

核融合の研究開発

狐崎晶雄
(元日本原子力研究所・核融合)

2021年 10月 30日
根津科学の会

1

核融合とは

- 今の原子力は核「分裂」
- 重い原子核(ウラン235)を分裂させるのは核分裂
- 軽い原子核(重水素*:D と 三重水素:T)を融合させるのが核融合
- 核融合はまだ研究開発の途上 実用化されていない
- 核融合は難しい が、安全性高い
- 本格的な燃焼実験を国際協力でマルセイユ(フランス)の近くで建設中
- (ITERの第1代、第2代Director は日本人)
- 実用化できれば世界のエネルギー問題は解決(燃料は海水から。世界中、1億年は大丈夫)

2

Why fusion ?

- 豊富な資源 重水素、リチウム(ともに海水から) 1億年はもつ
→ 原油などを輸入する必要なし
 - 安全
 - 発生がすぐ止められる(制御器少ない)
 - 異常があったら自動的に止まる
 - 放射性物質ある(発生する)が外部に出る心配は極小
 - 軍事利用できない
 - 日本が国際的に主導権をとれる貴重な分野
 - ただし、... 日本にエネルギーを与えたら世界の賢威
→ 国際協力にすることが不可欠
 - 個人的理由
 - 卒業は半導体: しかし、当時の半導体研究は欧米追従。本邦初演だけだった(と筆者には見えた)
 - 「世界初」をやりたい → 大学院から核融合
大学院(1967-)ではレーザーでプラズマ生成 超伝導も「世界初」で博士論文 → 数年後に米国で博士課程(大卒)
 - 日本原子力研究所(原研) 副総長は 核融合(トカマク型)
- (注): 1960:初のレーザー、1965 ノーベル賞が米・ソのレーザーに。孤獨は大学院1967-72 で約10台のレーザーを自作。

3

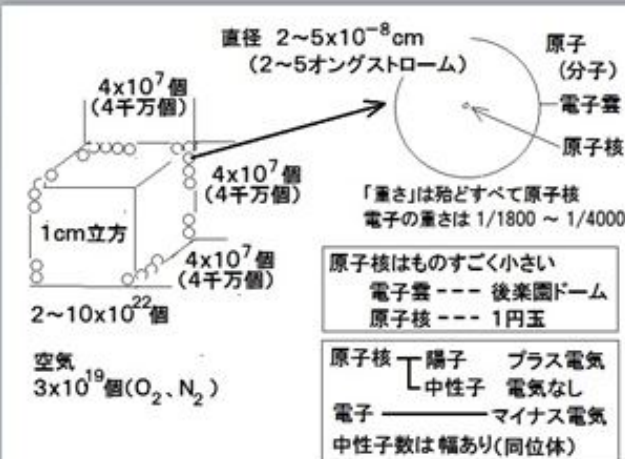
難しさ

- 超高温が条件(1億度以上) 日本の装置(JT-60)で5億度
- 燃料密度が超希薄(大気の100万分の1) → 大型化
- 僅かの磁場の乱れ、僅かの不純物で温度が低下してしまう
「不純物を制する者、核融合を制す」 (→固有安全性)
- 前例のない大規模技術 超電導コイル、プラズマ加熱装置など

開発の現状

- 従来は模擬燃料による実験 (H or D ..放射性なし*)
例外的に僅かのDT実験 (Tは放射性)
(*)DD反応で少量のT発生 Tは放射性
- 本当に熱が出る本格的DT実験はITER (50-70万kW)
(2028稼働開始の予定。フランスで日本も参加して建設中)
- 実験炉 ITERが成功すれば、実用化に一気に進むだろう
(石油業界の福音も?? 世界の様相が変わるだろう)
- 日本が国際的に主導権をとれる分野 (プラズマ物理も工学も)
日本にとって貴重な分野

