

JAERI - M
90-150

解 説 核 融 合

1 9 9 0 年 9 月

狐 崎 晶 雄

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

解説 核 融 合

日本原子力研究所企画室

狐崎 晶雄

(1990年8月10日受理)

核融合の研究開発全般にわたって、他分野の読者を対象に分りやすく解説したものである。核融合の原理と利点、磁場閉じ込めの一般論、トカマク型装置の原理と運転の実際の状況について解説し、今後の炉工学技術の研究開発の全般について記した。

Introduction to Fusion

Akio KITSUNEZAKI

Office of Planning
Japan Atomic Energy Research Institute
Uchisaiwai-cho, Minato-ku, Tokyo

(Received August 10, 1990)

The outline of the fusion research and technology is explained for people outside of the fusion research society using plain words.

The principle, long range objective and necessity, safety are described in the first chapter. Then the physics of the magnetic fusion and diagnostics are explained together with engineering research and development for future fusion reactor. Relation of fusion related technology with other field is also described.

Keywords: Fusion, Introduction, Research and Development

目 次

はじめに	1
1. 核融合炉とは	2
1.1 核融合反応	2
1.2 核融合炉	4
1.3 なぜ核融合?	6
1.4 核融合反応の物理	8
1.5 先端技術の開発	12
1.6 世界のエネルギー資源	14
2. 核融合炉への道	16
2.1 核融合炉に必要な条件	16
2.2 核融合炉の条件を実現するには?	20
2.3 磁場閉じ込め	22
2.4 慣性核融合	26
2.5 核融合開発の歴史	28
2.6 今後の開発計画	30
3. 磁場によるプラズマ閉じ込め	32
3.1 各種の閉じ込め磁場	32
3.2 閉じ込め時間	34
3.3 粒子の流出	36
3.4 エネルギーの流出	40
3.5 プラズマの様子	42
3.6 ベータ値	44
3.7 トーラス型閉じ込め磁場	46
3.8 核融合炉の条件	48
4. トカマク型核融合装置	50
4.1 トカマクの歴史	50
4.2 トカマクの原理	52
4.3 プラズマ電流の誘起	54
4.4 プラズマの位置形状制御	56
4.5 トカマクの構成	58
4.6 トカマクの運転	60
5. トカマク・プラズマの科学	64
5.1 安定係数(q)	64
5.2 ディスラプション	66

5.3	プラズマ電流と密度の領域	68
5.4	比例則	70
5.5	非円形断面	72
5.6	プラズマの加熱	74
5.7	電流駆動	78
5.8	不純物	80
5.9	不純物の発生	82
5.10	不純物対策	84
5.11	リミタとダイバータ	86
5.12	プラズマからの電磁波の放射	88
5.13	ペレット入射	90
5.14	最近の話題	92
5.15	高度のプラズマ制御	94
6.	プラズマの計測	96
6.1	真空計, 高速マノメータ	98
6.2	熱電対, 赤外線カメラ	98
6.3	静電プローブ, 磁気プローブ	100
6.4	ロゴスキー・コイル, ワンターン・コイル, 反磁性コイル	102
6.5	高速度カメラ, プラズマ・テレビ	102
6.6	分光計測	104
6.7	マイクロ波周波数分析	106
6.8	PIN ダイオード, ボロメータ	106
6.9	干渉計	108
6.10	レーザ散乱計測	108
6.11	中性粒子エネルギー分析	110
6.12	計測用粒子ビーム	110
6.13	プラズマ電流密度分布の計測	112
6.14	放射線計測	114
6.15	その他の新しい計測	114
7.	核融合炉の工学技術	116
7.1	核融合炉工学技術の特徴	116
7.2	核融合炉工学技術の分類	118
7.3	核融合炉工学技術と他分野の関連	120
7.4	超電導コイル技術	122
7.5	燃料供給技術	128
7.6	高熱流束機器技術	134
7.7	ブランケット技術	138
7.8	遠隔操作技術	142

Contents

Introduction	1
1. What is fusion ?	2
1.1 Fusion Reaction	2
1.2 Fusion Reactor	4
1.3 Why Fusion ?	6
1.4 Physics of Fusion Reaction	8
1.5 Development of Advanced Technologies	12
1.6 Energy Resources of the World	14
2. How to Reach Fusion Reactor ?	16
2.1 Necessary Condition for Fusion Reactor	16
2.2 How to Realize Necessary Condition ?	20
2.3 Magnetic Fusion	22
2.4 Inertial Fusion	26
2.5 History of Fusion Research	28
2.6 Future Plan	30
3. Plasma Confinement by Magnetic Field	32
3.1 Various Magnetic Fields	32
3.2 Confinement Time	34
3.3 Particle Loss	36
3.4 Energy Loss	40
3.5 General Feature of Plasma	42
3.6 Beta Value	44
3.7 Toroidal Field	46
3.8 Break-Even and Ignition Condition	48
4. Tokamak	50
4.1 History of Tokamak	50
4.2 Principle of Tokamak	52
4.3 Induction of Plasma Current	54
4.4 Position and Shape Control	56
4.5 Composition of Tokamak	58
4.6 Operation of Tokamak	60
5. Physics of Tokamak Plasma	64
5.1 Safety Factor (q)	64
5.2 Disruption	66
5.3 Plasma Current - Plasma Density Diagram	68
5.4 Scaling Law	70
5.5 Non-circular Cross-section	72
5.6 Plasma Heating	74
5.7 Current Drive	78
5.8 Impurities	80
5.9 Impurity Production	82
5.10 Impurity Reduction	84
5.11 Limiter and Divertor	86
5.12 Radiation Loss	88
5.13 Pellet Injection	90
5.14 Recent Topics	92
5.15 Advanced Plasma Control	94
6. Plasma Diagnostics	96
6.1 Vacuum Gauge and Manometer	98
6.2 Thermocouple and IR Camera	98
6.3 Electrostatic and Magnetic Probes	100
6.4 Rogowsky Coil, One-turn Coil and Diamagnetic Coil	102
6.5 High Speed Camera and Plasma TV	102

7.9 材料技術	144
7.10 ニュートロニクス	146
おわりに	148
索引	149

6.6	Spectroscope	104
6.7	Microwave Frequency Analyser	106
6.8	PIN Diode and Bolometer	106
6.9	Interferometer	108
6.10	Laser Scattering	108
6.11	Neutral Particle Analyser	110
6.12	Particle Beam for Diagnostics	110
6.13	Measurement of Plasma Current Density Profile	112
6.14	Measurement of Neutron, Gamma Ray and Alpha Particles	114
6.15	Other New Diagnostic Technics	114
7.	Fusion Reactor Engineering and Technologies	116
7.1	Characteristics of Fusion Engineering & Technologies	116
7.2	Grouping of Fusion Engineering and Technologies	118
7.3	Relation with Other Engineering Fields	120
7.4	Superconducting Magnet	122
7.5	Fuel Supply Technology	128
7.6	High Heat Flux Component Technology	134
7.7	Blanket Technology	138
7.8	Remote Handling Technology	142
7.9	Materials Development	144
7.10	Neutronics	146
	Acknowledgement	148
	Index	149

はじめに

最近、新聞やテレビで「夢のエネルギー」、「地上の太陽」として「核融合」が話題になることが多くなった。しかし、核融合について適当な詳しさを解説した本が少ないようである。

本書は、理科に多少興味を持つかたを対象に、核融合の研究開発について解説してみたものである。本書の趣旨は、核融合以外の分野の方に分かりやすい解説であり、研究者的な厳密さよりも分かり易さに重点を置いた。

いままでの核融合炉の研究開発では、プラズマの温度、密度などの特性を良くすることが中心であったが、今後は炉の厳しい条件に耐える複雑な大型構造物を作る炉工学・炉技術の研究開発が主となってくる。本書は、今までの成果の多いプラズマ科学が主となっているが、工学技術に興味のあるかたは、第1章から第7章に飛ばして読まれると良いであろう。

なお、本書の第1章から第3章までは全般にわたる解説をしているが、第4章以降の詳細については、専ら磁場をつかう核融合装置、それもトカマク型と呼ばれるものを中心に解説を進めた。

本書では、原則として、右側のページは図表のみとしたので、興味のあるところだけ左のページを読まれればよいかもしれない。所々に、文字の小さい部分があるが、ここはやや専門的な内容なので、飛ばして読まれるとよい。また、索引を十分に付けてあるので、辞書のように利用していただくこともできるであろう。

1. 核融合炉とは

1.1 核融合反応

核融合反応とは、水素のような軽い元素の二つの原子核が融合して一つの原子核になる反応で、反応に伴って大きなエネルギーが発生する。

核融合反応にはいくつかの種類があるが、そのなかで最も反応の起こりやすい重水素と三重水素（トリチウム）の反応をつかう核融合炉の開発が、世界の主要国で行なわれている。

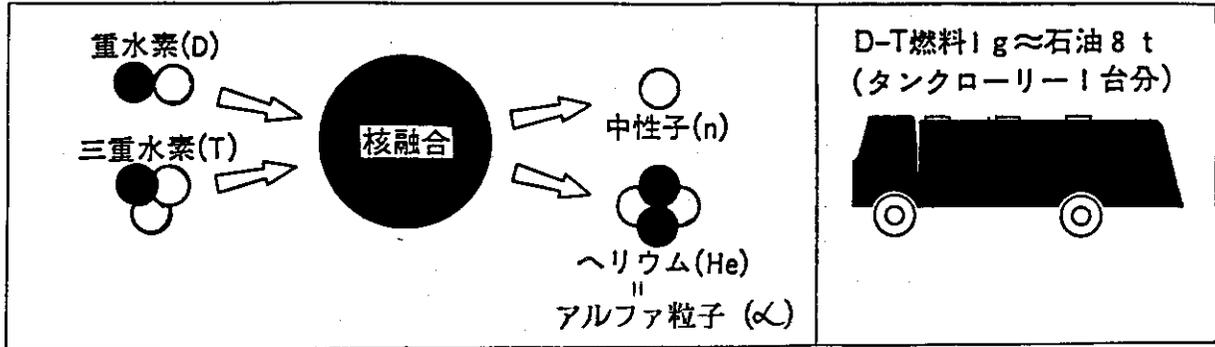
太陽や恒星も核融合反応によって莫大なエネルギーを発生している。したがって、核融合炉の開発とは、太陽と同じものをはるかに小さなサイズにして、地上に作ろうとするものである。

核融合反応は、第1-1図に示すように、たった1グラムの燃料からタンクローリー一台ぶんもの石油と同じだけの熱を発生する。

燃料である重水素は、海水から取ることができ、十分な量がある。もう一つの燃料である三重水素は、リチウムという元素に反応で生じた中性子を当てると作ることができる。リチウムも十分な量がある。また、リチウムも海水からも取れる。さらに、第二世代の核融合炉は重水素だけを燃料とするので、海水だけあればよい。

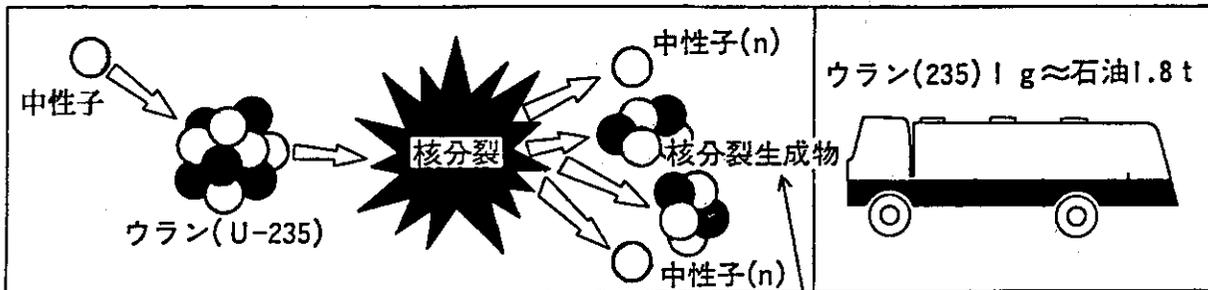
このように、核融合炉は、海に囲まれた我が国に最適のエネルギー源といえよう。

核融合の原理と発生エネルギー量



第1-1図 重水素・三重水素(DT)核融合反応

現在の原子炉における核分裂反応 (比較のため)



核分裂反応では核があらゆる比率で割れるので、あらゆる核種が発生する。

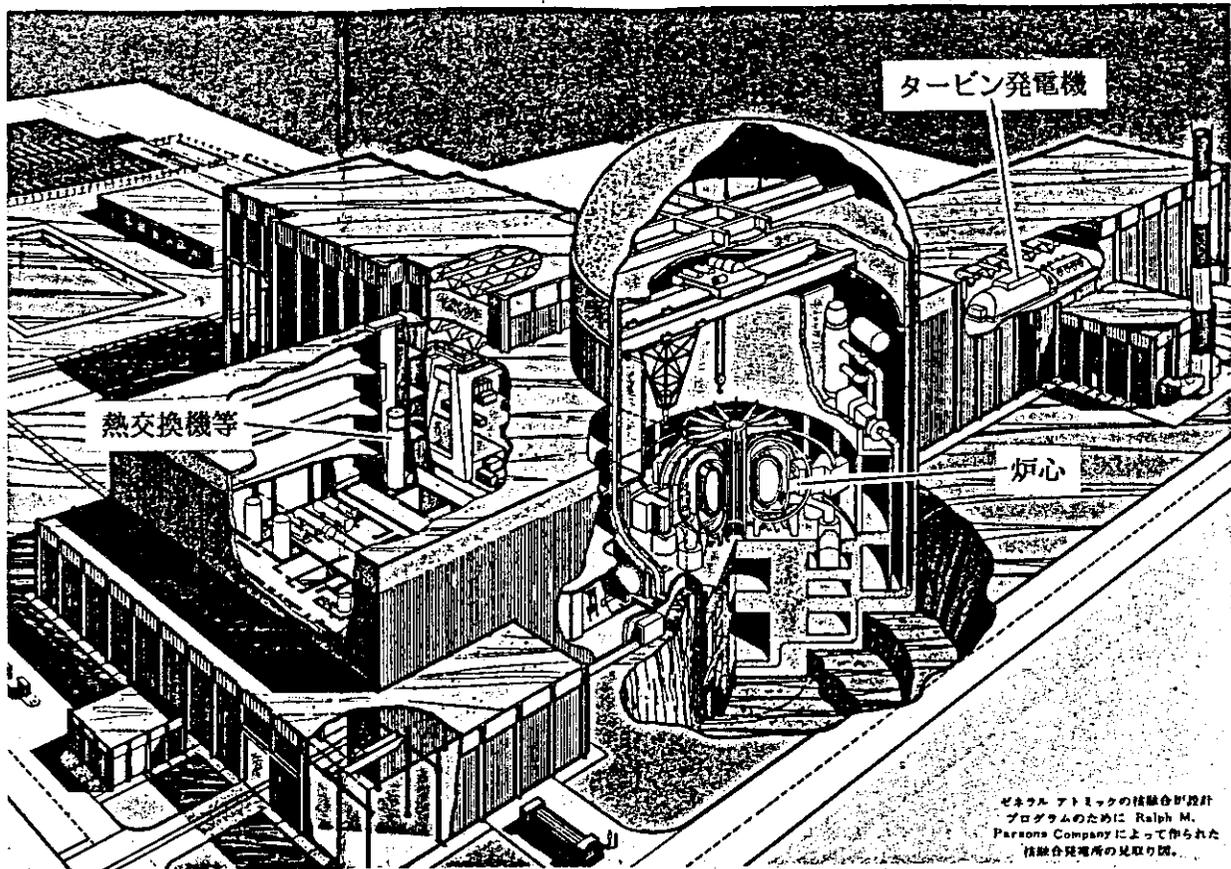
1. 2 核融合炉

核融合反応を起こして、エネルギーを電気などの形で取り出す設備が「核融合炉」である。第1-2図は、核融合発電所の予想図で、中心の部分（炉心）以外は、現在の火力発電所と殆ど同じである。これは、核融合炉でも発生するエネルギーを熱の形で、すなわち温度の高い蒸気あるいは熱湯として取り出し、あとは火力発電所と同じにスチーム・タービンを回して発電するからである。

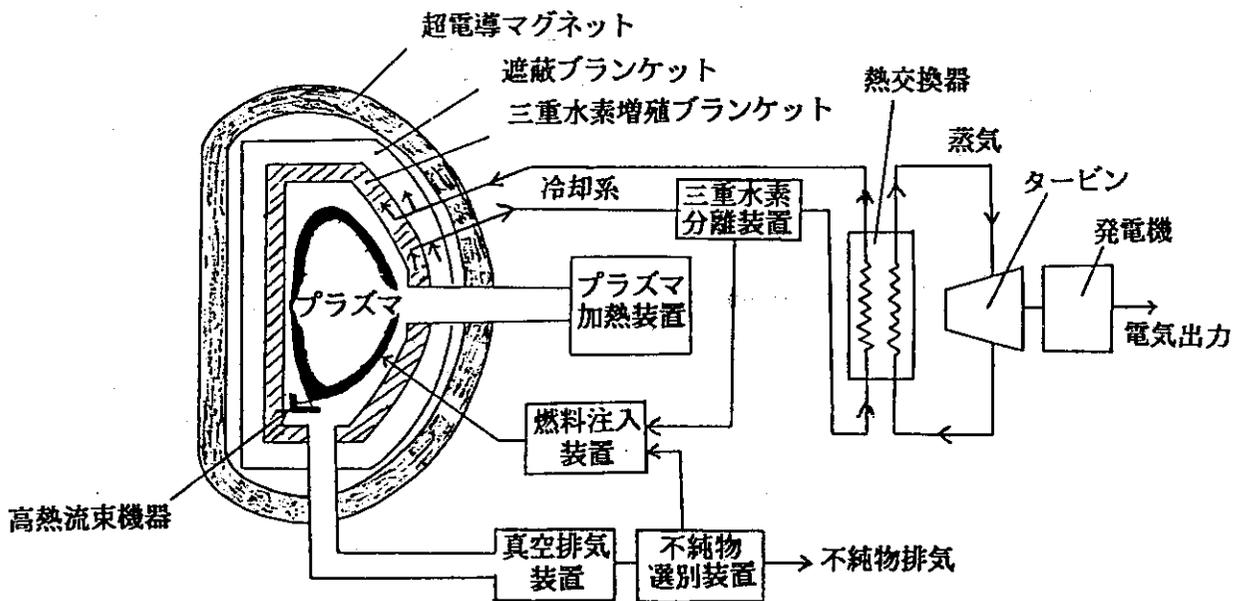
核融合発電所の構成は、第1-3図の様になっている。中心部に何億度という高温の水素同位体（重水素や三重水素）のガスがあり、核融合反応を起こしている。この高温のガスを「プラズマ」という。

プラズマのなかで起こる核融合反応の発生エネルギーのために、プラズマを入れる容器（「真空容器」という）の壁が熱くなるので、この熱を冷却材を流して取り出すとともに壁を冷やす。真空容器の壁は、熱を取り出すために特別な構造にする。これを「ブランケット（毛布の意）」という。熱くなってできた冷却材を熱交換器に通して熱交換器の二次側に蒸気を作り、この蒸気でタービンを回して電気を起こすわけである。

なお、プラズマの温度は数億度もあるが、真空容器（あるいは、ブランケット）の温度は一千度程度に保つことができ、現在の材料でも次世代の実験炉には使用出来る。これは磁場でプラズマが直接容器に触れないようにしているからである。



第1-2図 核融合発電所の想像図(米国GA社のパンフレットによる)



第1-3図 核融合炉の構成

1・3 なぜ核融合？

核融合のエネルギー源としての利点はつぎの通りである。

- 1) 何億年も人類のエネルギーを供給できる無尽蔵のエネルギー源である。
- 2) 海水から燃料を取れるので、資源の偏在、輸送の問題が少ない。
- 3) CO₂ を発生しない。(地球の温室化現象を避けることができる。)
- 4) 使用済み燃料の再処理や再処理後の放射性廃棄物の保管が不必要。
- 5) 安全性が高い。

- ・暴走しない。ガスコンロと同じに、燃料ガスの供給を止めれば簡単に燃焼はとまる。また、プラズマは水素以外の不純物に非常に弱いのでプラズマ容器のなかに空気がリークしたり、壁材が1mgでも落ち込むと燃焼がとまる。すなわち、本質的に安全特性を持っている。

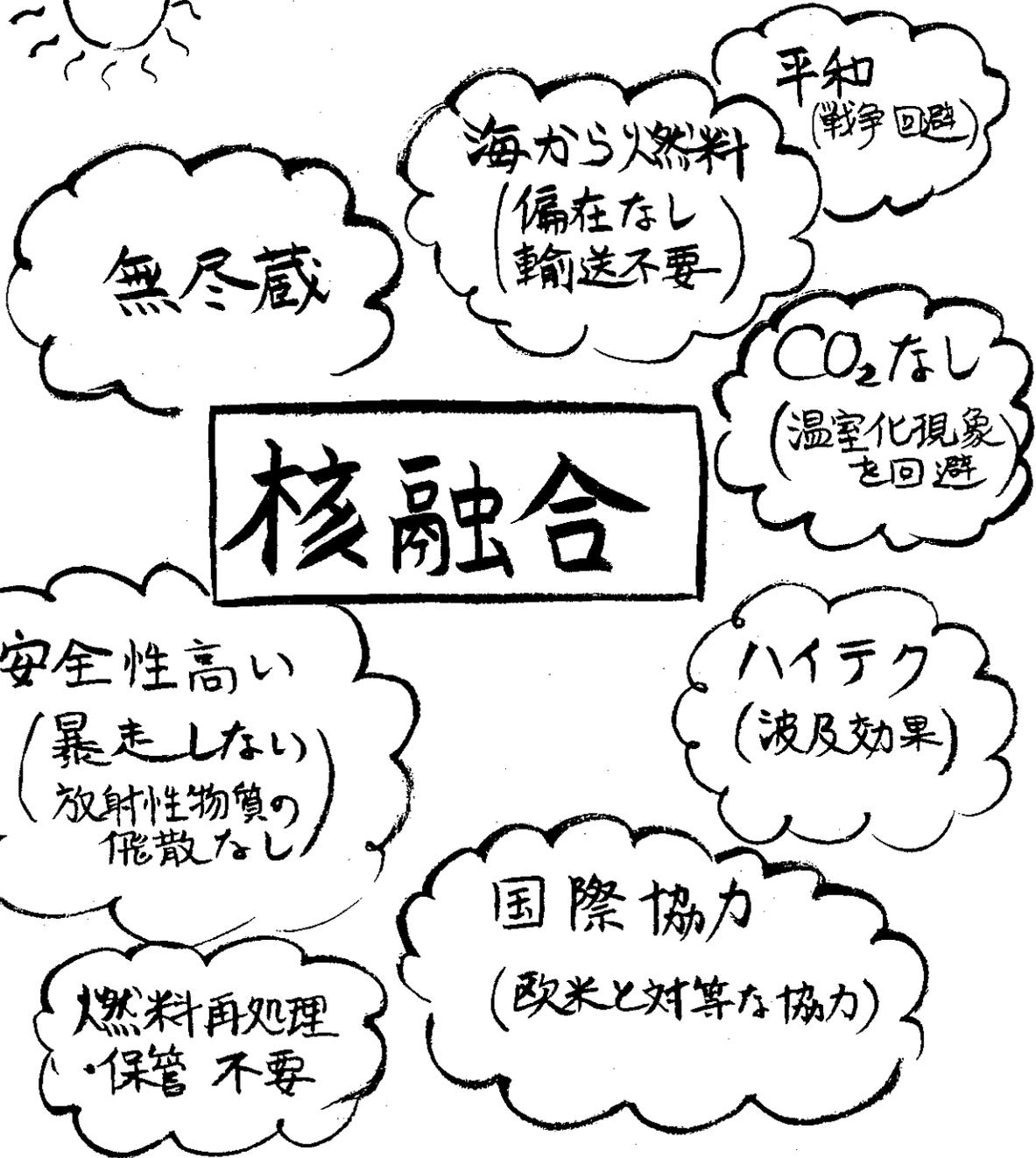
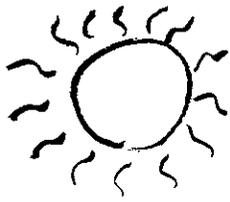
- ・放射性物質の種類が限られている。

DT核融合反応自体からは放射性物質は出来ない。しかし残念ながら、中性子によって炉の構造材が放射化するのでまったくクリーンなわけではない。ただし、放射性物質の発生は核融合炉の本質的なものではなく、半減期が数時間以上で取り扱いに注意を要する放射性核種は約十種類程に限られておりさらに、炉の材料を工夫することによって放射性物質を減らすことが可能である。より進んだ核融合炉ではまったく放射性物質のない、クリーンな炉とすることができる。

- ・発生する放射性原子核は全原子の数億分の一以下で、それも炉の構造材のなかに密封されており、飛び散ることは殆ど考えられない。

また、付随的な点として次のようなこともある。

- 6) 先端技術(ハイテク)の集合体であり、多くの面で波及効果を期待できる。
- 7) 我が国は、核融合の研究開発において欧米と対等のレベルを保っており、主体性を持って国際協力を進めることができる。我が国の国際的センスを高めるためにも国際協力に適した分野である。
- 8) 世界の中での我が国の経済的な状況から、いまこそ我が国がこのような研究開発を進めて世界に貢献すべきであろう。それにより、我が国に対する世界の評価を高めることができよう。



第1-4図 核融合の利点

1.4 核融合反応の物理

核反応の原理

原子核の中の核子（陽子及び中性子）一個当たりの結合エネルギーは、第1-5図のように元素によって差異があり、核反応で元素の種類が変わると、結合エネルギーの差の分のエネルギーが出入りする。自然に単独で起こる反応は発熱反応で、同図のカーブの上の方から下の方向に起こる。すなわち、水素のように原子量の小さい軽い元素がもっと重い元素に変わる核融合反応と、ウランのように原子量の大きい重い元素が分裂してより軽い元素になる核分裂反応がある。これらの反応の際には、詳しく言うと極く僅かの質量の変化があり、アインシュタインの原理によって、 $E=mc^2$ だけの質量がエネルギーに変わっている。

第1-5図で最もエネルギーの低いところ、すなわち安定な元素は鉄やニッケルの付近である。宇宙の中のあらゆる反応の結果の燃えかすと考えられる隕石が鉄やニッケルであることが納得できる。

核融合反応では、反応の結果生じる元素の種類がはっきり決まっているが、核分裂反応の場合には、原子核が丁度半分に割れるとは限らず、あらゆる種類の元素が発生し、その中にはストロンチウム90のように半減期が長くて取り扱いの難しい放射性同位元素が多い。核融合反応の場合には、反応生成物として放射性同位元素を発生しないものが多い。

核融合反応の種類

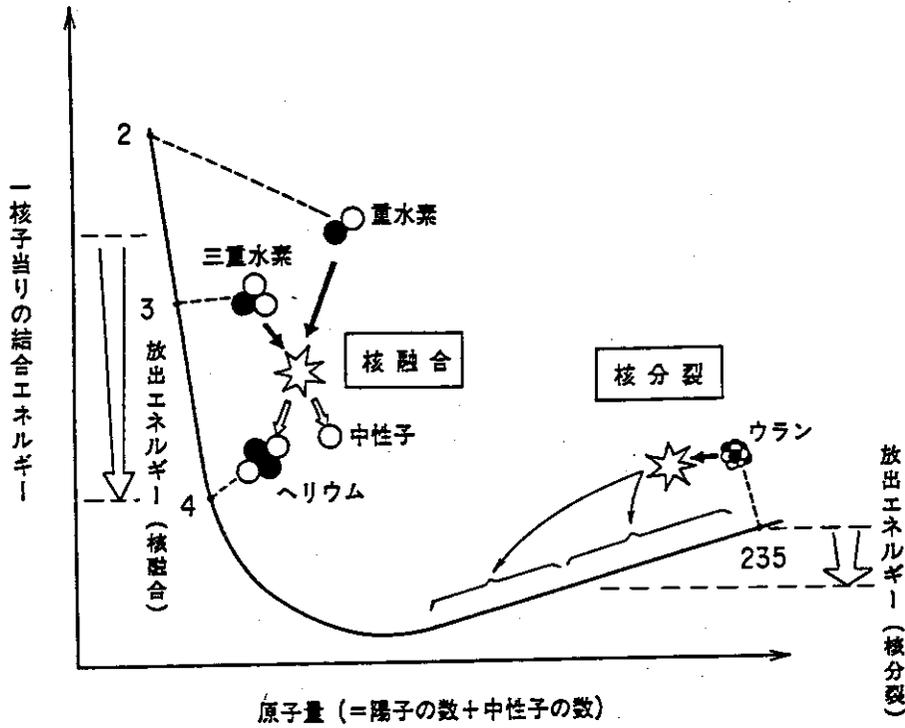
核融合反応にも色々あり、第1-1表にその主な反応を示した。このなかで、(3)の重水素と三重水素（トリチウム）との反応が最も低い温度で起こるので、現在、世界の主な国々で開発している第一世代の核融合炉はこの反応を使う炉である。これをDT炉（重水素、Deuterium と 三重水素、Tritium）という。重水素は、海水のなかに十分な量があるが、三重水素（トリチウム）は、自然には殆ど存在しない。また、トリチウムは放射性同位元素であるため取り扱いが難しい。重水素だけを燃料とするDD反応は、トリチウムに係わる難しさが無いので望ましいが、必要な温度が高いため第二世代の核融合炉と考えられている。また、水素とほう素の核融合反応（p-B、プロトン-ボロン反応）や重水素とヘリウム3との反応のように中性子も放射性物質も生じないクリーンな核融合反応もある。p-B反応は、DDよりもさらに高い温度が必要であり、また、D-He3は、ヘリウム3の資源が地球上にないなどの問題があり、さらに将来の第三世代以降の核融合炉と考えられている。

核融合炉の放射性物質

DT反応では、燃料のトリチウムが放射性であるほか、反応の結果生じる高速中性子が炉の構造材料を放射化する。したがって、第一世代のDT核融合炉は、放射性物質がない（クリーンな）わけでもない。しかし、以下に述べるように、環境に対する悪影響は極めて少ないと考えられる。

1) トリチウム

トリチウム（三重水素）は、弱いベータ線をだす放射性元素であるが、実は自然界にありふれた放射性元



第1-5図 核子間結合エネルギーと核反応エネルギー

第1-1表 地上における動力炉として利用の可能性のあるおもな核融合反応

(1)	${}_1\text{D}^2 + {}_1\text{D}^2 \longrightarrow {}_2\text{He}^3(0.82) + {}_0\text{n}^1(2.45)$	} D-D 反応
(2)	${}_1\text{D}^2 + {}_1\text{D}^2 \longrightarrow {}_1\text{T}^3(1.01) + {}_1\text{p}^1(3.03)$	
(3)	${}_1\text{D}^2 + {}_1\text{T}^3 \longrightarrow {}_2\text{He}^4(3.52) + {}_0\text{n}^1(14.06)$	D-T 反応
(4)	${}_1\text{D}^2 + {}_2\text{He}^3 \longrightarrow {}_2\text{He}^4(3.67) + {}_1\text{p}^1(14.67)$	D-He ³ 反応 x
(5)	${}_1\text{D}^2 + {}_3\text{Li}^6 \longrightarrow 2 {}_2\text{He}^4(22.4)$	
(6)	${}_1\text{p}^1 + {}_3\text{Li}^7 \longrightarrow 2 {}_2\text{He}^4(17.3)$	
(7)	${}_1\text{T}^3$ の生成反応: ${}_3\text{Li}^6 + {}_0\text{n}^1 \longrightarrow {}_1\text{T}^3 + {}_2\text{He}^4(4.8)$	
(8)	${}_1\text{p}^1 + {}_5\text{B}^{11} \longrightarrow 3 {}_2\text{He}^4(8.7)$	p-B 反応 xx

x: DD反応も同時に起こるので、中性子の発生がある。

xx: 中性子発生なし。放射性物質の全くない核融合反応。

${}_1\text{D}^2$ は重水素, ${}_1\text{T}^3$ は三重水素, ${}_1\text{p}^1$ は陽子, ${}_0\text{n}^1$ は中性子。

() の数字は MeV 単位

素である。例えば、普通の水100ccのなかには、約60万個のトリチウムが含まれている。我々の体のなかには3億個程度のトリチウムがすでに入っている。すなわち、トリチウムは、太古の時代から生物が共存してきた放射性元素である。（「体に優しい放射性元素」とも言えるだろう。）

しかし、残念ながら、この程度の量では、燃料としては使えず、リチウムという軽い金属に中性子を当ててトリチウムを作らなくてはならない。

トリチウムの取り扱い、充分注意しなければならないが、ベータ線なので遮蔽は容易であり、また、万一人体に入ってもストロンチウムなどのように骨などに付着して残留することはない。トリチウム水を飲ませる動物実験でトリチウムは一週間程度で体外に排泄され、個体にはあまり害のないことがわかっている。自分でトリチウム水を飲んでみた人もアメリカにいるそうである。

核融合発電所では、燃料として大量のトリチウムを扱うので、いくら人間の体に慣れているといっても取り扱いには十分な注意が必要である。ただし、核融合発電所では、トリチウムを吸いこんで貯める金属（吸蔵材、ちょうど水を吸うスポンジのようなもの）を使うので、なにかの故障が起こっても反応容器の外に放出されるガスの形のトリチウムの量は高々1グラム程度と考えられている。発電所の建物の外に漏れてくる量はこれよりもかなり少ないであろう。ガスの形のトリチウムは、もし放出されても水素風船と同じですぐに大気の上部に去り、影響は殆どない。ただし、そのごく一部がTHOなどのトリチウムを含む水分子に変わりそれが地上に落ちて生物に影響を与えるといわれている。

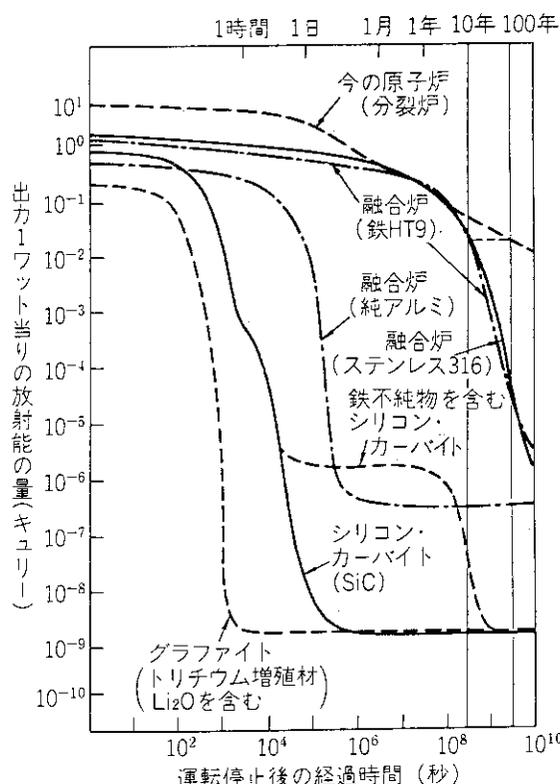
（実は、米国の砂漠のなかの研究所から1グラム程度のトリチウムを誤って放出したことが2回くらいあったが、追跡調査の結果では、その影響は計測できるほど大きくなかった。）

2) 高速中性子による炉材料の放射化

核融合反応で生じる高速中性子が炉を構成する物質、例えばニッケルや銅に当たるとその一部分を放射性元素に変えてしまう。このため、核融合炉にもトリチウム以外にも放射能がある。ただし、発電炉の寿命いっばいかかって放射能の量は現在の原子力発電所の5分の1ぐらいであるし、また、発生する放射性元素の種類が限られていて、例えば取り扱いが難しいアクチニドという種類の放射性元素がないことは、核融合炉の大きな利点である。さらに、放射性原子核に変わるのは全原子核の約1億分の1程度であり、相当にばらばらに壊れても自然に密封線源となっていて、周辺環境に放射性物質が飛散することはまず考えられない。

第1-6図は核融合炉の放射能量の計算結果で、一番上の破線は核分裂反応の現在の原子炉の値である。縦軸は、放射能の量で、1目盛りごとに10倍を示す対数目盛りである。横軸は炉を停止したあとの時間でこれも対数目盛りである。放射能の量は、それぞれの半減期にしたがって時間がたつとともに減衰する。左端の値でわかるように、炉を停止した直後の放射能の量は、核融合炉のほうが今の原子炉よりも5分の1ぐらいで小さい。また、停止後の減衰は、核融合炉の場合、特に約5年後以降が減衰が早く、10年後には、核分裂炉で100年経過したと同じレベルにまで減衰する。それも、現在使用できるステンレスなどの材料を使った場合で、もしも将来材料の開発が進んでアルミニウムやカーボンで発電炉を作れば、同図の下の3本のカーブで示すように、数日も待てば放射能が十分減衰する核融合炉ができる。

第1-6図 核融合炉と核分裂炉の放射能
(炉の停止後の放射能減衰の様子)



3) 第2世代、第3世代の核融合発電所の放射能

前記したように、第二世代のDD炉では燃料としてトリチウムは必要としないが、DD反応の結果トリチウムができる。そのトリチウムもDT反応で燃えてしまうので処理の問題はない。また、DD反応の中性子はDT反応の中性子よりもエネルギーが低いので放射化もすくない。第三世代以降では、まったく放射性物質のない、本当にクリーンな核融合炉となるであろう。

炉の停止

核融合炉は、ちょうどガスコンロのように、常に燃料ガスを外から注入しながら燃焼を続けるものなので、ガスの供給を止めれば、いつでも簡単に燃焼を止めることができる。核融合炉では、炉が暴走することはない。これは、炉のなかに大量の燃料が置いてある核分裂原子炉と基本的に異なる点である。

さらに、核融合炉の炉心であるプラズマは、極微量でも不純物（燃料以外の元素）が混入すると温度が下がって消滅する性質がある。したがって、もし故障が起こって空気が漏れて流入したり、容器の壁の小片が1mgでもプラズマのなかに入ると自動的にプラズマが消え、炉は停止する。核融合炉は本質的に安全特性を持っている。

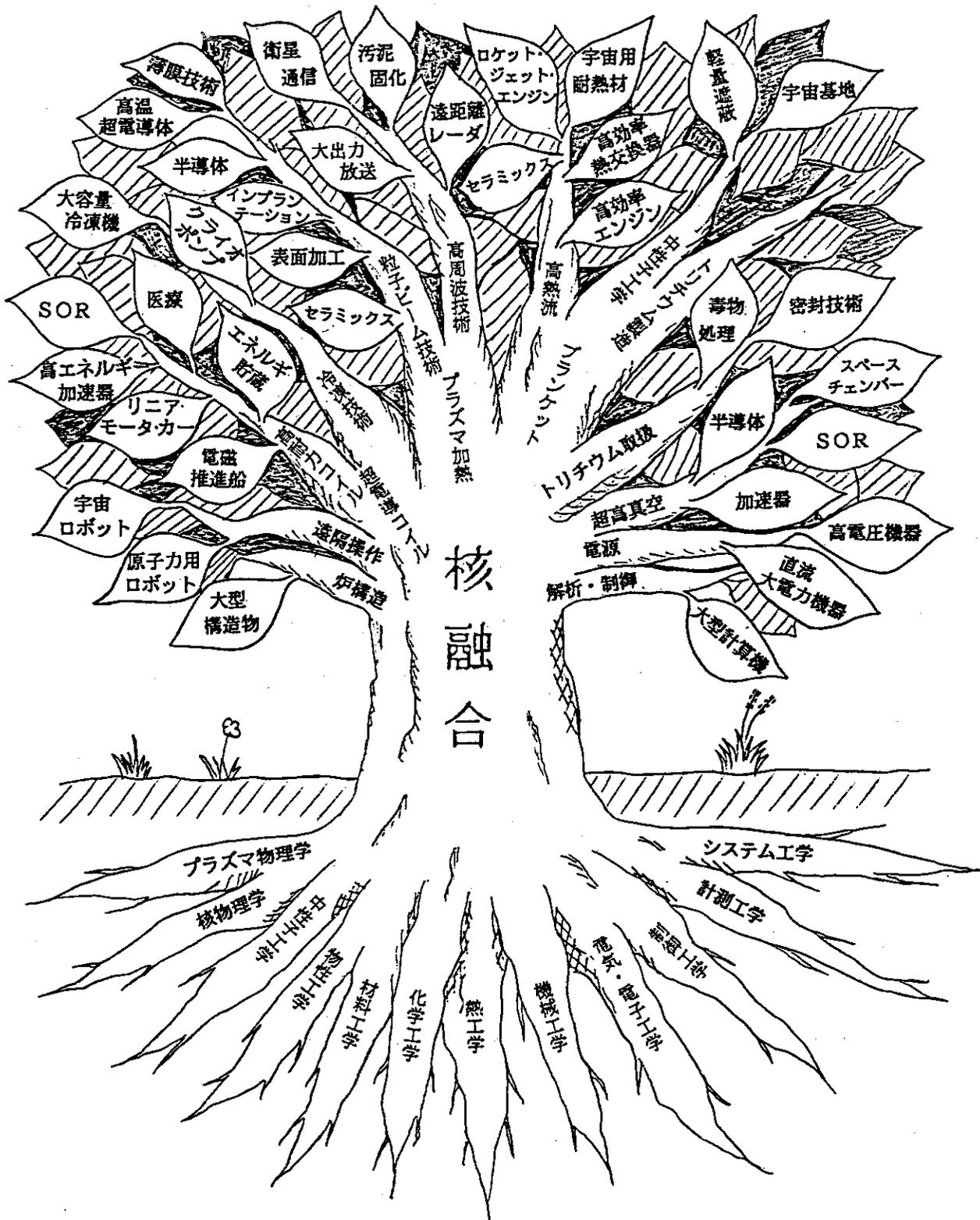
再処理

もう一つ、核分裂原子炉と比較して大きく異なる点として、使用済み燃料の再処理や、保管の必要がない点がある。核融合炉では、燃やすにしたがって再処理や保管の必要な使用済み燃料（放射性物質）がふえることはない。炉の構造材料が放射化するが、これは炉の寿命が終わったときに適切な処理をする。

1.5 先端技術の開発

核融合炉は、超電導コイル技術、極低温技術、超高真空技術、高熱流技術などの先端技術（ハイテク）の集合体である。実際、他分野との技術の関連を調査した結果によると、予想以上に多くの関連（波及効果）が抽出されている。第1-7図は、調査結果の一つで、主な関連技術の分野を示している。

核融合炉の開発は、狭義のエネルギー技術の枠を超えて、多くの先端技術開発の先導的役割を果たすものである。



第1-7図 核融合研究開発の関連分野

1. 6 世界のエネルギー資源

世界中のエネルギー資源の量は、第1-2表のように推定されている。また、世界中で使っている全エネルギーの量は第1-3表の通りである。Qという単位は、現在世界中で一年間に使う全エネルギーが約0.1Qというくらい非常に大きなエネルギーの単位である。

これによると石油と石炭で数百年はもつことになるが、実は、石油、石炭のような化石燃料を使うと二酸化炭素(CO₂)が発生して地球からの熱放散を阻害する、いわゆる温室化現象が起こる。したがって、できるだけ早く化石燃料の使用はやめて、むしろ炭素(カーボン)資源としての利用に向けるべきである。

すると、残るエネルギー源は、原子力であり、そのなかでも、安全性と資源の量の点から核融合炉が望ましい。

また、核融合炉の燃料は海水から取れるので、化石燃料のような、資源の偏在の問題がない。したがって、エネルギー源を求めての国際紛争(戦争)がなくなり、かつ、大型タンカーやシーレーン確保のような、輸送の問題がなくなる。この点で、世界の平和に貢献するものである。

核融合炉が人類究極のエネルギー源といわれるのは、このような理由によるものである。

以上は世界からの観点であるが、日本の観点からは、さらに次のようなことが言える。すなわち、エネルギー資源のない我が国は、世界のなかでも米国につぐ大エネルギー消費国である。水力を除く95%のエネルギーは輸入に頼っている。第1-8図は、縦軸にエネルギー源の構成、横軸に国別のエネルギー消費量をとった図で、日本は、原子力を国産としても80%が輸入である。

したがって、新しいエネルギー源の開発によって、エネルギーの面で世界に貢献することは、我が国の世界に対する義務とも言えるものである。かつ、輸入に頼らないエネルギー源である核融合炉の開発は、我が国にとって重要な課題である。

リチウム資源

地球上のリチウムの資源量は、100万kWの核融合発電所が3000基出来たとして(現在世界中で原子炉は約500基ある。)300年以上持つほど充分にある。これが無くなる前に、重水素だけで良いDD炉が出来るであろう。

エネルギー収支

炉を作る材料を精練したり、工作したり、建設するために、かなりのエネルギーを必要とする。これらの炉を作るために必要なエネルギーの量と、炉の寿命(30年程度)の間に生産するエネルギーの量との収支を「エネルギー収支」という。核融合炉についての試算では、建設に使ったエネルギーの30-50倍のエネルギーを生産できる。すなわち、最初の一年で使ったエネルギーを埋め合わせ、あとの30年間以上は正味のプラスのエネルギー生産である。

第1-2表 世界のエネルギー資源

		確定可採量	推定残留可採総量 ²⁾
化石燃料	石油	3.7Q	15.6Q
	天然ガス	2.0Q	11.2Q
	石炭	23.8Q	168.2Q
原子力	U ²³⁵ 分裂炉	0.8Q	1.6Q
	高速増殖炉 *	61. Q	120. Q
	核融合炉 *	~10億 Q	

*印は、開発途上

- 1) 「原子力ハンドブック」(61.5. オーム社)による。
- 2) 確定可採量を含む。

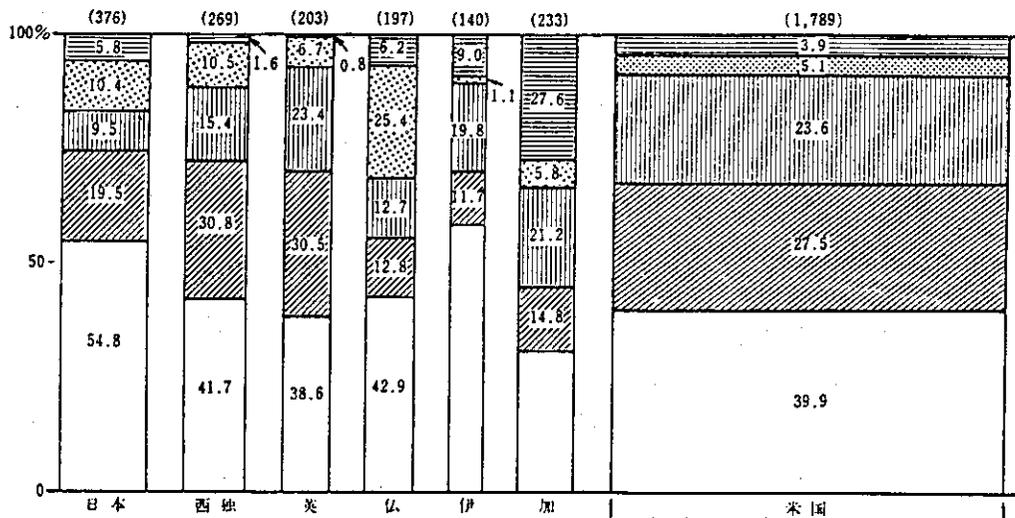
第1-3表 人類のエネルギー消費量

紀元0年 ~ 1850年	0.004 Q/年
1850年 ~ 1950年	0.04 Q/年
1950年 ~ 2000年	~0.1 Q/年
2000年 ~ 2050年	<1 Q/年

1 Q = 10¹⁸ BTU ≈ 10²¹ Joule = 280兆 KWH

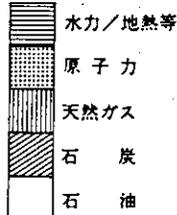
地球上への太陽エネルギー ~ 1500 Q/年

(単位: %, ()内は石油換算百万トン)



	全エネルギーの輸入依存度 (1985年)	石油の輸入依存度 (1985年)
日本	80.5%	99.7%
西独	49.9%	94.9%
英	△16.4%	△67.0%
仏	57.8%	96.1%
伊	80.1%	97.1%
加	△20.5%	△22.0%
米	11.2%	29.9%

(注) △は輸出を示す。



(出典: OECD ENERGY BALANCES 1970/1985)

第1-8図 主要国の一次エネルギー供給構成 (1985年)

2. 核融合炉への道

2.1 核融合炉に必要な条件

核融合反応は、2つの原子核同志を衝突させて融合するものであるが、原子核が両方とも正の電気を持っているため、はやいスピードでぶつけないと正の電荷同志の反発力でそれになってしまう。これに必要なスピードは、毎秒1000 km以上である。「温度」という概念で表現すると1億度以上となる。すなわち、核融合に必要な条件のひとつは高い温度である。

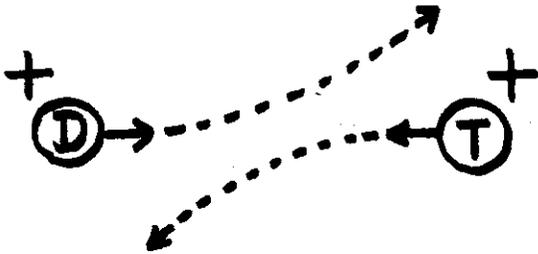
また、一回の核融合反応で出る熱量（エネルギー）は決まっているので、一定の電力、すなわち、毎秒当たりの出力エネルギー、を続けて得るためには衝突の頻度を高くしなければならない。そのため、燃料粒子の密度を高くする必要がある。すなわち、第二の条件は高い密度である。

