

## (1) Fusion Science (核融合科学)

### I. はじめに

核融合研究開発は磁場核融合、慣性核融合の両者ともに着実に進展している。磁場核融合では、トカマクが世界の主流をなし、ヨーロッパの JET、アメリカの TFTR で三重水素を使った実験がおこなわれ、後者で 10 メガワットの核融合反応出力がえられ、入力 of 39% に達した。日本原子力研究所の JT-60U では 4 億度を越える温度を実現している。トカマク型国際核融合実験炉 ITER の工学設計も進み中間報告書が承認された。

また、慣性核融合では、大阪大学の激光 XII 号で固体密度の 600 倍圧縮が達成され、核融合燃焼を目的とした国家点火施設(NIF ; National Ignition Facility)、メガジュールレーザー (MLJ ; Laser Mega Joule) の建設が、それぞれアメリカ、フランスで決定され 2003 年よりの実験開始を目指して設計研究と R&D 研究が進められている。

このように核融合研究は大きく前進しているが、実用炉の実現には更なる炉心プラズマの研究とこれを支える人材養成が必要である。

核融合科学ネットワーク分科会では、磁場核融合、慣性核融合の現状と課題、ならびに大学における核融合研究の目標を整理し、炉心プラズマ研究・人材養成の効率化と基礎学術への貢献を推進するためのネットワークの構想をまとめた。

磁場核融合と慣性核融合は基礎となる物理、技術が異なるため、磁場核融合科学ネットワークと慣性核融合科学ネットワークを核融合科学ネットワークの中に構成する必要がある。

磁場核融合科学の研究には純粋プラズマ科学として興味深い課題も多く、新しい分野やアプローチを生み出すのに極めて重要であり、この立場で研究を行っている研究者も多いため、プラズマ科学の核融合物理関連の研究者を包含した形で運営する。

慣性核融合科学は、これに用いられるレーザーや粒子ビームおよびこれらにより拓かれる X 線レーザー等を含む量子ビーム科学と密接に関係し、相互に影響を及ぼしあって発展している。また、慣性核融合科学には、ドライバー技術、燃料ペレット技術の様な核融合炉工学と関係する課題が含まれると共に量子ビーム科学と深く関わっている。このため慣性核融合科学ネットワークにあってはこれらの研究者をも含めた形で構成する。

## II. 磁場核融合科学ネットワーク

### II-1. 磁場核融合科学ネットワークの必要性

磁場核融合炉開発において、ITER に代表されるトカマク型次期装置は非常に重要なステップであり、大半の核融合研究者はその早期実現を望んでいる。事実、日本の大学で行われている核融合研究にも、現段階や次期段階のトカマク装置での研究に貢献するものが多い。その一方、現段階で想定できるトカマク型核融合炉は、極めて大型であり、ディスラプション問題や先進燃料(重水素/ヘリウム3)炉への対応の難しさ等、主エネルギー供給源としては不満足な点も多い。また、ITER の工学設計にも見られるように、マージンが極めて少なく大幅な改良が期待できず、核融合炉工学の進展だけで満足な解決は得難い。

大学における磁場核融合科学の研究は、この点を考慮して、より一層研究を進め、次期段階の成功を確実にすべく支援するとともに、主エネルギー源に相応しい核融合炉を追及していく必要がある。このためには ITER に代表される現在のトカマク概念のみにとらわれない研究を基礎から築き上げることが肝要である。しかしながら、最近の磁場核融合科学の進展は著しく、様々な核融合方式に共通な事柄が多く見いだされており、各種方式の間に従来の多岐路線よりはずっと緊密な相互関連をもって有機的に研究を推進することが効果的である。更に、磁場核融合科学の進展と共に、基礎的なプラズマ科学や応用面との結び付きも増大し、関連のプラズマ科学研究者との連携も強めることが大切である。

現在核融合科学の研究に関わる各大学研究機関の目標は次のように集約される。

- (1) 「次期装置を含めて核融合燃焼を実現するために必要な条件を確立し、核融合プラズマの磁場閉じ込め機構への理解を深めること」
- (2) 「主エネルギー源として好ましくない状況を改善し、より経済的な炉を実現するための基礎を築き上げること」
- (3) 「より安全で環境に受け入れられやすい先進的核融合炉をめざすこと」
- (4) 「純粋な基礎科学としての視点」
- (5) 「教育・人材の育成」

大学における研究には、(4)を大切にしている面もあるが、個々の研究者が基礎科学と核融合開発のどちらをより強く意識しているかの差はあっても、ほとんどの研究が上記(1)-(3)のいずれかに貢献している。また、(5)の面でも、核融合関連に限らず、広範な分野に研究者や技術者を送りだし、日本の基礎科学・応用技術の推進に貢献している。

磁場核融合ネットワークは、このような状況を踏まえて、今後の磁場核融合科学への要請に応えるべく、適切な協力と調整を推進する機構を設立して、大きな研究機関から小さな研究機関を含めて、各研究機関の目標設立や目標達成を支援することを目的とする。

## II-2. 磁場核融合科学ネットワークの概要

### 1. 磁場核融合科学ネットワークの組織

磁場核融合科学ネットワークは、全国共同利用文部省核融合科学研究所に加えて、いくつかの大学の研究拠点を中心として、全国の磁場核融合科学関連の研究者で組織する。この組織においては、核融合科学研究所が全国共同利用研究所としてより一層の中核的機能を発揮することは勿論、このほか、京都大学グループ<sup>注1)</sup>、筑波大学プラズマ研究センターやセンター新設が提案されている九州大学応用力学研究所が夫々の役割を果たして拠点として機能する。更に、現在学内で検討が進められているいくつかの機関(東京大学、名古屋大学、大阪大学等)が新たな拠点として相応しい機能と役割を持った組織に成長することが期待される。

また、磁場核融合科学を推進するうえで、プラズマ科学の独自の発展を尊重しつつ両者の密接な関連を確立することは極めて重要である。その為に、核融合科学にも関連しそれ以外のプラズマ科学分野においても実績のある研究グループ(地域的バランスも考慮して、東北大学、名阪地区の研究機関、九州大学等の拠点)がプラズマ科学の窓口となって磁場核融合科学のネットワークに参加することが適切である。このように核融合科学研究所のほかにいくつかの機関が拠点として機能することにより、他の中小研究機関に属する研究者が、これらの機関を通じてより密接で実質的な関連をもって磁場核融合研究に寄与し、ひいては核融合科学研究所との共同研究を促進する結果になると期待される。(図1は、現状と核融合科学ネットワーク設置後に期待される様子を示したもので、線の太さは協力関係の強さを表す。)