4

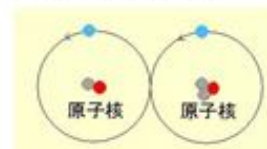


5

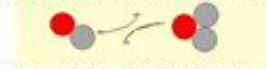
核融合と核分裂

核融合反応

低速で分子を接触させても、電子雲がさわるだけで、原子核は近づかない



加熱すると、1万度くらいで電子雲が離れる
でも、プラスの電気同士の反発力が核融合は起こらない

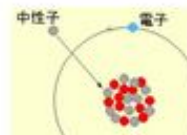


→ 1000kw 以上の高温にしないと核融合反応は起こらない

◎ 核融合反応を起こすには1億度が必要 → 安全 (超安全)

核分裂反応

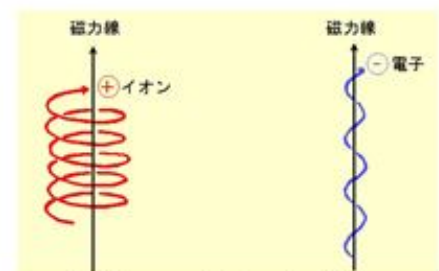
中性子が電子雲の中に入っている



核分裂反応は常温で起こる
(臨界量以上の燃料があれば)

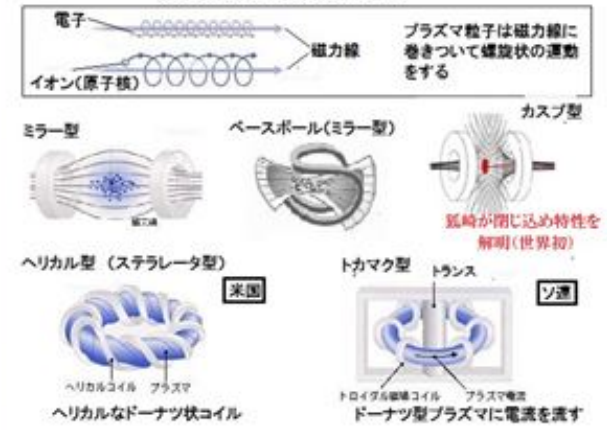
6

磁場による 超高温プラズマの保持(1)



① プラズマはイオン(原子核、プラスの電気をもつ)と電子(マイナスの電気をもつ)から出来ているが、イオンも電子も磁力線に螺旋のつるのようにならねて運動する。
② 磁力線を壁に貼らないようにして、プラズマを壁に貼らないように保持する。

閉じ込め用磁場のいろいろ



なぜ難しいのか

- 磁場とプラズマが起こす振動、不安定性
静かならばいいはずなのに、ちょっとしたきっかけで振動が起こり、振動が大きくなる
- 磁場の中にプラズマを注入することが困難
- プラズマの加熱が難しい
- 不純物の悪影響
- トカマク型磁場：不安定性が起こらなかった
不純物対策出来た (ダイバータ磁場)

核融合(Fusion)の研究開発

- 1940年代に開始 英国、ソ連、米国(秘密研究) 本格化したのは1950以降 (英国のZeta装置)
- 1955年8月第1回原子力平和利用国際会議(ジュネーブ)：バーバ議長「20年以内に制御された形で核融合エネルギーを解放する方策が見つかるであろう」と発言
- 1961 第1回IAEA主催「プラズマ物理と制御核融合に関する国際会議」 ⇒公開、国際協力へ
- 日本でも1950年代から核融合(プラズマ)研究
- ソ連のトカマク型で優れた成果(1960ころから)
- 原研のJFT-2:ソ連以外で初の本格的トカマク型装置(1972稼働) →日本が世界第1線上へ

1958年第2回原子力平和利用国際会議

(b) ZETA [Harwell]



