

核融合（フュージョンエネルギー） の概観と課題

核融合科学研究所・教授
長壁 正樹

講演の内容

- エネルギー開発の必要性
- 「核融合」とは
- 「核融合」を実現するには
- 「核融合」の課題
- 「核融合」を取り巻く状況
- まとめ

エネルギー開発の必要性

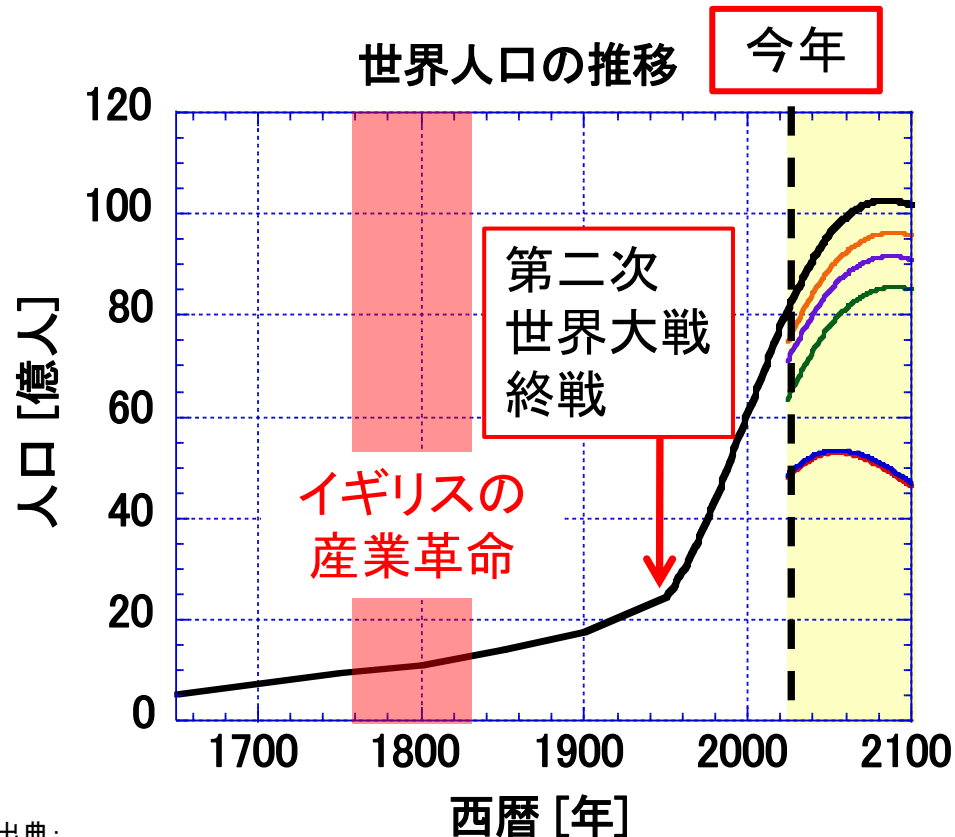
美しい夜の景色ですが・・・



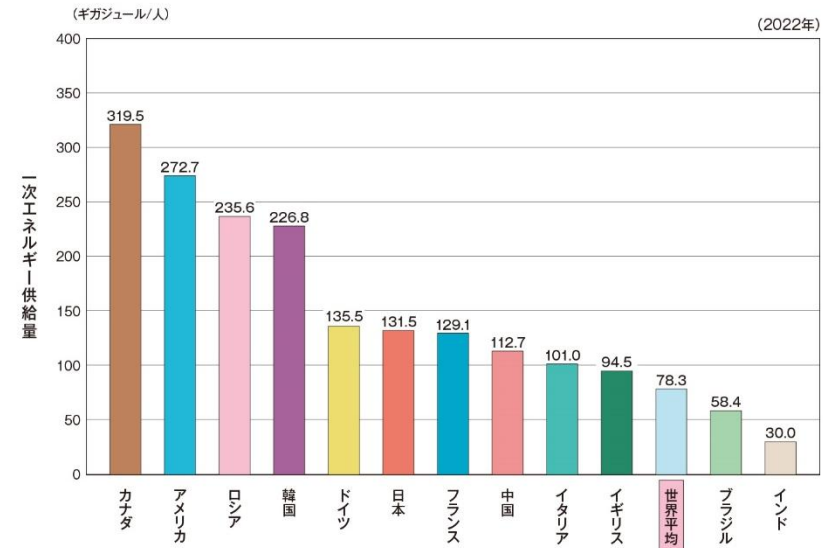
先進国ほど、エネルギーを多く消費していることがよくわかります。

今後、エネルギー消費の増大が予想されます。

- 産業革命以降、世界の人口は増加。
 - 第2次世界大戦以降は、爆発的に増加
- 先進国の一人あたりのエネルギー消費量は、世界平均の1.2～4倍。



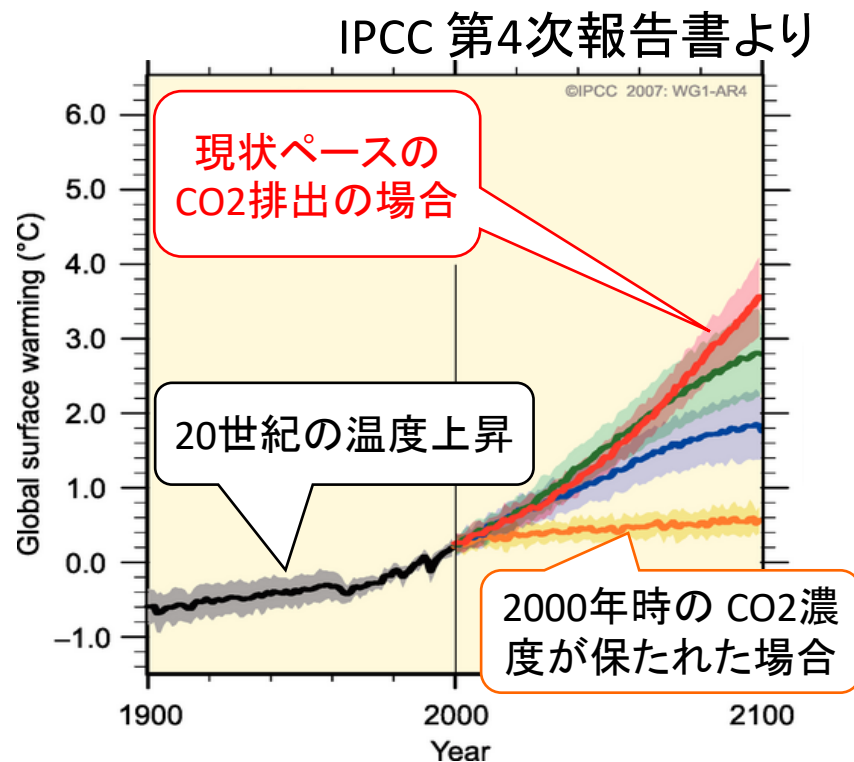
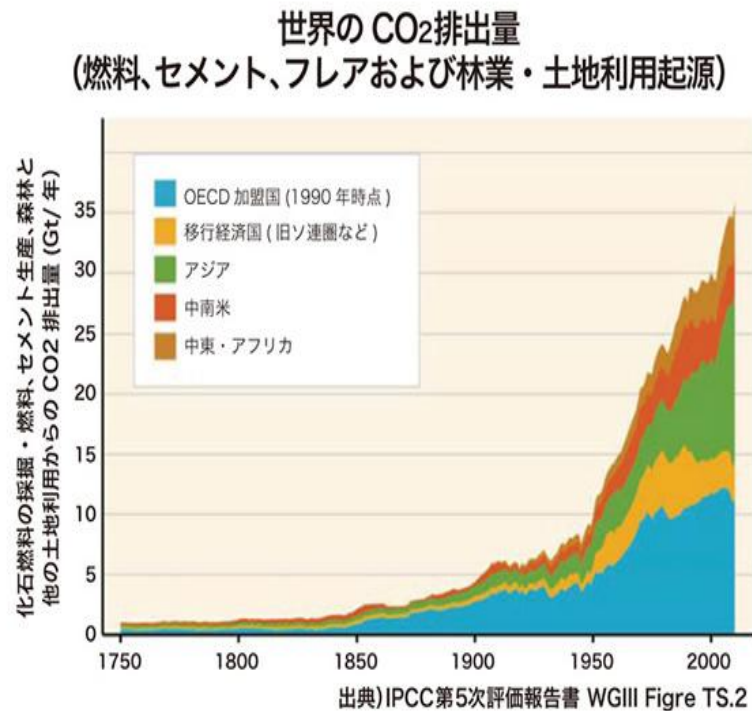
一人当たり 世界の一次エネルギー消費量



出典: IEA "World Energy Balances 2024"
<https://www.ene100.jp/zumen/1-1-4>

出典:
1900年以前の値は "The Determinants and Consequences of Population Trend Vol.1, 1973"
(<https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Data/Popular2005/01-08.htm>)
1950年以降は "World Population Prospects (2024)" による

化石燃料の枯渇と、温室効果ガスの増大による地球規模での環境変動が懸念されています。



世界各国で、

①海水面積の減少、②海面水位の上昇、③洪水・干ばつ・山火事の増加などが観測され、地球温暖化の影響が懸念されている。

2022年パキスタン豪雨 国土の1/3が水没

2019-20年 オーストラリア山火事、2023年 ハワイ・マウイ島山火事

2024年 カリフォルニア州山火事

例えば、南太平洋のツバルという国では、温暖化の影響による水没が懸念されています。
また、パキスタンでは2022年に国土の3分の1が水没する洪水が発生しました。

➤ ツバル

- ・ オセアニアにある9つの島からなる国
- ・ 人口1万2千人
- ・ 海拔が**最高でも4.5メートル**と低いため、地球温暖化による海面上昇とサイクロンの大規模化による国土の水没が懸念される
- ・ 2023年に豪政府と移住協定を締結*



首都があるフナフティ環礁の衛星写真

➤ 2022年パキスタン洪水

- ・ 2022年6月からのモンスーンによる豪雨が原因
⇒過去30年平均の3倍の雨量
- ・ 国土の3分の1が水没
- ・ 全人口の約15%に当たる3300万人以上が被災

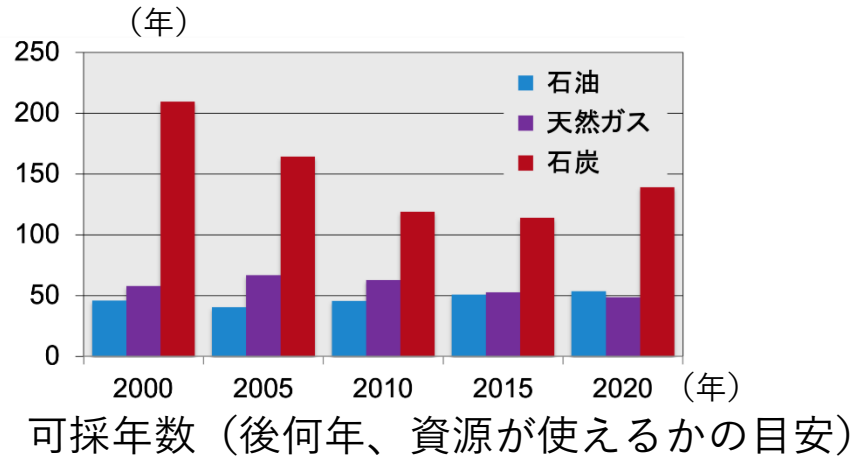
洪水による被害を受けた地域



[https://ja.wikipedia.org/wiki/パキスタン洪水_\(2022年\)](https://ja.wikipedia.org/wiki/パキスタン洪水_(2022年))
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCB18CXZ0Y4A410C2000000/>
<https://www.japanforunhcr.org/appeal/pakistan>
<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/cf3480acbcba2b8.html>

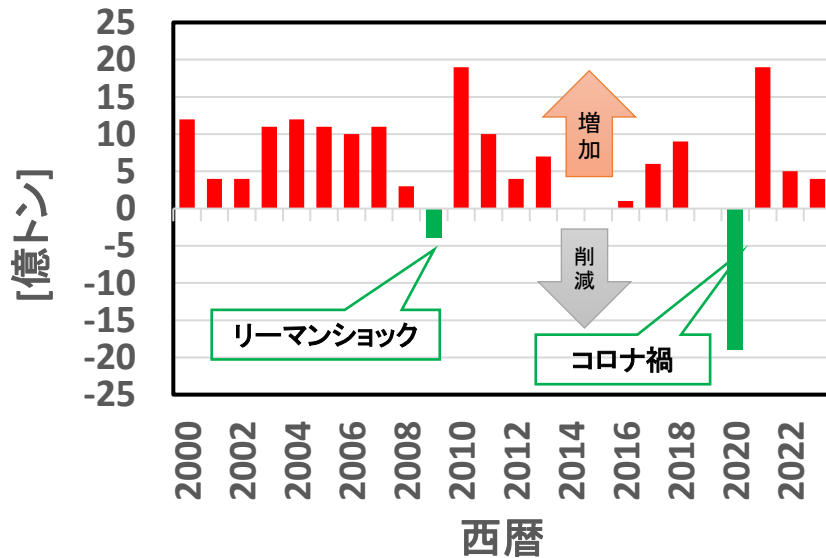
*<https://newsdig.tbs.co.jp/articles/-/830942>

