

平成27年度市民説明会 ご説明資料

核融合研究の進展と 核融合科学研究所の重水素実験計画

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



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



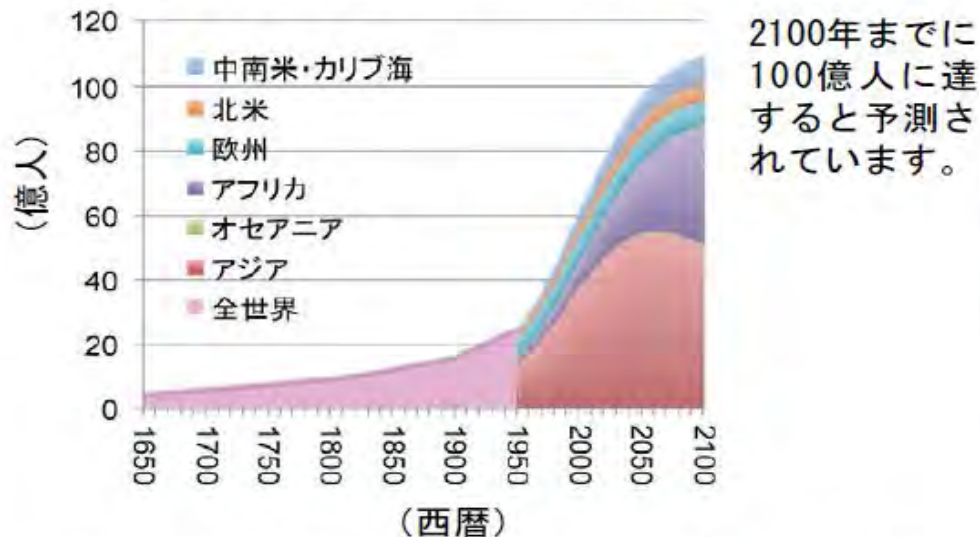
核融合エネルギーは、最も期待される将来のエネルギー源

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

エネルギー消費を減らすことは重要、でも..

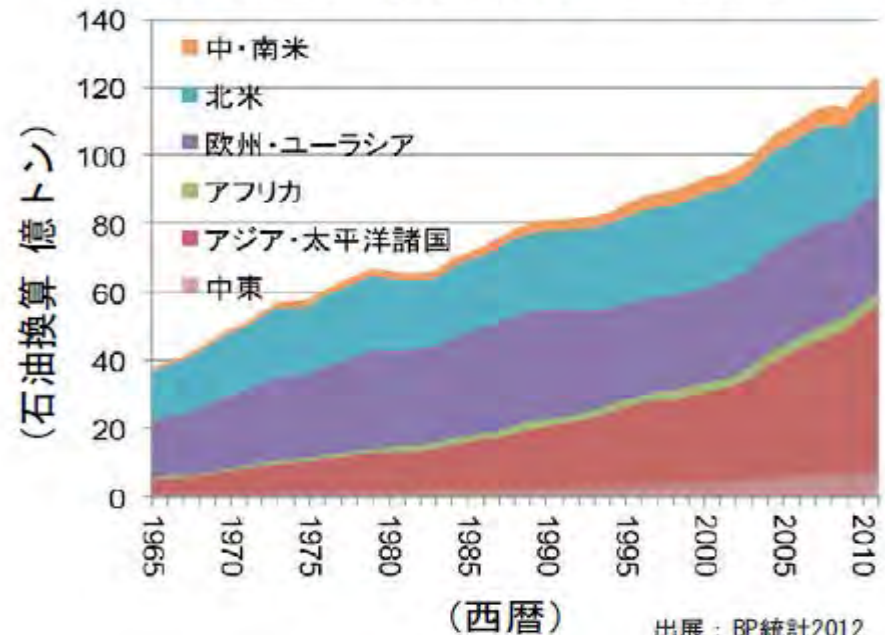
- ・ 世界人口の爆発的な増加や発展途上国の経済発展などによる世界的なエネルギー需要の増大
- ・ 産業にはエネルギーが必要。文明社会の維持にもエネルギーが必要
- ・ 日本だけが昔の生活に戻ることはできない。子孫の生活を奪ってしまう

世界の人口の推移(2011年以降は予測)



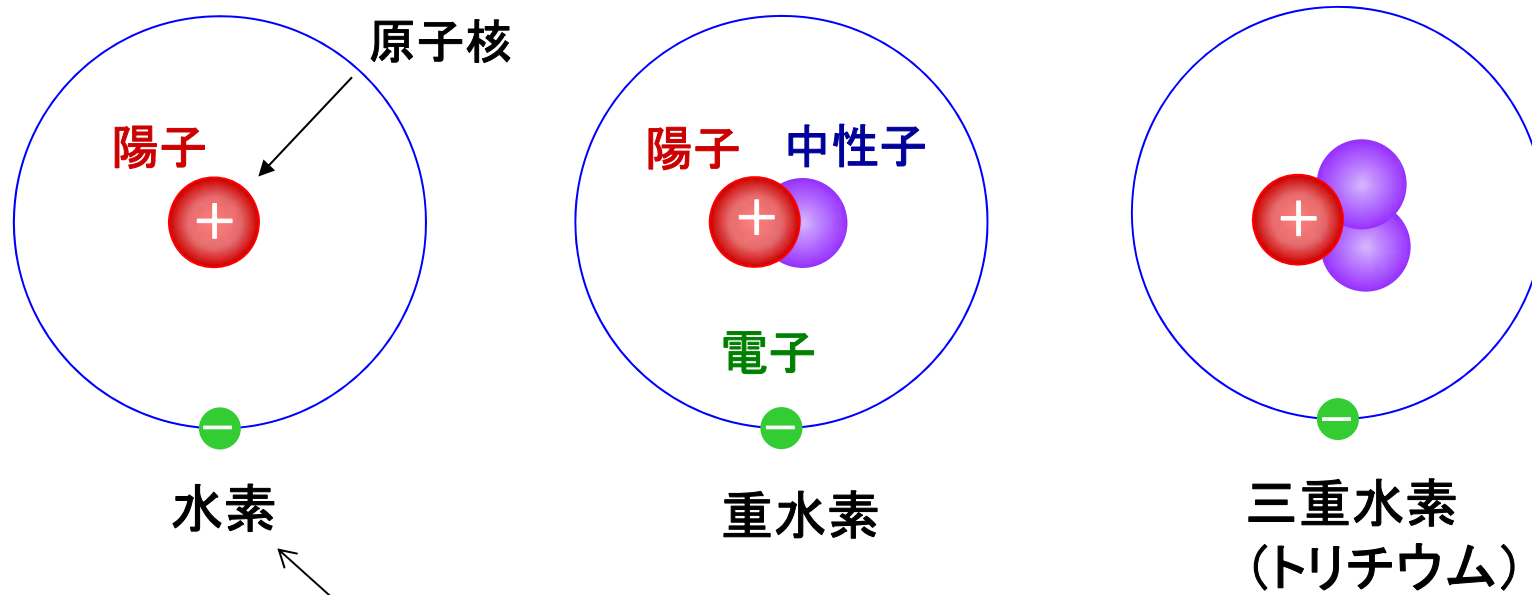
1900年以前は、UN, The Determinants and Consequences of Population Trends, Vol.1, 1973による。1950年以降は、UN, World Population Prospects: The 2010 Revision(中位推計)による。1950年以降は年央(7月1日)現在。

世界の1次消費エネルギーの推移



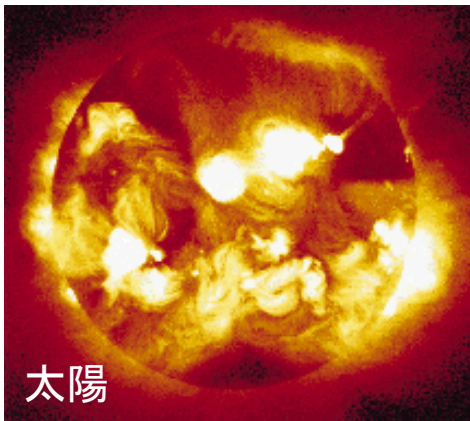
宇宙が誕生して 137億年 ビッグバン、核融合の開始

核融合、軽い原子・水素の仲間



星の核融合

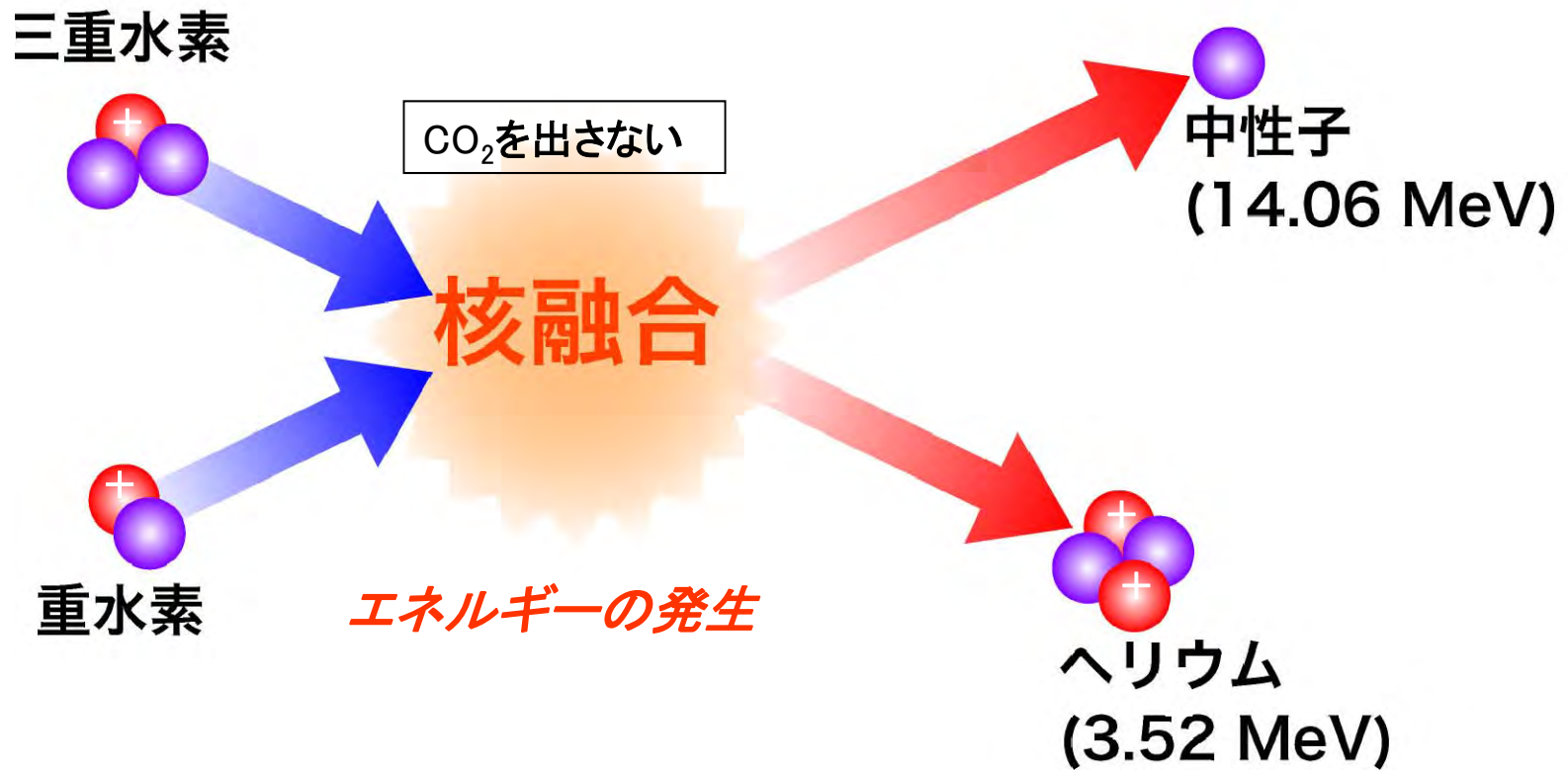
地上の核融合



太陽

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



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



携帯電話の電池
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%

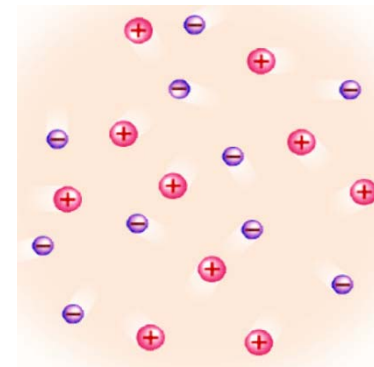
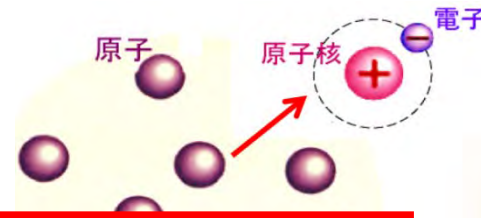
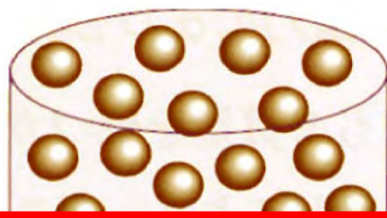
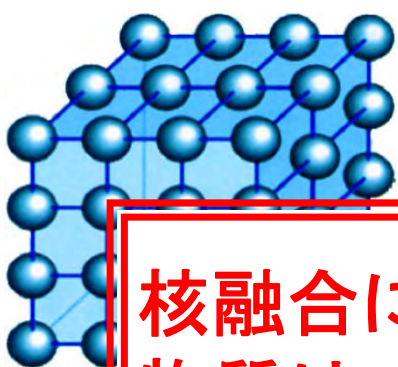
海水中に2,000億トンのリチウム⇒事実上、無尽蔵
100万kWの発電所 → リチウム約500kg/年 (体積では約1m³)

