

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

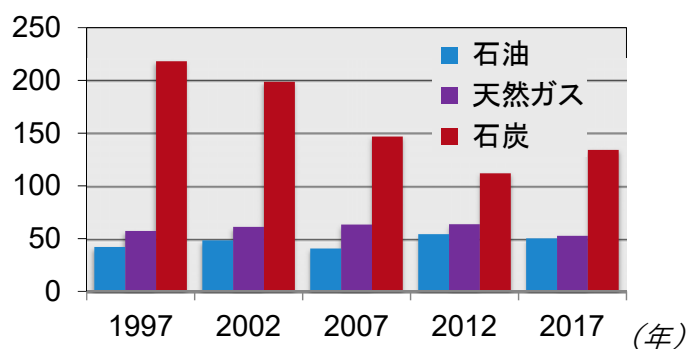


●日本の消費エネルギーのうち、電力の占める割合は25%

残り75%は化石燃料に頼っています

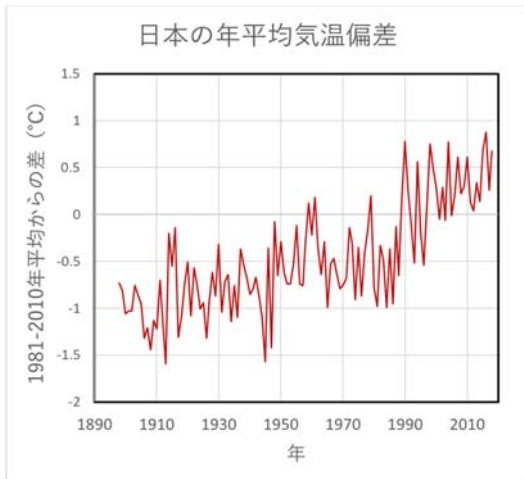
●シェールガス、メタンハイドライド等を含めても、化石燃料は100~200年で枯渇

