

# 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

竹入 康彦



## 今、エネルギーは化石燃料に頼っています

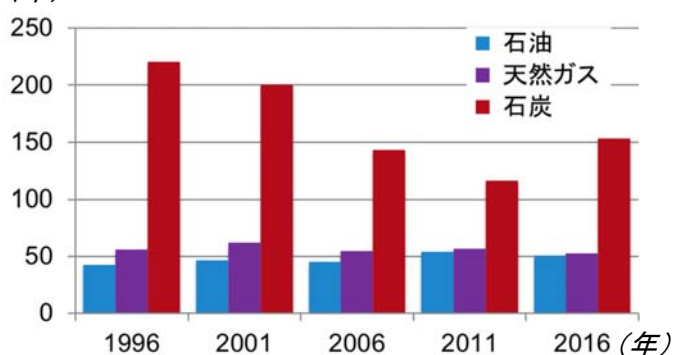


●日本の消費エネルギーのうち、電力の占める割合は25%

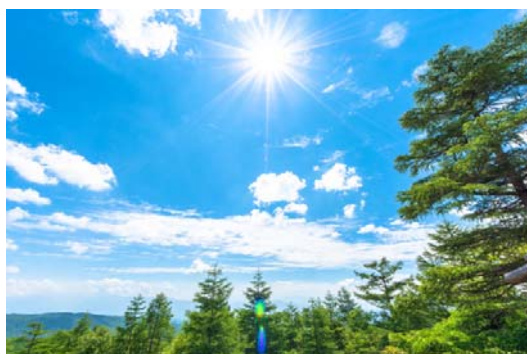
残り75%は化石燃料に頼っています

●シェールガス、メタンハイドライド等を含めても、化石燃料は100～200年で枯渇

(年) 可採年数(後何年、資源が使えるかの目安)



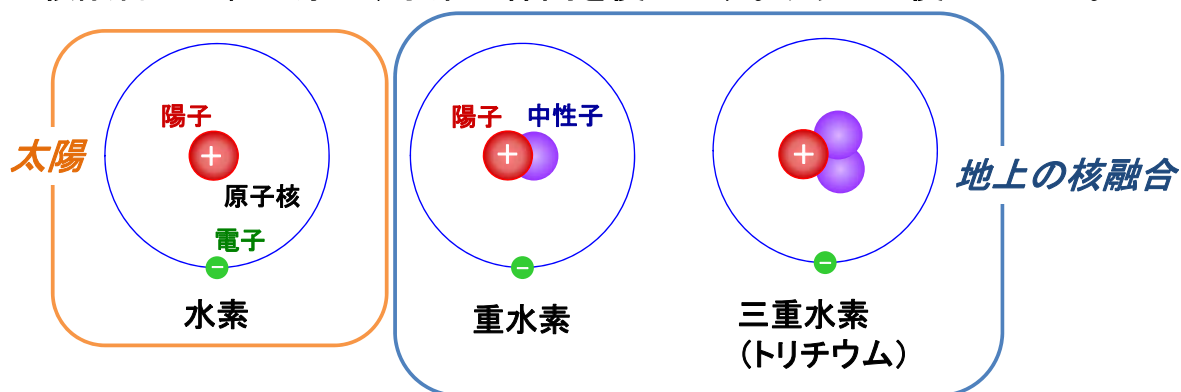
化石燃料が存在する今の間に、環境保全性が高く、基幹となり得る新エネルギー源を緊急に確立する必要



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

- 核融合では軽い原子、水素の仲間を使います。ウランは使いません。



3

- 燃料資源が無尽蔵
  - ◆ 海水から燃料がとれます
- 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

4

# 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 0.1g



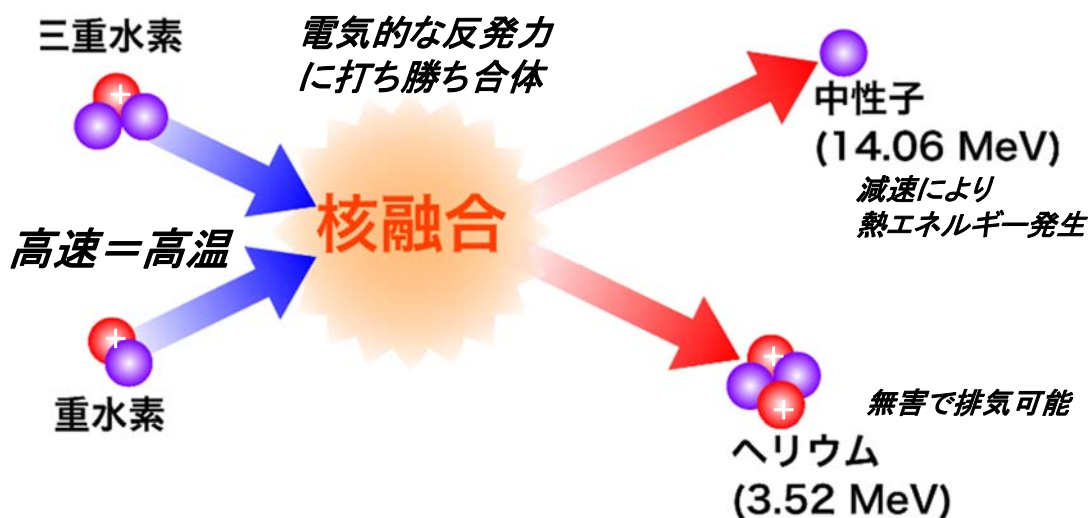
スマートフォンの電池1/2個分  
リチウム 0.3g

日本の一人当たりの年間電気使用量  
(7,500kWh)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%