さらに、燃料粒子を高い温度と高い密度に保つには、何らかの方法で加熱するが、必要な加熱電力（パワー）を低い値に抑えないとエネルギー源にはならない。少なくとも核融合反応によって出てくるパワー以下にしなければならない。これには、炉心の燃料粒子から逃げる熱を抑える必要がある。専門用語では、これを「エネルギー閉じ込め時間を長くする」という。すなわち、核融合炉の第三の条件は閉じ込め時間である。

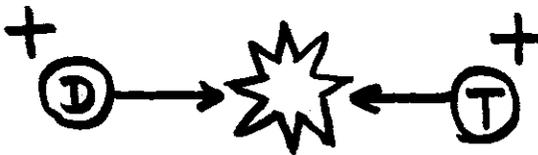
以上のように、核融合炉に必要な条件は、温度、密度、閉じ込め時間、の三つである。ただし、密度と閉じ込め時間は、両者の積の形で効く。すなわち、密度が高くて閉じ込め時間が短くても、密度が低くて閉じ込め時間が長くても同じである。（この積をローソン・パラメータという。）

核融合炉に必要な条件

① 反応粒子のスピード (温度)



DもTも正電荷のイオンなので
スピードが遅いと静電気の反発力で
それてしまう。



反発力に打ち勝って衝突するために
必要なスピードは
約1000 km/秒 (~1億度)

② 衝突の頻度 (粒子の密度が高いほど頻繁に衝突する)

一回の反応で出てくるエネルギーが決まっているので、ある出力パワー (毎秒当たりのエネルギー) を出すためには衝突頻度を高くしなければならない。

③ エネルギー閉じ込め時間

炉心プラズマが冷えないように、良い閉じ込め特性が必要。

②と③は「積」で効く。 この積を「ローソン数」という。

ところで、燃料の重水素および三重水素のガスをこのような高温に加熱すると、「プラズマ」という電気（電荷）を持った粒子の雲、あるいは、一種の高温ガスになる。

核融合炉を作るためには、重水素と三重水素を超高温に加熱してプラズマを作り、その温度、密度、閉じ込め時間の三つの値が核融合炉の条件を満たすようにする必要がある。その条件は、第2-1図のような図（ローソン図）で表わせる。ここでは、自己点火条件を示した。自己点火条件は、プラズマ加熱装置を使わないで（外部からプラズマを加熱する事なく）反応が続く状態をいう。すなわち、DT反応の結果生じるアルファ粒子（ヘリウムの原子核、第1-1図参照）による自己プラズマ加熱によって反応を持続する条件である。核融合炉、すなわち発電所としては、発電所内部で使う電力も必要で、もう少し高い条件が必要である。

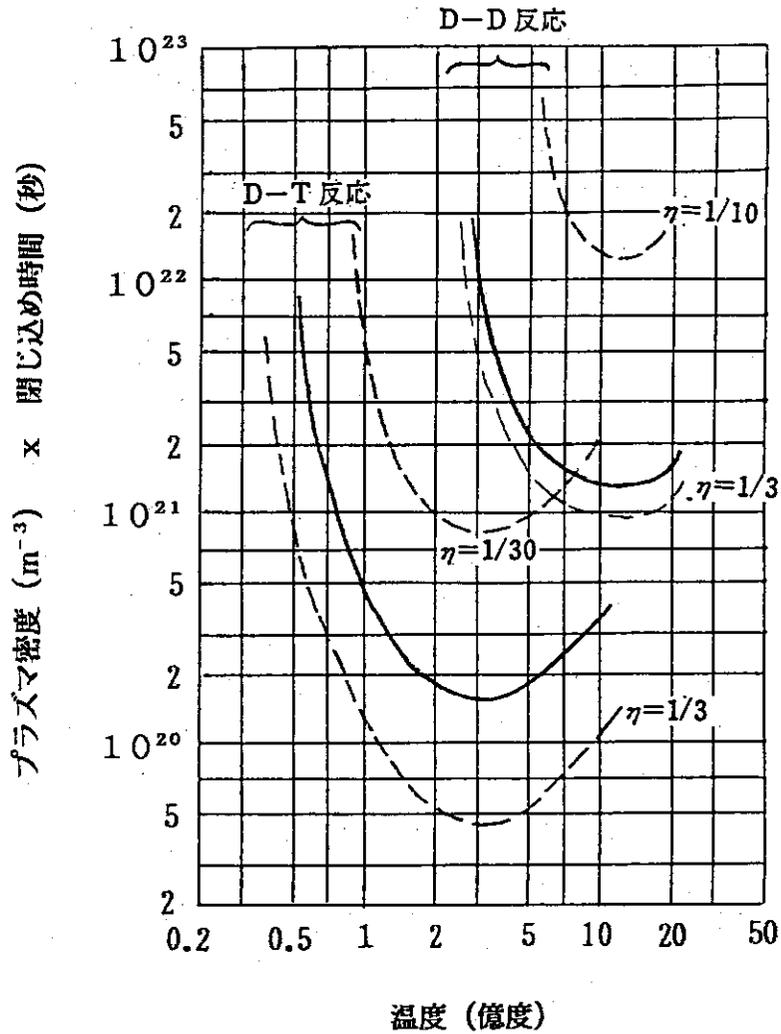
自己点火条件より一段階前の目標（マイルストーン）として「臨界プラズマ条件（Break-Even condition）」がある。臨界プラズマ条件とは、プラズマを外部から加熱するパワーと核融合反応の出力とが等しい状態をいう。プラズマ加熱装置を使いながら、核融合反応の出力をすべて回収して100%の効率でプラズマ加熱に使えると仮定すれば、反応を持続することができる条件である。

なお、プラズマの温度が低くても、僅かの核融合反応は起こっている。ある温度になると急に反応が起こる訳ではなく、核融合反応の回数は、連続的に変化する。上に述べた条件は、正味のエネルギーをとりだせる炉として必要な条件である。

「プラズマ」は、正の電気（電荷）を持つイオン（中性原子から電子がとれたもの。水素、重水素、三重水素は、一個しか電子を持っていないので、イオンは、電子のない裸の原子核そのものである。）と負の電気を持つ電子とから出来ている。イオンと電子をまとめてプラズマ粒子という。

プラズマは、物質の第四の状態と言える。すなわち、最も温度の低いときは「固体」、少し温度が高くなると「液体」、もっと温度が高くなると「気体」になる。水では、氷、水、水蒸気、という状態変化である。氷は分子間の結合が強くて、水の H_2O 分子が動けない状態、水は、熱運動のエネルギーが大きくなって分子がかなり自由に動ける状態ではあるが、分子間の距離は氷の時とあまり変わらない状態である。熱運動のエネルギーがさらに大きくなると、分子間の結合力が殆ど効かなくなり、分子と分子の距離が飛躍的に大きくなる。これが気体状態（水蒸気）である。さらに温度があがると、HとOとが解離する。（解離気体）

これをさらに温度をあげていくと、H及びOの原子の中の結合力にも熱エネルギーが打ち勝って、原子が正の電荷を持つイオンと負の電荷を持つ電子に別れる。これが「プラズマ」状態である。



第2-1図 核融合炉への条件(ローソン条件)

(空間的に一様なプラズマを想定した時の自己点火条件)

- η --- プラズマ加熱パワー/核融合出力パワー
- 出力パワーの何パーセントをプラズマ加熱に使うか、すなわち、 η によって幅がある。
- 実線 --- アルファ粒子によるプラズマ加熱(内部加熱)のみを考慮 (3.8参照)

2. 2 核融合炉の条件を実現するには？

2. 1で述べた核融合炉の条件を自然に実現しているものに太陽がある。第2-1表のように、太陽では、万有引力（重力）でプラズマを閉じ込めているので、閉じ込め時間が殆ど無限大であり、かつ、密度も高い。そのため、中心付近でも2000万度、表面では6000度程度で核融合反応が持続している。

核融合炉の条件を地上で実現する方法は、二つある。一つは磁場を使うものであり、もう一つは慣性を利用するものである。

（注）太陽の場合は、四つのHが融合する反応が主体と言われ、また、プラズマを自己加熱するプロセスも地上での実験とは異なるので、単純な比較はできない。また、木星も水素のガスで出来ていて、太陽（光る星）になりそこなった天体とも言え、内部では核融合反応が続いて熱がでている。不完全ながら、自然の中の核融合炉としては、木星ぐらいの大きさが最小限必要である。

自然に存在するものと同様な機能を人工的な物で実現する場合、人類の技術は、自然の物よりも大きくして実現してきた。昆虫のような小型の飛行機はまだ実現していないし、いわしのような潜水船もない。核融合炉の開発は、この点で非常に特殊である。木星よりもはるかにはるかに小型の、太陽の直径の約一億分の一、約10-15mの直径でミニ太陽を作ろうとしているわけである。

第2-1表 核融合のプラズマ条件

種類	温度	密度	閉じ込め時間
(1) 世界の最高性能 (トカマク型、1988年)	3億度	空気密度の 10万分の1	0.9秒
(2) 臨界プラズマ条件 (DT反応)	1億度	空気密度の 10万分の1	0.2秒
(3) 核融合炉 (自己点火条件) (DT反応)	2億度	空気密度の 10万分の1	0.5秒
(4) 核融合炉 (DD反応)	10億度	空気密度の 10万分の1	5秒
(5) 太陽 (重力による閉じ込め)	2千万度	空気密度の 100万倍	非常に長い

(注) (1) 温度、密度、閉じ込め時間 それぞれの最高値。

同時達成ではない。

(2)、(3)、(4) は、一例の値。第2-1図のように、それぞれ曲線であって、一つの値で表わせるものではない。

(5) 太陽では(1) - (4) に比べて、密度がきわめて高いことに注意。

(反応頻度は、密度の二乗に比例する。) 表面の温度は6000度程度である。

2.3 磁場閉じ込め

核融合炉の炉心である高温の燃料ガス、すなわち、プラズマの粒子は磁力線に朝顔のつるのように巻きつく特性を持っている。この性質を利用して、磁場でプラズマを閉じ込める方法が、磁場閉じ込め方式である。

プラズマ粒子が磁力線の回りに巻きつくことは、つぎのように説明出来る。すなわち、プラズマの粒子であるイオンと電子は電気を持った粒子であるが、電気（電荷）がスピードを持って運動すると電流となる。電流と磁場との間には、電磁気学の法則にしたがった電磁力（ローレンツ力）が働く。これは、実はモーターの原理と同じもので、磁力線にも電流にも直角な方向に力が働く。この結果、プラズマ粒子は、磁力線のまわりを旋回運動する。この旋回運動を「サイクロトロン運動」、あるいは「ラーマー運動」という。旋回運動と直角な方向、すなわち、磁力線と平行な向きは影響を受けないので、朝顔のつるのように、磁力線のまわりを螺旋状に進む。

回転運動の周期（周波数）は、磁場の強さと粒子の重さで決まっている。また、回転の半径は、粒子の重さと粒子の速度（すなわちエネルギーの大きさ、あるいは、温度とも言える）によって決まり、それぞれの大体の大きさは第2-2表の通りである。これらの周波数は、高周波によるプラズマ加熱で使われる周波数でもある。

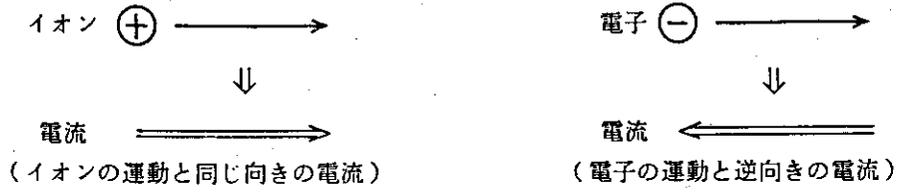
なお、同表にアルファ粒子を付け加えたのは、DT反応の結果アルファ粒子が発生し、これを一定時間、磁場中に閉じ込める必要があるためである。

第2-2表 サイクロトロン運動の旋回半径と周波数

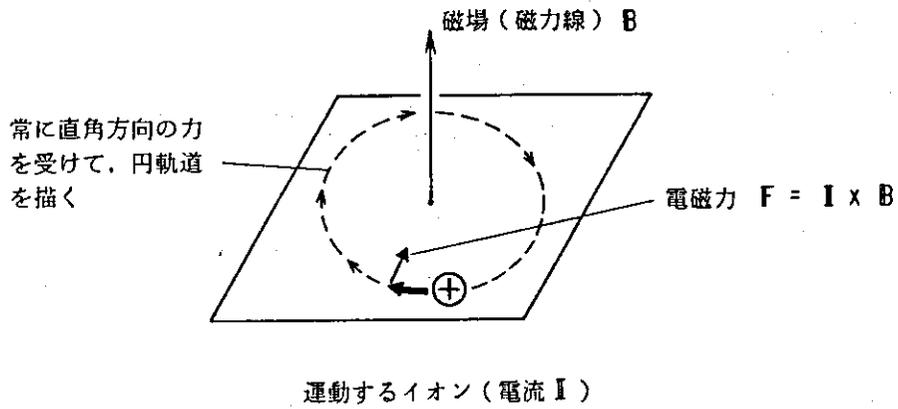
	B = 1 T		B = 5 T	
	周波数	半径 (10keV)	周波数	半径 (10keV)
電子	28.0 GHz	0.24 mm	140.0 GHz	0.048 mm
水素 (H) イオン	15.2 MHz	10.2 mm	76.0 MHz	2.04 mm
重水素 (D) イオン	7.6 MHz	14.4 mm	38.0 MHz	2.88 mm
三重水素 (T) イオン	5.1 MHz	17.7 mm	26.3 MHz	3.53 mm
アルファ粒子	3.8 MHz	381.6 mm (3.5 MeV)	19.0 MHz	76.3 mm (3.5 MeV)

$$\text{周波数 } f = \frac{1}{2\pi} \frac{ZeB}{m} \quad , \quad \text{旋回半径 } \rho = \frac{\sqrt{3mkT}}{ZeB} \quad , \quad (\text{MKS単位系})$$

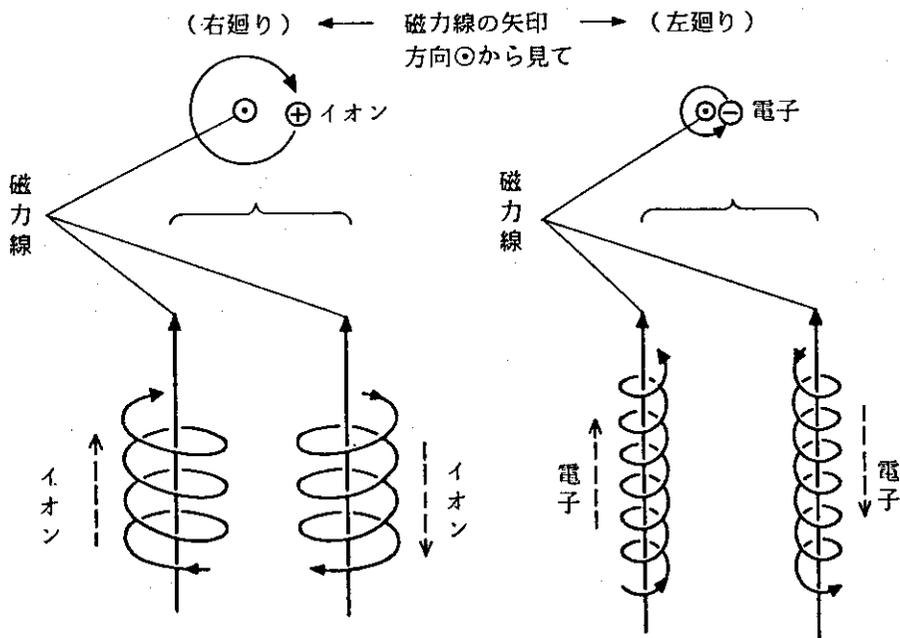
① 運動するイオン・電子は電流である。



② 磁場中の電流には、磁場にも電流にも直角の方向に力（電磁力）が加わる。



③ イオンや電子（プラズマ粒子）は磁力線にからみついて運動する。

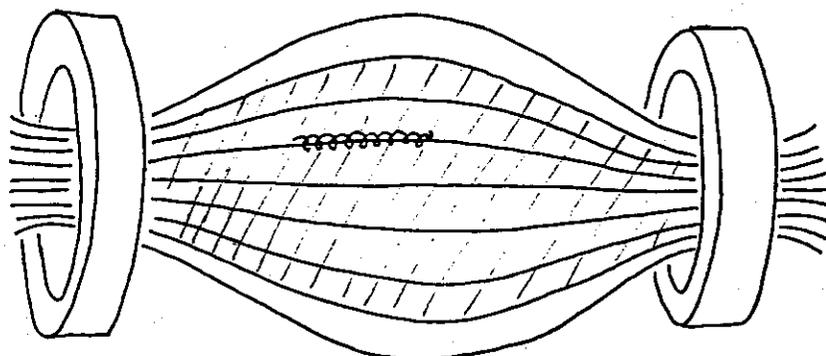


第2-2図 プラズマ粒子の磁場中の運動

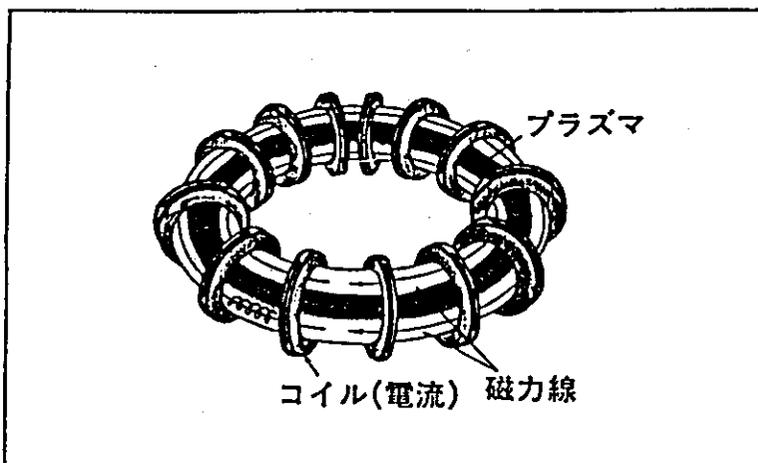
この性質を利用した閉じ込め磁場の一つが第2-3図に示すミラー磁場（磁気鏡）である。これは、ちょうど「わら入り納豆」のわらのような磁力線をつくり、納豆の代わりにプラズマを閉じ込めるものである。

しかし、ミラー磁場ではプラズマ粒子（イオンと電子）が磁力線に沿って両端から漏れやすい。そこで、端を無くしたのが第2-4図のドーナツ型（専門用語ではトーラス型という）の磁場である。

ミラー磁場でもトーラス磁場でも、色々な工夫を付け加えた形式がある。その詳細については、第3章で解説する。



第2-3図 ミラー磁場(磁気鏡)



第2-4図 トーラス型磁場

2.4 慣性核融合

もう一つのアイデアは、燃料（重水素と三重水素）の小さな粒を急激に加熱して、燃料のガスが飛び散ってしまう前に核融合反応を起こしてエネルギーを取り出してしまうものである。燃料粒子の慣性（質量）のおかげで、ガスが飛び散るのにある時間を要することを利用するわけである。反応の時間は、ナノセカンド（10億分の1秒）程度である。

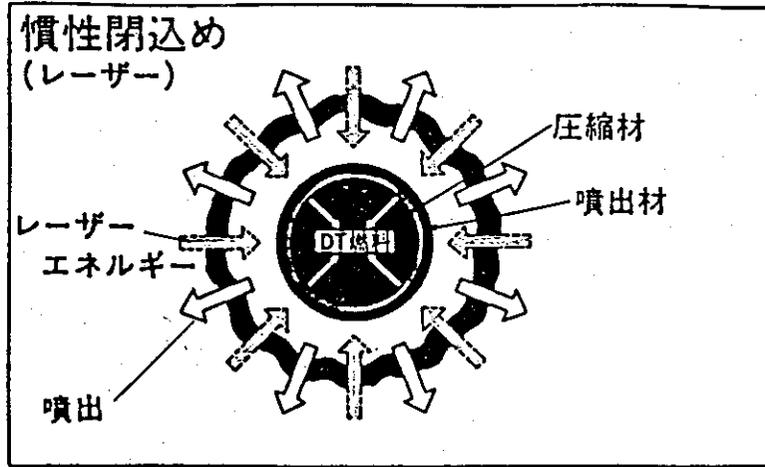
このような短時間に燃料を数億度以上に加熱するには、大きなエネルギーを小さな空間に集中出来るレーザー光やイオン・ビームをつかう。

慣性核融合の研究は、大阪大学で大規模に進められており、現在では世界で最もよい成果をだしている。最近、核融合反応の回数約 2×10^{13} 、核融合反応によるエネルギーが加熱用のレーザー光エネルギーの500分の1というデータを発表した。

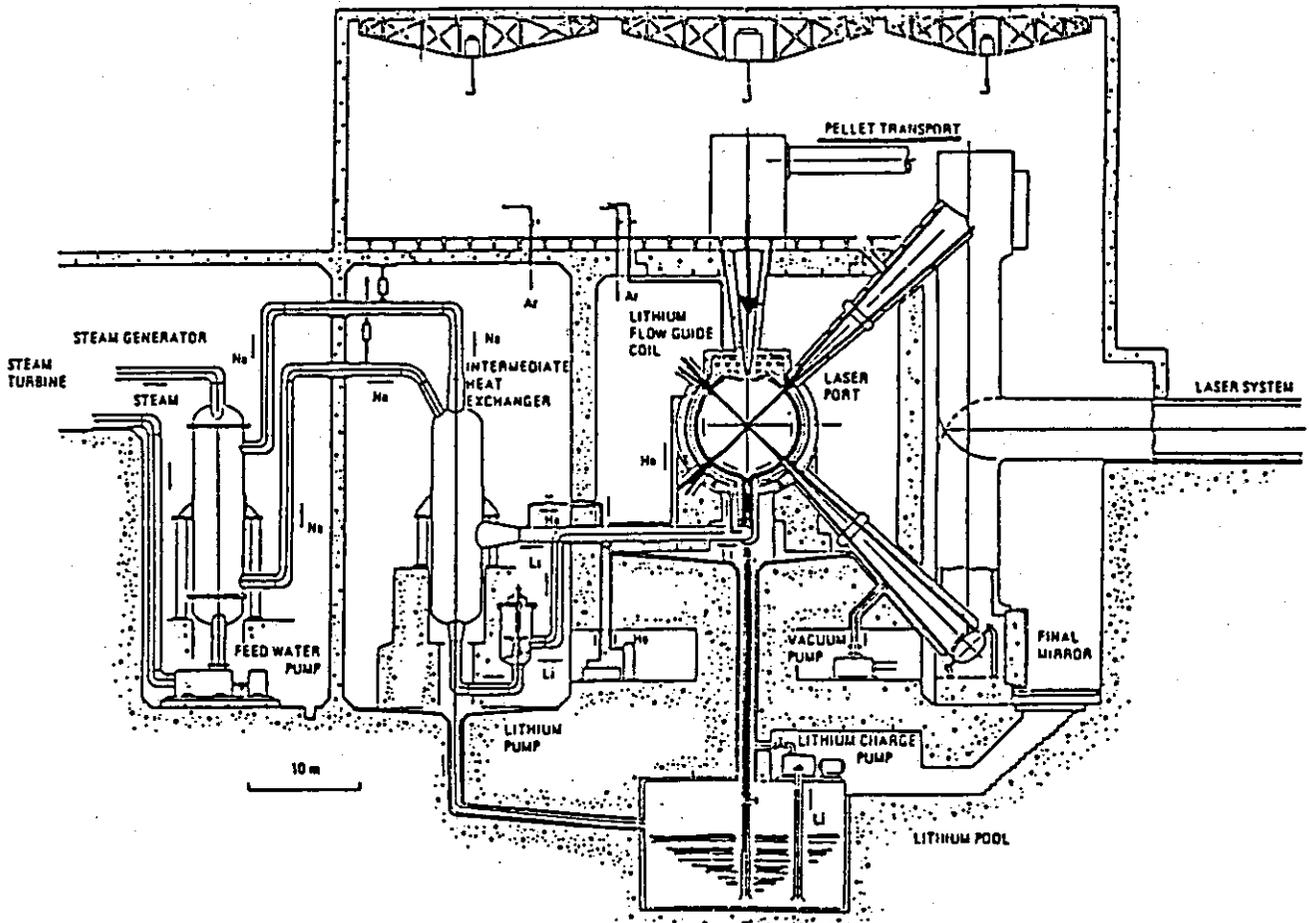
慣性核融合の方法によれば、閉じ込め用の磁場が不要であり、また不純物の問題もないので超高真空技術が不要となる。したがって、この面では炉を作りやすい。現在の実験では、一個の粒（ターゲット）は、直径約1mmで最大約 10^{19} 個の燃料粒子がある。もしもこの燃料粒子全部がDT核融合反応すると出てくるエネルギーは35MJである。出力100万kWとするには、毎秒28個、もしも反応する粒子が50%だとすると56個のターゲットが必要である。

逆に難しい点は、まず第一に、レーザーの効率が約1パーセント程度と低いことで、エネルギー源としては、さらに開発が必要である。ちょうど磁場閉じ込め方式で効率良く磁場を作る超電導コイルのように、効率100%にちかいレーザーか、あるいは、レーザー光の100倍のエネルギーを核融合で発生する必要がある。

また、ターゲットを連続的に炉の空間に供給し、超精密にレーザー光を照射すること、高繰り返しで高パワーのレーザを運転することなどが、今後の開発項目である。



第2-5図 慣性核融合の原理



第2-6図 レーザ核融合炉の設計例(大阪大学)

2.5 核融合開発の歴史

核融合の研究は、1950年代に英、米、ソで開始された。磁場によるプラズマの閉じ込めを意識した論文は、1951年にはじめて英国で発表された。1955年（昭和30年）の第一回原子力平和利用国際会議（ジュネーブ）でインドのバーバ議長は、制御核融合が20年以内に達成されるかもしれないと予言し、以後、研究情報を国際的に交換しながら核融合研究が始まった。1957年7月末には国際原子力機関（IAEA）が発足し、その雑誌 Nuclear Fusion および「プラズマ物理と制御核融合国際会議」は国際協力の中心となり、冷戦の時代でも核融合の分野では東西間でオープンな協力が続いた。

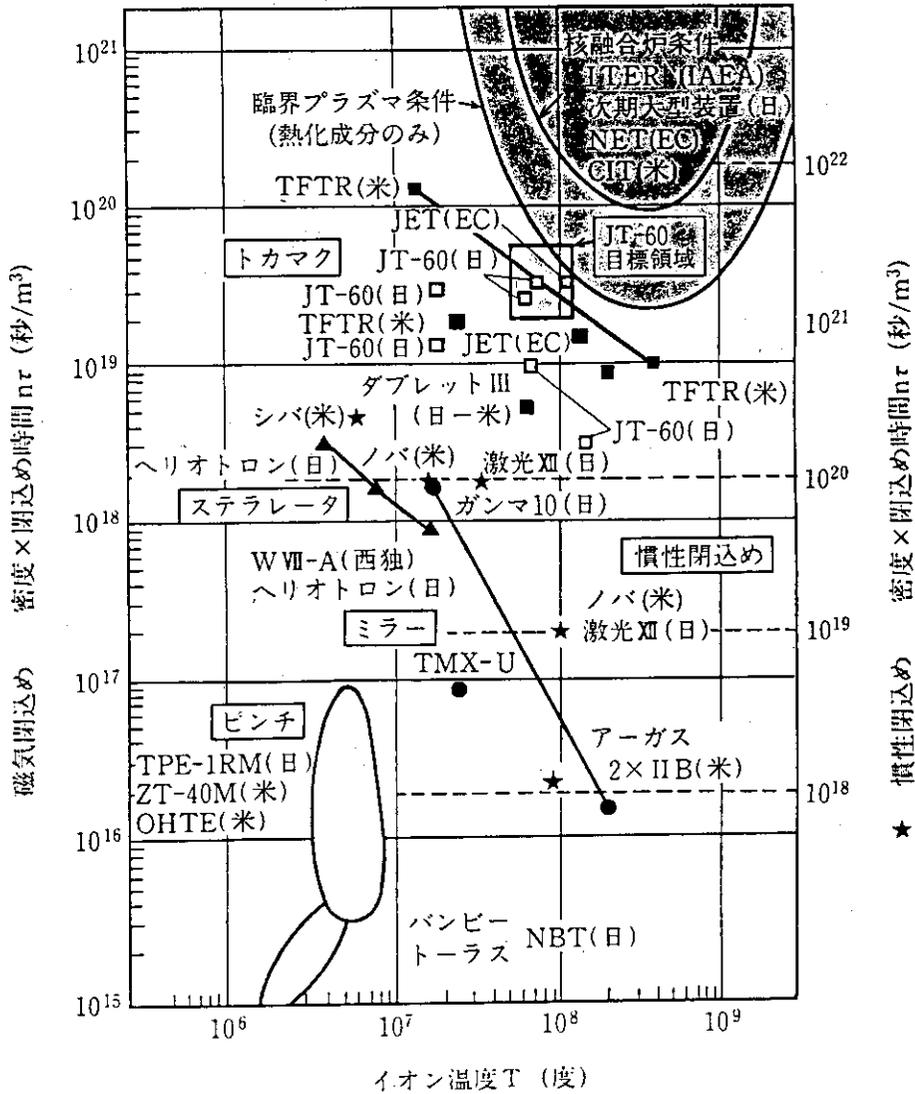
我が国でも同じ頃にいくつかの大学で研究が始まり、1961年には全国の大学の研究のセンターとして名古屋にプラズマ研究所が出来た。また、原研や電総研にも核融合のグループが出来た。また、核融合研究をする大学の研究室の数もふえた。

この後、我が国の研究は常に世界のトップ・レベルを維持し、世界の核融合研究をリードしてきた。科学技術の分野で外国からの導入に頼らず、世界でも初めての試みを重ねてきた分野は日本でははじめてであろう。我が国では珍しい真のフロンティアである。

研究開発の内容は、1960年頃までに色々な磁場形式が考案され実験された。この頃までは、プラズマの性質もよく分からず、また、実験装置の製作精度に注意が不十分で、誤差磁場の影響などもあったため、研究は苦難を極めた。1961年にソ連のヨッフエがミラー磁場で、1963年に米国にいた大河がオクタポール・トーラス磁場で、それぞれ「極小磁場」の概念によるプラズマ閉じ込めを実験で確認するまでを「煉獄時代」ということもあるくらいである。1968年にはソ連のトカマク型磁場装置で非常によい結果が発表された。この結果は当時の常識では信じられないくらいよいもので、実際、英国のカラム研究所からのチームがレーザ計測器を持ち込んでソ連の発表を確認した。その後、世界中がトカマク・ブームとなり、現在までの核融合研究開発はトカマクが主役となっている。なお、米国がそれまでの主実験装置であったCステラレータを急遽STトカマクに改造したのを除けば、原研のJFT-2（1972年運転開始）がソ連以外で初のトカマクである。

また、1960年にレーザが発明されると直ちにこれを利用するレーザ核融合、あるいは慣性核融合も研究開発が始まった。

核融合装置の各種方式到達性能



第2-7図 核融合各種方式の到達性能

(1990年現在)

目標である右上の臨界プラズマ条件、自己点火条件については第3.8節を参照。

2.6 今後の開発計画

世界の核融合の研究開発は、第2-7図に示したように、我が国のJT-60、米国のTFTR、及び、ヨーロッパ連合（EC）のJETの三大トカマクが最先端を進んでいる。ステラレータ型、ミラー型は最近プラズマ特性の向上がみられるが、トカマク型に比べると一桁以上遅れている。

今後の計画は、次段階の実験炉で第2-7図の自己点火条件の実現を狙うこととし、これにはプラズマ・パラメータの最も良いトカマク型で進めることとしている。そのあとは、原型炉によって核融合発電の全システムを試験し、さらにその後、実証炉によって経済性を含めた試験を行ない、核融合炉の実用化に備える計画である（第2-8図）。

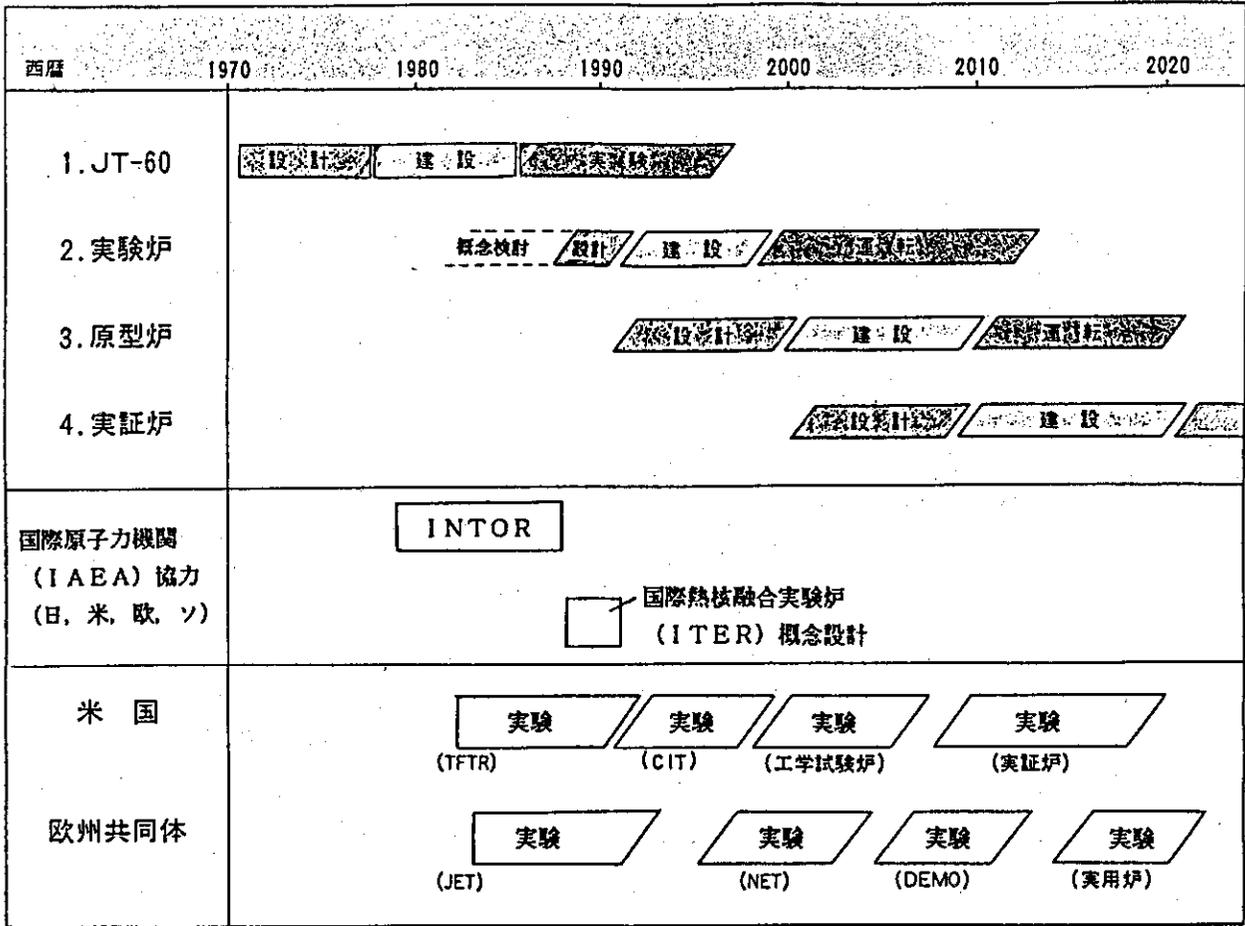
研究者の活動年数を考慮すると、研究開発の連続性を保つためには、すなわち、装置の建設と運転の経験を次の世代の装置に生かすためには、このような総合装置を10-15年ごとに建設して開発を進める必要がある。そうすると、2020年頃に実証炉の運転を開始し、2030年頃には実用化の準備が整うことになる。

1987年10月に米国の技術評価局（OTA）が発表したレポートでも、21世紀中ごろに商用電力のかなりの割合が核融合で発電されることを想定して計画を立てることが適当としており、我々と同じ考え方である。

なお、トカマク型以外の磁場形式における進展も期待でき、それらの成果をトカマク型に取り入れ、あるいは、極端な場合には別の磁場形式によって将来の炉をつくる可能性も残っている。

核融合炉の開発は、上記のように非常に長期間を要するものであるが、人類の質の良いエネルギー源としての必要性は、短期的なエネルギー事情に左右されるものではない。幸い、我が国は核融合の分野で、導入に頼らない自主開発を進めてきた結果、欧米と並ぶリード国であり、世界に真の貢献をすることができる。

(ITERをはじめ、世界で将来の計画もトカマク型としている。)



第2-8図 核融合炉開発計画の長期スケジュール

TFTR : TOKAMAK FUSION TEST REACTOR
 CIT : COMPACT IGNITION TEST
 JET : JOINT EUROPEAN TORUS
 NET : NEXT EUROPEAN TORUS
 DEMO : DEMONSTRATION REACTOR

3. 磁場によるプラズマ閉じ込め

3.1 各種の閉じ込め磁場

第2章で述べたように、磁場を使ってプラズマを閉じ込めることができるが、この閉じ込めは完全ではなく、漏れがある。この、磁場からのプラズマ粒子およびエネルギーの漏れをいかにして抑えるかが、現在までの磁場閉じ込め方式核融合炉開発の主題であった。

具体的には、磁場の形とプラズマの位置・形状の制御方法を色々工夫して漏れを減らしたり、有害な不純物の混入を防ぐ方法を工夫し、また、プラズマを効率よく加熱する方法を工夫してきた。

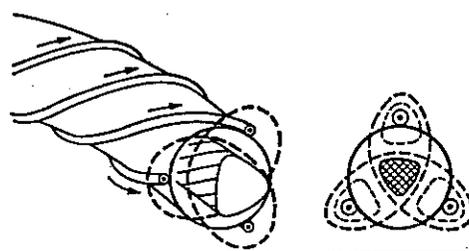
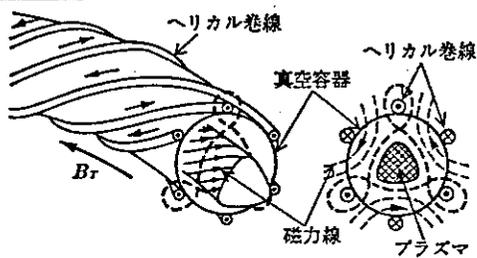
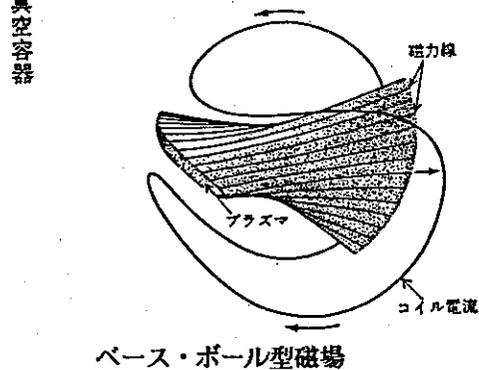
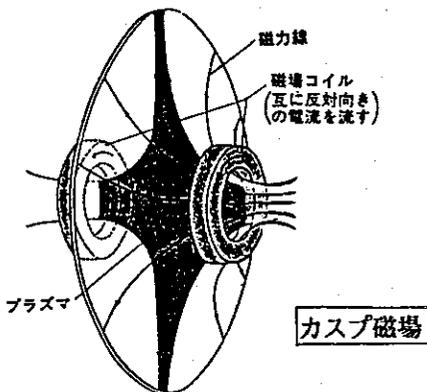
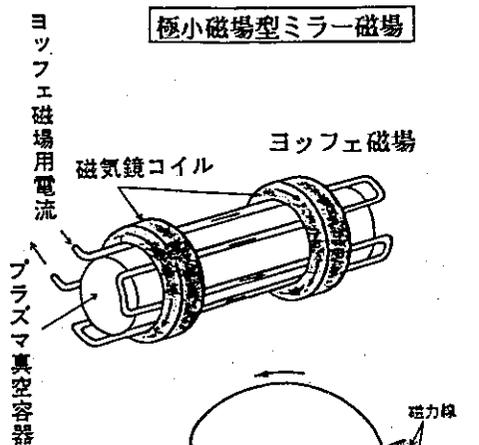
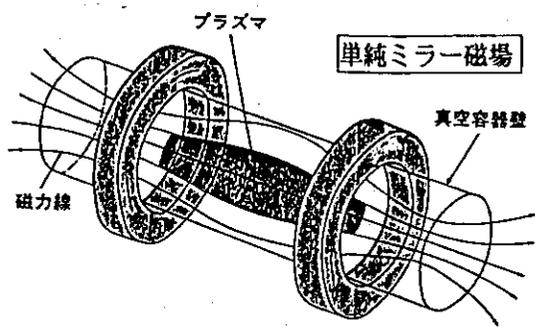
磁場の形式としては、ミラー磁場とトーラス磁場を第2・3節で紹介したが、それぞれのなかでも色々な工夫が行なわれてきた(第3-1図)。

トーラス磁場では、ドーナツに沿った磁力線をひねって捻り磁場にする必要があるで、磁力線を捻る方式によっていくつかの形式に区別される。(第3.7節参照)

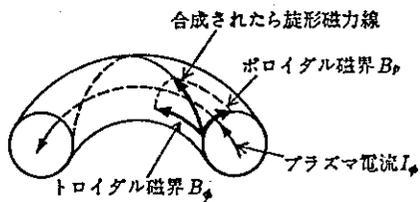
トカマクでは、ドーナツに沿ってプラズマ中に電流を流し、プラズマ電流が作る磁場によって磁力線をひねるのに対し、ステラレータ型装置では、コイルをヘリカル型に巻く。また、逆転磁場ピンチという形式では、トカマクと同じにドーナツに沿ったプラズマ電流で磁力線をひねるが、非常につよく捻る。特徴は、ドーナツに沿ったトロイダル磁場の強さがプラズマ環の断面内で変化していて、中心部と表面部では方向が逆になっていることである。プラズマを保持している時間は、トカマクやステラレータでは、小型装置でも0.1秒程度であるが、逆転磁場ピンチでは、長くても数ミリ秒、ほとんどは、マイクロ秒のオーダーである。

ミラー磁場では四重極磁場を組合せたヨッフエ磁場でよい結果がでたが、最近、両端に複雑な磁場を組合せたタンデム型が実験されている。

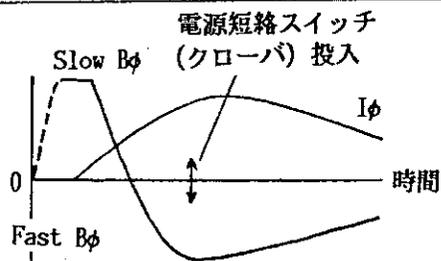
なお、ミラー磁場と同じ構成で、片方のコイルの電流の向きを逆にしたものをカスプ磁場という。この形式では、中心部で磁場がゼロで外側にいくほど磁場が強くなる。この磁場では、円周部の漏れが大きく、いまでは殆ど実験されていない。



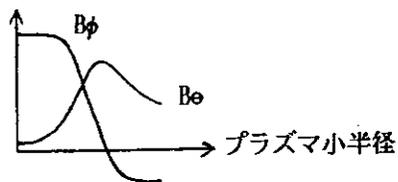
逆転磁場ピンチ RFP (Reversed Field Pinch)



トロイダル磁場 B_t とトロイダル方向のプラズマ電流 I_p で閉じ込め用のひねり磁場を作る。



トロイダル磁場 B_t を急速に変化させ、プラズマ断面内で磁場 B_t を反転させる。



第3-1図 各種の閉じ込め磁場

以下、本章では、トカマク型とかミラー型という形式にかかわらず磁場閉じ込め方式に共通なことがらについて解説する。

3. 2 閉じ込め時間

磁場プラズマ閉じ込め方式の核融合の研究開発は、磁場がプラズマを閉じ込める特性を如何に良くするかの研究といえる。ここで、最も重要な「閉じ込め時間」の説明を最初にしておこう。

磁場によるプラズマの閉じ込めは完全ではなく、漏れがある。ちょうど、「ざる」あるいは「穴開きバケツ」に水を貯めるようなものである。

第3-2図のように、バケツに穴があっても、どんどん水を注げば水を貯めることができる。漏れのある磁場でプラズマを閉じ込める場合も同じようなことである。磁場からプラズマが逃げだすが、それにかまわずにプラズマ粒子をどんどん注ぎ入れて、プラズマを貯める。時間的に同じ状態が続いているときは、注ぎ込む粒子の数(個/秒)と流れ出す粒子の数(個/秒)は等しい。これをFとし、また、貯まっている粒子の総数をN個とすると、粒子の平均滞在時間は、

$$(\text{粒子の平均滞在時間}) = \frac{N}{F} \quad \text{秒}$$

である。これを「粒子閉じ込め時間」という。

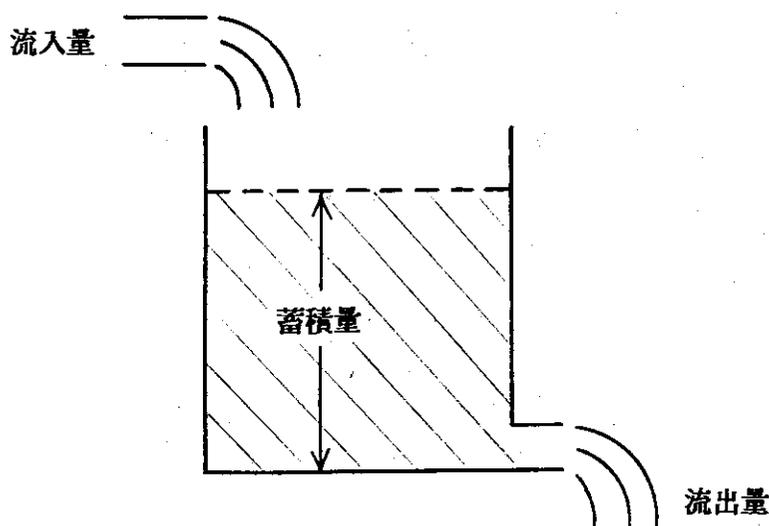
同じように、エネルギーについても平均滞在時間が定義できる。すなわち

$$\begin{aligned} (\text{エネルギーの平均滞在時間}) &= (\text{エネルギー閉じ込め時間}) \\ &= \frac{\text{蓄積エネルギーの量 (J)}}{\text{加熱パワー (W)}} \quad (\text{秒}) \end{aligned}$$

なお、「閉じ込め時間」は「プラズマ粒子、あるいは、エネルギーの平均滞在時間」であってプラズマが続いている(存在している)時間ではないことに注意されたい。

閉じ込め時間

- 磁場によるプラズマの閉じ込めは、ちょうど、穴のあいたバケツに水を貯めるようなものである。閉じ込めの良さをプラズマ粒子やエネルギーの「平均滞在時間」で表わす。穴が小さければ滞在時間が長い。この平均滞在時間を「閉じ込め時間」という。



第3-2図
「閉じ込め時間」は、
漏れて、出ていくまでの
平均滞在時間である。

- 漏れがあっても、水が貯まって同じ状態が続いているとき（水位が一定の時）は、

$$(\text{流入量}) = (\text{流出量})$$

であり、（水の）平均滞在時間は、次式で定義される。

$$(\text{平均滞在時間}) = \frac{(\text{貯まった水の量、蓄積量})}{(\text{流入量})} \quad (\text{下表参照})$$

- 閉じ込め時間は、普通、プラズマが持続する時間よりも短い。

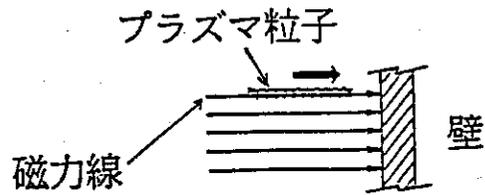
上式右辺の量	蓄積量	流入量・流出量
平均滞在時間		
エネルギー閉じ込め時間	蓄積エネルギー W (ジュール)	加熱パワー P (ワット=ジュール/秒)
粒子閉じ込め時間	全粒子数、Nケ	流入粒子量、Fケ/秒