(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

地球温暖化も私たちの生活に影響を与えています

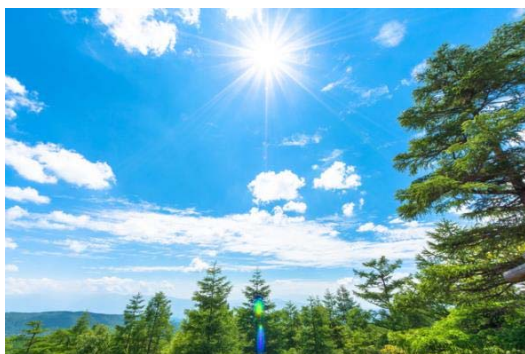


日本の平均気温は100年あたり1.2°Cの割合で上昇しています

大雨や洪水、台風が増えるかもかもしれません
逆に雨が降らず干ばつになるところも・・・

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

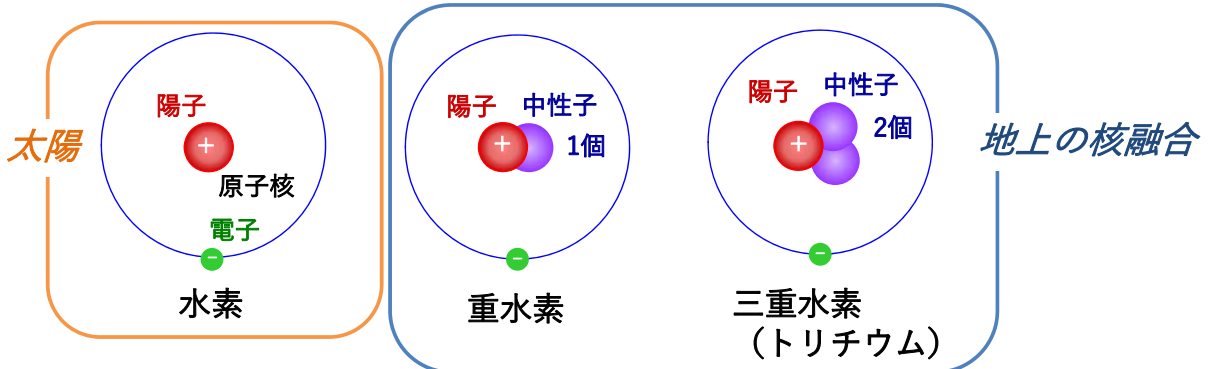
核融合エネルギーとは



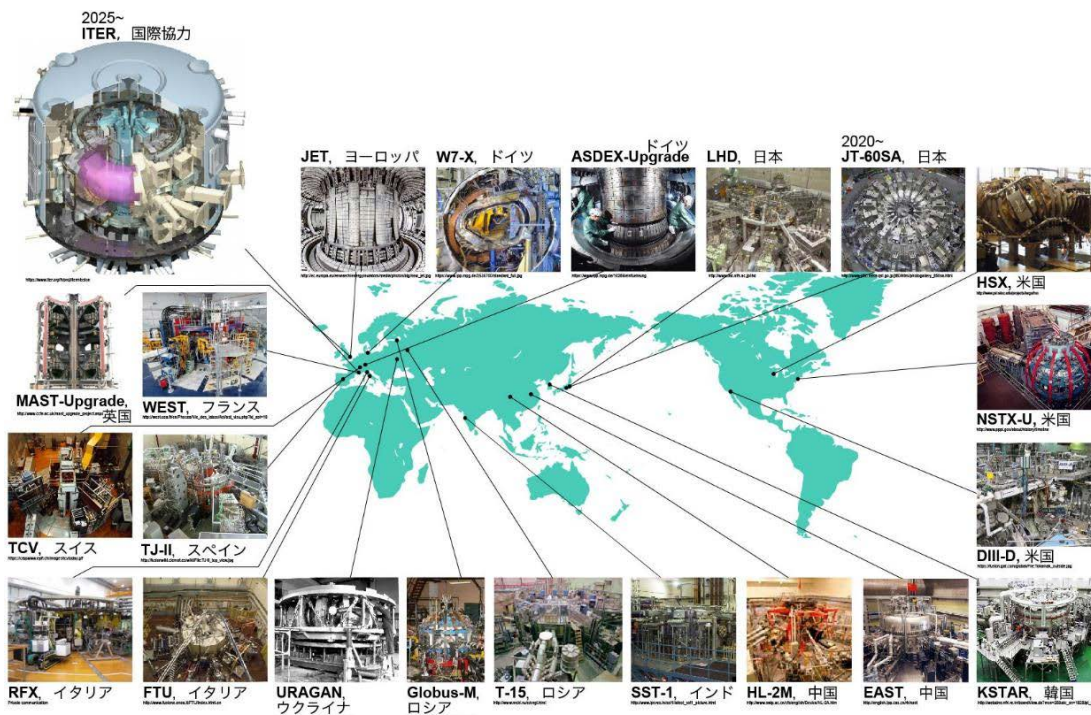
空に輝く太陽や星のエネルギー源は核融合

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

