

SANI2023 成果報告

派遣先：マサチューセッツ工科大学, Nuclear Science & Engineering

派遣期間：2023/9/2～2023/12/27

研究題目：磁場閉じ込め型核融合炉液体ブランケットにおける
液体金属MHD流れの乱流現象に関する研究

東京工業大学
工学院機械系原子核工学コース
近藤研究室 博士後期課程1年
西尾 龍乃介



派遣先研究室の概要



Massachusetts Institute of Technology (MIT) Nuclear Science & Engineering (NSE)



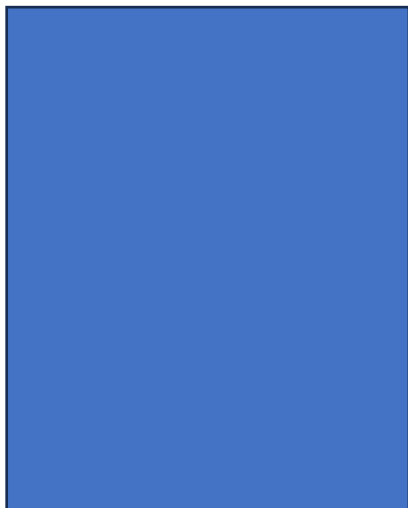
研究室があったNuclear Reactor Laboratory
の入り口



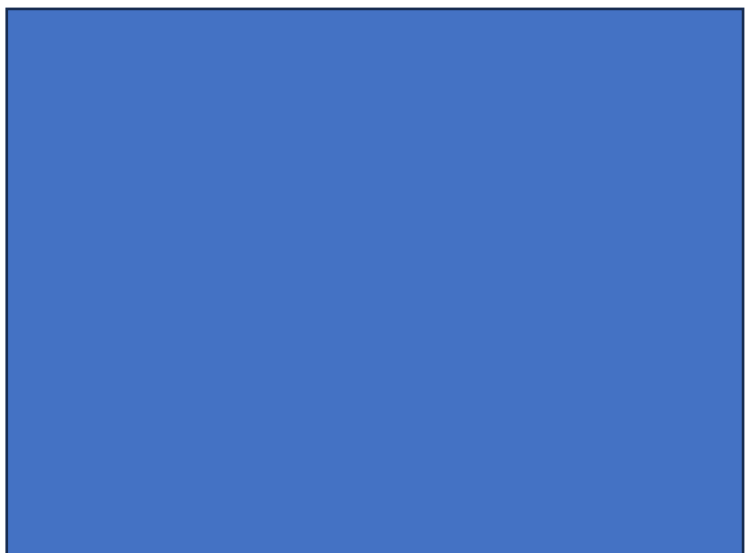
1998年にノーベル物理学賞を受賞した分数量子ホール効果の研究はNSEの建屋で行われた

研究グループについて

Prof. Emilio Baglietto



Baglietto先生は
東京工業大学で
博士号を取得した



研究室メンバーでご飯に行った時の様子

研究グループのメンバー：10人程度
(修士・博士が多数、共同研究先企業
の研究者もいた)

研究テーマ：計算流体力学 (CFD)、乱
流モデリング、非定常乱流現象、気液
二層流

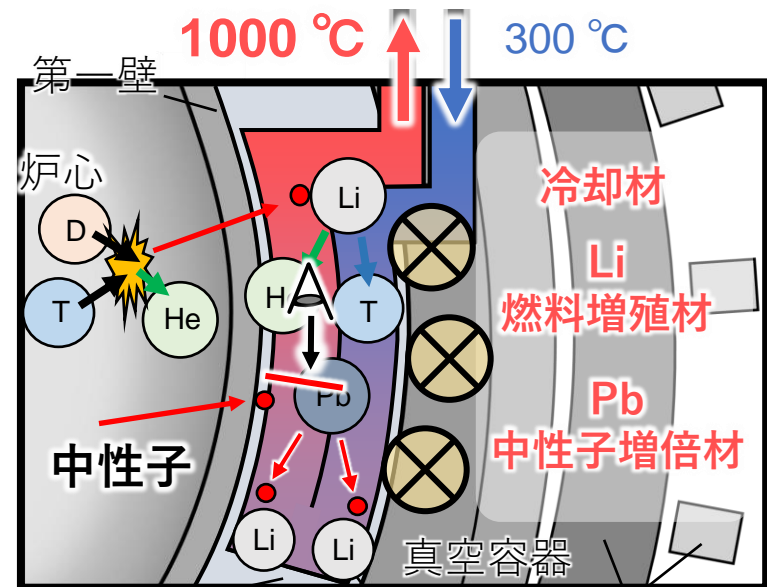
沸騰水型軽水炉 (BWR) やロケットのエ
ンジンなど、様々なプラントにおける
熱流体現象について、CFDを用いて現
象をモデル化し取り組んでいる

