



目指せ、核融合発電

— 西尾先生の衣鉢を引き継ぐ若手へ

長山 好夫

核融合科学研究所

nagayama.yoshio@nifs.ac.jp

QUEST研究会2017

九州大学応用力学研究所、平成27年2月9日



内容

ST Japan

- なぜST？
 - STにたどり着くまでの個人的研究遍歴
- 核融合実現のためには何をすべきか？
 - 中性子問題の勃発とその解を目指して
- 西尾先生の衣鉢を若手に引き継ぐ
 - 電気学会核融合炉の経済性向上調査専門委員会（西尾 敏委員長／長山好夫代理）報告書（2013年12月）



なぜST?

STにたどり着くまでの個人的研究遍歴

ST Japan

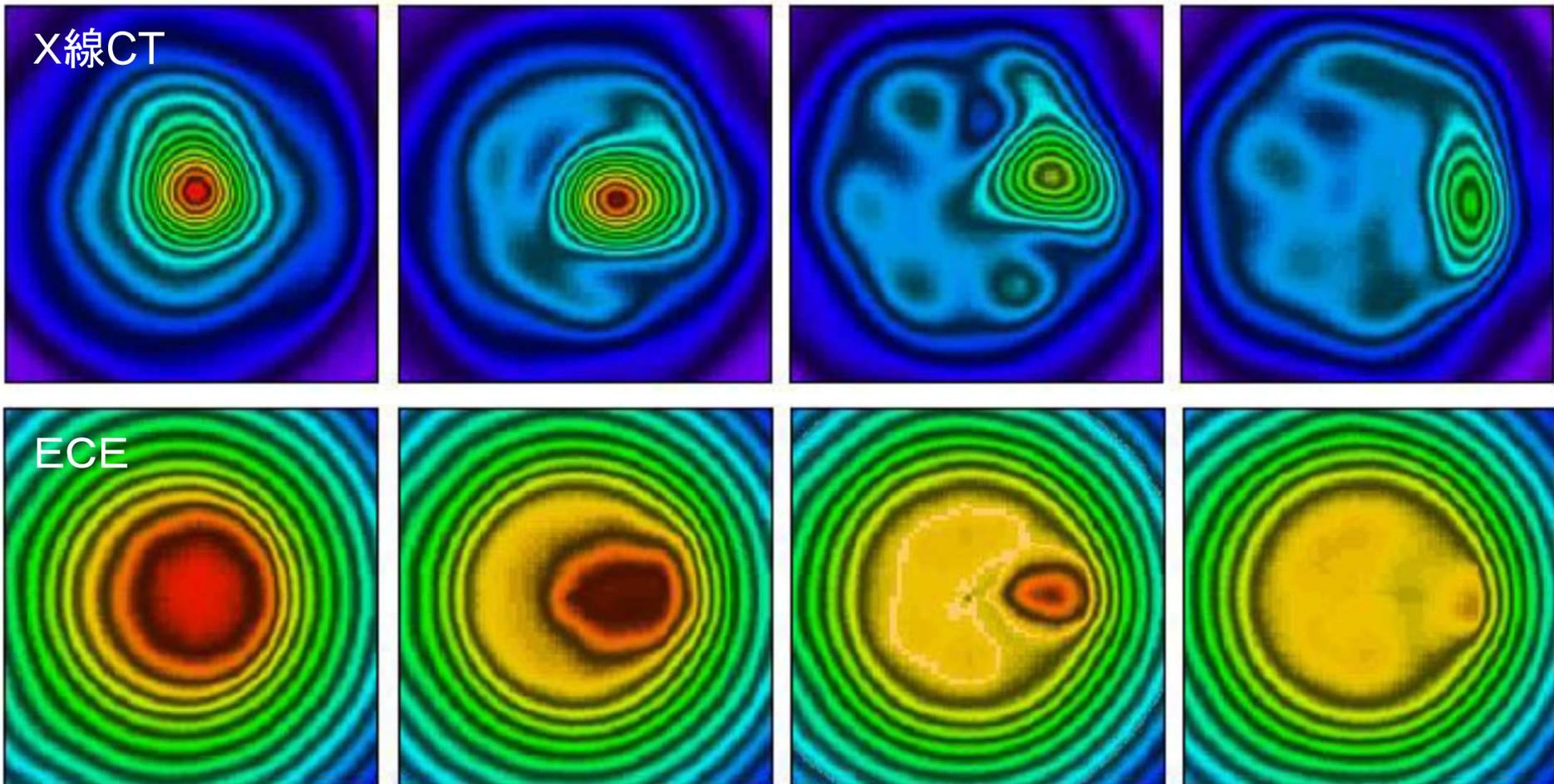
- 1979.3 東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程博士課程修了
学位論文「ルビーレーザーのトムソン散乱による非円形トカマクプラズマの研究」
- 1979.4 日本原子力研究所特別研究生（鈴木康雄室長、的場徹リーダー）
研究課題「軟X線トモグラフィー」
- 1979.10 東京大学理学部助手（物理学教室・宮本健郎研究室）
- 1980.4 名古屋大学プラズマ研究所共同研究
研究課題「JIPP T-IIの軟X線トモグラフィー」
（長山好夫、辻俊二、川端一男、野田信明、棚橋秀伍）
- Y. Nagayama, “Tomography of $m=1$ Mode Structures in Tokamak Plasma Using Least Square Fitting Method and Fourier-Bessel Expansions”, JAP 62, 2702 (1987)
 - Y. Nagayama, et al, “Soft X-ray Tomography of Sawtooth Oscillations in the JIPP T-II Tokamak”, PRL 61, 1839 (1988)
- 1989.4 プリンストンプラズマ物理研究所客員研究員



TFTRにおける鋸歯状波崩壊

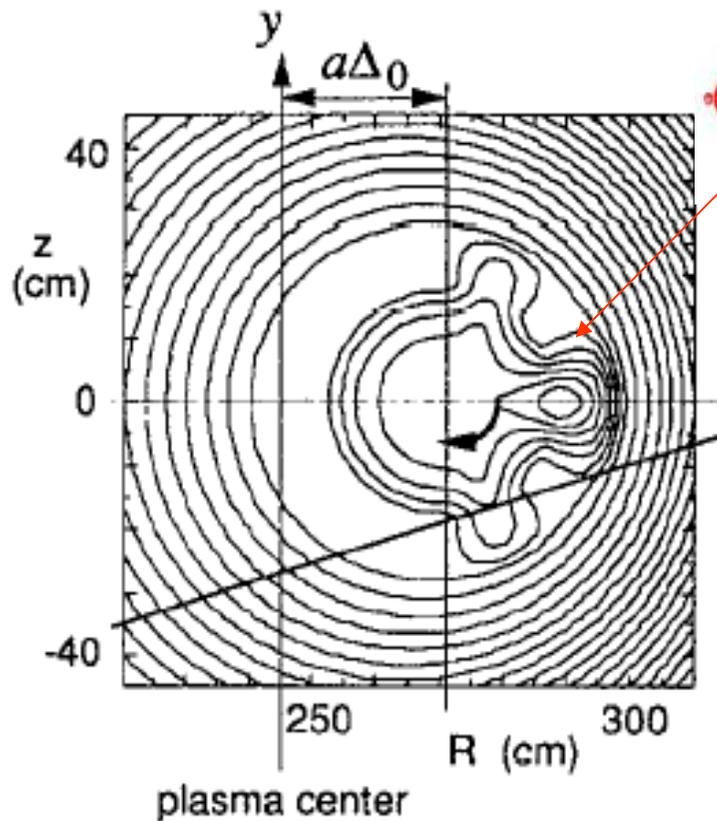
磁気再結合の証拠 = X線CTは重金属、ECEは電子温度

ST Japan



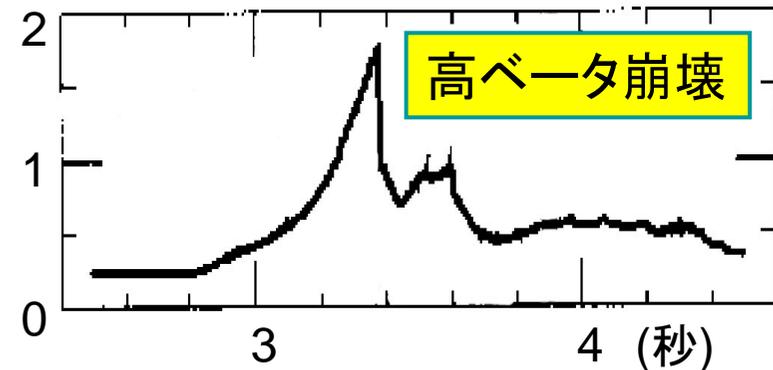
Y. Nagayama, et al., "Analysis of Sawtooth Oscillations Using Simultaneous Measurement of Electron Cyclotron Emission Imaging and X-ray Tomography on TFTR", PRL 67, 3527 (1991)

TFTRにおける高ベータ崩壊時の バルーニングモード



Ballooning Mode

軟×線強度



日経平均株価(千円)



核融合炉実現にはBallooning Mode退治が不可欠

Y. Nagayama, et al, "Observation of ballooning modes in high-temperature tokamak plasmas", PRL 69, 2376 (1992).



中性子問題の勃発と その解を目指して



中性子損傷のために核融合炉実現は不可能（藤原の問題提起）

ST Japan

1994.10 核融合科学研究所・助教授

<藤原正巳（核融合科学研究所・第2代所長）>

- 核融合炉が実現できないことは誰でも分かる。
- プラズマ閉じ込めの問題じゃないんだ。
- 電気出力から中性子量が分かる。
- 真空容器壁は3年持たない。壁材の性能は簡単には上がらない。
- どうすんだよ？（1995年3月）



中性子損傷のために核融合炉実現は不可能（藤原の問題提起）

ST Japan

1994.10 核融合科学研究所・助教授

<藤原正巳（核融合科学研究所・第3代所長）>

- 核融合炉が実現できないことは誰でも分かる。
- プラズマ閉じ込めの問題じゃないんだ。
- 電気出力から中性子量が分かる。
- 真空容器壁は3年持たない。壁材の性能は簡単には上がらない。
- どうすんだよ。（1995年3月）

<解説>

- 百万kW発電炉の中性子パワーは効率30%として、 $P=3\text{GW}$ 。
- 壁の14MeV中性子の耐性は、 10 MW-year/m^2 。
- 主半径 $R=8\text{m}$ 、副半径 $a=2.5\text{m}$ のドーナツ形真空容器の表面積 A は
 - $A=2\pi R \times 2\pi a=800\text{m}^2$ 。 $P/A=3.8\text{ MW/m}^2$ 。
 - $10\text{ MW-year/m}^2 \div 3.8\text{ MW/m}^2=2.6\text{ year}$



米国下院科学技術委員会センセン ブレナー委員長の難題

ST Japan

<Kevin McGuire (TFTR物理部長) の苦悩>

- 下院科学技術委員会は核融合炉は出来ないという。
- 中性子に耐える壁材など無い、
- 中性子の出ないD-³He炉でも目指すんだな。でもそれはエネルギー研究ではない、科学研究だ、と言うんだ。
- TFTRどころか、もう核融合研究は終わりだ。
- どうする？

(1996年)