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)

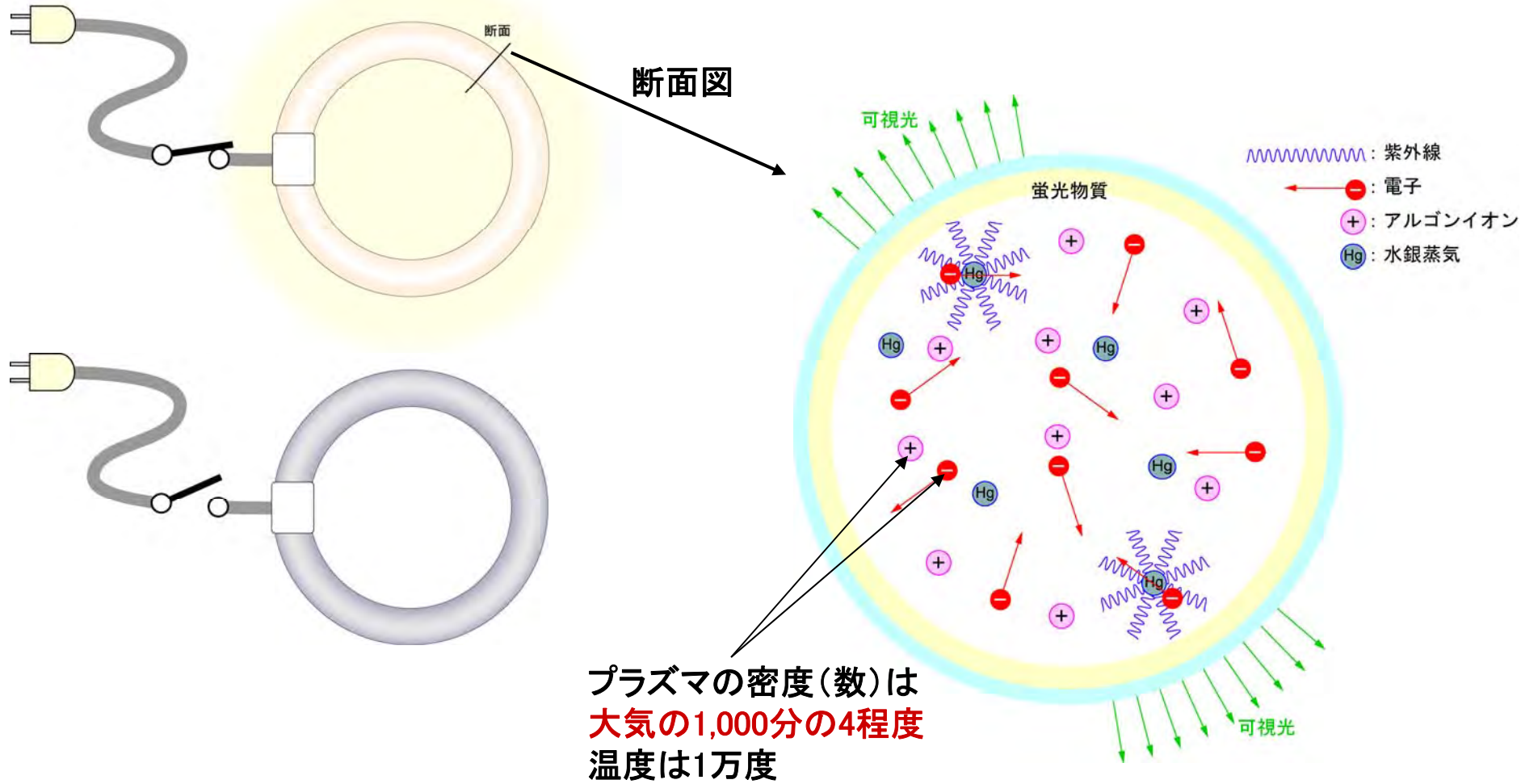


水蒸気
(気体)

プラズマ
(第4の状態)

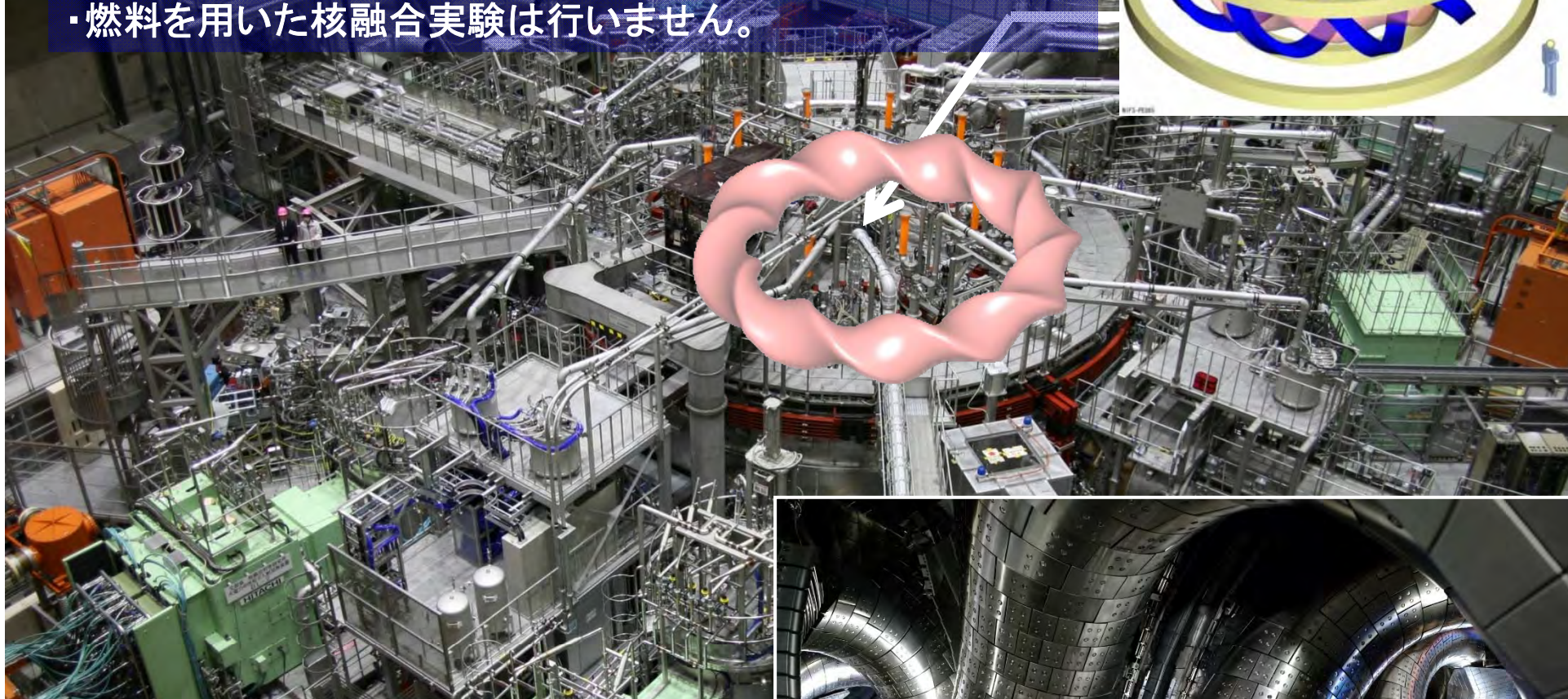
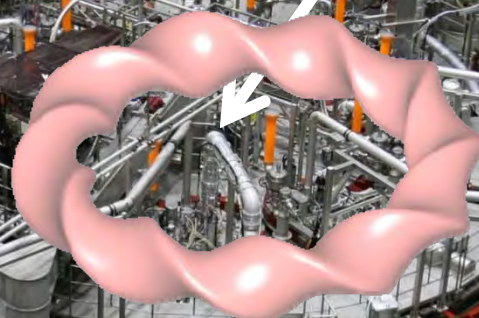
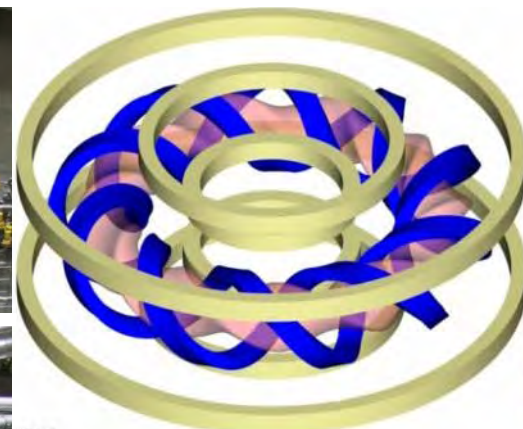
原子を構成する原子核
(イオン)と電子がばら
ばらになった状態

蛍光灯のプラズマと同じ性質



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。

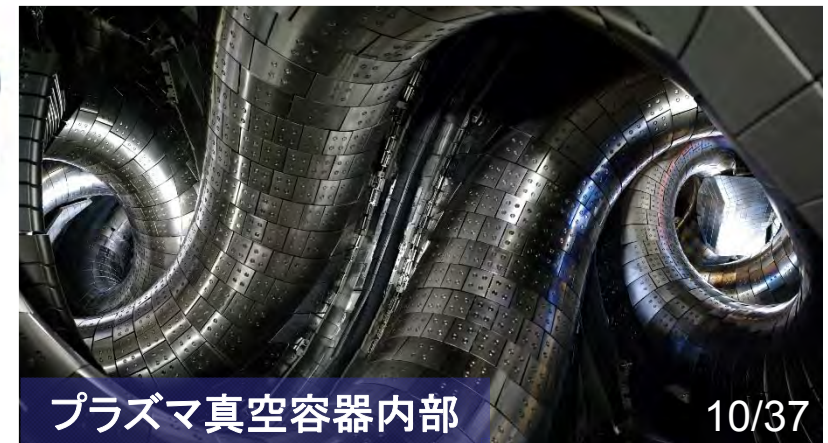
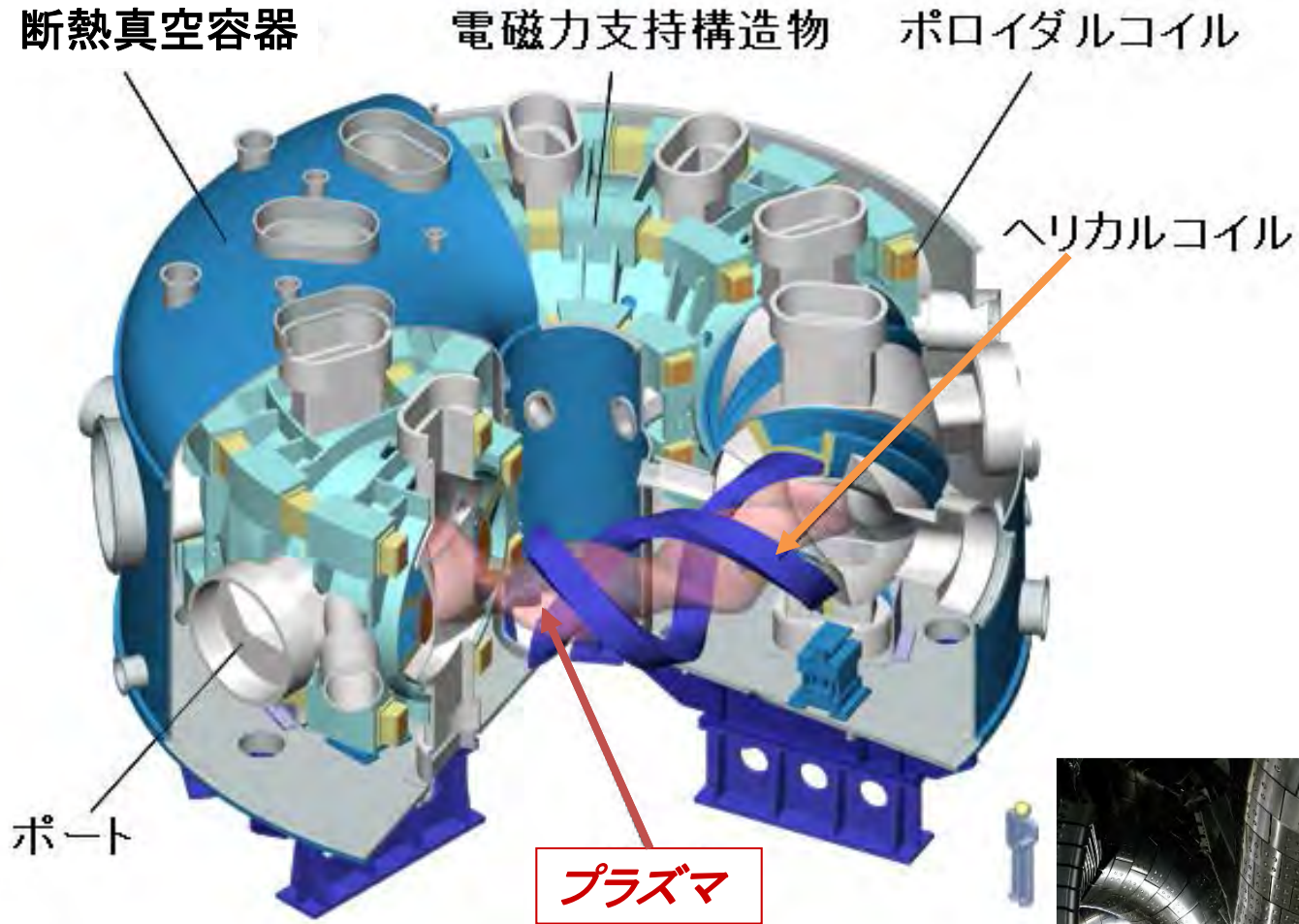


