

地上の太陽の実現に向けて

—核融合研究の現状—

自然科学研究機構 核融合科学研究所

小林 真

2020年10月17日大学共同利用機関シンポジウム2020(オンライン)

世界には人口増加によるエネルギー需要増加、地球温暖化など、解決しなければならない問題がたくさんあります。

核融合発電が実現すれば、これらの問題を一気に解決できる可能性があります。

1. 燃料は無尽蔵

主要なエネルギー資源の可採年数（2018年BP統計、IAEA「Uranium2016」）
石油50年、天然ガス53年、石炭134年、ウラン102年

核融合炉に必要な資源は**重水素**と**リチウム** ⇒海水から無尽蔵に取り出せる

⇒燃料が偏在しない、戦争のタネにならない

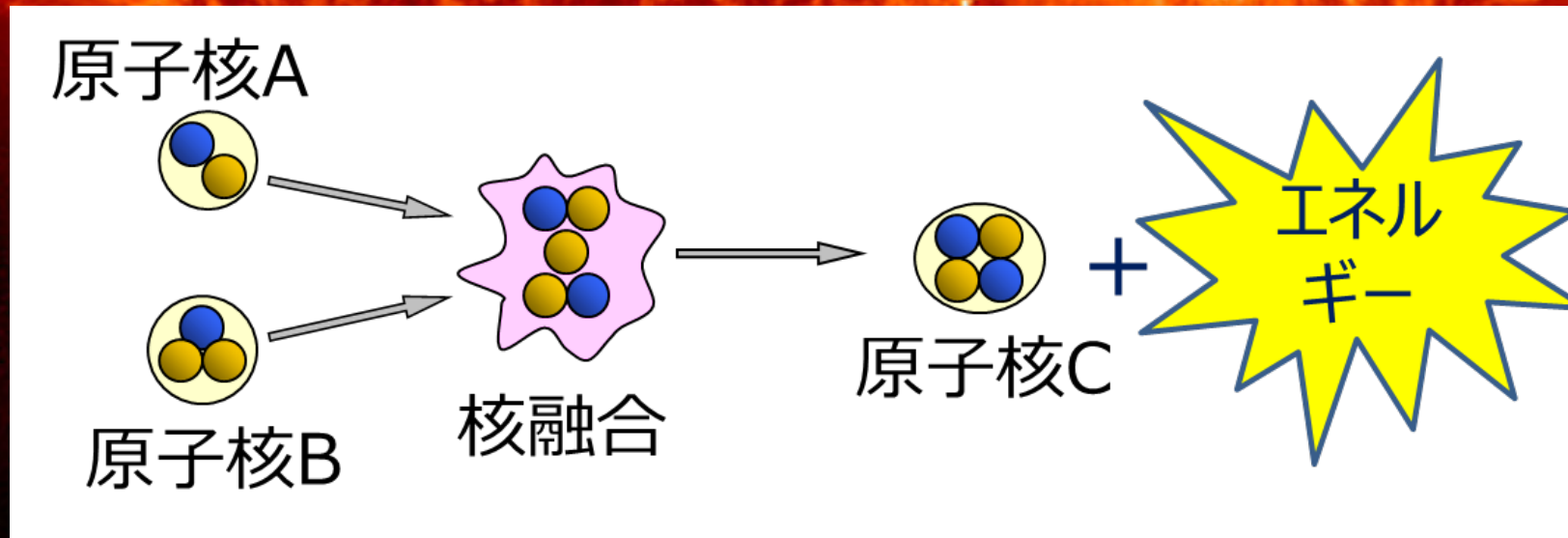
2. 制御することが容易

暴走することはありません。確実に停止する。

3. 二酸化炭素を出さない、など

「夢のエネルギー」と呼ばれる核融合研究の現状と、核融合科学研究所で行われている最先端研究について紹介します。

核融合とは？



核融合とは、2つの原子核が合体して別の原子核になることです。この時、エネルギーが発生します。

太陽などの恒星では、水素原子核同士が核融合反応を起こし、
ゆっくりと、約46億年燃え続けています。
また、太陽は地球の33万倍の重さを持ち、
その重力(地球の28倍)で粒子を閉じ込めています。



