

核融合研究の進展と 大型ヘリカル装置（LHD）の研究成果

大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
核融合科学研究所

高畑 一也



7 エネルギーをみんなに
そしてクリーンに



私たちは持続可能な開発目標（SDGs）を支援しています

1. エネルギー・環境問題と核融合エネルギーの必要性
 2. 核融合エネルギーとは
 3. 国内外の研究開発状況
 4. プラズマについて
-
5. 大型ヘリカル装置LHDの重水素実験とその成果
 6. 重水素実験の安全管理と検証
 7. 今後の研究計画

今、エネルギーは化石燃料に頼っています



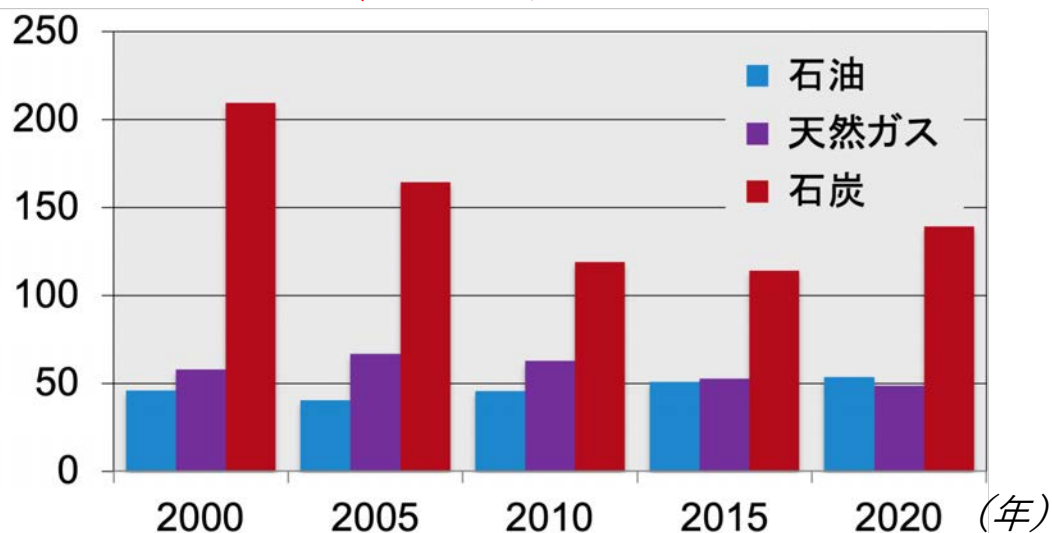
Image by Kristina Kasputienė from Pixabay

▶ 日本の消費エネルギーのうち、電力の占める割合は29%

69%は化石燃料に頼っています。

▶ シェールガスなどの新しい資源が見つかっていますが、化石燃料は、いつかは尽きてしまう「限りある資源」であることには変わりはありません。

(年) 可採年数 (後何年、資源が使えるかの目安)



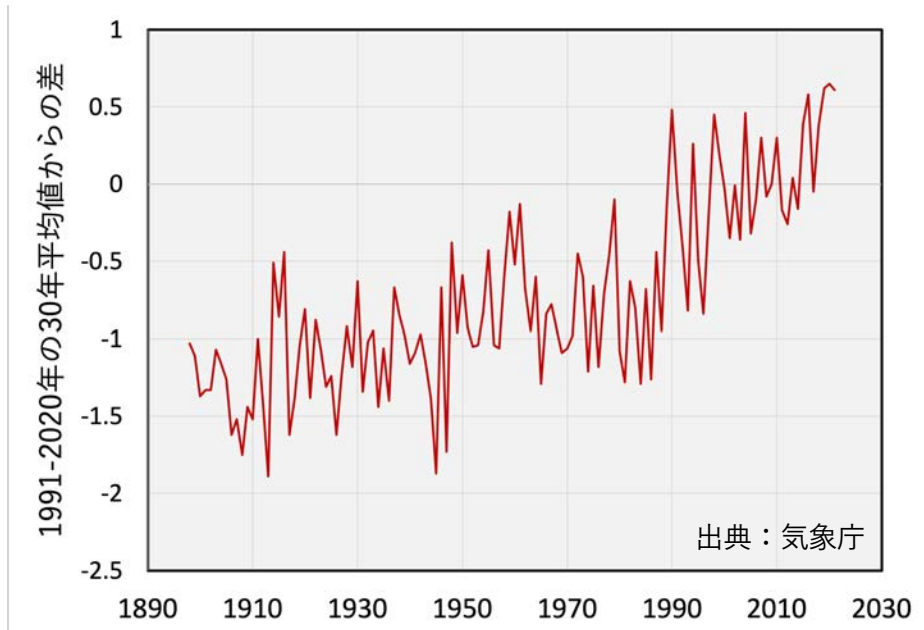
化石燃料が存在する今の間に、環境負荷が少なく、基幹となり得る新エネルギー源を緊急に確立する必要があります。

参考：国際エネルギー機関, IEA, BP統計

地球温暖化も私たちの生活に影響を与えています



日本の年平均気温偏差の推移



▶ 日本の平均気温は100年あたり1.28°Cの割合で上昇しています。特に1990年代以降、高温となる年が頻出しています。



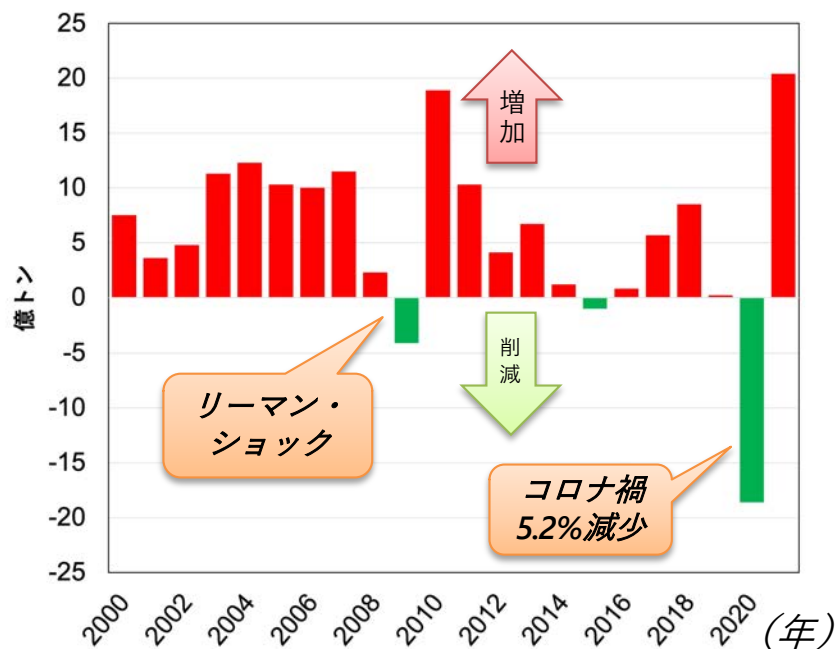
▶ 世界中で豪雨や干ばつなどの気象災害が起きています。これらも地球温暖化と関連しているようです。

地球温暖化の原因は、人間活動による二酸化炭素などの排出と考えられます

経済成長と二酸化炭素削減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



▶ コロナ禍の影響で2020年の二酸化炭素排出量は5.2%減少するとともに、世界経済の成長率は3.1%減少しました。

経済活動を維持しながら温暖化を抑制するためには核融合エネルギーの実現が急務です

パリ協定

2015年、温室効果ガス削減に関する国際的取り決め

産業革命からの気温上昇を1.5°Cに抑える努力をする

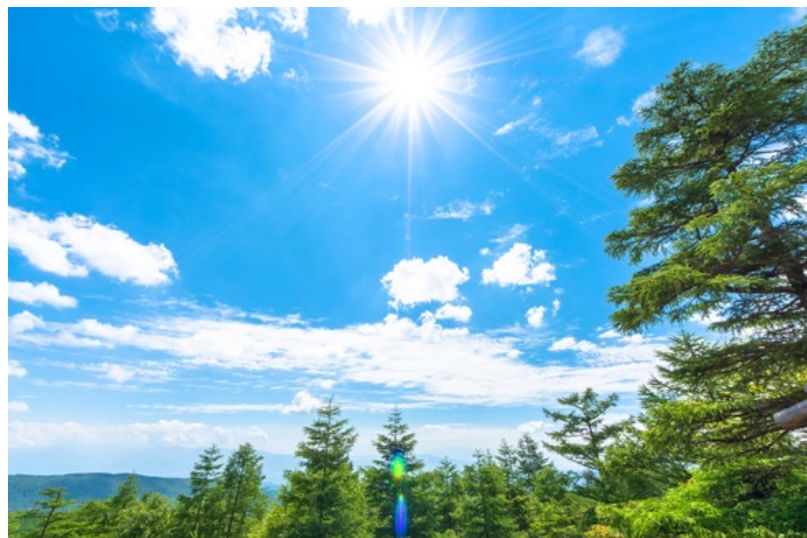


©UN Climate Change

2030年まで毎年継続して排出量を7.6%ずつ削減する必要がある。(国連環境計画UNEPの試算)

▶ 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。

核融合エネルギーとは

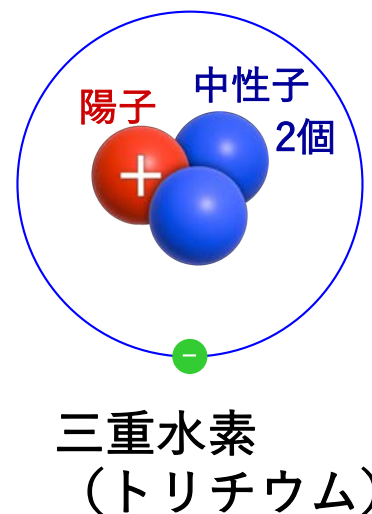
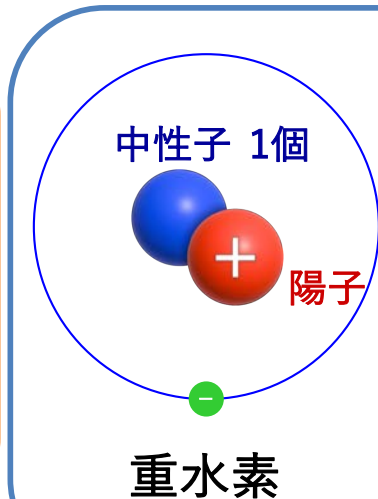
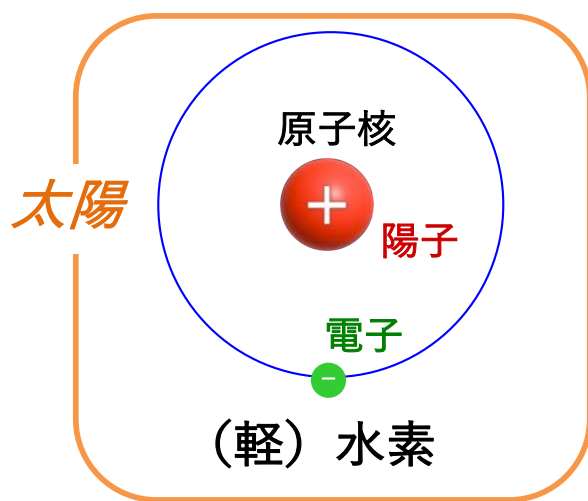