“煉獄の苦しみ” ソ連のArtsuimovich

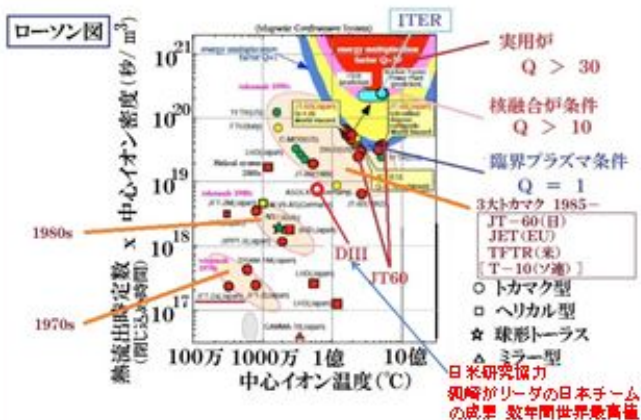


ヴェンデルシュタイン 7-X⁽¹⁾
Wendelstein 7-X⁽²⁾



種類	ヘリカル型
長径	5.5 m
短径	0.53 m
プラズマ量	30 m ³
磁場	3 テスラ
加熱	14 MW
所在地	ドイツ・グライフスヴァルト

核融合プラズマ特性の進展



13

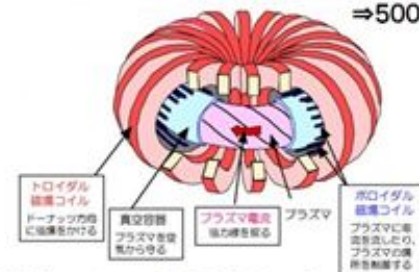
冷戦時代にも核融合の東西国際研究協力

- 1961年以降、公開、国際協力へ
理由—— ① 困難
② 軍事に利用できない
- 磁場核融合は軍事利用の可能性なし
(レーザー核融合は水爆の模倣になりうる)
→ 磁場核融合は1950年代から東西研究交流
- 1968 プライムの春事件の最中にモスクワ近郊のクルチャフ研究所でトカマクの共同実験(英、米など)
- ソ連崩壊(1991.12)には、核融合も影響
 - ITER活動(1988-)で最新科学技術
 - ソ連核融合の中心人物(ベリコフ)がゴルバチェフの親友: 改革(ペレストロイカ)と情報公開(グラスノスチは核融合から?)

14

トカマク型装置

1950年代にソ連で発案、実験開始
1965年に当時信じられない高温(100万度)の発表
1966- 英国からレーザー測定器を持ち込んで共同実験
⇒500万度を計画



現在は1億度レベル。最高温度は日本のJT-60の5.2億度

15

T-3 (ソ連) 1960 世界に多数のトカマク装置

ST (米、改造) 1970

JFT-2 (日本) 1974

PLT (米) 1975

JFT-2a 1974

(三トカマク) JT-60 1985

TFTR(米) 1982.12.24

JET(EU) 1983.6

T-10(ソ) 4大トカマク

TRIAM(九大)

超伝導トカマク

20 m

30 m

12 m

3 m

須崎が設計・建設
世界初のダイバータ付きトカマク装置

PDX(独)

TFR(仏)

