

核融合研究委員会報告書

調査報告No. 15

1959年11月

日本原子力研究所

序

本核融合研究委員会は1959年3月30日、原子力委員会核融合専門部会(部会長湯川秀樹)が原子力委員長宛答申した「核融合反応の研究の進め方について」(資料1)にもとづき組織されたもので、答申中にある「B」計画を立案する研究委員会である。予算、運営の便宜上日本原子力研究所内におかれた。

答申にあるB計画とは、外国である程度成功(注1)をみた型を参照して1000万度(注2)程度のプラズマを発生し、ある時間保持する中型装置(注3)を速かに建設し、プラズマ科学の研究に資し、併せてわが国核融合研究の強固な足場とすることである。

本委員会の発足に際しては、その目標・考え方・進め方は上記にしたがったが、専門部会においては、答申に示された規模(予算)、目標温度、タイムスケジュール、台数などの数値、採用する型式の規準(注4)にこだわらず、本研究委員会の自主的判断にまかされることになっていた。委員長は部会にて任命され、委員組織は委員長に一任された。

当初よりこの委員会は研究体制やB計画そのものの批判に関せず、わが国が近い将来もつことを望まれる中型超高温プラズマ発生装置の物理的・技術的検討・立案に重点をおいた。その主旨に沿い委員長が代表的な人々と相談の上委員を組織した。

メンバーは別記のように、実質的作業に参加出来そうな人の他に、わが国の主要な核融合研究グループの代表的研究者が参加されるように配慮された。それは当初は特に大切な大局的判断を下す段階にあり、また全国的な研究連絡・意見の疎通を容易にするためである(注5)。メンバーは、型式の種類・検討・設計の進行段階に応じて適宜追加または臨時参加をみた。

このように、本委員会は研究体制論におけるB計画の立場について統一の見解のもとに構成されていない。したがって委員会はこの点には触れぬ立場として運営された。触れた場合も単に参考的に意見分布を知る程度にとどめ結論を導くこととしなかった。

B計画としておよそ諒解されている主旨・意義は中型実験装置を速やかに建設することにある。「速やか」の度合・すなわちタイムスケジュールは核融合研究の進め方をきめる場合極めて重要なポイントである。この点に関しては各委員の見解は必ずしも一致しなかった。しかし多くの実験研究者の要望があったので、最も早く実施に移す場合を考慮し、次年度の予算編成の可能性を保ち、まず本年7月までにいわゆる「一次設計」を行なう方針をたてた。そしてほぼ予定通りにそれを了った。

しかし、この方針は本年8月以降生じた研究体制の新しい事情のためにただちに実施される見通しを失ったので、一次作業につづく作業を保留し、残余の検討を若干補って今日に至っている。

あらゆる意味で現在は一つの屈曲点にあるので、この機会に本委員会はこれまでの成果を一旦まとめることとした。もし今後新しい方針の下に再出発されるならば、その成果は年度末に補追報告が加えられることになろう。

当研究委員会は発足にあたり、菊池原子力委員（現日本原子力研究所理事長）より格別のご配慮とご指導を頂き、また委員会運営については、科学技術庁原子力局佐々木局長、法貴次長ほか担当の方々、日本原子力研究所駒形前理事長、嵯峨根前副理事長、研究協力課および文書課の方々のお世話になった。

また研究委員会に参加された人はいずれも本務のかたわら格別な仕事を負担され、限られた期間に可能な最善をつくされた。また東京芝浦電気、日立製作所、三菱電機の各株式会社およびその関係の方々、この研究委員会にきわめて協力的に参加され、とくに予算見積りには多大なご援助をおしめなかつた。ここに記して厚く謝意を表したい。

本報告書は現在の日本における一断面である。日本の核融合研究の一礎石として役立てばと願ってやまない。

1959年11月11日

委員長 山本賢三

追記. 本報告書が原子力委員会核融合専門部会に提出された後に、さらに本委員会と小委員会とおのおの一回開くことができた。その際新しく入手した文献を参照して内容を検討し、不備を補い、また国内の研究の現状などの資料にも筆を加えたが、全般に内容結論には殆んど変更はない。(1960年3月12日)

(注1) この成功という語は一部に誤解をまねいた。もちろんその意味するところは、数千～数万度に止っていたこれまでの段階から、新しい原理工夫をくわえて、一桁以上高い温度のプラズマを観測しうる程度の時間発生させることに成功したということである。

(注2) この数値はきわめて大略の目標にすぎぬことが部会にても諒解されている。

(注3) 中型とは予算数億円、100万度級の発生装置を意味する。

(注4) 必ずしも外国で提案された型だけでなく、その改良型または独創的なものも差支えないという意。

(注5) 全国の研究者の批判がうけられるように、核融合懇談会の席上、核融合研究誌上にてできるかぎり本委員会の経過を報告するよう努力された。

委員長

山本賢三(名大・工)

副委員長

森茂(東大理)

委員 (50 音順)

有安富雄(阪大・工)	伊藤博(阪大・工)	宇尾光治(京大・工)
大河千弘(東大・理)(注1)	岡田実(阪大・工)	岡本耕輔(理研)
川崎栄一(日大・理工)	木原太郎(東大・理)	小島昌治(東教育大・理)
笹倉浩(原子力研)	関口忠(東大・工)	田中正俊(原子力研)
玉河元(名大・工)(注2)	長尾重夫(東北大・工)	野畑金弘(静岡大・工)(注3)
早川幸男(名大・理)(注4)	林忠四郎(京大・理)(注1)	水野幸雄(東大・理)
宮本梧椽(東大・理)	村川梨(東大・航研)	森英夫(電気試)

特別参加者

荒田吉明(阪大・工)	安藤安二(三菱電機)	犬石嘉雄(阪大・工)
今村元(三菱電機)	岡田武夫(三菱電機)	上島千一(三菱原子力)
鴨川浩(東芝)	河合正(三菱電機)	後藤正之(三菱電機)
小林久信(理研)	桜井良文(阪大・工)	佐藤照幸(東北大・工)
里山正蔵(東芝)	沢田昌雄(阪大・理)	吹田徳雄(阪大・工)
杉田慶一郎(東北大・工)	高津清一(通研)	高橋誠(東北大・金研)
高山一男(通研)	槌本尚(日立)	遠井淳友(阪大・工)
百々太郎(日立)	中野義映(東工大)	西田稔(京大・理)
八田吉典(東北大・工)	藤家洋一(東大・理)	藤本敦(三菱電機)
前田清治郎(東北大・金研)	松田仁作(東芝)	山中千代衛(阪大・工)
山村豊(阪大・工)	横田昌広(日大・理工)	吉川允二(東大・理)

(注1) 在外

(注2) 当初(東大・理)

(注3) 当初(名大・工)

(注4) 当初(京大・基研) 辞意を表明され欠席中であつたが、事務手続上現在にいたる。

目 次

第1章	内外の研究の現状	1
第2章	B計画の主旨と目的	1
第3章	装置の型の選定について	2
第4章	選定した型に関する検討	3
§1	Stellarator 型	3
§2	DCX 型	4
§3	Ion Cyclotron Resonance Mirror 型	5
第5章	Stellarator 装置の演習設計	5
§1	Stellarator の大きさをきめる因子について	5
§2	Stellarator の技術的問題	7
§3	S-II 本体の設計および見積	8
§4	S-II の全容・研究計画	11
第6章	DCX 装置の具体的検討	14
§1	基礎的問題	14
§2	技術的問題	15
§3	測 定	16
§4	研究のすすめ方	16
第7章	Ion Cyclotron Resonance Mirror 装置の具体的検討	16
§1	設計方針	16
§2	Scaling Law	16
§3	設 計 例	17
第8章	測定に関する検討	18
§1	一般の問題	18
§2	電磁的測定	18
§3	電磁波による測定	19
§4	粒子の検出	20
§5	討論した主な事項および Lecture	21
第9章	結 論	21
第10章	議 事 日 程	22
資料1	核融合反応の研究の進め方について (専門部会答申)	25
資料2	プラズマ研究所の設立について (学会会議への提案)	26
資料3	内外の現状	27
資料4	核融合反応装置の基礎概念	37
資料5	各方式の簡単な説明	40
資料6	DCX 型に関する資料	44

第1章 内外の研究の現状

核融合反応の制御を目的とした研究は将来のエネルギー資源の問題として極めて重要であり、世界各国ともすでに約10年以前から考えられる方式・原理にもとずいて多種類の型の装置を試作し熱心に研究を進めてきた。その間にさまざまな物理的・技術的問題が生じ、ある種の問題はその解決がはかられたが、なお多くの問題点が残っている。これらを解明するとともにさらに新しい方式の可能性の検討も続けなければならない。

高温プラズマを磁場で保持する方式は現在までのところ最も可能性のあるものとして広くかつ詳細に検討され、大きな組織と規模によって発展的に継続研究されてきた。この方式は磁場の保持方式、プラズマの加熱方式（高エネルギー粒子の入射を含む）によって十数種類の型にわけられる。そして温度と保持時間の大きいものを必要とするため、これらの中の数種は次第に大きい実験規模に発展しつつある。

しかしながら、これらの装置をもってただちに制御熱核融合反応に必要な温度・密度・保持時間の条件を満たしうる見通しは得られていない。現状では超高温プラズマのふるまいに関する理解の不足を認めざるを得ない。すなわち、核融合の研究は現在基礎研究の段階にあるといえる。

ひるがえってわが国の事情をみると、ようやく1955年頃から研究の緒につき、現在十数カ所で小規模な基礎研究が行われている。研究の歴史も浅く、質・量と

も極めて不十分な状態にある。その関係する分野が極めて広いので、超高温プラズマの発生・制御の原理に関する基礎研究、装置に対する工学的・技術的研究、プラズマの性質を理解するための多様な精密計測装置の研究などを総合的に強力に推進すべきであろう。

一方研究者のグループとして核融合懇談会がつけられ（1958年2月）、大学・研究所・会社を含め極めて広範囲の専門分野からの研究者により全国的協同研究の組織が確立された。また原子力委員会核融合専門部会（1958年4月発足）および学術会議核融合特別委員会（1959年4月発足）がもうけられ、核融合研究の進め方・体制、その他の検討が行われた。

1959年4月には、専門部会が原子力委員会委員長に答申した「核融合反応の研究の進め方について」（資料1）に基きいわゆるB計画を立案する核融合研究委員会が発足した。その後8月まで核融合研究の体制につき専門部会・特別委員会は慎重にたびたび討議し、核融合は現在基礎研究を行うべき段階にあるので、大学の研究を強化すべきであり、その線に沿って文部省管下にプラズマに関する研究所を設けることを適当と認めた。そこにおいて、各大学・研究所・会社単独では持ち得ない規模の実験装置を設置し、これを中心にして超高温プラズマの発生・制御・計測に関し基礎学理と技術の研究を強力に推進することとなった。この提案は1959年10月の日本学術会議総会にて承認された（資料2）。

第2章 B計画の主旨と目的

核融合専門部会は“核融合反応の研究の進め方について”と題する原子力委員会への答申において、研究の現状を分析したのち、当面の研究方針として、次の2つの組織された研究計画を提案している。

A) 基礎研究に重点をおき、プラズマ物理の基礎的研

究および装置に対する新しい着想の育成と具体化をはかるとともに、新しい分野にはたらく研究者を養成する（A計画）。

B) 諸外国で多くの研究者による詳細なる検討により発展しつつある型およびその改良型の間規模的な

装置を建設して、すみやかにわが国の研究水準の向上をはかる（B計画）。

核融合研究委員会は後者の研究計画を具体化することを目的とする。

それゆえ、このB計画では核融合を目標としつつ、超高温プラズマの加熱保持の方式を研究し、またある程度の大きい装置でないとえられない超高温プラズマについて精密な諸計測の行えるようにする。

このための装置としては、

- (1) 超高温プラズマ物理の研究・装置自体の研究からも一応 $1\sim 5\times 10^6\text{K}$ のプラズマをある程度の時間保持できるものであること（注1）。
- (2) 装置の外に、計測装置、電源設備を完備し、十分に測定、実験ができるものであること。

が必要と考えられる。

装置の設計・製作・計測・実験の容易さから装置の大きさの最小の規模におのずから限界があるので、これから「中型」の実質的大きさや必要な予算が決るこ

とになろう。規模・金額や time schedule は答申にこだわらず、研究者として弾力性をもたせて考える。これらは具体案について自然に決ってくるであろう。また中型装置は複数の型および台数になっていくものと考えられる。

このような中型装置および計測装置の設計・製作にあたっては、個々に解決すべき特殊な、また高精度を要する技術的諸問題がある。たとえば高電圧大電流開閉器、精密な強磁場発生装置、超高真空技術、ミリ波および分光によるプラズマ診断装置などでいずれも現在の技術ではこの目的には不十分であり、その開発は核融合研究を行う上に極めて望まれるところである。またこの実験装置は広範囲の技術の総合的所産としてつくられるものであって、このような大規模な装置の設計・製作の経験をもつことはわが国の産業・技術の向上にも資し、核融合研究を速やかに進めるのに必要な措置であると考えられる。

第3章 装置の型の選定について

核融合研究のための装置の型を選定するばあい、その規準としてはいろいろ考えられるが、本委員会ではB計画の目的を考慮して検討した結果、主としてつぎの事項をとりあげた。

- (1) 将来の核融合炉という点からみて見込みのあるもの。

しかし研究の現段階では、これを装置の型の選定の規準とすることは困難である。

- (2) 高温プラズマの状態を正しく判断しうるような計測ができるもの。

たとえば再現性の確保が容易なもので、信頼できるデータを集積することが必要である。

- (3) “しずかな”プラズマを発生保持できるもの。しずかなプラズマの研究から出発して、乱流その他複雑な現象の研究にすすむのがのぞましい。
- (4) プラズマの反作用の小さいもの。

現象が理解しやすく見通しがつけやすい。

- (5) 各種の加熱法が適用できるもの。

加熱は保持と不可分であるが、加熱法（とくに高温における加熱法）およびそれともなう現象

の研究を重点的にすすめる。

以上のほかこの研究を実施する研究者の意向も十分尊重されるべきであると考えられた。

上述の装置の型の選定の規準を考慮しつつ、各方式について検討した結果をごく簡単にのべる。便宜上保持の原理によって分類する。

(1) 自己場による保持

ZETA型、直線ピンチ型などのピンチ方式ではプラズマは比較的こく、しかもしずかでない。またわが国でも現在かなりの規模で実験がおこなわれており、ただちに中型化する必要はない。

Scylla型ではプラズマの時間的变化がきわめて早いので、制御がむづかしく、かつ得られるプラズマに関する知識はかぎられる（注2）。

(2) 外場による保持

(a) mirror方式

まず高エネルギー粒子を入射するDCX型などは理論的にも検討すべき点が多いが、高温プラズマをうる加熱法の一つとして興味がある（注3）。

また比較的低エネルギーのイオンを入射し、サイクロトロン共鳴によってとじこめる Ion Cyclotron Resonance Mirror 型は日本で独立に提案されたものである。これは重要な加熱法の一つであるサイクロトロン共鳴の研究に役立つ。

圧縮型の mirror は国内でかなり研究がおこなわれている。

(b) cusp 方式 (注4)

これは高温でプラズマ中に磁場のはいついていない(また入っていてもごくよわい)プラズマをとじこめるばあい、磁気流体力学的に安定である。外部からプラズマを入射して cusp を形成させることが考えられている。また粒子像でかんがえると特異点から粒子が失われる。

cusp 方式は他の方式とくみ合せて利用できる。

る。

(c) Stellarator 型

保持についてくわしい理論的検討がなされており、難点も比較的少ない。しかし実験がすすむにつれ pumpout のような現象も観察されている。

また各種の加熱法を適用できる。

(3) 高周波電磁場による保持 (注5)

表皮効果による外壁でのエネルギー損失が大きく、これだけで高温プラズマを保持することは不利である。むしろ補助手段として利用することが考えられる(注6)。

これらの検討にもとづいて、Stellarator 型、DCX 型、Ion Cyclotron Resonance Mirror 型を一応とりあげ、さらに詳細かつ具体的な検討をおこなうことになった。

第4章 選定した型に関する検討

前章で選定した3つの型について、特徴、問題点および本委員会で検討した事項をのべる。

§ 1 Stellarator 型

1.1 保持

保持磁場は理論的に詳細に検討され、比較的欠点が少ない。これは rotational transform 磁場によるもので、現在具体的には8字型と helical winding 型とがある。これによる磁力線は toroidal magnetic surface を作り、ある値以下の β (プラズマ圧力と磁気圧力との比)では磁気流体力学的平衡状態の存在すること、また粒子近似で考えても粒子の保持されることが証明される。安定性に関しても sausage 型不安定性はなく、kink 型不安定性は、電流が Kruskal の制限以下ならばさけられることが理論的に示され、Stellarator B-1 において実験的に確かめられた(注7)。交換型不安定性は8字型および l (磁場の極数) = 2 の helical winding ではさけられない。 $l \geq 3$ ではある値以下の β で安定である。

1.2 加熱

Stellarator の加熱としては、高周波予備放電、ジュ

ール加熱および magnetic pumping (ion cyclotron を含む)の順序で行うことが考えられている。ジュール加熱は、プラズマの温度上昇と共に抵抗が減少するので到達温度には制限があるが、比較的簡単に高温プラズマ ($\sim 10^6$ K) がえられる。しかしジュール加熱電場による逃走現象 (runaway) について注意しなければならない。magnetic pumping は加熱の周波数とイオンサイクロトロン、イオンイオン衝突および transit の各周波数との大小関係をたくみに利用するものである。しかし magnetic pumping により与えられたエネルギーが randomize されて、Maxwell 分布になる過程については理論的にも問題がある(注8)。

Stellarator における加熱の研究の現状はつぎのようである。高周波予備放電により 2~3% 電離し、その後ジュール加熱を行ったところ、kink 型不安定性、交換型不安定性等を防ぎ、理論的には不安定性が予測されなかったのに、ジュール加熱の途中より電子密度の急激な減少がおこった(いわゆる pumpout 注9)。この現象の理解のために、理論と実験の両面から精力的な研究が行われている。本委員会でも、この pumpout は、ジュール加熱のため一方向に電場がかけられるので、一方向電流あるいは逃走電子 (runaway electron)

によりプラズマが乱されるために起るという認識からジュール加熱の周波数を上げるいわゆる高周波ジュール加熱が提唱された(注10)。しかし高周波予備放電中にも pumpout の起ることが観測されており(注11)、高周波ジュール加熱をすれば、必ず pumpout が避けられるとはいえない。pumpout は現状では Stellarator の研究の重要課題であるが、一般に pumpout を避けるためにはプラズマを静かに加熱する必要があるならば、Stellarator のみならず核融合研究の上でも重大な問題となる。しかし pumpout については、現在どちらかといえば、実験的な探求を特に必要とする段階であり、高周波ジュール加熱などのいろいろな加熱方法を使い、実験条件を純粹にして集中的に実験することが大切であると考えられる。

なお、これに見られるように保持と加熱とは密接な関係があり、総合的に考えなければならない。

Stellarator は上述のような状態であるので、未だ本格的な magnetic pumping は行われていないが、微少出力の ion cyclotron 加熱をした結果ではプラズマへのエネルギー注入は予期のように有効であった。プラズマ加熱の研究では、エネルギー注入より加熱に到る過程とそれに伴う諸現象を調べることも重要である。

1.3 技術的意義

Stellarator の建設には、以下のごとき技術的開発の意義がある。

- (1) 不純物の介入を減少させるための divertor. ガスの精製、超高真空技術、たとえば大型装置の baking, もれの少ない容器の作製、超高真空ポンプなど。
- (2) 精密な強磁場の作製 (helical winding, divertor)。
- (3) 低圧気体の予備電離方法。

1.4 プラズマとしての性質をよく調べること

粒子入射方式では、burnout するまでの状態はプラズマとしての性質が明瞭に具現しないが、これに反し Stellarator では最初から常にプラズマといえる。したがって、高温プラズマの研究に役立つ、しかも比較的しづかであるので物理的意味のある各種の測定がしやすい。しかし、多くの測定をするためには装置の寸法がある程度以上大きいことが必要である。

1.5 討論した主な事項

- (1) 保持磁場のコイルの回路論的分析
- (2) 予備放電およびジュール加熱
- (3) 高周波ジュール加熱
- (4) Stellarator の磁場についての文献による調査

(NYO-7904(1958), NYO-8051(1958))

- (5) Stellarator の大きさをきめる因子の関係について
- (6) 超高真空技術
- (7) 演習設計および仕様
- (8) 見積り
- (9) 実施のときの time schedule

§ 2 DCX 型

2.1 概要

DCX は前節の Stellarator とは根本的にその原理を異にしている。すなわち保持は mirror 型の直流磁場を用い、加熱は非常に高エネルギー (300 keV 程度) の粒子の入射、蓄積による。

また Stellarator では初めに非常に強い放電をおこさせるから、容器内のガスはほとんどイオン化していると考えてよいが、DCX では有限の圧力の容器内に外からイオンを入射する。高エネルギー・イオンは残留ガスの中の中性原子と電荷を交換して、高エネルギー中性原子となって側壁に行き、エネルギー損失の大きな部分を占めることになる。この中性ガスの源としては初めに存在したガスあるいは出ガスだけでなく、定期的に高エネルギー・イオンを入射しているときはそれと同じ割合で生じている中性ガスも含めて考える (1mA は 1.8×10^{-4} mmHg·l/sec に相当する) (注12)。

DCX の可能性の議論は大きく2つに分けられる。すなわち保持、安定性、蓄積の方法、burnout、熱損失、熱運動化などに関する基礎的なことと、技術的な加速器(加速管を含む)、排気系統、コイル系統などに関することとである。また測定に関する問題がある。

本委員会の会合の初期に C. F. Barnett et al. *Geneva II* 31 (1958) 98 を検討したが burnout に必要な入射電流が 600 keV, 数 100 mA ということから、日本の技術ではその製作が不可能視され、選定外になっていたが、その後各電機メーカーに問いあわせたところ、出来ないことはないというのが、一致した意見であったので、DCX 小委員会をつくり、Thermonuclear project Semiannual Report for Period Ending January 31, 1959 ORNL-2693 を主に参考としてその検討を行った(注13)。

主に実験的な面で検討されたが、理論的な面の検討の重要性が再認識された。

2.2 討論した主な事項

- (1) DCX 理論の一般的問題
- (2) 加速器
- (3) energetic arc
- (4) 真空
- (5) 測定
- (6) 阪大の研究計画
- (7) 仏国の計画
- (8) DCX 型の研究のすすめ方

§ 3 Ion Cyclotron Resonance Mirror 型

3.1 特 徴

この方法は比較的低エネルギーのイオンを mirror 型の直流磁場の磁力線に平行に入射し、サイクロトロン運動に共鳴する高周波電場をくわえ、磁力線に垂直方向のエネルギーを増加させることにより、加速と同時にとじこめをおこなう。

その特徴はおもにつきのようなものである。

- (1) 入射イオンの 1/2 程度が捕捉できるし、捕捉されたイオンはさらに加速される。
- (2) 不純物は共鳴しないので mirror から速く失われる。また電子温度もひくく制動放射による損失が少ない。
- (3) イオンに選択的にエネルギーを供給するのでイオン温度の高いプラズマがえられる。
- (4) 現象が単純で見通しがつけやすい。

3.2 問題点

- (1) プラズマの反作用のため加速電場が入りにくくなり、到達イオン密度が制限される。ほぼ 10^{11} / cm^3 の程度までである (注 14)。
- (2) イオンが加速されすぎると側壁にあたって失われるので (モンテカルロ法でエネルギー分布が計算された)、側壁の近くで磁場を空間的に波うたせ、off resonance にして加速されすぎないようにすることが考えられる。
- (3) 端からのイオン損失がある。しかし加速に要する時間がイオンイオンの衝突時間よりずっと短いため、それはあまり多くない。
- (4) 比較的低エネルギーのイオンを入射するので荷電交換、イオン化の断面積のエネルギー依存性からみて、DCX にくらべて burnout の達成は困難と思われるが、はっきりした結論はえられていない。
- (5) 軸方向の電場の影響も検討を要する。
- (6) 入射捕捉を目的とする実験装置に関する技術的問題があるが、ほとんど解決されている。

3.3 討論した主な事項

- (1) 入射捕捉および加速について
- (2) プラズマの反作用によるイオン密度の制限について
- (3) エネルギー分布について
- (4) scaling law について
- (5) 設計例

第5章 Stellarator 装置の演習設計

§ 1 Stellarator の大きさをきめる 因子について

1.1 プラズマ圧力と磁気圧との比 β

Stellarator はその保持の原理上、 β を大きく (1 に近く) とすることはできない。理論的検討によれば、いろいろの条件により異なるが、 $\beta < 0.2$ といわれている。

Stellarator のように外場による保持をしている場合は、 β を大きくすると、プラズマよりの反作用が大き

くなり、現象としても複雑になり、理論的解釈も非常に困難となる。したがって、 β の小さい ($10^{-3} \sim 10^{-4}$) 場合でも、相当の密度および温度のプラズマを保持できるようにしておいて、この段階での保持、プラズマのふるまいなどの研究をへたのち、磁場を下げるなどの方法により β を大きくした場合の研究に進むのがよい。したがって、強い磁場を出せる装置にしておけば (大体、磁場の強さの自乗に比例して) 広い範囲の β についての研究が出来ることになる。

