

NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

人工太陽は燃えるか —核融合研究最前線—

伊藤 公 孝

(1993年4月19日受理)

NIFS-MEMO-10

May 1993

RESEARCH REPORT
NIFS-MEMO Series

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. This document is intended for information only and for future publication in a journal after some rearrangements of its contents.

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to the Research Information Center, National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan.

人工太陽は燃えるか -核融合研究最前線-

原子力オープン・スクール講演

核融合科学研究所

伊藤公孝

要旨

核融合研究の現状を易しく紹介する講演を、原子力オープン・スクール(日本原子力学会主催: 1992年10月21日、於名古屋大学)で行った。その講演内容を、当日用いられたオーバー・ヘッド・プロジェクタ用原稿とともに示す。

At the Front of Fusion Research
-- Introductory Lecture Open to Public --

Kimitaka Itoh
National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan

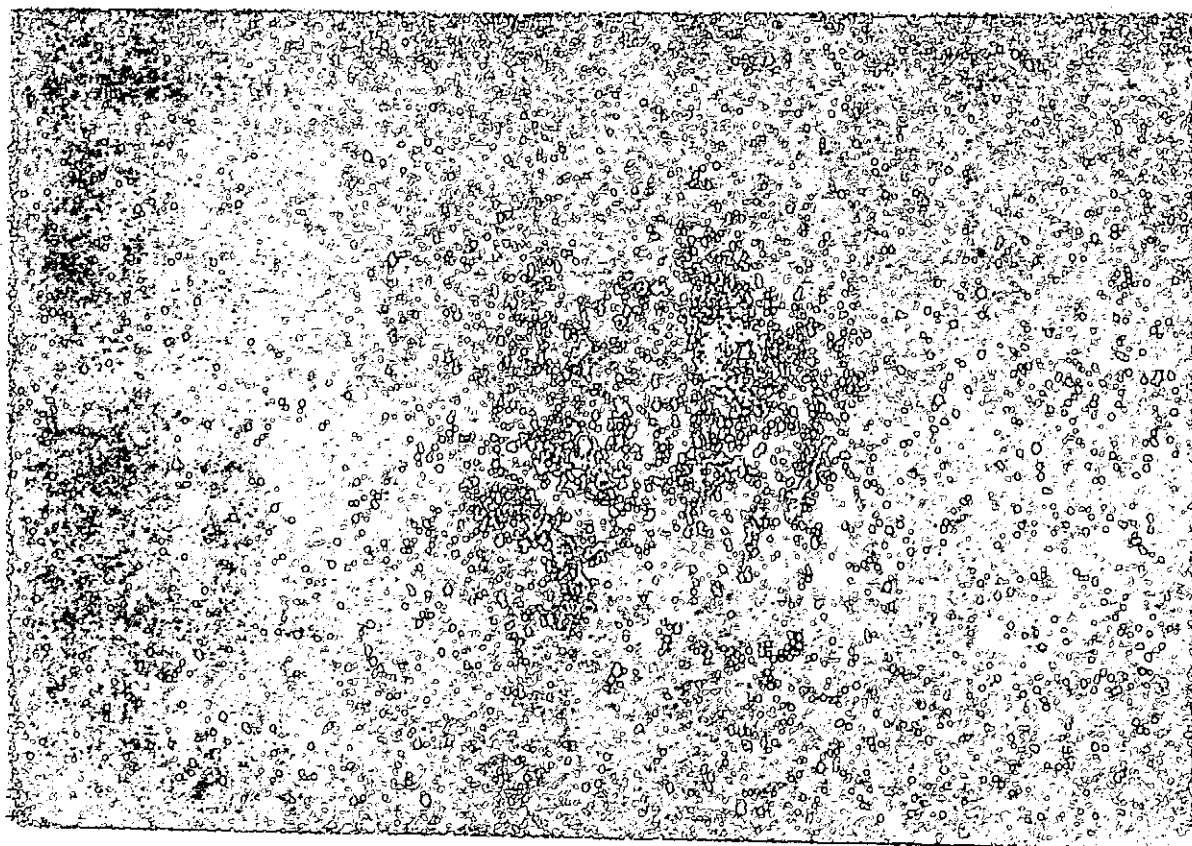
Abstract

An introductory lecture for the fusion research was held on October 21, 1992 at Nagoya University, on occasion of the 'Open School for Atomic Energy'. The school was organized by Atomic Energy Society of Japan. The lecture, together with OHP sheet, is reported.

Keywords: Status of Fusion Research, Lecture open to public, Open School for Atomic Energy

1 宇宙の炎 核融合

宇宙には、一つ一つ輝く星や、星雲、銀河の様なさまざまな輝きを持って光に満ちています。最初の図(1)は薔薇星雲の写真です。普通に暮らしていると、美しいとのみ感じるものですが、一つの星に注目してみると、そこでは、大変ダイナミックな活動があります。



次に一つの星をもっとはっきり見てみましょう。図(2)は、恒星のひとつ太陽をクローズ・アップして映したものです。核融合科学研究所の土岐会議のポスターに使われた写真ですが、光(の一種の X線)を強く光らせている、活発な大規模の活動が見えています。この写真に一端を見せる太陽の活動が、エネルギーを生み出して、周囲へ発散しています。遠く離れば星となって道しるべや詩的感興の源であります、それに近い所には、命を支え発展させる源になっています。

地上の鮮やかに花開いているエネルギーは、殆ど太陽エネルギーの恵みによるものですし、何よりも、緑と多彩な生物に満ちた地球があるのもそのおかげです。

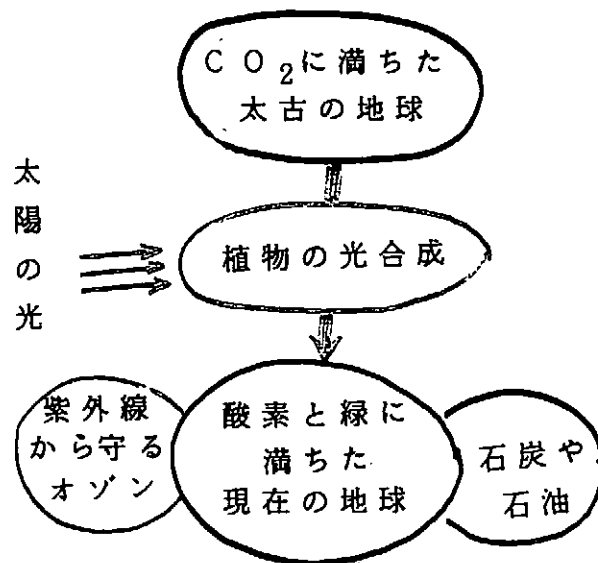


図(3)に、太古から現在迄の地球の姿を示します。

皆さんもよく御存知と思いますが、太古の地球は炭酸ガス (CO_2) に満ち、紫外線が容赦無く降り注ぐ荒々しい世界でした。動物は海の中でしか生きていられません。植物が生まれると、太陽の光を通した光合成によって、酸素が増えてきたわけです。そしてオゾンが出来ますと、紫外線が大気のカバーの中で遮られます。やっと、生物が海水の外でも暮らせる様になった訳です。