海水中に2,000億トンのリチウム  
⇒事実上、無尽蔵

# 地上の核融合を起こすには



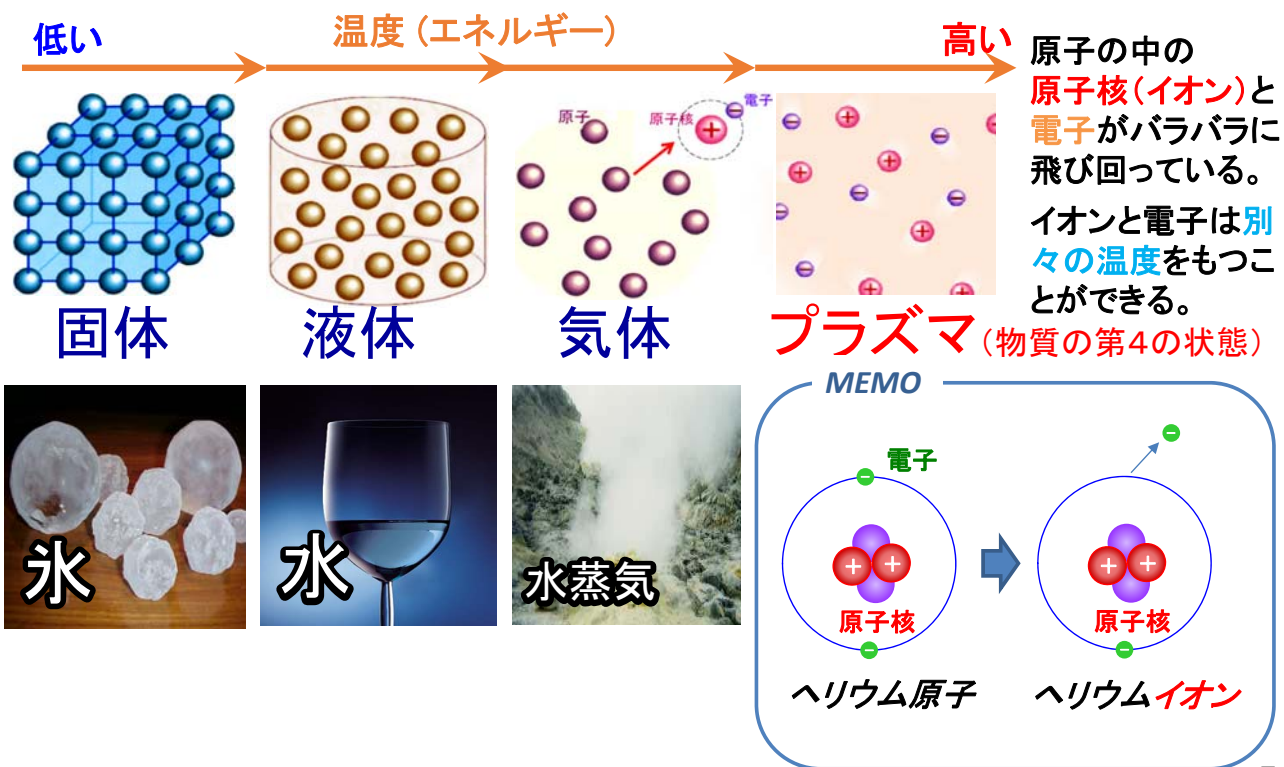
核融合に必要な条件

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

➡ プラズマ状態



# 核融合に必要な超高温状態はプラズマ



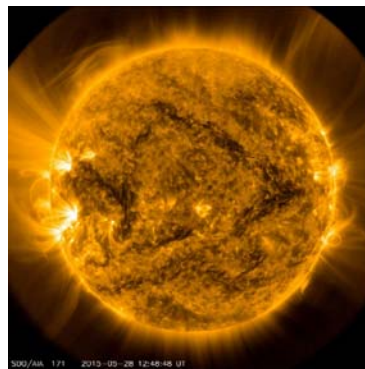
# さまざまなプラズマ



オーロラ



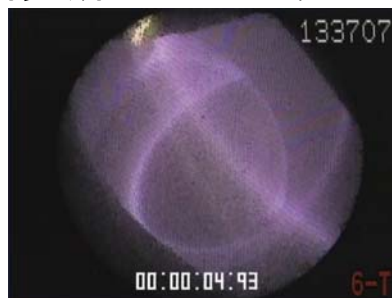
太陽コロナ



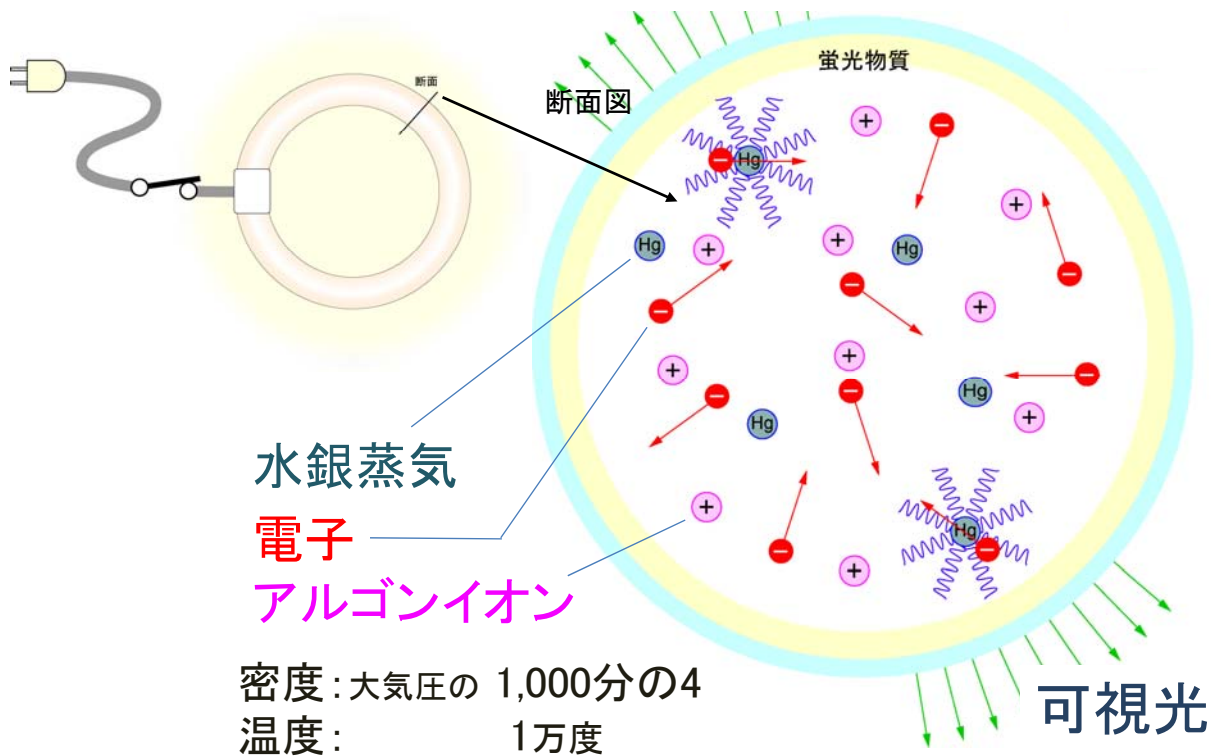
炎



研究所LHDのプラズマ



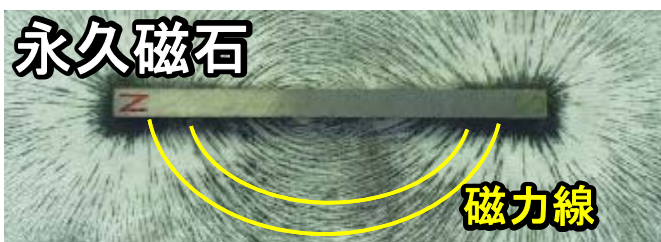
