

平成25年3月15日(金)15:00~16:30  
ES総合館 3階 034講義室

# 最終講義

## プラズマと核融合の未来 ～実験と理論の狭間で～

名古屋大学大学院工学研究科  
山崎 耕造

# 過去・現在・未来

Dreifach ist der Schritt der Zeit:  
Zoegernd kommt die Zukunft hergezogen  
Pfeilschnell ist das Jetzt entfliegen  
Ewig still steht die Vergangenheit

Sprüche des Konfuzius  
Friedrich von Schiller

時の歩みは三重である。  
未来はためらいながら近づき、  
現在は矢のように速く飛び去り、  
過去は永久に静かに立っている。

「孔子の言葉」より  
フリードリヒ・フォン・シラー  
(ドイツの詩人・劇作家)

# 未来の夢

SF映画にでてくる「核融合」

大学1年生

## 2001: A Space Odyssey (1968)

Eighteen months ago,  
the first evidence of intelligent life  
off the Earth was discovered.  
Its origin and purpose still a total mystery.

映画「2001年宇宙の旅」より、  
核融合宇宙船ディスカバリー号の映像が、  
「ツァラトストラはかく語りき」の  
音楽にあわせて紹介された。

(著作権保護の為に動画削除)

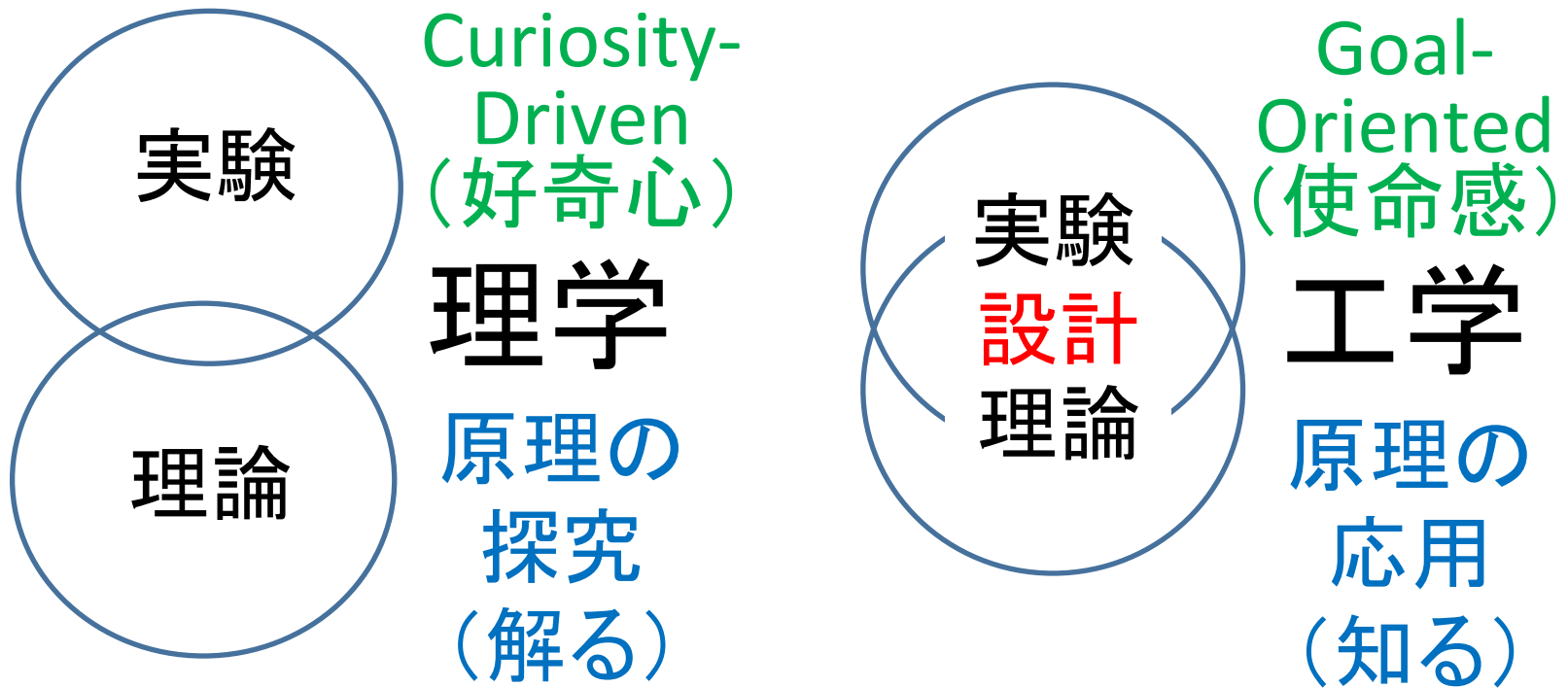
[http://  
www.cinemabox.com/  
filmarc/2001/img/  
yokoku.html](http://www.cinemabox.com/filmarc/2001/img/yokoku.html)

# 夢への挑戦

分野： プラズマ屋か炉工屋か？

手法： 理論屋か実験屋か？

# 理論と実験の狭間で



実験的実験家  
理論的実験家  
実験的理論家  
理論的理論家

純実験屋、装置屋、測定屋  
装置屋設計屋、データ解析屋  
計算機屋、シミュレーション屋  
純理論屋、解析屋

# 教育・研究歴

●学部(東京大学、4年間)

●大学院(東京大学、5年間)

+学振奨励研究員(約1年間)

●名古屋大学プラズマ研究所(約10年間)

プリンストン大学プラズマ物理研究所 2年間

●名古屋大学核融合研究所(仮称)創設準備室(約1年間)

●核融合科学研究所(約16年間)

(約8年間は東山キャンパス)

●名古屋大学工学研究科(8年間)

名古屋大学  
約10+1+8=約19年間  
(東山キャンパスは約27年間)

## 核融合開発のトピックス

- (S53-S63) 名古屋大学プラズマ研究所： 助手、助教授  
プラズマ研究所移転問題 =>ヘリカル、土岐
- (S63-H01) 名古屋大学核融合研究所(仮称)創設準備室：助教授  
常温核融合騒動 =>沈静化、着実な研究の必要性
- (H01-H17) 核融合科学研究所： 助教授、教授  
ITER誘致問題 =>トカマク、カダラッシュ(フランス)
- (H17-H25) 名古屋大学工学研究科： 教授  
福島第一原子力発電所事故 =>…、巨大科学の安全性

●学部時代(東京大学、4年間)  
卒論(核融合炉設計)

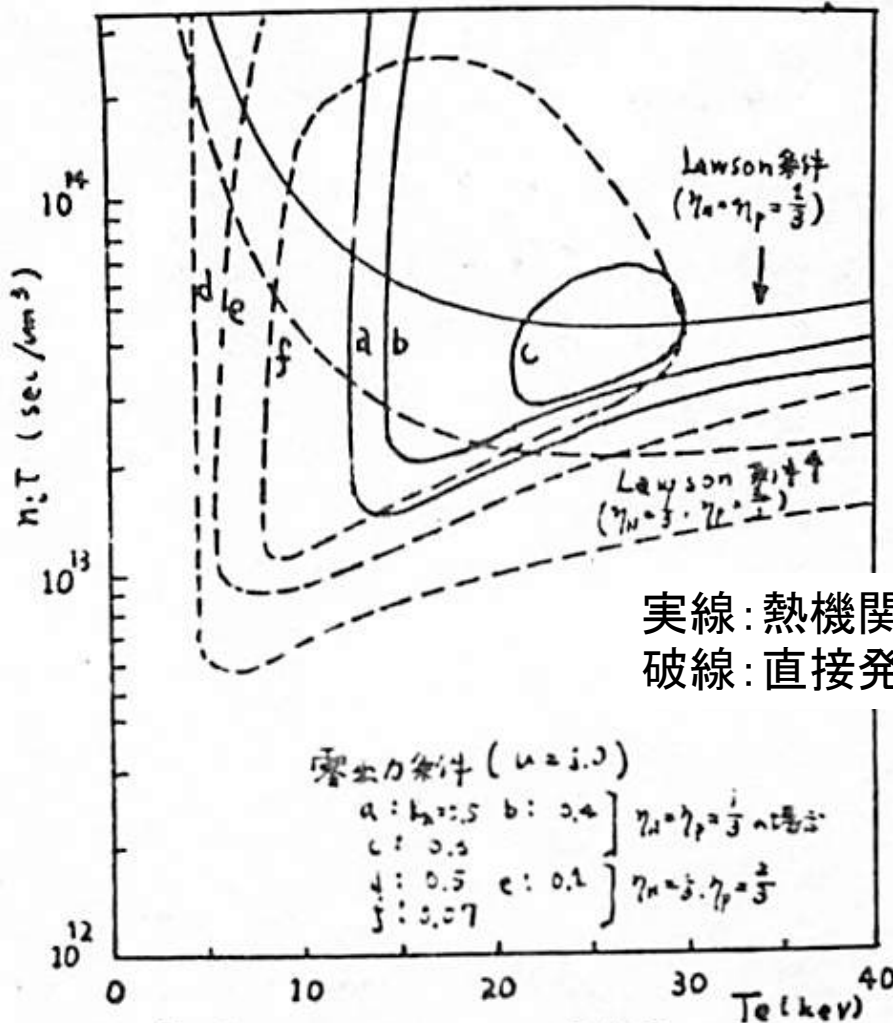
●大学院時代(東京大学、5年間) +  
学振奨励研究員(約1年間)  
修論(TORIUT実験)  
博論(PT-1、PT-2実験)



## 「核融合炉の臨界条件」

モデル: パルス炉、または、定常炉  
 熱核反応、TCT反応  
 方程式: 発電エネルギーバランス  
 プラズマパワーバランス  
 粒子バランス

アルファ灰のローソン曲線への影響  
 熱核反応、TCT反応熱核反応の  
 ローソン条件の明確化



実線: 熱機関発電  
 破線: 直接発電

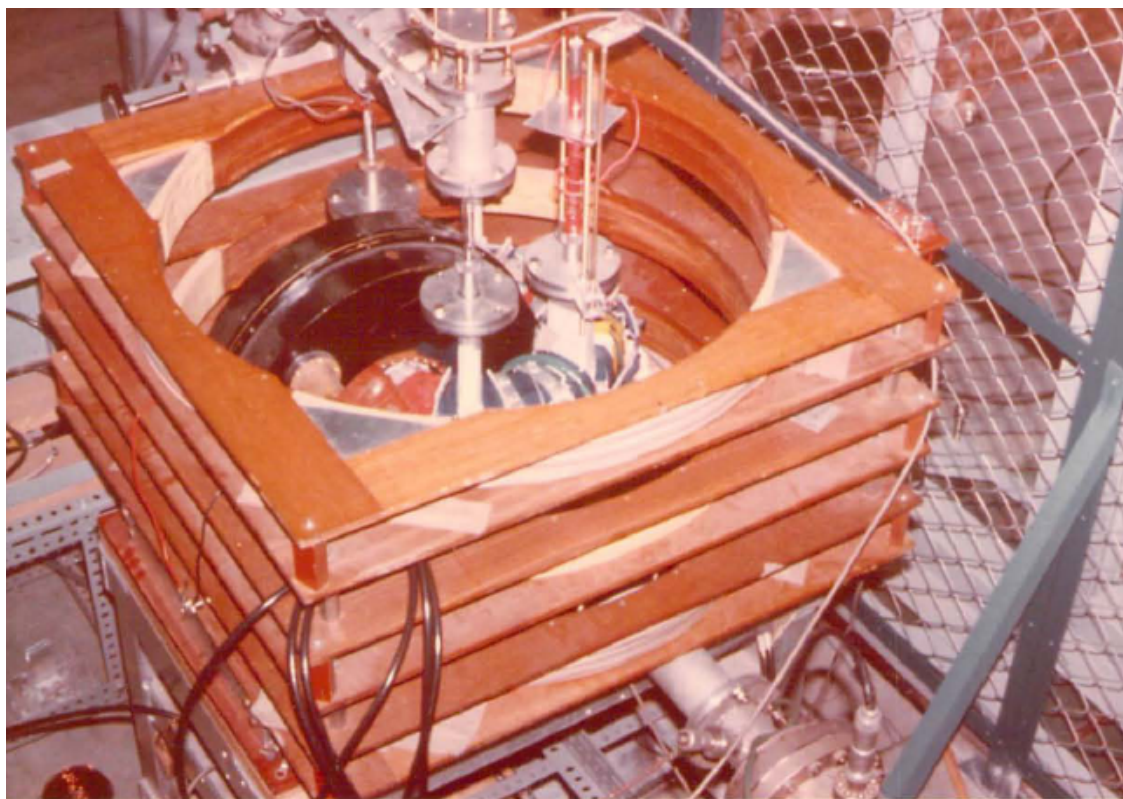
零出力条件 ( $u=0$ )  
 $a: k_\alpha=0.5 \quad b: 0.4 \quad \left. \begin{array}{l} \eta_\alpha = \eta_p = \frac{1}{3} \end{array} \right\} \text{標準}$   
 $c: 0.3$   
 $d: 0.5 \quad e: 0.1 \quad \left. \begin{array}{l} \eta_\alpha = \frac{1}{5}, \eta_p = \frac{1}{3} \end{array} \right\}$   
 $j: 0.07$

Fig.1 パルスシステムでの  $n_i T - T_e$  線図

山崎耕造、井上信幸、内田岱二郎、二瓶 仁、西野 治:  
 「高エネルギー中世粒子入射による核融合炉の出力条件」  
 日本原子力学会 炉物理・炉工学分科会 A3  
 京都大学工学部 昭和47年11月20日

# 修士論文(1974年3月)

## “Behavior of Runaway Electrons in a Tokamak Plasma”



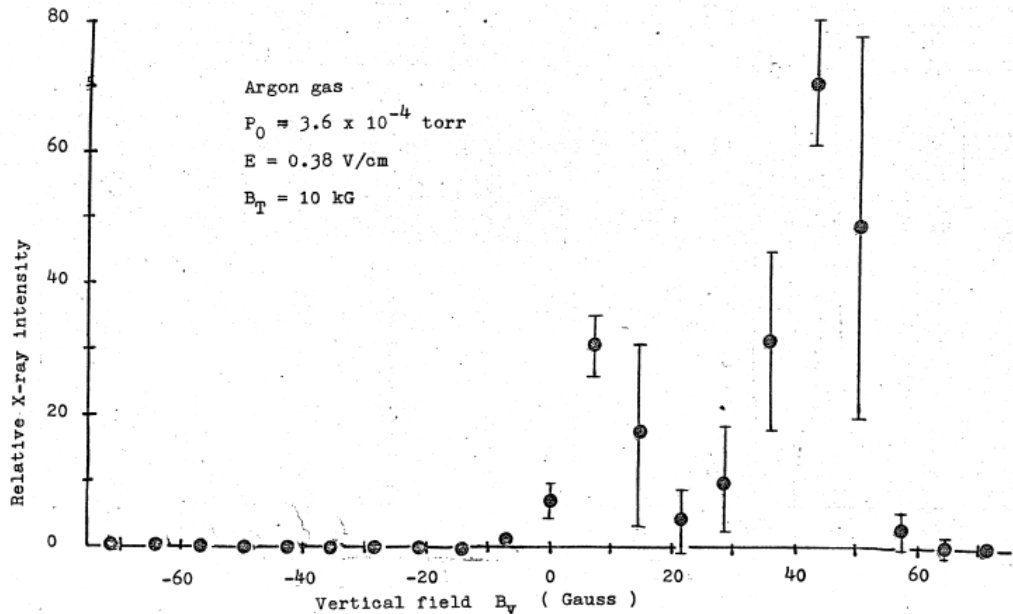
小型トカマク(TORIUT)実験と  
逃走電子解析

主半径  $R=15\text{cm}$

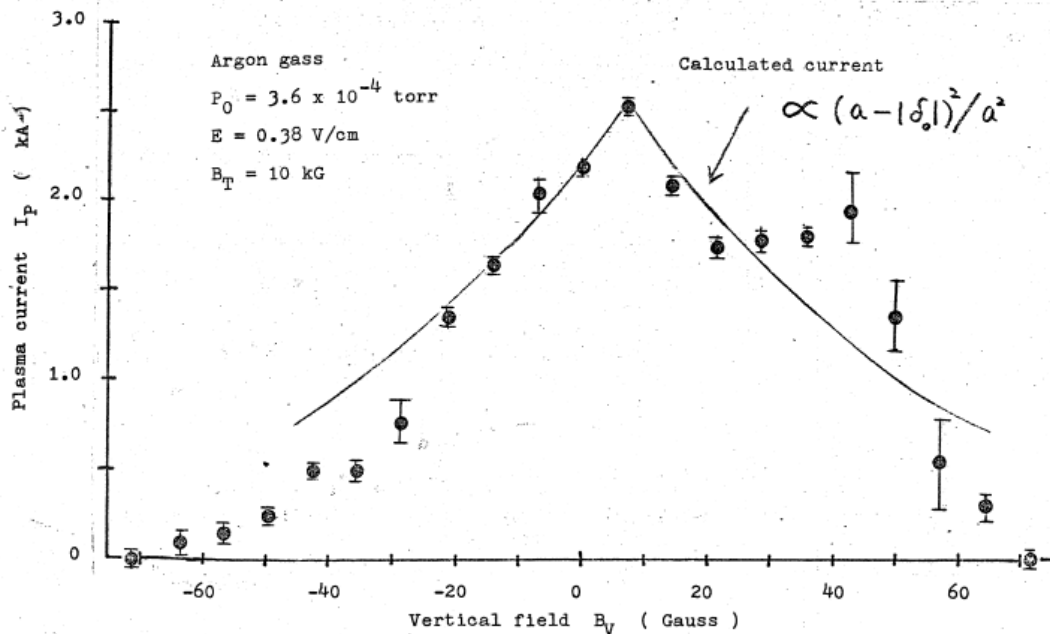
小半径  $a=3\text{cm}$

磁場  $B=1\text{T}$

プラズマ電流  $I_p \leq 7\text{kA}$



ドリフト面の  
 磁気面からの変位を  
 硬X線とプラズマ電流から確認

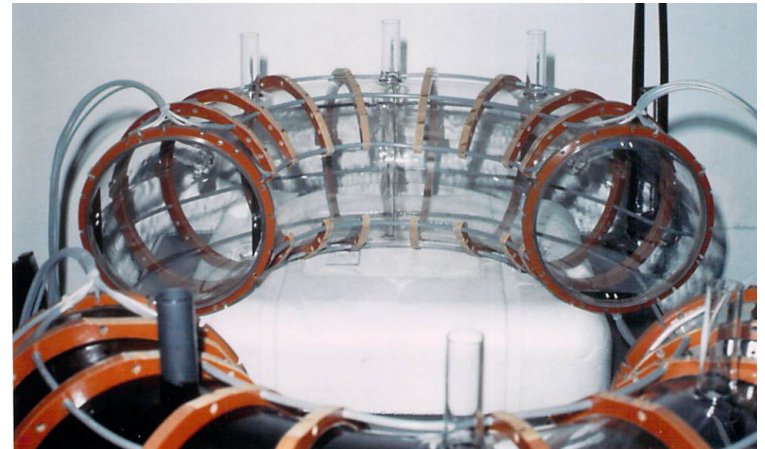
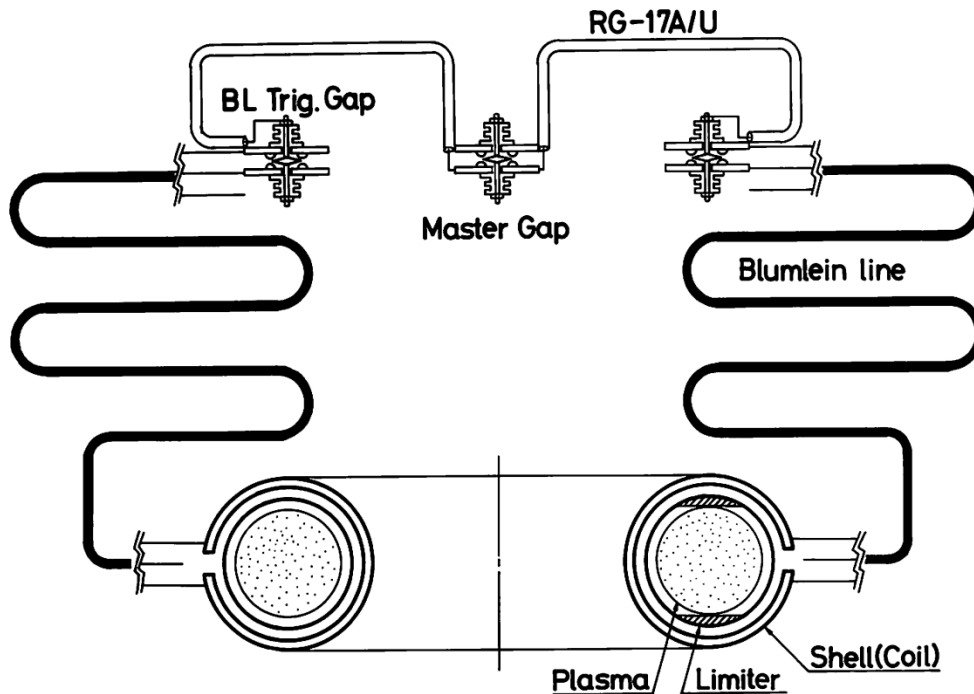


