

データサイエンス：プラズマからの信号を読み解く

竹永 秀信

量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門

第8回茨城県高校生科学研究発表会
平成31年3月16日(土)
筑波大学

現職：研究企画室長

専門分野：プラズマ物理

略歴：

昭和58年4月～61年3月 熊本県立第二高等学校

⇒科学者になることを決意

昭和61年4月～平成2年3月 九州大学工学部電気工学科

⇒核融合エネルギーと出会う

**平成2年4月～平成7年3月 九州大学大学院総合理工学研究科
修士・博士課程**

⇒JT-60と出会う

平成7年4月 日本原子力研究所 那珂研究所 入所

平成17年10月 日本原子力研究開発機構発足

⇒平成20年8月の実験完遂までJT-60で研究を実施

平成28年4月 量子科学技術研究開発機構発足

- **時代はビッグデータと人工知能(AI)**
- **ビッグデータとAIは新たな物理法則を発見できるか？**

質問1: 属性は？

高校1年生
高校2年生
高校3年生
教諭
その他

質問2: 研究は楽しい？

楽しい
楽しくない
どちらでもない

質問3: 研究の進め方で難しいのは？

テーマの選定
データの取得
データの解析
その他
ない

質問4: 核融合を知っている？

知っている
聞いたことはある
聞いたこともない

質問5: ビッグデータを知っている？

知っている
聞いたことはある
聞いたこともない

質問6: AIを知っている？

知っている
聞いたことはある
聞いたこともない

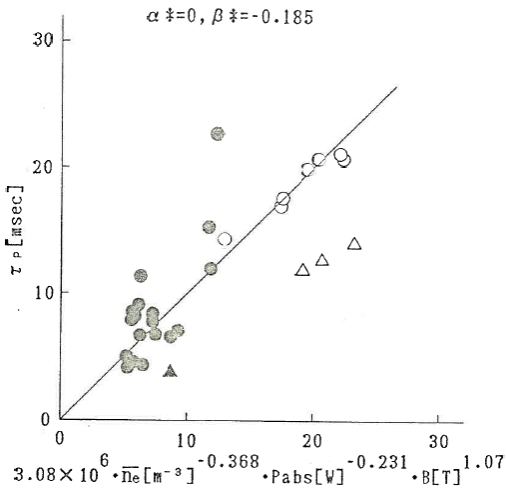
質問7: ビッグデータとAIは新たな物理法則を発見できるか？

できる
できない
わからない

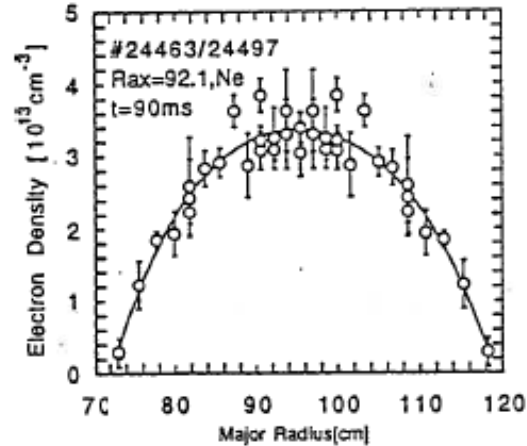
データ解析の進展

○ITの発展により、データ解析の量・質が格段に向上

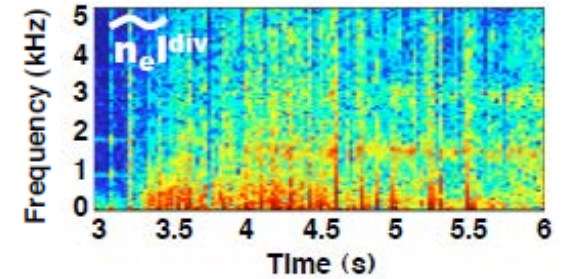
卒論(平成2年)



修論(平成4年)



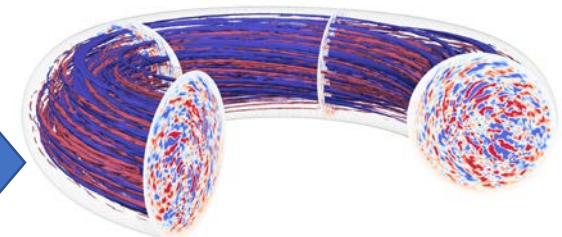
現在(平成31年)



手書き



パソコン



スパコン

平成3年世界初のwebサイト開設

「**主観性**」と「**客観性**」のバランスが重要

主観性 理論に基づくところなるべきと言ったある種の先入観を持ってデータ解析を実施

客観性 矛盾点はないか、他の理論やモデルで説明できないかなど、先入観なしに多方面からデータ解析を実施

主観性が強すぎると思い込みや都合のいいデータの選択が発生する危険性。

→ **間違った理解につながる**

客観性のみだとデータを並べただけで、なぜそうなるかがわからない。

→ **現象の理解には至らない**

常に、両者の観点からデータを眺めることが重要。

プラズマとは

固体 → 液体 → 気体



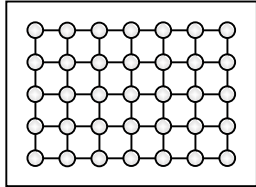
固体 → 液体 → 気体



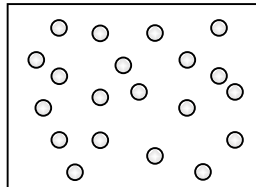
固体 → 液体 → 気体



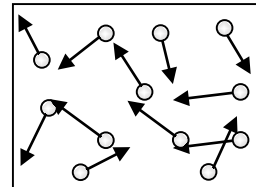
プラズマ



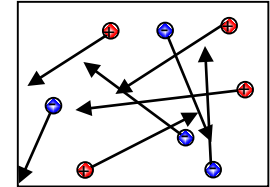
固体



液体

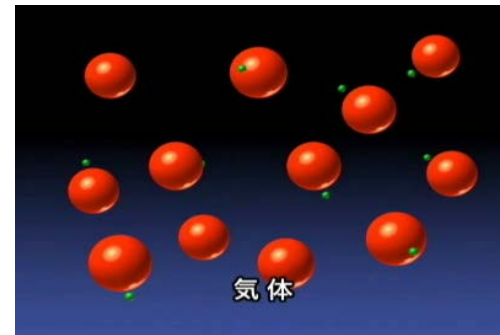


気体



プラズマ

1万度を超えるとどんな物も電子とイオンに分離(プラズマ状態)