米国下院科学技術委員会センセン ブレナー委員長の難題

ST Japan

＜Kevin McGuire（TFTR物理部長）の苦悩＞

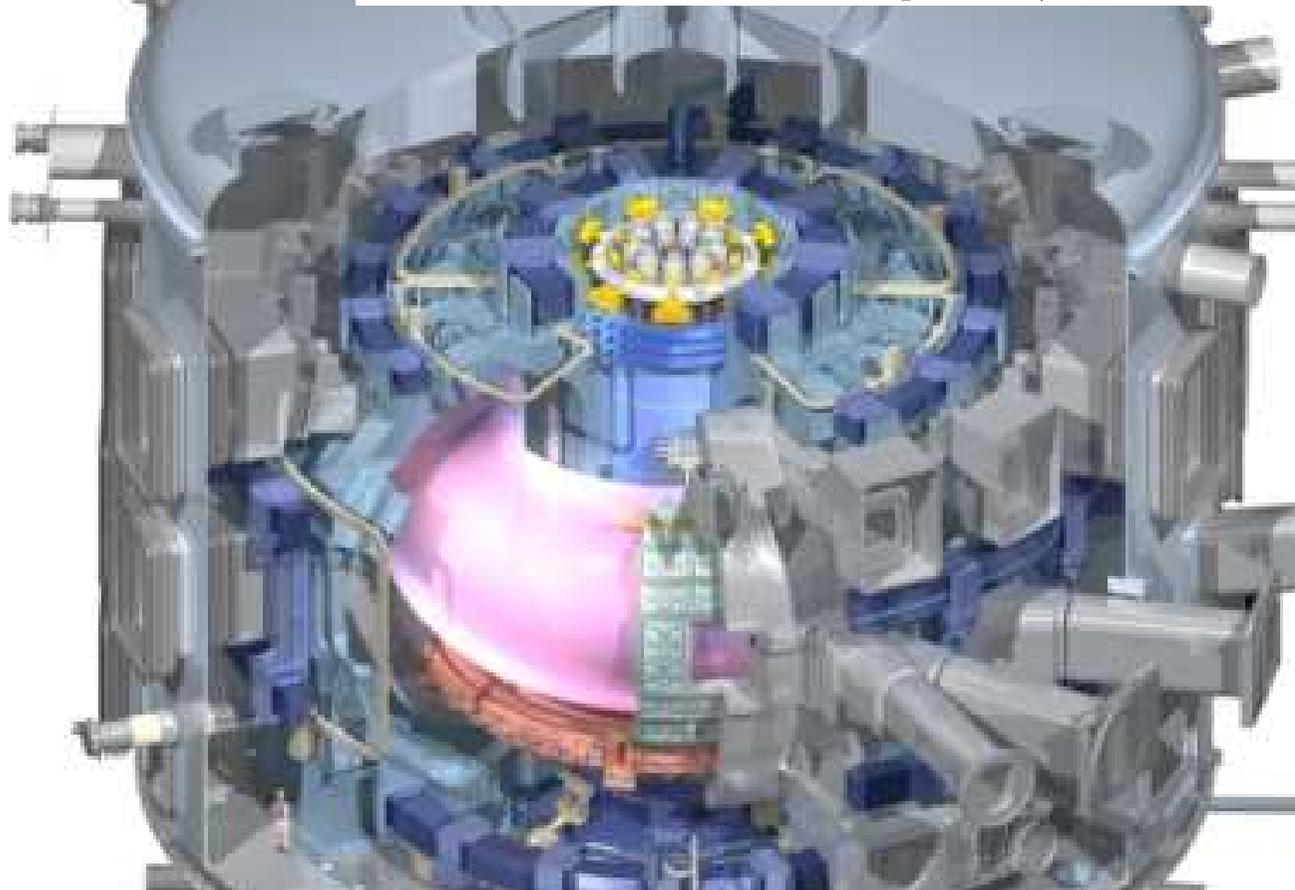
- 下院科学技術委員会は核融合炉は出来ないという。
- 中性子に耐える壁材など無い、
- 中性子が出ないD-³He炉でも目指すんだな。でもそれはエネルギー研究ではない、科学研究だ、と言うんだ。
- TFTRどころか、もう核融合研究は終わりだ。
- どうする？

(1996年)

Z. Chan（NTMの発見者）はMcGuireについて核融合業界から出て行ったが、長山は藤原ワクチンで免疫（ST）ができていたので、McGuireの誘いには乗らなかった



1998年米国、ITER脱退



ITERプラズマ主要諸元

| | |
|------------------|--------------------|
| 主半径(R) | 6.2 m |
| 副半径(a) | 2 m |
| 体積 | 840 m ³ |
| 電流 | 15 MA |
| 磁界強度 | 5.3 T |
| 磁界エネルギー | 41 GJ |
| 核融合出力 | 0.5 GW |
| エネルギー増倍率(Q) | 10以上 |
| 2020年 プラズマ実験開始予定 | |

中性子線を受けてぼろぼろになっていく炉の内壁は、せいぜい1年で取り替えねばなるまい。複雑な形状、超電導コイルに囲まれた狭い場所、高度の取り付け精度。毎年の製造と施工に費やすエネルギーの凄まじさは、想像もつかない

「未来エネルギー核融合の挫折」, 団藤保晴の「インターネットで読み解く!」 No.59, (1998)
<<http://dandoweb.com/backno/981029.htm>>

<http://savingjapan.net/2011/03/21/formspring-response-remember-iter-between-rokkasho-and-france-would-fusion-energy-be-a-good-choice-for-japan/>



中性子問題は予想以上に深刻

核融合炉を目指す以上、解を用意しなければならない



中性子問題の 米国下院科学技術委員会の解

ST Japan

D-³He炉



D-³He炉は可能か、検討した

ST Japan

<0D核融合燃焼方程式>

1. エネルギーバランス

$$\frac{dW}{dt} = P_{ext} + P_{alpha} - P_{Brems} - P_{syn} - \frac{W}{\tau_E}$$

2. 粒子バランス

$$\frac{dn_\alpha}{dt} = \nu_\alpha + \frac{1}{V} \sum_\beta s_{\alpha\beta} N_{\alpha\beta} - \frac{n_\alpha}{\tau_p}$$

(α : H, D, T, ³He, ⁴He, C)

• 核反応数

$$N_{\alpha\beta} = \int_V \delta_{\alpha\beta} \langle \sigma v \rangle_{\alpha\beta} n_\alpha n_\beta dV$$

• アルファ加熱

$$P_{alpha} = \int_V Q_{\alpha\beta}^{alpha} \delta_{\alpha\beta} \langle \sigma v \rangle_{\alpha\beta} n_\alpha n_\beta dV \quad \delta_{\alpha\beta} = \begin{cases} 0.5 & (\alpha = \beta = D) \\ 1 & (others) \end{cases}$$



設計条件

ST Japan

- 閉じ込め時間： ITERスケーリング

$$\tau_{E,IPB98(y)} = 0.0562 R^{1.97} A^{-0.58} \kappa^{0.78} B_t^{0.15} I_p^{0.93} n^{0.41} M^{0.19} P^{-0.69}$$

- ベータ限界： Troyon Limit

$$\beta_{\text{lim}} = \beta_N \frac{I_p}{aB_t} \quad I_p = \frac{5(1 + \kappa^2) a B_t}{2q_a A}$$

- 密度限界： Greenwald Limit

$$n_G = \frac{I_p}{\pi a^2}$$

- Miller-LinLiu Scaling Law

$$\beta_N = \beta_{N0} \left(c_0 + c_1 \kappa + c_2 \kappa^2 + c_3 \kappa^3 \right) \coth \left(\frac{d_0 + d_1 \kappa}{A^m} \right) \frac{1}{A^n}$$
$$\kappa = 1 + \frac{3}{A}$$



Miller-LinLiu Scaling

The Miller-LinLiu Scaling Law

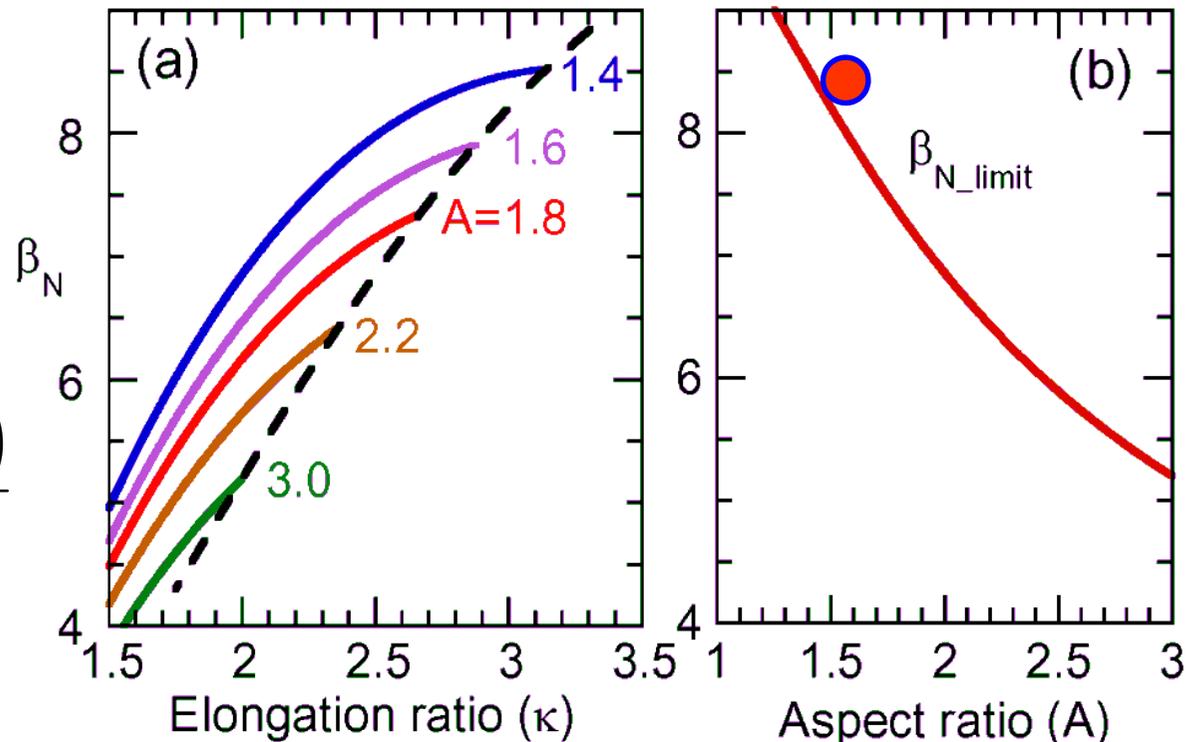
$$\beta_N = \beta_{N0} \left(c_0 + c_1 \kappa + c_2 \kappa^2 + c_3 \kappa^3 \right) \coth \left(\frac{d_0 + d_1 \kappa}{A^m} \right) \frac{1}{A^n}$$