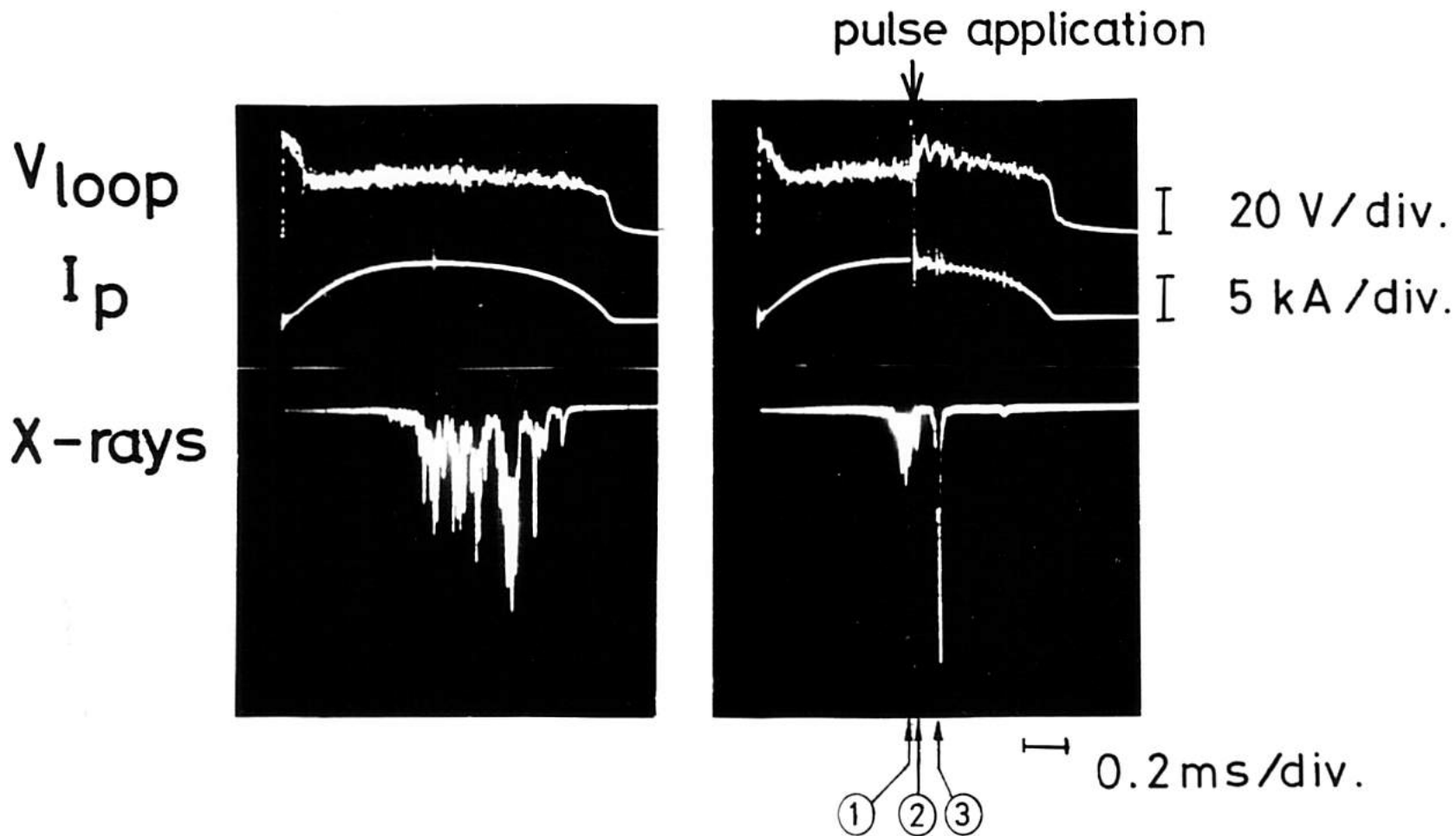
K, Yamazaki,  
 Behavior of Runaway Electrons in  
 a Tokamak Plasma  
 Master Thesis, University of  
 Tokyo (1974.03)

山崎耕造、他  
 「小型トカマク実験V」  
 日本物理学会春の分科会  
 金沢大学1974年4月

## “Application of a Fast Theta Pinch to a Tokamak Plasma”

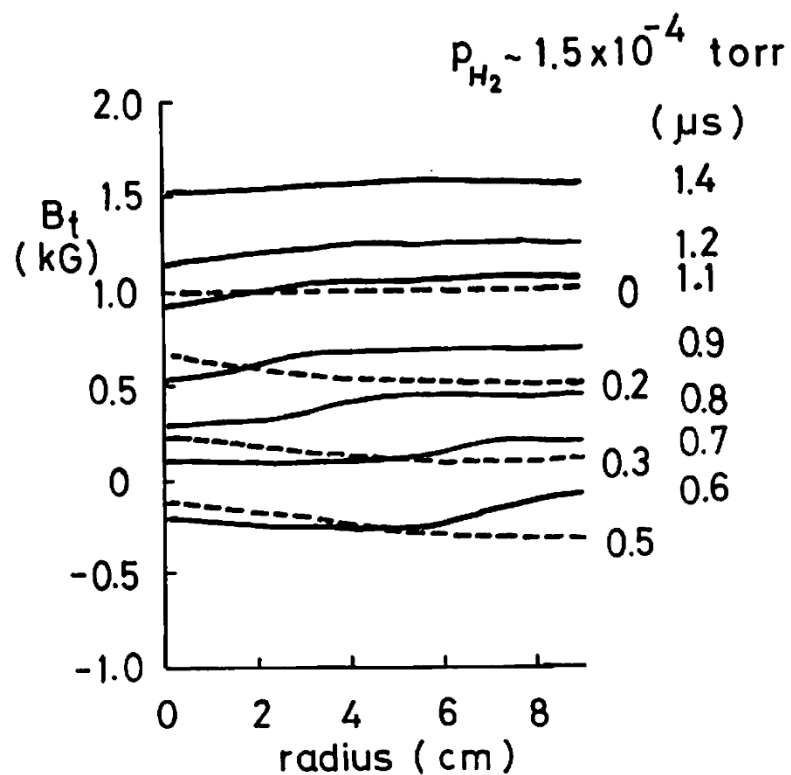
### ピンチトカマク(PT)実験と ショック加熱



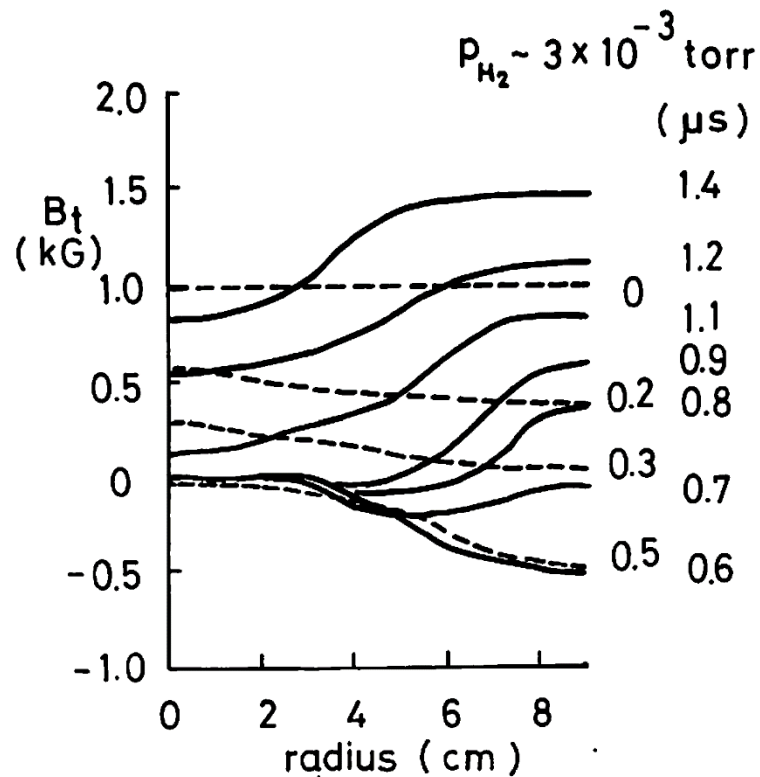


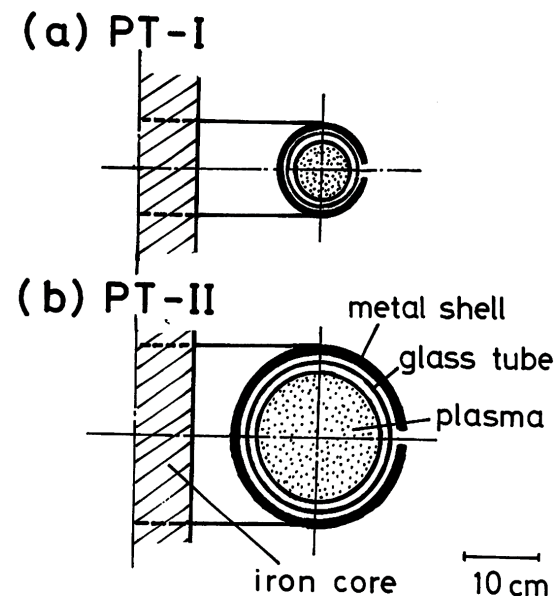
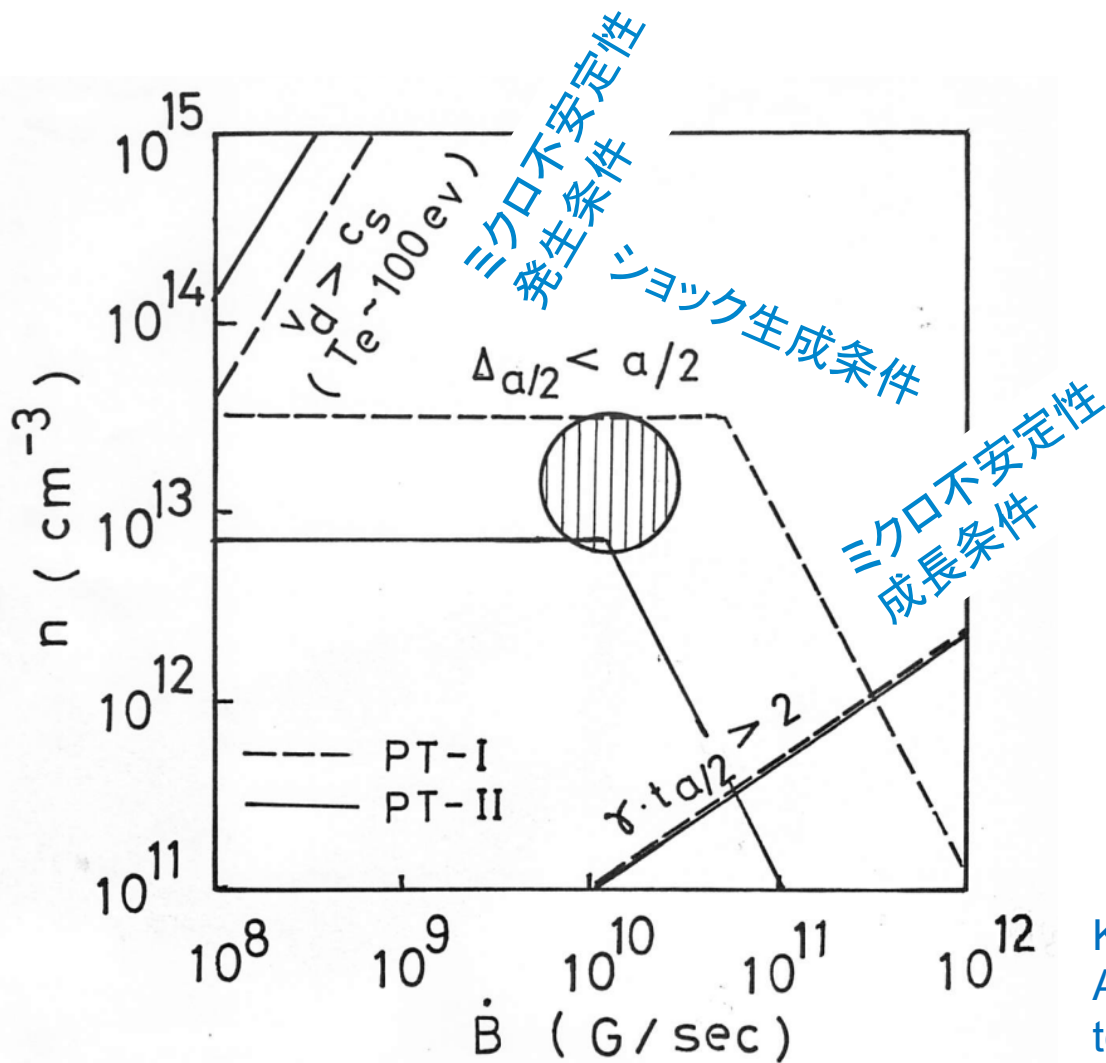
K.Yamazaki, M.Ichimura, K.Hoshino, J.Morikawa, H.Nihei, N.Inoue, and T.Uchid,  
 Disappearance of Hard X-Rays from a Tokamak Plasma by Application of a Fast-Rising Magnetic Pulse  
 Proceeding of the International Symposium on Plasma Wall Interaction (Julich, 18-22 October 1976) Permagon Press (1977)  
 pp.619-626.

(a) low pressure case



(b) high pressure case





Heating Criteria for PT-I and PT-II

K. Yamazaki,  
 Application of a Fast Theta Pinch  
 to a Tokamak Plasma  
 Doctor Thesis, University of Tokyo  
 (1977.03)

# 名古屋大学プラズマ研究所時代 (約10年間)

\* 高ベータグループ 実験、理論

Princeton 実験、理論

R-Tokamak設計G

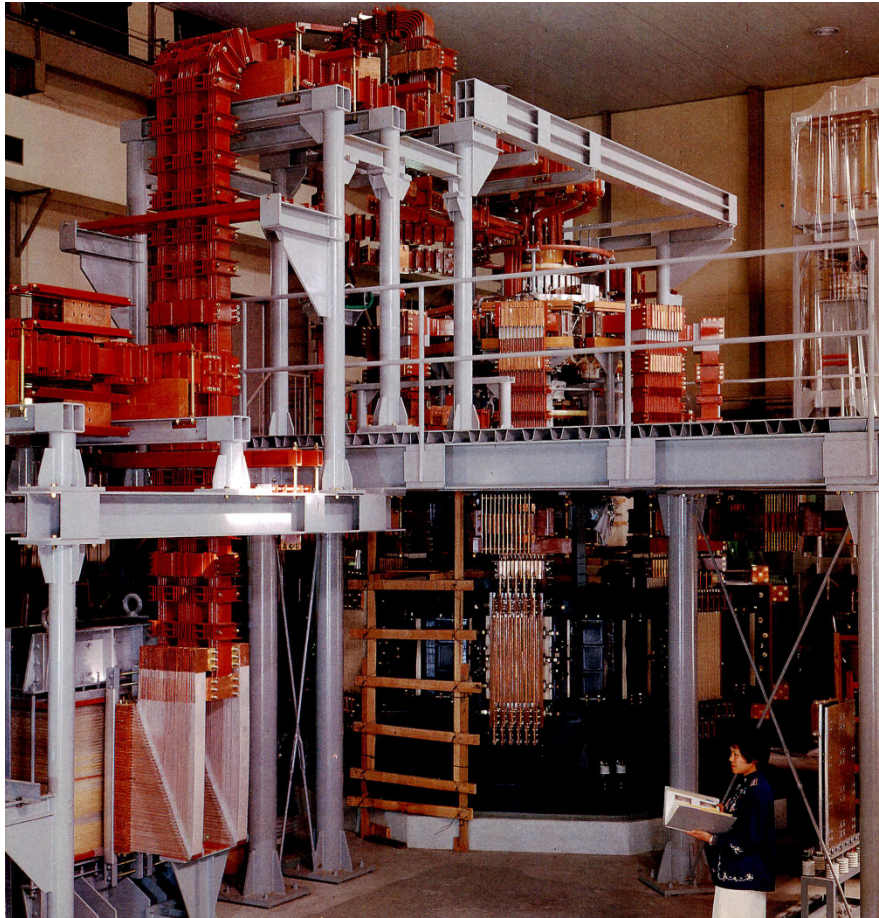
CSG



# STP-3 高ベータトカマク 第2安定化領域

P研HB-1 / 2

理論家若谷誠宏さん  
(京大へ転出)の  
後任として  
名大プラズマ研に着任



米国コロンビア大学 C.K. Chu教授(1981年当時)

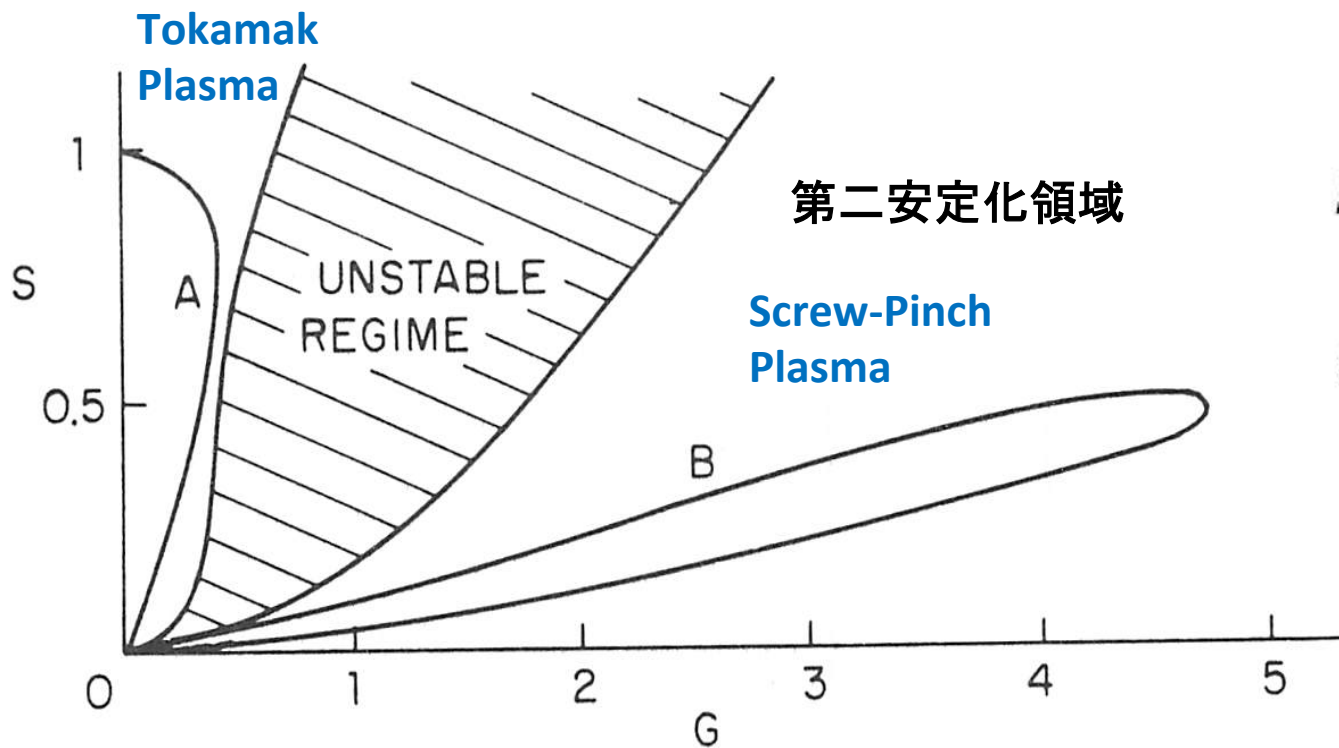


(顔写真

<http://apam.columbia.edu/plasma-physics-lab-50th-anniversary-celebration> )

# 第2安定化領域

$$\frac{d}{dy} [1 + (Sy - G \sin y)^2] + G[\cos y + \sin y(Sy - G \sin y)]F = 0,$$



$$S = \frac{d(\ln q)}{d(\ln r)}$$

$$G = - \left( \frac{2Rq^2}{B^2} \right) \frac{dp}{dr}$$

K. Yamazaki, and C. K. Chu  
 Ballooning-Mode-Stable High-Beta Configurations for Tokamaks  
 Japan. Journal of Applied Physics, Vol.20, No.3 (1981) pp.665-666.

# 名古屋大学プラズマ研究所時代 (約10年間)

高ベータグループ 実験、理論

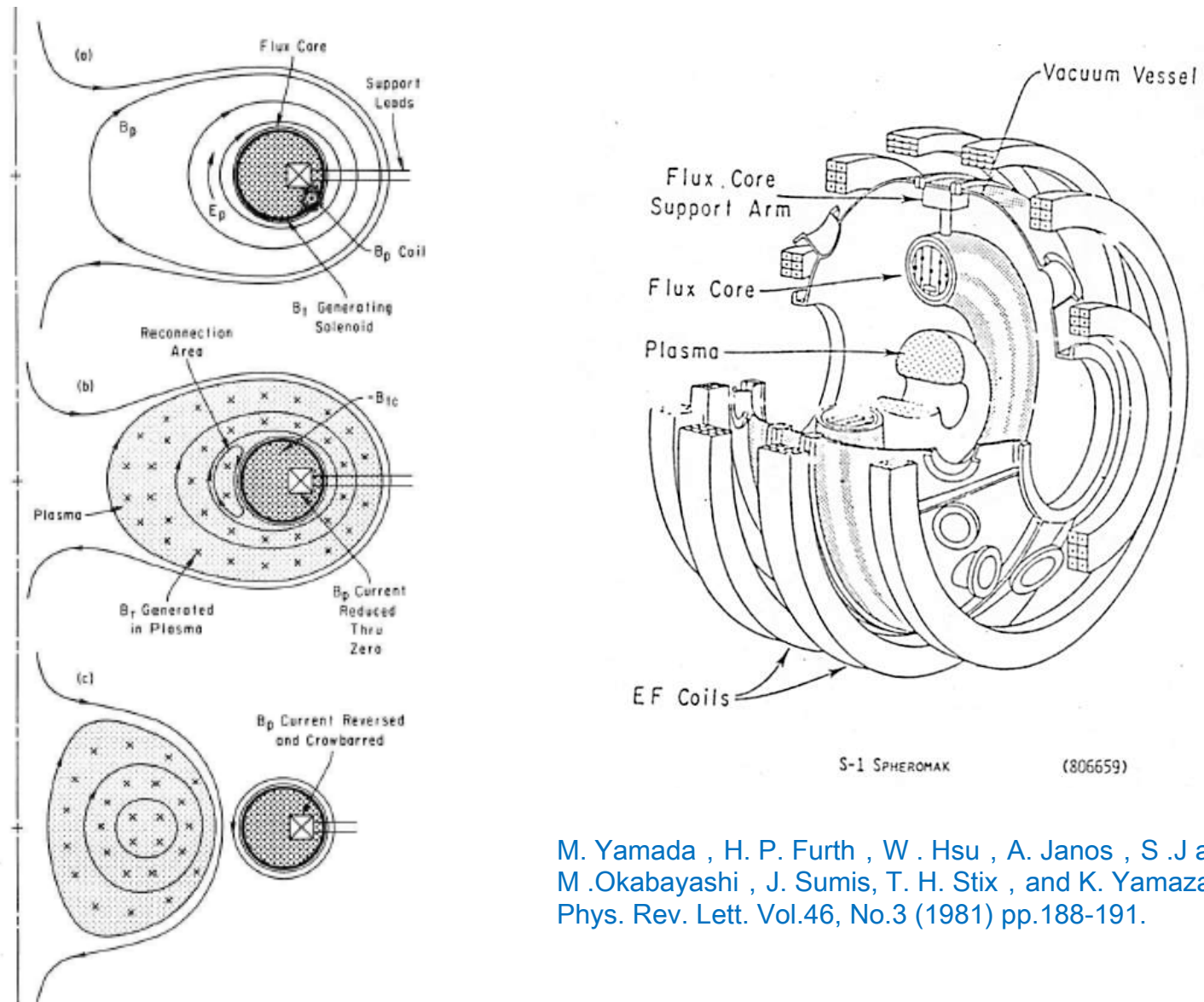
\* Princeton 実験、理論

---

R-Tokamak設計G

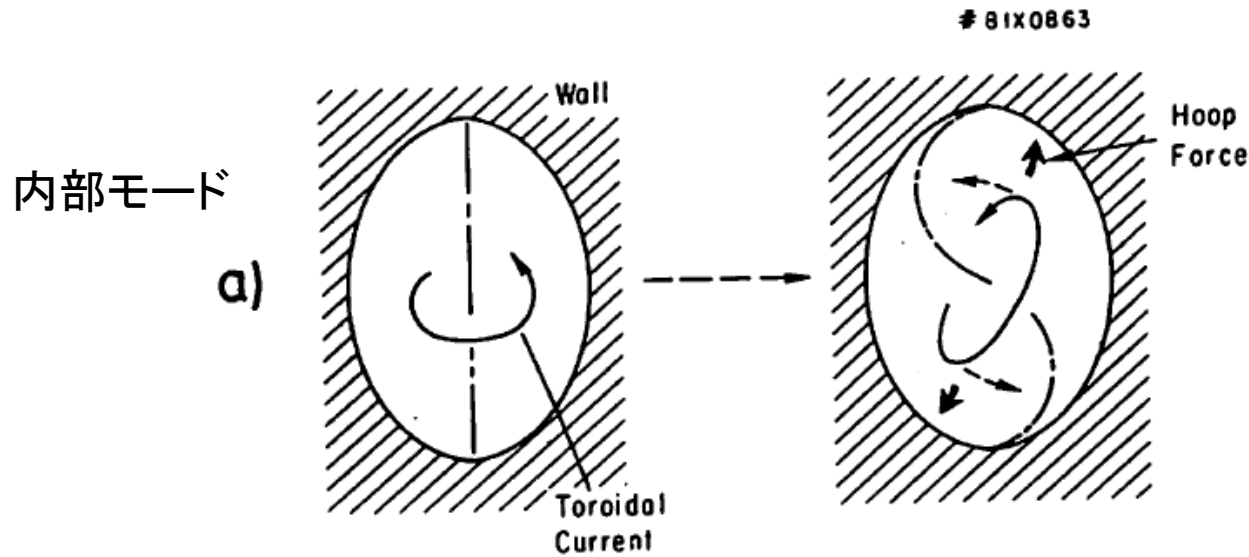
CSG

# Proto-S1スフェロマック実験



M. Yamada , H. P. Furth , W. Hsu , A. Janos , S. Jardin ,  
 M. Okabayashi , J. Sumis, T. H. Stix , and K. Yamazaki,  
 Phys. Rev. Lett. Vol.46, No.3 (1981) pp.188-191.