● 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。



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



5

核融合エネルギーが実現すると



- 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

6



水 3リットル
重水素 0.1 g



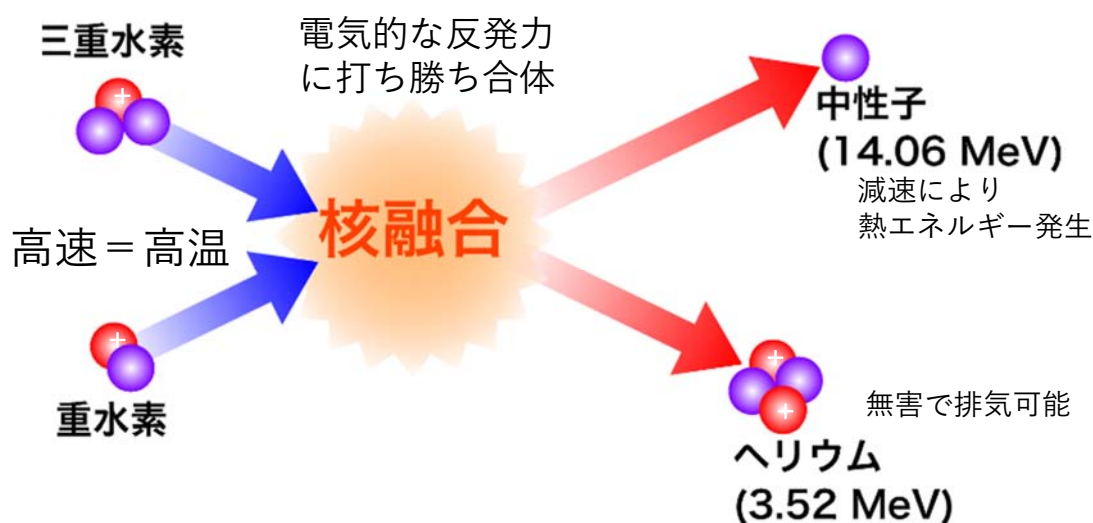
スマートフォンの電池1/2個分
リチウム 0.3 g

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

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 1cm³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