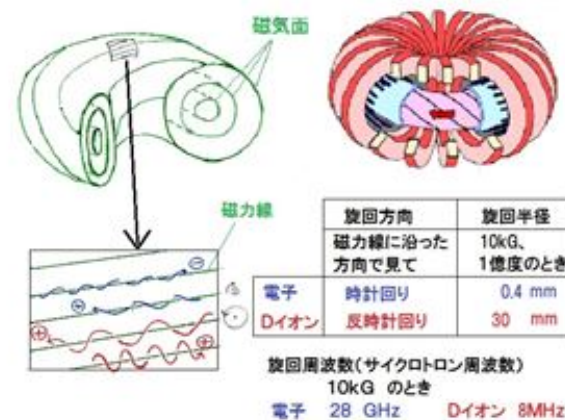
16

トカマク型核融合装置の研究の進展



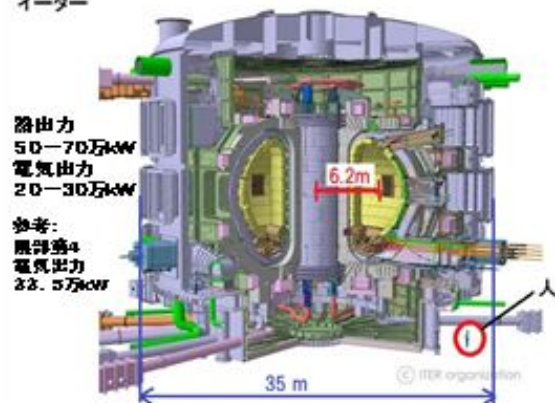
17

プラズマ粒子は磁力線に螺旋状にからまって運動する



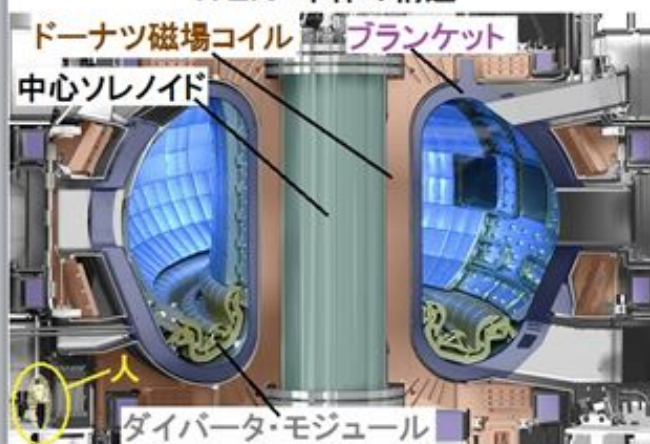
18

ITER 建設中の超大型核融合実験炉 イーター

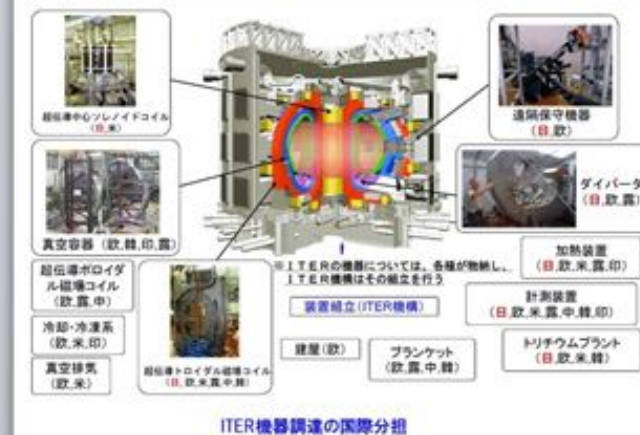


25

ITER 本体の構造

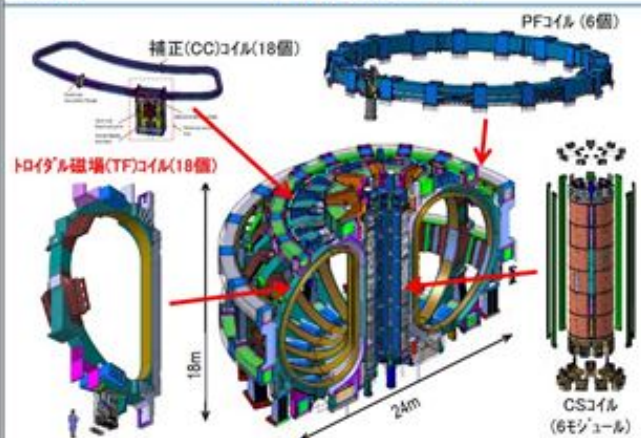


26



27

ITER超電導コイル



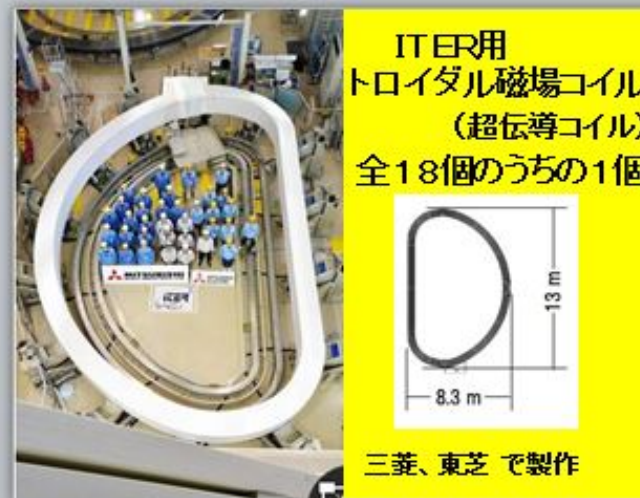
28

ITER超電導コイル調達分担

項目	ITER機構	中国	EU	韓国	日本	ロシア	米国
TF導体		7%	20%	20%	25%	20%	8%
TFコイル			10個		9個		
TF構造物					100%		
CS導体					100%		
CSコイル						7個	
PF導体		65%	21%			14%	
PFコイル			5個			1個	
補正コイル		18個					
フィーダー		100%					
計測素子	100%						