エネルギー問題、環境問題の解決のために 新たなエネルギー源を緊急に確立する必要があります



- シェールガス、メタンハイドレード等を含めても、化石燃料は100～200年で枯渇
- 二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化が懸念されています。

**二酸化炭素削減と経済成長は
両立できるでしょうか？**



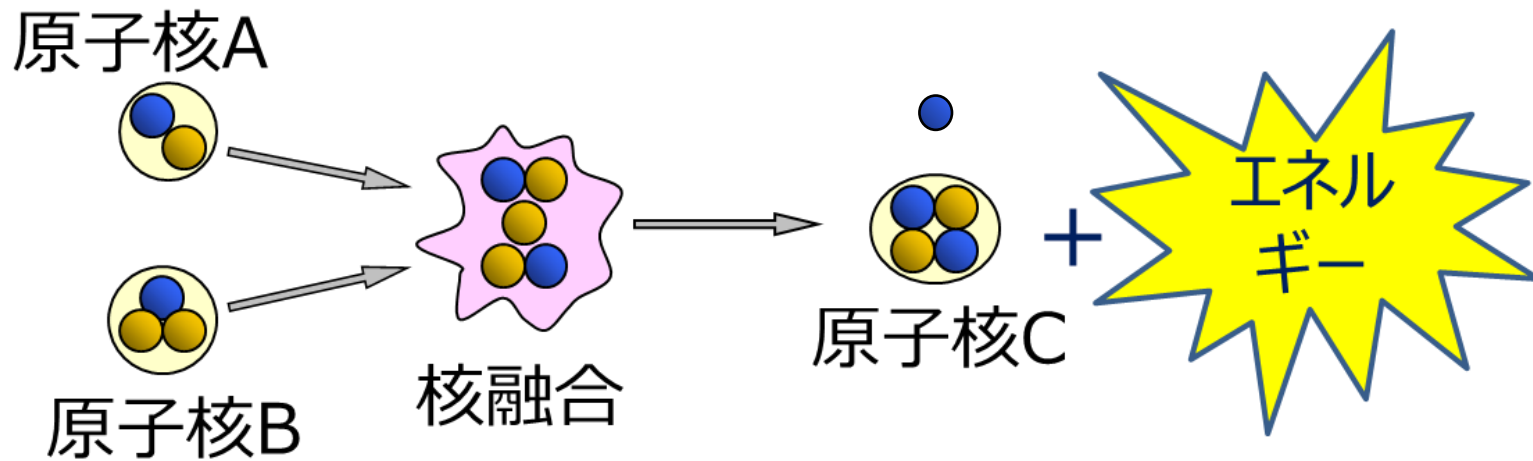
世界の二酸化炭素排出量の増減(前年比)

- 「パリ協定」の目標: 産業革命前からの気温上昇を1.5℃以下にする。
 - 二酸化炭素の排出量の**毎年7.6%の削減**が必要であるとUNEP(国連環境計画)が予測しています。
- コロナ禍による世界規模の経済活動の停止(2020年度)
 - 二酸化炭素の排出量が**前年比5.8%の減少した**とIEA(国際エネルギー機関)が報告しています。
 - コロナ禍の影響で**世界経済の成長率は3.3%減**となったことをIMFが報告しました。

経済成長と二酸化炭素排出量削減を両立させるためには、**画期的な技術革新**により**脱炭素社会**を実現しなければなりません。

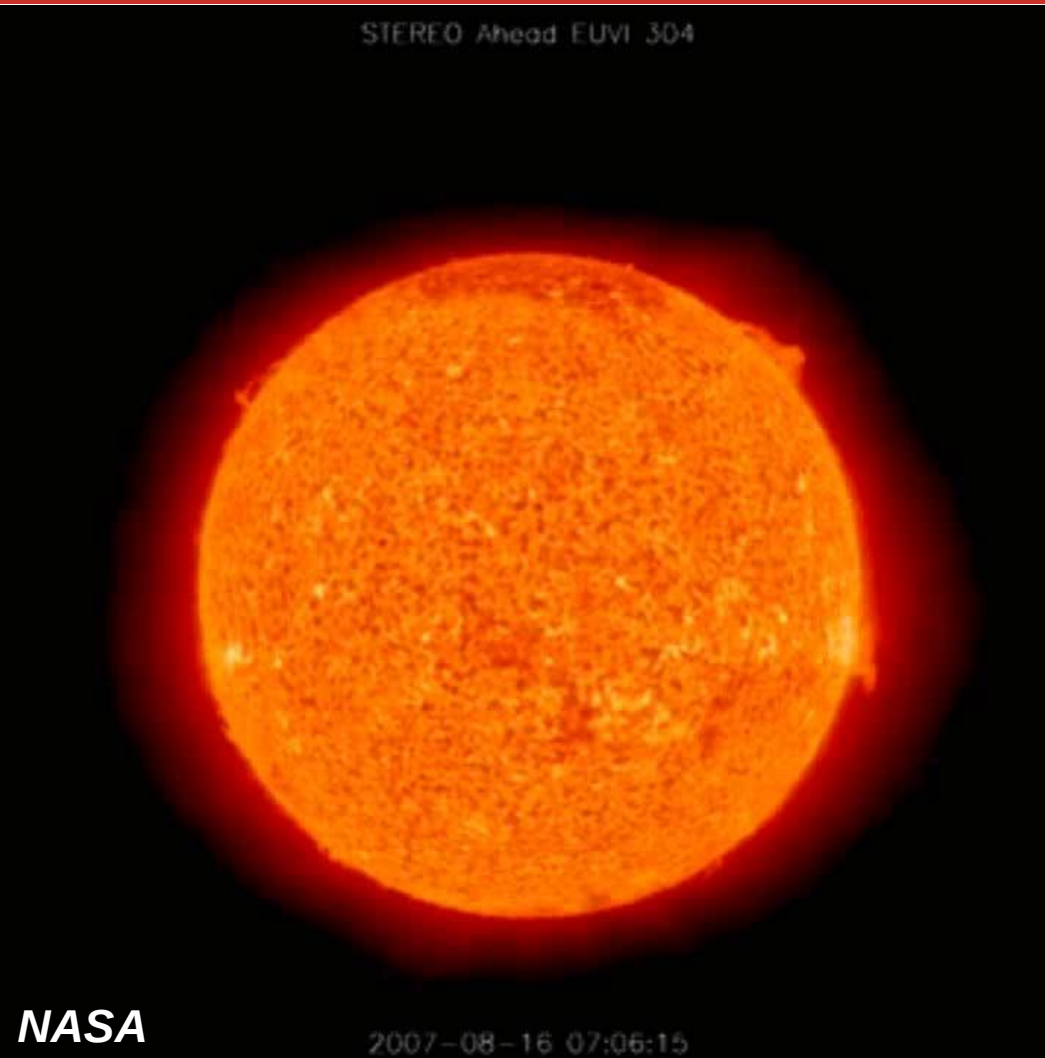
「核融合」とは

「核融合反応」とは？



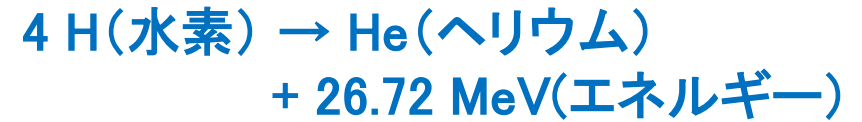
2つの原子核が合体して別の原子核になることです。
この時、エネルギーが発生します。

太陽は重力による閉じ込めで 「核融合」を実現



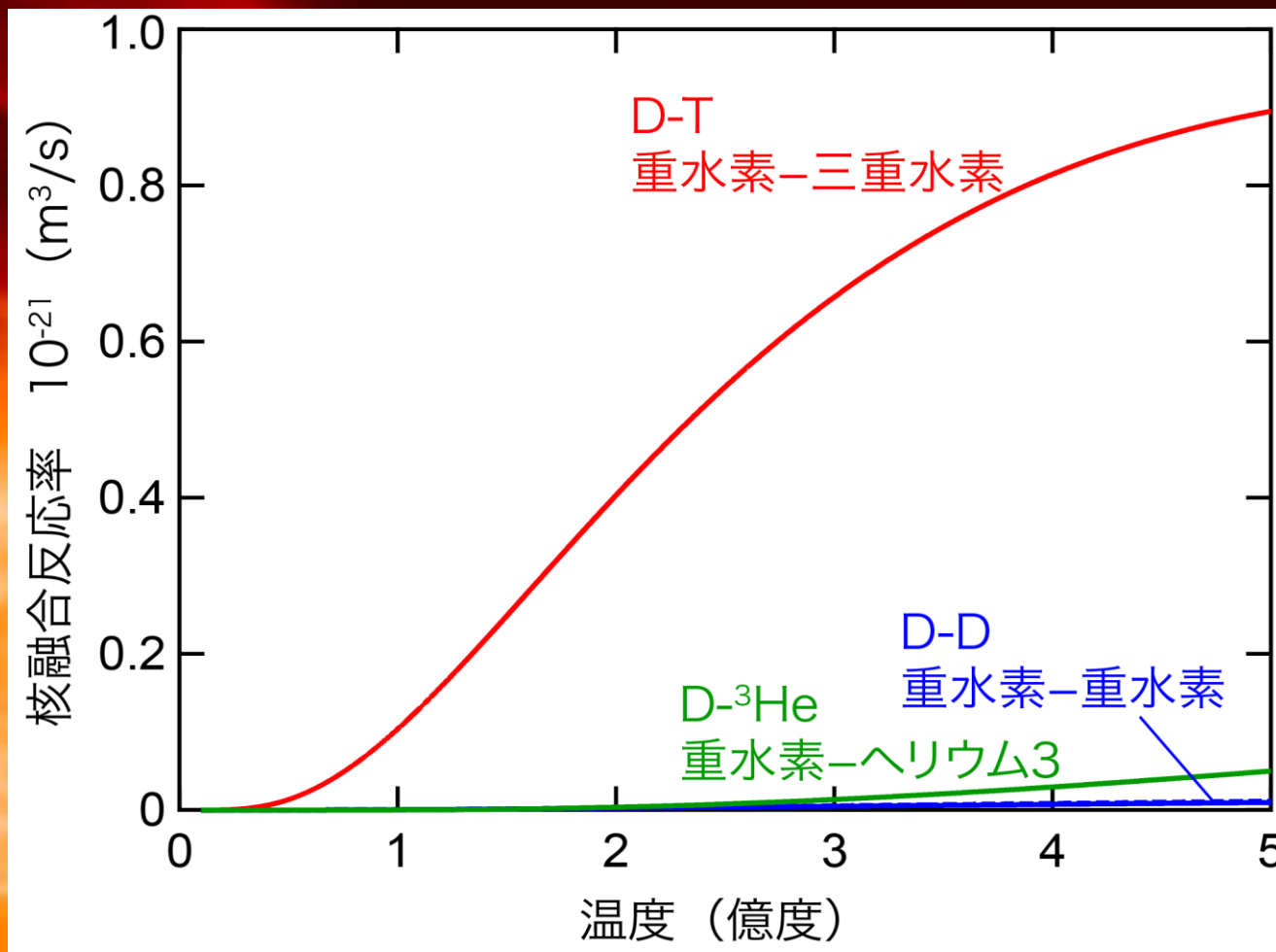
太陽の核融合

水素(陽子)4個が融合(Proton-Proton反応:P-P反応)してヘリウムに



地上で実現可能な核融合反応

より高い
温度が必要になる

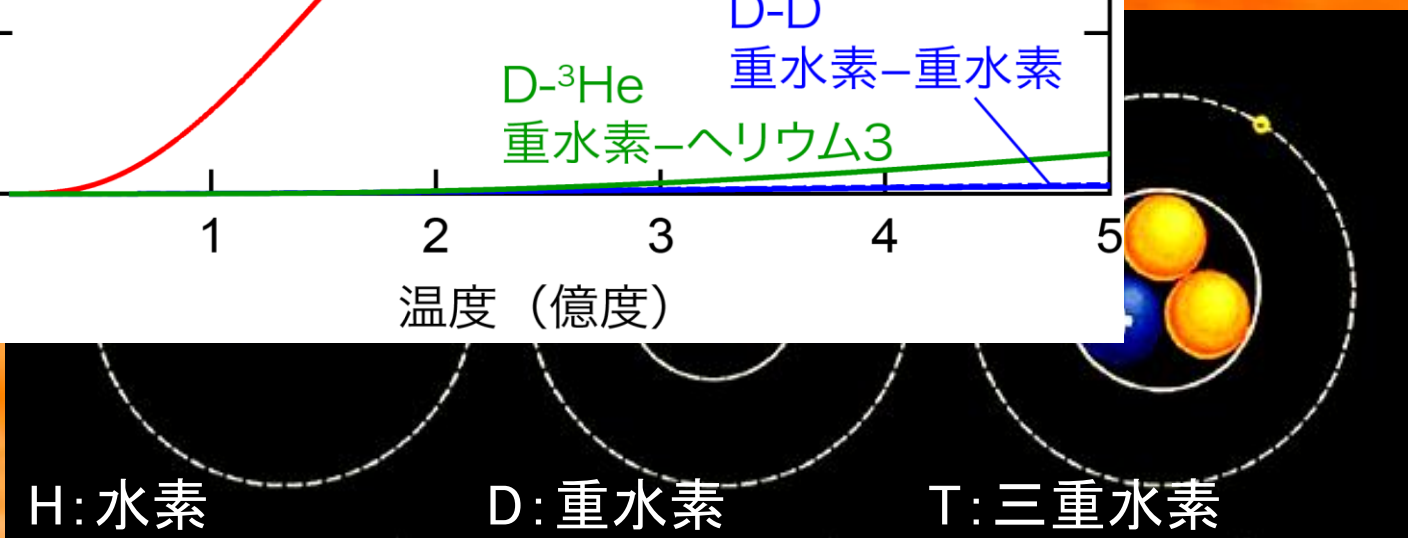


10 MeV)

7 MeV)

10 eV)