下に、温度・ヘリウムイオン・密度・磁場について、常識的な数値をとった場合の例を示す。

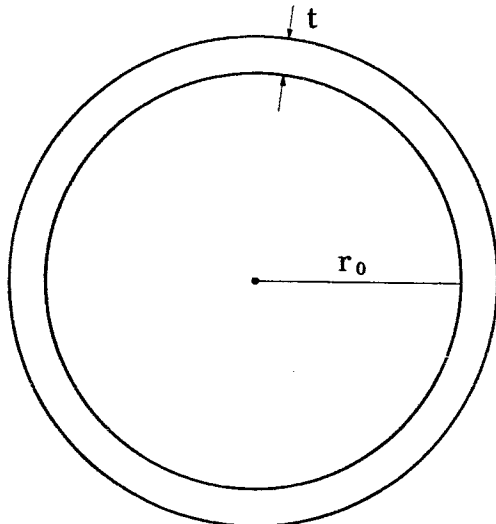
第 5・1 表

	B(ガウス)	T(°K)	n(/cm ³)	β
S-I	2×10 ⁴	5×10 ⁶	10 ¹⁴	1.3×10 ⁻²
S-II	3×10 ⁴	5×10 ⁶	10 ¹⁴	5.9×10 ⁻³

S-I, S-II は演習設計した 2 つの Stellarator 型である (§ 3 参照) (注 15)

1.2 Larmor 半径

Stellarator では、プラズマ柱の半径が Larmor 半径に比べてはるかに大きいことが必要であるが、これと関連して、プラズマの表面がプラズマの実質に比べて小さいことも要求される。これはプラズマより得られる知識が、表面現象のため、不純なものにならないための条件であって、いわば、測定値の純粋さのために要求されるものである。



第 5・1 図

第 5・1 図はプラズマの断面図で、 t はプラズマ表面の厚さ、 r_0 はプラズマ実質の半径である。 t としては Larmor 半径をとるのが適当であると考えられる。

$$\frac{\text{プラズマの表面的体積}}{\text{プラズマの体積}} = \frac{2\pi r_0 t}{\pi r_0^2} = \frac{2t}{r_0} \propto r_0^{-1} B^{-1} T^{1/2}$$

第 5・2 表

	磁場 (ガウス)	温度 (°K)	He ²⁺ の Larmor 半径 (mm)	r ₀ (mm)	2t/r ₀
S-I	2×10 ⁴	5×10 ⁶ (4.3×10 ² eV)	1.5	25	0.06
S-II	3×10 ⁴	5×10 ⁶ (4.3×10 ² eV)	1.0	30	0.035

第 5・3 表

	B(ガウス)	T(°K)	r ₀ (mm)	n(/cm ³)	古典的 (秒)	drain 型 (秒)
S-I	2×10 ⁴	5×10 ⁶	25	10 ¹⁴	1	5×10 ⁻⁵
S-II	3×10 ⁴	5×10 ⁶	30	10 ¹⁴	4	1.1×10 ⁻⁴

である (第 5・2 表). この点からいえば、 r_0 を大きく磁場を強くすればするほどよいことになる。しかし建設コストは r_0 の 2~3 乗に比例することを注意したい。

1.3 平均保持時間

予想される保持時間は測定に必要な時間に比べて長くなければならない。

一応、磁場を横切ったの拡散が、この時間を制限する。これは古典的な二体衝突の考えより出すと

$$\tau_c \sim 0.2 B^2 T^{1/2} r_0^2 / n \text{ 秒}$$

ここに τ_c : 保持時間(秒), B : 保持磁場(ガウス), T : プラズマの温度 (°K), r_0 : プラズマ柱の半径 (mm), n : 粒子密度 (1 cm³ 当り) である。一方、プラズマの局所の変動を考えると (drain 型)

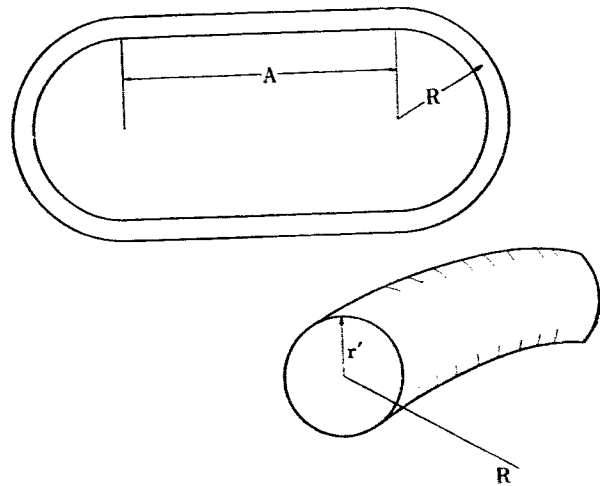
$$\tau_c \sim 2 \times 10^{-5} B r_0^2 / T \text{ 秒}$$

となる。数値例を第 5・3 表にあげる。

この 2 つの保持時間の何れになるかは、プラズマの状態により変る。また上の保持時間の式そのものも、現在、理論的実験的に研究中である (資料 4 参照)。

1.4 ドーナツの幾何学的大きさ

磁場の計算の際 r'/R で展開しているの、 $r'/R \ll$



第 5・2 図

1 でなければならない。 R は半円部の半径、 r' はコイルの半径であるが、そのつくる磁場の複雑さから考えて helical winding の r' をとる (第 5・2 図)。

第 5・4 表

	r'/R
S-I	0.146
S-II	0.125
Stellarator C	0.135

直線部分の長さは真空の引き口, 測定用枝管の太さ, 数, 枝管をつけた所の補正コイル, 加熱部などからきまってくる。

測定としてはマイクロ波, 分光, 写真, 質量分析などが必要である。しかも, プラズマは必ずしも軸方向に一樣ではないので, 例えば分光測定などは二, 三カ所で行うことができるのが望ましい。

ドーナツの太さと同じ太さの枝管をつけると, 磁場の乱れの補正のためドーナツの太さ程度以上の長さの補正部を必要とする。

1.5 Kruskal 制限電流

ジュール加熱を行う場合は, その電流値が保持を行うために制限される (Kruskal の制限)。これはジュール加熱をおこなうのに十分な値にならない。

Kruskal の制限について電流 I は 8 字型の場合, 次式で与えられる。

$$I = 0.5 Br_0^2 \eta / L \text{ Amp}$$

ここに $\eta = l + 2\pi h$, l は rotational angle, h は η を正にする最小の整数, L はプラズマ柱の長さ (mm)。

helical winding の場合 l は軸からの距離に依存するが, その場合はプラズマ表面での値を取る。

第 5.5 表

	B (ガウス)	r_0 (mm)	L (mm)	η (rad)	I (Amp)
S-I	2×10^4	25	5,000	$\sim \pi$	4×10^3
S-II	3×10^4	30	7,400	$\sim \pi$	6×10^3

これらはいずれも必要なジュール加熱をおこなうに十分すぎるくらいの値である。

1.6 helical winding の磁場の極数 l

磁場の極数 l は安定性, β , 磁場の有効さ, コイルの製作技術などからきめられるが, $l=3$ にするのが適当であろう (注 16)。なお二つの半円部に helical winding をまくわけであるが, その l の値を異ったものにしてプラズマ保持の能率を上げるという試みもある (注 17)。

§ 2 Stellarator の技術的問題

Stellarator の放電は普通 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ mmHg の充填ガスでおこなわれている。この際基礎真空度を 1×10^{-6} mmHg にしておいた場合は, 不純物による制動放射エネルギー損失のため 10^6 °K 以上の高温プラズマはえられないようである (注 18)。しかし基礎真空度を

10^{-10} mmHg 程度にすれば, 10^{-6} mmHg に較べて不純物は 10^{-3} 以下になり, 温度は上げやすくなる。しかし Stellarator 程度の金属真空容器を 10^{-7} mmHg 以下という超高真空にすることは, 技術的に相当困難な問題であるが, 現在の最高の真空技術を使えば不可能ではない。なお基礎真空度が上がれば, それに応じて当然充填ガスの純度も上げなければならない。 10^{-10} 程度の純度の水素あるいはヘリウムを得ることは可能であるが, 細心の注意を必要とする。ヘリウムの場合は液体ヘリウムより精製する必要がある, 相当大がかりなものになる。 10^{-10} mmHg 以下に基礎真空度を上げる場合はさらにガスを純化することも考えなければならない (注 19)。

現在, 実際に 10^{-10} mmHg 程度の超高真空をうるには, 真空函を高真空度で 450°C 程度で $10 \sim 60$ 時間加熱排気するいわゆる baking をもちいる。これによって, 常温での出ガスを 10^{-10} mmHg/l/sec より 10^{-15} mmHg/l/sec に下げられる。さらにプラズマ衝撃による不純物の流出も大巾に減少する。このように, プラズマ衝撃の際の不純物発生量が表面の材質と状態に大きく影響される。baking および出ガスなどのために超高真空用材料は制限をうけるとともに, 高圧コイルの内側にある真空函を到るところ 450°C の高温にしなければならず (注 26 参照), 電気機器としては非常に特殊なむずかしいものとなる。また真空函にフランジをつけて分解可能にすることは望ましいことであるが, S-II のようにパルス磁場を使う場合は, 磁場の時間的变化により誘起される電圧 (約 10V) のため, 主コイル電流の数 10% におよぶ電流がフランジに流れるので, フランジをつけることは望ましくない。したがって容器の枝管以外の部分はすべて Heliarc (注 20) により熔接しなければならない。ジュール加熱用の誘導電圧を短絡しないために, 容器には高純度のアルミナのセラミックを挿し入れなければならない (セラミック部)。Heliarc 技術とセラミック金属接合の技術については, すでに国内で実用化されており, 設計の当初心配されたほどの製作上の困難はないようである。

予備加熱としては, 高周波放電が一般に用いられている。その周波数は, 充填ガス圧との関係があるので多段切換にしておくことが望ましい。高真空 ($\sim 10^{-5}$ mmHg) になると, 高周波放電が困難となるので, J. G. Linhart (注 21) の提唱している電子を入射して電子の drift により電離させることも考えられる。

保持磁場として定常磁場を使うかパルス磁場を使う

かは、もちろん実験計画よりきまることであるけれども、費用の点も無視できない要素である。定常磁場にしておくと、出来るプラズマも定常に近いものが期待できるので非常によい。しかしながら、そのために装置は大きなものになり、例えばコイルに必要な銅は莫大な量になる。核融合反応のように“若い”研究分野にあっては、装置の有用さという意味での寿命は比較的短いので、電源のような流用出来る装置はともかく、装置本体は研究上の支障のないかぎり手軽にしておくことが望ましいと考えられる。パルス磁場では、電流を数サイクル流した後、コイルの冷却時間をおくので、コイルの断面積は小さくなり、製作は容易になる。しかしこの場合は、例えば1分に1回しか測定ができないという不便はある。それ以上に重要なことは、磁場が時間と共に変化することである。その場合、磁場の変化がわずかである頂上部分の間に測定ができれば研究上は定常の場合に比べてあまり遜色のない装置とすることが出来る。もちろん定常的な装置は研究上優れている。研究の段階が進めば定常なものに進んで行くようになる (sine 波形にした場合の頂上部分の具体的な時間については (注22) 参照)。

パルス磁場の電源としては、はずみ車発電機・蓄電池・インダクタンスおよびコンデンサーが考えられる。これらの電源のどれを使うかは、電源エネルギー、使用相当周波数、くりかえしなどがきまると、経済的な問題として決定出来る。S-IIのように 2×10^6 ジュール・20 サイクル、くりかえし1分間に1回程度の場合には、コンデンサーが経済的である。

§ 3 S-II 本体の設計および見積

以上の考察を経て、S-I、S-IIの2つの設計を行った(第5・3~6図参照)。§1に大きさをきめる因子について述べたが、Stellarator 設計のとき各パラメータは物理的要請だけからはきまらない。製作の技術、建設コストなどと総合的に考えなければならない。研究費は一方的にきめられるものではないが自ら限界がある。研究費を一定とした場合の各部のパラメータは §1 1.3 のような不確実な要素があるにしても、一応いく組かを決定できる。Stellarator 研究のどの点に重点をおくかにより、どのパラメータの組を選ぶかがきまる。このS-IIでは測定の信頼度の点と保持の解析の簡易さに主眼をおき、§1 1.2 と 1.4 を重くみた。また加熱の研究も重点の一つであるので加熱部には相当大きなスペースを取った。安定性の点より8

字型でなく racetrack 型を選んだ。磁場の強さ、管の太さ、長さなどは Larmor 半径, β , Kruskal の制限、プラズマの表面と実質、保持時間、測定の便宜などを考慮して決定した。S-I、S-II の主な数値は §1 の各表にあるが、さらに装置の諸元を加えて第5・6表に示してある。

第5・6表

	S-I	S-II
プラズマの温度 (°K) (一次目標)	5×10^6	5×10^6
プラズマの長さ (mm)	5,000	7,400
プラズマの半径 (mm)	25	30
真空函の半径 (mm)	50	60
コイルの平均半径 (mm)	93	120
保持磁場の強さ (ガウス)	2×10^4	3×10^4
磁場のエネルギー (Joule)	3×10^5	1.2×10^6
電源コンデンサ・ エネルギー (Joule)	5×10^5	2×10^6
電圧 (Volt)	1.2×10^4	2×10^4
測定用枝管の数	3	6
divertor	つけられない	将来つけられる 様になっている

3.1 S-II 仕様の要点

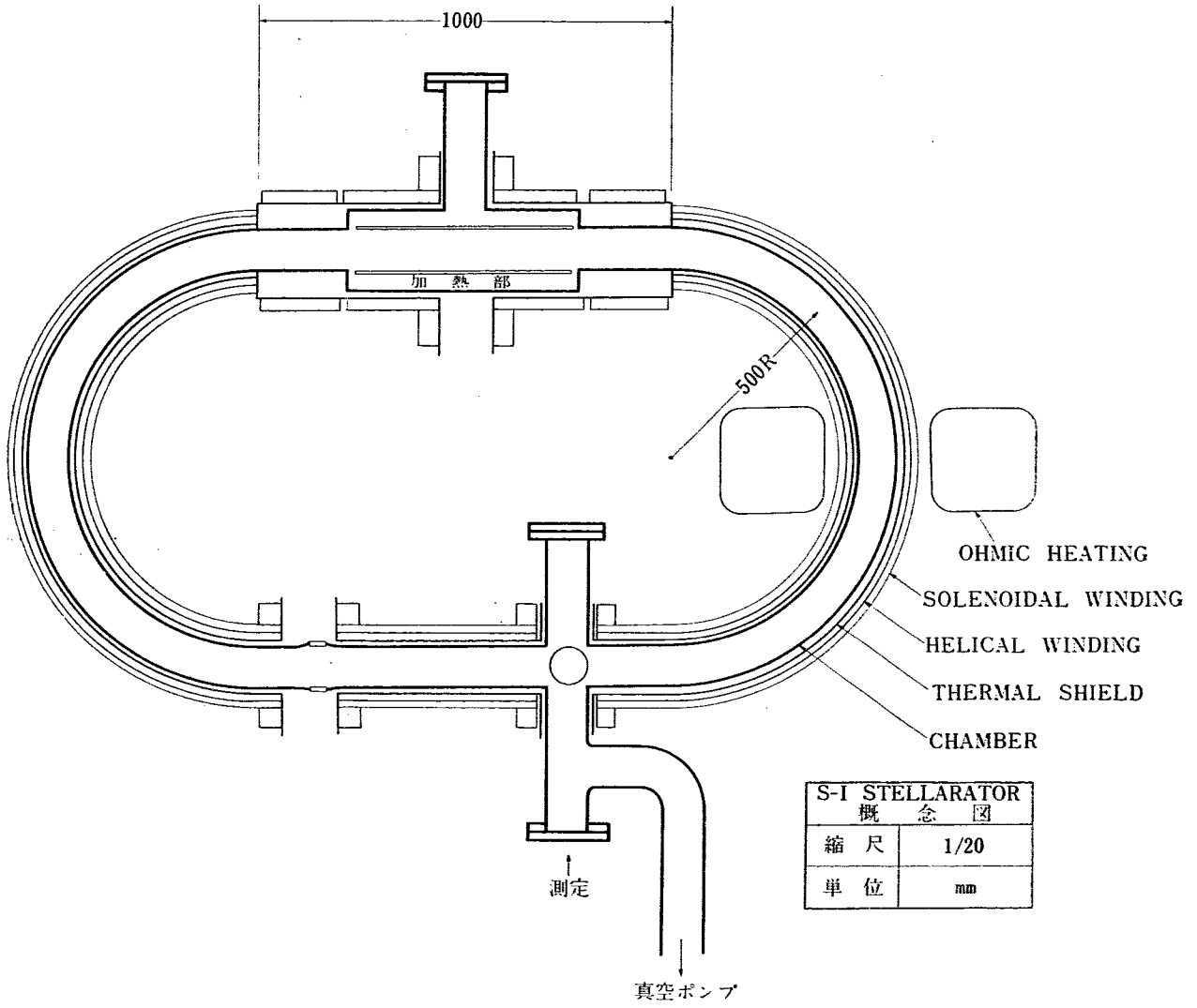
S-II についてはさらに詳細な検討をおこない、次のような仕様にまとめた (第5・5~6図参照) (注 23)。

(1) 真空函。材質は stainless steel で厚さ 2 mm (non-magnetic, 例えば #310) のものを用い、Heliarc 溶接により作る。軸方向は溶接後焼鈍する。測定枝管は金ガスケット (Mura 280 (1957) 参照) でメクラぶたをしておく。到る所 450 ± 20 °C, 100 時間 bake できるようにする。測光の窓は水晶および sapphire になる予定である。マイクロ波用の枝管および他の1本にはベローをつける。

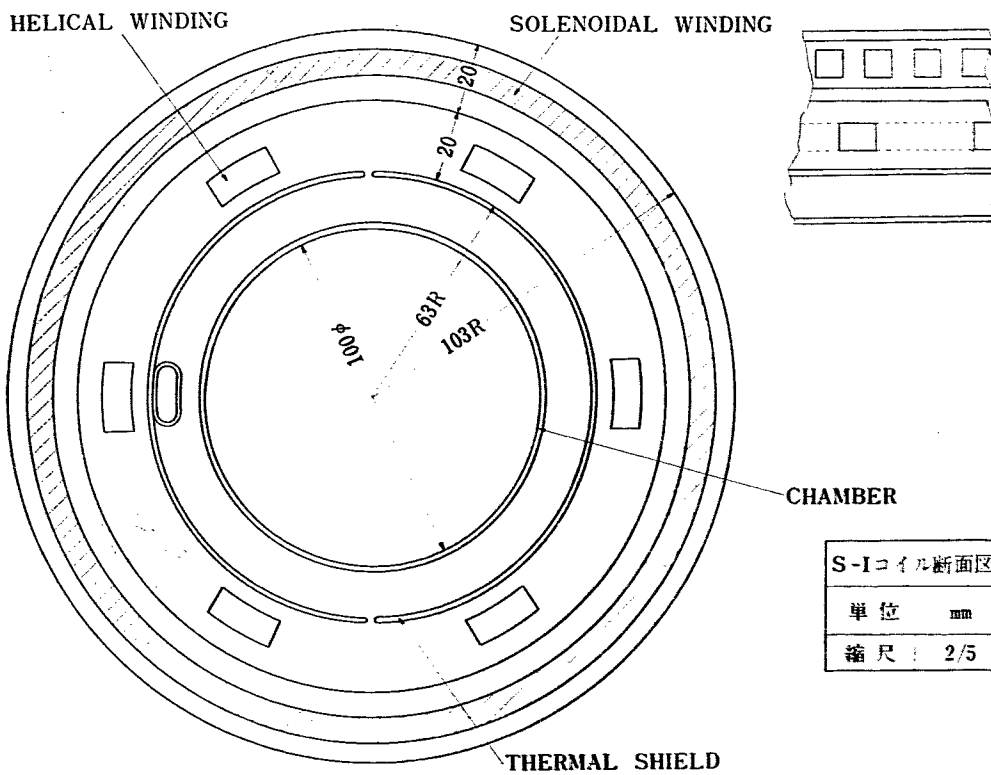
(2) コイル。強度はもちろん 3×10^4 ガウスの磁場による電磁力に耐えられなければならない。bake にも耐えられること、磁場の検査のため “rabbit” (注 24) を使うことを考えているのでコイル枠とコイルの中心は ± 2 mm 以内で一致していること bake のときの熱絶縁のため熱絶縁板は one-turn short にならぬようにすることなどが要求される。冷却水あるいは冷却風の量は制御する。

各コイルの図面指定の位置と実際のコイルのずれの自乗偏差はつぎの通りにする (注 25)。

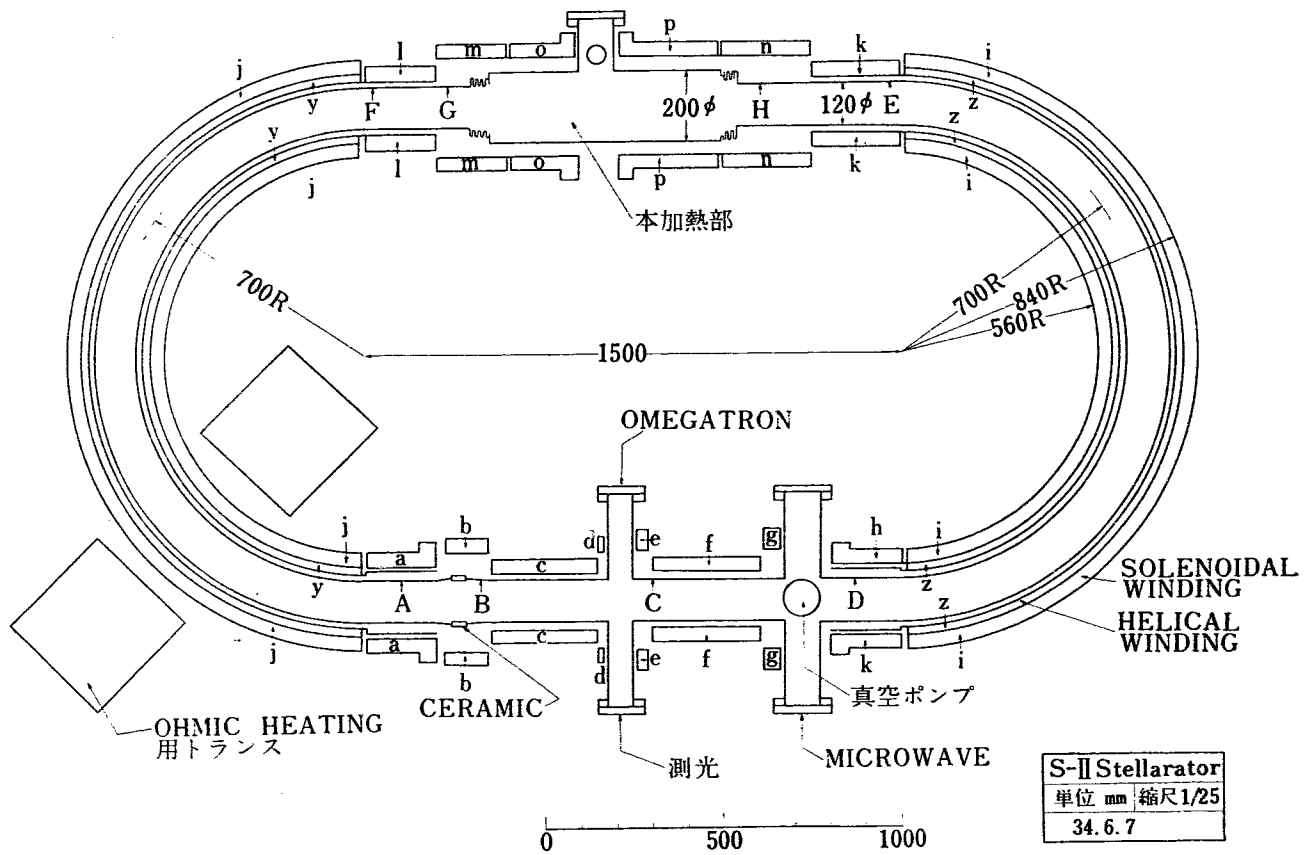
helical winding	± 0.5 mm
solenoidal winding	± 1.0 mm
helical winding と solenoidal winding	



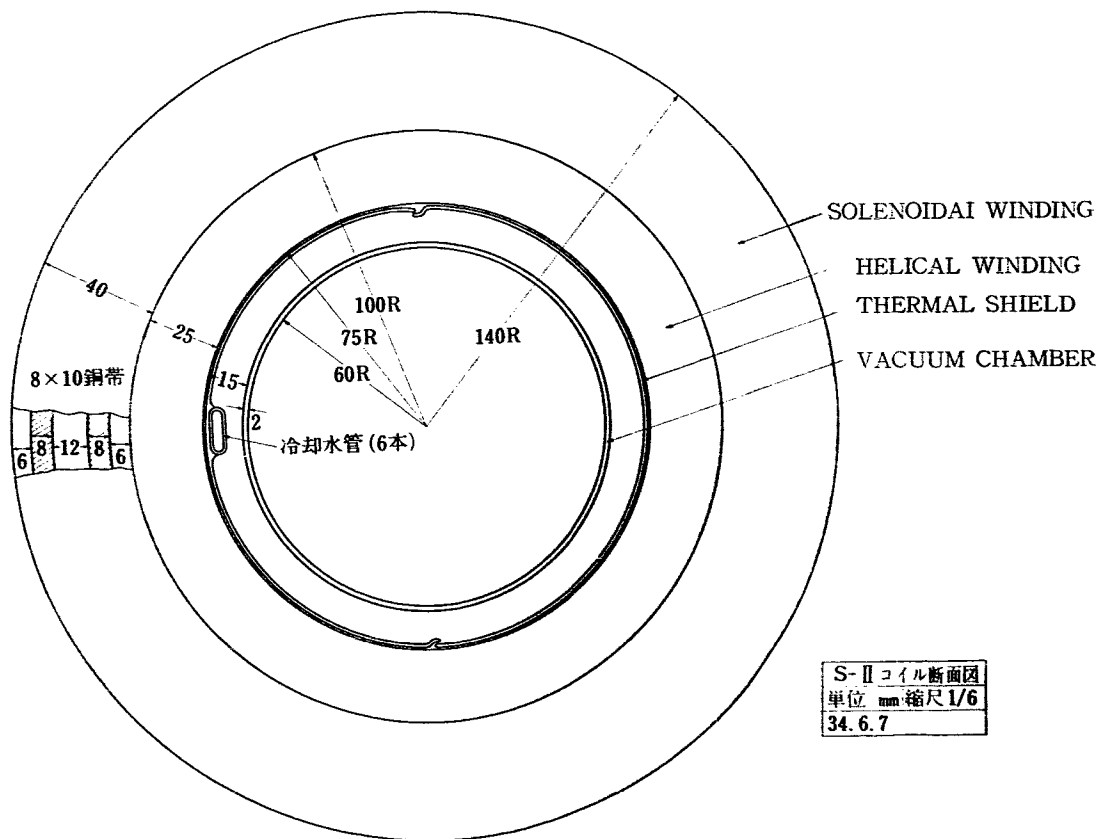
第 5-3 図



第 5-4 図



第 5-5 図



第 5-6 図

との centering $\pm 0.5 \text{ mm}$

helical winding の出し方は計算の上指定する。helical winding は $l=3$ 。電圧 25 kV, $3 \times 10^4 \text{ A}$, 20 サイクル相当の電流を 3 サイクルの間流しそのくりかえしは 1 分 1 回とする。