(注1:平成8年度より京都大学ヘリオトロン核融合研究センターは改組されて、1部はエネルギー理工学研究所に、1部は大学院エネルギー科学研究科へ移行した。具体的機能については目下検討されつつあるが、その規模からして今後も引き続き拠点的役割を担うものと期待される。)

磁場核融合科学の研究に於ては、多くの研究が一つの重要課題だけでなく、複数の重要課題に強く関連しているため、夫々の拠点や各機関の役割を一元的に記述はできない。また、一課題に関連した機関を眺めたとき、磁場核融合科学のネットワークは、地域性を越えた全国的な連携機構でなくてはならない。実際、現在の情報・交通機能の発達は、以前効率的実行が困難であった全国的連携を可能としている。また、同様の課題を追及している世界中の研究機関との対応も、このネットワークの大切な役割である。

運営に関しては、磁場核融合科学ネットワークの事務局は核融合科学研究所に置くが、下記の委員で構成する委員会を設置して運営に当たる。

## 委員会委員

- ・各磁場核融合研究拠点(核融合科学研究所、及び、大学のセンターまたはセンターに準じる研究機関)の代表者
- ・その他の磁場核融合ネットワーク参加者の代表者若干名
- ・プラズマ科学の代表者若干名

## 2.磁場核融合ネットワークの機能

磁場核融合ネットワークの機能としては、全国の磁場核融合科学関連の研究者の指向や動向を汲み上げて、主要課題を検討してその課題に関連した機関・研究者の連携を深め、各研究機関の目標がより効果的に達成されるよう相互支援を行う。また、定期的にネットワーク活動を評価し、運営機構の再検討を行う。具体的な活動としては、下記の事項が含まれる。

- ・研究情報交換の効率化  
研究会の企画・調整
- ・共同研究の活性化  
計算機ネットワークの充実  
計測器等の共同開発の企画  
研究者・大学院生の交流の活性化
- ・研究拠点の充実整備支援
- ・基礎研究の活性化支援
- ・核融合炉工学との緊密化推進
- ・国際交流の推進
- ・若手教育の推進

現在のところこのネットワークに参加が見込まれている研究機関数は～80であり、その機関名リストは第II-4.節に付してある。

現在これらの研究者が携わっている研究で、今後連携を強めることにより一層の進展が期待される重要研究課題を下記に示すが、主エネルギー源としての核融合炉実現の為には、いずれも核融合科学として力を入れて研究し解決しなければならない課題を多く含み、また、炉工学との結び付きを強化して手を携えて解決に当たる必要がある課題も多い。この詳細については、次節に記述する。

1. 定常運転
  - 1a. 電流駆動機構
  - 1b. ディスラプション制御
  - 1c. 粒子維持機構
2. 定常磁場配位
3. 熱処理・不純物制御
4. 高ベータシステム
  - 4a. トーラス系高ベータシステム
  - 4b. 直線系高ベータシステム
5. 閉じ込め・輸送
6. 加熱
7. 先進的核融合
8. 核融合炉概念
9. 計測
10. 純粋科学としての興味

### II-3. 磁場核融合科学ネットワークの現時点での主要課題と協力機関

#### 1. 定常運転

定常運転は、将来の主エネルギー供給源としての磁場閉じ込め核融合炉を考える上で重要な要素である。次期段階で今までにほとんど経験がない長時間運転領域に入ることになるが、トカマク型次期装置における熱処理問題や電流のディスラプション制御は極めて厳しい条件であり、将来的にもディスラプションの全く起こらない確約は得られていない。このため次期段階を目指しての改善から、現在のトカマク型と異なる定常磁場方式の研究を含めた広い立場から取り組む必要がある。

トカマクにおける大きな課題は、高効率の電流駆動機構を用いた安定した長時間運転と高ベータで良い閉じ込め性能を持ったプラズマとの整合性の追及である。この場合、MHD安定性、粒子維持機構、自己励起電流、プラズマ・壁相互作用等色々な要素が複合的に関係してくる。このような総合的研究の出来る超伝導コイルトカマクは、現在のところ世界的にもほとんどなく、九州大学応力研究所の TRIAM-1M 装置での長時間運転の研究が貴重な貢献をもたらす。

また、核融合科学研究所においては、超伝導の世界最大の大型ヘリカル装置 LHD の完成があ

と 2 年余に迫り、定常磁場配位での運転に関する研究が大いに進展すると期待されている。ダイバータ・システム等ヘリカル型固有の点もあるが、総合的な定常運転という見地からは核融合装置一般に共通の課題が多く、ヘリカル系のみならず核融合研究全体への寄与も大きい。

このように定常運転には、総合的研究が大切であるが、その基盤には総合的研究を支える様々な要素の研究がある。特に、電流駆動機構、ディスラプション制御と粒子維持機構の研究は、多様なアイデアがあってまだまだ進展の余地があり、数多くの研究機関の主要な研究課題となっている。

#### 1a. 電流駆動機構

トカマクにおける電流駆動機構に関しては、電磁波による駆動や中性粒子入射による駆動に大きな進展があった。特に、九州大学応用力学研究所の TRIAM-1M、京都大学大学院理学系研究科の WT-3 トカマクや核融合科学研究所の JIPPT-2U トカマクでの成果が大型トカマクでの実験に応用され発展させられてきている。今後は、より良い効率の駆動を追及する研究が行われる。例えば、負イオン中性粒子入射やヘリシティ入射等これまでに試されていない機構の研究も期待される。

RFP、スフェロマク、FRC 等でも、磁場配位を維持するために、何らかの電流駆動機構が必要である。特に、東京大学大学院工学系研究科の TS-3 ではヘリシティ入射に関連した実験が行われており、夫々の特長を生かした電流駆動機構が色々な観点から追及されている。

#### 1b. ディスラプション制御

プラズマのディスラプションに関しては、多くの研究が行われて、ディスラプションを起こす要因は一つでなく、複数あることが分かってきた。トカマクなどプラズマ電流のディスラプションを伴う現象にもいくつかのタイプがあることが判明している。その一方、安全係数を非常に大きくとらない限り、完全にディスラプションが起こらない状態を保証することはまだ確立されていない。従って、電流分布や圧力分布の詳細とディスラプションとの関係を明らかにし、これらの分布を制御して、ディスラプションが皆無の状態を得る手立てを確立する必要がある。電流分布制御に関連する研究は核融合科学研究所(JIPPT-2U)、京都大学大学院理学系研究科(WT-3)、九州大学応用力学研究所(TRIAM-1M)、東京大学大学院工学系研究科(REPUTE)等で行われてきている。また、ディスラプション時の熱負荷等悪い影響を低減することも、核融合炉に到達するまでの道筋を容易にする意味で大切な研究である。この意味で、この課題は 1a, 1c や 3 との関連も深い。

