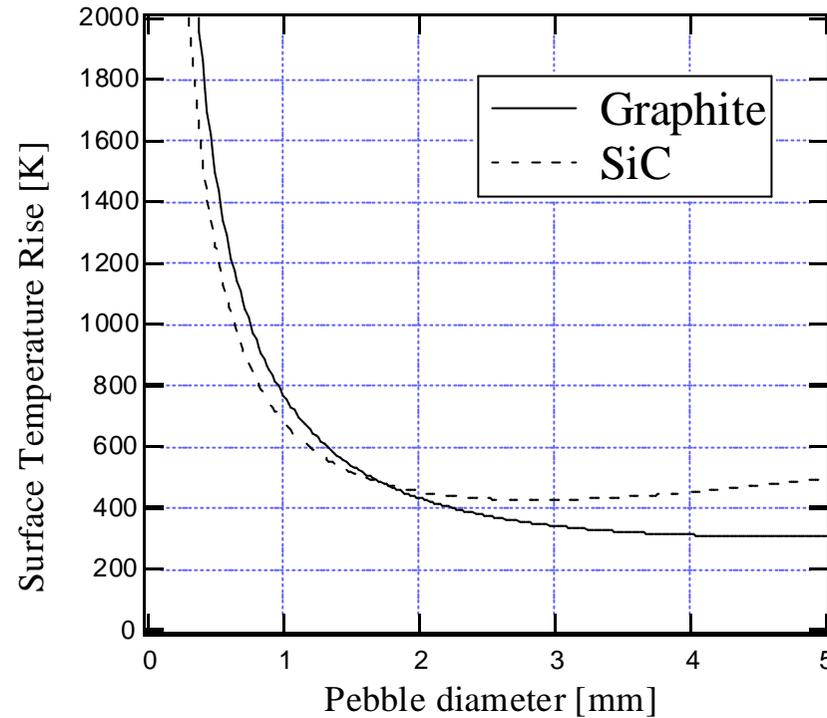
SiCカーネル



Dropping height above strike zone : 1 m
 The width of strike zone : 0.1 m → 26 msec
 Heat load to the pebbles : 30 MW/m²



