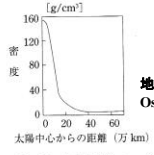
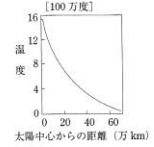
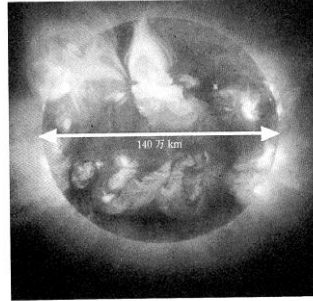


エネルギー工学概論

— 第12回(材料系第5回)核融合炉材料 —

- ① 太陽と核融合炉
- ② 核融合炉の構造・計画・展望
- ③ 核融合炉真空容器

① 太陽と核融合炉



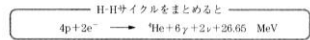
地球上元素
Os 22.57 g/cc

2.4x10¹¹ atm

巨大な重力によって閉じ込められた水素原子が融合してエネルギーを生み出している太陽とその中心部の密度と温度分布。[1-11]

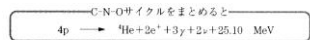
水素・水素サイクル

反応	放出エネルギー (MeV)	反応平均時間
p+p → D+e ⁺ +ν	0.4	140億年
e ⁺ +e ⁻ → 2γ	1.0	10 ⁻¹⁹ 秒
p+D → ³ He+γ	5.5	5.7秒
³ He+ ³ He → ⁴ He+2p	12.85	100万年



炭素・窒素・酸素サイクル

反応	放出エネルギー (MeV)	反応平均時間
p+ ¹² C → ¹³ N+γ	1.95	1300万年
¹³ N → ¹³ C+e ⁺ +ν	1.87	7分
p+ ¹³ C → ¹⁴ N+γ	7.54	270万年
p+ ¹⁴ N → ¹⁵ O+γ	7.35	3.3億年
¹⁵ O → ¹⁵ N+e ⁺ +ν	1.73	82秒
p+ ¹⁵ N → ¹² C+ ⁴ He	4.96	11万年



太陽の中で起こっている核融合反応
 ν: ニュートリノ, γ: ガンマ線

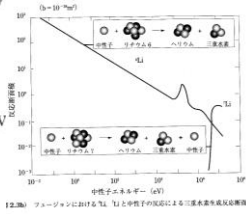
- 太陽 (質量=地球×300,000) 半径 700,000km
 - 木星 (質量=地球×300) 半径 71,000km
 - 地球 (質量=5.974×10²⁴kg) 半径 6,400km
- 核融合反応が起こる太陽と地球、木星との大きさの比較

太陽と核融合炉の状態およびエネルギー発生率密度の比較

比較項目	太陽の中心の状態	想定される核融合炉の状態
温度	約1,600万度	約2~3億度
密度	約160 g/cm ³	約4.15×10 ⁻¹⁰ g/cm ³ (1×10 ¹⁴ /cm ³) 地上の空気密度の1/10 ¹⁴
圧力	約2,400億気圧	約3~4気圧 (プラズマ)
エネルギー発生密度	約10 W/m ³ (人間は約1,000 W/m ²)	約600,000~約4,000,000 W/m ² (実験炉の場合) (原型炉の場合)

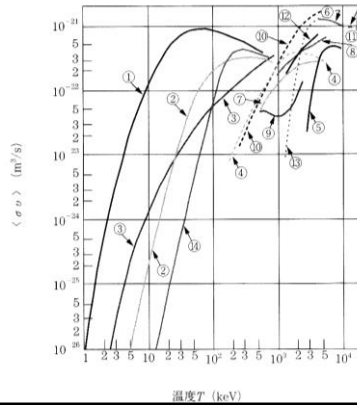
核融合炉に利用可能と考えられる核融合反応候補

- ① D+T → ⁴He(3.52)+n(14.06)
- ② D+³He → ⁴He(3.67)+p(14.67)
- ③ D+D {
 - ³He(0.82)+n(2.45)
 - T(1.01)+p(3.03)
- ④ p+⁶Li → ⁴He(1.7)+³He(2.3)
- ⑤ p+⁷Li → ⁴He+D+p-1.5 MeV
- ⑥ n+⁶Li → ⁴He+D+n-1.5 MeV
- ⑦ D+⁶Li {
 - ⁷Li(0.6)+p(4.4)
 - ⁴He+T+p+2.6MeV
- ⑧
- ⑨
- ⑩ D+⁶Li {
 - ⁷Be(0.43)+n(2.97)
 - ⁴He+³He+n+1.8MeV
- ⑪ D+⁷Li → ⁴He+2D-1.5 MeV
- ⑫ ³He+⁶Li → ²He+p+16.9MeV
- ⑬ p+T → ³He+n-0.8 MeV
- ⑭ p+¹¹B → ³He+8.68MeV