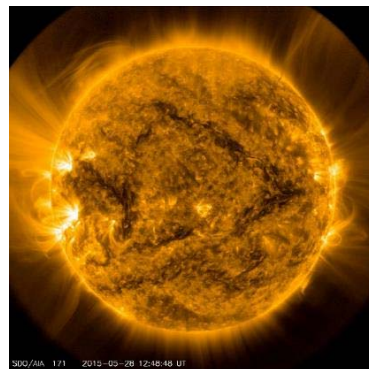
身近にあるさまざまなプラズマ



オーロラ



太陽コロナ



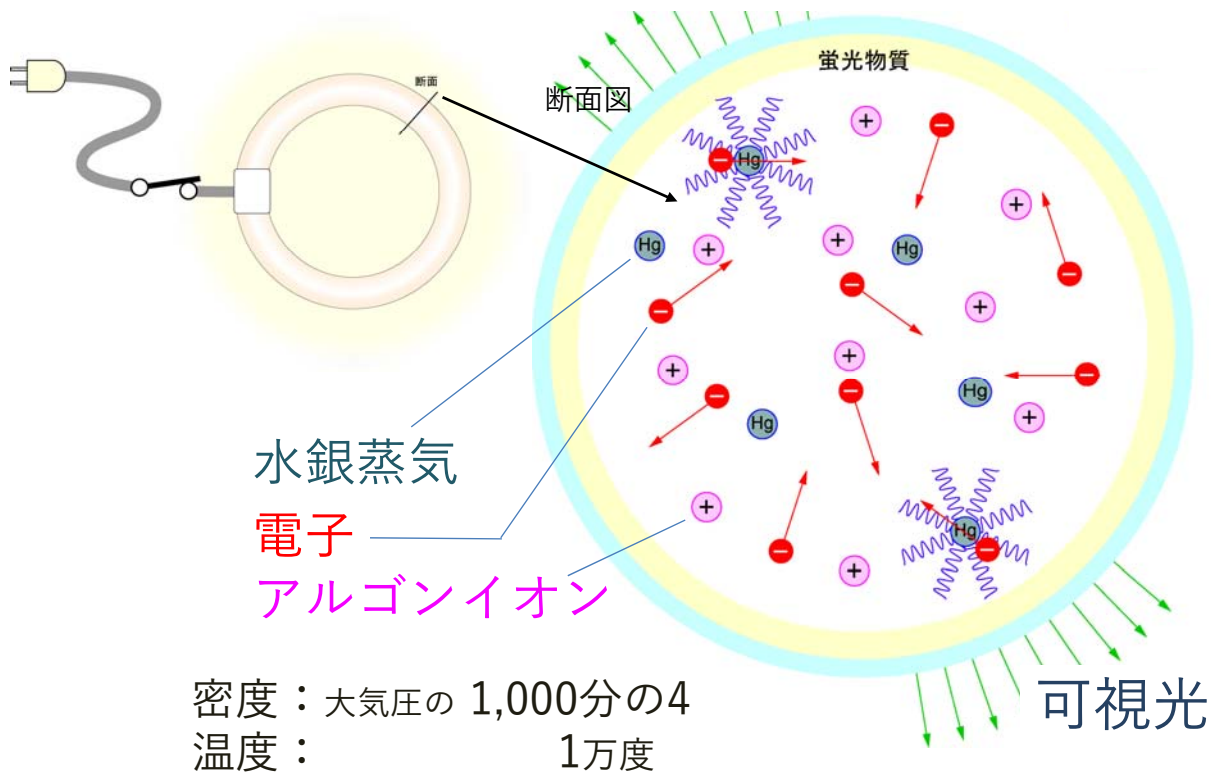
炎



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



ドーナツ状の磁力線「かご」でプラズマを閉じ込め

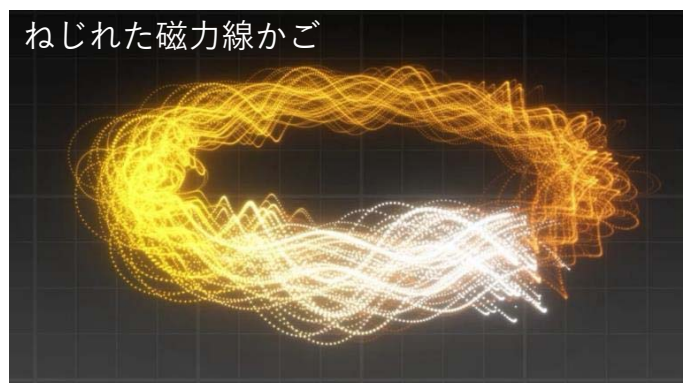


そもそも...
プラズマが壁に当たると消える！

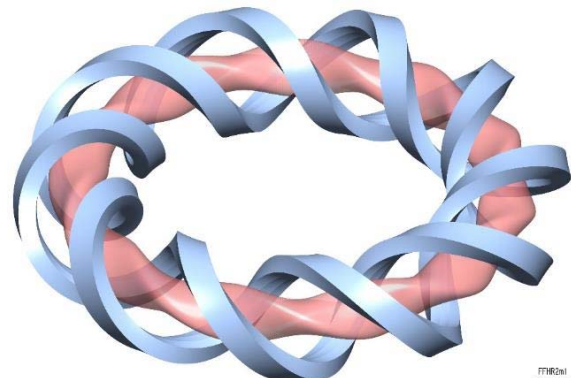
磁力線に巻き付く性質を利用する

詳しくは
動画で。

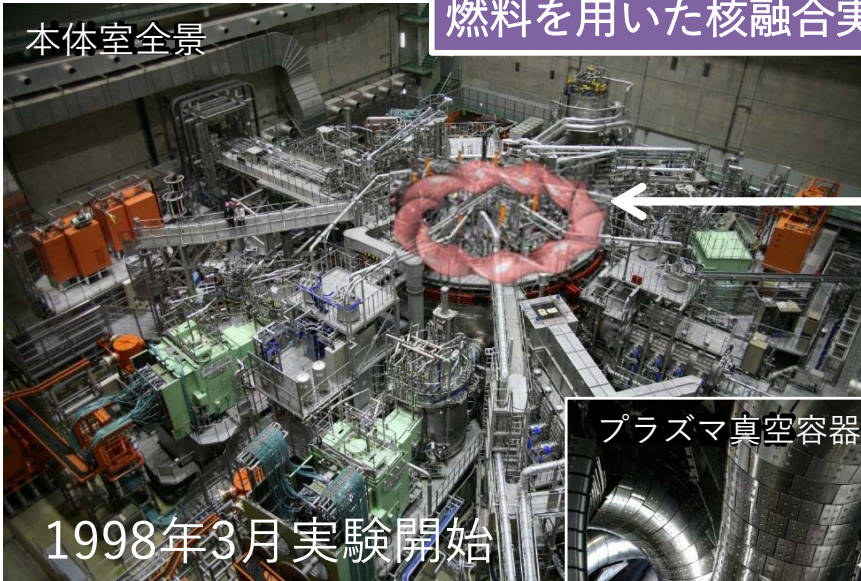
ねじれたドーナツ型の磁力線かご



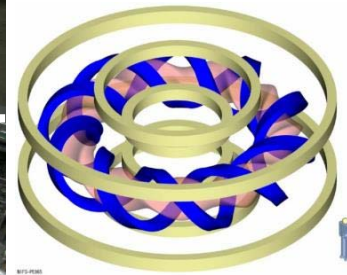
