

核融合液体・固体ブランケット
およびダイバータの
熱流動研究の進展

京都大学 功刀・横峯研究室
三浦雅人・坂部俊郎

研究概要

本講演では京大 功刀・横峯研究室で行っている核融合に関連した研究についての紹介を行う

- リチウム鉛の流動計測法の開発
- 磁場下での液体金属の流動実験
- リチウム鉛の気体吸収・排出特性の解明
- ペブル層内の有効熱伝導率の比等方性に関する研究
- ガス冷却ダイバータに関する研究

液体ブランケット

固体ブランケット

ダイバータ

本研究室が日米共同計画で担当している研究

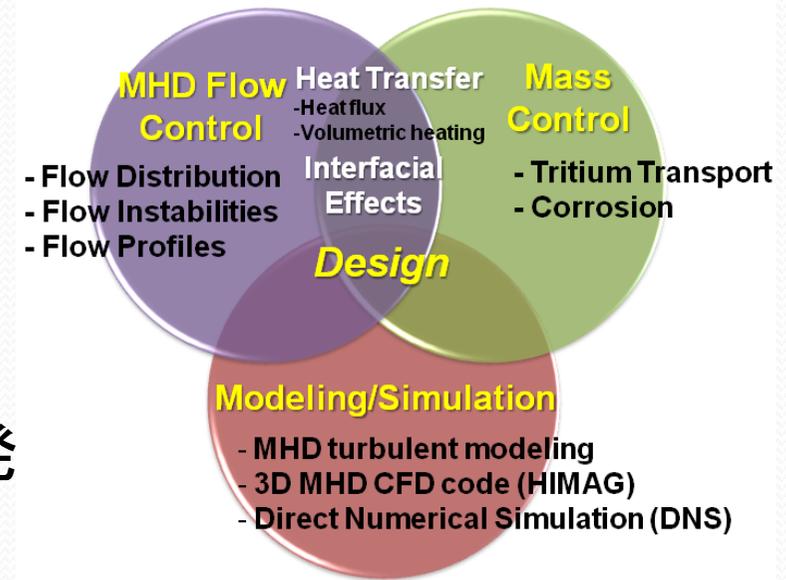
JUPITER- II 計画(2001-2006)

- UCLAに設置した実験ループを使用
- 30%濃KOHで熔融塩冷却材FLiBeを模擬し強磁場下での熱流動実験



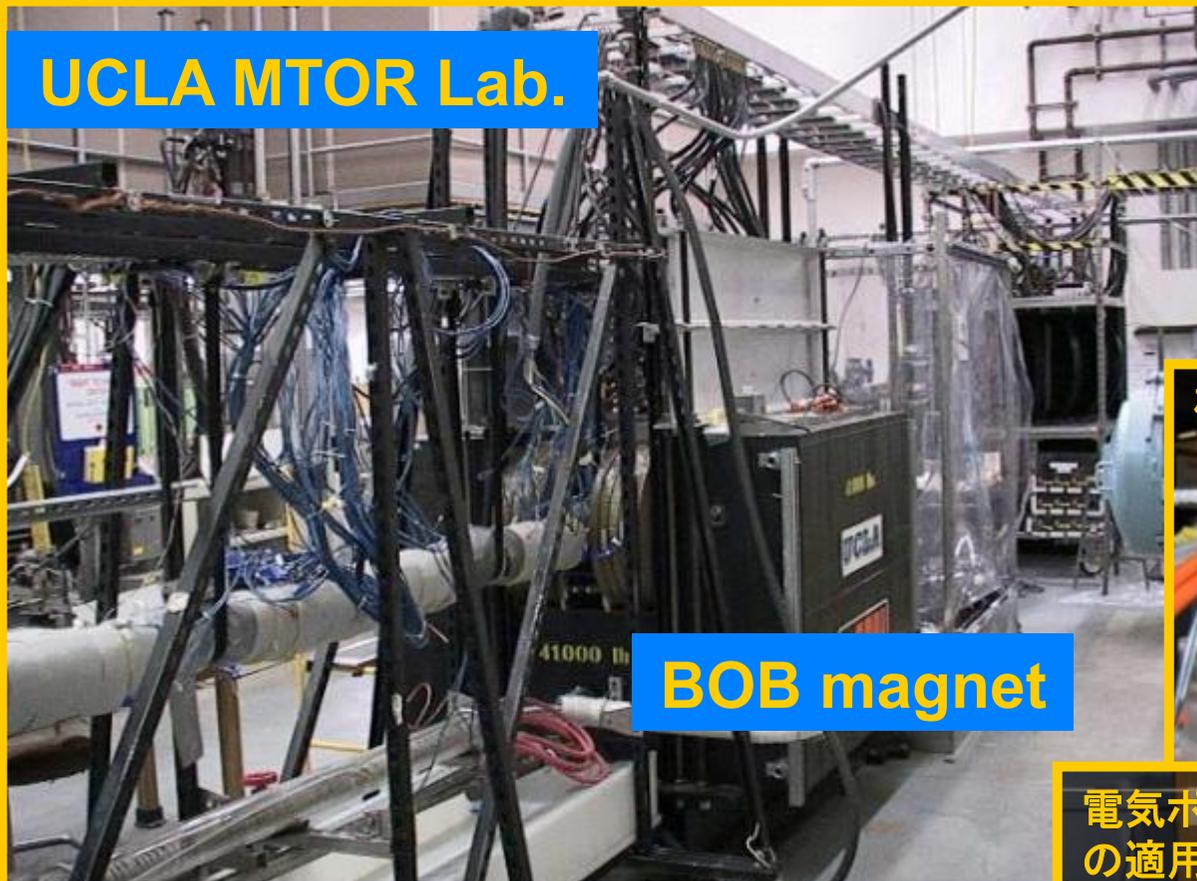
TITAN計画(2007-2012)

- 同じくUCLAの実験ループを使用
- リチウム鉛の流動計測法の開発
- リチウム鉛の磁場下流動実験



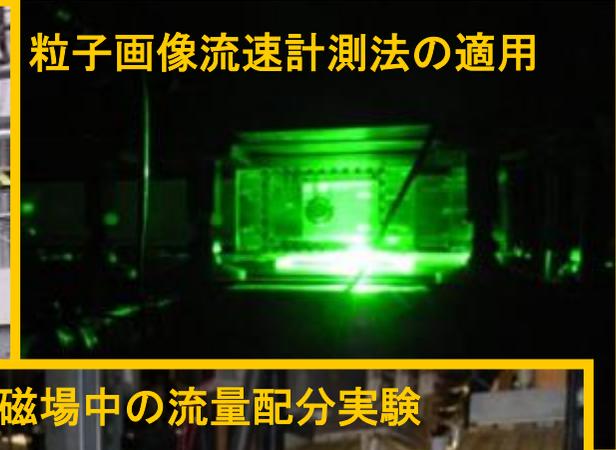
TITAN計画タスク1-3のための実験設備

UCLA MTOR Lab.



BOB magnet

粒子画像流速計測法の適用



磁場中の流量配分実験



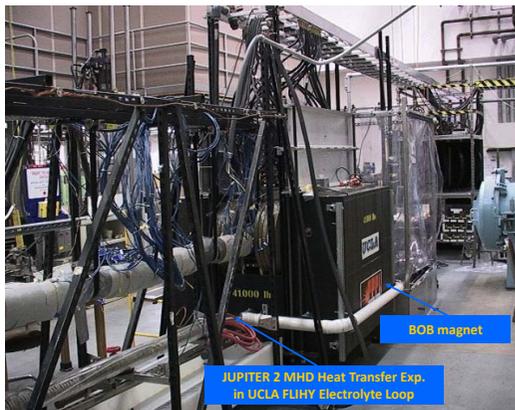
電気ポテンシャル・プローブ計測の適用



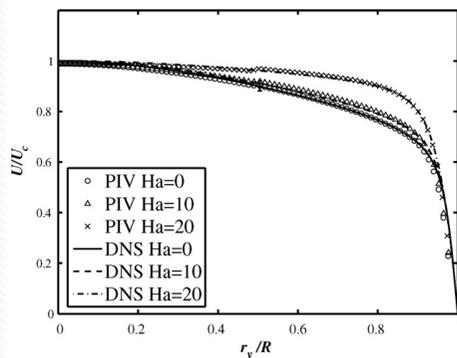
- ✓幅15cm 長さ1mにわたる最大2T均一磁場
- ✓液体金属流から高プラントル流体を模擬した電解液を用いたMHD流動実験まで幅広く対応するハイブリット・タイプの実験施設

強磁場下での熔融塩流動実験

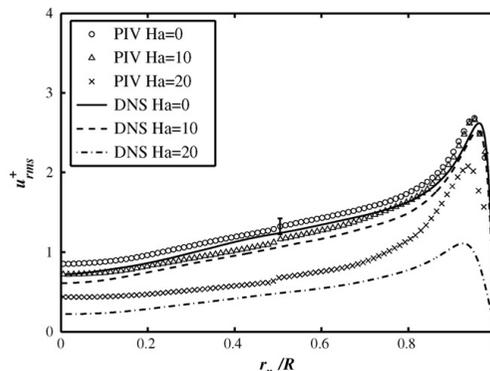
- 30%濃KOHで熔融塩冷却材FLiBeを模擬し強磁場下での熱流動実験 (UCLAに設置した実験ループを使用)



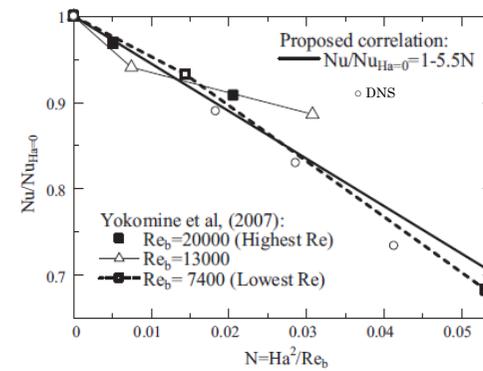
- 直径88mmの円管試験部
- 速度分布はPIVにより測定
- 解析結果と良く一致
- 流れの層流化



Re=11300での管内無次元速度分布



Re=11300での管内主流方向無次元乱流強度分布



磁場によるNuの変化

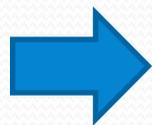
リチウム鉛の流動計測法の開発

高温超音波ドップラー流速計測法HT-UDV

- 超音波技術を用いた非侵入型流速計測法
- 流体内の粒子から散乱されるドップラー周波数から速度情報
- パルスの伝播時間から位置情報を得る

HT-UDVによるリチウム鉛流動の計測

- リチウム鉛音響基礎特性・物性値の取得
- リチウム鉛を伝搬する音速値(UDVにおける距離・速度評価に必要)
- 超音波散乱源となる流動トレーサーの確認(酸化鉛粒子)

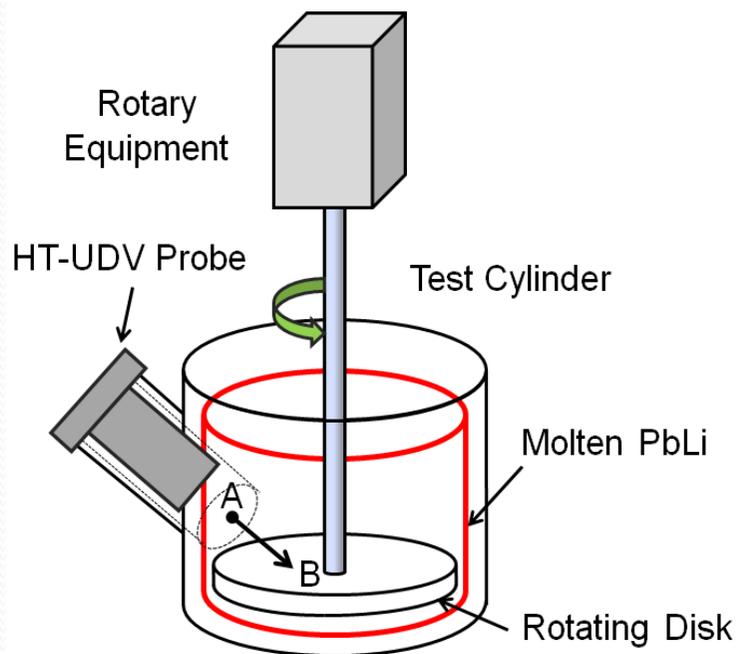


HT-UDVの適用可能性を確認

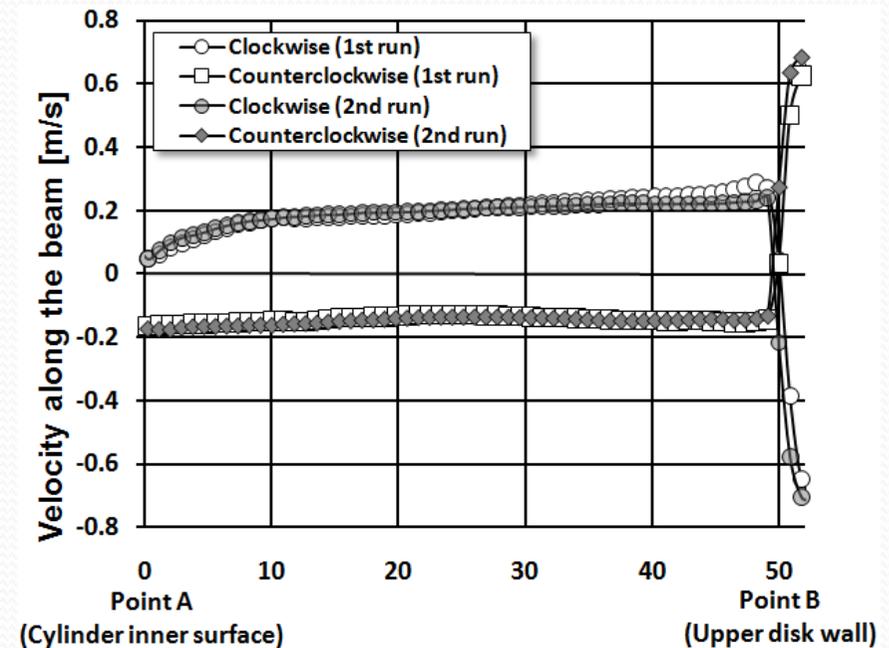
リチウム鉛のHT-UDV測定

- これまで実績のなかったリチウム鉛のHT-UDV測定を非磁場環境下にて実証

リチウム鉛回転流の測定試験

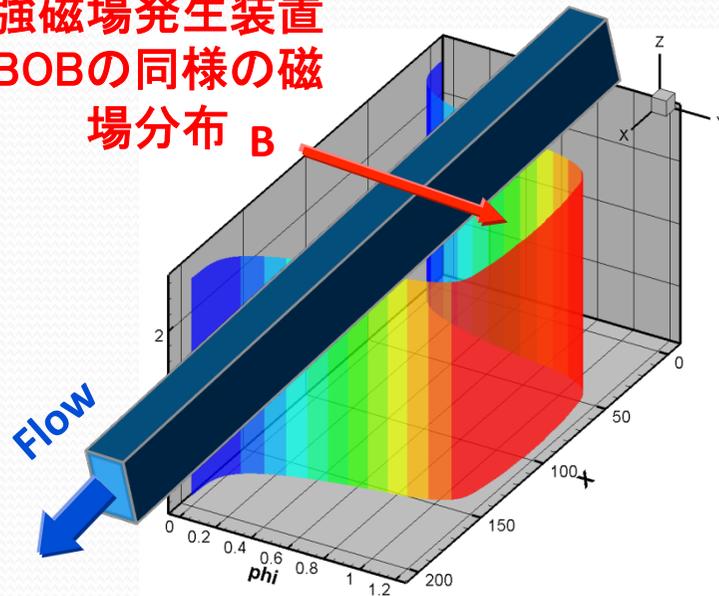


測定流速分布



2次元・3次元数値解析コードによるMHD流動の事前検討

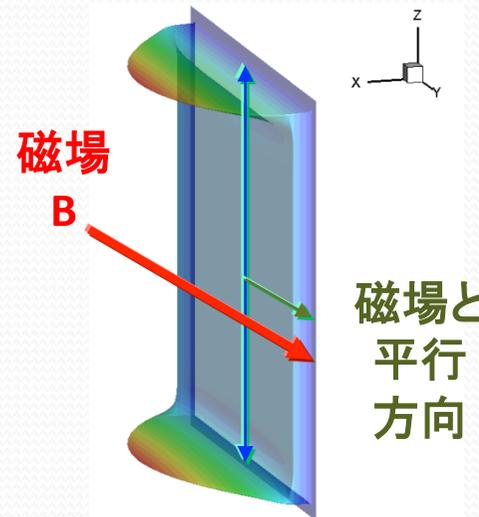
強磁場発生装置
BOBの同様の磁
場分布 B



流路長 200 cm
流路幅 65 cm 正方管
PbLi温度 300°C
印加磁場 1.2 T
流入速度 3.9 cm/s

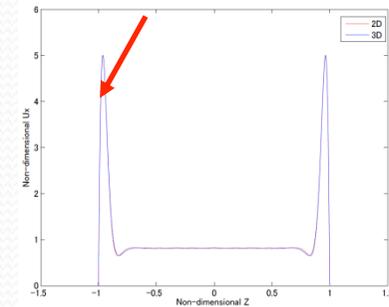
Re 5473
Ha 739
 C_w 0.126

磁場と垂直方向

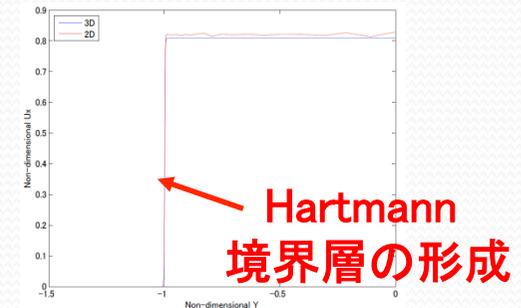


磁場中心部での
速度分布
X=100 cm (発達流)