- (3) ジュール加熱. Hypersil (2 トン), 48 turn を巻き, 電圧 3 kV, 5 kJ を投入する。クローバー・スイッチも付ける (共にイグニトロンスイッチ)。
- (4) 架台. 真空函の中心を床上 1.2 m の高さに保ち, 架台のコイルに近い部分は, non-magnetic にする。
- (5) 真空系. Bayard-Alpert type の球 20 本, 真空計 3 台を用意する。ポンプは液体窒素トラップ 2 段付 4 インチ油拡散ポンプ (液体窒素自動補給式, 排気速度はトラップ 2 段付で $5 \sim 10 \text{ l/sec}$, 10^{-8} mmHg) で, 拡散ポンプ油は輸入し, 廻転ポンプにも冷却トラップをつける。

長時間連続運転 (10 日間) および 停電時の別電源への自動的切りかえができるようにする (全自動式)。

bake は到る所 $450 \pm 20^\circ \text{ C}$ に自動制御する (このためには電動発電機 2~6 組必要になるであろう)。

- (6) 励磁電源. 負荷のコイルはインダクタンス $\sim 4 \times 10^{-3} \text{ H}$, 抵抗 0.2Ω , 電流 $2.6 \times 10^4 \text{ A}$ 。コンデンサー電源とし, エネルギー $\left(\frac{1}{2} CV^2\right) 2 \times 10^6 \text{ Joule}$, 容量 $1.6 \times 10^{-2} \text{ F}$, 充電電圧 $5 \sim 20 \text{ kV}$ 可変とする。使用周波数は 20 サイクル相当とする。
- (7) 予備テスト用電源. 磁場測定 (rabbit 等) などに使用する。20 kW, 300 A の発電機 (これで 300 ガウスできる) で, 簡単な安定器をつける。

3.2 S-II の見積りおよびメーカーとの交渉

3.1 の仕様によって, 東芝, 日立, 三菱の三社に製作上の検討および見積りをしてもらった。

- (1) 三社から製作上の問題についてこもごも注意されたが, その主なものはつぎの通りである。

コイルの指定が嚴重すぎる。例えば, 30° C 温度上昇とすれば, helical winding (半円) で $\sim 1 \text{ mm}$ 延びる。もちろんこれに角度がかかって, 温度上昇による winding のずれとなるが, helical winding の誤差 $\pm 0.5 \text{ mm}$ はこれを見ても相当厳格なものであることがわかる。

コイルの中心の位置で $\pm 0.5 \text{ mm}$ と指定してあるが中心は非常に測りにくい。

コイルについて磁場で指定された場合は, 三社でもそれくらいのことはやれると思われる。しかし, それをやれるような体制になるには時間がかかる。

bake 電源について, bake されない所が 1 cm^2 あってもいけない (注 26) と指定されると, 案外設計がむづかしい。実際につくって各部の温度をはかり手直しをすることになる。しかし手直しをすれば出来る。

直接真空函に電流を流すのは電流のリードなどでうまくないので, フレキシブル・ヒーティング・テープをまいた方がいい。セラミック部分が bake をくり返したときこわれる恐れがある。

(2) S-II 本体の見積り

三社より 1959 年 7 月次のような見積りをもらった。

区分の仕方は社内事情により各社で異っている。次表は主として A 社の区分を用いた。このために B, C 社の区分は不揃いなものになったが, もちろん, B, C 社ともに上述の仕様にある S-II 本体の見積りである。

第 5-7 表 (単位千円)

区 分	A 社	B 社	C 社
真 空 系		10,000	9,000
baking			
baking vac. control	59,200	50,000	16,000
真 空 函		7,000	
コ イ ル		50,000	130,000
台	27,000	(または 40,000)	
主 電 源	197,000	150,000	190,000
ジ ュ ー ル 加 熱	15,500	20,000	16,500
直 流 補 助 電 源			3,500
制 御	25,000		8,000
ケ ー ブ ル	7,050		
調 整 関 係	5,250	30,000	47,000
	(据付含まず)	(据付など)	(据付 after-service)
合 計	336,000	317,000	420,000

§ 4 S-II の全容・研究計画

S-II 研究のためには本体の研究室を含めて $1,500 \text{ m}^2$ (約 450 坪) 必要である。受電能力としては S-II 研究だけについては 300 kVA あれば十分である。

測定器, 付属施設を全部数え上げ評価すると第 5-8 表の通りである。

第5・8表 (単位千円)

項 目	費 用
設 計 ・ 計 算	20,000
本 体 電 源	340,000
制 御 パ ネ ル } 配 管 配 電 }	40,000
高周波予備放電 (30 kW)	3,000
高周波ジュール加熱	25,000
magnetic pumping	15,000
ガ ス 充 填 系	25,000
液 体 窒 素 製 造 機	3,000
測 定 器	128,000
micro 波 (2 bands)	30,000
分 光 (vacuum) ordinary)	15,000
オ メ ガ ト ロ ン	7,000
leak detector	2,000
中 性 子	5,000
X 線	10,000
synchroscope (pulse 系記録装置)	15,000
高速カメラ (Beckman)	40,000
電 圧 電 流 など	2,000
無 雑 音 別 電 源	2,000
合 計	604,000
受電・建屋の費用概算	60,000

4.1 S-II研究計画 (time schedule)

第5・9表がその研究計画である。この研究計画は概算要求などの国家予算の時間割も考慮して造ってある。スタッフとしては密接な連絡があり区別しにくい面もあるが、専門に応じて装置関係、測定関係、理論関係の3グループに分けられる。S-II 本体の設計は計画の各部にわたり関連があるので、本体の設計、特にその初期の段階では、全グループが参加しなければならない。測定グループは本体設計の途中より本体納入までの約2カ年間測定器の整備・調整をおこない、

さらに簡単なプラズマによりプラズマ測定を行い、測定結果の信頼度を上げるような予備研究をおこなう。装置グループは主として本体設計後、本体納入までの1年3カ月間加熱装置の設計、予備実験、試運転をおこなう。理論グループは本体設計に参加し、次いで加熱の検討簡単なプラズマの測定結果の解析などをおこなう。図の下方にある“本運転についての検討”は全グループがそれまでの結果をもちより、本運転による研究についての検討を集中的に行う期間を示す。また同じく下方にある“new idea についての模索、将来計画”はその頃より S-II 建設のための仕事量が減ってくるので、S-II について直接研究する人々以外にもっと自由な立場にたって研究するグループをもつことができる。このグループへはもちろん3グループより参加し3~5人が中心となる。

各グループの各年度別の構成は第5・10表の通りである。ただし、この構成は現実にそのような人が得られるかどうかについては考慮していない。

第5・10表

	第1年度 (A+B)	第2年度 (A+B)	第3年度 (A+B)
理 論	4+1	5+1	4+1 2+0 (長期計画)
測 定	1.5+1	4+3	4.5+5 0.5+0 (長期計画)
装 置	5.5+2	5+2	2+4 2+0 (長期計画)
計	11+4	14+6	15+10

しかし日本の現状では、これらの人すべてに既成の人を予想することは出来ない。相当の部分は S-II 研究グループ自身で養成しなければならない。この表で A+B とあるが A は研究者、B は研究補助者の数である。

第6章 DCX装置の具体的検討

§ 1 基礎的問題

1.1 保持

磁場の強さ, mirror比, 磁場の配位などが問題となる(注 27, 28, 29).

1.2 安定性

たてみぞ型不安定性, あるいはイオンおよび電子の速度分布の非等方性のためプラズマ振動が励起されるという不安定性などが考えられている. これらは線型化した理論なので振幅を論ずることは出来ない. いまままでの所, これらの不安定性は実験的には認められていない(注 27, 28).

1.3 イオン蓄積の方法

DCX ではカーボン・アークにより分子イオンを解離し, 原子イオンとして高速度イオンを捕捉しておりその解離能率は 15~40% で相当よい. しかし, カーボン・アークの存在はガス中の不純物のもととなること(約 1×10^{-3} mmHg l/sec), アーク内の冷い電子(約 30 eV) が熱損失の一つの原因となること, あるいはカーボン電極の消耗が大ききこと(10 cm/時間)等の問題がある. 現在不明である解離の機構を明らかにすれば, 解離の能率をあげたり, その動作を安定させたり, あるいはカーボン・アークに代るものを考えることができるかも知れない. このアーク内には C^{++} が多く存在することは光学的に確かめられており, これが解離に大きく寄与しているという説もある. 不純物の対策の一つとして重水素アークも試みられたが, 解離能率が低いこと, アークの部分短いことなどの点で現在用いられていない(注 28, 29, 30, 31).

1.4 burnout (注 32, 33, 34)

初期状態ではイオン密度はまだ大きくないので, 高速イオンの損失としてはイオン同士の衝突による mirror 損失や側壁への損失は考えなくてもよく, おもに中性原子との電荷交換により高速中性粒子となって失われる. 高速イオンの捕捉されている領域内で低速中性原子はイオン化と電荷交換で低速イオンとなって mirror から出て行く. プラズマに入ってくる中性粒子

の平均自由行路が捕捉領域の平均弦長に等しくなることを burnout の定義とすると, これ以上の捕捉電流でその領域内の中性原子密度は薄くなり, イオンの有効な蓄積が始まり, Coulomb 散乱による損失と釣り合う定常状態になる. この burnout するときの臨界捕捉電流を I_{crit} (mA) とすると

$$I_{crit} = \frac{1}{6.25 \times 10^{15}} \cdot \frac{N_0}{2} \cdot \frac{v_0 S}{4} \cdot \frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{ex} + \sigma_i}$$

$$= \frac{I_0}{2} \frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{ex} + \sigma_i}$$

ここに N_0 はプラズマ外空間の中性原子密度 (cm^3), v_0 はその速度 (cm/sec), S はプラズマ表面積 (cm^2), σ_{ex} , σ_i はそれぞれ電荷交換およびイオン化に対する断面積 (cm^2), $I_0 = \frac{1}{6.25 \times 10^{15}} \frac{v_0 S}{4} N_0$ はプラズマ表面から流入する中性原子流を mA で表わしたものの (1 mA は毎秒 6.25×10^{15} 個の流れに相当). この定義は(注 34)によるもので, (注 32)では違った定義を burnout に与えているので臨界捕捉電流は上式の2倍になっているが, 何れにしても burnout が始まる領域の有益な尺度となっている. § 2.2.1 の計算には安全のため(注 32)による臨界捕捉電流を用いている.

臨界捕捉電流の約 10 倍の電流では中性原子との損失は無視できるようになり, その捕捉電流で決まる最終のイオン密度に落ち着く. 臨界捕捉電流の値は加速器の出力に直接関係するからさらに詳細な検討が望ましい. その数値例は第 6.1 表にある.

最近の ORNL 報告(注 35)によればアーク内の C^0 および C^+ との電荷交換による高速イオン損失は相当大ききことが実験で見出された. 分子イオン解離能率 η とアーク内の電荷交換損失 L_c の関係は, 現在のアークでは η を大きく (30~40%) すれば L_c も大きくなる ($\sim 2 \times 10^{-6}$ mmHg の圧力の中性原子による損失と同じ位). 1×10^{-6} mmHg の圧力でも臨界捕捉電流は大きくて問題となる所であるから, このように大きな L_c では全然だめなので L_c を $\sim 1 \times 10^{-7}$ mmHg に相当する所で DCX を運転しているが, η は $\sim 8\%$ となっている. 何れにしても, burnout するため

には加速器への要求は非常に大きくなっている。

1.5 プラズマ形成への過程

臨界捕捉電流より充分大きい捕捉電流のとき、熱運動化の後でプラズマができるであろうが、そのイオンの密度および温度は次のような損失に依存する。このとき電荷交換による損失は無視して考えてよい。質量の連続の式、エネルギーの釣り合の式を連立して考えなくてはならない。イオンは Coulomb 散乱による mirror 損失および側壁への損失で失われる。エネルギー損失は mirror から出て行く電子を補う冷い電子の加熱、イオンがアークを通るときアーク内の冷い電子へのエネルギー損失、電子の制動放射損失、などである。

側壁への損失はプラズマと側壁との距離がイオンの Larmor 半径程度である DCX では特に問題となる所であるが楽観的結果が出ている。

アーク内の損失は電子がアーク内だけでなくイオン軌道の全円周にそって薄くなって同じ全電子数存在するとして計算しているが、電子のエネルギー分布が不明であり、またイオンの軌道が衝突によりアークをそれることを考えていないので、やや悲観的な結果が出ている (注 36)。

熱運動化した後のイオン温度は簡単な仮定で計算され (注 37)、相当の高温が期待されているが、Fokker-Planck 方式によるより詳細な計算が現在 Oak Ridge で進行中である (注 38)。

以上より詳細な検討が必要であり、また熱運動化の過程の物理的説明も望ましい。

§ 2 技術的問題

2.1 加速器

$I_{crit} = \frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{ex} + \sigma_i} I_0$ から加速器の仕様が大体決まる。

σ_{ex} はイオン速度 v と共に大体指数函数的に減り (注 38)、 σ_i は v^{-2} で (注 39) σ_{dis} (アークにより解離する断面積) は v^{-1} で共に減る (注 30)。これらの数値を第 6.1 表に示す。

第 6.1 表より重水素より水素を用いた方が burnout は容易で磁場の全エネルギーは小さいことが解る。したがって、burnout 前後のプラズマの様子を調べるには水素を用いる方が有利である。次に加速器に対するメーカー (東芝、日立、三菱) の意見を述べる。いずれも予備実験を重ねれば製作できる見通しで、具体的内容は次の通りである。

(1) Cockcroft (1 キロサイクル/秒) 4 段、数百

第 6.1 表

	D ⁺			H ⁺
E_{mol} (入射分子イオンエネルギー) keV	500	1,000	2,000	500
E (捕捉イオンエネルギー) keV	250	500	1,000	250
σ_i cm ²	1×10^{-16}	5.6×10^{-17}	3.1×10^{-17}	5.6×10^{-17}
σ_{ex} cm ²	5×10^{-18}	2×10^{-19}	1×10^{-20}	2×10^{-19}
$\frac{\sigma_{ex}}{\sigma_{ex} + \sigma_i}$	4.8×10^{-2}	3.6×10^{-3}	3.2×10^{-4}	3.6×10^{-3}
I_{crit} (注 40) mA	85	15	1.8	5.3
σ_c (注 41) cm ²	4×10^{-23}	1×10^{-23}	0.25×10^{-23}	4×10^{-23}
n_+ (注 42) cm ³	3.1×10^{13}	1.2×10^{13}	4.1×10^{12}	1×10^{13}
ρ_c (Larmor 半径) (10 ⁴ ガウスで) cm	10.4	15	20	7.3

mA, 脈動率 0.1%。

(2) 脈動率は n を段数とすると Cockcroft のときは n^2 に比例し、cascade 方式のときは n に比例するから cascade の方がよいのではないか。整流はセレンで、150~500 サイクル/秒。

(3) cascade あるいは Cockcroft を数台並列に用いる。

イオン源は各種の型 (低電圧アーク型、高周波型、Von Ardenne 型、PIG 型等) につき検討する必要があり、また加速管は相当問題である。

2.2 排気系統

$I_{crit} \propto I_0 \propto P_0$ である。 P_0 はプラズマ外部の圧力であるが、 P_0 が小さいほど加速器への負担が小さくなる (注 43)。 P_0 を構成するものは、入射粒子やアークおよび高速粒子による出ガスである。捕捉電流 I (mA)、排気速度 S (10³ l/秒) のとき、 I のみによる圧力 P (mmHg) は

$$P = 1.7 \times 10^{-7} \frac{I}{\epsilon S}$$

である。ここで ϵ はアークの解離効率 (注 44)。

プラズマ内部およびアークで中性原子がイオン化され mirror の外にでることがプラズマ発生部での主なポンプ作用となっており、これを能率よく除去することが問題となっている。たとえば拡散ポンプを用いるとき 10⁻⁶ mmHg は以上の高真空中で相当の排気速度を要求される (注 28, 29)。

2.3 コイル系統

原理的には問題ないが、実際の製作にはいろいろ考えなくてはならぬ点がある。コイルと電源を総合的に検討しなくてはならない。また duty time およびコ

イルの動作温度も問題である(注 28, 29, 45).

2.4 資料

参考のため DCX および OGRA の諸元その他の性質および仏国で計画中の DCX 型装置を資料 6 に示す.

§ 3 測定

3.1 アーク

電子密度, 電子温度, イオン密度, イオン温度, イオン化の度合, 電位分布, 拡散速度, 集団速度などにつきマイクロ波, 探針, 質量分析計, 分光器, 輻射熱量計等で測定. 解離の機構を知るためにはアークの各成分について解離断面積を測らなくてはならない(注 28, 29, 31).

3.2 捕捉されたビーム

リング電流はその減衰時間および捕捉電流により計算するか, Rogowski コイルで測定. 電子密度はマイクロ波で測るが密度が小さいので相当難しい. 電子温度は制動輻射あるいはサイクロトロン輻射から知れる. 高エネルギー中性粒子の検出は箔を用いた Faraday カップを用いるが, そのエネルギー測定は相当むずかしい. プラズマ位置, イオン軌道などは蛍光板で測る(注 28, 29, 30).

3.3 その他

不純物はオメガトロンおよび分光器により測定. mirror からの損失は, 電子についてはいろいろの厚さの吸収板と scintillation counter あるいは核乾板の組合せ, イオンについては質量分析計などにて測定(注 28, 29, 49).

§ 4 研究のすすめ方

DCX は burnout 以上をねらうと相当大がかりなものになる(多分 10 億円以上).

DCX を Project として取り上げる場合は, 次の 3 段階をへるのが適当であろう.

第一段階: 加速器の開発, アークの予備実験および理論的検討をする. またアークおよび捕捉イオンによるポンプ作用を有効に利用する方法の予備実験も重要である.

第二段階: burnout の手掛りをつかめるような DCX をつくり burnout 前後の状態を研究する.

第三段階: 充分 burnout できる装置をつくり, DCX 全体として研究をする.

ただし以上の 3 段階は今後の研究成果を取り入れ, 修正されるかもしれない.

第 7 章 Ion Cyclotron Resonance Mirror 装置の具体的検討

§ 1 設計方針

ここで考える装置は burnout はねらわず入射イオンの捕捉を研究の対象とする. 設計の基礎となるおもな関係は次の通りである.

- (1) 最終エネルギーの重水素イオンを閉じこめるために必要な $B_0\rho_c$ (B_0 は中央部での磁場の強さ, ρ_c は Larmor 半径) から磁場の強さと最小の容器半径との関係が得られる.
- (2) mirror 比をきめると他端での反射の条件から磁場の軸方向の長さおよび加速電場の強さがきまる.

§ 2 Scaling Law

設計の見通しをつけるために, 次のような scaling law が検討された. 結論を先に述べると入射エネルギー E_0 が低く, ($B_0\rho_c$ が一定でも) B_0 を大, ρ_c を小にとる方が, イオン密度が上り, 必要な高周波出力も減り有利である(注 47).

装置のパラメーターおよび単位, [] 内は従属変数と考えられる量,

プラズマ [E_i]: イオンの最高エネルギー, keV;

[n]: イオン密度, cm^{-3} ; n の上限はイオン電流の反作用から $10^{11}/\text{cm}^{-3}$ におさえられ

る。

直流磁場 H_0 : 磁場の強さ, キロガウス; R : 磁場の半径, cm; l : mirror間の距離, cm; $[P_0]$: 磁場の電源の出力, MW; $[W_0]$: 磁場のコイルの銅材, トン

イオン源 E_0 : 入射エネルギー, eV; I : 入射電流, A; $[E_1]$: 高周波コイルを通過する間にかかる平均エネルギー, eV; $[A_0]$: 容器内の真空度, 10^{-6} mmHg

高周波発振器 $[f_0]$: 発振器の周波数, Mc/秒; $[P_1]$ 発振器の出力, kW; $[L_0]$: 高周波コイルのインダクタンス, μ H; $[\tau_1]$: 容器壁に衝突するまでの平均寿命, 10^{-3} 秒; $[\tau_2]$: イオン-イオンの衝突時間, 10^{-3} 秒

(1) $H_0 \rightarrow \alpha H_0$ にした場合

$$E_1 \rightarrow \alpha^2 E_1, \tau_1 \rightarrow \alpha^2 \tau_1, \tau_2 \rightarrow \alpha^{1/2} \tau_2$$

$n \rightarrow \alpha^2$ (密度は τ_1 からきまるとして), $n \rightarrow \alpha^{1/2} n$ (密度は τ_2 からきまるとして)

$W_0 \rightarrow \alpha W_0$ では $P_0 \rightarrow \alpha P_0$ (または $W_0 \rightarrow W_0$ では $P_0 \rightarrow \alpha^2 P_0$)

イオン源は不変。ただし E_1 の増加に伴い burn-out の条件が有利となる。(E_1 の増加と共にイオン化断面積 σ_i は増加, 電荷交換断面積 σ_{ex} は減少)。 $f_0 \rightarrow \alpha f_0, P_1 \rightarrow \alpha^{-1} P_1 (L_0 \rightarrow L_0)$

(2) $R \rightarrow \alpha R$ にした場合

$$E_1 \rightarrow \alpha^2 E_1, \tau_1 \rightarrow \alpha^2 \tau_1, \tau_2 \rightarrow \alpha^{1/2} \tau_2$$

$n \rightarrow n$ (密度は τ_1 からきまるとして), $n \rightarrow L^{1/2} n$ (密度は τ_2 からきまるとして), プラズマ体積 V は $V \rightarrow \alpha^2 V$ となることに注意。

$W_0 \rightarrow \alpha W_0, P_0 \rightarrow \alpha P_0$ ただし, (1) の場合よりは磁場の作り方は易しい。

イオン源は不変。 E_1 が増加するが, V が増加するので burnout に必要な真空度は同じ程度が必要。

$P_1 \rightarrow (1-\alpha) P_1$ (無限長コイルと考えると $P_1 \rightarrow P_1$), $L_0 \rightarrow (\alpha^2 \sim \alpha) L_0$ (無限長コイルと考えると $L_0 \rightarrow \alpha^2 L_0$)

(3) $E_0 \rightarrow \alpha E_0$ にした場合

$E_1 \rightarrow E_1, \tau_1 \rightarrow \alpha^{-1} \tau_1, \tau_2 \rightarrow \tau_2, n \rightarrow \alpha^{-1} n$ (密度は τ_1 からきまるとして), $n \rightarrow n$ (密度は τ_2 からきまるとして)

直流磁場は不変。 $E_1 \rightarrow \alpha E_1, A_0 \leq A_0$ (真空度を少しよくする必要がある), $P_1 \rightarrow \alpha^2 P_1$

(4) $I \rightarrow \alpha^2 I$ にした場合

$$E_1 \rightarrow E_1, \tau_1 \rightarrow \tau_1, \tau_2 \rightarrow \alpha^{1/2} \tau_2$$

$n \rightarrow \alpha n$ (密度は τ_1 からきまるとして), $n \rightarrow \alpha^{1/2} n$ (密度は τ_2 からきまるとして)

直流磁場は不変。 $A_0 \rightarrow \alpha A_0$ (真空は α 倍悪くてもよい), 高周波発振器は不変。 P_1 は少し増大の必要あり。

§ 3 設計例

以下に述べるように 2 種の仕様について検討した (注 48)。第 7.1 表の I の概略を第 7.1 図に示す。

重水素の場合 σ_i は 200 keV で最大になるのでイオンの最終エネルギーとして 200 keV をとった。また, 加速されすぎて側壁にあたりイオンの寿命がきまる場合には, イオンのエネルギー分布の山は最終エネルギーの約 $1/3$ のところにあるので分布の山は約 40 keV となり測定の間からもよい。

入射エネルギーは § 2 (3) で示したように低い方がよいが, イオン源の技術的制限から 400 eV とした。イオン源は低電圧アーク型で第 1・第 2 電極を持ついわゆる Caltron 型である。イオン電流は 100 mA。装置の加熱部分 (A 部) の長さを 2.2 m とする。端の部分には A 部と別のコイルを巻く (B 部)。mirror 比は 2 とする。