(カッコ内は反応生成物のエネルギー (MeV))

核融合反応の平均核反応率 温度の単位換算: 1keV=0.116億K



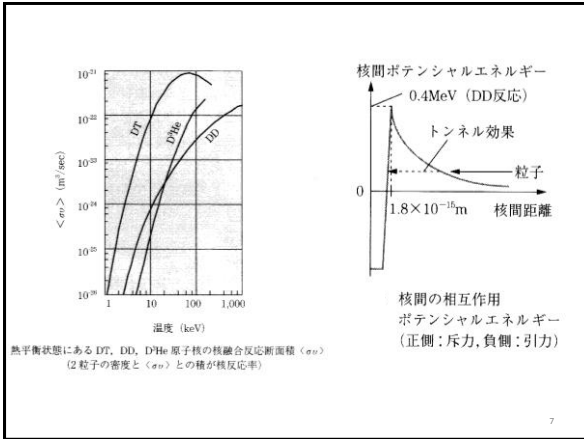


Table 1.1. Properties of the nuclei of the natural hydrogen isotopes [1.11-13]

Atom	Protium ${}^1\text{H}=\text{p}+e^-$	Deuterium $\text{D} = {}^2\text{H}=\text{d}+e^-$	Tritium $\text{T} = {}^3\text{H}=\text{t}+e^-$
nucleus	Proton p	Deuteron d	Triton t
Rest mass m [kg]	$1.6726 \cdot 10^{-27}$	$3.3436 \cdot 10^{-27}$	$5.0061 \cdot 10^{-27}$
Spin	1/2	1	1/2
Magnetic moment [J·T ⁻¹]	$1.41062 \cdot 10^{-26}$	$4.33066 \cdot 10^{-27}$	$1.50457 \cdot 10^{-26}$
Gyromagnetic ratio [rad·s ⁻¹ ·T ⁻¹]	$2.6752 \cdot 10^8$	$0.4106 \cdot 10^8$	$2.853 \cdot 10^8$
Quadrupole moment [m ²]	0	$2.77 \cdot 10^{-31}$	0
Half life $T_{1/2}$ [years]	stable	stable	12.323
Incoherent neutron cross-section, σ_{nc} [barns]	80.20 ± 0.06	2.04 ± 0.3	$0.0^{+0.1}_{-0.8}$
Bound scattering cross-section σ_{sc} [barns]	81.96 ± 0.06	7.64 ± 0.03	2.3 ± 0.7
NMR resonance frequency at 1.14 T [MHz]	90.0	13.8	96.0
Relative NMR sensitivity at constant field	1.0	$9.65 \cdot 10^{-3}$	1.21
Natural abundance [%]	99.984	0.0156	10^{-10}

Table 1.3. Characteristic properties of the 6 hydrogen molecules [1.18, 19]

	H ₂	HD	HT	D ₂	DT	T ₂
Molecular weight [g]	2.015650	3.021927	4.023875	4.028204	5.030152	6.032100
Triple point temp. [K]	13.804	16.60	17.70	18.69	19.79	20.62
Triple point pressure [bar]	0.0703	0.1237	0.1458	0.1713	0.2008	0.216
Critical point temp.[K]	32.976	35.91	37.13	38.262	39.42	40.44
Critical point pressure [bar]	12.93	14.84	15.71	16.5	17.73	18.50
Ionization energy [eV]	15.43	15.44	15.45	15.47	15.47	15.49
Dissociation energy [eV]	4.478	4.514	4.527	4.556	4.573	4.591
First excited vibrational level [K] (Einstein temp.)	5986	5225	4940	4307	3948	3548