研究内容について



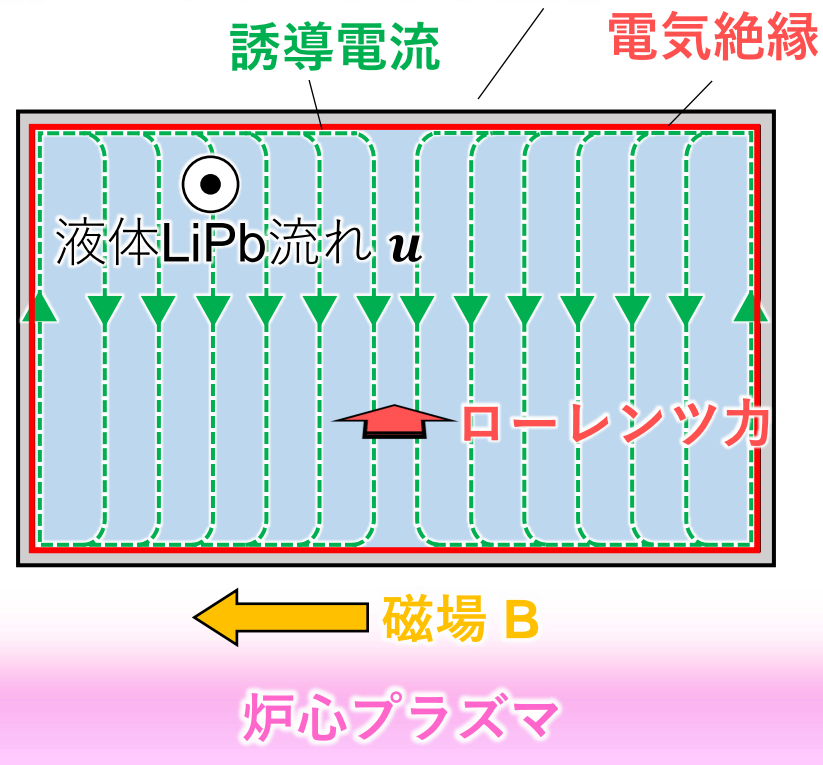
磁場閉じ込め型核融合炉 液体リチウム鉛合金 (LiPb) ブランケット

1. 燃料増殖
2. 中性子遮蔽
3. 熱エネルギーの回収



ブランケット 液体LiPb 超電導コイル
 プラズマ閉じ込めの
 強磁場 (10 T)

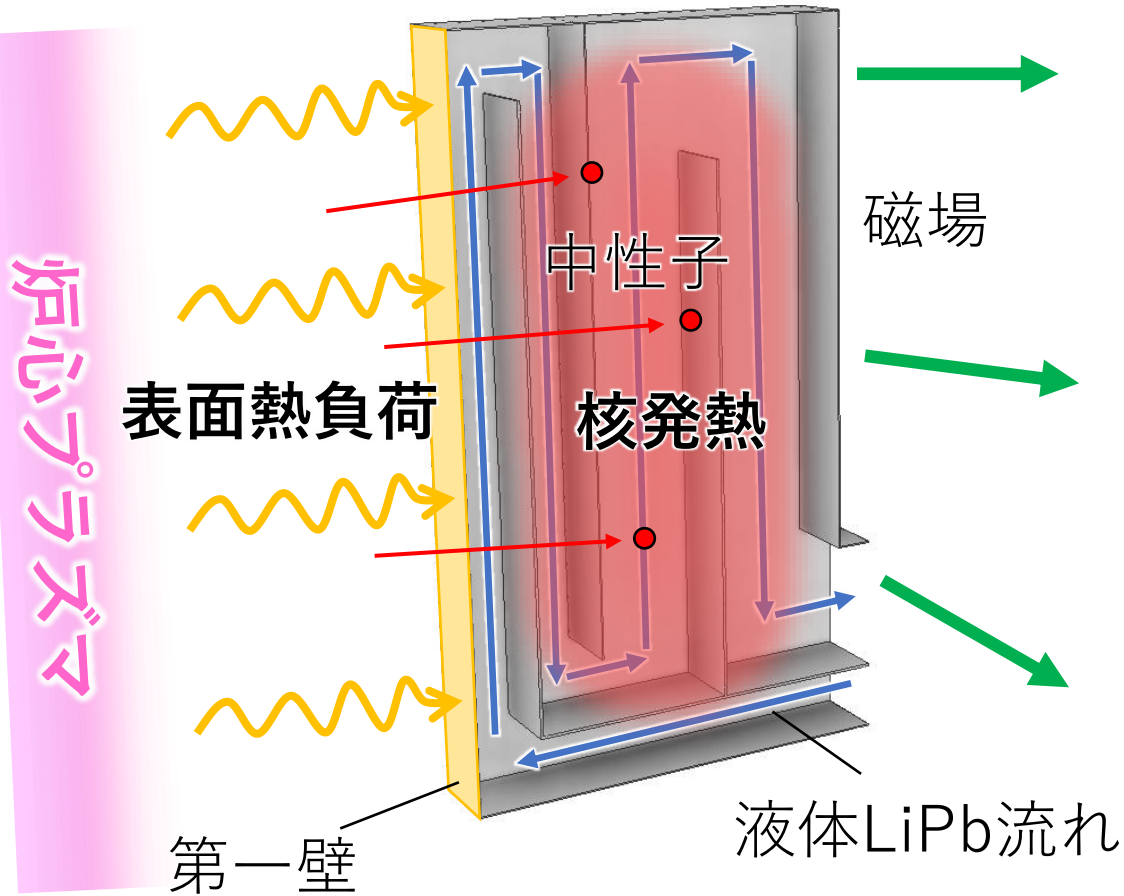
液体LiPbブランケット流路



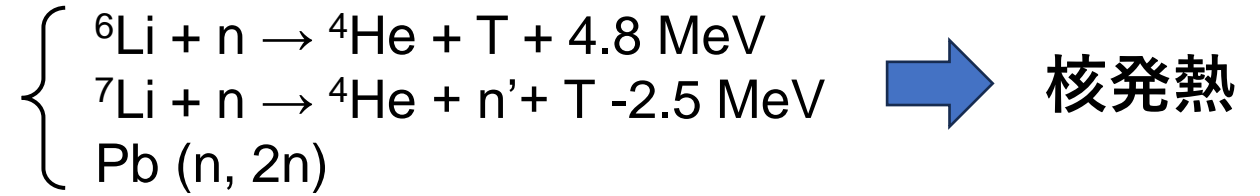
電磁流体力学

Magnetohydrodynamics (MHD)