)

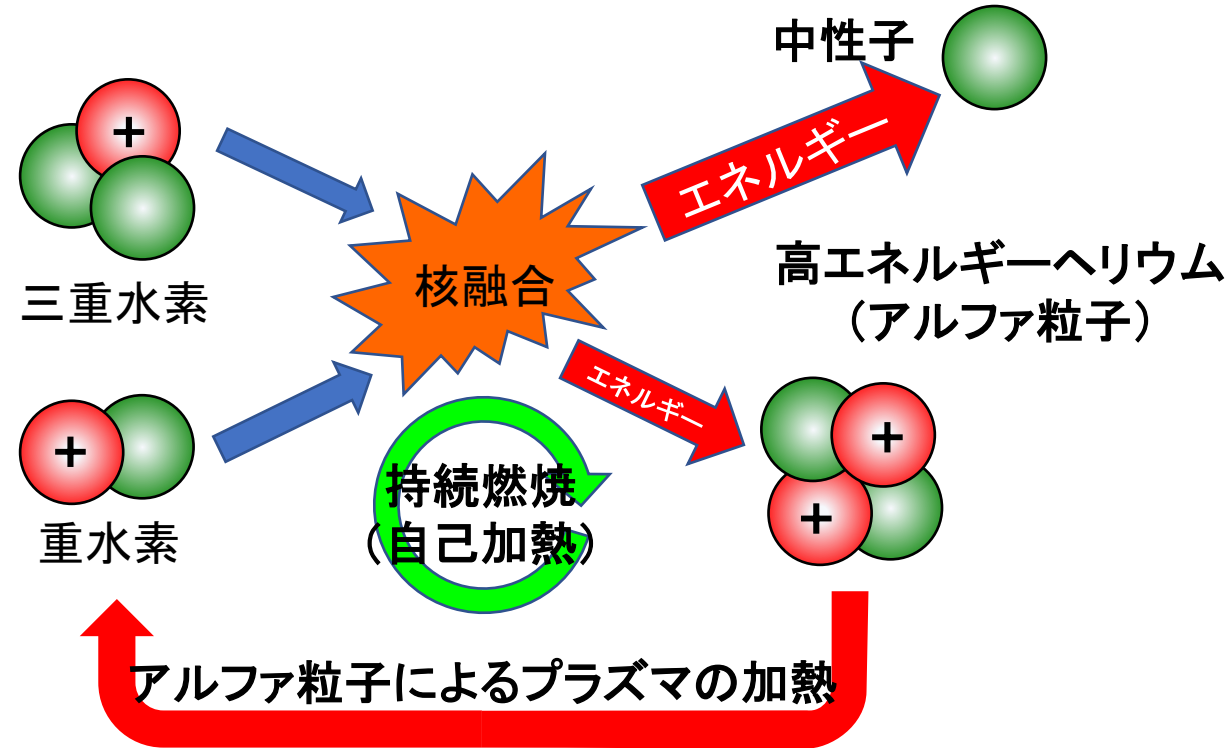


地上の核融合に必要な条件と核融合発電の利点

プラスの電氣的反発力に
逆らって融合させるには
高温(高速)が必要

核融合条件

- 温度: 1億2000万度以上
- 密度: 1cc当たり100兆個以上
- 閉込め時間: 1秒以上

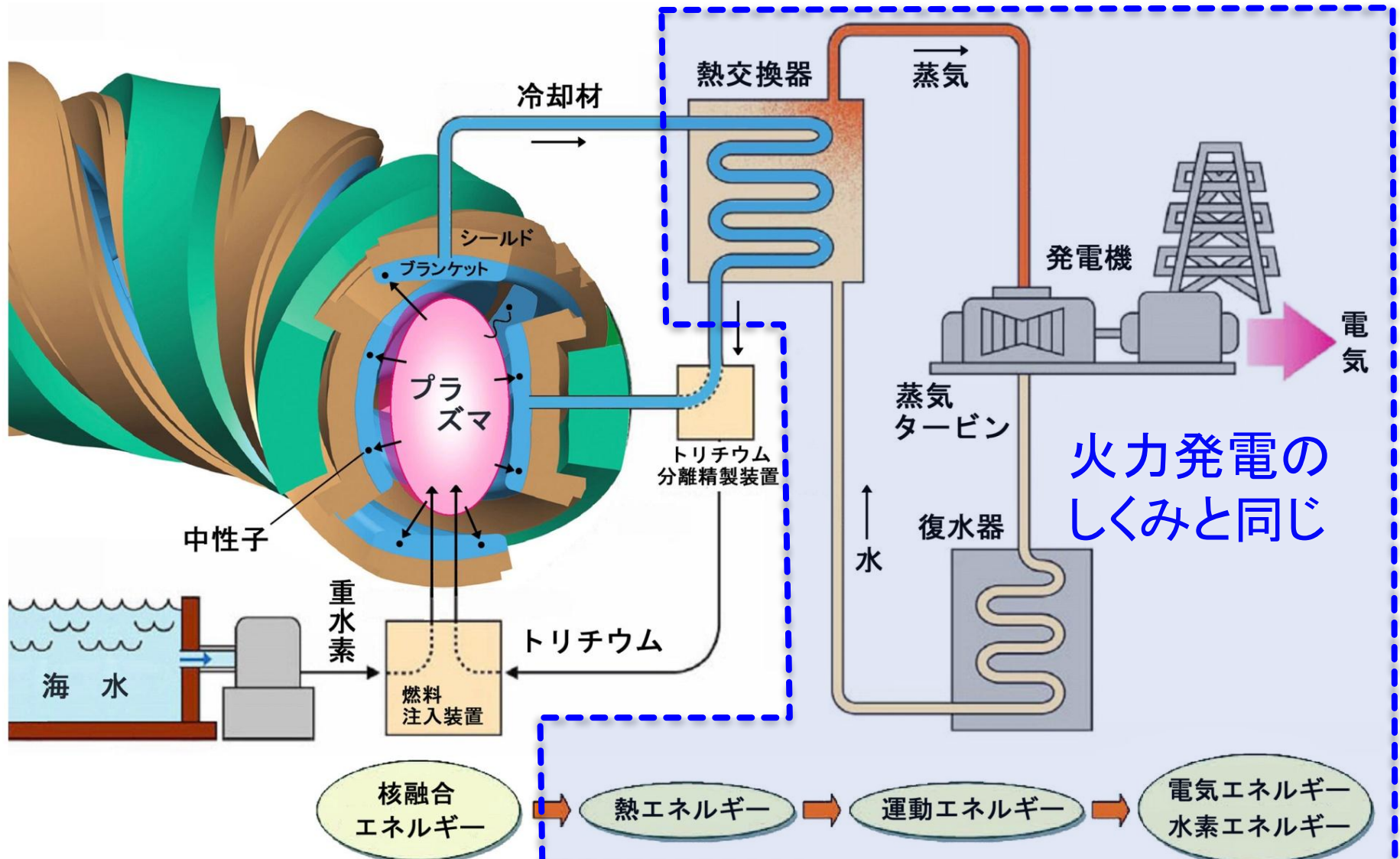


核融合発電の燃料は重水素と三重水素

- 重水素は水素の同位体、水中に豊富に含まれている
水素: 99.985%
重水素: 0.015%
- 三重水素はリチウムから生成

核融合発電炉のしくみ

核融合反応で発生した中性子の運動エネルギーを熱エネルギーにして
その熱を電気エネルギーに変換します

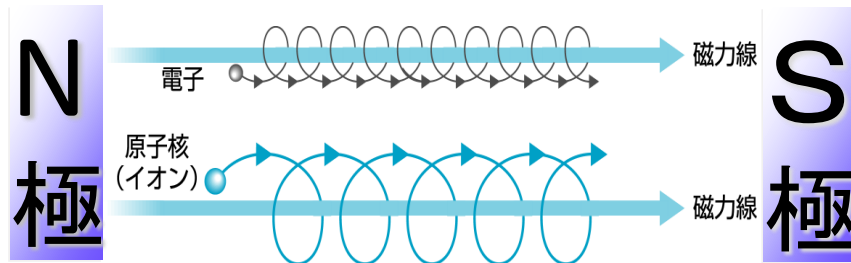


「核融合」を実現するには

地上で「核融合」を実現するための閉じ込め方式

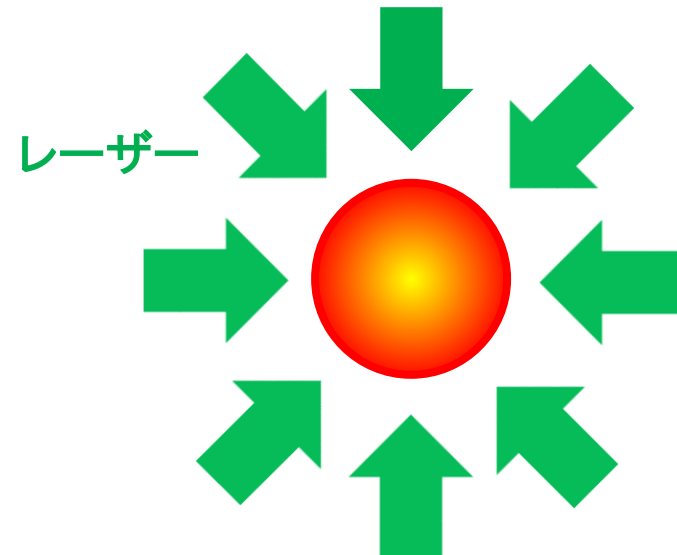
磁場閉じ込め方式

イオンが磁場の周りに巻き付く性質（ジャイロ運動・ラーマー運動）を利用して燃焼状態を実現する

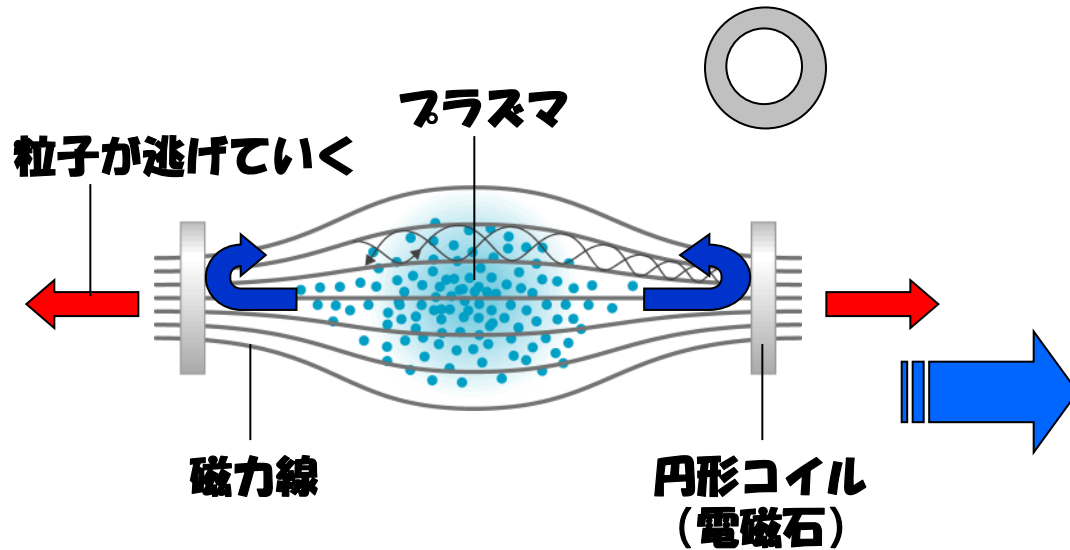


慣性閉じ込め方式

レーザー等を用いて、燃料を中心に向かって圧縮して、燃焼状態を実現する。

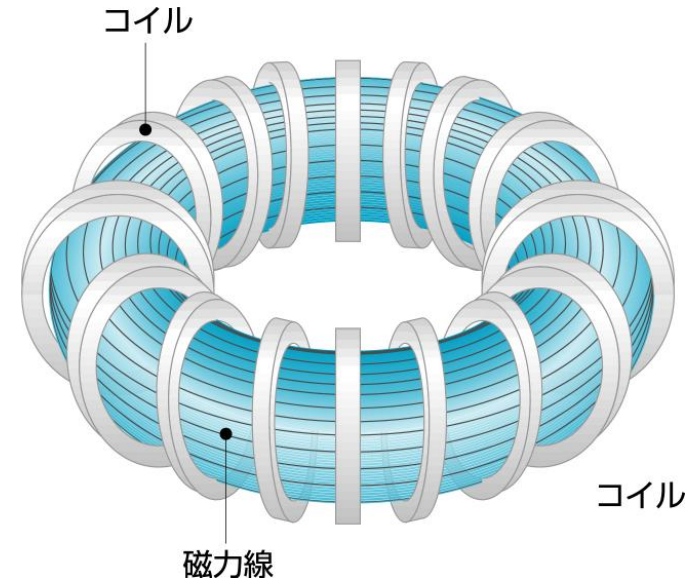


磁場によるプラズマの閉じ込め



ミラー磁場

荷電粒子は、両端の円形コイル付近で鏡(ミラー)のように反射されて閉じ込められるが、