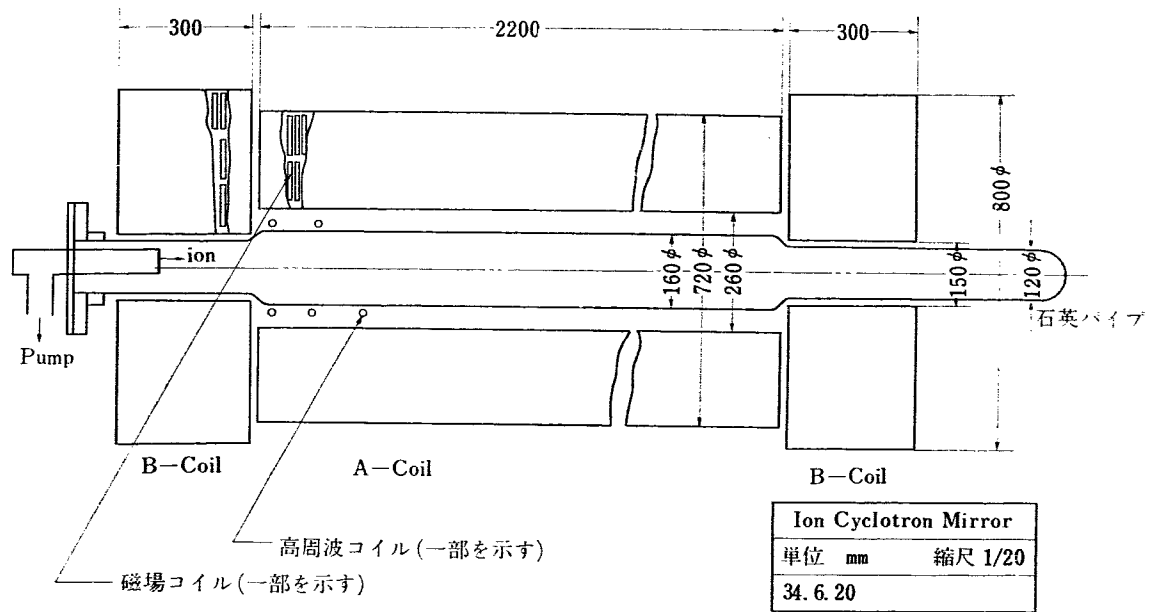
第 7.1 表

	I	II
真空容器の半径 (中央部) (mm)	80	250
磁場の強さ (中央部) (ガウス)	3×10^4	10^4
直流コイル		
A 部 長さ (mm)	2200	2200
電流 (A)	2×10^4	10^4
まき方 (A/m)	120	80
抵抗 (m Ω)	6	10
B 部 長さ (mm)	300	500
電流 (A)	2×10^4	10^4
まき方 (A/m)	280	190
抵抗 (m Ω)	5.5	10
コイルの銅量 (トン)	約 3	約 5
所要電力 (MW)	6	3
高周波所要電力 (KW)	7	20~60

II の方は装置の製作, 技術, 経費の点からみて有利であるが, burnout 粒子密度の点からは I の方が有利である。

I ではイオンの平均寿命時間から粒子密度は大体 $1.5 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ くらいである。なお, プラズマの反作用については今後とも検討すべきである。

加速されすぎて側壁にあたるとすると 10^{-2} 秒程度



7.1 図

で定常になるので、この程度の磁場の持続時間があればよい。またもしも burnout すれば数十秒の持続時間が必要であろう。磁場コイルの設計には本質的な困難はないが、冷却・コイル間引力に対する機械的強度などには注意がいる。上述の I・II は大電流、低電圧電源の場合の例である。

イオンが加速されすぎて、壁に当るのを防ぐために磁場の強さを空間的にわずか波うたせて off-resonance にする方法も考えられている。このような磁場を作るためのコイルの巻き方は相当技術的にむつかしく、また磁場電源は波うたさない場合に較べて大きなものが必要になる。

第 8 章 測定に関する検討

§ 1 一般の問題

現在測定の対象になっているプラズマはきわめて過渡的なものが多く、したがってプラズマの性質を時間的に追跡することが必要であり、高い time resolution が要求されることが多い。さらに器壁その他の副次的な要因が測定に影響を与えたり、あるいはまた測定することによりプラズマを乱すこともある。またいろいろの方法で独立に同一の量を測定出来、その量を cross check することが必要である。なおプラズマの測定において特に注意しなければならないのは実験の再現性を確保することである。再現性を妨げる大きな原因の一つは壁からの不純物などであり、これは測定の精度を上げるときに問題になる。

雑音を防ぐためアース（安全性を確保するためにも

必要）について慎重に検討することが必要であるが、これは現在の技術で可能なものと思われる。また測定装置をできる限り外界から遮蔽することや、安定な電源施設をもうけることが必要である。

§ 2 電磁的測定

電圧、電流などの測定は通常行われる方法による。例えば電圧は低インダクタンスの抵抗を負荷に並列に接続してその一部の電圧を測ることにより、電流は Rogowski コイルに誘起する電圧によって測定する。

プラズマ内を流れる電流はたとえば Rogowski コイルで直読するか下に述べる磁気探針による磁場分布の測定から間接に測定する。

電子密度、イオン密度、電子温度、イオン温度、空間電位などは通常の低温プラズマでは Langmuir の探

針の電流電圧特性から求められる。しかし高温プラズマではこの方法は完全に確立しているとはいえない。

プラズマ中の磁場を測定するためには磁気探針が利用される。これはたんに磁場のみでなくプラズマ諸量の理論的關係によってプラズマ中を流れる電流・プラズマの圧力などを時間空間の函数として与えることが可能であり、有用な手段である。

§ 3 電磁波による測定

プラズマと電磁場の相互作用からプラズマ諸量を測定することができる。(この相互作用を特徴づける量はプラズマ振動数、サイクロトロン振動数などである。たとえば磁場のない場合プラズマ振動数より低い振動数の波は反射されてしまう。プラズマ振動数は粒子密度が $10^{14}/\text{cm}^3$ の場合、 10^{11} サイクル/秒で波長に換算すると 3 mm 程度である)。

電磁波による測定にはプラズマから輻射される電磁波のスペクトル、偏光などを測定する方法と、外部から電磁波を入射して反射率、透過率、位相のずれなどを測定する方法がある。以下に電磁波の波長の順にのべる。

3.1 マイクロ波

まづ透過による方法では磁場のない場合には振動数がプラズマ振動数より大きいことが必要である。このとき位相のずれを測定することによって、電子密度、減衰から衝突振動数が求まる。衝突振動数からは適当な仮定のもとで電子温度も求まる。磁場のある場合は波の進行方向、波の偏光に依存して複雑であるが、偏光の性質から磁場の強さも推測できる。なおこれらの方法はプラズマ中のマイクロ波の通路全体の平均値のみが測定される。

つぎに雑音の測定では、その振動数がプラズマ振動数より小さく透過の場合と逆である。雑音をヘテロダイン受信器で受け、その強さを標準の雑音源からの値と比較して電子温度が得られる。また磁場のある場合サイクロトロン輻射の幅からも電子温度が推定出来る。

以下にいくつかの問題点をまとめておく。

- (1) 粒子密度が空間的に変化しているとき、その平均値しかはかれない。
- (2) 制動輻射やサイクロトロン輻射と集団運動との関係がはっきりしていない。
- (3) プラズマ振動は一樣なプラズマでは外に出ないが、実際のプラズマでは輻射として出る。

(4) 磁場方向に進むマイクロ波は磁場のない場合より波長が長くてもよい場合もあるが、この利用法。

(5) 雑音(輻射)と透過で使用波長が違ふから少くとも 2 bands 必要であるが、どの周波数帯を選ぶのが適当か。

(6) 現在外国では 3~4 mm のミリ波計測は確立されており、目下それより短い波長のところを開発中である。日本では 6 mm までで 4 mm は確立されていない。出力および周波数の安定性に問題がある。

(7) 容器の中に horn を入れるのは baking などの問題があるので厄介と思われる。直径数 cm の穴があれば誘電体レンズや parabola もつかえよう。

3.2 可視光・紫外線

(1) 分光測光

通常核融合反応の研究には軽い元素が用いられるがこれらの原子は超高温で電子を失って裸になり線スペクトルを輻射しない。よって他の元素ガスを添加してそのスペクトル線の強度および幅などを測定してプラズマの諸量を推定する。このとき測られるのは添加ガスの諸量であり、充填ガスの値は添加ガスと熱平衡にならなければ決定することは難かしい。

スペクトル線の Doppler shift からはイオンの集団運動の速度が得られる。

スペクトル線の幅は種々の原因によっておこる。例えば Doppler 効果、Stark 効果などである。Doppler 効果からイオン温度を求めるときは他の寄与を差引くことが必要である。さらに Stark 効果からはイオン密度が求まる。また同じ元素の二本の線の強度の比較から電子温度(この場合輻射平衡にないので、Saha の式はそのままでは使えないことに注意)、また不純物の線の強さからその割合などが求まる。

lectureでとくに取り上げられた点はつぎの通りである。

- (a) 波長に対する強度分布曲線には電場による Stark 効果がありそのすその方はイオンが影響を与え(Holtmark の計算あり)真中の方は電子による光の位相変化で起る。よって正確には測定値の半値幅から電子の寄与を差引かねばならない。大体最小限 2~3 割はある。
- (b) 水素プラズマでは水素のスペクトル線の強度と標準光源とを比較して温度が求まる。高温では水素が裸になるので他の気体の Doppler 効果から

求めるのがよい。

- (c) 分光学的な瞬間撮影には Fabry-Perrot 干渉計と光電増倍管を組合せて行う。ただしこの干渉計は波長の長いときは銀のスプッタリングでよいが、波長の短いところでは誘電体の複層を必要とする。

(2) カメラによる測定

プラズマの形を測定するのに高速度カメラが用いられる。不安定性によるプラズマの変形の研究にも役立つ。フィルターによって特定の波長範囲を選ぶこともできる。ある瞬間の形を撮影するには高速度のシャッターが必要であるが、おもに Kerr 効果を利用する。また光を電子ビームにかえ、電子回路をシャッターとして、電子を蛍光板に当てて写真をとる方法もある (image converter tube)。つぎに連続的に形を求めるものとして流しカメラ、駒どりカメラがある。共に回転鏡を利用し、前者はプラズマからの光をスリットを通して、その一次元的拡がりの相対強度を時間的に分解して知る。後者は、露出約 $0.2 \mu\text{sec}$ 、82 枚どりのものが市販されており、いろいろの時刻のプラズマ光の位置と相対強度が求まる。

3.3 X 線

hard なものについてはあまり問題はないが、soft なものにはいろいろ困難な点がある。X線はとくに逃走電子の発生状態をしらべるのに欠くことができない。

lecture で指摘されたおもな事項をつぎにあげる。

(1) 分光

grating または結晶による回折像でしらべる。plane 型および concave 型の 2 種がある。concave 型で集束する方が能率がよい。ultra-soft ($15 \sim 500 \text{ \AA}$) ではガラスまたは金属の grating を使う。 $15 \sim 3 \text{ \AA}$ ではマイカ、それ以下では quartz を使う。

(2) 検出法

- (a) 写真乾板を利用する場合 50 \AA 程度では光子のエネルギーが弱いのでエマルジョンをうすくする (イーストマン SWR, イルフォード Q)。欠点は密度が小さい。長所は長時間露出がきく。
- (b) 光電増倍管では光子のエネルギーがひくくなると、出力が雑音より低くなるので、 $100 \sim 300 \text{ \AA}$ で使用する。液体空気で冷却し熱雑音をへらす方法もある。乾板より感度はよい。結果は写真と一致する。
- (c) GM 計数管は $20 \sim 200 \text{ \AA}$ で使用する。窓

は例えば ニトロセルローズの薄膜 (厚さ 0.05μ) で、 46 \AA で 94%, 220 \AA で 17% 透過する。感度はよい。

§ 4 粒子の検出

4.1 中性子

現在の実験によると数多くの装置において中性子が観測されている。しかし、それらの多くは不安定性に起因するプラズマの乱れによって生ずる強い電場での加速によるものである。したがって、熱核反応によるものであるか、否かをたしかめるためには、中性子発生絶対強度、エネルギー分布および角度分布などを測定する必要がある。

1 回の放電で発生する中性子の総数は activation counter, BF_3 counter, scintillation counter 等によって測られる。activation counter は ^{115}In , ^{106}Ag をパラフィンで減速した中性子で活性化し、発生するベータ線を GM 計数管あるいは scintillation counter で測定する。ガンマ線の background は問題にならない。 BF_3 counter は速い中性子に対する感度がよくないので、パラフィンで中性子を減速する。そのため time resolution はよくない。scintillator および光電増倍管の time resolution は極めてよい ($\sim 10^{-8}$ 秒)。scintillator は鉛遮蔽でガンマ線および X線をさけ、光電増倍管にも電磁遮蔽が必要である。

中性子のエネルギー分布の測定は核乾板、霧箱および scintillation counter による。前 2 者は、time resolution がいい。霧箱はエネルギー分解能がいいので役立つ。

4.2 荷電粒子

これにはプラズマ中の粒子の種およびエネルギー分布などが、測定の対象となる。飛行時間測定では荷電粒子を高速の電磁シャッターなどを通して外部の分析器に導く。分析器は普通のものでいい。また、原子核乾板も使用できる。磁気的分析器と静電分析器とを通すとイオンのエネルギーと e/m (e は電荷, m は質量) を測定できる。蛍光面もプラズマの位置、イオン軌道の測定に用いられ、密度も定性的ながらわかる。

4.3 中性粒子

中性粒子について知識も要求されることがある。中性粒子を箔によりイオン化して、ある charge balance の状態で Faraday カップで電流を測定するか、あるいは二次電子を測って、その中性粒子を検出できる。真空の出ガスは、オメガトロンで測る。

§ 5 討論した主な事項および lecture

(1) 討論

(a) 一般の問題

time resolution, 信頼度

雑音, 遮蔽, アース

(b) 各種測定法について

低周波によるプラズマの抵抗測定

質量分析器, オメガトロロン

マイクロ波による計測

X線計測

中性子計測

光学的計測

(2) lecture

マイクロ波による計測

超軟X線

光学的計測 (おもに分光)

第9章 結 論

核融合研究用超高温プラズマ発生装置としてどの型が優れているかを決定することは、現段階ではできない。しかしながらわが国が核融合研究を促進するためなるべく速やかに中型装置を建設し研究するとして、望ましい条件を設定することができる。本研究委員会は各種の点から検討し、第3章にのべた選定基準をまず立て、これに従って一応3つの型をえらんで検討した。その結論はつぎのごとくである。

(1) 保持磁場としては Stellarator 型磁場および mirror 型磁場を適当とする。

(2) 加熱方式は、研究の予地が多いので、なるべく多様な研究のできるものが望ましい。大別して磁気容器内にて低温プラズマを発生し、それを高温度にあげる方法と、高エネルギー粒子を予め用意し、これを磁気容器に注入蓄積する方法とがある。

前者では温度の上昇・加熱の程度にかかわらず常にプラズマ状態が得られる点で、超高温プラズマ物理の研究には多くの知識がえられるという利点がある。後者では粒子のエネルギーが予め高いのでよい保持と熱運動化を経れば極めて高い温度が得られる。

このように両方式は極めて対比的特徴があるので、共に研究することが望ましい。

(3) 以上より Stellarator, DCX, Ion Cyclotron

Resonance Mirror がとりあげられる。

(a) Stellarator には pumpout という未知な粒子損失現象がある。この損失機構が不可避のものか、否かはわからない。敢ていえば、それ自体がプラズマ物理の重要課題である。

(b) DCX は burnout の達成が重要な意義をもつ。これに着手するには少なくとも burnout の条件を推定できる実験が可能である規模を目標にする方がよく、そのためには理論的、実験的検討をさらに加えることを要する。また実験の段階に応じた大電流加速器の開発が必要となる。

(c) Ion Cyclotron Resonance Mirror 型はわが国として独創的(注 49)に提案されたものである。ただちに中型にせず、最初やや小さい型より着手することも考えられる(注 50)。この型はプラズマ密度が高いと ion cyclotron resonance 加熱に際してプラズマの反作用で高周波の入力効率が低下する可能性があるので、高い密度を望むにはやや適しないであろう。

(4) これら三つの型にはおのおおの特徴があるので、十分に検討を加えながら、年次的につらせてとりあげることが適当である。それには国外の研究の進展、A計画との関連やその研究成果および実施する研究者の意向も考慮された上でできるのがよいと考えられる。

第10章 議事日程

第1回委員会；昭和34年4月22日～24日 愛知県常滑市

4月22日

1. B計画の在り方，進め方
2. 新しい方式の提案と各型の比較検討

4月23日

1. 具体的内容について(型，規模，設備 計測，建物，年次，計画等)
2. 進め方の再検討

4月24日

1. 学術体制における位置(菊地原子力委員，法貴原子力局次長出席)
2. 宿題

第2回委員会 昭和34年5月12日～13日 東京都千代田区日立製作所会議室

5月12日

1. 第1回委員会議事録の承認
2. 測定関係の作業について
3. mirror(宿題)の報告
4. Stellarator(宿題)の報告
5. cuspについて

5月13日

1. Dr. Weinberg の講演内容
2. R. F. confinement について
3. mirror, Stellarator, DCX の比較検討

(法貴原子力局次長，長柄原子力局技官出席)

第3回 昭和34年6月1日～3日 熱海市東京芝浦電気芝生荘

6月1日

1. 第2回委員会議事録の承認
2. DCX について
3. 測定について

6月2日

1. Stellarator の報告
2. Ion Cyclotron Resonance Mirror 方式の報告
3. DCX, Ion Cyclotron Resonance Mirror, Stellarator の比較検討
(法貴原子力局次長，長柄原子力局技官出席)

6月3日

1. DCX, Ion Cyclotron Resonance Mirror, Stellarator 各方式の比較検討
(長柄原子力局技官出席)

Stellarator 装置についての小委員会 昭和34年6月9日 東京大学

- 岡本耕輔，笹倉浩，田中正俊，長尾重夫，森 茂，森英夫

小委員(専門部会への一次報告書に関する検討，とりまとめ) 昭和34年6月11日 名古屋大学
山本賢三，森 茂，野畑金弘

第4回 昭和34年7月12日～14日 茨城県大洗町
7月12日

1. 第3回議事録の承認
2. 一次設計のとりまとめ

7月13日

1. 一次設計のとりまとめ(続)
2. 今後の進め方
3. マイクロウェーブ測定について

7月14日

1. 今後の進め方(続)

DCX 小委員会 昭和34年9月4日～6日 宝塚市
三菱電機桂寮

9月4日 DCX 装置および behaviour の問題点

9月5日

DCX プラズマおよびアークプラズマ測定に関する問題点

9月6日

1. B計画の対象としてとりあげた時の DCX の性能および研究組織について
2. 大阪大学の計画について

第5回 昭和34年10月26日～28日 京都市京都大学

10月26日

1. 7月以来の核融合研究の体制，プラズマ研究所案に至る経過報告
2. DCX 小委員会の報告と討論
3. 超軟X線についての lecture

4. 本委員会の今後の在り方についての討論

10 月 27 日

1. 本委員会の今後の在り方について (湯川専門部会長, 伏見核融合特別委員長出席)
2. 委員会報告の取まとめ方とその原案の検討

10 月 28 日

1. プラズマの光学的測定の lecture
2. 委員会報告の検討ととりまとめ方針

小委員会(委員会報告書作製) 昭和 34 年 11 月 11 日
~14 日 静岡市

出席者: 岡本耕輔, 笹倉浩, 田中正俊, 野畑金弘
水野幸雄, 森 茂, 山本賢三

第 6 回 昭和 35 年 2 月 19 日~21 日 仙台市東北
大学

2 月 19 日

1. 東北大学金属材料研究所前田研究室, 電気通信研究所上領研究室, 工学部電子工学科八田研究室, 工学部電気工学科長尾研究室見学

2. Heliotron についての lecture

3. DCX に関する論文紹介

2 月 20 日

1. 第 5 回委員会議事録の承認
2. 研究委員会報告についての経過報告 (法貴原子力局次長出席)
3. 委員会報告書の検討と決定
4. DCX に関する論文紹介
5. A 計画の発生装置の現況と見通し

2 月 21 日

1. vacuum についての lecture
2. プラズマ研究所について

小委員会 (委員会報告書本文の完成, 資料の検討および国内研究についての資料の追加) 昭和 35
年 3 月 10 日~13 日 蒲郡市

出席者: 岡本耕輔, 笹倉浩, 田中正, 俊野畑金弘
水野幸雄, 森 茂, 山本賢三

注

(注 1) プラズマの基礎諸量のうち, 電離度・電気伝導度・熱伝導度・緩和時間・拡散などは温度の函数である. 温度が数万度 (ほぼ電離電圧以上) になると電離度は 100% に近ずき, 高温プラズマとしての性質が顕著になる. したがって高温プラズマの研究には, この程度の温度が一つの目安になる. しかし核融合の研究にはさらに高い温度におけるプラズマが問題になり, 上述の諸量の値は著るしく変わってくる. 参考のために温度に対するこれら諸量の依存性を示す.

プラズマの固有抵抗 η は $T^{3/2}$ (T は温度) に逆比例し, 10^6 °k で約 6×10^{-5} Ω cm である. 温度の上昇と共に抵抗は低下し, 磁場の捕捉時間は長くなる. たとえば磁場分布の崩れる時間は $T^{3/2}$ に比例する. 10^6 °k で特長的長さ 10 cm のプラズマでは捕捉時間は約 10^{-3} 秒である.

Stellarator の場合 Kruskal の制限電流に対応する電場は ηB (B : 磁場の強さ) に比例し, 温度の高いほど小となる.

純粋な熱核反応で発生する中性子量は温度の上昇と共に指数函数的に増加する. この発生量を正確に検知することにより, 温度およびエネルギー分布に関する情報がえられる. 10^6 °k 以下では検出が極めて困難であり, $2 \sim 3 \times 10^6$ °k 以上であることが望ましい.

なお Larmor 半径は $T^{1/2}/B$ に比例し, B が 2×10^4 ガウス, 10^6 °k の重水素イオンで 0.13 cm である. 装置の寸法がこれに対し充分大きいことが原則的に望ましい.

衝突の緩和時間は $T^{3/2}/n$ (n は密度) に比例する. 重水素イオン間では $n=10^{13}$ /cm³, $T=10^6$ °k で 10^{-5} 秒となる.

拡散については資料 4 参照.

(注 2) 高密度, 超高温の発生という点では有用であるが, 非定常なので現状ではとりあげなかった. しかし定常化するための研究がおこなわれているようである.

(注 3) burnout に必要な臨界電流は, DCX 型, OGRA 型, 中性粒子入射型の順に大きくなる.

Nucl. Instr. 4 (1959) 282

(注 4) NYO-7969 (1959), NYO-2536 (1959) を中心として討論が行われた.

(注 5) Butler et al.; Geneva II 32 (1958) 324 を中心として討論が行われた. なお Geneva II は Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy の略. 以下この略称を用いる.

(注 6) 高周波電磁波で安定な平衡状態がえられるか否か疑問がある.

(注 7) Stellarator B-1 のジュール加熱の実験で Kruskal 制限電流が理論値とよく一致することが示されたのであるが, それに付随して測られた現象には理論的に説明できない点もある.

(注 8) I. B. Bernstein; Phys. Rev. 109 (1959) 10, Appendix 参照.

(注 9) pumpout でわかっている主な実験事実は次の通りである.

(1) 水素と重水素とはあまり変わらないが, ヘリウムではこの現象は少ない.

(2) 密度減少の時定数は 3×10^4 ガウスの磁場中の水素プラズマでは初期圧力 $P_0 \sim 2 \times 10^{-4}$ mmHg のとき $\sim 2 \times 10^{-4}$ sec の程度である.

(3) P_0 を増すと密度減少の時定数は直線的に増加し, $P_0 \sim 10^{-3}$ mmHg 程度になると密度は減少しない. この P_0 に対する依存性は壁に吸着されていた粒子が戻ることにより説明される.

(4) 時定数は大体磁場の強さ B に比例する.

pumpout の原因については逃走電子がプラズマ振動を励起し, その電場が電子を散乱するであろうという憶測がある程度で定説はない.

