

核融合研究の進展と 核融合科学研究所の重水素実験実施状況

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



核融合研究の必要性

現在、エネルギーは化石燃料に依存している

- ・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る
 - ⇒再生可能エネルギーで全電力を賄えたとしても、化石燃料が枯渇すれば、現在の生活は成り立たない

燃料資源の枯渇

- ・シェールガス、メタンハイドレイド等を含めても、化石燃料は100～200年

加えて、

二酸化炭素増大による地球温暖化

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



核融合エネルギーは、最も期待される将来のエネルギー源

燃料資源が無尽蔵で、二酸化炭素を放出せず、安全性が高い

持続可能な発展のために新しいエネルギー源が必要です

世界人口の増加や新興国の経済成長



エネルギー消費量の増大



資源の枯渇

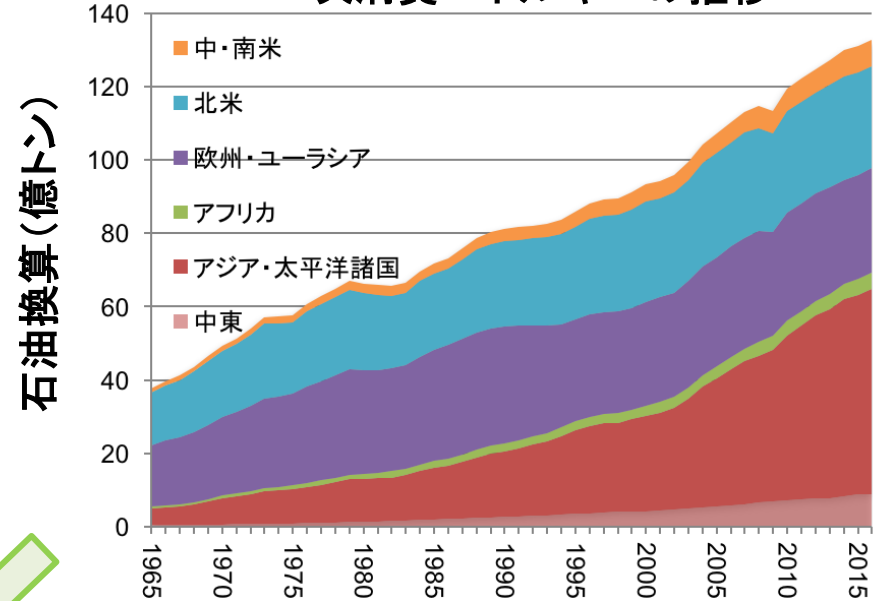
紛争



炭酸ガス排出量の増加

地球温暖化

一次消費エネルギーの推移

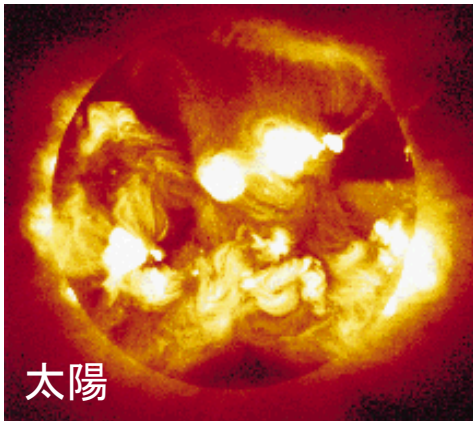
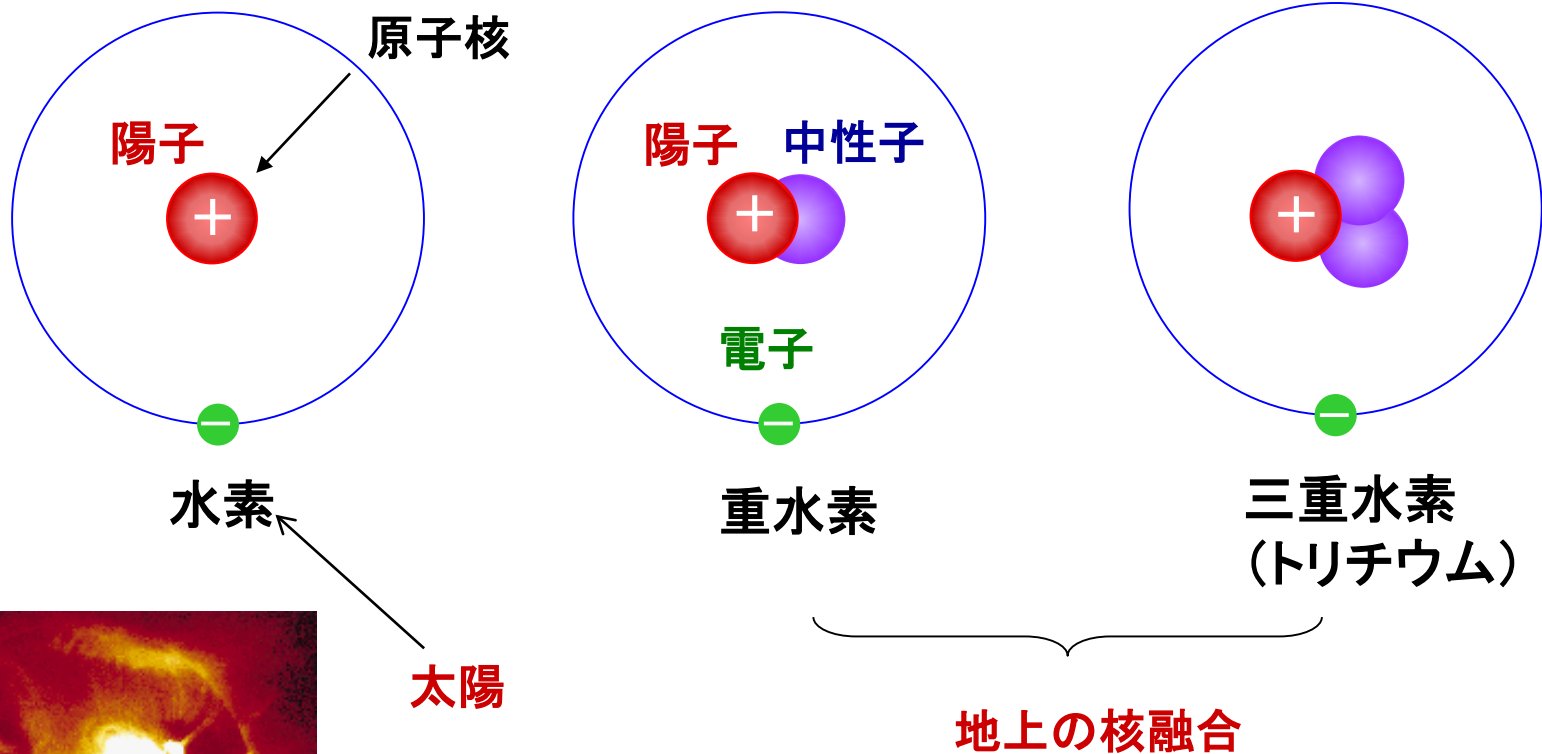


出典: BP統計2017

資源の枯渇による紛争や地球温暖化を起こさないよう、世界が持続的に発展しなければなりません。日本は燃料のほぼすべてを輸入していますから、エネルギー保障の観点からも、新しいエネルギー源が必要です。

宇宙が誕生して 138億年 ビッグバン、核融合の開始

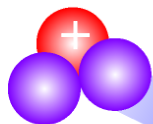
核融合では軽い原子、水素が必要。ウランは使いません



空に輝く太陽や星のエネルギー源は核融合

地上の核融合によるエネルギー生成

三重水素



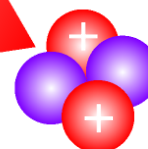
重水素



核融合

エネルギーの発生

中性子
(14.06 MeV)



ヘリウム
(3.52 MeV)

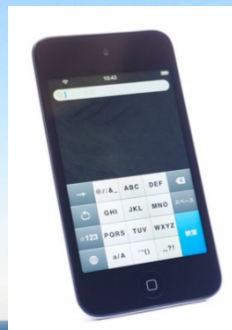
プラスの電気的反発力に逆らって合体させるには高温(高速)である必要



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

核融合の燃料は海から採れる ⇒ 燃料資源は無尽蔵



スマートフォンの電池1/2個分
リチウム 0.3g



水 3リットル
重水素 0.1g

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%

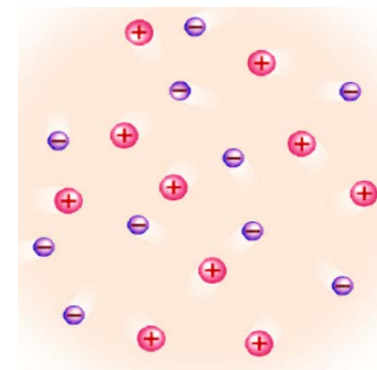
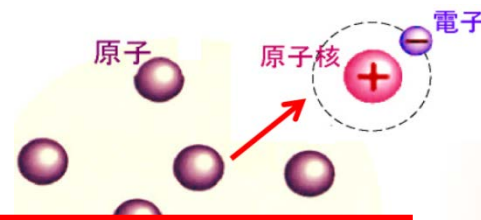
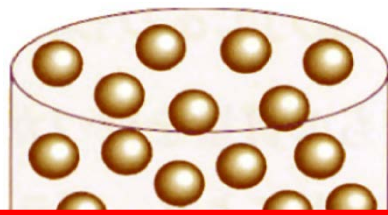
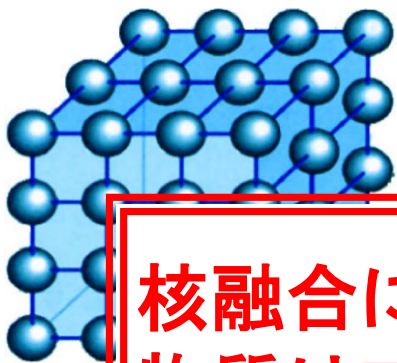
海水中に2,000億トンのリチウム⇒事実上、無尽蔵
100万kWの発電所 → リチウム約500kg/年 (体積では約1m³)