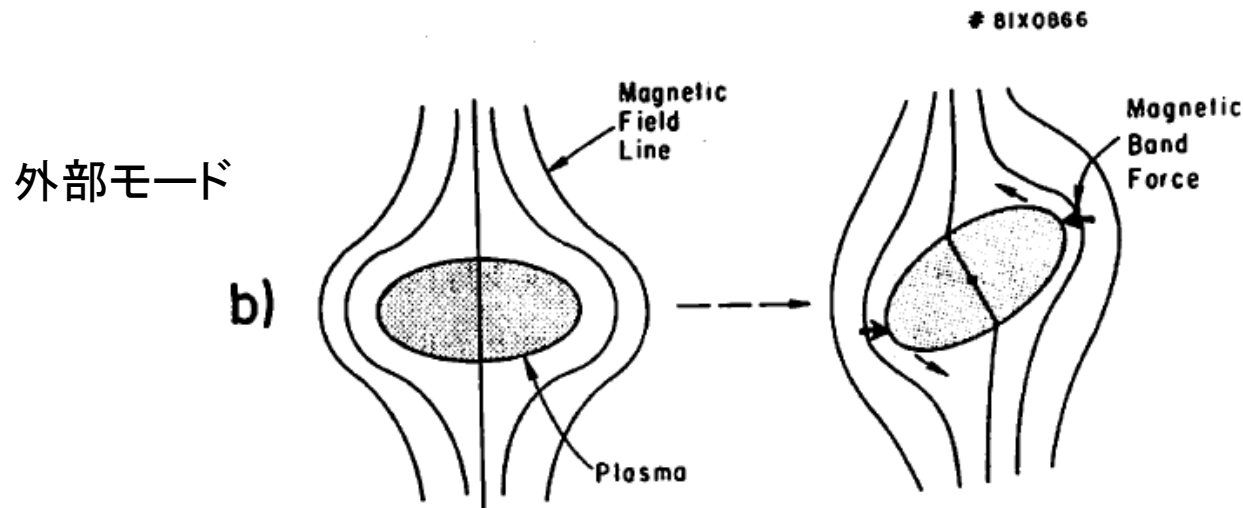
# テイルテイング不安定性解析



$$\vec{J} = k \vec{B}$$

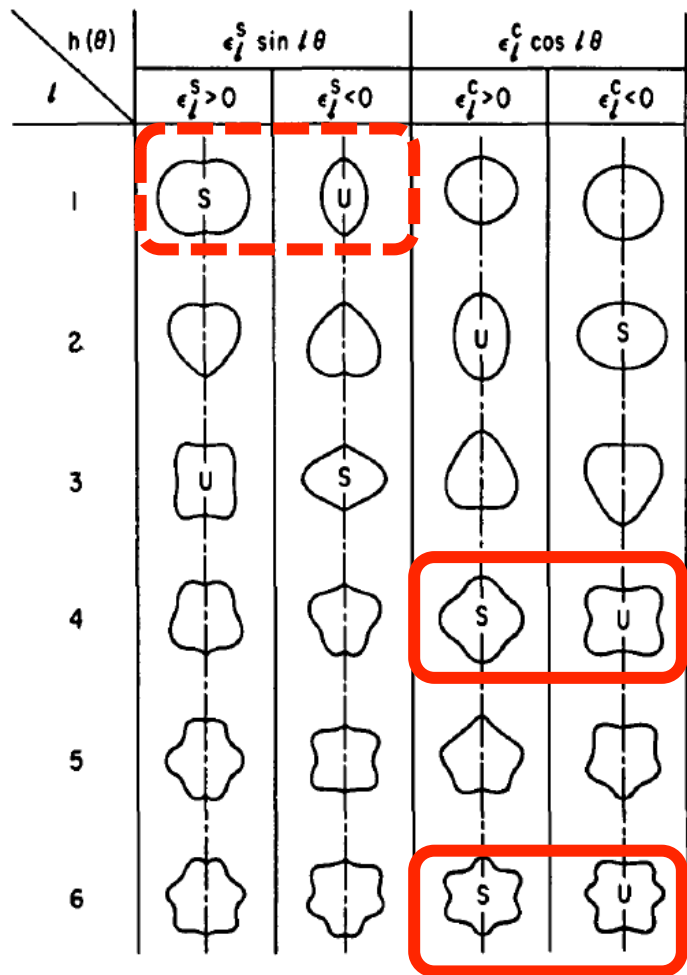
$$k = k_0 + \delta k$$

$$\delta k|_{n=0} < \delta k|_{n=1}$$



$$r = r_o \left( 1 + \sum_{l=1}^{\infty} \epsilon_l^S \sin l\theta + \sum_{l=0}^{\infty} \epsilon_l^C \cos l\theta \right)$$

$$= r_o \left( 1 + h(\theta) \right), \quad h \ll 1.$$



$$\vec{B} \cdot \nabla r_o = B_r - B_\theta h'(\theta) + O(h^2) = 0$$

$$b_1 j_1'(k_o r_o) \left\{ 2 P_1^n(\cos\theta) \frac{\delta k}{k_o} + h(\theta) \right. \\ \left. + \sin\theta P_1^{n'}(\cos\theta) h'(\theta) \right\} \\ + \left\{ P_m^n(\cos\theta), m \geq 2 \text{ terms} \right\} = 0.$$

$$\frac{\delta k}{k_o} \Big|_{n=0} = -\frac{9\pi}{32} \epsilon_1^S + \frac{3\pi}{32} \epsilon_3^S - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{9}{(4m^2 - 1)(4m^2 - 9)} \epsilon_{2m}^C$$

$$\frac{\delta k}{k_o} \Big|_{n=1} = -\frac{15\pi}{64} \epsilon_1^S - \frac{3\pi}{64} \epsilon_3^S + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{3(2m^2 - 3)}{(4m^2 - 1)(4m^2 - 9)} \epsilon_{2m}^C$$

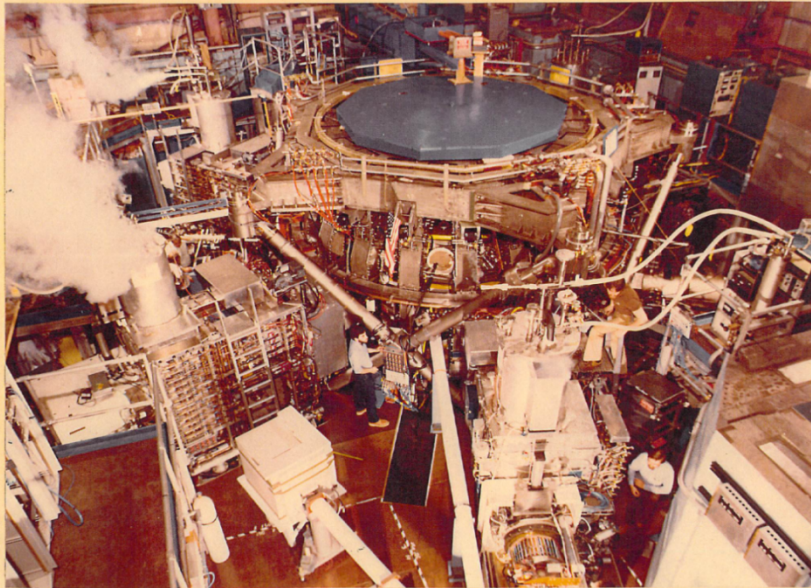
$$\delta k \Big|_{n=0} < \delta k \Big|_{n=1}$$

# PDX Tokamak (Princeton PPL) 実験

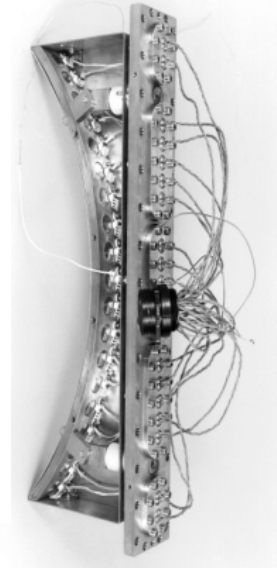
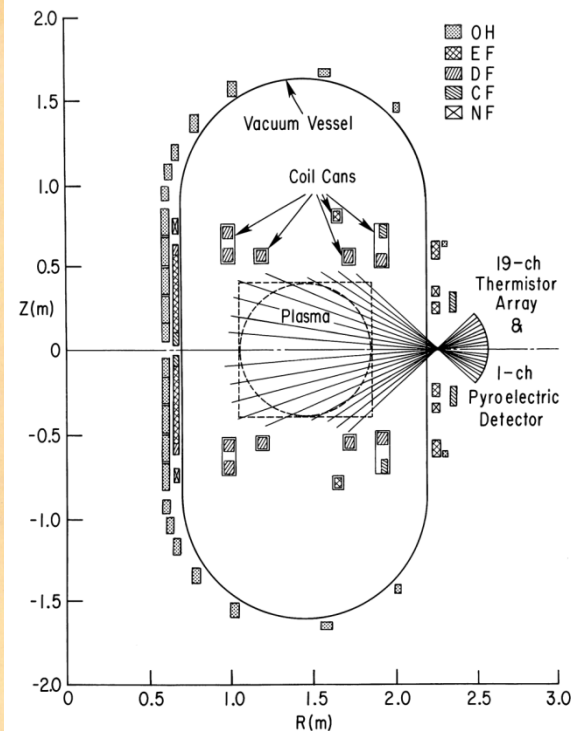
PPPL-4/6

With G.L.Schmidt, K. McGuire, M.Okabayashi

Dr. KOZO YAMAZAKI



*Ray Adams*      *Michio Okabayashi*      *Fred Rowley*  
*Shimomura*      *M. Yamazaki*      *Alan Todd*  
*Tom M. ...*      *Hal ...*      *Kevin McGuire*  
*Alan ...*      *Hal ...*      *Kevin McGuire*



# PPPL Disruption Analysis

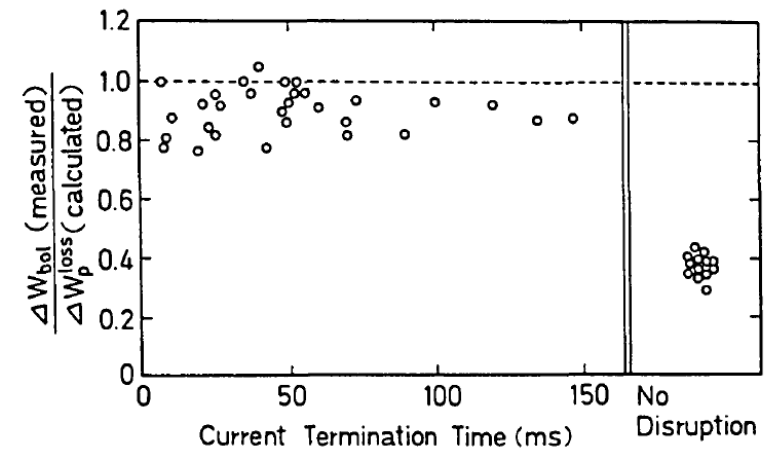
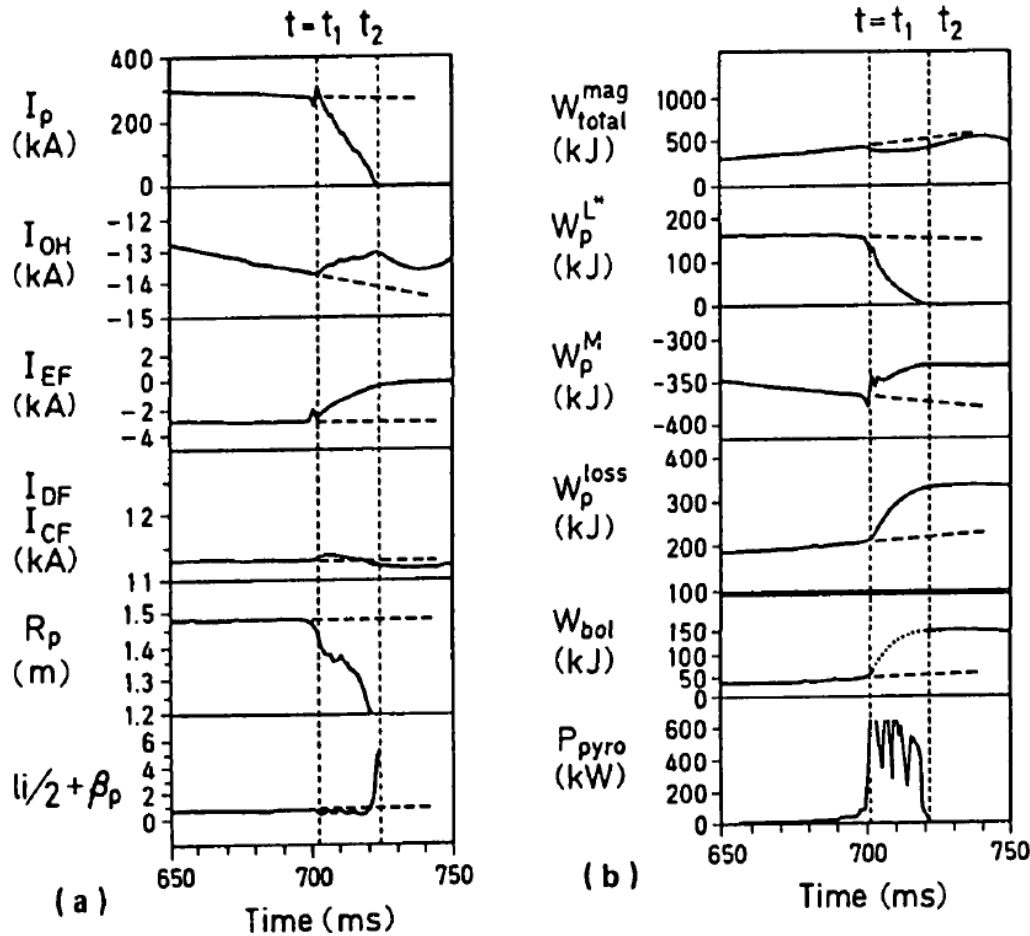


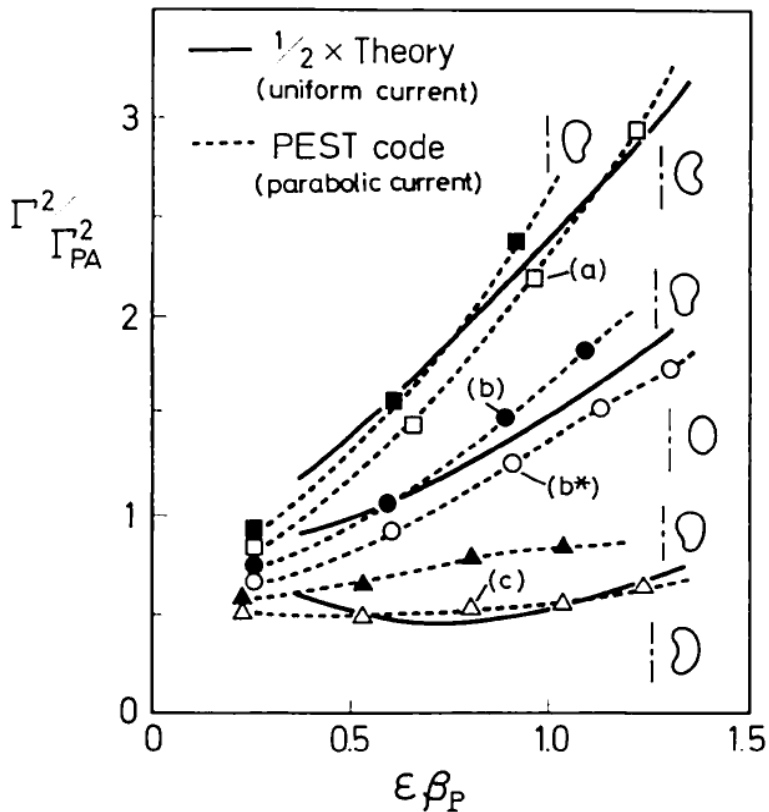
FIG.3. Ratio of measured to calculated plasma energy loss as a function of the duration of the disruptive termination of the current. The data presented were obtained in discharges with currents of 400–450 kA.

K.Yamazaki & G.L.Schmidt

Nuclear Fusion Vol.24, No.4 (1984) pp.467-472.

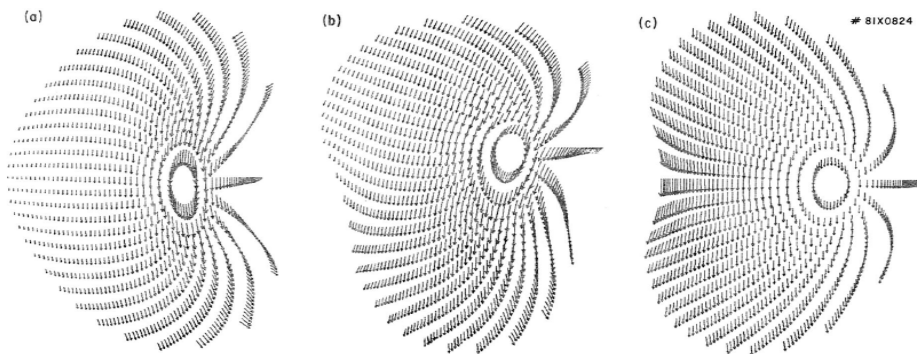


# PESTコード 安定性解析



$$\Gamma^2 = - 2\delta W / \xi^2 \int M \bar{a} v$$

$$\left(\frac{\Gamma}{\Gamma_{PA}}\right)^2 = - \frac{8}{x_{..}^2} - 4 [ 2 + (\epsilon\beta_p)^2 ] \delta_2 \cos\alpha_2 - \frac{113}{6} \epsilon\beta_p \delta_3 \cos\alpha_3 - 4 (\epsilon\beta_p)^2 \delta_4 \cos\alpha_4 + \epsilon \frac{\epsilon\beta_p}{2} (1 + 3 \epsilon\beta_p) < 0 .$$



K. Yamazaki, H. Fishman, M. Okabayashi, and A. M. M. Todd  
 Axisymmetric Stability of Vertically Asymmetric Tokamks at Large Beta Poloidal  
 Plasma Physics Vol. 25, No.11 (1983) pp.1243-1256.