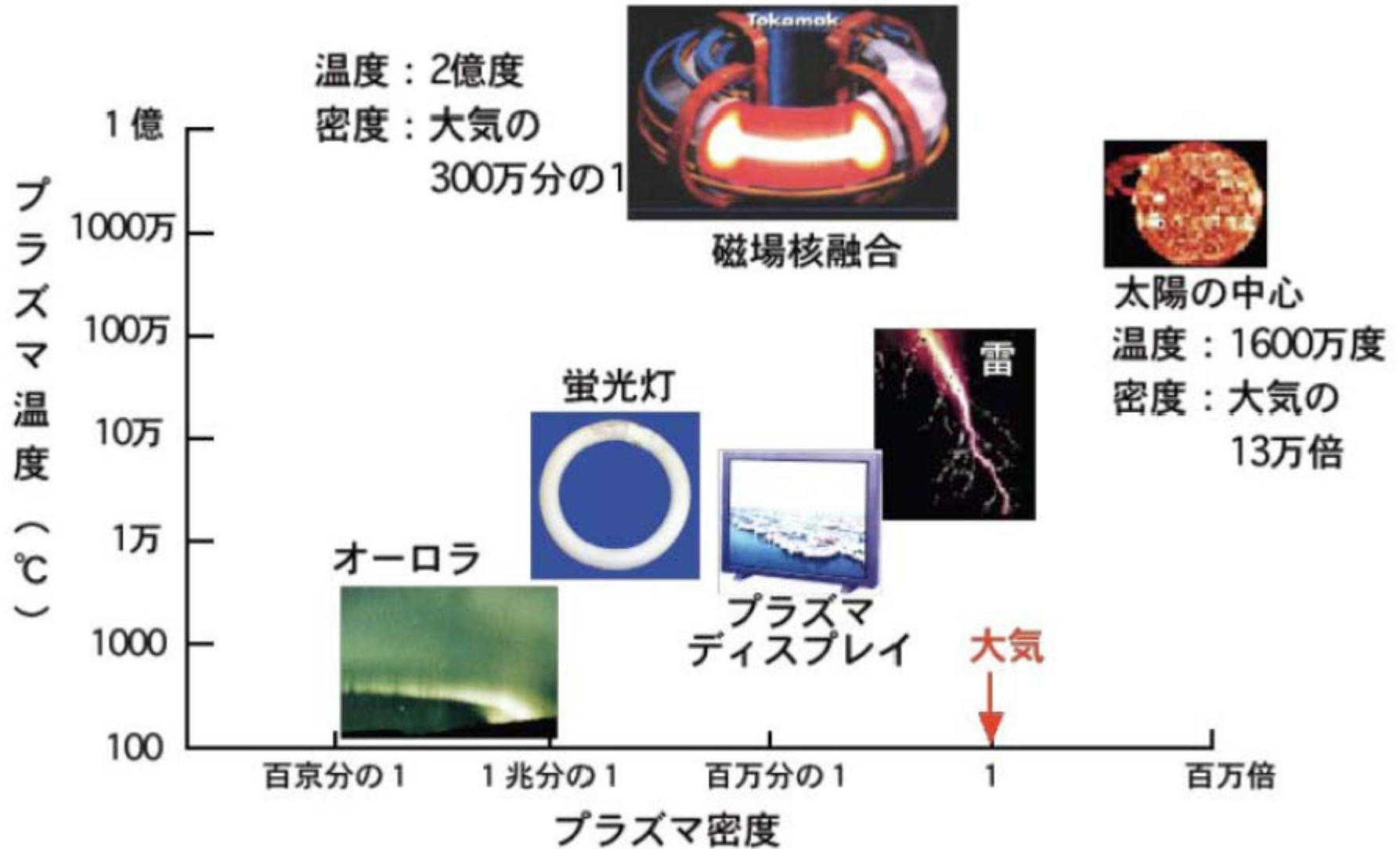
気体



プラズマ

宇宙の構成物質の99%以上がプラズマ状態

様々なプラズマ

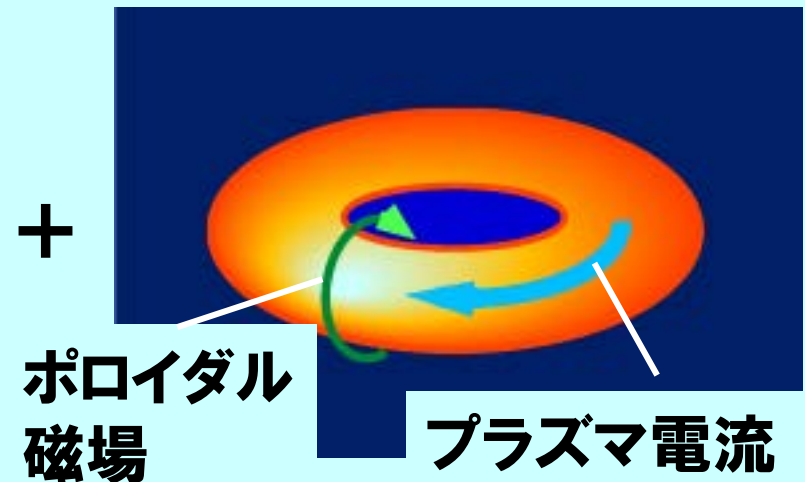
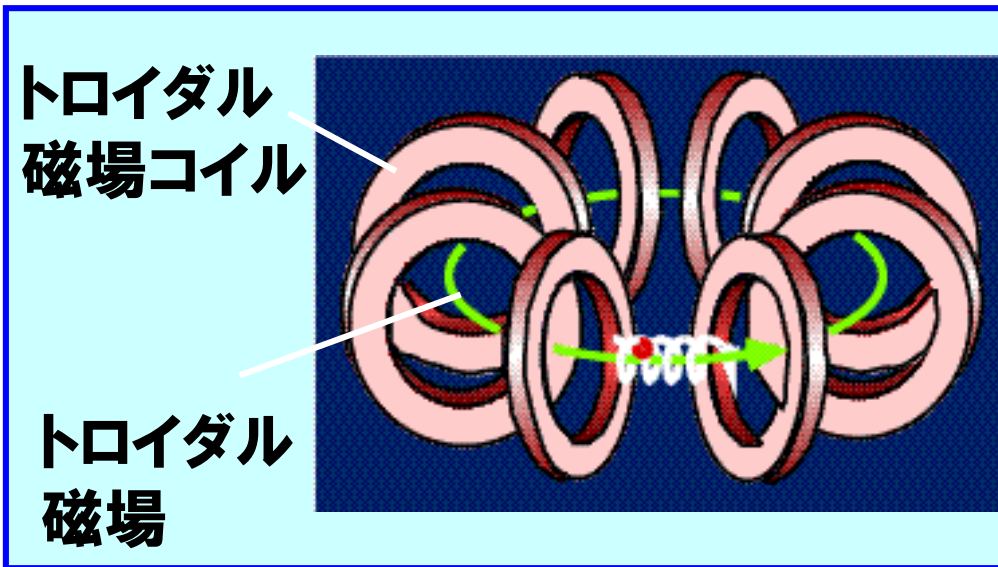
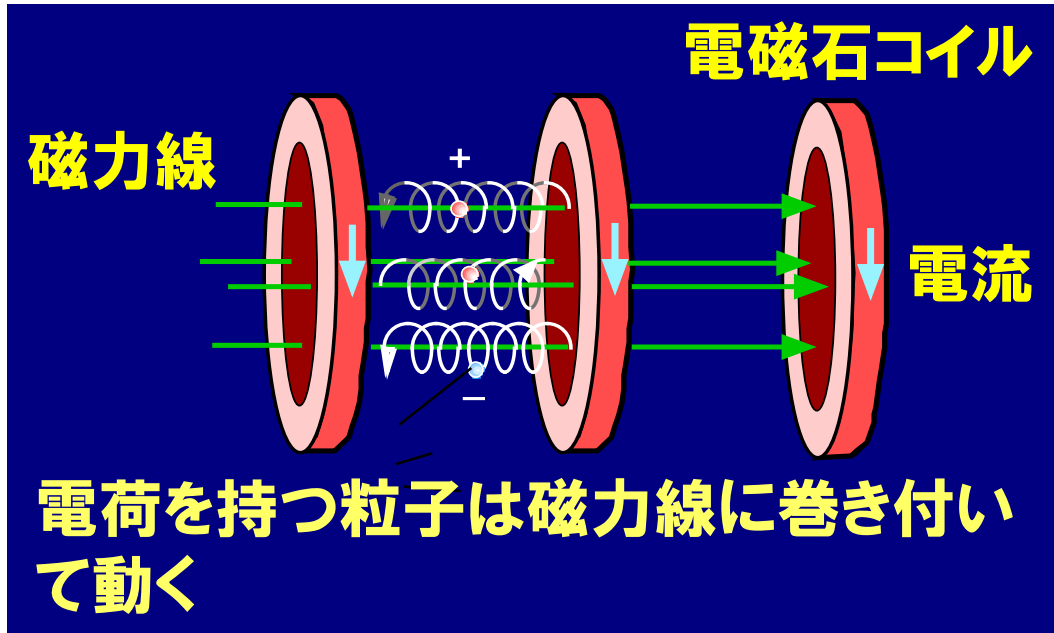


