

「Fusion Science School 2025 :  
フュージョン発電所の作り方  
～未来をデザインする三日間～」

「核融合プラズマを“見る・測る・  
操る”技術 — 実験炉運転のリアルと  
計測工学の最前線」

九州大学応用力学研究所  
花田 和明

# 自己紹介(花田和明)

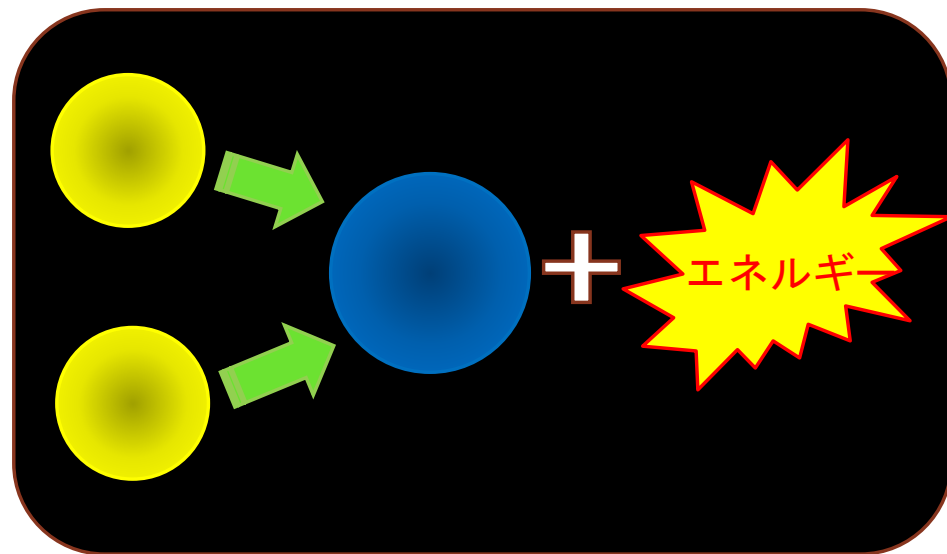
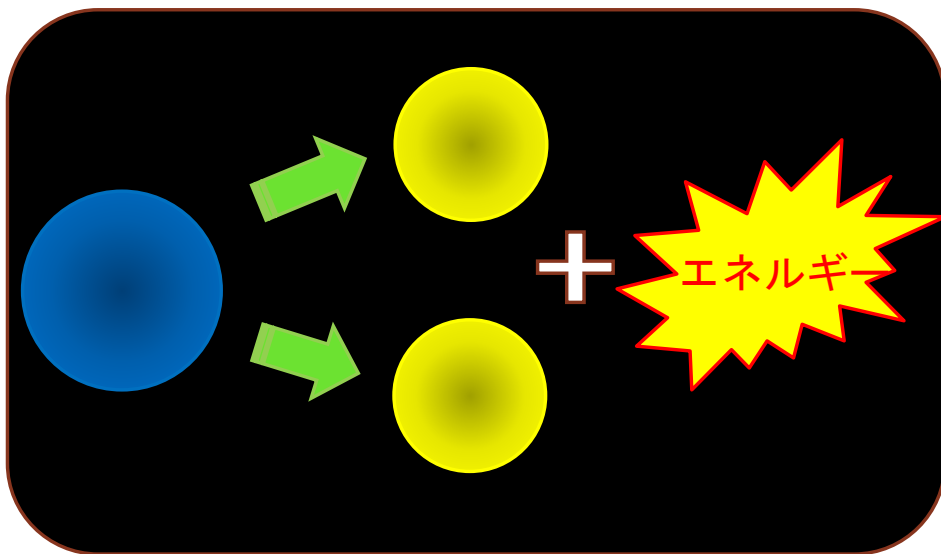
- ・ 出身は奈良県奈良市
- ・ 学生時代は京都大学 ← トカマクと出会う
- ・ 職場は東京大学 ← 球状トカマクと出会う
- ・ 現在は九州大学 ← 超伝導トカマクと出会う