Table 1.2. Characteristic data of tritium. The data are partly taken from [1.18]

atomic weight:	3.01605g
radiation:	β^- decay (100%)
half life: $T_{1/2}$:	12.323 y ($\lambda = 365.25 \text{d}^{-1}$)
decay constant: $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$:	$1.782 \cdot 10^{-9} \text{s}^{-1}$
decay product:	${}^3\text{He}$ (atomic weight: 3.01603g)
maximum β energy:	18.582keV
mean β energy:	5.685keV
heat produced by tritium:	0.324W/g ($\hat{=} 1.954 \text{W/mol T}_2$)
ionization energy: $\text{T} \rightarrow \text{T}^+ + e^-$:	13.595eV
dissociation energy: $\text{T}_2 \rightarrow 2\text{T}$:	4.591eV
tritium activity per gram:	355.7TBq (9615Ci)
tritium activity per mol T_2 :	2146TBq (58.00kCi)
tritium activity in 1cm ³ at 1 bar and 293K:	88.1GBq (2.38Ci)
tritium activity of 1g T_2O :	97.42TBq (2633Ci)
tritium activity of 1g DTO:	51.0TBq (1379Ci)
tritium activity of 1g HTO:	53.6TBq (1449Ci)

核融合炉燃料消費量の見積もり例

DT : 0.35 g (0.07 mol)
 8.4×10^{22} 個

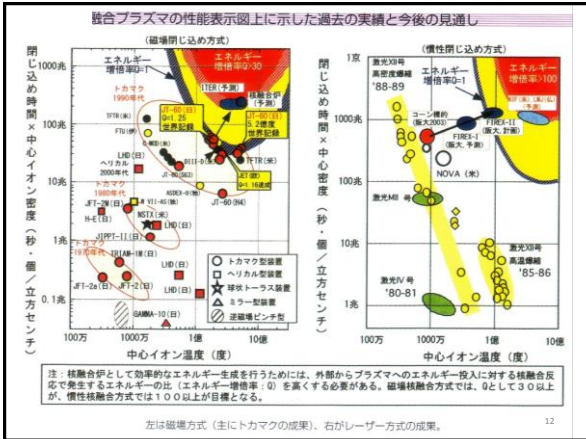
真空容器: 1600 m³
数密度 5×10^{19} 個/m³

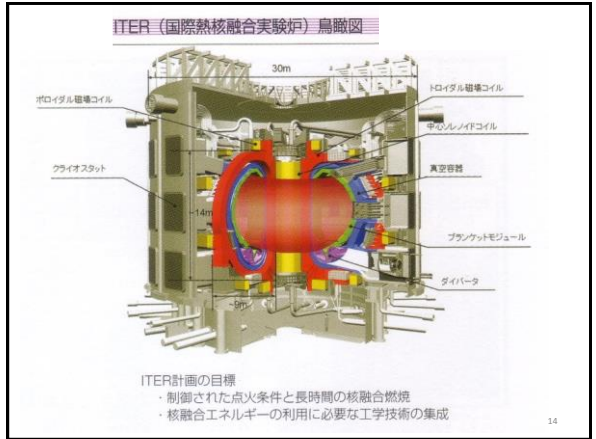
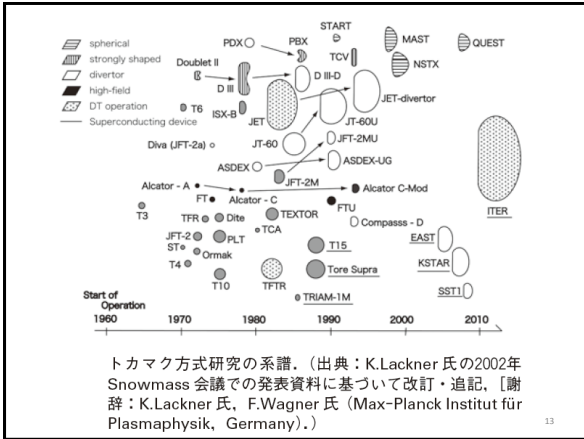
T : 0.21 g ~ 2000 Ci
 $\sim 7 \times 10^{13}$ Bq