- ・ 世界最大の超伝導プラズマ実験装置
装置の高さ：約9m
装置の直径：約13m
装置の重量：約1500トン
- ・ 1998年3月実験開始



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



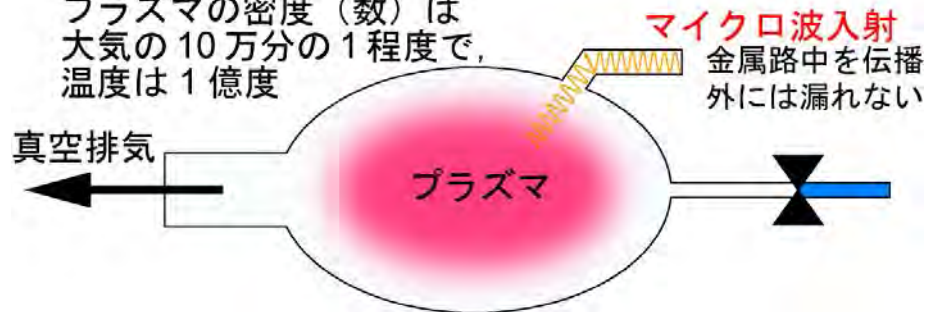
LHDのプラズマも 蛍光灯と同様です



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

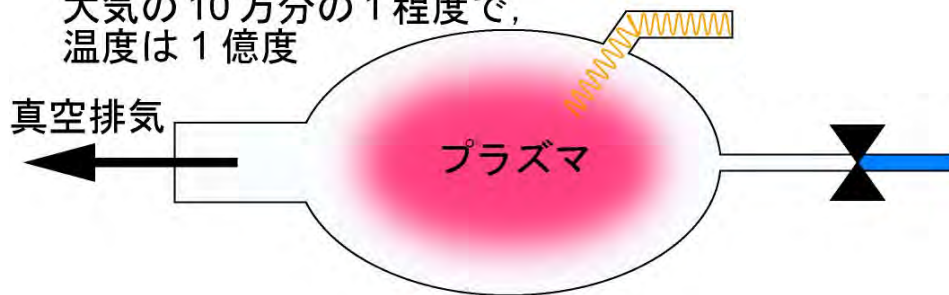


LHDは爆発・暴走しません プラズマテレビ、蛍光灯と同様の安全性を 持っています

プラズマは真空中ないと点かない

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



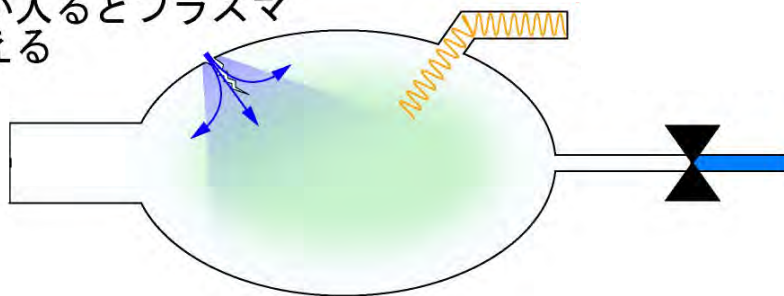
実験のガスを入れ過ぎる

↓
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

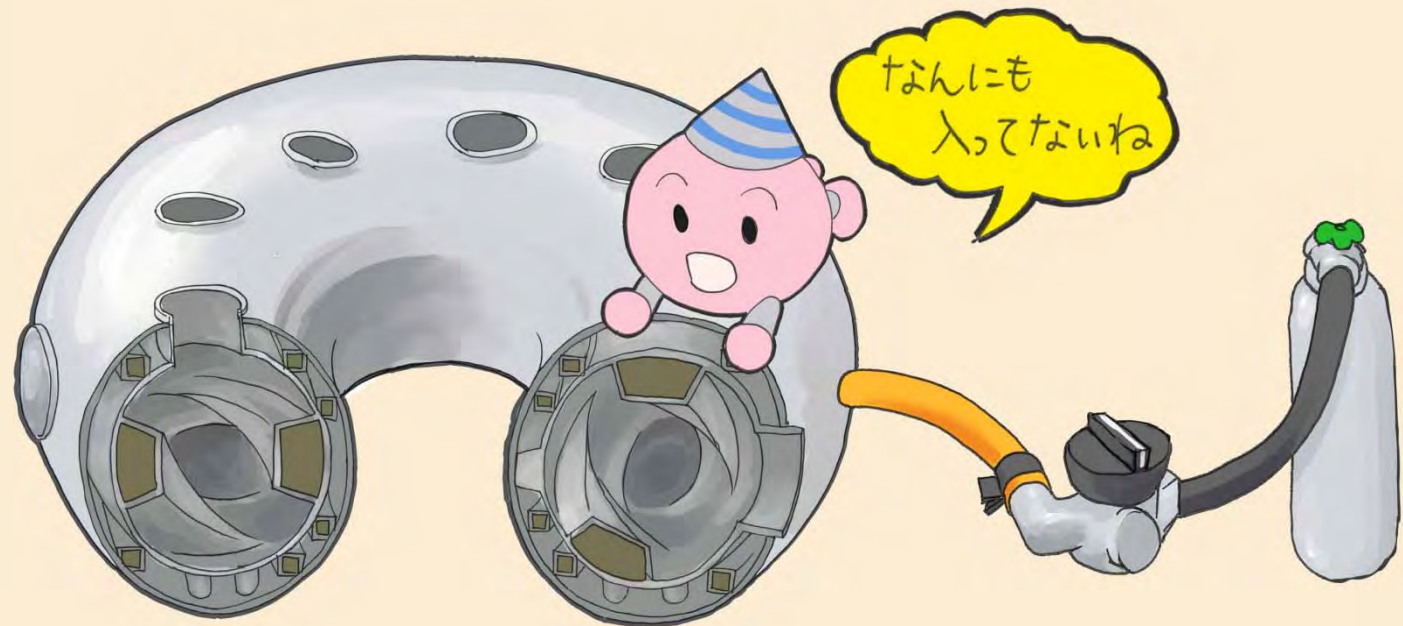
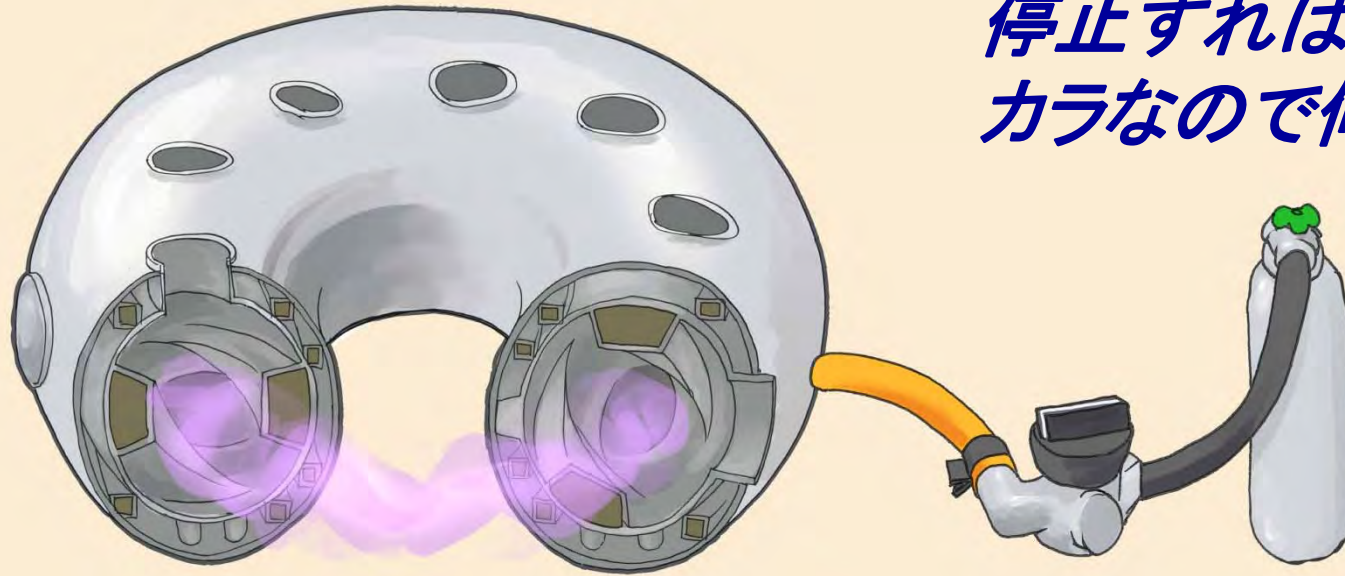
プラズマを点ける電気が増える

↓
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)

