

(2) Fusion Engineering (核融合炉工学)

1. 全体のまとめ

核融合炉工学分科会は平成 6 年度に 9 分野構成で活動を開始し、ネットワーク化に関する意見と研究の現状の調査、研究者データベースの作成などを行い、その成果は「炉工学分科会中間報告書(平成 7 年 7 月)」にまとめられた。続いて平成 7 年度にはネットワークの形成と発展を進める過程で 3 つのグループ「炉材料・燃料」、「電磁・マグネット」、「炉システム・安全性」に慣性核融合の炉工学分野を含める形に統合され、それぞれの分野において、それぞれの果たすべき役割に対応した主要な目標を達成すべく、着実な成果を納めつつある。図 1 に炉工学分科会の構成を示す。

核融合炉工学の広範囲かつ多様な目標に対して、効率よく研究を進め、総合工学としての最適化を図る事は、過去に例を見ない大きな工学課題への挑戦である。このためには、(1)お互いに研究内容や成果を理解すること、(2)グループ間でより多くの共通基盤を形成する事が重要であり、その当然の帰結として、異なった基盤を有する研究単位が共同研究や研究支援・補完研究などを活発に行う事が期待される。このような多様な相互協力を行う為には従来の縦形や横形、ないしは単純な階層構造による研究活動では極めて無駄が多いことが理解されるようになってきた。そこで検討されてきたのが本研究で進めているネットワーク構想である。

核融合炉工学分科会においてはネットワークの多様な形態について議論し、かつ、これまでの活動から得られた多くの経験を基にして第一段階のネットワーク構想を次のように定義した。すなわち、比較的領域の近い、共通の基盤が多い研究者間でのネットワーク活動を最優先で行う事とした。また既存の研究支援体制とネットワーク活動との整合の為に、ネットワークの中心にヘッドクォーターを設定し、グループ間の自由な情報ネットワーク化の推進とともに、ヘッドクォーターの機能として全体会議等による共同研究や概算要求の企画・立案を行うことを想定している。図 2 に核融合炉工学分科の 3 つのグループについてその構造と共同研究として考えられる境界領域研究課題の例を示す。現状では核融合科学研究所をヘッドクォーターとして考えるのが最も自然であり、活動統合の中核的役割を果たす事が期待される。このような形態でのネットワーク構想が幅広い活動スペクトルを有する核融合炉工学コミュニティーにとって比較的無理のないものであると考えられる。初めに述べたように、幅広いスペクトルを有する核融合炉工学の研究の効率化・高度化のためには積極的なネットワーク化の推進が必要であり、ネットワークの自由な展開を育成できる構造の実現が重要であろう。

核融合炉工学ネットワークの主要構成要素となる各グループにおいても同様なネットワーク構造が存在することは言うまでもない。以下では慣性核融合炉工学を加えた 4 つのグループ毎に(1)グループ内ネットワークの構成案、および(2)グループ内ネットワークにより高度化されると期待される研究、について述べる。なお、各研究分野単位までさかのぼったネットワーク構想や共同研究構想などを含めて、炉工学分科会の構想をまとめた「炉工学分科会最終報告書」を発刊予定である。

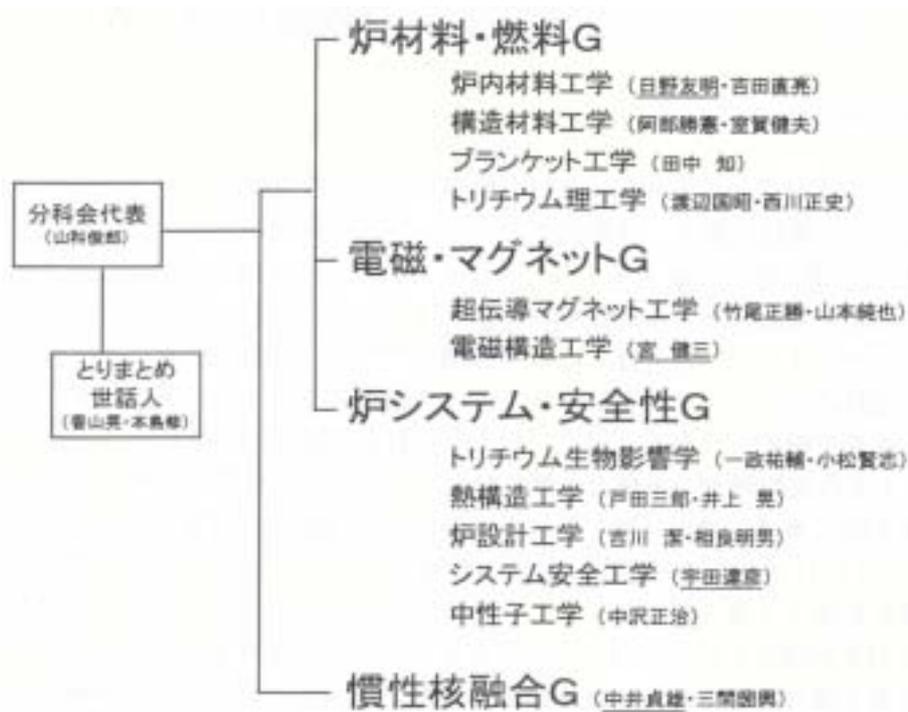


図1 炉工学分科会の構成 (下線は作業グループ幹事)