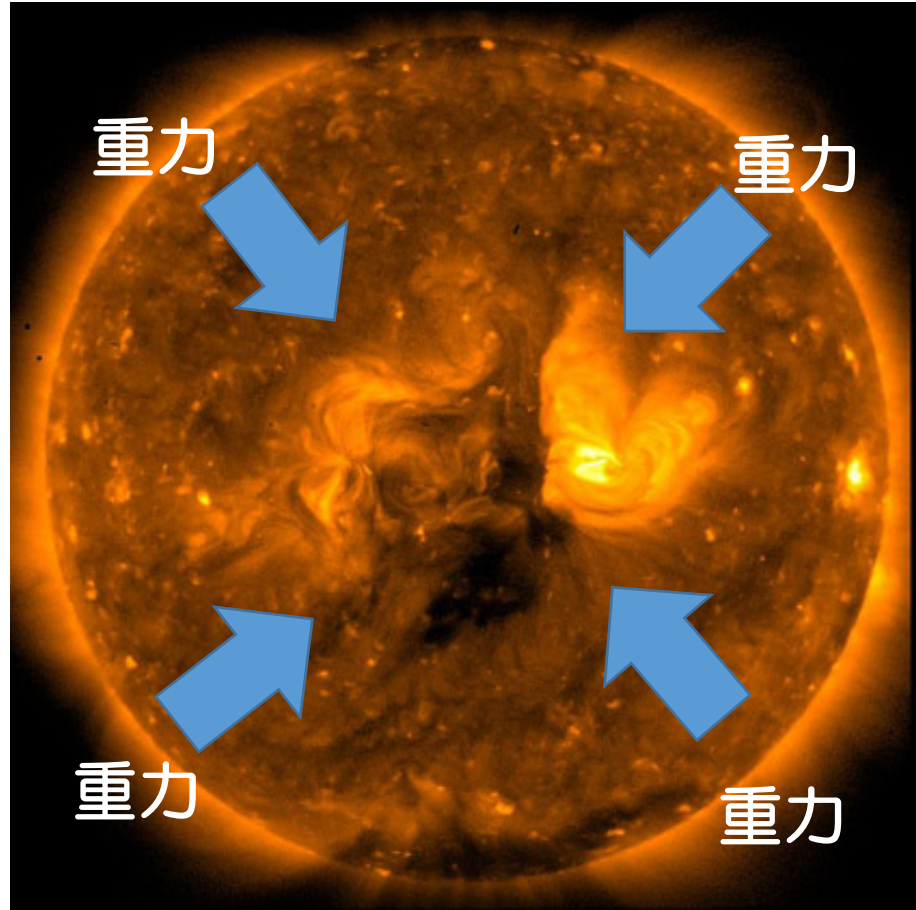
「地上の太陽」は可能か？

地上の太陽とは？

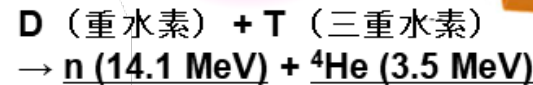
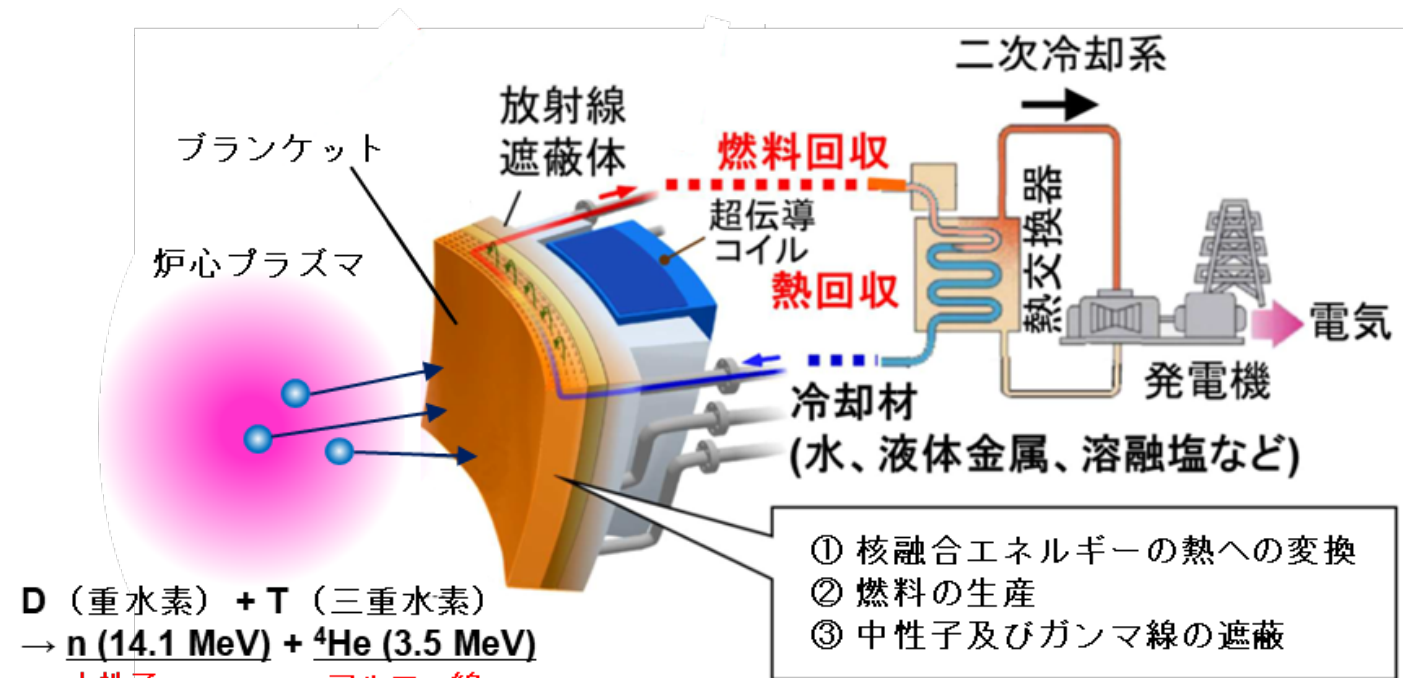
核融合に必要な超高温の条件では物質はプラズマの状態になります。

太陽 約 2×10^{30} kg

地上の太陽 0.1g以下



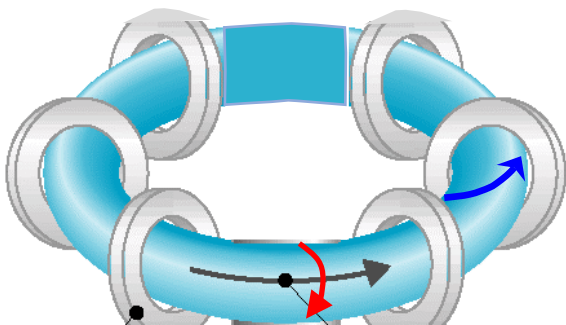
(c) JAXA/国立天文台



中性子: 発電・燃料生産
アルファ線: プラズマの自己加熱

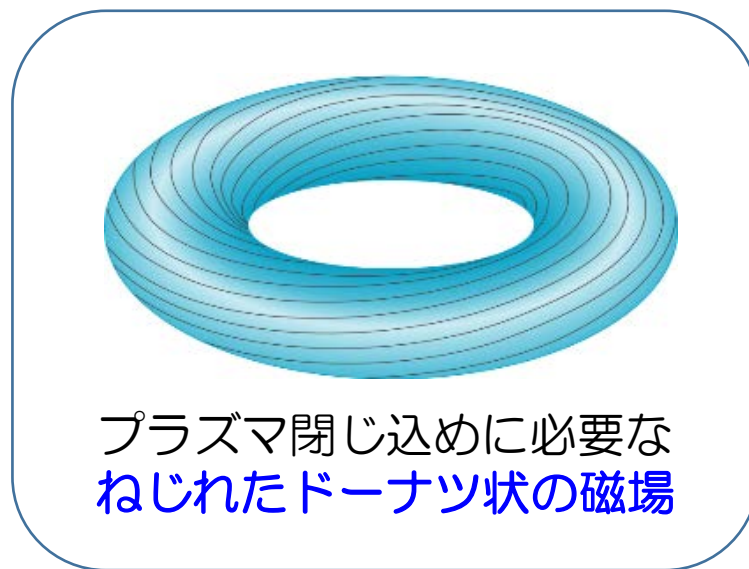
核融合反応で発生する粒子及びγを閉じ込める！
磁場でプラズマを閉じ込める！
プラズマを維持しつつ燃料生産・発電が可能なシステム

核融合炉を実現させるためには



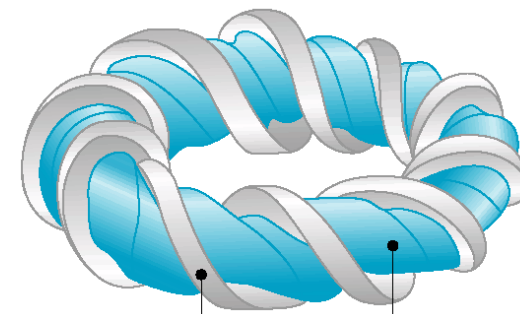
トカマク

プラズマ中に
電流を流す



プラズマ閉じ込めに必要な
ねじれたドーナツ状の磁場

コイルを
ねじる



ヘリカル

特長：核融合炉の必須条件達成
課題：定常運転の確立

特長：定常運転が可能
課題：プラズマの高性能化

核融合の
2大課題

=

高性能プラズマ
核融合炉の必須条件

- 温度 1億2,000万度以上
- 密度 100兆個/cm³以上
- 閉じ込め時間 1秒以上

↓ 実証

国際熱核融合実験炉
ITER (トカマク)