液体LiPbブランケットにおける熱エネルギー回収



ブランケット内で発生する中性子との核反応



表面熱負荷と核発熱を同時に
処理しなければならない

乱流現象

→ 熱・物質輸送に大きな影響を与える

→ ブランケットの熱輸送性能の評価には
乱流を考慮することが必須

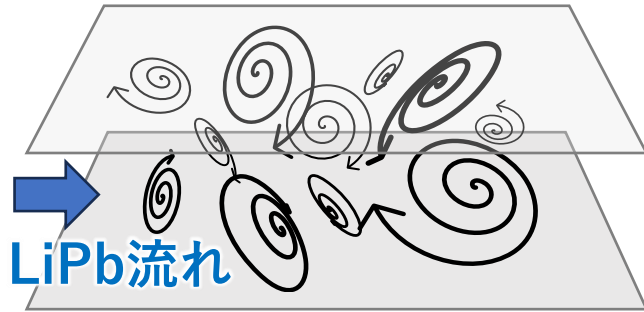
液体LiPbブランケット構造の例

液体LiPbブランケットの乱流現象

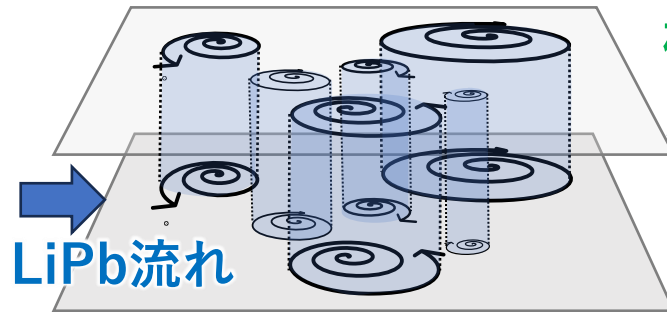
- 磁場の効果をうけた乱流 (MHD乱流) は非磁場下と大きく異なる

ハルトマン数 $Ha = \sqrt{\frac{\text{(電磁力)}}{\text{(粘性力)}}}$ Ha 大 \rightarrow 磁場 強

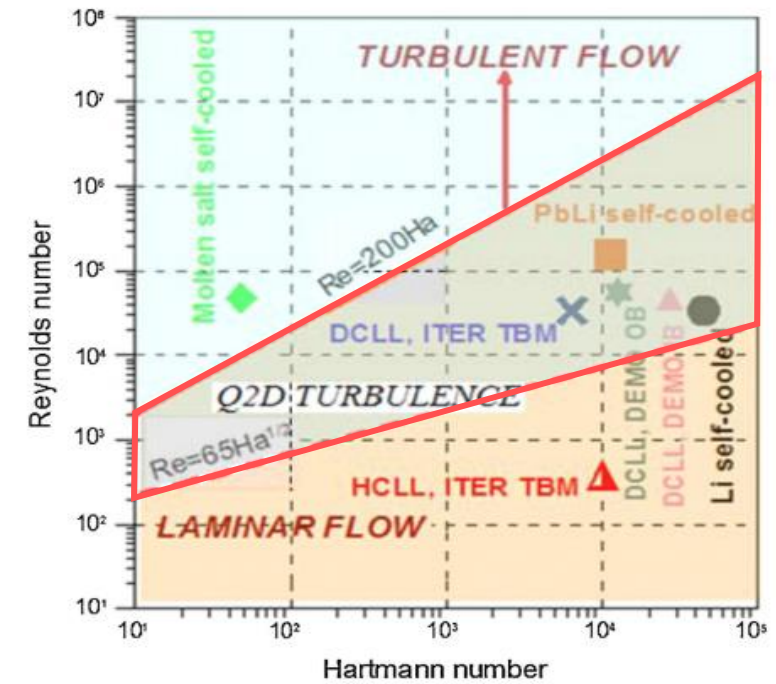
核融合炉液体ブランケットでは、**準2次元 (Quasi-2D; Q2D) 乱流**の領域に属する



3D乱流



Q2D乱流



S. Smolentsev et al., An approach to verification and validation of MHD codes for fusion applications, Fusion Eng. Des. 100 (2015) 65-72.