Elongation Ratio

$$\kappa = 1 + \frac{3}{A}$$

Troyon limit

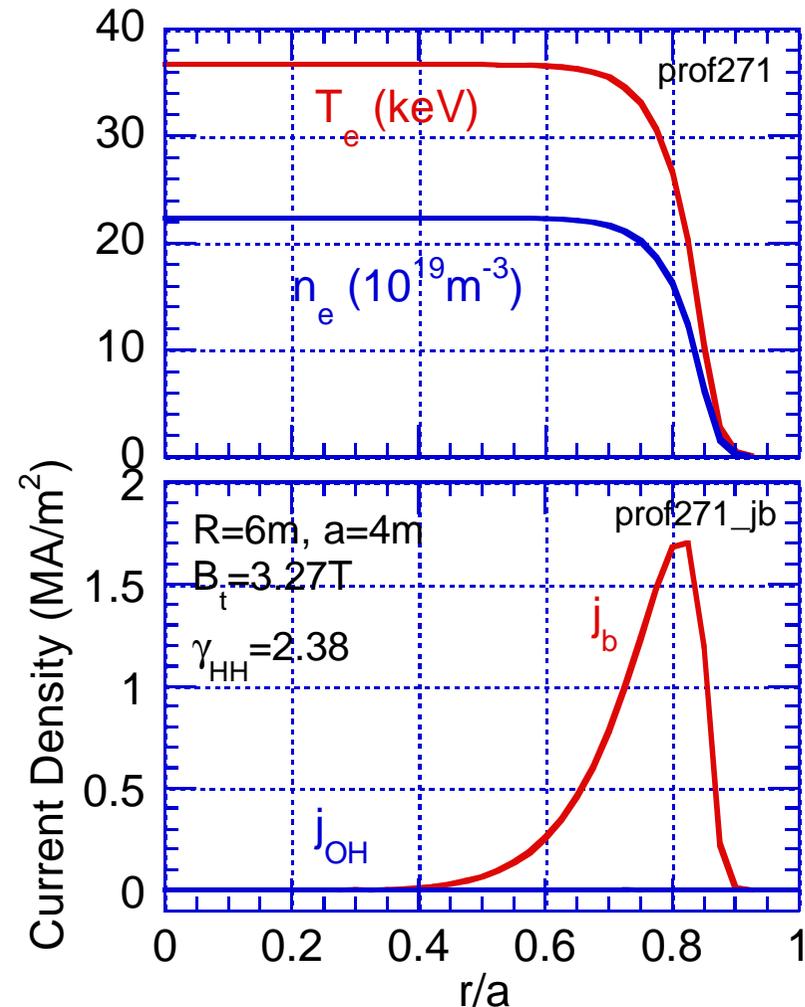
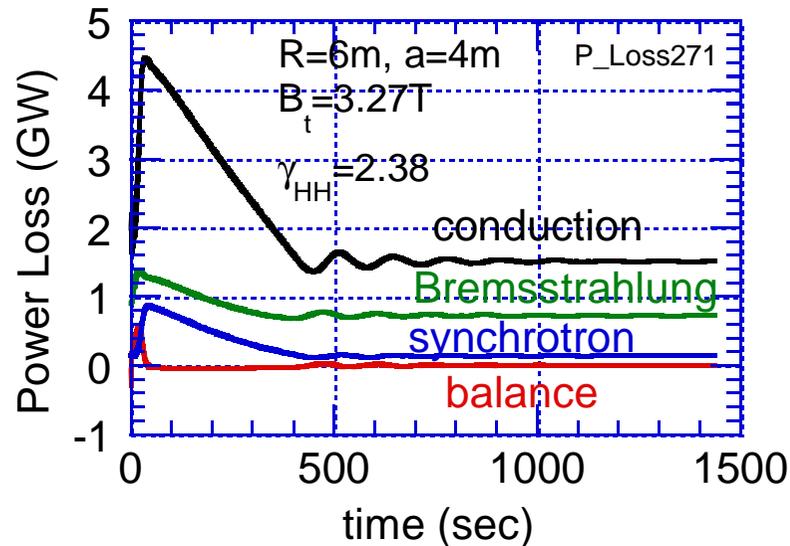
$$\beta_{\text{lim}} = \beta_N \frac{I_p}{aB_t} = \beta_N \frac{5(1 + \kappa^2)}{2q_a A}$$





Box形ITB分布を仮定、定常状態まで計算 シンクロトロン放射より制動放射が大きい

- ITB model is consistent with high f_{BS} (bootstrap current fraction) and high β .



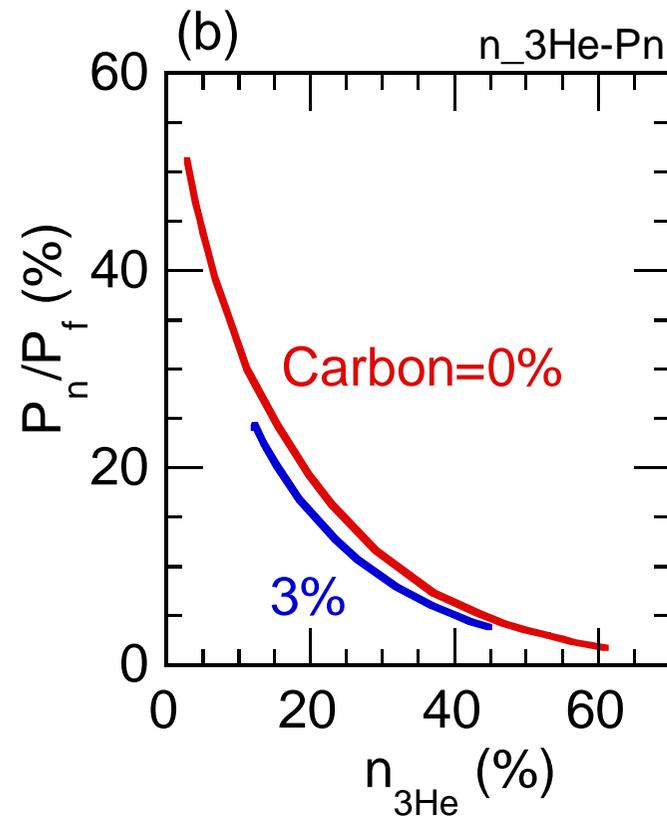
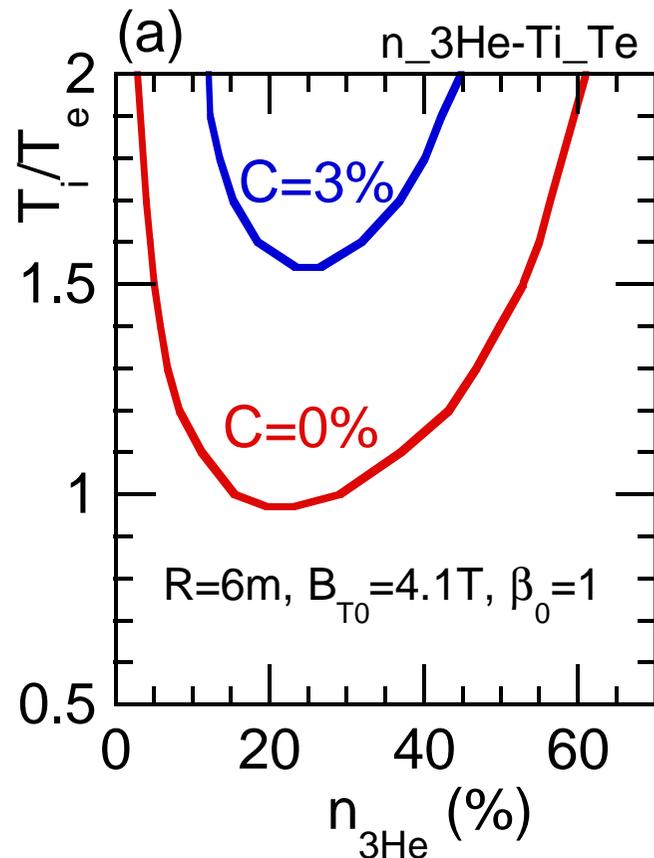


D-³He炉にはHot ionモードが必要 磁気核融合では D-³He 炉は無理！

ST Japan

制動放射を核融合発熱より小さくするにはイオン温度が電子温度より高い必要がある

DD反応のため、中性子量はDT炉の10%程度





米国下院科学技術委員会の答え

D-³He炉は、磁場核融合では無理

ST Japan

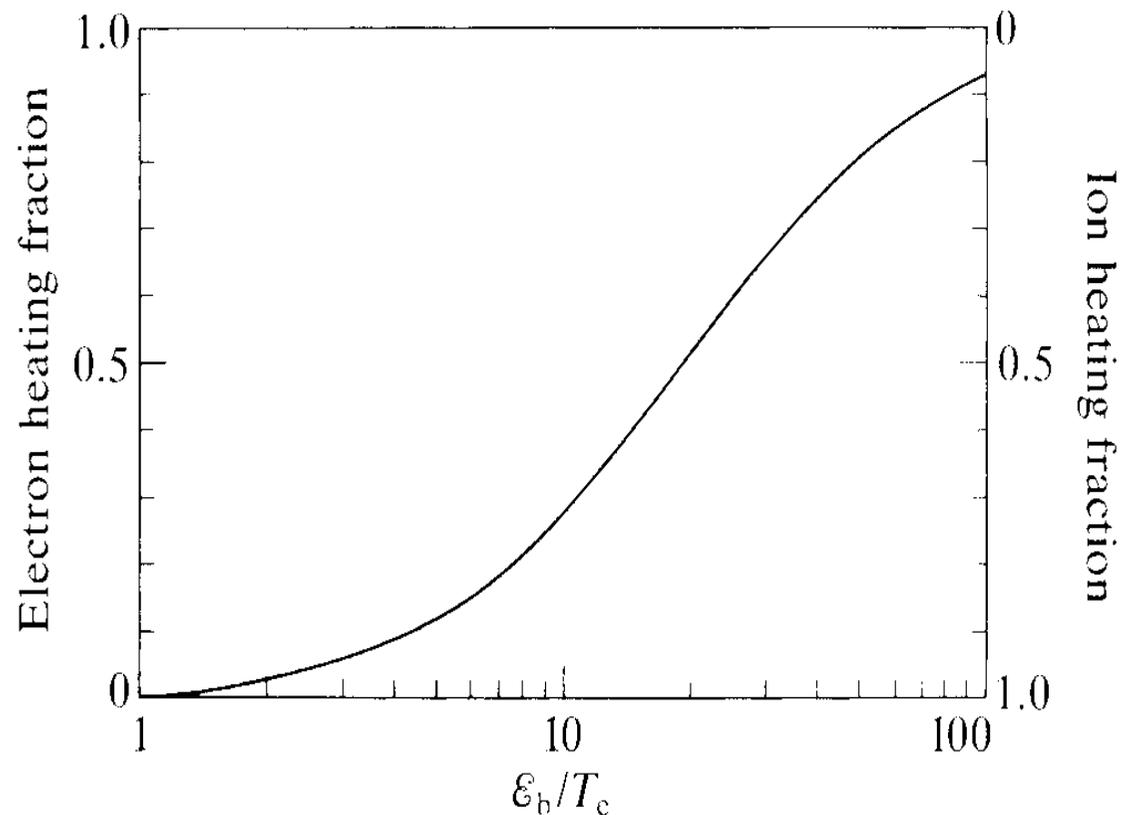
理由

- 中性子量はD-T炉の10%程度、炉壁の寿命が24年に伸びるだけ
- 制動放射のせいで、損失がD-³He発熱量を上回る
 - 制動放射を下げるにはイオン温度が電子温度より高い必要がある
 - アルファ加熱は電子加熱なので、 $T_i > T_e$ はあり得ない



アルファ加熱（3.5MeV）は電子加熱 電子加熱では、 $T_e > T_i$

- 電子加熱による高イオン温度は未経験
 - これまで $T_i=10\text{keV}$ は、正イオンNBIによるイオンITBのみで実現
 - LHDの180keV NBI運転では高イオン温度は得られなかった
 - LHDのECHでは電子のみが加熱され、イオン温度は上がらない
- ITERで高イオン温度は実現するのか？