# 名古屋大学プラズマ研究所時代 (約10年間)

高ベータグループ 実験、理論

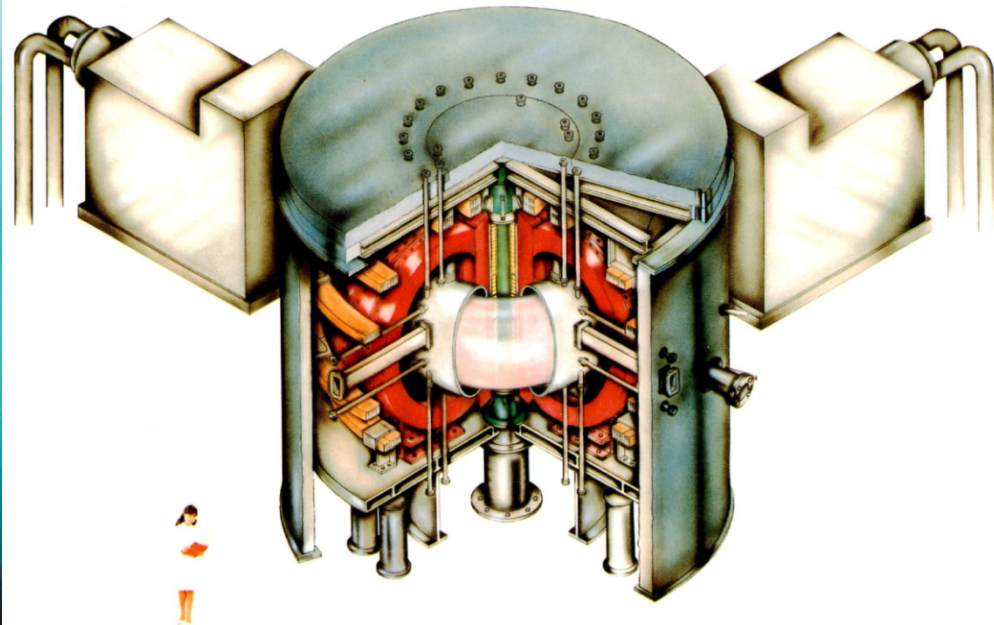
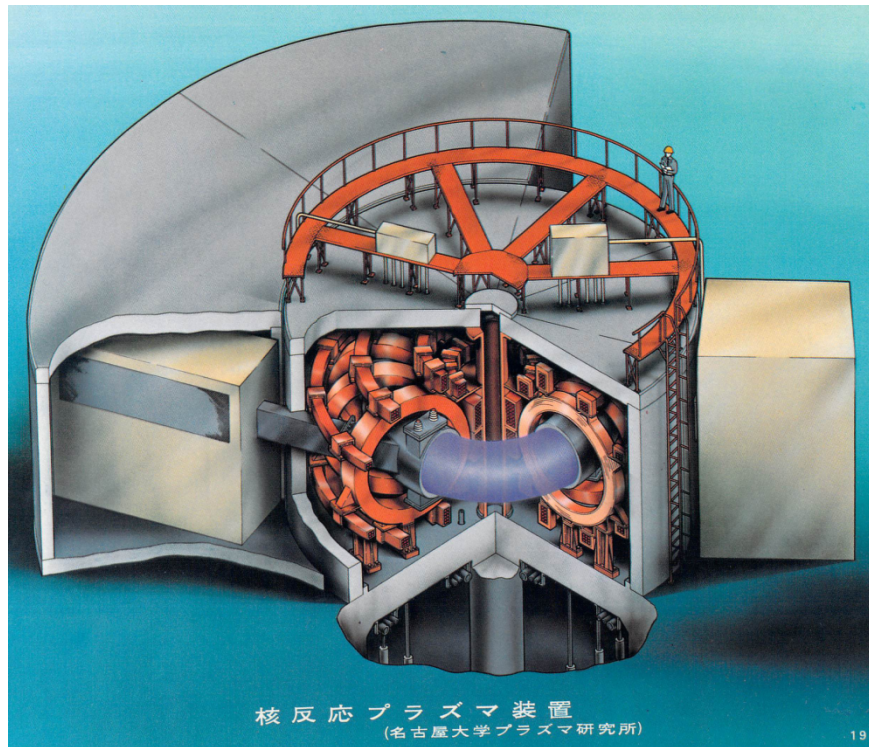
Princeton 実験、理論

\* R-Tokamak設計G

CSG

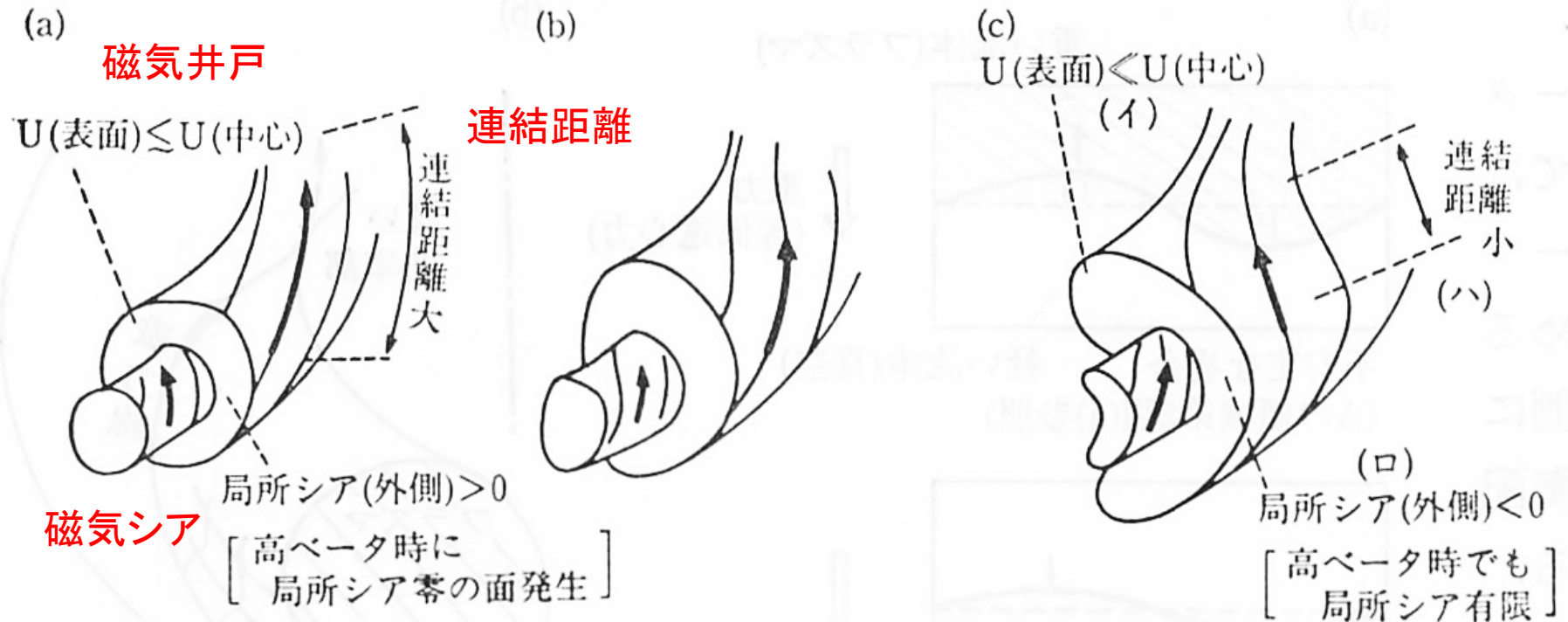
# R-Tokamak設計と 高ベータ化理論解析

P研RT-1/5



核融合反応プラズマ実験装置  
低誘導放射化D型Rートカマフ  
(名古屋大学プラズマ研究所)

# プラズマ断面変形による安定化



山崎耕造、浜田泰司：解説「プラズマ断面の形状制御」  
 日本物理学会誌 Vol. 41 No. 3 (1986) pp. 236-244.

# バルーニング解析と高ベータ化

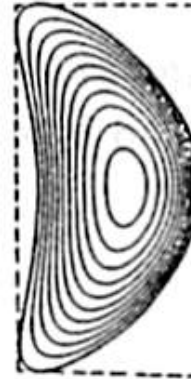
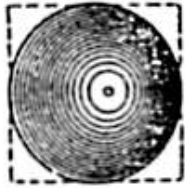
P研RT-3/5

(a-1)

(a-2)

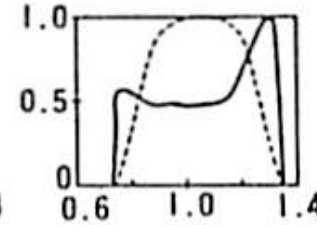
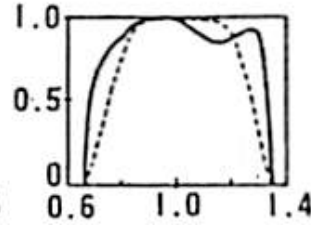
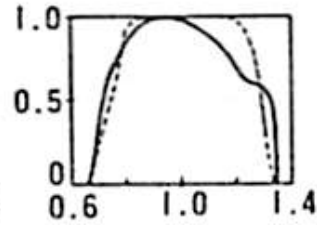
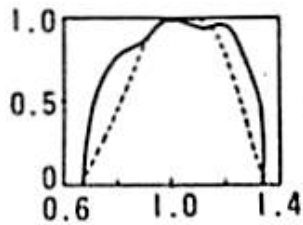
(a-3)

(a-4)



平衡コード  
Apollo Code

=> TOTAL code



—  $j/j_{max}$   
- - -  $p/p_{ma}$

R/R<sub>0</sub>

R/R<sub>0</sub>

R/R<sub>0</sub>

R/R<sub>0</sub>

FIG.2. Various plasma shape configurations that are marginally stable against ballooning mode at  $A = 3.0$ ,  $q_0 = 1.0$  and  $q_s = 2.0$ .

(a)  $\lambda = 1$  (sharp tip):

(a-1) circle ( $\kappa = 1.0$ ,  $\delta^* = 0$ )  $\beta = 3.5\%$ ,  $\beta_J = 0.83$

(a-2) ellipse ( $\kappa = 2.0$ ,  $\delta^* = 0$ )  $\beta = 7.2\%$ ,  $\beta_J = 0.51$

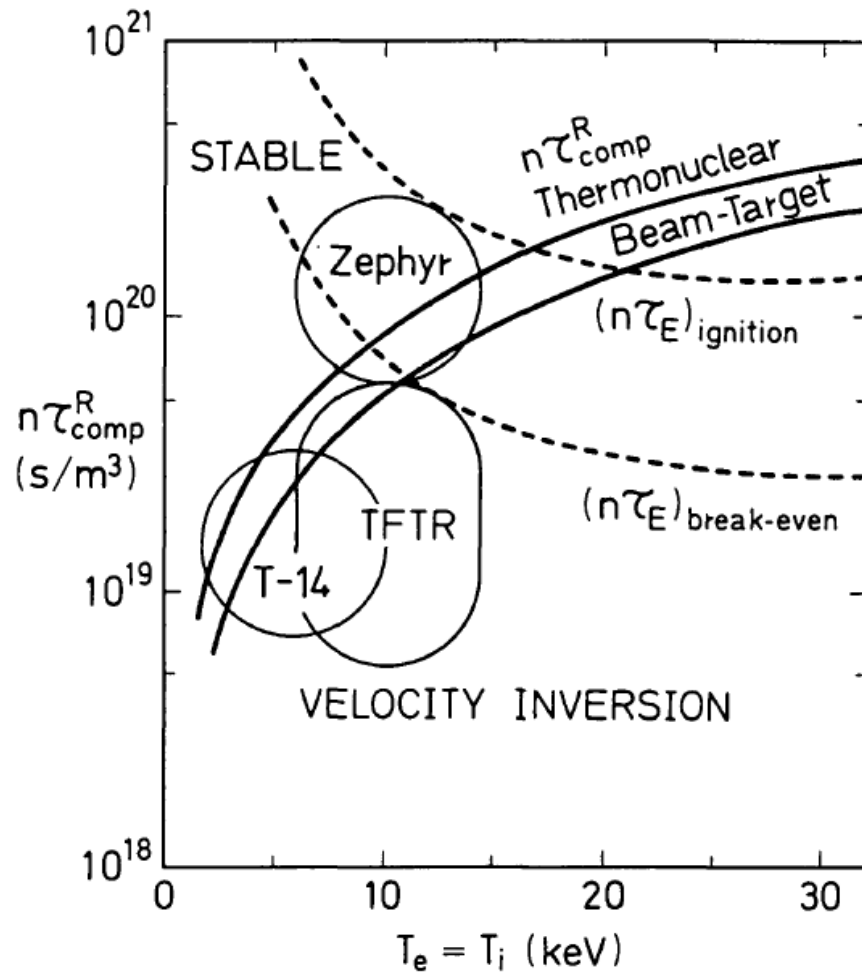
(a-3) standard sharp Dee ( $\kappa = 2.0$ ,  $\delta^* = 0.5$ )  $\beta = 13.0\%$ ,  
 $\beta_J = 0.54$

(a-4) crescent-type sharp bean ( $\kappa = 2.0$ ,  $\delta^* = 1.0$ )  $\beta = 24.7\%$ ,  
 $\beta_J = 0.60$

K.Yamazaki, T.Amano, H.Naitou,  
Y.Hamada, and M.Azumi ;  
"Ballooning Beta Limit of Dee and  
Bean Shaped Tokamaks"  
Nuclear Fusion Vol.25 (1985) pp.  
1543-1554.

# R-Tokamak 熱核不安定性解析

P研RT-4/5



K.Yamazaki & M.Okamoto  
Sufficient Stability Condition for Alpha-  
Driven Velocity- Space Modes in  
Compression- Heated Tokamaks  
Nuclear Fusion Vol.23, No.3 (1983)  
pp.375-379.

FIG.2. Parameter domain for compression time stable against thermonuclear instability. Major-radius compression time  $\tau_{\text{comp}}^R$  should be longer than the value shown by solid curve in order to stabilize velocity-inversion modes.

# トカマク設計 (PECの原型)

## PPPL でのBPX (Burning Plasma Experiment) 検討

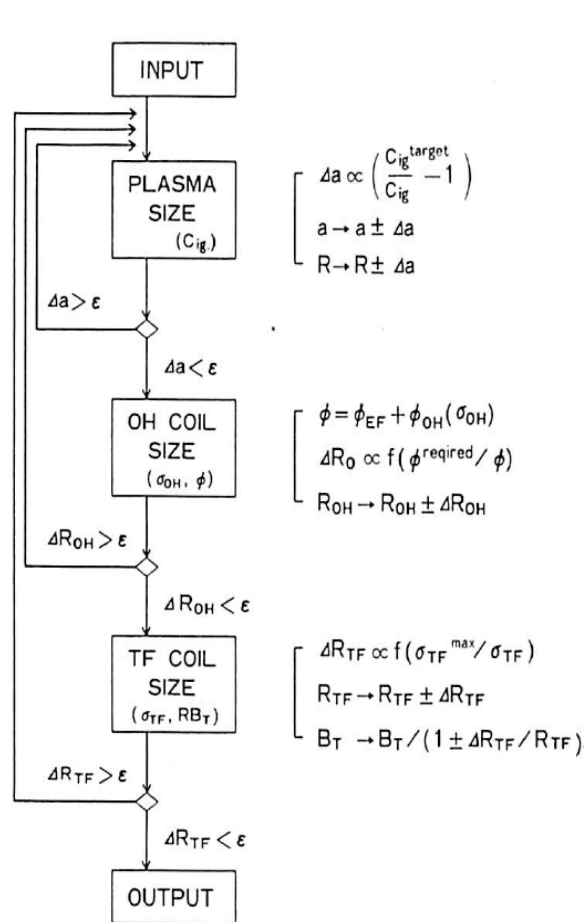


FIGURE 3 Flow chart of system design code.

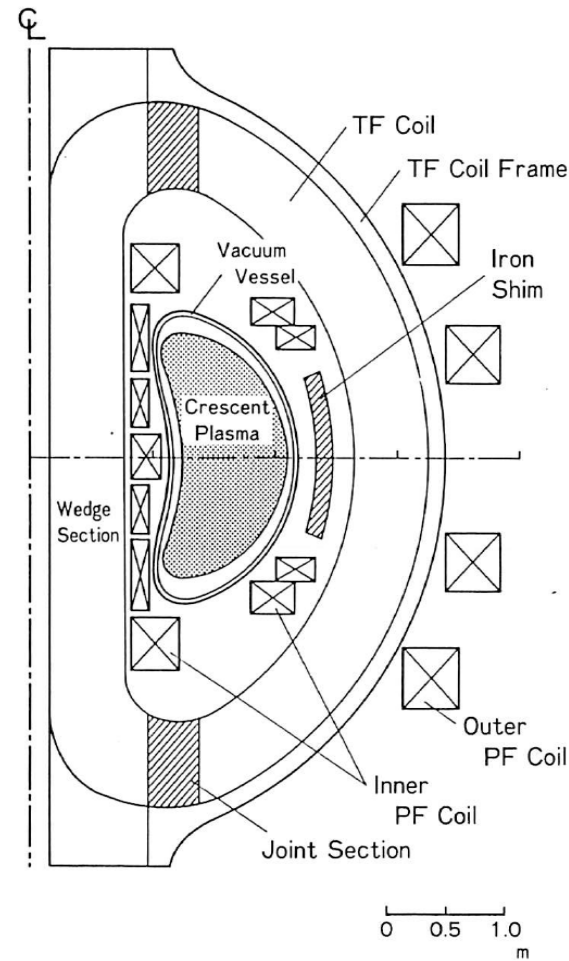


FIGURE 4 Typical design of CT (crescent-shaped tokamak).

# 名古屋大学プラズマ研究所時代 (約10年間)

高ベータグループ 実験、理論

Princeton 実験、理論

R-Tokamak設計G

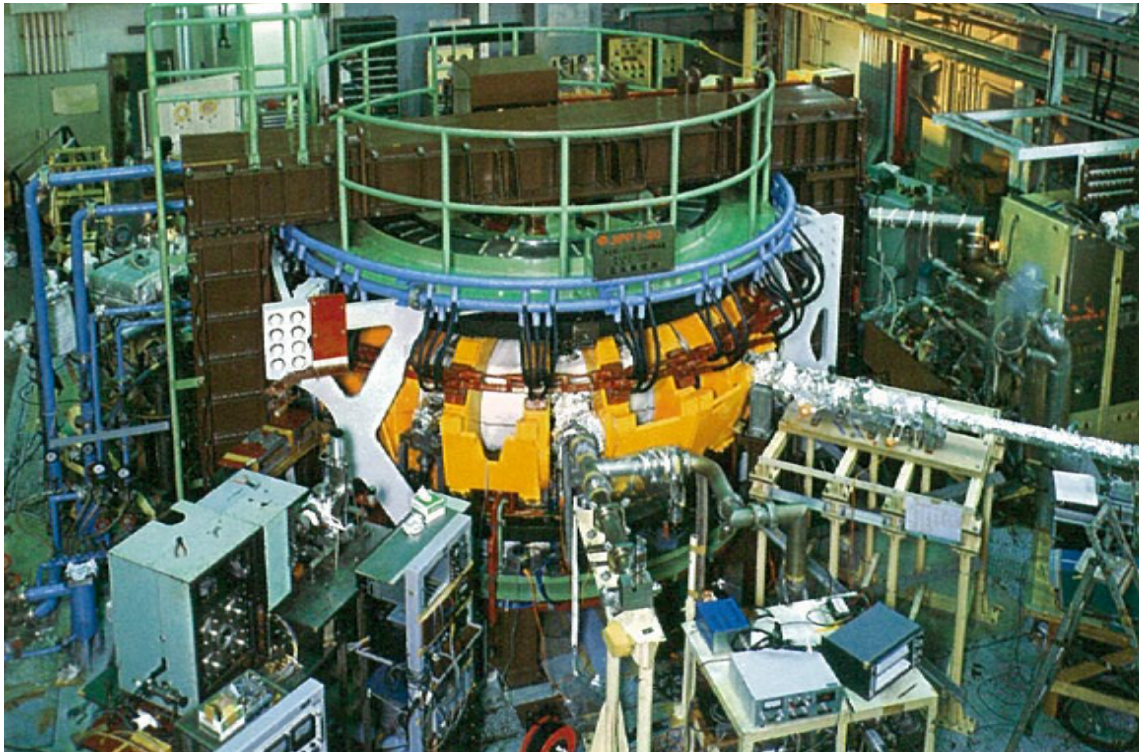
\* CSG



# JIPP T-IIU Tokamak (Nagoya University)実験と 新磁場配位の摸索

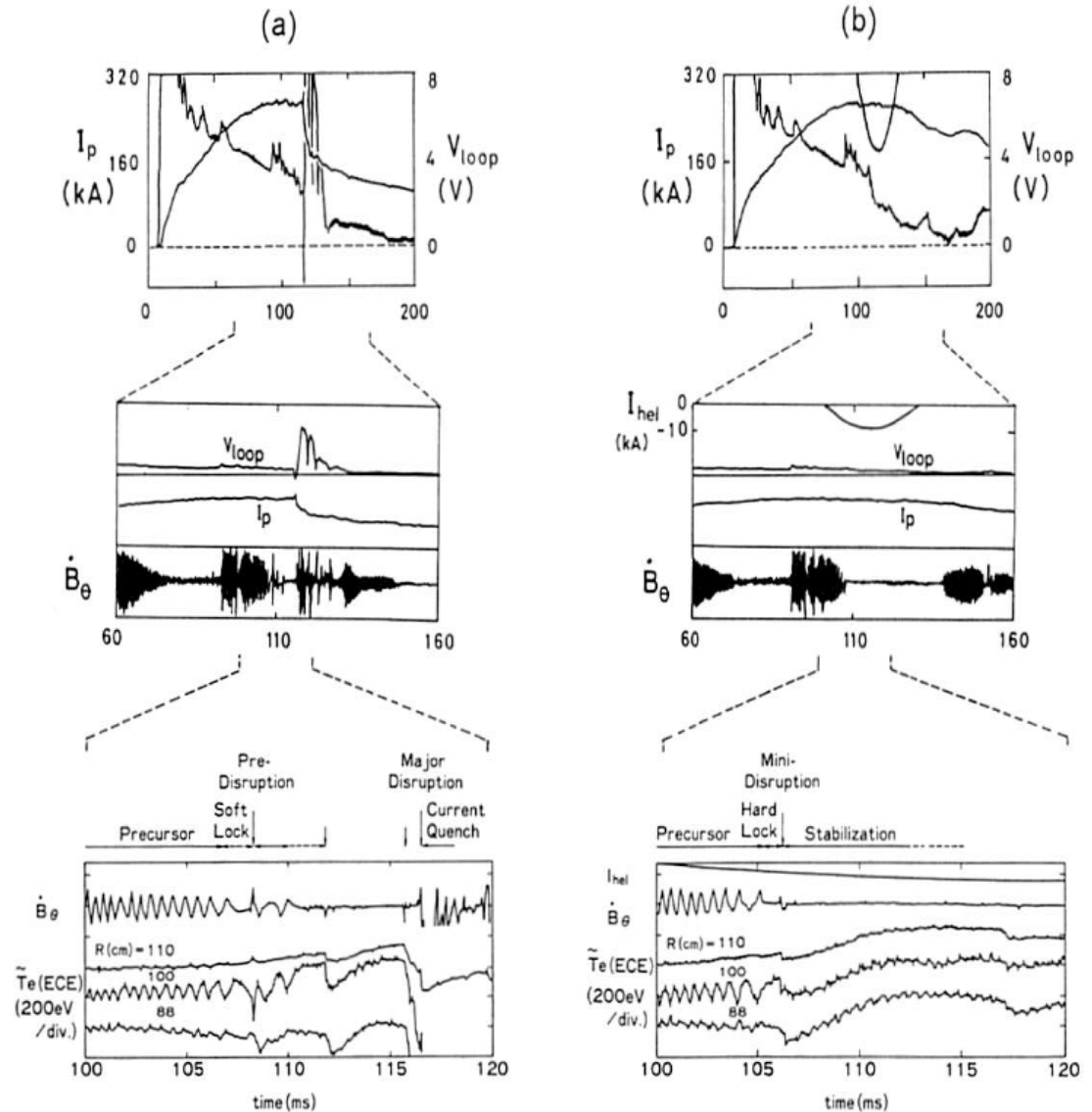
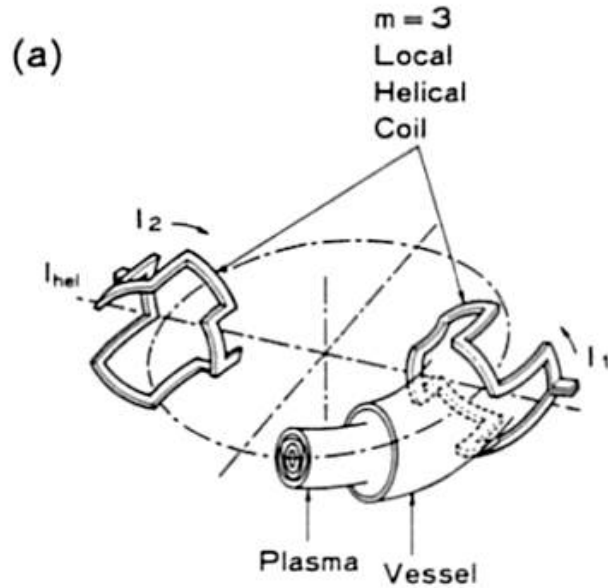
P研CSG-1/2

Concept Development:  
Toroidal System Group  
(Current System Group)



A. Mohri	(Leader	Ext. 6940)
JIPP T-IIU	(Exp. Bldg.	Ext. 4597)
Y. Hamada	(Gen.,	Ext. 6950)
K. Toi	(Gen.,	Ext. 6947)
K. Matsuoka	(Gen.,	Ext. 6991)
T. Watari	(Heating,	Ext. 6926)
K. Ohkubo	(Current driving,	Ext. 6946)
K. Yamazaki	(High $\beta$ ,	Ext. 6952)
S. Kitagawa	(NBI,	Ext. 6990)
K. N. Sato	(Diagnostics,	Ext. 6925)
SPAC-VII	(Exp. Bldg.	Ext. 6908)
K. Narihara	(Gen.,	Ext. 6941)
STP-3(M)	(Exp. Bldg.	Ext. 4592)
K. Sato	(Gen.,	Ext. 6952)
NBT-1M	(Exp. Bldg.	Ext. 4595)
M. Fujiwara	(Gen.,	Ext. 6929)

Local Helical Coil による  
Disruption 制御実験



K.Yamazaki, K.Kawahata et al.,  
 "Disruption Control Experiments Using  
 Local Modular Multipole-Field Coils"  
 10th International Conference on Plasma  
 Physics and Controlled Nuclear Fusion  
 Research (Kyoto, 1986) Vol.I, IAEA,  
 Vienna (1987) pp.309-316.