M字型流速度分布



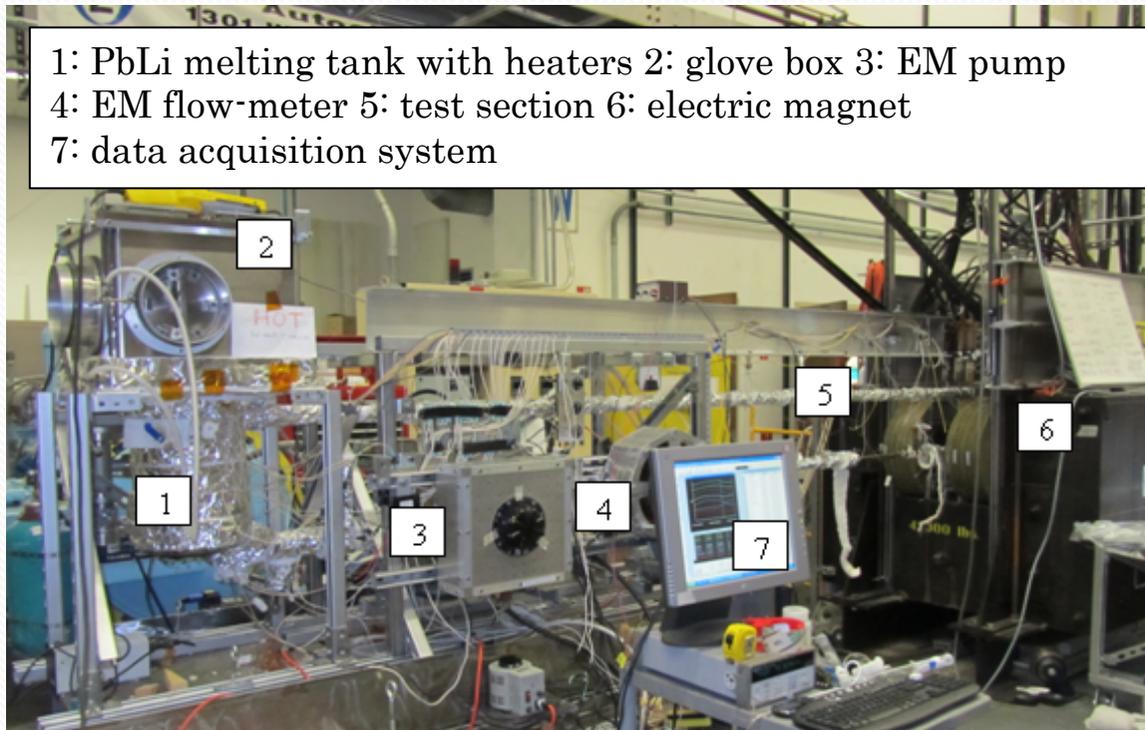
磁場と垂直方向の
流速度分布



磁場と平行方向の
流速度分布

- ✓ 3次元MHD流体解析コード(HIMAG)を使用
- ✓ 2次元発達流モデルを用いた解析結果(流速度分布とMHD圧力損失)と一致
- ✓ リチウム鉛の高温UDVの計測結果と比較するデータベースの構築

リチウム鉛流動ループと測定装置

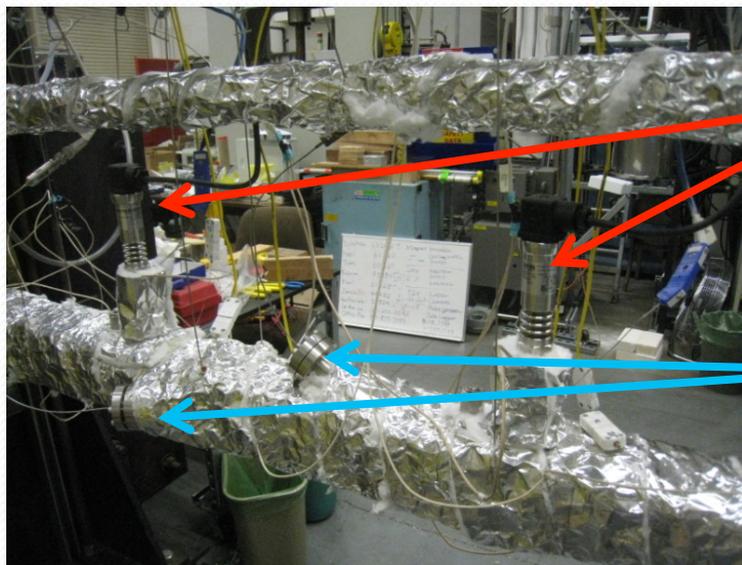


UCLAにおける磁場下高温液体リチウム鉛流動ループ

- 最大流量 50l/min
- 最大圧力 0.15MPa
- 最大磁場 1.8T

リチウム鉛流動ループ試験部

強磁場環境下にてリチウム鉛の流速度分布計測が進行中



高温圧力センサー
最高300°Cまで測定可能



HT-UDV プローブ
(JAEA型トランスデューサ)
最高500°Cの耐久性

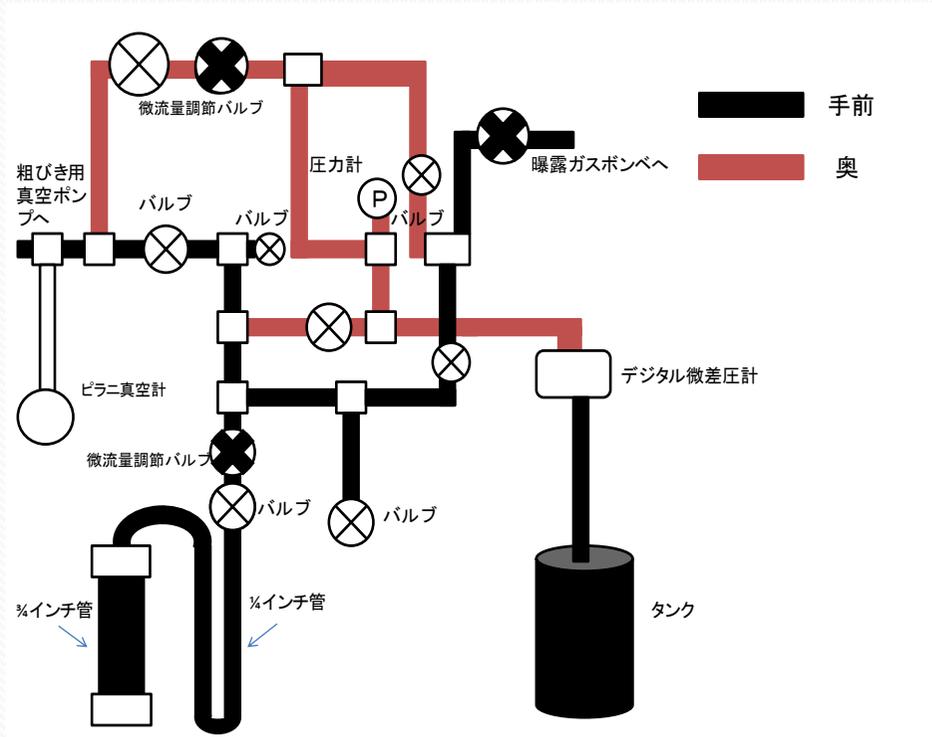


UDV 計測ユニット
(Signal Processing社)

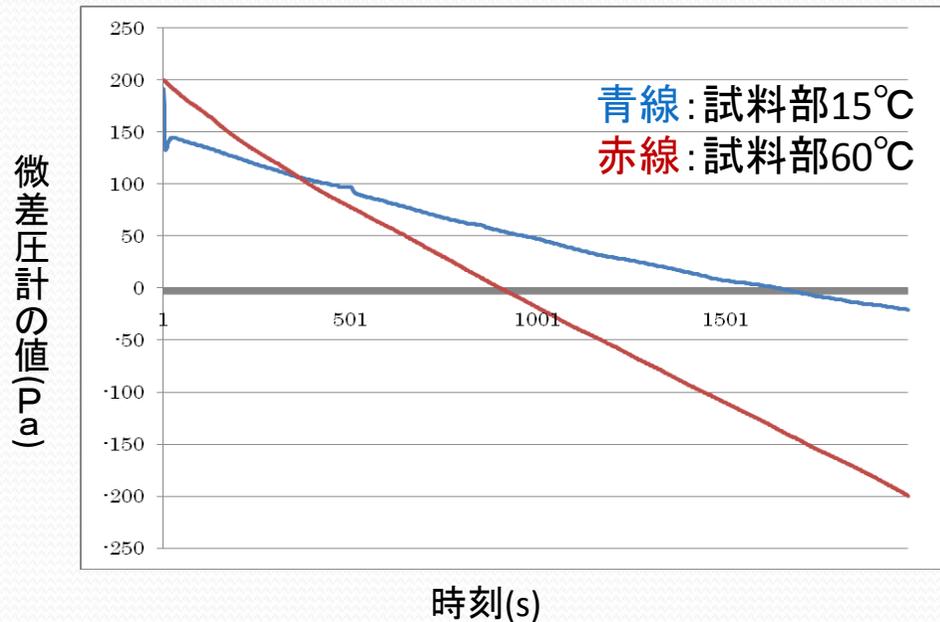
流路長 180 cm
流路幅 65 cm 正方管
壁厚さ 2.3 mm
流路材 SUS304
最大磁場 2 Tesla
プローブ取付け角度 30°

リチウム鉛の気体吸収・排出特性に関する研究

- リチウム鉛に**周囲の気体を吸収・排出**しているような挙動が見られた(はっきりとした原因は不明)
- 温度及び圧力によりリチウム鉛が周囲の気体に対しどのような挙動を示すのか明らかにする



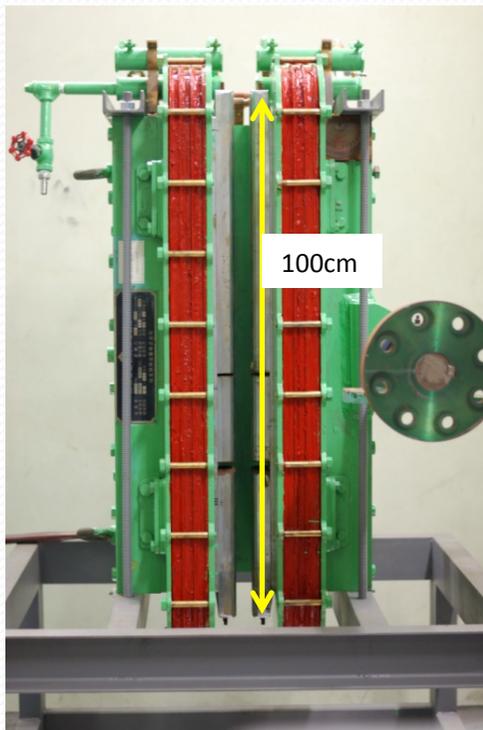
リチウム鉛のアルゴンガスに関する吸収曲線



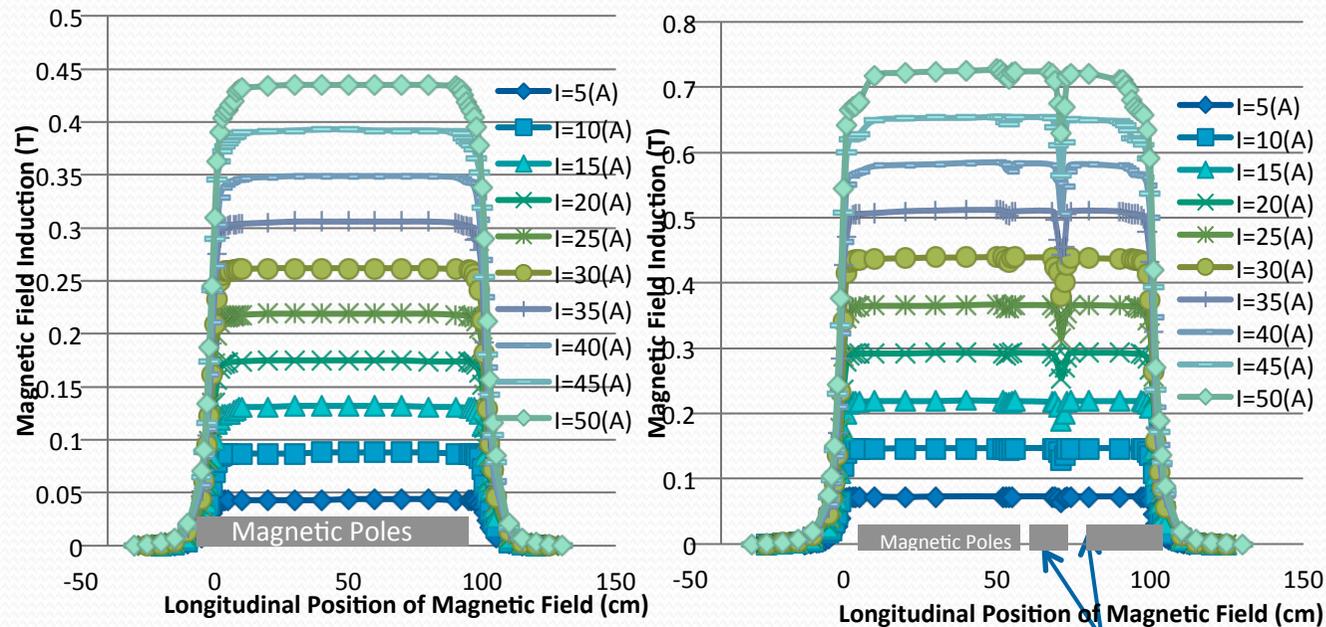
今後の調査

- 圧力・温度依存性に関するデータを充実させる
- ヘリウムやキセノン等の気体ごとの吸収特性の相違を解明
- 圧力及び温度の測定精度等の向上

本研究室における強磁場液体金属ループの製作



- 現在本研究室においても電磁石を用いた液体金属流動実験のための流動ループを準備中
- 磁極片の取り換えにより磁極間隔、磁極幅を変更可能
- 液体金属の噴流、曲がり流路での流動、沸騰現象などを検討中



Two gaps made for the past experiment (About 5mm and 10mm)

固体ブランケットにおける ペブル充填層熱機械特性の課題

主な性能決定因子

- 弾性率・充填層-壁間熱伝達・有効熱伝導率

有効熱伝導率の従来測定の問題点

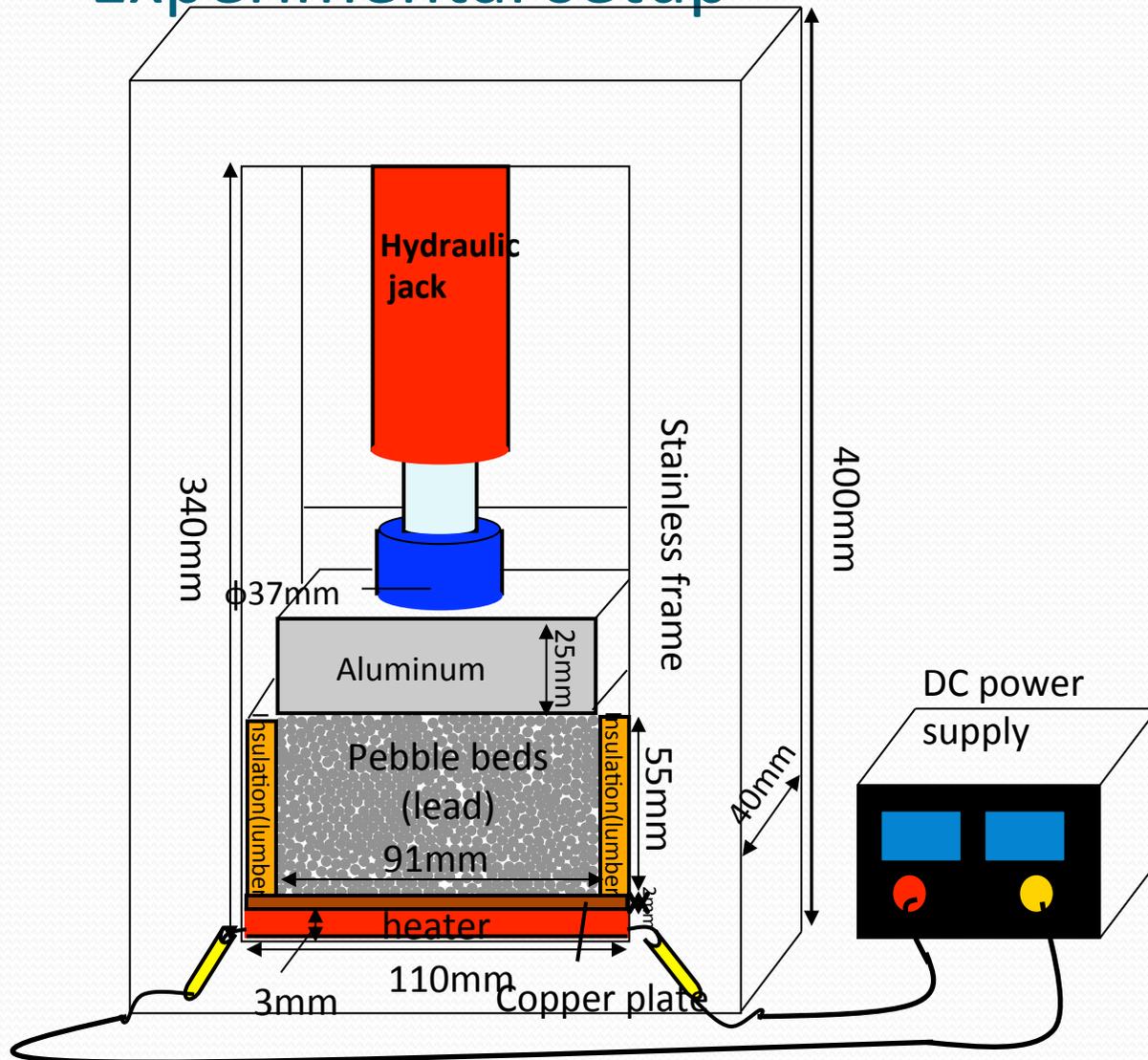
- 応力と熱流束の方向
- さらに核融合炉内では核発熱、温度分布、幾何形状などが加わり非常に複雑
- これまでは実験でスカラー量の有効熱伝導率を求めてきた