一部の粒子は逃げてしまう。



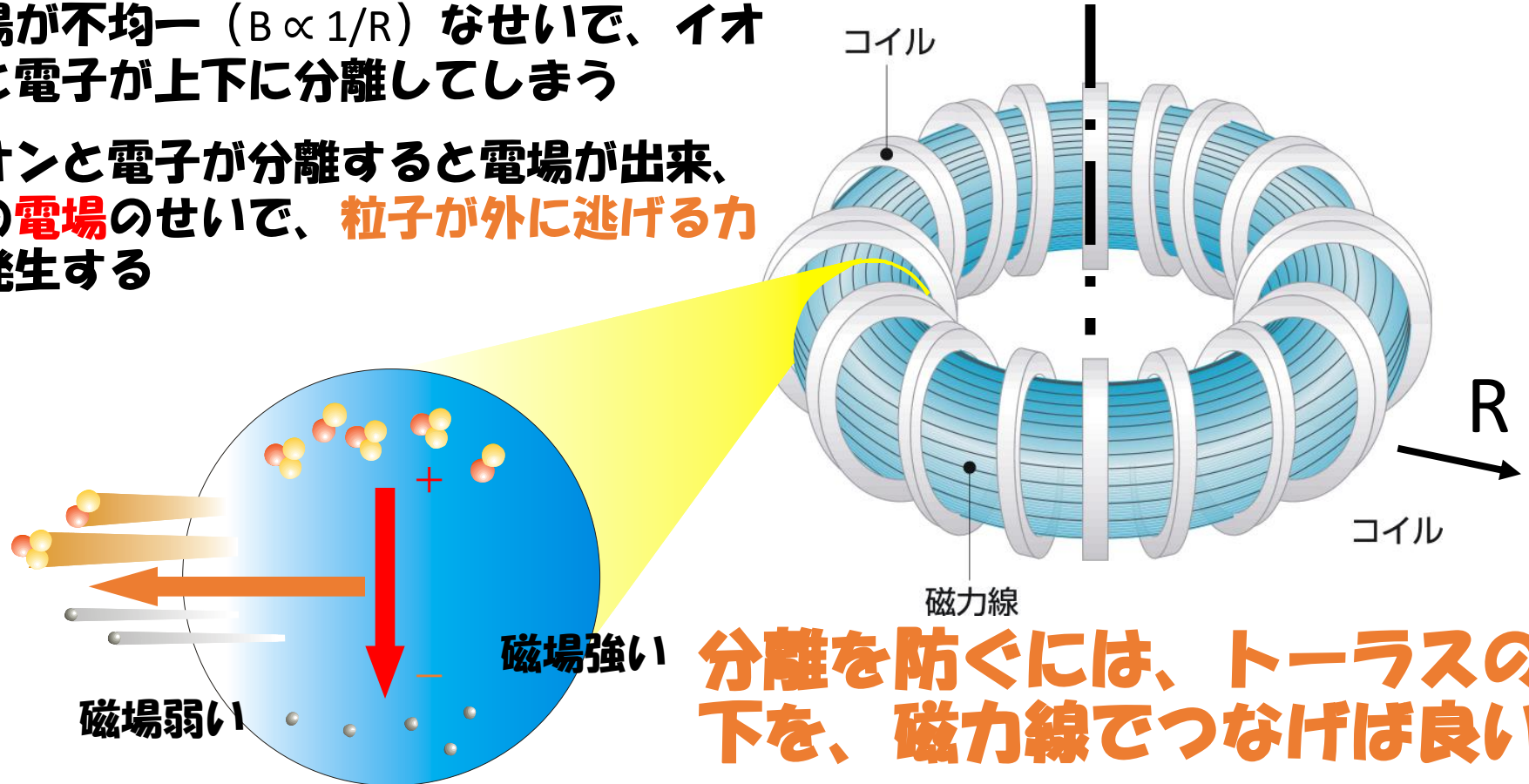
トーラス磁場

端が無いように、繋げて環状(トーラス)にしてやればよい！

単純なトーラス(ドーナツ形状)磁場では、プラズマは閉じ込められない

磁場が不均一 ($B \propto 1/R$) なせいで、イオンと電子が上下に分離してしまう

イオンと電子が分離すると電場が出来、その**電場**のせいで、**粒子が外に逃げる力**が発生する



分離を防ぐには、トーラスの上下を、磁力線でつなげば良い

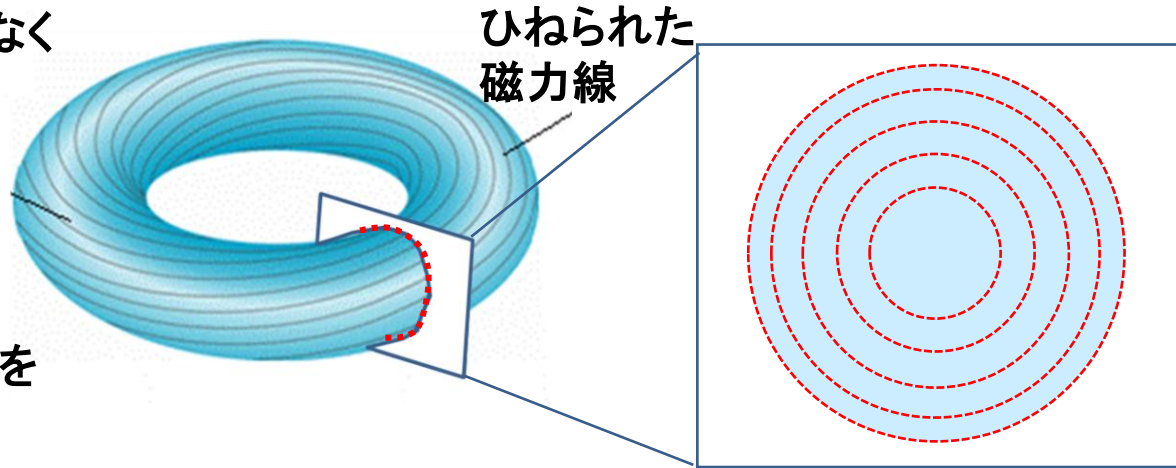
⇒ 磁力線をひねってやる

磁力線をひねって、「磁力線のかご」を作る

磁力線をひねることでイオンと電子の分離を抑制

磁力線を限りなく
追跡すると
ドーナツ型の
磁力線のかご
(面)ができる

磁力線のかごを
磁気面と呼ぶ



理想的な磁力線のかご
(磁気面)の断面図

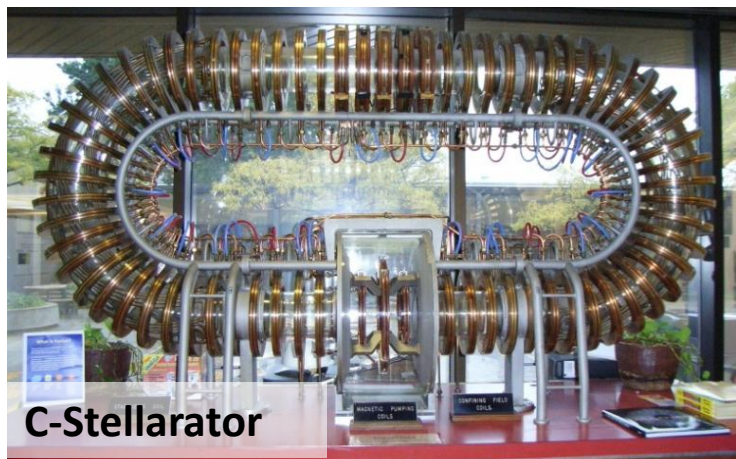
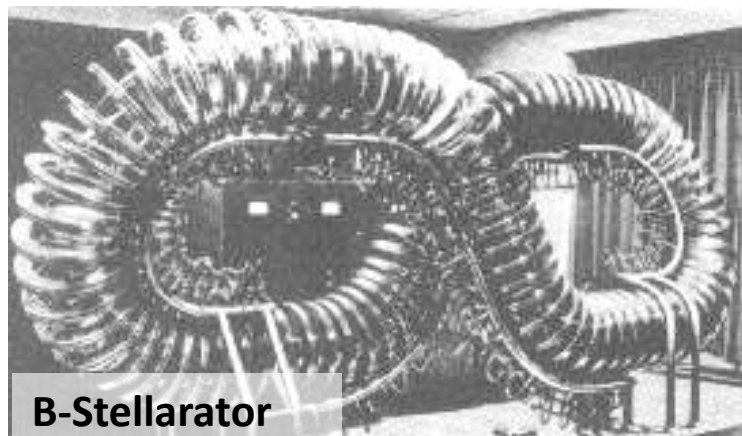
入れ子になった無数の磁力線のかご(磁気面)
でプラズマを閉じ込める

ドーナツ状の磁場の‘かご’に閉じ込める

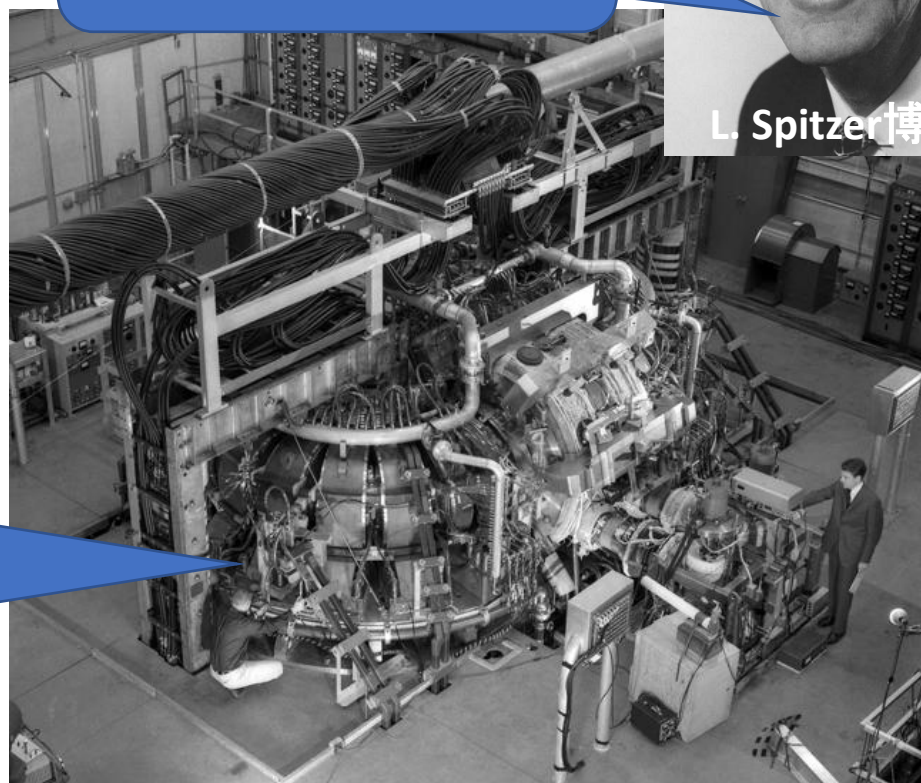
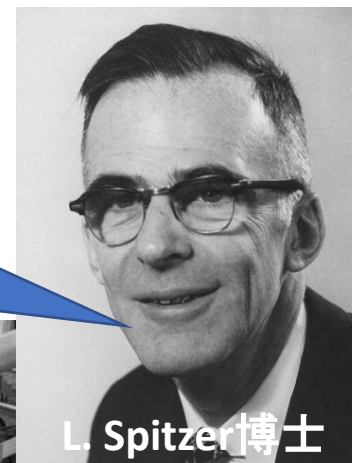


ひねった「磁力線のかご」をつくる

プリンストン大学におけるステラレータと呼ばれるヘリカル方式の研究が1958年に開始された。



ステラレータ
(星のエネルギー炉)