核融合反応

1億度以上のプラズマでは核融合反応によりエネルギーが発生

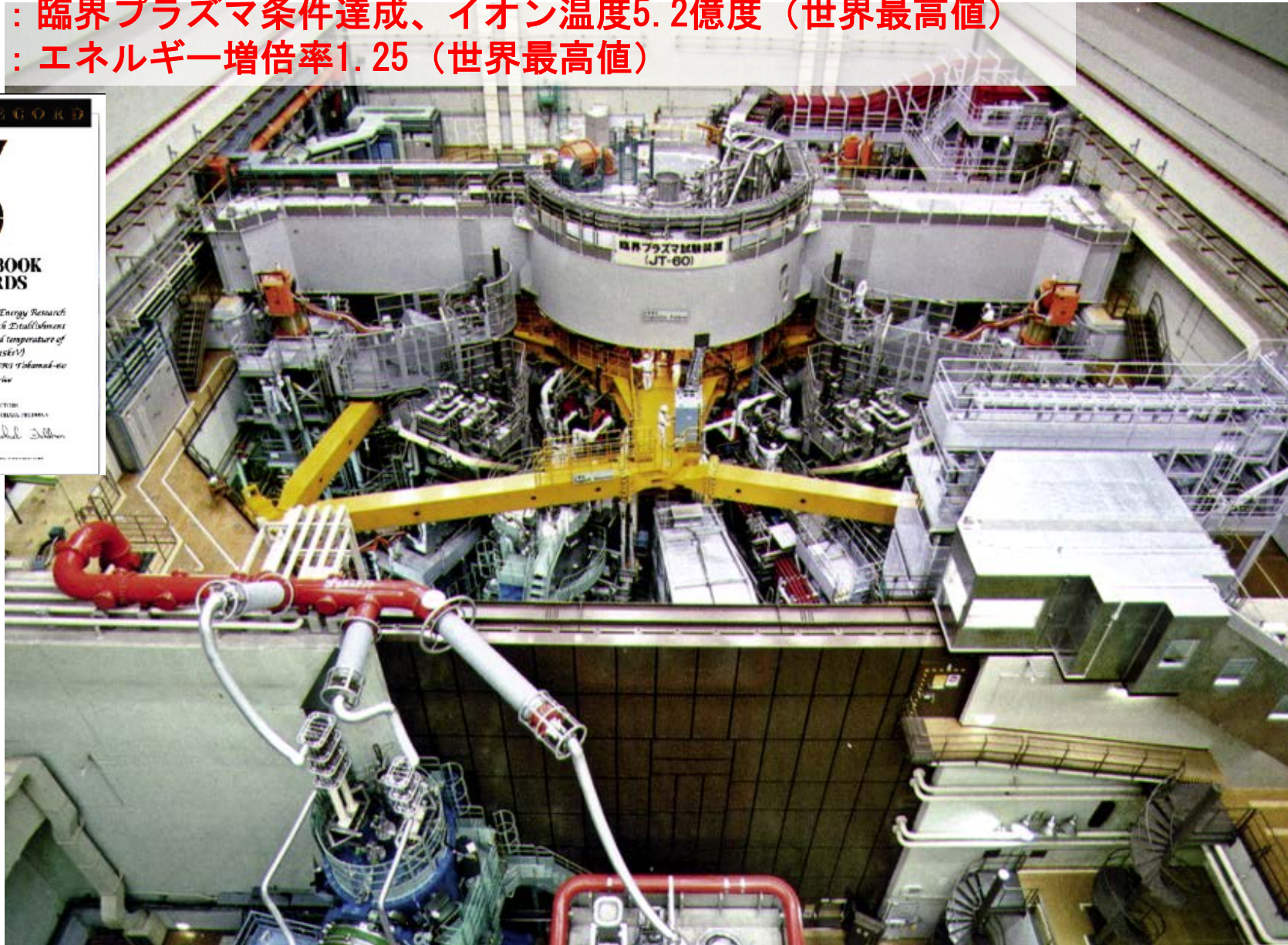
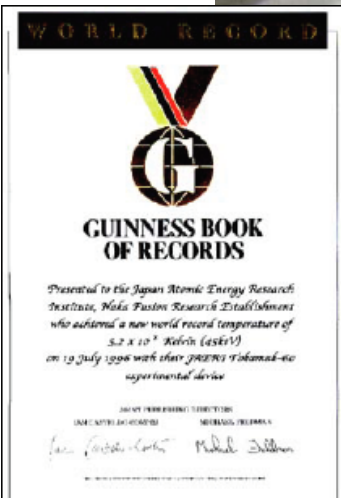