+

定常維持
(商用炉に必須)

↓ 実証

LHD (ヘリカル)
JT-60SA (トカマク)

世界中で研究が進められている

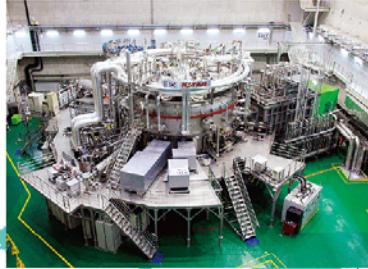
ヘリカル

W7-X
Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP), Germany



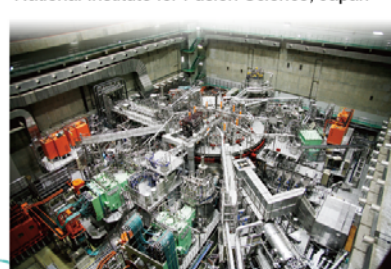
トカマク

KSTAR
National Fusion Research Institute (NFRI), Korea



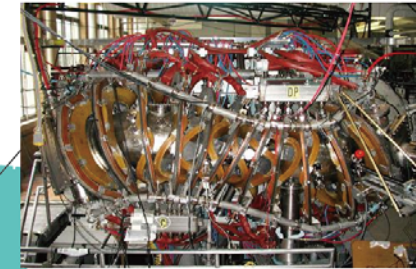
ヘリカル

LHD
National Institute for Fusion Science, Japan



ヘリカル

HSX
College of Engineering, University of Wisconsin, Madison, U.S.A.



NSTX-U
Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL), U.S.A.



トカマク

Photo by Elle Starkman
Oak Ridge National Laboratory (ORNL), U.S.A.

Dutch Institute for Fundamental Energy Research (FOM) (DIFFER), Netherlands

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), France

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Germany

Aix-Marseille University (AMU), France

Institute of Ionized Gas (IGI), Italy

CONSORZIO RFX, Italy

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Russian Research Center, Kurchatov Institute (KI), Russia

A. M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences (GPI), Russia

National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology (KIPT), Ukraine

Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion (IPPLM), Poland

HiLASE Centre, Institute of Physics CAS (FZU), Czech

Chiang Mai University, Thailand

Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), Thailand

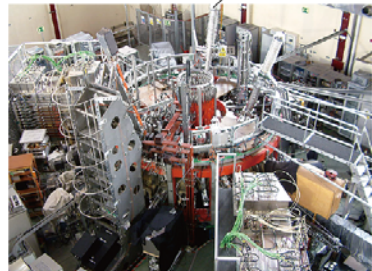
Peking University, China

Center for Energy Science and Technology Advanced Research, University of California, Los Angeles (UCLA), U.S.A.

Institute for Fusion Studies, The University of Texas at Austin (IFS), U.S.A.

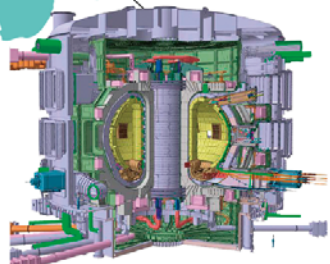
Southwestern Institute of Physics (SWIP), China

Australian National University (ANU), Australia



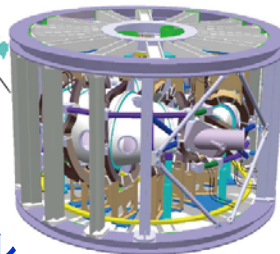
ヘリカル

TJ- II
National Research Center for Energy, Environment and Technology (CIEMAT), Spain

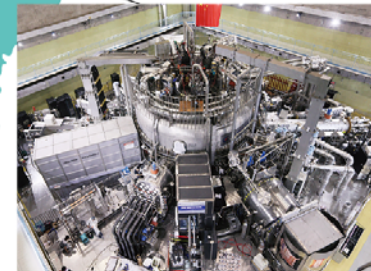


ITER トカマク
The ITER International Fusion Energy Organization (ITER), France

ヘリカル



CFQS
Southwest Jiaotong University (SWJTU), China



EAST
Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP), China

トカマク



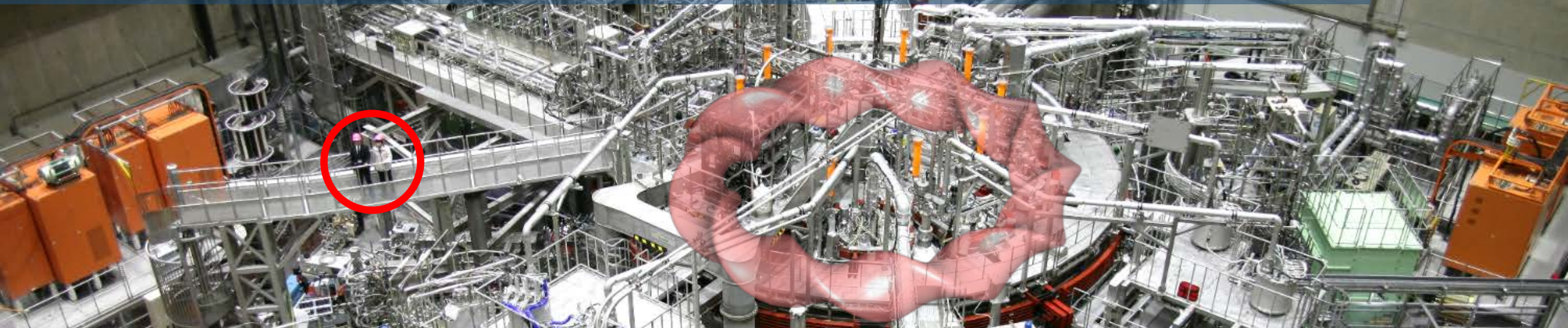
核融合科学研究所は大学共同利用機関として国内外の大学・研究所と共にヘリカル型核融合炉の実現へ向けた学術研究を展開しています。