太古からの植物の太陽の光の下での営みは、化石燃料としてエネルギーを蓄え、オゾンの保護層のもとで、酸素と緑、そして私達始め多様な生き物に満ちた地球を作りあげてきました。昨今、良く聞く話は、化石燃料の過大な使用による CO_2 の発生と温暖化、オゾン層の破壊とそれによる癌発生危険などという問題です。これは、太古の不毛の地球へと逆行しようというものです。

地上のエネルギー



過剰な CO_2 発生
太古の不毛の地球へ？

地球を美しく住みよい世界に作り上げてきた、太陽のエネルギーの源は、核融合反応というものです。図(4)

「地上に太陽を」という相言葉で進められてきた核融合研究は、私達に尽きないエネルギーをもたらしてくれるでしょうが、それだけではありません。太陽が地球に力の源のエネルギーを渡しただけでなく、不毛の太古の地球から美しさ命の多彩さを生み出した、そうした力をも人の知恵で作り出そうという夢に溢れた研究です。

この講演では、地上の太陽の原理から始め、地上でプラズマが燃え始めた現在の研究、そしてこれから私達がどんな研究を計画しているのか、その最前線を御紹介出来れば、と思います。

太陽や星では核融合反応でエネルギーが発生



2 核融合反応

最初に核融合反応のあらましを説明します。図(5)。

二つの原子を近づけてゆくと、一つの分子になります。二つのものが一緒になると言うので、二つが親しみ合う力、親和力が働く、と言いますが、一体におちついた所でエネルギーが開放され、これが普通の炎の輝きを生み出す反応です。

エネルギーは、実はもっと深く原子の奥底に蓄えられています。もっと勢いよく二つの原子を近づけますと、電子は原子核の周りから吹き飛び、互いに自由に動き回ります。(こうした状態をプラズマ状態といいます。手に取って眺める事はま

ず無いのですが、身の回りにも --例えば蛍光灯の中など-- 生まれています。)原子核は、プラスの電気を帯びているので、大変強く反発しあいますが、最後は融け合って大きいエネルギーを発生します。

坂道にボールを転がすイメージで行くと、少し離れた所に小さな窪みがある、その内側に急な登り坂があり、最後に中心に深い井戸が掘られている、と言った様子です。(井戸は、窪みに比べ、100万倍位深い。)遠くからボールを転がすとします。ゆっくりした転がしかたをすると、手前の浅い窪みに落ちて着くでしょう。勢いを増すと、それを飛び越えるが反発してもどる。もっとつよく転がすと、坂を超えて、勢いよく穴に落ちることになるでしょう。


核融合反応

二つの原子を近づけてゆくと

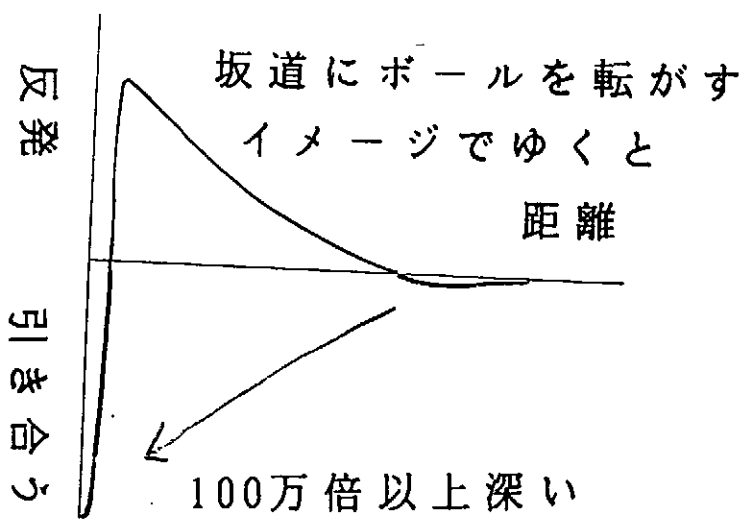


一体の分子になり

もっと勢いよく近づけると
電子はふき飛んでプラズマになり
原子核は強く反発するが



最後は融合して
大きいエネルギーを発生



こうして核融合反応の特徴を二つに纏めることができます。図(6)
[1]まず、普通の火(化学燃焼)に比べ、一回の反応で100万倍以上大きな熱が生まれます。これは、解き放たれる原子のエネルギーが大きいためですが、そのため、燃料が少なくて済むようになるという意味を持っています。よく、核融合で石油缶1杯の海水から、数トンの石油のエネルギーが取り出せる、といった話をお聴きと思います。

[2]次に、反応が起きるしきいが高いという事です。勢いよく原子核を何回もぶつけ続ける必要があります。先程、プラズマ状態になっているという話をしましたが、超高温のプラズマを閉じ込めるという課題が生まれてくるのです。今まで多大な研究を必要としてきた秘密がここにあります。ただし、日常的环境では燃えないというのですから、固有の安全性があるという事でもあるわけです。

特徴

(1) ふつうの火(化学燃焼)に比べ
一回の反応当たりの出力が
100万倍以上大きい

(2) 反応が起きるまでのしきいが高い

勢いよく原子核を何回もぶつける必要

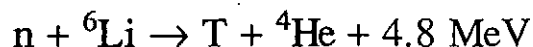
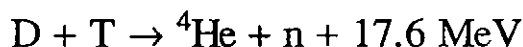
超高温プラズマの閉じ込め
(多くの研究を必要)

固有の安全性

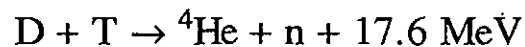
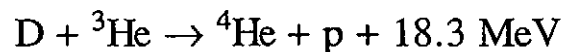
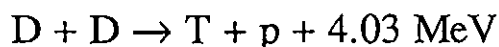
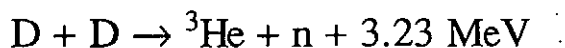
主な核融合反応の種類を図(7)に挙げておきます。普通の燃料にも、点火し易いけれど取扱注意のものや、火は点きにくいですが灰が少なく便利、といった種別があって、用途に応じています。核融合反応のなかでも、重水素と三重水素の組み合わせのように、最も低いエネルギーで反応を起こすものがあり、核融合発電の幕を開けるものと考えられています。また、重水素同志を反応させる場合の様に、反応が起きにくいのですが、高エネルギーの中性子の発生が少なく、充分プラズマが燃えるようになったなら、核融合炉を設計するのが容易になるだろう、と考えられるものもあります。

主な核融合反応

D T 反応 (低いエネルギーで反応：反応率最大約7億度)



D D 反応 (反応率は低い、高エネルギー中性子の生成が少ない)



3 プラズマの閉じ込め

核融合反応の燃料の話は分かりましたが、どのようにそれを集めて燃やすのでしょうか。図(8)