3.3 粒子の流出

プラズマの粒子が閉じ込め磁場から漏れて流れだす理由は、次のように、いくつか考えられる。閉じ込め特性の改善とは、これらの漏れを減らすことである。

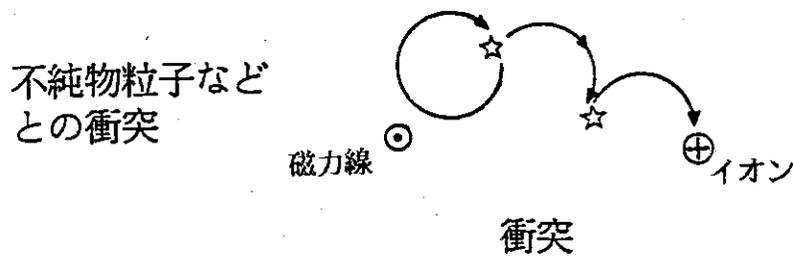
- 1) 端損失-----磁力線が第3-3図のように容器のかべに当たっていると、磁力線に沿って流れてきたプラズマ粒子が失われる。
- 2) 衝突による損失---第3-4図のように旋回運動をしている粒子が他の粒子（プラズマ粒子または不純物粒子）と衝突して磁場を横切って動いてゆく。
- 3) ドリフト運動による損失---第3-5図のように、磁場が変化していたり、電場があると、プラズマ粒子は磁場を横切って動く。
- 4) プラズマの形の変化による損失---第3-6図のように、磁力線とともにプラズマの形が変わる現象（不安定性）のために損失する。
- 5) 荷電交換衝突による損失---極くわずかに存在する中性粒子（水素分子）とイオンが衝突するとイオンのエネルギーがそっくり中性粒子に移り、エネルギーを持った中性粒子が磁場を感じずに流出する。（第3-7図）
- 6) その他の損失-----4) の不安定性よりも狭い範囲の（マイクロな）波（不安定性）などによる損失。

注) 上記1) の端損失は、ミラー型など、端のある（ドーナツ型でない）磁場形式における主な損失である。



第3-3図 端損失

(End loss)

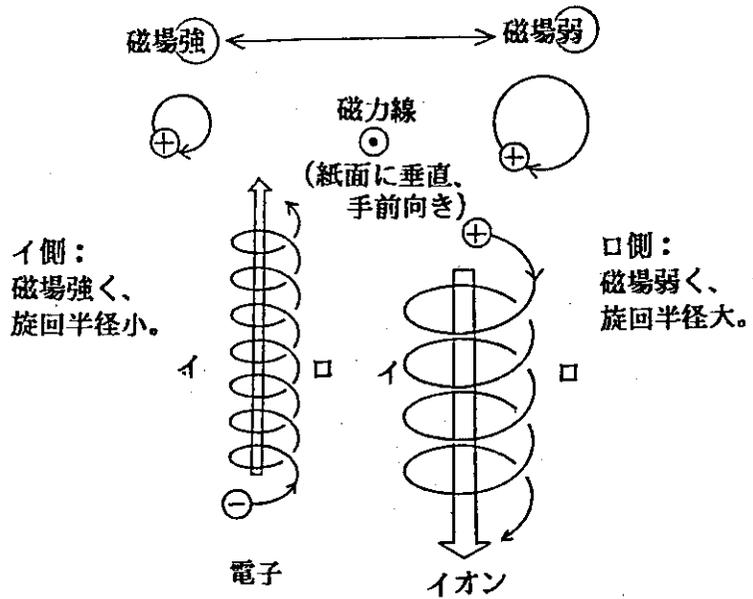


第3-4図 衝突による損失

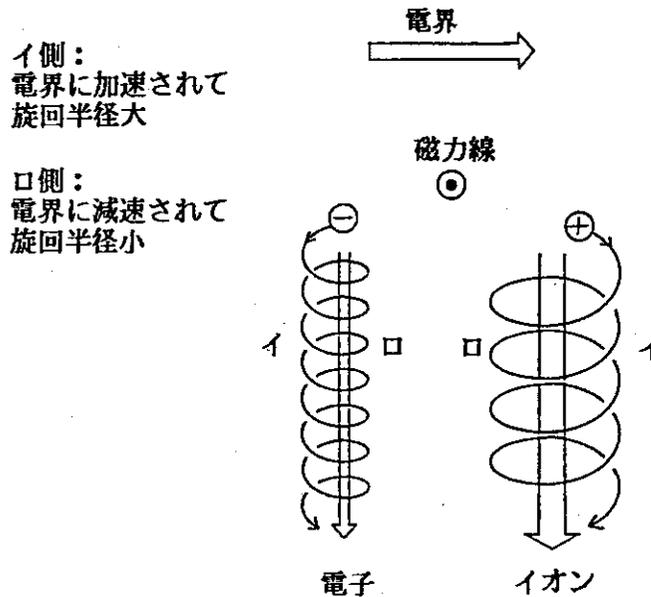
第3-4図の説明：このような衝突による粒子の流出は、粒子の旋回運動の半径と、粒子同志の衝突頻度によって決まる。その理論的な値を「古典拡散係数 D_{e1} 」という。

$$\begin{aligned}
 D_{e1} &= (\text{一回の衝突で旋回半径が移動する平均距離})^2 \times (\text{平均衝突頻度}) \\
 &= (\text{旋回半径 } \rho)^2 \times (\text{クーロン衝突周波数 } \nu)
 \end{aligned}$$

第3-5図 (a)
不均一磁場によるドリフト
(∇B ドリフト)
イオンと電子が逆方向に
ドリフトする。

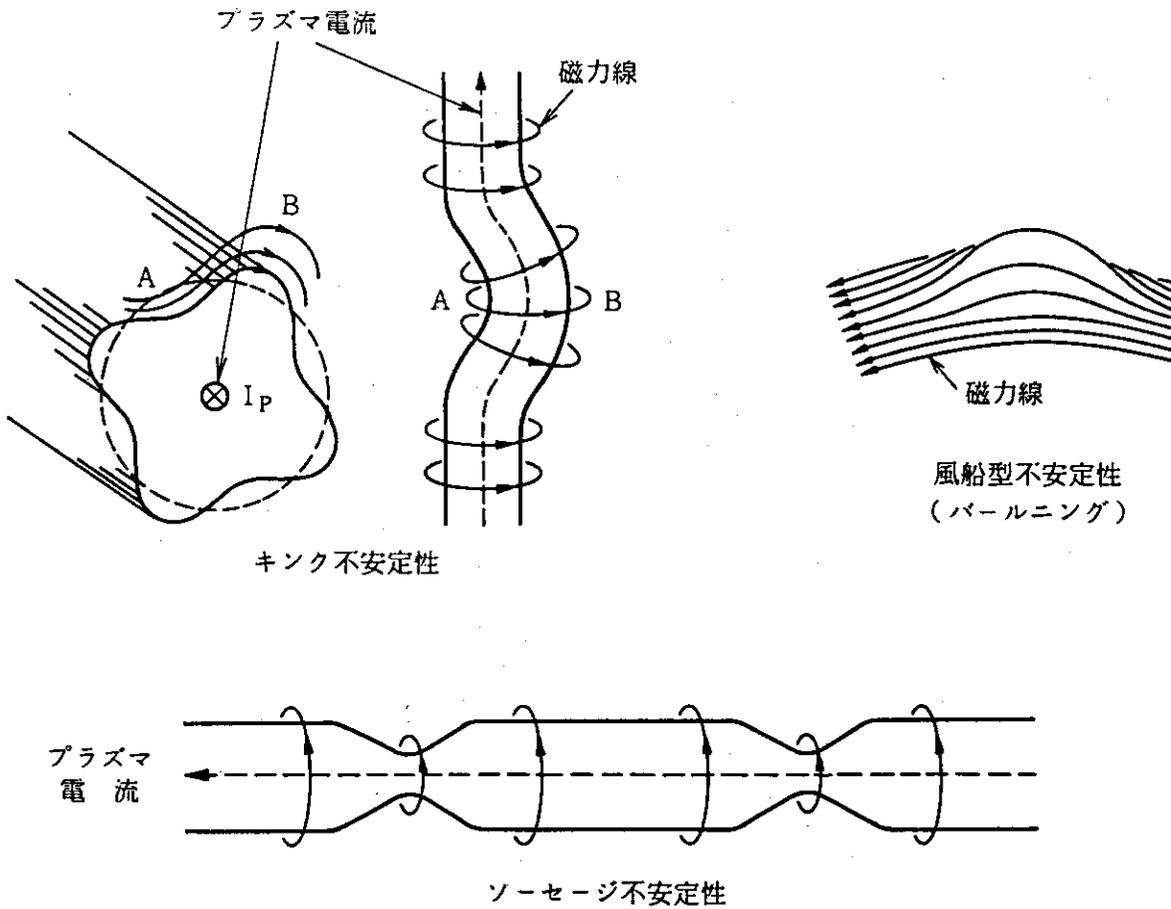


第3-5図 (b)
電界によるドリフト
($E \times B$ ドリフト)
イオンと電子が同方向
にドリフトする。

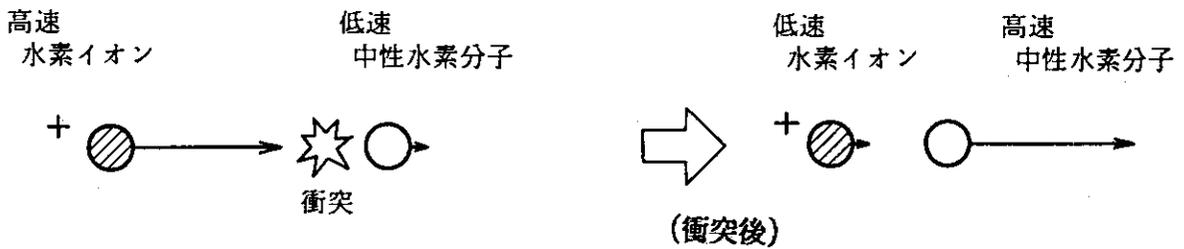


第3-5図 (a) の説明：イオン、あるいは電子の旋回半径の直径は磁場が強いほど小さい。同図では、左側、ロ、の方で磁場がつよく、直径が小さい。右側、イ、の方では磁場が弱く、直径は大きい。両方の領域を渡りながら旋回する粒子の軌道は、左側で曲率半径が小さく、右側で曲率半径の大きい軌道となる。これをなぞると、図のように粒子は、紙面に垂直な磁力線を横切って移動することが分かる。太い矢印は、粒子の旋回運動の中心の移動をしめす。ら旋型のように見える粒子の軌道は、ら旋ではなく、一平面内の移動を示している。(正確には、磁力線方向の等速運動が重なる。)これをドリフト運動という。図のように、電子とイオンは、反対方向にドリフトする。

第3-5図 (b) : 電場がある場合は、電場によって粒子が加速、あるいは減速されるので、やはり、旋回半径の大きさが、旋回円周の両側でことなることになる。したがって、(a)と同じに、粒子は磁力線を横切って運動する。ただし、電場の場合は、イオンと電子が同じ方向にドリフトする。



第3-6図 磁気流体不安定性



第3-7図 荷電交換衝突: イオンと中性子の速度がそっくり入れかわる

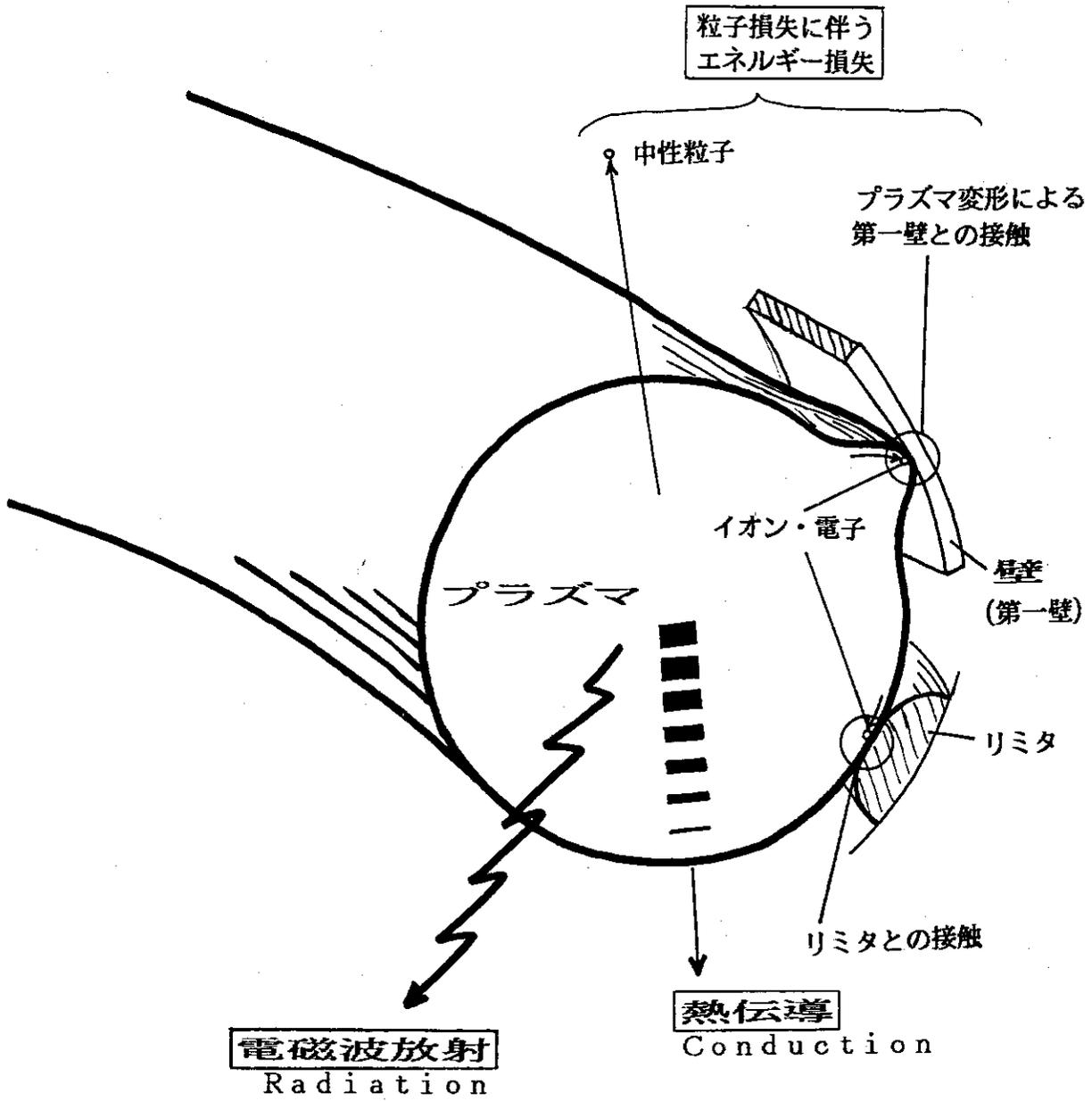
- イオンのエネルギーが、磁場を感じない中性粒子に移って、損失となる
- イオンの数としては損失していない

3.4 エネルギーの流出

プラズマのエネルギーが流出するプロセスには次のようなものがある。

- 1) エネルギーを持った粒子の流出による損失。――3・3に述べた粒子の損失に伴うエネルギーの損失。(対流損失、Convection loss および荷電交換損失)(第3-8図)
- 2) 熱伝導損失――粒子の移動を伴わない熱だけの移動。ちょうど、普通の物体中の熱伝導と同様のもの。(Conduction loss)
- 3) 電磁波の放射によるエネルギー損失――いろいろな理由による赤外線、可視光、紫外線、エックス線の放射によるエネルギーの損失。
(Radiation loss)
- 4) その他のエネルギー損失。――異常損失(Anomalous loss)とも呼ばれる。

なお、粒子やエネルギーの伝搬を「輸送」、「輸送現象」ともいう。



第3-8図 エネルギー損失

3.5 プラズマの様子

磁場で閉じ込めたプラズマの中やその周辺では何が起きているのかを、これからの説明の中心であるトカマク装置を例にして見てみよう。

まず、大気、あるいは空気は、プラズマにとってきわめて有害な不純物であり、プラズマは真空に引いた容器のなかに作る。このため、プラズマを入れる容器のことを「真空容器」という。

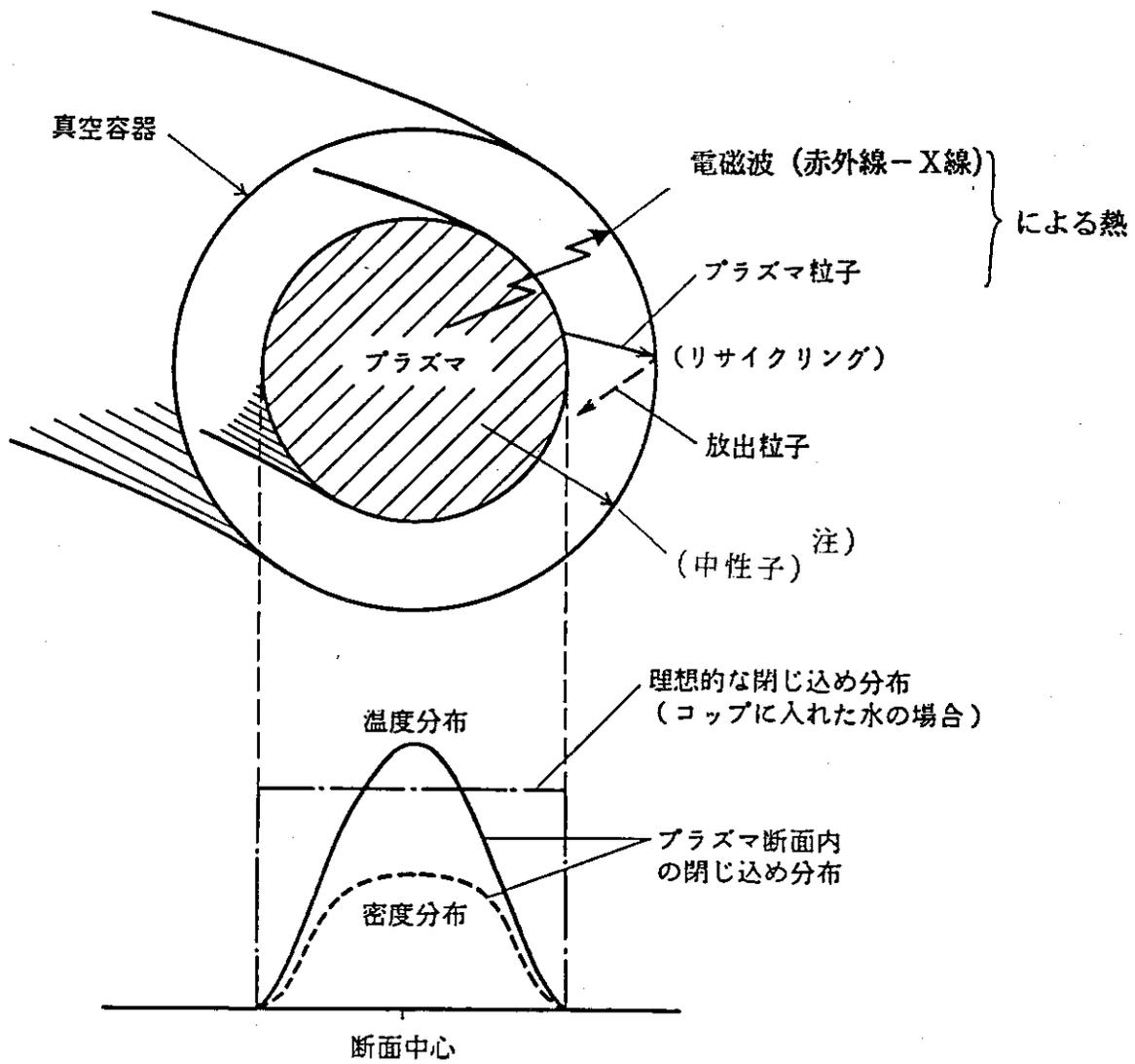
プラズマを作り、維持するために、水素（同位体）ガスを加熱する必要がある。3.4に述べたように、失われるエネルギーを外部から補いつつプラズマを維持する。エネルギーを補う（プラズマを加熱する）方法には、プラズマ自身のなかに電流を流すジュール加熱（オーミック加熱）が広く使われている。高周波加熱やビーム加熱もある。

プラズマの中には、燃料の水素同位体のイオンと電子があり、さらに、微量の不純物のイオンもある。イオンの種類ごとに異なる温度と密度をもち、電子はまた別の温度と密度を持っている。電荷を持つ粒子の集合なので、プラズマ中には場所ごとに強さと方向の異なる電場がある。このほかに、閉じ込め用の磁場があって、これも場所ごとに強さと方向が異なる。また、トカマクなどの場合には、プラズマ中に電流が流れており、電流密度の大きさも場所によって異なる。

プラズマ粒子は、外部から常温のガスの形で供給され、プラズマに触れると加熱されて電離し、プラズマ粒子になる。プラズマの中心部から流れ出る粒子は、真空容器の内面に当たって冷却され中性粒子になってふたたびプラズマ表面に戻るか、あるいは真空容器の内面に吸着される。同時に真空容器は粒子のエネルギーをもらって加熱される。逆に、真空容器の表面から粒子が放出されてプラズマ粒子を供給する現象も同時に起きている。このような、プラズマと真空容器の壁との間で粒子が循環する現象を「リサイクリング」という。

実燃料（DT）の場合には、かなり多量の高速中性子がプラズマから出るので、真空容器の壁は中性子の照射に強いものである必要がある。。

粒子もエネルギーも、理想的にはコップに水を入れるように、中心部で一様な高温高密度で、プラズマの端で急激にゼロになるような閉じ込めが望ましいが、実際にはコップの壁のような完全な壁はなく、中心で温度や密度が高く、端に近づくにしたがって徐々に温度密度が下がる分布となっている。



第3-9図 プラズマ断面内分布の例および第一壁との相互作用

注) 水素プラズマの場合は中性子は発生しない。重水素プラズマでは、少しの2.4MeV中性子がでる。実燃料のDTプラズマでは、かなりの14 MeV中性子が発生するので、中性子に強い材料が必要となる。

3.6 ベータ値

磁場閉じ込めの「良さ」を表わすパラメータに「ベータ値」がある。

これはプラズマの圧力（温度×密度）と磁場の圧力の比であり、磁場をどの位有効に利用しているかを表わすものである。

$$\text{ベータ値} = \frac{(\text{プラズマの温度}) \times (\text{プラズマの密度})}{(\text{磁場強度})^2 / 2\mu} \quad (\text{MKS単位系})$$

ベータ値が高いほど低い磁場で高い温度・密度のプラズマを閉じ込めることができる。すなわち、閉じ込め磁場を容易に作ることができ、装置全体の製作が易しくなる。将来の核融合炉には、5%以上のベータ値が必要である。

ベータ値は、「逆転磁場ピンチ」など「ピンチ型」と呼ばれる形式では数十パーセントと高いが、磁場が低いためであり、プラズマの温度・密度、すなわちプラズマ圧力としては高くない。現在、プラズマのパラメータとして最も高い値を得ているトカマク型では、1982年に日米協力のダブレットⅢで4.6%、1990年におなじくダブレットⅢで約10%の記録を出した。

最近のトカマク型磁場装置の研究では、プラズマを安定に閉じ込められるベータ値の最高値をあらわすトロヨン則（5.4）が得られている。

第3-10図は、世界の色々な磁場装置のベータ値を示したものである。プラズマの良さは、右さがりの斜め線で示したプラズマ圧力で比較出来る。

3.7 トーラス型閉じ込め磁場 (トロイダル型閉じ込め磁場)

磁力線に端が無いように工夫したドーナツ型の磁場を「トーラス磁場」、あるいは「トロイダル磁場」という。

ところが、単純に磁力線をトーラス型にただけでは、3.3で説明したドリフト運動で、プラズマは逃げだしてしまう。これを説明しよう。

ドーナツ型の磁力線は、第3-11図のように、コイルを円周上に並べて作るが、この時、プラズマの断面内では、磁場の強さがトーラス中心軸からの距離に反比例して外側にいくほど弱くなる。すると、まず第3-5図(a)の原理で、イオンは上へ、電子は下へドリフトする。このため、プラズマの中には、上から下へ向かう電場が出来る。そうすると、次には、この電場の影響で、第3-5図(b)の原理でイオンも電子もトーラスの外側にドリフトしてしまう。すなわち、単純なトーラス磁場ではプラズマ閉じ込めは出来ない。

この対策としては、第3-12図のように、磁力線を捻ったり、プラズマの方を捻る。これは、イオンや電子は主に磁力線に沿って走るの、これらプラズマ粒子がトーラスに沿って走るうちにトーラスの上部と下部を同じように経験して、トロイダル・ドリフトの効果を打ち消してしまうものである。上部に貯まるプラス電荷と下部に貯まるマイナス電荷を捻った磁力線をつないで中和してしまうものともいえる。この方法すなわち、磁力線を捻ることを「磁力線に”回転変換”を与える」という。

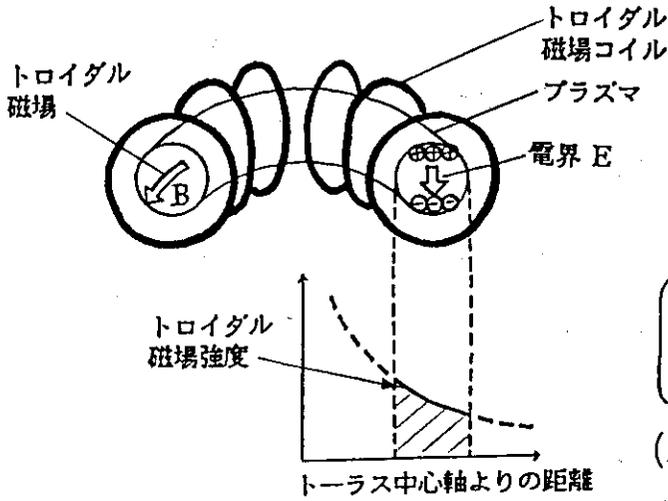
回転変換を与えると、トーラスに沿った磁力線は、らせん型に捻れながら一つのドーナツ面(トーラス面)の上をたどり、もとの点に戻る。磁力線がたどる閉じたトーラス面を「磁気面」という。

回転変換のあるトーラス磁場は、ちょうど長ねぎを輪ばにしように、無数に磁気面が重なったものである。いちばん中心部に(理論的には)一本の磁力線があり、これを「磁気軸」という。(第3-14図)

このような磁場の磁力線の捻り具合は、プラズマ断面の中心部と外側では異なるのが普通である。その場合、トーラスの磁力線を見通してみると、第3-14図のように、磁力線が編みものように交差して重なる。この状態を「(磁気)シアー」があるという。シアーがあると、局所的な磁場の乱れが発生しても、その上下の磁気面の磁力線が乱れを抑えるので、プラズマ閉じ込めの安定性が高い。これは、磁力線が、プラズマの閉じ込めに関しては、ちょうどゴム紐のような性質を持っているからである。

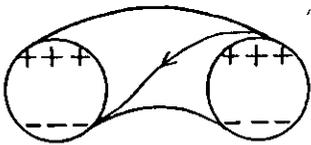
電流と磁場

プラズマ閉じ込めでは、「電流を右ねぎの進む方向に流すと、かならず右ねぎをまわす方向に磁場が出来る。」という原理(アンペアの右ねぎの法則)を至る所で使っている。電流は、プラズマの中の電流でも、コイルの中の電流でも同じである。プラズマ中の電流は、電子の流れ、あるいはイオンの流れ、あるいはこれらの和である。第2-2図のように、電子による電流の方向は、電子が流れる方向と逆方向であると定義する。

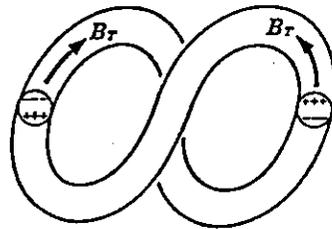


第3-11図
単純トラスにおける
トロイダル・ドリフト

3.3 に説明した ∇B ドリフトによりイオンが上へ、電子が下へドリフトする。
↓
(上から下に向かう電界 (E) が生じる。
↓
やはり 3.3 に説明した $E \times B$ ドリフトで、プラズマ全体がトラスの外側にドリフトする。



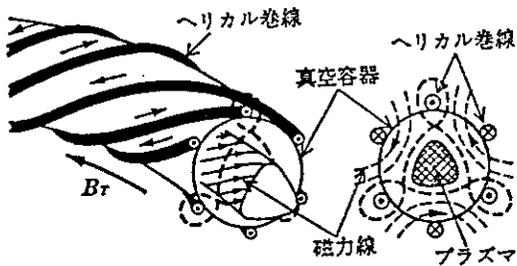
磁力線をひねって電荷を中和する。



8の字形トラス

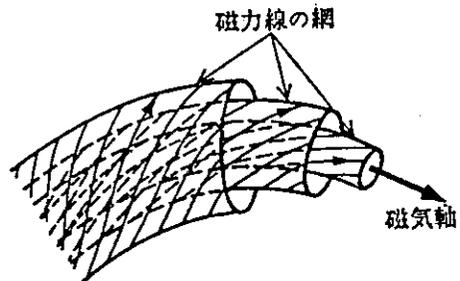
磁力線は8の字形でひねりはないが、一周のうちに外側と内側の両方を通るのでドリフト効果が打ち消される。

第3-12図 トロイダル・ドリフトの対策



第3-13図 ステラレータ磁場

ステラレータではヘリカルな磁場コイルによって磁力線をひねる。



第3-14図 磁気シアー

3.8 核融合炉の条件

磁場閉じ込め方式による核融合炉では、常にプラズマをなんらかの方法で加熱しつづける必要がある。(これは磁場による閉じ込めが完全なものではないからである。)このほか、発電所のなかで使う冷却機など色々な電力を核融合炉自身が消費する。これらのパワーよりも多くのパワーを発生して、発電所の外にパワーを供給しなければ役に立たない。(なお、以下では、一秒[単位時間]当たりのエネルギー量を論じるので、専ら「パワー」という。)

この観点から、核融合炉として必要な条件を考えることが出来る。

核融合発電所内のパワーの流れは、第3-15図のように表わすことが出来る。この図は、多くの場合を取り込めるように作っており、炉の形式によってはゼロとなる量も含んでいる。たとえば、アルファ粒子からの直接加熱のない形式($P_{\alpha d}=0$)も、外部プラズマ加熱のないもの($P_h=0$)も考えられている。

ここで、プラズマに直接関連のある部分だけを取り上げて、「臨界プラズマ条件、Break Even (plasma Condition)」と「自己点火条件、Self Ignition Condition」を定義する。

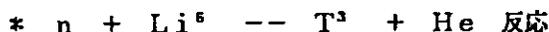
「臨界プラズマ条件」 --- 第3-15図の P_h と核融合反応で発生するパワー(P_f+P_b)が等しくなる条件(第3-16図)

「自己点火条件」 --- プラズマを外部から加熱しないで($P_h=0$)核融合反応が続く条件(第3-17図)

臨界プラズマ条件は、もしも効率100%のプラズマ加熱法があれば、プラズマと加熱装置からなる系の外部からパワーを供給しなくても核融合反応が続く条件である。自己点火条件は、第二段加熱がなくても反応が続く条件である。たとえて言えば、臨界プラズマ条件は、湿った木をバーナーであぶりながら燃やす場合で、木はくすぶりながら燃え、あるパワーを発生する。バーナーを外すと消えてしまう不完全な燃えかたであるが、くすぶって出てくるパワーとバーナーで与えるパワーが等しく、バーナーと木からなる系全体としては、パワーの損得がない状態である。自己点火条件はバーナーがなくても、木が燃え続ける条件である。

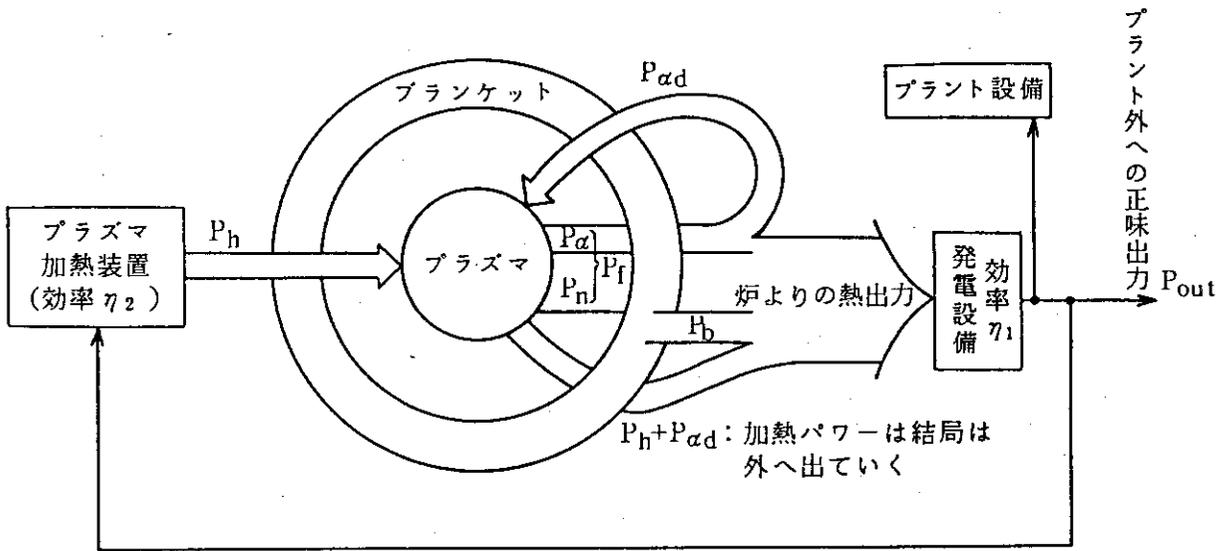
さて、核融合炉の出力パワーは、つぎのように分類出来る。

DT反応	プラズマ粒子のうち、 熱化した成分による反応	熱化しない成分 による反応
中性子(14MeV/反応)	1	4
アルファ粒子(3.5MeV/反応)	2	5
ブランケット内での 反応出力(4.8MeV/反応*)	3	6



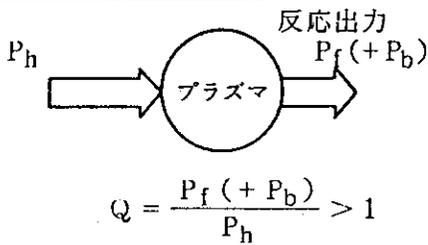
この表の内のどの部分を考えるか、また、非熱化成分としてどんなもの考えるかによって、臨界プラズマ条件、自己点火条件も、いく通りかの値(曲線)がある。広く使われているものは、1、2、3を考慮したもので、自己点火条件は、 $P_h=0$ で、5をすべてプラズマの自己加熱に利用すると仮定したものである。

p. 17のローソン図は、プラズマの温度などの特性を表わすもので、自己点火条件については、反応出力の何パーセントをプラズマ加熱に使うかによって中が出来る。臨界プラズマ条件については、(第二段)プラズマ加熱の方法やプラズマの寸法、プラズマ断面内の密度などの分布の様子によって中が出来る。

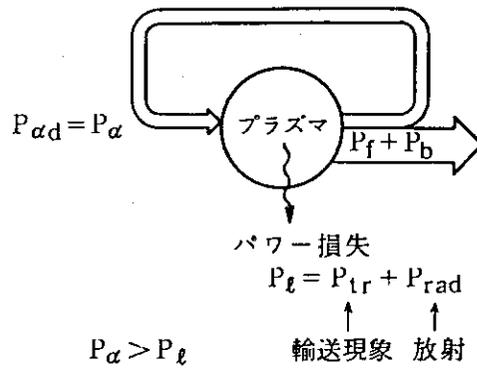


第3-15図 核融合発電プラント内のパワーの流れ

- P_h : (外部) プラズマ加熱パワー
- $P_{\alpha d}$: α 粒子による直接プラズマ加熱パワー
- P_α : 核融合出力のうち α 粒子分
- P_n : 核融合出力のうち中性子分
- P_f : 合計の核融合反応出力: $P_f = P_\alpha + P_n$
- P_b : ブランケット内での核発熱分
- η : パワー帰還率: $\eta = \eta_1 \cdot \eta_2$



第3-16図 臨界プラズマ条件



第3-17図 自己点火条件

パワー利得率 Q :

核融合反応で発生するパワーの大きさとプラズマを外部から加熱するパワーとの比を「パワー利得率:

Q 」で表わす。 $Q = \frac{\text{(核融合反応出力パワー)}}{\text{(プラズマ加熱パワー)}}$

外部加熱パワーがないとき ($P_h = 0$) は、 Q は無限大である。

直接発電 :

プラズマからでてくるイオンや電子 (荷電粒子) を使って直接発電をするアイデアもある。すなわち、逆方向 (減速の方向) の電界のなかにイオンや電子を通して、イオンや電子の運動エネルギーを電気エネルギーに変換するもの。DT反応で生じるアルファ粒子 (ヘリウム・イオン) のエネルギーを取り出すためには使える可能性がある。ダイバータの部分ではこの方法が使いやすいものと思われる。

4. トカマク型核融合装置

本書では、1968年以来、つぎつぎとプラズマの温度、閉じ込め時間の記録を書き替えて世界の核融合研究開発を先導しているトカマク型装置を中心に解説しているが、本章は、トカマク型装置の仕組みとプラズマの生成、制御について説明する。

4.1 トカマクの歴史 (第4-1図)

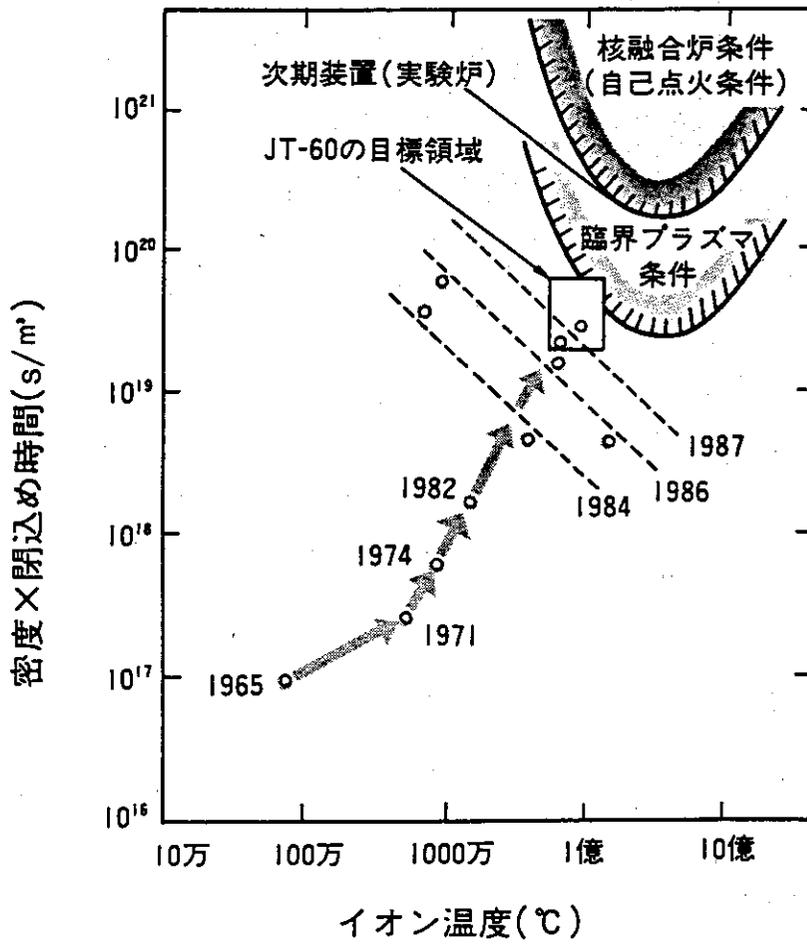
トカマクは、1950年代にソ連で考えられ、実験が始まった磁場形式で、トーラス型(ドーナツ型)の強い磁場でプラズマを閉じ込める装置である。「トカ」がロシア語で電流を意味することで示されるように、トーラス上のプラズマ環に沿ってプラズマ中に電流を流すことが特徴で、このプラズマ電流が重要な役割を持っている。

1960年代末までは専らソ連だけで実験が行なわれていた。その頃は、トーラスの主半径が0.5-1m程度の大きさで、世界を驚かせたT-3装置は主半径1mであった。1968年にT-3の成果がでてから、米国でSTトカマク、日本でJFT-2が作られて世界中で実験が始まった。その後、我が国でも多くの大学で主半径30cm程度の小型トカマクが多数作られた。1975年に米国でPLTが実験を開始し、主半径1.5m級トカマクの時代になった。このクラスの装置には、PLTの他、T-10(ソ)、PDX(米、PBXに改造)、ダブレットⅢ(米)、ASDEX(西独)がある。我が国は、このレベルの装置建設を断念し、一足飛びに次の世代の装置であるJT-60の設計、建設を行なった。(注)

1975年頃に、早くもトカマクによって"Break-Even Plasma Condition"を実現しようという計画が各国でたてられた。米国のTFTR、ヨーロッパのJET、ソ連のT-15、それに我が国のJT-60である。TFTRは、1982年に運転を開始し、主半径3m級の装置の時代が始まった。JT-60は1985年に運転を開始し、1987年には目標とした広義の臨界プラズマ条件に達した。このうち、T-15は1988年現在まだ建設中である。

各国とも、今後の開発もトカマク型としており、実験炉、原型炉、実証炉の三世代の試験装置を経て、実用炉にいたる計画である。

(注) 我が国は日米協力のダブレットⅢで1.3m級装置の経験を得た。



第4-1図 世界のトカマク型試験装置のプラズマ性能の進展

(○は、世界のトカマクのトップデータの進展を示す。
四角の枠は、JT-60に設定された臨界プラズマ条件(目
標領域)を示す。曲線は熱化されたイオンの起こす核融
合反応のみを考慮した臨界プラズマ条件を示す。)

4. 2 トカマクの原理

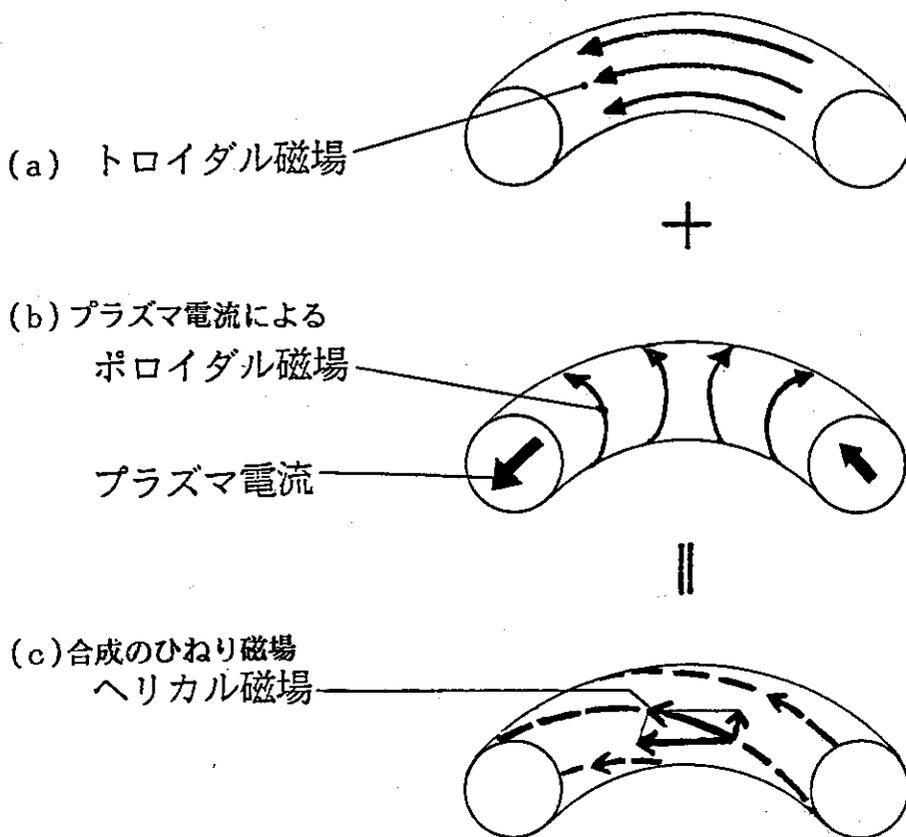
トカマク型磁場の原理を、第4-2図で説明しよう。

トカマク型に限らず、ドーナツ型（トーラス型）の磁場でプラズマを閉じ込めるためには、磁力線をドーナツに沿ってひねる必要がある。磁力線をひねる方法によって、磁場形式が区別され、トカマク型では、磁力線をひねるための特別のコイルを設けず、プラズマのなかにドーナツに沿って電流を流す。即ち、まず、(a)のようにドーナツ型の強い磁場（トロイダル磁場）を作る。次に、この磁場に沿って(b)のようにプラズマ電流を流すと、プラズマ電流によってポロイダル方向の磁場が生じる。この結果、もとのトロイダル磁場との合成で、磁力線は(c)のようにドーナツに沿ってひねれた磁場となる。トカマク型では、トロイダル磁場がポロイダル磁場よりもかなりつよく、磁力線のひねりの程度はそれ程大きくはない。ドーナツに沿って一周すると、ドーナツの断面を $1/10 - 1/3$ 回る程度である。

一方、プラズマのなかに電流を流すと、プラズマの電気抵抗により、電熱器と同じように発熱する。すなわち、プラズマが加熱される。実は、プラズマのなかに電流を流す方法は、最初にプラズマの研究が始まったとき以来、プラズマを作り、加熱する最もポピュラーな方法である。これを「ジュール加熱」または「オーミック加熱」という。

このように、トカマクでは、プラズマ電流が、プラズマ閉じ込めとプラズマ加熱の両方のために不可欠である。

- (注) ・ ステラレータ型磁場では、ドーナツに沿ってヘリカル型のコイルを設けて磁力線をひねる。この場合は、ドーナツを一周すると磁力線は十回程度断面をまわる。
- ・ プラズマ電流によるプラズマの加熱は、高温になると効率が悪くなり、2-3千万度以上に加熱することは難しい。（水素同位体以外の不純物があれば温度はあがるが、核融合炉には使えない。）
 - ・ ジュール加熱以外の方法による加熱を「第二段加熱」あるいは「追加熱」という。
 - ・ トカマク型ではプラズマ閉じ込めのためには、プラズマ電流が不可欠である。この点は、後で説明するように、トカマク型磁場の弱点でもある。この弱点を解決するものが非誘導電流駆動である。

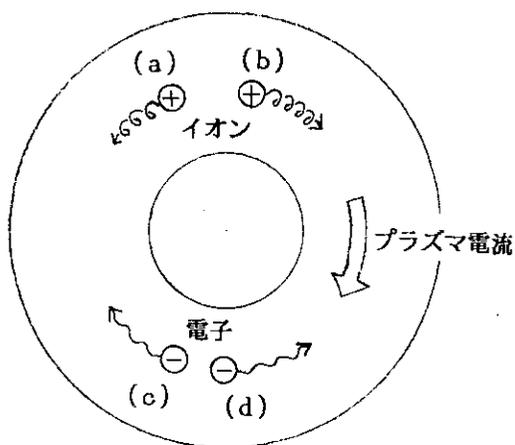


第4-2図 トカマク型磁場

プラズマの電流の作るポロイダル磁場によって、ひねり（ヘリカル）磁場とする。

トカマクのプラズマ電流

電気を持った粒子である電子あるいはイオンが動くときそれが電流である。トカマクのなかでは、電子とイオンが磁力線に朝顔のつるのように絡みついて運動しているため、プラズマのなかには電流が常に流れている。ただし、我々がいつも「プラズマ電流」というのは、ドーナツに沿って一周する電流であり、これに寄与するのは、右の図の場合、プラズマ電流と同じ方向に回るイオン（図の (b)）とプラズマ電流とは反対方向に回る電子（図の (d)）である。これらと反対方向に運動している (a) や (c) は、プラズマ電流を打ち消す効果を持つ。実際、a と b、あるいは c と d の数あるいは速度にほんの僅かな差があればかなり大きなプラズマ電流となる。全体としてみれば、イオンや電子はほとんどメチャクチャな方向に（ランダムな方向に）運動している。



トカマクを上から見た図

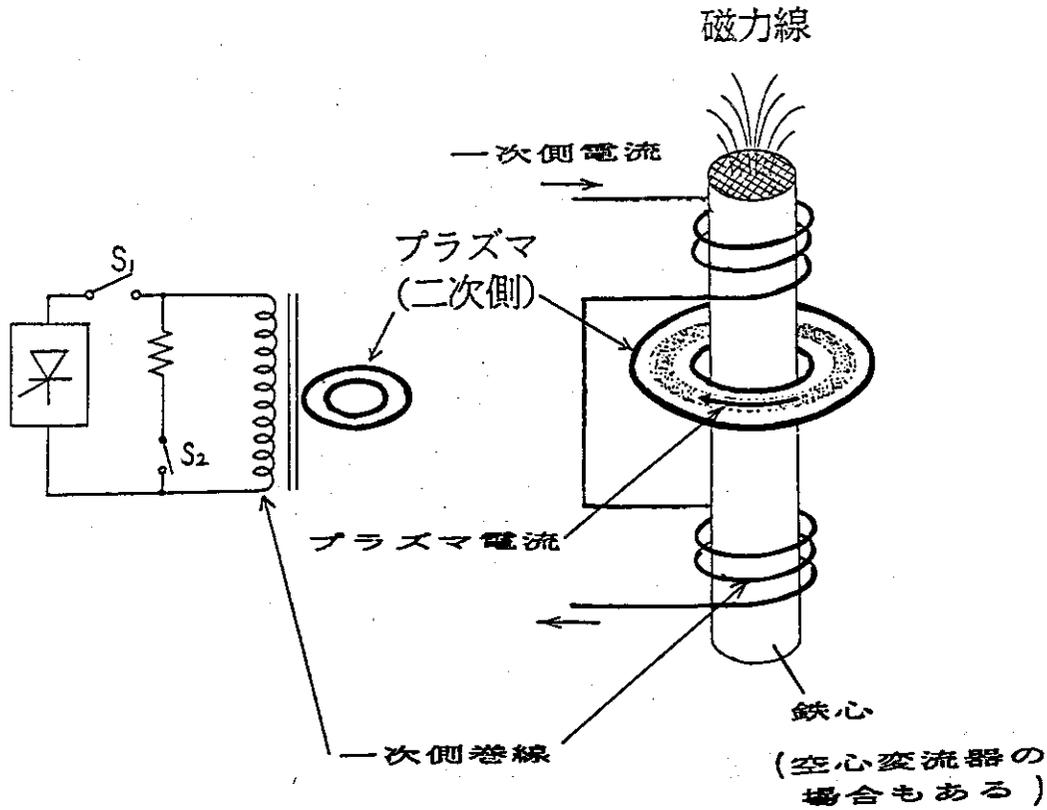
4.3 プラズマ電流の誘起

ドーナツに沿ってプラズマ電流を流すには、サークライン蛍光灯のように電極を入れるわけにはいかず、変圧器の原理（電磁誘導の原理）を使う。すなわち、電流を通す輪（ループ）があるとき、そのなかを通り抜ける磁力線が時間的に変化すると、その輪に電流が流れる、という原理を使う（第4-3図）。

