

核融合研究連絡委員会報告

核融合炉工学「共同研究拠点」の整備について

平成6年2月25日

日本学術会議（第15期）

核融合研究連絡委員会

この報告は、第15期日本学術会議核融合研究連絡委員会の審議結果を
取りまとめて発表するものである。

委員長	関口 忠 (第4部会員)	東京大学名誉教授
幹事	井上 晃	東京工業大学原子炉工学研究所教授
	井上信幸	東京大学工学部教授
委員	伊達宗行 (第4部会員)	日本原子力研究所 先端基礎研究センター長
	家田正之 (第5部会員)	愛知工業大学教授
	内藤奎爾 (第5部会員)	名古屋大学名誉教授
	飯吉厚夫	核融合科学研究所長
	石野 栞	東京大学工学部教授
	岡田重文	東京大学名誉教授
	住田健二	大阪大学工学部教授
	田村早苗	日本原子力研究所那珂研究所長
	中井貞雄	大阪大学 レーザー核融合研究センター長
	山科俊郎	北海道大学工学部教授

核融合炉工学「共同研究拠点」の整備について

(要 旨)

1. 核融合炉工学（特に大学における）研究の必要性

核融合研究開発はここ数年世界的に急速な進展を遂げつつあり、我が国では今後日本原子力研究所を中心とした「国際熱核融合実験炉（ITER）」の工学設計活動（EDA）および文部省核融合科学研究所における「大型ヘリカル装置（LHD）」の建設を軸にして研究開発が進められよう。このような動向に適切に対処するためには、大学において実験炉以降を展望した「核融合炉工学」の研究を先導的に実施し、革新的技術のシーズを用意するとともに、高度技術としての核融合炉工学の体系化を図ることが必要である。また、今後長期にわたり核融合研究開発を支える優秀な人材を養成すべき大学の使命からも、教育内容の充実につながる研究の推進を重視しなければならない。

2. 大学における核融合炉工学研究の進め方

大学における工学研究は研究室単位の研究、中規模の施設を擁し拠点的に推進すべき研究（拠点研究）及び大規模な中枢的研究の三つがあり、これらをバランスよく進める必要がある。この視点から、今後約10年間は上記の拠点研究に相応しい重点課題を絞り、人的資源の活用、資金の有効利用、共同研究の推進、将来センター・オブ・エクセレンスに発展する可能性等を勘案して、全国に数箇所の共同研究拠点を整備し、その間にネットワークを形成して核融合炉工学研究を重点的かつ組織的に推進する。

3. 核融合炉工学重点課題の選択と「共同研究拠点」の整備

今後、大学において重点的に追究すべき課題は、粒子・第一壁工学、重照射材料工学、ブランケット・安全工学、トリチウム理工学の4分野である。各大学における研究実績、概算要求計画等を勘案して、別表に示す7つの共同研究拠点の重点整備を提案する。これらの共同研究拠点に整備される研究設備は今後約10年にわたり、上記分野にまたがる研究に重点的に活用され、核融合原型炉設計開始時期と想定される2005年頃までを目途として、その設計に必要な工学的知見を提供することを目標とする。予算規模は総額で約200億円程度であり、第一期と第二期の二つに分けて整備する。

4. 「共同研究拠点」の有機的運用

上記数個の共同研究拠点間のネットワーク的運営・研究企画を行なうことにより研究交流、人的交流を活発化し、研究の効率的推進を図り、人材養成に対しても横断的大学院教育研究等多様な対応ができる組織を構築する。このようなネットワーク的運営、研究交流の企画推進のための「中枢センター」を設置する。

別 表

拠点研究分野	研究内容	研究設備名称	設備規模	設備時期
粒子・第一壁工学	電磁構造連成・制御 粒子ダイナミクス (境界プラズマ電磁制御)	第一壁工学模擬 実験設備	B	1
	粒子輸送 エロージョン 燃料リサイクリング	粒子・壁相互作用実験 設備	B	2
重照射材料工学	重照射材の照射後試験 損傷過程 耐照射損傷材	ホットラボ施設	A	1
	中性子工学(損傷、二次粒子) T-増殖性、ビーム加速器	強力中性子源	A	2
ブランケット・ 安全性工学	ブランケット工学 安全性 プラズマ異常現象と制御	核融合安全工学 実験設備	B	2
トリチウム理工学	トリチウム・材料相互作用 5000Ci T施設、計測法	トリチウム取扱施設	B	2
	トリチウム環境動態 被ばく低減法	トリチウム生物 影響実験施設	C	1