1995年の長山の課題

ST Japan

1. バルーニングモード退治
2. 中性子問題



1995年の長山の解

ST Japan

1. バルーンモード退治

➤ 第二安定化

➤ ST

伊藤公孝先生の教え

(Q) 圧力が高いほど安定な、第二安定化とは？

(A) プラズマ圧力が磁場を追い出すと、極小磁場ができる。悪い曲率側に極小磁場ができるとバルーンモードなどの不安定性は安定化する。これが第二安定化。

2. 中性子問題

➤ 壁を大きくする

➤ 磁場を下げる⇒ β を上げる

➤ ST



平衡計算で色んなことが分かる

STでは電流ホールと磁場ホールがしやすい

ST Japan

STでは、ふつうに

1.楕円度 (κ) が高い

- 電流が流せる
- β 限界が高い

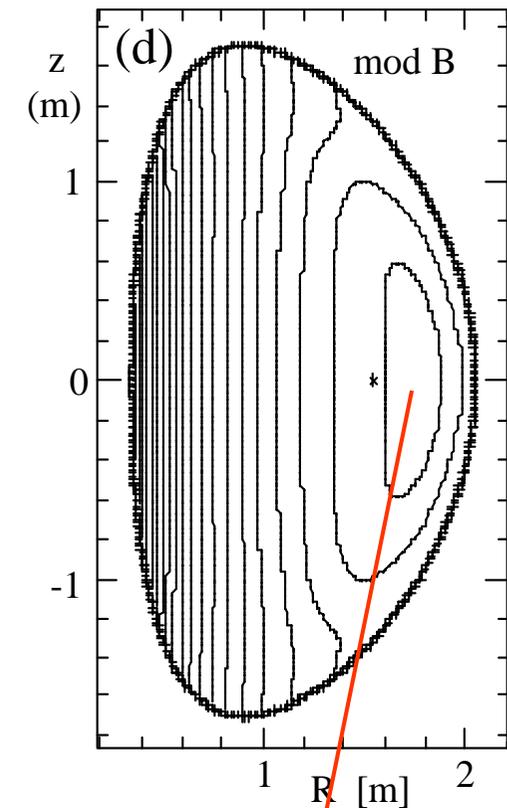
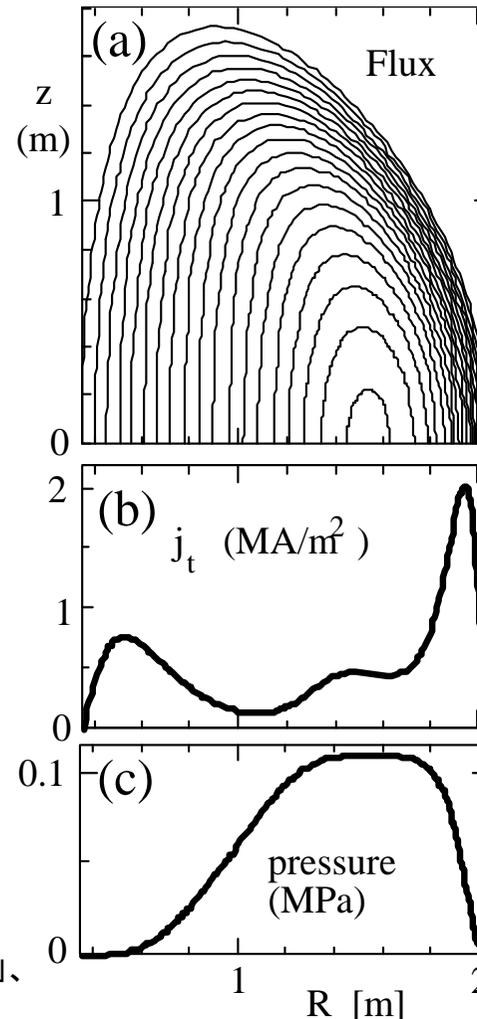
2.電流ホールができる

- Bootstrap電流と整合する
- 定常化しやすい

3.磁場ホール (minimum B) ができる

- 不安定性が成長しない
- バルーニングモードが第二安定化する
- 乱流が抑えられる

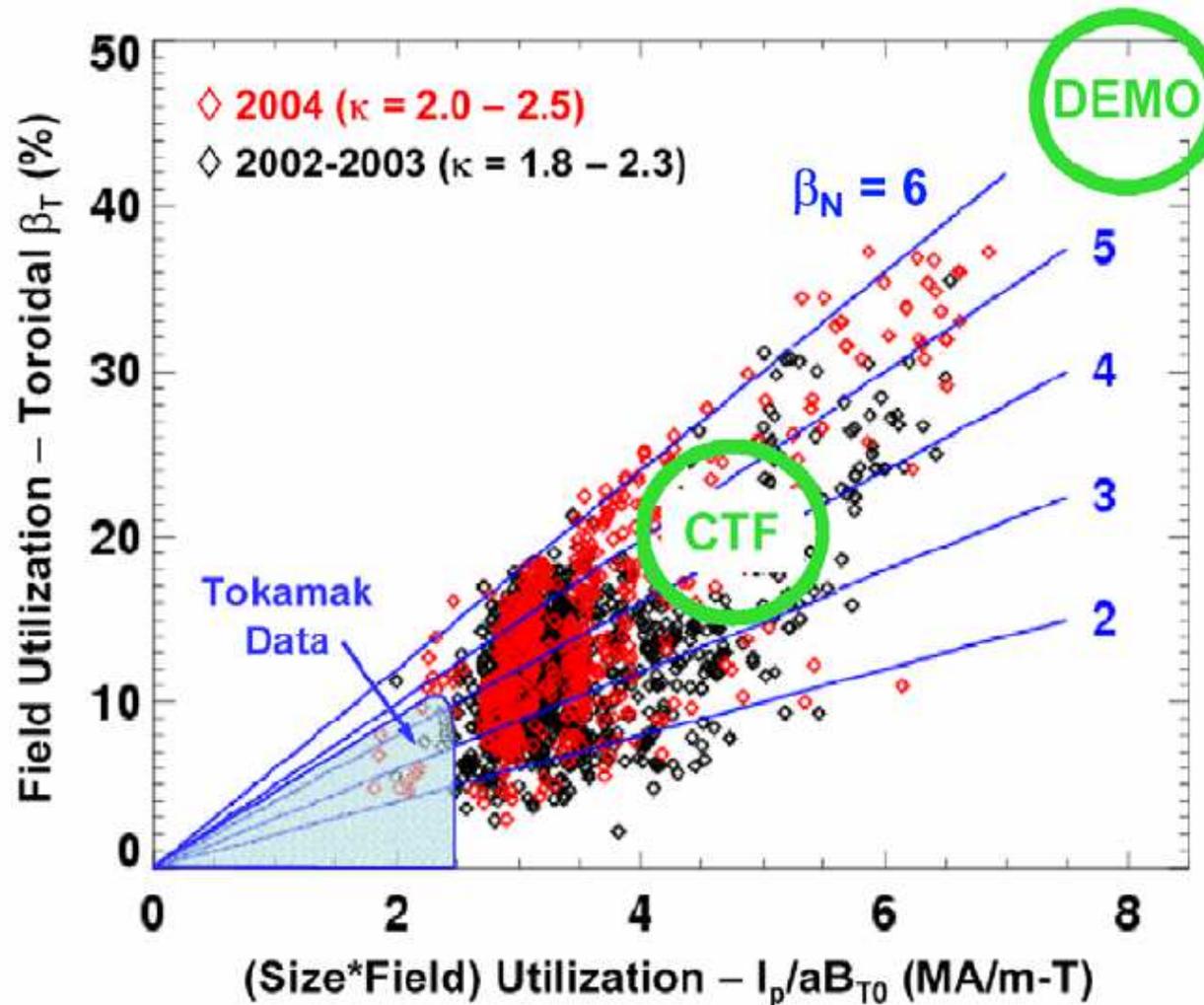
長山好夫:「第二安定化球状トラス核融合炉の可能性」、
電学誌A Vol.119-A, No.11, pp.1280-1285 (1999).



磁場ホール



STは実験的にも高 β



Troyon limit

$$\beta_{\text{lim}} = \beta_N \frac{I_p}{aB_t}$$
$$= \beta_N \frac{5(1 + \kappa^2)}{2q_a A}$$



中性子問題の長山の解(1995)

ST Japan

<長山の解>

- 真空容器壁面積を10倍に大きくする
- コストは、低磁場化で下げる
- それには、STだ！



中性子問題の長山の解(1995)