24x3600/200x0.21 = 90 g/day

ITERと太陽の比較表

物理量	ITER プラズマ	太陽	比
外径	16.4 m	140 万 km	~ 1 億分の 1
中心温度	2 億度	1500 万度	10 倍
中心密度	10^{20}m^{-3}	10^{24}m^{-3}	1 兆分の 1
中心気圧	~ 5 気圧	~ 10^{12} 気圧	千億分の 1
発熱密度	600kW/m ³	0.3W/m ³	2 百万倍
反応	DT 反応	PP 反応	
質量	0.35 g	2×10^{30} kg	6×10^{29} 分の 1
燃焼時定数	200 秒	100 億年	10^{27} 分の 1





ITERの主要な性能

全核融合出力	500 MW
Q (核融合出力 / 外部加熱パワー)	≥ 10
平均14MeV 中性子壁負荷	≥ 0.57 MW/m ²
プラズマ大半径	6.2 m
プラズマ小半径	2.0 m
プラズマ電流	15 MA
トロイダル磁場 (6.2m半径点)	5.3 T
外部加熱・電流駆動パワー	73 MW ⁽¹⁾

(1)引き続き運転段階において合計110MWまで増設の可能性がある。

プラズマ体積 840 m³

燃料 核融合の燃料資源量

核融合反応

重水素(記号D)+三重水素(記号T) → ヘリウム(He) + エネルギー

→ 発電所内でリチウム(Li)から作る

$${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4.8\text{ MeV}$$

$${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + n - 2.5\text{ MeV}$$

1) 重水素(海水中に無尽蔵)

地球の水に含まれる水素の0.0158%は重水素(D)

→ 海水中には重水素が50兆トン

100万キロワット発電所1500基(～世界の電力量相当)を運転するとしたら数千億年分…といふより無尽蔵と見るべき

高効率な重水素の大量製造技術は実用化済。

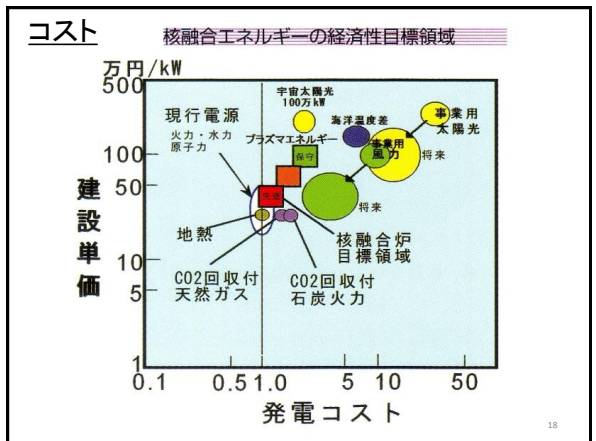
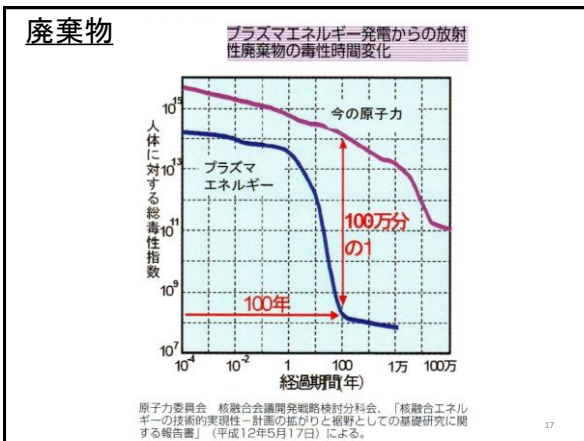
製造に要するエネルギーは微量で大量生産技術も現存。

2) リチウム(海水中に無尽蔵)

100万キロワット発電所1500基(～世界の電力量相当)を運転するとしたら発見済の鉱山…600年分 (+発見予想分:5万年分)

海水中には…150万年分が回収が容易に可能な濃度で存在

海水からの回収技術も存在。コストは鉱山からの2倍程度。



② 核融合炉の構成

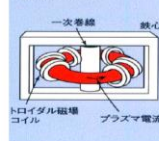
プラズマの閉じ込め方式

- ① 重力 (太陽)
- ② 磁場 (トカマク等)
- ③ 慣性 (レーザー)