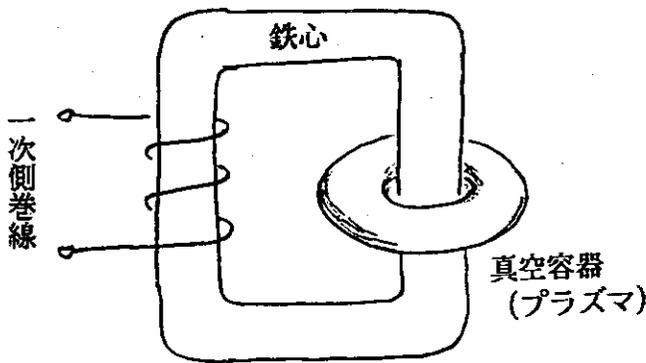
まず、プラズマを入れるドーナツ型の真空容器の輪のなかに鉄心を通し、同じ鉄心に一次側巻き線を巻く。すなわち、ドーナツ型真空容器の中のプラズマを一回巻きの二次側巻き線とする変圧器にするわけである。普通の変圧器であれば、一次側に交流電流を加えて二次側にも交流電流を作るが、交流では一サイクルごとに電流が切れて方向が変わってしまう。トカマクでは、一方向の電流をなるべく長く流し続けたい。そこで、トカマクではたとえば、コンデンサーを電源として一次巻き線に急に電流を流しはじめ、一定時間後に電流を止める。そうすると、ドーナツを通り抜ける磁力線が急にふえるときにプラズマ電流が流れはじめ、一次側巻き線の電流が減りはじめるまで続く。このとき、プラズマ電流は、変圧器の原理にしたがって、一次巻き線の電流よりも巻き数倍だけ大きな電流が流れる。例えば、一次巻き線が百回巻きの時は、一次側に1 kA流すと、プラズマには100 kAも流れる。トカマクでは電圧ではなく電流に着目しているので、「変流器」という。

実際には、磁力線を効率良くドーナツの中を通すため、第4-4図のように鉄心を輪にする。さらに、PLT以後、トカマクが大きくなると、磁力線が多くなって（磁場が強くなって）、鉄心が飽和して効果がなくなるので、鉄心のないトカマクが多くなった。これを、「空心」変流器という。この場合は、磁力線を効率良く利用するため、一回巻き線（「変流器コイル」）をプラズマのすぐ近くに巻く。第4-5図は、JT-60の例でドーナツ型のプラズマ（真空容器）は、この図のコイルの真ん中のドーナツ型の空間にある。

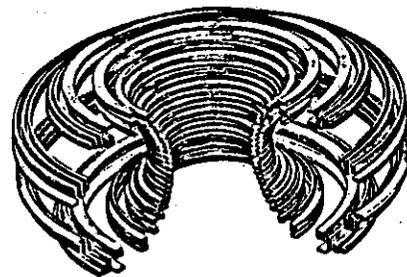
なお、変流器によらずに、高周波などでプラズマ電流を流す「（非誘導）電流駆動」が最近の重要な研究課題である。



第4-3図 プラズマ電流の誘起
ファラデーの電磁誘導の法則
(変圧器の原理) による。



第4-4図 鉄心型変流器



第4-5図 空心変流器
ドーナツ状に空いた空間に真空容器を
おいてプラズマ電流を誘起する。

- (注)
- ・ ドーナツに沿ってプラズマ中に生じる電界の強さは、変流器コイルの磁力線の量の時間変化率に比例する。プラズマ生成の初期には、大きな電界が必要であるが、出来たプラズマを維持するだけには、一周電圧 (ループ電圧 V_{1000}) で、1ボルト程度あれば良い。
 - ・ 空心変流器の場合には、まずゆっくりと (プラズマを発生するような大きな電界を作らないように) 一次巻き線の電流を増やし、急にその電流を減らして (遮断して)、初期に必要な大きな電界を作ることが多い。こうすれば、電圧の高い大きな電源が要らないからである。第4-3図の左はその回路で、電流遮断時にS1を開き、S2を閉じる。S2をつけず、接続したままでも良い。

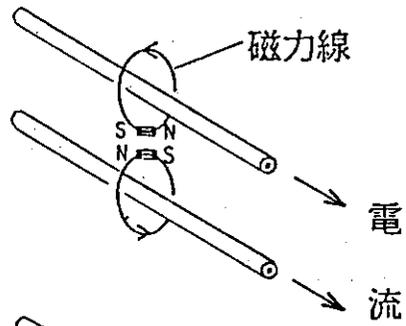
4.4 プラズマの位置形状制御

一般に、平行して流れる電流の間には、吸引力、あるいは、反発力が働く。第4-6図に示すように、同じ向き電流同志は引き合い、逆方向電流同志は反発する。それは次のように説明出来る。すなわち、電流が流れると、その回りに電流の流れるほうに向かって時計まわりの磁力線が出来る。空間の小さな部分をとってみると、磁力線がちょうど図のような小さな棒磁石があるときと同じようになっている。二つの棒磁石の間に力が働くことを考えれば、電流の間に力が働くことが理解出来るであろう。

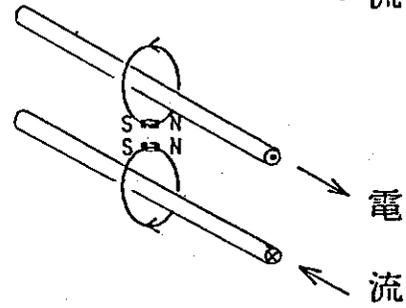
トカマクでは、幸いプラズマに電流が流れているので、上記の原理でプラズマの位置や形状を制御することが出来る。すなわち、第4-7図のようにプラズマに平行にドーナツに沿ったコイルを設置してプラズマを押ししたり引いたりして制御することが出来る。同図(a)は、内側の二本にプラズマ電流と同方向の電流を、外側の二本に逆方向の電流を流してプラズマを内側に寄せる例である。プラズマ電流がないとして四本のコイルで作る磁場を考えると、下向きに垂直の磁場であり、この「垂直磁場」とプラズマ電流の相互作用を考えてもプラズマには内向きの力が働く。同図(b)の場合も同じように、上二本と下二本のコイルで「水平磁場」を作って、プラズマを上方向へ動かす例である。

また、第4-8図のように、プラズマ断面の一部分を引き出したり押しつぶして、断面の形状を制御することも出来る。同図では、上下のコイルでプラズマ断面を上下に引き伸ばし、横にある二本のコイルで押しつぶして、プラズマ断面を楕円形にする例である。トカマクでは、このようにプラズマの断面を非円形、特にD型にすることがよいとされている。

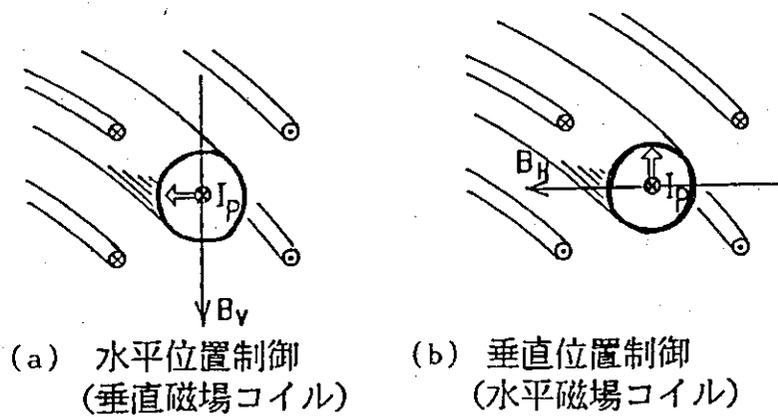
・同じ向きの電流には
引力



・逆向きの電流には
反発力



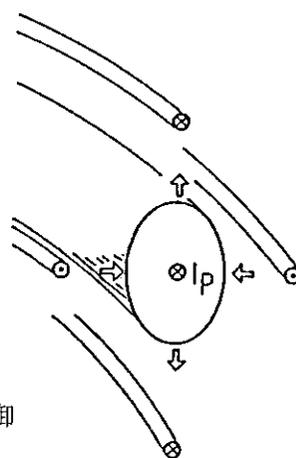
第4-6図 プラズマ位置形状制御の原理



(a) 水平位置制御
(垂直磁場コイル)

(b) 垂直位置制御
(水平磁場コイル)

第4-7図 プラズマ位置の制御



第4-8図 プラズマ断面形状の制御

(四重極磁場コイル)

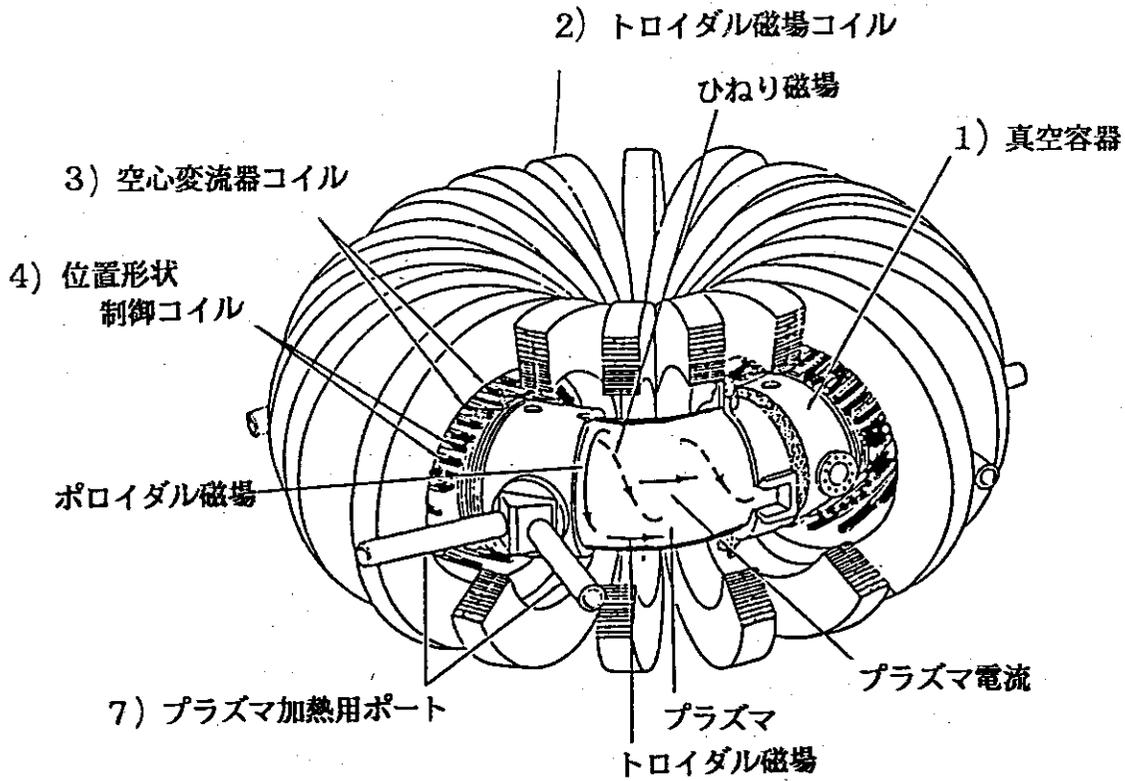
4.5 トカマクの構成

トカマクは、今までに述べた要素を組合せて作られている。すなわち、

- 1) ドーナツ型の真空容器と真空排気ポンプ
- 2) トロイダル磁場コイル
- 3) 変流器コイル
- 4) 位置形状制御用コイル } ポロイダル磁場コイル
- 5) 上記の各種コイル用の制御電源
- 6) コイルなどの冷却装置
- 7) プラズマ加熱装置 (高エネルギー・ビーム、高周波など) (注)
- 8) プラズマ計測装置

これらのうち、1) - 4) をまとめて「本体」と呼び、その例を第4-9図に示す。この例は、米国のPLT、あるいは我が国の原研のJT-60と同じ例で、鉄心がなく、空心変流器方式である。また、トロイダル磁場コイルとポロイダル磁場コイルが鎖交 (Interlink) するので、製作、組み立てが難しい。その困難を避けるため、ポロイダル磁場コイルをトロイダル磁場コイルの外に設置して、鎖交を避けることも出来る (第4-1表)。特に、これから将来に作るトカマクでは、超電導コイルを使うが、超電導コイルは組み立て中に接続出来ないので、鎖交しないようにせざるをえない。ただし、そうすると、位置制御用のコイルがプラズマから遠くなるので、制御用に大きな電源が必要となる欠点もある。

(注) プラズマ電流によるジュール加熱以外の方法でプラズマを加熱する装置。これがなく、ジュール加熱のみのトカマクもある。



第4-9図 トカマクの構成

第4-1表 主なトカマク装置

装置名	完成年	主半径 (m)	副半径 (m)	磁場強度 (テスラ、T)	国
T-3	1967	1.0	0.15	3.4	ソ連
JFT-2	1972	0.9	0.25	1.8	日
TFR	1973	0.98	0.20	6.0	仏
PLT	1975	1.3	0.45	3.5	米
JT-60	1985	3.0	0.95	4.5	日
核融合炉設計例		7.0	2.0	5.2	

4.6 トカマクの運転

トカマクが実際どのように運転されているか、プラズマの生成・制御と保持がどのようになっているかを見てみよう。

まず、今のトカマクは、数分間に一回、一秒間程度だけプラズマを作るパルス運転（間欠運転）をする。（4.6 補足の2. 参照） 小型トカマクでは、1-2分に一回、0.1 - 1秒間、JT-60のような大型トカマクでは、10分に一回、10秒間、プラズマを作る。第4-10図は、JT-60の場合の運転を示した図である。

(a) は、トロイダル磁場の時間変化で、トロイダル磁場が設定値になっている間（フラットトップ）に、短時間だけプラズマを作る。トロイダル磁場コイルの時定数は、その他のパラメータの時間変化よりもずっと長い。JT-60では、約30秒かけて磁場を立ち上げる。(b) 以下は、(a) の一部分の時間だけを引き伸ばして示した。

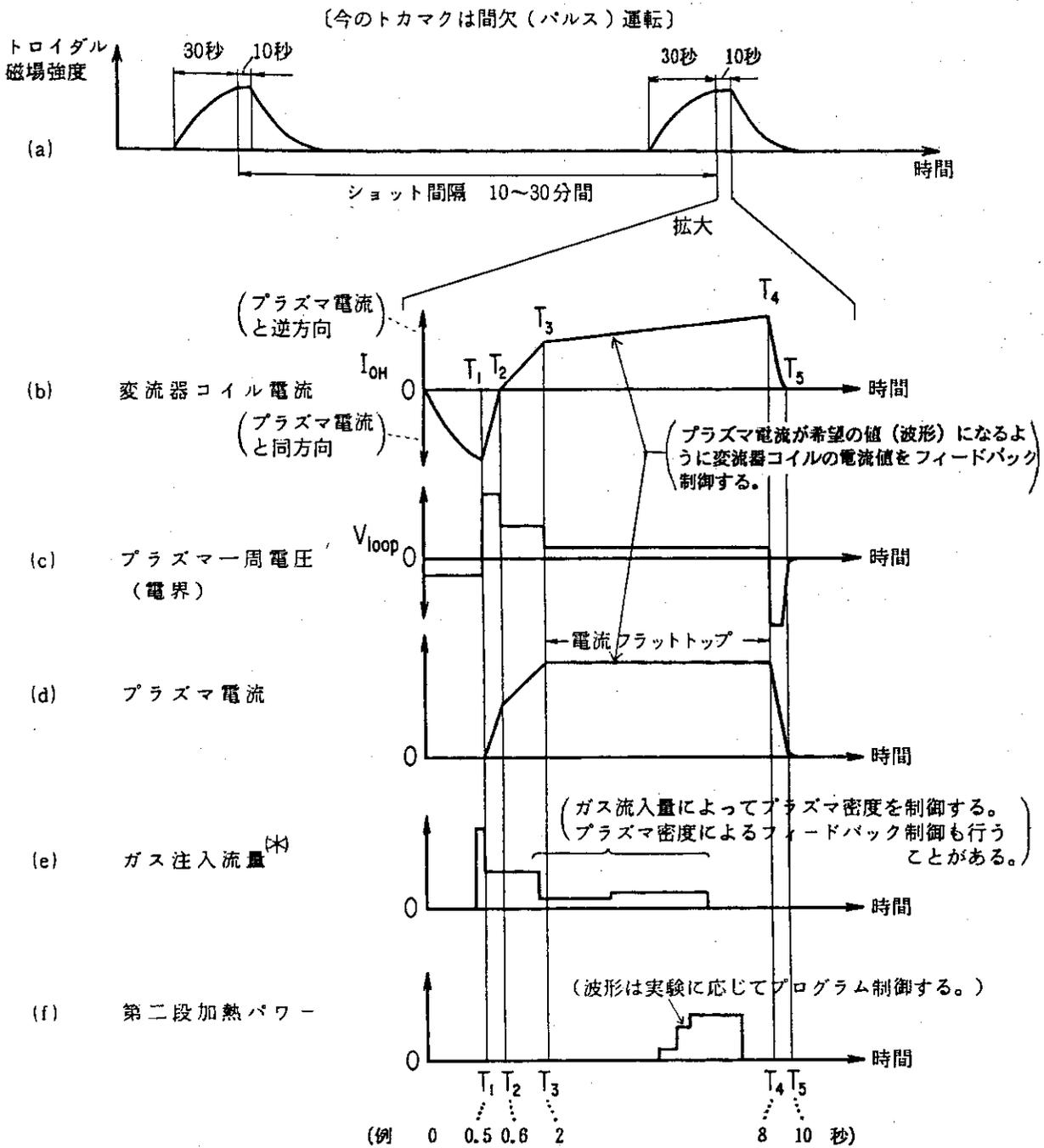
(b) 変流器コイル電流： p.53脚注の方法で、プラズマを作る前にコイルの電流をふやす。（プラズマ電流を流したい方向に。これをマイナス方向とする。）T1に電流遮断を開始して、プラズマ環に高い電界（一周電圧）をかける。T2までは、遮断用抵抗の大きさで波形が決まる。T3以降は、電源の極性を切り替えて接続し、電流波形を自由に制御する。

(c) プラズマ中の電界（一周電圧）： (b) の時間変化率（微分）に等しい。

(d) プラズマ電流： プラズマ電流は、予め波形を決めておいて、実際の電流が予定の波形になるように、変流器コイルの電流を（一周電圧を）制御する。右図の場合はT3で設定したプラズマ電流値に達し、T4まで一定に保つ。（電流フラットトップ）T4からT5まで終了のプロセスを行なう。

(e) ガス注入流量： プラズマのもとになる水素ガスを普通のガスの形で電磁弁で流量を制御しながら真空容器のなかに供給する。T1でプラズマを作り始める直前、0.01秒ぐらい前にガス注入を開始する。ショット間は真空でガスはない。また、プラズマが消滅した後は、真空ポンプで再び真空に引く。

(f) 第二段加熱パワー： 高エネルギー・ビームや高周波によるプラズマ加熱で、普通はプラズマ電流フラットトップの後半で、電流で加熱（ジュール加熱）されたプラズマの状態が定常状態になってから行なう。加熱のパワーは、たとえばこの図のように任意に制御出来るのが普通である。



(※) 外部から注入する流量：真空容器内にあるガス量は、この時間積分値から、真空ポンプで排出される量と、壁に吸着した量を差引いた値である。(場合によっては、壁から放出されるガス量を考える必要もある。)

第4-10図 トカマクの運転(数値はJT-60の例)

(4.6 補足) トカマク装置の補足説明

1. 変流器によるプラズマ電流の誘起

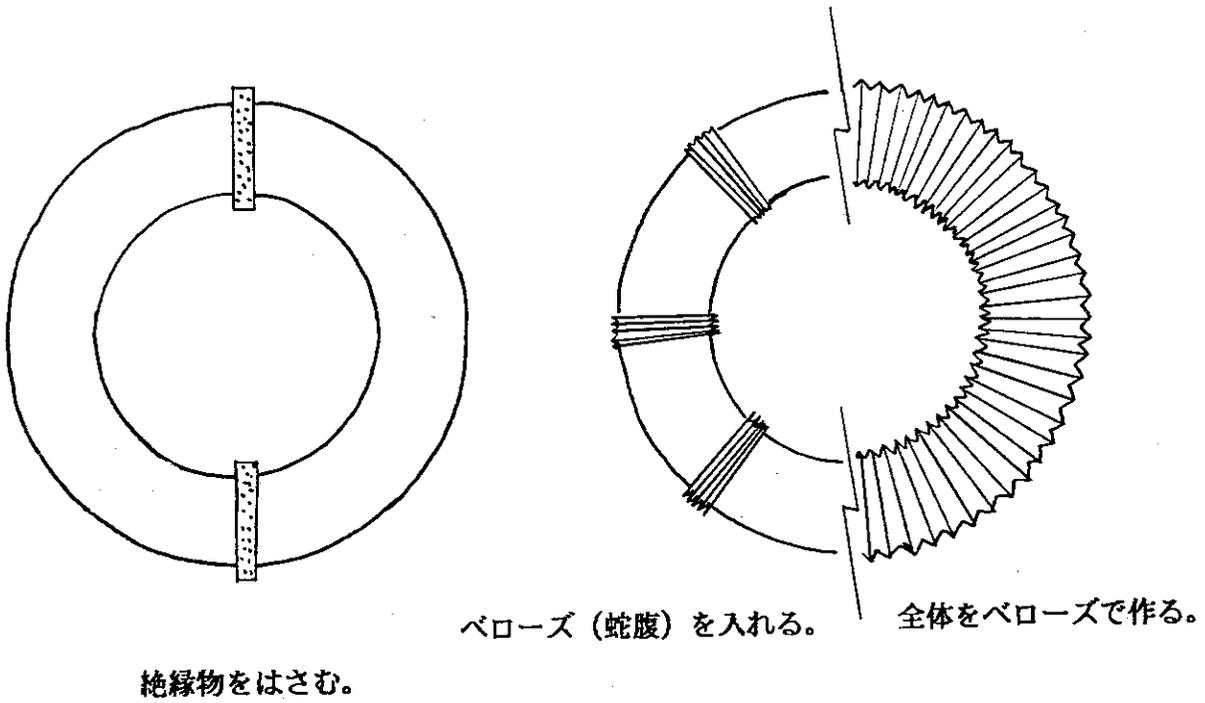
磁束（磁力線）の量の変化で電流を誘起するが、二次側の電流ループとしては、プラズマ環に限らず、電流が流れ得る金属など導体で出来たループにはすべて電流が流れる可能性がある。真空容器はその最も可能性の高いものであり、セラミックのような絶縁物の部分を設けてたり、薄肉の金属で真空容器全体を作り、あるいは、薄肉の（ペローズ、蛇腹）部分を設けて一周の電気抵抗を高くする。トカマク本体を支持する架台などの構造についても同じことで、出来るだけドーナツに沿っての電流ループを作らないようにする（第4-11図）。

2. トカマクの定常化——超電導コイルと電流駆動

現在の殆どのトカマクがパルス運転である理由は二つある。一つは、トロイダル磁場を作るコイルが銅で出来ていること、もう一つには、プラズマ電流を誘起するために変流器コイルを使っているためである。すなわち、銅の電気抵抗による発熱のために、強い磁場を長時間作ると銅の熱膨張による応力でコイルが壊れる恐れがあり、さらには、熱のために融けてしまう。また、電源容量の点でも、JT-60のような大きさのトカマクでは、長時間の運転は出来ない。実際、JT-60は、商用電力系統からの電力だけでは運転出来ず、水力発電機と同様な大容量の自家発電装置（フライホイールつき電動発電機）を使っている。超電導コイルを使えば、永久（定常）的な磁場を、電力を使わないで作ることが出来る。また、変流器コイルについては、第4-10図（b）のT3以降（プラズマ電流フラットトップ）、プラズマの電気抵抗で生じる一周電圧分だけ変流器コイルの電流を増やし続けなければならない。変流器コイルの許容電流値に達したらT4のようにプラズマ電流を切らなければならない。すなわち、現在までのトカマクは、この点からも定常運転（直流運転）は出来ず、パルス運転をしている。変流器を使わないでプラズマ電流を流せば、定常的にプラズマ電流を流すことが出来る。（非誘導電流駆動）

3. 中性ガスからプラズマへの電離過程

プラズマ生成の最初に、普通の中性ガスからプラズマになる過程は、電界で電子（及びイオン）が加速されて中性粒子を電離する雪崩現象である。最初の電子がどうして発生するかはなぞである。電子ビームなどで予備電離をすることもあるが、たいていのトカマクでは、その必要はない。自然の宇宙線による電離とも考えられている。



第4-11図 真空容器や支持構造は、プラズマ環に沿っての一周電気抵抗を出来るだけ高くする。

トカマクの定常化 (現在は、パルス間欠運転)

- ・磁場 ----- 超電導コイル
- ・プラズマ電流誘起 ---- 非誘導電流駆動 (高周波、ビームなど)

5. トカマク・プラズマの科学

5.1 安定係数 (q)

トカマクの磁力線はひねれているが、そのひねれ具合 (の逆数) を「安定係数」といい q であらわす。その定義は、ひねれた磁場をトロイダル方向成分 B_t とそれに直角なポロイダル成分 B_p とに分け、主半径 R とドーナツの断面の半径 (副半径) a をもちいて、

$$q = \frac{a}{R} \frac{B_t}{B_p}$$

である。 B_p はプラズマ電流 I_p によって生じるものであり、プラズマ表面での値は、円形断面の場合、

$$B_p = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$

と表わされる。表面での q の値を、半径 $r = a$ での値という意味で、 qa と書く。

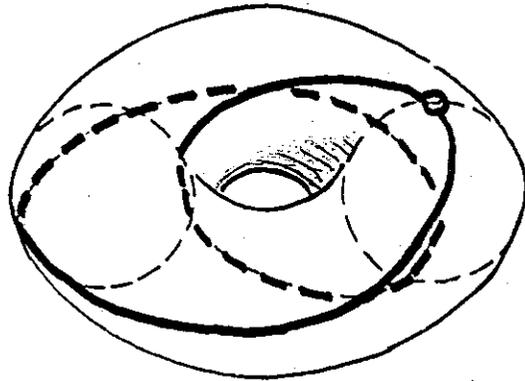
q は、第 5-1 図に示すように、ひねれた磁力線が、何回ドーナツを回るともとに戻るか、をしめす数である。 q が小さいほど、ひねれ具合が大きい。

プラズマ電流 I_p を増やしていくと、 q は、無限大から段々減っていく。そして、 $q = 1$ になる電流値が、理論的な電流の上限である。実際には、この上限値には達さず、半分程度がせいぜいである。($q = 2$ 程度まで。)

q 値と不安定性

磁力線は、トラスに沿って q 回まわると元の位置にもどってくる。 q が無理数のところでは、何回まわっても、元の位置に戻らない。

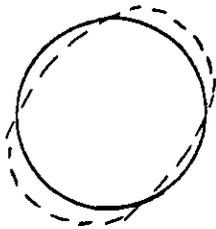
さて、プラズマの粒子は、主に磁力線に沿って動くので、プラズマの形状などの微小な変動も磁力線に沿って伝搬する。したがって、磁力線が短い距離で元に戻るときは、なんらかの拍子に発生した変動がすぐまた不安定な領域に戻ってきて、さらに大きく成長しやすい。すなわち、 q が 1、2、3 のような整数の場合、プラズマは不安定である。 $q = 1$ は、絶対に不安定であり、これがトカマクのプラズマ電流の理論的限界 (クルスカール-シャフランフ限界) である。 $q = 1、2、3$ の場合のプラズマ断面の変形は、第 5-2 図のような、花弁状の変形である。専門用語では、キンク不安定性という。



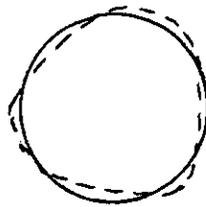
($q=2$ の場合)

第5-1図 安定係数 q

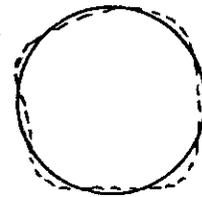
磁力線は、ドーナツの大円を q 回
まわってもとに戻る。



$q=2$ のとき
 $m=2$ モード



$q=3$ のとき
 $m=3$ モード



$q=4$ のとき
 $m=4$ モード

第5-2図 プラズマ断面の変形

5.2 ディスラプション

「ディスラプション」は、トカマクのプラズマ電流が突然急に消滅する現象である。「破壊的不安定性」と翻訳されることもあるが、装置が壊れるようなことはなく、プラズマの形状（磁場との力学的平衡状態）が壊れるという意味である。

この現象が起こると、真空容器やコイルに大きな電磁力が働き、また、プラズマが持っていた熱（エネルギー）が短時間のうちに真空容器内面の一部分に集中するので、これに耐えるように装置を設計する必要がある。大型の装置では、ディスラプションがなければ、設計がかなり楽になる。ディスラプションを避けるようなプラズマ制御の開発は、今後の重要な研究課題である。

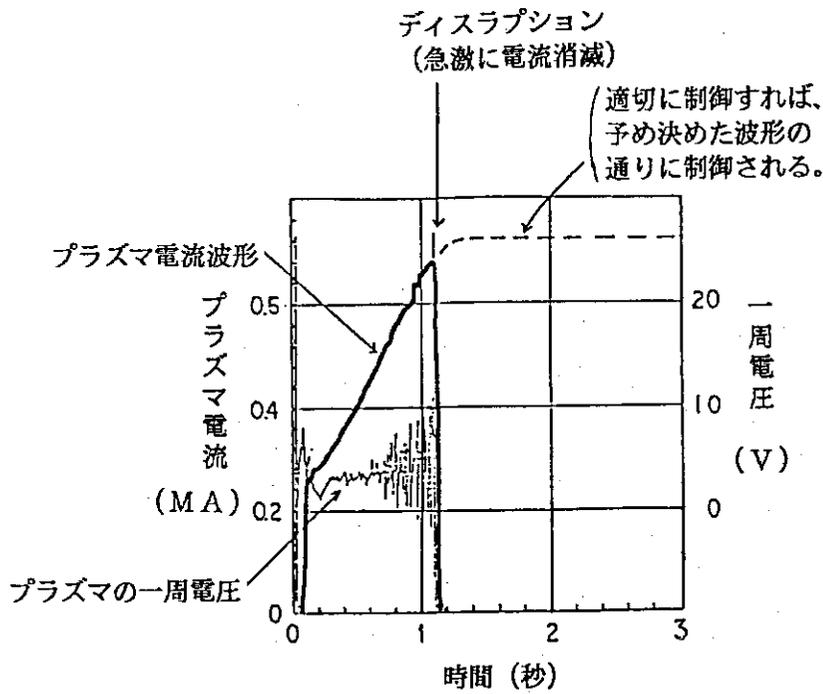
ディスラプションの原因は、プラズマ形状の変形（不安定性）が成長するためである。この最もあり得る説明は、プラズマ断面内のどこかで、安定係数 q が 1、2、3 のような小さな整数になることである。

電流分布とディスラプション

ディスラプションは、プラズマ断面のどこかで $q=1$ になることが原因であると考えられている。もしも、プラズマ電流のプラズマ断面の中での分布が、プラズマ断面中心付近に集中すると、プラズマ断面の中心付近で $q=1$ となり、ディスラプションが起こる。

ディスラプションによる電磁力

ディスラプションでプラズマ電流が急激に消滅すると、先に説明した変流器の原理で、プラズマと同じようなループを作るすべての部分に電流が流れようとする。プラズマに最も近い真空容器及びそのなかにある構造物には最もディスラプション時の電流が流れやすい。プラズマは、たいていの場合、位置も急激に変えながらディスラプションするので、トーラスに沿ったループがなくても電流が流れる。たとえば、第5-5図 (a) のように、真空容器内面に導体があったとき、これにループ電流が流れると、強いトロイダル磁場との相互作用で、 $I \times B$ の電磁力が発生する。この力は、図のように、板を片方の端では真空容器に押し付け、他端では真空容器から引き剥がすような力である。トロイダル方向の電流には、殆ど電磁力はかからない。したがって、図のように板を入れたいときは、トロイダル方向に長い板にすると良い。また、真空容器の電気抵抗が、トーラスに沿って一様でない時は、同図 (b) のように、ループ電流が流れ、真空容器を部分的に上下に折り曲げるような力が加わる。

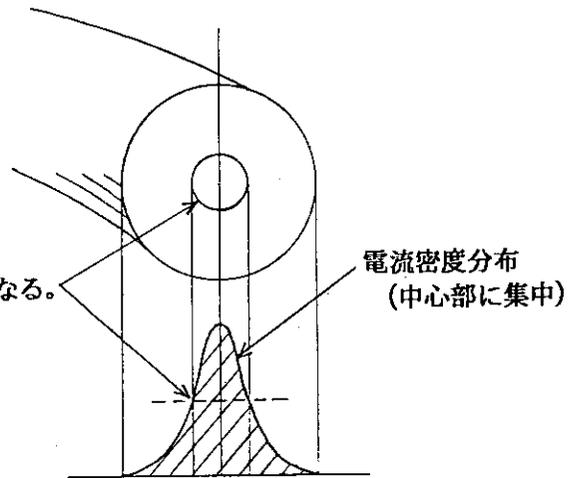


第5-3図 ディスラプション現象の例 (JT-60の例)

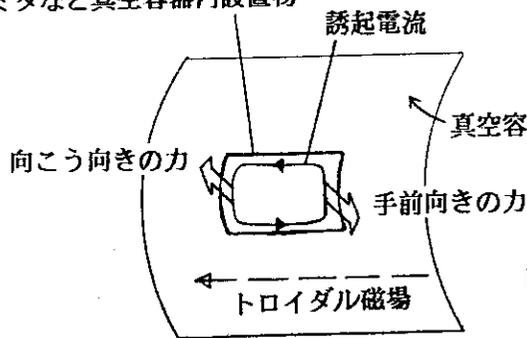
第5-4図

電流密度の分布が中心部にピークをもつと、 $q=1$ となる磁気面ができる。

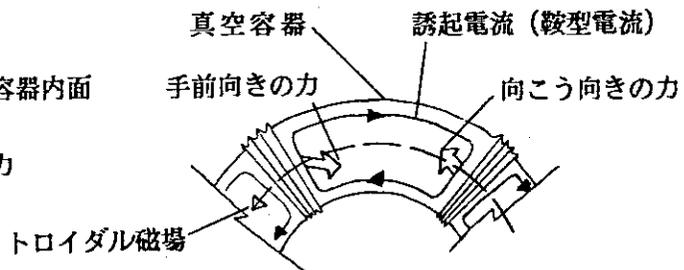
この磁気面で $q=1$ となる。
↓
ディスラプション



リミタなど真空容器内設置物



(a)



(b)

第5-5図 ディスラプション時の電磁力 ($F=I \times B$)

5.3 プラズマ電流と密度の領域

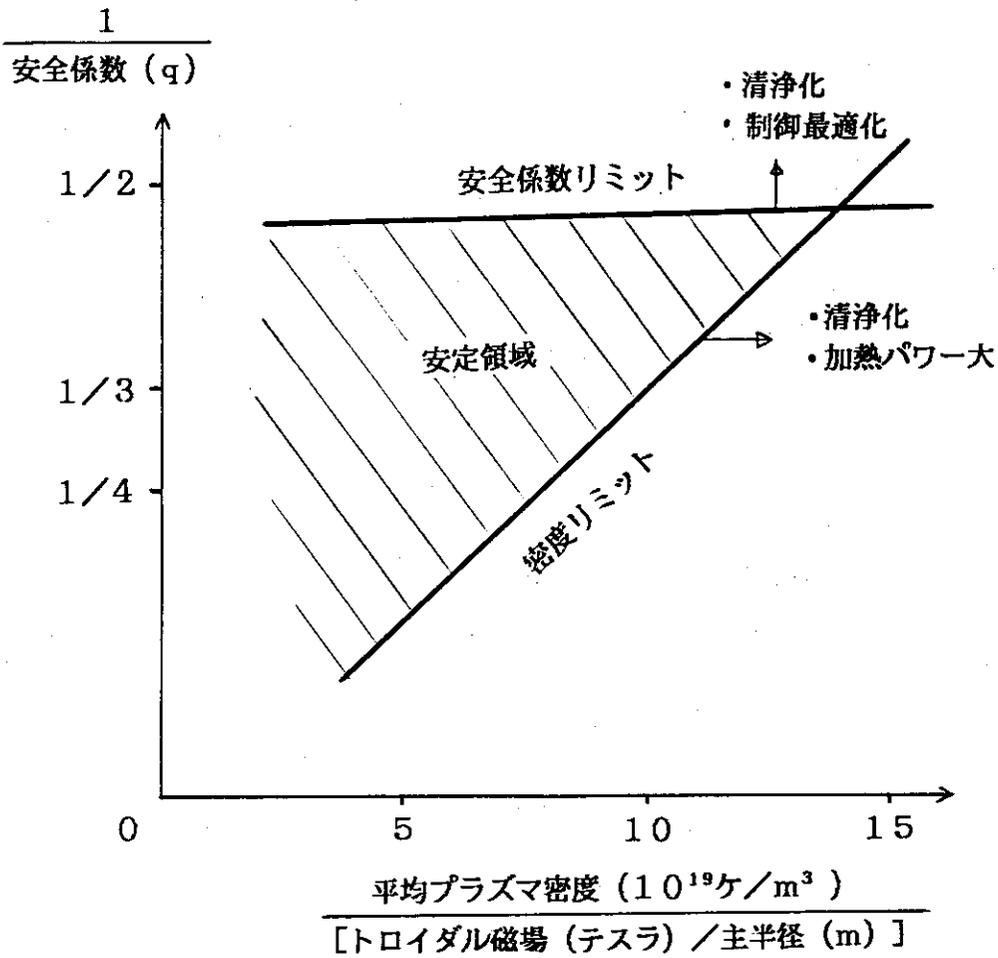
トカマクのプラズマ、あるいは、装置の性能を表わすものとして、第5-6図のようなプラズマ電流と密度の図を用いる。プラズマ電流は、トロイダル磁場との比、すなわち、安全係数の逆数で表わし、密度も磁場との比で表わしたものである。

真空容器の表面が汚いと、 q を低くすることが出来ない。すなわち、プラズマ電流を増やそうとするとディスラプションが起こって、プラズマ電流を増やせない。 q を低く出来るようになることが、真空容器内面の不純物が無くなってきた証拠である。

また、ガス注入の量を増やしてプラズマ密度を高くしようとしても、ある程度以上になると、やはりディスラプションが起こってしまう。密度の上限は、プラズマに入る加熱パワーが大きくなると高くなる。すなわち、プラズマ電流がふえれば密度を高くできるし、また、ビーム加熱などの第二段加熱パワーが高いときにも高密度を作れる。

プラズマ電流の上限値や密度の上限値は、装置のクリーニングやプラズマの位置形状制御法の進展に伴って徐々に高くすることが出来る。一度安定に制御出来た q 値や密度は、何度でも安定に再現することが出来る。すなわち、 q 値と密度の領域を適切に選択することにより、ディスラプションを避けることが出来る。

真空容器の内面などが汚れていてプラズマに不純物が入ると不純物イオンがプラズマを冷やしてしまう。装置運転の初期に多い酸素やカーボンなどが不純物の場合は、プラズマ断面の表面がよけい冷やされる。プラズマは、温度が低いと電気抵抗が高いため、不純物によって表面が冷えると、プラズマ電流がプラズマの表面から中心部に移り、中心部に集中した電流分布となる。したがって、電流が低く、 q_a がまだ高くてもプラズマが不安定になりやすい。すなわち、 q をどこまで下げられるかは、プラズマの(装置の)きれいさの目安である。



第5-6図 トカマクの運転領域

横軸のパラメータは、プラズマ電流密度（ほぼ、ジュール加熱パワーの密度）に対するプラズマ密度（電子密度）の比である。プラズマを加熱するためのパワーがどの位有効に使われているかを示し、不純物があるときは、プラズマ密度を高く出来ない。このパラメータは、米国オークリッジ研究所の村上博士が考案したもので、「村上係数、M」と呼ばれている。 $1/q$ と組合せたこの図は、英国カラム研究所のHugill博士の名を取って「Hugill Diagram」という。

5.4 比例則

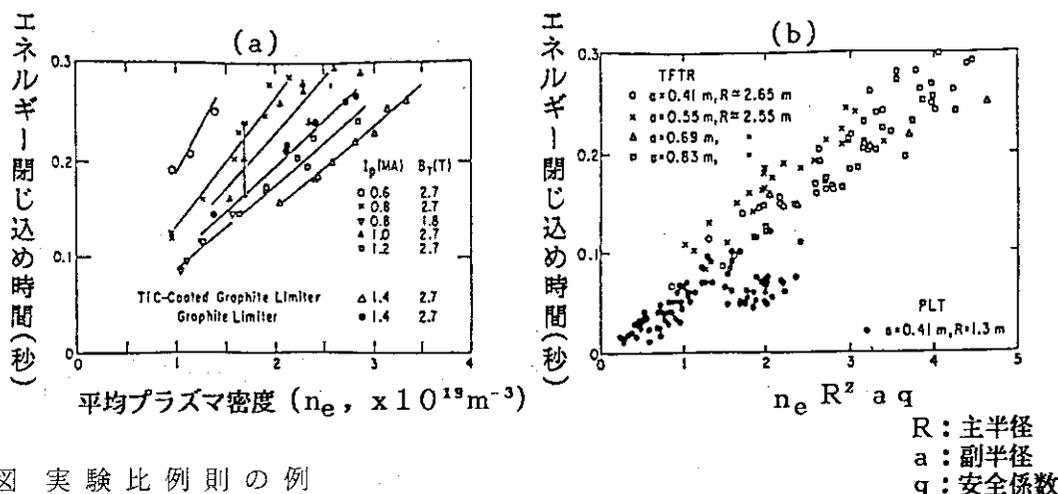
一般に、二つの量（パラメータ）の間に比例関係があるとき、それを表わす式を比例則という。比例則には、実験結果を整理して導き出す経験的な比例則と理論的な比例則との二通りがある。

トカマクの研究では、プラズマの温度や密度を高めて核融合炉の条件にまで加熱することに関係の深いエネルギー閉じ込め時間や粒子閉じ込め時間（3.2参照）の比例則が重要である。

トカマクでは、研究の初期から装置の寸法を大きくするほど閉じ込め時間が良くなる（長くなる）という比例則が出て、第4-1表のように、装置の大きさを段階的に大きくしながら研究を進めてきた。すなわち、現在の大きさの装置までの実験結果を整理していろいろな比例則をつくり、それにしたがって次の段階の装置を設計する。このとき、一つのステップの大きさはリスクが適切な大きさになるように選択する。そして、新しい段階の装置による実験の結果によって従来の比例則を修正し、さらに次の段階に進む。比例則の修正には理論解析の結果も最大限に活用することは当然である。

第5-1表に、イオン温度、エネルギー閉じ込め時間、ベータ値の比例則の例を示す。イオン温度の比例則は、1970年頃の古いもので、ジュール加熱のトカマク・プラズマに適用出来る。擬古典則は、プリンストン大の吉川博士が提案し、一時は世界中で使われたが、トカマクが大型になり、また磁場が強くなると、アルカトール則がひろく使われるようになった。ネオ・アルカトール則は、これに寸法の要素を付け加えたもので、いまでも（JT-60のような大型装置でも）ジュール加熱のプラズマには適用出来る。

これらのような比例則は、実験の進展に伴って、今後もつぎつぎに新しいものが提案され、より現実に近いものを選択されていくものである。



第5-7図 実験比例則の例

- (a) 図: 実験データの点をグラフ上に打つと、閉じ込め時間と平均プラズマ密度の間に大体比例則のあることが分かった。
- (b) 図: 他のパラメータも組合せてみて、新しい実験比例則ができた。
(この例のように、実験比例則は、かなりのばらつきを含んでいる。)

第5-1表 トカマクの主な比例則

イオン温度 (ジュール加熱)	: $T_i \propto A^{1/2} (I_p B R^2 n)^{1/3}$
エネルギー閉じ込め時間	: $\tau_E \propto I_p T^{1/2} / Z_{eff}$ (擬古典則)
	$\tau_E \propto n a^2$ (Alcator, アルカトール則)
	$\tau_E \propto n a R^2 q^{0.5}$ (新アルカトール則)
	$\tau_E^{1/2} (s) = I_p (MA) \cdot P_h^{-0.5} (MW) \cdot R^{1.75} (m)$
	$\cdot a^{-0.37} (m) \cdot \kappa^{0.5}$ (Goldston, Lモード則)
	$\tau_E^{1/2} (s) = 2 \times \tau_E^{1/2}$ (Goldston, Hモード則)
ベータ値	: $\langle \beta \rangle = g \cdot (I_p / a \cdot B)$ (Troyon則)

ただし、 T_i :イオン温度、 τ_E :エネルギー閉じ込め時間
 $\langle \beta \rangle$:平均ベータ値、 A :原子量、 I_p :プラズマ電流
 T :プラズマ温度、 B :トロイダル磁場強度、 R :主半径
 a :小半径、 n :プラズマ密度、 Z_{eff} :実効電荷数
 q :安全係数、 κ :非円形度、 P_h :加熱パワー
 g :トロイオン係数

比例則: 直接の相関関係がはっきりしない場合でも二つの量の間に実験的な比例関係がある場合がある。
 たとえば、海水の温度と割り箸の使用量の間とか、風速と桶屋の儲け(!)の間にほぼ比例関係があれば、これも比例則で表わすことが出来る。

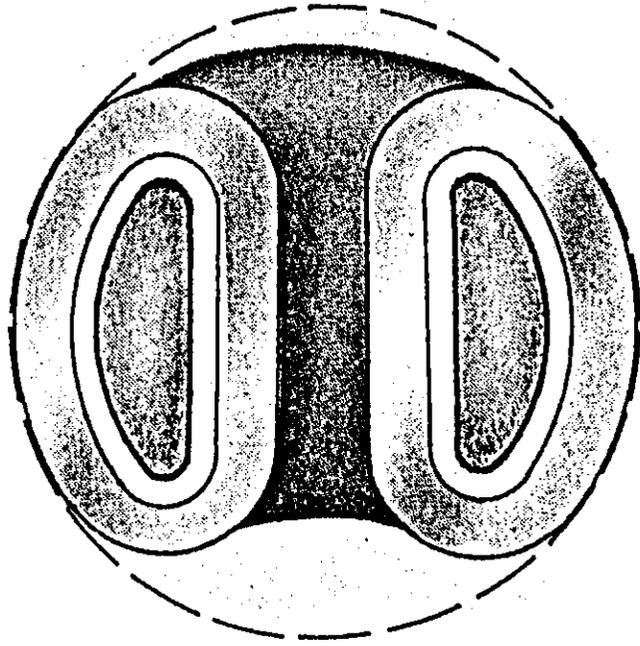
トカマクにおいては、プラズマの詳細な計測が難しいなどのため、どのようにプラズマを加熱したらプラズマが何度になるかを理論的に予測(計算)することが非常に困難である。このため、実験的な比例則が重要なものとなっており、実験比例則からプラズマ内部における物理現象を推測する場合が多い。

5.5 非円形断面

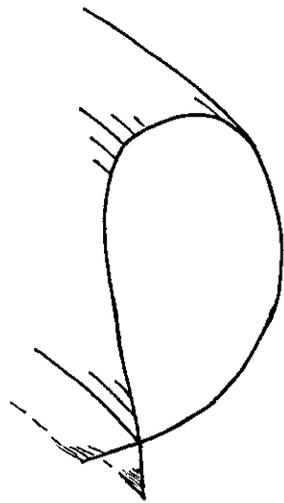
トカマクのプラズマの形は、ドーナツの断面が円形のものから研究が始まり、現在でも大部分は円形断面である。しかし、理論的には非円形断面のほうがプラズマ・ベータ値を高くできることがかなり昔からわかっていた。

非円形断面が合理的であることを簡単に説明すると次のようにいえる。まず、エネルギーを貯めておくものの形としては、球形がもっとも合理的である。これは、体積と表面積との比、すなわち、エネルギーの量と外へ逃げる損失の比を考えればわかる。太陽も球形であるのも尤もである。円形断面も一見合理的に見えるが、ドーナツ全体の形をみるとそうではなく、球よりも円盤に近い。第5-8図のように、球形のなかに入るドーナツの断面はD型である。