(注 10) しかし, 周波数をあげたため表皮効果による加熱率が低下するなやみもある. また加熱するにしたがってプ

ラズマ状態が変化して、負荷の特性が変わるので、発振器の設計には相当の予備実験が必要である。

(注 11) TID-7558, p 240 (1958)

(注 12) A. Simon; Phys. of Fluids 1 (1958) 495

(注 13) DCX型の研究を計画し実験をおこなっている阪大グループにとくに参加していただいた。

(注 14) プラズマの反作用に関連して、UCRL-5286(1958)の紹介があった。

(注 15) Princeton で研究されている Stellarator の諸元は次の通り。

	型	真空容器 (cm)	半径 長さ	磁場の強さ (ガウス)	電 源
B 1	8字型	2.5 450		3×10^4 (pulse)	10^3 joule
B 2	"	2.5		3×10^4 (")	
B 3	"	2.5 650		5×10^4 (")	3×10^6 joule
B 65	racetrack 型	5		2×10^4 (")	
B 66	"	6.25		3.2×10^4 (")	3×10^6 joule
Etude	"	2.5 240		10^4 (D.C.)	600 kW
C	"	10.0 1200.		5×10^4 (pulsed D.C.)	200 MW

B-65 をのぞき他は bakable. B-3 は helical winding もある。電源は共用のものもある。B 66, C は現在(1959年夏)建設中。

(注 16) dr/dr (r : 軸からの距離) は $l=2$ のとき 0, $l=3$ のとき最大となり交換型不安定性に対してよい。 $l>3$ では v は急速に減少し、またコイルの製作も困難になる。

(注 17) NYO-7899(1957), Nucl. Instr. 4 (1959) 279

(注 18) J. M. Berger et al.; Phys of Fluids 1 (1958) 297

(注 19) 基礎真空度 1×10^{-10} mmHg にしておいて 1×10^{-3} mmHg のガスを詰めるとすれば、ガスとしては、 10^{-7} 以上の純度が要求される。ヘリウムの純化については Rev. Sci. Instr. 22 (1951) 535 参照。

(注 20) ヘリウム雰囲気中で thoriated tungsten アークによりおこなう溶接で、アルゴンを使うこともある。

(注 21) J. G. Linhart and L. M. Ornstein; CERN 59-2 (1959)

(注 22) S-II の場合 最高磁場は 3×10^4 ガウスであって、相当周波数 20 サイクルで時間と共に変化する。磁場が $(3 \pm 0.05) \times 10^4$ ガウスである時間は 2.9×10^{-3} 秒である。これは普通の測定器にとって充分の時間である。

(注 23) 第 5-5 図において A, B, B, D, E, F, G, H は現場にての Heliac 溶接箇所, a, b, ……p は solenoidal winding, y, z は helical winding である。

(注 24) S-II で考えている rabbit は、電子銃および蛍光面よりなり電子の飛行中にうける偏向をはかり、それによりその磁場をはかるものである。

(注 25) コイルの許容誤差についてはその誤差の磁場への影響を計算すべきである。計算の近似以上にコイルを正確に製作しても意味は少い。上に指定した誤差は、実際の製作技術上、出来るかどうかのギリギリの値である。

コイルの仕様書を磁場できめるか上述の様に幾何学的位置できめるかは問題である。前者にするとメーカーの技術向上にもなり、一方研究者側の設計の負担が軽減するので理想的であるが、現状では前例もなく諸種の事情で困難である。

(注 26) stainless steel の出ガス量

bake 前 $\sim 10^{-10}$ mmHg $l/cm^2 \cdot sec$

bake 後 $\sim 5 \times 10^{-15}$ mmHg $l/cm^2 \cdot sec$

S-II (の真空から見た) 表面積 $\sim 3 \times 10^4 cm^2$

bake 後の予想真空度(ポンプ・スピード 1 l/sec)

$$\{5 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^4 + 1 \times 10^{10}(\text{leak})\}/1 \\ = 2.5 \times 10^{10} \text{ mmHg}$$

1 cm^2 unbake の分があると

$$\{5 \times 10^{-15} \times 3 \times 10^4 + 10^{-10} + 1 \times 10^{-10}\}/1 \\ = 3.5 \times 10^{-10} \text{ mmHg}$$

(注 27) M. Bineau et al.; Nucl. Instr. 4 (1959) 290

(注 28) ORNL-2693 (1959)

(注 29) ORNL-2457 (1958)

(注 30) C. F. Barnett; Geneva II 32 (1958) 398

(注 31) J. S. Luce; Geneva II 31 (1958) 305

(注 32) A. Simon; Phys. of Fluids 1 (1958) 495

(注 33) A. Simon; Phys. of Fluids 2 (1959) 336

(注 34) ORNL-2831 (1959)

(注 35) ORNL-2802 (1959)

(注 36) C. F. Barnett et al.; Geneva II 31 (1958) 298

(注 37) T. K. Fowler and A. Simon; ORNL-2552 (1958)

(注 38) C. F. Barnett and H. K. Reynolds; Phys. Rev. 109 (1958) 355

(注 39) 例えば H. Bethe and J. Askin, Experimental Nuclear Physics Part II, P. 166

(注 40) P_0 (プラズマ外空間の圧力) $= 10^{-6}$ mmHg とする。プラズマは ρ_0 を半径とする球とする。 I_{crit} を分子イオンの解離能率で割ったものが必要な入射電流となる。

(注 41) Coulomb 相互作用による大角度散乱の断面積で E^{-2} に比例する。

(注 42) n_+ は、真空度が充分よく中性原子によるイオンの損失なしとしたとき磁場の性質および捕捉電流で決まるイオン密度。 E にはよらない。 $n_+^2 \sigma_c v_+ P V = I_{crit}$, ここで $V = \frac{4}{3} \pi \rho_0^3$ でプラズマの体積, P はあるイオンが損失円錐に散乱される確率, v_+ はイオンの平均速度である。

(注 43) 重水素ガス内の重水素イオンのとき $I_{crit} = 5 \times 10^7 P_0$, 同様にして水素のとき $I_{crit} = 4 \times 10^6 P_0$ である。 P_0 は mm Hg, I_{crit} は mA. ただし、イオン・エネルギーは 300 keV, 磁場の強さは 10^4 ガウスとした。

(注 44) したがって I_{crit} になるために必要な s は、例えば重水素イオンのとき $1.7 \times 10^{-7} \frac{I_{crit}}{ES} \leq 2 \times 10^{-6} I_{crit}$ から $ES \geq 8.5$, 水素イオンのとき $ES \geq 0.68$ でなければならない。カーボン・アークの S は実験によれば重水素で 7.5, 水素で 10.4。

(注 45) TID-7558(1958)

(注 46) C. B. Wharton et al.; Geneva II 32 (1958) 388

(注 47) 高周波出力が減るのは高周波発振器のコストが下るだけでなく、高周波コイルの絶縁が容易になる点からも有利である。高周波コイルは磁場コイルの内側にあるので絶縁が簡単になることは重大である。

(注 48) ここに示されたものは本委員会で行われた演習設計である。日立製作所は粒子損失・エネルギー分布などを検討して新しく具体的設計を行い、原子力平和利用研究委託費によりその研究に着手した。

(注 49) その後米国にても同種の家が検討されたことが知られた。

(注 50) その後日立製作所でそのように着手された。

資料 1 核融合反応の研究の進め方について

(専門部会答申)

昭和 34 年 3 月 30 日

原子力委員会委員長

高橋達之助殿

核融合専門部会部会長

湯川秀樹 ㊟

核融合反応の研究の進め方について

核融合専門部会は、核融合反応に関する内外の研究の現状を検討し、わが国における今後の研究の進め方について審議した結果、下記の結論を得たので報告する。

記

1. 研究の現状

先にかかれた第 2 回原子力平和利用国際会議で各国における核融合反応の制御に関する研究の状況が明らかになった。それによると、米、英、ソの 3 国は 1950 年頃から制御の原理についての基礎研究を始め、それに基いてさまざまな方法の高温プラズマ発生装置を多数建設して広汎な研究を続けている。こうして数百万度の温度を得ることに成功したが、熱核反応の確証を得るには到っていない。さらに、こういう研究によって一方では核融合反応の制御に対する希望が増大すると共に、他方では高温プラズマの諸性質について一層理解を深めることの必要性が再確認された。参加者の大部分の一致した意見によれば核融合の制御という目標達成のためには長年月にわたる研究を積み重ねることが必要であると考えられている。

一方わが国ではこの分野の研究は 1955 年頃から着手され、その活動は近年次第に活発になり、その基盤はある程度確立された。

しかし、これに対して今までに支出された研究費は文部省科学研究費と原子力予算を合せて約 8,000 万円であり、これは米国のそれと比較して 0.2 パーセントに過ぎない。研究費の増額は核融合に限らず、科学の全分野にわたって必要なことで、基礎科学の新分野として登場した核融合の研究も、基礎科学振興の一翼

として、また将来の成果を期待する地固めとして一層強力に推進する必要がある。

2. 今後の研究方針

核融合反応の研究を推進するに当たっては、研究の各段階で現状を分析し、将来の方針を立てて行く必要がある。そのためには柔軟性を持った研究体制が望ましい。当面の方針としては、1 の分析に基き、(A)基礎研究に重点を置き、新しい着想の育成と具体化をはかると共に、新しい研究分野に働く研究者を養成することが大切と考える。さらにそれと平行して、(B)諸外国である程度成功の可能性の示された実験装置、またはその改良型を建設し、その建設過程において得られる経験と、作られた高温プラズマの利用によって、速かにわが国の研究水準の向上をはかることも大切である。そのために国内の諸機関、諸専門分野間の交流を盛んにして、組織化された研究を行うと共に、諸外国との知識の交換のための研究者の交流を盛んにすることも考慮しなければならない。組織化された研究としては、次の A、B 両計画を実施することを提案する。

A 計画 新しい着想の育成と具体化

核融合の研究に関して、過去数年間に次々新しい考案が生れてきたが、そのうちどれが終局の成功に導かれるかどうかは今なお不確定である。わが国でもいくつかの新しい着想が生れつつあるが、それを積極的に育てて行くことが必要である。そのためには、当面次の措置を講ずることが望ましい。

- (1) 大学にプラズマ科学の促進を目的とするいくつかの講座を増強し、基礎研究を進めると共に研究者の養成を行なう。
- (2) 核融合研究の根幹になり、特に多額の経費を要する高温プラズマ発生装置については、新しい着想の検討、装置の試作を目的とする研究グループを作る。
- (3) 上記の活動でかなり有望だとわかってくればこの研究グループを恒常化してそれを中心にして一つの研究中核を組織する。
- (4) このための予算的措置を講ずることが必要で

ある。

B 計画 中型装置の建設

諸外国ではピンチ型、ステラレーター型、磁気鏡型等の高温プラズマ発生装置を建設し、プラズマ物理学に多くの成果をもたらした。わが国でも各研究機関で類似の小型装置を製作または設計し、高温プラズマについてさまざまな知識を得つつある。しかし百万度を境にしてプラズマのふるまいにかなり質的な違いが予想されるので、1千万度程度の高温を保持することを目標とする中型装置が必要である。そのためには諸外国である程度成功をみた型を参照して、中型装置をできるだけ速かに建設することが望ましい。これは3-10億円の経費が予想され、わが国としては、かなりの規

模の研究になるので、効率的で総合的な方法として次のような措置を講ずるのがよいと考える。

- (1) 中型装置の形式、規模を調査研究し、その設計の具体案を作るために、中型装置設計グループを組織する。このグループは日本原子力研究所に置かれ直ちに活動を始めるのが望ましい。
- (2) このグループは、昭和34年度中に中型装置の形式、規模等を選定し、さらに具体的な検討を行なうことを目標とする。
- (3) 上の仕事の成果に基づき、中型装置を建設、運転、研究を行なう実施機関を決める。実施機関は、昭和35年度から出発できることが望ましい。

資料2 プラズマ研究所の設立について

(学術会議への提案)

提案 プラズマ研究所の設立について

1. 提案者：核融合特別委員会
原子核特別委員会
原子力特別委員会
原子力問題委員会
物理学研究連絡委員会

2. 議案：

次のことを政府に勧告すること。

プラズマの科学を体系的に研究し、あわせて核融合制御の原理を探求し関連技術を開発するため、文部省所管のプラズマ研究所を設立する。

このプラズマ研究所は、(1)理論・基礎実験・高温プラズマの各部門から成り、それらの部門は相互に緊密に協力する。(2)全国的な共同研究をたてまえとし、このため関係研究と密接な連絡をとり、研究者の自主的運営の精神を具体化するための組織をもつ。

(3)基礎研究の段階であっても相当多額の経費を必要とし、なかでも超高温プラズマ発生装置の建設維持には予算上特別な配慮が望まれる。

3. 提案理由：

将来のエネルギー問題を根本的に解決するであろうといわれている核融合エネルギーの利用については、高温プラズマの磁気的閉じこめの着想が生れてから急速に研究が盛んになり、初期段階には全く秘密裡に行われていたのが、昨年のジュネーブ会議の前後に大量

の研究報告が公開されるようになり、その実現のイメージが相当明瞭になってきた。しかしながら、初期の試みは多分に摸索的であり、いまだ熱核反応の実現に至っていない。ここに深い反省がおこり、プラズマに関する基礎的、体系的研究の積み上げが先行しなければ熱核反応の制御は実用的段階に達しないであろうと見られるようになった。プラズマは他の研究分野、たとえば天体物理学においても極めて重要な研究対象である。また広く工学諸分野にも応用されているが、プラズマの本質の解明とともに新しい応用分野が期待されている。したがってプラズマの研究はそれ自身としての重要性をもつ。

わが国でも核融合に関連して数年前から各地の大学や研究所で研究が始められ、今日ではこの問題に関心をもつ研究者は相当の数に達し、全国的視野でこの研究の促進策を講ずる機運は十分熟していると思なされる。

その研究体制をどうすべきかについても、この一、二年活発な議論があり、核融合特別委員会はこれらの情勢に応じ、研究体制確立の必要上から組織されたものである。核融合特別委員会は約半年間熱心に討議した結果、「提案」のようなプラズマ研究所の設置を、全国の研究機関の充実と平行して、行なうことが現情勢から見てもっとも適切であると考えに至ったものである。

資料3 内外の現状

1. 概況

アメリカ、ソビエト、イギリスでは1950年頃から核融合反応の制御を目的とした理論的、実験的研究がはじめられ、多くの装置が建設されてきた。そのほぼ10年の才月にわたる成果が昨年(昭和28年)の第2回原子力平和利用国際会議を切掛に公表されはじめた。三国がほぼ独立に研究をすすめた結果、ともに磁場によって高温プラズマをとじこめる方法にその努力を集中し、よりこまかい点においてもおどろくほどよく似た idea を発展させている。このことは現在の方向が核融合エネルギーの解放へのきわめて有力なものであることを物語っている。もちろん各国の研究方針にはそれぞれ特徴があり、たとえばイギリスは一つの方式にその精力を集中し、アメリカ、ソビエトは多くの方式について広汎な研究をすすめている。さらに以上の三国以外にもいくつかの国で研究が開始されている。個々の方式については後に簡単にふれることとして、現在の研究段階を一言にしていえば次のようにいってよいであろう。

多くの方式の装置によって、数百万度にもよる超高温プラズマをある程度の時間保持し、プラズマおよび装置の研究がなされているが、熱核融合反応が実現したという確証はまだえられていない。むしろ未知の現象、予想しなかった結果がつぎつぎにあらわれ、高温プラズマについてさらに研究をすすめる必要が再確認された。しかし、一方理論的、実験的な進歩もいちじるしく、制御された核融合の反応の実現にたいする希望は増大しつつあるとも考えられる。すなわち各国ともプラズマに関する基礎的な知識を集積しつつ、核融合エネルギーの解放を目標として研究をすすめているといつてよいであろう。

次に、国内のおもな核融合研究装置の型式と研究機関を第1表にまとめた。第1表は便宜上保持の原理によって分類したが、個々の装置によって行われる研究は必ずしもその保持の原理についてではない。また、この表にあげた以外にも、多くのプラズマ実験装置が

あるが、本報告と直接の関係がうすいので、こゝにあげなかった。

第1表

型 式	研究機関	第2節の 記載番号	
pinch	直線状 阪大・理・工 理 研 東 工 大	1	
		2	
		3	
pinch	環状 名大・工 三菱原子力(三菱電機) 電 試	4	
		5	
		6	
pinch	Scylla	電 試	7
mirror	圧縮 日大理工 東 芝	8	
		9	
	Ion Cyclo. Res.	日 立	10
	DCX	阪大・工	11
	磁気流体波 共鳴	東北大・工	12
mirror		名大・理	13
Stellarator	Heliotron	京 大	14
	scallop	東芝-東大・理	15
	8字型	東大・理	16

2. A 計画の現状

第1表に示すおもな発生装置グループより提出された下記の諸項目についての要約を資料としてここに集録する。すなわち各研究機関における (i) 型式, (ii) 内容, (iii) 設備(電源・計測), (iv) 研究の現状, (v) 将来の見通し(近い将来の scale up の要素を含む), (vi) 研究上の隘路(理論・技術・予算に関して)である。

1. 大阪大学理学部・工学部

- (i) ピンチ型
- (ii) 大電流放電によるピンチ・プラズマの研究(直線型およびシラー型)
- (iii) 設備:

- a 発生装置；直線型，シラー型，タイコ型，トランスストロン
- b 電源；100 kJ コンデンサー・バンク (50 kV, 80 μ F), 18 kJ コンデンサー・バンク (15 kV, 100 μ F)
- c 測定器；高速度流しカメラ 4 mm/ μ s (干渉フィルター式) (借用中), 6 mm/ μ s (ステレオ方式モノクロメート) (製作中), イメージ・コンバータ式高速度カメラ 12 コマ/20 μ s (試作中)
- 放射線測定 (X線, 中性子, β 線, シンチレータ方式, 溶液方式)
- 中型水晶分光器 (転用中), 真空紫外分光光度計 (製作中), フェブリー・ペロー・エタロン干渉計 (製作中), 結晶X線分光器 (転用中), 平面格子X線分光器 (転用中)
- (iv) 現状：従来のコンデンサー (100 kV, 20 μ F) を 50kV, 80 μ F に改造しその特性を調べた。直線ピンチの多重円筒形成の実験的証明。磁場中の放電によるプラズマの挙動。干渉フィルター方式, 流しカメラによる不純物およびプラズマ構造の研究, プラズマ・ジェットの電気的および分光的研究。 (高温プラズマの物理的諸量の測定についての基礎資料をうるためプラズマ・ジェットを試作し, 基礎的研究を行なった)
- (v) 見通し：大電流放電による各種発生方式の研究。トランスストロンの建設。
- (vi) 隘路：測定器具の不足, 予算 (実働人員, 実験運営費) の不足, 電力不足。

2. 理化学研究所

- (i) 直線状放電
- (ii) 完全電離とみなせるプラズマを作り, 測定の研究
- (iii) 設備：
- a 放電管 内径 104 mm, 長さ 160 mm
- b 電源 500 V, 0.12 F, 16.3 kJ
- c 計測 マイクロ波 (8 mm, 3 cm), 分光器 (ヒルガー E1, E6), 瞬間写真 (A.D.P. 使用5素子), 中性子 (シンチレーター $5\frac{1}{2}'' \phi \times 5''$, 6099 B 付グローブ, 比例増幅器, スケーラー)
- (iv) 現状：重畳磁場最大 1200 ガウス, 放電電流最大約 60 kA, 放電持続時間約 2 ms, 電子温度約 30 万度 (約 200 μ sec), 電子密度 $10^{13}/\text{cm}^3$ 以上瞬間写真および中性子測定装置は調整中
- (v) 将来計画, 研究の見通し
- a 直線状放電 磁場を 2×10^4 ガウスにする (5

- kV, 25 kJ, 発注済), 排気系の改善 (発注済), 電極材料の吟味
- b 高周波発振器 (5, 10, 15 MC, 連続 8 kW, 瞬間 25 kW, 発注済) で磁気結合による放電現象の研究。出来ればカスプ型磁場でプラズマ閉じ込めの研究。
- c マイクロ波 4 mm の整備
- d 分光 ガラスを用いた単色計と光電管との組合せ (4000~8000 Å) 調整中。回折格子単色計と光電管の組合せ (800~8000 Å) 設計中。真空分光器 (写真, 光電測光両用, 2 Å/mm, 分解能 10^5 , 800~3000 Å) 計画
- e 写真 10^5 コマ/sec (日立) 購入予定。image converter tube による流し撮影計画
- (vi) 隘路：研究員の不足

3. 東京工業大学

- (i) 直線状ピンチ
- (ii) 直線状ピンチ・プラズマの電磁測定
- (iii) 設備
- a 電源；3 μ F コンデンサー 8 台並列接続, 実測全容量 25.6 μ F, 充電電圧 50 kV_{max}, 最大充電エネルギー 32 kJ, 全回路残留インダクタンス 0.39 μ H, 縦磁場発生装置, 予備イオン化用高周波発振器 (500 W, 20 Mc)
- b 測定器；三要素高速度単掃引ブラウン管オツシロ (単一ビーム 3 台, 自家製), デュアル・ビーム・シンクロスコープ (テクトロニクス社製, 3 月入手予定), ログウスキー・コイル, 磁気探針, 大電流用低インダクタンス・シャント等。
- (iv) 現状：名古屋における高温プラズマ発生装置研究会 (1959 年) に報告した計画に沿って研究はほぼ進められている。抵抗分圧器による放電管端子電圧の測定, シャントによる電流測定, 磁気探針, ログウスキー・コイルによる測定の検討を行い, 放電時のアース振動の問題, 測定回路への静電および電磁的誘導の問題などをほぼ解決し, 磁気探針, ログウスキー・コイルおよびシャントの周波数特性の解析, 差動アンプの作製などにより, 信頼のおける測定が可能となった。(一般に遅い現象の測定はこれより容易であろう)

放電管内外に設けた数個の小型ログウスキー・コイル, 磁気探針により放電管内の電流密度分布およびその時間的変化を測定した。これによりプラズマ柱の収縮, 崩壊過程, 電流方向の逆転などが判明し

た。なお電磁的測定と並行して特性の非常に優れた衝撃大電流放電用真空スイッチの開発を行った。

(放電電圧 0~50 kV, 始動時間 0.5 μ s 以内, 無音)

- (v) 見通しと近い将来の計画: デュアル・ビームのシンクロの入手により, さらに詳細な磁気探針などによる測定を行い, これの理論的検討を行う。放電装置の一部を近日改造。衝撃大電流放電用真空スイッチの改良および始動機構の解明。shock tube, plasma source の研究。大電流イオン源の開発およびイオン・ビームの磁気容器内への注入, 保持の研究。
- (vi) 隘路: 真空, 硝子細工の技術の不足。測定器の不足。予算と人の不足。年額 300~400 万円あればと思われる。場所も今少し風の入らぬ建屋がほしい。

4. 名古屋大学工学部

- (i) トーラス型ピンチ
- (ii) 大電流環状放電による高温プラズマの研究
- (iii) 設備
- a 放電装置; Al トーラス(厚さ 1 cm, 管半径 15 cm, 環半径 52.7 cm)。縦磁場コイル (1000 ガウス)。巻鉄芯 3.75 ton (0.35 mm の oriented core)。
- b コンデンサー; 100 kV (50 kV \times 2) 用 27 個 54 kJ。2.5 kV (1.25 kV \times 2) 用 20 個 40 kJ。直流源として 400 kVA (電圧 0~400 V 可変) 1 台。20 kVA (200 V \times 100 A) 1 台。高周波発振器 10~100 Mc (可変), 連続 20 kW (peak 100 kW) 1 台。45 Mc, 300 W 1 台。
- c 真空装置; 油拡散ポンプ (1500 l/sec) 1 台。油回転ポンプ (1500 l/min) 1 台, (250 l/min) 1 台。
- d 計測器; シンクロスコープ; DS-5153 型 (岩崎 2 電子銃型) 1 台。5301 型 (岩崎) 2 台。分光器: 中型石英分光器 (分解能 10 $\text{\AA}/\text{mm}$) その他 3 台。流しカメラ; 回転鏡型 (3 cm \times 3 cm の鏡, 分解能 1/60 msec/cm)。回転ドラム型 (ドラム直径 30 cm, 分解能 60 μ sec/cm)。中性子計測器; 5 吋プラスチック・シンチレーター (比例増幅器, 電源付)。X線計測器: NaI 2 吋 \times 2 吋。マイクロ波計測器: 4000 Mc および 10000 Mc の計測装置。900~2000 Mc 測定器一式。6 mm および 8 mm 測定器 (共同研究)。
- (iv) 現在までにえられた結果; He 10⁻²~10⁻⁴ mmHg で行なった高周波予備放電により放電開始電圧が 100 V 以下低下にしうる。電圧・電流特性は Scepter III に類似。電流の最大値約 140 kA。最大の電流の半波

の周期 600 μ sec。電子温度約 20~40 万度 (放電抵抗より), 10~50 eV (スペクトル線の励起より)。その他の実験も行いつつあり, かつ温度を上げるためライナーを製作した。

- (v) 問題点と見通し; 安定性に問題がある。放電電圧が 1000 V 位では数百回の conditioning をしても (ライナーなし) power arc がさけられない。対策として, 放電電圧を下げるか, 適当なライナーを作ること, runaway に対する考慮などが必要である。将来の計画としては; 気圧を広範囲にわたって変える。(波長の短いミリ波の開発が必要)。印加電圧を下げるための高周波放電の注入法の研究。B_z プログラミング。放電管材料の調査研究。以上のような予備研究をしつつ, 安定な放電が得られるような 2 号機を考慮している。一方において測定の精度を上げるために努力する。2 号機は管径を細くして直線性を増し, 磁力線と器壁との平行度をよく, かつ安定磁場を強くすることを考えている。
- (vi) 隘路; 定員および建屋の不足, とくに測定器の不備。

5. 三菱グループ

- (i) 環状ピンチ型
- (ii) 環状放電の研究: 昭和 33, 34 年度原子力平和利用委託研究を主体とした研究。後記小型環状放電装置を主対象とし, Zeta 型のジュール加熱以外に放電管に直接巻きつけたコイルに高周波および衝撃波を印加する方式を併用することを特徴とする。この基礎現象の研究のために直線状無電極放電装置の実験も行う。高温プラズマ発生機器の研究: スイッチ, 電源, 真空容器, 排気装置, 加速器, イオン・ソース, 諸測定機器の開発研究や, これらを使用した強磁場および高電力発生装置, 測定法などの研究を行う。付随研究, 派生研究: 放電現象に関係した現用機器たとえば, 遮断器, イグナイトロンなどの発展への寄与, プラズマ物理や電磁流体力学の原理を応用した新しい機器および技術の開発研究。
- (iii) 研究設備
- a 磁器製大型放電管 (mean 1200 ϕ , bore 220 ϕ), 小型環状放電装置 (鉄芯: 690 kg, 放電管: mean 600 ϕ , bore 120 ϕ , 硝子製), 直線状無電極放電装置 (放電管: 75 ϕ \times 250 硝子製)
- b 2 MVA 短絡発電機, 2~20 Mc 100 kW 高周波発振器, 100 kJ 無誘導コンデンサー, 30 kVA 高圧充電装置, 25 kW 2.5 kA 直流発電機, イ

グナイトロン, 同上用点弧および格子制御装置
 c 専用タイマー, 3×2 素子シンクロスコープ,
 広帯域シンクロスコープ, 同軸分流器, 流しカメラ,
 高真空排気装置, 重水素導入装置等.

(iv), (v) 現状と見通し: 環状放電の研究に関しては相当大きな規模の設備が整い稼動を始めたので, 今後はプラズマ物理上興味のある data をかなり提供出来よう. また高温プラズマ発生機器の研究において, 例えば差当ってイグナイトロンについての参考となるものも発表できると思う.