空気が入るとプラズマ
は消える



停止すれば容器内は
カラなので何も起きない



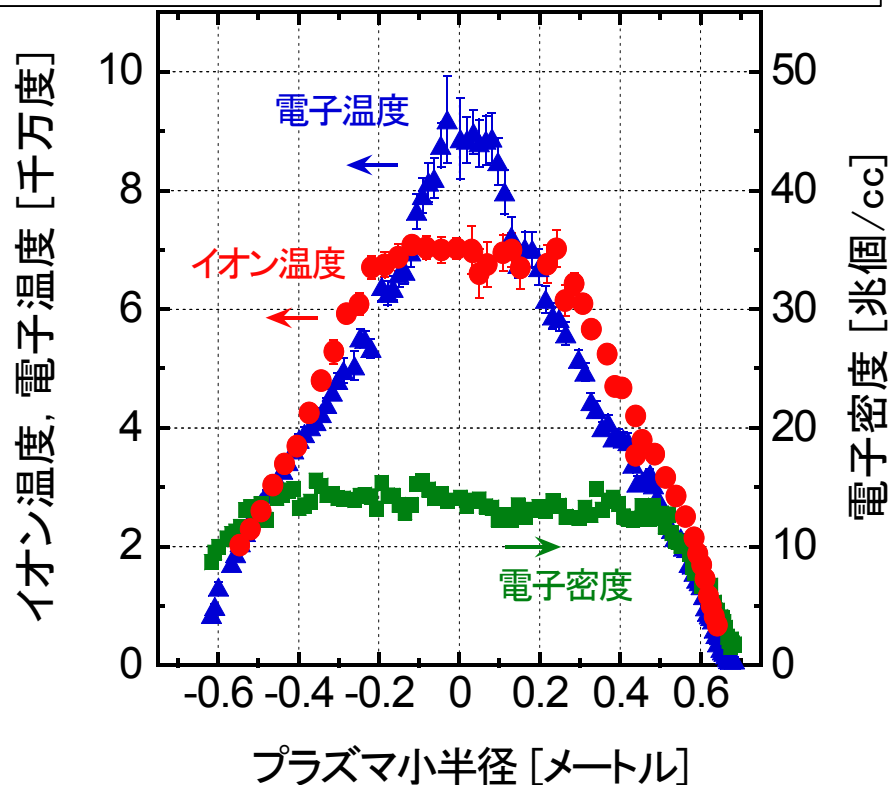
LHDのプラズマ性能は着実に向上

平成26年度のLHD実験の成果

プラズマ実験期間：H26年10月6日～H27年2月5日

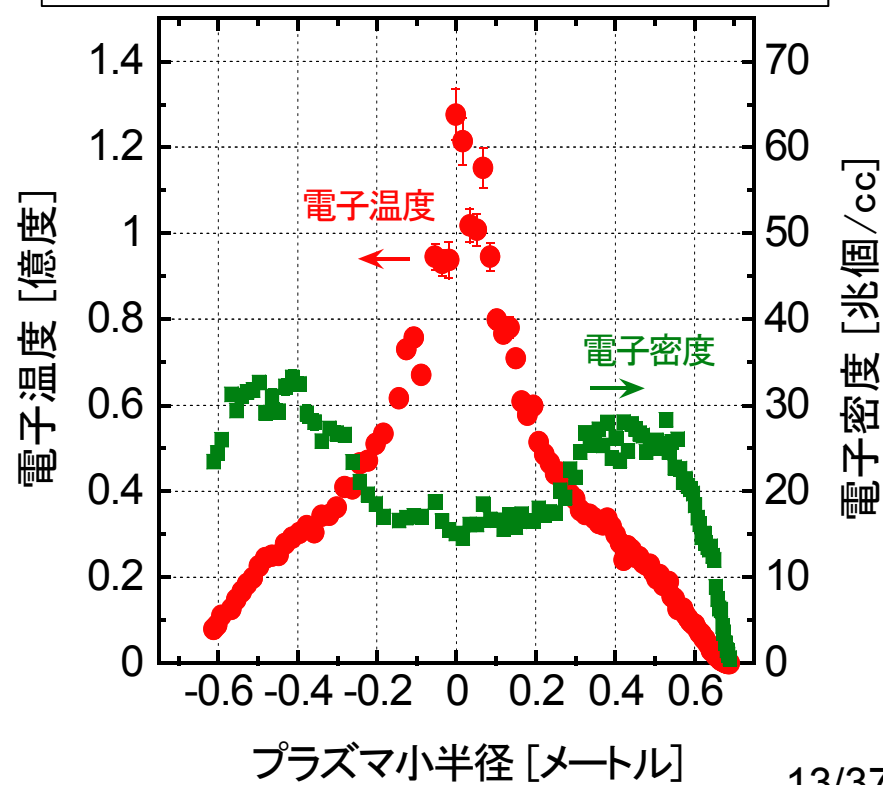
イオン温度7,000万度、電子温度8,800万度の高温プラズマを同時に達成

⇒核融合プラズマ条件に必要なイオンと電子の同時高温化の見通しを確立



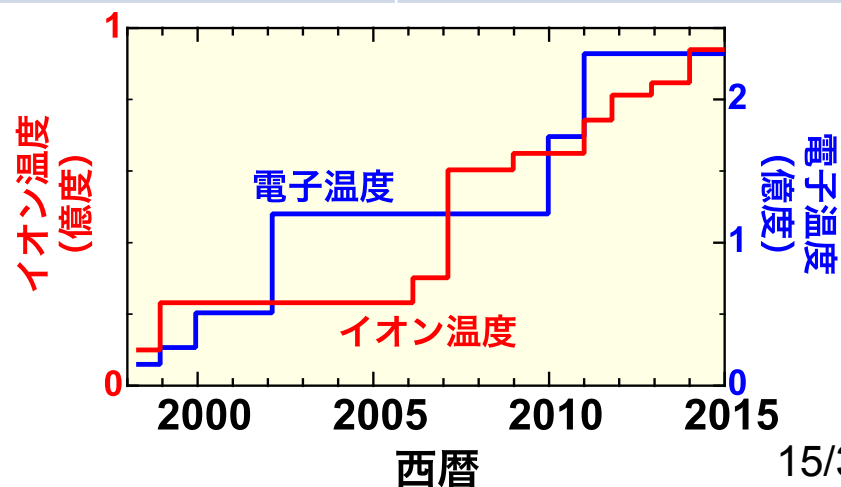
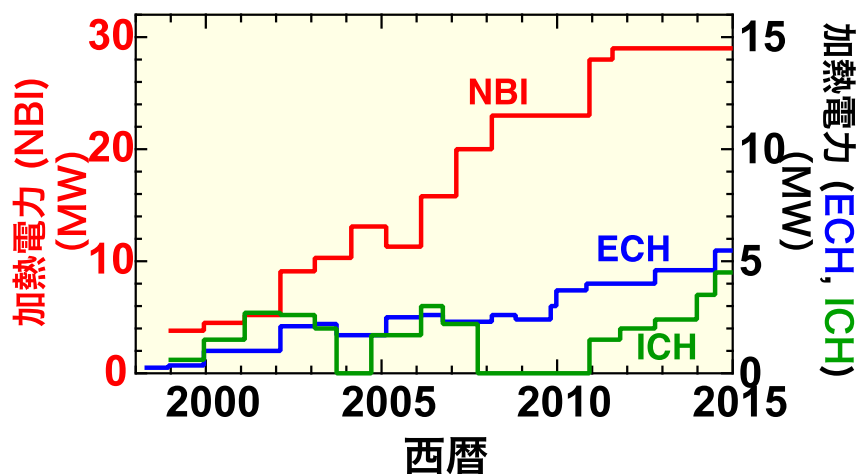
1億2,000万度という電子温度を、平均密度20兆個/ccという高い密度のプラズマで達成

⇒電子温度の最終目標値に迫る



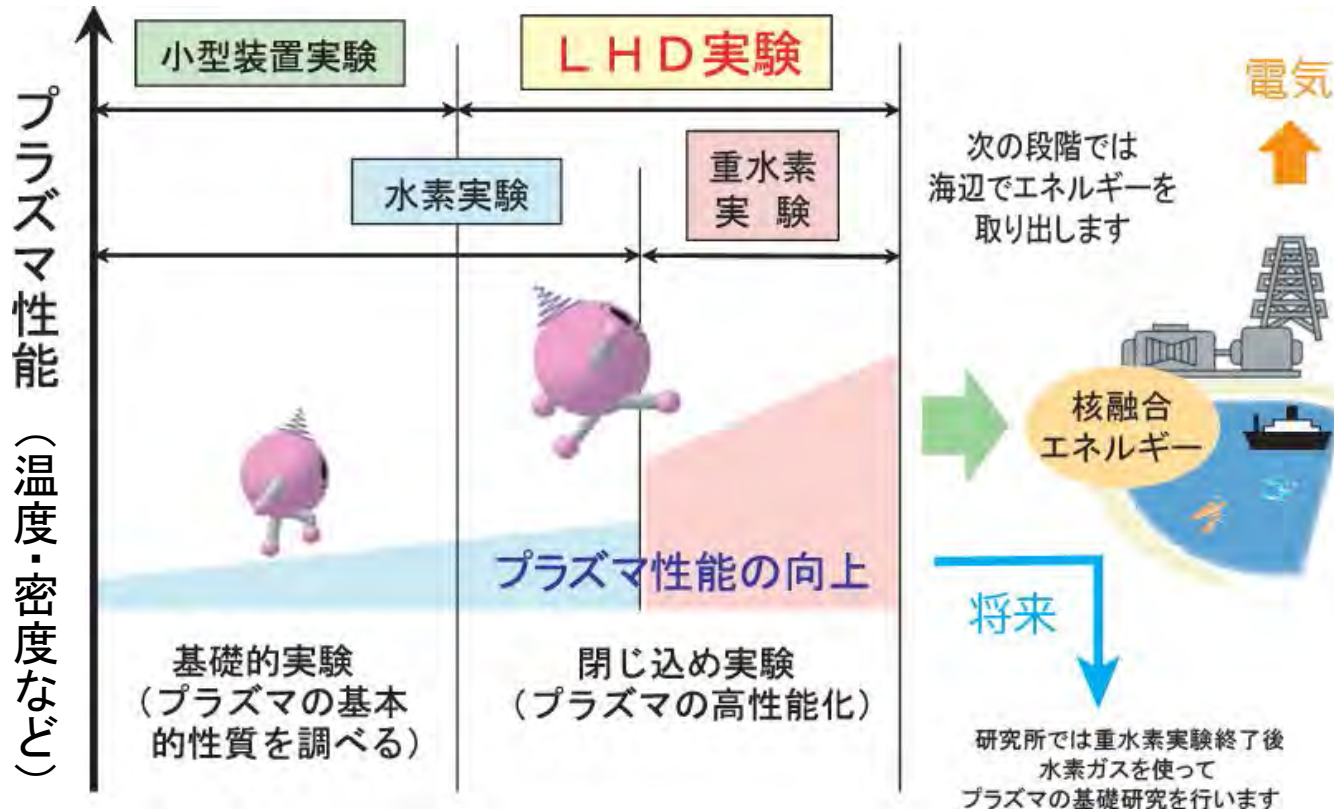
大型ヘリカル装置は目標(パラメータ)の8合目まで到達

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	9,400万度 (密度 10兆個/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)



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



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

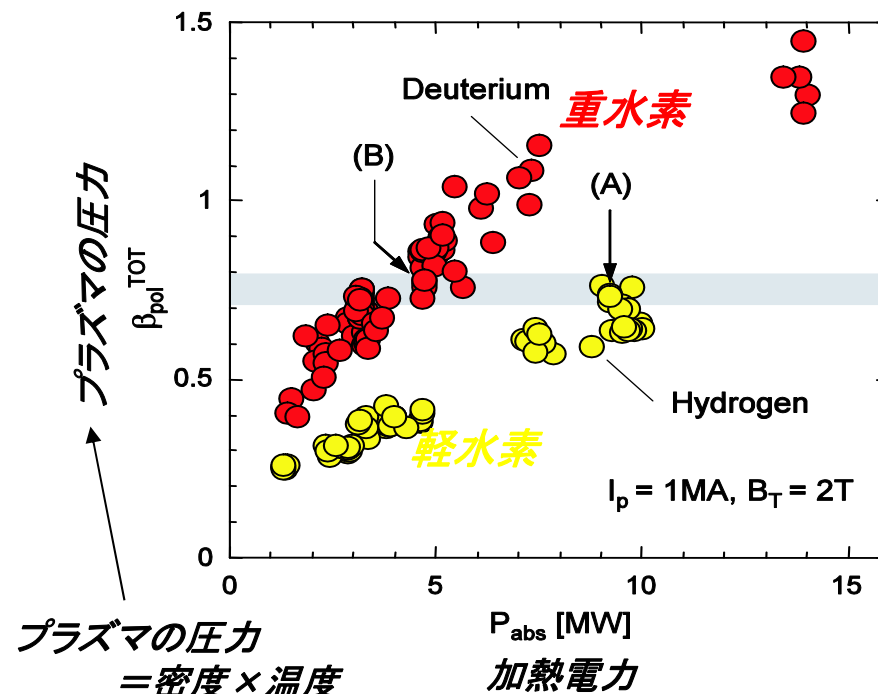
重水素で世界中の大型装置のプラズマ性能が向上

世界の核融合実験は重水素で実施

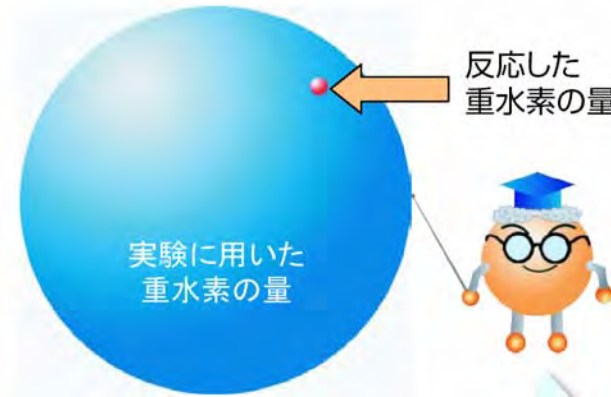
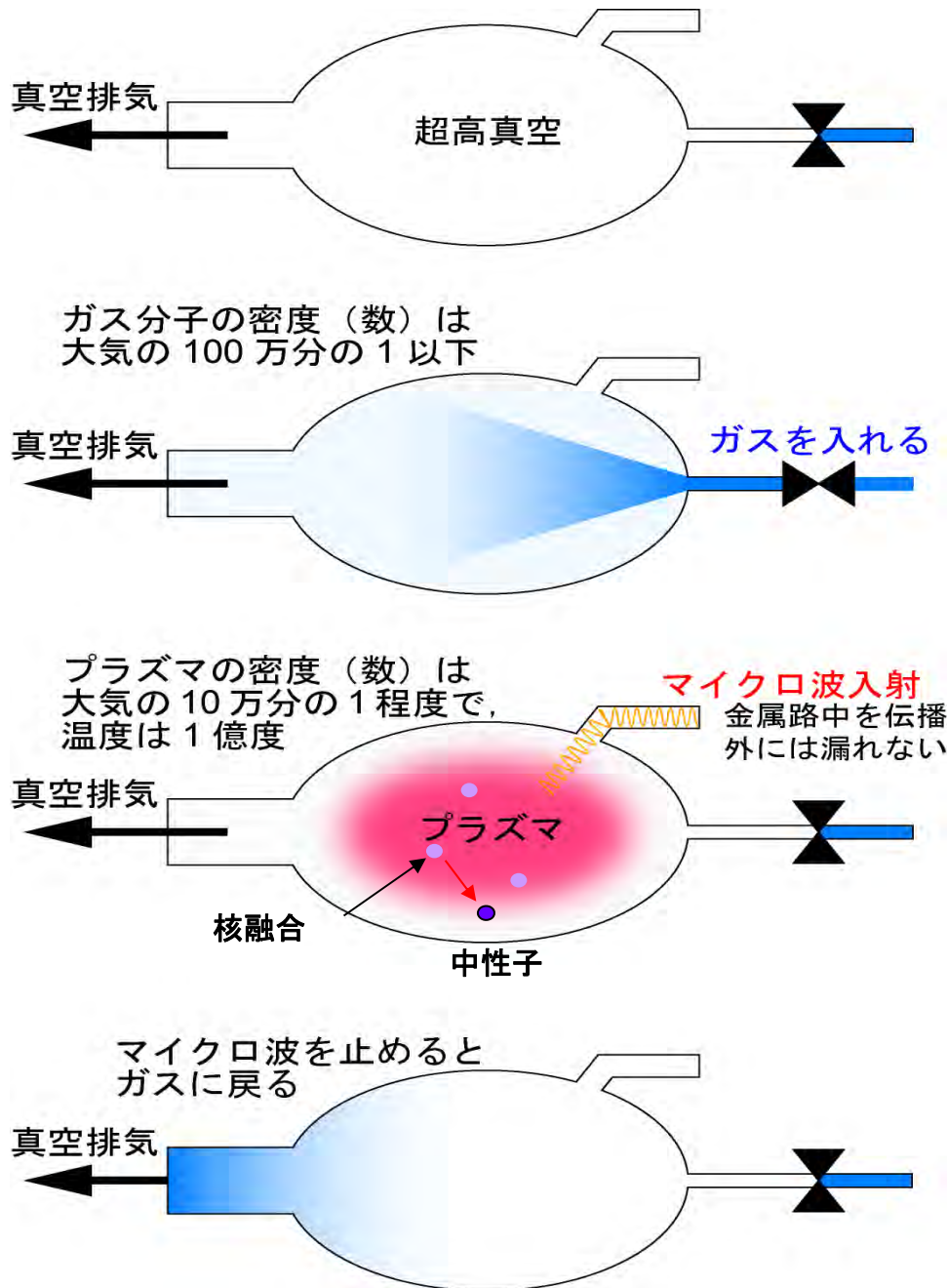
実験装置名	国	重水素による向上度
JFT-2M	日	1.1~1.4
JT-60U	日	1.2~2
Alcator C	米	1.5
DIII-D	米	1.4~2
ISX-B	米	1.4
TFTR	米	1.2
ASDEX	独	1.3~2
ASDEX-U	独	1.5
TEXTOR	独	1.4
JET	英	1.2~1.4
FTU	伊	1.4