星では、上手く燃えています。そこでは重力で燃料が引きつけられ熱されています。燃料が集まれば集まる程、重力は強くなり、燃料は逃げ出し難くなります。ですから、星の様に大きい所では、確実に核融合反応が起こります。でも、巨大過ぎて人間の地上の太陽には向かない話です。

地上では、色々工夫が必要です。例えば、燃料が飛び散るに任せるけれど、燃料をぎっちり密にして、飛び散る間に燃やしてしまう、という考えがあります。(これは慣性核融合という考え方で、日本では大阪大学を中心に進められています。日本は世界をリードする成果を上げています。)

もうひとつは、磁石(電磁石)を使いプラズマを逃がさないようにするものです。(専門家は、磁場閉じ込めと呼びます。)

どのように核融合の燃料を 集めて燃やすのか？

(1)星：重力で引きつける
(確実だが巨大)

(2)地上では？

○燃料が散るまでに燃やし尽くす

○磁場で逃がさないようにする

磁場閉じ込めを図(9)に示します。

電気を帯びた粒子は、磁石の回りでは、勝手に直進出来ません。一寸難しい話ですが、磁力線(磁石の N 極から S 極に向かって磁場の有り様を伝えるものですが)のまわりを巻きついた運動をします。ですから、磁場を作っておきますと、高温のイオンはそれを横切って飛び散ってしまうわけにはいかなくなります。

磁力線の方には、すいすいと動くことができますから、つぎに、その運動をどうにかしなくてははいけません。

端の磁場を強くしておくで、そこで電気を帯びた粒子は反射されるものがでてくるので、両端を強めれば、その間を行ったり来たりして、閉じ込められることになります。鏡で光が反射されることの連想から、こういう現象を磁気ミラー効果とよび、「ミラー配位」の閉じ込めと呼びます。(日本では、筑波大学が中心になって研究しています。)

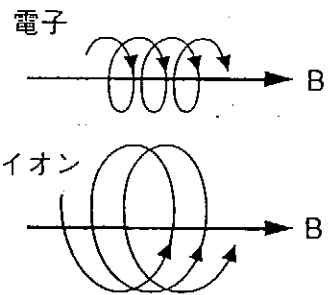
もし磁力線の「端」がなければ、磁力線にそって自由に動いても、いつまでも(お釈迦様の掌の上の孫悟空の様に)その上から逃げて行かないでしょう。そう考えて、ドーナツ型の面の上に磁力線を織り込めた構造を作るのがトラス型磁場閉じ込めの考えです。本日は、この流れの研究を御紹介してゆきます。

磁気閉じ込め

荷電粒子は磁力線に巻きついて運動

磁力線に垂直な方向の拡散は遅い。

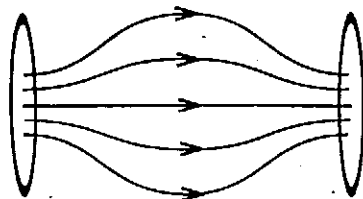
まず磁力線方向の輸送を抑えればよい。



閉じ込め配位

ミラー配位

端からの損失を抑える



トラス配位

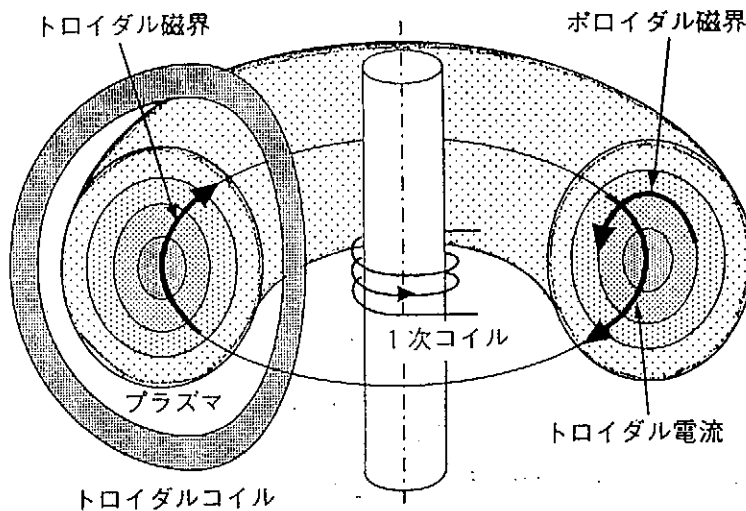
端をなくす



トーラス型の閉じ込め研究で最も進んでいるのが、トカマクと呼ばれる方式です。図(10)。ドーナツ型の磁場をつくるのはどうするのでしょうか。一筋縄ではゆかない話ですが。図のドーナツがプラズマの占める所です。その回りに、丁度指輪の様に、トロイダルコイルと呼ぶコイルが巻かれます。16個とか24個とか置かれるコイルの一つを書いています。ドーナツの軸方向の強い磁場ができます。更に、その軸方向に電流を流します。(プラズマの中を流れます。蛍光灯でも、プラズマの中に電流が流れています。)ドーナツの様に端の無いプラズマに電流を流すには、一次コイルを置いて、トランスの原理で電流を誘起します。電流が流れると、それを巻く様な磁場が生まれます。ドーナツを巻きつく向きに磁場も生まれましたから、これでめでたく磁力線を織り込むことができました。