核融合は高温高密度のプラズマで実現 —プラズマとは？—

低い

温度 (エネルギー)

高い



核融合に必要な超高温の条件では
物質はプラズマの状態になります



氷(固体)



水(液体)

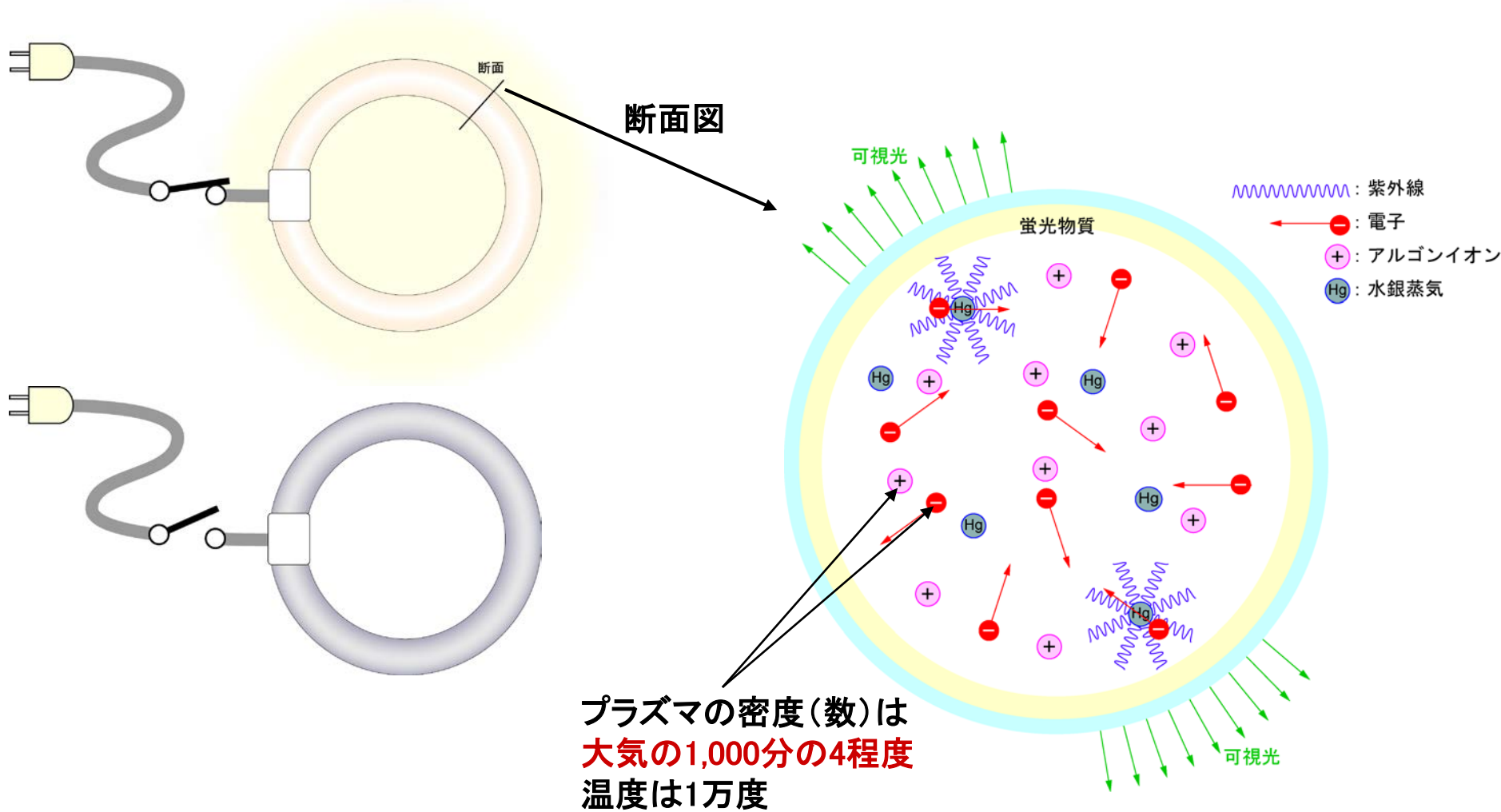


水蒸気
(気体)

プラズマ
(第4の状態)

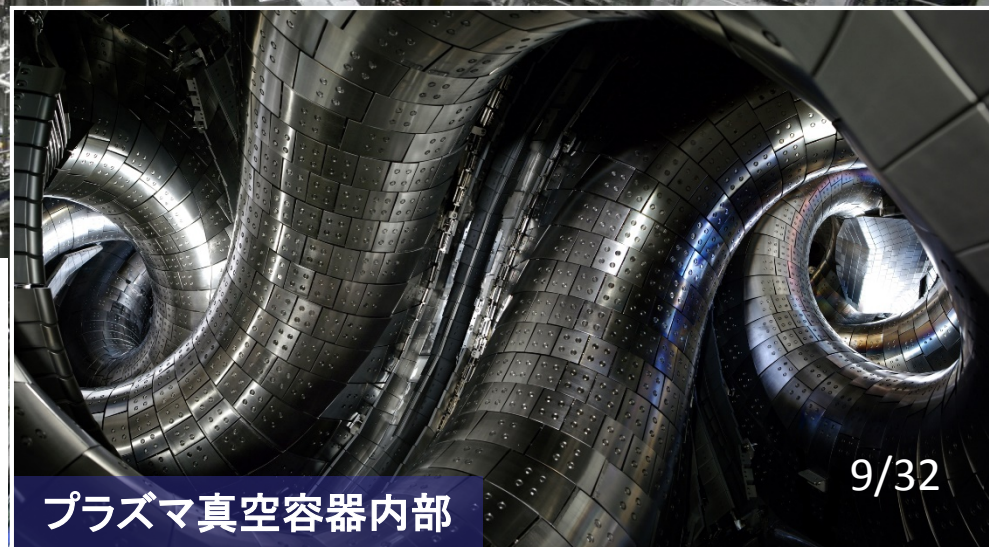
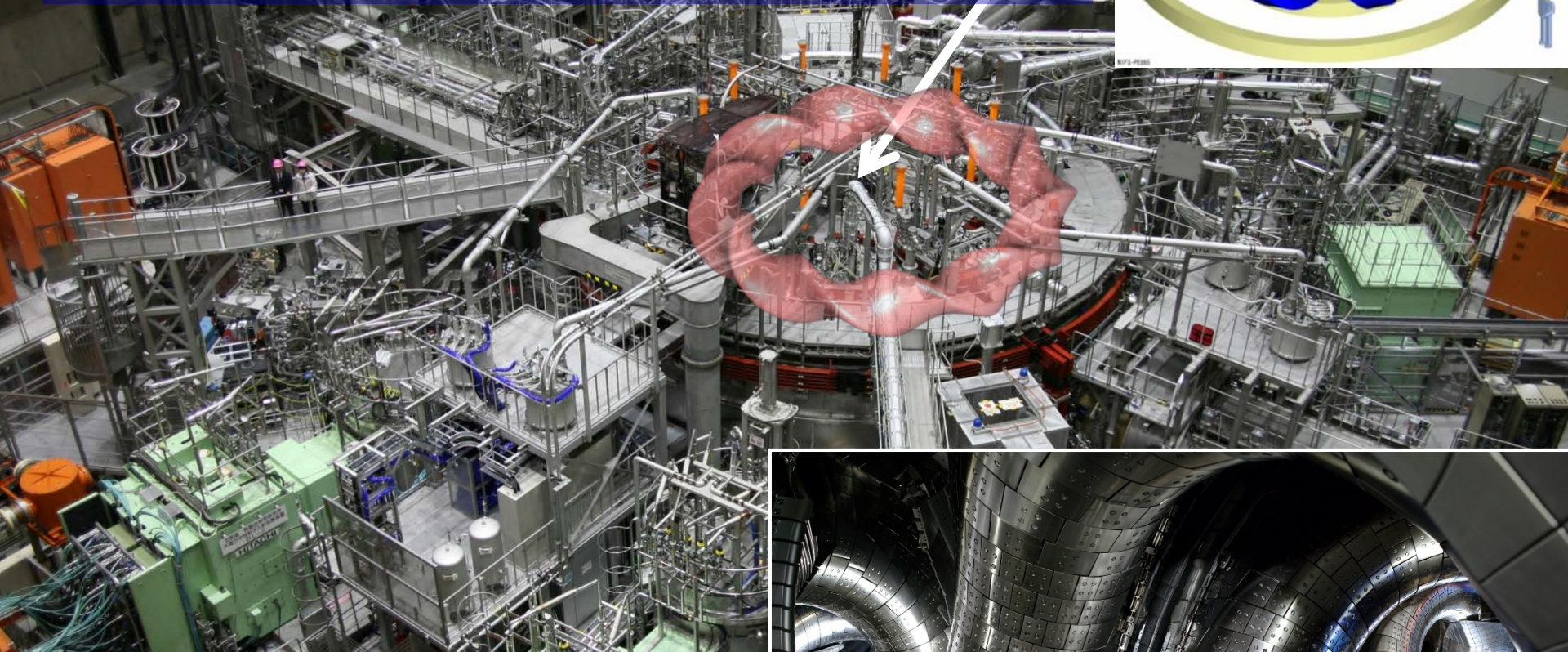
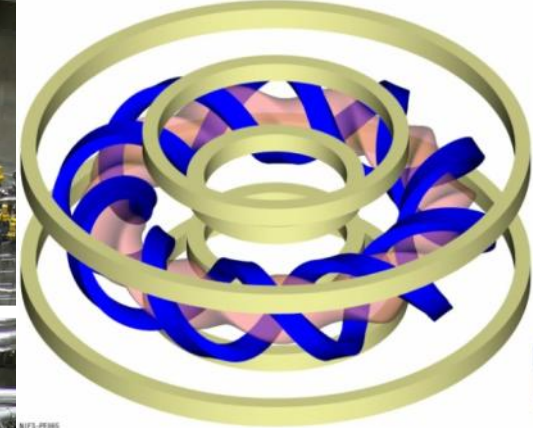
原子を構成する原子核
(イオン)と電子がばら
ばらになった状態