二次元的なMHD乱流の特徴をCFDに組み込むモデルが研究されている
 \rightarrow 自分のCFD解析目的に合ったモデルを用いる必要がある

研究の目的

CFDを用いた液体LiPbブランケットの熱輸送性能評価に適したMHD乱流モデルを調査・改良する

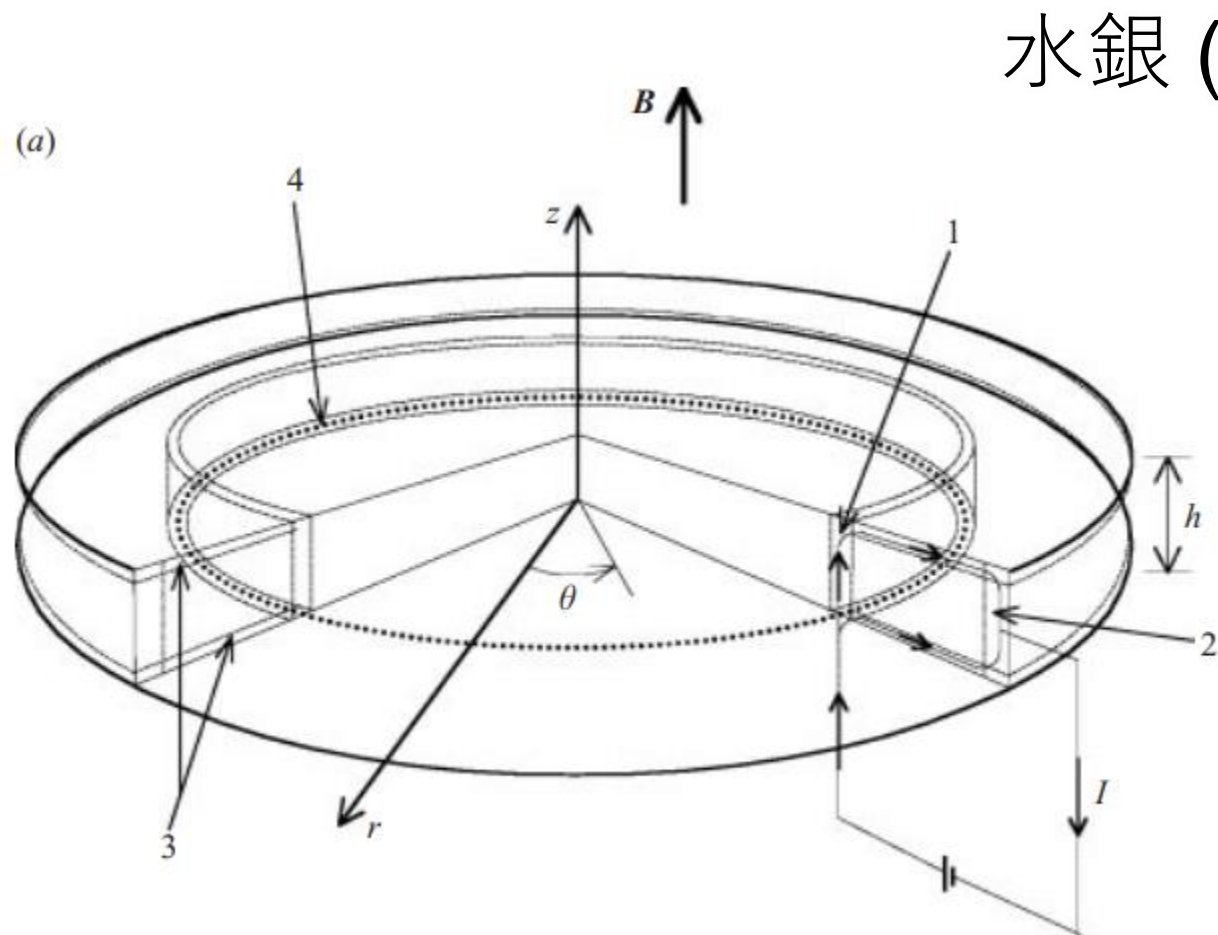
研究内容

1. 液体金属MHD流れCFD解析の妥当性検証
2. **MHD乱流モデルの改良**
3. 液体LiPbブランケット流路における