トカマク

トロイダルコイル → トロイダル磁界 → らせん形磁界
 トロイダル電流 → ポロイダル磁界 → らせん形磁界

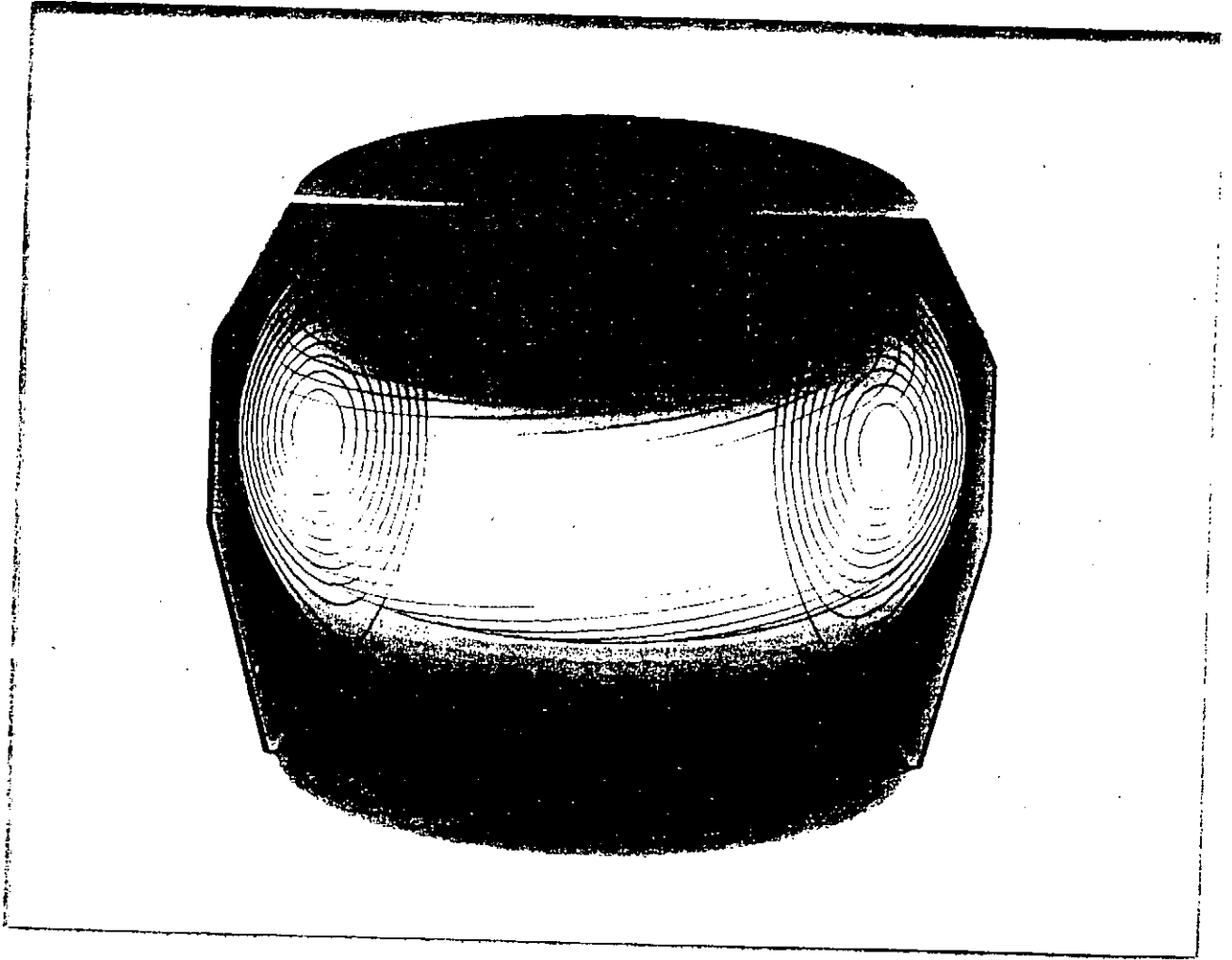


随分込み入った話だと思った方もおられるかもしれません。核融合の研究が始められたころ天才的な研究者が思いついたアイデアです。(その頃の研究の熱気を円地文子は「私も燃えている」という長編小説でいきいきと描いています。)実は、トロイダル(ドーナツ型)プラズマは自然界にも生まれていたのです。図(11)。この図は最初に紹介したのですが、良く見ると、活発に活動している部分がトーラス状になっています。この事実は、最近宇宙の観察が進んで分かってきたことです。オスカー・ワイルドの言葉をかりれば、「自然が芸術を模倣する」と言ったところですが、できるだけうまく核融合を起こさせようとして人間の知恵が工夫してきたものは、自然界が自ずと選びとってきた姿でもありました。



4 燃えるプラズマの実現

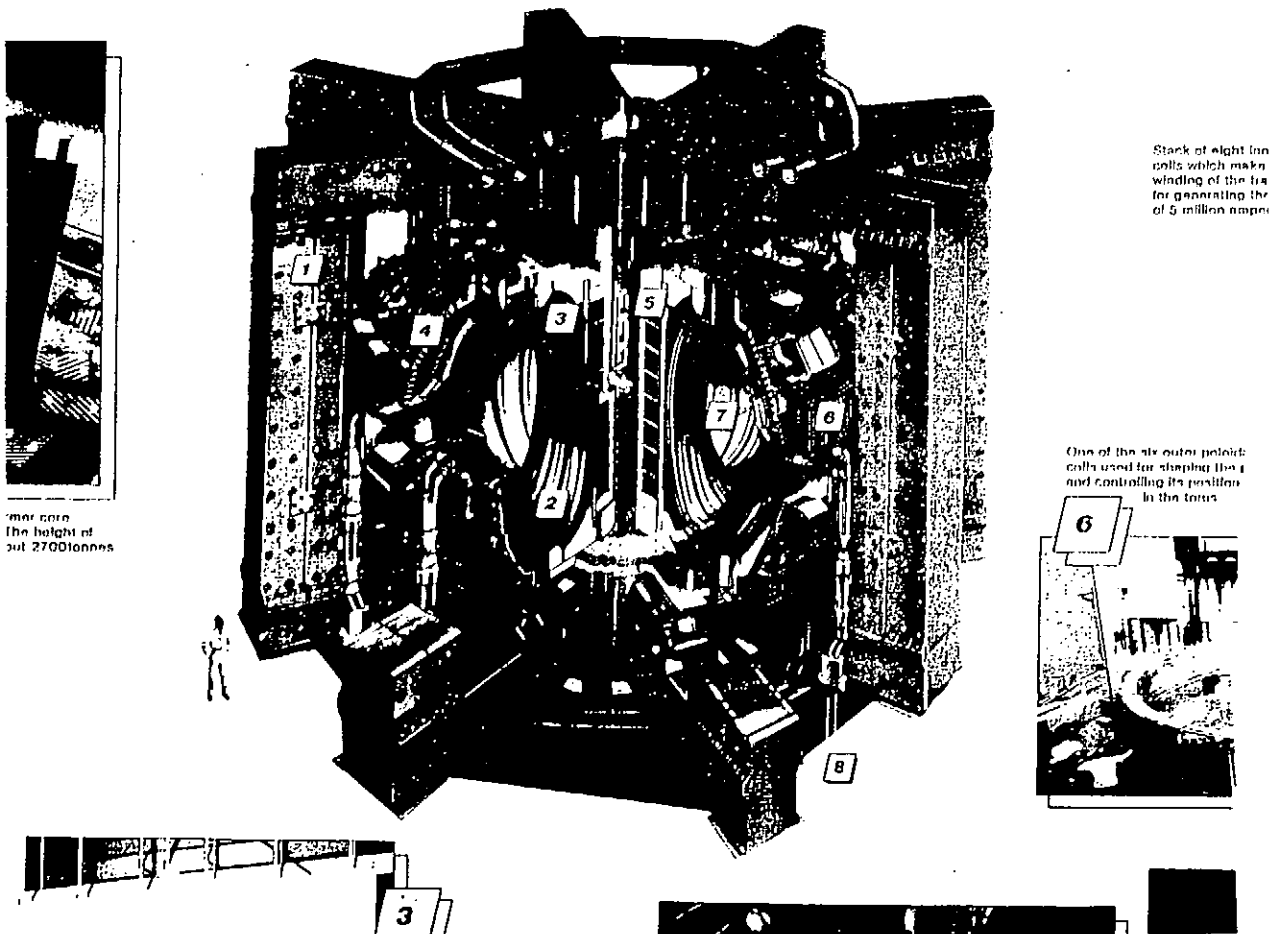
トカマクにプラズマを閉じ込める(図(12))研究は遂に燃えるプラズマを実現する所まで届きました。