空に輝く太陽や星のエネルギー源は核融合

核融合エネルギーは将来最も期待される究極のエネルギー源

→ 電気
→ 水素

▶ 核融合では軽い原子、水素の仲間を使います。



地上の核融合

- 燃料資源が無尽蔵
 - ◆ 海水から原料がとれます
- 二酸化炭素を排出しません
 - ◆ 地球温暖化を防止します
- 安全性が高い
 - ◆ 暴走や爆発はしません



持続可能で環境負荷の少ないエネルギー源です

核融合エネルギーの燃料資源は無尽蔵



水 3リットル
重水素 0.1 g



スマートフォンの電池1/2個分
リチウム 0.3 g

三重水素
の原料

日本の一人当たりの年間電気使用量
(7,500 kWh) を発電できる

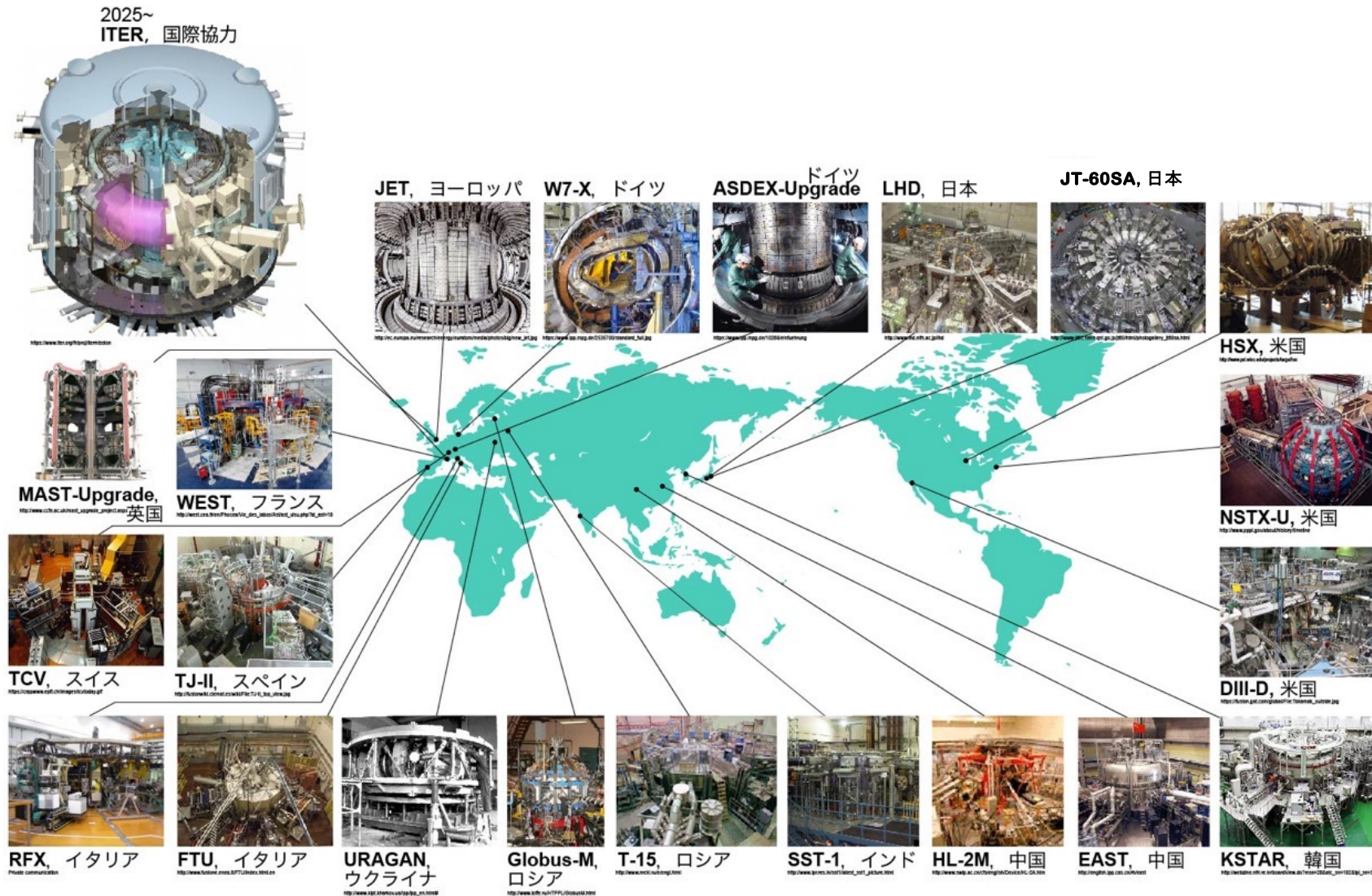
重水素は水の中に含まれている
水素 99.985% 重水素 0.015%
地球上に50兆トン

海水中に2,000億トンのリチウム
⇒事実上、無尽蔵

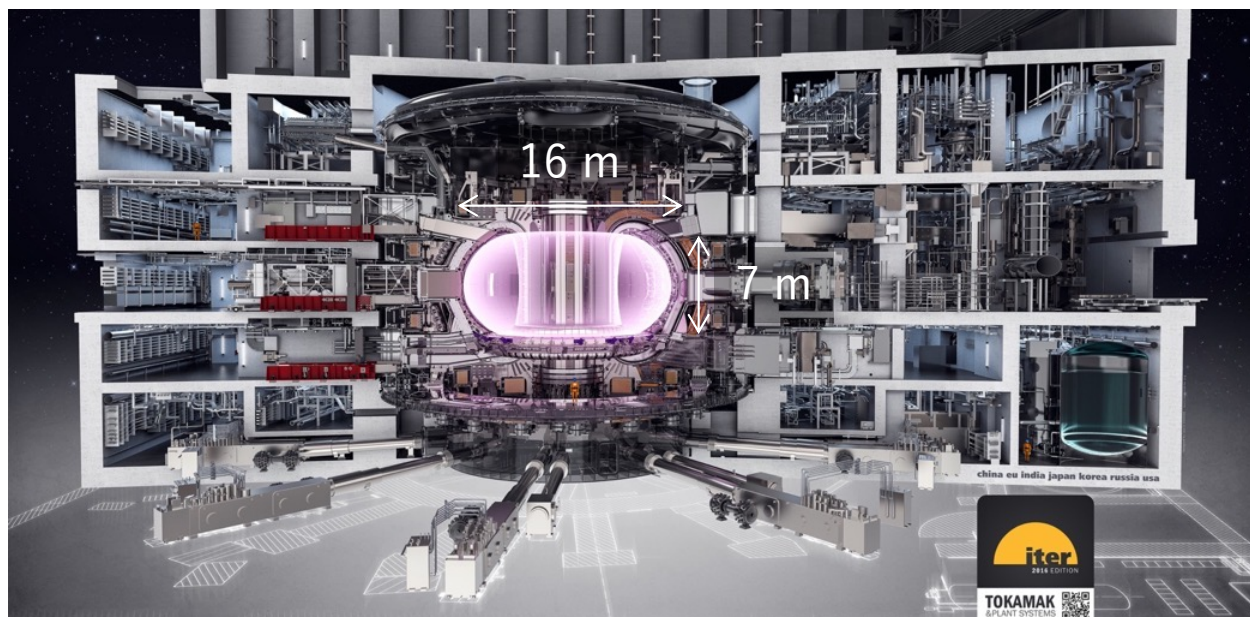
核融合エネルギーの実現は今世紀中葉



核融合は将来のエネルギー源として様々な国において研究開発が進められています



国際協力でITER（イーター）を建設中



35ヶ国が共同で建設
現在77%完成

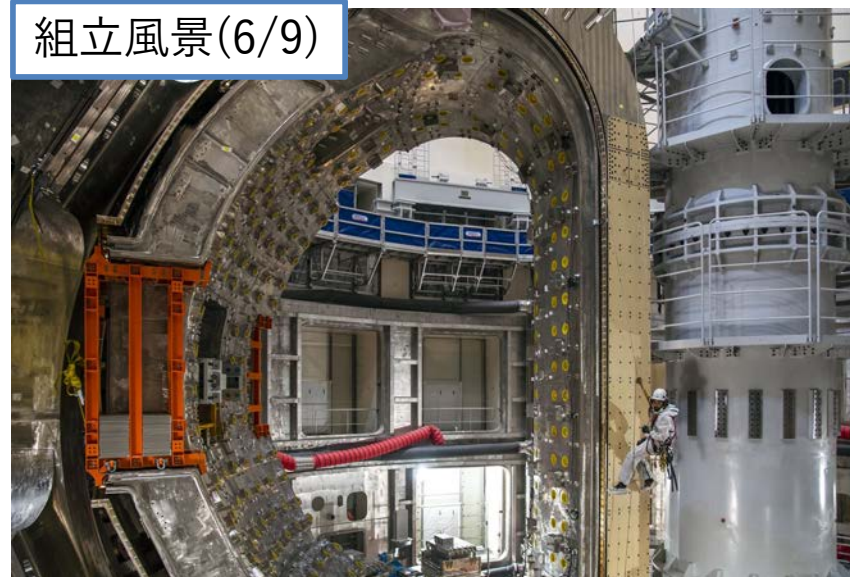
2025年
運転開始

2035年
実燃料での運転開始
エネルギー発生：
50万キロワット

建設サイトの風景 (4/14)