(vi) 隘路; 現在の各種プラズマ発生装置は, 工学的に見て甚だ非能率的なもので, 純粋物理の研究装置としても幼稚な段階にあるが, これからの飛躍は技術の本質的限界のため著しく困難であるように思われる. 優れたアイデアの不足が少くとも現状における最大の隘路である. また, 今後高温プラズマ発生機器の研究, 付随研究, 派生研究に力を注ぎたいと思っているが, プラズマ物理等の副産物として工業的応用の価値のある現象が今の所余り見出しえないのでこの方面の見通しを付けにくいこと, さらに機器の開発研究も特殊高性能機器になるほど長期間を要するが開発目標が明確でないため着手しにくい事態も近い将来に起りうるであろうことなどもわれわれの隘路として指摘できるであろう.

6. および 7. 電気試験所

- (i) ビンチ型 (環状放電型および Scylla 型)
- (ii) 研究内容; Scylla 型: プラズマの巨視的 behaviour.

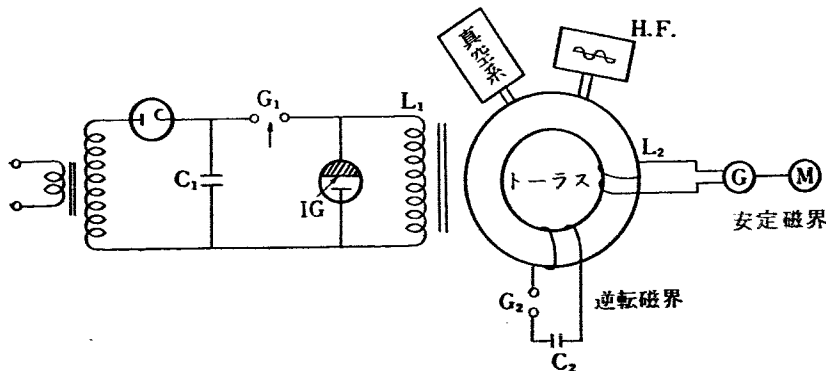
環状放電型: 安定化ピンチの外部磁界逆転の際の安定性への影響.

(iii) 設備

a 発生装置

ZETA 型装置

(1) 概略図



(2) 装置

C1: 主コンデンサー (30 kV, 500 μF, 240 kJ)

G1: 始動ギャップ (始動バラツキ 1 μs 以内)

IG: クランプ用イグナイトロン (50 kA, 1000 A/μs)

L1: トーラス用 1 次コイル (巻数 6, 12, 24)

H.F.: 予備放電用高周波発振器 (5~15, 30 Mc/s, 4 kW)

M.G.: 安定化磁界用直流電源 (70 kW (連続), 250~500 V)

L2: 安定化磁界コイル (最大 2000 gauss)

C2, G2: 逆転磁界用コンデンサーおよびギャップ (矩形波を加えるよう分布回路とする)

トーラス: bore 内径 210 mm, 外径 240 mm, 直径 (平均) 1200 mm, 磁器製, 8 個の観測窓を有す

真空系: バッチ方式によるチタニウムゲッターポンプ, 胴径 16", 排気速度 10⁻⁷ mmHg 以下で 300 l/sec (N₂ に対し) および, 油拡散ポンプ—活性炭冷却トラップ系

Scylla 型装置

C0: 8 μF

L0: コイルの L 0.6 μH

L: 外部の L 1.0 μH

Vc: 50 kV

放電電流 (一次) 100 kA

放電周波数 45 kc

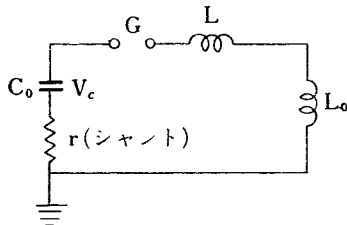
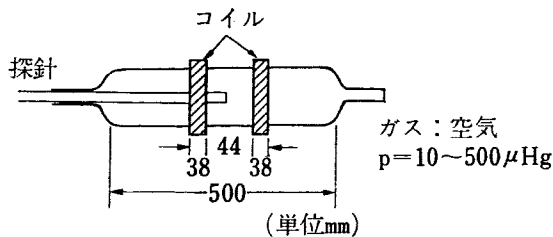
コイルは各 4 turns (誘起電界強度を最高にするため)

プラズマ電流 20~40 kA

高速度流しカメラおよび探針によってプラズマ電流の大きさおよび軸方向, 半径方向の収縮, 膨張の状況を調べた. 収縮時の速度は 5×10⁶ cm/sec 程度で膨張時はその半分位の速度である.

小規模のトロイダル放電実験装置

管径 40 cm, bore 内径 4 cm のガラス管を用いる. コンデンサー 4.4 μF, 15 kV. 気圧 10⁻³ mmHg~1 気圧 (空気). 主としてプラズマ電流, 電界の測定および重畳放電などの基礎実験用.



Scylla 型装置および概略図

- b 計測；電圧・電流：ZETA 型では 1 turn coil による軸方向，電圧シャントによる電流，ログースキーコイルによる放電電流の測定。磁気探針：石英管（外径 10 mm）の磁気探針で磁界分布を測定する。流しカメラ：最高 4.5 mm/ μs ，日立工機製。コマ取カメラ：10 万コマ/秒，日立工機製。KDP カメラ：5 コマ，1/4 μs ，沖電機製。マイクロ波測定：波長 8 mm，さらに短い波長も計画中，透過，反射，雑音による測定。分光器：エバート型平面回析格子分光器（島津製）。分解能約 90,000，ドップラー効果によるイオン電子温度の測定，time resolve を計画中。中性子， γ 線の測定：シンチレーター，原子核乾板を用いる。シンクロスコープ：2 素子，2 台その他。シーケンス制御：電子管式で自動化することを計画中。

8. 日本大学理工学部

- (i) ミラー型誘導ピンチ
(ii) 磁場を横ぎるプラズマの速度，加熱の機構，ミラー開口部からのプラズマの逃げ，不安定性等。
(iii) 設備
a 装置および電源：コンデンサーに貯えられる総エネルギー 288 kJ. コンデンサー電圧. 60 kV, 30 kV (両用). コンデンサー 40 箇の全容量 640 μF , 160 μF . コイルの総インダクタンス (2 コ) 74 μH . 放電の周期 520 μsec , 1040 μsec . 放電開始時の磁場の立上り 3.3×10^8 gauss/sec. ミラー磁場(最大値) 5.5×10^4 gauss. コイル電流(最大)は 11×10^4 A. コイルのサイズは長さ各 40 cm, 厚み 6 cm, 平均直径 24 cm, 総巻数 40 回, 巻き方

1 巻/2 cm, コイル間隔 10~50 cm 可変, はじめは 22 cm. 放電管のサイズは全長約 650 cm, 内径 15 cm, (ガラス).

- b 測定器：大型水晶分光器，流しカメラ，瞬間写真機，マイクロ波 (3 cm, 8 mm, 4 mm), シンクロスコープ等.

- (iv) 現状；この装置は据付を完了したが，調整の後近く運転を開始する予定である。この装置のために行った予備実験は完了した。

予備実験は上述のコンデンサー 1 個を電源に用い，管径 13 cm の石英管または硬質ガラス管に 20 回のコイルを巻いて (ミラーの場合とミラーでない場合の双方) 空気，水素，窒素，酸素，アルゴンを封入して放電させた。3 万ボルトに充電した場合までやったが，現在までにわかった事柄は次のとおりである。

高周波予備放電をしなくても主放電はおきる。予備放電のないとき主放電はコンデンサー放電のはじめのサイクルから起ることは殆どなく 2~3 サイクル後に起ることが多い。加熱はアルゴンの場合を除き，主として衝撃波によっておこなわれる。温度は 20 万度，粒子密度は $10^{16}/\text{cc}$ 程度のプラズマができる。ピンチしたプラズマ柱は電磁流体的な振動をする。(ただし説明のまだついていない振動も起っている)。巨視的な不安定性が起っているという証拠はあらわれていない。

- (v) 見通し；今後の方針は大型装置の模様によってきまるが，ビーム注入，高真空，荷電粒子のエネルギー分布などのことはすでに検討を開始している。

9. 東京芝浦電気・鶴見研究所

- (i) 誘導ピンチ
(ii) 誘導ピンチ型の実験 (原子力平和利用委託費による)
(iii) 設備
a 装置：放電管：内径 12 cm, 長さ 60 cm, 石英組立寸部コイル：10, 20, 30 ターンの 3 種類。管。外法：長さ約 5 m, 高さ約 3 m。
b 電源：衝撃電流発生装置 (充電電圧 50 kV, 60 kJ). 高周波発振器 (20 kW, 400 kc~27 Mc).
c 主な測定装置：高速カメラ 1 台。光電子増倍管 1 台。高速度ブラウン管 1 台。テクトロ 1 台。
(iv) 現状；外部コイル電流の時間的变化が重水素の放電の進展におよぼす影響，並にプラズマがピンチする条件を各種圧力のもとで測定した。測定は高速

度カメラや、光電子増倍管を使用した、コイルの磁場変化率 10^9 gauss/sec, ガス圧 10^{-2} mmHg でよく重水素のプラズマはピンチすることが観測されたが、このような誘導ピンチを利用するものでは、磁場変化率を可及的に高くとる必要が認識された。(原子力平和利用委託費による)。

10. 日立製作所

- (i) イオンサイクロトロン・レゾナンス・ミラー型
- (ii) イオンビーム入射サイクロトロン共鳴による閉じ込め。(原子力平和利用委託研究)。その他。
- (iii) 設備
 - a 磁場用コイル: 500 mm ϕ , 1,200 mm length, 15,000 gauss および 300 mm ϕ , 200 mm length, 30,000 gauss. 発振器: 20 Mc, 100 kW イオン源: 400~1,000 eV, 10 mA. 真空容器: 350 mm ϕ , 2,400mm, 10^{-6} ~ 10^{-7} mmHg. イオン源移動装置などを含めて全長10米。以上製作中。
 - b 測定器: シンクロスコープ 3~4 台。水晶分光器。高速度 (4 mm/ μ sec) 流しカメラ。小型ドーナツ放電実験装置。3,000 gauss 空心コイルと電源。3 cm マイクロ波セット等。8 mm マイクロ波測定器を製作中。
- (iv) 現状; サイクロトロン共鳴によるマイクロ波の吸収の測定 (螢光灯, 3 cm 帯, 中研: 百々), 大電流イオン源 (中研: 槌本)。小型ドーナツのスペクトル測定 (中研: 山本)。直線型放電の実験 (日研)。強磁場用コイルの製作法の調査など (日立工場)
- (v) 見通し; 製作中のイオンサイクロ装置は今年末に出来上り予備実験に入る。イオンの入射閉じ込め, 加熱の実験に 1~2 年を費す予定。測定は電子サイクロトロン共鳴を主眼とするマイクロ波によるものと, Faraday cup による mirror からの escape ion を測る。
- (vi) 隘路; 理論では多体問題としてのイオンの運動方程式の解。イオン電子のエネルギースペクトル。残留ガスから生じたイオンの振舞いなど。すべて面倒。

技術としては、ガラスと金属の真空容器のシール。(bake out のことなど)。発振器は 20 Mc 近くになるとむつかしい高周波アークの絶縁など不安がある。マイクロ波, Faraday cup による以外の有効な測定方法がないこと。

その他人員不足: 東北大から学生が参加してくれる予定ではあるが、この実験に参加していただける

方があれば大歓迎。

11. 大阪大学工学部 (HX 研究グループ)

- (i) DCX 型
- (ii) 高エネルギー粒子入射方式による高温プラズマの研究。
 - mirror 型の直流磁場と energetic arc の解離性を利用して高エネルギー粒子の保持蓄積をはかり高温プラズマの発生, 特に burnout 前後の現象を系統的に検討する。これがため大電流加速器の開発, 各種断面積の測定, energetic arc の特性などの基礎研究並びにこの装置を対象とした測定法の開発を行う。
- (iii) 設備
 - a 装置および電源: 600 kV, 10 mA 高周波コッククロフト加速器。5,000 gauss 直流磁場。250 kV A ディーゼル発電機。
 - b 測定器: カーボンアーク発生装置および断面積測定装置。マイクロ波測定装置。電磁探針測定装置。光学測定装置。中性粒子および放射線測定装置。以上既設および昭和34年度経費で購入済。
- (iv) 現状; 発生装置および放射線測定関係は主として原子核工学教室が当り, 測定関係は電気工学教室を中心に通信, 電子, 精密工学教室が参加している。理論的研究は理学部を中心とした理論グループの協力を得ている。発生装置の組立てに時間をとっているが, 測定関係並びに基礎的研究 (HX-O 計画) は次第に軌道に乗ってきた。
- (v) 見通し; 昭和 35 年度中に建設中の加速器とカーボンアークを組合せて簡単な実験ができる。これと並行して小型カーボンアークの発生装置と 50kV, 1 mA の加速器で基礎データをとる。測定関係は既設の装置を発展せしめる。当分は理論的検討と共に基礎研究, 測定に重点を置く。
- (vi) 隘路; 直流電源, 大電流イオン源, 直流強磁場, ミリ波測定, burnout 以後の理論的検討

12. 東北大学工学部

- (i) mirror 型
- (ii) 磁気流体波の発生, 反射, 共鳴などの研究。
- (iii) 設備
 - a 電源: 磁場用コンデンサ・バンク 30 kV, 110 μ F. 予備放電用コンデンサ・バンク 475 V, 70,000 μ F. パルス発振器 300 kc, 100 kW 3 台。
 - b 測定器: 水晶分光器 島津 QF60. シンクロス

コープ。2現象オッシロスコープ。

- (iv) 現状; AWRA-I では放電管 (300 ϕ ×600)の両側におのおの一对の球一環状電極を置き, 一方の電極間でコンデンサ放電 (170 kc) を行い, 他方の電極間に誘起される電圧の時間的遅れから伝播速度を求め大体において磁気流体波 (Alfven wave) であることを確認した。また磁場 (2 k~5 k ガウス), 気圧 (5×10⁻³~5×10⁻² mmHg), および予備放電電流 (6~9.5 kA) による速度の変化を予定した。現在磁気流体波の反射波の測定をおこなっている。
- (v) 見通し; 3月中に AWRA-II (150 ϕ ×1000) を完成。300 kc パルス発振器により磁気流体波を励起して, その波形分析に加えて分光およびマイクロ波による測定をおこなう。さらに定在波を作ることによって 300 kc の power をプラズマ中に効率よく注入し高温プラズマを作る。また近く M.H.D. shock wave の勉強を始める。
- (vi) 隘路; 理論としては, 予備放電電流による B_{ϕ} の影響を導入すると式が非線型になる。技術としては, load がアース側にある場合のバラツキが少なく電圧範囲の広いトリガー・ギャップを開発してほしい。また, 実験室が木造バラック建で実験研究に支障を来たすため実験室の新築が切望される。予算, スタッフの不足は言をまたない。

13. 名古屋大学理学部

- (i) ミラー型
- (ii) ミラー磁場における粒子の軌導, 統計的加速, 閉じ込めなどに関する研究。
- (iii) 設備 (工学部と一部共同利用をする)
- a 装置: 10 cm ϕ ×100 cm l , ミラー比 10, 中心の磁場 150 ガウス。
- b 電源: DC 50 V, 150 A (power transistor 制御で $\pm 0.05\%$ の安定度), ポンプ 800 l/sec, 10⁻⁶ mmHg 以下。
- c 計測: 波高分析器 1 チャンネル, 岩崎シンクロスコープ (5361) 1 台, テクトロニクス 545 A 1 台。
- (iv) 現状; 装置の組立ほぼ完了。最初電子ビームによる閉じ込めおよび drift などの実験をおこない, Faraday ケージによる電子分布, 電子エネルギー分布等の測定, 螢光面による軌道の測定等をおこなう。
- (v) 将来計画: 粒子の閉じ込めと同時に統計的加速の実験をおこなう。さらに scale up して核融合の研究と同時に宇宙線の加速機構をしらべる実験もお

こなう。

- (vi) 研究上の隘路; 計測器, 人員, 建屋の不足 (工学部と共通の問題)。

14. 京都大学 (ヘリコン計画)

- (i) Stellarator 型
- (ii) ヘリオトロンにおける保持と加熱の研究
- (iii) 設備
- a 発生装置: ヘリオトロンとしてはヘリオトロン A (磁器), ヘリオトロン B (ステンレス, レーストラック)。ステラレーターとしてはヘリカル巻線, ステンレス, レーストラック。
- b 計測: ミリ波 (6 ミリ), 分光, 磁気プローブ, ラングミュアプローブ, フォトマルチプライヤー, 6 チャンネル単掃引ブラウン管オッシロ等を用いてプラズマ諸量の計測を行う。
- (iv) 現状; 京大においては理・工・教養の各学部および工研, 化研, 基研等の研究者 38 名の協力の下に, Project Helicon を作り, 理論, 発生装置, 測定 of 3 部門に分れて研究をつづけ, 適時合同の研究会およびプロジェクト会議を持っている。

磁器製放電管を用いたヘリオトロン A は, 予備電離が比較的容易におこなえることを確かめ, 3×10⁻⁴ mmHg の気圧 (air) において主放電をおこなわしめることに成功し, 一次側の電流電圧特性と投入コンデンサー容量を変化させて, オッシロで撮影し, 周期回路の調整など, 計測装置群のセッティングをおこなった。その後真空洩れが起り, 本体の磁器に熱応力のためと思われる亀裂を生じていることがわかった。ヘリオトロン B は 3 月末に出来るので, それまで磁気プローブによる磁場の測定, プラズマを銅線でおきかえ, 抵抗を大幅に変化させて, 非線型回路の過渡現象の計測および歪抵抗計を用いてコイルおよび放電管の応力歪み試験, 破壊試験をおこなう。

理論は電磁流体力学, 荷電粒子力学, 統計力学等の各分野に分れプラズマの閉じ込め, 平衡, diffusion, 磁場の構造, 粒子のドリフトなどの問題につき研究を進めている。

15. 東京芝浦電気・鶴見研究所

- (i) Stellarator 型
- (ii) トーラス型放電管によるプラズマの研究 (プラズマの confinement に関する研究を主眼とする) (原子力平和利用委託費による, 目下研究中)

(iii) 設 備

- a 放電管はテレックス硝子管(内径 70φ)で、トラス平均直径約 4 m, トラス全長約 13.2 m. 外部磁場は最高約 30k ガウス. 予備放電は 20kW 高周波発振器, 400 kc~27 Mc. オーム加熱用変圧装置(鉄心約 13 トン). 重水素発生装置. 排気装置.
- b 電源: 短絡発電機 (35,000 kVA). 衝撃電流発生装置 (60 kJ, 50 kV). 発振器 (20 kV, 400 kc~27 Mc). (備考) 280kJ の衝撃電流発生装置一式を目下建設中.
- c 測定器; 流しカメラ 1 台. 水晶分光器 1 台. テクトロ 1 台. その他高速度ブラウン管および放射線測定器数台.
- (v) 将来の計画; 前記装置に加熱部の増設を計画. また超高真空技術の開発を計画.

16. 東京大学理学部

(i) Stellarator 型

(ii) 回転プラズマ, マイクロ波によるプラズマの加速および高速電子流とプラズマの相互作用の研究.

(iii) 設 備

- a 装置; プラズマ・ベータートロン (8 字型)
- b 電源: 電磁石 (~2 トン, 5000 ガウス). マグネトロン発振器 (3 kMc, 2 MW). 3 kMc 立体回路. コンデンサー・バンク (磁場用, 30 kV, 140 k J). コンデンサー・バンク (加速用, low inductance, 60 kV, 10 μF, 18 k J).
- c 測定器: シンクロスコープ数台. 回折格子分光器.

(iv) 現状; 回転プラズマ—— $\vec{E} \times \vec{B}$ による回転とプラズマの保持とが認められた. プラズマ線型加速器——2 MW のマイクロ波により, プラズマの移動することを, プローブにより検出した. マイクロ波によるプラズマ加速についての理論を展開し, 特にその安定性について詳しく調べたが, この点の確認は実験によらねばならない. プラズマ・ベータートロン——相対論的電子流とプラズマの相関, 特に電子流の安定性について研究中.

(v) 見通し; 回転プラズマ——外部電極を分割し, マグネトロン型の振動を起させ, さらに摩擦による加熱についても観測する. プラズマ線型加速器——高真空の導波管中に, 局所的にプラズマを造り (あるいは入射し), それをマイクロ波により加速し, μeV 出力 MeV × Amp 程度のものを目標とする.

プラズマ・ベータートロン——本年初夏より運転開始.

さらに, 完全収斂場によるプラズマの実験も始められている.

(vi) 隘路; 真空の導波管中に, $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$ のプラズマ塊を造ること. low inductance crowbar switch. 定員の不足など.

以上を要約すると:

(1) 直線 pinch 型はわが国として着手が早かったので実験が次第に集積しつつある. この型はそのままでは, 核融合炉につながる可能性はすくないが, 各種の電場・磁場の組合せにおけるプラズマの振舞を調べる装置として有用である. 外国では, Triax pinch 型・inverse pinch 型・hard core pinch 型のように新しく発展しているが, 日本ではいまだそういう多様性ある研究に到らない.

(2) 環状 pinch 型は規模と研究領域の違った研究が, 三カ所でおこなわれており, 一部実験が開始され始めた. 今後研究上の連携を密にすることが望ましい.

(3) DCX は, 本報告にあるように, 種々の予備実験が必要であるが, 現状では計画が進展していない.

(4) Stellarator そのものについての研究は殆どない.

(5) 現在は, 何れも測定器群として不十分なものしかもっていない. 測定器群が不完全な場合は, cross-check が出来ないため, ひどく効率のわるいグループになることは強調されなければならない.

3. 測定関係の現況と将来

核融合研究に使われる測定法については第 8 章 § 2 以下に列挙されているが, 現在わが国でおこなわれているのはその中の一部分である.

電磁的測定 ログウスキーコイル, 磁気探針は東工大, 電気試験所などで作られ, 非常に速い現象に対する目的から周波数特性などが検討されている. ラングミュア探針などの静電探針は定常状態では確立されているが, 変化の速い過渡プラズマに適用するには問題がある. これについて東北大, 東大, 京大, 通研などで, 新しい方式の提案や, プラズマの応答が研究されている. また実際のピンチ装置に使うばあいの乱れや雑音の障害についても名大で調べられている.