19

核融合の主な閉じ込め方式

●トカマク型



○ドーナツ状の磁気のかごをつくり、その中にプラズマを閉じ込める
 ○プラズマ中に電流を流して、ねじれた磁場を形成
 ○ITERで考案され、世界が通じた方式
 → 現時点で最も進んだ方式

ITER (国際熱核融合実験炉)
 JT-60 [日本原子力研究開発機構]

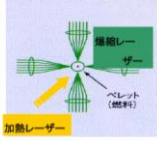
●ヘリカル型



○トカマク型と同様にドーナツ状のかごをつくるが、ねじれたコイルを使うのが特徴
 ○磁場は外部コイルのみで形成されるため、プラズマ中に電流を必要としない
 → 経済的な運転、長時間運転が可能

大型ヘリカル装置 (LHD)
 【核融合科学研究所】

●レーザー方式

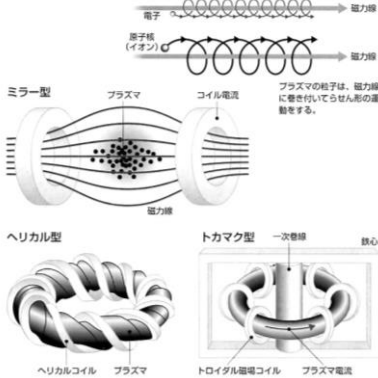


○左の2つの方式と全く異なり、燃料を高出力レーザーで爆発的に圧縮・加熱し、その圧力でプラズマを閉じ込める
 → 原理実証完了前の基礎的段階
 ○米仏では、国防関係機関が推進

激光XII号・LFEX
 【大阪大学】

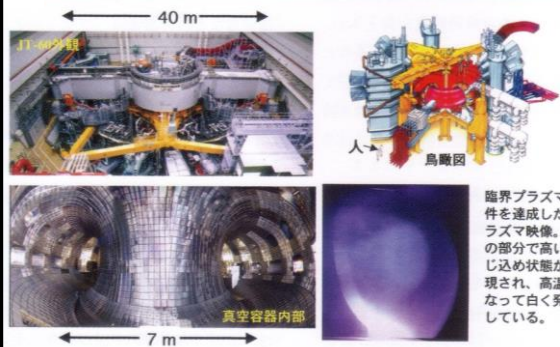
20

磁場閉じ込め方式



21

JT-60の外観、真空容器内部、鳥瞰図、臨界プラズマ映像



臨界プラズマ条件を達成したプラズマ映像。芯の部分で高い閉じ込め状態が実現され、高温となって白く発光している。

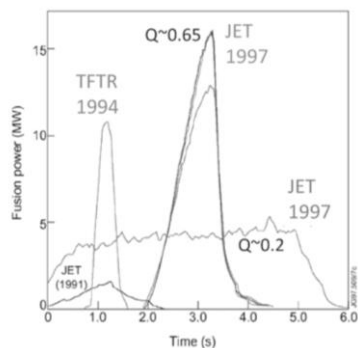
22

JET内部 (4大トカマク装置)



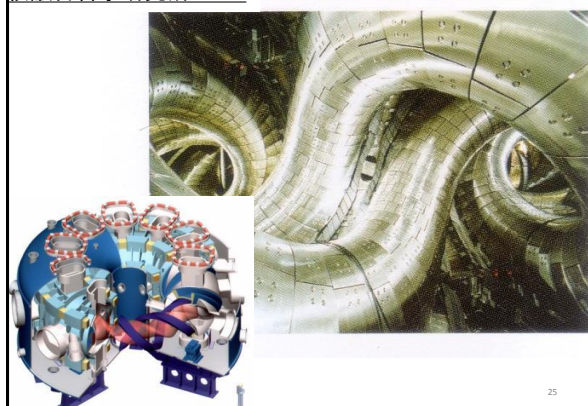
23

DT実験



大型トカマクにおけるDT実験の推移。JETにおける1997年の実験では16.1 MW ($Q=0.65$)、定常化を図った条件では、およそ4sにわたって、約4 MW ($Q=0.2$)を実現している[10]。

24



我が国における核融合政策の現状

磁場閉じ込め方式 ☆トカマク・ヘリカルともに原理実証段階を完了

トカマク

○工学的実証段階
○現段階では最も進展しているとの国際的認識
→ 実験炉ITER、JT-60SA

＜主な実験成果(JT-60)＞
・エネルギー増倍率: 1.25 (世界記録)
・イオン温度: 5.2億度 (世界記録)
・運転時間: 28秒間 (約1億度)