蛍光灯の中にもプラズマがあります



大型ヘリカル装置 (LHD)

- ・LHDでは、将来の核融合発電に必要な高温高密度プラズマの生成とその性質を調べる学術研究を行っています。
- ・燃料を用いた核融合実験は行いません。



- ・世界最大級の超伝導核融合プラズマ実験装置
装置の高さ：約9m
装置の直径：約13m
装置の重量：約1500トン
- ・1998年3月実験開始

プラズマ真空容器内部

LHDとプラズマ ー蛍光灯と同じドーナツ状ー

断熱真空容器

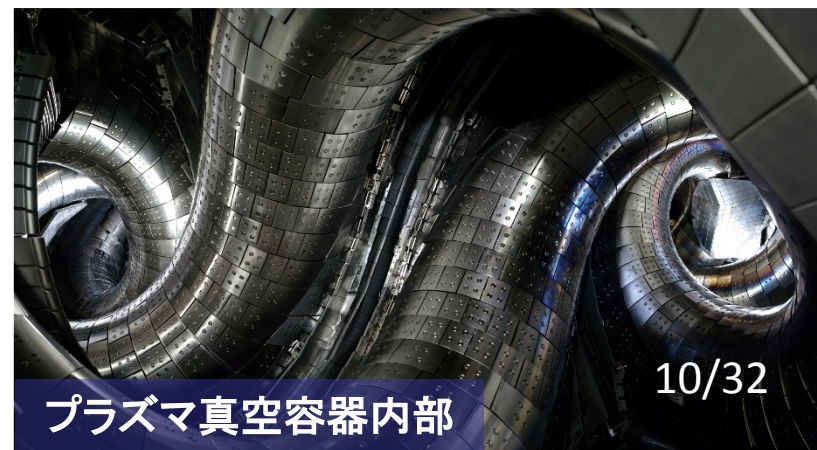
電磁力支持構造物

ポロイダルコイル

ヘリカルコイル

ポート

プラズマ

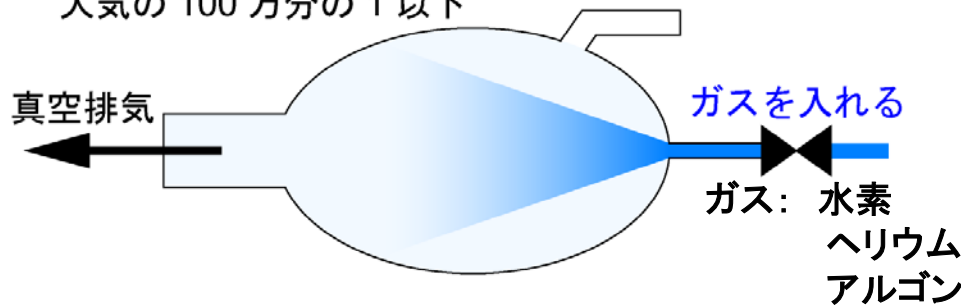


プラズマ真空容器内部

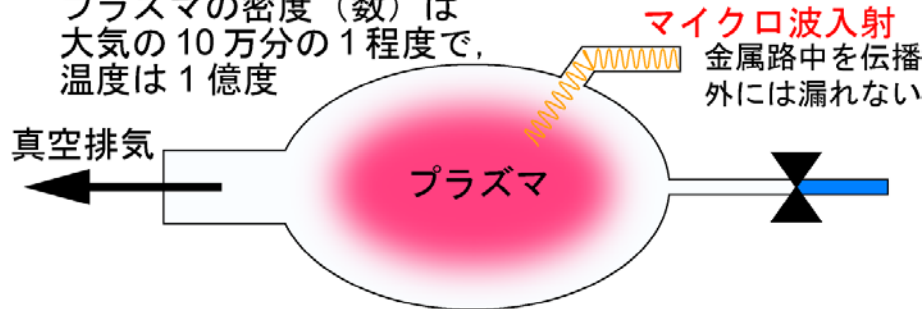
LHDのプラズマも 蛍光灯と同様です



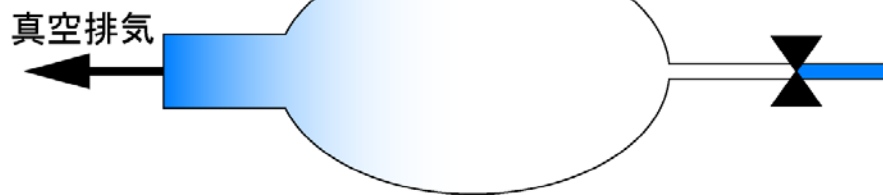
ガス分子の密度（数）は
大気の100万分の1以下



プラズマの密度（数）は
大気の10万分の1程度で、
温度は1億度

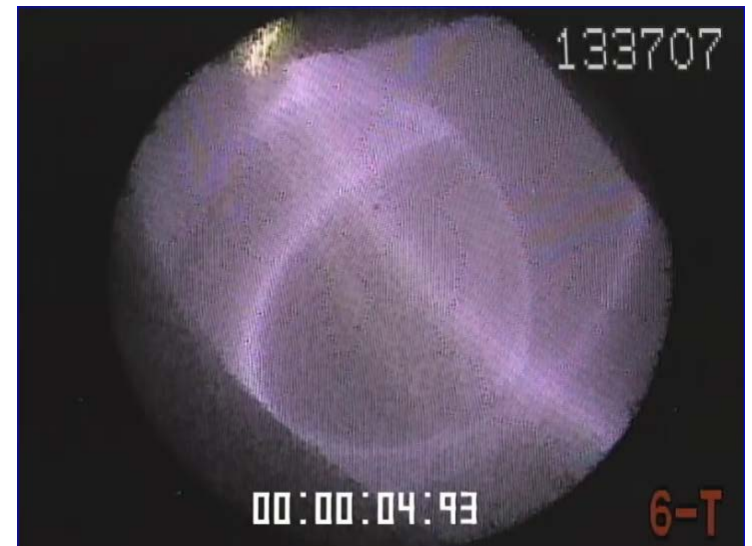


マイクロ波を止めると
ガスに戻る



真空でないといとプラズマが点きません