ペブルの表面温度上昇



Dropping height above strike zone : 1 m → 26 msec

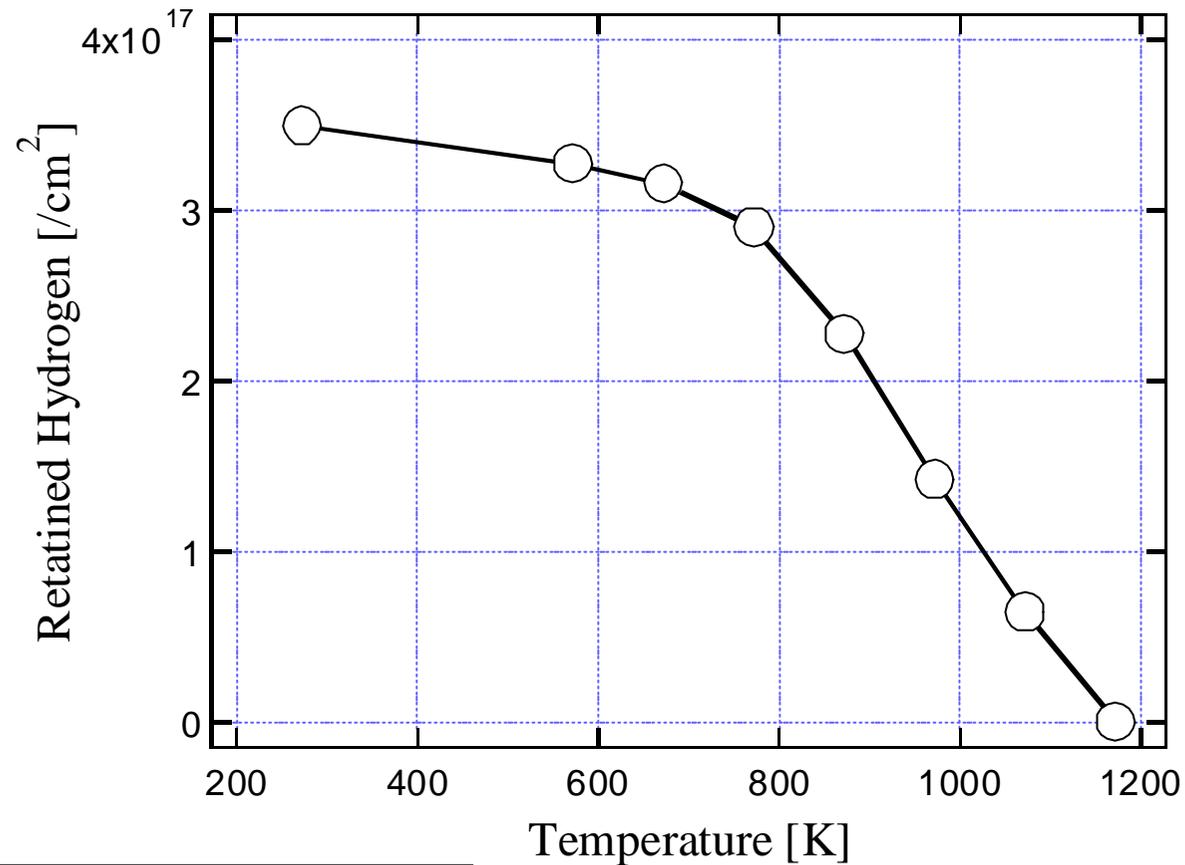
The width of strike zone : 0.1 m

Heat load to the pebbles : 30 MW/m²

Inlet temperature : 500 K



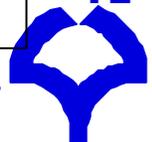
黒鉛材料中の水素吸蔵量の温度依存性



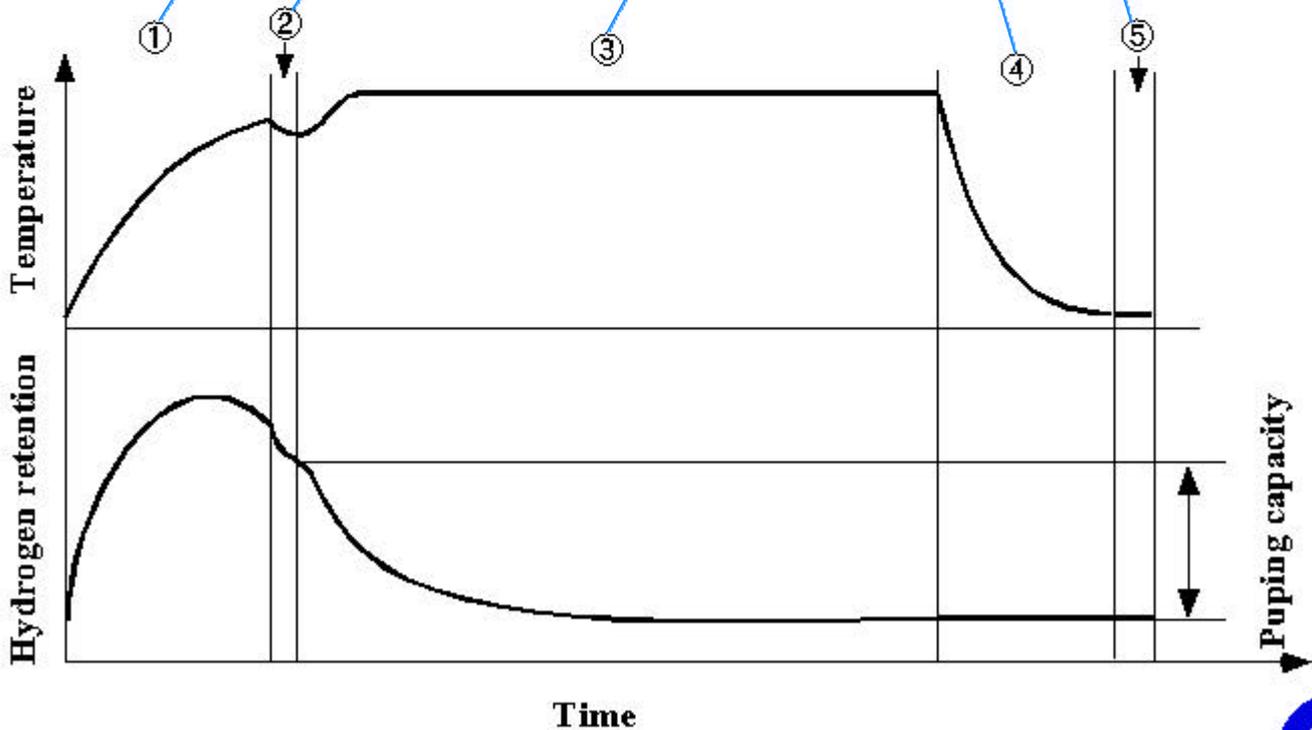
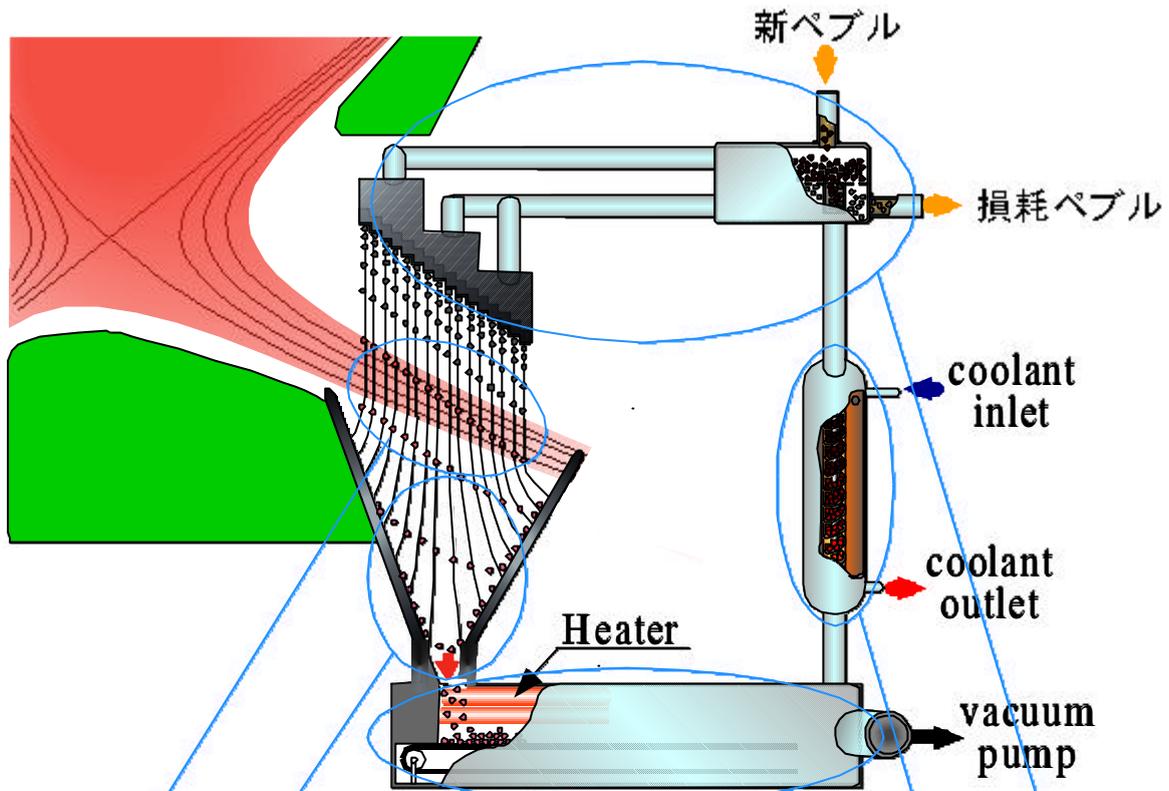
核融合炉のような高粒子束照射下では、黒鉛に一時的に多くの水素が注入され、照射後、過渡的に放出される