ねじれたコイル
ヘリカルコイル



本体室全景



燃料を用いた核融合実験は行いません



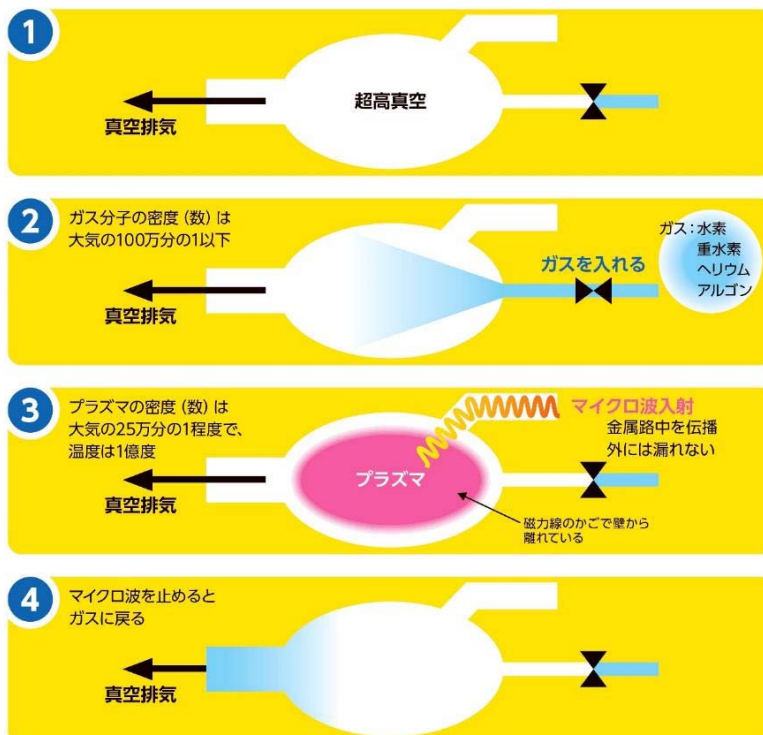
1998年3月実験開始

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



プラズマ真空容器内部

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



時：分：秒

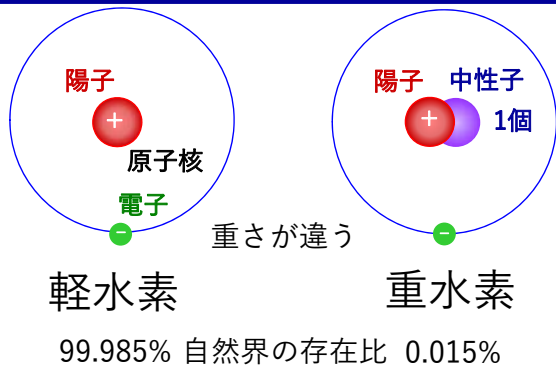
47分39秒放電

#124579

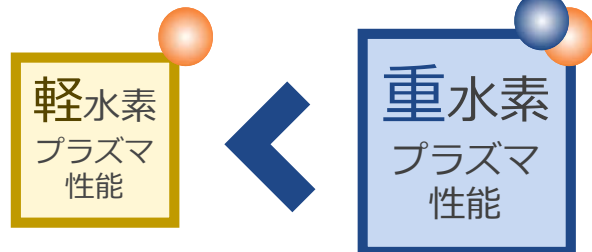
温度	2,300万度
密度	12兆個/cm ³
加熱方法	電磁波加熱 ICH,ECH
加熱総電力	1,200kW
入力総電力量	3.4GJ 世界記録