また、教育機関として、次世代の優れた人材を育成し、社会と連携しながら核融合プラズマに関する教育を推進しています。

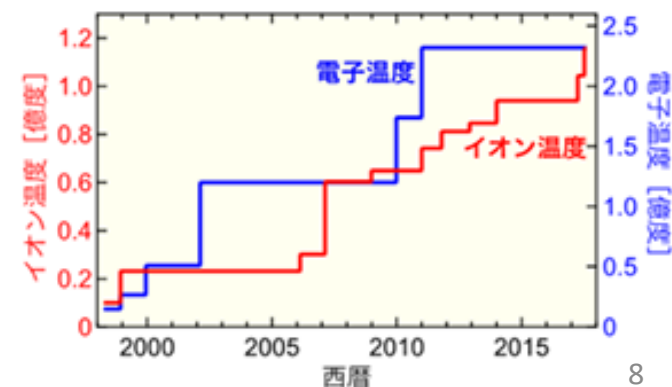
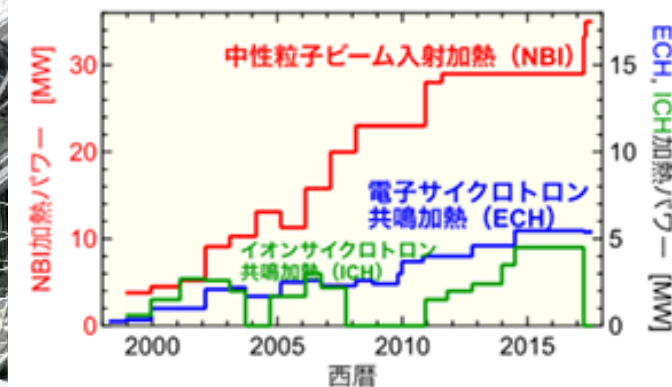


大型ヘリカル装置 LHD (本体室)

世界最大級の超伝導核融合プラズマ実験装置
約20年に渡る軽水素実験の後、2017年3月7日より重水素ガスを用いた
プラズマ実験(重水素実験)を実施



装置の高さ：約9m
装置の直径：約13m
装置の重量：約1500トン



大型ヘリカル装置（真空容器内）

らせん型の超伝導コイル（ヘリカルコイル）によりドーナツ型のねじれた磁力線のカゴをつくることでプラズマを閉じ込める

47分39秒放電 #124579



| | |
|--------|----------------------|
| ガス | 軽水素 |
| イオン温度 | 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しています

重水素実験を開始

重水素ガスを用いて高温度を実現し、目標達成を目指す



2017年3月7日、重水素実験を開始

重水素プラズマ点火



重水素ガスによる最初のプラズマ

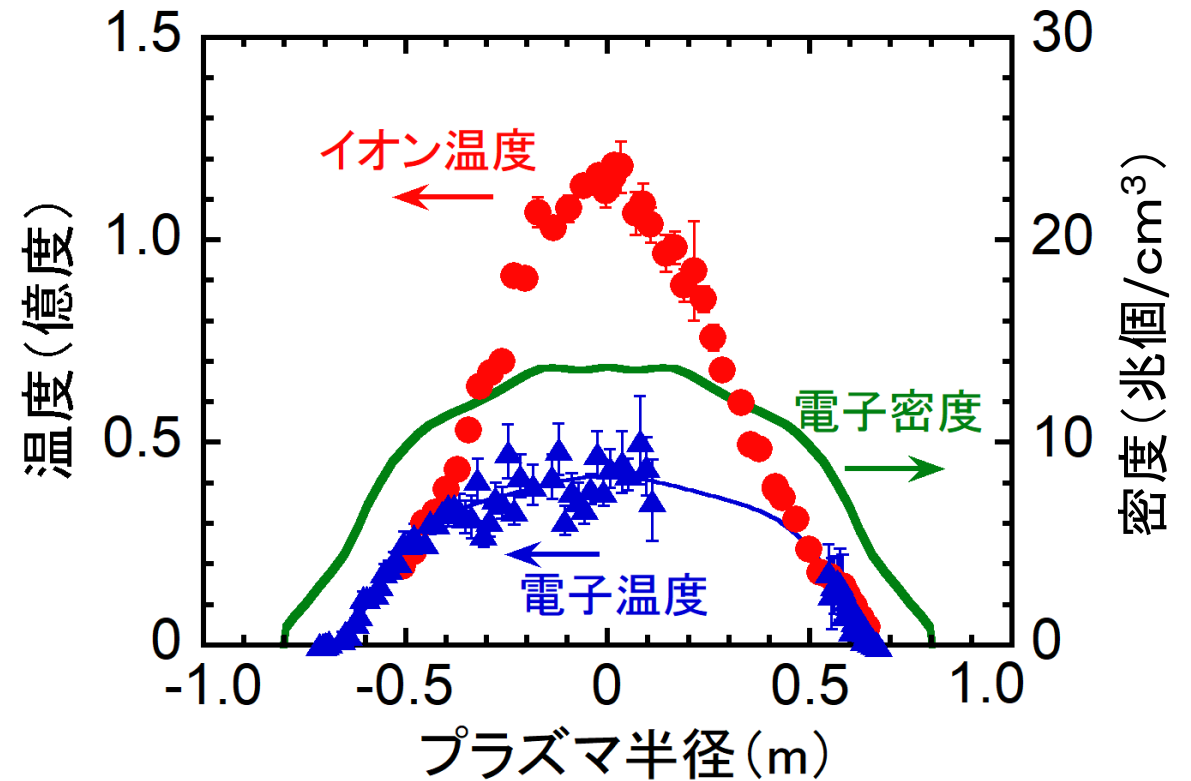
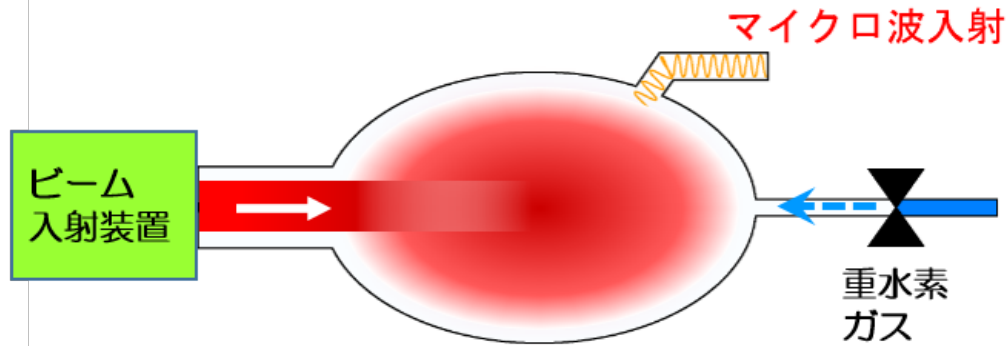
イオン温度1億2,000万度の達成