重水素実験で得られた値を
軽水素実験の値で割ったもの

(JT-60Uにおける重水素と軽水素を使った実験の比較)

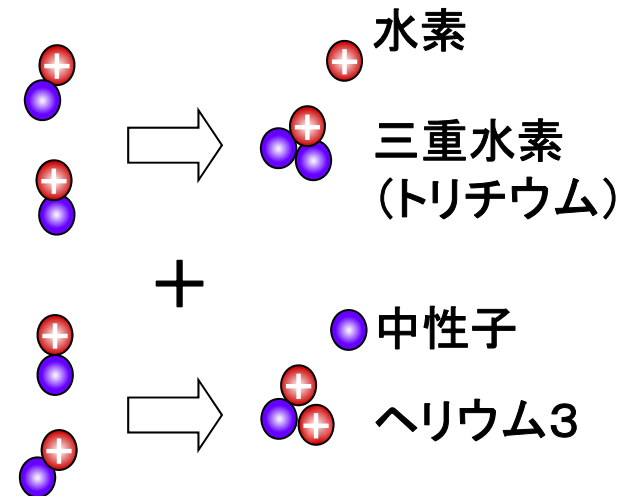


重水素ガスを使った実験

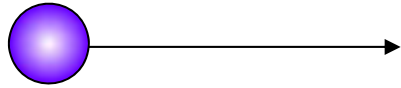


使用した重水素の約1万分の1以下が
プラズマが生成されているときだけ
核融合を起こす

重水素の核融合

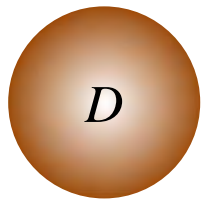


中性子



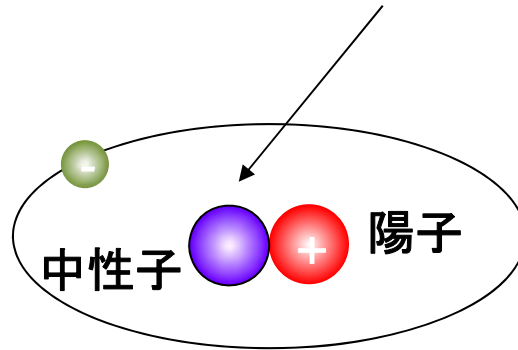
中性子

発生した中性子は、もともと原子核を構成する粒子



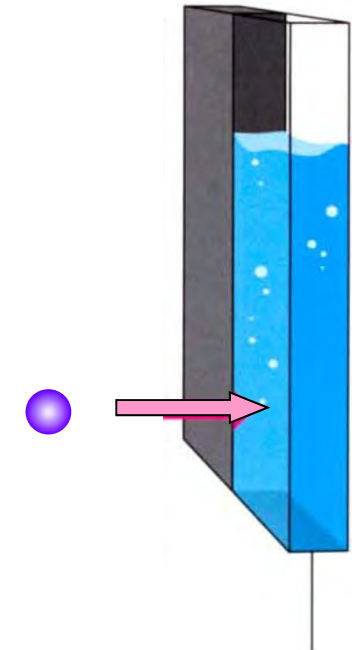
重水素原子

=



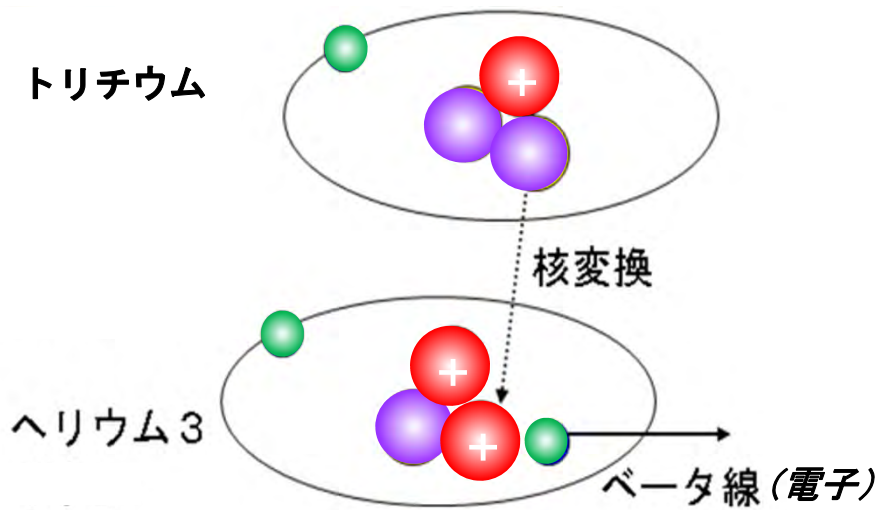
中性子は、水やコンクリートで止まります

中性子



水やコンクリート

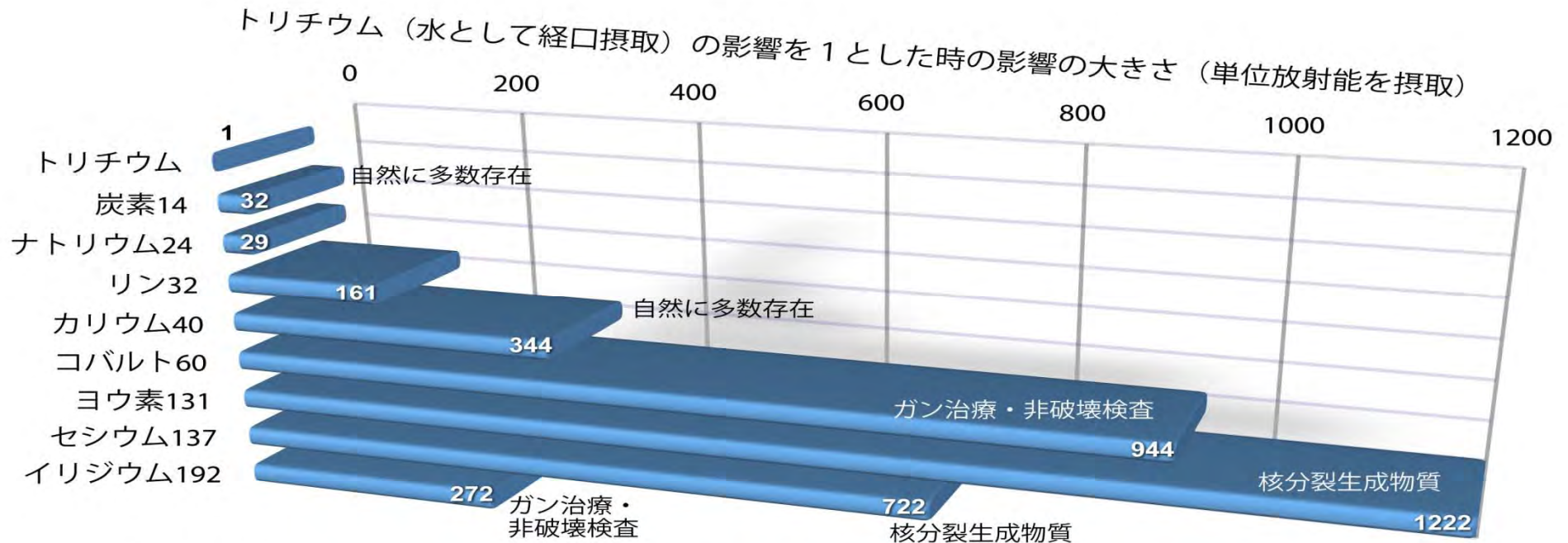
三重水素(トリチウム)