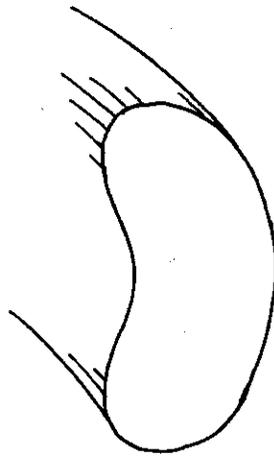
ところが、たてに長い断面のプラズマには上下の方向に移動しやすい性質（不安定性）がある。この位置不安定性があることと、装置が円形断面のものに比べて作りにくいため、従来は円形断面のトカマクが多かった。一時は、不安定性を逃げるために第5-9図のように、そら豆形や三角など色々な断面形状が考えられた。しかし、現在は、装置を単純にするにはD型がもっともよいと考えられている。（原研で設計していたJT-4は、この観点からD型とダイバータを組合せたものであった。その後、日米協力のダブルットIII計画でD型とダイバータの組合せが実際に優れたものであることが実証され、核融合炉がその形であることが世界の共通認識となった。）



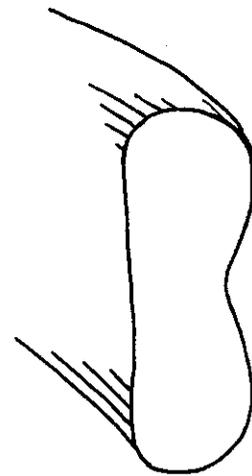
第5-8図 球形の中に入るドーナツはD形断面である。



ダイバータ付きD形断面



ビーン形



ダブルレット形

第5-9図 いろいろな非円形断面
(いずれも左側がトーラス中心軸)

5.6 プラズマの加熱

プラズマを加熱する方法には、次のようなものがあり、1) のジュール加熱以外のものを「第二段加熱」、または、「追加加熱」という。

1) プラズマ電流によるジュール加熱 (オーム加熱)

- ・プラズマの電気抵抗による発熱。
- ・約 2 keV 以上の温度にすることはできない。

2) 高速の粒子ビームによる加熱 (第5-10図)

- ・必要なプラズマ温度 (20 keV 以下) よりも十分に高いエネルギー ($40 - 500\text{ keV}$) の粒子ビームを打ち込み、プラズマ粒子との衝突によってプラズマ粒子の速度、すなわち温度をあげる。
- ・プラズマ閉じ込め用の磁場でビームが曲げられないようにするため電氣的に中性な粒子のビームでなければならない。(中性粒子ビーム入射, Neutral Beam Injection, NBI)

3) 高周波加熱 (Radio Frequency Heating, RF加熱)

- ・種々の共鳴現象を利用
イオン・サイクロトロン共鳴加熱(ICRH)、電子サイクロトロン共鳴加熱(ECRH)、低域混成波共鳴加熱(LHRH) など。

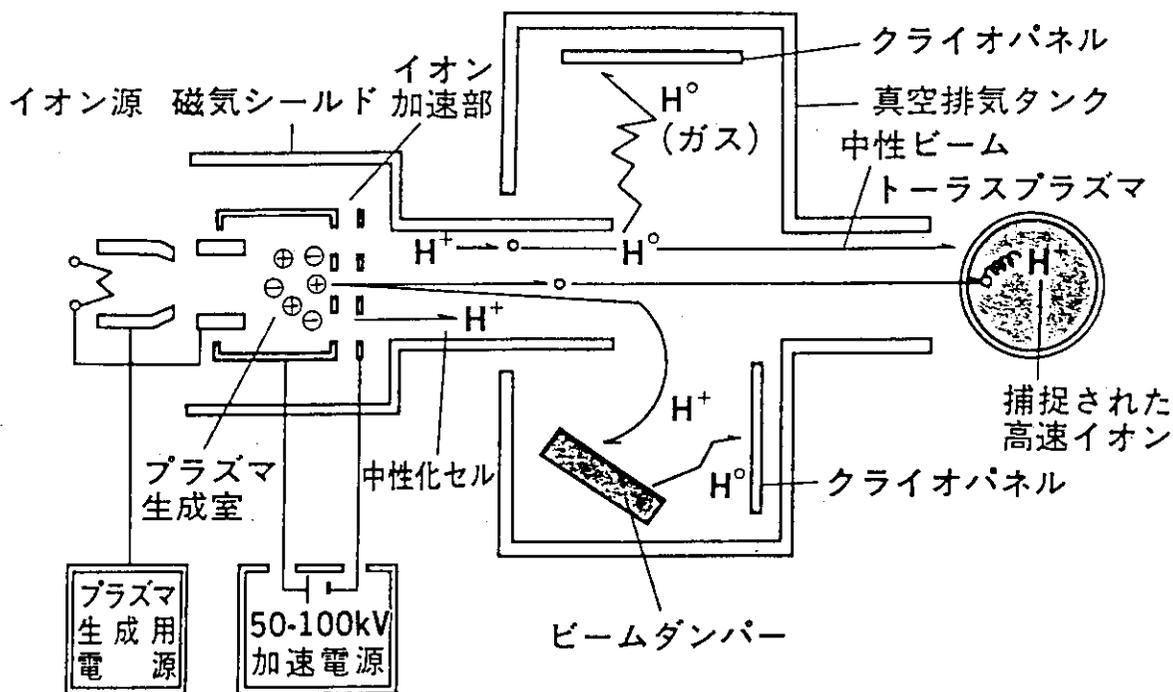
4) 断熱圧縮加熱

- ・プラズマの体積を短時間のうちに圧縮する。(第5-12図)

5) レーザ光による加熱

- ・磁場閉じ込めではまだ使われていない。

(注) 2.1 にも述べたが、「温度」は、物質を構成する粒子(分子)の運動の激しさを表わすパラメータである。したがって、「加熱」とは、粒子を加速することである。電場で電子とイオンを加速するのがジュール加熱であり、高速粒子をぶつけて加速するのがビーム加熱である。



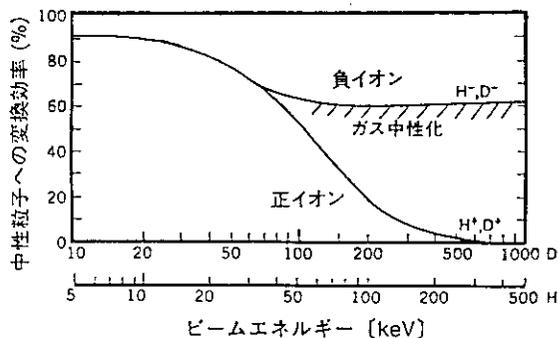
第5-10図 粒子入射(NBI)加熱の原理

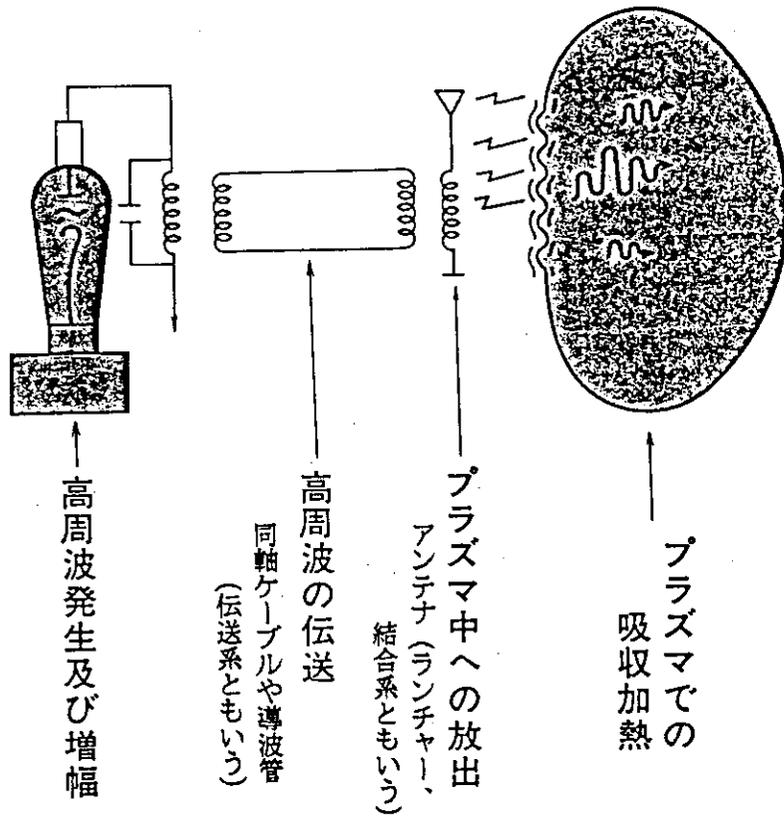
左端のプラズマ生成室でフィラメントを用いて作ったプラズマからイオンを引き出して、数枚のイオン加速用電極で加速して（この部分はリニア加速器である。）イオンビームを作る。つぎに中性ガスの中を通して荷電交換衝突によって中性粒子のビームに変換する。イオンビームから中性粒子への変換効率は、70 keVで約35%程度であり、加速電圧が高くなると（ビームエネルギーが高くなると）変換効率が下がる。500 keVでは、下の図のように変換効率がほとんどゼロになってしまう。（Dでは約2%）

中性粒子化されずに残ったイオンビームは、偏向磁石の磁場で曲げてビーム・ダンパーで吸収する。ふつう、水冷した銅で出来たダンパーでエネルギーをとり、ダンパー面で低温の（低速の）中性粒子になったビーム粒子は、プラズマ空間に入らないようにクライオ・パネル（クライオ・ポンプ）で吸着する。

なお、加速電圧が高くても中性粒子への変換効率の下がらない負イオン・ビームの開発も行なわれている。

正イオン及び負イオンの中性粒子への変換効率

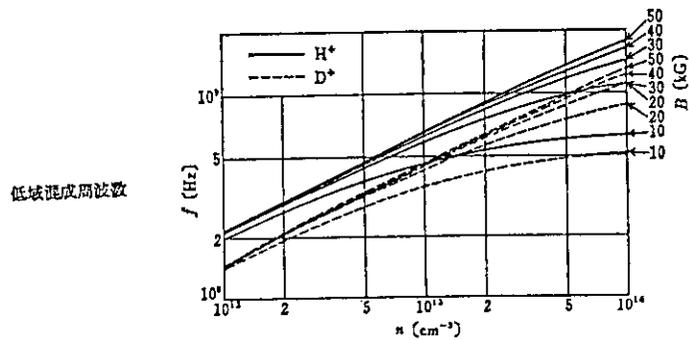


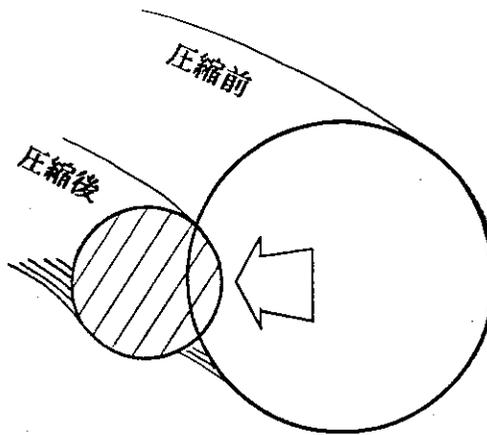


第5-11図 高周波加熱の原理

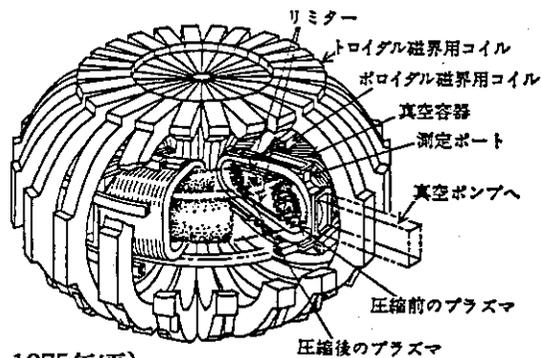
	イオン・サイクロトロン 共鳴加熱 ICRH, ICH	電子サイクロトロン 共鳴加熱 ECRH, ECH	低域混成波 共鳴加熱 LHRH Lower Hybrid	速波 共鳴加熱
周波数 (2T) (5T)	15.2 Mhz 38.0 Mhz (重水素)	56 GHz 140 GHz	下図参照	100- 500 MHz
多く使われる発振管	四極管	ジャイロトロン (自由電子レーザ)	クライストロン	四極管

(注) サイクロトロン周波数は、2、3 に示したものと同じである。

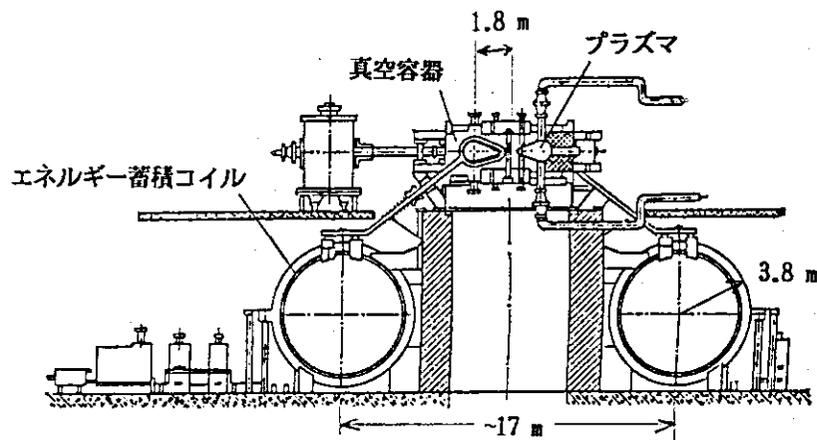




(a) 断熱圧縮加熱



(b) ATC装置 (米国、1975年頃)
主半径を90cm—36cmに圧縮する。



(G.S.Boronov: Attack to Thermonuclear Fusion, Nauka, Moscow, 1985.による。)

(c) T-14装置 (ソ連、1988年頃)

5. 7 電流駆動

4. 3にトカマクのプラズマ電流の誘起について説明したが、変流器の原理を使う場合は、変流器の一次側巻線に流せる電流に制限があるので、4. 6で説明したように間欠的なパルス運転しかできない。核融合炉としては、温度がパルスの的に上下するパルス運転は出来るだけ避け、定常運転が望ましい。

そこで、変流器によらないでプラズマ電流を定常的に流す方法が考えられている。トカマクの分野ではこれを「電流駆動」と呼んでいる。

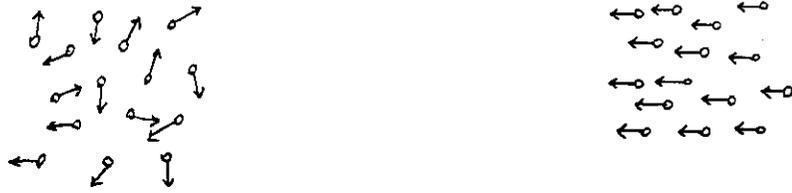
第5-13図のように、電流駆動とは電子あるいはイオンに決まった方向の速度を与えることである。一方、電子やイオンの加熱とは電子やイオンにランダムな方向の速度を与えることに他ならない。したがって、プラズマ加熱と同じ方法を上手に使いえば電流駆動に使うことができる。(第5-14図)

実際、中性粒子ビームを電流の方向に入射するとプラズマ電流が駆動される。また、高周波電力を波面や位相を工夫して入射すると、やはりプラズマ電流が駆動される。特に、低域混成波(LH)による電流駆動は、原研のJFT-2ではじめて実験されて世界中にひろまった方法である。

高周波による電流駆動は将来の核融合炉に使えるものとして有望と考えられているが、現在まではまだプラズマ密度の低い領域しか使えず、プラズマ密度の高いときにも使える周波数やアンテナの開発をこれから実施する必要がある。

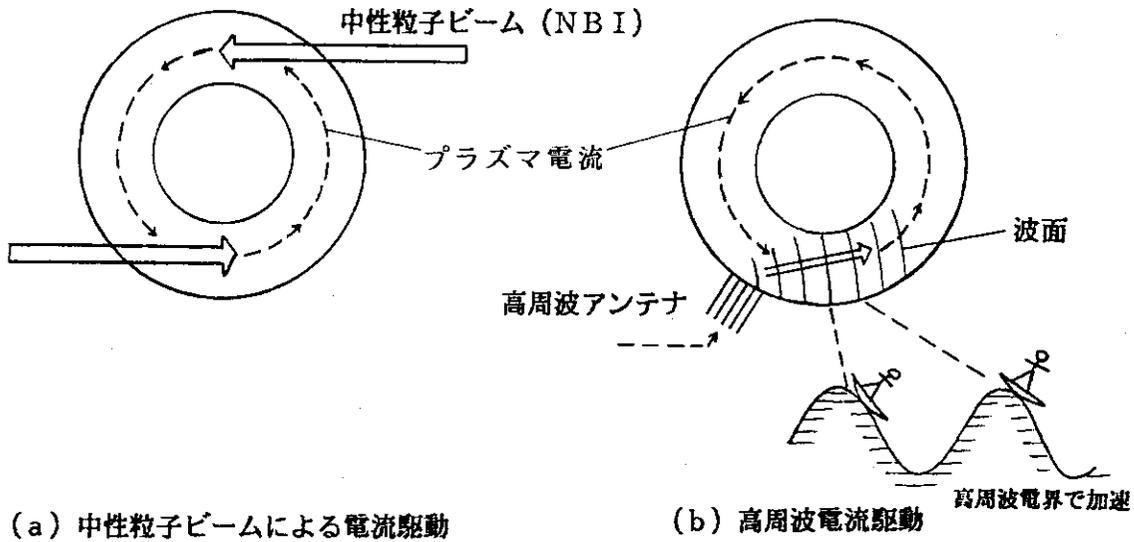
中性粒子ビームによる電流駆動も、原研で500keVの負イオンビームのアイデアが出てから有力な候補となり、開発がはじめられている。

なお、(非誘導)電流駆動のなかでも、第5-15図のように、内容によって名称を区別する場合がある。



(a) ランダムな方向への加速 (加熱) (b) 一方向への加速 (電流駆動)

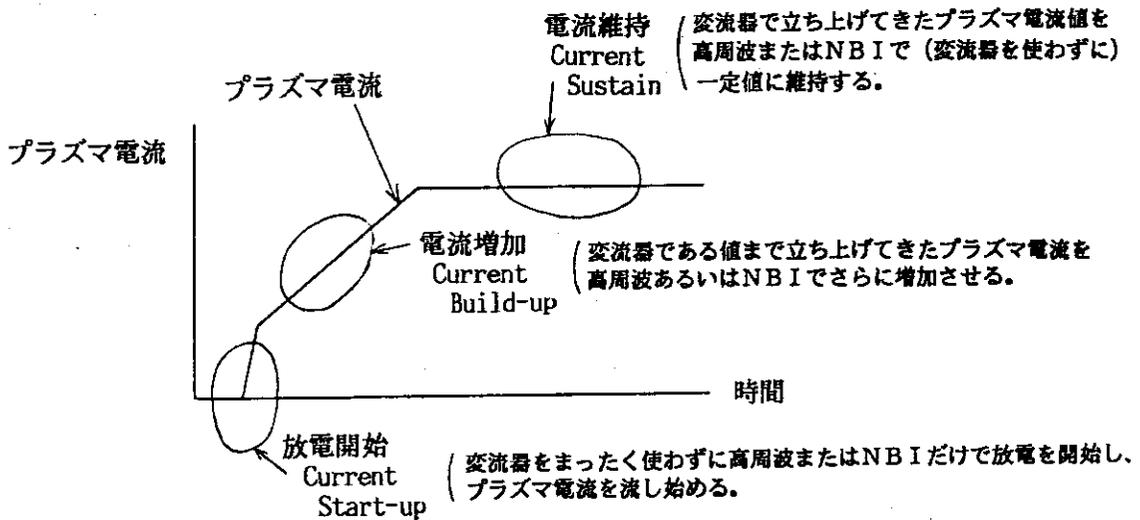
第5-13図 プラズマ加熱と電流駆動



(a) 中性粒子ビームによる電流駆動

(b) 高周波電流駆動

第5-14図 電流駆動



第5-15図 電流駆動 (Current Drive) の分類

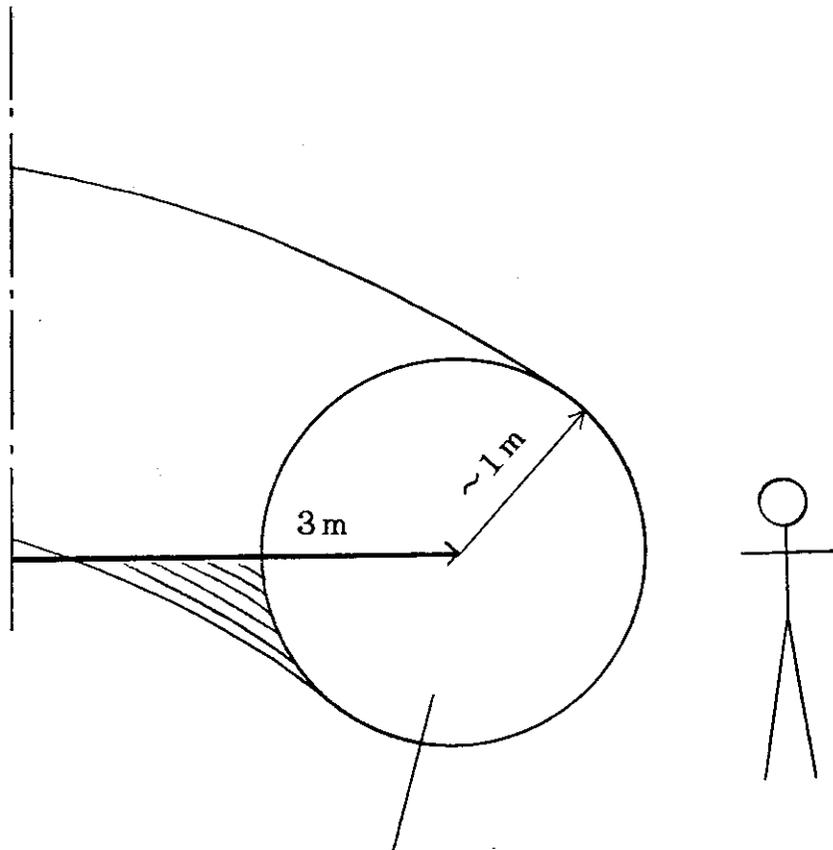
5.8 不純物 (第5-16図)

核融合炉のプラズマにとっては、燃料である重水素と三重水素以外はすべて不純物である。第3章でも不純物がプラズマの特性に影響を与えることをいくつか説明したが、実際トカマクのプラズマは不純物にきわめて弱い。不純物を抑制してプラズマを加熱できれば、炉心プラズマは実現できた、といえるくらいである。

第2-1表のように、トカマク・プラズマは密度が低いので、JT-60のような大きな装置でもプラズマの質量は5mg程度しかない。したがって、1mgでも不純物が混入すると大きな影響があり、プラズマ自体が消滅することも不思議ではない。しかも、高温のプラズマに曝されている真空容器の内側表面から1mgくらいの破片が落ちることは十分に考えられることである。

不純物の悪影響には次のような例がある。

- 1・不純物の多価イオンによる線スペクトル放射——プラズマ冷却
- 2・不純物イオンの分だけ燃料（重水素、三重水素）イオンの量が減る。電荷数の高い不純物ほど、同じ電子密度に対する燃料イオンの数が減る。
- 3・プラズマ内の粒子の間の衝突現象などに影響をあたえ、加熱パワーの吸収、熱伝導率、粒子の拡散などに悪影響を与える。



JT-60でもプラズマの質量は数 \sim 10mg

第5-16図 不純物

JT-60のような大型装置でもプラズマの質量は数mgしかないので、ごく微量の不純物でも大きな悪影響がある。

5.9 不純物の発生

不純物の発生原因を整理してみると次のようになる。

1) 真空容器の内面から

第5-17図のように、表面には水分のように吸着された不純物があり、また、酸素のように壁の素材のなかにしみ込んだ不純物もある。

プラズマからの光や粒子によってこれらの不純物がたたき出されると、プラズマのなかに混入して悪影響をあたえる。また、壁の材料自体も叩き出されれば（解けて飛び散ったり、高温で蒸発すると）不純物になる。

2) その他

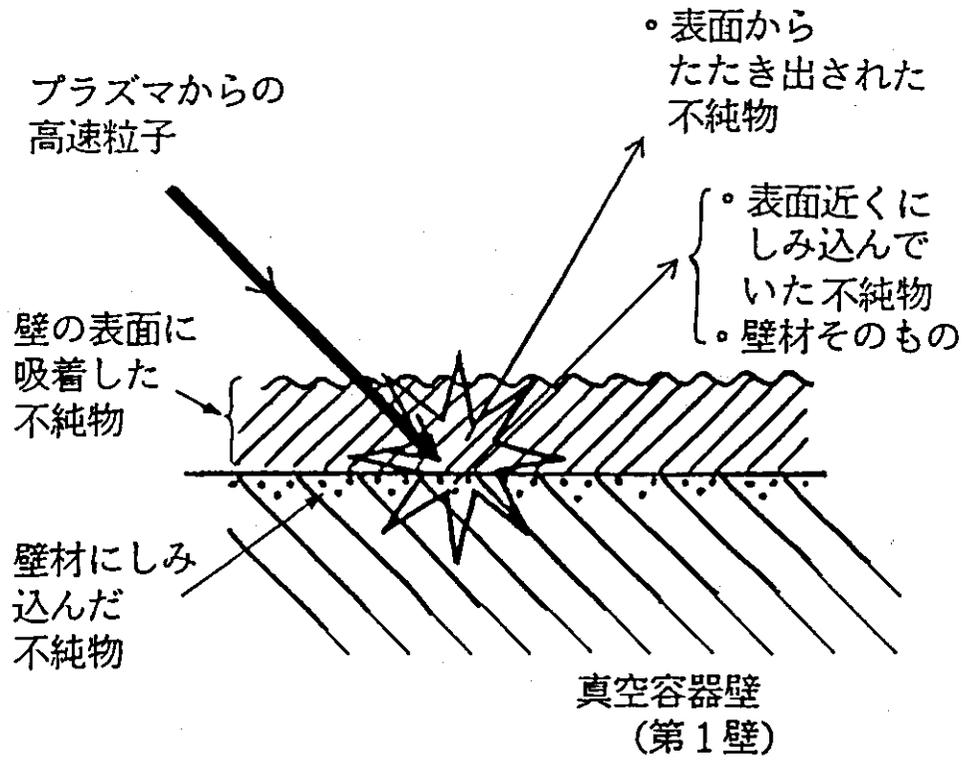
(イ) プラズマ粒子用に供給するガスあるいはペレットの純度が悪いため不純物。

(ロ) 加熱用あるいは計測用に入射する中性粒子ビーム、イオン・ビームに含まれる不純物。

(ハ) 真空排気ポンプなどから逆流して入ってくる不純物。

(ニ) 真空フランジなどの真空もれによる空気の混入。

ハ、ニのものは普通は少量で、1) の表面吸着を経てプラズマに混入する。



第5-17図 不純物の発生

5.10 不純物対策

プラズマ中に混入する不純物を低減するため、次のような方法を組合せて実施することが多い。

- 1) 製作時から切削油を繰り返し洗浄するなどの表面管理を行なうこと。
- 2) 製作組み立て後に洗浄すること。(超高真空用の洗浄方法はノウハウである。)
- 3) ベーキング—真空に引いたまま150°C-400°C程度の高温に保って表面に弱く吸着した不純物をガス・蒸気の形にして排気する。
- 4) 放電洗浄—グロー放電、弱電流放電などで弱いプラズマを作り、プラズマ粒子で表面を叩き、表面につよく吸着された不純物を取り除く。
 - ・プラズマ粒子の衝撃で不純物粒子を叩きだす。
 - ・化学反応を起こして不純物をガスにして排気する。
- 5) 壁材料の選択—
 - ・不純物を吸着しにくい材料
 - ・インコネル、ステンレスなどプラズマ中に混入しても害の少ない材料
 - ・カーボンのような原子番号の低い材料
- 6) 壁構造—————不純物の出にくい構造

また、5) に述べた材料を組合せて、真空および強度材料としてはステンレスをつかい、プラズマに面するところにはカーボンを使うことが、最近よく行なわれている。

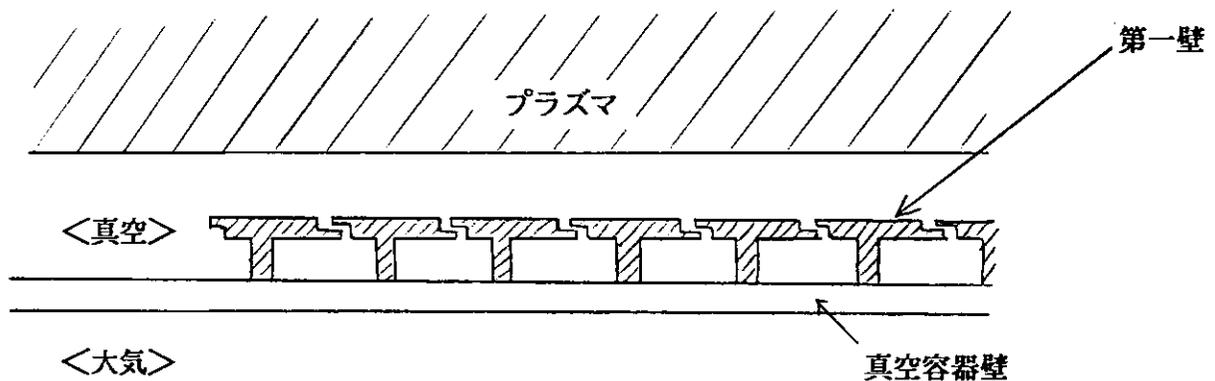
このようなとき、プラズマに面するものを「第一壁」あるいは「アーマー板」という。(第5-18図)

ベーキング --- 数時間～数日間、高温に保って真空排気を続ける。

放電洗浄 ----- グロー放電
弱電流放電（トカマクとしてのプラズマ生成）

TDC (Taylor Discharge Cleaning) -- 米国のTaylorが提案した放電洗浄の方法。商用周波数（50-60 Hz）をそのまま使ったり、あるいは一秒に数回の高繰り返しで弱電流放電をくりかえす。

ベーキングしながら放電洗浄を行なうと効果が大きい。



第5-18図 第一壁の構造例

5. 11 リミタとダイバータ

高温のプラズマによって真空容器が損傷を受けないようにするには、そして、プラズマに不純物が入らないようにするにはどうしたらよいだろうか。

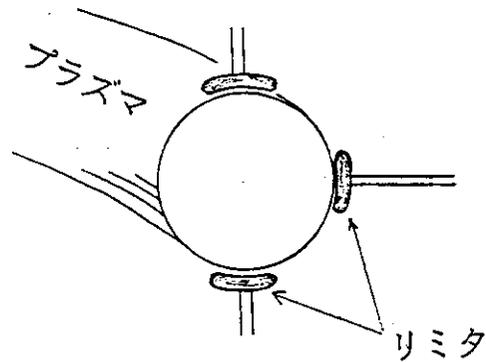
もしもプラズマが均一に真空容器に当たっていれば、面積当たりの熱（熱流束）はそれほど大きくはない。しかし、実際には真空容器を完全にプラズマと同じ形にすることはできないし、かつ、5. 2で述べたディスラプションのようにプラズマを制御できないときが問題である。

そこで、第5-19図のように、真空容器の内面の一部にブロックを置いてそこ以外にはプラズマが当たらないようにする方法が広く使われている。このブロックをリミタという。

プラズマを加熱するパワーが低い時代にはモリブデンなどの解けにくい金属でリミタを作っていたが、近年、加熱パワーが高くなってくると、低原子番号材料のカーボンのリミタが多く使われるようになった。

さらに、磁力線の形を工夫してプラズマがどこにも触らず、宙に浮くようにする「ダイバータ」もある。これは第5-20図のようにプラズマに沿ってコイルを巻き、プラズマ電流と同じ方向の電流を流してプラズマの一部を引き出すものである。この方法をトカマクに応用することは日本（原研）のアイデアであり、JFT-2aは世界ではじめてのダイバータ付きトカマクであった。

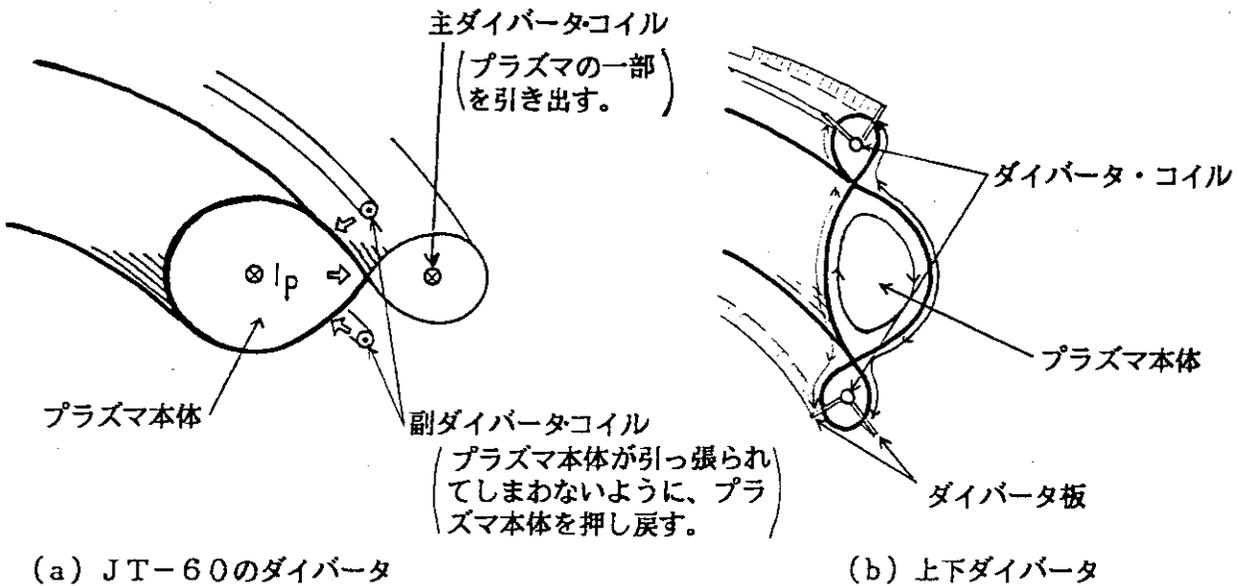
ダイバータを使うとプラズマに混入する不純物の量をきわめてわずかに抑えることができる。



第5-19図 リミタ

モリブデン、カーボンなどのブロックを置いて真空容器の他の部分にプラズマがあたらないようにする。このブロックをリミタという。

（プラズマはドーナツ状の磁力線に沿って動くので、リミタ以外のところでは真空容器の壁に触れない。リミタ表面にあたるプラズマ粒子のスパタリングやリミタ表面の溶融によりリミタ材が不純物としてプラズマ中に混入する。プラズマの温度が高くなると、リミタからの不純物がふえる。



第5-20図 ダイバータ

磁力線の形でプラズマを浮かせて保持する。

ダイバータ・コイルによって作られる8の字形磁気面をセパトリックス磁気面、8の字形の交差点をX点、ヌル点（零点）、あるいはセパトリックス点という。セパトリックス面の内側では、閉じた磁気面になっていて、プラズマを閉じ込めることができる。その外側では磁気面が閉じず、磁力線はダイバータ・コイルや真空容器壁に当たっているので、プラズマは保持出来ない。すなわち、プラズマが出来る空間を磁力線の形で決めており、（リミタなしで）プラズマ本体は真空容器壁から浮いている。

ダイバータ・コイルの近くのプラズマ粒子がよく当たるところには、熱に強い「ダイバータ板」を置く。

5. 12 プラズマからの電磁波の放射

プラズマからの電磁波の放射は、エネルギー損失の一つのプロセスとして重要なものである。特に不純物のある時には大きなエネルギー損失となる。一方、放射される電磁波のスペクトルを分光分析することは、プラズマを計測するための重要な方法である。

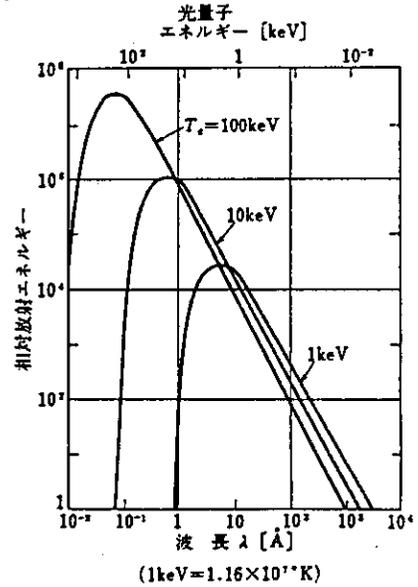
プラズマからの電磁波放射は次のように分類される。

- 1) 制動放射——電子がイオンの電荷で軌道を曲げられるときに出す電磁波でどんなプラズマからも出ている。放射強度はイオンの電荷数に比例するので、不純物があると大きな損失となる(第5-21図)。
- 2) サイクロトロン放射——粒子が磁場中で旋回運動をするときに出す放射で、周波数は2, 3に述べたものと、その整数倍(高調波)である。数keV以上のプラズマでは制動放射より大きくなる。
- 3) 再結合放射——イオンに電子が再結合して電離荷数が下がるときや中性の分子になるときにでる光。主にプラズマ温度の低いプラズマの周辺部から出る。水素の光はよく計測に使われる。(H α , D α など)
- 4) 線スペクトル放射——(水素以外の不純物の)イオンに残っている電子が(励起)エネルギー・レベル間を移るときに出す放射。原子番号の大きいイオンはプラズマ温度の高い中心部でも電子が残っているので線スペクトル放射によるエネルギー損失が大きい。温度の高いところからはエックス線領域の放射になる。

1) 制動放射 (Bremsstrahlung)

$$I_B \text{ (W/m}^3\text{)} = 5.4 \times 10^{-37} Z n_e^2 \text{ (m}^{-3}\text{)} T_e^{1/2} \text{ (keV)}$$

第5-21図
制動放射エネルギーの波長依存性

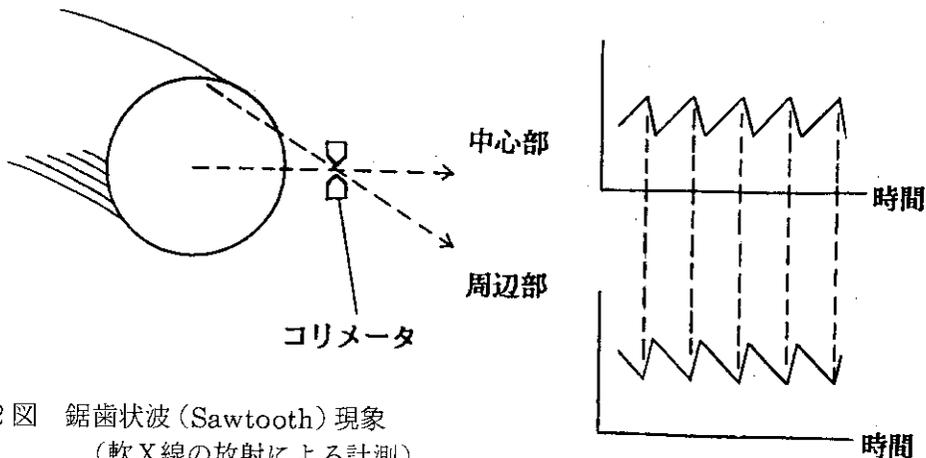


2) サイクロトロン放射
(シンクロトロン放射とも)

$$I_C \text{ (W/m}^3\text{)} = 5.0 \times 10^{-44} n^2 \text{ (m}^{-3}\text{)} T^2 \text{ (keV)}$$

不純物があるときは、特に4)の「線スペクトル放射」が大きい。金属など、原子番号の大きい(すなわち、電子の数が多い)元素は、温度が高いプラズマの中心部でもまだ電子がイオンの回りに残っていて、波長の短いX線領域で大きなパワー損失を生じる。カーボンなど、原子番号の低いものは、温度の高いところでは、電子がない裸のイオンになっていて、線スペクトルは放射しない。

6. 8にも述べるように、X線領域の放射はPINダイオードで簡便に計測出来る。X線強度は、プラズマ温度の関数であるが、これをオシロスコープで見ると鋸の歯のように見える振動を繰り返し、その位相がプラズマの中心部と周辺部で反対になる現象がトカマクで広く観測されている。これを「鋸歯状波現象、Sawtooth Oscillation」という。これは、間欠的に中心部のエネルギーがプラズマ周辺部の方へ移動する現象である。(第5-22図)



第5-22図 鋸歯状波 (Sawtooth) 現象
(軟X線の放射による計測)

5.13 ペレット入射

プラズマへの粒子の供給はもっぱらガスの形でプラズマの外から行なわれている。この時には、粒子はプラズマの周辺部で電離してプラズマの中心部に拡散していく。

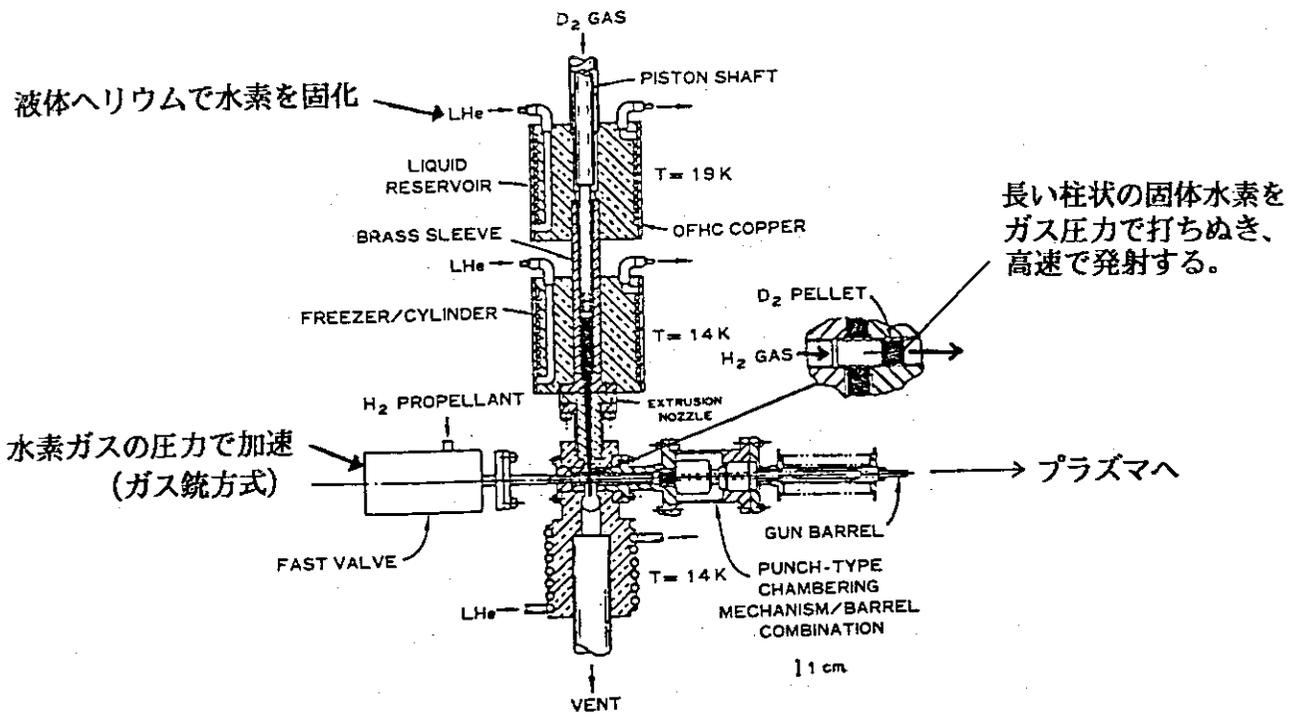
一方、プラズマ周辺部のガスを減らしたり、プラズマの中心部から粒子を発生させたいことも多い。そのようなときにはガスによる粒子供給は使えない。その方法として、ペレットと中性粒子ビームがある。

ペレットとは、第5-23図のように、水素ガスを液体ヘリウムの極低温をつかって固体にした小さな粒である。この固体水素の粒（直径1-5mmくらい）を高速度でプラズマの中に打ち込むと、一部分はプラズマの表面で解けるが、残った部分は温度の高いプラズマ中心部に達して、そこで解けて加熱されてプラズマ粒子となる。第5-24図は、日米協力のダブルットⅢにおけるペレット入射実験のデータである。

現在はペレットのスピードが1-2 km/秒 程度しかないので、第二段加熱をしたプラズマでは中心部にペレットを届かせることはできない。今後、ペレットのスピードをあげる研究開発が必要である。

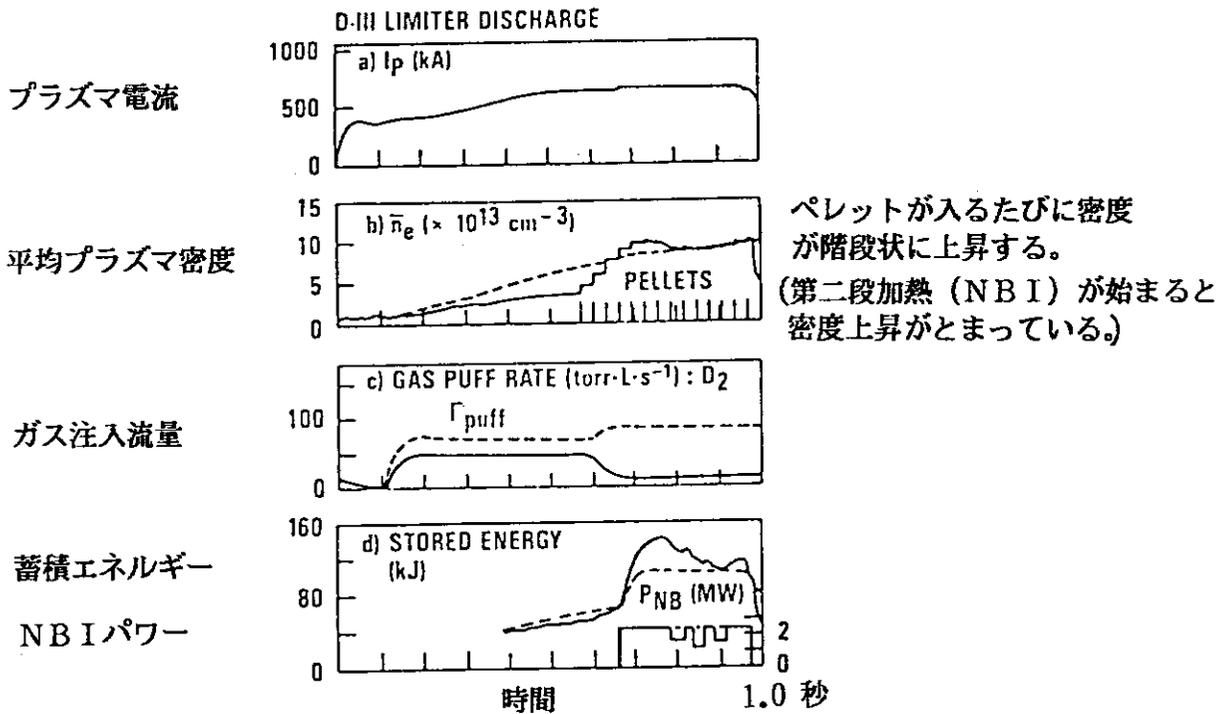
ペレットの大きさとスピードをうまく選択すれば、プラズマのなかでの解けかたを調整することも可能であり、プラズマの内部の密度分布の制御方法として重要である。

なお、トリチウムのペレットを作る技術は、今後の開発による。



ORNLが開発した“Extruder”方式による多発ペレット入射装置 (文献より引用)。銃身を往復運動させて、固体水素をペレット状に切断し、銃身に装てんする。

第5-23図 ペレット入射装置の例



第5-24図 プラズマ中へのペレット入射実験

5.14 最近の話題 (Hモード、ポンプリミタ、など)

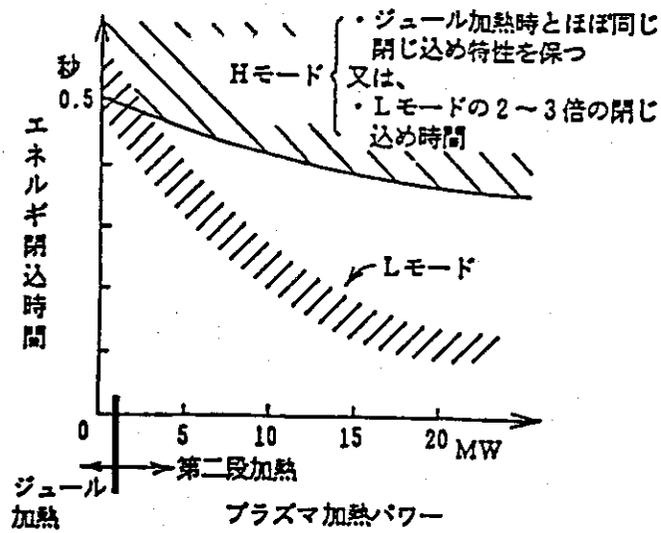
Hモード

高パワーの第二段加熱のもとでも閉じ込め特性が劣化しない放電のモード。1980年頃プラズマ加熱のパワーが世界中でメガワット (MW) 級になると、第5-25図 (a) のように、プラズマのエネ르기閉じ込め特性が低パワーの時よりも悪くなることがわかってきた。ところが、1982年に西独のASDEX装置でダイバータ形状の時には閉じ込め特性が劣化しないモードがあることがわかった。これをHigh Confinementの意味で「Hモード」という。