重水素実験を開始

- 重水素のプラズマ実験を2017年から開始

運転の調整

- 加熱装置の調整、入射タイミングの最適化
- ガスの入射量、タイミングの最適化

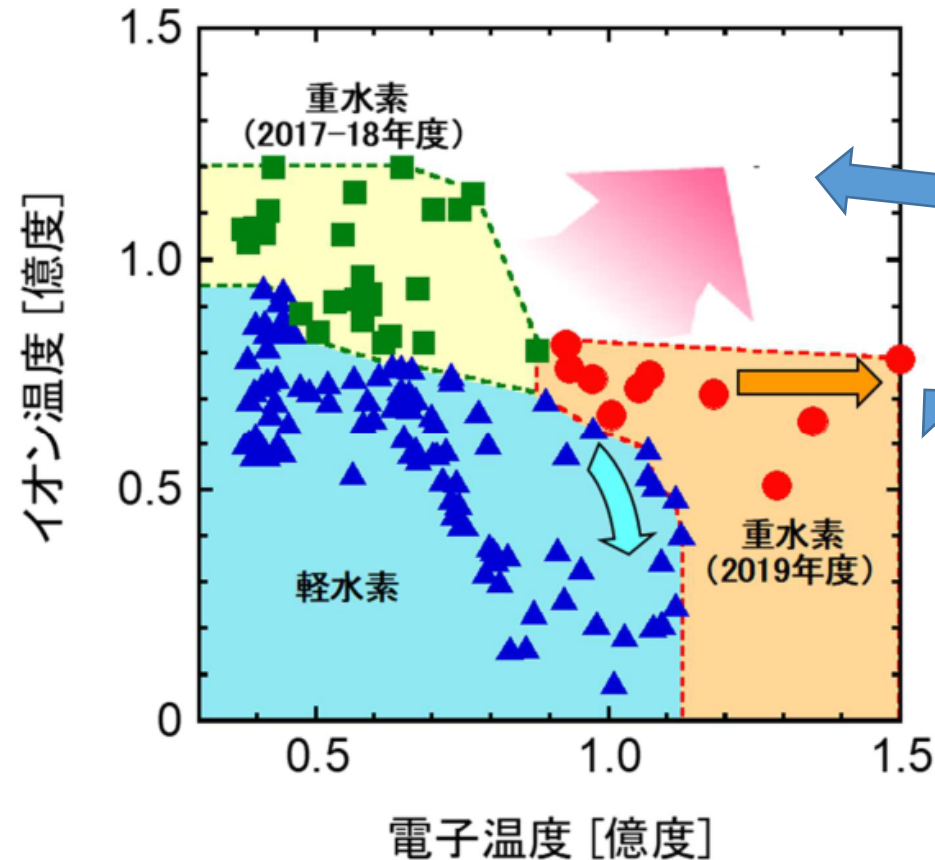
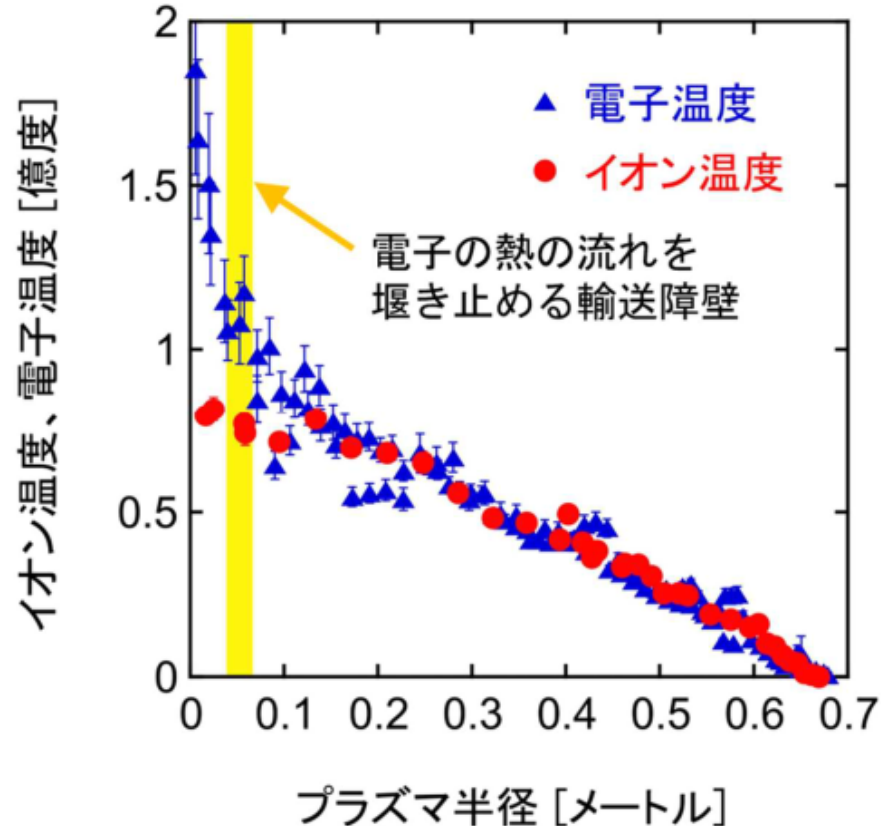


核融合炉の必須条件の一つである
イオン温度：1億2,000万度を世界で初めてヘリカル装置で達成
(密度：13兆個/cm³)