定常運転を世界最高レベルで実証

重水素実験で、超高温のプラズマ生成



他の装置（トカマク型）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

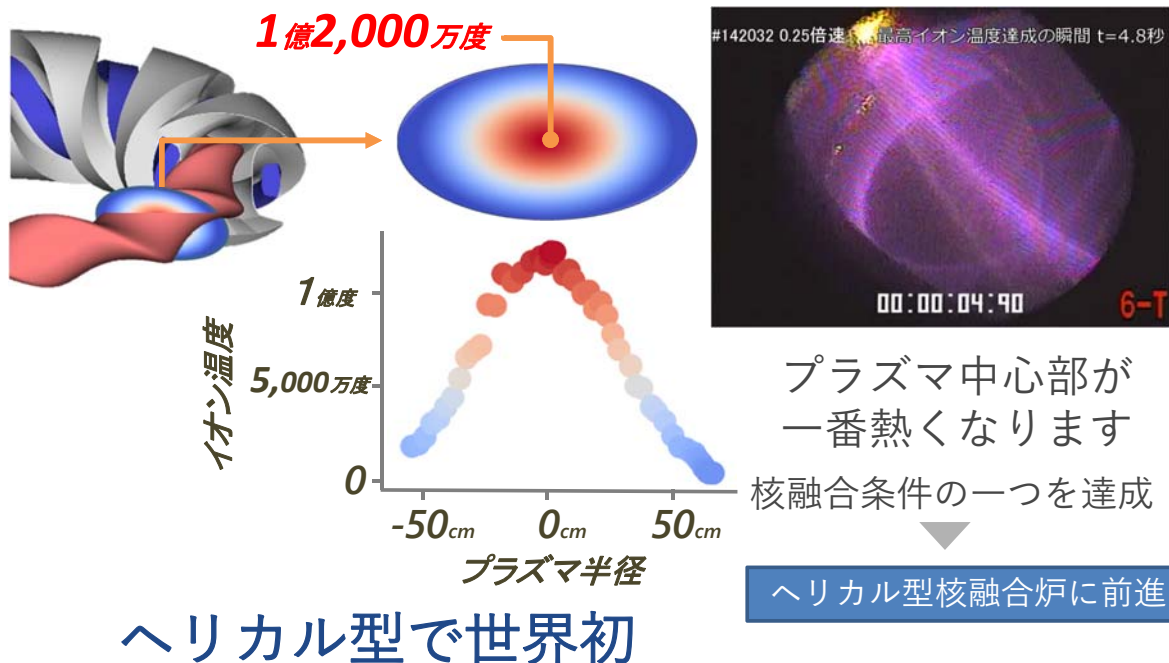
- より温度の高いプラズマの性質を調べる
- どうして重水素を使うとプラズマの温度が高くなるのかを調べる

2017年3月7日、重水素実験を開始

第1年次 2017/3/7~2017/7/7 (軽水素実験を除く)

第2年次 2018/10/23~2019/1/25 (軽水素実験を除く)

イオン温度の核融合条件を達成 (第1年次実験)



ヘリカル型で世界初

イオン温度も電子温度も高温に (第2年次実験)