核融合を目指す世界最大のプラズマは、JET (Joint European Torus) という名のトカマクに閉じ込められています。これはヨーロッパ連合が遂行し、イギリスのオックスフォード近郊の研究所に置かれています。図(13)。脇に人が立っていますが、それから全体の大きさを見て下さい。

ドーナツ型の容器の切り口(2という番号が振ってある)の中にプラズマができます。トロイダル・コイルがぎっしりと取り囲み、トランスの鉄心(1という番号)が回りにあります。人間よりずっと大きいプラズマですが、コイルや配管のため、中心のドーナツ型プラズマの大きさより、一段と、全体が大きくなっています。こうした先進の装置のなかで最高性能のプラズマが閉じ込められています。

世界最大のトカマク J E T (Joint European Torus: 英)



Center core
The height of
is 2700mm

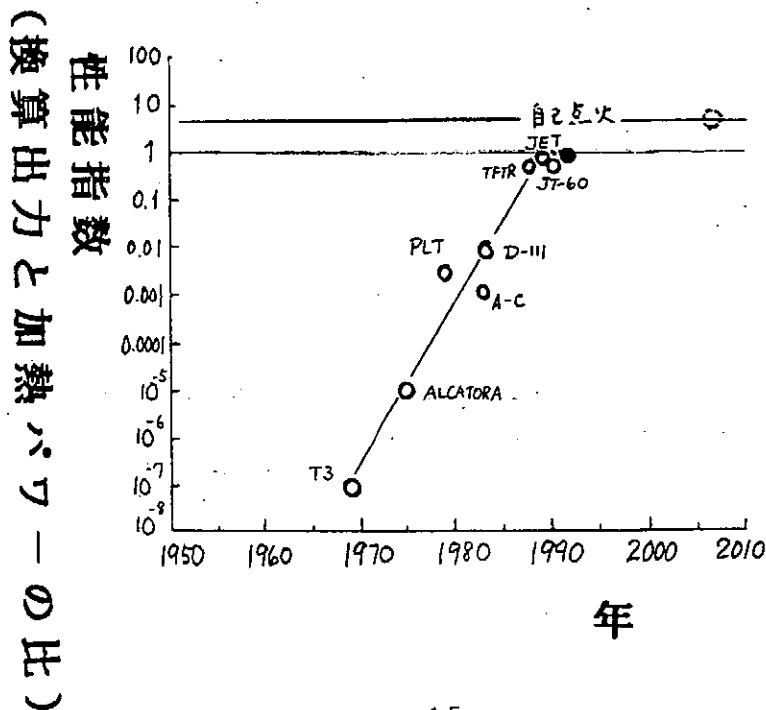
Stack of eight toroidal coils which make winding of the torus for generating the field of 5 million amperes

One of the six outer poloidal coils used for shaping the plasma and controlling its position in the torus

プラズマ閉じ込め性能の進歩は年を追って進んでいます。図(14)。燃えない水素を用いた実験ですが、そのプラズマの核融合出力を換算して評価することができます。そうして評価した出力と、プラズマを維持する為に使う入力との比を、性能指数としましょう。性能指数でもって、進歩の度合いを測ります。その指数が1になったら、使うパワーと反応で出てくるパワーが同じだ、ということです。自己点火と書いた所を超えると、プラズマが自分の核融合反応で燃え続けることになります。

グラフの印は、実験装置の名前（T3などと書かれている）と、その装置が達成した性能指数です。対数目盛りで縦軸を書いている事に注意して下さい。上に一目盛り上ると、性能指数が、10倍になった、ということです。この20年の間に性能指数が1000万倍になったというのです。JT-60と書いてあるのは日本原子力研究所で実験している装置です。TFTRとあるのは米国の装置であり、JETというのは前にも述べたヨーロッパ連合の研究ですから、日本が、欧米と伍して研究の最前線を引っ張っている事が分かります。日本の（そして海外で活躍の日本人の）核融合の研究者は、世界の最先端のオリジナルな研究を進めているのだという誇りにあふれています。

プラズマ閉じ込め性能は 年とともに急速に進歩して来た



いよいよこの高い性能指数のプラズマを使って、実際に重水素と三重水素で核融合反応を積極的におこす実験が行われました。図(15)。世界初の本格的燃焼実験をトライしたのはヨーロッパ連合のJET装置で、この記念の実験は昨1991年11月9日に行われました。

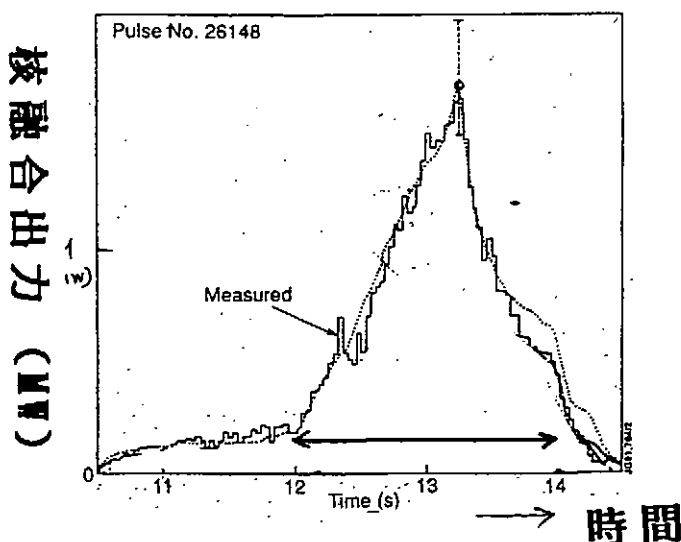
重水素プラズマを閉じ込めておき、そこに三重水素を含むビームを打ち込み、矢印の時間、強くプラズマを熱し、核融合反応を起こさせたのです。グラフは、核融合出力の時間変化です。出力はぐんぐん増えて、200万ワット近くになりました。100万ワット級の出力を1秒間発生させ、地上に太陽を、という研究の実現に、一歩、はっきりと歩みをしめす事ができたのです。

世界初のDT燃焼実験行われる

J E T にて1991年11月9日

重水素プラズマに三重水素と重水素のビームを入射

MW級出力を1秒間発生



5 燃やし続ける研究も

燃えるプラズマの実証に合わせて、燃やし続ける研究も進んでいます。図(16)。というのも、いざ核融合反応が続くと [1]トロイダル・プラズマを保ち続けるにはどうすればよいか、とか、[2] 壁が熱に耐えるか、とか、[3]燃料に補給や排気はどうするか、といった様な研究も大事になります。