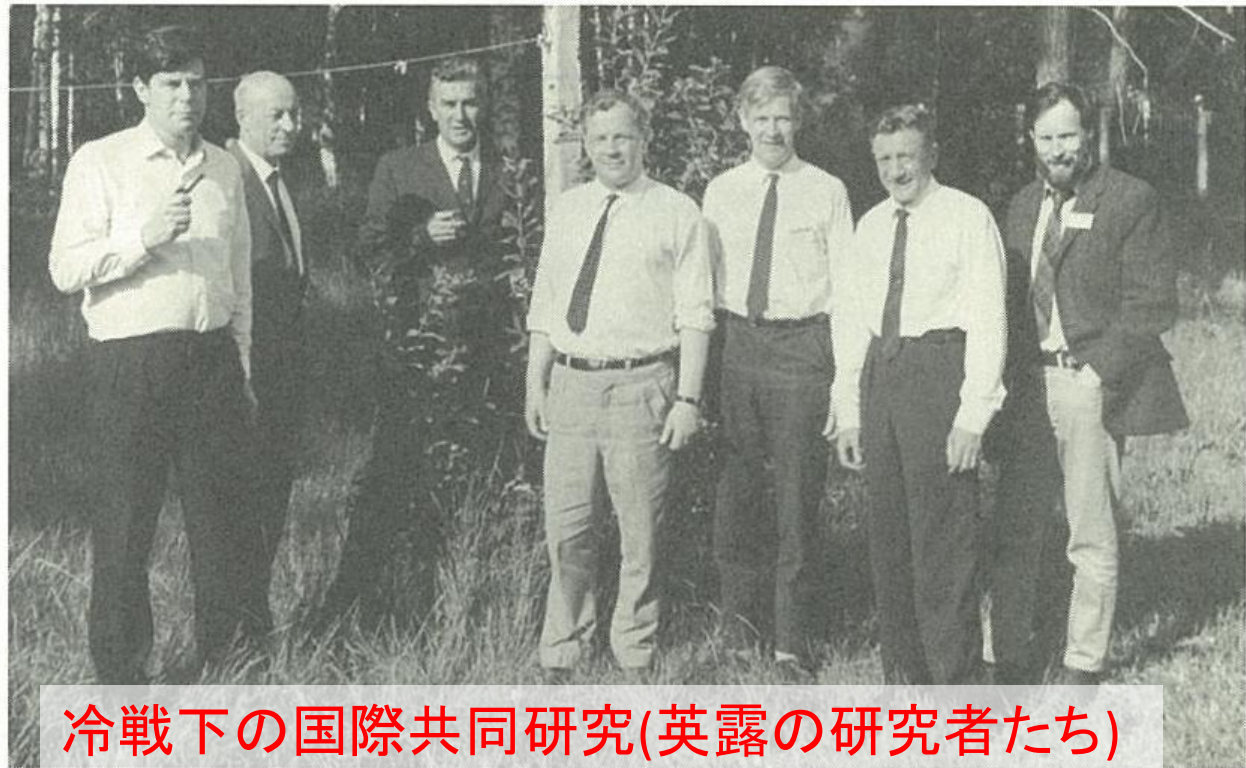
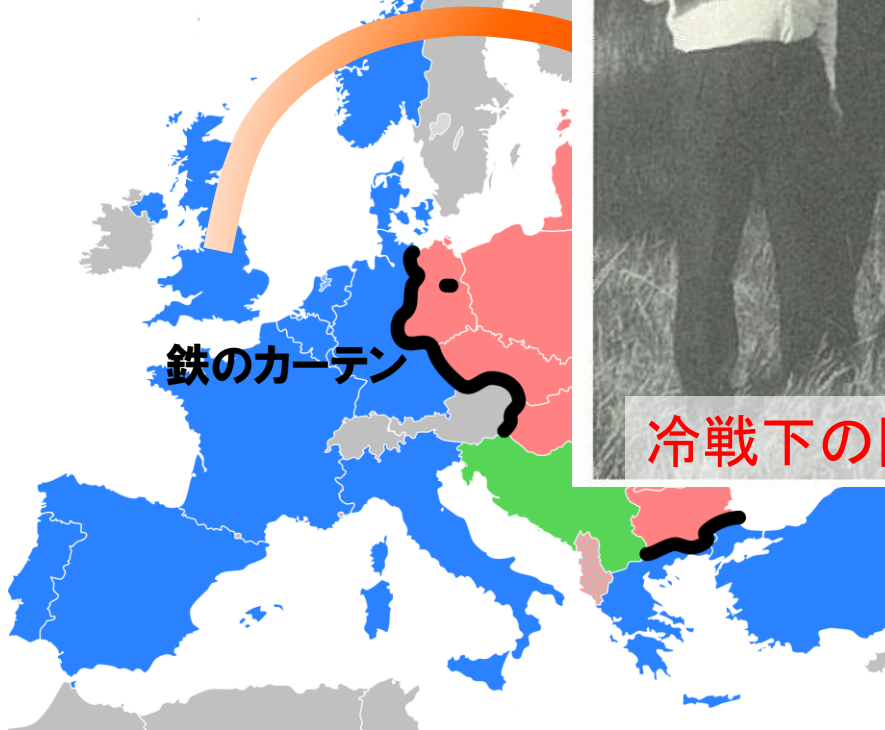


1950～1960年代は、プラズマの性能を上げるのが困難であった。 21/49

トカマク方式の衝撃

英国から計測チームが確認の為、ソ連に向かった。

英国からの計測チーム
が1000万度超の温度を
確認した。(1969年)



冷戦下の国際共同研究(英露の研究者たち)

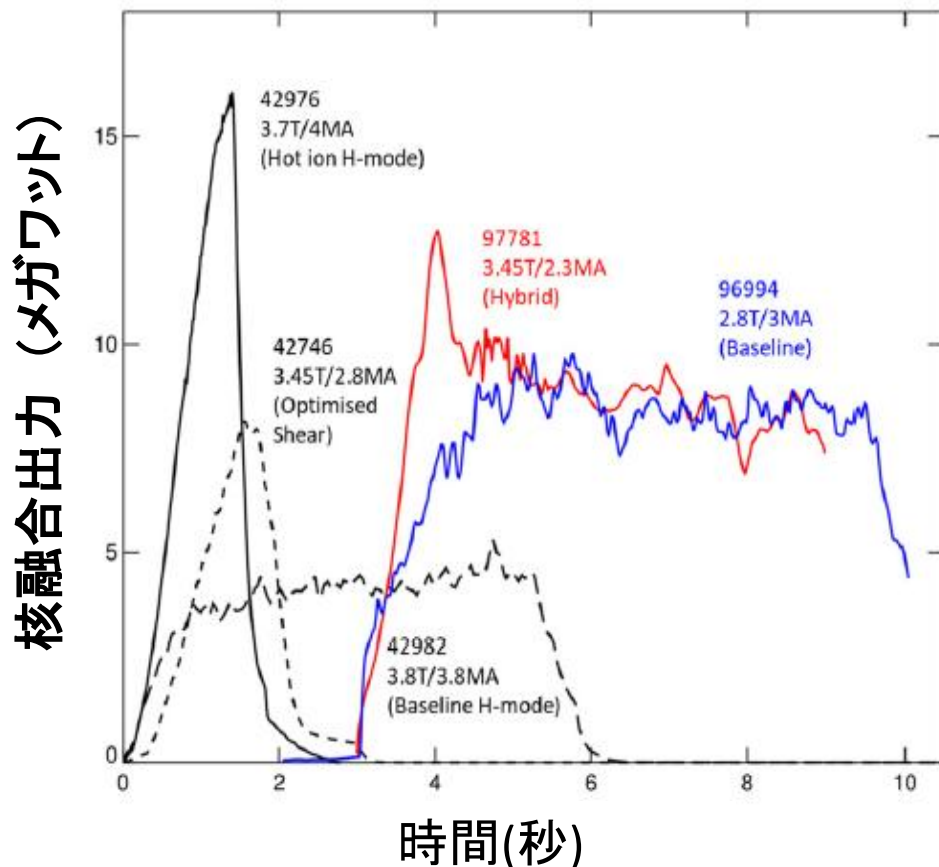


Reproduced from Prof. F.Waelbroeck's
presentation
25th JET Anniversary, Culham (2004)

トカマクへの関心が一気に高まる
⇒米国プリンストンのCステラレータはトカマクに改造された

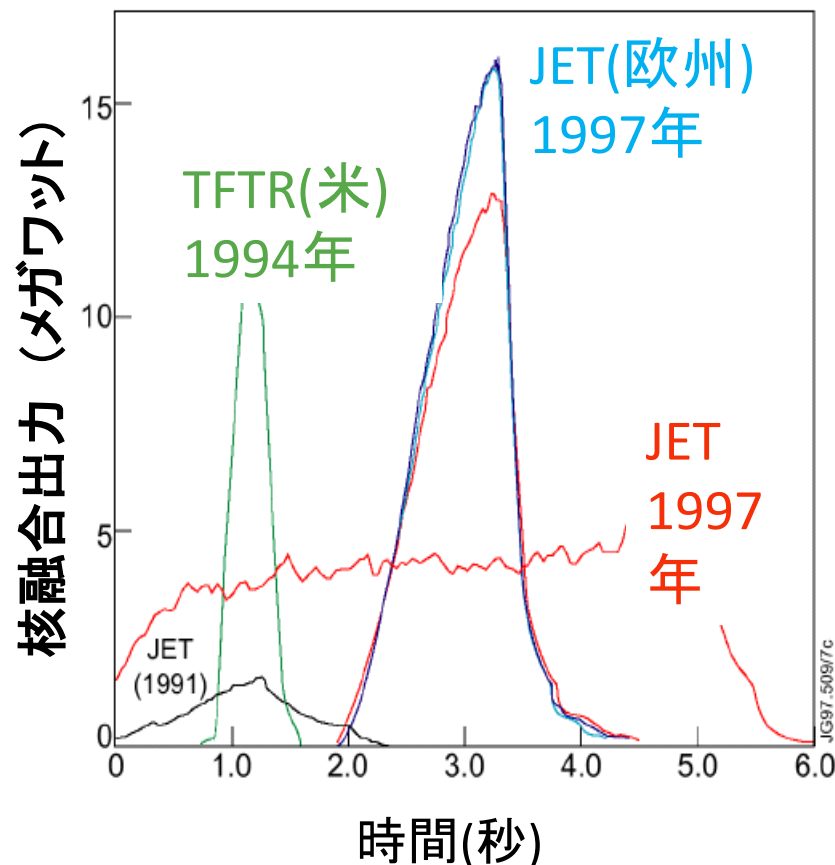
プラズマ性能の大きな進展

最近は、高い核融合出力のプラズマをより長い時間の保持に成功



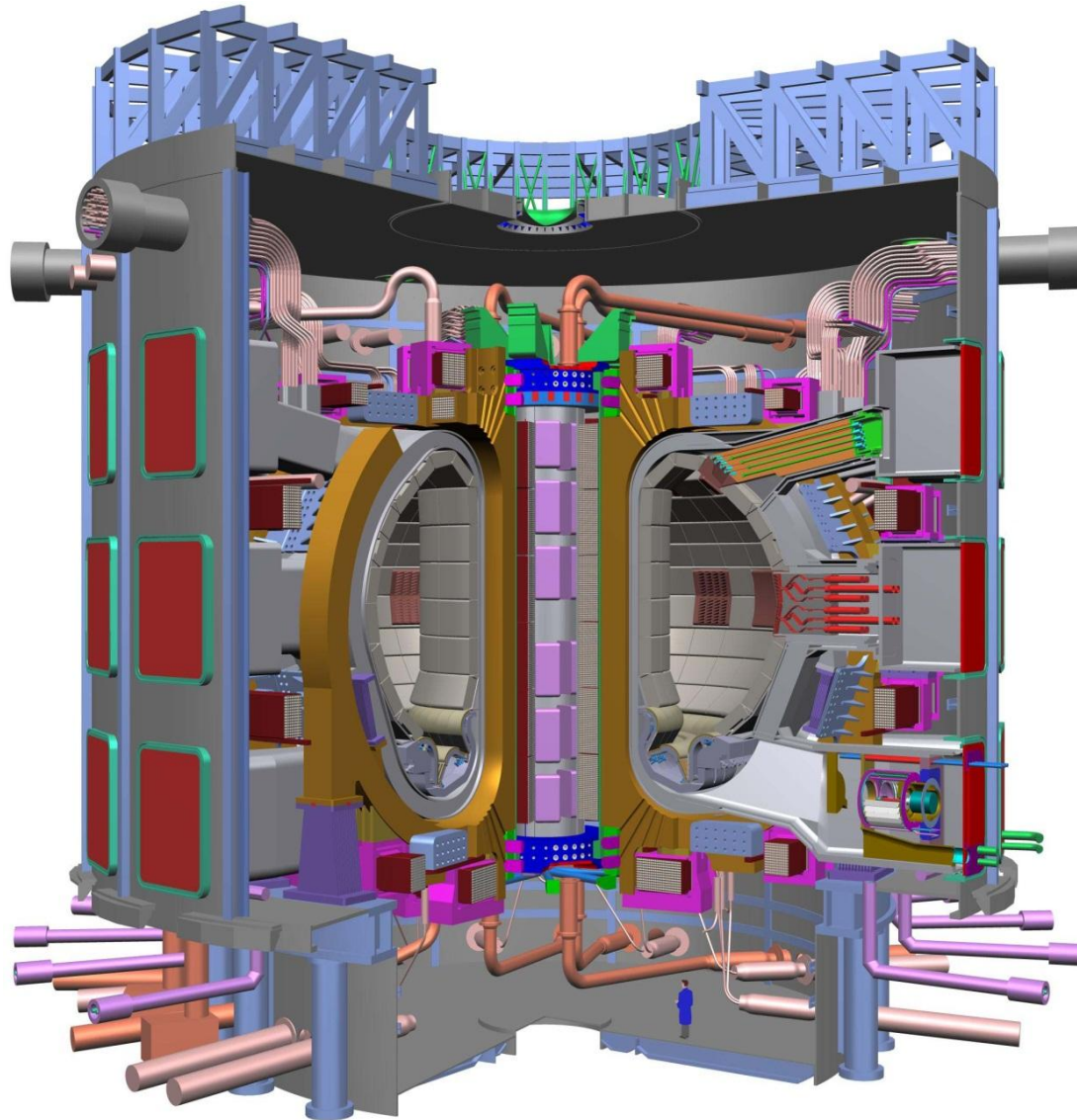
J. Mailloux et al, NF 62 (2022) 042026

1990年代に核融合反応出力を実証



J.Jaquinot et al., PPCF 41 (1999) A13

ITER (イーター)