1: 第一期、2: 第二期、 A>20億円、B: 10~20億円、C: 1~10億

核融合炉工学「共同研究拠点」の整備について

(本文)

1. 核融合炉工学（特に大学における）研究の必要性

核融合研究開発はここ数年世界的に急速な展開を遂げつつある。1991年JET(BC)において世界で初めて重水素-三重水素を用いた燃焼実験が行われ、1 MW以上の核融合出力が得られた。また、1993年3月、JT-60U（日本原子力研究所）における重水素プラズマを用いた実験では核融合積で評価して世界最高 ($1.1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{sec} \cdot \text{keV}$) のプラズマが実現された。更に国内では核融合科学研究所においては1997年運転開始を目指して大型ヘリカル装置の建設が進行している。一方、慣性核融合に関しても、激光XII号により初期固体密度の600倍に達する超高密度爆縮が達成されるなど基本原理である爆縮物理の解明が進み、レーザーの出力増大と制御性能の向上に伴い、プラズマ温度にして1億度、ショット当たり 10^{13} 個の中性子の発生が実現された。1992年7月からは日本、米国、EC、ロシア連邦の4極によって国際熱核融合実験炉（ITER）の工学設計活動が開始されている。

以上のことから、核融合エネルギーの実用化を目指して、今後どのような開発課題を推進すべきかは、おのずと明白であろう。すなわち実験炉の建設によって自己点火プラズマとその長時間燃焼を達成し、総合的な核融合炉工学技術（以下「炉工学」と略称する。）を確立するとともに、原型炉を目指した長期的な炉工学課題の解決に取り組むべきである。

核融合炉は技術集約型の大型装置であり、かつDT核融合炉ではキログラムオーダーのトリチウムを取り扱うばかりでなく、中性子の発生とそれによる放射化された相当量の物質を取り扱うことは避けられない。しかしながら、核エネルギーの利用は、核分裂炉、D-T核融合炉、さらにD-D核融合炉やD-³He核融合炉の実現へと進化を遂げると考えられ、究極的には人類は放射能から解放された核エネルギーを入手する可能性もある。このような大事業を完成させるためには、炉心プラズマと炉工学の研究者が車の両輪となって今後の研究開発を進めて行くことがますます重要となろう。また、安全性・経済性が強く要求される原型炉・実証炉の技術と現在の技術との間には大きな格差が存在するので、長いリードタイムを要する研究開発課題については今から着手することが不可欠である。

実験炉（ITER）では、プラズマの自己点火及び長時間燃焼を実現するために、超伝導トロイダルコイル・ポロイダルコイル、真空設備、生体遮蔽装置、トリチウム取扱設備等の大型設備を建設しなければならない。また、その機能を十分発揮するためには、炉システムの総合化技術、トリチウム

の核燃焼技術およびダイバータなどの高度化技術の確立が必要となってくる。これらは ITER国際協力の枠組みの中で鋭意開発されることになっているが、その中心は装置技術開発であり、これらを体系化、普遍化する作業は不十分と言わねばならない。実験炉以降の展開はこの点にかかっており、大学の研究が期待されるところである。

一方、実用炉で必要とされる技術のうち、実験炉の段階では本格的に開発されない主要な技術が2つ存在する。これらは中性子照射に耐える構造材料の開発とエネルギー変換・トリチウム増殖・中性子遮蔽の機能を有するブランケットの開発である。複合環境下で設計条件を満足する能力の指標を技術性ということにすると、この両者は特に飛躍的に技術性を高める観点から研究を実施する必要がある。その革新的技術のシーズは大学における炉工学研究の基礎的展開によって効果的に与えられよう。

原子力委員会は1992年、「第三段階核融合開発基本計画」を策定し、実験炉開発を主体的に担当する日本原子力研究所の研究開発に関して、今後の方針を明らかにした。更にそこでは大学における核融合研究の推進について言及されており、実験炉以外の開発研究は大学、国立研究機関の相互の連携・協力により進められる事が期待されている。特に実験炉以降の炉工学の先駆的課題については、大学の役割が重要視されている。欧米の核融合研究開発は主として、国立研究所において推進されており、大学における研究活動は我が国に較べて極めて低い。従って、わが国の大学が有する核融合研究の高いポテンシャルを活用して行くことは、特徴ある研究成果を生み出す上でも効果的と思われる。