熱輸送性能評価

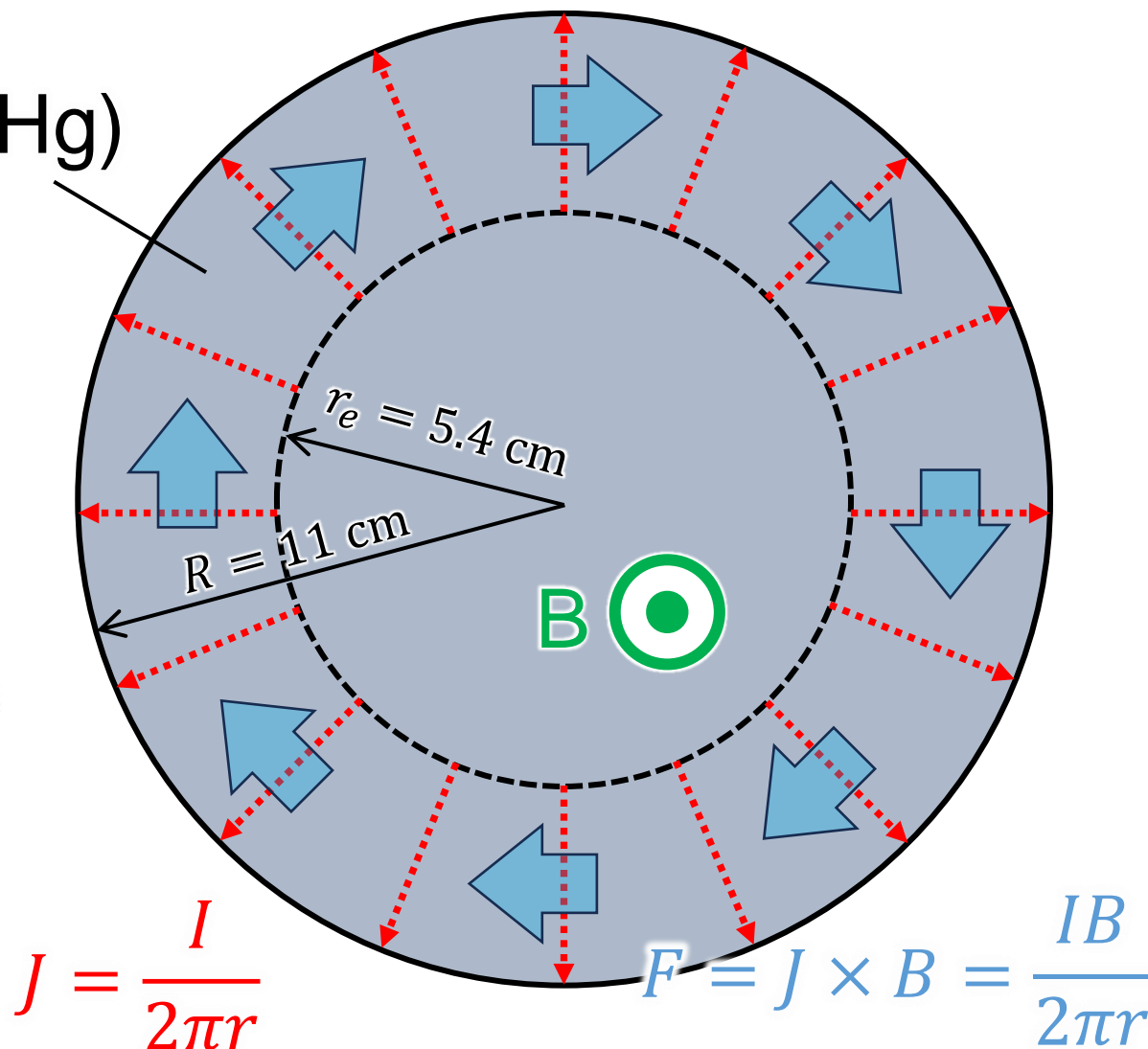
MHD乱流モデル評価に用いた実験

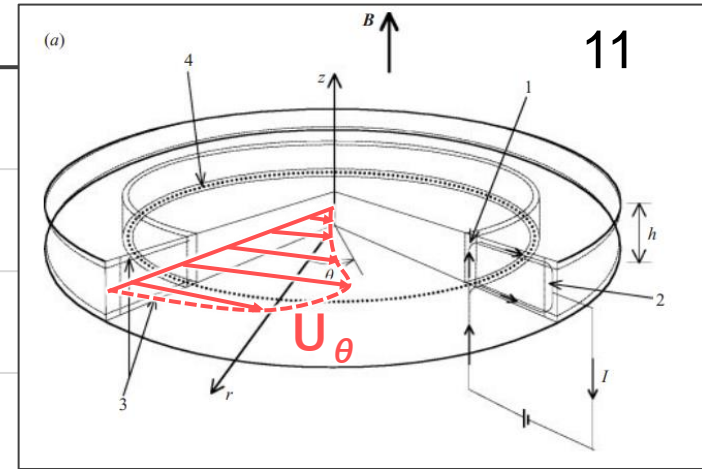
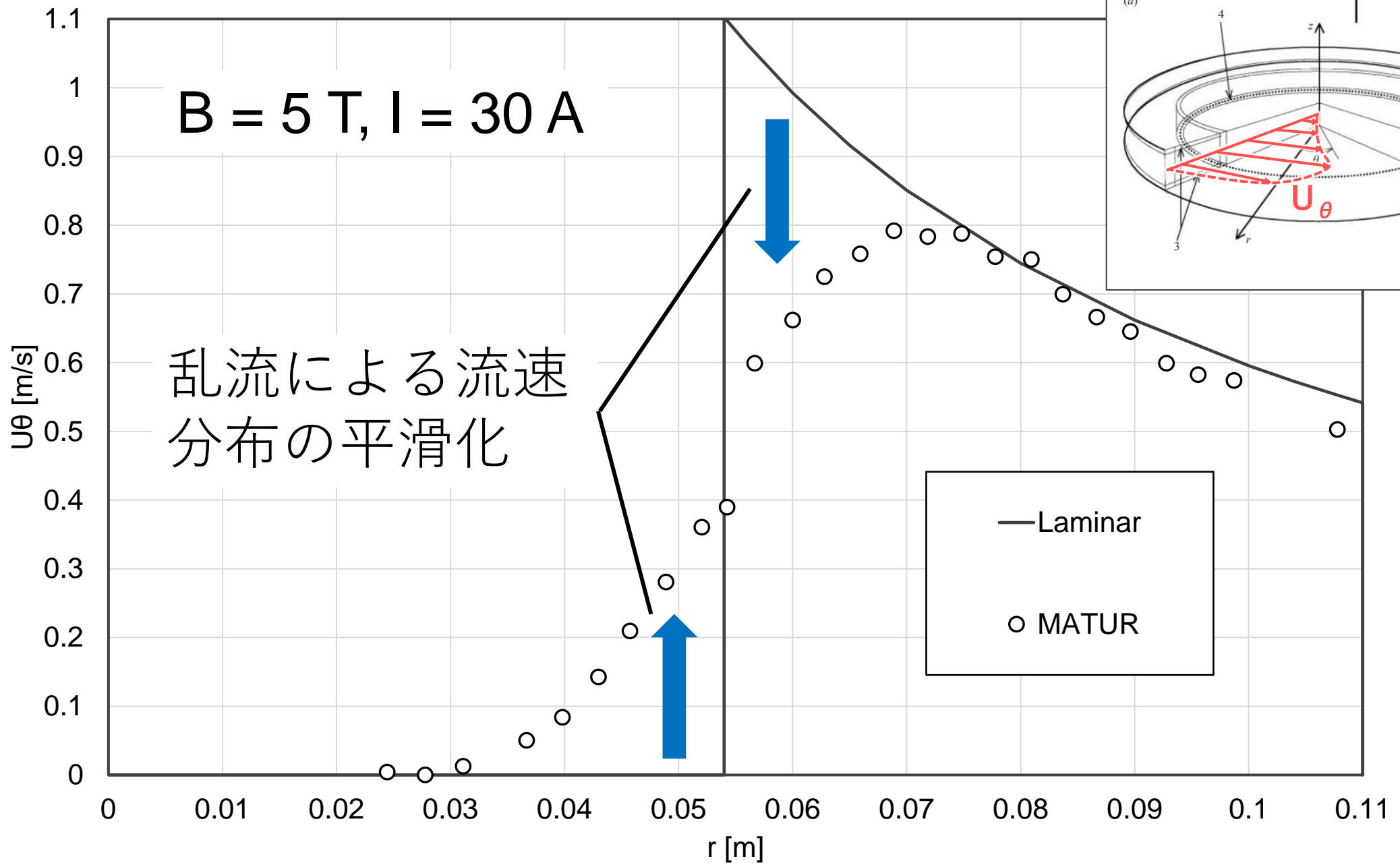
Magnetohydrodynamic TURbulence (MATUR) experiment

(K. Messadek and R. Moreau, 2002)