ドーナツ半径 : 6 m, プラズマ半径 : 2 m

欧州・日本・アメリカ・ロシア・中国・韓国・インドの7極による国際協力でフランス(カダラッシュ)に建設している装置
重水素と三重水素を使用して、核融合エネルギーによるプラズマの燃焼維持

- ✓ 数値目標: 核融合出力
500MWのプラズマを400s
維持

プラズマに投入した電力の
10倍の核融合出力の実現

「核融合」の課題

プラズマの性能の進展

➤ 核融合利得(Q)

$$Q = \frac{\text{プラズマ中の核融合反応によって発生したパワー}}{\text{プラズマを加熱するために外部から投入したパワー}}$$

Q=1: 臨界条件、

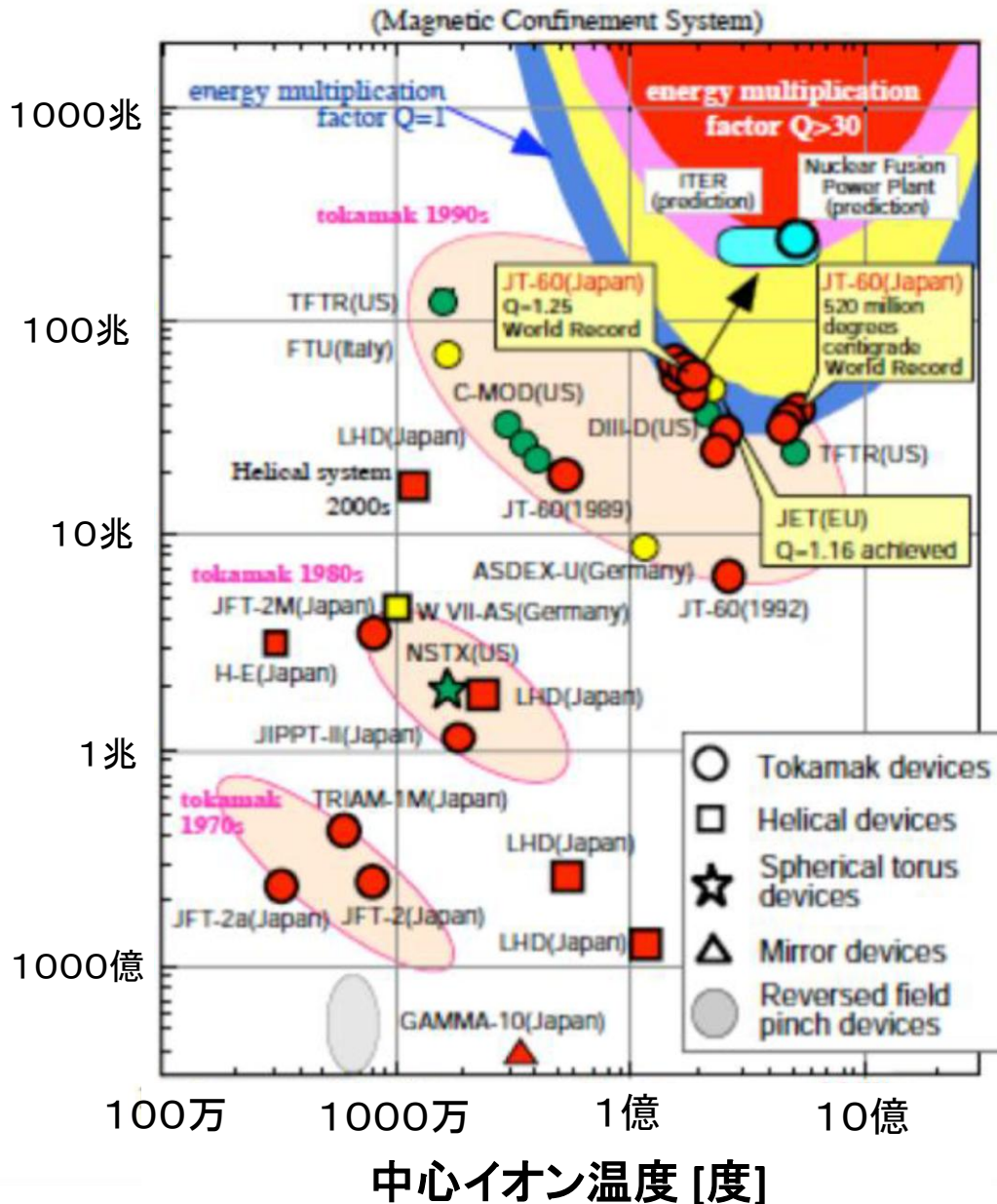
Q~5: 核融合反応によって生成したアルファ粒子による加熱パワーが外部加熱パワーと等しくなる

➤ 核融合三重積(nτT):

- 核融合反応を効率的に実現するための指標
- プラズマ中のイオン密度(n)、エネルギー閉じ込め時間(τ)、及び、イオン温度(T)の積であらわされる。
- 1cm³あたり100兆個の密度、1秒の閉じ込め時間、イオン温度1億度がQ=1に対応

D-Tプラズマではないものの、既に臨界条件は実現している。ITERではQ~10を目指す

エネルギー閉じ込め時間 × 中心イオン密度 [秒・個/cm³]



装置の大型化をすることで、「核融合」実現の見通しは得られている。

- 世界中の核融合装置の実験データを用いて、エネルギー閉じ込め時間(τ_E)のスケーリング則が評価されている

例: IPB98(y,2)スケーリング

$$\tau_E^{IPB98(y,2)}[s] = (1.45 \times 10^{-1}) I_p^{0.93} B^{0.15} P^{-0.69} (n_e/10^{20})^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \varepsilon^{0.58} \kappa_a^{0.78}$$

I_p : プラズマ電流[A]、 B : 磁場強度[T]、 P : 加熱電力[MW]、 n_e : プラズマの電子密度、

M : プラズマのイオン種の質量、 R : プラズマの大半径[m]、

$\varepsilon (=a/R)$: 小半径(a [m])と大半径の比、 κ_a : プラズマの楕円度

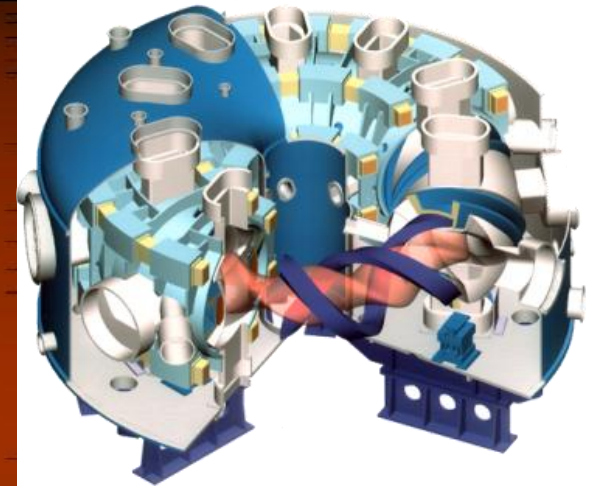
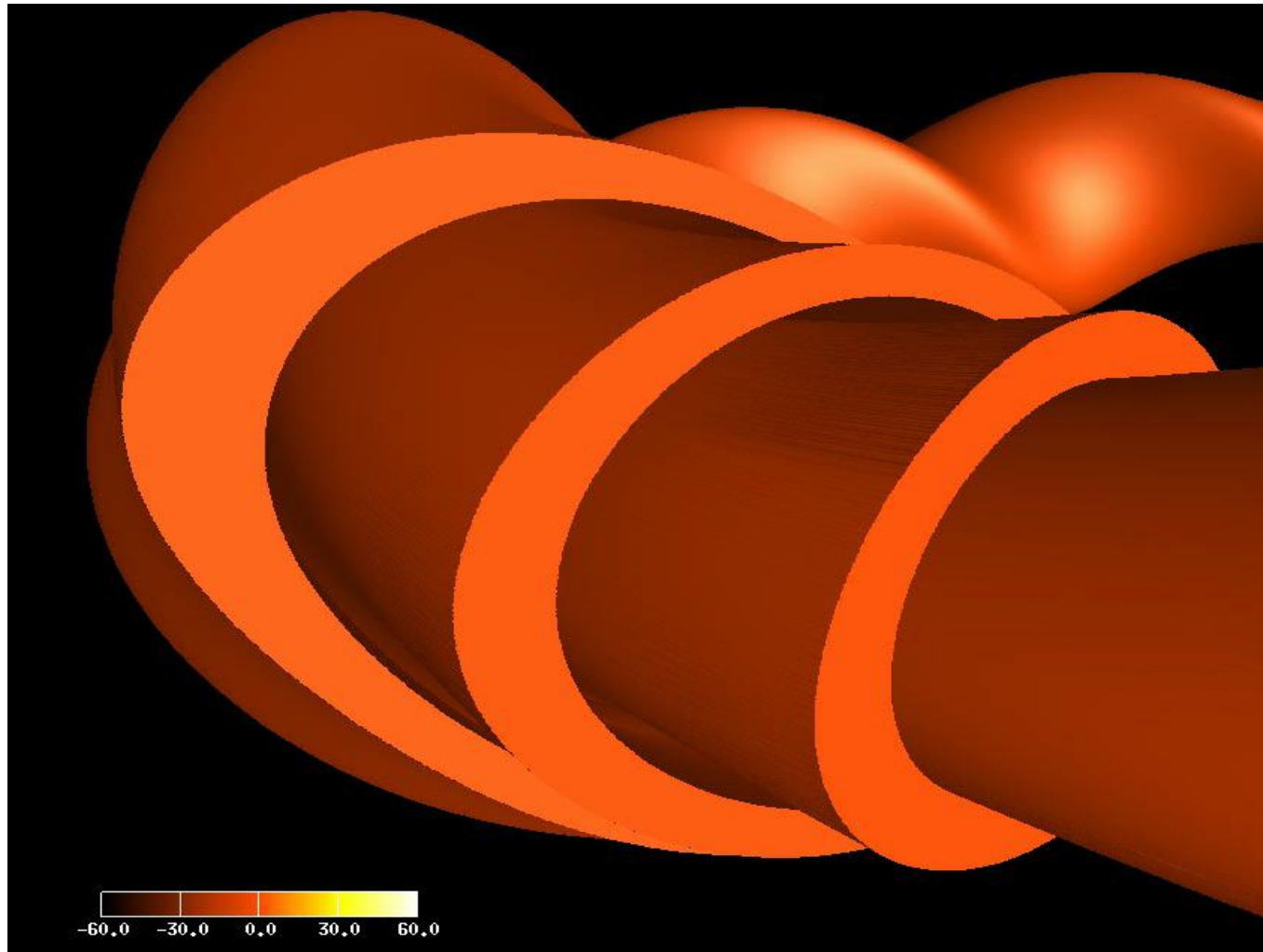
- 装置の大型化によって製作が困難に