プラズマを閉じ込める

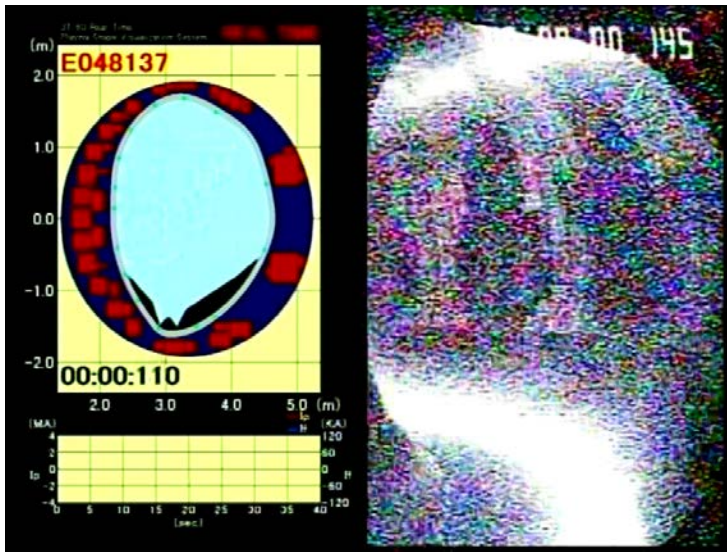


平成 8年：臨界プラズマ条件達成、イオン温度5.2億度（世界最高値）

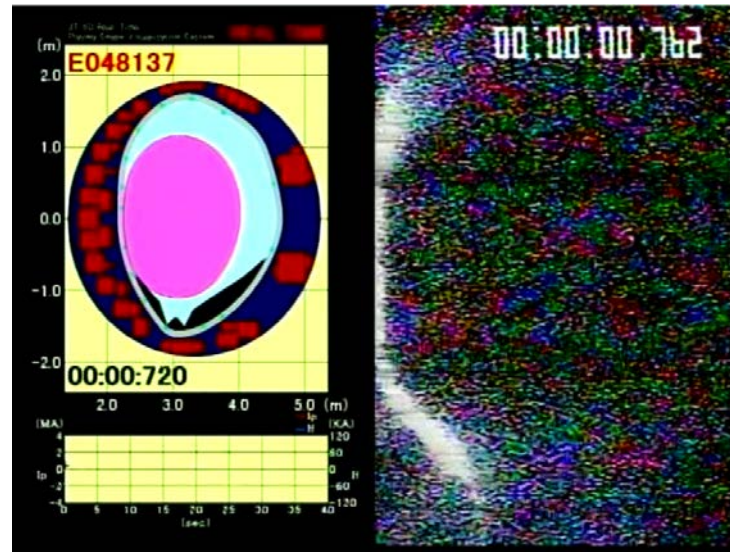
平成10年：エネルギー増倍率1.25（世界最高値）



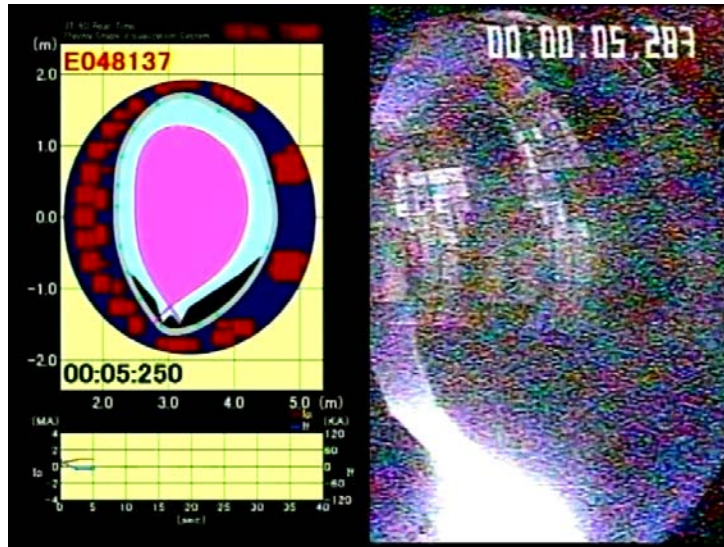
JT-60プラズマ



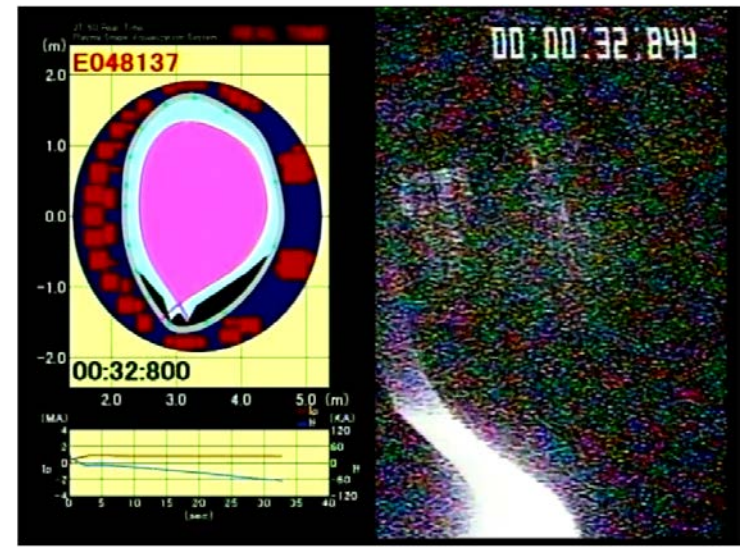
実験開始



プラズマ発生



プラズマ維持



30秒間持続

エネルギー閉じ込め時間

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau_E} + P$$

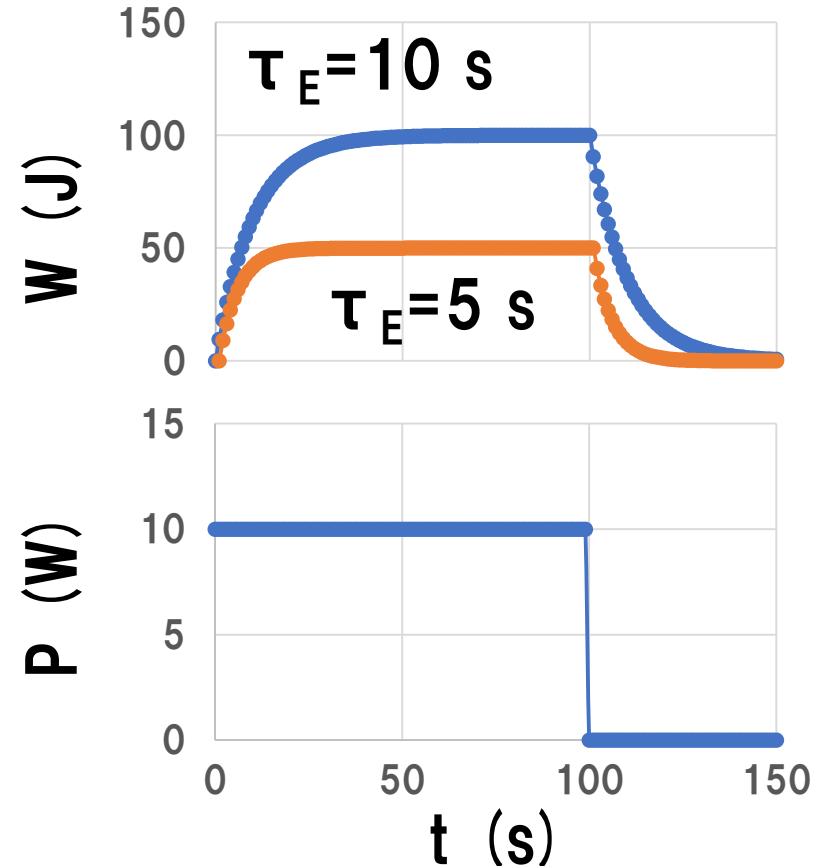
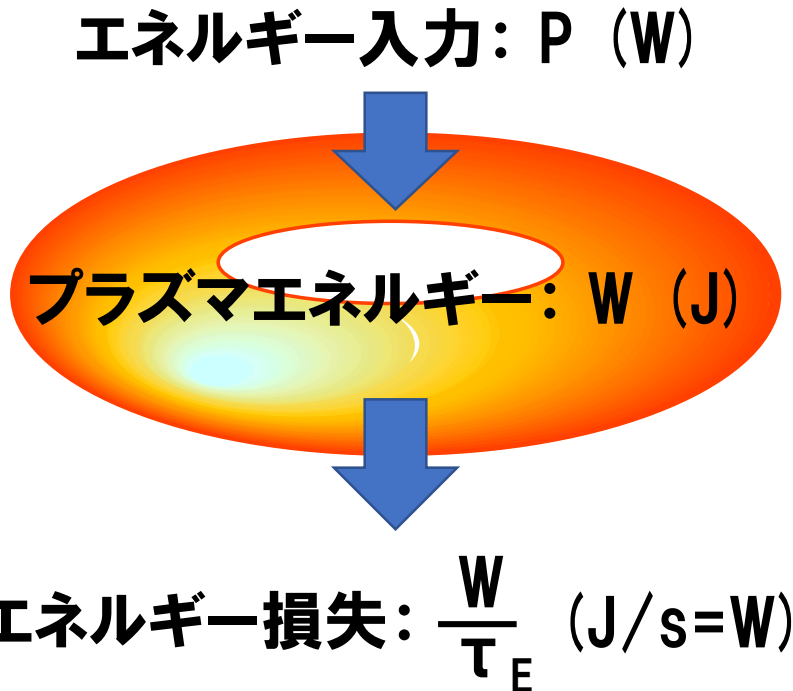
τ_E : エネルギー閉じ込め時間 (s)