#### 1c. 粒子維持機構

粒子維持機構としては、ガス入射、ペレット入射、中性粒子ビーム入射などが通常的手段として

用いられてきたが、今後の大型装置への適用を目指す研究も多い。また、コンパクト・トーラス、スフェロマク等では、磁場配位の形成・維持のために、プラズマガンなどを利用してプラズマを入射し、プラズマの圧力を活かした入射方法の研究が行われている。これは、トカマク、ヘリカル、ミラーなどへの粒子補給法とも強く結び付いており、興味ある課題として研究を深めるに値する。

## 2. 定常磁場配位

定常核融合炉を実現する方策として、トカマク等とは異なる外部導体系の定常磁場配位方式がある。トーラス型の代表がヘリカル系で、直線型の代表がミラー系であるが、電流に起因したディスプレイションが存在しないという大きな利点を有する。ヘリカル系の研究は、これまで京都大学(旧)ヘリオトロン核融合研究センターのヘリオトロン E や核融合科学研究所の CHS を中心に進められてきたが、超伝導コイルを用いた大型ヘリカル装置 LHD の完成が 2 年後にせまり、世界を代表する本格的ヘリカル系核融合実験装置での定常運転実証に期待が高まっている。これらの平面軸配位とは異なるヘリカル軸配位の実験は、東北大学大学院工学系研究科で進められている。また、これらをサポートする新しいヘリカル装置が、核融合科学研究所や京都大学で検討されてきている。

ミラー系は、開放端系であるので端損失制御が重要な課題であり、最近の研究は電位閉じ込めを加味したタンデムミラーに代表される。筑波大学プラズマ研究センターの世界最大の稼働中のタンデムミラー装置 GAMMA10 を中心に研究が進んでいる。ヘリカル系やミラー系等の外部導体系は、定常磁場配位であるので、駆動機構を必要としない利点があるが、非軸対称磁場配位中での粒子の運動、特に捕捉粒子や、プラズマ中の電場の影響など検討すべき課題がある。また、プラズマの圧力に起因する磁場変化や不整磁場なども考慮した磁場配位の最適化も追及されている。

定常磁場配位の場合にも、密度や電位をいかに定常的に維持するかは重要な課題であり、長時間に亘る不純物の振る舞いとその影響を調べることも今後の課題である。

## 3. 熱流処理

核融合炉においては、加熱パワーは勿論、核融合反応熱も定常的に処理できる機能が必要となる。トーラス系におけるこの条件は大変厳しく、ITER でも最大の課題の一つとなっている。特に、ただ単に熱流を処理するだけでなく、プラズマ・壁相互作用を通して炉心プラズマへの影響が無いようにしなければならない。この問題を解決すべく、種々のダイバータ方式が研究されているが、まだ十分な回答が得られていない。ITER 等で用いようとしている一つの方向は、ダイバータ前面に非常に低温の領域を設けて熱の放射により拡散させる方法であるが、十分な放射が得られるかどうか、放射領域を設けることにより、中性粒子等がプラズマ閉じ込めに影響しないかどうか確認されなければならない。

プラズマ閉じ込めへの影響の可能性を考慮すると、ダイバータ前面を高温にしたまま熱流処理ができることが望ましい。これを目指した先進的高温ダイバータの研究も進められている。

総合実験としては、核融合科学研究所や九州大学応用力学研究所の実験装置が中心となるが、ダイバータを模擬する実験やコンピュータ・シミュレーションは名古屋大学大学院工学研究科、北海道大学工学部、東京大学大学院工学系研究科、九州大学総合理工学研究科などかなりの大学で行われている。また、ダイバータ付近の計測なども研究されている。

熱流処理そのものではないが、関連した重要な事柄に核融合反応生成物としての中性子束への対応がある。核融合科学研究所の LHD では 3 重水素の使用は予定されていないが、重水素使用の場合でも定常運転となると、中性子束の積分量としてこれまでの核融合装置における経験を越えることとなり、貴重なデータが得られる。

#### 4. 高ベータシステム

##### 4a. トーラス系高ベータシステム

現在想定されるトカマク炉の一つの欠点として、経済性が指摘されている。経済性を決める要因の一つはベータ値(プラズマの圧力と磁場の圧力の比)である。トカマクのベータ値を決めているものはプラズマの安定性限界であるが、現在の限界を打ち破る可能性が球状トカマク(低アスペクト比トカマク)として提案されている。小規模の実験がイギリスで行われ、これに刺激されて米国、韓国などで新たな実験が計画されている。日本では東京大学理学部での小規模の球状トカマク実験装置 TST で高ベータの追及が始められているが、プラズマの閉じ込め性能も追及出来る規模の実験が望まれ、核融合科学研究所をはじめとていくつかの研究機関で検討されている。また、手段は異なるが、同様の目的で電磁波を用いた動的制御によるトカマクの安定性改善などが研究されている。

ヘリカル系でも同様にベータ値の高い磁場配位が望まれ、理論的検討がなされている。核融合科学研究所での LHD 実験の進展につれて、ヘリカル系とトカマク系との高ベータ特性に関する比較検討が出来るようになることも大切である。

RFP では、外部コイルから供給しなければならないトロイダル磁場が小さくてすむ利点があり、この利点を生かした核融合炉の基礎研究が東京大学(REPUTE)、名古屋大学(STP-3M)、京都工芸繊維大学、日本大学、岩手大学等で進められてきている。トカマクと RFP との中間領域である ULQ も東京大学の REPUTE で研究されており、その構造の詳細が明らかにされてきている。これらの研究は、プラズマの安定性やプラズマの輸送機構を理解するうえでも役だっており、この面で他のトーラス系との一層の連携が期待されるが、RFP 方式自体の最重要課題としては、磁場配位維持や閉じ込め・輸送の問題解決がある。なお京都工芸繊維大学では世界に先駆けてポロイダルダイバータ付 RFP 配位を実現している。

#### 4b. 直線系高ベータシステム

直線系システムでは、原理的にトーラス系よりも高いベータのプラズマが安定に得られることが予測され、この特徴を活かしてトーラス系とは異なる核融合炉の可能性が追及されている。その磁場配位としてはミラー(タンデムミラー)や FRC があり、タンデムミラーでは 1 億度のイオン温度(GAMMA10)や 10%を越えるベータ値(HIEI)が得られており、更に高温・高密度を目指した研究が進められている。

また、FRC では、100%に近いベータ値のプラズマを形成し、その安定性の研究や移送・定常維持といった問題が大阪大学工学部超高温理工学研究施設や日本大学理工学部等で追及されている。両者とも究極の目標を重水素・ヘリウム 3 核融合炉において研究を進めている。