趣味は博物館・美術館めぐりとグルメ

# フュージョンと核分裂の違い

くっついているものが分かれてエネルギー発生

分かれているものがくっついてエネルギー発生



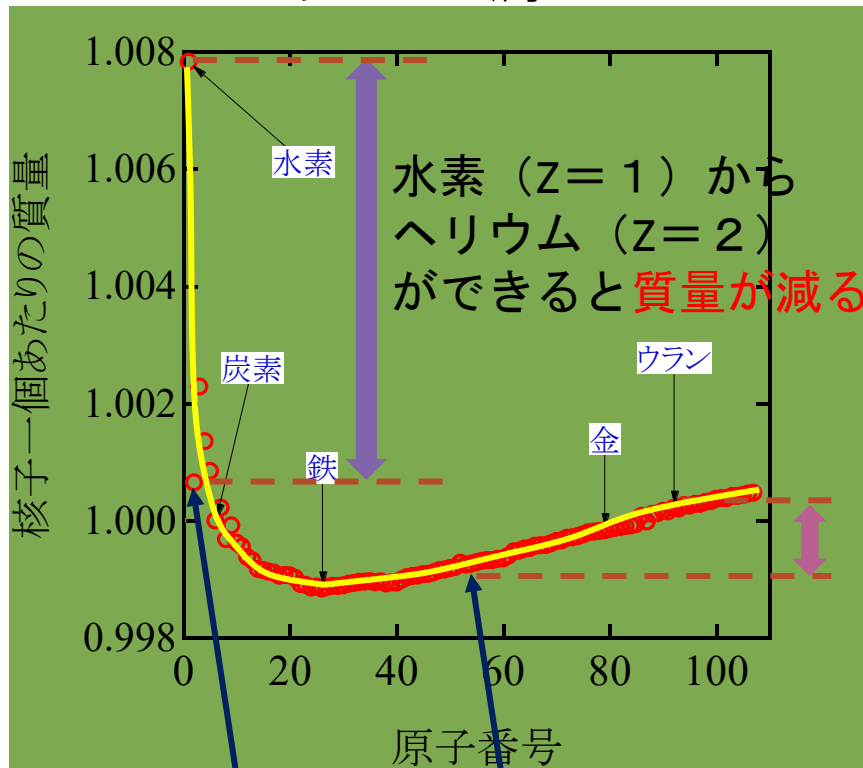
核分裂

フュージョン・エネルギー

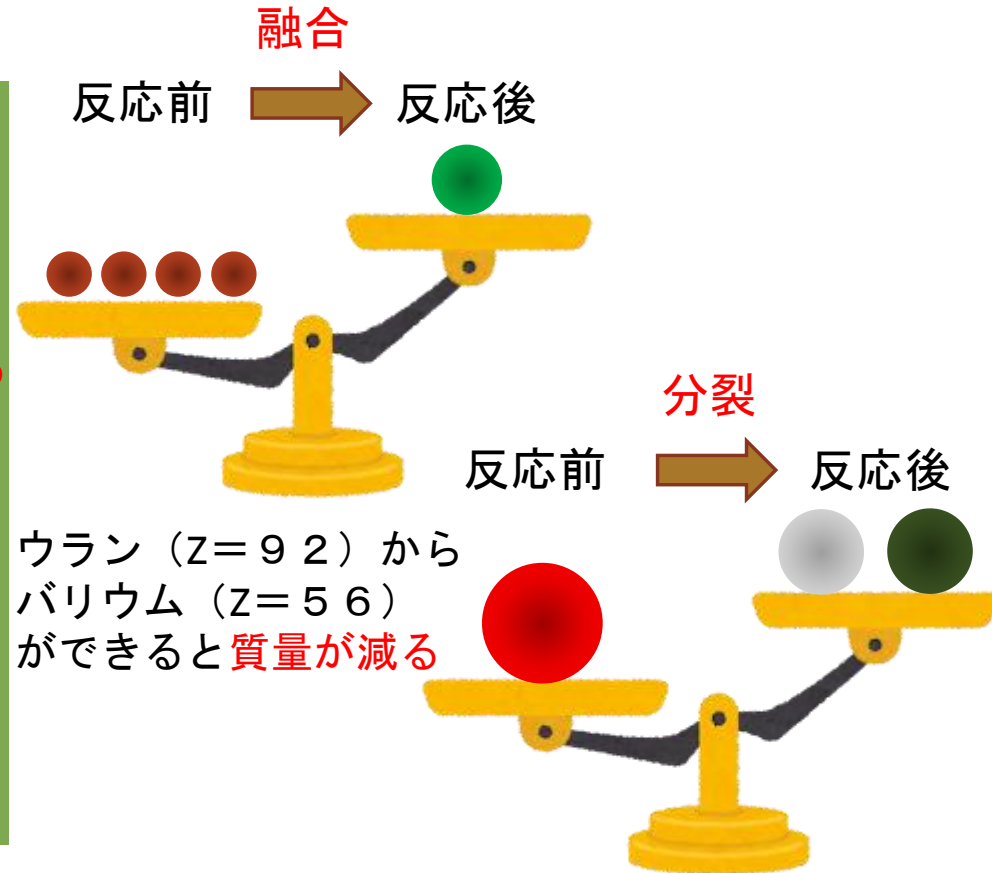
# フュージョン・エネルギーとは？

- エネルギーを取り出すには質量が減ることが必要
- 軽い元素は融合、重い元素は分裂で質量が減る

エネルギーの源は $E=mc^2$

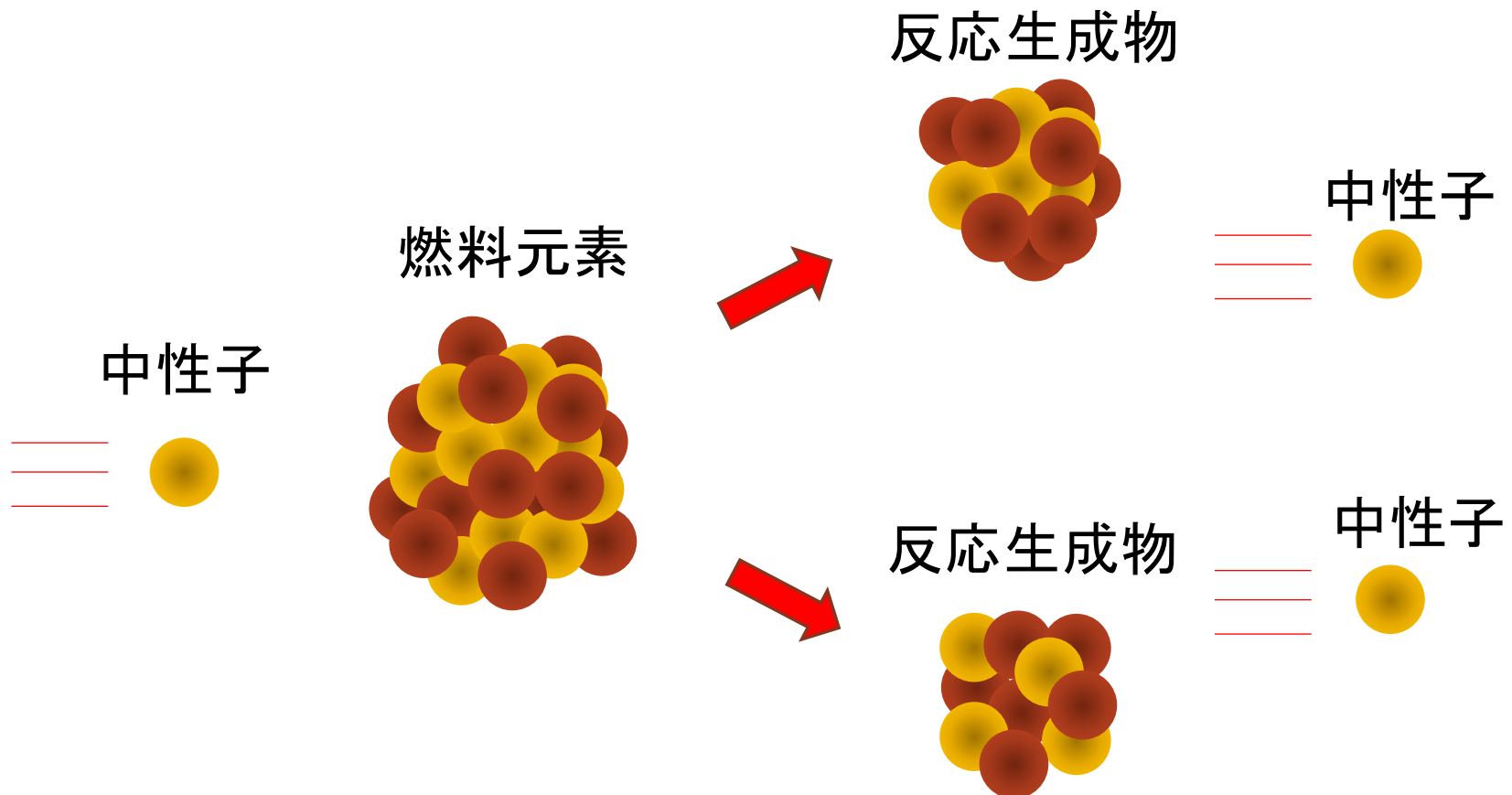


ヘリウム      バリウム



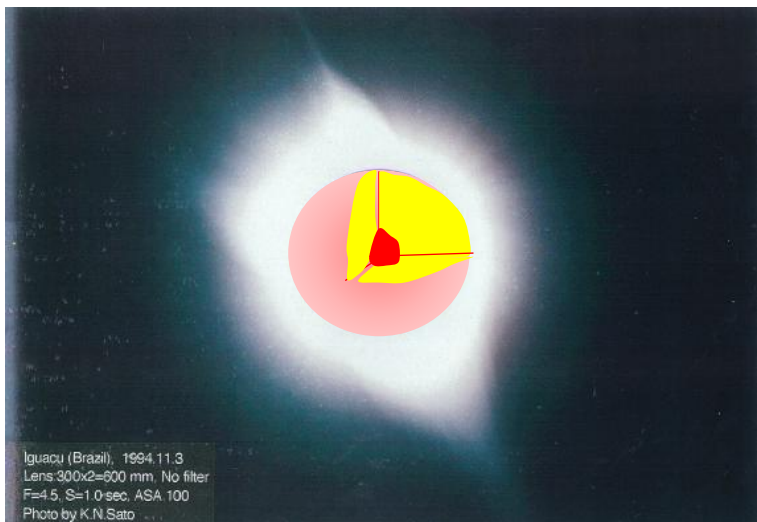
# 原子核を分裂させるには？

- 一つの中性子が重い元素に衝突して分裂をさせる
- この反応で、2つ以上の中性子が生成されると、その中性子が次の燃料元素に衝突することで連鎖的に反応が進む。
- 制御には中性子が次の燃料元素に衝突しないようにする。

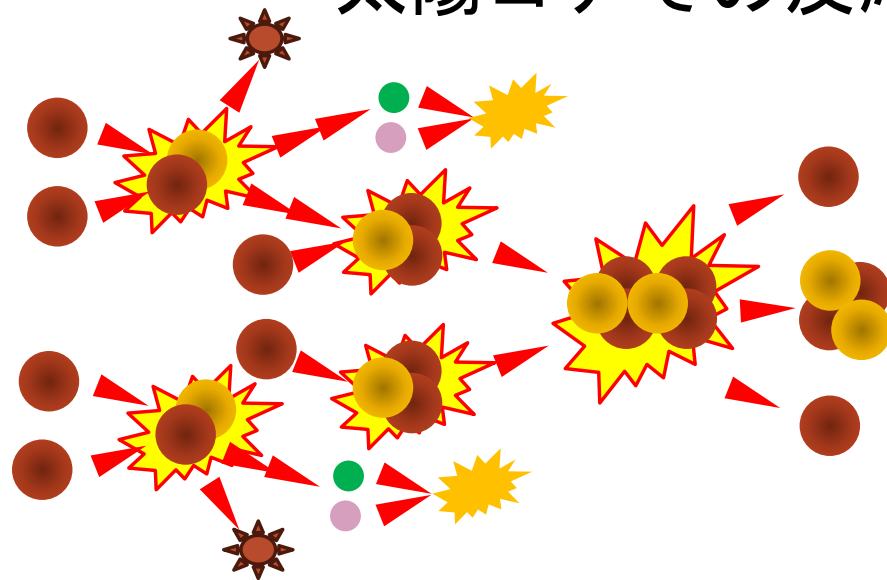










# フュージョン・エネルギーとは？

## 太陽のエネルギー源



## 太陽コアでの反応

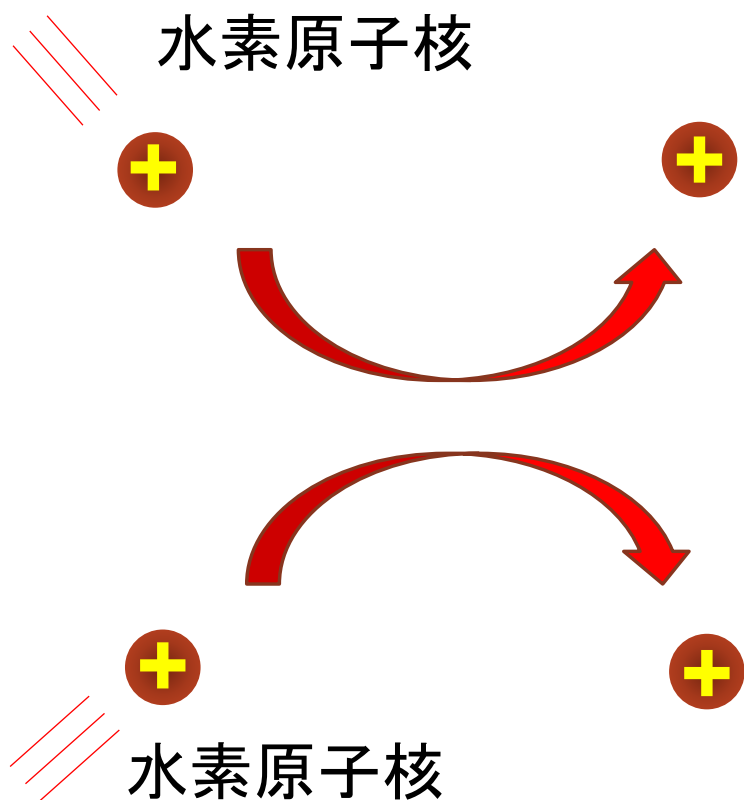


-  P : 水素原子核
-  D : 重水素原子核
-  e : 電子
-  e<sup>+</sup> : 陽電子
-   $3\text{He}$  : ヘリウム3原子核
-   $4\text{He}$  : ヘリウム原子核
-  ニュートリノ
-  ガンマ線