三重水素のベータ線

ブラウン管テレビの電子銃よりもエネルギーが低く皮膚を貫通しないため、体外からの被曝を受けない

半減期: 12.3年



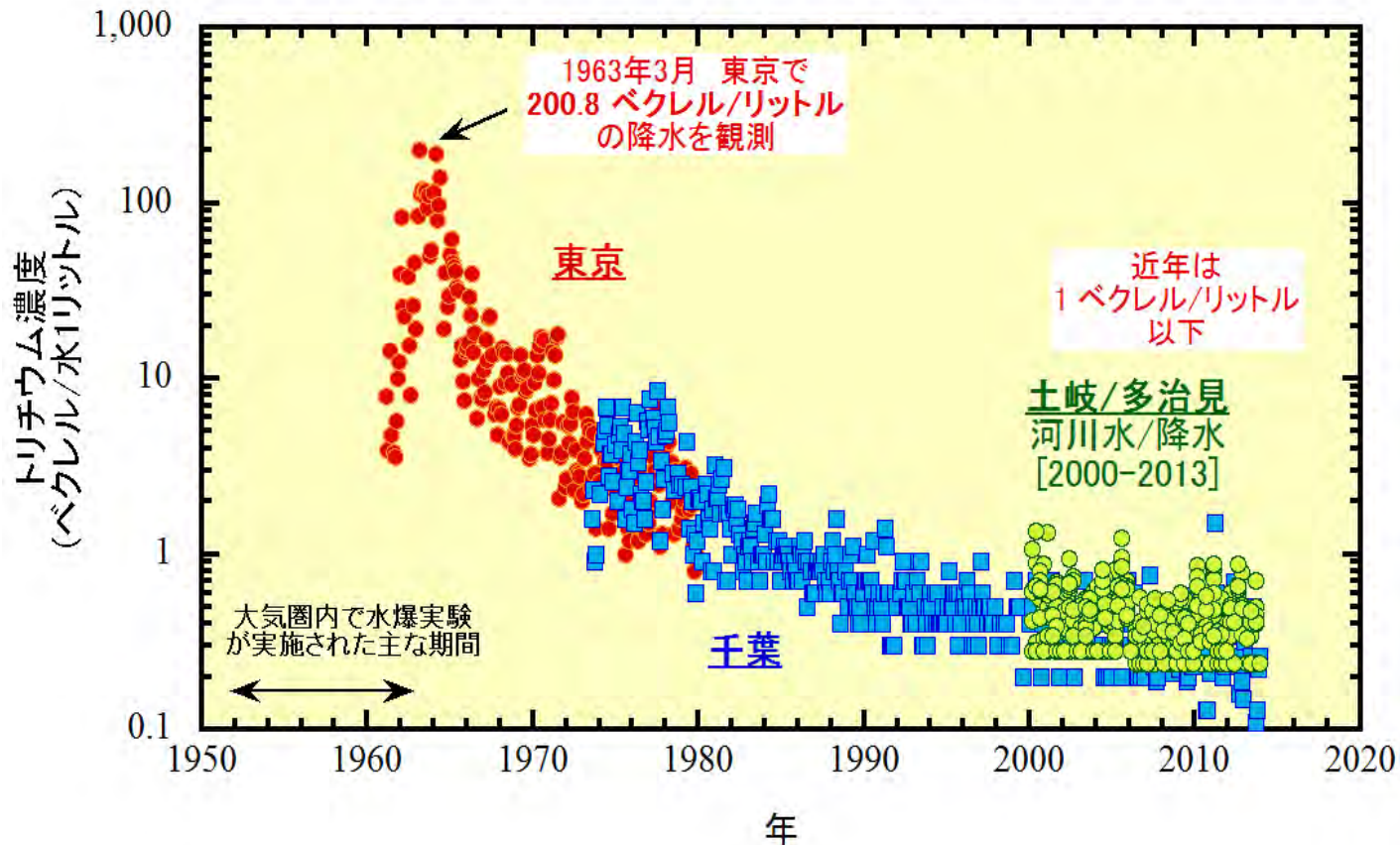
※トリチウム以外は、もっとも影響の大きい形態で摂取した時の影響

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

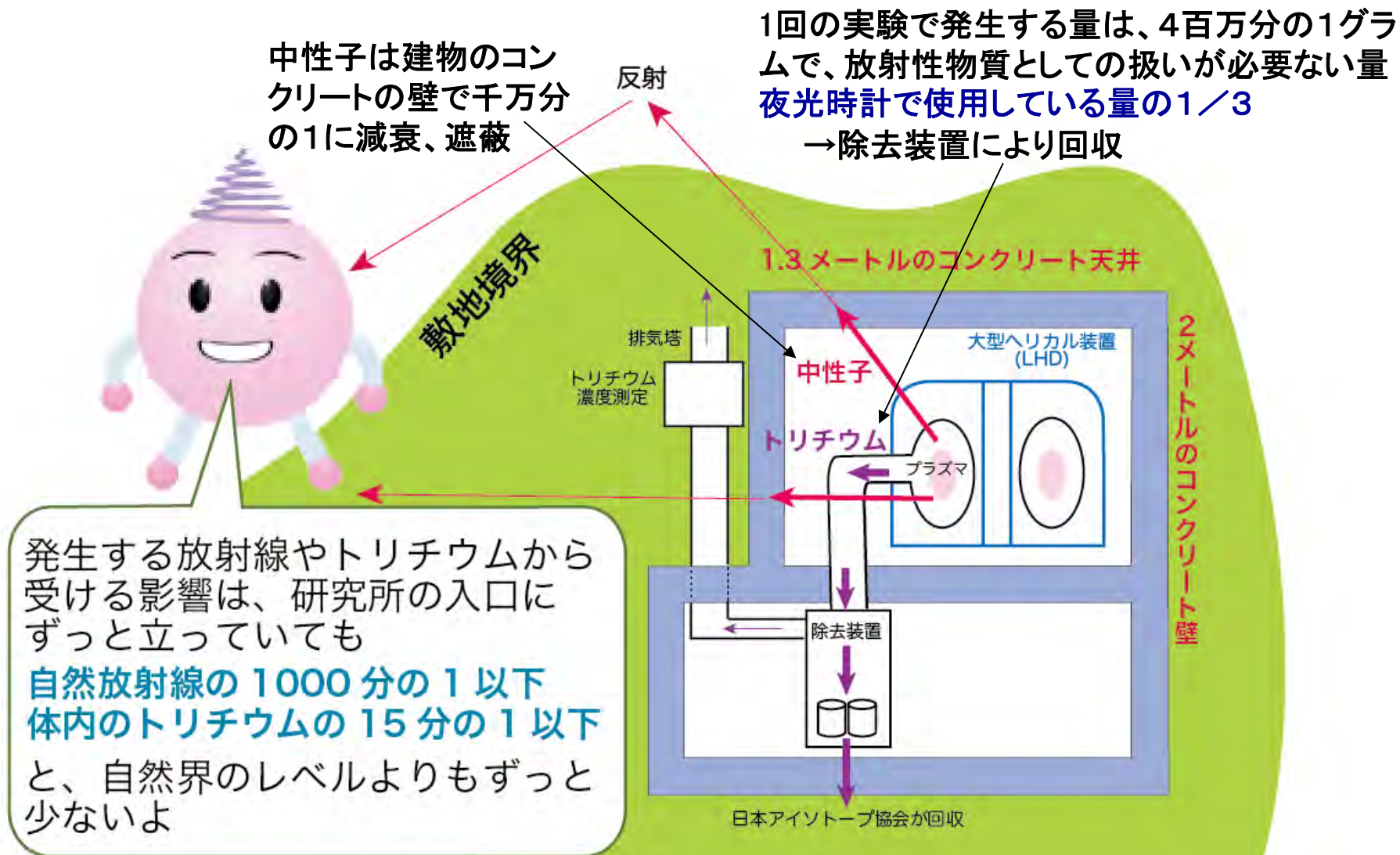
降水中トリチウム濃度(東京・千葉)

河川水/降水中トリチウム濃度(土岐/多治見)



環境中のトリチウム測定調査データベース[NETS DB (Nirs Environmental Tritium Survey Data Base)]:
<http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/NetsDB.html#>
原子力規制庁「日本の環境放射能と放射線」 <http://www.kankyo-hoshano.go.jp/> (2007年以降のデータ)

重水素ガスを使った実験と環境



日本原子力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

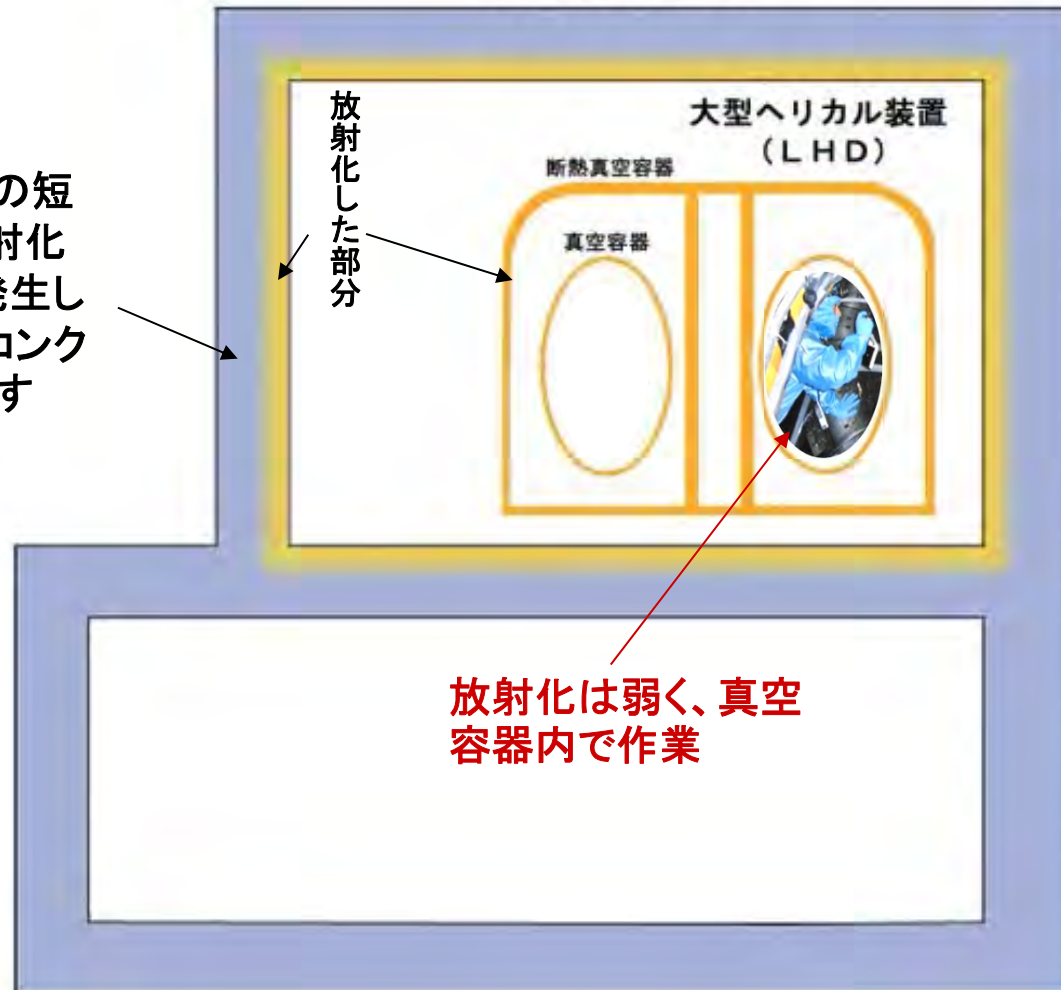
体重60kgの日本人
カリウム40 4000ベクレル
炭素14 2500ベクレル
トリチウム 50ベクレル等

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

中性子はLHDとコンクリートを放射化 → 影響はどのくらい残るか？

重水素実験後も管理
コンクリートは約10年
で自然のレベル
LHDも、約40年で放
射線は減衰してクリア
ランスレベル以下

実験終了直後



ガンマ線は波長の短い電磁波で、放射化により二次的に発生しますが、金属やコンクリートで止まります

放射化した部分

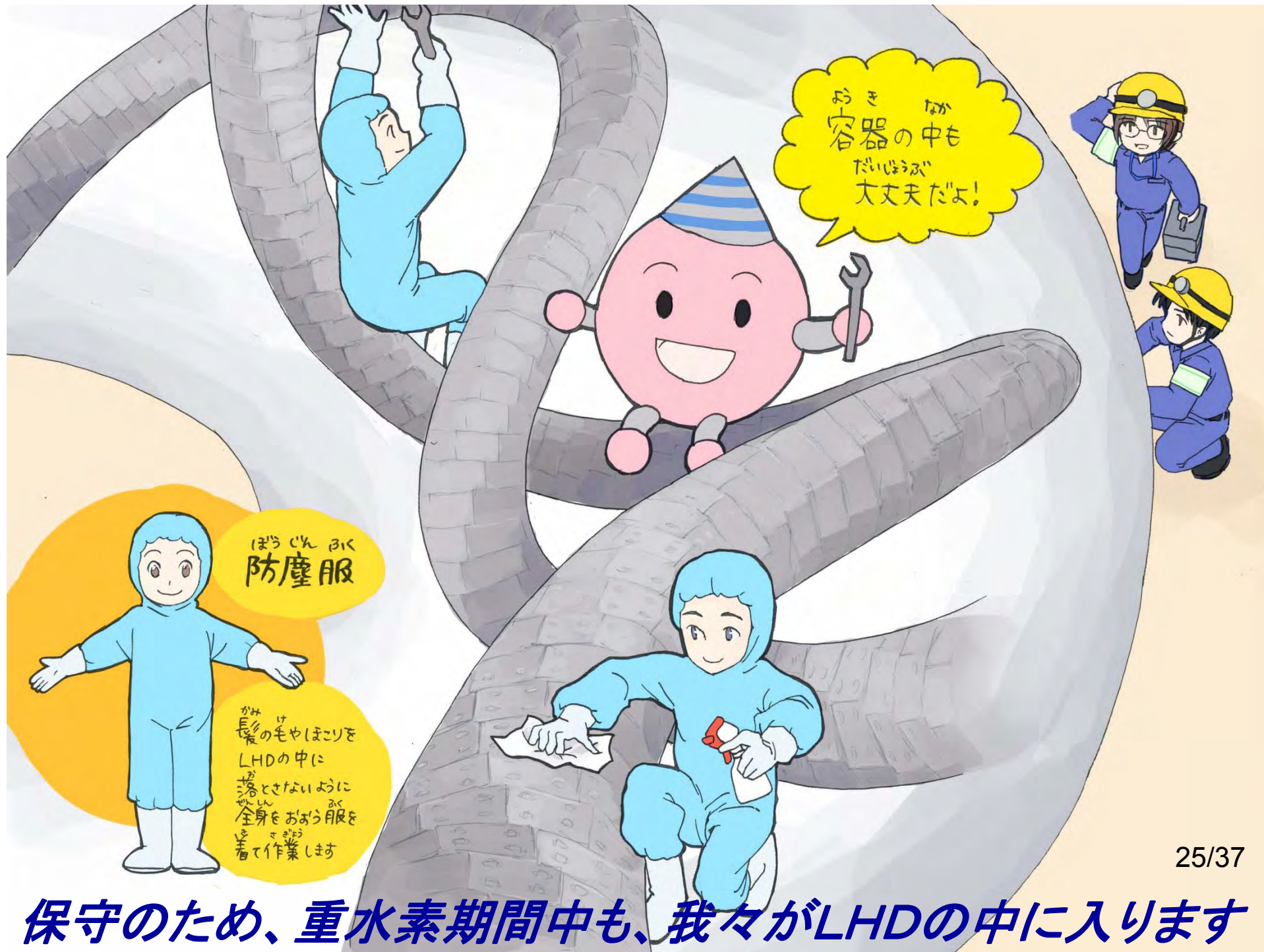
大型ヘリカル装置 (LHD)

断熱真空容器

真空容器

本体室内のコンクリート及びLHDが放射化

放射化は弱く、真空容器内で作業



おきなか
容器の中も
だいじょうぶ
大丈夫だよ!

ほろじん びく
防塵服

かみ 長髪 の毛やほこりを
LHDの中に
落とさないように
全身をおおう服を
着用して作業します

保守のため、重水素期間中も、我々がLHDの中に入ります

LHD重水素実験計画

重水素実験は9年間を予定しています

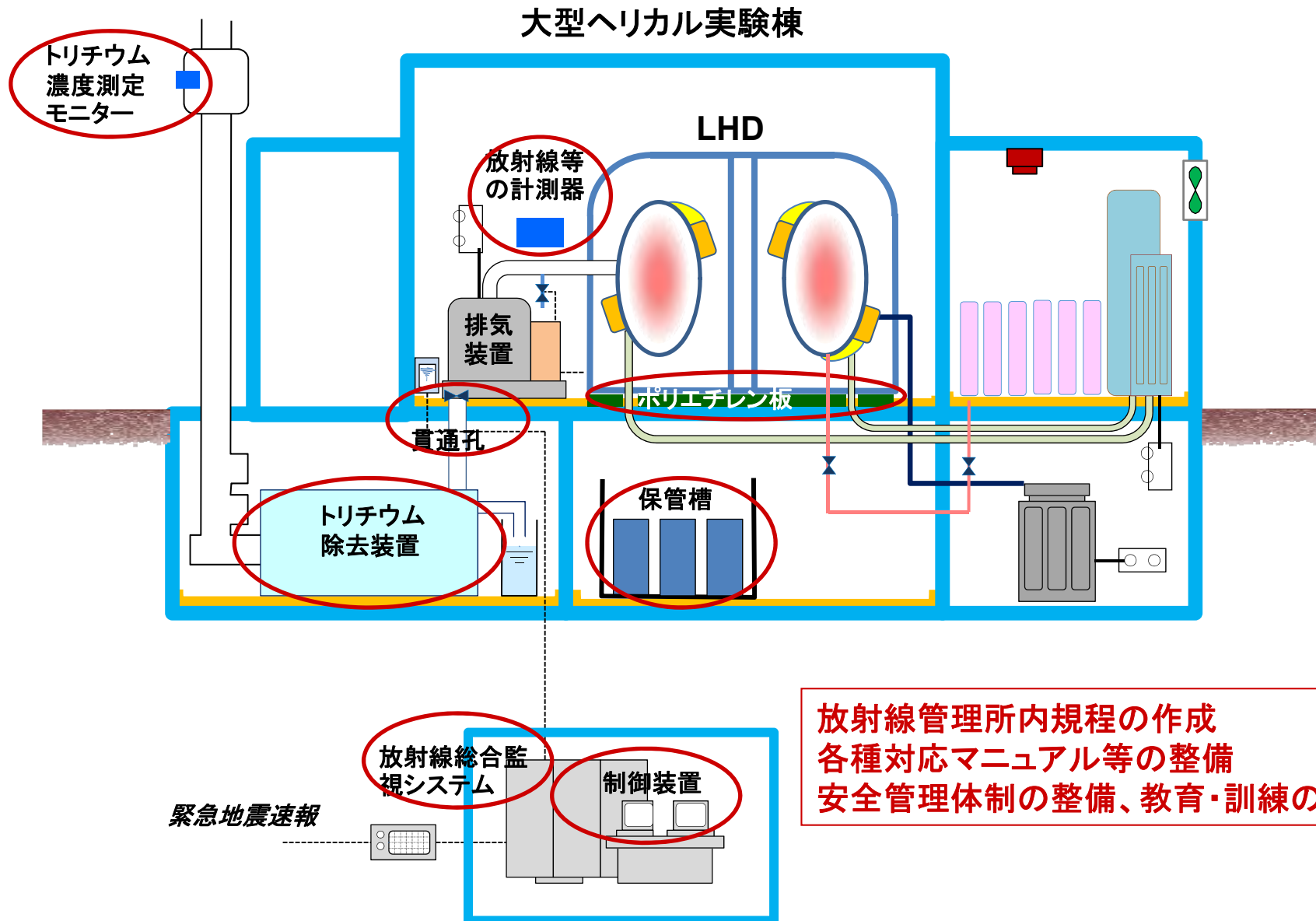
実験開始は、準備終了後

	前半6年間		後半3年間	
年度	初年度	第2～6年度	第7～9年度	第10年度以降
事項	予備的实验 (許認可検査)	プラズマ 高性能化实验	総合性能实验	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(0.1キュリー) (各年度)			---
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)	---