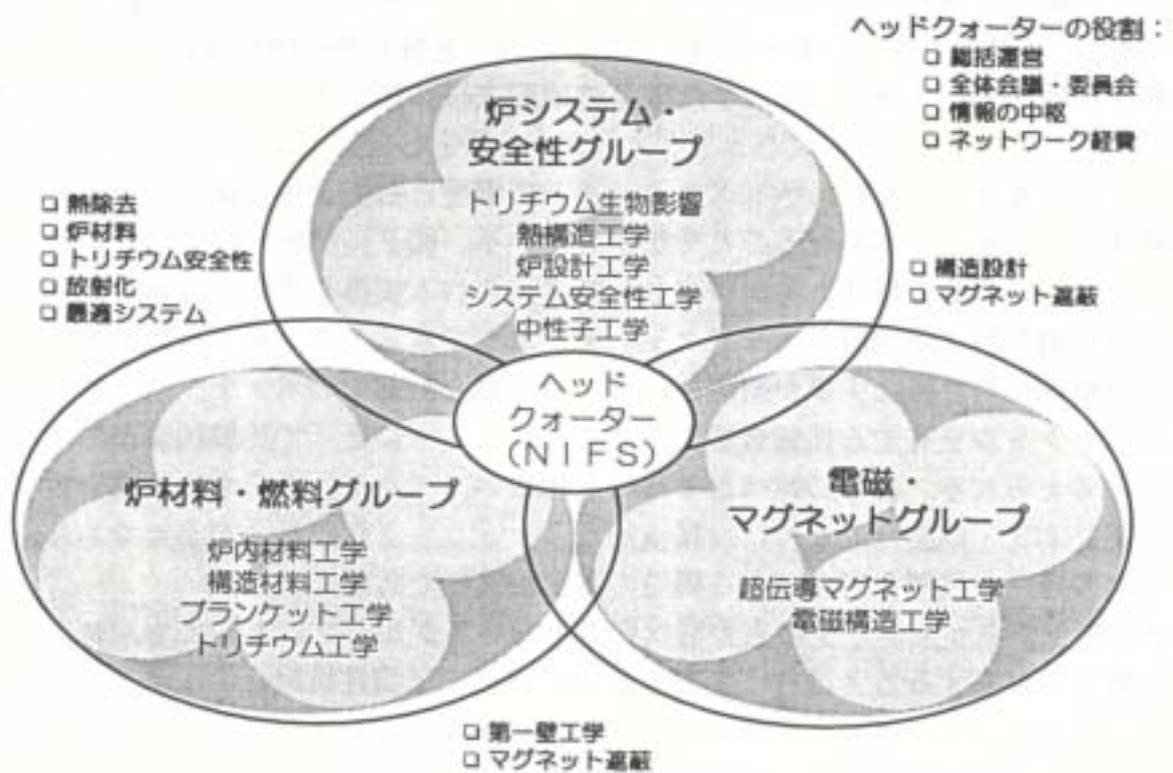


図2 炉工学分科における3つのグループの構造と境界領域の例

2. 「炉材料・燃料」グループ

2-1. グループ内ネットワーク構成案と図式化

「炉内材料工学」分野の研究対象は、対向材料の開発、ダイバータとコンディショニング(不純物、リサイクリング、ヘリウム灰)、プラズマ表面相互作用、トリチウムインベントリー、照射損傷等である。「構造材料工学」分野では、候補材料の照射下特性の評価と材料開発、材料の照射下挙動の機構研究と材料照射研究手法の高度化を主テーマとしている。「ブランケット工学」分野では、増殖材料の基礎工学、ブランケットシステム工学、ブランケット安全工学を対象としている。「トリチウム理工学」分野は広い領域にまたがっており、その主テーマは装置でのトリチウム挙動と制御、トリチウムにかかわる要素技術の高度化である。このグループの研究対象は炉心プラズマから超伝導マグネットの領域にまたがっている。ただし、「トリチウム理工学」分野ではさらに環境全体にかかわる研究をも対象としている。このグループの各分野の主な研究対象領域を図3に示してある。4つの分野を統合するネットワーク化についての見解は次のようになっている。まず、核融合科学研究所を情報ネットワークの拠点として位置づけることにほぼコンセンサスが得られている。研究ネットワークに関しては、大学における幅広い研究活動の実績に鑑みて、またそれを維持するためにも、テーマ毎の拠点を考える方が現実的である。核融合科学研究所を核融合炉工学の情報ネットワークの拠点とし、各グループおよび分野の情報拠点を整備し、グループ間や分野間の情報交換や共同研究の推進を図っていくことが必要であろう。

2-2. グループ内ネットワーク化により高度化される研究

各分野間で図4に示してある共同研究が可能であり、より高度な成果が得られると期待される。特に本グループは多くの共通課題をもっており、ネットワークによる研究交流の促進が重要である。