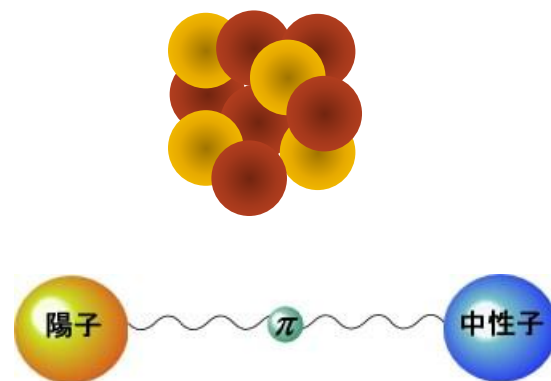
# 原子核を融合させるには？

## 原子核では陽子同士がくっついている？

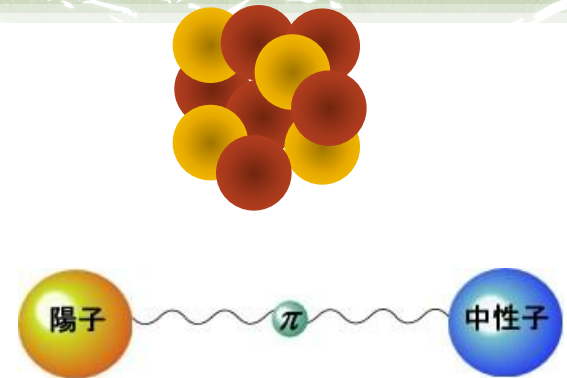
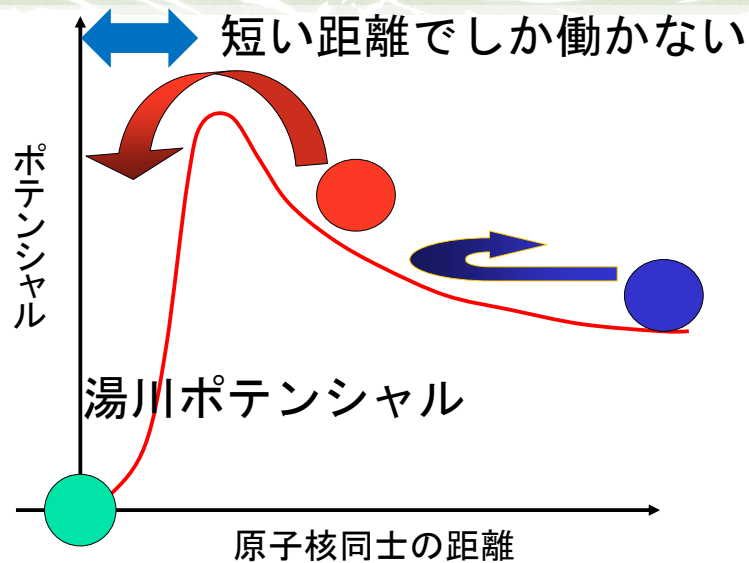
- 水素原子核同士を衝突させようとしても同じ電荷のため反発するため**通常はこの反応は起きない。**



### 原子核はどうしてくっついているの？



# 原子核はなぜくっついていてるの？ パイ中間子が介在する核力が存在

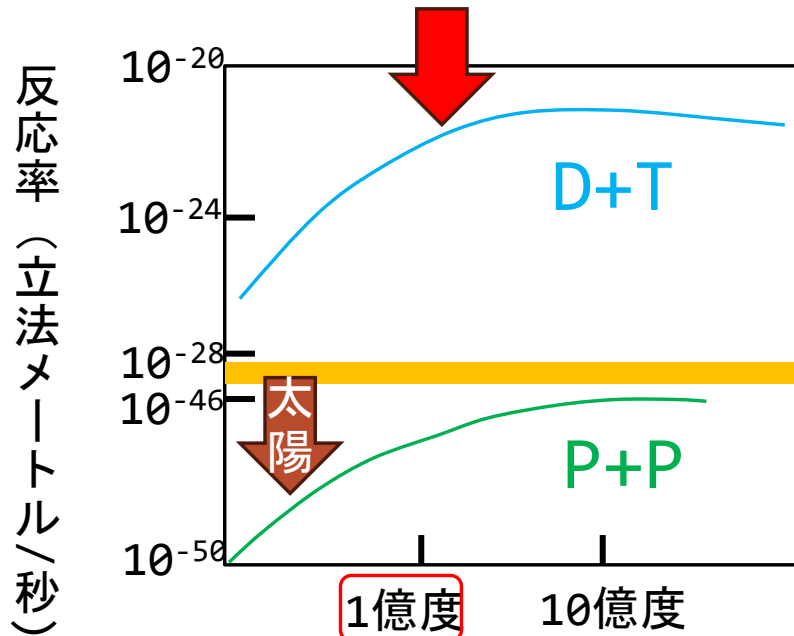


核力の源：パイ中間子の予言(1935年)  
1949年 ノーベル物理学賞受賞

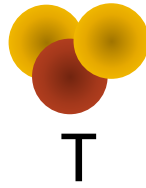
- 1955年8月 第1回原子力平和利用国際会議で核融合研究が平和利用に向けて公開
- 1957年2月 原子力委員であった湯川教授の尽力により、核融合反応懇談会が開催
- 1958年 「核融合懇談会」（湯川秀樹会長）設立
- 1958年7月 研究連絡誌「核融合研究」発刊
- 1960年5月 日本学術会議・核融合特別委員会（湯川秀樹部会長）、  
プラズマ研究所創設へ
- 1983年 「核融合懇談会」は「プラズマ・核融合学会」へ継承・発展

# 太陽では半分の水素が反応を起こす まで100億年くらいかかる。

地上では重水素 (D) と三重水素 (T) を使ってフュージョンエネルギーを得る。  
ただし3重水素は半減期12年の放射性同位元素でとても貴重



温度



- 水素原子核（プロトン：P）の反応確率は極めて小さい。太陽のように高密度 $10^{30}/\text{m}^3$ でも $10^{18}$ 秒～**100億年**かかる。→ 地上で使うことはできない。
- 反応確率の高い反応（重水素D+三重水素T）を使う。→ 密度 $10^{10}/\text{m}^3$ で**10-100秒**くらい閉じ込めればOK

# 地上で利用する核融合反応とは？

- 重水素と三重水素が融合してエネルギーを生みだす。エネルギー密度は極めて高く、燃料 1 g で石油 8 トン分のエネルギーを放出
- この反応で、生成された $\alpha$ 粒子と中性子は次の融合反応とは無関係なのでゆっくりと反応が進む。
- $\alpha$ 粒子のエネルギーは重水素と三重水素の加温に使われる

重水素

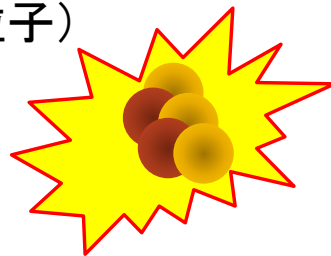
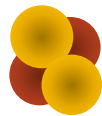


三重水素

ヘリウム原子核 ( $\alpha$ 粒子)

中性子

3.5MeV~400億度



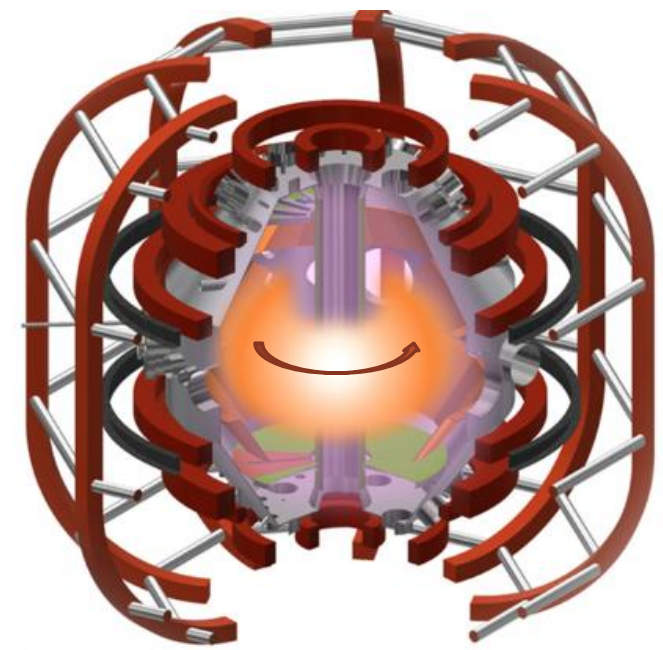
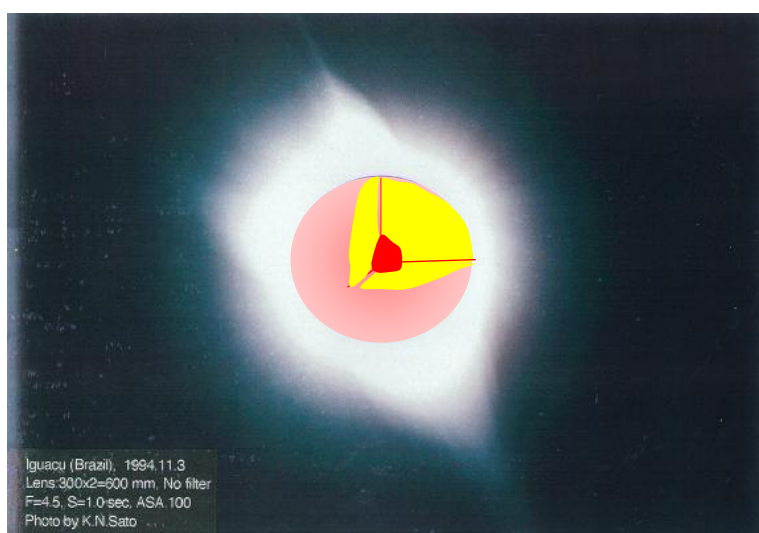
14MeV~1600億度