電気が止ると消え、何も起こりません



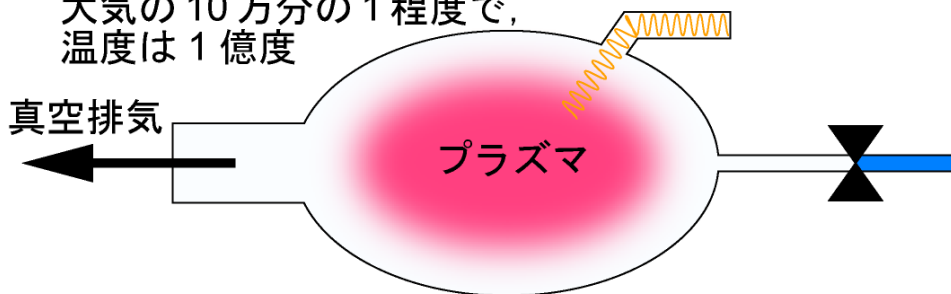
1億度のプラズマ

LHDは爆発・暴走しません プラズマテレビや蛍光灯と同様に安全です

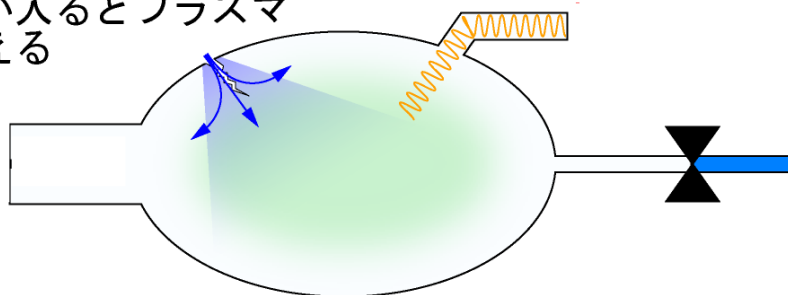
プラズマは真空でない点かない

真空容器が壊れる

プラズマの密度（数）は
大気の10万分の1程度で、
温度は1億度



空気が入るとプラズマ
は消える



燃料のガスを入れ過ぎる

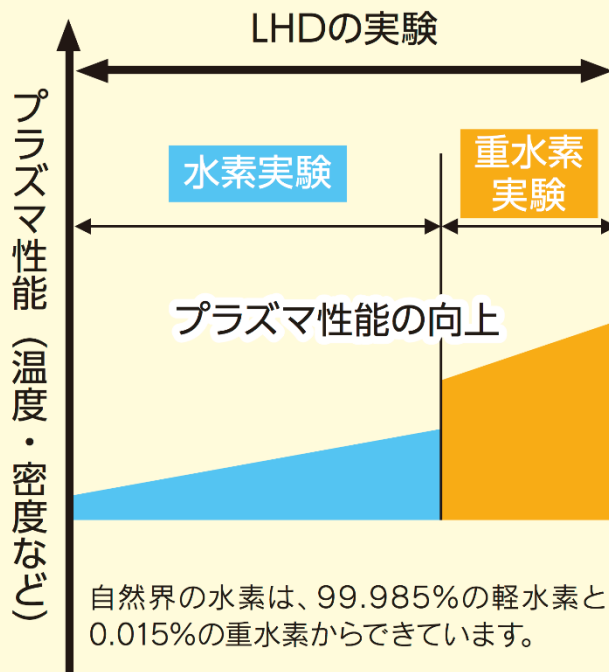
↓
圧力が上がってプラズマが消える
ガス不足 → プラズマは消える

プラズマを点ける電気が増える

↓
電気設備が壊れて、プラズマは消える
(電気は通常、最高出力で使用)

重水素ガスを用いて高温度を実現し、目標達成！

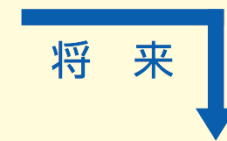
普通の水素ガスより重い重水素ガスを使うと、
プラズマの性能が向上



次の段階では
海辺でエネルギーを
取り出します。



核融合
エネルギー



将来

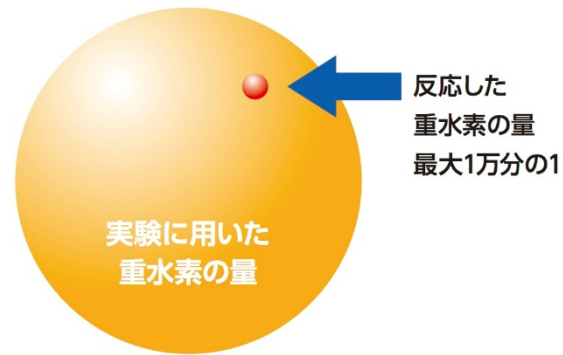
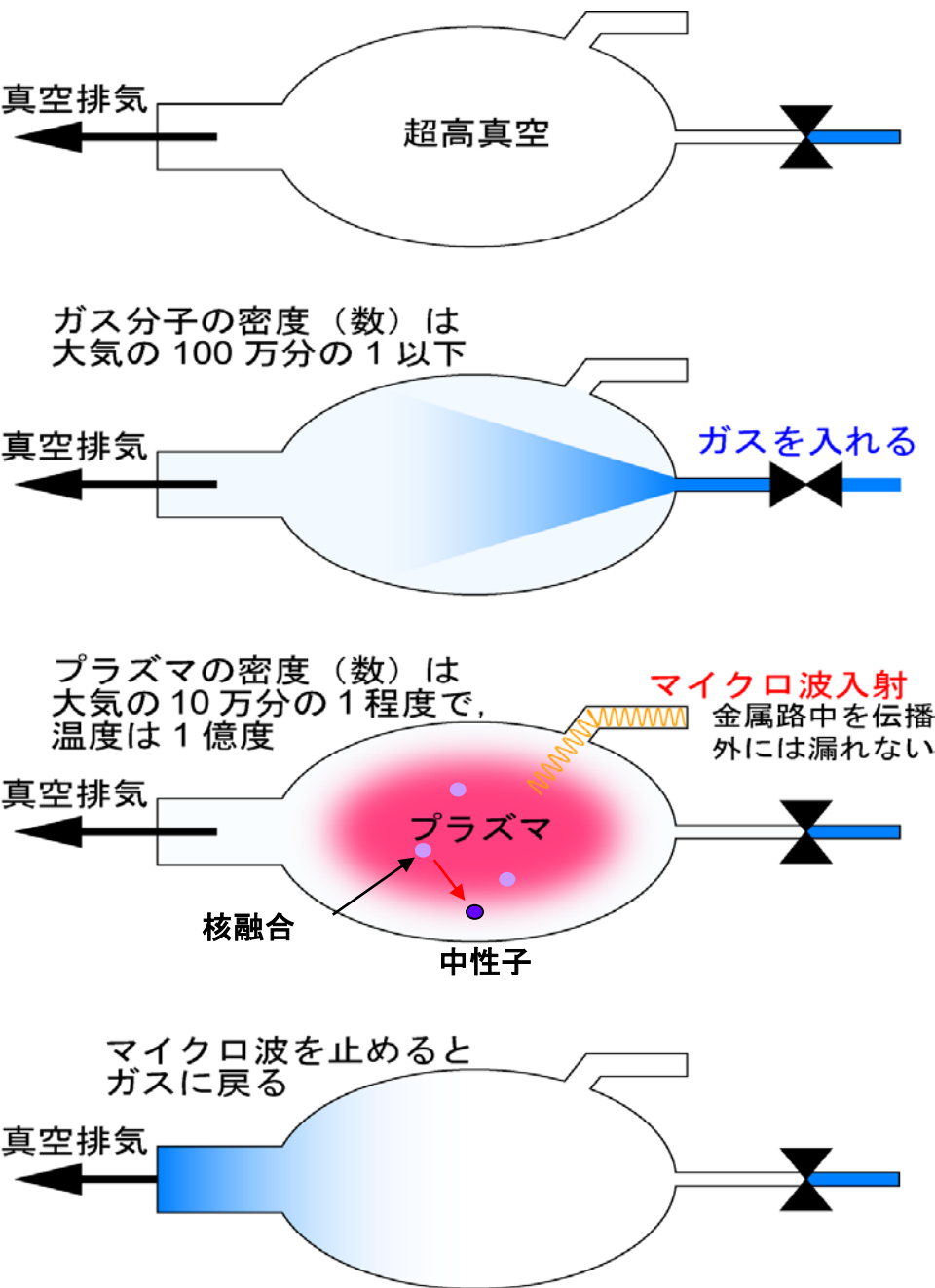
研究所では重水素実験終了後、水素ガスを使
ってプラズマの基礎研究を行います。