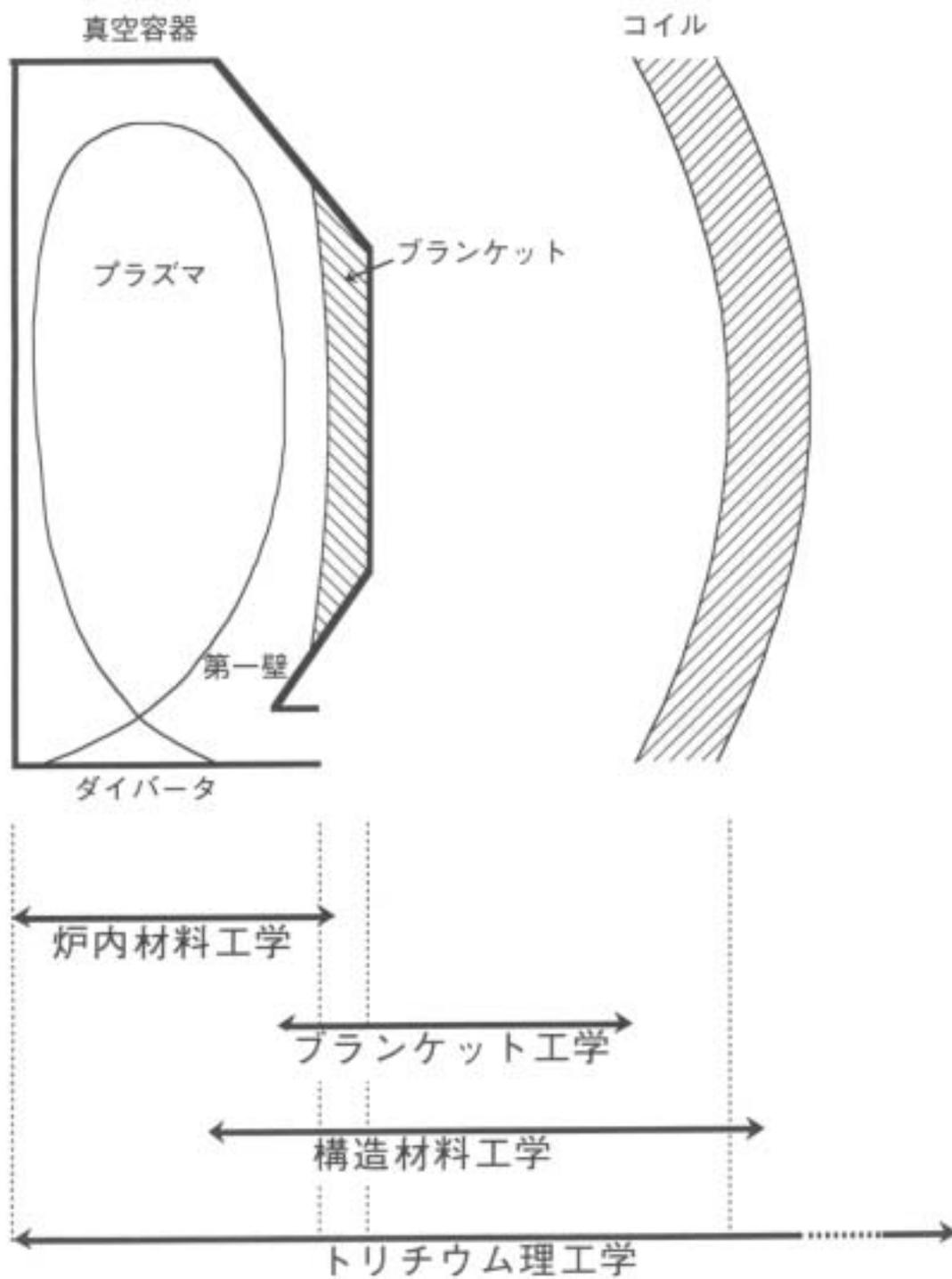


図3 各分野の研究対象領域

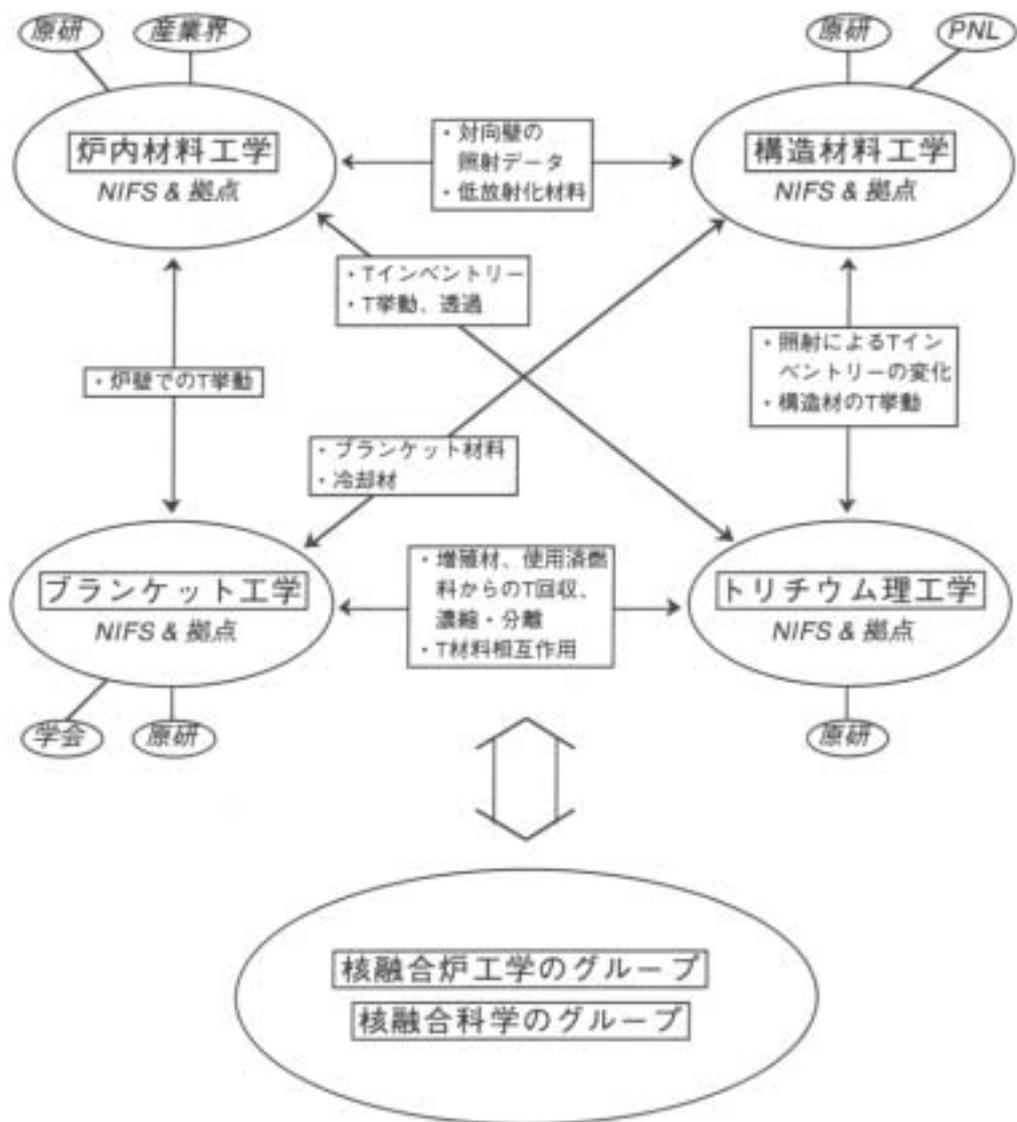


図4 炉材料・燃料グループのネットワーク

3. 「電磁・マグネット」グループ

3-1. グループ内ネットワークの構成案と図式化

超伝導マグネット技術および電磁構造の健全性評価・検査・解析技術は、本来、各炉型さらには一般産業機器に共通する基盤技術である。今後の研究者ネットワークの整備充実により、現在、特定の炉型を対象に行われている R&D の成果・知見を、より一般的な成果として共有していくことが大切である。国内的にも国際的にも電磁・マグネット研究の拠点となる研究設備が実現できれば、実験炉・原型炉の実現にむけて、その意義は大きい。ひいては一般産業界への波及が大いに期待される。

マグネット工学分野の拠点である核融合科学研究所装置技術研究系および電磁構造工学分野の拠点である東京大学の核融合炉電磁構造力学研究設備(仮称)を核とするネットワーク構成案を図 5 に示す。本センターは、国内外との共同研究や情報交換の中心となるだけでなく、電磁・マグネット研究に関連する一般産業界との密接な交流の拠点として機能させていきたい。

3-2. グループ内ネットワークにより高度化されると期待される研究

超伝導マグネットあるいは核融合炉構造機器の長寿命化、信頼性の向上のために解決すべき課題は多い。また、将来の実用炉にむけて、長期的に機器性能の向上をめざしていくべきである。具体例としては、

- ・超伝導マグネットの構造健全性評価法を体系化し一般性のある手法として確立するための研究
- ・超伝導マグネットの検査手法を高精度化するための研究
- ・大型超伝導マグネットの構造最適化のための研究
- ・高温超伝導体の核融合炉への応用に関する研究