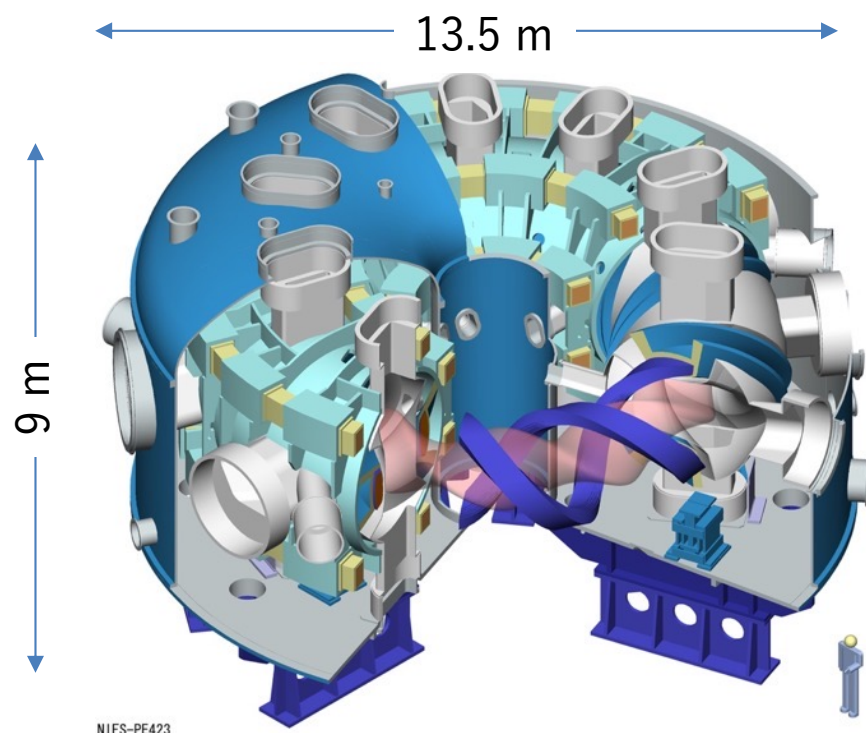
組立風景 (6/9)



日本にある大型実験装置



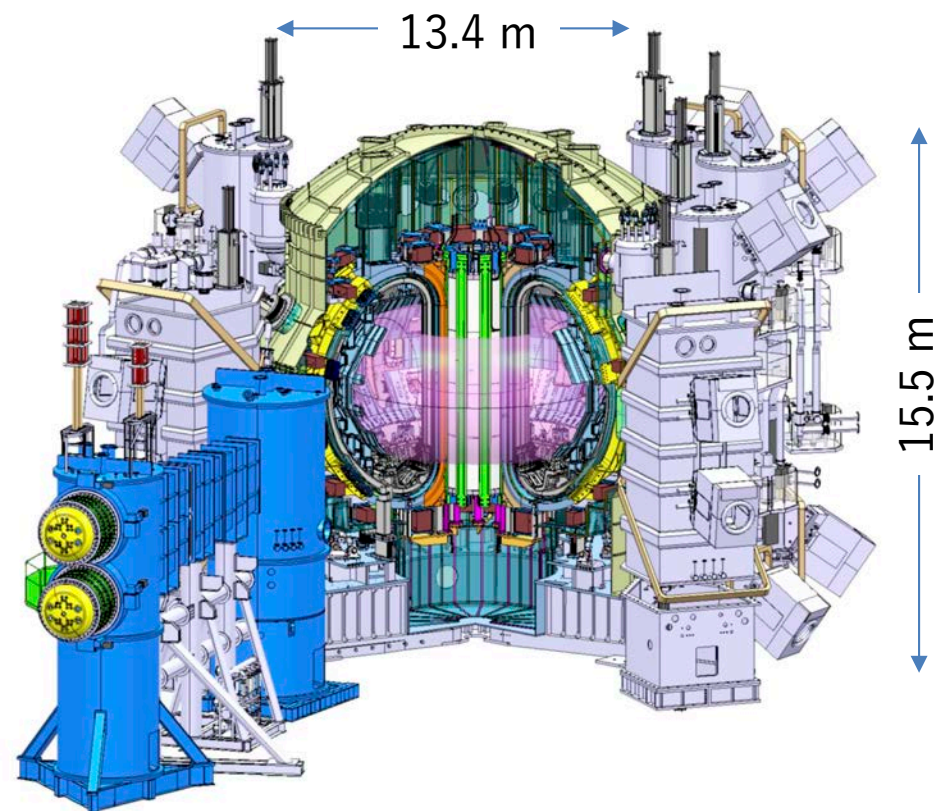
大型ヘリカル装置 (LHD)



核融合科学研究所 (岐阜県)
ファーストプラズマ 1998年3月

ヘリカル方式

JT-60SA



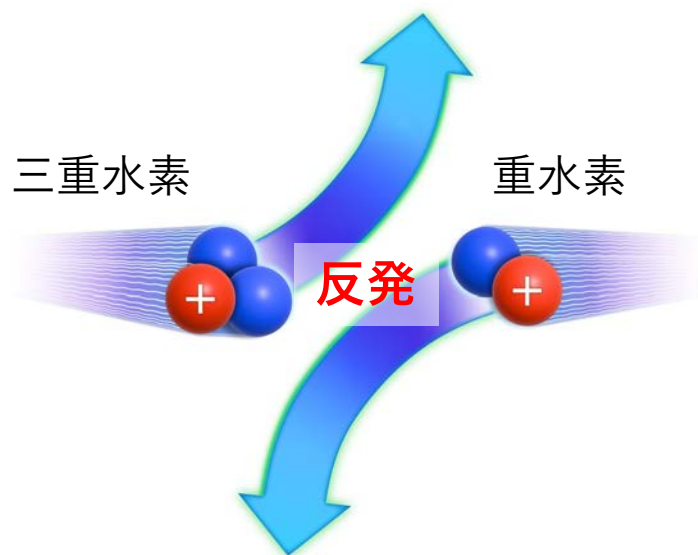
量子科学技術研究開発機構 (茨城県)
まもなく稼働開始

トカマク方式

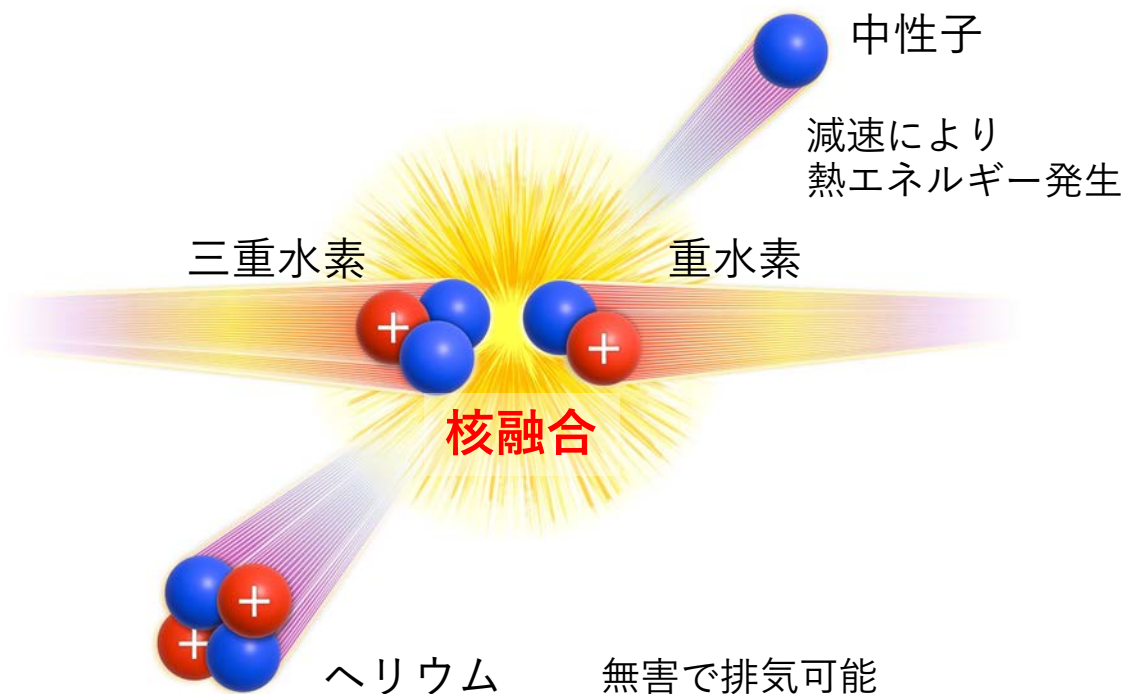
地上の核融合を起こすには高温が必要



温度が低いと



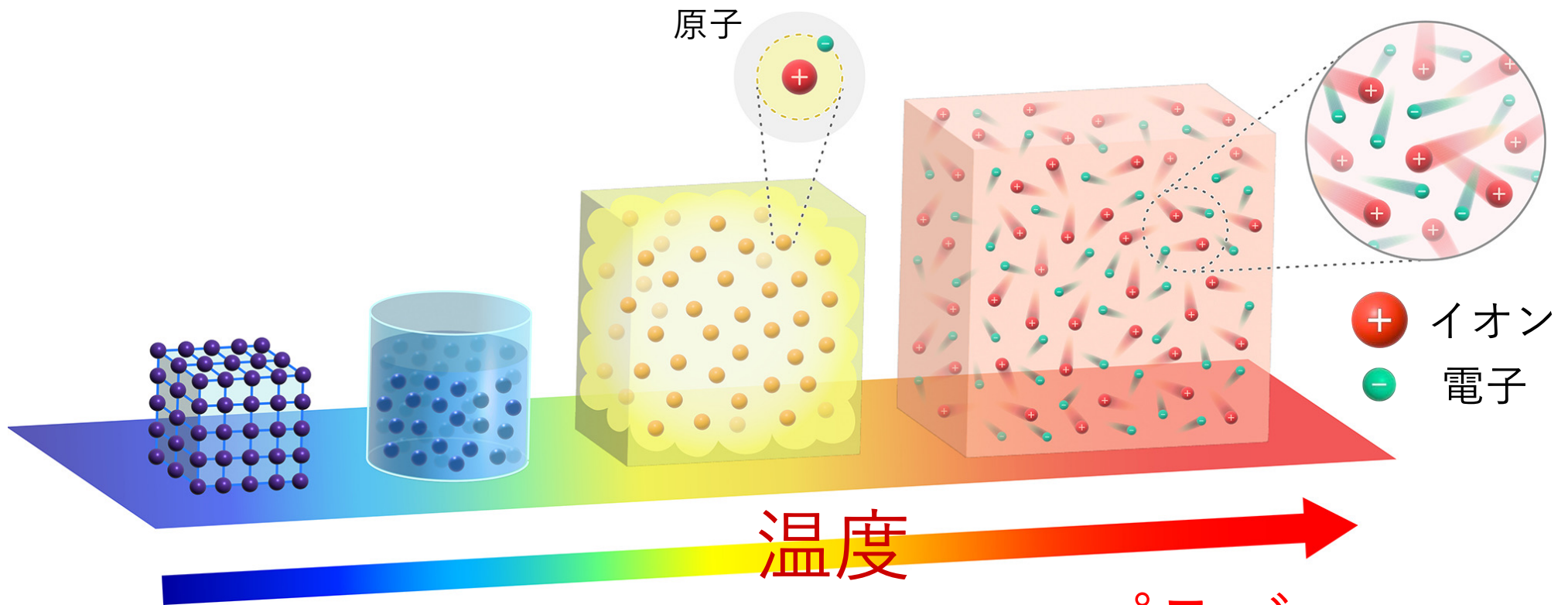
温度が高いと



核融合に必要な条件

- 温度 **1億 2,000万度** (空気の25万分の1の密度)
- 水素粒子の密度 **1cm^3 当たり100兆個以上**
- 閉じ込め時間 **1秒** (エネルギーの逃げにくさを表す指標)