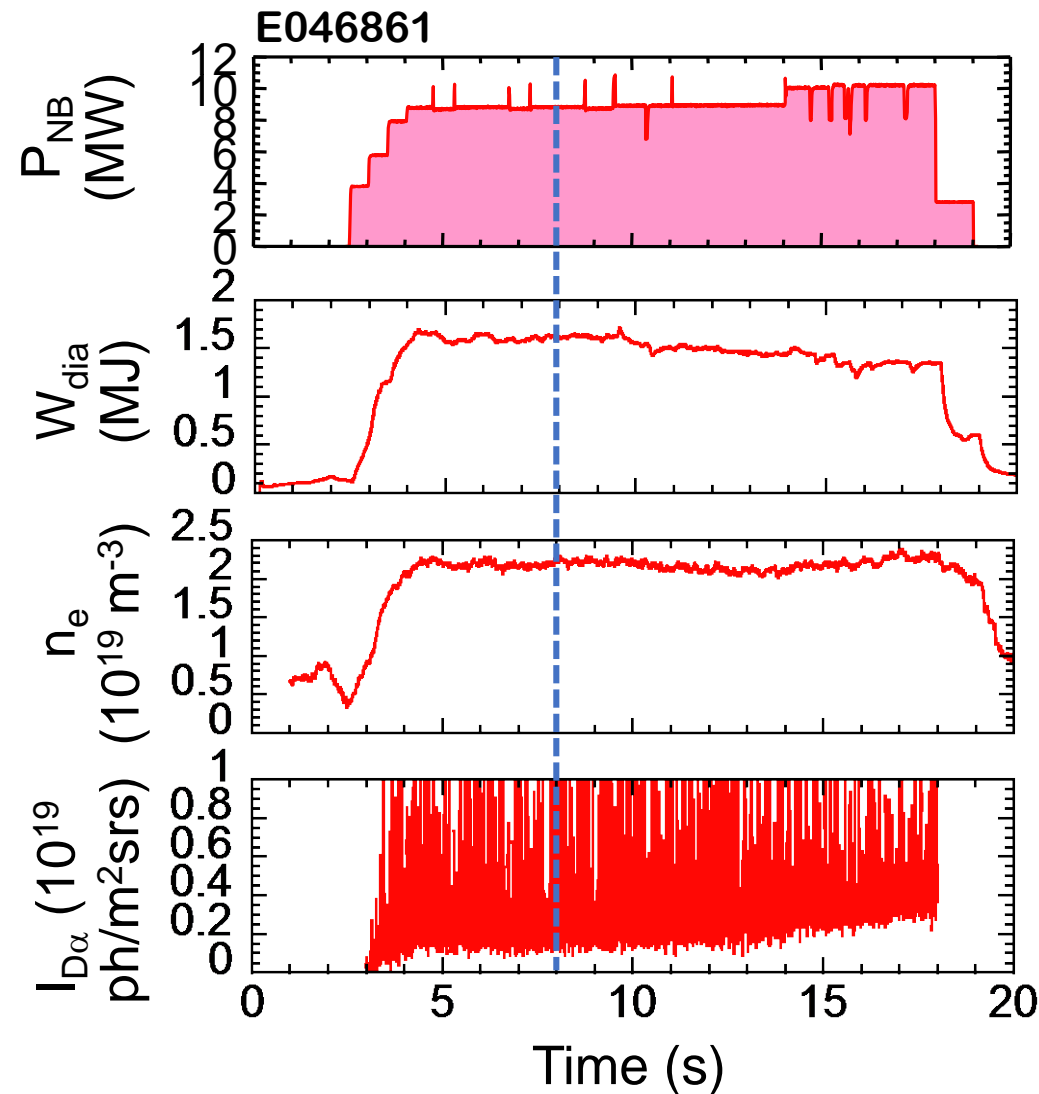
$t=0-100$ s $P=10$ MW

$t=100-150$ s $P=0$ MW

$$W(t) = \tau_E P (1 - \exp(-t/\tau_E))$$

$$W(t) = W_0 \exp(-(t-100)/\tau_E)$$





$$t = 8 \text{ s} \quad \frac{dW}{dt} = 0$$

$$\tau_E = \frac{W}{P} = \frac{1.6 \text{ J}}{8 \text{ MW}} = 0.2 \text{ s}$$

新古典輸送理論より短い！

(主観的)

磁力線の構造を考慮した(新しい)磁力線に巻き付く運動とたまに起こるクーロン衝突(古い)によりエネルギー損失が決まるとした理論。

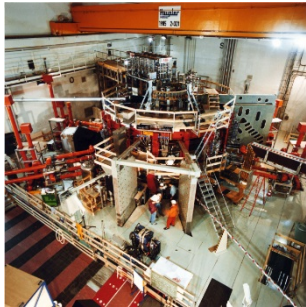


異常輸送

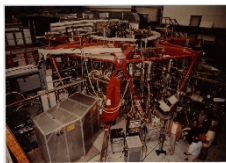
欧州



JET



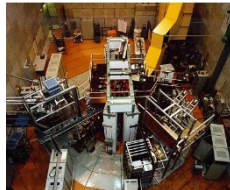
ASDEX-U



ASDEX



COMPASS



TCV

日本

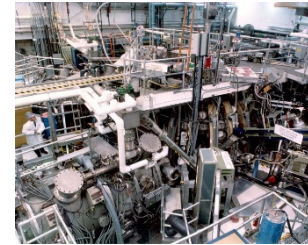


JT-60U



JFT-2M

米国



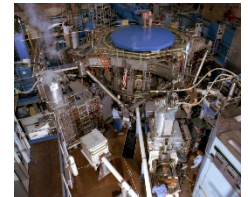
DIII-D



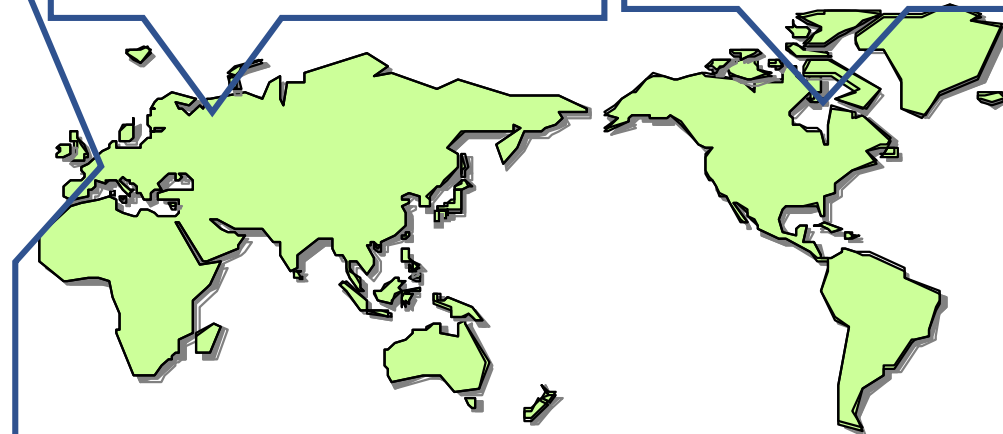
C-MOD



PBX-M



PDX

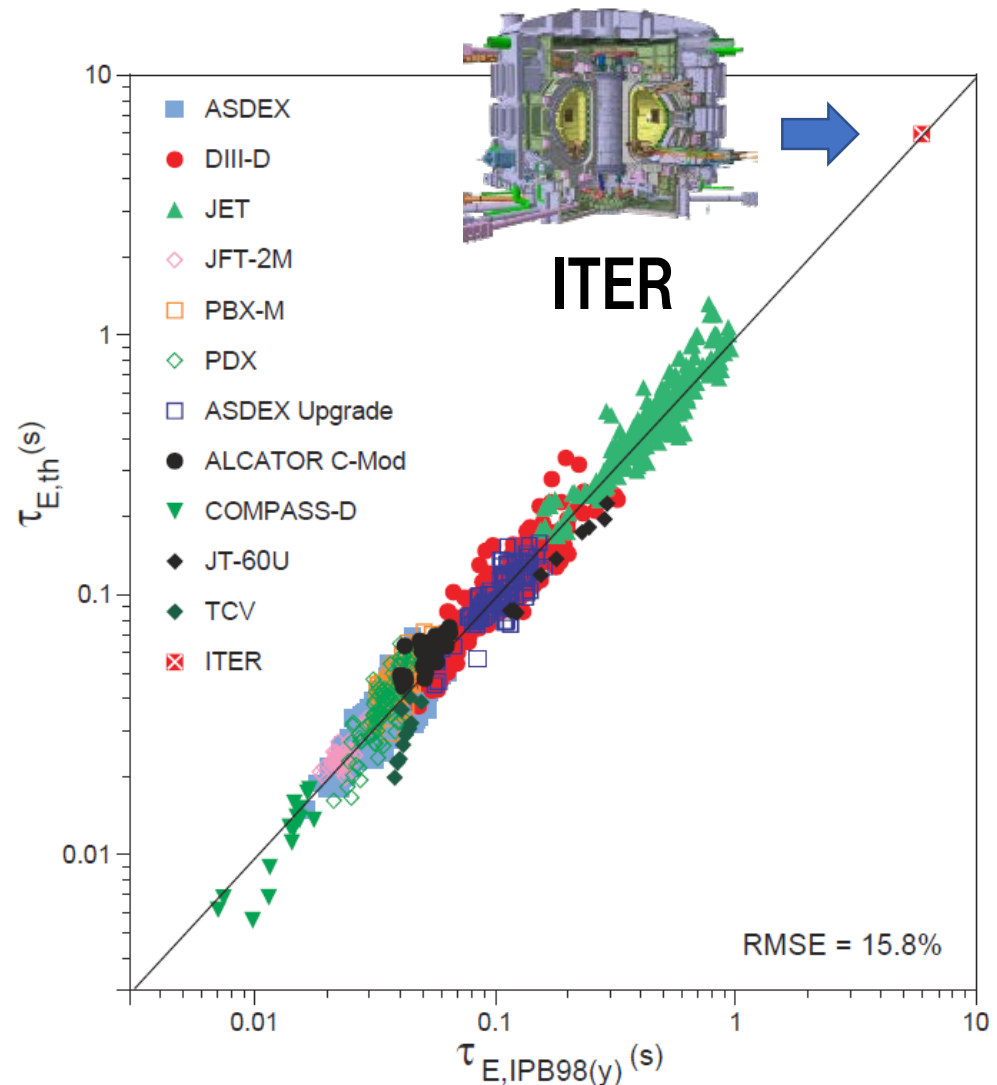


$$\tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.0562 M^{0.19} I_p^{0.93} B_t^{0.15} R^{1.39} a^{0.58} \kappa_a^{0.78} n_{19}^{0.41} P^{-0.69}$$