マイクロ波測定 伝播特性を利用する方法には反射

法と透過法があるが、ふつうの放電プラズマについてこの二つの方法とも行われている。透過に用いる干渉計としてはブリッジ法の最も簡単な方法が用いられている。波長は3cm付近のものが多いが、日大、理研、沖電機などでは8mmが用いられ、 10^{13} 程度での電子密度が測られている。なお密度はこの程度の温度では静電探針からも求められるので、比較検討が進められている。測定に当っては電磁ホーンとプラズマの幾何学的配置などに問題があり、定常状態での測定にもまだ研究が必要である。将来は瞬間測定のためのfringe-shift interferometer, 高密度測定のためのミリ波、あるいはサブミリ波の開発が望まれる。

プラズマからのマイクロ波放射も熱雑音やサイクロトロン放射が京大、教育大などで調べられているが、まだ定量的に温度や磁場の強さを測定するまでには至っていない。

また、装置の設計などに当って必要なプラズマの基礎的な定数・輸送係数の測定も東大その他でおこなわれ始めた。

光学的測定 分光測定のためにはさまざまな分光器が使われ、2500 Å 程度の紫外線から可視光線まで調べられ、線の励起の強度などから温度が推定されている。阪大ではプラズマジェットの温度を測定している。また東大航研ではエタロンを使ってシュタルク効果からの密度測定、ドップラー効果からの温度測定の方法が検討されている。定常状態としても幅やシフトの解析にはまだ研究の必要があるが、このばあい最も大切なことは、これを速い現象に応用する方法を確立することである。

瞬間写真については、ケルセルなどを用いた高速度シャッターのカメラも二、三の所に設備されているが、流しカメラの方が多く利用され、実際に阪大では衝撃波に、日大では誘導ピンチに、電気試験所ではシラー型放電などに適用され、他の電磁的方法とともにプラズマの挙動を調べるのに役立っている。流しカメラについては明るさなどの問題があるが、これは別に専門の高速度写真研究会があり活発に研究が進められている模様である。

瞬間写真については、ケルセルなどを用いた高速度シャッターのカメラも二、三の所に設備されているが、流しカメラの方が多く利用され、実際に阪大では衝撃波に、日大では誘導ピンチに、電気試験所ではシラー型放電などに適用され、他の電磁的方法とともにプラズマの挙動を調べるのに役立っている。流しカメラについては明るさなどの問題があるが、これは別に専門の高速度写真研究会があり活発に研究が進められている模様である。

4. 昭和34年度までの主要な研究経費

第2表および第3表に、原子力予算関係および文部省関係の核融合研究予算を集録した。これ以外に、各会社の自己調達研究費、各大学の講座研究費あるいは校費のやりくりによる研究費なども使われている。また国家予算によらないおもなものとしては、日本大学理工学部の昭和33,34年度で建屋を含めて約60,000,000円、理化学研究所は、第2表の原子力平和利用委託金以外に所内費により、昭和33,34年度で約37,000,000円の研究費が投入されている。

第 2 表

年 度	原 子 力 予 算			予 算		
	原 子 力 平 和 利 用 委 託 費			予 算		
	研 究 題 目	研 究 者	金 額 円	研 究 題 目	研 究 所	金 額 円
33 (32年度 くりこし 分)	誘導ピンチ型プラズマの研究	東 京 芝 浦 電 気 K K	2,997,260	超高温プラズマと核 融合に関する研究	電 気 試 験 所	20,000,000
	超高温プラズマ発生用低インダクタンスコンデンサの試作研究	K K 関 西 二 井	2,395,535			
	核融合超高温プラズマの発生並びに観測に関する研究(特殊像変換管による高速カメラの試作)	神 戸 工 業 K K	8,528,723			
33	核融合を目的とした超高温プラズマに関する研究	三 菱 原 子 力 工 業 K K	7,477,800			
	大電流環状放電による超高温プラズマに関する研究	東 京 芝 浦 電 気 K K	6,996,000			
	核融合超高温プラズマの発生並びに観測に関する研究	神 戸 工 業 K K	1,995,118			
	超高温プラズマ現象の測定に関する研究	理 化 学 研 究 所	3,976,493			

34	イオン・サイクロトロン・レゾナンス方式による高温プラズマの発生に関する研究	K K 日立製作所	17,637,815	核融合反応に関する研究	電気試験所	51,120,000
	核融合を目的とした超高温プラズマに関する研究	三菱原子力工業 K K	5,672,952	委員会費	日本原子力研究所	2,760,000
	高温プラズマ現象の測定に関する研究	理化学研究所	7,248,407			
	高温プラズマ測定用ミリ波測定器の試作に関する研究	沖電気 K K	6,873,195			
	高温プラズマ観測用真空紫外分光光度計の試作に関する研究	K K 島津製作所	8,934,320			
	トーラス型放電による超高温プラズマの研究	東京芝浦電気 K K	8,280,000			

第 3 表

文 部 省 予 算								
科 学 研 究 費					予 算 (国立大学校費)			
年度	区分	研究題目	研究者	金額 円	研究題目	研究場所	金額 円	
32	機関研究費	超高温熱源およびピンチ効果に関する研究	岡田 実 (阪大・工)	5,000,000				
33	機関研究費	磁気流体共鳴現象の実験的研究	渡辺 寧 (東北大・工)	3,960,000	プラズマ物理学研究用電源設備費	東大・理	2,900,000	
		大電流環状放電における加速プラズマおよびその核融合反応への応用に関する研究	山本 賢三 (名大・工)	7,000,000				
		放電による核融合の研究 (核融合の基礎となる放電現象の研究)	岡田 実 (阪大・工)	5,500,000				
		超高温プラズマの分光学的研究	堀江 忠男 (阪大・理)	1,000,000				
	総合研究費	核融合の総合的研究	代表者 湯川 秀樹 (京大・基研)	6,400,000				
34	機関研究費	磁気流体力学的共鳴現象の実験的研究	渡辺 寧 (東北大・工)	8,000,000	超高温発生装置設備費	東大・理	20,000,000	
		プラズマのマイクロ波実験	小島 昌治 (東教育大・理)	1,600,000				
		超高温環状プラズマ発生装置における加熱・加速および安定化に関する研究	山本 賢三 (名大・工)	7,800,000				
		外部磁場による超高温プラズマの加熱と制御に関する研究	林 重憲 (京大・工)	7,500,000				
		総合研究費	核融合の総合的研究	代表者 湯川 秀樹 (京大・基研)	6,000,000			
		輸入機械補助金	framing camera (Beckman & Whitley # 189)	川崎 栄一 (日大・理工)	5,000,000			

資料4 核融合反応装置の基礎概念

1. 今日核融合反応の制御を目的とした研究が、世界各国において精力的にすすめられている。その最大の原因は将来のエネルギー資源の問題にあると見てよいだろう。P. C. Putnumによると、核エネルギー以外の既存のエネルギー資源は現在の消費状態を extrapolate すると今後 1~2 世紀のあいだにその大部分が消費されてしまうと予想される(注 1)。

核分裂エネルギーの利用は、それに対処する最も有力な手段の一つである。しかし放射性廃棄物の処理というきわめて面倒な問題があるので、核分裂エネルギーの大幅な利用が制限されるおそれがある。

核融合エネルギーの利用においてはこの点はほとんど問題なく、また重水素から核融合エネルギーをとり出すことに成功したならば海水中の重水素が利用できるため、その資源はほとんど無制限と考えてよい。

核融合エネルギーを、エネルギー資源として利用するためには、エネルギーの発生を人為的に操作することが必要である。したがってわれわれの課題は制御された核融合反応 (controlled nuclear fusion reaction) によってその経済的利用を実現することである。

もちろんこれはきわめて困難な問題で、さらに多くの研究を必要とする。しかし現在、極めて有力と思われる方法については、一応のすじみちがえられているといえよう。それは、高温のプラズマ状態にある軽い原子核 (重水素、三重水素など) を、おもに磁場の圧力によって保持し、それらの間に熱核融合反応を実現させるものである。もちろん一応のすじみちといっても、物理的、工学的問題が山積している。

以下核融合反応装置を考える際の基礎的事項について簡単にのべる(注 2)。

2. まずプラズマが安定に保持されたとして、それからエネルギーを取り出せるための条件を考える。(注 3)。取り出して利用できるエネルギーは核融合より生じたエネルギーと利用の効率との積から、プラズマ加熱に要したエネルギーとエネルギー損失とを差引いたもので与えられる。

エネルギー損失の機構として最も重要なイオンによ

る電子の制動輻射のみを考慮すると、エネルギーをとり出すためには、温度 T (°K) およびイオン密度 n (/cm³) と持続時間 t (秒) との積 nt が、つぎのようにそれぞれある値より大きくなければならないことがわかる。

重水素-重水素反応

$$T > 2 \times 10^8 \text{ }^\circ\text{K}, \quad nt > 10^{16} \text{ sec/cm}^3$$

重水素-三重水素反応

$$T > 3 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{K}, \quad nt > 10^{14} \text{ sec/cm}^3$$

ただしここでエネルギー利用の効率として一応 1/3 をとり、速度はマックスウエル分布と仮定した(注 4)。

エネルギー損失の機構としては、さらに電子-電子の制動輻射(注 5) や電子のサイクロトロン輻射(注 6) も問題となることが指摘されている。

プラズマからエネルギーをとり出す方法としていくつかの考えが提案されているが、通常熱交換により技術的問題から発生するエネルギーを 100 watts/cm³ 程度におさえる (核分裂炉もこの程度) とすると、 $n \sim 10^{14} \sim 10^{15} / \text{cm}^3$ となり持続時間は秒の程度必要になる。

3. プラズマを以上のような高温に保持するためには、物質の壁から離しておかなければならない。そのために磁場の圧力を利用する。粒子密度が小さいのでプラズマの圧力は $2nkT$ (k : Boltzman 常数, 電子とイオンの温度は等しいとした) で与えられる。したがって、磁場の圧力でプラズマをとじこめるためには、 $\beta \equiv 2nkT / (B^2 / 8\pi) < 1$ がみたされなければならない。 β が大きいと熱核反応に有利なことは明らかである。

保持の磁場としては、外場、プラズマ中を流れる電流による磁場のいずれもが利用されている。さらに高エネルギーの電子流や通常無視されている変位電流の作る磁場の利用も考えられる。

磁力線がまがっていたり、磁場の強さが場所によって異なるときには、電子とイオンの運動に差があらわれる。そのためプラズマが分極し、平衡状態の達成されないことがある。これをふせぐためにいろいろの磁場の配位が提案されている。

4. 不安定な平衡状態にあるプラズマは、ある短か

い時間でこわれてしまう。重水素プラズマで温度が 10^6 °K, 大きさを 10 cm とすると, この時間はほぼ 10^{-6} sec である (注 7)。一方, 前に述べたように持続時間は秒の程度必要なので, 不安定性をさけることがまず必要である。不安定性には装置によりいろいろの型があって, これをさける方法もいろいろ研究されている (注 8)。

不安定性以外にもプラズマのとじこめを破る多くの過程がある。これらについて簡単にふれておく。

プラズマの電気抵抗が有限なために, プラズマ中の磁場は減衰してしまい, とじこめられなくなる。上と同じ条件でその減衰時間は $\sim 10^{-2}$ 秒である (注 9)。高温ではあまりつよい制限にならない。

また, 粒子損失の第一の原因として, プラズマをとじこめている磁場を横切って粒子が拡散し, プラズマ粒子が失われる現象がある。これはイオン間の 2 体衝突によるもので, その拡散の時定数は, 理論的に (完全電離気体に対して)

$$20 B^2 T^{1/2} r_0 / n \text{ 秒}$$

で与えられる。ここで B は磁場の強さ (ガウス), T はイオン温度 (°K), r_0 はプラズマ柱の半径 (cm) である。この式が非常に強い磁場内の高温プラズマでも成立するとすれば, (現在 $B=4\sim 5 \times 10^3$ ガウスまで, $T=10^4\sim 5 \times 10^4$ °K のプラズマに対しては実験的にたしかめられている (注 10)。磁場による高温プラズマのとじこめはきわめて容易となる。

なお, 磁場方向の長さが半径にくらべて十分大きくないプラズマ容器では, 磁力線にそって電子の拡散 (直角方向の拡散に比べずっと大きい) と容器の端の影響が介入し, いわゆる “短絡効果” のため, 直角方向の拡散係数が見かけ上 3 桁近く大きくなることが知られている (注 11)。

粒子損失の第 2 の機構として, 磁場中の電場のゆらぎによる $E \times B$ 型 drift にもとづく, “drain” 型の拡散が実験的に観察されている。Bohm によると拡散の時定数は,

$$2 \times 10^{-3} B r_0^2 / T \text{ 秒}$$

で与えられる (注 12)。この理論式の根拠はあまり明確でないが, もしこれが正しいとすると, 前にのべたものと異なり, 磁場による高温プラズマのとじこめはかなり困難となる。

さらに, プラズマ粒子の速度分布の非等方性にもとづく不安定性や, 後にふれる逃走電子の存在に由来するいろいろの動振にもとづく不安定性による粒子の損失などが存在する (注 13)。

しかし, 上に述べた粒子損失の機構はいまだ十分に解明されておらず, 今後の核融合における重要な研究課題であろう。

以上のようなプラズマの “保持” と “不安定性と粒子損失” が加熱の方法と密接に関係していることは, 以上述べたことから明らかである。

5. とじこめられた高温プラズマを得る方法としては低温から加熱する方法と, 高エネルギーの粒子を注入してとじこめる方法との 2 つがある。いずれも粒子に規則的な運動エネルギーを与え, それが衝突によって熱エネルギーに変化していくことを利用する。衝突の断面積はエネルギーの 2 乗に逆比例するので高温では能率が悪くなる (注 14)。

まず, 前者の方法について考えよう。これはさらにプラズマ中を流れる電流によるもの (ジュール加熱), 保持の磁界を変化させてプラズマを圧縮するもの (圧縮加熱) および振動する外場によるもの (magnetic pumping) とにわけられる。

ジュール加熱では電場でまず電子が加速され, 衝突によってさらにエネルギーがイオンに移され, 結局プラズマ全体が加熱される。Coulomb 力による散乱の断面積がエネルギーの 2 乗に逆比例するため, 高温ではイオン加熱の効率がわるくなる。このため t 秒間に到達できる温度 T_i (°K) は

$$T_i \leq 1.7 \times 10^{-2} n t$$

に制限されるので (現段階で考えられる値として $n=10^{19}/\text{cm}^3$, $t=10^{-2}$ sec とすると, $T_i \leq 10^6$ (°K), さらに高温を得るためには他の方法との併用が必要である。

また同様な理由によって, 電場 E (volt/cm) があるので, エネルギーが

$$4.5 \times 10^{-13} n / E \text{ eV}$$

以上の電子は無制限に加速されてしまう (逃走電子) (注 15)。これによって電子が失なわれ, プラズマが中性でなくなったり, プラズマ中にいろいろの振動が励起され, 不安定性などの原因にもなったりしていると考えられる。そのため高周波ジュール加熱が提案されている。

圧縮加熱はその速さによって断熱圧縮と衝撃的な圧縮とに分けられる。

圧縮の速さがおそいばあいは断熱圧縮とみなせる。これを利用するときは最終状態は安定な配位でなければならない。ピンチ型では安定な範囲にとどめるためには圧縮比に限られ, あまり有効でない。したがってこの方法はおもに mirror 型に適用されるので資料 5

の mirror の項で説明する。

圧縮の速さはやく、プラズマ壁の収縮の速さがイオンの熱運動の速さより速いばあい、プラズマ中の粒子に直接衝撃が与えられる形になり、プラズマは急速に加速される。

例えば、直線放電のばあい磁気の壁がプラズマ粒子をはきよせながら収縮するという近似 (snow plough model) によると、単位長あたりのプラズマに与えられる運動エネルギーは $En^{-1/2}$ に比例し、非常に有効である (注 16). $n=10^{13}$ とすると $10^4 E^\circ K$ に相当する運動エネルギーを得る。しかし持続時間が短いのので、融合反応のためには、なにか外の保持方式と組合せる必要がある。

最後に振動磁場をプラズマに作用させても、プラズマにエネルギーが供給される。有効に加熱するためには、振動周期 τ をプラズマのいろいろの特性時間 (イオンの衝突時間 τ_c , 加熱領域をイオンが通過する時間 τ_i , イオンのサイクロトロン周期 τ_g) との関連において適当に定める必要がある。それらの大小関係によって、つぎの4つの方法が考えられる (注 17)。まとめて magnetic pumping という。プラズマの密度が比較的大きいばあい、プラズマの反作用で、加速電場が入りにくくなるが、これをある程度ふせぐ方法も試みられている (注 18)。

(1) $\tau_g \ll \tau_c \sim \tau \ll \tau_i$

磁気緩和とよばれる。磁場が増加するときは磁気能率の不変性から磁場に垂直な速度、したがってその運動エネルギー W_{\perp} が増加する。 $\tau_c \sim \tau$ なので次に磁場が弱くなる頃には、すでに衝突によって磁場に平行な速度成分、したがって W_{\parallel} も増加し、熱運動化した後に考えると、結局プラズマにエネルギーが有効に注入されたことになる。衝突が重要な役割を演ずるので、ジュール加熱と同じく、高温で能率が低くなる。

(2) $\tau_g \ll \tau_i \sim \tau \ll \tau_c$

$\tau_i \sim \tau$ のために有効に加速されるイオンも減速さ

れるイオンもあるが、平均すると統計的效果として正の量が残り、確かにエネルギーが注入されたことがわかる。しかも $\tau^{-1/2}$ に比例して変化させると、高温できわめて能率がよい。

(3) $\tau_g \ll \tau_c \ll \tau \sim \tau_i$

この場合は加熱領域にある粒子がそろって加速や減速を受けながら互に衝突するので、結局音波が発生する。加熱の能率は (2) と同程度。

(4) $\tau_g \sim \tau \ll \tau_i \ll \tau_c$

これはイオン、サイクロトロン共鳴加熱とよばれ $\tau_g \sim \tau$ なのでイオンだけが共鳴して、選択的に急速に加速され、加熱法としてきわめて有効である。

高エネルギーの粒子を入射してためていく方法では、プラズマの複雑な性質がある程度消去され、みとおしがつけやすい。

入射する粒子の種類と捕捉の方法とによって各種の組合せも考えられているが、分子イオンを mirror に入射して、炭素アークなどで原子イオンに分解し、その際 Larmor 半径が減少することを利用して捕捉するもの (DCX, OGRA), 分子イオンのかわりに中性分子を入射するもの (Allice) プラズマを入射するものなどが典型的なものである。Astron なども加熱方式としてはこの部類に属する。

DCX 型などの装置ではせっかく捕捉した高速イオンが、中性粒子と荷電を交換して中性化され、エネルギーをもったまま逃げてしまうという損失がある。しかしある程度以上の入射イオン電流では、中にあった中性粒子はもとより、外から入り込む中性粒子も片端からイオン化される。いわゆる burn out の現象がおこる。この burnout した状態では、粒子的に考えたときはじめもかなり完全になり、しかも熱運動化したあとでは非常な高温になっている。したがって burnout が達成されるならば、これは核融合反応実現への有力な手段となろう。

注

(注 1) P. C. Putnum: "Energy in the Future" Van Nostrand Co. (1953)

(注 2) 核融合反応における基本的問題については、たとえば、早川、林 "核融合" 岩波講座・現代物理学 (1959) を参照、なお基礎となるプラズマ物理の問題については、さらに L. Spitzer, Jr.: "Physics of Fully Ionized Gases" Interscience Publishers. (1956) 木原・水野: "プラズマの物理学" 岩波講座・現代物理学 (1959) を参照。

(注 3) J. D. Lawson: Proc. Phys. Soc. B 70 (1957) 11

(注 4) この仮定には疑問な点が多い。マックスウエル分布からのずれの影響については、H. Grad: Geneva II 31 (1958) 263 参照。

(注 5) 井本: 核融合研究 1 (1958) 417

(注 6) S. Hayakawa et al.: Geneva II 32 (1958) 385

(注 7) プラズマのこわれてしまう時間は (プラズマの大きさ $L(\text{cm})/(\text{音速}) \approx 10^{-4} L T^{-1/2}$ 秒で与えられる。高温で短

かくなる。

- (注 8) 不安定性については資料 4 を参照。
 (注 9) 磁場の減衰時間は $\sim 10^{-12} T^{3/2} L^2$ 秒
 (注 10) R. J. Bickerton: Proc. Phys. Soc. B 70 (1957) 305 なお (11) も参照。
 (注 11) A. Simon: Geneva II 32 (1958) 343, B. Lehnert: Geneva II 32 (1958) 349.
 (注 12) A. Guthrie and R. K. Wakerling "The characteristics of electrical discharges in magnetic fields" p. 197 McGraw-Hill (1949), 実験については (注 11) も参照。
 (注 13) 磁場の存在による分布の非等方性による機構については E. G. Harris: Phys. Rev. Letters 2 (1959) 34 逃走電子に起因する不安定性については, Stellarator の pumpout をそれから説明しようとする speculation がある。
 (注 14) この場合 Landau 減衰も規則的な運動を不規則な運

動にかえる有力な機構である。しかし, これは phase mixing のために thermalization とは異なる (エントロピーは増加しない)。I. Bernstein: Phys. Rev. 109 (1958) 10. Appendix.

- (注 15) J. M. Berger et al.: Geneva II 32 (1958) 197, I. Bernstein: Geneva II 32 (1958) 210, 逃走電子に対するくわしい計算は H. Dreicer: Geneva II 31 (1958) 57 参照。
 (注 16) O. A. Anderson et al.: Proc. Venice. Conf (1957) p. 62
 (注 17) J. M. Berger et al.: Geneva II 31 (1958) 112, T. H. Stix: Geneva II 31 (1958) 125, R. S. Sagdeyev and V. D. Shafranov: Geneva II 31 (1958) 118, A. Schlüter: Z. Naturforsch. 129 (1957) 822
 18) (注 17) の Stix の論文参照。

資料 5 各方式の簡単な説明

熱核反応をおこさせるための装置には, プラズマの保持の方式および加熱の方式にいろいろな可能性がある。それらにしたがって分類しておくとお見とおしがつけやすい。

まず保持の方式はつぎのように分けられる。

- (1) 自己場による保持 (ピンチ方式)
- (2) 外場による保持
 - 2.1) Stellarator 型
 - 2.2) mirror 方式
 - 2.3) cusp 方式
- (3) 振動する外場による保持
- (4) 高速電子流によるもの

加熱の方式は

- (1) ジュール加熱
- (2) 圧縮加熱
- (3) 振動する外場による加熱 (magnetic pumping)
- (4) 磁場の拡散による加熱
- (5) 高速粒子の入射

加熱法については資料 4 で述べたのでここでは再説しない。ただし磁場の拡散による加熱は前にふれなかったが (注 1) 参照。

以上の保持の方式と加熱の方式とのくみ合せによって, いろいろな型式が考えられるが, 以下では保持の方式による分類にしたがって順次各種の型式の簡単な説明を与える。

(1) 自己場による保持

プラズマ中を流れる電流と, それのできる磁場とによる Lorentz 力でプラズマをとじこめる。普通はピンチ方式と呼ばれている。模型的にはプラズマの外側をかこむ磁場の壁が, プラズマの圧力と Lorentz 力との関連において定まる速さでうごいて, プラズマを圧縮するように考えることができる。この磁気壁の進む速さと音速との大小関係によって, 速いピンチと遅いピンチとに分けられる。またプラズマ中を軸方向に流れる電流によるピンチと, 方位角方向に流れる電流による (誘導) ピンチとも分けられる。

装置の型としては直線状のものおよび torus 状のものがある。ここではほとんど本質的な差異のある速いピンチと遅いピンチとの分類によって話をすすめる。

1.1) 速いピンチ (注 2) 磁気壁の収縮の速さが音速より速いので, 衝撃的圧縮が加熱の原理になる。現象が急速にすすむため, 放電管の端へのエネルギー損失, 不純物などの問題が少ないので, 簡単のため直線状の装置が用いられる。加熱の機構解析は, イオンが急速にうごく壁ではねかえされるといふ模型を用いた。いわゆる M-理論 (Rosenbluth) により行われ, 実験ともわりによい一致を示している。

融合炉として考えるのは, 持続時間がみじかいのでむづかしいが, 比較的容易にかなりの高温がえら

れるので、将来他の保持方式とくみ合せて用いられる可能性もある(注3)。

この型に属するものには通常のピンチ型の *Columbus* とよばれるものなど沢山ある。誘導ピンチ型の *Scylla* は、高温プラズマ発生装置のうち、熱核反応によると思われる中性子の観測されている唯一のものである。

1.2) 遅いピンチ(注4) 円柱状プラズマは、プラズマ中の軸方向の磁場および外側の導体の壁により、適当な条件のもとで、安定な平衡状態になることが示された(注5)。これを利用して長時間プラズマを保持するのがおそいピンチ方式である。安定性は容器にまいたコイルによる軸方向の比較的よわい磁場と金属壁によって確保する。安定のための条件は *sausage* 型の変形に対しては、電流が表面だけ流れるとすると、 $H_z^2 > H_\theta^2/2$ で与えられる。また *kink* 型の変形に対しては短波長の変形の成長は H_z で、長波長の変形は金属壁を流れる渦電流でおさえることにするとプラズマ柱の半径と金属壁の半径との比が、ある値以上のとき安定にできる。この比は最も好都合な場合でも $1/5$ より小さくはできず H_z が存在すると安定性が大いに損なわれる。ここで、 H_z 、 H_θ 、 H_ϕ はそれぞれプラズマ内外の軸方向の磁場およびプラズマ中を流れる電流による磁場のプラズマ表面での値をあらわす。安定な配位に留まるためには以上より、あまり圧縮比をあげることができないので、圧縮加熱は有効に用いることができず別にジュール加熱などを用いる。また長時間保持を目的とするので、直線状放電管は端へのエネルギー損失などのため使用できず、*torus* 状の放電管が用いられる。

典型的な例として、*ZETA*型を考える。金属製の状の容器中のプラズマに誘導によって軸方向に大電流を流しピンチさせる。プラズマの電気伝導度が有限のため実際には H_z が存在する。また磁場の拡散のためにも H_θ が発生するが、この現象には同時にプラズマが加熱されるという有利な面もある(磁場の拡散による加熱(注1)) この H_θ を打ち消すために逆向きの磁場をつくることも考えられている。いずれにしても、相当面倒な磁場の programming が必要になる(注6)。

加熱はおもにジュール加熱(電場 ~ 2 Volt/cm)である。そのため加熱の能率に問題があり、また逃走電子が発生していろいろの不安定性の原因となるおそれがある。(これをさけるため粒子密度をきく大

することが考えられている)。実験によると入力90%近くがこれらの不安定性によって失われてしまうものと思われる。

なお *kink* 型は H_θ/H_z がプラズマの半径で *torus* の半径をわたったものより大きい場合にも安定になる。これは一長一短である。この場合外場がつよく磁場の配位もつぎの *Stellarator* と似てくる。

(2) 外場による保持

2.1) *Stellarator* 型(注7) *torus* に一様にコイルをまき軸方向の磁場をつくると、磁場のつよさは *torus* の中心からの距離に逆比例する。この磁場の勾配による電子とイオンの drift がたがいちがうため上下方向に荷電の分離がおこり $E \times B$ 型の drift を生じて、プラズマは平衡にならない。磁力線をラセン状にすると、磁力線に平行な方向の電子の易動度が大きいので荷電の分離をふせぐことができる。このような磁場をつくるため、容器を8字型にするか、またはゆるいピッチのコイルを偶数本まき交互に逆向きの電流を流すか (*helical winding*) することによって、磁力線をひねることが試みられている。適当なひねりを与えると、各磁力線は一つの面をつくる。この面はプラズマの等圧面になり、 β がある値以下であると、平衡状態が可能になる(注8)。

つぎに安定性についてのべよう。軸方向の磁場がつよいので、*sausage* 型の不安定は存在しない。*kink* 型にたいする安定の条件から、8字型のばあいプラズマ中を流れる電流は、つぎの式で与えられる I_c (A) より大きくなることはできない。

$$I_c = \frac{5a^2 B_z}{L} (\ell + 2\pi h)$$

ここで a 、 L はプラズマの半径および長さ(cm)、 ℓ は *torus* を一周したときの磁力線のひねりの角、 h は $(\ell + 2\pi h)$ を正にする最小の整数であり、また電流は表面電流とした。この I_c を *Kruskal* の制限電流という(注9)。この現象は、プラズマ中を流れる電流が大きくなると、その電流のつくる磁場によって、磁力線のひねりがうちけされてしまうためにおこるものと解釈できる。この条件は実験的にもたしかめられている。たてみぞ型の不安定がないための条件は β にたいする制限を与える ($\beta < \beta_c$)。8字型の場合、および *helical winding* による磁場の極数が2の場合は、 $\beta_c = 0$ となってしまう。磁場の極数が3以上では dl/dr (r : 断面の中心からの距離)

でさだまる0でない β_c がある(注10). ι は磁場の極数が2のとき, $d\iota/dr$ は磁場の極数が3のとき最大になる.

加熱はジュール加熱とサイクロトロン共鳴その他の高周波加熱が採用されている(注11). ジュール加熱の電場は比較的小さいが(≤ 0.1 volt/cm) 逃走電子が観測されている(注12). またジュール加熱あるいは高周波予備加熱の実験によると, 電子がきわめて早く失われてしまう現象がある(pumpout)(注13). これはプラズマ振動その他の原因によるものと思われ, 加熱の方法とも密接な関係がある. プラズマを流れる電流によっても, 磁力線がひねられるが, これにたよっては, “しずかな”プラズマをつくることは難かしい.