29



30



31

QST ITER: 国際協カメガサイエンスプロジェクト

1. 国際協力
 ●参加国 日、欧、米、露、中、韓、印
 ●建設地 フランス・カダラッシュ

2. 計画
 ●計画 35年間
 運転開始: 2025年 (2016.6決定)
 核融合反応: 2035年
 ●建設費 約2.5兆円
 (1ユーロ=135円として推定)
 ●ITER機構 国際機関
 直接雇用職員 約770名 (2017.7)
 (黄色部は最近見直し)

●機器の製作・建設
 各々が分担する機器を調達・製造。
 ITER機構が全体を組み立てる。

ITER計画のスケジュール

ITER計画	準備期間	建設期間	運転期間	閉鎖・撤去			
準備期間	10年	建設期間	20年	運転期間	5年	閉鎖・撤去	5年

(QST [量子科学技術研究開発機構 2016設立] 井上多加志氏より)

32



33



34



35



36



2020.7.28 ITER組立開始式典の様子 (写真: ITER機構提供)

37



2020年8月、韓国製作の最初のセクター-VVS#6 がITER機構に到着

38

令和3年4月中旬にSSAT(Sector Sub-Assembly Tool)上に1機目の真空容器(韓国製)が設置され、その後のサブセクター(40°分の真空容器、サーマルシールド、TFコイル2機)のSSAT上での組立が進行中です。

4月末にはインポート製真空容器サーマルシールドの設置が開始され(図1)、8月にはアウトポート製真空容器サーマルシールドの設置が開始されました。その際、ボロイダル増幅コイル(PF6)がマグネットとして初めてピット内に仮設置されました(図2)。



図1 PF6ピット内仮設置

39

また、6月には日本から輸送されたTFコイル初号機(TF12)の立て起こし作業が成功裏に実施され、2つあるSSATのうち使用していないISSAT上に仮設置し、初めての立て起こし時のコイル最重実形確認等が行われました(図3、4)。このTFコイルは、縦16.5m、幅9m、重量330tもの超巨大構造物であり、これをSSAT上ではmm単位で組み立てていく計画です。



図3 TF12の立て起こし作業

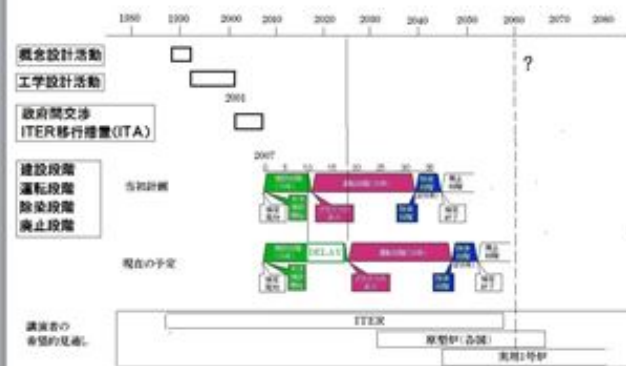
40



図4 TF12のSSATへの仮設置

41

ITER と その後の段階



42

国内の核融合研究開発

大学・・・高温プラズマの科学・核融合炉工学（人材育成）

量子科学技術研究機構（QST 2016設立）

：旧 放射線医学研究所 + 日本原子力研究所）

茨城県那珂市 超伝導トカマク JT-60SA
JT-60U を全面改造 加熱装置などを再利用

青森県六ヶ所村 国際核融合エネルギー研究センター

ITER遠隔実験センター

国際核融合材料照射施設(IFMIF)