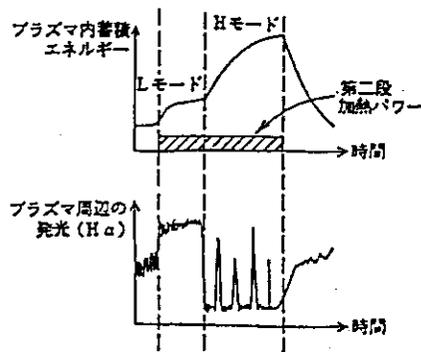
その後、ダブレットIII (日米協力)、PDX (米) などダイバータを持った装置でHモードがでた。閉じ込めの悪いモードをLowの意味でLモードというが、第5-25図 (b) のように、モードがLからHに急峻に遷移することや、その時にプラズマの周辺で水素の光が急峻に低下するなど、Hモードに伴う特徴的な現象がどの装置でも観測されている。最近では、JETでもHモードがでており、また、JT-60でもHモードに伴う現象がでている。

ポンプリミタ

第5-26図のように、リミタの形状を工夫してプラズマの表面を削り取り、ダイバータと同じような効果を持たせるアイデアで、小規模な実験も行なわれている。もしうまくいけば、ダイバータ・コイルなしでダイバータと同じことができるので装置が簡単になる。ただし、プラズマと接触する刃先の薄い部分の熱負荷が大きく、その解決が今後の課題である。

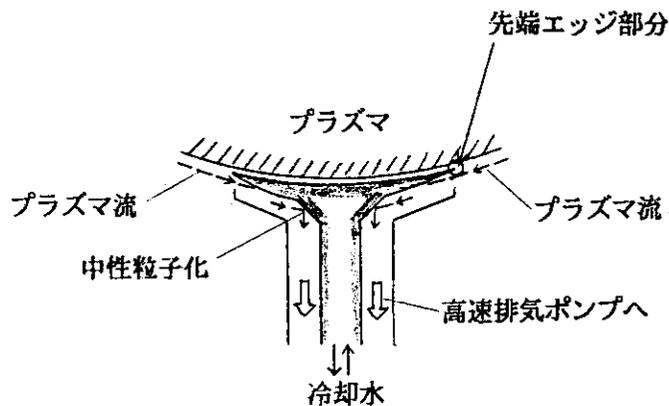


(a) HモードとLモード
(数値 0.5 秒、20MW はJT-60の例)



(b) Hモードの特徴的現象

第5-25図 Hモード



第5-26図 ポンプ・リミタ

5.15 高度のプラズマ制御

現在までのトカマクでは、プラズマの温度、密度などがプラズマ断面内でどのような分布になるか、すなわち、中心部の高いピークした分布か、あるいは中心部から周辺部まで同じような平坦な分布かは、自然に決まるだけで、特に人間による制御は行なわれていない。

一方、プラズマの安定性は、プラズマの温度、密度、電流密度の分布形に依存するところが大きく、これらを制御すれば、閉じ込め特性を改善することが出来ると考えられている。特に、ベータ値を高めるには、これらの分布制御が重要である。

そのため、各種の加熱、電流駆動、ペレット入射などの方法を組合せて、これらの制御をすることが、これからの実験研究の方向となっている。

プラズマ・パラメータの断面内分布制御

- ・安定性の向上
- ・効率の向上

温度分布	--	選択的局所加熱
		高周波加熱 (周波数と磁場強度による共鳴位置の制御)
		NBI加熱 (ビームの方向とエネルギーによる浸透深さの制御)
密度分布	--	ペレット入射など
電流密度分布	--	高周波電流駆動、NBIビーム電流駆動

6. プラズマの計測

今までの説明でわかったように、核融合の研究はプラズマの性質を一步一步調べながら段階的に進んでいる。プラズマ、すなわち自然がなんと答えるかを聞きながら、プラズマさんが我々に都合よく振る舞ってくれるように装置を作っているわけである。

この時、プラズマの答えを聞く道具が計測器である。したがって、同じプラズマ実験装置でも計測器のよしあしで研究開発の進度に大きな差がでる。

すでに説明したように、プラズマは不純物を極度に嫌うので、プラズマのなかに計測器を突っ込んで計るわけにはいかない。そのためプラズマ粒子の色々な性質を利用して、さまざまな工夫をしている。

本章では、計測器のハードウェア別に、ほぼ歴史的に古い順に説明する。

トカマクにおいて計測の対象となる量を整理すると次のようになる。

(1) プラズマの諸量

- 粒子の種別の計測 (判定) -- 電子、重水素イオン、三重水素イオン、不純物イオン (その種別、イオンの電荷数別)
- 粒子の種類それぞれの密度
- 粒子の種類それぞれの速度分布 -- (イ) 詳しくは速度ベクトルの方向も計測対象
(ロ) 等方向的な場合は方向は計測しないですむ。
(ハ) 等方向的で、速度分布が熱平衡 (Maxwell) 分布の時は、「温度」として一つのパラメータで表わせる。
- 磁場 (ベクトル量)
- 電場 (ベクトル量)

(2) プラズマ周辺の諸量

プラズマの周辺部には、薄く低温のプラズマと中性分子の形のガスが混在している。ここで計測すべき対象は、

- 周辺プラズマについての (1) と同じ諸量
 - 中性分子の諸量 -- 種別、密度、温度、流れ (ベクトル量) *、熱流 (ベクトル量) *
- *印は、多くの粒子の速度ベクトルを総合した量である。

(3) これらの諸量の空間分布、時間変化を出来るだけ詳しく (分解能高く) 計測する必要がある。

計測の分解能 (第6-1図)

(a) のカーブ (斜線部) のような値を計測するとき 間隔を置いて○印の点だけで計ると、その結果から推定される計測対象の値は (b) のようになる。

計測間隔を細かくして□印の点を加えると、今度は (c) 図のように、大体は元の値 (a) と合うようになる。しかし、まだ (a) の細かい変化は計れていない。

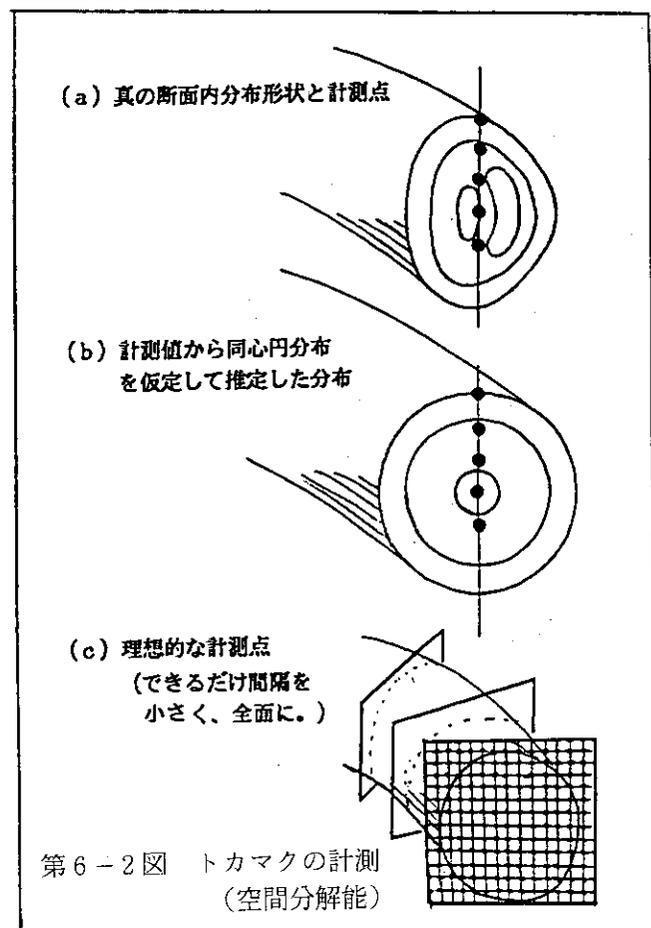
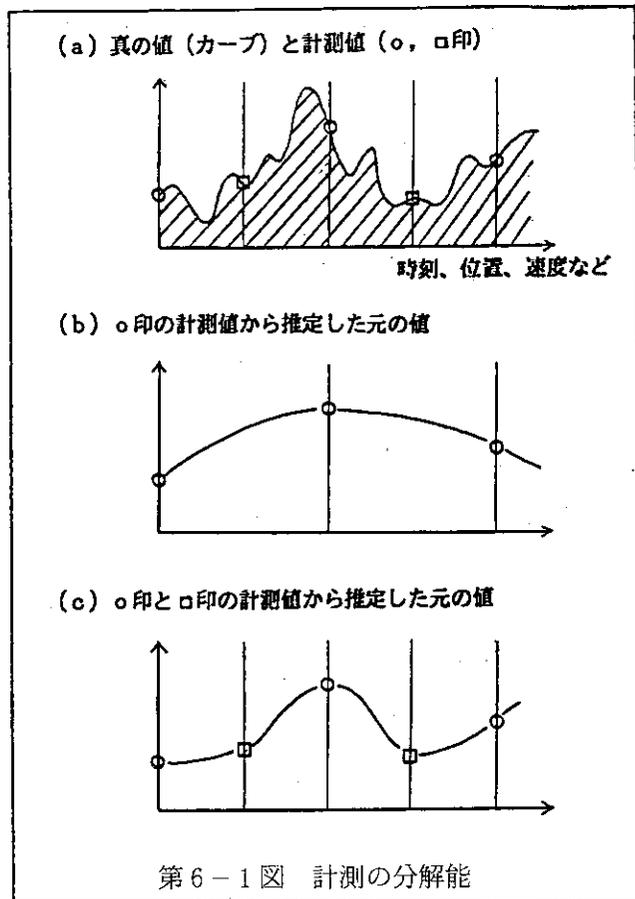
一般に、波長 L の正弦波状の変化を計測するためには、計測の間隔を $L/4$ 以下とする必要がある。

これは、時間分解能についても、空間分解能についても同じである。時間分解能については、周期 T の変化を計測するためには、 $T/4$ 以下の時間間隔で計測する必要がある。

同じように、トカマクのプラズマ断面内の計測についてみると、第6-2図のようなプラズマの断面形状と温度分布の時に、(a) の5点だけの計測では、円形のプラズマ断面と同心円状の分布を仮定して、(b) のような分布が推定されるにすぎない。実際、現在のトカマクの計測はこの状態に近い。

正しい計測を行なうためには、(c) のような多くの点で計測しなければならない。トロイダル方向についても同じことが言え、実に膨大な計測装置系が必要となる。この計測装置は相当の予算を必要とし、かつ、そのデータ処理にも膨大な計算機と労力を必要とする。

このために、あるいは、これよりも簡単に安く開発を進めるために、トカマクの分野では、5.4で述べたように、実験比例則を使ってきた。



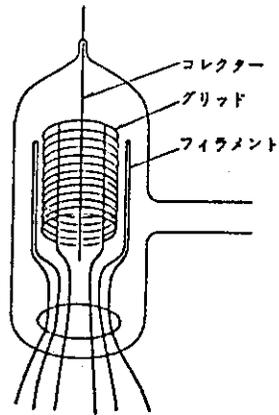
6. 1 真空計、高速マノメータ

普通のイオンゲージを使うこともあるが、磁場のある時には正確な値を示さない。磁場の値を使って正確な値に読み変えることもできるが、磁場が時間的に変化しているときには不便であり、磁気シールドを十分に用いて使う。 10^{-8} Torr (約 1.3×10^{-6} Pa) 程度の高真空には、第6-3図のBAゲージを使う。また、真空度(ガス粒子の密度)の速い変化を計るには、ガス粒子がゲージの電極まで速やかに到達する必要がある、細いパイプのようなコンダクタンスの悪い部分のないようにする。すなわち、電極を直接真空容器のなかに突き出すヌード・ゲージなどを使う。このような早い変化を計る真空計を高速マノメータという。

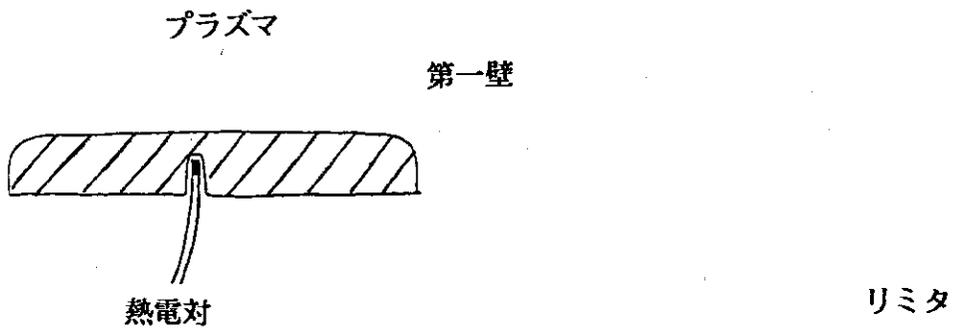
6. 2 熱電対、赤外線カメラ

プラズマそのものの測定ではなく、プラズマが第一壁に与えた熱の測定に使う。第一壁が融けたりリミタが壊れたりしないようにするために設置されたのであるが、それだけでなく、プラズマからの熱流やその分布、時間変化などプラズマ特性に関する計測も行なう。熱電対は細くし、第一壁との接触に注意して早い変化も計れるようにするが、第6-4図のように第一壁の裏側につけるのでそれほど速くはできない。

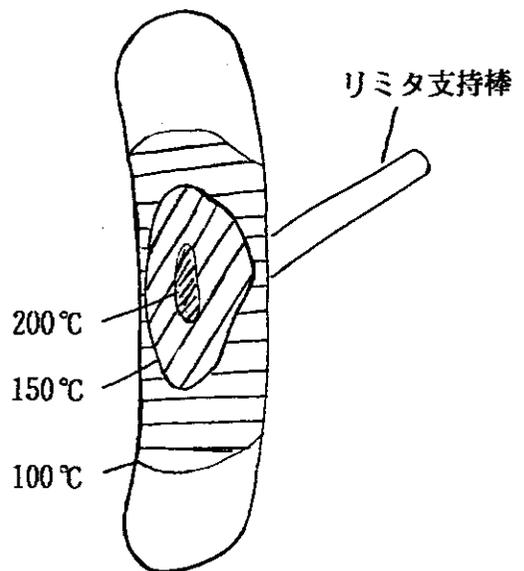
赤外線カメラは、第一壁の表面を見せておいて、第6-5図のように表面上での温度分布を二次元的に計るものである。室温から数千度まで、きわめて高速に計れ、装置が簡単で市販のものもあるので、便利な計測器である。



第6-3図 真空計
(ベヤード・アルパート型)



第6-4図 熱電対



第6-5図 赤外線カメラによる温度分布計測の例

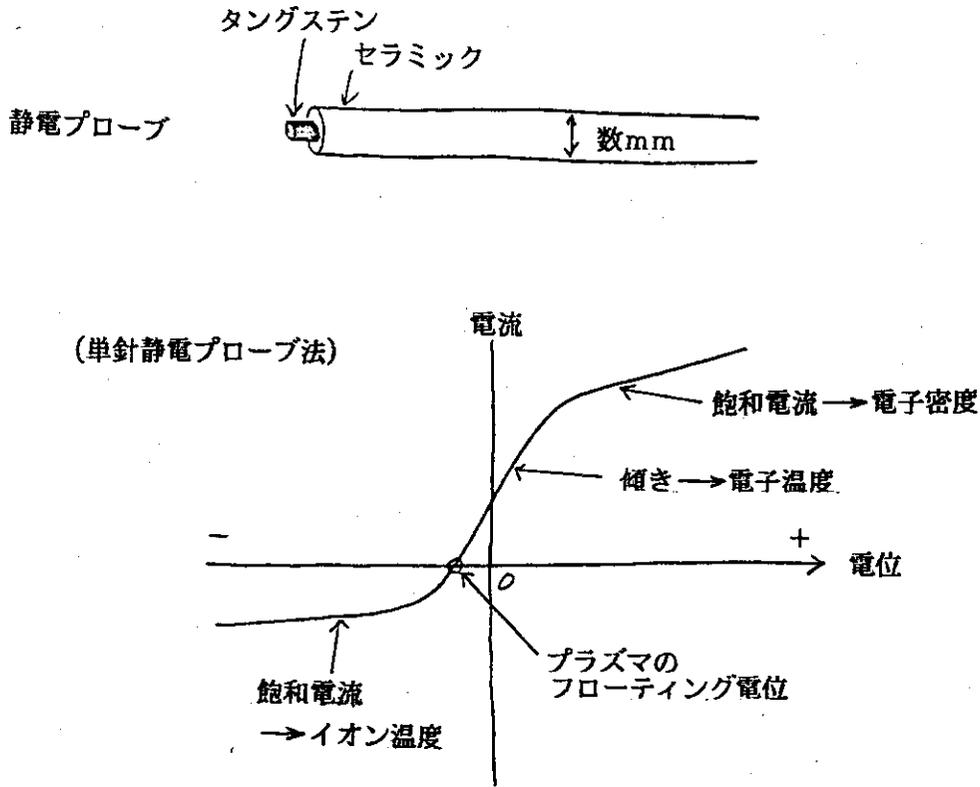
6.3 静電プローブ、磁気プローブ

静電プローブ（静電深針）

針金を使って電位を計るもの。計る場所をはっきりするため、先端以外を絶縁物で覆う。電位だけでなく、プラズマの密度と温度も計ることができる。針金には、融けにくいようにタングステンなどを使うが、それでも温度の高いところは計れない。トカマクの場合は、専ら閉じ込め領域の外側で、洩れてた低温・低密度のプラズマの計測に使う。すなわち、プラズマと壁（第一壁）との相互作用の計測に使う（第6-6図）。

磁気プローブ

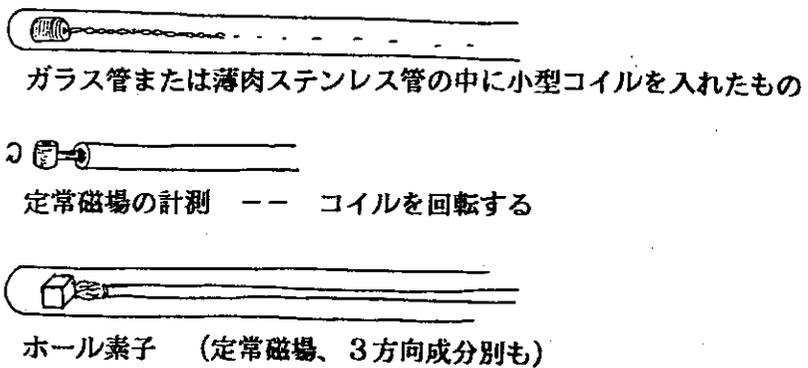
磁場を計るもので、細い棒のさき小さなコイルやホール素子をつけたもの。磁場には方向があるので、一般的には x 、 y 、 z の3軸成分を別々に計る必要がある。コイルは定常的な磁場や、時間変化の遅い磁場は計れない。また、蛍光灯のような薄いプラズマならばコイルやホール素子をガラス管などの中に入れてプラズマ中にさしこみ、プラズマの中の磁場を計ることもできるが、トカマクのようなプラズマでは無理である。トカマクでは、真空容器の内側に多数のコイル（近い将来にホール素子など定常磁場を計れるものになるであろう。）を設置しておいてプラズマの外側の磁場分布を計測する。磁場の一般的な性質やプラズマの性質を組合せて、磁気プローブのデータからプラズマの中の磁場分布などをかなり詳しく知ることができる（第6-7図）。



第6-6図 静電プローブ

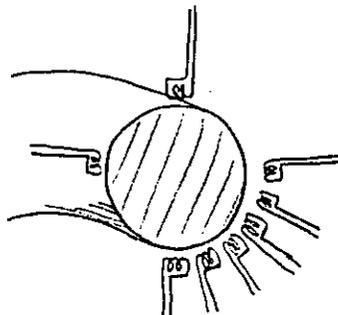
(注) 2本のプローブを使って、その間に電圧をかける複(ダブル)プローブ法、3本のプローブを使う3探針プローブ法もある。

(a) 各種の磁気プローブ



(b) トカマクの磁気プローブ

多数の磁気プローブを設置する



第6-7図 磁気プローブ

6. 4 ログスキー・コイル、ワンターン・コイル、反磁性コイル (第6-8図)

ログスキー・コイルは、プラズマ電流を計るもので、プラズマの外側でドーナツと鎖交する一周経路に沿ってポロイダル磁場を積分するように作ったコイルである。

ワンターン・コイルは、ドーナツ型プラズマの一周電圧を計るもので、実際にはドーナツを通り抜ける磁束量の変化率をはかる。

反磁性コイルはプラズマによって追い出される磁場(磁束)の量を計るもので、これからプラズマの中の蓄積エネルギー量が分かる。

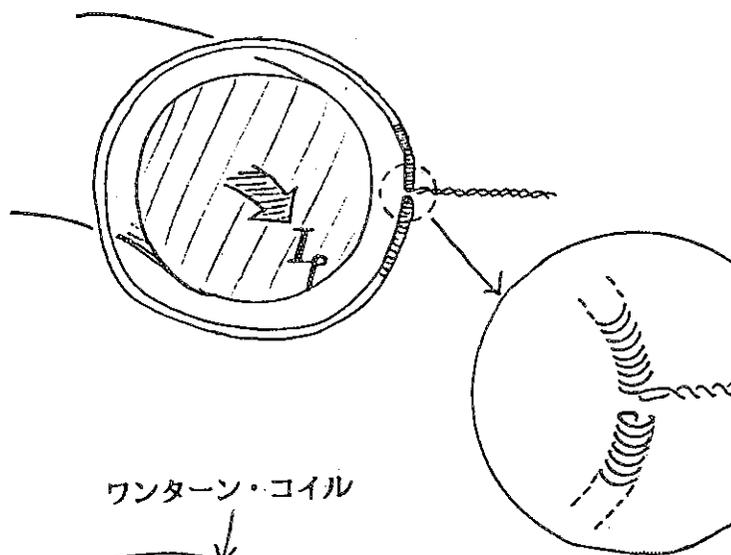
反磁性コイルはドーナツに沿ったトロイダル磁場の磁束量を、ワンターン・コイルはこれと直交してドーナツを通り抜けるポロイダル磁場の磁束量を計るものである。

これらのコイルは、6. 3の磁気プローブとともに「電磁気計測器」と呼ばれ、電気回路をつなぐだけで簡単に定常的にプラズマを監視(モニタ)できる基本的な計測器である。

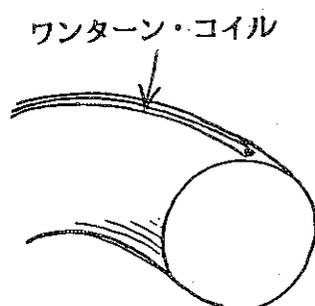
6. 5 高速度カメラ、プラズマ・テレビ

プラズマの形状(の変化)や、どこで壁と触っているか、などを知るために便利で重要なものである。ただし、プラズマが高温になると可視光を出さないので、普通のカメラやテレビで見えるのはプラズマ周辺の温度の低いところと、第一壁と触っているところだけである。また、トカマクのようなドーナツを接線方向から見るわけであるが、実際、ドーナツの断面周辺の形がよくみえる(第6-9図)。

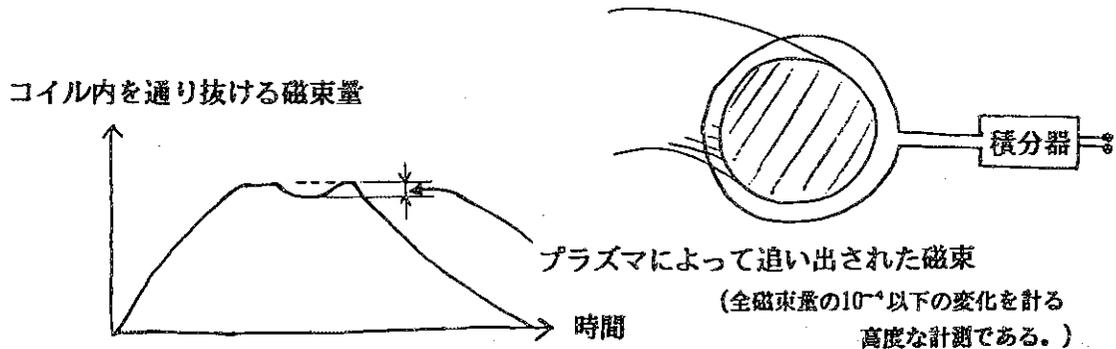
(a) ログスキー・コイル
(プラズマ電流の計測)



(b) ワンターン・コイル
(一周電圧の計測)



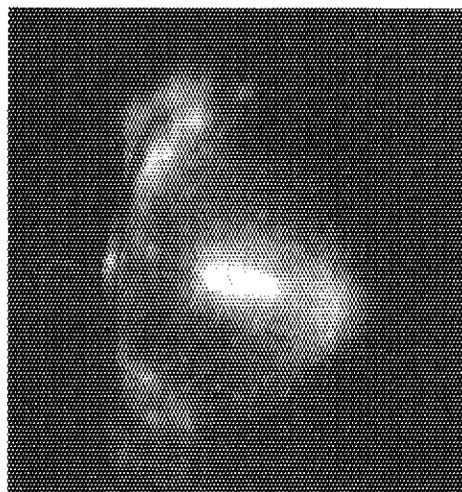
(c) 反磁性コイル
(プラズマ蓄積エネルギーの計測)



第6-8図 ログスキー・コイル、ワンターン・コイル、反磁性コイル

第6-9図 プラズマ TV 計測の例

D形断面プラズマの中でペレットがプラズマ
化して光っている。(原研のJFT-2M)



6. 6 分光計測

プラズマ粒子は、5. 1 2に述べたように各種の電磁波を放射する。赤外線領域（波長数マイクロン）より波長の短い領域で、波長分析による計測を分光計測という（第6-10図）。

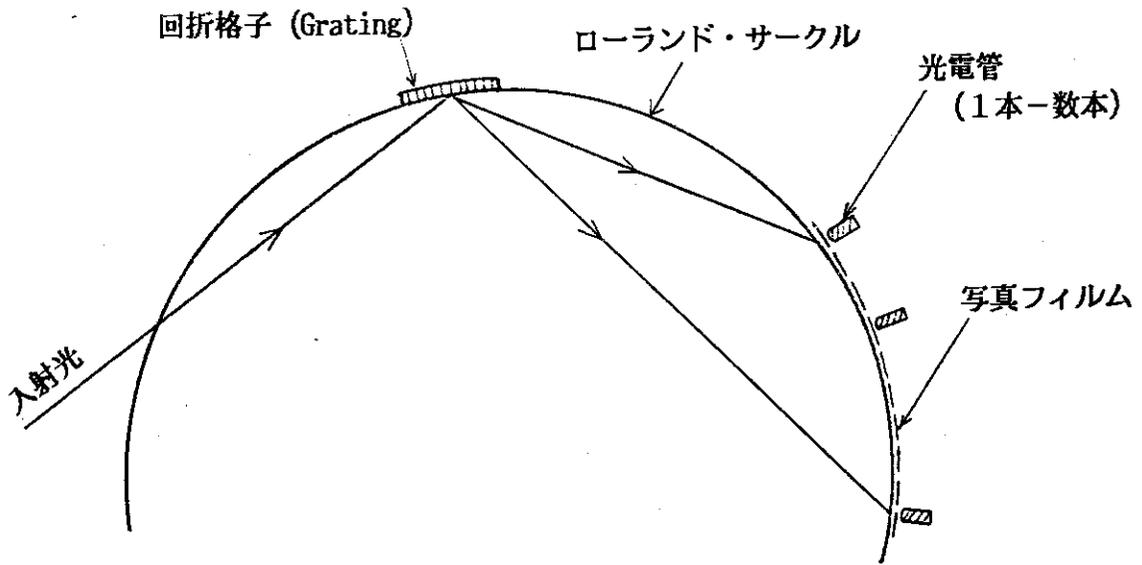
分光計測の第一の対象は、不純物の種類と量である。不純物の種類としては、元素の種類のみでなく、同じ元素でも電離荷数の区別もできる。

一本の線スペクトルについて見てみると、放射する光はイオン運動の速度によってドップラー効果を受けて波長が少しずれている。したがって、スペクトルの波長の広がりを見るとイオンの速度の大きさ、すなわちイオンの温度が分かる。

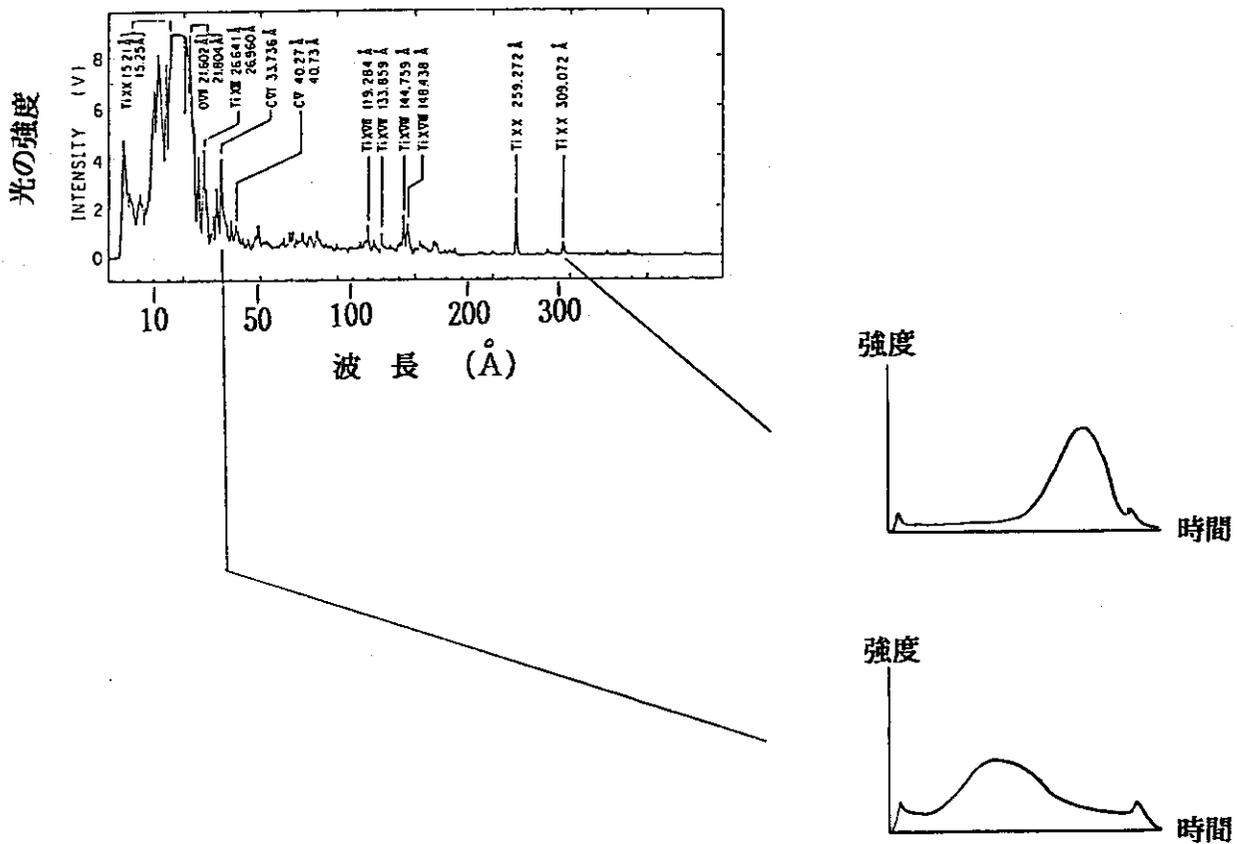
また、同じ元素の電離荷数のちがうイオンの光の強度の比からは電子の温度をだすことができる。

可視光の分光には、ガラスのプリズムを使うこともできるが、他の波長では一般的に梯子のように等間隔の無数の線のある回折格子をつかう。エックス線領域では、結晶の原子の配列を回折格子として使う。

分光器には、光電管（フォトマル）のような高感度素子で特定の波長の時間変化を測定するものと、分光したスペクトルを写真フィルムで測定するものがある。前者では一本、あるいは数本のスペクトルしか測定できないが、時間分解能がある。逆に後者では、広い範囲のスペクトルの分布を計ることができ、不純物の種類を探したりするのに便利であるが時間分解能がない。大抵の分光器は、光電管モードと写真分光モードとの切り替えができるようになっている。最近では、無数の超小型光電管を並べたと同じ性能の半導体素子、Multi Channel Plate が開発され、両方の特性をあわせ持つものもできている。この場合、膨大なデータの記録、処理をする必要がある（第6-11図）。



第6-10図 分光器の構成



第6-11図 分光計測データの例

6.7 マイクロ波周波数分析

磁力線に絡みついて旋回運動をしている電子は、旋回運動の周波数とその高調波の電磁波を出す。そのなかで、第二次高調波の強度から電子の温度を知ることができる。その周波数は、50-500GHzであり、マイクロ波から遠赤外線の領域である。この方法は、時間的に連続的に、比較的簡便に電子の温度の分布を計測できるので、広く使われるようになった。ECE, $2\omega_{ce}$, フーリエ分光、などとも呼ばれる。スペクトル分析には、ヘテロダイン法、マイケルソン干渉法、ワイヤ分光格子（グレーティング）などが使われている（第6-12図）。

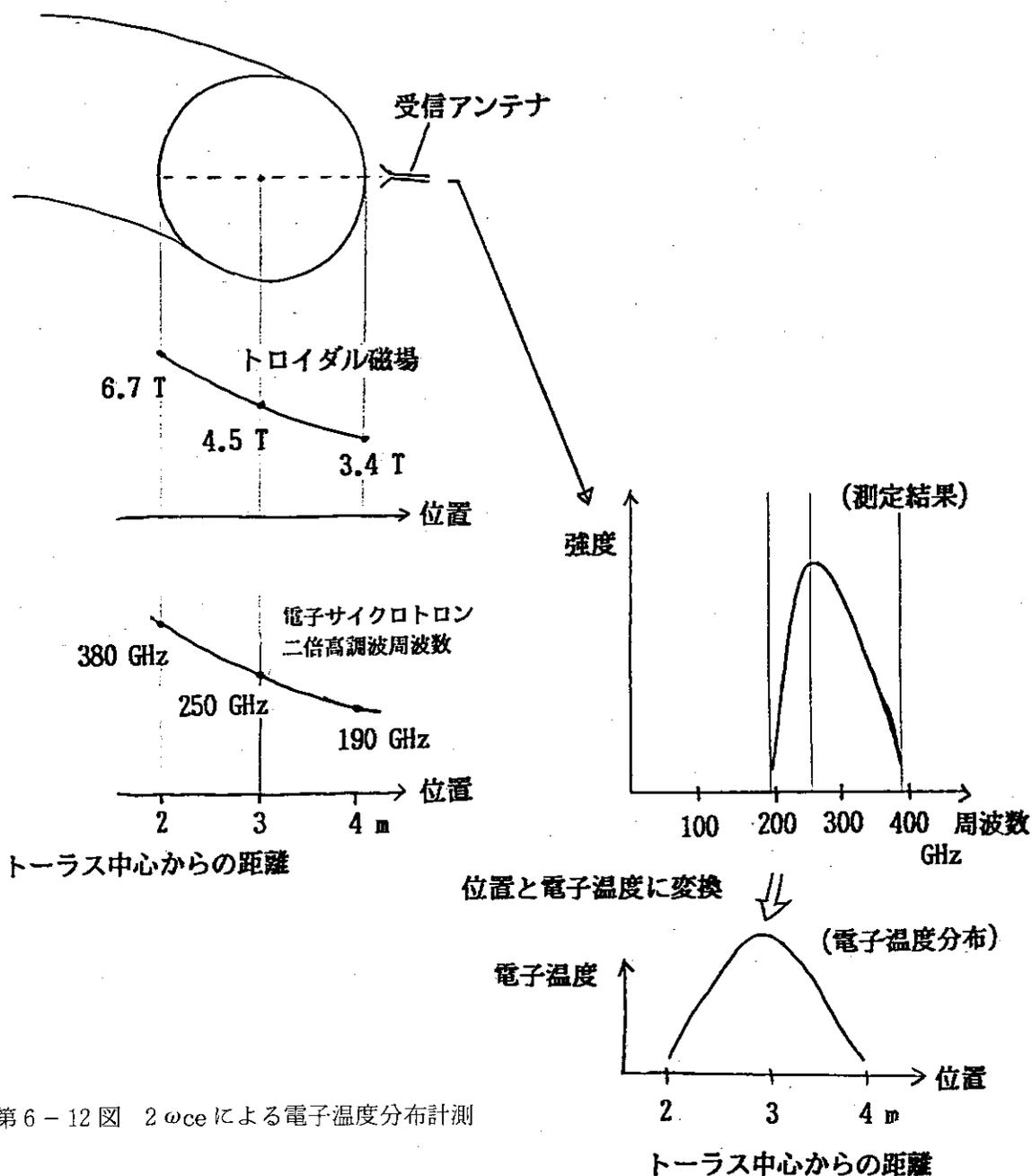
6.8 PINダイオード、ボロメータ

PINダイオード

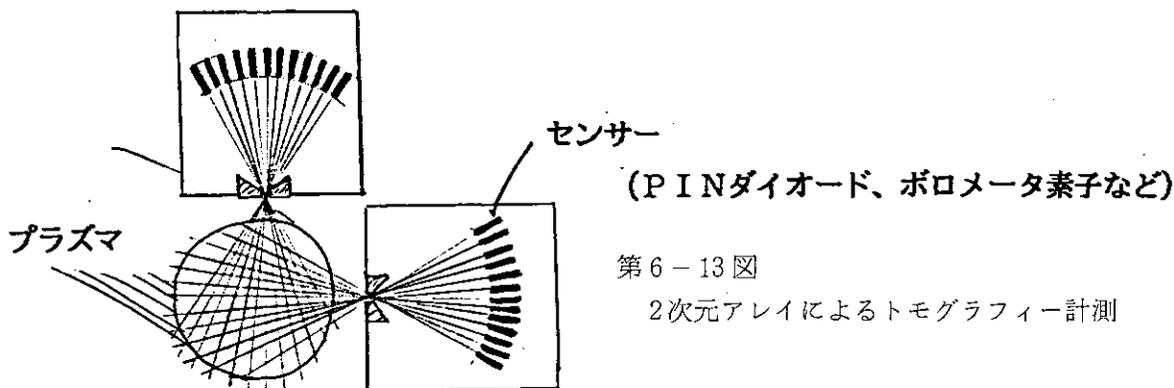
X線領域の放射を連続的に計測するもので、半導体を置くだけで計れるので簡便な計測器である。ただし、X線の強度はプラズマの温度と不純物の量とのによって決まるので、定量的な計測にはなりにくい。コリメータ（方向ぎめ用の覗き穴）と組み合わせた多チャンネル・ダイオード列を二つ使ってプラズマ断面内の分布を二次元的に測定する「トモグラフィー」も使われている。また、不純物の量が一定ならば、透過率の違う二種類のフィルタ（ベリリウムなど）を使って電子温度を計ることもできる（第6-13図）。

ボロメータ

プラズマからの放射パワーを計るもので、できるかぎり広い波長域に感じるようにする。黒く塗った感温素子とコリメータを組合せて、放射パワーの分布も計るようになるのがふつうである。



第6-12図 $2\omega_{ce}$ による電子温度分布計測



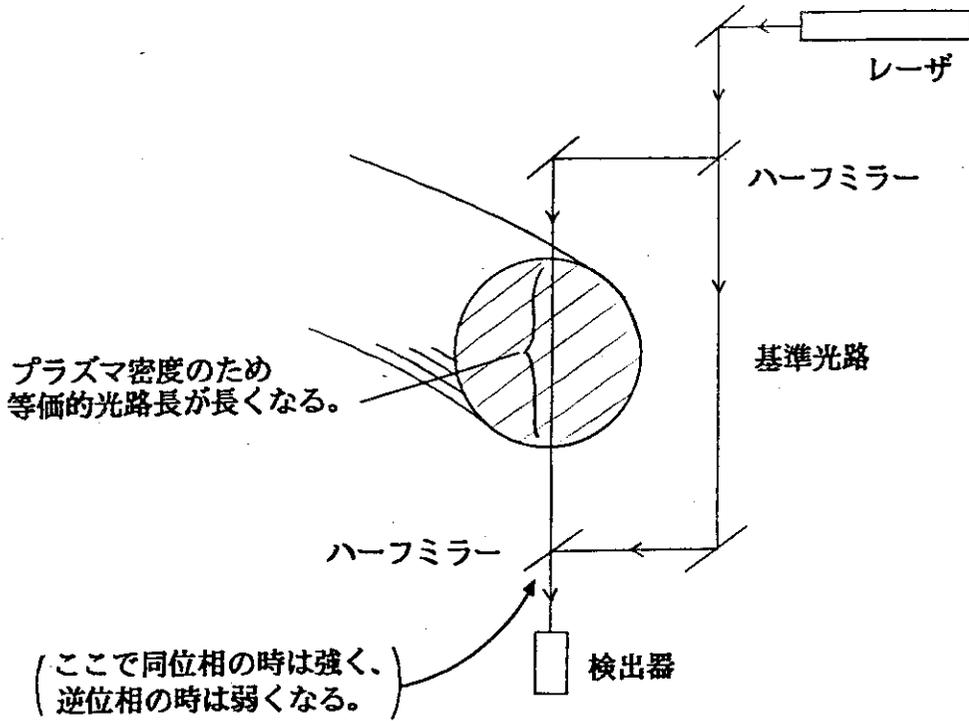
6.9 干渉計

プラズマの電子密度を計るため、マイクロ波またはレーザを用いた干渉計を使う。電子密度の高いときには波長の短い電磁波（たとえばCO₂ レーザなど）を使う必要がある。これは、やや複雑な装置であるが、密度を連続的に計測でき、一般的な計測器である。これは、プラズマのなかで光が進む速度が遅くなることを利用するものであるが、干渉計の光路に僅かの振動でもあると誤差を生じるので、かなり高度な技術が必要である。ただし、プラズマ密度の光路に沿った積分値しか計れない（第6-14図）。

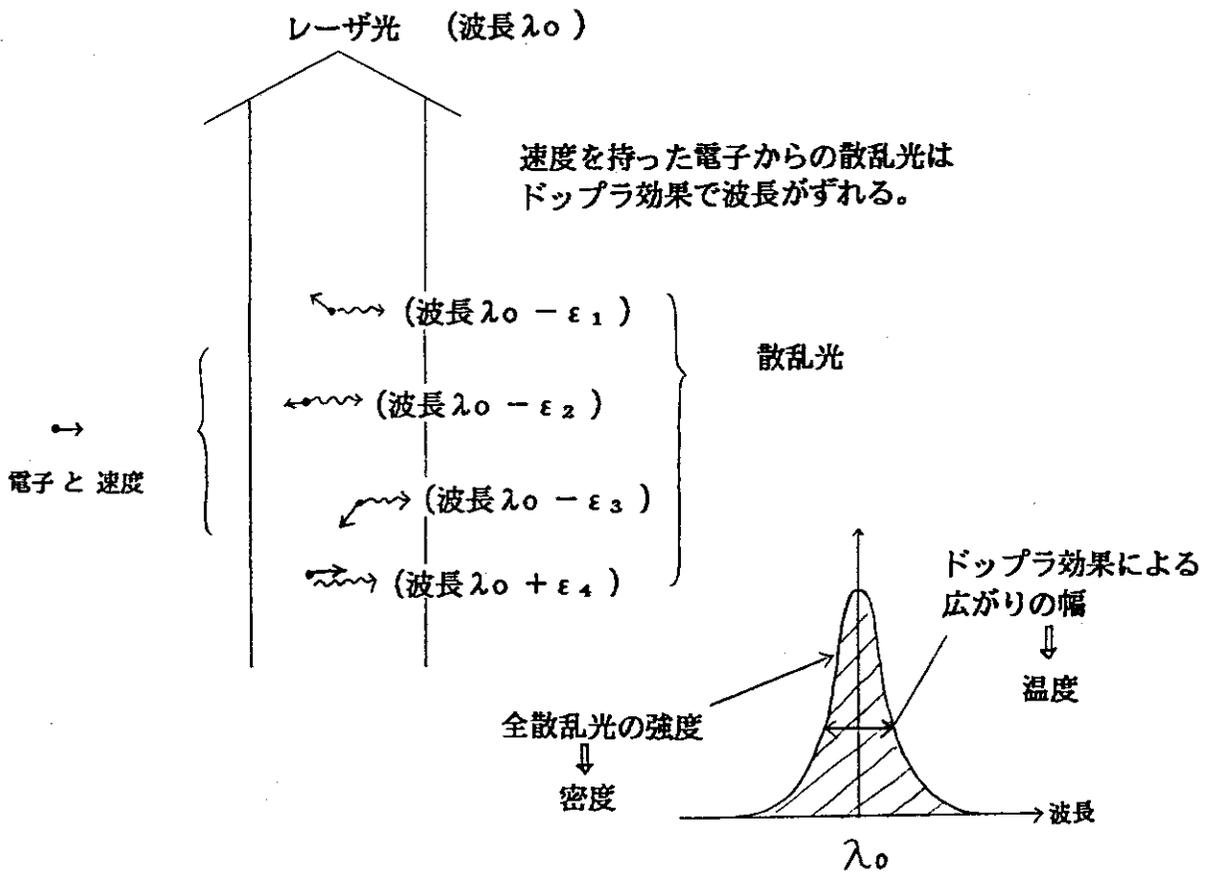
6.10 レーザ散乱計測

プラズマのなかに強力なレーザ光をうちこみ、プラズマ粒子からの散乱光を計測するもの。プラズマ粒子一個一個がその速度によるドップラ効果で元のレーザ光の波長からずれた波長の散乱光を出すことを利用する。光の散乱の割合がきわめて低く 10^{-10} 以下なので、GW級のレーザ光が必要である。散乱光のスペクトルの広がりから電子の温度が、散乱光の強度からプラズマの密度が分かる。このような強い光はルビーやガラス・レーザに限られ、連続的な測定はできず、約1秒に一回程度のパルスの計測しかできない。

現在では、レーザ散乱計測がもっとも信用できるものとされている（第6-15図）。



第6-14図 干渉計によるプラズマ密度計測



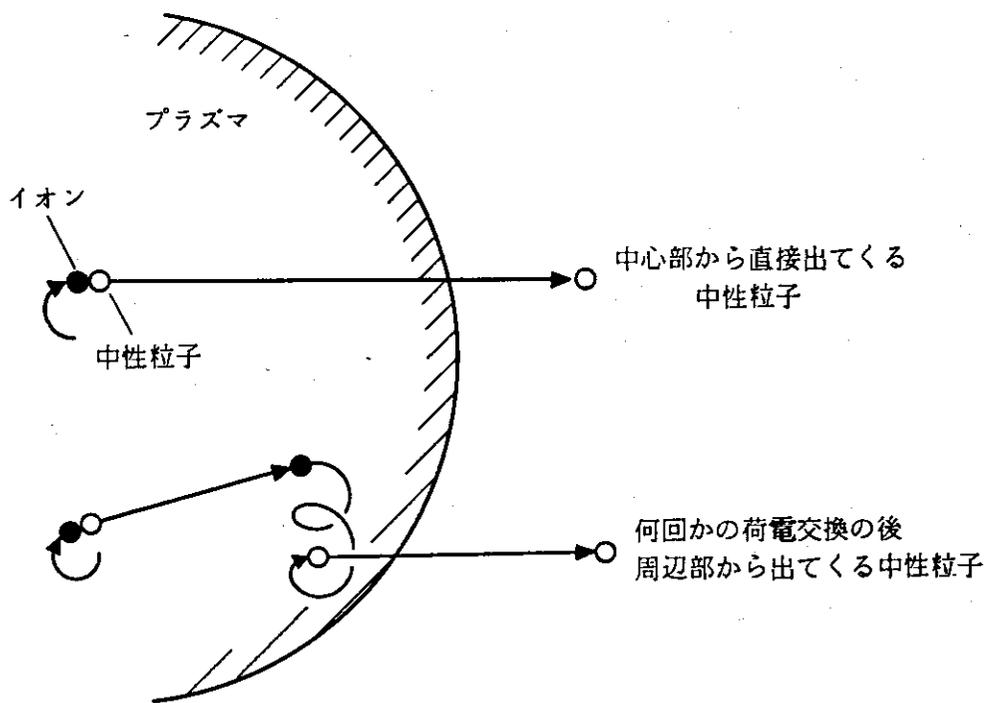
第6-15図 レーザ光散乱による電子温度、電子密度の計測

6. 1 1 中性粒子エネルギー分析

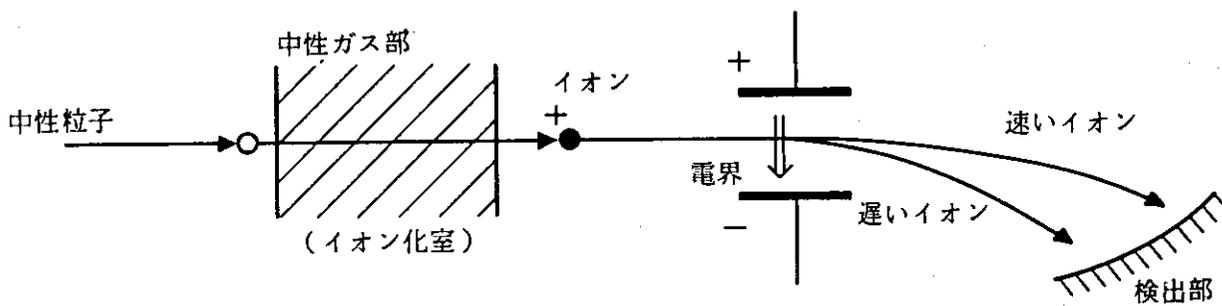
プラズマから飛び出してくる中性粒子を計ってプラズマの中のイオン温度を求めるものである。3. 3の5) に説明したように、中性粒子はプラズマのイオンと同じ速度を持って、磁場を感じずにでてくるので、そのエネルギーを計ることによりプラズマ内部のイオンの速度が分かる。ただし、プラズマのどの部分のイオンの速度かは計算で推測するしかない。このほうほうでは、プラズマの密度が高いときは、また、プラズマの温度が低く速度が遅いときは、プラズマの表面に近い部分の温度しか分からない。(第6-16図、第6-17図)