しかしながら、炉工学研究に関する大学側の体制は、核融合研究開発がエネルギー研究開発の一環として位置付けられるようになった現在もなお、“基礎科学”振興の段階に留まっており、“工学”振興の視点が欠落している。特に「核融合特別研究」の終了以降、炉工学分野に対しては、日米協力(FFTF/MOTA計画)による材料研究や核融合科学研究所における超伝導ヘリカルコイルの開発については必要な措置がなされ、成果が得られつつあるものの、その他は予算措置が講じられないまま現在に至っている。核融合研究は知識集約的であるがゆえに、関連各分野がバランス良く発展することが必要であり、この意味で炉工学分野に対し特段の包括的な整備計画が立案されることが望ましい。核融合研究開発が新しい段階に立ち至った現在、大学における炉工学研究の将来計画を構築し直し、研究の一層の活性化を図ることは時宜を得ているところである。特に、我が国の炉工学の基礎研究は欧米諸国と異なり大学における厚い研究者層と豊富な研究業績に支えられてきた。さらに、長期にわたる核融合炉研究開発の継続性を考えた場合、優秀な人材の育成は不可欠であり、この観点からも研究と同様に教育内容を充実させるための炉工学研究は大学において必須である。

すでに、第13期本研究連絡委員会では、1988年5月に「大学における核融合炉工学分野の拡充整備について」の要望書を取りまとめ関係方面に提

出したが、核融合科学研究所の創設時期とも重なり未だ検討されるに至っていない。このため、本将来計画は、第13期の要望書以降の核融合研究開発環境の変化に対応しさらに深刻になった大学における炉工学研究の事態を早急に改善するために策定されたものであり、ここに改めて炉工学分野の拡充整備を要望するものである。

2. 核融合炉工学重点課題の選択

核融合炉工学は、中性子工学、材料工学、熱・電磁構造工学、トリチウム理工学、マグネット工学、炉設計および安全工学などの重要な学問分野から成り立っており、これらが、炉工学としてバランスよく発展することが大切である。

核融合炉工学の重要課題は過去数年間にわたって機会あるごとに検討され、適宜に報告書も出版されてきている。最近では平成3年～5年の3ヶ年にわたる文部省科学研究費・総合研究(A)「大学における核融合研究の進め方」(研究代表者飯吉厚夫)の中でプラズマ科学、核融合科学の他に、炉工学研究のあり方についても検討がなされ、重要課題が整理されている。第15期本研究連絡委員会核融合炉工学小委員会では、以上の資料を参考にして、炉工学の今後の重要課題に焦点を合わせて検討を進め、その推進方策についても各大学の核融合炉工学に関する概算要求との整合性を考慮して提案を行うこととした。

幾多の重要課題の内から以下に述べる重点課題を抽出するに際して次のような諸点を特に勘案した。

- (1) 研究開発の各段階(実験炉、原型炉、実証炉)に固有の研究課題を抽出する。
- (2) 安全性・技術性・経済性の観点から重要課題の種別化及び評価を行う。このとき、これまでの実績を踏まえて今後十分な発展が期待できる分野、また逆に重要でありながら著しく遅れており、今後急速な発展を必要とする分野、さらに新しい学問領域の開拓につながる分野、などに留意する。
- (3) 研究の役割分担に関して、大学は、原型炉、実証炉を遠望した主要課題のうち、革新技術の創造につながる基礎的研究を中心に、先導性及び学問の体系化に留意しながら研究を行う。これに対して国公立を含む公共的研究機関、特に日本原子力研究所は国際共同プロジェクトであるITERの推進のため装置指向型の研究開発に責任を負う。産業界は自主研究はもとより日本原子力研究所および大学・直轄研究所等における大型プロジェクトに参画していく。

その結果選択された、整備を必要とする重点課題は以下のとおりである。

(図1参照)

(1) 粒子・第一壁工学

核融合条件下のプラズマとダイバータ・第一壁との相互作用における壁近傍プラズマの挙動とその電磁制御、固体壁における電磁連成現象、壁材料のエロージョンと不純物の発生および燃料リサイクリング現象などの研究を行う。

(2) 重照射材料工学

強力な高エネルギー中性子源の開発とこれを利用した高速中性子の物質中における二次核反応と増殖・拡散挙動などの中性子工学研究、および照射損傷機構と耐照射性材料の開発研究や低誘導放射化材料の開発など材料工学の研究を行う。

(3) ブランケット・安全性工学

安全性にスポットをあて、ブランケットにおける燃料の挙動・増殖・回収および炉心の異常に伴うブランケット部の熱・流体・物質挙動や破損事故時の諸現象を明かにするとともに、安全設計手法を体系的に研究する。