テンソル(異方性)で表現

ペブル充填層伝熱の研究

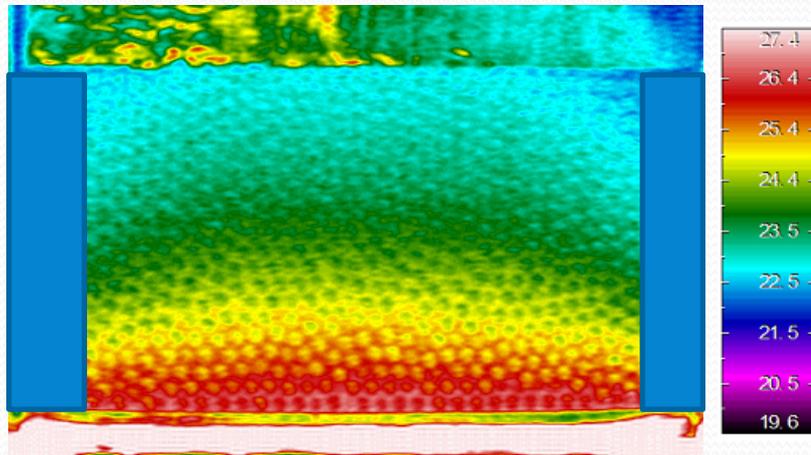
Experimental setup



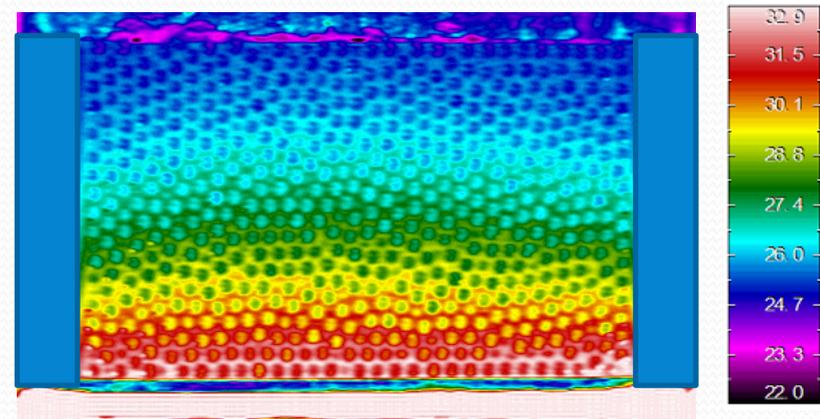
The pebbles were applied pressure by a hydraulic jack (30kN)

ペブル充填層伝熱の研究

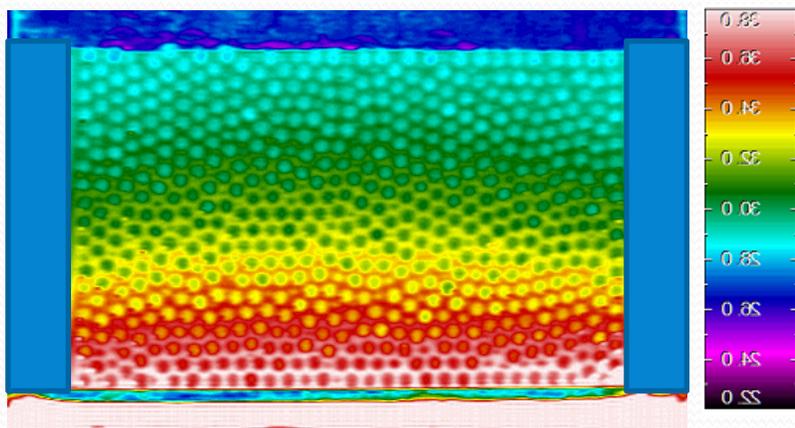
Temperature profile (unloaded condition)



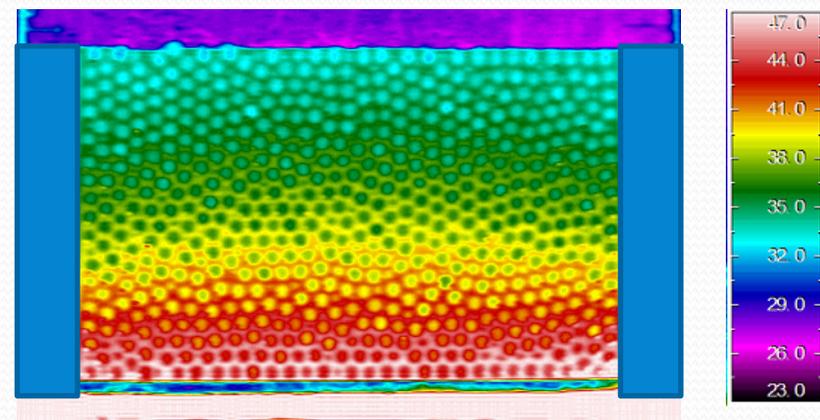
6V,0.71A



8V,0.96A



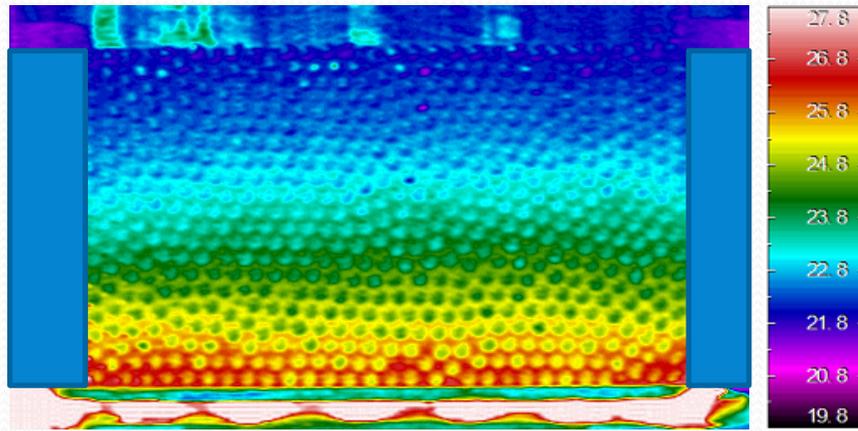
10V,1.18A



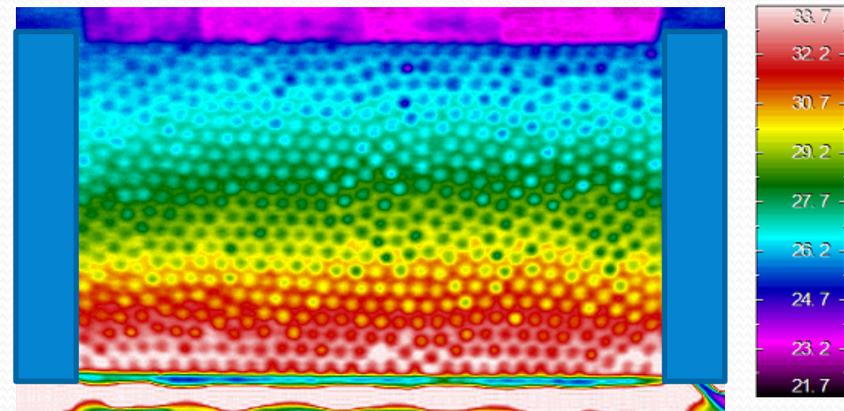
12V,1.43A

ペブル充填層伝熱の研究

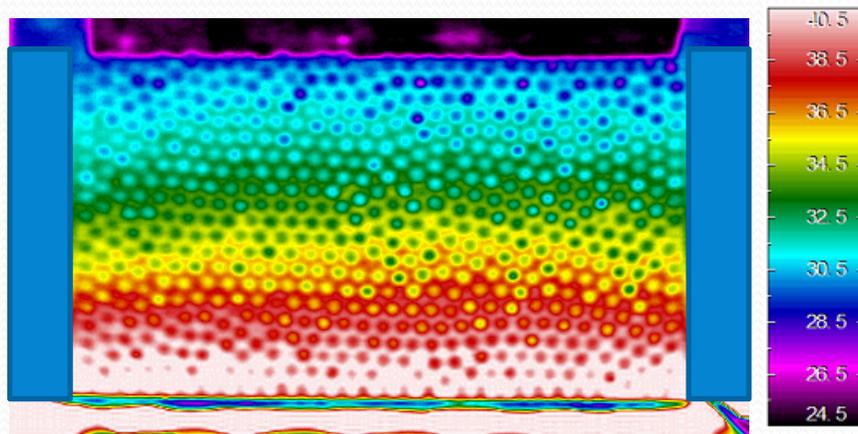
Temperature profile (loaded condition)



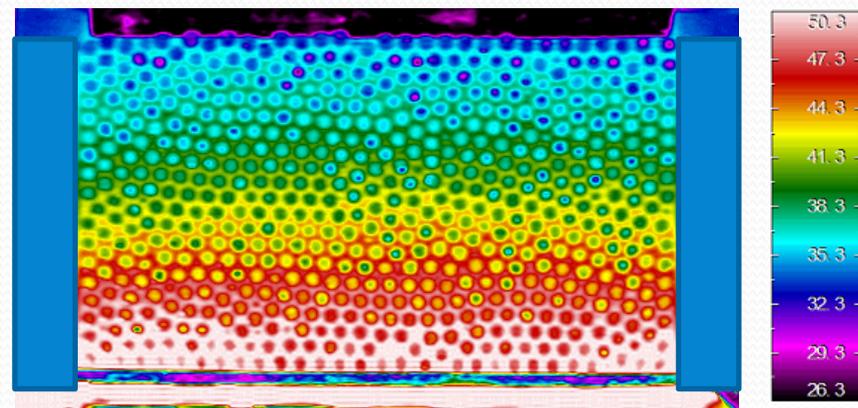
6V,0.71A



8V,0.96A



10V,1.18A



12V,1.43A

ペブル充填層伝熱の研究

Measured thermal conductivity tensor

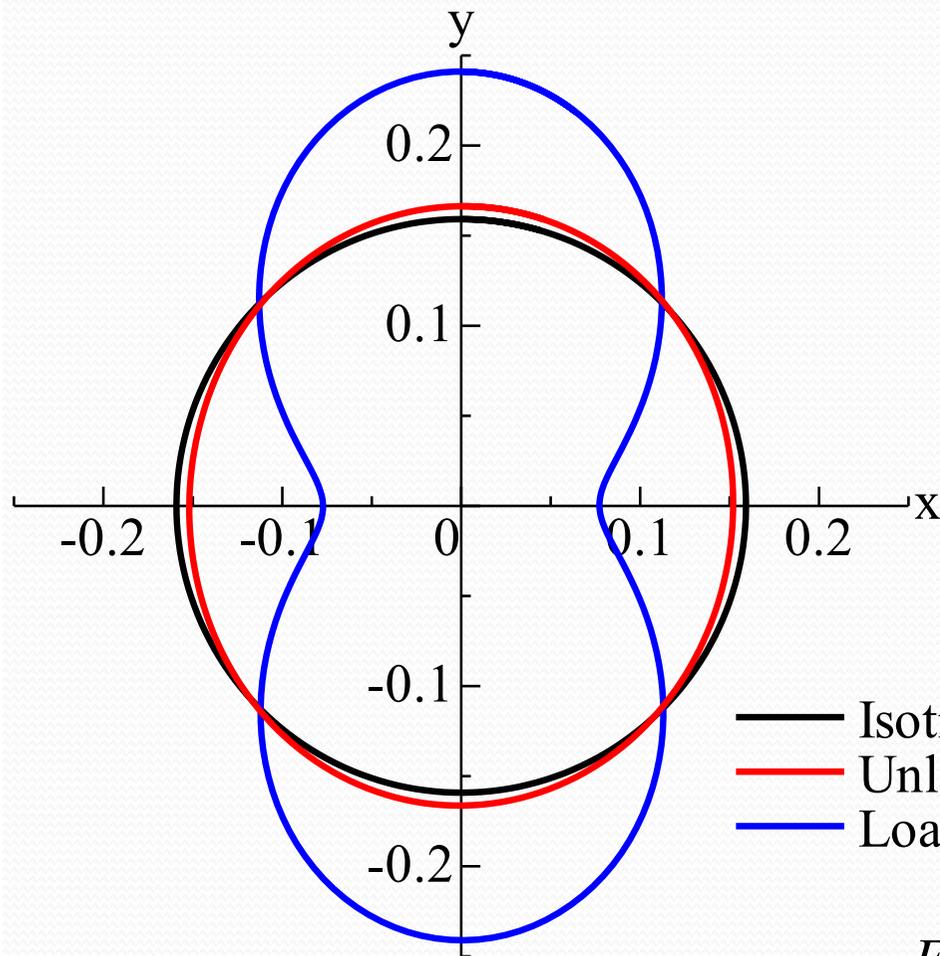
| | k_{xx} | k_{yy} | k_{xy} | k_{yy}/k_{xx} |
|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| unloaded | 2.442 | 2.726 | 0.230 | 1.11 |
| loaded | 2.253 | 6.531 | 0.109 | 2.90 |

$$\mathbf{k}_{eff} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{xy} & k_{yy} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{q}_x = k_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \mathbf{q}_y = k_{xy} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial T}{\partial y}$$

ペブル充填層伝熱の研究

Distribution function of Fabric tensor



- The structural anisotropy of granular packings is quantified by a fabric tensor

$$F_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(\mathbf{n}) d\Omega = 4 \left[N_{ij} - \frac{1}{4} \delta_{ij} \right]$$

$$N_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{c=1}^N n_i n_j$$

— Isotropic
— Unloaded
— Loaded

Distribution function of inter-particle contacts

$$E(\mathbf{n}) = \frac{1}{2\pi} \left[1 + (1 - F_{11}) \cos 2\theta + F_{12} \sin 2\theta \right]$$

ペブル充填層伝熱の研究

Measured fabric tensor

| | F_{xx} | F_{yy} | F_{xy} | F_{yy}/F_{xx} |
|----------|----------|----------|------------------------|-----------------|
| Unloaded | 0.955 | 1.045 | 4.183×10^{-3} | 1.09 |
| Loaded | 0.485 | 1.514 | 3.724×10^{-3} | 3.12 |
| | k_{xx} | k_{yy} | k_{xy} | k_{yy}/k_{xx} |
| Unloaded | 2.442 | 2.726 | 0.230 | 1.11 |
| Loaded | 2.253 | 6.531 | 0.109 | 2.90 |