電気



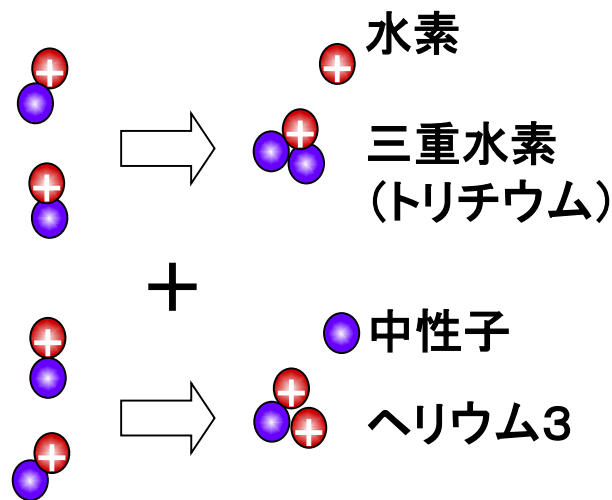
LHDの目標:核融合炉に外挿しうる高性能プラズマの達成
→発電所の設計が可能に

重水素ガスを使った実験



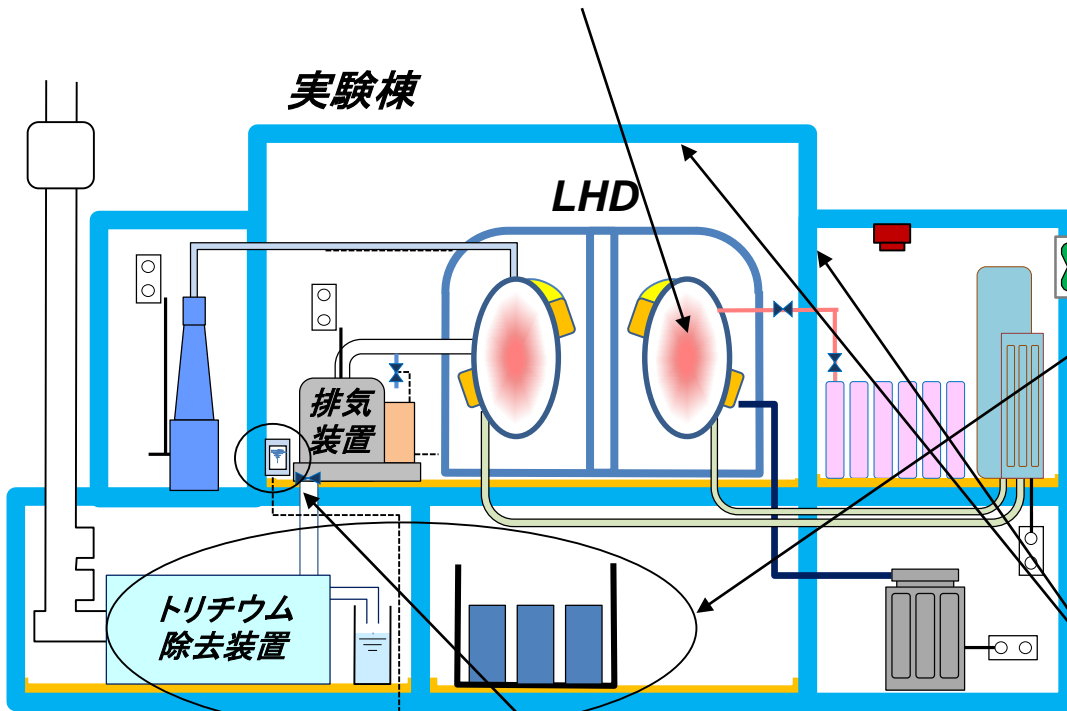
使用した重水素の約1万分の1以下が
プラズマが生成されているときだけ
核融合を起こす

重水素の核融合



LHD重水素実験における安全管理

プラズマが点いているときだけ、真空容器の中で、トリチウムと中性子が発生



トリチウム

1回に最大で 4百万分の1g
(1.0×10^8 Bq)発生

放射性物質として扱わなくてよい量
他の研究施設ではそのまま大気中に放出

処置

トリチウム除去装置で回収し、日本アイソトープ協会に引き取ってもらう

中性子

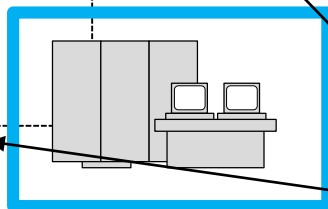
1回に最大で 5.7×10^{16} 個 発生

処置

本体室のコンクリートの壁で千万分の1に減衰、遮蔽

地震対応(電気が止まると、即座に消える)

緊急地震速報

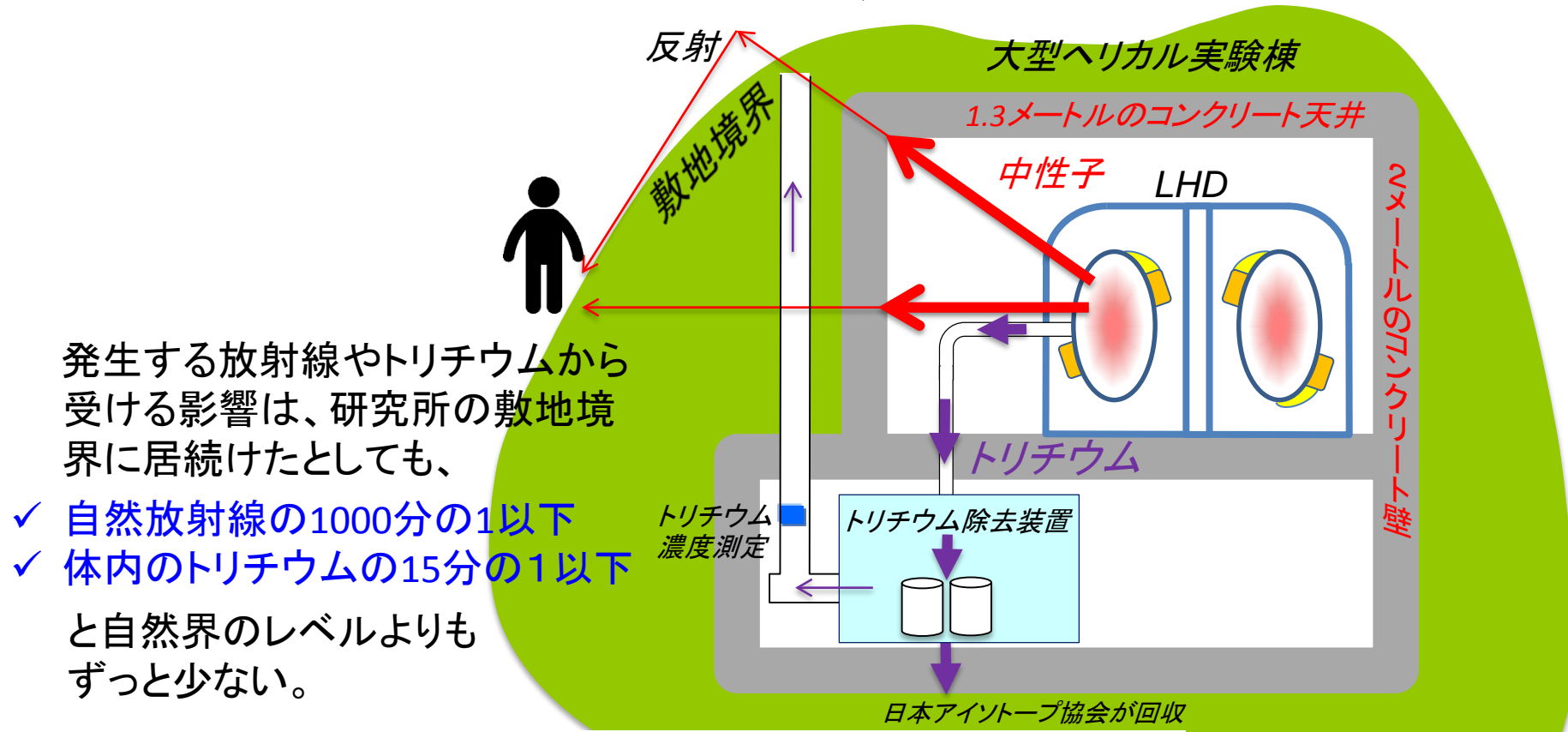


実験棟は震度7でも倒壊しない、震度4で自動停止
緊急地震速報を受信すると自動停止

重水素実験で発生する放射線等の環境への影響

使用した重水素のごく一部(約1万分の1以下)が核融合反応を起こしますが

- 実験で発生する中性子は、建物のコンクリート壁で遮蔽 ⇒ 1千万分の1に減衰
- 1回の実験で発生するトリチウムの量は、最大でも4百万分の1グラムで、放射性物質としての扱いが必要ない微量 ⇒ これを除去装置により回収



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1000分の1以下
- ✓ 体内のトリチウムの15分の1以下

と自然界のレベルよりもずっと少ない。

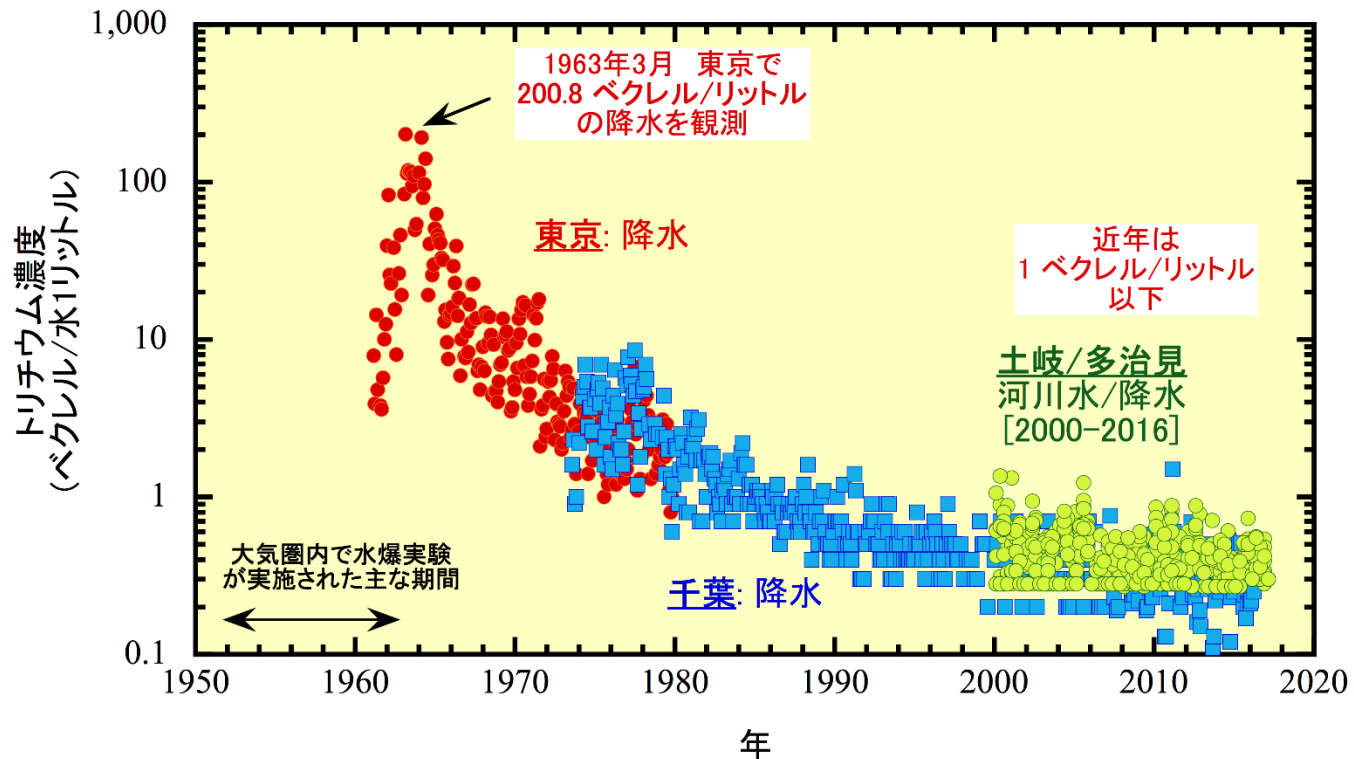
国内(量子科学技術研究開発機構)や諸外国の多くの研究施設で、何十年も行われており、初めての実験ではありません。安全性は確認されています。