などがあげられる。

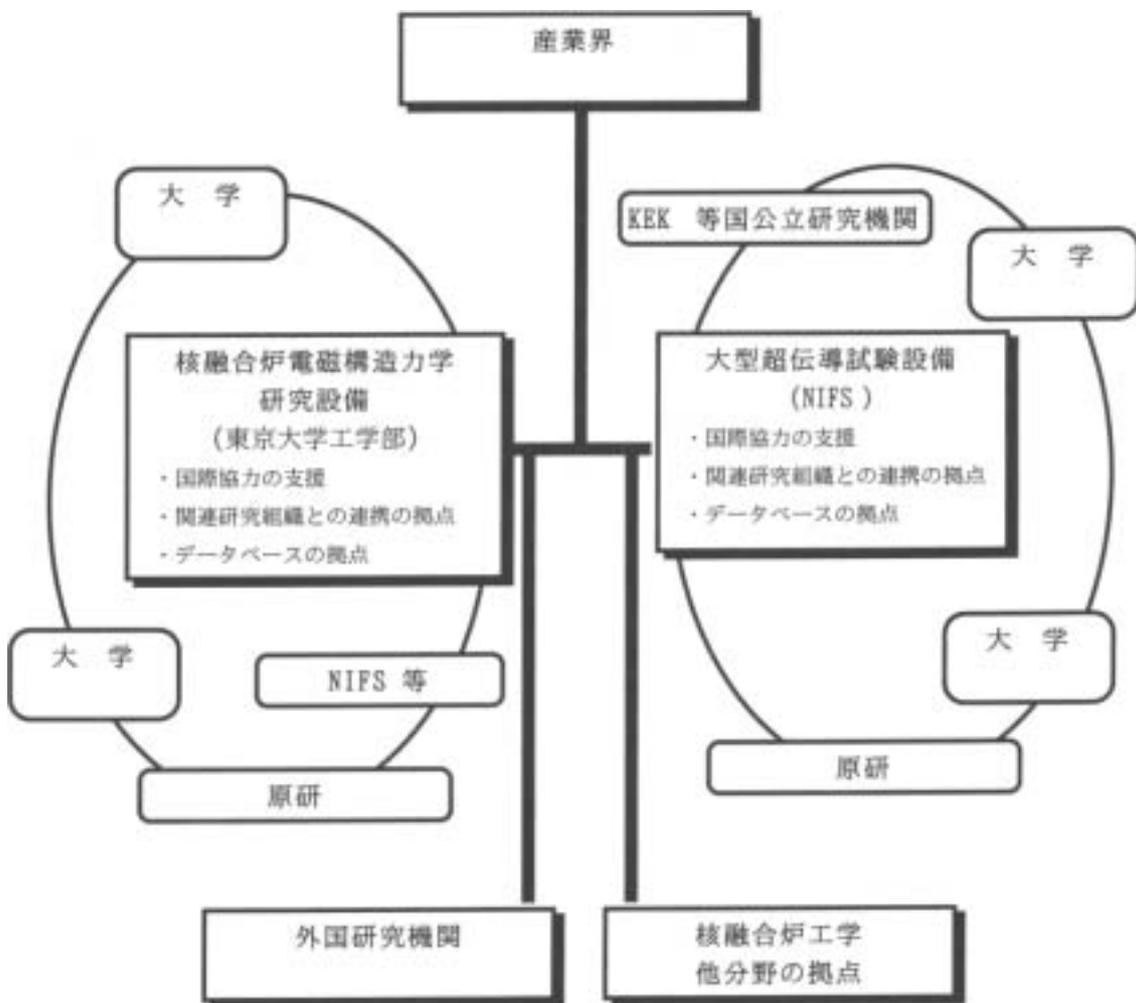


図5 電磁、マグネットグループ内ネットワークの構成案

4. 「炉システム・安全性」グループ

4-1. グループ内ネットワーク構成案と図式化

炉システム・安全性グループは(1)トリチウム生物影響学、(2)熱構造工学、(3)中性子工学、(4)炉設計工学、(5)システム安全性工学の5つの分野から構成される。これらは核融合炉の設計に直結する工学的な色彩の強い分野である。しかしながら、設計に先立つ前提条件の設定、基本的なデータや解析ツールを揃えるなど基本的な研究課題が多い。核融合炉システムは先端科学技術を取り入れた極めて多くの独立したサブシステム及び機器から成り立っている。これらを技術的に矛盾無くかつ有機的に組み合わせ、それが経済性や安全性を満足するだけでなく社会に受容される新たなシステムに組み上げられる必要がある。核融合炉システムでは、熱以外に大量の中性子と誘導放射線及び放射性物質が発生するので、核及び熱設計技術の確立が不可欠である。また、炉設計と安全性では高効率化と固有の安全性を追求した炉の研究及びリスクや被曝評価の研究が欠かせない。これらの研究のためには、例えば強力中性子源のような大型実験設備を有する核となる機関のあることが望ましいが、ネットワークの形態としては中央集中型より広域分散型の柔軟性のある結びつきが好まれる傾向にある。

グループの外とのネットワークでは燃料となるトリチウムの取り扱い技術並びに構造材料の低放射化材や耐照射損傷材料の開発が望まれる。電磁・マグネットグループとは電磁構造力学的な評価を加えた設計におけるつながりが望まれる。当然のことながら、プラズマの挙動解析研究とのつながりは基本的に必要なことである。

4-2. グループ内のネットワークにより高度化されると期待される研究(図6)

1)安全性、経済性、社会的受容性を追究し、革新的な要素技術導入を図った先進的核融合発電炉システムの概念構築と設計研究

- ・安全性を有する高効率化発電炉システムの開発
- ・低放射化、耐照射性、耐熱性の材料開発と適用化
- ・保守・交換技術の開発及び作業の実現化
- ・低トリチウムインベントリー化とトリチウム安全取扱い技術開発
- ・核燃焼プラズマ診断と計測制御技術の開発
- ・核融合炉システムの安全解析評価手法の確立

2)核・放射線、熱、電磁力の複合下における安全性と信頼性を追究した核融合炉システムの開発研究

- ・各種データベースと計算コードの開発及び整備による設計手法の高度化
- ・真空容器、プラズマ対向機器、ブランケット及び冷却系等の最適な炉構造材料選定と構造解析・設計及び関連する実験研究