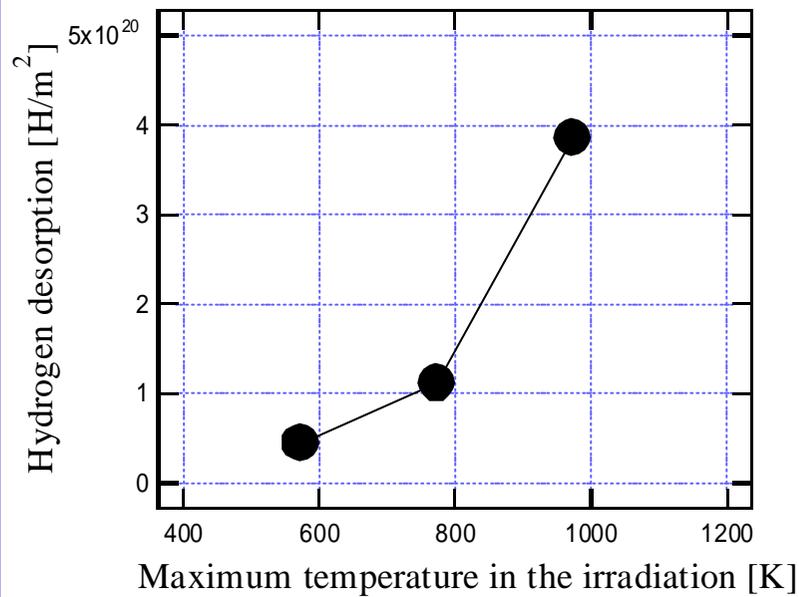


照射時の最高温度で照射後保持するだけでも水素が放出され脱ガスにあまりエネルギーを消費しない効率的な排気ができる。

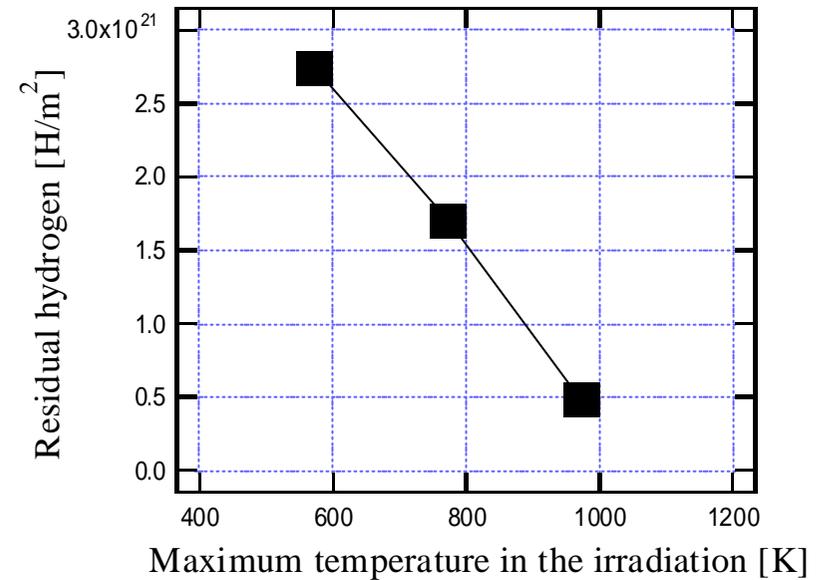


ペブルダイバータにおける排気プロセス





排気に寄与する水素放出量の
照射時最高温度依存性



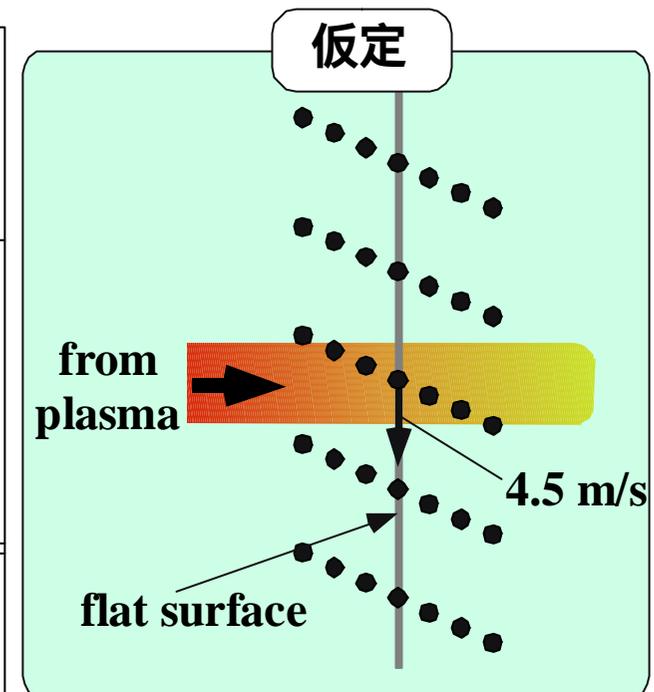
残留水素量の
照射時最高温度依存性



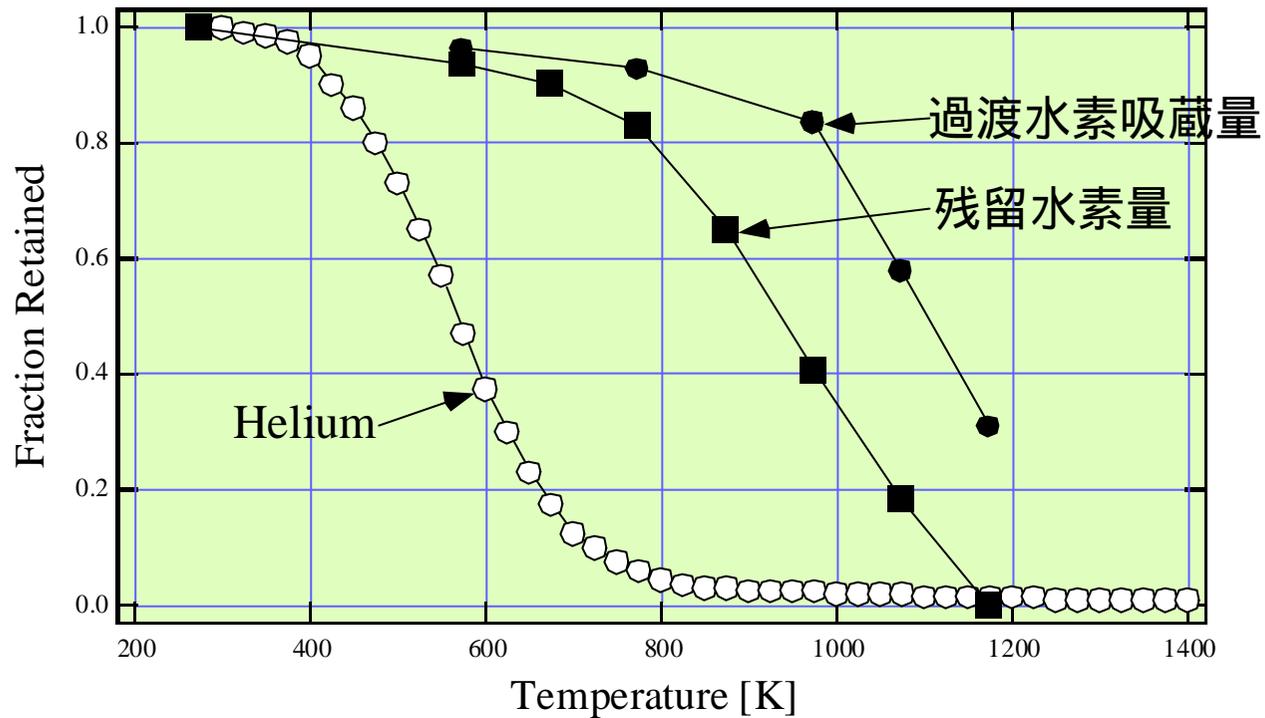
ペブルダイバータの燃料ガス排気能力

照射時最高温度973Kのときの排気に寄与する水素放出量から
計算したペブルダイバータの燃料ガス排気能力
(ペブルの落下高さをストライクポイントより1m、ペブルのカー
テンを平面と仮定したとき。)