- M** : 質量数
- I_p** : プラズマ電流(A)
- B_t** : 磁場強度(T)
- R** : プラズマ大半径(m)
- a** : プラズマ小半径(m)
- κ_a** : 非円形度
- n_{19}** : プラズマ密度
(10^{19} m^{-3})
- P** : 加熱パワー(MW)

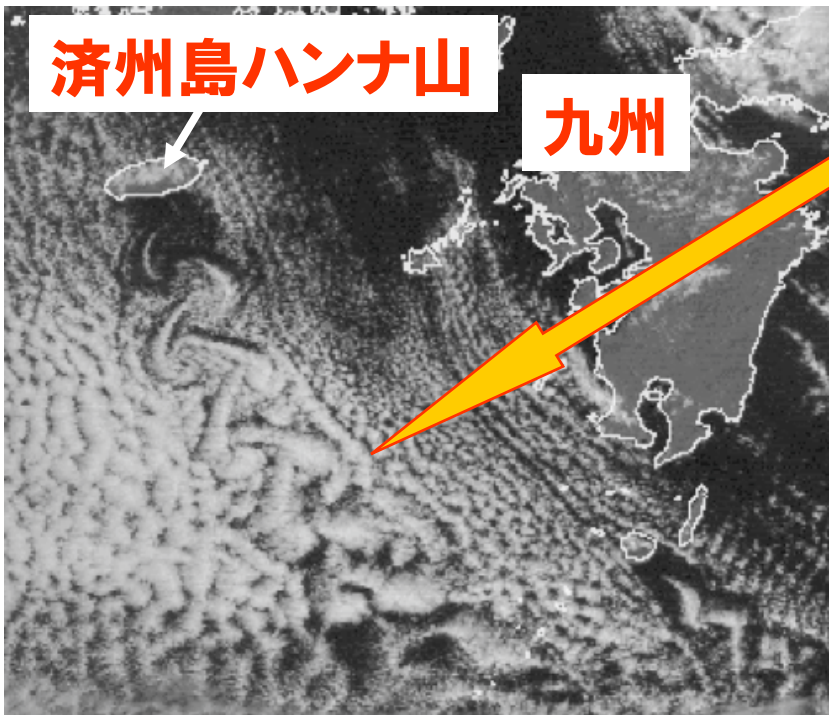
(客観的)

- 工学パラメータ
- 物理は？

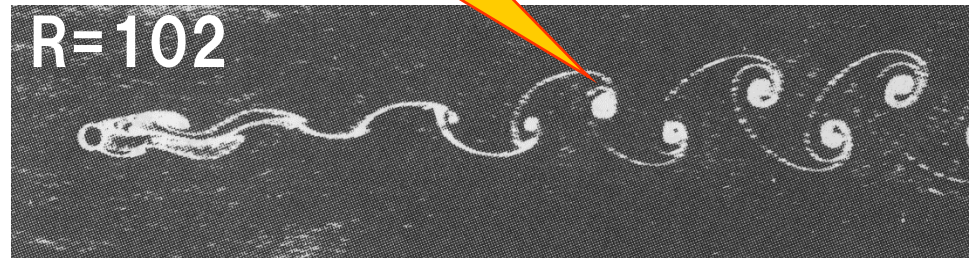
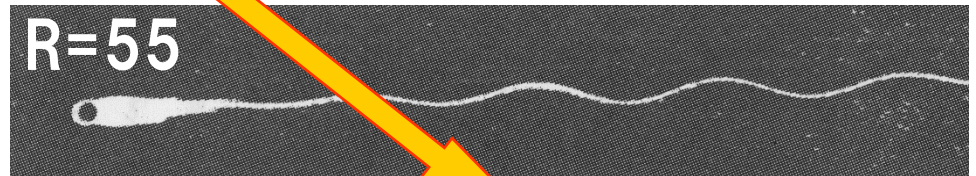


無次元パラメータ

カルマン渦: 流体中を柱状物体が適当な速さで動く、もしくは物体が静止し流体が動くと、物体の左右両側から交互に規則正しく逆向きに発生する渦。



粘性流体の流れにおける粘性力と慣性力の比を表わす無次元パラメータであるレイノルズ数 (R) で決まる



無次元パラメータが同一な流体は、異なるサイズでも同様に振る舞う

スケーリングが物理を表しているのであれば、無次元パラメータで記述できるはず。

$$\tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.0562 M^{0.19} I_p^{0.93} B_t^{0.15} R^{1.39} a^{0.58} \kappa_a^{0.78} n_{1g}^{0.41} p^{-0.69}$$



$$\tau_E = \tau_B \rho^{*-0.70} \beta^{-0.90} v^{*-0.01} M^{0.96} q^{-3.0} \varepsilon^{0.73} K_a^{2.3}$$

無次元パラメータで整理できることを実証(主観的)

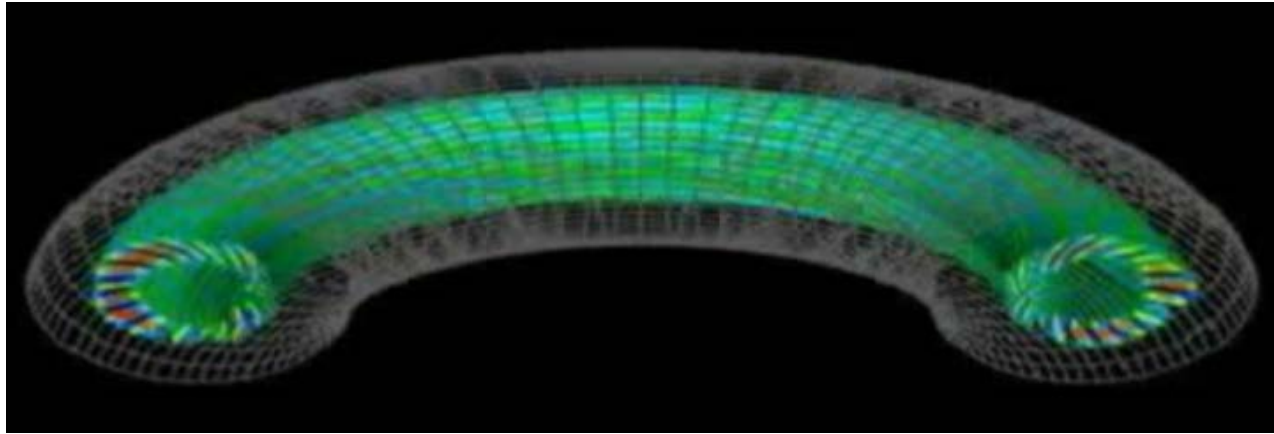
ρ^* : 規格化ラーマ半径(大きさの比)

β : ベータ(圧力の比)

v^* : 規格化衝突周波数(時間の比)

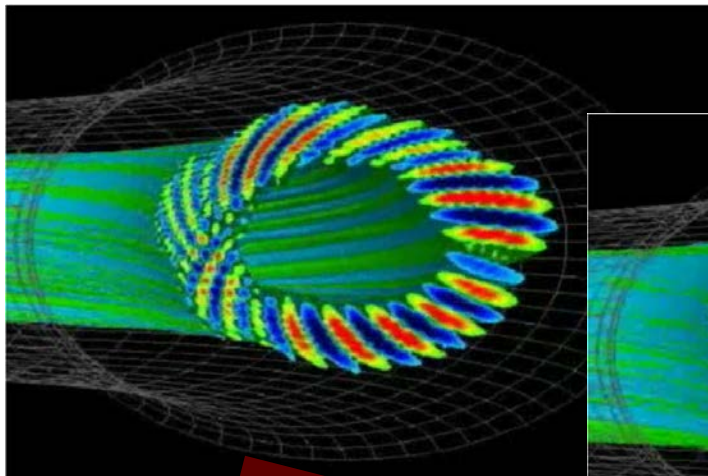
実験的にも2つの無次元パラメータを固定した上で、残りの無次元パラメータ依存性を検証(客観的)。