- 有効熱伝導率テンソルは構造テンソルに係数をかけた形で表わせると推測
- 比例定数Kは粒子の物性や荷重の大きさの関数でモデル化

$$\left(k_{eff}\right)_{ij} = K \cdot F_{ij}$$

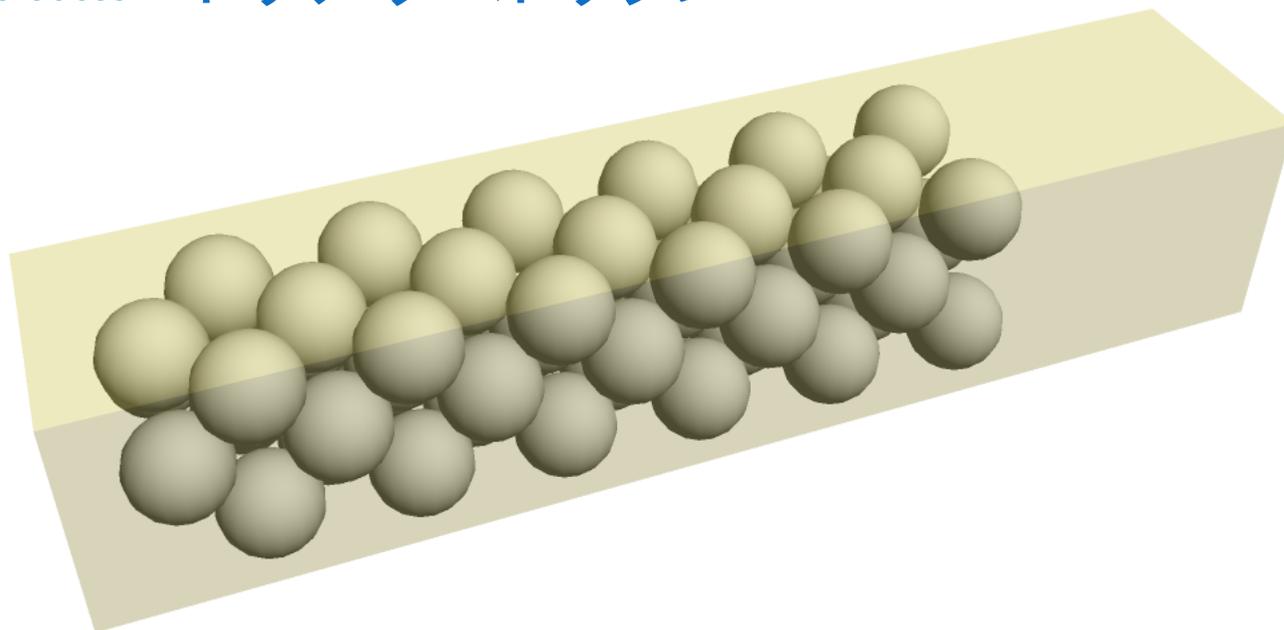
ペブル充填層伝熱の研究

Pebble Flow Simulation

固体ブランケット以外にも充填層流れは用いられる

例 FFHR 第一壁高温熔融塩除熱

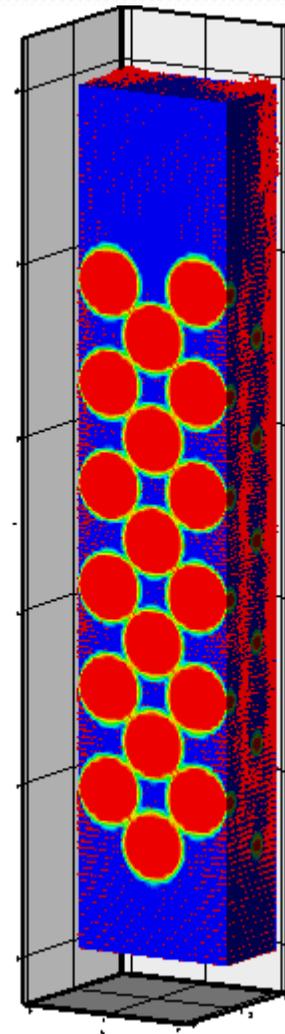
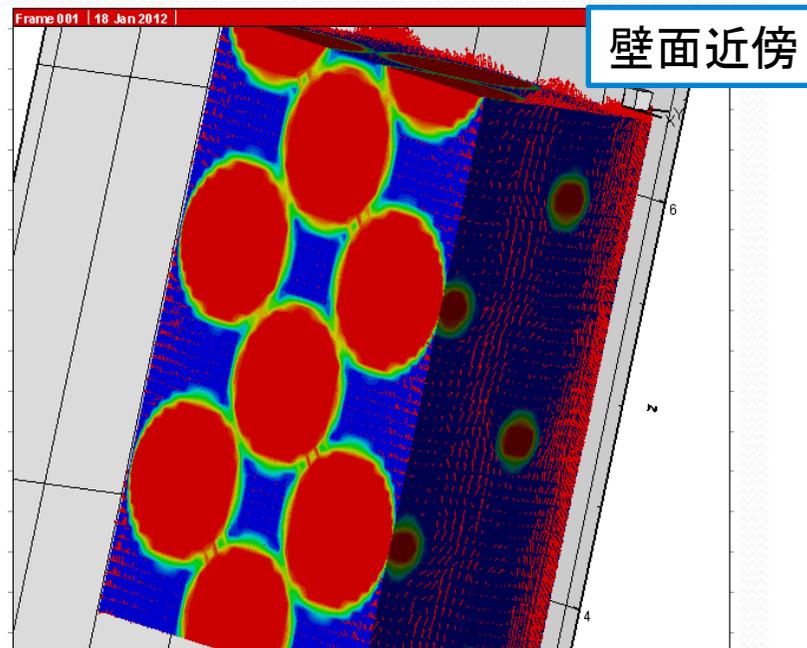
IFMIF トリチウムトリップ



ペブル充填層伝熱の研究

計算結果例

- 粒子配置によらず流れはダクト壁面近傍に集中する
- 壁面近傍で流速は増加するが、乱流混合を促進するような大きな渦構造生成は見られない
- 今後、大規模計算、乱流計算を実施



ガス冷却ダイバータ

- ダイバータで除熱すべき熱流束は $10\text{MW}/\text{m}^2$ 以上
- 伝熱面積も大きい
- 高温高圧のヘリウムガスで冷却
- マルチノズル衝突噴流冷却



- 欧州で行われている冷却実験は一種の耐熱実験
- 本研究室では伝熱機構の解明に向けた基礎実験のための高圧ガスループを構築中

今後の展望

- 液体ブランケットにおける測定法の確立
- UCLAおよび本研究室での液体金属流動実験の実行
- リチウム鉛の気体吸収特性の解明
- 固体ブランケットのペブル充填層伝熱の大規模計算の実施
- ペブル充填層における構造テンソルによる有効熱伝導率モデルのさらなる検討
- ダイバータにおける伝熱挙動の解明



まだまだ課題が山積み

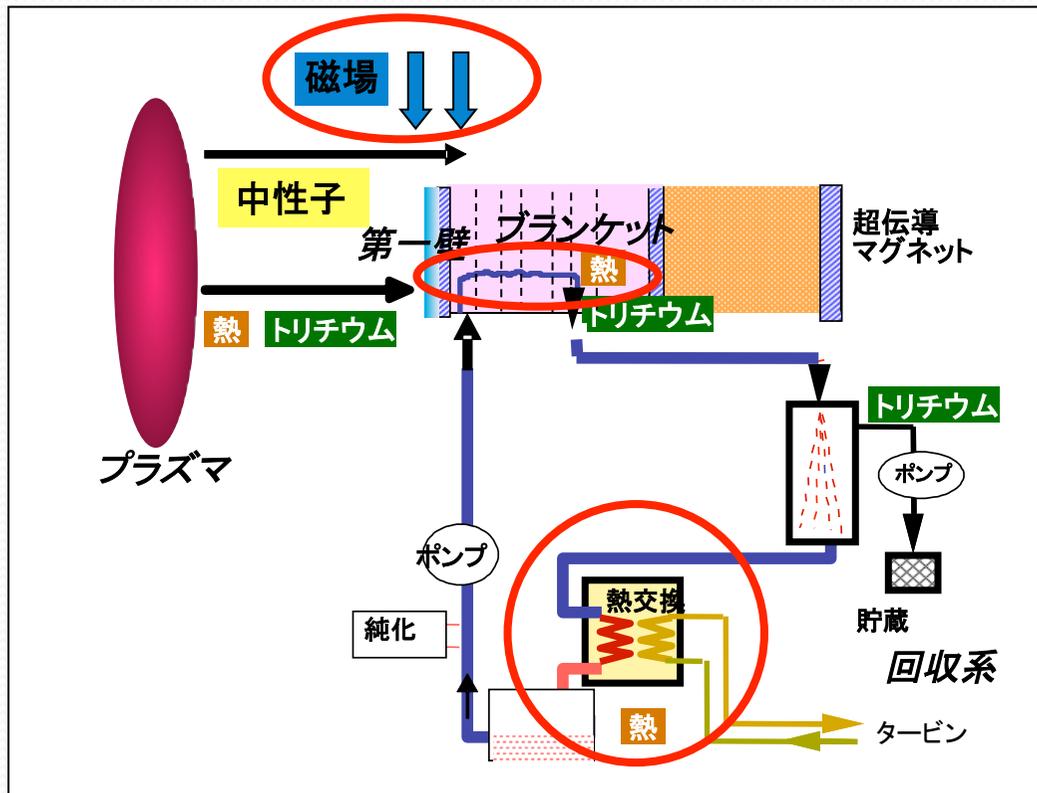
ブランケットの課題解決に向け今後も日米で協力し研究





Back Up

TITAN計画(2007-2012)



1-1 第一壁トリチウム・物質移行

1-2 ブランケットトリチウム移行

1-3 熱流動制御とモデリング

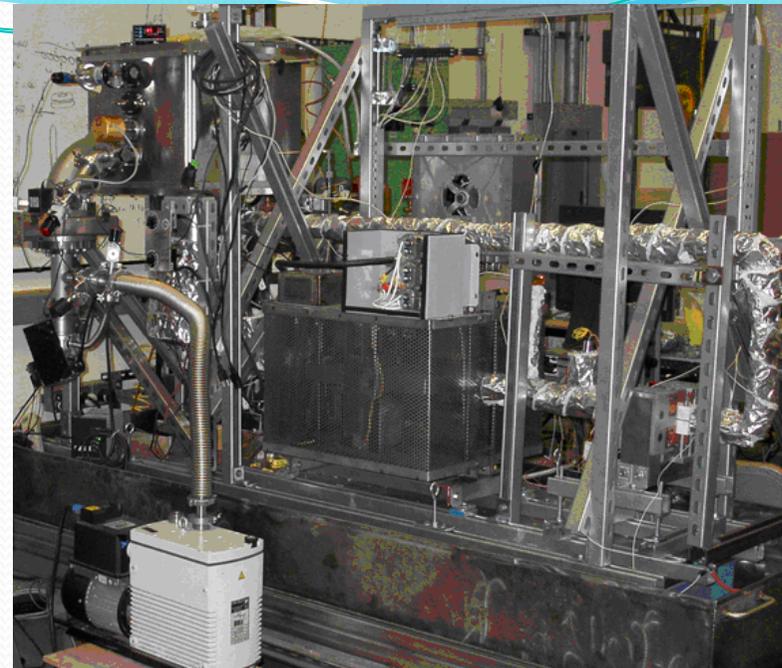
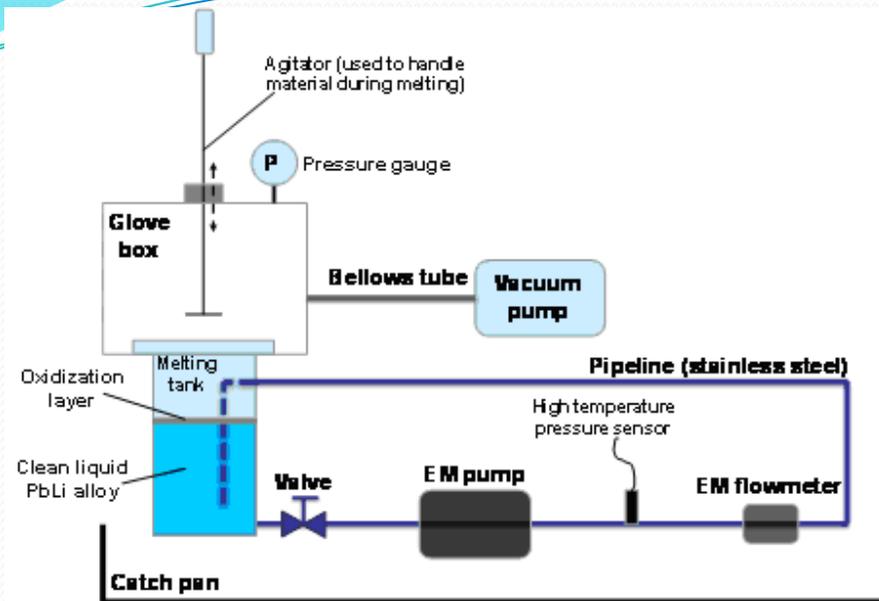
2-1 照射・トリチウム複合効果

2-2 接合・被覆システムの健全性

2-3 動的変形挙動

MFE/IFE システム統合モデリング

電磁ポンプの性能試験装置の設置



リチウム鉛溶融前

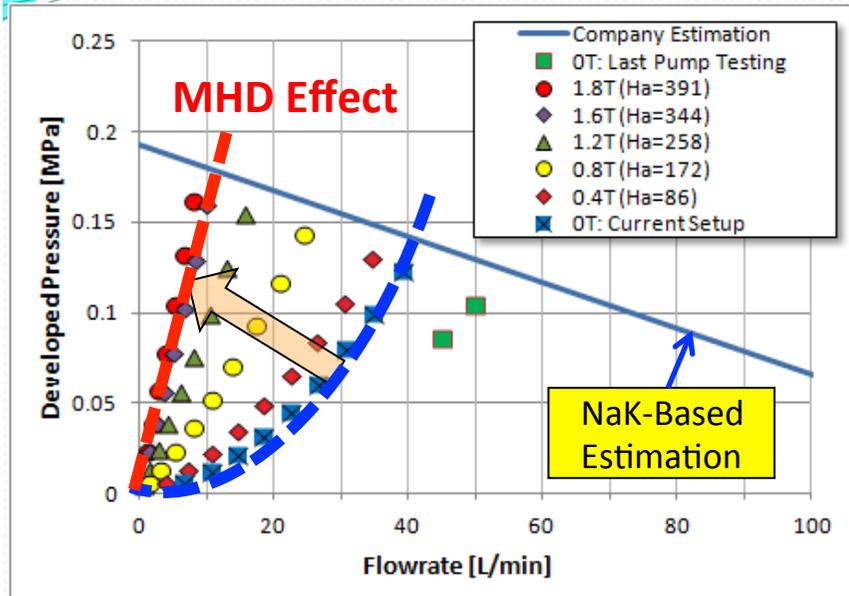


溶融時に激しい脱気泡を確認
(真空環境下で溶融)



リチウム鉛全量溶融後

電磁ポンプの性能試験の結果



Testing the EM pump
(Flowrate versus Pressure)

$$\Delta p = \Delta p_{\text{hydrodynamic}} + \Delta p_{\text{EMF}} + \Delta p_{\text{MHD}}$$

$$\Delta p_{\text{hydrodynamic}} = \frac{\rho u^2}{2} \left\{ \lambda \frac{l}{d} + \zeta_{\text{bends}} + \zeta_{\text{expansion in M.T.}} \right\}$$

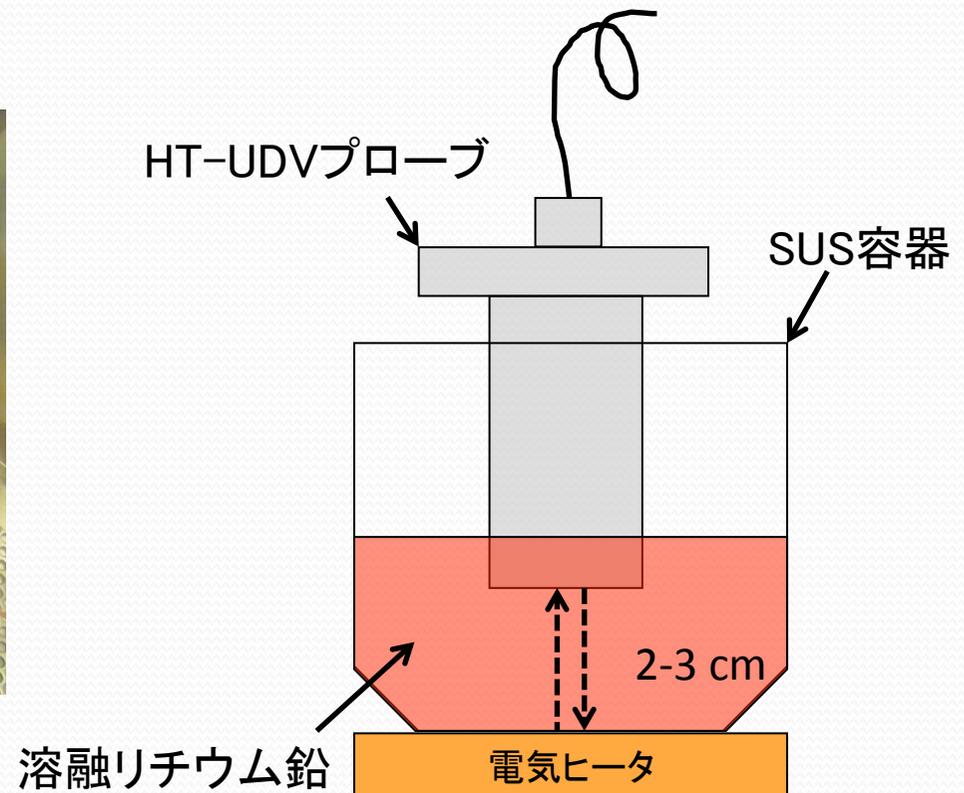
$$\Delta P_{\text{MHD}} = \underbrace{\left(\frac{C}{1+C} \right) \sigma_f u B^2 L_{\text{Bfield}}}_{\text{Main MHD Pressure Drop}} + \underbrace{kN \frac{1}{2} \rho u^2}_{\text{Effect of Fringing Magnetic Field}}$$

(ΔP_{EMF} is estimated by the same formula)