トロイダル方向 1 m 当たりの ペブルダイバータの排気量	7.5 Pa·m ³ /s
ITERクラス(大半径 8 m)の 核融合炉を想定した場合のペ ブルダイバータの排気能力。	380 Pa·m ³ /s
ITERの定常運転時のガス供給量	200 Pa·m ³ /s



黒鉛材中のHe、水素保持特性の比較

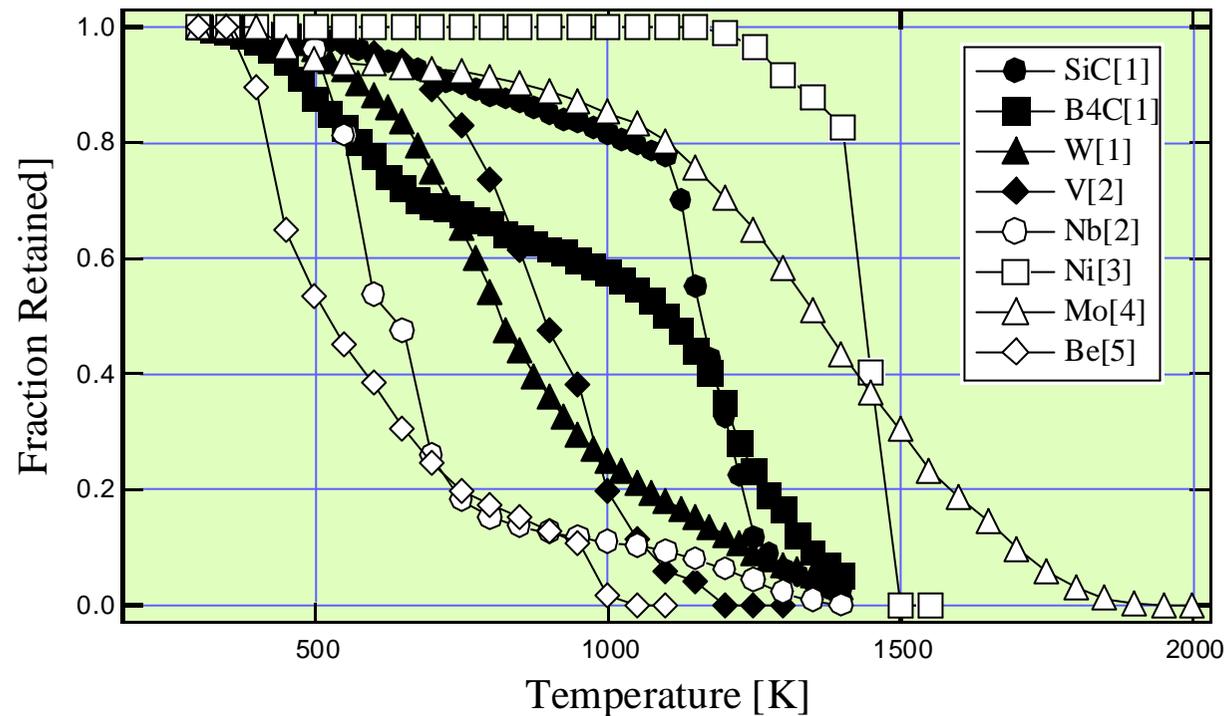


Ref of He data: T.Hino, et al., J. of Nucl. Mater. 266-269(1999)538

燃料ガス排気のための温度領域だとHe排気はほとんどできない。



さまざまな材料でのヘリウム吸蔵特性



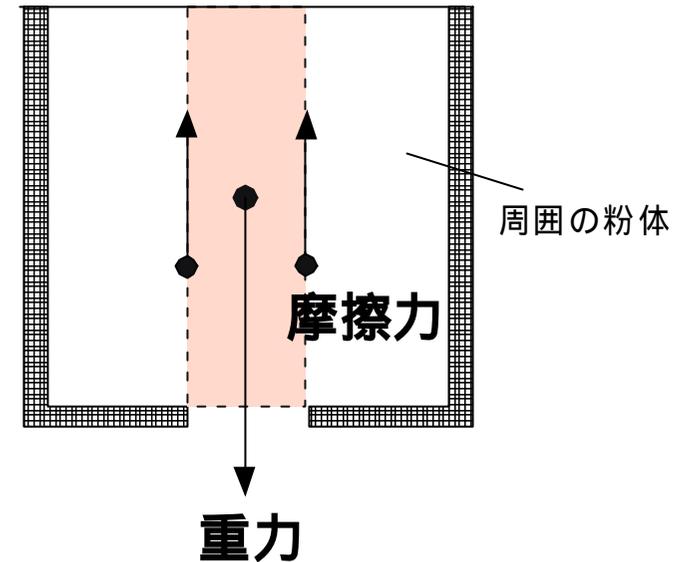
- Ref: [1] T.Hino, et al., J. of Nucl. Mater. 266-269(1999)538
 [2] A. van Veen, et al., J. of Nucl. Mater. 212-215(1994)287
 [3] I.I.Chernov, et al., J. of Nucl. Mater. 271-272(1999)333
 [4] W.Th.M.Buters, et al., J. of Nucl. Mater. 141-143(1986)253
 [5] K.Morishita, et al., J. of Nucl. Mater. 266-269(1999)997