自然界のトリチウム濃度の変遷

自然界には、太陽などの放射線により生成されたトリチウムが存在
1960年代は大気中の核実験により増加

降水中トリチウム濃度(東京・千葉)

河川水/降水中トリチウム濃度(土岐/多治見)



出典:量子科学技術研究開発機構 環境中のトリチウム測定調査データベース
原子力規制庁 日本の環境放射能と放射線 環境放射線データベース

自然界にある放射線より少なければ安全

空からは宇宙放射線

中性子も

温泉からも放射線

食物として体内へ

体重60kgの日本人
カリウム40 4000ベクレル
炭素14 2500ベクレル
トリチウム 50ベクレル等

大地、空気などの自然界には放射性物質がいたるところにあります

LHD重水素実験計画

重水素実験は、法令、協定書・覚書、安全管理計画を遵守して実施します

重水素実験は9年間を予定しています

10億ベクレル(=1GBq)

	前半6年間		後半3年間	
実験年度	初年度 (第19サイクル)	第2～6年度	第7～9年度	第10年度 以降
事項	予備の実験 (施設検査)	プラズマ 高性能化実験	総合性能実験	ポストLHD 計画へ転換
年間トリチウム 最大発生量	370億ベクレル(1キュリー) (各年度積算量)		555億ベクレル (1.5キュリー) (各年度積算量)	---
年間トリチウム 最大放出量	37億ベクレル※(各年度積算値)			---
年間中性子 最大発生量	2.1×10 ¹⁹ 個 (各年度積算量)		3.2×10 ¹⁹ 個 (各年度積算量)	---

※ T25表示のあるダイバースウオッチなどの特殊な時計に使用されている量の4個分

進捗状況に応じ、軽水素だけで実験を行う年、あるいは実験を休止する年は9年間に含めません。

重水素実験を進めるにあたって

重水素実験を進めるにあたって

以下を遵守します。

1. 関係法令(放射線障害防止法、同法施行令等)
2. 核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書、及び同覚書
3. 大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画

併せて、岐阜県・3市が設置する「核融合科学研究所安全監視委員会」が行う監視・測定等に最大限協力します。

災害緊急時に備えて

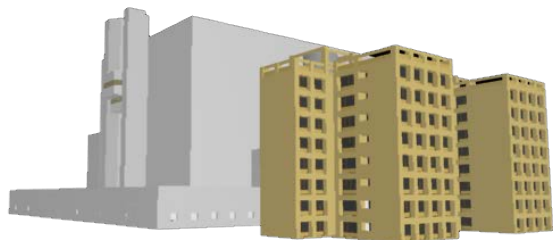
1. 災害・異常時のマニュアルを整備しています。
2. 通年24時間体制で、トリチウム含有水の保管状況等を監視しています。
3. 研究所全員で防災訓練を実施しています。
4. LHD実験期間中に火災を想定した消火訓練を実施しています。
5. 災害等発生時は、危機管理指揮本部を設置して対処します。



LHD消火訓練の様子

安全性の評価と安全監視委員会への協力

核融合科学研究所



諮問



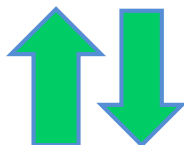
提言・答申



核融合科学研究所
重水素実験安全評価委員会

研究所が設置、運営
放射線、プラズマ等の専門家とジャー
ナリスト、地元有識者(公募を含む)に
よる委員で構成

監視



協力

核融合科学研究所
安全監視委員会

協定書と覚書に基づき、
岐阜県・三市(土岐市・多治
見市・瑞浪市)が設置、運営

平成26年11月1日設置
研究所の監視及び測定結果の確認
環境中性子線量の測定
環境トリチウム濃度の測定 等

(平成19年11月)

安全管理計画は妥当という評価、また、第三者による監視委員会の設置
などを提言

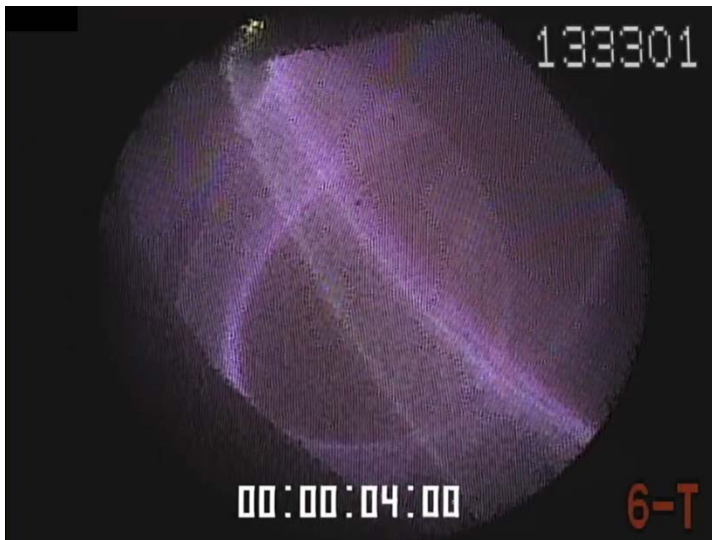
(平成24年2月)

東日本大震災を受けて再検討された安全管理計画は妥当という評価、
また、再検討された安全管理計画を確実に実行に移すことが肝要である
との答申

平成25年3月28日

地元自治体(岐阜県、土岐市、多治見市、瑞
浪市)との間で、核融合科学研究所周辺環境
の保全等に関する協定書及び覚書を締結

LHD重水素実験を開始しました



重水素ガスによる最初のプラズマ

平成29年3月7日、重水素実験を開始

放射線障害防止法に基づく「施設検査合格証」が交付されました(3月29日)

7月7日まで、重水素ガスを用いた実験を実施

1億度を超えるイオン温度を達成するなど、大きな成果を挙げました
また安全に実験が行われました

7月11日～8月3日、当初の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



146名の来賓、所員約300名が出席した点火式

安全管理機器の性能及び安全管理体制の機能を確認

- 1. 遮蔽壁の性能検査を経て「施設検査合格証」が交付されました。**
- 2. 安全管理計画に基づいて設置された、トリチウム除去装置、放射線総合監視システム等の健全性を確認しました。**
- 3. 実験実施体制、危機管理・連絡体制、防災訓練の実施等、安全確保上の体制も十分機能していることが確認されました。**

安全管理機器の性能確認状況

2mコンクリート遮蔽壁の性能検査（3月7日より2週間）

重水素ガスを用いた調整運転（予備的実験）で発生した中性子を管理区域内外で測定

- 遮蔽壁の外に複数設置したクイクセルバッジによる測定
⇒ 全て検出下限値(0.01mSv)以下
- 環境放射線モニタリングシステム(RMSAFE)の屋外モニタによる測定
⇒ 実験に起因する放射線量は検出されず

放射線障害防止法に基づく、LHDの「放射線発生装置（プラズマ発生装置）に係る施設検査」について、同法に基づく検査業務を行う登録検査機関から、平成29年3月29日付けで施設検査合格証が交付

トリチウム除去装置

- ・ LHDの真空排気システムとの連動運転試験を実施し、問題のないことを確認
- ・ 現在まで連続運転を行っており、稼働率100%でトリチウムの除去・回収運転を継続中
- ・ 95%以上の除去装置でのトリチウム回収率を確認
⇒ トリチウム除去装置が所期の性能を発揮していることを確認

放射線総合監視システム

- ・ 管理区域入退管理システム、環境放射線モニタリングシステム等の信号を一元管理
⇒ 所期性能を確認
- ⇒ 放射線の測定値は、研究所ホームページ上で速報値として公開中
- ・ インターロックシステムは、施設検査において健全性を確認