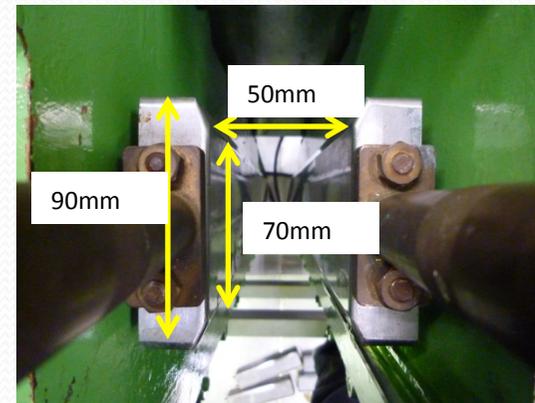
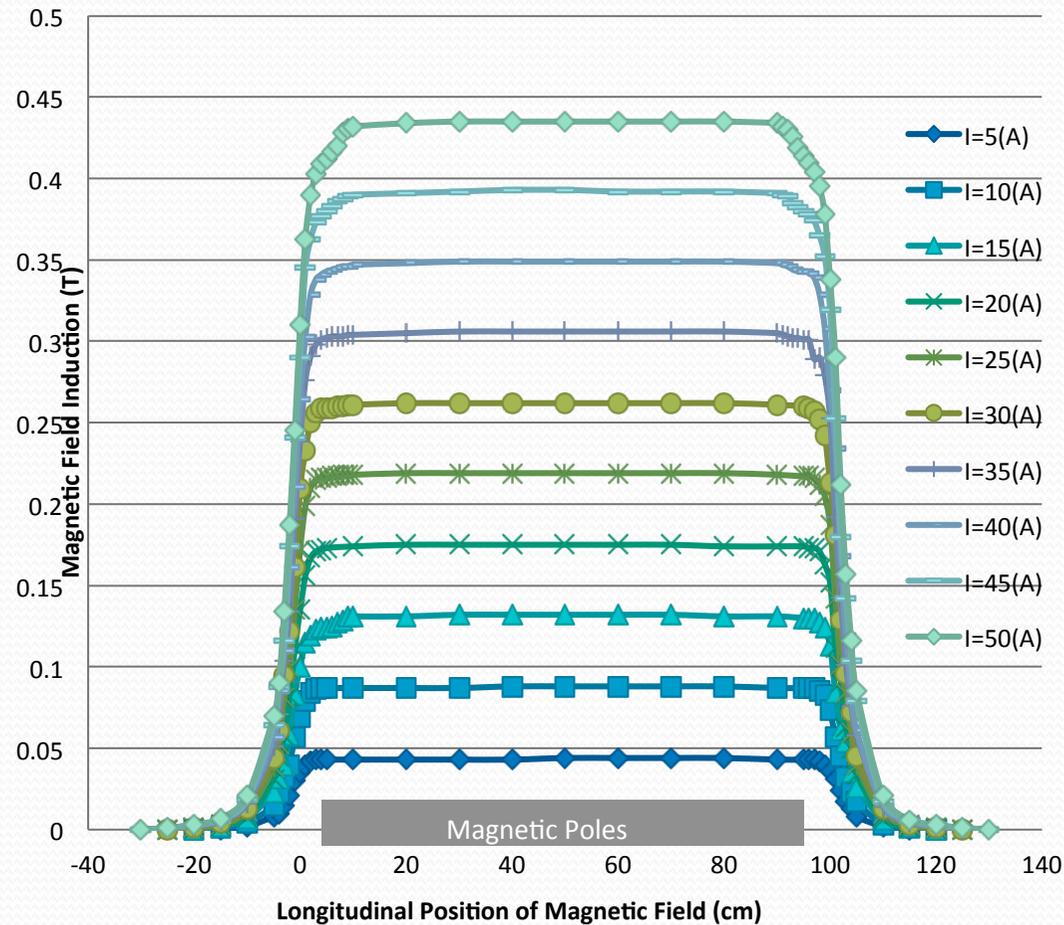
- 磁場B=1.8T 最大流量: 8 l/min 吐出圧:0.16 MPa
- MHD圧損の測定値は理論値と良好な一致
- 電磁ポンプの性能の把握
- 磁場1T以上の領域において、MHD効果が通常の流動抵抗よりも支配的

HT-UDV信号試験

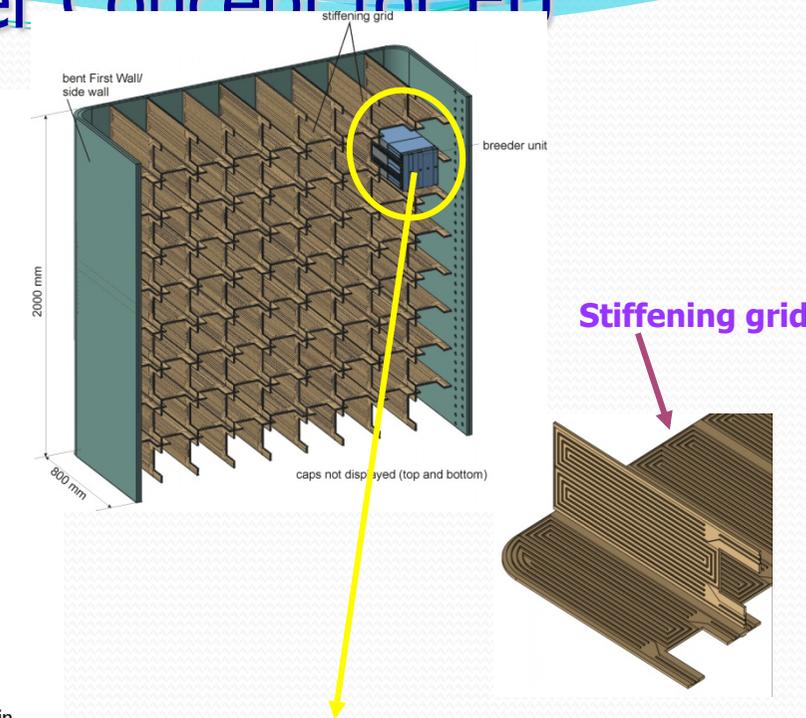
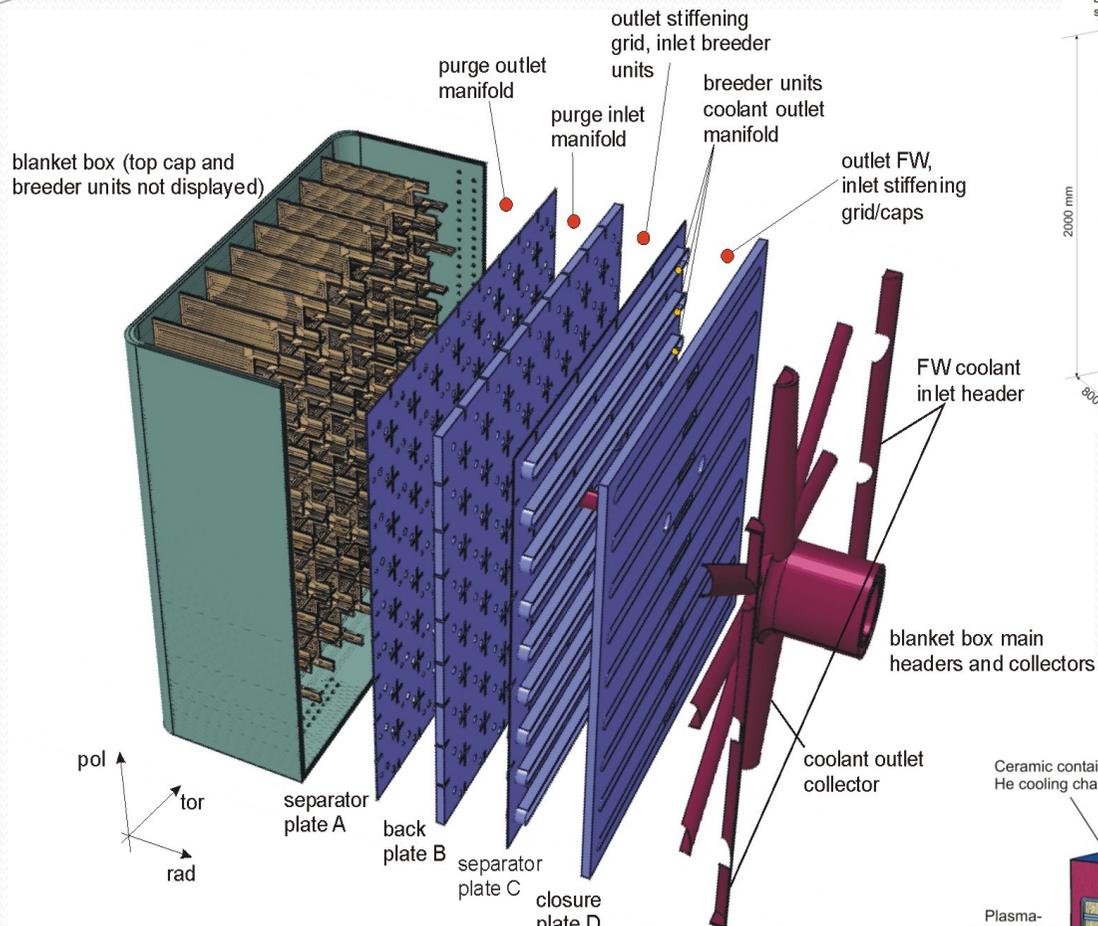
- 目視観察可能な不活性雰囲気グローブボックス内にて実施
- HT-UDVプローブから流体への超音波伝搬、超音波散乱トレーサ粒子、UDV計測ユニットの計測特性の違いなど各項目を順次確認



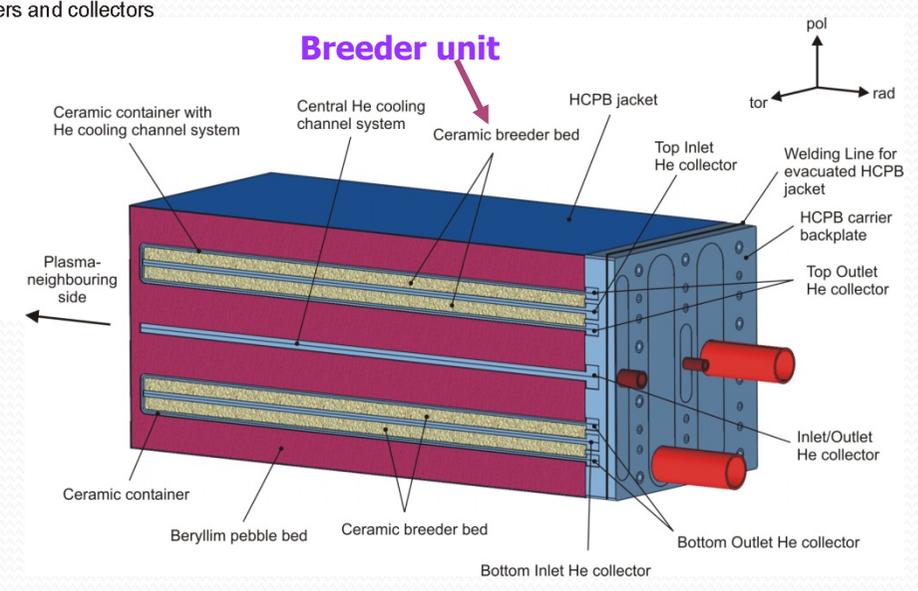
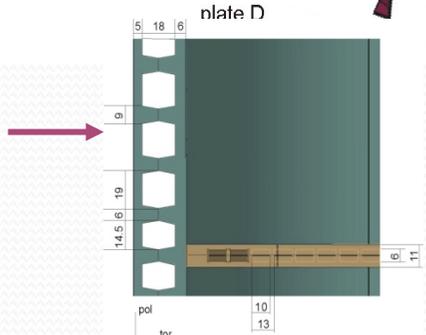
Magnetic Field Profile(D=50mm)



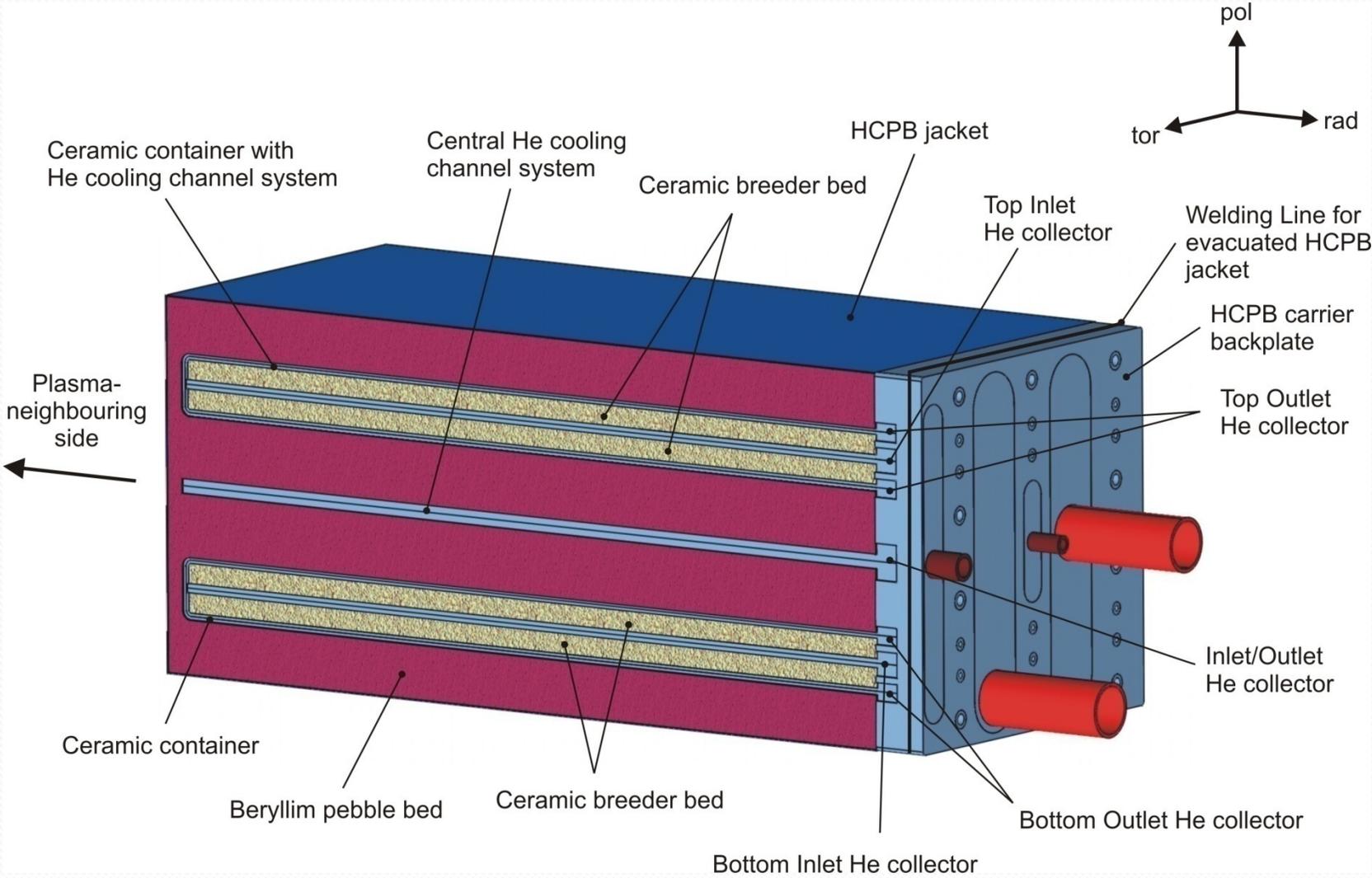
Helium-Cooled Pebble Breeder Concept for FI