- ✓ 人類が経験したことのない大型構造材の製作

- ✓ 製作の遅延、コストの増加

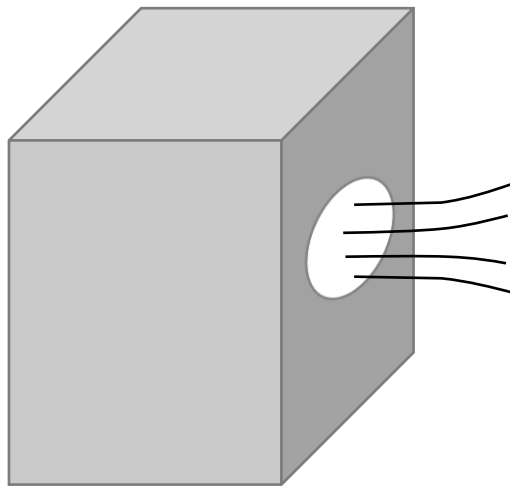
プラズマの高性能化・装置小型化によるリスクの低減

理論・シミュレーションによりプラズマ中の流れが、プラズマの性能改善に関与していることが明らかになっている。

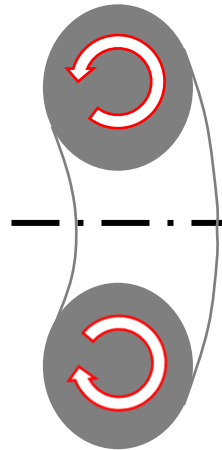


流れがあると閉じ込めが良くなる

例えば、「**空気砲**」で出来る
煙の輪は、**リング状に出来た**
空気の流れが、煙をその中に
閉じ込めている。



煙の断面



空気の流れ

空気がうまく出来た時

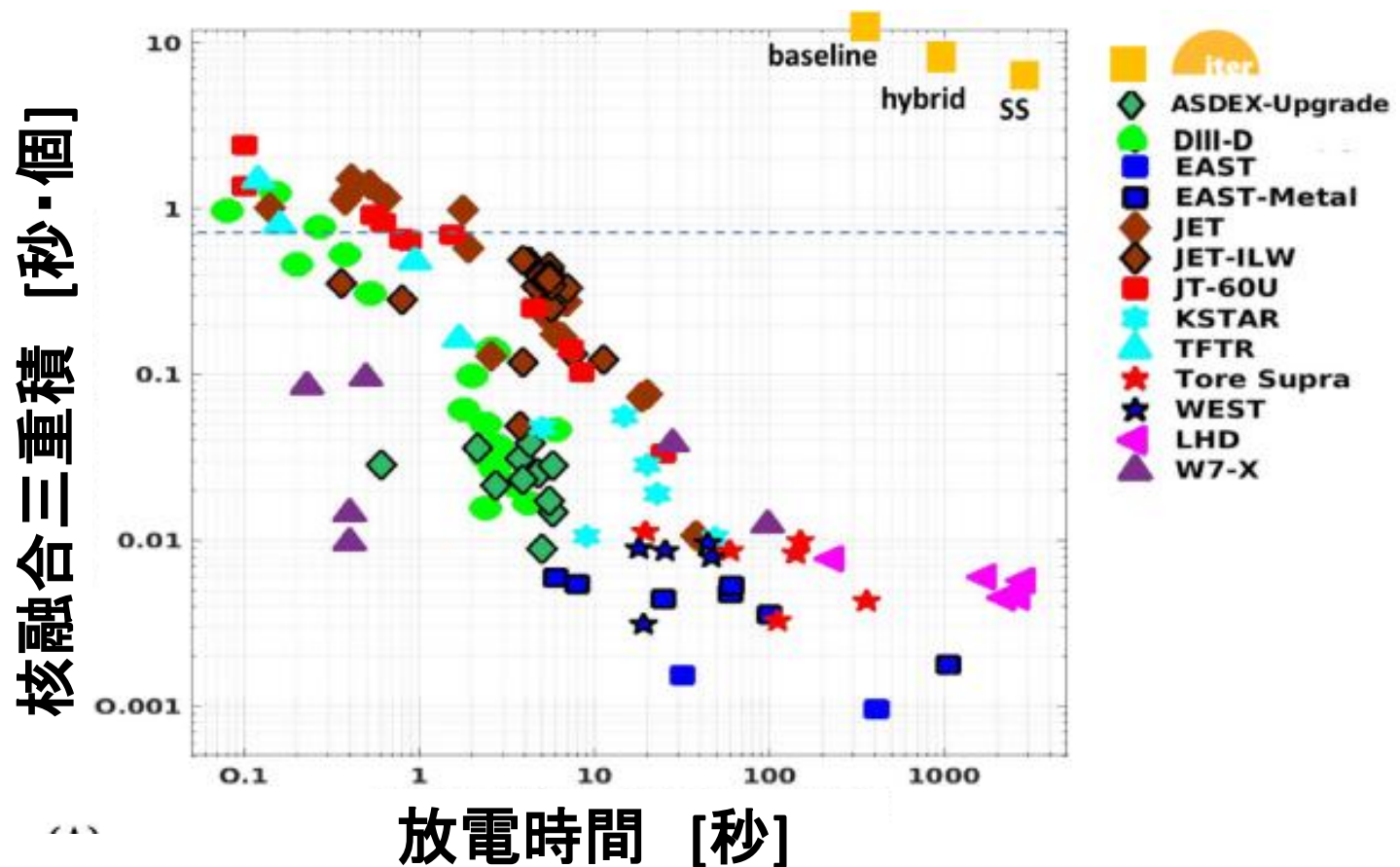


空気がうまく出来なかった時



定常高性能プラズマの実現の課題

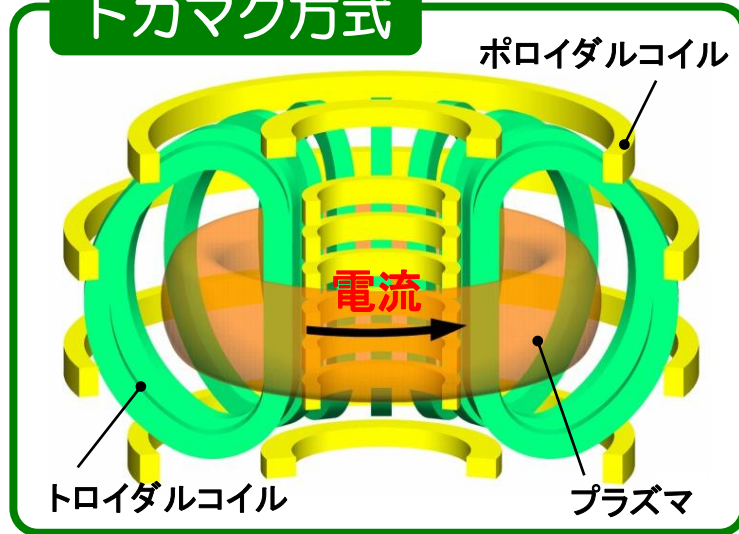
- 高性能プラズマは数秒しか実現できていない。



プラズマの長時間保持はトカマク方式の課題

プラズマ中に大電流を流す方式

トカマク方式



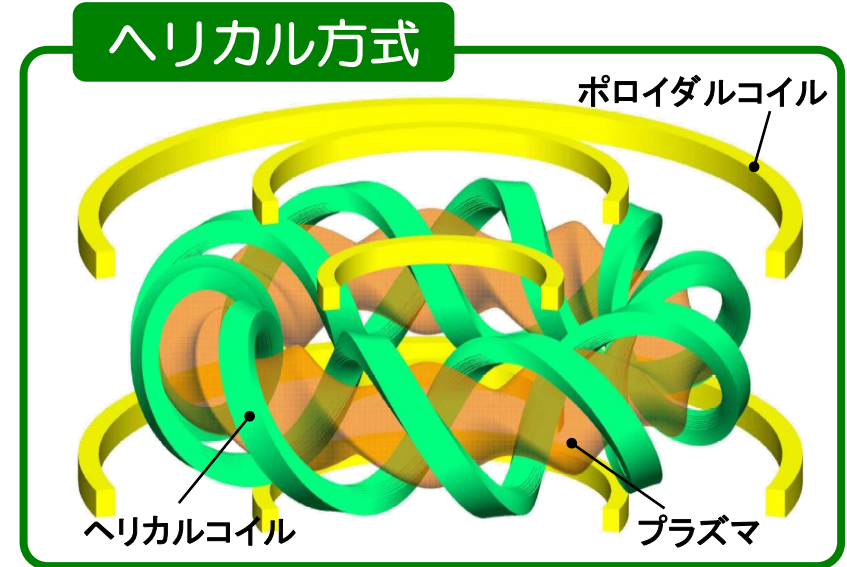
トーラス方向に電流を流すことにより磁力線をひねり、外部コイルとの組み合わせにより磁気面を形成する。

トランス(変圧器)の原理でプラズマ中に電流を流す。

☞ 定常運転のためには、**プラズマ電流を維持する必要がある。**

電磁石をねじる方式

ヘリカル方式



外部コイルのみにより磁力線をひねって、磁気面を形成する。

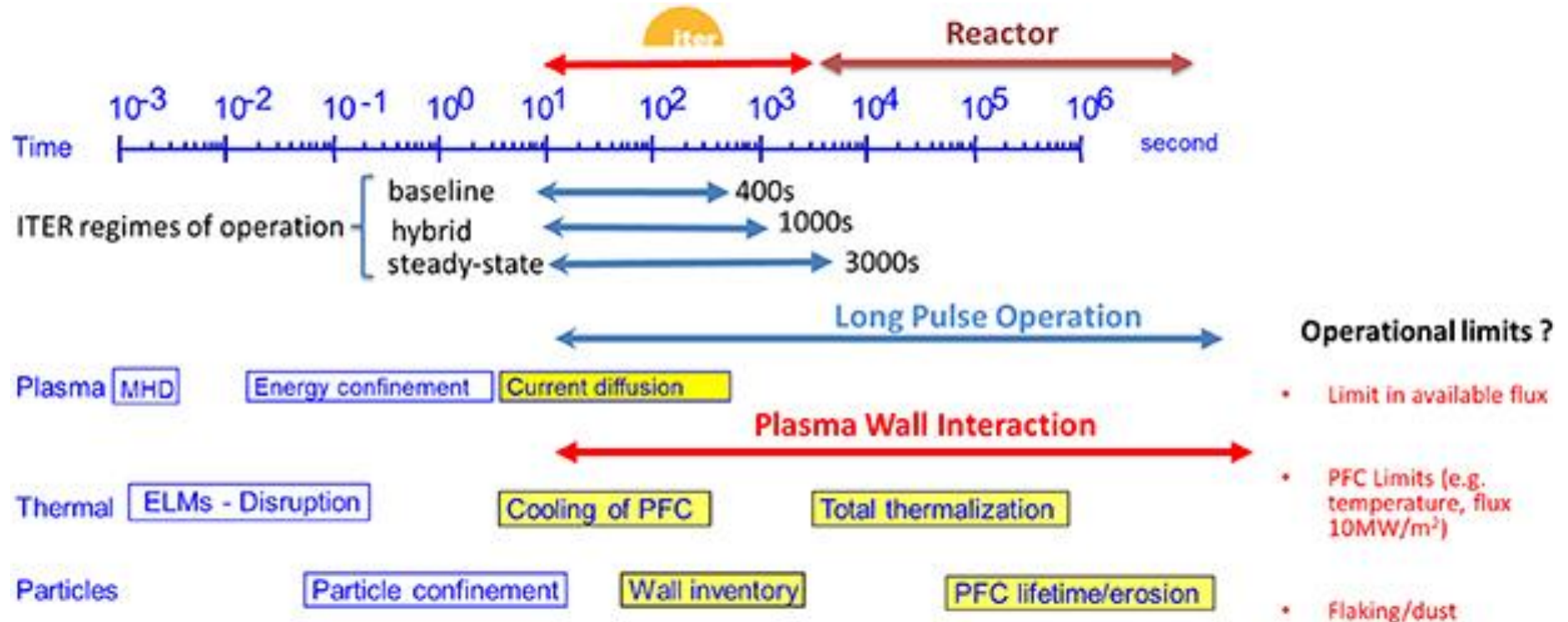
⇒ **定常運転**に適している。

✓ **プラズマを長時間維持した時の振る舞い**

✓ **高性能プラズマの実現に必要なメカニズムの解明**

定常高性能プラズマの実現を目指して

- プラズマの保持時間が長くなるにしたがって、それに対応した時定数の新たな現象が見えてくる。
- ➡ これらの現象のプラズマの性能に対する影響は未解明



プラズマの長時間保持の課題

高性能のプラズマの長時間保持は前人未踏の領域

当初予想

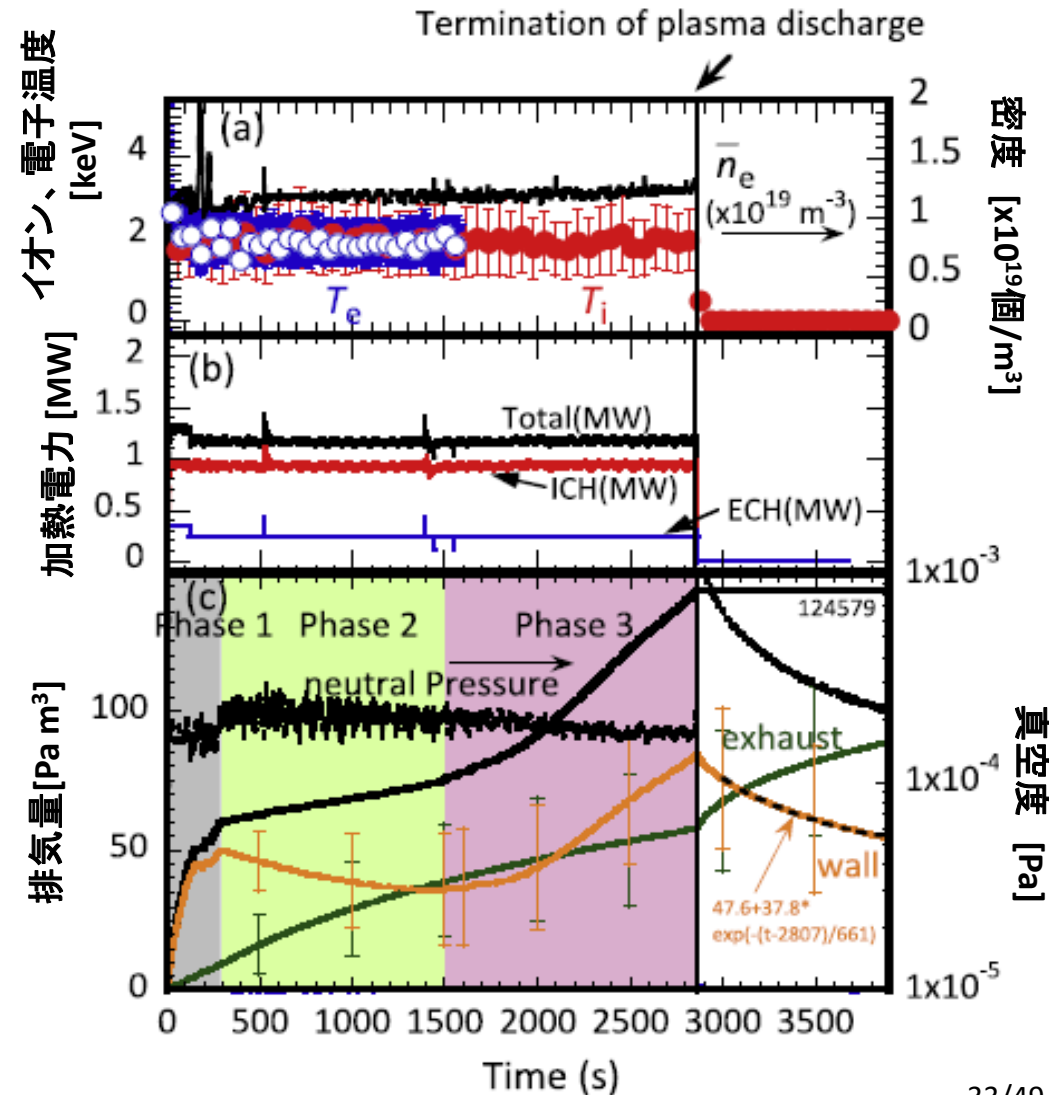
- ① 何も変わらない
- ② 最初の状態

⇒ 最終的な状態
(2段階の変化)