JT-60SA (JAEA) ITER

ヘリカル

○工学的実証を目指す段階
○磁場で閉じ込める考え方はトカマクと同じ。プラズマの安定性という長所を持つため、ヘリカルが原型炉段階で採用される可能性 → LHD (大型ヘリカル装置)

＜主な実験成果(LHD)＞
・エネルギー増倍率: 0.075
・イオン温度: 0.8億度
・運転時間: 54分28秒 (約0.1億度) (世界記録)

LHD (核融合科学研究所)

↑ 知見を反映 ↓

核融合エネルギーの段階的研究開発

今世紀中葉までに実用化の見通しを得ることを視野に

技術的実証・経済的実現性

科学的・技術的実現性

科学的実現性

燃焼プラズマの達成・長時間燃焼の実現
→ 原型炉に必要な炉工学技術の基礎の形成

燃焼プラズマ条件の達成

JET(EU) TFTR(US)

【主要実験装置】

ITER計画 JT-60SA

原型炉 IFMIF BA活動

27

JT-60SAの装置パラメータ

プラズマ電流 I_p	5.5MA
トロイダル磁場 B_t	2.25T
大半径 R_0	2.97m
小半径 a_0	1.18m
非円形度 κ_c	1.93
三角度 δ_s	0.5
表面安全係数 q_{95}	3
プラズマ体積 V_p	133m ³
フラットトップ時間	100 s
加熱・電流駆動パワー	41MWx100 s
垂直入射 NBI	16 MW
接線入射(Co) NBI	4 MW
接線入射(CTR) NBI	4 MW
負イオン源NBI	10 MW
ECRH	7 MW
プラズマ対向機器熱負荷	15 MW/m ²
中性子の年間発生量	1.5×10^{21}