FW channel

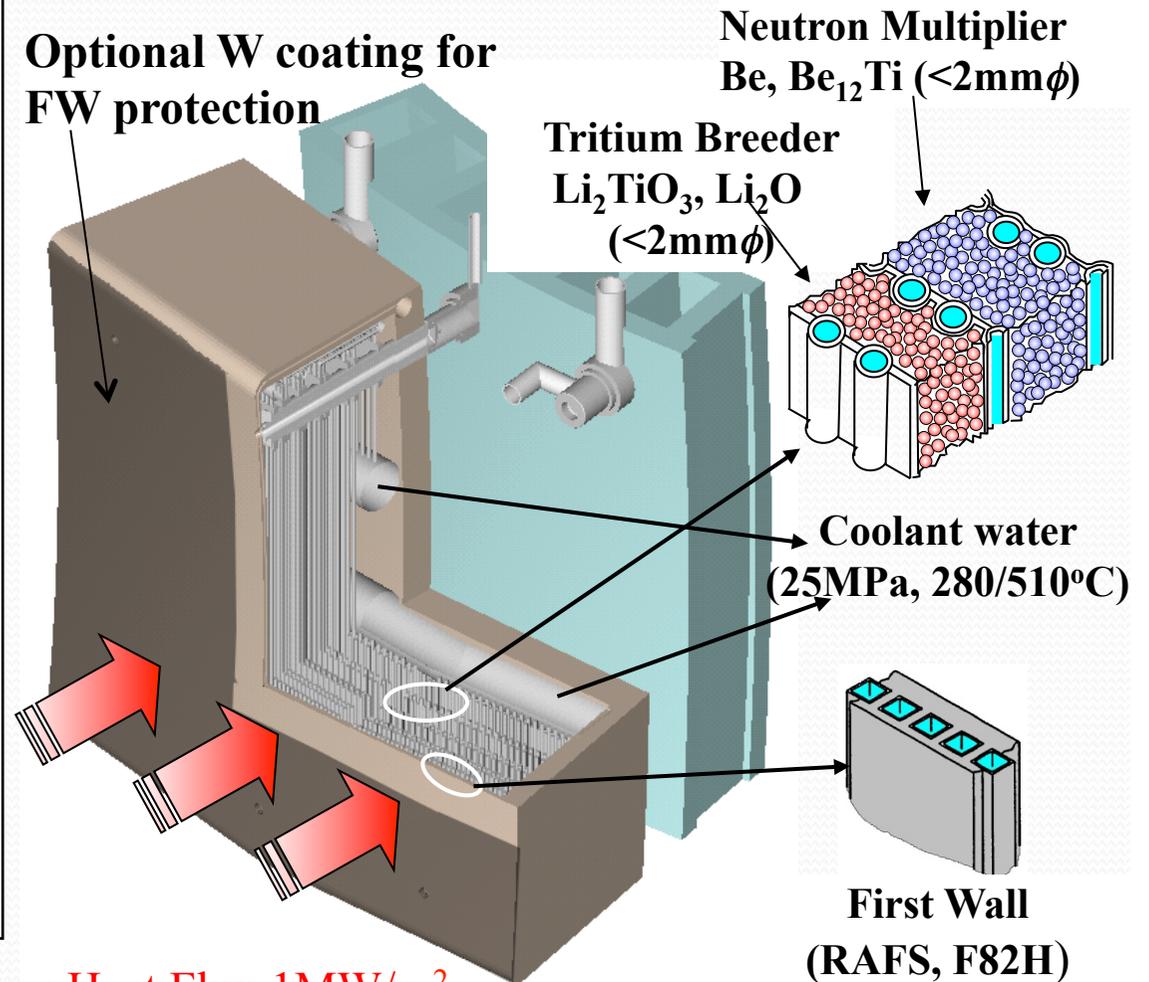


Breeder Unit for EU Helium-Cooled Pebble Bed Concept



JA Water-Cooled Solid Breeder Blanket Design

- Modular type, front access replacement on sight
- Box wall with embedded coolant channels
- Pebble bed type breeder and multiplier layers separate with cooling tubes and partition walls
- Supercritical Water for coolant (25MPa, 280-510°C)
- Coolant flow pattern to cool first walls first and, then, breeder and multiplier layers of multiple blanket modules



Surface Heat Flux: 1MW/m²

Neutron Wall Load: 5MW/m²(1.5×10¹⁵n/cm²s)

[M. Enoeda, et al., "Design and R&D results of Solid Breeder Blanket Cooled by Supercritical Water in Japan", FT/P1-08, Fusion Energy 2002 (Proc. 19th Int. Conf. Lyon, 2002) (Vienna:IAEA) CD-ROM file FT/P1-08 and <http://www.iaea.org/programmes/ripc/physics/fec2002/html/fec2002.htm>.

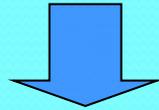
ペブル充填層伝熱の研究

local non-equilibrium thermal condition

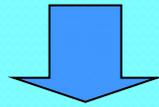
局所熱非平衡状態

有効熱伝導率の非等方性

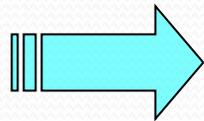
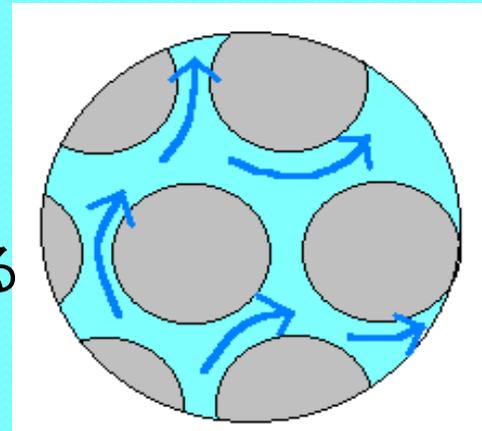
充填層内の速度場は構造に依存し、かなり複雑



粒子・流体間の熱伝達を介して熱非平衡性を強める



速度場の非一様性が有効熱伝導率の非等方性に影響する!!



速度場の複雑性

+

局所熱非平衡状態

有効熱伝導率の非等方性

の寄与を考慮できるモデルの構築

ペブル充填層伝熱の研究1

Thermo-mechanics of pebble bed

differential thermal expansion between the beds and the structures (“interference”)

elastic & plastic deformations of PBs & structures

irradiation swelling

thermal creep

“bed ratcheting”

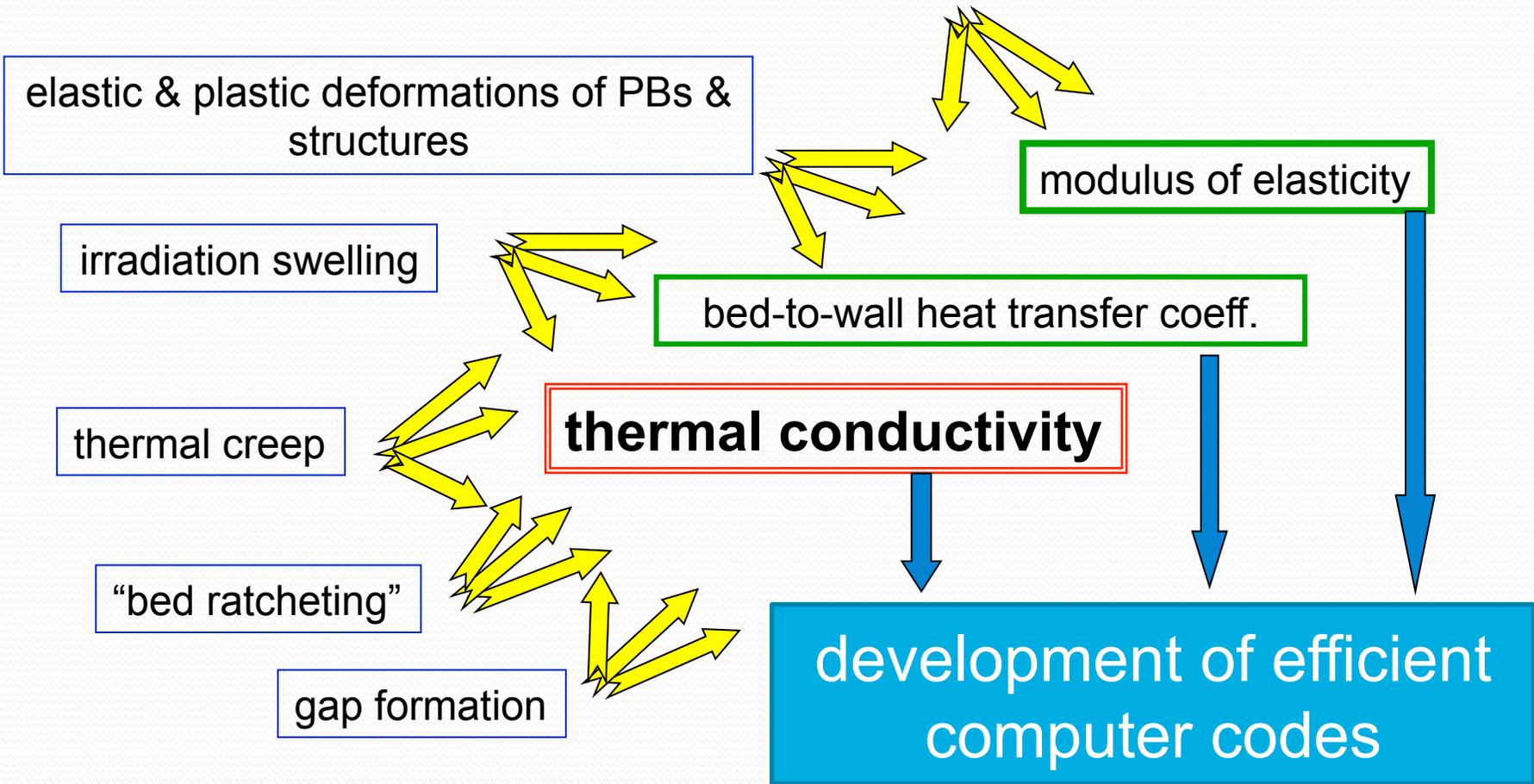
gap formation

modulus of elasticity

bed-to-wall heat transfer coeff.

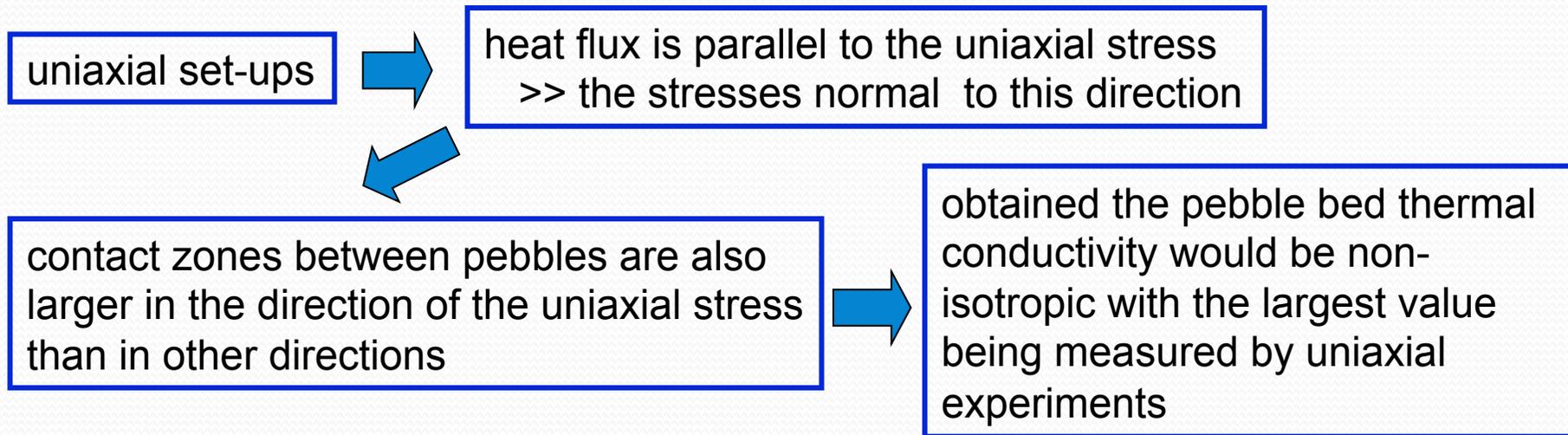
thermal conductivity

development of efficient computer codes



ペブル充填層伝熱の研究2

Conventional measured effective thermal conductivity



In the blanket, the situation is much more complicated

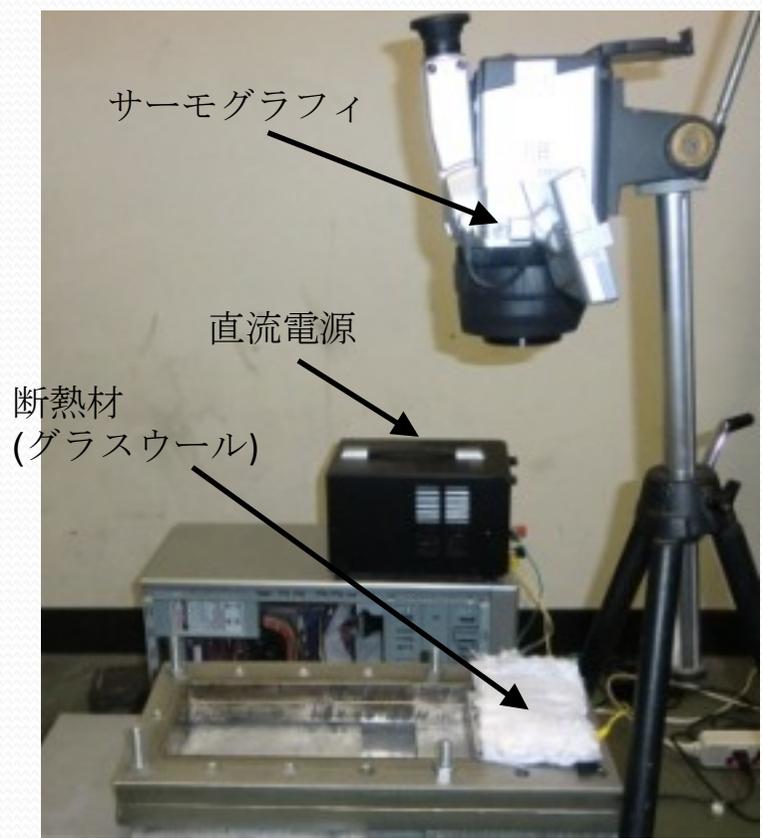
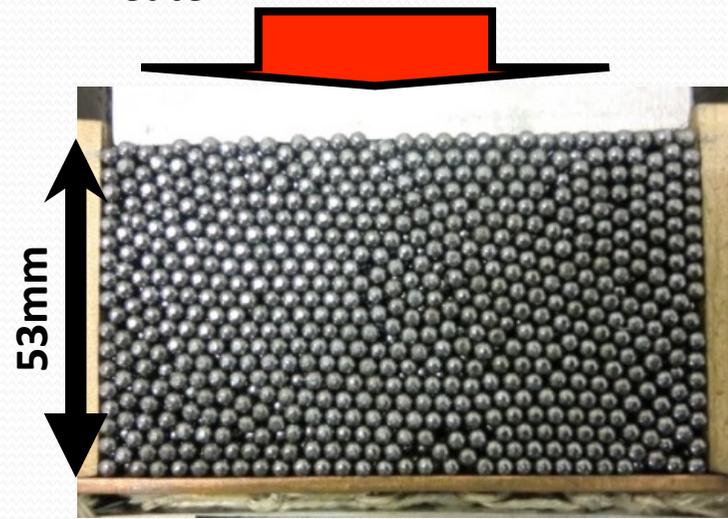
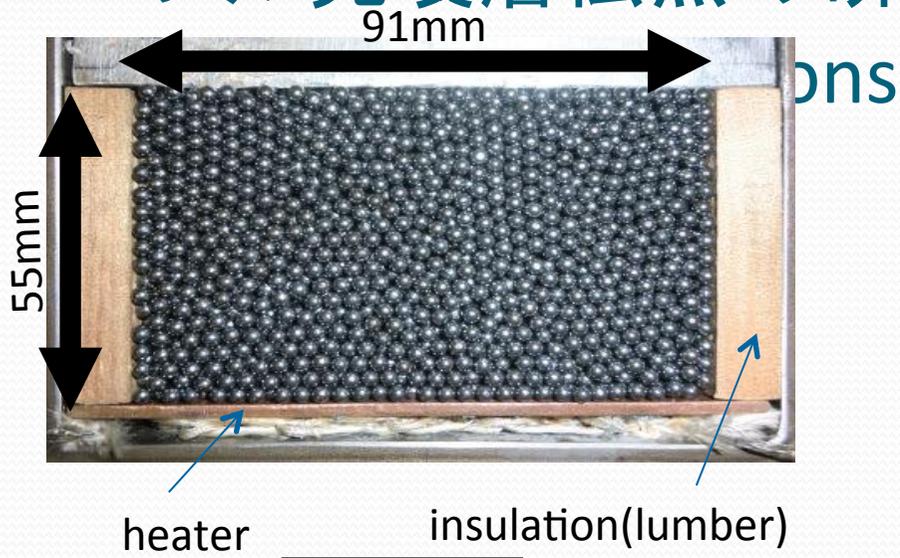
volumetric heat, temperature profile, geometry

$$\frac{k_s \cdot k_f}{\varepsilon \cdot k_s + (1 - \varepsilon) \cdot k_f} \leq k_{eff} \leq \varepsilon \cdot k_s + (1 - \varepsilon) \cdot k_f \Rightarrow \mathbf{k}_{eff}$$