FIG. 2. Time behaviour of discharge parameters and expanded typical Mirnov signals and ECE temperature fluctuations: (a) without a pulse and (b) with an A-mode pulse;  $V_{loop}$  is loop voltage,  $I_p$  is plasma current,  $I_{hel}$  is helical coil current and  $\dot{B}_\theta$  is Mirnov signal.

● **名古屋大学核融合研究所**  
**(仮称)創設準備室時代**  
**(約1年間)**

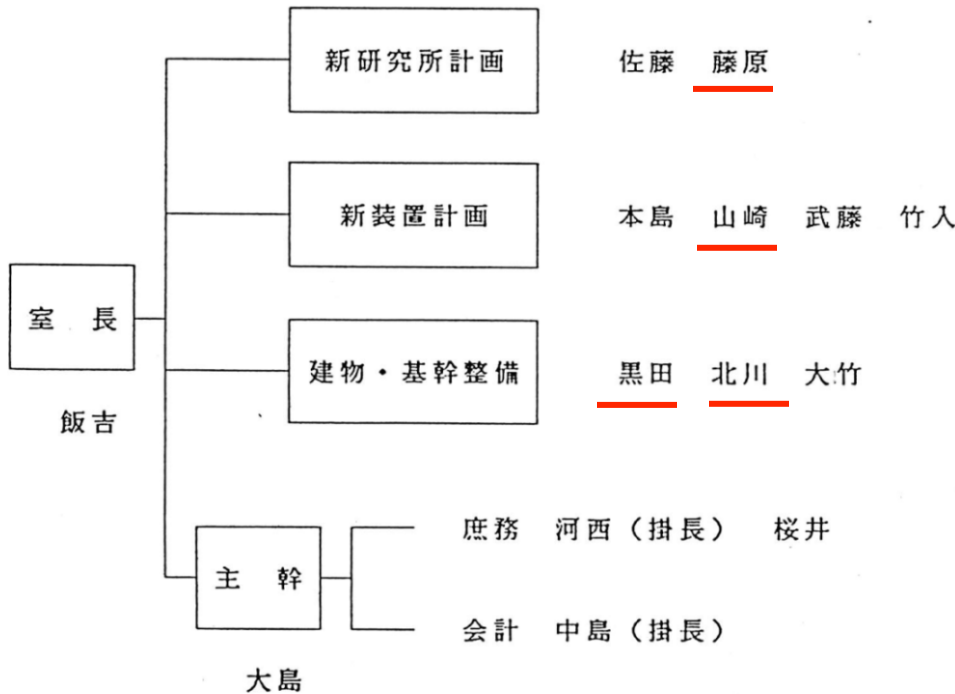


朝日新聞  
1989年  
(平成元年)  
4月19日  
(水)

サトウサンペイさん  
の漫画「フジ三太  
郎」より  
未来のエネルギー  
常温核融合の作品

(著作権保護の為  
に漫画削除)

## 準備室体制



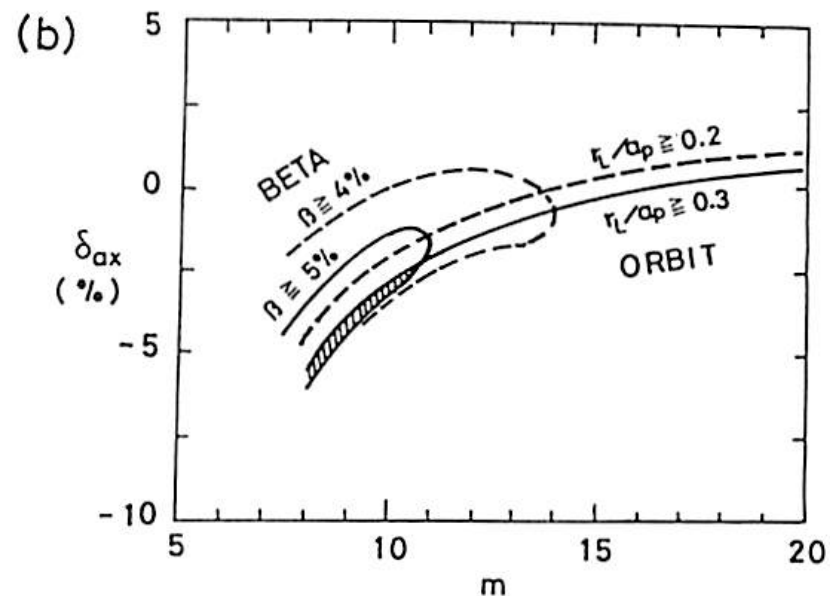
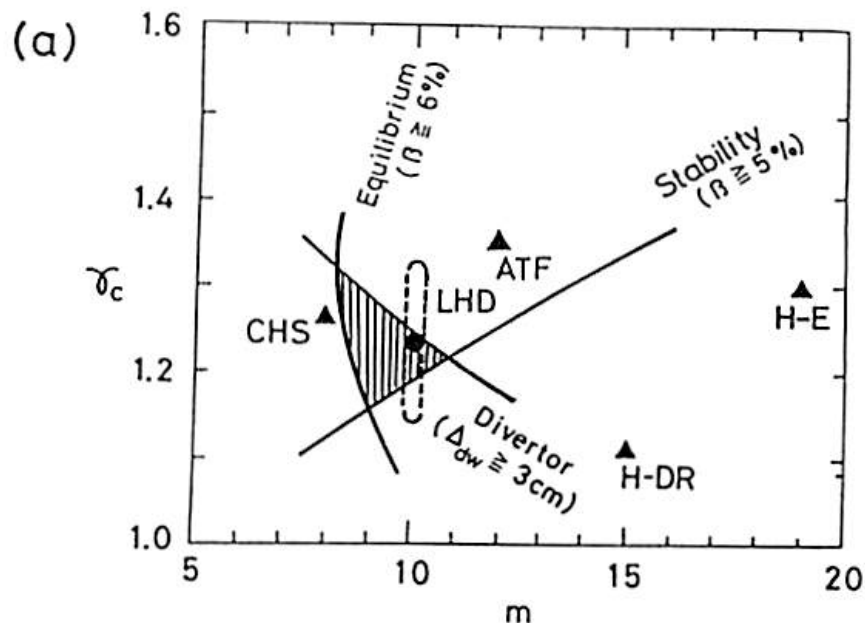
準備室ニュース  
昭和63年4月16日

●核融合科学研究所時代  
(約16年間)

LHD

(物理設計、制御、理論、炉設計)

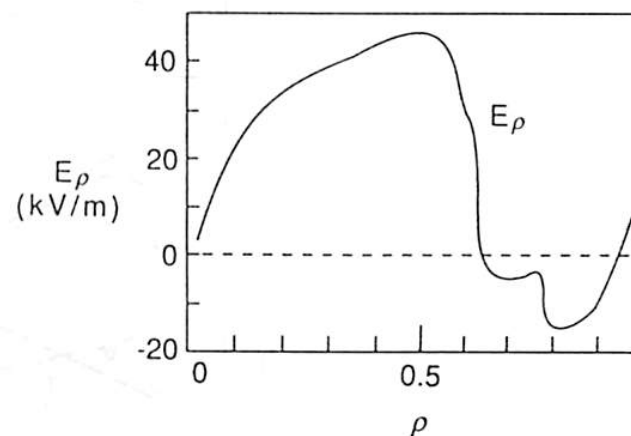
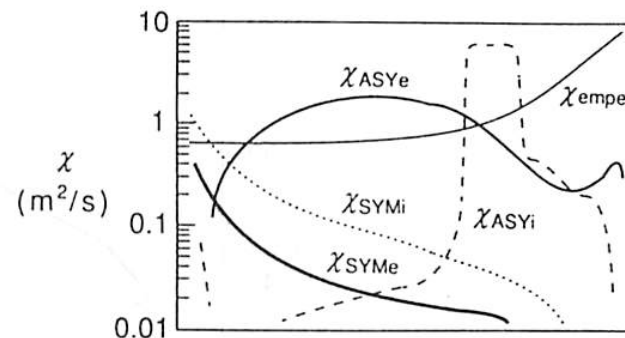
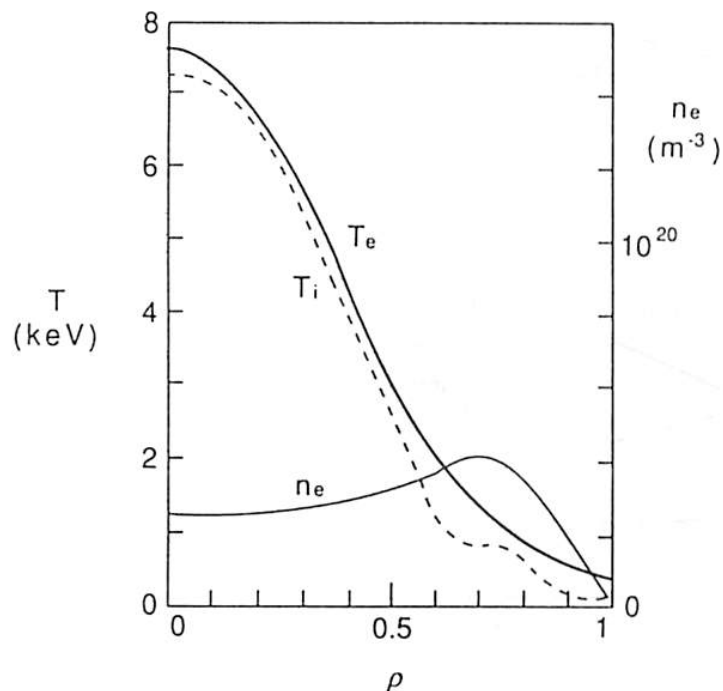
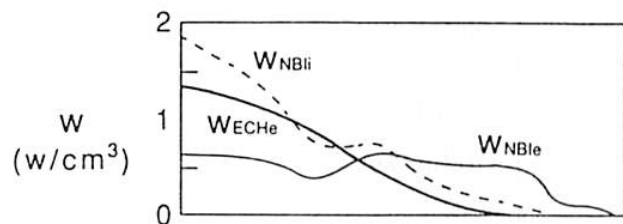
# LHD 物理設計 (LHD配位)



[K.Yamazaki](#), N.Ohyabu, M.Okamoto, T.Amano, J.Todoroki, et al.,  
 "Physics Studies on Helical Confinement Configurations with  $I = 2$  Continuous Coil Systems"  
 in Proceeding of the 13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear  
 Fusion Research 1990 (Washington, 1990) Vol.2(1991) pp.709-716.

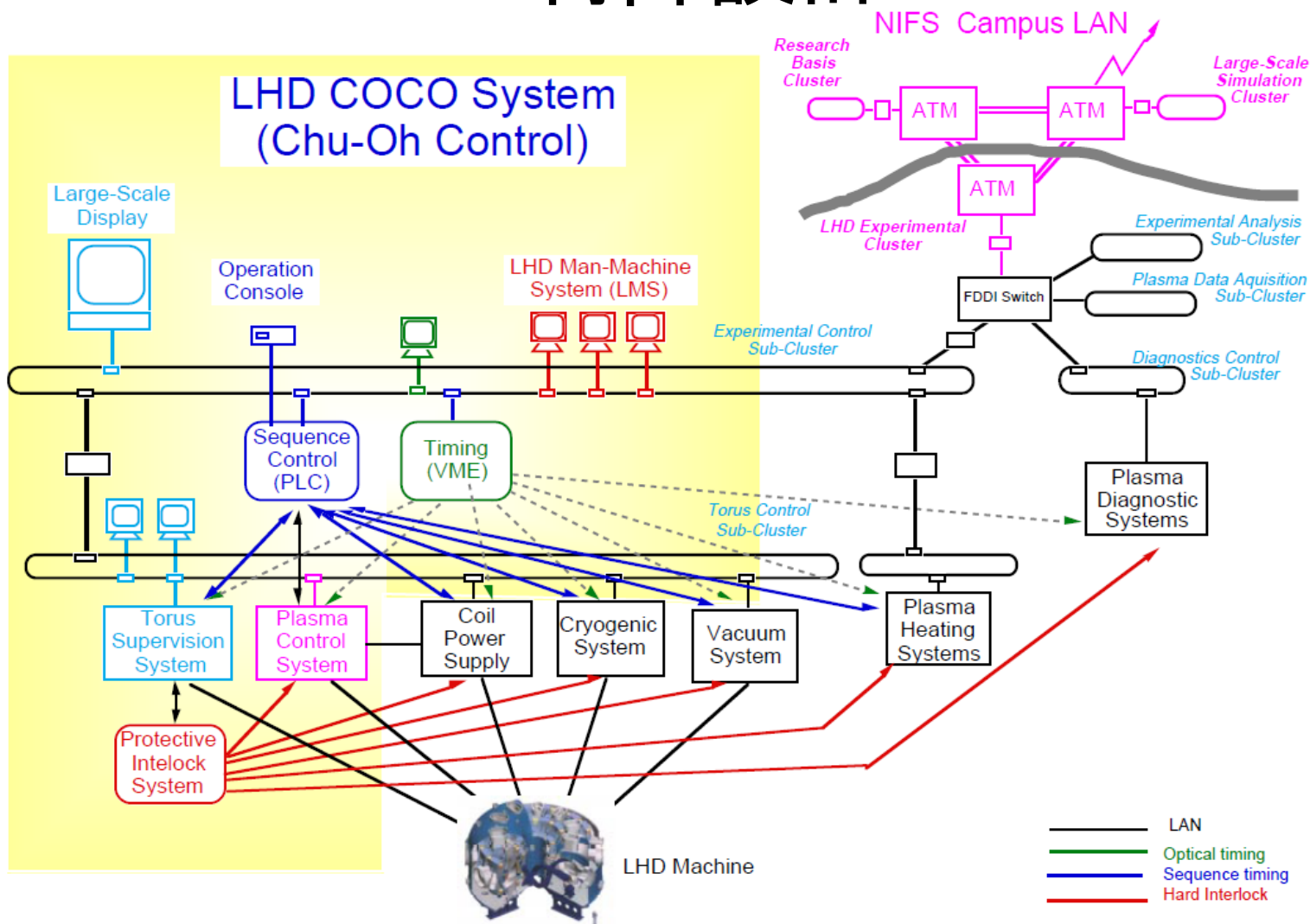
# LHD 物理設計 (輸送)

With 天野恒雄、J.Garcia



Kozo Yamazaki and Tsuneo Amano;  
 "Plasma Transport Simulation for Helical Confinement Systems"  
 Nuclear Fusion Vol.32 (1992) pp.633-644.

# LHD 制御設計



K. Yamazaki et al., Present status of the Large Helical Device (LHD) and its Control System International Workshop on Controls for Small- and Medium-Scale Accelerators (IWCSMSA96) (KEK, Tsukuba, Nov. 11 - 15, 1996) KEK Proceedings 97-19 (January, 1998) pp.10-12.



# Central Unit of COCOS (Chu-Oh Control System)



central operation console, four central control computer, central supervision panel and large-scale display in the central control room.



VME timing board, central sequence control board, and I/O board in the basement of the control building.



protective interlock board and so on in the LHD building

K.Yamazaki, H.Yamada, K.Y.Watanabe, et al.,  
 Overview of the Large Helical Device (LHD) Control System  
 and its First Operation  
 PCaPAC'99 KEK, Tsukuba

# JT-60UとLHDとの共同実験



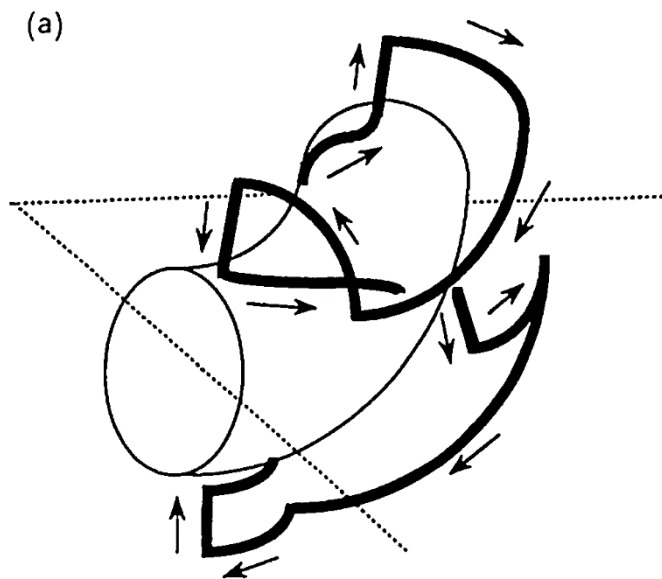
JT-60Uトカマク実験装置中央制御室(平成13年7月日本原子力研究所那珂研究所にて)



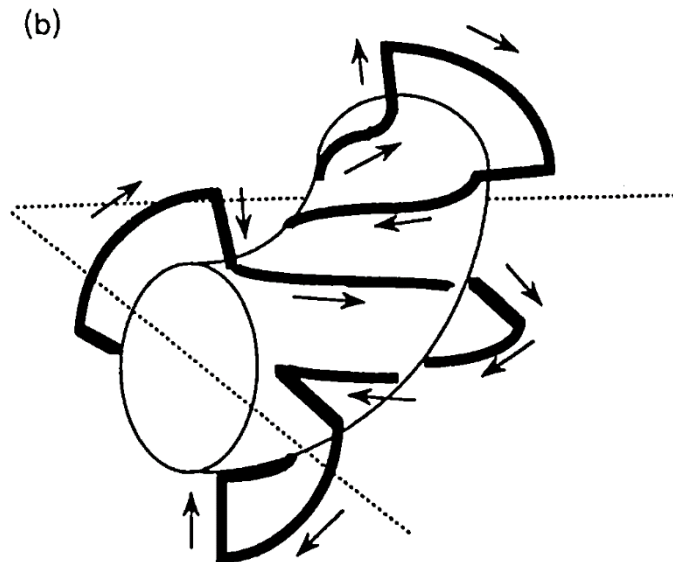
LHDヘリカル実験装置中央制御室(平成14年2月核融合科学研究所にて)

# LHD型炉設計

## Modular Coil System



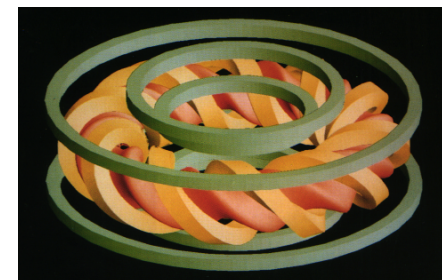
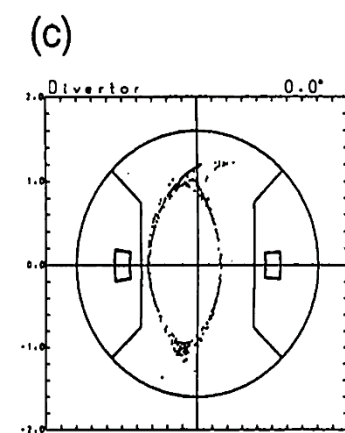
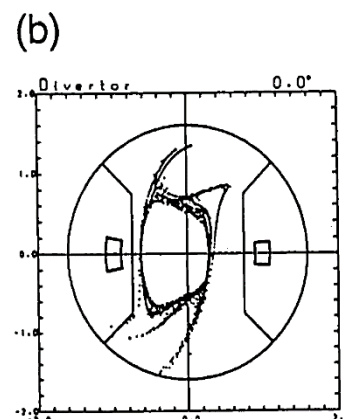
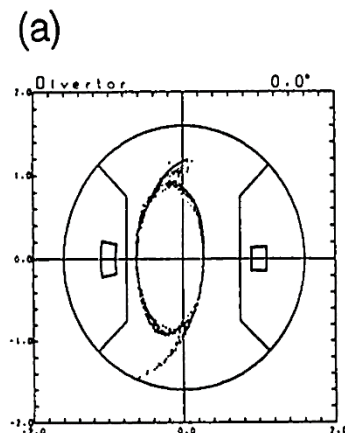
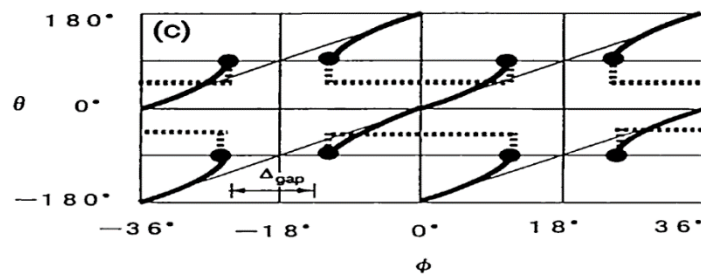
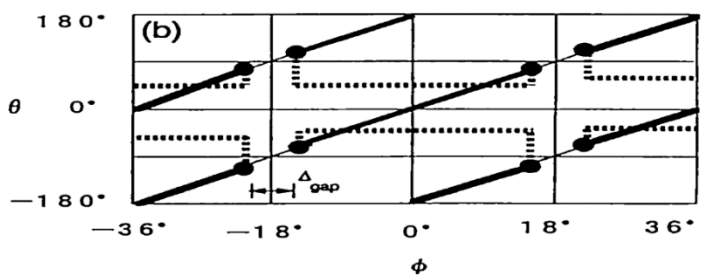
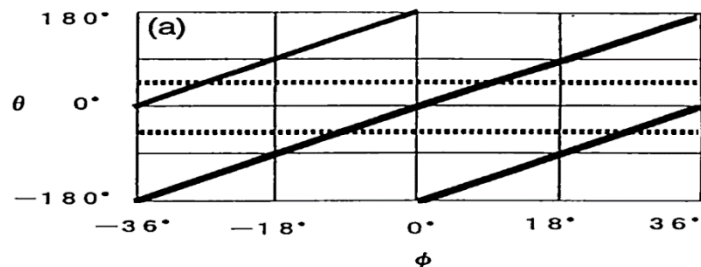
Modular Heliotron