RMSAFEによる環境放射線のリアルタイム表示

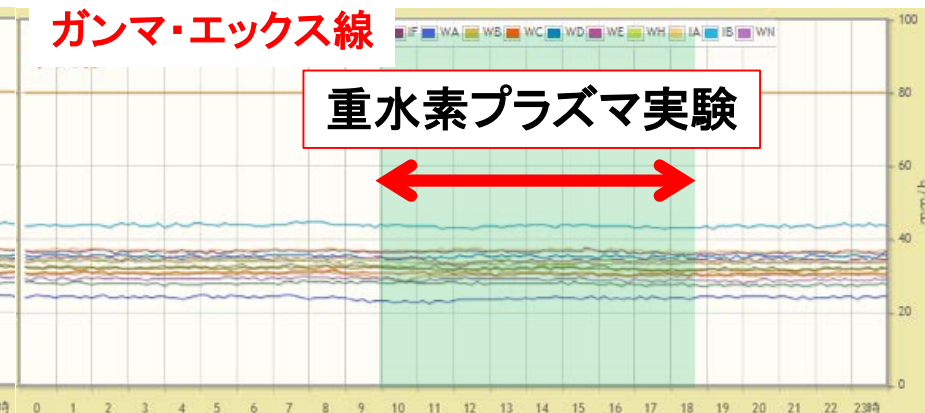
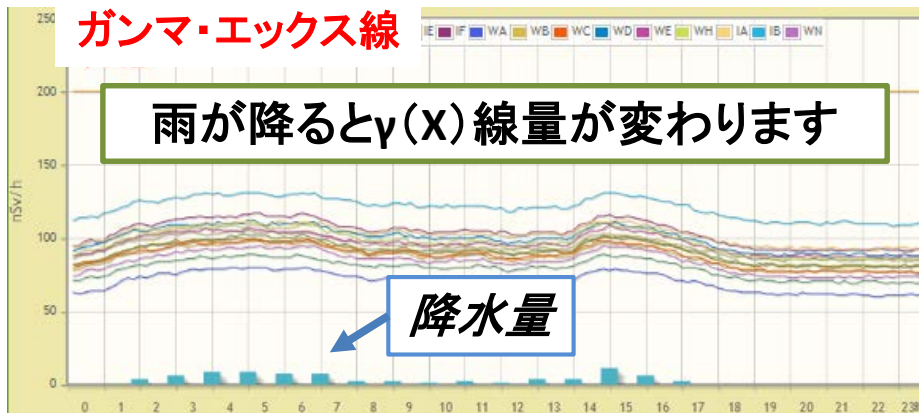
- ・ 研究所敷地境界部に9ヶ所、実験棟近傍に5ヶ所の放射線モニタリングポストを設置
- ・ 各ポストでの環境放射線測定データは、リアルタイムでホームページ上に公開(<https://sewebserv.nifs.ac.jp/map.php>)



環境放射線データ 日報トレンドグラフ(全地点)

2017年3月21日

2017年3月22日



重水素実験情報の公開

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LHD重水素プラズマ実験期間：2017年3月6日～2017年7月7日

中性子総発生量：研究所管理値；年間 2.1×10^{19} 個
本実験計画期間中の発生量：管理値の17.3%

2017年7月7日 現在
(積算期間:2017年3月6日～2017年7月7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17.3%

2017年7月7日 現在
(積算期間:2017年3月6日～2017年7月7日)

敷地境界線量(中性子線、 $\gamma(x)$ 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0.4%

2017年7月7日 現在
(積算期間:2017年3月6日～2017年7月7日)

排気中トリチウム濃度：研究所管理値(3月平均)； 2×10^{-4} Bq/cm³
トリチウム濃度：管理値の0%

2017年6月26日 現在
(積算期間:2017年4月1日～2017年6月26日)

災害等緊急時における連絡体制

- 火災・災害・事故等発生時は、所長(危機管理指揮本部長)、自衛消防隊隊長を含む「危機管理指揮本部」を設置して対処する。
 - 1) 所内及び関係機関への通報
 - 2) 必要に応じて、消火活動、避難誘導、救助活動等
 - 3) 広報対応
- 自治体等への連絡が必要な場合は、「火災・災害・事故等発生時の緊急連絡網」に基づき、連絡を行う。

緊急時の県・3市への連絡先、連絡手段

連絡先		連絡手段					
		時間内			時間外・休日		
		固定電話 ○	固定電話 ×	固定電話 × 衛星電話 ×	固定電話 ○	固定電話 ×	固定電話 × 衛星電話 ×
岐阜県	環境生活部 環境管理課	電話及びFAX	/	/	電話又は携帯	/	/
	東濃県事務所 環境課	/	衛星(電話及びFAX)	派遣	/	衛星(FAX)	派遣
土岐市	総務部 総合政策課	電話及びFAX	衛星(電話及びFAX)	派遣	電話又は携帯	衛星(FAX)	派遣
多治見市	企画部 企画防災課	電話及びFAX	衛星(電話及びFAX)	派遣	電話又は携帯	衛星(FAX)	派遣
瑞浪市	総務部 企画政策課	電話及びFAX	衛星(電話及びFAX)	派遣	電話又は携帯	衛星(FAX)	派遣

時間内の固定電話によるFAXは、一斉送信により実施
 時間内の衛星電話によるFAXは、回線が1回線のため電話連絡の後、順次実施
 時間外・休日の電話又は携帯：県・3市担当者等の電話又は携帯

火災・災害・事故連絡用

自然科学研究機構 核融合科学研究所

ファクシミリ送付のご案内

(日付:平成 年 月 日 送信枚数(この送付状を含む) 枚)

送付先: 岐阜県環境生活部環境管理課 御中
 東濃県事務所環境課 御中(衛星時のみ)
 土岐市総務部総合政策課 御中
 多治見市企画部企画防災課 御中
 瑞浪市総務部企画政策課 御中

発信元: 核融合科学研究所
 自衛消防隊総務班(管理部総務企画課)、
 宿日直者、防災センター

件名: 火災・災害・事故等の発生について

・通報区分 火災・災害・事故等
 ・異常発生(確認)日時 平成 年 月 日() 時 分
 ・具体的な場所の名称
 ・管理区域区分 管理区域 管理区域外 不明
 ・状況の概要

①施設・設備の異常、故障の有無	<input type="checkbox"/> 有	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
②被ばくの有無	<input type="checkbox"/> 有 (推定線量 mSv)	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
③汚染の有無	<input type="checkbox"/> 有	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
④放射性物質の漏えいの有無	<input type="checkbox"/> 有	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
⑤人身事故の有無	<input type="checkbox"/> 有	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
⑥火災の有無	<input type="checkbox"/> 有(消防通報 時 分)	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中 (鎮火確認 時 分)
⑦爆発の可能性の有無	<input type="checkbox"/> 有	<input type="checkbox"/> 無	<input type="checkbox"/> 確認中
⑧危険時の措置の有無	<input type="checkbox"/> 危険なし	<input type="checkbox"/> 措置済み	<input type="checkbox"/> 未処置

・事象の発生状況・概要(いつ・だれが・何を・どうした・なぜ)