# 蛍光灯の中にもプラズマがあります



# プラズマが容器に当たらないようにするには？

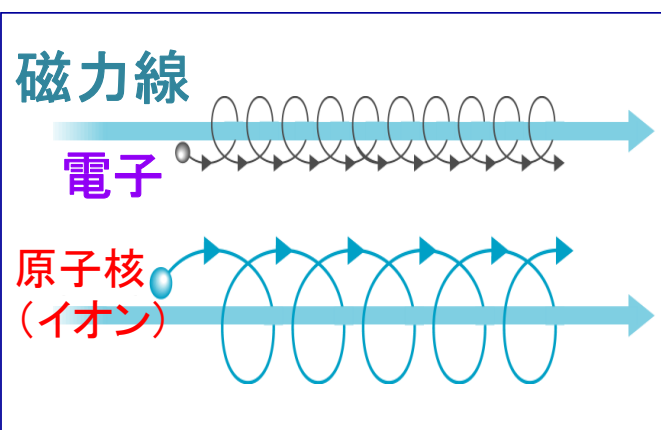


プラズマは冷たい容器の壁にあたると冷えて消えてしまいます



## 磁力線

磁場の向きを繋げた見えない線



## 電子とイオンは

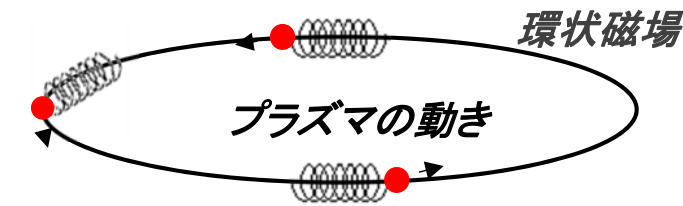
磁力線に巻きつく

- 磁力線が容器に当たらないよう設計



- プラズマも容器に当たらない

# ドーナツ状の磁力線の「カゴ」でプラズマ閉じ込め



普通は磁力線の端で壁にあたってしまう

ドーナツ状にすると磁力線の端がなくなる

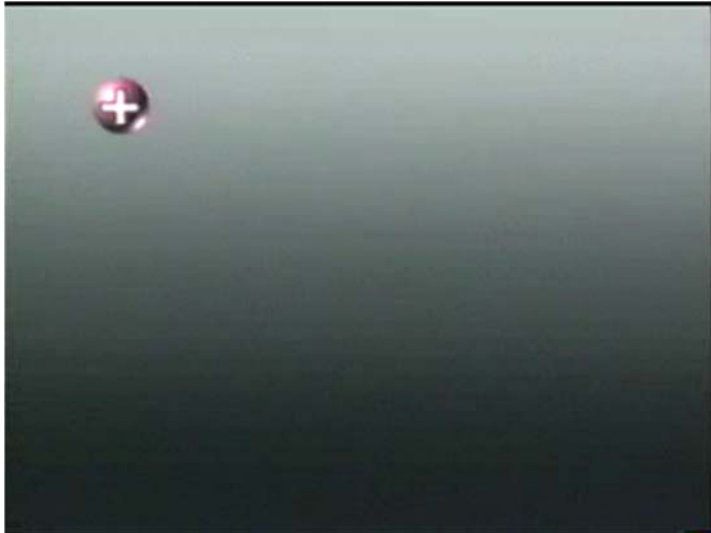


プラズマが周回できる



さらに

磁場をねじりながらドーナツ状の「カゴ」で閉じ込めることができる

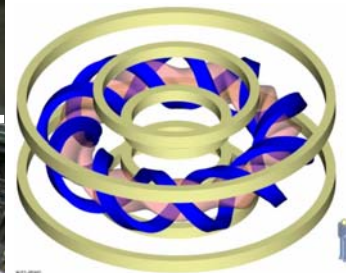