有効熱伝導率→スカラー

有効熱伝導率→テンソル

ペブル充填層伝熱の研究6



ペブル充填層伝熱の研究

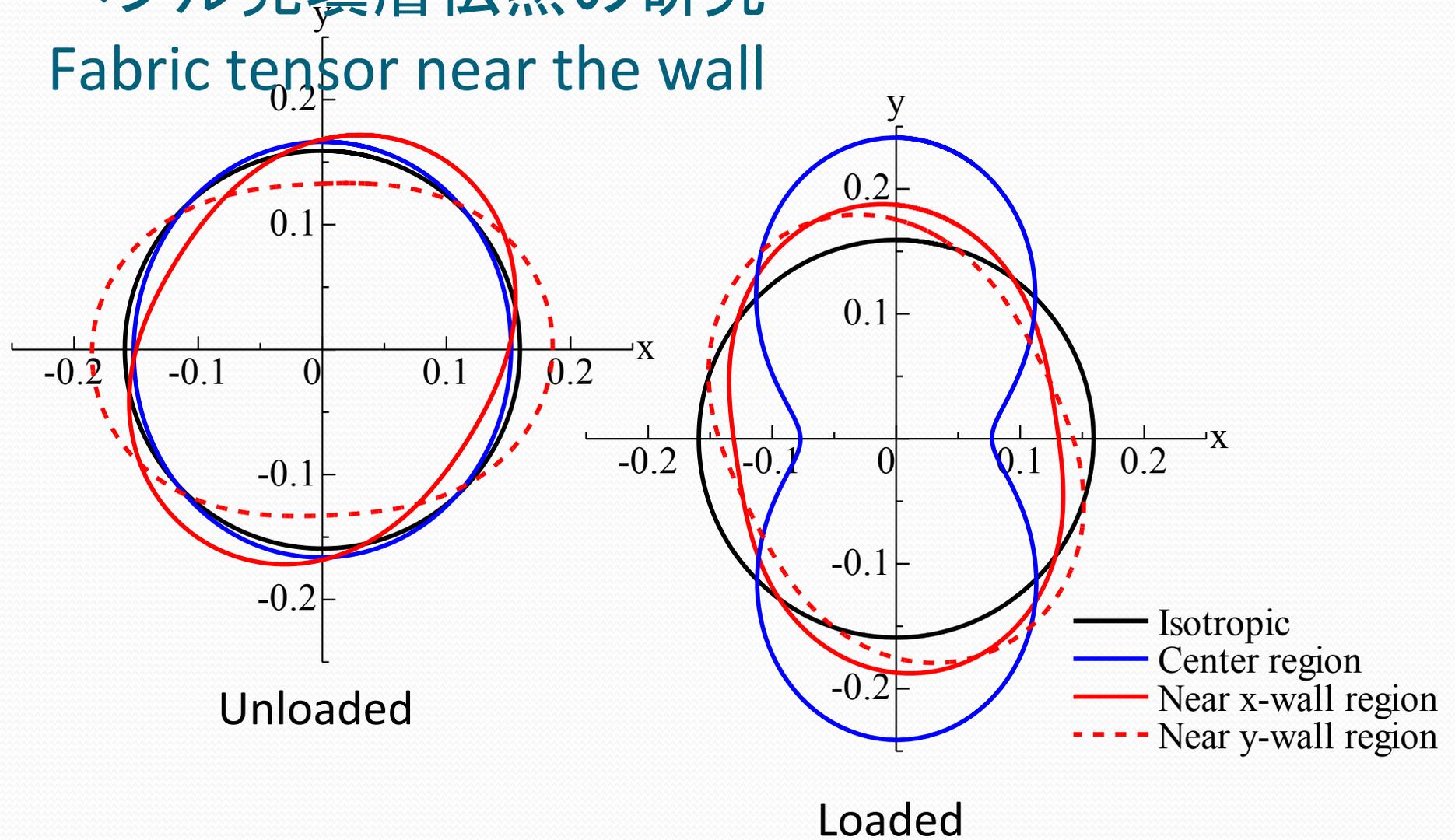
Anisotropic+non-equilibrium → Two Eq. Model

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon (\rho c_p)_f \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial t} + \varepsilon (\rho c_p)_f \langle u_j \rangle^f \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x_j} - (\mathbf{u}_{ff})_j \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x_j} - (\mathbf{u}_{fs})_j \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial x_j} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mathbf{K}_{ff})_{ij} \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x_j} + (\mathbf{K}_{fs})_{ij} \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial x_j} \right] + a_V h \left(\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f \right) \\
 & (1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial t} - (\mathbf{u}_{sf})_j \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x_j} - (\mathbf{u}_{ss})_j \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial x_j} \\
 &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mathbf{K}_{sf})_{ij} \frac{\partial \langle T_f \rangle^f}{\partial x_j} + (\mathbf{K}_{ss})_{ij} \frac{\partial \langle T_s \rangle^s}{\partial x_j} \right] - a_V h \left(\langle T_s \rangle^s - \langle T_f \rangle^f \right) + (1 - \varepsilon) \langle H \rangle^s
 \end{aligned}$$

K_{ss} : solid phase effective thermal conductivity tensor , K_{ff} : fluid phase effective thermal conductivity tensor, K_{fs} : fluid phase coupled thermal conductivity tensor

ペブル充填層伝熱の研究

Fabric tensor near the wall



ペブル充填層伝熱の研究

Measured fabric tensor

$$\left(k_{eff}\right)_{ij} = K \cdot F_{ij}$$

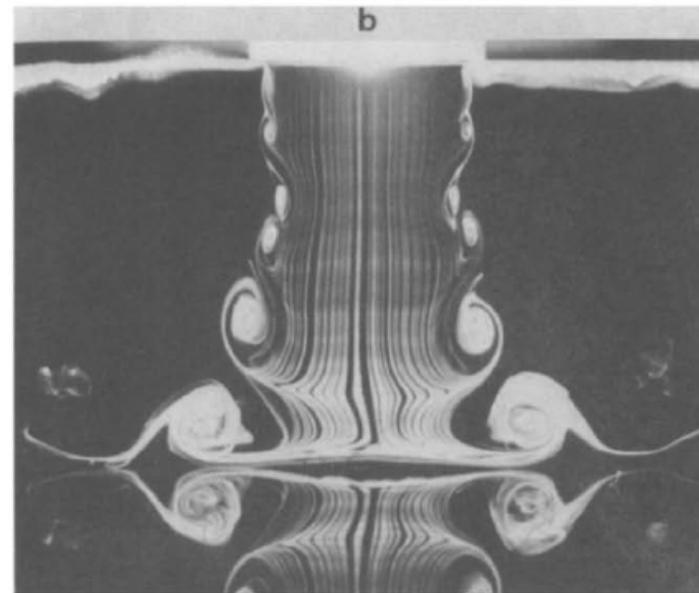
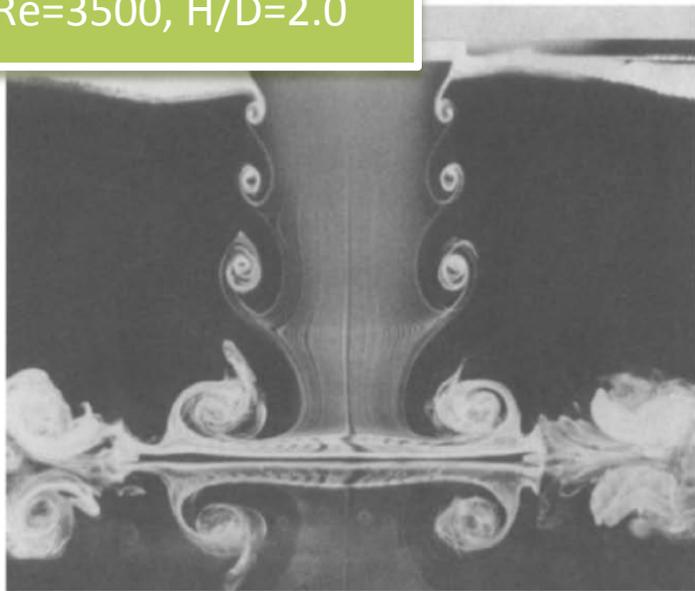
K is the function of particle properties and loaded pressure

| | F_{xx} | F_{yy} | F_{xy} | F_{yy}/F_{xx} | k_{yy}/k_{xx} |
|-------------------------|----------|----------|------------------------|-----------------|-----------------|
| Unloaded | 0.955 | 1.045 | 4.183×10^{-3} | 1.09 | 1.11 |
| Loaded | 0.485 | 1.514 | 3.724×10^{-3} | 3.12 | 2.90 |
| | | | | | |
| Unloaded Near x-wall | 0.943 | 1.057 | 0.123 | | |
| Unloaded Near y-wall | 1.165 | 0.834 | 1.502×10^{-2} | | |
| Loaded Near x-wall | 0.823 | 1.176 | 5.547×10^{-2} | | |
| Loaded Near y-wall | 0.897 | 1.103 | 0.140 | | |

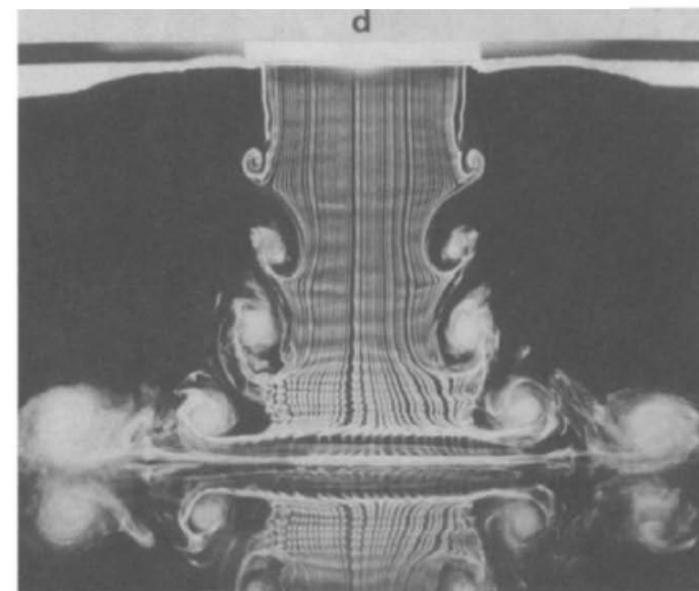
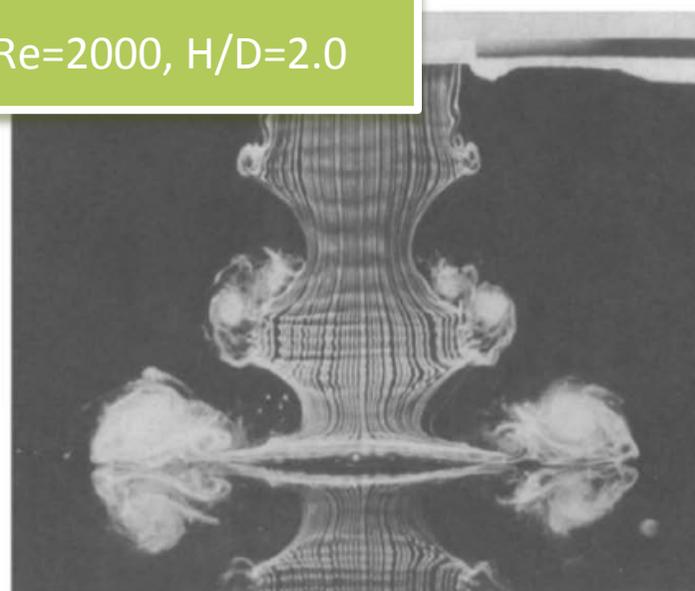
2. Heat Transfer Issues (impinging jet)

- Effective parameters
 - nozzle shape
 - nozzle-to-plate distance
 - jet Reynolds number
 - presence of external disturbances, such as cross-flow (scheme)
 - impingement surface shape (curvature, obliquity, fabrication)
 - ratio of jet temperature and ambient temperature
 - nozzle pitch

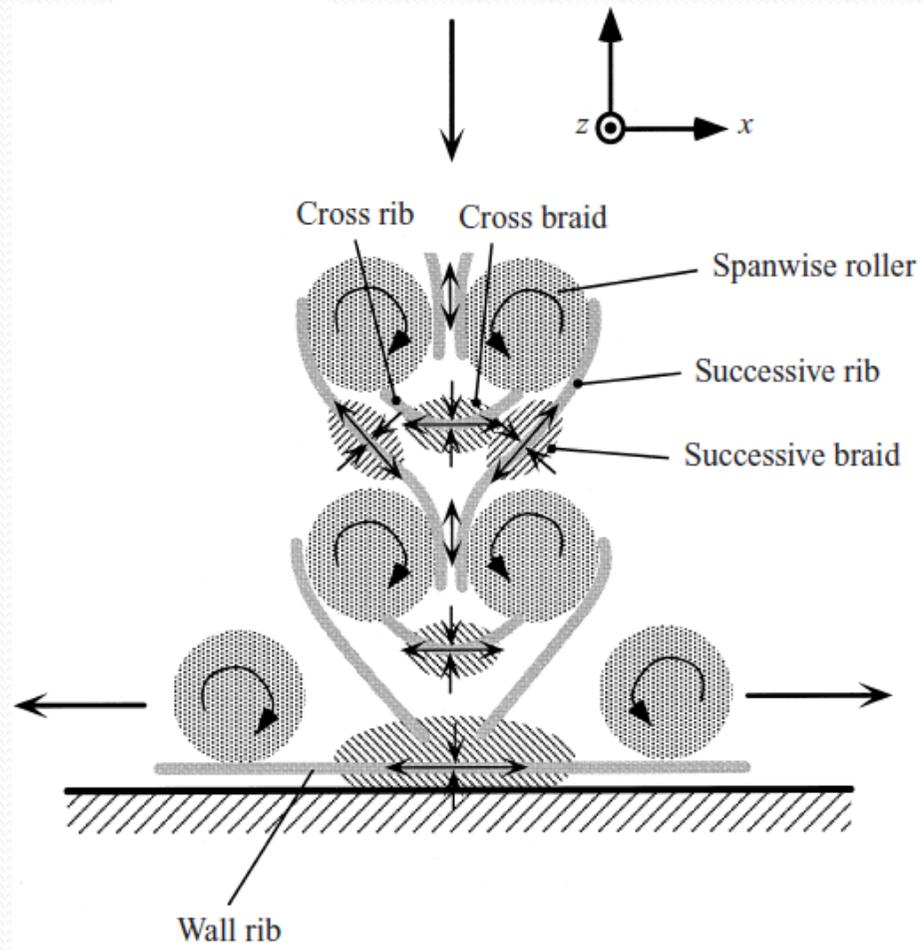
Re=3500, H/D=2.0



Re=2000, H/D=2.0



Impinging jet heat transfer



Effect of nozzle-to-plate space

- $H/B < 0.5$
 - よどみ点付近で極小値を取り、ノズル側壁付近($r/B=0.5$)で極大値を取る分布となる.
 - ノズル側壁付近で極大値を有するのは、ノズル側壁と衝突 壁面間で流体が縮流されることで噴流が加速し、局所的に温度境界層の厚さが薄くなるためである
 - 流動場は壁面 噴流となり、よどみ点近傍はノズル出口に形成される渦により複雑な流れとなっており、その特性はノズル側板の有無や大きさに依存する
- $0.5 < H/B < 7$
 - よどみ点近傍で形成された層流境界層が自由噴流の初期領域の強い乱れの影響を受けて乱流へ遷移し、乱流壁面噴流に移行する
 - よどみ点での熱伝達率最大値とその脇に第2の極大点を持つ
 - 熱伝達率分布に第2の極大点が生じる理由として、層流境界層から乱流境界層への遷移が生じていることや衝突噴流領域から壁面噴流領域へ移行し乱流レベルが上昇するためであることなどが挙げられる
 - この第2の極大点はノズル出口初期乱れ度が大きい場合やレイノルズ数が小さい場合は生じない
- $7 < H/B < 10$
 - よどみ点での熱伝達率は高いままで第2の極大点が明確でなくなる
 - Gardon&Akfiratは、 $H/B=5\sim 8$ で最大熱伝達率が得られ、その値はポテンシャル流れを仮定した層流理論解を80%程度上回ることを報告している
- $H/B > 10$
 - よどみ点から単調に減少する分布となり、衝突距離が大きくなるにつれて、壁面への噴流到達速度が減衰するために熱伝達率は減少していく

Rough estimation

- Single circular jet heat transfer

$$Nu_{stag} = 0.94 Pr^{0.4} Re_D^{0.5}$$

- $T_{in}=600^{\circ}\text{C}$, $P_{in}=10\text{MPa}$, $G_{\text{He}}=7.9\text{g/s}$ (25holes), $D=1.0\text{mm}$, $H/D=1.2$, $q_w=10\text{MW/m}^2$
- $Re_D=22100$, $U_{jet}=165\text{m/s}$ ($M=0.1$), $Nu_{stag}=117$,
h.t.c.= $38,583\text{W/m}^2\text{K}$, $\Delta T=259\text{K}$ ($T_w=859^{\circ}\text{C}$)
- $Re_D=30000$, $U_{jet}=224\text{m/s}$ ($M=0.13$), $Nu_{stag}=136$,
h.t.c.= $44,953\text{W/m}^2\text{K}$, $\Delta T=222\text{K}$ ($T_w=822^{\circ}\text{C}$)