核融合に必要な超高温状態はプラズマ



固体

液体

気体

プラズマ

物質の第4の状態

原子から電子が剥ぎ取られ（電離）、イオンと電子がバラバラになって自由に飛び回る



身近にあるさまざまなプラズマ



オーロラ 1千度



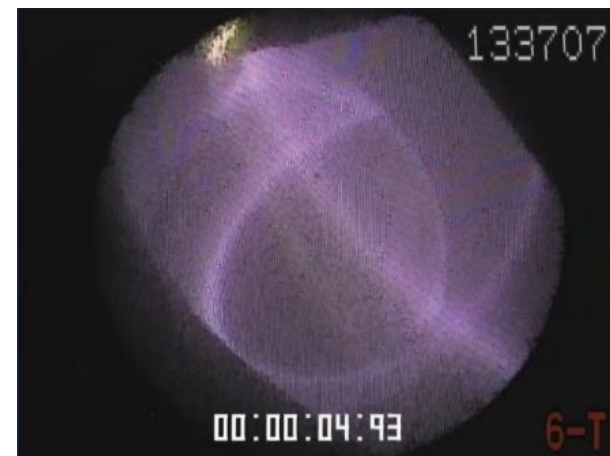
蛍光灯 1万度



炎 1千度



LHDのプラズマ 1億度



ドーナツ状の磁力線「かご」でプラズマを閉じ込め

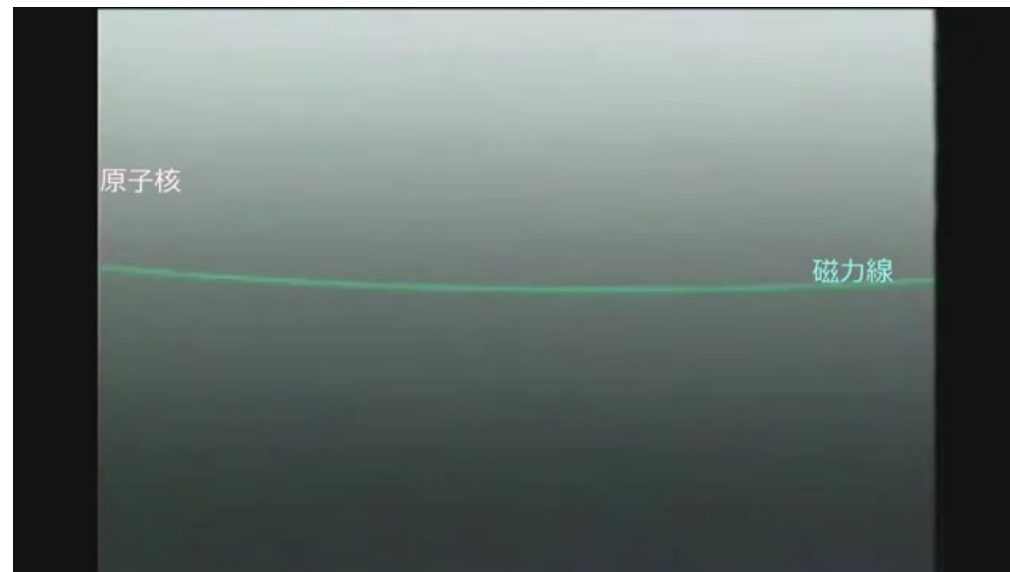


プラズマが壁に当たると消える

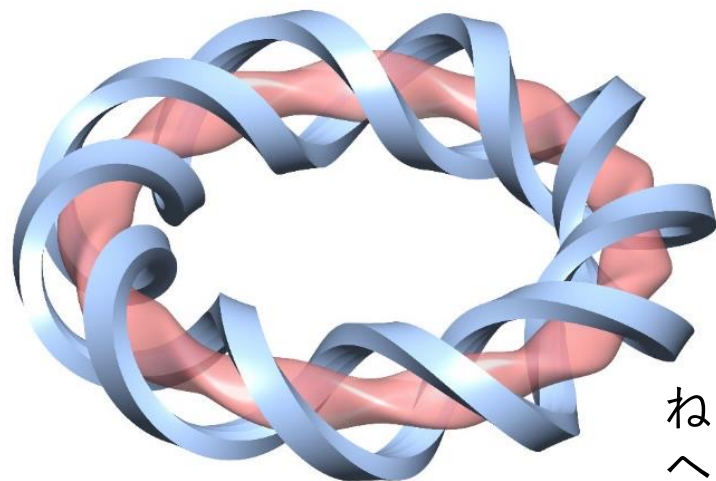


磁力線に巻き付く性質を利用する

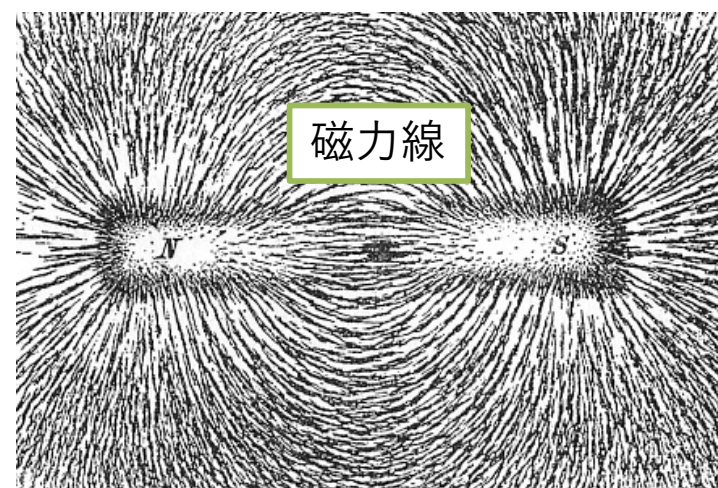
詳しくは
動画で。



ねじれたドーナツ型の磁力線かご



ねじれたコイル
ヘリカルコイル

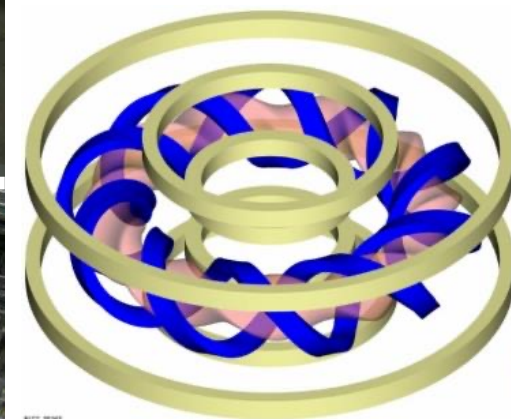
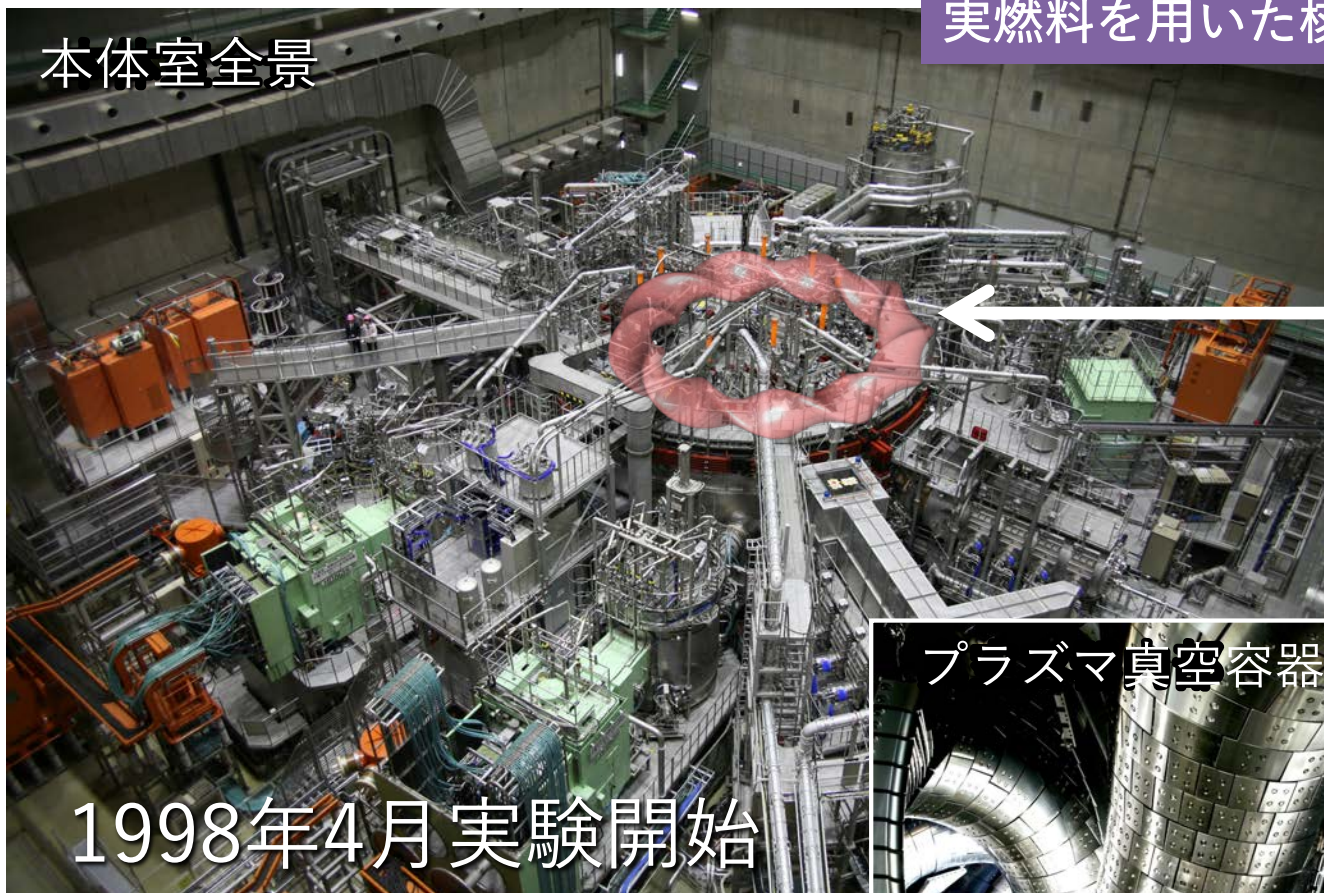