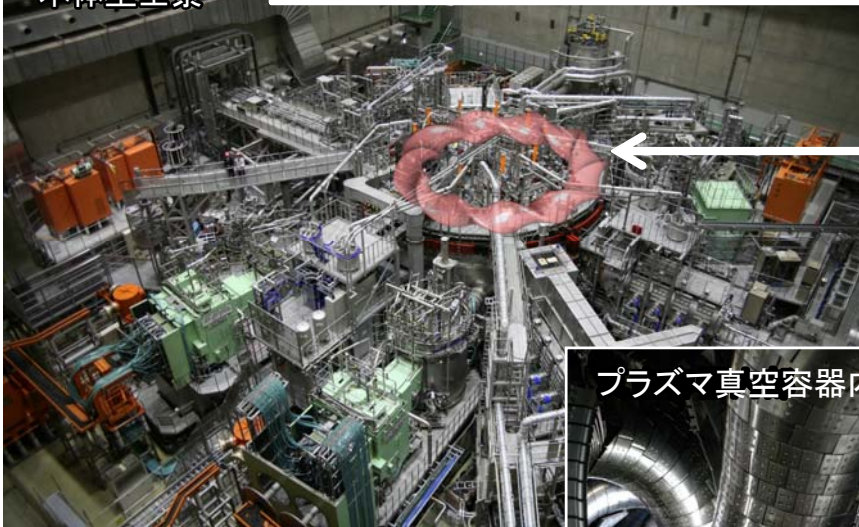


# 大型ヘリカル装置 Large Helical Device: LHD

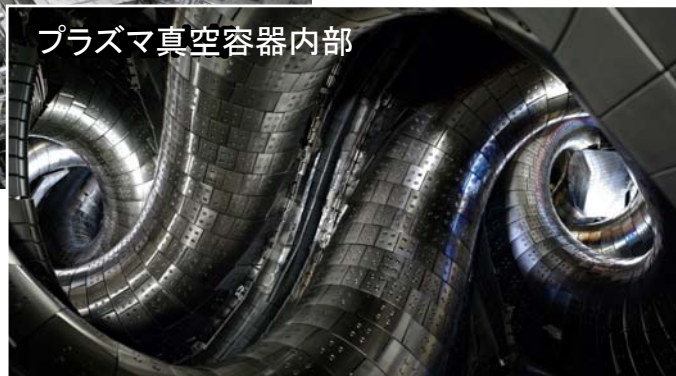


本体室全景

燃料を用いた核融合実験は行いません



プラズマ真空容器内部



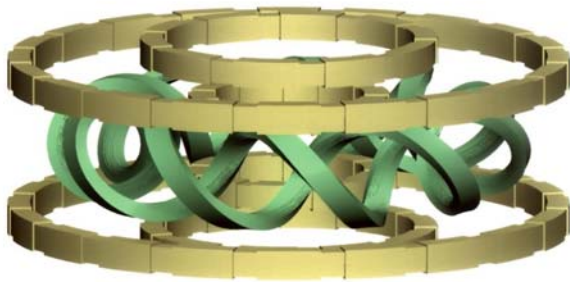
装置の直径	約 13 メートル
装置の高さ	約 9 メートル
装置の重さ	約 1,500 トン



# ドイツでも同規模の装置が始動！



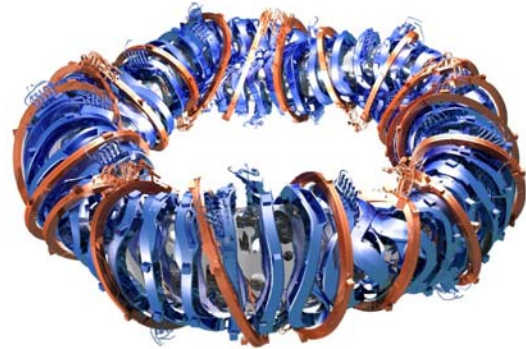
大型ヘリカル装置 (LHD)



NIFS-PE111

日本  
核融合科学研究所  
ファーストプラズマ 1998年3月  
コイルの数 8

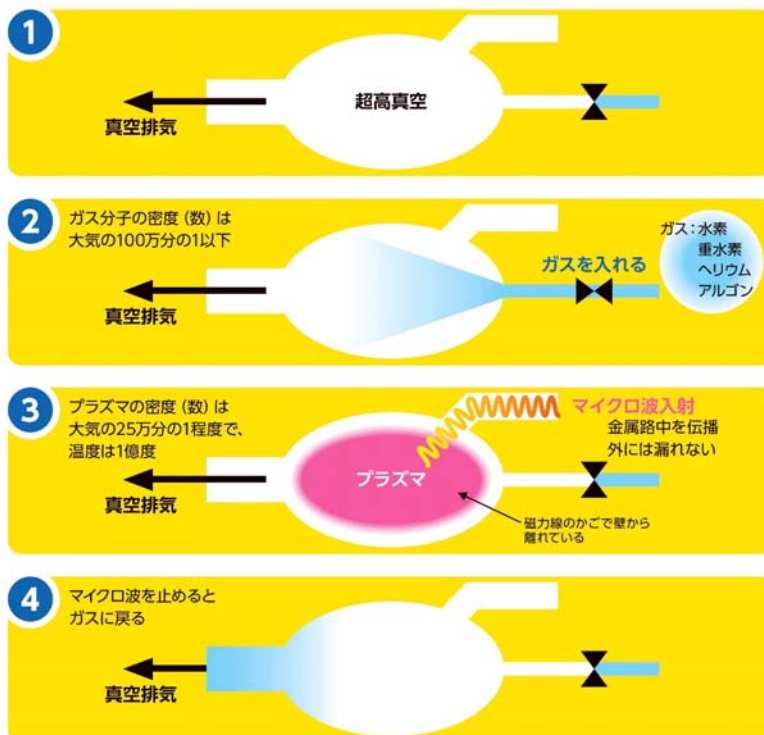
ヴェンデルシュタイン7-X (W7-X)