Modular Stellarator

K. Yamazaki

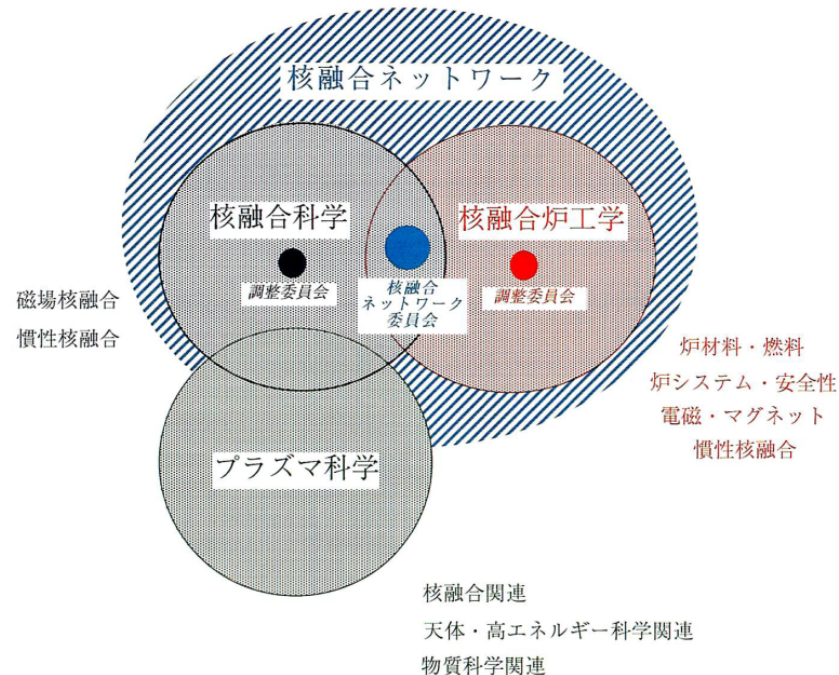
Proposal of MODULAR HELIOTRON: Advanced Modular Helical System Compatible with Closed Helical Divertor  
J. Plasma and Fusion Research Vol.70 (1994) pp.281-288.



K. Yamazaki, and K. Y. Watanabe  
 Nucl. Fusion Vol.35, No.10 (1995) pp.1289 - 1296.

# 核融合ネットワーク

(旧)文部省国際学術局学術調査官として



山崎耕造  
 「核融合の総合的体系化の推進  
 (代表:飯吉厚夫)」の活動と  
 研究組織ネットワークの検討について  
 プラズマ・核融合学会誌69巻11号(1993年)  
 1380~1381頁.

● **名古屋大学工学研究科時代**  
**(8年間)**

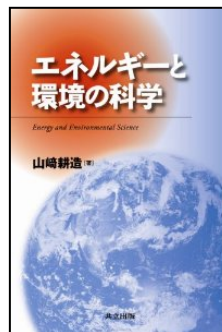
**研究と教育**

**(核融合炉工学、核融合科学、プラズマ科学)**  
**(Tokastar実験、理論、炉設計)**

# 研究の3本柱 (FE,FS,PS)

(原子力学会 核融合工学部会)

核融合炉工学  
(FE)



核融合システム

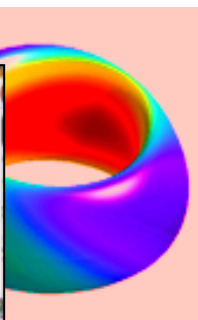
基礎プラズマ

(庄司)

(物理学会)  
プラズマ科学  
(PS)

(山崎、有本、大石)

プラズマ閉じ込め



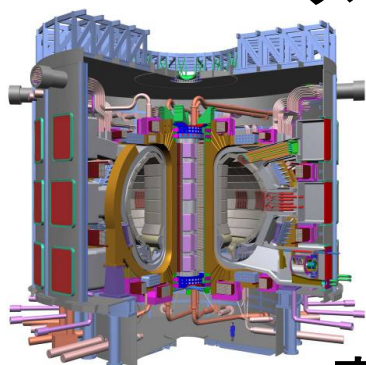
(プラズマ・核融合学会)  
核融合科学  
(FS)



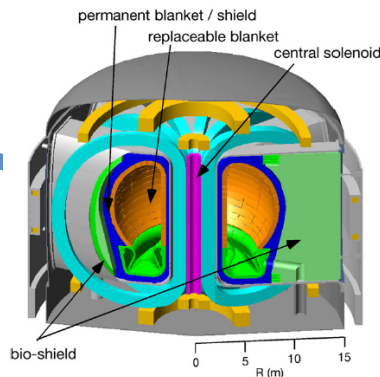
# 核融合炉システム(設計)

## 磁場核融合炉のシステム設計

- \* ヘリカル・トカマク核融合炉のプラズマ・工学設計
- \* ヘリカル・トカマク核融合炉の経済性、環境負荷評価



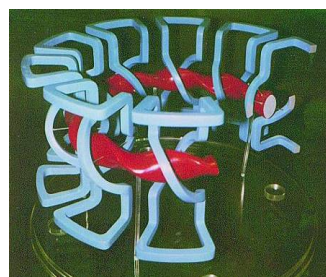
実験炉  
ITER



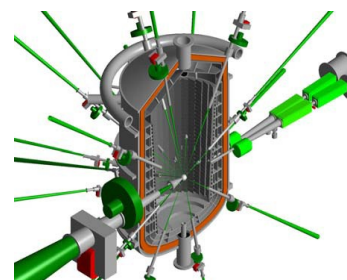
トカマク炉  
Slim-CS



Physics, Engineering, Cost



ヘリカル炉  
LHR/MHR



慣性炉  
KOYO-F

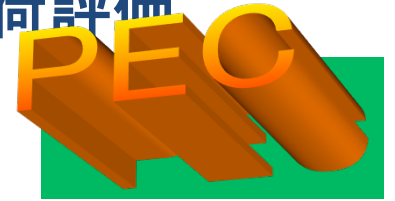
D-<sup>3</sup>He炉  
夢のクリーンエネルギー  
<sup>3</sup>He月資源の利用



- 大学院生論文
- H19 東山 陽
  - H20 植村 聡、浅野 敦
  - H21 梅田晃一
  - H22 森 賢二郎
  - H23 伴佳奈恵
  - H24 近藤拓也

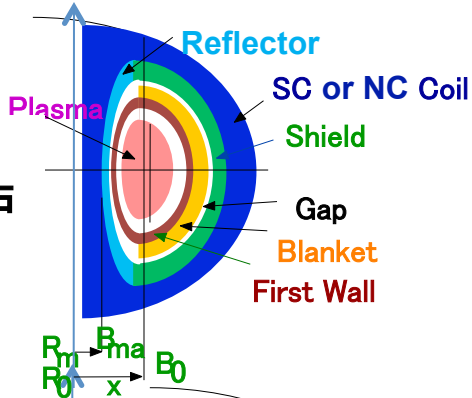


# 核融合炉のシステム・経済性・環境負荷評価 PEC-2/3

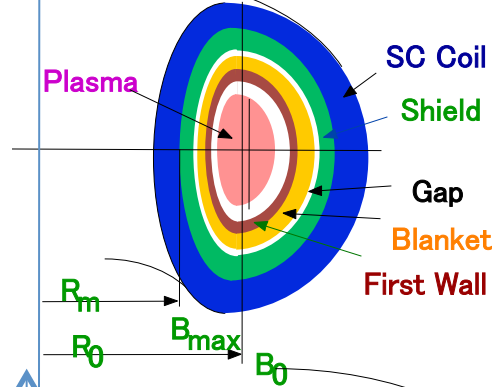


Physics, Engineering, Cost

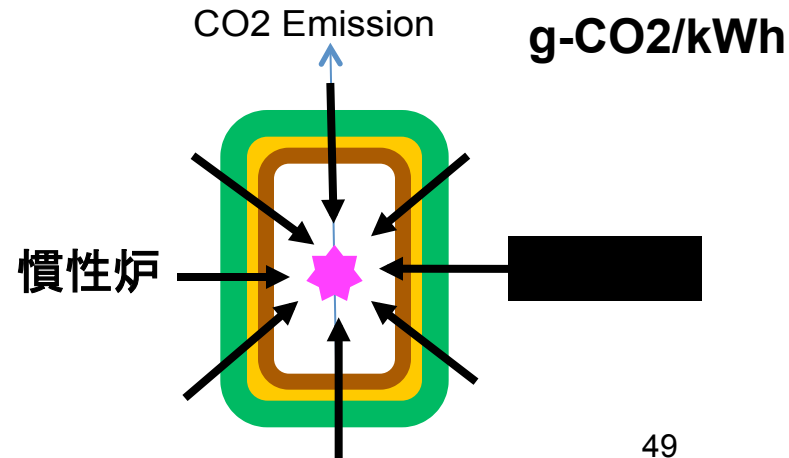
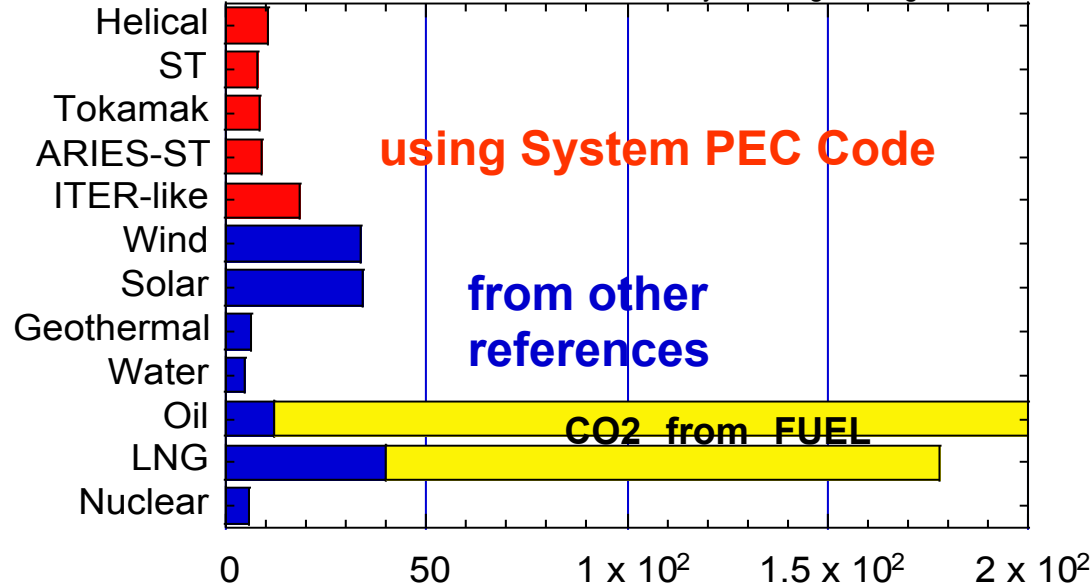
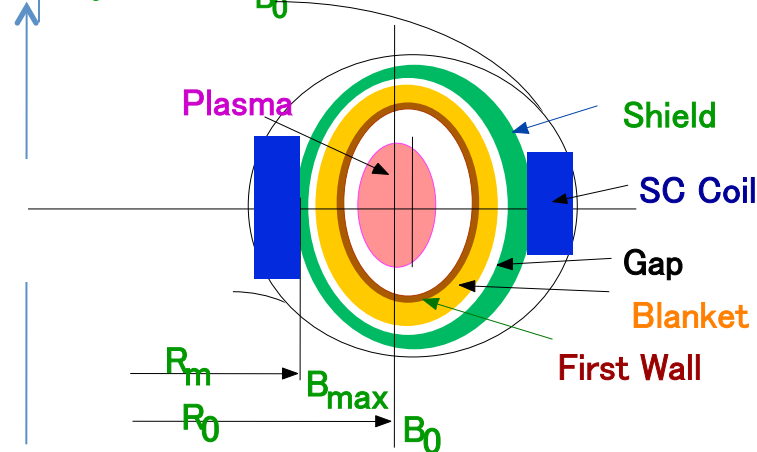
球状  
トカマク炉



トカマク炉



ヘリカル炉





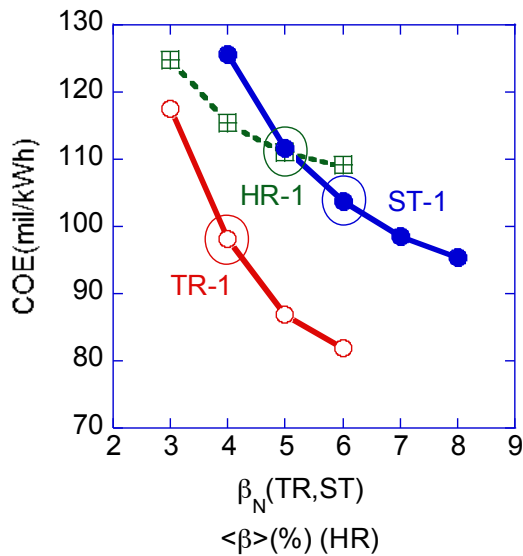
# 高ベータ化、コンパクト化の効果

発電単価 (COE) = 使った全コスト / 全発電量(kWh)

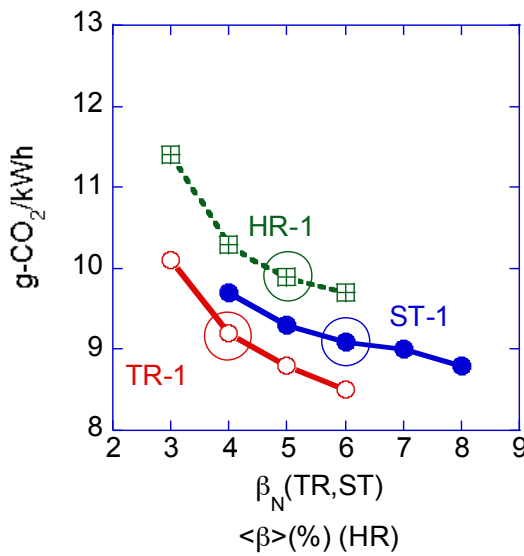
温室効果ガス排出率 = ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量(g-CO<sub>2</sub>) / 全発電量(kWh)

エネルギー利得 (EPR) = 生産した全エネルギー / 消費した全エネルギー

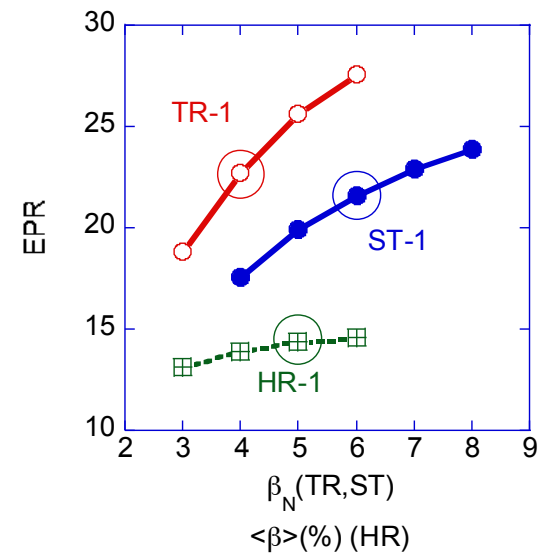
発電単価



温室効果ガス排出率



エネルギー利得

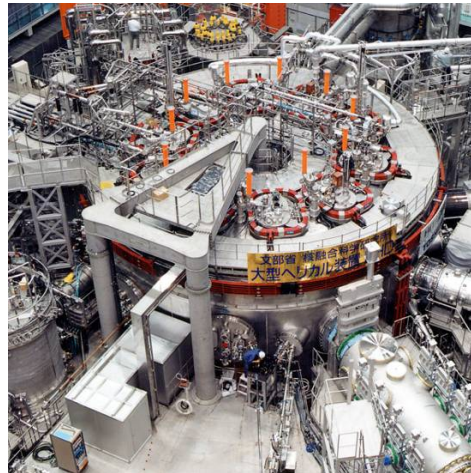


K. Yamazaki et al., Nucl. Fusion **49** (2009) 055017.

# プラズマ閉じ込め研究(実験)

## 小型先進プラズマ閉じ込め概念の模索

- \* 球状ヘリカル・トカマク装置の設計・実験研究(実験)
- \* トーラス磁場配位の最適化解析(理論)



JT60(原子力機構)  
トカマク

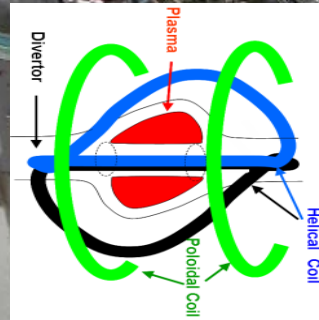
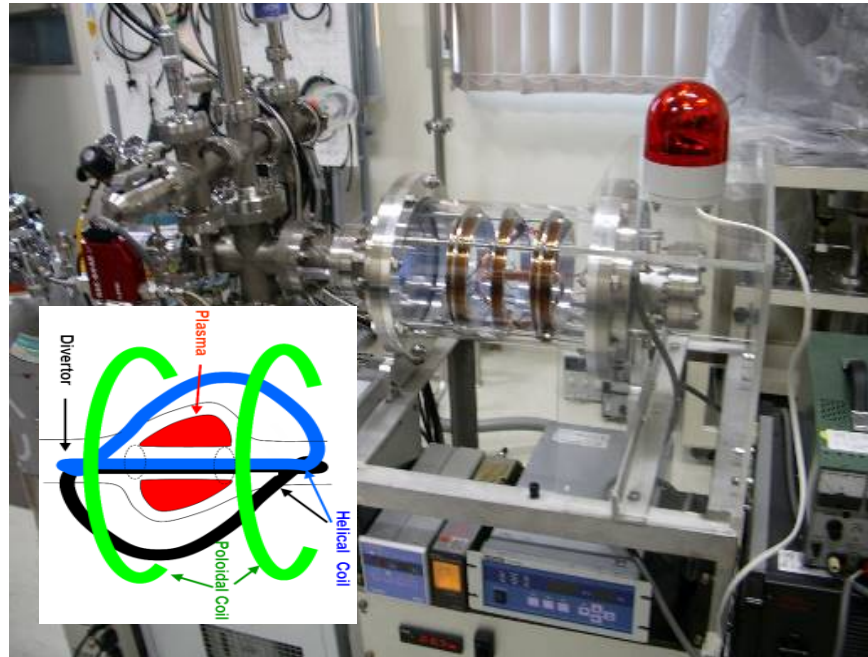
LHD(核融合研)  
ヘリカル

Tokastar装置(工学部8号館)  
ハイブリッド

大学院生論文  
 H19 澤藤忠範  
 H20 平 裕一  
 H21 岡野 晃希  
 H22 馬場一富  
 H23 尾関秀将、長谷川誠



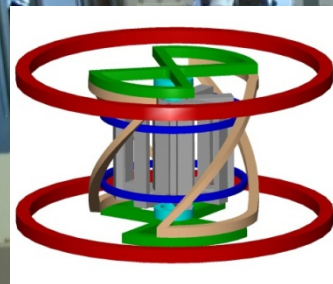
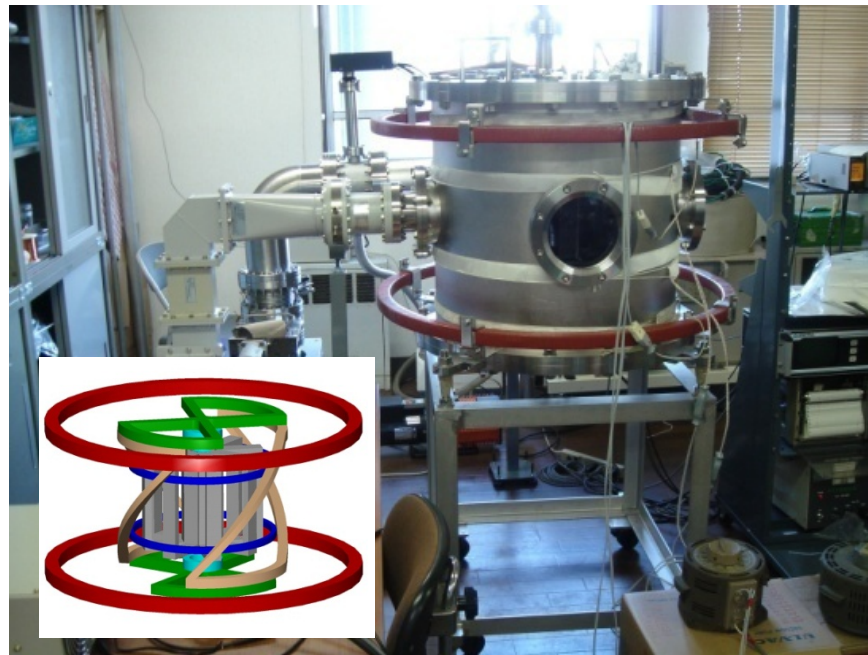
## TOKASTAR-1 (C-Tokastar)