大型ヘリカル装置 LHD



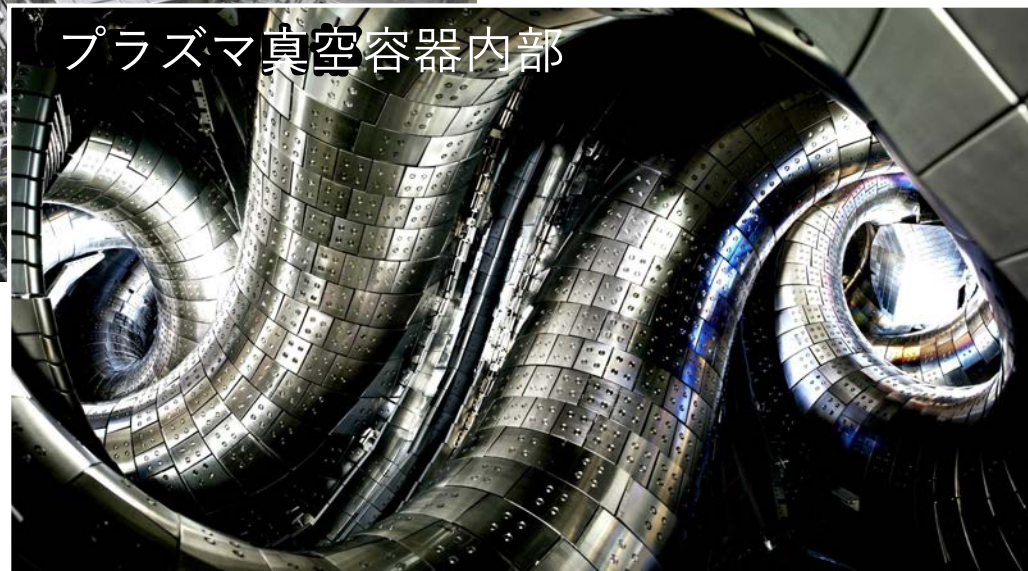
実燃料を用いた核融合実験は行いません

本体室全景



1998年4月実験開始

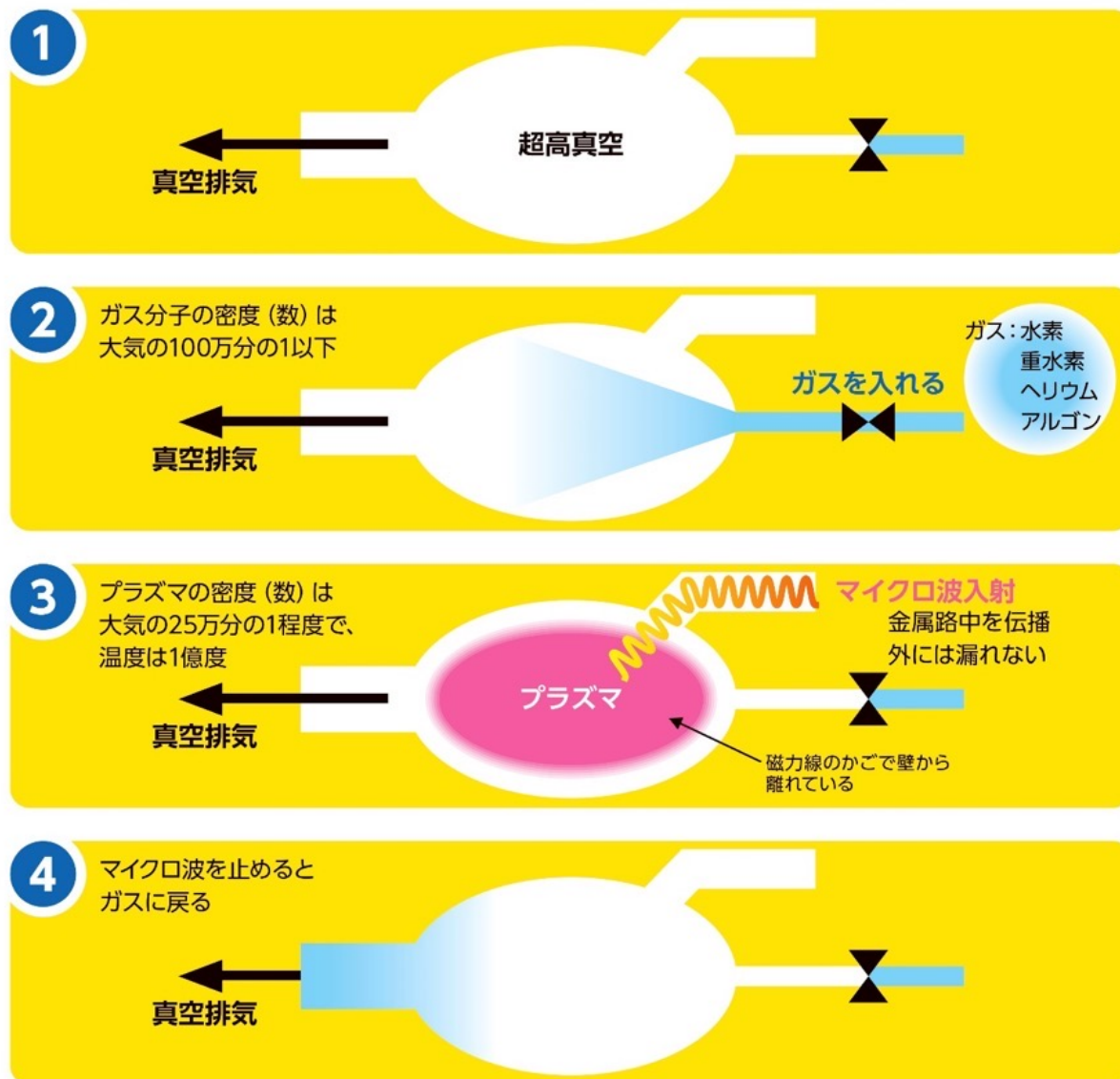
プラズマ真空容器内部



装置の直径 約 13 メートル

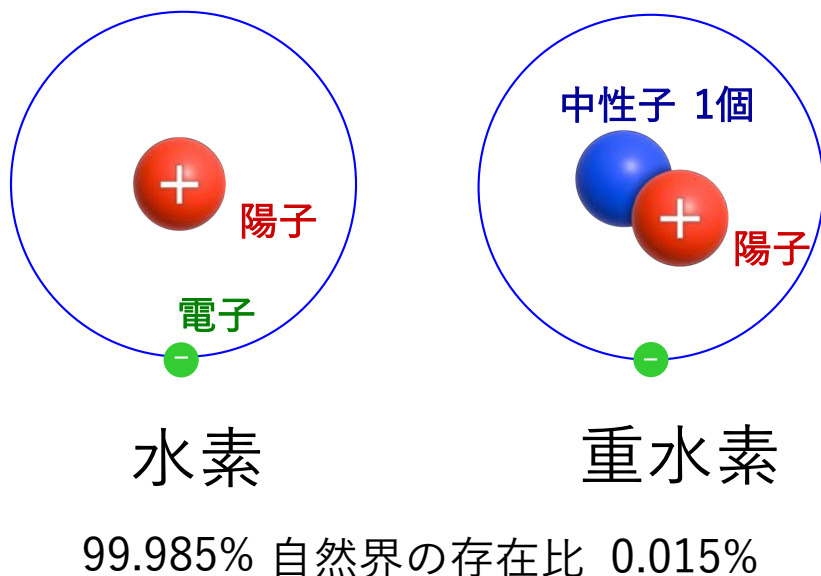
装置の高さ 約 9 メートル

装置の重さ 約 1,500 トン

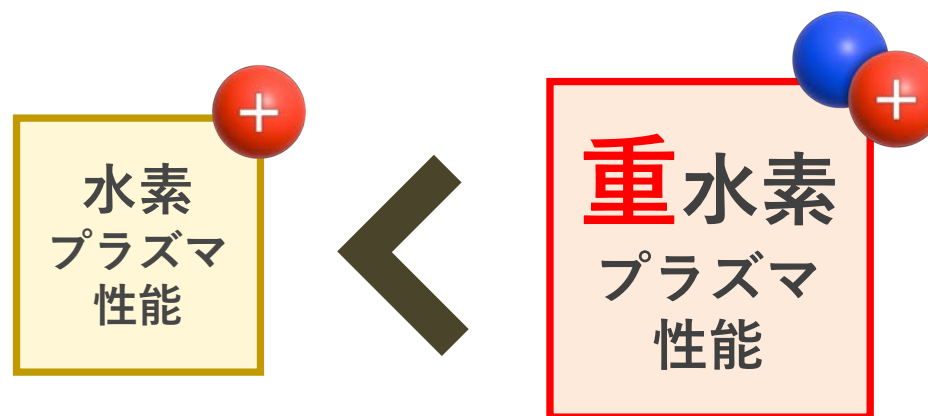


- 爆発や暴走がありません
- 瞬時に実験を停止することができます
 - ◆ ガスを止める
 - ◆ 加熱を止める
 - ◆ 電気を止める
 - ◆ ガスを入れすぎても止まる
 - ◆ 空気が入っても止まる