#### 5. 閉じ込め・輸送

閉じ込め・輸送の課題は核融合研究の初期から継続的に重要な課題である。まだ第一原理から理解されていない面も多いが、最近の H モードの発見などに刺激されて新しい展開が見られる。

閉じ込め実験にはある程度の規模の実験装置が必要であり、核融合科学研究所の LHD 装置の完成も間近となって、これに大きな期待が寄せられている。特に最近の閉じ込め研究は主にトカマクが中心であるので、LHD の完成は新しい視角を広げ、ヘリカル系に限らずトーラス系全体の理解に寄与すると期待される。また、理論面でも活発な研究活動が行われている。

体制改組で新たにスタートする京都大学エネルギー理工学研究所は目下今後の企画を検討中だが、研究所付属施設のエネルギー複合機構研究センターを中心にトーラスに関する閉じ込め・輸送の研究を手掛ける可能性が高い。

タンデムミラーでも、電位閉じ込めが進むにつれ、磁場を横切る輸送が究明出来るようになり、H モードやエータ・アイ・モードなど共通の課題や、直線系とトーラス系での輸送の比較検討といった面で貢献が期待できる。

また、いくつかの大学で内部導体系を利用した閉じ込め・輸送の基礎研究も再検討されている。この領域は、後に述べる純粋科学の立場からも興味ある課題が多く、大学での研究課題として遣っている。

#### 6. 加熱

加熱に関しては、オーム加熱、ピンチ加熱、中性粒子ビーム加熱、電磁波加熱等、外部加熱法が用いられてきたが、核融合装置の大型化や強磁場化、そしてプラズマの高温・高密度化に伴い、これに適応できる効率の良い加熱法の追及が必要となってきた。中性粒子ビーム加熱のための負イオン源開発、サブミリ波源としてのジャイロトロン開発などが代表的例であるが、プラズマ粘性を利用した新しい手法の開発等も研究され、核融合点火に必要なパワーを供給するという点では、かなりの見通しがつくようになってきた。しかしながら、より効率の高い経済的な加熱とい

う点ではまだまだ改善が必要である。更に、最近の核融合プラズマは安定性や閉じ込めの観点から特定の径方向温度分布が要求されるので、これに適合した効率良い加熱法が研究されねばならない。

このような視点から、核融合科学研究所を中心として、山口大学工学部、京都大学等のいくつかの機関が協力して中性粒子加熱のためのイオン源の開発が行われている。高周波加熱に関しても、ECH, ICRH, LHH等の加熱技術や加熱機構に関連した研究が核融合科学研究所、筑波大学、九州大学、京都大学、岡山大学工学部等で行われている。また、磁場配位形成等に関連してプラズマ自体に存在する加熱機構の利用や解明を狙った研究がRFP, ULQ、あるいはFRCなどで追及されている。

## 7. 先進的核融合

核融合炉の安全性に関しては、原子炉とは異質で極めて安全と考えられているが、燃料としての三重水素や、生成物の中性子による誘導放射能の取り扱いには注意を要する。特に、重水素・三重水素核融合炉においては、放射能レベルは遥に低いものの生成される誘導放射物質の量は原子炉と余り変わらない。このため重水素・ヘリウム3反応を用いた先進的核融合炉研究を進めたいという声が次第に高まっている。重水素・ヘリウム3炉は、重水素・三重水素炉に比べて少なくとも数倍高いプラズマ温度を必要とするので、更に高ベータシステムになり、通常のトラス系では困難と考えられている。従って、ミラーやFRCを中心に研究が進められている。先進的核融合を目指した研究とは言え、その過程においては重水素・三重水素核融合と共通の課題も多く、また、核融合開発は数段階を必要とする長期的なプロジェクトであるので、現在基礎研究を固めておかないと急な要望には答えられない。

タンデムミラーの実験では、閉じ込め電位の形成・維持の研究が進んでおり、磁場を横切る輸送も解明されつつある。これらの課題が解明されるにつれ、実験のデータベースに基づいた先進的核融合炉(重水素・ヘリウム3炉)としての概念設計の検討が必要な段階に来ている。

FRCは大阪大学工学部(FIX-FRC)、日本大学理工学部(NUCTE)、東京大学等で実験が行われているが、現在の課題は磁場配位の維持やプラズマ加熱等の基礎研究にある。実験と平行してFRCに基づいた重水素・ヘリウム3核融合炉の概念設計が進められており、これを支える閉じ込め則等のデータベースを実験的に確立することが必要である。重水素・ヘリウム3核融合生成物が荷電粒子である特徴を活かした高効率のエネルギー変換も研究されている。

また、重水素・ヘリウム3核融合炉をトカマクに基づいて設計した場合のトカマクに要求される条件なども検討されている。これらの磁場閉じ込めとは異質のスピンの偏極を利用して核融合反応率を高め、重水素・ヘリウム3核融合を実現しようという研究が九州大学と名古屋大学工学研究科で行われている。この先進的核融合研究の領域では、これまでの概念にとらわれない斬新なアイデアを要する面も多く、色々な方面の研究者と一緒に議論する場が大切である。

## 8. 核融合炉概念

核融合炉概念を研究することは、核融合科学の立場からも大変重要である。とくに、特定の炉の長所・欠点を知り、その改善の為に必要な科学的要素を解明することは、実験計画にも指針を与える。

トカマク核融合炉概念に関連した研究がいくつかの大学で行われている。特に、核融合炉早期実現のシナリオ構築を目指した核融合炉の概念設計(IDLT)が東京大学大学院工学系研究科で推進されているのを始めとして、東京工業大学、京都大学でも先進的トカマク型核融合炉の設計研究が実施されている。また、ヘリカル炉概念に関しては核融合科学研究所でLHD設計をベースとしての概念設計(FFHR,MHR)が開始されている。さらに、直線系を基礎とした重水素・ヘリウム3炉に関する研究も筑波大学や核融合科学研究所などで概念設計が行われている。そのほか、灰処理やエネルギー変換に関する色々な考察がなされており、次第にその実験的テストも可能な状況になってきている。

今後は、互いの長所・短所を比較検討して各方式の追及すべき道を明確にすることも大切となる。

## 9. 計測

最近の核融合科学の研究では、データの精密化が進んで、研究の進展が計測の進歩に拠るところが大きい。核融合の進展にともない、対象となるプラズマの高温高密度化、規模の拡大に応じた計測の開発が必要となり、計測はかなり大きなプロジェクトとなる場合が多くなってきている。一方、計測技術は個々の装置の特性に合わせて作り上げる必要もあるが、基礎技術は多くのグループで分かち合うことが出来る故、共同開発に適している。このような意味で、技術を共有できる専門家(グループ)を中心とした協力体制が育ってきている。特に、九州大学総合理工学研究科、中部大学工学部、福井大学工学部、富山県立大学工学部等では独自の計測技術を育てており、核融合科学研究所等との共同研究においてその成果が生かされてきている。