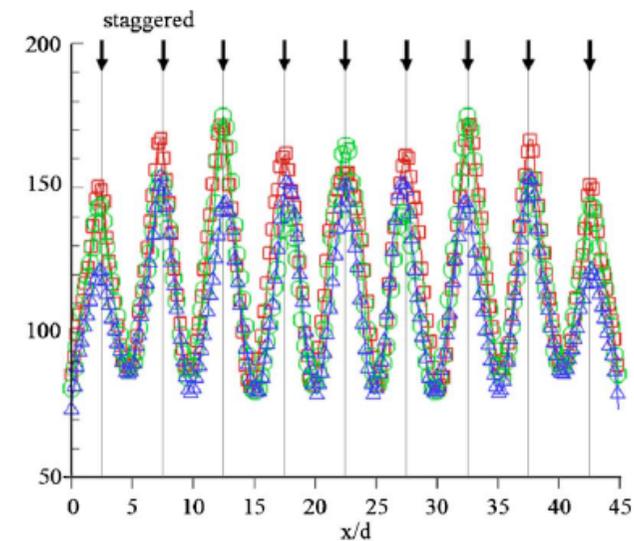
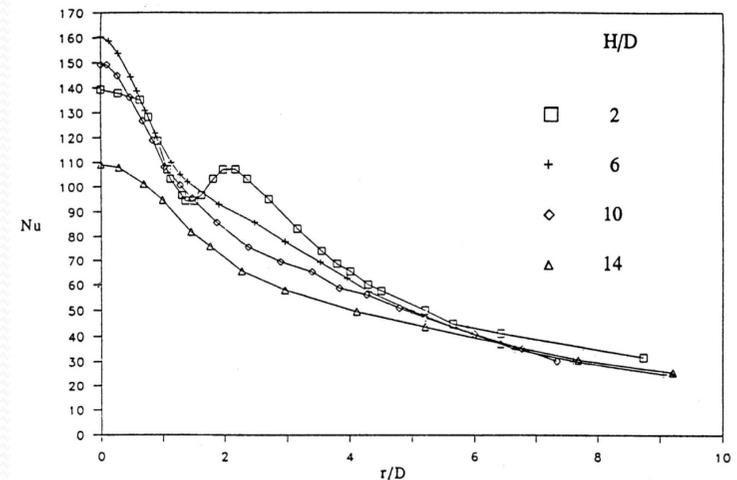
Expected issues

- Very restricted heat removal area
- Flow instability due to non-uniformity of ejected mass flow
- Predicted tool (standard k- ϵ model or SST model)
 - Anomaly
- Laminarization (laminariscent)

$$K = \frac{\nu}{u^2} \frac{du}{dx} = 1.8 \times 10^{-6}$$

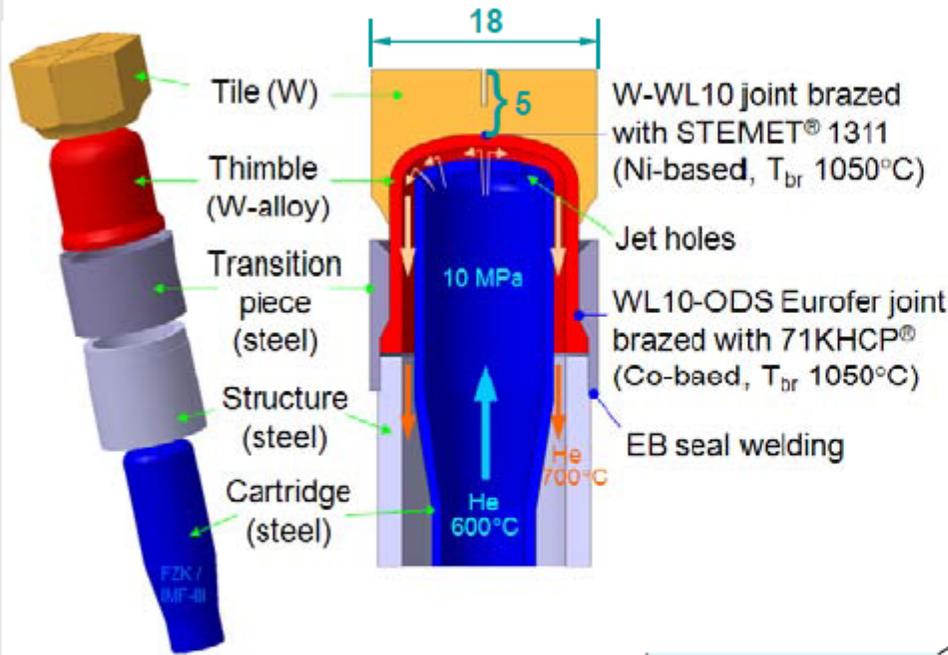
$$K = \frac{4q_i^+}{\text{Re}} \frac{T_i}{T_m} = 1.5 \times 10^{-6}$$

$O(10^{-5})$

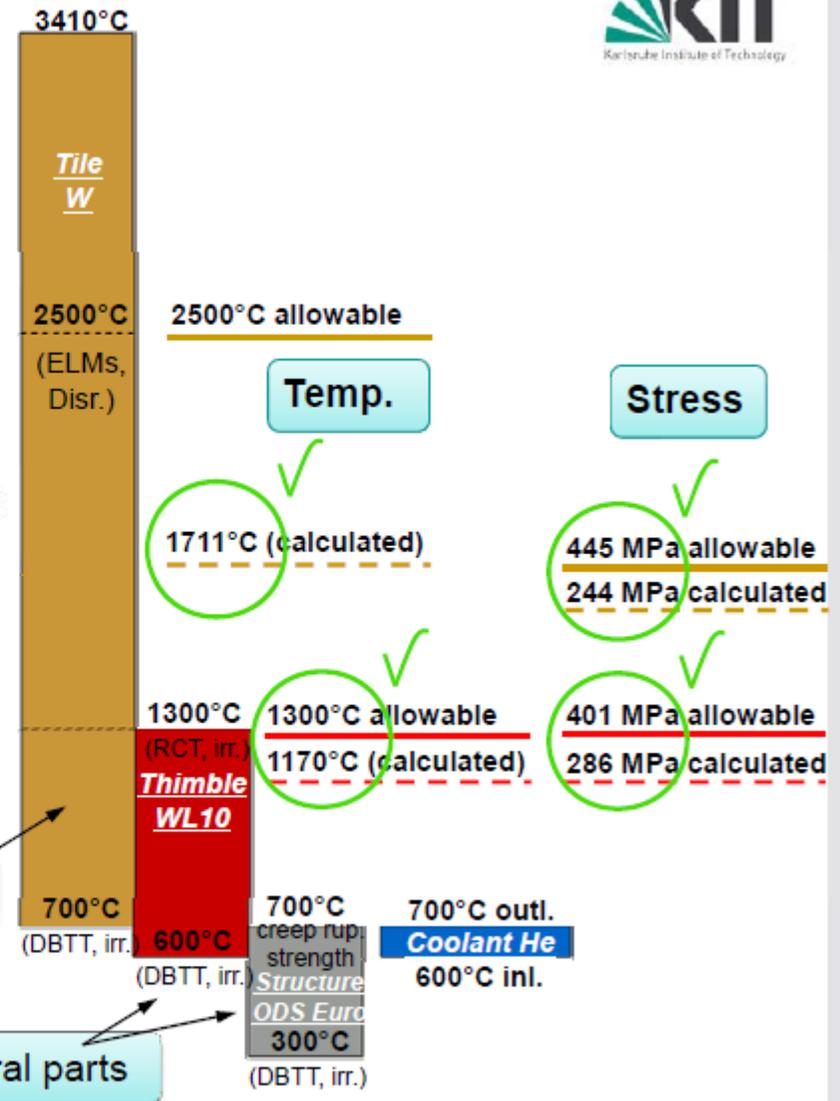


The reference design

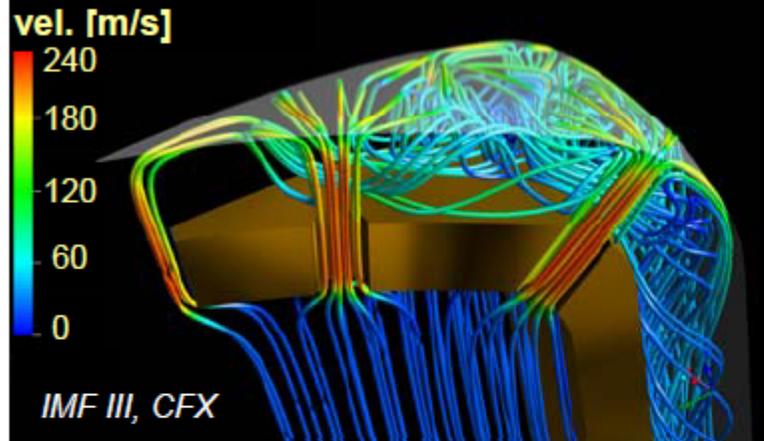
Design temperature windows



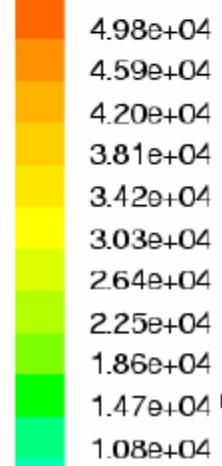
- Layout reference case
- 10 MW/m²
- mfr 6.8 g/s per finger
- pumping power ≤ 10%Q_{removal}



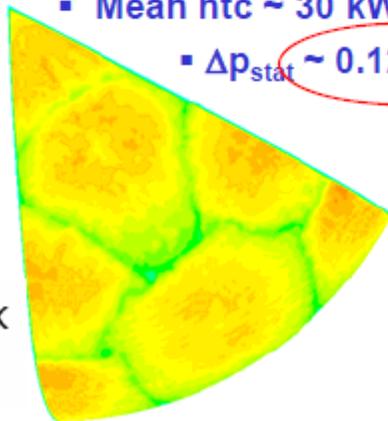
He stream lines & velocities



htc [W/m²K]

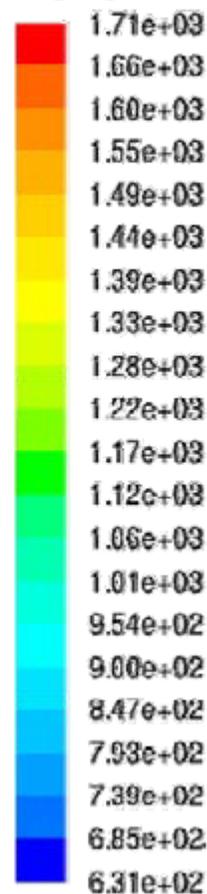


- Max. He velocity ~ 240 m/s
- Mean htc ~ 30 kW/m²K
- $\Delta p_{stat} \sim 0.12$ MPa



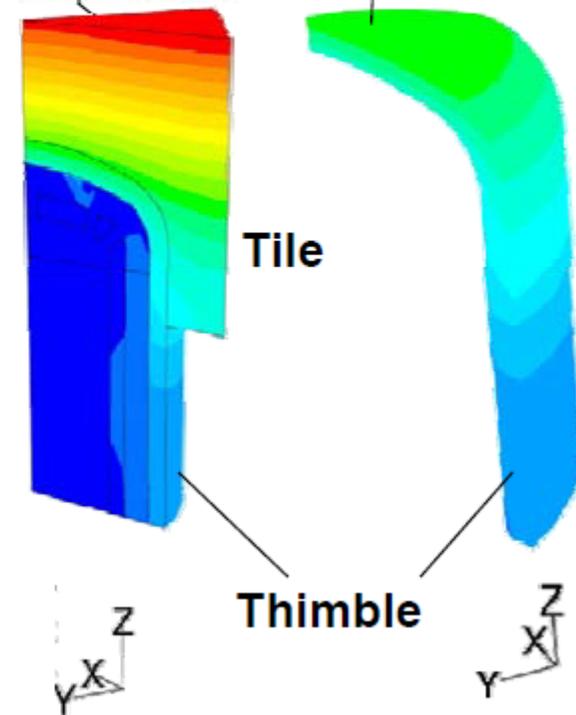
Temperature distribution

T [°C]



T_{max} 1710 °C
(<2500 °C)

T_{max} 1170 °C
(<1300 °C)



[R. Kruessmann]

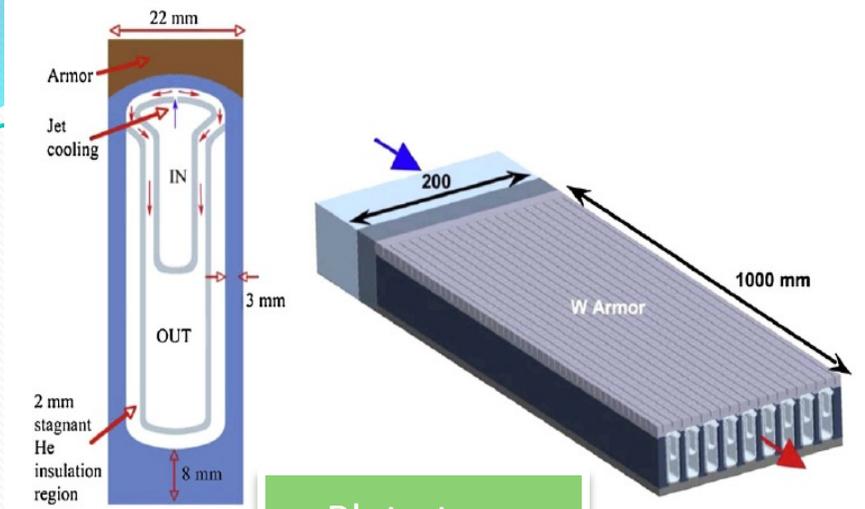
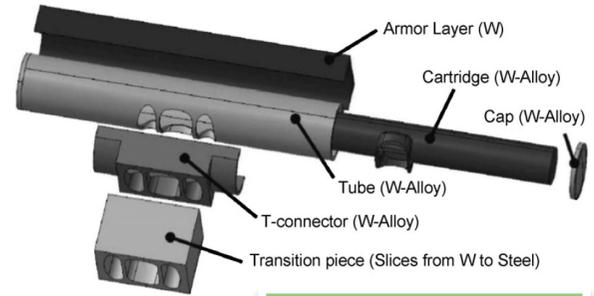
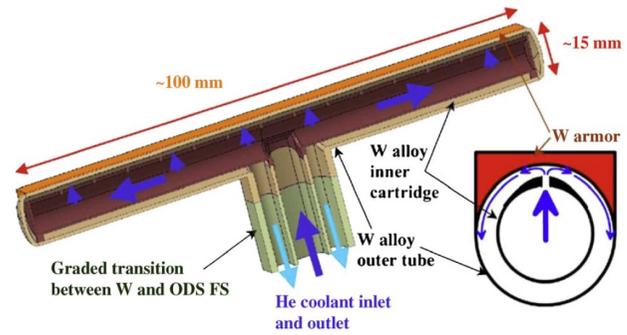
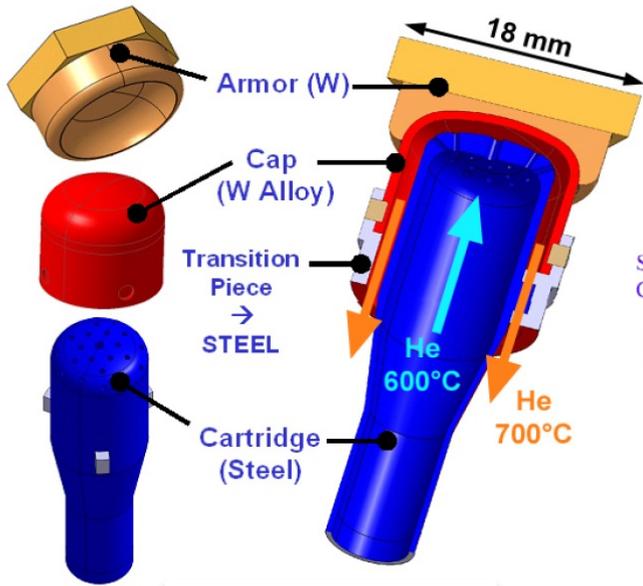


Plate type

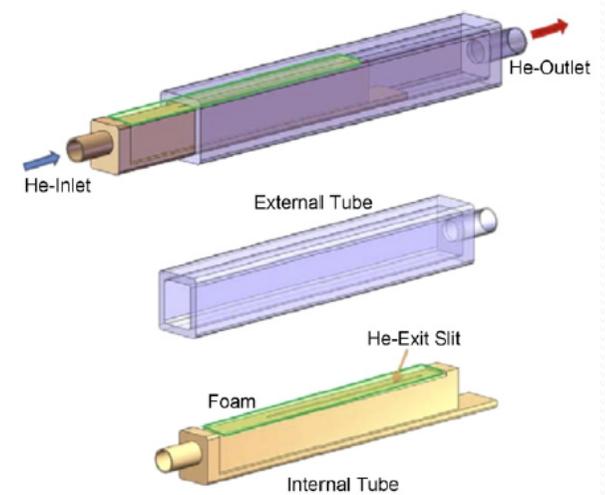
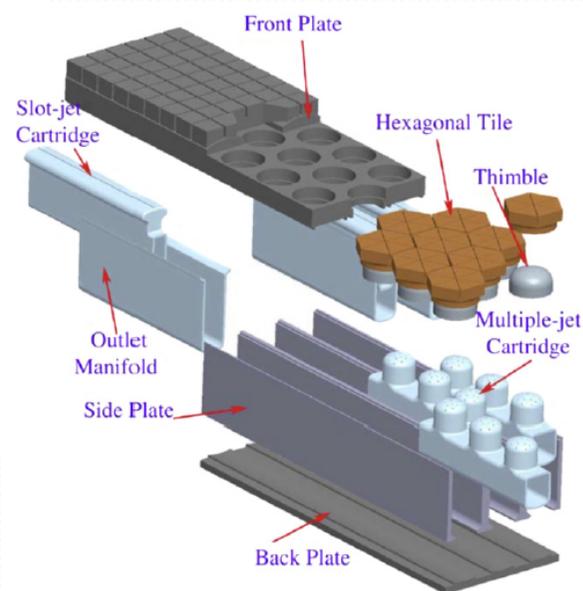


T-tube type



Finger type (HEMJ)

Integrated type



Form-in-tube type