フランスと ITERの建設サイトを争った

・・・ ⇒ EU との共同活動

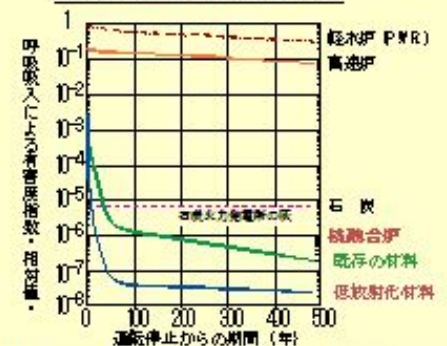
43

核融合の安全性

- ・ 暴走が無い(核分裂と大きさが違う)
- ・ 停止後の熱発生は非常に少ない(同上 冷却止まっても大丈夫)
(福島事故は停止後の発熱(崩壊熱)が原因、核分裂の原子炉は停止後も冷却が必要。)
- ・ 核融合炉でも放射性物質は発生する。しかし、外部に出る可能性はほぼゼロ。気体、液体はほとんどが炉の材料の中に埋め込まれた形で発生するから。
- ・ 発生する放射性物質の半減期が短い
(100年監視すればよい)
- ・ 超大型の超電導コイルのエネルギーがリスク
(でも、均一に熱が伝われば -263°C のコイルが破砕されるだけ、燃料のトリチウムもリスク
(大部分は固体に吸収して保存、ITERからの漏れは再処理施設からのトリチウム混入の10分の1以下、実用炉でも、ほぼITERと同じ。))
- ・ 磁場を作るコイルが動いたら停止する(磁場が乱れるから)
- ・ 壁から0.1gでも破片が温ざったら停止する
→ 本質的にFail safe

44

潜在的生物影響の比較

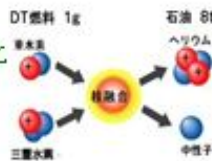


出典：IEA Safety and Environmental Impact of Fusion Power (2006)

45

核融合炉と核分裂炉の安全性

- ・ 生成物(放射性廃棄物)
- ・ 核分裂:ありとあらゆる核種が発生
その95%以上は放射性
- ・ 核融合:炉の材料が中性子で放射化
材料の選択で放射性原子核の種類を設計できる



- ・ 反応停止後の熱発生(発生した放射性核種が発熱)
- ・ 核分裂:停止1時間後に1%の熱発生
電気出力100万kW炉で停止1時間後に2.5万kW
冷却が切れると福島事故になる
- ・ 核融合:崩壊熱に相当する発熱は非常に小さい
冷却が切れても大丈夫

46

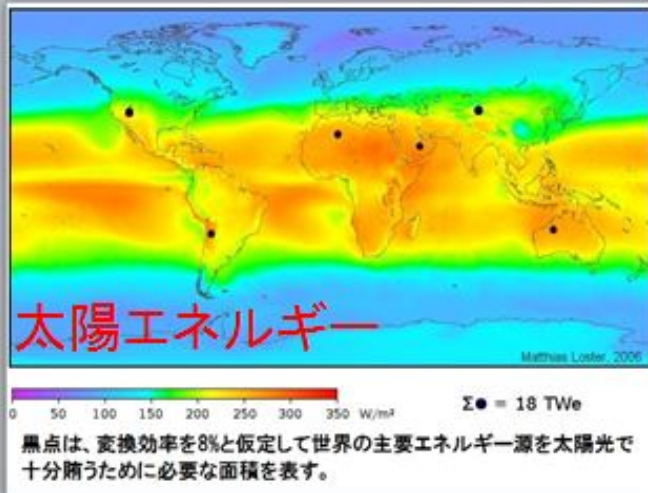
核融合炉と核分裂炉の安全性(2)

- ・ 反応の条件
核分裂:常温で反応する (臨界量以上のウラン)
核融合:1億度以上が必要 (温度低下したら止まる)
- ・ 安全性の考え方
事故が起こる可能性の有無でなく
最大事故が起こった時に対処できるかどうかで
判断すべき
技術だけではない。社会として対処できるかも含む

47



48



49

まとめ

- 核融合は我が国が世界第一線にある貴重な分野
- 太陽エネルギーが最善だが、長期間の天候不順があるので、核融合のようなエネルギー源も必要
- 将来は、核融合 + 太陽エネルギー + 水力
- (核融合は基本的にベースロード：定常出力)
- ITERが成功したら、世界は核融合の実用化に向かうだろう

50

ご清聴ありがとうございました



51