重水素実験後は、LHDで、原型炉の工学設計等を目的とした科学的基礎研究計画を実施、また、原型炉の設計や超伝導材などの研究を進め、プラズマ・核融合の研究教育を行っていきます

進捗状況に応じ、軽水素で実験を行う年、あるいは、休止する年がある場合は9年間に含めません

重水素実験の準備(抜粋)



放射線管理所内規程の作成
各種対応マニュアル等の整備
安全管理体制の整備、教育・訓練の実施、等

安全管理計画事項(抜粋)、安全評価委員会報告 (H19年11月16日)の留意事項(抜粋)

○自治体等への連絡体制の確立の強化

- ・連絡体制の強化： 衛星電話(ファクシミリ)の整備、訓練の実施
- ・岐阜県・三市(土岐市・多治見市・瑞浪市)との協定書等締結後も、市民説明会を三市において継続的に実施

○中性子線・ガンマ線、トリチウム対策

- ・高精度測定器(フィッションチェンバー)等の測定器の整備
- ・管理区域の設定
- ・本体室地下の管理区域境界の貫通孔の閉止処理
- ・トリチウム除去装置の整備
 - トリチウム濃度測定モニター等の整備と一体
 - 保管槽などトリチウム水を引き取ってもらうまでに必要な設備、機器の整備
- ・保守を行うための設備、機器の整備

○安全管理体制の構築

- ・協定書・覚書の締結を受けて、**県・三市が安全監視委員会を設置**
- ・放射線総合監視システムの整備
 - 異常時に運転を停止するインターロックシステム等と一体
- ・日常、災害・事故時の対応マニュアル等の整備
- ・安全管理体制の整備、教育・訓練の実施

衛星電話の整備

地元自治体への災害時の連絡のため、バッテリー(非常用電源)を具備した衛星電話(ファクシミリ)を整備する

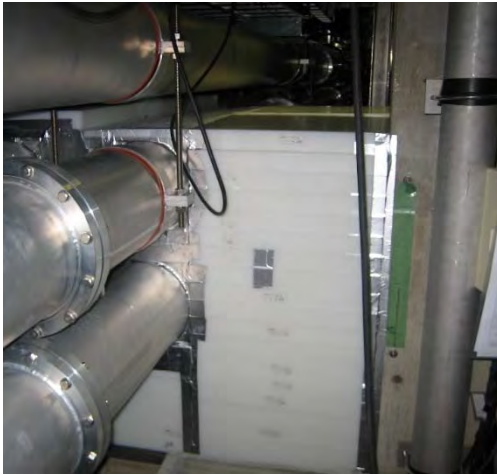


- ・ 土岐市、多治見市、瑞浪市及び岐阜県(東濃県事務所)に各1台、衛星電話を設置する。
- ・ 衛星電話の端末はKDDIの「インマルサット」(ファクシミリ送受信のための周辺機器を含む)。
- ・ 試験運用を開始するため、研究所と岐阜県(東濃県事務所)に設置を完了。現在、土岐市に設置するための手続き中。
- ・ 多治見市と瑞浪市に対しても、平成27年度中に導入を予定。

KDDI「インマルサット」

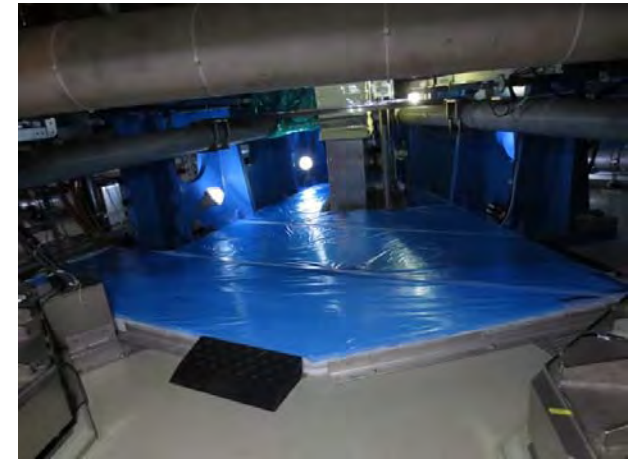


中性子・ガンマ線対策

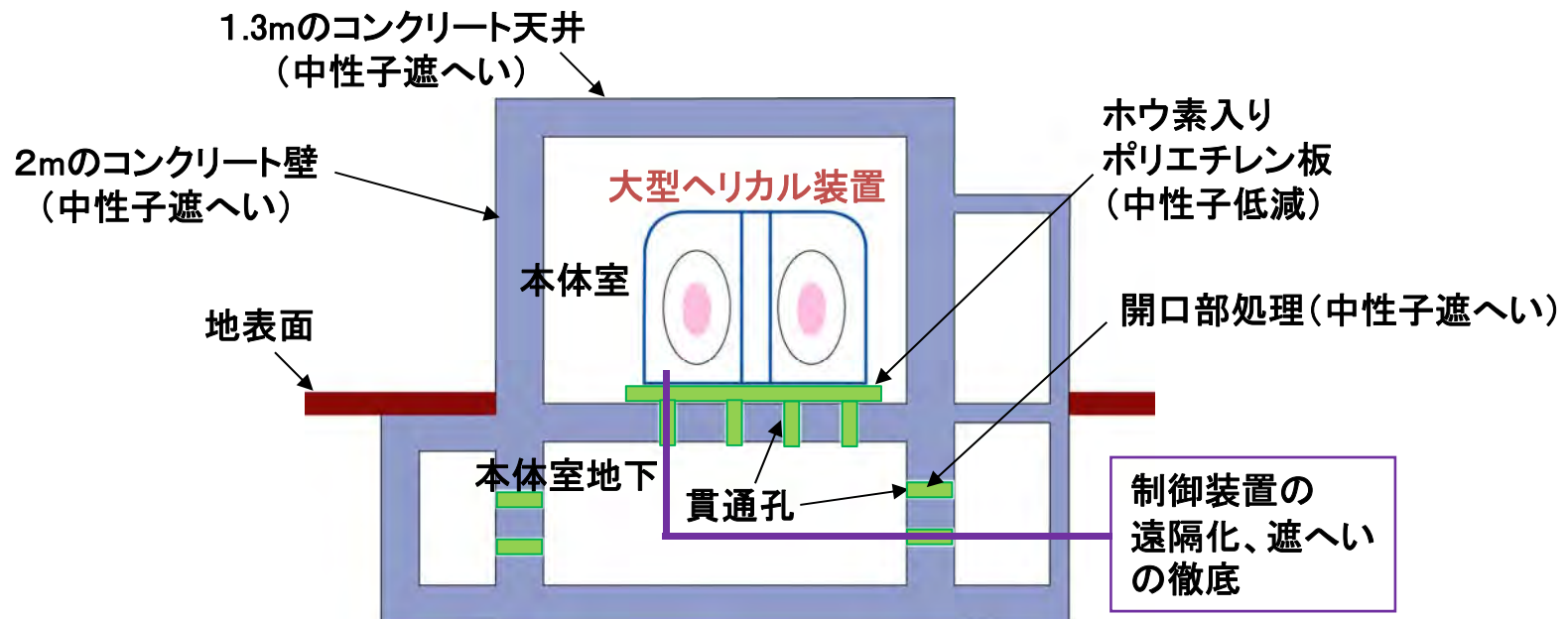


貫通孔埋めの様子

- 北側・南側壁の貫通孔の閉止処理はほぼ終了
- ポリエチレン板を床面に順次敷設
- 各機器の遮へい、遠隔制御化、不要機器の撤去等を順次実施



床上へのポリエチレン板の敷設

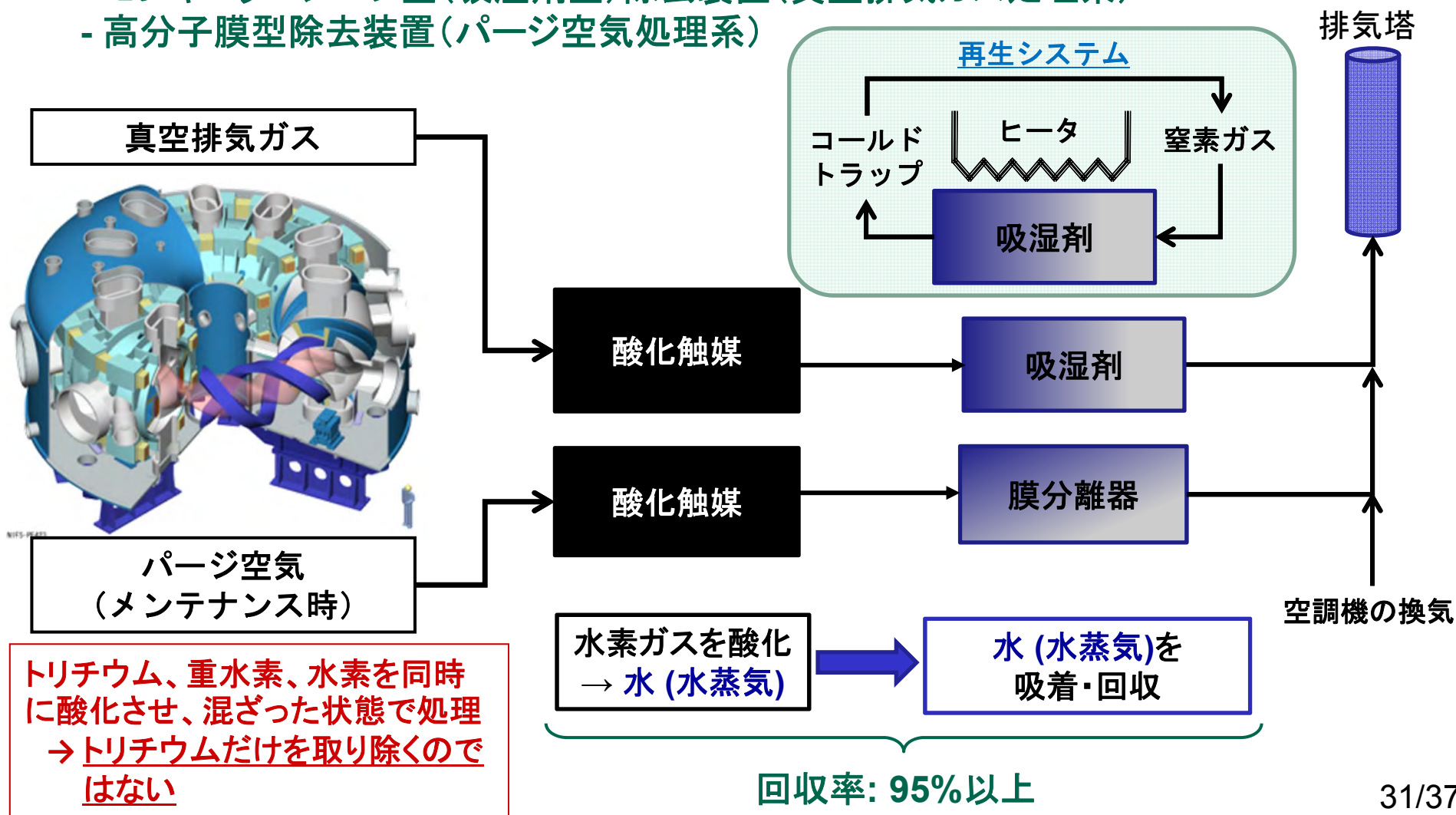


トリチウム除去装置(排気ガス処理システム)