ペブル流量の計算モデル

スリット真上部分の粉体を塊とみなして、その塊が重力によって落下する過程で周囲の粉体との間の摩擦力と付着力が働くと考えたモデル。

塊の落下する速度を粉体の流出速度とみなし、流出速度に粉体のかさ密度と排出口の断面積をかけたものを流量と考える。

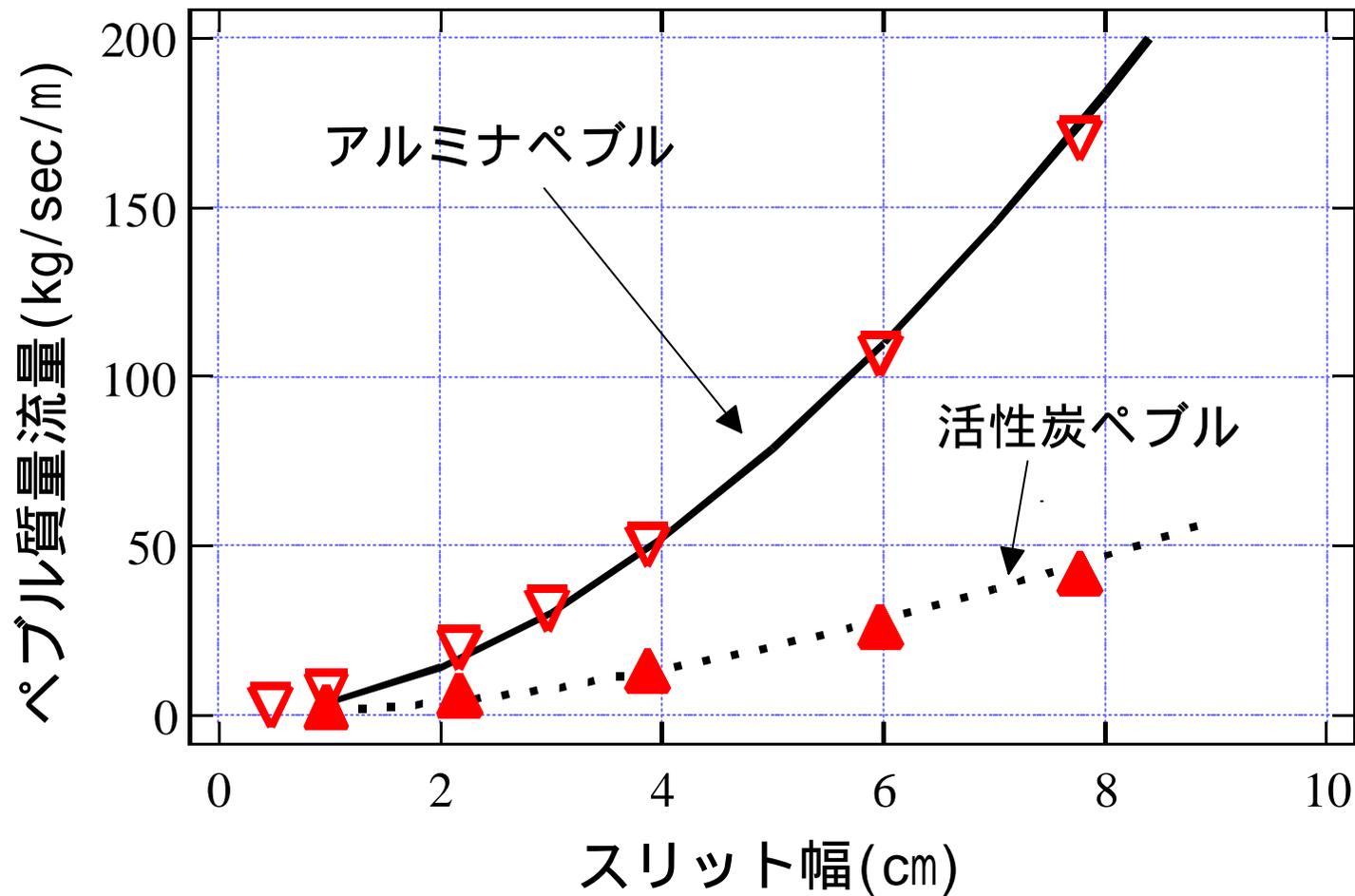


$$\frac{dv}{dt} = g \left[1 - \underbrace{\frac{C_s}{\rho_b}}_{\text{付着力の項}} - \underbrace{\frac{\mu_i}{\rho_b H} \left\{ k_d \int_0^{v_{kt}} p dy + k_s \int_{v_{kt}}^H p dy \right\}}_{\text{摩擦力の項}} \right]$$