1億度の粒子を閉じ込めておくには磁場を使うか、強力なレーザーで圧縮する。

- 地上では太陽のような強力な重力は得られない。
- 別の力を利用する。

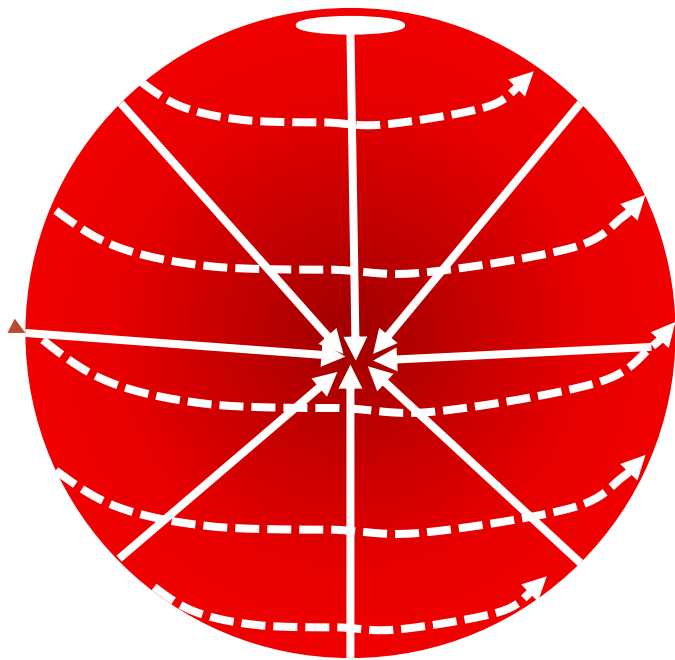
太陽：重力：球形  
レーザー：慣性力：球形

地上：電磁力：トーラス

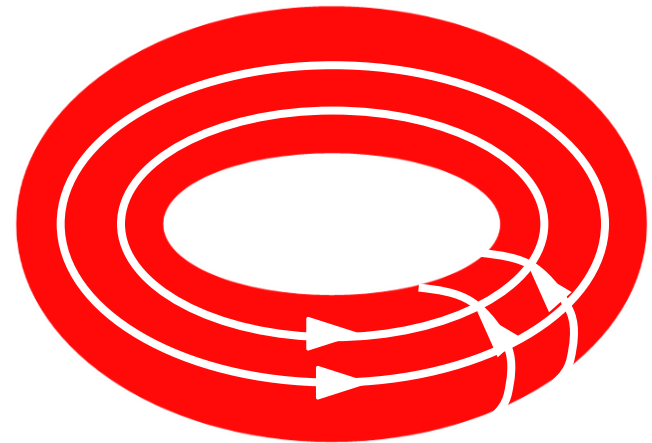


地上で1億度の粒子を閉じ込めておくには重力以外の力を使う必要がある。磁場・電流を使う場合にはトーラス

重力は向心力  
閉じ込められるものは、  
トポロジ的には球形となる。

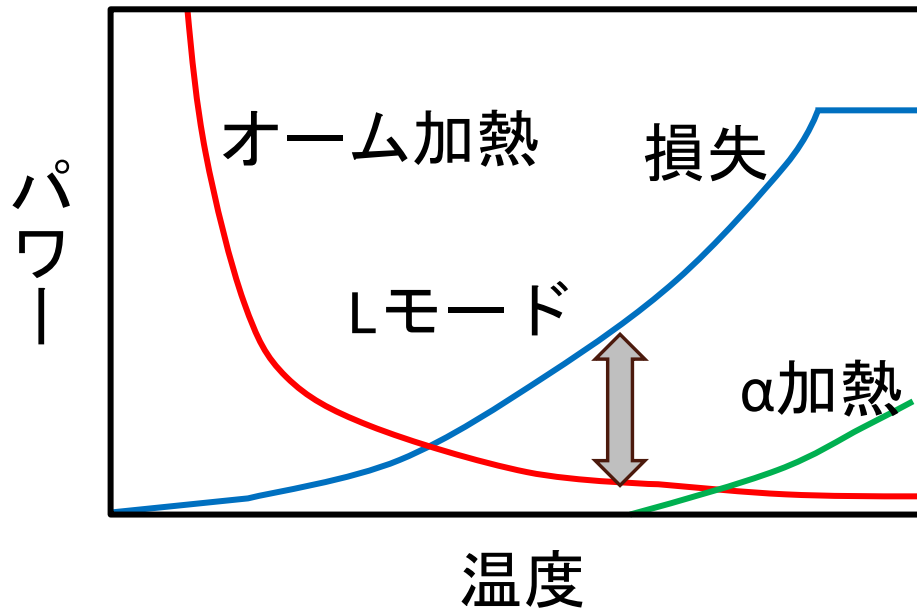


磁場・電流は流れ場  
トーラスは流れの停留点を  
造らない。



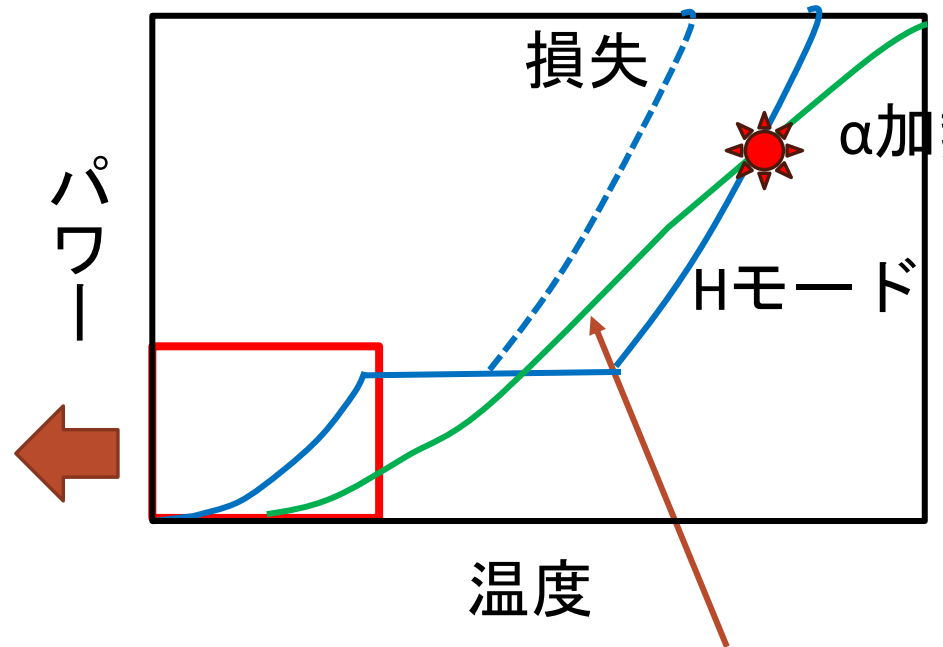
# プラズマをどうやって加熱するか？ オーム加熱と $\alpha$ 加熱、LとHモード

低温部分（イメージ図）



差分を埋めるためにパワーを注入する必要がある

全温度領域（イメージ図）



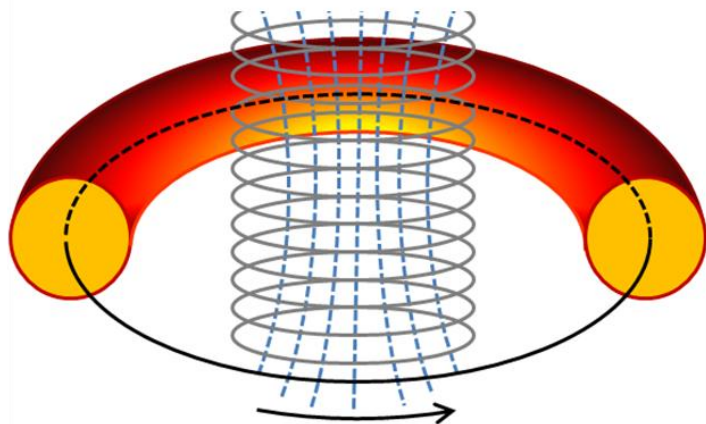
温度をあげるためにパワーを注入する必要がない

$$\text{閉じ込め時間} = \text{蓄積エネルギー} / \text{加熱パワー} = \text{損失}$$

# オーム加熱と $\alpha$ 加熱

## オーム加熱

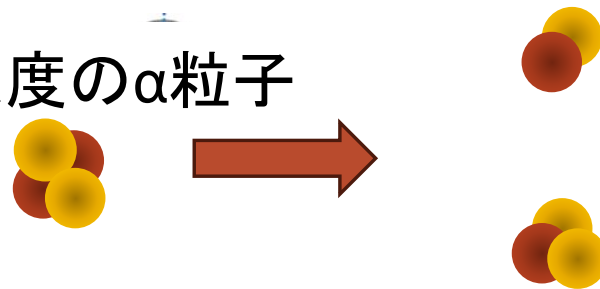
トーラス中心部に置いたコイルに時間的に変化する電流を流して誘導起電力によりプラズマに電流を流して加熱する。