ドイツ  
マックスプランク・プラズマ物理研究所  
ファーストプラズマ 2015年12月  
コイルの数 60

世界に同規模の装置が2つ出来たことで一層の協力と競争

## 実験の手順

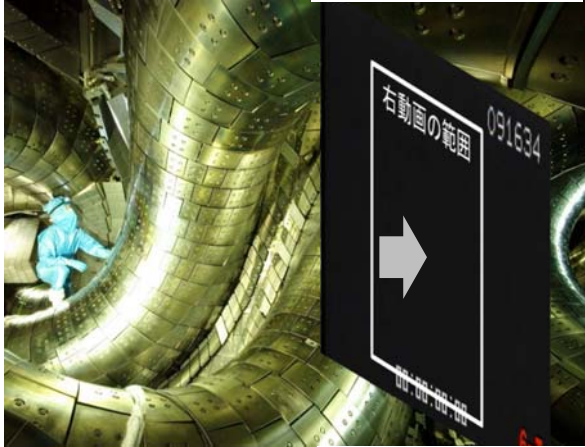


- 蛍光灯と同じで爆発や暴走がありません
- 瞬時に実験を停止することができます
  - ◆ ガスを止める
  - ◆ 加熱を止める
  - ◆ 電気を止める
  - ◆ ガスを入れすぎても止まる
  - ◆ 空気が入っても止まる

# LHDの中で生成したプラズマ



真空容器内部

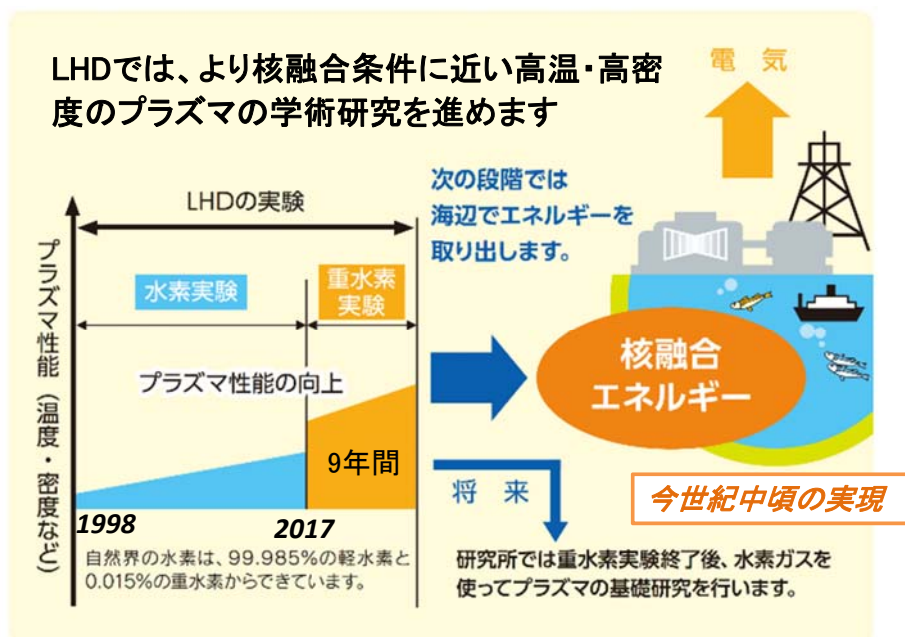


LHDのプラズマ



可視光の観測

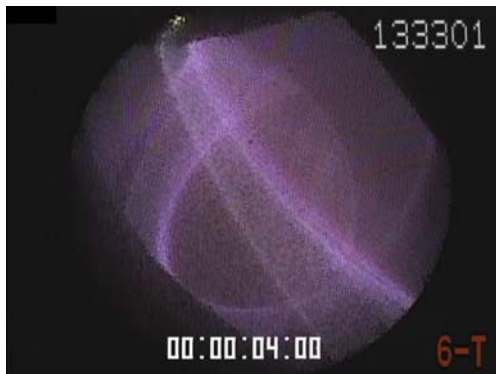
# 2017年から重水素実験を開始しました



LHDでは発電実証を行いません  
将来の核融合発電所は海辺に建設されます



# 2017年の重水素実験実施状況



重水素ガスによる最初のプラズマ

2017年3月7日、重水素ガスを用いた実験(重水素実験)を開始

7月7日まで、重水素実験を実施

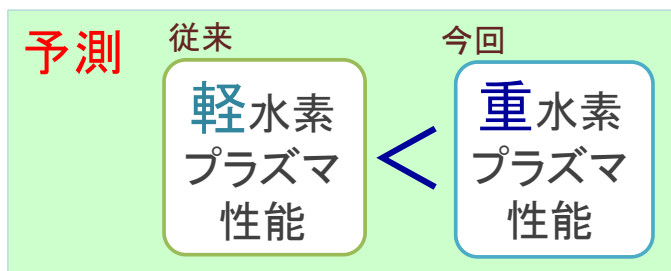
数々の成果を挙げながら安全に実験を実施しました。



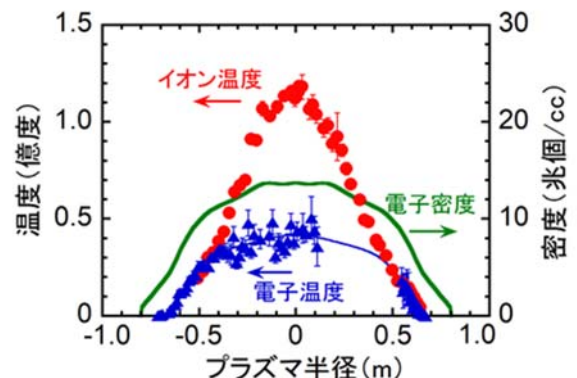
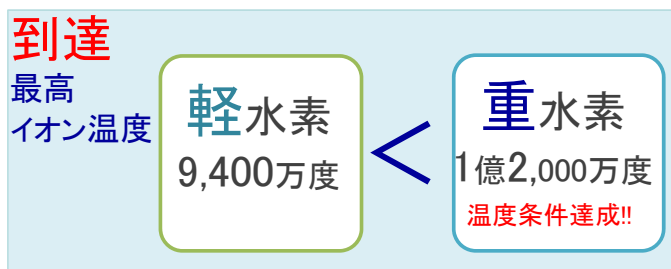
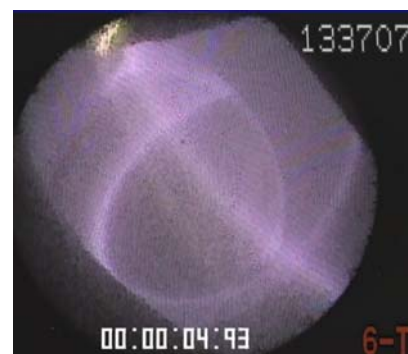
146名の来賓、所員約300名が出席した実験開始の式典