(4) トリチウム理工学

トリチウムは弱いベータ崩壊核種であるが、核融合炉ではかなりの量を取り扱う必要があるため、物質中におけるトリチウムの物性、動態及び挙動を解明し、その新しい計測法と完全な閉じ込めを指向した技術を開発するとともに、トリチウムの環境における動態や生物影響を調べ、被ばく低減化法に関する研究を行う。

これら重点研究課題の必要性と研究拠点の整備の有効性についてさらに敷衍すると；

(1)のプラズマ・壁相互作用に関しては、大型プラズマ実験装置と連携した大学間の横断的組織が研究実績を挙げてきているとともに、大学間の協力分担によりプラズマ対向材料に関するデータベースの構築も進められ、おのずと研究拠点の候補が出来上がっている。また、境界プラズマの電磁制御や電磁・熱・構造連成現象の実験的・理論的取扱は我が国の大学において、世界に先駆けて進められてきた分野であり、このような先導的地位をより発展させることが望ましい。

(2)の重照射材料工学は、国際プロジェクト等を活用しつつ質的に世界をリードしているばかりでなく量的にも我が国の大学の寄与が常に全世界の活動の数分の一を占めている分野である。しかし現状は大学研究者が利用できる照射後試験施設（ホット・ラボラトリー）が極めて限られており、そ

の貧困さは国際的にも指摘されているとおりで、これが研究の進展を阻害している最大の要因であり、早急な改善が必要である。また、米国 RTNS-II装置が 1987 年に停止されて以来、オクタヴィアン（大阪大学）および FNS（日本原子力研究所）は世界最大の D-T 中性子源となっはいるが、中性子工学および材料照射損傷基礎研究には不足であり、国際的に高く評価され実績のある日本の基礎研究を発展させるためにも、少なくとも現在の 10 倍以上強力な中性子源が必要である。

(3)の核融合炉ブランケットは、核融合で発生したエネルギーを熱に変換し、燃料のトリチウムを生成し、かつ放射線及び熱遮蔽を行うという核融合炉では炉心プラズマと並ぶ重要な部分であるが、この総合工学としてのブランケット工学研究は世界に先駆けて 1970 年代前半に日本の大学研究者により始められている。その後 1980 年代に科学研究費特別研究によって組織化が進められ、日本の活動が世界のほぼ 3 分の 1 を占めるまでに至ったが、1990 年代に入ってから学会活動等の自主的努力によって辛うじて研究のネットワークを保っているに過ぎない。ブランケットはエネルギー発生装置としての核融合炉の中心であり、かつ安全性に最も深く関わっていることから、その体系化に向けて大学の研究を活発化することが急務であり、その素地は既に十分に培われている。

(4)の核融合において対象とされるトリチウムの量は、 $\sim 10^{-3}$ ベクレルから $\sim 10^{17}$ ベクレルと実に 20 桁の範囲に及び、それぞれの領域で問題となる研究対象、手法や計測法も異なっている。日本原子力研究所はトリチウムの大量取扱技術の開発に責任を持っているが、さらに低レベルあるいは極低レベルのトリチウムについては大学の研究にまたねばならない。大学におけるトリチウム研究は 1980 年前後に発足し、いくつかの研究拠点が作られたが上記の広範な研究領域からみて組織的かつ体系的な研究が必要である。とくに理工学の側面では計測法および安全閉じ込め技術の開発に主眼をおく。また本格的なトリチウムの利用が始まる以前にトリチウムの生物影響及び環境動態を十分に調べておく必要があるが、この面でも医学、生物学、環境科学、放射線計測学等を含む大学関係者の学際的連携ができており、早急に研究の促進を図る必要がある。

一方、各大学における核融合炉工学関連の概算要求の調査により上記重点研究課題と関連の深い要求があることが判明しており、その予算規模は 1 件につき数千万円から数十億円となっている。

3. 大学における核融合炉工学研究の進め方

大学における研究体制は、従来からもしばしば議論されてきたように、

研究室単位の各個研究、拠点的に推進されるべき研究（拠点研究）、中核的に追究されるべき研究といった三つのカテゴリーの研究をバランス良く推進することが合理的かつ効率的である。このうち、拠点研究では、研究室単位では維持管理が困難な中・大型設備を利用した研究を拠点的に実施し、その設備が適当数全国に分散配置されることが望まれる。また、研究が進展した段階では、全国1ヶ所程度、あるいは全世界でも1～3ヶ所といった超大型設備を設置し、中核的かつプロジェクト的に研究を推進することが必要になると考える。