2017年から重水素実験を開始



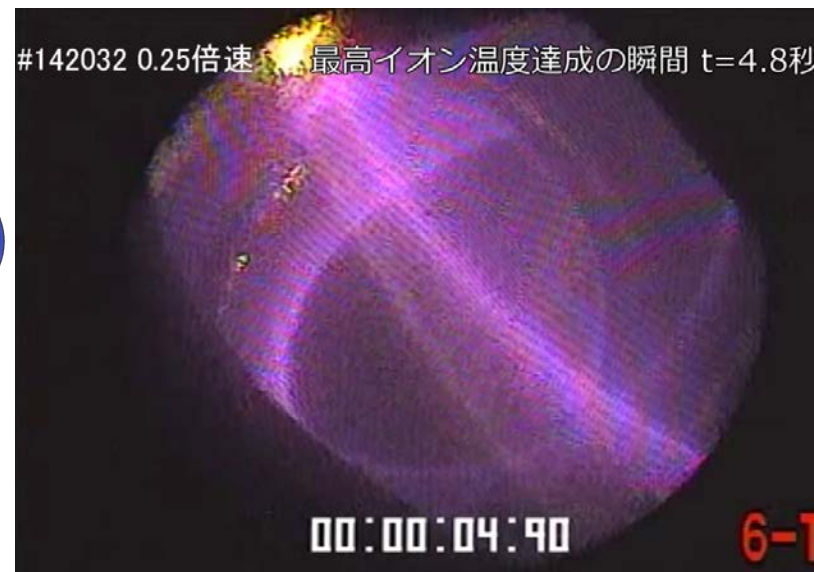
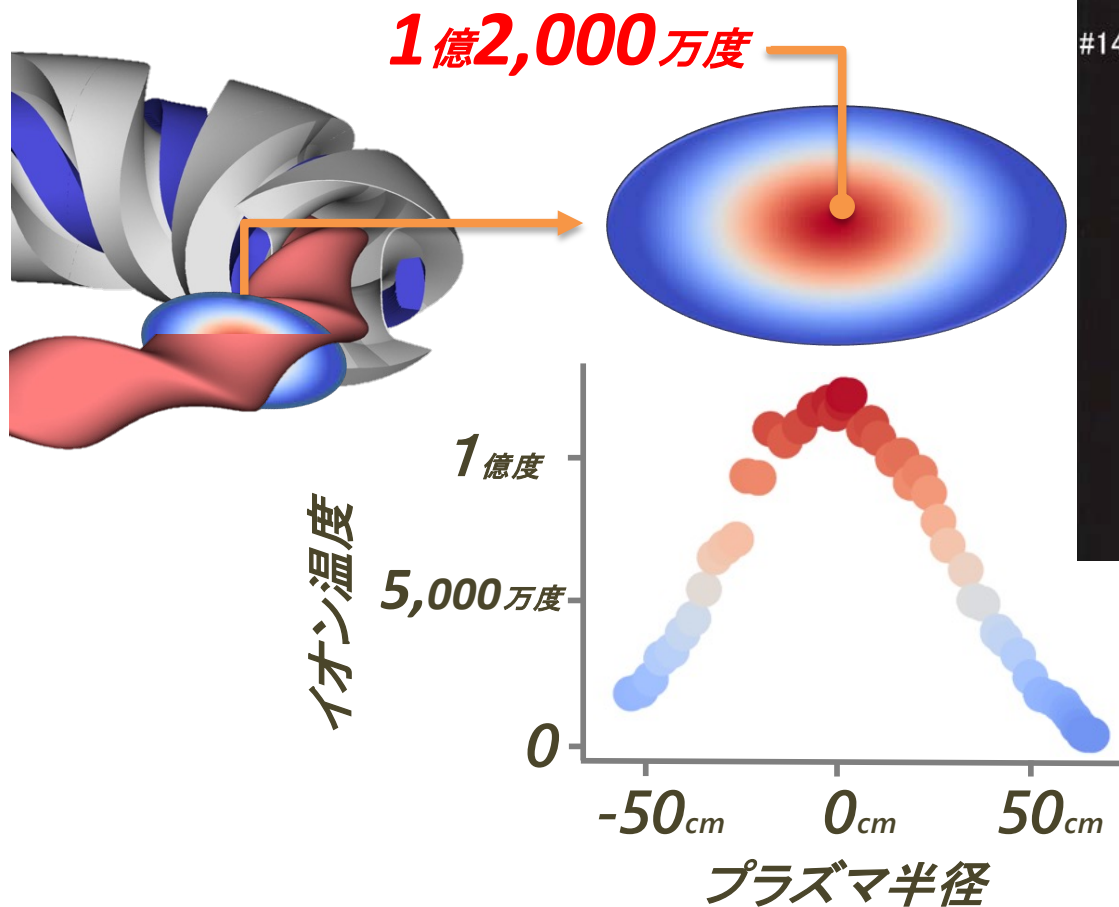
他の装置の実験で、**重水素を使ったほうがプラズマの温度が高くなる**ことが、経験的に知られていた



重水素実験の目的

- ✓ より温度の高いプラズマの性質を調べる
- ✓ どうして重水素を使うとプラズマの温度が高くなるのかを調べる

イオン温度の核融合条件を達成 (2017)



4:80秒が最高温度

プラズマ中心部が
一番高くなります

2020年、イオンも電子も同時に1億度に到達



核融合発電炉のプラズマは、イオン温度、電子温度が共に1億度以上

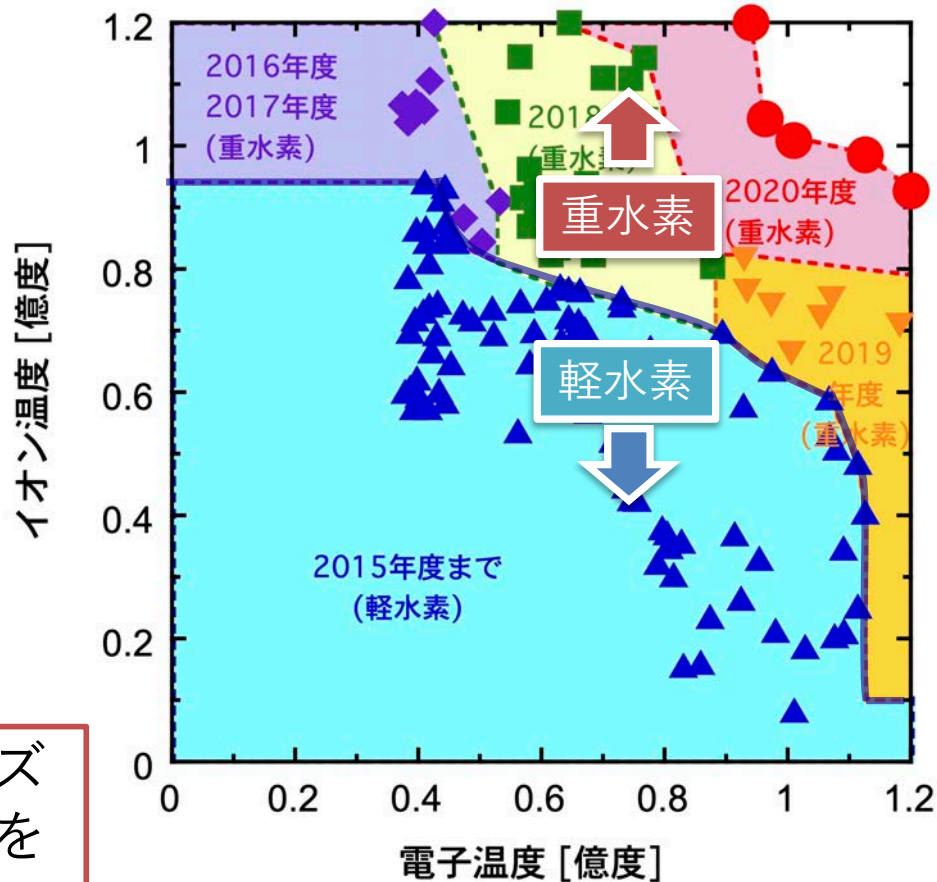
軽水素実験

- イオン温度の最高は9,400万度
- 電子温度を上げようとすると、イオン温度が下がってしまう

重水素実験

- イオン温度と電子温度が同時に1億度に到達

重水素を使うことでプラズマの温度が高くなることを実験で確認



memo

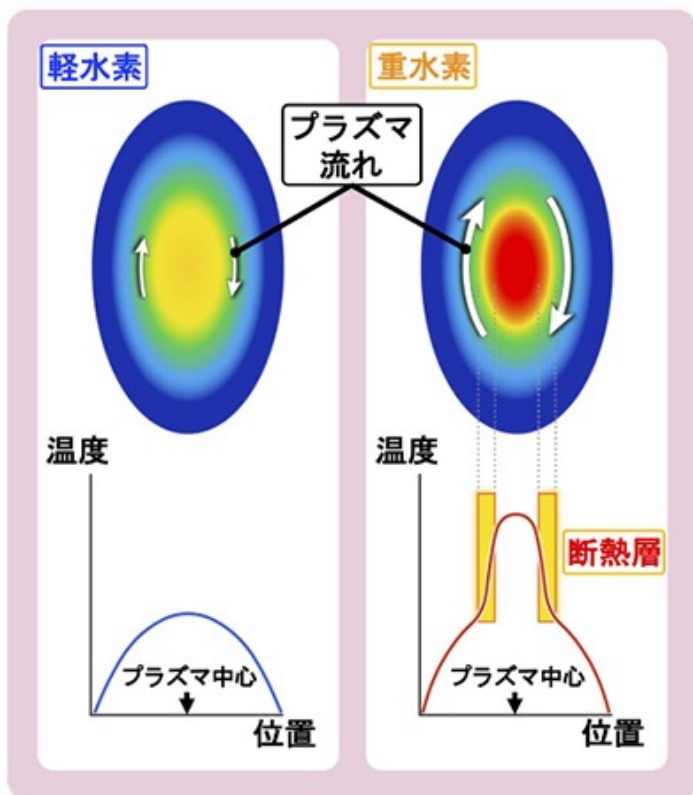
イオンと電子が自由に動き回るプラズマではそれぞれ別々の温度として計測することができます