ST Japan

<長山の解>

- 真空容器壁面積を10倍に大きくする
- コストは、低磁場化で下げる
- それには、STだ！

<西尾の反論>

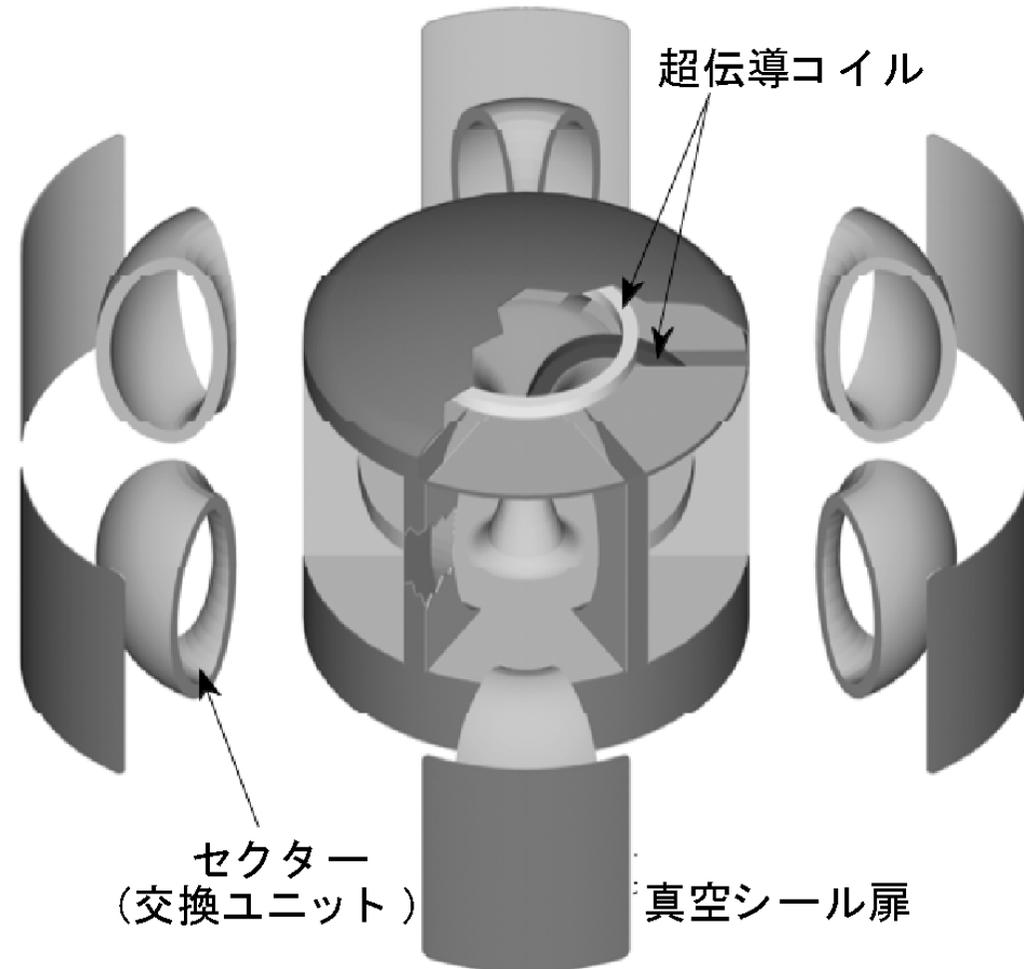
- そんなのは解にならない。
- ブランケットが大きくなりすぎてコスト高だ。

中性子問題の西尾の解

ブランケットのセクター式交換

セクター方式炉内保守

- トカマク実用炉ではセクター方式でブランケット交換し、中性子損傷を受けた炉壁を頻繁に交換する。



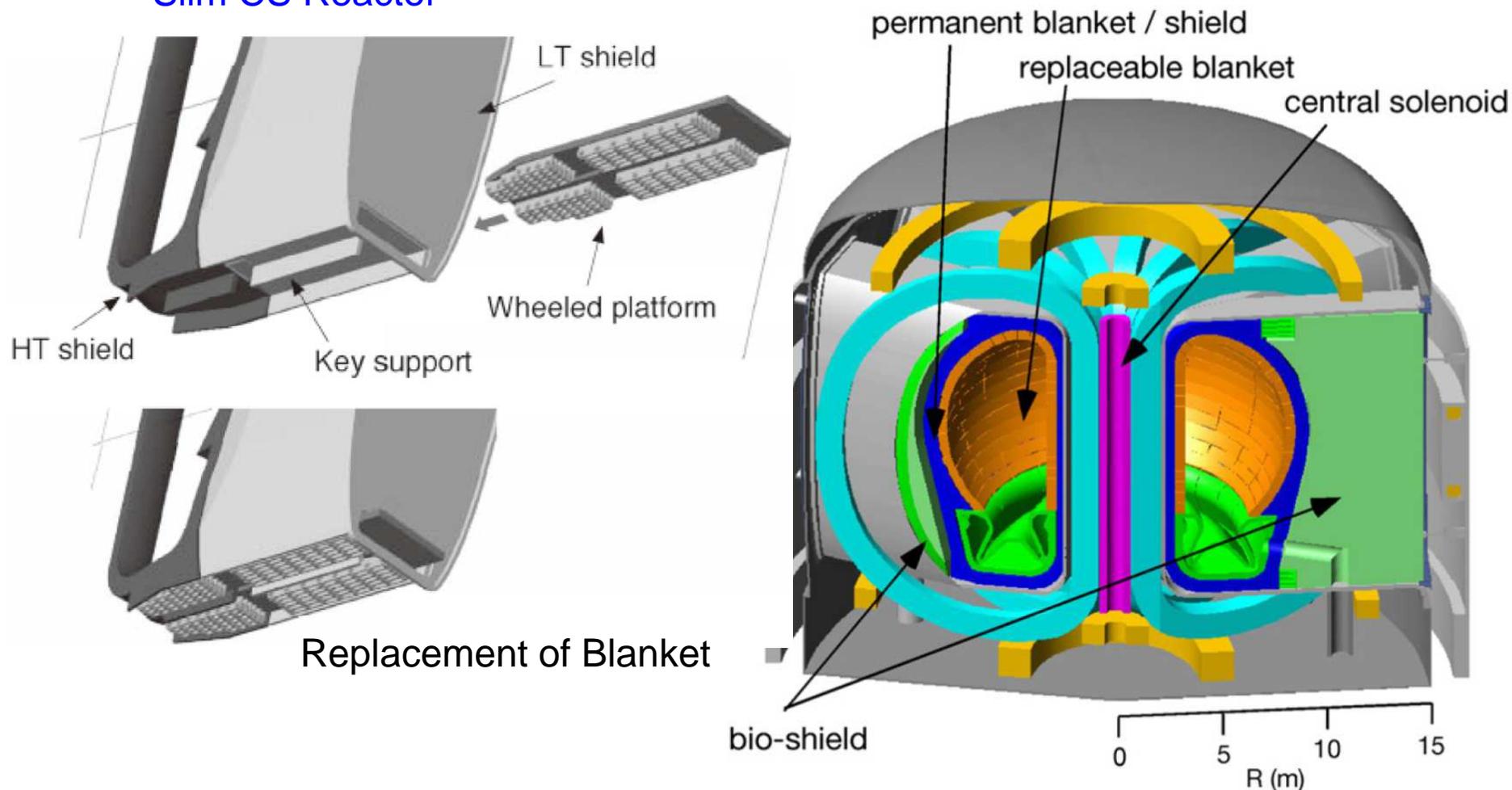
プラズマ・核融合学会第18回年会
(2001年11月, 福岡県春日市)

10日で壁（ブランケット）交換



ST Japan

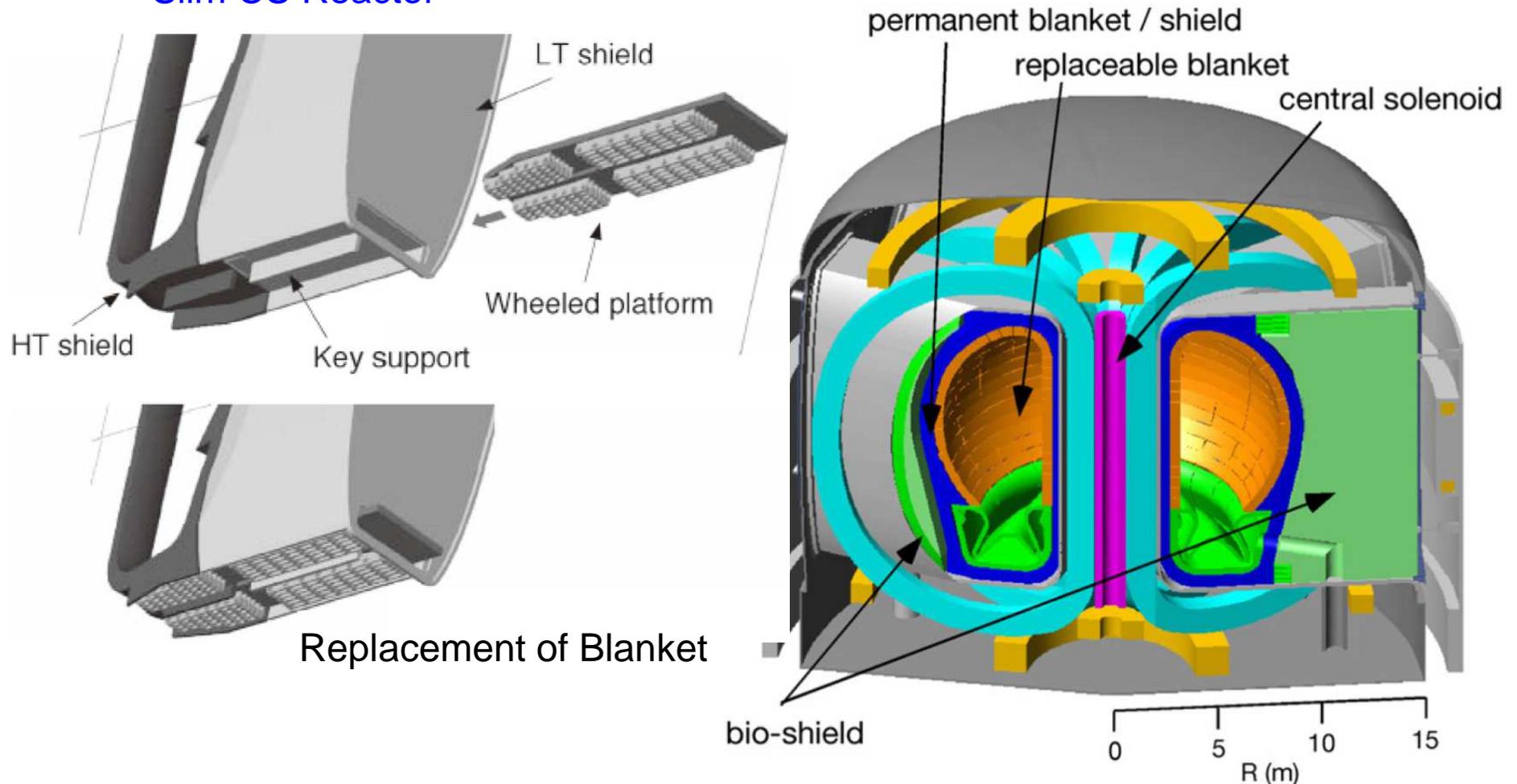
Slim CS Reactor





10日で壁（ブランケット）交換 交換ポートの強度は大丈夫？

Slim CS Reactor





大きなポートは、 捩り力（ $j_{TF} \times B_z$ ）に弱い

ST Japan

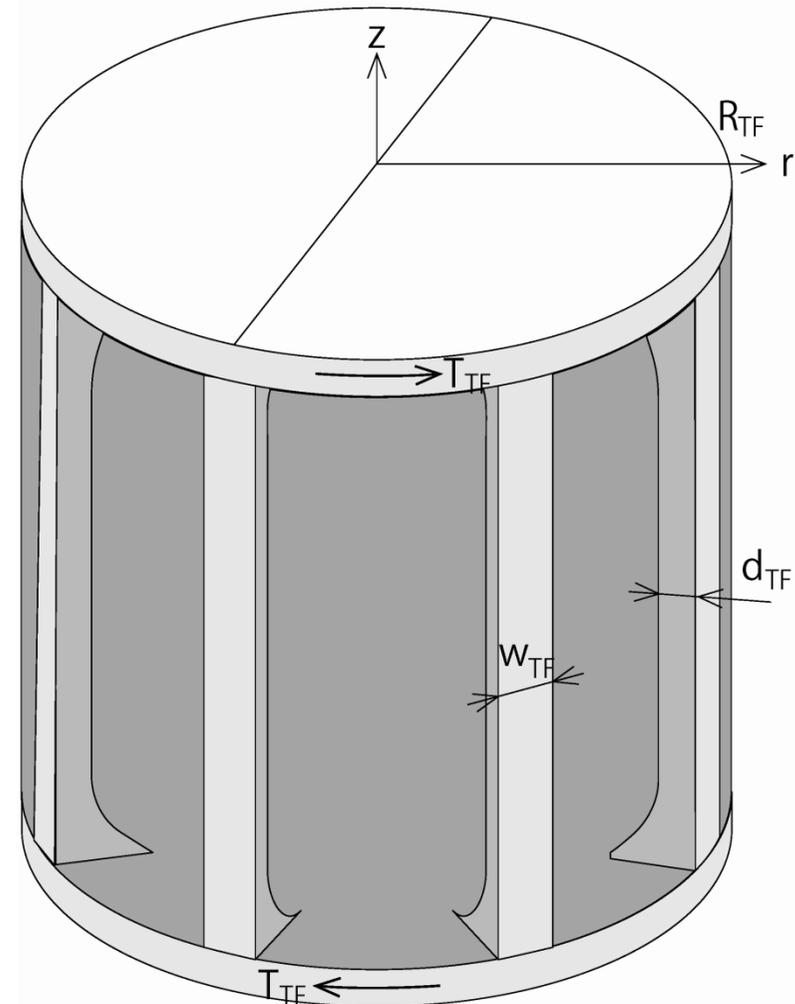
- Large port abandons standard TF coil support, such as compression plate between TF return coil
- Shear stress (τ)

$$\tau = \frac{R_{TF} T_{TF}}{I_\tau}$$

Second polar moment of inertia = 0.1 [Mm⁴]

$$I_\tau = \int_r r^2 dA$$

- Support parameters
 - $w_{TF}=1.6$ [m], $d_{TF}=2$ [m]
 - $\tau=60$ [MPa]
 - Strain: 0.3 mm
- The torque can be supported.