異常輸送から乱流輸送に

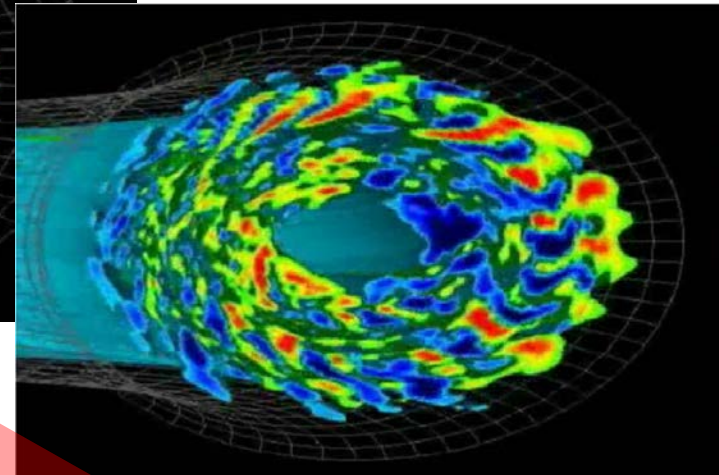
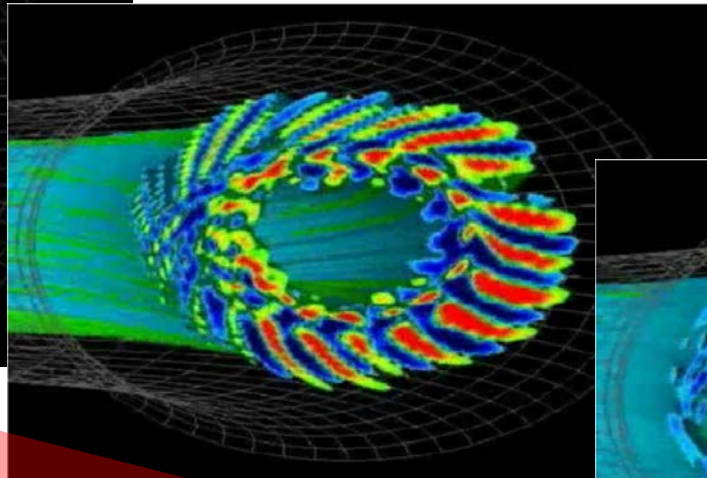


円環断面図

流速に差がある時
(乱流が発生)



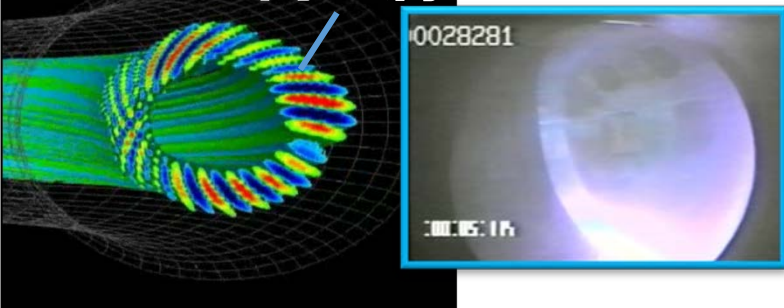
円環の内側と外側で
流速に差がない時



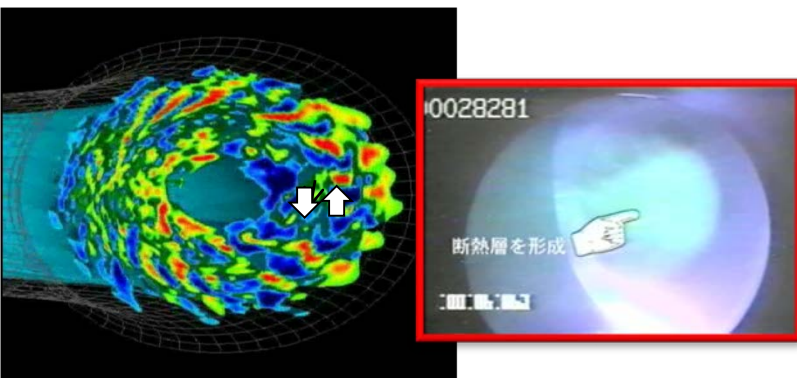
スパコンによるプラズマ内の渦計算

流れに差がない時

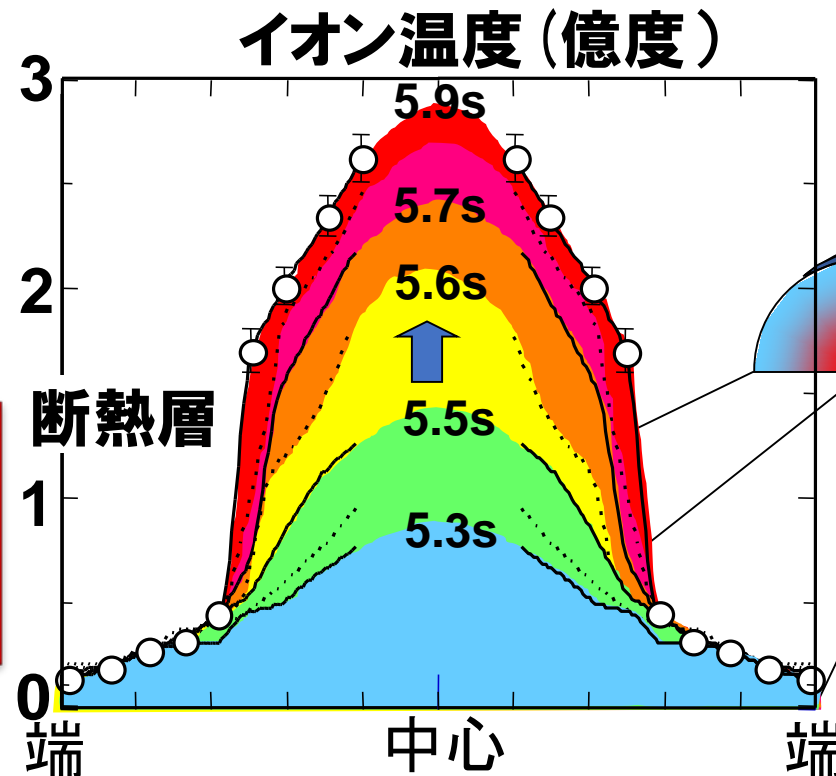
プラズマ内の渦



流れに差がある時



- プラズマ内に大きな渦(乱流)が発生し、エネルギーが早く逃げる要因に。
- プラズマ内の流れに差があると渦が細かく分断され、エネルギーが早く逃げることを防げる。



核融合エネルギー実現への道

試験装置
の段階

現在

実験炉
の段階

原型炉
の段階

今世紀
中葉

超高温プラズマ
の実現

持続的な核融合燃焼の実証
50万kWの核融合出力

発電実証

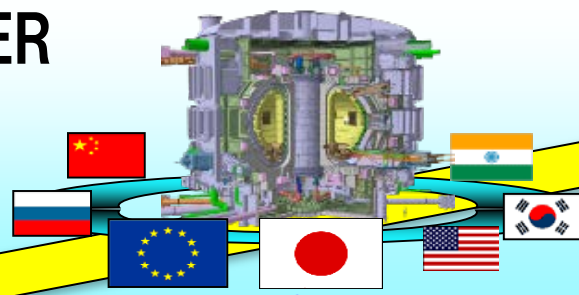
実用化

JT-60



世界最高
イオン温度
5.2億度

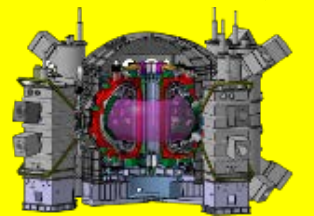
ITER



ITER支援

幅広いアプローチ (BA) 活動

- ・技術基盤構築
- ・国際拠点形成
- ・人材育成



原型炉

数十万kWの
電気出力

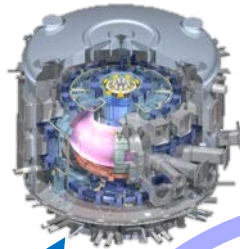
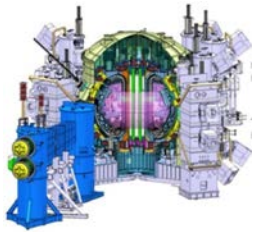
ITERでで
きないこ
とを補う