Tokastar-2/4

$R \sim 2 \text{ cm}$   
 $a \sim 1 \text{ cm}$   
 $R_{\text{coil}} = 6 \text{ cm}$   
 $B < 0.1 \text{ kG}$   
 $I_p \sim 0$

## TOKASTAR-2

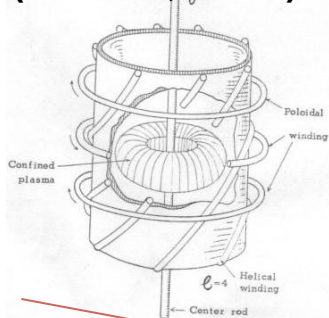


$R \sim 12 \text{ cm}$   
 $a \sim 5 \text{ cm}$   
 $B \sim 1 \text{ kG}$   
 $I_p < 10 \text{ kA}$   
 $P_{\text{ECH}} \sim 2 \text{ kW}$

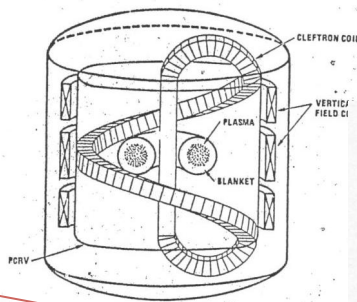


# Exotic Tokamak-Stellarator Hybrids

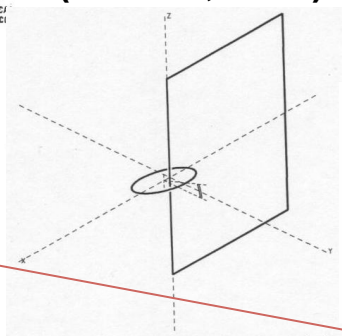
**Ikuta Torus**  
(K.Ikuta, 1968)



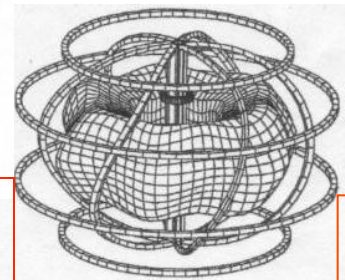
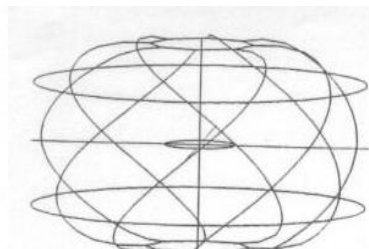
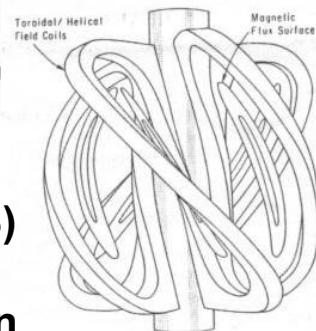
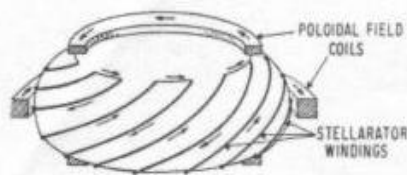
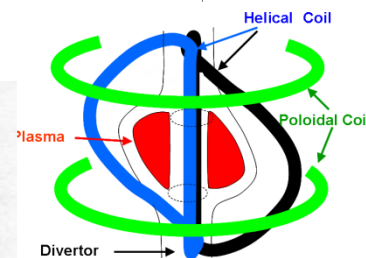
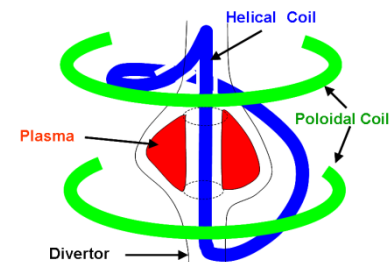
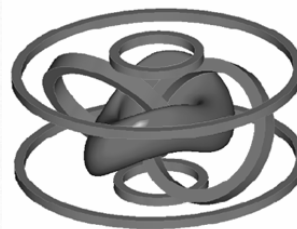
**Cleftron**  
(T.Ohkawa, 1981)



**Ultra Simple Stellarator**  
(T.Todd, 1990)



**CNT**  
(T.S.Pedersen & A.H.Boozer, 2002)



**Strong Negative V''**  
(H.P.Furth et al., 1968)

**Tokatron**  
(H.P.Furth et al., 1981)

**Tokastar**  
(K.Yamazaki, 1985)

**C-Tokastar**  
(K.Yamazaki, 2004)

名大プラズマ研

**Spherical Stellarator**  
(P.E.Moroz, 1996)

名大工学研究科



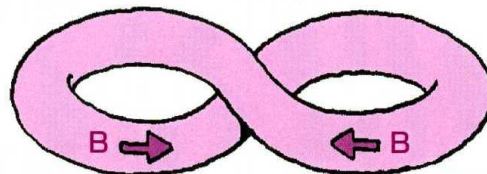
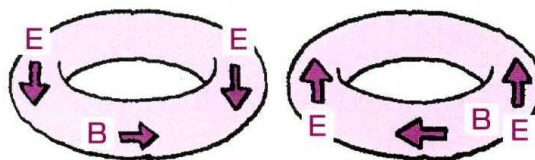
# プラズマ配位の最適化



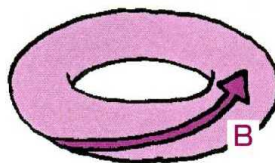
Lyman Spitzer, Jr. (Professor of Astronomy at Princeton University) and the Model A Stellarator ( a figure-eight machine built in 1952)

( Courtesy of the Princeton Plasma Physics Laboratory )

トロイダルドリフトを抑制する

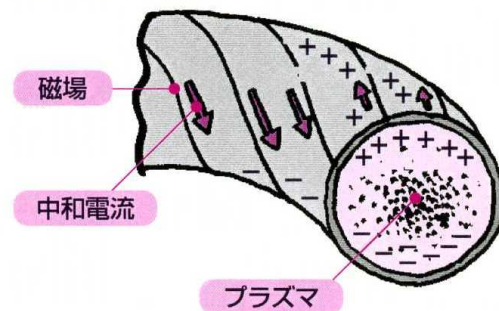


2つのドーナツを  
あわせる



あるいは、  
磁力線をねじる

このねじれドーナツの  
磁場構造は、トカマクや  
ヘリカル装置のものです。



磁力線のねじれにより、中和電流が流れ、荷電分離の電場が消える

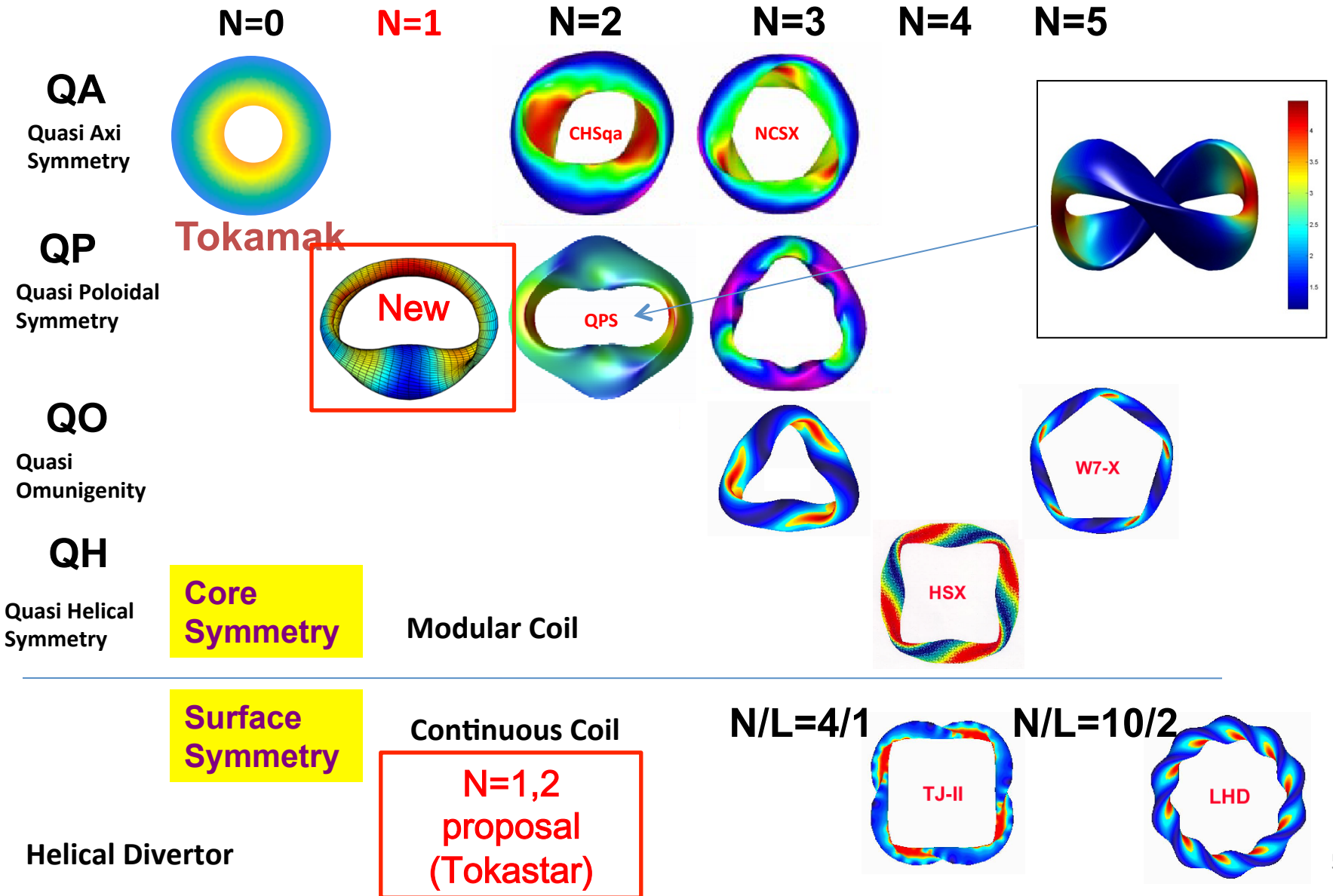


トコトンやさしい「プラズマの本」 山崎耕造著  
日刊工業新聞社 (2004) p.131



# Advanced Plasma Shaping

← Smaller N



# プラズマ閉じ込め研究 (理論)

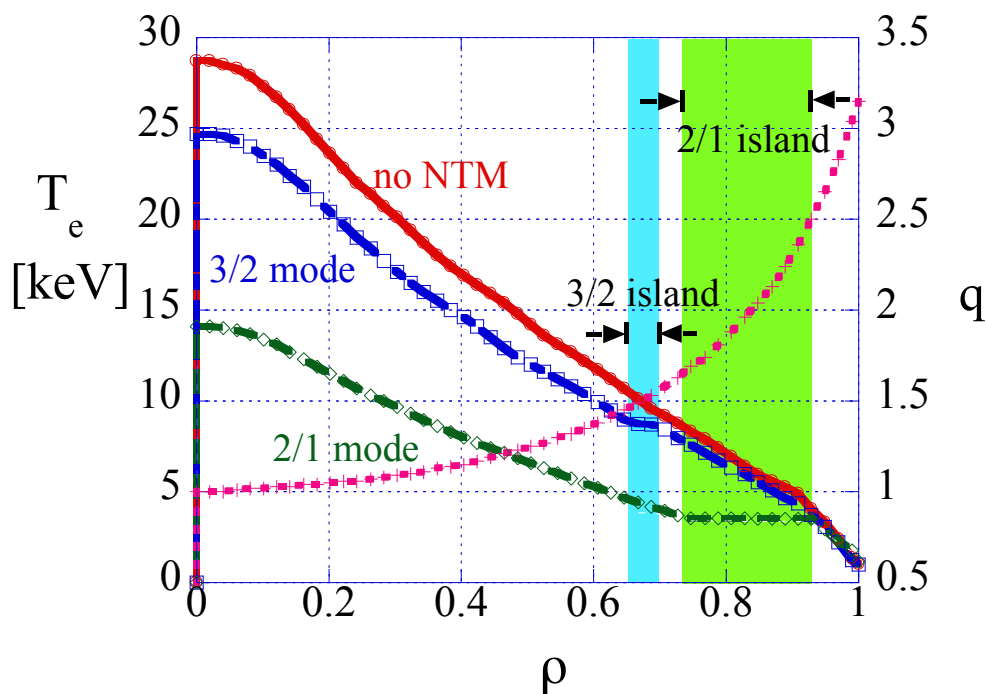
## 大型トカマク・ヘリカルの閉じ込め研究

- \* 核燃焼プラズマの輸送解析
- \* 大型装置でのプラズマ閉じ込め解析



Toroidal Transport Linkage

### 輸送解析コードによるシミュレーション例 ITERプラズマの温度分布



平衡  
安定性  
輸送

BSC  
NTM, RWM, ELM  
ITB, ETB, 不純物

#### 大学院生論文

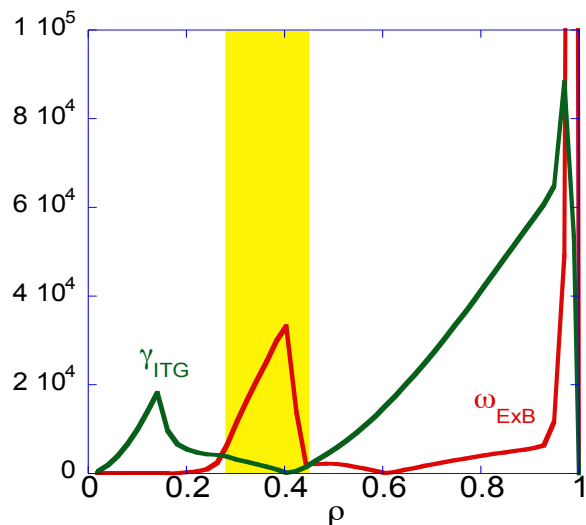
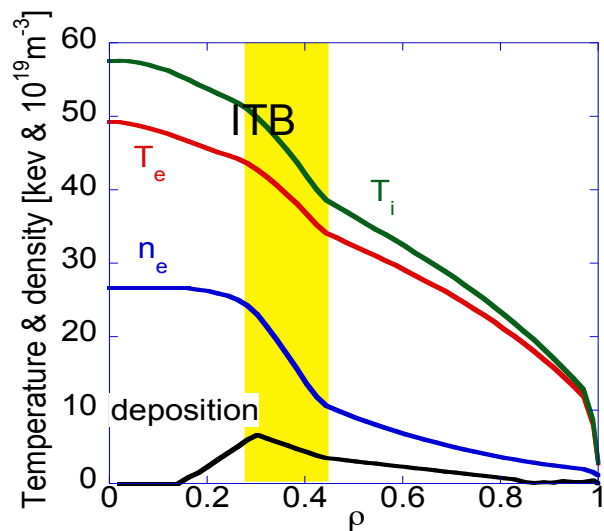
- H19 大西 工、高橋祐輝
- H20 山本弘明
- H21 山田育宏、谷口 智
- H22 堀 能士
- H23 栗田大輝
- H24 真野純次



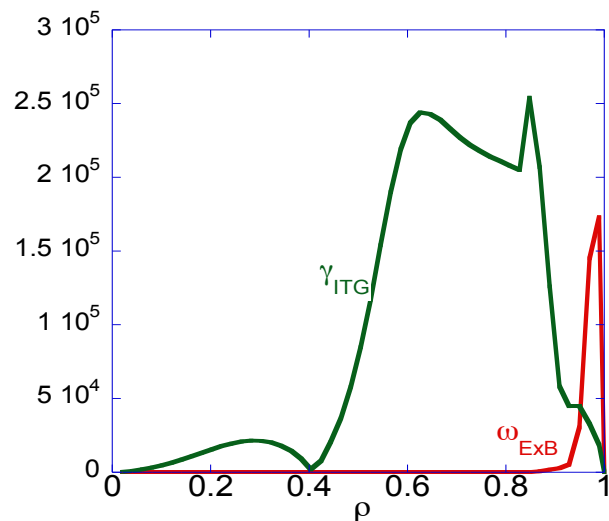
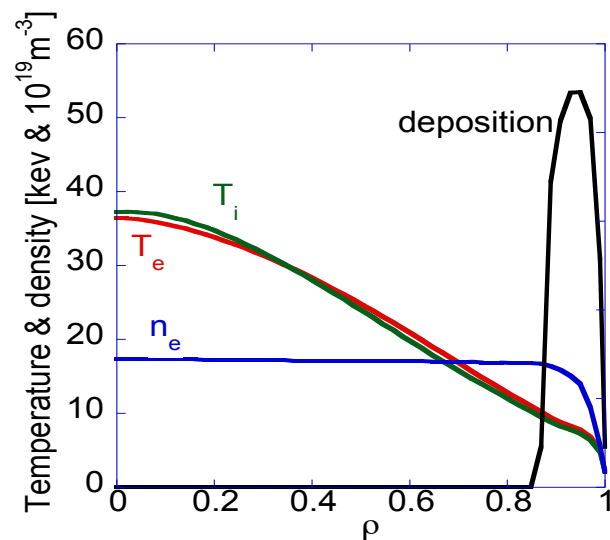


# Simulation of Tokamak Reactor TR-1

## HFS Pellet Injection with ITB



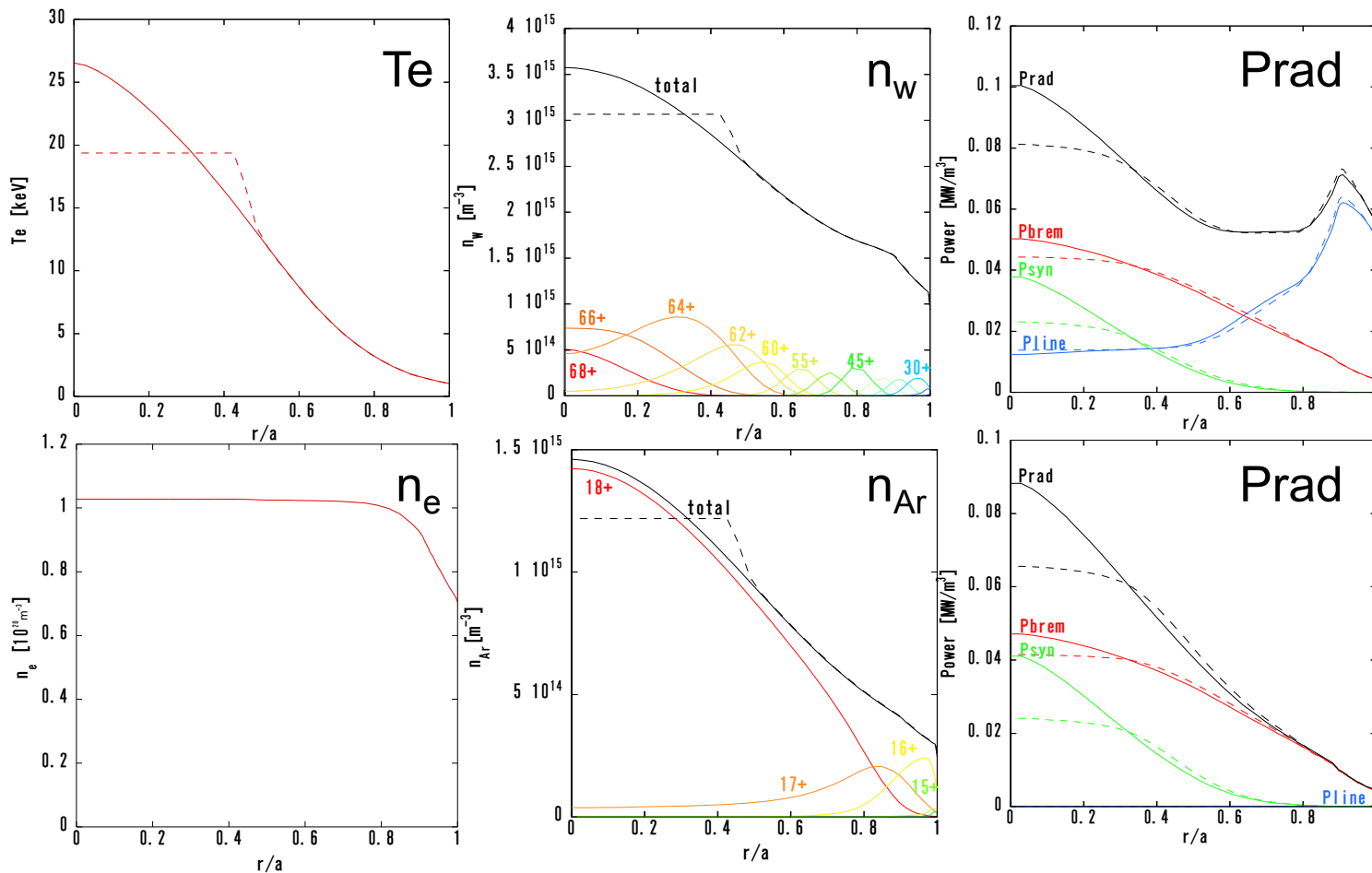
## LFS Pellet Injection Without ITB





# Radial profile before (solid curve) and after (dashed curve) a sawtooth crash.

ITER





# アメリカの“天才”高校生 核融合成功

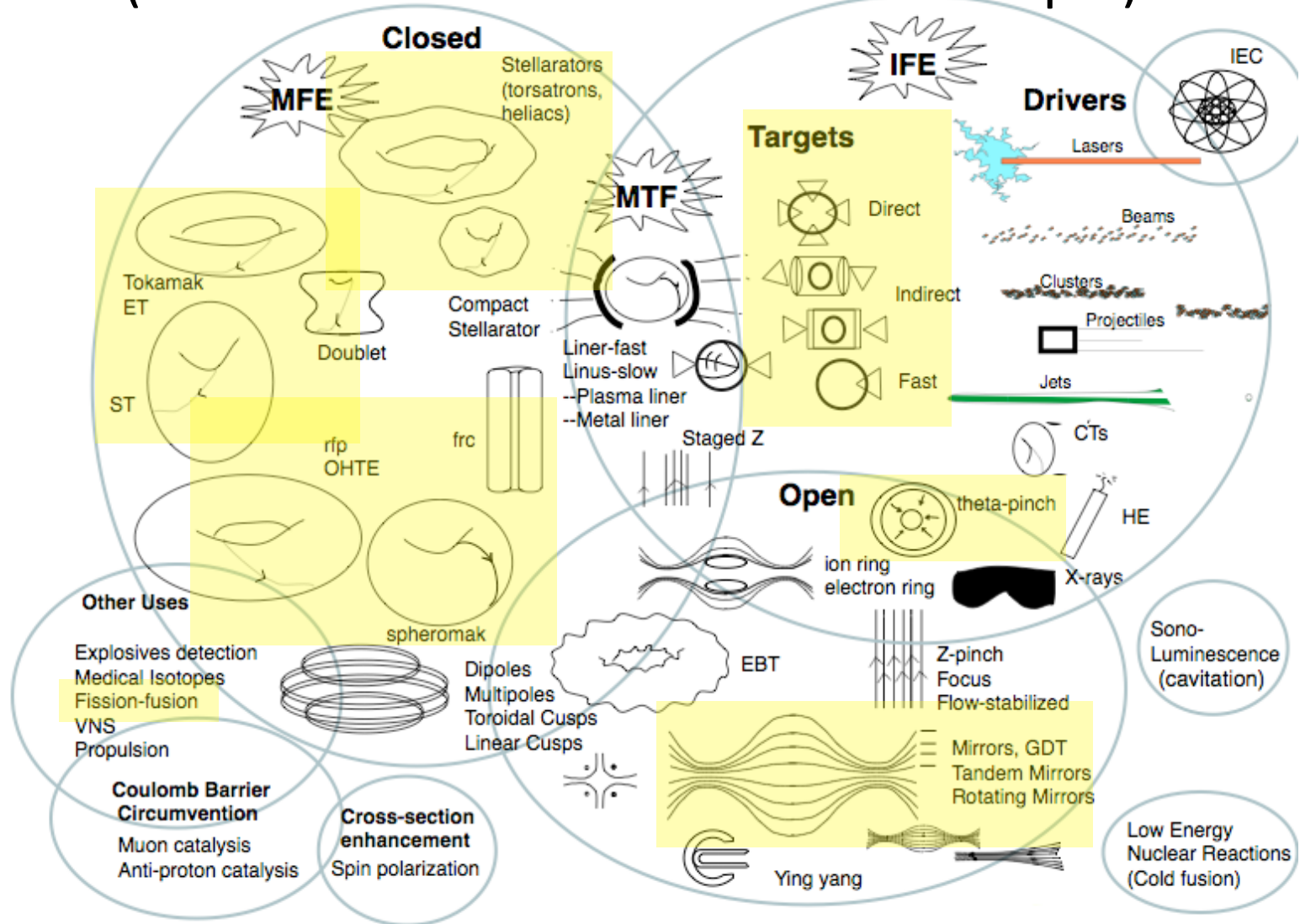
2007/05 ミシガン州オークランドの高校生Thiago Olson君  
手作り核融合成功