## $\alpha$ 加熱

3.5MeV $\sim$ 400億度の $\alpha$ 粒子は電荷をもつため磁場によって閉じ込められる。多数の粒子とクーロン散乱することでエネルギーを渡す。

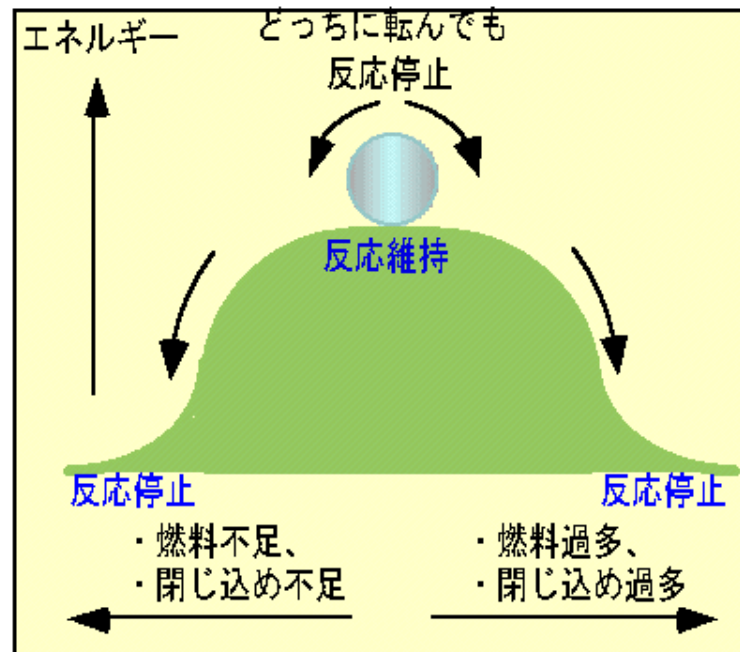
400億度の $\alpha$ 粒子



$\sim$ 1億度のD, T, 電子

# フュージョン炉の運転

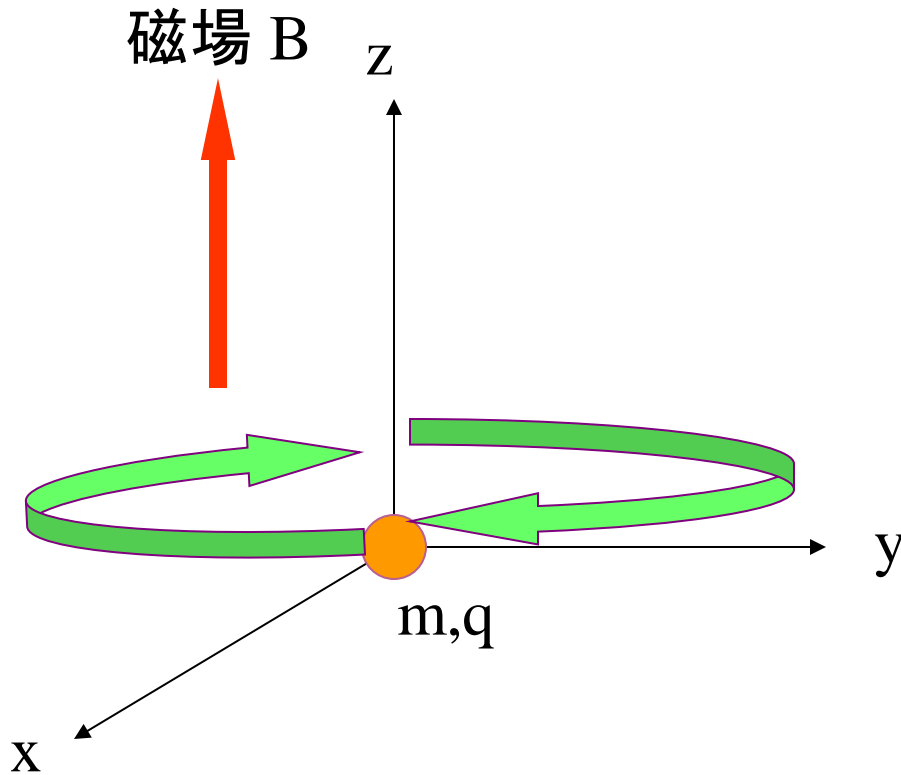
- ・ 原子炉の安全性は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が原則
- ・ フュージョン炉では、主に【閉じ込める】に注意を集中  
――>核的暴走を原理的に起こさない



核融合エネルギーの技術的実現性、計画の広がりと裾野としての基礎研究に関する報告書（内閣府原子力委員会）

# 磁場がなぜ有効か？ 荷電粒子は磁力線に巻き付く

## 定常磁場中での運動



$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B_z$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = -qv_x B_z$$

$$\frac{d^2 v_x}{dt^2} = -\left(\frac{qB_z}{m}\right)^2 v_x = -\Omega^2 v_x$$

$$v_x = v_x(0) \exp(i\Omega t)$$

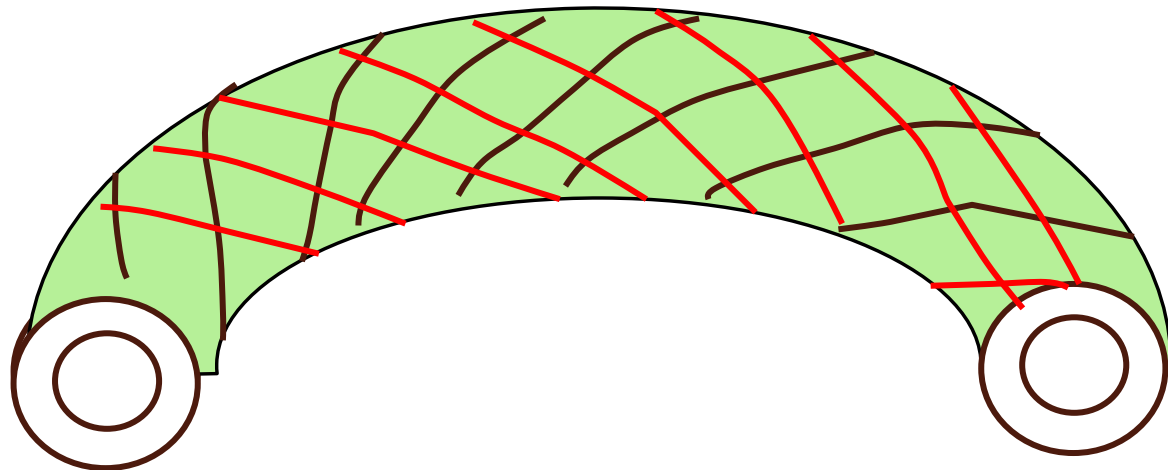
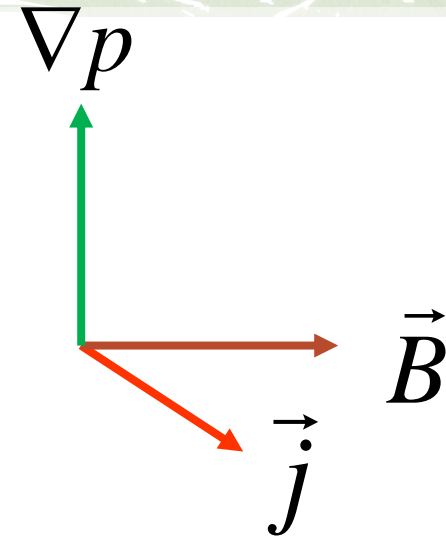
# プラズマの流体平衡はローレンツ力と膨張力のバランスで決まる