K. Messadek and R. Moreau (2002)



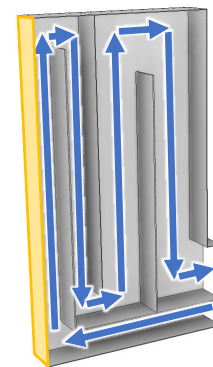


CFDシミュレーションの概要

CFDソフトウェア：STAR-CCM+ (Siemens社)

乱流モデル：Lag Elliptic blending k-εモデル

(曲がり管部の流れの剥離の予測に優れている)



12

➤ 乱流エネルギーkと乱流散逸率εの輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{2} + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho(\varepsilon - \varepsilon_0) + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \bar{\mathbf{v}}) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{2} + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{1}{T_e} C_{\varepsilon 1} P_\varepsilon - C_{\varepsilon 2}^* \rho \left(\frac{\varepsilon}{T_e} - \frac{\varepsilon_0}{T_0} \right) + S_\varepsilon$$

➤ MHD乱流モデル

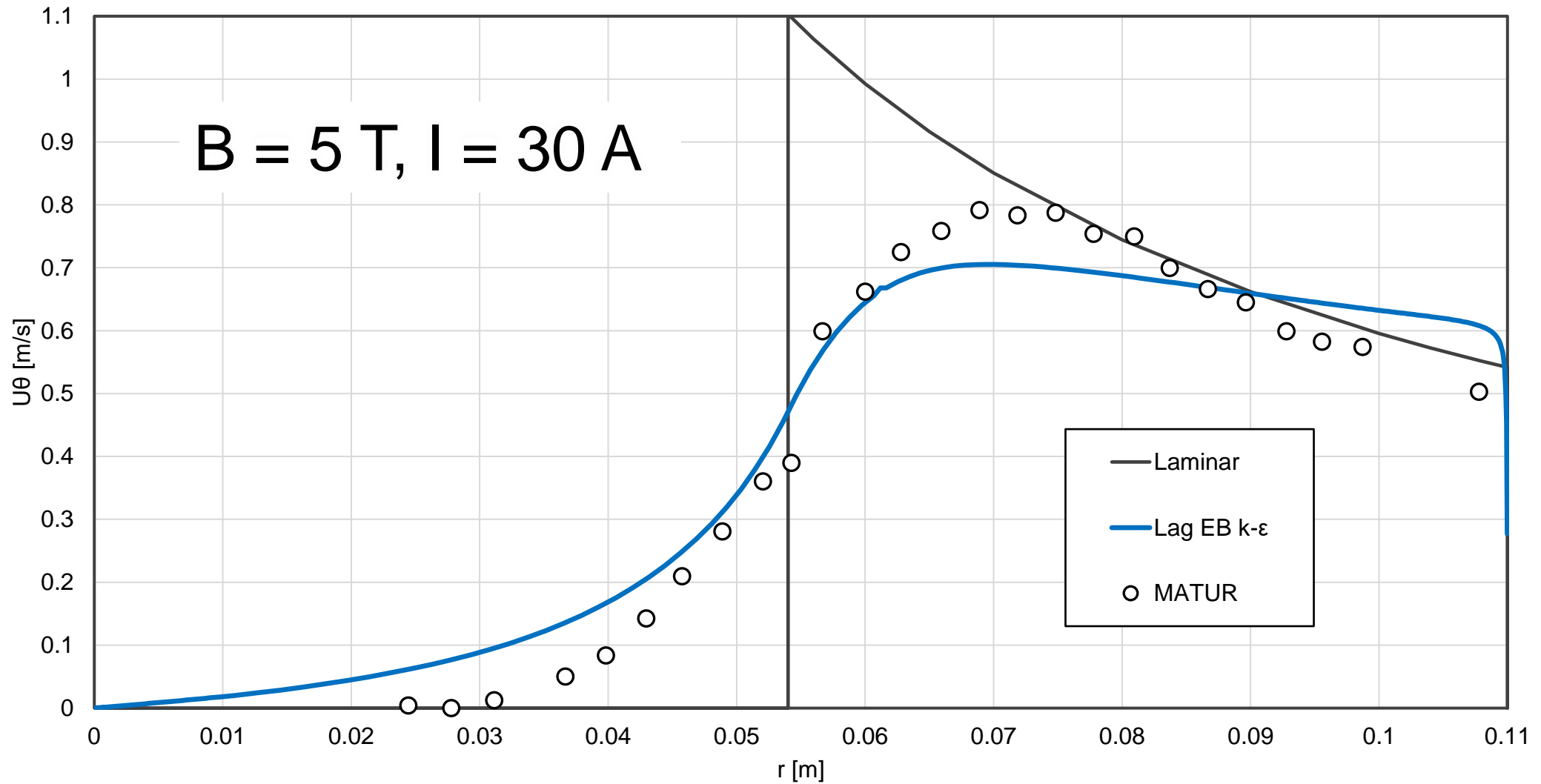
(Meng et al., 2017)

$$S_k = -\frac{\sigma}{\rho} B^2 k \exp \left(-30 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho} B^2 \frac{\nu}{k}} \right)$$