受領チェック欄

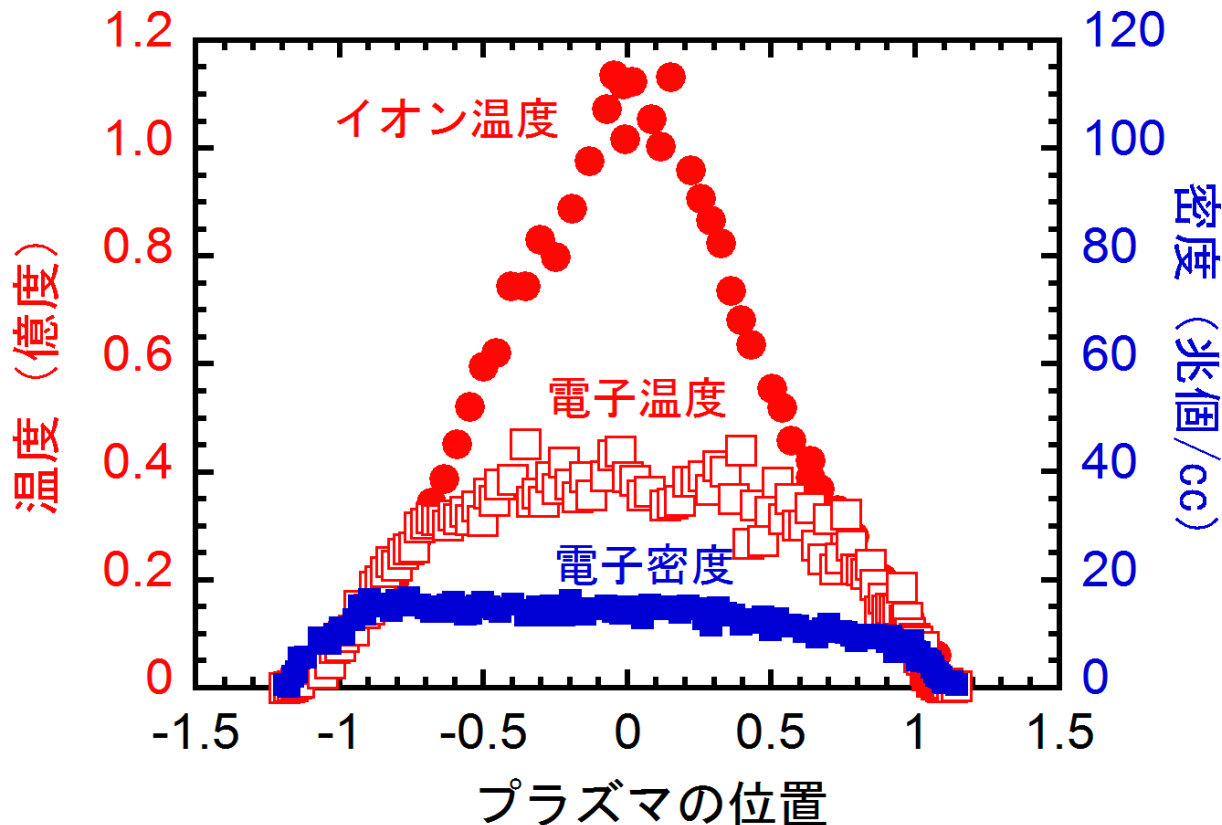
月 日 時 分

官署部課名: _____

確認のため、受領後、本書をご返送ください。

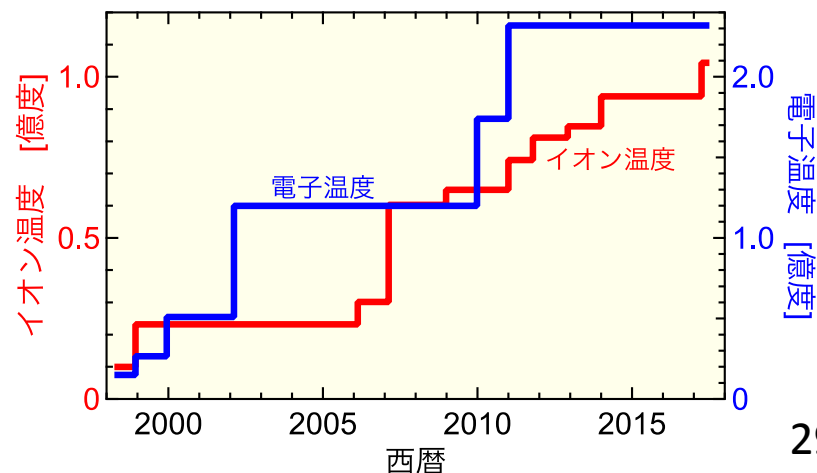
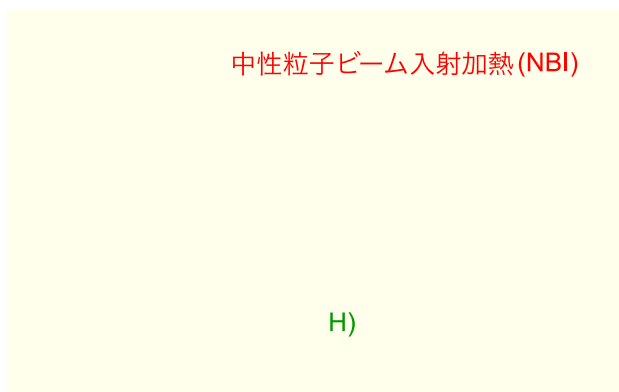
重水素実験により1億度を超えるイオン温度を達成

- ・ 重水素実験を開始(3月7日)した翌週に、最高イオン温度を更新(軽水素プラズマの最高は9,400万度)
- ・ 1億度を超える高性能な重水素プラズマの特性に関する研究にも着手

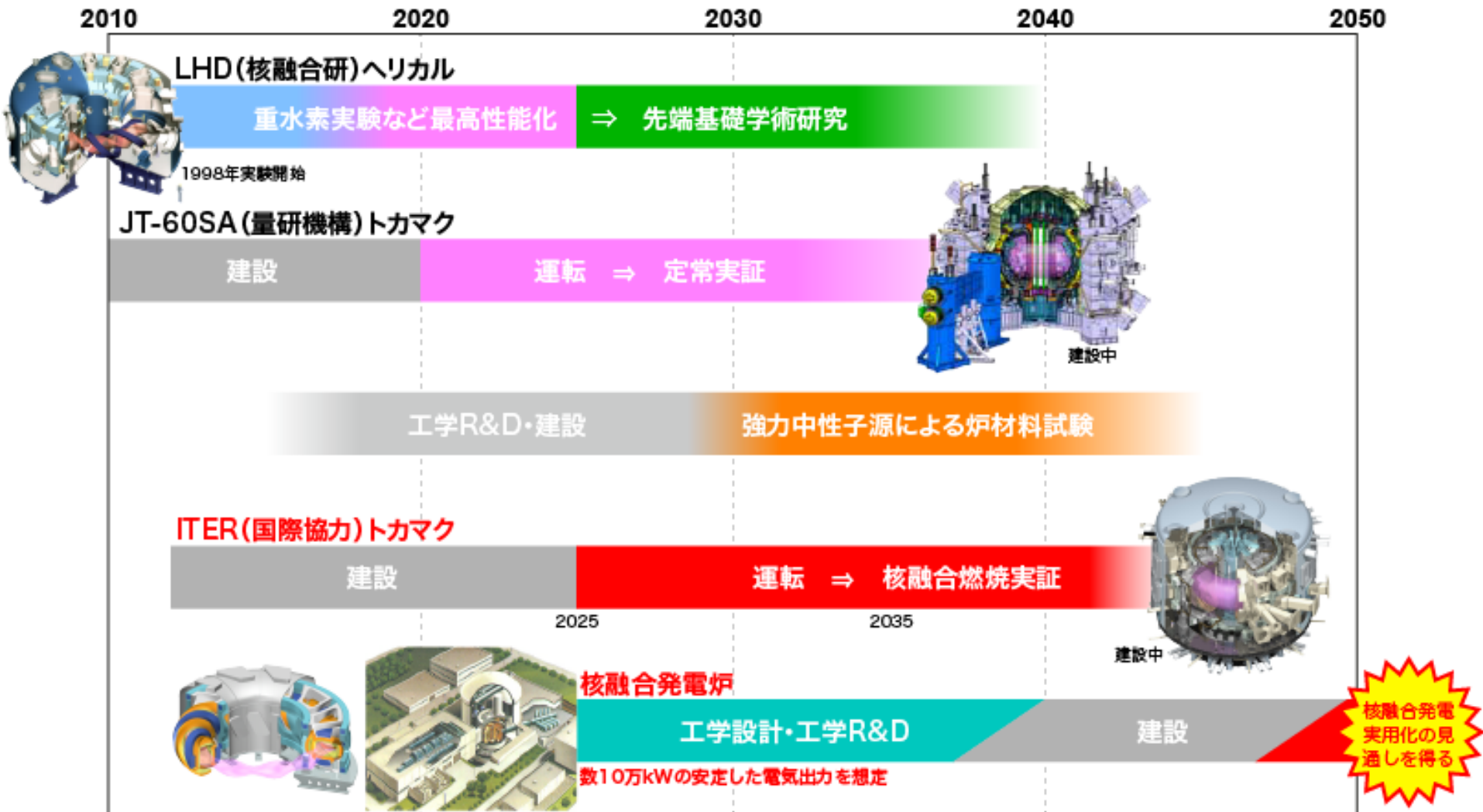


大型ヘリカル装置は目標(パラメータ)の8合目まで到達

プラズマ性能	大型ヘリカル装置 達成値	大型ヘリカル装置 最終目標値	核融合炉 設計条件の目安
イオン温度	>1億度 (密度 11兆個/cc)	1億2,000万度 (密度 20兆個/cc)	1億2,000万度以上 100兆個/cc以上 閉じ込め1秒以上
電子温度	2億3,000万度 (密度 2兆個/cc) 1億2,000万度 (密度 16兆個/cc)	1億2,000万度 (密度 20兆個/cc)	
密度	1,200兆個/cc (温度 300万度)	400兆個/cc (温度 1,500万度)	
ベータ値 (プラズマ圧力/ 磁場圧力)	5.1% (磁場 0.425T) 4.1% (磁場 1T)	5% (磁場 1-2T)	5%以上 (磁場 5T以上)
定常運転	54分 (500 kW) 48分 (1200 kW)	1時間 (3 MW)	定常(1年)



核融合発電実現への道のり



核融合研究、重水素実験等の研究所の活動 についてご説明しています

○毎年夏に市民説明会を開催(平成18年度から)

- ・重水素実験の実施状況と安全性、研究計画について説明
(11年間でのべ4,827名)
- ・平成28年度:三市合計23会場304名
(土岐市8会場150名、多治見市14会場126名、瑞浪市1会場28名)



市民説明会の様子(平成28年度)

○市民学術講演会の開催(年2回、多治見市・土岐市)

- ・科学技術一般に関する講演、核融合研究の進展などの講演

○研究所オープンキャンパスの開催(毎年2,000名を超えるご来場)

- ・重水素実験質問コーナーを設けて、重水素実験についても丁寧に説明

○随時の見学受付(平成28年度4,500名)

- ・研究所スタッフがLHDに関連する施設を案内

○広報誌の発行など

- ・研究所の活動を分かりやすく紹介したプラズマくんだよりの隔月発行など



市民学術講演会ポスター



プラズマくんだより



研究所の新キャラクター「ヘリカ」もお待ちしています！

今年のオープンキャンパス(一般公開)は
「体感！体験！プラズマエネルギー」をテーマとして
10月28日(土)に開催予定です

無限の神秘をたたえる宇宙のエネルギーの源は核融合です

宇宙の物質もまた、核融合により創成されています

138億年にわたって輝き続けている宇宙のエネルギー源を地上で実現できれば、人類は1万年以上にわたって、その文明を維持することができます

核融合の実現は、人類の夢の実現

今世紀中葉の発電実証をめざして、今、研究は急速に進んでいます