7月11日~8月3日、軽水素ガスを用いた実験を行い、その後、超伝導コイルを1ヶ月かけて昇温しました。

# 重水素実験により核融合の温度条件を達成



2017年3月7日 重水素プラズマを初生成

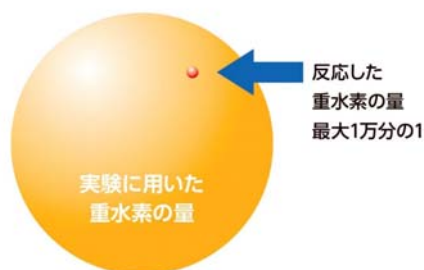


- 核融合条件であるイオン温度1億2,000万度を達成
  - 温度は低いながら48分の連続運転を達成
- ➡ ヘリカル型核融合炉の実現に見通し

### 今後の研究では

- 電子温度をイオン温度に近付ける
- どうして重水素にすると性能がよくなるのか？
- エネルギーの高いイオンの閉じ込めは？
- 高性能プラズマをより長時間維持する

## 重水素実験を進めるにあたって



- 実験に用いた重水素ガスの大部分はそのまま変わりませんが、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。

重水素実験を進めるにあたって以下を遵守します。

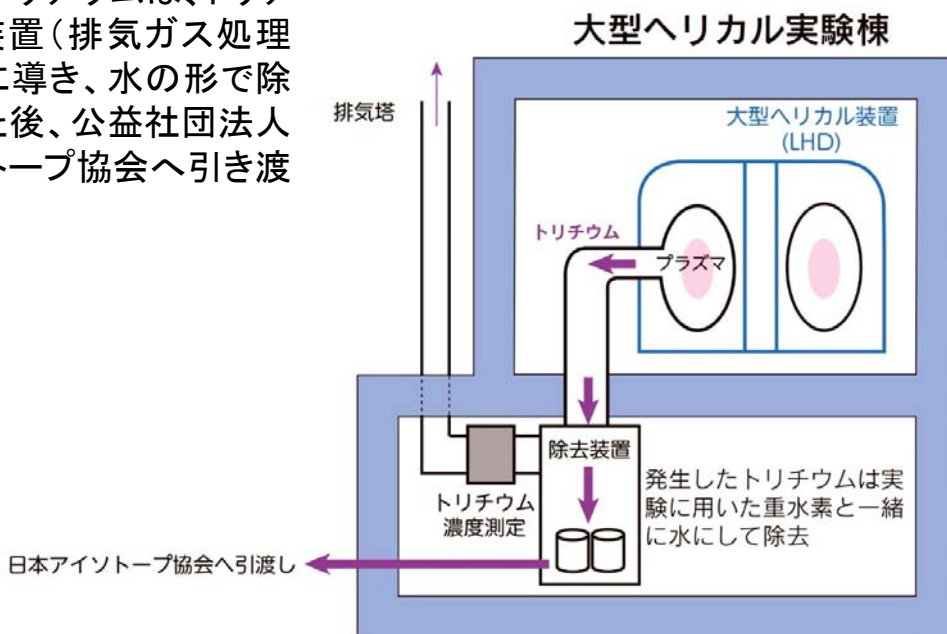
1. 関連法令
2. 協定書および覚書
3. 安全管理計画

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

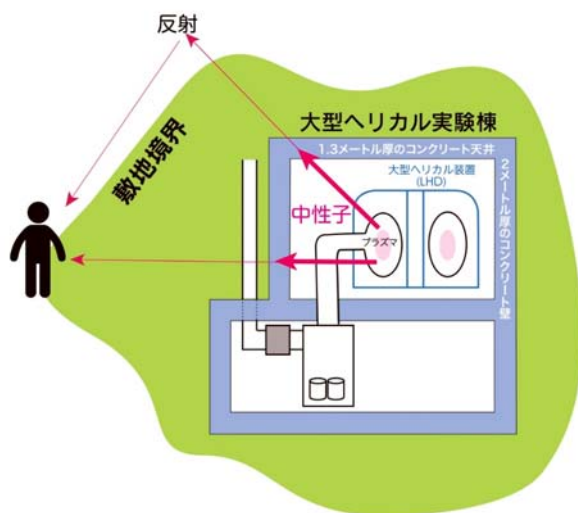


●発生したトリチウムは、トリチウム除去装置（排気ガス処理システム）に導き、水の形で除去・回収した後、公益社団法人日本アイソトープ協会へ引き渡します。



21

## 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、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

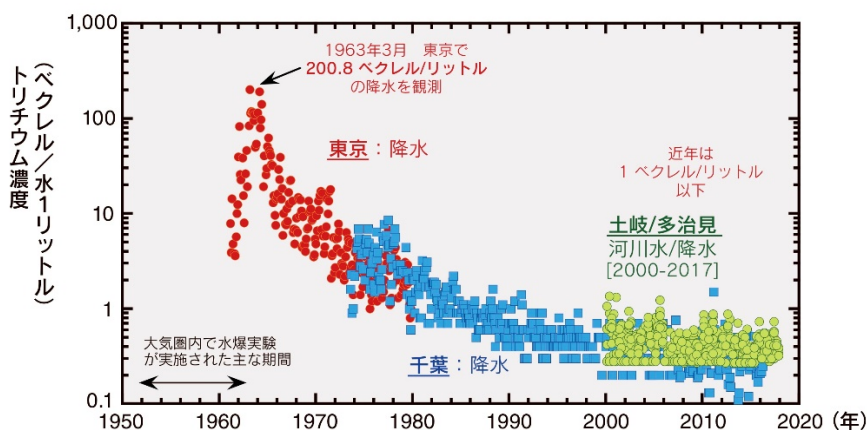
22





## 周辺の環境は常にモニターしています

重水素実験が始まって周辺環境の変化はありませんでした



河川/降水中トリチウム濃度の推移 (土岐/多治見・東京・千葉)