H26年度に整備、今年度(H27)は試験調整及び軽水素実験で性能確認を行う予定

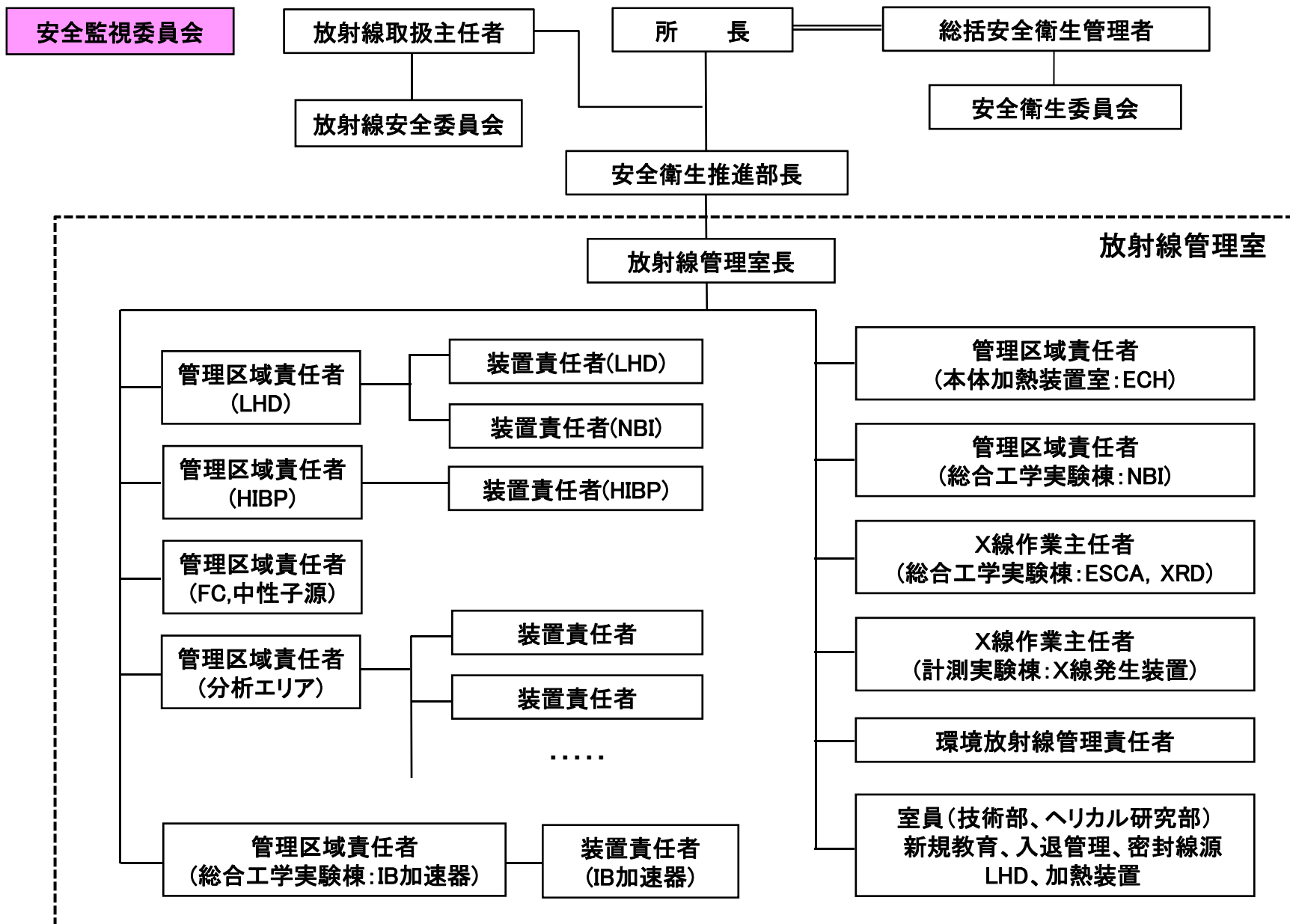
2種類のトリチウム除去装置を設置、いずれも酸化触媒・吸着方式

- モレキュラーシーブ型(吸湿剤型)除去装置(真空排気ガス処理系)
- 高分子膜型除去装置(パージ空気処理系)



トリチウム、重水素、水素を同時に酸化させ、混ざった状態で処理 → トリチウムだけを取り除くのではない

放射線安全管理組織（重水素実験対応）の整備



核融合科学研究所安全監視委員会

- ・平成25年3月28日に県・三市と締結した「核融合科学研究所周辺環境の保全等に関する協定書」と同時に取り交わした覚書に、県・三市が安全監視委員会を設置することを明記
- ・研究所が重水素実験を実施するにあたって、研究所周辺における環境を保全し、住民の安全を確保するために、県・三市が各議会の議決を経て、平成26年11月1日に、安全監視委員会を共同設置
- ・平成27年1月28日に第1回の安全監視委員会を、6月4日に第2回を開催

監視委員会の構成

- ・岐阜県が選任した専門家6名
- ・土岐市、多治見市、瑞浪市がそれぞれ1名選任した住民代表(計3名)

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)
中性子線量、トリチウム濃度等の測定
- ・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
- ・その他必要な事項の実施

放射線管理関連法令に基づく所内規程の作成 運転、災害・事故時の対応マニュアル等の整備

放射線障害
防止法



障防法施行細則



研究所
放射線障害
予防規程

装置管理細則

基準

運転マニュアル等

災害・事故時
マニュアル

放射線障害防止法	放射線障害防止法施行規則	核融合科学研究所 放射線障害予防規程 (保安規定、防護規定)	装置管理細則	基準	運転マニュアル他	災害時対応 マニュアル
第21条 放射線障害予防規程	第21条 放射線障害予防規程	第5条 所長は、法及びこの規程に定める事項の実施に関し、装置の維持・管理に関する取扱い及び運用基準等を、維持管理細則として別に定めるものとする	LHD実験計画 大型ヘリカル実験装置に係る通報連絡に関する規程 放射線管理基準 大型ヘリカル実験装置維持管理細則 ・実験実施 ・排気 ・排水 ・作業環境 (空間線量、空気中濃度、表面密度) ・物品搬出入 ・試料取扱	LHD実験計画 通報・連絡に関する基準 放射線管理基準 実験実施 排気 排水 作業環境 (空間線量、空気中濃度、表面密度) 物品搬出入 試料取扱	運転監視マニュアル 入退管理マニュアル 真空容器内作業マニュアル ポート作業マニュアル 真空系取扱マニュアル 本体室作業マニュアル 本体室清掃チェックリスト トリチウム回収マニュアル NBI取扱マニュアル 物品搬出入マニュアル 試料取扱マニュアル 分析エリア作業マニュアル	防災マニュアル
許可届出使用者は放射線障害を防止するための文部科学省令ので定めるところにより放射性同位元素若しくは放射線発生装置の使用を開始する前に、放射線障害防止規程を作成し、文部科学大臣に届け出なければならない。	放射線障害予防規程は、次の事項について定める		教育訓練実施細則	教育訓練実施基準 ・真空容器内作業 ・LHD本体真空系取扱 ・NBI取扱 ・ポート作業 ・本体室作業 ・周辺点検 ・試料取扱	LHD運転マニュアル 本体室作業マニュアル NBI運転マニュアル ECH運転マニュアル LHD運転マニュアル 計測器運転マニュアル 入退管理装置運転マニュアル 放射線総合監視装置運転マニュアル トリチウム除去装置運転マニュアル 分析機器運転マニュアル	
放射線取扱主任者(第34条)	(1)取扱に従事する者に関する職務及び組織に関すること	第7条、第18条				
放射線取扱主任者の代理者(第37条)	(1)の2 放射線取扱主任者及び安全管理に従事する者の職務及び組織に関すること	第7条～第13条				
使用の許可の基準(第6条)	(1)の3 放射線取扱主任者の代理者の選任に関すること	第14条				
使用の基準(第15条)	(1)の4 放射線施設の維持及び管理に関すること	第21条、 第23条				
保管の基準(第16条)、運搬の基準(第17条)、廃棄の基準(第18条)	(1)の5 放射線施設の点検に関すること	第24条、 第25-4条～第25-11条 第25-15条～第25-20条				
測定(第20条)	(2)放射性同位元素及び放射線発生装置の使用に関すること	第25-1条～第25-2条、 第25-12条～第25-13条				
教育訓練(第22条)	(3)放射性同位元素等の受入れ、払出し、保管、運搬又は廃棄に関すること	第27条、第28条、第29条、 第31条				
健康診断(第23条)	(4)放射線の量及び放射性同位元素による汚染の状況の測定並びにその測定の結果について実施すべき措置に関すること	第32条				
	(5)放射線障害防止のために必要な教育及び訓練に関すること					
	(6)健康診断に関すること					

災害・事故時マニュアル
運転監視マニュアル
入退管理マニュアル
真空容器内作業マニュアル
ポート作業マニュアル
真空系取扱マニュアル
本体室作業マニュアル
トリチウム除去装置・回収マニュアル
物品搬出入マニュアル、等

訓練の充実

防災訓練

- ・年1回研究所の全構成員で実施
- ・土岐市南消防署に参加頂いている他、地元自治体とも通報訓練を実施
- ・自衛消防隊の工作班に、放射線管理室が組み込まれており、放射線の業務分担に従って対応

LHD消火訓練

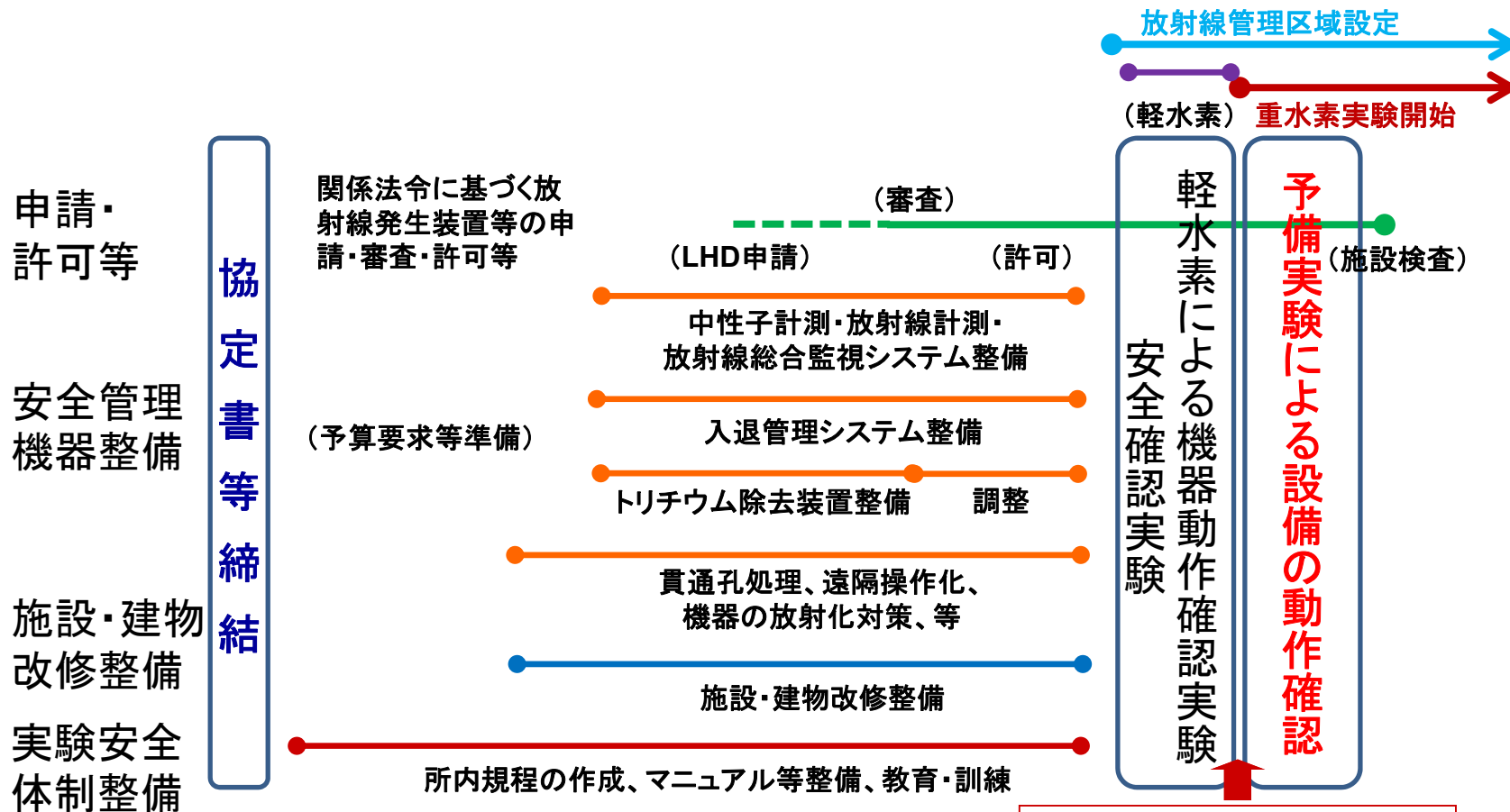
- ・LHD実験期間中に、本体室内で火災が発生した想定で消火訓練を毎年実施
- ・H26年度は4回実施、内2回は重水素実験を想定して、緊急時の入室手順等を確認して実施



LHD消火訓練の様子

重水素実験開始に向けた整備計画 —放射線安全管理等整備—

H25年度(2013) ————— H28年度(2016)



予備実験: 本格的な重水素実験に先立って行い、安全管理機器等の機能等を確認する実験

安全性、機器動作、手順、訓練等が全て正常・適切であることを確認

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

140億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

30年以内の発電実証をめざして、今、研究は着実に進んでいます