$$\nabla p = \vec{j} \times \vec{B}$$

この式から

$$\vec{B} \cdot \nabla p = 0$$

$$\vec{j} \cdot \nabla p = 0$$



# プラズマを見る（受動的計測）

□ 様々な波長の光が放出され、計測に利用される。

ミリ波・マイクロ波 → 電子温度

赤外線 → 対向壁温度

可視光 → 不純物密度、電子温度・密度

紫外線・軟X線 → 放射エネルギー

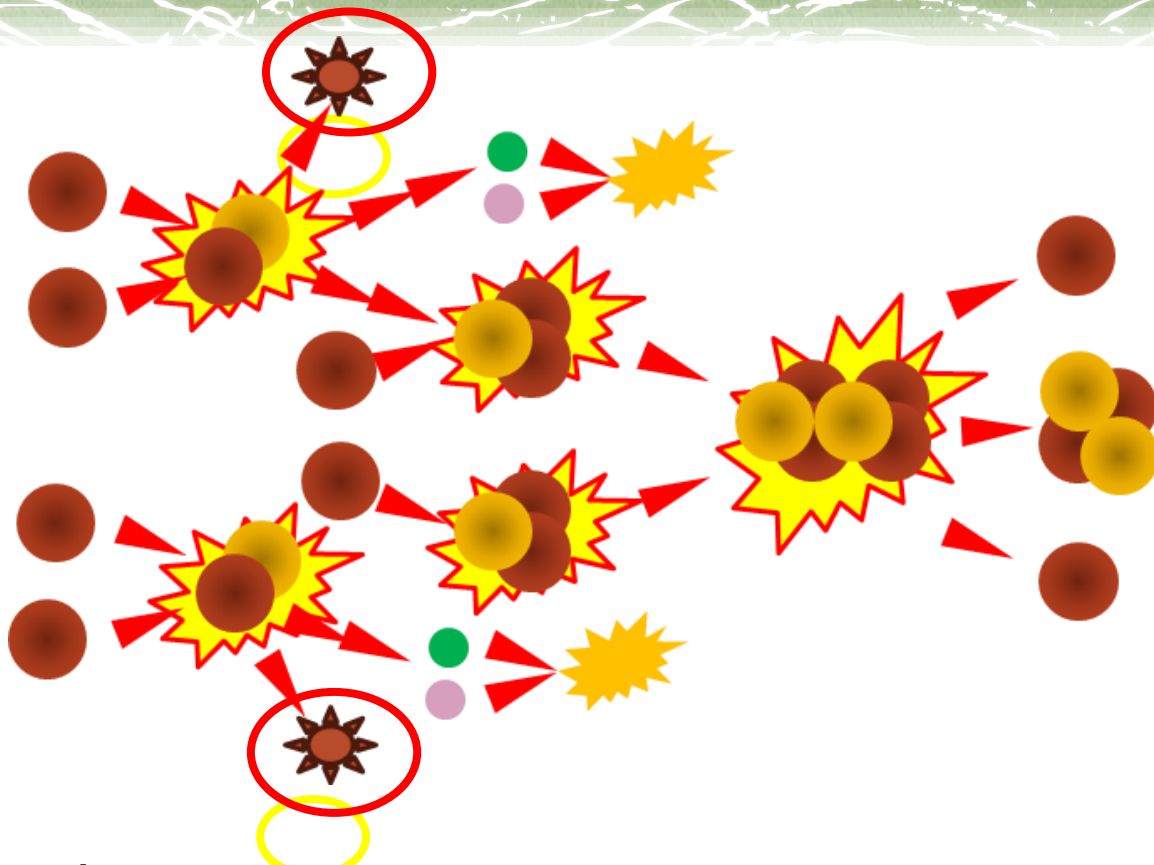
制動放射 → プラズマと壁の相互作用

$\gamma$ 線放射 → 高エネルギーイオン

シンクロトロン放射 → 放射エネルギー

中性子 → フュージョン反応

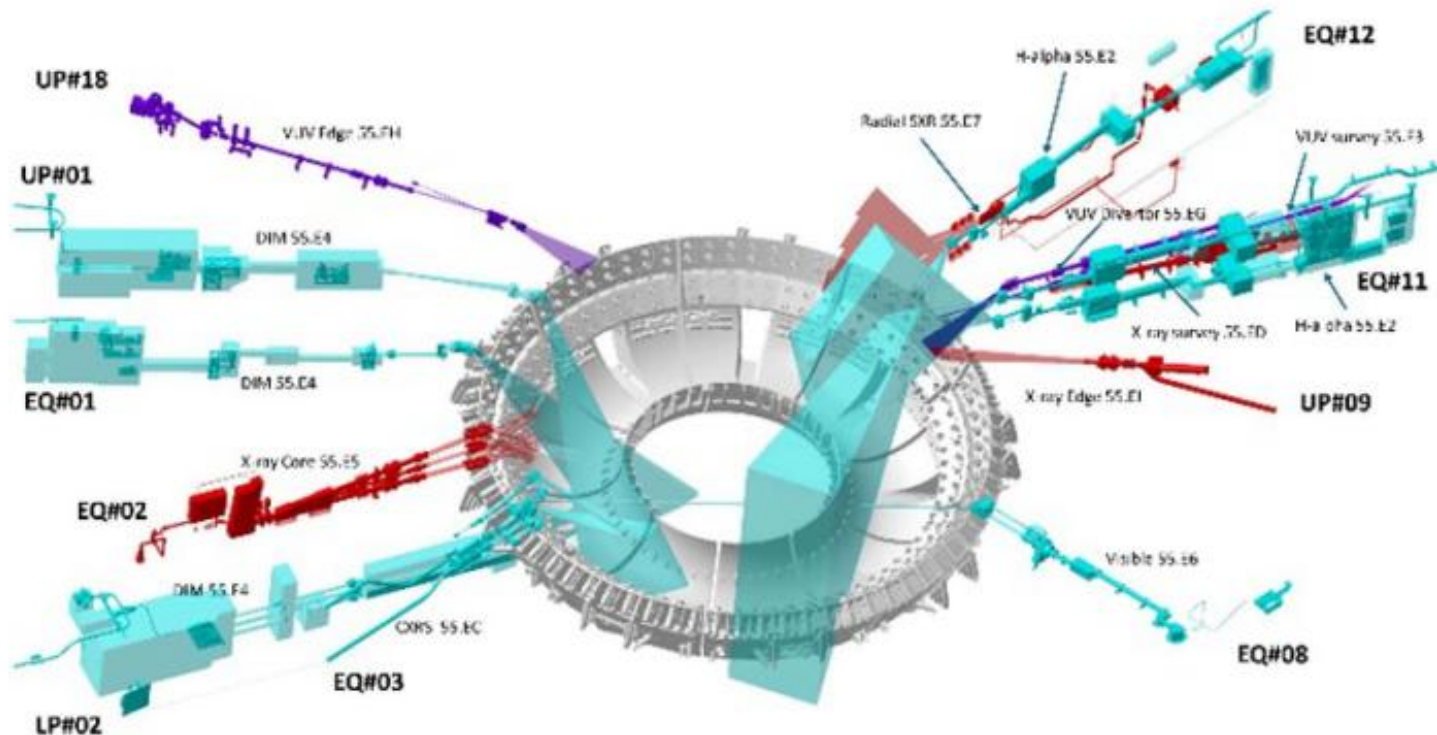
# 太陽の内部を見るには？ 太陽ニュートリノの観測



この反応で生じる電子ニュートリノはニュートリノ振動によって地球に届く際にタウ型/ミュー型に変化する。

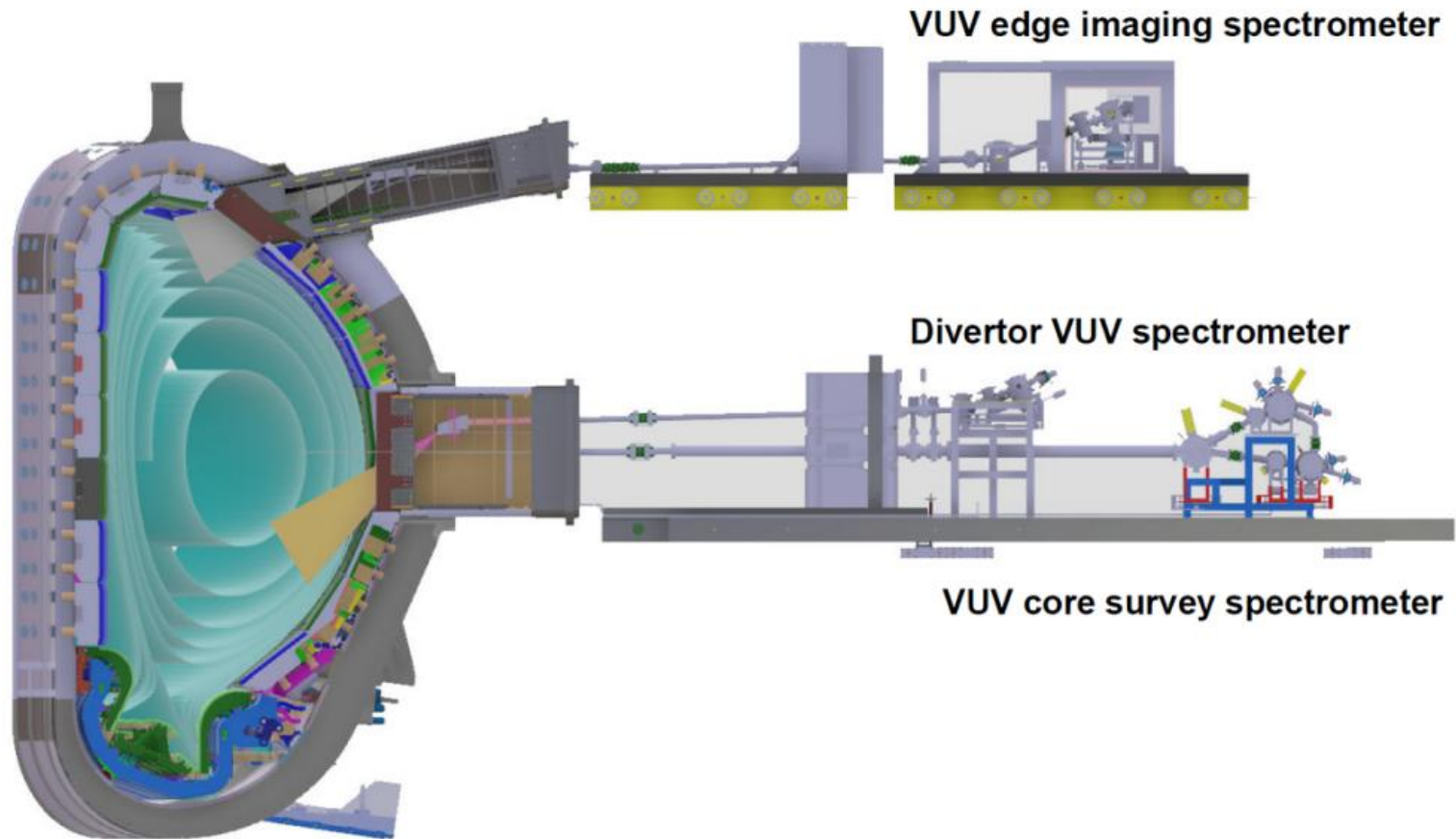
梶田先生とマクドナルド先生の2015年のノーベル物理学賞

# ITERにおける受動的分光計測

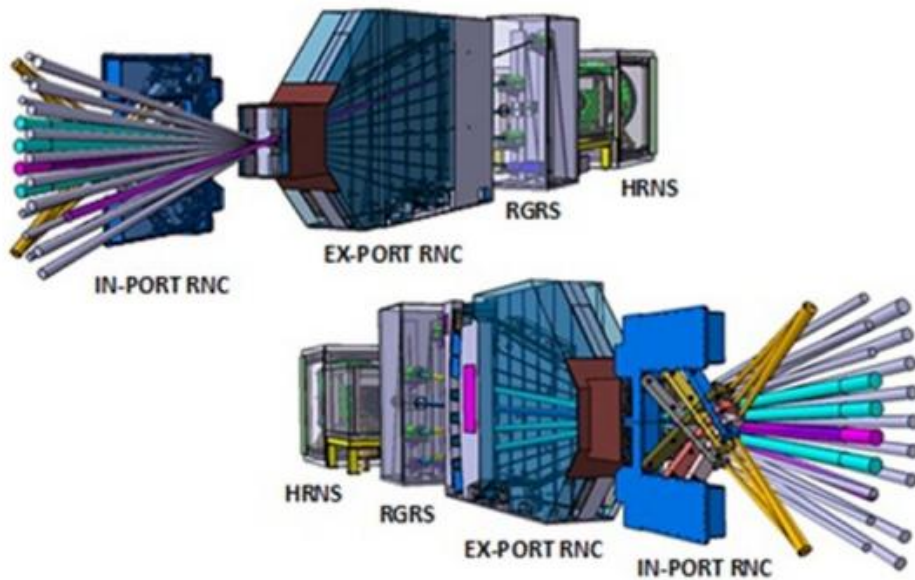


**Figure 91.** The port location, in upper (UP), lower (LP) or equatorial (EQ) ports, of the passive spectroscopy instruments of ITER with the extent of the cone of view for each instrument. See table 28 for measurement roles.

# ITERにおけるVUV計測イメージ

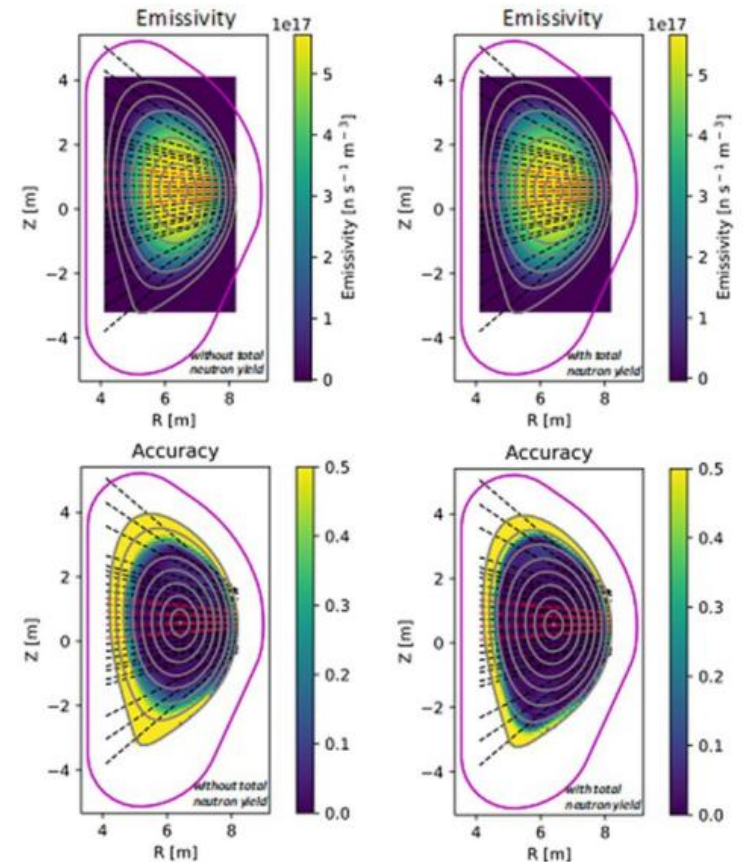


# 中性子で見たプラズマ (ITER)



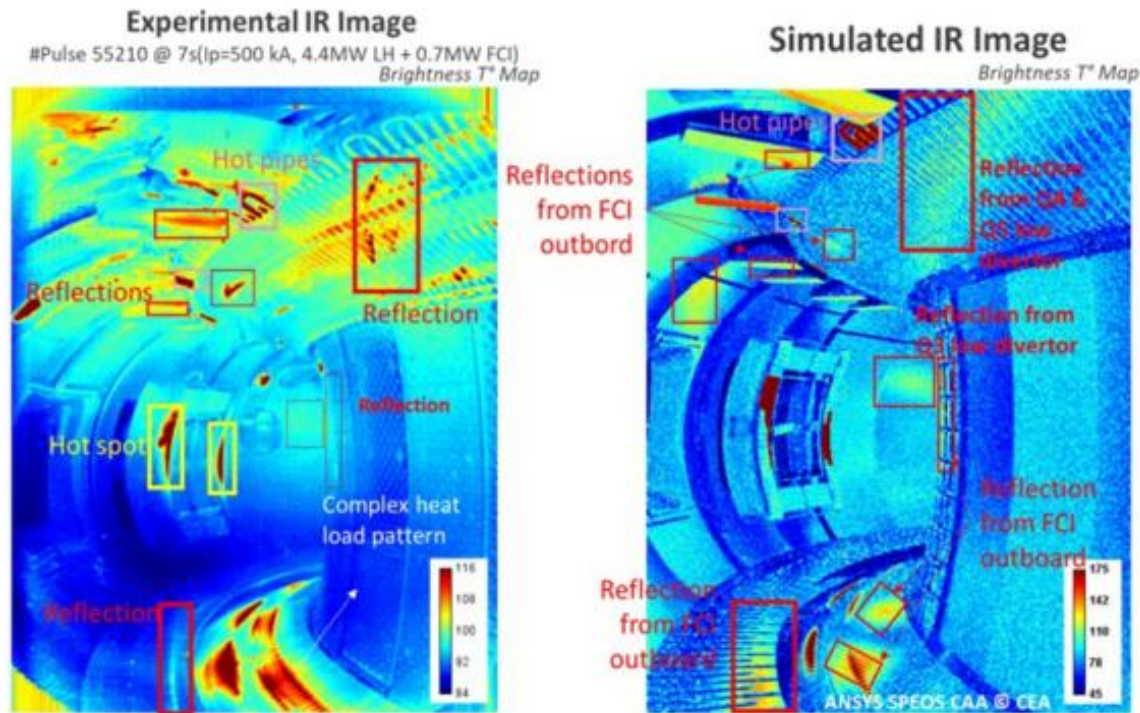
**Figure 36.** Layout of Radial Neutron Camera. The two interfacing diagnostics (Radial Gamma Ray Spectrometer (RGRS) and High Resolution Neutron Spectrometer (HRNS)) are also indicated. In-port RNC LOS are depicted in yellow, ex-port RNC LOS in grey, RGRS LOS in blue and HRNS LOS in pink.

Mazon\_2025\_Nucl.\_Fusion\_65\_113001



**Figure 41.** MFR reconstruction results with and without inclusion of total neutron yield constraint. Top: 2D maps of reconstructed neutron emissivity (average value). Center: 2D maps of reconstruction accuracy. Reproduced from [179]. CC BY 4.0.

# 赤外線で見たプラズマ(WEST)



**Figure 22.** Infrared experimental image (left) and simulated image (right) of ITER-like wide angle tangential view of WEST tokamak. The IR ray tracer is able to separate the thermal events from false hot spots caused by multiple reflections and provide the origin of reflections. Reproduced from [133]. CC BY 4.0.