- 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。



## プラズマ実験中の環境放射線量は変わりませんでした

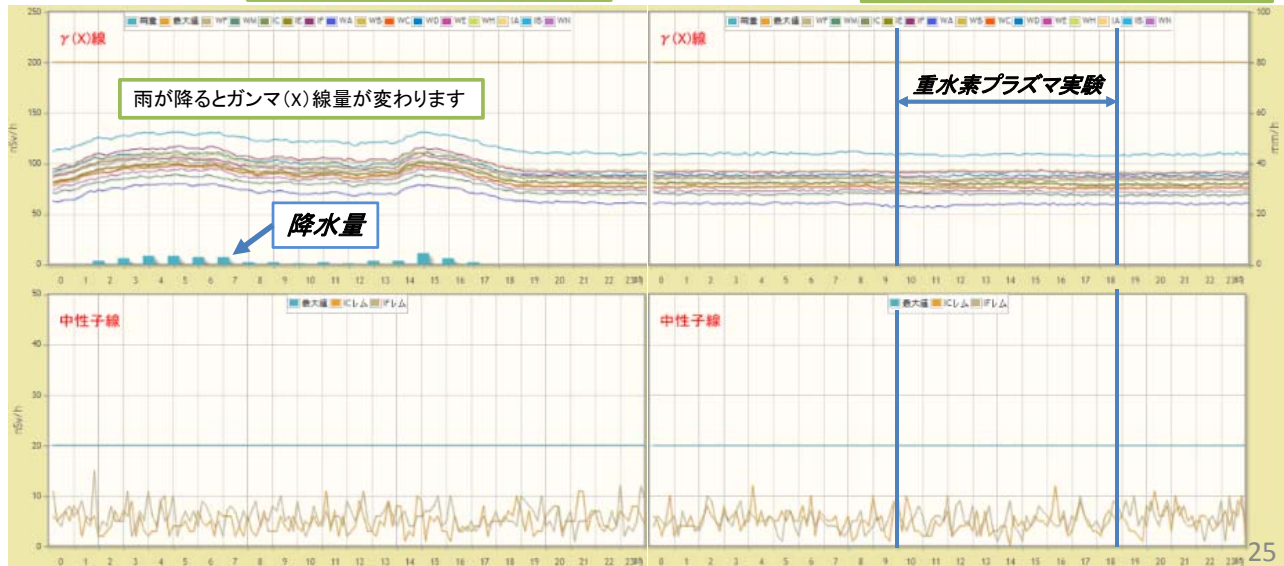
- 研究所敷地境界部に9ヶ所、実験棟近傍に5ヶ所の放射線モニタリングポストを設置しています。
- 各ポストでの環境放射線測定データは、リアルタイムでホームページ上に公開しています。  
(<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>)

2017年3月21日

メンテナンスのため実験は  
行っていません

2017年3月22日

プラズマ実験中の環境放射線  
量は変わりません



## 重水素実験の情報公開



- ホームページ (<http://sewhite.nifs.ac.jp/quick/>) 上に、中性子総発生量、トリチウム総発生量、敷地境界線量(中性子線、ガンマ・エックス線の合計)、排気中トリチウム濃度の速報値を随時公開しています。

### 重水素実験情報公開ページ

速報値

第19サイクルプラズマ実験期間は終了いたしました

中性子総発生量：研究所管理値；年間 $2.1 \times 10^{19}$ 個 本実験計画期間中の発生量：管理値の <b>17.3%</b>	2017年8月3日現在 (積算期間：2017年3月6日～2017年8月3日)
トリチウム総発生量：研究所管理値；年間37GBq 本実験計画期間中の発生量：管理値の <b>17.3%</b>	2017年8月3日現在 (積算期間：2017年3月6日～2017年8月3日)
敷地境界線量(中性子線、γ(x)線の合計)：研究所管理値；年間50uSv 本実験計画期間中の積算線量：管理値の <b>0.5%</b>	2017年8月3日現在 (積算期間：2017年3月6日～2017年8月3日)
排気中トリチウム濃度：研究所管理値(3月平均)； $2 \times 10^{-4}$ Bq/cm <sup>3</sup> トリチウム濃度：管理値の <b>0%</b>	2017年8月29日現在 (積算期間：2017年7月1日～2017年8月7日)

- 確定値については、「LHD重水素実験放射線管理年報」で公表しました。

監視結果は、いずれも研究所管理値を十分に下回る値でした

## 中性子、トリチウムの総発生量

	研究所管理値	監視結果 (研究所管理値に対する割合)
中性子発生量	2.1×10 <sup>19</sup> 個	0.36×10 <sup>19</sup> 個 (17.3%)
トリチウム発生量	370億ベクレル	64億ベクレル (17.3%)

## 排気塔からのトリチウム放出量

	研究所管理値	監視結果 (研究所管理値に対する割合)
トリチウム放出量	37億ベクレル	1.3億ベクレル (3.4%)

### memo

市販のダイバーズウォッチ等の特殊な腕時計には、トリチウムガスを針や文字盤に使用する蛍光型のものがあります。この蛍光型腕時計1個に使用されるトリチウムは約10億ベクレルです。

ホームページに公開しています

[http://www.nifs.ac.jp/j\\_plan/180531.pdf](http://www.nifs.ac.jp/j_plan/180531.pdf)

## トリチウムの回収とトリチウム含有水の搬出



- 重水素実験の開始に伴い、LHD真空容器からの排気ガス中に微量に含まれるトリチウムをトリチウム除去装置(排気ガス処理システム)により、軽水素や重水素と併せて水の状態にして回収しています。