2011/06 14歳のときに核融合炉を作ったTaylor Wilson君  
今度は核兵器発見技術



<http://www.whitehouse.gov/blog/2012/02/07/president-obama-hosts-white-house-science-fair>

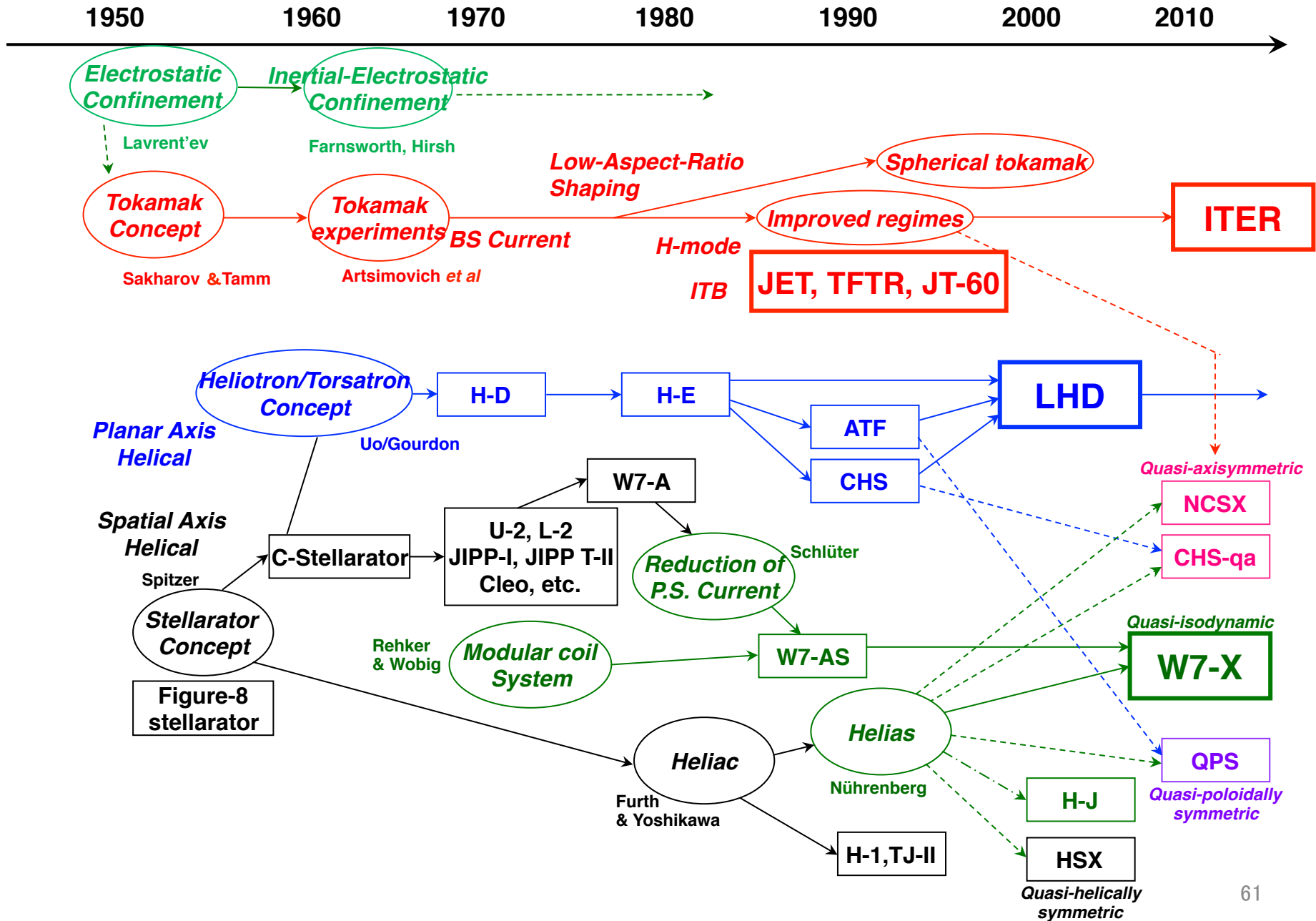
# 『革新的閉じ込め概念』 (ICC: Innovative Confinement Concepts)



S. Woodruff, T. R. Jarboe ICC2006

:Yamazaki's research

# 閉じ込め配位の発展



IAEA  
Dr. T.Dolan

ロシア核融合研究の父  
Dr. Oleg A. Lavrent'ev



Junior sergeant  
(Sakhalin Island, 1950)  
(from Physics - Uspekhi  
44 (8) 835 - 865 (2001) )

1926年7月生まれ  
2011年2月死去  
写真当時76才

ウクライナ会議にて 2000年9月

# 未来のプラズマ・核融合

## 「先進」とは何だろうか？

Advanced Tokamaks?

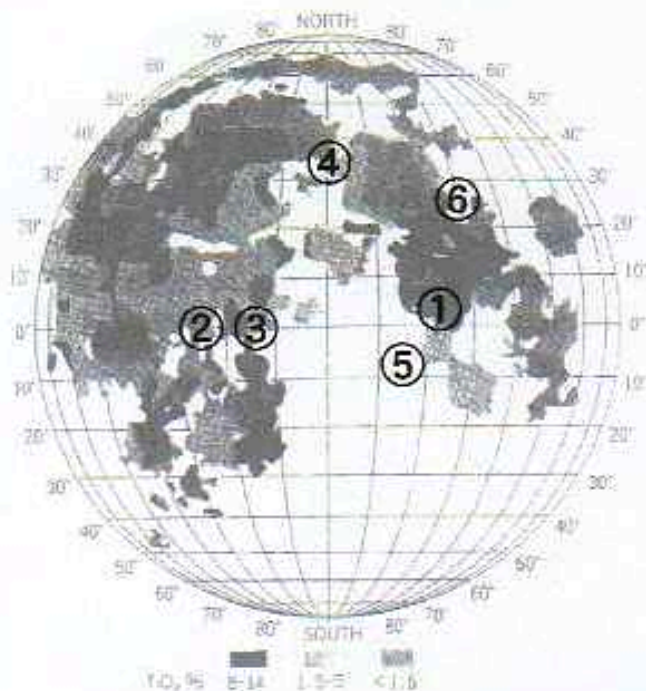
Advanced Concepts? Innovative? Novel?

Advanced Fuels?

- (1) 先進閉じこめ (出力密度の高いシステム)
- (2) 先進機器 (性能の良い、信頼性の高い機器)
- (3) 先進燃料 (豊富な燃料、中性子発生が少ない燃料)
- (4) 先進反応 (反応率が高い方式)
- (5) 先進応用 (核融合の発電以外の応用)

### (3) 先進燃料 (D<sup>3</sup>He反応)

#### ヘリウム3資源と月探査



月には磁場がないので太陽風により運ばれてきたヘリウム3が表面に吸収・堆積されます。酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) の中にヘリウム3が高濃度で蓄積されています。

トコトンやさしい「太陽の本」  
山崎耕造著 日刊工業新聞社

- ①アポロ11号 (静かな海)
- ②アポロ12号 (嵐の大洋)
- ③アポロ14号 (フラマウロ丘陵)
- ④アポロ15号 (ハドリー峡谷・アペニン山脈)
- ⑤アポロ16号 (デカルト高地)
- ⑥アポロ17号 (タウロス・リットル峡谷)

#### ヘリウム3資源量

地球上:

約400キログラム

核融合エネルギー開発用として約800万  
キロワット・年

月面上:

10<sup>9</sup>キログラム

約1000年間の世界のエネルギー使用量

巨大ガス惑星(木星・土星)上:

10<sup>23</sup>キログラム

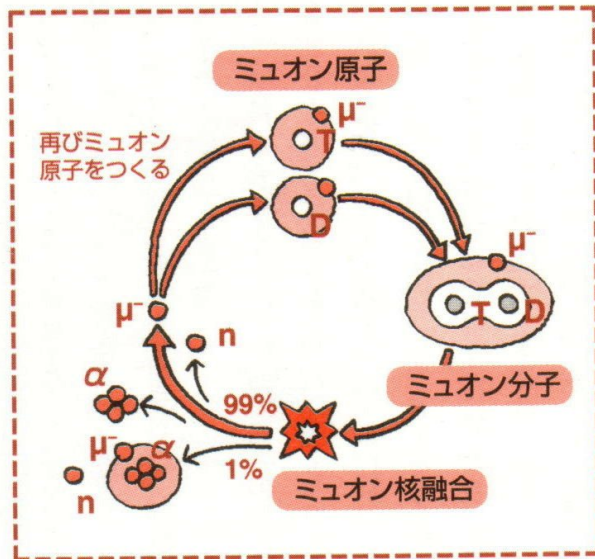
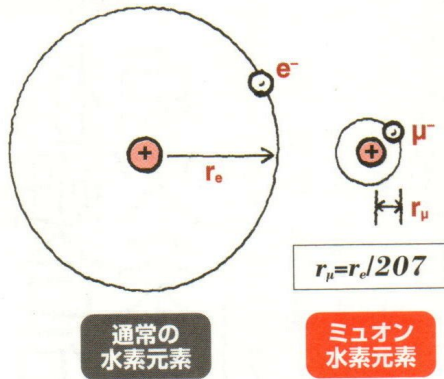
約10<sup>17</sup>年間の世界のエネルギー使用量

ヘリウム3は、木星や土星に豊富にあります。



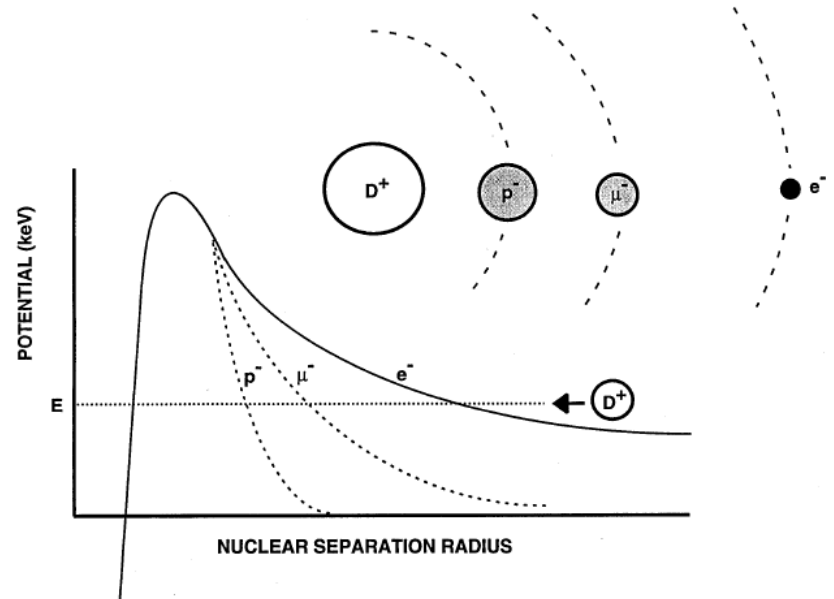
# (4) 先進反応

## ミュオン触媒核融合



トコトンやさしい「プラズマの本」  
山崎耕造著 日刊工業新聞社

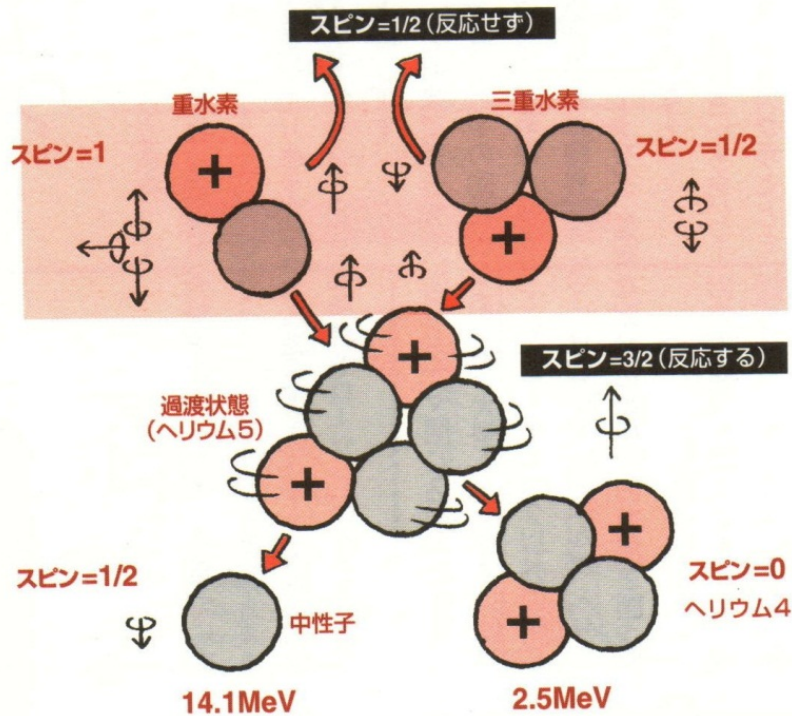
## アンチプロトン触媒核融合



THE FUSION CROSS SECTION IS DOMINATED BY THE BARRIER PENETRATION.  
SHIELDING PARTICLES HAVE A VERY LARGE IMPACT ON TRANSMISSION FACTOR

D.Morgan et al, UCRL-JC-120149 (1995)

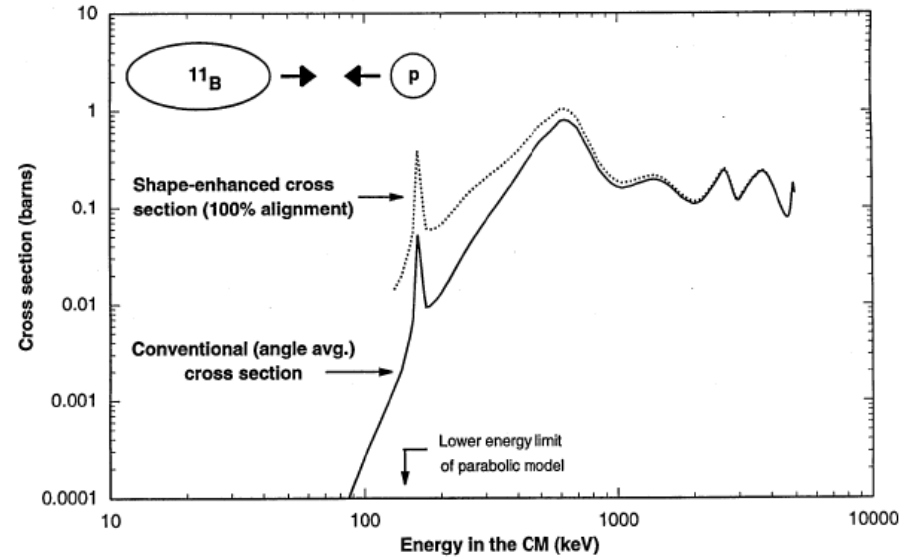
## スピン偏極核融合



DとTのスピンを制御することにより  
過渡的にできるヘリウム5のスピンを制御し、  
核融合反応を制御することができます。

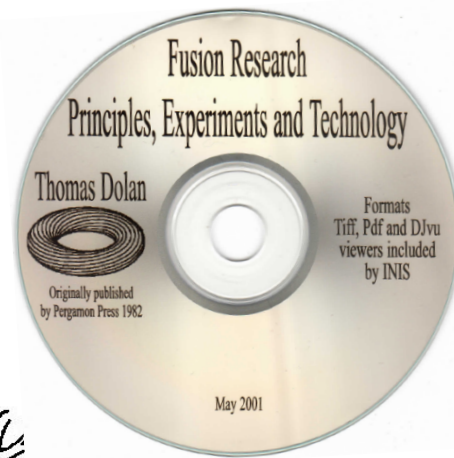
トコトンやさしい「プラズマの本」  
山崎著 日刊工業新聞社

## 形状増倍核融合

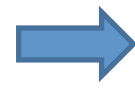


SHAPE-ENHANCEMENT OF THE  $p$ - $^{11}\text{B}$  CROSS SECTION

J.L.Parkins, Physics Letters A 236  
(1997) 345-350.



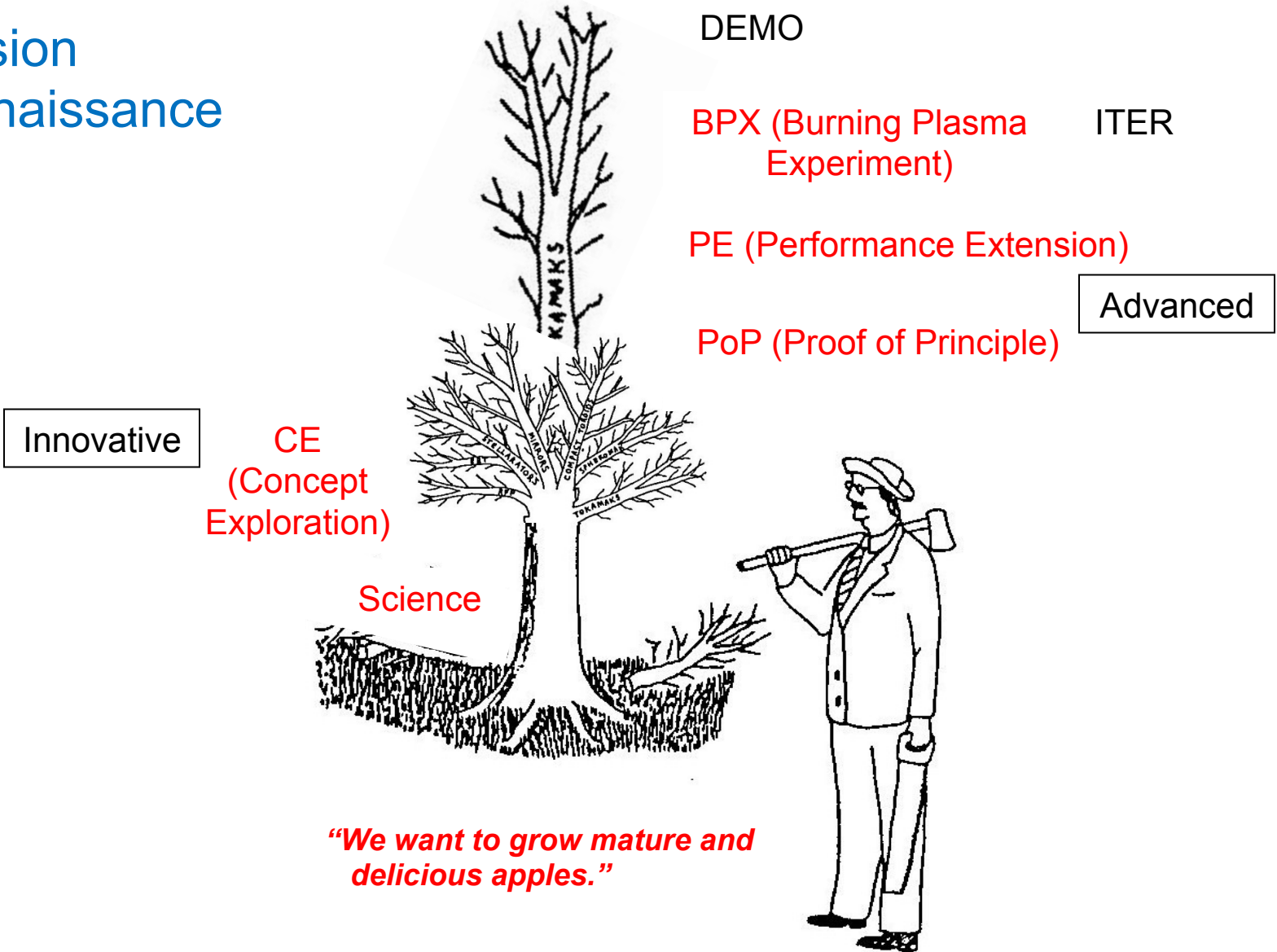
**"Pruning enhances productivity."**



**"Now we're ready to grow apples."**

Thomas J. Dolan  
 Idaho National Engineering Laboratory  
 EG&G Idaho, Inc.  
 P.O. Box 1625  
 Idaho Falls, ID 83415, USA

# Fusion Renaissance



# 「未来・夢・挑戦」

未来に目を向け、大きな夢を抱き、果敢に挑戦しよう

# 最後に 研究室の諸君に感謝を込めて (集合写真)

サラ・ブライトマンさんの歌  
「Time to Say Goodbye」に合わせて  
平成17年から24年までの  
研究室集合写真が紹介された。

(著作権保護の為に動画削除)