核融合発電炉のプラズマを模擬できる物理実験が可能になった

LHDの最新の研究成果

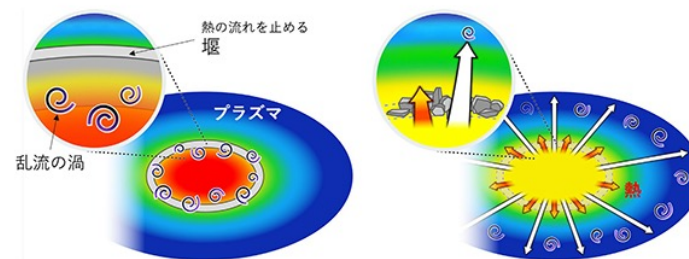


重水素プラズマの方がより高性能な断熱層が形成されることを発見



Scientific Reports誌, 2022年4月1日

熱よりも速く移動していく乱流を世界で初めて発見

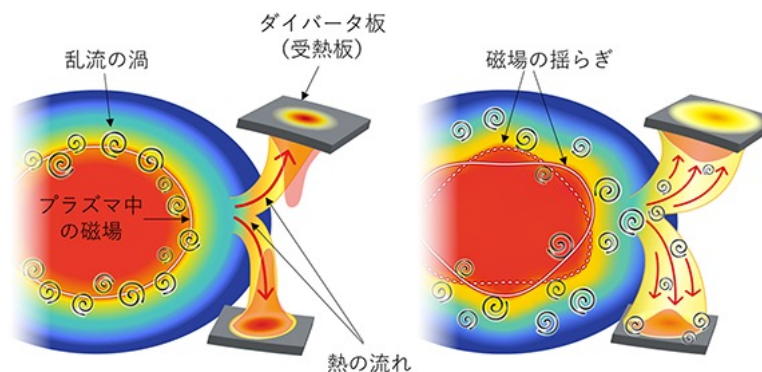


Scientific Reports誌, 2022年5月16日

乱気流も乱流



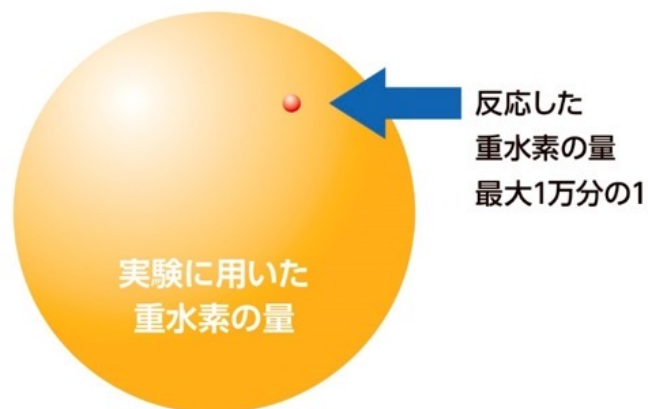
プラズマを閉じ込めている磁場に揺らぎを発生させると、プラズマ中の乱流が伝播するとともに、装置内壁の熱負荷が大幅に減ることを発見



Physical Review Letters誌, 2022年3月23日

- 核融合炉のプラズマを模擬した物理実験
 - 軽水素と重水素の混合プラズマ
 - 乱流の振る舞い
 - プラズマの発光スペクトル
- AI（人工知能）を活用したリアルタイムのプラズマ制御実験
 - 実験期間：9月29日～12月27日
 - うち重水素実験：9月29日～12月2日
 - その後の1か月間は、軽水素ガス、ヘリウムガスを用いた実験

重水素実験を実施するにあたって守ること



● 実験に用いた重水素ガスの大部分はそのままで変わりませんが、ごく一部がプラズマが発生しているときだけ、核融合反応を起こして、微量※の放射性物質である三重水素（トリチウム）ができ、放射線である中性子が発生します。

※ 1回の実験で発生する量は、最大でも400万分の1グラムで、放射性物質としての扱いが必要ない量

重水素実験を進めるにあたって以下を遵守します

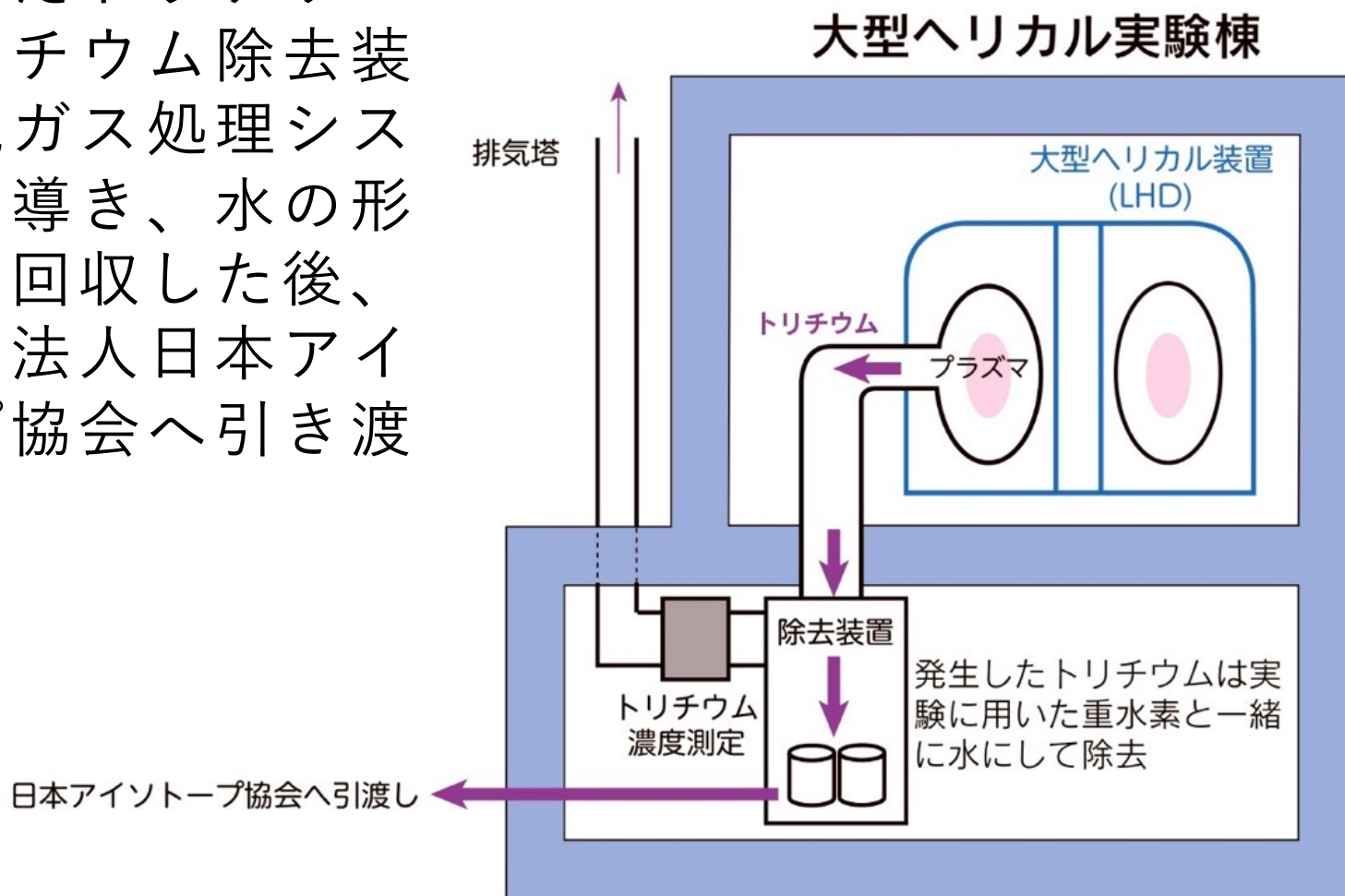
1. 関連法令
2. 協定書および覚書
3. 安全管理計画

また安全監視委員会が行う監視・測定等に最大限協力します

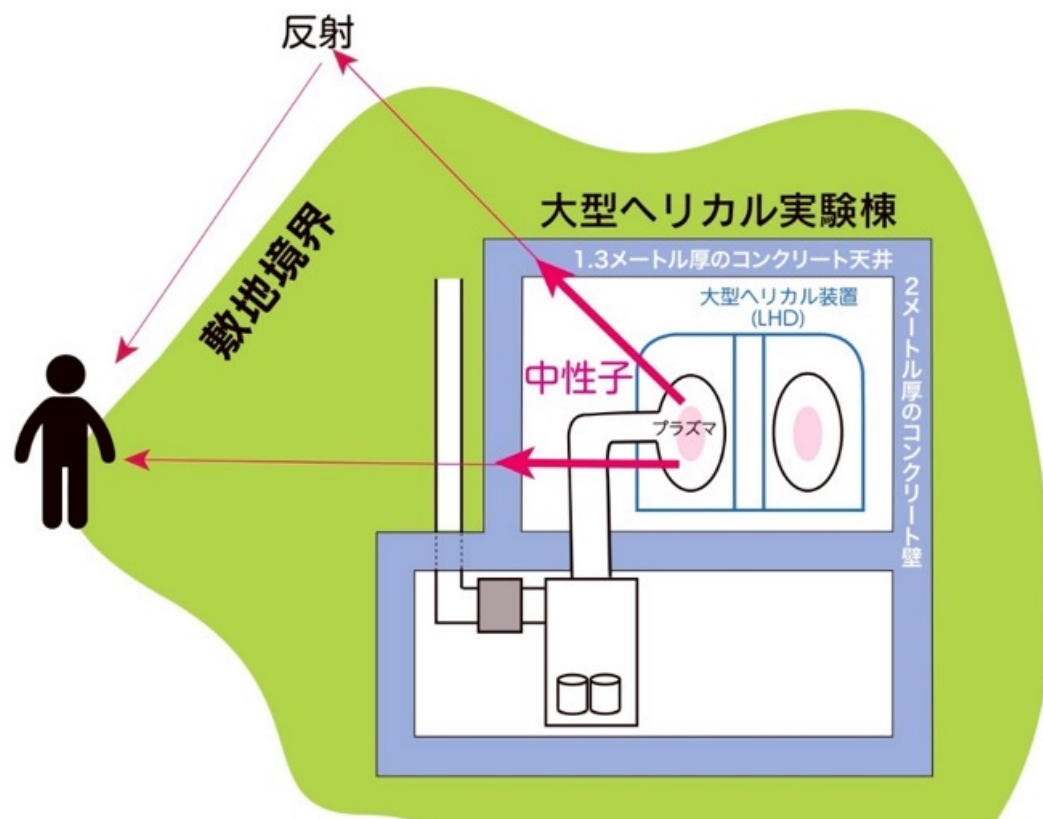
発生するトリチウムは、除去・回収します



●発生したトリチウムは、トリチウム除去装置（排気ガス処理システム）に導き、水の形で除去・回収した後、公益社団法人日本アイソトープ協会へ引き渡します。



発生する放射線は、コンクリート壁で遮へいします



- 発生した中性子は、厚さ2メートルのコンクリート壁で遮へいします。
- コンクリート壁やLHDは中性子によって放射化しますが、壁は約10年で自然のレベル、LHDは約40年で再利用が可能となります。それまで法令に基づいて適切に管理します。