重水素実験により核融合プラズマ研究が大きく進展中

2019年度の成果：輸送障壁形成により高性能プラズマを実現

- イオン温度と電子温度が共に1億2,000万度以上のプラズマの実現が必要。
- 熱の流れを堰き止める輸送障壁を形成することで電子温度1億5,000万度を達成。



LHDの最終目標である、イオン温度と電子温度が共に1億2,000万度以上の同時達成を目指す。

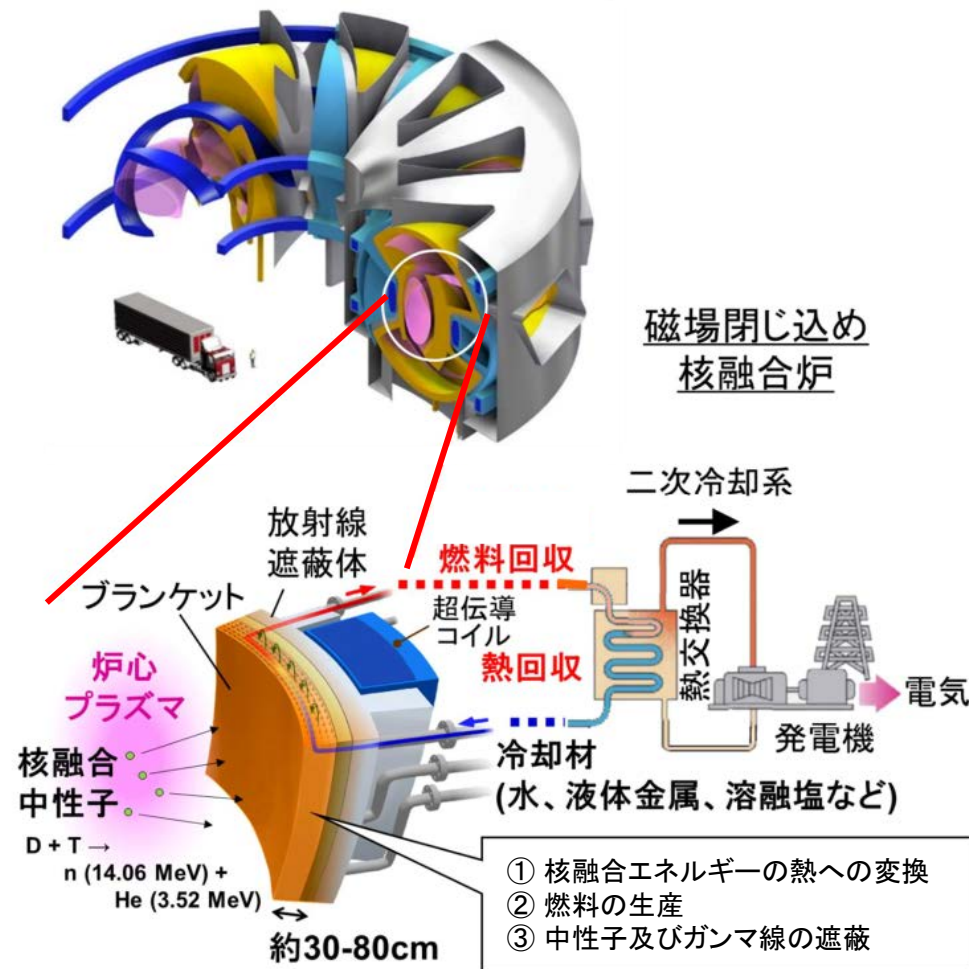
高イオン温度を保ったまま高電子温度を実現。

総合的な核融合研究を展開

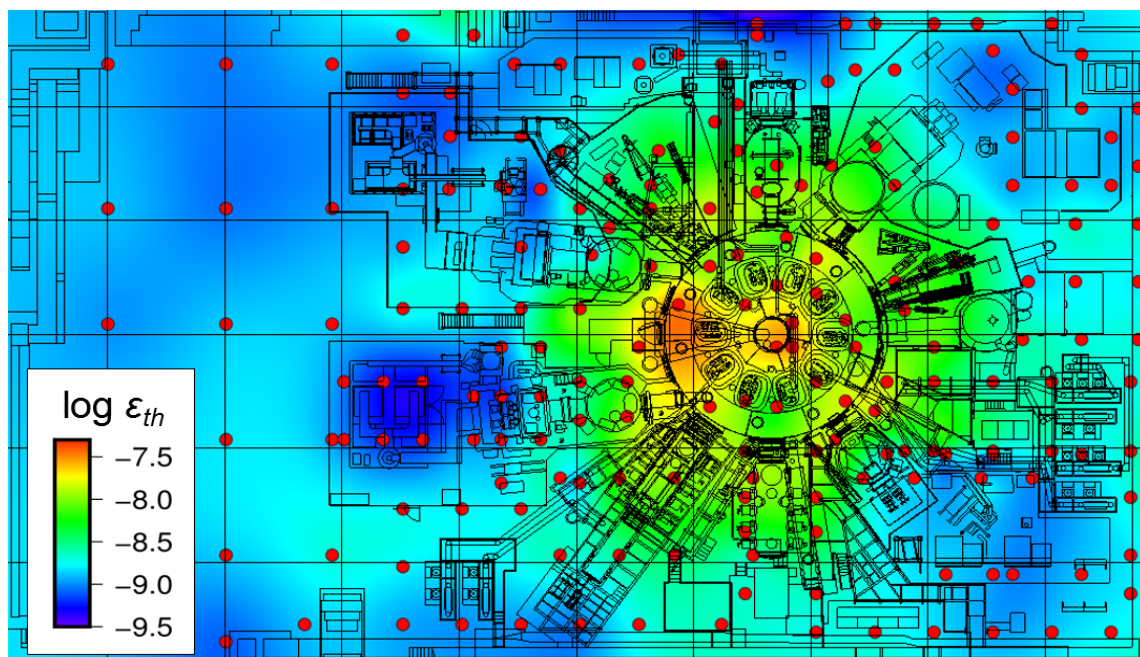
装置規模でのプラズマ挙動やプラズマ内の複雑な現象をスーパーコンピュータの中に再現し、核融合プラズマ現象を支配する物理法則の理解を目指したシミュレーション研究や、将来のヘリカル方式の核融合炉を想定した概念設計と、その開発に必要な工学研究を進めています。

- ◆ 核融合炉においてはプラズマ内での核融合反応により高エネルギーの中性子が発生し、このエネルギーを用いて発電を行います。
- ◆ 広い空間に渡る散乱中性子の分布の制御・管理方法の確立や、中性子測定によるプラズマの状態診断に使用する高い耐放射線性を有する中性子モニターの開発が必要です。

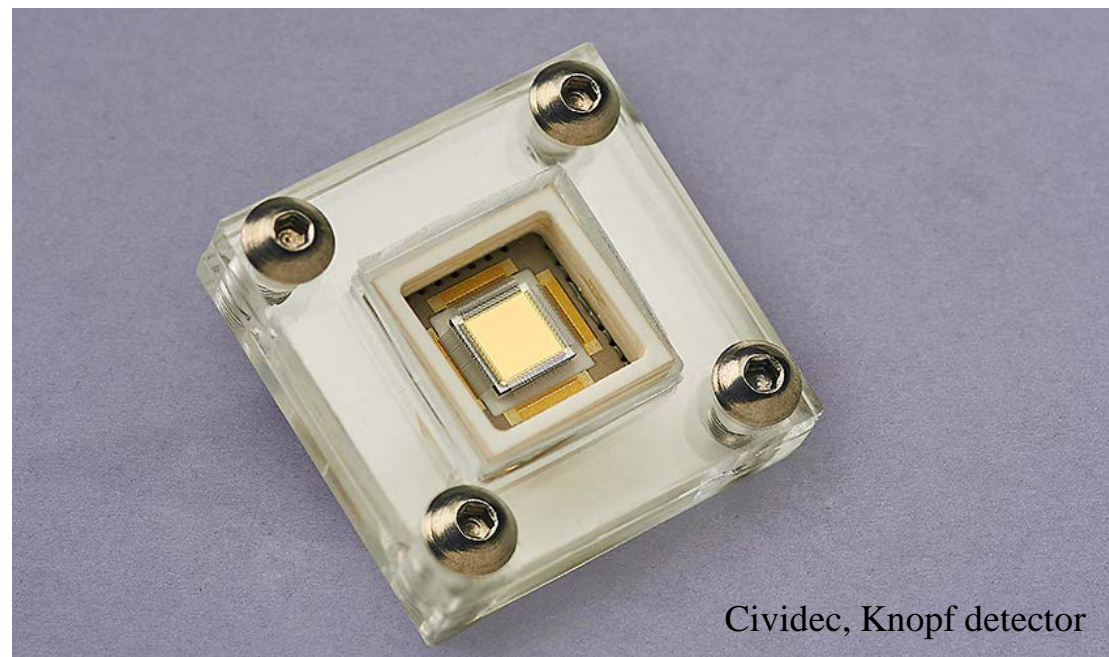
核融合炉の実現のため、
中性子の空間分布・エネルギー評価法の確立や人工ダイヤモンドを使用した中性子検出器の開発を行っています。