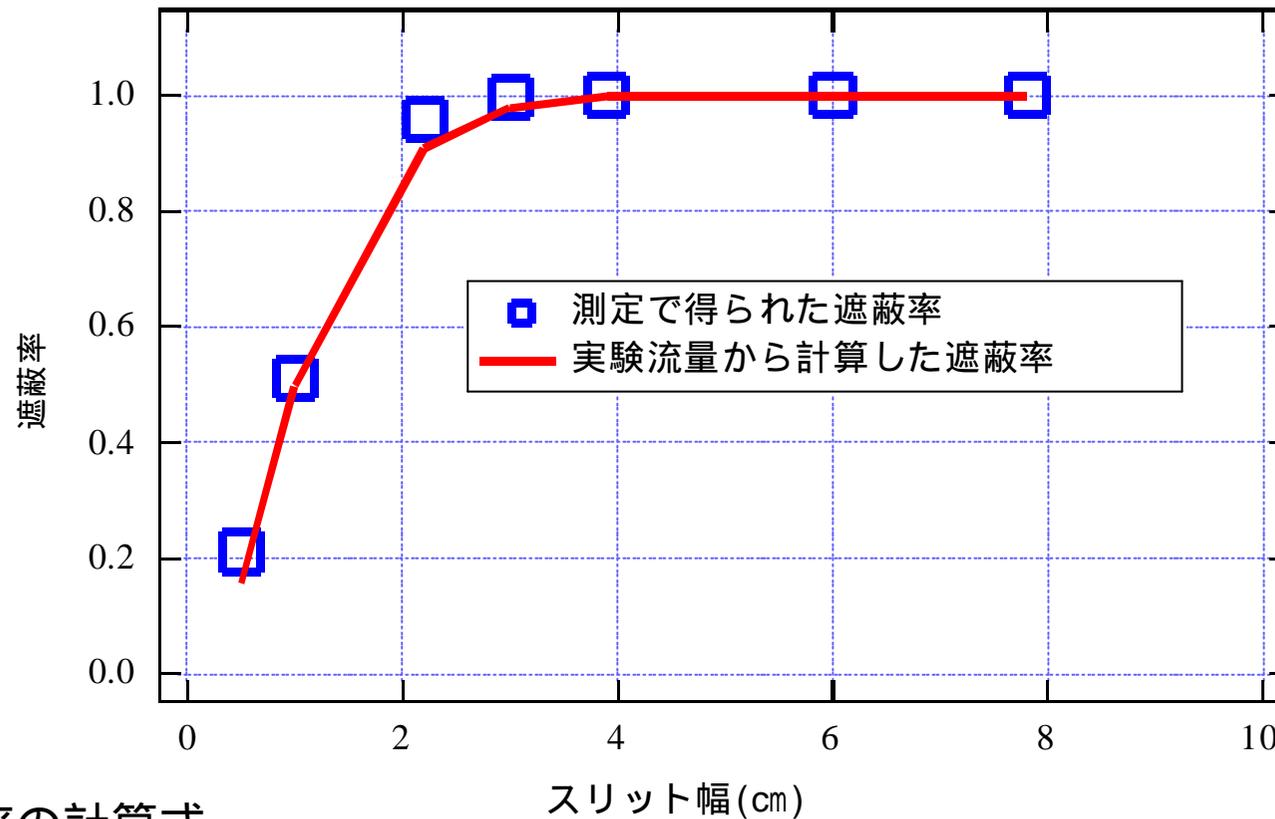
ペブルの流量

それぞれの試験用ペブルにおける、ペブル流量のスリット幅依存性



遮蔽率

落下装置下方50cm地点での遮蔽率（アルミナペブル）



遮蔽率の計算式

$$S = 1 - \frac{I}{I_0}$$

遮蔽率

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

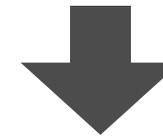
ペブルカーテン深さ方向のプラズマの熱流束の減衰



ペブル落下装置の仕様評価

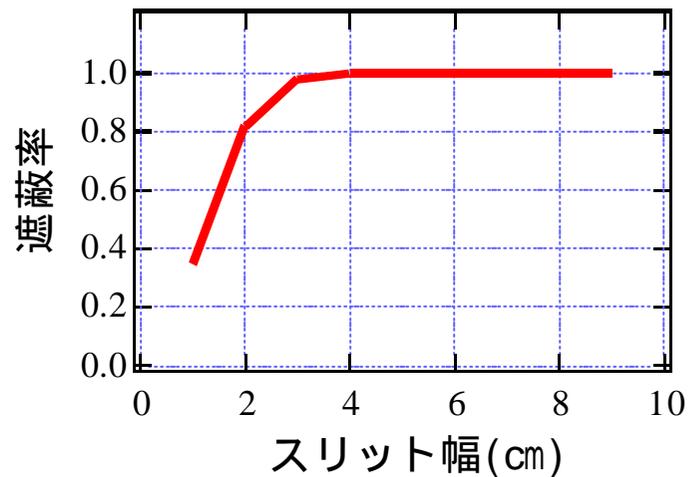
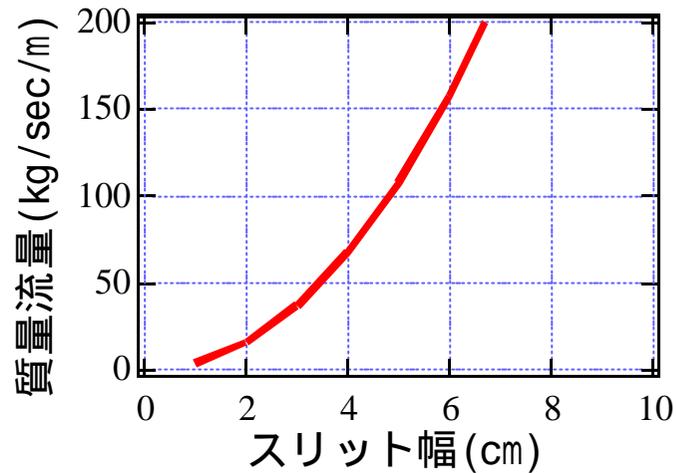
計算条件

- 多層被覆ペブルを使用
- コンテナ高さ ...0.5m
- スリット長 ...1.0m
- ストライクゾーンの位置 ...スリット下方1.0m



遮蔽率を90%に
設定したとき

スリット幅・・・2.5cm
ペブル流量・・・30kg/sec/m



まとめ

実験および計算結果より

- ペブル流量については、実験結果と計算結果がよく一致していた。
- ペブル流量から求めた計算遮蔽率と、実験で得られた遮蔽率がよく一致していた。

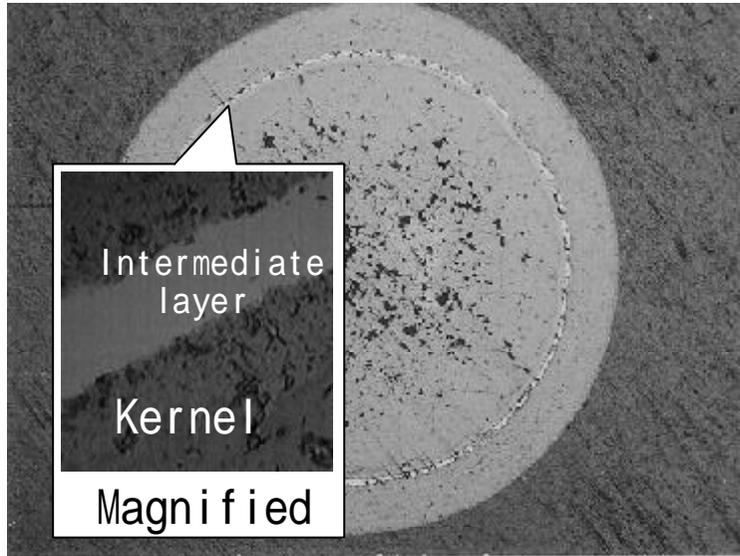
以上により、この計算モデルを用いてペブル落下装置の設計パラメータを評価できると判断した。

ペブル落下装置の仕様評価結果

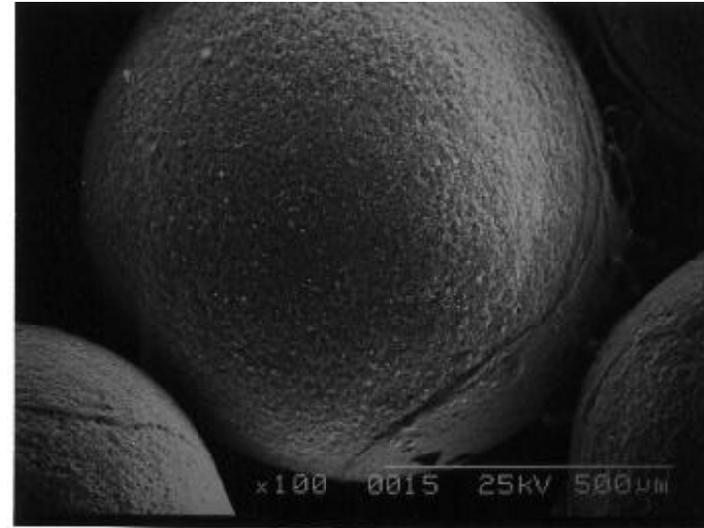
- 90%のプラズマ遮蔽率を得るために必要な流量は 30kg/sec/m 、そのときのスリット幅は 2.5cm であるという計算結果を得た。