プラズマを燃やし続ける研究

(1) 壁が熱に耐えるか

(2) 燃料補給と排気

今までどこまで達成したか

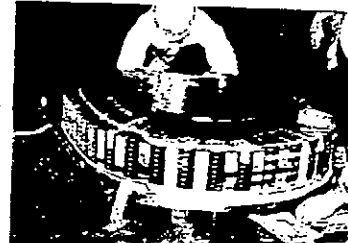
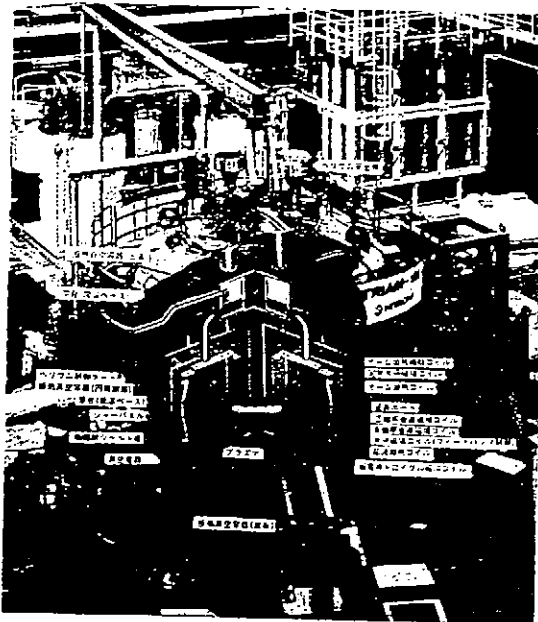
九州大学トライアム1M装置 (超伝導コイル)
一時間以上プラズマを維持

世界を断然リード

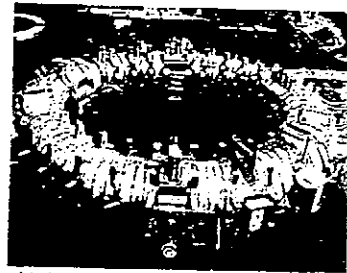
さて燃えたらどうなるか？

高温プラズマの保持に関し、今まで達成した最高の値は、九州大学の
 実験です。超伝導コイルを用いた先進的装置ですが、それを用いて、1時間
 を超える長い時間、プラズマを維持することに成功しました。この成果は
 断然世界をリードしています。装置の実際を次の図(17)に示します。(プラ
 ズマの位置が揺れているように思うかも知れませんが、それは、プラズマ
 が壁のひとところばかり熱くさせないように慎重に制御しているためで
 す。こうした工夫が、プラズマの保持時間を際立って長くするのに役立っ
 ています。)

TRIAM-1Mの内部構造

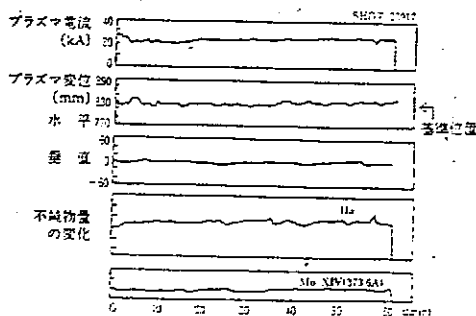


超伝導トロイダル磁場コイル(巻線作業)

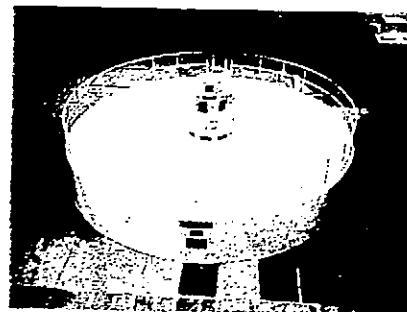


プラズマ真空容器

1時間放電プラズマの波形



プラズマ放電は良く制御され、不純物量も
 時間の経過とともに増殖しないことが確認
 されました。



TRIAM用電動発電機 定格出力 125MVA
 平成2年12月完成 地上約3m、地下約7m、
 風洞直径約8m、重量約350ton

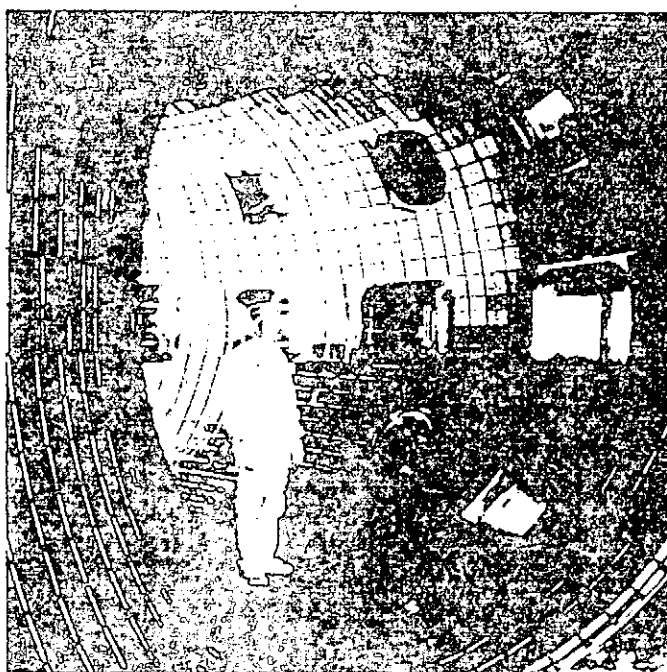
耐熱性の良い設計と言うのは、ハイテクノロジーの基本課題です。図(18)。未来のエンジンとしてセラミックを使う研究は、愛知・岐阜にいますと、身近に見聞きしています。また、スペース・シャトルが無事に帰還できるかは、大気に再突入するとき、高い表面温度に耐えなければなりません。核融合研究も似たようなチャレンジをしています。図に示すのは日本の JT-60装置の現在のトーラス内部です。炭素のタイルを張りめぐらし、プラズマからの熱に耐えるよう工夫しています。この工夫のため、プラズマの性能自体も改善されています。

耐熱性のよい素材と設計

ハイ・テクノロジーの基本的課題

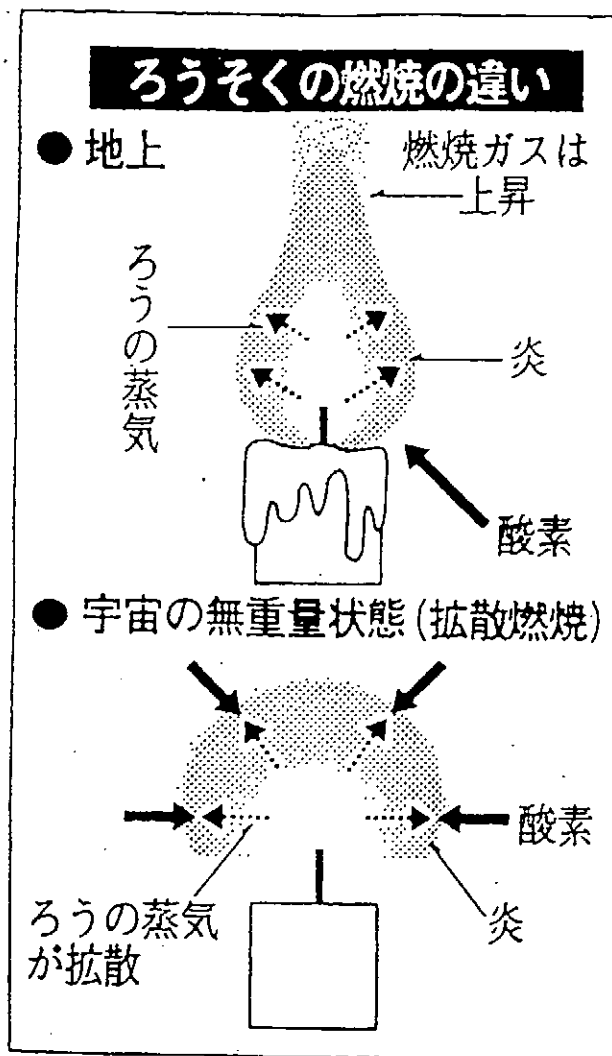
新エンジン(セラミック)