大型ヘリカル装置の重水素実験で発生する熱中性子の空間分布を放射化法および放射線イメージング手法により評価しました。これにより周辺機器の誤動作など放射線影響評価やその安全管理の精度が向上しました。
さらに、この中性子場を生かし、核融合炉での利用が検討されている先進中性子検出器である単結晶CVDダイヤモンド検出器の特性評価を行っています。



LHD本体室の鳥観図と熱中性子束分布。赤い点は測定点。



Cividec, Knopf detector

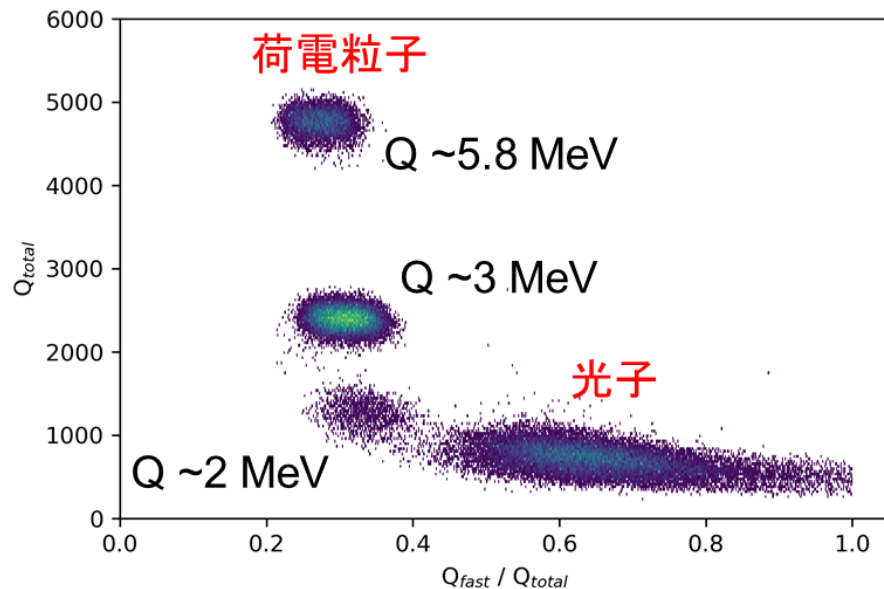
単結晶CVDダイヤモンド検出器

人工ダイヤモンド中性子検出器

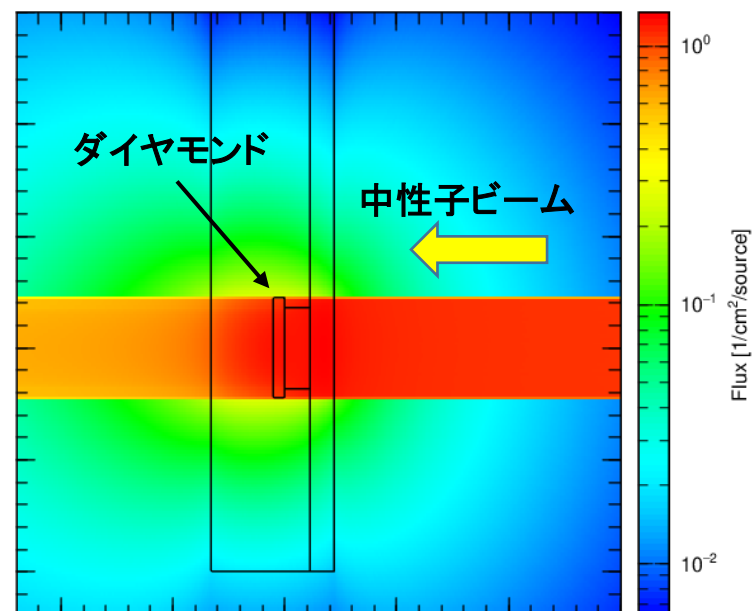
ダイヤモンドは耐放射線性、耐熱性が高いため将来の核融合炉における中性子モニタとして有望視されています。

ダイヤモンド内への放射線入射により誘起される電流を計測し、電流の流れ方、大きさから入射した放射線の種類・エネルギーを推定するプログラムを作成し、その原理実証研究をしています。

モンテカルロ法という乱数を用いたシミュレーション技法を使用し、検出効率の評価を行うなど、包括的な検出器の特性評価研究を進めています。



ダイヤモンド検出器で弁別測定された各粒子とそのエネルギー
(Qは粒子のエネルギーを表す)