## 10. 純粋科学としての意義

核融合科学の研究には純粋科学として意義深い課題も多く、この立場で研究をしている大学の研究者も多い。これらの基礎研究は、核融合開発研究の理解を深めたり、新しい分野やアプローチを産み出すのに極めて大切である。また、核融合開発や近接科学(例えば、宇宙物理、プラズマ応用等)と密接に結び付いている課題も多い。

主要な例としては、自己組織化、カオスやその他の非線形現象と、非平衡系の科学がある。自己組織化はRFPのダイナモ現象に関連して研究が進み、ヘリシティと対称性の関係、異常加熱現象との関係、MHDモードの非線形効果の役割などが実験と理論・シミュレーションにより明らかになってきている。例えば、ULQ配位は太陽コロナやサブストームのフラックスループに

極めて近い磁力線構造を持っており、宇宙や天体のプラズマ現象を模擬する事も可能である。その他、非線形現象はプラズマの輸送を理解するのにも重要である。プラズマは夫々が準平衡状態にあるいくつかの系から成り立つと考え得る場合も多く、これらの系間の相互作用を考えるとしばしば非平衡状態にあり、非平衡状態を扱う手法の確立が必要となる。例えば、プラズマ中の電場形成と閉じ込め改善への遷移については、物質の相転移の物理と関連づけて議論が深められてきている。このほか非中性プラズマやビームプラズマも科学的に重要な研究課題である。

厳密にはほとんど全ての核融合科学の研究がなんらかの意味でこれらの純粋科学に関連している。特に純粋科学を意識した立場で研究を遂行している研究者も多数いるが、この人々の核融合研究への貢献も極めて大きい。

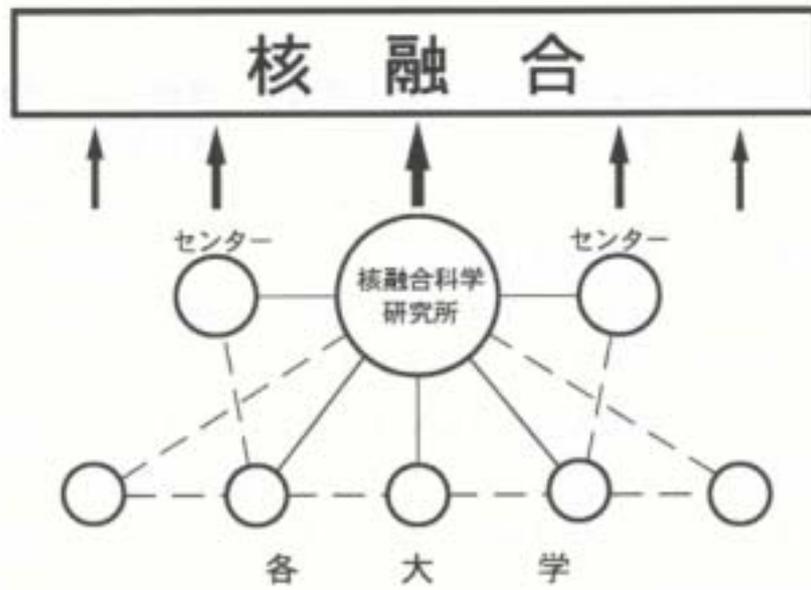
#### II-4. ネットワークに参加が期待される研究機関

磁場核融合科学ネットワークに参加が期待される研究機関は約 80 機関があり、平成 8 年度から始まった LHD 計画共同研究を契機として磁場核融合ネットワークの一部が構築されつつある。更に広い連絡網やより緊密な研究協力体制の整備・強化が現在望まれている。

北海道大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻  
八戸工業大学工学部  
岩手大学工学部電気電子工学科  
東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻  
東北大学大学院工学研究科電子工学専攻  
東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻  
東北大学電気通信研究所  
新潟大学理学部自然環境科学科  
新潟大学工学部  
宇都宮大学工学部電気電子工学科  
群馬大学工学部電気電子工学科  
茨城大学工学部電気電子工学科  
筑波大学プラズマ研究センター  
筑波大学物理学系  
東京理科大学理工学部  
早稲田大学理工学部電気学科  
東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻  
東京工業大学原子炉工学研究所  
成蹊大学工学部  
中央大学総合政策学科  
日本大学理工学部原子力研究所  
日本大学理工学部物理学科  
日本大学文理学部物理学科  
東海大学理学部物理学科  
慶応大学理工学部計測工学科  
北里大学医学部  
東京商船大学流通情報工学科  
東京大学大学院工学系研究科システム量子工学専攻  
東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻  
横浜国立大学工学部  
自治医科大学一般教養部門物理学教室  
山梨大学工学部  
静岡大学理学部物理学科  
静岡大学工学部  
信州大学工学部  
長岡技術科学大学工学部電気系  
富山県立大学工学部電子情報工学科  
金沢大学理学部  
金沢工業大学工学部電気電子系  
福井大学工学部応用物理学科  
岐阜大学工学部電子情報工学科  
岐阜薬科大学基礎教育大講座物理  
文部省核融合科学研究所  
大同工業大学  
中部大学工学部工学基礎教室  
豊田工業大学工学研究科  
名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻  
名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻  
名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻  
名古屋大学理工科学総合研究センター総合エネルギー科学部門  
三重大学教育学部  
京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科  
京都大学エネルギー理工学研究所  
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻  
京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻  
京都大学大学院工学研究科物理工学専攻  
京都大学大学院工学研究科電子物性工学専攻  
京都大学総合人間学部  
同志社大学工学部  
大阪市立大学工学部  
大阪産業大学工学部電気電子工学科  
大阪大学レーザー核融合研究センター  
大阪大学工学部超高温理工学研究施設  
大阪大学工学研究科  
姫路工業大学電気工学科  
岡山大学工学部電気電子工学科  
広島大学理学部  
広島大学工学部  
山口大学工学部電気電子工学科  
九州大学応用力学研究所  
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻  
九州大学工学部  
福岡教育大学  
佐賀大学理工学部  
長崎大学工学部  
熊本大学工学部  
九州東海大学電気工学科