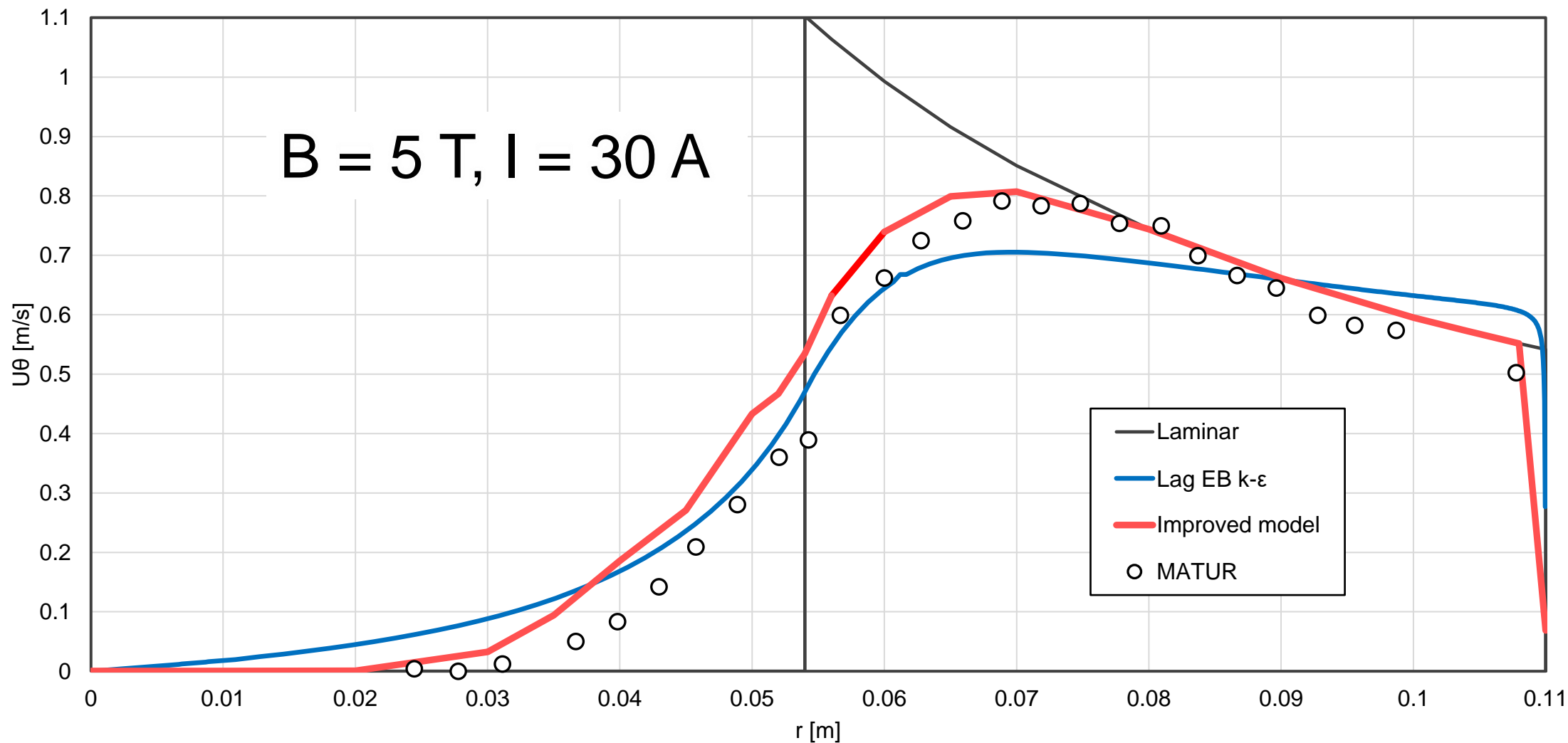
$$S_\varepsilon = -\frac{\sigma}{\rho} B^2 \varepsilon \exp \left(-30 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho} B^2 \frac{\nu}{k}} \right)$$

Lag Elliptic blending k-εモデルのkとεの輸送方程式のソース項 (S_k , S_ε) に
磁場による乱流抑制を表した式を代入

STAR-CCM+の結果と MATUR実験結果と比較



- 実験よりも緩やかな形状
 - 磁場や平均流速を変えると形が合わなくなる
- **MHD乱流モデルの改良を試みた**



実験結果により近い流速分布が得られた

研究まとめ

核融合炉液体LiPbブランケットの液体金属MHD流れについて

1. CFDソフトSTAR-CCM+におけるMHD流れの妥当性を検証した.
2. 液体ブランケットの熱輸送性能評価を目標としてMHD乱流モデルの改良を行い、より正確に流速分布を与えるMHD乱流モデルを考案した.

今後の展望

現在のMHD乱流モデルが低磁場にも適用するように改良

→ 研究結果を国内学会で発表

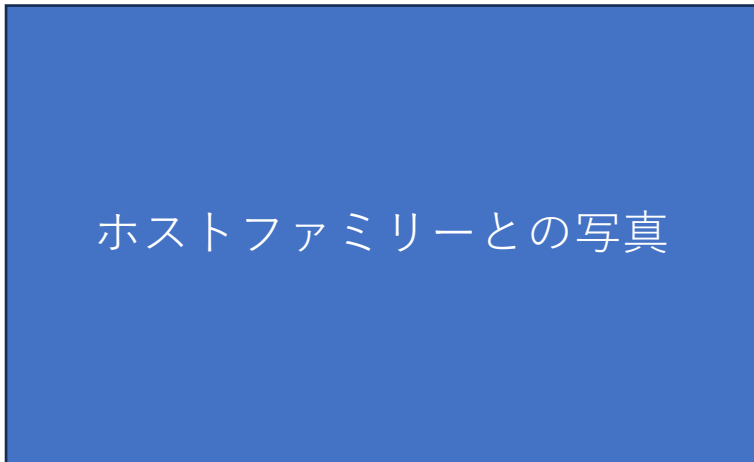
→ 国際投稿論文で発表

(改良したMHD乱流モデルも用いてブランケット流路の熱輸送性能評価)

留学先での生活について



住居・交通手段



電車で1時間ほど通学
レンタルバイクも活用した

とてもやさしく迎え入れてくれました

食事

- \$10~20 (¥ 1500~3000) / meal



American



Vietnamese



Japanese



Korean



Free food



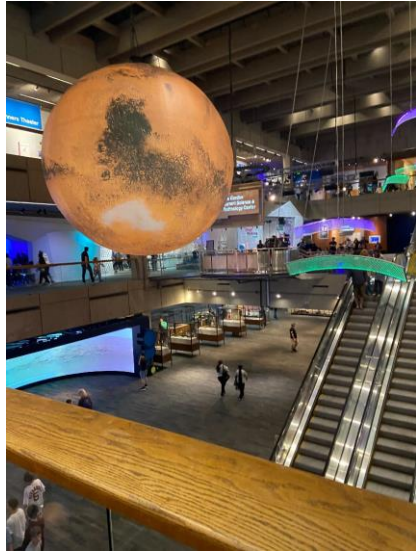
Mexican



Chinese,
Taiwanese,
etc...