スペースシャトル



改造した JT-60 の内部

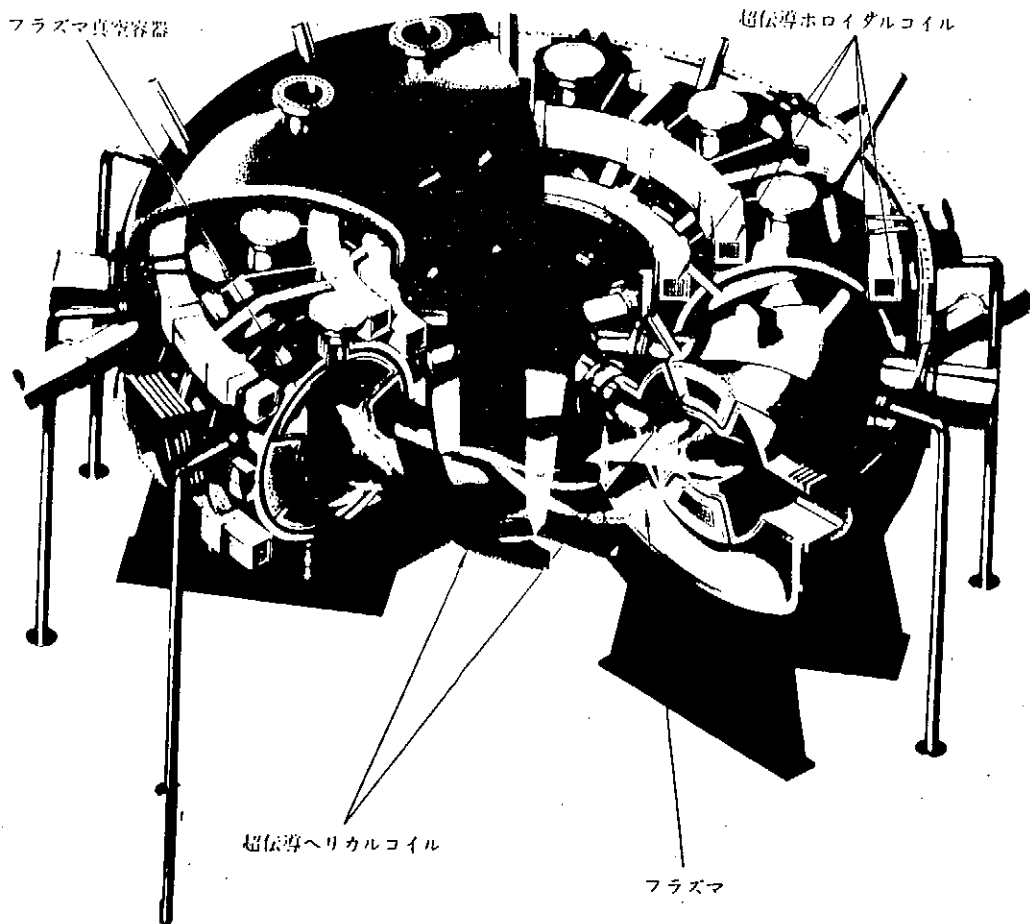
プラズマを燃やし続けるのに燃料の循環がどうなるかこれからの大事な研究です。皆さん、宇宙で火を燃やすとどうなるか、スペース・シャトルの実験の話をお聴きかもしれません。図(19)は、新聞の切り抜きです。地上では気付かずに進んでいる燃料の補給と排気が、重力の無いところでは働かず、短い時間で火が消えてしまったのです。実は、プラズマが核融合で燃える時、どのように燃料と排気が入れ代わるかはっきりデータがありません。(前にも申しましたが、丁度1秒だけ燃え始めたところなのです。)宇宙の炎核融合の燃え方はどうなるのでしょうか。



ろうそく、宇宙で燃えず
 コロニアシアトル
 1分ほどで消える

燃やし続ける上で大切な問題を基礎的にかつ大規模に研究すべく、当地の核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置（LHD）という実験装置を建設しています。図(20)。TRIAM-1M同様、LHDも超伝導コイルを使っています。コイルがらせん型に捻れていて、今まで紹介した例と違っている所にも特徴があります。(今日はそれを説明する時間はありませんが、プラズマを長時間保持する工夫なのです。)人の姿がありますが、それと比べることで規模がお分かりでしょう。ここに近い岐阜県土岐市に作られるこの装置をつかって、平成9年度末には実験が始められると期待が高まっています。日本がリードしてきた研究課題が、この中部地区で一段と飛躍する事でしょう。

大型ヘリカル装置



核融合実験炉

いよいよ核融合実験炉の計画に着手する時代になりました。図(21)。本当に核融合反応を続け、発電に役立つほどの核融合出力を生み出せるかの実験です。プラズマが自己点火状態をこえ、長時間保ち、プラズマに向かい合う壁の材料を求め、環境安全性を示す、といった数多くのチャレンジが目の前です。

国際協力によって、実験炉の設計がされています。国際熱核融合炉 (ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor) という名前で、皆さんも新聞などでも目にしておられるかも知れません。

次はいよいよ

核融合実験炉での研究

本当に燃やし続けられるだろうか？

チャレンジ

自己点火、長時間運転、材料試験
環境安全

国際協力による実験炉設計

国際熱核融合実験炉 (ITER)