平成5年度から科学研究費補助金の中に細目「核融合学」が新設され、研究室単位の各個研究の推進は制度的に保証されるようになったが、さらに核融合炉工学が総合工学であり長期ビジョンに立った研究が必要であることから、各個研究のレベルでは、新しい研究領域の開拓に貢献する重点領域研究などにより積極的に研究を推進する必要がある。

一方、拠点研究では、1) 中・大型設備による先端的研究の推進、2) 新学問分野の開拓、3) 共同研究の推進などを目指し、研究を集中的かつ組織的に推進する。予算及び人的規模が大きくなるので、資金の有効利用と人的資源の活用を図る必要がある。このため、研究拠点を整備し、ここで重点的に研究を推進する。さらに複数の研究拠点を中心とした研究ネットワークを結び、総合工学としての核融合炉工学の広範な研究分野の有機的連携を図ることにより研究を効果的に推進する。また、研究拠点間を横断的に結ぶ大学院教育により炉工学分野の若手の養成も行う。

本報告が対象としている今後約10年間の将来計画としては、拠点研究に焦点を絞り、以下に述べる研究設備を抽出し、これを研究拠点に重点的に整備することにより研究を推進する。

4. 「共同研究拠点」の整備とその有機的運用

抽出された4つの重点課題と各大学の概算要求とを比較検討し、当該大学の推進機関の研究実績、人的資源、研究ポテンシャル、実現性等を勘案した結果、次期整備計画として次の内容の研究設備を有する「研究拠点」の整備を提案する。（別表参照）

下記研究設備は緊急性を勘案して第一期と第二期の二つに分けて整備され、今後約10年にわたり、重点的に研究に供され、原型炉の設計開始時期と想定される2005年頃までを目途として、それまでに必要な基礎的工学的知見を提供することを目途とする。予算規模は総額で約200億円程度である。

これら複数の「研究拠点」は、大学の附置研究所、研究センター、研究施設など附置研究機関に設置されることが望ましい。さらに、その効率的運営を図る、かつ大学間の有機的連携のもとに研究を進めるため、大学横

断的研究機関とし、

1. 一部予算の共同的利用（ネットワーク共同研究経費などによる）、
 2. 流動研究部門（期限付きで専任として研究に従事）の充実、
 3. 客員研究部門（「研究拠点」相互間の客員部門の流動的活用）の充実、
 4. 各大学院に所属しつつ、どの「研究拠点」でも教育・研究指導を受けられる横断的大学院制度の創設、
 5. 「研究拠点」間のネットワーク的運営・研究交流の企画推進のための「中枢センター」の設置、
- など研究交流、人的交流を活発化し、さらに、人材養成に関して、多様な対応ができる組織を構築することを提案する。（図2参照）

核融合炉工学関係の中核研究所は、第10期本研究連絡委員会将来計画など古くからその設置が要望されてきたが、現在の炉工学の進展状況と諸般の事情からその機が熟しているとは言い難く、その設置についてはなお将来の検討課題とする。

なお、研究機関を中心とした“ネットワーク”構想に関しては、文部省科学研究費・総合研究(A)、「大学における核融合研究の進め方」（研究代表者 飯吉厚夫）においても、核融合分野全体として検討されていることを付記する。

以上

本報告作成にあたってのワーキング・グループは、以下のとおり。

委員長	石野 栞	東京大学工学部教授
幹事	井上 晃	東京工業大学原子炉工学研究所教授
委員	内藤奎爾	名古屋大学名誉教授
	岡田重文	東京大学名誉教授
	住田健二	大阪大学工学部教授
	田村早苗	日本原子力研究所那珂研究所長
	宮 健三	東京大学工学部教授
	本島 修	核融合科学研究所教授
	山科俊郎	北海道大学工学部教授
オブザーバー	一政祐輔	茨城大学理学部教授

別 表

拠点研究分野	研究内容	研究設備名称	設備規模	設備時期
粒子・第一壁工学	電磁構造連成・制御 粒子ダイナミクス (境界プラズマ電磁制御)	第一壁工学模擬 実験設備	B	1
	粒子輸送 エロージョン 燃料リサイクリング	粒子・壁相互作用実験 設備	B	2
重照射材料工学	重照射材の照射後試験 損傷過程 耐照射損傷材	ホットラボ施設	A	1
	中性子工学(損傷、二次粒子) T-増殖性、ビーム加速器	強力中性子源	A	2
ブランケット・ 安全性工学	ブランケット工学 安全性 プラズマ異常現象と制御	核融合安全工学 実験設備	B	2
トリチウム理工学	トリチウム・材料相互作用 5000Ci T施設、計測法	トリチウム取扱施設	B	2
	トリチウム環境動態 被ばく低減法	トリチウム生物 影響実験施設	C	1