実際は、3段階の変化であった。

プラズマと真空容器材料との相互作用が変化をもたらしている。

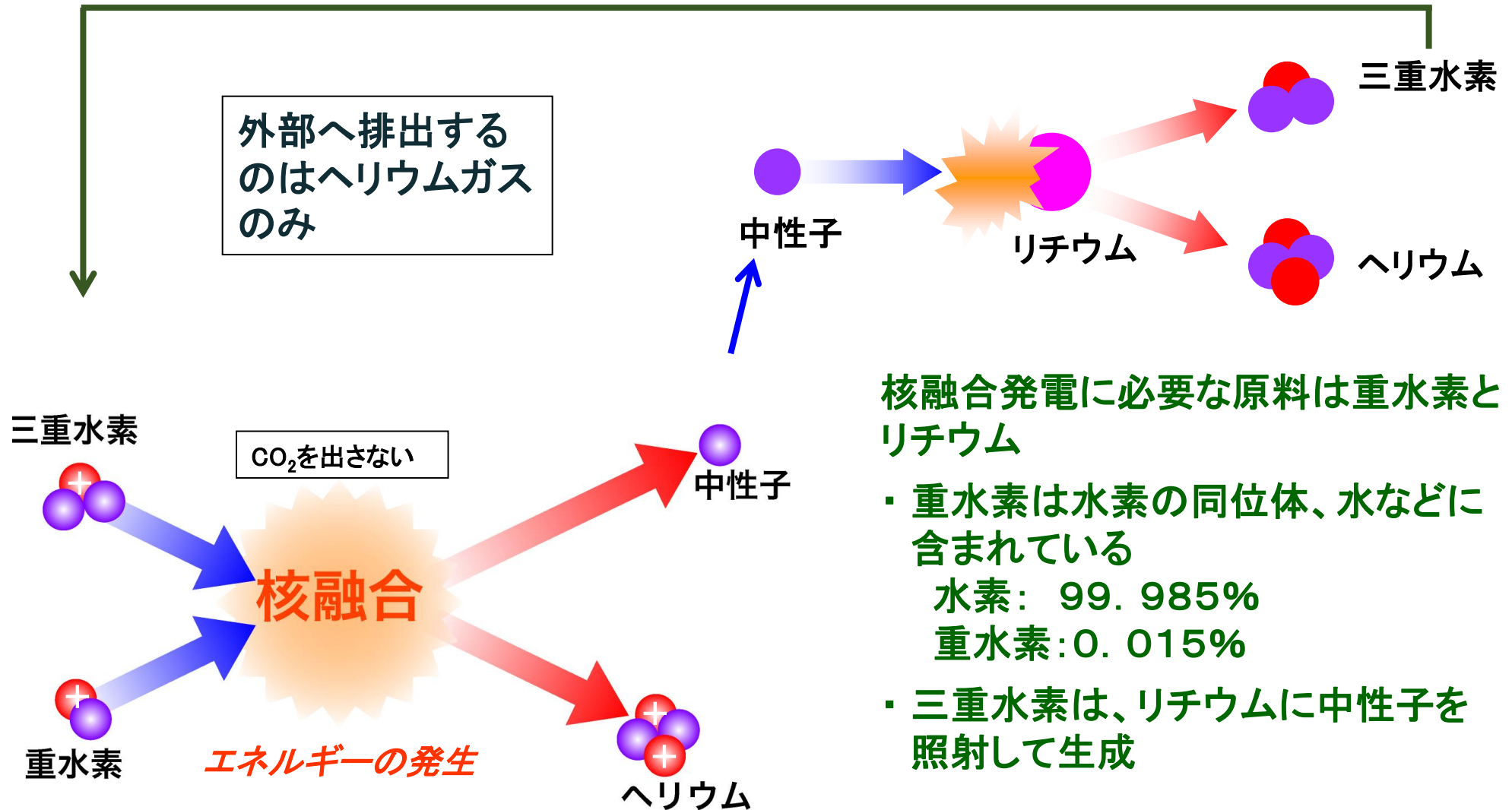
更なる疑問
プラズマの性能に影響はないのか？



燃料生産の課題

核融合炉では運転しながら燃料となる三重水素を生産する。

→ 運転による消費量を上回る三重水素を生産できるか？



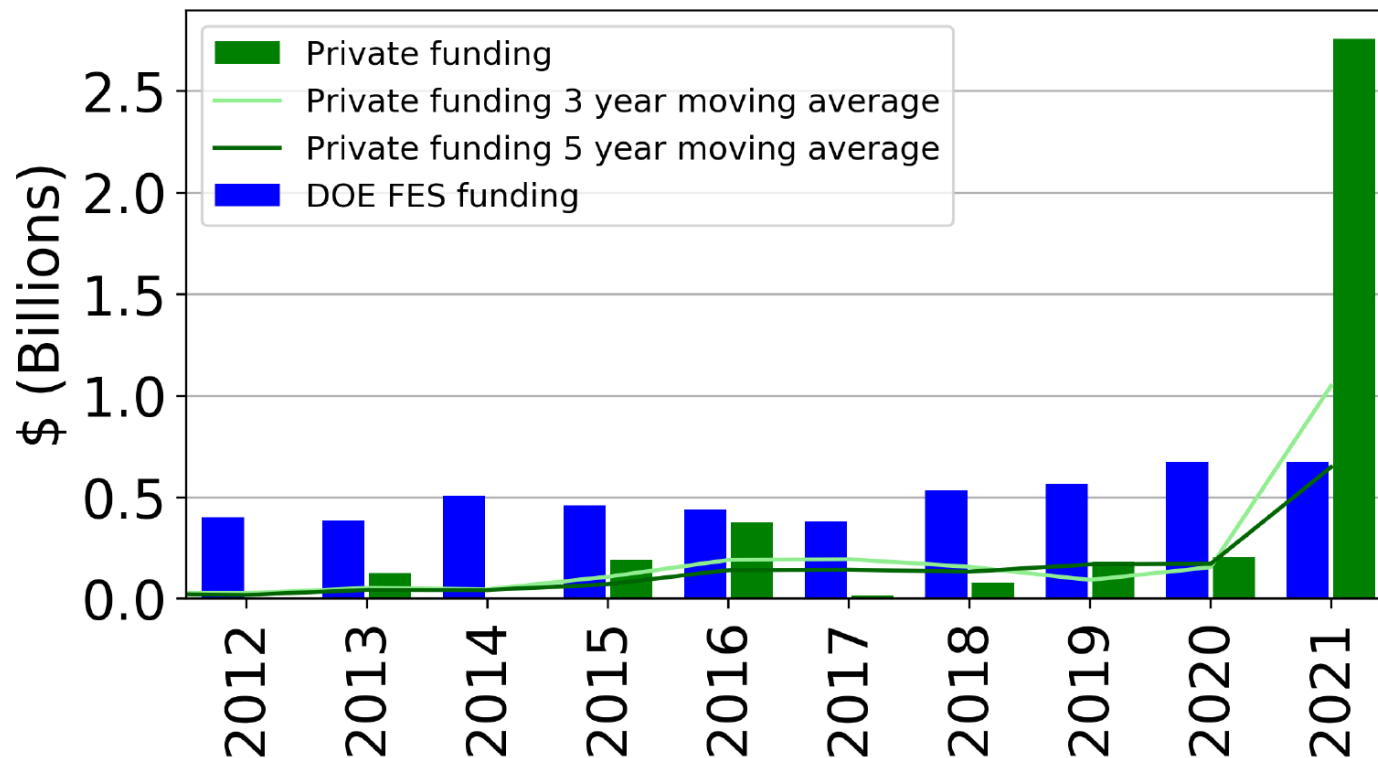
核融合炉材料の課題

- 中性子照射耐性の高い材料の開発
 - ✓ 100dpa (Displacement Per Atom)を超えるはじき出し損傷量
- 高熱負荷耐性材料の開発・熱負荷制御技術の開発
 - ✓ 10MW/m^2 を超える熱負荷が、核融合燃焼プラズマから真空容器内受熱板に流入しうる
- 低放射化材料の開発

「核融合」を取り巻く状況

カーボンニュートラル実現の切り札としての 核融合に対する期待の高まり

- 核融合スタートアップ企業及び、民間投資の増加
- 内閣府によるフュージョンエネルギー・イノベーション戦略の策定(2023.4)



<https://science.osti.gov/-/media/fes/pdf/fes-presentations/2022/Wurzel---PPP-Lighning-round-talk.pdf>

第38回原型炉開発総合戦略タスクフォース資料1 ページ2
を使わせていただきました。そちらをご覧ください。

https://www.mext.go.jp/content/20250212-mxt_kaisen-000040204_b01.pdf

第38回原型炉開発総合戦略タスクフォース資料1 ページ3

を使わせていただきました。そちらをご覧ください。

https://www.mext.go.jp/content/20250212-mxt_kaisen-000040204_b01.pdf

第38回原型炉開発総合戦略タスクフォース資料1 ページ6

を使わせていただきました。そちらをご覧ください。

https://www.mext.go.jp/content/20250212-mxt_kaisen-000040204_b01.pdf

第38回原型炉開発総合戦略タスクフォース参考資料1 ページ9
を使わせていただきました。そちらをご覧ください。

https://www.mext.go.jp/content/20250212-mxt_kaisen-000040204_c01.pdf

まとめ

- エネルギー資源の枯渇や地球温暖化抑制の観点から、「核融合」開発は必要
- 「核融合」を実現するためのしくみやこれまでの進展を、磁場閉じ込め方式を中心に説明
 - プラズマの高性能化のために環状の磁力線のカゴが必要
- 「核融合」実現のための課題について説明
- 「核融合」をとりまく状況を文科省・原型炉開発総合戦略TFの資料の等を利用して説明

ご清聴ありがとうございました。

核融合研究に興味のある方へ

- 文部科学省に核融合(フュージョンエネルギー)研究を紹介するサイトがあります。

https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/

- 名古屋大学

- 工学研究科 エネルギー理工学専攻/
総合エネルギー工学専攻

https://www.energy.nagoya-u.ac.jp/study_01

- 工学研究科 電気工学専攻

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/electrical/index.html>

- 理学研究科 物理科学領域

<http://www.phys.nagoya-u.ac.jp/>

- 総合研究大学院大学(総研大)

核融合科学研究所を含む全国の大学共同利用機関によって構成される大学院大学

- 先端学術院 核融合科学コース

夏の体験入学(8月末)をやっていますので、興味のある方は、ぜひご参加ください。

<https://soken.nifs.ac.jp/archives/open/opencampus>

昨年度のポスター

夏の体験入学
2024年度 第21回
核融合科学コース
2024 MON 8.26 > FRI 8.30
総合研究大学院大学 先端学術院 核融合科学研究所
世界最先端の研究と一緒に体験してみませんか。
対象者 大学1~4年生、大学院修士課程1年生、
高専4~5年生及び専攻科学学生
応募方法 <https://soken.nifs.ac.jp/> をご覧ください。
募集定員 30名
応募締切 2024年6月28日(金)
参加者募集
総合研究大学院大学 先端学術院 核融合科学研究所
研究主幹 大塚 誠司 TEL 059-4202 秘書 上野 千恵子 TEL 059-4202-6
TEL 059-4202-6 FAX 059-4202-6 E-mail: open@nifs.ac.jp
<https://soken.nifs.ac.jp/> / 総研大 総研大 体験



総研大 先端学術院
核融合科学コース ホームページ