28

トカマク型核融合炉の機器構成

超伝導コイル 第一壁 プラズマ加熱装置

ブランケット 炉心 トリチウム循環システム

ダイバータ

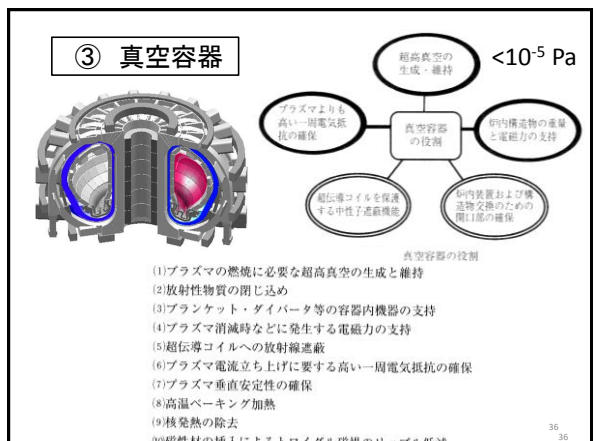
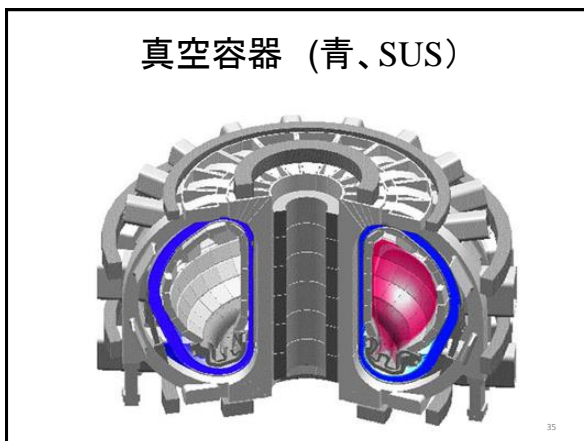
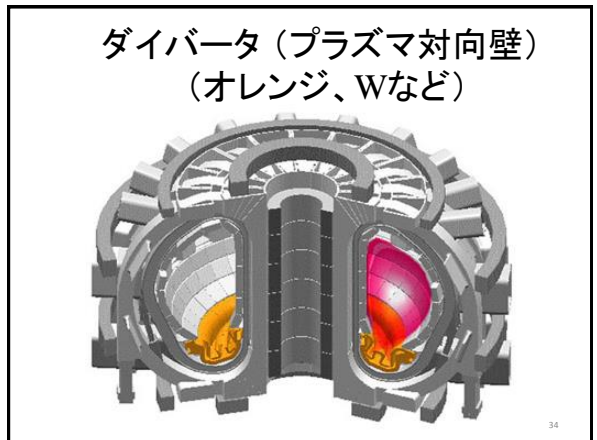
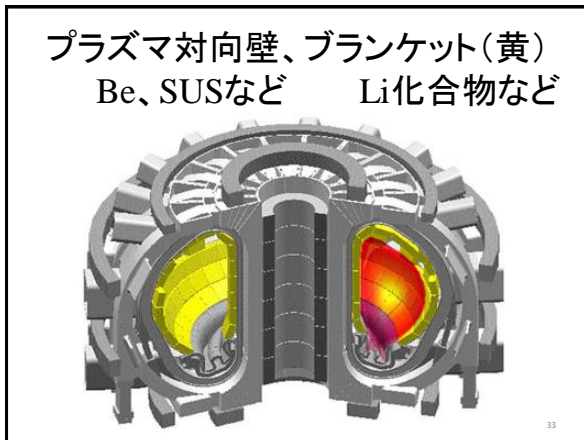
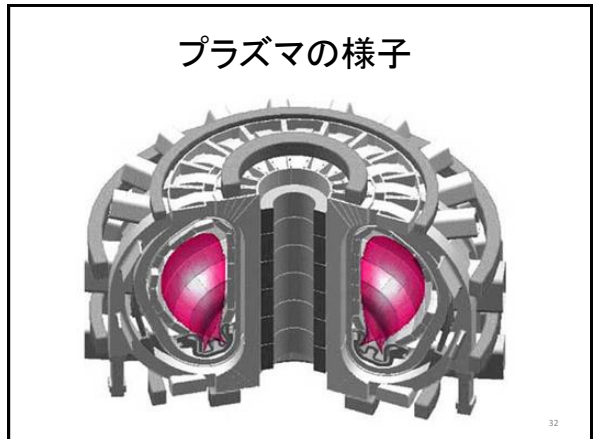
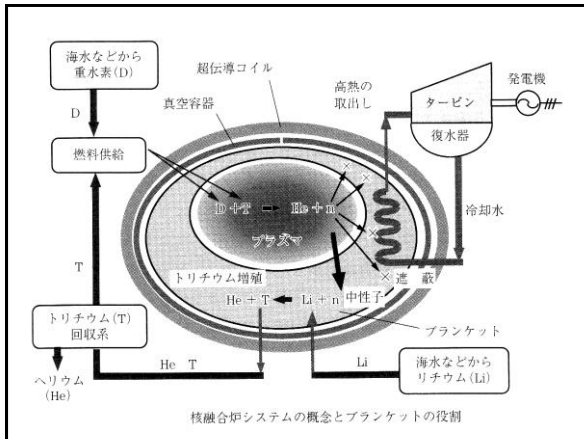
+ 熱除去・熱回収系
+ 発電設備

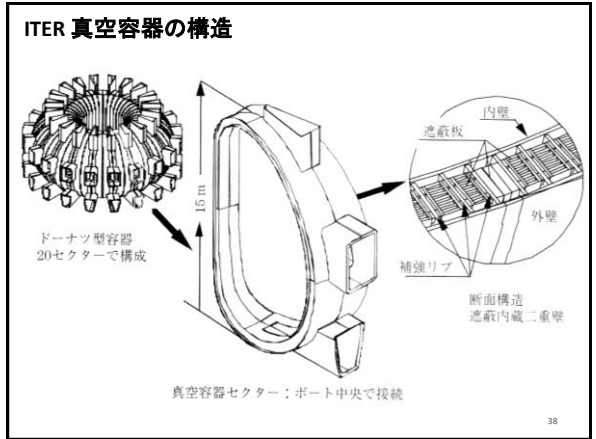
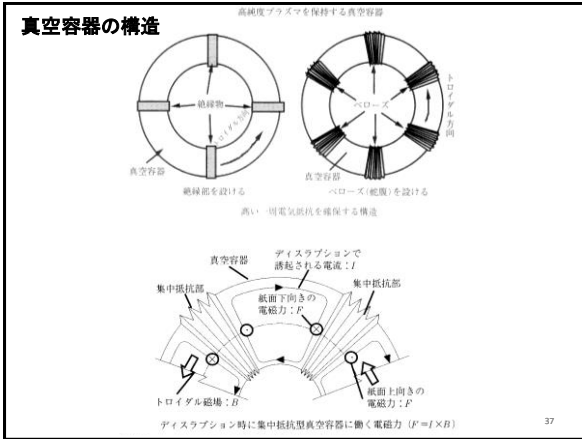
29