核融合ビッグデータ

ITER時代の核融合研究及び原型炉設計を推進のため、計算科学・情報科学を統合した**核融合情報科学センター**の構築を目指す。

JT-60SA

ITER



100PB/年の実験データ

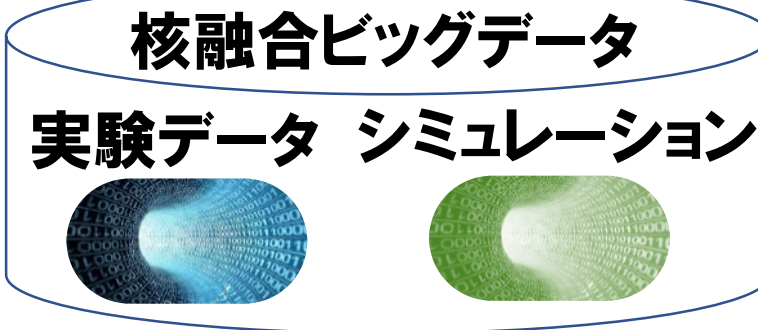
≈電子図書30億冊相当



情報科学

データマイニング

機械学習による統計モデリング・制御手法



計算科学

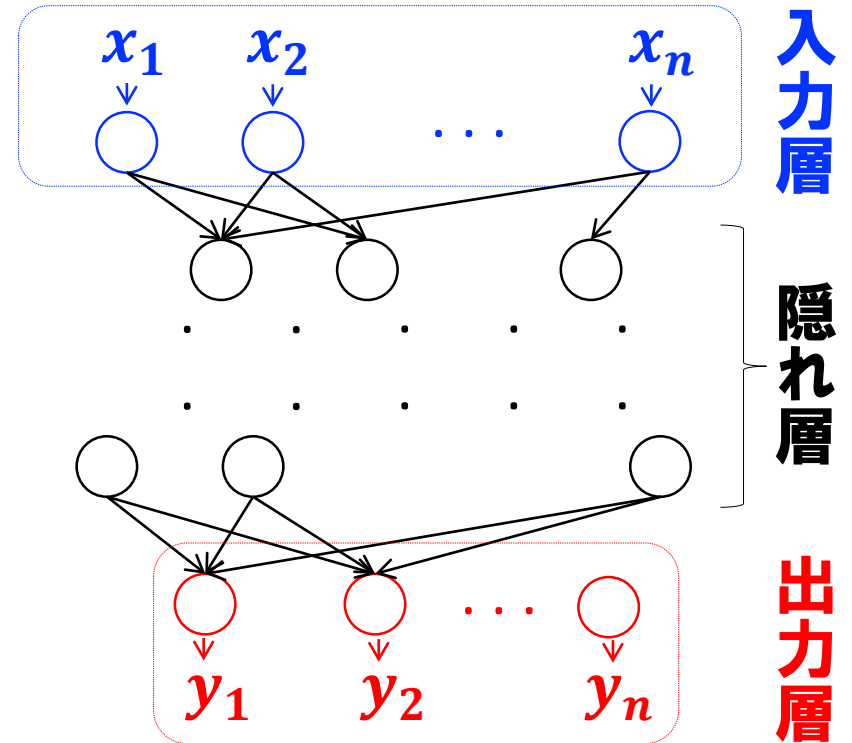
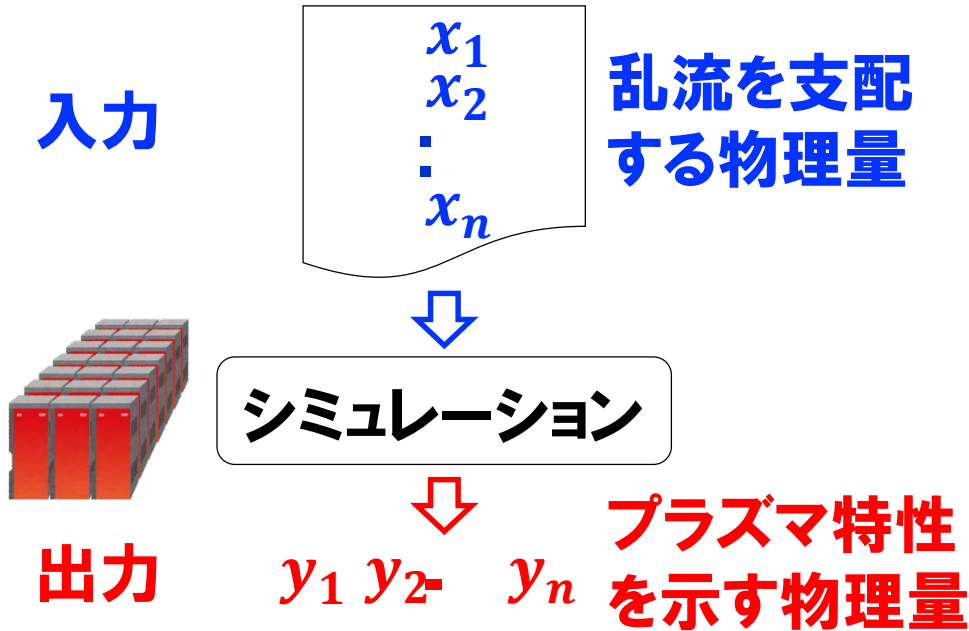


シミュレーションの信頼性向上

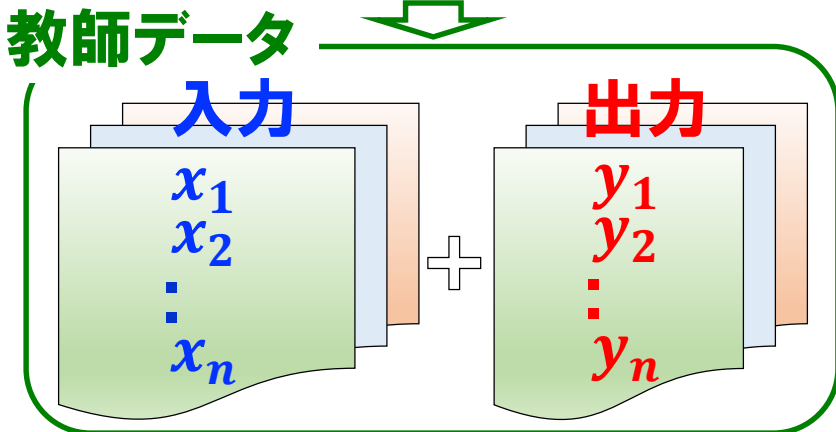


- ITERの目標達成を加速
- 原型炉設計への寄与

スパコンによる教師データの生成 ニューラルネットワーク (NN) の構築



✓ 様々な入力セットで繰り返し実施



- ✓ 教師データの入力と出力の関係を**重み**と**バイアス**で再現
- ✓ 高速で出力が得られ、実験との比較が容易に

- **時代はビッグデータと人工知能(AI)**
- **ビッグデータとAIは新たな物理法則を発見できるか？**
 - **現時点では、解析ツールとして活用**
 - **将来的に、研究者のセンス、ひらめきを再現できるAIが登場するか？**

質問8:ビッグデータとAIは新たな物
理法則を発見できるか？

できる
できない
わからない

質問9:内容は理解できた？

できた
まあまあできた
あまりできなかった
できなかった

質問10:今後の研究に
役立つ？

役立つ
役立たない
わからない

質問11:核融合に興
味を持った？

持った
持たない
どちらでもない

質問12:ビッグデータに
興味を持った？

持った
持たない
どちらでもない

質問13:AIに興味を持った？

持った
持たない
どちらでもない

質問14:将来研究者になりたい？

なりたい
なりたくない
わからない

質問15:好きな科目

数学・物理・化学・生物・地学・その他

質問16:苦手な科目

数学・物理・化学・生物・地学・その他

質問17:好きな物理の単元

力学・熱力学・波動学・電磁気学・原子物理学

質問18:苦手な物理の単元

力学・熱力学・波動学・電磁気学・原子物理学

質問19:好きな(あるいは知っている)科学者

ガリレオ・ニュートン・オーム・ファラデー・アインシュタイン

質問20:那珂研に見学に来たい?

是非来たい・機会があれば来たい・そうでもない