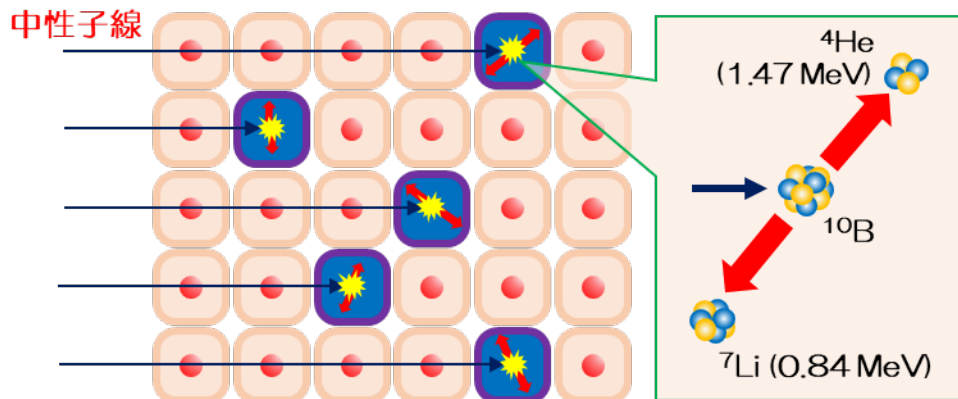


中性子のダイヤモンドへの輸送シミュレーション

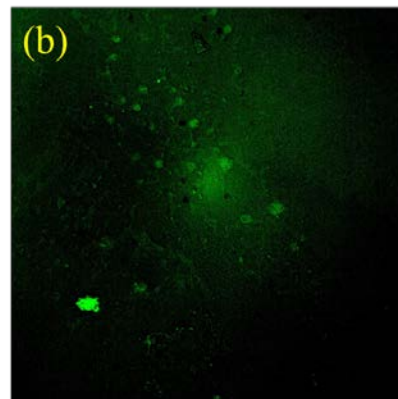
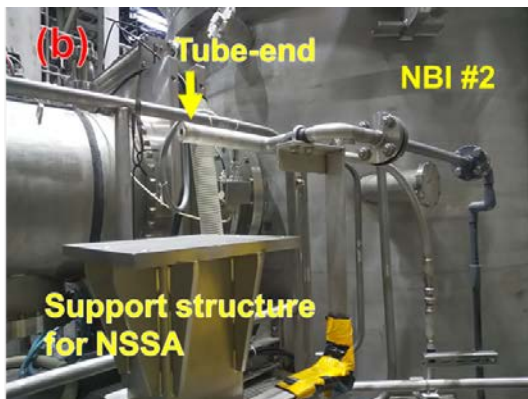
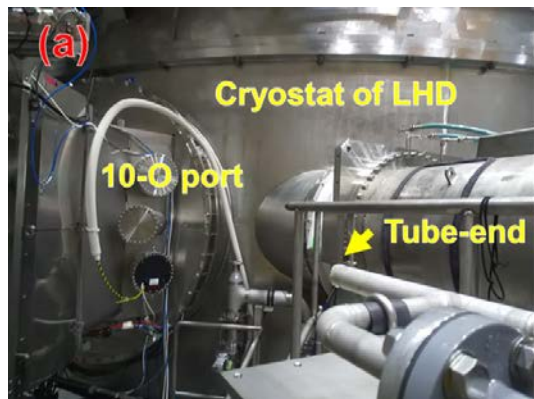
核融合環境を医療研究へ応用

自然科学研究機構の支援の下、基礎生物学研究所、名古屋大学、藤田医科大学、徳島大学との共同研究にて、大型ヘリカル装置の重水素プラズマ内で発生する中性子を有効活用した放射線治療の基礎研究を開始しました。

ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)



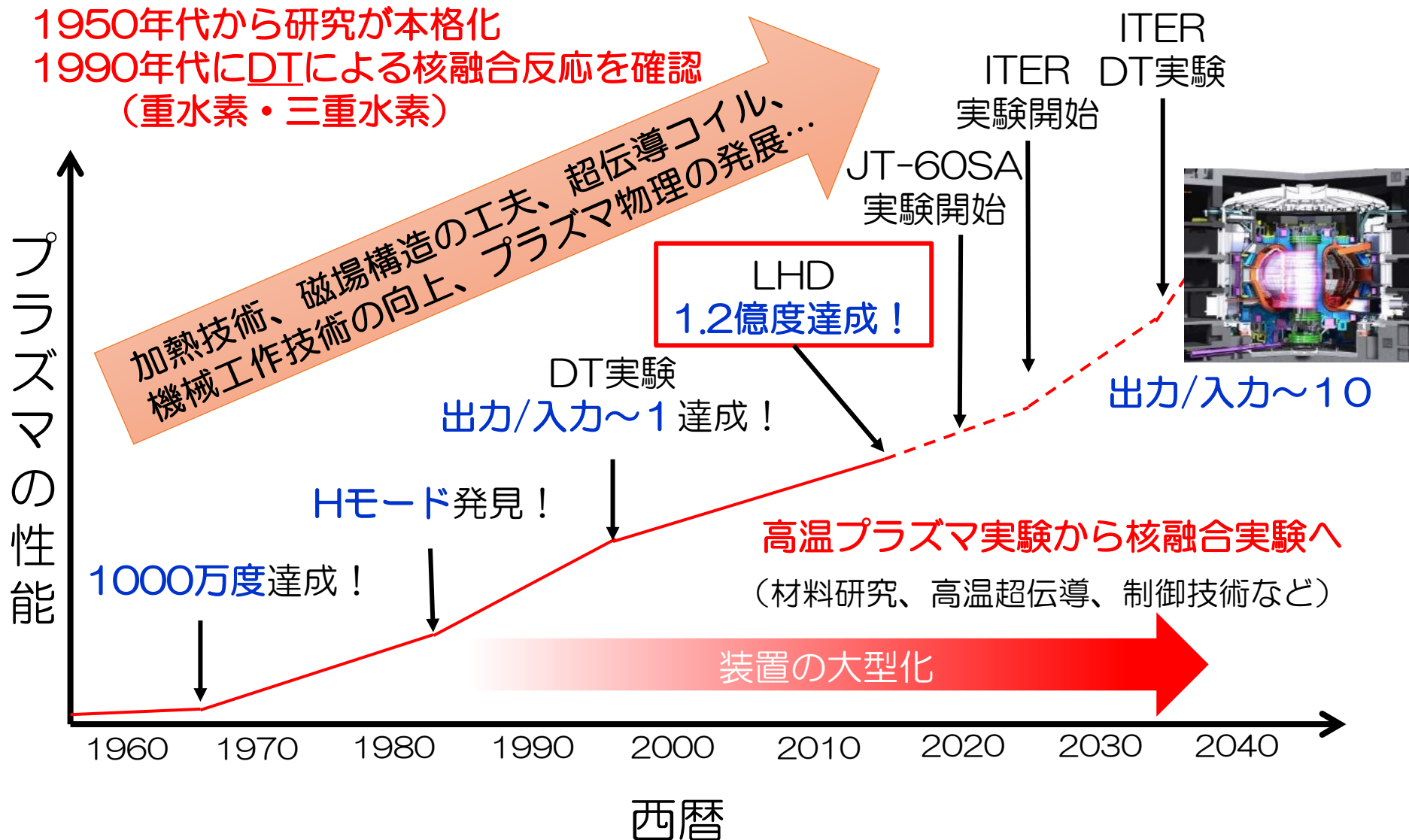
生物・物理・医学・工学分野の研究者が連携することで、BNCTの治療効果を研究しています。また、単結晶CVDダイヤモンド検出器をBNCT用リアルタイム中性子モニターに応用するなど、核融合研究で培った技術の異分野へ応用・展開を積極的に行っています。



核融合研究は着実に進展

いくつかのブレークスルーを経て、着実に研究が進展

1950年代から研究が本格化
1990年代にDTによる核融合反応を確認
(重水素・三重水素)



- ◆ 核融合研究は、「地上の太陽」をつくり、人類に無尽蔵のエネルギーをもたらす挑戦です。
- ◆ 核融合科学研究所では大型ヘリカル装置を中心に、核融合プラズマ実験研究、理論シミュレーション研究、核融合工学研究を有機的に連携させながら、核融合発電の実現を目指した研究・教育を推進しています。
- ◆ 核融合発電の実現のため、中性子の空間分布・エネルギー評価法の確立や先進中性子検出器の開発を行っています。

核融合研究は着実に前進していますが、その実現のためにはさらなる研究が必要です。一緒に地上の太陽を実現してみませんか？

「地上の太陽」の実現に向けて、
ぜひ一緒に研究しましょう！