排気ガス処理システム

- 回収されたトリチウム含有水500リットル(内訳 排気ガス処理システムから回収した水:450リットル、計測で使用した水:50リットル)を、平成30年1月23日に公益社団法人日本アイソトープ協会に引き渡しました。



# 排気ガス処理システムの保守点検



- 重水素実験終了後に、排気ガス処理システムの年次保守点検を実施しました
  - ✓ 定期的な消耗部品の交換、圧力容器の法令点検、回転機器運転状態の確認などを行いました。
  - ✓ 保守点検終了後に、水素ガスを用いた除去性能評価試験(平成29年10月3日～4日)を行い、95%以上の除去性能を確認しました。

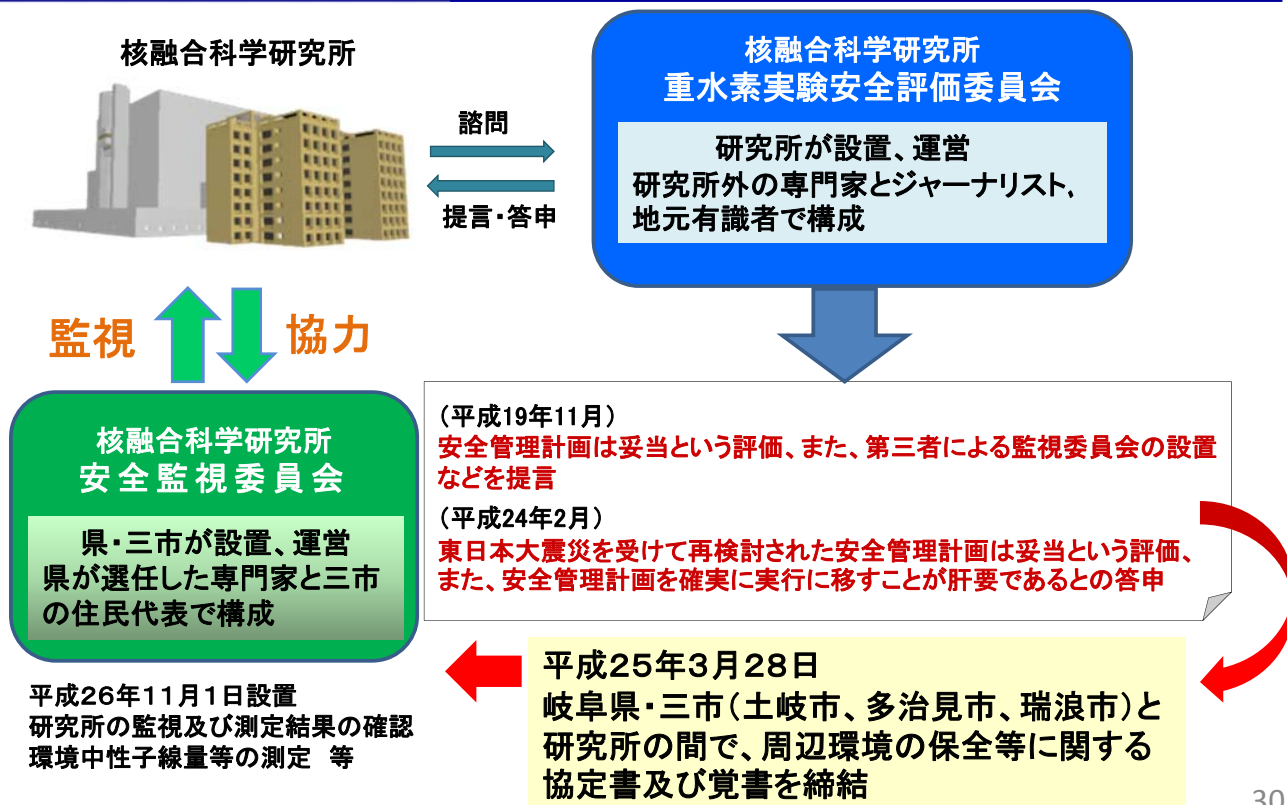


送風機保守点検の様子



圧縮機保守点検の様子

# 安全性の評価と安全監視委員会への協力



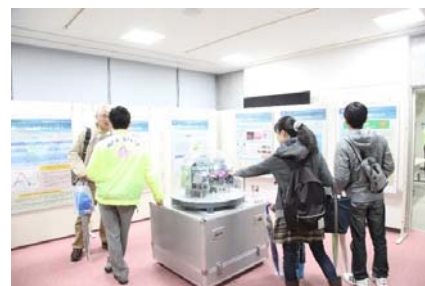
## 核融合研究、重水素実験についてのご説明



- 毎年夏に市民説明会を開催(平成18年度から12年で三市のべ5,130名)
- 市民学術講演会の開催(年2回、多治見市・土岐市、計約400名)
- 研究所オープンキャンパスの開催(平成10年度から毎年約2,000名)
- 随時の見学受付(平成29年度4,300名)
- 広報誌の発行(プラズマくんだよりなど)

市民学術講演会

7月21日(土)  
パロー文化ホールにて開催予定



オープンキャンパス  
研究所紹介コーナー

9月8日(土)開催予定

## 2018年度のLHDプラズマ実験スケジュール(予定)



- ◆ LHD真空容器真空引き: 8月中旬～3月上旬
- ◆ コイル冷却: 9月上旬～3月上旬
- ◆ プラズマ実験 : 10月上旬～2月中旬
  - 重水素ガスを用いた実験: 10月上旬～1月中旬
  - 軽水素ガスを用いた実験: 1ヶ月程度

- 重水素実験により、核融合条件の一つ、1億2,000万度のイオン温度を達成しました。
  - これにより、ヘリカル型核融合炉の実現に見通しを得ることができました。
- 今後も安全を最優先に、高性能プラズマの研究を進め、一日も早い核融合発電の実現を目指します。