3)放射線及び放射性物質の安全取扱いに係わる基盤技術の開発研究

- ・核融合炉システムにおける放射性物質の挙動とインベントリー評価
- ・放射線計測技術及び放射性物質の分析測定技術の高度化
- ・トリチウムなどの野外環境における化学的挙動と生物学的影響評価

4-3. ネットワークにより高度化が期待される各分野の研究(図 7)

(1) トリチウム生物影響学

業務従事者のトリチウム被曝防護からの安全確保の研究

生物における水素同位体効果の解明

各種形態のトリチウムの野外環境における化学的挙動と動態の解明
(模擬ドームによる試験)

(2) 熱構造工学

冷却方式と動力炉、壁材の熱負荷、熱流体システム、安全、設計

液体金属取り扱いに伴う絶縁材料コーティング

高温材料及び高熱流束技術に係わるダイバータ設計

核発熱、トリチウム系を考慮したブランケット設計

電磁影響および効果応用技術の導入

(3) 炉設計工学

社会的受容性の高い炉設計を目指した新規炉工学要素技術の開発

RF による選択的トリチウム閉じ込め

低放射化材料や耐照射性材料の開発

炉経済性による炉設計要素技術の重要度の評価

要素技術の経済性、安全性、信頼性に対する感度解析

(4) システム安全性工学

安全性、経済性、社会性等を考慮した核融合炉システムの概念構築

安全解析評価手法の確立

プラズマ異常から事象進展時の総合的安全解析

新規技術応用による固有の安全炉及び工学要素技術の開発

トリチウムの低インベントリー化と境界閉じ込め技術

遠隔保守技術の開発と作業の実現化

放射性物質の環境挙動と生態系影響に基づく事故時被曝評価

廃棄物の低減と処理・処分法の検討

(5) 中性子工学

形成ネットワーク分野:核データ、遮蔽、核設計、核計装・診断

耐放射線性材料、照射損傷及び修復技術の開発

核燃焼プラズマ診断及び計測制御技術の開発

核・放射線の観点からの先進核融合炉システムの設計

(ブランケットの核及び構造設計)