# 現 状



# 核融合科学ネットワーク

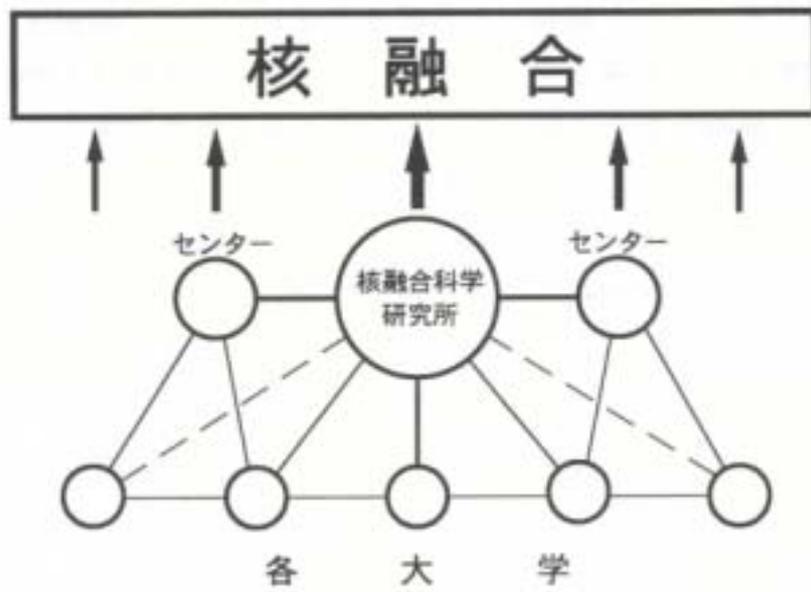


図 1

### III. 慣性核融合科学ネットワーク

#### III-1. 慣性核融合科学ネットワークの必要性

核融合炉の実現のための炉心プラズマの研究課題は、爆縮により燃料を固体密度の千倍以上に圧縮すること、およびこのプラズマに点火し燃料全体を効率良く燃焼させるためのホットスパーク(イグナイター)を圧縮プラズマの内部に形成することである。この両者に関係する主要な物理はレイリー・テイラー不安定性を中心とする流体不安定性で、燃料ペレット表面へのエネルギー付与の一様性に支配される。これまで、炉心プラズマ研究は技術的に最も進んだ Nd 固体レーザーをエネルギードライバーとして研究が進められ、点火に必要な温度 5keV を上回る 10keV、および固体密度の 600 倍圧縮が個別に実現されるまでになった。このような状況を受け、アメリカ、フランスでは高いエネルギー付与の一様性が得られると考えられている間接駆動爆縮法による核融合点火燃焼計画が進展している。

この核融合点火をこれまでに得られた知見を基に間接駆動爆縮法よりも効率の良い直接駆動爆縮で実現するためには、燃料ペレットへのレーザー照射の不均一を 1%以下に抑えた出力 300kJ 程度の高精度レーザーが必要であると評価されている。しかし、最近実用化が可能になってきた超短パルス超高輝度レーザーで高密度に爆縮された燃料プラズマを追加熱する「高速点火法」が実現するとこの条件は大幅に緩和される可能性がある。さらに爆縮性能を支配している流体不安定性や超高密度プラズマの状態方程式(equation of state)、エネルギー輸送に関するデータベースの精度を上げ、確度の高いシミュレーションコードを開発することにより米国、フランスで進められている計画よりも魅力的な慣性核融合エネルギー開発のシナリオが描ける可能性がある。

より魅力的な慣性核融合のシナリオを作成してそれに必要なデータベースを構築するためには、レーザー(粒子ビーム)と物質との相互作用、超高密度プラズマの物性、流体不安定性という広い立場でアプローチし、これらの研究を通して得られた知見を核融合という立場で整理する必要がある。大学の講座、研究者レベルで行われている研究手法はまさにその様なものである。このため慣性核融合を直接指向して大規模に研究を進めている中核研究機関を核とする研究組織を構成して多角的に研究を進めることが重要である。

また、慣性核融合の実用化にはレーザーを初めとするエネルギードライバー、爆縮の物理に関する広い知見を持った後継者を養成する必要がある。大学における核融合研究の使命はこの後継者の養成も大きな比重を占める。しかし各研究グループ単独での養成では広い視野をもった後継者の養成には限界があるためネットワークを通しての研究交流の活発化が必要である。

慣性核融合ネットワークは上記のような機能が発揮できるもので、各研究グループの研究を相互協力の下に相互支援を行い、それらグループの成果を核融合という立場で纏め慣性核融合科学として集約するとともに、広い立場で科学に取り組む素養を身に着けた人材を養成しようとする

ものである。

### III-2. 慣性核融合科学ネットワークの概要

慣性核融合科学ネットワークは我が国の慣性核融合の中核研究機関である大阪大学レーザー核融合研究センターを核として量子ビーム研究者をも含めて組織する。ここで云う量子ビーム科学は、高出力・超高輝度レーザーや高エネルギー粒子ビームならびにこれらを用いて行われる X 線レーザーや粒子加速を初めとするレーザーと物質との相互作用の研究および超高エネルギー密度科学等の研究領域で、炉心プラズマの理解と高度化に深く関係する分野である。

超高輝度レーザーは高密度に圧縮された燃料プラズマを極短時間に局所的に追加熱してイグナイターを形成する新しい「高速点火」方式の研究に不可欠であるばかりでなく、このレーザーと物質との相互作用により得られる知見は追加熱の物理機構の解明と深く関わっている。さらに、レーザーや高エネルギー粒子ビームにより作られる高エネルギー密度状態の物性研究、衝撃波による状態方程式の研究も爆縮物理の理解に不可欠であり、これらの研究者を含めたネットワークの構成が重要である。また、炉心プラズマ研究用のエネルギードライバー(レーザー、粒子ビーム)や燃料ペレットは実用炉を目指したエネルギードライバー技術、燃料技術と深く関わっているため核融合炉工学ネットワークの慣性核融合炉工学サブネットワークと連携を保ち運営する。(図 2 は慣性核融合ネットワークでの大学研究グループ等および慣性核融合炉工学サブネットワークとの繋がりを示している。線の太さは結び付きの強さをしめす。)

運営に当たっては、慣性核融合科学ネットワークの事務局は大阪大学レーザー核融合研究センターに依頼するものとし、ネットワーク参加者の代表若干名で調整委員会を構成し、全国の研究者の意見を汲み上げて主要研究課題を検討して、その課題に関連した研究機関・研究者の連携を深め、各研究機関の目標が効果的に解決されされるように相互支援する。具体的活動には、情報ネットワークを利用しての情報交換の活性化と海外情報の共有化、研究会の企画・調整、計測器やソフトウェアの共同開発と相互利用を含む共同研究・共同プロジェクトの立案、その発展としての中核研究拠点の形成、大学院学生の交流の活性化が含まれる。