6. 1 2 計測用粒子ビーム

計測のためにプラズマ中に粒子ビームを打ち込むもので、中性の水素ビーム、ヘリウム・ビーム、重イオン・ビーム、アルファ粒子ビームなどがある。水素ビームはプラズマ中の荷電交換再結合光 (Charge Exchange Recombination 光) によってイオン温度の計測に使う。ヘリウム・ビームは同じ原理でイオン温度の計測に使うほか、散乱されたヘリウムのエネルギー分布からもイオン温度が求まる。重イオン・ビームやアルファ・ビームはその軌道の曲がりの方向や大きさからプラズマ中の磁場や電場を計測するために使う。ただし、この場合、磁場や電場の軌道に沿った積分値しか計れない。



第6-16図 中性粒子の出てくるプロセス



第6-17図 中性粒子エネルギー分析

電界の代わりに磁界を使うものもある。
また、電界と磁界を組合わせて、イオン
種別の判別とエネルギー分析を同時に行
うものもある。

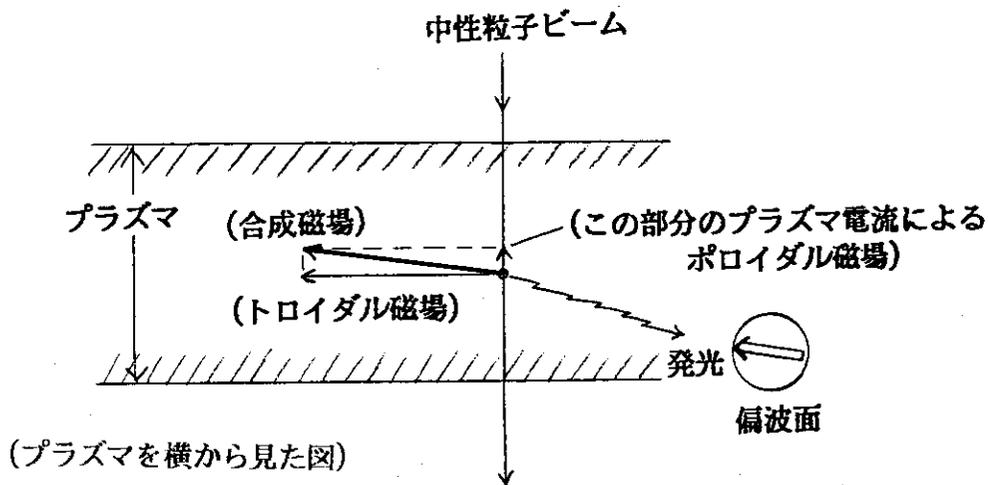
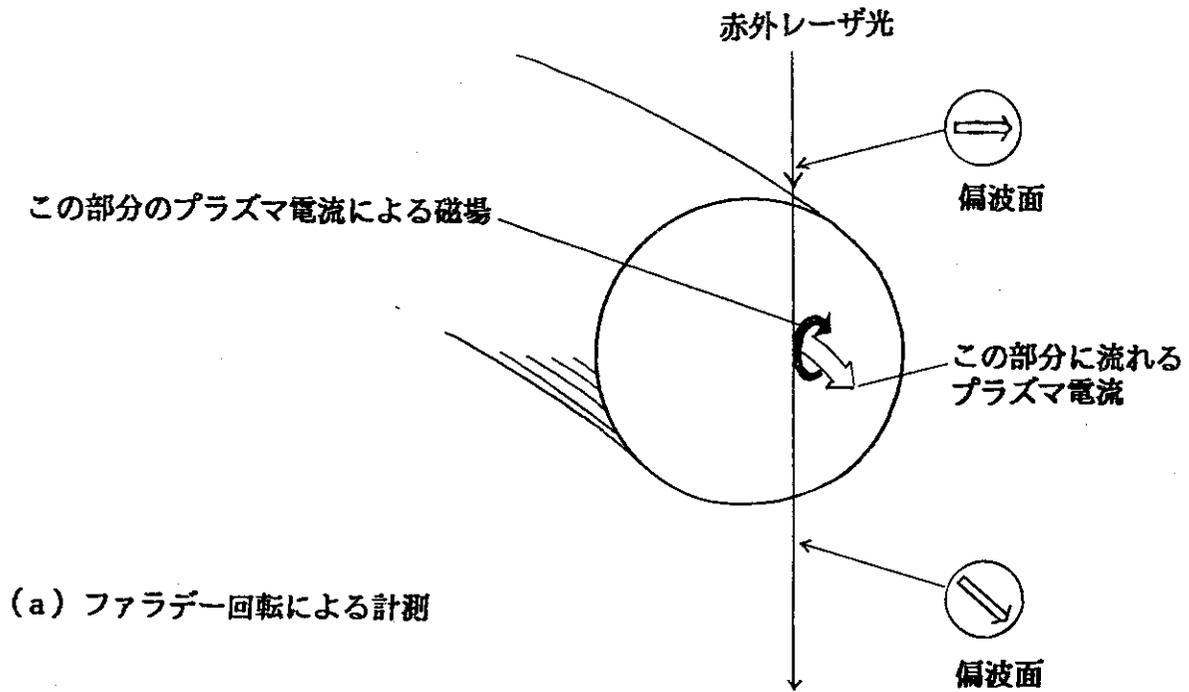
6.13 プラズマ電流密度分布の計測

トカマクにおいて電流は重要なパラメータであるが、そのプラズマ断面内での分布の計測は困難であり、今だに信頼できるものはない。いくつかの計測法が試験されているが、三つの例を紹介する。はじめの二つは、電流の作る磁場を計測して電流に読み変えるものである（第6-18図）。

レーザー光のファラデー回転 ——— レーザ光の偏波面が磁場によって回転することを利用する。密度計測用のレーザー光を利用できる。レーザー光の光路にそった磁場の積分値の計測。

粒子ビームの荷電交換再結合光の利用 —— 中性粒子ビームに沿って発光する光の偏波面が、そこに於て磁場（トロイダル磁場とプラズマ電流の作る合成時場）の方向に向いていることを利用して、プラズマ電流密度を求める。発光場所の磁場を計ることができる。

相互インダクタンスの周波数特性 ——— ドーナツに沿ったいくつかのコイルとの相互インダクタンスの周波数特性を計測し、電磁気学の手法で解析してプラズマの中の電流分布を求める。



(b) 中性粒子ビームをもちいた Charge Exchange Recombination 光による計測

第6-18図 電流密度分布の計測

6. 14 放射線計測

核融合プラズマ、すなわち、DDプラズマあるいはDTプラズマは、核融合反応による中性子を放射する。この中性子によってプラズマを計測することが出来る。

中性子の発生量は、プラズマ・イオンの温度につよく依存するので、中性子の量（1秒当たりの発生個数）からイオンの温度が（最も温度の高い部分の温度が）大体分かる。もしも、温度の分布形状とDTの密度分布が分かっていたら、正確な温度を知ることが出来る。また、中性子のエネルギーを精密に計ると、核融合反応で中性子に与えられるエネルギー（DTの場合14MeV）を中心に、熱運動の分だけ広がった分布なので、これからも温度を計ることが出来る。

中性子の計測自身は、新しいことではないが、プラズマ実験では速い変化に应答することが必要であり、従来の原子力分野における定常的な線量の計測とは異なる技術が必要である。

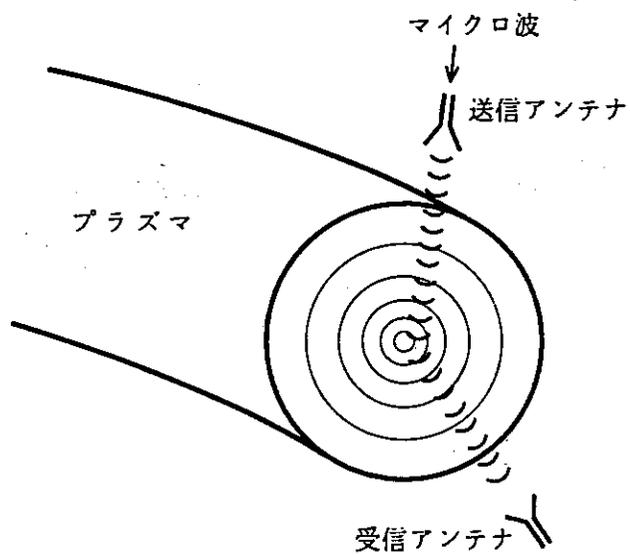
6. 15 その他の新しい計測

色素レーザーによる中性粒子（分子）の計測

波長を変化できる色素レーザーによって特定の分子を励起して発光させ、分子の種類と密度を計測するもの。プラズマの周辺部にある不純物の計測に適している。チタン蒸着中のような非常に薄い密度のものも計測できる。

マイクロ波散乱

プラズマによるマイクロ波の散乱（の角度分布、強度の時間変化など）から、プラズマ中の振動や波のようすをしらべることができる（第6-19図）。



第6-19図 マイクロ波散乱計測

密度の空間的非一様性でマイクロ波が散乱されるのを計測する。

7. 核融合炉の工学技術

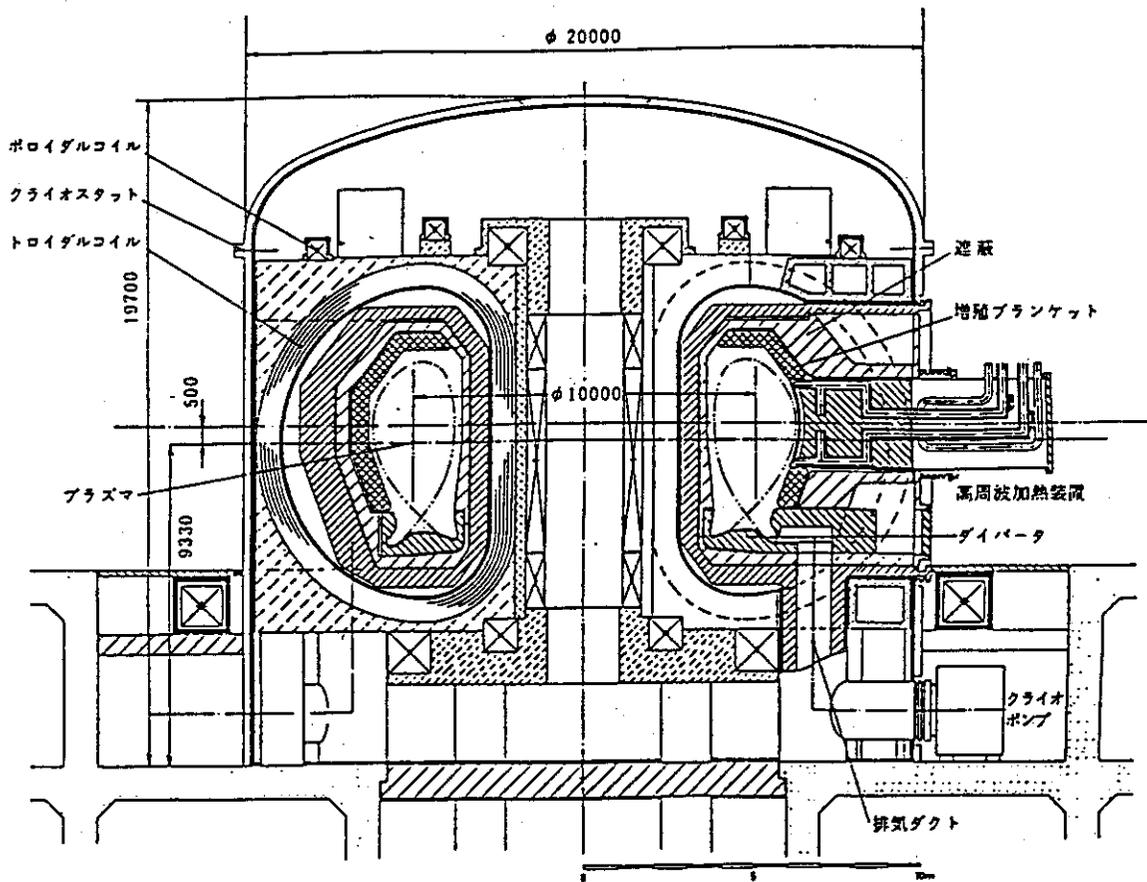
7.1 核融合炉工学技術の特徴

第6章までは、プラズマの特性を高めることに直接関係する研究開発を解説したが、核融合炉を実現するには多くの工学技術の開発も必要である。核融合炉には従来にない高度な工学技術が必要であり、その研究開発は、核融合以外の多くの分野の先端技術開発を促す面もある。

核融合炉の難しさは、つぎのようにまとめられるだろう。

- 1) プラズマの粒子密度が薄いので、炉（エネルギー源）として成り立つための最小寸法が大きいこと、
 - 2) プラズマのなかに熱を取り出すため冷却材の流れるパイプなどを入れられないこと。（ボイラーや核分裂原子炉などでは発熱部分のなかにパイプを多数入れて熱を取り出している。）このため、熱を取り出す壁（第一壁）の表面積が少なく、単位面積当たりの熱流が非常に高いこと。
 - 3) 放射性ガスである三重水素（トリチウム）がシステムの広い部分に分布していること。
 - 4) 核融合反応の結果、高速中性子が多量に発生すること。この中性子によって構造物が放射化すること。
 - 5) 磁場を作るための超電導コイルは液体ヘリウムでマイナス270° Cに冷やされたもので、かつ石油で約10m³にあたる電気エネルギーが貯まっている巨大な電気機器である。数億度の超高温のプラズマと絶対零度に近い極低温が隣り合ったシステムであること。
 - 6) プラズマを入れる真空容器が中心であるが、これは今までにないほど大きく、かつ強い電磁力を受ける構造物である。それとともに、プラズマが不純物を極端に嫌うため、真空がつながった部分の表面の清浄度の要求が高いこと。
- などである。

本章ではこれらの工学技術の開発について解説するが、現時点ではJT-60の次に続く「実験炉」が開発の目標である（第7-1図）。さらにその次の総合装置を「原型炉」と呼ぶ。



第7-1図 核融合実験炉の設計例

- ・ 2000年頃に運転開始を目指している次世代の核融合実験炉の設計の一例。
- ・ 本図は、1978-1988年に国際原子力機構 (IAEA) のもとで、日、米、ソ、欧 の四か国で共同設計したINTORである。
- ・ 当面の核融合工学技術の開発 (R&D) は実験炉の実現を目標とする。

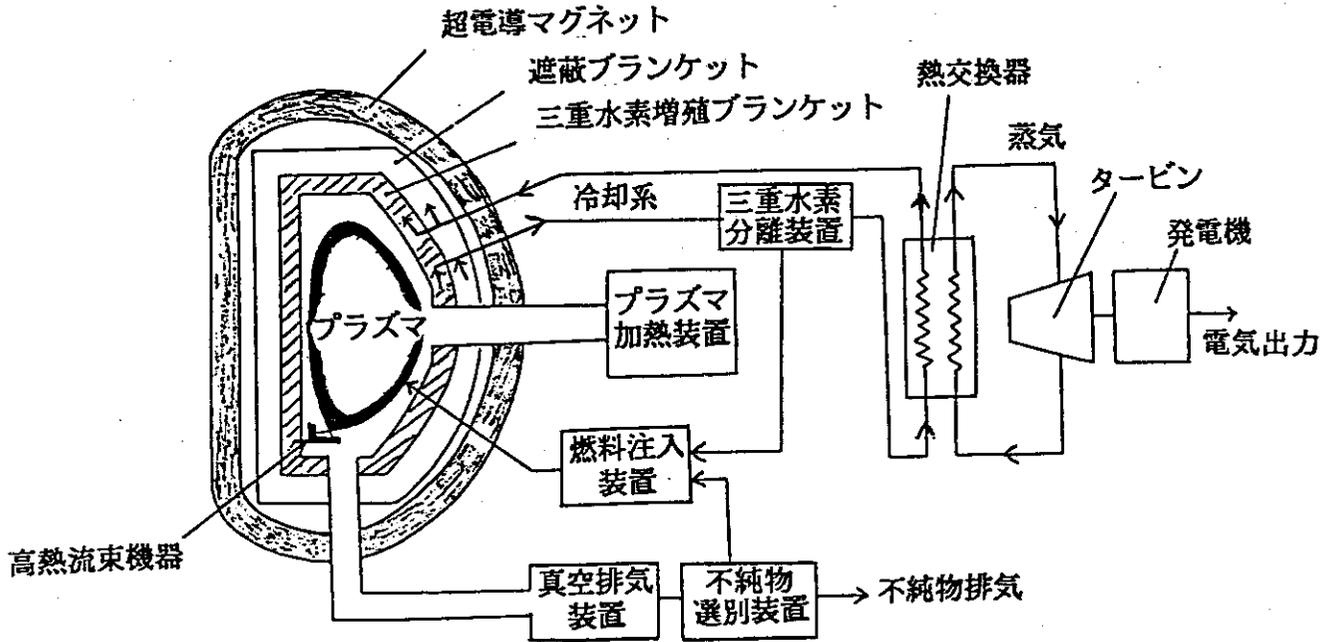
7. 2 核融合炉工学技術の分類

核融合炉の構成は、第7-2図に示すとおりで、これらを作るための工学技術が必要である。これらは互いに関連したものが多く、分類も難しいが、今までのトカマク型装置と質的に異なる新しい項目がある。超電導コイルとトリチウム、及びDT反応の中性子に関する技術である。また、ブランケットは、第一壁、冷却、遮蔽等、いろいろな要素を総合した複雑なもので、これに係わる開発項目がいくつかあり、ブランケットのなかでトリチウムを製造するので、トリチウム技術とも深い関連がある。

以下、工学技術をつぎのように分類して説明する。

1. 超電導コイル
2. 燃料供給技術-----トリチウム取り扱い技術そのものである。燃料である重水素と三重水素（トリチウム）を供給し、また燃え残った燃料ガスを排気する技術。（運転開始初期の）真空排気技術もここに含まれる。トリチウムの漏れがないようにすることが最も重要である。ペレット入射技術も含まれる。
3. 高熱流束機器技術-----高い熱流を受けるダイバータ板等の技術。4. のブランケットのプラズマ対向面の部分とも言える。
4. ブランケット技術-----中性子のエネルギーを熱に変えて取り出す技術とトリチウム製造技術を組合せる。電磁力と高温に耐える構造の開発。
5. 遠隔操作技術-----保守等のための技術。構造設計と組合せて最も経済的な設計とする。
6. 材料技術-----長期的観点から核融合炉に適した材料を開発する。
7. ニュートロニクス-----設計に必要な基礎データの精度を高める。
8. プラズマ加熱技術-----第5. 6節に述べたので、本章では触れない。
9. プラズマ計測技術-----第6章に述べたので、本章では触れない。
10. 電源技術-----1. のコイルの電源である。トロイダル・コイルでは異常時に電磁エネルギーを速やかに取り出すこと、ポロイダル・コイルでは現在（JT-60）とほぼ同様の機能を約三倍大容量化することが必要であるが、困難な開発ではない。

このほか、核融合炉の安全性、法的取り扱いに関する検討が必要である。



第7-2図 核融合炉の構成

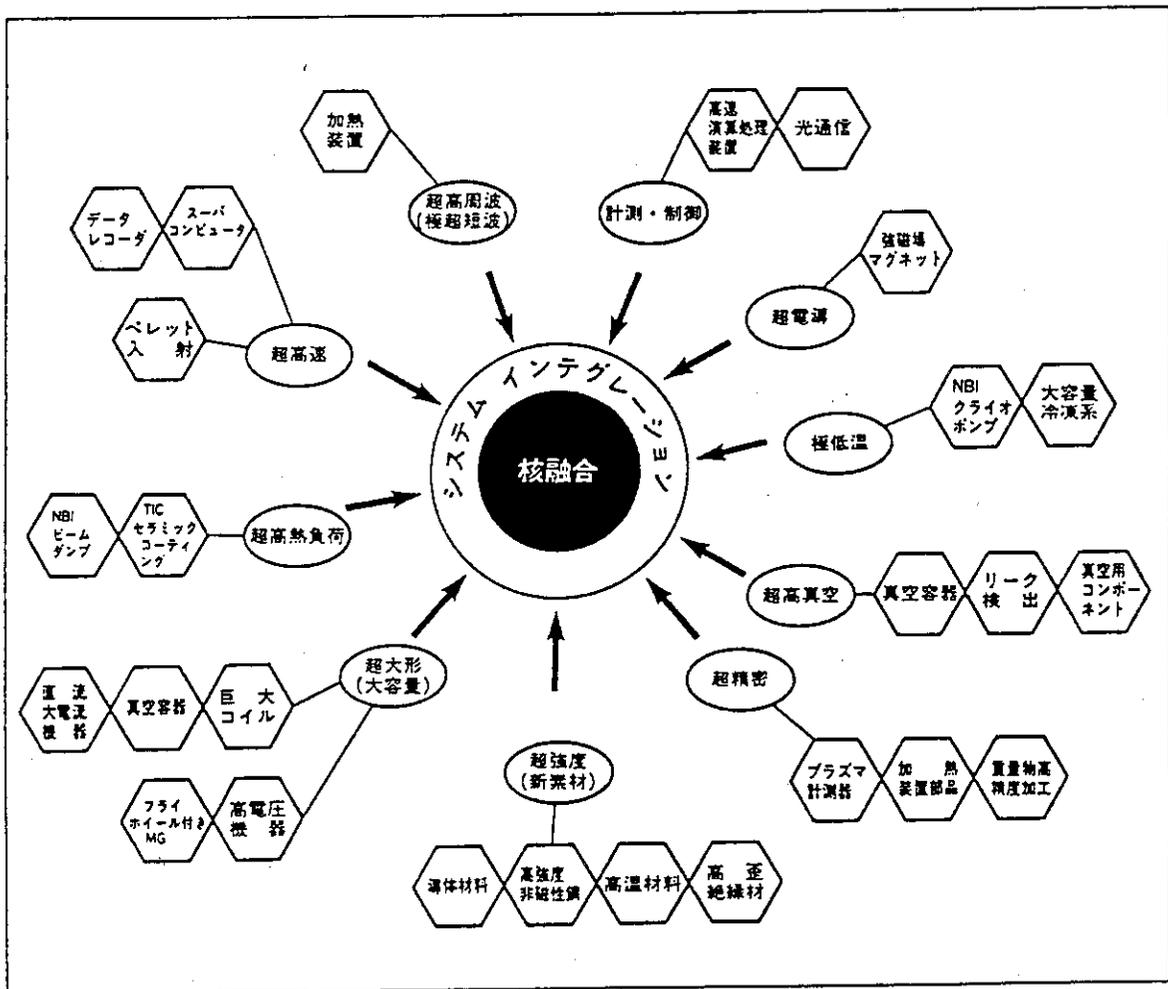
(参考) IAEAのもとで、日、米、欧、ソ の四か国協力で1988年から始まった核融合実験炉 (ITER) の設計活動では、次のようなグループに分類して作業を進めている。

	超電導 コイル	ポロイダル 磁場	炉心構造	保 守	加熱・ 電流駆動	プラズマ 対向機器	燃 料 サイクル	ブラン ケット	本書の 分 類
物 理									(9)
基礎技術 工 学									(6)
核工学									(7)
システム 分 析									
		磁場設計 電磁力 制御電源	真空容器 シールド 外部建屋	遠隔操作 運 搬		第一壁 ダイア リミタ	排気ポン プ トリウム 燃料供給		
本書の 分類	(1)	-- (10)	--	(5)	(8)	(3)	(2)	(4)	

7.3 核融合炉工学技術と他分野の関連 (波及効果)

核融合炉は、超電導、極低温、超高温、中性子環境、大電力制御、等々の先端技術を総合して初めて実現出来るものである。すなわち、核融合の研究開発は、狭義のエネルギー技術の枠を超え、幅広いハイテク (高度先端技術) の先導的役割を果たすものである。

核融合の研究開発と他分野の工学技術との関連は、今後ますます深まるものと考えられるが、現在までもすでに多くの波及効果が生まれている。62年度に日本原子力研究所と日本原子力産業会議が共同で実施した調査から主な結果を第7-3図と第7-1表に示す。



第7-3図 核融合炉工学技術と他分野との関連

第7-1表 核融合技術の他分野技術への波及効果

核融合技術分野 他分野	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	中性子工学・核融合炉工学	高真空技術	超電導マグネット技術	極低温技術	高エネルギービーム技術	高周波エネルギー技術	パワーエレクトロニクス技術	計測・制御技術	コンピュータ・通信技術	材料	生産・加工技術	システム・エンジニアリング	保守・点検技術	その他
エネルギー	●		●	○			●	○		●	●	●	●	○
エレクトロニクス		○		○	●			●	●					○
情報						●			○					
高エネルギー加速器	○	●	○	○		○		○	○	○		○	○	
海洋・宇宙		○			●				○	○			○	
ライフサイエンス				○				○		○				
交通			○							●				
一般産業		●			●	○				○	●			
その他・共通			○				○	●				○	○	○

注) ● : 波及効果が大きい

○ : 波及効果が認められる

他分野に波及した核融合技術の例

大電流超電導直流コイル 直流遮断器 極低温用高Mn系構造材 セラミックスと金属との接合技術 電子ビーム溶接(E B W)技術 多関節アーム レーザ誘起蛍光分光測定法 セラミックターボ分子ポンプ 改良型ヘリウムスニッファ法	大電流イオン源 分光分析用多チャンネル検出器 電力用半導体素子 スーパーコンピュータ 高Mn非磁性構造用鋼 耐熱・耐腐食・高硬度 セラミックコーティング技術
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

7. 4 超電導コイル技術

1) 超電導コイルとは

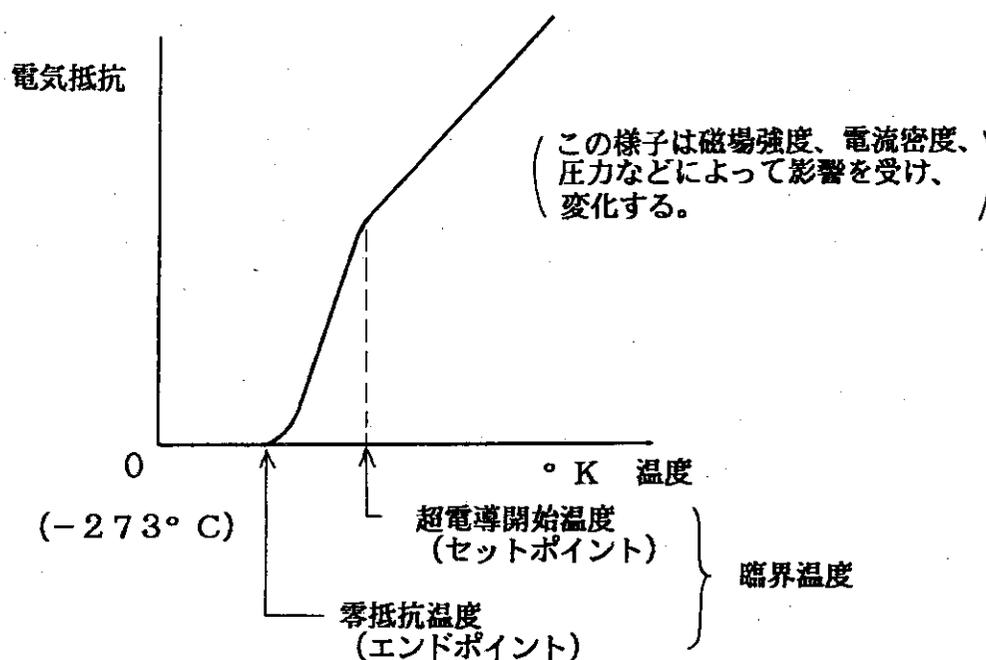
4.6 補足に述べたように、プラズマ閉じ込め用の磁場を発生するのに銅のコイルを用いると銅の電気抵抗による発熱が大きく、核融合炉のシステム全体として正味のエネルギーを生産することは不可能に近い。これを解決するのが超電導コイルである。

超電導コイルを用いれば、磁場を作って維持するために電力を必要としない。コイルの温度を極低温に保つためにいくらかの冷凍パワーは必要であるが、システム全体のエネルギーの収支に影響を与えるほどではない。

超電導は、最近の高温超電導材料のニュースで広く知られるようになったが、ある種の材料を非常に低温に冷やすと電気抵抗がゼロになる現象である。1908年に液体ヘリウムを初めて作ったオンネスが1911年に水銀を冷やしてみても発見した現象で、超電導材料を輪にして電流を流すと冷却されているかぎり電流が永久に流れつづけ、この電流によって磁場も保たれる。磁場を保つのに電力が必要ではないことは永久磁石を考えれば不思議ではない(第7-2表, 第7-4図)。

最近の高温超電導は、核融合に使えるようになるにはまだ10年以上はかかると予想されている。これができれば、核融合炉はその技術面が大幅に易しくなり、その実現が早まるであろう。

ここでは、従来の液体ヘリウムを用いる超電導コイルの技術について簡単に説明する。



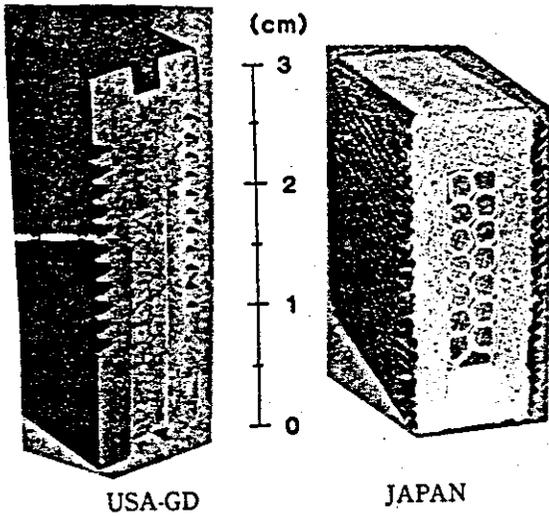
第7-4図 超電導現象

第7-2表 核融合用コイルに使える超電導物質

	臨界温度	臨界磁場	10テスラでの臨界電流密度
Nb-Ti	9 °K	11.5 °K	1 x 10 ⁴ A/cm ²
Nb ₃ Sn	18	21	5
(Nb, Ti) ₃ Sn	18	23	7
V ₃ Ga	15	21	6
Nb ₃ (Al, Ge)	20	40	2

2) 超電導コイル開発のポイント

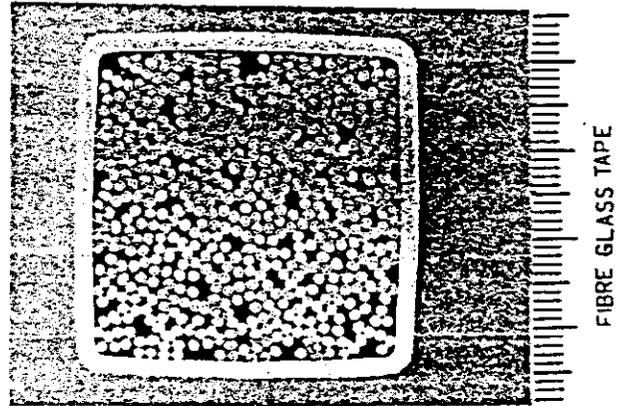
- 1・導体の安定化――超電導線がもしも超電導性を失うと電気抵抗がでて発熱し、まわりの超電導線もつぎつぎに超電導性を失う。これを防ぐため、超電導線のまわりを銅で包むことが一般に行なわれている。これを「安定化」という。このためにどの位の量の銅で包むかが難しい判断である。
- 2・安定化(2)――超電導線を各種の乱れに強くするため、毛髪ほどの細い線にして編み線にするなどの工夫が行なわれている。超電導線は磁力線の動き、変化に弱いので、パルス的に通電するポロイダル・コイルには特に各種の構造が考えられている(第7-5図)。
- 3・強い電磁力に耐え、かつ、外部から熱が侵入しない構造――導体には強い電磁力が加わり、これを支持のための構造体(ケース)に伝えなければならないが、これに太い構造を使うと、今度はこの構造を伝わって多量の熱が侵入してしまう。
- 4・冷却の構造、方法――運転中の熱除去だけではなく、常温からヘリウム温度までの冷却も考えなければならない。特に初期冷却および逆の昇温では大きな構造体の一部分が冷えて他の部分が冷えていないと、熱膨張(収縮)の差による応力のため、損傷する危険がある。
- 5・リード線引き出し部――コイルは超電導でも、電源につなぐにはどこかで銅(常電導)のケーブルとつなぐ必要がある。この部分から熱が侵入して超電導性をこわすことのないようなものとする必要がある。
- 6・冷凍機――大きな冷凍パワーの液体ヘリウム冷凍機の開発が必要である。



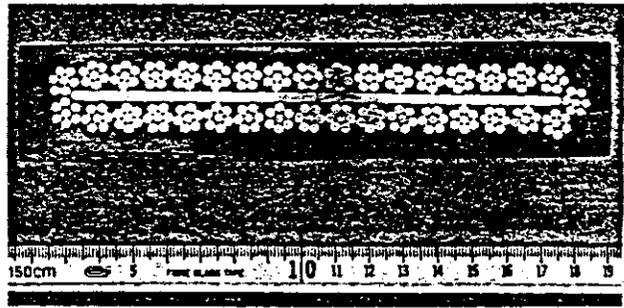
USA-GD

JAPAN

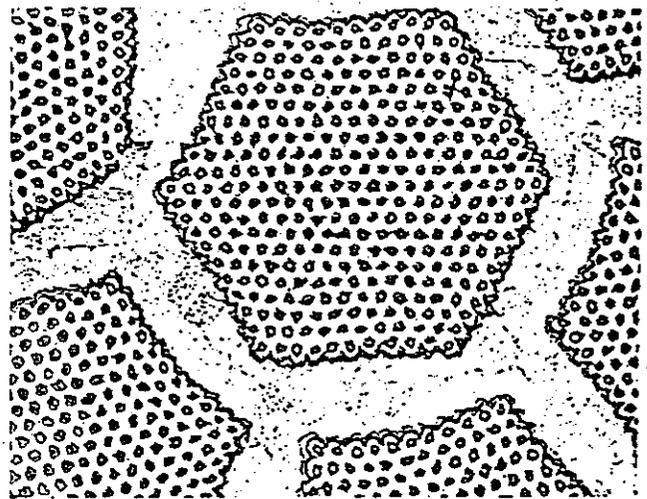
LCTコイルの導体



30kA強制冷凍パルス導体(JF-30) (ジャケット封入型, 34.5mm×34.5mm)



50kA浸漬冷凍パルス導体(JA-50) (内部支持型, 17.5mm×144.5mm)



ブロンズ法で加工した Nb₃Sn 極細多芯線の断面の例。芯径 5 μm

第7-5図 安定化した超電導導体の断面

3) 開発計画

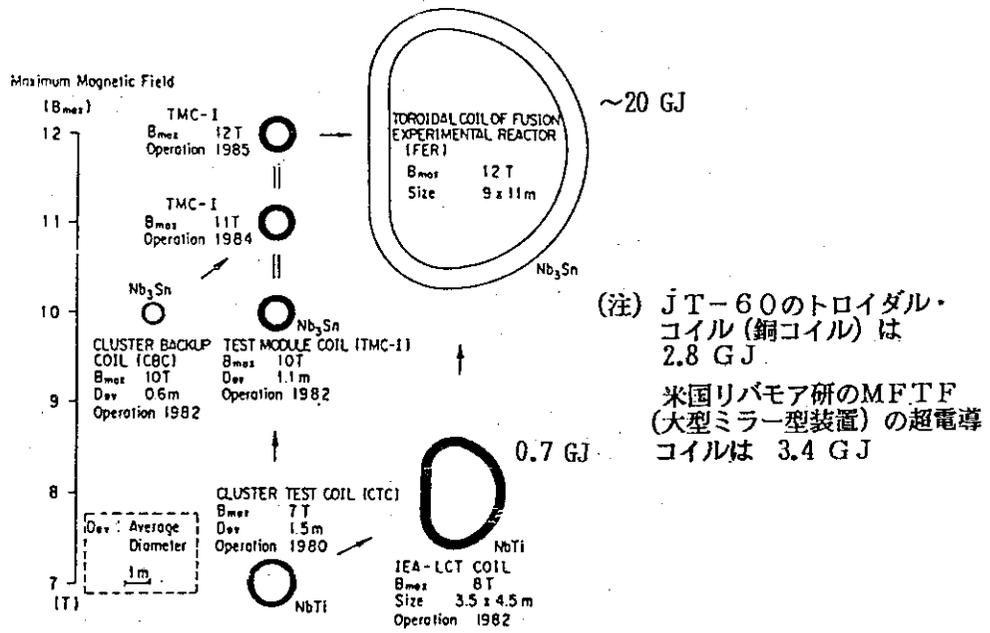
トロイダル磁場コイルは、磁場は定常であるが寸法が大きく磁場も強い。磁場はドーナツの中心部でつよく外側で弱くなる分布を持ち、ドーナツ中心部ではプラズマ中心部の磁場の二倍以上の磁場に耐える必要がある。コイルに貯えられる磁気エネルギーは、次期装置で約20ギガジュール（石油で、約6m³）にもなる。また、トーラス中心部の直線部では、上下方向の強い引張力と中心向きの強い向心力（圧縮力）が働く。

第7-6図はトロイダル磁場コイルの開発ステップの案を示したもので、寸法を大きくする方向と磁場を強くする方向の両方の開発を重ねて実験炉のコイルを作ることになっている。

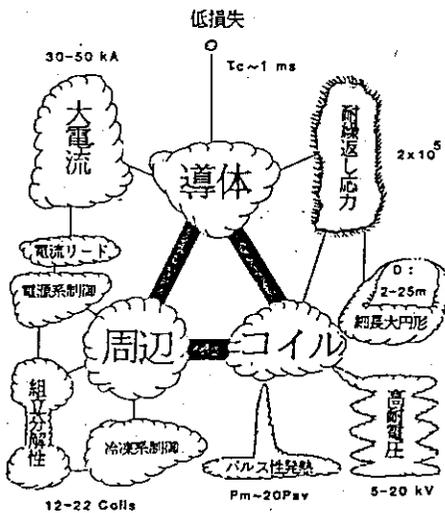
ポロイダル・コイルは、形状は単純な円形であるが、大きいものは直径が20mにもなり、かつ、常に電流を変化させながら運転する点で難しいものである。原理的に電流や磁場の変化に弱い超電導線をパルス運転するため、色々な工夫が行なわれており、すでにパルス運転の点では実験炉の技術は見通しがあるといえる。また、トロイダル・コイルでは電流を立ち上げたあとはコイルのなかで電流路を閉じて永久電流にして、外部の電源とつながるリード線には電流を流さないで置くことができるが、ポロイダル・コイルでは常に外部の電源とつながり電流を制御する必要がある。ただし、制御の時に取り扱うエネルギーの量は、JT-60の数倍程度である。

第7-7図にはポロイダル・コイルの技術課題を、第7-8図には開発計画の一案を示す。

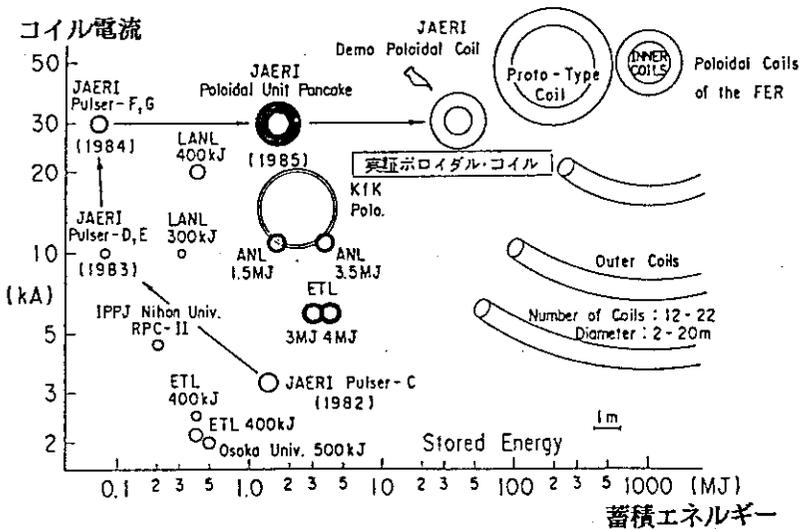
なお、トロイダル・コイルに関しては、1984年からIEA（国際エネルギー機構）のLCT計画（Large Coil Task）でコイル数6個だが、合計エネルギー0.7ギガジュールの超電導コイルの試験が行なわれ、ヒータを用いた常電導転移試験も含めて、安定な運転が確認された。



第7-6図 原研のトロイダル・コイル開発計画



第7-7図 超電導ポロイダル・コイルの技術課題



第7-8図
ポロイダル・コイルの開発計画

7.5 燃料供給技術 (トリチウム技術)

1) 燃料供給技術 (トリチウム技術) とは

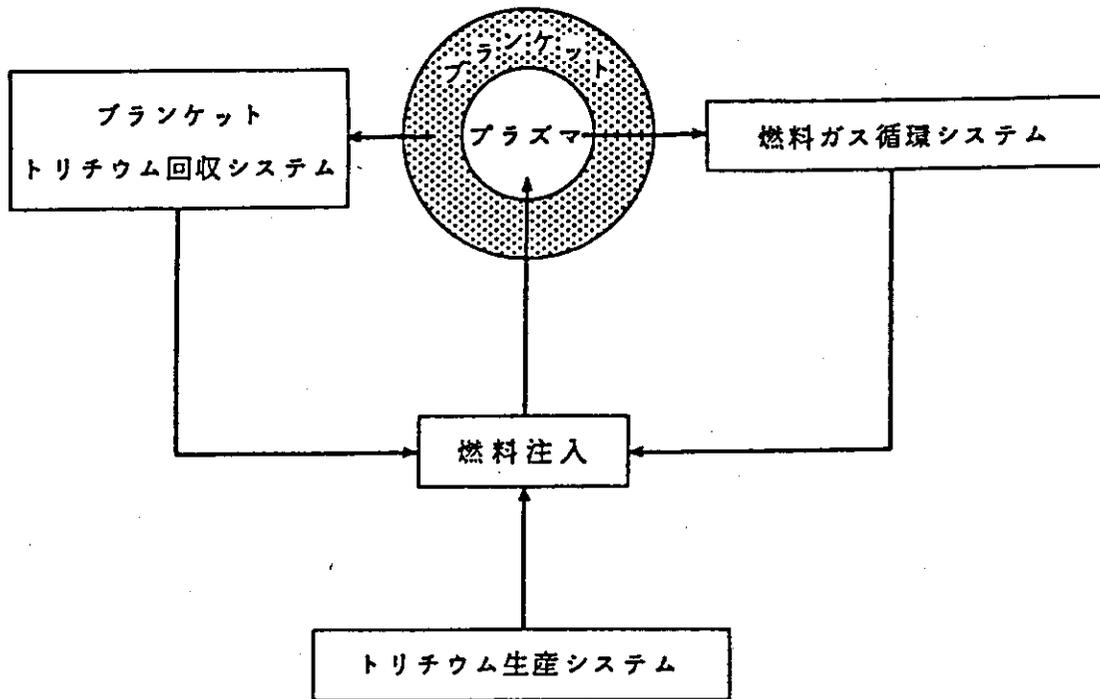
実験炉からあとの装置では実際に重水素と三重水素を使って核融合反応を起こすが、その三重水素 (トリチウム) は半減期12.3年の放射性ガスである。トリチウム1グラムで1万キュリーと割合に放射性が強く、水などの水素化合物の水素と置き変わりやすい、また、高温で金属の中を透過しやすい、など取り扱いが難しい元素である。ただし、間違っても人の体に入ってもストロンチウムなどのように体のなかに残ることはなく、数日で体外に排出されるので、少量ならば少なくともその個体には殆ど影響がないといわれている。遺伝的な影響については不明である。

さて、プラズマのなかで実際に反応して消費される (燃える) トリチウムがほんの僅かであることは核融合装置の特徴の一つである。すなわち、プラズマから洩れでて真空ポンプで排気されるガスは殆ど燃え残った重水素とトリチウムであり、わずかに反応生成物のヘリウムが混ざっている。排気した混合ガスからヘリウムなど不要なガスを取り除いて重水素とトリチウムを回収し、再びプラズマに供給する (第7-9図)。

なお、トリチウムは自然に存在しないので、核融合炉のブランケットのなかでリチウムに中性子を当てて製造する。運転初期に必要なトリチウム (初期装荷) は重水を使う原子炉から発生するトリチウムを使う予定である。

トリチウム製造も燃料技術であるがブランケットとの関連が深いので、本書ではブランケット技術として解説する。

上記のような燃料供給に関する技術のポイントは、漏れのない系を作り、運転することである。



《トリチウム安全取扱技術》

格納・除去技術
廃棄物処理・処分技術
計量管理技術(分析・測定)
放射線管理技術

第7-9図 核融合炉におけるトリチウム燃料サイクルの概念図

2) 燃料供給技術開発の概要

燃料供給技術の内容はつぎの通りである。

1. 真空排気技術-----トリチウムの付着、洩れの少ない排気ポンプ、ガスケット、バルブなどの開発。
2. 真空表面に関する技術-真空に面する表面へのトリチウムの付着の様子を調べ、また、付着の少ない材料の開発。さらに付着したトリチウムを取り除く技術。
3. トリチウム閉じ込め技術-----建てものの外へはもちろんのこと、建てものの中へもトリチウムを洩らさない技術。また、トリチウムを安全に保管する技術。
4. トリチウムのモニター、検出技術
5. 不純物除去技術-----プラズマから排気ポンプで回収した燃え残りの燃料ガスからヘリウムなどの不要な成分を取り除く技術。
6. 燃料注入技術-----DとTの混合比を計り、調節し、真空容器のなかに注入する技術。注入方法には、ガス注入、ペレット入射、中性粒子ビームなどがある。

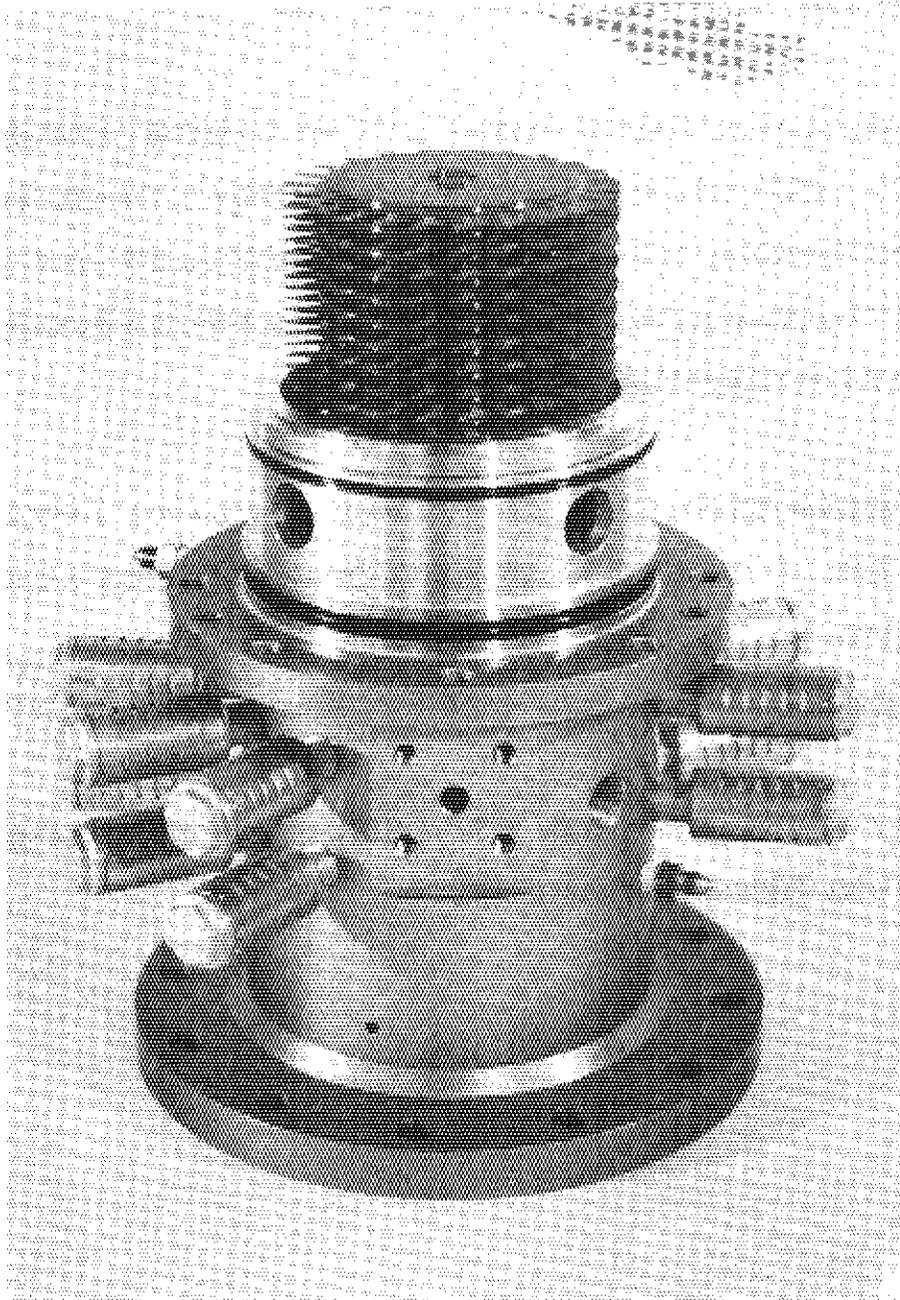
以下にこれら技術開発の例をいくつかを説明する。

(1) 真空排気ポンプの開発 (第7-10図)