2.2) mirror 方式(注14) 円柱状の容器にコイルをまき, 軸方向の磁場をつくり両端で磁場がつよくなるようにする. 断熱近似の成立つとき W_{\perp}/B (W_{\perp} : B に垂直な方向の粒子の運動エネルギー)は一定である. したがって粒子が端に近づくと W_{\perp} が大きくなり, それをはじめ与えたエネルギー W に等しくなった所で粒子は反射される. すなわち $W/W_{\perp}(0) < B_1/B_0$ ($W_{\perp}(0)$ は中心での W_{\perp} の値, B_0, B_1 はそれぞれ中心および両端での磁場)をみたとす粒子は容器内にとじこめられる.

軸対称なので荷電の分離はおこらない. しかしいろいろの原因によってとじこめられていたイオンも端から失われる. 一番大きな原因は衝突によって W_{\perp} がへることであって, とじこめの時間は大体衝突時間できまってしまう(注15). このほか, ambipolar 拡散, 断熱近似からのずれなどによるものがある.

たてみぞ型の不安定のあることが予想されるが(注16), 実験でははっきりわからない. 両端にある金属が安定化に役立っているともいわれている.

加熱には低温から圧縮その他で加熱する方式と, 高エネルギーの粒子を入射してためていく方式がある. 役者には電子温度がひくいという利点がある.

(a) 低温から加熱する方式はおもに圧縮による. 衝撃的圧縮については資料4を参照. 断熱圧縮は圧縮の時間 τ と粒子の衝突時間 τ_c との関係でさらに2通りにわけられる. $\tau \geq \tau_c$ の場合は温度は n^{n-1} に比例して変化する(n は粒子密度, γ は比熱の比 $=5/3$). $\tau < \tau_c$ の場合は動径方向および軸方向の断熱圧縮によるイオンのエネルギー変化は, それぞれ

$$W_{\perp}(t) = (B(t)/B(0))W_{\perp}(0), \quad W_{\parallel}(t) = W_{\parallel}(0) \\ \text{および} \quad W_{\perp}(t) = W_{\perp}(0),$$

$$W_{\parallel}(t) = (L(0)/L(t))^2 W_{\parallel}(0)$$

となる(L はmirrorの長さ). また両者のくみ合せも可能である. 後者はとじこめの条件を充すイオンの数を減少させるので, あまりのぞましくない. さらに両端の磁場を交互に変化させたり, 強さのことなるmirrorをつないでおき, つぎつぎにプラズマを移動させて圧縮する方法が試みられている.

(b) 高エネルギー粒子を入射してためていくばあい, まず必要なことは入射捕捉である. これは磁場を時間的に変化させるか, 粒子の荷電状態を変化させることによりおこなわれる. これは入射した粒子が源にもどってこないようにするためである.

まず前者は, 軸方向にイオンを入射して B_1 (あるいは B_0 もともに)を急速に増加させるものと垂直方向に入射してdrift(さらに圧縮)を利用するものがある. また軸方向にイオンを入射してサイクロトロン共鳴によって, W_{\perp} を増加させて加速と同時にとじこめを行う方法も提案されている(注17). このばあいプラズマの反作用のためイオン密度が制限される.

つぎにイオンの荷電を変化させる方法として, DCXとOGRAとの例がある(注18). 共に分子イオンを入射する. DCXでは特殊なアークにより, OGRAでは電子温度のきわめて高いプラズマによって分子イオンを解離させ, 入射捕捉をおこなう.

入射イオン電流 I が

$$I > \frac{\sigma_{ex} - I_0}{\sigma_i + \sigma_{ex}}$$

という条件を満足すると, 外部から入ってくる中性粒子が全部イオン化してプラズマが増殖する. このときburnoutが達成されたという. ここで I_0 は中性粒子束, σ_i, σ_{ex} はイオン化および荷電交換の断面積である. この方法では, イオンのLarmor半径が装置の大きさの1/2程度であるための, 壁への損失, 速度分布が異方性をもつための不安定性(注19)などが問題になる. いずれにしてもまだ研究すべき点が多い.

さらに, 高エネルギーの中性粒子を入射する方法や(注20)あるいはプラズマを入射する方法もおこなわれている.

(c) 最後に少し変わったものとして, Homopolar および Ixion がある (注 21). 共に軸方向の磁場と半径方向の電場による drift でプラズマを回転させるとじこめる. mirror型の磁場では遠心力のため, とじこめるのに有利になる. 回転速度は中心からの距離に逆比例するので粘性によりプラズマは加熱される. Ixion では中心電極としてアークを利用しているが, いずれにしても電極による不純物が問題である.

2.3) cusp 型 (注 22) たてみぞ型の不安定性はプラズマが磁場に対して凸であるときおこる. これをさけるためプラズマが磁場に対して凹であり, かつその上で磁場の圧力が一定という電位が考えられた. 必ず特異点が存在するが, そこでも磁場は 0 でなくとじこめには影響がない. しかし粒子近似で考えるとこの特異点から粒子が失われる. 外部から高温のプラズマを入射して cusp を形成させることが試みられている.

(3) 高周波によるとじこめ (注 23)

変位電流による磁場を利用する. 加熱も同時にできる可能性がある. たとえば球形の空洞の回転する TE_{110} , TE_{111} モードを使う. 時間平均すると, $(1 + \cos^2 \theta)$ (θ : 回転軸をの角) に比例する圧力によってプラズマはとじこめられる. しかし, 安定性の議論には変形のすべてのモードを考慮する必要があるので, 時間平均のもとして考えてよいかどうか疑問がある. またエネルギーはプラズマと壁との間を往復しているが, 表皮効果による壁への損失が大きい.

(4) 高速電子流によるもの (注 24)

典型的な例は Astron である. プラズマを保持するためには閉じた磁力線が望ましい. そのためには内部に電流が必要であるが, Astron では相対論的電子流を利用する. mirror型の磁場内に高エネルギーの電子を入射し, 電子流の層を作る. 1 cm あたりの粒子数 n が $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}/r_0$, ($r_0 = e^2/mc^2$) より大きくなると磁力線が閉じる. するとその中の中性子が電子によってイオン化され, 加熱される. 電子流にプラズマの相互作用もいろいろ調べられつつある (注 25).

注

(注 1) プラズマの中には軸方向の磁場, 外には方位角方向の磁場と, 空間的に完全に分離していることがのぞましいが, 粒子の衝突を考えると, これは平衡状態でなく, 磁場がまざり合ってくる. はじめの状態はエネルギー的に高い状態なので, 磁場の拡散によって, プラズマが加熱される. (例えば M. Rosenbluth: Geneva II 31 (1958) 85 参照)

(注 2) J. W. Mather and A. H. Williams: Geneva II 32 (1958) 26 (Columbus II)
S. A. Colgate and R. E. Wright: Geneva II 32 (1958) 145 (Collapse)
A. C. Kolb: Phys. Rev. 107 (1957) 345; 112 (1959) 1197.
W. C. Elmore et al.: Phys. Rev Letters 1 (1958) 32 (Scylla)
S. C. Curran et al.: Geneva II 31 (1958) 365
A. M. Andrianov et al.: Geneva II 31 (1958) 348

(注 3) “return” を流れる電流の磁場によって部分的に安定化をはかるものがある.

S. A. Colgate et al.: Geneva II 32 (1958) 140

(注 4) E. P. Butt et al.: Geneva II 32 (1958) 42 (ZE TA)
G. G. Dolgov et al.: Geneva II 32 (1958) 82
J. P. Conner et al.: Geneva II 32 (1958) 297 (Perhapatron S 4)
S. A. Colgate et al.: Geneva II 32 (1958) 129

理論としてまとまっているものとしては

S. I. Braginski and V. D. Shafranov: Geneva II 31 (1958) 43

(注 5) R. J. Tayler: Proc. Phys. Soc. B 70 (1957) 31,

1049

V. D. Shafranov: J. Nucl. Energy 5 (1957) 86

B. R. Suydam: Geneva II 31 (1958) 157 (安定の必要条件を与えている)

M. N. Rosenbluth: Geneva II 31 (1958) 85

(注 6) (注 5) の Rosenbluth および Suydam の論文を参照.

(注 7) L. Spitzer: Geneva II 32 (1958) 181 (一般的説明)

(注 8) M. D. Kruskal and R. M. Kulsrud: Geneva II 31 (1958) 213

(注 9) M. D. Kruskal et al.: Geneva II 32 (1958) 217
なお(注 10)も参照のこと.

(注 10) J. L. Johnson et al.: Geneva II 31 (1958) 198

(注 11) J. M. Berger et al.: Geneva II 31 (1958) 112

(注 12) S. T. Stix: Geneva II 31 (1958) 125 (理論)

S. T. Stix and R. W. Palladino: Geneva II 31 (1958) 282 (実験)

(注 13) W. Bernstein and A. Z. Kranz: Phys. of Fluids 2 (1959) 57

(注 14) R. F. Post: Geneva II 32 (1958) 245 および UC RL-4231 (一般論)

F. H. Coensgen et al.: Geneva II 32 (1958) 266

C. C. Damm and F. S. Eby: Geneva II 32 (1958) 273

(注 15) A. Garren et al.: Geneva II 31 (1958) 65

(注 16) M. Rosenbluth: and C. L. Longmire: Annals of Phys. 1 (1957) 120

(注 17) 百々: 核融合研究 2 (1959) 194

大河: 超高温発生装置研究会での講演(1959年1月)

18) C. F. Barnett et al.: Geneva II 31 (1958) 298 (DCX)
 A. Simon: Phys. of Fluids 1 (1958) 495
 G. I. Budker: "Plasma physics and the problems of controlled thermonuclear reactions" Vol 3. p.1 (Pergamon Press (1959))
 19) E. G. Harris: phys. Rev. Letters 2 (1959) 34
 20) G. Gibson et al: Geneva II 32 (1958) 275
 21) D. A. Anderson et al.: Geneva II 32 (1958) 155 (Homopolar)

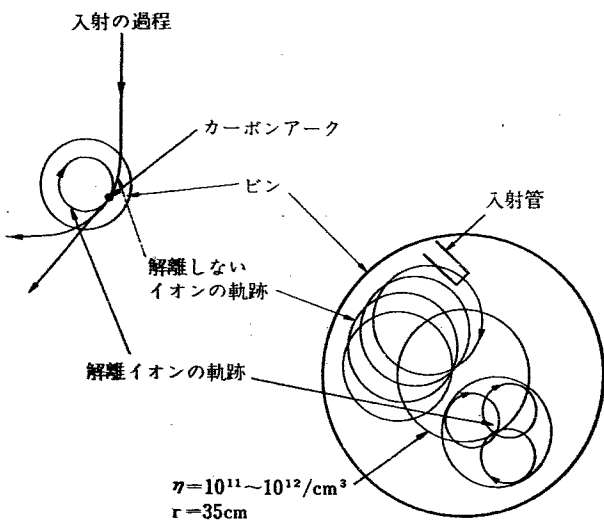
K. Boyer: Geneva II 31 (1958) 319 (Ixon)
 22) J. Berkowitz et al.: Geneva II 31 (1958) 171
 23) J. W. Butler et al.: Geneva II 32 (1958) 324
 E. S. Weibel: Plasma in a magnetic field (edited by Landshoff) p. 61 (Stanford Univ. Press (1958))
 24) N. C. Christofilos: Geneva II 32 (1958) 279
 25) J. Killeen: UCRL-5101
 なお L. Tonks: Phys. Rev. 113 (1959) 637

資料 6 DCX 型に関する資料

1. DCX および OGRA の諸元と動作

(Nucl. Instr. 4 (1959) 311 より)

	DCX	OGRA
(1) 磁気ビンの特性		
ビンの物理的半径 R cm	21-22	70
mirror 間の距離 L cm	40	1200
中心面での磁場の強さ H_0 ガウス	10×10^3	5×10^3
mirror での磁場の強さ H_1 ガウス	20×10^3	8×10^3
mirror 比 H_1/H_0	2	1.6
保持の電力 メガワット	2.7	4
最小の残留圧力 mmHg	3×10^{-8} (油ポンプ)	3×10^{-8} (水銀及びチタンポンプ)
ビンの容積 cm^3	10^4 (Geneva II 31(1958)298), 5×10^4 (計算)	1.8×10^7
(2) 入射		
原理	$D_2^+ \rightarrow \text{分解} \rightarrow D^+$ (或は $H_2^+ \rightarrow \text{分解} \rightarrow H^+$)	
入射イオンのエネルギー keV	600→300 ($v=5.8 \times 10^8$ cm/s)	200→100 (3.1×10^8 cm/s)
D_2^+ 束の強度 mA	max. 1 mA (高周波)	数十 mA (熱陰極をもつアーク・イオン源, 引出しの方向と垂直な磁場) 分散角 $2\alpha=5^\circ$



解離の能率

40% (測定)
 カーボンアークの特性
 正規 200-300 A/150 V; 長さ約 1m; 直径約

中央面に外から入射。イオンは唯一回の通過の際カーボンアーク内で解離。分解したイオンの軌跡はビンの軸と中心が一致。

中心面に内部で入射, 導入磁場の巾は 10 cm, 中心面との角は 20° , 軌跡は振動して, ビンの容積内で残留ガスに依り偶然解離, 解離したイオンの軌跡は偶然ビンの内で分割され, 軸方向に動く。入射イオンは解離しないとき mirror 間を約 30 回往復し, その距離は約 $1 \text{ km} = 10^5 \text{ cm}$ で入射管にぶつかる。冷いプラズマ柱での解離も予想される。

10% (推定)

	DCX	OGRA
解離した D^+ の Larmor 半径 ρ_c cm R/ρ_c	1 cm; Max. 5000 A アークの密度 $10^{13}-10^{14}$ /cm ³ ; 電子のエネルギー約 100 eV で Maxwell 分布でない. 13 1.7	~ 14 5
(3) 残留ガスの作用 動作時の圧力 mmHg 臨界電流	アークをつけて 10^{-7} 理論値 D^+ で 80 mA/10 ⁻⁶ mmHg 残留ガスの予備電離の実験で、捕捉電流 $i_{H^+} = 40 \mu A$ について $i/P = 14$ 倍の理論値は現在まで観測されていない。	10^{-6} $i_{D^+} = 2 A, i_{H_2} = 200 mA$ 初期圧力が充分低いならば ($\sim 10^{-3}$ mmHg) 臨界電流は圧力によらない
(4) 熱運動化	入射エネルギーの違いにより、クーロン断面積は DCX では OGRA の 1/10。 解離したイオンの軌道は DCX では平行、また OGRA では交る。 体積は OGRA の方が大きい。同じ入射電流に対し、 n は \sqrt{v} に逆比例する。	
(5) 高速粒子の損失 観測 プラズマの出来る時間 $\tau = \sqrt{\frac{ev}{I\sigma_{eff}v}}$ 到達イオン密度 $n = \sqrt{I/e\sigma_{eff}v}$, cm ³ 電荷交換による損失 拡散 (クーロン散乱) 損失円錐 (速度空間) 不安定性 解離したイオンの保持	$P = 5 \times 10^{-7}$ mmHg の時 H^+ で平均約 10 m sec の生存時間 約 10^6 回転し、 $200 \mu A H_2^+ \rightarrow 40 \mu A H^+$ 捕捉の時リング電流は 4 A. $D+1 mA$ で 80 sec, $10 mA$ で 25 sec 実験の報告なし $1mA$ 入射で 4×10^{12} OGRA より CDX の方がずっと小さい。入射エネルギーに起因するが、プラズマが出来たときはほとんど無視できる。 この損失は恐らく R/ρ_c の小さい DCX では非常に重要 DCX と OGQA で状況は同じで 厳密な理論がなく、初期条件は極めて有利である。 報告なし $DCX, R/\rho_c$ が OGRA より小さいが、しかし軌跡はピンの軸上に集っている。	$n = 10^{13}$ は 1 粒子を数百秒間保持する時間すなわち $10^5 km$ に相当する。 $D^+ 100 mA$ で 60 sec, $1 A$ で 18 sec. 推定 10^{13} 前の式から $10 mA$ の D^+ の捕捉にたいしては $6 \times 10^{11}/cm^3$ 磁場の方位角につき 週期的変化を生ずる可能性あり
(6) 中央での純度	解離しないイオンおよび中和したイオンの二次粒子は容易に消せる (局所的衝突) 損失円錐内の重い粒子を消すことによる浄化は共通だが、カーボン・アークの電極のため DCX の方が困難。	二次粒子は総ての面で生じ、簡単には消せない 他空間への移転は原理的に可能 軸方向への圧縮は原理的に可能
(7) その他	磁場内の電子の輻射によるエネルギー損失の起る可能性あり。 保持の他の空間への移転は、アーク電極のため困難	他空間への移転は原理的に可能 軸方向への圧縮は原理的に可能
(8) 将来	半径方向への圧縮予定 (ORION) (保持の改善加熱および二次生成物の保存) アークと入射の禁止の必要性	半径方向の圧縮は原理的に可能
	中間エネルギー (20 KeV) 中性粒子を入射しプラズマでイオン化する。	原理的に可能

2. 仏国で計画中の DCX 型装置

ミラー型磁場の赤道面に環状のイオン源をおき、そこから高速分子イオンを入射して、それが場の回転中心軸を何回も通るようにする。その軸に Luce のカーボンアーク、あるいは重水素アークあるいはそれらに代るものをおいて能率よく原子イオンを捕捉・閉じ込めようというのである。

そのためには①エネルギーに関係なく入射イオン分子は必ず軸を通ること、②それを何回も通しうること③解離してできた原子イオンが磁場内に止りうることなどを示さなくてはならない。

①は磁場内の粒子の軌道上の任意の2点の r を r_1 , r_2 とし、 $\int_{r_1}^{r_2} B 2\pi r dr = \Phi$ とおくと $\frac{e}{2\pi m} (\Phi_1 - \Phi_2) = r_1^2 \dot{\theta}_1 - r_2^2 \dot{\theta}_2$ の関係がある。

$\int_0^R B 2\pi r dr = \int_{R_1}^{R_2} B 2\pi r dr$ とし、それぞれの積分範囲内で B の向きが逆になるようにする。

R_2 の外にイオン源をおき、イオンを子午面内に V_{ac} で加速すれば、イオン源では $\Phi_2 = 0$, $r_2^2 \dot{\theta}_2 = 0$ であり軸では $\Phi_1 = 0$, $r_1^2 \dot{\theta}_1 = 0$ であるから軸を通りうることが解る。ただし、そのためには空間電荷などによる空間の電位を V_{sp} とするとき各点で

$$V_{ac} - V_{sp} \geq \frac{e}{8\pi^2 m} \frac{\Phi^2}{r^2}$$

を満たさねばならぬ (第2図参照)。

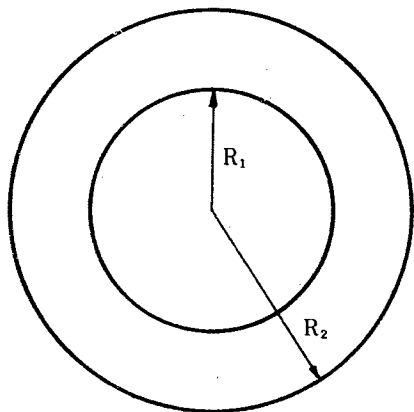
一方③の条件からは、 V_{ac} の取りうる値としては

$$V_{ac} + V_{sp}(r=0) - 2V_{sp} \leq \frac{e}{2\pi^2 m} \frac{\Phi^2}{r^2} \text{ ただし } r \leq R$$

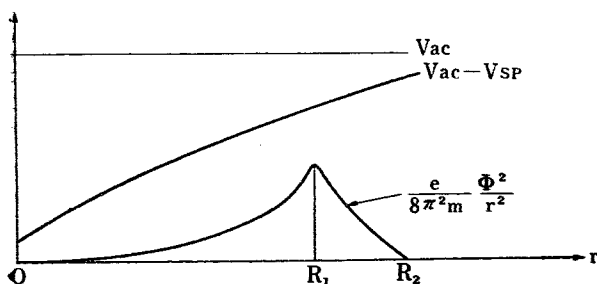
上の2つの不等式から V_{ac} の取り得る範囲が出て来る。 $V_{acmax} \approx 4V_{acmin}$ である。②に関しては2つの方法がある。一つは赤道面内でイオンを入射する。(第3図参照)。解離しない分子イオンは外に出て来るが、加速電圧に鋸歯状波を重畳させてイオン源に達する前に再び中心方向に送り込む方式である。一回の解離能率 n を 10% とし、一週期の間に 10 回軸を通すことにより総合解離能率 n_t は 54% に高めうる。他の方式はイオンを赤道面に少し傾いて入射させて一時的に分子イオンをミラー内に閉じ込めるものである。これに関しては単一粒子に関する計算を行うことにより、入射角を α とするとき $0.15 < \tan \alpha < 0.175$ のときは数 10 回軸を切ることが示されている。 $n=10\%$ のとき 20 回通れば $n_t=88\%$ となる。

なお、軸付近はイオンおよび電子の空間密度が非常に高くなり得るからこれらによる分子イオンの解離も著しく起り得る。

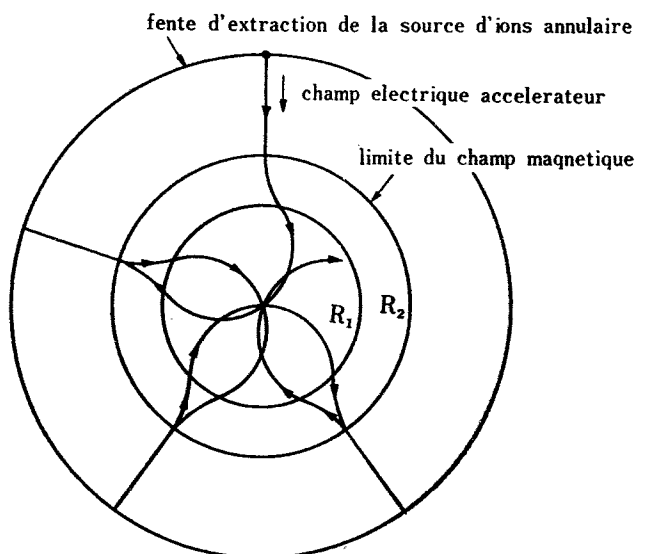
以上のことから磁場および加速電圧の偶発的な変化に耐えうる；基本的変数の系統的な探究が出来る；注入された束による空間電荷の存在下で運転が出来る；



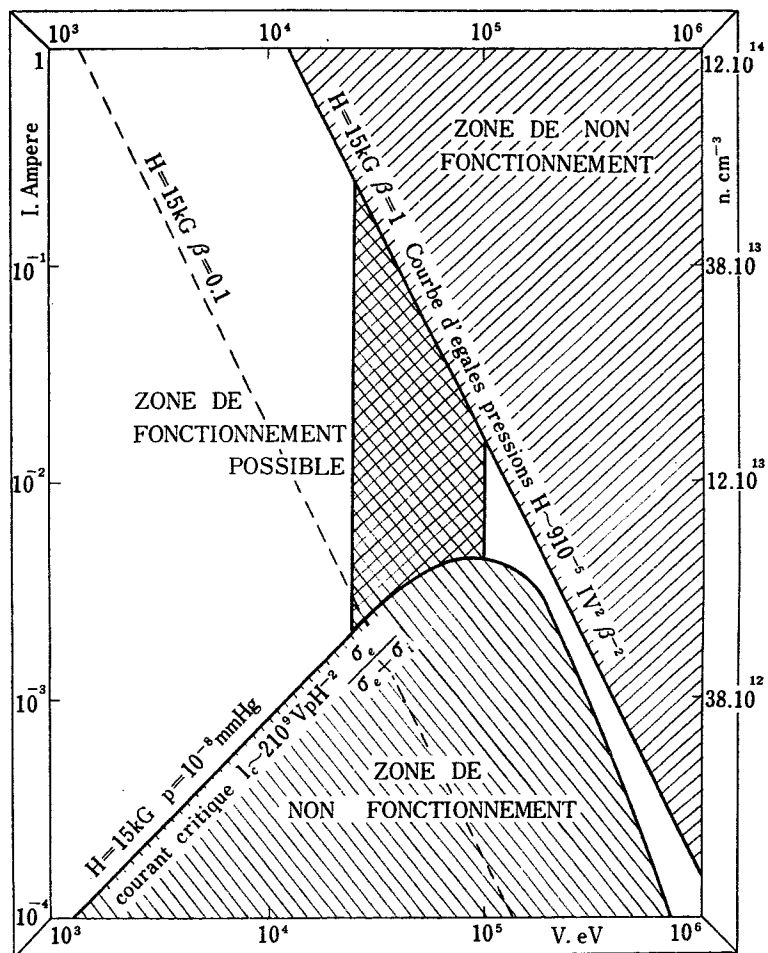
第1図



第2図



第3図



第 4 図

また、系の対象性と注入されたイオンの軌跡の収斂はプラズマの形成に導く、衝突による熱運動化の速さの見地から好ましい；また大きな寸法の環状源から引き出すイオン流は非常に強くし得る；等の利点を述べている。

第 4 図に仏国で意図している装置の動作図を示す。中央での磁場の強さは 15 kgauss, 加速電圧最大 200 kV, 圧力 10^{-8} mmHg, 縦軸は捕捉される D^+ イオン流, 横軸はそのエネルギーである。下方の斜線の山形

の部分は burnout しない範囲。右上方の斜線の範囲は $p_{\text{プラズマ}}/p_{\text{磁場}}=1$ を越す範囲。以上の間の部分が理論的に運転可能な範囲となる。分子イオンの加速が 200 kV であり、前に述べたように V_{ac} 最小は V_{ac} 最大の約 1/4 であるから基盤目の部分が動作しうる。 β は 0.1 から 1 の値を取りうることとなる。

文献: C. R. 249 (1959) 997; note SNE n° 27 (1959); note SNE n° 30 (1959); note DRP n° 45 (1959) note DRP n° 46 (1959)