International

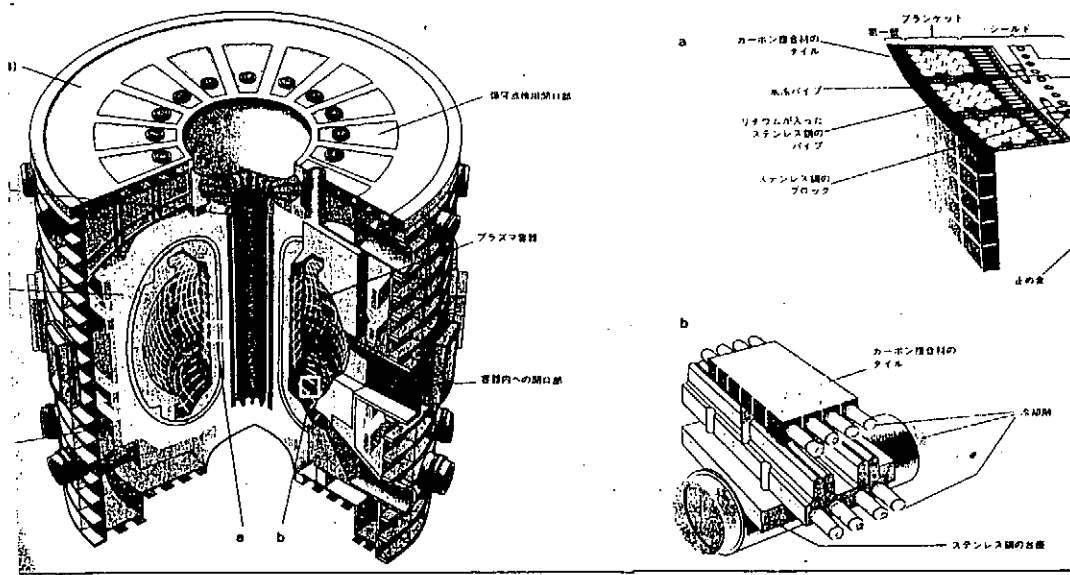
Thermonuclear

Experimental

Reactor

図(22)。どんな風になるのか、大体の図を示します。ドーナツ型の容器(上下に引き延ばされています)が真ん中にあるのは同じです。内壁は前に示した様にタイルが張り詰めてあります。詳細を見ると、タイルの内側に冷却や、燃料増殖のための構造が仕込まれています。全体が、大きな冷却タンクに入って、超伝導のコイルを働かせます。(そうした所は図(17)の TRIAM-1M と共通の原理ですが、何しろ大きさが格段に大きいのです。)遠隔操縦で大きくてかつ精密な工作をするなど、未踏の技術的チャレンジも目白押しです。技術的な開発にいろいろな知恵と努力がいるでしょう。)国際協力で行う、と言うところも、大変なチャレンジです。

国際熱核融合実験炉



日経サイエンス(1992年6月号)より

7 最後に

本日駆け足で紹介しましたことを、まとめてみましょう。図(23)。

核融合研究というのは、宇宙の火・太陽の活力の源を、私達のエネルギーとしよう、という夢からうまれました。太古から今の美しい地球を作りあげた核融合のエネルギーは、地球規模の問題の解決にはどうしても必要です。

プラズマの閉じ込め研究は、核融合反応の起きる状態を目指して進んで来ました。ついに、そのかいあって、100万ワット級の核融合反応が、1秒間実現されました。日本も、欧米と競い協力しつつ、その最先端を開いてきました。

燃やし続ける研究は、プラズマ保持・壁や熱のコントロールなど、いよいよ研究に油が乗ったところです。

核融合実験炉の計画がそれらを踏まえて始まります。2005年の完成を目指し国際協力で設計が始まりました。

核融合研究

宇宙の火

地球的規模の問題の解決に不可避

プラズマの閉じ込め研究

ついに2秒間反応するところに到達

燃やし続ける研究

プラズマ、熱、壁、保持制御、いよいよこれから

核融合実験炉

2005年の完成目指し国際協力設計

核融合研究は、多くの顔をもっています。人類を長きにわたって支えるエネルギー開発です。また、ハイ・テクノロジーの牽引車でもあります。さらに、平等に競うところから始まる国際協力や摩擦解消の役目もライト・アップされました。そして、自然の理解のための深い学問を生み出す役も果たしています。

今日の話がその一端でも御紹介出来ればとおもいます。そして、核融合の研究を紹介説明する、(吉川庄一著「核融合への挑戦」始め)幾つもの優れた本が有りますが、そうしたものを手に取ってみようという、御興味をすこしでも持っていただけたら、と思っています。

核融合研究

宇宙の理解

エネルギー開発

ハイ・テクノロジー
国際協力と摩擦解消

謝辞

年次報告等の出版物を使わせて頂いた各位に感謝いたします。この講演を準備するうえで、平成元年度原子力委員会委託調査「核融合プラズマの閉じ込め改善点に関する調査研究」及び同二年度委託調査「核融合プラズマの長時間燃焼制御に関する調査研究」(いずれも主査山本賢三)の場で議論した事が大変参考になりました事の特記させていただきます。また、図面製作の上で、福山淳、安積正史、加藤隆子、政井邦昭、伊藤早苗、各氏の援助を頂きました。

NIFS-MEMOシリーズ出版リスト
(Recent Issues of NIFS-MEMO Series)

- NIFS-MEMO-1 都築哲哉、東井和夫、松浦清剛、「パソコンによる JIPP T-IIU プラズマの平衡位置フィードバック制御」1991年4月
T.Tsuzuki, K.Toi and K.Matsuura, "Feedback Control of Plasma Equilibrium with Control System Aided by Personal Computer on the JIPP T-II Tokamak" ; Apr.1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-2 久保田雄輔、大林治夫、宮原 昭、大野和子、中村光一、堀井憲爾、「環境磁界の研究 (I) 三次元積分磁束計の開発」1991年7月
Y.Kubota, H.Obayashi, A.Miyahara, K.Ohno, K.Nakamura and K.Horii, "Development of Three-Dimensional Compact Magnetic Dosimeter for Environmental Magnetic Field Monitoring" , July,1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-3 「核融合科学研究所技術研究会; 1991年3月19、20日 土岐文化プラザ」1991年8月
"Proceedings of Symposium on Technology in Laboratories; Mar. 19, 20, 1991" Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-4 「プラズマ中におけるカオス現象」1991年8月
"Chaotic Phenomena in Plasmas " , Aug. 1991 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-5 山崎耕造、「ファジー論理のトロイダルプラズマ制御への応用」1992年2月
"Fuzzy Logic Application to Trooidal Plasma Control" , Feb. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-6 平成3年度 核融合科学研究所 支援調査共同研究報告書 「大出力マイクロ波源の開発に関する調査研究」1992年4月
"Development of High Power Microwave Source" , Apr. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-7 平成3年度 核融合科学研究所 共同研究(調査支援研究) 研究成果報告書 「プラズマにおけるカオス現象」1992年11月
"Chaotic Phenomena in Plasma, II" , Nov. 1992 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-8 NIFSシンポジウム報告書「核融合炉材料照射用強力中性子源の設計と大学の役割」1993年1月
"Design of Intense Neutron Source for Fusion Material Study and the Role of Universities" , Jan. 1993 (In Japanese)
- NIFS-MEMO-9 平成2、3、4年度 核融合科学研究所共同研究研究会研究成果報告書 「開放磁場における電位と輸送機構」1993年4月
"Potential Formation and Transport in Open Field Line Systems" , Apr. 1993 (In Japanese)