閉じた磁気面 プラズマ境界 ベテスタル領域 スクレイブオフ領域 ダイバータ領域

トカマクの磁場構成; (a)コイルの基本構成, (b)らせん磁場の成り立ち, (c)プラズマ断面形状, (d)プラズマ領域の構成

30





ITER真空容器の概要1

国際熱核融合実験炉 (ITER) 真空容器の諸元

ITER 用真空容器 (1998年度設計)	
直径	26 m
高さ	14.5 m
大半径	8.1 m
断面の幅	8.9 m
体積	4250 m ³
表面積	1430 m ²
重量	~9,000 ton (遮蔽体を含む)
使用温度	200°C (運転時は120°C)
真空性能	1 × 10 ⁻¹⁰ Pa
一周電気抵抗	10 μΩ 以上
寸法精度	
a) 工場製作時	± 5 mm
b) 現地組立後	± 20 mm

ITER真空容器の概要2

ITER 真空容器の基本諸元

ITER 真空容器の基本諸元	
基本構造	二重壁 D 型断面真空容器
寸法	
全高	11.3 m
内筒最小半径	3.2 m
外筒最大半径	9.7 m
内外壁板厚	60 mm
内表面積	940 m ²
ガラス領域内容積	1,600 m ³
材料	
構造材	SUS316LN-IG
遮蔽材	SUS304H7, SUS304B4, SUS430
リッフル板用インサート材	
耐腐蝕層	
運転時	100°C
ペーキング時	200°C
循環水条件	
運転時	100°C 1.1 MPa
ペーキング時	200°C 2.4 MPa
電気抵抗	
トロイダル方向	7.9 μΩ
ポロイダル方向	4.1 μΩ
概略重量	
真空容器本体	2,540 トン
遮蔽体 (リッフル板用インサート材含む)	2,800 トン
ポート構造体	1,970 トン

Steady State Tokamak Reactor (SSTR)

図1.3.1-4 定常トカマク型核融合炉SSTR鳥瞰図とSSTR主要諸元

	設計値
プラズマ電流 I_p	120 A
トロイダル磁場 B_t	9 T
主半径 R	7 m
アスペクト比 A	4.1
積肉度 κ_{95}	1.85
規格化ベータ値 β_N	3.5
熱出力 P_{th}	36 MW
電流駆動パワー P_{cd}	600 MW
加熱電力 P_{he}	1,000 MW
エネルギー増倍率 Q	50
平均中性子流密度 $\Phi_{n,0}$	3N m ⁻²

表1.3.1-2 SSTR核融合炉の本体機器構成、機能、主要材料、重量

機器名称	機能	主要材料	重量
交換ブランケット	トリチウム増殖 エネルギー変換	放射線化フェライト鋼 酸化リチウム(Li ₂ O)	~250 トン ~23 トン(Li)
固定ブランケット	トリチウム増殖 エネルギー変換	ペリリウム 放射線化フェライト鋼 酸化リチウム(Li ₂ O)	~110 トン ~720 トン ~74 トン(Li)
ダイバータ	除熱	放射線化フェライト鋼等	~360 トン
真空容器	真空境界、遮蔽	ステンレス鋼 and/or 放射線化フェライト鋼	~10000 トン
トロイダル磁場コイル	磁場発生	低温度ステンレス鋼 Nb ₃ Sn or Nb ₃ Al 素線 NbTi 素線	~10000 トン ~150 トン(Nb) ~16 トン(Nb)
ポロイダル磁場コイル	磁場発生	低温度ステンレス鋼 NbTi 素線	~2200 トン ~41 トン(Nb)