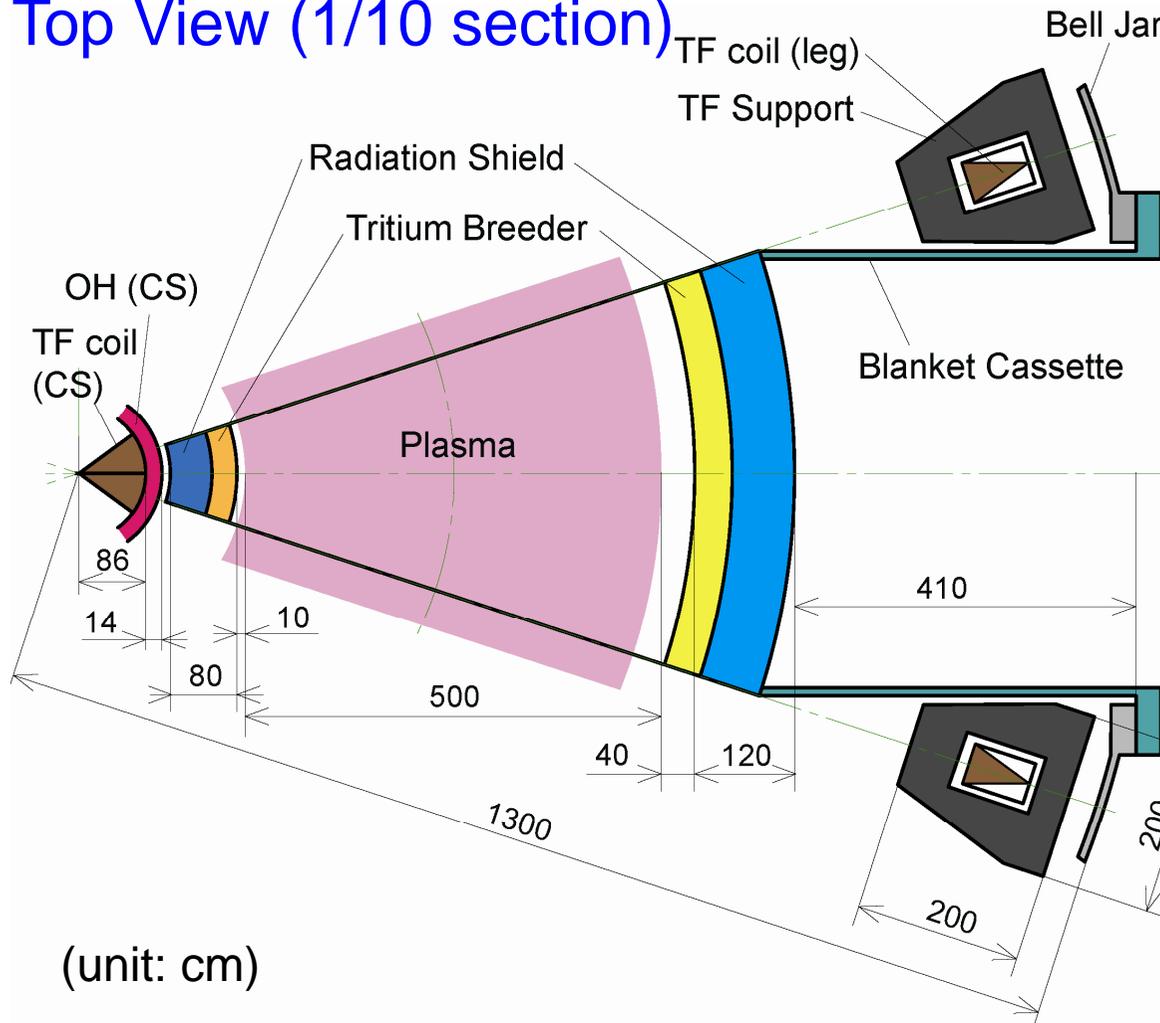




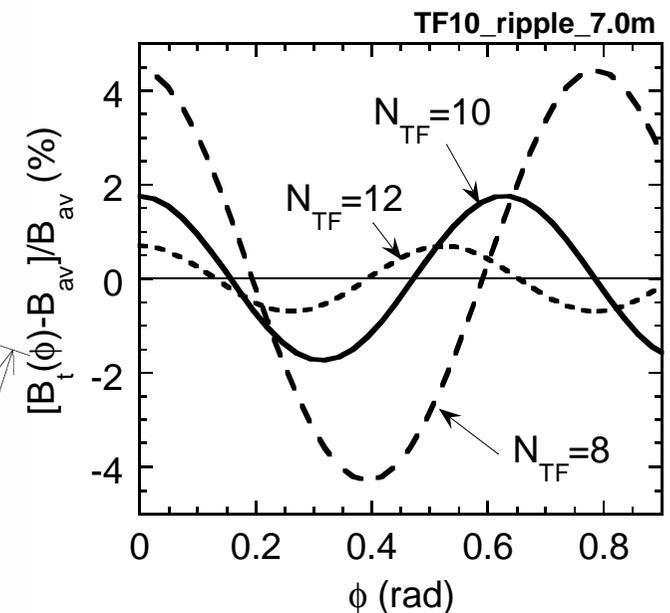
STなら強度は十分

低アスペクト比なので強い支持構造が可能

Top View (1/10 section)



- TFコイル数を減らすことでスペースを確保する
- $N=10$ でも、 α 粒子損失の谷の条件 “ripple < 2%” を満足する





STでは、センターポスト の中性子束が高すぎる？

ST Japan

<長山の発表>

- STでは、センターポストの中性子束が高いため、原子炉使用済み核燃料の核変換処理が効率的に行える

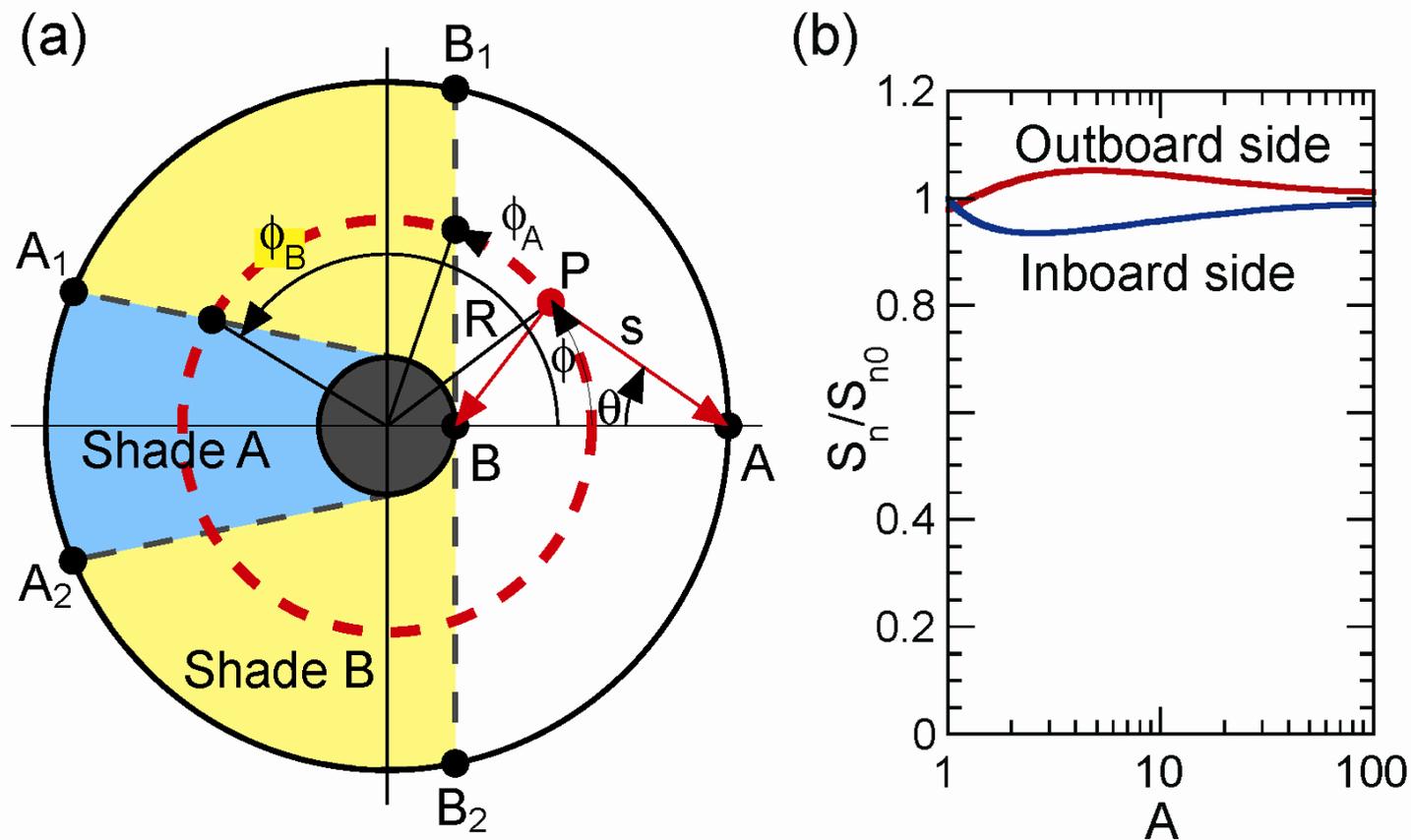
<西尾の反論>

- 中心側も外側も中性子束は同じだ。
- アスペクト比にも関係ない。
- 自分で計算しろ。

第3回核融合エネルギー連合講演会（2000年6月、愛知県春日井市）

家に帰って、計算した。
西尾先生は正しかった。

- 中心側も外側も中性子束は同じ。アスペクト比にも関係ない。





経済性向上が核融合実現のカギ

ST Japan

原子力発電所は4千億円なのに

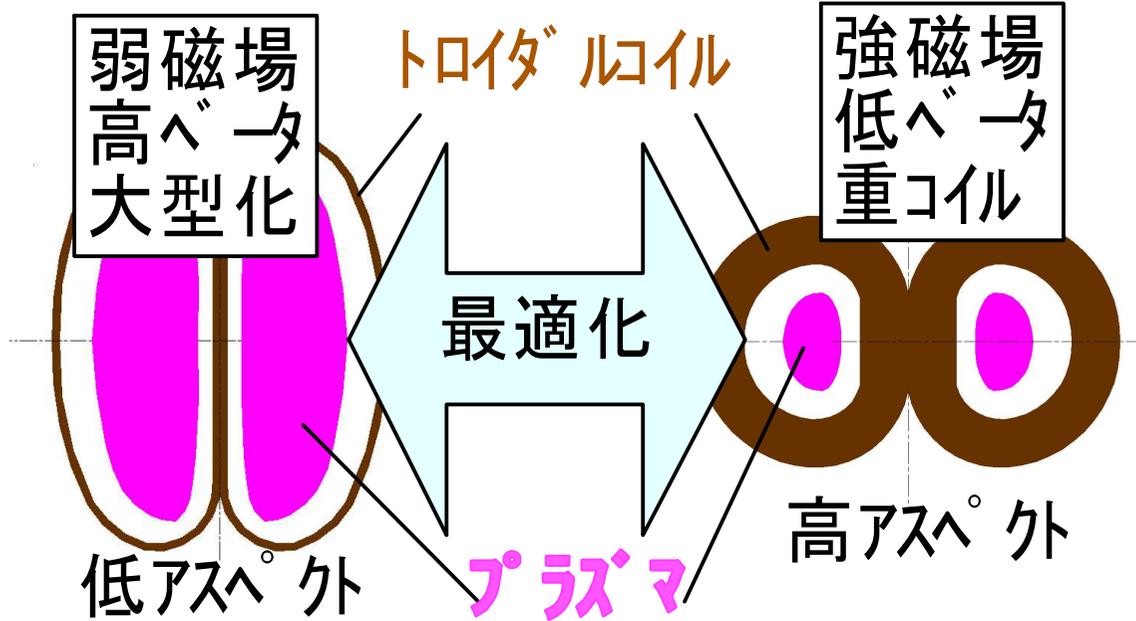
- ITER (40GJ) の建設コストは2兆円以上
 - 高コストが研究の進歩を妨げる
 - LHD (1GJ) の建設コストは0.05兆円なので、建設コストは磁場エネルギーに比例する
 - 磁場エネルギー = 磁場² × 体積
 - 強力な磁場圧力を支えるのには、膨大な支持構造物が必要