発生する放射線やトリチウムから受ける影響は、研究所の敷地境界に居続けたとしても

自然放射線の1,000分の1以下
体内のトリチウムの15分の1以下

※遠くなるとさらに小さくなります

私たちは自然界から放射線を受けています



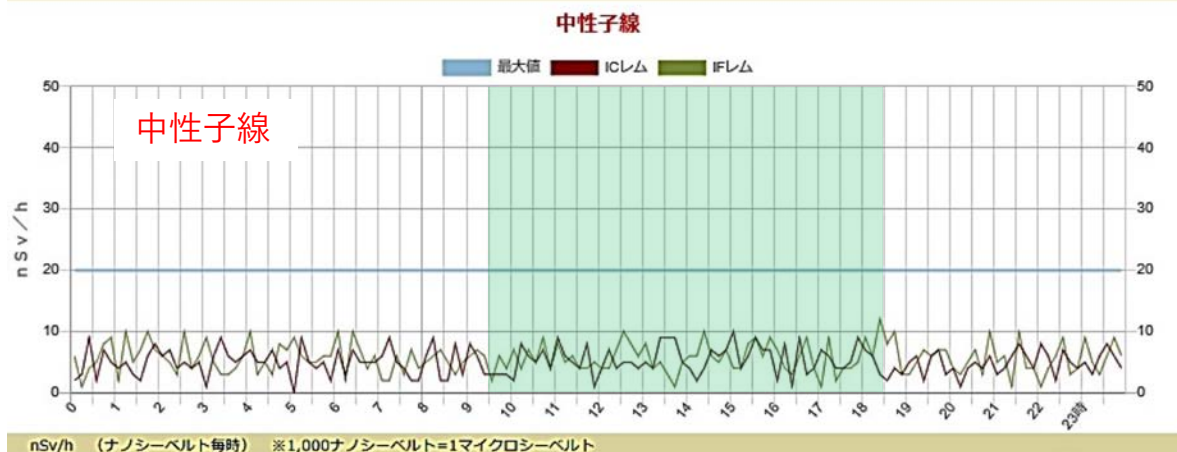
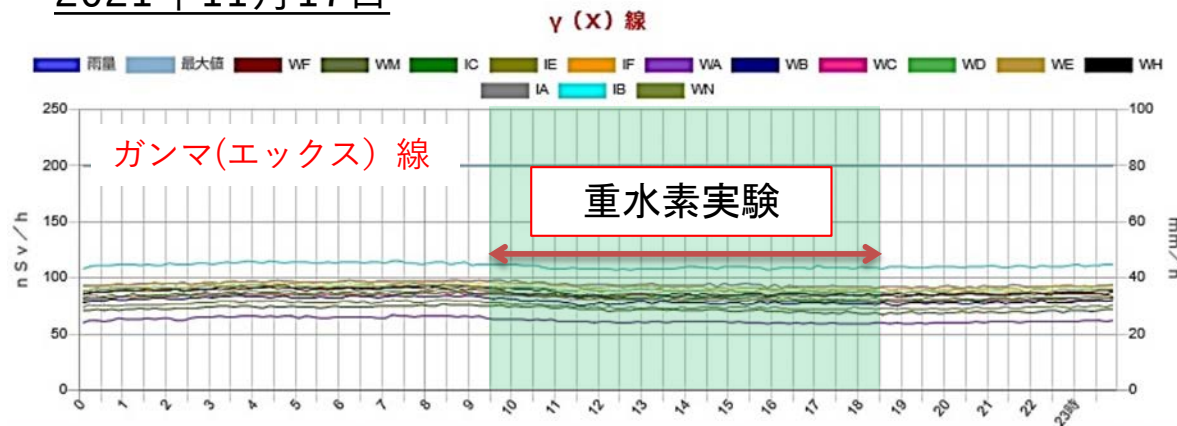
自然放射線であっても人工放射線であっても、受ける放射線の期間と量が同じであれば人体への影響は同じです。

環境放射線はリアルタイムで測定・公開しています

- 研究所敷地境界部に 9 ヶ所、実験棟近傍に 5 ヶ所の放射線モニタリングポストを設置しています。
- 各ポストでの環境放射線測定データは、リアルタイムでホームページ上に公開しています。
(<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>)

放射線モニタリングシステムによる環境放射線データ日報トレンドグラフ (全地点)

2021年11月17日

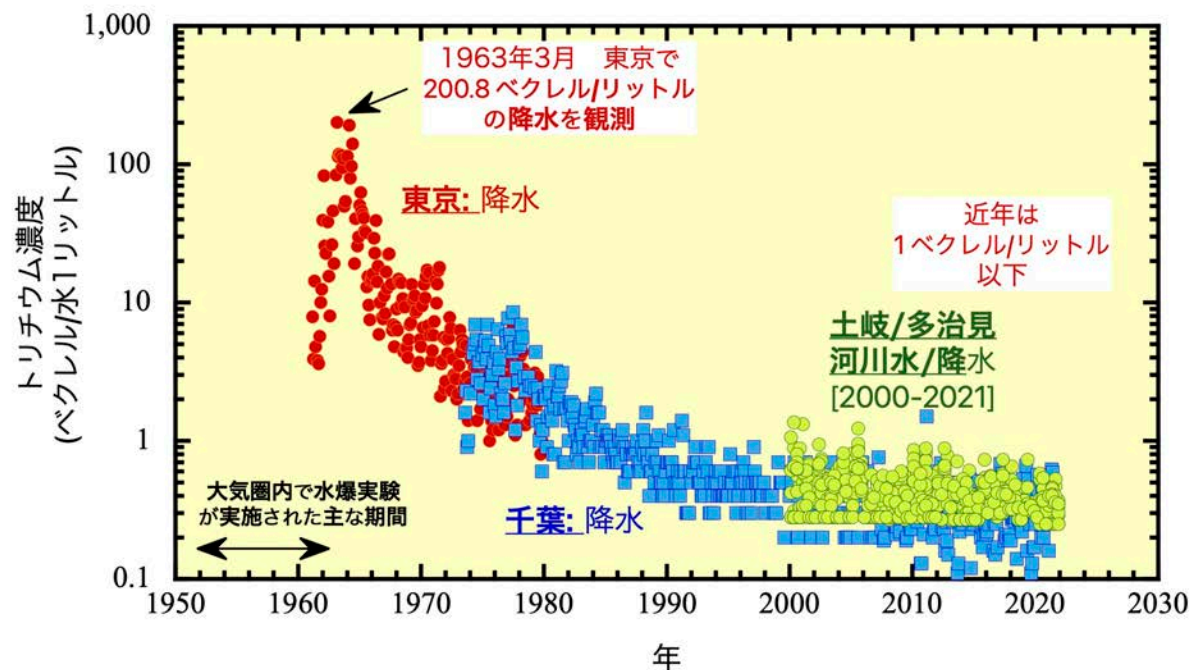


モニタリングポスト



これまで、プラズマ実験を実施した時間帯で線量が増加したことはありません。

周辺環境を常に監視しています



- 宇宙線により大気の上層部でトリチウムが生成されるため、自然界には微量のトリチウムが存在しています。
- 1960年代までの水爆実験により増加した大気中のトリチウムは、私たちの環境の中で、次第に減少してきているのがわかります。

重水素実験を開始してから、近隣の河川水のトリチウム濃度に変化はありません。

監視結果等は安全監視委員会で確認・検証



岐阜県・3市（土岐市、多治見市、瑞浪市）が、2014年11月1日、各議会の議決を経て共同設置

県が指名した専門家と3市が指名した住民代表で構成
研究所と独立した第三者委員会

監視委員会の業務内容

- ・ 研究所の監視及び測定結果の確認
- ・ 委員会による監視・測定結果の検証（クロスチェック）
環境中性子線量の測定（2015年10月より実施）
環境水中トリチウム濃度の測定（2015年8月より実施）
どちらも実験期とメンテナンス期の年2回
- ・ 研究所の安全対策設備の整備状況の確認
- ・ 研究所の教育・訓練の実施状況の確認
- ・ 非常時における研究所の対応等の確認

委員会の開催状況

- ・ これまで11回の委員会を開催（第1回 2015年1月）
- ・ これまでの委員会において、安全性を最優先に重水素実験を進めていること、及び重水素実験による周辺環境への影響がないことを確認いただいています



安全監視委員会と研究所が合同で行う環境水採水の様子



環境中性子線量測定の様子

今後の研究計画について



- ◆ 数々の成果を上げてきたLHDプロジェクトは、2013年度より国の大規模学術フロンティア促進事業の支援のもと実施されてきました。同事業により予算措置される期間は最大で10年と決められていることから、同事業としてのLHDプロジェクトは2022年度に終了することになります。このことにより、**重水素実験（重水素を用いた実験）も成功裏に完了**します。
- ◆ 重水素実験終了後は、**LHDを引き続き、核融合研究の学術基盤**として使用することを検討・協議しているところです。使うガスは重水素以外の水素やヘリウムです。
- ◆ LHDは「放射性同位元素等の規制に関する法律（RI規制法）」に基づく放射線発生装置ではなくなり、新たな中性子やトリチウムの発生はありませんが、同法に基づく**管理区域は引き続き設定し、適切な管理**を継続していきます。
- ◆ 2023年度以降は、これまでの成果を生かし、**他の分野の研究者とも協力**しながら、科学的にまだ分かっていない課題に取り組んでいきます。そして**核融合の早期実現**を目指します。
- ◆ さらに、民間企業とも連携して、核融合研究で培った技術を**社会に役立てる応用研究**にも取り組みます。

- LHDの重水素実験により、プラズマの高性能化に成功し、学術論文等によって発表された研究成果は、国際的にも高く評価されています。
- 重水素実験の安全性は確保されています。また周辺環境に影響を与えていません。これらのことは、第三者委員会である安全監視委員会で確認をいただいています。
- 今年度の実験は、核融合炉のプラズマを模擬した物理実験やAIを活用したプラズマ制御実験を行います。
- 重水素実験は今年度で成功裏に完了し、核融合科学研究所は新しい段階に進みます。LHDは学術基盤として引き続き使用することを検討・協議しています。
- 今後とも皆様のご理解とご支援の程よろしくお願い申し上げます。