従来のポンプでは、潤滑油やゴムのガスケットにトリチウムが吸着されるので、保守の観点から好ましくない。また、従来は、かなり長いパイプの先にポンプを設置して真空容器を排気しているが、こうするとパイプの部分のコンダクタンスが効いて、有効排気速度がポンプの排気速度のほんの一部しかとれない。

これらの点を改善するには、まず、潤滑油を使わないことが望ましい。これにはガスの流れを潤滑油の代わりに使うガス・ベアリングを使用し、また、動力にもガス・タービンを使うものが考えられている。こうすると、電気モータと異なって、強い磁場のなかでも使え、プラズマにポンプを近付けることが出来る。磁場の影響を受けないセラミックで回転部分を作ればさらに高性能なものとなる。

なお、排気速度の大きなものとしてクライオポンプも検討されているが、トリチウムも吸着され、燃焼を継続するに必要なトリチウムの量が大きくなる点が問題である。



第7-10図 セラミック製回転羽根，タービン駆動の
ターボ分子型真空排気ポンプ

(2) トリチウム・プロセス技術

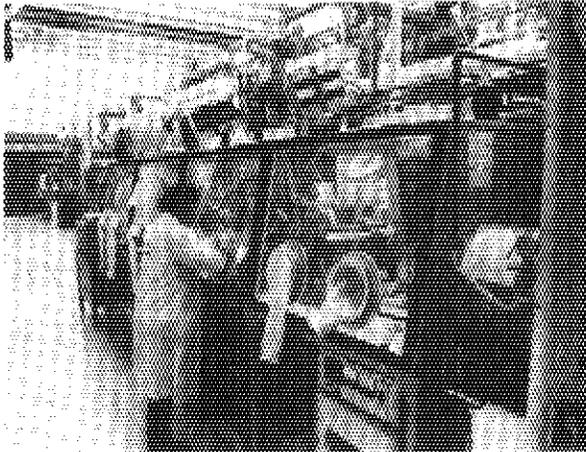
ヘリウム等が混ざったガスから重水素とトリチウムを選別し、これらのガスを貯蔵し、貯蔵したガスを再び取り出して供給する技術。

混合ガスから水素同位体ガスを選別するパラジウム-銀合金フィルム法や、液体ヘリウムを用いて重水素とトリチウムを分ける深冷蒸留法などが実験されている。前者は同位体分離にも使える。なお、ウラン等の吸着材の吸着率や再放出率の差を利用する方法も有力であるが、放射性のトリチウムを吸着した多量の吸着材を頻繁に交換するので放射性廃棄物の処理の問題がある。

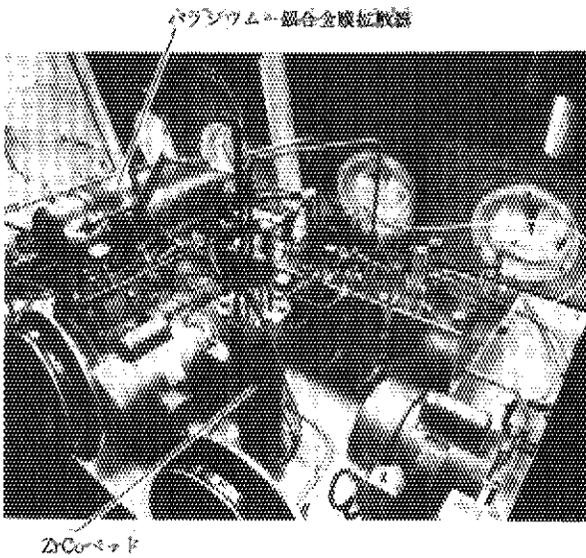
これらの処理を行なうときにグローブ・ボックスなどからのトリチウムの漏れを防ぐため、ゴム等のトリチウム透過を調べてこれらの材料を改良する研究も行なわれている。

なお、トリチウムを含んだガスを移動させる排気ポンプ等も開発項目である。

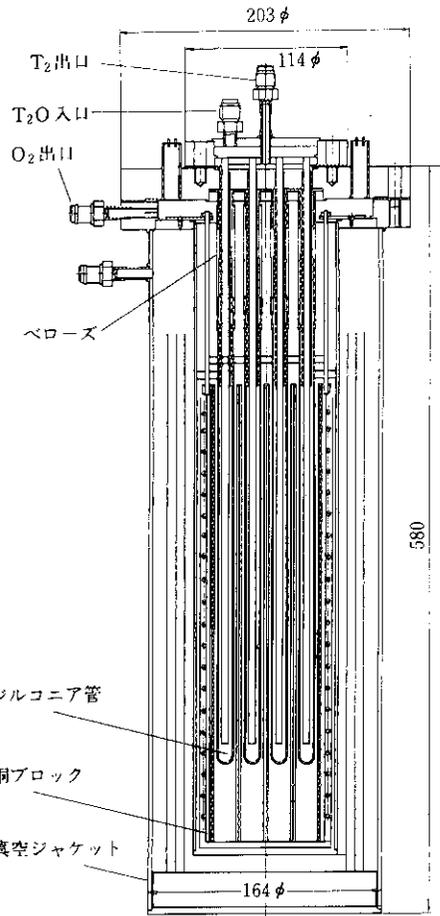
第7-11図、第7-12図、第7-13図には、原研で実施しているトリチウム取り扱い技術の研究開発の例を示す。



第7-11図 ロスアラモス国立研究所, TSTAにおける
パラジウム-銀合金膜拡散器のトリチウム
実証試験装置外観(日米協力, Annex III)



第7-12図 パラジウム-銀合金膜拡散器試験装置の
グローブボックス内配置



第7-13図 固体電解質電解セルの構造

7.6 高熱流束機器技術

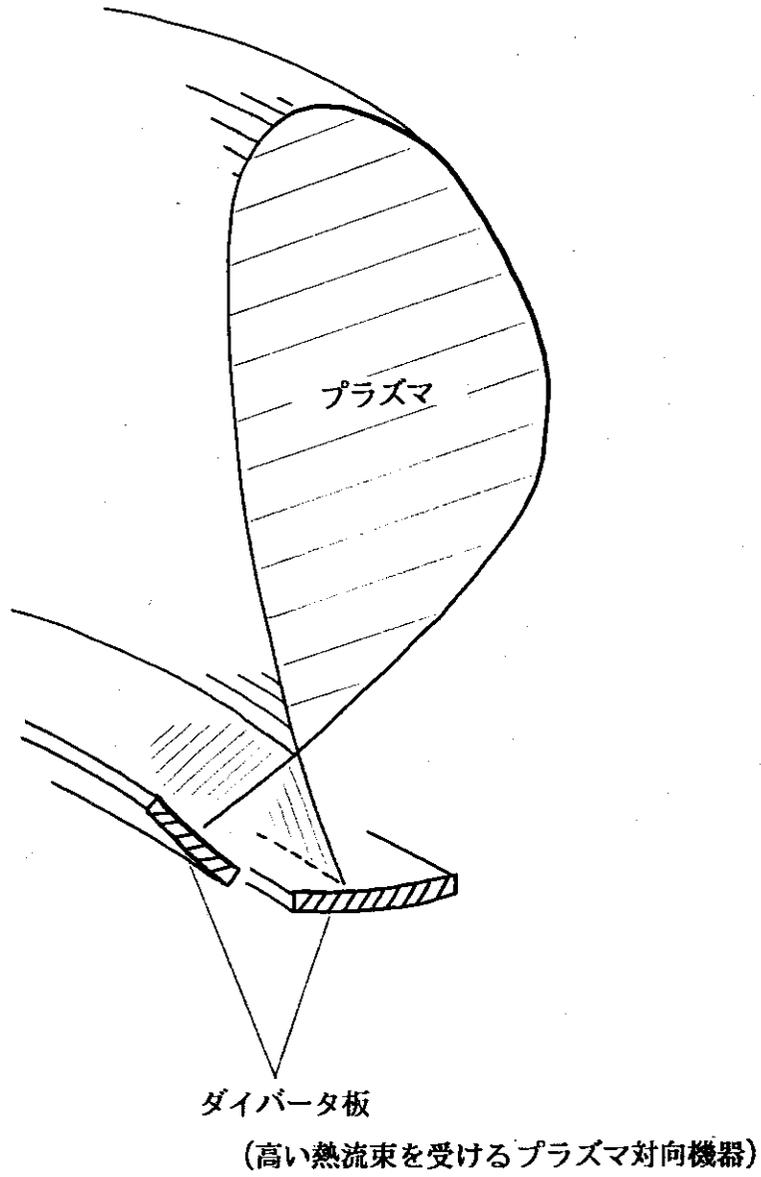
1) 高熱流束機器技術の概要

核融合炉の第一壁は、高い熱流束を受ける。これは、核融合炉では、熱を取り出すためのパイプをプラズマのなかに通せないためと言える。すなわち、普通のボイラーや原子炉では、発熱部のなかに多数の冷却パイプを通せるので、熱を受けるパイプ表面の合計面積は大きく、熱流束、すなわち、面積当たりのワット数を低くすることができる。ところが、核融合炉では、プラズマの外側の第一壁（とブランケット）ですべての熱を受けなければならない。

アルファ粒子のエネルギーを受ける第一壁での熱流束は、次期装置（実験炉）で、全面に一樣に熱がいくとして、平均 0.3MW/m^2 程度になる。ダイバータ板ではこれよりも一桁以上高い値になる。（第7-14図）

ブランケットでは、中性子のエネルギーを体積発熱に変えて吸収するが、プラズマに向かう面積当たりの熱量は平均 1.0MW/m^2 程度になる。

このように高い熱流束を受けても、こわれず、不純物を発生しないものが必要である。これには材料と冷却構造の開発が必要である。現在、試験装置の部品として、 4MW/m^2 に耐えるものが開発されている。さらに、ディスラプション現象が完全に制御できるようになるまでは、強い電磁力にも耐えることが必要である。



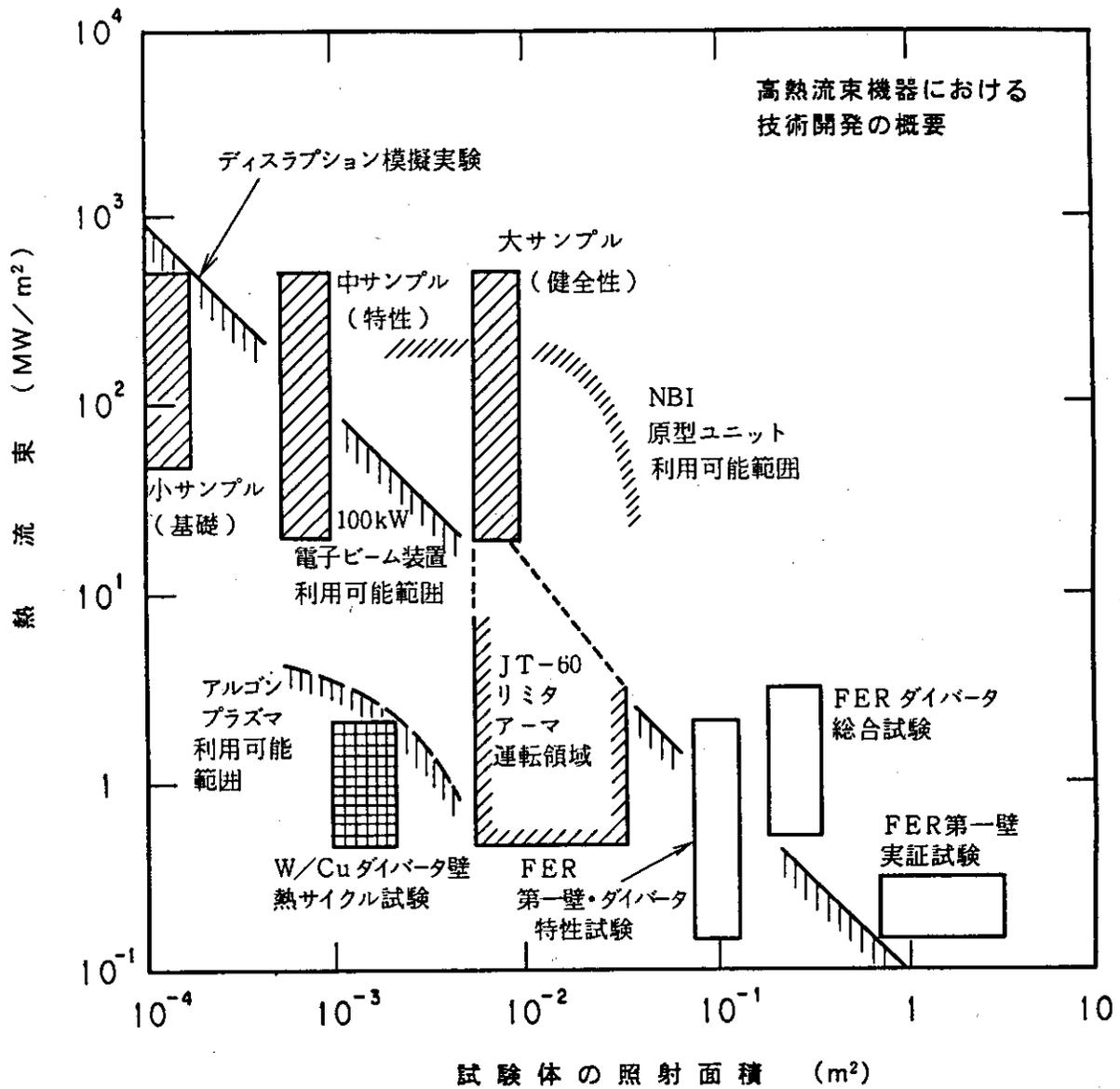
第7-14図 高熱流束機器

2) 高熱流束機器技術開発の概要

現在までは、トカマク装置でそれぞれ実状に応じてリミタ等の開発が行なわれてきた。最も進んだものと考えられているのは、グラファイトのリミタあるいはダイバータ板、または、NBI装置のビーム・ダンプに使われている水冷の銅パイプを並べたものである。

今後は、イオン・ビーム、あるいは、電子ビームを用いて高熱流束機器の開発を実施する予定である。

第7-15図は、熱流の大きさと熱流を受ける面積との関係で、開発目標を示したものである。



第7-15図 熱流束と試験体照射面積

(加熱装置の運転領域とR&D実験計画の領域)

7.7 ブランケット技術

1) ブランケット技術の概要

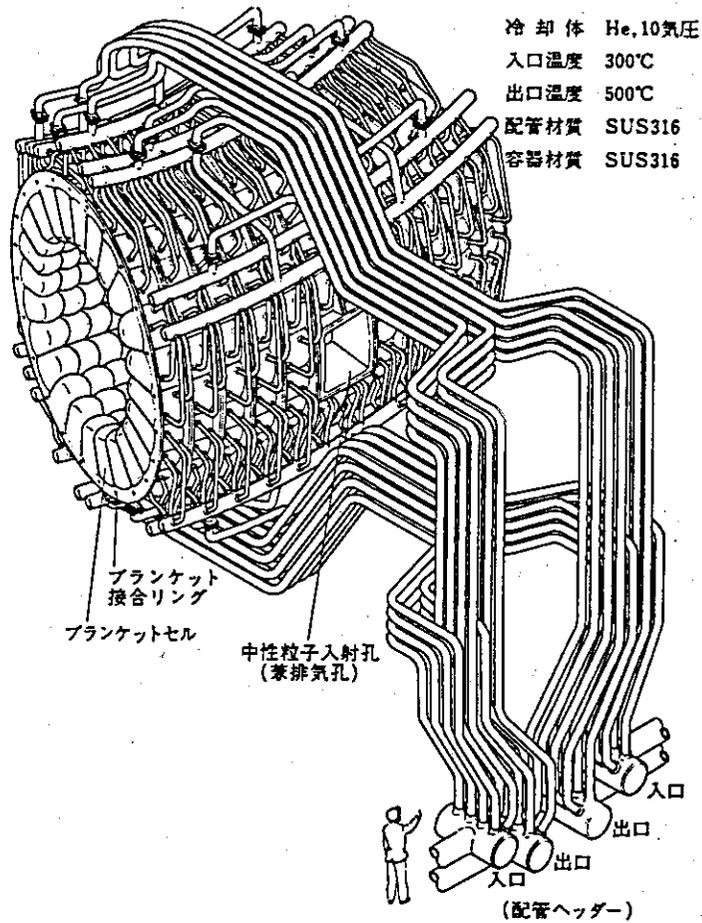
まず、ブランケットとはどういうものか、を第7-16図で説明しよう。

この図は、1980年頃の設計で(a)の円形断面のプラズマのように古いところもあるが、核融合炉のブランケットの要点を示している。すなわち、(b)のようなセルを並べて(a)のようにプラズマを囲む。ブランケットの中には、トリチウムを製造するための酸化リチウムと、中性子の遮蔽および中性子のエネルギーを熱に変換するための遮蔽材(この図ではステンレス)が収められており、これらを冷却するためにガスを流す。

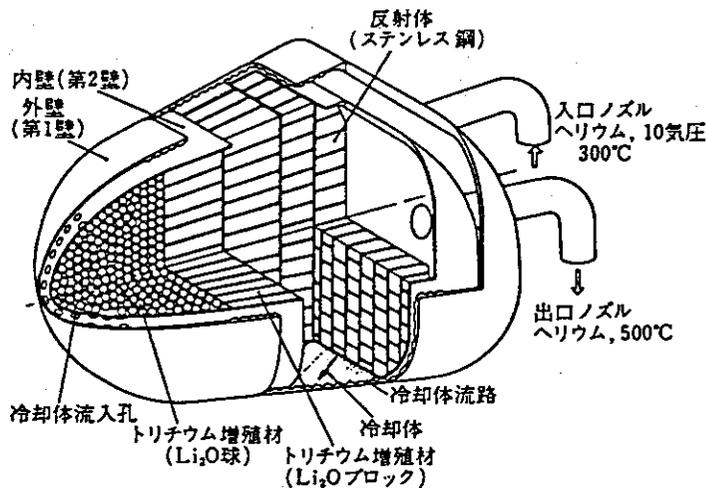
別の設計例では、高温(400°C)の融けた金属リチウム、あるいは、リチウムを含む熔融塩を流して、冷却とトリチウム製造の両方を行なう。この場合には、冷却用液体の化学的活性が激しいので、ブランケットの構造材料との適合性に注意する必要がある。

冷却材は、ブランケットから熱を取り出す役目を持っている。核融合炉では、高温になって出てきたガスを熱交換器に送って蒸気を作り、あとは現在の火力発電と同じにタービンをまわして発電する。

最近の実験炉の設計では、第7-17図のように、単純な操作で修理あるいは交換ができるようにすることに重点を置いており、同図(b)のようなものとなっている。この設計では、ブランケットは遮蔽だけで、トリチウム製造及び熱の取出しは殆ど考慮されていない。



(a) ブランケットモジュール(8ケでブランケット集合体を構成)



(b) ブランケットセル構造概念図

第7-16図 核融合炉のブランケットの設計例

このように、ブランケット技術は、次のような要素技術の総合である。

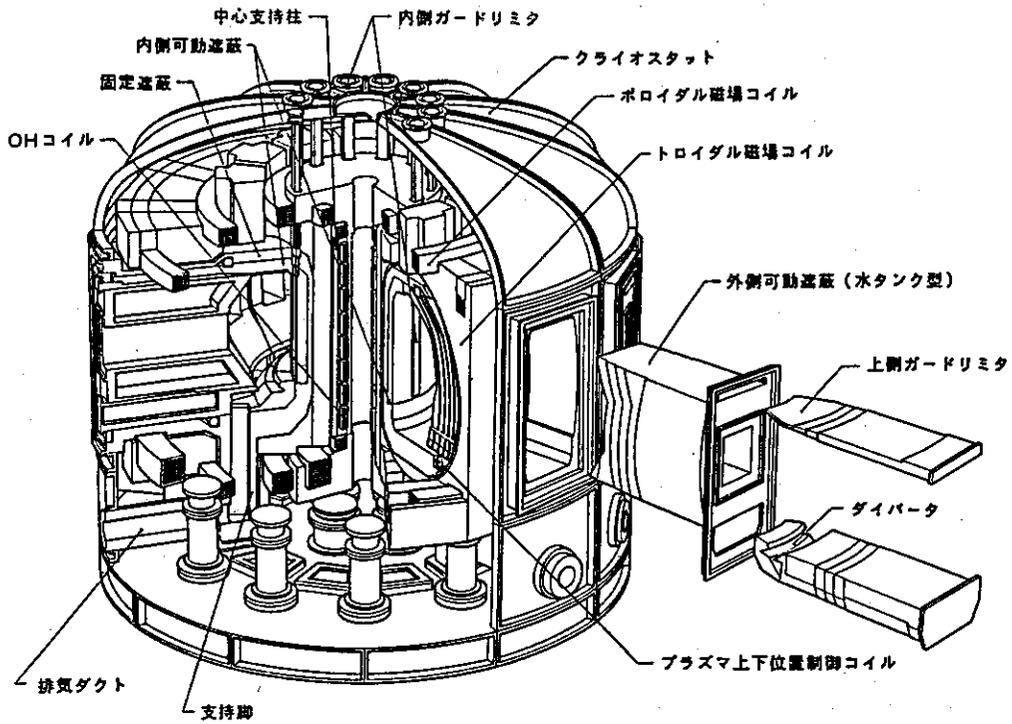
- 1) 放射線（中性子線）遮蔽技術
- 2) 高温技術----- 7. 6に述べたものほど高温ではなく、1000程度
の高温と冷却の技術。現在まで高温ガス炉の研究開
発で得られた成果は殆ど活用出来る。
- 3) 高温液体冷却技術----- 高温の金属あるいは溶融塩を冷却に用いる場合に必要
となる。
- 4) トリチウム製造技術----- ブランケットのなかに入れたリチウム6からトリチウ
ムを作り、取り出して燃料として使えるようにする技
術。トリチウム製造（トリチウム増殖）が出来る様に
したブランケットを「（トリチウム）増殖ブランケッ
ト」という。
- 5) 真空技術----- プラズマ空間とつながる空間は超高真空条件が必要。
- 6) 構造技術----- 1) から5) までを総合して、電磁力に耐えるように
大型の中空構造を製作する技術。

トリチウム製造

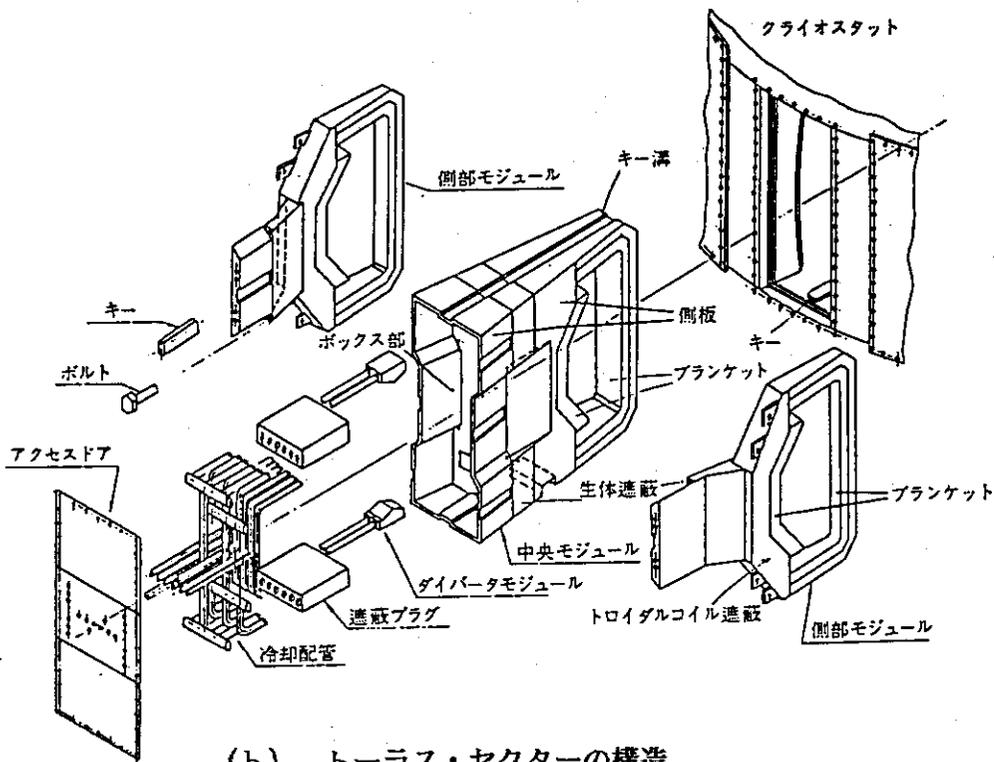
トリチウム製造には、p. 9 (7) 式の反応により、リチウム6を使うが、自然のリチウムの中に7. 5%だけ含まれているので、リチウム6を濃縮する考えもある。核融合炉（ブランケット）のなかでは中性子増倍材（ベリリウム等）を用いたり、冷却材のなかにリチウムを混ぜて取出しを容易にする案もある。リチウムは、金属のままでは化学的に活性すぎるので、セラミックスや合金（ Li_2O , LiAlO_2 , Li-Al , Li-Pb 等）を用いるが、これらの物質の中でのトリチウムの挙動などを研究する必要がある。

ブランケット技術開発の概要

すでに説明したように、遮蔽、電磁力、高温、中性子照射、トリチウム取り扱い、トリチウム取出し、超高真空などを考慮して、また、次に述べる遠隔操作技術とも整合を計りつつ、総合的に設計、製作を行なうことが重要である。



(a) 核融合実験炉の分解組み立て
(原研の実験炉 FER の設計の一例)



(b) トーラス・セクターの構造

第7-17図 最近の核融合実験炉のブランケット設計例

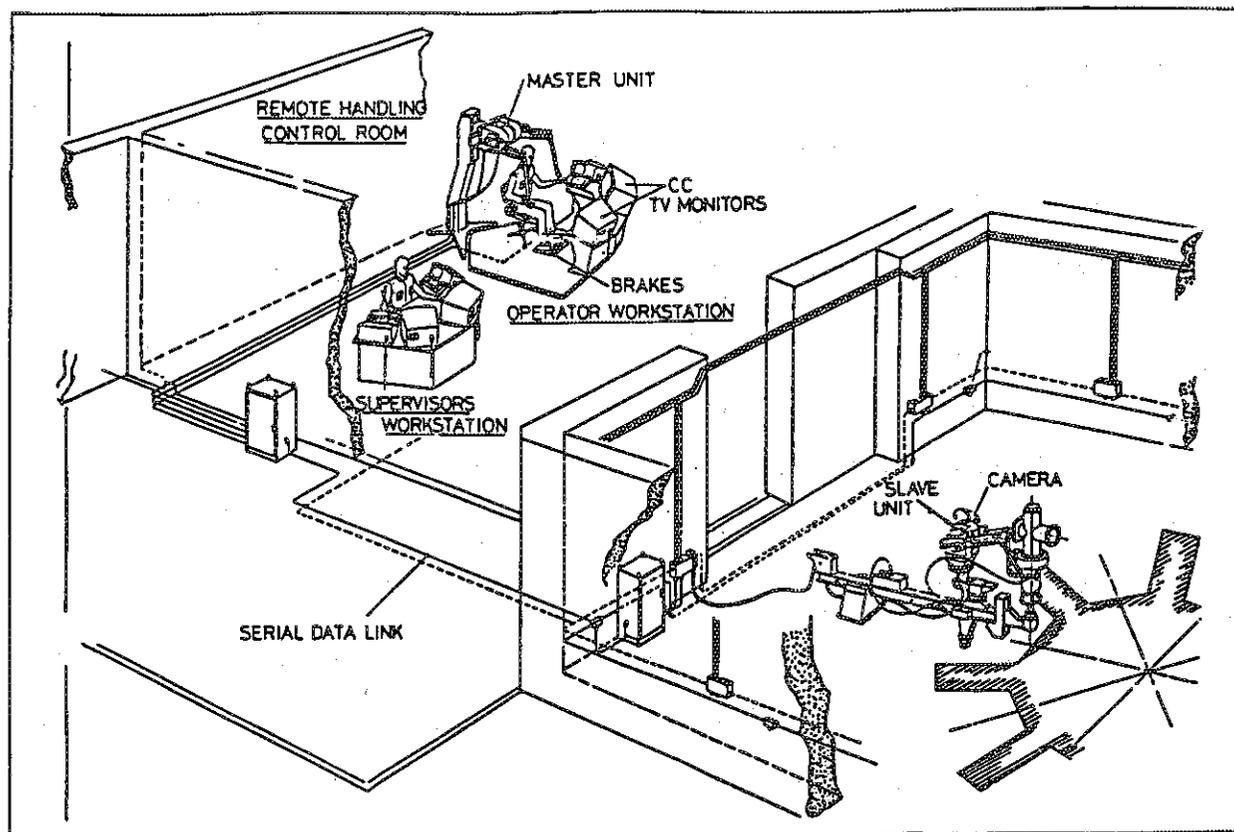
7.8 遠隔操作技術

DT反応を起こす実験炉あるいは核融合炉では、中性子による真空容器、コイルなど、炉の放射化のため、人が近付くことが難しくなる。とくに、遮蔽よりも内側の残留放射能は非常につよく、まず、近付くことはできない。

このため、第7-18図のようなロボットによる遠隔操作が必要である。ただし、ロボット技術は、自動車やトンネル工事などでも開発が進んでおり、それらの成果を十分に活用することがまず必要である。核融合炉に特有な点としては強い放射線があり、これに耐えるセンサーや潤滑剤、プラスチック（ゴム）などは、独自に開発する必要がある。

ロボットの開発は、炉の構造設計と整合を取って、全体として最も安く早く炉ができるように計画を立てる必要がある。

ヨーロッパのJETでは、DT運転に備えて、ロボットの開発を進めている。第7-19図は、JETで作ったロボットであり、数100kgの物を操作することができる。



第7-18図 核融合炉での遠隔操作の概念図



第7-19図 ヨーロッパのJET装置の中でのロボットの試験
(約100 kgの重量を扱える。)

7.9 材料技術

1) 材料技術の概要

核融合炉の材料は核分裂原子炉におけるよりも厳しい状況に耐える必要がある。

その一つの理由は、7.7節で述べた高い熱流である。そのほかに、原子炉よりもはるかに高いエネルギー、14 MeV の中性子と高エネルギーのプラズマ粒子も存在する。

将来の核融合炉と2000年頃に運転開始を狙っている次段階の核融合実験炉に必要なとされる材料の特性は第7-3表にまとめられている。

このうち、核融合実験炉は、現在ある材料を用いて製作可能であり、現在計画されている材料の開発計画は、実験炉の次の原型炉（デモ炉、Demonstration Reactor）を目標としている。ただし、材料の開発には長い期間を必要とするので、できるだけ早く本格的な開発計画を開始する必要がある。

2) 材料開発の概要

現在は、核分裂原子炉の中で材料に中性子を照射して特性の変化を調べることが行なわれている。具体的には、原研の材料試験炉（JMTR）でトリチウム製造材料の試験が行なわれているほか、日米協力で米国ORNLの炉で材料の照射試験が行なわれている。

将来の計画としては、デモ炉、あるいは、核融合炉よりも10倍以上高い中性子量（フラックス）をもつ材料試験用の核融合中性子源が提案されている。これは、実際の核融合炉での状況よりも強い中性子量によって短時間で寿命試験をしようとするもので、このような中性子源そのものも開発対象である。また、そのコストも核融合実験装置の数分の一あるいは同程度と予想されている。

第7-3表 核融合材料に必要な特性

用途	重要項目	中性子・熱的環境		
		高速炉	核融合実験炉 ¹⁾	核融合実用炉 ²⁾
第一壁・ ダイバータ	浸食と再付着の速度 熱伝導率の変化 疲労 トリチウム透過速度 ヘリウム生成・脆性	(燃料被覆管) 中性子 ~0.3 MeV ~100 dpa 平均熱流束 ~2 MW/m ²	中性子 14 MeV 3 MWa/m ² ダイバータ板 ピーク熱流束 18 MW/m ²	中性子 14 MeV ≤100 dpa プラズマ粒子 0.01~1 keV ≤ 10 ³⁰ /m ² 熱流束 < 5 MW/m ²
ブランケット	機械的、ミクロ的 構造・寸法の変化 トリチウム透過速度 トリチウム増殖材 との両立性 ヘリウム生成・脆性			中性子 14 MeV ≤200 dpa 温度 ≤700 °C
トリチウム	トリチウム放出特性 構造の組み立て性 構造材料と冷却材料 の整合性 中性子増倍材の 開発と評価			中性子 0.1~10 MeV 反応比 ≤ 15 % 温度 400-900 °C
超電導コイル	臨界温度、臨界磁場 臨界電流密度 工作性と機械的 安定性 コイルの安定性			放射線量は 比較的小
特殊用途	機械的、寸法的变化 電気伝導度、 誘電特性の変化			中性子 ≤100 dpa

1) INTOR Phase 2A, Part 2 (1983-1985)

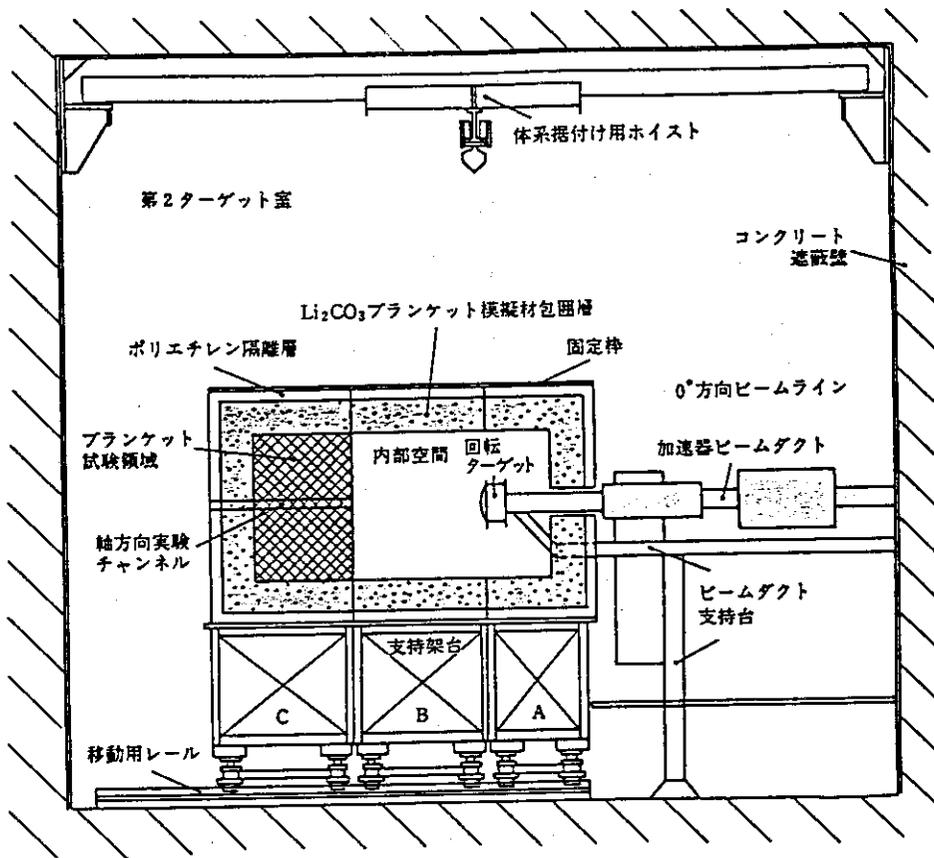
2) IEA, Report to FPCC, "Materials for Fusion" (Dec. 1986)

7.10 ニュートロニクス (中性子工学)

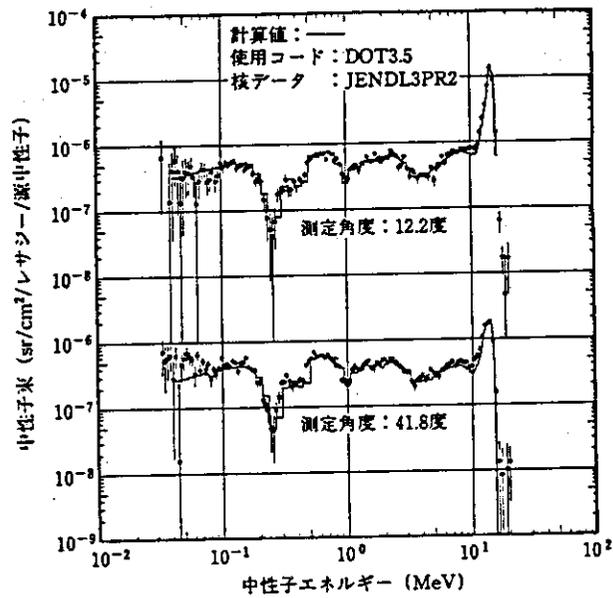
遮蔽、トリチウム製造、放射化、などの検討や設計には、中性子と他の物質との相互作用の大きさ、すなわち、反応断面積が重要である。しかし、現在知られている断面積はあまり精度の良いものではなく、適切な状況でのデータがない場合もある。トリチウム増殖ブランケットの設計では、増殖率を1以上にする必要があるが、僅かの断面積の違いで設計にかなりの影響がでる。また、遮蔽の設計でも、断面積によって必要な遮蔽材の量や遮蔽壁の厚さに差がでる。

核融合炉に必要な断面積の測定には、14 MeVの中性子が必要であり、重水素のビームをトリチウムに当ててDT中性子を発生する装置が使われている。原研のFNS、大阪大学のオクタビアン、米国リバモアのRTNS-IIなどがそれである。

第7-20図、第7-21図には、原研のFNSにおける研究開発の例を示す。



第7-20図 ニュートロニクス実験の一例(原研のFNS)



酸化リチウム平板体系からの角度別漏洩
中性子スペクトルの実験値と計算値

第7-21図 FNSの実験結果の例

お わ り に

核融合炉研究開発の全容を分かりやすく解説するつもりであったが、まだまだ専門的になってしまったようである。少しでも皆様の理解に役立てば、あるいは、自分の関連部門以外の開発について考えてみる動機になれば幸いである。

なお、本書の図表には、著者のまわりにある公表済の図表と一部未公表の原研内資料の図表を使わせていただいた。

本書の作成中に助言をいただいた多くのかたがたに深く感謝いたします。

索引

アルファベット		あ	
ASDEX	50	アーマー板	84
ATC	77	アイター (ITER)	119
BA (ベヤド・アルパート) 型	99	アインシュタインの原理	8
Cステラレータ	28	アノマラス (Anomalous) 損失	40
D, Deuterium	3	アルカトール則	70
D-He3反応	8	アルファ粒子	18
ECE	106	アルファ粒子ビーム	110
ECRH, ECH	74	アンペアの右ねじの法則	46
ExBドリフト	38	安全性	6, 118
FNS	146	安定係数 q	64
Hugill 図	69	安定領域	69
Hモード	92, 93	い	
Hモード則	71	イター (ITER)	119
I x B	66	イオン・サイクロトロン	74
IAEA	28	イオン・温度の制御	104, 110, 114
ICRH, ICH	74	位置・形状の制御	32, 56
ITER	119	位置・形状制御用コイル	58
JET	30, 50	位置不安定性	72
JFT-2	28	位置異常損失	40
JT-60	30, 50	一周電圧	60
LCT計画 (超電導コイル)	126	う	
LHRF, LHH	74	ウラン	3
Lモード	92, 93	え	
Lモード則	71	エネルギーの流出	40
NBI	74	エネルギー資源	14
PDX	50	エネルギー閉じ込め時間	16, 35
PINダイオード	106	エンダックス線、軟エンダックス線	40, 107
PLT	50	エンド・ロス	36
P-B反応	8	永久磁石	122
Q (パワー利得率)	49	液体ヘリウム	116, 122
Q (エネルギー単位)	14	遠隔操作技術	118, 142
RTNS-II	146	お	
Sawtooth Oscillation	89	オーミック加熱	42, 52
STトカマク	28	オクタビアン	146
T, Tritium, トリチウム	3	オクネス (Onnes)	122
T-10	50	大河	28
T-14	77	温室化現象	14
T-15	50	温度	16
TDC	84	か	
TFTR	30, 50	カスプ磁場	32
X線	40, 107	カラム研究所	28
		ガス注入計測	60
		化石燃料	114
		加熱	14
		荷電交換再結合光	74
		荷電交換衝突	110
		荷電交換格子	36, 39
		回転格子	104
		外部プラズマ加熱	46
		核子	48
		核反応	8
		核分裂反応	8
		核融合発電所	4
		核融合反応	2, 8
		核融合炉の条件	4, 118
		核融合炉の条件	48
		荷電交換衝突	40, 75, 110
		干渉計	108
		慣性核融合	24, 28
		間欠運転	60
		関連分野	13

き			す		
ク不安定性	39、64		ステラータ型装置 (磁場)	30、32、	47
擬古典則	70		スパッタリング		82
逆転磁場ピンチ	32		垂直磁場		56
吸着不純物	82		垂直磁場コイル		57
鋸歯状波現象	89		水平磁場コイル		57
極小磁場	28		せ		
金属リチウム、リチウム	2、128、138		パラトリックス		87
く			セラミック	130	
クライストロン	76		制御電源		58
クリーン	6		制動放射		88
クルスカルーシャフラノフ限界	64		静電プローブ	100	
空間分布	96		赤外線カメラ		98
空心変流器	54		先端技術		12
け			洗浄		84
計測	96		旋回運動		22
原研	30、50、116、144		旋回半径		22
原研	28		線スペクトル放射		88
こ			そ		
リメータ	106		ソーセージ不安定性		39
古典拡散係数	37		相互インダクタンス	112	
光電管 (光電増幅真空管)	104		増殖ブランケット	140	
高周波加熱	42、74、76		た		
高速 (高エネルギー) 中性子	116		タンデム型		32
高速マノメータ	98		ダイバータ		86
高速カメラ	102		ダイバータ・コイル		87
高度プラズマ制御	94		ダイバータ板		87
高温流動束機器技術	118、132		ダブレット	44、50、	72
国際原子力機関 (IAEA)	28		他分野との関連	120	
さ			太陽		20
サイクロトロン運動	22		対流損失		40
サイクロトロン放射	88		第一壁		84
鎖交結合放射	58		第二段加熱	52、60、	74
材料技術	88		端損失		36
三重水素 (トリチウム)	118、144		断熱圧縮加熱		74
酸化リチウム	3		断面内分布		43
残留放射能	138		ち		
し			中性子		3
シアー	46		中性子源		142
ジャイロトロン	76		中性子工学		144
ジュール加熱	42、52		中性子増倍材		140
四重極磁場	32		中性粒子 (ガス分子) 計測		114
四重極磁場コイル	57		中性粒子エネルギー分析		110
時間変化	96		中性粒子ビーム加熱		74
磁気シアー	46		超電導コイル (マグネット)	5、58、62	
磁気プローブ	100			116、122	
磁気鏡	24		超電導線の安定化		124
磁気軸	46		超電導物質		123
磁気面	46		長期スケジュール		31
磁場の圧力	44		直接発電		49
磁場の閉じ込め	22		つ		
自己点火条件	18、30、48		追加熱		52、74
実験炉	30、50、116、142、144		て		
遮蔽ブランケット	5		ディスラプション	66、134	
周波数	22		低Z材		86
重イオン・ビーム	110		低域混成波		74
重水素	3		定常化		62
初期装荷	128		電界 (電場)		38
衝突損失	36		電源技術 (電場)		118
色素レーザー	114		電子サイクロトロン		74
真空	42		電子温度計	104、106、108	
真空計	98		電磁気計測器		102
真空排気ポンプ	58、130		電磁波の放射		40、88
真空排気技術	130		電磁弁		60
真空表面	130		電磁誘導		54
真空容器	42、58		電磁力	22、66、134	

電総研	28	プラズマの圧力	44
電動発電機	62	プラズマの生成	60
電磁	42、62	プラズマの加熱装置	74
電流フラットトップ	60	プラズマ加熱装置	58
電流駆動	62、78	プラズマ計測装置	96
電流遮断	55、60	プラズマ計測装置	58
電流密度	42	プラズマ研究所	28
電流密度計測	112	プラズマ生成電流密度	62
		プラズマ電流密度	53、108
		プラズマ密度	108
と		プローブ	100
トラス型閉じ込め磁場	24、32、46	不安定性	36
トカマク	28、32	負イオン・ビーム	75
トカマクの構成	58	不均一ドリフト	38
トカマク型磁場	52	不均一磁場によるドリフト	38
トモグラフィ	106	不純物対策	84
トリチウム、T、三重水素	3、10	風船型不安定性	39
トリチウム・プロセス技術	132	分解能	96
トリチウム技術	128	分光	104
トリチウム増殖	140	分布	42
トリチウム増殖ブランケット	5、140	分布制御	94
トリチウム燃料サイクル	128		
トロイダル・ドリフト	47		
トロイダル型閉じ込め磁場	46		
トロイダル磁場コイル	58		
トロイオン (Trojan) 則	71	ヘテロダイナ法	106
ドーナツ型	24	ヘリウム磁場	3
ドップラー効果	104、108	ベータキッキング	53
ドリフト	38	ベータ値	84
ドリフト運動	36	ペヤド・アルパート型真空計	44、71
閉じ込め時間	34	ペレット入射	99
閉じ込め磁場	32	平均滞在時間	90
		変圧器の原理	34
な		変流器	54
雪崩現象	62	変流器コイル	54
			54、58、62
に			
ニュートロニクス	118、146	ほ	
		ボロメータ	106
ぬ		ポロイダル磁場	52
ヌード・ゲージ	98	ポロイダル磁場コイル	58
		ポンプリミタ	92
ね		放射化	6、116
ネオ・アルカトール則	70	放射線計測	114
熱伝導損失	40	放電洗浄	84
熱電対	98	法律的取り扱い	118
熱平衡	96	暴走	10
燃料供給技術 (燃料注入技術)	118、128	本体	58
	130		
は		ま	
ハイテク	12	マイクロ波散乱	114
バーバ議長	28	マイクロ波周波数分析	106
パルニング不安定性	39	マイケルソン干渉法	106
パルス運転	60	マックスウェル (Maxwell) 分布	96
パワー利得率	49	マルチ・チャンネル・プレート	104
波及効果	12、120		
破壊的不安定性	66	み	
反磁性コイル	102	ミラー型磁場	24、30、32
		密度分布の制御	90
ひ			
ビーム加熱	42	む	
ビーム・ダンプ	75	村上係数	69
ピン (PIN) ダイオード	106		
ピンチ型	44	ゆ	
比例則	70	輸送	40
非円形断面	72	輸送現象	40
非誘導電流駆動	54、62		
		よ	
ふ		ヨッフエ	28
フーリエ分光	106	ヨッフエ磁場	32
フラットトップ	60	溶融塩	138
ブランケット技術	118、138		
プラズマ	4、18	ら	
プラズマ・テレビ	102	ラーマ運動	22

り		
リサイクリング		4 2
リチウム	2、1 2 8、	1 3 8
リチウム6		1 4 0
リミタ		8 6
粒子の流出		3 6
粒子閉じ込め時間		3 5
臨界プラズマ条件	1 8、	4 8
臨界温度 (超電導)		1 2 3
れ		
レーザー核融合	2 6、	2 8
レーザー散乱計測		1 0 8
冷却装置		5 8
冷凍パワー		1 2 2
ろ		
ローソン・パラメータ		1 6
ローソン図		1 8
ローレンツ力		2 2
ロゴスキー・コイル		1 0 2
ロボット		1 4 2
炉の停止		1 0
炉工学技術		1 1 6
わ		
ワイヤ分光格子		1 0 6
ワンターン・コイル		1 0 2