核融合炉ドジメトリー(材料、機器、生体、環境)と安全の関連研究

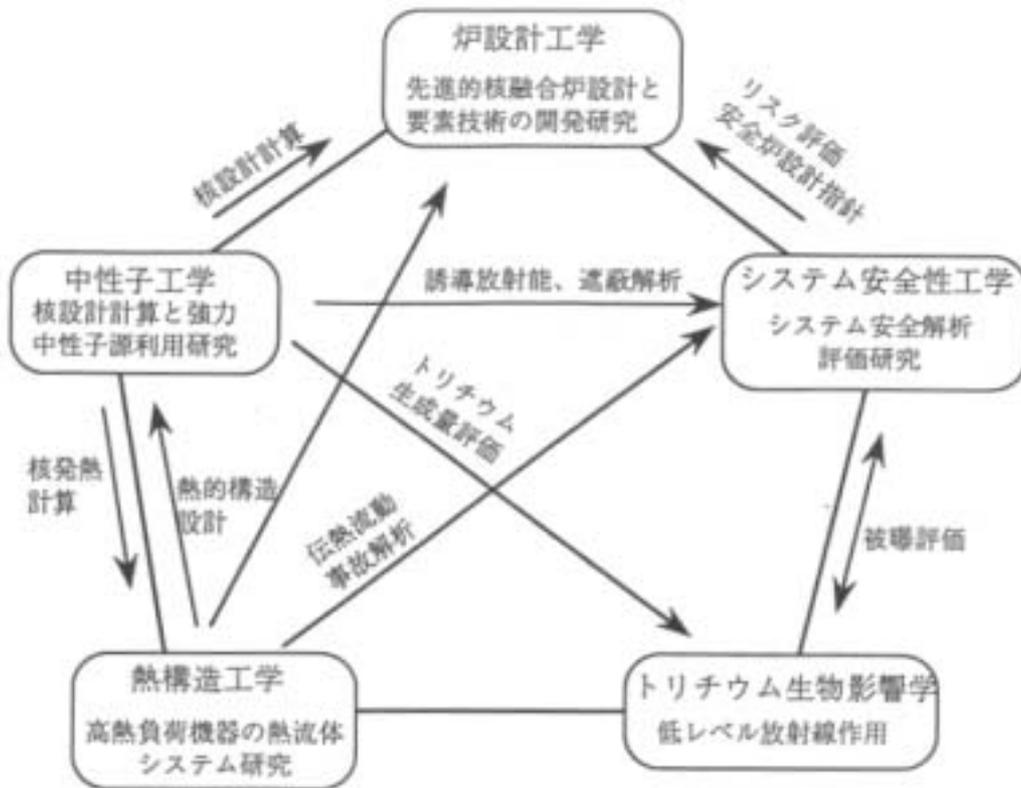


図6 炉システム・安全性グループ内のネットワーク

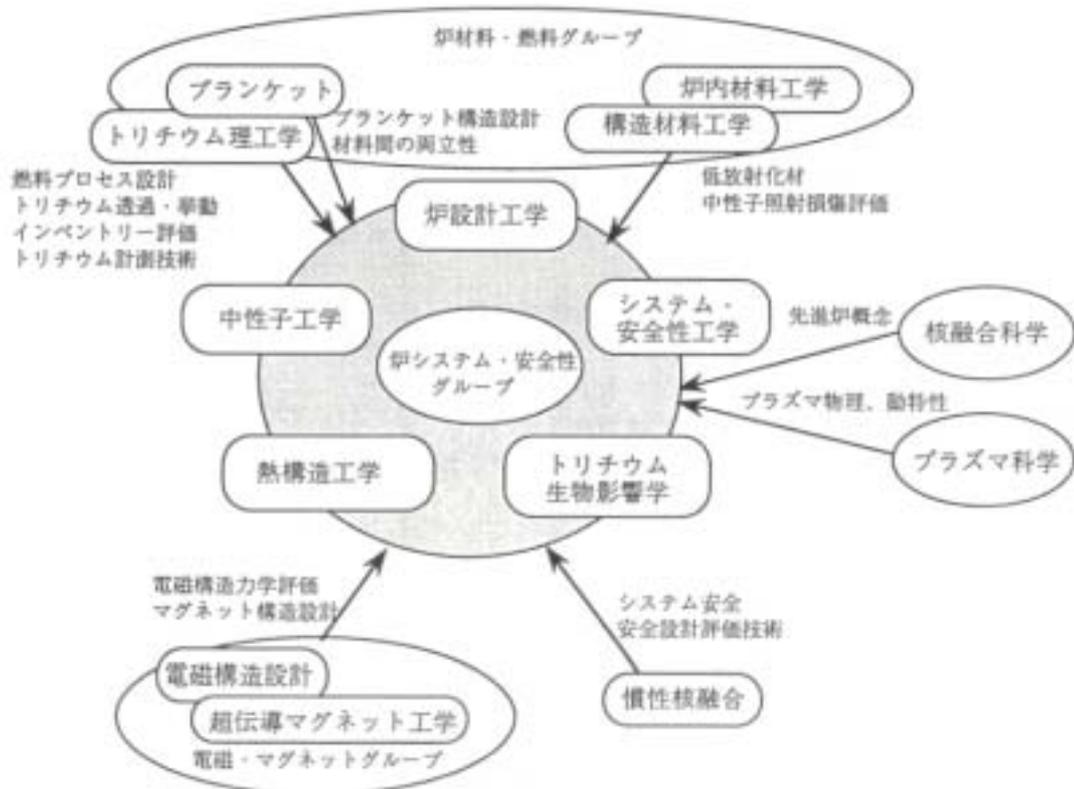


図7 炉システム・安全性グループ外とのネットワーク

5. 「慣性核融合」グループ

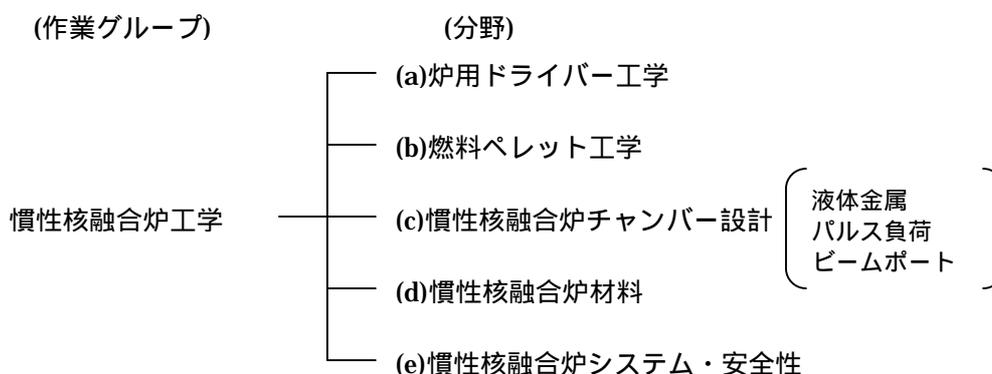
5-1. 慣性核融合炉工学の概要とその特徴

開表面の液体金属流をプラズマ対向第 1 壁及びブランケットとする慣性核融合炉ではその技術的成立性を左右する基幹技術として独自の炉工学技術があり、その研究開発を進める必要がある。

磁場ガイドリチウム流を第 1 壁・ブランケットとして用いた慣性核融合動力炉「千里」の概念設計作業、及びその後のドライバー技術の進歩、炉材料に関する新知見、爆縮炉心プラズマ研究の進展を取り込んで実施された動力炉「光陽」の概念設計及び関連する技術の評価、研究開発課題の整理、開発戦略の検討等に関する具体的な作業を通じて、慣性核融合炉工学に関する全国的な研究組織が形成されてきた。

国際原子力機関(IAEA)が主催して 1992～94 年にわたり実施された慣性核融合エネルギー開発に関する炉技術を中心としたレビュー作業が実施され、最終報告として「Energy from Inertial Fusion」が 1995 年 4 月に出版された。このレビュー作業には全世界より約 80 名の炉工学専門家が参加しており、その内我が国からも 19 名が共同研究者として参加している。