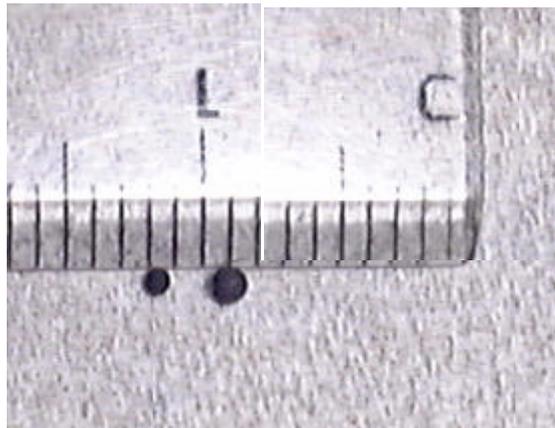
Photograph of Test Pebble



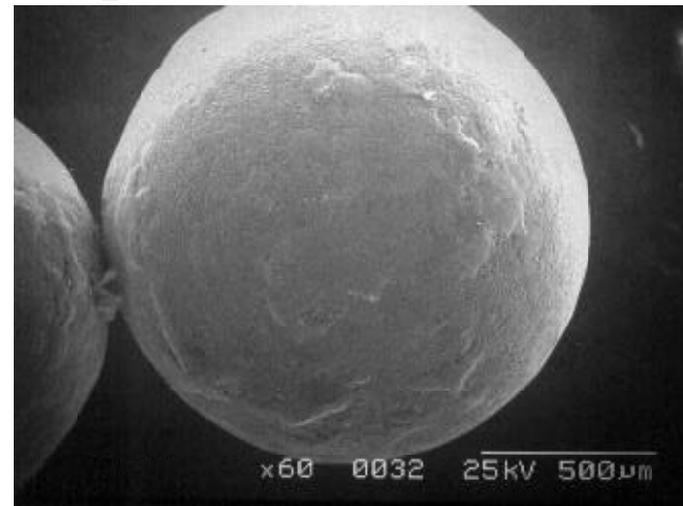
Graphite Kernel Pebble



Graphite Kernel Pebble



Graphite Kernel Pebble and SiC Kernel Pebble



SiC Kernel Pebble

Concept of Pebble dropping device

Desirable element of pebble dropping device

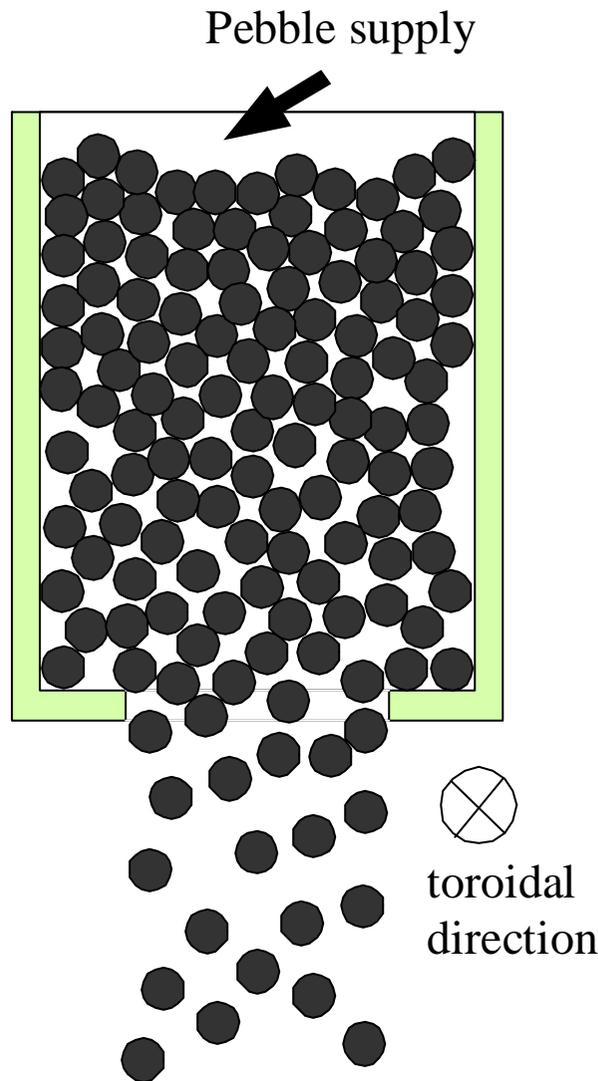
- Formation of dense pebble curtain at the strike zone
- Simple system
- Small shape

Experimental:

Dependence of the flow rate of pebble on the slit width is observed

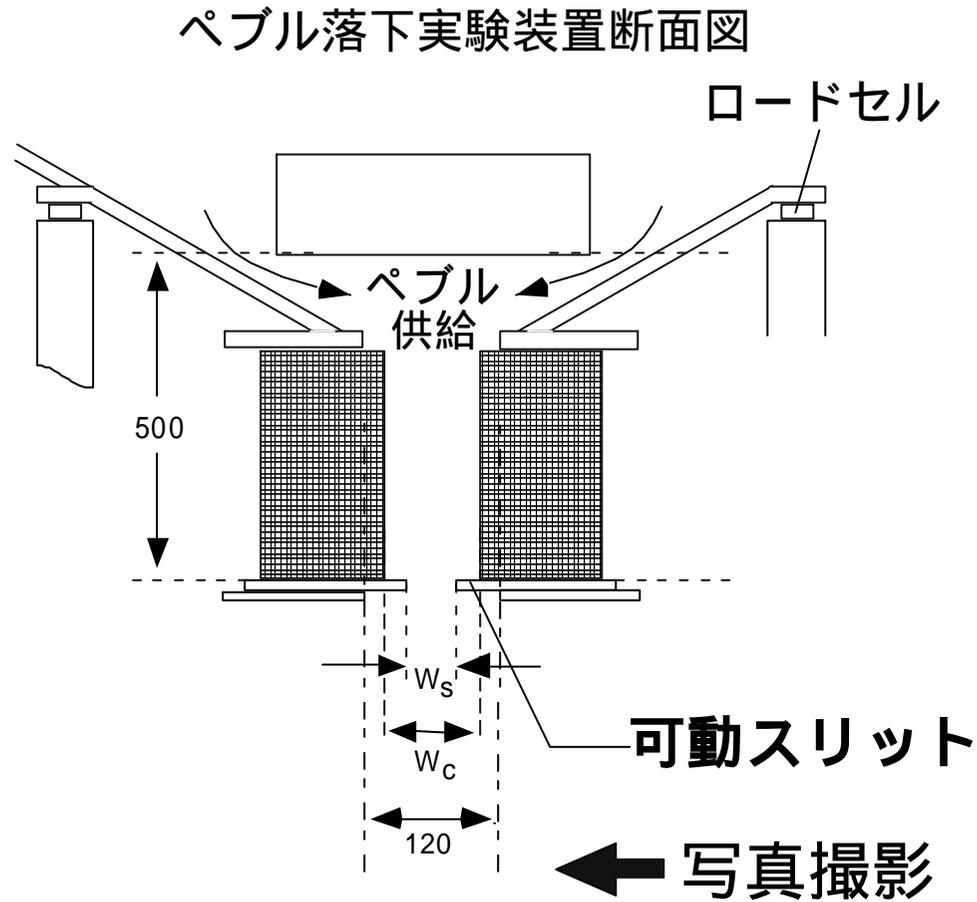
Calculation:

A calculational model is proposed. The frictional coefficient the density of pebble and the shape of pebble dropping device is considered in the calculational model.