当面の対象課題は以下に示すもので、何れも慣性核融合炉心プラズマの理解と制御に関する重要テーマであるとともに関連先端科学の発展にとって貢献するものである。それぞれの内容については次節で述べる。

#### 1. 流体不安定性の制御

1a. 流体不安定性のスタートアップ問題、流体不安定性の成長率の定量評価、乱流混合のモデル化と定量評価

1b. 流体不安定性の制御に関する燃料ペレット設計

- 1c. 照射均一性を初めとするドライバービームの制御
2. 超高密度プラズマの物性
  - 2a. 状態方程式 (equation of state)
  - 2b. エネルギー輸送
  - 2c. 輻射輸送と輻射スペクトルのモデル化
3. 粒子加熱と核融合燃焼
  - 3a. 超高密度プラズマ中での 粒子の輸送
  - 3b. 核融合燃焼波 (爆燃波) の伝播
4. 高速点火の物理
  - 4a. オーバーデンス領域へのレーザー伝播とホールボウリング (hole boring)
  - 4b. 超高輝度レーザーによるオーバーデンスプラズマの加熱
5. 爆縮統合コードの開発
6. 粒子ビーム核融合
7. 超高密度プラズマの計測診断技術
8. 基礎科学、応用科学としての興味

これらの研究テーマに関係する研究者が所属する研究機関は 37 大学、5 国立研究所、1 財団法人の 43 機関(51 学部研究所)である。

### III-3. 慣性核融合科学の現時点での主要課題

#### 1. 流体不安定性の制御

燃料ペレットや照射レーザーに不均一があると、加速時に燃料ペレットの外表面で流体不安定性が発生してシェルのブレイクアップが起る。一方、爆縮の最終段階の減速相ではシェルの内面で流体不安定性が起り中心に出来るホットスパークが破壊される。これまでの研究でホットスパークのみを形成する条件、中心にホットスパークを持たない超高密度プラズマを生成する条件が明らかにされた。しかし、エネルギー生成に必要な高い利得を発生させるためには中心にホットスパークを持つ超高密度プラズマの発生が必要である。このためには流体不安定性の種となる物理機構の解明(スタートアップ問題)、流体不安定性の成長率の定量評価とその飽和状態での乱流混合の定量評価を行う必要がある。さらに、その成果を実用化するためには流体不安定性を抑制する燃料ペレット設計やレーザーの照射方法の研究が重要で、その解決のためにはプラズマ物理、燃料ペレット、レーザーの研究者が協力して総合的に取り組む必要がある。

#### 2. 超高密度プラズマの物性

爆縮により達成される超高密度プラズマは電子縮退プラズマで、その状態方程式は未だ十分に

定量化されていない。この状態方程式は爆縮の時間発展、すなわち照射レーザーの波形やエネルギーに関係するため精度の高い定量化が必要である。さらにエネルギー吸収領域から高密度領域および高密度領域内での電子によるエネルギー輸送や X 線輻射輸送により爆縮プラズマの終状態が変化するばかりでなく、流体不安定性の成長率も変化する。これらエネルギー輸送に関する定量化が進められてきたが、炉心プラズマ生成条件の確定には未だ不十分で、今後高い精度で爆縮を記述出来るエネルギー輸送のモデル化が必要である。

### 3. 粒子加熱と核融合燃焼

イグナイターで核融合反応により生成された粒子による縮退プラズマの加熱効率(ストップングパワー)、これにより発生する核燃焼波の振る舞いは核融合燃焼率を決定する重要な物理過程である。粒子のストップングパワーに関しては理論的研究が色々行われているが、未だ縮退超高密度プラズマ中でのストップングパワーに関する精度の高いデータはない。このストップングパワーが変化すると核融合燃焼波の振る舞い、ひいては燃焼率に影響するためこれからの重要な研究課題である。

### 4. 高速点火の物理

これまで中心に進められてきた等圧圧縮により爆縮プラズマの中心にイグナイターとなるホットスパークを持つ超高密度プラズマを生成して高利得を発生する方法は物理的に自然でオーソドックスな方法であるが、流体不安定性の制御のために燃料ペレット表面への高いエネルギー照射の一樣性が要求される。しかし、既に実証されている低温の超高密度プラズマをまず生成しておき、次いでこのプラズマの一部を最近その進歩が著しい超高強度のピコ秒レーザーパルスで点火温度まで追加熱する高速点火方式が実現すると燃料ペレット表面へのエネルギー付与の一樣性が緩和されるばかりでなく、より小さいドライバーエネルギーで大きな利得を発生出来る可能性がある。このためには超高輝度レーザーとプラズマとの相互作用の研究、高密度領域へレーザー光を伝送するための伝送路形成(ホールボウリング(hole boring))の機構等を解明する必要がある。これには超高輝度レーザー研究者とそのプラズマ・物性研究への応用研究者(量子ビーム研究者)との密接な情報交換共同研究が必要である。

### 5. 爆縮統合コードの開発

慣性核融合では個々の物理を個別的に研究することが可能で、それらを組み合わせることにより精度良く爆縮過程をシミュレーション出来る。これまでコード開発は研究者個々独立行われてきたが、ネットワークにより互いに協力して進める必要がある。このコードの妥当性の評価には核融合点火プラズマと等価な小規模プラズマを準備する必要があるが、ネットワークの中核研究機関に設置することで可能になる。その装置規模は現在の「激光 XII 号」レーザーを一回り大き

くした出力 50-100kJ クラスのものとなろう。

この爆縮統合コードの開発はネットワークでのプロジェクト研究の格好のテーマであり、その実現により慣性核融合の実用化へのシナリオを明確にすることが出来る。

#### 6. 粒子ビーム核融合

軽イオンビーム、重イオンビームは発生効率が高くとれる可能性を有しているため、実用炉用のエネルギードライバーとして研究が進められてきた。この粒子ビームドライバーの実用化に関しては炉工学の課題ではあるが、燃料ペレットとの相互作用に関してはレーザーのそれとは異なるため、ビームプラズマ相互作用の研究を既存の装置を活用(改造を含む)して多角的に展開する必要がある。

#### 7. 超高密度プラズマの計測診断技術

物理の理解には診断技術の高度化が不可欠である。慣性核融合が必要とする計測装置は他の領域で開発利用されているものの性能を遥かに越えたものが要求される。これまで各研究者がそれぞれの研究に必要なものを個別に開発してきたが、ネットワークを構成して計画的に開発し、互いに融通し合うことにより効率化が図れる。