# 地上のプラズマを測る

## □ 受動計測と能動計測

電子温度・密度（分光、トムソン散乱）

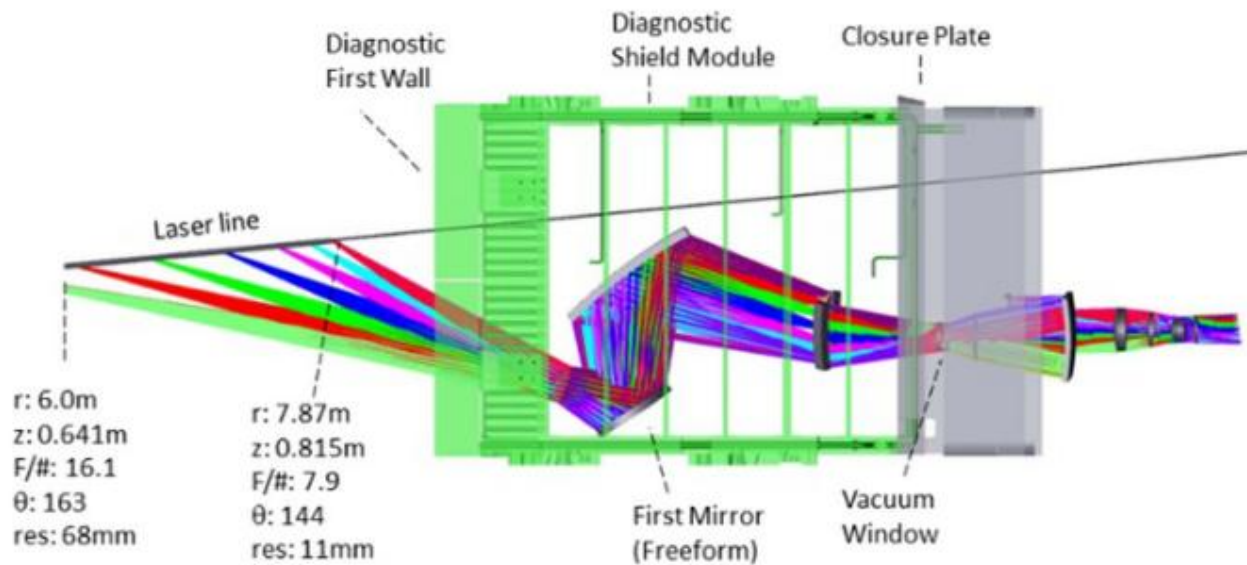
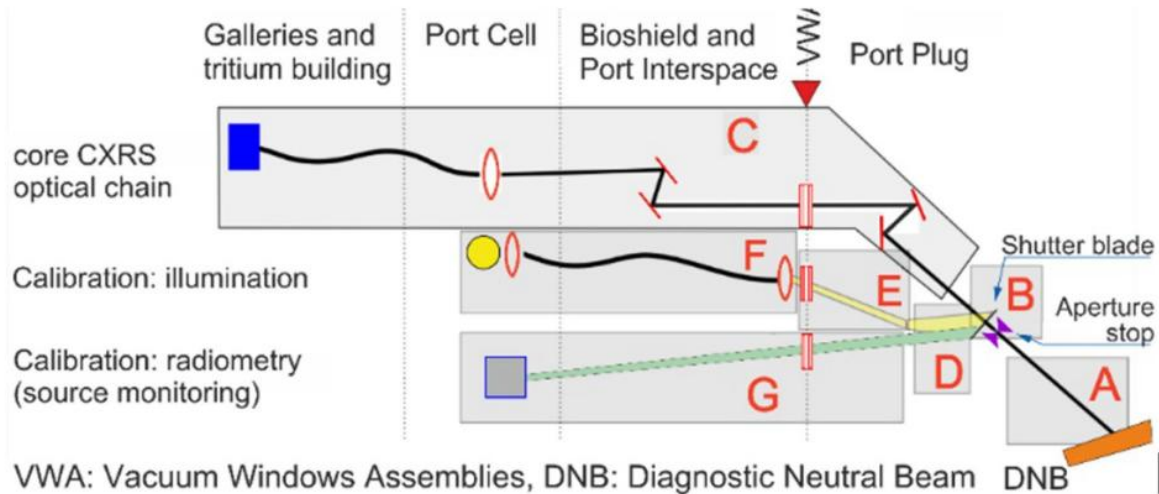
イオン温度・密度（NPA、CXRS）

磁場分布（磁気計測、ファラデー回転）

揺動（磁気プローブ、電磁波反射）

能動計測は太陽ではできない計測でフュージョン炉では主力計測

# ITERでのCXRS & CPTSシステム



# ITERでの計測の分類例

MP; Machine Protection, BC; Basic Control, AC; Advanced Control, PHY; Physics Purpose

**Table 5.** Primary contributions of the laser-aided diagnostics by operational role and parameter.

System	Role	Parameter
C1: Core plasma Thomson scattering	AC AC	052: Core $T_e$ profile 054: Core $n_e$ profile
C2: Thomson scattering—edge	AC PHY	055: Edge $n_e$ profile 053: Edge $T_e$ profile
C4: Thomson scattering (Divertor, Outer)	PHY PHY	090: $n_e$ Divertor 091: $T_e$ , divertor
C5: Toroidal interferometer/ Polarimeter	BC PHY	011: $\int n_e dl / \int dl$ 063: TAE $\delta N/n$ , $\delta T/T$
C6: Polarimeter poloidal	AC AC PHY	057: $r(q = 1.5, 2)/a$ 058: $r(q_{min})/a$ 056: $q$ profile
EA: Laser-induced fluorescence	BC	087: $n_{He}$ , divertor
FA: Density interferometer polarimeter (DIP)	BC PHY	011: $\int n_e dl / \int dl$ 090: $n_e$ profile, divertor

# フュージョン炉での計測は？

- 磁気計測 → 制御に必要
- 中性子 → 制御・安全に必要
- 熱負荷分布 → 出力・安全に必要

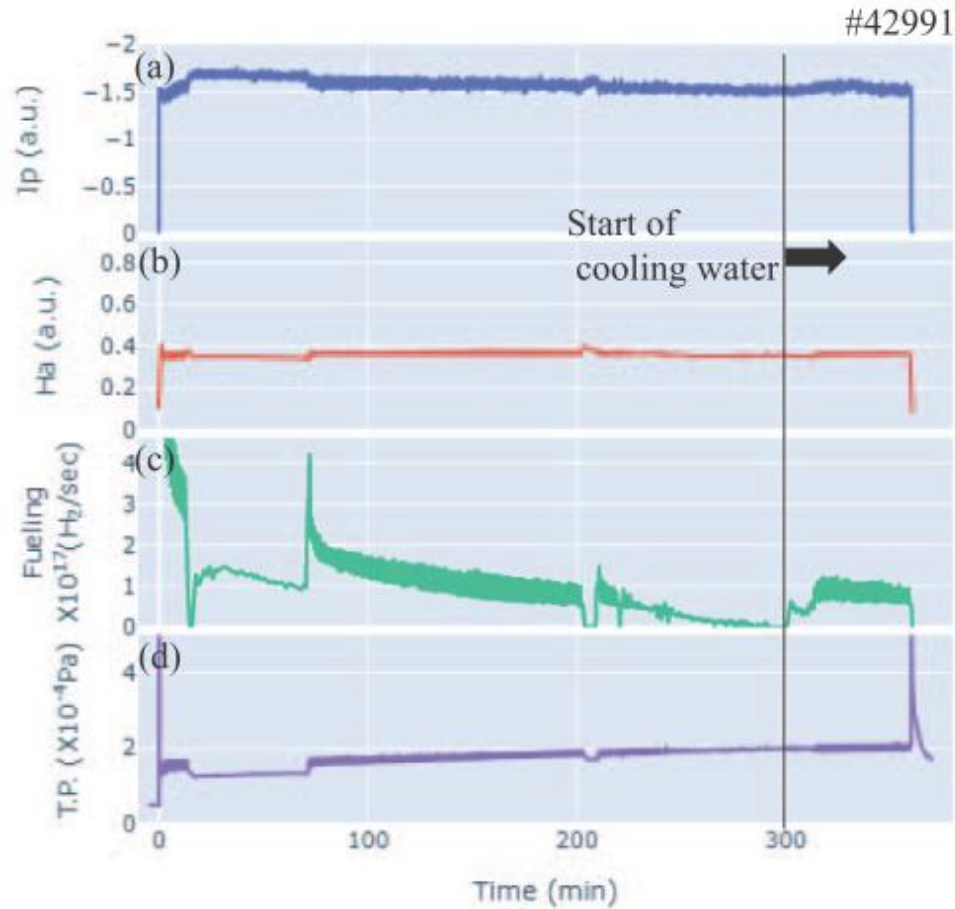
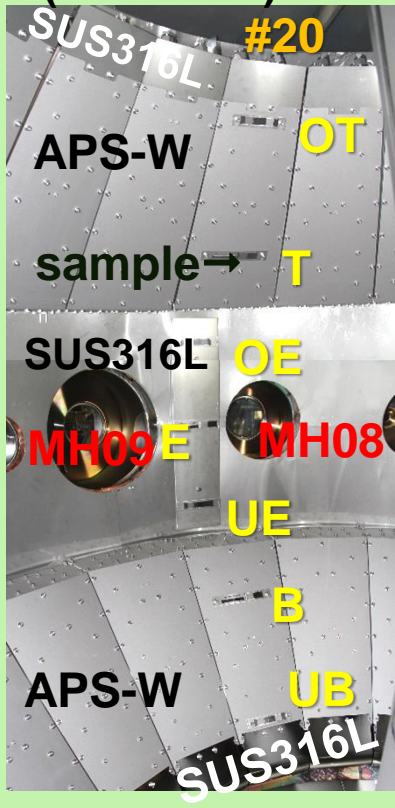
# フュージョン炉を操る

- 磁場分布制御
- 燃料制御
- プラズマ加熱 ←  $\alpha$ 加熱下では困難
- プラズマ回転 ←  $\alpha$ 加熱下では困難
- 能動的壁制御

# 能動的壁温制御

Before 2014AW  
(Initial wall)

Upper Wall  
Equator Wall  
Lower Wall



# まとめ

- 太陽とフュージョン炉を見る場合の比較を行った。観測方法も観測から得られるデータも異なるが、能動的な観測ができること、操作できることが大きな違いである。
- ただし、フュージョン炉では一部の観測方法、操作方法が使えなくなる可能性が高く、より自律性が高くなると考えられる。
- 磁場配位や燃料供給や対向壁温度が数少ない制御ノブとなることが想定される。