1: 第一期、2: 第二期、 A>20億円、B: 10~20億円、C: 1~10億

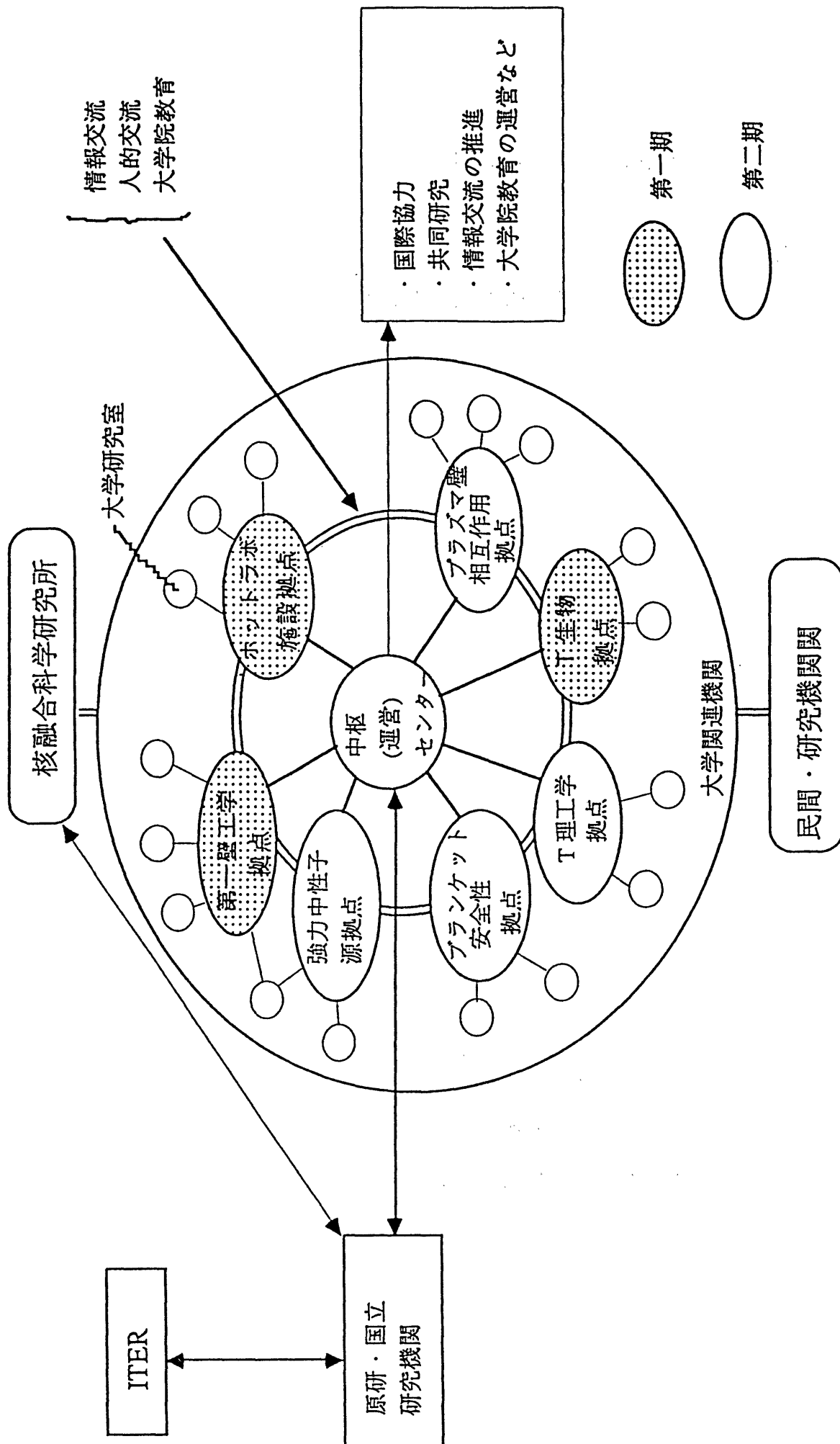


図2 核融合炉工学関連ネットワーク