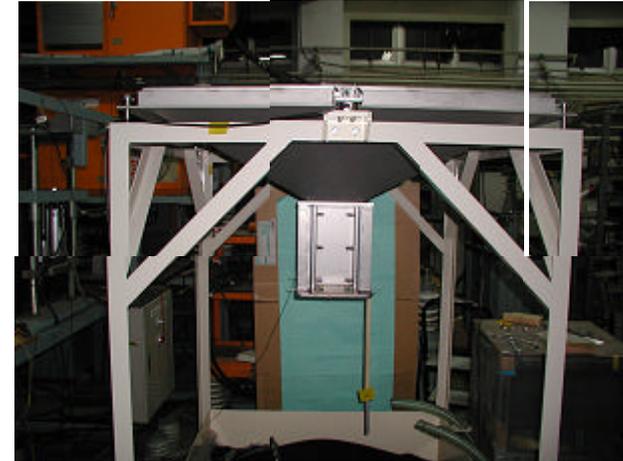


The validity of the calculation model is estimated from the comparison with the experimental result and the calculation result for the fundamental design activity of pebble dropping device.

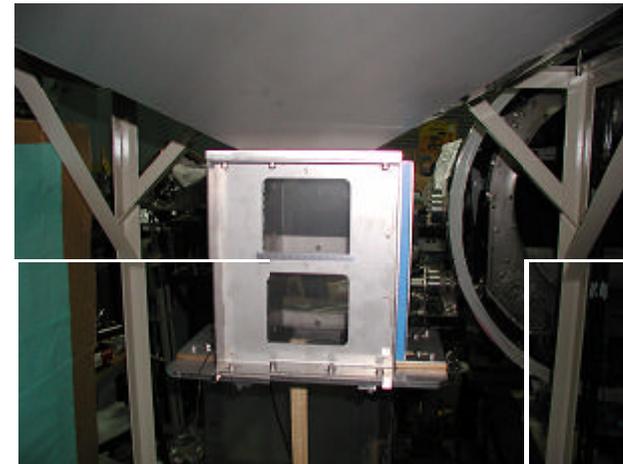
ペブル落下実験



試験用ペブル
アルミナペブル、活性炭ペブル



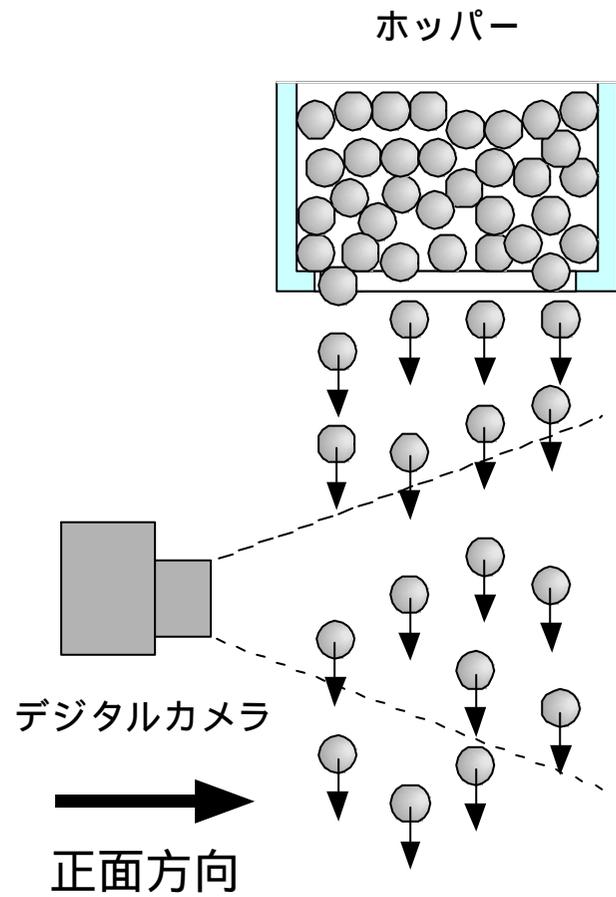
ペブル落下装置正面



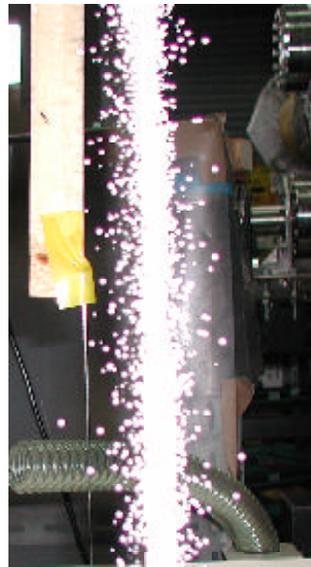
ペブル落下装置側面

遮蔽率測定

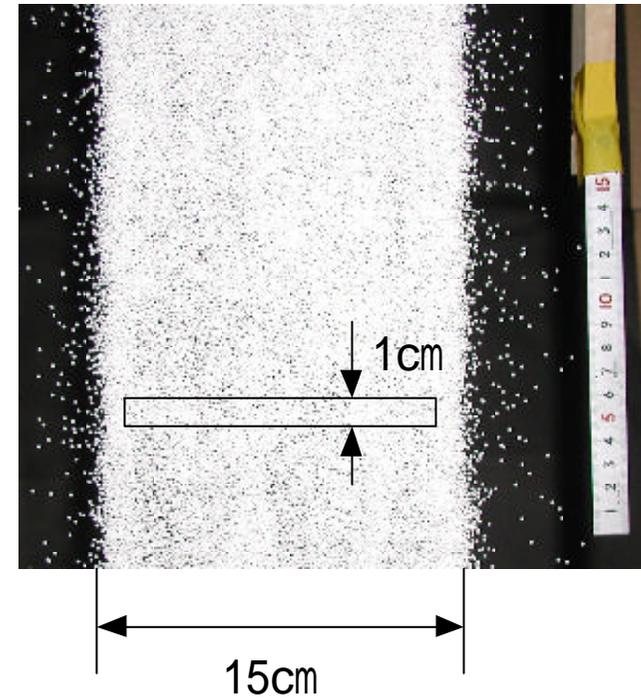
測定系



側面



正面



落下装置の排出口から下50cmの位置での遮蔽率を測定した。