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

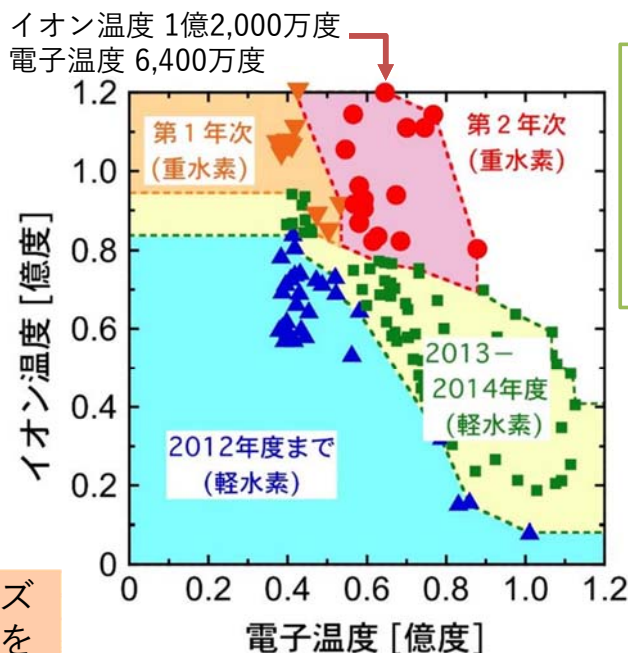
軽水素実験

- イオン温度の最高は9,400万度
- イオン温度が上がると電子温度が下がっていく

重水素実験

- イオン温度の最高は1億2,000万度
- イオン温度を下げることなく、電子温度も上げることに成功

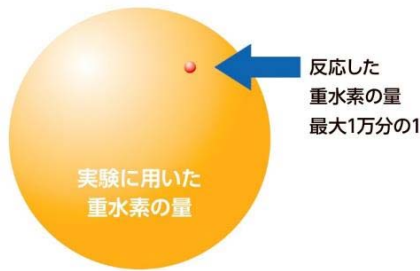
重水素を使うことでプラズマの温度が高くなることを実験で確認



memo

プラズマはイオンと電子がバラバラなので、異なる温度になることがあります

重水素実験を進め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

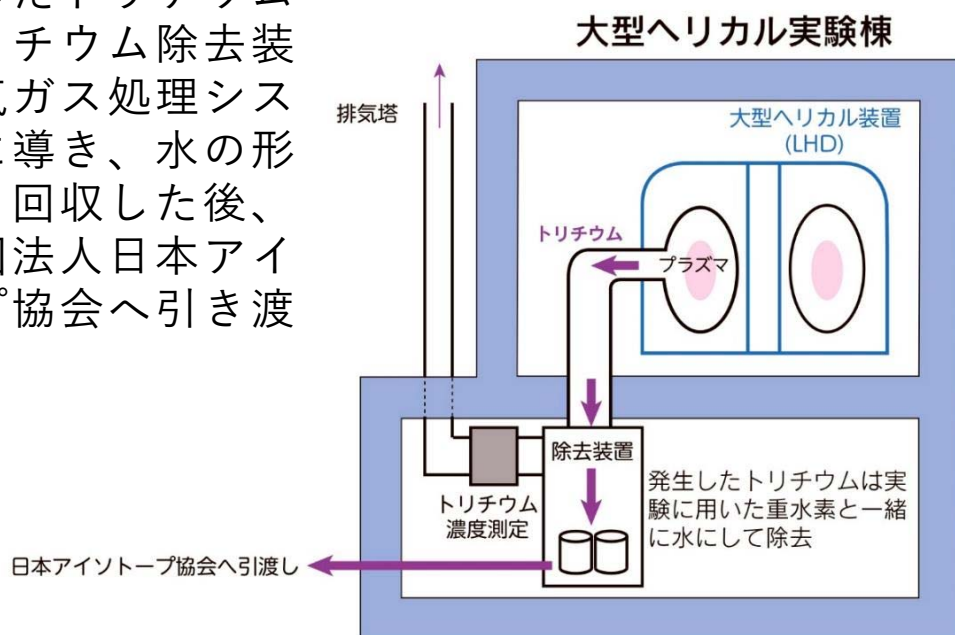
また安全監視委員会が行う監視・測定等に最大限協力します

19

発生するトリチウムは、除去・回収します

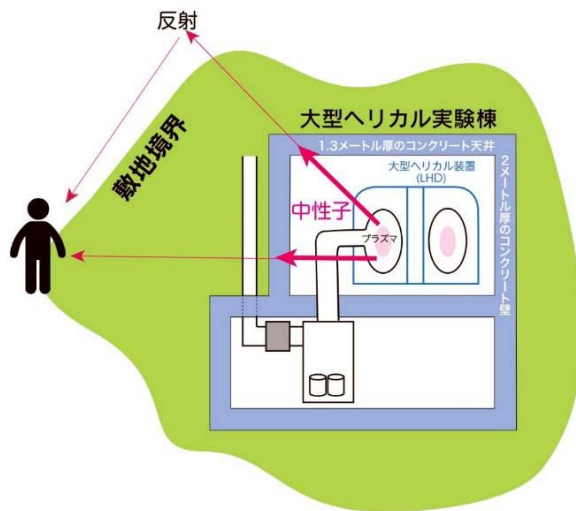


発生したトリチウムは、トリチウム除去装置（排気ガス処理システム）に導き、水の形で除去・回収した後、公益社団法人日本アイソトープ協会へ引き渡します。



20

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メートル厚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