以上のような作業を通して形成されてきた慣性核融合炉工学は以下のような分野により構成される。



5-2. ネットワークの構成とその必要性及び効果

上記の各炉工学分野はそれぞれサブネットワークが構成され、それぞれの構成要素技術の相補性、整合性、研究協力がはかれる。ネットワークを図 8 に示す。

(1)各分野のネットワークにより高度化が期待される研究、あるいは効果は各分野により異なる。例えば炉用ドライバーについては固体レーザー、ガスレーザー、LIB・HIB、等の技術課題やそのフィジビリティの比較検討が可能となる。燃料ペレットについては造粒技術、多層コート技術、これと密接に関連したガス封入・クライオ固化技術、ペレットハンドリング技術等、相互

に関連した各プロセスの密接な連携により、最終目標に対する整合性がはかれる。

(2)作業グループ内ネットワークの必要性

ドライバーの選択及び仕様は燃料ペレットの設計・製作と密接に関連しており、さらに炉チャンバーの構造、材料、技術課題等と一体となって検討されるものである。それぞれの専門分野の研究開発の方向を明確にし、かつ課題を定量化するため作業グループ全体のネットワークによる研究開発の密接な交流、協力が不可欠である。

5-3. 慣性核融合炉工学の主要課題

各分野の技術課題の現状、炉としての必要パラメータ、目標等について、さらにそれらが慣性核融合炉の構成にどのように関係するかについては中間報告にその概要が述べられている。重点事項を要約すると以下ようになる。

(a)炉用ドライバー工学

高出力(~MJ)、高効率(~10%)、高繰り返し(~10Hz)、短パルス(~10ns)、短波長(0.3~0.5 μm)でかつ低コスト、長寿命なドライバーが必要である。半導体レーザー励起固体レーザー、KrF レーザー、重イオンビーム、軽イオンビーム等がそれぞれ独自に技術開発が行われている。炉用ドライバーとしての比較検討、評価が必要である。

(b)燃料ペレット工学

安定な爆縮に必要な所定の構造、精度のペレット製造は技術的には可能となったが、炉用としては大量・低コスト製造技術、輸送保管等のハンドリング技術、炉チャンバーへの高速高精度入射、トラッキング、等の技術開発が必要である。

(c)慣性核融合炉チャンバー設計

開表面液体金属第1壁ブランケットに固有の問題、高ピーク強度パルス負荷に対する応答、ビームポート及び最終光学系、等慣性核融合炉独自の技術課題に関する研究開発が必要である。

(d)慣性核融合炉材料

流体壁・ブランケットとして用いられる溶融塩、液体金属等と構造材との共存性、耐放射線光学材料、2相流による衝撃力緩和、炉材料放射化、流体金属中でのトリチウム増殖と分離等対象とする炉材料、及び材料選択上考慮すべき現象が磁場核融合炉材料と異なる。

(e)慣性核融合炉システム・安全性

炉システムの構成要素が全く異なるので、一般的手法考え方としては磁場核融合炉と同じであるが、具体的な設計・検討段階では異なる特性のものを対象とすることになる。

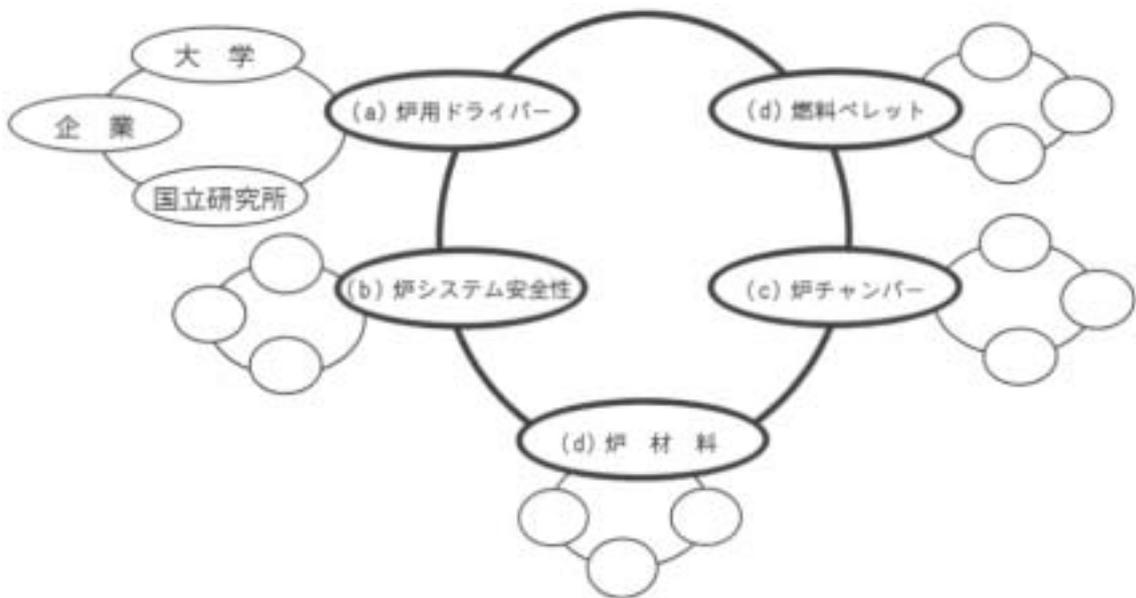


図8 慣性核融合炉ネットワーク