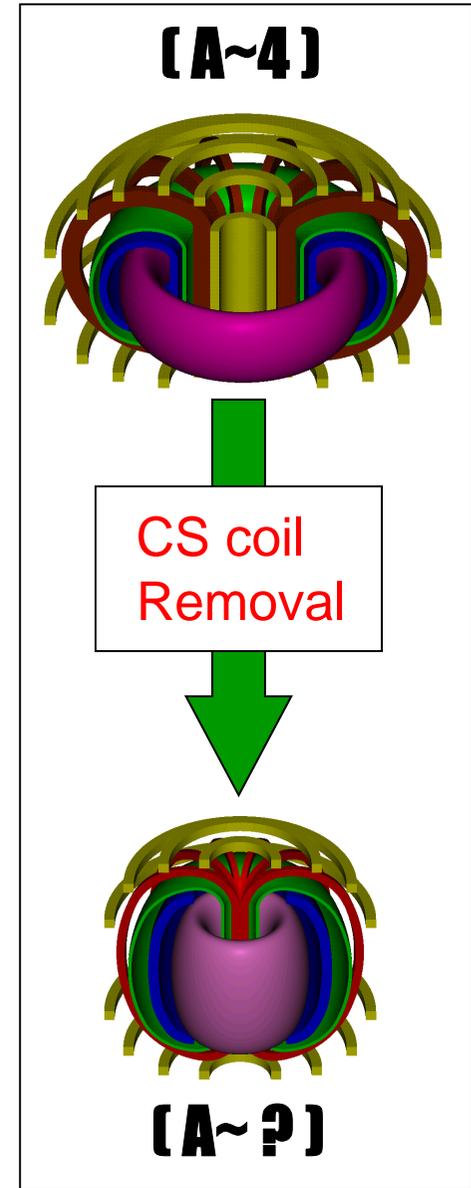
西尾先生の解

CSコイルなしで低Aだ!

高磁場・高アスペクト比か
低磁場・低アスペクト比か？



Power/Weight Ratio

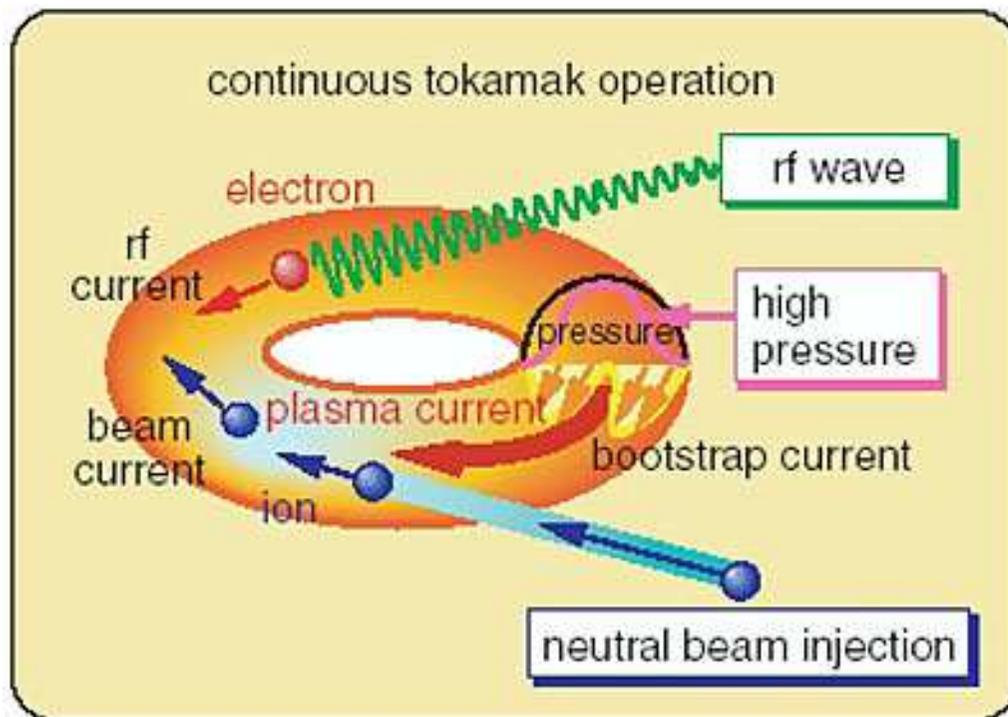


CSなしトカマクは可能か？

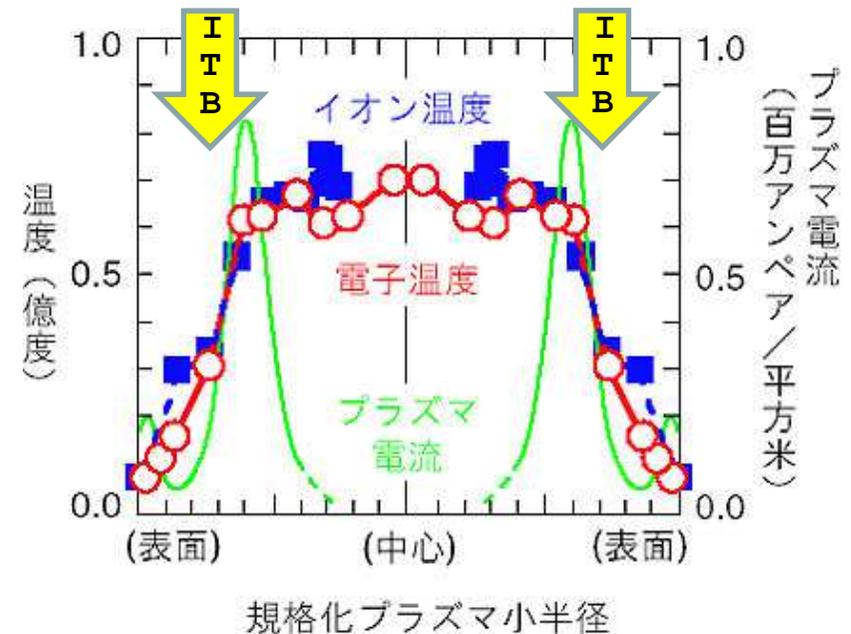
東大・高瀬研がJT-60Uで実験したら準定常/ITBトカマクができた



- High-temperature plasma is generated and sustained by using RF waves, NBI, and bootstrap current in JT-60U.
- The ITB is produced in the steady state tokamak plasma, then 90% of the plasma current is bootstrap current.



Internal Transport Barrier (ITB)

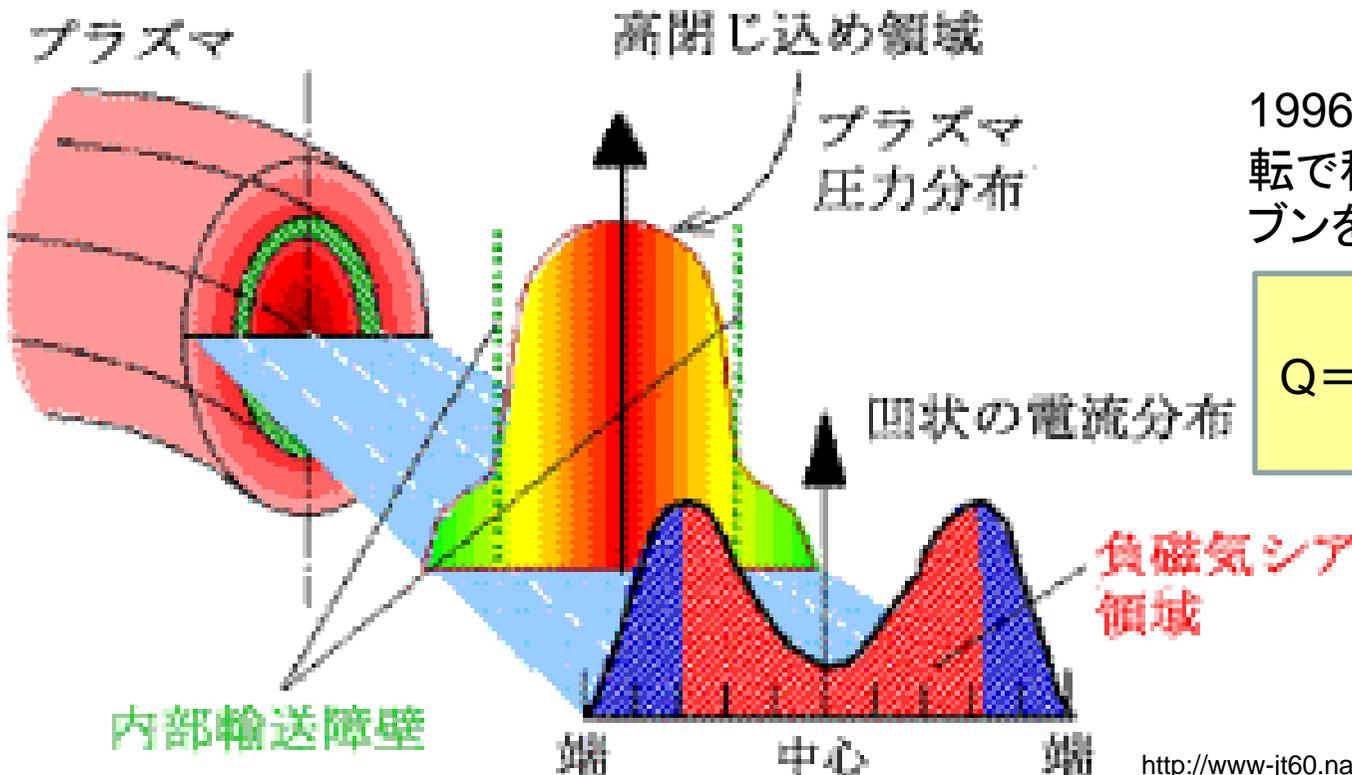




核融合発電炉は実現可能

壁交換しやすいST、ITBとBS電流でプラズマ維持

- 高温・高閉じ込めのために、ITBが必須
- 定常＝高BS電流のために、ITBが必須
- BS電流による凹型電流分布はITBに必須 ⇒ MHD不安定性を励起しやすい