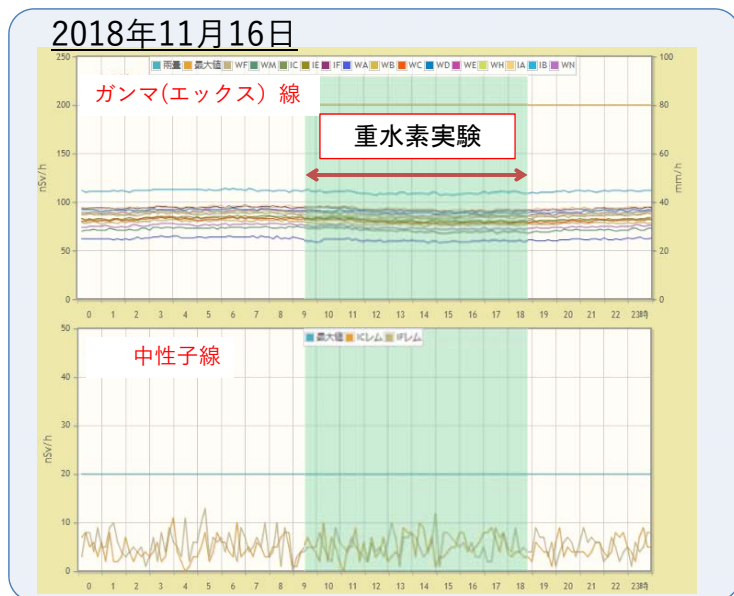
自然界にある放射線より少なければ安全



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>)

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



RMSAFEモニタリングポスト



第1年次に引き続き、プラズマ実験を実施した時間帯で線量の増加はありませんでした。

LHD重水素実験放射線管理年報で監視結果を公表

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	2.1x10 ¹⁹ 個	0.34x10 ¹⁹ 個 (16.2%)
トリチウム発生量	370億ベクレル	60億ベクレル (16.2%)

2018年4月1日～2019年3月31日の監視結果

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	0.7億ベクレル (1.7%)

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/190531.pdf

県・3市が、平成26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

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・環境水中トリチウム濃度の測定
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



環境中性子線量測定の様子

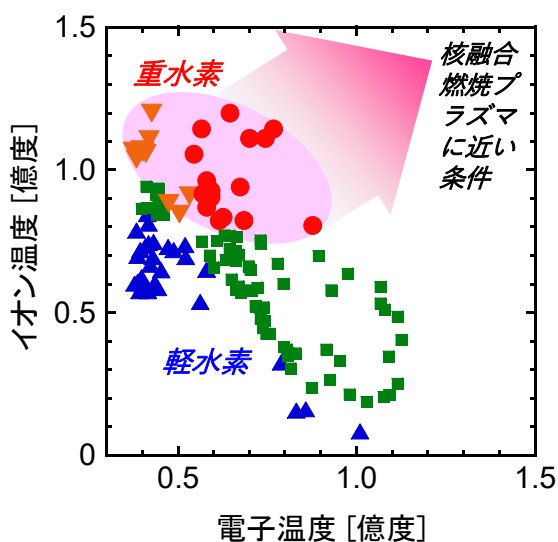
委員会の開催状況

- ・ これまで7回の委員会を開催
- ・ 重水素実験開始後の委員会において**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**をご確認いただきました。
(第6回委員会（平成29年11月）、第7回委員会（平成31年3月）)



安全監視委員会の様子

今年度のプラズマ実験の目標とスケジュール



- プラズマのさらなる高性能化
- 重水素と軽水素でプラズマの温度の違いが出る理由を解明
- 定常維持に必要なプラズマ制御



核融合炉級超高性能プラズマの実現

- 重水素実験： 10月上旬～1月中旬
- 軽水素実験： 1月中旬～2月中旬

真空容器内の点検作業



クリーンルームウェアに着替えて、真空容器内に入る様子

排ガス処理システムの保守点検作業



定期的な消耗部品の交換、保守点検後の運転状態の確認(95%以上の除去性能)

放射線モニタリングシステムの保守点検作業



モニタリングポストの点検の様子
全機器の健全性を確認

安全に関わる機器の健全性を確認しました

実験機器の保守点検と調整

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13年で三市のべ5,365名）
- 市民学術講演会の開催（年2回、多治見市・土岐市、計約500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30年度3,500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



オープンキャンパス
重水素実験質問コーナー

9月7日（土）開催予定

- 大型ヘリカル装置（LHD）の重水素実験により、超高温のプラズマに対する研究が着実に進展しています。
- 研究成果は、学術論文等で公表され、国際的にも高く評価されています。
- これもひとえに、皆様のご理解とご支援の賜物と心より感謝申し上げます。