毎週木曜日は研究グループでランチがあった

観光



科学博物館



ハーバード大学

- マンハッタン & ワシントンD.C.旅行



野球観戦



ホワイトハウス



タイムズスクエア

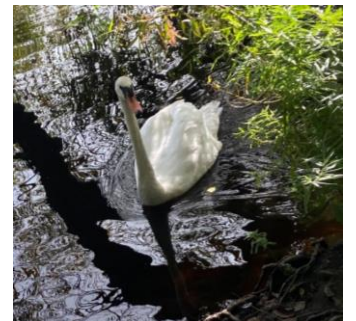


ボストン美術館



ボストン交響楽団

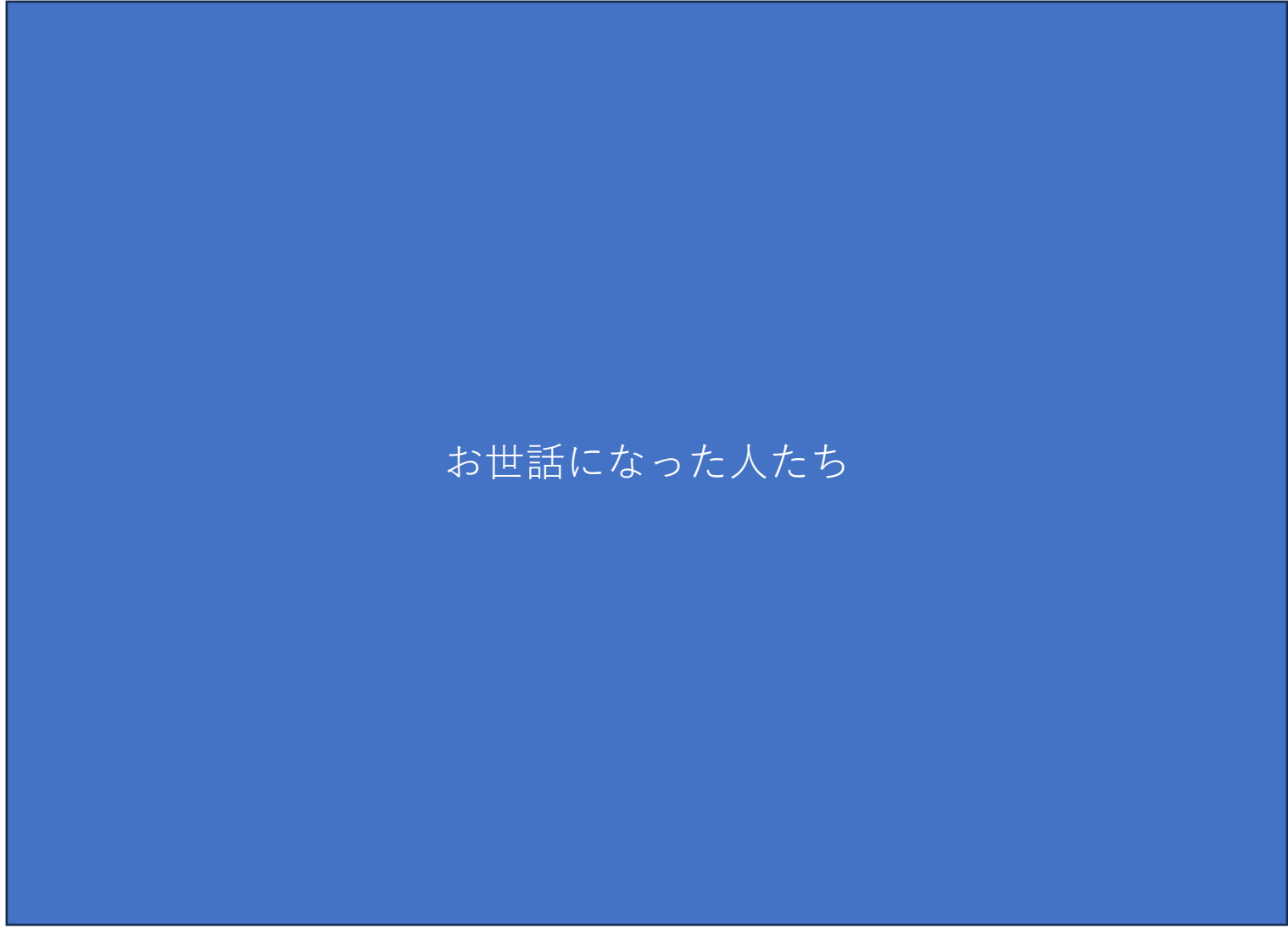
- さまざまな動物もみられた



現地で出会った人々



研究室・NSEの大学院生たち



お世話になった人たち

沢山の人に
お世話になりました

SANI2023まとめ

1. 数値流体計算の扱い方を学び，磁場下液体金属の乱流について理解を深める事が出来た。
2. 研究活動・日々の暮らしを通して英語によるコミュニケーションを積極的に行い，語学力を向上させる事が出来た。
3. 日本では感じにくい文化や生活の違いを実感し，それにどう対応していくかを考える事が出来た。

大変貴重な体験をさせていただき，誠にありがとうございました。