1996年, JT-60UのITB運転で科学的ブレークイーブンを達成

$$Q = \frac{\text{核融合出力}}{\text{加熱入力}} > 1$$

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/html/yougo.html#NA>

NBIは中性子遮蔽・壁交換が困難

マイクロ波駆動ST炉に期待

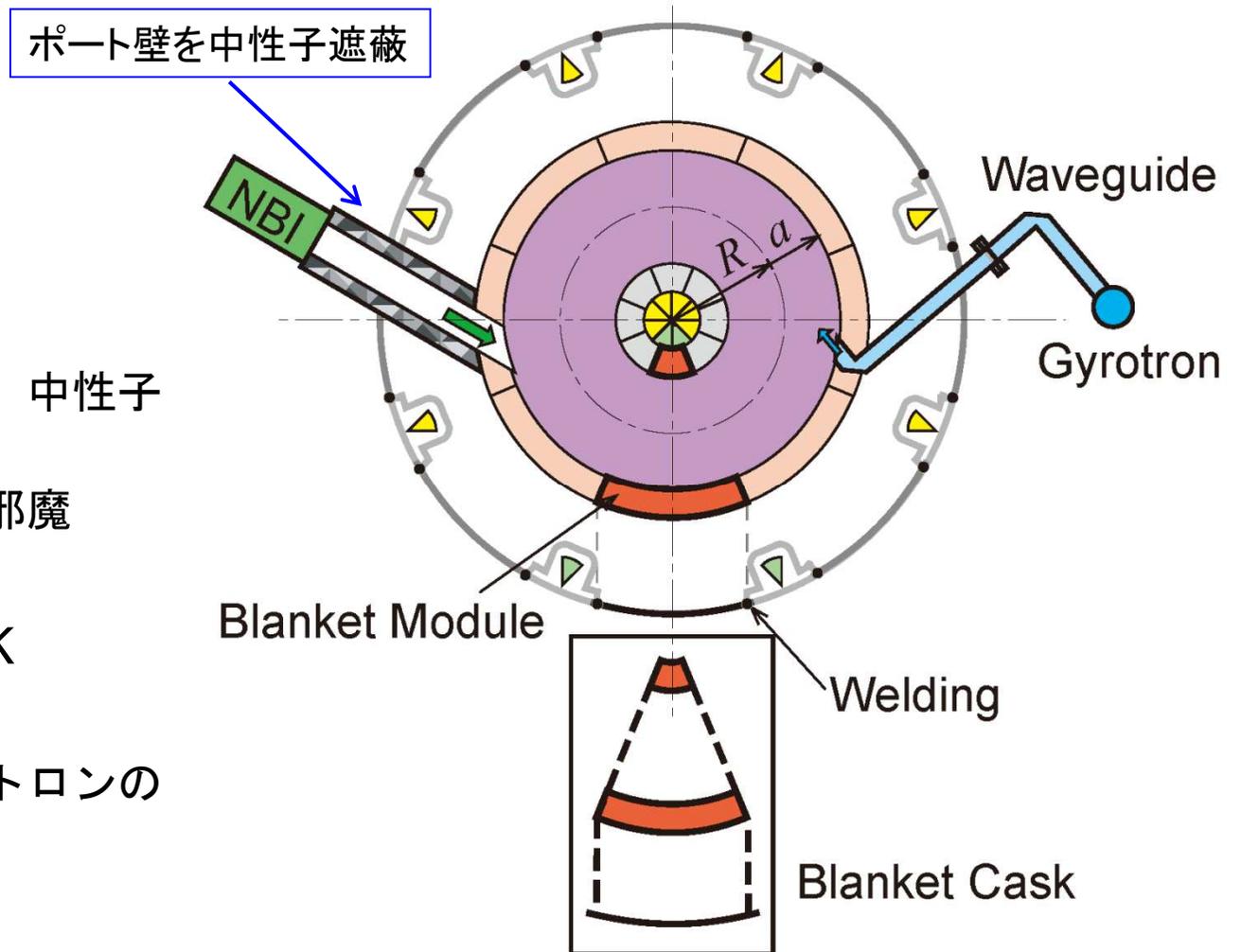
加熱・駆動

- **NBIは不可**

- 中性子の直射を受け、中性子遮蔽が困難
- ブランケット交換の邪魔

- **マイクロ波駆動はOK**

- 中性子遮蔽
- アンテナ、ジャイロトロン
のメンテナンス可能



残された課題（疑問？）

高磁場STでのECH・ITB実験で大半の疑問は回答可能



ST Japan

- ブランケット交換は可能？
 - ST（低磁場）プラズマでのITBは可能？
 - LHDでは磁場2T以下ではITBができなかった。
 - NBIを置く場所がない
 - ECHでイオン温度10keVは可能？
 - ITBでは電子の閉じ込めも良いので希望はある
- 自己組織化トカマクは可能？
 - アルファ加熱による自己維持は可能？
 - アルファ加熱は電子加熱⇒電子加熱でITBは可能？
 - ブーストラップ電流による定常維持は可能？
 - ITBプラズマのMHD安定化
 - Greenwald密度限界はBS駆動トカマクでは変わるか？



西尾先生の教え

ST Japan

- 絵（設計図）を描け
 - 設計図を描くと問題点が明らかになる
- 反対意見をひねり出して議論しろ
 - 大河先生（GA副社長）は、想定される反対意見を出す赤信号チームを作り、青信号チームの計画を批判させ、予算計画書を作った
- 未来技術ではなく、現在の技術で解を見つける
- 炉設計に直接役立つ物理研究をしてくれ
- **どんな難問にも答はある。自分の頭で考えろ。**

絵を描いてみた



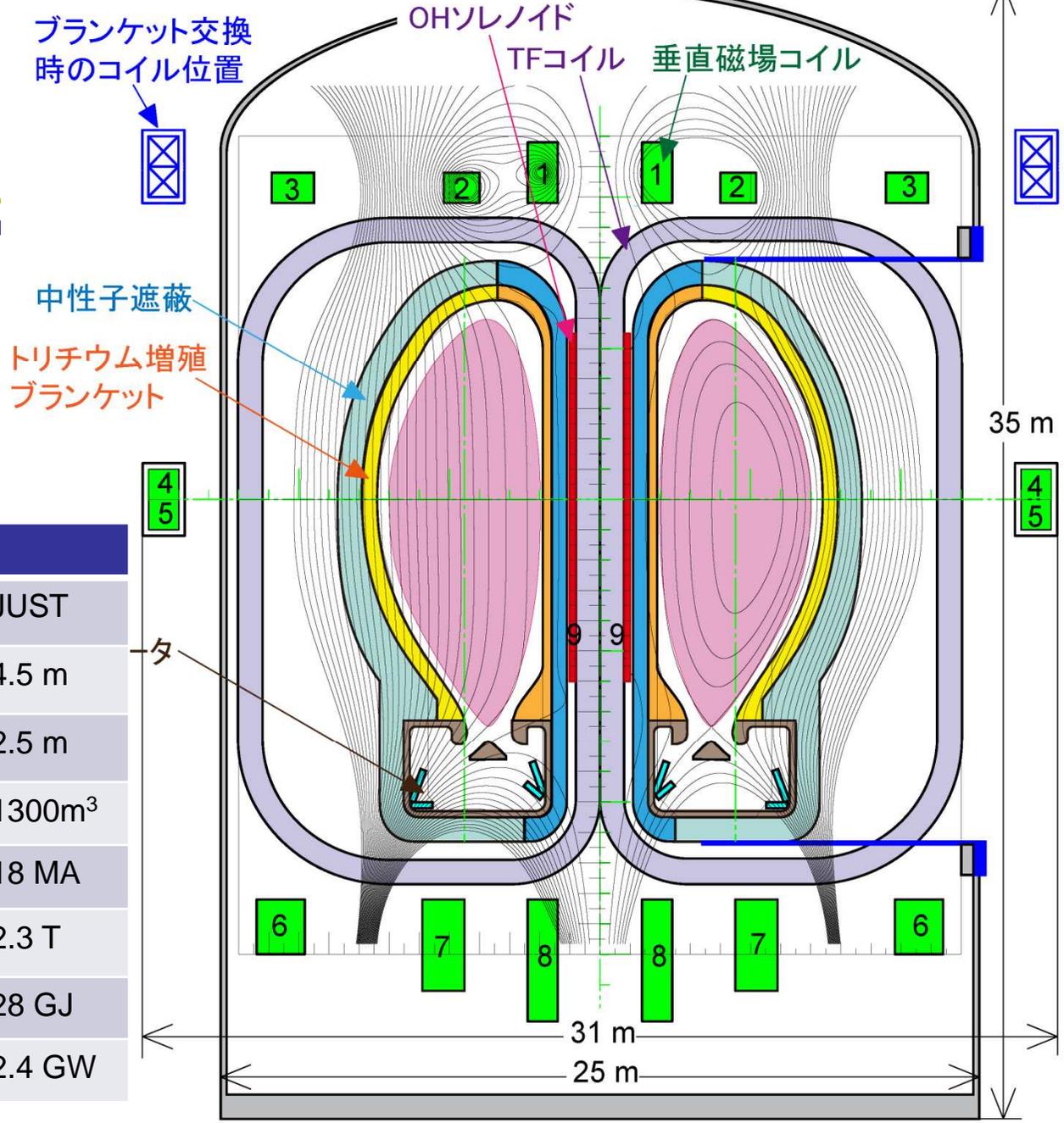
JUST

Japanese Universities'
Super Tokamak reactor

A 800MWe Fusion
Power Reactor

Major Specifications

| | ITER | JUST |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|
| Major radius (R) | 6.2 m | 4.5 m |
| Minor radius(a) | 2 m | 2.5 m |
| Volume | 840 m ³ | 1300m ³ |
| Plasma Current (I _p) | 15 MA | 18 MA |
| Toroidal Field (B _t) | 5.3 T | 2.3 T |
| TF Energy | 41 GJ | 28 GJ |
| Fusion Power | 0.5GW | 2.4 GW |





電気学会・核融合炉の経済性向上調査専門委員会報告書
球状トカマクをベースとする核融合発電炉
 平成25年12月発行

ST Japan

| | | | |
|-----------------------------------|----|-----------------------|-----|
| はしがき | 1 | 3.2 周辺プラズマと対向機器の相互作用 | 66 |
| 1. はじめに | 4 | 3.3 燃料供給 | 71 |
| 1.1 熱核融合の原理 | 4 | 3.4 ブランケット | 75 |
| 1.2 核融合プラズマ保持装置 | 6 | 3.5 炉材料 | 80 |
| 1.3 核融合発電炉 | 7 | 3.6 中性子遮蔽 | 87 |
| 1.4 核融合エネルギーの必要性 | 9 | 3.7 トリチウムと安全性 | 91 |
| | | 3.8 トリチウムの回収 | 95 |
| 2. 炉心プラズマの物理 | 11 | 4. 核融合発電炉の概念設計 | 97 |
| 2.1 MHD平衡 | 11 | 4.1 はじめに | 97 |
| 2.2 MHD不安定性と β 限界 | 18 | 4.2 ST炉心プラズマの物理モデル | 99 |
| 2.3 輸送 (Lモード、Hモード、ITB) | 24 | 4.3 超電導ST炉の概念設計 | 103 |
| 2.4 ブートストラップ電流 | 31 | 4.4 構造概念 | 104 |
| 2.5 加熱と電流駆動の理工学 | 35 | 4.5 ブランケット, 発電 | 109 |
| 2.6 α 加熱と α 粒子の閉じ込め | 42 | 4.6 コスト、環境負荷、エネルギー比評価 | 116 |
| 2.7 制御 | 51 | | |
| 3. 炉工学 | 60 | 5. まとめと今後の課題 | 121 |
| 3.1 超電導マグネット | 60 | 5.1 まとめ | 121 |
| | | 5.2 開発項目とロードマップ | 125 |

教科書
 プラズマ物理

ST炉設計

教科書
 炉工学

課題抽出

電気学会・核融合炉の経済性向上調査専門委員会 西尾委員長からのメッセージ



委員長 西尾 敏 (1952 – 2009)
(photo: 2007.3.2 at NIFS)

「核融合炉が実現できない」理由については

- 中性子に耐える材料がない
- ダイバータの熱流束に耐える材料がない
- 高磁場を発生できる超伝導線がない
- 自己点火炉までの実験データベースがない
- コストが高すぎる

などいくらかでも挙げられる。

他方、「アカデミズム」の名目で核融合炉設計には不要な理論・実験研究も多い一方で、必要な研究がかなり欠けている。

核融合発電を実現するには、情熱を持ち、知恵を絞って現在の技術でできる範囲を見通し、必要な知識やデータを得る努力をしなければならない