#### 8. 基礎科学、応用科学としての興味

爆縮により生成される超高密度プラズマはこれまで実験室では実現しえなかった物質状態であり、それ自体基礎物理学としても興味ある対象である。特に、爆縮の終状態は超新星爆発での星の崩壊爆発過程との類似性が高いばかりでなく、爆縮超高密度プラズマ(物質)中でのエネルギー輸送は星の内部でのエネルギー輸送の研究にも有用である。また、超高強度レーザー、超短パルスレーザーと物質との相互作用はそれ自体基礎科学として興味或る問題であるばかりでなく核融合の高速点火に関係する物理と密接に関係している。さらに、超高エネルギー密度プラズマ・物質状態を新材料の研究に応用する研究がレーザー、粒子ビームを用いて進められている。これらの研究に携わる研究者も多く、これらの研究者とネットワークを通して研究を進めることは慣性核融合研究の基盤の充実に有効であるばかりでなく、新しい学問領域の開拓に繋がる。このためこれらをも含めた形でのネットワークの構成が重要である。

### III.4. ネットワークに参加が期待される研究機関

慣性核融合科学ネットワークに参加が期待できる主な国内研究機関は以下の 43 機関である。国際協力も一部既に行われているが、連絡網、研究協力体制を整備して一層の国際協力をネットワークの一環として進める必要がある。

北海道大学大学院工学研究科  
東北大学流体科学研究所  
新潟大学工学部電気工学科  
長岡技術科学大学  
茨城大学工学部電気工学科  
宇都宮大学工学部電気電子工学科  
高エネルギー研究所  
東京大学物性研究所  
東京工業大学大学院総合理工学研究科、原子炉工学研究所  
電気通信大学レーザー極限技術研究センター  
北里大学理学部  
東京農工大学工学部  
東京学芸大学  
慶応義塾大学理工学部電気工学科  
早稲田大学工学部  
東海大学工学部  
山梨大学工学部  
豊橋技術科学大学  
豊田工業大学  
核融合科学研究所  
名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻  
中部大学工学部  
岐阜大学工学部電子工学科  
福井大学工学部  
京都大学大学院工学研究科  
大阪大学レーザー核融合研究センター、大学院工学研究科、大学院理学研究科、基礎工学部、  
接合科学研究所  
大阪市立大学工学部、理学部  
大阪工業大学  
近畿大学理工学部、工学部  
摂南大学工学部  
大阪電気通信大学  
大阪産業大学  
(財)レーザー技術総合研究所  
奈良女子大学理学部  
神戸商船大学  
姫路工業大学理学部、高度産業科学技術研究所  
岡山大学工学部電気工学科  
九州大学工学部、総合理工学研究科  
熊本大学工学部  
宮崎大学工学部  
電子総合技術研究所  
理化学研究所  
日本原子力研究所関西研究所(光量子科学センター)

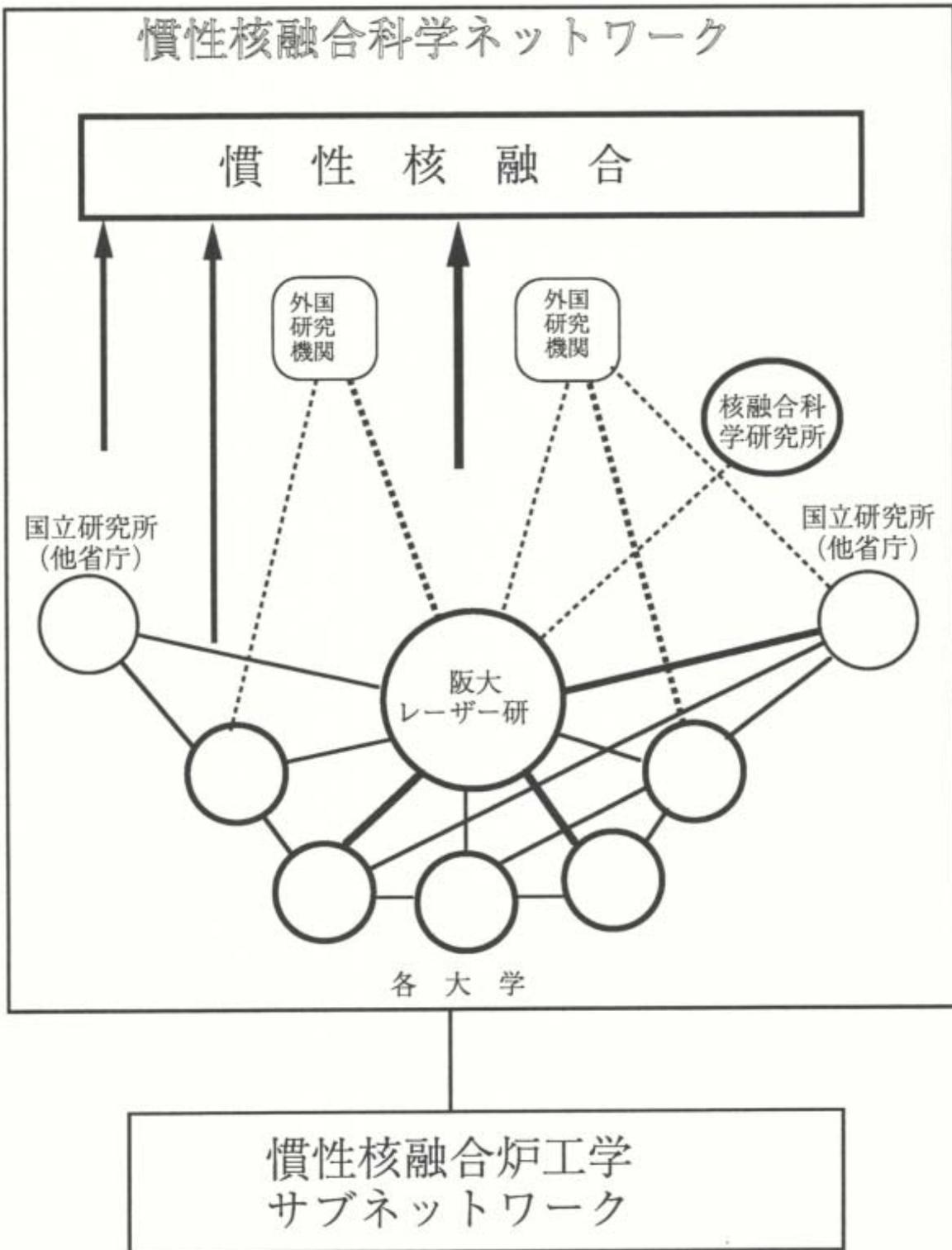


図2 慣性核融合ネットワークの構成、各研究グループの繋がりの様子